

RECOMMENDATIONS 2007 ICRP RECOMMENDATIONS 2007 ICRP RECOMMENDATIONS
2007 국제방사선방호위원회권고 2007 국제방사선방호위원회권고 2007 국제방사선방호위원회권고

RECOMMENDATIONS 2007 ICRP RECOMMENDATIONS 2007 ICRP RECOMMENDATIONS
2007 국제방사선방호위원회권고 2007 국제방사선방호위원회권고 2007 국제방사선방호위원회권고

RECOMMENDATIONS 2007 ICRP RECOMMENDATIONS 2007 ICRP RECOMMENDATIONS
2007 국제방사선방호위원회권고 2007 국제방사선방호위원회권고 2007 국제방사선방호위원회권고

RECOMMENDATIONS 2007 ICRP RECOMMENDATIONS 2007 ICRP RECOMMENDATIONS
2007 국제방사선방호위원회권고 2007 국제방사선방호위원회권고 2007 국제방사선방호위원회권고

RECOMMENDATIONS 2007 ICRP RECOMMENDATIONS 2007 ICRP RECOMMENDATIONS
2007 국제방사선방호위원회권고 2007 국제방사선방호위원회권고 2007 국제방사선방호위원회권고

RECOMMENDATIONS 2007 ICRP RECOMMENDATIONS 2007 ICRP RECOMMENDATIONS
2007 국제방사선방호위원회권고 2007 국제방사선방호위원회권고 2007 국제방사선방호위원회권고

RECOMMENDATIONS 2007 ICRP RECOMMENDATIONS 2007 ICRP RECOMMENDATIONS
2007 국제방사선방호위원회권고 2007 국제방사선방호위원회권고 2007 국제방사선방호위원회권고

RECOMMENDATIONS 2007 ICRP RECOMMENDATIONS 2007 ICRP RECOMMENDATIONS
2007 국제방사선방호위원회권고 2007 국제방사선방호위원회권고 2007 국제방사선방호위원회권고

RECOMMENDATIONS 2007 ICRP RECOMMENDATIONS 2007 ICRP RECOMMENDATIONS
2007 국제방사선방호위원회권고 2007 국제방사선방호위원회권고 2007 국제방사선방호위원회권고

RECOMMENDATIONS 2007 ICRP RECOMMENDATIONS 2007 ICRP RECOMMENDATIONS
2007 국제방사선방호위원회권고 2007 국제방사선방호위원회권고 2007 국제방사선방호위원회권고

2007년 국제방사선방호위원회 권고

ICRP 간행물 103

역주

이재기

한양대학교 원자력공학과

대한방사선방어학회



The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection

Publication 103

이 권고의 우리말 번역 배포는 2008년 8월 ICRP의 승인을 받았으며 ICRP 정신에 따라 실비로 배포합니다.

International Commission on Radiological Protection

역사서문

1990년대 말부터 약 8년에 걸친 준비와 자문, 논의, 다듬기를 거쳐 이 권고가 확정되었다. 이전에도 그러했듯이 이 2007년 ICRP 권고는 향후 10여년 기간에 전리방사선 방호에 대한 기틀 역할을 할 것이다. 직무피폭에 대한 개인 선량한도를 큰 폭으로 축소했던 1990년 ICRP 60 권고와는 달리, 이번 권고는 비록 접근법을 수정했지만 권고 이행 관점에서는 현실적인 중요 변화는 예상되지 않는다. 한편으로는 권고 안정성이 유지됨에 만족하면서도, 한편으로는 이 권고 초안을 준비할 당시 기대했던 매우 낮은 선량 피폭에 대한 과도한 우려를 완화하는 데 도움이 될 어떤 정책이 구체화되지 못한 데 대해서는 아쉬움도 있다.

비록 유전영향에 대한 위험계수가 큰 폭으로 감소했지만 암 위험 평가 접근법을 달리한 결과는 우연히 전체적으로는 위험계수가 기존 평가치와 유의한 차이를 보이지 않는다. 또, 방호체계의 근간이 되는 ‘문턱 없는 선형비례(LNT) 가설’도 ‘가설’을 ‘모델’로만 수정했을 뿐 그 기초가 유지되므로 방호체계 기틀이 유지되는 것은 당연한 결과로 볼 수 있다. 행위와 개입이라는 이원화된 접근을 통합하여 계획피폭상황, 비상피폭상황, 기존피폭상황이라는 피폭상황 중심체계로 접근 방식을 달리했지만 개념을 정리한 것일 뿐 방호 실무에 미치는 현실적 충격은 없다.

기존 권고에 비해 한 단계 더 강조한 것은 최적화의 중요성인데, 특히 선원중심의 선량계약치나 위험계약치 또는 참조준위 제약 아래 최적화 과정을 적용할 것을 권고하고 있다. 따라서 여기에 사용할 선원중심 제약치나 참조준위 값을 적절하게 설정하고 운용하는 일이 규제기관이나 사용자가 이 권고를 충실히 이행하기 위한 과제로 남는다. 이들 제약치 설정에서 피폭을 줄이겠다는 욕심만 앞세우면 빈번하게 실패에 부딪칠 것이고, 반대로 너무 완화하면 제약치로서 역할을 수행하지 못하므로 경험과 논의, 합의를 거쳐 현명한 선택이 요구되는 어쩌면 쉽지 않은 과제이다.

한편, 최적화 과정에서 과거에 치중했던 정량적 최적화에서 한 걸음 더 나아가 이해당사자 참여와 같은 방사선 외적 인자의 중요성도 분명히 밝히고 있다. 최적화 과정이 정형화된 틀이 아니라 관련된 모든 사람이 ‘방호에 최선을 다했는가?’라고 항상 자문하는 안전문화 또는 마음가짐에 바탕을 둔 지속적인 과정임을 강조하고 있다.

새 권고는 방사선방호의 기초가 되는 선량 정의에 사용되는 방사선가중치와

조직가중치에 부분적 변경을 동반하고 있다. 또, 사람의 선량을 평가하는 데 사용하는 기준모의제도 새로운 모델로 바꿨다. 따라서 ICRP는 기존에 사용하던 외부피폭 선량환산계수와 내부피폭 선량계수를 모두 새로 계산하여 제공할 것이다. 아마도 2009년 말까지 새 데이터가 가용할 것으로 본다.

새 권고를 준비하는 과정에서 처음으로 매우 투명한 절차를 통해 많은 이해 당사자의 의견을 들었지만, 그 세부를 들여다보면 가끔 만족스럽지 못한 부분도 눈에 띈다. 단순한 오타자 문제만 아니라 개념이 다소 혼란스런 부분도 없지는 않다. 특히, 잠재피폭의 개념과 위상, 기존피폭의 핵심 중 하나인 직장이거나 주택에서 라돈 피폭관리 체계에 대해서는 역자도 아직 혼란스럽다고 고백할 수밖에 없다. 이 권고를 수용하는 규제기관이 이러한 문제점에 대해 보다 현명한 접근을 개발하기를 기대해 본다.

비영어권 독자를 위해 영문을 보다 명쾌하게 만들도록 노력했음에도 불구하고 여전히 애매하거나 이해하기 어려운 표현들도 보인다. 보다 정교하고 안정된 권고를 만들지 못한 점에 대해 권고를 최종 확정된 위원의 한 사람으로서 유감으로 생각한다. 나아가 한 다리를 더 건너 이 번역본을 읽는 독자는 번역자의 역량 미흡이나 실수로 인한 또 다른 오류에 접할 수도 있겠다.

이 권고의 우리말 번역과 배포는 이미 2008년 8월 ICRP 승인을 받았으나 일의 진척이 늦어 이제야 배포가 가능하게 되었다. 아울러 이 번역본은 한국원자력 안전기술원 동료들(조건우 박사 등)이 마련한 초안을 바탕으로 수정과 주해 첨가를 거쳐 준비된 것임을 밝힌다. 번역 과정에서 보충 설명이 필요한 부분에는 역자가 나름으로 주를 달았다. 때로는 약간 과속하여 원문을 거스르는 의견도 제시하기도 했는데 자칫 역자의 오해나 독선이 없는지 걱정도 한다.

번역본 편집에서 원본과 달리 용어집을 본문 뒤로 재배치하였는데 기본 권고인 만큼 권고내용이 용어보다 중요하다고 생각한 결과이다. 용어는 참조 편의를 위해 영문 알파벳순이 아니라 번역한 우리말 가나다순으로 재배열하였고, 부분적으로 역자가 정의를 첨가한 부분도 있으며 몇몇 용어는 원문에 없지만 필요할 것으로 보아 추가했다. 주요 용어가 처음 나올 때는 우리말 용어에 이어 원문용어를 작은 글씨로 병기하여(예: 계획피폭상황planned exposure situation) 참조가 되게 했다. 또, 이 권고에서 사용되는 약어표를 목차 다음에 수록했다.

바람이 있다면 번역본을 읽는 것이 원문을 읽는 것보다 더 어렵다는 평가는 나오지 않았으면 하는 것이다.

2009년 3월

역자 이재기(대한방사선방어학회장, ICRP 위원)

2007년 국제방사선방호위원회(ICRP) 권고

ICRP 간행물 103

2007년 3월 ICRP 승인

요지-방사선방호체계를 위한 이 개정 권고는 이전 1990년 권고를 대체하며, 1990년 이후 발간된 방사선원으로부터 피폭을 관리하는 추가지침을 갱신하고 집약하며 발전시킨다.

현행 권고는 방사선피폭의 물리학, 생물학 분야의 최신 정보를 바탕으로 등가선량과 유효선량에 사용되는 방사선가중치와 조직가중치를 일부 갱신한다. 권고는 방사선방호의 기본 3원칙 즉, 정당화, 최적화 및 선량한도 적용 원칙을 유지하되 이 원칙들이 피폭을 주는 방사선원과 피폭하는 개인에게 어떻게 적용되는가를 명확하게 한다.

행위와 개입을 사용한 과거의 과정기반 방호접근으로부터 피폭상황 기반 접근으로 이동함으로써 권고가 진화했다. 현행 권고는 계획피폭상황, 비상피폭상황 및 기존피폭상황을 구별하여 정당화와 방호최적화 원칙을 이들 상황에 적용한다. 계획피폭상황에서 모든 규제되는 선원으로부터 유효선량과 등가선량에 대한 기존 개인 선량한도는 유지된다. 현행 권고는 방호최적화 원칙을 다시 강조한다. 최적화는 모든 피폭상황에 유사한 방법으로 적용되며 개인 선량과 위험에 대한 제한 즉, 계획피폭상황에 대해서는 선량과 위험 제약치, 비상피폭상황과 기존피폭상황에 대해서는 참조준위와 함께 적용된다. 나아가 현행 권고는 환경에 대한 방사선방호를 내보이기 위한 기틀을 개발하는 접근도 포함한다.

중심어: 정당화, 최적화, 선량한도, 제약치, 참조준위

논설

여러분 도움 없이는 할 수 없었던 일

세계의 많은 과학자, 규제자 및 사용자들이 참여한 8년에 걸친 논의를 거쳐서 ICRP 새 권고가 2007년 3월 21일 독일 에센에서 채택되었다.

ICRP는 적절한 방사선방호가 기초할 수 있도록 주로 기본원칙에 대한 지침을 제공함으로써 규제기관이나 조연조직에 대해 권고하는 조연기관이다. 1928년에 창설된 이래 ICRP는 전리방사선 위험에 대한 방호에 관한 권고를 정기적으로 발행해 왔다. 현행 시리즈의 첫 보고서인 ICRP 1(ICRP 1959)은 1958년 권고를 수록했다. 비교적 근래 권고들은 ICRP 26(ICRP 1977), ICRP 60(ICRP 1990)에 제시되었으며 각각 1977년과 1990년 권고를 수록하고 있다.

방사선 사용자와 함께 방사선방호에 책임 있는 국제기구나 국가 당국은 ICRP가 제시하는 권고와 원칙을 그 방호조치의 기본 바탕으로 채택해 왔다. 그래서 실질적으로 방사선방호를 겨누는 모든 국제표준과 국가 규정이 ICRP 권고에 바탕을 두고 있다.

현재 대부분 국가 규정들은 ICRP 60의 1990년 권고에 근거하고 있다. 국제 기본안전표준(BSS)과 같은 국제표준, 여러 국제 노동협약, 그리고 EC 규약도 ICRP 권고에 근거한다.

ICRP 26에서 ICRP는 방사선의 확률론적 위험을 정량화했으며 정당화, 최적화 및 개인선량한도와 함께 선량제한체계를 제안했다. ICRP 60에서는 권고를 갱신하고 방호의 기본 원칙을 유지하되 그 철학을 방사선방호체계로까지 확장했다.

생물학적, 물리적 가정과 개념은 견고히 유지되고 있지만 ICRP 60 이후 새로운 과학적 데이터들이 발행되어 일부 갱신이 필요하게 되었다. 결정론적 영향에 대한 전체적 평가는 기본적으로 변함이 없다. 방사선피폭 탓으로 볼 수 있는 암 위험 평가치도 지난 17년 동안 크게 바뀌지는 않았으나 유전영향의 위험 평가치는 이전에 비해 낮아졌다. 이러한 새로운 데이터는 위험을 모델링하고 위해를 평가하는 데 더욱 공고한 기초를 제공한다.

2007년 권고는 행위와 개입으로 된 과거의 과정기반 접근으로부터 방사선 피폭상황의 특성에 기반을 둔 접근으로 발전시켰다. 방사선방호체계는 원칙적으로 모든 피폭상황에 적용된다. 피폭상황과 무관하게 유사한 절차가 방호조치의 범위와 수준을 결정하는 데 사용된다. 특히 정당화와 최적화 원칙은 공히 적용된다. ICRP는 최적화에 보다 집중함으로써 지금까지 개입으로 분류되었던 상황에 대한 방호가 증진될 수 있다고 본다.

ICRP 권고의 중요성 관점에서 그리고 새 권고가 국가적 문제와 우려를 적절

하게 고려하도록 과거 권고 개발과정에서 사용했던 것보다 훨씬 개방적인 과정을 시도했다. 또한 방호를 최적화할 때 이해당사자의 관점과 우려를 고려할 필요성을 처음으로 ICRP가 언급했음은 주목할 점이다.

따라서 ICRP는 정부기관으로부터 국제기구, 개인 과학자, 비정부기구에 이르기까지 넓은 스펙트럼의 방사선방호 이해당사자에 대해 입력을 요청했다. 권고 초안은 방사선방호에 관심 있는 많은 국제 또는 국가 회합에서 논의되었다.

많은 당사자들이 권고 프로젝트와 관련하여 특별한 활동을 마련했다. 예를 들어 국제방사선방호학회연합(IRPA)은 2000년, 2004년 총회와 2006년 자문을 통해 세계 회원학회의 검토를 진행시켰으며, OECD 원자력국(NEA)은 국제 워크숍을 7회 개최하고 권고안에 대해 4회(2003, 2004, 2006 및 2007년)의 상세평가를 수행하였다. 유럽위원회(EC)도 2006년에 세미나를 개최하여 권고의 과학적 문제들을 토론했다. 유엔 기구들도 IAEA 주도아래 2007년 ICRP 권고를 국제기본안전표준(BSS) 개정사업의 주요 입력으로 사용하고 있고, 마찬가지로 EC도 유럽기본안전표준 개정에 입력으로 사용하고 있다.

권고는 두 차례의 국제적 자문을 거쳐 준비되었다. 이러한 투명성과 이해당사자 참여 정책에 따라 새 권고가 더 잘 이해되고 더 널리 채택될 것을 ICRP는 기대하고 있다. 비록 개정된 권고가 방사선방호 정책에 어떠한 원론적 변화를 포함하고 있지는 않지만, 직면하는 많은 피폭상황들에 방호체계 적용을 명확히 함으로써 이미 높은 수준에 있는 방호를 더욱 발전시키는 데 도움을 줄 것이다.

ICRP는 오래 걸렸지만 많은 자문을 수용하여 보람된 잉태단계의 종점에 도달한 것을 기쁘게 생각하며, 2007년 권고를 제공하게 된 것을 자랑스럽게 여긴다. 깊이 있는 자문은 문서의 품질을 높였다. ICRP는 많은 시간과 경험을 헌신하여 권고를 개선하도록 만든 수많은 기관, 전문가 및 일반인 모두에게 감사한다. 이들의 기여가 향후 2007년 권고의 성공에 결정적 역할을 할 것이다.

Lars-Erik Holm ICRP위원장

참고문헌

- ICRP,1959. Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication1. Pergamon Press, Oxford, UK.
- ICRP, 1977. Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 26, Ann. ICRP 1(3).
- ICRP, 1991b. 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 60, Ann. ICRP21(1-3).

머 리 말

1990년 ICRP 60(ICRP 1991b)으로 권고를 발행한 이래 ICRP는 정기적으로 권고를 검토해서 수시로 ICRP 연보에 보완 보고서를 발행해 왔다. 이러한 보완 보고서가 늘어남에 따라 이 간행물에서 보인 것처럼 이들을 통합하고 합리적으로 만들 필요성이 생겼다. 생물학적, 물리학적 가정과 개념적 근거는 견고하게 유지되지만, ICRP 60 이후에 새로운 과학적 자료들이 발표되어 일부 수정도 필요해졌다. 결정론적 영향과 확률론적 위험에 대한 전반적 평가는 근본적으로 변화가 없다. 방사선피폭에 의해 발생하는 암 위험에 대한 전반적 평가는 지난 16년 동안 별로 변하지 않았다. 반면에, 새로 평가한 유전영향 위험은 과거보다 낮다. 전반적으로 새로운 자료들은 위험 모델링과 위해평가에 보다 확고한 기반을 제공한다. 또한, 환경에 대한 방사선방호가 과거보다 주목받고 있음이 분명하다.

따라서 ICRP는 국제 또는 국가 규정의 안정 요구를 인식하면서 다음 두 가지 일차적 목표를 두고 이 개정 권고를 발행하기로 결정했다.

- 새로운 생물학적, 물리학적 정보와 방사선 안전표준 설정 동향을 반영한다.
- 권고 기술 방법을 개선하여 매끄럽게 한다.

또한 ICRP는 새로운 과학적 정보와 사회적 기대에 부합하면서 권고 안정성을 최대한 유지하고자 했다.

개정된 방호체계에서는 행위와 개입이라는 과거의 과정기반 접근으로부터 방사선 피폭상황 특성에 기초한 접근으로 권고가 발전했다. 이 접근법을 채택함에 있어 ICRP는 원칙적으로 어떠한 방사선 피폭상황에도 방호체계를 적용할 수 있음을 확인하고자 했다. 피폭상황에 관계없이, 방호조치 범위와 준위의 결정에 유사한 절차가 사용된다. 특히, 정당화와 최적화 원칙은 보편적으로 적용된다. 이러한 공통 특성에 보다 유의함으로써 현재까지 개입으로 분류했던 대상에 대한 방호 이행을 개선할 수 있다는 것이 ICRP 견해이다.

2004년에 이 권고 초기 초안으로 내부는 물론 공개적으로 의견을 수렴했고, 2006년 개정본에 대하여 다시 의견 수렴절차를 거쳐 마련된 수정본을 기초로 하여 ICRP 본위원회가 이 권고를 작성했다. 개정 과정에서 투명성을 강화함에 따라 방사선방호에 관심을 가진 많은 기관과 개인이 참여함으로써 권고에 대한 공통된 이해와 수용이 더 용이할 것으로 ICRP는 기대한다.

이 권고 준비기간 동안 본위원회 위원은 다음과 같다.

(2001-2005)

R.H. Clarke(위원장)	A.J. Gonzalez	Y. Sasaki
R.M. Alexakhin	L.-E. Holm(부위원장)	C. Streffer
J.D. Boice jr	F.A. Mettler jr	A. Sugier(2003-2005)
R. Cox	Z.Q. Pan	B.C. Winkler(2003년별세)
G.J. Dicus (2006년별세)	R.J. Pentreath(2003-2005)	

과학서기: J. Valentin

(2005-2009)

L.-E. Holm(위원장)	J.-K. Lee	Y. Sasaki
J.D. Boice jr	H. Menzel(2007-2009)	N. Shandala
C. Cousins	Z.Q. Pan	C. Streffer(2005-2007)
R. Cox(부위원장)	R.J. Pentreath	A. Sugier
A.J. Gonzalez	R.J. Preston	

과학서기: J. Valentin

P. Burns, J. Cooper, J.D. Harrison 및 W. Weiss가 ICRP 일에 크게 기여했다. 또한 수많은 국제회의에서 이 권고에 대해 이루어진 토론도 도움이 되었다.

ICRP는 이 권고의 개발에 기여한 국제기구, 정부 또는 비정부 국가기구, 그리고 모든 개인에게 감사를 표한다.

목 차

역자서문	iii
요지	v
논설	vii
머리말	ix
사용 약어	xv
요 약	1
제1장 서 론	9
1.1. ICRP 역사	9
1.2. ICRP 권고의 발전	10
1.2.1. 선량과 단위의 변천	13
1.3. 권고의 구조	15
1.4. 참고문헌	15
제2장 권고의 목표와 범위	19
2.1. 권고의 목표	19
2.2. 방호체계의 근거와 구조	20
2.3. 권고의 범위	23
2.4. 배제와 면제	25
2.5. 참고문헌	26
제3장 방사선방호의 생물학적 측면	27
3.1. 결정론적 영향의 유발	28
3.2. 확률론적 영향의 유발	29
3.2.1. 암 위험	29
3.2.2. 유전영향 위험	32
3.2.3. 암과 유전영향의 위해조정 명목위험계수	34
3.2.4. 암에 대한 유전적 감수성	35
3.3. 암외질환 유발	36
3.4. 배태아의 방사선영향	37

3.5. 판단 및 불확실성	38
3.6. 참고문헌	38
제4장 방사선방호에 사용하는 양	41
4.1. 서론	41
4.2. 보건영향의 고려	42
4.3. 선량 양	42
4.3.1. 흡수선량	43
4.3.2. 선량의 평균	43
4.3.3. 등가선량과 방사선가중치	44
4.3.4. 유효선량과 조직가중치	50
4.3.5. 유효선량의 결정	51
4.3.6. 실용량	53
4.4. 방사선 피폭평가	55
4.4.1. 외부 방사선피폭	55
4.4.2. 내부 방사선피폭	55
4.4.3. 직무피폭	57
4.4.4. 일반인 피폭	58
4.4.5. 환자의 의료피폭	59
4.4.6. 유효선량의 적용	59
4.4.7. 집단 유효선량	60
4.5. 불확실성과 판단	62
4.6. 참고문헌	63
제5장 사람에 대한 방사선방호체계	65
5.1. 선원의 정의	66
5.2. 피폭상황의 유형	67
5.3. 피폭범주	69
5.3.1. 직무피폭	69
5.3.2. 일반인피폭	70
5.3.3. 환자 의료피폭	70
5.4. 피폭자 구분	70
5.4.1. 종사자	71

5.4.2. 일반인	73
5.4.3. 환자.....	74
5.5. 방사선방호의 수준	75
5.6. 방사선방호의 원칙	76
5.7. 정당화.....	77
5.7.1. 정당화 원칙의 적용.....	78
5.7.2. 부당한 피폭.....	79
5.8. 방호최적화.....	80
5.9. 선량제약치와 참조준위	82
5.9.1. 선량제약치.....	84
5.9.2. 참조준위.....	85
5.9.3. 선원중심 선량제약치와 참조준위 선택에 영향을 미치는 인자.....	86
5.10. 선량한도.....	89
5.11. 참고문헌.....	92
제6장 ICRP 권고의 이행.....	93
6.1. 계획피폭상황.....	93
6.1.1. 직무피폭.....	94
6.1.2. 일반인피폭.....	95
6.1.3. 잠재피폭.....	96
6.2. 비상피폭상황.....	99
6.3. 기존피폭상황.....	103
6.3.1. 주택과 작업장의 실내 라돈.....	104
6.4. 비상피폭상황과 기존피폭상황에서 배태아의 방호.....	109
6.5. 방사선방호 기준의 비교.....	109
6.6. 실제 이행.....	109
6.6.1. 방사선 방호 및 안전을 위한 기반구조.....	112
6.6.2. 외부 전문지식과 자문 및 권한 위임.....	114
6.6.3. 사건 보고.....	114
6.6.4. 경영관리 요건.....	114
6.6.5. 방호기준의 준수.....	116
6.7. 참고문헌.....	116

제7장 환자, 위안자와 간병인 및 의생명연구 자원자 의료피폭	119
7.1. 의료절차의 정당화.....	121
7.1.1. 특정 방사선학적 절차의 정당화.....	122
7.1.2. 개별 환자에 대한 절차의 정당화.....	122
7.2. 의료피폭에서 방호최적화.....	123
7.2.1. 진단참조준위.....	123
7.2.2. 방사선치료.....	124
7.3. 의료피폭과 유효선량.....	124
7.4. 임신 환자의 피폭.....	125
7.5. 외부 빔치료와 근접치료에서 사고예방.....	126
7.6. 방사성핵종으로 치료받는 환자의 간병인과 위안자 방호.....	126
7.7. 의생명연구 자원자.....	128
7.8. 참고문헌.....	129
제8장 환경보호	131
8.1. 환경에 대한 방사선방호의 목적.....	131
8.2. 참조동식물.....	132
8.3. 참고문헌.....	133
용어집	135
용어집 참고문헌.....	154
부록A. 전리방사선에 의한 보건위험에 관한 생물학적, 역학적 정보:	
사람의 방사선방호 목적을 위한 판단 요약	155
부록B. 방사선방호에 사용되는 양	285
총괄 참고문헌	377

〈역주〉 사용 약어

ALI	annual limits on intake	연간섭취한도
AMAD	activity median aerodynamic diameter	방사능중양공기역학직경
AP	anterior-posterior	전방에서 후방으로
Apc	adenomatosis polyposis coli	암억제유전자 일종
ATM	ataxia telangiectasia mutated	혈관확장성 운동실조증 유전자
BEIR	Board on Radiation Effects Research	미국 과학원 방사선영향연구회
BSS	Basic Safety Standards (국제원자력기구 방사선원 안전과 방호)기본안전표준	
CDC	Center for Disease Control	미국 질병관리본부
CERRIE	Committee Examining Radiation Risks of Internal Emitters (유럽)내부피폭 방사선위험평가위원회	
CLL	chronic lymphocytic leukemia	만성림프성백혈병
DAC	derived air concentration	유도공기농도
DD	doubling dose	배가선량
DDREF	dose and dose rate effectiveness factor	선량선량률효과인자
DMF	dose modifying factor	선량수정인자
DNA	deoxylibonucleic acid	디옥시리보핵산
DSB	double strand break	양가닥절단
DS86, DS02	Dosimetry System 1986, 2002	원폭생존자 선량계측체계
EAR	excess absolute risk	초과절대위험
EC	European Commission	유럽위원회
ELR	excess lifetime risk	초과생애위험
EPA	Environmental Protection Agency	미국환경부
ERR	excess relative risk	초과상대위험
ESTR	expanded simple tandem repeat	단순직렬 DNA 반복
FLRM	finite locus threshold model	유한 유전자위 문턱모델
FSU	functional subunits	기능소단위
GM-CSF	granulocyte-macrophage colony-stimulating factor	과립구-대식세포 집락자극인자
HATM	human alimentary tract model	사람소화기모델
HRTM	human respiratory tract model	사람호흡기모델
HTO	tritiated water	삼중수소수

IAEA International Atomic Energy Agency 국제원자력기구

ICNIRP International Commission on Non-ionizing Radiation Protection 국제비전리 방사선방호위원회

ICRP International Commission on Radiological Protection 국제방사선방호위원회

ICRU International Commission on Radiation Units and Measurements 국제방사선단위 측정위원회

IEC International Electrotechnical Commission 국제전기기술위원회

ILO International Labor Organization 국제노동기구

IQ intelligence quotient 지능지수

IRPA International Radiation Protection Association 국제방사선방호학회연합

ISO International Organization for Standardization 국제표준화기구

ISO isotropic 등방(방사선 조사방향에서)

IXRPC International X ray and Radium Protection Committee 국제X선라듐방호위원회

LAR lifetime attributable risk 생애기인위험

LAT lateral 측방

LD50 lethal dose 50% 반치사선량

LET linear energy transfer 에너지전달선밀도

LLE loss of life expectancy 기대수명손실

LNT linear-non-threshold 문턱 없는 선형모델

LSS life span study (일본 원폭생존자)수명연구

MC mutation component 돌연변이성분

MIRD Medical Internal Radiation Dose 미국 핵의학회 의료내부피폭선량위원회

MTM multifactorial threshold model 다인자성 문턱모델

NAS/NRC National Academy of Science/National Research Council 미국 과학원/ 국가연구위원회

NBS Nijmegen Breakage Syndrome Nijmegen 손상증후군

NCI National Cancer Institute 미국암연구원

NCRP National Council on Radiation Protection and Measurements 미국 방사선방호 위원회

NEA Nuclear Energy Agency OECD 원자력국

NORM naturally occurring radioactive material 천연방사성물질

NRC Nuclear Regulatory Commission 미국 원자력규제위원회

NUREG Nuclear Regulation 미국 원자력규제위원회 보고서

OBT organically bound tritium 유기결합 트리튬
 OECD Organization for Economic Cooperation and Development 경제협력개발기구
 OSCC Oxford Survey of Childhood Cancers 옥스퍼드 아동암연구
 PA posteria-arteria 후방에서 전방으로
 PAHO Pan American Health Organization 범미보건기구
 PKCs protein kinase catalytic subunit 유전자
 PPE personal protective equipment 개인방호장구
 PRCF potential recoverability correction factor 회복잠재력보정인자
 RAP reference animals and plants 참조동식물
 RBE relative biological effectiveness 생물학적효과비
 REID risk of exposure-induced death 피폭유발사망위험
 RMR relative mutation risk per unit dose 단위선량 당 상대돌연변이
 ROT rotational 회전
 SEER Surveillance, Epidemiology and End Results 미국 암등록프로그램
 SOD superoxide dismutases 항산화제 효소 일종
 SSB single strand break 한가닥절단
 UNEP UN Environment Programme 유엔환경기구
 UNSCEAR UN Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation 유엔방사선
 영향과학위원회
 WHO World Health Organization 세계보건기구

요 약

(a) 2007년 3월 21일 국제방사선방호위원회(ICRP) 본위원회는 방사선방호체계1)를 위한 개정된 이 권고를 승인했다. 이 권고는 1991년 간행물 ICRP 60(ICRP 1991b)으로 발간된 이전 권고를 공식적으로 대체하며, 방사선원으로부터 피폭관리에 관해 ICRP 60 이후 제공된 추가 지침들을 갱신한다. 이 개정 권고는 이전 권고와 지침을 통합하고 발전시킨다.

(b) ICRP는 초안 권고에 대해 2004년과 2006년에 각각 한번씩, 두 차례 국제 공개 협의를 거친 후 이 권고를 마련했다. 투명성과 이해당사자 참여라는 정책 과정을 거침으로써 이 권고가 명확히 이해되고 널리 채택될 것으로 ICRP는 기대한다.

(c) 이 권고의 주요 특징은 다음과 같다.

- 방사선피폭의 물리학 및 생물학에 대해 가용한 최신 과학적 정보에 기초해 등가선량equivalent dose 및 유효선량effective dose에 내포되는 방사선가중치 radiation weighting factor 및 조직가중치tissue weighting factor, 나아가 방사선위해를 업데이트 한다.
- 방사선방호에 관한 ICRP의 세 기본원칙 즉, 정당화justification, 최적화 optimisation 및 선량한도 적용application of dose limits을 유지하고, 피폭을 주는 방사선원과 피폭을 받는 개인에게 이들 원칙을 적용하는 방법을 명료하게 한다.
- 이전에 행위practice와 개입intervention으로 나누어 적용한 과정기반 방호 접근에서 발전하여, 현행 권고는 계획피폭planned, 비상피폭emergency 및 기존피폭 existing 상황으로 특성화되는 관리 가능한 모든 피폭상황에 정당화와 방호최적화 기본원칙을 적용하는 상황기반 접근으로 이동한다.
- 계획피폭상황에서 규제되는 모든 선원으로부터 받는 유효선량과 등가선량에 대한 ICRP 개인 선량한도는 유지한다. 이 한도는 모든 계획피폭상황에서 규제당국이 용인하는 최대 선량을 나타낸다.
- 모든 피폭상황에 대해 유사한 방식으로 적용할 수 있는 방호최적화 원칙을

1) <역주> 이 번역에서는 자주 단어의 조합으로 사용되는 항들은 특성화함으로써 개념 혼동을 피하기 위해 띄어 쓰지 않고 의도적으로 붙여쓰기를 많이 사용하였다. 예를 들면 방사선방호, 계획 피폭상황, 생물학적효과비, 선량선량물효과인자, 방향성선량당량 등에서 보는 것과 같다. 그러나 원문적 어법에서는 띄어 쓰는 것도 무방하다.

강조한다. 계획피폭상황에 대해서는 선량제한치dose constraint 또는 위험제한치 risk constraint로, 비상피폭상황 및 기존피폭상황에 대해서는 참조준위reference level로 개인의 선량 또는 위험을 각각 제약한다.

- 환경에 대한 방사선방호를 구현할 기틀 개발을 위한 접근을 포함한다.

(d) ICRP 방사선방호체계는 크기나 원천에 관계없이 모든 선원으로부터 전리방사선 피폭 모두에 적용된다. 그러나 권고는 선원이나 개인선량 피폭경로를 합리적 방법으로 제어할 수 있는 상황에만 제대로 적용할 수 있다. 일반적으로 규제수단으로 통제할 수 없음을 근거로 방사선방호 법령에서 배제exclusion되는 피폭상황이 있는가 하면, 그러한 통제가 합당하지 않음을 근거로 법령 요건의 전체 또는 일부를 면제exemption하는 피폭상황도 있다.

(e) 전리방사선의 보건영향을 이해하는 것은 ICRP 권고의 기반이다. ICRP는 전리방사선에 의해 발생하는 보건위험에 대한 생물학적, 역학적 정보를 검토하여 다음과 같은 결론에 도달했다. ICRP 60 이후 여러 장기/조직에 대한 위험 분포가 약간 변경된 것으로 판단하는데 특히 유방암과 유전질환 위험에서 그러하다. 그러나 낮은 선량에서 선형반응을 가정하면 초과 암 및 유전영향에 의한 종합위험은 여전히 Sv 당 약 5%로 유지된다. 이 평가치는 고형암에 대한 선량선량률효과인자로서 전과 같이 2를 사용함을 내포하고 있다. 또한 태내피폭 후 a) 암 위험은 아동기 피폭 후 위험과 유사하며, b) 기형 유발과 심각한 정신지체 발현에는 문턱선량이 존재한다는 것이 ICRP 판단이다. ICRP 60에서 제시한 유효선량한도와 피부, 손/발 및 눈에 대한 등가선량한도를 그대로 유지하지만, 특별히 눈과 관련해서는 추가 정보와 이에 대한 검토 및 판단이 필요할 수 있음을 ICRP가 인지하고 있다. 암외질환(예: 심혈관 장애) 증가에 대해 가용한 데이터는 낮은 선량에서 위험을 논의하기에는 불충분한 것으로 판단된다.

(f) 전리방사선의 보건영향에 대한 ICRP의 광범한 검토 결과 방사선방호체계를 근본적으로 변경할 필요는 없는 것으로 나타났다. 1991년 이후 발행된 정책 지침에 수록된 기존 수치권고는 따로 언급하지 않는 한 그대로 유효하다는 점이 중요하다. 따라서 이전 권고와 후속 정책지침에 기초한 방사선방호 규정에 큰 변경을 개정된 현행 권고가 요구하지는 않을 것이다.

(g) 암과 유전영향 유발에 대해 선형 선량-반응 관계의 중심 가정 즉, 낮은 선량에서도 위험증가가 선량증가에 비례한다는 가정은 계속해서 외부피폭과 내부피폭 선량을 합산하는 근거를 제공한다.

(h) 등가선량과 유효선량 사용은 변하지 않지만, 그 계산 방법에는 몇 가지 개정이 있다. 여러 종류 방사선의 생물학적효과비와 관련한 가용 자료에 대한 폭넓은 검토와 생물물리학적 고려로부터 중성자와 양성자 방사선가중치 값이 변경되었다. 중성자 가중치는 중성자 에너지의 연속함수로서 제공되며, 하전 파이온 방사선가중치가 새로 주어진다. 광자, 전자, 뮤온 및 알파입자의 방사선가중치에는 변화가 없다.

(i) 여러 수학적 모델 대신에 인체 의도 단층영상에 기초한 전산용 기준모의체 reference phantom를 사용해 외부피폭과 내부피폭 선량을 계산하는 점은 중요한 변화이다. 성인의 경우 등가선량은 남성과 여성 모의체를 각각 사용해 평가한 값의 평균으로 계산한다. 그 다음 수정된 연령 및 성 평균 조직가중치를 사용하여 유효선량을 산출하는데, 이 조직가중치는 개정된 위험 데이터에 기초한 반올림 값으로서 남녀와 모든 연령 집단에 적용된다. 유효선량은 특정 개인이 아닌 기준인 reference person에 대해 계산된다.

(j) 유효선량은 방호량으로 사용하려는 것이다. 유효선량의 주요 용도는 방사선방호 계획과 최적화를 위한 전망적 선량평가와, 규제목적에서 선량한도 준수를 입증하는 것이다. 역학평가에는 유효선량 사용을 권고하지 않으며, 개인에게서 피폭과 위험의 구체적 소급 연구에도 유효선량을 사용해서는 안 된다.

(k) 집단유효선량collective effective dose은 최적화를 위한 도구로서 주로 직무피폭occupational exposure에서 방사선 기술이나 방호절차들을 비교하는 데 사용한다. 집단유효선량은 역학적 위험 평가의 도구로 사용하기 위한 것이 아니며, 따라서 위험 예측에 사용하는 것도 적합하지 않다. 장기간에 걸친 아주 낮은 개인선량을 합산하는 것은 부적절하며, 특히 사소한 개인선량을 합산하여 얻은 집단유효선량을 근거로 암 사망자 수를 계산하면 안 된다.

(l) 방사선량을 평가하려면 외부피폭의 배열, 섭취한 방사성핵종의 생물역동학 및 인체를 모사하는 모델이 필요하다. 기준모델과 필요한 기준변수 값은 폭넓은 인체연구와 실험연구로부터 판단에 의해 선택되고 수립된다. 규제목적으로는 이러한 모델과 변수 값이 협정적으로 고정되면 불확실성 대상이 되지 않는다. ICRP는 모델과 변수 값에 정밀도가 부족하며 불확실성이 있음을 알고 있고 그러한 불확실성을 자세히 평가하고 줄이려 노력하고 있다. 개인에게서 선량과 위험의 소급적 평가에는 개별 변수 값과 불확실성을 고려해야 한다.

(m) ICRP가 이전 지침과 권고를 통합하는 과정에서 명료성과 효용을 증진하기 위해 방호체계 구조와 용어를 어느 정도 변경하는 것이 바람직한 것으로 나타났다. 특히 방사선방호 공동체 폭을 넓혔을 때 종종 행위와 개입의 차이가 명확히 이해되지 않았다. 나아가 이 두 갈래로 분류하기 어려운 피폭상황도 있었다.

(n) 이제 ICRP는 행위와 개입으로 나누는 이전 분류를 대체하는 세 가지 피폭상황을 채택한다. 모든 피폭상황 범위를 포괄하고자 하는 세 피폭상황은 다음과 같다.

- **계획피폭상황:** 선원을 계획적으로 도입해 운용함과 관련된 피폭상황(이전에 행위로 분류된 상황은 이 피폭상황 유형에 포함된다).
- **비상피폭상황:** 계획상황 운영 중 발생할 수 있거나 악의적 행위 결과 등 예상치 못한 피폭상황으로서, 긴급한 조치가 필요한 피폭상황.
- **기존피폭상황:** 자연 백그라운드 방사선에 의해 발생하는 경우처럼, 관리를 결정하는 시점에 이미 존재하는 피폭상황.

(o) 방사선방호의 세 가지 핵심 원칙은 현행 권고에도 그대로 유지된다. 정당화와 최적화 원칙은 세 피폭상황에 모두 적용되며, 선량한도적용 원칙은 계획피폭상황의 결과로서 확실히 발생할 것으로 예상하는 선량에만 적용된다. 세 원칙은 다음과 같이 정의된다.

- **정당화 원칙:** 방사선 피폭상황의 변화를 초래하는 모든 결정은 해로움보다 이로우미 커야 한다.
- **방호최적화 원칙:** 피폭 발생 가능성, 피폭자 수 및 개인선량 크기는 경제적, 사회적 인자를 고려해 합리적으로 달성할 수 있는 범위에서 낮게 유지되어야 한다.
- **선량한도적용 원칙:** 환자 의료피폭을 제외하고 계획피폭상황의 규제된 선원으로부터 개인이 받는 총 선량은 ICRP가 규정한 걱정 한도를 초과하지 않아야 한다.

ICRP는 직무피폭, 일반인피폭 및 환자(간병인, 위안자 및 연구대상 자원자 포함) 의료피폭이라는 세 피폭범주를 계속 구분한다. 여성 종사자가 임신을 선언한 경우에는 배태아 보호를 위해 일반인 보호 수준과 대등한 수준이 되도록 추가 관리를 고려해야 한다.

(p) 현행 권고에서도 최적화 원칙의 핵심적 역할을 강조하는데 이 원칙은 모든 피폭상황에서 동일한 방식으로 적용되어야 한다. 제한^{restriction} 즉, 계획피폭

상황에 대한 선량제약치와 비상피폭 및 기존피폭 상황에 대한 참조준위는 명목 개인(기준인)에 대한 선량에 적용된다. 이 제한값보다 큰 선량을 초래하는 방안은 계획단계에서 배제되어야 한다. 이러한 선량 제한값은 총체적 최적화와 함께 전망적으로 적용한다는 것이 중요하다. 최적화한 방호전략을 이행한 후 제약치나 참조준위를 초과한 경우는 그 원인을 조사해야 하지만, 이러한 사실만으로 즉시 규제 조치를 취할 필요는 없다. 모든 피폭상황에서 방사선방호를 위한 공통적 접근을 강조하는 것이 다양한 방사선 피폭 환경에서 ICRP 권고의 적용에 도움이 될 것으로 ICRP는 기대한다.

(q) 관련 국가당국이 선량제약치와 참조준위 값 선택에 중요한 역할을 하는 경우가 많을 것이다. 선택 과정에 대한 지침이 현행 권고에서 제공된다. 이 지침은 ICRP가 이전에 제공한 수치권고를 참고하고 있다.

(r) 계획피폭상황에는 ICRP가 이전 권고에서 “행위”로 적절하게 관리해온 선원과 상황이 포함된다. 방사선의 의료 이용에서 방사선방호 또한 계획피폭상황 유형에 포함된다. 계획피폭상황에서 방호를 계획하는 과정에는 사고와 악의적 행위를 포함해, 정상 운영절차로부터 벗어나는 사태도 포함한다. ICRP는 그러한 상태에서 발생할 수 있는 피폭을 잠재피폭potential exposure이라고 부른다. 잠재피폭은 계획된 것은 아니지만 예상할 수는 있다. 따라서 선원 설계자와 사용자는 사건 확률을 평가하고, 그 확률에 적합한 공학적 안전장치를 도입하는 등, 잠재피폭 발생 가능성을 줄이기 위한 조치를 취해야 한다. 계획피폭상황에 대한 권고는 ICRP 60 및 후속 간행물에 수록된 것에서 크게 변하지 않았다. 행위에 대한 직무피폭 및 일반인피폭 선량한도는 계획피폭상황의 규제대상 선원에 그대로 적용된다.

(s) 의료에서 방사선방호에는 환자는 물론, 환자를 돌보고 간호하는 개인과 의생명연구 대상으로 참여하여 방사선을 피폭하는 자원자에 대한 방호도 포함된다. 이들 그룹의 방호에는 특별한 고려사항이 필요하다. 의료에서 방사선방호와 안전에 관한 ICRP 권고는 ICRP 73(ICRP 1996a)과 후속된 일련의 간행물에 상세히 수록되어 있다. 이들 간행물에 수록된 권고, 지침 및 조언은 그대로 유효하고 현행 권고에 요약 수록된다. 제3분과위원회가 준비한 ICRP 105(ICRP 2007b)도 현행 권고를 뒷받침한다.

(t) 비상피폭 및 기존피폭상황에서 참조준위를 사용하는 최적화에서는 방호전략 이행 후 잔여선량residual dose 예상 준위에 주목할 것을 강조한다. 이 잔여선

량 준위는 선택된 참조준위 값 미만이어야 한다. 이들 피폭상황은 종종 여러 피폭 경로를 포함하는데 이는 다양한 방호조치를 포함하는 방호전략이 고려되어야 함을 의미한다. 그러나 최적화 과정에서는 특정 대응책에 의한 회피선량^{averted dose}이 최적화전략 개발의 중요한 입력으로서 계속 사용될 것이다.

(u) 비상피폭상황은 비상대비^{preparedness} 및 비상대응^{response}에 대한 고려를 포함한다.²⁾ 비상대비는 비상상황이 발생한 경우 피폭을 참조준위 값 이하로 감소시킬 목적의 최적 방호전략 이행을 위한 계획을 포함해야 한다. 참조준위는 비상대응 중에 방호조치 효과를 평가하는 기준점 역할을 하며, 추가 조치 필요 여부를 결정하는 한 요소가 된다.

(v) 기존피폭상황에는 자연적으로 발생하는 피폭뿐만 아니라 ICRP 권고 밖에서 이루어졌던 행위와 과거 사건이나 사고로부터 발생하는 피폭이 포함된다. 이 유형의 피폭상황에서 방호전략은 여러 해 동안 상호작용적이고 점진적인 방식으로 시행되는 경우가 많다. 주택과 작업장의 실내 라돈은 중요한 기존피폭상황이며, 1994년 ICRP 65(ICRP 1993b)에서 구체적 권고를 ICRP가 제공한 바 있다. 이후 여러 역학연구에서 라돈 피폭의 보건위험을 확인하였으며, 이들이 라돈 방호에 대한 ICRP 권고를 일반적으로 뒷받침하고 있다. 현행 권고의 방사선방호 접근과 일관되게 라돈 피폭에 대한 방호최적화를 돕도록 국가 당국이 자국 참조준위를 설정할 것을 ICRP는 권고한다. ICRP는 연속성과 현실성을 위해 ICRP 65에 제시한 연간 선량 참조준위로서 상한 값 10 mSv(유효선량, 주택에서 Rn-222 농도 600 Bq/m³에 대한 협정환산 값)를 그대로 유지한다. 국가 참조준위를 초과하는 준위의 직장 라돈피폭은 직무피폭의 일부로 간주해야 하며³⁾, 그 준위 미만인 피폭은 직무피폭으로 간주하지 않음을 ICRP는 재확인한다. 그렇지만 국가 참조준위 미만의 경우에도 최적화는 필요하다.

(w) 현행 권고는 환경보호의 중요성을 인정한다. 이전에 ICRP는 주로 계획피폭상황 맥락에서 환경을 통한 방사성핵종의 거동과 관련해 인류 환경에만 관심

2) <역주> 비상대비나 비상대응을 직접 포함한다는 표현이 아니라 이들에 대한 '고려를 포함한다.'는 모호한 표현을 사용하고 있지만 다소 문제가 있다. 비상피폭상황이란 실제로 진행되고 있는, 높은 선량이 예상되는 상황이다. 그러나 비상대비는 만일의 사태를 대비해 평소에 준비하는 것이므로 비상피폭상황과 관련되지만 포함되는 것으로 볼 수는 없다. 비상대응도 초기에는 상황이 긴박하여 대체로 비상피폭상황이 발생하겠지만 '비상대응'은 중기 또는 장기 대응도 포괄하므로 반드시 비상피폭상황으로 직결되는 것은 아님을 감안할 필요가 있다.

3) <역주> 이 표현에는 약간의 혼선이 있다. 직무피폭에는 참조준위가 적용되는 것이 아니라 선량 제약치가 적용된다. 세부 논의에 대해서는 해당 분야의 역주를 참조하기 바란다.

을 두었다. 그러한 상황에서 일반인 방호에 필요한 환경관리 표준은 다른 생물종이 위협에 처하지 않음을 보장할 것이라고 ICRP는 계속 믿는다. 모든 피폭상황에서 환경보호를 위한 건실한 체계를 제공하기 위해 ICRP는 참조동식물 사용을 제안한다. 수용 근거를 확립하기 위해, 이러한 참조 생물체에 대해 계산한 추가 선량을 특정 생물학적 영향이 있는 것으로 알려진 선량이나 자연환경에 통상 존재하는 선량률과 비교할 수 있을 것이다. 그러나 ICRP는 환경보호를 위해 어떠한 형태의 '선량한도'를 설정함을 제안하지는 않는다.

(x) 비록 현행 권고가 방사선방호 정책에 대한 근본적인 변화를 내포하지는 않지만, 직면하는 많은 피폭상황에 방호체계 적용을 명확히 함에 현행 권고가 도움이 될 것이며, 이로써 이미 높은 수준에 있는 방호표준을 더 한층 높일 것으로 ICRP는 기대한다.

참고문헌

ICRP, 1991b. 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 60. Ann. ICRP 21(1-3).

ICRP, 1993b. Protection against radon-222 at home and at work. ICRP Publication 65. Ann. ICRP 23(2).

ICRP, 1996a. Radiological protection in medicine. ICRP Publication 73. Ann. ICRP 26(2).

ICRP, 2007b. Radiological protection in medicine. ICRP Publication 105. Ann. ICRP 37(5).

제1장 서론

(1) 제1장에서는 ICRP⁴⁾와 그 권고의 역사를 다룬다. 이 장에는 본 보고서의 목적과 구성에 대해 기술하고, ICRP가 전리방사선에 대한 방호만을 다루고 있는 이유를 제시한다.

1.1. ICRP 역사

(2) 국제방사선방호위원회International Commission on Radiological Protection(이하 ICRP)는 제2차 국제방사선의학회International Congress of Radiology의 결정에 따라 국제X선라듐방호위원회International X ray and Radium Protection Committee라는 명칭으로 1928년에 설립되었다. 1950년에 조직이 개편되면서 현재 이름으로 변경되었다.

(3) ICRP는 독립 공익단체, 즉 비영리기구이다. ICRP는 그 자매기구인 국제방사선단위측정위원회International Commission on Radiation Units and Measurements(이하 ICRU)와 긴밀하게 협력하고 있으며, 유엔방사선영향과학위원회(UNSCEAR), 세계보건기구(WHO) 및 국제원자력기구(IAEA)와도 공식적인 관계를 유지하고 있다. 또한 국제노동기구(ILO), 유엔환경프로그램(UNEP) 및 기타 유엔기구와도 중요한 관계를 유지한다. 유럽공동체위원회(유럽위원회, 이하 EC), 경제협력개발기구의 원자력국(OECD/NEA), 국제표준화기구(ISO) 및 국제전기기술위원회(IEC)와도 협력하고 있다. ICRP는 또한 국제방사선방호학회연합International Radiation Protection Association(IRPA)과 강한 연계를 통해 전문 방사선학회들과 관계를 유지한다. ICRP는 국가 기관들이 보고하는 발전 내용도 참작한다.

4) <역주> 모든 ICRP 간행물에서는 ‘the Commission’이라는 표현을 빈번히 사용한다. 과거의 ICRP권고 번역물은 ICRP를 지칭하는 ‘the Commission’을 그대로 ‘위원회’로 번역했었다. ICRP가 권고의 주체로서 그 입장을 밝히는 문서이므로 이러한 1인칭 표현을 사용하는 것이 원칙적으로 적절하다. 그러나 ICRP권고에 대해 익숙하지 않은 독자들도 있음을 감안하여 의미를 쉽게 전달하기 위해 이 번역본에서는 3인칭 방식이지만 모두 ‘ICRP’로 표현했다.

1.2. ICRP 권고의 발전

(4) ICRP가 발표한 최초의 일반 권고는 1928년 의료용 선원의 취급시간을 제한하는 방법을 통한 의료인 보호에 관한 것이었다(ICRPC 1928). 이 제한은 지금으로 보면 연간 약 1000 밀리시버트(mSv) 상당 선량으로 평가된다. 초기에 발표된 권고들은 문턱 영향 방지에 대한 정성적 방법으로 시작했다. 방호를 정량화하고 선량한도를 정의하려면 선량 측정체계가 필요했다. 1934년에는 현재 종사자 선량한도의 약 10배에 해당하는 안전 문턱 개념을 품은 권고를 발표했다(ICRPC 1934). 계속해서 '용인tolerance' 개념을 사용하다가 1951년에 낮은 LET 방사선에 대해 지금으로 주당 약 3 mSv로 평가되는 한도를 제안했다(ICRP 1951). 1954년께에는 미국 방사선의학자들에게 초과 악성질환이 발현된 역학적 증거와 일본 원폭생존자들에게 나타난 초과 백혈병의 첫 징후로 인해 문턱 근거가 사라졌다(ICRP 1955).

(5) 군사와 산업에서 원자력 에너지 사용이 확대됨에 따라 1950년대 초기에 일반인 방호를 위한 권고를 도입했다. 1956년도 ICRP 권고(ICRP 1957)에서 주간 및 누적 선량에 대한 한도를 설정했는데 그 값은 종사자의 경우 50 mSv, 일반인의 경우 5 mSv의 연간 선량한도에 해당한다. 지금 확률론적 영향으로 규정하는 영향의 가능성과 그러한 유형의 영향에 문턱 존재여부를 확인할 수 없다는 사실을 인식하여 1954년도 ICRP 권고는 '**모든 종류의 전리방사선 피폭을 가능한 최소 준위로 감소시키기 위해 제반 노력을 기울여야 한다**'고 권고했다(ICRP 1955). 후속 권고에서 이 표현은 피폭을 '**실행 가능한 한 낮게**as low as practicable(ICRP 1956)', '**용이하게 달성할 수 있는 한 낮게**as low as readily achievable(ICRP 1966)', '**경제적, 사회적 인자를 고려하여 합리적으로 달성 가능한 한 낮게**as low as reasonably achievable, economic and social factors being taken into account(ICRP 1973)' 유지하도록 계속 개선되었다.

(6) ICRP 1(ICRP 1959)로 번호가 부여된, 현행 간행물 형태의 ICRP 최초 보고서가 1958년 승인된 권고를 실었다. 이후의 일반권고는 ICRP 6(ICRP 1964), ICRP 9(ICRP 1966), ICRP 26(ICRP 1977) 및 ICRP 60(ICRP 1991b)에 수록되었다. 이들 일반권고는 보다 특화된 주제를 조언하는 많은 다른 간행물에 의해 뒷받침 받아왔다.

(7) ICRP 26에서 처음으로 ICRP는 방사선의 확률론적 영향 위험을 정량화했

으며, 정당화, 방호최적화 및 개인선량한도라는 세 원칙과 함께 선량제한체계 System of Dose Limitation(ICRP 1977)를 제안했다. 1990년에 ICRP는 부분적으로는 방사선피폭으로 인한 위험 평가치의 상향 조정 때문에, 또 한편으로는 개념을 선량제한체계로부터 방사선방호체계 System of Radiological Protection로 확장할 필요 때문에 권고를 대대적으로 개정했다(ICRP 1991b). 정당화, 최적화 및 개인선량한도의 원칙은 그대로 유지되었으며, 여러 유형의 피폭상황 차이를 고려하기 위해 '행위practices'와 '개입interventions'으로 구분하였다. 또한 본질적 경제적 및 사회적 판단에서 발생할 수 있는 불평등을 제한하기 위해 제약치constraint를 적용하는 방호최적화를 강조하였다.

(8) 1956년에 설정된 종사자에 대한 연간 선량한도 50 mSv⁵⁾는 1990년까지 유지되었는데, 1990년에는 히로시마-나가사키 원폭생존자에 대한 수명연구에서 재평가한 확률론적 영향 위험에 기초하여 연평균 20 mSv로 낮춰졌다(ICRP 1991b). 일반인에 대한 연간 선량한도 5 mSv는 ICRP '파리 성명'(ICRP 1985b)에서 연평균 1 mSv로 낮추었고, ICRP 60(ICRP 1991b)은 '특별한 상황'에서 5년간 평균 가능성을 인정하면서 연간 1 mSv로 규정하였다.

(9) ICRP 60 이후 일련의 간행물이 방사선원으로부터 피폭관리를 위한 지침을 추가로 제공해 왔다(참고문헌 목록 참조). 1990년 권고를 포함하면 이들 보고서는 다양한 상황에서 개인선량 제한에 관해 약 30개의 상이한 수치를 제시하고 있다. 또한 이들 수치는 다양한 방법으로 정당화되었다(ICRP 2006b). 나아가 ICRP 91에서는 환경보호를 위한 정책지침을 개발하기 시작했다(ICRP 2003).

(10) 이제 ICRP는 기존 권고의 안정성을 유지하면서 새로운 권고를 채택하기로 결정했다.

(11) 전리방사선 보건영향에 관한 방대한 문헌을 ICRP가 장기간 검토한 결과 방사선방호체계에는 근본적 변경이 필요 없다는 사실이 밝혀졌다. 따라서 현행 권고⁶⁾는 변경보다는 연속성을 위주로 한다. 일부 권고는 유효하고 명확하기 때문에 계속 유지되지만 이해 정도가 발전함에 따라 갱신된 권고도 있다. 부족한 부분이 있는 곳에 일부 항목이 추가되었으며, 안내가 더 필요한 곳에는 개념을 추가로 설명했다.

5) 이전 보고서에 사용한 일부 용어와 단위는 일관성을 위해 현행 체계로 변환되었다.

6) <역주> 이 번역판에서 “현행 권고”라는 표현은 ICRP 103 권고를 의미한다.

(12) 현행 권고는 다양한 ICRP 간행물로 발표된 이전의 권고들을 통합하고 추가한다. 1991년 이후 여러 정책지침에 수록된 기존 수치권고는 따로 언급하지 않는 한 그대로 유효하다. 따라서 ICRP 60에 수록된 기존 권고 및 후속 정책지침에 적절히 기초한 방사선방호 규정에 큰 변화는 없을 것으로 해석해도 좋다. 현행 권고에서도 방사선방호 최적화의 중요성이 다시 한 번 강조되고 강화되며, 행위(이제 계획피폭상황에 포함됨)에 대한 요건을 성공적으로 이행한 경험을 다른 상황, 즉 비상피폭상황과 기존피폭상황으로 확대 적용한다.

(13) ICRP는 장차 다양한 상황에서 최적화 과정에 적용할 보고서로 현행 권고를 보완할 계획이다.

(14) ICRP 정책의 중요한 측면을 발전시키며 권고의 근거가 되는 다음과 같은 일련의 기반문서가 통합된 현행 권고를 보완한다.

- 방사선 관련 압 위험의 낮은 선량 외삽(ICRP 99, ICRP 2005d)
- 전리방사선에 의한 보건위험에 관한 생물학적, 역학적 정보: 사람의 방사선방호 목적을 위한 판단 요약(부록A)
- 방사선방호에 사용하는 양(부록B)
- 방사선방호 최적화(ICRP 101, ICRP 2006a, Part 2)
- 대표인에 대한 선량평가(ICRP 101, ICRP 2006a, Part 1)
- 전리방사선의 환경영향 평가를 위한 기틀(ICRP 91, ICRP, 2003b)

또한 ICRP는 방사선방호 범위에 관한 지침(ICRP 104, ICRP 2007a)과 의료 행위에서 방사선방호에 관한 지침(ICRP 105, ICRP 2007b)도 제공한다.

(15) ICRP의 일차적인 목적은 사람에 대한 방사선방호를 달성하는 것이었으며, 지금도 그러하다. 전체적 환경보호에 관한 일반적 선언은 없었지만 다른 종에 대한 잠재적 영향도 고려해 왔다. 물론 ICRP 60(ICRP 1991b)에서 ICRP는 당시로서 환경을 통한 방사성핵종 이동에 관해서만 고려한다고 설명했는데, 이러한 이동이 사람의 방사선방호에 직접 영향을 미치기 때문이었다. 그렇지만 ICRP는 당시 바람직하다고 판단되는 수준으로 사람을 보호하기 위한 환경관리 표준이 다른 종을 위험에 처하지 않도록 할 것이라는 견해를 피력했다.

(16) ICRP는 이러한 견해가 일반적인 **계획피폭상황**(계획피폭상황의 정의는 제 5.2절 참조)에 적용될 것이며, 따라서 사람 거주지에 상당히 높은 수준의 방호가 제공될 것으로 계속 믿는다. 그러나 사람이 존재하지 않거나 사람의 방호에 대한 ICRP 권고가 적용되지 않는 곳과 같은 다른 환경도 있으며, 환경영향에 대하여

고려할 필요가 있는 다른 피폭상황도 있을 것이다. 또, 어떤 국가 당국들은 환경이 심지어 계획피폭상황에서도 보호되고 있음을 직접적이고 명확하게 설명할 필요도 있음을 ICRP는 인지하고 있다. 이에 따라 이제 공통된 과학적 기반에서 사람 이외 생물종에 대해 피폭과 선량 사이, 그리고 선량과 영향 사이 관계와 그러한 영향의 결과를 평가하기 위한 보다 분명한 기틀을 개발할 필요가 있다고 ICRP는 믿는다. 이 내용은 제8장에서 추가로 논의한다.

(17) ICRP 조안은 주로 방사선방호를 담당하는 규제당국, 기관 및 개인을 겨냥한 것이다. ICRP 권고들은 과거에 국가 또는 지역적⁷⁾ 규제표준에 대해 일관된 근거를 제공하는 것을 도왔으며, ICRP는 권고의 안정성 유지에 유념해 왔다. ICRP는 적절한 방사선방호가 이루어질 수 있는 기반에 대한 지침만을 제공하며, 규제적 규정을 제공하지는 않는다. 그러나 그러한 규제적 규정은 ICRP 지침으로부터 개발되어야 하며, 지침과 일관성을 유지해야 한다고 ICRP는 믿는다.

(18) 유엔 산하 관련 국제기구가 공동으로 후원하고 IAEA가 발행하는 “전리방사선에 대한 방호 및 방사선원의 안전에 대한 국제기본안전기준(일반적으로 ‘BSS’로 칭함)”과 ICRP 권고 사이에는 긴밀한 관계가 있다. IAEA 집행부가 BSS는 ICRP 권고를 고려해야 한다고 결정했기 때문에 BSS는 ICRP 권고가 바뀔 때마다 항상 이를 따라 왔다. 예를 들어 1977년과 1990년 ICRP 권고는 각각 1982년과 1996년에 발표된 국제기본안전기준 개정판의 기초가 되었다.

(19) 이전 보고서와 마찬가지로 현행 권고는 전리방사선에 대한 방호로 그 범위가 제한된다. ICRP는 비전리방사선원에 대해서도 적절한 관리의 중요성을 인식하고 있다. 국제비전리방사선방호위원회(International Commission on Non-ionizing Radiation Protection(이하 ICNIRP))가 그러한 선원에 대한 권고를 제공한다(ICNIRP 2004).

1.2.1. 선량과 단위의 변천

(20) 최초의 선량 단위인 뢰트겐(roentgen(r))은 나중에 ICRU가 된 국제X선단위 위원회에 의해 1928년 X선을 위한 단위로 제정되었다(IXRUC 1928). ‘선량dose’이라는 용어는 뢰트겐(r) 단위의 개정된 정의와 함께 ICRU의 1937년도 권고에

7) <역주> ICRP 간행물에서 지역(region)이라 함은 주로 국가보다 넓은 영역을 의미하는 경우가 많다. 이 개념은 특히 영토가 작은 유럽 국가들에서 흔히 사용하고 있다.

서 처음으로 공식적으로 사용되었다(ICRU 1938). 1953년에 ICRU는 선량 개념을 공기 이외의 임의 물질로 확대하기 위해 흡수선량absorbed dose 개념을 제안하고 그 명칭과 '라드rad' 단위를 공식적으로 정의했다(ICRU 1954).

(21) ICRU가 여러 종류 방사선에 대한 생물학적효과비relative biological effectiveness(RBE)를 고려하여 처음으로 사용한 선량은 1956년도 ICRU 권고에 규정한 '렘 단위 RBE 선량'이었으며, 이는 라드 단위 흡수선량의 RBE 가중 합을 의미한다. ICRU와 ICRP의 공동노력 결과로 이 선량은 선량당량dose equivalent으로 대체되었는데, 선량당량은 흡수선량, 방사선 선질계수quality factor, 선량분포계수 및 기타 필요한 수정인자의 곱으로 정의된다(ICRU 1962). '렘rem'은 선량당량의 단위로 유지되었다. 나아가 1962년 권고에서 ICRU는 다른 선량인 커마kerma를 정의했으며, 피폭선량이라는 명칭을 '조사선량exposure'⁸⁾으로 변경했다.

(22) 1977년 권고(ICRP 1977)에서 ICRP는 확률론적 영향stochastic effects을 관리하기 위해 새로운 선량당량을 도입했는데, 이 양은 인체의 다양한 조직 및 장기 선량당량의 가중 합으로 정의되며, 이때 가중치는 '조직가중치tissue weighting factor'로 명명되었다. 1978년 스톡홀름 회의에서 ICRP는 이 새로운 가중선량을 '유효선량당량effective dose equivalent'으로 명명했다(ICRP 1978). 동시에 선량의 SI 단위가 채택되어 라드는 그레이gray(Gy)로, 렘은 시버트sievert(Sv)로 대체되었다.⁹⁾

(23) 1990년 권고(ICRP 1991b)에서 ICRP는 인체관련 선량을 다시 정의했다. 방호 목적을 위해 조직이나 장기 전체에 평균한 흡수선량을 기본 선량으로 정의했다. 또한 생물학적 영향이 에너지전달선밀도에만 지배되지 않는다는 사실을 감안해, ICRP는 1990년 권고에서 선량당량 계산에 사용하는 선질계수 대신 낮은 선량에서 확률론적 영향 유발과 관련한 RBE에 기초해 선택한 '방사선가중치'를 사용하기로 결정했다. 이렇게 도출된 양을 선량당량과 구별하기 위해 ICRP는 이 새로운 선량을 '등가선량equivalent dose'으로 명명했다. 그에 따라 유효선량당량은 '유효선량'으로 개명되었다. 방사선의 보건영향에 관한 새로운 정보를 반영하기 위해 조직가중치 일부를 수정했다.

8) <역주> 원문은 'exposure dose'를 'exposure'로 바꾼 내용을 설명한다. 그러나 이들 용어를 직역하여 피폭선량과 피폭으로 나타내면 현재 사용하는 용어와 혼란이 있다. 당시의 exposure dose 또는 개정된 exposure는 현재 우리가 조사선량으로 부르는 공기의 노출량이다. 따라서 일반적 개념의 '피폭'과 혼란을 피하기 위해 '조사선량'으로 표현한다.

9) <역주> 정확히 표현하자면 SI 단위가 채택됨에 따라 그 특별명칭이 각각 그레이와 시버트로 대체되었다.

(24) 현재 사용하는 선량계측량과 단위는 제4장에서 자세히 설명한다.

1.3. 권고의 구조

(25) 제2장에서는 권고의 목적과 범위를 다룬다. 제3장에서는 방사선의 생물학적 측면을 다루며, 제4장에서는 방사선방호에 사용하는 선량과 단위가 설명된다. 제5장에는 방사선방호체계에 관한 개념적 기틀이 설명되며, 제6장에는 세 가지 유형의 피폭상황에 대한 ICRP 권고의 이행을 다룬다. 제7장은 환자의 의료피폭을 설명하며, 제8장은 환경보호를 논의한다.

1.4. 참고문헌

ICNIRP, 2004. ICNIRP Publications 1992-2004. A reference CD-ROM based on guidelines on limiting exposure to non-ionizing radiation and statements on special applications. Matthes, R., Bernhardt, J.H., McKinlay, A.F. (eds) International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection, Munich, Germany. ISBN 3-934994-05-9.

ICRP, 1951. International Recommendations on Radiological Protection. Revised by the International Commission on Radiological Protection and the 6th International Congress of Radiology, London, 1950. Br. J. Radiol. 24, 46-53.

ICRP, 1955. Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. Br. J. Radiol.,(Suppl. 6).

ICRP, 1957. Reports on Amendments during 1956 to the Recommendations of the International Commission on Radiological Protection (ICRP). Acta. Radiol. 48, 493-495.

ICRP, 1959. Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 1. Pergamon Press, Oxford, UK.

ICRP, 1964. Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 6. Pergamon Press, Oxford, UK.

ICRP, 1966. Recommendations of the International Commission on

- Radiological Protection. ICRP Publication 9, Pergamon Press, Oxford, UK.
- ICRP, 1973. Implications of Commission Recommendations that Doses Be Kept As Low As Readily Achievable. ICRP Publication 22. Pergamon Press, Oxford, UK.
- ICRP, 1977. Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 26, Ann. ICRP 1(3).
- ICRP, 1978. Statement from the 1978 Stockholm Meeting of the ICRP. ICRP Publication 28, Ann. ICRP 2(1).
- ICRP, 1985b. Quantitative bases for developing a unified index of harm. ICRP Publication 45. Includes: Statement from the 1985 Paris meeting of the ICRP. Ann. ICRP 15(3).
- ICRP, 1991b. 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 60, Ann. ICRP 21(1-3).
- ICRP, 2003b. A framework for assessing the impact of ionising radiation on non-human species. ICRP Publication 91. Ann. ICRP 33(3).
- ICRP, 2005d. Low dose extrapolation of radiation-related cancer risk. ICRP Publication 99, Ann. ICRP 35(4).
- ICRP, 2006a. Assessing dose of the representative person for the purpose of radiation protection of the public and The optimisation of radiological protection: Broadening the process. ICRP Publication 01. Ann. ICRP 36(3).
- ICRP, 2006b. Analysis of the Criteria used by the ICRP to Justify the setting of Numerical Values. Supporting Guidance 5. Ann. ICRP 36(4).
- ICRP, 2007a. Scope of radiological protection control measures. ICRP Publication 104. Ann. ICRP 37(5).
- ICRP, 2007b. Radiological protection in medicine. ICRP Publication 105. Ann. ICRP 37(6).
- ICRU, 1938. Recommendations of the International Commission on Radiation Units, Chicago, 1937. Am. J. Roentgenol., Radium Therapy Nucl. Med. 39, 295.
- ICRU, 1954. Recommendations of the International Commission on Radiation Units, Copenhagen, 1953. Radiology 62, 106.
- ICRU, 1962. Radiation Quantities and Units, Report 10a of the International Commission on Radiation Units and Measurements, Natl. Bur. Std Handbook 78.

- IXRPC, 1928. X ray and Radium Protection. Recommendations of the 2nd International Congress of Radiology, 1928. Br. J. Radiol. 12, 359-363.
- IXRPC, 1934. International Recommendations for X ray and Radium Protection. Revised by the International X ray and Radium Protection Commission and adopted by the 4th International Congress of Radiology, Zurich, July 1934. Br. J. Radiol. 7, 1-5.
- IXRUC, 1928. International X ray unit of intensity. Recommendations of the 2nd International Congress of Radiology, 1928. Br. J. Radiol. 12, 363-364.

제2장 권고의 목표와 범위

2.1. 권고의 목표

(26) ICRP 권고의 일차적인 목표는 방사선피폭을 수반할 수 있지만 바람직한 인간활동을 부당하게 제한하지 않으면서 방사선피폭의 해로운 영향으로부터 사람과 환경을 보호하기에 적합한 수준에 기여하는 것이다.

(27) 권고의 목표는 방사선피폭이나 그 보건영향에 관한 과학적 지식만으로는 달성될 수 없다. 목표를 달성하려면 방사선으로부터 사람과 환경을 보호할 수 있는 모델이 필요하다. 권고는 과학적 지식과 전문가 판단에 기초한다. 방사선피폭의 보건위험에 관한 과학적 데이터가 선행 필수자료이지만 방호의 사회적, 경제적인 측면 또한 고려되어야 한다. 방사선방호에 관련한 모든 사람은 다양한 위험에 대한 상대 중요도 및 위험과 혜택의 균형에 대한 가치판단을 해야 한다. 이러한 관점에서 방사선방호는 다른 위험요소를 다루는 분야와 차이가 없다. ICRP는 투명성을 증진시켜 결정이 어떻게 이루어졌는지 이해를 높이기 위해 가능하면 과학적 평가와 가치판단의 근거, 그리고 그 구분이 항상 명확해야 한다고 믿는다.

(28) 방사선방호에서는 두 가지 유해한 영향을 다룬다. 문턱선량 이상의 높은 선량은 종종 급성으로 나타나는 결정론적 영향(유해한 조직반응, 제3장 참조)을 초래한다. 높은 선량과 낮은 선량 모두 확률론적 영향(암이나 유전적 영향)을 유발할 수 있는데, 이러한 영향은 피폭 후 긴 시간 뒤에 통계적으로 검출 가능한 발생증가로 확인될 수 있다.

(29) ICRP 방사선방호체계의 주목적은 사람의 보건이고 보건 목적은 비교적 단순하다. 즉, 결정론적 영향을 방지하고, 확률론적 영향 위험을 합리적으로 달성할 수 있는 수준으로 낮추도록 전리방사선 피폭을 관리하고 제어하는 것이다.

(30) 반면, '환경보호'에 대해서는 단일하고 간단한 보편적 정의가 없으며, 개념은 국가마다, 상황마다 서로 다르다. 따라서 사람 외 생물종에 대해서는 조기

사망이나 이환 또는 생식성공률 감소와 같은 방사선 영향을 고려하는 다른 방법을 사용하는 것이 유용하게 나타날 수도 있다. ICRP의 목표는 생물학적 다양성 유지, 종의 보존 또는 자연 서식환경, 공동체 및 생태계에 무시해도 좋을 정도의 영향을 주는 수준으로 유해한 방사선 영향을 방지하거나 그러한 영향의 발생 빈도를 낮추는 것이다. 그러나 ICRP는 이러한 목표 달성에 있어 방사선 피폭은 고려해야 할 요소의 하나에 불과하며, 아마도 중요하지 않은 요소일 수 있음을 인지하고 있다. ICRP는 방호 접근이 위험 수준에 부합하고 다른 인간활동의 영향으로부터 환경을 보호하기 위한 노력에 상당함을 보장하는 지침과 조언을 제공할 것이다.

2.2. 방호체계의 근거와 구조

(31) 방사선 피폭상황이 다양하고 광범한 적용에서 일관성을 유지해야 하기 때문에 ICRP는 방호에서 이행 가능하고 체계적인 접근을 조장할 목표로 방사선 방호의 공식 체계를 수립했다. 이 체계는 기존 피폭원, 사회적 선택에 따라 의도적으로 도입되는 피폭원 또는 비상사태의 결과로 유발된 선원을 포함하는 많은 피폭원을 다루어야 한다. 이들 선원은 현재 및 미래의 개인, 그룹 또는 전체 집단에 피폭을 초래하는 상호 결속된 다양한 사건이나 상황들과 연계된다. 방호체계는 이러한 복잡한 네트워크를 논리적 구조로 다룰 수 있도록 개발되었다.

(32) 사람을 위한 방호체계는 a) 방사선량 평가를 위한 사람의 기준 해부학 및 생리학적 모델, b) 분자 및 세포 차원 연구, c) 실험동물 연구 및 d) 역학연구의 활용을 기반으로 한다. 모델들을 활용하여 방사선 작업종사자, 환자 및 일반인에 대해 내부피폭에서 다양한 방사성핵종의 ‘단위 섭취 당 예탁선량’, 외부피폭에서 ‘단위 공기커마 또는 플루언스 당 선량’을 위한 도표화되고 표준화된 자료를 얻어왔다. 역학연구와 실험연구를 통하여 외부 및 내부 방사선 피폭의 위험을 평가한다. 생물학적 영향의 경우, 실험 생물학에 바탕을 둔 사람에 대한 경험으로부터 데이터를 얻는다. 암 및 유전영향에 대한 ICRP의 출발점은 역학연구 결과와 동물과 사람 유전학 연구의 결과이다. 발암현상과 유전의 기전에 대한 실험연구 정보의 보완을 통해 이들로부터 방사선방호의 관심대상이 되는 낮은 선량에서 위험 평가치를 얻는다.

(33) 조직가중치와 위해detriment 평가치에 연계된 불확도를 고려할 때, 연령과

성 평균한 조직가중치와 위험 평가치를 사용하는 것이 방사선방호 목적으로 적절하다고 ICRP는 본다. 이 방호체계는 남성과 여성 모두에 대해 적절한 방호를 달성하는 데 충분히 견고하다. 또한 이렇게 하는 것이 불필요한 차별로 간주될 수 있는 성별 또는 연령별 방사선방호 기준을 두도록 하는 요구를 예방할 수 있다. 그러나 역학연구처럼 방사선 관련 위험을 소급적으로 평가하는 목적으로는 성별 및 연령별 자료를 사용하여 특정 성 및 연령에서 위험을 계산하는 것이 적합하다. 위험을 계산하는 ICRP 방법론에 대한 자세한 내용은 부록A와 부록B에서 논의한다.

(34) ICRP의 위험 평가치는 전형적 연령 분포를 갖는 남녀 명목 집단의 피폭에 해당되며, 연령군과 성별에 대한 평균으로 계산하기 때문에 '명목값'으로 불린다. 방사선방호를 위해 권고된 선량계측량인 유효선량 역시 연령과 성에 평균해 계산한다. 유효선량을 평가하는 명목 인자의 정의에는 본질적 불확실성이 많이 존재한다. 치사율과 위해계수 평가치는 방사선방호 목적에 적합하지만, 역학에서 도출한 모든 추정치처럼 명목위험계수는 특정 개인에게는 적용되지 않는다. 개인이나 지정된 모집단 피폭으로 가능한 영향을 평가하려면 피폭한 개인들에 관한 구체적 데이터를 사용해야 한다.

(35) ICRP가 이미 권고(ICRP 1999a)한 바와 같이 해당 장기에 결정론적 영향이 나타날 수 있는 문턱선량을 초과하는 상황에서는 거의 모든 여건에서 방호조치가 수행되어야 한다. 특히 장기간 피폭 해당 상황에서는 결정론적 영향 문턱치의 현행 불확실성을 고려하는 것이 신중한 자세이다. 결국 100 mSv에 접근하는 연간선량은 이에 대한 방호조치 도입을 거의 항상 정당화할 것이다.

(36) 연간 100 mSv 미만인 방사선량의 경우, 확률론적 영향 발생이 낮은 확률로, 그리고 백그라운드 선량을 넘는 방사선량의 증가에 비례하여 증가할 것으로 ICRP는 가정하고 있다. 소위 문턱 없는 선형모델linear-non-threshold(LNT)은 방사선피폭으로부터 위험을 관리하는 최선의 현실적 접근법이며, '예방원칙'(UNESCO 2005)과도 상응하는 것으로 ICRP는 간주한다. ICRP는 낮은 선량과 선량률에서는 LNT모델이 방사선방호의 신중한 기초를 유지한다고 본다(ICRP 2005d).

(37) 단일 피폭범주에서도 개인은 여러 선원에 피폭할 수 있으므로 총 피폭의 평가가 이루어져야 한다. 이 평가를 '개인중심individual-related 접근'이라 한다. 또한 단일 선원이나 선원군에 피폭하는 모든 사람의 피폭도 고려해야 한다. 이 절

차를 '선원중심source-related' 평가라 한다. 선원에 조치를 취함으로써 여러 사람들을 선원으로부터 보호할 수 있기 때문에 ICRP는 선원중심 평가의 우선적 중요성을 강조한다.

(38) 확률론적 영향의 확률적 본성과 LNT모델의 특성 때문에 '안전'과 '위험'을 분명하게 구별할 수 없어서 방사선 위험 관리를 정확히 규정하기는 다소 어렵다. LNT모델의 정책적 주요 의미는 작은 위험이라도 수용 가능한 수준에 근거하여 어떤 방호수준을 고려해야 한다는 것이다. 이에 따라 ICRP는 다음의 3대 방호 기본원칙과 함께 방호체계를 도출했다.

- 정당화Justification
- 방호최적화Optimisation of protection
- 선량한도 적용Application of dose limits

이들 원칙은 제5.6절에서 더 자세히 다룬다.

(39) 전리방사선의 유해한 영향으로부터 개인을 보호할 때 선원 종류에 관계없이 방사선량 관리(제한 의미)가 중요하다.

(40) 방사선방호체계의 주요 구성요소를 아래와 같이 요약할 수 있다.

- 방사선피폭이 발생할 수 있는 상황의 특성(계획planned, 비상emergency 및 기존existing 피폭상황)
- 피폭 유형의 분류(확실히 발생할 피폭과 잠재피폭potential, 그리고 직무피폭occupational, 환자 의료피폭medical 및 일반인public 피폭)
- 피폭자 구별(종사자, 환자 및 일반인)
- 평가 유형의 구분: 선원중심 평가와 개인중심 평가
- 방호원칙의 구체적 구성: 정당화, 방호최적화 및 선량한도 적용
- 방호조치나 평가가 필요한 개인선량 준위 설명(선량한도, 선량제약치dose constraints 및 참조준위reference level)
- 선원 보안을 포함한 방사선원 안전성 조건과 비상대비 및 대응 요건에 대한 기술.

(41) 현행 권고에서 기술하고 요약한 방사선방호체계의 이행은 감시되고 평가되어야 한다. 경험을 통한 학습과 개선 필요 분야를 확인한다는 점에서 정기적인 검토가 중요하다.

(42) 현행 권고에서 ICRP는 선원, 피폭상황 또는 피폭자 유형에 관계없이 선

원중심 방호에서 동일한 개념적 접근을 사용하며, 방호최적화를 강조한다. 선량이나 위험에 대한 선원중심 제한이 방호최적화 과정에서 적용된다. 원칙적으로 그러한 제한 수준을 초과하는 선량을 시사하는 방호방안은 거부되어야 한다. ICRP는 행위에 대한 이들 제한치에 대해 이전에 '제약치'라는 용어를 사용하였다. 계획피폭상황이 정상운영 행위를 망라하고 있기 때문에, ICRP는 일관성 유지 차원에서 계획피폭상황에 대해서는 '제약치'라는 용어를 계속 사용하기로 하였다. 그러나 'constraint'라는 어휘로 인해 많은 국가에서 제약치를 엄중한 한도로 해석한다는 사실도 ICRP는 인지한다. '제약치'는 지역 상황에 따라 다르게 적용해야 하기 때문에, 엄중한 한도라는 의미는 결코 ICRP가 의도하는 바가 아니다.

(43) 방호조치 수준은 ICRP의 일반권고(제6.5절 표8 참조)를 포함한 일반적 고려나 모범관행을 바탕으로 선택할 수 있다. 특정 상황, 특히 비상피폭상황이나 기존피폭상황에서는 기본 고려사항으로부터 도출된 방호수준을 바로 만족시킬 수 있는 실행 가능한 방호방안이 없는 경우도 있겠다. 따라서 제약치를 한도 형태로 엄격하게 해석할 경우 최적화과정의 결과를 부정적으로 심각하게 왜곡할 수 있다. 이러한 이유 때문에 ICRP는 비상피폭상황이나 기존피폭상황의 경우 선량이나 위험의 제한에 '참조준위'라는 용어를 사용할 것을 제안한다. 참조준위를 초과하는 피폭이 발생하도록 계획하는 것은 부적합한 것으로 판단되며, 참조준위 미만에서는 방호최적화가 적용되어야 한다. 그러나 ICRP는 계획피폭상황이 아닌 두 피폭상황의 명칭 차이 때문에 방호체계 적용에 근본적 차이가 있는 것은 아니라는 사실을 강조하고자 한다. 계획피폭상황, 비상피폭상황 및 기존피폭상황에서 최적화 원칙의 적용에 관한 지침은 제6장에서 설명된다.

2.3. 권고의 범위

(44) ICRP 방사선방호체계는 규모와 원천에 관계없이 모든 선원에 의한 방사선피폭 전체에 적용된다. **방사선**이라는 용어는 전리방사선을 의미한다. ICRP는 방사선이나 방사성핵종에 노출되는 과정에 대한 일반적 의미로 **방사선피폭**(또는 줄여서 **피폭**)이라는 용어를 사용하며, 피폭의 중대성은 결과인 방사선량에 의해 결정된다(ICRP 1991b). '선원'이라는 용어는 피폭의 원인을 나타내기 위해 사용하며, 반드시 물리적 방사선원을 의미하지는 않는다(제5.1절 참조). 일반적으로, 권고를 적용할 목적에서 선원은 방사선방호가 총체적으로 최적화되는 실체이다.

(45) ICRP는 권고를 가능한 한 광범하고 일관성 있게 적용하고자 한다. 특히 ICRP 권고는 천연 및 인공 선원에 의한 피폭 모두에 적용된다. 권고는 전체적으로 피폭원이나 개인의 선량으로 이어지는 경로를 합리적 방법으로 제어할 수 있는 상황에만 적용할 수 있다. 그러한 상황의 선원을 **제어가능 선원**이라 한다.

(46) 선원은 많으며 어떤 사람들은 둘 이상의 선원으로부터 피폭하는 경우도 있다. 결정론적 영향(유해한 조직반응)의 문턱선량 이하인 경우, 상황에 기인하는 선량 증가와 해당 확률론적 영향 확률의 증가 사이에 예상되는 비례관계는 총 피폭의 각 성분을 별도로 취급하고, 방사선방호에 중요한 성분의 선택을 가능하게 한다.¹⁰⁾ 나아가 이들 성분을 목적에 따라 그룹으로 소분할 수도 있다.

(47) 과거에 ICRP는 선량을 증가시키는 '행위'와 선량을 감소시키는 '개입'을 구분했었다(ICRP 1991b). 이제 ICRP는 상황기반 접근을 사용하여 방사선피폭이 가능한 상황을 **계획피폭상황**, **비상피폭상황** 및 **기존피폭상황**으로 특징짓고 단일 세트의 방호 기본원칙을 이들 상황 모두에 적용한다.

(48) 그러나 '행위'라는 용어가 방사선방호에 광범하게 사용되고 있어서, ICRP는 방사선피폭 증가나 방사선피폭 위험을 높이는 활동을 의미하도록 이 용어를 계속 사용할 것이다.

(49) 행위는 업무, 교역, 산업 또는 기타 생산활동과 같은 활동일 수 있으며, 정부업무나 공익사업일 수도 있다. 행위가 도입하거나 유지하는 방사선원은 그 선원에 직접 조치를 가함으로써 제어될 수 있음을 행위라는 개념이 내포하고 있다.

(50) '개입'이라는 용어도 방사선방호에 널리 사용되며, 피폭을 줄이려 조치를 취하는 상황을 설명하기 위해 국가나 국제 표준에 채택되어 있다. ICRP는 개입이라는 용어의 사용은 피폭을 감축하는 방호조치를 설명하는 것으로 한정하고,¹¹⁾ 반면 피폭감축을 위해 그러한 방호조치가 필요한 방사선 피폭상황을 설명

10) <역주> 낮은 선량에서 위해가 선량에 정비례한다는 가정은 소위 선량의 덧셈성을 정당화한다. 실제로 높은 선량에서 그러하듯이 선량과 위해가 정비례하지 않는다면 선량 수준별로 구분하여 피폭을 관리해야 하는 매우 복잡한 문제를 초래한다. 이러한 관점이 낮은 선량에서 LNT모형을 채택하는 결정의 한 배경이 되기도 한다.

11) <역주> 그렇다고 피폭을 감축하기 위한 모든 조치를 개입으로 부르는 것은 적절하지 않아 보인다. 예를 들어 선원 주변 특정 장소에 선량률이 높아 적절한 보조 차폐를 설치하는 것은 '개입'이라기보다 단순한 방호조치로 보는 것이 적절하다. 대개 개입은 어떤 방호조치로 인해 상당

하는 데는 ‘비상피폭’이나 ‘기존피폭’이라는 용어 사용이 적합할 것으로 본다.

2.4. 배제와 면제

(51) ICRP 권고가 모든 수준과 유형의 방사선피폭에 관심을 두지만, 이것이 권고 적용을 위해 법규체계를 수립할 때 모든 피폭, 모든 선원 그리고 모든 인간 활동을 동등하게 고려할 수 있다거나 고려할 필요가 있음을 의미하는 것은 아니다. 대신에 특정 선원이나 피폭상황의 규제관리 가능성과 그 피폭/위험 수준에 따라 차등된 책무 부담을 예견해야 한다.

(52) 방사선방호 관리의 범위를 구획하는 다음과 같은 두 가지 구별되는 개념이 있다. 즉, (i) 규제 수단으로 관리할 수 없기 때문에(규제할 수 없음) 특정 피폭상황을 방사선방호 법령에서 ‘배제exclusion’한다는 개념과 (ii) 관리가 부당한 상황이거나 수반 위험과 비교하였을 때 관리를 위한 노력이 더 크다고 판단되어(규제가 필요 없음) 방호 규제요건의 일부 또는 전부를 ‘면제exemption’하는 개념이다. 방사선방호를 위한 법제체계는, 첫째 법률 체계에 포함시켜야 할 대상과 그 밖에 있어 법령으로부터 배제할 대상이 무엇인지 결정하여야 한다. 둘째로, 규제조치가 정당하다고 볼 수 없어 일부 또는 전체 규제요건으로부터 면제되는 대상이 무엇인지 결정하여야 한다. 이러한 목적을 위해 법제 기틀은 규제당국에게 특히 신고, 승인 피폭평가, 검사처럼 행정적 성격의 요건과 같은 특정 규제요건에서 면제할 수 있는 권한을 허용해야 한다. 배제는 관리체계 범위를 규정하는 것과 확고히 관련되지만, 단지 하나의 메커니즘이기 때문에 그것만으로는 불충분할 수 있다. 반면, 면제는 규제당국이 어떤 선원이나 행위가 규제관리의 일부 또는 전부의 대상이 아니라고 판단할 수 있는 권한과 관련된다. 배제와 면제의 구별은 절대적인 것은 아니어서 다른 국가의 규제당국은 특정 선원이나 상황의 면제나 배제에 대해 서로 달리 결정할 수도 있다.

(53) 방사선방호 법령에서 배제할 수 있는 피폭에는 제어불가 피폭과 규모에 관계없이 본질적으로 제어가 정당하지 않은 피폭이 포함된다. 제어불가 피폭은 체내 K-40에 의한 피폭처럼 어떤 상황에서도 규제조치로 제한할 수 없는 피폭을 의미한다. 관리가 부당한 피폭은 지표면에서 우주선에 의한 피폭처럼 제어가

한 부작용이 예상됨에도 불구하고 선량감축이라는 우선순위가 높은 목표를 위해 이를 시행하는 것으로 이해하는 것이 무방하다.

명확히 비현실적인 피폭이다. 어떤 피폭의 제어가 부당한지 결정에는 입법자의 판단이 필요하고 이 판단에는 문화적 인식이 영향을 미친다. 예를 들어 천연 방사성물질에 의한 피폭 규제에 대한 각국의 성향은 서로 매우 다르다.¹²⁾

(54) 배제와 면제에 관한 추가 지침은 ICRP 104(ICRP 2007a)에 제공된다.

2.5. 참고문헌

ICRP, 1991b. 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 60, Ann. ICRP 21(1-3).

ICRP, 1999a. Protection of the public in situations of prolonged radiation exposure. ICRP Publication 82. Ann. ICRP 29(1-2).

ICRP, 2005d. Low dose extrapolation of radiation-related cancer risk. ICRP Publication 99. Ann. ICRP 35(4).

ICRP, 2007a. Scope of radiological protection control measures. ICRP Publication 104. Ann. ICRP 37(5).

UNESCO, 2005. The Precautionary Principle. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, Paris, France.

12) <역주> ‘배제’란 제어가 현실적으로 불가능한 대상에 적용되는 개념이므로 대체로 국제 공통적이다. 이에 반해 ‘면제’는 규제관리가 합당한가에 대한 판단에 따른 것이므로 그 사회환경 즉, 가치판단에 의존하므로 국가별로 차이가 있을 수 있다. 그러나 국제간 교역을 고려하면 식품 중 방사능처럼 민감한 사안에 대해서는 특정 국가의 독립적 면제기준보다 국제적 조화를 고려한 면제기준을 적용하는 것이 필요한 경우도 있다.

제3장

방사선방호의 생물학적 측면

(55) 방사선피폭의 가장 부정적인 보건영향은 두 종류 일반적 범주로 분류할 수 있다.

- 높은 선량 피폭 후 주로 세포가 사멸하거나 제 기능을 발휘하지 못해 발생하는 결정론적 영향(유해한 조직반응)
- 체세포 돌연변이에 의한 피폭자에 암 발생 또는 생식세포 돌연변이에 의한 자손의 유전질환에 관련되는 확률론적 영향, 즉 암과 유전적 영향.

배아나 태아(배태아¹³⁾)에 대한 영향 및 암외질환도 고려 대상이다.

(56) ICRP 60(ICRP 1991b)에서 ICRP는 방사선이 조직에 반응을 일으키는 영향을 결정론적 영향으로 분류했고, 방사선 유발 암과 유전질환에는 확률론적 영향이라는 용어를 사용했다. ICRP 41(ICRP 1984)에서는 세포 무리의 상해에 의한 영향을 비확률적 영향(non-stochastic effect)이라고 정의했지만, ICRP 60에서는 이 용어를 '선형 사건에 의해 인과관계로 결정된다.'는 의미의 결정론적 영향으로 대체했다. 결정론적 영향과 확률론적 영향이라는 통괄적 용어는 방사선방호 분야 밖의 사람들에게는 낯설 수 있다. 이러한 이유 및 다른 이유들(부록A 참조) 때문에 이 장과 부록A에서는 직설적으로 조직반응과 암/유전적 영향이라는 용어도 사용한다. 그러나 ICRP는 결정론적 영향과 확률론적 영향이라는 통괄적 용어가 방호체계에 이미 깊이 뿌리박고 있다고 판단해, 문맥에 따라 통괄적 용어와 직설적 용어를 동의어로 사용할 것이다.

(57) 이러한 관점에서 일부 방사선 관련 보건영향, 특히 암외영향(제3.3절 참조)을 통괄적 범주 어느 쪽에 지정할 것인지 아직 충분히 파악되지 않았다고 ICRP는 판단한다. 1990년 이후 ICRP는 방사선에 의한 생물학적 영향의 다양한 측면을 검토했다. ICRP가 개발한 관점이 이 장에 요약되어 있는데, 1회 선량이나 연간 누적선량으로 약 100 mSv까지의 유효선량(또는 낮은 LET 방사선으로 약 100 mGy의 흡수선량)에 집중하고 있다. 방사선생물학과 역학에서 1990년 이

13) <역주> 아직 통용되는 용어로 보지는 않으나 '배아와 태아'로 쓰기보다 간결함과 소통 편의를 위해 '배태아' 사용을 시도한다. 배아와 태아의 구분이 분명하지 않고 법률적인 논쟁도 있으므로 영문에서도 huefet; human embryo and fetus)이란 용어도 시도되고 있다.

후 진전된 내용에 대한 보다 자세한 요약 설명은 부록A와 ICRP 99(ICRP 2005d)에 수록되어 있는데, 이 장에서 도출한 권고를 떠받치는 판단에 관한 설명도 함께 수록되어 있다.

3.1. 결정론적 영향의 유발(유해한 조직반응)

(58) 조직반응 유발은 일반적으로 문턱선량에 의해 특성화 된다. 이러한 문턱 선량이 존재하는 이유는 상해가 임상적 형태로 나타나기 전에 특정 조직 내 임계수에 이르는 세포들의 방사선 손상(심각한 기능상실 또는 사멸)이 유지될 필요가 있기 때문이다. 문턱선량을 초과하면 조직 회복력 상실을 포함해 상해 심각도는 선량에 따라 증가한다.

(59) 문턱선량을 초과한 경우 일어나는 방사선에 대한 조기(일 또는 주) 조직 반응은 세포인자들의 유출로 나타나는 염증성 유형이거나 세포 손실에서 오는 반응일 수 있다(ICRP 59, ICRP 1991a). 수개월에서 수년 후에 일어나는 지발 조직반응은 조직 손상의 직접적인 결과로 발생할 경우 일반 유형일 수 있다. 반대로, 다른 지발반응은 조기 세포손상의 결과로서 발생하는 경우 귀결형 consequential type일 수 있다(Dörr과 Hendry 2001). 이러한 방사선 유발 조직반응의 사례는 부록A에 수록되어 있다.

(60) 생물학적, 임상적 데이터의 검토로부터 조직반응의 기초를 이루는 세포나 조직의 기전과, 주요 장기와 조직에 적용되는 선량 문턱에 대한 ICRP 판단에 발전이 있었다. 그러나 최대 약 100 mGy(낮은 LET나 높은 LET)까지 흡수선량 범위에서는 조직에 임상적으로 유의한 기능부전이 나타나지 않는 것으로 판단된다. 이러한 판단은 단일 급성 선량에도 적용되며, 낮은 선량이 장기간에 걸쳐 연간 피폭으로 반복되는 상황에도 적용된다.¹⁴⁾

(61) 부록A는 다양한 장기와 조직에서 선량 문턱(약 1% 발생률을 나타내는 선량에 해당)에 대한 갱신된 정보를 제공한다. 현행 데이터에 기초하여 ICRP 60(ICRP 1991b)에서 규정한 피부, 손/발 및 눈의 등가선량 한도를 포함하는 종사자 및 일반인에 대한 선량한도는 결정론적 영향(조직반응)의 발생 방지에 계속

14) <역주> 이 표현은 소위 ‘낮은 선량’이 100 mGy(낮은 LET 방사선의 경우) 또는 100 mSv까지이며, 매년 100 mSv보다 낮은 선량은 반복 피폭하더라도 낮은 선량 피폭으로 볼 수 있음을 의미한다.

적용 가능하다고 ICRP는 판단한다(제5.10절과 표6 참조). 그러나 눈의 방사선 민감성에 대한 새로운 데이터가 예상되는데, 이것이 가용하면 ICRP는 이를 고려할 것이다. 또한 부록A에는 피부 등가선량에 선량한도를 적용할 임상적 기준에 대해 참조를 제공했다.

3.2. 확률론적 영향의 유발

(62) 암의 경우 역학적, 실험적 연구에 따르면 약 100 mSv 혹은 약간 미만까지 선량에서 불확실성은 있지만 방사선 위험 증거가 포착된다. 유전질환의 경우 사람에게 방사선 위험의 명백한 증거는 없지만, 실험적 관찰은 미래 세대에서 그러한 위험을 방호체계에 포함시켜야 한다는 주장에 설득력을 제공한다.

3.2.1. 암 위험

(63) 1990년 이후 방사선 종양형성에 관한 세포 및 동물실험 데이터가 축적됨에 따라, 개별 세포에서 DNA손상 반응 과정이 방사선 피폭 후 암 발병에 극히 중요하다는 관점을 공고히 하였다. 암 진전에 관한 일반적 지식의 발달과 함께, 이러한 데이터는 DNA손상 반응/복구 및 유전자/염색체 돌연변이 유발에 관한 상세 정보가 낮은 선량에서 방사선 관련 암 발생 증가에 대한 판단에 크게 기여한다는 데 믿음을 주고 있다. 이 지식은 생물학적효과비(RBE), 방사선가중치 및 선량선량률효과의 판단에도 영향을 준다. 특히 중요한 것은, 복잡한 형태의 DNA 양가닥절단 유발, DNA 복잡손상을 바르게 복구하는 데 세포가 겪는 어려움, 그리고 결과적인 유전자/염색체 돌연변이 발생과 같은 방사선이 DNA에 미치는 영향에 대한 이해의 진전이다. 방사선 유발 DNA손상에 관한 미시선량계측¹⁵⁾의 진전 또한 이러한 이해에 크게 기여하였다(부록A와 부록B 참조).

(64) 몇몇 예외는 있지만, 방사선방호 목적에서 선량-반응 데이터와 연계된 기초 세포공정에서 확실한 증거의 무게는 약 100 mSv 미만의 낮은 선량 범위에서 암이나 유전영향 발생이 해당 장기나 조직의 등가선량 증가와 정비례로 증가한다고 가정함이 과학적으로 그럴듯하다는 관점을 지지한다고 ICRP는 판단한다.

15) <역주> ‘microdosimetry’를 의미한다. 이를 마이크로선량계측으로 표현할 수도 있어 보이지만 우리말 용어를 선택하였다.

(65) 따라서 ICRP가 권고하는 방사선방호의 현실적 체계는 약 100 mSv 미만 선량에서 선량이 증가하면 방사선에 의한 암이나 유전영향의 발생확률도 정비례로 증가한다는 가정에 계속 기초할 것이다. 이 선량-반응 모델을 일반적으로 ‘문턱 없는 선형(LNT)모델’이라고 한다. 이 관점은 UNSCEAR(2000)의 견해와 일치한다. 여러 국가기관이 UNSCEAR 견해와 일치하는 평가치들을 제시한 반면(예: NCRP 2001, NAS/NRC 2006), 프랑스 과학한림원(French Academies 2005) 보고서는 방사선 암 위험에 실질적인 문턱이 있다는 쪽에 서 있다. 그러나 자체 분석 결과(ICRP 99, ICRP 2005d)에 따라, ICRP는 LNT모델이 선량선량률효과인자(DDREF)와 함께 낮은 선량 방사선 피폭에서 발생하는 위험의 관리라는 방사선방호의 현실적 목적에 신중한 기반을 제공한다고 본다.

(66) LNT모델이 방사선방호의 현실적 체계에는 과학적으로 무난한 요소이지만, 모델의 기초가 되는 가설을 명확하게 증명하는 생물학적, 역학적 정보는 나타나지 않을 것이라는 것이 ICRP의 관점이다(UNSCEAR 2000; NCRP 2001 참조). 이렇게 낮은 선량에서는 불확실성 때문에, 가령 장기간에 많은 사람들이 소량의 방사선을 피폭한 때 공중보건계획을 목적으로 방사선에 기인할 수 있는 암이나 유전질환 발생 수를 가상적으로 계산하는 것은 적절하지 않다고 ICRP는 판단한다(소절4.4.7 및 제5.8절 참조).

(67) LNT모델을 채택하는 데 있어서 ICRP는 세포 적응반응adaptive responses, 자연발생에 대한 낮은 선량 유발 DNA손상의 상대빈도, 피폭 후 유발 게놈불안정성induced genomic instability이나 구경꾼교신bystander signalling의 존재와 같은 세포적 현상에 대한 정보를 근거로 하는 잠재적 반론도 고려했다(ICRP 99, ICRP 2005d). 장기간 방사선피폭에서 발생할 가능성이 있는 종양 촉진효과를 포함하여, 이러한 생물학적 인자들과 면역학적 현상들이 방사선 암 위험에 영향을 줄 수는 있지만(Streffer 등 2004), 현실적 판단을 도출하기에는 이들 과정의 기전과 종양형성 영향에 대한 불확실성이 아직 너무 크다고 ICRP는 본다. 증거는 ICRP 99(ICRP 2005d)와 UNSCEAR(2008)에서 검토되었다. 또, 암 명목위험계수 평가가 사람 역학 데이터에 직접적으로 기초하기 때문에 이러한 생물학적 기전에 의한 어떤 기여도 그 평가치에 포함될 수 있다고 ICRP는 생각한다. 암 위험에 있어서 이들 과정의 불확실성은 생체에서 암 발현 관련성이 입증되고 관련 세포 기전의 선량 의존성에 대한 지식이 확보될 때까지 남아 있을 것이다.

(68) 방사선피폭 후 장기별 암 위험에 관한 역학적 정보가 1990년 이후 추가로 축적되어 왔다. 대부분 새로운 정보는 1945년 일본 원폭생존자에 대한 계속

적인 추적연구, 즉 수명연구(Life Span Study(LSS))에서 나온 것이다. 암 사망률(Preston 등 2003) 추적조사 기간은 47년(1950년10월~1997년12월)이며, 암 발생률(Preston 등 2007) 추적조사 기간은 41년(1958년1월~1998년12월)이다. 암 발생이 더 정확한 진단을 하기 때문에 1990년에는 존재하지 않았던 후자 데이터가 보다 신뢰성 있는 위험평가를 가능하게 한다. 따라서 ICRP는 현행 권고를 위해서 암발생 데이터를 강조하여 다루었다. 또한 LSS 역학 데이터는 시간적, 연령 종속적 방사선 암 위험 패턴, 특히 어린 나이에 피폭한 피해자의 위험 평가에 관한 더 많은 정보를 제공한다. 전체적으로 LSS로부터 유도된 현행 암 위험 평가치는 1990년 이후 크게 바뀌지 않았지만, 암 발생률 데이터를 포함함으로써 부록A에 설명한 위험 모델링에 보다 확고한 기초를 제공한다.

(69) 그렇지만 LSS가 방사선 암 위험에 관한 유일한 정보원은 아니므로, ICRP는 의료, 직무 및 환경 연구(UNSCEAR 2000, NAS/NRC 2006) 데이터도 고려했다. 일부 사이트¹⁶⁾에서 발생한 암은 LSS 데이터와 다른 정보원 데이터 사이에 상당한 유사성이 있다. 그러나 여러 장기/조직의 위험과 전체적 위험에서 여러 데이터 세트 사이에 방사선 위험 평가치에 차이가 있음을 ICRP는 파악하고 있다. 환경방사선 피폭에 관한 대부분 연구에서는 ICRP 위험 평가치에 직접 영향을 줄 정도로 충분한 선량계측과 종양 확인 데이터가 없지만, 향후에는 잠재적으로 중요한 데이터원이 될 수도 있을 것이다.

(70) UNSCEAR는 높은 선량 및 선량률에서 평가된 암 위험을 낮은 선량 및 선량률로 투사할 수 있도록 선량선량률효과인자(DDREF)를 사용하였다. 일반적으로 낮은 선량 및 선량률에서 발생하는 암 위험은, 역학, 동물실험 및 세포 데이터를 조합해 판단할 때, DDREF로 제시되는 인자 값만큼 감소할 것으로 판단된다. ICRP는 1990년 권고에서 DDREF값 2를 방사선방호의 일반적 목적에 적용해야 한다고 포괄적 판단을 내린 바 있다.

(71) 원칙적으로 환경 및 직무 여건에서 발생하는 것과 같은 장기간 피폭에 관한 역학 데이터가 DDREF를 판단하는 데 직접적으로 정보를 줄 수 있어야 할 것이다. 그러나 이러한 연구가 뒷받침하는 통계적 정밀도나 교란인자(부록A 참조)에 대한 적절한 통제의 부재와 관련된 불확실성 때문에 현 시점에서는 DDREF를 정밀하게 평가할 수 없다. 이에 따라 ICRP는 실험 데이터의 선량-반응 특성, LSS, 기타 연구(NCRP 1997, EPA 1999, NCI/CDC 2003, 부록A)에

16) <역주> ‘cancer site’는 암이 발생한 부위뿐만 아니라 잠재적으로 발생할 수 있는 조직까지 의미하므로 이를 적절히 표현할 용어를 찾지 못해 외래어 표기로 ‘사이트’를 사용한다.

의한 확률적 불확실성 분석 결과에 기초한 포괄적 판단을 DDREF 선택에 계속 사용하기로 결정했다.

(72) 최근 BEIR VII 위원회(NAS/NRC 2006)는 베이지언 통계분석을 통해 DDREF에 관련된 방사선생물학적 자료와 역학적 입증자료를 조합했다. BEIR VII 위원회가 고려한 데이터는 a) LSS 고형암과 b) 동물에서 암과 수명단축이었다. 이 분석에서 도출된 최빈 DDREF값은 1.1부터 2.3까지 범위에서 1.5이었고, 이로부터 BEIR VII 위원회는 1.5를 선택했다. BEIR VII 위원회는 특정 DDREF 값을 선택함에 필연적으로 따르는 본질적이고 확률적인 불확실성을 인정하였고, DDREF값 2도 사용한 데이터와 수행한 분석과 양립함을 인정했다. 나아가 ICRP는 부록A에서 유전자 및 염색체 돌연변이 유발의 경우 DDREF값이 2~4 범위에 있으며, 동물 암유발과 수명단축에서 DDREF값은 2~3 범위에 든다고 적시한다.

(73) 위에 설명한 모든 데이터를 검토하고, 장기간 피폭에서 발암 효과와 수명 단축의 감소를 보이는 광범한 실험동물 데이터를 고려할 때, ICRP는 DDREF를 2로 정한 1990년 권고를 변경할 강한 이유가 없다고 판단한다. ICRP는 방사선 방호의 실용 목적으로 거시적 정수 판단을 유지함이 불확실성 요소도 포괄한다는 점을 강조한다. ICRP는 위험 감소계수 2를 사용해 표1에 보인 전체 암에 대한 명목위험계수를 도출하지만, 실제로 개별 장기나 조직에 대해서는 다른 선량 선량률효과가 적용될 수 있다는 점도 인식한다.

표1. 낮은 선량을 방사선피폭의 확률론적 영향에 대한 위해조정 명목위험계수 (10^{-2}Sv^{-1})

피폭 집단	암		유전영향		계	
	현행 ¹⁾	ICRP 60	현행 ¹⁾	ICRP 60	현행 ¹⁾	ICRP 60
전체집단	5.5	6.0	0.2	1.3	5.7	7.3
성인	4.1	4.8	0.1	0.8	4.2	5.6

1) 부록A의 값.

3.2.2 유전영향 위험

(74) 부모의 방사선피폭으로 자손에 초과 유전질환이 발생할 것이라는 직접적

인 증거는 여전히 없다. 그러나 실험동물에서는 방사선이 유전영향을 일으키는 명백한 증거가 있다고 ICRP는 판단한다. 따라서 ICRP는 유전영향 위험을 방사선방호체계에 포함시킨다는 신중한 입장을 계속 견지한다.

(75) 또한 ICRP는 원폭생존자와 실험 생쥐 유전자 데이터에 기초해 과거에 유전질환이 과대평가되었다는 보고들(UNSCEAR 2001에서 검토)에 주목한다. 방사선 유발 세포 돌연변이의 정량적 측면에 관한 사람과 동물실험 데이터가 1990년 이후 몇 건 생성되었는데, 이들이 ICRP가 미래 세대에서 표출되는 유전질환 유발 위험을 판단하는 데 영향을 미쳤다. 또한 방사선피폭으로 발생하는 것을 포함해 사람의 유전질환과 생식계열돌연변이(germ line mutagenesis)에 관한 기초적 이해에도 상당한 발전이 있었다. ICRP는 다인자성질환(multifactorial diseases) 위험을 포함한 유전적 위험 평가를 위해 ICRP 60에 사용한 방법론을 재평가했다(ICRP 83, ICRP 1999c).

(76) 이제 ICRP는 사람과 생쥐 연구 데이터를 활용하는 새로운 위험평가 체계(UNSCEAR 2001, NAS/NRC 2006)를 채택한다. 또한 다인자성질환 위험 평가에 대하여 과학적으로 정당화된 방법이 처음으로 포함되었다. 방사선에 의해 발생하는 생식계열돌연변이가 자손에 입증 가능한 유전영향을 초래한다는 명백한 증거를 사람에게서 확인할 수 없기 때문에, 유전적 위험을 평가하는 데는 생쥐연구를 계속 사용할 것이다.

(77) 유전적 위험에 대한 이 새로운 접근법 역시 ICRP 60에서 사용한 질병관련 돌연변이에 대한 배가선량(doubling dose, DD) 개념에 기초한다. 그러나 DD를 평가하는 데 있어서 출생아의 경우 돌연변이로부터 복구력(recoverability)을 인정한다는 점에서 방법론이 서로 다르다. 다른 차이점 하나는 사람의 자연발생적 돌연변이 발생률을 생쥐 실험연구에서 도출한 방사선 유발 돌연변이 발생률과 연계해 사용하는 것이다. 이러한 새로운 방법론(부록A, 글상자2 참조)은 UNSCEAR 2001 보고서에 기초하며, 최근 NAS/NRC(2006)에서도 이 방법을 사용했다. ICRP 60에서 유전적 위험은 돌연변이와 도태 사이의 이론적 평형으로 표현되었다. 진전된 지식의 관점에서는 그러한 계산의 기반이 되는 가정 대부분이 더 이상 유효하지 않을 것으로 ICRP는 판단한다. 이러한 관점은 UNSCEAR(2001) 및 NAS/NRC(2006) 견해와 일치한다. 따라서 이제 ICRP는 둘째 세대까지만 유전적 위험을 표현한다.

(78) ICRP는 이러한 절차가 유전적 영향을 유의하게 과소평가 하지는 않을 것

으로 판단한다. 이 문제는 UNSCEAR(2001)와 부록A에 자세히 설명되어 있는데, 부록A에는 2세대까지와 10세대까지 표현되는 유전적 위험 사이에 큰 차이가 없음을 논증하고 있다.

(79) 제2세대까지 유전적 위험이 Gy 당 약 0.2%라는 ICRP의 현행 평가치는 UNSCEAR(2001)에서 발표한 것과 기본적으로 같다(부록A 및 UNSCEAR 2001, 표46 참조). 그러나 방법론이 상당히 변경된 상황에서 현행 두 세대 위험과 ICRP 60에 수록된 위험이 유사함은 우연의 일치일 뿐이다. 현행 값은 두 세대에 걸친 지속적인 낮은 선량률 피폭에 해당된다.

3.2.3. 암과 유전영향의 위해조정 명목위험계수

(80) 방사선 유발 암과 유전영향 위험에 관한 새로운 정보를 성 평균 명목위험계수 평가를 위한 위험 모델링과 질환위해 계산에 사용했다.

(81) ICRP가 권고한 명목위험계수는 개인이 아닌 전체 인구에 적용함은 ICRP 정책으로 유지된다. 이 정책이 단순하면서도 충분히 견실한 방호의 일반체계를 제공할 것으로 ICRP는 믿는다. ICRP는 이 정책을 유지함에 있어서, 남성과 여성 간에(특히 유방), 그리고 피폭연령에 따라 위험에 상당한 차이가 있다는 사실을 인지한다. 부록A에 이러한 차이에 관한 데이터와 계산이 제공된다.

(82) 암에 대한 성 평균 명목위험계수 계산은 상이한 장기와 조직에 대한 명목위험 평가와, DDREF, 치사율, 삶의 질에 대한 이들 위험의 조정, 마지막으로 생식선 피폭으로 인한 유전영향을 포함하는 한 세트의 사이트별 상대위해 값 도출로 이어진다. 이 상대위해가 부록A(글상자1)에 설명하고 제4장에 요약한 조직가중치에 대한 ICRP 체계의 기반을 제공한다.

(83) 이러한 계산을 근거로 ICRP는 위해조정 암 위험의 명목확률계수로 전체 인구에 대해 $5.5 \times 10^{-2} \text{Sv}^{-1}$, 성인 종사자에 대해 $4.1 \times 10^{-2} \text{Sv}^{-1}$ 를 제안한다. 유전영향의 경우 위해조정 명목위험은 전체 인구집단에서 $0.2 \times 10^{-2} \text{Sv}^{-1}$, 성인 종사자에서 $0.1 \times 10^{-2} \text{Sv}^{-1}$ 로 평가된다. ICRP 60으로부터 가장 중요한 변경내용은 유전영향의 명목위험도계수가 1/6~1/8로 감소했다는 것이다. 표1에 ICRP 60(ICRP 1991b)의 1990년 권고에 사용한 위해 평가치와 비교하여 이들 평가치를 보였다. 유전적 위험의 개정된 평가치 때문에 생식선의 조직가중치 판단 값이

상당히 감소되었다(제4장 참조). 그러나 이러한 생식선 조직가중치 감소를 이유로 제어 가능한 생식선 피폭을 높이는 것은 정당하지 않음을 ICRP는 강조한다.

(84) 표1에 수록된 암의 현행 명목확률계수는 ICRP 60과는 다른 방식으로 계산한 것이다. 현행 평가치는 치사율과 생활장애에 가중치를 둔 암 발생률 데이터에 기초하는 반면, ICRP 60 위하는 비치사암, 치사암 상대 수명손실 및 비치사암 생활장애를 가중한 치사암 위험에 기초한다.

(85) 표1의 모든 계수는 작은 수까지 표현되지만,¹⁷⁾ 이 표현은 부록A와 비교 목적으로만 사용할 뿐이며 정밀도 수준을 나타내는 것은 아니다(제81항 및 82항 참조).

(86) 암 위험 자료와 그 처리법이 변경되었지만 현행 명목위험계수는 ICRP 60(ICRP 1991b)에서 ICRP가 권고한 계수와 거의 대등하다. 부록A에 설명한 불확실성을 감안하면 1990년 이후 명목위험 평가치의 작은 차이에 실질적 의미는 없다고 ICRP는 본다.

(87) 따라서 현행 국제방사선안전표준이 근거를 두고 있는 전체 치명적 위험 계수 근사치가 Sv 당 5%라는 ICRP 권고는 앞으로도 방사선방호 목적에서 계속 적절하다.

3.2.4. 암에 대한 유전적 감수성

(88) 방사선 유발 암에 대한 감수성에서 개인 유전적 차이 문제는 ICRP 60에 설명하였고 ICRP 79(ICRP 1999a)에서도 검토하였다. 1990년 이후 단일 유전자에 의한 사람의 다양한 유전적 장애에 관한 놀랄만한 지식의 발전이 있었는데, 여기에서 초과 암으로 강하게 표현되는 이른바 고침투도 유전자 담체¹⁸⁾에서 초과 자연발생 암이 높은 비율로 나타났다. 배양된 사람세포 연구와 유전자 변형된 실험 설치류를 사용한 연구 또한 많은 지식의 발전을 가져왔는데, 보다 제한된 역학적, 임상학적 데이터와 함께 희귀 단일 유전자 대부분은 암 취약 이상이 방사선의 종양형성 효과에 보통보다 높은 민감성을 나타낼 것을 시사한다.

17) <역주> 여러 자릿수의 유효숫자를 제공하고 있으나 그것이 정확성을 의미하지는 않는다.

18) <역주> 유전자 담체gene carrier란 특정 유전자를 지닌 사람을 말한다.

(89) 비록 입증 데이터가 제한적이긴 하지만, 여러 저침투도 유전자들도 유전자-유전자 또는 유전자-환경 상호작용을 통해 방사선 피폭 후 매우 다양한 암을 표출할 수도 있다는 인식이 확대되고 있다.

(90) ICRP 79에서 개발한 데이터와 판단, 그리고 UNSCEAR(2000, 2001)와 NAS/NRC(2006) 보고서에서 검토한 정보를 바탕으로 강하게 표출하는 고침투도 암 유전자는 매우 희귀하여 낮은 선량 방사선에 의한 암 위험의 집단기반 평가치를 심각하게 왜곡하지 못한다고 ICRP는 믿는다. 비록 여러 저침투도 암 유전자가 방사선 암 위험의 집단기반 평가에 영향을 미칠 정도로 충분히 존재한다고 ICRP는 인정하지만, 이 문제에 대해 유의한 정량적 판단을 내리기에에는 정보가 충분하지 않다.

3.3. 암외질환 유발

(91) 1990년 이후 일부 피폭 집단에 암외질환¹⁹⁾ 빈도가 높아지는 증거가 누적되고 있다. 1 Sv 정도의 유효선량에서 이러한 암 이외 영향의 유발에 대한 가장 강력한 통계적 증거는 1968년부터 추적 조사한 일본인 원폭생존자의 최근 사망률 분석에서 도출된다(Preston 등 2003). 이 연구는 특히 심장질환, 발작, 소화기장애 및 호흡기질환의 선량 연관성에 대한 통계자료를 강화했다. 그러나 낮은 선량에서 선량-반응 형태가 현재 불확실하고, 또한 LSS 데이터가 질병 사망 위험에 대한 선량 문턱이 없다는 쪽과 약 0.5 Sv의 선량 문턱이 있다는 쪽 모두와 모순되지 않는다는 점에 ICRP는 주목한다. 방사선치료를 받은 암 환자 연구처럼 선량이 높은 경우 암외 영향의 증거가 추가로 발생하지만, 이러한 데이터로도 선량 문턱 문제를 명쾌하게 규정할 수 없다(부록A). 또한 그러한 다양한 암외 장애가 있게 하는 세포 및 조직 기전의 형태도 분명하지 않다.

(92) ICRP는 암외질환의 관찰이 잠재적으로 중요하다는 사실은 인정하지만, 현재 가용한 데이터를 약 100 mSv 미만의 낮은 방사선량에 따른 위해평가에 포함시킬 수는 없다고 판단한다. 이러한 판단은 1 Gy 미만에서 초과위험 증거를 거의 발견할 수 없었다는 UNSCEAR(2008) 결론과 부합한다.

19) <역주> 우리말에서는 ‘암 외 질환’ 또는 ‘암 이외 질환’으로 적는 것이 옳다. 그러나 앞서 설명한 것처럼 용어를 특화하기 위해 의도적으로 붙여쓰기를 사용한다고 설명했듯이 이 용어에 대해서도 무리함이 없지 않지만 한자말로 간주하여 붙여 써 하나의 용어가 되게 하려한다.

3.4. 배태아의 방사선영향

(93) 배태아의 조직반응과 기형 위험은 ICRP 90(ICRP 2003a)에 설명되어 있다. 새로운 데이터에 의해 관점이 명확해진 현안도 일부 있지만, 이 검토는 대체로 ICRP 60에 수록된 태내 위험 판단을 강화했다. ICRP 90을 근거로 ICRP는 낮은 LET 방사선에 의한 약 100 mGy 미만 선량에서 일어날 수 있는 조직 손상 및 기형의 태내 위험에 관해 다음과 같은 결론을 도출할 수 있었다.

(94) 새 데이터는 배아 발달과정에서 착상전기에 방사선피폭이 있는 경우 배아의 사멸 영향 감수성을 확인시켰다. 100 mGy 미만 선량에서는 그러한 사멸 영향이 아주 드물 것이다.

(95) 기형발생과 관련하여 새 데이터는 태내 방사선감수성은 태령중속 패턴이 있고 최대 민감성은 주요 장기형성기에 나타난다는 관점도 강화했다. 동물 데이터에 근거하면 기형발생에는 약 100 mGy의 실질 선량 문턱이 있는 것으로 판단되고, 따라서 실용 목적으로 100 mGy 미만 선량에서는 태내 피폭 후 기형 위험은 없을 것으로 ICRP는 판단한다.

(96) ICRP 90(ICRP 2003a)에서 원폭생존자 데이터에 관한 검토 결과는 임신 중 가장 민감한 기간인 수태 후 8-15주에서 방사선피폭에 따른 심각한 정신지체 발생은 최소한 300 mGy의 선량 문턱이 있고, 따라서 낮은 선량에서는 위험이 없음을 지지한다. Gy 당 약 25점으로 추정된 IQ 손실 관련 데이터는 해석이 더욱 어렵고,²⁰⁾ 그 선량 반응에 문턱이 없을 가능성도 배제할 수 없다. 그러나 실질 선량 문턱이 없더라도 100 mGy 미만 선량의 태내 피폭으로 IQ에 미치는 영향은 실질적 의미가 없을 것이다. 이 판단은 ICRP 60(ICRP 1991b) 판단과 일치한다.

(97) ICRP 90에서 태내 방사선피폭 후 암 위험에 관련된 데이터도 검토되었다. 태내 의료피폭에 관한 가장 대규모 사례대조연구 결과는 모든 유형의 아동암이 증가하는 증거를 제시한다. 태내피폭 후 방사선 유발 고형암 위험이 특별히 불확실함을 ICRP는 인지한다. 태내피폭으로 인한 생애 암 위험은 유년시절 초기에 방사선피폭 후 암 위험과 유사하여, 전 인구집단에 대한 위험의 약 세 배에

20) <역주> Sv 당 IQ 25점(과거에는 30점)이 저하한다는 해석을 더 이상 사용하지 않기를 바라는 완곡한 표현이다.

달한다고 ICRP는 본다.

3.5. 판단 및 불확실성

(98) ICRP는 방사선과 기타 작용인자 사이에 있을 수 있는 시너지효과의 잠재적 중요성을 인정하지만, 낮은 선량에서 방사선 위험에 대한 기존 평가치의 수정을 정당화할 그러한 상호작용에 관한 확실한 증거는 현재 없다(UNSCEAR 2000).

(99) 이 장에서 설명한 정보를 고려하여 ICRP가 권고하는 현실적 방사선방호 체계는 약 100 mSv 미만 선량에서 일정한 선량 증분은 방사선에 의한 암이나 유전영향의 발생확률 증분과 정비례한다는 가정에 계속 그 근거를 둘 것이다. 판단한 DDREF값과 결합된 LNT모델의 계속적 적용은 전망적 상황에서 낮은 선량 방사선피폭으로부터 위험관리라는 방사선방호의 현실적 목적에 신중한 근거를 제공할 것으로 ICRP는 생각한다.

3.6. 참고문헌

- Dörr, W., Hendry, J.H., 2001. Consequential late effects in normal tissue. *Radiother. Oncol.* 61, 223-231.
- EPA, 1999. Estimating Radiogenic Cancer Risks. Addendum: Uncertainty Analysis. U.S. Environmental Protection Agency, Washington, D.C.
- French Academies Report, 2005. La relation dose-effet et l'estimation des effets cancérogènes des faibles doses de rayonnements ionisants. (http://www.academie-sciences.fr/publications/rapports/pdf/dose_effet_07_04_05.pdf).
- ICRP, 1984. Non-stochastic effects of ionising radiation. ICRP Publication 41. *Ann. ICRP* 14(3).
- ICRP, 1991a. The biological basis for dose limitation in the skin. ICRP Publication 59. *Ann. ICRP* 22(2).
- ICRP, 1991b. 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 60. *Ann. ICRP* 21(1-3).

- ICRP, 1998a. Genetic susceptibility to cancer. ICRP Publication 79. Ann. ICRP 28(1-2).
- ICRP, 1999b. Risk estimation for multifactorial diseases. ICRP Publication 83. Ann. ICRP 29(3-4).
- ICRP, 2003a. Biological effects after prenatal irradiation (embryo and fetus). ICRP Publication 90. Ann. ICRP 33(1/2).
- ICRP, 2005d. Low dose extrapolation of radiation-related cancer risk. ICRP Publication 99. Ann. ICRP 35(4).
- NAS/NRC, 2006. Health risks from exposure to low levels of ionizing radiation: BEIR VII Phase 2. Board on Radiation Effects Research. National Research Council of the National Academies, Washington, D.C.
- NCI/CDC, 2003. Report of the NCI-CDC Working Group to Revise the 1985 NIH Radioepidemiological Tables. NIH Publication No. 03-5387. National Cancer Institute, Bethesda, MD.
- NCRP, 1997. Uncertainties in Fatal Cancer Risk Estimates used in Radiation Protection. NCRP Report 126. National Council on Radiation Protection and Measurements, Bethesda MD.
- NCRP, 2001. Evaluation of the Linear-Non threshold Dose-Response Model for Ionizing Radiation.
- NCRP Report No. 136. National Council on Radiation Protection and Measurements, Bethesda MD.
- Preston, D.L., Shimizu, Y., Pierce, D.A., et al., 2003. Studies of mortality of atomic bomb survivors. Report 13: Solid cancer and non-cancer disease mortality 1950-1997. Radiat. Res. 160, 381-407.
- Preston, D.L., Ron, E., Tokuoka, S., et al., 2007. Solid cancer incidence in atomic bomb survivors: 1958-1998. Radiat. Res. 168, 1-4.
- Streffer, C., Bolt, H., Follesdal, D., et al., 2004. Low Dose Exposures in the Environment: Dose-Effect Relations and Risk Evaluation. Wissenschaftsethik und Technikfolgenbeurteilung, Band 23. Springer, Berlin, Germany.
- UNSCEAR, 2000. Sources and Effects of Ionizing Radiation. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation Report to the General Assembly with Scientific Annexes. Vol. II: Effects. United Nations, New York, NY.
- UNSCEAR, 2001. Hereditary Effects of Ionizing Radiation. United Nations

Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation Report to the General Assembly with Scientific Annexes. United Nations, New York, NY.

UNSCEAR, 2008. Effects of Ionizing Radiation. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation Report to the General Assembly with Scientific Annexes. United Nations, New York, NY.

제4장

방사선방호에 사용하는 양

4.1. 서론

(100) 방사선피폭으로부터 선량을 평가하기 위해 특별한 선량계측량이 개발되어 왔다. ICRP가 채택한 기본 방호량protection quantity은 인체 장기나 조직에 부여된 에너지량에 기초를 둔다. 방사선량을 방사선 위험(위해)과 연계시키기 위해서는 종류가 다른 방사선에서 생물학적 효력 차이와 전리방사선에 대한 장기와 조직의 민감성이 다를 것을 고려해야 한다.

(101) ICRP 26(ICRP 1977)에서 방호량으로서 인체 장기와 조직의 선량당량dose equivalent과 유효선량당량effective dose equivalent이 도입되었다. 이 양들의 정의와 계산 방법이 ICRP 60(ICRP 1991b)에서 수정됨에 따라 등가선량equivalent dose과 유효선량effective dose이라는 양으로 되었다. 유효선량당량과 유효선량을 개발함으로써 다양한 유형의 외부 방사선에 의한 전신 및 신체 일부 피폭 그리고 방사성핵종 섭취로부터 선량을 합산할 수 있게 되어 방사선방호가 상당히 발전할 수 있었다.

(102) 등가선량과 유효선량은 인체 조직에서 직접 측정할 수 없다. 따라서 방호체계는 측정 가능하며, 등가선량과 유효선량을 평가할 수 있는 실용량operational quantities을 포함한다.

(103) 방사선방호에서 유효선량에 대한 일반적 수용성과 용도 입증은 방사선방호에서 선량평가를 위한 중심 양으로 유효선량을 유지하는 중요한 이유이다. 그러나 아래에 요약하고 부록B에 상세히 제시한 바와 같이 ICRP 60에 수록된 선량계측 체계의 여러 측면을 설명하고 명확히 할 필요가 있다. 또한 유효선량을 사용해야 하고 사용하면 안 되는 상황을 설명함에 주의도 필요하다. 조직 흡수선량이나 등가선량이 더 적절한 양인 상황도 있다.

4.2. 보건영향의 고려

(104) 낮은 선량 범위에서 방사선방호 목적은 일차적으로 방사선 유발 암과 유전질환으로부터 보호하는 것이다. 이러한 영향은 본성이 확률적이어서 문턱 없이 방사선량과 비례하여 빈도가 증가하는 것으로 보아야 한다(제3장 및 부록A 참조). 유효선량 정의와 계산에서 권고된 방사선가중치 w_R 은 확률론적 영향을 유발하는 다양한 방사선의 효력을 차별할 수 있으며, 조직가중치 w_T 는 확률론적 영향 유발에 대한 다양한 장기나 조직의 방사선 민감성을 차등화 할 수 있다(소절4.3.4 및 부록B 참조). 높은 LET 방사선인 높은 에너지전달선밀도 특성을 갖는 방사선에 대한 방사선가중치(소절4.3.3 참조)는 낮은 선량에서 확률론적 영향에 대해 유도되었다.

(105) 높은 선량, 특히 비상상황의 경우 방사선피폭으로 결정론적 영향(조직 반응)이 발생할 수 있다. 임상적으로 관찰할 수 있는 그러한 손상은 문턱선량을 초과하면 발생한다. 손상 정도는 흡수선량과 선량률, 방사선질(부록A와 부록B 참조), 조직 민감성에 의해 결정된다. 높은 LET 방사선에 의해 발생하는 조직반응의 생물학적효과비(RBE) 값은 일반적으로 낮은 선량의 확률론적 영향에 대한 RBE값보다 낮게 나타나며²¹⁾, 조직의 상대적 민감성도 차이가 있다. 등가선량과 유효선량은 높은 방사선량 정량화나 조직반응에 관련된 치료 필요성 판단에 사용하면 안 된다. 그러한 목적을 위한 선량은 흡수선량(Gy 단위)으로 평가해야 하며, 높은 LET 방사선(예를 들면, 중성자나 알파입자)이 개입된다면 해당 RBE를 가중한 흡수선량을 사용해야 한다(부록B 참조).

4.3. 선량 양

(106) ICRP가 채택한 유효선량 평가절차는 흡수선량을 기초 물리량으로 사용하고, 특정 장기나 조직에 대해 흡수선량을 평균하며, 등가선량을 평가하기 위하여 다양한 방사선의 생물학적 영향 차이를 고려할 수 있도록 적절히 선택한 가중치를 적용하며, 확률적 보건영향에 대한 장기와 조직의 민감성 차이를 고려하

21) <역주> 같은 방사선에서 결정론적 영향에 대한 RBE보다 확률론적 영향에 대한 RBE가 값이 크므로 확률론적 영향에 대한 RBE를 참조하여 조직가중치를 선정하면 ICRP의 방호체계에서 결정론적 영향의 위험을 과소평가하지는 않은 것이라는 논리이다. 그러나 실제 결정론적 영향에 대해서는 등가선량이 아니라 조직가중치를 적용하지 않은 흡수선량과 그 특정 영향 및 특정 방사선의 RBE를 고려하는 것이 원칙이다.

는 것이다. 장기와 조직의 등가선량 값²²⁾에 이러한 장기나 조직의 방사선 민감성을 가중한 다음 합산해 유효선량을 평가할 수 있다. 이 양은 외부 방사선장이거나 섭취 방사성핵종이 방출하는 방사선에 노출과, 인체조직과 주요 물리적 상호작용, 그리고 확률적 보건영향으로 이어지는 생물학적 반응에 관한 판단에 기반을 둔다(부록B 참조).

4.3.1. 흡수선량

(107) 방사선생물학, 임상방사선학 및 방사선방호에서 흡수선량 D 는 기본적인 물리적 선량이며, 모든 종류 전리방사선 및 조사형태에 사용된다. D 는 전리방사선에 의해 질량 dm 인 물질에 부여된 평균에너지 $\bar{d\varepsilon}$ 를 dm 으로 나눈 몫으로 정의된다. 즉,

$$D = \frac{\bar{d\varepsilon}}{dm}. \quad (4.1)$$

(108) 흡수선량의 SI 단위는 J kg^{-1} 이며, 이 단위의 특별 명칭은 그레이(Gy)이다. 흡수선량은 확률적 양인 부여에너지 ε 의 평균값으로부터 도출되며, 조직에서 상호작용 사상의 무작위 요동은 반영되지 않는다. 물질 내 어떤 점에서도 정의할 수 있는 이 값은 질량소 dm , 즉 물질에서 매우 많은 수의 원자나 분자에 대한 평균으로 구한다. 흡수선량은 측정할 수 있는 양이며, 값의 결정에 1차표준이 존재한다. 흡수선량 정의는 기본 물리량으로서 요구되는 과학적 엄격함을 지닌다(부록B).

4.3.2. 선량의 평균

(109) 실제 방호에 흡수선량을 사용할 경우 선량은 조직 전체에 대해 평균된다. 낮은 선량의 경우, 특정 장기나 조직에 평균한 흡수선량 평균값은 방사선방호 목적에서 해당 조직의 확률론적 영향의 방사선위해와 충분한 정확도로 상관된다고 가정한다. 조직이나 장기의 흡수선량을 평균하고 인체의 다양한 장기와 조직에 대한 가중치를 적용한 평균선량을 합산하는 것은 낮은 선량에서 확률론적 영향을 제한하는 데 사용하는 방호량을 정의하는 기반이 된다. 이 접근은 LNT모델에 기초하며, 따라서 외부피폭과 내부피폭에서 발생하는 선량을 합산할

22) <역주> 원문의 표현은 조직과 장기의 방사선 민감성을 가중한(즉, 조직가중치를 가중한) 등가선량을 합산하는 것으로 오해할 소지가 있어 약간 수정했다.

수 있다.

(110) 흡수선량의 평균은 특정 장기(예를 들면 간)나 조직(예를 들면 근육) 또는 조직 민감부(예를 들면 뼈대의 뼈표면)의 질량에 대해 수행된다. 외부피폭의 경우, 평균선량 값이 장기 전체, 조직 또는 부분 조직의 흡수선량을 대표할 수 있는 정도는 피폭 균질성 및 인체에 입사하는 방사선의 비정에 따라 결정된다. 낮은 선량 범위에서 선량분포 균질성은 미시선량계측 특성에 따라 결정된다. 투과력이 낮거나 짧은 비정을 갖는 방사선(예: 저에너지 광자나 하전입자)이나 광범하게 분산된 조직과 장기(예: 적색골수, 림프절 또는 피부)의 경우, 특정 장기나 조직 내 흡수선량 분포는 더욱 불균질할 수 있다. 극단적인 국부피폭의 경우, 장기나 조직의 평균선량이나 유효선량이 선량한도 미만일 경우에도 조직 손상이 발생할 수 있다. 낮은 투과력을 갖는 방사선피폭의 경우, 예를 들면 국부적 피부선량의 경우, 이를 위한 특별 한도를 고려해야 한다.

(111) 인체 장기나 조직 내의 방사성핵종에서 방사되는 방사선, 즉 체내 방사체의 경우 장기 내 흡수선량 분포는 방사선 투과력과 비정에 의존한다. 따라서 알파입자, 연질 베타입자, 저에너지 광자 또는 오제전자(Auger electron)를 방사하는 방사성핵종에 대한 흡수선량 분포는 매우 불균질할 수 있다(부록B 참조). 이러한 불균질성은 특히 호흡기, 소화기계 및 뼈대에 있는 방사성핵종에 해당된다. 그렇게 특별한 경우에, 방사능의 분포와 잔류의 불균질성 및 민감부를 고려하는 고유한 선량계측 모델이 개발되었다.

4.3.3. 등가선량과 방사선가중치

(112) 방호량은 확률적 보건영향 발생을 허용되지 않는 준위 미만으로 유지하고 조직반응이 일어나지 않음을 보장하는 피폭한도를 명시하는 데 사용된다. 방호량의 정의는 방사선 종류 R(표2 참조)에 의한 특정 장기나 조직 T(표3 참조) 체적의 평균 흡수선량 $D_{T,R}$ 에 기초한다. 방사선 R은 인체에 입사되거나 체내에 존재하는 방사성핵종이 방출하는 방사선 종류와 에너지로 명시된다.²³⁾ 장기나

23) <역주> 방사선가중치는 인체에 입사하는 방사선 또는 체내 방사성핵종에서 방출되는 방사선의 가중치를 적용한다는 의미이다. 예를 들어 1 MeV 중성자가 외부피폭으로 인체에 입사하면 그 중성자가 인체 내에서 상호작용 결과 감마선, 베타선, 중하전입자 등 다른 종류 2차 방사선을 만들고 이들 방사선이 조직에 각각 흡수선량을 발생시키더라도 등가선량 산출에는 관심 체적의 총 흡수선량(서로 다른 2차 방사선이 기여한 것을 포함)에 입사하는 1 MeV 중성자의 방사선가중치인 22(식4.3 참조)를 적용한다. 내부피폭의 경우에도 체내 방사성핵종이 방출하는 방사선을 기준으로 방사선가중치가 적용된다.

조직에서 방호량인 **등가선량** H_T 는 다음과 같이 정의된다.

$$H_T = \sum_R w_R D_{T,R} \quad (4.2)$$

여기서 w_R 은 방사선 R의 방사선가중치이다. 관련된 모든 종류의 방사선에 대해 합산한다.²⁴⁾ 등가선량의 단위는 $J kg^{-1}$ 이며, 이 단위의 특별 명칭은 시버트(Sv)이다.

(113) 1960년대 초 방사선 방호량 정의에서 방사선 가중은 ICRP 26(ICRP 1977)의 Q(L) 함수에서 L로 표시되는 LET의 함수로서 방사선 선질계수 Q와 관련되었다. ICRP 60(ICRP 1991b)에서는 방호량인 등가선량과 유효선량의 계산에서 방사선 가중 방법을 변경했다. ICRP는 방사선방호 적용에 적합한 것으로 간주되는 일반적 방사선가중치(w_R)값 한 세트를 선정했다. w_R 값은 다양한 방사선의 생물학적효과비(RBE)에 주로 기초했다.

(114) 사용 가능한 데이터의 재평가 결과를 토대로 현행 권고에 개정된 w_R 값을 채택했다(부록A 및 부록B 참조). 현행 권고에 주어진 중성자와 양성자의 w_R 값은 ICRP 60의 값과 다르다(아래 설명 및 부록B 참조). 하전 파이온에 대한 w_R 값도 추가되었다. 광자 w_R 값은 모든 에너지의 X선과 감마선에 대해 동일하다. w_R 수치는 체내 방사성핵종에서 방출되거나 인체에 입사하는 방사선의 종류

24) <역주> 식4.2나 이 설명은 등가선량이 관련된 모든 방사선에 대해 합산한 양으로 정의된다는 것인데 이에 대해서는 의문이 있다. 가령 중성자와 감마선 혼합 방사선장에 노출될 때 체내 조직의 등가선량은 중성자 성분과 감마성분이 있으며 두 양은 서로 독립적이다. 독립적인 양이라면 성분별로 표현(즉, 중성자 등가선량 및 감마선 등가선량)할 수 있도록 자유도를 주는 것이 편리하며 현실적으로도 분리하여 다루고 있다. 그럼에도 정의를 합산으로 한정하면 성분별로는 등가선량 자체를 규정할 수 없는 어려움을 초래한다. 다시 말해서 식4.2는 양을 불필요하게 뭉친 것으로 평가된다. 이러한 문제는 내부피폭에서도 마찬가지이다.

이렇게 합산한 연유는 아래 113항에서 보듯이 ICRP 60 이전에 방사선가중치와 연계된 등가선량이 아닌 선질계수와 연계된 선량당량을 사용할 때 사용하던 관행이 남은 것으로 이해된다. 선량당량은 외부피폭의 경우 인체에 입사하는 방사선의 선질계수가 아니라 체내 관심체적에서 흡수선량을 부여하는 방사선의 선질계수를 적용하기 때문에 위의 역주 예에서 입사하는 1MeV 중성자의 선질계수가 아닌 관심체적에서 흡수선량을 형성하는 방사선이 중성자와 원자핵의 충돌에서 발생하는 반도핵(양성자 포함), 2차 감마선의 상호작용으로 생성되는 전자 등으로 다양하기 때문에 관심체적의 선량당량은 각 성분 방사선의 기여를 합산해서 표현해야 했다(또는 총 흡수선량과 관련 방사선의 평균 선질계수 \bar{Q} 를 곱해 산출하기도 한다). 나아가 당시 사용하던 개념으로 2차한도인 선량당량지수는 ICRU구 내에서 최대 선량당량인데 입사방사선 종류에 따라 최대 선량당량이 형성되는 위치가 다르므로 혼합 방사선장일 경우 모든 입사 방사선을 종합하여 최대 선량당량 값을 결정해야 했기 때문에 방사선 종류에 대해 합산이 필요했다. 그러나 등가선량으로 변경하고 조직가중치를 적용하는 원칙이 현행처럼 규정된 후로는 합산할 이유가 소멸되었다.

표2. 권고 방사선가중치^a

방사선 유형	방사선가중치, w_R
광자	1
전자 ^b 또는 뮤온	1
양성자 및 하전 파이온	2
알파 입자, 핵분열파편, 중이온	20
중성자	중성자 에너지의 연속 함수(그림1 및 식4.3 참조)

a 모든 값은 인체에 입사하는 방사선 또는 체내 방사선원의 경우 방사성핵종에서 방사되는 방사선에 관련된다.

b 오제전자에 대해서는 116항 및 부록B 제B3.3절에서 논의한다.

표3. 권고 조직가중치

조직	w_T	$\sum w_T$
적색골수, 결장, 폐, 위, 유방, 잔여조직*	0.12	0.72
생식선	0.08	0.08
방광, 식도, 간, 갑상선	0.04	0.16
뼈표면, 뇌, 침샘, 피부	0.01	0.04
합계		1.00

* 잔여조직: 부신, 흉외기도(ET), 쓸개, 심장, 신장, 림프절, 근육, 구강점막, 췌장, 전립선(♂), 소장, 비장, 흉선, 자궁/자궁경부(♀).

와, 중성자의 경우 에너지에 대해 명시된다(표2). w_R 값은 확률론적 영향과 관련된 되는 광범한 실험적 RBE 데이터에 기초한 판단에 따라 선택되었다. RBE 값은 방사선량이 감소하면 최대값(RBE_M)으로 증가하므로(ICRP 2003c) RBE_M 값을 w_R 선택에 사용했다. 방사선방호 목적을 위해서는 w_R 에 고정 값을 부여한다.²⁵⁾

25) <역주> 다른 종류의 생물학적 효력은 과학적 데이터이지만 생물실험과 연계되므로 평가 조건과 평가자가 다를 때 그 값도 다를 수 있다. 실제로 보고된 RBE 값들은 상당한 불확도를 가진다. 그러나 방사선가중치는 가용한 RBE 데이터를 참조하여 방사선방호 목적으로 ICRP 판단으로 선정한 값이므로 불확도와 무관한 고정된 값이라는 의미이다.

(115) **기준방사선**reference radiation. 실험으로 얻은 RBE값은 선택한 기준방사선에 따라 달라진다. 선택에 어떤 특정 에너지를 함의하지는 않았지만 일반적으로 낮은 LET 광자 방사선을 기준으로 선택한다. ICRP 60에서 방사선가중치를 선택할 때 약 200 kV 이상의 X선이나 코발트-60 또는 세슘-137 감마 방사선을 사용한 많은 실험적 RBE 데이터를 고려했다(부록B 참조). X선과 더 높은 에너지 감마 방사선(예를 들면 코발트-60) 사이에 기준방사선 선택에 따라 실험적으로 다른 RBE값이 나올 수 있다는 것을 인지하지만, 이 접근법이 현행 권고에도 사용되었다. 이러한 차이는 주로 체외 세포에 대한 연구에서 확인되었다(부록B 참조).

(116) **광자, 전자 및 뮤온**²⁶⁾. 광자, 전자 및 뮤온은 LET 값이 10 keV/μm 미만인 방사선이다. 이들 방사선에는 방사선가중치로 항상 1을 부여한다. 모든 낮은 LET 방사선에 대해 w_R 로 1을 계속 사용하는 데는 좋은 논증이 있다(부록B 참조). 그러나 이것이 에너지가 다른 광자의 방사선질에 차이가 없음을 의미하는 것은 아니다. 제안된 단순화는 등가선량과 유효선량의 의도한 적용 즉, 낮은 선량 범위에서 선량제한과 선량의 평가 및 관리에 대해서만 적절하다. 개인에 대한 소급적 위험평가를 수행해야 할 경우는, 관련 데이터를 사용할 수 있다면 방사선장과 적절한 RBE값에 대한 자세한 정보를 고려할 필요가 있을 수 있다. DNA에 함유된 삼중수소나 오제전자 방사체에서 발생할 수 있는 것과 같은 세포 내 방사선량 불균질성도 특별한 평가를 요구할 수 있다(부록B 참조). 등가선량과 유효선량은 그러한 평가에 사용할 수 있는 적합한 양이 아니다(소절4.4.6 참조).

(117) **중성자**. 중성자 방사선가중치는 외부피폭에 따른 생물학적효과비를 반영한다. 인체에 입사하는 중성자의 생물학적 효력은 중성자 에너지에 의존한다(부록B 참조).

(118) ICRP 60(ICRP 1991b)에서 중성자 방사선가중치는 계단함수로 정의되었다. 현행 권고에서는 중성자 방사선가중치를 연속함수로 규정하여 권고한다(그림1). 그러나 연속함수 사용은 대부분 중성자 피폭이 어떤 에너지 범위에 관련된다는 현실적 고려에 기초함에 유의해야 한다. 함수로 권고하는 것이 기본 데이터의 정밀도가 높음을 의미하지는 않는다. 중성자 w_R 함수 선택에 관한 자세한 논

26) <역주> 뮤온muon: 전자처럼 음전하를 띠지만 전자보다 훨씬 무거운 단수명(평균수명 약 2.2 μs) 하전입자. 정지질량은 1.885x10⁻²⁸ kg(전자 질량의 206.8배, 에너지로 105.6 MeV)에 해당하며 붕괴하여 중성미자와 전자로 된다. 양전기를 띤 반뮤온antimuon도 있는데 수명은 뮤온보다 1만배 길며 양전자와 중성미자로 붕괴한다.

의는 부록B에 있다. ICRP 60에 주어진 데이터와 비교해 가장 중요한 변경 내용은 낮은 에너지 범위에서 인체의 흡수선량에 대한 2차 광자의 큰 기여 때문에 w_R 이 감소했고, 100 MeV를 초과하는 중성자 에너지에서도 w_R 이 감소했다. 중성자 방사선가중치 계산을 위해 중성자 에너지 $E_n(\text{MeV})$ 에 대한 다음의 연속함수를 권고한다.

$$w_R = \begin{cases} 2.5 + 18.2 e^{-[\ln(E_n)]^2/6}, & E_n < 1 \text{ MeV} \\ 5.0 + 17.0 e^{-[\ln(E_n)]^2/6}, & 1 \text{ MeV} \leq E_n \leq 50 \text{ MeV} \\ 2.5 + 3.25 e^{-[\ln(0.04E_n)]^2/6}, & E_n > 50 \text{ MeV} \end{cases} \quad (4.3)$$

식(4.3)과 그림1의 함수는 경험적으로 유도되었으며, 기존의 생물학적, 물리적 지식과 부합한다(부록B 참조).

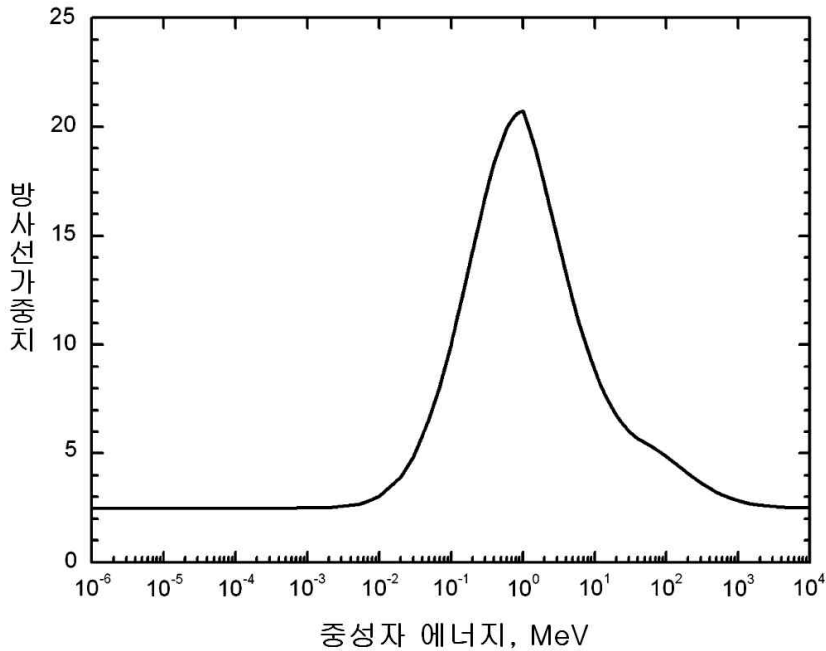


그림7. 중성자 에너지에 대한 중성자 방사선가중치 w_R .

(119) **양성자와 파이온**²⁷⁾. 양성자에 의한 피폭을 고려할 때 실제 방사선방호

27) <역주> 파이온pion: π 중간자. 양(π^+), 음(π^-), 중성(π^0)이 있고 그 질량은 하전인 경우 139.6 MeV(전자의 약 273배), 중성인 경우 135.0 MeV(전자의 약 264배)이다. 수명은 수십 나

에는 외부 방사선원만 중요하다. 우주 방사선장이나 고에너지 입자가속기 근처 방사선장의 양성자 성분은 매우 높은 에너지 양성자가 대부분을 차지한다. 낮은 에너지에서 생물학적 효력이 증가함을 고려하더라도 수 MeV 에너지를 가지는 양성자는 중요하지 않다. 10 MeV 이상 고에너지 양성자에 대한 방사선생물학적 데이터에 근거하여, 모든 에너지 양성자에 대해 단일 w_R 값을 채택하는 것은 방사선방호 목적에서 충분히 정확한 것으로 판단된다. 조직에서 10 MeV 양성자의 비정은 1.2 mm이며 에너지가 낮아지면 함께 감소한다. 이러한 양성자는 피부에서 흡수된다(부록B). 외부 양성자 방사선에 대한 단일 방사선가중치 2를 일반 용도로 사용할 것을 권고한다(ICRP 2003c). 이 가중치는 ICRP 60(ICRP 1991b)에서 권고한 값 5를 대체한다.

(120) 파이온은 대기 중 높은 고도에서 원자핵과 1차 우주선의 상호작용에서 형성되는 방사선장에서 접하는 입자로서, 양전하나 음전하를 띠기도 하고 중성이기도 하다. 이러한 입자들은 항공기에서 피폭에 기여하게 된다. 또한 이러한 입자는 고에너지 입자가속기 차폐 뒤 복잡한 방사선장의 일부로서 발견되며, 가속기 담당자의 직무피폭에 기여한다. 방사선장의 파이온 에너지 분포가 매우 넓은을 고려하여, 모든 하전 파이온에 대해 단일 가중치 2를 사용할 것을 권고한다.

(121) **알파입자.** 사람은 흡입한 라돈 자손핵종이나, 섭취한 플루토늄, 폴로늄, 라듐, 토륨 또는 우라늄 동위원소 등 알파입자 방출 핵종과 같은 내부 방사체로부터 알파입자를 피폭할 수 있다. 많은 역학연구 및 동물실험 데이터가 체내 알파 방사체의 위험에 관한 정보를 제공하고 있다. 그러나 장기와 조직 내 방사성 핵종의 분포는 복잡하며, 선량 평가치는 사용 모델에 따라 달라진다. 따라서 계산된 선량의 불확실성이 크며, 역학연구는 물론 실험연구로부터 도출된 RBE값도 광범하다(ICRP 2003c 및 부록B).

(122) 알파 방출 방사성핵종 섭취로부터 선량과 위험 평가치의 불확실성이 크에도 불구하고, 가용한 사람과 동물실험 데이터는 RBE가 고려하는 생물학적 종점에 따라 달라짐을 보인다. 제한적인 사람 데이터로부터 제시된 알파입자 RBE 값은 폐암이나 간암에서 약 10-20이며 골수암과 백혈병에서는 그 보다 낮다. 가용한 데이터와 알파입자 w_R 선택에 관한 판단은 ICRP 92(ICRP 2003c)에서 검토되었다. 근래 데이터가 알파입자 방사선가중치를 변경할 명백한 증거로서는 불충분함에 따라 ICRP 60(ICRP 1991b)에서 채택한 w_R 값 20을 유지한다.

노초보다 짧으며 붕괴하여 거의 뮤온과 중간자로 된다.

(123) **핵분열과편 및 중이온.** 핵분열과편에서 발생하는 선량은 주로 내부피폭의 방호에 중요하며, 방사선가중치에 관한 상황은 알파입자 상황과 유사하다. 장기와 조직 내에서 중이온 및 핵분열과편의 짧은 비정과 그 결과인 전리밀도는 이들 입자의 생물학적 효력에 강한 영향을 미친다. 방사선가중치로 알파입자와 같은 20(표2 참조)을 권고한다(부록B 참조).

(124) 중이온은 고공비행과 우주탐험 같은 데서 외부 방사선장에서 접하게 된다. 중이온에 관한 RBE 데이터는 거의 없으며, 대부분 데이터는 체외실험에 근거한 것이다. 인체에 입사하거나 체내에서 정지되는 중하전입자의 방사선질은 입자 경로를 따라서 상당히 변한다. 모든 중하전입자 종류와 에너지에 대해 단일 w_R 값 20을 선정함은 보수적인 평가이며, 방사선방호의 일반적 적용에 충분하다고 권고한다. 인체의 총 선량에 이들 입자 기여가 상당한 우주공간에 적용할 경우, 보다 실질적인 접근법을 사용해야 할 것이다.

4.3.4. 유효선량과 조직가중치

(125) ICRP 60(ICRP 1991b)에서 도입된 유효선량 E 는 조직 등가선량의 가중 합으로 정의된다.

$$E = \sum_T w_T H_T = \sum_T w_T \sum_R w_R D_{T,R} \quad (4.4)$$

여기서 w_T 는 조직 T의 조직가중치이며 $\sum w_T$ 는 1이 된다. 합산은 인체에서 확률론적 영향 유발에 민감한 것으로 간주되는 장기와 조직 전체에 대해 이루어진다. w_T 값은 확률론적 영향으로 인한 전체적인 방사선 위해에 대한 개별 장기와 조직의 기여를 나타내도록 선정되었다. 유효선량의 단위는 $J kg^{-1}$ 이며, 그 특별 명칭은 시버트(Sv)이다. 이 단위는 등가선량과 유효선량은 물론 실용량에서도 동일하다(소절4.3.7 참조). 따라서 사용하는 양을 명확히 기술하였는지 주의를 기울여야 한다.

(126) w_T 값이 지정되는 장기와 조직은 표3에 수록되어 있다(부록A 참조).

(127) 피폭집단의 암 유발에 대한 역학연구와 유전영향 위험 평가치에 기초하여, 해당 상대적 방사선위해 값(부록A의 표A.5 참조)을 근거로 이 권고를 위한 w_T 값 한 세트(표3)를 선정했다. 이 값들은 성과 전체 연령 사람들에 대해 평균한 값이므로 특정 개인 특성과는 관련이 없다.

(128) 잔여조직 w_T 값(0.12)은 표3의 각주에 수록된 각 성별로 13개 장기나 조직의 산술평균에 적용한다. ICRP 60(ICRP 1991b)에서 잔여조직 취급에 사용한 소위 ‘분할규칙’은 더 이상 사용하지 않으며, 따라서 유효선량이 덧셈성을 갖는다.

4.3.5. 유효선량의 결정

기준모의체

(129) 등가선량 및 유효선량은 실제로 측정할 수 있는 양이 아니다. 직무피폭에서는 그 값들은 실용량을 사용하는 방사선감시로 결정된다(소절4.3.6 참조). 외부피폭 환산계수 계산을 위해 다양한 방사선장에서 선량 평가를 위한 전산용 모의체²⁸⁾를 사용한다. 방사성핵종 섭취에 의한 선량계수 계산을 위해서는 방사성핵종에 대한 생물역동학 모델, 생리학적 기준데이터, 그리고 전산용 모의체가 사용된다(부록B 참조).

(130) 기준남성 및 기준여성에 대한 등가선량과 기준인에 대한 유효선량 계산은 인형 모델 사용에 기초한다. 과거에 ICRP는 특정 모의체를 권고하지 않았고, MIRD형 양성(兩性) 모의체(Snyder 등 1969), Kramer 등(1982)의 성별 모델, 또는 Cristy와 Eckerman(1987)의 연령별 모의체와 같은 다양한 수학적 모의체들이 사용되었다. ICRP는 이제 장기 및 조직의 등가선량 계산을 위해 성인 기준남성 및 기준여성에 대한 전산용 기준모의체를 사용한다. 이 모의체는 단층영상에 바탕을 두며(Zankl 등 2005) 3차원 체적소voxel로 구성된다. 규정된 장기를 구성하는 체적소는 ICRP 89(ICRP 2002)의 기준남성과 기준여성에 부여된 장기 질량에 가깝게 조정되었다. 등가선량과 유효선량의 평가에 실제적 접근방법을 제공하기 위해, 물리량(즉, 외부피폭에 대한 입자 플루언스 또는 공기커마, 내부피폭에 대한 방사능 섭취량)과 연계하는 환산계수를 표준 피폭조건에서 기준모의체에 대해 계산했다.

(131) 이러한 모델은 계산 목적에서 기준남성과 기준여성을 대표하며, 인체 외부의 기준 방사선장으로부터 또는 섭취된 방사성핵종 붕괴로부터 받는 장기나 조직 T의 평균 흡수선량 D_T 를 계산하는 데 사용된다. 이러한 모델들은 외부 방

28) <역주> ‘phantom’을 외래 표기로 ‘팬텀’으로 적기도 하나 공허한 표현이어서 우리말로 ‘모의피폭체’라는 용어를 시도한 적도 있다. 그러나 예를 들어 CT용 모의체나 개인선량당량을 측정하기 위해 개인선량계 후방에 설치하는 물체는 그 자체의 선량을 평가하기 위한 것이 아니므로 ‘피폭체’라고 부르기 곤란하여 단순히 ‘모의체’를 사용하기로 한다.

사선장에 대한 선량환산계수 및 방사성핵종 섭취에 대한 선량계수의 계산에 사용된다(부록B 참조)²⁹⁾. 이러한 장기와 조직 흡수선량에 방사선가중치를 곱해 기준남성과 기준여성의 조직이나 장기의 등가선량을 얻는다(그림2 참조). 연령이 다른 아동들이나, 임부와 태아에 대한 계산을 위한 전산용 기준모의체들도 개발될 것이다.

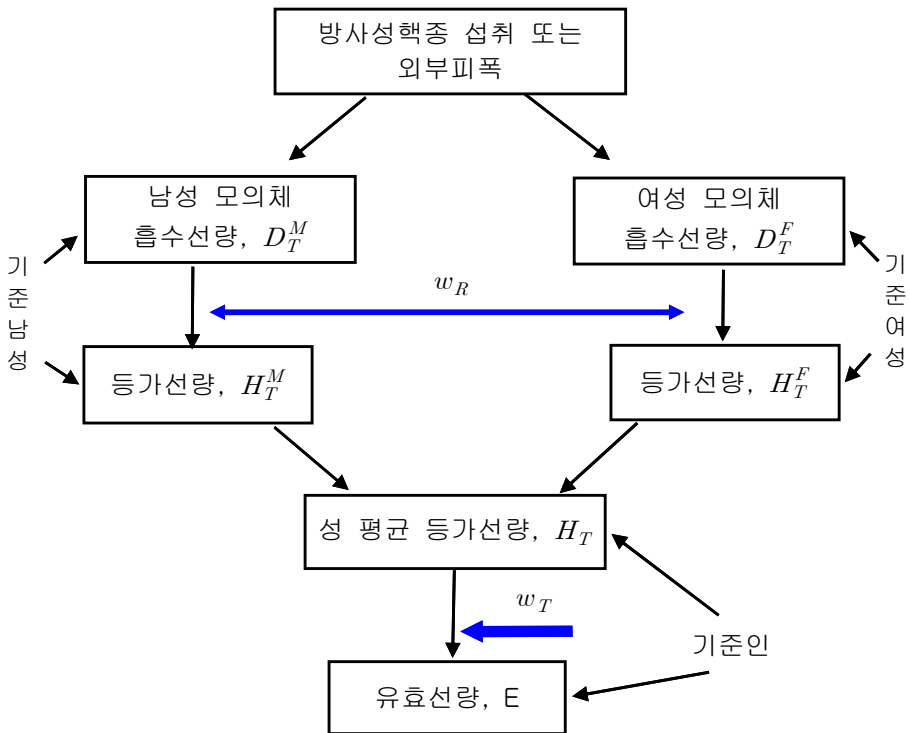


그림 2. 유효선량 계산을 위한 성별 평균 계산.

유효선량을 위한 성 평균

(132) 방사선방호 목적을 위해, 각 성에 대해 단일 유효선량 값을 적용하는 것이 유용하다(제33항 참조). 표3의 조직가중치는 남녀 유방, 고환과 난소(생식선: 발암 및 유전영향)를 포함한 모든 장기와 조직에 대한 성과 연령 평균값이

29) <역주> 이 권고에서 ICRP는 외부피폭에 대해서는 ‘선량환산계수’라는 용어를 사용하는데 반해 내부피폭에 대해서는 ‘선량계수’라는 용어를 사용한다. 목적은 동일하지만 외부피폭에서는 평가된 양이 노출에 해당하는 플루언스, 공기커마, 흡수선량, 조사선량 등과 같이 선량에 준하는 양이고, 이 양을 등가선량이나 유효선량으로 ‘환산’한다는 의미를 부여한다. 반면, 내부피폭에서는 평가된 양이 총 섭취 방사능이며 이 양을 장기나 조직의 등가선량 또는 전체적 유효선량과 연계하는 역할을 하므로 환산개념이 아니라고 보아 단순히 ‘선량계수’로 표현하고 있다.

다. 이러한 평균화 접근법의 적용은 방사선방호에서 유효선량 결정에 한정되며, 특히 개인 위험 평가에는 사용될 수 없음을 시사한다. 따라서 유효선량은 장기나 조직 T에서 평가한 **기준남성** 등가선량 H_T^M 와 **기준여성** 등가선량 H_T^F 로부터 다음과 같이 계산된다(부록B 참조).

$$E = \sum_T w_T \left[\frac{H_T^M + H_T^F}{2} \right]. \quad (4.5)$$

(133) 다른 장기와 조직에 대한 접근과 마찬가지로 잔여조직 등가선량도 기준남성과 기준여성에 대해 따로 정의되며, 그 값들이 식(4.5)에 하나의 조직처럼 포함된다(그림 2 참조). 잔여조직 등가선량은 표3의 각주에 수록된 조직들의 등가선량을 산술평균하여 계산한다. 기준남성 잔여조직 등가선량 H_{rmd}^M 및 기준여성 잔여조직 등가선량 H_{rmd}^F 은 다음과 같이 계산한다.

$$H_{rmd}^M = \frac{1}{13} \sum_T^{13} H_T^M, \quad H_{rmd}^F = \frac{1}{13} \sum_T^{13} H_T^F \quad (4.6)$$

여기서 T는 표3의 잔여조직이다. 식(4.5)의 합은 기준남성과 기준여성의 잔여조직에 대한 등가선량에도 적용된다(부록 B).³⁰⁾

(134) 방호목적을 위한 유효선량은 인체 장기나 조직의 평균선량에 기초한다. 유효선량은 **기준인**에 대해 정의되고 평가된다(그림2 참조). 이 양은 주어진 피폭 조건을 고려하지만 특정 개인의 특성을 고려하지는 않는다. 특히, 조직가중치는 양 성별의 많은 개인에 대한 평균을 나타내는 평균값이다. 기준남성과 기준여성의 장기 및 조직의 등가선량도 평균된다(식4.5). 평균된 선량에 해당 조직가중치를 곱하고 그 값들을 합산하면 기준인의 성 평균 유효선량이 된다(그림 2).

4.3.6. 실용량^{Operational quantities}

(135) 인체 관련 방호량인 등가선량과 유효선량은 실제로 측정 가능한 양이 아니다. 따라서 조직이나 장기의 유효선량 또는 평균 등가선량의 측정이나 감시에는³¹⁾ 실용량을 사용한다. 이 양을 사용하는 목적은 대부분 피폭조건에서 사람

30) <역주> 식4.5로 합산할 때 잔여조직은 표3에 열거된 14개 개별 조직과 함께 15번째 조직으로 하나의 연합된 조직(표3 각주의 성별 13개 조직)처럼 간주할 수 있다. 달리 보면 잔여조직에 포함된 성별 13개 조직은 각각 가중치 0.12/13을 갖는 개별 조직으로 간주하여 식4.5에 같이 포함할 수도 있다. 참고로 이 마지막 문장은 같은 항 위에서도 언급한 내용을 반복하고 있다.

31) <역주> 원문은 '평가assessment'로 표현되어 있으나 계산에 의한 평가에는 실용량을 사용하지 않고 직접 등가선량이나 유효선량을 평가할 수 있다. 따라서 혼란을 방지하기 위해 '측정이나 감

의 피폭에³²⁾ 관련된 방호량의 보수적 평가치를 얻으려는 것이다.³³⁾ 실용량은 실제 규정이나 지침에 사용되는 경우가 많다. 아래에 요약하여 설명한 것처럼 몇 종류의 실용량이 외부피폭³⁴⁾에 사용된다. 자세한 사항은 부록B에 있다.

(136) ICRU는 외부피폭에 대한 지역감시 및 개인감시를 위한 실용량을 정의하였다(부록B 참조). 지역감시를 위한 실용량은 주위선량당량ambient dose equivalent $H^*(10)$ 및 방향성선량당량directional dose equivalent $H'(0.07, \Omega)$ 이다. 개인감시를 위한 실용량은 몸체³⁵⁾ 특정 점 아래 ICRU조직 내 적정 깊이 d에서 선량당량인 개인선량당량personal dose equivalent $H_p(d)$ 이다. 특정 점은 일반적으로 개인선량계를 패용한 부위이다. 유효선량 평가를 위해 깊이 d=10 mm인 $H_p(10)$ 을 선정하며, 피부와 손발에 대한 선량 평가를 위해서는 깊이 d=0.07 mm인 개인선량당량 $H_p(0.07)$ 이 사용된다. 거의 감시하지는 않지만 눈의 수정체 선량을 위해 깊이 d=3 mm가 제안되었다. 그러나 실제로 $H_p(3)$ 은 거의 감시하지 않으며, 대신 $H_p(0.07)$ 를 수정체 감시목적으로 이용할 수 있다. 실용량은 측정 가능한 양이며, 방사선 감시 측정기는 이 양으로 교정된다. 일상감시의 경우, 이러한 실용량 값은 특히 그 값이 방호 한도 미만일 경우 각각 유효선량과 피부선량을 충분히 정확하게 평가하는 것으로 간주된다.

(137) 내부피폭에 대한 등가선량이나 유효선량 평가를 제공하는 실용량은 정의되지 않았다. 일반적으로 인체 내부에 존재하는 방사성핵종을 다양한 방법으로 측정하며, 생물역동학 모델을 사용해 방사성핵종 섭취량을 평가한다. 등가선량이나 유효선량은 ICRP가 권고하는 기준 선량계수(단위 섭취 당 선량, SvBq⁻¹)를

시'로 표현을 구체화 했다.

- 32) <역주> 원문은 '또는 잠재피폭'을 추가하고 있지만 실용량은 측정을 위해 정의된 것이므로 일어나지 않은 잠재피폭에 대해서 실용량을 연계하는 것은 부적절하여 삭제했다.
- 33) <역주> 실용량을 정의하는 목적은 유효선량의 보수적 평가치를 얻으려는 것이 아니라 실측이 불가능한 유효선량(또는 등가선량)을 근사하게 대신할 수 있는 실측 가능한 대체량을 두려는 것이다. 개념상으로는 합당하지만 실측이 전혀 뒷받침 되지 않는 양을 방호량으로 사용할 수는 없기 때문이다. '보수적'도 의도하는 바는 아니며 대체량이 유효선량을 과소평가하지는 않아야 할 당위성 때문에 자연히 보수적이 될 뿐이다.
- 34) <역주> 원문은 내부피폭과 외부피폭에 대해 사용된다고 적고 있으나 제137항에서 보듯이 내부피폭에 대해서는 실용량이 공식으로 정의된 것이 없어 내부피폭은 삭제했다.
- 35) <역주> 원문은 "인체(human body)"로 적고 있는데 실용량은 측정량이고 실제 인체가 아니라 유사한 모의체 위에서 교정된다. 종사자 감시에서는 인체 위에 패용하는 선량계로 측정하지만 측정치의 소급은 모의체 위에서 평가된 값이다. 따라서 개인선량당량을 설명할 때 "인체"로 표현하는 것에 이의가 있을 수 있다. ICRU의 원본 정의에서는 애매하게 "body"로 적고 있음에 유의할 필요가 있다.

사용해 섭취량으로부터 계산된다(부록B 참조).

4.4. 방사선 피폭평가

4.4.1. 외부 방사선피폭

(138) 외부 선원 방사선에 의한 피폭선량 평가는 일반적으로 인체에 패용하는 개인선량계를 사용하는 개인감시로 수행되거나, 전망적 평가의 경우 예를 들면 $H^*(10)$ 을 측정하거나 평가하여 적절한 환산계수를 적용함으로써 이루어진다. 개인감시를 위한 실용량은 $H_p(10)$ 과 $H_p(0.07)$ 이다. 만약 개인선량계를 피폭하는 인체의 대표 부위에 패용했다면, 낮은 선량과 균일한 전신피폭이라는 가정 아래서 $H_p(10)$ 값은 방사선방호 목적에 충분히 정밀한 유효선량 값을 제공한다.

4.4.2. 내부 방사선피폭

(139) 방사성핵종 섭취에 대한 선량평가체계는 내부피폭 선량평가를 위한 실용량으로 간주할 수 있는³⁶⁾ 방사성핵종 섭취량 계산에 의지한다. 섭취량은 직접 측정(예를 들면 전신 또는 특정 장기나 조직을 외부에서 감시), 간접측정(예를 들면 소변이나 대변) 또는 환경 시료에 대한 측정과 생물역동학 모델 적용으로 추정할 수 있다. 그 다음 많은 방사성핵종에 대해 ICRP가 권고한 선량계수를 사용해 섭취량으로부터 유효선량이 계산된다. 선량계수는 다양한 연령의 일반인과 직무로 피폭하는 성인에 대해 주어진다.

(140) 인체에 함유된 방사성핵종은 물리적 반감기와 체내 생물학적 잔류에 의하여 결정되는 시간 동안 조직에 방사선을 조사한다. 그러므로 섭취 후 몇 개월이나 몇 년 동안 인체 조직에 선량을 부여할 수 있다. 방사성핵종 노출과 장기간에 걸친 방사선량 누적을 규제할 필요성으로부터 **예탁선량**committed dose quantities 이 정의되었다. 체내 방사성핵종으로부터 예탁선량은 일정 기간에 피폭할 것으로 예상되는 총 선량이다. 조직이나 장기 T의 **예탁등가선량**committed equivalent dose

36) <역주> 이 표현에는 이의가 있을 수도 있다. '실용량'이 무엇인지 엄격히 정의되어 있지는 않지만 외부피폭을 위한 실용량을 보면 가령 개인선량당량은 유효선량과는 다른 선량인데 실용 목적으로 유효선량의 대체량으로 인정하는 것이다. 내부피폭에서 섭취량은 선량이 아니라 선량평가 과정에 있는 다른 물리량이므로 이를 실용량으로 간주할 수 있는지는 의문이다.

$H_T(\tau)$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$H_T(\tau) = \int_{t_0}^{t_0+\tau} \dot{H}_T(t) dt \quad (4.7)$$

여기서 τ 는 섭취 시점 t_0 이후의 적분시간이다. **예탁유효선량** committed effective dose $E(\tau)$ 는 다음과 같이 된다.

$$E(\tau) = \sum_T w_T H_T(\tau) . \quad (4.8)$$

(141) ICRP는 선량한도 준수 적용에서 예탁선량을 섭취가 발생한 연도에 배정할 것을 계속 권고한다. 종사자의 경우 예탁선량은 일반적으로 섭취 후 50년 기간 동안 평가된다. 예탁 기간 50년은 노동력으로 진입하는 젊은 종사자의 예상 종사수명으로 ICRP가 판단한 어림값이다. 방사성핵종 섭취에 의한 예탁유효선량은 일반인에 대한 전망적 선량 평가치로도 사용된다. 이 경우 성인에게는 50년의 예탁 기간이 권고된다. 유아와 아동에 대해서는 70세까지³⁷⁾ 선량을 평가한다.

(142) 직무로 인한 방사성핵종 섭취에 따른 유효선량은 종사자의 섭취량과 기준 선량계수에 근거하여 평가된다. 특정 방사성핵종에 대한 선량계수(SvBq^{-1}) 계산에서는 규정된 생물역동학과 선량계측 모델을 사용한다. 다양한 화학적 형태의 방사성핵종이 체내로 들어와 혈액으로 흡수된 후 분포와 잔류를 설명하기 위한 모델들이 사용된다. 여러 선원에 대해 선원부 S로부터 방출된 에너지가 표적부 T에 흡수되는 분율을 계산하는 데 남성과 여성 전산용 모의체를 사용한다. 이러한 근사가 방사선방호 주요 업무에 적합한 것으로 본다.

(143) 특정 방사성핵종 섭취에 대한 성 평균 예탁유효선량계수 $e(\tau)$ 은 다음과 같은 수식으로 계산한다.³⁸⁾

$$e(\tau) = \sum_T w_T \left[\frac{h_T^M(\tau) + h_T^F(\tau)}{2} \right] \quad (4.9)$$

여기서 w_T 는 조직 T의 조직가중치이며, $h_T^M(\tau)$ 와 $h_T^F(\tau)$ 는 예탁 기간 τ 동안 남

37) <역주> 성인에 대해서는 50년 동안 적분하고 아동에 대해서는 70세까지 적분하는 개념에도 의의가 있을 수 있다. 가령 40세 종사자가 섭취한 경우는 50년 적분은 90세까지 피폭을 고려하는 셈이 되기 때문이다. 실제로 50년 이상 영향을 미치는 경우는 거의 없으므로 실질적인 의미는 없지만 개념이 통일되지 않는 문제는 있다.

38) 소문자 기호 e와 h는 관행에 의해 유효선량 E와 등가선량 H의 계수를 나타내기 위해 사용한다.

성과 여성 각각의 조직 T에 대한 예탁등가선량계수이다. 식(4.9)의 합은 남성과 여성의 잔여조직에 대한 예탁등가선량 계수에도 적용된다.

4.4.3. 직무피폭

(144) 외부 방사선에 대한 직무피폭 감시에서 개인선량계는 개인선량당량 $H_p(10)$ 을 측정한다. 이 측정값은 전신의 고른 피폭을 가정하여 유효선량 평가치로 채택된다. 내부피폭에서는 예탁유효선량은 일반적으로 생물분석(bioassay) 측정이나 다른 양(체내 잔류 방사능 또는 일일 배설물의 방사능)으로부터 얻은 방사성핵종 섭취량 평가로부터 결정된다. 방사선량은 권고된 선량계수를 사용해 섭취량으로부터 구한다(부록B 참조).

(145) 외부 방사선 및 방사성핵종 섭취로 인한 직무피폭 평가로부터 얻은 선량은 선량한도나 제약치와 부합성을 입증하기 위해 다음 식을 사용해 합쳐서 총 유효선량 E값으로 나타낸다.

$$E \cong H_p(10) + E(50) \quad (4.10)$$

여기서 $H_p(10)$ 는 외부피폭에 의한 개인선량당량이며 $E(50)$ 은 내부피폭에 의한 예탁유효선량으로 다음과 같이 평가된다.

$$E(50) = \sum_j e_{j,inh}(50) \cdot I_{j,inh} + \sum_j e_{j,ing}(50) \cdot I_{j,ing} \quad (4.11)$$

여기서 $e_{j,inh}(50)$ 은 방사성핵종 j의 흡입에 의한 섭취 방사능의 예탁유효선량계수, $I_{j,inh}$ 는 흡입에 의한 방사성핵종 j의 방사능 섭취량, $e_{j,ing}(50)$ 은 취식에 의한 방사성핵종 j의 섭취 방사능의 예탁유효선량계수, $I_{j,ing}$ 는 섭취에 의한 방사성핵종 j의 방사능 취식량이다. 구체적인 방사성핵종의 유효선량 계산에서는 인체로 들어오는 물질의 특성을 고려해야 할 수도 있다.

(146) 식(4.11)에서 사용한 선량계수는 기준남성과 기준여성의 해부학, 생리학 및 생물역동학 특성에 맞도록 ICRP가 정한 계수이다(ICRP 2002). 흡입된 에어로졸의 방사능중양공기역학직경(AMAD) 및 특정 방사성핵종이 부착된 해당 물질의 화학적 형태를 포함해 섭취의 물리적, 화학적 특성을 고려할 수도 있다. 종사자 선량기록에서 유효선량은 종사자가 접한 방사선장과 방사능 섭취에 대해 기준인이 피폭할 수 있는 값을 의미한다. 예탁기간 50년은 종사 수명에 걸쳐 선량이 누적될 수 있는 기간을 의미한다(물리적 반감기가 길고 체내 조직에 장기간 잔류하는 방사성핵종에만 해당한다).

(147) 상처가 관련된 통제할 수 없는 사건을 통한 방사성핵종 체내 유입은 직무 관행 범위를 벗어남을 의미하며, 따라서 그러한 사건은 식(4.11)에 포함되지 않는다. 이러한 사건은 중요하므로 평가되고 기록되어야 하고, 적절한 의료처치를 제공하고, 합당하다면 그 종사자의 피폭에 추가 제한을 고려하여야 한다.

(148) 약한 투과력을 갖는 방사선이 외부피폭에 상당히 기여하는 드문 경우, 유효선량 평가를 위해 식(4.10)에 다른 항을 추가하여 유효선량에 대한 피부선량 기여를 고려해야 한다(부록B 참조).³⁹⁾ 라돈 동위원소(주로 라돈-222)와 그 붕괴 생성물에 의한 방사선량도 전체 선량평가에 고려할 필요가 있을 수 있다(ICRP 1993a).

(149) 항공승무원 피폭처럼 개인선량계로 개인감시를 수행하지 않는 상황에서 유효선량 평가는 주위선량당량 $H^*(10)$ 값으로부터 얻을 수도 있다. 방사선장 데이터로부터 유도된 적절한 인자를 사용하여 계산하거나 데이터로부터 직접 유효선량을 계산할 수도 있다.

4.4.4. 일반인 피폭

(150) 일반인에 대한 유효선량 평가를 위한 기본 원칙은 종사자에게 적용되는 원칙과 동일하다. 일반인의 연간 유효선량은 외부피폭으로부터 1년 동안 유효선량과 같은 해에 섭취한 방사성핵종에 의한 예탁유효선량을 합산한 값이다. 일반인 선량은 직무피폭 경우처럼 직접적 측정방법으로는 개인 피폭선량을 얻지는 못하므로⁴⁰⁾ 주로 유출물 및 환경 측정, 습관 데이터와 모델링으로 구한다. 방사성유출물의 방출로 인하여 발생하는 선량 성분은 기존 시설에서 유출물을 감시하거나 설계단계에서 시설이나 선원으로부터 유출물을 예측함으로써 평가할 수 있다. 유출물과 환경에서 방사성핵종 농도에 관한 정보를 방사선생태학 모델링(공기, 물, 토양, 침전물, 식물 및 동물에서 사람에 이르는 환경 이동경로 분석)과 연계하여 외부피폭과 방사성핵종 섭취에 따른 선량을 평가하는 데 사용한다(부록 B 참조).

39) <역주> Hp(10)에는 투과력이 약한 방사선(예: 베타)에 의한 얇은 위치에 있는 조직(예: 피부)의 선량을 적절히 반영하지 않는다. 가령 어떤 종사자의 선량계에서 측정된 Hp(10)이 1.2 mSv 이고 같은 종사자가 같은 감시기간에 베타 핵종의 피부오염으로 50 mSv의 피부선량을 받았다면 이 종사자의 유효선량은 $1.2 + 50 \times 0.01 = 1.7$ mSv로 산출되어야 함을 의미한다.

40) <역주> 정상적인 경우 일반인 선량은 매우 낮으므로 개인선량계의 측정하한 이하이다.

4.4.5. 환자의 의료피폭

(151) 환자 피폭과 위험-이득 평가를 계획하는 데 적합한 양은 조사되는 조직의 등가선량이나 흡수선량이다. 환자 피폭선량을 평가하는 데 유효선량을 사용하는 것은 심각한 한계가 있음을 의료피폭을 정량화할 때 고려해야 한다. 유효선량은 여러 진단절차에 대해 선량을 비교하거나, 다른 병원과 국가에서 사용하는 유사한 기술과 절차를 비교, 또는 동일한 의학검사에 다른 기술의 사용을 비교하는 데만 가치가 있다.

(152) 특히 X선 진단처럼 장기나 조직의 일부만 피폭하거나 매우 불균질한 피폭일 경우 환자 의료피폭에 대한 유효선량 평가와 해석은 문제 소지가 매우 많다.

4.4.6. 유효선량의 적용

(153) 종사자와 일반인을 위한 방사선방호 모두에서 주요하고 일차적인 유효선량 용도는 다음과 같다.

- 방호 계획과 최적화를 위한 전망적 선량평가.
- 선량한도 준수를 입증하거나 선량제약치 또는 참조준위와 비교를 위한 소급적 선량평가.

(154) 따라서 세계적으로 유효선량이 규제목적으로 사용된다. 실제 방사선방호 적용에서, 종사자와 일반인의 확률론적 영향 위험을 관리하기 위해 유효선량을 사용한다. 외부피폭에서 유효선량이나 해당 환산계수 및 내부피폭에서 선량계수의 계산은 흡수선량, 가중치(w_R 및 w_T) 및 인체나 장기, 조직의 기준값에 근거한다. 유효선량은 개인 데이터에 기초하지 않는다(부록B 참조). 일반적 적용의 경우 유효선량은 개인 고유 선량을 제공하는 것이 아니라 주어진 피폭상황에 있는 기준인에 대한 선량을 제공한다.

(155) 유효선량 계산에서 변수 값이 기준값에서 변경될 수 있는 상황이 있을 수 있다. 따라서 피폭의 특정 상황에서 유효선량 계산 중 변경될 수 있는 기준 변수 값과 유효선량 정의에서 변경할 수 없는 값(예를 들면 가중치)을 구별하는 것이 중요하다. 직무피폭 상황에서 유효선량을 평가할 때, 예를 들면 외부 방사선장 특성(예: 피폭 방향)이나 흡입 또는 취식한 방사성핵종의 물리적, 화학적 특

성에 관한 것은 변경이 가능하다. 이러한 경우 변수 기준값으로부터 이탈을 명시해야 한다.

(156) 선량한도를 상당한 수준으로 초과할 가능성이 있는 특정 개인의 선량을 소급적으로 평가함에 있어, 유효선량은 전체적 위해에 대한 대략적 초기 척도를 제공할 수 있다. 방사선량과 위험을 보다 정확한 방법으로 평가해야 할 필요가 있는 경우, 더 구체적인 장기나 조직의 선량 평가치가 필요한데, 특정 개인의 장기 고유 위험이 필요하다면 더욱 그러하다.

(157) 유효선량은 기준값에 바탕을 둔 방호량으로 사용하기 위한 것이므로 역학적 평가에는 권고되지 않으며, 개인의 피폭 및 위험에 대해 상세하고 구체적인 소급적 조사에 사용되어서는 안 된다. 대신, 가장 적절한 생물역동학적, 생물학적 효력 및 위험인자 데이터와 함께 흡수선량을 사용해야 한다. 피폭자에게서 암 발병 확률 평가에는 유효선량이 아닌 장기나 조직 선량이 필요하다.⁴¹⁾

(158) 유효선량 사용은 조직반응 평가에 적합하지 않다. 그러한 상황에서는 흡수선량을 평가하고, 방사선 영향평가를 위한 기초로 적절한 RBE를 고려할 필요가 있다(부록B 참조).

4.4.7. 집단 유효선량

(159) ICRP는 방사선방호 최적화 목적을 위해 주요 직무피폭 상황에 대해 집단선량 양을 도입했다(ICRP 1977, 1991b). 집단선량은 한 그룹의 모든 개인이 주어진 기간에 받은 피폭, 또는 지정 방사선 구역에서 그룹이 수행한 특정 운영으로 받는 모든 피폭을 고려한다. 실제로 집단 등가선량은 특수한 상황에서만 사용된다. 따라서 ICRP는 현행 권고에서 집단유효선량 양에 대해서만 논의한다. 집단유효선량 S(ICRP 1991b)는 고려하는 일정한 기간 또는 작업에 대해 모든 개인 유효선량의 합으로 계산된다. 집단유효선량 양에 사용하는 단위의 특수 명칭은 '인-시버트man sievert'이다. 최적화 과정에서 다양한 방사선방호 수단과 운영 시나리오를 예상 개인 유효선량 및 집단유효선량으로 비교한다.

41) <역주> 이러한 구체적 평가를 위한 장기나 조직 선량(등가선량 또는 흡수선량)은 피폭 상황의 재구성을 통해야 한다. 해당 피폭자가 전형적으로 피폭하는 상황을 모사하여 관심 조직의 선량과 기록되는 선량 Hp(10) 또는 E(50)과 관계를 얻어 이를 기록선량에 적용하여 조직 선량을 얻는 등의 방법을 사용한다.

(160) 집단유효선량 S는 확률론적 영향에 대한 문턱 없는 선형 선량-영향 관계(LNT 모델) 가정에 기초한다. 이러한 조건에서 유효선량은 덧셈성이 있는 것으로 간주된다.

(161) 집단유효선량은 방사선 기술이나 방호 절차들을 비교하기 위한 최적화의 한 도구이다. 집단유효선량은 역학연구에 사용하려는 도구가 아니며, 따라서 위험 투사에 사용하는 것은 적합하지 않다. 집단유효선량 계산의 묵시적 가정(예를 들면 LNT 모델을 적용할 경우)이 생물학적 및 통계적으로 큰 불확실성을 숨기고 있기 때문이다. 특히 사소한 피폭을 대규모 집단에 적용한 집단유효선량에 기초한 암 사망 계산은 타당하지 않으며 피해야 한다. 집단유효선량에 기초한 그러한 계산은 결코 의도한 바가 아니며, 생물학적으로나 통계학적으로 불확실성이 매우 크고, 전후 관계를 무시하고 평가치를 인용할 때 재현성이 없는 많은 단서를 전제로 하며, 집단유효선량이라는 방호량을 그르게 사용하는 것이다.

(162) 예를 들어 장기간 또는 넓은 지리적 지역에 대해 매우 낮은 개인선량을 부적절하게 합산하는 것을 피하기 위해서는 제한조건을 설정할 필요가 있다. 선량 범위와 기간을 명시해야 한다. E_1 과 E_2 사이의 개인 유효선량에 의한 집단 유효선량은 다음과 같이 정의된다.⁴²⁾

$$S(E_1, E_2, \Delta T) = \int_{E_1}^{E_2} E \left(\frac{dN}{dE} \right)_{\Delta T} dE \quad (4.12)$$

여기서 $(dN/dE)dE$ 는 ΔT 기간에 E 와 $E+dE$ 사이의 유효선량을 받은 개인의 수를 의미한다(부록B 참조). 개인선량의 범위가 여러 차수 크기에 걸쳐 있을 때는 개인선량을 2~3 차수를 넘지 않는 여러 범위로 나눠 각 범위에 대해 별도로 분포를 특성화해야 한다. 특성화에는 집단크기, 평균 개인선량 및 불확실성을 고려한다. 집단유효선량이 관련 위험 위해의 역수보다 작을 경우, 위험 평가에서 초과 보건영향의 가장 그럴 듯한 수가 아마도 0임에 주목해야 한다(NCRP 1995).⁴³⁾

42) <역주> 특정 유효선량 구간 E_1 과 E_2 사이의 집단선량은 개인선량이 그 구간에 있는 사람들 선량의 단순 합과 같다. 그럼에도 이렇게 복잡한 형식으로 정의하는 것은 개인선량 분포의 의미를 강조하기 위한 점도 있지만, 전망적 평가에서는 아직 개인 유효선량들이 각각 평가되어 있지 않기 때문에 이해할 수 있다.

43) <역주> 가령 성인 종사자 집단의 명목 위험계수는 $4 \times 10^{-2} \text{Sv}^{-1}$ 이므로 그 역수는 25Sv가 된다. 만약 어떤 종사자 집단의 집단선량이 15man-Sv ($<25 \text{Sv}$)라면 이 집단의 보건위험은 0일 가능성이 크다는 의미이다.

4.5. 불확실성과 판단

(163) 방사선량 평가에서 외부피폭의 배열, 체내 섭취에 대한 생물역동학 및 방사성핵종의 잔류, 그리고 인체 구조를 모사하는 모델이 필요하다. 많은 경우 이러한 모델들과 변수 값들은 모델 변수 값의 ‘최선평가치’나 ‘중앙평가치’를 얻기 위한 실험적 조사와 사람 연구로부터 개발되었다. 비슷한 고려가 조직가중치와 방사선가중치 선택에도 적용되었다. 일부 변수 값과 모델 자체의 형성이나 구조에 상당한 불확실성이 있음을 인지한다. 선량 평가에 필요한 가장 적합한 모델과 변수의 선택에는 판단이 필요하다(부록B 참조).

(164) 불확실성은 주어진 변수 값이나 모델의 예측에 부여할 수 있는 신뢰 수준을 의미한다. 신뢰 수준은 모든 외삽 절차에 중요한 인자이다. 이러한 연계에서 개별 변수의 가변성과 측정 정확도 또한 매우 중요하다. 선량이 낮아지고 시스템 복잡성이 높아지면 측정 및 판단의 정확도가 떨어진다. 가변성은 문제가 되는 집단의 개인 구성원 사이의 정량적 차이를 의미한다. 모델 개발에서 이러한 모든 측면이 판단에 고려되었다(부록B 참조).

(165) 방사선량 모델의 확실도 또는 정밀도 결여는 일정 상황에서의 다양한 변수와 환경에 따라 변한다. 따라서 불확실성 평가가 모델 개발의 중요한 부분인 것은 하지만, 광범한 ICRP 모델 전체에 걸쳐 불확실성 값을 주는 것은 가능하지 않다. 그러나 특별한 경우에 대해서는 불확실성을 평가해야 할 필요가 있을 수 있으며, 그 접근 방법은 많은 간행물 즉, Goossens 등(1997), CERRIE (2004), ICRP(1994b, 2005d), Bolch 등(2003), Farfan 등(2005)에 설명되어 있다. 일반적으로 방사성핵종의 생물역동학을 포함해 내부피폭에서 오는 방사선량 평가의 불확실성이 외부피폭에서보다 크다고 말할 수 있다. 불확실성 정도는 방사성핵종마다 다르다.

(166) ICRP는 방사선량 모델의 불확실성 또는 정밀도 결여를 인식하고 있으며, 그러한 문제점을 심도 있게 평가하고 가능하면 감소시키도록 노력을 기울이고 있다. 규제목적을 위해 ICRP가 권고하는 선량계측 모델 및 변수 값들은 기준 값들이다. 이러한 값은 협정적으로 고정되므로 불확실성의 대상이 되지 않는다. 또한 선량평가 목적에 필요한 생물역동학 및 선량계측 모델도 기준 데이터로서 정의되며, 그에 따라 역시 고정되므로 불확실성이 적용되지 않는다는 것이 ICRP의 견해이다. 이러한 모델과 값은 주기적으로 재평가되며, 새로운 과학적 데이터

와 정보가 유용할 때 그러한 평가를 기반으로 ICRP가 변경할 수 있다.⁴⁴⁾

(167) 규제 준수성은 기준인에 적용되는 점 추정치를 사용해 결정되는데 이 점 추정치에도 불확실성이 적용되는 않는 것으로 간주한다. 한도에 접근하거나 한도⁴⁵⁾를 초과할 수 있는 선량의 소급적 평가의 경우, 선량과 위험을 개별적으로 평가하고 그러한 평가치에 불확실성을 고려하는 것이 적절하다고 볼 수 있다.

(168) 선량계측 모델의 변경과 유효선량 계산의 차이에도 불구하고, 등가선량이나 유효선량에 관한 이전의 평가는 적절한 것으로 보아야 한다. 일반적으로 새로운 모델과 변수로 기존의 값을 재계산하는 것을 ICRP는 권고하지 않는다.

4.6. 참고문헌

Bolch, W.E., Farfan, E.B., Huston, T.E., et al., 2003. Influences of parameter uncertainties within the ICRP-66 respiratory tract model: particle clearance. *Health Physics* 84(4), 421-435.

CERRIE, 2004. Report of the Committee Examining Radiation Risks of Internal Emitters(CERRIE). www.cerrie.org, ISBN 0-85951-545-1.

Cristy, M., Eckerman, K.F., 1987. Specific absorbed fractions of energy at various ages from internal photon sources. Report ORNL/TM-8381: vol. 1-7. Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, TN.

Farfan, E.B., Bolch, W.E., Huston, T.E., et al., 2005. Uncertainties in electron-absorbed fractions and lung doses from inhaled beta-emitters. *Health Physics* 88(1), 37-47.

Goossens, L.H.J., Harrison, J.D., Kraan, B.C.P., et al., 1997. Probabilistic Accident Consequence Uncertainty Analysis: uncertainty assessment

44) <역주> ICRP가 정하는 기준값들이 정확하다는 의미가 아니라 방사선방호 목적에서 문제를 단순화하기 위해 고정된 값으로 본다는 의미이다. 양성자나 중성자 방사선가중치가 ICRP 60 권고값과 변경되었듯이 다른 기준값들도 새로운 지식과 판단에 따라 향후 변경될 수는 있다. 그러한 변경이 있기까지는 현재 권고된 값을 고정된 것으로 보며 그 불확실성을 고려할 필요가 없다는 의미이다.

45) <역주> 예를 들어 개인선량계로 측정된 개인선량은 당연히 불확실성을 수반한다. 그러나 일단 평가된 개인선량을 두고 그 불확실성까지 고려하여 선량한도 초과 여부를 검토하는 것은 불필요하게 업무를 복잡하게 만들 것이므로 이러한 점 추정치도 고정된 값으로 보는 것이 적절하다는 의미이다. 여기서 ‘한도’에 근접할 경우에 불확실성을 고려할 필요가 있다고 기술한 것은 약간 지나친 느낌이다. 역자는 한도보다는 ‘결정론적 영향 문턱선량’이 더 적절한 선택으로 생각한다.

- for internal dosimetry, NUREG/CR-6571 vol. 1, U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC.
- ICRP, 1977. Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 26. Ann. ICRP 1(3).
- ICRP, 1991b. 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 60. Ann. ICRP 21(1-3).
- ICRP, 1993a. Protection against radon-222 at home and at work. ICRP Publication 65. Ann. ICRP 23(2).
- ICRP, 1994b. Dose coefficients for intakes of radionuclides by workers. ICRP Publication 68. Ann. ICRP 24(4).
- ICRP, 2002. Basic anatomical and physiological data for use in radiological protection. ICRP Publication 89. Ann. ICRP 32(3/4).
- ICRP, 2003c. Relative biological effectiveness (RBE), quality factor (Q), and radiation weighting factor (w_R). ICRP Publication 92. Ann. ICRP 33(4).
- ICRP, 2005d. Low dose extrapolation of radiation-related cancer risk. ICRP Publication 99, Ann. ICRP 35(4).
- Kramer, R., Zankl, M., Williams, G., et al., 1982. The calculation of dose from external photon exposures using reference human phantoms and Monte Carlo methods, Part I: The male (Adam) and female (Eva) adult mathematical phantoms. GSF-Report S-885, GSF-National Research Center for Environment and Health, Neuherberg, Germany.
- NCRP, 1995. Principles and application of collective dose in radiation protection. NCRP Report 121. National Council on Radiation Protection and Measurements. Bethesda, MD.
- Snyder, W.S., Ford, M.R., Warner, G.G., et al., 1969. Medical Internal Radiation Dose Committee (MIRD) Pamphlet No. 5. J. Nucl. Med. 10, Supplement No 3.
- Zankl, M., Becker, J., Fill, U., et al., 2005. GSF male and female adult voxel models representing ICRP reference man -. the present status. Proceedings of The Monte Carlo Method: Versatility Unbounded in a Dynamic Computing World. Chattanooga, TN, American Nuclear Society, La Grange Park, USA.

제5장

사람에 대한 방사선방호체계

(169) 모든 사람은 천연 선원과 인공 선원들로부터 방출되는 전리방사선을 피폭한다. 이러한 피폭 유발 과정들을 사건과 상황의 한 네트워크라 생각하면 편리하다. 이 네트워크의 각 부분은 선원으로부터 출발하여 방사선 혹은 방사성물질이 환경이나 다른 경로를 통해 사람들의 피폭으로 이어지고, 결국 개인에 대한 선량으로 귀결된다. 선원이나 피폭경로에 어떤 조치를 취하거나, 피폭자의 위치나 특성을 변경함으로써 방사선방호 목적을 달성할 수가 있다. 편의상 환경 경로가 피폭원과 개인이 받는 선량 사이의 연계를 포함하도록 하는 것이 보통이다. 가용한 조치점points of action들이 방호체계에 크게 영향을 미친다.⁴⁶⁾

(170) 선량 증가와 확률론적 영향 위험 증가가 비례관계에 있다는 가정은 사건 네트워크의 다른 부분들이나 피폭을 초래하는 상황들을 분리하여 다룰 수 있게 하고, 주어진 상황과 관련된 부분을 선택할 수 있게 해준다. 그러나 이러한 선택을 하려면 네트워크 각 부분에 대한 목적, 방호 담당 조직(개인 포함), 책임계선, 그리고 필요한 정보 획득 가능성을 정의해야 한다. 이를 위해서는 복잡한 절차가 필요하므로 ICRP는 방사선학적 상황을 관리하는 데에 두 가지 단순화를 제안한다.

(171) 첫 번째 단순화는 1990년 권고에서 사용되었는데 분리하여 취급할 수 있는 몇 가지 피폭범주로 개인들을 분류할 수 있음을 인식하는 것이다(ICRP 1991b). 예를 들면, 직무로 방사선원에 노출되는 대부분 종사자는 일반인으로서 자연방사선원에도 노출되며, 환자로서 의료피폭도 받을 수 있다. ICRP는 이러한 다른 선원에 의한 피폭이 작업으로 인한 피폭을 제어하는 데 영향을 끼칠 필요가 없다는 정책을 유지한다. 이 정책은 여전히 현행 권고에도 전반적으로 반영되어 피폭을 직무피폭occupational exposure, 환자 의료피폭medical exposure of patients, 일반인피폭public exposure의 세 범주로 구분하고 있다(제5.3절 참조). ICRP는 규제 목적으로 한 범주의 피폭을 받는 동일인에게 다른 범주 피폭을 더하지 말 것

46) <역주> 선원-환경-선량으로 이어지는 피폭 경로에 방호를 위해 어떤 방호조치를 취할 수 있는 위치나 시간(조치점)이 얼마나 있고 그 효과가 큰가하는 점이 결국 방호수준을 결정하게 되므로 중요하다. 즉, 조치점은 공간적 위치뿐만 아니라 시점 개념도 포함한다. 속수무책인 사고라면 그러한 조치점이 거의 없다는 의미이다.

을 계속 권고한다.⁴⁷⁾

(172) 두 번째 단순화는 다양한 피폭경로를 구성하고 있는 네트워크를 취급할 때 선원중심 고려사항과 개인중심 고려사항을 구분하는 것이다(제5.5절 참조). 각 피폭범주에서 개인이 몇 가지 선원에 피폭될 수 있지만 방사선방호 목적으로 각 선원이나 선원군을 따로 취급할 수 있다(ICRP 1991b). 그러면 이 선원이나 선원군에 노출될 수 있는 모든 개인들의 피폭을 고려할 필요도 있는데 이러한 절차를 ‘선원중심 평가’라 한다.

(173) 현실적인 피폭관리 목적으로 ICRP 60에서는 이렇게 피폭을 유발하는 사건과 상황 네트워크를 두 부류의 광범한 상황 유형 즉, ‘행위practices’와 ‘개입 interventions’으로 나누었다. 행위는 선원, 경로 및 개인을 모두 포함하는 전체 블록이 새로 도입되거나 기존 선원으로부터의 경로 네트워크를 변경함으로써 개인 피폭량이나 피폭자 수를 증가시키는 인간 활동으로 정의된다. 개입은 기존의 네트워크 형태에 영향을 줌으로써 전체 피폭을 줄이는 인간 활동으로 정의된다. 개입 형태는 기존 선원을 제거하거나 피폭경로를 수정하는 것, 혹은 피폭 개인의 수를 줄이는 것 등이 될 수 있다. ICRP가 권고하는 개정된 방호체계는 피폭 과정에 기초한 접근법에서 세 종류의 방사선 피폭상황 특성, 즉 계획피폭, 비상피폭 및 기존피폭 상황에 기초한 접근법으로 발전하였다.

5.1. 선원의 정의

(174) ICRP는 한 사람이나 집단에 대해 정량화할 수 있는 잠재적 방사선량을 발생시키는 물리적 실체나 절차를 지칭하기 위해 ‘선원’이라는 용어를 사용하고 있다. 물리적인 선원(예: 방사성물질이나 X선 발생장치)이 한 선원이 될 수도 있고 시설(예: 병원이나 원자력발전소) 또는 유사한 특성을 가지고 있는 물리적인 선원 그룹이나 절차(예: 핵의학 진료절차, 백그라운드 또는 환경방사선)도 선원이 될 수 있다.⁴⁸⁾ 만약 어떤 시설로부터 환경으로 방사성물질이 방출될 경우에는

47) <역주> 즉, 종사자로서 직장에서 받는 피폭은 직무피폭으로 따로 다루고 같은 사람이 병원에서 받는 의료피폭도 따로, 나아가 같은 사람이 직무와 무관한 제3의 선원으로부터 일반인으로서 받는 피폭도 따로 분리하여 각각에 대한 제한을 적용하는 것으로 충분하다.

48) <역주> 보통 ‘선원’이란 방사선을 내는 실체(즉, 물리적 선원)를 의미하는 것으로 생각하고 있으므로 오해를 피하기 위해서는 ‘source’를 ‘피폭원’으로 부르는 것이 더 정확할 수 있다. 그러나 ‘선원’이란 용어가 보편적으로 사용되기 때문에 이 번역본에서도 선원으로 표현한다. 다만, ‘선원’으로 표기하는 것이 의미상 적절하지 않다고 생각되는 곳에는 ‘피폭원’이라는 용어도 사용

시설 전체가 하나의 선원으로 간주될 수 있고, 이미 환경에 분산되어 그 일부가 사람에게 피폭을 초래한다면 그 일부분만을 하나의 선원으로 간주할 수도 있다. 대부분 상황에서는 특정 개인에 대해 주 피폭원이 있게 마련이므로 어떤 조치를 고려할 때 선원들을 개별적으로 취급하는 것이 가능하다.⁴⁹⁾

(175) 일반적으로 선원의 정의는 최적화를 위한 적합한 방호전략의 선택과 연관된다. 정책이 왜곡되면 어려움이 발생할 수도 있다. 예를 들어 방호조치 요구를 피하기 위해 선원을 인위적으로 세분하거나 조치 필요성을 과장하기 위해 선원을 지나치게 묶는 경우가 그러하다. 규제당국과 사용자(사용자를 정의할 수 있는 경우) 양쪽 모두가 ICRP 포괄적 정책의 정신을 존중한다면 선원 정의에 실용적 합의를 도출할 수 있을 것이다.⁵⁰⁾

5.2. 피폭상황의 유형

(176) ICRP는 생각할 수 있는 모든 상황을 겨냥 다음 세 유형의 피폭상황에

한다.

- 49) <역주> 특정 개인의 피폭에 ‘주 피폭원’이 있다는 점은 방호체계를 단순화하는 데 중요하다. 대부분 주 피폭원으로부터 피폭하고 부피폭원은 사소하다면 각 선원을 독립적으로 다룰 수 있다. 그러나 특정 그룹이 피폭 수준에서 비슷하지만 독립적인 다섯 선원에서 피폭을 받고 있다면 그들 선원에 대해 일반적으로 설정한 선원중심 선량제한치가 문제가 될 수 있다. 가령 이들 다섯 선원에 대한 선량제한치들이 연간 15 mSv 내외라면 위 특정 그룹 사람들은 다섯 선원으로부터 연간 75 mSv까지 피폭할 수 있어 개인선량한도를 초과할 우려가 있다. 이러한 그룹 종사자의 예는 하청업체 직원이 원전을 순회하면서 정비에 참여하는 경우가 된다. 이렇게 특별한 그룹에 대해서는 피폭원(선원) 관리 책임자들과 종사자 고용주 사이에 긴밀한 유대를 통한 특별 관리가 필요하게 된다. 다수호기 원전 부지 지역에서 주민 피폭도 비슷한 상황이 된다. 이 경우 고용주는 없으므로 일반인 보호를 감독하는 규제기관이 그 역할을 하게 될 것이다.
- 50) <역주> 선원의 의도적 분할이나 뭉침 문제가 다수호기 원전부지에서 이슈로 될 수 있어 보인다. 현행 국내 규정은 한 원전 운영으로 인한 주민선량 제약치(규정에서 구체적으로 제약치로 부르고 있지는 않지만 제약치에 해당함.)는 연간 0.1 mSv 수준인데 다수호기 부지에 대한 통합 제약치는 0.25 mSv로 규정되어 있다. 따라서 만약 주민 선량이 진실로 ‘정상운영’으로 발생하는 것을 전제로 한다면 한 부지에 둘 이상의 발전소(현재 관행으로는 4개 호기)는 운영하기 어렵다. 이 제한을 해소하기 위해 사업자는 발전소를 각각 독립된 선원으로 간주하고 싶을 것이고, 반대로 규제기관은 어떻게 같은 주민에게 피폭을 주므로 모두를 하나의 선원으로 간주하려 할 것이기 때문이다. 이러한 마찰에 대해 합리적 사고에 따른 타결이 필요할 것이다. 실제로 그러하듯이 한 발전소가 진실로 ‘정상운영’에 의해 연간 주민선량에 기여하는 정도는 제약치는 0.1 mSv보다 상당히 낮을 것이므로 주민의 개인선량한도나 부지 전체 제약치를 초과하지는 않을 것이다. 그 밖에 운영 중 예상되는 사건들로 인한 추가 기여까지 합쳐 평균적 기대 선량이 연간 0.1 mSv에 근접한다고 볼 때 이러한 사건들이 여러 선원에서 같은 해에 동시에 발생할 것으로 가정하는 것은 지나치게 보수적인 판단이 될 수도 있다. 즉, 이러한 판단에 대해 규제기관과 운영자가 협의와 합의가 필요하게 된다.

서 모든 선원과 모든 피폭자에게 ICRP 권고가 적용되게 하고자 한다.

- **계획피폭상황**planned exposure situations은 선원을 의도적으로 도입하여 운용하는 것과 관련 있는 상황이다.⁵¹⁾ 계획피폭상황에서는 발생할 것으로 예상되는 피폭(정상 피폭)과 발생할 것으로 예상되지 않는 피폭(잠재피폭, 소절6.1.3 참조) 모두가 일어날 가능성이 있다.⁵²⁾
- **비상피폭상황**emergency exposure situations은 계획상황 운영 중⁵³⁾, 악의적 행위로, 기타 예상하지 못한 사건으로부터 발생할 수 있고, 바람직하지 않은 결과를 피하거나 감소시키기 위해 긴급조치가 요구되는 상황이다.
- **기존피폭상황**existing exposure situations은 제어 결정이 이루어지는 시점에 이미 존재하는 피폭상황으로 비상상황 후 장기적 피폭상황도 포함한다.

이에 따라 ICRP가 '행위'라 불러왔던 것은 계획피폭, 비상피폭 및 기존피폭 상황의 원인이 될 수 있다. 환자의 의료피폭도 계획피폭상황이지만, 그 피폭의 특수성 때문에 따로 논의한다. 계획상황에 대한 방호원칙은 비상피폭상황에 관련된

51) <역주> 사고 후 수습과정의 피폭이나 광부 또는 항공승무원 피폭 상황이 “선원을 의도적으로 도입하여 운용하는 것과 관련 있는 상황”이라는 표현과 어울리는지 의문이 있다. 보다 안정적으로는 “피폭이 사전에 충분히 예측, 평가되고 필요한 방호조치를 취할 수 있는 피폭상황”과 같이 정의하는 것이 나아 보인다. ICRP가 이러한 방식으로 계획피폭을 정의하지 않은 이유는 아래 주에서 보듯이 사실 계획피폭과 관계 짓기 어려운 잠재피폭을 계획피폭에 포함시키려 한 때문으로 본다.

52) <역주> 소위 ‘잠재피폭’을 계획피폭상황의 한 갈래로 본 현행 분류에 대해 역자는 의문을 가지고 있다. ICRP가 사용했던 잠재피폭potential exposure는 단순히 피폭 가능성exposure potential과는 개념이 달라서 일어날 확률은 낮지만(거의 일어나지 않을 것으로 보지만) 일단 일어난다면 그 영향이 큰 사태(예를 들어 원전 중대사고)를 의미한다. 이러한 사태를 ‘계획피폭상황’과 연계하는 것은 개념적으로 어색하다. 계획피폭상황이란 선원의 문제만이 아니라 예상한 피폭이 일어나고 있는 ‘상황’을 의미하는데 반해 잠재피폭은 선원이 내포하고 있는 불확실한 위험(risk)과 관계된다. 잠재피폭이란 실제로 일어나고 있어 방호의 대상이 되는 ‘상황’이 아니라 불확실한 위험으로서 엄밀히 볼 때 ‘피폭’이 아니다. 따라서 계획피폭상황에 적용되는 선량한도나 선량제한치 대신에 위험한도 또는 위험제한치가 적용된다. 잠재피폭에서 고려하는 사태가 발생하면 그때에는 비상피폭, 계획피폭, 기존피폭 상황들이 모두 전개될 수 있다. 달리 표현하면 잠재피폭은 일어나는 피폭이 아니다. 그것이 일어나면 이미 비상피폭상황이거나 계획피폭상황이거나 기존피폭상황이 되기 때문이다.

ICRP가 과거에 행위(선원을 포함)와 개입으로 접근한 방식을 바꿔 피폭상황 중심으로 방호체계를 수정하면서 선원이라는 실체의 문제를 서술하기가 어려워진 것이 혼란을 초래한 원인이다. 잠재피폭이라는 용어가 ‘피폭exposure’이라는 단어를 포함하고 있어서 그것을 피폭으로 착각하게 만드는 것도 한 원인으로 본다. 이러한 혼란을 피하기 위해서는 잠재피폭이라는 용어 대신에 예를 들어 ‘희귀사건 방사선위험rare event radiological risk’과 같은 직접적 표현 방법을 사용하는 것도 고려해볼 필요가 있다.

현행 권고의 많은 부분에서 잠재피폭에 관한 이러한 문제가 발견되지만 적어도 현재로서는 ICRP 입장이 결정되어 있으므로 매년 의견을 달지는 않는다.

53) <역주> ‘계획상황 운영 중’이란 표현은 계획상황을 어떤 피폭원 또는 선원처럼 해석하게 만들어 다소 혼란을 초래한다. 직접 ‘선원 또는 시설 운영 중’ 또는 과거 용어를 사용하여 ‘행위 운영 중’으로 구체화하는 것이 분명해 보인다.

직무피폭에도 적용된다.⁵⁴⁾

5.3. 피폭범주

(177) ICRP는 피폭을 세 범주 즉, 직무피폭, 일반인피폭 및 환자의 의료피폭으로 분류하고 있다. 환자 위안자나 간병인의 피폭과 의생명연구 대상으로 자원자⁵⁵⁾ 피폭은 제7장에서 논의한다.

5.3.1. 직무피폭

(178) ICRP는 작업 결과로 종사자들에게 발생하는 모든 방사선 피폭을 직무피폭으로 정의한다. ICRP는 전통적 직무피폭⁵⁶⁾ 정의가 피폭원에 관계없이 직장에서 발생하는 유해 인자에 모든 노출을 포함함에 유의한다. 그러나 방사선은 어디나 있기 때문에 그와 같은 정의를 방사선에 직접 적용할 경우 모든 근로자가 방사선방호 대상이 되어야 한다. 따라서 ICRP는 ‘직무피폭’ 사용을 ‘경영자 책임으로 보는 것이 합리적인 상황의 결과로서 직장에서 방사선 피폭’으로 한정한다(소절6.3.1 참조). 규제 배제된 피폭 또는 규제 면제된 행위나 선원으로 인해 발생한 피폭은 일반적으로 직무피폭 방호 대상으로 고려할 필요가 없다.

(179) 고용주는 종사자를 방호할 주된 책임을 진다. 그러나 선원을 책임지는 허가취득자(반드시 고용주가 아닐 수도 있다)도 종사자에 대한 방사선방호 책임

54) <역주> 원문은 “기존피폭 및 비상피폭 상황에 관련된 직무피폭”으로 적고 있으나 기존피폭상황에는 직무피폭이 없어 수정했다. 직무피폭은 본질적으로 사전에 계획된 피폭이므로 기존피폭상황이 존재하지 않는다. 광산의 라돈과 같이 선원은 기존 선원이더라도 광부에 대한 피폭은 사전에 계획되고 필요한 방호조치를 취하는 것이므로 일반 계획피폭상황과 다를 바가 없다. 비상사태 수습에 투입되는 종사자도 엄밀하게는 계획된 피폭이다. 평가를 통해 투입으로 인해 예상되는 선량을 추산하고 이에 따르는 본인의 동의와 의사결정을 거쳐 수행하기 때문이다. 다만, 이 경우 정규 계획피폭과는 달리 정규 선량한도를 적용하지 않고 참조준위를 적용한다는 점에서만 다를 뿐이다. 돌이켜보면 이 상황은 과거에 ICRP가 사용하던 ‘계획된 특수피폭’에 해당하는데 넓은 의미의 계획피폭으로서 특별 선량한도를 적용하는 대상으로 생각할 수도 있다. 그러나 비상상황에서 엄격한 선량한도를 준수하는 것이 불확실하므로 일반인 비상피폭과 함께 따로 비상피폭으로 분류하는 것은 무방하다.

55) <역주> 원문은 ‘volunteer in biomedical research’인데 의생명연구 자원자로 번역할 때 이 분야 연구에 종사하는 사람으로 오해하는 경우가 있어 실험대상으로 자원하는 사람을 분명히 하기 위해 여기서는 ‘의생명연구 대상으로 자원자’라는 표현을 썼다. 그러나 이 번역물이 다른 곳에서는 편의를 위해 단순히 ‘의생명연구 자원자’ 또는 ‘연구대상 자원자’라는 표현도 사용한다.

56) <역주> 여기서 피폭이란 방사선피폭을 의미하지 않으며 특정 유해인자에 노출을 의미한다.

이 있다. 종사자가 고용주가 관리하지 않는 선원과 관련되거나 관련될 수 있는 작업에 종사할 경우,⁵⁷⁾ 허가받은 자와 고용주는 정보의 교환 등 작업장에서 적정 방사선방호에 필요한 조치를 취하는 데 협력해야 한다.

5.3.2. 일반인피폭

(180) 일반인피폭은 직무피폭과 환자 의료피폭을 제외한 일반인의 모든 피폭을 포괄하는 것으로(소절5.3.3 참조) 다양한 방사선원으로부터 발생한다. 일반인 피폭의 성분 중 천연 선원에 의한 피폭이 확연히 가장 크지만, 그렇다고 이 사실이 더 낮지만 쉽게 관리될 수 있는 인공선원에 의한 피폭에 소홀함을 정당화하지는 않는다. 임신한 종사자의 배태아의 피폭은 일반인피폭으로 간주하여 규제해야 한다.

5.3.3. 환자 의료피폭⁵⁸⁾

(181) 환자의 방사선 피폭은 진단, 중재방사선 및 치료 과정에서 발생한다. 의료에서 방사선 절차는 일반적 계획피폭상황에 적용하는 방사선방호와 다른 접근을 요구하는 몇 가지 특질이 있다. 의료피폭은 의도적인 것으로 환자에게 직접적인 이득이 있다. 특히 치료방사선에서는 세포살상과 같은 고선량 방사선의 생물학적 영향이 암이나 기타 질병을 치료하는 데 사용되어 환자에게 이득을 주고 있다. 따라서 방사선의 의료 사용에는 ICRP 권고 적용에 별도로 지침이 필요하다(제7장 참조. 위안자와 간병인의 의료피폭, 연구대상 자원자의 피폭도 제7장에서 논의한다).

5.4. 피폭자 구분

(182) 최소한 세 범주의 피폭자 즉, 종사자, 일반인 및 환자는 분리하여 다루는 것이 필요하다. 피폭자는 피폭이 기본적으로 제5.3절에서 정의한 세 피폭범주 중 하나에 부합하는 사람들이 된다. 한 사람이 종사자, 일반인, 환자 자격으로 피

57) <역주> 타인의 시설에서 역무를 제공하는 서비스업 종사자가 여기에 해당된다.

58) <역주> 과거에 단순히 ‘의료피폭’으로 표현하던 것을 ‘환자 의료피폭’으로 풀이한 이유는 의료 피폭이 종종 의료진의 직무피폭과 혼동된다고 보기 때문이다. ‘환자, 위안자,...의료피폭’처럼 적더라도 방호 실무자들은 여전히 ‘의료피폭’으로 줄여 사용하겠지만 외부인들에게는 오해를 예방하는 기능을 기대하여 수식어를 달고 있다.

폭할 수도 있다.

5.4.1. 종사자

(183) ICRP는 종사자를 정규직, 시간직 또는 임시직 여부에 관계없이 고용주에 의해 고용되고, 직무 방사선방호와 관련한 권리와 의무를 인지하는 사람으로 정의한다. 자영업자는 고용주와 종사자 양쪽 의무를 모두 지는 사람으로 간주된다. 방사선 관련한 의료 종사자의 피폭은 직무피폭이다.

(184) 고용주 및 허가취득자의 중요 임무 중 하나는 피폭원을 관리하고 직무로 피폭하는 종사자를 보호하기 위한 관리 기능을 유지하는 것이다. 이러한 기능의 원활한 수행을 위해 ICRP는 종사자 분류가 아닌 작업구역 분류를 계속 사용할 것을 권고한다.⁵⁹⁾ 선원이 존재하는 작업구역을 정식으로 지정하면 관리에 도움이 된다. ICRP는 두 종류를 규정하는데 즉, **관리구역** controlled areas과 **감시구역** supervised areas이다. 관리구역은 정상 작업조건에서 정규피폭의 관리나 오염 확산 방지, 또는 잠재피폭 방지나 제한을 위해 특정 방호조치나 안전대책을 요구하거나 요구할 수 있는 구역으로 정의된다.⁶⁰⁾ 감시구역은 작업조건이 검토 대상은 되어야 하지만 일반적으로 특별한 절차를 필요로 하지는 않는 구역을 의미한다. 관리구역이 감시구역 내부에 존재하는 경우가 종종 있지만, 반드시 그럴 필요는 없다.

(185) 작업장의 '관리구역' 내 종사자는 방사선피폭을 충분히 이해하고 특별히 훈련되며, 쉽게 구분되는 그룹을 형성해야 한다.⁶¹⁾ 이들 종사자에 대해서는 대개

59) <역주> 현행 국내 법규는 직무로 방사선을 피폭하는 사람을 방사선작업종사자와 '수시출입자'로 구분하고 그 선량한도를 차별화하고 있다. 그러나 이러한 분류는 여기서 ICRP가 권고하는 방향으로부터 이탈한 관행이다. ICRP는 관리 편의를 위해 종사자를 등급으로 구분할 것이 아니라 작업구역을 구분할 것을 권고한다.

60) <역주> 현행 국내 규정은 방사선량률, 오염도 등이 규정하는 일정 준위 이상이 되는 구역을 '방사선관리구역'으로 정하여 관리하도록 규정하고 있으나 ICRP는 어떤 수치기준을 권고하지 않는다. 즉, 관리구역이란 방호를 책임지는 경영자가 출입관리 등 종사자 피폭관리를 원활하고 효과적으로 수행하기 위해 그 구역 내에 출입하는 사람에 대해 행동의 제한 또는 의무를 부과할 수 있는 권한을 갖기 위해 설정하는 구역일 뿐이다. 어떤 수치기준을 둘 경우 예를 들면 사소한 선원이 있더라도 선원 중심 반경 수십 cm에서는 선량률이 높을 수 있으므로 관리구역이 되어야 하며, 역으로 한 방에서도 선원에서 먼 위치는 선량률이 낮아 관리구역이 되지 않는 불합리한 문제를 초래한다.

61) <역주> 쉽게 구분되는 그룹을 형성해야 한다는 설명은 종사자를 유형별로 구분하라는 의미는 아니며 관리구역에서 작업하는 직원이 다른 직원과 구분되도록 종사자 등록과 같은 시스템을 운영해야 한다는 의미로 해석하는 것이 적절하다.

작업장에서 발생하는 방사선 피폭을 감시하며, 특별한 의학적 점검을 실시할 수도 있다.

임신 또는 수유 중인 종사자의 피폭

(186) ICRP는 1990년 권고에서 직무피폭 관리 목적을 위해 피폭자의 성을 구별할 필요가 없다고 결론지었는데 현행 권고에서도 동일한 정책을 계속 유지한다. 그러나 여성 종사자가 임신을 선언한 경우(즉, 고용주에 통보한 경우) 배태아의 보호를 위해 추가적인 관리를 고려해야 한다. 직장에서 임신 여성 방호 방법이 배태아 방호수준을 일반인 방호수준과 비슷한 정도가 되도록 방호를 제공해야 한다는 것이 ICRP 정책이다. 임신 선언 전 그 여성이 ICRP가 권고한 방호체계 아래서 피폭했다면 이 정책이 적절히 적용될 것으로 ICRP는 본다. 임신 사실을 통보 받으면 고용주는 배태아 보호를 위한 추가적인 방호조치를 고려해야 한다. 임신 선언 후 임신 종사자의 작업조건은 배태아의 추가 선량이 나머지 임신 기간에 약 1 mSv를 초과하지 않도록 해야 한다. 방사선을 피폭한 배태아의 방호에 관한 추가 지침은 제7.4절에 설명된다.

(187) 배태아에 대한 선량제한이 방사선이나 방사성물질과 관련된 작업에서 임신 여성을 완전히 배제하거나 방사선 지정구역 출입이나 작업을 금지해야함을 의미하는 것은 아니다(제184항 참조). 그러나 고용주는 임신 여성의 피폭조건을 세심하게 검토해야 함을 시사한다. 특별히 필요하면 임신 중 우발적 피폭이나 방사성핵종 흡입 가능성이 극히 낮도록 작업조건을 변경해야 한다.⁶²⁾ 임신 종사자의 피폭관리에 관한 구체적 권고는 ICRP 84와 ICRP 88에 수록되어 있다(ICRP 2000a, 2001a). 또한 ICRP는 모유수유 여성 종사자의 방사성물질 섭취 후 자녀의 선량을 계산할 수 있는 정보를 ICRP 95(ICRP 2004c)로 발간했다. 태어나 유아의 보호를 위해, ICRP는 임신이나 육아를 선언한 여성은 높은 방사선 피폭이 가능한 비상조치에는 참여하지 않도록 강력히 권고한다(ICRP 2005a).

(188) ICRP 88(ICRP 2001a)에서 ICRP는 임신 전 또는 임신 중 여성 종사자의 방사성물질 섭취에 따른 배태아, 신생아의 선량계수를 제시하였다. 태아 선량은 기준여성의 선량과 비슷하거나 그보다 낮다. ICRP 95(ICRP 2004c)에는 모유내 방사성핵종에 의한 모유수유 유아의 방사선피폭에 관한 정보를 제공하였다.

62) <역주> 아울러 임신 고지 또는 확인 전에 우발적 사건으로 배태아가 높은 선량(예를 들면 수 mSv 이상)을 피폭할 수 있는 위험이 상당한 작업조건에는 '임신 가능한 여성'은 종사하지 않도록 하는 것이 일종의 예방원칙에 해당한다. 어떤 여성이 임신 가능한 여성인지에는 이론의 여지는 있으나 객관적 여건과 종사자 자신의 의사를 고려하면 이를 판단할 수 있을 것으로 본다.

고려한 대부분 방사성핵종에서 모유 섭취로 받는 유아 선량은 기준여성의 선량과 비교해서 작을 것으로 평가되었다.

비행 및 우주에서 피폭

(189) ICRP 60(ICRP 1991b)에서 민간 제트항공기 탑승과 우주비행 중 우주선(宇宙線)에 의한 피폭은 직무피폭의 일부가 된다고 ICRP는 권고하였다. ICRP는 후속 ICRP 75(ICRP 1997a)에서 권고를 더욱 분명히 했는데, 탑승이 잦은 승객의 피폭은 관리 목적에서 직무피폭으로 취급할 필요가 없다고 적시했다.⁶³⁾ 따라서 승무원만 기본적으로 고려 대상이 된다. 당시 이미 ICRP는 유일한 현실적 규제수단은 비행시간과 노선 배정 관리를 통해 개인피폭을 관리하는 것임에 주목했다. ICRP는 이 입장을 계속 유지한다.

(190) 우주여행에서 우주선 피폭처럼 피폭선량이 상당히 높고 어떤 형태의 관리가 필요한 예외적 경우는 이러한 피폭을 주는 특별한 상황을 고려해 별도로 취급해야 한다.⁶⁴⁾

5.4.2. 일반인

(191) ICRP는 직무피폭이나 의료피폭이 아닌 피폭을 받는 개인을 일반인(member of the public)으로 정의한다(소절5.4.3 참조).⁶⁵⁾ 일반인 피폭에는 매우 다양

63) <역주> 우주선 피폭이 관심의 대상이 되는 항공승무원이 국제선을 탑승하는 시간은 연간 800시간 정도이다. 항로에 따라 차이는 있지만 이 정도 비행으로 연간 선량은 4 mSv 내외가 된다. 따라서 일반인 선량한도를 초과하며 직무로 받는 피폭이기 때문에 직무피폭으로 간주한다. 여기서 직무로 인한 빈번한 탑승자의 피폭을 ‘피폭관리 목적에서’ 직무피폭으로 취급할 필요가 없다고 설명한 데 주목할 필요가 있다. 즉, 이들의 피폭이 본질적으로 직무피폭이 아니라는 말이 아니며 직무피폭으로 관리할 필요가 없다는 말이다. 일부 여행사 안내자의 경우 연간 800시간 이상 탑승하는 경우도 없지는 않으나 그렇더라도 결국 비행시간은 한정적이며 따라서 피폭 가능한 선량도 수 mSv 수준이므로 이를 직무피폭으로 보더라도 특별히 관리대책을 강구할 필요는 없다는 의미이다. 그러나 이들의 고용주는 최소한 항공여행이 추가 방사선피폭의 원인이 되며 그 피폭으로 인한 보건영향에 관한 사항을 종사자가 이해하도록 할 책무는 있다. 피폭원 제공자인 항공사도 승객에 대해 우주방사선 피폭에 대해 기본적 정보를 제공하는 것은 무방해 보인다. 이것이 발생할 수 있는 책임시비를 예방하는 방법으로 생각된다.

64) <역주> 단순히 ‘별도로 취급해야 한다.’는 설명만으로는 부족한 느낌이다. 특별한 사안인 만큼 ICRP 기본권고로서 어떠한 고려가 필요한지 더 구체적 입장을 밝혔으면 하는 소감이 있다. 관련된 정보는 미국 NCRP 보고서 153(2006)을 참조할 수 있다.

65) <역주> 무엇이 일반인피폭인가를 정방향으로 정의하지 않고 이것, 저것 제외하고 나머지가 일반인피폭이라고 정의하는 것은 사실 적절하지 않다. 정방향으로 일반인피폭을 정의하는 것이 간단하지는 않지만 역자 생각으로는 ‘자신의 의사에 반하는 피폭’ 또는 ‘자신의 동의와 무관한 피폭’이 일반인피폭을 가장 잘 특성화하는 설명이라고 보고 싶다.

한 천연 및 인위적 선원이 기여한다.

(192) 특히 일반인피폭에서는 보통 개개 선원이 많은 사람들에게 선량을 분포시킨다. 일반인 방호목적을 위해 ICRP는 인구집단 내에서 더 높은 선량을 피폭하는 개인을 특성화하기 위해 '결정집단critical group' 개념을 사용해 왔으며(ICRP 1977) 적절한 결정집단의 평균선량에 대하여 선량제한을 적용했다. 지난 수십년 동안 결정집단 개념의 적용에 상당한 경험이 축적되었다. 특히 확률론적 기법의 사용 확대와 같은 일반인에 대한 선량평가 기술 또한 발전했다. '결정적critical'이라는 형용사에는 위기crisis라는 의미도 포함되는데 ICRP가 의도한 바는 전혀 아니다. 또한 평가한 선량이 개인에 대한 것이라는 문맥에서 '집단group'이라는 단어도 혼동을 초래할 수 있다.

(193) 이제 ICRP는 방사선방호 목적을 위해 과거의 결정집단 개념 대신 '**대표인representative person**'을 사용할 것을 권고한다. ICRP는 '대표인'의 특성 규정과 대표인에 대한 선량평가에 관한 지침을 ICRP 101(ICRP 2006a)에 주었다.

(194) 대표인은 가상 인물일 수 있다. 그러나 대표인의 특성 규정에 사용되는 습관들(예를 들어 식품 소비, 호흡율, 위치, 현지자원 사용 정도)은 가장 높은 수준으로 피폭되는 사람들을 대표하는 적은 수의 개인들에 대한 일반적인 습관이며, 집단 내 특정 구성원 1인의 극단적 습관이 아니라는 점은 중요하다. 때로는 극단적이거나 비정상적인 일부 습관을 검토해야 할 경우도 있겠지만 그러한 습관들이 관심 대상인 대표인의 특성을 나타내는 것으로 간주하면 안 된다.

5.4.3. 환자

(195) ICRP는 환자를 진단절차, 중재방사선절차 또는 치료절차와 관련하여 피폭하는 개인으로 정의한다. ICRP 선량한도와 선량제약치는 환자의 진단이나 치료 효과를 낮출 수 있고, 이로 인해 이로운보다 해로운이 더 클 수도 있으므로 개인 환자에게는 권고하지 않는다. 따라서 의료절차의 정당화 및 방호최적화와 함께 진단절차에 대해서는 진단참조준위 사용을 강조한다(제7장 참조).

(196) 임신한 환자의 피폭은 제7.4절에서 다룬다.

5.5. 방사선방호의 수준

(197) 1990년 권고에서 개인의 피폭선량이 유해한 결정론적 영향의 문턱보다 훨씬 낮을 경우에는 어느 한 선원이 기여한 개인선량의 영향은 다른 선원들에서 발생하는 선량의 영향과는 독립적이라고 적시했다. 여러 목적에서 개별 선원이나 선원 그룹을 독자적으로 취급할 수 있다. 이 경우 단일 선원이나 선원그룹에 피폭하는 사람들의 피폭을 포괄하여 고려하는 것이 필요하게 된다. 이 절차를 '선원중심(source-related)' 접근이라고 한다. 개인 그룹을 선원으로부터 방호하기 위한 조치를 선원에 취할 수 있기 때문에 ICRP는 이제 선원중심 접근법의 일차적 중요성을 강조한다.⁶⁶⁾

(198) 계획피폭상황의 경우, 개인에게 발생할 수 있는 선량에 대한 선원중심 제한은 **선량제약치**(dose constraint)이다. 잠재피폭의 경우, 이에 상응하는 개념은 **위험제약치**(risk constraint)이다. 비상피폭상황 및 기존피폭상황의 경우, 선원중심 제한은 **참조준위**(reference level)가 된다(제5.9절, 제6.2절 및 제6.3절 참조). 선량제약치와 참조준위의 개념은 사회적, 경제적 인자를 고려해 모든 피폭을 가능한 한 낮게 유지함을 보장하는 방호최적화 과정에서 사용된다. 따라서 제약치와 참조준위는 대부분 상황에서 적절한 방호수준을 보장하는 최적화 과정의 핵심 부분이라고 설명할 수 있다.

(199) 다수 선원이 존재하는 경우 선원중심 제한만으로는 충분한 방호를 제공하지 못할 수 있다는 반론이 있을 수 있다. 그러나 지배적 선원은 보통 하나이며, 적합한 참조준위나 제약치를 선택할 경우 적절한 방호수준이 확보될 수 있다는 것이 ICRP의 관점이다. 제약치나 참조준위 아래에서 선원중심 최적화 원칙은 보통 상황에서 방호에 가장 효과적인 도구라는 것이 ICRP가 계속 견지하는 입장이다.

(200) 계획피폭상황에 대해서만 직무피폭 선량 합과 일반인 선량 합에 별도 제한이 요구된다. ICRP는 그러한 개인중심 제한을 선량한도라 부르며(제5.10절 참조), 이에 해당하는 선량평가를 '**개인중심**(individual-related)' 접근이라고 부른다.

(201) 그러나 모든 선원으로부터 오는 개인의 총 피폭량을 평가한다는 것은

66) <역주> 개인을 방호하면 그 개인에게만 효과가 있지만 선원에 방호조치를 가하면 관련된 여러 사람에게 효과가 있기 때문에 선원에 대한 방호조치가 우선적이라는 의미이다.

그 가능성이 매우 희박하다. 따라서 특히 일반인피폭에서는 정량적 한도와 비교하기 위한 선량의 어림이 필요하다. 직무피폭의 경우에는 경영진이 모든 해당 선원으로부터 발생하는 선량을 확인하고 관리하는 데 필요한 정보에 접근할 수 있기 때문에 그러한 어림이 보다 정확할 것으로 보인다.

(202) 그림3에는 계획피폭상황에서 개인 선량한도 사용과 모든 피폭상황에서 선원에 대한 제약치 또는 참조준위 사용 사이의 개념 차이가 묘사되어 있다.

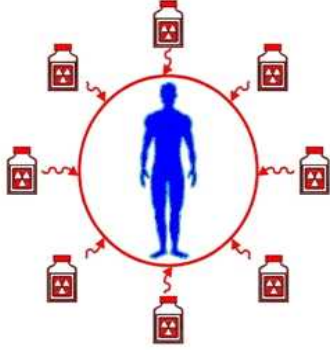
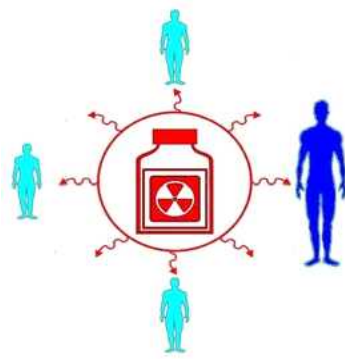
선량한도	제약치 및 참조준위
개인 종사자를 직무피폭에서 보호하고, 대표인을 일반인피폭에서 보호함	
	
계획피폭상황의 모든 규제 선원으로부터 보호	모든 피폭상황에서 단일 선원으로부터 보호

그림3. 종사자와 일반인의 보호를 위한 참조준위와 선량제약치를 선량한도와 비교한 그림.

5.6. 방사선방호의 원칙

(203) ICRP는 1990년 권고에서 방호원칙들을 행위와 개입 상황에 대해 별도로 제시하였다. ICRP는 계속 그 방호원칙들을 방호체계의 기초로 간주하면서, 이제 계획피폭, 비상피폭 및 기존피폭 상황에 적용할 수 있는 단일 세트의 원칙들을 만들었다. 또한 ICRP는 현행 권고에서 이러한 기본원칙을 선원과 개인에

대해 어떻게 적용할 것이며, 선원중심 원칙들을 모든 제어가능 상황에 어떻게 적용할 것인지를 명확히 하고 있다.

아래 두 원칙은 선원중심적이며, 모든 피폭상황에 적용된다.

- **정당화 원칙:** 방사선 피폭상황의 변화를 초래하는 모든 결정은 해로움보다 이로우미 커야 한다.

이것은 새로운 방사선원의 도입, 기존피폭의 감축 또는 잠재피폭 위험의 감축을 통한 개인이나 사회적 이익이 그것이 초래하는 위해를 능가해야 함을 의미한다.

- **방호최적화 원칙:** 피폭 발생 가능성, 피폭자 수 및 개인선량 크기는 경제적, 사회적 인자를 고려해 합리적으로 달성할 수 있는 한 낮게 유지해야 한다.⁶⁷⁾ 이것은 방호수준이 위해요소를 능가하는 이익을 극대화함으로써 현재 상황에서 최선이여야 함을 의미한다. 이러한 최적화 절차에서 심각하게 불평등한 결과를 방지하기 위해 특정 선원으로부터 개인의 선량이나 위험에 대한 제한이 있어야 한다(선량 또는 위험 제약치와 참조준위).

아래 하나의 원칙은 개인중심적이며, 계획피폭상황에만 적용된다.

- **선량한도 적용 원칙:** 환자 의료피폭이 아닌 계획피폭상황의 규제되는 선원로부터 한 개인의 총 선량이 ICRP가 권고하는 적절한 한도를 초과해서는 안 된다.

(204) 규제 선량한도는 국제 권고를 고려하여 각 규제당국이 결정하며, 계획 피폭상황에서 종사자 및 일반인에 대해 적용한다.

5.7. 정당화

(205) ICRP는 방사선피폭 또는 잠재피폭 위험의 준위를 증가시키거나 감소시키는 것과 관련된 활동을 고려할 때는 방사선 위해에 예상되는 변화를 의사결정 과정에 명백히 포함시킬 것을 권고한다. 고려할 영향은 방사선에 관련된 것만으로 한정되지는 않으며 활동에 따른 다른 위험과 비용 및 이익이 포함된다. 때로는 방사선 위해가 전체 위해의 작은 부분에 불과한 경우도 있다. 따라서 정당화

67) <역주> 이 표현은 ICRP 26이나 ICRP 60에서 표현했던 것과 차이가 없지만 그 단축어인 “ALARA”라는 표현을 현행 권고나 최적화를 다루는 ICRP 101 part 2에서 더 이상 사용하지 않음을 발견할 수 있다. 이러한 입장의 수정은 ALARA를 풀이할 때 “합리적reasonably”에는 비중을 두지 않고 “최소as low as” 의미를 부각하는 관행을 개선하려는 의도를 내포한다. 즉, ICRP는 이 둘째 원칙을 ALARA라고 부르는 대신 “최적화”로 부르기를 바라는 것이다. 최적화는 반드시 선량을 최소화하는 개념이 아니다.

는 방사선방호의 범위를 훨씬 넘어선다. 이러한 이유 때문에 ICRP는 순이익이 양(+)일 것만을 정당화 요건으로 권고한다. 가용한 모든 대안 중 최선의 방안을 찾는 것은 방사선방호 당국의 책임을 넘는 일이다.

5.7.1. 정당화 원칙의 적용

(206) 직무피폭 및 일반인피폭에 관련된 상황에서 정당화 원칙을 적용하는 두 가지 접근법이 있는데, 선원을 직접 제어할 수 있는지 여부에 따라 결정된다. 첫째 접근법은 선원에 대하여 방사선방호를 미리 계획하고 필요한 조치를 취할 수 있는 새로운 활동 도입에 사용될 수 있다. 이 상황에서 정당화 원칙 적용은 그 활동이 피폭자나 사회에 충분한 순이익을 제공하여 방사선 위험을 상쇄할 수 있는 경우가 아니라면 이를⁶⁸⁾ 도입하지 말아야 한다. 전리방사선 피폭과 관련되는 특정 유형의 활동을 도입하거나 지속함을 정당화할 수 있는지 여부 판단은 중요하다. 새로운 정보나 기술이 등장하면 정당화 과정을 다시 검토할 필요가 있을 수 있다.

(207) 두 번째 접근법은 선원에 직접 조치를 하기보다는 피폭경로를 수정하는 조치를 취함으로써 피폭을 관리할 수 있는 경우 사용된다. 기존피폭상황 및 비상 피폭상황이 그 주요 예이다. 이러한 상황에서 정당화 원칙은 후속 피폭을 피하기 위한 조치를 취할 것인지에 관한 의사결정에 적용된다. 선량 감축에는 항상 어느 정도 부담도 있지만 그 의사결정은 해로움보다 이로움이 많다는 관점에서 정당화되어야 한다.

(208) 두 접근법 모두에서 정당화 판단 책임은 일반적으로 정부나 국가당국의 몫인데, 개인 차원이라기보다는 매우 광범한 관점에서 사회에 이익이 됨을 보장해야 한다. 그러나 정당화 결정에 대한 입력에는 사용자나 다른 기관 또는 정부 밖 사람들이 제공할 수 있는 많은 측면이 포함될 수 있다. 그래서 정당화 결정에는 무엇보다도 관련 피폭원 규모에 따라 종종 공청 과정을 통한 입력이 필요할 것이다. 정당화에는 여러 측면이 있으며, 다양한 기관이 관련되고 또한 책임도 나눌 것이다. 이런 의미에서, 방사선방호 관련 고려사항은 광범한 의사결정 과정에 하나의 입력일 뿐이다.

68) <역주> 원문은 계획피폭상황을 도입하지 말아야 한다고 표현하고 있으나 도입하는 것은 계획 피폭상황을 초래하는 그러한 활동이지 피폭상황 자체는 아니어서 수정하였다. 예를 들어 사고 후 계획피폭상황은 도입되는 것이라기보다 사고로 인해 저절로 형성되는 것이다.

(209) 환자 의료피폭은 정당화 과정에서 접근법을 달리하며 보다 구체적 접근을 요구한다. 다른 계획피폭상황처럼 의료적 방사선 사용도 정당화되어야 하지만, 그 정당화는 정부나 관할 규제당국보다는 전문업에서 판단하는 경우가 더 많다. 의료피폭의 주요 목표는 피폭으로 인한 방사선의학 의료진이나 다른 사람들의 방사선 위해를 마땅히 고려하면서⁶⁹⁾ 환자에게 해보다 큰 이로운을 주는 것이다. 특정 절차 사용의 정당화 책임은 해당 의사에게 있으므로 의사들은 방사선방호 특별 훈련을 받을 필요가 있다. 따라서 의료절차의 정당화는 ICRP 권고의 일부로 남는다(제7.1절 참조).

5.7.2. 부당한 피폭

(210) 예외적인 상황을 제외하고, 어떤 피폭은 추가 분석 없이도 정당화되지 않는다고 ICRP는 생각한다. 이러한 피폭에는 다음이 포함된다.

- 의도적인 방사성물질 첨가나 방사화에 의해 식품, 음료, 화장품, 완구 및 보석류나 장신구와 같은 제품에 방사능을 높이는 것.⁷⁰⁾
- 임상 지시 없이 직무, 건강보험 또는 법적 목적으로 수행하는 방사선학적 검사. 단, 검사 결과가 검사를 받는 개인의 건강이나 중요한 범죄 수사에 유용한 정보를 제공할 것으로 예상되는 경우는 예외로 한다.⁷¹⁾ 이는 대체로 요구한 영상에 대해 임상적 평가를 수행해야 하며, 그렇지 않으면 피폭이 정당화되지 않음을 의미한다.
- 피검 개인이나 전체 인구에 예상되는 편익이 방사선 위해를 포함한 경제적, 사회적 비용을 보상하기에 충분하지 않은 경우 자각 증상이 없는 집단에 대한 방사선피폭이 있는 검진. 이때 질병 탐지, 탐지된 질병의 효과적 치료 가능성 그리고 특정 질병에서는 질병 통제의 사회적 혜택도 고려해야 한다.

69) <역주> 이런 꼬리를 달고 있으나 원론적으로 의료피폭이란 환자의 피폭이므로 의료진의 직무 피폭과는 별개의 문제로서 직무피폭에 대한 고려가 의료피폭 목표의 일부가 되지는 않으므로 적절한 표현으로 볼 수는 없다.

70) <역주> 수준과 무관하게 어떤 방사능 증가도 정당하지 않다고 해석하는 것은 지나치게 경직된 이해로 본다. 가령 곡물 결실기에 칼륨비료(KCI)을 시비하는 것은 엄밀하게는 곡물 내 천연 방사성물질인 ⁴⁰K 농도를 높인다. 또 보석가공에서 중성자를 조사하더라도 유도 방사능이 극미한 수준이라면 이를 정당하지 않다고 볼 수는 없기 때문이다. 따라서 정당화되지 않는 것은 '유의한 수준의 방사능 증가'로 해석하는 것이 적절하다.

71) <역주> 특히 미국을 중심으로 시행을 계획하고 있는 의심스러운 항공기 승객에 대해 투과 또는 산란 X선영상화는 이 예외에 해당한다고 본다. 항공기 탑승 중 받게 될 우주선 피폭보다 훨씬 작은 스캔 선량은 테러 위협을 고려할 때 정당하다고 보기 때문이다.

5.8. 방호최적화

(211) 방호최적화 과정은 정당화가 이루어진 것으로 간주되는 상황에 적용된다. 개인의 선량이나 위험 크기에 대한 제한과 함께 방호최적화 원칙은 방사선방호체계의 핵심이며 세 피폭상황 즉, 계획피폭상황, 비상피폭상황 및 기존피폭상황 모두에 적용된다.

(212) ICRP는 최적화 원칙을 피폭 발생 가능성(피폭이 확실하지는 않을 때), 피폭하는 사람 수 및 개인선량 크기를 경제적, 사회적 인자를 고려해 가능한 한 낮게 계속 유지하기 위한 선원중심 과정으로 규정한다.

(213) 최적화원칙 적용 방법에 관한 권고를 이미 ICRP가 제시한 바 있으며(ICRP 1983, 1989, 1991b, 2006a), 이 권고들은 여전히 유효하기 때문에 여기서 다시 언급하지 않는다. 객관적 방식으로 최적화된 방사선방호 대책을 확인하려면 의사결정보조 기법이 여전히 요긴하다. 이러한 기법에는 비용편익분석과 같은 정량적 최적화 방법이 포함된다. 최적화 과정은 지난 수 십 년간 직무피폭과 일반인피폭을 괄목할 만큼 감소시켰다.

(214) 최적화는 다음과 같은 계속적이고 반복적인 과정을 통해 주어진 상황에서 최고 수준의 방호를 달성하는 것을 항상 목표로 삼는다.

- 잠재피폭을 포함한 피폭상황의 평가(과정 구성)
- 적합한 제약치나 참조준위 값 선택
- 채택 가능한 방호 방안의 확인
- 주어진 여건에서 최선의 방안 선택
- 선택된 방안 이행.

(215) 경험은 계획상황에 대한 방호최적화가 방사선방호를 어떻게 개선했는지를 보여 준다. 제약치는 최적화 과정에서 적절한 상한을 제공한다. 어떤 선원이나 기술은 낮은 준위에 설정된 제약치를 충족할 수 있는 반면, 어떤 선원이나 기술은 더 높은 준위에 설정된 제약치만 충족할 수 있다. 이러한 현상은 정상적인 것으로서, 특정 상황에 적합한 값을 선정함에 있어 규제당국 또는 기타 해당 기관의 자유에 이러한 점이 반영되어야 한다.

(216) 모든 상황에서, 제약치나 참조준위 사용과 함께 최적화 과정은 주어진

여건에서 방호조치 계획이나 적절한 방호수준 설정에 적용된다. 선량제약치나 참조준위와 비교할 선량은 대개 전망적 선량 즉, 미래에 받게 될 선량인데 이 선량만이 방호조치 결정에 의해서 영향을 받기 때문이다. 선량제약치나 참조준위는 소급적 선량한도 형태로 사용하려는 것이 아니다.

(217) 방호최적화는 미래의 피폭을 방지하거나 감축하기 위한 전망적인 반복 과정이다. 최적화 과정은 기술적, 사회경제적 수준을 고려해 이루어져야 하며 정량적, 정성적 판단 모두를 요구한다. 최적화 과정은 체계적이며 세심하게 조직되어 모든 관련 측면을 고려할 수 있어야 한다. 최적화는 주어진 여건에서 최선을 다했는지, 선량을 줄이기 위해 합리적인 모든 것을 다했는지를 항상 자문하는 마음의 틀이다. 최적화는 적절한 절차와 자원을 필요로 하며 모든 관련 기관의 모든 지위에 책임을 요구한다.

(218) 최선 방안은 항상 그 피폭상황에 고유하며, 주어진 여건에서 달성 가능한 최선의 방호수준을 의미한다. 따라서 그 아래에서는 최적화 과정을 중단할 선량 준위를 사전에 설정하는 것은 적절하지 않다. 피폭상황에 따라서, 최선 방안의 결과 선량은 해당 선원중심 제약치나 참조준위와 비슷하거나 훨씬 낮을 수도 있다.

(219) 방호최적화가 선량의 최소화를 의미하는 것은 아니다. 최적화된 방호는 피폭에 따른 위해와 개인 방호에 가용한 자원간의 균형을 신중하게 맞추는 것이다. 따라서 최선 방안이 반드시 선량이 가장 낮은 방안은 아니다.

(220) 개인피폭 크기를 줄이는 것 이외에도 피폭자 수를 줄이는 것도 고려해야 한다. 종사자 방호의 최적화에 집단 유효선량은 핵심적인 변수였으며, 지금도 그러하다. 그러나 최적화 목적으로 방호 방안들을 서로 비교할 때는 피폭 집단 내 개인피폭의 분포 특성도 면밀하게 검토해야 한다.

(221) 대규모 집단, 지리적으로 광범한 지역 또는 장기간에 걸친 피폭이 발생할 경우에는 총 집단유효선량이 의사결정에 유용한 도구가 되지 않는다. 그러한 집단유효선량은 정보를 부적절하게 뭉쳐 방호조치 선택을 오도할 수 있기 때문이다. 집단유효선량에 내재된 한계를 극복하기 위해서는, 각개 관련 피폭상황을 세심하게 분석해 그 특정 상황에 대해 관심 집단의 피폭 분포를 가장 잘 설명할 수 있는 개인 특성과 피폭 변수를 확인해야 한다. 그러한 분석은 피폭하는 사람과 장소, 시점을 파악하는 것이며, 분석결과에 따라 최적화 과정에서 집단유효선

량을 계산할 수 있는 균질 특성을 가지는 여러 인구그룹을 확인하고 그에 대한 최적화된 방호전략을 정의할 수 있게 해 준다(제4.4절 참조). 실제 최적화 평가에서는 집단선량 계산에서 낮은 선량을 종종 절사하는데, 이는 고려하는 여러 방호대안에서 집단선량을 정의하는 전체 적분이 아니라 적분들 간 차이를 평가에 사용하기 때문에 무방하다(ICRP 1983).

(222) ICRP 77과 ICRP 81(ICRP 1997d, 1998b)에서 시간이 길어지면 개인 선량과 피폭 집단의 규모가 점점 더 불분명해짐을 ICRP는 인정하였다. 의사결정 과정에서 불확실성 증가 때문에 매우 낮은 선량과 먼 미래에 받게 될 선량에는 보다 낮은 가중치가 적용될 수 있다는 것이 ICRP 견해이다(소절4.4.7절 참조). 그러나 ICRP는 그러한 가중에 대해 상세한 지침을 제공하지는 않으며, 단지 가중하는 방법이 투명한 방식으로 입증되어야 할 중요성만을 강조한다.

(223) 최적화의 모든 측면을 규정할 수는 없으며 모든 당사자가 최적화 과정에 책임을 져야 한다. 규제당국이 최적화를 다룰 때는 특정 상황에서 나온 특정 결과보다는 과정과 절차, 그리고 판단에 초점을 맞추어야 한다. 규제당국과 운영 경영진 사이에 대화가 열려 있어야 하며, 최적화 과정의 성공여부는 이러한 대화의 질에 크게 좌우된다.

(224) 방사선방호 수준의 최종 결정에는 대개 사회적 가치가 영향을 미친다. 따라서 현행 권고가 주로 방사선방호에 대한 과학적 고려에 기초하여 의사결정을 돕는 권고를 제공하는 것으로 여겨야 한다. ICRP 권고가 최종(일반적으로 더 넓은) 의사결정 과정에 한 입력 역할을 할 것을 기대하는데, 의사결정 과정에는 투명성뿐만 아니라 기타 사회적 관심사나 윤리적 측면까지 포함될 수도 있다(ICRP 2006a). 의사결정 과정에는 방사선방호 전문가뿐만 아니라 종종 해당 이해당사자들의 참여를 포함할 수 있다.

5.9. 선량제약치와 참조준위

(225) 선량제약치와 참조준위 개념은 개인선량을 제한하기 위해 방호최적화와 연계해 사용한다. 선량제약치 또는 참조준위는 항상 어떤 개인선량 준위로 정의될 필요가 있다. 1차적 의도는 이들 준위 이하로 유지하는 것이며, 지향하는 바는 경제적, 사회적 인자를 고려해 합리적으로 달성가능한 낮은 수준으로 모든 선

량을 감축하는 것이다.

(226) ICRP는 이전 권고(ICRP 1991b)와 연속성을 유지하기 위해 계획피폭상황(환자 의료피폭은 제외한다)에 대해서는 이 준위의 선량에 '선량제약치'라는 용어를 계속 사용한다. 비상피폭상황과 기존피폭상황의 경우, ICRP는 이러한 준위 선량을 설명함에 '참조준위reference level'라는 용어를 사용할 것을 제안한다.⁷²⁾ 계획상황에서는 개인선량에 대한 제한이 계획 단계에서 적용될 수 있고 제약치가 초과되지 않음을 보장하기 위하여 선량을 예측할 수 있다는 사실을 표현하고자, ICRP는 계획피폭상황과 다른 피폭상황(비상 및 기존)에 사용하는 용어에 차이를 두었다. 비상피폭과 기존피폭 상황에서는 더 광범한 피폭이 존재할 수 있으며, 최적화 과정은 참조준위를 넘는 개인선량 초기 준위에 적용될 수 있다.⁷³⁾

(227) 진단참조준위diagnostic reference level는 일상 조건에서 특정 영상화 절차의 환자 선량준위나 투여 방사능준위가 그 절차로서 비정상적으로 높거나 낮은지를 적시하기 위해 의료 진단(즉, 계획피폭상황)에 이미 적용되고 있다. 비정상적이라면 적절하게 최적화되었는지, 또는 시정조치가 필요한지 여부를 판단하기 위해 자체 검토를 시작해야 한다.

(228) 제약치나 참조준위로 선택하는 값은 고려하는 피폭의 여건에 달려있다. 선량/위험 제약치 혹은 참조준위 중 어떤 것도 '안전'과 '위험'의 경계로 인식되어서는 안 되며, 수반되는 개인 보건위험에 어떤 단계적 변화를 반영하는 것으로 인식되어서도 안 된다.⁷⁴⁾

(229) 피폭상황 유형이나 피폭범주와 관련해 ICRP 방호체계에 사용되는 선량 제한(한도, 제약치, 참조준위)의 다양한 유형들이 표4에 수록되어 있다. 계획피폭

72) <역주> 과거 권고에서 참조준위는 조사준위, 개입준위, 기록준위 등 그 준위에 도달하면 어떤 조치를 취하기 위해 미리 설정하여 두는 값을 통칭하는 용도로 사용했다. 이제 ICRP가 참조준위라는 용어를 이 항에서 설명하는 용도로 사용하고 위의 구체적 준위들을 포괄하는 다른 용어를 정의하지 않는다. 그러나 조사준위나 개입준위, 기록준위는 유용한 관리 수단이므로 필요에 따라 각각 구체적 개별 명칭으로 계속 사용할 수 있다.

73) <역주> 계획피폭상황에서는 사전에 계획하므로 기본적으로 제약치를 충족하고 2단계로 그 아래에서 최적화를 적용하는 개념임에 반해, 비상 및 기존 피폭에서는 불확실성이 크며 충분한 방호방안이 가용하지 않을 수도 있으므로 먼저 참조준위를 충족할 수 있다는 보장이 없다. 따라서 최적화가 처음부터 적용될 수도 있고 때에 따라서는 최적화된 결과 선량이 참조준위를 넘는 경우도 있을 수 있다.

74) <역주> 결정론적 영향의 문턱선량에 이르는 높은 피폭이 아니라면 위험은 확률론적 영향에 의존하므로 제약치나 참조준위를 넘느냐 여부로 위험 수준이 급변하는 것이 아니라 선량에 비례하여 연속적으로 증가할 뿐이다.

표4. ICRP 방호체계에 사용되는 선량제약치 및 참조준위

상황의 유형	직무피폭	일반인피폭	의료피폭
계획피폭	선량한도 선량제약치	선량한도 선량제약치	진단참조준위 ^d (선량제약치 ^e)
비상피폭	참조준위 ^a	참조준위	N.A. ^b
기존피폭	N.A. ^c	참조준위	N.A. ^b

a 장기적인 복구 작업에는 계획 직무피폭의 일환으로 취급해야 함.

b 해당 없음.

c 장기적 완화작업이나 피해지역에서 장기적 고용에 따른 피폭은 관련된 방사선원이 '기준'이더라도 계획된 직무피폭의 일부로 취급되어야 함.

d 환자.

e 위안자, 간병인 및 연구대상 자원자만 해당(제7.6절 및 제7.7절 참조).

상황에는 잠재피폭을 고려하기 위한 위험제약치도 있다.⁷⁵⁾

5.9.1. 선량제약치

(230) 선량제약치는 계획피폭상황(환자의 의료피폭은 제외)에서 단일 선원에 의한 개인선량에 대한 전망적이고 선원중심적인 제한으로서 해당 선원에 대한 방호최적화에서 예상선량의 상한이 된다. 선량제약치는 주어진 피폭원에서 그 값 이상에서는 방호가 최적화되지 않을 것이어서 거의 항상 조치를 취해야할 선량 준위이다. 계획상황에 대한 선량제약치는 기본적 방호수준을 나타내며, 항상 해당 선량한도보다 낮아야 한다. 계획단계에서 관심 선원이 제약치를 초과하는 선량을 시사하지 않음을 보장해야 한다. 방호최적화는 선량제약치 미만에서 어떤 합당한⁷⁶⁾ 선량준위를 수립할 것이다. 이렇게 최적화된 준위는 계획된 방호조치에 따른 예상결과가 된다.

75) <역주> 잠재피폭에 대해서는 위험한도나 위험제약치를 적용할 수 있는데, 잠재피폭은 경우에 따라 종사자, 일반인, 환자 모두가 처할 수 있는 위험이다. 따라서 표4의 매트릭스에 잠재피폭에 대한 위험제약(한도)을 배치하기가 어려워 이렇게 본문에만 설명하고 있다. 이것은 속성이 다른 잠재피폭을 계획피폭상황의 범위에 무리하게 편입한 탓으로 볼 수 있다.

76) <역주> 원문은 'acceptable'인데 보통처럼 '용인할 수 있는' 정도의 표현은 이 경우 적절하지 않아 보여 '합당한'이란 표현을 썼다. 아래 제231항에서도 같다.

(231) 선량제약치를 초과하였을 경우 필요한 조치로는 방호가 최적화되었는지, 적절한 선량제약치가 채택되었는지, 또는 바람직한 준위로 선량을 낮추기 위한 추가 조치가 적합한지 여부 판단이 포함되어야 한다. 잠재피폭의 경우 해당 선원중심 제한을 위험제약치라 부른다(소절6.1.3 참조). 선량제약치를 목표값으로 삼는 것은 충분하지 않으며, 제약치 아래에 합당한 선량수준을 수립하기 위해 방호 최적화가 필요하다.

(232) 선량제약치의 개념은 최적화 과정에서 불평등 즉, 최적화된 방호 계획에서 일부 사람들이 평균치보다 훨씬 높게 피폭할 가능성을 유발하지 않도록 ICRP 60에서 도입되었다.

'방호최적화에 사용하는 대부분 방법은 사회 및 전체 피폭집단에 대한 편익과 위험을 강조하는 경향이 있다. 편익과 위험은 사회에 동일한 방식으로 분포하지는 않는다. 따라서 방호최적화는 개인들 사이에 상당한 불평등을 초래할 수도 있다. 이러한 불평등은 최적화 과정에서 개인선량에 대해 선원중심 제한을 도입하면 제한될 수 있다. ICRP는 전에는 상한값이라고 불렀던 이 선원중심 제한을 선량제약치라고 부른다. 이 제약치는 방호최적화에서 불가결한 부분이다. 잠재피폭의 경우에 이에 해당되는 개념은 위험제약치이다'(ICRP 1991b).

이 설명은 ICRP 견해를 나타낸 것이며 여전히 유효하다.

(233) 직무피폭의 경우, 선량제약치는 제약치 아래로 선량을 낮출 것으로 예상되는 방안만이 최적화 과정에서 고려하도록 방안의 범위를 제한하기 위해 사용하는 개인선량 값이다. 일반인피폭에서 선량제약치는 제어되는 특정 선원의 계획된 운영으로 인해 일반인이 받을 수 있는 연간 선량의 상한값이다. ICRP는 선량제약치를 지시형 규제한도로 사용하거나 그러한 한도로 이해되지 않기를 강조하고자 한다.⁷⁷⁾

5.9.2. 참조준위

(234) 제어 가능한 비상피폭상황이나 기존피폭상황에서, 참조준위는 그 이상에서는 피폭을 허용하도록 계획하는 것이 부적절하다고 판단되어 따라서 방호조치가 계획되고 최적화되어야 할 선량준위를⁷⁸⁾ 의미한다(제6.2절 참조). 참조준위

77) <역주> 이와 같은 강조에도 불구하고 일반인피폭에 대한 선량제약치는 규제기관이 설정하는 관계로 거의 지시형 규제한도와 유사하게 기능할 것이 예상된다. 선량한도와 차이가 있다면 선량한도 초과는 위법으로서 제재의 대상이 됨에 반해, 선량제약치 초과는 문제의 원인을 조사하고 대책을 강구하거나, 나아가서는 규제기관이 제약치 적절성을 재검토할 필요성을 제기할 뿐 제재의 대상은 아니라는 점이다.

로 채택되는 값은 고려하는 피폭상황의 여건에 달려있다.

(235) 비상피폭상황이 발생하거나 기존피폭상황이 확인되어 방호조치를 이행할 경우 종사자와 일반인의 선량을 측정하거나 평가할 수 있다. 이 경우 참조준위는 채택된 방호방안에 대해 소급적으로 대조 판단할 수 있는 벤치마크 기능을 할 수도 있다. 계획된 방호전략의 이행으로 얻는 선량분포는 전략의 성공 여부에 따라 참조준위 이상의 피폭을 포함할 수도 있고 그렇지 않을 수도 있다. 그러나 참조준위를 초과하는 피폭을 가능한 한 참조준위 미만으로 낮추기 위한 노력을 해야 한다.

5.9.3. 선원중심 선량제약치와 참조준위 선택에 영향을 미치는 인자

(236) 100 mSv를 초과하는 선량의 경우, 결정론적 영향과 유의한 암 위험 증가 가능성이 높아진다. 이러한 이유 때문에 ICRP는 급성으로 혹은 1년 동안 발생하는 피폭에 대한 참조준위의 최고값으로 100 mSv를 고려한다. 급성 혹은 1년 동안 100 mSv를 초과하는 피폭은 극단적인 상황 즉, 피폭이 불가피한 상태이거나 인명구조나 심각한 재해를 방지하는 등 예외적인 상황에서만 정당화된다. 다른 어떤 개인적 또는 사회적 편익도 그러한 높은 피폭을 보상하지 못한다 (ICRP 2005a 참조).

(237) ICRP가 ICRP 60과 후속 간행물에서 권고한 다양한 수치기준은 한도를 제외하고 모두 제약치나 참조준위로 간주하면 된다. 그 값들은 다음 항에 설명하는, 각각의 속성을 갖는 세 밴드(표5 참조)로 구분된다. 값들을 이러한 방식으로 표현하면 ICRP가 명백하게 언급하지 않은 구체적인 상황에서 제약치나 참조준위에 적합한 값을 선택할 수 있게 하므로 매우 유용할 것으로 본다.

(238) ICRP가 제시한 제약치와 참조준위의 밴드화(표5 참조)는 세 가지 피폭 상황에 모두 적용되며, 검토 대상 상황에 적절한 기간 동안 예측선량에 적용된다. 계획피폭에 대한 제약치와 기존상황에 대한 참조준위는 연간유효선량(연간 mSv)으로 표현될 수 있다. 비상피폭상황에 대한 참조준위는 급성이든(반복될 것으로 예상하지 않는) 또는 연 단위의 장기적인 피폭이든 비상상황의 결과로 개인에게 초래될 것으로 예상되는 총 잔여선량으로 표시된다.

78) <역주> 원문은 'level of dose or risk'로 적고 있으나 'risk reference level'은 권고되지 않으므로 여기서 risk는 선량에 따른 보건위험으로 해석하는 것이 적절하다. 그렇다면 굳이 위험을 강조하지 않는 것이 오해의 소지를 없애므로 이를 삭제했다.

표5. 제어가능한 모든 피폭상황에서 단일 주요 선원으로부터 종사자와 일반인에 대한 제약치의 예와 함께 보인 선원중심 선량제약치와 참조준위의 골격

제약치 및 참조준위 범위 ^a (mSv)	피폭상황의 특성	방사선방호 요건	예
20 ^b 이상 100 ^{b,c} 까지	통제할 수 없는 선원 또는 선량 감축조치가 불균형적으로 충격적인 선원에 피폭하는 개인. 통상 피폭경로에 대한 조치로 피폭이 관리된다.	선량 감축을 고려한다. 선량이 100 mSv에 근접할수록 선량감축 노력은 증가되어야 한다. 방사선 위험에 관한 정보와 선량감축을 위한 조치에 관한 정보를 개인에게 제공해야 한다. 개인선량 평가가 수행되어야 한다.	방사선 비상상황으로부터 최고 계획 잔여 선량에 대해 설정하는 참조준위. 단발성 중요작업을 위한 50 mSv 미만의 특별 제약치. ⁷⁹⁾
1이상 20까지	피폭 자체로부터는 아닐 수 있지만 개인은 일반적으로 피폭상황에서 편익을 얻는다. 선원에 대한 조치 또는 피폭경로에 대한 조치로 피폭을 관리할 수 있다.	가능하다면 개인이 선량을 낮출 수 있도록 일반적 정보가 가용해야 한다. 계획상황의 경우 개인에 대한 선량평가와 훈련을 수행해야 한다.	계획상황에서 직무피폭에 설정한 제약치. 방사성의약품으로 치료 받는 환자의 위안자와 간병인에 대한 제약치. 주택 내 라돈으로부터 최고 계획 잔여선량에 대한 참조준위.
1 이하	일반적으로 개인에게는 편익이 거의 없거나 전혀 없지만 사회에는 편익이 있는 선원에 개인이 피폭한다. 일반적으로 피폭은 선원에 직접적인 조치를 취해 관리될 수 있다. 이때 선원에 대해서는 방사선방호 요건을 사전에 계획할 수 있다.	피폭준위에 대한 일반적인 정보가 가용해야 한다. 피폭 준위에 따라 피폭경로를 주기적으로 점검해야 한다.	계획상황에서 일반인 피폭에 대한 제약치.

a 급성 또는 연간 선량.

b 예외적인 상황으로, 충분한 정보를 제공받은 자원자가 인명구조, 심각한 방사선 보건영향의 예방, 또는 재앙적 사태로 발전을 방지하기 위한 작업으로 이 범위를 초과하는 선량을 피폭할 수도 있음.

c 관련 장구나 조직의 결정론적 영향의 문턱선량을 초과될 수 있는 상황에서는 항상 조치가 요구됨.

(239) 1 mSv 미만인 첫째 밴드는 피폭자에게는 직접 편익이 없지만 사회에는 편익이 있을 수 있는 피폭(대개 계획피폭)을 개인이 받는 피폭상황에 적용된다.

79) <역주> 이해를 돕기 위해 제241항에서 설명하는 특별한 상황에 대한 특별 제약치를 역자가 추가하였다.

행위의 계획된 운영에 따른 일반인피폭이 이러한 상황의 대표적인 예이다. 이 밴드의 제약치와 참조준위는 일반적인 정보와 환경 조사나 감시 또는 평가가 있는 상황에 대해 선정될 수 있으며, 개인이 어떤 훈련을 받을 필요는 없지만 관련된 정보는 제공받을 수 있다. 관련되는 선량은 자연 백그라운드를 약간 넘는 수준이 되며, 참조준위 최대값보다 최소 두 자리 이상 낮아서 엄격한 수준의 방호를 제공하게 된다.

(240) 1 mSv부터 20 mSv 사이의 둘째 밴드는 개인이 피폭상황에서 직접 편익을 받는 상황에 적용된다. 이 밴드에서는 개인감시나 선량 모니터링 또는 선량 평가가 이루어지며, 개인은 훈련을 받고 정보를 제공 받는다. 계획피폭상황의 직무피폭에 대해 설정하는 제약치가 그 예이다. 비정상적으로 높은 준위의 자연 백그라운드 방사선, 혹은 사고 후 재입주 단계에서 피폭상황이 이 밴드에 포함될 수 있다.

(241) 20 mSv와 100 mSv 사이의 셋째 밴드는 피폭 감축조치가 파괴적으로 비정상적이고, 극단적인 상황에 적용된다. 참조준위와, 가끔 피폭상황의 편익이 비견되게 높을 때 50 mSv 이하의 ‘단발성 피폭’에 대해 제약치⁸⁰⁾가 이 범위에 설정될 수 있다. 방사선 비상에서 피폭 감축을 위한 조치는 이 상황의 대표적인 예이다. 선량이 100 mSv까지 상승하는 경우에는 거의 모든 경우에 대해 방호조치가 정당화될 수 있다고 ICRP는 본다. 또한 해당 장거나 조직의 피폭선량이 결정론적 영향의 선량 문턱을 초과할 수 있는 상황에서는 항상 적절한 조치가 요구된다(ICRP 1999a의 제83항 참조).

(242) 방호최적화 원칙을 적용할 때 꼭 필요한 단계는 선량제약치나 참조준위에 적합한 값을 선택하는 것이다. 첫 단계는 피폭의 성격, 피폭에 따른 개인과 사회에 대한 편익, 기타 사회적 기준, 그리고 피폭감축이나 회피의 측면에서 해당 피폭상황을 특성화하는 것이다. 이러한 속성을 표5에 기술된 특성과 비교하면 제약치나 참조준위의 해당 밴드를 선정할 수 있다. 제약치나 참조준위에 대한 구체적인 값은 국가적 혹은 지역적 속성과 선호도를 고려하여 일반적 최적화 과정에 의해 설정할 수 있는데, 적절하다면 국제적 지침과 기타 모범관행들을 함께 참조할 수도 있다.

80) <역주> 제약치는 계획피폭상황에 적용되므로 보통의 경우 20 mSv를 넘지 않아야 한다. 그러나 특별한 사유에 따라 개인선량이 5년 평균 100 mSv를 넘지 않는 범위에서 특정 1년에 개인선량 한도를 50 mSv까지 높여 적용할 수 있는 장치를 두고 있음을 고려하면 계획된 직무피폭에서 특별한 경우 특별 제약치를 20~50 mSv 범위에 설정할 수 있게 자유도를 부여할 필요가 있다.

5.10. 선량한도

(243) 선량한도는 환자 의료피폭이 아닌 계획피폭상황에만 적용된다. ICRP는 ICRP 60(ICRP 1991b)에서 권고한 기존 선량한도가 계속 적절한 수준의 방호를 제공할 것으로 결론을 내렸다. 종사자와 일반인 모두에 대한 명목위해계수는 수치상 1990년도에 규정한 값보다 어느 정도 낮아졌지만 1990년 권고와 부합한다. 수치의 작은 차이는 실제 별로 중요하지 않다(부록A 참조). 피폭범주 내 즉, 직무피폭 또는 일반인피폭에서 선량한도란 이미 정당화된 행위들에 관련된 선원으로부터 발생하는 피폭의 합에 적용된다. 권고하는 선량한도를 표6에 요약하였다.

(244) 계획피폭상황에서 직무피폭의 경우, ICRP는 어느 한 해 동안 유효선량이 50 mSv를 초과하지 않아야 한다는 추가 규정과 함께 지정된 5년 동안 평균하여 연간 20 mSv(5년 동안 100 mSv)의 유효선량을 선량한도로 하는 권고를 계속 유지한다.

(245) 계획피폭상황에서 일반인피폭의 경우, ICRP는 선량한도를 연간 1 mSv

표6. 계획피폭상황에 권고된 선량한도^a

한도의 유형	직무피폭	일반인피폭
유효선량한도	지정된 5년간 평균하여 연간 20 mSv ^e	연간 1 mSv ^f
연간 등가선량한도		
눈 수정체 ^b	150 mSv	15 mSv
피부 ^{c,d}	500 mSv	50 mSv
손, 발	500 mSv	-

a 유효선량 한도는 지정 기간 중 외부피폭에 의한 유효선량과 같은 기간 방사성핵종 섭취에 따른 예탁유효선량의 합에 적용함. 예탁유효선량은 성인의 경우 방사성핵종 섭취 후 50년 기간에 대해 계산되며, 아동의 경우에는 70세까지 기간에 대해 계산됨.

b 현재 이 한도는 ICRP 작업그룹에서 재검토 중임.

c 유효선량한도만으로도 피부에 대한 확률론적 영향으로부터 방호를 제공하기에는 충분함.

d 피폭한 면적에 관계없이 1 cm² 피부에 대해 평균함.

e 어느 한 해의 유효선량이 50 mSv를 초과하면 안 된다는 추가 규정을 적용함. 임신여성의 직무피폭에 대해서는 추가 제한이 적용됨.

f 5년 평균이 연간 1 mSv를 초과하지 않는 조건에서, 특수한 상황에서는 이보다 높은 유효선량이 어느 한 해에 대해 허용됨.

의 유효선량으로 하는 권고를 유지한다. 단, 특수한 상황에서 그보다 높은 유효선량이 한 해에 대해 허용되지만, 이 경우에도 5년 동안 평균값이 연간 1 mSv를 초과하면 안 된다.

(246) 유효선량한도는 외부피폭에 의한 선량과 방사성핵종 섭취에 따른 내부 피폭에 의한 예탁유효선량의 합에 적용된다. ICRP 60(ICRP 1991b)에서 ICRP는 직무에서 방사성물질 섭취를 5년 기간에 대해 평균할 수 있도록 하여 어느 정도 유연성을 제공한다고 명시하였다. ICRP는 이 입장을 계속 유지한다. 마찬가지로, 일반인에 대한 선량의 평균이 허용되는 특별한 경우에는 일반인의 방사성물질 섭취를 5년 동안 평균하는 것도 허용할 수 있다(전항 참조).

(247) 상황을 충분히 이해하는 개인이 자원하여 인명구조 조치에 종사하거나 재앙상황 방지를 시도하는 비상피폭상황에는 선량한도가 적용되지 않는다. 이해하는 자원자가 긴급 구조활동을 수행할 때는 정규 선량제한을 완화할 수 있다. 그러나 비상피폭상황의 후기 단계에서 복구와 재건 활동을 수행하는 대응자는 직무로 피폭하는 종사자로 간주되어야 하며, 정규 직무피폭 방호 기준에 따라 방호되어야 하고 ICRP가 권고한 직무피폭 선량한도를 초과해서는 안 된다. ICRP는 임신 중이거나 유아 육아를 밝힌 여성 종사자에 대해 특별 방호대책을 권고하고 있으므로(소절5.4.1 참조), 비상피폭상황에서 초기 대응 수단의 불가피한 불확실성을 고려할 때 그러한 조건에 있는 여성 종사자를 인명구조나 기타 긴급조치를 위한 초동 대응자로 쓰지 말 것을 권고한다.

(248) 비밀봉 방사성핵종으로 치료를 받은 후 병원에서 퇴원한 환자를 간호하고 위안하는 충분히 이해하는 사람의 경우 정규 선량제한이 완화될 수 있으며, 그런 사람은 일반인에 대한 선량한도 적용 대상이 되지 않는다(제7.6절 참조).

(249) 눈의 수정체나 국부 피부는 유효선량한도만으로는 항상 방호할 수 없기 때문에 유효선량한도 외에 수정체와 피부에 대한 한도가 ICRP 60에 설정되었다. 그 값은 등가선량으로 설정되었다. 이 한도 역시 변경 없이 그대로 유지한다(표6 참조). 그러나 시각장애와 관련되는 눈의 방사선민감성에 대한 새로운 데이터가 도출될 것으로 예상된다.⁸¹⁾ 눈의 수정체에 대한 새로운 데이터가 가용하면 ICRP는 데이터와 수정체 등가선량한도 관점에서 중요성을 검토할 예정이다. 눈의 위험에 이와 같은 불확실성을 고려할 때 눈이 피폭하는 상황에서 최적화가 특히

81) <역주> 체르노빌 정화작업자 추적에서 1 Gy보다 낮은 선량에서 백내장이 발견된다는 보고도 있다. ICRP는 이미 이 문제를 심층 검토하는 작업그룹을 운영 중이다.

중요하다.

(250) 조직에 대한 선량한도는 등가선량으로 표현된다. 그 이유는 결정론적 영향에 관련된 RBE값이 항상 확률론적 영향에 대한 w_R 값보다 작다고 ICRP가 간주하기 때문이다. 그러므로 선량한도가 낮은 LET 방사선에 대한 방호에 못지 않은 방호를 높은 LET 방사선에 대해 제공할 것으로 무리 없이 추론할 수 있다. 따라서 ICRP는 결정론적 영향에 대해 w_R 을 사용하는 것만으로도 충분히 보수적일 것으로 믿고 있다.⁸²⁾ 높은 LET 방사선이 주요 인자가 되고 단일조직(피부와 같은)이 현저히 피폭하는 특별한 상황에서는 피폭을 흡수선량으로 표현하고 적절한 RBE를 고려하는 것이 보다 적절할 수 있다(부록B 참조). 혼동을 방지하기 위하여 RBE 가중 흡수선량이 Gy 단위로 사용되는 경우에는 이를 분명히 밝힐 필요가 있다.⁸³⁾

(251) 선량한도 선택을 위한 ICRP의 다속성 접근법에는 위험의 다양한 속성에 적용되는 사회적 판단을 포함하고 있다. 이러한 판단은 모든 의미에서 반드시 동일할 수는 없으며, 특히 다른 사회에서는 달리 적용될 수도 있다. 이러한 이유 때문에 ICRP는 국가나 지역 상황의 차이를 포괄할 수 있도록 융통성이 충분한 지침을 제공하려고 했다. 그러나 가장 높게 피폭하는 개인에 대한 방호에서 규제당국이 선정하고⁸⁴⁾ 방호최적화 과정에 적용되는 선원중심 선량제약치를 사용함으로써 그러한 차이는 잘 반영될 것으로 ICRP는 본다.⁸⁵⁾

82) <역주> 이러한 설명은 결정론적 영향 또는 조직반응과 직결되는 선량으로는 흡수선량이 더 직접적임을 설명하면서 이 절에서 결정론적 영향 방지를 위한 선량한도로 Sv 단위의 등가선량을 사용하는 이유를 제시하려는 것이다. 그 논리는 등가선량 산출에 사용된 방사선가중치가 확률론적 영향을 기준으로 도출되었고 이 방사선가중치는 결정론적 영향에 대한 RBE보다 늘 크기 때문에 산출된 등가선량 값이 가령 RBE가중 흡수선량보다 크다. 따라서 선량한도를 등가선량으로 설정하면 조직을 보호하는 추가 여유를 확보하게 된다.

83) <역주> 이 구분을 돕기 위해 ICRP도 가령 RBE-Gy와 같은 특별 표기를 고려한 바 있다. 그러나 RBE 자체도 가변적이고, 국제표준기구도 이와 같은 비표준 단위를 남용하는 것을 억제하고 있어 공식적으로 특별 표기를 채택하지는 않았다. 그러나 정보교환에서 혼란을 예방하려면 비표준이더라도 어떤 공통된 표기를 시도하는 것도 의미 있어 보인다. 예를 들어 흡수선량에 중성자 RBE 3.5를 적용한 선량이라면 Gy(n 3.5)처럼 적을 수도 있어 보인다. 참고로 미국 NCRP는 Gy-eq라는 명칭을 사용하기도 한다(NCRP 보고서 153, 2006 참조).

84) <역주> 제257항에서도 설명하듯이 계획피폭에 대한 선량제약치는 운영자가 결정할 수도 있다. 그렇더라도 현실적으로는 규제기관의 검토나 지침이 운영자의 제약치 선정에 영향을 미치므로 규제당국이 선정한다는 표현이 의미 있는 차이를 내는 것은 아니다.

85) <역주> 원론적으로는 선량한도도 사회적 배경을 반영하는 것이 옳으나 최종 울타리인 선량한도에 가변성을 두지 않더라도 그 보다 아래에 있는 선원중심 선량제약치가 사회적 차이를 반영할 수 있다는 설명이다.

5.11. 참고문헌

- ICRP, 1977. Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 26. Ann. ICRP 1(3).
- ICRP, 1983. Cost-benefit analysis in the optimisation of radiation protection. ICRP Publication 37. Ann. ICRP 10(2/3).
- ICRP, 1989. Optimisation and decision-making in radiological protection. ICRP Publication 55. Ann. ICRP 20(1).
- ICRP, 1991b. 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 60. Ann. ICRP 21(1-3).
- ICRP, 1997a. General principles for the radiation protection of workers. ICRP Publication 75. Ann. ICRP 27(1).
- ICRP, 1997d. Radiological protection policy for the disposal of radioactive waste. ICRP Publication 77. Ann. ICRP 27(Suppl).
- ICRP, 1998b. Radiation protection recommendations as applied to the disposal of long-lived solid radioactive waste. ICRP Publication 81. Ann. ICRP 28(4).
- ICRP, 1999a. Protection of the public in situations of prolonged radiation exposure. ICRP Publication 82. Ann. ICRP 29(1-2).
- ICRP, 2000a. Pregnancy and medical radiation. ICRP Publication 84. Ann. ICRP 30(1).
- ICRP, 2001a. Doses to the embryo and embryo/fetus from intakes of radionuclides by the mother. ICRP Publication 88. Ann. ICRP 31(1-3).
- ICRP, 2004c. Doses to infants from ingestion of radionuclides in mothers' milk. ICRP Publication 95. Ann. ICRP 34(3/4).
- ICRP, 2005a. Protecting people against radiation exposure in the event of a radiological attack. ICRP Publication 96. Ann. ICRP 35(1).
- ICRP, 2006a. Assessing dose of the representative person for the purpose of radiation protection of the public and The optimisation of radiological protection: Broadening the process. ICRP Publication 101. Ann. ICRP 36(3).

제6장 ICRP 권고의 이행

(252) 앞장에서는 방사선피폭 관리 결정이 필요한 모든 상황에 적용되는 ICRP 방호체계를 설명했다. 이 장에서는 세 유형의 피폭상황 즉, 계획피폭, 비상 피폭 및 기존피폭 상황에서 체계를 이행하는 방법을 설명한다. 권고 이행이 단순하지 않을 부분에 특별히 주의를 기울였다. 본문에 적시하듯이 많은 영역에 ICRP 추가 지침이 적용된다. 권고에 수록된 방사선방호 기준을 이전 권고인 ICRP 60(ICRP 1991b) 및 파생 간행물의 기준과 비교한 내용이 포함된다. 이장의 마지막 부분에는 주로 사용자와 규제당국 책임인, ICRP 권고 이행에 관한 공통적 측면이 설명된다.

6.1. 계획피폭상황

(253) 계획피폭상황은 피폭 발생 전 방사선방호를 계획할 수 있으며, 피폭 규모와 범위를 무난히 예측할 수 있는 상황을 의미한다. 이 용어 즉, 계획피폭상황은 행위에 대한 ICRP의 이전 권고로 적절하게 관리된 선원과 상황을 포함한다. 계획피폭상황을 받아들일 때 방사선방호에 관련된 모든 측면을 고려해야 한다. 이러한 측면에는 설계, 건설, 운영, 퇴역, 폐기물관리 및 기사용 시설과 부지의 복원이 포함되며, 정상피폭뿐만 아니라 잠재피폭도 고려한다. 계획피폭상황에는 환자, 위안자, 간병인의 의료피폭도 포함된다. 계획상황에 대한 방호원칙은 기존 피폭상황에도 적용되며 비상상황이 수습된 시점부터는 비상피폭상황과 관련하여 계획된 작업에도 적용된다. 의료를 포함한 정상운영 행위에 대한 방호에서는 계획상황에 대한 권고가 ICRP 60(ICRP 1991) 및 후속 간행물 권고와 거의 차이가 없다. 의료피폭은 그 특수한 성격 때문에 제7장에 따로 논의한다.

(254) 모든 피폭범주 즉, 직무피폭(소절6.1.1), 일반인피폭(소절6.1.2) 및 위안자와 간병인이 포함된 환자의 의료피폭(제7장)이 계획피폭상황에서 발생할 수 있다. 계획상황의 설계와 개발은 정상운영 조건에서 벗어나는 상황에서 발생할 수 있는 잠재피폭도 적절히 다룰 수 있어야 한다. 잠재피폭 평가와 방사선원의 안전 및 보안에 관한 현안에도 주의를 기울여야 한다(소절6.1.3).

6.1.1. 직무피폭

(255) ICRP는 종사자 방사선방호를 위한 일반적인 원칙을 이미 권고한 바 있다(ICRP 75; ICRP 1997a). 그 원칙은 현재 유효하다.

(256) ICRP는 선원중심 제약치(소절5.9.1) 미만으로 유지하는 최적화 절차 및 지시형 선량한도(제5.10절)를 사용하여 계획피폭상황에서 직무피폭을 관리할 것을 계속 권고한다. 제약치는 운영을 위한 계획피폭상황의 설계단계에서 규정해야 한다. 계획피폭상황의 여러 종류 작업에 대해, 잘 관리된 운영이 줄 것으로 보는 개인선량 준위에 대한 결론을 이끌어낼 수 있다. 이 정보를 사용해 그러한 유형의 작업에 대한 선량제약치를 규정할 수 있다. 작업은 산업 방사선투과검사, 원자력발전소 일상운영, 또는 의료기관 운영처럼 상당히 광범하게 규정해야 한다. 그러나 특정 활동을 유도하기 위한 제약치를 규정할 수 있는 특별한 상황도 있을 수 있다.⁸⁶⁾

(257) 그러한 선량제약치는 운영자 수준에서 설정하는 것이 일반적으로 적절하다. 선량제약치를 사용할 때 설계자는 제약치가 관련된 선원을 규정함으로써 종사자가 병행 피폭할 수 있는 다른 선원과 혼동을 방지해야 한다. 계획상황에서 직무피폭에 대한 선원중심 선량제약치는 선량한도가 초과되지 않도록 설정해야 한다(제5.10절 참조). 방사선을 피폭하는 종사자 관리에서 얻은 경험은 직무피폭에 대한 제약치 값 선정을 도울 것이다. 이러한 이유 때문에 종합적인 방사선방호 인프라를 운영하는 대규모 기관은 직무피폭에 대한 자체 제약치를 설정하는 경우가 많다. 경험이 부족한 소규모 기관은 관련 전문단체나 규제당국으로부터 이 주제에 관한 추가 지침을 받을 필요도 있을 것이다. 그렇지만 제약치를 설정할 총괄책임은 종사자 피폭에 책임이 있는 기관에 있다.

(258) 여러 고용주와 허가사용자가 책임을 공유하는 성격 때문에 임시 종사자나 순회 종사자에 대해서는 특별히 주의를 기울여야 한다. 때로는 여러 규제당국이 같이 관련되는 경우도 있다.⁸⁷⁾ 그러한 종사자에는 운영자 직원이 아닌 원자력발전소 정비운영 계약업체 직원 및 비파괴검사 종사자가 포함된다. 이들의 방호를 위해 그러한 종사자의 이전 피폭을 적합하게 고려하여 선량한도를 준수하

86) <역주> 예를 들면 원전에서 일상적이지 않은 특별한 보수작업을 위한 한시적 특별 선량제약을 설정하여 관리할 수 있다.

87) <역주> 특히 유럽에서는 여러 나라를 이동하면서 원자력발전소 보수나 비파괴검사에 종사하는 종사자들이 있다.

고 피폭을 추적할 수 있도록 관리해야 한다. 따라서 순회 종사자의 고용주와 계약을 체결한 시설 운영자 사이에 적절한 협력관계를 유지해야 한다. 규제당국은 이러한 관점에서 규정이 적절한지 확인해야 한다.⁸⁸⁾

6.1.2. 일반인피폭

(259) ICRP는 선원중심 제약치(제5.7절) 미만에서 최적화 절차 및 선량한도 적용으로 계획피폭상황에서 일반인피폭을 관리할 것을 계속 권고한다. 특히 일반인피폭의 경우 일반적으로 선원 하나가 많은 사람에게 선량을 분포시키기 때문에 보다 높은 준위 피폭자를 대표하는 **대표인** Representative Person 개념을 사용한다(ICRP 2006a). 계획피폭상황에서 일반인에 대한 제약치는 일반인 선량한도보다 낮아야 하며, 주로 각국 규제당국이 설정할 것이다.

(260) 폐기물처분으로부터 발생하는 일반인피폭 관리를 위해 ICRP는 앞서 연간 약 0.3 mSv 미만의 선량제한치 값이 일반인에 적합하다고 권고한 바 있다(ICRP 1998a). ICRP 81(ICRP 1998a)에서 장수명 방사성폐기물의 계획 처분을 위해 그 권고를 발전시킨 바 있다.

(261) ICRP 82(ICRP 1999a)에서 ICRP는 환경에 장수명 방사성핵종을 계획 배출하는 상황에서 계획평가는 피폭의 모든 합리적 조합과 누적을 고려할 때 환경 축적이 제약치를 초과하는 결과를 초래할지 여부를 고려해야 한다는 지침을 냈다. 그러한 확인이 불가능하거나 크게 불확실한 경우 장수명 인공 방사성핵종에 기인한 선량의 장기간 성분에 대해 연간 0.1 mSv 자릿수 정도의 선량제한치를 적용하는 것이 신중할 것이다. 천연방사성물질에 관련된 계획피폭상황에서는 이 제한은 실현 가능성이 없을 뿐 아니라 필요하지도 않다(ICRP 1999a).⁸⁹⁾ 이러한 권고는 계속 유효하다. 계속되는 행위에서 발생해 누적되는 연간 선량 때문에 미래에 선량한도가 초과되는 일을 방지하기 위해 **선량예탁**을 사용할 수 있다

88) <역주> 이 문제는 허가제도가 방사선 피폭원(시설이나 물질) 중심으로 되어 있는 우리나라에서 어려움이 되고 있다. 예를 들어 많은 수의 원전 보수작업자는 보수전문기관 직원인데 허가는 원전 운영자에게만 발급되어 있어 원론적으로 규제기관이 보수업체 종사자 피폭을 직접 규제할 수 없다. 현행 제도는 허가사용자인 원전 운영자로 하여금 계약업체 종사자 피폭을 관리하도록 간접적으로 규제하고 있으나 어떠한 경우에도 종사자 보호책임은 1차적으로 그 고용주에게 있음을 고려하면 합리적 제도는 아니다. 피폭원 사용자만 규제대상으로 할 것이 아니라 직원에게 직무상피폭을 받게 하는 고용주도 규제대상으로 포함하는 방안을 고려할 필요가 있다.

89) <역주> 가령 석탄의 연소로 대기 중으로 방출하는 C-14로 인한 일반인의 선량이 연간 0.1 mSv를 넘는다고 이에 대해 조치를 취할 방법이 없다. 즉, 이러한 문제는 이 권고에서 다루는 방사선방호의 범위 밖의 문제가 된다.

(ICRP 1991b, IAEA 2000b). 선량예탁은 방출을 유발하는 1년간 계획된 활동과 같은 단일 사건에 의해 궁극적으로 발생할 수 있는 총 선량이다. 과거 채광이나 정광 활동과 같은 장수명 천연방사성핵종과 관련된 특별한 상황에는 어느 정도 융통성이 필요할 수도 있다(ICRP 82의 제2.3절 및 소절5.2.2, ICRP 1999b 참조).

6.1.3. 잠재피폭⁹⁰⁾

(262) 계획피폭상황에서 일정 준위의 피폭이 발생할 것으로 당연히 예상된다. 그러나 계획 운영절차 이탈, 방사선원 제어 상실을 포함하는 사고, 그리고 악의적 사태로부터 보다 높은 피폭이 발생할 수 있다. 비록 선원은 계획된 것이지만⁹¹⁾ 그러한 높은 피폭 발생은 계획한 것이 아니다. 이러한 피폭을 ICRP는 **잠재 피폭**이라고 부른다. 계획 운영절차를 벗어난 상황과 사고는 예견할 수 있고 발생 확률을 추정할 수 있지만 상세하게 예측할 수는 없다. 방사선원이 제어되지 않거나 악의적 사태가 발생하는 경우는 예측이 더 어려우며, 따라서 다른 접근법이 요구된다.

(263) 정상 계획 운영에서 발생하는 피폭과 잠재피폭과 사이에는 보통 상호작용이 있다. 예를 들어 정상운영 중 발생하는 피폭의 감축을 위한 조치 때문에 잠재피폭 발생 확률이 커질 수 있다. 장수명 폐기물을 처리하지 않고 보관함으로써 배출로 발생하는 피폭은 줄일 수 있지만 잠재피폭은 증가한다. 잠재피폭을 관리하려면 어떤 조사나 유지보수 활동을 수행해야 하는데 이러한 활동은 정상 피폭을 증가시킬 수 있다.

(264) 잠재피폭은 계획피폭상황을 받아들이는 계획단계에서 검토해야 한다. 피폭의 잠재력에 따라 그러한 사건 발생확률을 줄이고, 사건이 발생한 경우 피폭을 제한(완화)하기 위한 조치가 뒤따를 수 있음에 유의해야 한다(ICRP 1991b, 1997b). 정당화와 최적화 원칙의 적용에서 잠재피폭을 확실히 검토해야 한다.

90) <역주> 잠재피폭은 실질 피폭이 아니므로 계획피폭상황을 다루는 절에 배치하는 것은 적합하지 않으나 현행 권고에서는 계획피폭상황을 그러한 피폭을 초래하는 선원(또는 과거 개념으로 행위)을 포함하는 것으로 보고 있기 때문에 여기에 포함하고 있다. 그러나 전술한 이유로 역자는 이러한 접근에 적절하지 않다는 의견을 갖고 있다.

91) <역주> 원문은 상황이 계획된 것으로 표현하고 있으나 잠재피폭은 상황으로 간주하기 어려워 선원이 계획된 것으로 표현을 수정했다.

(265) 잠재피폭에는 포괄적으로 다음과 같은 세 종류 문제가 포함된다.

- 잠재피폭이 주로 계획피폭 대상인 사람들에게 영향을 미치는 사태: 일반적으로 사람 수는 적으며 해당 위해는 직접 피폭하는 개인의 보건위험이다. 그러한 피폭이 발생하는 과정은 상대적으로 단순한데, 예를 들어 조사실에 안전조치 없이 출입할 우려이다. 그러한 상황에서 잠재피폭 방호에 관한 지침을 ICRP 76(ICRP 1997b)에 제공한 바 있는데 그 지침은 계속 유효하다. 의학 분야에서 사고에 관한 추가 예들을 제7.6절에서 논의한다.
- 잠재피폭이 많은 사람에게 영향을 주고 보건위험뿐만 아니라 토지오염이나 식품 소비통제와 같은 다른 위해도 초래하는 사태: 관련 메커니즘이 복잡하며 그 예는 원자로 중대사고 또는 방사성물질의 악의적 사용 우려이다. ICRP는 그러한 유형의 사건에 대한 방호의 개념적 기틀을 ICRP 64(ICRP 1993a)에 제시한 바 있으며 그 개념적 기틀은 계속 유효하다. ICRP는 악의적 사태 이후의 방사선방호에 관한 추가 지침을 ICRP 96(ICRP 2005a)에 제공했다.
- 예를 들어 심지층처분장의 고체폐기물 경우처럼 잠재피폭이 먼 장래에 발생할 수 있으며 피폭이 장기간 발생할 수 있는 사태: 먼 미래에 발생할 피폭에는 불확실성이 상당히 높다. 따라서 평가된 선량을 몇 백 년을 넘는 미래 시간에서 보건위해 적도로 간주하면 안 되며, 처분시스템이 제공하는 방호 지표로 간주해야 한다. ICRP 81(ICRP 1998a)에 장수명 고체 방사성폐기물의 처분을 위한 구체적 지침을 제시했는데 그 지침은 계속 유효하다.

잠재피폭의 평가

(266) 방호수단의 계획이나 판단을 위한 잠재피폭 평가는 일반적으로 a) 피폭을 발생시키는 사건경위를 전형적으로 나타내는 시나리오 구축, b) 각 경위에 대한 발생확률 평가, c) 결과 선량 평가, d) 선량에 따르는 위해 평가, e) 위해 결과와 소정 용인기준과의 비교, f) 위 단계를 몇 번 반복할 수도 있는 방호최적화 과정을 기반으로 한다.

(267) 시나리오 구축과 분석의 원칙은 잘 알려져 있으며 공학에서 자주 사용된다. 그 적용은 ICRP 76(ICRP 1997b)에서 논의했다. 잠재피폭 용인성을 판단할 때는 피폭 발생 확률과 그 규모를 모두 고려해야 한다. 이 두 요소를 따로 고려하여 의사를 결정할 수 있는 상황도 있다. 다른 여건에서는 유효선량보다 개인의 방사선 기인 사망확률을 고려하는 것도 유용하다(ICRP 1997b). 이 목적으로는 1년에 선량을 받을 확률과 선량이 발생한 조건부로 그 선량에서 방사선 기인 사망 생애확률의 곱으로 확률을 정의한다. 이 확률을 위험제약치와 비교할 수 있고, 확률이 위험제약치 미만일 경우 용인할 수 있다. ICRP 81(ICRP 1998c)의

장수명 고체방사성폐기물 처분에 대한 ICRP 권고에서 이들 두 접근법을 논의하고 있다.

(268) 위험제약치는 선량제약치와 마찬가지로 선원중심이며, 원론적으로는 같은 선원의 선량제약치가 시사하는 보건위험과 같아야 한다. 그러나 불안정한 상황과 결과 선량의 확률 추정에는 큰 불확실성이 존재한다. 따라서 위험제약치의 통상 값을 사용해도 충분한 경우가 많다. 종사자의 경우 특정 운영에 대한 구체적인 연구보다는 정상 직무피폭에 대한 일반화에 근거를 둘 수 있다. ICRP 선량제한체계를 적용하고 방호를 최적화할 경우 평균적 개인의 연간 직무 유효선량은 일부 선정된 운영의 경우 약 5 mSv 정도이다(UNSCEAR 2000). 따라서 종사자의 잠재피폭에 대해 ICRP는 5 mSv의 연간 평균 직무선량에 해당하는 치명적 암 확률과 유사한, 연간 2×10^{-4} 의 일반 위험제약치(ICRP 1997b)를 계속 권고한다. 마찬가지로 일반인 잠재피폭의 경우에도 연간 1×10^{-5} 인 위험제약치를 ICRP는 계속 권고한다.

(269) 확률 평가의 사용은 발생 가능성이 낮은 사건을 예견할 수 있는 정도에 의해 제한을 받는다. 매우 넓은 스펙트럼을 갖는 초기사건의 확대로 사고가 발생하는 상황에서는 발생 가능성이 낮은 모든 초기사건의 존재를 예측함에 큰 불확실성이 따르므로 전체 확률의 모든 평가치에 주의를 기울여야 한다. 대부분 경우 발생확률과 결과 선량을 분리하여 검토함으로써 의사결정 목적을 위한 정보를 더 많이 파악할 수 있다.

(270) 대규모 원자력시설의 경우 사고 방지와 완화를 위한 설계 기반으로서 선정된 잠재피폭 시나리오에 대해 선량기준을 규제기관이 설정할 수 있다. 이 경우 잠재피폭에 적용되는 선량기준은 사고 확률을 고려해 위험제약치로부터 도출해야 한다.⁹²⁾

방사선원의 안전과 보안 및 악의적 사태

(271) 계획피폭상황과 관련된 잠재피폭은 방사선원에 대한 제어 상실로 발생할 수 있다. 이러한 상황은 최근 몇 년 동안 점점 주목을 받아 왔고 ICRP도 특별히 고려하고 있다. ICRP 권고는 적절한 방사선방호의 전제조건으로서 방사선원은 적절한 보안조치의 대상이 되어야한다고 본다(ICRP 1991b). 모든 계획피폭

92) <역주> 예를 들어 원전 설계기준 냉각재상실사고에 대해 제한값으로 유효선량 250 mSv를 설정하고 있는 것은 표5의 제약치 범위(최대 100 mSv) 밖에 있듯이 선량으로서 의미보다 위험제약치에 위험계수를 적용하여 도출된 값으로 이해해야 한다.

상황에서 방사선피폭 관리는 환경보다는 선원을 제어함으로써 이행된다. 이러한 ICRP 견해가 국제기본안전기준(BSS)에 반영되어, BSS는 어떤 상황에서도 선원 관리가 상실되어서는 안 된다고 요구한다(IAEA 1996a). BSS는 도난이나 손상을 방지할 수 있도록 선원 보안을 요구한다. 또한 “방사능선원의 안전성 및 보안에 관한 이행준칙(IAEA 2004)”은 방사능선원⁹³⁾의 보안에 적용할 원칙을 제시한다. 방사선원에 대한 전세계적 관리 강화를 ICRP는 지지한다.

(272) 방사능선원 보안은 선원 안전성 확보를 위한 충분조건은 아니지만 필요 조건이다. 예를 들어 선원의 악의적 사용 방지처럼 적절한 관리를 통해 방사능선원 보안을 유지할 수 있지만, 안전한 것은 아니어서 사고가 날 수도 있다. 따라서 ICRP는 그동안 보안 측면을 방호체계에 포함시켜 왔다(ICRP 1991b). 안전 관점에서 보안대책은 물질, 장치 또는 설비에 대해 분실, 접근, 무단 소유나 양도 및 사용의 방지에 필요한 일반적 관리로 한정된다.⁹⁴⁾ 방사성물질 관리와 방사선 장비나 설비에 접근 통제를 보장하는 수단은 안전 유지에 필수적이다.

(273) 1990년 ICRP 권고에서는 테러나 기타 악의적 행위로부터 방호하는 수단에 대해 구체적으로 주의를 기울이지는 않았다. 그러나 방사선 안전은 그러한 시나리오 잠재성도 포함해야 한다는 사실이 명백해지고 있다. 우발적인 선원 보안 실패에 대한 과거 경험 또는 방사선 위협에 무지한 사람이 폐기되었거나 방기된 선원을 발견한 경험은, 예를 들어 공공 지역에 방사성물질을 고의적으로 살포하는 것처럼 의도적으로 해를 입히기 위해 방사성물질을 사용했을 때 어떤 일이 일어날 것인가를 적시하고 있다. 그러한 사태는 사람들을 방사선에 노출시키고, 심각한 환경오염을 초래할 수 있는 잠재력이 있으며, 따라서 특별한 방사선방호 대책을 요구한다(ICRP 2005a).

6.2. 비상피폭상황

(274) 잠재피폭의 확률과 결과를 최소화하기 위해 설계단계에서 모든 합리적

93) <역주> 원문 용어는 ‘radioactive source’로서 직역하면 ‘방사성선원’이 되겠지만 우리말로 방사성선원은 X선장치와 같은 발생장치도 포함하는 것으로 이해될 가능성이 높다. 따라서 방사성 물질 선원에 한정됨을 더 명확히 표현하기 위해 새로 ‘방사능선원’이란 용어의 사용을 시도한다.

94) <역주> 보안대책이 핵물질방호에서처럼 공격, 탈취, 사보타주와 같은 사건까지 포함한 강도 높은 보안을 요구하는 것은 아니라는 의미이다. 그러나 9/11사태 이후 방사능테러에 악용될 수 있는 주요 방사성물질에 대해서는 보안수준을 강화하려는 노력이 이미 국제적으로 진행 중이다.

인 조치를 취할 경우에도 그러한 피폭에 대한 비상 대비 및 대응 검토가 필요할 수 있다. 비상피폭상황은 예상하지 않은 상황으로서, 긴급 방호조치가 필요할 수 있으며, 상당기간 방호조치를 이행할 필요가 있을 수도 있다. 이러한 상황에서는 일반인이나 종사자 피폭 및 환경오염이 발생할 수 있다. 피폭이 독립적인 경로에서 동시에 발생할 수 있다는 점에서 상당히 복잡해질 수 있다. 또한 방사능 위험 요소에 다른 위험요소(화학적 위험, 물리적 위험 등)가 동반될 수도 있다. 고려되는 시설과 상황에 따라 보다 정밀하게 또는 간략하게 가능한 잠재피폭⁹⁵⁾이 미리 평가될 수 있으므로 그에 대한 대응조치가 계획되어야 한다. 그러나 실제 비상피폭상황은 본질적으로 예측하기 어려우므로, 필요한 방호수단의 정확한 성격도 미리 알 수 없어 실제 여건에 맞춰 융통성 있게 전개되어야 한다. 이러한 상황의 복잡성과 가변성은 ICRP가 권고에서 특별히 취급할만한 고유 특성을 형성한다.

(275) ICRP는 방사선 비상상황의 경우 개입을 계획하기 위한 일반원칙을 ICRP 60과 63에 설정했다(ICRP 1991b, 1993a). 관련된 추가 지침이 ICRP 86, 96, 97 및 98(ICRP 2000c, 2005a, 2005b, 2005c)에 수록되어 있다. 일반원칙과 추가 지침은 계속 유효하지만, ICRP는 이제 비상상황 대응에 대해 최근 개발된 내용과 이전 지침 간행 후 축적된 경험을 바탕으로 방호수단 적용에 관한 지침을 확장한다.

(276) 이제 ICRP는 비상피폭상황에 적용할 방호전략의 정당화와 최적화의 중요성을 강조하며, 최적화 과정이 참조준위에 의해 안내되기를 강조한다(제5.9절 참조). 독립적이고 동시적이며 시간에 따라 변하는 복수 피폭경로의 가능성 때문에 방호수단을 개발하고 이행할 때 모든 경로에서 발생할 수 있는 전체 피폭에 집중하는 것이 중요하다. 그래서 방사선학적 상황의 평가와 다양한 방호수단 이행을 일반적으로 포함하는 포괄적 방호전략이 필요하다. 비상피폭상황이 지역에 따라 다른 영향을 미칠 수 있기 때문에 장소에 따라, 또 비상피폭상황이 진전되기 때문에 시간에 따라 방호수단이 달라질 수 있다. 비상피폭상황의 결과로서 방호조치를 취하지 않을 때 발생할 것으로 예상되는 전체 피폭을 **전망선량**projected dose이라고 하며,⁹⁶⁾ 방호전략이 이행되는 경우 남는 선량을 **잔여선량**residual dose

95) <역주> 원문은 잠재피폭상황으로 적고 있으나 잠재피폭이 '상황'인지 의문이 있어 수정했다.

96) <역주> 'projected dose'를 쉽게 번역하여 '예측선량'으로 적을 경우 보편적 용어에 특정 의미를 부여함으로써 혼동을 초래할 우려가 있다. 따라서 용어를 특화시켜 구별이 용이하도록 하기 위해 잘 사용하지 않는 '전망선량'이란 용어를 채택했다.

여기서 방호조치를 취하지 않을 때라는 것은 방호전략에서 고려하는 여러 방호조치 모두가 취해지지 않은 경우가 될 수도 있다. 과거 개입 기반 접근에서는 개별 방호조치마다 선량 감축분과 부담을 비교하여 선택했으나 이제 종합 잔여선량이 참조준위 아래서 최적화되도록 방호조치를

이라고 한다. 나아가 각개 방호조치로 피폭을 어느 정도 절감할 수 있는데 이 선량을 **회피선량**(averted dose)이라고 하며, 이는 ICRP 63(ICRP 1992)에 주어진 것처럼 전체 방호전략을 구성하는 개별 방호수단의 최적화를 위한 개념이다.⁹⁷⁾ 이제 ICRP는 개별 수단보다 전체 전략에 대한 최적화에 집중할 것을 권고한다. 그러나 ICRP 63에 권고한 개별 방호수단에 대한 방호최적화를 위한 회피선량 준위는 전반적 대응을 개발하기 위한 입력으로서 여전히 유용하다(ICRP 96; ICRP 2005a 참조).

(277) 비상피폭상황의 경우 짧은 시간에 선량이 높은 준위에 도달할 수 있으므로 심각한 결정론적 보건영향 방지에 특별한 주의를 기울여야 한다. 또한, 대형 비상상황의 경우 보건영향에 기초한 평가가 불충분할 수 있으며, 따라서 사회적, 경제적 및 기타 측면의 영향을 충분히 고려해야 한다. 다른 중요한 목표 하나는 '정상'으로 간주되는 사회적, 경제적 활동 재개가 가능한 범위까지 대비하는 것이다.

(278) 비상상황에 대한 계획에서 참조준위를 최적화 과정에 적용해야 한다. 비상상황에서 최고 계획 잔여선량에 대한 참조준위는 소절5.9.3에 설명한 것처럼 전형적으로 20 mSv부터 100 mSv 선량⁹⁸⁾ 밴드에 포함된다. 전체적인 방호 전략에 대한 예상 잔여선량은 전략의 적합성에 대한 초기 평가에서 참조준위와 비교된다. 참조준위 미만으로 잔여선량을 낮추지 못하는 방호전략은 계획단계에서 배제해야 한다.

(279) 비상피폭상황이 발생하여 실제 여건이 긴급한 조치를 필요로 할 경우 자동으로 이행될 조치들을 계획에서 준비해야 한다. 그러한 즉각적 조치를 결정한 후 예상 잔여선량 분포를 평가할 수 있으며, 방호전략의 효율성 및 추가조치를 취하거나 수정할 필요성 평가에 참조준위가 벤치마크 역할을 한다. 참조준위를 초과하는 피폭은 물론 미달하는 피폭도 방호최적화의 대상이 되어야 하며, 참조준위를 초과하는 피폭에는 특별한 주의를 기울여야 한다.

선택하는 접근으로 수정했기 때문이다. 다만, 아래의 회피선량은 과거처럼 개별 방호조치에 대해 평가할 수 있다.

97) <역주> 개별 방호조치에 대해서는 전망선량-잔여선량=회피선량으로 볼 수 있다. 그러나 전망선량과 잔여선량은 단일 방호조치가 아니라 일련의 방호조치 전체에 대해서도 사용하는 용어이므로 위와 같은 단순한 뺄셈이 항상 적용되는 것은 아님에 주의가 필요하다.

98) <역주> 원문은 'projected dose'로 적고 있으나 이 용어는 방호조치가 없을 때 예상되는 선량으로 특별한 의미를 가지므로 적절하지 않아 단순히 '선량'으로 적었다.

(280) 특정 비상피폭상황에 대한 방호전략을 작성할 때 고유의 방호수단이 각각 필요한 다양한 인구집단이 파악될 수 있다. 예를 들어 비상피폭상황의 발생지(시설이나 비상 현장)와 거리는 고려해야 할 피폭 크기 확인에 중요하고, 이에 따른 방호조치의 유형과 긴급성 확인에도 중요할 수 있다. 방호조치의 계획은 피폭하는 집단의 다양성을 고려해 ICRP 101(ICRP 2006a)에서 설명한 것처럼, 확인한 다양한 집단에서 선택된 대표인의 피폭에 기초해야 한다. 비상상황 발생 후 모든 피폭 집단의 실제 조건을 잘 다룰 수 있도록 계획 방호조치가 개발되어야 한다. 임신 여성과 어린이에게 특별한 주의를 기울여야 한다.

(281) 비상계획은 모든 가능한 시나리오를 감당할 수 있도록 개발해야 한다(필요한 경우 상세하게). 비상계획(국가, 지방 또는 특정시설) 개발은 평가, 계획, 자원 할당, 훈련, 연습, 감사 및 개정을 포함하는 다단계 반복 과정이다. 방사선 비상대응계획은 종합위해 비상관리 프로그램⁹⁹⁾에 포함되어야 한다.

(282) 비상피폭상황이 발생할 경우 첫째 이슈는 그 발생을 확인하는 것이다. 초동대응은 일관성을 가지고, 그러나 융통성 있게 비상계획을 실행하는 것이다. 초기에 이행되는 방호전략은 계획단계의 일환으로 수행한 일반적 최적화에 기초하여 해당 사건 시나리오에 따라 비상계획에 기술한 것일 것이다. 일단 비상계획의 방호수단이 개시되면 비상대응은 검토, 계획, 집행의 반복 순환으로 이루어질 수 있다.

(283) 비상대응은 정보가 거의 없는 상황에서 시작되어 시간이 지남에 따라 잠재적으로 정보가 방대한 상황으로 발전하며, 피해를 받는 사람들의 방호 기대와 참여 역시 시간에 따라 빠르게 증가하는 과정일 수밖에 없다. ICRP 96(ICRP 2005a)에서 논의한 것처럼 비상피폭상황의 세 단계 즉, 초기단계(정보 및 방출 단계로 구분할 수 있음), 중간단계(방출 종료와 방출원에 대한 제어의 회복부터 시작) 및 후기단계를 고려해야 한다. 모든 단계에서 의사결정권자는 필연적으로

99) 'all-hazard emergency management program'으로서 여러 위해요소가 병행될 수 있음을 가 정하여 총체적이고 체계적으로 재해를 관리하는 개념이다. 아직 국내에는 이러한 체계가 정착되 지 않아 다소 생소할 수 있다. 그러나 이 권고는 현재 우리 방사선비상대책의 주무관청이 교육 과학기술부로 규정되어 있음이 부적절함을 시사하고 있다. 종합위해관리 관점에서는 원자력이나 방사선 재난도 재난관리청이 주무관청이 되고 교육과학기술부는 기술적 지원을 담당하는 체계로 발전시켜야 한다. 예를 들어 도심에 폭탄테러가 있었다고 가정할 때 그것이 단순 폭발물인지 방 사능이나 생물무기인지 처음에는 알 수 없다. 이때 종합위해관리 체계가 없다면 일관된 지휘체 계 없이 개별 부처(예: 교육과학기술부, 보건복지부, 국립보건원 등)가 각자 소관 재난대응계획 을 발동해야 할 것이다.

다양한 인자 중 특히 향후 영향, 방호수단의 효과, 직간접적 피해자들의 우려와 관련된 상황을 충분히 이해할 수 없다. 따라서 영향에 대한 정기적인 검토를 통해 효과적인 대응을 융통성 있게 발전시켜야 한다. 참조준위가 이러한 검토에 중요한 입력을 제공하는데, 상황에 관해 확인한 내용과 이행한 수단으로 실현한 방호를 비교할 수 있는 벤치마크를 제공한다. 비상상황으로부터 발생하는 장기적 오염의 관리는 기존피폭상황으로 취급된다(제6.3절 참조).

6.3. 기존피폭상황

(284) 기존피폭상황은 제어를 위한 의사결정 시점에 이미 존재하는 피폭상황을 의미한다. 방사선 방호조치가 필요하거나 그러한 조치를 검토할 정도로 높은 피폭을 발생시킬 수 있는 기존피폭상황에는 다양한 유형이 있다. 주택이나 작업장 라돈과 천연방사성물질(NORM)이 잘 알려진 예이다. ICRP 방호체계를 따르지 않았던 운영에 의한 방사능 방출로 인한 환경 잔류물 또는 사고나 방사능사태¹⁰⁰⁾에 기인한 오염 토지와 같은 기존의 인위적 피폭상황에 관련된 방사선방호 의사결정이 필요할 수도 있다. 피폭 감축조치가 타당하지 않은 기존피폭상황도 있다. 관리 불가능한 기존피폭 성분을 결정하려면 선원이나 피폭의 제어 가능성 및 주요한 경제, 사회 및 문화적 여건에 따른 규제당국의 판단이 필요하다. 방사선원의 배제와 면제에 관한 원칙은 제3.3절에서 설명했다.

(285) 기존피폭상황에는 여러 피폭경로가 관련될 수 있고, 아주 낮은 선량에서부터, 드문 경우이긴 하지만 수십 밀리시버트에 이르기까지 광범한 연간 개인 선량 분포를 갖기 때문에 복잡할 수 있다. 그러한 상황은 예를 들어 라돈처럼 종종 주택이 관련되며, 많은 경우 피폭자 행동이 피폭 준위를 결정한다. 다른 예는 장기간 오염지역의 개인피폭 분포인데 영향을 받는 거주자의 식습관 차이가 직접 반영된다. 피폭경로의 다중성과 개인 행동의 중요성 때문에 관리가 어려운 피폭상황이 발생할 수 있다.

(286) 개인선량으로 설정된 참조준위를 기존피폭상황에서 피폭 최적화 과정과 연계해 사용할 것을 ICRP는 권고한다. 그 목표는 최적화된 방호전략 또는 점진적 범위의 전략을 이행함으로써 개인선량을 참조준위 미만으로 낮추는 것이다. 그러나 참조준위 미만의 피폭을 무시하면 안 되며, 이러한 피폭상황도 평가

100) <역주> 현행 권고에서 “방사능사태radiological event”는 주로 악의적 방사능 공격을 의미한다.

해 방호가 최적화되었는지, 또는 방호수단이 추가로 필요한지 여부를 확인해야 한다. 최적화 과정의 종점을 미리 확정하면 안 되며, 최적화된 방호수준은 상황에 따라 결정된다. 주어진 상황의 관리를 위해 이행되는 참조준위의 법적 위상을 결정하는 것은 규제당국의 책임이다. 소급적으로는 방호조치를 이행한 경우 방호 전략 효과를 평가하기 위해 참조준위를 벤치마크로서 사용할 수도 있다. 기존 상황에서 참조준위를 사용하는 방법을 그림4에 예시하였는데 최적화 과정의 결과로 시간에 따른 개인선량 분포의 변화를 보이고 있다.

(287) 기존피폭상황에 대한 참조준위는 소절5.9.2과 소절5.9.3 및 표5에 설명한 것처럼 일반적으로 예측선량이 1~20 mSv인 밴드에 설정해야 한다. 피폭상황에 관한 일반적 정보와 선량 감축 방법을 관련 개인에게 제공해야 한다. 개인 생활습관이 피폭의 핵심 요인인 상황에서는 교육훈련과 함께 개인감시나 평가가 중요한 요건일 수 있다. 원자력사고나 방사능 사태 후 오염 토지에서 생활하는 것이 그러한 대표적 상황이다.

(288) 기존피폭상황에 대한 참조준위 설정에 고려해야 할 주요 인자는 상황제어 가능성 및 과거 유사상황 관리 경험이다. 대부분 기존피폭상황에서 피폭자와 당국은 피폭준위를 '정상'으로 간주되는 상황에 근접하거나 유사한 준위로 낮추기를 원한다. 예를 들어 NORM 잔류물과 사고로 인한 오염과 같이 인간 활동에서 발생한 물질로부터 피폭하는 상황에서는 특히 그러하다.

6.3.1. 주택과 작업장의 실내 라돈

(289) 주택과 작업장에서 라돈 피폭은 기존피폭상황 또는 예를 들어 모나자이트 모래 저장이나 처리와 같은 행위로부터 발생할 수 있다. ICRP는 이미 라돈 피폭과 관련한 구체적 권고를 낸 바 있다(ICRP 1993b). 이후, 여러 역학연구 결과 비교적 심각하지 않은 농도에서도 라돈-222 피폭의 위험을 확인했다(UNSCEAR 2008). 유럽과 북미 및 중국의 거주지 사례대조연구 결과에서도 폐암 위험과 주택 라돈-222 피폭 사이에 상당한 연관성이 입증되었다(Darby 등 2006, Krewski 등 2006, Lubin 2004). 이들 연구는 라돈 방호에 대한 ICRP 권고 근거를 일반적으로 지지한다.

(290) 이제 광부에 대한 역학연구와 주택 라돈 사례대조연구에서 밝혀진 위험 평가치 사이에 상당한 일관성이 있다. 광부연구가 라돈 피폭의 위험 평가와 선량 반응관계에 대한 수정인자 영향의 조사에 강력한 근거를 제공하는 반면, 최근 수

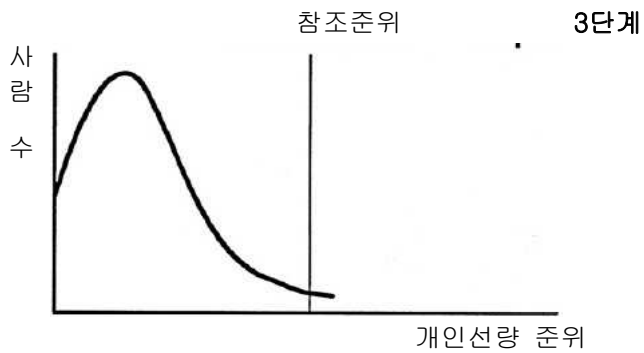
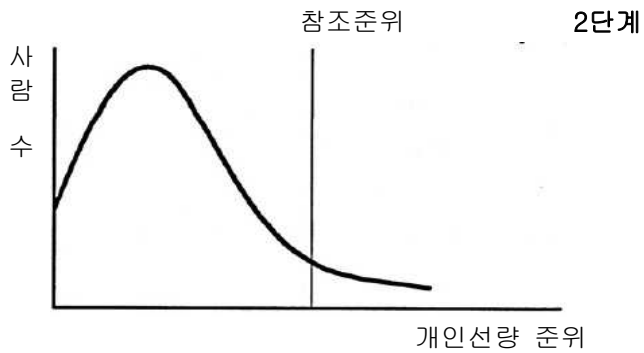
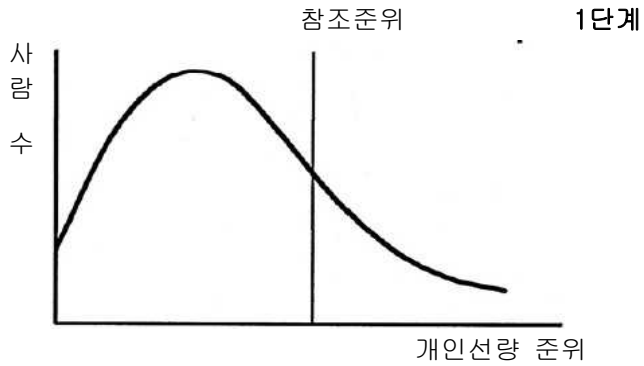


그림4. 기존피폭상황에서 참조준위 사용과 최적화 과정의 결과 시간에 따른 개인선량 분포의 개선.

행한 주택연구 병합 결과는 이제 광부연구 결과를 외삽할 필요 없이 가정에서 사람들의 위험을 직접 평가할 수 있는 수단을 제공한다(UNSCEAR 2008).

(291) 라돈 위험평가에 대한 ICRP 견해는 지금까지는 광부에 대한 역학연구를 반영해야 한다는 것이었다. 이제 가정 라돈피폭 데이터가 풍부하게 확보되어 있으므로, ICRP는 가정 라돈피폭의 위험평가에 주택에 대한 라돈-222 병합 사례대조연구를 포함시킬 것을 권고한다. 그러나 선량반응관계, 흡연 교란효과, 다른 작용제 피폭을 연구하는 데 광부 역학연구는 여전히 상당히 유용하다. 현재까지 밝혀진 역학적 근거에 따르면 라돈-222(붕괴핵종 포함) 피폭에서 폐암 이외 위험은 작은 것으로 보인다.

(292) 라돈에 관한 ICRP 권고에서 바탕 주제는 피폭의 관리 가능성이다. 피폭을 관리할 수 있는 능력에 따라 지하광산을 포함해 어떤 작업장에서 라돈피폭이 ICRP 방호체계 대상이 되어야 하며, 주택에서 라돈피폭을 제한하기 위한 조치를 고려해야 하는지를 구별하게 된다. 라돈-222를 이렇게 별도 방법으로 취급해야 하는 이유가 몇 가지 있다. 라돈 피폭경로가 다른 천연 선원 경로와 다르며, 라돈-222 고유의 선량계측과 역학적 현안이 있다. 대부분 사람들에게 라돈-222는 원칙적으로 관리할 수 있는 중요한 피폭원이다. ICRP는 '가정과 직장에서 라돈-222 방호'에 관한 권고를 이미 ICRP 65(ICRP 1993b)에 발표했다. 여기서 제 공한 정책이 널리 근거가 되고 있으며 현행 권고에도 대체로 계승되지만, 현행 권고에는 최적화 원칙과 참조준위 사용이 중심 역할을 하는 피폭상황 기반의 새로운 접근법이 채택된다.

(293) ICRP 65(ICRP 1993b)에서 정책은 피폭감축을 위한 조치가 거의 확실하게 필요한 준위로 라돈-222로부터 유효선량 연간 10 mSv를 설정하는 것으로부터 출발한다. 규제당국들이 일반적 방호최적화를 적용할 것을 예상하면 조치를 취하는 준위는 보다 낮아서 3~10 mSv 범위에 있게 될 것이다. 이 유효선량을 선량환산함의¹⁰¹⁾에 따라 라돈-222 농도 값으로 환산했으며, 그 값은 해당 장소에서 보내는 시간이 다르기 때문에 가정과 직장에서 달라졌다. 주택의 경우 라돈 농도 범위는 200-600Bq m⁻³인 반면, 직장의 농도는 500-1500Bq m⁻³이다. 최적화 결과는 그 수준을 초과하면 선량 감축조치가 필요한 조치준위¹⁰²⁾를 설정하게 된다.

101) <역주> 라돈피폭이 경우 흡입한 라돈(실체로는 그 자손핵종)으로 인한 선량을 물리적으로 산출하는 모델이 완전하지 않아 역학적 위험평가 결과와 괴리가 있다. 따라서 라돈 피폭을 선량으로 환산하는 데는 역학연구에서 평가된 위험에 해당하는 유효선량(또는 폐 등가선량) 값을 부여하는 접근을 채택하고 있는데 이렇게 도출된 환산계수를 '협정환산계수'라 부르고 이러한 절차를 선량환산협정dose conversion convention이라 부른다.

102) <역주> 조치준위action level은 최적화 결과로부터 설정되며 그 이상이면 감축조치를 시행하도록 설정하는 준위이고, 참조준위는 최적화의 제약조건으로 사용되는 준위이다.

(294) 이제 ICRP는 라돈피폭 관리를 위해 선원중심 방사선방호 원칙을 적용할 것을 권고한다. 따라서 국가 당국은 방호최적화를 돕도록 국가 참조준위를 설정해야 한다. Sv 당 명목위험이 약간 변경되었지만 ICRP는 연속성과 실용성을 위해 ICRP 65에 규정한 것과 같이 개인선량 참조준위 상한 값으로 10 mSv, 그리고 이에 해당하는 방사능 농도를 유지한다. 즉, 방사능 농도로 표현되는 참조준위 상한 값은 작업장¹⁰³⁾에서는 1500 Bq m⁻³로, 가정에서는 600 Bq m⁻³로 유지된다(표7).¹⁰⁴⁾

(295) 다른 선원과 마찬가지로, 현재의 경제사회적 상황을 고려해 국가 참조준위를 결정한 다음 방호의 최적화 과정을 적용하는 것은 해당 국가 당국의 책임이다. 국가 차원에서 설정하는 참조준위 미만으로, 그리고 방호가 최적화된 것으로 간주할 수 있는 준위까지 가정과 직장의 라돈-222 피폭을 낮추기 위한 모든 합리적 노력을 기울여야 한다. 조치는 라돈 피폭을 괄목하게 줄이는 것을 목표로 해야 한다. 라돈 농도를 국가 참조준위 바로 아래까지만 낮추는 목적으로 하는 사소한 방법으로는 불충분하다.

표7. 라돈-222 참조준위[†]

상황	참조준위 상한 값: 방사능 농도
주택	600 Bq m ⁻³
작업장	1500 Bq m ⁻³

[†]붕괴사슬 머리 또는 초기 방사성핵종의 방사능.

(296) 최적화 과정의 이행은 방사능 농도를 국가 참조준위 미만으로 만들 것이다. 그러면 방사능농도 준위가 낮은 수준으로 유지되는지 가끔 방사능 농도를 감시하는 이외의 추가 조치는 일반적으로 필요하지 않을 것이다. 그러나 국가 당국은 라돈피폭에 대한 국가 참조준위 값을 정기적으로 검토해 적절한 수준으로

103) <역주> 작업장에 대해 참조준위를 제시한 것은 과거 ICRP 65의 내용을 옮겨옴에 따른 잘못이다. 표4에서 보듯이 현행 권고의 피폭상황 중심체계 접근에서는 기존피폭상황에 해당하는 직무피폭은 없다. 직무피폭이 없으면 직장에서 참조준위도 설정할 이유가 없다. 직무피폭에 대해서는 참조준위가 아니라 선량제약치와 선량한도가 관리를 위한 기준이 된다.

104) <역주> 최근 주택에서 라돈 피폭에 대한 역학연구 자료가 갱신됨에 따라 선량환산합의를 수정(선량이 증가됨)해야 한다는 이슈도 제기되어 있다. 그러나 현 시점에서는 최종 정책이 확정되지 않았다.

유지되고 있는지 확인해야 한다.

(297) 가정이나 기타 장소에서 라돈에 대한 조치 책임은 종종 소유자 개인에게 있는데 이 사람들은 상세한 최적화를 수행하지 못할 것으로 보인다. 따라서 규제당국은 참조준위 이외에도 그 아래서는 라돈-222에 대한 방호가 최적화된 것으로 볼 수 있는 준위 즉, 추가 조치가 필요하지 않을 것으로 간주되는 준위를 정할 수 있다. ICRP는 실내 라돈농도가 전국의 전형적 농도보다 높을 것으로 예상되는, ‘라돈 유의지역radon-prone area’을 정의하는 것이 유리하다고 여전히 본다. 그러면 라돈이 가장 높게 나타나고 조치가 가장 효과적인 데에 조치를 집중할 수 있게 된다(ICRP 1993b).

(298) 국가 참조준위 이상 수준의 직장에서 라돈피폭은 직무피폭의 일부로 간주되어야 하며, 반면 그 미만인 수준에서는 그렇게 간주하지 않아야 한다.¹⁰⁵⁾ 직업안전 표준에 대한 국제적 조화를 위해 단일 조치준위 값 1000 Bq m^{-3} 이 BSS에서 수립되었다(IAEA 1996). 마찬가지로 이유로 ICRP는 국제적으로 수립된 이 값을 현재 용어로 참조준위로¹⁰⁶⁾ 보고 라돈 피폭상황에 대한 직장 방호요건의 개시점을 정하는 데 세계적으로 사용함이 마땅하다고 생각한다.¹⁰⁷⁾ 실제로 이 국제 준위는 매우 필요한 ‘세계적으로 조화된 감시와 기록유지 시스템’ 역할을 수행한다. 이는 언제 직무상 방사선방호 요건이 적용되는지, 즉 무엇이 규제관리 체계에 실제로 포함되는지를 결정하는 데 적절하다. 이 근거에서 BSS는 라돈과 토론 자손의 섭취와 피폭에 대한 한도를 결정한다(IAEA 1996의 표II-1 참조).

105) <역주> 참조준위란 최적화 과정에 지표(제약)가 되는 준위인데 그것을 초과하면 직무피폭에 포함하고 그 아래서는 포함하지 않는다는 것은 이해하기 어렵다. 여기에는 또 직무피폭에 대해서는 참조준위 자체가 규정되지 않는다는 사실(표4 참조)과 상충문제도 있다. 역사서문에서 토론했듯이 이 문제에 대해서는 역자도 혼란스럽다.

106) <역주> 전술한 바와 같이 기존피폭상황에 대해 직무피폭 참조준위를 권고하는 것은 적절하지 않다. 이 항에서 설명하는 것처럼 특정 준위 이상에서는 직무피폭으로 간주하여 관리하고 그 준위 이하는 직무피폭으로 간주하지 않는다면 그 준위는 참조준위라기 보다 일종의 ‘면제준위’ 개념이다. 여기 제안된 1000 Bq/m^3 를 선량으로 환산하면 연간 약 6.7 mSv 인데 이보다 낮으면 직무피폭으로 취급하지 않는 것은 다른 피폭원과 비교할 때 형평에 의문이 제기된다. 물론 어디나 상당한 수준으로 존재하는 라돈이라는 특수성이 반영된 것이지만 그렇다면 최적화를 위한 참조준위 문제가 아니라 관리 필요성(또는 합당성) 판단에 따른 면제가 더 적당한 개념이 될 것이다.

107) <역주> 방사선방호를 위한 궁극적 참조가 되는 ICRP 기본권고에서 이러한 표현을 사용함에 대해서는 역자는 다소 불만을 지닌다. 비록 BSS가 IAEA, WHO, ILO 등 여러 국제기구가 연합으로 수립한 방호표준이지만 흔히 설명되는 것처럼 BSS는 ICRP 권고를 바탕으로 구축되는 문서이다. 그럼에도 BSS가 규정하고 있고 그것이 국제적으로 합의된 것이니 ICRP도 따라간다는 것은 말과 마차가 바뀐 느낌을 주기 때문이다. ICRP가 정책과 원론을 정리하여 제시하는 것이 바람직하다.

6.4. 비상피폭상황과 기존피폭상황에서 배태아의 방호

(299) ICRP 82(ICRP 1999a)에서 출생 전 피폭은 특별 방호사례가 아니며, 일반인에 대한 방호조치 이외의 조치는 필요하지 않다고 결론을 내렸다. 배태아 또는 유아의 방호는 소절5.4.1에서 논의했다. ICRP 82(ICRP 1999a)에서 ICRP는 태내피폭에 관한 현실적 권고를 제시했다. 어머니의 방사성핵종 섭취로 인한 배태아의 선량계수는 ICRP 88(ICRP 2001a)에 제공했다. ICRP 90(ICRP 2003a)에서 ICRP는 낮은 선량(최고 수십 mSv)에서 태내 위험에 관한 새로운 정보가 ICRP 60, 82, 84 및 88(ICRP 1991b, 1999a, 2000a, 2001a)에 수록된 조언을 지지한다는 결론을 내렸다. 이 현안에 대한 ICRP 입장은 유지된다.

6.5. 방사선방호 기준의 비교

(300) 표8에 현행 권고의 방호기준 값을 ICRP 60(ICRP 1991b) 및 과생 간행물에 수록된 이전 권고가 제공한 값과 비교했다. 계획피폭상황에 대해서는 현행 권고가 이전 권고와 기본적으로 동일함을 비교 결과로 알 수 있다. 기존피폭상황과 비상피폭상황의 경우 현행 권고가 일반적으로 이전의 값을 모두 포괄하지만 적용 범위가 확대된다. 인용된 값의 양이 다른 경우도 있다. 예를 들어 비상피폭상황에서 ICRP 60(ICRP 1991b) 기준은 회피선량(개입준위)으로 규정되는 반면, 현행 권고 기준은 잔여선량(참조준위)으로 규정된다. 이러한 차이는 표8에 적시하고 있다.

6.6. 실제 이행

(301) 이 절에서는 세 유형 피폭상황에 공통으로 적용되는 인자를 다루는 ICRP 권고의 일반적 이행을 설명하는데, 주로 ICRP 권고 이행에 도움이 되는 조직 특성에 집중한다. 조직 구조는 국가마다 다르기 때문에 이 장은 세부보다는 개략적인 설명만 제공한다. 국제원자력기구(IAEA)와 OECD 원자력국(NEA)은 회원국의 다양한 상황에서 방사선방호에 요구되는 추가 조언을 제공한다(IAEA1996a, 2000a, 2002 및 NEA 2005 참조). 직장에서 보건이나 안전과 관련하여 조직에 적용되는 일반지침은 국제노동기구(ILO), 세계보건기구(WHO) 및 범미보건기구(PAHO)가 제공한다.

표8. 1990년 및 2007년 권고의 방호기준 비교(괄호 안 수는 ICRP 간행물 번호를 나타낸다.)

피폭의 범주 (간행물)	1990년 권고 및 후속 간행물	현행 권고
계획피폭상황		
		개인 선량한도^a
복구 운영(96)을 포함한 직무피폭(60, 68, 75)	지정 5년간 평균 연간 20mSv ^c	지정 5년간 평균 연간20mSv ^c
- 눈 수정체	150 mSv/y ^b	150 mSv/y ^b
- 피부	500 mSv/y ^b	500 mSv/y ^b
- 손과 발	500 mSv/y ^b	500 mSv/y ^b
- 임신여성, 잔여 임신기간	복부 표면에 2 mSv 또는 방사성핵종 섭취로 1 mSv	배태아에 대해 1 mSv
일반인피폭(60)	연간 1 mSv	연간 1 mSv
- 눈 수정체	15 mSv/y ^b	15 mSv/y ^b
- 피부	50 mSv/y ^b	50 mSv/y ^b
		선량제약치^a
직무피폭(60)	연간 20 mSv 이하	연간 20 mSv 이하
일반인피폭(77, 81, 82)		
- 일반	...	상황에 따라 연간 1 mSv 미만으로 선택
- 방사능 폐기물 처분	연간 0.3 mSv 이하	연간 0.3 mSv 이하
- 장수명 폐기물 처분	연간 0.3 mSv 이하	연간 0.3 mSv 이하
- 장기간 피폭	연간 <~1 & ~0.3 mSv 이하 ^f	연간 <~1 & ~0.3 mSv 이하 ^f
- 장수명 핵종의 장기간 성분	연간 0.1 mSv 이하 ^h	연간 0.1 mSv 이하 ^h
의료피폭(62, 94, 98)		
- 사회적 편익이 다음과 같은 경우 의생명연구 자원자		
- 사소	0.1 mSv 미만	0.1 mSv 미만
- 중간	0.1 - 1 mSv	0.1 - 1 mSv
- 보통	1 - 10 mSv	1 - 10 mSv
- 막대	10 mSv 초과	10 mSv 초과
- 위안자 및 간병인	치료건 당 5 mSv	치료건 당 5 mSv

(다음 페이지 계속)

표8 (계속)

피폭의 범주 (간행물)	1990년도 권고 및 후속 간행물	현행 권고
비상피폭상황		
	개입준위 ^{a,d,g}	참조준위 ^{a,g}
직무피폭(60, 96)		
- 인명구조(충분이해 자원자)	선량 제한 없음 ⁱ	다른 사람의 편익이 구조자 위험을 초과할 경우 선량 제한 없음 ^k
- 기타 비상 구조운영	~500 mSv; ~5 Sv(피부) ⁱ	1000 또는 500 mSv ^k
- 기타 구조운영	...	100 mSv 이하 ^l
일반인피폭(63, 96)		
- 식품	연간 10 mSv ^l	
- 안정 옥소 배포	50-500 mSv(갑상선) ^{b, l}	
- 대피	2일에 5- 50 mSv ^l	
- 일시 소개	1주에 50-500 mSv ^l	
- 영구 이주	첫해에 100 mSv 또는 1000 mSv ^d	
- 총괄 방호전략의 모든 대응방법 조합	...	계획에서, 전형적으로 연간 20~100 mSv 사이(상황별)
기존피폭상황		
	조치준위 ^a	참조준위 ^{a, m}
라돈(65)		
- 가정	연간 3-10 mSv (가정: 200-600 Bq m ⁻³)	연간 10 mSv 미만 (가정: 600 Bq m ⁻³ 미만)
- 직장	연간 3-10 mSv (직장: 500-1500 Bq m ⁻³)	연간 10 mSv 미만 (직장: 1500 Bq m ⁻³ 미만)
	기본 참조준위 ^e	참조준위 ^{c, m}
NORM, 자연 백그라운드 방사선, 사람 거주환경의 방사능 잔류물(82)		
개입:		
- 정당화되지 않음	연간 ~ 10 mSv 미만	상황에 따라 연간
- 정당화 가능	연간 ~ 10 mSv를 초과	1과 20 mSv 사이
- 거의 모든 경우 정당	연간 100 mSv까지	(소절5.9.2절 참조)
a 따로 명시 없으면 유효선량. b 등가선량.		
c 어느 한 해에 유효선량이 50 mSv 이하라는 추가 규정. 임신여성 직무피폭에는 추가 제한 적용. 방사성핵종 섭취에 적용할 경우 선량은 예탁유효선량이다.		
d 회피선량.		
e 제5.9절 및 제6.2절 참조.		
f 선량제약치는 1 mSv 미만이어야 하며, 약 0.3 mSv를 초과하지 않는 값이 적합하다.		
g 개입준위는 특정 대응책의 회피선량을 의미한다. 개입준위는 방호전략을 계획할 때 개별 대응책의 최적화에 참조 준위의 보조로 유용하게 사용될 수 있다. 선량 값은 잔여선량을 의미한다.		
h 어떤 선량 조합 상황에서도 준수성을 보장할 수 있는 선량평가 방법이 없을 경우 고려.		
i ICRP 60(ICRP 1991b).		
k ICRP 96(ICRP 2005a). 1000 mSv 이하 유효선량은 심각한 결정론적 영향을 피해야 하며, 500 mSv 이하는 다른 결정론적 영향을 피해야 한다.		
l ICRP 63(ICRP 1992).		
m 개별 방호조치로부터 회피선량을 가리키는 기존 권고의 개입준위와는 반대로 참조준위는 잔여선량이며 방호전략 평가에 사용된다.		

6.6.1. 방사선 방호 및 안전을 위한 기반구조

(302) 적절한 방호표준을 유지하기 위해서는 기반구조infrastructure가 요구되는데, 이 기반구조에는 최소한 법률체계, 규제당국, 전리방사선에 관련된 사업(장치와 시설의 설계, 운영 및 퇴역, 그리고 항공운항과 우주비행을 포함한 자연 방사선의 후천적 증가 포함)의 경영진 및 그러한 사업 종업원이 포함된다. 방호와 안전을 담당하는 조직과 담당자도 포함될 수 있다.

(303) 법률체계에서는 필요에 따라 전리방사선 관계 사업의 규제와, 방호와 안전을 위한 분명한 책임 부과를 규정해야 한다. 규제당국은 방사선 관련 사업에 대해 필요한 규제 관리 및 규제 집행에 책임이 있다. 규제당국은 방사선피폭을 발생시키는 활동을 수행하거나 촉진하는 조직과는 분명히 구별되어야 한다.

(304) 방사선 해독의 성격상 법률체계에 다양한 특수성이 필요하며, 규제당국은 전문지식이 있어야 한다. 방사선학적 관련 의문을 제대로 설명하고, 적절한 전문지식을 이용할 수 있고¹⁰⁸⁾, 방사선 안전에 관련된 의사결정이 경제 또는 방사선 외적고려 때문에 부당한 영향을 받으면 안 된다는 것이 중요한 현안이다.

(305) 방사선피폭에 대해 만족스러운 관리를 달성하고 유지하는 일차적 책임은 피폭을 발생시키는 운영을 수행하는 기관의 경영진에게 있다. 장치나 공장을 다른 기관이 설계하거나 공급하는 경우, 공급 및 설계 기관은 차례로 공급 품목이 의도대로 사용될 때 만족스러운가를 살필 책임이 있다. 정부는 국가 규제당국을 설치할 책임이 있으며, 이 당국은 경영진 책임을 강조하기 위한 그리고 종종 자문까지 할 수 있는 규제체계를 갖춰야 하며, 동시에 전반적 방호표준을 설정하고 집행해야 한다. 또한 많은 천연 선원에 의한 피폭처럼 관련 경영 주체가 없는 경우 당국이 직접적 책임을 질 수도 있다.

(306) 해당 경영진이 없을 수 있는 이유는 여럿 있다. 예를 들어 인간 활동이 야기하지 않은 방사선이 있을 수 있으며, 활동이 방기되었거나 소유주를 확인할 수 없는 경우도 있다. 그러한 경우 국가 규제당국이나 지정기관이 일반적으로는 소관 경영진이 질 책임 일부를 담당해야 할 것이다.

108) <역주> 전문지식이 반드시 규제당국 내에 있어야 한다는 의미는 아니며 적절한 방법으로 그러한 전문가를 활용할 수 있는 시스템이 있어야 한다는 의미로 해석한다.

(307) 모든 조직에서 수행할 직무 내용의 복잡성에 따라 책임과 함께 관련 권한이 위임된다. 이러한 위임의 성패는 정기적으로 검토되어야 한다. 그러나 조직의 경영진은 적절한 방사선방호 대책에 대해 계속 책임을 지며, 임무와 책임의 위임 때문에 그러한 책임이 면제되는 것은 아니다. 각 조직의 최고위층까지 이어지는 명백한 책임소재 계선이 있어야 한다. 여러 조직 사이에 상호작용도 있다. 조언과 규제를 하는 당국은 제공한 조언과 부과한 요건에 대해 책임을 분명히 할 수 있어야 한다.

(308) 요건, 운영 지침, 규제 승인과 허가, 기타 행정적 수단 자체만으로는 방사선방호에 적합한 표준 달성에 불충분하다. 개인 종사자, 그 대표자 나아가 고위 경영진에 이르기까지 활동에 참여하는 모든 사람은 방호와 비상상태 예방을 일상 활동의 필수 부분으로 간주해야 한다. 조직의 기본 기능 성패가 중요한 것 못지않게 방호와 예방의 성패도 중요하다.

(309) 일반적 표현으로 요건을 부과하고 조언을 수용하는 것으로서 운영조직의 의무와 책임이 경감되는 것은 아니다. 이점은 어떻게 방호표준을 유지하는지 규제당국이 상세하게 지시하는 지시적 요건 원칙에서도 마찬가지이다. 그러나 운영과 관련된 지시적 요건은 현실적으로 의무와 책임의 일부를 사용자로부터 규제당국으로 이전한다. 지시적 요건은 장기적으로는 자체 개선을 위한 사용자의 동기를 저하시킨다. 따라서 사용자에게 보다 명확한 의무를 부과하고, 적절한 방호 방법과 표준을 사용하고 유지함에 대해 사용자가 규제당국을 확신시킬 수 있도록 하는 규제체도를 채택하는 것이 일반적으로 더 낫다.¹⁰⁹⁾

(310) 그러므로 지시형 요건의 적용은 항상 세심하게 정당화되어야 한다. 어떤 경우에도 방호최적화 과정에 대한 대안으로 간주하면 안 된다. 공장이나 그 운영의 특성을 막론하고, 선량한도의 임의 분율을 설계나 운영의 한도 또는 목표로 설정하는 것으로 만족스럽지 않다.¹¹⁰⁾

109) <역주> 규정이 “이것은 해야 한다.” 또는 “저것은 하면 안 된다.”와 같이 구체적으로 지시하는 요건(지시형 요건)을 부과했고, 사용자가 그것을 따랐기 때문에 문제가 발생했다고 해서 사업자의 방호책임이 면제되는 것은 아니다. 다만, 그러한 규정을 만들고 시행한 규제기관이 일부 책임을 공유할 뿐이다. 지시형 요건은 장기적 방호 발전에 저해요소가 되므로 가능하면 목표와 책임을 분명히 제시하는 ‘목표형 요건’을 운용하는 것이 바람직하다. 지시형 규정은 후진국형이다. 그런데 현행 국내 규제요건은 대체로 지시형이므로 법규체계 개선방안을 검토할 필요가 있다. 전적으로 목표형에 의존하기는 어렵지만 지시형 요건을 최소화하는 것이 중요하다.

110) <역주> 선량한도의 일부, 예를 들어 연간 개인선량 12 mSv(60%)를 운영 한도로 정해두고 이것만 만족하면 된다는 접근은 곤란하며 항상 최적화를 고려해야 함을 의미한다. 즉, 선량제약치를 운용할 때 1차적으로 이를 만족하고 그 아래에서는 최적화가 역할을 해야 한다는 앞의 권고

6.6.2. 외부 전문지식과 자문 및 권한 위임

(311) 전리방사선과 관련된 사업의 방사선방호와 방사선안전에 관한 일차적 책임은 운영조직에 있다. 조직에 방사선방호 전문지식이 있어야 이러한 책임을 완수할 수 있다. 이러한 전문지식이 운영조직 내에 있어야 한다고 요구하는 것이 항상 필요하거나 합리적인 것은 아니다. 특히 운영조직이 소규모이며 방사선방호의 복잡성이 높지 않은 경우, 대안으로서 운영조직이 컨설턴트나 자문조직을 사용하는 것이 허용되며, 권장된다.

(312) 그러한 방책이 어떤 방법으로든 운영조직에게 그 책임을 해지하는 것은 아니다. 컨설턴트나 자문조직의 역할은 필요한 경우 정보와 자문을 제공하는 것이다. 그러한 자문을 기초로 의사결정과 조치를 수행하는 것은 운영조직의 책임이며, 개별 종업원은 안전한 운영을 위해 합리적으로 할 수 있는 모두를 다했는가를 스스로 계속 묻는 '안전문화(safety culture)'를 신봉할 필요가 있다.

(313) 마찬가지로 규제당국이 컨설턴트나 자문기관을 사용한다 하더라도 그 책임이 소멸되거나 변경되는 것은 아니다. 규제당국이 컨설턴트를 고용할 경우 컨설턴트는 이해관계가 없어야 하며, 공정한 자문을 제공해야 한다는 것이 특히 중요하다. 의사결정에 투명성을 유지할 필요성에 유념해야 한다.

6.6.3. 사건 보고

(314) 비상상황 방지에 있어 사고와 사건을 보고하고 사용자들에게 과급하는 일상과정이 필수불가결하다. 그러한 시스템을 운영하고 목표를 달성하려면 상호 신뢰가 필요하다. 허가는 사용자에 대한 규제당국의 신뢰에 대한 공식적 확인이다. 운영조직도 규제당국을 신뢰할 수 있어야 한다. 일차적 요건은 모든 사용자를 공정하고 동등하게 취급해야 한다는 것이다. 상황을 해결하기 위한 즉각적인 조치와 함께 문제에 대한 정직한 보고는 처벌할 것이 아니라 장려해야 한다.

6.6.4. 경영관리 요건

(315) ICRP 권고를 이행하는 첫 실제 단계이면서 가장 중요한 단계는 설계부터 퇴역까지 모든 운영에 관련된 모든 사람이 안전중심 마음가짐을 확립하는 것

를 따르는 것이 옳은 접근법이다.

이다. 이러한 목표는 훈련에 대한 충분한 책무와 함께, 안전은 개인의 책임이며 최고경영자의 주요 관심사라는 인식에 의해서만 달성될 수 있다.

(316) 안전에 대한 조직의 명백한 책무가 최고위 경영진의 서면 정책성명, 방사선방호를 담당하는 공식 관리구조 설치, 분명한 운영지침서 발행, 작업장과 환경의 방사선방호에 직접 책임을 지는 담당자에 대한 명확하고 가시적인 지원에 의해 표명될 수 있도록 해야 한다(ICRP 75, ICRP 1997a). 이러한 책무를 유효한 조치로 전환하기 위해서는 고위 경영진은 적절한 설계와 운영기준을 확인하고, 조직의 준비를 결정하며, 그러한 정책이 집행되도록 분명한 책임을 부과하고, 조직의 모든 구성원이 정상 또는 잠재 방사선 피폭을 제한하는 중요성을 인식하는 문화를 확립해야 한다.

(317) 사고와 비상상황에 대처할 수 있는 계획이 있어야 한다. 이러한 계획은 주기적으로 검토하고 연습해야 하며, 서면 경영관리 요건으로 이어져야 한다. 비상상황 사태에 대한 계획은 정상 운영절차의 일부가 되어야 한다. 예를 들어 통상 명령계통에서 비상관리자에게로 이관과 같은 책임의 모든 이관은 사전에 계획되어야 한다. 지득한 교훈을 이행하기 위한 요건과 장치를 확립해야 한다.

(318) 조직의 접근에는 모든 종사자의 관여와 참여가 포함되어야 한다. 참여는 모든 종업원이 보건안전 노력에 책임을 지고 충분히 이해하고 기여할 수 있게 하는 역량 강화와 효과적인 의사소통에 의해 달성될 수 있다. 보건안전 관리를 지원하는 문화의 개발과 유지에는 고위 경영진의 가시적이고 능동적인 지도력이 필요하다. 목표는 단순히 사고방지가 아니라 직원이 작업을 안전하게 수행하도록 동기와 권한을 부여하는 것이다. 종사자가 방사선 방호 문제에 대한 피드백을 제공하고, 선량을 가능한 낮게 유지할 수 있는 방법 개발에 충분히 참여할 수 있는 메커니즘이 운영되고 있는지 경영진이 확인하는 것이 중요하다.

(319) 다른 하나의 공통적 경영진 책임은 방호와 보건을 취급하는 직업보건부서 또는 방호부서¹¹¹⁾에게 접근로를 제공하는 것이다. 방호부서는 전문가 자문을 제공하고, 운영이나 잠재적 위험요인의 복잡성에 적합한 감시대책을 준비해야 한

111) <역주> 원문은 ‘protection service’라는 용어를 사용하고 있는데 방사선방호 실무 조직이 기관의 규모와 업무량에 따라 차이가 클 수 있기 때문에 가령 ‘실’이나 ‘과’, ‘팀’과 같은 조직 단위 명칭을 부여하기 곤란하기 때문이다. 원자력발전소와 같이 큰 조직에서는 ‘부’ 정도 규모를 가질 수 있지만 작업 사업소에서는 1명이 방호업무를 담당할 수도 있다. 나아가 이러한 업무를 외부 기관에 위탁할 수도 있음을 감안한 용어의 선택이다. ‘service’가 ‘국’이나 ‘과’ 등 넓은 의미를 가지지만 여기서는 특정 조직단위 명칭 대신 ‘부서’로 표기했다.

다. 방호부서장은 고위 운영관리진과 직접 상대할 수 있어야 한다. 직업보건부서의 주요 역할은 다른 직업에서 그 역할과 동일하다.

6.6.5. 방호기준의 준수

(320) 방사선량 측정이나 평가는 방사선방호 관행에 기본적인이다. 조직 등가선량이나 유효선량은 직접 측정할 수 없다. 이러한 양의 값은 일반적으로 환경, 신진대사 및 선량계측 요소가 관련된 모델을 사용해 추론해야 한다. 이러한 모델과 그 변수 선택 값은 추론 결과가 '최선 평가치'로 설명될 수 있도록 실질적이어야 한다. 가능한 한 평가치와 그에 대한 논의에는 필연적인 결과의 불확실성이 포함되어야 한다(제4.4절 참조).

(321) 방사선방호에 관련된 모든 조직에게는 자체 목표와 절차의 준수를 확인할 의무가 있다. 경영진은 재정 감사와 유사한 기능으로 조직 구조와 절차를 검토하는 체계를 확립해야 한다. 국가 당국도 유사한 내부 감사를 수행해야 하며, 운영 경영진이 달성하는 방호 수준과 규제규정 준수 정도를 평가하기 위한 부가의 의무와 권한을 가져야 한다. 이러한 모든 확인 절차에는 안전대책 확인을 통해 잠재피폭에 대한 고려도 포함되어야 한다. 확인 절차에는 품질보증 프로그램 검토와 적절한 형태의 검사가 포함되어야 한다. 그러나 검사는 표본검사의 형태로서 모든 결과를 검사할 수는 없다. 수검자가 자체 질서를 수립하고 유지하도록 설득하는 것이 가장 좋은 기법이다.

6.7. 참고문헌

Darby, S., Hill, D., Deo, H., et al., 2006. Residential radon and lung cancer -detailed results of a collaborative analysis of individual data on 7148 persons with lung cancer and 14,208 persons without lung cancer from 13 epidemiologic studies in Europe. Scand. J. Work Environ. Health 32 (Suppl. 1), 1-84.

IAEA, 1996. International Basic Safety Standards for Protection against Ionizing Radiation and for the Safety of Radiation Sources. Safety Series 115. STI/PUB/996. International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria.

IAEA, 2000a. Legal and Governmental Infrastructure for Nuclear, Radiation, Radioactive Waste and Transport Safety. Safety

- Requirements; Safety Standards GS-R-1.STI/PUB/1093. International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria.
- IAEA, 2000b. Regulatory Control of Radioactive Discharges to the Environment. Safety Guide WS-G-2.3. STI/PUB/1088. International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria.
- IAEA, 2002. Preparedness and Response for a Nuclear or Radiological Emergency, Safety Requirements, Safety Standards Series No. GS-R-2. STI/PUB/1133. International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria.
- IAEA, 2004. Code of Conduct on the Safety and Security of Radioactive Sources. International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria.
- ICRP, 1991b. 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 60, Ann. ICRP 21(1-3).
- ICRP, 1991c. Radiological protection in biomedical research. ICRP Publication 62. Ann. ICRP 22(3).
- ICRP, 1992. Principles for intervention for protection of the public in a radiological emergency. ICRP Publication 63. Ann. ICRP 22(4).
- ICRP, 1993a. Protection from potential exposure: a conceptual framework. ICRP Publication 64. Ann. ICRP 23(1).
- ICRP, 1993b. Protection against radon-222 at home and at work. ICRP Publication 65. Ann. ICRP 23(2).
- ICRP, 1994b. Dose coefficients for intakes of radionuclides by workers. ICRP Publication 68. Ann. ICRP 24(4).
- ICRP, 1997a. General principles for the radiation protection of workers. ICRP Publication 75, Ann. ICRP 27(1).
- ICRP, 1997b. Protection from potential exposures: application to selected radiation sources. ICRP Publication 76. Ann. ICRP 27(2).
- ICRP, 1997d. Radiological protection policy for the disposal of radioactive waste. ICRP Publication 77. Ann. ICRP 27(Suppl).
- ICRP, 1998b. Radiation protection recommendations as applied to the disposal of long-lived solid radioactive waste. ICRP Publication 81. Ann. ICRP 28(4).
- ICRP, 1999a. Protection of the public in situations of prolonged radiation exposure. ICRP Publication 82. Ann. ICRP 29(1-2).
- ICRP, 2000c. Prevention of accidental exposures to patients undergoing radiation therapy. ICRP Publication 86. Ann. ICRP 30(3).

- ICRP, 2001a. Doses to the embryo and embryo/fetus from intakes of radionuclides by the mother. ICRP Publication 88. Ann. ICRP 31(1-3).
- ICRP, 2003a. Biological effects after prenatal irradiation (embryo and fetus). ICRP Publication 90. Ann. ICRP 33(1/2).
- ICRP, 2004b. Release of patients after therapy with unsealed sources. ICRP Publication 94. Ann. ICRP 34(2).
- ICRP, 2005a. Protecting people against radiation exposure in the event of a radiological attack. ICRP Publication 96. Ann. ICRP 35(1).
- ICRP, 2005b. Prevention of high-dose-rate brachytherapy accidents. ICRP Publication 97. Ann. ICRP 35(2).
- ICRP, 2005c. Radiation safety aspects of brachytherapy for prostate cancer using permanently implanted sources. ICRP Publication 98. Ann. ICRP 35(3).
- ICRP, 2006a. Assessing dose of the representative person for the purpose of radiation protection of the public and The optimisation of radiological protection: Broadening the process. ICRP Publication 101. Ann. ICRP 36(3).
- Krewski, D., Lubin, J.H., Zielinski, J.M., et al., 2006. A combined analysis of North American case control studies of residential radon and lung cancer. *J. Toxicol. Environ. Health Part A* 69, 533-597.
- Lubin, J.H., Wang, Z.Y., Boice Jr., J.D., et al., 2004. Risk of lung cancer and residential radon in China: pooled results of two studies. *Int. J. Cancer* 109(1), 132-137.
- NEA, 2005. Nuclear Regulatory Decision Making. Nuclear Energy Agency, Organisation for Economic Co-operation and Development, Paris, France.
- UNSCEAR, 2000. Sources and Effects of Ionizing Radiation. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation Report to the General Assembly with Scientific Annexes. Vol. II: Effects. United Nations, New York, NY.
- UNSCEAR, 2008. Effects of Ionizing Radiation. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation Report to the General Assembly with Scientific Annexes. United Nations, New York, NY.

제7장

환자, 위안자와 간병인 및 의생명연구 자원자의 의료피폭

(322) 의료피폭은 주로 진단검사, 중재방사선 절차 및 방사선치료를 받는 개인(환자)이 받는 선량이다. 환자를 간병하고 위안하는 사람도 방사선에 피폭할 수 있다. 이러한 사람에는 진단절차 중 아동을 붙들거나 핵의약품 처치 후 또는 근접치료 중 환자에게 접근할 수 있는 부모, 가족이나 가까운 친지가 포함된다. 퇴원한 환자에 의해 일반인도 피폭하지만, 그 피폭 정도는 대부분 경우 매우 낮다. 의생명연구 자원자도 환자에게 사용하는 절차와 유사한 방사선피폭이 있는 의료절차를 수행하는 경우가 많다. 환자 의료피폭이란 이러한 모든 유형의 피폭을 의미한다. 이 장에서는 다루는 내용은 다음을 포괄한다.

- 진단, 중재방사선 및 치료 목적을 위한 개인의 피폭으로서 태내 배태아, 모유 수유하는 환자의 유아 피폭을 포함한다.
- 병원이나 자택에서 진단이나 치료를 받는 환자를 돕고 간병하는 가족이나 친지와 같은 사람이 피폭을 예상하면서 기꺼이 받는 피폭(직무피폭 제외¹¹²⁾).
- 직접적 이익이 없는 의생명연구 프로그램에 대상으로 참여하는 자원자가 받는 피폭.

(323) 의료 환자의 방사선피폭에는 다른 계획피폭상황에서 방사선방호와는 다른 접근법이 요구된다. 노출이 의도적이고 직접적으로 환자에게 유익한 것이다. 방사선치료에서도 높은 선량 방사선의 생물학적 영향(예: 세포 사멸)을 이용하여 암이나 기타 질병을 치료하므로 환자에게 유익하다. 따라서 방사선의 의료 사용에 대한 ICRP 권고의 적용에는 별도 지침이 필요하여 환자의 의료피폭을 이 장에서 따로 다룬다.

112) <역주> 개인이든 회사에 소속되든 급여를 받는 간병인이 이러한 피폭을 한다면 이는 일종의 의료피폭이 아니라 직무피폭으로 보아야 마땅하다. 그러나 아직 국내 규정은 이러한 피폭을 관리하는 체계를 구축하지 못하고 있다. 개인 간병인(1인 회사로 간주됨)은 물론 간병인 인력을 운영하는 회사를 현행 원자력법규 규정으로 파악할 수 없으므로 허가사용자인 병원을 통해 간접적으로 최소한의 관리(예: 정보의 제공과 개인선량계 지급)할 수 있는 제도라도 구축할 필요가 있다고 본다. 그러나 직업적 간병인이 피폭할 수 있는 경우는 매우 드문 것으로 예상된다.

(324) 권고의 적용이란 진단 및 중재방사선 절차에서는 불필요한 피폭을 방지함을 의미하고, 방사선치료에서는 치료할 부위에 필요한 선량을 조사하는 동시에 건강한 조직의 불필요한 피폭을 방지하는 것이다.

(325) 목표는 의료절차의 정당화와 그 의료 목적에 적합한 방호최적화이다. 의료에서 방사선 방호와 안전에 관한 ICRP 권고는 아직 유효한 ICRP 73(ICRP 1996a)에 수록되어 있다. 이 권고에서 방호체계 이행에 있어서 의료피폭과 다른 두 피폭 범주(직무피폭 및 일반인피폭) 사이의 중요한 차이에 유의하고 있다. 그 차이는 다음과 같다.

- 의료에서 정당화 원칙은 제7.1절에 설명한 바와 같이 세 준위로 적용된다.
- 환자 방호에 최적화 원칙을 적용함에 있어 편익과 위해 모두를 같은 사람 즉, 환자가 받으며, 환자 선량은 주로 의학적 필요에 따라 결정된다. 따라서 직무 피폭과 일반인피폭에서는 선량제한치가 중요하지만 환자에 대한 선량제한치는 적합하지 않다. 그렇더라도 환자피폭에도 어떤 관리가 필요하여 ICRP 73(ICRP 1996a)에서 진단참조준위 사용을 권고하였고, 보조지침 2(ICRP 2001b)에도 추가 지침을 주었다.
- 개인 환자에 대한 선량을 제한할 경우 진단이나 치료 효율성이 저감되어 환자에게 이로운보다 해로운을 더할 수 있으므로 그러한 한도는 권고하지 않는다. 그래서 의료절차의 정당화와 방호최적화를 강조한다.

(326) ICRP 60(ICRP 1991b)에서 수립한 방호 기본골격은 아래에 설명하는 일련의 간행물에서 보완되었다. 이들 간행물에 수록된 권고, 지침 및 조언은 계속 유효하며 ICRP가 속속 제공하는 의료피폭 정보자료체계를 구성한다[ICRP 105(ICRP 2007b) 참조].

(327) 환자 피폭은 의도적으로 이루어지지만, 방사선치료를 제외하고는 방사선량을 부여하는 것이 그 목표는 아니며 진단 정보 파악과 중재방사선 절차 수행을 위해 방사선을 사용하는 것이다. 그렇더라도 선량은 의도적으로 주는 것이어서 의도한 결과의 훼손 없이 선량을 한없이 낮출 수는 없다. 의학적 방사선 사용은 환자 개인 건강에 직접적 이익을 기대한다는 점에서 그 성격상 자발적이다. 환자나 적법 보호자가 방사선을 사용한 의료절차에 합의하거나 동의한다. 이 결정은 예상 편익은 물론 잠재적 위험(방사선 포함)에 관한 다양한 수준의 이해동의(理解同意)¹¹³⁾로 이루어진다. 이해동의를 얻는 데 필요한 정보량은 피폭준위

113) <역주> ‘informed consent’를 역자는 다른 자료에서 ‘인지동의’로 표현한 적 있으나 ‘인지’는 단순히 사실을 인식하는 정도의 의미가 강하고 충분히 이해한 상태를 나타내는 의미가 약하여

(예를 들어 진단, 중재방사선 또는 치료) 및 방사선피폭에 기인한 의료부작용 가능성에 따라 차이가 있다.

(328) 환자에 방사선을 조사하는 절차에 참여하는 의사와 보건 전문인은 반드시 물리학 및 생물학의 기초적인 원리를 포함해 방사선방호 원칙에 관한 교육을 받아야 한다. 환자 의료피폭에 대한 최종 책임은 의사에게 있으며, 따라서 의사는 관련 절차의 위험과 편익 모두를 알아야 한다.¹¹⁴⁾

(329) 외부 방사선에 의한 환자 의료피폭은 일반적으로 신체 일부만 관련되는데, 조사야에서 정상 조직이 받는 선량을 의료진이 충분히 아는 것이 중요하다. 그러한 상황에서 바람직하지 않은 조직반응이 발생하지 않도록 주의를 기울여야 한다.

7.1. 의료절차의 정당화

(330) 환자 의료피폭의 정당화 과정에는 특별하고 더 상세한 접근법을 필요로 한다. 다른 계획피폭상황에서처럼 방사선의 의료 사용은 정당화되어야 하지만, 이 정당화는 정부나 규제당국보다는 통상적으로 의료 전문직에서 판단한다. 의료피폭의 주된 목표는 환자에게 해로움보다 많은 이로움을 주는 것이며 부차적으로 방사선의학 직원이나 다른 사람들의 방사선피폭 위험을 고려한다.¹¹⁵⁾ 특정 절차 사용의 정당화 책임은 관련 의사에게 있다. 따라서 의료절차의 정당화는 ICRP 권고의 주요 부분으로 남는다.

(331) 정당화 원칙은 의료에서 방사선 사용의 세 수준에 적용된다.

- 첫째 수준에서는 의료에서 방사선 사용은 환자에게 해로움보다 많은 이로움을 주는 것으로서 수용된다. 이 수준의 정당화는 현재 확보된 것으로 보아 이

새로 ‘이해동의’라는 용어를 시도한다.

114) <역주> 현대 의료에서 방사선은 전공분야를 가리지 않고 사용된다. 따라서 의료방사선 안전에 관해서는 방사선 관련 전문의(즉 의료영상학, 핵의학 및 방사선종양학)뿐만 아니라 모든 전공 의사가 기본적 소양은 가져야 한다고 본다. 특히 진단과 중재방사선 절차는 주치의가 의뢰하거나 시술하므로 더욱 그러하다. 이러한 관점에서 볼 때 우리 의과대학 과정에서 방사선방호 교육 훈련의 비중을 더 높여야 한다고 본다.

115) <역주> 의료진의 피폭은 직무피폭이고 기타 제3자가 받는 피폭은 일반인피폭이므로 이 장에서 다루는 의료피폭과는 별개의 문제이다. 이에 대한 권고는 앞의 장들에서 제공한 내용을 따른다. 따라서 여기서 적은 부차적 고려는 불필요한 사족이다.

후 더 이상 논의하지 않는다.

- 둘째 수준에서는 특정 목적의 특정 절차가 정의되고 정당화된다(예를 들어 해당 증상을 보이는 환자 또는 확인되고 치료될 수 있는 위험에 접한 집단에 대한 흉부X선 촬영). 둘째 수준의 정당화 목표는 방사선학적 절차에 의해 진단이나 치료가 일반적으로 개선될 것인지, 또는 피폭자에 대한 필요한 정보를 제공할 것인지를 판단하는 것이다.
- 셋째 수준에서는 그러한 절차를 개별 환자에 적용함이 정당화되어야 한다(즉, 특정 적용이 개별 환자에 대해 해로움보다 이로움이 많다고 판단되어야 한다).¹¹⁶⁾ 따라서 모든 개인의 의료피폭은 노출의 구체적 목적과 해당 개인의 특성을 고려해 사전에 정당화되어야 한다.

아래에서 둘째와 셋째 수준 정당화에 대해 논의한다.

7.1.1. 특정 방사선학적 절차의 정당화(수준 2)

(332) 방사선학적 절차의 정당화는 국가의 보건 및 방사선방호 당국, 그리고 관련 국제기구와 연계해 국가/국제 전문직 기구의 소관이다. 우발적 또는 의도하지 않은 피폭 가능성도 고려해야 한다. 기존 절차와 새로운 절차의 위험과 효과에 관한 추가 정보가 있을 때 수시로 결정 내용을 재검토해야 한다.

7.1.2. 개별 환자에 대한 절차의 정당화(수준 3)

(333) 개인별 피폭 정당화에는 얻으려는 정보가 이미 알려진 것이 아니며, 제안된 검사가 필요한 임상정보 제공에 가장 적합한 방법임을 확인하는 것이 포함되어야 한다.¹¹⁷⁾ 복잡한 진단 및 중재방사선 절차처럼 높은 선량으로 검사해야 할 경우 개인별 정당화가 특히 중요하며, 가용한 모든 정보를 고려해야 한다. 여기에는 제안한 절차와 대안 절차의 상세 내용, 그 환자의 특성, 환자에 적용할 선량 및 과거 또는 추후 검사나 치료에 관한 정보 등이 포함된다.¹¹⁸⁾ 의뢰기준과 환자 범주를 미리 정의하면 종종 최적화 절차를 보다 신속하게 진행할 수 있

116) <역주> 그렇다고 방사선 절차의 의뢰가 모든 절차 모든 환자마다 따로 정당화되어야 한다는 의미는 아니다. 보편적인 환자가 일반적인 절차를 거치는 경우는 따로 정당성 여부를 확인할 필요는 없다. 체격, 연령, 임신여부, 건강상태 등을 고려할 때 특별한 환자인 경우 정당화를 재고할 필요가 있다.

117) <역주> 의료피폭 방호에서 무엇보다 중요한 것은 고려하는 방사선 절차가 꼭 필요한 것인지를 재확인하는 것이다.

118) <역주> 중재방사선 절차처럼 회 당 상당한 선량을 부여하는 절차에서 과거의 피폭 이력을 고려하지 않아 누적 선량 과다로 부작용이 발생한 보고들이 있다.

다.119)

7.2. 의료피폭에서 방호최적화

(334) 이제 ICRP는 선원 종류에 관계없이 선원중심 방호에 동일한 개념적 접근법을 사용하고 있다. 진단 및 중재방사선 절차에서 피폭하는 경우 진단참조준위가 방호최적화를 목적으로 하지만, 개인 환자선량에 대한 제약치로 이행되는 것은 아니다. 진단참조준위는 환자선량을 의료목적에 적합하게 관리하는 장치이다(소절7.2.1 참조).

7.2.1. 진단참조준위

(335) 진단참조준위는 의료영상 목적을 위한 절차에서 발생하는 환자의 방사선 피폭에 적용되며 방사선치료에는 적용되지 않는다. 진단참조준위는 ICRP 선량한도나 선량제약치 수치와는 직접적으로 연계되지 않는다. 실제로 진단참조준위 값은 환자들이나 한 명의 참조 환자에게서 관찰한 선량분포의 백분위를 기초로 선택된다. 그 값은 국가 보건 및 방사선방호 당국과 협력해 의료 전문직이 선택하고 주기적으로 검토하여야 한다. 검토주기는 안정성 요구와 관찰되는 선량분포의 장기적 변동에 견주어 정해야 한다. 선정된 진단참조준위 값은 국가나 지역마다 다를 수 있다.

(336) 진단참조준위는 일상 조건의 특정 영상화 절차에서 환자선량 준위 또는 투여한 방사능(방사성물질의 양)이 그 절차로서 비정상적으로 높거나 낮은지 여부를 살피기 위해 의료영상 분야에서 사용한다. 비정상적이라면 방호가 적절하게 최적화되었는지, 또는 시정조치가 필요한지 여부를 결정하기 위한 현장¹²⁰⁾ 검토가 있어야 한다(ICRP 1996a). 진단참조준위는 특정 절차에 대해 쉽게 측정할 수 있는 환자선량 연계 양¹²¹⁾으로 표현되어야 한다. 일반인 집단에서 자각증상이 없는 여성의 유방촬영과 같은 스크리닝 프로그램에는 유사한 진단 방법이 임상적

119) <역주> 단순히 임의적 판단으로 방사선 절차를 의뢰하는 것이 아니라 특정 절차를 의뢰하기 위한 구체적인 임상지시 지침이 사전에 마련되어 있고 이를 활용한다면 불필요한 피폭의 예방과 함께 필요한 진단을 간과하지 않는 데 도움이 될 것이다.

120) <역주> ‘현장local’이란 해당 병원으로 보면 된다.

121) <역주> 쉽게 측정할 수 있고 환자선량과 연계되어야 한다는 점에서 X선 영상화의 경우는 입사선량(CT의 경우는 CTDI)이, 핵의학의 경우는 투여 방사능이 전형적 지표가 된다.

으로 사용될 때와는 다른 진단참조준위를 필요로 할 수도 있다. 추가 지침은 ICRP 105(ICRP 2007b)와 보조지침 2(ICRP 2001b)에 수록되어 있다.

(337) 원칙적으로 그 아래에서는 충분히 좋은 영상품질을 제공하기에 선량이 너무 낮을 것으로 보는 하단 진단참조준위를 선정할 수도 있다. 그러나 선량 이외의 요소 또한 영상품질에 영향을 미치므로 그러한 진단참조준위를 설정하기는 쉽지 않다. 그렇지만 관찰한 선량이나 투여한 방사성물질 양이 늘 진단참조준위보다 훨씬 낮다면 얻은 영상품질에 대한 현장검토가 있어야 한다.¹²²⁾

(338) 형광투시 안내 중재방사선 절차, 전산화단층촬영 및 디지털 X선촬영에서 환자선량을 관리하기 위한 많은 정보를 ICRP 85, 87 및 93(ICRP 2000b, 2000d, 2004a)에 제공한 바 있다.

7.2. 방사선치료

(339) 방사선치료에서 최적화는 종양에 대한 처방선량 뿐만 아니라 표적부위 밖 건강한 조직의 방호 계획이 포함된다. 방사선치료에서 문제들은 ICRP 44 (ICRP 1985a)에서 논의했다.¹²³⁾

7.3. 의료피폭과 유효선량

(340) 종사자와 일반인(유효선량이 도출되는)의 연령 분포는 전리방사선을 사용하는 의료절차를 거치는 환자의 전반적 연령 분포와는 상당히 다를 수 있다. 또한 평가 대상인 의학적 상태에 대한 이환율에 따라 의학적 절차마다 연령 분포가 다를 수 있다. 이러한 이유 때문에 전리방사선을 사용하는 의학적 진단 및 치료에 대한 위험평가는 위험에 처한 개별 조직 및 그 의료절차를 거치는 사람들의 연령과 성별 분포에 적합한 위험 값을 사용해 평가하는 것이 가장 좋다. 참조환자나 환자집단의 나이와 성별이 유사하다면, 상이한 진단절차에 대해 상대적 선량 비교, 다른 병원과 국가에서 사용하는 유사한 기술과 절차의 비교 및 동일

122) <역주> 일반적으로 특히 디지털 영상화에서는 영상품질은 선량에 비례하여 향상된다. 선량을 낮춰 영상품질이 지나치게 저하되면 방사선피폭보다 더 즉각적 위험인 병소확인이 실패할 수 있기 때문에 선량을 낮추는 것만이 최선은 아니다.

123) <역주> ICRP 85의 권고는 일반 원칙 측면에서는 여전히 유효하지만 그 기술측면은 현행 기술과 격차가 크다. ICRP는 첨단 치료방사선에 대한 새로운 지침을 준비 중이다.

한 의학검사에 다른 기술의 사용을 비교하는 데는 유효선량이 유용할 수 있다.

(341) 환자 의료피폭에서 유효선량의 평가와 해석은 특히 진단 및 중재방사선 절차처럼 장거나 조직이 부분적으로 피폭하거나 심하게 비균질하게 피폭하는 경우 문제점들을 제기한다.

7.4. 임신 환자의 피폭

(342) 여성 환자의 경우 전리방사선을 사용하는 절차를 수행하기에 앞서 임신 여부를 확인하는 것이 중요하다. 배태아의 방사선 민감성 때문에 임신 중 의료피폭의 가능성이나 그 성과는 특별히 고려해야 한다.

(343) 정확한 진단절차로 받은 출생 전 선량으로 인해 출생 전이나 출생 후 사망, 기형을 포함한 발달이상 또는 정신지체 위험에서 백그라운드 발생률을 넘는 초과 위험을 보인 예는 없다. 태내피폭 후 생애 암 위험은 소아 시절 피폭에 따른 위험과 유사한 것으로 본다. 치료절차에 관련된 경우처럼 선량이 높을 때는 발달장애 잠재성이 있다(제3.4절 참조).

(344) 임신 중인 환자는 태내피폭으로 발생할 수 있는 잠재적 방사선영향의 유형과 크기를 알 권리를 갖는다. 진단방사선 검사가 의학적으로 지시된다면 그러한 절차를 거치지 않을 때 어머니 위험이 배태아에 대한 잠재적 유해 위험보다 거의 항상 높다. 그러나 일부 절차나 일부 핵의약품(예: 방사성옥소)은 배태아의 위험을 증가시킬 수 있다. ICRP 84(ICRP 2000a)에 자세한 지침을 제공한 바 있다.

(345) 방사선치료와 일부 복부 중재방사선 절차를 수행하기에 앞서 여성 환자의 임신 여부 확인은 필수적이다. 임신 환자라도 골반과 먼 신체부위의 암은 일반적으로 방사선치료를 실시할 수 있다. 다만, 치료계획에 각별한 주의를 기울여야 한다. 배태아에 대하여 산란방사선에 의한 기여분을 포함한 예상 방사선량을 반드시 평가해야 한다. 골반 내 암을 배태아에 심각하거나 치명적 결과 없이 방사선치료로 적절히 치료할 수 있는 경우는 거의 없다.

(346) 방사선피폭을 이유로 임신중절은 개인의 결정에 따르지만 결정에는 많

은 인자가 영향을 미친다. 배태아에 100 mGy 미만의 흡수선량을 임신중절 사유로 간주해서는 안 된다. 이 준위를 초과하는 배태아 선량의 경우, 배태아 선량 평가치 및 발육하는 배태아에 심각한 상해 위험과 생후 암 위험 등 개별적 여건을 기초로 이해결정을 내릴 수 있도록 임신 환자에게 충분한 정보를 제공해야 한다.

(347) 태내 방사선 피폭으로 인한 방사선 위험은 ICRP 90(ICRP 2003a)에 자세히 논의하고 있다. 임신 환자의 피폭은 ICRP 84(ICRP 2000a)와 ICRP 105(ICRP 2007b)에 자세히 다루고 있으며, 여기에는 방사선 피폭 후 임신중절과 관련한 고려사항도 설명되어 있다. 의생명연구에서 임신 여성의 방사선 피폭은 제7.7절에 설명한다.

7.5. 외부 빔치료와 근접치료에서 사고예방

(348) 외부 빔치료와 근접치료에서 사고의 방지는 장비나 시설의 설계 및 작업 절차의 일부이어야 한다. 오래전부터 사고예방의 핵심은 실패 결과에 대한 다중방어를 적용하는 것이었다. '심층방어(defence in depth)'로 불리는 이 접근법의 목표는 장비 고장이나 인적 오류를 방지하고, 사태 발생 시 그 피해를 최소화하는 것이다. ICRP 76, 86, 97 및 98(ICRP 1997b, 2000c, 2005b, 2005c)에 잠재피폭 확률을 줄이고 사고예방을 위한 많은 조언을 주었다.

7.6. 방사성핵종으로 치료받는 환자의 간병인과 위안자 방호

(349) 비밀봉 방사성핵종은 주사, 경구투여 또는 흡입과 같은 방법을 통해 환자에게 투여되는 방사성의약품 형태로 다양한 질병의 진단과 치료에 사용된다. 이러한 방사성의약품은 붕괴되거나 여러 경로(예: 소변)를 통해 제거될 때까지 인체 조직의 어떤 부분에 집중될 수 있다. 밀봉선원은 환자 인체에 삽입하여 사용된다.

(350) 진단 핵의학 절차 후 일반인에 대한 주의가 필요한 경우는 거의 없지만, 특별히 옥소-131을 사용한 방사선치료처럼 타인, 특히 환자 간병인과 위안자에게 상당한 피폭을 발생시킬 수 있는 치료 핵의학절차도 있다. 따라서 병원

이나 가정에서 그러한 환자를 돌보는 사람¹²⁴⁾에게는 개별 고려가 필요하다.

(351) ICRP 94(ICRP 2004b)에는 비밀봉 방사성핵종으로 치료한 환자의 퇴원에 관한 권고를 제공한다. 이러한 권고에는 아동이나 유아를 포함해 간병이나 위안에 직접 관계하지 않는 방문객은 방사선방호 목적상 일반인(즉, 연간 1 mSv인 일반인 선량한도 적용)으로 취급해야 함을 포함하고 있다. 아동이나 유아를 제외하고, 위안이나 간병에 직접 관여하는 사람의 경우 건(즉, 치료 후 퇴원 때까지의 기간) 당 5 mSv 선량제약치가 무방하다. 선량제약치는 융통성 있게 적용되어야 한다. 예를 들어 병세가 심한 아동 환자의 부모에게는 더 높은 선량이 적합할 수 있다.

(352) 15세 미만인 사람의 갑상선은 성인에 비해 방사선 민감성이 높으므로 옥소-131로 치료받는 환자로부터 유아, 아동 및 임신 여성의 오염을 방지할 수 있도록 특별한 주의를 기울여야 한다.

(353) 치료 후 환자의 입원이나 퇴원에 관한 결정은 환자의 잔여 방사능, 환자의 의향, 가족 고려사항(특히 아동 존재여부), 환경적 문제 및 기존 규정과 지침 같은 여러 사항을 고려하여 개별적으로 이루어져야 한다. ICRP 94(ICRP 2004b)에는 소변 저장을 위한 보관용기 사용에 대해 설명하는데 그 사용이 필요 없음을 시사했다.

(354) 방사성옥소로 치료 받고 있는 환자의 경우를 제외하고는 대기실이나 대중교통에서 일반인의 의도되지 않은 피폭은 특별 관리기준을 필요로 할 정도로 높지 않다(ICRP 73과 94, ICRP 1996a, 2004b).

(355) 원칙적으로 영구 이식된 밀봉선원으로 치료받는 환자에게도 유사한 논리가 적용된다. 가용한 데이터는 거의 대부분 위안자와 간병인의 선량이 연간 1 mSv보다 훨씬 낮은 값에 머무름을 보이고 있다(ICRP 98, ICRP 2005c). 드물지만 예외로서 이식 당시 환자의 배우자가 임신 중일 때 배우자의 예상 선량이 연간 1 mSv를 초과할 수는 있다.

(356) 밀봉선원을 이식한 후 수 개월 이내에 환자가 사망하여 시신을 화장할 경우(일부 국가에서는 흔히 발생) 몇 가지 현안이 있는데, 1) 환자의 재에 잔류

124) <역주> 원문은 ‘일반인’으로 적고 있으나 이들의 피폭은 의료피폭의 일부로 간주하므로 혼란을 피해 ‘사람’으로 수정했다.

하는 방사성물질과 2) 공기로 방출되어 화장 직원이나 일반인이 잠재적으로 흡입할 수 있는 방사성물질의 문제이다. 가용한 데이터는 옥소-125를 이식한 후 12개월이 경과했다면 화장을 허용할 수 있다(팔라듐-103의 경우 3개월). 이 지연기간이 경과하기 전 환자가 사망할 경우 특별한 조치가 취해져야 한다(ICRP 2005c).¹²⁵⁾¹²⁶⁾

7.7. 의생명연구 자원자

(357) 연구대상 자원자는 의생명연구에 큰 기여를 한다. 질병의 연구에 직접적 가치를 제공하는 연구 활동도 있으며, 작업장이나 환경 오염에서 섭취할 수 있는 방사성핵종 또는 의약품의 신진대사에 관한 정보를 제공하는 연구도 있다. 이러한 연구가 모두 의료기관에서 이루어지는 것은 아니지만 ICRP는 모든 의생명연구 자원자 피폭은 의료피폭 범주에 포함한다.

(358) ICRP는 의생명연구 자원자 참여에 대한 윤리적, 절차적 측면 및 그 정당화를 ICRP 62(ICRP,1991c)에서 설명하고 있다. 그 간행물에는 상이한 조건에서 자원자에 대한 선량제약치를 설명하고 있는데 표8(제6장)에 요약한 것과 같다.

(359) 많은 국가에서는 의생명연구 대상으로서 임신여성에 대한 방사선 노출을 구체적으로 금지하지는 않고 있다. 그러나 임신여성이 그러한 연구에 참여하는 것은 매우 드문 일이며, 임신이 연구의 중요한 일부인 경우를 제외하고는 그러한 참여는 억제되어야 한다. 임신에 대한 연구에서도 배태아 보호를 위해 방사선 사용을 엄격하게 통제해야 한다.

125) <역주> 시신의 화장이 규정인 일본에서는 시술 후 조기에 사망한 환자에 대해 전립선을 적출하는 등 필요한 조치를 한다. 국내에는 전립선암 치료가 주로 HDR 근접치료에 의존하며 I-125나 Pd-103 씨알선원 이식은 드물게 사용된다. 그렇더라도 불의의 오염을 예방하기 위해 영구이식 환자에 대한 어떤 관리대책이 필요하다.

126) <역주> 제7장은 원론적으로 의료피폭을 다루는데 몇몇 문항은 의료방사선과 관련되지만 의료피폭이 아닌 내용들을 다루고 있어 독자의 혼란을 조장할 우려가 없지는 않다. 이러한 예로는 제353항의 소변 저장문제, 제354항의 환자로부터 일반인 피폭문제, 이 항의 시신 화장문제 등이다.

7.8. 참고문헌

- ICRP, 1985a. Protection of the patient in radiation therapy. ICRP Publication 44. Ann. ICRP 15(2).
- ICRP, 1991b. 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 60. Ann. ICRP 21(1-3).
- ICRP, 1991c. Radiological protection in biomedical research. ICRP Publication 62. Ann. ICRP 22(3).
- ICRP, 1996a. Radiological protection in medicine. ICRP Publication 73. Ann. ICRP 26(2).
- ICRP, 1997b. Protection from potential exposures: application to selected radiation sources. ICRP Publication 76. Ann. ICRP 27(2).
- ICRP, 2000a. Pregnancy and medical radiation. ICRP Publication 84. Ann. ICRP 30(1).
- ICRP, 2000b. Avoidance of radiation injuries from medical interventional procedures. ICRP Publication 85. Ann. ICRP 30(2).
- ICRP, 2000c. Prevention of accidental exposures to patients undergoing radiation therapy. ICRP Publication 86. Ann. ICRP 30(3).
- ICRP, 2000d. Managing patient dose in computed tomography. ICRP Publication 87. Ann. ICRP 30(4).
- ICRP, 2001b. Radiation and your patient: A guide for medical practitioners. ICRP Supporting Guidance 2. Ann. ICRP 31(4).
- ICRP, 2003a. Biological effects after prenatal irradiation (embryo and fetus). ICRP Publication 90. Ann. ICRP 33(1/2).
- ICRP, 2004a. Managing patient dose in digital radiology. ICRP Publication 93. Ann. ICRP 34(1).
- ICRP, 2004b. Release of patients after therapy with unsealed sources. ICRP Publication 94. Ann. ICRP 34 (2).
- ICRP, 2005b. Prevention of high-dose-rate brachytherapy accidents. ICRP Publication 97. Ann. ICRP 35(2).
- ICRP, 2005c. Radiation safety aspects of brachytherapy for prostate cancer using permanently implanted sources. ICRP Publication 98. Ann. ICRP 35(3).
- ICRP, 2007b. Radiological protection in medicine. ICRP Publication 105. Ann. ICRP 37(5).

제8장 환경보호

(360) 근년에 인간활동의 모든 측면과 관련하여 환경보호에 대한 관심이 크게 증가하였다. 그러한 관심 증가에 따라 환경에 대한 인적 영향의 다양한 형태를 평가하고 관리하기 위한 여러 방법이 개발, 적용되고 있다. 환경에 대한 방사선 영향에서 새롭거나 구체적인 문제가 발생하지 않았다 하더라도 방사선방호와 관련하여 그러한 문제에 대한 조언과 지침의 필요성이 증대하고 있음을 ICRP는 인식하고 있다. 또한 ICRP는 방사선과 관련된 그러한 현안의 취급에서 국제적 수준에 일관성이 결여되어 있기 때문에 이제는 보다 전향적인 접근이 필요하다는 사실을 인지하고 있다.

8.1. 환경에 대한 방사선방호의 목적

(361) 사람에 대한 방사선방호와와는 반대로 환경보호 목적은 정의하기 복잡하고 까다롭다는 사실을 ICRP는 인정한다. 그러나 ICRP는 생물학적 다양성을 유지하고, 종을 보존하며 천연 서식지, 공동체 및 생태계의 건강과 상태를 보호하는 데 요구되는 범세계적 필요성과 노력에 찬동한다. 이러한 목적은 여러 방식으로 충족될 수 있고, 전리방사선은 환경피폭상황에 따라 중요한 관심사가 아닐 수 있으며, 목적 달성에 비례성 개념¹²⁷⁾이 필요하다는 사실도 ICRP는 인지하고 있다.

(362) ICRP는 이전에는 주로 계획피폭상황과 연계하여 인류 환경을 통한 방사성핵종의 이동과 관련되는 인류 환경에만 관심을 두었다. 이러한 방사성핵종 이동이 사람의 방사선방호에 직접 영향을 미치기 때문이다. 그러한 상황에서 ICRP는 일반인 방호에 필요한 환경관리 표준은 다른 종이 위협에 처하지 않도록 보장할 것으로 보았는데 이는 계속 그러할 것으로 믿고 있다.

(363) 이제 ICRP는 모든 피폭상황과 관련하여 조언을 제공할 필요가 있다고

127) <역주> 비례성이란 방호 노력이 위험 수준에 비례해야 한다는 논거이다.

판단한다. 또한 사람과 연관성 여부에 관계없이 보다 광범한 환경상황을 고려할 필요가 있다고 생각한다. 나아가 어떤 국가 당국은 계획상황에서까지 환경이 보호됨을 직접적이고 명시적으로 보일 필요가 있음을 ICRP는 인식한다.

(364) 그에 따라 ICRP는 사람의 생물종에 대한 노출과 선량 사이, 선량과 영향 사이의 관계 및 그러한 영향의 결과를 보편적 과학 근거에서 평가하려면 보다 분명한 기틀을 개발할 필요가 있다고 믿는다. 이 현안은 ICRP 91(ICRP 2003b)에서 처음 논의되었으며, 사람 방호를 위한 체계적 기틀의 개발에서 축적한 경험을 바탕으로 입안되어야 한다는 것이 ICRP의 결론이었다. 사람 방호를 위한 기틀은 방대한 양의 지식에 바탕을 두고 있는데, ICRP는 여러 데이터베이스의 광범한 오차, 불확실성 및 지식 간극을 유념하면서 이러한 지식을 다양한 피폭상황 관리에 가치가 있는 실용적 조언으로 변환하고자 노력하고 있다.

(365) 그러한 종합적이면서 체계적인 접근법의 장점은 시스템의 구성요소를 변경해야 할 경우(새로운 과학적 데이터 입력이나 사회적 성향의 변화 또는 단순히 실제 적용 경험에 따라), 그러한 변경 결과가 시스템의 어떤 부분이나 시스템 전체에 무슨 변화를 가져오는지 파악할 수 있다는 것이다. 몇몇 핵심 참조점을 포함한 수치적 기틀에 근거하지 않으면 그러한 접근은 작동하지 않을 수 있다.

8.2. 참조동식물

(366) 사람에 대한 방사선방호의 경우 위와 같은 문제에 대한 ICRP 접근법은 해부학 및 생리학 기준모델 개발로 큰 도움을 받고 있다(ICRP 2002). 유사한 접근법이 다른 종을 보호하기 위한 추가 조언과 지침 개발의 기초로서 가치 있을 것으로 ICRP는 결론지었다. 이에 따라 ICRP는 주요 환경에 전형적인 몇몇 유형의 생명체에 대해 하나의 작은 ‘참조동식물(RAP)’¹²⁸⁾ 세트(Pentreath 2005)와 이에 대한 데이터베이스를 개발하고 있다. 이러한 실체들은 피폭과 선량, 선량과 영향 사이의 관계 및 그러한 영향의 잠재적 결과를 이해하는 데 보다 구조적인 접근법의 기초를 형성할 것이다.

128) <역주> 사람의 선량계측 모델에서는 ‘reference person’을 우리말로 ‘기준인’이란 용어를 선택했으나 ‘reference animals and plants’에 대해서는 ‘참조동식물’이란 용어를 선택했다. 사람의 경우 기준인이 선량계측의 표준을 제공하는 수준이므로 ‘참조’라는 어휘가 약한 느낌인데 반해, 동식물에서는 역으로 ‘참조’ 정도가 더 적합해 보이기 때문이다.

(367) 참조동식물은 정의된 해부학, 생리학 및 생명이력 특성이 있는 분류학 수준으로 과family의 일반성으로 묘사되는 특정 유형 동물이나 식물의 기본적인 생물학적 특성을 가진 가상의 실체로 간주할 수 있다. 따라서 반드시 그 자체가 방호의 직접 대상일 필요는 없지만, 참조점을 제공함으로써 어떤 관리 결정을 수립할 수 있는 기초를 제공할 것이다. 각 유형 RAP의 수명주기의 다양한 단계에 대해 현재 선량계측 모델 및 관련 데이터가 개발 중이며, 방사선 영향에 대한 유용한 데이터 또한 검토 중에 있다.

(368) ICRP 목적의 달성을 위해, 여러 유형 동식물의 방사선 영향에 대한 현재 지식수준에 기초한 판단을 위해서는 일정한 형태의 실용적 수단이 분명히 필요하다. 그러나 포유동물을 제외하고는, 특히 대부분의 피폭상황에서 볼 수 있는 낮은 선량률과 관련해 유용한 결론을 도출할 수 있는 선량-반응 관계를 구축할 수 있는 정보가 부족한 것이 사실이다. 일반적으로 대부분 동식물에 대한 방사선 영향에 대한 데이터는 '화학적 독성' 연구와 관련된 데이터와 크게 다르지 않은데, 화학독성 연구에서는 특정 영향 유발에 필요한 수준이 대부분 환경 상황에서 예상되는 수준보다 여러 차수 높다.

(369) 방사선의 경우 다른 참조원이 있는데, 그러한 동식물이 연속적으로 또한 '전형적으로' 피폭되는 자연 백그라운드 방사선이다. 따라서 동식물에게 추가로 발생하는 방사선량을 그러한 종류의 동식물에 특정 생물학적 영향이 있는 것으로 확인되었거나 예상되는 선량률이나, 자연환경에서 그러한 동식물이 통상 접하는 선량률과 비교할 수 있다.

(370) 따라서 ICRP는 환경보호에 대해 어떤 형태로도 '선량한도'를 규정하기를 제안하지는 않는다. ICRP는 투명하게 도출하는 방법으로, 후속조치가 필요할 수 있는 참조동식물에 대한 데이터를 설정함으로써 과거보다 현실적인 조언을 제공하고자 한다. ICRP는 이러한 기틀을 사용해 데이터를 취합하고 해석함으로써, 특히 다양한 방사선 피폭상황에서 문제가 될 수 있는 환경의 여러 측면이나 특성과 관련해 보다 종합적 조언을 장차 제공하고자 한다.

8.3. 참고문헌

ICRP, 2002. Basic anatomical and physiological data for use in

radiological protection. ICRP Publication 89. Ann. ICRP 32(3/4).

ICRP, 2003b. A framework for assessing the impact of ionising radiation on non-human species. ICRP Publication 91. Ann. ICRP 33(3).

Pentreath, R.J., 2005. Concept and use of reference animals and plants. In: Protection of the Environment from the Effects of Ionizing Radiation, IAEA-CN-09, IAEA, Vienna, 411-420.

용어집¹²⁹⁾

감시구역supervised area: 관리구역으로 지정되지는 않아 통상 특정 방호수단이나 안전 규정이 요구되지는 않지만 직무피폭 조건이 검토되는 구역.

개인선량당량personal dose equivalent, $H_p(d)$: 실용량의 하나. 몸체의 특정 지점 아래 적절한 깊이 d에서 연조직(흔히 ‘ICRU조직’으로 해석됨)의 선량당량. 개인선량당량의 단위는 킬로그램 당 줄($J kg^{-1}$)이며, 그 특별명칭은 시버트(Sv)이다. 특정 지점은 일반적으로 개인선량계가 위치한 부위이다.

결정론적 영향deterministic effect: 문턱선량이 있고 선량이 증가함에 따라 반응 심각도가 증가하는 특성을 지닌 세포 집단의 상해. 조직반응이라고도 한다. 생물학적 반응 수정자를 포함하여 피폭 후 절차로 결정론적 영향을 수정할 수 있는 경우도 있다.

계통오차systematic error: 재현성이며 같은 방향으로 일어나는 경향의 오차. 적어도 원론적으로는 그 원인을 찾을 수 있으며 일정하거나 가변적인 성분을 가질 수 있다. 일반적으로 이러한 오차는 통계적으로 처리될 수 없다.

계획피폭상황planned exposure situations: 피폭이 충분히 예측되어 사전에 적절한 방호조치를 강구할 수 있어 계획에 따라 개인선량을 정상 제한치 이내로 관리할 수 있는 피폭상황. 계획피폭상황은 종종 발생할 것으로 예상되는 사건을 포함한다.[†] 선원의 계획 운영에 관련된 일상적 상황으로서 해체, 방사성폐기물 처분 및 과거 사용하던 토지에 재입주 활동 등을 포함한다. 운영 중인 행위는 계획피폭상황이다.

고용주employer: 상호 합의 관계에 의해 고용관계에 있는 종사자에 대해 책임, 약속 및 의무와 관련된 국가 법령에 따라 지정된 기관, 법인, 공동투자회사, 기업, 조합, 트러스트, 경제실체, 공공 또는 민간 기관, 단체, 정치적 또는 행정적 실체나 기타 개인. 자영업자는 고용주와 종사자 모두에 해당된다.

129) <역주> 일부 용어 설명에서는 역자가 필요한 내용을 추가하고 이에 대해 † 표기를 했다. 몇몇 용어는 편의를 위해 원문에 없는 항을 포함시키고 같은 표기를 했다.

고유흡수비specific absorbed fraction: 선원부 S에서 특정 종류 방사선으로 방출되어 표적조직 T 1kg에 흡수되는 에너지 비율.

공기역학직경[†]aerodynamic diameter: 주어진 입자와 같은 공기 중 종속도를 갖는 비중 1인 구형입자의 직경.

관리구역controlled area: 정상 작업조건 중 정상피폭 관리, 오염확산 방지 또는 잠재피폭 방지나 제한을 위해 특정 방호수단이나 안전 규정을 요구하거나 요구할 수 있도록 지정된 구역. 관리구역은 감시구역 안에 있는 경우가 많지만, 꼭 그래야 할 필요는 없다.

구경꾼효과bystander effect: 조사된 인접 세포에서 받는 신호에 의해 촉발되는 조사되지 않은 세포의 반응.

그레이gray, Gy: 흡수선량의 SI 단위에 대한 특별명칭: $1 \text{ Gy} = 1 \text{ J kg}^{-1}$.

근접치료brachytherapy: 밀봉하거나 밀봉하지 않은 방사선원을 환부에 근접시켜¹³⁰⁾ 조사하는 방사선치료.

기록선량dose of record: 측정한 개인선량당량 $H_p(10)$ 과 작업자 개인감시 결과 및 ICRP의 기준 생물역동학적 선량 계산모델을 사용하여 기준인에 대해 소급적으로 산출한 예탁유효선량을 합한 값으로 평가된 종사자 유효선량. 기록선량은 방사성물질 종류, AMAD 등과 같은 현장 특정 피폭변수를 고려하여 평가할 수도 있지만, 기준인 변수는 ICRP가 정한대로 고정해야 한다. 기록선량은 기록, 보고 및 규제 선량한도 만족 여부의 소급적 입증 등의 목적으로 종사자에게 책정된다.¹³¹⁾

기저율baseline rates: 연구 대상 제체에 노출이 없는 경우 어떤 집단에서 관찰되는 연간 질병 발생률.

130) <역주> 원문은 ‘환자의 체내에 넣어서’ 치료하는 것으로 표현되어 있으나 신체 표면 또는 표면 가까이 있는 압은 거품집 형태의 노출지를 이용해 외부에서도 조사하므로 표현을 수정했다.

131) <역주> 기록선량으로서 유효선량 해당량(즉, 개인 심부선량당량과 예탁유효선량의 합)만을 의미한 이 정의는 미진함이 있다. 우리 법규는 유효선량 해당량과 피부선량 해당량 즉, $H_p(0.07)$ 감시결과도 기록에 포함하고 있다. 기록선량은 규제기관이 지정하는 것이 적절해 보인다.

기존피폭상황existing exposure situation: 관리를 결정하는 시점에 이미 존재하는 피폭상황. 자연 백그라운드 방사선 및 ICRP 권고 밖에서 수행되었던 과거 행위 잔류물 등이 포함된다.

기준값¹³²⁾reference value: 보다 구체적 정보가 없을 경우 생물역동학 모델에 사용하기 위해 ICRP가 권고한 변수 값으로 즉, ICRP 간행물에 제시된 선량계수 계산에 사용한 바로 그 값. 계산 중 반올림 오차 누적을 방지하기 위해, 기준값은 실험값에 파악된 불확실성을 반영하여 선정할 수 있는 값보다 훨씬 정밀하게 명시되기도 한다.

기준남성, 기준여성Reference Male, Reference Female: 방사선방호 목적을 위해 ICRP가 정의한 특성을 갖고 ICRP 작업그룹 보고서(ICRP 89; ICRP 2002)에 정의한 해부학적, 생리학적 특성을 갖춘 이상화된 남성과 여성.

기준모의체reference phantom: 인체의 체적소형 모의체(의료영상 데이터에 기초한 남성 및 여성 체적소형 모의체). ICRP 작업그룹 보고서에 정의한 해부학적, 생리학적 특성을 갖춘 기준인의 특성을 가지고 있다(ICRP 89; ICRP 2002).

기준방사선reference radiation:¹³³⁾ 생물학적효과비를 평가할 때 기준으로 삼는 특정 종류, 특정 에너지의 방사선. 현재로서는 낮은 LET 방사선인 광자 방사선을 기준방사선으로 사용한다는 약속만 있을 뿐 구체적으로 어떤 에너지를 사용할 것인가에 대한 약속은 없다. 통상 코발트-60 감마선이나 250 kVp X선이 사용된다.

기준인reference person: 장기나 조직 등가선량을 기준남성과 기준여성의 해당 선량을 평균하여 계산하는 이상화된 사람.¹³⁴⁾ 기준인의 등가선량은 그 선량에

132) <역주> 이 권고에서 'reference'라는 어휘는 용도에 따라 사뭇 다른 의미로 사용된다. 'reference level'은 강한 제한을 수반하는 준위가 아니므로 우리말로써는 완곡한 '참조준위'를 사용했다. 그러나 용어집의 이 부분에서 사용되는 reference는 변경이 인정되지 않는 '기준' 성격이 강하므로 reference value의 경우 '기준값'을 채택했다. 이하 '기준인'까지 마찬가지이다. 참고로 과거 ICRP 23 당시 reference man은 '표준인'으로 적었으나 '표준'은 다소 과한 표현으로 이해된다.

133) <역주> 원문 용어집에는 없는 용어이나 필요할 것으로 판단하여 역자가 추가했음.

134) <역주> 기준남성이나 기준여성 개념적으로는 형상이 있는 사람이지만 이를 평균한 기준인은 개념적으로도 형상을 구성할 수 없어 기준인이란 용어를 사용하는 것이 적절한지 의문이 있다. 조직등가선량을 평균하는 데 사용하는 가상의 사람이란 표현을 사용함으로써 이러한 문제가 발생하므로 차라리 남녀 구분이 없이 단일 세트에 제공되는 조직가중치 평가나 생물역동학 모델

해당 조직가중치를 곱함으로써 유효선량을 계산하기 위해 사용한다.

다단계 종양형성multistage tumorigenesis: 단일 (표적)세포에서 종양을 형성하게 되는 세포 성질의 단계적 획득.

다인자성질환multifactorial diseases: 복수의 유전인자 및 환경인자에 기인하여 발생하는 질환.

대표인representative person: 인구집단 중 보다 높은 수준으로 피폭하는 개인들이 받는 대표적 선량을 받는 한 개인(ICRP 101, ICRP 2006a 참조). 이 용어는 과거 ICRP 권고에 사용한 '결정집단의 평균 구성원'과 대등하며 이를 대체한다.

돌연변이성분mutation component, MC: 돌연변이율의 상대적 단위 변화 당 질병 발생 빈도의 상대적 변화 정도를 제공하는 양으로서 반응도 척도. MC값은 유전질환 등급별로 다르다.

등가선량equivalent dose, H_T : 다른 선질의 방사선이 미치는 생물학적 효력 차이를 반영하기 위해 조직이나 장기의 평균 흡수선량에 그 흡수선량을 부여한 방사선의 방사선가중치를 가중한 선량.[†] 조직이나 장기 T의 선량이며 다음과 같이 정의된다.

$$H_T = \sum_R w_R D_{T,R}$$

여기서 $D_{T,R}$ 는 조직이나 장기 T가 방사선 R로부터 받은 평균 흡수선량, w_R 은 방사선가중치이다. w_R 는 무차원이므로, 등가선량 단위는 흡수선량 단위와 같이 킬로그램 당 줄($J\ kg^{-1}$)이며, 그 특별명칭은 시버트(Sv)이다.

면제exemption: 방사선 관련 행위 활동 또는 선원에 규제관리의 일부 또는 전부를 적용하지 않는다는 규제당국의 결정.

명목위험계수nominal risk coefficient: 대표 집단에 대한 성별 및 피폭 연령 평균 생애위험평가치.

링 또는 이를 적용한 유효선량이 평가되는 대상으로서 가상적 사람으로 표현하는 것이 더 적절해 보인다.

멘델질환mendelian diseases: 단일 유전인자 돌연변이에 기인하여 발생하는 유전질환.

무작위오차random error: 반복적이지 않은 형태로 일어나는 오차. 이러한 오차는 확률론을 이용하여 통계적으로 처리될 수 있다.

문턱 없는 선형모델linear-non-threshold model(LNT): 낮은 선량 영역에서 0보다 큰 방사선량은 초과 암 및 유전질환 위험을 단순 정비례로 증가시킨다는 가정에 기초한 선량-반응 모델.

민감도분석sensitivity analysis: 모델의 결과가 포함된 여러 변수들에 종속되는 정도를 정량화하기 위한 분석.

발생, 발생률incidence, incidence rate: 특정 기간에 집단에서 질병이 발생한 비율. 일반적으로 연간 1십만 명(또는 1십만 인-년) 당 질병 사례 수로 표현한다.

방사능activity, A: 물질의 특정 양에서 단위 시간 당 발생하는 핵변환 수의 기대치. 방사능의 SI 단위는 매초(s^{-1})이며, 그 특별명칭은 베크렐(Bq)이다.

방사능공격radiological attack: 협박, 살인, 사보타주 및 테러와 같은 악의적 목적으로 방사성물질 또는 핵물질을 사용하는 것.

방사능중양공기역학적경Activity Median Aerodynamic Diameter,(AMAD): 특정 에어로졸에서 공기 중 방사능의 50%가 AMAD보다 큰 입자에서 나올 때의 공기역학적경 값. 특히, AMAD가 약 $0.5 \mu\text{m}$ 보다 큰 경우로서 침적이 주로 관성 부착과 침전에 의존하는 경우에 사용된다.

방사선가중치radiation weighting factor, w_R : 낮은 LET 방사선에 비해 높은 LET 방사선의 생물학적 효력이 높음을 반영하기 위해 조직이나 장기의 흡수선량에 곱하는 무차원 인자. 이 가중치는 조직이나 장기에 평균한 흡수선량으로부터 등가선량을 도출하는 데 사용한다.

방사선위해radiation detriment: 신체 여러 부위에 대한 방사선 피폭의 유해한 건강 영향을 정량화하기 위한 개념. ICRP는 방사선위해를 방사선 관련 암이나 유전영향의 발생, 이들의 치사율, 삶의 질 및 그러한 조건에 의해 상실되는 수

명 연수와 같은 몇 가지 인자의 함수로 정의한다.

방사성물질radioactive material: 방사능과 방사능 농도를 모두 고려하여, 그 방사능 때문에 규제관리 대상이 되도록 국가 법률이나 규제기관이 규정하는 물질.¹³⁵⁾

방호량protection quantities: 방사선방호 목적으로 전신 또는 부분 외부피폭과 방사성핵종 섭취에 의한 인체의 전리방사선 피폭 정도를 정량화할 수 있도록 ICRP가 개발한 선량.

방호원칙principles of protection: 모든 관리 가능한 피폭상황에 동일하게 적용되는 일련의 원칙. 정당화 원칙, 방호최적화 원칙 및 계획상황에서 개인중심 선량에 선량한도 적용 원칙.

방향성선량당량directional dose equivalent, $H'(d, \Omega)$: 어떤 방사선장의 한 지점에서 선량당량으로서 해당 확장 방사선장 내 ICRU구에서 특정 Ω 방향 반경의 깊이 d 에서 발생할 선량당량. 방향성선량당량의 단위는 킬로그램 당 줄 ($J kg^{-1}$)이며, 그 특별명칭은 시버트(Sv)이다.

배가선량doubling dose, DD: 한 세대에서 자연적으로 발생하는 유전 돌연변이만큼 유전 돌연변이를 발생시키는 데 필요한 방사선량.

배제exclusion: 특정 피폭범주를 규제관리 제도의 범위에서 의도적으로 제외하는 것.¹³⁶⁾

배태아[†]embryo and fetus: 배아나 태아.

병합분석¹³⁷⁾pooled analysis: 병렬로 수행된 연구들의 원본 데이터에 기초해 여러

135) <역주> 세상의 모든 물질은 방사성핵종을 함유하고 있기 때문에 농도나 양에 한계를 두지 않으면 모든 물질이 방사성물질이 된다. 따라서 '방사성물질'이란 학술적으로나 법률적으로 반드시 하한기준이 있다. 그럼에도 우리 법규에 '공기 중 방사성물질 농도'라는 표현을 사용하고 있다. 그런데 극단적인 경우가 아니라면 공기농도는 '방사성물질'이 되기에는 충분하지 않다. 따라서 이러한 표현은 '공기 중 방사성핵종농도'로 고쳐야 한다. 아니면 편의를 고려해 '공기 중 방사능 농도'를 정의하여 사용할 수도 있겠다.

136) <역주> 주로 규제관리가 현실적으로 불가하여 제외한다.

137) <역주> '통합분석'이란 용어도 많이 쓰이고 있다.

연구들에서 도출한 역학자료를 결합하여 수행하는 분석.

베크렐becquerel, Bq: 방사능 SI 단위의 특별명칭, $1\text{ Bq}=1\text{ s}^{-1}$ ($\approx 2.7\times 10^{-11}\text{ Ci}$).

보안security: 핵물질, 방사성물질 또는 유관 시설과 관련된 도난, 사보타주, 무단 접근, 불법 양도 또는 악의적 행위의 방지, 발견 및 그에 대한 대응.

분화differentiation: 딸세포가 특화된 기능을 획득하도록 줄기세포가 분열증식 경로에 들어가는 절차.

비상emergency: 사람 보건과 안전, 삶의 질, 재산 또는 환경의 손해 또는 부정적인 결과를 완화시키기 위해 즉각적인 조치가 필요한 비정상적인 상황이나 사건. 여기에는 예측된 위협의 영향을 완화시키기 위한 즉각적인 조치가 필요한 상황이 포함된다.

비상피폭상황emergency exposure situation: 예기하지 않게 발생한 방사선 사태로서 수습을 위해 긴급조치가 필요하며 정규 선량제한을 적용하기 어려운 피폭상황.[†] 행위 수행 중 발생하는 예기치 않은 상황으로서, 긴급한 조치가 필요한 상황. 비상피폭상황은 악의적 행위에서도¹³⁸⁾ 발생할 수 있다.

비적구조track structure: 전리방사선의 경로에서 비적을 따라 형성되는 에너지 부여의 공간 양상.

상대생존relative survival: 암 진단 후 특정 연수(예를 들어 5년) 동안 생존하는 암 환자 비율과 암 질환이 없는 동등한 수의 인구에서 생존 비율의 비.

상대수명손실relative life lost: 피폭 인구 중 질병으로 사망하는 사람에서 관찰한 수명손실 연수의 비율과 피폭하지 않은 유사한 인구 중 해당 비율의 비.

생물분석bioassay: 인체에서 배설되거나 다른 방법으로 제거된 물질의 체외분석, 또는 체내측정을 통해 인체 내 방사성핵종의 성질, 방사능, 위치 또는 잔류를 파악하기 위한 절차.

138) <역주> 원문은 단순히 ‘행위’로 적고 있으나 앞선 설명과 중복되고 악의적 행위 추가가 필요하여 수정하였다.

생물학적 반감기biological half-life: 어떤 생물학적 계통에 들어 온 물질(예, 방사성 물질)의 양이, 더 이상의 새로운 유입이 없을 때, 그 절반으로 줄어드는 데 걸리는 시간.

생물학적효과비relative biological effectiveness, RBE: 동일한 생물학적 효과를 내는 고려 방사선 선량에 대한 낮은 LET 기준방사선 선량의 비. RBE값은 선량, 선량률 및 생물학적 종점에 따라 결정된다. 방사선방호에서 낮은 선량의 확률론적 영향에 대한 생물학적효과비(RBE_M)가 특히 관심 대상이 된다.

생애위험평가치lifetime risk estimates: 어떤 개인이 피폭 후 특정 질병이 발생하거나 그 질병으로 사망할 생애위험을 계산하는 데는 다음과 같은 몇 가지 생애위험평가 방법이 있다.

- 1) 피폭 집단에서 질병이 발생하거나 그 질병으로 사망한 사람의 비율과 피폭하지 않은 집단의 해당 비율과의 차이로 표현되는 초과생애위험excess lifetime risk(ELR).
- 2) 집단에 추가적 특정 원인에 있을 때, 성별 및 피폭연령별로, 피폭 집단과 피폭하지 않은 집단의 원인특정 사망률 차이로 정의되는 피폭유발사망위험 risk of exposure-induced death(REID)
- 3) 피폭으로 인한 기대수명의 감소로 표현되는 기대수명손실loss of life expectancy(LLE)
- 4) 피폭하지 않은 사람들에 의해 정해지는 집단 백그라운드율 대비 일정기간 초과 사망(또는 발병)으로 표현되며, REID의 근사치인 생애기인위험 lifetime attributable risk(LAR). 현행 권고에서는 생애위험도를 평가하기 위해 LAR을 사용했다.

선량계수dose coefficient: 피폭의 원인이 되는 양과 종점인 선량 사이의 관계를 짓도록 모델과 기준값을 사용하여 평가한 계수.[†] 방사성물질 단위 섭취 당 선량과 동의어로 사용하지만, 표면에 분포하는 어떤 방사성핵종의 단위면적당 방사능으로부터 일정 거리 떨어진 지점에서 외부선량률과 같이, 선량이나 선량률을 방사능의 양이나 농도와 연계하는 계수를 설명하는 데에도 사용한다.

선량당량dose equivalent, H: 조직의 한 지점에서 D와 Q의 곱. 여기에서 D는 흡수 선량이며, Q는 그 지점에서 그 방사선의 선질계수이다. 즉,

$$H = DQ$$

선량당량의 단위는 킬로그램 당 줄(Jkg^{-1})이며, 그 특별명칭은 시버트(Sv)이다.

선량문턱가설dose-threshold hypothesis: 백그라운드보다 높은 어떤 선량으로서 이 값 아래에서는 초과 암 및 유전질환 발생 확률이 영(0)이라는 가설(조직반응에 대한 문턱선량 참조).

선량선량률효과인자dose and dose-rate effectiveness factor, DDREF: 높은 선량률, 높은 선량 피폭의 경우와 비교하여 낮은 선량률, 낮은 선량 방사선 피폭에서 일반적으로 낮은 생물학적 영향(단위 선량 당)을 보편화하기 위해 판단으로 선정한 인자.

선량수정인자dose modifying factor, DMF: 수정 요소가 있는 경우와 없는 경우 동일한 생물학적 효과를 일으키는 선량의 비.

선량예탁dose commitment, E_c : 방출을 야기하는 계획된 1년간 활동과 같은 어느 특정 사건에 의한 1인 당 선량률 \dot{E} 의 무한 시간적분으로 정의되는 계산 도구. 일정 율로 무한 방출할 경우, 특정 집단에 대해 예상되는 연간 최대 1인 당 선량 E 는 집단 규모 변화에 상관없이 1년 운영의 선량예탁과 동일하다. 방출을 야기하는 활동이 일정한 기간 τ 동안만 계속된다면 예상되는 최대 연간 1인 당 선량은 해당 기간으로 절사된 선량예탁과 동일하며, 이는 다음과 같이 정의된다.

$$E_c(\tau) = \int_0^{\tau} \dot{E}(t) dt .$$

선량제약치dose constraint: 한 선원으로부터 개인선량에 대한 전망적이고 선원중심적 제한. 어떤 선원으로부터 가장 높게 피폭하는 개인에 대한 방호의 기본 수준을 제공하며, 그 선원에 대한 방호최적화에 상한 선량 역할을 한다. 직 무피폭 경우 선량제약치는 최적화 과정에서 고려하는 방안들의 범위를 한정하는 데에 사용하는 개인선량 값이다. 일반인피폭의 경우 선량제약치는 일반 구성원이 하나의 제어된 선원의 계획된 운영으로부터 받는 연간 선량의 상한이다.

선량평가체계 1986Dosimetry System, DS86: 일본 원폭생존자에 대한 1986년 선량평가체계.[†] 다양한 상황에서 감마 및 중성자 피폭 평가체계로서 수명연구

(LSS) 대상들의 특정 장기에 대한 흡수선량 계산을 제공한다.

선량평가체계 2002Dosimetry System, DS02: 일본 원폭생존자에 대한 2002년 선량평가체계.[†] 다양한 상황에서 감마 및 중성자 피폭 평가체계로서 수명연구 (LSS) 대상들의 특정 장기에 대한 흡수선량 계산을 제공한다. DS02는 DS86 평가체계를 향상시킨 것이다.

선량한도dose limit: 계획피폭상황에서 초과해서는 안 되는 개인 유효선량이나 등가선량 값.

선원source: 병원의 X선 장치나 시설로부터 방사성물질 방출처럼 방사선방호를 총체적으로 최적화할 수 있는 대상 실체. 방사선발생장치와 밀봉 방사성물질, 또는 보다 넓은 범위로 방사선이나 방사성핵종에 의해 피폭을 발생시키는 방사선의 원천.

선원부source region, S_i : 섭취로 인한 방사성핵종을 포함하고 있는 기준모의체 내의 해부학적 영역. 이 영역은 장기, 조직, 위장관이나 방광 내용물 또는 뼈대나 기도 조직의 표면일 수도 있다.

선질계수quality factor, $Q(L)$: 조직에서 하전입자 비적을 따라 형성되는 전리밀도에 근거하여 방사선의 생물학적 효력을 특성화하는 인자. Q 는 물속에서 하전입자의 제한 없는 에너지전달선밀도 L_∞ (종종 LET 또는 L 로 표시)의 함수로 정의된다.

$$Q(L) = \begin{cases} 1 & L < 10 \text{ keV}/\mu\text{m} \\ 0.32L - 2.2 & 10 \leq L \leq 100 \text{ keV}/\mu\text{m} \\ 300/\sqrt{L} & L > 100 \text{ keV}/\mu\text{m} \end{cases}$$

등가선량의 정의에서는 Q 가 방사선가중치로 대체되지만, 감시에 사용하는 선량당량 양 계산에는 계속 Q 를 사용한다.

선형선량반응linear dose response: 질병 또는 기형과 같은 영향 발생 위험이 선량에 비례함을 표현하는 통계적 모델.

선형이차 선량반응linear-quadratic dose response: 영향의 위험(예를 들어 질병, 사망 또는 기형)이 선량에 비례하는 선형항과 선량 제곱에 비례하는 2차항의 합으로 표현되는 통계적 모델.

성장인자growth factors: 어떤 세포 집단의 세포 재생산 및 분열/분화를 제어하는 분자.

섭취량intake, I: 환경에서 호흡기관 또는 소화기관을 통해 체내로 들어온 방사능.
- 급성섭취: 짧은 시간에 일어난 흡입 또는 취식에 의한 단일 섭취.
- 만성섭취: 일정한 기간에 걸쳐 일어난 섭취.

세포자살apoptosis: 방사선 피폭 또는 다른 손상 이후 일어나도록 계획된 능동적 세포 사망의 생화학적 과정.

수명연구Life Span Study, LSS: 히로시마와 나가사키의 일본인 원폭생존자 건강 영향에 관한 장기적 집단 연구.

시버트sievert, Sv: 등가선량, 유효선량 및 실용량의 SI 단위에 대한 특별명칭. SI 단위는 킬로그램 당 줄($J kg^{-1}$)이다.

신뢰한계confidence limits: 데이터와 통계학적으로 양립할 수 있는 어떤 변수의 최저치와 최고치 평가값을 주는 구간. 95% 신뢰구간이란 그 구간에 그 변수가 들어갈 확률이 95%임을 의미한다.

실용량operational quantities: 실측이 불가능한 방호량을 대신하여 사람의 선량을 평가할 수 있는 체계를 제공하도록 도입한 측정 가능한 선량. 실용량은 적절한 등가선량으로 정의된다.[†] 외부피폭이 관련된 상황의 조사나 감시 실제에 사용되는 양으로서 인체 선량의 측정과 평가를 위해 정의한다. 내부피폭 선량계측에는 등가선량 또는 유효선량을 평가하기 위해 직접 사용할 수 있는 실용량을 정의한 것이 없다. 인체 내 방사성핵종으로 인한 등가선량 또는 유효선량 평가에는 다른 방법들을 적용하는데 대개 여러 방사능 측정법과 생물역동학적 모델(계산 모델)을 적용한다.

안전성safety: 적절한 운영조건, 사고의 방지 또는 사고영향의 최소화를 달성하는 것.

암외질환non-cancer diseases: 심장질환과 백내장 같은 암 이외의 신체적 질환.

에너지전달선밀도¹³⁹⁾linear energy transfer,(L, LET): 어떤 물질에서 하전입자 방사

선의 평균 선형 에너지 손실률. 즉, 물질 내 경로의 단위 길이 당 방사선 에너지 손실. 하전입자가 물질 내 거리 dl 을 지나면서 전자와 충돌하여 잃은 평균에너지 손실량 dE 를 dl 로 나눈 값.

$$L = \frac{dE}{dl}.$$

L 의 단위는 $J m^{-1}$ 이며, 흔히 $keV \mu m^{-1}$ 로 나타낸다.

연간섭취량annual intake, AI: 1년 동안 취식¹⁴⁰⁾ 또는 흡입에 의해 체내로 들어간 특정 방사성핵종의 양.

예탁등가선량committed equivalent dose, $H_T(\tau)$: 기준인이 방사성물질을 섭취한 후 받는 어떤 조직 또는 장기 T의 등가선량률을 시간 적분한 값. 여기서 τ 는 년 단위 적분기간이다.

예탁유효선량committed effective dose, $E(\tau)$: 조직 또는 장기의 예탁등가선량과 해당 조직가중치(w_T)의 곱의 합. 여기서 τ 는 섭취 후 경과한 년 단위 적분시간(예탁기간)이다. 예탁기간은 성인의 경우 50년, 아동의 경우 70세까지로 한다.

운영관리자operating management: 최고위 차원에서 조직을 지시하고 관리하며 평가하는 개인이나 그룹. 이에 대해 예를 들어 대표이사(CEO), 전무(DG), 상무(MD) 및 경영진 등 다양한 용어가 사용된다.

원종세포progenitor cell: 제한된 증식을 할 수 있는 분화전 세포.

유도공기농도¹⁴¹⁾derived air concentration, DAC: 어떤 방사성핵종의 연간섭취한도 ALI를 기준인이 1년 근무 기간 중 흡입하는 공기 양 즉, $2.2 \times 10^3 m^3$ 로 나눈 값. DAC의 단위는 $Bq m^{-3}$ 이다.

139) <역주> 기존에 '선형에너지전달', '선에너지전달'과 같은 용어들이 사용되어 왔으나 의미전달이 어려워 새로 이 용어를 시도한다.

140) <역주> 'ingestion'으로서 '경구섭취'라는 용어도 사용되고 있으나 '흡입'과 대응하는 짧은 표현으로 위해 약간 의미가 확장되지만 '취식'이란 용어의 사용을 시도한다. '섭취'라는 용어도 무난해 보이지만 방사선방호에서 섭취는 흡입과 취식을 합해 체내로 들어간 총량을 의미하도록 차별화할 필요가 있다.

141) <역주> 기존에 '유도공기중농도'를 사용해 왔으나 특화된 용어로 어감을 개선하기 위해 '중'을 생략했다. 영문도 'derived concentration in air'로 사용하지는 않는다.

유발게놈불안정성 induced genomic instability: 돌연변이 자연발생 비율 또는 기타 게놈 관련 변화가 여러 세포세대 동안 지속적으로 증가하는 특성을 갖는 변형된 세포상대 유발.

유효선량 effective dose, E: 단일 양으로 방사선에 피폭한 사람의 종합 위해를 근사적으로 나타내기 위해 도입한 방호량.[†] 유효선량은 다음과 같이 인체의 모든 특정 조직과 장기에서 등가선량을 조직가중치로 가중한 합으로 표현된다.

$$E = \sum_T w_T \sum_R w_R D_{T,R} \quad \text{또는} \quad E = \sum_T w_T \sum_R w_R D_{T,R}$$

여기서 H_T 나 $w_R D_{T,R}$ 는 조직이나 장기 T의 등가선량, w_T 는 조직가중치이다. 유효선량은 기준인에 대해 평가되며 피폭자 개인 특성을 반영하지 않는다.[†] 유효선량의 단위는 흡수선량 단위와 같이 킬로그램 당 줄(Jkg^{-1})이며, 그 특별명칭은 시버트(Sv)이다.

위해 detriment: 그룹이 방사선원에 노출된 결과로서 피폭 그룹 및 그 후손이 겪는 보건상의 전체적 해(害). 위해는 다차원 개념이다. 위해의 주요 성분은 확률론적 양들인데, 이러한 해가 발생함을 전제로 방사선피폭으로 인한 치명적 암의 발생 확률, 비치명적 암을 가중한 확률, 심각한 유전영향을 가중한 확률 및 수명손실 기간 등이 포함된다.

위해조정위험도 detriment-adjusted risk: 영향의 심각성 표현을 위하여 위해의 다양한 성분을 고려하도록 수정한 확률론적 영향의 발생 확률.

위험이전 transport of risk, transfer of risk: 한 집단에 대해 평가된 위험계수를 다른 특성을 가진 집단에 적용하는 것.

위험제약치 risk constraint: 한 선원으로부터 개인 위험에 대한 전망적이고 선원중심적 제한(잠재피폭에 의한 위해의 확률 관점에서). 이 제한은 선원으로부터 높은 수준 위험에 처하는 개인의 방호에 대한 기본 준위를 제공하며, 그 선원에 대한 방호최적화에서 개인 위험에 대한 상한치 역할을 한다. 이 위험은 선량을 초래하는 우발적 사건의 확률과 그 선량에 의한 위해 확률의 함수이다. 위험제약치는 선량제약치에 상당하지만 잠재피폭에 관련된다.

의료피폭 medical exposure: 의료 또는 치과 진단이나 치료의 일환으로 환자에게 발생하는 피폭. 개인이 환자 간병이나 위안을 자발적으로 하는 동안 발생하는

피폭(직무피폭 제외). 피폭이 수반되는 의생명연구 프로그램 대상 자원자에게 발생하는 피폭.

일반인피폭public exposure: 방사선원으로부터 공중 구성원이 받는 피폭. 단, 직무 피폭이나 의료피폭 및 정상적 현지 자연 백그라운드 방사선피폭은 해당되지 않는다.

입자 플루언스particle fluence, Φ : 플루언스 참조.

잔여선량residual dose: 개입 완료 후(또는 개입하지 않기로 결정한 후) 발생할 것으로 예상되는 선량.

잠재피폭potential exposure: 확실하게 발생할 것으로 예상하지 않는 피폭이지만, 선원에서 사고, 장비 고장과 운전 오류를 포함해 확률적 성격의 사건이나 일련의 사건들의 결과로 발생할 수 있는 피폭.

적응반응adaptive response: 후속 방사선 피폭에 대한 세포의 저항성을 증가시키는 노출 후 세포 반응.

전망선량projected dose: 방호조치들을 사용하지 않을 경우 발생할 것으로 예상되는 선량.

정당화justification: 다음을 판단하는 절차. 즉, (1) 방사선 관련 계획된 활동이 전체적으로 편익을 제공하는지 여부, 즉 활동 도입이나 계속을 통해 개인과 사회에 주는 편익이 활동에서 발생하는 해(害)(방사선 위해 포함)보다 큰지 여부 또는 (2) 비상피폭상황이나 기존피폭상황에서 제안된 복구조치가 전체적으로 편익을 가져오는지 여부. 즉, 복구조치 도입이나 지속에 따라 개인과 사회에 대한 편익(방사선 위해 감축 포함)이 피폭상황에서 발생하는 비용과 해 또는 손상을 능가하는지 여부.

조직가중치tissue weighting factor, w_T : 신체가 균질하게 피폭할 때(ICRP 1991b) 총 보건위해에 대한 조직이나 장기 T의 상대적 기여를 나타내기 위해 그 등가선량에 가중하는 인자. 가중치의 합은 1이다.

$$\sum_T w_T = 1.$$

조직 또는 장기 T의 평균흡수선량 mean absorbed dose in a tissue or organ T, D_T : 조직 또는 장기 T에서 평균한 흡수선량 D_T .

$$D_T = \frac{\varepsilon_T}{m_T}$$

ε_T 는 조직 또는 장기 T에 전달된 평균 총에너지이고, m_T 는 그 조직 또는 장기의 질량이다.

조직반응 tissue reaction: 결정론적 영향 참조.

조직반응 문턱선량 threshold dose for tissue reactions: 1%에게 조직반응을 유발할 것으로 추정되는 선량.

종사자 worker: 전일제, 시간제 또는 임시직 여부에 관계없이 고용주가 고용한 사람으로서 직무 방사선방호와 관련하여 분명한 권리와 의무가 있는 사람.

주위선량당량 ambient dose equivalent, $H^*(10)$: 방사선장의 한 지점에서 선량당량으로서 확장되고 정렬된 해당 방사선장의 ICRU구에서 정렬 방사선장과 반대 방향의 반경 벡터 10 mm 깊이에서 생성될 선량당량. 주위선량당량의 단위는 킬로그램 당 줄(J kg^{-1})이며, 그 특별명칭은 시버트(Sv)이다.

줄기세포 stem cell: 여러 종류의 신체 조직으로 분화할 수 있는 능력을 가진 세포, 즉 '미분화(未分化)'세포.

지정구역 designated area: 관리구역이나 감시구역.

직무피폭 occupational exposure: 작업 중 종사자에게 발생하는 모든 피폭. 다만, 1) 배제된 피폭 및 면제된 선원 또는 방사선에 관련된 면제된 활동으로부터 피폭과 2) 모든 의료피폭, 3) 지역의 정상적인 자연 백그라운드 방사선피폭은 제외한다.

진단참조준위 diagnostic reference level: 전리방사선을 사용하는 의료영상 분야의 특정 절차에서 환자선량 또는 투여 방사능(방사성물질의 양)이 일상 조건에서 비정상적으로 높거나 낮은지 여부를 확인하기 위해 사용하는 지표.

집단선량 collective dose: 집단유효선량 참조.

집단유효선량 collective effective dose, S: 피폭과 그 영향의 관점에서 대체로 균질한 집단의 개인선량 합.[†] 특정 선원에서 일정 ΔT 기간에 E_1 과 E_2 사이 개인유효선량 값으로 인한 집단유효선량은 다음과 같다.¹⁴²⁾

$$S(E_1, E_2, \Delta T) = \int_{E_1}^{E_2} E \left[\frac{dN}{dE} \right]_{\Delta T} dE$$

이는 $S = \sum_i E_i N_i$ 로 근사시킬 수 있다. 여기서 E_i 는 소집단 i 의 평균 유효선량이며, N_i 는 이 소집단의 사람 수이다. 유효선량이 합산되는 시간과 사람 수는 항상 지정되어야 한다. 집단유효선량의 단위는 킬로그램 당 줄(J kg^{-1})이며, 그 특별명칭은 인-시버트(man Sv)이다. 유효선량 E_1 과 E_2 범위에 해당하는 개인의 수 $N(E_1, E_2, \Delta T)$ 는 다음과 같다.

$$N(E_1, E_2, \Delta T) = \int_{E_1}^{E_2} \left[\frac{dN}{dE} \right]_{\Delta T} dE$$

또한 개인선량 E_1 과 E_2 범위와 시간 ΔT 에서 유효선량의 평균값 $\bar{E}(E_1, E_2, \Delta T)$ 는 다음과 같다.

$$\bar{E}(E_1, E_2, \Delta T) = \frac{1}{N(E_1, E_2, \Delta T)} \int_{E_1}^{E_2} E \left[\frac{dN}{dE} \right]_{\Delta T} dE. \quad 143)$$

참조동식물 Reference Animals and Plants RAP: 방사선의 환경영향을 평가하고 관리할 목적으로 ICRP가 선정한 특정 동물과 식물.[†] 참조동식물은 정의된 해부학, 생리학 및 생명이력 특성이 있는 분류학 수준으로 과family의 일반성으로 묘사되는 특정 유형 동물이나 식물의 기본적인 생물학적 특성을 가진 가상의 실체로 간주할 수 있으며, 그러한 유형의 생명체에 대해 노출과 선량, 선량과 영향을 연계하는 목적에 사용할 수 있다.

참조준위 reference level: 특정 피폭원에 대해 방호를 최적화할 때 선량에 대한 제

142) <역주> 여기서 $\left[\frac{dN}{dE} \right]_{\Delta T}$ 는 ΔT 시간에 받은 유효선량 E 의 함수로서 개인 수 N 의 분포이다.

143) <역주> 수학적 완결성을 위해, 그리고 전망적 평가에서는 개인선량이 아직 가용하지 않아 복잡하게 표현하고 있다. 운영 결과 개인선량이 가용하면 개인 유효선량 구간 (E_1, E_2)에서 다음과 같이 단순히 표현해도 무방하다.

$$S = \sum_i N_i E_i, \quad N = \sum_i N_i, \quad \bar{E} = \frac{1}{N} \sum_i N_i E_i = \frac{S}{N}.$$

약조건으로 설정하는 최대 개인선량 준위.[†] 제어 가능한 비상상황이나 기존 피폭상황에서 참조준위는 이를 초과하는 피폭이 일어나게 하는 계획은 적합하지 않은 것으로 판단되며, 그 미만일 경우 방호최적화를 이행해야 하는 선량이나 위험 준위를 의미한다. 선택하는 참조준위 값은 검토 중인 피폭의 보편적 여건에 따라 결정된다.

체적소형 모의체 voxel phantom: 의료 단층영상에 근거한 계산용 가상 인형 모의체. 인체의 다양한 조직과 장기의 밀도와 원자구성을 구체화하는 작은 3차원 체적소voxel(복셀)로 나타낸다.

초과상대위험 excess relative risk: 피폭 집단의 질병 발생률을 피폭하지 않은 집단의 질병 발생률로 나눈 값에서 1을 뺀 값. 흔히 Gy 또는 Sv 당 초과상대위험으로 표현된다.

초과절대위험 excess absolute risk: 피폭 집단의 질병 발생률과 사망률에서 피폭하지 않은 집단의 질병 발생률과 사망률을 뺀 값. 초과절대위험은 흔히 Gy 또는 Sv 당 초과율로 표현된다.

최적화, 방호와 안전 optimisation of protection and safety: 피폭 및 잠재피폭의 확률과 크기를 경제사회적 인자를 고려해 합리적으로 달성 가능한 낮은 수준으로 유지하기 위해 방호와 안전의 수준을 결정하는 절차.

커마 kerma, K: 물질의 어떤 질량 dm에서 비하전입자에 의해 생성된 모든 하전입자 운동에너지의 합 dE_{tr} 을 dm으로 나눈 값. 즉

$$K = \frac{dE_{tr}}{dm}$$

커마는 비확률적인 양으로 정의되며, dE_{tr} 은 운동에너지 합의 기대치이다. 커마의 단위는 킬로그램 당 줄($J kg^{-1}$)이며, 그 특별명칭은 그레이(Gy)이다.

통계검증력 statistical power: 어떤 역학연구가 특정 신뢰도로 증가된 위험의 주어진 수준을 검출할 확률.

표적부 target region, T_i : 신체(기준모의체) 내 방사선이 흡수되는 부위. 부위는 장기, 조직, 또는 위장관, 방광, 뼈대나 기도의 특정 조직일 수 있다.

플루언스, 입자 플루언스fluence, particle fluence Φ : 일정 시간 동안 단면적 크기가 da 인 조그만 구를 향해 들어온 입자 수 dN 을 da 로 나눈 값.

$$\Phi = \frac{dN}{da}.$$

피폭범주categories of exposure: ICRP가 방사선 방호체계를 단순화하기 위해 피폭자 속성에 따라 분리한 피폭의 유형.[†] ICRP는 방사선피폭을 직무피폭, 일반인피폭 및 환자 의료피폭의 세 가지 범주로 분류한다.

피폭자exposed individuals: 방사선을 피폭하는 사람.[†] ICRP는 피폭자를 세 범주로 분류한다. 즉, 종사자(이해 개인), 일반인(일반 개인), 그리고 위안자와 간병인을 포함한 환자이다.

허가취득자licensee: 시설이나 활동과 관련하여 특정 활동을 수행할 수 있도록 권한을 부여하기 위해 규제기관이 발급한 유효한 법적 문서 소유자.

확률론적 영향stochastic effects: 암이나 유전영향처럼 선량이 증가하면 영향의 심각도가 아니라 빈도가 같이 증가하며 문턱선량이 없는 것으로 간주되는 영향.

활성(적색)골수active(red) bone marrow: 뼈 속에서 혈액세포를 생성하는 조직.[†] 장 기계통 골수는 전분화능 조혈 줄기세포로부터 성숙 혈액세포에 이르는 혈액세포 생성을 위한 세포 체계를 가지고 있다.

회피선량averted dose: 개별 방호조치 또는 일련의 방호조치 적용으로 방지하거나 회피하는 선량. 즉, 방호조치를 적용하지 않은 경우 전망선량과 조치 후 잔여선량의 차이.

흡수선량absorbed dose, D: 전리방사선이 질량 dm 에 부여한 평균에너지 $d\bar{\varepsilon}$ 를 dm 으로 나눈 몫으로서 기본 선량 양.[†] 즉,

$$D = \frac{d\bar{\varepsilon}}{dm}.$$

흡수선량의 SI 단위는 킬로그램 당 줄(J kg^{-1})이며, 그 특별명칭은 그레이(Gy)이다.

α/β 비율: 세포생장곡선의 곡률 척도이며 선량분할에서 조직 또는 종양의 감수성 척도. 세포살상의 일차항과 이차항 성분이 동일한 때의 선량 값이 된다.

DD: 배가선량 참조.

DNA손상 교신DNA damage signalling: 예를 들어 생식 세포주기 정지를 유발함으로써 세포 내 DNA 손상을 인지하고 반응하는 생화학적 상호작용 과정.

ELR: 생애위험평가지 참조

FSUfunctional subunits of tissue: 신장의 네프론, 폐의 폐포와 같은 조직의 기능 소 단위.

LAR: 생애위험평가 참조.

LD50: 피폭자 절반에게 치명적인 선량.

LET: 에너지전달선밀도 참조

LLE: 생애위험평가 참조.

MC: 돌연변이성분 참조.

NORMnaturally occurring radioactive material, 천연방사성물질. 천연적으로 발생한 방사성핵종 이외의 방사성핵종이 거의 포함되지 않은 방사성물질. 어떤 과정으로 천연 방사성핵종 방사능 농도가 변경된 물질도 NORM에 포함된다.¹⁴⁴⁾

PRCFpotential recoverability correction factor, 회복잠재력보정인자. 다른 종류의 생식 계열 돌연변이가, 배태아의 성장 완성도 능력 차로 인해 출생 생아 후손에서 회복 정도가 달라지는 사실을 고려하는 한 세트의 인자.

RBE: 생물학적효과비 참조

144) <역주> 이 경우 특별히 TENORM(technically enhanced NORM)으로 부르기도 한다.

REID: 생애위험평가 참조.

용어집 참고문헌

ICRP, 1991b. 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 60. Ann. ICRP 21(1-3).

ICRP, 2002. Basic anatomical and physiological data for use in radiological protection. ICRP Publication 89. Ann. ICRP 32(3/4).

ICRP, 2006a. Assessing dose of the representative person for the purpose of radiation protection of the public and The optimisation of radiological protection: Broadening the process. ICRP Publication 101. Ann. ICRP 36(3).

국제방사선방호위원회 2007년 권고(ICRP 103)

부록A

**전리방사선에 의한 보건위험에
관한 생물학적, 역학적 정보:
사람의 방사선방호 목적을 위한
판단 요약**

부록A 머리말

1998년 남아프리카 케이프타운에서 열린 ICRP 본위원회에서 1990년 권고를 갱신하기 위한 검토를 시작했을 때부터 1990년 권고가 그러했듯이 과학적 부록과 간행물이 새로운 권고의 본문을 보완할 필요가 있음이 분명했다. 따라서 제1분과위원회(방사선영향을 다룸)와 제2분과위원회(방사선피폭으로부터 선량을 다룸)는 방사선의 보건영향과 선량계측학적 고려에 관한 부록을 초안하도록 요구받았다. 마찬가지로 의료에서 방사선방호를 다루는 제3분과위원회와 ICRP 권고의 적용을 다루는 제4분과위원회도 필요한 보완 보고서들을 준비하도록 요구했는데 이들은 각각 별도 간행물로 출판되었다. 의료에서 방호에 관한 ICRP 105(2007b)와 대표인과 최적화에 관한 ICRP 101(2006a)가 그것이다.

첫 예비작업 후 2001년 제1분과위원회는 본위원회에 대해 조언할 작업반을 구성하여 이 부록을 초안하기 시작했다. 작업반 위원은 다음과 같다.

R. Cox(위원장)	J. Hendry	A. Kellerer
C. Land	C. Muirhead	D. Preston
J. Preston	E. Ron	K. Sankaranarayanan
R. Shore	R. Ullrich	

교신위원은 다음과 같다.

A. Akleyev	M. Blettner	R. Clarke
J.D. Harrison	R. Haylock	J. Little
H. Menzel	O. Niwa	A. Phipps
J. Stather	F. Stewart	C. Streffer
M. Tirmarche	P. Zhou	

이 부록을 준비하는 기간 제1분과위원회 위원은 다음과 같다.

(2001-2005)

R. Cox(위원장)	A. Akleyev	M. Blettner
J. Hendry	A. Kellerer	C. Land
J. Little	C. Muirhead(서기)	O. Niwa
D. Preston	J. Preston	E. Ron
K. Sankaranarayanan	R. Shore	F. Stewart
M. Tirmarche	R. Ullrich(부위원장)	P.-K. Zho

(2005-2009)

J. Preston(위원장)
R. Chakraborty
C. Muirhead
E. Ron
F. Stewart
P.-K. Zho

A. Akleyev
J. Hendry(서기)
O. Niwa
W. Rühm
M. Tirmarche

M. Blettner
W. Morgan
D. Preston
R. Shore
R. Ullrich(부위원장)

부록A 차례

주요 결론 및 권고	161
A.1. 서론	163
A.1.1. 제A.1절 참고문헌	164
A.2. 세포 및 조직과 방사선의 상호작용	165
A.2.1. 세포에 대한 방사선 작용의 생물물리학 측면	165
A.2.2. 방사선의 주 표적으로서 염색체 DNA	166
A.2.3. DNA 손상에 대한 반응 및 회복	167
A.2.4. 유전자와 염색체 돌연변이 유발	168
A.2.5. 방사선에 대한 후성적 반응	170
A.2.6. 조직반응	172
A.2.7. 방사선 종양형성 기전	173
A.2.8. 유전질환	176
A.2.9. 제A.2절 참고문헌	177
A.3. 조직반응 위험	181
A.3.1. ICRP 60 판단의 개정	181
A.3.2. 배태아의 영향	192
A.3.3. 제A.3절 참고문헌	193
A.4. 방사선 유발암 위험	197
A.4.1. 방사선 반응에 관한 기본 데이터	197
A.4.2. 종양 유발과 수명단축에 관한 동물 데이터	200
A.4.3. 생물학적효과비와 방사선가중치	201
A.4.4. 역학데이터로부터 암 위험 평가	202
A.4.5. 기타 위해 계산의 세부사항	227
A.4.6. 성별 집단 위험 평가	229
A.4.7. 제A.4절 참고문헌	242
A.5. 방사선 피폭 후 암외질환	247
A.5.1. 제A.5절 참고문헌	247

A.6. 유전질환 위험	249
A.6.1. 서론.....	249
A.6.2. 배경 정보.....	249
A.6.3. 최근의 이해 진전.....	252
A.6.4. 2001년도 UNSCEAR 위험 평가치.....	266
A.6.5. 유전영향에 대한 위험계수 도출을 위한 ICRP 위험평가치의 이전 및 현행 평가.....	270
A.6.6. 제A.6절 참고문헌.....	276
A.7. 주요 결론과 제안의 요약	281
A.7.1. 제A.7절 참고문헌	284

주요 결론 및 권고

아래 요약문은 주로 방사선방호 목적으로 보건에 영향을 주는 약 100 mSv(단일 또는 연간 선량)까지 선량 범위의 방사선에 해당된다.

- 낮은 선량/낮은 선량률에서 암 또는 유전질환 유발에 있어 선량 증분과 위험 증가 사이에 단순 비례관계를 사용하는 것이 과학적으로 타당하다. 그러나 이 판단에 불확실성도 인정된다.
- ICRP 60(ICRP, 1991b)에 권고된 선량선량률효과인자(DDREF)값 2는 방사선방호 목적에 계속 사용해야 한다. 낮은 선량에서 암 위험에 대한 문턱치 가능성을 도입하는 효과는 DDREF값의 불확실성 증가 효과와 대등한 것으로 판단된다.
- 양성자와 중성자에 대해 방사선가중치 변경을 제안한다. 현행 권고 부록B “방사선방호에 사용하는 양”에서 이 판단을 논의한다.
- 방사선 위해 값과 조직가중치(w_T)가 새로 제안되었다. ICRP 60로부터 가장 크게 변경된 부분은 유방과 생식선, 그리고 잔여조직의 취급에 대한 것이다. 해당 w_T 변화는 유방이 0.05에서 0.12로, 생식선이 0.20에서 0.08로, 그리고 잔여조직은 새로운 가산체계를 사용하며 0.05에서 0.12로 된 것이다.
- 암발생 데이터를 근거로 한 위해조정 암 명목위험계수는 전인구에 대해 $5.5 \times 10^{-2} \text{Sv}^{-1}$, 성인 종사자에 대해 $4.1 \times 10^{-2} \text{Sv}^{-1}$ 이다. 각각의 ICRP 60 값은 $6.0 \times 10^{-2} \text{Sv}^{-1}$ 및 $4.8 \times 10^{-2} \text{Sv}^{-1}$ 이었다.
- 제2세대까지 유전질환에 대한 위해조정 확률계수는 전인구에서 $0.2 \times 10^{-2} \text{Sv}^{-1}$, 성인 종사자에서 $0.1 \times 10^{-2} \text{Sv}^{-1}$ 이다. ICRP 60에서 각각의 값은 $1.3 \times 10^{-2} \text{Sv}^{-1}$ 및 $0.8 \times 10^{-2} \text{Sv}^{-1}$ 인데 이 값은 더 이상 정당화되지 않는 이론적 평형에서 위험이다.
- 태내피폭 후 암위험은 소아기 피폭에 따른 위험보다 크지 않은 것으로 판단된다.
- 방사선 유발 보건영향의 기원에서 유발유전자불안정성, 구경꾼세포 교신 및 유전자 적응반응의 역할에 관한 지식은 방사선방호 목적에 충분할 정도로 개발되지 않았다. 대부분 경우 이러한 세포학적 과정은 위험의 역학적 척도에 반영되어 있다.

- 강하게 발현하는 유전자와 관련된, 방사선 유발 암에 대한 유전적 감수성은 인구집단 위험 평가치를 의미 있게 왜곡하기에는 너무 드문 것으로 판단된다. 흔하지만 약하게 발현하는 유전자의 잠재적 영향은 확실하지 않다.
- 성인과 아동의 방사선 유발 조직반응(결정론적 영향)의 선량 반응은 일반적으로 낮은 선량에서 위험을 없게 하는 실질 선량문턱을 갖는 것으로 판단된다. 백내장 유발(시각장애)의 선량문턱치 저하에 대해서는 추가 고려가 필요하다.
- 방사선 유발 태내 조직반응, 기형 및 신경학적 영향에 대한 선량 반응 또한 약 100mGy 이상에 선량 문턱치를 갖는다고 판단한다. IQ 저하 유발은 불확실하지만, 낮은 선량에서 그 위험은 실제로 중요하지 않은 것으로 판단된다.
- 낮은 선량에서 암외질환 위험은 매우 불확실하여 어떤 구체적 판단을 내릴 수 없다.

A.1. 서론

(A1) ICRP 1990년도 권고(ICRP 60; ICRP 1991b) 발간 이후 ICRP 제1분과 위원회는 방사선피폭 영향으로 보이는 보건영향의 정량화와 그러한 영향의 근거가 되는 생물학적 기전에 관한 과학적 발전에 대해 포괄적으로 고찰해 왔다. 제1분과위원회 활동 결과의 대부분은 ICRP 작업그룹 보고서에 수록되어 있으며, 제1분과 작업반은 다른 관련 분야 데이터도 검토했다.

(A2) 이 부록의 목적은 ICRP의 새 권고 개발을 지원하기 위해 1990년도 이후 방사선의 보건영향에 관한 제1분과위원회의 모든 판단을 요약하는 것이다. 이 부록에 반영한 많은 분야에서 제1분과위원회가 이미 여러 판단을 제시한 바 있는데 예를 들어 다인자성질환(ICRP 83; ICRP 1999b), 방사선가중치(ICRP 92; ICRP 2003c) 및 낮은 선량에서 암위험(ICRP 99; ICRP, 2005d)에 관한 것이다. 그러나 a) 조직반응 유발에 관한 판단, b) 암과 유전질환 위험에 관한 명목위험계수, c) 상이한 인구 사이에 암위험 이전 및 d) 조직가중치 선택 등 개정에 많은 추가 작업이 필요했다. 이러한 이유 때문에 이들 주제를 이 부록에서 자세히 다룬다.

(A3) 이 부록의 부가적 특징은 1990년 이후 역학 및 생물학적 지식의 누적 이 ICRP 60 판단 중 일부를 강화하거나 때에 따라서는 위험평가 절차를 개정하기도 했다는 점이다. 증가한 지식이 상세함에도 불구하고 이 부록의 기본목표는 방사선방호의 실제 목적을 위해 개괄적 판단을 제공하는 것이다. 그에 따라 여기서 제시하는 많은 작업이 인구집단의 위험을 전망적으로 추정하고 선량한도 준수를 입증하기 위한 방사선 방호량으로 유효선량을 계속 사용함에 집중하고 있다. 유효선량 개념의 적용을 부록B에서 논의한다.

(A4) 이 부록은 다음과 같이 구성된다. 제A.2절에는 방사선피폭의 보건영향 기초가 되는 생물학적 과정에 관해 1990년 이후 습득한 지식이 간략하게 수록된다. 제A.3절에는 방사선 유발 조직반응의 기전과 위험에 관해 갱신된 판단을 수록한다. 제A.4절에는 암 유발 기전과 유전학을 고려하고, 방사선가중치에 관한 이전의 판단을 요약하며 명목위험계수, 위험 이전, 방사선위해와 조직가중치에 관한 새로운 역학 기반 판단을 자세히 설명한다. 제A.4절은 태내피폭 암위험에 관한 지금까지 판단을 요약한다. 제A.5절에는 방사선피폭 후 암외질환이 간단히

설명된다. 제A.6절에는 유전질환 위험의 평가에 대해 새로 개발한 접근법을 상세히 설명하고 위험의 새 평가치를 제공한다. 마지막으로 제A.7절은 이 부록의 주요 권고를 요약 설명하고 그러한 판단을 부록의 해당 절에 연계하는 간략한 표를 제공한다.

A.1.1. 제A.1절 참고문헌

ICRP, 1991b. The 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection.

ICRP Publication 60. Ann. ICRP 21 (1-3).

ICRP, 1999b. Risk estimation for multifactorial diseases. ICRP Publication 83. Ann. ICRP 29 (3-4).

ICRP, 2003c. Relative biological effectiveness (RBE), quality factor (Q) and radiation weighting factor (w_R). ICRP Publication 92. Ann. ICRP 33 (4).

ICRP, 2005d. Low-dose extrapolation of radiation-related cancer risk. ICRP Publication 99. Ann. ICRP 35 (4).

ICRP, 2006a. Assessing dose of the representative person for the purpose of radiation protection of the public and The optimisation of radiological protection: Broadening the process. ICRP Publication 101. Ann. ICRP 36 (3).

ICRP, 2007b. Radiological protection in medicine. ICRP Publication 105. Ann. ICRP 37 (5).

A.2. 세포 및 조직과 방사선의 상호작용

(A5) 이 절의 목적은 인체 내 세포나 조직이 방사선과 일으키는 상호작용에 관한 지식을 1990년 이후 개발된 정보와 개념을 중심으로 요약하는 것이다. 이 부록의 후속 절에서 전개될 판단에 대한 생물학적 골격을 제공하려는 것이다. 이러한 생물학적 데이터와 개념 일부는 복잡하지만, 이 부록의 많은 부분은 비전문가 독자를 위한 것이다. 따라서 이 부록은 많은 생물학적 또는 생물물리학적 논란에 깊이 들어가기보다는 내리는 판단의 명료성과 단순성을 추구했다. 자세한 논의는 이전 ICRP 간행물이나 기타 검토문서에서 찾을 수 있다.

A.2.1. 세포에 대한 방사선 작용의 생물물리학 측면

(A6) ICRP는 1990년 이후 방사선 생물물리학 및 미시선량계측의 광범한 주제를 특별히 다루지는 않았지만, 중요한 발전과 판단은 ICRP 92(ICRP 2003c) 및 낮은 선량 위험에 관한 ICRP 작업그룹 보고서(ICRP 99; ICRP 2006)에 수록되어 있다. 피폭 후 세포와 조직 내 조기 생물물리학적 공정에 관한 이해가 크게 발전했는데 그러한 진전의 일부 요점을 아래 문항들에서 간단히 설명한다. 자세한 정보는 ICRP 92(ICRP 2003c), ICRP 99(ICRP 2005d), Goodhead 등(1996) 및 NAS/NRC(2006)에서 찾을 수 있다.

(A7) 주로 몬테칼로 비적구조 코드의 지속 발전을 통해 DNA 규모의 방사선 비적에서 일어나는 에너지 부여의 미세 구조에 관한 지식이 늘었다. 방사선생물학적 정보와 함께 비적구조 데이터는 DNA에 대한 생물학적 중대손상의 본질 측면 생각에 큰 영향을 미쳤다.

(A8) 특히 DNA에서 방사선 유발 손상의 상당한 비율이 화학적 변화가 복잡한 μ cluster로 나타남을 알게 되었다. 그러한 복잡손상은 1차 비적, 2차 전자 및 2차 활성기단에 의해 유발된 손상의 조합으로 발생할 수 있다. 총 손상의 큰 비율이 근접하게 되면 DNA의 당-인산 중추의 한가닥절단(SSB) 또는 양가닥절단(DSB)에 더한 다양한 DNA 염기손상이 조합하여 때로 될 수 있다. 복잡손상의 빈도와 복잡성이 방사선의 에너지전달선밀도(LET)에 의존한다는 증거도 있다.

(A9) DSB, SSB 및 염기손상을 같이 고려할 경우 복잡손상은 낮은 LET 방사선과 높은 LET 방사선 피폭에서 각각 총 DNA 손상의 60%와 90%를 차지할 수

도 있다. 이러한 데이터는 방사선으로 유발되는 DNA 병변과 활성 화학기단에 의한 산화성 공격을 통해 자연적으로 발생하는 병변 사이에 주된 차이를 드러낸다. 전자는 주로 복잡하고 때를 이루는 반면, 후자는 산재하고 화학 구조도 단순하다.

(A10) ICRP 99에 설명되어 있고 제A.4.1절에도 언급한 것처럼 단순하거나 복잡한 DNA 병변에 대한 여러 복구 특성은 낮은 선량 방사선의 보건영향 판단에 중요한 인자이다.

(A11) 방사선에 의한 복잡한 DNA 손상 유발에 관한 이해의 발전 외에도 방사선 생물물리학에 또 다른 진전도 있었다. 예를 들어 염색체구조 차원에서 방사선 유발 손상이 조사되었으며, 이러한 연구는 유전자/염색체 돌연변이 유발의 생물물리학적 모델링과 함께 진행되었다. 또한 개별 입자 조사시스템(마이크로빔) 개발과 DNA 손상 반응 동안 DNA-단백질 상호작용의 세포 차원 가시화를 위한 영상화기법 개발과 같은 유용한 기술혁신도 있었다(ICRP 99; ICRP 2005d, Churubini 등 2002).

A.2.2. 방사선의 주 표적으로서 염색체 DNA

(A12) 제A.2.1절에 설명한 생물물리학적 정보 이외에도 생물학적 영향에서 염색체 DNA가 주된 세포 표적임을 암시하는 보다 직접적인 증거가 있다. 이 현안에 관한 많은 초기 증거가 일반적 세포 단백질과 비교할 때 세포핵 DNA에 내포된 방사성핵종의 방사선생물학적 영향이 더 큼을 시사했다(UNSCEAR 1993). 최근에는 세포의 다른 부분에 소정의 선량을 부여할 수 있는 마이크로빔 조사장치를 사용함으로써 세포핵의 방사선 민감성을 확실히 확인할 수 있었다. 그러나 제A.2.5절에 설명한 것처럼 이러한 마이크로빔 기법은 세포 방사선 반응의 잠재적 복잡성에 대한 증거도 제공한다.

(A13) 또한 1990년 이후 암 유발과 같은 방사선생물학적 영향에 대한 DNA 손상의 결정적 중요성은 DNA 손상에 대한 반응에서 유전자적 결함이 있는 세포와 동물에 대한 많은 연구에 의해 입증되었다. 즉, 이러한 특정 유전자결핍 상태는 방사선생물학적 영향의 빈도를 증가시킨다(UNSCEAR 1993, 2000, ICRP 79; ICRP 1998a, NAS/NRC 2005). 마지막으로, 방사선 작용에 관한 생물물리학적 예측, 복잡한 DNA 손상의 생물학적 중요성, 그리고 방사선 유발 유전자와 염색체 돌연변이의 특성간의 일치가 제A.2.1절에서 보듯이 빠른 속도로 진행됨

에 따라 특정 형태 DNA 손상이 방사선생물학적 영향에 결정적으로 중요하다는 결론에 무게를 싣고 있다.

A.2.3. DNA 손상에 대한 반응 및 회복

DNA 복구, 세포자살 및 세포교신

(A14) 세포에서 피폭 후 과정의 기전과 결과에 대한 지식 발전은 방사선생물학에 대한 이해에 심대한 변화를 가져올 것으로 볼 수 있다. 이러한 발전의 많은 부분은 현대 세포/분자생물학과 유전학의 특성인, 크게 향상된 기술과 지식 기반으로 여겨지고 있다. 여러 보고서(UNSCEAR 2000, NCRP 2001, NAS/NRC 2006, ICRP 99; ICRP 2005d)에 이러한 현안이 자세히 설명되어 있는데, 몇 가지 핵심 결론은 다음과 같다.

- 중대한 DNA 손상 반응 유전자(예: ATM, NBS 및 DNA PK_{CS} 단백질)를 분리하고 특성을 파악함으로써 DNA 손상을 확인하고 신호를 내도록 하는 가장 중요한 생화학적 경로의 구조와 기능에 대한 통찰력을 제공했다.
- 이제 이러한 다양한 경로에 대해 많이 알고 있으며, 이로부터 화학적으로 복잡한 DNA 양가닥 병변에 대해 오류에 취약한 복구가 다년간 알려진 방사선생물학적 반응, 즉 염색체 변형, 유전자 돌연변이 및 세포 살상을 가장 잘 설명할 수 있다는 견해에 이르게 되었다.
- 방사선 유발 DNA 양가닥 병변의 무오류, 재조합복구 가능성을 인지할 수 있지만 세포주기의 후기단계에 한정된다고 판단되기 때문에 전체적인 방사선 위험에 대한 영향은 크지 않을 것이다.
- 과거의 세포연구와 함께, 분자 및 생화학적 데이터는 DNA 손상 반응의 활성화와 복구과정이 세포에서 선량/선량률 및 방사선질 영향에 있어 중요한 결정요소라는 관점에 무게를 더한다.
- 피폭 후 프로그램된 세포사멸(세포자살) 및 재생주기를 통한 세포경로에 미치는 지연효과는 이제 분자 및 생화학적 차원에서 한층 잘 파악되고 있다.
- 방호영향 측면에서, 방사선 손상세포의 세포자살 제거가 복구의 대안으로 사용될 수 있다. 즉, 세포자살에 따라 돌연변이를 전수하는 생존세포viable cell의 빈도를 줄일 수 있다.
- 피폭 세포에 세포주기 검사점을 두어 DNA 손상 교신의 복잡한 네트워크와 연계할 수 있으며, 복구 기회를 최대화하거나 세포가 생화학적 균형에 기초해 그 운명(생존이나 사멸)을 결정하는 지점으로 사용할 수 있어 보인다. 그러나 그에 관한 증거는 많지 않다.

- 단일 세포에 DNA 양가닥절단 유발과 피폭 후 세포교신을 연구하는 새롭고 매우 민감한 기법은 낮은 선량에서 DNA 손상 반응에 관한 지식을 얻는 데 크게 기대된다.

(A15) 위 판단에 기초가 되는 발전 중 결정적 요소는 DNA 손상 반응/회복 및 세포자살/세포주기제어의 교란이 종종 종양발생과 긴밀히 연관되는 증거이다. 이러한 세포 활동이 피폭 후 종양 발생에 대한 세포방어에 필수적임이 이 개념에 의해 더 확실해진다. 이는 곧 이러한 세포과정의 특성이 방사선방호에서 판단 발전에 중요한 요소가 됨을 뜻한다.

적응반응

(A16) 피폭 후 DNA 복구, 세포자살 및 세포교신에 대해 습득된 비교적 높은 지식은 소위 적응반응의 기전과 중요성이 아직 불확실하다는 점과 대비된다. 전형적으로 일부 실험 시스템에서 방사선 1차 선량에 의해 조정된 세포에서 적응반응이 확인된다. 어떤 방식을 통해 이러한 조정 선량으로부터 세포가 2차 방사선 시련에 대한 내성을 키우게 한다.

(A17) 다양한 종류 적응반응에 관련된 데이터를 광범하게 검토했다 (UNSCEAR 1994, 2000, NCRP 2001, NAS/NRC 2006, ICRP 2005d). 이 검토에서 도출한 주요 결론을 다음과 같이 요약할 수 있다.

- 시험관 및 생체 내 세포에서 적응반응은 보편적인 특성이 아니다.
- 가장 잘 연구된 세포계통(인체 림프구에서 세포유전적 반응)에서도 a) 수십 밀리그레이 선량으로 적응반응이 촉발된다는 증거가 없으며, b) 반응 표출에 공여자donor 차이가 크다.
- 보다 일반적인 스트레스 반응 기전, 화학기단 청소, 보다 효율적인 DNA 회복과 연계성을 지원하는 연구도 일부 있지만, 적응반응의 기계론적 지식은 아직 부분적이다.
- 일부 긍정적인 결과는 있지만, 종양유발(또 면역 반응)에 대한 동물연구가 보건 악영향을 줄이는 적응반응에 대한 일관된 증거를 제공하지 않는다.

A.2.4. 유전자와 염색체 돌연변이 유발

(A18) 앞에서 설명한 것처럼 복잡한 DNA 양가닥손상 유발, 오류 취약 DNA 손상 반응/회복 과정 및 유전자와 염색체의 전리방사선 피폭 특징적 돌연변이 형

태(DNA 서열 손실이나 재배열)를 결정하는 생물물리학적 과정들은 상호 강하게 연관된다. 세포의 선량-반응에 대해 가용한 대부분 정량적 데이터는 ICRP 60 이전에 확보된 것이며, 기록된 돌연변이의 선량반응 특정 형식은 생물학적 시스템, 돌연변이 귀착점, 방사선질(LET) 및 선량률에 따라 달라진다(Thacker 등 1992, UNSCEAR 1993, 2000).

(A19) 그러나 일반적으로 돌연변이 선량-반응은 낮은 LET에서는 선형-이차 반응이며, LET가 증가하면 선형성도 강화된다. 낮은 LET 방사선의 경우 선량률이 낮아지면 포유류 체세포와 배아세포에 유발되는 유전자/염색체 돌연변이 빈도도 감소한다. 일반적으로 선량률 감소 인자는 최대 3-4이지만, 인체 림프구에서 염색체 변형의 경우 어느 정도 높을 수 있다. 돌연변이 유발에 대해 RBE와 LET 사이 관계는 상당히 일관성이 있으며, 70-200 keV μm^{-1} LET 범위에서 RBE 최대값이 대개 약 10-20으로 기록되었다.

(A20) '염색체 착색' 기법이 사용되는 최근의 새로운 연구에 따르면 셋 이상의 파열점 상호작용에 관련된 복잡한 염색체 교환은 낮은 LET 방사선에 의한 낮은 선량에서는 드물게 나타나지만, 높은 LET 유발 사상에서는 모든 선량에서 상당히 높게 나타난다. 세포 DNA의 방사선 작용에 대한 이해 발전에는 염색체 교환 형성 모델링이 포함되지만, 이러한 교환에 두 개의 손상부 상호작용이 필요한지, 또는 상당 부분이 손상부와 손상되지 않은 부위 사이의 상호작용에서 도출되는지에 관한 논란은 남아있다(UNSCEAR 2000). 1990년 이후 낮은 선량에서 유전자와 염색체 돌연변이 유발을 규명하기 위해 많은 노력이 전개되었다. 그러한 낮은 선량에서 분해능을 제한하는 기술적 요소들이 있는데 다음 두 연구가 주목된다.

(A21) 첫째, 사람 림프구에서 X선에 의해 유도된 염색체 변형을 광범하게 조사한 결과 약 20 mGv 분해능 한계로 낮은 선량에서 선형 선량-반응의 증거가 확인되었다. 둘째, 생쥐 피부의 색소 생성 세포와 관련되는 매우 민감한 체내 돌연변이 시스템이 최저 약 50 mGy의 X선 선량까지 돌연변이 선량-반응의 선형성을 나타냈다(UNSCEAR 2000, ICRP 2005b 참조).

(A22) 또한 방사선피폭의 생물표지로서뿐 아니라 생체 내 세포반응, 선량/선량률 영향 및 잠재적 보건 결과 사이의 관계를 구축할 목적으로도 염색체 변형을 사용하는 중요한 진전이 있었다(Tucker 등 1997, Tawn 등 2004).

A.2.5. 방사선에 대한 후성적 반응

(A23) 1990년 이후 방사선생물학적 연구의 주요 특징은 직접 유발된 DNA 손상에 대한 명백한 요건 없이 계놈 변화나 세포영향을 일으키는 것으로 보이는 조사 후 세포반응을 입증하는 연구가 광범위하게 이루어졌다는 것이다 (Churubini 등 2001 참조, NAS/NRC 2006, ICRP 2005d). 이러한 과정은 일반적으로 후성적(epigenetic)이라 할 수 있으며, 생물물리학과 DNA 손상 반응 분야에서 1990년 이후 진전된 많은 결과를 지지하는 개념 즉, 전리방사선 비적에 DNA가 직접 표적이 되는 개념과는 대조된다. 일부 요소는 중복되지만 이러한 후성적 영향은 a) 방사선 유발계놈불안정성과 b) 피폭 후 세포끼리 구경꾼교신이라는 두 가지 범주로 구분할 수 있다.

방사선 유발계놈불안정성

(A24) 기존의 DNA 손상 반응은 피폭 후 계놈 손상을 1차 또는 2차 세포 주기 중 표출하는 것으로 알려져 있지만, ‘유발계놈불안정성’이라는 용어는 계놈 손상과 세포 영향이 조사 후 여러 세포 주기에 걸쳐 일관성 있게 표출되는 현상을 설명하기 위해 사용된다(Little 2003, Morgan 2003). 배양세포에서 표출되는 이 불안정성은 염색체 변형, 유전자 돌연변이 및 세포자살/사멸의 빈도 증가와 같은 형태로 나타난다. 다른 현상도 인지되고 있다. ICRP 99 및 NAS/NRC(2005) 보고서에서는 아래에 설명한 예를 포함해 유발계놈불안정성에 관련된 최근의 증거를 검토했다.

(A25) 유발계놈불안정성에 관한 시험관 세포연구 대부분은 염색체 종점을 사용해 수행되었다. 확립된 세포주의 대량 배양에서 염색체 불안정성이 재현 가능하게 나타났지만 복제세포 집단과 정상 2배체 세포에 관한 연구는 거의 없었다. 이러한 관점에서 대량 배양과 복제기법을 사용한 사람 2배체 섬유아세포에 대한 최근의 세포유전 연구가 불안정성 현상에 관한 증거를 찾을 수 없었다는 점에서 특별한 의미가 있다.

(A26) 이러한 부정적 결과 때문에 비정상적이거나 유전적으로 변형된 세포에서 유발계놈불안정성이 표출될 가능성이 제기되고 있으며, 이러한 현상은 생체에서 이 현상을 분명히 입증하기 어렵다는 사실과 부합된다. 높거나 낮은 LET 방사선에 대한 사람과 생쥐의 생체 조사 후 조혈세포에서 세포유전적 결과는 부정적이거나 불안정성 증거에 일관성이 없었다. 그러나 특정 생쥐 주와 정상세포

에 어느 정도 긍정적인 결과가 있으므로, 후속 연구가 필요하다. 또한 생쥐의 경우 유발계놈불안정성은 유전적 백그라운드에 따라 변하며, DNA 손상 반응의 참여와 연관되는 경우도 있다.

(A27) 다양한 형태의 유발계놈불안정성에 대한 생물학적 기초는 잘 파악되고 있지 않다. 일부 생화학적 데이터는 세포 스트레스와 산화성 과정이 연관됨을 시사한다. 다른 세포유전적 연구에서는 DNA 반복 서열을 인코딩하는 잠재적으로 불안정한 DNA 조각의 존재를 암시하고 있다.

피폭 후 구경꾼교신

(A28) 소위 **구경꾼효과**는 방사선 비적이 직접 교차하지 않는 세포에서 세포 사멸/세포자살, 유전자/염색체 돌연변이, 계놈불안정성 및 단백질 존재 패턴의 변화가 있는 것과 관련된다(Little 2003, Morgan 2003, Mothersill과 Seymour 2001). 이러한 구경꾼 세포는 인접한 세포막 간극 연결 상태를 통하는 분자 또는 세포 배양 매체에서 그러한 신호발생 분자 확산을 통해 조사된 인접 세포가 내는 신호에 반응하는 것으로 판단된다. 방사선에 의한 구경꾼효과에 관련된 데이터는 ICRP 99(ICRP 2005d) 및 NAS/NRC(2006) 보고서에 수록되어 있으며 여기에서는 몇 가지만 언급한다.

(A29) 배양세포의 구경꾼효과에 대한 실험적 연구는 일정 수의 방사선 비적을 세포나 세포핵에 부여할 수 있는 마이크로빔 조사장치가 개발됨에 따라 크게 활발해졌다. 그에 따라 피폭하지 않은 세포에서 발생하는 세포 영향을 정확히 결정할 수 있다. 다르게는 대량배양에서 세포/세포핵 중 일부만 교차되는 정도의 입자 플루언스를 사용해 세포를 조사시키는 방법도 있다. 이때 구경꾼교신의 표출은 비적 교차 수를 초과하는 세포 영향의 빈도로 입증할 수 있다.

(A30) 대부분의 구경꾼 연구는 높은 LET 알파입자와 양성자를 사용한 세포 조사와 관련되지만 특히 배양매체를 통한 교신에 대해 낮은 LET 연구도 일부 있다. 구경꾼교신에 관련된 생물학적 기전은 다양하며 계속 규명해야 할 대상이다. 일부 데이터는 산화성 스트레스 유발이나 방사선 손상 반응경로 조절을 지목한다. 배양매체를 통해 조정되는 효과의 경우 피폭 세포가 염색체손상(염색체 파괴)인자를 방출하고 수용 세포에서 활성산소종 증가에 따라 세포 내 칼슘이 이동함에 어느 정도 증거가 있다.

(A31) 따라서 시험관에서 표출될 경우 유발계놈불안정성과 구경꾼효과 현상은

일반적인 스트레스 관련 기전을 보일 수 있다. 그러나 전체적인 세포 영향에 대한 구경꾼신호의 상대적 영향 및 그러한 신호가 선량종속이라는 데이터는 거의 없으며 일부 반론도 있다. 염색체과과인자에 관한 어느 정도 데이터가 있다 하더라도 생체 내 구경꾼효과에 관한 연구는 아직은 유아기에 있다.

A.2.6. 조직반응(결정론적 영향)

(A32) 1990년 이후 방사선 유발 유해한 조직반응(결정론적 영향)의 정량적 측면에 관한 과학적 관점에 커다란 변화는 없었다. 그러나 그러한 반응을 수정할 수 있는 기전에 관해서는 어느 정도 진전이 있었다(제A.3절 참조).

(A33) 조기 조직반응에 관해 증가하고 있는 연구 결과는 다양한 사이토킨과 성장인자를 사용해 주로 원종progenitor세포의 재생을 촉발하여 조직반응을 수정할 수 있는 가능성이 입증되고 있다. 다른 생물학적 반응 수정자는 지발 반응에 사용할 수 있는데, 특히 실험동물 시스템에 유발된 기관손상의 표출을 지연시키는 혈관 수정제가 있다. 조직과 기관의 반응을 수정할 수 있게 됨에 따라, 정량적 관점에서 영향이 반드시 미리 결정되지는 않으므로 ‘결정론적 영향’이라는 용어가 완전히 정확하지는 않다. 그러나 이 용어가 널리, 그리고 견고하게 정착되어 있으므로 ICRP는 조직반응 또는 기관반응을 나타내는 데에 ‘결정론적 영향’이라는 표현을 계속 사용한다.

(A34) 1990년 권고 이후 조직이나 기관의 구조가 피폭에 대한 반응에서 주요한 역할을 한다는 사실이 더욱 인식되고 있다. 쌍으로 존재하는 기관 또는 기능소단위(FSU)가 직렬이 아닌 병렬로 배열된 기관의 경우 많은 FSU의 비활성에도 임상적 손상 징후 없이 지탱할 수 있는데, 이는 상당한 예비용량과 잔여 FSU에 의한 보상 때문이다. 이것이 명백한 부상에 대한 문턱선량이 존재하는 중요한 이유 중 하나이며, 특히 장기의 결정적 부위가 보호될 수 있는 신체 일부 조사에서 높은 내성을 보이는 것도 그러하다.

(A35) 지발 조직반응에는 표출 전 길고 선량 의존적인 잠복기가 있을 뿐 아니라, 많은 경우 조사 후 10년이 지난 후에도 발생이 여전히 증가하도록 긴 진행기를 갖기도 한다. 지발반응이 ‘일반적generic’이라 함은 해당 표적조직에 직접 발생한다는 의미이다. 다르게는 ‘결과적consequential’일 수도 있는데 이것은 표적조직에 영향을 주는 심각한 조기반응의 후속 결과로서 발생하는 것이다.

(A36) 급성 단일 선량, 다중 분할 선량 또는 연속 피폭과 같은 선량 부여 패턴의 변화에 따르는 동효력선량(iso-effective dose) 변화를 설명하는 데 선형-이차 형식을 사용하는 것이 굳어 왔다. 일반적으로 선형항과 이차항 상수의 비는 조기 반응과 결과적 지발반응에서 높으며, 일반적 지발반응에서는 낮다.

A.2.7. 방사선 종양형성 기전

(A37) 1990년 이후 생물학의 기술적, 학술적 진보가 이루어짐에 따라 종양형성의 복잡한 다단계 과정에 대한 이해를 발전시켰다(예를 들어 UNSCEAR 1993, 2000, NCRP 2001, NAS/NRC 2006, ICRP 2005d). 쉽게 말하면 복잡한 다단계 과정은 a) 정상세포가 암으로 이어질 변형세포(종양선행 상태) 경로로 들어가는 종양 개시, b) 종양선행 개시세포 무리의 성장이 강화되는 종양 촉진, c) 종양선행 상태에서 암으로 진전이 예상되는 상태로 바뀌는 악성변환. d) 종양형성의 말기 단계로서 세포가 더 빨리 자라고 침습성이 되는 속성을 갖는 종양 진전 단계로 분류할 수 있다.

(A38) 간단히 줄이면 임파-조혈암이나 고형종양 모두가 해당 조직에서 하나의 유사줄기세포(stem-like cell)로부터 기인한다고 간주된다. 대개 조직 고유성 특정 유전자와 염색체 돌연변이가 이러한 표적 줄기세포에게 성장발전의 정상적인 제약을 부분적으로 벗어날 수 있는 세포 특성을 부여할 수도 있다. 때로는 그러한 세포에서 소위 종양유전자에 기능 돌연변이 획득을 통해 특수 속성을 확보할 수도 있으며, 다르게는 소위 종양억제유전자 기능 상실이 일어날 수도 있다. 현재의 가설에 따르면 이러한 종양개시 세포무리에서 유전자/염색체의 다른 돌연변이 출현을 통해, 또는 핵심 유전자의 비돌연변이성 침묵을 통해 충분한 악성잠재성이 단계적 양상으로 발전한다. 이렇게 하여 시간이 지나면 세포노화 회피와 성장선택을 통해 종양의 악성 잠재도가 증가한다. 돌연변이가 발생해 DNA와 염색체 안정성이 상실됨에 따라 종양 진전 속도가 빨라지는 경우가 있다. 가속된 돌연변이율의 이러한 과정은 많은 조직에서 종양형성의 주요 동인일 수 있지만, 돌연변이 근거가 분명하다면 종양 관련 게놈불안정성은 제A.2.5절에 설명한 방사선 유발게놈불안정성 현상과 구별된다.

(A39) 그러나 종양 진전은 돌연변이 무리의 단계적 누적보다 훨씬 복잡하다. 종양형성과 정상세포의 미세 환경 상호작용이 암 진전에 결정적 요소라는 훌륭한 증거가 있는데, 자라는 고형종양에 대한 혈액 공급 인입이 이에 대한 중요한 예이다.

(A40) 1990년 이후 동물 모델을 사용하거나 방사선 관련 특정 인체 종양의 유전학적 분석을 수행한 결과 방사선 종양형성의 기계론적 기초에 대한 이해가 상당히 진전했다(UNSCEAR 1993, 2000, NCRP 2001, NAS/NRC 2006, ICRP 2005d).

방사선 종양형성의 동물 모델

(A41) 다단계 방사선 종양형성의 실험적 연구에 세포학, 세포유전학, 분자생물학 및 조직병리학적 기법이 조합되어 사용되었다. 가장 의미 있는 대부분 연구는 설치류 모델에서 수행되었는데, 그 몇몇은 해당 사람 종양 연구로 파악한 유전학적 기반을 가진다. 백혈병과 피부, 뼈, 뇌, 폐, 유방 및 위장관 고형종양의 경우 방사선 피폭 후 다단계 종양형성 과정과 함께 일부 관련된 결정적 돌연변이 본질에 대한 증거가 있다. 이러한 돌연변이 중 여럿은 사람 종양에 존재하며, 같은 종양이 설치류에서도 자연발생적으로 또는 다른 발암물질 노출로 인해 일어난다. 전체적으로 이러한 연구에서 도출한 중요 메시지는 방사선 종양형성이 방사선을 비상한 발암물질로 구별할 정도로 명확한 특성이 없는 다단계 방식으로 진행된다는 것이다. 특히, 데이터는 부족하지만 유발계놈불안정성의 후성적 과정이 방사선 종양형성에 일관적이고 주되게 기여한다는 증거는 찾아볼 수 없다.

(A42) 다단계 종양 진행에서 방사선의 작용위치 연구에 동물모델을 사용해 왔다(UNSCEAR 1993, 2000, NCRP 2001, ICRP 2005d, NAS/NRC 2006). 이러한 데이터에 따르면 방사선은 종양 진전에 있어 약한 촉진제일 뿐이며 종양형성 최초 단계(개시)에서 역할을 하는 것으로 보인다. 그러한 개시 속성에 대한 보다 직접적인 증거를 *Apc* 결핍 생쥐에서 조사 후 위장계 종양형성에 관한 최근 연구에서 확보할 수 있었다(Ellender 등 2005). 이 연구는 방사선의 주요 영향이 종양 진전의 강화보다는 종양선행성 미시적 위장 병변 수를 증가시킴을 보였으며, 또한 직접적 단일 유전자돌연변이 사상이 방사선 유발 위장선종 발생을 설명함을 보였다. 동물모델을 사용한 분자 및 세포유전 연구 결과는 방사선이 유전자 손실 기전을 통해 종양형성 초기 과정에 작용한다는 주장을 추가로 지지한다.

(A43) 원칙적으로 방사선의 돌연변이 유발 속성은 방사선이 다단계 종양형성 전반에 영향을 줄 수 있을 것이다. 그러나 종종 피폭 후 단계를 특성화하는 계놈 불안정성 및 손상의 매우 높은 자연발생률은 후기 단계에서는 방사선 유발 돌연변이 의존성을 약하게 만들 것이다(UNSCEAR 2000).

(A44) 방사선 종양형성에 관한 정량적 동물연구에서 얻은 데이터는 방사선방

호에서 일부 긴요한 판단 도출에 중요하다. 선량, 선량률 및 방사선질 관점에서 그러한 데이터의 의미는 뒤에서 설명한다.

사람에서 방사선 관련 종양

(A45) 방사선 인과확률이 높은 사람 종양의 기계론적 연구 기회는 제한되어 있다. 방사선 관련 폐, 간, 갑상선, 피부 및 골수 종양에 대해 수행한 세포유전학적 및 분자학적 연구는 특정 유전자나 염색체 돌연변이에 집중된 경향이며, 그러한 돌연변이와 초기 방사선 손상 사이 관계는 아직 분명하게 밝혀진 바 없다(UNSCEAR 2000). 그러나 1990년 이후 사람에 대해 개발된 데이터는 동물연구 결과와 대체로 부합하여 방사선 종양형성이 비상한 방식을 따르지 않음을 시사하며 방사선 고유한 특정 돌연변이 표식은 아직 알려지지 않았다. 방사선 종양형성에 유발계놈불안정성의 개입은 없거나 논쟁의 여지가 있는 것으로 보고 있다(Nakanishi 등 2001, Cox와 Edwards 2002, Lohrer 2001).

암에 대한 유전적 감수성

(A46) 방사선 유발 암에 대한 감수성에 있어 개인 사이 유전적 차이 문제는 ICRP 60에 언급했고 ICRP 79(ICRP 1998a), UNSCEAR(2000, 2001) 및 BEIR VII 보고서(NAS/NRC 2006)에서도 검토되었다. 1990년 이후 유전자(소위 고침투 유전자) 담체의 높은 비율에서 초과 자연발생 암이 나타나는 여러 단일 유전자 오류에 관한 많은 정보가 확보되었다. 또, 유전자-유전자 또는 유전자-환경 상호작용이 훨씬 다양한 암의 표출을 결정하는 여러 저침투 유전자에 대한 일부 데이터와 인식도 존재한다.

(A47) 배양된 사람세포와 유전자 변형 실험실 설치류를 사용한 연구도 지식에 크게 기여했는데, 보다 제한된 역학 및 임상학적 데이터에 따르면 높은 비율의 암 취약, 단일 유전자결함은 방사선의 종양형성에 증가된 감수성을 보일 것임을 시사한다.

(A48) 저침투성 암선형 유전자의 발현 기초가 될 수 있는 복잡 상호작용을 실험적으로 입증함에 상당한 진전이 최근 이루어졌다(NAS/NRC 2006). 그러나 이 연구는 아직 초보단계이다.

A.2.8 유전질환

(A49) 생식선의 방사선 피폭에 의한 유전질환 유발 위험에 관한 검토는 ICRP 60에서 실험동물(주로 생쥐) 배아세포 돌연변이에 대한 선량-반응의 정량적 데이터를 사람으로 연장하여 이루어졌다. 일본 원폭생존자 자손에 대한 사망률과 암 발생에 관한 추적이 추가로 이루어졌지만(Izumi 등 2003a, 2003b), 데이터가 이전 분석의 결론을 수정할 정도는 아니었다. 또한 생쥐에서 돌연변이 발생에 관한 새로운 정량적 데이터도 거의 없다. 그러나 1990년 이후 돌연변이 과정과 인구 집단에서 유전위험 추정에 관한 새로운 개념이 상당히 개발되었다(UNSCEAR 2001, NAS/NRC 2006). 사람에 대한 연구에서 방사선에 의한 초과 유전질환에 대한 직접적인 증거가 확보된 것은 없지만, 실험동물에서 얻은 데이터는 ICRP가 유전질환 위험평가의 개선에 유전학 발전을 최선으로 이용할 수밖에 없는 이유를 제공했다.

(A50) 분자유전학 기법을 적용함으로써 사람에게 자연적으로 발생하는 유전질환의 분자학적 근거에 대한 상세한 지식과 생쥐 배아세포에서 방사선 유발 유전자(특정 유전자위) 돌연변이에 대한 지식을 얻을 수 있었다. 또한 생쥐 유전자세포의 방사선 유발 유전자(특정 유전자 좌위) 돌연변이의 기초도 마련할 수 있었다. 이제 계놈에서 커다란 복수 유전자위 탈락이 방사선 유발 우성 돌연변이를 형성할 수 있다는 강력한 증거가 있다. 그러한 복수 유전자상실 사건의 일부만이 배태아 발육과 출산으로 이어질 것으로 판단된다. 이러한 발견은 사람에게서 주된 유전적 악영향은 단일 유전자 질환보다는 복수 시스템 발육이상의 형태로 나타날 것이라는 개념을 이끌어 냈다.

(A51) 사람 유전자의 새로운 정보에 기초한 다른 하나의 개념적 변화는 돌연변이 증가에 대한 만성 다인자성질환(예를 들어 관상동맥 심장질환 및 당뇨병) 빈도의 반응성을 평가하는 방법의 발전이다. 이에 따라 표출에 유전과 환경 요인의 상호작용이 필요한 대규모이고 복잡한 이러한 질환 부류에 관한 위험평가를 개선할 수 있었다.

(A52) 사람 유전학에 대한 이러한 실험 및 개념의 발전은 유전적 위험평가에 새롭고 보다 견고한 하나의 골격을 형성하는 데 통합되었다(UNSCEAR 2001).

(A53) 또한 생쥐에서 확장 단순직렬 DNA 반복(ESTR) 좌위와 사람에게서 미니위성좌위(minisatellite loci)를 사용해 생쥐와 사람의 방사선 유발 돌연변이율을 추

정하는 데도 발전이 있었다. 이러한 DNA 반복은 직렬반복 수 변화로 나타나는 돌연변이에서 매우 돌변성이 높다. 이러한 돌변성 증가는 자연적으로나 방사선 피폭으로 표출되며, 따라서 비표적 및 세대 간 방사선 영향을 포함한 관련 돌연변이 기전에 주의가 집중되었다(UNSCEAR 2000, 2001, CERRIE 2004). 그러나 현재 지식으로는 이러한 DNA 반복서열에서 돌연변이는 유전질환과 연관되는 경우가 드물기 때문에 ICRP는 그러한 좌위에 대한 정량적 돌연변이 데이터를 이 부록 제A.6절에 주어진 유전위험 평가에 포함시킬 충분한 이유가 없다고 판단한다.

A.2.9. 제A.2절 참고문헌

- CERRIE, 2004. Report of the Committee Examining Radiation Risks of Internal Emitters (CERRIE). CERRIE: London October 2004, www.cerrie.org ISBN 0-85951-545-1.
- Cherubini, R., Goodhead, D.T., Menzel, H.G., et al. (Eds.), 2002. Proceedings of the 13th Symposium on Microdosimetry. Radiat. Prot. Dosim. 99 Nos. 1-4.
- Cox, R., Edwards, A.A., 2002. Comments on the paper: Microsatellite instability in acute myelocytic leukaemia developed from A-bomb survivors and related cytogenetic data. Int. J. Radiat. Biol. 78, 443-445.
- Ellender, M., Harrison, J.D., Edwards, A.A., et al., 2005. Direct single gene mutational events account for radiation-induced intestinal adenoma yields in Apc(min/+) mice. Radiat. Res. 163, 552-556.
- Goodhead, D.G., O'Neill, P., Menzel, H.G. (Eds.), 1996. Microdosimetry: An interdisciplinary approach. Proceedings of the 12th Symposium on Microdosimetry. Royal Society of Chemistry, Cambridge.
- ICRP, 1991b. The 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection.
- ICRP Publication 60. Ann. ICRP 21 (1-3).
- ICRP, 1998a. Genetic susceptibility to cancer. ICRP Publication 79. Ann. ICRP, 28 (1/2).
- ICRP, 2003c. Relative biological effectiveness (RBE), quality factor (Q) and radiation weighting factor(w_R). ICRP Publication 92. Ann. ICRP 33 (4).

- ICRP, 2005d. Low-dose extrapolation of radiation-related cancer risk. ICRP Publication 99. Ann. ICRP 35 (4).
- Izumi, S., Suyama, A., Koyama, K., 2003a. Radiation-related mortality among offspring of atomic bomb survivors after a half-century of follow-up. *Int. J. Cancer* 107, 291–297.
- Izumi, S., Koyama, K., Soda, M., et al., 2003b. Cancer incidence in children and young adults did not increase relative to parental exposure to atomic bombs. *Br. J. Cancer* 89, 1709–1713.
- Little, J.B., 2003. Genomic instability and bystander effects: a historical perspective. *Oncogene* 22, 6978–6987.
- Lohrer, H.D., Braselmann, H., Richter, H.E., et al., 2001. Instability of microsatellites in radiation-associated thyroid tumours with short latency periods. *Int. J. Radiat. Biol.* 77, 891–899.
- Morgan, W.F., 2003. Non-targeted and delayed effects of exposure to ionizing radiation: I Radiation-induced genomic instability and bystander effects in vitro. *Radiat. Res.* 159, 567–580.
- Mothersill, C., Seymour, C., 2001. Radiation-induced bystander effects: Past history and future directions. *Radiat. Res.* 155, 759–767.
- Nakanishi, M., Tanaka, K., Takahashi, T., et al., 2001. Microsatellite instability in acute myelocytic leukaemia developed from A-bomb survivors. *Int. J. Radiat. Biol.* 77: 687–794 and Comments (2002), *Int. J. Radiat. Biol.* 78, 441–445.
- NAS/NRC, 2006. Health Risks from Exposure to Low Levels of Ionizing Radiation: BEIR VII Phase 2. Board on Radiation Effects Research. National Research Council of the National Academies, Washington, D.C.
- NCRP, 2001. Evaluation of the Linear-Non-threshold Dose-Response Model for Ionizing Radiation.
- NCRP Report No. 36. National Council on Radiation Protection and Measurements, Bethesda, MD.
- Tawn, E.J., Whitehouse, C.A., Tarone, R.E., 2004. FISH Chromosome analysis of retired radiation workers from the Sellafield nuclear facility. *Radiat. Res.* 162, 249–256.
- Thacker, J., Nygaard, O.F., Sinclair, W.K., et al., 1992. Radiation induced mutation in mammalian cells at low doses and dose rates. *Advances in Radiation Biology*, Vol. 16. Academic Press Inc, New York, NY, pp. 77–124.

- Tucker, J.D.; Tawn, E.J., Holdsworth, D., et al.,1997. Biological dosimetry of radiation workers at the Sellafield nuclear facility. *Radiat. Res.* 148, 216-226.
- UNSCEAR, 1993. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Sources and Effects of Ionizing Radiation. 1993 Report to the General Assembly with Scientific Annexes, United Nations, New York.
- UNSCEAR, 1994. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Sources and Effects of Ionizing Radiation. 1994 Report to the General Assembly with Scientific Annexes, United Nations, New York.
- UNSCEAR, 2000. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Sources and Effects of Ionizing Radiation. Vol. II Effects. 2000 Report to the General Assembly with Scientific Annexes, United Nations, New York.
- UNSCEAR, 2001. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Heritable Effects of Radiation. 2001 Report to the General Assembly with Scientific Annex, United Nations, New York.

A.3. 조직반응 위험(결정론적 영향)

A.3.1. ICRP 60 판단의 개정

확률론적 영향 및 조직반응의 정의

(A54) 전리방사선 에너지의 전달은 무작위 과정이다. 매우 낮은 선량에서도 세포 내 결정체적에 충분한 에너지가 부여되어 세포 변화나 세포사멸을 초래할 수 있다. 대부분 경우 세포 하나 또는 소수 세포가 죽더라도 조직에는 영향이 없지만, 결국 악성으로 되는 유전적 변화나 변형처럼 단일 세포의 변화도 심각한 결과를 초래할 수도 있다. 단일 세포 손상에서 발생하는 이러한 영향을 확률론적 영향이라 한다. 매우 낮은 선량에서도 그러한 확률론적 사상이 발생할 가능성이 어느 정도 있기 때문에, 어떤 선량 준위까지는 모든 그러한 사상들을 복구하지 못한다면 문턱선량은 없게 된다. 선량이 증가하면 그러한 사상의 빈도도 증가하지만, 조직반응의 경우와는 달리 다른 수정 요인이 없을 경우 발생하는 영향의 심각도는 증가하지 않을 것으로 예상된다(아래 참조).

(A55) 선량이 클 경우 세포 살상이 충분하여 조직반응이 감지될 수 있다. 이러한 반응은 조사 후 즉시 또는 추후에 나타날 수도 있다. 기질영향으로 인한 간실질세포(parenchymal cell) 재생의 감소는 조기 조직반응의 병인론에 결정적 역할을 한다. 검출 준위에 도달하려면 소정 비율의 세포감소가 있어야 하는데 이것이 문턱을 형성하며 문턱은 손상의 특정 준위에 따라 결정된다. 이 반응은 단일 세포의 확률론적 영향과는 다르다. 후자는 피폭한 체세포로부터 암의 유발과 어미 배아세포 피폭 후 자손의 유전질환 초래이다.

(A56) 단일세포 영향에 확률론적이라는 용어를 도입했을 때 세포 집단의 손상에 의한 영향은 비확률론적이라고 불렀다(ICRP 41; ICRP 1984). 그 뒤 이 용어가 적합하지 않은 용어로 판단되어, ICRP 60(ICRP 1991b)에서는 “선행 사상에 의해 자연히 결정”된다는 의미의 결정론적이라는 용어로 대체되었다. 이제 조기 및 지발성 조직반응 모두가 반드시 미리 결정되는 것은 아니며 다양한 생물학적 반응 수정자를 통해 피폭 후 수정될 수 있다고 인식된다. 따라서 그러한 영향을 조기 또는 지발성 조직반응이나 기관반응으로 부르는 것이 더 정확하다고 생각한다. 그러나 ICRP는 확률론적 또는 결정론적 영향이라 이라는 일반 용어가 방호체계에 굳게 뿌리박고 있어서, 문맥에 따라 이 일반 용어(결정론적 영향)와 직설 용어(조직반응)를 같은 의미로 사용할 것이다.

조직과 장기 반응

(A57) 초기 조직반응(몇 시간에서 수주에 이르는 시간축에서)은 세포 삼투도 변화와 히스타민 배출에 의한 염증성 반응(예: 홍반)과 점막염 예와 같은 세포 소실 결과로 오는 후속반응, 그리고 상피조직의 박리 반응으로 나타날 수 있다.

(A58) 지발성 조직반응(몇 달에서 수년의 시간축에서)은 장기간 피폭 후 혈관 폐색에 따른 깊은 조직 괴사와 같이 직접적 표적조직 손상의 결과로 일어날 경우 ‘일반적generic’이라고 하며, 예를 들어 심각한 표피박락과 만성 감염의 결과인 피부괴사나 심한 점막궤양에 의한 장협착과 같이 초기반응의 결과로서 발생할 경우 ‘결과적’이라고 한다(Dörr과 Hendry 2001).

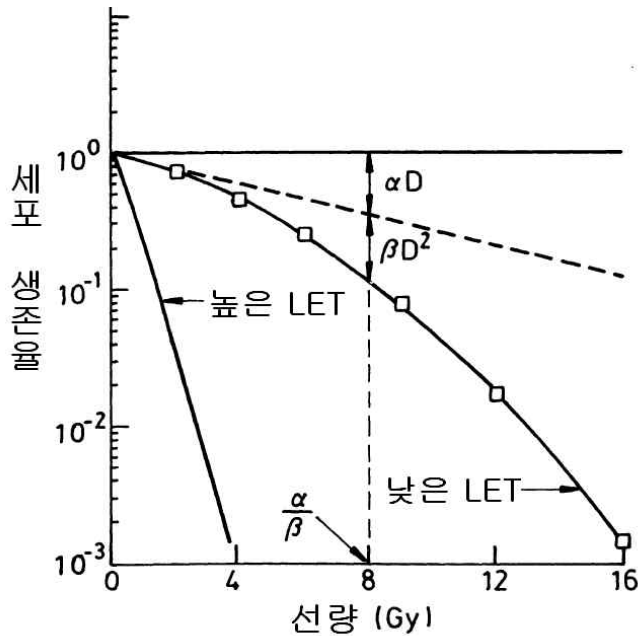
세포 생존곡선

(A59) 세포 소실은 피폭 후 상피조직의 초기 박리반응에 주된 역할을 한다. 몇몇 세포 유형과 조직의 경우 피폭 후 급격한 세포 소실은 림프샘이나 침샘의 예에서 보듯이 세포자살에 의해 조정된다. 다른 조직의 경우 유사분열 전후에 세포자살 과정을 밟을 수 있는 재생줄기세포 또는 증식 과정(분열 중인)의 세포 재생실패에 의해 세포사가 유발된다. 대부분 비증식 성숙세포는 조사 때문에 사멸하지 않으며 자연 노쇠로 죽는다. 일정 수준 조직손상에서 상이한 조사 조건에 대한 선량수정인자(DMF)는 조직 표적세포의 생존과 일정 수준 초기 조직반응에 대해 같다고 파악되어, 이러한 유형의 반응에서 표적세포 생존의 중요성이 입증된다(Hendry와 Thames 1987).

(A60) 선량 함수로서 세포 생존(그림 A.3.1)은 다음의 선형-이차식으로 설명할 수 있다.

$$S = e^{-(\alpha D + \beta D^2)}$$

(A61) 상수 α 는 생존(로그) 대 선량(선형)의 반대수 그래프에서 살상에 대한 세포 감수성의 선형성분을 나타내며, β 는 높은 방사선량에서 증가하는 감수성을 나타낸다. α/β 비는 세포 사멸의 선형 및 2차 성분이 동일한 위치에서 선량이다. 이 비는 생존곡선의 곡률을 나타낸다. 신장이나 척수처럼 느린 재생 기관계통에서와 같이 천천히 증식하는 동질적 세포집단에서 α/β 비는 낮으며 반대수 그래프 상 곡선은 더 완만하다. 구강점막이나 장의 재생 표적세포 집단과 같이 빠르게 증식하고 이질적인 세포집단에서는 α/β 비가 커지며 생존곡선은 더 직선에 가깝다. 이러한 직선성을 유발하는 기여자로 세포주기 단계에서 감수성이 상이한 소집단



그림A.3.1. 선형 이차식 $\log S = -(\alpha D + \beta D^2)$ 로 나타내어 반
대수 그래프로 그린 세포생존(S)의 선량-반응(ICRP 1991b).

의 존재를 들 수 있다. α/β 비는 조직에서 조기반응의 경우 일반적으로 7-20 Gy(통상 10 Gy 사용)이며, 지발반응의 경우 0.5-6 Gy(통상 3 Gy 사용) 범위에 있다.

(A62) 선량률이 약 0.1 Gy/h 미만일 경우 조사 중에도 세포의 방사선 부상 복구가 이루어진다. 이것이 β 성분을 감소시키고 매우 낮은 선량률에서는 0에 도달하게 한다. α 성분은 선량률을 변경해도 수정되지 않는다. 일부 유형 세포의 특징 중 하나는 0.5 Gy 미만, 일반적으로 0.2-0.3 Gy에서 초선형을 보이지만(Joiner 등 2001) 더 높은 선량에서는 그렇지 않다. 이 경우 매끄러운 선형-이차 세포생존 곡선으로부터 이탈이 발생한다. 어떤 사람은 이것이 0.2-0.3 Gy 이상의 선량에서 복구공정을 촉발하기 때문이라고 생각한다. 이러한 이탈은 사람에게서 조기 피부 반응과 실험동물 시스템의 피부 반응 및 신장 부상에서 관찰된다. 조직 부상 문턱치에 대한 이러한 초선형 현상의 관련성은 아직 분명하지 않다.

(A63) 높은 LET 방사선 피폭에서는 복구가 어려운 부상이 있으므로 β 성분과 선량률효과가 적거나 없다. 또한 생존곡선에 초선형 성분도 없다.

조직과 기관의 조기 및 지발 반응

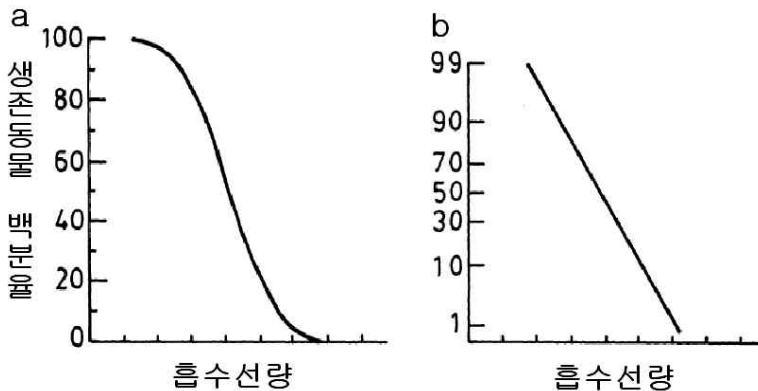
(A64) 상피의 조기 박리반응 및 조혈계통의 저하는 조직의 줄기 원종세포 사멸에 의해 발생하는데, 선량 준위에 따라 성숙세포의 과도적 또는 영구적 결핍으로 이어진다. 이러한 반응은 상피, 점막, 조혈세포 및 정자생성 세포와 같은 재생 세포 계열의 방사선 반응 특성이다. 표출과 조직 요소 복원의 시간적 과정은 그 정상적인 재생 속도에 따라 결정되며 낮은 선량에서는 선량에 의존하나 높은 선량에서는 그렇지 않다. 높은 선량 피폭 후 그러한 조직의 완전한 벗김은 새로운 성숙세포와 있을 수 있는 방사선 내성 원종세포에서 발생하는 세포수명에 해당하는 시점에 발생한다. 기질stroma이 특정 조직성분의 복구에 필요한 재증식과 분화를 유도하는 다양한 성장인자를 발생시킨다. 회복공정을 한층 촉진하는 외래 exogenous 성장인자를 적용하면 시간이 단축될 수 있으며 복구가 보다 완전하게 수행될 수 있다.

(A65) 지발 조직반응은 구성 세포집단의 사멸과 재생 속도가 낮아 발생할 수 있는데 이 경우 세포는 기능하고 분열할 수도 있다(Michalowski 1981, Wheldon 등 1982). 또한 지발반응은 일반적으로 조직과 장기의 여러 기능을 조절하는 세포 간 신호 경로의 복잡한 시스템이 제 기능을 발휘하지 못할 경우에도 발생한다(Rubin 등 1998). 일부 조직에서는 여러 유형 손상이 서로 다른 잠복기를 가지고 발생하는 것으로 밝혀졌다. 척수의 예를 보면 수개월 내에 발생하는 조기 탈수질demyelination이 나타나고 6-18 개월 후 2단계 탈수질과 백색질 괴사가 발생하며, 1-4 년 후 대개 맥관장애vasculopathy 형태의 후기단계가 따른다(van der Kogel 2002).

(A66) 대부분 조직에서 피폭 체적이 크면 반응도 심각해진다. 조기 피부반응에서 체적 영향은 대체로 넓은 면적 치료능력의 감소로 나타나는데, 이는 주로 가장자리로부터 세포 이동에 제한을 받기 때문이다. 지발반응에서 체적 영향은 기관구조와 관련된다. 척수의 경우 핵심 요소들이 직렬로 배열되므로 피폭하는 요소가 많을수록 그 중 하나가 비활성화되어 마비될 기회가 커진다. 조사 체적이 클 경우 방사선장 가장자리로부터 세포 이동의 편익도 감소한다. 반대로, 신장과 폐의 경우 조직의 기능소단위(FSU, 각각 신단위nephrons와 폐포)는 병렬로 정렬된다(Withers 등 1988). 이러한 경우 FSU의 임계 숫자에 도달할 때까지 일부 FSU의 비활성화가 발생하더라도 기관 기능의 감소는 없을 수 있다. 지발 조직 부상은 진전성이 있고 선량에 강하게 의존한다. 사람에게서 방사선치료 후 지발 이환율이 10년 이상까지 계속 증가하기도 한다(Jung 등 2001). 실험동물 시스템에서 지발 방사선 이환의 개시와 진전을 지연시키는 다양한 절차가 알려져 있다

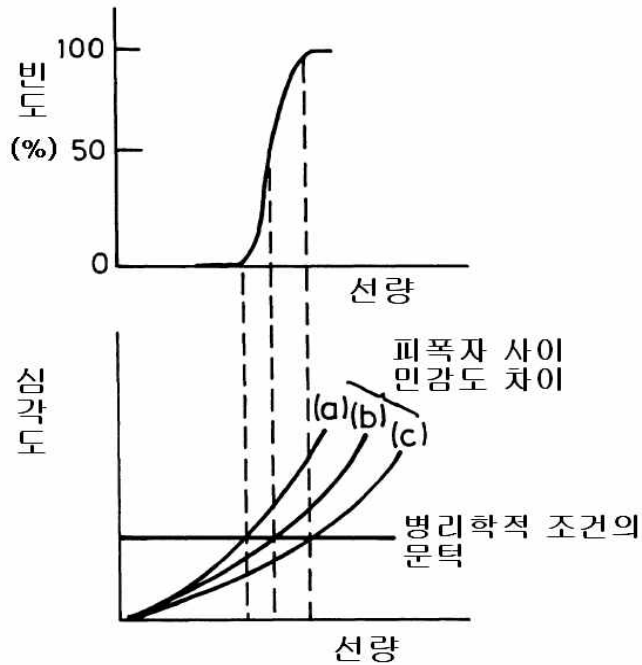
(아래 참조).

(A67) 조직들은 시간적 반응성은 물론 방사선 감수성도 다르다. 방사선에 가장 민감한 조직에는 난소, 고환, 골수 및 수정체가 포함된다. 일반적으로 그러한 조직에서 선량-발생 관계는 선형 축에 그릴 때 S자형이어서 선량이 증가하면 영향이 더 자주 발생한다(그림A.3.2a 참조). 조직과 장기 반응은 선량에 따라 빈도뿐만 아니라 그 심각도도 변한다. 그림A.3.3 상단 패널에는 임상적으로 식별되는 병리학적 상태로 정의되는 특정 반응의 발생이 감수성이 다른 개인 집단에서 선량의 함수로서 증가함을 보여준다. 그림A.3.3 하단 패널은 감수성이 다른 개인의 집단에서 선량-심각도 관계를 보여준다. 병리학적 상태의 심각도는 가장 민감한 소그룹에 속하는 개인에게서 가장 가파르게 증가하여(곡선 a) 감수성이 덜한 집단(곡선 b와 c)에서보다 낮은 선량에서 검출 문턱에 도달하게 된다. 다른 소집단들이 일정한 심각도 문턱을 지나는 선량의 범위는 그림A.3.3의 상단 패널에 표현되는데, 이 그림은 전체 인구의 병리학적 상태의 빈도를 보이는 것이다. 빈도는 집단 내 모든 구성원에 대해 정의된 심각도 문턱을 상당히 초과하는 선량에서 100%에 도달함을 보여준다.



그림A.3.2. 사망률과 선량 사이의 관계 a) 선형-선형 그래프의 S자형 관계
b) 변형 확률-선형 그래프의 선형 관계. 자료: ICRP(1991b).

(A68) DNA 손상 감지 또는 복구에 중요한 유전자의 돌연변이 유전 때문에 방사선에 매우 민감한 사람은 실제로 인구의 1%에 훨씬 못 미친다. 나머지 인구의 감수성 스펙트럼은 광범위하며, 이로써 선량-유발 곡선의 구배를 완만하게 만드는 효과가 있다. 이와 같은 구배의 수정은 표적세포 내재적 감수성이나 위에서 설명한 조직 구조의 특성에 의한 주된 수정 기여에 추가된다. 세포나 분자 시험



그림A.3.3. 선량과 조직반응(결정론적 영향)의 빈도 및 심각도 관계. 상단패널: 민감도가 다른 사람들 집단에서 예상되는 빈도의 S형 증가. 하단패널: 민감도가 다른 3인에 대해 예상되는 선량-심각도 관계. 자료: ICRP(1991b).

을 통해 이러한 방사선 감수성 스펙트럼에서 개인 감수성을 정밀하게 결정하는 것은 아직 가능하지 않다.

(A69) 인체에서 방사선에 보다 민감한 일부 조직과 기관의 문턱선량을 표 A.3.1에 보였다. 이 값들은 다양한 치료방사선 경험과 피폭사고 자료에서 도출된 것이다. 일반적으로 선량이 분할되거나 낮은 선량률로 오래 받는 선량은 급성 선량보다 손상이 작다.

전신피폭에 따른 사망

(A70) 일반적으로 피폭 후 사망은 체내에서 하나 이상의 중요한 장기의 세포가 심각하게 감소하거나 중대한 기능마비를 일으킨 결과이다. 인체의 부분 피폭 또는 불균질 전신피폭 후 개인의 사망확률은 피폭한 특정 기관, 조사된 체적 및 선량 준위에 따라 결정된다. 예를 들어 에너지가 약 1 MeV 이상인 투과성 광자

표A.3.1. 성인의 고환, 난소, 수정체 및 골수 조직 영향에 대한 문턱 평가치 (ICRP 1984; ICRP 41^a)

조직 및 영향	문턱치		
	짧은 단일 피폭에서 받은 총 선량(Gy)	다수 분할 또는 장기간 피폭에서 받은 총 선량(Gy)	다수 분할 또는 장기간 피폭으로 연례적으로 받는 연간 선량률(Gy y ⁻¹)
고환			
일시 불임증	0.15	NA ^b	0.4
영구 불임증	3.5-6.0 ^c	NA	2.0
난소			
불임증	2.5-6.0	6.0	>0.2
수정체			
검출 가능한 혼탁	0.5-2.0 ^d	5	>0.1
시각장애(백내장) ^e	5.0 ^e	>8	>0.15
골수			
조혈활동 위축	0.5	NA	>0.4

개정된 판단에 대해서는 표A.3.4와 제3.1.7절 참조.

a 자세한 사항은 ICRP 41(ICRP 1984) 참조.

b 문턱치가 총 선량이 아닌 선량률에 의존하므로 해당 없어 NA로 표기함.

c UNSCEAR 1988 참조.

d Otake와 Schull 1990 참조.

e 급성 선량 문턱치는 2-10 Sv(NCRP 1989).¹⁾

빔 노출처럼 상당히 균질적으로 전신피폭을 받은 경우, 특정 선량 범위에 특징적이고 특정 장기계통 부상 때문에 발생하는 여러 독특한 증후군 중 하나에 의해 사망할 수 있다.

(A71) 사망으로 이어질 수 있는 특정 증후군의 경우 생존자 퍼센트와 선량 사이의 관계는 선형 그래프에서 S자형이며, 반면 변형 확률-선형 그래프에서는 대략적으로 직선 형태이다(그림A.3.2b). 생존-선량 관계는 종종 중간점과 곡선의 기울기로 설명되는데, 중간점이란 개인들의 절반이 치사하는 선량인 LD₅₀이다. 기울기는 분포의 표준편차인 프로빗 너비, 또는 데이터를 달리 변환한 때에는 다른 매개변수에 의해 특성화된다. 소수 또는 다수의 사망을 초래하는 선량의 평가

1) <역주> 급성 고선량은 등가선량 단위인 Sv보다 흡수선량 단위인 Gy로 표현함이 옳으나 참고문헌 자료를 그래프 인용한 결과이다. 전술한 바와 같이 백내장 문턱선량이 낮아질 가능성에 대해 현재 ICRP가 검토 중이다.

에는 LD_{5-10} 및 LD_{90-95} 값이 유용하다.

(A72) 정상적이고 건강한 성인의 경우 $LD_{50/60}$ 즉, 60일 이내 반치사선량의 중간선은 약 4 Gy이지만, 문헌 평가치들은 3부터 5 Gy 범위에 있다. LD_{10} 평가치는 약 1-2 Gy이며, LD_{90} 은 약 5-7 Gy이다(UNSCEAR 1988 부록 G, NUREG 1997). 방사선 내성이 큰 적혈구 대체가 없는 출혈이 원인일 수도 있지만 주로 수명이 짧은 기능성 과립구를 생성하는 원종세포 결핍에 기인하는 조혈기능 상실이 사망 원인이다. $LD_{50/60}$ 또는 이를 초과하는 선량을 피폭한 개인이 생존할 수 있는 기회는 체액교환, 항생제나 항진균제 사용, 격리간호 같은 적절한 가료를 통해(UNSCEAR 1988 Annex G), 또 동종혈액 줄기세포 농축물과 혈소판의 주입, 그리고 과립구-대식세포 집락자극인자(GM-CSF)와 같은 성장인자 투입으로 높아질 수 있다. 의학적 지지치료로 $LD_{50/60}$ 를 약 5 Gy까지 높이고 성장인자를 사용할 경우 약 6 Gy까지 높일 수 있다고 보는 전문가도 있다(NUREG 1997). 실험동물 시스템에서 이러한 절차로 LD_{50} 값이 상당히 증가하는 것으로 나타났다(표A.3.2). 사람에게 대해서도 혈액학적 질환을 위한 전신 조사 후 치료에 성장인자를 다년간 사용하여 왔다. 그러나 방사선 피폭사고에 적용한 소수 사례에서는 성장인자가 사망위험에 처한 사람의 생명을 구하지 못했는데 아마도 치료 시작의 지연 때문으로 보인다. 성장인자는 피폭 후 이른 시간에는 어느 정도 편익이 있다고 판단되지만, 폐렴과 같은 기관 반응 때문에 치료 받은 사람이 사망했다.

(A73) 선량이 약 5 Gy를 초과하면 심각한 위장(줄기세포 및 내피 모세관세포) 손상과 같은 추가 영향이 발생하여 조혈손상과 결합하여 1-2주에 사망을 초래한다. 이러한 증후군에 있어 LD_{50} 을 정밀하게 평가할 수 있는 사람 데이터는 거의 없지만, 그 근사치는 급성 선량 10 Gy 정도일 것이며(UNSCEAR 1988, 부록 G, NUREG 1997), 의학적 지지치료와 성장인자를 적용하면 그 값은 높아질 것이다. 비균질 피폭에서 골수 일부와 위장 대부분이 피폭을 회피했다라도 폐에 10 Gy 이상의 급성 선량은 급성 염증(폐렴)을 일으켜 사망으로 이끌 수 있다. 신장이 조사되었다면 그러한 선량 범위에서 신장 손상도 발생할 수 있다. 피폭 후 동물 시스템에서 조직이나 기관 부상의 경감에 성장인자와 기타 분자물질의 성공이 입증하듯 이러한 모든 영향은 어느 정도 경감할 수 있다(표A.3.2). 더 높은 선량 즉, 50 Gy 정도 또는 그 이상에서는 신경 및 심혈관 시스템에 급성 손상이 발생할 수 있으며 쇼크로 수일 내에 사망한다(NCRP 1974). 여러 시점에서 사망에 대한 대략적 선량은 표A.3.3과 같은데 이 값은 LET가 낮은 방사선으로 몇

분 동안에 높은 선량을 받을 때에 대한 것이다.

표A.3.2. 생쥐와 기타 종에서 보고된 선량수정인자(DMF)[Hendry 1994 개정]

기관	제제	DMF ^a
골수:		
조기 반응	항생제 과립구-대식세포 집락자극인자(GM-CSF)	1.2-1.8 (설치류 및 원숭이)
장:		
조기 반응	항생제 인터루킨-I 혈관형성 성장인자 인터루킨-II, 변환 성장인자-β3	1.1-1.4(쥐) 1.1 1.1(생쥐) ^b >1.0
지발 반응	저분자량 식이 항혈소판제 Clopidogrel	>1.0(쥐) >1.0(쥐) ^c
피부:		
탈모증	Prostaglandin E2	1.2-1.5
조기 반응	γ-리놀렌산	1.1-1.2(돼지)
지발 반응	γ-리놀렌산 혈액세포 조절제 Cu/Zn/Mn-SOD	1.1-1.2(돼지) 1.4 >1.0(돼지) ^d
구강점막:		
조기 반응	각질세포Keratinocyte 성장인자	약 2.0
폐:		
폐렴	인터루킨-I 종양 괴사인자-α	>1.0 >1.0
척수:		
지발 반응	혈관작용제Vasoactive agents	1.1(쥐)
신장:		
지발 반응	Captopril, 안지오텐신 II 차단제	>1.0(쥐)

a DMF = 보호제가 있고 없음에 따라 동일한 수준의 영향을 발생시키는 방사선량 비율. ">1.0"은 선량-반응 관계를 알 수 없어 관찰한 방호를 DMF값으로 정량화할 수 없음을 의미한다. 방사선과 다른 제제의 조합에 대한 반응은 덜 심각한 것으로 평가되었다.

b Okunieff 등(1998).

c Wang 등(2002).

d Lefaix 등(1996).

표A.3.3. 낮은 LET 방사선에 급성으로 균일하게 피폭한 사람에게서 특정 방사선 유발 증후군 및 사망을 초래하는 선량 범위

전신 흡수선량 ^a (Gy)	사망에 미치는 주 영향	피폭 후 사망까지 시간(일)
3-5	골수 손상($LD_{50/60}$)	30-60
5-15	위장관 손상	7-20
5-15	폐와 신장 손상	60-150
>15	신경계 손상	<5, 선량의존

a 일부 선량범위 데이터에는 신체 일부 피폭 결과에 따른 판단이 포함된다.

(A74) 몇 시간을 초과하는 기간에 선량이 주어지면 그러한 영향을 일으키는 데 더 높은 전신선량이 필요하다. 예를 들어 선량률이 시간 당 약 0.2 Gy인 경우 LD_{50} 값은 대략 50%까지 증가할 수 있다(NUREG 1997). 선량이 한 달에 걸쳐 일어나면 $LD_{50/60}$ 값은 두 배로 될 수도 있다(UNSCEAR 1988, 부록 G). 낮은(만성) 선량률에서 특히 조혈, 면역 및 신경 시스템에 영향을 주는 만성 방사선 증후군에 대한 증거가 있다(Guskova 등 2002, AFRRRI 1994, 1998, Akleyev와 Kisselyov 2002). 면역체계를 약화시키는 문턱선량은 연간 약 0.3-0.5 Gy이며(Akleyev 등 1999), 다른 장기에 대한 영향의 문턱선량 평가치는 표A.3.1에 주었다. 연간 선량 0.1 Gy 미만으로 다년간 피폭한 성인이나 아동의 신체 조직 대부분에서 심각한 반응은 발생하지 않는다. 적색골수, 생식세포 및 수정체의 감수성이 가장 높게 나타난다.

(A75) 높은 LET 방사선 피폭에서 발생하는 조직과 장기의 반응은 낮은 LET 피폭에서와 유사하지만, 단위 흡수선량 당 빈도와 심각성은 높은 LET 피폭에서 더 높다. 이러한 차이는 고려하는 영향에 대한 생물학적효과비(RBE)라는 항으로 표현된다. 높은 LET 방사선 대 낮은 LET 방사선의 RBE는 동일한 수준의 생물학적 영향을 내는 낮은 LET 기준방사선의 흡수선량에 대한 높은 LET 방사선 흡수선량의 비로 정의된다.

(A76) 조직과 장기 반응에 대한 RBE값은 낮은 선량에서 더 크며, 분할 당 낮은 선량을 반복하여 총 선량을 누적할 때 높아진다(ICRP 58; ICRP 1989b). RBE값은 조혈조직과 생식조직의 조기 영향에서는 작으며, 위장관과 피부에서는 높고, 예를 들어 폐와 신장의 지발반응에서는 더 높다.

(A77) 유효 최고 RBE는 특정 영향에 대한 문턱치 선량에서 적용되는 값이다. 이 값은 매우 낮은 선량에서 그러한 선량의 비로 정의되는 RBE_M 값보다 작다. 이것은 높은 선량에서 선형-이차 맞춤의 선형 인자에 대한 낮은 선량에서 선형 인자의 비율이다. 따라서 이 비율은 문턱선량 아래 선량 준위까지 외삽한 것을 나타내는데 이는 이론적일뿐 실질적인 의미는 없다. 이것은 또한 매우 낮은 선량에서 이상한 초선형성 가능성을 무시한다(제A.3.1절 A59-A63항 참조). 조직반응에 대한 증성자의 RBE_M 값은 해당 조직의 확률론적 영향에 대한 RBE_M 값보다 2-5배 낮으며, 유효 최대 RBE 값은 그보다 더 낮다. 따라서 조직 영향이 압도적인 경우 Q나 w_R 값을 사용하면 높은 LET 방사선의 위험에 대한 기여를 과대평가할 수 있다.

이환과 사망에 대한 선량문턱 평가치 요약

(A78) 현행 권고를 위한 판단을 개발할 목적으로 ICRP는 감마선에 의한 전신 피폭 후 성인의 장기나 조직에 1%의 이환과 사망 발생에 대한 급성 흡수선량의 문턱 평가치를 갱신하고 요약하기로 했다. 선량-반응 데이터의 수학적 투사를 활용하는 간행물에서 도출한 1% 발생 평가치를 표A.3.4에 주었으며, 해당 영향의 진전 시간 평가치도 같이 수록했다.

특정 조직의 선량한도

(A79) ICRP 60(ICRP 1991b, 제194항과 표6)에는 눈과 국지 피부의 피폭에 대한 선량한도를 제공할 필요성을 설명하고 있는데 그 이유는 암 발생에 대해 방호하는 유효선량한도만으로는 이들 조직이 방사선 유발 반응/손상에 대해 반드시 보호되지 않기 때문이다.

(A80) 1990년 이후 가용한 정보가 피부나 피하조직의 종양발생 방사선 감수성 관점을 변경할 필요성을 제기하지 않았다. 따라서 ICRP 60의 표6에 준 피부와 손/발에 대한 종사자 및 일반인 선량한도가 적용할 수 있을 것으로 판단한다. 그러나 최근 연구에 따르면 눈 수정체의 방사선 감수성이 이전에 생각한 것보다 높을 수 있음을 시사하고 있다. 특히 원폭생존자(Minamoto 등 2004)와 피부 혈관종 치료를 받은 어린이 집단(Hall 등 1999) 모두에서 예상보다 어느 정도 낮은 선량에서 피질 및 후낭하 백내장이 초과한 증거가 있다. 백내장에 대한 선량 문턱치 설정에서 백내장 발병의 기전뿐만 아니라 수정체 혼탁의 검출과 시각장애 표출 사이 관계에 불확실성이 존재한다. 최근의 데이터와 위에서 설명한 기계론적 불확실성에 따라 눈 수정체의 방사선 감수성에 대한 상세한 재평가 필요성

표A.3.4. 감마선 전신 피폭 후 성인의 기관과 조직에서 이환과 사망 1% 발생에 대한 급성 흡수선량의 예상 문턱치

영향	기관/조직	영향 발생 시간	흡수선량 (Gy) ^e
이환:			
일시 불임증	고환	3-9주	1% 발생 ~0.1 ^{a,b}
영구 불임증	고환	3주	~6 ^{a,b}
영구 불임증	난소	1주 미만	~3 ^{a,b}
혈액형성 프로세스 억제	골수	3-7일	~0.5 ^{a,b}
피부홍반의 주요 단계	피부(넓은 면적)	1-4주	<3-6 ^b
피부화상	피부(넓은 면적)	2-3주	5-10 ^b
일시 탈모	피부	2-3주	~4 ^b
백내장(시각장애)	눈	수년	~1.5 ^{a,c}
사망:			
골수 증후군:			
- 의학적 치료가 없는 경우	골수	30-60일	~1 ^b
- 의학적 치료가 있는 경우	골수	30-60일	2-3 ^{b,d}
위장 증후군:			
- 의학적 치료가 없는 경우	소장	6-9일	~6 ^d
- 재래식 의학적 치료가 있는 경우	소장	6-9일	>6 ^{b,c,d}
폐렴	폐	1-7개월	6 ^{b,c,d}

a ICRP(1984).

b UNSCEAR(1988).

c Edwards와 Lloyd(1996).

d Scott와 Hahn(1989), Scott(1993).

e 대부분의 값은 Gy로 반올림. 범위로 주어진 것은 피부에 대한 면적 의존성이나 골수에 대한 의학적 지지 차이를 반영함.

을 제기하며, 따라서 새로 구성된 제1분과위원회 작업그룹이 이 현안을 다룰 것이다.

A.3.2. 배태아의 영향

(A81) 배태아의 조직 부상과 발육변화(기형 포함) 위험은 최근 ICRP 90(ICRP 2003a)에서 검토했다. 일부 이슈에 대해서는 새로운 데이터가 관점을 명확히 한 점도 있지만, 검토 결과는 대체로 ICRP 60에서 준 태내위험 판단을 보강했다. ICRP 90을 근거로 수십 mGy까지의 낮은 LET 선량에서 조직 부상이나 기형에

대한 태내 위험에 관해 다음과 같은 결론을 요약할 수 있었다.

(A82) 동물연구에서 도출한 새 데이터에 따라 착상 이전의 배발달기 피폭에서 배가 치사영향에 대해 민감함이 확인된다. 수십 mGy의 선량에서는 그러한 치명적 영향은 거의 발생하지 않으며, 데이터를 검토한 결과 출생 후 건강에 심각한 위험이 표출될 것으로 믿을 이유도 없다.

(A83) 기형 유발과 관련해 동물 데이터는 태내 방사선감수성에 태령중속 패턴이 있고 최대 감수성은 주 기관형성기에 나타난다는 관점을 뒷받침한다. 동물 데이터를 기초로 하면 기형유발에는 약 100 mGy의 선량 문턱치가 있는 것으로 판단된다. 따라서 현실적 목적으로 낮은 선량 태내피폭 후 기형위험은 무시할 수 있다. ICRP 90(ICRP 2003a)에서는 선량 문턱치가 일반적으로 적용되는 태내피폭 후 신경발달에 관한 실험 데이터를 검토했다. 또한 사람에 대한 역학 데이터도 고려했는데 다음과 같이 요약할 수 있다.

(A84) 가장 민감한 태아기(수태 후 8-15주) 피폭 후 심각한 정신지체 발생에 대한 사람 원폭 데이터 검토 결과는 이러한 영향에 대해 최소한 300 mGy의 선량 문턱치가 있어 낮은 선량에서는 그 위험이 없음을 보다 분명히 지원한다. 관련하여 Gy당 약 25점으로 추정된 IQ 손실 데이터는 해석이 쉽지 않고 그 중요성도 분명하지 않다. 문턱 없는 선량-반응을 배제할 수도 없지만, 실제 선량문턱이 없는 경우에도 수십 mGy의 태내 선량이 IQ에 미치는 영향은 대부분 개인에게 실질적 의미가 없을 것이다. 이 판단은 ICRP 60(ICRP 1991b) 판단과 일치한다.

A.3.3. 제A.3절 참고문헌

AFRRI Contract Report 94-1, 1994. Analysis of chronic radiation sickness cases in the population of the Southern Urals. AFRRI, Bethesda, Maryland, USA.

AFRRI Contract Report 98-1, 1998. Chronic radiation sickness among Techa Riverside Residents. AFRRI, Bethesda, Maryland, USA.

Akleyev, A.V., Kisselyov, M.F. (Eds.), 2002. Medical-biological and ecological impacts of radioactive contamination of the Techa river. Fregat, Chelyabinsk. ISBN5-88931-026-7.

Akleyev, A., Veremeyeva, G.A., Silkina, L.A., et al., 1999. Long-term

hemopoiesis and immunity status after chronic radiation exposure of red bone marrow in humans. *Central European Journal of Occ. and Env. Medicine* 5, 113–129.

- Do" rrr, W., Hendry, J.H., 2001. Consequential late effects in normal tissues. *Radiother. Oncol.* 61, 223–231.
- Edwards, A.A. and Lloyd, D.C., 1996. Risk from deterministic effects of ionising radiation. *Doc. NRPB Vol. 7 No.3.*
- Guskova, A.K., Gusev, I.A., Okladnikova, N.D., 2002. Russian concepts of chronic radiation disease in man. *Br. J. Radiol. Supp.* 26, 19–23.
- Hall, P., Granath, F., Lundell, M., et al., 1999. Lenticular opacities in individuals exposed to ionising radiation in infancy. *Radiat. Res.* 152, 190–195.
- Hendry, J.H., 1994. Biological response modifiers and normal tissue injury after irradiation. *Seminars in Radiation Oncology* 4, 123–132.
- Hendry, J.H., Thames, H.D., 1987. *Fractionation in Radiotherapy.* Taylor and Francis, London.
- ICRP, 1984. Non-stochastic effects of irradiation. ICRP Publication 41. *Ann. ICRP* 14 (3).
- ICRP, 1989b. RBE for deterministic effects. ICRP Publication 58. *Ann. ICRP* 20 (4).
- ICRP, 1991b. The 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 60. *Ann. ICRP* 21 (1–3).
- ICRP, 2003a. Biological effects after prenatal irradiation (embryo and fetus). ICRP Publication 90. *Ann. ICRP* 33 (1/2).
- Joiner, M.C., Marples, B., Lambin, P., et al., 2001. Low-dose hypersensitivity: current status and possible mechanisms. *Int. J. Radiat. Oncol. Biol. Phys.* 49, 379–389.
- Jung, H., Beck-Bornholdt, H.P., Svoboda, V., et al., 2001. Quantification of late complications after radiation therapy. *Radiother. Oncol.* 61, 233–246.
- Lefaix, J.L., Delanian, S., Leplat, J.J., et al., 1996. Successful treatment of radiation-induced fibrosis using Cu/Zn-SOD and Mn-SOD: an experimental study. *Int. J. Radiat. Oncol. Biol. Phys.* 35, 305–312.
- Michalowski, A., 1981. Effects of radiation on normal tissues: hypothetical mechanisms and limitations of in situ assays of clonogenicity. *Radiat. Environ. Biophys.* 19, 157–172.

- Minamoto, A., Taniguchi, H., Yoshitani, N., et al., 2004. Cataracts in atomic bomb survivors. *Int. J. Radiat. Biol.* 80, 339-345.
- NCRP, 1974. Radiological factors affecting decision-making in a nuclear attack. Report No. 42. National Council on Radiation Protection and Measurements, Bethesda, MD.
- NCRP, 1989. Radiation protection for medical and allied health personnel. Report No. 105. National Council on Radiation Protection and Measurements, Bethesda, MD.
- NUREG, 1997. Probabilistic accident consequence uncertainty analysis – Early health effects uncertainty assessment. CR-6545/ EUR 16775. US Nuclear Regulatory Commission, Washington DC, USA, and Commission of the European Communities, Brussels, Belgium.
- Okunieff, P., Mester, M., Wang, J., et al., 1998. In-vivo radioprotective effects of angiogenic growth factors on the small bowel of C3H mice. *Radiat. Res.* 150, 204-211.
- Otake, M., Schull, W.J., 1990. Radiation-related posterior lenticular opacities in Hiroshima and Nagasaki atomic bomb survivors based on the DS86 dosimetry system. *Radiat. Res.* 121, 3-31.
- Rubin, P., Finklestein, J.N., Williams, J.P., 1998. Paradigm shifts in the radiation pathophysiology of late effects in normal tissues: molecular vs classical concepts. In: Tobias, J.S. and Thomas, P.R.M. (Eds) *Current Radiation Oncology Vol 3*. Arnold, London.
- Scott, B.R., 1993. Early occurring and continuing effects. In: *Modification of models resulting from addition of effects of exposure to alpha-emitting nuclides*. Washington, D.C., Nuclear Regulatory Commission, NUREG/CR-4214, Rev 1, Part II, Addendum 2 (LMF-136).
- Scott, B.R., Hahn, F.F., 1989. Early occurring and continuing effects models for nuclear power plant accident consequence analysis. Low-LET radiation. Washington DC, Nuclear Regulatory Commission, NUREG/CR-4214 (SAND85-7185) Rev. 1, Part II.
- UNSCEAR, 1988. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation. 1988 Report to the General Assembly with Annexes, United Nations, New York.
- van der Kogel, A.J., 2002. Radiation response and tolerance of normal tissues. In: *Basic Clinical Radiobiology*. Steel, G.G. (Ed). Arnold, London.

- Wang, J., Albertson, C.M., Zheng, H., et al., 2002. Short-term inhibition of ADP-induced platelet aggregation by clopidogrel ameliorates radiation-induced toxicity in rat small intestine. *Thromb. Haemost.* 87, 122-128.
- Wheldon, T.E., Michalowski, A.S., Kirk, J., 1982. The effect of irradiation on function in self-renewing normal tissues with differing proliferative organisation. *Br. J. Radiol.* 55, 759-766.
- Withers, H.R., Taylor, J.M., Maciejewski, B., 1988. Treatment volume and tissue tolerance. *Int. J. Radiat. Oncol. Biol. Phys.* 14, 751-759.

A.4. 방사선 유발암 위험

(A85) 약 100 mSv 미만의 선량 범위에서 방사선 유발암 위험의 판단을 도출할 때, ICRP는 a) 방사선 반응에 관한 기본적인 데이터의 의미, b) 동물 종양발생의 정량적 측면, c) 대체로 선량이 100 mSv보다 높기는 하지만, 사람에게서 암 위험에 대한 역학적 직접 관찰에 주목했다. 기본 데이터나 동물 데이터 의미에 대해 ICRP가 도달한 결론은 i) 관심 있는 낮은 선량 영역에서 암위험 추정을 위해 높은 선량 역학데이터를 투사하고, ii) 낮은 선량, 낮은 선량률로 피폭하는 사람에게 적용할 선량선량률효과인자(DDREF) 적용을 고려하는 데 사용하는 것이다. 유전영향에 관해 제A.6절에서 개발한 판단을 위해와 명목위험계수를 제공하기 위해 이 절의 한 소절로 끌고 왔다.

A.4.1. 방사선 반응에 관한 기본 데이터

(A86) 방사선의 발암영향으로부터 사람을 보호하기 위한 권고를 작성함에 있어 ICRP는 매우 광범한 생물학 데이터와 개념을 고려해야 하는데 많은 데이터나 개념이 논의 또, 때로는 논쟁의 대상이 될 수 있다. 그러나 암 위험 추정에 사용하는 역학적 방법은 약 100 mSv 미만의 선량 범위에서 암 위험을 직접 규명할 분석력을 갖지 못함에 대체로 동의하고 있다. 따라서 ICRP 권고 개발에 생물학적 데이터의 역할이 증가하고 있다. 불확실성이나 논쟁이 있는 경우 동료검토를 바탕으로 과학적으로 균형을 이룬 판단에 도달해야 한다.

(A87) 생물학적 데이터를 균형 있게 고찰하기 위해 ICRP가 사용한 원칙 기준은 다음과 같다.

- 문제의 방사선 생물학적 중점이 사람 생체 내 종양형성에 얼마나 관련되는가?
- 특정 연구의 설계, 방법 및 통계적 분석이 발표한 결론 입증에 충분한가?
- 발표한 결론이 유사연구 결론과 일치하며, 해당 다른 실험데이터를 적절하게 반영하는가?

데이터와 개념에 논쟁이 있을 경우에는 다음의 원칙이 적용되었다.

- 상반된 요소 어느 쪽이 일반적 암 과정의 기초지식과 더 잘 합치하며, 가능하다면, 역학데이터와도 합치하는가?
- 방사선방호의 광범한 목적에 이 현안이 얼마나 중요한가?

(A88) 이러한 질문들을 ICRP 제1분과위원회와 방사선 암 위험에 관심 있는 다른 위원회(예를 들어 UNSCEAR 2000, NCRP 2001, NAS/NRC 2006, ICRP 2005d)가 고려한 방대한 암 관련 기초 데이터에 적용하였다. 이러한 평가로부터 ICRP는 다음과 같은 판단을 도출했다.

유전자 및 염색체 돌연변이의 선량-반응 관계

(A89) 방사선에 의한 유전자나 염색체 돌연변이 유발이 암 과정에 직접적으로 중요하다는 근거에서 세포연구에서 도출한 대부분 관련 데이터는 선량과 영향 사이의 단순한 관계에 부합한다. 선형-이차 형태는 낮은 LET 방사선에 대한 전반적 선량 반응을 무난하게 설명한다. 훌륭한 정보를 제공하는 데이터는 그 수가 많지는 않지만 수십 mGy의 낮은 선량까지 선형성을 제시하며, 수 mGy까지 낮은 선량 범위에서 이러한 단순비례로부터 이탈을 시사할 합당한 이유는 없다. 수 mGy 이하의 낮은 LET 방사선 선량에서 비적 플루언스가 방사선장에 있는 세포 수 이하가 되기 때문에 세포의 표적사상에 대한 반응의 선형성이 예상된다²⁾(제 A.2.1절 참조). 그러나 구경꾼효과가 낮은 선량에서 일반적 세포 영향에 크게 기여할 수 있다면 이러한 예측은 틀릴 수도 있다.

세포의 DNA 손상 반응

(A90) 세포의 DNA 손상 반응 공정 활성도가 세포의 방사선생물학적 영향이나 암유발과 긴밀하게 연계된다는 견해를 입증하는 데이터는 많이 있다. 따라서 피폭 DNA의 복구 충실성이 낮은 선량 반응에 중요한 결정자가 될 것으로 예상된다. 현재 데이터는 방사선 작용의 특징인 화학적으로 복잡한 DNA 양가다당변에 대해 본성적으로 오류에 취약한 복구공정의 지배를 주목한다. 수십 mGy까지 낮은 선량에서 오류에 취약한 DNA 복구는 유전자/염색체 돌연변이에 대한 세포 선량-반응의 대략적인 선형성과 일치하며, 그러한 돌연변이에 관련된 암위험과 선량 사이 단순비례성을 시사한다. 수십 mGy 이하 선량에서는 DNA 복구충실성에서 생화학적 변화 가능성을 배제할 수는 없지만, 그러한 변화를 예상할 특별한 이유도 없다.

(A91) 이러한 전통 과학적 견해는 DNA에 자연 발생하는 상대적으로 높은 빈

2) <역주> 표적세포에 영향이 나타나는 모델을 적용한다면, 낮은 LET 방사선 선량 수 mGy를 전달하는 플루언스가 단위 면적 당 세포수 보다 작으므로 선량이 증가하면 표적세포 수도 증가하여 적어도 이 수준 선량에서는 선량과 영향이 비례할 것이라는 의미이다. 반대로 비표적세포 영향(예: 구경꾼효과)를 인정하면 적어도 이론적으로는 매우 낮은 선량에서는 표적세포 수가 작아 세포교신 범위가 넓어져 초선형 반응을 보일 수 있다.

도의 산화성 손상을 수선하고 유지하는 세포역량에 기초한 제안으로부터 도전을 받고 있다(UNSCEAR 2000, NAS/NRC 2006, ICRP 2005d). 제기되는 이슈는 세포가 상대적으로 높은 수준의 자연발생 DNA손상을 적절하게 처리할 수 있다면 수십 mGy까지 피폭에서 발생하는 DNA 추가 병변(~50 mGy의 낮은 LET 선량에서 세포 당 약 2개의 DNA 양가닥 손상이나 약 1개의 복잡손상)이 암위험에 미치는 영향은 사소하거나 거의 없을 수 있다.³⁾

(A92) 이 도전은 자연발생과 방사선 유발 DNA 병변이 동일한 유형일 경우 상당히 강력할 수 있다. 그러나 제A.2.1절과 제A.2.3절에서 설명한 것처럼 방사선 작용의 특징인 화학적으로 복잡하고 때 지은 DNA병변은 세포의 자연발생 산화성 공정에서는 거의 발생하지 않는다. 이러한 산화성 공정은 DNA 한가닥에 단순하고 쉽게 복구할 수 있는 손상을 발생시킨다. DNA 복잡병변은 본질적으로 정확히 복구하기 어렵기 때문에 도전 주장은 과학적 근거가 크게 약화된다.

(A93) 이 문제는 UNSCEAR(2000), NAS/NRC(2005) 및 ICRP(2005d)에서도 자세히 다루었으며, 위에 요약한 이유 때문에, ICRP는 증거의 저율이 도전에 반하여 자연발생과 방사선 유발 DNA손상 상대빈도에 기초한 낮은 선량 반응에서의 단순비례성에 무게를 둔다는 결론을 내린다.

(A94) 또한 제A.2.3절에 설명한 DNA손상에 대한 적응 반응공정 활성화 때문에 선량과 방사선생물학적 영향 사이의 단순한 비례성은 모든 상황에 적용할 수는 없다는 제안도 있다. 사람 림프구의 적응반응에 관한 데이터가 상당히 재현성이 있지만 그 데이터도 이러한 형식의 적응반응이 세포주들에서 일관성 있게 표현되지 않으며 기계론적 기초도 잘 설명되지 않음을 ICRP는 인식한다. 또, UNSCEAR(1994, 2000)가 검토한 면역학적 자극, 또는 최근에 동물연구에서 발견된 중앙형성(Mitchel 등 1999, 2003)과 같은 다른 형태의 적응반응도 생물학적 근거가 매우 불확실한 것으로 판단된다.

(A95) BEIR VII 위원회(NAS/NRC, 2005)도 유사한 결론을 도출했다. 그러나 피폭 세포 교신의 선량의존성과 그것이 DNA 손상 반응과 암 위험에 주는 잠재적 시사점은 정보가 더 필요한 분야라고 ICRP는 판단한다. 프랑스 한림원의 한 보고서(French Academies 2005)는 그러한 세포교신의 잠재적 중요성을 강조하

3) <역주> 세포 당 하나의 DSB이더라도 어떤 장기에 10억개 세포가 있다면 10억개 DSB가 된다. 그러나 세포 당 하나의 DSB는 자연발생 DSB 빈도에 비하면 매우 낮은 빈도이다. 그러나 방사선 손상 병변은 복잡손상 비율이 자연발생에 비해 크게 높은 부가 특징이 있다.

고 있으며, 낮은 선량 암 위험에 실질적인 문턱치를 옹호하는 주장을 지지하기 위해 다른 데이터도 거론하고 있다(제A.4.4절 A178-A187항 참조).

(A96) 요약하자면, 방사선에 대한 적응반응 개념은 적절한 생물학적 지지가 부족하며, 현재 데이터로는 암에 대한 견고한 적응 및 방호 효과를 내는 충분한 증거를 제시하지 못하고 있다는 것이 ICRP 결론이다. 따라서 방사선방호를 위한 생물학적 체계에 적응반응 개념을 통합함은 현시점에서는 정당성이 없다고 판단한다.

방사선에 의한 후성적 반응

(A97) 연구가 빠른 속도로 진행 중임을 ICRP가 인정하지만, 가용한 데이터는 유발가능불안정성과 구경꾼교신이라는 후성적 현상과 암위험 사이에 견고한 인과관계를 충분히 입증하지는 못한다. 다양한 스트레스 관련 세포공정이 두 가지 반응 표출의 기초인 것으로 판단되지만 그 선량-반응 특성, 생체 내 표출 정도, 그리고 이것이 암위험에 어떤 영향을 미치는지는 상당히 불확실하다. 이러한 근거에서 현재로서는 이러한 공정에 관한 데이터를 방사선방호에 필요한 낮은 선량 판단에 유의하게 통합할 수 없다고 ICRP는 본다. 게다가 약 100 mGy 이상의 낮은 LET 선량에서 직접적 사람 역학데이터가 명목암위험계수 평가를 위한 주된 수단을 제공하므로, 이 선량에서 암위험 평가치는 이 부록에 설명한 후성적 요소를 포함하여 관련된 모든 생물학적 공정을 내포하고 있다. 따라서 불확실성이라는 중요한 문제는 단순히 그러한 후성적 인자가 그 자체로 암 위험에 영향을 미친다는 것이 아니라, 생체 내 선량-반응 특성이 가령 10 mSv와 비교한 예를 들어 200 mSv에서 위험에 서로 다른 영향을 미치는지 여부이다. BEIR VII(NAS/NRC 2006)와 CERRIE(2004) 위원회도 방사선 종양 위험에 대한 이러한 후성적 공정의 불확실한 기여에 대해 언급한 바 있다.

A.4.2. 종양 유발과 수명단축에 관한 동물 데이터

(A98) 주로 설치류 연구에서 도출된 동물데이터는 ICRP 92(ICRP 2003c)의 생물학적효과비(RBE) 고려에 포함되었으며, 선량-반응과 관련해 ICRP 99(ICRP 2005d)에서 선량선량률효과인자(DDREF) 판단을 위해서도 검토했다. RBE와 방사선가중치(w_R) 관계를 ICRP 92에 충분히 요약했고 ICRP 99에서 발전시켰다.

(A99) 선량 반응과 관련해 가장 믿을만한 동물데이터는 선량과 위험의 단순비

레 관계와 일반적으로 일치하지만, 생쥐 가슴샘 림프종 및 난소암 유발에 있어 상당히 굵은, 문턱과 유사한 반응을 나타내는 예도 있다. 그러한 유형의 종양 유발 기초가 되는 공정은 세포살상 의존성이 높는데, 이러한 이유 때문에 ICRP는 그러한 반응을 비정형적인 것으로 판단한다(ICRP 2005d 참조).

(A100) 가슴샘 림프종 및 난소암에 대한 생쥐 데이터를 분석에서 제외할 경우 동물연구에서 도출한 DDREF값은 일반적으로 적합하며, 약 2 Gy 이하 선량에서 DDREF값으로 약 2를 시사한다.

A.4.3. 생물학적효과비(RBE)와 방사선가중치(w_R)

(A101) RBE와 w_R 사이 관계는 ICRP 92(ICRP 2003c)에서 검토했다. 제1분과위원회와 제2분과위원회가 제공한 자료와 관련된 이 검토 결과는 양성자와 중성자 w_R 값 개정이 필요하지만 다른 방사선의 w_R 값은 ICRP 60(ICRP 1991b)에서 준 값이 여전히 적절하다는 권고였다.

(A102) ICRP 92에서 에너지가 2 MeV를 초과하는 양성자의 경우 ICRP 60에 정한 w_R 값 5가 생물학적 효과를 상당히 과대평가한다고 판단했으며, 실질적인 중요성을 갖는 입사 양성자(10 MeV 초과)의 w_R 로 2를 제안했다. 중성자의 경우 ICRP는 입사 중성자의 에너지에 의존하는 w_R 값을 계속 사용할 것으로 ICRP 92에 제안했다. 다만 ICRP 92에 주어진 연속 함수(3페이지 그림1)를 ICRP 60에 규정한 계단함수 대신 권고했다. ICRP 92는 이 절차의 실질적인 목적이 유효선량 계산에 오는 문제점을 줄이는 것이지, 저변의 생물학적 효과를 정밀하게 나타내는 것으로 받아들이면 안 된다고 명시했다. 중성자와 광자/전자에 대한 w_R 문제는 ICRP 제2분과위원회가 검토했으며, 자세한 판단 내용은 현행 권고 부록B에 수록되어 있다.

(A103) ICRP 60은 세포핵에 국지화되어 DNA에 결합할 가능성이 있는 오제 전자 방출 방사성핵종과 그 화합물은 낮은 LET 방사선에 대한 특수한 경우로 인정했다. ICRP는 방사선방호에서 오제전자 방사체에 계속 관심을 둘 것이고 오제전자 방출 화합물을 사안별로 고려하기 위해 구체적 생리학 및 생물물리학 데이터가 필요하다는 ICRP 92의 관점을 지지한다.

A.4.4. 역학데이터로부터 암 위험 평가

(A104) ICRP는 작업그룹에게 암 위험에 대한 명목위험계수를 개발하고, 인구 사이 위험 이전, 방사선위해 평가 및 조직가중치 도출에 관한 권고를 제시하라는 임무를 부여했다. 이는 제1분과위원회의 새로운 주요 업무였으며, 제2분과위원회와 분위원회의 데이터가 필요했다. 이 작업의 결과를 아래에 요약한다.

명목위험계수, 방사선위해 및 조직가중치

(A105) 명목위험계수는 대표 인구의 성별과 피폭연령에 평균한 생애위험 평가치로 도출된다. 소급적 사례대조연구에서는 선택 편향이 문제가 될 수 있으며 문서화되지 않은 개인 기억에서 피폭 데이터가 도출될 경우 선량 평가치가 매우 불확실할 수 있기 때문에 일반적으로 코호트연구가 바람직했다. 생애위험 평가는 다양한 암 부위 고유의 위험 평가치를 사용해 계산한다. 일본인 수명연구(LSS), 다수 연구의 병합분석 또는 기타 자료원에서 적절한 선량-반응 데이터가 가용하면 중앙부위 별 암 발생 데이터에 대해 방사선 위험 평가치가 도출된다. 발생 데이터는 사망률 데이터보다 진단 분류 오류 가능성이 작고, 치사율이 상대적으로 낮은 사이트에 대해서 더 나은 평가치를 제공한다. ICRP 시스템 사용자가 위험을 쉽게 계산할 수 있도록 생애위험 평가치는 남성과 여성을 결합하여 도출한다. 한 인구에서 도출된 위험모델을 암 패턴이 다른 인구에 적용하는 것의 불확실성 때문에 특정 인구 명목위험은 대안 모델로 평가한 위험의 평균으로 한다. 이 내용을 A110-A124항에서 설명하고 있다. 이러한 명목위험을 각 사이트에 대해 계산하고 합산하여 그 인구 총합 명목위험을 얻는다. 전체적인 사이트별 또는 총 명목위험은 집단 고유의 평균 위험을 평균하여 산출한다.

(A106) 방사선위해는 인체 여러 부위가 피폭한 방사선 영향을 정량화하기 위한 개념이다. 치명성과 수명상실 연수 관점에서 질환의 심각도를 고려해 명목위험계수로부터 위해를 계산한다. 총 위해는 인체 부위(조직이나 기관)별 위해의 합이다.

(A107) 특정 피폭에 관련된 ‘유효선량’ 개념은 관심 있는 개별 조직과 장기에 대해 이들 인체 부위의 상대위해를 가중한다. 그러한 시스템에서 유효선량이라고 불리는 조직별 선량당량의 가중합은 인체 내 등가선량 분포에 관계없이 피폭으로 인한 총 추정 위해와 비례해야 한다. 위해 성분은 암과 유전질환에 있어 본질적으로 동일하므로, 필요한 경우 이들 위해를 결합할 수 있다.⁴⁾

(A108) 일반적으로 여기서 요약 설명하는 위험 평가치는 아시아와 구미 인구 전체의 평균으로서 도출된다. 적절하다고 판단되는 새로운 모델이 등장할 때마다 다른 집단 사이에 위험을 이전하기 위한 적합한 모델을 찾으려 했다. 위험 모델링은 주로 일본인 원폭생존자의 수명연구(LSS) 데이터를 사용해 진행되었지만, LSS에서 도출한 평가치의 적합성 확인을 위해 광범한 방사선 역학 문헌을 검토했다. 일부 조직에서는 여러 데이터 무리를 사용해 암위험을 평가할 수 있었다.

(A109) 위험의 일반적인 모델과 사용한 자료원, 위험평가 방법론적 측면, 그리고 여러 조직의 위해에 대해 아래에 간략하게 설명한다. 이 작업에서 도출한 평가치 및 권고는 표A.4.1, 표A.4.2, 표A.4.3 및 표A.4.4에 수록되어 있다.

(A110) **위험 모델링.** 성별, 연령 및 피폭연령과 같은 인자에 따른 초과위험 변화를 모델이 수용할 수 있다면 주어진 피폭 집단에서 방사선 관련 위험의 비교 설명에 초과상대위험excess relative risk(ERR)이나 초과절대위험excess absolute risk(EAR)을 사용할 수 있다. 데이터가 충분히 많으면 곱하기multiplicative모델(ERR)이나 더하기additive모델(EAR) 어느 것을 사용해도 위험을 평가하는 인구의 초과위험에 대해 실질적으로 동일하게 설명할 수 있지만, 기저율이 다른 인구에 적용할 경우 상당히 다른 초과위험 평가치가 발생할 수 있다.

(A111) ERR모델과 EAR모델 모두 식도, 위장, 결장, 간, 폐, 유방, 난소, 방광, 갑상선 및 백혈병(골수)에 대해 개발되었다. 아래에 설명한 것처럼 ICRP 60 명목위험을 뼈암과 피부암에 적용했다(ICRP 1991b). 다른 조직이나 장기들의 데이터는 방사선위험 크기를 개별로 판단하기에는 데이터가 불충분하므로 그러한 조직과 장기는 “잔여조직remainder” 범주("기타 고형암"이라고 칭함)로 분류했다. 이 그룹에 대해서도 ERR과 EAR 모델이 개발되었다.

(A112) 일반적으로 이들 위험모델의 변수는 고형암에 대해 1958년부터 1998년까지 일본 원폭생존자 연구에서 얻은 암발생 데이터(Preston 등 2007)를 사용해 평가했다. 고형암에서 이들 모델은 선량에 대해 선형반응을 나타내며 성별, 피폭연령 및 발병연령에 따른 영향을 수정할 수 있다. 이들 영향은 모든 고형암을 그룹으로 묶어 파악한 값과 동일하도록 제약을 두었는데, 원인별 암 유형을 모델링할 때 이 제약 때문에 맞춤 적합성이 상당히 감소하는 경향이 있는 경우에는 달리하였다. 백혈병 위험평가는 성별, 피폭연령 및 피폭 후 경과시간에 대

4) <역주> 실제 생식선(고환이나 난소)에 대한 위험은 유전위험과 발암위험을 결합하여 하나의 상대위험 값에 해당하는 조직가중치가 부여된다.

표A.4.1. 성별 평균 명목위험과 위해의 요약

조직	명목위험계수 (Sv 당 10000명 당 증례)	치사율	치사율과 삶의 질을 조정한 명목위험*	암 없는 수명 상대손실	위해 (열 1과 관련)	상대 위해 ⁺
a) 전체인구						
식도	15	0.93	15.1	0.87	13.1	0.023
위	79	0.83	77.0	0.88	67.7	0.118
결장	65	0.48	49.4	0.97	47.9	0.083
간	30	0.95	30.2	0.88	26.6	0.046
폐	114	0.89	112.9	0.80	90.3	0.157
뼈	7	0.45	5.1	1.00	5.1	0.009
피부	1000	0.002	4.0	1.00	4.0	0.007
유방	112	0.29	61.9	1.29	79.8	0.139
난소	11	0.57	8.8	1.12	9.9	0.017
방광	43	0.29	23.5	0.71	16.7	0.029
갑상선	33	0.07	9.8	1.29	12.7	0.022
골수	42	0.67	37.7	1.63	61.5	0.107
기타 고형	144	0.49	110.2	1.03	113.5	0.198
생식선(유전적)	20	0.80	19.3	1.32	25.4	0.044
합계	1715		565		574	1.000
b) 근로연령인구(18-64 세)						
식도	16	0.93	16	0.91	14.2	0.034
위	60	0.83	58	0.89	51.8	0.123
결장	50	0.48	38	1.13	43.0	0.102
간	21	0.95	21	0.93	19.7	0.047
폐	127	0.89	126	0.96	120.7	0.286
뼈	5	0.45	3	1.00	3.4	0.008
피부	670	0.002	3	1.00	2.7	0.006
유방	49	0.29	27	1.20	32.6	0.077
난소	7	0.57	6	1.16	6.6	0.016
방광	42	0.29	23	0.85	19.3	0.046
갑상선	9	0.07	3	1.19	3.4	0.008
골수	23	0.67	20	1.17	23.9	0.057
기타 고형	88	0.49	67	0.97	65.4	0.155
생식선(유전적)	12	0.80	12	1.32	15.3	0.036
합계	1179		423		422	1.000

* $Rq + R(1-q)[(1-q_{min})q + q_{min}]$ 로 정의됨: 여기에서 R은 명목위험계수, q는 치사율, $(1-q_{min})q + q_{min}$ 은 비치사 암에 할당된 가중치. 여기서 q_{min} 는 비치사 암의 최소 가중치. q_{min} 수정은 피부암에는 적용하지 않음(본문 참조).

+ 이 값들을 정밀한 것으로 보면 안 된다. 계산의 추적성을 위해 유효숫자 3개를 사용하고 있을 뿐이다.

표A.4.2. 상이한 계산방법에 기초한 전체 인구의 성평균 명목위험과 위해 비교

조직	계산방법	명목 위험계수 (Sv 당 10000명 당 증례)			치사율 상대 조정된 위험*	치사를 맞을 명목 위해	상대 위해 ⁺
		합계	치사	비치사			
식도	현행 발생	15.1	14.0	1.1	15.1	13.1	0.23
	현행 사망률	29.1	27.0	2.1	29.0	2.25	0.037
	BEIR VII	14.1	13.1	1.0	14.1	12.2	0.019
	현재ICRP 60	26.7	24.8	1.9	26.6	23.2	0.032
	ICRP 60 실제	31.6	30.0	1.6	31.5	24.3	0.033
위	현행 발생	79.1	65.5	13.5	77.0	67.7	0.118
	현행 사망률	72.0	59.7	12.3	70.1	61.7	0.091
	BEIR VII	96.3	79.8	16.5	93.8	82.5	0.129
	현재ICRP 60	56.2	46.6	9.6	54.7	48.1	0.067
	ICRP 60 실제	122.2	110.0	12.2	121.0	100.8	0.139
결장	현행 발생	65.4	31.3	34.2	49.4	47.9	0.083
	현행 사망률	71.8	34.3	37.5	54.2	52.6	0.078
	BEIR VII	74.5	35.6	38.9	56.2	54.5	0.085
	현재ICRP 60	245.3	117.2	128.1	185.1	179.5	0.249
	ICRP 60 실제	154.5	85.0	69.5	123.3	102.7	0.142
간	현행 발생	30.3	28.9	1.4	30.2	26.6	0.046
	현행 사망률	67.5	64.4	3.1	67.4	59.3	0.088
	BEIR VII	40.0	38.2	1.8	39.9	35.1	0.055
	현재ICRP 60	15.8	15.0	0.8	15.7	13.8	0.019
	ICRP 60 실제	15.8	15.0	0.8	15.8	15.8	0.022
폐	현행 발생	114.2	101.5	12.6	112.9	90.3	0.157
	현행 사망률	110.8	98.6	12.2	109.6	87.7	0.130
	BEIR VII	136.9	121.8	15.1	135.4	108.3	0.169
	현재ICRP 60	70.3	62.5	7.8	69.5	55.6	0.077
	ICRP 60 실제	89.5	85.0	4.5	89.3	80.3	0.111
뼈	현행 발생	7.0	3.2	3.9	5.1	5.1	0.009
	현행 사망률	7.0	3.2	3.9	5.1	5.1	0.008
	BEIR VII	7.0	3.2	3.9	5.1	5.1	0.008
	현재ICRP 60	7.0	3.2	3.9	5.1	5.1	0.007
	ICRP 60 실제	6.9	5.0	1.9	6.4	6.4	0.009
피부	현행 발생	1000.0	2.0	998.0	4.0	4.0	0.007
	현행 사망률	1000.0	2.0	998.0	4.0	4.0	0.006
	BEIR VII	1000.0	2.0	998.0	4.0	4.0	0.006
	현재ICRP 60	1000.0	2.0	998.0	4.0	4.0	0.006
	ICRP 60 실제	1000.0	2.0	998.0	4.0	4.0	0.006
유방	현행 발생	112.1	33.0	79.1	61.9	79.8	0.139
	현행 사망률	56.5	16.6	39.8	31.2	40.2	0.059
	BEIR VII	111.9	32.9	78.9	61.8	79.7	0.124
	현재ICRP 60	47.5	14.0	33.5	26.2	33.9	0.047
	ICRP 60 실제	40.0	20.0	20.0	30.0	36.3	0.050

표A.4.2. (계속)

조직	계산방법	명목위험계수 (Sv 당 10000명 당 증례)			치사율 조정된 위험*	치사를 맞을 질을 명목 위험	위해	상대 위해
		합계	치사	비치사				
난소	현행 발생	10.6	6.0	4.6	8.8	9.9	0.017	
	현행 사망률	21.2	12.0	9.2	17.6	19.7	0.029	
	BEIR VII	11.5	6.5	5.0	9.6	10.7	0.017	
	현재ICRP 60	23.4	13.3	10.2	19.4	21.8	0.030	
	ICRP 60 실제	14.3	10.0	4.3	13.0	14.6	0.020	
방광	현행 발생	43.4	12	31	23.5	16.7	0.029	
	현행 사망률	71.7	20	51	38.7	27.5	0.041	
	BEIR VII	51.9	15	37	28.0	19.9	0.031	
	현재ICRP 60	100.4	29	72	54.2	38.5	0.053	
	ICRP 60 실제	60.0	30	30	45.0	29.3	0.040	
갑상선	현행 발생	32.5	2.2	30.3	9.8	12.7	0.022	
	현행 사망률	23.3	1.6	21.8	7.1	9.1	0.013	
	BEIR VII	32.0	2.1	29.9	9.7	12.5	0.020	
	현재ICRP 60	120.3	8.0	112.3	36.4	47.0	0.065	
	ICRP 60 실제	80.0	8.0	72.0	15.2	15.2	0.021	
골수	현행 발생	41.9	28.0	13.9	37.7	61.5	0.107	
	현행 사망률	54.2	36.3	18.0	48.9	79.6	0.118	
	BEIR VII	41.9	28.0	13.9	37.7	61.5	0.096	
	현재ICRP 60	46.9	31.4	15.6	42.3	68.9	0.096	
	ICRP 60 실제	50.5	50.0	0.5	50.5	104.0	0.143	
기타고형	현행 발생	143.8	70.5	73.3	110.2	113.5	0.198	
	현행 사망률	226.3	111.0	115.3	173.4	178.6	0.264	
	BEIR VII	163.3	80.1	83.2	125.1	128.9	0.201	
	현재ICRP 60	196.4	96.3	100.0	150.5	155.0	0.215	
	ICRP 60 실제	70.4	50.0	20.4	64.5	58.7	0.081	
생식선 (유전적)	현행 발생	20.0	16	4	19.3	25.4	0.044	
	현행 사망률	20.0	16	4	19.3	25.4	0.038	
	BEIR VII	20.0	16	4	19.3	25.4	0.040	
	현재ICRP 60	20.0	16	4	19.3	25.4	0.035	
	ICRP 60 실제	100.0	100	0	100.0	133.0	0.183	
합계	현행 발생	1715.4	414	1301	564.8	574.3	1	
	현행 사망률	1831.4	503	1328	675.4	675.8	1	
	BEIR VII	1801.2	474	1327	639.6	640.4	1	
	현재ICRP 60	1976.3	479	1497	709.2	719.9	1	
	ICRP 60 실제	1835.8	600	1236	709.3	725.3	1	

각주와 수치 값은 표A.4.1에서와 같다.

추가 주석: BEIR VII은 DDREF 2를 바탕으로 구미 및 아시아 인구에 대한 BEIR VII 위험모델을 적용하여 평가한 것이다. BEIR VII의 DDREF 1.5를 사용할 경우 명목위험과 위해 값은 4/3배 증가할 것이다. BEIR VII은 피부, 뼈 표면 및 생식선의 생애 위험 평가를 고려하지 않았으므로 BEIR VII 위험에서 이들에 대한 위험은 ICRP값과 같이 했다. “현재ICRP 60” 평가치는 DDREF로 2로 하여 ICRP 60 위험모델을 구미와 아시아 인구에 대해 적용하여 얻은 것이다. “ICRP 60 실제” 평가치는 ICRP 60 데이터에서 온 것이다.

해 영향 수정이 허용되는 선형-이차 선량반응을 따르는 EAR모델에 기초했다 (Preston 등 1994). 모델 변수는 제A.4.5절에 주었다.

표A.4.3. 제안된 조직가중치

조직	w_T	$\sum w_T$
골수(적색), 결장, 폐, 위, 유방, 잔여조직* (13개 조직의 평균선량에 명목 w_T 적용)	0.12	0.72
생식선	0.08	0.08
방광, 식도, 간, 갑상선	0.04	0.16
뼈 표면, 뇌, 침샘, 피부	0.01	0.04

* 잔여조직(모두 14개, 각 성별 13개): 부신, 흉외기도 부위, 쓸개, 심장, 신장, 림프절, 근육, 구강점막, 췌장, 전립선, 소장, 비장, 흉선, 자궁/자궁경부.

표A.4.4. 압과 유전적 영향에 대한 위해 조정 명목 위험계수(10^{-2} Sv^{-1})*

피폭 집단	압		유전적 영향		계	
	현재	ICRP 60	현재	ICRP 60	현재	ICRP 60
전체	5.5	6.0	0.2	1.3	5.7	7.3
성인	4.1	4.8	0.1	0.8	4.2	5.6

* 표A.4.1a, 표A.4.1b 및 ICRP 60의 값.

(A113) LSS연구는 피부암 위험에 대한 정보도 일부 제공하지만(Ron 등 1998), 피부 착색과 관련된 위험이 서로 다르므로 일반 인구집단에 적합하지 않을 수 있다고 판단했다. 그에 따라 ICRP는 ICRP 59(ICRP 1991a)에 준 명목 피부암 위험 평가치인 Gy 당 0.1을 사용했다. 이 평가치는 ICRP 60(ICRP 1991b)에도 사용했다. LSS 원폭생존자 연구에서는 뼈에 대한 명목위험 평가 데이터를 제공하지 않고 다른 자료원도 매우 제한되기 때문에 이 명목위험 평가치도 ICRP 60의 것을 사용했다. ICRP 60에 사용한 낮은 LET 평가치는 Gy당 0.00065였다. 골수암에 대한 ICRP 위험 평가치는 라듐-224에 의한 뼈 평균선량에 기초한 것이지만, 지금의 선량계측 모델은 뼈 표면에 대한 선량을 평가한다는 점은 고려할 필요가 있다. Puskin 등(1992)이 설명한 것처럼 뼈 표면의 선량을 기초로 계산할 경우 위험 평가치는 1/9로 낮아질 것이다. 그러나 뼈 선량계측에 대해 변경된 제안은 이 차이를 줄일 것이다. 현행 권고의 목적을 위해, 약간 보수적일 수

있음을 이해하면서 뼈 평균선량에 기초한 위험 평가치를 사용한다.

(A114) 위에 설명한 위험 모델은 위에서 설명한 것처럼 아시아와 구미의 복합 인구의 연령 범위(5년 간격으로 0년에서 85년까지)에 대해 성별 생애위험 평가치 계산에 사용했다. 그 다음 전체 인구나 근로 연령(18-64세) 인구의 연령분포를 반영하는 가중치를 사용해 평균하여 피폭연령에 대한 생애위험을 계산했다.

(A115) ICRP 60에서는 명목 암 위험을 사망률 데이터를 근거로 계산했으나 현행 권고에서 위험 평가치는 주로 발생 데이터에 기초한다. 변경의 이유는, 특히 생존율이 높은 암의 경우, 발생 데이터가 사망률 데이터보다 암 부담을 더 충실하게 설명하기 때문이다. 또한 암 등록(발생) 진단이 더 정확하고 진단 시간이 더 구체적이다. 그러나 히로시마나 나가사키로부터 이주에 따른 원폭 인구의 불완전한 포함은 이러한 암 발생 데이터에 기초한 위험평가치에 불확실 인자를 하나 더한다. ICRP 60 당시에는 종합적인 발생 데이터가 없었으나 그 이후 일본인 원폭생존자 수명연구(LSS)에서 암 발생을 상세히 평가하여 발간하였다(Thompson 등 1994, Preston 등 1994). 1958년부터 1998년까지 추적을 통한 원폭생존자 고형암 발생 데이터에 관한 최신 LSS 분석(Preston 등 2007)으로부터 사이트별 위험 평가치를 가져왔으며, 개인선량 평가치의 불확실성에서 오는 위험 평가치 편향을 줄이기 위해 조정했다(Pierce 등 1990). 새로 실시한 원폭선량 평가체계인 DS02는 DS86을 상당히 개선했다. 평균적으로 DS02 선량 평가치는 DS86 평가치보다 약간 높다. 두 시스템을 사용한 위험 평가치의 차이는 10% 미만이다(Preston 등, 2004).

(A116) 주된 평가치는 LSS 데이터에서 도출한 모델에 기초하지만 방사선을 피폭한 다른 집단의 정보도 검토했다. 그러한 정보로 다음 연구들이 있다.

- 치료 또는 진단 목적을 위해 방사선을 피폭한 환자
- 직무 중 방사선을 피폭한 종사자(예: 우라늄 광부)
- 예를 들어 낙진이나 자연 방사선과 같은 환경방사선을 피폭하는 사람.

(A117) 이들 연구에 대해 UNSCEAR(2000)와 국제암연구기구(IARC 2001, 2002)가 상세히 검토했다. 이들 연구 중 일부는 방사선위험에 관해 탁월하게 많은 정보를 제공한다. LSS는 주로 전망적인 매우 장기간의 추적, 코호트의 규모, 광범한 선량을 받은 모든 연령 남녀를 포함한다는 이유로 특히 방사선위험 평가에 귀중하다. 이에 반해 의료피폭에 관한 많은 연구는 선량의 함수로서 위험을 정밀하게 평가하기에는 표본 크기와 선량계측 품질이 부족하다(NAS/ NRC

2005). 또한 치료 피폭에 관한 연구에서는 선량이 5 Gy를 초과하는 경우가 많아, 세포사멸 때문에 단위 선량 당 암 위험이 과소평가될 수 있다.

(A118) 그렇지만 LSS 이외의 연구는 낮은 LET 방사선이 아닌 높은 LET 방사선 피폭, 급성이 아닌 만성 또는 분할된 피폭처럼 다른 환경에서 받는 피폭의 영향에 관한 정보나 일본 이외의 나라에서 위험 정보를 제공할 수 있다. 예를 들어 일본의 유방암 기저율은 매우 낮기 때문에 그 부위 고유 위험 평가치 결정에는 LSS 이외에도 북미와 서유럽의 7개 코호트 데이터를 사용했다(Preston 등 2002). 갑상선 암 경우에도 여러 국가에서 의학적 이유 때문에 방사선을 피폭한 네 집단을 LSS와 함께 검토했다(Ron 등 1995). 앞에서 설명한 것처럼 뼈와 피부에 대한 명목위험평가치는 ICRP 60(ICRP 1991b)에 사용된 것인데 이들 평가치는 의료피폭 그룹의 연구에 주로 기초한다(예를 들어 뼈의 경우 라듐-224 섭취).

(A119) 어떤 사이트에 발생한 암에서는 LSS 데이터와 다른 정보원 데이터 사이에 상당한 유사성이 있다. 그렇지만 방사선 위험에 차이를 보이는 많은 사이트가 있음을 ICRP는 알고 있다. 예를 들어 라돈에 피폭된 광부와 비교할 때 폐가 그러하지만(UNSCEAR 2000) 그 차이(2-3배 이내)는 평가치의 불확도에 비해 크지는 않다. 사례대조연구들을 결합한 최근의 분석에서 저준위 라돈 피폭의 영향에 대한 보다 직접적인 정보를 확보할 수 있는데 여기서는 가정에서 라돈 피폭으로부터 폐암 위험이 증가했다(Darby 등 2005, Krewski 등 2005, Lubin 등 2004). LSS와 광부연구에 기초한 평가치의 정밀한 비교는 어렵지만 다양한 불확실성을 감안한다면 이 발견은 대체로 적합한 것으로 판단된다. ICRP 60에서는 간암 위험 평가치가 방사성 조영제인 소로트라스트(Thorotrast)를 주사한 환자 연구에서 도출되었지만, 현행 권고에서는 LSS 간암 위험 평가치를 선택했다. LSS 평가치는 X선이나 감마선에 노출된 집단에 대한 평가치보다 높는데(UNSCEAR 2000), LSS에서 간염 바이러스와 방사선 사이에 보고된 강한 상호작용 때문일 것이다(Sharp 등 2003). 그러나 아래에서 보듯이 LSS에 기초해 도출한 평가치는 ICRP 60 평가치와 유사하다. 보다 일반적으로 말하자면 낮은 LET 외부 방사선에 의료나 직무로 피폭한 사람들의 암 발생 위험과 LSS 암 발생 위험을 비교할 때 위험평가치는 대체로 비슷하다(NAS/NRC 2005).

(A120) **여러 조직의 암위험.** 12개 조직이나 장기(식도, 위장, 결장, 간, 폐, 뼈, 피부, 유방, 난소, 방광, 갑상선, 골수)와 나머지 조직과 장기를 하나의 '잔여 조직' 범주로 묶어 명목 암위험과 조직가중치를 개발했다. 방사선의 중앙발생 영

항에 관한 역학정보가 암위험 평가에 필요한 판단에 충분하다고 생각되기 때문에 이들 개별 조직과 장기가 선택되었다. 만성 림프구성백혈병(CLL) 이외의 백혈병과 다발골수종이 골수 범주에 포함되었다. 잔여조직 범주에는 개별 암 사이트로서 명백히 평가되지 않은 기타 조직들이 포함된다.

(A121) **병합 인구집단.** 식도, 위장, 결장, 간, 폐, 여성 유방, 난소, 방광, 갑상선, 백혈병(CLL 제외) 및 총 고형암에 대한 6개 인구집단의 발생률을 평균하여 병합 기저율을 계산했다. 목표는 세계 여러 곳의 대표 인구에 대한 기저율을 작성하는 것이었다. 인구 기반 암 발생률은 “5 대륙의 암 발생”(Parkin 등, 2002) 제8판을, 인구수 데이터는 WHO 국제 사망률통계 데이터베이스를 사용했다. ICRP 60 부록B(ICRP 1991b)에서 다섯의 다른 인구에 대해 각각 위험을 계산했다. 이번 접근법은 약간 다른데 오랜 암 등록체계가 있어 선정된 구미인(스웨덴, 영국, 미국 SEER)과 아시아인(상하이, 오사카, 히로시마 및 나가사키)에 대해 암 발생률을 편집했다. 이 발생률은 제A.4.5절에 수록되어 있다. 병합 인구집단을 형성하기 위해 아시아인과 구미인 데이터의 무가중 평균을 계산했다.

(A122) 1994년-1999년(5년 생존)과 1979년-1999년(20년 생존)에 대해 미국 SEER 프로그램의 성별, 모든 단계의 상대 생존통계를 평균하여 여러 암 사이트에 대한 전반적 상대생존율을 계산했다. 비록 SEER 상대생존율이 다른 많은 유럽과 아시아 국가에서 조사된 것보다 높지만, 생존율이 감소해도 상대 위해 평가치가 변하지는 않았다.

(A123) **유전위험.** ICRP 60 보고서 이후 새로운 정보가 가용하고 또 그 동안의 ICRP 작업 결과로 방사선에 의한 유전위험 평가치는 크게 개정되었다. 개정된 평가치와 그 도출과정은 제A.6절에 수록되어 있다. 유전위험 평가치의 개정에는 다음과 같은 여러 인자가 작용했다.

- 대부분의 방사선 유발 돌연변이는 대규모 복수 유전자 결손인데, 이는 단일 유전자 질환(즉, 멘델법칙을 따르는)보다는 다발적 발육이상(multisystem developmental abnormality)을 유발하기 쉽다. 중요한 것은 이러한 발육이상의 단지 일부만이 생아출산으로 이어질 수 있는 점이다.
- 거의 모든 만성질환에는 유전소인이 있지만, 이러한 질환 대부분은 다유전자성, 다인자성이기 때문에 돌연변이 성분(즉, 돌연변이율 변동에 대한 이러한 질환의 반응성)이 적어서 만성질환은 방사선 유발 돌연변이율 증가에 최소한으로 반응할 뿐이다.
- ICRP 60에서는 모든 유전질환을 치명적인 것으로 취급해야 한다고 명시적으

로 가정했다. 다양한 유형의 유전질환에 대한 심각도와 치사율 관점에서 이제 유전질환에 대한 치사분율로 명시적으로 80%를 부여한다.

- ICRP가 권고한 새로운 유전 위험계수는 두 세대만의 유전위험을 고려한다. 도태계수(selection coefficients), 돌연변이 성분 및 수백 년 동안 인구 변화가 필요한 근거 없는 가정이 필요한 ICRP 60에 사용한 평형 값은 과학적 타당성에 한계가 있다고 판단된다.

(A124) 그 결과 생식선 선량과 관련된 전체 인구의 유전영향 위험은 ICRP 60의 Sv 당 10000명 당 약 100 증례가 아닌 Sv 당 10000명 당 약 20 증례로 평가된다(제A.6절 표A.6.6 참조). ICRP 60과 같이 근로 인구의 유전적 영향 위험은 전체 인구에 대한 위험의 60%로 했다. 생식선 선량이 총 위험에 미치는 해당 상대 영향은 이전의 ~18% 대신 3-4%로 평가된다.

(A125) **방법론적 측면. 불확실성과 민감성 분석.** 방사선 위험 평가치에는 몇 가지 원인으로부터 발생하는 불확실성이 존재한다. 가장 보편적인 것은 신뢰한도 또는 통계적 우도분포로 대표되는 통계적 불확도이다. 만성이나 낮은 선량 피폭의 경우 평가치와 그 통계적 불확도를 선량선량률효과인자(DDREF)로 나누는데 그 과정이 평가치는 낮추고 불확도는 더욱 키운다(아래 참조).

(A126) 특정 피폭집단에 근거한 평가치를 다른 집단이나 다른 방사선원에 적용하면 추가 불확실성이 개입된다. 원본집단 또는 이차집단 선량 평가치의 우연 오차나 계통오차 때문에 방사선원간 차이가 불확실성을 낼 수 있다.

(A127) 위험기반 방사선방호는 원폭생존자 수명연구 코호트처럼 정보가 많은 피폭집단 연구에 기초한 평가치를 다른 피폭집단에도 적용할 수 있다는 가정에 크게 의존한다. 여러 집단의 선량-반응 데이터 병합분석(예를 들어 Preston 등 2002)은 이러한 가정에 관련된 귀중한 정보를 제공한다. 불행히도 그러한 정보는 극히 소수 사이트의 고유 암에 대해서만 가용하다. 집단 사이에 위험 평가치를 이전할 경우 두 집단 사이에 기저율이 크게 다른 암 사이트에서 특히 까다로운 문제가 발생한다. 아래에서 이 문제에 대해 자세히 논의한다.

(A128) 불확실성의 다른 주요 원천에는 방사선피폭과 다른 암 위험인자 사이의 가능한 상호작용이 포함되는데, 특히 폐암의 경우 흡연이력, 여성 유방암의 경우 출산이력이 이러한 위험인자에 속한다. 상호작용은 더하기 및 곱하기 모델의 불확실한 선형조합으로 표출될 수 있다는 점에서 이 문제는 집단 사이에 위

험 평가치를 이전하는 경우의 문제와 유사하다. 그러나 폐암과 흡연의 경우 더하거나 곱하기보다 submultiplicative 상호작용(Pierce 등, 2003, Travis 등, 2002, Lubin 등, 1995)을, 유방암과 출산이력의 경우 곱하기 상호작용(Land 등, 1994)이 선호할 역학적 증거가 있다.

(A129) 불확실성이 발생하는 다른 원천 하나는 30-200 keV 범위 의료용 X 선, 전자, 중성자, 양성자 및 알파입자를 포함하는 다양한 선질의 방사선을 높은 에너지 광자와 비교한 생물학적효과비이다. 그러한 불확실성의 정량화는 예를 들어 NCI/CDC(2003)와 같은 다른 보고서에 자세히 설명되어 있다. ICRP는 방사선방호 목적에 중앙값 사용을 선호하지만, 특정 방사선의 RBE값은 근본적으로 불확실하다는 사실을 잊지 말아야 한다. 암위험에 낮은 선량 문턱이 있을 수 있음과 관련된 다른 불확실성 측면은 제4.4절 (A173)-(A187)항에 요약 설명했다. 체내 방사성핵종에 대한 선량평가와 관련된 불확실성(예를 들어 CERRIE 2004)은 ICRP 99(ICRP 2005d)에 설명되어 있다.

(A130) **선량선량률효과인자**. 역학연구에서는 작은 위험을 검출하기 어렵기 때문에 현행 권고에 설명한 방사선 관련 선량별 위험 평가치는 주로 200 mSv 이상의 급성 선량에 피폭한 사람들로부터 구한다. 그러나 방사선방호에서 보다 논쟁적인 현안 대부분은 연속 피폭 또는 급성 분할이 몇 mSv 이하인 분할피폭에서 오는 위험에 관한 것이다. 실험조사 결과에 따르면 선량분할이나 기간 연장은 위험을 줄이는 것으로 나타나고 있으며, 따라서 높은 선량의 급성 피폭 데이터에 기초한 선량별 평가치를 낮은 선량의 연속 또는 분할 피폭에 적용하기 위해서는 선량선량률효과인자(DDREF)로 나누어야 함을 암시한다.

(A131) 앞에서 설명한 것처럼 수백 mSv 미만의 선량에서 발생하는 암위험은 역학연구로부터 직접 평가는 어려운데 주로 통계학적분석력 때문이다. 아직 위험을 정밀하게 평가할 수는 없지만, 데이터 병합분석은 통계학적 분석력을 높일 수 있다. 최근의 예는 15개국 원자력종사자의 암 사망률에 관한 데이터를 병합해 분석한 내용에 관련된다(Cardis 등 2005). 대규모 집단(주된 분석에서 약 400,000명의 종사자)에도 불구하고 집단이 아직 젊어 추적 종점까지 종사자 중 6%만 사망했다. 결과적으로 종사자 선량에 따른 암 위험에 대한 평가된 경향의 신뢰구간이 넓었다. 특히, 결과가 DDREF로 2를 사용하여 높은 선량의 급성 피폭 데이터를 외삽한 위험뿐만 아니라 다른 여러 값과도 부합함이 발견되었다. 또한 백혈병 이외의 암에서 관찰된 증가 위험의 일부는 흡연에 의한 교란 때문에 나타나는 것으로 보인다. 이 사실은 낮은 선량 연구에서 비교적 작은 편향이 미

치는 충격을 강조한다.

(A132) DDREF 크기는 불확실하며, 정량적 불확도 분석에 기초한 최근의 여러 보고서[예를 들어 NCRP(1997) EPA(1999), NCI/CDC(2003)]에서 불확실한 것으로 취급했다. 그러나 그러한 분석에 사용한 DDREF의 확률적 불확도분포의 평균은 ICRP 60(ICRP, 1991b)과 UNSCEAR(1993)에서 권고한 값 2와 거의 차이가 없다. 또 DDREF값 2는 일반적으로 제A.4.2절에 설명한 동물데이터와 대체로 일치한다. ICRP는 이러한 불확실성을 인식하면서 방사선방호 목적으로는 DDREF값으로 2를 계속 사용할 것을 권고한다.

(A133) BEIR VII 위원회(NAS/NRC 2005)가 DDREF 선택에 LSS 사람 데이터와 적절히 선택된 동물연구 결과의 조합에 기초한 베이시언통계 접근법을 채택한 사실을 ICRP는 알고 있다. 이 분석은 1.1-2.3 범위의 DDREF값이 데이터와 부합함을 보였는데, BEIR VII은 암 위험 평가 목적으로 1.5를 DDREF값으로 선정했다. BEIR VII은 DDREF 선택에 필연적인 주관성 요소를 설명하고 있는데, ICRP는 방사선방호 목적의 ICRP DDREF값으로 2를 유지하는 권고가 주관성과 확률적 불확실성 양쪽 요소 모두를 고려한 광범한 판단임을 강조한다.

(A134) **성 평균.** 일부 방사선 관련 암은 성별 고유이며, 다른 많은 암의 경우 성별은 방사선 관련 위험의 주요 수정인자이다. ICRP 절차에 따르면 현행 권고에 제시된 중간 및 최종 위험 평가 수치는 성 평균값이다. 중간 결과에서는 성별 고유성을 유지하고 최종 단계에서 성 평균하여 방사선위험을 계산하기도 했다. 두 계산 방법에 있어 최종 결과는 용인한도 내에서 유사했지만, 성별 고유 데이터를 방사선방호의 일반목적으로 사용하는 것은 권고하지 않는다.

(A135) **집단 사이 위험 이전.** 방사선 관련 위험의 알려진 수정인자 강세에서 두 집단이 다르다면 방사선피폭에 대한 반응도 다를 것으로 예상된다. 그러나 그러한 정보가 없는 경우에도 해당 기저율이 다르다면 방사선 관련 위험의 사이트별 평가치를 어느 한 집단에서 다른 집단으로 이전할 때 문제가 있다. 극단적인 예로서 LSS집단은 지금까지 방사선 관련 위암 위험에 활용도가 가장 높은 평가치를 제공하고 있지만, 연령별 기저율은 일본과 미국 사이에 12배까지 차이가 있다. 일본인 인구에서 선량별 초과절대위험(EAR_{LSS})이 초과상대위험(ERR_{LSS})에 기저율을 곱한 값과 대략적으로 일치한다. 즉,

$$EAR_{LSS} = ERR_{LSS} \times \text{기저율}_{\text{일본}}$$

그러나 그 관계는 미국에서는 대략적으로 다음에 해당된다.

$$EAR_{LSS} = 12 \times ERR_{LSS} \times \text{기저율}_{\text{미국}}.$$

(A136) 따라서 ERR모델에 기초한 미국 인구의 위암에 대한 초과위험의 곱하기모델 평가치, 즉

$$ERR_{mult} = ERR_{LSS}$$

은 EAR_{LSS} 직접 이전에 근거한 평가치의 약 1/12이 된다. 즉,

$$ERR_{add} = EAR_{LSS} / \text{기저율}_{\text{미국}} = ERR_{LSS} \times (\text{기저율}_{\text{일본}} / \text{기저율}_{\text{미국}}).$$

(A137) 전리방사선 피폭이 주로 암 시발자(initiator) 작용을 한다고 가정할 때 인구의 암 발생률 차이가 암 촉진자 노출 차이에 관련된다면 곱하기이전이 적절할 것이며, 발생률 차이를 경쟁 암 시발자 노출 차이로 설명할 경우 더하기이전이 적절할 것이다. 미국 인구의 방사선 관련 위암 위험에 관한 정보나 두 국가 위암률 사이 12배 차이를 초래한 어떤 요인에 의한 방사선 관련 위험의 수정에 관한 정보가 거의 없기 때문에 모든 평가를 다음과 같은 방식으로 고려하는 것이 무난할 것이다.

$$ERR_{US}(p) = p \times ERR_{add} + (1-p) \times ERR_{mult}$$

여기서 가중치 p 는 $0 \leq p \leq 1$ 범위에서 동등하게 가능하다. 이러한 접근법을 사용할 경우 전체적인 불확도는 높아지며, 평균값 $ERR_{US}(1/2)$ 가 동등하게 가능한 이전(移轉)평가치 범위를 실제로 대표하지는 않는다.

(A138) 대부분 사이트의 경우 일본과 미국 발생률 사이 차이는 12배보다 훨씬 작아서 더하기와 곱하기 이전모델을 구별하지 못함이 미치는 영향은 작다. 그러나 현행 권고에서 고려한 사이트 중 폐, 유방 및 갑상선에 대해서는 $ERR_{US}(1/2)$ 이 아닌 대표값을 정당화할 수 있는 충분한 정보가 있다고 보았다.

(A139) 유방암 위험의 방사선 영향에 관한 최근의 병합분석(Preston 등 2002)이 통상의 ERR모델에 반하는 강력한 증거를 제공하기 때문에 유방암 위험은 원폭 데이터에 기초한 EAR모델만 바탕으로 하였다. 그러나 갑상선암 위험 평가에 EAR모델을 사용할 경우 문제가 발생한다. 선별강도(screening intensity) 차이가 방사선 관련 갑상선암 발생률에 상당한 영향이 미칠 수 있기 때문이다. 따라서 갑상선암 위험은 방사선 관련 갑상선암 위험 병합분석에서 개발한 ERR모델만 바탕으로 하였다(Ron 등 1995).

(A140) 따라서 두 위험 평가치의 상대적 적용률 판단에 기초한 가중치에 의한

더하기(절대) 및 곱하기 초과위험 평가치의 가중평균으로 집단 위험을 정의했다. 유방, 골수, 갑상선, 피부 및 폐를 제외한 모든 조직에 0.5의 가중치를 사용했다. 유방과 골수에 대해서는 EAR모델만 사용했고, 갑상선과 피부에 대해서는 ERR모델만 사용했다. 폐에 대해서는 ERR 모델에 0.3의 가중치를 부여했는데⁵⁾ 원폭 생존자 데이터에 따르면 EAR이 ERR보다 성별 차이가 작고, 방사선량과 흡연이력이 폐암 위험인자로서 더하기 방식으로 상호작용하기 때문이다(Pierce 등 2003).

(A141) **방사선위해 계산.** ICRP 60에서와 마찬가지로 조직 T에 대한 위해는 다음과 같이 정의된다.⁶⁾

$$d_T = (R_{F,T} + q_T R_{NF,T}) l_T.$$

여기서 R_F 는 치명적 질병의 명목위험, R_{NF} 는 비치명적 질병의 명목위험, q 는 심각한 질병에 의해 저하된 삶의 질을 반영하는 비치명가중치(0과 1사이)이며, l 은 정상 기대수명에 대해 질병에 의한 평균 수명손실로서 전체 암 평균에 대한 상대 값으로 표현한다. 아래에 설명한 것처럼 삶의 질 인자는 질병 치사율(k)의 함수이며, 통증, 고통, 치료 부작용을 고려한 주관적 판단이다. 조직가중치 계산 시스템 개발을 위해 방사선위해를 계산한 단계를 글상자A.1에 요약 설명했다.

(A142) 여기서의 발생 데이터가 사용되기 때문에 명목위험계수는 $R_I = R_F + R_{NF}$ 이며, 위해는 다음과 같이 계산된다.

$$[k_T R_{I,T} + q_T (1 - k_T) R_{I,T}] l_T = [R_{I,T} (k_T + q_T (1 - k_T))] l_T.$$

(A143) ICRP 60의 계산은 명목 사망위험계수 R_F 에 기초했으며, 치사율 k 와 동일하게 q 를 택했다. 따라서 ICRP 60의 원인별 위해는 $R_F (2 - k) l$ 과 같은 $(R_F + k(1 - k) R_F / k) l$ 이며(ICRP 60의 134-136 페이지와 표B20 참조), 여기서 $R_{NF} = (1 - k) R_F / k$ 이다.

(A144) **삶의 질 위해.** 암 생존자는 일반적으로 삶의 질에 부정적인 영향을 겪는다. 따라서 암에 대해서는 치사율뿐만 아니라 통증, 고통 및 암 치료의 부작용도 가중해야 한다는 것이 ICRP 판단이다. 이를 위해 q_T 라는 조정 치사율을 얻는데 q_{min} 라는 인자를 암의 비치사분율에 적용한다. 비치사 위해를 조정하여 q_T 를

5) <역주> 제137항 식의 p 값으로 0.7을 부여했다는 의미이다.

6) <역주> 원문은 위해의 기호로 D_T 를 사용하고 있으나 조직 흡수선량 기호와 혼란을 초래할 우려가 있어 d_T 로 바꿨다.

글상자A.1. 조직가중치 시스템 개발 단계

조직가중치 시스템의 개발은 주로 암에 의한 상대 방사선위해에 기초했다. 순차적 단계는 다음과 같다.

- a) 방사선 연관 암에 대해 생애 암 발생 위험평가치를 구한다: 14개 장기와 조직에 대해 초과상대위험(ERR)과 초과절대위험(EAR) 모델을 모두 사용해 남녀의 생애 초과 암위험을 평가한 후 양 성별에 대해 평균했다.
- b) 선량선량률효과인자(DDREF)를 적용한다: DDREF를 고려하여 생애위험 평가치를 1/2로 낮췄다(위험에 대한 선형-이차 모델에서 이미 DDREF를 반영한 백혈병은 제외).
- c) 인구집단 사이 위험 평가치를 이전한다: 각 암 사이트의 방사선위험 평가를 위해 기저위험이 서로 다른 인구집단 간 일반화에 타당한 기반을 제공하도록 ERR과 EAR 생애위험 평가의 가중체계를 수립했다(ERR:EAR 가중치는 유방과 골수에는 0:100%, 갑상선과 피부에는 100:0%, 폐에는 30:70%, 다른 모든 조직에는 50:50%을 부여했다).
- d) 명목위험계수: 이 가중위험 평가치를 서구 및 아시아 7개 인구에 적용하고 평균하여 표A.4.1과 표A.4.2에 수록된 명목위험계수를 얻었다.
- e) 치사율 조정: 초과 발생 암에 기초하는 해당 암 사이트에 대한 생애위험을 대표적 국가 암 생존 데이터에서 도출한 치사율과 곱함으로써 치명적 암 위험으로 변환했다.
- f) 삶의 질 조정: 비치사성 암에 대한 이환율과 고통을 반영하기 위해 추가 조정이 적용되었다.
- g) 수명손실 연수 조정: 암 종류에 따라 연령 분포가 다르므로 여러 유형의 암에 대한 평균 연령을 국가 암 데이터에서 평가한 후 암이 발생한 때 수명손실의 평균 연수로 변환했다. 다음으로 앞 단계 결과에 수명손실 연수를 적용하여 조정했다.
- h) 방사선 위해: 위의 계산 결과 각 유형의 암에 관련된 방사선 위해 평가치가 나온다. 이 위험을 합에 대해 1로 정규화하면 표A.4.1에 수록한 상대 방사선 위해를 구성한다.
- i) 조직가중치: 표A.4.1의 상세한 상대 방사선위해는 평가와 관련된 불확실성 때문에 정밀하지는 않으므로 상대위해를 대략 반영하도록 네 개 범주로 구분했다. 상세한 방사선위험 계산이 의미가 없는 장기나 조직에 대한 방사선위험을 반영하도록 나머지 '잔여조직' 그룹도 추가했다.

계산하는 식은 다음과 같다.

$$q_T = q_{\min} + k_T(1 - q_{\min}).$$

여기서 k_T 는 치사율이며 q_{\min} 은 비치사암의 최소 가중치이다.

(A145) q_{\min} 값은 0.1로 설정했다(대부분의 경우 선택한 값에 대해 결과가 민감하지 않다). 실제로 q_{\min} 조정은 비치사성인 암 분율에 비례해 위해 계산에 영향을 준다. 따라서 폐암이나 위암 같이 치사율이 높은 암은 q_{\min} 에 의해 거의 영향을 받지 않지만, 유방암이나 갑상선암과 같이 치사율이 비교적 낮은 암은 상당한 영향을 받는다. 예를 들어 암의 치사율이 0.30일 경우 조정된 q_T 는 0.37이 된다. 그러나 방사선 기인 피부암은 통증, 고통 또는 치료 부작용이 거의 없는 대사세포 유형이기 때문에 피부암에는 q_{\min} 조정을 적용하지 않았다.

(A146) **명목위험의 치사율 조정.** 발생한 암(또는 유전적 영향)에 대한 상대 치사율 반영을 위해 명목위험계수를 조정한다. 치사율이 높은 암에는 사망을 거의 초래하지 않는 암보다 상대적으로 높은 가중치가 적용된다. 치사율 조정은 $(R \times q)$ 로 계산하는데 여기서 R은 중앙 사이트에 대한 명목위험계수이며, q는 전국 암 생존 데이터에서 도출한 치사율이다.

(A147) **상대 수명손실.** 수명손실의 상대적 연수는 위해 계산에 중요한 요소이다. 주어진 원인에 대한 평균 수명손실 연수는 각 병합인구에서 성별로 피폭연령 및 잔여 수명에서 도달연령의 평균으로서 계산했다. 가중치는 각 연령그룹에서 해당 원인으로 발생한 사망수와 같이 했다. 가중치는 모든 암에 대한 수명손실 평균 연수로 나눠 상대 값으로 변환했다.

(A148) 제A.4.5절의 표A.4.5에는 현행 계산에 사용한 치사율 인자, 비치사 증례 가중치 및 상대 수명손실 값이 수록되어 있다. 비교를 위해 ICRP 60 값도 보였다.

(A149) **암 위험에 대한 새 평가치의 주요 특성.** ICRP 60에서는 골수를 제외한 여러 조직에 대해 ERR과 EAR 모델에 같은 가중치가 주어졌다. 현행 평가에서는 ERR과 EAR 모델에 할당된 상대 가중치는 입증 데이터가 있을 경우 50:50에서 변경할 수 있도록 허용했다. 이에 따라 방사선유발 유방암 위험의 국가간 이전에 대해 보다 실질적인 모델이 나왔으며, 갑상선암이나 피부암 위험 평가치가 서로 다른 암 검사수준의 영향을 받는 잠재적 문제를 크게 방지할 수 있었다.

(A150) 현행 상대위해(표A.4.1)는 유방, 골수, 잔여조직과 생식선의 네 그룹을 제외하고는 ICRP 60에서 계산한 값과 유사하다. 유방암 상대 위해가 0.05에서 0.139로 증가한 데는 몇 가지 이유가 있다. 지금은 LSS 코호트에서 아동으로서 피폭한 사람들이 전체 유방암 위험에 상당히 기여한 한편, ICRP 60 분석에 사용한 사망률 데이터는 이 기여를 부분적으로만 반영했을 뿐이다. 또한 최근 발생 분석(Preston 등 2007)에서는 40세 이상 연령에서 피폭한 여성에 대한 ERR 평가치가 ICRP 60에 사용한 값보다 높다. 방사선과 고형암 발생에 관한 1958-1987 LSS 종양등록 보고서(Thompson 등 1994)에서는 유방암이 남녀 평균으로 총 초과 고형암의 약 11%를 기여한다. 현행 분석에서는 유방암이 방사선 관련 고형암의 약 18%를 차지한다. 다른 피폭집단에 대한 연구 결과도 방사선에 의한 높은 유방암 위험이 확인되었다(Preston 등 2002). 한편, 조기 발견과 치료법의 향상 때문에 지난 15년 동안 유방암 치사율은 감소했지만, 이것이 상대위해 평가치에는 거의 영향을 주지 않는 것으로 나타난다.

(A151) 백혈병 위험의 시간에 따른 감소에 관한 설명이 개선됨에 따라 골수 상대위해가 0.143에서 0.101로 감소했다. 생식선 위험 감소는 앞서 이미 설명했으며 유전질환 위험 평가를 위한 새로운 정보와 개정된 접근과 관계된다.

(A152) ICRP 60 이후 기간 동안 LSS 데이터가 추가로 축적됨에 따라 ‘잔여 조직’ 범주에도 상당한 영향을 미쳤다. 개별 조직에 대한 위험 정도는 분명하지 않지만 이제 여러 다른 조직에서 종합적으로 초과 방사선위험에 대한 새로운 증거가 있다. 잔여조직 범주의 위험은 많은 조직과 장기에 분산되기 때문에 특정 조직에는 작은 가중치를 할애해야 한다는 것이 ICRP 판단이다. 이 판단은 위험이 매우 낮거나 증거가 없음을 시사하는 LSS 또는 다른 증거와 부합한다.

(A153) 위해 평가치에 영향을 주는 인자들에 대한 보충 정보를 제공하기 위해 ICRP는 다양한 방법을 사용해 사이트별로 치사율 조정 명목 위험과 위해를 계산했다. 사용한 방법은 1) 최신 발생기반 평가치, 2) 현행 치사율과 수명손실 인자와 함께 현행 병합집단에 적용되는 최신 LSS 사망률 데이터(Preston 등 2003)에 기초한 위험모델을 사용한 사망률 기반 계산[즉, 1)과 같지만 발생 데이터가 아닌 현재 사망률에서 도출한 위험모델을 사용], 3) ICRP 60 ERR모델(표1, Land와 Sinclair 1991)을 현행 치사율과 수명손실 인자와 함께 현행 병합집단에 적용한 사망률 기반 계산[즉, 1)과 같지만 현행 발생 데이터에 근거한 모델이 아닌 ICRP 60 상대위험 모델을 사용], 4) 실제 ICRP 60 값이다.

(A154) 표A.4.2에 이러한 계산 결과가 수록되어 있다. 표A.4.2는 BEIR VII 모델(NAS/NRC 2006)을 DDREF로 2를 가정하고 구미와 아시아 병합인구에 적용한 상대위해 계산도 포함한다(표A.4.2 각주 참조). 방법 2)에 사용한 위험모델의 변수 평가치를 제A.4.5절에 주었다. 발생 및 사망률 기반 위험모델[즉, 위의 접근법 1)과 2)]을 사용한 상대위해 값은 대체로 유사하다. 그러나 몇 개 조직에서는 ICRP 60 방법론을 현행 데이터에 적용한 값('현행 ICRP 60')과 ICRP 60에 실린 특정 값('실제 ICRP 60')에서 큰 차이가 있다. BEIR VII 모델(NAS/NRC 2006)을 적용한 결과도 일부 조직의 상대위해에 유사한 정도의 차이를 보였다. 그러나 매우 일부 경우에서만 이러한 차이가 3배보다 크며, 총 위해는 2배 미만이다.

(A155) 전체적으로, 이러한 비교 계산은 LSS에 기반을 둔 방사선 암 위험의 중앙 평가치는 적절히 견고하며 위험모델 선택에 민감하지 않음을 시사한다.

(A156) 암 발생과 사망 데이터에 기초한 위해의 성 평균값을 계산하는 과정에서 ICRP는 남성과 여성 고유 데이터를 계산해야 했다. 이러한 데이터(제A.4.6절에 표A.4.18 및 표A.4.19)는 글상자1에 요약 설명한 것처럼 ICRP 조직가중치 모양을 구성하는 데 직접 영향을 미치지 않지만 다른 관련 판단에 정보를 제공할 수는 있다. 명목위해에 대한 ICRP 평가치는 전형적 연령분포의 여성과 남성 명목인구에 관련되고, 연령 그룹과 성별에 대해 평균으로 계산되기 때문에(선량 계측량인 유효선량 또한 연령과 성별 평균으로 계산한다.) 이러한 성별 데이터의 용도는 제한적임을 강조한다.

(A157) **조직 가중체계를 위한 발생 데이터 기반 상대위해의 사용.** ICRP는 양성별과 모든 연령에 대해 평균한 한 세트 w_T 값만 있어야 한다는 정책을 결정했다.

(A158) 그러나 이 정책을 유지함에 있어 ICRP는 남성과 여성(특히 유방에 대해) 그리고 피폭연령과 관련해 위험에 상당한 차이가 있다는 사실을 충분히 인지한다.

(A 159) 표A.4.1에 수록된 발생 데이터 및 표A.4.2에 수록된 보충 데이터에 기초한 해당 상대위해 값을 근사적으로 따르는 한 세트 w_T 값을 제안할 수 있다. 그러나 ICRP는 위해의 수학적 구축에 반영되지 않은 주관적 인자를 포함시키기 위해 추가로 판단이 필요하다고 본다. 특히 다음과 같은 판단이 적용되었다.

- 생식선 피폭에 따르는 유전영향과 암에 대한 위험을 묶어서 0.08의 w_T 를 준다.
- 갑상선은 아동기에 암 위험이 집중되기 때문에 갑상선 가중치는 0.04로 설정했다. 어린이는 특히 민감한 소집단으로 간주된다.
- 구체적으로 정량화하기 어렵지만 침샘과 뇌의 암 위험은 잔여조직 분류에 있는 다른 조직들보다 높은 것으로 판단되며, 이러한 이유 때문에 각각 0.01의 w_T 를 부여한다.⁷⁾

(A160) 위에 설명한 판단을 사용해 w_T 값을 재배열하되 조직가중치 값들이 표A.4.1의 상대위해로부터 약 2배 이상 벗어나지 않도록 했다. 이 재부여는 잔여조직에 0.12의 w_T 값을 할당한다. ICRP는 잔여조직 가중치를 취급하는 방법에 새로운 방안을 제시한다.

(A161) 이 방안은 잔여조직에 대한 $w_T(0.12)$ 를 표A.4.3의 각주에 보인 13개 조직에 대해 균등하게 나눈다.⁸⁾ 그 결과 각 조직에는 0.00923이 할당되는데 이 값은 명시 조직⁹⁾의 최저 $w_T(0.01)$ 보다 작은 값이다. 결합조직(connective tissue) 내 낮은 암 위험은 표A.4.3에 수록된 명시 장기의 암에 대한 영향을 통해 고려된다.¹⁰⁾ 지방조직의 암 위험은 사소한 것으로 판단되며, 그러한 이유 때문에 잔여조직에 포함하지 않았다. 잔여조직에 포함되는 조직의 수는 필요한 경우 늘일 수 있다.¹¹⁾ 이 시스템은 유효선량에서 덧셈성을 유지한다. 이 시스템은 잔여조직에 대한 w_T 를 가장 높은 선량을 받는 다섯 개 나머지 조직에 배분하는 ICRP 60 개념(따라서 합산적이지 않은 시스템임)을 적절히 단순화한 것으로 판단된다. 잔여조직에 속하는 조직들에 대한 질량 가중도 검토되었지만 폐기되었다. 주된 폐기 이유는 조직간 질량 차이가 매우 광범하기 때문에 때에 따라 어떤 방사성핵종에 대한 유효선량이 허용할 수 없을 정도로 왜곡되었기 때문이다.¹²⁾

7) <역주> 그러나 잔여조직에 속하는 개별 조직이 평균적으로 0.12/13(=0.0923)의 가중치를 갖기 때문에 0.01과 의미 있는 차이는 없다.

8) <역주> 원문은 14개 조직으로 되어 있고 따라서 뒷 문장의 개별 조직 할당 가중치도 0.086으로 적고 있으나 전연조직의 전립선(남성)과 자궁/경부(여성)이 선택적으로 적용되므로 실제로 13개 조직이며 따라서 할당치도 0.0923이 된다.

9) <역주> 조직가중치 표(표A.4.3)에서 잔여조직이 아닌 개별적으로 명시된 조직들을 말한다.

10) <역주> 현행 권고의 초안에는 결합조직이 잔여조직의 하나로 포함되었으나 이러한 이유로 최종적으로는 잔여조직에서 삭제했다.

11) <역주> 이렇게 표현하고 있지만 잔여조직에 대한 총 가중치 12%는 고정되고 그것이 13개 이상의 조직 산술평균 선량에 적용되므로 새로운 조직이 잔여조직에 추가되더라도 그것이 유효선량 결과에 미치는 영향은 사실 기대되지 않는다.

(A162) 표A.4.1과 표A.4.2의 위해 데이터 및 위에 요약 설명한 판단을 바탕으로 ICRP는 표A.4.3에 수록된 조직가중치 시스템을 제안한다. 조직 고유 방사선 위해를 대략적으로 나타내는 것을 모색하는 이 개념은 당연히 정밀하지는 않다. 특히 잔여조직의 경우 개별 조직에 대한 방사선 관련 암의 역학적 증거가 거의 없거나 전혀 없지만, 이들을 포함한다는 것은 상당히 신중한 방법이라 할 수 있다. w_T 는 단순히 방사선 방호량이며, 예를 들어 암의 방사선 인과 판단과 같은 다른 목적에 사용하려는 것이 아님을 ICRP는 강조한다.

암 및 유전영향의 명목위험계수

(A163) 명목위험계수 평가를 위해 ICRP는 위험 모델링과 질환 위해 계산에 방사선 유발 암과 유전영향 위험에 관한 새 데이터를 사용했다.

(A164) 이러한 계산(표A.4.1)을 근거로 ICRP는 치사율 조정 암 위험의 명목 위험계수로 전체 인구에 대해서는 $5.5 \times 10^{-2} \text{ Sv}^{-1}$ 을, 18세에서 64세까지의 성인 종사자에 대해서는 $4.1 \times 10^{-2} \text{ Sv}^{-1}$ 을 제안한다. 유전적 영향의 경우 치사율 조정 명목위험은 전체 집단의 경우 $0.2 \times 10^{-2} \text{ Sv}^{-1}$ 로, 성인 종사자의 경우 $0.1 \times 10^{-2} \text{ Sv}^{-1}$ 로 평가된다. 이 평가치를 표A.4.4에 보였으며, ICRP 60의 1990년도 권고에 사용한 위해 평가치와 비교했다. 이러한 평가치는 집단에만 적용하기 위한 것이며, 개인이나 소그룹의 위험평가에 사용은 권고되지 않는다.

(A165) 표A.4.4와 관련해, 여기서 평가한 암에 대한 위해조정 명목위험계수는 ICRP 60의 것과는 다른 방식으로 계산한 것임을 아는 것이 중요하다. 현행 평가치는 상대수명손실이 조정된 암 발생률에 치사율이나 생활장애 가중 데이터에 기초하는 반면, ICRP 60에서 위하는 치사 암 위험에 비치사성 암, 치사 암에서 상대수명손실, 그리고 비치사성 암에서 생활장애를 가중한 것에 기초한다. 따라서 표A.4.1a의 암 발생 기반 데이터에서 추정할 수 있는, 전체 인구에 대한 치사 암의 위해 미조정 명목위험계수는 Sv 당 약 4%로서 ICRP 60의 Sv 당 5% 값과 대비된다. 암 사망률 기반 모델을 사용하는 해당 값은 Sv 당 약 5%로서 본질적으로 불변이다.

12) <역주> 체내 선량분포가 거의 균질하다면 어떤 경우에도 문제되지 않는다. 그러나 조직간 등가 선량이 불균질할 때 가령 근육의 질량이 다른 조직들에 비해 압도적으로 크기 때문에 질량을 가중하면 다른 조직들의 선량이 비록 상대적으로 크더라도 유효선량 기여는 무의미해지는 문제가 발생한다.

(A166) 표A.4.4에 수록된 현행 위해조정 암 계수와 관련한 추가 관점의 하나는 현행 ICRP 권고가 적용될 것으로 보이는 시기에는 많은 암에 대한 생존률이 높아질 것으로 예상된다. 이런 점에서 여기서 제안한 명목위험계수는 미래의 위험을 과대평가하는 것일 수 있다.

(A167) 현행 권고와 ICRP 60 사이의 위해조정 유전영향 평가치의 차이는 제 A.6.5절에서 설명하고 논의한다.

출생 전(태내) 피폭에 따른 암 위험

(A168) 태아 피폭에 따른 암 위험에 관한 연구는 ICRP 90(ICRP 2003a)에서 검토하였다.

(A169) 태내피폭 후 암에 관한 가장 큰 규모의 사례대조연구인 “소아기 암에 관한 옥스퍼드 연구(OSCC)”는 방사선이 모든 유형의 암을 거의 같은 정도로 증가시킴을 발견했다. 태내 방사선에 관한 여러 코호트연구에서 방사선 유발 소아 암에 관한 분명한 증거를 찾지 못했음에 반해 두 번째로 규모가 큰 연구는 고형 종양보다 높은 백혈병 상대위험을 보였다. 원폭생존자의 제한된 데이터에서는 태내피폭에 따른 생애 암 위험이 소아 초기의 피폭으로 인한 것과 유사함을 시사한다.

(A170) OSCC 데이터에 따르면 암 유발은 첫 3분기¹³⁾ 피폭 후 유발이 적어도 나머지 두 3분기에서와 같다. 지금까지 발표된 데이터로부터 여러 조직이나 장기에서 암 위험을 규정하기 위한 조직가중치를 결정하는 것은 가능하지 않다. 낮은 LET 방사선에 대한 선량선량률효과인자(DDREF)나 중성자 또는 기타 높은 LET 방사선에 대한 RBE 값을 규정하는 데 사용할 수 있는 사람 태내피폭 데이터는 없다.

(A171) 사용할 수 있는 데이터가 없으므로 ICRP는 출생 전 피폭 후 생애 암 위험에 대한 명목계수의 구체적 값을 도출하려 하지 않았으며, 그 위험을 전체 인구 위험에 비해 최대 수배로 보는 것이 합리적이라는 ICRP 90(ICRP 2003a)의 판단을 지지한다. 태내 위험은 소아 초기 피폭에 따른 위험보다 크지 않은 것으로 판단된다.

13) <역주> 총 임신기간을 9월로 볼 때 첫 3분기는 수태 후 3월까지가 된다.

방사선 유발 암에 대한 유전적 감수성

(A172) ICRP 79(ICRP 1998a)에서 발전시킨 데이터 분석과 판단, UNSCEAR (2000, 2001) 및 BEIR VII 위원회(NAS/NRC 2006)가 검토한 추가 정보를 바탕으로 ICRP는 강력하게 표출되는 고침투도 암 유전자가 이 절에서 이루어진 낮은 선량 방사선 암 위험의 집단 기반 평가치를 유의하게 왜곡하기에는 너무 희귀하다는 입장을 견지한다. 그러나 ICRP 79에 적시했듯이 특히 일차 종양에 대해 방사선치료를 받은 유전자 담체의 이차 암에서는 개인 암 위험에 대한 암시가 있을 수 있다. 약하게 표출되는 다양한 암 유전자가 원칙적으로 방사선 암 위험의 집단 기반 평가치에 영향을 미칠 정도로 충분히 흔하게 존재한다고 ICRP는 인식하지만 이 문제에 대한 의미 있는 정량적 판단을 내기에는 가용 정보가 충분하지 않다.

암 위험에 대한 낮은 선량 비선형 반응 가능성

(A173) 새로운 데이터와 가설이 등장함에 따라 과학적 가설과 실제 적용의 유효성에 의문을 제기하는 경우가 많다. 이점은 방사선방호에서도 확실히 그러한데 특히 암 위험을 낮은 선량과 낮은 선량률로 투사하기 위해 사용하는 소위 문턱 없는 선형(LNT)모델과 유도 LNT모델¹⁴⁾이 그러하다(UNSCEAR 2000, CERRIE 2004, NAS/NRC 2005, French Academies Report 2005). 아래에 보듯이 두 가지 주요 범주의 도전이 있는데 두 범주 모두 낮은 선량에서 비선형 반응을 가설로 한다.

(A174) **낮은 선량 초선형 반응.** 암 유발에 대한 방사선량 반응은 낮은 선량에서 초선형 요소가 있으며(즉, 쌍정점bimodal 선형-반응 관계) 따라서 높은 선량에서 관찰된 것을 낮은 선량 위험에 투사할 경우 실제 위험이 심하게 과소평가될 수 있다고 주장하는 연구도 있다(CERRIE 2004 및 그 참고문헌). 그러한 가설은 비정상적인 역학 및 실험 관찰에 대한 보고와 관련해 자주 인용된다.

(A175) 영국 CERRIE위원회(CERRIE 2004)는 특히 내부 방사선과 관련해 그러한 암 위험 과소평가 주장의 과학적 근거를 검토했다. 고려된 주장들은 대체로 a) 선정된 역학 데이터의 해석, b) 특정 내부 방사선 작용의 형태에 대한 생물물리학적 제안, c) 암 진전에 있어 유발계놈불안정성이나 구경꾼교신의 역할, d) 역학 및 실험 데이터에 쌍정점 또는 다정점 선량-반응의 맞춤에 근거한다.

14) <역주> 유도 LNT 모델이란 단순 정비례(선형) 모델이 아닌 선형-이차 모델 또는 DDREF를 반영한 선형 모델처럼 변형된 LNT 모델을 의미한다.

(A176) 위험의 전체적인 과소평가에 대한 제안 중 어떤 것도 온당한 과학적 근거가 없으며, 일부는 명확히 결함이 있다는 다수 CERRIE 위원의 일반적 의견에 ICRP는 동의한다. 다음 몇 가지는 ICRP 견해의 예이다.

- 인용한 역학연구에서는 수립된 방사선위험 모델이 핵실험 낙진으로부터 아동 백혈병 위험을 심각하게 과소평가했다는 증거를 일관성 있게 제시하지 않았다.
- ^{90}Sr 및 입자 형태의 알파 방사체에서 예상보다 높은 암 위험을 지원한다고 인용한 소위 2차사상이론(Second Event Theory)은 부적절하게 구축된 것이며, 잘 확립된 생물학적 데이터와 일치하지 않는다.
- 유발계놈불안정성이나 구경꾼교신과 암 위험 사이의 연관성은 아직 충분히 파악되지 않았다(제A.4.1절 A97항 참조).
- 쌍정점 또는 다정점 선량 반응에 관련된 데이터는 일반적으로 취약하고, 통계적 분석이 부적절하며, 그러한 현상이 있더라도 명백한 기계론적 근거가 없다.

(A177) ICRP는 낮은 선량에서 암 위험 평가치의 불확도가 상당하다고 판단하는 동시에, 초선형 선량 반응에 관련된 데이터와 이론이 문턱 없는 선형모델(LNT) 가설에 기초한 현행 암 위험 모델의 적용과 유효선량 개념의 적용이 암 위험을 전체적으로 과소평가한다는 증거를 제공하지 않는다고 판단한다.

(A178) **선량 문턱치.** 앞의 설명과 계산에서 낮은 선량과 낮은 선량률에서 낮은 LET 방사선의 사이트별 암 위험은 LNT모델과 일치하게 방사선량과 비례하는 것으로 가정했다. 따라서 그 이하에서는 방사선 관련 암 위험이 없는 문턱치 선량의 가능성은 무시되었다. LNT모델은 생물학적 진리로 항상 수용되지는 않지만, 매우 낮은 선량 피폭과 관련된 위험 수준을 실제로 알지 못하므로 공중 정책에서 피폭으로부터 불필요한 위험을 방지하기 위한 신중한 판단으로 간주된다.

(A178) ICRP 99(ICRP 2005d)에 자세히 설명한 것처럼, LNT는 LSS의 모든 고형암 사망률과 이환률 위험이 최저 약 100 mGy까지 방사선량에 비례한다는 관점에서 방사선 관련 암 위험 역학연구에 의해 결정적이지는 않지만 상당한 지원을 받는다. 선량이 그 이하로 내려갈수록 기저위험의 통계적 요동과 작지만 통제할 수 없는 편향 때문에 방사선 관련 위험에 관한 증거는 점점 불투명해 진다. 주로 이러한 불확실성 때문에 역학연구만으로는 수십 mSv 이하 수준에서는 방사선피폭에 관련된 암 위험 증가 유무를 판단할 수 없다. 그러한 피폭의 위험평가는 역학데이터가 의미가 있는 높은 선량에서 위험과 직접적인 역학 관찰이

무의미한 낮은 선량 사이에 단순한 관계, 예를 들어 선형, 선형-이차 또는 선량 선량률효과인자(DDREF)와 결합된 선형을 가정하는 수학적 모델을 사용해 구할 수 있다.

(A180) 전리방사선이 포유류의 복구 메커니즘이 오류에 취약한 DNA 복잡손상을 유발한다는 점에서 LNT모형을 지원하는 생물학적 증거에도 불구하고 모르지만 어떤 낮은 선량에 암 유발에 대한 문턱 존재 가능성을 배제할 수는 없다(제 A.4.1절 참조).

(A181) 분자 수준에서 근접한 공간 내에 다수 DNA 병변은 포유류의 복구 메커니즘이 오류에 취약한 복잡손상을 발생시키는데 이것이 돌연변이와 염색체변형을 유발해 결국 방사선이 암 병인에 기여하는 것으로 판단된다. DNA에서 그러한 복잡손상은 원론적으로 세포 내 단일 방사선 비적에 의해서도 유발될 수 있다. 또한 그러한 방사선 유발 손상을 가진 생존 가능 세포의 대부분을 세포 주기 검사점 제어나 자살세포사와 같은 손상반응 경로가 제거할 수 있지만, 세포유전학적 또는 돌연변이 데이터를 분석하면 손상되거나 변형된 세포가 그러한 방어수단을 회피해 번식할 수 있음이 분명하게 나타난다.

(A182) 방사선 종양형성에 대한 새로 개발된 동물모형을 사용한 최근 연구결과는 종양형성 과정에서 핵심 방사선 관련 사상이 주로 결정적 유전자가 있는 특정 게놈 부위에 집중된 DNA 손실을 초래하는 초기 사상이라는 관점을 지지하고 있다(제A.2.7절 A41-A44항 참조). 따라서 시발 사상에 대한 반응은 세포유전적 손상 또는 돌연변이 손상 유발에 대한 반응에 해당할 것으로 보인다. 이를 바탕으로 기계론적 주장은 낮은 선량 영역에서 선형반응을 지지한다. 즉, 상이한 전자 비적 사이의 상호작용은 드물기 때문에 위와 같은 과정이 선량률에 독립적이어야 한다. 정량적 불확실성은 상당하지만 실험동물의 종양형성 및 수명단축에 대한 선량 반응의 정량적 분석 또한 이러한 예측을 지지하는 경향이다.

(A183) 한편으로는 낮은 선량이 면역체계의 반종양형성 요소를 어떤 형태로 자극하여 암 위험 경감에 기여하는지 여부에 관해 오랜 논쟁도 있다. 그러한 제안에 대해 UNSCEAR(1993, 1994)가 깊이 있게 검토했는데, 낮은 선량의 어떤 암 관련 적응과정에 면역체계가 중요한 역할을 하는지에 대한 UNSCEAR의 의문에 ICRP도 동의한다(UNSCEAR 2000).

(A184) ICRP 99에서 논의했듯이 이 절 처음에 강조한 통계적 불확실성 외에

도 낮은 방사선량에서 방사선 관련 암 위험 평가에 필요한 모델 가정에 다른 불확실성도 수반된다. 후자 불확실성은 오로지 주관적 정량화만 가능하다. 불확실한 가정에는 낮은 선량과 낮은 선량률에 적용하는 DDREF, 평가치를 한 집단에서 다른 집단으로 이전할 때 초과 발병률과 기저 암발병률 사이의 관계, 위험 평가치가 도출된 피폭집단의 평가선량과 실제선량 사이의 관계 등이 포함된다(A125-A148항 참조). 이러한 모든 가정은 평가한 위험 및 그 확률적 불확실성 한계에 상당한 영향을 미칠 수 있다. 만약 어떤 알려진 준위에 일반적 문턱선량 존재의 불확실한 가능성이나, 값이 매우 불확실한 문턱치 또는 피폭집단 구성원 사이에서 크게 변하는 문턱치를 가정한다면 이 또한 위험 평가치와 그 불확실성 한계에 영향을 준다. ICRP 99에서 설명한 분석에서, 문턱치 존재가 실제로 확실하다고 가정하고 그 가능한 값이 현재 지식으로 정당화될 수 있는 값보다 충분히 낮게 제한되지 않는 한, 문턱치의 불확실한 가능성을 도입하는 영향은 DDREF값의 불확실한 증가 영향과 대등하다. 즉, 문턱치 가능성을 무시하고 얻은 결과의 변동에 지나지 않는다.

(A185) 특정 조직 내 암 유발에 대한 낮은 선량 문턱치 존재가 불가능한 것은 아니다. 실제로, ICRP 99에 설명한 것처럼 예를 들어 임파구성백혈병, 고환암 및 흑색종 피부암처럼 몇몇 인체 조직에서는 방사선 관련 초과 암에 대한 명백한 증거가 없다.

(A186) 가용한 데이터가 낮은 선량 문턱의 존재를 보편적으로 배제하는 것은 아니지만, 이 부록에서 설명하고 요약한 종합 증거는 그 존재를 지지하지 않는다. 최근 BEIR VII 위원회(NAS/NRC, 2006)는 낮은 선량 위험에 관한 보고서를 발간했는데 이 보고서도 역학적, 생물학적 데이터를 근거로 동일한 결론에 도달하고 있다. 그러나 마찬가지로 최근 프랑스로학원(French Academies, 2005)의 한 보고서는 낮은 선량에서 방사선 암 위험에 대한 실질적인 낮은 선량 문턱치의 존재를 주장하기 위해 피폭 후 세포교신, DNA 회복, 세포자살 및 적응성 반응양발생 과정의 잠재적 선량 의존성에 대한 증거를 강조했다. 전체적으로 LNT 모델의 참 타당성에 관한 오랜 의문은 확고한 과학적 해소까지 거리가 멀고 따라서 가까운 장래에는 “증거가 무게 있는” 논증과 실질적 판단이 계속 적용될 것으로 보인다.

(A187) 요컨대, 현재로서는 방사선방호 목적을 위한 암 위험 계산에 초선형 선량반응이나 낮은 선량 문턱 가능성을 포함시킬 수 있는 좋은 과학적 근거가 없다는 것이 ICRP의 판단이다. 이러한 바탕에서 높은 선량으로부터 외삽하기 위

해 판단한 DDREF 값과 결합된 LNT 모델이 계속하여 낮은 선량 및 낮은 선량률에서 방사선방호의 실질적인 목적을 위한 신중한 근거가 되기를 권고한다.

표A.4.5. 현행 계산에 사용한 치사율 인자, 비치사 증례 가중치, 상대수명손실 값 및 ICRP 60의 해당 값

사이트	현행			ICRP 60	
	치사율 (k)	비치사 증례 가중치(q)	상대 수명손실	치사율 (k = q)	상대 수명손실
식도	0.93	0.935	0.87	0.95	0.65
위	0.83	0.846	0.88	0.90	0.83
결장	0.48	0.530	0.97	0.55	0.83
간	0.95	0.959	0.88	0.95	1.00
폐	0.89	0.901	0.80	0.87	0.90
뼈	0.45	0.505	1.00	0.72	1.00
피부	0.002	0.002	1.00	--	1.00
유방	0.29	0.365	1.29	0.50	1.21
난소	0.57	0.609	1.12	0.70	1.12
방광	0.29	0.357	0.71	0.50	0.65
갑상선	0.07	0.253	1.29	0.10	1.00
골수	0.67	0.702	1.63	0.99	2.06
기타 고형	0.49	0.541	1.03	0.71	0.91
생식선	0.80	0.820	1.32	--	1.33

k, q 및 상대 수명손실은 A.4절 A141-A148항에 정의되어 있다. 특히 q는 현행 계산에서 $q_{\min} + (1 - q_{\min}) * k$ 로 계산했으며, 여기서 q_{\min} 는 피부의 경우 0, 갑상선의 경우 0.2, 다른 모든 부위의 경우 0.1이다.

A.4.5. 기타 위해 계산의 세부사항

(A188) 이 절에서는 ICRP 위험모델에 사용된 모델 변수들이 상세하게 제공된다. 표A.4.5에는 다양한 기관에 대한 치사율 인자, 비치사 증례 가중치 및 상대수명손실을 열거하고 있다. 표A.4.6과 표A.4.7에는 각각 현행 암 발생기반 ERR 및 EAR 모델 계수값이 나타나 있고, 표A.4.8과 표A.4.9에는 현행 암 사망기반 ERR 및 EAR 모델 계수값을 보이고 있다. 구미 여성과 남성의 연령과 부위별 암 발생률은 표A.4.10과 표A.4.11에 나타나 있으며, 이들의 암 사망률은 각각 표A.4.12와 표A.4.13에 나타나 있다. 표A.4.14와 표A.4.15은 각각 아시아 여성과

남성의 암 발생률을, 표A.4.16과 표A.4.17은 각각 이들의 암 사망률을 보이고 있다.

표A.4.6. 현행 암 발생기반 ERR 모델 계수

사이트	성별	30세 피폭 후 70세의 Gy 당 ERR	피폭연령 십 년 증가 당 ERR 변화 %	ERR 변화가 따르는 발병 연령의 지수	F:M 비율	일관성 P ^a
모든 고형	M	0.35	-17%	-1.65	1.65	
	F	0.58				
식도	M	0.40	-17%	-1.65	1.65	>0.5
	F	0.65				
위	M	0.23	-17%	-1.65	1.65	>0.5
	F	0.38				
결장	M	0.68	-17%	-1.65	0.48	0.006
	F	0.33				
간	M	0.25	-17%	-1.65	1.65	>0.5
	F	0.40				
폐	M	0.29	+17%	-1.65	4.77	0.09
	F	1.36				
유방	F	0.87	0%	-2.26	--	0.37
난소	F	0.32	-17%	-1.65	--	>0.5
방광	M	0.67	-17%	-1.65	1.65	0.27
	F	1.10				
갑상선	M	0.53	-56%	0.00	2.00	0.04
	F	1.05				
기타	M	0.22	-34%	-1.65	0.78	0.50
	F	0.17				

a) P값은 ERR에 대한 연령, 피폭연령 및 (해당 경우)성별 영향이 조직별 분석보다 LSS 데이터를 더 잘 설명할 수 있다는 가설의 시험에 대한 것이다. 갑상선암은 예외인데 여기서 P값은 합체분석(Ron 등 1995) 결과에 기초하는 BEIR VII(NRC 2006)에서 사용하는 모델이 현행 LSS 데이터를 적절히 설명한다는 가설의 시험에 사용한 것이다.

표A.4.7. 현행 암 발생기반 EAR 모델 계수

사이트	성별	30세 피폭 후 70세의 Gy 당 ERR	피폭연령 십 년 증가 당 ERR 변화 %	ERR 변화가 따르는 발병 연령의 지수	F:M 비율	일관성 P ^a
모든 고형	M	43.20	-24%	2.38	1.38	
	F	59.83				
식도	M	0.48	64%	2.38	1.38	0.08
	F	0.66				
위	M	6.63	-24%	2.38	1.38	>0.5
	F	9.18				
결장	M	5.76	-24%	2.38	0.42	0.02
	F	2.40				
간	M	4.18	-24%	2.38	0.31	0.06
	F	1.30				
폐	M	6.47	1%	4.25	1.38	<0.001
	F	8.97				
유방	F	10.9	-39%	3.5*	--	0.06
				1.0		
난소	F	1.47	-24%	2.38	--	>0.5
방광	M	2.00	-11%	6.39	1.38	0.01
	F	2.77				
갑상선	M	0.69	-24%	0.01	3.36	<0.001
	F	2.33				
기타	M	7.45	-24%	2.38	1.38	0.12
	F	10.45				

a P값은 ERR에 대한 연령, 피폭연령 및 (해당 경우)성별 영향이 조직별 분석보다 LSS 데이터를 더 잘 설명할 수 있다는 가설의 시험에 대한 것이다. 갑상선암은 예외인데 여기서 P값은 병합분석(Ron 등 1995) 결과에 기초하는 BEIR VII(NRC 2006)에서 사용하는 모델이 현행 LSS 데이터를 적절히 설명한다는 가설의 시험에 사용한 것이다.

* 상단 값은 50세 이전 연령 영향이고, 하단 값은 50세를 초과한 연령 영향이다.

A.4.6. 성별 집단 위험 평가

(A189) 이 절에서는 성별 위해 평가치를 암 발생 데이터에 근거하여 제시하였다. 표A.4.18에는 피폭연령 0-85세의 데이터를 표A.4.19에는 피폭연령 18-64

표A.4.8. 현행 사망률 기반 ERR 모델 계수

사이트	성별	30세 피폭 후 70세의 Gy 당 ERR	피폭연령 십 년 증가 당 ERR 변화 %	ERR 변화가 따르는 발병 연령의 지수	F:M 비율	일관성 P
모든 고형	M	0.35	-31%	-0.74	1.68	
	F	0.58				
식도	M	0.76	-31%	-0.74	1.68	0.47
	F	1.27				
위	M	0.26	-31%	-0.74	1.68	0.48
	F	0.43				
결장	M	0.25	-31%	-4.46	1.00	0.43
	F	0.25				
간	M	0.21	-31%	-0.74	1.68	0.94
	F	0.34				
폐	M	0.55	-4%	-0.74	1.68	0.76
	F	0.92				
유방	F	0.96	-31%	-0.74		0.70
난소	F	0.67	-31%	-0.74		0.67
방광	M	0.74	12%	-0.74	1.68	0.75
	F	1.24				
기타	M	0.13	-56%	-0.74	1.68	0.40
	F	0.22				

세의 데이터를 나타내었다. 이러한 성별 위해 값은 ICRP 방사선방호 체계에서 특정 기능을 갖지는 않는다(A156항 참조).

표A.4.9. 현행 사망률 기반 EAR 모델 계수

사이트	성별	30세 피폭 후 70세의 Gy 당 ERR	피폭연령 십 년 증가 당 ERR 변화 %	ERR 변화가 따르는 발병 연령의 지수	F:M 비율	일관성 P
모든 고형	M	28.91	-24%	3.63	1.04	
	F	29.99				
식도	M	0.98	-24%	3.63	1.00	0.42
	F	0.98				
위	M	5.79	-24%	3.63	1.00	0.45
	F	5.79				
결장	M	2.24	-24%	3.63	1.00	0.66
	F	2.24				
간	M	6.46	-24%	5.56	0.37	0.42
	F	2.36				
폐	M	6.72	-24%	6.56	1.00	0.70
	F	6.72				
유방	F	15.73	-44%	5.78 ^a -2.83		0.01 ^b
난소	F	1.40	-24%	3.63		0.90
	M	0.83				
방광	M	0.83	0%	8.04	1.00	0.23
	F	0.83				
기타	M	3.68	52%	3.63	1.00	0.29
	F	3.68				

a 상단 값은 50세 이전 연령 영향이고, 하단 값은 50세를 초과한 연령 영향이다.

b 도달연령의 스플라인spline이 필요하지 않다는 가설의 시험.

표A.4.10. 연령 및 사이트별 구미 여성 암 발생률

연간 100,000명당 증례의 수														
연령	모든 암	모든 고형암	식도	위	결장	간	폐	유방	난소	방광	갑상선	백혈병	비CLL 백혈병	CLL
0-4	18.37	10.95	0.00	0.01	0.01	0.32	0.01	0.02	0.05	0.06	0.01	6.95	6.92	0.03
5-9	9.03	5.28	0.00	0.01	0.03	0.03	0.04	0.00	0.23	0.00	0.08	3.07	3.05	0.02
10-14	10.20	6.57	0.00	0.04	0.11	0.04	0.02	0.01	0.69	0.00	0.54	2.15	2.15	0.00
15-19	17.49	11.03	0.01	0.08	0.25	0.07	0.04	0.12	1.77	0.07	1.80	2.20	2.19	0.00
20-24	29.46	21.96	0.02	0.09	0.36	0.09	0.19	1.19	2.89	0.19	3.87	1.63	1.59	0.04
25-29	51.15	43.58	0.04	0.27	0.83	0.17	0.39	7.17	4.03	0.31	5.60	1.66	1.61	0.04
30-34	83.77	76.06	0.10	0.75	1.27	0.24	1.04	23.53	5.82	0.50	6.38	1.90	1.86	0.04
35-39	137.56	129.33	0.13	1.17	3.27	0.39	3.20	54.12	9.00	0.98	7.00	2.41	2.27	0.14
40-44	227.67	215.47	0.50	2.28	6.00	0.64	8.29	107.57	13.73	1.85	7.20	3.72	3.41	0.31
45-49	372.68	355.20	1.07	3.31	11.90	1.42	20.20	183.33	24.54	4.05	8.48	4.52	3.72	0.80
50-54	540.14	512.41	2.42	5.02	21.92	2.43	40.44	243.57	34.33	7.90	8.07	7.61	5.28	2.34
55-59	703.34	663.31	5.27	8.76	41.98	4.07	67.32	263.17	41.39	13.25	7.97	9.99	6.59	3.40
60-64	907.16	851.75	7.92	14.26	63.80	6.73	106.00	298.07	49.35	22.38	7.16	15.15	9.82	5.33
65-69	1127.22	1048.58	11.24	21.99	94.46	9.82	154.72	305.57	55.60	33.45	7.79	21.91	12.96	8.94
70-74	1385.31	1279.59	16.96	33.48	138.10	14.11	190.74	328.61	62.04	47.83	8.53	30.29	17.72	12.57
75-79	1557.27	1427.72	21.52	47.53	177.76	17.32	191.05	339.09	61.42	56.59	8.13	37.99	21.96	16.03
80-84	1707.07	1565.32	26.77	65.22	234.14	22.02	166.82	365.99	56.31	68.67	8.73	43.94	26.88	17.05
85-89	1660.82	1667.88	34.82	76.14	241.25	21.66	127.96	335.97	49.39	83.68	8.73	43.98	26.91	17.07
90+	1720.81	1706.61	23.34	73.73	266.50	16.94	76.51	382.23	38.63	54.69	8.73	73.39	44.90	28.48

표A.4.11. 연령 및 사이트별 구미 남성 암 발생률

연간 100,000명당 증례의 수														
연령	모든 암	모든 고형암	식도	위	결장	간	폐	유방	난소	방광	갑상선	백혈병	비CLL 백혈병	CLL
0-4	21.64	12.70	0.00	0.01	0.00	0.62	0.01			0.12	0.00	7.78	7.77	0.01
5-9	11.66	6.18	0.00	0.00	0.00	0.10	0.00			0.01	0.05	3.80	3.80	0.00
10-14	12.26	6.18	0.00	0.00	0.06	0.05	0.03			0.02	0.13	3.07	3.07	0.00
15-19	18.72	11.10	0.00	0.06	0.13	0.10	0.11			0.10	0.43	2.73	2.73	0.00
20-24	29.00	20.81	0.02	0.10	0.33	0.15	0.19			0.39	0.77	1.98	1.98	0.00
25-29	43.12	32.54	0.09	0.27	0.92	0.22	0.36			0.60	1.54	2.36	2.33	0.03
30-34	58.48	45.37	0.21	0.82	1.75	0.32	0.99			1.27	1.47	2.87	2.80	0.07
35-39	77.82	61.65	0.64	1.45	3.15	0.72	3.19			2.52	1.78	3.61	3.20	0.41
40-44	115.96	95.95	1.94	3.27	6.71	2.06	9.41			5.70	2.15	4.65	3.81	0.84
45-49	198.61	170.47	4.26	6.02	12.42	3.12	23.28			12.63	2.83	6.67	4.85	1.82
50-54	380.05	337.58	9.47	11.72	25.26	5.53	56.22			25.29	3.34	11.59	7.20	4.38
55-59	676.04	617.96	15.68	21.64	47.90	9.60	108.53			46.07	3.81	16.47	9.56	6.91
60-64	1136.55	1053.31	24.79	36.02	84.67	15.00	189.00			79.67	4.16	25.34	14.06	11.28
65-69	1767.07	1651.87	33.72	58.28	129.65	22.80	304.06			132.28	5.24	37.75	20.92	16.83
70-74	2415.76	2255.06	46.59	87.72	185.35	30.88	400.78			184.53	5.69	56.29	30.97	25.33
75-79	2882.34	2680.83	49.57	114.49	248.89	36.70	456.24			229.94	5.98	68.43	39.48	28.95
80-84	3225.05	2983.09	55.88	145.00	310.36	36.96	459.96			275.56	6.26	86.36	50.15	36.21
85-89	3033.46	3166.00	59.36	165.76	316.71	37.73	404.07			266.44	6.26	91.89	38.53	53.36
90+	3676.73	3290.99	49.36	137.84	335.18	39.21	337.79			376.32	6.26	102.86	43.13	59.73

표A.4.12. 연령 및 사이트별 구미 여성 암 사망률

연간 100,000명당 사망의 수														
연령	모든 원인	모든 암	모든 고형	식도	위	결장	간	폐	유방	난소	방광	백혈병	비CLL 백혈병	CLL
0-4	114.61	2.22	1.46	0.00	0.00	0.00	0.06	0.02	0.00	0.01	0.00	0.76	0.76	0.00
5-9	11.35	2.01	1.42	0.00	0.00	0.00	0.02	0.01	0.00	0.01	0.01	0.59	0.59	0.00
10-14	13.28	2.05	1.34	0.00	0.02	0.01	0.02	0.01	0.00	0.03	0.00	0.71	0.71	0.00
15-19	28.51	2.76	1.74	0.00	0.03	0.04	0.05	0.02	0.00	0.10	0.00	1.02	1.02	0.00
20-24	33.03	3.40	2.46	0.01	0.05	0.06	0.10	0.04	0.09	0.21	0.00	0.94	0.94	0.00
25-29	40.17	5.97	5.10	0.02	0.14	0.21	0.11	0.10	0.96	0.31	0.01	0.87	0.87	0.00
30-34	55.43	12.77	11.86	0.04	0.41	0.35	0.15	0.53	3.85	0.74	0.06	0.91	0.91	0.00
35-39	81.36	26.07	24.79	0.10	0.69	1.11	0.28	1.90	9.49	1.41	0.09	1.27	1.27	0.00
40-44	122.96	48.98	47.14	0.30	1.23	2.02	0.58	5.45	18.24	3.34	0.19	1.84	1.84	0.00
45-49	193.21	88.79	86.48	0.87	1.76	4.59	1.07	13.34	31.03	7.13	0.49	2.31	2.31	0.00
50-54	309.20	150.52	147.17	1.87	2.98	8.82	1.82	28.25	45.67	13.39	1.00	3.34	3.34	0.00
55-59	489.59	232.48	227.46	3.93	5.16	16.19	3.28	48.94	57.28	21.10	1.82	5.15	5.02	0.13
60-64	801.25	343.06	335.47	6.24	8.47	25.88	5.31	81.35	68.26	27.83	3.70	7.59	7.59	0.00
65-69	1283.49	487.75	476.42	9.10	14.54	39.32	8.87	123.13	82.37	34.97	6.63	12.06	11.33	0.73
70-74	2098.33	654.11	636.96	13.79	21.54	58.94	12.40	158.51	97.91	42.39	11.95	17.97	17.15	0.83
75-79	3406.46	801.53	778.31	20.07	32.16	81.11	16.83	167.46	117.85	45.48	17.98	25.36	23.22	2.15
80-84	5934.90	988.90	956.69	26.37	47.48	118.84	21.81	159.62	146.37	47.35	29.09	35.14	32.21	2.94
85-89	9876.82	1178.13	1146.03	35.87	64.84	165.46	26.79	137.93	188.77	46.61	48.53	38.97	35.71	3.25
90+	19441.90	1220.69	1172.64	24.05	62.78	182.78	20.95	82.47	214.76	36.46	31.72	65.02	59.59	5.43

표A.4.13. 연령 및 사이트별 구미 남성 암 사망률

연간 100,000명당 사망의 수														
연령	모든 원인	모든 암	모든 고형	식도	위	결장	간	폐	유방	난소	방광	백혈병	비CLL 백혈병	CLL
0-4	143.02	2.75	1.97	0.00	0.00	0.00	0.11	0.00			0.00	0.78	0.78	0.00
5-9	15.39	2.74	1.70	0.00	0.00	0.00	0.05	0.01			0.01	1.04	1.04	0.00
10-14	19.43	2.52	1.39	0.00	0.00	0.01	0.02	0.01			0.01	1.12	1.12	0.00
15-19	66.78	3.50	2.10	0.00	0.01	0.04	0.05	0.02			0.00	1.41	1.41	0.00
20-24	94.71	4.50	3.27	0.02	0.06	0.13	0.09	0.12			0.01	1.23	1.23	0.00
25-29	99.79	5.87	4.56	0.05	0.14	0.28	0.12	0.20			0.01	1.31	1.31	0.00
30-34	124.33	9.09	7.75	0.18	0.36	0.55	0.21	0.64			0.05	1.34	1.34	0.00
35-39	160.80	16.28	14.65	0.48	0.83	1.12	0.50	2.23			0.14	1.63	1.63	0.00
40-44	224.83	34.98	32.89	1.66	1.78	2.46	1.33	7.19			0.46	2.08	2.08	0.00
45-49	321.50	69.83	67.16	3.62	3.33	5.22	2.38	18.84			1.00	3.09	2.67	0.42
50-54	505.70	143.81	139.31	7.94	6.11	10.74	3.90	45.14			2.87	4.79	4.50	0.30
55-59	821.44	262.09	254.99	13.88	11.61	20.26	7.03	89.61			6.09	7.64	7.11	0.54
60-64	1378.11	457.53	446.19	21.98	21.78	35.75	11.69	162.02			12.33	12.85	11.34	1.51
65-69	2241.12	734.15	714.15	30.93	34.77	56.32	17.62	260.63			23.18	20.56	20.00	0.56
70-74	3590.14	1065.72	1036.77	41.20	53.11	85.62	24.51	354.10			39.44	32.65	28.94	3.70
75-79	5634.15	1427.76	1387.32	49.19	75.51	116.26	31.46	421.65			61.53	45.15	40.44	4.71
80-84	9122.79	1880.96	1826.90	55.21	103.50	165.63	36.27	464.57			96.92	64.25	54.06	10.19
85-89	13879.10	2208.86	2287.11	63.41	132.47	221.43	37.50	445.09			135.96	82.03	69.02	13.01
90+	24029.19	2677.26	2377.40	52.73	110.15	234.35	38.98	372.08			192.04	91.82	77.26	14.57

표A.4.14. 연령 및 사이트별 아시아 여성 암 발생률

연간 100,000명당 증례의 수														
연령	모든 암	모든 고형암	식도	위	결장	간	폐	유방	난소	방광	갑상선	백혈병	비CLL 백혈병	CLL
0-4	16.18	10.16	0.00	0.00	0.00	0.41	0.00	0.00	0.017	0.23	0.00	4.63	4.63	0.00
5-9	7.47	4.04	0.00	0.00	0.00	0.15	0.00	0.00	0.248	0.00	0.18	2.44	2.44	0.00
10-14	10.32	6.13	0.00	0.00	0.00	0.15	0.05	0.00	1.170	0.00	0.55	3.25	3.25	0.00
15-19	9.62	7.27	0.00	0.20	0.30	0.11	0.12	0.00	1.485	0.00	1.54	1.62	1.62	0.00
20-24	16.76	13.77	0.00	0.95	0.26	0.22	0.14	0.51	2.075	0.06	3.26	1.58	1.58	0.00
25-29	29.87	26.73	0.11	2.41	1.52	0.32	0.86	3.62	2.492	0.15	3.84	1.76	1.76	0.00
30-34	61.04	56.94	0.05	8.54	2.40	0.92	1.26	14.77	3.452	0.13	5.74	2.02	2.02	0.00
35-39	113.76	107.71	0.20	15.25	5.53	2.25	2.97	38.85	5.848	0.43	6.78	3.29	3.27	0.01
40-44	184.71	177.61	0.65	24.58	9.34	3.69	7.70	67.94	9.592	0.75	10.45	3.93	3.92	0.01
45-49	242.53	233.01	1.15	27.18	16.76	5.89	12.55	86.55	13.050	0.94	13.31	4.26	4.18	0.08
50-54	302.19	290.49	2.17	34.98	28.27	11.12	19.96	81.36	15.142	2.80	12.54	6.02	5.89	0.13
55-59	401.39	386.17	6.38	52.62	44.43	21.21	34.36	76.81	16.122	4.62	11.59	5.96	5.60	0.36
60-64	592.40	565.68	12.35	75.78	71.50	46.70	63.49	88.33	19.615	7.49	12.86	9.70	9.19	0.51
65-69	776.54	744.60	17.66	113.21	89.08	75.39	89.27	86.57	19.888	10.82	12.59	11.11	10.75	0.36
70-74	1017.79	974.89	28.42	159.53	126.39	84.23	145.22	84.42	20.507	18.15	13.96	15.34	14.84	0.49
75-79	1177.00	1127.05	34.69	195.44	138.59	96.89	171.64	82.73	20.268	25.43	13.00	14.35	13.56	0.79
80-84	1338.05	1279.76	38.69	260.54	152.09	111.69	176.17	82.34	15.482	35.23	11.16	19.49	18.58	0.92
85-89	1470.65	1400.73	28.65	284.69	174.60	114.47	184.59	52.17	21.20	50.41	11.16	21.61	19.69	1.91
90+	1733.18	1653.38	27.96	354.64	244.83	113.01	193.15	65.36	23.17	34.96	11.16	22.70	20.69	2.01

표A.4.15. 연령 및 사이트별 아시아 남성 암 발생률

연간 100,000명당 증례의 수														
연령	모든 암	모든 고형암	식도	위	결장	간	폐	유방	난소	방광	갑상선	백혈병	비CLL 백혈병	CLL
0-4	16.69	10.30	0.00	0.08	0.00	0.74	0.03			0.03	0.00	5.17	5.09	0.08
5-9	10.73	4.54	0.00	0.05	0.00	0.24	0.05			0.00	0.02	4.73	4.73	0.00
10-14	10.72	5.48	0.00	0.06	0.06	0.33	0.07			0.00	0.23	3.31	3.31	0.00
15-19	12.15	7.20	0.00	0.33	0.10	0.13	0.14			0.06	0.59	3.51	3.51	0.00
20-24	13.97	9.68	0.00	0.81	0.50	0.70	0.41			0.31	0.74	2.30	2.30	0.00
25-29	21.59	16.88	0.10	2.29	0.91	1.67	0.51			0.59	0.99	2.94	2.89	0.05
30-34	37.04	31.17	0.13	5.05	3.54	3.60	2.30			0.81	1.16	3.55	3.49	0.06
35-39	72.78	65.58	0.80	14.96	5.45	11.41	5.09			2.20	1.67	3.03	2.93	0.10
40-44	140.70	131.55	2.94	29.51	12.43	21.68	14.83			3.59	2.15	3.90	3.71	0.19
45-49	227.28	213.75	7.05	47.43	24.55	36.58	23.27			5.14	3.17	5.45	5.30	0.15
50-54	357.46	339.23	14.35	76.73	39.96	54.82	44.64			10.69	2.82	7.01	6.67	0.34
55-59	588.80	564.44	25.49	127.25	72.34	95.29	80.55			17.08	2.86	9.51	9.07	0.43
60-64	1059.95	1019.71	44.55	217.15	119.83	170.87	176.67			33.03	3.84	13.36	12.55	0.81
65-69	1523.88	1468.59	58.10	316.67	162.08	195.63	317.21			55.42	5.13	20.21	18.61	1.60
70-74	1948.97	1878.15	82.63	412.58	186.30	192.09	439.32			73.66	5.16	27.13	25.46	1.67
75-79	2267.27	2180.80	92.66	488.08	214.56	183.31	509.83			108.13	4.68	30.62	28.83	1.79
80-84	2470.31	2375.91	94.17	520.98	222.27	187.30	540.57			120.05	4.35	31.68	28.87	2.81
85-89	3372.14	3223.64	69.75	716.89	326.54	232.57	682.18			158.97	4.35	49.11	44.17	4.94
90+	3907.81	3742.07	68.97	863.48	422.02	215.09	608.83			264.33	4.35	49.86	44.84	5.02

표A.4.16. 연령 및 사이트별 아시아 여성 암 사망률

연간 100,000명당 사망의 수														
연령	모든 원인	모든 암	모든 고형암	식도	위	결장	간	폐	유방	난소	방광	백혈병	비CLL 백혈병	CLL
0-4	127.18	3.38	1.70	0.00	0.01	0.00	0.10	0.02	0.00	0.01	0.01	1.34	1.34	0.00
5-9	16.67	3.08	1.33	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00	0.01	0.00	1.33	1.33	0.00
10-14	15.15	3.52	1.42	0.01	0.00	0.01	0.05	0.00	0.01	0.04	0.00	1.66	1.66	0.00
15-19	18.31	3.39	1.46	0.02	0.07	0.04	0.08	0.04	0.01	0.13	0.01	1.24	1.24	0.00
20-24	27.75	3.97	2.31	0.01	0.28	0.17	0.20	0.16	0.08	0.19	0.00	1.16	1.16	0.00
25-29	33.29	6.37	4.66	0.04	0.89	0.39	0.40	0.38	0.36	0.20	0.01	1.15	1.15	0.00
30-34	44.91	13.20	11.14	0.06	2.28	1.02	0.98	1.06	1.67	0.52	0.04	1.43	1.43	0.00
35-39	62.83	23.88	21.06	0.15	4.13	1.95	1.79	2.27	4.58	1.24	0.06	1.79	1.79	0.00
40-44	107.45	45.04	41.40	0.46	7.14	3.39	3.74	5.45	8.89	2.26	0.09	2.32	2.32	0.00
45-49	162.17	66.72	62.51	1.26	9.31	5.26	6.20	9.08	12.01	4.36	0.16	2.65	2.65	0.00
50-54	237.87	94.83	90.12	2.16	12.01	7.43	9.43	15.19	14.91	6.52	0.38	2.71	2.57	0.14
55-59	399.63	151.41	144.12	4.31	19.77	12.43	15.91	29.64	17.01	6.21	0.81	3.65	3.57	0.08
60-64	740.16	245.00	234.08	8.43	30.60	20.91	28.82	54.90	17.67	9.05	1.45	5.44	5.26	0.18
65-69	1239.84	357.21	342.78	15.26	47.37	30.14	41.39	83.63	18.97	9.55	3.27	6.05	5.32	0.72
70-74	2184.11	508.02	488.66	25.09	73.47	46.13	57.19	115.76	20.60	10.22	6.20	8.56	7.23	1.33
75-79	3682.84	653.04	630.76	34.41	101.60	64.40	67.38	138.34	24.32	11.85	10.27	8.60	7.58	1.02
80-84	6509.31	780.83	755.96	37.66	134.47	82.36	73.27	148.97	31.19	9.55	15.88	9.19	8.56	0.63
85-89	8923.98	712.91	693.30	39.96	126.81	75.93	63.03	119.29	29.99	8.63	21.78	6.95	6.71	0.23
90+	17750.63	840.17	818.35	39.00	157.96	106.46	62.23	124.82	37.57	9.43	15.10	7.30	7.05	0.25

표A.4.17. 연령 및 사이트별 아시아 남성 암 사망률

연간 100,000명당 사망의 수														
연령	모든 원인	모든 암	모든 고형암	식도	위	결장	간	폐	유방	난소	방광	백혈병	비CLL 백혈병	CLL
0-4	149.24	3.79	1.75	0.00	0.00	0.01	0.15	0.02			0.02	1.60	1.60	0.00
5-9	24.88	3.96	1.62	0.00	0.00	0.01	0.08	0.01			0.00	1.77	1.77	0.00
10-14	23.65	4.78	2.00	0.00	0.01	0.01	0.10	0.01			0.00	1.98	1.98	0.00
15-19	35.16	4.81	2.20	0.00	0.09	0.05	0.18	0.09			0.01	1.66	1.66	0.00
20-24	50.43	5.06	2.87	0.02	0.25	0.19	0.47	0.22			0.02	1.44	1.44	0.00
25-29	59.21	7.79	5.40	0.06	0.62	0.37	1.36	0.59			0.03	1.46	1.46	0.00
30-34	80.39	14.60	11.97	0.17	1.67	0.91	3.75	1.70			0.04	1.74	1.74	0.00
35-39	114.64	29.41	25.77	0.48	3.83	1.99	8.34	4.17			0.14	2.13	2.12	0.00
40-44	188.22	58.32	53.62	2.13	8.05	3.58	17.40	9.85			0.25	2.61	2.55	0.06
45-49	276.69	95.90	90.33	5.09	14.22	5.43	26.64	18.17			0.57	3.03	2.59	0.44
50-54	399.85	149.26	141.77	9.83	23.38	8.45	36.85	31.35			1.04	3.48	2.97	0.51
55-59	646.43	252.16	242.34	17.39	42.54	14.49	55.24	58.84			2.09	4.85	4.73	0.12
60-64	1257.04	482.58	466.03	34.20	80.47	28.65	95.25	130.56			5.07	6.98	6.33	0.65
65-69	2107.53	755.18	732.35	54.58	130.26	43.47	118.07	230.26			11.07	10.31	9.74	0.57
70-74	3550.26	1065.73	1035.03	82.96	194.71	65.39	131.80	335.02			19.49	13.49	12.52	0.97
75-79	5749.87	1365.66	1325.91	102.71	259.01	90.86	142.09	409.23			37.80	16.55	15.52	1.02
80-84	9661.98	1661.07	1614.41	121.87	328.69	122.29	155.29	446.43			62.69	18.78	16.66	2.12
85-89	12799.94	1586.63	1542.42	121.60	307.77	128.12	137.19	397.35			73.45	19.76	18.03	1.74
90+	22367.18	1838.67	1790.47	120.24	370.70	165.59	126.88	354.63			122.13	20.06	18.30	1.76

표A.4.18. 피폭연령이 0-85세인 인구의 성별 위해 평가치^{a)15)}

조직	명목위험계수 (Sv 당 10,000명 당 증례)	치사율 분율	치사율 조정 명목위험도 (열1 관련)	암 없는 상대 수명손실	위해 (열1 관련)	상대위해 ^{b)}
남성						
식도	15	0.93	14	0.87	12.6	0.026
위	68	0.83	66	0.88	57.9	0.120
결장	91	0.48	69	0.97	66.8	0.138
간	41	0.95	41	0.88	36.1	0.075
폐	76	0.89	75	0.80	59.9	0.124
뼈	7	0.45	5	1.00	5.1	0.011
피부	1000	0.00	4	1.00	4.0	0.008
유방	0	2	0	1.29	0.0	0.000
난소	0	0.29	0	1.12	0.0	0.000
방광	46	0.57	25	0.71	17.5	0.036
갑상선	12	0.29	4	1.29	4.8	0.010
골수	48	0.07	43	1.63	69.8	0.144
기타 고형	157	0.67	120	1.03	123.9	0.256
생식선(유전)	20	0.49	19	1.32	25.4	0.053
합계	1580		485		483.9	1.00
여성						
식도	16	0.80	16	0.87	13.6	0.021
위	91	0.93	88	0.88	77.5	0.117
결장	40	0.83	30	0.97	29.0	0.044
간	19	0.48	19	0.88	17.0	0.026
폐	153	0.95	151	0.80	120.7	0.182
뼈	7	0.89	5	1.00	5.1	0.008
피부	1000	0.45	4	1.00	4.0	0.006
유방	224	0.00	124	1.29	159.7	0.240
난소	21	0.29	18	1.12	19.8	0.030
방광	41	0.57	22	0.71	15.8	0.024
갑상선	53	0.29	16	1.29	20.6	0.031
골수	36	0.07	33	1.63	53.2	0.080
기타 고형	131	0.67	100	1.03	103.1	0.155
생식선(유전)	20	0.49	19	1.32	25.4	0.038
합계	1851	0.80	645		664.6	1.00

a) ICRP 방사선방호 체계에서 이러한 성별 위해 값의 특정 기능은 없다(A156항 참조).

b) 암 발생 데이터에 기초한 평가치.

15) <역주> 표A.4.18과 표A.4.19의 일부 데이터에 약간의 착오가 있으나 결과에 영향은 없다.

표A.4.19. 피폭연령 18-64세인 인구의 성별 위해 평가치^{a)}

조직	명목위험계수 (Sv 당 10,000명 당 증례)	치사율 분율	치사율 조정 명목 위험도 (열1 관련)	암 없는 상대 수명손실	위해 (열1 관련)	상대위해 ^{b)}
남성						
식도	14	0.93	14	0.91	12.8	0.035
위	51	0.83	50	0.89	44.5	0.122
결장	73	0.48	55	1.13	62.0	0.170
간	31	0.95	31	0.93	28.5	0.078
폐	84	0.89	83	0.96	80.0	0.219
뼈	5	0.45	3	1.00	3.4	0.009
피부	670	0.002	3	1.00	2.7	0.007
유방	0	0.29	0	1.20	0.0	0.000
난소	0	0.57	0	1.16	0.0	0.000
방광	40	0.29	22	0.85	18.6	0.051
갑상선	4	0.07	1	1.19	1.6	0.004
골수	24	0.67	22	1.17	25.2	0.069
기타 고행	94	0.49	72	0.97	70.1	0.192
생식선(유전)	12		12	1.32	15.3	0.042
합계	1103		368		365	1.00
여성						
식도	16	0.80	16	0.91	14.4	0.028
위	70	0.93	68	0.89	60.7	0.119
결장	33	0.83	25	1.13	27.7	0.054
간	16	0.48	16	0.93	14.7	0.029
폐	174	0.95	172	0.96	165.4	0.325
뼈	5	0.89	3	1.00	3.4	0.007
피부	670	0.45	3	1.00	2.7	0.005
유방	116	0.00	64	1.20	76.6	0.150
난소	16	0.29	14	1.16	15.7	0.031
방광	39	0.57	21	0.85	17.7	0.035
갑상선	20	0.29	6	1.19	7.0	0.014
골수	22	0.07	20	1.17	22.9	0.045
기타 고행	88	0.67	67	0.97	65.1	0.128
생식선(유전)	12	0.49	12	1.32	15.3	0.030
합계	1242	0.80	505		509	1.00

a) ICRP 방사선방호 체계에서 이러한 성별 위해 값의 특정 기능은 없다(A156항 참조).

b) 암 발생 데이터에 기초한 평가치.

A.4.7. 제A.4절 참고문헌

- Cardis, E., Vrijheid, M., Blettner, M., et al., 2005. Risk of cancer after low doses of ionising radiation: retrospective cohort study in 145 countries. *Br. Med. J.* 331, 77-80.
- CERRIE, 2004. Report of the Committee Examining Radiation Risks of Internal Emitters (CERRIE). CERRIE: London October 2004, www.cerrie.org ISBN 0-85951-545-1.
- Darby, S., Hill, D., Auvinen, A., et al., 2005. Radon in homes and risk of lung cancer: collaborative analysis of individual data from 13 European case-control studies. *Br. Med. J.* 330, 223-226.
- EPA, 1999. Estimating Radiogenic Cancer Risks. Environmental Protection Agency Report 402-R-00-003, Washington DC.
- French Academies Report, 2005. La relation dose-effet et l'estimation des effets cancérogènes des faibles doses de rayonnements ionisants (<http://www.academie-sciences.fr/publications/rapports/pdf/doseeffect-070405gb.pdf>).
- IARC, 2000. IARC monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans. Ionizing radiation, Part I: X and gamma radiation and neutrons, vol. 75. IARC Press, Lyon.
- IARC, 2001. IARC monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans. Ionizing radiation, Part 2: some internally deposited radionuclides, vol. 78. IARC Press, Lyon.
- ICRP, 1991a. The biological basis for dose limitation in the skin. ICRP Publication 59. *Ann. ICRP* 22 (2).
- ICRP, 1991b. The 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 60. *Ann. ICRP* 21 (1-3).
- ICRP, 1998a. Genetic susceptibility to cancer. ICRP Publication 79. *Ann. ICRP* 28 (1/2).
- ICRP, 2003a. Biological effects after prenatal irradiation (embryo and fetus). ICRP Publication 90. *Ann. ICRP* 33 (1/2).
- ICRP, 2003c. Relative biological effectiveness (RBE), quality factor (Q) and radiation weighting factor (w_R). ICRP Publication 92. *Ann. ICRP* 33 (4).
- ICRP, 2005d. Low-dose extrapolation of radiation-related cancer risk. ICRP Publication 99. *Ann. ICRP* 35 (4).

- Krewski, D., Lubin, J.H., Zielinski, J.M., et al., 2005. Residential radon and risk of lung cancer: a combined analysis of seven North American case-control studies. *Epidemiology* 16, 137-145.
- Land, C.E., Hayakawa, N., Machado, S.G., et al., 1994. A case-control interview study of breast cancer among Japanese A-bomb survivors. II. Interactions with radiation dose. *Cancer Causes Control* 5, 167-176.
- Land, C.E. and Sinclair, W.K., 1991. The relative contributions of different organ sites to the total cancer mortality associated with low-dose radiation exposure. *Ann ICRP* 22, 31-57.
- Lubin, J.H., Boice, J.D. Jr, Edling, C. et al., 1995. Lung cancer in radon-exposed miners and estimation of risk from indoor exposure. *J. Natl Cancer. Inst.* 87, 817-827.
- Lubin, J.H., Wang, Z.Y., Boice, J.D. Jr, et al., 2004. Risk of lung cancer and residential radon in China: pooled results of two studies. *Int. J. Cancer*, 109, 132-7.
- Mitchel, R.E., Jackson, J.S., McCann, R.A., et al., 1999. The adaptive response modifies latency for radiation-induced myeloid leukaemia in CBA/H mice. *Radiat. Res.* 152, 273-279.
- Mitchel, R.E., Jackson, J.S., Morrison, D.P., et al., 2003. Low doses of radiation increase the latency of spontaneous lymphomas and spinal osteosarcomas in cancer-prone, radiation-sensitive Trp53 heterozygous mice. *Radiat. Res.* 159, 320-327.
- NAS/NRC, 2006. Health Risks from Exposure to Low Levels of Ionizing Radiation: BEIR VII Phase 2. Board on Radiation Effects Research. National Research Council of the National Academies, Washington, D.C.
- NCI/CDC, 2003. Report of the NCI-CDC Working Group to revise the 1985 NIH Radioepidemiological Tables. US Department of Health and Human Services, National Institutes of Health, National Cancer Institute, Bethesda, Maryland, NIH Publication No. 03-5387.
- NCRP, 1997. Uncertainties in Fatal Cancer Risk Estimates Used in Radiation Protection. NCRP Report No. 126. National Council on Radiation Protection and Measurements, Bethesda, MD.
- NCRP, 2001. Evaluation of the Linear-Non-threshold Dose-Response Model for Ionizing Radiation. NCRP Report No. 36. National Council on Radiation Protection and Measurements, Bethesda, MD.

- Parkin, D.M., Whelan, S.L., Ferlay, J., et al. (Eds.), 2002. Cancer Incidence in Five Continents Vol VIII. IARC Scientific Publications No. 155. Lyon International Agency for Research on Cancer.
- Pierce, D.A., Sharp, G.B., and Mabuchi, K., 2003. Joint effects of radiation and smoking on lung cancer risk among atomic bomb survivors. *Radiat. Res.* 159, 511–520.
- Pierce, D.A., Stram, D.O., and Vaeth, M., 1990. Allowing for random errors in radiation dose estimates for the atomic bomb survivor data. *Radiat. Res.* 123, 275–284.
- Preston, D.L., Kusumi, S., Tomonaga, M., et al., 1994. Cancer incidence in atomic bomb survivors. Part III. Leukaemia, lymphoma and multiple myeloma, 1950–1987. *Radiat. Res.* 137, S68–97.
- Preston, D.L., Mattsson, A., Holmberg, E., et al., 2002. Radiation effects on breast cancer risk: a pooled analysis of eight cohorts. *Radiat. Res.* 158, 220–235.
- Preston, D.L., Shimizu, Y., Pierce, D.A., et al. 2003. Studies of mortality of atomic bomb survivors. Report 13: Solid cancer and non-cancer disease mortality 1950–997. *Radiat. Res.* 160, 381–407.
- Preston, D.L., Pierce, D.A., Shimizu, Y., et al., 2004. Effect of recent changes in atomic bomb survivor dosimetry on cancer mortality risk estimates. *Radiat. Res.* 162, 377–389.
- Preston, D.L., Ron, E., Tokuoka, S., et al., 2007. Solid cancer incidence in atomic bomb survivors: 1958–98. *Radiat. Res.* 168, 1–4.
- Puskin, J.S., Nelson, N.S., Nelson, C.B., 1992. Bone cancer risk estimates. *Health Phys.* 63, 579–580.
- Ron, E., Lubin, J.H., Shore, R.E., et al., 1995. Thyroid cancer after exposure to external radiation: a pooled analysis of seven studies. *Radiat. Res.* 141, 259–277.
- Ron, E., Preston, D.L., Kishikawa, M., et al., 1998. Skin tumor risk among atomic-bomb survivors in Japan. *Cancer Causes Control* 9, 393–401.
- Sharp, G.B., Mizuno, T., Cologne, J.B., et al., 2003. Hepatocellular carcinoma among atomic bomb survivors: significant interaction of radiation with hepatitis C virus infections. *Int. J. Cancer* 103, 531–537.
- Thompson, D.E., Mabuchi, K., Ron, E., et al., 1994. Cancer Incidence in atomic bomb survivors. Part II: Solid tumours, 1958–1987. *Radiat. Res.* 137, S17–67.

- Travis, L.B., Gospodarowicz, M., Curtis, R.E., et al., 2002. Lung cancer following chemotherapy and radiotherapy for Hodgkin's disease. *J. Natl Cancer Inst.* 94, 182-192.
- UNSCEAR, 1993. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Sources and Effects of Ionizing Radiation. 1993 Report to the General Assembly with Scientific Annexes, United Nations, New York.
- UNSCEAR, 1994. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Sources and Effects of Ionizing Radiation. 1994 Report to the General Assembly with Scientific Annexes, United Nations, New York.
- UNSCEAR, 2000. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Sources and Effects of Ionizing Radiation. Vol. II Effects. 2000 Report to the General Assembly with Scientific Annexes, United Nations, New York.
- UNSCEAR, 2001. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Heritable Effects of Radiation., 2001 Report to the General Assembly with Scientific Annex, United Nations, New York.

A.5. 방사선 피폭 후 암외질환

(A190) 피폭집단에 암외질환 발생빈도가 증가하는 증거가 1990년 이후 누적되고 있다. 1 Sv 수준의 선량에서 이러한 암 외 영향이 유발되는 가장 강력한 증거는 원폭 LSS에서 도출되는데, 최근 사망률 분석(Preston 등 2003) 결과는 특히 심장병, 발작, 소화기 장애 및 호흡기 질환 등에 대해 선량과 연관성에 대한 통계적 증거를 보강했다. 그러나 낮은 선량에서 선량-반응 모양이 현재로서 불확실하며, LSS 데이터가 질병 사망위험에 선량 문턱치가 없다는 쪽과 약 0.5 Sv의 문턱치가 있다는 쪽 모두에 부합함을 ICRP는 주목한다. 무증상 염증과 어느 정도 연관성이 있을 것으로 보지만(예를 들어 Hayashi 등 2003) 어떤 세포/조직 기전의 형태가 LSS 데이터에서 보고된 그러한 다양한 암 외 장애의 기초가 되는지는 불분명하다.

(A191) 높은 선량에서이긴 하지만 암 외 방사선 영향의 추가 증거는 방사선 치료를 받는 암환자 연구에서도 도출된다. 호지킨병(예를 들어 Hancock 등 1993, Aleman 등 2003)이나 유방암(예를 들어 Early Breast Cancer Trialists Collaborative Group 2000) 치료를 받은 환자 연구는 수십 Gy 선량과 관련해 심혈관질환 사망률 위험이 높아짐을 보였다. 낮은 선량에서의 상황은 불분명하다. 의료피폭 또는 직무피폭 그룹에 대해 발간된 역학데이터 검토에서 같은 집단에서 피폭한 사람들과 피폭하지 않은 사람들의 순환계질환 발병률을 비교한 결과는 0 부터 4 Sv 선량 범위의 대부분 연구에서 위험증가 증거를 찾을 수 없었다(McGale 및 Darby 2005). 그러나 많은 연구는 선량 반응 데이터가 거의 없으며 흡연과 같은 교란 인자에 관한 정보가 없기 때문에 해석이 어려웠다.

(A192) 암외질환에 대한 이러한 관찰이 잠재적으로 중요하다는 사실은 인정하지만, 현재 가용한 자료로는 약 100 mSv의 낮은 방사선량 피폭의 위해 평가에 암외질환을 포함시키기에 부족하다는 것이 ICRP 판단이다. 이러한 판단은 0.5 Sv 이하에서는 어떠한 초과위험 증거도 없다는 UNSCEAR(2008) 결론과도 부합한다.

A.5.1. 제A.5절 참고문헌

Aleman, B.M., van den Belt-Dusebout, A.W., Klokman, W.J., et al., 2003. Long-term cause-specific mortality of patients treated for Hodgkin's

disease. *J. Clin. Oncol.* 21, 3431–3439.

Early Breast Cancer Trialists' Collaborative Group, 2000. Favourable and unfavourable effects on long-term survival of radiotherapy for early breast cancer: an overview of the randomised trials. *Lancet* 355, 1757–1770.

Hancock, S.L., Tucker, M.A. and Hoppe, R.T., 1993. Factors affecting late mortality from heart disease after treatment of Hodgkin's disease. *J. Am. Med. Assoc.* 270, 1949–55.

Hayashi, T., Kusunoki, Y., Hakoda, M., et al., 2003. Radiation dose-dependent increases in inflammatory response markers in A-bomb survivors. *Int. J. Radiat. Biol.* 79, 129–36.

McGale, P. and Darby, S.C., 2005. Low doses of ionizing radiation and circulatory diseases: A systematic review of the published epidemiological evidence. *Radiat Res.* 163, 247–257.

Preston, D.L., Shimizu, Y., Pierce, D.A., et al. 2003. Studies of mortality of atomic bomb survivors. Report 13: Solid cancer and non-cancer disease mortality 1950–997. *Radiat. Res.* 160, 381–407.

UNSCEAR, 2008. Effects of Ionizing Radiation. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation Report to the General Assembly with Scientific Annexes. United Nations, New York, NY.

A.6. 유전질환 위험

A.6.1. 서론

(A193) 현행 권고에서 사용하는 ‘유전위험genetic risk’라는 용어는 방사선을 피폭한 집단의 후손에 나타나는 유해한 유전영향의 확률을 의미한다. 이러한 영향은 낮은 LET, 낮은 선량/만성 피폭 집단에서 단위 선량 당 기준 빈도를 넘은 유전질환의 증가로 표현된다.

(A194) 1990 ICRP 권고(ICRP 1991b), 1990 BEIR 보고서(NRC 1990) 및 UNSCEAR(1993) 보고서가 발간된 이후 사람 집단의 전리방사선 피폭에 따른 유전위험 예측에 있어 몇 가지 중요한 발전이 있었다. 이를 바탕으로 UNSCEAR(2001)는 이전의 위험 평가치를 개정했다. 이 절의 목표는 가용한 정보에 대한 배경을 간략히 설명하고 위험평가에 사용한 방법을 제시하여 최신 발전을 요약하며, 개정된 위험 평가치를 제시하고, 새 평가치를 사용해 유전영향의 위험계수를 도출한 방법을 밝히는 것이다.

A.6.2. 배경 정보

자연발생 유전질환

(A195) 여기서 관심 대상인 유전질환은 단일 유전자 돌연변이에 의한 질환(멘델질환)과 복수 유전자 및 환경 요인에 의한 질병(다인자성질환)이다. 그 동안 UNSCEAR, BEIR위원회 및 ICRP는 다른 부류 유전질환 즉, 염색체 전체적인 구조 및 수 이상에 의해 발생하는 염색체 질환도 고려해 왔다.

(A196) **멘델질환**은 돌연변이 유전자의 염색체 위치(상염색체 또는 X염색체)와 전달 패턴에 따라 상염색체 우성, 상염색체 열성 및 X연관 열성 범주로 분류된다. 상염색체 우성질환의 경우 부나 모(즉, 이형접합체 상태)로부터 유전되는 단일 돌연변이 유전자 하나로도 질병 발병에 충분하다(예를 들어 연골무형성증 achondroplasia, 신경섬유종증neurofibromatosis, 마르판Marfan 증후군 등). 우성으로 유전된 암 소인 중 약간 비정상적인 유전에 대해서는 ICRP 79(ICRP 1998a)에서 논의했다. 그러나 상염색체 열성 질병의 경우 동일한 유전자 좌위에 부와 모에서 하나씩 받은 두 유전자 모두(즉, 동형접합성)에 돌연변이가 있어야 질환이 발현한다(예를 들어 낭성섬유증, 혈액소침착증haemochromatosis, 블루움Bloom 증후군,

모세혈관확장성 보행실조증(ataxia telangiectasia 등). 남성에게는 X염색체가 하나만 있으므로 X연관 열성 질환의 경우 주로 남성이 이 질병에 걸린다(예를 들어 혈우병, 뒤시엔느Duchenne 근위축증, 파브리병Fabry disease 등). 일부 확인된 X연관 우성질환(예를 들어 레트Rett증후군)은 현행 권고의 목적을 위해 X연관 열성질환에 포함한다. 멘델질환과 관련해 일반적으로 중요한 사항은 돌연변이와 질환 사이의 관계가 단순하고 예측할 수 있다는 것이다.

(A197) **다인자성질환**은 병인학적으로 복잡하며, 따라서 돌연변이와 질병 사이의 관계도 복잡하다. 즉, 유전에 멘델 패턴을 나타내지 않는다. 다인자성질환을 구성하는 두 소그룹은 일반적 선천성기형(예를 들어 신경관 결함, 구개열이 있거나 없는 구순열, 선천성 심장결함 등)과 성인의 만성질환(예를 들어 관상동맥 심장병, 본태고혈압, 당뇨병 등)이다. 병인학에 있어 유전적 성분의 증거는 가계나 쌍둥이 연구로부터 나오는데, 소인자의 1급친척¹⁶⁾은 해당 대조군보다 질환 위험이 높게 나타났다. 대부분의 경우 관련 유전자, 돌연변이의 유형 및 환경인자의 본질에 대한 지식은 매우 제한적이다. 다인자성질환의 유전 패턴을 설명하고 친척에서 발생 위험 추정에 사용하는 모델에는 질환책임의 ‘다인자성 문턱모델 multifactorial threshold model(MTM)’이 있다. 그 내용은 뒤에서 다룬다.

(A198) 염색체 질환은 일반적으로 세포의 세포학적 처리로 검출되는 거시적 수 이상(예를 들어 21번 염색체 세염색체증에 의한 다운증후군)과 염색체의 구조적 기형(예를 들어 5번 염색체 단완의 일부 또는 전부 탈락에 의한 고양이울음증후군Cri du chat syndrome)의 결과로서 발생한다. 이는 실질적으로 별도의 병인학적 범주는 아니어서 지금은 결손(현미경적으로 검출할 수 있는지 여부)은 상염색체 우성, 상염색체 열성 및 X연관 질환 아래 분류되는 많은 유전질환에 기여하는 것으로 파악된다.

배가선량법

(A199) 방사선 유발 유전질환에는 사람 데이터가 없으므로 1950년대 중반에 개발해 현재까지 사용하고 있는 방법은 모두 간접적이다. 이러한 방법의 목표는 생쥐의 방사선 연구에서 확보한 돌연변이 데이터, 집단에서 유전질환 기저빈도 및 집단 유전이론을 사용해 사람 유전질환의 방사선 위험을 예측하는 것이다. 1970년대 초부터 현재까지 사용하고 있는 그러한 방법 중 하나(예를 들어

16) <역주> 1급친척(FDR)은 본인의 부모, 형제, 그리고 자녀이다. 2급친척은 조부모, 숙부, 고모, 조카, 손자 등이며 3급친척은 4촌관계 친척이다.

UNSCEAR 2001)는 배가선량법이다. 이 방법을 사용하면 다음 식을 통해 기저 빈도 관점에서 유전질환 빈도의 예상증가를 표현할 수 있다.

$$\text{단위 선량 당 위험} = P \times [1/DD] \times MC \quad (\text{A.6.1})$$

여기서 P는 연구대상 유전질환 분류의 기저빈도이고, DD는 배가선량이며(1/DD은 단위 선량 당 상대 돌연변이 위험), MC는 질환 분류 고유의 돌연변이 성분이다.

(A200) 위험평가를 위한 DD법 사용의 기초가 되는 유전이론은 집단의 돌연변이 유전자의 역동학 설명을 위해 집단유전학자들이 사용하는 평형이론이라 부르는 것이다. 이 이론은 집단의 돌연변이 유전자 빈도 안정성(따라서 질병 빈도의 안정성)은 자연발생 돌연변이가 모든 세대의 집단유전자 풀에 들어가는 율과 돌연변이가 자연선택¹⁷⁾, 즉 생존이나 생식 실패 때문에 제거되는 율 사이에 평형이 이루어진 결과라고 가정한다. 정상 조건(즉, 방사선 피폭이 없는 조건)에서는 집단은 돌연변이와 도태 사이 평형상태에 있는 것으로 간주된다.

(A201) 예를 들어 매 세대에서 방사선으로 돌연변이율이 높아지면 돌연변이와 도태 사이의 균형은 유발 돌연변이의 유입에 의해 교란되지만, 집단은 결국 돌연변이와 도태 사이의 새로운 평형(몇 세대에 걸쳐)에 도달할 것으로 예측된다. 돌연변이 빈도 증가의 크기, 집단이 새 평형에 도달하는 시간 및 평형에 접근하는 비율은 모두 유발 돌연변이율, 도태의 강도, 유전질환 유형, 그리고 방사선 피폭이 한 세대만 있는지 또는 여러 세대에 걸쳐 발생하는지에 따라 결정된다. 시작 집단(방사선 피폭 이전)은 돌연변이와 도태 사이의 평형상태에 있다고 간주되기 때문에 식(A.6.1)의 P항은 평형 유발을 나타낸다는 것을 언급할 필요가 있다.

(A202) **배가선량**. 배가선량(DD)는 한 세대에서 자연 발생하는 돌연변이만큼 돌연변이 생성에 필요한 방사선의 양이다. 이상적으로는 특정 유전자 세트에서 평균 자연발생율과 유발 돌연변이율의 비로 배가선량을 평가한다.

(A203) DD의 역수(즉, 1/DD)는 단위 선량 당 상대 돌연변이위험relative mutation risk per unit dose(RMR)이다. RMR은 분수이기 때문에 DD가 작아질수록 RMR이 커진다. 그 역도 마찬가지이다.

(A204) **돌연변이 성분**. 돌연변이 성분(MC)을 공식적으로 정의하자면, 돌연변이

17) <역주> ‘자연도태’로 부르기도 한다.

이율의 단위 상대 증가 당 질병 빈도의 상대 증가이다. 즉,

$$MC = [\Delta P/P] / [\Delta m/m] \quad (A.6.2)$$

여기서 P는 기저 질환빈도이고, ΔP 는 돌연변이율의 Δm 변화로 인한 빈도변화이며, m은 자연발생 돌연변이율이다. MC 평가에 사용하는 절차는 상염색체 우성질환과 X연관 질환의 경우 상대적으로 단순하고, 상염색체 열성질환의 경우 약간 복잡하며(방사선 피폭 후 중간세대에서 유발 열성 돌연변이가 열성질환을 촉발하지 않기 때문에), 다인자성 질환에서는 더 복잡하다. 이 절차는 집단에서 그 안정 빈도의 설명에 사용하는 모델에 의존한다.

A.6.3. 최근의 이해 진전

(A205) 지난 몇 년 동안 이루어진 진전은 (a) 멘델질환의 기저빈도 평가치의 상향 개정, (b) DD 계산에 수정된 개념 도입, (c) 멘델 및 만성 질환에 대한 MC 추정 방법 수립, (d) 생쥐에서 방사선 유발 돌연변이율과 생아출산 사람의 방사선 유발 유전질환 위험 사이의 간격에 다리를 놓는 위험 산출식에 '잠재회복력보정인자potential recoverability correction factor(PRCF)'라는 새로운 인자의 도입, (e) 사람의 방사선 유발 유전적 손상의 부작용이 주로 임신 중 다중계통 발생기형 multisystem developmental abnormality으로 발현될 것으로 보는 개념의 도입이다. 이들에 대해서는 최근의 문헌들에 자세히 설명되어 있다(Chakraborty 등 1998, Denniston 등 1998, Sankaranarayanan 1998, 1999, Sankaranarayanan과 Chakraborty 2000a, 2000b, 2000c; Sankaranarayanan 등 1994, 1999, NAS/NRC 2006). 글상자A.2에는 이러한 이해의 진전을 반영하여 방사선의 유전 질환 위험 평가에 ICRP가 사용한 절차가 요약되어 있다.

유전질환 기저빈도

(A206) 1993년 UNSCEAR보고서가 발간될 때까지는 위험평가에 사용한 기저 빈도로 멘델질환은 Carter(1977), 염색체질환은 UNSCEAR(1977), 선천성기형은 Czeizel과 Sankaranarayanan(1984), 만성질환은 Czeizel 등(1988)에 근거했다. 뒤의 세 그룹 질환에 대한 평가치는 변한 것이 없지만, 멘델질환에 대한 평가치는 이제 상향 개정되었다(Sankaranarayanan 1998). 과거와 현행 평가치(후자는 UNSCEAR 2001에서 사용됨) 모두 표A.6.1에 수록되어 있다.

배가선량

(A207) 위험평가에 생쥐 데이터에 기초한 DD 사용과 관련된 가정 재검토.

글상자A.2. 방사선의 유전질환 위험 평가 단계

- a) 모든 등급의 사람 유전질환에 대한 기저빈도 수립(P값 세트)
- b) 사람 유전자에 대해 세대 당 평균 자연발생 돌연변이율 평가
- c) 사람 데이터가 없으므로 생쥐의 방사선 유발 평균 돌연변이율 평가 - 생쥐 평균율이 사람 평균율과 유사할 것으로 가정
- d) 위의 b와 c로부터 유전 배가선량(DD) 평가. DD는 한 세대의 자연발생과 같은 돌연변이 생성에 필요한 방사선량이다.
- e) 유전질환 등급별 돌연변이 성분(MC) 평가. MC는 돌연변이 변화율과 질환 빈도 증가 관계에 대한 상대 척도이다.
- f) 돌연변이 등급별 잠재회복력보정인자(PRCF)의 평가. PRCF는 생아출산 중 돌연변이 회복도 즉, 배태아 발육과 양립하는 돌연변이 분율을 차별화할 수 있게 한다.
- g) 사람 유전질환 등급별로 위 a~f의 평가치를 사용해 다음 식을 완성한다.
단위 선량 당 위험 = $P \times [1/DD] \times MC$

1993년 UNSCEAR보고서 이전까지 사용한 DD는 1 Gy(만성, 낮은 LET 방사선 조건에서)였는데, 이 값은 모두 생쥐의 7개 유전자에서 열성 돌연변이의 자연발생 및 유도 빈도 데이터에 기초했다. 위험 평가에서 생쥐데이터 기반 DD를 사용한 가정의 하나는 생쥐와 사람에게 자연발생과 유도 돌연변이 비율이 같다는 것이다. 돌연변이의 유도 비율에 관련된 가정은 피할 수 없는 것이지만, 두 종에서 대체로 유사한 유전자 구조, 유전자 DNA 서열에 있어 70-90% 동질성, 그리고 많은(전체는 아님) 염색체 부위에서 신테니¹⁸synteny 보전이라는 점들을 바탕으로 타당하다고 할 수 있다. 그러나 자연발생 돌연변이율에서는 상황이 다르다.

(A208) 생쥐와 사람의 자연발생 돌연변이율이 같지 않을 수 있다는 관점을 지지하는 주장에 대해 논의도 있다(Sankaranarayanan 1998, Sankaranarayanan 및 Chakraborty 2000a, UNSCEAR 2001). 간단히 말하면, 생쥐와는 달리 사람의 경우 자연발생 돌연변이율에 명백한 성별 차이가 있으며(여성보다 남성이 높음) 돌연변이율이 부(아버지)의 연령에 따라 증가한다는 것이다(부모연령효과). 사람 수명이 생쥐보다 길다는 사실을 고려할 때, 이러한 차이는 수명이 짧은 생쥐에서 사람으로 외삽하는 것은 모든 연령의 이질성 사람집단에서 믿을만한 평

18) <역주> 염색체상의 유전자 구성의 상동성을 의미하는데 예를 들면 생쥐의 제11번 염색체는 사람 17번 염색체와 상응하는 유전자를 약 50% 정도 가지고 있다.

표A.6.1. 사람 집단의 유전질환 기저빈도

질환 분류	기저빈도(생아출산 당 퍼센트)	
	UNSCEAR(1993)	UNSCEAR(2001)
멘델		
상염색체우성	0.95	1.50
X연관	0.05	0.15
상염색체열성	0.25	0.75
염색체	0.40	0.405
다인자성		
만성질환	65.00 ^a	65.00 ^a
선천성기형	6.00	6.00

a 집단 빈도

균 자연발생률을 제공할 것 같지 않다. 또한 배아 모자이크(germinal mosaic)로 일어나는 돌연변이(다음 세대에 동일한 돌연변이 때를 초래) 생쥐데이터의 최근 해석은 생쥐에서 자연발생 돌연변이율에 대해 상당한 불확실성을 도입했다(Selby, 1998).

(A209) **자연발생 돌연변이율에 관한 사람데이터 및 DD 계산을 위한 유발 돌연변이율에 대한 생쥐데이터 사용.** 앞 문항들에서 설명한 이유의 관점에서 UNSCEAR(2001)는 1972 BEIR 보고서(NRC 1972)에서 최초로 시도한 것처럼 자연발생에 대한 사람데이터와 유발 돌연변이율에 대한 생쥐데이터에 기초하여 DD를 계산하는 것이 신중한 것으로 판단했다. DD 계산에 사람데이터를 사용하는 장점은 (a) 그러한 데이터가 사람의 질환유발 유전자와 관련되고, (b) 돌연변이율 평가치가 남녀에 대해 평균되기 때문에 부모연령영향이 자동으로 포함되며, (c) 돌연변이율 평가에서 사람유전자학자들이 돌연변이 클러스터 여부에 관계없이 모든 돌연변이를 계수하므로 클러스터가 발생할 경우 이미 포함된다는 데 있다.

(A210) **사람유전자에 대한 평균 자연발생 돌연변이율.** 사람유전자 평균 자연발생 돌연변이율 계산에 있어 UNSCEAR(2001)는 도태계수(selection coefficient(s)) 평가치가 가용한 유전자에 대해 발표된 데이터에 집중했는데, 그 이유는 도태계수가 MC 평가와 유관하기 때문이다(다음 절에서 설명). 또한 X연관 질환이 아

닌, 상염색체우성 질환만 분석에 포함되었는데 그 논리적 근거는 다음과 같다.
 (a) 멘델질환 중 상염색체우성 질환이 유전위험 관점에서 가장 중요한 그룹이다.
 (b) X연관 질환 또한 돌연변이율 증가에 직접적으로 반응한다고 예상되지만, 집단에서 발현할 가능성은 상염색체우성 질환보다 한 단위 낮다(0.15% 대 1.50%).
 (c) 따라서 위험평가 관점에서 이 두 부류 질환이 평균 돌연변이율에 있어 유사하다는 가정은 위험을 과소평가하지 않을 것이다.

(A211) 상염색체우성 질환 26개 표현형(현재 지식으로 대략 135개 유전자에서 돌연변이에 관련되는) 모두에 기초한 평균(비가중) 자연발생 돌연변이율은 $(2.59 \pm 0.64) \times 10^{-6}$ 유전자⁻¹ 세대⁻¹였다(Sankaranarayanan와 Chakraborty 2000a). 이 평가치는 1972 BEIR보고서(NRC 1972)에서 평가한, 유전자 당 0.5×10^{-5} 에서 0.5×10^{-6} 범위 안에 든다. 또한 자연발생 돌연변이율 계산에 사용하는 데이터를 사용하면 그러한 질환에 관련된 평균 도태계수(s)는 0.294로 평가된다.

(A212) **생쥐에서 평균 유발 돌연변이율.** 앞에서 설명한 것처럼 1993 UNSCEAR 보고서 이전까지 DD 계산에 사용하는 평균 유발 돌연변이율은 7개 유전자의 열성 특화 유전자위 연구 데이터에 기초한 것이다. 그러나 2001년 보고서에서 UNSCEAR는 이 뿐만 아니라 효소활동 돌연변이 연구 데이터와 4개 유전자위의 우성 돌연변이(SI, W, Sp 및 T)를 포함하도록 데이터베이스를 확대했다. 이러한 모든 데이터는 피폭 배아세포 단계가 정조(精祖)spermatogonia 줄기 세포¹⁹(위험 관점에서 남성에서 해당 배아세포 단계)인 수컷 연구에서 도출한 것이다. 1988 UNSCEAR 보고서에 설명한 것처럼, 생쥐의 미성숙 난모세포(급성 및 만성 조사 후 돌연변이 유발 감수성이 거의 0에 가까운)가 여성의 해당 배아세포 단계인 사람 미성숙 난모세포의 돌연변이 방사선 민감성 평가에 잘 활용할 수 있는 모델을 제공하는지 여부가 불확실하기 때문에 암컷 생쥐 연구에서 도출한 데이터는 사용하지 않았다. 위험평가 목적에서 신중을 위해 여성에 유발된 비율이 남성에 유발된 비율과 동일하다고 가정했다.

(A213) 사용한 데이터의 자세한 설명은 UNSCEAR 2001 보고서 및 Sankaranarayanan과 Chakraborty(2000a) 논문에 수록되어 있다. 모두 34개 생쥐 유전자에서 발견된 돌연변이에 기초한 평균 돌연변이율은 X선이나 감마선 급성 조사의 경우 $(1.08 \pm 0.30) \times 10^{-5}$ 유전자⁻¹ 세대⁻¹이다. 기존에 사용하던 선

19) <역주> 정원(精原)세포라 부르기도 한다.

량을감축계수 3을 적용하면 만성 피폭조건에 대한 돌연변이율은 $(0.36 \pm 0.10) \times 10^{-5}$ 유전자⁻¹ 세대⁻¹로 된다.

(A214) **배가선량.** 사람유전자에 대해 개정된 평균 자연발생 돌연변이율 $(2.95 \pm 0.64) \times 10^{-6}$ 유전자⁻¹ 세대⁻¹과 생쥐유전자에 대한 평균 유발 돌연변이율 $(0.36 \pm 0.10) \times 10^{-5}$ 유전자⁻¹ 세대⁻¹를 사용하면 새 DD는 (0.82 ± 0.29) Gy가 된다. 이 평가치는 완전히 생쥐데이터에만 기초해 현재까지 사용해온 1Gy와 많이 다르지 않다.

(A215) UNSCEAR(2001)는 현재 개념이 변화했고(즉, 자연발생 돌연변이율에는 사람데이터를, 유발 돌연변이율에는 생쥐데이터를 사용), 현행 평가치는 과거보다 광범한 데이터의 지지를 받는다는 점을 밝히면서도 과도하게 정밀한 인상을 주는 것을 방지하기 위해 DD 평가치 1Gy를 계속 사용하도록 제안했다. ICRP도 UNSCEAR 판단을 지지하며 따라서 DD값 1Gy를 유지한다.

돌연변이 성분

(A216) 제A.6.2절에 설명한 것처럼 식(A.6.1)에 사용한 ‘돌연변이 성분’(MC)은 다양한 부류의 유전질환에 대한 돌연변이율 단위 상대변화 당 질환빈도 상대변화에 대한 척도를 제공한다. 기본적인 MC 개념의 요소는 이미 1972 BEIR보고서(NRC 1972)에 소개되었으며, Crow와 Denniston(1981, 1985)의 논문에 반영되었다. 1993년에 구성된 ICRP 작업그룹의 골격에서 이 문제가 심층적으로 연구되었고, 멘델질환과 다인성질환 모두에 대해 평가의 개념, 이론 및 수식이 개발되었다. 작업그룹 보고서는 ICRP 83(ICRP 1999b)으로 발간되었다. 이 ICRP 간행물에서 개발한 방법을 사용하면 돌연변이율의 일회성 증가 또는 영구 증가(즉, 매 세대 방사선피폭) 후 관심 있는 임의 세대에서 MC 크기를 평가할 수 있다. 아래에 주요 고찰사항을 간략히 설명한다.

(A217) **상염색체우성 질환의 돌연변이 성분.** 상염색체우성 질환(돌연변이와 질환 사이의 관계가 단순한)의 경우 평가절차는 상대적으로 단순하다. 돌연변이율에 일회성 증가(‘돌발파burst’로서 아래의 MC_b 처럼 아래첨자 'b'로 표시)가 발생하는 단일 세대 방사선피폭의 경우 시간 t(세대)에 따른 변화는 다음 식으로 계산된다.

$$MC_b(t) = s(1 - s)^{t-1} \tag{A.6.3}$$

돌연변이율의 영구 증가를 유발하는 연속적인 여러 세대 방사선피폭의 경우(아래

첨자 'p'로 표시)는 다음과 같다.

$$MC_p(t) = [1 - (1 - s)^t]. \quad (A.6.4)$$

(A218) 식(A.6.3)과 (A.6.4)에 따르면 돌연변이율의 일회성이나 영구 증가 후 피폭 후 첫 세대에 대해 $MC_b = MC_p = s$ 이다. 후속 세대에 더 이상 피폭이 없을 경우 MC값은 세대 당 $(1-s)$ 의 비율로 다시 0으로 소멸된다. 그러나 돌연변이율이 영구 증가한 경우 MC값은 새 평형상태에서 1이 될 때까지 천천히 증가한다. 일회 피폭 시나리오에서 이러한 MC 변화에 따라 질환빈도는 첫 세대에서 일시적으로 증가하지만 시간이 경과하면 초기 또는 '이전' 평형값으로 되돌아온다. 돌연변이율이 영구 증가한 경우 질환빈도는 새로운 평형값 $MC = 1$ 에 도달할 때까지 계속 증가한다. 새 평형값에서 돌연변이율이 $x\%$ 증가하면 질환빈도도 $x\%$ 증가한다.

(A219) **X연관 질환 및 상염색체열성 질환의 돌연변이 성분.** 상염색체우성 질환에서와 마찬가지로 X연관 질환에서 돌연변이율 일회성 증가에 대해 첫 세대 MC는 s 이지만, 남성에는 총 X염색체의 1/3밖에 안 되는 상보염색체가 있다는 사실을 고려해 s 값을 조정해야 한다. 후속 세대에서 MC 변화의 역동학은 상염색체우성 질환에서와 유사하다. 상염색체열성 질환의 경우 첫 세대의 MC는 0에 근접한다(상염색체열성 돌연변이로 첫 세대에는 질환이 발현하지 않는다는 사실과 일치).

(A220) 두 질환에 대한 돌연변이율 영구 증가의 경우 MC는 새로운 평형상태에서 값 1에 이를 때까지 계속 증가하지만, 새 평형값에 접근 속도는 서로 다르며, s 값과 피폭 후 시간(세대)에 따라 결정된다. 특히, 상염색체열성 질환의 경우 새로운 평형값 접근 속도는 매우 느려서 상염색체우성 질환과 X연관 질환 경우보다 훨씬 느리다.

(A221) 위의 설명에서 나온 요점은 MC가 s 와 유관하며, 따라서 s 를 알면 피폭 후 관심 있는 세대에서 MC 증가와 질환빈도 증가의 역동학을 평가할 수 있다는 것이다. 제(A211)항에서 설명한 것처럼 자연발생 상염색체우성 질환 데이터에서 평가한 평균 도태계수는 0.294이다. 0.30으로 반올림한 이 값은 상염색체우성 질환과 X연관 질환에 대한 MC의 최선 평가치로 사용되는 값이다.

(A222) **만성질환의 돌연변이 성분.** 앞에서 설명한 것처럼 다인자성질환의 집

단 빈도는 높지만, 멘델질환 증례와는 달리 집단에서 질환의 안정된 빈도를 설명하는 데에 적절한 모델이 없기 때문에 이 질환의 방사선 위험에 대해 의미 있는 평가가 방해 받는다. 이러한 질환에서 관찰된 전달 패턴을 설명하고 집단빈도 데이터에서 소인 개인의 친척에 대한 위험을 평가하기 위한 질환 경향의 다인자성문턱모델(multifactorial threshold model(MTM))과 같은 설명모델은 오래 전부터 있어 왔으나 그러한 모델은 돌연변이율 증가에 대한 질환빈도의 영향을 평가하는 데는 적합하지 않다. 마찬가지로 기계론적 모델(진화에서 반대 힘으로서 돌연변이와 도태를, 그리고 집단에서 다유전자/정량적 특성 가변성 유지를 끌어내는)에 대한 많은 자료가 있지만, 다인자성질환 빈도에 대한 돌연변이율 증가의 영향을 평가하는 데에 사용된 모델은 없다.

(A223) ICRP 83(ICRP 1999b)을 작성하던 당시 ICRP 작업그룹은 MTM의 일부 요소와 위에 설명한 기계론적 모델의 일부 요소가 포함된 ‘혼종모델(hybrid model)’을 개발함으로써 위 문제를 겨누는 첫발을 뗐다. 이후 이 혼종모델을 ‘유한 유전자위 문턱모델(finite locus threshold model(FLTM))’이라고 불렀다. 원래 의도는 이 모델을 사용해 선천성기형과 만성질환에 대한 MC를 추정하는 것이었지만, 선천성기형에 사용할 경우 생물학적으로 의미가 없다는 사실이 이내 밝혀졌다. 그에 따라 작업그룹은 그 사용을 만성질환에만 제한하기로 결정했다. 이 부록 뒷부분에서 설명하겠지만, DD 방법에 의존하지 않고도 선천성기형 위험을 평가할 수 있기 때문에 이 방법은 그러한 평가에 아무런 문제도 발생시키지 않는다. 그 배경의 제공을 위해 MTM의 가정과 사용에 대해 우선 아래에 설명한다.

(A224) **질환 경향의 다인자성 문턱모델(MTM)**. 1960년대 초에는 다인자성 질환의 기초가 되는 유전자나 환경 요소에 관한 정보가 없었기 때문에 문턱 특성을 위한 정량적 유전학에 사용한 MTM을 이 질환으로 확대하여 전달 패턴과 친척의 위험평가에 사용했다. 다인자성질환은 ‘전부 아니면 전부’ 성향(키나 체중과 같은 정량적 특성과는 달리)이기 때문에 이러한 질환에 MTM을 사용하려면 다인자성질환의 기초가 되는 ‘경향’이라 불리는 가설적 변수와 그것을 초과할 경우 질환이 발병되는 경향의 ‘문턱치’를 가정하는 것이 필요했다(Carter 1961, Falconer 1965). 여기서 주목할 사실은 가계 문침과 가족의 재발 위험 파악에 MTM이 유용했다는 것이며(지금도 그러함), 저변 기전의 불확실성에도 불구하고 상당한 수준으로 정확하게 예측할 수 있다는 것이다. 질환 경향에 대한 MTM의 자세한 설명은 여러 문헌에 수록되어 있다(참고문헌 목록은 ICRP 1999b 참조).

(A225) MTM 표준 버전의 가정은 대략 다음과 같다.

- 모든 환경 및 유전적 원인은 ‘경향liability’이라 부르는 하나의 연속 변수로 묶을 수 있으며, 이 변수는 측정 불가하다.
- 경향은 우세성이나 우위성 없이 덧셈형으로 작용하는 유전적 및 환경적 인자의 조합으로 결정되는데, 각 인자는 경향에 조금씩 기여하고 따라서 가우시안(정규)분포를 보인다.
- 소인자란 경향이 특정 문턱치를 초과한 사람이다.

(A226) MTM을 사용하면 집단(P)과 소인자(q)의 친척에서 특정 다인자성질환 발생에 관한 정보를 친척간 경향의 상관관계 평가치로 변환할 수 있게 한다. 이로부터 질환 인과에서 유전인자의 상대적 중요성 척도를 제공하는 양인 유전도 heritability(h^2)가 평가된다.

(A227) **유전도Heritability**. 정량적 유전학에 사용하는 보통 통계인 유전도는 전체 표현형 변화에 대한 전달 가능한 유전적 변화의 상대적 중요성 척도를 제공한다. 표현형은 유전인자와 환경 인자에 기원을 두기 때문에 분산해석에서 전체 표현형 분산total phenotypic variance(V_p)은 일반적으로 두 가지 요소, 즉 유전적 분산(V_G)과 환경적 분산(V_E)로 분리되는데 이 둘은 상호 독립적(즉, 상호 관련되지 않음)인 것으로 가정한다. V_G/V_p 의 비율을 ‘광의의 유전도’ 또는 ‘유전 결정도’라고 하며 h^2 로 표현했다(엄밀히는 h^2_B). 여러 다인자성질환에 대한 경향의 유전도 평가치는 많은 문헌으로 발행되었으며 0.30과 0.80 사이의 범위에 있다. 그러나 대부분의 암 유형에 있어 유전도 계수는 0.30 미만으로 판단된다.

(A228) 표현형 분산 V_G 는 더하기 성분additive component(V_A)과 더하기에서 벗어나는 성분으로 분리할 수 있다. 더하기 유전적 분산은 생식자에서 전달되고, 개별로 고려되는 유전자의 평균 영향으로 볼 수 있는 성분이다. V_A/V_G 비율은 ‘협의의 유전도narrow-sense heritability(h^2_N)’라 불리며 친척 사이 상관도 크기를 결정한다(Falconer 1960).

(A229) **만성질환에 대한 MC 평가에 사용하는 유한 유전좌위 문턱모델**. FLTM은 MTM(유한한 수의 유전자에서 돌연변이를 고려할 수 있도록 적절히 재정의된)으로부터 오는 경향 문턱치 가정과, 정량적 특성의 기초가 되는 다원 유전자 가변성의 유지와 진화에 관한 모델에서 도출하는 돌연변이와 도태 개념을 내포한다. FLTM의 선택은 두 가지 주요 고려에 의해 결정된다. 즉, (a) 관상동맥 심장병(CHD)처럼 연구가 많은 만성질환의 유전적 기초에 관한 현재 지식이

집단의 중간 정량적 형질의 가변성(예를 들어 CHD의 위험인자인 혈청 콜레스테롤 수준과 같은) 대부분이 제한된 수의 유전좌위에서 돌연변이에 의한 것이라는 견해를 지지하고(ICRP 1999b, Sankaranarayanan 등 1999), (b) 대부분 다인자성질환의 유전적 기초에 관한 상세정보가 없기 때문에 FLTM이 유용한 출발점을 제공한다는 고려이다. 이러한 모델을 사용할 경우 돌연변이율과 도태를 반영하는 변수의 의미를 단일 유전자 영향의 관점에서 정량적으로 평가할 수 있기 때문이다.

(A230) 대체로 FLTM은 유전인자와 환경인자로 구성되는 질환의 경향이 연속 변수라고 가정한다. 경향의 유전인자는 이산적이어서 총 돌연변이 유전자 수와 환경영향에 의해 결정된다. 돌연변이 유전자 총 수는 무작위 변수 g 로 정의되고, n 개 유전좌위에서 유전자형의 돌연변이 유전자 수가 되며, 환경 인자 e 는 평균이 0이고 분산이 V_e 인 가우시안(정규) 분포를 갖는 무작위 변수이다. 따라서 총 경향에도 (a) 개인의 n 개 유전좌위 유전자형 내 돌연변이 유전자 수의 함수 $[f(g)]$ 와 (b) 정규분포하는 환경영향 e 의 두 가지 성분이 있다. 경향이 T 를 초과하는 개인은 표현형적으로 $(1 - s)$ 의 적합도로 소인을 가지며, 그에 미달할 경우 적합도 1로 정상이 되는 것으로 가정함으로써 모델의 문턱 특성이 설명된다.

(A231) FLTM 수식은 단일 수식 형태로 표현할 수 없지만, 모델 예측은 이 목적을 위해 개발된 컴퓨터 프로그램의 순환계산으로 값을 얻을 수 있다. 그 단계로 첫째 일정한 세트의 변수 값(돌연변이율, 도태계수, 문턱치 등)을 사용해 집단이 돌연변이와 도태 사이에 평형이 될 때까지 프로그램이 실행된다. 평형이 이루어지면 돌연변이가 한번 또는 영구적으로 증가하며, 새로운 돌연변이율(다른 변수는 동일하게 유지된 상태에서)로 다시 계산이 실행된다. 원하는 세대와 새 평형에서 MC 크기의 변화 및 경향 유전도(h^2)와의 관계가 검토된다. h^2 평가치는 프로그램 입력이 아니라, 변수 값들(유전좌위 3부터 6까지에 대해 돌연변이율, 도태계수, 환경 분산 및 문턱치)의 여러 조합에서 얻는 출력이다. 이 부록 뒤에서 논의하는 결론은 5개 유전좌위 모델이지만 유전좌위 숫자가 달라져도 정량적으로 변하지 않는다.

(A232) **전산 시뮬레이션 연구의 주요 결론.** 이 연구에는 5개 유전좌위 모델이 사용되었으며, MC 변화와 h^2 사이 관계를 다음의 두 시나리오에 대해 평가하였다. (a) 집단이 매 세대 돌연변이율 증가를 유지한다. (b) 집단이 한 세대에만 돌연변이율 증가를 유지한다. 계산에 가정한 초기(자연발생) 돌연변이율은 유전자

당 10^{-6} 이었으며, 도태계수 $s=0.2\sim 0.8$ 에서 돌연변이율 15% 증가(즉, 1.0×10^{-6} /유전자에서 1.15×10^{-6} /유전자로)의 영향을 검토하였다. 결론은 다음과 같다.

- 돌연변이율이 영구 증가하는 조건에서 h^2 이 현재 관점에서 중요한 넓은 범위인 약 0.3부터 0.8 사이에 있을 때, 새 평형에서 MC는 1에 근접한다. 달리 말하면 돌연변이율이 x% 증가하면 새 평형에서 질환빈도도 x% 증가한다.
- 동일한 조건과 동일한 h^2 값 범위에서 최초 몇 세대의 MC는 매우 작아 0.01~0.02 범위에 있는데 0.02보다는 0.01에 가까운 경우가 많다. 즉, 질환빈도의 예측되는 상대증가는 매우 작다.
- 집단의 한 세대만 방사선에 피폭될 경우 첫 세대의 MC는 위 결론과 같으며 그 값은 서서히 줄어 0에 이른다.
- 위 세 결론은 질환에 산발적 요소가 없는 경우, 즉 유전형질에 관련되지 않은 질환을 갖는 개인이 발생하지 않을 경우에 유효하다. 산발성이 있는 경우에는 초기 몇 세대와 새 평형에서 MC가 감소한다.

(A233) 위에 설명한 결론은 다양한 매개변수 값(즉, 문턱치, 도태계수, 유전좌위 수, 환경 분산, 동시발생 돌연변이율, 돌연변이율의 증가 등)의 조합에도 성립하므로 견실한 것으로 판단할 수 있다. 또한 멘델 유전자에 확인된 돌연변이율 수준에서 몇 개 유전좌위와 약한 도태로 구성하는 FLTMs은 방사선에 피폭한 집단의 만성질환 빈도증가 연구에 좋은 근사치를 제공한다.

(A234) 2001년도 보고서에서 UNSCEAR는 만성질환 위험 평가를 위한 위험식에서 최선 평가치로 $MC = 0.02$ 를 사용했다.

잠재회복력수정인자 개념

(A235) 위험 평가에 식(A.6.1)(즉, 위험 = $P \times [1/DD] \times MC$)을 사용한다는 것은 자연발생 돌연변이가 질환(P에 포함)을 초래하는 것으로 알려진 유전자가 유도 돌연변이에도 반응하며, 그러한 돌연변이가 생존가능성과 양립하고, 따라서 피폭한 개인의 생아출생 후손에서 회복 가능성이 있다는 것을 의미한다. 이러한 가정은 여러 모델 시스템에서 특정 유전자의 유발 돌연변이에 대한 연구의 지지를 받는다. 그러나 방사선 유발 배아세포 유전자 돌연변이, 즉 단독 유발 유전질환은 사람연구에서는 아직 확인된 바 없다.

(A236) 사람에 대한 분자생물학과 방사선생물학의 진전에 따라 다음이 밝혀졌

다. (a) 자연발생 병인 돌연변이와 실험시스템에서 방사선 유발 돌연변이는 발생하는(또는 유발되는) 성격과 기전의 여러 속성에서 서로 다르다. (b) 모든 계놈 부위에 유발된 돌연변이의 회복성이 배제되는 구조적, 기능적 제약치가 있다. 즉, 질환 관점에서 해당 사람 유전자의 작은 비율만이 생아출생 후손에서 회복가능 방사선 유발 돌연변이에 반응한다. (c) 여기서 유발 돌연변이 연구에 사용한 유전자는 생존성에 필수적인 것은 아니며, 역시 생존에 필수적이지 않은 계놈 부위에 우연히 위치하는 유전자도 있다(Sankaranarayanan 1999의 검토). 따라서 이 주장의 핵심은 위험 평가에 사용한 생쥐연구에서 온 유발 돌연변이율은 사람에게 유발 돌연변이가 질환을 촉진하는 비율에 대한 과대평가할 것이라는 점이다.

(A237) 위험 평가를 위해 생쥐의 유도 돌연변이 데이터를 사용함에는 대안이 없기 때문에 생쥐의 유발 돌연변이에 대해 경험적으로 결정한 비율과 사람 생아출생에서 질환 유발 돌연변이가 회복될 수 있는 비율 사이의 간극을 좁힐 수 있는 방법을 고안해야 한다. 개발된 그러한 방법 중 하나는 잠재회복력수정인자 potential recoverability correction factor(PRCF)라는 수정계수를 위험식(A.6.1)에 도입한 것으로서 이제 위험이 원래 셋 대신 네 양의 곱으로 된다.

$$\text{단위 선량 당 위험} = P \times [1/DD] \times MC \times PRCF \quad (\text{A.6.5})$$

여기서 처음 세 항은 앞서 정의한 것이며, PRCF는 질환등급 고유 잠재회복력수정인자이다. PRCF는 분율이기 때문에 위험 평가치는 낮아진다.

(A238) 유발 돌연변이의 **잠재회복력**을 평가하기 위해 실험시스템에서 회복 돌연변이에 대한 분자정보를 사용해 우선 일련의 기준을 정의하였다. 중요 단어는 (a) 사람 계놈의 구조적, 기능적 유전체에 관한 지식이 아직 완성되지 않았고, (b) 현재까지 방사선 유발 사람 배아세포 돌연변이가 기준으로 사용할 수 있을 정도로 회복된 바 없고, (c) 기준은 앞으로 지식 발전에 따라 변경될 수 있기 때문에 **굵림꼴**로 표시한다. 개발할 수 있는 기준은 유전자 크기, 조직, 기능, 계놈 상황(즉, 유전자 위치가 ‘유전자 풍요gene-rich’ 영역인지 ‘유전자 궁핍gene-poor’ 영역인지 여부), 유전자의 자연발생 돌연변이 스펙트럼, 인접 유전자를 포함하는 영역에서 결손 인지 여부, 그리고 기지의 돌연변이 메커니즘을 고려해 질환 관점에서 해당 사람유전자에 적용했다. 이 경우 제기되는 의문은 다음과 같은 것이었다. 결손(방사선 유발 변화 우세 유형)이 유전자/유전자 영역에 유발될 경우 생아출산에서 잠재적으로 회복될 수 있을 것인가?

(A239) 사용하는 상세기준과 유전자를 세 그룹, 즉 유발결손이 그룹 1: '아마도 회복불능', 그룹 2: '불확실한 회복력' 및 그룹 3: '잠재적 회복가능'으로 분

류함에 대해서는 Sankaranarayanan과 Chakraborty(2000b) 및 UNSCEAR (2001) 보고서에 자세히 설명되어 있다. 그룹 1 할당은 덜 주관적이므로(따라서 보다 신뢰성이 높음) 약간 지나치게 조심스럽지만 잠재 회복력은 다음과 같이 계산할 수 있다. 총 N 유전자를 분석하고 n 유전자를 '회복 불가능할 것'으로 제외 한 경우 나머지(그룹 2와 3)는 $(N-n)$ 을 구성하며, 비율 $(N-n)/N$ 은 유발 돌연변이가 회복될 수 있는 유전자에 대한 대략적 척도를 제공하게 된다. 이 비율을 '비가중' PRCF라고 한다.

(A240) 그러나 위에서 평가한 PRCF는 여러 질환의 발생 차이를 고려하지 않는다. 예를 들어 발생률이 높은 질환이 그룹 1에 속할 경우 사회적 관심은 다른 그룹에 속할 때보다 훨씬 낮을 것이다. 따라서 가중 PRCF도 계산했다. P 가 N 유전자에서 돌연변이에 의한 질환의 총 발생이고 p 가 $(N-n)$ 유전자에서 돌연변이에 의한 질환 발생이면 $p(N-n)/PN$ 가 '가중 PRCF'가 된다.

(A241) 총 67개 상염색체 및 X연관 유전자에 대한 분석 결과가 표A.6.2에 요약 표시되어 있다.

(A242) **상염색체우성 질환과 X연관질환의 PRCF.** 상염색체우성 질환이 X연관 질환에 비해 10배쯤(1.5% 대 0.15%) 발현이 높다는 관점에서 전자에 대한 PRCF가 더 관련성이 크다. 따라서 UNSCEAR은 상염색체우성 질환과 X연관 질환 위험 평가에 사용하는 위험식에 0.15~0.30 범위의 PRCF를 사용할 것을 권고했다.

(A243) **상염색체열성에 대한 PRCF.** 유발 열성 돌연변이의 회복력 또한 구조 및 기능의 제약 대상이 되는 반면, 이러한 돌연변이가 이형접합체에 처음 발생한다는 관점에서(또한 유전자 산물의 50%로 정상 기능에는 충분), 이형접합체에서는 탈락이 큰 경우에도 회복 가능성을 가정할 수 있다. 또한 앞에서 설명한 것처럼 유발 열성 돌연변이는 최소한 처음 몇 세대에서는 열성질환을 발병하지 않는다. 따라서 열성질환에 대한 PRCF는 평가하지 않았다. 위험식에서 PRCF를 무시하는 것은 PRCF를 1이라고 간주하는 것이지만, 실제로는 이것이 위험 평가에는 영향을 주지 않는다. 처음 몇 세대에서 MC는 거의 0이어서 P 와 MC의 곱은 더욱 0에 가깝기 때문이다.

표A.6.2. 상염색체 및 X연관 유전자의 방사선 유발 돌연변이 잠재적회복력에 관한 평가 요약

그룹	유전자수	비가중 ^a PRCF	발생율 ($\times 10^4$) ^b	가중 ^c PRCF
상염색체우성				
1 (아마도 회복 불가)	42	-	46.45	-
2 & 3 (불확실 + 잠재적 회복가능)	17	0.29	55.90	0.157
소계	59		102.35	
상염색체우성 + X연관				
1 (아마도 회복 불가)	43	-	48.95	-
2 & 3 (불확실 + 잠재적 회복가능)	24	0.36	60.90	0.199
소계	67		109.85	

a 비가중 PRCF: 상염색체우성: $17/59 = 0.29$; 상염색체우성 + X연관 = $24/67 = 0.36$

b Sankaranarayanan(1998) 및 Sankaranarayanan과 Chakraborty(2000b)의 평가치.

c 가중 PRCF: 상염색체우성: $(55.9 \times 17)/(102.35 \times 59) = 0.157$; 상염색체우성 + X연관: $(60.9 \times 24)/(109.85 \times 67) = 0.199$

(A244) **만성질환의 PRCF.** 되돌아보면 만성질환의 MC 추정에 사용한 FLTM에서 하나의 가정은 저변의 모든 유전자에서 돌연변이율이 동시에 증가해 경향 문턱을 초과한다는 것이다. 각 다인자성 표현형에 대한 대략적인 PRCF는 단일 유전좌위 돌연변이의 x 승인데, 여기에서 x 는 질환의 원인이 되는 서로 독립적이라고 판단되는 유전좌위 수이다. 만성질환의 경우 단일 유전자 돌연변이에 대한 PRCF는 0.15부터 0.30 범위이므로 다인자성 질환 PRCF 값은 0.15^x 부터 0.30^x 가 된다. 유전좌위가 불과 2개일 때에도 평가치는 0.02부터 0.09이며, 좌위가 많아지면 평가치는 감소한다. 둘 이상의 독립 유전자에서 유발 돌연변이의 동시 회복력 확률을 평가하는 것임을 고려할 때 직관적으로 이러한 결론은 예상하지 못한 것이다.

(A245) UNSCEAR는 0.02부터 0.09까지의 이 PRCF 범위를 채택했으며, 이러한 범위가 위험을 과소평가하지 않을 것으로 판단했다.

(A246) **선천성기형의 PRCF.** 선천성기형에 대한 PRCF를 평가할 수 있는 데이터가 없다. 그러나 이 등급의 질환에 대한 위험 평가에는 이제 DD 방법(아래 설명 참조)이 사용되지 않으므로 PRCF를 추정하지 못해도 문제가 되지 않는다.

다수 계통 발생기형이 사람의 방사선 유발 유전손상의 주요 현상일 것이라는 개념

(A247) 위 문항들에서 설명한 것처럼 유전위험 평가에 있어 자연발생 유전질환 연구에서 확인한 것과 표현형이 유사할 것이라는 예상과 함께 유발 가능한 유전질환 관점에서 위험을 표현함에 치중하였다. 그러나 다음과 같은 사실을 고려할 때 유전질환에만 집중할 경우 유전위험에 대한 의문에 일부 답변만 얻을 수 있다. 사실과 관찰한 바는 다음과 같다.

- 방사선은 에너지의 무작위 부여를 통해 유전 손상을 유발한다.
- 전체 게놈이 표적이다.
- 실험 시스템에서 연구한 대부분의 방사선 유발 돌연변이는 종종 둘 이상의 유전자가 관련되는 DNA 탈락이다.
- 유발 탈락의 회복력에는 구조 및 기능의 제약을 받으므로, 그 중 일부만 생아 출산과 양립한다.
- 생존가능성과 양립 가능한 탈락의 표현형은 탈락으로 인해 결손된 유전자 기능을 반영할 것이다. 모든 게놈 부위를 들여다보는 ‘창’은 아직 없다.

따라서 유전위험 평가 문제는 자연발생 유전질환에서 상대자가 있거나 없는 여러 게놈 영역에서 유발될 수 있는 생존가능 양립성 결손의 표현형을 구분하는 것이다.

(A248) **사람에게서 미세탈락 증후군.** 사람의 자연발생 미세탈락 증후군 연구로부터 방사선 유발 탈락의 잠재적 표현형을 어느 정도 추론할 수 있다. 이형접합 조건에서 생존가능성과 양립하며, 비정상적인 외관과 기관형성 결함이라는 특징적 연관성을 통해 임상학적으로 확인되는, 물리적으로 인접하고 기능적으로는 관련되지 않은 복수 유전자의 탈락으로부터 그러한 추론이 가능하다. 사람 유전학 문헌에서 미세탈락 예가 많이 보고되었으며 계속 보고될 것이다. 그러한 탈락은 거의 모든 염색체에서 확인할 수 있지만 상이한 염색체 영역에서 발생이 무작위적은 아니다(예를 들어 Brewer 등 1998). 상이한 염색체/염색체 영역의 유전자 밀도가 서로 다르다는 점으로부터 이것을 예상할 수 있다. 여기서 중요한 점은 탈락들이 서로 다른 염색체에서 발생하지만 이러한 탈락 대부분 표현형의 공통분모는 정신지체, 특징적 비정상 외모, 심각한 기형 및 성장지체라는 점이다. 이러한 발견은 다른 문헌도 있지만 Cattanch 등(1993, 1996)의 연구가 지지하고 있는데, 생쥐를 통해 이 연구에서 얻은 방사선 유발 다수 유전좌위 탈락이 성장지체 동물의 상당한 부분에 대한 유전적 기반을 구성한다고 보고되어 있다.

(A249) 그에 따라 사람의 생식선피폭에 따른 지배적인 부작용은 공식적으로

‘선천성기형’으로 불리는 다수 계통 발생기형 증상일 가능성이 높음을 시사한다(Sankaranarayanan 1999). 그러나 다인자성이라고 해석되는 자연발생 선천성기형과는 달리 방사선 유발 선천성 기형은 다수 유전좌위 탈락이기 때문에 방사선 유발 선천성기형은 유전에서 어느 정도 상염색체우성 패턴을 나타낼 것으로 예측된다. 이러한 예측은 골격(Ehling 1965, 1966, Selby와 Selby 1977), 백내장(Favor 1989), 성장지체(Searle와 Beechey 1986) 및 선천성기형(Kirk와 Lyon 1984, Lyon와 Renshaw 1988; Nomura 1982, 1988, 1994)에 대한 생쥐 방사선 연구에서 입증된다. 그러나 선천성기형은 자궁 내에서만 확인할 수 있었기 때문에 전달 시험은 수행할 수 없었다.

(A250) **발생기형 위험.** UNSCEAR(2001)은 골격 기형, 백내장 및 선천성기형에 대한 생쥐 데이터를 사용해(낮은 LET 방사선 만성 조건에 대해 비율을 적절히 조정함) 전체적 발생기형 위험이 약 $20 \times 10^{-4} \text{ Gy}^{-1}$ 인 것으로 평가했다(이 부록 표A.6.3 ‘선천성기형’란에서는 첫 세대에 Gy 당 100만 당 2000으로 주었음). 이러한 계산에 사용한 모든 데이터는 수컷 조사 연구에서 도출된 것으로서 이를 암컷에도 적용할 수 있다고 가정했다.

A.6.4. 2001년도 UNSCEAR 위험 평가치

여러 세대에 걸쳐 방사선을 피폭하는 진단에 대한 유전위험 평가치

(A251) 표A.6.3에 2001 UNSCEAR 보고서에 제시된 위험 평가치가 요약 수록되어 있다. 아래에 설명하고 표에 수록된 위험은 여러 세대에 걸쳐 낮은 LET, 낮은 선량 또는 만성 피폭 집단에 대해 Gy 당 1백만 생아출산 당 여러 분류의 유전질환 예상 추가 증례(즉, 기저율 이상)로 표현된다. 선천성기형을 제외한 모든 분류의 평가치는 각기 분류에 대해 1Gy의 DD와 대표적 P, MC 및 PRCF 값에 기초를 둔다. 선천성기형의 경우 위험 평가치는 생쥐 데이터에서 온 것이며(앞의 문항에서 설명), DD 방법에 기초하지 않는다.

(A252) 표A.6.3에서 알 수 있듯이 제1세대 위험(즉, 피폭집단의 자녀에 대한 위험)은 상염색체우성 질환과 X연관 질환의 경우 750 내지 1500 증례, 상염색체열성 질환의 경우 0, 만성질환의 경우 250 내지 1200 증례, 선천성기형은 2000 증례로 평가된다. 총 위험은 기저위험의 약 0.4 내지 0.6%에 해당하는 약 3000 내지 4700 증례이다.

표A.6.3. 배가선량 1 Gy를 가정하고 낮은 LET, 낮은 선량 또는 만성적 피폭이 지속될 경우 유전위험의 현행 평가치(UNSCEAR 2001)

질환 분류	기저빈도 (백만 생아출산 당)	백만 후손 당 Gy 당 위험	
		제1세대	제2세대
멘델			
상염색체우성 및 X연관	16500	~750 내지 1500 ^a	~1300 내지 2500
상염색체열성	7500	0	0
염색체	4000	b	b
다인자성			
만성질환	650000 ^c	~250 내지 1200	~250 내지 1200
선천성기형	60000	~2000 ^d	~2400 내지 3000 ^e
합계	738000	~3000 내지 4700	~3950 내지 6700
기저율의 퍼센트로 나타낸 Gy 당 합계		~0.41 내지 0.64	~0.53 내지 0.91

- a 범위는 통계적 불확도가 아니라 생물학적 불확실성을 반영한다.
- b 부분적으로는 상염색체우성 질환과 X연관 질환에, 부분적으로는 선천성기형에 합산된 것으로 가정됨.
- c 집단에서 빈도.
- d DD 방법을 사용하지 않고 생쥐데이터에서 평가함.
- e 기존 손상에서 새로 유발된 손상(제1세대 소인자의 20-50%가 손상을 다음 세대로 전달하여 400에서 1000 증례를 발생할 것으로 가정한다).

(A253) 제2세대의 위험(즉, 손자의 위험)은 만성질환을 제외한 모든 분류에서 약간 높아진다. 만성질환에 대해서는 돌연변이 성분이 처음 몇 세대 동안 증가하지 않는다고 본다.

한 세대만 방사선을 피폭한 집단에 대한 유전위험 평가치

(A254) 집단이 한 세대에서만 방사선을 피폭한 상황(이후 세대에는 방사선 노출이 없는)의 유전위험 평가치는 표A.6.4에 수록되어 있다. 마찬가지로 모든 평가치는 1백만 후손에서 Gy 당 값으로 표현된다. 예상한 것처럼 제1세대 위험(즉, 피폭 집단 자녀의 위험)은 표A.6.3의 값과 같다. 후속 방사선이 없을 경우

제2세대(즉, 손자)에서 상염색체우성 질환과 X연관 질환의 위험은 도태의 결과로 감소한다. 만성 다인자성질환의 경우 여러 세대에 걸쳐 돌연변이 성분이 낮게 유지되기 때문에 제2세대의 위험은 제1세대와 거의 같은 수준으로 유지된다. 선천성 기형 위험은 400 내지 1000 증례로 예상된다(제1세대 소인자의 약 20 내지 50%가 손상을 다음 세대로 전달할 것으로 가정).

표A.6.4. 배가선량 1 Gy를 가정하고 한 세대만 낮은 LET, 낮은 선량 또는 만성적 피폭할 경우 유전적 위험의 현행 평가치(UNSCEAR 2001)

질환 분류	기저빈도 (백만 생아출산 당)	백만 후손당 Gy 당 위험	
		제1세대	제2세대
멘델			
상염색체우성 및 X연관	16500	~750 내지 1500 ^a	~500 내지 1000
상염색체열성	7500	0	0
염색체	4000	b	b
다인자성			
만성질환	650000 ^c	~250 내지 1200	~250 내지 1200
선천성기형	60000	~2000 ^d	~400 내지 1000 ^e
합계	738000	~3000 내지 4700	~1150 내지 3200
기저율의 퍼센트로 나타낸 Gy 당 합계		~0.41 내지 0.64	~0.16 내지 0.43

a 방사선피폭이 한 세대에서만 발생한다고 가정하기 때문에 제2세대의 위험은 제1세대보다 낮다. 위험은 시간(세대) 경과에 따라 점차 감소한다.

b 부분적으로는 상염색체우성 질환과 X연관 질환에, 부분적으로는 선천성기형에 합산된 것으로 가정됨.

c 집단에서 빈도

d DD 방법을 사용하지 않고 생쥐데이터에서 평가함.

e 제1세대 소인자의 약 20 내지 50%가 다음 세대로 손상을 전달하는 것으로 가정.

위험 평가치의 역량과 한계

(A255) UNSCEAR(2001)에 기초해 ICRP가 처음으로 모든 분류의 유전질환 위험에 대한 ICRP 평가치를 제공할 수 있었다. 이러한 평가치가 이 분야에서 현행 지식을 반영하지만, 사용한 다양한 가정의 관점에서 이 평가치의 역량과 한계를 명심해야 한다.

(A256) **사람에서 남성과 여성의 돌연변이 동등 감수성.** 생쥐의 미성숙 난모세포가 사람 미성숙 난모세포의 돌연변이 방사선 감수성 평가에 적절하지 않을 수 있다는 유력한 견해는 사람의 여성과 남성에서 돌연변이 방사선 감수성이 동일하고 따라서 생쥐 수컷의 것과 동등하다는 가정을 필요로 했다. 그러나 사람 여성의 감수성이 이러한 점에서 낮다면, 유발 돌연변이 평균율이 사용한 것보다 낮을 것으로 예상된다. 따라서 DD가 높아질 것이다(또한 $1/DD$ 는 사용한 0.01보다 작을 것이다). 현재로서는 이 문제를 가늠할 수는 없다.

(A257) **DD 계산에 사용한 평균 자연발생 및 유발 돌연변이율.** 앞에서 설명한 것처럼 사람 유전자 당 평균 평가치 2.95×10^{-6} 는 기저빈도 평가에 포함된 질환의 일부를 구성하는 약 26개 상염색체우성 질환 표현형의 바탕이 되는 135개 추정 유전자에 기초한 것이다. 사람 게놈에는 약 30000개의 유전자가 있다는 사실을 감안한다면 위의 평균 자연 돌연변이율 평가치가 실제 평균율을 과대평가한 것인지 과소평가한 것인지는 추측만 할 수 있을 뿐이다.

(A258) 마찬가지로 생쥐 유전자의 유발 돌연변이율 평가치도 현재까지의 사람 증례보다는 더 많은 데이터에 기초한 것이지만, 현재 분석에 포함된 유전자의 총수는 34개에 불과하며 그 상당 비율에서 유발 돌연변이는 희귀했다. 따라서 현재 추정된 유발 비율이 상향 편향되었을 가능성이 상존하지만 현재로서는 그 범위를 결정하기는 어렵다.

(A259) **돌연변이 성분.** 상염색체우성 질환과 X연관 질환에 대한 평가치 $MC = 0.3$ 은 상염색체우성 질환에 대한 평균 s 값(제1세대에서 $MC = s$ 이기 때문에) 즉, 자연발생 돌연변이율 계산의 바탕을 제공한 데이터에 근거했다. 그러나 질환의 큰 비율에서 발병이 중년이나 노년에 일어나는데(즉, 출산연령을 초과한 나이), 이것은 s 가 작기 때문에 사용한 MC 값이 과대평가될 수 있음을 인식해야 한다.

(A260) **잠재회복력수정인자.** 상염색체우성 질환과 X연관 질환의 경우 PRCF의 범위로 0.15~0.30을 사용했는데, 그 하한은 가중 평가치이고 상한은 비가중 평가치이다. 그러나 유발 결손의 잠재회복력에 대해 개발된 기준에는 탈락과 관련된 자연발생 멘델질환에 틀림없이 중요한 과열점 특이성breakpoint specificities은 포함되지 않는다. 방사선 유발 탈락은 이러한 특이성을 공유하지 않은 것으로 판단되며, 모든 게놈 부위에서 그런 것은 더욱 아니다. 이러한 특이성이 유도 탈락 회복에 관련될 경우 가중PRCF도 과대평가될 수 있다.

(A261) 만성질환의 경우 PRCF는 단순히 단일 유전자 질환 PRCF의 x 승이 될 것으로 가정한다. 여기서 x 는 질환을 유발하기 위해 동시에 돌연변이 해야 하는 유전자 수이고 0.02~0.09 범위의 값은 $x = 2$ (최소수)를 가정한 것이다. 통계적으로 그러한 계산을 방어할 수는 있지만, 낮은 방사선량에서 만성질환의 기초가 되는 독립된 두 돌연변이가 동시에 유발되고 회복된다는 목시적 생물학적 가정은 비현실적일 것 같다.

(A262) 또 하나의 이슈가 있는데 만성질환에 대한 PRCF가 x 에 매우 민감하다는 것이다(예를 들어 $x = 3$ 인 경우에도 PRCF 범위는 0.003 내지 0.03이다). 만성질환에 사용하는 PRCF가 위험을 과대평가할 수 있다는 것이 주장의 핵심이다.

(A263) **위험 평가치의 중복.** 다음은 상기할 필요가 있다. (a) 상염색체우성 질환과 X연관 질환에 대한 평가치는 DD법을 사용해 결정했다. (b) 부정적인 우성 영향인 유발 선천성기형의 위험은 DD법에 의존하지 않고 생쥐데이터를 사용해 별도로 평가했다. (c) ‘염색체질환’의 위험은 상염색체우성 질환과 X연관 질환 위험에 소계 처리된 것으로 가정했다. 여기에서 중요한 점은, 이러한 모든 것이 우성 영향을 나타내기 때문에(또한 대부분의 발달 유전자의 돌연변이가 멘델질환을 유발한다고 파악되었기 때문에) 그 크기는 평가하기 어렵지만 ‘상염색체우성 질환 + X연관 질환’과 ‘선천성기형’이라는 표제의 분류 위험에는 중복이 있을 것이다. 그 결과 합계 값은 우성 영향의 실제 위험을 과대평가할 수 있다.

A.6.5. 유전영향에 대한 위험계수 도출을 위한 ICRP 위험평가치의 이전 및 현행 평가

ICRP 60

(A264) ICRP 60(ICRP 1991b)에서 ICRP는 당시 가용한 유전위험 평가치(UNSCEAR 1988, NRC 1990)를 ‘심각한 유전영향’의 위험계수 도출에 대한 시점으로 사용했다. 1Gy로 가정한 DD가 현재 사용하는 것과 같지만, 당시 ICRP 계산에서 멘델질환의 기저빈도는 현재 사용하는 빈도의 약 반에 불과했다(당시 1.25% 대 현재 2.4%). 또한, 전체적 다인자성질환에 있어(평가된 기저빈도는 현재와 같이 71%) ICRP는 방사선 피폭 후 모든 세대에 $MC = 0.05$ 로 가정했으며 [이 가정은 현재 계산 관점에서는 틀렸다. (A216)~(A234)항 참조], ‘심각한’ 것일 수 있는 유발 가능 다인자성질환의 비율을 추정하기 위해 1/3이라는 임의 수

정계수(“심각도 수정계수”라 불렀음)를 추가로 포함했다(현행 평가에서는 그러한 수정은 사용하지 않는다).

(A265) 낮은 LET, 낮은 선량률에 피폭한 집단에 대해 ICRP(1991b)가 추정된 위험계수는 표A.6.5에 수록되어 있다(Sankaranarayanan 1991의 표3도 참조).

(A266) 집단의 모든 개인이 피폭한 방사선량이 유전학적으로 유의할 경우 ‘생식가능 집단’에 대한 평가치가 적용된다. 그러나 모든 연령의 총 집단을 고려할 경우 유전학적 유의선량은 생애에 걸쳐 피폭한 총 선량보다 훨씬 낮다. 생식 연령을 벗어나거나 어떤 이유이건 아이를 낳을 수 없는 개인의 배아세포 유전적 손상은 유전위험을 초래하지 않는다. 출생 시 평균 기대수명을 75세 정도라고 가정할 경우 30세(즉, 평균 생식 연령)까지 피폭한 선량은 전체 선량의 40%(즉, $30/75 = 0.4$)이다. 따라서 총 집단에 대한 위험계수는 위 값의 40%로 평가된다.

표 A.6.5. 여러 세대에 걸쳐 계속 방사선을 피폭한 집단에 대한 ICRP 60의 위험계수 평가치(ICRP 1991b, Sankaranarayanan 1991)

시간 범위	질환 범주	Gy 당 % 단위의 위험계수	
		생식 집단	전체 집단
최대 2세대까지	멘델 및 염색체	0.3	0.1
	다인자성	0.23	0.09
	합계	0.53	0.19
새 평형	멘델 및 염색체	1.2	0.5
	다인자성	1.2	0.5
	합계	2.4	1.0 ^a

a ICRP(1991b)가 ‘확률론적 영향에 대한 명목확률계수’ 요약에서 사용한 평가치(표 3, ICRP 1991b). 그 표에 수록한 수치 $1.3 \times 10^{-2} \text{Gy}^{-1}$ 은 수명손실 연수에 대한 가중치를 반영한다(ICRP 1991b).

(A267) ICRP(1991b)는 첫 두 세대와 새로운 평형에 대한 위험계수를 제시했지만, 총 집단에 대해 $1.0 \times 10^{-2} \text{Gy}^{-1}$ 의 평형 평가치를 사용하고 ‘명목확률계수 nominal probability coefficients’ 요약표(표3, ICRP 1991b)의 ‘심각한 유전영향severe heritable effects’에 대한 값 $1.3 \times 10^{-2} \text{Gy}^{-1}$ 에 도달하기 위해 수명손실 연수에 대한 가중치를 추가로 적용했다.

현행 평가

(A268) 현행 평가에서 ICRP는 표A.6.3에 제시된 위험 평가치를 출발점으로 했다. 평가된 각 범위의 상한과 하한이 평균 평가치를 얻는 데 사용되었으며, 이 평균들을 조합해 모든 유전영향의 위험계수로 단일 평가치를 산출했다. 계산의 상세한 설명은 다음 절에 설명한다.

(A269) 매 세대 계속 방사선을 피폭한 집단에 대한 2세대까지 위험계수.

- 멘델질환 위험 = Gy 당 10^6 후손에서 1300 - 2500 증례
(= 0.13×10^{-2} 내지 $0.25 \times 10^{-2} \text{Gy}^{-1}$; 평균: $0.19 \times 10^{-2} \text{Gy}^{-1}$);
- 만성 다인자성질환 위험 = Gy 당 10^6 후손에서 250 - 1200 증례
(= 0.03×10^{-2} 내지 $0.12 \times 10^{-2} \text{Gy}^{-1}$; 평균: $0.08 \times 10^{-2} \text{Gy}^{-1}$);
- 선천성기형 위험 = Gy 당 10^6 후손에서 2400 - 3000 증례
(= 0.24×10^{-2} 내지 $0.30 \times 10^{-2} \text{Gy}^{-1}$; 평균: $0.27 \times 10^{-2} \text{Gy}^{-1}$)
- 모든 분류 위험(즉, 위 세 종류 결합) = Gy 당 10^6 후손에서 3950-6700 증례 또는 0.40×10^{-2} 내지 $0.67 \times 10^{-2} \text{Gy}^{-1}$; 평균: $0.54 \times 10^{-2} \text{Gy}^{-1}$. 이들 평가치는 생식집단에 관한 것이다. 총 집단의 경우 평가치에 0.4를 곱해 계산한다. 모든 평가치를 표A.6.6에 요약하였다.

A.6.6. 매 세대가 계속 피폭할 때 생식집단과 총 집단의 2세대까지 위험계수 (모든 값은 Gy 당 퍼센트로 표현됨)

질환 분류	생식집단		총 집단
	범위	평균 ^a	평균 ^b
(a) 멘델질환	0.13 내지 0.25	0.19	0.08
(b) 만성질환	0.03 내지 0.12	0.08	0.03
(c) 선천성기형	0.24 내지 0.30	0.27	0.11
합계		0.54	0.22

a 표시된 범위 한계의 평균

b 생식 집단에 대한 값의 40%

(A270) 멘델질환의 서로 다른 기저 빈도, MC와 상응하는 분류의 질환에 대한 위험 평가치 차이에도 불구하고 생식집단에 대한 현행 평가치(0.54)와 총 집단에 대한 평가치(0.22)는 ICRP 60(1991b, 각각 0.53과 0.19, 표5 참조)의 값과 놀랄 만큼 유사하다. 그러나 이러한 유사성은 순전히 우연의 일치임을 강조한다.

(A271) 상기하자면 멘델질환과 만성질환의 위험계수 평가치 범위는 PRCF 범위(상염색체우성 질환과 X연관 질환의 경우 0.15 내지 0.30, 만성질환의 경우 0.02 내지 0.09)가 반영된 것이다. 이 범위의 상한은 과대평가를 대표할 것이며 실제 값은 하한에 근접할 수 있다는 주장을 A.6.3절에 제기했다. 이 주장이 타당할 경우 위 두 분류 질환에는 범위의 하한을, 선천성기형에는 범위의 평균을 사용하는 것이 의미가 있다. 그러면 위험계수는 아래에 보듯이 표A.6.6에 제시된 값보다 작아질 것이다.

- 생식 집단: 멘델질환, 0.13; 만성질환, 0.03; 선천성기형, 0.27; 합계: 0.43% Gy⁻¹.
- 전체 집단: 멘델질환, 0.05; 만성질환, 0.01, 선천성기형, 0.11, 합계: 0.17% Gy⁻¹.

(A272) **피폭 후 첫 세대만의 위험계수.** 방사선피폭 후 첫 세대만의 위험계수가 표A.6.7에 요약되어 있다. 역시 예상할 수 있는 것처럼 값이 처음 두 세대까지의 값과 유사하다.

표 A.6.7. 피폭 후 첫 세대의 생식집단 및 총 집단의 위험계수(모든 값은 Gy 당 퍼센트로 표현)

질환 분류	생식 집단		총 집단
	범위	평균 ^a	평균 ^b
(a) 멘델질환	0.075 에서 0.150	0.11	0.05
(b) 만성질환	0.025 에서 0.120	0.07	0.03
(c) 선천성기형	-	0.20	0.08
합계		0.38	0.16

a 표시된 범위 한계의 평균.

b 생식집단 값의 40%.

(A273) 그러나 멘델질환과 만성질환에 대한 범위의 하한을 적용할 경우 평가치는 생식집단의 경우 $0.30 \times 10^{-2} \text{ Gy}^{-1}$ (즉, $0.075 + 0.025 + 0.20 = 0.30$)이고 전체 집단의 경우는 $0.12 \times 10^{-2} \text{ Gy}^{-1}$ 이다(즉, $[0.075 \times 0.4] + [0.025 \times 0.4] + [0.20 \times 0.4] = 0.12$).

위험계수 계산 대비 2세대까지 위험 평가치 사용의 정당화

(A274) 유전 위험계수를 암 위험계수와 비교할 경우 몇 가지 문제가 있다. 암 위험계수가 피폭 개인 본인에 대한 방사선의 유해한 영향의 확률을 정량화하는 것인데 반해, 유전 위험계수는 생식계열 돌연변이와 세대 간 전달로 피폭자 후손에 나타나는 유해한 영향의 확률을 정량화하는 것이기 때문이다. 가용한 데이터에 대한 고려와 UNSCER(2001)과 NAS/NRC(2006)의 새 분석에 따른 ICRP 입장은 두 세대까지 유전위험을 표현하는 것이다(표A.6.6). 아래에서 보듯이 이 접근법을 옹호하는 중요한 과학적 논증이 있다.

(A275) 배가선량법 사용의 기초가 되는 돌연변이와 도태 사이 평형에 관한 집단유전이론과 가용한 수학적 모델은 원론적으로는 새로운 평형(모든 세대가 계속 방사선에 피폭하는 조건에서)에서 유전위험을 예측할 수 있게 한다. 앞에서 설명한 것처럼 정보 분석 없이 유전위험 과소평가를 방지하기 위해 ICRP 60(ICRP 1991b)은 평형 평가치를 유전영향 위험계수 계산을 위한 근거로 사용했다. 그러한 평형 계산에 반하는 현행 논거는 사용된 가정 즉, (a) 도태계수, 돌연변이 성분, 기타 위험식에 사용되는 양의 평가치가 수십 또는 수백 사람세대 동안 유효하게 유지되고, (b) 인구 구조, 인구통계학 및 보건복지 시설이 수백 년 동안 일정하게 유지될 것이라는 가정이 매우 비현실적이고 시험 불가능하다는 데 중심을 둔다.

(A276) ICRP 관점에서 이러한 가정은 더 이상 인정하기 어려우며, 따라서 ICRP는 방사선방호의 현실적 목적에서는 제2세대까지의 위험에 기초한 유전위험 평가치를 권고한다. UNSCEAR(2001)과 NAS/NRC(2006)도 이 문제에 대해 같은 판단을 했다.

(A277) 특히 (a) 방사선 유발 유전적 변화는 종종 둘 이상의 유전자가 관련되는 탈락 중심이며 그러한 유발 결손의 일부만이 생아출산과 양립하며, (b) 사람에서 방사선 유발 유전영향은 단일 유전자 돌연변이에 의한 질환이 아니라 후손의 다중시스템 발생기형으로 발현될 가능성이 크다는 개념이 이 현안과 관련성을 갖는다. 후손에서 소인자의 생식 적합도가 감소되기 때문에 발생에 영향을 미치는 대부분의 방사선 유발 유전적 변화는 제1세대와 제2세대에서 강하게 도태될 것으로 예상된다. 따라서 제2세대까지 유전위험을 표현해도 방사선의 유전영향이 크게 과소평가되지는 않을 것이다.

(A278) 그러나 생식선 조직가중치의 도출에는 어느 정도 주의를 기울여야 한

다. 표A.4.1a에 따르면 상대위해 값은 유전적 영향이 0.044이며, 난소암이 0.017이다. 이렇게 계산한 값의 합인 0.061은 0.08로 판단한 조직가중치보다 낮다(표A.4.3 참조).

(A279) 또한 X연관 질환을 더한 상염색체우성 질환(DD법)과 선천성기형(직접 생쥐 데이터로부터)의 위험 계산에 사용한 방법이 다르기 때문에 위험을 ‘이중 계상’할 소지가 상당히 있음을 ICRP는 인식한다. 따라서 UNSCEAR과 ICRP가 그 동안 사용한 것처럼 이러한 위험 범주를 합산할 경우 전체적인 유전위험을 상당히 과대평가하게 될 것이다.

(A280) 마지막으로, 5세대나 10세대까지 유전위험을 평가하는 것이 보다 적합할 것인지 ICRP는 검토했다. 이 판단에는 UNSCEAR(2001)가 제공하는 일부 모델 예측 정보가 도움이 되었다.

(A281) 변수가 지정된 경우 UNSCEAR나 ICRP가 사용하는 모델에 따르면 돌연변이율 연구 증가의 경우 질환 발생의 응답성(돌연변이 성분, MC)은 상염색체우성 질환이 가장 높으며, X연관 질환의 경우 그보다 낮고, 상염색체열성 질환의 경우 훨씬 낮다. 따라서 상염색체우성 질환의 경우 제5세대와 제10세대 집단의 질환 빈도는 제2세대에서보다 최대 1.5배 클 것으로 예측된다(UNSCEAR 2001, 그림 V).

(A282) 다인자성질환의 응답성에 관한 입장은 돌연변이 성분과 경향의 유전도 사이의 관계를 주는 UNSCEAR 2001의 그림VII에 설명되어 있다. 이러한 관계는 제1, 제5 및 제10세대에서 서로 크게 다르지 않다. 나아가 모델은 관심 선량률에서 돌연변이율의 연구 증가에 대한 제10세대에서 이러한 장애의 최소 응답성(MC_{TU})을 예측한다.

(A283) 위 모델에 의한 예측은 각 세대가 X선에 조사된 후 30세대 이상까지 돌연변이 부하 누적의 어떤 증거도 보이지 않는 여러 동물유전연구(주로 생쥐)의 결과와 전체적으로 일치한다(Green 1968 및 UNSCEAR 1972에서 검토).

(A284) 요약하면 두 세대가 아닌 다섯 세대나 열 세대의 방사선 유전위험을 나타낸다고 해도 위험계수의 판단에 상당한 영향은 없을 것으로 ICRP는 결론을 내린다.

(A285) 결론적으로, 불확실성은 충분히 인정하지만, ‘첫 두 세대에 대해 제시한 위험 평가치가 발전하고 있는 이 분야의 현재 지식을 적절하게 반영한다.’는 UNSCEAR 2001 판단(531항)에 ICRP도 동의한다.

A.6.6. 제A.6절 참고문헌

- Brewer, C., Holloway, S., Zawalynski, P., et al., 1998. A chromosomal deletion map of human malformations. *Am. J. Hum. Genet.* 63, 1153–1159.
- Carter, C.O., 1961. The inheritance of pyloric stenosis. *Brit. Med. Bull.* 17, 251–254.
- Carter, C.O., 1977. Monogenic disorders. *J. Med. Genet.* 14, 316–320.
- Cattanach, B.M., Burtenshaw, M.D., Rasberry, C., et al., 1993. Large deletions and other gross forms of chromosome imbalance compatible with viability and fertility in the mouse. *Nature Genet.* 3, 56–61.
- Cattanach, B.M., Evans, E.P., Rasberry, C., et al., 1996. Incidence and distribution of radiation-induced large deletions in the mouse. In: Hagen, U., Harder, D., Jung, H. et al. (Eds). *Congress Proceedings, Tenth Int. Cong. Radiat. Res., Wu`rzburg, Germany, Vol. 2, 531–534.*
- Chakraborty, R., Yasuda, N., Denniston, C., Sankaranarayanan, K., 1998. Ionizing radiation and genetic risks. VII. The concept of mutation component and its use in risk estimation for mendelian diseases. *Mutat. Res.* 400, 41–52.
- Crow, J.F., Denniston, C., 1981. The mutation component of genetic damage. *Science* 212, 888–893.
- Crow, J.F., Denniston, C., 1985. Mutation in human populations. In: Harris, H., Hirschhorn, H. (Eds.), *Adv. Hum. Genet.*, Vol. 12. Plenum Press, N.Y, pp. 59–123.
- Czeizel, A., Sankaranarayanan, K., 1984. The load of genetic and partially genetic disorders in man. I. Congenital anomalies: estimates of detriment in terms of years lost and years of impaired life. *Mutat. Res.* 128, 73–103.
- Czeizel, A., Sankaranarayanan, K., Losonci, A., et al., 1988. The load of genetic and partially genetic disorders in man. II. Some selected common multifactorial diseases. Estimates of population prevalence and of detriment in terms of years lost and impaired life. *Mutat. Res.* 196, 259–292.

- Denniston, C., Chakraborty, R., Sankaranarayanan, K., 1998. Ionizing radiation and genetic risks. VIII. The concept of mutation component and its use in risk estimation for multifactorial diseases. *Mutat. Res.* 405, 7-79.
- Ehling, U.H., 1965. The frequency of X-ray-induced dominant mutations affecting the skeleton in mice. *Genetics* 51, 723-732.
- Ehling, U.H., 1966. Dominant mutations affecting the skeleton in offspring of X-irradiated male mice. *Genetics* 54, 1381-1389.
- Falconer, D.S., 1960. *Introduction to Quantitative Genetics*. Oliver and Boyd, Edinburgh.
- Falconer, D.S., 1965. The inheritance of liability to certain diseases, estimated from the incidence among relatives. *Ann. Hum. Genet. (Lond)* 29, 51-76.
- Favor, J., 1989. Risk estimation based on germ cell mutations in animals. *Genome* 31, 844-852.
- Green, E.L., 1968. Genetic effects of radiation on mammalian populations. *Ann. Rev. Genet.* 2, 87-120.
- ICRP, 1991b. The 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 60. *Ann. ICRP* 21 (1-3).
- ICRP, 1998a. Genetic susceptibility to cancer. ICRP Publication 79. *Ann. ICRP* 28 (1/2).
- ICRP, 1999b. Risk estimation for multifactorial diseases. ICRP Publication 83. *Ann. ICRP* 29 (3-4).
- Kirk, K.M., Lyon, M.F., 1984. Induction of congenital abnormalities in the offspring of male mice treated with x rays at pre-meiotic and post-meiotic stages. *Mutat. Res.* 125, 75-85.
- Lyon, M.F., Renshaw, R., 1988. Induction of congenital malformation in mice by parental irradiation: transmission to later generations. *Mutat. Res.* 198, 277-283.
- NAS/NRC, 2006. *Health Risks from Exposure to Low Levels of Ionizing Radiation: BEIR VII Phase 2*. Board on Radiation Effects Research. National Research Council of the National Academies, Washington, D.C.
- Nomura, T., 1982. Parental exposure to X-rays and chemicals induces heritable tumors and anomalies in mice. *Nature* 296, 575-577.
- Nomura, T., 1988. X-ray and chemically induced germ line mutations

- causing phenotypic anomalies in mice. *Mutat. Res.* 198, 309–320.
- Nomura, T., 1994. Male-mediated teratogenesis: ionizing radiation and ethylnitrosourea studies. In: Mattison, D.R., Olshan, A.F. (Eds.), *Male-mediated Developmental Toxicity*. Plenum Press, New York, pp. 117–127.
- NRC, 1972. National Academy of Sciences–National Research Council, *The BEIR Report*. National Academy Press, Washington, D.C.
- NRC, 1990. National Academy of Sciences–National Research Council, *The BEIR V Report*. National Academy Press, Washington, D.C.
- Sankaranarayanan, K., 1991. Genetic effects of ionising radiation in man. *Ann. ICRP* 22, 76–94.
- Sankaranarayanan, K., 1998. Ionizing radiation and genetic risks. IX. Estimates of the frequencies of mendelian diseases and spontaneous mutation rates in human populations: a 1998 perspective. *Mutat. Res.* 411, 129–178.
- Sankaranarayanan, K., 1999. Ionizing radiation and genetic risks. X. The potential ‘disease phenotypes’ of radiation-induced genetic damage in humans: perspectives from human molecular biology and radiation genetics. *Mutat. Res.* 429, 45–83.
- Sankaranarayanan, K., Chakraborty, R., 2000a. Ionizing radiation and genetic risks. XI. The doubling-dose estimates from the mid 1950s to the present, and the conceptual change to the use of human data on spontaneous mutation rates and mouse data on induced mutation rates for doubling-dose calculations. *Mutat. Res.* 453, 107–127.
- Sankaranarayanan, K., Chakraborty, R., 2000b. Ionizing radiation and genetic risks. XII. The concept of ‘potential recoverability correction factor’ (PRCF) and its use for predicting the risk of radiation-inducible genetic disease in human live births. *Mutat. Res.* 453, 129–181.
- Sankaranarayanan, K., Chakraborty, R., 2000c. Ionizing radiation and genetic risks. XIII. Summary and synthesis of papers VI to XII and estimates of genetic risks in the year 2000. *Mutat. Res.* 453, 183–197.
- Sankaranarayanan, K., Chakraborty, R., Boerwinkle, E.A., 1999. Ionizing radiation and genetic risks. VI. Chronic multifactorial diseases: a review of epidemiological and genetic aspects of coronary heart disease, essential hypertension and diabetes mellitus. *Mutat. Res.* 436, 21–57.

- Sankaranarayanan, K., Yasuda, N., Chakraborty, R., et al., 1994. Ionizing radiation and genetic risks. V. Multifactorial diseases: a review of epidemiological and genetic aspects of congenital abnormalities in man and of models on maintenance of quantitative traits in populations. *Mutat. Res.* 317, 1-23.
- Searle, A.G., Beechey, C.V., 1986. The role of dominant visibles in mutagenicity testing. In: Ramel, C. et al. (Eds). *Genetic Toxicology of Environmental Chemicals, Part B, Genetic Effects and Applied Mutagenesis*. Alan R. Liss, New York, NY, 511-518.
- Selby, P.B., 1998. Discovery of numerous clusters of spontaneous mutations in the specific locus test in mice necessitates major increases in estimates of doubling doses. *Genetica* (102/103), 463-487.
- Selby, P.B., Selby, P.R., 1977. Gamma-ray-induced dominant mutations that cause skeletal abnormalities in mice. I. Plan, summary of results and discussion. *Mutat. Res.* 43, 357-375.
- UNSCEAR, 1972. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Sources and Effects of Ionizing Radiation. 1972 Report to the General Assembly with Annexes, United Nations, New York.
- UNSCEAR, 1977. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Sources and Effects of Ionizing Radiation. 1977 Report to the General Assembly with Annexes, United Nations, New York.
- UNSCEAR, 1988. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation. 1988 Report to the General Assembly with Annexes, United Nations, New York.
- UNSCEAR, 1993. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Sources and Effects of Ionizing Radiation. 1993 Report to the General Assembly with Scientific Annexes, United Nations, New York.
- UNSCEAR 2001. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Heritable Effects of Radiation., 2001 Report to the General Assembly with Scientific Annex, United Nations, New York.

A.7. 주요 결론과 제안의 요약

(A286) 연구는 계속되어야 하지만, 이 부록을 초안한 작업그룹의 결론과 제안 대부분은 과거 약 10년 동안 개발된 ICRP 제1분과위원회 판단에 근거한다. 따라서 현행 권고의 많은 부분은 기존 판단을 요약한 것이기도 하다. 이러한 이유 때문에 ICRP는 주요 결론과 제안을 전체적으로 요약 설명하기 위해 단순한 표 형식(표A.7.1)을 채택했다. 표A.7.1에 각 주제에 대한 해당 결과 표들에 대한 색인을 포함하여 문서의 약도가 되게 하여 독자를 관심 주제로 안내하도록 했다. 해당 각 절에는 종종 표A.7.1에 충분히 반영되지 않은 상세한 방법론, 불확실성 및 단서가 제공된다. 따라서 표A.7.1에 ICRP의 견해와 판단에 관한 모든 정보가 수록된 것으로 보아서는 안 된다.

(A287) 또한 ICRP는 현행 권고의 부록B(제2분과위원회 작업그룹이 초안)에서 논의되는 중요한 사안을 강조하고자 한다. 표A.7.1에 요약 수록한 결론과 제안은 주로 방사선방호에서 전망적 계획이라는 포괄적 목적을 위한 것이다. 제안된 판단의 많은 부분이 다른 목적에는 불충분할 수 있으며, 그러한 상황에서는 방사선 영향과 보건 위험에 대한 구체적이고 잘 정당화된 판단이 필요할 것이다.

표A.7.1. 특별히 방사선방호 목적을 위한 주요 결론과 제안의 요약

주제	자료원/방법론	결론/수치 판단
1 암과 유전영향에 대한 낮은 선량/낮은 선량률의 선량 반응(제A.2.1-A.2.5절; 제A.2.7-A.2.8절; 제A.4.1절 A86-A96항)	ICRP 99(ICRP 2005d); UNSCEAR 2000, 2001; NCRP 2001; NAS/NRC 2006에서 검토한 연구에 기초한 판단	불확실성은 상당하지만, 증거의 저울은 선량과 위험 증가 사이에 단순한 정비례 관계 사용에 무게를 둔다.
2 유발 보건영향 위험에서 유발 계능 불안정성, 구경꾼교신 및 적응반응의 역할(제A.2.3절; 제A.2.5절; 제A.4.1절 A90-A97항)	ICRP 99; NCRP 2001; UNSCEAR 2000; UNSCEAR 1994; NAS/NRC 2006에서 검토한 연구에 기초한 판단	이들 생물학적 영향에 관한 지식은 증가하고 있지만, 방사선방호 목적에는 아직 불충분하다.
3 생물학적효과비(RBE)와 방사선가중치 (w_R) (제A.4.3절)	ICRP 92(ICRP 2003c)에 포함된 권고에 기초한 판단	부록B에 판단이 잘 개발되었다.
4 선량선량률효과인자(DDREF)와 가능한 선량문턱의 영향(제A.2.4절; 제A.4.2절; 제A.4.4절 A125 -A148항; 제A.4.4절 A173-A187항)	ICRP 99, UNSCEAR 2000 및 NAS/NRC 2006에서 검토한 연구에 기초한 판단	ICRP 용도로는 DDREF값으로 2를 유지한다. 암 위험에 대한 낮은 선량문턱의 불확실한 가능성은 DDREF값의 불확실한 증가와 대등하다.
5 방사선 위해 및 조직가중치(w_T) (제A.4.4절 A105-A162항)	주로 원폭 수명연구(LSS)의 암 발생, 국제 암 사망률 데이터베이스 및 유전영향에 대한 새 평가치(아래 7 참조)에서 개발한 새로운 판단. 암 사망률 데이터의 추가 고려로 지지되는 판단.	개정 w_T 를 제안. 유방과 생식선에 대한 상당한 w_T 변경(표A.4.3 참조); 잔여조직을 다루는 수정된 방법(표A.4.3 참조).
6 암에 대한 위해조정 명목위해계수 (제A.4.4절 A105-A162항)	암 발생에 치사율/생활장애를 가중한 데이터에 근거로 개발한 새로운 위험 평가치(위의 5 참조).	전체 집단에는 $5.5 \times 10^{-2} \text{ Sv}^{-1}$, 성인 종사자에는 $4.1 \times 10^{-2} \text{ Sv}^{-1}$ 의 위해조정 명목위험계수가 제안된다(표A.4.4참조).

표A.7.1. (계속)

주제	자료원/방법론	결론/수치 판단
7 유전영향의 위해조정 명목 위험계수(제A.6절)	피폭 후 제2세대까지 모든 분류의 유전영향에 대한 위험을 사용한 UNSCEAR 2001 판단에 기초한 새 위험 평가치 (표A.6.4 및 표A.6.6 참조)	2세대 위해조정 명목위험계수로 전체 집단에는 $0.2 \times 10^{-2} \text{Sv}^{-1}$, 성인 종사자에는 $0.1 \times 10^{-2} \text{Sv}^{-1}$ 가 제안된다(표A.4.4참조). ICRP 60(ICRP 1991b)은 이론적 평형에서 집단유전 위험을 사용했기 때문에 현행 평가치가 상당히 낮다.
8 태내피폭 후 암 위험 (제A.4.4절 A168-A171항)	ICRP 90(ICRP 2003a)에서 검토한 연구에 기초한 판단	생애 암 위험은 소아기 중 피폭에 따른 위험보다 크지 않은 것으로 판단된다.
9 방사선 유발 암에 대한 유전적 감수성(제A.2.7절 A46-A48항, 제A.4.4절 A172항)	ICRP 79(ICRP 1998a), UNSCEAR 2000, 2001 및 NAS/NRC 2005에서 분석한 연구와 분석에 기초한 판단	강하게 표출되는 암 취약 장애는 전체 집단의 위험 평가치를 왜곡하기 어려울 정도로 희귀하다. 잠재적으로 흔하지만 약한 유전적 결정요소의 영향은 불확실하다.
10 성인의 방사선 유발 조직반응 (제A.2.6 및 제A.3절)	기전을 재평가했으며, 이환도/치사도의 선량 문턱치를 다양한 데이터를 바탕으로 개정.	표A.3.1, 표A.3.2와 표A.3.4에 개정된 판단이 수록되어 있지만 다른 ICRP 간행물로부터 변경된 것은 거의 없다. 백내장 유발의 선량 문턱치와 눈의 선량한도에 대한 판단은 더 검토해야 한다.
11 조직반응, 기형 및 신경학적 영향의 태내 위험(제A3.2절)	ICRP 90에서 검토한 연구에 기초한 판단	조직반응, 기형 및 심각한 정신지체에 대한 선량 문턱치 존재에 대한 판단 강화. 그에 따라 낮은 선량에서 위험은 없음. IQ 저하는 불확실성이 크지만, 낮은 선량 위험의 실질 중요성은 없는 것으로 판단.
12 암외질환 위험(제A.5절)	특히 심혈관질환에 대해 LSS 데이터와 방사선치료 후 결과 연구에 기초한 판단	1 Sv 미만의 선량-반응 형태에 큰 불확실성: 낮은 선량에서는 구체적 판단 불가.

A.7.1. 제A.7절 참고문헌

- ICRP, 1991b. The 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 60. Ann. ICRP 21 (1-3).
- ICRP 1998a. Genetic susceptibility to cancer. ICRP Publication 79. Ann. ICRP 28 (1/2).
- ICRP 2003c. Relative biological effectiveness (RBE), quality factor (Q) and radiation weighting factor (w_R WR). ICRP Publication 92. Ann. ICRP 33 (4).
- ICRP, 2005d. Low-dose extrapolation of radiation-related cancer risk. ICRP Publication 99. Ann. ICRP 35 (4).
- NAS/NRC, 2006. Health Risks from Exposure to Low Levels of Ionizing Radiation: BEIR VII Phase 2. Board on Radiation Effects Research. National Research Council of the National Academies, Washington, D.C.
- NCRP, 2001. Evaluation of the Linear-Non-threshold Dose-Response Model for Ionizing Radiation.
- NCRP Report No. 36. National Council on Radiation Protection and Measurements, Bethesda, MD.
- UNSCEAR, 1994. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Sources and Effects of Ionizing Radiation. 1994 Report to the General Assembly with Scientific Annexes, United Nations, New York.
- UNSCEAR, 2000. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Sources and Effects of Ionizing Radiation. Vol. II Effects. 2000 Report to the General Assembly with Scientific Annexes, United Nations, New York.
- UNSCEAR, 2001. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Heritable Effects of Radiation., 2001 Report to the General Assembly with Scientific Annex, United Nations, New York.

국제방사선방호위원회 2007년 권고(ICRP 103)

부록B

방사선방호에 사용되는 양
(Quantities Used in Radiological Protection)

부록B 머리말

1998년 남아프리카 케이프타운에서 열린 ICRP 본위원회에서 1990년 권고를 갱신하기 위한 검토를 시작했을 때부터 1990년 권고가 그러했듯이 과학적 부록과 간행물이 새로운 권고의 본문을 보완할 필요가 있음이 분명했다. 따라서 제1분과위원회(방사선영향을 다룸)와 제2분과위원회(방사선피폭으로부터 선량을 다룸)는 방사선의 보건영향과 선량계측학적 고려에 관한 부록을 초안하도록 요구받았다. 마찬가지로 의료에서 방사선방호를 다루는 제3분과위원회와 ICRP 권고의 적용을 다루는 제4분과위원회도 필요한 보완 보고서들을 준비하도록 요구했는데 이들은 각각 별도 간행물로 출판되었다. 의료에서 방호에 관한 ICRP 105(2007b)와 대표인과 최적화에 관한 ICRP 101(2006a)가 그것이다.

첫 예비작업 후 2001년 제2분과위원회는 본위원회에 대해 조언할 작업반을 구성하여 이 부록을 초안하기 시작했다. 작업반 위원은 다음과 같다.

C. Streffer(위원장)	G. Dietze	K. Eckerman
J. Harrison	H. Menzel	J. Stather

교신위원은 다음과 같다.

W. Albert	M. Balonov	V. Berkovski
A. Bouville	A. Edwards	J. Lipsztein
M. Pelliccioni	A. Phipps	A. Pradhan

이 부록을 준비하는 기간 제2분과위원회 위원은 다음과 같다.

(2001-2005)

C. Streffer(위원장)	B. Boecker	A. Bouville
G. Dietze	K. Eckerman	J. Inaba
I. Likhtarev	J. Lipsztein	H. Menzel
H. Métivier	H. Paretzke	A. Pradhan
J. Stather(부위원장)	D. Taylor(서기)	Y. Zhou

(2005-2009)

C. Streffer(위원장)	M. Balonov	V. Berkovski
W. Bolch	A. Bouville	G. Dietze
K. Eckerman	J. Harrison(서기)	N. Ishigure
P. Jacob(2006부터)	J. Lipsztein	H. Menzel(위원장,2007)
F. Paquet	H. Paretzke(2006까지)	A. Pradhan
J. Stather(부위원장)	Y. Zhou	

부록B 차례

요 약.....	291
B.1. 서론.....	295
B.1.1. 참고문헌.....	298
B.2. 보건영향.....	301
B.2.1. 확률론적 영향	301
B.2.2. 조직반응.....	303
B.2.3. 참고문헌.....	305
B.3. 방사선방호에 사용되는 양.....	307
B.3.1. 플루언스와 커마.....	308
B.3.2. 흡수선량.....	309
B.3.3. 흡수선량 평균화.....	311
B.3.4. 등가선량과 유효선량.....	314
B.3.5. 가중치.....	320
B.3.6. 참고문헌.....	339
B.4. 실용량	345
B.4.1. 외부피폭	345
B.4.2. 내부피폭.....	351
B.4.3. 참고문헌.....	352
B.5. 선량 양의 방사선방호 실제 적용.....	355
B.5.1. 방사능 및 예탁선량.....	355
B.5.2. 기준모의체.....	358
B.5.3. 내부피폭용 예탁유효선량계수	359
B.5.4. 외부피폭용 환산계수.....	360
B.5.5. 직무피폭.....	361
B.5.6. 일반인피폭.....	365
B.5.7. 환자의 의료피폭.....	365
B.5.8 유효선량 적용.....	366

B.5.9. 집단선량	368
B.5.10. 참고문헌	370
B.6. 방사선방호에서 불확실성과 판단	373
B.6.1. 참고문헌	376

요 약

(Ba) 선량계측량은 사람과 기타 생물에 대한 방사선피폭을 정량적인 방법으로 평가하는 데 필요하다. 이는 방사선방호에서 위험평가 근거를 제공하는 방사선 영향의 선량-반응 관계를 설명하기 위해 필수적이다.

(Bb) 흡수선량 D 는 방사선방호를 위한 기본 물리량이다. 이는 조직 체적에 부여된 에너지 분포의 평균으로 정의된다. 흡수선량은 물질의 어느 지점에서든 잘 정의되며 측정 가능하다. 방사선방호에서 중요한 낮은 선량 영역에서 특히 높은 LET 방사선 피폭의 경우 에너지부여 분포는 불균질하다. 실제 적용에서는 장기나 조직 체적 전체에 걸쳐 흡수선량을 평균한다. 장기나 조직 내 흡수선량 평균값이 낮은 선량 영역에서 확률론적 영향의 방사선 위해와 상관된다고 가정한다. 인체조직과 장기 내 흡수선량 평균과 그들의 가중합이 방호량 정의의 기초가 된다. 심하게 불균질한(예를 들어 삼중수소나 오제전자 방사체가 붙은 DNA 전구체) 선량분포는 특별 취급이 필요하다.

(Bc) 방호량 정의는 종류 R 인 방사선으로 인한 장기나 조직 T 내에서 평균 흡수선량, $D_{T,R}$ 에 근거한다. 방호량인 등가선량 H_T 는 아래와 같이 정의된다.

$$H_T = \sum_R w_R D_{T,R}$$

여기서 w_R 은 방사선 R 의 방사선가중치이다. w_R 값은 낮은 선량에서 여러 종류 방사선의 생물학적효과비(RBE)에 대한 실험적 데이터 및 생물물리학적 고려와 판단에 기초를 둔다. ICRP 60(ICRP 1991b)에서 w_R 값을 설정한 바 있는데 이들 값의 일반적 개념은 변화 없이 유지되지만 그 값에는 일부 수정을 권고한다. 즉, 양성자 w_R 값은 반으로 감소되었고, 중성자에 대해서는 연속함수를 사용하는데 10 keV 미만과 1 GeV 이상 에너지에서 w_R 값이 2.5로 감소되었다. 유효선량의 원론적 정의는 다음처럼 ICRP 60(ICRP 1991b)과 다름없이 유지된다.

$$E = \sum_T w_T H_T$$

그러나 일부 조직가중치 w_T 는 암 유발에 대한 새로운 역학적인 데이터에 기초하여 변경되었다(부록A 참조).

(Bd) w_T 값은 연령과 성별에 대한 평균이다. 따라서 E 는 개인에 대해 계산되

지 않고 기준인에 대해 계산된다. ICRP는 기준남성과 기준여성에 대해 성별 고유 전산용 모의체를 새로 정의하였다.¹⁾ 이러한 모의체 모델들이 외부 피폭에 대한 선량환산계수 및 내부피폭에 대한 선량계수의 계산에 사용될 것이다. 성별 고유의 새로운 전산용 모델은 남성과 여성 장기선량을 따로 계산할 수 있게 하며 그 결과로부터 평균 장기등가선량이 계산된다. 다시 이들은 E 계산에 사용된다. 몇몇 연령대 아동과 태아에 대한 전산용 모의체들도 규정될 것이다. 낮은 선량 영역(<100 mSv)에서 확률론적 방사선영향에 대한 문턱 없는 선형 선량 반응(LNT모델)을 가정함에 따라 E 는 더하기 가능한 양이 된다. 높은 방사선량에서 조직반응(결정론적영향)이 발생할 때는, 위험평가를 위해 장기 및 조직에서 흡수 선량을 사용해야 한다. 높은 LET 방사선 피폭에 대해서는 결정론적 영향과 관련되는 적합한 RBE값이 사용되어야 한다.

(Be) 신체 관련 방호량(등가선량과 유효선량)은 그들을 직접 측정할 수 없으므로 방사선감시에 직접 적용할 수는 없다. E 와 H_T 평가를 대신하기 위해 실용량을 측정한다. 외부피폭에 대해서는 공간과 개인 감시를 위해 실용 선량당량 양이 정의된다. 자유공기 중에서는 공간 감시기로 측정을 수행하는 것이 선호되며, 개인선량계는 신체에 패용한다. 이러한 검출기가 보는 방사선장은 다르므로 다양한 실용량이 정의된다. 공간 감시 실용량은 ICRU구체 내 10 mm와 0.07 mm 깊이에서 선량당량을, 개인감시 실용량은 인체에 준하는 물체 위에 있고 연조직 10 mm 또는 0.07 mm로 덮힌 선량계의 선량당량을 권고하고 있다.²⁾ E 와 장기선량은 외부피폭에 대한 선량환산계수에 의해 계산된다. 내부피폭으로부터 선량평가에 대해서는 신체 내 방사성핵종의 거동을 설명하는 생물역동학모델을 사용하는 직접(즉, 전신 방사능 측정) 또는 간접(즉, 배설물 방사능 측정) 측정을 근거로 방사성핵종 섭취와 그 결과로 발생하는 등가선량과 유효선량을 계산한다.

(Bf) 종사자와 일반인에 대한 방사선방호에서 선량은 주로 계획피폭상황에서 전망적 선량평가, 최적화 및 선량한도 준수 확인을 위한 소급적 선량평가 용도로 필요하다. 1년 동안 방사성핵종 섭취는 예탁유효선량을 결정한다. 성인에 대해서는 예탁기간 50년을 고려하고 어린이에 대해서는 70세까지를 고려한다. 종사자와 공중 구성원의 연간 유효선량은 외부피폭으로부터 1년 동안 받는 유효선량과

1) <역주> 기준 성인남성 모의체는 Rex(왕), 기준 성인여성 모의체는 Regina(왕비)라는 이름으로 개발되어 있다. 이들 전산용 모델은 소위 체적소형 모의체voxel phantom로서 실제 인체의 의료 영상을 바탕으로 제작되어 과거에 사용하던 MIRd형 모의체보다 크게 정교해졌다.
 2) <역주> 원문의 표현에 오해의 소지가 있어 수정했다. 상세 내용은 이 부록 본문을 참조하기 바란다. 수정체 선량을 위한 $H^+(3)$ 과 $Hp(3)$ 이 정의되어 있으나 실제에서는 수정체 깊이 3 mm 대신 0.07 mm를 사용할 수 있다.

같은 기간 방사성핵종 섭취로 인한 예탁유효선량의 합이다.

(Bg) 작업장에서 외부피폭에 의한 유효선량은 일반적으로 균일한 전신피폭을 가정하는 합당한 평가로서 개인선량당량 $H_p(10)$ 을 측정하여 책정한다. 방사성핵종 섭취로 인한 예탁유효선량은 방사성물질의 취식과 흡입을 고려하여 평가된다. 일반인피폭은 천연 방사선원과 인공 시설로부터 발생할 수 있다. 주로 환경측정과 습관데이터 및 모델링에 의해 선량을 구한다. 환자 의료피폭에 대한 E 사용은 중요한 제약을 받는데 종종 장기나 신체의 일부분이 피폭하고, 환자 연령분포가 일반인 연령분포와 다르기도 하고, 또 고려할 다른 인자들도 있다.

(Bh) E 의 주된 용도 하나는 선량한도 준수를 입증하는 것이다. 이러한 관점에서 E 는 낮은 선량에서 확률론적 영향의 발생을 제한하고 규제하는 역할을 하며 세계적으로 규제목적으로 사용되고 있다. E 는 기준인에 대한 기준값들을 바탕으로 계산된다. 가중치들은 광범한 실험과 역학 데이터로부터 판단에 의해 선정되고 남녀 모든 연령의 인구에 적용된다. 소급적 선량 특히 개별 경우에 대한 위험 평가에는 성별, 연령과 같은 개인 변수 및 장기선량을 고려할 필요가 있다. E 는 역학연구에 사용되지 않는다. 결정론적 영향이 발생할 수 있는 사고의 경우 장기와 조직에 대한 흡수선량과 흡수선량률 평가가 필수적이다. 다음으로 문턱선량 고려가 중요하고 높은 LET 방사선 피폭에서는 적합한 RBE값을 선정해야 한다.

(Bi) 집단유효선량은 최적화에서 특히 직무피폭에 대해 중요하고 유용한 도구로서 유지된다. 과거에 종종 폭넓은 선량과 장기간 및 광범한 지리적 영역에 걸친 방사선피폭의 합으로서 집단유효선량을 계산했었다. 나아가 이에 근거해 방사선 관련 위해까지 계산하기도 했다. 높거나 중간 방사선량으로부터 매우 낮은 선량까지 외삽 절차와 선량평가에 관련된 큰 불확실성이 있기 때문에 이러한 계산은 의미가 부족하다. 장기간에 걸친 낮은 개인선량의 합산을 피하기 위해서 제약 조건을 설정해야 한다. 피폭자 수, 피폭자 연령 및 성별, 피폭선량 범위, 선량의 시간적 분포 및 피폭자의 지리적 분포 등과 같은 특징이 고려될 수 있다

(Bj) 방사선방호에서 선량평가를 위해서는 다양한 모델과 변수 값이 필요하다. 모델과 변수 값의 '최선평가치'를 실험적 조사와 사람연구로부터 도출해 왔다. 어떤 경우에는 이들 값에 큰 불확실성이 있을 수 있음을 알고 있다. 이러한 불확실성 외에 여러 변수에서 생물학적 다양성이 크기 때문에 폭넓은 값으로부터 기준값을 선택해야 한다. 이러한 기준값과 모델들은 협정적으로 고정되고 따라서 불확도가 없는 점 값이다. 이들을 주기적으로 재평가하고 새로운 과학적 데이터가

가용할 때에는 갱신한다. 이러한 기준 체계는 규제 과정에서 주로 전망적 선량평가를 위해 개발되었다. 선량평가와 특히 선량한도를 넘는 선량 영역에서 위험평가, 그리고 개별적 경우에는 모델과 변수 값의 불확실성이 고려되어야 할 것이다.

B.1. 서론

(B1) 방사선방호의 원칙과 체계를 수립할 때, 선량계측량은 사람과 기타 생물의 방사선피폭을 정량적인 방법으로 평가하기 위해 필요하다. 또한 피폭한 사람 집단이나 실험동물에 대한 방사선량 정량화는 방사선 영향의 선량-반응 관계 개발에도 중요하다. 선량-반응 관계는 데이터가 가용한 범위보다 넓은 범위, 특히 방사선방호에 중요한 낮은 선량 범위에서도 사용될 수 있다.

(B2) 전리방사선에 의한 보건영향 발생은 생물학적 조직에서 이루어지는 에너지 흡수의 물리적 과정에서 시작해 전리를 일으키고, 결과적으로 예를 들어 때로는 세포핵의 DNA인 세포 유전정보에 분자 변화를 때로 발생시킨다. 이러한 손상은 인체 장기와 조직에 방사선손상으로서 표출되며 이어서 단기 및 장기 보건영향이 발생할 수 있다. 높은 선량에서 장기와 조직에 대한 급성 손상은 주로 세포사멸에 관련된 기능손실의 결과로 발생하며, 극단적인 경우 피폭자의 사망을 초래할 수 있다. 이러한 유형의 손상을 **결정론적 영향**(ICRP 60, ICRP 1991b) 또는 **조직반응**(부록A, A56항)이라고 하는데, 과거 ICRP 26(ICRP 1977)에서는 **비확률론적** 영향이라고 불렀다. 낮은 선량, 낮은 선량률에서는 이러한 조직반응이 나타나지 않지만, 유전 물질이 손상되어 몇 년 후 암 위험이 증가하거나 후손에 유전질환 위험이 증가할 수 있다. 영향의 심각도가 아니라 영향의 확률이 선량에 따라 증가하는 것으로 가정하여 이러한 손상은 **확률론적** stochastic이라고 계속 부른다.

(B3) 부록A에 설명한 것처럼 세포, 장기 및 조직과의 다른 상호작용(예를 들어 세포막 손상) 또한 방사선피폭에 대한 신체의 반응을 이해함에 중요할 수 있다. 그러나 관찰된 조직 영향의 관점에서 다른 반응들의 의미에 대한 정보는 지금으로서는 명확하지 않으며, 따라서 현재 그러한 영향을 방호목적을 위한 선량과 위험 평가에 고려할 수 없다고 결론을 내렸다.

(B4) 방사선방호는 조직반응을 방지하고 확률론적영향의 위험을 합당한 수준으로 제한할 수 있도록 전리방사선 피폭을 제어하는 일에 관련된다. 방사선피폭에서 발생하는 선량을 평가하기 위해 ICRP와 국제방사선단위측정위원회(ICRU)가 **선량계측량**을 개발했다. ICRP가 채택한 기초적인 **방호량**은 인체 장기와 조직에 부여되는 에너지당에 기초한다. 이러한 양을 사용하면 외부 방사선원 및 방사

성핵종 섭취에 따른 전신 및 신체 일부 피폭에서 오는 전리방사선 피폭 정도를 정량화할 수 있다. 그러면 평가된 선량을 직부로 피폭하는 사람과 일반인에 대해 권고된 선량한도와 비교할 수 있다.

(B5) ICRP는 이러한 정량화 요강을 ICRP 26(ICRP 1977)에 최초로 채택했다. 그 양들은 ICRP 60(ICRP 1991b)의 1990년도 권고에서 수정되었으며, 2007년 권고에서 한층 발전되었다.

(B6) 선량한도 준수를 입증하기 위해서는 전신 또는 부분으로 피폭한 ‘크기’를 나타내는 단일 방호량이 유용하다. 이 방호량은 신체에 입사하는 방사선이거나 체내에 있는 방사성핵종이 내는 방사선이거나 관계없이 모든 종류의 방사선에 대해 영향의 확률과 정량적으로 연계됨이 필요하다. 다른 선질의 방사선에 대해 장기와 조직의 반응이 다르며, 신체 장기와 조직의 방사선 민감성도 서로 다르기 때문에 그러한 이상을 달성하는 것이 복잡해진다. 이러한 효과는 일반적으로 집단의 모든 구성원의 방사선 반응에 유사한 방식으로 영향을 미친다. 따라서 ICRP 26(ICRP 1977)에 권고된 방호량에서는 선질계수와 조직가중치를 통해, ICRP 60(ICRP 1991b)에 권고된 방호량에서는 방사선가중치와 조직가중치를 통해 이러한 효과를 반영했다. 성별, 연령 및 개인 민감성이 포함되는 개인적 인자 또한 위험에 영향을 미치지만, 집단의 모든 구성원에 적용되는 방호량 정의에는 그러한 생물학적 영향을 반영하지 않는다.

(B7) ICRP 26(ICRP 1977)에는 선량당량이라는 양을 사용해 상이한 방사선질을 고려했다. 선량당량 H 는 다음과 같이 정의되었다.

$$H = DQN \quad (B.1.1)$$

여기서 D 는 특정 조직 내 한 지점에서 흡수선량이며, Q 는 그 지정된 위치에서 해당 방사선의 선질계수³⁾이다. 방사선량으로 인한 위험을 수정할 수 있는 다른 인자들을 포괄하기 위해 N 이 포함되었다. 그러나 ICRP 26에 그러한 수정인자가 명시되지 않아 이후 H 정의는 다음과 같이 변경되었다(ICRP 1991, ICRU 1993b 참조).

$$H = DQ. \quad (B.1.2)$$

(B8) ICRP는 Jacobi(1976)가 제안한 방호량인 유효선량당량^{effective dose equivalent}을 ICRP 26(ICRP 1977)에서 처음 도입했다. 이 유효선량당량은 낮은

3) <역주> 선질계수^{quality factor}는 번역의 일관성을 고려하면 선질인자로 적는 것이 적절하나 오래 전부터 선질계수라는 용어로 굳어왔으므로 그대로 사용한다.

선량에서 피폭제한 및 위험관리에 사용하기 위한 것이었으며, 주로 직무피폭에 사용하기 위해 개발되었지만 더 널리 공중 구성원에게도 사용되어 왔다. ICRP 60(ICRP 1991b)에서 ICRP는 **유효선량**이라는 양으로 이 개념을 개정하였다. 배경 원칙은 **흡수선량**을 기초 물리량으로 사용하고, 특정 장기와 조직에 대해 흡수선량을 평균한 다음 다양한 방사선의 생물학적 영향력 차이와 확률론적 보건영향에 대한 장기와 조직의 방사선 민감성 차이를 고려하기 위해 적절히 선택한 가중치를 적용하는 것이었다.

(B9) 유효선량당량과 후속 유효선량을 개발함으로써 외부 방사선이나 방사성 핵종 섭취에 의한 전신 또는 신체 일부 피폭의 선량을 합산할 수 있게 되어 방사선방호가 상당히 발전할 수 있었다.

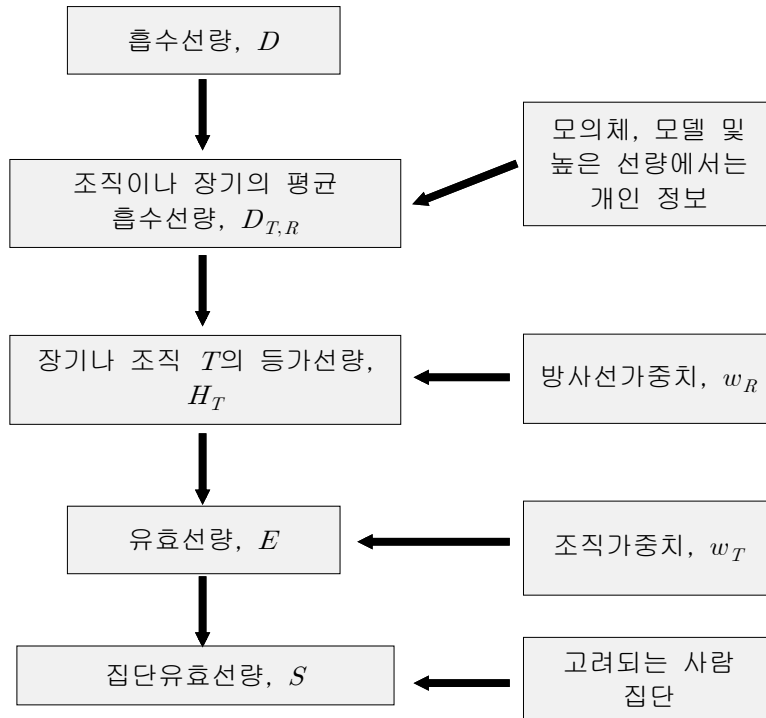
(B10) ICRP 60(ICRP 1991b)에서 정의한 유효선량은 세계의 많은 국가에서 법령과 규정에 포함되어 적용되고 있다. 유효선량은 직무피폭 및 일반인피폭에 관련된 방사선위험 관리와 제한을 위한 실용적 접근을 제공하는 것으로 밝혀졌다. 유효선량의 일반적 채택과 그 실용성 입증은 방사선방호에서 중심 양으로 유효선량을 유지하는 중요한 이유이다.

(B11) 유효선량을 신체에서 직접 측정할 수는 없다. 따라서 방호체계는 측정 가능하며(그림 B.1), 유효선량을 평가하는 데 사용될 수 있는 **실용량**operational quantities을 포함한다. ICRU가 외부 방사선에 의한 피폭을 위한 선량 실용량을 개발했으며, ICRP와 ICRU의 합동 작업그룹이 이 값을 평가했다(ICRP 74, ICRP 1996b). ICRP 74의 분석 결과에 따르면 ICRU가 권고한 선량 실용량은 “방호량을 적절히 나타낼 수 있는 측정 가능한 양”을 제공한다는 목표를 무난히 달성하고 있다. 방사성핵종 섭취에 따른 내부피폭의 경우 ICRP가 개발한 선량계수와 조합한 방사능 양이 유효선량 평가에 사용된다.⁴⁾

(B12) ICRP 60(ICRP 1991b)에 주어진 선량계측 시스템에는 언급하고 명확히 해야 할 몇몇 측면이 있다. 이 부록에서는 방사선방호 목적을 위해 ICRP가 개발한 선량계측량을 고려하며, 현행 권고에서 채택한 ICRP 선량계측 시스템에 관한 상세한 설명을 제공한다. 제B.2절에는 전리방사선 피폭으로 인한 보건영향을 간략히 설명하고, 방호표준 설정과 적용에 있어 보건영향의 위치를 기술한다. 조직

4) <역주> 원문은 “실용량으로 사용된다.”고 표현하고 있으나 정확한 표현이 아니다. 측정량을 정의하는 권한은 ICRU 소관인데 아직 ICRU는 내부피폭에 대한 실용량을 정의한 바 없다.

가중치 w_T 의 개발을 위한 토대가 부록A에 자세히 설명되어 있지만 여기에서도 요약 설명된다. 선량계측량의 개발과 현행 권고에 채택된 측정량이 제B.3절에 설명되어 있다. 또한 조직가중치와 방사선가중치를 검토하는데 방사선가중치에 더 집중한다. 제B.4절에는 ICRU와 연계해 개발한 실용량이 설명된다. 방사선방호에서 이러한 선량계측량을 실질적으로 적용하는 방법 및 유효선량 사용이 적합하거나 적합하지 않은 상황에 관한 설명이 제B.5절에 수록된다. 마지막으로, 제B.6절에는 이러한 양들의 사용에서 고려해야 하는 불확실성과 판단을 검토한다.



그림B.1. 방사선방호를 위한 선량 양 체계.

B.1.1. 참고문헌(B.1절)

ICRP, 1977. Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 26. Ann. ICRP 1(3).

ICRP, 1991b. 1990 Recommendations of the ICRP. ICRP Publication 60.

Ann. ICRP 21(1-3).

ICRP, 1996b. Conversion coefficients for use in radiological protection against external radiation. ICRP Publication 74. Ann. ICRP 26(3/4).

ICRU, 1993b. Quantities and units in radiation protection dosimetry. ICRU Report 51. ICRU Publications: Bethesda, MD.

Jacobi, W., 1975. The concept of effective dose ?A proposal for the combination of organ doses. Radiat. Environ. Biophys. 12, 101-109.

B.2. 보건영향

(B13) 낮은 선량 영역에서 방사선방호는 일차적으로 방사선 유발 암과 유전질환으로부터 방호하는 것이다. 이러한 질환은 성격상 확률적이므로 확률론적영향이라고 한다. 어떤 피폭도 문턱 없이 이 영향을 발생시킬 수 있다고 가정한다(부록A). 따라서 그러한 영향을 방지할 수는 없으며, 발생을 제한하여 용인되지 않는 수준의 위험을 방지할 수 있도록 선량한도를 설정한다. 전술한 것처럼 ICRP는 위에 언급한 가중치를 사용해 외부피폭과 내부피폭을 공통적인 기반으로 평가할 수 있도록 유효선량이라는 양을 개발했다.

(B14) 주로 사고상황과 관련해 약 0.5-1 Gy(LET가 낮은 방사선에 대한) 이상의 흡수선량을 주는 피폭에서 그러한 보건영향에 대한 문턱선량(부록A)을 초과할 경우 조직반응이 발생할 것이다. 이러한 문턱은 선량률과 방사선질에 따라 다르며 영향의 심각도와 정도는 선량과 선량률 증가에 따라 증가한다. 조직반응은 확률론적 영향과는 별도로 고려되어야 하며, 유효선량과 그 변수인 w_R 및 w_T 체계에서 조직반응을 다룰 수는 없다.

B.2.1. 확률론적 영향

(B15) 전리방사선 피폭은 낮은 선량에서도 세포의 핵(유전) 물질을 손상시킬 수 있으며, 그에 따라 오랜 세월 후 방사선 유발 암과 후손에 유전질환, 그리고 특정 조건에서는 어떤 발생학적 영향을 유발할 수 있다(ICRP 2003a). 낮은 LET 방사선에 의해 유발되는 암은 약 100 mGy 이상의 선량영역에서 확실히 입증되었으며, ‘방사선 발암과정에서 DNA 복구 및 세포/분자 공정에 관한 연구 결과, 일반적으로 종양 유발에 낮은 선량문턱이 있을 것으로 가정할 근거가 없다’는 것이 UNSCEAR의 결론이었다(UNSCEAR 2000). 방사선 유발 유전질환은 사람집단에서는 입증되지 않았지만, 동물연구에서는 배 세포(난자와 정자 및 그 전구 세포)의 유전적 손상에 관한 많은 증거가 있다. 방사선 유발 암과 유전질환에서는 선량에 의존하는 것이 영향의 발생확률이며 심각도가 아니다. 방사선방호를 위한 일반적 가정은 이러한 확률론적영향의 위험이 낮은 선량 영역에서 문턱 없이 선형적으로 선량에 비례해 증가한다(LNT)는 것이다.

(B16) 부록A에 인체의 장기와 조직에 있어 방사선 유발 암 위험 및 유전질환 위험과 그 선량 반응 관계에 대한 정보가 상세히 주어졌다. 암 유발에 대한 민감

도는 인체의 장기와 조직마다 상당히 다름에 주목할 필요가 있다. 예를 들어 아동의 갑상선, 여성의 유방, 그리고 골수는 고형암과 백혈병 유발에 높은 민감성을 나타내지만, 근육과 결합조직의 민감성은 상대적으로 낮다.

(B17) 또한 부록A는 방사선피폭 후 발생할 수 있는 다른 영향⁵⁾에 관한 정보도 주고 있다. 여기에는 순환계 혈관조직의 손상도 포함된다. 그러나 현재 약 0.5에서 1 Gy 미만의 선량 영역에서 선량-반응 관계를 결정하거나 선량한도 설정을 위한 근거로 그것들을 사용할 정도로 충분한 데이터는 없다.

(B18) ICRP 26(ICRP, 1977) 권고의 핵심 입장은 여러 종류 방사선에 대한 민감성이 바르게 고려된다면 외부 방사선 조사나 방사성핵종 섭취로부터 인체가 균일하게 또는 불균질하게 피폭하는 피폭 방식에 관계없이 ICRP 선량한도에 상당하는 피폭에서 확률론적 영향의 전체 위험은 거의 같다는 것이다. 이러한 원칙을 채택함에 따라 방사선방호에 사용하기 위한 유효선량당량 정의에 두 종류 가중치가 포함되었다.

(B19) ICRP 6(ICRP 1964)에서 처음 사용한 선질계수를 채택하면 다양한 방사선의 생물학적 영향을 발생시키는 상대적 효력을 고려할 수 있는데, 이 선질계수는 방사선의 생물학적효과비(RBE)를 대표하는 인자로 간주될 수 있다. 시험관 세포연구와 동물연구에서 RBE를 실험적으로 측정된 결과를 보면 중성자와 알파 입자를 포함한 높은 LET 방사선은 낮은 LET 방사선보다 흡수선량 단위 당 손상을 더 많이 발생시킨다. 가중치 w_T (이후 ICRP 60에서 조직가중치라고 부름)은 확률론적 영향 유발에 대한 조직의 방사선 민감성 차이를 고려한다.

(B20) ICRP 26(ICRP 1977)에서 ICRP가 권고한 w_T 값(표B.1)은 치명적 암 위험과 첫 두 세대의 심각한 유전질환에 기초한 것이다. ICRP 60(ICRP 1991b)에서는 조직의 확률론적 방사선 영향에 대한 보다 풍부한 정보와 방사선 위해에 관한 보다 광범한 개념을 바탕으로 하는 조직가중치를 사용해 이 개념을 한층 발전시켰다. 방사선 유발 치명적 암과 모든 미래 세대에서 유전질환의 위험을 평가하는 것에 추가하여, 총 방사선 위해에서 질환의 심각도와 수명손실 연수도 고려했다. 이 방사선위해는 ICRP 60에서 조직가중치 w_T 값을 개정하는 기초를 제공했다. 또한 방호량 정의에서 방사선가중치 w_R 가 선질계수 Q를 대체했다. 방호

5) <역주> 원문은 확률론적 영향으로 적고 있으나 순환계 혈관조직과 같은 영향은 아직 확률론적이라는 입증이 없어 수정했다.

목적에 위해서는 낮은 선량 영역에서 가중치가 선량이나 선량률과는 관계가 없다고 가정했다. w_R 값은 피폭하는 장기나 조직에 관계없는 것으로 했고, w_T 값은 방사선 종류와 에너지에 관계없는 것으로 했다.

(B21) 2007년 권고에서 ICRP는 조직가중치 개념을 한층 발전시켰는데, 대체로 방사선 유발 암으로 인한 사망률이 아닌 발생을, 그리고 첫 두 세대의 유전질환 위험을 기초로 w_T 값을 결정했다(부록A). 이것이 방사선위해 평가에 대해 보다 적합한 기초를 제공하는 것으로 생각된다. 마찬가지로 암 위험은 심각도와 수명손실 연수로 조정했다. 2007년 권고에 주어진 조직가중치는 표B.2에 수록되어 있으며 제B.3.5절 (B132)–(B145)항에서 자세히 설명된다.

B.2.2. 조직반응(결정론적 영향)

(B22) 방호체계에서 권고되는 선량한도보다 훨씬 높은 선량, 특히 사고 상황에서 방사선피폭의 경우 **결정론적 영향**(조직반응)이 발생할 수 있다. 이러한 영향은 장기나 조직의 건전성이나 기능이 손상됨으로써 발생한다. 손상 정도는 흡수선량, 선량률 및 방사선질에 따라 결정되지만, 문턱선량을 초과하면 임상적으로 관찰되는 손상이 발생한다. 상해의 표출은 세포의 방사선 민감성, 분화세포의 기능, 세포 구성과 세포 재생능력에 따라 조직이나 장기마다 서로 다르다. 세포 증식능력 손실, 섬유화 진행 및 세포사멸이 대부분 조직반응의 병인에 중요한 역할을 한다. 조기 조직반응에서 가장 민감한 조직은 조혈조직, 위장관 내벽세포, 피부 기저세포층 및 남성 배(胚) 세포와 같이 빈번히 증식하는 세포체계 조직이다. 지발성 조직반응도 부분적으로는 모든 장기나 조직, 눈 수정체의 기능에 필수적인 혈관이나 결합조직의 손상에 의해 영향을 받는다. 이러한 손상은 방사선 피폭 후 몇 달 또는 몇 년 후에도 나타날 수 있다.

(B23) 중성자와 알파입자와 같은 높은 LET 방사선은 낮은 LET 방사선보다 흡수선량 단위 당 더 많은 손상을 발생시킨다. 조직반응에 대한 RBE값은 ICRP 58(ICRP 1989b)에 수록되어 있다. 일반적으로 조직반응에 대한 RBE값은 낮은 선량에서 확률론적 영향의 RBE보다는 작으며, 설정하는 조직 손상에 따라 다르게 나타난다.

(B24) 높은 LET 방사선의 방사선가중치 w_R 은 낮은 선량에서 확률론적 영향으로부터 도출된다. 광자 피폭과 비교할 때, 이 w_R 값을 높은 선량 피폭과 손상

표B.1. ICRP 26(1977)과 ICRP 60(1991b)에서 조직가중치에 대한 ICRP 권고

조직	조직가중치, w_T	
	1977 ICRP 26	1991 ICRP 60 ^{2,3)}
뼈표면	0.03	0.01
방광		0.05
유방	0.15	0.05
결장		0.12
생식선 간	0.25	0.20
폐	0.12	0.05
식도		0.12
적색골수	0.12	0.05
피부		0.12
위	0.03	0.01
갑상선		0.12
잔여조직	0.30 ¹⁾	0.05
합계	1.0	1.0

- 1) 가장 높게 조사된 5개 기타 조직이 잔여조직에 포함되며 각각 $w_T = 0.06$ 이 부여된다.
- 2) 가중치 값은 광범한 연령의 양성 동수 참조집단으로부터 도출되었다. 유효선량 정의에서 이들 값은 종사자, 전체 집단 및 각 성별에 모두 적용된다.
- 3) ICRP 60 페이지 68, 표5.2의 각주 참조.

평가에 적용할 경우 조직반응 발생과 심각도를 과대평가할 수 있다. 따라서 조직 반응 잠재성 판단을 위해 방사선피폭을 평가할 때는 장기나 조직의 평균 흡수선량에 관심 대상 생물학적 종점에 적합한 RBE값을 가중해 사용해야 한다. 이러한 RBE값은 생물학적 종점에 따라, 그리고 조직이나 장기마다 다를 수 있다. 적합한 RBE값에 대한 지침은 ICRP 58(ICRP 1989b), NCRP 보고서 104(1990) 및 ICRP 92(ICRP 2003b)에서 얻을 수 있다.

(B25) 따라서 특별명칭이 시버트(Sv)인 단위로 쓰이는 양인 등가선량과 유효

선량은 조직반응이 유발되는 상황에서 방사선량 계량이나 치료 필요성 판단에 사용하면 안 된다. 일반적으로 이러한 경우 선량은 그레이(Gy) 단위의 흡수선량으로 표현해야 하며, 높은 LET 방사선(예를 들어 중성자나 알파입자)이 관련되었다면 해당 RBE를 가중한 선량인 RBE·D(Gy)를 사용해야 한다. 그러나 해당 RBE값은 관련 입자의 종류와 에너지는 물론 그 구체적 상황의 선량과 선량률, 그리고 조직과 장기에 따라 달라진다. 이러한 경우 적용한 RBE값을 분명하게 명시하는 것이 필요하다.

표B.2. 2007년 권고의 조직가중치 w_T

장기/조직	조직 수	w_T	총 기여도
폐, 위, 결장, 골수, 유방, 잔여조직*	6	0.12	0.72
생식선	1	0.08	0.08
갑상선, 식도, 방광, 간	4	0.04	0.16
뼈표면, 피부, 뇌, 침샘	4	0.01	0.04

1) 생식선 w_T 는 고환과 난소의 평균선량에 적용된다.

2) 결장에 대한 선량은 ICRP 60의 공식처럼 ULI 및 LLI 선량의 질량가중평균으로 구한다.

* 특정 잔여조직(모두 14개, 각 성별로 13개)은 다음과 같다: 신장, 흉외기도(ET), 담낭, 심장, 신장, 림프절, 근육, 구강점막, 이자, 전립선(♂), 소장(SI), 비장, 흉선, 자궁/자궁경부(♀).

B.2.3. 참고문헌 (B.2절)

ICRP, 1964. Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 6. Pergamon Press, Oxford, UK.

ICRP, 1977. Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 26. Ann. ICRP 1(3).

ICRP, 1989b. RBE for deterministic effects. ICRP Publication 58. Ann. ICRP 20(4).

ICRP, 1991b. 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 60. Ann. ICRP 21(1-3).

ICRP, 2003a. Biological effects after prenatal irradiation (embryo and fetus). ICRP Publication 90. Ann. ICRP 33(1/2).

ICRP, 2003c. Relative biological effectiveness (RBE), quality factor(Q), and

radiation weighting factor(w_R). ICRP Publication 92. Ann. ICRP 33(4).

NCRP, 1990. The Relative Biological Effectiveness of Radiations of Different Quality. NCRP Report No.104. National Council on Radiation Protection and Measurements, Bethesda, MD.

Streffer, C., Bolt, H., Follesdal, D., et al., 2004. Low Dose Exposures in the Environment–Dose–Effect Relations and Risk Evaluation. Springer, Berlin.

UNSCEAR, 2000. Sources and Effects of Ionizing Radiation. Report of the United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Volume II: Effects. United Nations, New York.

B.3. 방사선방호에 사용되는 양

(B26) 방사선방호의 주된 목표는 전리방사선에 의한 외부, 내부 피폭으로 발생하는 해로움으로부터 사람과 환경을 보호하는 것이다. 이를 위해 인체의 외부 및 내부 방사선장에 대한 정량적 표현이 필요하다. 다른 생명체 방호에도 유사한 고려가 적용되지만 이에 대해서는 이 부록에서 더 다루지는 않는다.

(B27) 인체 외부의 방사선장은 공기 중 입자 플루언스나 공기커마와 같은 물리량으로 잘 설명할 수 있지만, 방사성핵종 섭취 후 체내 방사선장은 인체의 생물역동학적, 해부학적, 생리학적 변수에 의존한다.

(B28) 플루언스는 외부 방사선장을 설명하는 데 사용하는 양이지만 방사선방호와 한도의 정의에 일반적으로 사용하기에는 실용적이지 않다. 플루언스에는 항상 입자와 입자 에너지 및 방향 분포에 관한 추가적 사양이 필요하다. 플루언스와 위해의 상관관계는 복잡하다.

(B29) 서론에서 언급한 것처럼 방사선방호 실제에서 전리방사선 종류와 상관없이, 방사선이 인체에 입사한 것인지 체내의 방사성핵종이 낸 것인지와 관계없이 모든 종류의 방사선에 대해 인체에서 확률론적 영향의 확률과 정량적으로 연계되는 피폭 “크기”를 나타내기 위한 단일 양이 개발되었다. 이 양은 판단에 근거한 변수 값에 근거를 두는 실용적 방호량이라는 점을 강조할 필요가 있다.

(B30) 전리방사선과 생물학적 물질 사이 상호작용의 첫 단계는 에너지 전달이며, 그에 따라 전리가 일어난다. 방사선방호에서 주어진 피폭에 따른 위험을 평가하기 위해 방사선피폭을 정량화하는 유일한 양으로 단위 질량 당 흡수된 에너지(흡수선량)를 사용하는 것이 타당해 보인다. 그러나 방사선 영향은 흡수선량뿐 아니라 방사선 종류, 인체에 흡수되는 에너지의 시간과 공간에 따른 분포, 피폭 조직이나 장기의 방사선 민감성에 따라 결정되기 때문에 흡수선량으로는 충분하지 않다.

(B31) ICRP가 채택한 선량평가의 기본 절차는 흡수선량을 기초 물리량으로 사용하고, 특정 장기와 조직에 대해 이를 평균하며, 서로 다른 방사선의 생물학적 효력 차이와 확률론적 보건영향에 대한 장기와 조직의 민감성 차이를 고려하기 위해 적절히 선택한 가중치를 적용하는 것이다. 따라서 유효선량은 내부와 외

부 방사선장, 인체 조직의 일차적인 물리적 상호작용뿐만 아니라 확률론적 보건 영향을 유발하는 방사선 반응에 관한 판단에 근거하는 양이다.

B.3.1. 플루언스와 커마

(B32) 특정 유형의 방사선장은 입자 수 N , 그들의 에너지 및 방향 분포, 그리고 공간과 시간 분포를 사용해 충실히 설명할 수 있다. 여기에는 스칼라양과 벡터양의 정의가 필요하다. 방사선장 양의 정의는 ICRU보고서 60(1998)에 자세히 설명되어 있다. 방향 분포에 관한 정보를 제공하는 벡터양이 방사선 수송이론과 계산에 주로 적용되지만, 선량계측 용도에는 입자 플루언스나 커마와 같은 스칼라양이 자주 사용된다.

(B33) 방사선장 양은 방사선장 내 어떤 지점에서든 정의된다. 두 부류의 방사선장 양이 있는데 플루언스나 플루언스율⁶⁾과 같이 입자 수를 나타내는 양과 에너지 플루언스나 에너지 플루언스율처럼 입자에 의해 전달되는 에너지를 나타내는 양이다. 방사선장은 여러 종류의 방사선으로 구성될 수 있으나, 입자 수에 기초하는 방사선장 양은 항상 특정 종류와 관련을 짓는다. 그래서 방사선장 양에 예를 들어 중성자 플루언스와 같이 입자 이름을 붙여 표현하는 경우가 많다.

(B34) 물리량 플루언스는 작은 구(球)에 입사하거나 통과하는 입자 수를 계수하는 개념에 기초한다.

(B35) 플루언스 Φ 는 단면적 da 인 작은 구에 입사하는 입자 수 dN 을 da 로 나눈 몫이다.

$$\Phi = \frac{dN}{da} \quad (\text{B.3.1})$$

플루언스는 구로 들어가는 입자의 방향 분포와는 무관하다. 계산에서는 플루언스를 작은 체적 dV 를 통과하는 입자의 비적 길이로 달리 표현할 수도 있는데 이때는 플루언스 Φ 가 다음과 같이 계산된다.

$$\Phi = \frac{dl}{dV} \quad (\text{B.3.2})$$

여기서 dl 은 체적 dV 를 통과하는 비적 길이의 합이다.

6) <역주> 표준용어는 아니지만 플루언스율의 실용 용어로 선속밀도flux density도 사용된다.

(B36) 방사선장에서 작은 구를 횡단하는 입자 수는 무작위적으로 요동한다. 그러나 플루언스 및 관련 양은 비확률론적⁷⁾ 양으로 정의되며, 따라서 본질적 요동 없이 주어진 위치와 시간에서 단일 값을 갖는 것으로 본다. 플루언스 값은 기대치로 간주해야 한다.

(B37) 물질에서 비하전입자(예를 들어 광자나 중성자처럼 간접적으로 전리시키는 입자)의 에너지전달은 물질 내에서 2차 하전입자의 생성과 감속에 의해 이루어진다. 이로부터 **커마**kerma 양이 정의된다. 커마 K 는 비하전입자에 의해 물질 내 질량 dm 에 생성된 모든 하전입자 운동에너지의 합 dE_{tr} 을 dm 으로 나눈 몫으로서 다음과 같다.

$$K = \frac{dE_{tr}}{dm} \quad (B.3.3)$$

(B38) 커마의 SI 단위는 $J\,kg^{-1}$ 이며 그 특별 명칭⁸⁾은 그레이(Gy)이다. 커마도 비확률론적 양으로서 dE_{tr} 를 생성된 하전입자 에너지 합의 기대치로 본다.

B.3.2. 흡수선량

(B39) 방사선생물학, 임상방사선학 및 방사선방호에서 흡수선량 D 는 기본 물리적 선량 양이다. 흡수선량은 모든 종류의 전리방사선 및 조사 배열(geometry⁹⁾)에 대해 사용된다.

(B40) 흡수선량 D 는 전리방사선에 의해 질량 dm 에 부여된 평균에너지 $\bar{d\varepsilon}$ 를 dm 으로 나눈 몫으로 정의된다. 즉,

$$D = \frac{\bar{d\varepsilon}}{dm} \quad (B.3.4)$$

SI 단위는 $J\,kg^{-1}$ 이며, 그 특별 명칭은 그레이(Gy)이다. 커마 값은 질량소 dm 물질 내의 상호작용에 의해서만 결정되지만, 흡수선량 값은 질량소 dm 의 주변에서

-
- 7) <역주> 이 의미에서는 stochastic을 통계적으로 쓰는 것이 나으니 모른다. 그러나 stochastic effect를 “확률론적” 영향으로 적어 왔기 때문에 같은 어휘를 달리 번역함에 따르는 혼동을 피하기 위해 “확률론적”으로 적는다.
 - 8) <역주> “J/kg의 특별명칭을 그레이라 부른다”고 표현함은 Gy가 표준 단위로 채택된 것이 아니므로 정확성을 기하기 위한 것이다. 실제에서는 Gy를 단위인 것처럼 사용한다. 이는 흡수선량(Gy)이나 등가선량(Sv), 유효선량(Sv)에서도 마찬가지이다.
 - 9) <역주> 배열이란 방사선이 외부에서 입사하거나 체내 방사성핵종에서 나오거나 관계없이 적용할 수 있음을 의미한다.

발생하여 이 질량소로 들어오는 2차 하전입자에도 의존한다. 흡수선량은 확률론적 양인 부여 에너지 ε 의 평균값에서 도출되며, 조직 내에서 상호작용 사상의 무작위적 요동은 반영하지 않는다. 흡수선량은 물질의 어떤 점에서도 정의할 수 있지만 그 값은 dm 즉, 물질의 많은 원자나 분자에서 평균으로 구한다.

(B41) 흡수선량 정의에는 기본 물리량에 필요한 과학적 견고함이 있다. 이 정의에는 방사선장 및 특정 체적 내부와 외부에서 물질과의 모든 상호작용도 묵시적으로 고려된다. 그러나 물질의 원자 구조나 상호작용의 확률론적 성격은 고려하지 않는다. 흡수선량은 측정 가능한 양이며, 측정으로 그 값을 결정할 수 있도록 1차표준이 존재한다.

(B42) 전리방사선의 한 특성은 물체와 상호작용이 불연속적이며, 이에 따라 에너지 흡수가 확률론적 본성이 있다는 것이다. 개별 원자나 분자와 상호작용을 통해 하전입자가 조직에 에너지를 전달한다. 인체는 장기와 조직으로 구성되고 장기와 조직은 세포, 세포 하부구조, 나아가 DNA와 같은 고분자로 형성된다. 흡수선량은 체적소에 부여된 에너지의 확률론적 분포의 평균으로 정의된다. 개별 세포와 세포 하부구조에 부여되는 에너지의 요동이나 하전입자의 미시적 비적은 **미시선량계측**¹⁰⁾microdosimetry의 대상이 된다.

(B43) 크기가 다른 작은 조직 체적에 부여되는 에너지의 요동 폭은 흡수선량 값과 해당 체적의 크기에 의존한다. 주어진 선량에서도 이러한 요동은 하전입자 비적(에너지전달선밀도 LET에 의해 결정. 제B.3.5절 B73-B131항 참조) 내 전리밀도가 증가하면 같이 증가한다. 방사선방호에서 주로 관심이 큰 낮은 흡수선량에서도 부여 에너지의 통계적 요동은 개별 세포들 사이, 그리고 하나의 표적세포 안에서도 상당히 클 수 있다. 알파입자 및 중성자 상호작용에 의한 2차 하전입자와 같은 조밀 전리(높은 LET) 방사선의 경우 특히 그러하다.

(B44) 특정 흡수선량에서 예를 들어 단일 세포와 같은 소규모 조직 체적에 부여된 에너지 ε 의 실제 값은 모든 개별 사상에 의해 그 체적에 부여한 에너지의 합으로 정의된다. 어떤 체적에서 ε 의 변동은 사상 수의 변화와 각 사상에서 부여하는 에너지의 변화에 의해 유발된다. 낮은 LET 방사선(예를 들어 광자와 전자)의 경우 개별 사상(히트)에서 부여되는 에너지는 상대적으로 낮으며, 같은 크기 낮은 선량에서 높은 LET 방사선이 유발하는 것보다 더 많은 세포가 에너지 부

10) <역주> 미시선량계측이란 용어 대신에 “마이크로 선량계측”도 사용할 수 있어 보인다.

여 사상을 겪게 된다. 결과적으로 세포들 사이에 부여 에너지의 요동은 높은 LET 방사선보다는 낮은 LET 방사선에서 작다.

(B45) 높은 LET 방사선(예: 중성자 상호작용에서 나오는 하전입자나 알파입자)에 의한 낮은 평균선량의 경우 대부분 세포에서 히트 빈도는 영(0)이며, 1인 경우가 몇몇 있고, 2 이상인 경우는 거의 없다. 따라서 대부분 개별 세포에 누적된 에너지 값은 영(0)이지만, ‘히트’ 세포의 경우 조직 평균값(즉, 흡수선량)의 10배를 초과할 수도 있다. 히트 세포들 사이에서도 이러한 사상의 분포는 매우 비균질적이다. 여러 종류(에너지 포함) 방사선에 의한 미시영역 에너지 부여 분포에서 이러한 큰 차이를 방사선질이나 생물학적효력에서 관찰된 차이와 연계시킨 바 있다(Goodhead 등 1994). 자세한 정보는 UNSCEAR 1993 및 2000 보고서(UNSCEAR 1993; 2000) 등에 수록되어 있다.

(B46) 체내 방사성핵종에서 방출되는 오제전자는 그러한 방사체가 DNA 내나 근접하여 있을 때 특별한 주의를 필요로 한다. 내부전환을 통해 붕괴하는 방사성핵종은 오제전자를 다수 방출한다. 이러한 방출에 따라 매우 국부적으로 에너지 부여가 발생할 수 있으며, 따라서 생물학적영향이 높은 LET 방사선 영향과 유사할 수 있다. 이러한 현상은 ICRP 60(ICRP 1991b)에 이미 고려했다(제B.3.5절, B86–B99항 참조).

(B47) 방사선 방호량 정의에서 미시 수준에서 물리적 과정의 확률론적 분포를 명시하려는 시도는 하지 않았다. 이러한 분포함수를 명시적으로 고려하는 대신 실용적이고 경험적 접근법을 채택해 방사선질 차이를 고려했다. 방사선생물학적 실험결과에 기초한 판단을 통해 방사선가중치가 미시 영역에 부여되는 에너지 분포의 차이에 의한 영향을 고려한다. 이 내용은 제B.3.5절 B73–B131항에 자세히 설명한다.

B.3.3. 흡수선량 평균화

(B48) 위에서 설명한 것처럼 물리량 흡수선량은 물질의 어떤 지점에서든 구체적인 값을 주도록 정의된다. 그러나 실제 적용에 있어 흡수선량은 종종 큰 조직 체적에 대해 평균한다. 따라서 낮은 선량의 경우 특정 장기나 조직에 평균한 흡수선량 값을 방사선방호 목적에 충분한 정밀도로 해당 장기나 조직 전체에서 확률론적 영향으로 인한 방사선위해에 연계시킬 수 있다고 가정한다.

(B49) 하나의 장기나 조직 T 영역의 평균 흡수선량 \overline{D}_T 는 다음과 같이 정의된다.

$$\overline{D}_T = \frac{\int_T D(x,y,z)\rho(x,y,z)dV}{\int_T \rho(x,y,z)dV} \quad (\text{B.3.5})$$

여기서 V 는 조직 T 영역의 체적이고, D 는 그 영역 내 지점 (x,y,z) 에서 흡수선량이며, ρ 는 그 지점의 질량 밀도이다. 실제에서 장기나 조직 T 의 평균 흡수선량 \overline{D}_T 는 일반적으로 D_T 로 표기한다.

(B50) 인체의 여러 조직이나 장기의 흡수선량을 평균하고 이를 가중 합산함이 낮은 선량에서 확률론적 영향의 제한에 사용하는 방호량 정의의 기초이다. 이 접근법은 문턱 없는 선형 선량-반응 관계(LNT 모델)의 가정에 근거하며, 외부와 내부 피폭 선량을 합산할 수 있게 한다. 이 개념은 방사선방호 목적에 합당한 근사로 간주되며, ICRP 9(ICRP 1996)에서 처음으로 ICRP가 채택했다. 이 개념은 ICRP 26과 ICRP 60(ICRP 1997, 1991b) 권고에서 재확인되었으며, 현행 권고 부록A에서 한층 더 지지된다. 모든 방호량의 정의는 낮은 선량 영역에서 이 LNT모델의 기본적 가정에 근거한다.

(B51) 흡수선량 평균화는 특정 장기(예: 간)나 조직(예: 근육) 또는 조직의 부분(예: 뼈대의 뼈표면, 피부) 질량에 대해 수행된다. 평균 흡수선량(식B.3.5)이 장기, 조직 또는 부분 조직 부위의 흡수선량을 대표하는 범위는 여러 인자에 달려 있다. 외부 방사선 피폭의 경우 그 범위는 주로 피폭의 균질성과 인체에 입사하는 방사선의 투과력이나 비정에 의존한다. 투과성 방사선(광자, 중성자)의 경우 대부분 장기 내 흡수선량 분포는 충분히 균질할 수 있으므로 평균 흡수선량은 장기나 조직 전체 선량의 적합한 척도가 된다.

(B52) 투과력이 낮거나 비정이 한정된 방사선(예: 저에너지 광자나 하전입자)의 경우나 분산된 조직이나 장기(예: [적색]골수나 림프절)가 비균질 방사선장에 있는 경우, 특정 장기나 조직 내 흡수선량 분포는 매우 비균질할 수 있다. 극단적 국부 신체 노출의 경우, 장기나 조직의 평균선량이나 유효선량이 선량한도 미만인 경우에도 조직손상이 발생할 수 있다. 이러한 일은 예를 들어 피부가 투과력이 낮은 방사선에 피폭하는 경우 발생할 수 있다. 조직반응 예방을 위해 국부적 피부선량에 별도 한도가 적용된다(제B.5.5절 참조).

(B53) 신체 장기나 조직에 있는 방사성핵종에서 방출되는 방사선, 즉 내부 방사체의 경우 장기 내 흡수선량 분포는 방사성핵종 분포와 방출되는 방사선의 투과력 또는 비정에 따라 결정된다. 장기나 조직의 구조에 따라서도 달라진다(예를 들어 방광과 같은 격벽형 장기walled organ, 호흡기 기도, 고도로 비균질한 뼈 무기물 혼합체, 활성/비활성 골수). 알과입자, 연질 베타입자, 저에너지 광자 또는 오제전자를 내는 방사성핵종에 의한 흡수선량 분포는 매우 비균질할 수 있다.

(B54) 특히 기도에 침적되거나(예: 기관세지 점막의 라돈 붕괴산물) 위장관을 지나거나 뼈 표면에 침적되거나(예: 플루토늄 및 유관 원소) 피부에 부착된 방사성핵종의 경우 이러한 비균질성이 발생한다. 이러한 상황에서는 전체 장기나 조직에 대해 평균한 평균 흡수선량은 확률론적 손상의 확률 평가에 적합한 선량 양으로 간주되지 않는다. ICRP는 이러한 현안에 주목하여 이들 조직에 대한 평균 흡수선량의 계산에서 방사성핵종 분포와 민감한 세포의 위치를 고려하는 호흡기계통(ICRP 1994a), 위장관(ICRP 2006c) 및 뼈대(ICRP 1979)에 대한 선량 계측 모델을 개발했다. 이들 경우에 방사선 유발 암 발병에 표적으로 간주되는 일정 조직 부위에 대해 결정한 선량을 평균선량으로 취급한다.

(B55) 위에서 논의한 것처럼 에너지 부여의 비균질 분포는 낮은 선량 범위에서 평균계산 과정에서 문제가 되며, 특히 장기나 조직에 비균질하게 분포하고 비정이 짧은 입자를 방출하는 방사성핵종에서 문제가 된다. 그러나 현재로서는 미시선량계측학적 고려나 조직에서 3차원 비적 구조와 이에 관련된 에너지 부여를 고려하는 수립된 절차가 방사선방호 실제에 사용하도록 가용하지 않다. 암과 유전질환 유발의 확률론적 본질과 전리 입자의 단일 비적만으로 개시 과정에 충분할 수 있다는 가정을 고려할 때, 현재의 접근법은 정당화된 과학적 근거와 함께 방사선방호에서 실용적인 것으로 판단된다. 그러나 이러한 접근과 관련된 불확실성을 잊지는 말아야 한다.

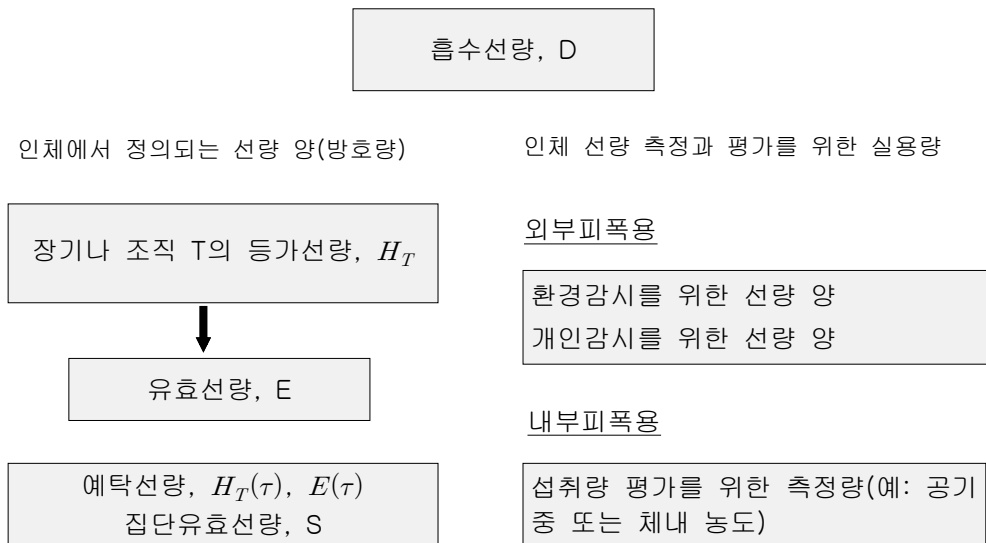
(B56) 폐나 다른 조직에 '고방사능입자hot particles'가 부착된 경우(예: 용해도가 낮고 비방사능이 높은 연무가 폐에 침적) 관련 악성질환 유발 해독이 동일한 방사능이 폐에 균질 분포할 때 발생하는 것과 유사하거나 낮다는 입장을 ICRP는 계속 유지한다(Lafuma 등 1974, ICRP 1980, Charles 등 2003).

(B57) 삼중수소가 표지된 DNA전구체(예: 티미딘thymidine, 디옥시시티딘 deoxycytidine)나 세포핵의 DNA에 함유된 오제전자 방사체로 인한 선량분포는 매우 불균질할 수 있다. 방사체의 특별한 위치와 삼중수소 베타 방사선과 오제전자

의 매우 짧은 비정 때문에 세포나 장기 또는 조직에 대한 평균선량보다 훨씬 높은 선량을 세포핵이 피폭할 수 있다. 따라서 삼중수소화 DNA전구체는 세포핵에 특징적으로 위치하지 않는 삼중수소수(HTO 또는 ^3HHO)와 같은 삼중수소 화합물보다 방사성 독성이 높을 수 있다(Streffer 등 1978). 그러한 경우 위험은 세포핵 선량에 기초해 결정해야 한다. 다른 접근법 하나는 비균질 분포한 방사성핵종(예: 삼중수소화 티미딘)의 생물학적효과비에 대해 실험한 포유류데이터를 보다 균일하게 분포하는 동일 핵종(예: 삼중수소수)이나 외부 조사와 비교하여 고려하는 것이다(Streffer 등, 1978). 그러한 국지적 세포핵 조사에서 발생하는 선량과 위험을 다루는 구체적 개요를 ICRP가 제안하지는 않는다(제B.3.5절 B86-B99항 참조).

B.3.4. 등가선량과 유효선량

(B58) 방호량은 확률론적 보건영향 발생을 허용되는 수준 미만으로 유지하고 조직반응을 방지하기 위한 선량한도 지정에 사용된다. 방호량의 체계는 그림B.1 및 B.2와 같다. 그 정의는 종류 R 인 방사선으로 인한 특정 장기나 조직 T 체적 (또는 인체의 다른 명시된 표적 부위에서)의 평균 흡수선량 $D_{T,R}$ 에 기초한다(식 B.3.5 참조). 방사선 R 은 신체에 입사하거나 체내에 있는 방사성핵종이 방출하는 방사선의 종류와 에너지가 된다. 따라서 방호량인 장기나 조직의 등가선량 H_T 는 다음과 같이 정의된다.



그림B.2. 방사선방호에 사용하는 방호량과 실용량 시스템.

$$H_T = \sum_R w_R D_{T,R} \quad (\text{B.3.6})$$

여기서 w_R 은 방사선 R 의 방사선가중치이다(제B.3.5절 B73–B131항 및 표B.4 참조). 관련된 모든 종류 방사선에 대해 합산한다. 등가선량의 단위는 J kg^{-1} 이며, 그 특별 명칭은 시버트(Sv)이다.

(B59) w_R 값은 낮은 선량에서 여러 종류 방사선의 생물학적효과비(RBE) 실험 데이터에 주로 기초한다. 여러 방사선의 w_R 값 세트가 ICRP 60(ICRP 1991b)(표 B.3)에서 주어졌다. 이러한 방사선가중치의 일반적 개념은 변경 없이 유지된다. ICRP 60(ICRP 1991b)에 채택한 w_R 값에 대한 일부 수정 필요성을 제B.3.5절, B73–B131항에 제안하고 논의한다(표B.4 참고).

표B.3. 방사선가중치¹ (ICRP 1991b)

종류 및 에너지 범위 ²	방사선가중치, w_R
광자, 모든 에너지	1
전자 및 뮤온, 모든 에너지 ³	1
중성자, 에너지	
< 10 keV	5
10 keV ~ 100 keV	10
> 100 keV ~ 2 MeV	20
> 2 MeV ~ 20 MeV	10
> 20 MeV	5
반도 양성자 이외의 양성자, 2 MeV 초과	5
알파입자, 핵분열 파편, 무거운 핵	20

1) 모든 값은 인체에 입사하는 방사선과 내부 선원에서는 선원이 방출하는 방사선과 관련된다.

2) 다른 방사선에 대한 값의 선택은 ICRP(1991b) A14항에 설명되어 있다.¹¹⁾

3) DNA에 결합한 핵에서 방출하는 오제전자 제외(ICRP 1991b의 A13항 참조).¹²⁾

11) <역주> 현행 권고는 공식적으로 기존 권고인 ICRP 60을 대체하므로 ICRP 60의 내용을 계속 참조하도록하는 설명은 사실 적절하지 않다. 방사선가중치가 구체적으로 제시되지 않은 방사선에 대해 ICRP 60 부록 A14항은 외부피폭의 경우 ICRP 70 10mm 깊이에서 계산된 평균선질계수를 근사적 방사선가중치로 사용할 수 있다고 기술하고 있다. 즉,

표B.4. 2007년 권고의 방사선가중치¹

방사선 종류	방사선가중치, w_R
광자	1
전자 또는 뮤온	1
양성자 및 하전 파이온	2
알파입자, 핵분열 파편, 중이온	20
중성자	중성자 에너지 함수로서 연속 곡선 (그림B.4 및 식B.3.16 참조)

1) 모든 값은 인체에 입사하는 방사선 또는 내부 선원에서 방출되는 방사선과 관련된 다.

(B60) ICRP 60에서 도입된 유효선량 E는 다음과 같이 정의된다.

$$E = \sum_T w_T \sum_R w_R D_{T,R} = \sum_T w_T H_T \quad (\text{B.3.7})$$

여기서 w_T 는 조직 T의 조직가중치이며(제B.3.5절 B132–B145항 및 표B.2 참조) $\sum w_T$ 는 1이다. E의 정의와 w_T 값이 표B.2에 수록된 인체 장기와 조직 전체에 대해 합산한다. 유효선량의 단위는 J kg^{-1} 이며, 그 특별 명칭은 시버트(Sv)이다. 등가선량과 유효선량의 이 단위는 선량 실용량에도 동일하게 사용된다(제B.4.1절 단락 B159–B170항 참조). 사용하고 있는 양이 분명히 표시되는지 주의해야 한다.

(B61) 특정 조직의 흡수선량은 물리량인 반면, 등가선량과 유효선량은 생물학적, 역학적으로 파악한 내용에 기초한 가중치들이 포함된다. 이러한 가중치들은 방사선방호에 적용하기 위해 판단에 의해 선택되며, 용인할 수준의 단순화를 포함한다(제B.3.5절 참조). 따라서 유효선량의 정의와 값은 물리적 특성에만 근거하지 않는다. 예를 들어 조직가중치 w_T 는 방사선 피폭 후 암 유발에 관한 역학

$$w_R \approx \frac{1}{D} \int_0^\infty Q(L) D(L) dL$$

여기서 $D(L)dL$ 은 그 지점에서 흡수선량의 LET 분포이다. 내부피폭의 경우에 대해서는 특별한 권고가 없다.

12) <역주> 같은 이유로 여기서도 ICRP 60을 참조하도록 하는 것보다는 현행 권고 B57항을 참조하도록 설명하는 것이 적절하다.

연구 및 실험적 유전 데이터에 기초한다. 나아가 조직가중치는 사람의 양 성별과 모든 연령에 대해 평균한 평균값을 나타낸다.

(B62) 유효선량 정의는 인체 장기나 조직의 평균선량에 기초한다. 이 양은 주어진 피폭 상황을 고려하지만 특정 개인의 특성 값을 제공하지는 않는다. 예를 들어 사람의 내부피폭에서, 방사성핵종 섭취량을 평가하고 여기에 섭취 방사능과 해당 평균 장기선량을 연계시키는 선량계수를 적용함으로써 장기선량을 구하는 것이 보통이다. 이 계수는 일반적인 생물역동학 및 기준모의체(reference phantom)를 사용해 계산한다. 즉, 특정 방사성핵종의 섭취 방사능에 해당하는 유효선량을 평가됨을 의미한다. 선량의 이러한 근사는 방사선방호 목적으로 합당한 것으로 판단된다.

(B63) 유효선량을 사용하면 매우 다양한 상황의 피폭(예를 들어 다양한 종류의 방사선에 의한 내부 및 외부 피폭)을 조합해 단일 값을 도출할 수 있다. 따라서 기본 피폭한도를 단일 양으로 표현할 수 있다. 이것은 선량 제한체계와 기록 유지를 한층 편이하게 한다.

(B64) 유효선량 평가를 위한 실용적 접근법을 제공하기 위해 예를 들어 외부 피폭의 경우 입자 플루언스나 공기커마를, 내부피폭의 경우 섭취 방사능과 같은 물리량에 유효선량을 연계하는 계수를 명확히 정의한 기하학적 인형 모의체에서 기준조건(예를 들어 단일 에너지 방사선, 기준 조사배열, 방사성핵종이 붙은 선정된 화합물, 인체에서 방사성핵종의 이동 모델)에 대해 계산한다. 이러한 모의체는 인체 대부분의 장기와 조직, 특히 조직가중치 표(표B.2)에 수록된 장기와 조직을 포함한다.

(B65) ICRP 26(ICRP 1977) 이후 ICRP 간행물에서 외부 방사선 및 인체에 내포된 방사성핵종에 의한 유효선량(또는 유효선량당량)의 계산은 성 평균 조직가중치를 가중한 성 무관 해부학 및 생물역동학 모델에서 도출한 장기와 조직 등가선량에 기초했다(ICRP 1994b). 남성과 여성 모의체가 개발됨에 따라 이제 이 계산 요강을 변경했다(제B.5.2절 참조).

(B66) 예를 들어 커마나 입자 플루언스과 같은 방사선장 양에 대해 유효선량을 연계하는 환산계수 계산에서(외부피폭 상황에 대해) ICRP 74(ICRP 1996b)에서 각 성별의 해부학적 모델을 사용하면서 ICRP는 과거 접근법 사용을 중단했다. 유효선량 계산을 위해 장기와 조직의 성별 고유 등가선량을 사용한 아래 식

이 ICRP 74에서 적용되었다.

$$E = w_{breast} H_{breast, female} + \sum_{T \neq breast} w_T \left[\frac{H_{T, male} + H_{T, female}}{2} \right] \quad (B.3.8)$$

여기서 합계에는 생식선(여성의 난소, 남성의 고환)에 대한 선량이 포함된다. 그러나 다른 절차(성별 고유 또는 양성모델을 사용한)를 사용해도 유효선량에서 서로 큰 차이는 나지 않으며 방사선방호에 적용하기에 충분히 정밀한 유효선량 값을 구할 수 있다.

(B67) 이제 ICRP는 남성과 여성에 대해 새로운 전산용 모의체를 정의한다(제 B.5.2절 참조). 이 모델은 외부 방사선 피폭에 대한 선량환산계수와 내부피폭에 대한 선량계수 계산에 사용된다.¹³⁾ 성별 고유의 계산모델을 사용하면 남성과 여성 장기 선량을 계산할 수 있고 이로부터 유효선량 계산에 사용할 평균 등가선량을 계산할 수 있다. 유방과 생식선에 대한 선량도 다른 장기나 조직에 사용하는 방법으로 수행할 수 있다.

(B68) 조직가중치 결정을 위해 채택하는 절차는 우선 남성과 여성의 방사선 유발 확률론적 영향 위험을 별도로 평가한 다음, 각 성별 고유의 방사선위해를 계산하고 이 값에서 성 평균 w_T 값을 도출할 수 있다(부록A). 성 평균 w_T 값과 성 평균 장기 및 조직 선량을 사용해 유효선량을 계산할 수 있다(그림B.3). 이러한 조건에서는 유효선량 계산에 남성과 여성 선량의 기여를 따로 취급하는 것은 타당하지 않다.¹⁴⁾ 모든 조직은 식B.3.9에 따라 취급할 수 있다.

(B69) 그러면 유효선량 E는 다음 식에 따라 잔여조직¹⁵⁾을 포함해(제B.3.5절 B132–B145항 및 식B.3.17 참조) 기준남성의 조직이나 장기 T의 등가선량 H_T^M

13) <역주> 외부피폭에 대해서는 선량환산계수dose conversion coefficient로 부르고 내부피폭에 대해서는 선량계수dose coefficient라 달리 부르는 것은 완전히 정립된 개념은 아니다. 그러나 외부피폭에서는 선량 또는 선량에 준하는 양을 다른 선량으로 변환하는 개념(예: 조사선량이나 공기커마를 조직 등가선량 또는 유효선량으로)이므로 “환산”계수라 부르고, 이에 반해 내부피폭에서는 섭취한 방사능을 조직 등가선량 또는 유효선량으로 연계하는 계수이므로 “환산”이라 보기 어려워 단순히 “선량계수”라는 용어를 사용한다.

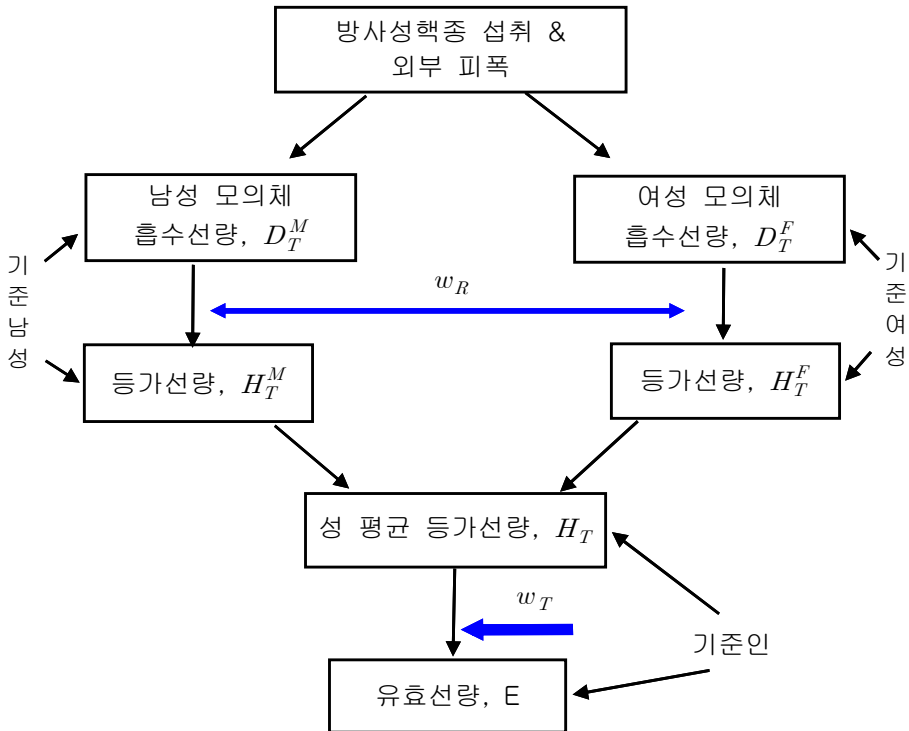
14) <역주> 조직가중치가 남녀구분 없이 한 세트밖에 없으므로 남성 유효선량, 여성 유효선량을 따로 계산하는 것이 의미가 없다는 뜻이다.

15) <역주> “remainder”를 “잔여조직”으로 사용하기도 했으나 “기타”라는 평범한 어휘를 사용할 경우 가령 ‘other tissues’와 혼동할 수 있어 잘 사용하지 않는 “잔여”를 사용했다. 의미로는 “나머지 조직”으로 대체 가능하나 “잔여조직”으로 용어를 특성화하는 편이 나아 보인다.

와 기준여성에 대한 H_T^F 로부터 계산될 수 있다.

$$E = \sum w_T \left[\frac{H_T^M + H_T^F}{2} \right] \quad (B.3.9)$$

이 식은 남성과 여성의 새로운 기준모의체(제B.5.2절과 그림B.2, B.3 참조)와 함께 향후 선량환산계수와 선량계수 계산에 사용될 것이다.



그림B.3. 유효선량(E) 계산에서 성 평균.

(B70) 실용을 위해 외부피폭의 경우 장기선량이나 환산계수, 내부피폭의 경우 선량계수(섭취 당 선량, Sv Bq⁻¹)의 계산은 개인 데이터를 기준으로 하지 않고, ICRP 89(ICRP 2002)에 규정한 인체의 기준값을 근거로 한다. 또한 일반인의 피폭 평가에는 예를 들어 음식물 소비와 같은 연령별 데이터도 고려해야 할 것이다. 기준값을 사용하고 유효선량의 계산에서 양 성별을 평균한다는 것은 기준 선량계수의 목표가 특정 개인이 아니라 기준인¹⁶⁾에 대한 선량을 제공함을 의미한

16) <역주> 과거 'reference man'은 '표준인'으로 번역해 사용했으나 "표준"은 보다 강한 의미이며 달리 "참조"는 약한 의미여서 "기준"의 사용을 시도한다. 기타 reference male/female,

다. 일반인 선량계수 계산을 위해 아동에 대한 전산용 기준모의체도 개발될 것이다.

B.3.5. 가중치

(B71) 앞에서 언급했듯이 방사선 피폭으로 인한 위해 평가에는 평균 흡수선량 만으로는 불충분하다. 방사선방호에 적용하는 선량과 확률론적 영향(방사선 유발 암과 유전질환) 사이에 상호관계를 구축하기 위해 두 종류 가중치를 도입했는데 방사선가중치 w_R 과 조직가중치 w_T 이다.

(B72) 가중치를 사용하는 목적은 방사선 종류와 인체의 다양한 장기와 조직의 확률론적 영향을 고려하기 위한 것이다. 따라서 가중치는 광범위한 실험 데이터와 역학연구에 대체로 기초하며, 연령과 성별에 관계없이 사용된다. ICRP 60(ICRP 1991b)에서 ICRP는 방사선방호 수요에 적합한 것으로 간주되는 일반적인 방사선가중치(w_R) 세트를 선택한 바 있다(표B.1과 표B.3). 이 절차는 2007년도 권고에도 유지된다.

방사선가중치

(B73) 방사선 방호량을 정의할 때 방사선 특성을 가중하는 방법은 1960년대 초부터 사용되었다. 1991년 이전에는 특정 Q(L) 함수(ICRP 1977)를 사용하는 선질계수 개념을 적용해 왔다. ICRP 60(ICRP 1991)에서 방호량을 위한 방사선 가중치가 외부피폭 측정에 사용하는 선량 실용량을 위한 가중치와 다르게 정의되었다.¹⁷⁾

(B74) 방사선 가중은 상이한 방사선의 확률론적 영향에 대한 생물학적효과비(RBE) 평가에 주로 기초한다. RBE는 방사선의 생물학적효과력 차이를 특성화하기 위해 방사선생물학에서 사용된다. RBE값은 동일 조사 조건에서 동일한 특정 생물학적 영향을 발생시키는 두 종류 방사선의 흡수선량 비율로 나타낸다(동일한 수준의 영향을 발생시키는 것으로 판단되는 기준 방사선 선량 값을 대상 방사선 선량 값으로 나눈 값).

reference field 등에서도 같다. 그러나 방호체계에서 reference level은 “기준”보다 약한 의미이므로 “참조”준위를 채택했다.

17) <역주> 방호량인 등가선량을 얻는 데는 조직가중치를 적용하지만 측정량인 실용량에는 여전히 선질계수 Q가 사용된다.

(B75) 특정 방사선의 RBE값은 고려한 생물학적 영향, 관련 조직이나 세포 유형, 선량과 선량률, 그리고 선량 분할 방식과 같은 피폭 조건에 따라 달라진다. 그래서 특정 종류와 에너지의 방사선에 대해서도 RBE값에 어떤 범위가 존재한다. RBE는 낮은 선량과 낮은 선량률에서 최대값(RBE_M)에 도달한다. 따라서 RBE_M 이 방사선방호에 사용하는 방사선가중치 정의에 특히 중요하다. 가중치는 낮은 선량 영역에서는 선량이나 선량률과 무관한 것으로 한다.

(B76) 선질계수와 방사선가중치 개념은 원래 다른 종류 방사선의 생물학적 효과 차이에 기초하는데 이 차이는 하전입자 비적을 따라 발생하는 에너지 부여 특성의 차이에 뿌리를 둔다. 방사선방호에 적용을 위해 조직 내 하전입자 비적의 복잡한 구조를 단일 변수인 제약 없는 에너지전달선밀도unrestricted linear energy transfer L_∞ (에너지전달선밀도 LET 또는 L 로 칭하는 경우도 많음)로 특성화하는데, 선질계수 Q 는 ICRP와 ICRU의 여러 간행물(ICRP 1963, 1977, 1991b, ICRU 1970, 1986)에 규정한 L 의 함수로 정의된다(자세한 설명은 B.4.2절 참조).

(B77) 낮은 LET와 높은 LET 입자의 에너지 전달에서 또 다른 특성은 제 B.3.2절에 이미 설명하고 논의한 사상(事象) 분포의 차이이다. 이 효과도 생물학적 효력에 영향을 미친다.

(B78) ICRP 60(ICRP 1991b) 이후 방호량의 정의에 방사선가중치 w_R 이 명시되었다. 방사선가중치는 광자 방사선과 비교해 다른 종류 방사선에 의해 발생하는 상대적 위해를 고려하기 위해 조직이나 장기의 평균 흡수선량에 곱하는 인자이다. w_R 수치값은 인체에 입사하거나 체내 방사성핵종에서 방출되는 방사선의 종류와 에너지에 대해 명시된다. ICRP 60(1991b)에서 채택했던 w_R 값을 표B.3에 보였다.

(B79) 1차 방사선의 감쇠와 약화, 방사선질이 다른 2차 방사선 발생에 의해 실제 방사선장이 변화한다는 사실에 관계없이 동일한 값의 방사선가중치 w_R 이 인체의 모든 조직과 장기에 적용된다. 따라서 w_R 값은 인체의 다양한 조직과 장기에서 평균 계산한 방사선질을 나타내는 인수로 간주할 수 있다.

(B80) w_R 결정에 사용된 평균계산 절차는 특히 2차 광자(낮은 LET 방사선)가 조직과 장기 선량에 상당한 기여하는 저에너지 중성자 방사선 외부피폭의 경

우 몇 가지 문제를 제기했다(Dietze와 Alberts 2004). 따라서 저에너지 중성자에 피폭하는 조직이나 장기의 평균 방사선질은 몸체 내 위치에 의존하며 입사 방향에 따라 변한다.

(B81) 방사선질과 흡수선량의 지정에 있어 '위치이중성bilocality' 문제¹⁸⁾는 ICRP 92(ICRP 2003c)에 자세히 설명되어 있다. ICRP 92는 높은 LET 입자의 방사선가중치를 개선하기 위한 방법을 제안하고 수정된 함수를 제시했다. 등방 피폭에 대해 계산하고 몸체에 대해 평균한 선질계수와 방사선가중치 사이에 고정된 관계를 제안했다. 그러나 현행 2007년 권고에서 ICRP 92에 제안된 절차를 모두 따르는 것은 아니다. 제B.3.5절 B100-B115항에 상세한 설명이 있다.

(B82) 이상적으로는 확률론적 영향에 대한 생체 내 *in vivo* 연구에서 얻은 RBE 데이터를 주된 근거로 w_R 값을 결정해야 할 것이다. 종종 전신 피폭 후 암이나 백혈병 발병, 또는 수명단축을 평가하기도 한다. 시험관 세포연구가 발암의 기초 기전 이해에 크게 기여할 수도 있지만 그러한 연구에서 확보한 RBE 값이 사람에게서 발암과 제대로 상관되지 않을 수도 있다. 그러나 방사선방호에서 관심 있는 방사선질 범위에서 동물 생체 내 연구로 확보한 데이터는 대개 제한적이다. 따라서 주로 시험관실험 데이터에 기초하는 Q(L) 함수(NCRP 1990)가 필요한 경우 인체에 대한 평균 Q값 계산의 근거로 사용되며, 이 평균 Q값이 방사선가중치 값 추정에 사용된다. 특히 양성자와 중이온의 경우 그러하며, 중성자의 경우도 어느 정도 해당된다(ICRP 2003c).

(B83) 대체로, 방사선가중치가 필요한 영향과 직접적인 관계가 없는 다양한 생물학적 영향의 연구에서 광범한 RBE값들이 도출되어 있다. 가령 실험에 사용한 동물 수가 작거나 영향 인자가 많기 때문에 실험적으로 결정한 RBE값은 큰 불확실성을 갖는다. 확인된 데이터에 대표값을 부여하고 방사선방호에 적용함에 충분히 정밀한 값이 되도록 가중치를 선정했다. 방호량 결정에 사용하기 위해 판단에 의해 w_R 값이 결정된다. 따라서 방사선가중치는 고정된 값이며, 어떤 불확실성을 수반하지 않는다¹⁹⁾(제B.6장 참조).

18) <역주> 위치이중성 문제란 등가선량 정의 즉, $H_T = w_R D_{T,R}$ 에서 조직 평균 흡수선량 $D_{T,R}$ 은 장기 T의 위치에서 평가되는 반면, 방사선가중치 w_R 은 인체에 입사되는 방사선의 종류와 에너지에 따라 평가되는 괴리를 의미한다. 즉, 다른 위치를 기준으로 평가된 두 양을 하나의 양인 등가선량 평가에 사용하는 개념적 문제이다. 그러나 이 괴리가 방사선방호 목적에서 심각한 문제는 되지 않는 것으로 판단했다.

19) <역주> 이 말이 현재 부여된 방사선가중치 값이 절대적 참값임을 의미하는 것은 아니다. 방사

(B84) **기준방사선**. 실험적으로 얻는 RBE값은 선택한 기준방사선에 따라 달라진다. 일반적으로 낮은 LET 방사선이 기준으로 선택되는데, 실험에서는 대개 ^{60}Co 또는 ^{137}Cs 감마선, 또는 200 kV를 넘는 높은 에너지 X선이 사용된다. 그러나 일반적 기준방사선으로 구체적 광자 종류나 에너지를 선정한 국제적 합의는 없다. 따라서 RBE에 관한 모든 연구에서는 사용한 기준방사선 정보가 필요하다.

(B85) ICRP 60(ICRP 1991b)에서 ICRP는 모든 광자에 대해 방사선가중치로 1을 채택했고(표B.3) 이는 또한 ICRP 92(ICRP 2003c)에서도 제안되었는데, 이는 특정 광자 에너지를 기준방사선으로 확정하지 않은 사실과 부합한다. 다양한 에너지 광자에 관한 RBE 데이터의 평균이 방사선방호를 위한 w_R 값 설정에 가장 적합한 것으로 판단된다. 그렇지만 이 접근이 다양한 에너지 광자에서 생물학적 효력에 차이가 없음을 암시하는 것은 아니다(제B.3.5절, B86-B99항 참조).

(B86) **광자, 전자 및 뮤온의 방사선가중치**. 광자, 전자 및 뮤온은 LET값이 $10\text{ keV}/\mu\text{m}$ 미만인 낮은 LET 방사선이다. 낮은 LET 방사선의 방사선가중치로는 항상 1을 부여해 왔다. 1991년 이전에는 $L < 3.5\text{ keV}/\mu\text{m}$ 일 때 $Q(L) = 1$ 로 설정하여 이를 유지했다. ICRP 60(ICRP 1991b)에서는 이들 방사선에 대해 $w_R = 1$ 로 정의하고, 선량 실용량을 위해서는 $L < 10\text{ keV}/\mu\text{m}$ 일 때 $Q(L) = 1$ 로 정의했다(식B.4.2 참조). 이러한 결정에는 주로 현실적 이유도 있지만, 방사선 위험 평가의 큰 불확실성이 더 상세한 표현을 정당화하지 않는다는 고려도 있다.

(B87) ICRP 92(ICRP 2003c)는 발표된 낮은 LET 방사선의 RBE값에 대한 자세한 설명을 수록했으며, 상이한 에너지 광자 방사선의 가중에 대한 영향도 설명했다. 다른 간행물에서도 이 문제를 다루었다(예를 들어 SSK 2005, Harder 등 2004).

(B88) 사람 림프구의 이동원염색체 이상dicentric chromosome aberration에 대한 시험관연구(Sasaki 1991, Schmid 등 2002, Guerrero-Carbajal 등 2003), 그리고 예를 들어 Frankenberg 등(2002)에 의한 사람 및 사람-햄스터 혼종세포와 같은 다른 세포주의 돌연변이와 변형에 대한 시험관연구 결과는 저에너지 X선은 ^{60}Co 감마선보다 현저히 큰 RBE를 가짐을 보였다. 그러한 세포실험에서는 20

선가중치 값은 측정된 물리량이 아니라 ICRP가 “규정한” 값이기 때문에 오차 평가 대상이 아니라는 의미이다. 이미 양성자나 중성자 가중치가 바뀌었듯이 앞으로도 변경 소지는 있지만, 그러한 변경(새로운 결정)이 있을 때까지는 현재 값으로 고정된다. 조직가중치도 마찬가지이다.

kV X선이 전통적 200 kV X선보다 약2~3배 효과가 높을 수 있고, 후자도 ^{60}Co 감마선에 비해 약 두 배 효과가 높을 수 있다. 동물실험에서는 훨씬 낮은 비율들이 관측되었지만 역학데이터는 차이를 확인할 정도로 정밀하지 않다.

(B89) 시험관에서 세포에 대한 영향으로 밝혀졌듯이 1~5 MeV 광자는 X선보다 효과가 낮지만, 예를 들어 고에너지 가속기 근처 또는 우주선 방사선장과 같은 매우 높은 에너지 광자의 경우 상황이 다를 수 있다. 그러한 광자는 핵 상호작용에서 예를 들어 중성자나 기타 높은 LET 입자와 같은 2차 입자를 생성할 수 있다. 따라서 이러한 광자의 RBE가 약 1~5 MeV 광자보다 높음을 배제할 수 없다.

(B90) ICRP 60(ICRP 1991b)에서 ICRP는 “단순성은 사람에게 대한 우리의 지식 부족과 방사선방호의 실제 측면을 반영함에 중요하다. 예를 들어 다른 광자 에너지에 서로 다른 선질계수를 채택하는 것이 도움이 될 것으로 ICRP는 판단하지 않는다.”라고 말했다. 세포연구 결과 에너지가 다른 광자의 방사선질에 상당한 차이가 있음을 보이는 추가 데이터들도 있다. 그러나 유효선량 계산에는 모든 광자와 전자에 대해 단일 w_R 값을 유지해야 하는 현실적 이유도 더 있다(Dietze와 Alberts 2004).

(B91) 30 keV부터 5 MeV까지 에너지 광자에 의한 외부피폭의 경우 장기선량의 일부는 체내에서 콤프턴산란을 겪은 광자에 의해 전달되는데 산란 광자 평균 에너지는 입사 광자보다 상당히 낮다(Harder 등 2004). 따라서 다양한 에너지의 외부 광자 방사선에 대해 인체에 걸쳐 평균한 평균 RBE의 변화는 시험관에서 얇은 세포층(대개 홀층)에 대한 연구에서 관찰한 차이보다 작을 것으로 예상된다. Chen 등(2005)은 작고 큰 수용체에서 미시선량계측량 ‘선량평균 선에너지 dose mean lineal energy’ y_D 를 계산했는데, 그 결과 위에 설명한 효과가 Harder 등(2004)이 주장한 것만큼 크지 않음을 보였다.

(B92) 나아가 저에너지(약 30 kV 미만 X선) 광자 외부 방사선은 신체 표면에 가까운 조직에서 크게 감쇠하여, 유효선량에 대한 기여가 일반적으로 낮다. 이에 대한 예외는 유방조영법 mammography과 같은 방사선진단 절차에 저에너지 광자를 사용하는 경우이다. 그러나 외부피폭의 경우 선량 실용량 $H^*(10)$ 와 $H_p(10)$ (제 B.4.3절과 제 B.4.4절 참조)이 방사선방호 감시와 유효선량 평가에 사용된다. 에너지가 10~40 keV인 광자에 의한 신체 전방조사(AP)의 경우 $H^*(10)$ 는 E보다

6배까지 높으며, 다른 방향 조사(PA, LAT, ROT, ISO)의 경우 그 보수성은 더욱 커진다(ICRP 1996b).²⁰⁾

(B93) 내부선량 계측에서 모든 광자와 전자에 대한 단일 w_R 값 사용은 대단한 단순화지만, 이러한 접근법을 지지하는 주장은 외부피폭에서와 같다. 방사성핵종이 DNA에 내포되거나 또 달리 핵에 국지화된 경우, 삼중수소나 오제전자 방사체로부터 나온 비정규 짧은 방사선의 효력이 클 것으로 보인다. 이 특별한 경우에 대해서는 제B.3.3절에서 설명했다.

(B94) 그러나 삼중수소의 저에너지 베타 방출에 대해 $w_R = 1$ 을 사용함에는 아직 논란이 있다(CERRIE 2004). Straume와 Carsten(1993)은 동물과 시험관 세포 시스템에서 삼중수소수소(HTO)와 유기결합 삼중수소organically bound tritium(OBT) 피폭의 발암, 유전적 및 발생학적 영향, 그리고 생식 영향에 관한 실험적 데이터를 면밀하게 검토했다. 관찰한 영향의 스펙트럼은 X선이나 감마선의 전신 외부피폭 영향과 구별할 수 없다. 삼중수소에서 관찰한 영향이 전리방사선에 의한 손상에서 기인했을 가능성이 매우 높지만, 삼중수소에서 헬륨으로 변환 또한 DNA 손상을 유발할 잠재력이 있다. 삼중수소에서 관찰한 영향에는 그러한 변환 손상의 기여도 포함된다. HTO 피폭에서 관찰한 모든 영향을 고려할 때 RBE값의 범위는 1과 3.5 사이이다. 감마선과 비교한 경우는 대부분 RBE값은 1과 3 사이였으며, X선과 비교한 경우는 대부분 값은 1과 2 사이였는데 그 중 1과 1.5 사이의 값이 가장 많았다. 삼중수소 베타 조사에 대한 RBE 측정치는 미시방사선량계측에 기초한 평가치와 대체적 일관성을 유지한다(Bigildeev 등 1992, Morstin 등 1993, Moiseenko 등 1997).

(B95) 만성적 낮은 선량의 위험 평가 목적에는 발암에 대한 연구가 가장 적합하다. 여기에는 쥐에서 유선mammary종양 발현(Gragtams 등 1984)과 생쥐에서 급성 골수성백혈병 발현 가속이 포함된다(Johnson 등 1995). 두 연구 모두 HTO나 X선(250 kVp)에 의한 만성 피폭을 비교했으며 RBE값으로 1-1.3을 도출했다. 10T1/2 세포의 변형에 관한 시험관연구 결과 RBE 값은 감마선과 비교해 약 2까지 나타났다.

20) <역주> 인체에 대한 방사선 조사방향을 표시하는 기호는 다음과 같다.

AP(전방조사): 신체 전방에서 후방으로 조사; PA(후방조사): AP의 역방향; PAT(측방조사): 인체의 좌(LLAT) 또는 우(RLAT)에서 조사; ROT(파노라마 조사): 신장 방향 신체축을 중심으로 회전 조사; ISO(등방조사): 신체 중점을 중심으로 모든방향 균일 조사.

(B96) HTO인 삼중수소의 베타 방출에 대해 얻은 RBE값은 낮은 LET 방사선에서 일반적으로 파악되는 값 범위에 있으며, 따라서 단일 w_R 값 1을 사용하는 단순화한 접근법을 삼중수소에 적용할 수 있다. OBT에 대한 제한된 RBE 데이터는 대부분의 경우(예를 들어 표지 아미노산) HTO와 유사한 값을 보이지만 삼중수소화 DNA전구체에서는 더 높게 나타났다. 예를 들어 Ueno 등(1988)은 시험관 배양 생쥐 세포에서 사멸과 돌연변이 비율을 측정하여 HTO, ^3H -티미딘($^3\text{HTdR}$) 및 ^3H -아미노산의 RBE값을 비교했다. 선량은 세포의 ^3H 함량 측정값을 근거로, 그리고 $^3\text{HTdR}$ 이 핵에 집중되고 HTO와 ^3H -아미노산은 세포 내에 균등 분포하는 가정 위에서 평가했다. 이 근거에서 $^3\text{HTdR}$ 의 영향이 HTO와 ^3H -아미노산 영향보다 2배 높게 확인되었다.

(B97) 시험관 및 생체 내 여러 실험시스템에서 오제전자 방사체의 생물학적 영향이 광범위하게 연구되었다(Bingham 등 2000, Goddu 등 1996). ^{55}Fe , $^{99\text{m}}\text{Tc}$, ^{111}In , $^{114\text{m}}\text{In}$, ^{123}I , ^{125}I , ^{210}Tl 과 같은 광범한 오제전자 방사체의 생체 내 세포독성 평가를 위한 모델 시스템으로 설치류 정자발생을 사용했다. 시험관의 경우 ^{35}S , ^{75}Se , ^{51}Cr , ^{67}Ga , ^{77}Br , 그리고 여러 종류의 ^{123}I 및 ^{125}I 표지화합물의 세포독성을 다양한 사람 및 설치류 세포주와 모델 배양 시스템에서 연구했다. 보고된 다양한 결과의 대표적인 것으로 ^{125}I -iododeoxyuridine($^{125}\text{IUdR}$) 투여 후 DNA에 부착된 ^{125}I 의 경우 생물학적 효과가 7-9배 증가했고, 핵에 국지화되었지만 DNA와는 직접 결합하지 않은 ^{125}I 의 경우 RBE 값은 약 4배였으며, 세포질에 국지화된 ^{125}I 의 경우 RBE의 값은 약 1이었다(Hofer 등 1975, Howell 등 1993, Kassis 등 1989, Rao 등 1990, Waters 등 1978).

(B98) DNA에 결합된 방사체의 비율을 안다면 이에 대해 w_R 로 20을 사용하는 것을 포함해서 오제전자 방사체에 대한 여러 선량계측 요강이 제안되었다(Howell 등 1993). 선량과 위험 평가에는 조직과 세포 내 방사성핵종 분포에 관한 정보가 필요함이 분명한데 이는 그 화학적 형태에 따라 달라진다. 평균 조직 선량에 기초해 평가한 것과 비교해 상당히 강화된 효과를 예상할 수 있는 것은 오제전자 방사체가 핵에 집중된 때문이다. ICRP는 이러한 불확실성을 인정하고, 오제전자 방사체는 사안별로 분석해야 한다고 언급했다.

(B99) 요약하자면 일반적인 방사선방호 목적으로는 모든 낮은 LET 방사선에 대해 w_R 로 1을 계속 사용해야 할 당위성이 충분히 많다. 그러나 이러한 단순화는 예를 들어 선량제한, 선량의 평가 및 관리를 위해 유효선량을 평가하는 의도

된 용도에만 충분함에 유의하는 것이 중요하다. 이런 단순화는 방사선피폭에 의한 확률론적 영향의 개인 위험을 소급 평가하는 목적이 아니다. 개인에 대한 소급적 선량평가의 경우 가능하다면 방사선장(낮은 LET 방사선의 종류 포함) 및 적절한 RBE값에 관한 보다 상세한 정보가 필요할 것이다(제B.5.8절 참조). DNA에 부착된 삼중수소나 오제전자 방사체에서처럼 발생할 수 있는 세포 내 선량 비균질성에 대해서도 별도 평가가 필요할 수 있다.

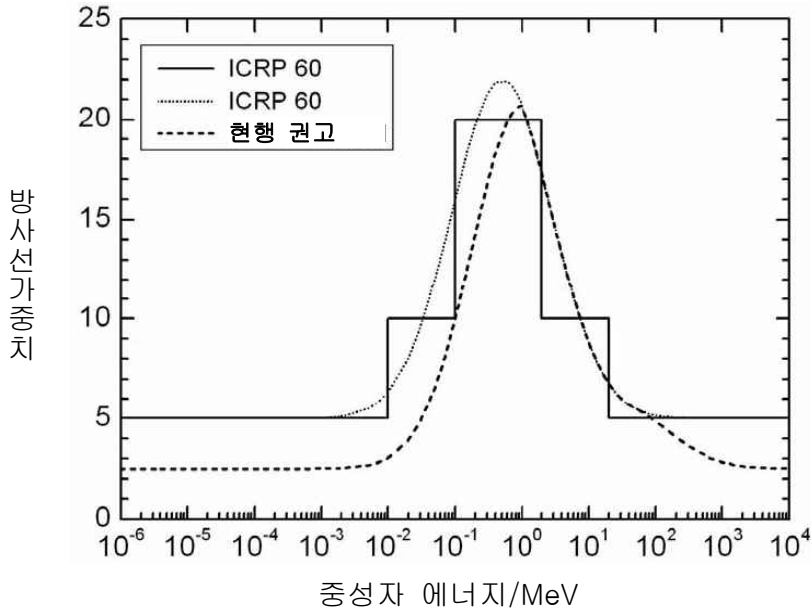
(B100) **중성자 방사선가중치.** 인체에 입사하는 중성자의 생물학적 효과는 에너지에 따른 2차 방사선 변화 때문에 중성자 에너지에 강하게 의존한다. 정성적으로 다음 영향이 중요하다.

- 중성자 에너지가 감소하면 증가하는 조직 내 중성자 흡수에 의한 2차 광자 발생
- 중성자 에너지가 증가하면 같이 증가하는 반도 양성자 에너지
- 높은 중성자 에너지에서 중하전입자 발생
- 매우 고에너지 중성자가 일으키는 핵파쇄 공정.

(B101) ICRP 60(ICRP 1991b)에서 중성자 방사선가중치는 두 가지 방식으로 주어졌다. 즉, 5개 중성자 에너지 범위에 대해 각각 5, 10, 20, 10, 5의 w_R 값을 갖는 계단함수(표B.3, 그림B.4) 또는 계산에 사용하도록 한 연속함수가 그것이다. 표B.3에 수록된 w_R 값은 실질적으로 사용되지 않고 연속함수가 주로 적용된다. 광범한 에너지 스펙트럼을 갖는 중성자 방사선장에서 선량을 평가하는 데 에너지 종속 환산계수를 사용한 계산이 종종 수행된다. ICRP 74(ICRP 1996b)에 수록된 것을 포함해, 국제적으로 권고된 환산계수는 연속함수에 기초한다. 따라서 이제 연속함수를 사용하여 중성자 방사선가중치를 정의한다. 그러나 연속함수 사용은 현실적이고 계산을 위한 고려일 뿐이며, 그것이 더 정밀한 데이터가 가용함을 의미하지는 않음에 유의해야 한다.

(B102) ICRP 60(ICRP 1991b)에서 w_R 의 최고값은 고정된 20이었다. ICRP 92(ICRP 2003b)에서도 1 MeV 근처의 중성자 에너지에서 최고 w_R 값으로 약 20이 계속 채택할 수 있는 근사였다. 이 판단은 특정 실험값에 기초한 것이 아니라, 원자로의 핵분열 중성자를 사용한 연구에서 얻은 발암과 수명단축에 대한 실험동물 데이터에서 파악한 광범위한 RBE값을 고려한 대표값을 반영한다(ICRP 2003c). 따라서 약 1 MeV 중성자 에너지에 대해 이 20이라는 값을 유지한다.

(B103) 인체가 1 MeV 미만의 중성자에 피폭하면 주로 H(n,γ) 반응에서 발생하는 2차 광자에 의해 흡수선량의 상당 부분이 부여되므로 생물학적 효력이 낮아지게 된다. 이 에너지 범위에서 RBE에 대한 이 영향은 중성자 생성 2차 하전 입자-주로 양성자-의 LET분포 변화에 의한 영향보다 훨씬 크다.



그림B.4. 중성자 에너지에 대한 중성자 방사선가중치 w_R . ICRP 60(ICRP 1991b)에서 정한 계단함수와 연속함수 및 2007년 권고에 채택한 함수.

(B104) 핵분열 중성자나 낮은 에너지 중성자에 대해 작은 동물로 실험하여 얻은 RBE 데이터를 사람 피폭에 대한 w_R 값 평가 근거로 사용할 경우 인체에서 2차 광자 선량 기여가 생쥐와 같은 작은 동물에서보다 훨씬 높다는 사실에 유의해야 한다(Dietze와 Siebert 1994). 광자는 에너지가 낮아진 중성자가 주로 수소에 포획될 때 많이 발생하며, 장기 총 등가선량에 기여는 몸체 크기와 몸체 내 장기 위치에 따라 크게 달라진다. ICRP 60(ICRP 1991b) 시점에는 인형 모의체에서 중성자를 계산한 데이터는 없었으며, 대신 ICRU구에서 계산한 데이터를 사용했다. 이에 따르면(ICRP 2003c, SSK, 2005) 약 1 MeV 미만 중성자의 경우 인형 모의체에서 2차 광자를 고려하면 상당히 낮은 평균 선질계수를 얻게 되고 따라서 ICRP 60(ICRP 1991b)에 주어진 값보다 낮은 w_R 이 도출된다.

(B105) ICRP 92(ICRP 2003c)에서는 방사선가중치의 중성자 에너지 의존성은 ICRP 60(ICRP 1991b)에서 정의한 Q(L) 함수와 인체 평균 선질계수 q_E 의 계산에 근거할 것을 제안했다(식B.3.10 참조). q_E 와 가중치 w_R 사이의 관계는 다음과 같은 함수로 주어진다.

$$w_R = 1.6(q_E - 1) + 1 \quad (\text{B.3.10})$$

이 식은 1 MeV 근처 중성자 에너지에서 w_R 값으로 약 20을 제공한다. q_E 계산은 체내 선량 분포를 반영하고, 상이한 장기나 조직의 조직가중치 w_T 를 사용해 다음 식으로 수행했다.

$$q_E = \frac{\sum_T w_T Q_T D_T}{\sum_T w_T D_T} \quad (\text{B.3.11})$$

여기서 Q_T 는 조직이나 장기 T의 평균 선질계수이며, D_T 는 해당 평균 흡수선량이다. 체내에 대칭으로 분포하지 않는 장기와 조직의 여러 w_T 값 때문에 q_E 값은 방사선이 인체에 입사하는 방향에 따라 달라진다. 계산에 따르면 열중성자의 경우 추정 w_R 값(식B.3.10)이 피폭 조건에 따라 2.5(ISO 또는 ROT 입사)에서 3.2(AP 입사)까지 다양하며, 선택한 모델의 성별에 따라 차이도 있다(Kellerer 등 2004). 또한 일반적으로 q_E 값은 인체 모델, 예를 들어 계산을 MIRD형 모의체로 수행하는지 체적소형 모의체로 수행하는지에 따라서도 달라진다(B.5.2절 참조).

(B106) 식B.3.10에 주어진 것처럼 원론적으로 모든 종류와 에너지 입자에 대해 w_R 과 평균 선질계수 q_E 사이에 일반적 관계를 규정하는 제안은 그로써 실용량 정의에 사용하는 방사선가중치와 선질계수 개념의 공통 과학적 근거를 보다 분명히 하므로 매력적이다. 그러나 실제로 식B.3.10은 예를 들어 중성자, 고에너지 양성자 또는 고에너지 중이온처럼 투과력이 강한 높은 LET 방사선 외부피폭에만 적용할 수 있다. 1 MeV 중성자에 대해 계산한 w_R 값을 실험 데이터와 일치시키기 위해 인자 1.6을 식B.3.10에 사용했다. 이 인자를 2차 하전입자 스펙트럼이 다른 입자와 에너지까지 확대하는 것이 정당화될지는 의문이 있다. 이 일반적 관계를 정함에 있어 다른 단점 하나는 q_E 가 선택한 모의체, w_T 값, 피폭 상황, 심지어 컴퓨터 코드와 같은 다양한 변수에 의존한다는 것이다. w_R 값이 안정되게 유지되어야 하는 상황에서 많은 변수를 사용한다면 향후 변화가 발생할 수 있다. 따라서 식B.3.10은 중성자에 대한 w_R 값 설정에만 지침으로 사용해야 한다.

(B107) 1 MeV 미만인 중성자 에너지의 경우 방사선 가중의 유사한 에너지 의

존성은 Q와 w_R 사이에 고정 관계를 사용하지 않고, 다른 고려(SSK 2005, Dietze 및 Harder 2004)를 통해 파악했다. 이 관계는 다음 가정에 기초한다. 즉, 1 MeV 미만 중성자 에너지의 경우 인체에서 중성자 가중의 에너지 의존성은 주로 2차 광자의 선량 기여에 따라 다르며, 작은 조직 탐침probe의 경우 중성자가 유발한 높은 LET 성분의 평균 RBE값 [$RBE_{high-LET}$, 주로 반도 양성자, N(n,p) 반응 양성자 및 중이온에 의해 결정]은 중성자 에너지와 대체로 무관하다는 것이다(Edwards 1997, Sasaki 1991, Schmid 등 2003).

(B108) AP 방사선 입사에서 인체 내 2차 광자의 평균 흡수선량 기여 $f_{low-LET}$ (총 선량에서 낮은 LET 성분)와 2차 하전입자 기여(높은 LET 성분)는 다음과 같이 계산했다.

$$f_{low-LET} = (\sum w_T D_T f_{low-LET,T}) / (\sum w_T D_T) \quad (B.3.12)$$

$$f_{high-LET} = 1 - f_{low-LET} \quad (B.3.13)$$

여기서 $f_{low-LET,T}$ 는 낮은 LET 2차 방사선으로부터 조직 또는 장기 T의 상대 흡수선량이다. 인체 평균 생물학적효과비 계산에는 다음 식이 적용된다.

$$RBE_{av} = RBE_{high-LET}(1 - f_{low-LET,T}) + RBE_{high-LET} f_{low-LET,T} \quad (B.3.14)$$

여기서 RBE_{av} 는 전신에서 적절히 평균한 RBE이다. 이 ‘혼합규칙mixing rule’은 열중성자로부터 최고 1 MeV까지 중성자 에너지 범위에 적용된다. 광자 기여에 대해서는 $RBE_{low-LET} = 1$ 의 값이 선택되고 높은 LET 성분에는 $RBE_{high-LET} = 25$ 의 평균값이 선택된다. 높은 LET 성분 값은 세포의 이동원염 색체이상dicentric chromosomal aberrations 유발에 대한 실험 데이터(Schmid 등 2003) 및 종양유발과 수명단축에 대한 동물 데이터(SSK, 2005)와 일치한다. 이렇게 선택한 RBE값은 1 MeV 중성자에 대해 인체에서 RBE_{av} 값으로 약 20을 주는데 이는 위에 언급한 값과 일치한다. RBE_{av} 의 에너지 의존성은 선택한 피폭 조건에 따라 열중성자로부터 최고 1 MeV 에너지 범위에서 식B.3.10으로 계산한 w_R 의 의존성과 유사하다.

(B109) 이러한 모든 고려에서 1 MeV 미만 에너지 범위에서 방사선가중치 정의에 다음 함수를 사용한다.

$$w_R = 2.5 + 18.2 \exp[-(\ln E_n)^2 / 6] , \quad E_n < 1 \text{ MeV} \quad (E_n : \text{MeV 단위}) \quad (B.3.15)$$

(B110) 그림B.4를 보면 1 MeV 미만 중성자 에너지 범위에서 w_R 값은 ICRP 60(1991b)에 규정한 값보다 낮다. 이 함수는 인체의 2차 광자 영향을 충실히 반

영하며, ICRP 92(ICRP 2003c)에 주어진 평균 선질계수 q_E 와 잘 연계된다.

(B111) 1 MeV 이상 에너지 범위에는 다른 고려가 필요하다. 이 에너지 범위에서는 동물연구에서 얻은 새로운 실험 데이터가 거의 없다. 그러나 동물이나 세포에 대해 수행한 모든 기존 실험데이터에 따르면 중성자 에너지가 증가하면 RBE가 명확히 감소한다. 이 현상은 Q(L) 함수에 기초해 계산한 값과 일치한다(ICRP 2003c). 그러나 식B.3.10에 규정한 q_E 와 w_R 사이 관계를 적용할 경우, ICRP 60(ICRP 1991b)에 규정한 연속함수 데이터에 비해 5 MeV와 100 MeV 사이 에너지 범위에서 중성자 w_R 이 약 30% 증가한다. 이러한 차이는 이 에너지 범위에서 RBE 값의 불확실성보다 훨씬 작다. 따라서 현실적 관점에서 이 에너지 범위의 기존 함수를 약간 변경하기 보다는 ICRP 60(ICRP 1991b)에 정한 값을 유지하는 것이 더 적절해 보인다.

(B112) 약 50 MeV를 초과하는 중성자 에너지에 대해 동물실험 데이터는 발표되지 않았다. 인체 림프구 이동원염색체 유발에 관한 일부 RBE 데이터가 최근 발표되었다(Nolte 등 2005). Pelliccioni(1998, 2004), Yoshizawa 등(1998) 및 Sato 등(2003)의 계산과 함께 이 데이터를 고려할 경우, 인체 내 평균 선질계수는 중성자 에너지가 증가하면 5 미만까지 감소하며, 약 1 GeV 이상의 아주 높은 에너지에서는 양성자 선질계수 값에 근접함을 보여준다. 이 문제는 향후 보다 상세하게 검토되어야 하지만, 약 50 MeV 이상 에너지의 중성자에 대해서도 가중치 연속함수를 사용한다. 함수 값은 에너지 증가에 따라 감소하여 50 MeV에서 약 5.5로부터 10 GeV에서 약 2.5로 감소한다. 50 MeV에서 이 함수는 그 아래 중성자 에너지에 대한 함수와 맞춰진다. Pelliccioni(1998, 2004), Yoshizawa 등(1998) 및 Sato 등(2003)이 발표한 데이터의 중성자 에너지 의존성이 고에너지에 대한 지침으로 사용되었다.

(B113) 요약하자면, 중성자 방사선가중치 계산에 다음 연속함수가 사용된다.

$$w_R = \begin{cases} 2.5 + 18.2e^{-[\ln(E_n)]^2/6}, & E_n < 1 \text{ MeV} \\ 5.0 + 17.0e^{-[\ln(2E_n)]^2/6}, & 1 \text{ MeV} \leq E_n \leq 50 \text{ MeV} \\ 2.5 + 3.25e^{-[\ln(0.04E_n)]^2/6}, & E_n > 50 \text{ MeV} \end{cases} \quad (\text{B.3.16})$$

이들 함수는 물론 복잡하다. 이들 함수는 10단위 이상의 중성자 에너지 범위에 대해 중성자 가중치를 나타내도록 경험적 접근으로 선택된 것이다. 그러나 중성자 선량, 선량률 및 생물학적 종점에 따라 실제로는 광범한 RBE값을 보이는 생물학적 데이터를 이러한 상세한 함수가 정밀하게 반영한다고 오해하면 안 된다.

(B114) 중성자 w_R 의 에너지 의존에 관한 중요한 사항에 대해 위에서 자세하게 논의한 내용을 아래와 같이 요약할 수 있다.

- ICRP 92(ICRP 2003c)에 주어진 내용에 근거하지만 추가 데이터를 반영하여 중성자 w_R 함수를 현행 권고에서 채택한다.

중성자 w_R 함수는 다음과 같은 기준에서 도출되었다.

- 현실적 이유로 계단함수(ICRP 1991b) 대신 연속 w_R 함수를 선택한다. 그러나 이 결정은 가용한 방사선생물학적 데이터가 더 정밀해진 결과가 아니라 실용적 고려에 근거한 것이다.
- ICRP 60(ICRP 1991b)과 ICRP 92(ICRP 2003c)에 준 것처럼 약 1 MeV 중성자에서 최대 w_R 값으로 약 20이 그대로 유지된다.
- 약 1 MeV 미만 중성자 에너지에서 w_R 의 에너지 의존 곡선 모양은 평균 선질계수 q_E 및 식B.3.14로 나타낸 평균 RBE_{av} 에 일반적으로 근거한다. 권고한 w_R 값은 ICRP 92(ICRP 2003c)에 제안한 값과 유사하다.
- 50 MeV를 넘는 에너지에서는 물리적 이유 때문에 w_R 는 양성자 가중치에 가까운 값에 접근해야 한다(이에 대한 방사선생물학적 데이터가 어느 정도 있다). Pelliccioni(1998, 2004), Yoshizawa 등(1998) 및 Sato 등(2003)의 계산에 따라 1GeV 이상 중성자 에너지에서는 접근값 2.5를 선정했다.

(B 115) 결과로 얻은 함수(그림B.4)는 기존의 관련된 물리, 생물학적 지식과 부합한다. 이 함수는 ICRP 92(ICRP 2003b)에 제안한 것처럼 모든 중성자 에너지에서 평균 선질계수와 방사선가중치 사이의 관계를 엄격하게 규정하지는 않으므로, 위에 제시한 이유 때문에 방호량과 실용량에 충분히 공통적 접근법은 없다. 그러나 방사선방호에 있어 외부피폭 감시에 사용하는 선량실용량이 대부분 피폭상황에서 유효선량에 대한 양호하고 보수적인 평가치를 제공한다는 점이 더 중요하다. 식B.3.16으로 준 중성자 방사선가중치를 적용할 때 이점이 달성된다.

(B116) **양성자와 파이온 방사선가중치.** 실제 방사선방호에 있어 외부 양성자 피폭에는 외부 방사선원만 고려해야 한다. ICRP 60(ICRP 1991b)에서 반도 양성자를 제외하고 에너지 2 MeV 이상 모든 양성자에 대해 방사선가중치로 5가 권고되었다(표B.3).

(B117) 근년에 승무원과 우주비행사의 우주선 피폭선량 평가에 대한 관심이 높아지면서 양성자 방사선에 대해 더 주목하고 있다. 이 경우 외부 양성자 방사선 피폭은 태양 및 우주 방사선에서 온다. 1차 방사선장에서 고에너지 양성자가

지배적이지만, 낮은 에너지에서 생물학적 효력이 높음을 고려하더라도 수 MeV 에너지 양성자는 그리 중요하지 않다. 조직에서 낮은 에너지 양성자의 비정이 짧아서(조직 내 양성자 비정: 4 MeV 양성자; 0.25 mm, 10 MeV 양성자; 1.2 mm), 대부분 피부에서 흡수된다.

(B118) 따라서 방사선방호에 적용에서는 모든 에너지 양성자에 단일 w_R 값을 채택해도 충분히 정확하다고 판단한다. 고에너지 양성자가 우주 방사선장에 가장 관련성이 높으므로 고에너지 양성자 데이터를 따르는 것이 적절하다.

(B119) 고에너지 양성자 RBE 정보를 제공하는 동물연구는 극소수이다. 측정된 대부분 RBE값은 1과 2 사이에 있다. 조직 내 전리밀도와 연계하면 고에너지 양성자는 낮은 LET 방사선(평균 LET값이 10 keV/μm보다 훨씬 낮은)으로 간주할 수 있으며, ICRP 60(ICRP 1991b)의 Q(L) 함수를 적용하면 조직에서 정지하는 100 MeV 양성자의 평균 선질계수는 1.2 미만으로 계산된다(ICRP 2003c). 1 GeV에 근접하는 매우 높은 양성자 에너지에서는 핵반응에 의한 2차 하전입자가 더 중요하게 되어 평균 선질계수는 약 1.8까지 높아진다.

(B120) 가용한 모든 데이터를 고려하여 현행 권고에서 채택한 양성자 방사선 가중치는 2이다(표B.4).

(B121) 파이온은 1차 우주선(주로 고에너지 양성자)과 대기 중 원자핵과의 상호작용에서 발생하는 음이나 양의 하전입자 또는 중성입자로서 대기 고도에서 발견되는데, 따라서 항공 승무원이나 승객의 피폭에 기여한다[$H^*(10)$ 의 약 1%]. 또한 이들 입자는 고에너지 입자가속기 차폐 후방 복잡한 방사선장의 일부로도 나타나므로 가속기 직원의 직무피폭에도 기여한다[$H^*(10)$ 의 4%까지]. 파이온의 질량은 273개 전자 질량에 해당되며, 양성자 질량의 약 1/7이다. 하전 파이온은 주로 쿨롱 상호작용을 통해 에너지를 상실한다. 음전하 파이온은 정지상태로 되면 대개 원자핵에 포획되고 그 포획핵은 여러 높은 LET 입자를 방사하면서 분해된다('성형분열 star fragmentation').

(B122) Pelliccioni(1998)는 에너지 함수로서 파이온에 대해 인체에서 평균한 평균 선질계수를 평가하기 위한 몬테칼로 계산을 수행했다(식B.3.12 참조). 그 결과에서 양전하 파이온과 50 MeV 이상의 음전하 파이온의 평균 선질계수는 완전한 에너지 의존도를 보였다(1과 2사이 값). 이 에너지 아래에서는 성형분열 때

문에 음전하 파이온의 q_E 는 증가한다.

(B123) 실제 방사선장에서 파이온 에너지 분포가 매우 광범함을 고려하고 복잡한 고에너지 방사선장에서 총 피폭에 기여가 작다는 관점에서 모든 하전 파이온에 대해 가중치 2를 사용할 것을 권고한다.

(B124) **알파입자 방사선가중치.** 사람의 알파입자 피폭은 예를 들어 라돈자손 흡입 또는 플루토늄, 폴로늄, 라듐, 토륨 및 우라늄 동위원소와 같은 알파 방출 방사성핵종 취식처럼 주로 내부 방사체로부터 온다. 흡입하거나 정맥에 주사한 알파 방사체의 위험에 관한 정보를 제공하는 많은 역학연구가 있다. 방사성핵종의 분포와 선량 및 장기나 조직 내 선량분포의 평가는 매우 복잡하며 사용 모델에 따라 달라진다. 일반적으로 선량분포가 매우 불균질하므로 계산된 선량의 불확실성은 매우 크다. 따라서 역학 및 실험 연구가 가치 있는 지침을 제공하지만 알파 방사체에 대한 RBE 평가에 이러한 연구결과만 사용할 수는 없다. 조직 내 알파입자의 저지능과 Q(L) 함수를 사용해 계산하면 조직에서 감속되는 6 MeV 알파입자의 평균 선질계수는 약 20으로 평가된다.

(B125) 알파 방출 방사성핵종의 RBE에 대한 사람과 동물 데이터를 살펴보면 RBE는 고려한 생물학적 종점에 의존한다(UNSCEAR 2000, Harrison와 Muirhead 2003). 동일한 종점에 대한 RBE값에서 방사성핵종 사이에 차이가 발생하는 주요 이유는 조직 내 방사체의 위치 차이 탓으로 본다. 알파입자 RBE값 평가를 가능하게 하는 제한된 사람 데이터에 따르면 폐암이나 간암의 경우 약 10-20을 제시하며, 뼈암과 백혈병에서는 그 보다 낮다.

(B126) 동물과 시험관 연구에서 암 관련 영향에 대해 낮은 LET 외부 방사선에 비교한 알파 방사체 RBE값이 약 10 또는 그 이상임에 대한 좋은 증거가 있다. 개에서 골수암 유발 연구 결과 이 종점에 대해 상이한 항골성 알파 방출 방사성핵종은 상이한 RBE값을 나타내는데, ^{239}Pu 에서 값이 높고 Ra 동위원소에서 값이 낮다(UNSCEAR 2000). 그러나 이러한 비교는 뼈대 평균선량에 기초하며, 그러한 차이가 발생하는 이유는 아마도 뼈 내 방사성핵종의 위치가 다르기 때문으로 보인다. 즉, 뼈 표면에 밀집하는 ^{239}Pu 과 관련 악티나이드 동위원소로부터는 뼈 표면에 가까운 표적세포 선량이 석회화 뼈 매트릭스에 보다 균일하게 분포하는 Ra(Ca과 화학적으로 유사한 알칼리토 원소로서) 동위원소에 비해 높다(ICRP 1993c; Harrison와 Muirhead 2003). 사람과 동물 연구 데이터에 따르면 뼈에 침적된 알파 방사체의 백혈병 위험에 대한 RBE는 20 미만이다(WHO

2001, Harrison과 Muirhead 2003). 따라서 알파입자 w_R 로 20을 적용하면 (적색)골수 내 표적 세포 위험이 과대평가될 수 있다.

(B127) 알파입자에 대한 데이터의 판단과 w_R 값 선택은 ICRP 92(ICRP 2003c)에서 검토했다. 최근 데이터가 알파입자 방사선가중치 변화 필요성을 강하게 지지하지 않으므로 현행 권고에서는 w_R 값으로 20을 그대로 유지한다(표 B.4).

(B128) **중이온 및 핵분열파편의 방사선가중치.** 핵분열파편에서 발생하는 선량은 주로 내부선량 계측에서 방사선방호에 중요하며, 방사선가중치에 관한 상황은 알파입자의 상황과 유사하다. 핵분열파편의 짧은 비정 때문에 장기나 조직 내 악티나이드의 생물역동학과 분포가 매우 중요하며 생물학적 효력에 크게 영향을 미친다. 따라서 표B.3과 표B.4에 주어진 방사선가중치 20은 알파입자와 동일하며, 대략적이고 보수적인 평가치로 간주할 수 있다. 조직 내 핵분열파편의 짧은 비정과 이에 따른 작은 체적 조직에 전달되는 높은 에너지는 이 부위에 매우 높은 국지 선량을 주어 RBE를 감소시킬 수 있다.²¹⁾ 제B.3.2절에서 논의한 것처럼 그러한 경우 장기나 조직 평균선량 개념을 적용함에 주의해야 하며, 특별한 고려가 필요하다.

(B129) 외부피폭 중이온은 주로 고에너지 가속기 근처, 비행 고도, 그리고 우주 방사선에서 볼 수 있다. 중이온 RBE 데이터는 거의 없으며, 그마저 대부분 데이터는 시험관실험에 근거한 것이다. ICRP 92(ICRP 2003c)에 방사선가중치 값 설정에 관련되는 RBE값을 도출한 방사선생물학적 데이터에 대해 개괄했다.

(B130) ^{40}Ar 과 ^{56}Fe 중이온에 의한 생쥐 하더리안선Harderian gland 종양 유발에 대한 RBE_M 값으로 약 30이 보고되었고 낮은 LET 방사선 범에는 낮은 값들이 보고되었다(Fry 등 1985, Alpen 등 1993). 그 결과 RBE값은 약 $100\text{--}200\text{ keV}\mu\text{m}^{-1}$ 에서 최대에 달하고 더 높은 LET에서는 이 수준이 유지될 것으로 나타났다. 동일한 시스템에서 핵분열중성자 RBE값은 중이온에 대해 관찰된 RBE 최대값에 상당한 것으로 나타났다. 염색체 이상, 세포변이, 그리고 돌연변이에 대한 체내연구도 약 $100\text{--}200\text{ keV}\mu\text{m}^{-1}$ 까지 LET가 증가할 때 중이온의 RBE가 증가하지만 매우 높은 LET에서는 감소하는 증거를 제공한다.

21) <역주> 국소 부위에 매우 높은 선량이 집중되면 세포 사멸로 인해 확률론적 관점의 생물학적 영향이 줄어들고, 따라서 RBE가 감소할 수 있다.

(B131) Sato 등(2004)은 평균 선질계수를 계산했다. 입자의 방사선질은 인체에 입사하여 그 내부에서 정지하는 중이온의 비적을 따라서 크게 변한다. w_R 도출을 위해 평균값을 선택할 수 있다. 모든 종류와 에너지의 중이온에 대해 단일 w_R 값으로 20을 선택하는 것이 방사선방호의 일반적인 용도에 적합한 것으로 판단된다. 인체의 총선량에 대해 이들 입자가 상당히 기여하는 우주에 적용할 경우 제B.3.5절 B100–B115항에서 언급한 것처럼 인체에서 평균 선질계수 계산에 기초해 보다 실질적인 접근법을 사용해야 할 것이다.

조직가중치

(B132) 유효선량 정의에는 확률론적 영향에 의한 방사선 위해에 대해 인체 내 다양한 장기와 조직의 상이한 상대적 방사선 감수성을 고려한다. 이 목적을 위해 ICRP 26(ICRP 1977)에서 여섯 개 명시된 조직과 나머지 그룹의 조직(집합적으로 “잔여조직”으로 부름)에 대해 가중치 w_T 를 도입했다. ICRP 60(ICRP 1991b)에서는 12개 조직과 장기 및 “잔여조직”에 대해 조직가중치를 지정했다(표B.1). 조직가중치는 상대적인 값이고 그 합은 1이기 때문에 전신에 선량이 균일하게 분포될 경우 인체 각 장기나 조직의 등가선량과 수치상으로 동일한 유효선량을 준다.

(B133) 2007년 권고를 위해 결정한 조직가중치는 확률론적 영향에 대한 위해 조정 명목위험계수에 근거한다(부록A). 조정전 명목위험계수는 동수의 남성과 여성으로 된 조합집단에서 암발생에 대한 방사선 기인 생애위험 평가치를 평균하여 계산했다. 위해는 수명손실, 치사율 및 삶의 질 손실의 함수로서 모델링된다. 소수 예외를 제외하고, 위험 모델의 변수는 일본 원폭생존자 연구에서 도출한 암 발생 데이터를 사용해 평가된다. 대부분 암 사이트²²⁾에 대해 초과 상대위험과 초과 절대위험 모델 모두가 개발되었다.

(B134) 유전질환의 경우 부록A에 설명한 것처럼 첫 두 세대 위험만 고려했다. 상대 방사선위해는 ICRP 60(ICRP 1991b)에 정한 것과 다르며, 따라서 w_T 값이 변경되었다. 주요 변화는 유방(0.05에서 0.12로), 생식선(0.20에서 0.08로), 그리고 잔여조직(0.05에서 0.12로)에 대한 것이다. 뇌와 침샘에 새로 0.01의 w_T 값이 부여된다. ICRP가 현행 권고에서 제안한 조직가중치는 표B.2에 주었다.

22) <역주> “cancer site”를 “암 부위”로 번역하는 경우가 많으나 “암 부위”는 발현한 암 환부를 의미하는 듯하여 잠재적 장소를 의미하도록 “암 사이트”로 표기했다.

(B135) 조직가중치 w_T 는 성 평균이며, 종사자뿐만 아니라 아동을 포함한 일반인에 대한 유효선량 평가를 위한 것이다. 근래 ICRP 88(ICRP 2001)에서 “이러한 w_T 값은 출생 후 개인의 피폭에 대해 개발되었으며, 이러한 값이 시사하는 방사선위해의 배분은 태내 선량에는 적합하지 않을 수 있다”라고 적시하면서도 자라는 태아에도 w_T 값을 적용한 바 있다. 그러나 이 접근법은 태내피폭에 의한 장기와 조직의 상대위험에 대한 종합적 데이터 없이 채택된 것이다. 출생 전 방사선 피폭에 대해 구체적 w_T 값을 권고하기에는 현재 데이터가 불충분하다는 것이 ICRP 90(ICRP 2003a)과 Streffer(2005)의 결론이다.

(B136) 여성 난소에서 암 발생에 기초한 상대위해에서 성별 고유 차이의 경우(부록A, 제A.4.6절), 생식선에 할당된 0.08의 성 평균 w_T (암과 유전적 영향 합산)는 여성 난소 가중치(0.036)에 유전적 영향 가중치(0.039)를 더한 값과 유사하다. 이에 따라 여성 난소는 충분히 보호된다고 판단한다.

(B137) 갑상선의 경우 암 발생에 기초한 상대위해 값 0.021(여성)과 0.008(남성)(부록A, 제A.4.6절)은 거의 3배 정도 다르다. 그러나 아동의 높은 감수성을 반영하기 위해 갑상선에 0.05를 할당하기 때문에 성별 사이 위해 차이는 보수적인 방법으로 고려된다.

(B138) 유효선량 계산에서 특별 현안 하나는 ‘잔여’조직에 대한 선량 평가이다. ICRP 26(ICRP 1977)에서는 잔여조직에 가중치 0.30을 할당했다. 잔여조직에 대한 선량당량은 잔여조직 중 가장 많이 피폭한 다섯 조직 선량의 산술평균으로 하고 이들 각 조직에 w_T 값 0.06을 할당했다. 이 절차는 외부나 내부의 다양한 피폭에서 이들 다섯 조직이 달라질 수 있기 때문에 유효선량당량이 덧셈성 additivity을 상실하게 한다.

(B139) ICRP 60에서는 잔여조직에 0.05의 가중치를 할당했다. 그러나 ICRP 60의 표A-3 주3에 규정한 배분규칙splitting rule 때문에 크기는 줄었지만 덧셈성은 여전히 상실된다(아래 설명 참조). “잔여조직”에 대한 등가선량은 10개의 특정 조직과 장기에 대한 평균값으로 할당했다(표 B.1). 이전에 잔여조직에 포함되었던 상부대장(ICRP 1991)은 하부대장과 함께 결장 정의에 포함되었다(ICRP 1995a). 호흡기관과 흡입한 방사성핵종의 선량계수를 다룬 ICRP 66(ICRP 1994a)에서는 흡외기도를 잔여조직의 일부로 간주해야 한다고 명시했다.

(B140) ICRP 60(ICRP 1991b)에서 상세히 설명하지 않았지만 잔여조직 취급은 ICRP 68과 72(ICRP 1994b, 1996c)에 설명되어 있다. 잔여조직 선량은 잔여조직 장기나 조직 등가선량의 질량 가중평균으로 정의했다(ICRP 60의 표A-3 주 2 참조). 특정 장기나 조직의 질량은 서로 매우 다르기 때문에 잔여조직 선량에 대한 이들 조직과 장기의 기여도 서로 매우 다르다. 근육은 질량이 크기 때문에 거의 0.05의 유효 가중치가 적용되었는데, 근육의 방사선 감수성은 낮다고 판단되므로 이 값은 정당화되지 않는다. 그러나 외부피폭의 경우 여러 조직의 선량은 유사하며(근육 선량과는 다소 다름), 이에 따라 ICRP 74(ICRP 1996b)에서는 가중치 없는 단순 산술적 선량 평균을 근사값으로 사용했다(제B.3.4절 참조).

(B141) ICRP 60(ICRP 1991b)에서 권고한 유효선량 계산 방법에는 명시적 가중치(w_T)가 없는 잔여조직 중 한 조직이 모든 조직 중 가장 높은 선량을 받을 경우에 대한 규정이 들어있다. 그러한 경우 잔여조직의 $w_T(0.05)$ 는 잔여조직의 질량 가중평균 선량(즉, 기본 잔여조직 선량. 위 설명 참조)과 그 특정 조직 선량에 균등하게 분할된다. 이를 ‘배분규칙’이라 하며, 그러한 규칙이 적용되는 경우를 ‘잔여조직 배분’ 사례라 했다.

(B142) Nelson 등(1997)은 이 규칙의 시사점을 탐구했다. 배분규칙의 목적은 유효선량과 그 한도를 통해 특정 가중치가 할당되지 않지만 잠재적으로 높게 피폭하는 조직(예를 들어 흉외 부위 ET_1 23) 또는 특정 방사성핵종 섭취 후 신장에 방호를 제공하는 것이었다. 그러나 이 접근에서 단점 중 하나는 유효선량의 형성이 상이한 방사성핵종이나 상이한 외부 광자빔 에너지마다 다를 수 있기 때문에 유효선량이 엄격한 덧셈 가능한 양이 아니라는 것이다.

(B143) 이제 표B.2에 주어진 잔여조직의 특정 조직에 대한 등가선량은 추가적인 질량 가중 없이 평균하기를 권고한다. 이는 각각의 잔여조직에 주어지는 가중치는 명시 조직에 할당된 최소값(0.01)보다 작음을 의미한다. 잔여조직의 w_T 는 0.12이다.

(B144) 잔여조직 선량 계산에 대해 ICRP는 양 성별의 잔여조직에 대한 선량의 산술평균을 나타내는 선량을 잔여조직 선량으로 정한다. 다른 장기와 조직에 대한 접근법과 마찬가지로 잔여조직의 등가선량은 남성과 여성에 대해 따로 정의되며, 이 값은 식B.3.9에 포함된다. 잔여조직에 대한 등가선량은 표B.2의 각주

23) <역주> 호흡기모델에서 ET_1 은 비강 부위를 지칭한다.

에 열거된 조직에서 등가선량의 산술평균으로 계산한다. 현재의 잔여조직 구성은 양 성별에 공통인 12개 조직과 각 성별 고유 조직 하나(남성의 전립선, 여성의 자궁/자궁경부)를 지정한다. 남성 잔여조직 등가선량, H_{rem}^M 및 여성 잔여조직 등가선량 H_{rem}^F 은 다음과 같이 계산한다.

$$H_{rem}^M = \frac{1}{13} \sum_1^{13} H_T^M \quad \text{and} \quad H_{rem}^F = \frac{1}{13} \sum_1^{13} H_T^F \quad (\text{B.3.17})$$

(B145) 식B.3.9에서 합산은 남성과 여성의 잔여조직 등가선량에도 확대 적용된다.

B.3.6. 참고문헌(B.3절)

- Alpen, E.L., Poweres-Risius, P., Curtis, S.B., et al., 1993. Tumorigenic potential of high-Z, high-LET charged-particle radiations. *Radiat. Res.* 136, 382-391.
- Bigildeev, E.A., Michalik, V., Wilhelmova', L., 1992. Theoretical estimation of quality factor for tritium. *Health Phys.* 63, 462-463.
- Bingham, D., Gardin, I., Hoyes, K.P., 2000. The problem of Auger emitters for radiological protection. In: *Proc. Workshop on Environmental Dosimetry*, Avignon, September 1999. *Radiat. Prot. Dosim.* 92, 219-228.
- CERRIE, 2004. Report of the Committee Examining Radiation Risks of Internal Emitters (CERRIE). www.cerrie.org, ISBN 0-85951-545-1.
- Charles, M.W., Mill, A.J., Darley, P.J., 2003. Carcinogenic risk of hot-particle exposures. *J. Radiol. Prot.* 23, 5-28.
- Chen, J., Roos, H., Kellerer, A.M., 2005. Radiation quality of photons in small and large receptors - a microdosimetric analysis. *Radiat. Prot. Dosim.* 118(3), 238-242.
- Dietze, G., Harder, D., 2004. Proposal for a modified radiation weighting factor for neutrons. *Proceedings of the 11th International Congress of IRPA*. Available at www.irpa.net.
- Dietze, G., Siebert, B.R.L., 1994. Photon and neutron dose contributions and mean quality factors in phantom of different size irradiated by monoenergetic neutrons. *Radiation Research* 140, 130-133.

- Dietze, G., Alberts, W.G., 2004. Why it is advisable to keep $w_R = 1$ and $Q = 1$ for photons and electrons. *Radiat. Prot. Dosim.* 109(4), 297–302.
- Edwards, A.A., 1997. The use of chromosomal aberrations in human lymphocytes for biological dosimetry. *Radiat. Res.* 148(suppl.), 39–44.
- Frankenberg, D., Frankenberg-Schwager, M., Garg, I., et al., 2002. Mutation induction and neoplastic transformation in human and human–hamster hybrid cells: dependence on photon energy and modulation in the low dose range. *J. Radiol. Prot.* 22, A17–A20.
- Fry, R.J.M., Powers-Risius, P., Alpen, E.L., et al., 1985. High-LET radiation carcinogenesis. *Radiat. Res.* 104, S188–S195.
- Goddu, S.M., Howell, R.W., Rao, D.V., 1996. Calculation of equivalent dose for Auger electron emitting radionuclides distributed in human organs. *Acta Oncol.* 35, 909–916.
- Goodhead, D.T., 1994. Initial events in the cellular effects of ionizing radiations: clustered damage in DNA. *Int. J. Rad. Biol.* 65, 7–17.
- Gragtmans, N.J., Myers, D.K., Johnson, J.R., et al., 1984. Occurrence of mammary tumours in rats after exposure to tritium beta rays and 200 kVp x rays. *Radiat. Res.* 99, 636–650.
- Guerrero-Carbajal, C., Edwards, A.A., Lloyd, D.C., 2003. Induction of chromosome aberration in human lymphocytes and its dependence on x-ray energy. *Radiat. Prot. Dosim.* 106(2), 131–135.
- Harder, D., Petoussi-Hens, N., Regulla, D., et al., 2004. Spectra of scattered photons in large absorbers and their importance for the values of the radiation weighting factor w_R . *Radiat. Prot. Dosim.* 109(4), 291–295.
- Harrison, J.D., Muirhead, C.R., 2003. Quantitative comparisons of cancer induction in humans by internally deposited radionuclides and external radiation. *Int. J. Radiat. Biol.* 79, 1–13.
- Hofer, K.G., Harris, C.R., Smith, J.M., 1975. Radiotoxicity of intracellular ^{67}Ga , ^{125}I and ^3H : nuclear versus cytoplasmic radiation effects in murine L1210 cells. *Int. J. Radiat. Biol.* 28, 225–241.
- Howell, R.W., Narra, V.R., Sastry, K.S.R., et al., 1993. On the equivalent dose for Auger electron emitters. *Radiat. Res.* 134, 71–78.
- ICRP/ICRU, 1963. Report of the RBE Committee of the International Commissions on Radiological Protection and on Radiation Units and Measurements. *Health Phys.* 9, 357.

- ICRP, 1966. Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 9. Pergamon Press, Oxford, UK.
- ICRP, 1977. Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 26. Ann. ICRP 1(3).
- ICRP, 1979. Limits for the intake of radionuclides by workers. ICRP Publication 30, Part 1. Ann. ICRP 2(3/4).
- ICRP, 1980. Biological effects of inhaled radionuclides. ICRP Publication 31. Ann. ICRP 4(1/2).
- ICRP, 1991b. 1990 Recommendations of the ICRP. ICRP Publication 60. Ann. ICRP 21(1-3).
- ICRP, 1993c. Age-dependent doses to members of the public from intake of radionuclides: Part 2. Ingestion dose coefficients. ICRP Publication 67. Ann. ICRP 23(3/4).
- ICRP, 1994a. Human respiratory tract model for radiological protection. ICRP Publication 66, Ann ICRP 24(1-3).
- ICRP, 1994b. Dose coefficients for intake of radionuclides by workers. ICRP Publication 68. Ann. ICRP 24(4).
- ICRP, 1995a. Age-dependent doses to members of the public from intake of radionuclides: Part 3: Ingestion dose coefficients. ICRP Publication 69. Ann. ICRP 25(1).
- ICRP, 1996b. Conversion coefficients for use in radiological protection against external radiation. ICRP Publication 74. Ann. ICRP 26(3/4).
- ICRP, 1996c. Age-dependent doses to members of the public from intake of radionuclides: Part 5 Compilation of ingestion and inhalation dose coefficients. ICRP Publication 72. Ann. ICRP 26(1).
- ICRP, 2001. Doses to the embryo and embryo/fetus from intakes of radionuclides by the mother. ICRP Publication 88. Ann. ICRP 31(1-3).
- ICRP, 2002. Basic anatomical and physiological data for use in radiological protection. ICRP Publication 89. Ann. ICRP 32(3-4).
- ICRP, 2003a. Biological effects after prenatal irradiation (embryo and fetus). ICRP Publication 90. Ann. ICRP 33(1/2).
- ICRP, 2003c. Relative biological effectiveness (RBE), quality factor (Q), and radiation weighting factor δ_{WRD} . ICRP Publication 92. Ann. ICRP 33(4).
- ICRP, 2006c. Human alimentary tract model for radiological protection.

- ICRP Publication 100. Ann. ICRP 36(1/2).
- ICRU, 1970. Linear Energy Transfer. ICRU Report 16. ICRU Publications: Bethesda(MD).
- ICRU, 1986. The Quality Factor in Radiation Protection. ICRU Report 40. ICRU Publications: Bethesda(MD).
- ICRU, 1998. Fundamental Quantities and Units for Ionizing Radiation. ICRU Report 60. ICRU Publications: Bethesda, MD.
- Johnson, J.R., Myers, D.K., Jackson, J.S., et al., 1995. Relative biological effectiveness of tritium for induction of myeloid leukaemia. Radiat. Res. 144, 82–89.
- Kassis, A.I., Fayed, F., Kinsey, B.M., et al., 1989. Radiotoxicity of an I-125 labeled DNA intercalator in mammalian cells. Radiat. Res. 118, 283–294.
- Kellerer, A.M., Leuthold, G., Mares, V., et al., 2004. Options for the modified radiation weighting factor of neutrons. Radiat. Prot. Dosim. 109(3), 181–188.
- Lafuma, J., Nenot, J.C., Morin, M., et al., 1974. Respiratory carcinogenesis in rats after inhalation of radioactive aerosols of actinides and lanthanides in various chemical forms. In: Experimental Lung Cancer. Karbe, E. and Parks, J.F.(eds) Vol. 1, p. 443–453, Springer Verlag, New York.
- Moiseenko, V.V., Walker, A.J., Prestwich, W.V., 1997. Energy deposition pattern from tritium and different energy photons—a comparative study. Health Phys. 73, 388–392.
- Morstin, K., Kopec, M., Olko, P., et al., 1993. Microdosimetry of tritium. Health Phys. 65, 648–656.
- NCRP, 1990. The Relative Biological Effectiveness of Radiations of Different Quality. NCRP Report No. 104. National Council on Radiation Protection and Measurements, Bethesda, MD.
- Nelson, C.B., Phipps, A.W., Silk, T.J., et al., 1997. The ICRP Publication 60 formulation of remainder dose and its contribution to effective dose in internal dosimetry. Radiat. Prot. Dosim. 71, 33–40.
- Nolte, R.M., Uhlbradt, K.H., Meulders, J.P., et al., 2005. RBE of quasi-monoenergetic 60 MeV neutron radiation for induction of dicentric chromosome aberrations in human lymphocytes. Radiat. Environ. Biophys. 44, 201–209.
- Pelliccioni, M., 1998. Radiation weighting factors and high energy

- radiation. *Radiat. Prot. Dosim.* 80(4), 371–378.
- Pelliccioni, M., 2004. The impact of ICRP Publication 92 on the conversion coefficients in use for cosmic ray dosimetry. *Radiat. Prot. Dosim.* 109 (4), 303–309.
- Rao, D.V., Narra, V.R., Howell, R.W., et al., 1990. Biological consequences of nuclear versus cytoplasmic decays of ^{125}I : cysteamine as a radioprotector against Auger cascades in vivo. *Radiat. Res.* 124, 188–193.
- Sasaki, M.S., 1991. Primary damage and fixation of chromosomal DNA as probed by monochromatic soft x rays and low-energy neutrons. In: Fielden, E.M., O'Neil, P.(Eds.). *The Early Effects of Radiation on DNA*. NATO ASI Series, Vol. H54, 369–84. Springer Verlag, Berlin, Germany.
- Sato, T., Tsuda, S., Sakamoto, Y., et al., 2003. Analysis of dose-LET distribution in the human body irradiated by high energy hadrons. *Radiat. Prot. Dosim.* 106, 145–153.
- Sato, T., Tsuda, S., Sakamoto, Y., et al., 2004. Profile of energy deposition in human body irradiated by heavy ions. *J. Nucl. Sci. Technol. Suppl.* 4, 287–290.
- Schmid, E., Regulla, D., Kramer, H.M., 2002. The effect of 29 kV x-rays on the dose response of chromosome aberrations in human lymphocytes. *Radiat. Res.* 158, 771–777.
- Schmid, E., Schlegel, D., Guldbakke, S., et al., 2003. RBE of nearly monoenergetic neutrons at energies of 36 keV–14.6 MeV for induction of dicentrics in human lymphocytes. *Radiat. Environm. Biophys.* 42, 87–94.
- SSK, 2005. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. Vergleichende Bewertung der biologischen Wirksamkeit verschiedener ionisierender Strahlungen. Veröffentlichungen der Strahlenschutzkommission, Bd. 53. Verlag Elsevier/Urban und Fischer.
- Straume, T., Carsten, A.L., 1993. Tritium radiobiology and relative biological effectiveness. *Health Phys.* 65, 657–672.
- Streffer, C., van Beuningen, D., Elias, S., 1978. Comparative effects of tritiated water and thymidine on the preimplanted mouse embryo in vitro. *Curr. Topics Radiat. Res. Q.* 12, 182–193.
- Streffer, C., 2005. Can tissue weighting factors be established for the embryo and fetus?. *Radiat. Prot. Dosim.* 112, 519–523.

- Ueno, A.M., Furuno-Fukushi, I., Matsudaira, H., 1989. Cell killing and mutation to 6-thioguanine resistance after exposure to tritiated amino acids and tritiated thymidine in cultured mammalian cells. In: Tritium Radiobiology and Health Physics(Ed., S. Okada). Proc. 3rd Japanese-S Workshop. Nagoya University, Japan. IPPJ-REV-3, 200-210.
- UNSCEAR, 1993. Sources and Effects of Ionizing Radiation. Report of the United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Annex F. Influence of dose and dose rate on stochastic effects of radiation. United Nations, New York, NY.
- UNSCEAR, 2000. Sources and Effects of Ionizing Radiation. Report of the United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Volume II: Effects. United Nations, New York.
- Warters, R.L., Hofer, K.G., Harris, C.R., et al., 1978. Radionuclide toxicity in cultured mammalian cells: elucidation of the primary site of radiation damage. *Curr. Topics Radiat. Res. Q.* 12, 389-407.
- WHO, 2001. IARC Monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans. Vol. 78. Ionizing Radiation, Part 2: some internally deposited radionuclides. World Health Organisation, International Agency for Research on Cancer. IARC Press, Lyon.
- Yoshizawa, N., Sato, O., Takagi, S., et al., 1998. External radiation conversion coefficients using radiation weighting factor and quality factor for neutron and proton from 20 MeV to 10 GeV. *Nucl. Sci. Techn.* 35(12), 928-942

B.4. 실용량

(B146) 인체 관련 방호량(등가선량 및 유효선량)은 실제로 측정할 수 없으므로 방사선 감시에서 물리량으로 직접 사용할 수는 없다. 따라서 실용량을 조직이나 장기의 유효선량이나 등가선량 평가에 사용한다(그림B.1과 그림B.2).

(B147) 실용량을 사용하는 목적은 대부분 피폭 조건에서 사람의 피폭²⁴⁾에 관련된 방호량의 평가치 또는 그 상한 값을 제공하는 것이다. 이 양이 실제 규정이나 지침에 사용되는 경우가 많다. 그림B.2 보인 것처럼 다양한 유형의 실용량이 외부피폭에²⁵⁾ 사용된다. 외부 방사선 피폭의 감시를 위해 ICRU가 선량 실용량을 정의했으며(ICRU 1985, 1988)(제B.4.2절 참조) 1990년대에 많은 국가에서 이 실용량을 방사선보호 실무에 채택했다. 그 사용을 계속 권고하며, 약간의 변경만 제안한다. 내부 선량계측의 경우 등가선량이나 유효선량 평가치를 직접 제공하는 선량 실용량은 정의되지 않았다. 인체 내 방사성핵종으로 인한 등가선량이나 유효선량 평가에는 다양한 방법이 적용된다. 이러한 방법은 대개 다양한 방사능 측정 및 생물역동학 모델(전산 모델) 적용을 바탕으로 한다(제B.4.2절 참조).

B.4.1. 외부피폭

(B148) 외부피폭 상황에서 방사선감시를 위해(공간감시 또는 개인감시) 특정 선량당량 실용량이 정의된다. 일상감시에서 이러한 선량당량 값은 특히 그것이 방호 한도 미만일 경우 유효선량이나 피부선량 각각에 대한 충분히 정밀한 평가치로 간주된다.

(B149) 선량 실용량은 다음과 같은 이유 때문에 외부피폭 감시에 사용된다.

- 지역감시에 점 양이 필요하다.²⁶⁾
- 지역감시에서 선량 값은 입사 방사선의 방향 분포에 의존하지 않아야 한다.

24) <역주> 원문은 ‘또는 잠재피폭’을 포함하고 있으나 잠재피폭은 일어나지 않은 상황이므로 측정과 관련된 실용량과 연계하는 것은 부적절하여 삭제했다.

25) <역주> 원문은 내부피폭도 포함하고 있으나 아직 내부피폭에 대한 실용량은 정의된 것이 없으며 그림B.2도 외부피폭에 대해서만 보이고 있어 삭제했다.

26) <역주> 점 양이 필요하다는 의미는 지역감시가 공간의 어떤 위치 즉, 점에서 피폭준위를 평가하기 위한 것이기 때문이다. 실제에서는 측정기 자체도 어느 정도 크기를 가지고 있기 때문에 엄밀한 점 양을 측정할 수는 없지만 개념적으로는 점 양을 겨눈다는 의미이다.

- 방사선감시를 위한 측정기는 교정표준이 존재하는 물리량으로 교정할 필요가 있다.

(B150) 지역감시와 개인감시를 위해 다른 선량당량 실용량이 정의되었다.

(B151) 외부피폭에 대한 선량 실용량의 기본적 개념은 ICRU 보고서 39와 43 (ICRU 1985, 1988)에 설명되어 있다. 2007년 권고를 위해 채택한 정의는 ICRU 보고서 51(ICRU 1993b)과 ICRU 보고서 66(ICRU 2001b)에 주어졌다.

(B152) 제B.1절에 설명한 것처럼 선량당량 H는 다음과 같이 정의된다.

$$H = Q \cdot D \quad (\text{B.4.1})$$

여기서 D는 조직 내 관심 지점에서 흡수선량이며, Q는 이 지점에서 해당 선질계수로서 그 값은 이 지점의 작은 체적소를 지나는 하전입자의 종류와 에너지에 의해 결정된다. 방사선의 생물학적 효력은 조직 내 하전입자 비적을 따르는 전리 밀도와 상관됨이 잘 알려져 있다. 따라서 Q는 물에서 하전입자의 무제한 에너지 전달선밀도 L_∞ (L 이나 LET로도 표현)의 함수로 정의된다.

$$Q(L) = \begin{cases} 1 & L < 10\text{keV}/\mu\text{m} \\ 0.32L - 2.2 & 10 \leq L \leq 100\text{keV}/\mu\text{m} \\ 300/\sqrt{L} & L > 100\text{keV}/\mu\text{m} \end{cases} \quad (\text{B.4.2})$$

(B153) 선질계수 함수 $Q(L)$ 은 ICRP 60(ICRP 1991b)에 규정되어 있다. 이 함수는 세포와 분자체계에 대한 방사선생물학적 연구 결과와 동물실험 결과를 고려해 판단한 결과이다. 이 함수의 평가를 위한 방사선생물학 데이터베이스는 1990년 이후 크게 변하지 않았으며(ICRP 2003c 참조), 따라서 함수에 어떤 변경을 제안하지 않는다.

(B154) 그러면 조직 내 한 지점에서 선질계수 Q는 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$Q = \frac{1}{D} \int_{L=0}^{\infty} Q(L) D_L dL, \quad (\text{B.4.3})$$

여기서 $D_L = \frac{dD}{dL}$ 는 관심 지점에서 흡수선량에 기여한 하전입자의 L 에 대한 D의 분포이다. 중성자 상호작용에 의해 조직에 다양한 종류의 2차 하전입자가 발생하기 때문에 이 함수는 중성자에 대해 특히 중요하다.

(B155) 방사선방호의 여러 가지 과제에는 여러 선량 실용량이 필요하다. 여기에는 작업장에서 방사선관리 및 관리구역 또는 제한구역 정의를 위한 지역감시 area monitoring와 개인 피폭의 관리와 제한을 위한 개인감시 personal monitoring가 포함된다. 지역감시기를 사용한 측정은 자유공기에서 수행하는 것이 바람직하고, 개인선량계는 신체에 패용한다. 결과적으로 주어진 상황에서 자유공기 중의 지역감시기가 “보는” 방사선장은 인체 내 방사선의 후방산란과 흡수에 의해 방사선장이 강하게 영향을 받는 인체에 패용한 개인선량계가 “보는” 방사선장과 다르다. 다른 선량 실용량 사용은 이러한 차이를 반영한다.

(B156) 외부피폭을 감시하는 과제들에 대해 상이한 선량 실용량 적용을 설명하는 데 표B.5를 사용할 수 있다.

(B157) 표B.5의 요강을 사용하면 실용량 적용 범위를 지정함에 있어 “강투과 방사선 strongly penetrating radiation”(“투과성 방사선”이라고도 함)과 “저투과 방사선 low-penetrating radiation”(“약투과 방사선”이라고도 함)과 같은 용어를 사용할 필요가 없다. ICRU(1993b)는 $H^*(10)$ 과 $H_p(10)$ 는 강투과 방사선(예: 광자[12 keV 이상]나 중성자) 감시를 위한 것이고, $H'(0.07, \Omega)$ 와 $H_p(0.07)$ 는 저투과 방사선(예: 베타 입자) 감시를 위한 것이라고 설명했다. 또한 $H_p(0.07)$ 는 모든 전리방사선에서 손과 발에 대한 선량 감시에도 사용된다. 눈 수정체 피폭의 감시에 드물게 사용되는 양 $H'(3, \Omega)$ 와 $H_p(3)$ 는 이 요강에 포함하지 않았다(제B.4절 B165-B167항 참조).

(B158) 개인감시가 사용되지 않고, 지역감시나 계산 방법이 개인피폭을 평가하기 위해 적용되는 상황도 있다. 그러한 상황에는 항공 승무원 선량 평가, 계획 선량 평가 및 작업장과 자연 환경에서 선량 평가가 포함된다.

지역감시용 실용량

(B159) 모든 종류의 외부 방사선에 대해 지역감시용 실용량은 단순한 모의체, 즉 ICRU구 내 한 지점에서 선량당량 값을 근거로 정의된다. ICRU구는 조직 등가 물질이다(직경 30 cm, 밀도 $1g/cm^3$ 인 ICRU(연)조직, 질량 조성: 76.2% 산소, 11.1% 탄소, 10.1% 수소 및 2.6% 질소). 방사선감시에서 대부분 경우 ICRU구는 고려하는 방사선장의 산란과 감쇠와 관련해 인체를 적절히 근사시킨다.

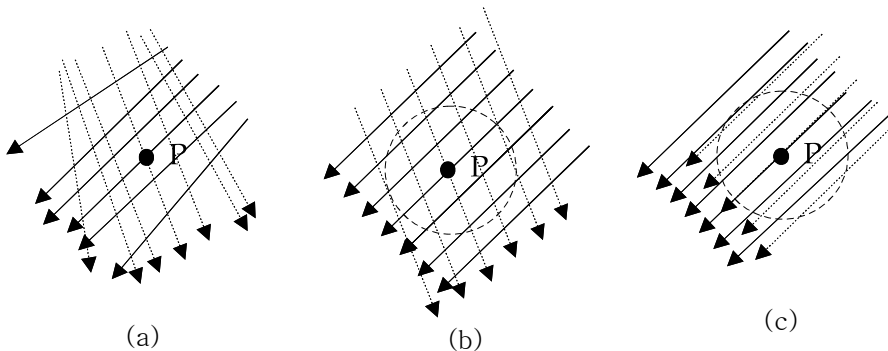
표B.5. 외부피폭 감시에 관한 선량 실용량의 적용

과제	선량 실용량 적용 대상	
	지역감시	개인감시
유효선량 관리	주위선량당량, $H^*(10)$	개인선량당량, $H_p(10)$
피부, 손, 발 및 눈 수정체 선량 관리	방향성선량당량, $H'(0.07, \Omega)$	개인선량당량, $H_p(0.07)$

(B160) ICRU구에서 정의한 지역감시용 실용량은 점 양과 덧셈성 특성을 가져야 한다. 이들 양의 정의에서 “확장expanded”, “정렬aligned” 방사선장이라는 용어를 도입하여 이러한 특성을 달성한다.²⁷⁾

(B161) 가상 방사선장으로 정의된 확장방사선장은 충분히 큰 체적 내 모든 지점에서 관심 지점의 실제 방사선장 값과 같은 스펙트럼과 방향각 플루언스 값을 갖는 방사선장이다. 방사선장을 확장하면 실제 방사선장의 관심 지점과 동일한 플루언스, 에너지 분포 및 방향 분포로 된 균질 방사선장에 ICRU구를 노출할

27) <역주> 아래 그림은 외부피폭 실용량 정의를 위한 확장방사선장과 정렬확장방사선장을 개념적으로 도시한 것이다. 확장정렬방사선장은 항상 확장을 전제로 하므로 편의를 위해 ‘정렬방사선장’으로 줄여 부르기도 한다.



실용량을 정의하기 위해 실제 방사선장(a)를 확장방사선장(b)과 정렬확장방사선장(c)로 변경한 개념. 점선으로 된 원은 방향성선량당량(b)과 주위선량당량(c)을 측정하기 위해 관심 있는 점 P에 중심을 두는 ICRU구를 나타낸다.

수 있게 한다.

(B162) 확장방사선장에서 모든 방사선을 ICRU구에서 명시한 한 반경 벡터 Ω 에 반대 방향이 되도록 정렬하면 확장정렬방사선장을 얻는다. 이러한 가상 방사선장에서 ICRU구는 한 방향으로 균질하게 조사되며, 방사선장의 플루언스는 실제 방사선장의 관심 지점에서 각미분 플루언스를 모든 방향에 대해 적분한 것이 된다. 확장정렬방사선장에서 ICRU구 내 어떤 지점에서든 선량당량 값은 실제 방사선장의 방사선 방향 분포와 무관하게 된다. 방사선장 양을 실용량에 연관시키는 환산계수는 일반적으로 고려하는 모의체 외부로 진공으로 가정하여 계산한다.

(B163) **주위선량당량** $H^*(10)$. 지역감시의 경우 유효선량 평가를 위한 실용량은 다음과 같이 정의한 주위선량당량 $H^*(10)$ ²⁸⁾이다(ICRU 2001b).

- **주위선량당량** $H^*(10)$ -방사선장의 한 지점에서-은 해당 확장정렬방사선장에서 ICRU구 내 정렬방사선장과 반대로 향한 반경 벡터의 10 mm 깊이에서 발생하는 선량당량이다.

(B164) 외부 방사선피폭의 대부분 실제 상황에서 주위선량당량은 제한량 값의 보수적 평가치나 상한을 제공한다는 목표를 달성한다. 고에너지 가속기 근처나 우주선 방사선장처럼 고에너지 방사선장에 있는 사람에게는 항상 그렇지 않다(Pelliccioni 1998). 이 경우 2차 하전입자 평형상태를 달성할 수 있는 깊이가 매우 중요하다. 매우 고에너지 입자에 대해서는 실용량으로 정의한, ICRU조직 10mm 깊이는 해당 지점 앞에 하전입자 적립build-up을 형성하기에 충분하지 않으므로 실용량이 유효선량을 과소평가할 수 있다. 그렇지만 항공승무원에 관련된 방사선장의 경우 중성자와 양성자에 권고한 방사선가중치(제B.3.5절 B100-B123항 참조)를 고려할 경우 $H^*(10)$ 는 적합한 실용량으로 판단된다(Pelliccioni, 개인교신).

(B165) **방향성선량당량**, $H'(d, \Omega)$. 저투과 방사선²⁹⁾에 대한 지역감시에서 실용량은 방향성선량당량 $H'(0.07, \Omega)$ 또는 드문 경우이긴 하지만 $H'(3, \Omega)$ 로서

28) <역주> 선량 실용량의 일반적 기호는 $H^*(d)$ 이다. 즉, 정렬확장방사선장에 놓인 ICRU구의 정렬 방사선장과 평행한 축(주축) 위 구면으로부터 d mm 깊이에서 선량당량으로 정의된다. 즉, 위상 첨자 *는 주축을 의미하며 깊이 d는 mm 단위로 표현한다.

29) <역주> 157항에서 설명했듯이 실제 실용량을 방사선방호에 적용하는데 “고투과 방사선” 또는 “저투과 방사선”과 같은 제한을 더 이상 둘 필요가 없다. 그럼에도 여기서 이렇게 표현하는 것은 실용량을 정의하는 권한은 ICRU에 있는데 아직 기존 표현을 유지하고 있는 ICRU 정의를 옮겨왔기 때문이다.

다음과 같이 정의된다.

- **방향성선량당량** $H'(d, \Omega)$ -방사선장의 한 지점에서-는 해당 확장방사선장에서 ICRU구의 특정 방향 Ω 인 반경 위 깊이 d 에서 발생하는 선량당량이다.³⁰⁾
- 저투과 방사선의 경우 $d=0.07$ mm이며 $H'(d, \Omega)$ 는 $H'(0.07, \Omega)$ 로 표기할 수 있다.

(B166) 눈 수정체 선량을 감시하는 경우에 ICRU는 $d=3$ mm인 $H'(3, \Omega)$ 를 권고하고 있다. 그러나 방향성선량당량 $H'(3, \Omega)$ 과 개인선량당량 $H_p(3)$ 는 실제로 거의 사용하지 않으며, 이 양의 측정을 위한 계측기도 거의 없다. 눈 수정체 선량을 다른 실용량으로 평가할 수 있다면 눈 수정체 피폭 감시는 충분히 달성될 수 있으므로 3 mm 깊이에서 선량의 사용 중단을 제안하고 있다. 보통 $H_p(0.07)$ 를 이 특별 목적으로 사용한다(ICRU 1998).

(B167) 저투과 방사선에 대한 지역감시에는 $H'(0.07, \Omega)$ 가 거의 유일하게 사용된다. 교정 절차에서 주로 발생하는 한 방향 방사선 입사의 경우 이 양은 $H'(0.07, \alpha)$ 로 표현할 수 있다. 여기서 α 는 Ω 방향과 입사 방사선의 반대 방향 사이의 각도이다. 방사선방호 실제에서 중요한 것은 최대 $H'(0.07, \Omega)$ 값일 경우가 많기 때문에 방향 Ω 는 그 방향이 지정되지 않는 경우가 많다. 최대값은 통상 측정 중 선량계를 돌리면서 최고 관독값을 확인함으로써 얻는다.

개인감시용 실용량

(B168) 외부피폭의 개인감시는 주로 신체에 패용한 개인선량계를 사용해 수행되며, 이 적용을 위해 정의한 실용량은 이 상황을 반영한다. 실용량의 참값은 선량계를 패용한 위치에 인접한 곳의 노출상황에 따라 결정된다. 개인감시를 위한 실용량은 개인선량당량 $H_p(d)$ 이다.

(B169) **개인선량당량** $H_p(d)$ 는 몸체의 특정 지점 아래 ICRU(연)조직 내 적절한 깊이 d 에서 선량당량이다. 특정 지점은 일반적으로 개인선량계를 패용한 부위이다. 유효선량을 평가할 때는 $d=10$ mm 깊이를, 피부나 손과 발의 등가선량 평가에는 $d=0.07$ mm 깊이를 사용할 것을 권고한다. 눈 수정체 선량을 감시하는 특별한 경우 $d=3$ mm 깊이가 적합한 것으로 제안된다.³¹⁾

30) <역주> 방향성선량당량의 일반적 표기는 $H'(d, \vec{\Omega})$ 이다. 즉, 확장방사선장에 놓인 ICRU구에서 방향 $\vec{\Omega}$ 인 반경 위 구면으로부터 깊이 d mm에서 선량당량이다. 좌표축은 기준이 없으므로 사용 문맥에서 설정한 방향이 $\vec{\Omega}$ 가 된다.

(B170) 개인감시를 위한 실용량은 유효선량 평가를 가능하게 하거나 거의 모든 피폭조건에서 보수적 평가치를 제공해야 한다. 그러나 이 경우 개인선량계는 피폭 관점에서 대표적인 인체의 부위에 패용해야 한다. 선량계 위치가 몸통 앞일 경우, $H_p(10)$ 는 인체에 대해 측방이나 등방성 방사선 입사의 경우에도 대체로 보수적인 유효선량 평가치를 제공한다. 그렇지만 후방에서만 피폭한다면 $H_p(10)$ 을 옳게 측정하는 선량계를 앞에 패용해서는 E 평가에 적합하지 않을 것이다. 또한 인체 일부만 피폭하는 경우 개인선량계가 유효선량 평가를 위한 대표적 값을 제공하지 않을 수 있다.

B.4.2. 내부피폭³²⁾

(B171) 방사성핵종 섭취에 대한 선량평가에 일반적으로 적용되는 체계는 직접 측정(예: 전신계수기로 전신의 방사능 측정 또는 외부 계수기로 특정 장기나 조직의 방사능 측정)이나 간접측정(예: 소변, 대변, 공기 또는 기타 환경 시료의 방사능 측정)으로부터 방사성핵종 섭취량을 계산하는 방법을 우선 사용한다. 생물역동학 모델을 적용하고, 섭취량과 ICRP가 권고하고 EU 기본안전기준(EU 1996)과 국제기본안전기준(IAEA 1996)에 도입된 기준 선량계수(단위 섭취 당 선량, Sv Bq⁻¹)로 유효선량을 계산한다. ICRP는 많은 수의 방사성핵종에 대해 흡입이나 취식에 의한 섭취에 대한 선량계수를 제공했는데, 이 계수들은 특정 핵종 섭취량과 이로 인해 일정 기간 예탁된 장기선량 또는 유효선량을 연계해 준다(ICRP 1994b, 1996c). 선량계수는 일반인과 직부로 피폭하는 성인에 대해 제공된다.

(B172) Berkovski 등(2003)은 논문에서 일부 상황에서는 다른 접근법이 유용할 수 있다고 밝혔다. 여기서는 측정치를 그 섭취시점과 연계시키는 함수를 사용하여 측정으로부터 직접 예탁유효선량을 계산하는 장점이 있다. 측정은 전신이나 장기 내용물, 소변이나 대변 시료를 대상으로 할 수 있으며, 환경 측정일 수도 있다. 이 접근법을 사용하려면 측정데이터 해석을 위해 섭취 후 시간의 함수로서 “단위 내용물 당 선량” 표를 ICRP가 추가로 제공해야 하지만, 다양한 상황에서 감시데이터 해석을 편리하게 한다. 이 접근법은 선량 평가에 현행 모델이 사용됨

31) <역주> 165항의 결론과 이 설명은 일치하지 않는다. 요컨대 수정체 선량을 따로 감시하기 위한 노력은 굳이 필요하지 않다.

32) <역주> 147항에서 밝혔듯이 내부피폭 평가를 위한 실용량은 공식적으로 정의된 것이 없다. 그럼에도 실용량이란 절에 내부피폭을 논의하는 것은 내부피폭을 평가하는 “실용적 접근”이라는 의미로 해석하는 것이 좋다.

을 보장하고, 표에서 데이터를 읽게 되므로 오류 발생 기회를 제한하여 분석을 지원한다.

B.4.3. 참고문헌(B.4절)

- Berkovski, V., Bonchuk, Y., Ratia, G., 2003. Dose per unit content functions: a robust tool for the interpretation of bioassay data. Proc Workshop on Internal Dosimetry of Radionuclides. Radiat. Prot. Dosim. 105(1/4), 399-402.
- EU, 1996. Council of the European Union: Council Directive on laying down the Basic Safety Standards for the protection of the health of workers and the general public against the dangers arising from ionising radiation. Official. J. Eur. Community 39, No. L, 159.
- IAEA, 1996. International Basic Safety Standards for Protection against Ionizing Radiation and for the Safety of Radiation Sources. Safety Series 115. STI/PUB/996. International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria.
- ICRP, 1991b. 1990 Recommendations of the ICRP. ICRP Publication 60. Ann. ICRP 21(1-3).
- ICRP, 1994b. Dose coefficients for intake of radionuclides by workers. ICRP Publication 68. Ann. ICRP 24(4).
- ICRP, 1996c. Age-dependent doses to members of the public from intake of radionuclides: Part 5. Compilation of ingestion and inhalation dose coefficients. ICRP Publication 72. Ann. ICRP 26(1).
- ICRP, 2003c. Relative biological effectiveness(RBE), quality factor(Q), and radiation weighting factor (w_R). ICRP Publication 92. Ann. ICRP 33(4).
- ICRU, 1985. Determination of dose equivalents resulting from external radiation sources. ICRU Report 39. ICRU Publications: Bethesda, MD.
- ICRU, 1988. Measurement of dose equivalents from external radiation sources, Part 2. ICRU Report 43. ICRU Publications: Bethesda, MD.
- ICRU, 1993b. Quantities and units in radiation protection dosimetry. ICRU Report 51. ICRU Publications: Bethesda, MD.
- ICRU, 1998. Fundamental quantities and units for ionizing radiation. ICRU Report 60. ICRU Publications: Bethesda, MD.
- ICRU, 2001b. Determination of operational dose equivalent quantities for neutrons. ICRU Report 66. Journal of ICRU 1(3).

Pelliccioni, M., 1998. Radiation weighting factors and high energy radiation. *Radiat. Prot. Dosim.* 80(4), 371-378.

B.5. 선량 양의 방사선방호 실제 적용

(B173) 관리되는 선원에 의해 피폭하는 종사자나 일반인 모두를 위한 방사선 방호에 있어 선량 양의 주요 용도는 다음과 같다.

- 방호 계획과 최적화를 위한 전망적 선량 평가
- 선량한도 준수 입증을 위한 소급적 선량 평가.

(B174) 실제로 종사자와 일반인 모두에 대한 방사선피폭으로 인한 위험을 제한하기 위해 한도, 제약치, 참조값 및 조치준위 등이 선량 양으로 정의된다. 방사선방호의 기본 선량한도는 등가선량이나 유효선량으로 정의된다. 위에서 설명한 것처럼 이 두 양은 직접 측정할 수 없기 때문에 측정 가능한 다른 양, 모델 및 계산으로 평가한다(그림B.1과 B.2). 해당 상황에 따라(직무피폭 또는 일반인피폭) 서로 다른 절차가 적용된다.

B.5.1. 방사능 및 예탁선량

(B175) 방사성핵종에서 방출된 방사선에 대한 내부 및 외부 피폭으로 인한 방사선량을 계산하려면 그 반감기와 방출되는 핵 및 원자 방사선의 종류, 에너지, 강도에 관한 정보가 필요하다. 1980년 이후 ICRP 간행물에 사용한 데이터는 ICRP 38(ICRP 1983b)과 같다. ICRP 38을 대체하기 위한 핵 붕괴 데이터베이스를 준비하는 전략에 대해 Endo 등(2003, 2005)이 개괄적으로 설명했다. 향후 선량계수 계산에는 이 데이터베이스를 사용할 것이다.

(B176) 주어진 시간에 특정 에너지 상태의 방사성핵종 양인 방사능 A 는 시간 dt 동안 그 에너지 상태에서 자발적 핵변이 수의 기대치 dN 을 dt 로 나눈 몫이다.

$$A = - \frac{dN}{dt} \quad (\text{B.5.1})$$

방사능의 SI 단위는 s^{-1} 이며, 그 특별 명칭은 베크렐(Bq)로서 $1Bq = 1s^{-1}$ 이다.

(B177) 방사성핵종은 다른 고체, 액체 또는 기체 물질에 포함되거나 그에 흡수된 경우가 많으며, 동일 원소의 안정 동위원소를 수반할 수도 있는데 그 양을 다른 물리량으로 정의하기도 한다.

(B 178) 표본 내 특정 방사성핵종의 **비방사능** specific activity a_m (**질량방사능** 또는 **질량으로 나눈 방사능** 또는 **질량 당 방사능**이라고도 함)은 표본 내 방사성핵종의 방사능 A를 표본의 총 질량 m으로 나눈 것이다.

(B179) 체적 내 특정 방사성핵종의 **방사능 농도** a_v (**체적 방사능** 또는 **체적으로 나눈 방사능** 또는 **체적 당 방사능**이라고도 함)은 체적 내 방사성핵종의 방사능 A를 그 체적 V로 나눈 것이다.

(B180) 표면 위 특정 방사성핵종의 **표면 방사능밀도** surface activity concentration a_F (**면방사능 농도** areal activity concentration 또는 **면방사능**이라고도 함)은 표면적 F 위에 있는 방사성핵종의 방사능 A를 그 면적으로 나눈 것이다.

(B181) 이들 세 양의 명칭과 기호는 일관되게 표준화되지는 않았으며, ICRU(2001b), ISO(1992), IEC(2005) 및 ICRP와 같은 국제기구가 사용하는 정의에도 서로 어느 정도 차이가 있다. 일원화는 오류와 비일관성을 피하는 데 매우 도움이 될 것이다.

(B182) 섭취 방사능 activity intake³³⁾ I는 취식, 흡입 또는 피부를 통한 흡수에 의해 인체로 들어간 특정 방사성핵종의 양이다. 이 섭취량은 유효선량의 평가를 위한 해당 양으로 사용하는 경우가 많다.³⁴⁾ 일반적으로 이 양은 직접 측정할 수 없고 전신이나 신체 일부 측정, 배설물 또는 공기시료와 같은 환경 측정 데이터로부터 결정해야 한다(그림B.1). 사고에서는 상처 부위를 통해 방사능이 인체로 들어갈 수도 있다. 상처를 통한 침투 및 혈액 흡수를 설명하는 모델은 NCRP(2006)가 설명하고 있다.

(B183) 체내에 들어온 방사성핵종은 그 물리적 반감기와 체내 생물학적 체류에 의해 결정되는 기간 동안 조직에 피폭을 준다. 따라서 신체 조직이 아주 짧은 기간 또는 생애에 걸쳐 선량을 받을 수 있다. 예를 들어 삼중수소수를 섭취한 경우 짧은 생물학적 반감기(10일, 물리적 반감기는 12.3 y) 때문에 모든 선량은 섭취 후 2-3개월 내에 전달된다. 그러나 ²³⁹Pu의 경우 생물학적 체류 시간과 물리

33) <역주> “intake”는 직역하면 “섭취”이지만 이 권고에서 사용되는 문맥상 의미는 “섭취 행위”가 아니라 “섭취 방사능”이다. 따라서 다른 곳에서도 intake를 “섭취량”으로 번역한 경우가 많다.

34) <역주> 원문은 “실용량으로 사용하는 경우가 많다.”로 되어 있으나 147항에서 내부피폭을 위한 실용량은 정의되지 않았으므로 수정했다.

적 반감기(24000년) 모두가 매우 길어 개인의 여생 동안 선량이 누적된다. 따라서 질산플루토늄 형태의 ^{239}Pu (사람 호흡기모델[HRTM, ICRP 1994a]의 M형)을 흡입하면 첫째에는 예탁유효선량의 약 10%만 받고 10년 말까지 약 30%를 받을 것으로 모델이 예측한다. 그림B.5는 이러한 예와 다른 예를 보이고 있다. 불용성 토륨-232(S형)를 흡입한 후 여러 조직의 예탁등가선량 누적률 차이도 그림에 보이고 있다.

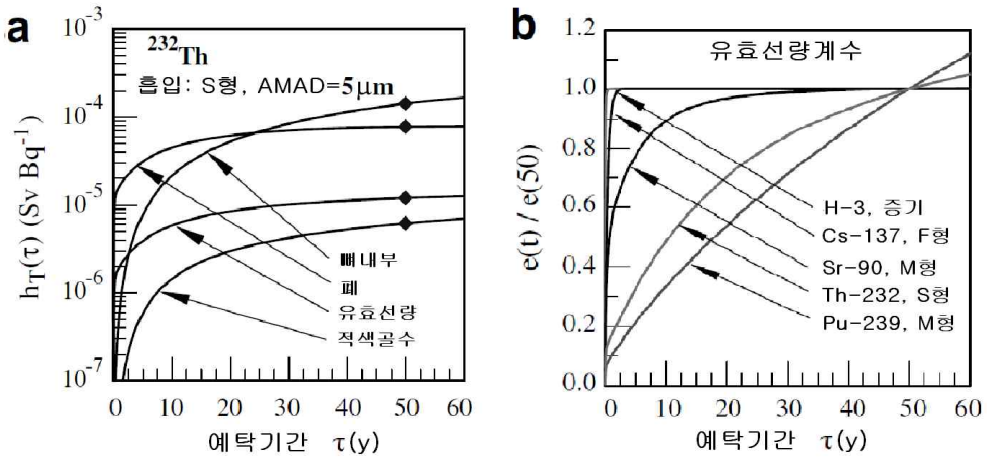
(B184) 방사성핵종에 의한 피폭과 방사선량 누적을 장기간 조절할 필요 때문에 예탁선량이라는 양이 정의되었다. 체내 방사성핵종으로 인한 예탁선량은 일정 기간 발생할 것으로 예상되는 총 선량이다. 조직이나 장기 T의 예탁등가선량 $H_T(\tau)$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$H_T(\tau) = \int_{t_0}^{t_0+\tau} \dot{H}_T(t) dt \quad (\text{B.5.2})$$

여기서 τ 는 섭취 시점 t_0 부터 적분시간이다. 예탁유효선량 $E(\tau)$ 는 다음과 같이 주어진다.

$$E(\tau) = \sum_T w_T H_T(\tau) \quad (\text{B.5.3})$$

선량한도 준수와 기준값대 관리 목적으로 예탁선량을 섭취가 발생한 연도에 부여할 것을 ICRP는 계속 권고한다.



그림B.5 적분기간의 함수로서 예탁선량계수. (a) ^{232}Th 흡입 후 적분시간(τ)의 함수로서 폐내부 조직, 폐 및 활성(적색)골수의 예탁등가선량계수와 예탁유효선량계수. 점은 50년 기간 시점 표시. (b) 50년 선량에 정규화한 선정된 방사성핵종들의 예탁유효선량.

(B185) 종사자의 경우 예탁선량은 일반적으로 섭취 후 50년 기간 동안 평가된다. 예탁기간 50년은 노동인구로 편입되는 젊은 종사자의 예상 수명까지로 ICRP가 판단한 기간의 반올림 값이다. 취식에 따른 예탁유효선량은 일반인에 대해서도 전망적 선량 예측에 사용한다. 이 경우 성인에게는 50년의 예탁기간이 고려된다. 유아와 아동의 경우 선량은 70세까지 평가된다(ICRP 1996c).

B.5.2. 기준모의체

(B186) 유효선량은 성 평균한 기준인Reference Person에 대해 정의된다(제B.3.4 절). 유효선량을 결정하기 위해, 먼저 기준남성과 기준여성에서 장거나 조직의 등가선량을 평가해야 하고 그런 다음 기준인의 유효선량을 얻기 위해 평균된다. 이 평균값에 성 평균 조직가중치를 곱하여 가중된 등가선량을 모든 조직에 걸쳐 합산함으로써 유효선량을 얻는다(식B.3.7; 그림B.3).

(B187) 기준남성과 기준여성에 대한 등가선량과 기준인에 대한 유효선량의 평가는 인형 모델 사용에 기반을 둔다. 과거에 ICRP는 특정 모의체를 명시하지는 않았고, 실제로는 양성 MIRD형 모의체, Kramer 등(1982)의 성별 모델 및 Cristy와 Eckerman(1987)의 연령별 모의체와 같은 여러 수학적 모의체가 사용되어 왔다.

(B188) ICRP는 이제 장기와 조직의 등가선량 계산을 위해 남성과 여성 기준 모의체reference phantom를 채택했다. 등가선량과 유효선량 평가를 위한 실제적인 접근을 제공하기 위해 물리량(예: 외부피폭에 대해 입자 플루언스나 공기커마, 내부피폭에 대해 섭취 방사능)과 연계하는 환산계수를 기준모의체의 표준 피폭조건(외부피폭에서는 단일 에너지 표준 배열 방사선, 내부피폭에서는 방사성핵종의 표준 생물역동학 등)에서 계산했다.

(B189) 실제 사람의 의료영상 데이터로부터 구성된 체적소voxel 모델은 수학적으로 정형화된 모의체보다 인체를 사실적으로 묘사한다. 그래서 ICRP는 선량 환산계수의 갱신을 위한 기준모의체 정의에 체적소 모델 사용을 결정했다. 이러한 모델(또는 수치적 모의체)은 기준남성과 기준여성을 대표하고, ICRP 89(ICRP 2002)에 편집된 기준값에 부합하는 장기 질량을 갖는다.

(B190) 성인 남성과 여성 체적소 기준 모델 둘은 기준남성과 기준여성의 키와

몸무게에 가까운 두 사람의 체적소 모델을 바탕으로 개발되었다(Zankl 등 2005, Zankl 등 2007). 체적소 모의체는 한 사람을 고해상도로 연속 촬영한 전산화단층촬영 영상으로부터 개발되었고, 수백만 체적소로 구성되며 신체의 3차원적 표현과 이를 구성하는 장기와 구조의 공간 형상을 제공한다. 다양한 골격 조직, 연골, 근육 및 주요 혈관을 포함한 약 140개 장기와 조직들이 정의된다. 남성과 여성 모델의 장기 질량은 실제 해부구조 왜곡 없이 ICRP 89(ICRP 2002)의 기준 성인 남성과 여성에 대해 정한 장기와 조직들과 근사하도록 맞춰졌다.

(B191) 따라서 기준 체적소 모델은 기준남성과 기준여성을 수치적으로 대표하며 방사선 수송과 에너지 부여를 모의하는 코드를 써서 종사자, 그리고 내부피폭에 대해서는 일반인 성인에 대한 선량계수 계산에 사용될 수 있다. 이 모델은 선원부 S_i 에서 방출된 방사선 에너지가 표적부 T_j 에 흡수되는 분율 계산에도 사용될 수 있다. 마찬가지로 이 모델로 인체 외부 방사선장에서 장기나 조직 T의 평균 흡수선량 D_T 의 계산, 그리고 유효선량과 방사선장 고유 양 사이 관계를 계산할 수도 있다. 공중 구성원에 대한 선량계수 계산에 사용하기 위해 연령대가 다른 아동을 위한 기준 전산용 모의체들도 개발될 것이다.

B.5.3. 내부피폭용 예탁유효선량계수

(B192) 직부피폭에서는 연간 방사성핵종 섭취량은 예탁유효선량 $E(\tau)$ 를 할당하는데, 이때 종사자에 대해서는 예탁기간 τ 로 50년이 반영된다. 성인 일반인에 게도 같은 기간이 적용되며, 유아와 아동의 경우는 70세까지 선량률이 적분된다(ICRP 1996c).

(B193) 예탁유효선량계수 $e(\tau)$ 는 $E(\tau)$ 와 측정 가능한 양 사이에 수치적 연계를 제공하는 기준인에 대한 계수인데, 여기서는 흡입(e_{inh})이나 취식(e_{ing})에 의한 방사성핵종의 섭취량과 $E(\tau)$ 사이 연계가 된다. 남성과 여성에 대한 선량계수는 성인 기준남성과 기준여성의 성별 고유 생리학적, 해부학적, 생물역동학적 변수에 기초한다. 또한 조직 T의 평균 흡수선량 평가에 사용하는 선량계측 변수는 성별 전산용 모의체에서 도출된다(제B.5.2절 참조).

(B194) 유효선량에 대한 잔여조직 기여는 조직가중치가 명시되지 않고 잔여조직에 열거된 조직들 사이의 등가선량 산술평균에 이 조직집단에 대한 조직가중치를 적용해 도출한다(제B.3.5절 B132–B145항 참조). 잔여조직 선량은 유효선

량의 덧셈성을 제공하는 방식으로 평가된다.

(B195) 따라서 표B.2에 주어진 성별과 인구 평균 조직가중치에 기초한 예탁 유효선량계수는 다음과 같이 계산된다.

$$e(\tau) = \sum_T w_T \left[\frac{h_T^M + h_T^F(\tau)}{2} \right] \quad (\text{B.5.4})$$

여기서 $h_T^M(\tau)$ 와 $h_T^F(\tau)$ 는 각각 기준남성과 기준여성 조직 T의 예탁등가선량계수이다(그림B.3). 외부피폭에도 유사한 식이 적용된다.

B.5.4. 외부피폭용 환산계수

(B196) 제B.4절에 설명한 것처럼 방호량, 등가선량 및 유효선량은 측정할 수 없으며, 그 값은 예를 들어 자유공기 중 공기커마 K_a , 입자 플루언스 Φ 또는 선량 실용량과 같은 측정 가능한 물리량³⁵⁾과 관계를 사용해 평가된다. 기준인에 대해 정의되는 환산계수는 이들 양 사이의 수치적 연계를 제공하는데, 직무피폭과 일반인 피폭에 대한 방사선방호 실제에 일반적으로 사용할 수 있는, 국제적으로 합의된 환산계수가 있다는 사실은 매우 중요하다.

(B197) ICRU/ICRP 공동 작업그룹의 작업에 기초해 “외부 방사선에 대한 방사선방호에 사용하기 위한 환산계수”에 관한 보고서(ICRP 1996b, ICRU 1997)가 ICRP와 ICRU에 의해 각각 발간되었다. 이 보고서는 방호를 위한 환산계수 평가데이터evaluated data와 특정 피폭조건에서 단일 에너지 광자, 중성자 및 전자 방사선에 의한 외부피폭에 대한 실용량을 권고한다. 평가에 사용한 방호량 데이터 대부분은 MIRD형 해부학 모델을 기초로 계산된 것이며 모두 전신피폭을 고려했다. 광자에 대해서는 자유공기 중 공기커마 당 장기나 조직 평균 흡수선량과 자유공기 중 공기커마 당 유효선량이 제공되며, 중성자와 전자의 경우 선량을 입자 플루언스와 연계했다. 나아가 ICRP 74(1996b)에는 특정 이상적 조사 배열에 대해 방호량인 유효선량과 선량 실용량 사이 관계를 자세히 검토했다. 이 간행물에서 인체의 부분 피폭은 다루지 않았는데, 그러한 경우 권고되는 환산계수는 없다.

35) <역주> 원문은 “물리적 방사선장 양”이란 용어를 사용하고 있으나 예를 들어 공기커마는 방사선장 양이라기보다 방사선장과 공기의 상호작용 결과로 형성되는 선량에 해당하는 물리량이므로 표현을 “측정 가능한 물리량”으로 수정했다.

(B198) 인체에 대한 새로운 기준모의체(의료영상 데이터에 기초한 남성과 여성 체적소 모의체)를 정의함에 따라 고려하는 모든 종류 방사선과 조사 배열에 대한 새로운 환산계수 계산이 필요하다. 그러나 대부분 장기에 있어 기존 데이터(ICRP 1996b)와 $D_{T,R}$ 차이는 크지 않을 것으로 본다. 유효선량 계수 값은 또한 w_R 과 w_T 값의 영향도 받으므로 이 값의 변경은 특히 중성자와 양성자 환산계수에 상당한 영향을 미칠 것이다.

(B199) 체적소 기반 기준모의체(ICRP 2002)를 채택함에 따라 기존 데이터(ICRP 1996b)를 대체할 환산계수를 모든 방사선과 조사 배열에 대해 새로 계산해야 한다. 광자에 대한 계산 결과, 광자 방사선에 대한 유효선량 값 변경은 일반적으로 작다(Zankl 등 2002). 다만, 저에너지 광자에서 인체 외형이 변경됨으로써 기준모의체 장기 깊이가 달라져 예를 들어 갑상선의 흡수선량에 영향이 미칠 수 있다. 그러나 그 결과 유효선량 계수의 변동폭은 크지 않을 것으로 예상된다(Schlattl 등 2007).

B.5.5. 직무피폭

(B200) 직무피폭의 경우 선량은 외부와 내부 방사선원에서 발생할 수 있다. 외부피폭에서는 개인선량 감시에 일반적으로 개인선량계를 사용해 개인선량당량 $H_p(10)$ 을 측정하고, 이 값을 균일한 전신피폭이라는 가정 아래 합당한 유효선량 평가치로 받아들임으로써 이루어진다. 내부피폭에서는 예탁유효선량은 생물분석 bioassay 측정을 통한 방사성핵종 섭취량 또는 기타 양(예: 신체 잔류 방사능이나 일일 배설물 방사능 - 예외적으로 공기 중 방사능농도도 사용될 수 있다.)을 평가하고 적절한 선량계수를 적용하여 예탁유효선량을 구한다.

(B201) 실제 목적에서 평가는 외부피폭과 내부피폭 선량 값을 조합해 총 유효선량 값이 선량한도와 제약치를 준수하는지 입증해야 한다.

(B202) 대부분 직무피폭 상황에서는 유효선량 E 는 다음 식을 사용해³⁶⁾ 도출된다.

$$E \cong H_p(10) + E(50) \quad (\text{B.5.5})$$

여기서 $H_p(10)$ 는 외부피폭(제B.4.4절 참조) 개인선량당량이며 $E(50)$ 은 내부피폭

36) <역주> 원문은 “실용량을 사용해”로 표현되어 있으나 내부피폭 선량 $E(50)$ 은 실용량이 아니므로 표현을 수정했다.

에 의한 예탁유효선량이다.

(B203) $H_p(10)$ 을 측정하는 개인선량계로 피폭을 감시함으로써 식B.5.5에 따라 외부피폭 유효선량을 측정하려면 인체의 피폭에 대표적인 인체 부위에 개인선량계를 패용해야 한다. 측정한 선량 값이 연간 선량한도보다 충분히 낮을 경우 $H_p(10)$ 값은 유효선량의 적절한 평가치로 간주된다. 그러나 개인선량이 연간 선량한도에 근접하거나 초과할 정도로 높거나 매우 비균질한 방사선장일 경우 이 절차는 충분하지 않으며, 유효선량 평가에서 피폭의 실제상황을 세심하게 검토해야 한다. 개인 방호장구personal protective equipment(PPE)나 기타 방호수단의 사용을 고려할 수도 있다.

(B204) 항공승무원이 우주선에 피폭하는 특수한 경우 유효선량을 평가하기 위해 $H_p(10)$ 을 측정하는 개인선량계를 사용한 개인감시는 수행하지 않는 것이 보통이다.³⁷⁾ 개인선량계를 사용하지 않는 다른 작업환경도 있을 수 있다. 그러한 경우 외부피폭 유효선량은 주위선량당량 $H^*(10)$ 을 감시하거나 방사선장 특성을 사용해 계산에 의해 평가할 수 있다.

(B205) 예를 들어 β 선과 같은 저투과 방사선에 의한 외부피폭의 경우 $H_p(10)$ 은 유효선량을 충분히 평가할 수 없다. 그러한 경우 $H_p(0.07)$ 를 사용해 피부 등 가선량을 평가할 수 있으며, 피부에 대한 조직가중치 0.01을 적용하여 피부의 유효선량 기여를 평가할 수 있다.

(B206) 새 전산용 모의체는 인체 외부의 방사선장에서 장기 T의 등가선량 H_T 와, 그리고 유효선량과 방사선장 고유 실용량 사이 관계의 계산에 사용될 것이다. 방사선 에너지의 함수로서 단위 플루언스나 공기커마 당 유효선량을 나타내는 환산계수를 다양한 조사 배열에 대해 계산해야 하며, 그것이 작업장의 외부 피폭에 적용될 것이다. 같은 기준 전산용 모의체가 내부피폭에서 해당 표적부위의 등가선량 H_T 와 유효선량 선량계수 도출에도 사용될 것이다.

37) <역주> 유럽연합 규정은 항공승무원에 대해 개인감시를 권고하고 있지만 항공승무원 피폭은 태양활동 상황과 개인별 탑승기록을 통해 합리적 수준에서 평가가 가능하므로 개인감시를 수행할 필요성은 없다고 ICRP는 본다. 태양활동이 불안정하거나 비행고도에서 방사선 준위가 매우 가변적인 경우에는 해당 항로별로 승무원 대표자가 개인선량계를 패용하여 피폭을 확인할 수는 있겠다. 그러나 이 경우에도 항공기 내 우주방사선 스펙트럼에 대해 개인선량당량을 적절히 측정할 수 있는 개인선량계가 별도로 준비되어야 하는 어려움이 있다.

(B207) 베타 입자 외부피폭의 경우 매우 불균질한 인체의 피폭이 발생할 수 있다. 유효선량이 한도 미만인 경우에도 조직반응이 가능한 높은 국부선량이 피부에 발생할 수 있다. 이러한 이유 때문에 피부선량에 대한 연간한도(직무피폭에 대해 500 mSv)는 1 cm² 피부에 대해 평균한 0.07 mm 깊이에서 평균 등가선량으로 정의되는 국부 피부선량에 적용한다.

(B208) 방사성핵종 섭취에 따른 예탁유효선량 E(50)는 다음과 같이 계산된다.

$$E(50) = \sum_j e_{j,inh}(50) \cdot I_{j,inh} + \sum_j e_{j,ing}(50) \cdot I_{j,ing} \quad (B.5.6)$$

여기서 $e_{j,inh}(50)$ 은 흡입에 의한 방사성핵종 j 방사능 섭취에 대한 예탁유효선량계수이고, $I_{j,inh}$ 는 흡입에 의한 방사성핵종 j 방사능 섭취량, $e_{j,ing}(50)$ 은 취식에 의한 방사성핵종 j 방사능 섭취에 대한 예탁유효선량계수, $I_{j,ing}$ 는 취식에 의한 방사성핵종 j 방사능 섭취량이다. 특정 방사성핵종에 의한 유효선량 계산에 있어 인체로 섭취되는 물질의 특성을 고려할 수 있어야 한다.

(B209) 식B.5.6에서 사용한 선량계수는 해부학, 생리학 및 생물역동학 특성에서 기준남성과 기준여성과 특성과 차이 없이 ICRP가 정한 계수이다. 그러나 흡입한 연무질의 방사능중앙공기역학직경(AMAD) 및 특정 방사성핵종이 부착된 입자 물질의 화학적 형태를 고려해야 할 수도 있다. 종사자 ‘선량기록’에 들어가는 유효선량은 종사자가 접하는 방사선장과 방사능 섭취에서 기준인이 경험하는 선량을 의미한다(제B.5.8절 참조). 제B.5.1절에서 설명한 것처럼 예탁기간 50년은 노동인구로 편입되는 개인의 기대 수명과 관계된다.

(B210) 라돈 동위원소와 붕괴 산물의 방사선량 또한 전체 선량평가에 고려해야 할 필요가 있다(ICRP 1993b). 피부를 통한 방사성핵종 흡수가 있다면 해당 유효선량에 관한 추가 항이 식B.5.6에 포함될 수 있다. 부상과 같은 통제할 수 없는 사건을 통한 방사성핵종 섭취는 작업 관행 준수 범위를 넘는 의미가 있으므로 식B.5.6에는 포함하지 않는다. 그러나 이러한 사건의 중요도를 평가하고 기록해야 하며, 필요하다면 적절한 의료처치를 제공하고 해당 종사자 피폭에 부가적 제한도 고려해야 한다.

(B211) 작업장 공기 중 불활성기체 방사성핵종에 의한 피폭은 $H_p(10)$ 이 지시하는 피폭 외의 평가를 필요로 할 수도 있다. 그러한 경우 불활성기체의 시간적분 공기농도와 소위 침잠submergence피폭에 대한 유효선량계수의 곱을 나타내는 항을 식B.5.6에 포함시켜야 한다. 전망적 및 소급적 적용을 위한 그러한 선량계

수는 ICRP가 정한다.

(B212) 특정 방사성핵종 실제 섭취나 작업장 공기 중 방사성핵종 농도와 관련된 운영 데이터로부터 종사자의 예탁유효선량을 평가하려면 이들 데이터를 연간 섭취한도(ALI)나 유도공기농도(DAC)에 참조하는 것이 종종 유용하다.

(B213) ICRP 60(ICRP 1991b, S30항)에서 ALI는 종사자가 그 특정 방사성핵종에만 노출된다고 예상할 때 연간 선량한도 $E_{limit,w}$ 에³⁸⁾ 해당하는 유효선량을 줄 것으로 보는 방사성핵종 섭취(Bq)로 정의되었다. 방사성핵종 j의 ALI는 다음과 같다.

$$ALI_j = \frac{E_{limit,w}}{e_j(50)} \quad (B.5.7)$$

여기서 $e_j(50)$ 은 핵종 j의 Sv Bq⁻¹ 단위 예탁유효선량계수이다. ICRP 60에서 ALI는 시간평균 없이 연간 20 mSv인 선량한도에 근거해야 한다고 ICRP는 권고했다.

(B214) DAC는 성 평균 호흡률 1.1 m³ h⁻¹ 및 연간 2000시간 작업시간(연간 공기 흡입 2200 m³)의 조건에서 ALI(Bq) 상당 섭취가 발생할 것으로 예상되는 Bq m⁻³ 단위의 공기 중 방사성핵종 농도이다. 따라서 방사성핵종 j의 DAC는 다음과 같이 계산된다.³⁹⁾

$$DAC_j = \frac{ALI_j}{2200} \quad (B.5.8)$$

(B215) 위에서 설명한 것처럼 선량한도 준수에 있어 방사성핵종 섭취로부터 뿐만 아니라 외부 방사선으로부터 총 선량이 고려되어야 한다고 보아 ICRP는 이제 ALI 값을 제시하지 않는다. 그러나 ALI 개념은 예를 들어 방사선원의 적절한 관리를 확인하기 위해 상대적 해독을 특성화하는 등 여러 실제 상황에서 유용할 수 있다.⁴⁰⁾

(B216) 침적되지 않는 비활성가스에 대한 DAC는 공중 방사능에서 인체에 입

38) <역주> 여기서 하첨자 'w'가 종사자를 의미한다는 설명이 누락되었다.

39) <역주> 과거에는 시간 당 공기 흡입률 기준데이터로 1.2 m³를 적용하여 연간 2400 m³를 사용했는데 이 값이 이제 2200 m³로 조정되었음에 주목할 필요가 있다.

40) <역주> ALI가 일종의 방사성핵종 독성지표 역할을 할 수는 있겠지만 그렇더라도 “연간섭취한도”로 표현되는 규제적 또는 제한적 용어가 사용되는 것은 적합하지 않아 보인다. 예를 들어 AI(annual intake index)와 같은 다른 용어를 사용하는 방안을 검토할 필요가 있다.

사하는 방사선의 유효선량에 의해 제한된다. 따라서 DAC는 다음과 같이 계산된다.

$$DAC = \frac{E_{limit,w}}{2000 e_{sub}} \quad (B.5.9)$$

여기서 e_{sub} 는 비활성가스 방사성핵종을 함유한 구름에 침착할 때 유효선량률계수 [$mSv m^3(Bq h)^{-1}$]이며, 2000 h는 연간 작업시간이다. 일부 방사성핵종의 경우 DAC는 피부선량으로 제한된다.

B.5.6. 일반인피폭

(B217) 일반인피폭은 인간 활동에 의해 변경된 천연 방사선원, 기술 시설 또는 그러한 선원의 조합에서 발생할 수 있다. 일반인에 대한 연간 유효선량은 외부피폭에 의해 1년간 받은 유효선량과 같은 해 동안 섭취한 방사성핵종에 의한 섭취유효선량을 합산한 값이다. 일반적으로 직무피폭 경우처럼 선량을 개인감시 방법으로 구하지는 않으며 주로 환경 측정, 습관 데이터와 모델링으로 구한다. 일반인 선량은 다음으로부터 추정할 수 있다.

- 설계단계에서 선원이나 기술 시설로부터 유출물 중 방사성핵종 준위의 시물레이션과 예측
- 운영 기간 중 유출물과 누설 방사선 감시
- 방사생태학적 모델링(예를 들어 방사성핵종이 방출되어 토양-식물-동물을 통해 사람으로 전달되는 것과 같은 환경 이동 경로분석).

(B218) 개인의 외부피폭은 시설물로부터 방출되어 공기, 토양, 물에 존재하는 방사성핵종으로부터 발생할 수도 있다. 선량은 모델링과 계산에 의한 환경 중 방사능 농도로부터 계산할 수 있다.

(B219) 내부피폭은 구름의 공기 중 방사성핵종 흡입 또는 오염된 식품이나 물을 취식함으로써 발생할 수 있다.

B.5.7. 환자의 의료피폭

(B220) 환자피폭 평가에 유효선량 사용은 의료 전문인이 고려해야 할 몇 가지 제한이 있다. 유효선량은 다양한 진단절차와 소수 특별한 경우의 치료절차에서 선량을 비교하거나, 유사한 기술과 절차를 사용하는 다른 병원 또는 다른 나라와

비교 또는 동일한 의료 검사에 사용하는 다른 기술의 비교에는 가치가 있을 수 있다. UNSCEAR(1988, 2000)가 그러한 데이터를 검토했다. 그러나 환자피폭의 계획과 위험-편익평가에서는 피폭 조직의 등가선량 또는 우선적으로 흡수선량이 더 적절한 양이다. 위험평가 목적인 경우에는 특히 그러하다.

(B221) 외부 방사선에 의한 환자 의료피폭에서는 일반적으로 신체 일부만 관련되는데, 의료 전문인은 조사야에 노출되는 정상 조직의 선량에 충분히 유념해야 한다. 피부에 대한 낮은 조직가중치나 상대적으로 낮은 선량을 받는 많은 다른 조직 때문에 신체 일부 피폭은 해당 유효선량이 작은 경우에도 국부 조직에 상당한 등가선량을 초래할 수 있다. 방사성핵종의 섭취에 의한 선량에도 그와 같은 고려가 적용된다.

B.5.8 유효선량 적용

(B222) 유효선량의 가장 중요한 용도는 선량한도의 준수를 입증하는 수단을 제공하는 것이다. 따라서 유효선량은 세계적으로 규제 목적에 사용된다.

(B223) 유효선량은 확률론적 영향(암과 유전영향)의 발생 제한에 사용되며, 조직반응 가능성의 평가에는 적용할 수 없다. 연간 유효선량한도 미만의 선량 범위에서 조직반응은 발생하지 않는다. 몇몇 경우에서만(예를 들어 피부처럼 조직가중치가 낮은 단일 장기의 급성 국부 피폭) 연간 유효선량한도 적용이 조직반응 방지에 불충분할 수 있다. 그러한 경우에는 국부 조직선량도 평가해야 한다.

(B224) 방사성핵종 섭취에 대한 기준 선량계수 및 외부피폭에 대한 선량환산계수의 계산은 정의한 생물역동학 및 선량계측 모델과 함께 인체 장기나 조직에 대한 기준 해부학적 데이터에 근거한다. 일반적인 접근법은 개인이나 환경을 감시하고 그 측정 데이터로부터 외부피폭이나 방사성핵종 섭취를 평가하는 것이다. 그 다음 ICRP가 제공한 선량계수와 선량환산계수를 사용해 노출이나 섭취로부터 유효선량을 평가한다. 기준 선량계수와 환산계수 계산에 사용하는 가중치는 남녀와 모든 연령 인구에 적용된다. 따라서 규제관리 목적에서 선량계수와 그 계산에 사용한 기준 모델과 가중치는 개인 특성이 아니라 기준인에게 적용된다. 환산계수나 선량계수는 기준 성인 종사자나 정의한 연령 그룹의 기준 일반인에 대해 계산한다.

(B225) 작업자 유효선량은 측정된 개인등가선량 $H_p(10)$ 과 작업자에 대한 개인감시 결과와 ICRP의 기준 생물역동학과 선량계측학적 수치 모델에서 평가된 예탁등가선량의 합으로부터 평가되고, **기록선량**이라고 불린다. 기록선량은 규제 선량한도 준수의 소급적 입증, 기록 및 보고 목적을 위해 종사자에 대해 측정된다.

(B226) 특히 직무피폭에 대한 소급적 선량평가에서 선량환산계수와 선량계수 계산에 사용된 기준 변수 값과 다른 정보가 있을 수 있다. 그러한 경우 피폭 수준에 따라 피폭이나 섭취의 평가나 선량 계산에 해당 구체적 데이터를 사용하는 것이 적합할 수도 있다. 따라서 피폭의 특정 상황에서 유효선량의 계산에서 변경될 수 있는 변수 값과 유효선량 정의에서 변경할 수 없는 변수 값을 구별하는 것이 중요하다.

(B227) 방사성핵종에 노출되는 직무 상황에서 유효선량을 평가할 때 섭취나 피폭을 더 잘 평가하기 위해 흡입하거나 취식한 방사성핵종의 물리적, 화학적 특성을 변경하는 것이 타당할 수도 있다. 이러한 변경은 명시해야 한다. 흡입한 방사성핵종에 의한 선량계산에서 물질 고유 데이터를 사용하는 예는 **보조지침 3**(ICRP 2002)에 수록되어 있다.

(B228) 방사선량이 한도나 제약치를 초과할 수 있는 상황에서 특정 개인에 대한 직무피폭 선량을 소급적으로 평가함에 있어 특정 개인에 대해 선량과 위험을 평가하는 것이 적합할 때도 있다. 이 경우 흡수선량 계산에 사용한 선량계측 가정의 변경과 함께 개인 연령과 성별 및 방사선 피폭에 관련된 장기 고유 위험 평가치를 고려해야 한다. 기준 변수값에 대한 그러한 변경은 유효선량의 정의나 사용목적과 부합하지는 않는다. 그러한 변경은 피폭 준위에 의해 결정되는 노력 수준으로 방사선방호 전문가에 의해 수행되어야만 한다. 그러한 경우 변수 값의 변경을 설명해야 한다.⁴¹⁾

(B229) 조직반응(결정론적 영향)을 일으킬 수 있는 사건이나 사고의 경우 장기나 조직에 대한 흡수선량과 흡수선량률을 평가해야 하고 선량문턱(NCRP 1990, ICRP 1989b) 이상에서 발생할 것으로 보는 잠재적 방사선 영향을 평가하

41) <역주> 예를 들면 종사자의 흡입에 대한 내부피폭 선량계수는 입자 크기분포 기준 변수로 AMAD=5 μ m를 근거로 산출된 값이다. 특정 상황에서 이렇게 기준 변수를 적용하여 평가한 선량이 매우 높아서 실패를 정밀 분석한 결과 실제 종사자가 흡입한 공기 오염의 AMAD가 5 μ m가 아니라 10 μ m로 나타났다면 이를 설명하여 특별 선량계수를 적용할 수 있음을 의미한다.

는 데는 선량-반응 관계를 고려해야 한다. 높은 LET 방사선(중성자와 알파입자)과 관련된 사고의 경우 확률론적 영향에 적용하는 방사선가중치(w_R)는 조직반응에는 적용되지 않음에 유의해야 한다. 그런 상황에는 조직반응에 관련된 생물학적효과비(RBE)를 사용해야 한다.

(B230) 유효선량은 전신피폭의 영향에 기초를 두는 위험 관련 양이다. w_T 값은 현행 역학적(또는 유전적 영향에 대해서는 실험) 증거를 바탕으로 암과 유전 영향 관점에서 확률론적 영향으로 인한 총 방사선 위해에 대한 개별 장기와 조직의 기여를 고려하기 위해 선정된 값이다. 또한 w_T 값은 양 성별과 모든 연령에 적용되는 평균값이다. 사람 보건에 대한 방사선 영향에 대한 가설 설정을 목적으로 하는 시범 연구에 유효선량이 사용되는 경우도 있지만 유효선량은 방사선 위험의 역학적 연구에 사용할 적합한 양은 아니다. 대신에 역학적 분석은 가능하다면 피폭상황과 연구 집단 내 피폭 개인의 특성을 최대한 고려하여 조직이나 장기에 대한 흡수선량 평가를 필요로 한다. 마찬가지로, 피폭한 사람들에게서 암 인과확률의 계산에도 유효선량이 아닌 흡수선량이 필요하다.

(B231) 요약하자면, 유효선량은 규제 목적을 위한 피폭평가와 확률론적 영향의 관리에 사용해야 한다. 선량한도 준수를 입증하고 선량 기록용 목적으로 사용할 수 있다. 유효선량은 선량 기록 유지와 규제 목적을 위해 내부와 외부의 모든 피폭경로를 고려해 전체 방사선피폭의 평가에 편리한 양을 제공한다. 비록 개인에 구체적이지는 않고 기준인에게 적용되지만 위와 같은 방식으로 사용할 때 유효선량은 실제 방사선방호 목적에 가치 있게 사용할 수 있는 양이다. 소급적 상황에서 유효선량 평가는 방사선방호의 품질에 대한 통찰을 제공하며, 선량한도 초과 가능성에 대한 정보를 제공한다.

(B232) 그러나 유효선량 사용이 적합하지 않아 대신 개별 장기나 조직의 흡수선량을 사용해야 하는 상황도 있다. 여기에는 역학연구, 암 인과확률 평가, 조직반응 가능성 평가 및 치료나 의학적 감시가 필요한 선량의 평가가 포함된다.

B.5.9. 집단선량

(B233) 위에 논의한 방사선방호를 위한 선량계측량은 기준인에 관한 것이다. 그러나 방사선방호의 과제는 직무로 피폭하는 개인이나 일반인 집단의 방사선 피폭을 최적화하고 감축하는 것을 포함한다. 이러한 목적을 위해 ICRP는 집단선

량을 도입했는데(ICRP 1977, 1991b) 이 양은 최적화 수단으로 이해되어야 한다. 이 양은 일정 기간 피폭에 대해 한 선원으로부터 피폭하는 개인 그룹을 고려한다. 이러한 양으로 조직이나 장기 T와 관련된 집단등가선량 S_T 와 집단유효선량 S가 정의되어 왔다(ICRP 1991b). 이러한 집단선량 단위의 특별 명칭은 인-시버트(man Sv)이다.

(B234) ICRP 60(ICRP 1991b)에서 집단선량은 집단이 받는 선량의 적분으로 정의된다(A34항). 이때 ICRP는 집단등가선량과 집단유효선량을 도입했다. 집단선량을 사용하는 의도는 특히 직무피폭에서 방사선방호 최적화의 도구가 되게 하려는 것이고, 집단등가선량은 특별한 상황에서만 사용되므로, 현행 권고에서는 집단유효선량만 논의한다.

(B235) 직무피폭에서 집단유효선량은 종사자 그룹의 계획피폭상황 최적화를 위해 사용된다. 계획된 작업이 개시되기 전에 다양한 운영 시나리오에 대해 집단유효선량과 개인선량 분포를 전망적으로 평가한다. 그런 다음 운영 시나리오의 선택을 위한 의사결정 과정에서 해당 변수로서 집단선량을 사용된다. 전망적으로 평가된 집단유효선량과 작업 수행 후 감시 데이터로부터 얻은 전체 개인 유효선량 합을 비교하면 차후 최적화 절차와 방사선방호 수단을 위한 관련 정보를 얻을 수 있다. 집단유효선량은 의료행위에서 방사선 기술을 비교하거나 다른 장소(예: 다른 병원과 다른 지역)에 대해 동일한 방사선 기술을 비교하는 도구로 사용될 수 있다.

(B236) 위에 설명한 집단 양의 정의는 때에 따라 집단유효선량을 잘못 사용하도록 만들었는데, 광범위한 선량과 매우 긴 기간, 광대한 지리적 지역에 대한 방사선 피폭을 합산하고 이를 근거로 방사선 관련 위험을 계산하는 것이 그것이다. 그러나 집단유효선량의 그러한 사용은 집단선량에 기여하는 모든 선량 범위에서 유해한 방사선 영향에 대한 위험계수에 대한 충분한 지식이 있을 때만 의미가 있다(Kaul 등 1987). 낮은 선량 범위에서는 관련된 큰 불확실성 때문에 위험계수에 대한 그러한 지식은 존재하지 않는다.

(B237) 이러한 의미에서 위험인자(예: 낮은 선량에서 발암)가 중간 및 높은 방사선량 범위에서 관찰된 역학데이터를 외삽하여 얻는 것임을 인식해야 한다. 제B.2절에 설명한 것처럼 외삽은 문턱 없는 선형 선량-영향 관계(LNT 모델) 가정에 근거를 둔다. ICRP는 낮은 선량 범위에서는 위험인자에 높은 수준의 불확실성이 있다고 본다. 천연 선원에서 받는 방사선량의 작은 분율에 지나지 않는

매우 낮은 개인선량에서는 특히 그러하다. 그러한 상황에서 상세한 위험 평가에 집단선량을 사용하는 것은 바른 절차가 아니다.

(B238) 장시간, 넓은 지역에 대해 낮은 개인선량을 뭉치는 것을 피하기 위해 유효선량과 시간의 범위를 제한하고 명시해야 한다. 시간 ΔT 동안 E_1 과 E_2 사이의 개인 유효선량에 의한 집단유효선량은 다음과 같이 정의된다.

$$S(E_1, E_2, \Delta T) = \int_{E_1}^{E_2} E \left[\frac{dN}{dE} \right]_{\Delta T} dE \quad (\text{B.5.10})$$

E_1 과 E_2 사이 영역에 유효선량을 갖는 개인의 수 $N(E_1, E_2, \Delta T)$ 은 다음과 같다.

$$N(E_1, E_2, \Delta T) = \int_{E_1}^{E_2} \left[\frac{dN}{dE} \right]_{\Delta T} dE \quad (\text{B.5.11})$$

또한 시간 ΔT 에서 E_1 과 E_2 사이의 개인선량 구간에서 유효선량의 평균 값 $\bar{E}(E_1, E_2, \Delta T)$ 는 다음과 같다.

$$\bar{E}(E_1, E_2, \Delta T) = \frac{1}{N(E_1, E_2, \Delta T)} \int_{E_1}^{E_2} E \left[\frac{dN}{dE} \right]_{\Delta T} dE . \quad (\text{B.5.12})$$

(B239) 개인의 그룹에 대한 집단유효선량 S 는 아래와 같이 계산할 수도 있다.

$$S = \sum_i E_i N_i \quad (\text{B.5.13})$$

여기서 E_i 는 소그룹 i 에서 평균한 유효선량이고, N_i 는 이 소그룹에서 개인 수이다(ICRP 1991b).

(B 240) 집단유효선량의 계산과 해석에는 다음과 같은 측면을 고려해야 하고 집단유효선량의 오용을 피하기 위해 정밀하게 검토해야 한다.

- 피폭 개인의 수
- 피폭 개인의 연령과 성별
- 개인선량의 범위
- 시간에 따른 선량분포
- 피폭 개인의 지리적 분포.

B.5.10. 참고문헌(B.5절)

Cristy, M., Eckerman, K.F., 1987. Specific absorbed fractions of energy at various ages from internal photon sources. Oak Ridge, TN: Oak Ridge

- National Laboratory Report ORNL/TM-8381:Vol. 1-7.
- Endo, A., Yamaguchi, Y., Eckerman, K.F., 2003. Development and assessment of a new radioactive decay database used for dosimetry calculations. *Radiat. Prot. Dosim.* 105(1/4), 565-569.
- Endo, A., Yamaguchi, Y., Eckerman, K.F., 2005. Nuclear Decay Data for Dosimetry Calculation: Revised Data of ICRP Publication 38. JAERI 1347.
- ICRP, 1977. Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 26. *Ann. ICRP* 1(3).
- ICRP, 1983b. Radionuclide Transformation: energy and intensity of emissions. ICRP Publication 38. *Ann. ICRP* 11-13.
- ICRP, 1989b. RBE for deterministic effects. ICRP Publication 58. *Ann. ICRP* 20(4).
- ICRP, 1991b. 1990 Recommendations of the ICRP. ICRP Publication 60. *Ann. ICRP* 21(1-3).
- ICRP, 1993b. Protection against radon-222 at home and at work. ICRP Publication 65. *Ann. ICRP* 23 (2).
- ICRP, 1996b. Conversion coefficients for use in radiological protection against external radiation. ICRP Publication 74. *Ann. ICRP* 26(3/4).
- ICRP, 1996c. Age-dependent doses to members of the public from intake of radionuclides: Part 5. Compilation of ingestion and inhalation dose coefficients. ICRP Publication 72. *Ann. ICRP* 26(1).
- ICRP, 2002. Basic anatomical and physiological data for use in radiological protection. ICRP Publication 89. *Ann. ICRP* 32(3/4).
- ICRU, 1997. Conversion coefficients for use in radiological protection against external radiation. International Commission on Radiation Units and Measurements, Bethesda, MD.
- ICRU, 2001b. Determination of operational dose equivalent quantities for neutrons. ICRU Report 66 *Journal of ICRU* 1(3).
- IEC, 2005. International Electrotechnical Vocabulary(IEV). Online database. IEV 393-04-13, 393-04-14, 393-04-15. International Electrotechnical Commission, Geneva, Switzerland.
- ISO, 1992. Quantities and Units. ISO 31-9-34, 31-9-35, 31-9-36(E). International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- Kaul, A., Aurand, K., Bonka, H., et al., 1987. Possibilities and limits for applying the concept of collective dose. *Health Phys.* 53, 9-10.

- Kramer, R., Zankl, M., Williams, G., Drexler, G., 1982. The calculation of dose from external photon exposures using reference human phantoms and Monte Carlo methods, Part I: The male (Adam) and female (Eva) adult mathematical phantoms. Neuherberg, Germany: GSF-Report S-885, GSF-National Research Center for Environment and Health.
- NCRP, 1990. The Relative Biological Effectiveness of Radiations of Different Quality. NCRP Report No. 104. National Council on Radiation Protection and Measurements, Bethesda MD.
- NCRP, 2006. Development of a Biokinetic Model for Radionuclide-Contaminated Wounds and Procedures for Their Assessment, Dosimetry and Treatment. NCRP Report No. 156. National Council on Radiation Protection and Measurements, Bethesda, MD.
- Schlattl, H., Zankl M., Petoussi-Henss, N., 2007. Organ dose conversion coefficients for voxel models of the reference male and female from idealized photon exposures. *Phys. Med. Biol.* 52, 2123-2145.
- UNSCEAR, 1988. Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation. Report of the United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Annex C. Exposures from medical uses of radiation.
- UNSCEAR, 2000. Sources and Effects of Ionizing Radiation. Report of the United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Volume II: Effects. United Nations, New York.
- Zankl, M., Fill, U., Petoussi-Henss, N., Regulla, D., 2002. Organ dose conversion coefficients for external photon irradiation of male and female voxel phantoms. *Phys. Med. Biol.* 47(14), 2367-2385.
- Zankl, M., Becker, J., Fill, U., et al., 2005. GSF male and female adult voxel models representing ICRP Reference Man – the present status. Proceedings of The Monte Carlo Method: Versatility Unbounded in a Dynamic Computing World. Chattanooga, TN, American Nuclear Society, La Grange Park, USA.
- Zankl M., Eckerman, K.F., Bolch, W.E., 2007. Voxel-based models representing the male and female ICRP reference adult – the skeleton. *Radiat. Prot. Dosim.* 127.

B.6. 방사선방호에서 불확실성과 판단

(B241) ICRP 60(ICRP 1991b)에 명시했듯이 장기나 조직의 등가선량이나 유효선량을 직접 측정할 수는 없지만 방사선량의 평가는 방사선방호에 기초라고 ICRP는 강조한다. 이러한 선량을 평가할 때 외부피폭의 배열이나 체내 방사성핵종 섭취와 체류의 생물역동학, 그리고 인체 구조를 시뮬레이션하는 모델이 필요하다. 방법론과 실제 사용 관점에서 선량계측학적 고려 역시 대단히 중요하다.

(B242) 모델 변수값의 ‘최선평가치’ 도출을 위해 이러한 모델과 변수 값들이 많은 실험적 연구와 인체연구를 통해 개발되었다. 일부 변수의 값이나 모델 자체의 양상이나 구축에 큰 불확실성이 존재한다고 본다. 일부 불확실성에 대해서는 최근 간행물(Leggett 등 1998, ICRP 2002, Harrison 등 2001, Likhtarev 등 2003)에서 검토했는데, 예를 들어 생리학적, 해부학적 특성과 같은 변수 값의 예시적 가변성에 관한 평가치들을 보였다(ICRP 2002). 변수값의 그러한 가변성은 내부피폭에서 선량평가에 필요한 모델과 관련해 특히 중요하다. 값의 범위가 넓은 상황으로부터 선량평가를 위한 가중치나 기타 변수를 평가하기 위해 판단에 의해 필요한 변수를 선정한다.

(B243) 불확실성uncertainty과 가변성variability을 구별하는 것이 중요하다. 불확실성은 주어진 변수 값, 모델의 예측 또는 집단에서 선량 중심값 평가치에 부여할 수 있는 신뢰수준을 의미한다. 결정된 변수의 저준위 측정값의 불확실성도 포함된다. 이는 모든 외삽절차에 중요 인자이며, 특히 낮은 선량 범위에서 방사선량과 그 영향을 평가할 때 중요하다.

(B244) 가변성(엄격하게는 생물학적 가변성)은 해당 집단 내 여러 사람 사이에서 가령 생리학적, 대사학적 변수의 정량적 차이이다. 예를 들어 나이와 성별이 같고 식습관도 같은 두 명의 건강한 사람도 결장을 통한 물질 운반속도는 상당히 다를 수 있다. 마찬가지로 집단의 개별 구성원은 동일한 초기 섭취에 대해 갑상선의 방사성옥소 흡수는 서로 크게 달리 나타난다. 평가치가 가변성이 높은 소수의 관찰에 기초할 경우 가변성은 중심값 평가치 불확실성의 중요한 원인이 된다.

(B245) w_R 및 w_T 값이 도출되는 확률론적 영향에 대한 위험인자는 중간 또는 높은 선량 범위에서 역학적, 실험적 방사선생물학 데이터에서 얻었다. 방사선

방호 및 유효선량 개념에 중요한 낮은 선량 범위의 위험인자는 문턱 없는 선형 모델(LNT)을 사용하여 높은 선량 영역에서 측정 데이터를 외삽한 것에 기초한다.

(B246) LNT모델은 과학적으로는 검증되지 않은 가정이다. 이 모델은 현재의 실험데이터와 역학데이터를 가장 적합하게 해석하며, 확률론적 방사선 영향에 대한 현행 이해와 일관성을 갖는 모델로 보인다. 그러나 이 모델을 사용할 경우 특히 낮은 선량과 낮은 선량률 피폭과 관련해 높은 수준의 불확실성이 도입된다(UNSCEAR 2000). 선량-반응의 선형성과 선량의 덧셈성은 낮은 선량 범위에서 방사선방호에 사용되는 개념에, 특히 앞에서도 설명한 것처럼 유효선량 사용에 필요조건이다.

(B247) 방사선량과 보건위해의 평가에 관련된 불확실성은 이 문서 여러 곳에 설명되어 있다. 그 중 중요한 인자 몇 가지는 다음과 같다.

- 외부와 내부 피폭의 낮은 선량 범위에서 조직 내 에너지 부여 불균질성이 설명되었다(제B.3.2절).
- 인체나 조직 내 방사성핵종의 불균질한 분포는 알파입자처럼 비정이 짧은 전리 입자를 고려할 때 특히 중요하다(제B.3.2, 제B.3.3절).
- 내부피폭 선량 평가에서 생물역동학 모델 및 그 변수 값은 가변적이며 피폭의 구체적 조건에 따라 달라진다. 종종 동물실험을 사용해야 하고 그 결과를 사람에게 외삽해야 한다.
- 생리학적 변수와 기타 변수 측면에서 사람 집단은 세계적으로 인종기반에서 서로 다르다(ICRP 2002). 변수들이 종종 매우 불확실하고 생물학적 가변성이 크며, 측정 방사능이 주로 낮은 범위에 있기 때문에 식품 내 방사성핵종 농도 평가에 방사생태학적 모델을 사용할 경우 가변성이 커지며, 그에 따라 습관 데이터로부터 섭취 가변성도 커진다.
- w_R 값 선정에 중요한 RBE값은 고려하는 중점 및 실험설계에 따라 달라진다. 종종 그 값이 동물이나 시험관 데이터에 의존한다(제B.3.5절 B73-B131항).
- 암 유발 표적세포와 조직 내 그 위치가 분명하지 않다. 확률론적 영향에 대한 낮은 선량 범위에서 선량-반응, 외삽과 LNT모델의 방식이 불확실하다(부록 A).
- 보건위해 평가와 연계된 변수 평가에 성 평균을 수행하며 이것도 불확실성을 초래한다(제B.3.4절).

(B248) 주어진 피폭상황에서 불확실성 정도는 다양한 변수와 여러 조건에 따

라 달라진다. 따라서 불확실성에 보편적 값을 부여할 수는 없지만, 특별한 경우에 이를 고려해야 하고 또 그렇게 해 왔으며, 종합적인 평가에도 포함되어야 한다(예: CERRIE 2004, ICRP 2006c). 일반적으로 방사성핵종의 생물역동학을 포함해 내부피폭에서 방사선량 평가에 대한 불확실성은 외부피폭에서 불확실성보다 크다. 불확도는 방사성핵종마다 다르다.

(B249) ICRP는 그러한 불확실성을 인지하고 있으며, 가능한 한 그러한 불확실성을 상세하게 평가하고 감축하기 위해 노력하고 있다. 그러나 규제 과정의 전망적 선량평가에서는, 작업장이나 환경의 방사선장에 대한 정량적 정보로부터 또는 방사성핵종 섭취량으로부터 선량을 구하도록 ICRP가 권고하는 변수 값과 함께 선량계측 모델은 기준모델로 봐야 한다는 것이 ICRP 입장이다. 이들 값은 합의적 고정값이므로 불확실성의 대상이 되지 않는다.

(B250) 마찬가지로 선량한도나 제약치 권고 목적에 필요한 선량계측 모델과 변수 값도 기준데이터로 정의되며, 따라서 불확실하지 않은 것으로 ICRP는 본다. 그러나 이러한 모델과 값은 정기적으로 재평가되며, 새로운 과학적 데이터와 정보가 가용하면 그러한 평가를 기반으로 ICRP가 이를 갱신할 수 있다.

(B251) ICRP가 권고하는 선량계측 모델, 환산계수 및 기타 변수는 주로 정상적 직무피폭의 계획과 평가, 환경방출 계획 및 선량의 일반 평가를 위해 개발된 것임을 유의해야 한다. 그러한 모델이나 데이터는 선량한도 준수 입증에 필요하다. 선량이 낮은 상황에서 그러하다(제B.5.5절). 예를 들어 사고피폭으로 인한 높은 선량의 경우 또는 역학연구를 위해서는, 개인과 피폭 조건에 관한 보다 상세한 정보가 필요하다. 그러한 상황에서는 개인 해부학 및 생리학적 데이터의 가변성, 방사성핵종 선원향에 대한 구체적 정보, 생물역동학, 그리고 외부피폭의 경우 방사선 입사 방향을 포함한 모든 불확실성 발생원을 고려해야 한다.

(B252) 결론적으로, 기준 모델과 그 변수는 전망적 방사선방호에 사용하기 위해 개발되었다. 이러한 모델과 변수 값은 피폭이 낮은 경우 선량한도 준수 입증에도 사용할 수 있지만, 일반적으로 개인 위험 평가나 역학연구에는 사용할 수 없다. 이러한 상황에 사용할 경우 반드시 불확실성을 상세히 검토해야 한다. 그러한 개인 데이터가 없는 경우 기준 변수를 사용할 수 있지만, 그 사용을 반드시 분명히 기록해야 한다. 이러한 용도 제한은 특히 유효선량에 적용된다. 개별 사안의 평가와 판단에는 가장 적합한 생물역동학적 변수, 전리방사선의 생물학적 영향 및 위험계수와 함께 장기나 조직의 흡수선량을 사용해야 한다. 이때 불확실

성을 고려해야 한다.

B.6.1. 참고문헌(B.6절)

- CERRIE, 2004. Report of the Committee Examining Radiation Risks of Internal Emitters(CERRIE). www.cerrie.org, ISBN 0-85951-545-1.
- Harrison, J.D., Leggett, R.W., Noßke, D., et al., 2001. Reliability of the ICRP's dose coefficients for members of the public, II. Uncertainties in the absorption of ingested radionuclides and the effect on dose estimates. Radiat. Prot. Dosim. 95, 295-308.
- ICRP, 1991b. 1990 Recommendations of the ICRP. ICRP Publication 60. Ann. ICRP 21(1-3).
- ICRP, 2002. Basic anatomical and physiological data for use in radiological protection. ICRP Publication 89. Ann. ICRP 32(3/4).
- ICRP, 2006c. Human alimentary tract model for radiological protection. ICRP Publication 100. Ann. ICRP 36(1/2).
- Leggett, R.W., Bouville, A., Eckerman, K.F., 1998. Reliability of the ICRP's systemic biokinetic models. Radiat. Protect. Dosim. 79, 335-342.
- Likhtarev, I., Minenko, V., Khrouch, V., et al., 2003. Uncertainties in thyroid dose reconstruction after Chernobyl. Radiat. Prot. Dosim. 105, 601-608.
- UNSCEAR, 2000. Sources and Effects of Ionizing Radiation. Report of the United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Volume II: Effects. United Nations, New York.

총괄 참고문헌

- AFRRI Contract Report 94-1, 1994. Analysis of chronic radiation sickness cases in the population of the Southern Urals. AFRRI, Bethesda, Maryland, USA.
- AFRRI Contract Report 98-1, 1998. Chronic radiation sickness among Techa Riverside Residents. AFRRI, Bethesda, Maryland, USA.
- Akleyev, A.V., Kisselyov, M.F.(Eds.), 2002. Medical-biological and ecological impacts of radioactive contamination of the Techa river. Fregat, Chelyabinsk. ISBN5-88931-026-7.
- Akleyev, A., Veremeyeva, G.A., Silkina, L.A., et al., 1999. Long-term hemopoiesis and immunity status after chronic radiation exposure of red bone marrow in humans. *Central European Journal of Occ. and Env. Medicine* 5, 113-129.
- Aleman, B.M., van den Belt-Dusebout, A.W., Klokman, W.J., et al., 2003. Long-term cause-specific mortality of patients treated for Hodgkin's disease. *J. Clin. Oncol.* 21, 3431-3439.
- Alpen, E.L., Poweres-Risius, P., Curtis, S.B., et al., 1993. Tumorigenic potential of high-Z, high-LET charged-particle radiations. *Radiat. Res.* 136, 382-391.
- Berkovski, V., Bonchuk, Y., Ratia, G., 2003. Dose per unit content functions: a robust tool for the interpretation of bioassay data. *Proc. Workshop on Internal Dosimetry of Radionuclides. Radiat. Prot. Dosim.* 105, 399-402.
- Bigildeev, E.A., Michalik, V., Wilhelmová, L., 1992. Theoretical estimation of quality factor for tritium. *Health Phys.* 63, 462-463.
- Bingham, D., Gardin, I., Hoyes, K.P., 2000. The problem of Auger emitters for radiological protection. In: *Proc. Workshop on Environmental Dosimetry, Avignon, September 1999. Radiat. Prot. Dosim.* 92, 219-228.
- Bolch, W.E., Farfan, E.B., Huston, T.E., et al., 2003. Influences of parameter uncertainties within the ICRP-66 respiratory tract model: particle clearance. *Health Physics*, 84(4) 421-435.
- Brewer, C., Holloway, S., Zawalynski, P., et al., 1998. A chromosomal deletion map of human malformations. *Am. J. Hum. Genet.* 63, 1153-1159.

- Cardis, E., Vrijheid, M., Blettner, M., et al., 2005. Risk of cancer after low doses of ionising radiation: retrospective cohort study in 15 countries. *Br. Med. J.* 331, 77–80.
- Carter, C.O., 1961. The inheritance of pyloric stenosis. *Brit. Med. Bull.* 17, 251–254.
- Carter, C.O., 1977. Monogenic disorders. *J. Med. Genet.* 14, 316–320.
- Cattanach, B.M., Burtenshaw, M.D., Rasberry, C., et al., 1993. Large deletions and other gross forms of chromosome imbalance compatible with viability and fertility in the mouse. *Nature Genet.* 3, 56–61.
- Cattanach, B.M., Evans, E.P., Rasberry, C., et al., 1996. Incidence and distribution of radiation-induced large deletions in the mouse. In: Hagen, U., Harder, D., Jung, H. et al.(Eds.), *Congress Proceedings, Tenth Int. Cong. Radiat. Res., Vol. 2, Wuřzburg, Germany*, pp. 531–534.
- CERRIE, 2004. Report of the Committee Examining Radiation Risks of Internal Emitters(CERRIE). www.cerrie.org, ISBN 0-85951-545-1.
- Chakraborty, R., Yasuda, N., Denniston, C., et al., 1998. Ionizing radiation and genetic risks. VII. The concept of mutation component and its use in risk estimation for mendelian diseases. *Mutat. Res.* 400, 41–52.
- Charles, M.W., Mill, A.J., Darley, P.J., 2003. Carcinogenic risk of hot-particle exposures. *J. Radiol. Prot.* 23, 5–28.
- Chen, J., Roos, H., Kellerer, A.M., 2005. Radiation quality of photons in small and large receptors –a microdosimetric analysis. *Radiat. Prot. Dosim.* 118, 238–242.
- Cherubini, R., Goodhead, D.T., Menzel, H.G., et al.(Eds.), 2002. *Proceedings of the 13th Symposium on Microdosimetry. Radiat. Prot. Dosim.* 99, Nos. 1–4.
- Cox, R., Edwards, A.A., 2002. Comments on the paper: Microsatellite instability in acute myelocytic leukaemia developed from A-bomb survivors and related cytogenetic data. *Int. J. Radiat. Biol.* 78, 443–445.
- Cristy, M., Eckerman, K.F., 1987. Specific absorbed fractions of energy at various ages from internalphoton sources. Report ORNL/TM-8381: Vol.1–7. Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, TN.
- Crow, J.F., Denniston, C., 1981. The mutation component of genetic damage. *Science* 212, 888–893.

- Crow, J.F., Denniston, C., 1985. Mutation in human populations. In: Harris, H., Hirschhorn, H.(Eds.), *Adv. Hum. Genet. Vol. 12*, Plenum Press, NewYork, pp. 59–123.
- Czeizel, A., Sankaranarayanan, K., 1984. The load of genetic and partially genetic disorders in man. I. Congenital anomalies: estimates of detriment in terms of years lost and years of impaired life. *Mutat. Res.* 128, 73–103.
- Czeizel, A., Sankaranarayanan, K., Losonci, A., et al., 1988. The load of genetic and partially genetic disorders in man. II. Some selected common multifactorial diseases. Estimates of population prevalence and of detriment in terms of years lost and impaired life. *Mutat. Res.* 196, 259–292.
- Darby, S., Hill, D., Auvinen, A., et al., 2005. Radon in homes and risk of lung cancer: collaborative analysis of individual data from 13 European case-control studies. *Br. Med. J.* 330, 223–226.
- Darby, S., Hill, D., Deo, H., et al., 2006. Residential radon and lung cancer –detailed results of a collaborative analysis of individual data on 7148 persons with lung cancer and 14,208 persons without lung cancer from 13 epidemiologic studies in Europe. *Scand. J. Work Environ. Health* 32(Suppl. 1), 1–84.
- Denniston, C., Chakraborty, R., Sankaranarayanan, K., 1998. Ionizing radiation and genetic risks. VIII. The concept of mutation component and its use in risk estimation for multifactorial diseases. *Mutat. Res.* 405, 7–79.
- Dietze, G., Alberts, W.G., 2004. Why it is advisable to keep $w_R = 1$ and $Q = 1$ for photons and electrons. *Radiat. Prot. Dosim.* 109, 297–302.
- Dietze, G., Harder, D., 2004. Proposal for a Modified Radiation Weighting Factor for Neutrons. Proceedings of the 11th International Congress of IRPA. Available from <www.irpa.net>.
- Dietze, G., Siebert, B.R.L., 1994. Photon and neutron dose contributions and mean quality factors in phantom of different size irradiated by monoenergetic neutrons. *Radiat. Res.* 140, 130–133.
- Dörr, W., Hendry, J.H., 2001. Consequential late effects in normal tissue. *Radiother. Oncol.* 61, 223–231.
- Early Breast Cancer Trialists' Collaborative Group, 2000. Favourable and unfavourable effects on long-term survival of radiotherapy for early breast cancer: an overview of the randomised trials. *Lancet* 355, 1757–1770.

- Eckerman, K.F., Westfall, R.J., Ryman, et al., 1994. Availability of nuclear decay data in electronic form, including beta spectra not previously published. *Health Phys.* 67, 338-345.
- Edwards, A.A., 1997. The use of chromosomal aberrations in human lymphocytes for biological dosimetry. *Radiat. Res.* 148(suppl.), 39-44.
- Edwards, A.A., Lloyd, D.C., 1996. Risk from deterministic effects of ionising radiation. *Doc. NRPB Vol. 7 No.3.*
- Ehling, U.H., 1965. The frequency of X-ray-induced dominant mutations affecting the skeleton in mice. *Genetics* 51, 723-732.
- Ehling, U.H., 1966. Dominant mutations affecting the skeleton in offspring of X-irradiated male mice. *Genetics* 54, 1381-1389.
- Ellender, M., Harrison, J.D., Edwards, A.A., et al., 2005. Direct single gene mutational events account for radiation-induced intestinal adenoma yields in *Apc(min/+)* mice. *Radiat. Res.* 163, 552-556.
- Endo, A., Yamaguchi, Y., Eckerman, K.F., 2003. Development and assessment of a new radioactive decay database used for dosimetry calculations. *Radiat. Prot. Dosim.* 105(1/4), 565-569.
- Endo, A., Yamaguchi, Y., Eckerman, K.F., 2005. Nuclear Decay Data for Dosimetry Calculation: Revised Data of ICRP Publication 38. JAERI 1347.
- EPA, 1999. Estimating Radiogenic Cancer Risks. Addendum: Uncertainty Analysis. U.S. Environmental Protection Agency, Washington, D.C.
- EU, 1996. Council of the European Union: Council Directive on laying down the Basic Safety Standards for the protection of the health of workers and the general public against the dangers arising from ionising radiation. *Official. J. Eur. Community* 39, No. L, 159.
- Falconer, D.S., 1960. *Introduction to Quantitative Genetics*, Oliver and Boyd, Edinburgh.
- Falconer, D.S., 1965. The inheritance of liability to certain diseases, estimated from the incidence among relatives. *Ann. Hum. Genet.* (Lond) 29, 51-76.
- Farfan, E.B., Bolch, W.E., Huston, T.E., et al., 2005. Uncertainties in electron-absorbed fractions and lung doses from inhaled beta-emitters. *Health Physics* 88(1), 37-47.
- Favor, J., 1989. Risk estimation based on germ cell mutations in animals. *Genome* 31, 844-852.

- Fill, U.A., Zankl, M., Petoussi-Henss, N., et al., 2004. Adult female voxel models of different stature and photon conversion coefficients. *Health Phys.* 86(3), 253–272.
- Frankenberg, D., Frankenberg-Schwager, M., Garg, I., et al., 2002. Mutation induction and neoplastic transformation in human and human–hamster hybrid cells: dependence on photon energy and modulation in the low dose range. *J. Radiol. Prot.* 22, A17–20.
- French Academies Report, 2005. La relation dose–effet et l’estimation des effets cancérogènes des faibles doses de rayonnements ionisants. (http://www.academie-sciences.fr/publications/rapports/pdf/dose_effet_07_04_05.pdf).
- Fry, R.J.M., Powers–Risius, P., Alpen, E.L., et al., 1985. High-LET radiation carcinogenesis. *Radiat. Res.* 104, S188–S195.
- Goddu, S.M., Howell, R.W., Rao, D.V., 1996. Calculation of equivalent dose for Auger electron emitting radionuclides distributed in human organs. *Acta Oncol.* 35, 909–916.
- Goodhead, D.T., 1994. Initial events in the cellular effects of ionizing radiations: clustered damage in DNA. *Int. J. Rad. Biol.* 65, 7–17.
- Goodhead, D.G., O’Neill, P., Menzel, H.G.(Eds.), 1996. *Microdosimetry: An interdisciplinary approach. Proceedings of the 12th Symposium on Microdosimetry.* Royal Society of Chemistry, Cambridge.
- Goossens, L.H.J., Harrison, J.D., Kraan, B.C.P., et al., 1997. Probabilistic Accident Consequence Uncertainty Analysis: uncertainty assessment for internal dosimetry, NUREG/CR–6571 Vol. 1, U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC.
- Gragtmans, N.J., Myers, D.K., Johnson, J.R., et al., 1984. Occurrence of mammary tumours in rats after exposure to tritium beta rays and 200 kVp x-rays. *Radiat. Res.* 99, 636–650.
- Green, E.L., 1968. Genetic effects of radiation on mammalian populations. *Ann. Rev. Genet.* 2, 87–120.
- Guerrero–Carbajal, C., Edwards, A.A., Lloyd, D.C., 2003. Induction of chromosome aberration in human lymphocytes and its dependence on x-ray energy. *Radiat. Prot. Dosim.* 106, 131–135.
- Guskova, A.K., Gusev, I.A., Okladnikova, N.D., 2002. Russian concepts of chronic radiation disease in man. *Br. J. Radiol. Supp.* 26, 19–23.
- Hall, P., Granath, F., Lundell, M., et al., 1999. Lenticular opacities in individuals exposed to ionising radiation in infancy. *Radiat. Res.* 152,

190–195.

- Hancock, S.L., Tucker, M.A., Hoppe, R.T., 1993. Factors affecting late mortality from heart disease after treatment of Hodgkin's disease. *J. Am. Med. Assoc.* 270, 1949–1955.
- Harder, D., Petoussi-Henss, N., Regulla, D., et al., 2004. Spectra of scattered photons in large absorbers and their importance for the values of the radiation weighting factor w_R . *Radiat. Prot. Dosim.* 109, 291–295.
- Harrison J.D., Leggett, R.W., Nosske, D., et al., 2001. Reliability of the ICRP's dose coefficients for members of the public, II. Uncertainties in the absorption of ingested radionuclides and the effect on dose estimates. *Radiat. Prot. Dosim.* 95, 295–308.
- Harrison, J.D., Muirhead, C.R., 2003. Quantitative comparisons of cancer induction in humans by internally deposited radionuclides and external radiation. *Int. J. Radiat. Biol.* 79, 1–13.
- Hayashi, T., Kusunoki, Y., Hakoda, M., et al., 2003. Radiation dose-dependent increases in inflammatory response markers in A-bomb survivors. *Int. J. Radiat. Biol.* 79, 129–136.
- Hendry, J.H., 1994. Biological response modifiers and normal tissue injury after irradiation. *Seminars in Radiation Oncology* 4, 123–132.
- Hendry, J.H., Thames, H.D., 1987. *Fractionation in Radiotherapy*. Taylor and Francis, London.
- Hofer, K.G., Harris, C.R., Smith, J.M., 1975. Radiotoxicity of intracellular ^{67}Ga , ^{125}I and ^3H : nuclear versus cytoplasmic radiation effects in murine L1210 cells. *Int. J. Radiat. Biol.* 28, 225–241.
- Howell, R.W., Narra, V.R., Sastry, K.S.R., et al., 1993. On the equivalent dose for Auger electron emitters. *Radiat. Res.* 134, 71–78.
- IAEA, 1982. *Basic Safety Standards for Radiation Protection, 1982 Edition*. Safety Series No. 9. STI/PUB/607. International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria.
- IAEA, 1996. *International Basic Safety Standards for Protection against Ionizing Radiation and for the Safety of Radiation Sources*. Safety Series 115. STI/PUB/996. International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria.
- IAEA, 1999. *Occupational radiation protection*. Safety Guide RS-G-1.1. International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria.
- IAEA, 2000a. *Legal and Governmental Infrastructure for Nuclear,*

- Radiation, Radioactive Waste and Transport Safety. Safety Requirements; Safety Standards GS-R-1.STI/PUB/1093. International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria.
- IAEA, 2000b. Regulatory Control of Radioactive Discharges to the Environment. Safety Guide WS-G-2.3. STI/PUB/1088. International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria.
- IAEA, 2001. National Regulatory Authorities with Competence in the Safety of Radiation Sources and the Security of Radioactive Materials. Proceedings of an International Conference in Buenos Aires, Argentina, 11–15 December 2000. IAEA-CSP-9/P. International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria.
- IAEA, 2002. Preparedness and Response for a Nuclear or Radiological Emergency, Safety Requirements, Safety Standards Series No. GS-R-2. STI/PUB/1133. International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria.
- IAEA, 2004. Code of Conduct on the Safety and Security of Radioactive Sources. International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria.
- IARC, 2000. IARC monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans: Volume 75. Ionizing radiation, Part I, X and gamma radiation and neutrons. IARC Press, Lyon.
- IARC, 2001. IARC monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans: Volume 78. Ionizing radiation, Part 2: some internally deposited radionuclides. IARC Press, Lyon.
- ICNIRP, 2004. ICNIRP Publications 1992–2004. A reference CD-ROM based on guidelines on limiting exposure to non-ionizing radiation and statements on special applications. Matthes, R., Bernhardt, J.H., McKinlay, A.F.(eds) International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection, Munich, Germany. ISBN 3-934994-05-9.
- ICRP, 1951. International Recommendations on Radiological Protection. Revised by the International Commission on Radiological Protection and the 6th International Congress of Radiology, London, 1950. Br. J. Radiol. 24, 46–53.
- ICRP, 1955. Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. Br. J. Radiol., Suppl. 6.
- ICRP, 1957. Reports on Amendments during 1956 to the Recommendations of the International Commission on Radiological Protection (ICRP). Acta. Radiol. 48, 493–495.
- ICRP, 1959. Recommendations of the International Commission on

- Radiological Protection. ICRP Publication 1. Pergamon Press, Oxford, UK.
- ICRP/ICRU, 1963. Report of the RBE Committee of the International Commissions on Radiological Protection and on Radiation Units and Measurements. Health Phys. 9, 357.
- ICRP, 1964. Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 6. Pergamon Press, Oxford, UK.
- ICRP, 1966. Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 9, Pergamon Press, Oxford, UK.
- ICRP, 1973. Implications of Commission Recommendations that Doses Be Kept As Low As Readily Achievable. ICRP Publication 22. Pergamon Press, Oxford, UK.
- ICRP, 1977. Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 26. Ann. ICRP 1(3).
- ICRP, 1978. Statement from the 1978 Stockholm Meeting of the ICRP. ICRP Publication 28. Ann. ICRP 2(1).
- ICRP, 1979. Limits for the intake of radionuclides by workers. ICRP Publication 30, Part 1. Ann. ICRP 2(3/4).
- ICRP, 1980. Biological effects of inhaled radionuclides. ICRP Publication 31. Ann. ICRP 4(1/2).
- ICRP, 1983. Cost-benefit analysis in the optimisation of radiation protection. ICRP Publication 37. Ann. ICRP 10(2/3).
- ICRP, 1983b. Radionuclide transformation: energy and intensity of emissions. ICRP Publication 38. Ann. ICRP 11-13.
- ICRP, 1984. Non-stochastic effects of ionising radiation. ICRP Publication 41. Ann. ICRP 14(3).
- ICRP, 1985a. Protection of the patient in radiation therapy. ICRP Publication 44. Ann. ICRP 15(2).
- ICRP, 1985b. Quantitative bases for developing a unified index of harm. ICRP Publication 45. Includes: Statement from the 1985 Paris meeting of the ICRP. Ann. ICRP 15(3).
- ICRP, 1989. Optimisation and decision-making in radiological protection. ICRP Publication 55. Ann. ICRP 20(1).
- ICRP, 1989b. RBE for deterministic effects. ICRP Publication 58. Ann.

ICRP 20(4).

ICRP, 1991a. The biological basis for dose limitation in the skin. ICRP Publication 59. Ann. ICRP 22(2).

ICRP, 1991b. 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 60. Ann. ICRP 21(1-3).

ICRP, 1991c. Radiological protection in biomedical research. ICRP Publication 62. Ann. ICRP 22(3).

ICRP, 1992. Principles for intervention for protection of the public in a radiological emergency. ICRP Publication 63. Ann. ICRP 22(4).

ICRP, 1993a. Protection from potential exposure: a conceptual framework. ICRP Publication 64. Ann. ICRP 23(1).

ICRP, 1993b. Protection against radon-222 at home and at work. ICRP Publication 65. Ann. ICRP 23(2).

ICRP, 1993c. Age-dependent doses to members of the public from intake of radionuclides: Part 2. Ingestion dose coefficients. ICRP Publication 67. Ann. ICRP 23(3/4).

ICRP, 1994a. Human respiratory tract model for radiological protection. ICRP Publication 66. Ann. ICRP 24(1-3).

ICRP, 1994b. Dose coefficients for intakes of radionuclides by workers. ICRP Publication 68. Ann. ICRP 24(4).

ICRP, 1995a. Age-dependent doses to members of the public from intake of radionuclides: Part 3: Ingestion dose coefficients. ICRP Publication 69. Ann. ICRP 25(1).

ICRP, 1995b. Age-dependent doses to members of the public from intake of radionuclides: Part 4: Inhalation dose coefficients. ICRP Publication 71. Ann. ICRP 25(3/4).

ICRP, 1996a. Radiological protection in medicine. ICRP Publication 73. Ann. ICRP 26(2).

ICRP, 1996b. Conversion coefficients for use in radiological protection against external radiation. ICRP Publication 74. Ann. ICRP 26(3/4).

ICRP, 1996c. Age-dependent doses to members of the public from intake of radionuclides: Part 5. Compilation of ingestion and inhalation dose coefficients. ICRP Publication 72. Ann. ICRP 26(1).

ICRP, 1997a. General principles for the radiation protection of workers. ICRP Publication 75. Ann. ICRP 27(1).

- ICRP, 1997b. Protection from potential exposures: application to selected radiation sources. ICRP Publication 76. Ann. ICRP 27(2).
- ICRP, 1997c. Individual monitoring for internal exposure of workers. ICRP Publication 78. Ann. ICRP 27(3-4).
- ICRP, 1997d. Radiological protection policy for the disposal of radioactive waste. ICRP Publication 77. Ann. ICRP 27(Suppl).
- ICRP, 1998a. Genetic susceptibility to cancer. ICRP Publication 79. Ann. ICRP 28(1-2).
- ICRP, 1998b. Radiation protection recommendations as applied to the disposal of long-lived solid radioactive waste. ICRP Publication 81. Ann. ICRP 28(4).
- ICRP, 1999a. Protection of the public in situations of prolonged radiation exposure. ICRP Publication 82. Ann. ICRP 29(1-2).
- ICRP, 1999b. Risk estimation for multifactorial diseases. ICRP Publication 83. Ann. ICRP 29(3-4).
- ICRP, 2000a. Pregnancy and medical radiation. ICRP Publication 84. Ann. ICRP 30(1).
- ICRP, 2000b. Avoidance of radiation injuries from medical interventional procedures. ICRP Publication 85. Ann. ICRP 30(2).
- ICRP, 2000c. Prevention of accidental exposures to patients undergoing radiation therapy. ICRP Publication 86. Ann. ICRP 30(3).
- ICRP, 2000d. Managing patient dose in computed tomography. ICRP Publication 87. Ann. ICRP 30(4).
- ICRP, 2001a. Doses to the embryo and embryo/fetus from intakes of radionuclides by the mother. ICRP Publication 88. Ann. ICRP 31(1-3).
- ICRP, 2001b. Radiation and your patient: A guide for medical practitioners. ICRP Supporting Guidance 2. Ann. ICRP 31(4).
- ICRP, 2002. Basic anatomical and physiological data for use in radiological protection. ICRP Publication 89. Ann. ICRP 32(3/4).
- ICRP, 2003a. Biological effects after prenatal irradiation (embryo and fetus). ICRP Publication 90. Ann. ICRP 33(1/2).
- ICRP, 2003b. A framework for assessing the impact of ionising radiation on non-human species. ICRP Publication 91. Ann. ICRP 33(3).
- ICRP, 2003c. Relative biological effectiveness (RBE), quality factor(Q), and radiation weighting factor(w_R). ICRP Publication 92. Ann. ICRP 33(4).

- ICRP, 2004a. Managing patient dose in digital radiology. ICRP Publication 93. Ann. ICRP 34(1).
- ICRP, 2004b. Release of patients after therapy with unsealed sources. ICRP Publication 94. Ann. ICRP 34(2).
- ICRP, 2004c. Doses to infants from ingestion of radionuclides in mothers' milk. ICRP Publication 95. Ann. ICRP 34(3/4).
- ICRP, 2005a. Protecting people against radiation exposure in the event of a radiological attack. ICRP Publication 96. Ann. ICRP 35(1).
- ICRP, 2005b. Prevention of high-dose-rate brachytherapy accidents. ICRP Publication 97. Ann. ICRP 35(2).
- ICRP, 2005c. Radiation safety aspects of brachytherapy for prostate cancer using permanently implanted sources. ICRP Publication 98. Ann. ICRP 35(3).
- ICRP, 2005d. Low dose extrapolation of radiation-related cancer risk. ICRP Publication 99, Ann. ICRP 35(4).
- ICRP, 2006a. Assessing dose of the representative person for the purpose of radiation protection of the public and The optimisation of radiological protection: Broadening the process. ICRP Publication 101. Ann. ICRP 36(3).
- ICRP, 2006b. Analysis of the criteria used by the ICRP to justify the setting of numerical values. Supporting Guidance 5. Ann. ICRP 36 (4).
- ICRP, 2006c. Human alimentary tract model for radiological protection. ICRP Publication 100. Ann. ICRP 36(1/2).
- ICRP, 2007a. Scope of radiological protection control measures. ICRP Publication 104. Ann. ICRP 37(4).
- ICRP, 2007b. Radiological protection in medicine. ICRP Publication 105. Ann. ICRP 37(5).
- ICRU, 1938. Recommendations of the International Commission on Radiation Units, Chicago, 1937. Am. J. Roentgenol., Radium Therapy Nucl. Med. 39, 295.
- ICRU, 1951. Recommendations of the International Commission on Radiation Units, London, 1950. Radiology 56, 117.
- ICRU, 1954. Recommendations of the International Commission on Radiation Units, Copenhagen, 1953. Radiology 62, 106.
- ICRU, 1957. Report of the International Commission on Radiation Units and Measurements, Natl. Bur. Std Handbook 62.

- ICRU, 1962. Radiation Quantities and Units, Report 10a of the International Commission on Radiation Units and Measurements, Natl. Bur. Std Handbook 78.
- ICRU, 1970. Linear Energy Transfer. ICRU Report 16. ICRU Publications: Bethesda, MD.
- ICRU, 1985. Determination of Dose Equivalents Resulting from External Radiation Sources. ICRU Report 39. ICRU Publications: Bethesda, MD.
- ICRU, 1986. The Quality Factor in Radiation Protection. ICRU Report 40. ICRU Publications: Bethesda, MD.
- ICRU, 1988. Measurement of Dose Equivalents from External Radiation Sources, Part 2. ICRU Report 43. ICRU Publications: Bethesda, MD.
- ICRU, 1992. Measurement of Dose Equivalents from External Photon and Electron Radiations. ICRU Report 47. ICRU Publications: Bethesda, MD.
- ICRU, 1993a. Stopping Powers and Ranges of Protons and Alpha Particles with Data Disk. ICRU Report 49. ICRU Publications: Bethesda, MD.
- ICRU, 1993b. Quantities and Units in Radiation Protection Dosimetry. ICRU Report 51. ICRU Publications: Bethesda, MD.
- ICRU, 1997. Conversion Coefficients for Use in Radiological Protection against External Radiation. ICRU Report 57. ICRU Publications: Bethesda, MD.
- ICRU, 1998. Fundamental Quantities and Units for Ionizing Radiation. ICRU Report 60. ICRU Publications: Bethesda, MD.
- ICRU, 2001a. Quantities, units and terms in radioecology. ICRU Report 65. Journal of ICRU 1(2).
- ICRU, 2001b. Determination of operational dose equivalent quantities for neutrons. ICRU Report 66. Journal of ICRU 1(3).
- IEC, 2005. International Electrotechnical Vocabulary(IEV). Online database. IEV 393-04-13, 393-04-14, 393-04-15. International Electrotechnical Commission, Geneva, Switzerland.
- ISO, 1992. Quantities and Units. ISO 31-9-34, 31-9-35, 31-9-36(E). International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- IXRPC, 1928. X ray and Radium Protection. Recommendations of the 2nd International Congress of Radiology, 1928. Br. J. Radiol. 12, 359-363.
- IXRPC, 1934. International Recommendations for X ray and Radium Protection. Revised by the International X ray and Radium Protection

- Commission and adopted by the 4th International Congress of Radiology, Zurich, July 1934. *Br. J. Radiol.* 7, 1-5.
- IXRUC, 1928. International X ray unit of intensity. Recommendations of the 2nd International Congress of Radiology, 1928. *Br. J. Radiol.* 12, 363-64.
- Izumi, S., Suyama, A., Koyama, K., 2003a. Radiation-related mortality among offspring of atomic bomb survivors after a half-century of follow-up. *Int. J. Cancer* 107, 291-297.
- Izumi, S., Koyama, K., Soda, M., Suyama, A., 2003b. Cancer incidence in children and young adults did not increase relative to parental exposure to atomic bombs. *Br. J. Cancer* 89, 1709-1713.
- Jacobi, W., 1975. The Concept of Effective Dose –A Proposal for the Combination of Organ Doses. *Radiat. Environ. Biophys.* 12, 101-109.
- Johnson, J.R., Myers, D.K., Jackson, J.S., et al., 1995. Relative biological effectiveness of tritium for induction of myeloid leukaemia. *Radiat. Res.* 144, 82-89.
- Joiner, M.C., Marples, B., Lambin, P., et al., 2001. Low-dose hypersensitivity: current status and possible mechanisms. *Int. J. Radiat. Oncol. Biol. Phys.* 49, 379-389.
- Jung, H., Beck-Bornholdt, H.P., Svoboda, V., et al., 2001. Quantification of late complications after radiation therapy. *Radiother. Oncol.* 61, 233-246.
- Kassis, A.I., Fayed, F., Kinsey, B.M., et al., 1989. Radiotoxicity of an I-125 labeled DNA intercalator in mammalian cells. *Radiat. Res.* 118, 283-294.
- Kaul, A., Aurand, K., Bonka, H., et al., 1987. Possibilities and limits for applying the concept of collective dose. *Health Phys.* 53, 9-10.
- Kaul, A., Becker, D.(Eds.), 2005. Radiological Protection. Landolt-Börnstein, Group VIII, Vol. 4.
- Kellerer, A.M., 1990. Rigour within uncertainty. *ICRU News*, 3- December 1990, ICRU: Bethesda, MD.
- Kellerer, A.M., Leuthold, G., Mares, V., et al., 2004. Options for the modified radiation weighting factor of neutrons. *Radiat. Prot. Dosim.* 109, 181-188.
- Kirk, K.M., Lyon, M.F., 1984. Induction of congenital abnormalities in the offspring of male mice treated with x rays at pre-meiotic and post-meiotic stages. *Mutat. Res.* 125, 75-85.

- Kramer, R., Zankl, M., Williams, G., et al., 1982. The calculation of dose from external photon exposures using reference human phantoms and Monte Carlo methods, Part I: The male(Adam) and female(Eva) adult mathematical phantoms. GSF-Report S-885, GSF-National Research Center for Environment and Health, Neuherberg, Germany.
- Krewski, D., Lubin, J.H., Zielinski, J.M., et al., 2006. A combined analysis of North American case-control studies of residential radon and lung cancer. *J. Toxicol. Environ. Health Part A* 69, 533-597.
- Lafuma, J., Nenot, J.C., Morin, M., et al., 1974. Respiratory carcinogenesis in rats after inhalation of radioactive aerosols of actinides and lanthanides in various chemical forms. In: Karbe, E., Parks, J.F.(Eds.), *Experimental Lung Cancer*, Vol. 1, Springer Verlag, New York, pp. 443-453.
- Leggett, R.W., Bouville, A., Eckerman, K.F., 1998. Reliability of the ICRP's systemic biokinetic models. *Radiat. Protect. Dosim.* 79, 335-342.
- Likhtarev, I., Minenko, V., Khrouch, V., et al., 2003. Uncertainties in thyroid dose reconstruction after Chernobyl. *Radiat. Prot. Dosim.* 105, 601-608.
- Little, J.B., 2003. Genomic instability and bystander effects: a historical perspective. *Oncogene* 22, 6978-6987.
- Lohrer, H.D., Braselmann, H., Richter, H.E., et al., 2001. Instability of microsatellites in radiation-associated thyroid tumours with short latency periods. *Int. J. Radiat. Biol.* 77, 891-899.
- Lubin, J.H., Boice Jr., J.D., Edling, C., et al., 1995. Lung cancer in radon-exposed miners and estimation of risk from indoor exposure. *J. Natl. Cancer. Inst.* 87, 817-827.
- Lubin, J.H., Wang, Z.Y., Boice Jr., J.D., et al., 2004. Risk of lung cancer and residential radon in China: pooled results of two studies. *Int. J. Cancer* 109(1), 132-137.
- Lyon, M.F., Renshaw, R., 1988. Induction of congenital malformation in mice by parental irradiation: transmission to later generations. *Mutat. Res.* 198, 277-283.
- McGale, P., Darby, S.C., 2005. Low doses of ionizing radiation and circulatory diseases: A systematic review of the published epidemiological evidence. *Radiat. Res.* 163, 247-257.
- Michalowski, A., 1981. Effects of radiation on normal tissues: hypothetical mechanisms and limitations of in situ assays of clonogenicity. *Radiat.*

- Environ. Biophys. 19, 157–172.
- Minamoto, A., Taniguchi, H., Yoshitani, N., et al., 2004. Cataracts in atomic bomb survivors. *Int. J. Radiat. Biol.* 80, 339–345.
- Mitchel, R.E., Jackson, J.S., McCann, R.A., Boreham, D.R., 1999. The adaptive response modifies latency for radiation-induced myeloid leukaemia in CBA/H mice. *Radiat. Res.* 152, 273–279.
- Mitchel, R.E., Jackson, J.S., Morrison, D.P., Carlisle, S.M., 2003. Low doses of radiation increase the latency of spontaneous lymphomas and spinal osteosarcomas in cancer-prone, radiation-sensitive Trp53 heterozygous mice. *Radiat. Res.* 159, 320–327.
- Morgan, W.F., 2003. Non-targeted and delayed effects of exposure to ionizing radiation: I Radiation-induced genomic instability and bystander effects in vitro. *Radiat. Res.* 159, 567–580.
- Moiseenko, V.V., Walker, A.J., Prestwich, W.V., 1997. Energy deposition pattern from tritium and different energy photons— comparative study. *Health Phys.* 73, 388–392.
- Mothersill, C., Seymour, C., 2001. Radiation-induced bystander effects: Past history and future directions. *Radiat. Res.* 155, 759–767.
- Morstin, K., Kopec, M., Olko, P., et al., 1993. Microdosimetry of tritium. *Health Phys.* 65, 648–656.
- Nakanishi, M., Tanaka, K., Takahashi, T., et al., 2001. Microsatellite instability in acute myelocytic leukaemia developed from A-bomb survivors. *Int. J. Radiat. Biol.* 77, 687–94 and Comments(2002), *Int. J. Radiat. Biol.* 78, 441–445.
- NAS/NRC, 2006. Health risks from exposure to low levels of ionizing radiation: BEIR VII Phase 2. Board on Radiation Effects Research. National Research Council of the National Academies, Washington, D.C.
- NCI/CDC, 2003. Report of the NCI-CDC Working Group to Revise the 1985 NIH Radioepidemiological Tables. NIH Publication No. 03–387. National Cancer Institute, Bethesda, MD.
- NCRP, 1974. Radiological factors affecting decision-making in a nuclear attack. Report No. 42. National Council on Radiation Protection and Measurements, Bethesda, MD.
- NCRP, 1989. Radiation protection for medical and allied health personnel. Report No. 105. National Council on Radiation Protection and Measurements, Bethesda, MD.

- NCRP, 1990. The Relative Biological Effectiveness of Radiations of Different Quality. NCRP Report No. 104. National Council on Radiation Protection and Measurements. Bethesda, MD.
- NCRP, 1995. Principles and Application of Collective Dose in Radiation Protection. NCRP Report 121. National Council on Radiation Protection and Measurements. Bethesda, MD.
- NCRP, 1997. Uncertainties in Fatal Cancer Risk Estimates used in Radiation Protection. NCRP Report 126. National Council on Radiation Protection and Measurements, Bethesda MD.
- NCRP, 1999. Biological Effects and Exposure Limits for 'Hot Particles'. NCRP Report 130. National Council on Radiation Protection and Measurements. Bethesda, MD.
- NCRP, 2001. Evaluation of the Linear-Non threshold Dose-Response Model for Ionizing Radiation. NCRP Report No. 136. National Council on Radiation Protection and Measurements, Bethesda MD.
- NCRP, 2006. Development of a Biokinetic Model for Radionuclide-Contaminated Wounds and Procedures for Their Assessment, Dosimetry and Treatment. NCRP Report No. 156. National Council on Radiation Protection and Measurements, Bethesda, MD.
- NEA, 2005. Nuclear Regulatory Decision Making. Nuclear Energy Agency, Organisation for Economic Co-operation and Development, Paris, France.
- Nelson, C.B., Phipps, A.W., Silk, T.J., et al., 1997. The ICRP Publication 60 formulation of remainder dose and its contribution to effective dose in internal dosimetry. *Radiat. Prot. Dosim.* 71, 33-40.
- Nolte, R.M., Uhlbradt, K.H., Meulders, J.P., et al., 2005. RBE of quasi-monoenergetic 60 MeV neutron radiation for induction of dicentric chromosome aberrations in human lymphocytes. *Radiat. Environ. Biophys.* 44, 201-209.
- Nomura, T., 1982. Parental exposure to X-rays and chemicals induces heritable tumors and anomalies in mice. *Nature* 296, 575-577.
- Nomura, T., 1988. X-ray and chemically induced germ line mutations causing phenotypic anomalies in mice. *Mutat. Res.* 198, 309-320.
- Nomura, T., 1994. Male-mediated teratogenesis: ionizing radiation and ethylnitrosourea studies. In: Mattison, D.R., Olshan, A.F.(Eds.), *Male-mediated Developmental Toxicity*. Plenum Press, New York, pp. 117-127.

- NRC, 1972. National Academy of Sciences–National Research Council, The BEIR Report. National Academy Press, Washington, D.C.
- NRC, 1990. National Academy of Sciences–National Research Council, The BEIR V Report. National Academy Press, Washington, D.C.
- NUREG, 1998. Probabilistic accident consequence uncertainty analysis – Early health effects uncertainty assessment. CR-6545/ EUR 16775. US Nuclear Regulatory Commission, Washington DC, USA, and Commission of the European Communities, Brussels, Belgium.
- Okunieff, P., Mester, M., Wang, J., et al., 1998. In-vivo radioprotective effects of angiogenic growth factors on the small bowel of C3H mice. *Radiat. Res.* 150, 204–211.
- Otake, M., Schull, W.J., 1990. Radiation-related posterior lenticular opacities in Hiroshima and Nagasaki atomic bomb survivors based on the DS86 dosimetry system. *Radiat. Res.* 121, 3–31.
- Parkin, D.M., Whelan, S.L., Ferlay, J., et al.,(Eds.), 2002. Cancer Incidence in Five Continents Vol VIII. IARC Scientific Publications No. 155. International Agency for Research on Cancer. Lyon.
- Pelliccioni, M., 1998. Radiation weighting factors and high energy radiation. *Radiat. Prot. Dosim.* 80, 371–378.
- Pelliccioni, M., 2004. The impact of ICRP Publication 92 on the conversion coefficients in use for cosmic ray dosimetry. *Radiat. Prot. Dosim.* 109, 303–309.
- Pentreath, R.J., 2005. Concept and use of reference animals and plants. In: Protection of the Environment from the Effects of Ionizing Radiation, IAEA-CN-09, IAEA, Vienna, 411–420.
- Pierce, D.A., Sharp, G.B., Mabuchi, K., 2003. Joint effects of radiation and smoking on lung cancer risk among atomic bomb survivors. *Radiat. Res.* 159, 511–520.
- Pierce, D.A., Stram, D.O., Vaeth, M., 1990. Allowing for random errors in radiation dose estimates for the atomic bomb survivor data. *Radiat. Res.* 123, 275–284.
- Preston, D.L., Kusumi, S., Tomonaga, M., et al., 1994. Cancer incidence in atomic bomb survivors. Part III. Leukaemia, lymphoma and multiple myeloma, 1950–987. *Radiat. Res.* 137, S68–S97.
- Preston, D.L., Mattsson, A., Holmberg, E., et al., 2002. Radiation effects on breast cancer risk: a pooled analysis of eight cohorts. *Radiat. Res.* 158, 220–235.

- Preston, D.L., Shimizu, Y., Pierce, D.A., et al. 2003. Studies of mortality of atomic bomb survivors. Report 13: Solid cancer and non-cancer disease mortality 1950–997. *Radiat. Res.* 160: 381–407.
- Preston, D.L., Pierce, D.A., Shimizu, Y., et al., 2004. Effect of recent changes in atomic bomb survivor dosimetry on cancer mortality risk estimates. *Radiat. Res.* 162, 377–389.
- Preston D.L., Ron, E., Tokuoka, S., et al., 2007. Solid cancer incidence in atomic bomb survivors: 1958–98. *Radiat. Res.* 168, 1–64.
- Puskin, J.S., Nelson, N.S., Nelson, C.B., 1992. Bone cancer risk estimates. *Health Phys.* 63, 579–580.
- Rao, D.V., Narra, V.R., Howell, R.W., et al., 1990. Biological consequences of nuclear versus cytoplasmic decays of ¹²⁵I: cysteamine as a radioprotector against Auger cascades in vivo. *Radiat. Res.* 124, 188–193.
- Ron, E., Lubin, J.H., Shore, R.E., et al., 1995. Thyroid cancer after exposure to external radiation: a pooled analysis of seven studies. *Radiat. Res.* 141, 259–277.
- Rubin, P., Finklestein, J.N., Williams, J.P., 1998. Paradigm shifts in the radiation pathophysiology of late effects in normal tissues: molecular vs classical concepts. In: Tobias, J.S. Thomas, P.R.M.(Eds.), *Current Radiation Oncology*, Vol 3. Arnold, London.
- Sankaranarayanan, K., 1991. Genetic effects of ionising radiation in man. *Ann. ICRP* 22, 76–94.
- Sankaranarayanan, K., 1998. Ionizing radiation and genetic risks. IX. Estimates of the frequencies of mendelian diseases and spontaneous mutation rates in human populations: a 1998 perspective. *Mutat. Res.* 411, 129–178.
- Sankaranarayanan, K., 1999. Ionizing radiation and genetic risks. X. The potential ‘disease phenotypes’ of radiation-induced genetic damage in humans: perspectives from human molecular biology and radiation genetics. *Mutat. Res.* 429, 45–83.
- Sankaranarayanan, K., Chakraborty, R., 2000a. Ionizing radiation and genetic risks. XI. The doubling-dose estimates from the mid 1950s to the present, and the conceptual change to the use of human data on spontaneous mutation rates and mouse data on induced mutation rates for doubling-dose calculations. *Mutat. Res.* 453, 107–127.
- Sankaranarayanan, K., Chakraborty, R., 2000b. Ionizing radiation and

- genetic risks. XII. The concept of 'potential recoverability correction factor'(PRCF) and its use for predicting the risk of radiation-inducible genetic disease in human live births. *Mutat. Res.* 453, 129-181.
- Sankaranarayanan, K., Chakraborty, R., 2000c. Ionizing radiation and genetic risks. XIII. Summary and synthesis of papers VI to XII and estimates of genetic risks in the year 2000. *Mutat. Res.* 453, 183-197.
- Sankaranarayanan, K., Chakraborty, R., Boerwinkle, E.A., 1999. Ionizing radiation and genetic risks. VI. Chronic multifactorial diseases: a review of epidemiological and genetic aspects of coronary heart disease, essential hypertension and diabetes mellitus. *Mutat. Res.* 436, 21-57.
- Sankaranarayanan, K., Yasuda, N., Chakraborty, R., et al., 1994. Ionizing radiation and genetic risks. V. Multifactorial diseases: a review of epidemiological and genetic aspects of congenital abnormalities in man and of models on maintenance of quantitative traits in populations. *Mutat. Res.* 317, 1-23.
- Sasaki, M.S., 1991. Primary damage and fixation of chromosomal DNA as probed by monochromatic soft x rays and low-energy neutrons. In: Fielden, E.M., O'Neil, P.(Eds.), *The Early Effects of Radiation on DNA*. NATO ASI Series, Vol. H54, Springer Verlag, Berlin, Germany, pp. 369-384.
- Sato, T., Tsuda, S., Sakamoto, Y., et al., 2003. Analysis of dose-LET distribution in the human body irradiated by high energy hadrons. *Radiat. Prot. Dosim.* 106, 145-153.
- Sato, T., Tsuda, S., Sakamoto, Y., et al., 2004. Profile of energy deposition in human body irradiated by heavy ions. *J. Nucl. Sci. Technol. Suppl.* 4, 287-290.
- Schlattl, H., Zankl, M., Petoussi-Henss, N., 2007. Organ dose conversion coefficients for voxel models of the reference male and female from idealized photon exposures. *Phys. Med. Biol.* 52, 2123-2145.
- Schmid, E., Regulla, D., Kramer, H.M., 2002. The effect of 29 kV X-rays on the dose response of chromosome aberrations in human lymphocytes. *Radiat. Res.* 158, 771-777.
- Schmid, E., Schlegel, D., Guldbakke, S., et al., 2003. RBE of nearly monoenergetic neutrons at energies of 36 keV-14.6 MeV for induction of dicentrics in human lymphocytes. *Radiat. Environm. Biophys.* 42, 87-94.

- Scott, B.R., 1993. Early occurring and continuing effects. In: Modification of models resulting from addition of effects of exposure to alpha-emitting nuclides. Washington, D.C., Nuclear Regulatory Commission, NUREG/CR-4214, Rev 1, Part II, Addendum 2(LMF-136).
- Scott, B.R., Hahn, F.F., 1989. Early occurring and continuing effects models for nuclear power plant accident consequence analysis. Low-LET radiation. Washington DC, Nuclear Regulatory Commission, NUREG/CR-4214(SAND85-7185) Rev. 1, Part II.
- Searle, A.G., Beechey, C.V., 1986. The role of dominant visibles in mutagenicity testing. In: Ramel, C., et al.,(Eds.), Genetic Toxicology of Environmental Chemicals, Part B, Genetic Effects and Applied Mutagenesis. Alan R. Liss, New York, 511-518.
- Selby, P.B., 1998. Discovery of numerous clusters of spontaneous mutations in the specific locus test in mice necessitates major increases in estimates of doubling doses. *Genetica* 102/103, 463-487.
- Selby, P.B., Selby, P.R., 1977. Gamma-ray-induced dominant mutations that cause skeletal abnormalities in mice. I. Plan, summary of results and discussion. *Mutat. Res.* 43, 357-375.
- Snyder, W.S., Ford, M.R., Warner, G.G., et al., 1969. Medical Internal Radiation Dose Committee(MIRD) Pamphlet No. 5. *J. Nucl. Med.* 10, Supplement No. 3.
- SSK, 2005. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. Vergleichende Bewertung der biologischen Wirksamkeit verschiedener ionisierender Strahlungen. Veröffentlichungen der Strahlenschutzkommission, Bd. 53. Verlag Elsevier/Urban und Fischer.
- Straume, T., Carsten, A.L., 1993. Tritium radiobiology and relative biological effectiveness. *Health Phys.* 65, 657-672.
- Streffer, C., 2005. Can tissue weighting factors be established for the embryo and fetus? *Radiat. Prot. Dosim.* 112, 519-523.
- Streffer, C., van Beuningen, D., Elias, S., 1978. Comparative effects of tritiated water and thymidine on the preimplanted mouse embryo in vitro. *Curr. Topics Radiat. Res.* 12, 182-193.
- Streffer, C., Bolt, H., Follesdal, D., et al., 2004. Low Dose Exposures in the Environment: Dose-Effect Relations and Risk Evaluation. *Wissenschaftsethik und Technikfolgenbeurteilung*, Band 23. Springer, Berlin, Germany.

- Tawn, E.J., Whitehouse, C.A., Tarone, R.E., 2004. FISH Chromosome analysis of retired radiation workers from the Sellafield nuclear facility. *Radiat. Res.* 162, 249–256.
- Thacker, J., Nygaard, O.F., Sinclair, W.K., et al., 1992. Radiation induced mutation in mammalian cells at low doses and dose rates. *Advances in Radiation Biology*, Vol. 16. Academic Press Inc, New York, pp. 77–124.
- Thompson, D.E., Mabuchi, K., Ron, E., et al., 1994. Cancer Incidence in atomic bomb survivors. Part II: Solid tumours, 1958–1987. *Radiat. Res.* 137:S17–S67.
- Travis, L.B., Gospodarowicz, M., Curtis, R.E., et al., 2002. Lung cancer following chemotherapy and radiotherapy for Hodgkin's disease. *J. Natl. Cancer Inst.* 94, 182–192.
- Tubiana, M., Aurengo, A., Averbeck, D., et al., 2005. Dose-effect relationships and estimation of the carcinogenic effects of low doses of ionizing radiation. Académie des Sciences –Académie Nationale de Médecine, Paris, France, 94 pp.
(<http://www.academie-sciences.fr/publications/rapports/pdf/dose>).
- Tucker, J.D., Tawn, E.J., Holdsworth, D., et al., 1997. Biological dosimetry of radiation workers at the Sellafield nuclear facility. *Radiat. Res.* 148, 216–226.
- Ueno, A.M., Furuno-Fukushi, I., Matsudaira, H., 1989. Cell killing and mutation to 6-thioguanine resistance after exposure to tritiated amino acids and tritiated thymidine in cultured mammalian cells. In: Okada, S.(Ed.), *Tritium Radiobiology and Health Physics. Proc. 3rd Japanese-S Workshop. IPPJ-REV-3*, Nagoya University, Japan, pp. 200–10.
- UNESCO, 2005. *The Precautionary Principle*. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, Paris, France.
- UNSCEAR, 1972. *United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Sources and Effects of Ionizing Radiation. 1972 Report to the General Assembly with Annexes*, United Nations, New York.
- UNSCEAR, 1977. *United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Sources and Effects of Ionizing Radiation. 1977 Report to the General Assembly with Annexes*, United Nations, New York.
- UNSCEAR, 1988. *United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation*.

- 1988 Report to the General Assembly with Annexes, United Nations, New York.
- UNSCEAR, 1993. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Sources and Effects of Ionizing Radiation. 1993 Report to the General Assembly with Scientific Annexes, United Nations, New York.
- UNSCEAR, 1994. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Sources and Effects of Ionizing Radiation. 1994 Report to the General Assembly with Scientific Annexes, United Nations, New York.
- UNSCEAR, 2000. Sources and Effects of Ionizing Radiation. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation Report to the General Assembly with Scientific Annexes. Vol. II: Effects. United Nations, New York, NY.
- UNSCEAR, 2000a. Sources and Effects of Ionizing Radiation. Report of the United National Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. 2000 Report to the General Assembly, with scientific annexes. Volume I: Sources. United Nations, New York.
- UNSCEAR, 2001. Hereditary Effects of Ionizing Radiation. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation Report to the General Assembly with Scientific Annexes. United Nations, New York, NY.
- UNSCEAR, 2008. Effects of Ionizing Radiation. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation Report to the General Assembly with Scientific Annexes.
- van der Kogel, A.J., 2002. Radiation response and tolerance of normal tissues. In: Steel, G.G.(Ed.), Basic Clinical Radiobiology. Arnold, London.
- Wang, J., Albertson, C.M., Zheng, H., 2002. Short-term inhibition of ADP-induced platelet aggregation by clopidogrel ameliorates radiation-induced toxicity in rat small intestine. *Thromb. Haemost.* 87, 122-128.
- Warters, R.L., Hofer, K.G., Harris, C.R., et al., 1977. Radionuclide toxicity in cultured mammalian cells: elucidation of the primary site of radiation damage. *Curr. Topics Radiat. Res. Q.* 12, 389-407.
- Wheldon, T.E., Michalowski, A.S., Kirk, J., 1982. The effect of irradiation on function in self-renewing normal tissues with differing proliferative organisation. *Br. J. Radiol.* 55, 759-766.

- WHO, 2001. IARC Monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans. Vol. 78. Ionizing Radiation, Part 2: some internally deposited radionuclides. World Health Organisation, International Agency for Research on Cancer. IARC Press, Lyon.
- Withers, H.R., Taylor, J.M., Maciejewski, B., 1988. Treatment volume and tissue tolerance. *Int. J. Radiat. Oncol. Biol. Phys.* 14, 751–759.
- Yoshizawa, N., Sato, O., Takagi, S., et al., 1998. External radiation conversion coefficients using radiation weighting factor and quality factor for neutron and proton from 20 MeV to 10 GeV. *Nucl. Sci. Techn.* 35(12), 928–942.
- Zankl, M., Fill, U., Petoussi-Hens, N., et al., 2002. Organ dose conversion coefficients for external photon irradiation of male and female voxel phantoms. *Phys. Med. Biol.* 47(14), 2367–2385.
- Zankl, M., Becker, J., Fill, U., et al., 2005. GSF male and female adult voxel models representing ICRP reference man –the present status. *Proceedings of The Monte Carlo Method: Versatility Unbounded in a Dynamic Computing World*. Chattanooga, TN, American Nuclear Society, La Grange Park, USA.
- Zankl M., Eckerman, K.F., Bolch, W.E., 2007. Voxel-based models representing the male and female ICRP reference adult –the skeleton. *Radiat. Prot. Dosim.* 127.

RECOMMENDATIONS
2007 국제방사선방호위원회권고

RECOMMENDATIONS 2007 ICRP RECOMMENDATIONS 2007 ICRP RECOMMENDATIONS
2007 국제방사선방호위원회권고 2007 국제방사선방호위원회권고 2007 국제방사

RECOMMENDATIONS 2007 ICRP RECOMMENDATIONS 2007 ICRP RECOMMENDATION
2007 국제방사선방호위원회권고 2007 국제방사선방호위원회권고 2007 국제방사

RECOMMENDATIONS 2007 ICRP RECOMMENDATIONS 2007 ICRP RECOMMENDATION
2007 국제방사선방호위원회권고 2007 국제방사선방호위원회권고 2007 국제방사

RECOMMENDATIONS 2007 ICRP RECOMMENDATIONS 2007 ICRP RECOMMENDATION
2007 국제방사선방호위원회권고 2007 국제방사선방호위원회권고 2007 국제방사

RECOMMENDATIONS 2007 ICRP RECOMMENDATIONS 2007 ICRP RECOMMENDATION
2007 국제방사선방호위원회권고 2007 국제방사선방호위원회권고 2007 국제방사

RECOMMENDATIONS 2007 ICRP RECOMMENDATIONS 2007 ICRP RECOMMENDATION
2007 국제방사선방호위원회권고 2007 국제방사선방호위원회권고 2007 국제방사

RECOMMENDATIONS 2007 ICRP RECOMMENDATIONS 2007 ICRP RECOMMENDATION
2007 국제방사선방호위원회권고 2007 국제방사선방호위원회권고 2007 국제방사

RECOMMENDATIONS 2007 ICRP RECOMMENDATIONS 2007 ICRP RECOMMENDATION
2007 국제방사선방호위원회권고 2007 국제방사선방호위원회권고 2007 국제방사

RECOMMENDATIONS 2007 ICRP RECOMMENDATION
2007 국제방사선방