



ICRP 간행물 101 A

일반인 방사선방호 목적을 위한 대표인 선량평가

**Assessing dose of the representative person
for the purpose of radiation protection of
the public**



대한방사선방어학회

이 번역본 발간은 원자력안전위원회 지원 아래 대한방사선방어학회가 운영하는 2011년도 방사선방호 정책지원 워킹그룹 사업(한국동위원소협회로부터 위탁)의 일환으로 이루어졌습니다.

ICRP Publication 101A

일반인 방사선방호 목적을 위한 대표인 선량평가

**Assessing dose of the representative person
for the purpose of radiation protection of
the public**

ICRP 승인: 2005년 9월

역주: 이재기

이 ICRP 간행물의 우리말 번역본은
ICRP의 허락(2010년 8월)을 받았으며
ICRP 정신에 따라 무료로 배포합니다.

국제방사선방호위원회

역자 서문

원자력시설에서 환경으로 방출되는 방사성핵종에 의해 주변 일반인이 피폭하는 선량은 당연히 제한대상이다. 이론상 일반인은 주어진 한 시설뿐만 아니라 현재 있거나 앞으로 있을 수 있는 다른 시설로부터도 피폭할 수 있기 때문에 단일 선원이 일반인 선량한도인 연간 1 mSv에 근접하여 선량을 부여하는 것을 인정하지 않고 그 일부 값을 선량계약치로 설정하여 규제한다. ‘일부’의 크기는 국가에 따라, 고려하는 시설 특성에 따라 차이가 있지만 대개 10-30% 수준이고 따라서 선량계약치는 연간 0.1-0.3 mSv가 된다.

일반인 피폭은 주로 시설로부터 방출된 방사성핵종을 섭취하여 받을 것으로 보는 내부피폭인데 연간 0.3 mSv 수준의 작은 만성적 내부피폭은 실측기술의 측정한계 미만이다. 따라서 일반인 선량은 시설에서 방출하는 방사능을 감시하여 얻는 방출량 정보와 그 환경거동 및 일반인의 섭취과정의 모델링을 통한 계산에 의존할 수밖에 없다.

그런데 환경매체 중 방사능 농도는 동일하더라도 개인이 방사능 섭취량은 그 사람의 구체적 위치와 습관에 따라 달라진다. 일반인 집단은 실로 다양한 사람들의 모임이다. 남녀노소가 있고 특정 식품을 특별히 선호하는 사람도 있어 개인의 선량에 차이를 낸다. 따라서 어떤 사람에 대한 선량을 기준인 선량계약치와 비교해야 하는가라는 문제가 제기된다. 많은 사람들의 구체적 개인 습관을 모두 파악하기는 어렵고 그렇다고 무조건 극단적인 경우로만 가정하게 되면 비현실적인 과대평가로 이어진다. 위험을 보수적으로 평가하여 규제하는 것은 원론적으로는 바람직한 접근이지만 극단적으로 과대평가하면 그 행위 자체를 전면 금지해야 하는 결과를 낼 수 있다. 종일 자동차 배기가스를 직접 흡입하는 사람을 가정하여 자동차가 그런 사람에게도 무해한 수준이 되어야 한다고 규제한다면 결국 모든 자동차는 없어져야 할 것이다.

그러면 어느 정도까지 보수적인 접근이 합리적인 것일까? 이 질문에 대한 답을 주려는 것이 이 보고서 내용인 ‘대표인’ 개념이다. 보고서는 ‘집단에서 보다 높게 피폭하는 사람들을 대표하는 개인’으로 규정하고 있다. 또, 대표인 설정에서 기본적으로 고려할 속성으로 합리성, 지속성, 균질성을 강조한다. 즉, 설정한 대표인의 속성이 극단적이지 않아 무난히 발견될 수 있을 것이 예상되며 관심 기간 동안 유지될 것으로 간주할 수 있어야 한다. 그렇다고 집단의 평균 속성을 기준으로 준수를 판단하는 것은 내재하는 불확도를 감안할 때 무리가 있기 때문에 높게 피폭하는 95백분위에 해당하는 사람을 대표인으로 설정할 것을 권고한다.

과거 ICRP 권고에서는 이러한 목적으로 집단에서 가장 높게 피폭하는 그룹으

로 ‘결정집단’ 개념을 권고해 왔다. 새로 정의하는 대표인은 결정집단의 평균에 해당하는 사람으로 간주된다. 중요한 차이는 결정집단이 결정론적 방법으로 점추정을 위한 것임에 비해 대표인은 확률론적 평가에도 적용할 수 있도록 개인을 정의하는 변수들의 불확도 분포를 도입한 것이다.

논리적으로는 간단하지만 실제 어떤 원자력시설 지역 주민집단에서 대표인을 선정하는 일은 그렇게 단순하지 않아 보인다. 시설 주변 주민 중 선량이 95백분위에 해당하는 그룹을 식별하기 위해서는 가능하면 선원에서부터 환경거동 및 방사능 분포, 개인 습관 자료에 이르기까지 인자들의 분포를 얻고 이를 결합하여 평가한 선량의 95백분위에 해당하는 사람들을 찾아야 한다. 불충분한 자료 때문에 때로는 전문가의 직관에 따른 판단도 필요하다. 이러한 과정은 모델도 복잡하고 관련 인자들의 속성도 다양할 뿐만 아니라 몬테칼로 기법과 같은 반복계산도 필요하다. 정규분포나 대수정규분포는 물론 여러 인자들의 속성에 적합할 수 있는 다양한 확률분포함수들도 필요하다. 따라서 이렇게 번잡한 과정에 체계적으로 접근할 수 있고 계산을 돕는 전산코드 개발이 가치 있는 연구과제로 보인다.

이 보고서는 ICRP 현행 권고를 뒷받침하지만 ICRP 103이 확정되기 전에 발간되었기 때문에 원문에는 일부 용어나 개념이 ICRP 103과 다르게 표현되어 있다. 독자의 개념 혼란을 덜기 위해 현행 권고와 부합하게 고치려 역자가 노력했지만 놓친 부분도 없지는 않을 것으로 본다.

이 간행물 번역 배포는 2010년 8월 ICRP 승인을 받았다. 이에 역자는 ICRP에 감사를 표한다.

2012년 6월

역자

한양대학교 교수 이재기(ICRP 위원)

서문

2001년 10월 20일, ICRP 본위원회는 개인의 정의에 대해 제4분과위원회로 보고할 새로운 작업그룹 설립을 승인했다. 사업계획은 작업그룹의 목적이 선량을 평가하고 ICRP 방호체계에 부합함을 확인하는 데 사용될 개인을 정의하는 것을 도울 원칙을 개발하는 것으로 설명하고 있다. 계속 진화하는 ICRP 권고는 이제 사회전체보다 개인에 더 비중을 둘 것으로 예상되기 때문에 개발할 원칙이 중요하다고 본 것이다. 준수를 입증하는 것도 겨누도록 했다. 임계집단이나 불확도 개념과 관련한 이슈도 고려하도록 했다.

이 보고서는 그 작업그룹 노력의 결과물이며 수정된 ICRP 권고를 보조하는 문서의 하나이다. 보고서는 위에서 언급한 분야는 물론 작업그룹 업무 과정에서 드러난 다른 이슈들도 다루고 있다. 이 보고서의 지침은 이전에 ICRP가 사용했던 임계집단 개념 위에 세워졌고 그것을 대체한다. 지침은 선량제약치와 선량한도를 준수함을 확인하는 데 사용될 대표인을 정의한다.

작업그룹 위원은 다음과 같다.

J.E. Till(그룹장)
D. Cancio

J.R. Cooper
T. Kosako

A.C. McEwan
C. Zuur

객원위원은 다음과 같다.

M.E. Clark

D.A. Cool

K. Ulbak

작업그룹은 연령별 선량과 관련된 계산을 도운 영국 국가방사선방호원National Radiological Protection Board의 Wayne Oatway 박사의 기술지원에 감사한다. 또한 보고서 도표 작성을 도운 Shawn Mohler, 부록 B에 있는 통계적 문제들에 도움을 준 George Killough, 그리고 보고서 편집을 도운 Cindy Galvin에게도 감사의 말을 전한다.

나아가 작업그룹은 회의 시설과 편의를 제공한 기관과 그 직원에게도 감사한다. 여기에는 덴마크 국립방사선위생연구소National Institute of Radiation Hygiene, 네덜란드 건설환경부Ministry of Housing, Spatial Planning and Environment, 영국 국립방사선방호원(NRPB, 현재는 보건청 방사선방호부Radiation Protection Division of the Health Protection Agency), 스페인 공학환경기술연구센터Research Centre for Engineering, Environment and Technology, OECD 원자력국(NEA), 미국 원자력규제위원회(USNRC) 및 질병관리예방센터(CDC)가 포함된다.

이 보고서는 2005년 9월 ICRP 제네바 회의에서 승인받았다.

일반인 방사선방호 목적을 위한 대표인 선량평가

ICRP Publication 101

2005년 9월 ICRP 승인

요지- ICRP는 수정될 기본권고가 단순하지만 넓게 적용할 수 있는 방호체계에 기반을 두도록 의도하였다. 이러한 방호체계는 목적이 분명하고 운영기관과 규제 기관에 필요한 더욱 공식적인 체계를 위한 기반을 제공한다. 기본권고는 특정 선 원으로부터 개인선량에 대한 정량적인 제약치나 한도를 수립한다. 이러한 선량제 약치는 직무피폭, 의료피폭 또는 일반인피폭을 받는 실제 사람이나 대표인에게 적용된다. 이 보고서는 일반인 선량평가를 위한 이전 지침을 업데이트 한다. 일 반인 선량은 직접 측정하는 것이 어려우며 때로는 전혀 불가능하다. 그러므로 일 반인 방호 목적으로는 가상 또는 구체적 개인을 특징짓고, 해당 선량제약치를 준 수함을 판단하는 데 그 개인의 선량을 사용할 필요가 있다. 이 개인을 '대표인'으 로 정의한다. 단일선원이 대표인에 대한 선량제약을 충족하고 방사선방호가 최적 화된다면 일반인 방호에 대한 ICRP의 목표는 달성된다.

이 보고서에 연간선량을 평가하는 과정을 설명하지만 이 목적에 이용 가능한 다른 여러 방법도 있음을 ICRP는 이해한다. 방법들은 결정론적 계산에서부터 더 욱 복잡한 확률론적 기법까지를 망라한다. 나아가 이들 기법을 혼합해서 사용할 수도 있을 것이다. 대표인 특성을 선정함에는 세 가지 중요한 개념 즉, 합리성, 지속가능성, 동질성에 유념해야 한다. 보고서는 각 개념들을 설명하고 그 역할을 보이기 위한 예시도 제공하였다. 일반인 선량은 전망적(장차 일어날)일 수도 있 고 회귀적(과거에 발생한)일 수도 있다. 회귀적 선량은 일반적으로 특정 사람들 에 대해 계산되는 반면 전망적 선량은 미래에 있거나 있지 않을 수도 있는 가상 의 사람에 대한 것이다.

대표인 선정이나 일반인선량의 평가에는 본질적 불확실성이 관련됨을 고려할 때, 여섯 연령범주로 된 선량계수를 사용하는 기존 방법의 상세함은 전망적 선량 평가에는 필요하지 않음을 ICRP는 인식했다. ICRP는 이제 전망적 평가를 위한 대표인 연간선량 평가에는 세 연령범주 사용을 권고한다. 그 범주는 0-5세(유 아), 6-15세(아동), 그리고 16-70세(성인)로 나뉜다. 이 권고의 실제 이행을 위 해서는 1세 유아, 10세 아동, 그리고 성인에 대한 선량계수와 습관 자료가 세 연 령범주를 대표하여 사용되도록 한다.

계획된 시설이든 기존상황이든 확률론적 선량평가에서는 집단에서 무작위 추

출된 사람이 그 대표인 선량보다 높은 선량을 받을 확률이 5% 미만인 되도록 대표인을 정의할 것을 ICRP는 권고한다. 만약 평가에서 수십 명 이상이 해당 제약치보다 높은 선량을 피폭할 것으로 나타나면 이 사람들에게 대한 특성 분석이 필요하다. 추가 분석에서 수십 명이 확실히 해당 선량제약치를 초과할 것으로 나타난다면, 피폭을 수정하기 위한 조치를 고려해야 한다.

이해당사자들이 대표인 특성을 결정하는 데 기여할 수 있음을 ICRP는 인정한다. 이해당사자 참여는 대표인의 특성은 물론 평가된 선량의 품질이나, 그에 대한 이해 또는 수용 수준을 상당히 증진시킬 수 있다.

중심어: 일반인피폭, 대표인, 임계집단, 선량평가, 불확도

목 차

역자 서문	i
서문	iii
요지	v
요약	1
제1장 서론	7
1.1. 목적	8
1.2. 배경	10
1.3. 근본 원칙과 개념	12
제2장 선량평가	15
2.1. 선량평가 목적	15
2.2. 선량평가 유형	15
2.3. 선량평가 절차의 개괄	17
2.4. 선량평가에서 불확실성 처리	19
2.5. 결정론적 및 확률론적 선량평가 방법	20
제3장 대표인	23
3.1. 대표인 정의	23
3.2. 피폭경로, 시간대 및 방사성핵종의 공간분포	23
3.3. 대표인 특성	24
3.4. 연령별 선량계수	26
3.5. 준수 판단	29
제4장 대표인에 대한 기타 고려사항	33
4.1. 환경감시 및 모델링과 대표인의 관계	33
4.2. 잠재피폭 상황	33
4.3. 대표인 특성화에 이해당사자 입력의 가치	35
부록 A. 일반인 선량평가에 사용하기 위한 연령범주의 분석	37
A.1. 서론	37
A.2. 배경	37
A.3. 방법	38
A.4. 결과	39
A.5. 결론	40
부록 B. 확률론적으로 평가한 일반인 선량의 준수 판단	49
B.1. 서론	49

B.2. 회구선량과 전망선량.....	50
B.3. 선량에 관련된 분포.....	52
B.4. 선량분포의 구체적 형식.....	54
B.5. 정규분포와 중심극한정리.....	56
B.6. 대수정규분포의 발생.....	57
B.7. 예시.....	60
B.8. 결론.....	65
참고문헌.....	67

요약

(a) 2001년 10월 20일 ICRP 본위원회는 개인을 정의하기 위한 새로운 작업그룹 설립을 승인하였다. 작업그룹의 목적은 일반인선량을 평가하고 ICRP 방호체계 준수를 확인하는 데 사용될 개인을 정의하는 것을 도울 원칙을 개발하는 것이었다. 직무피폭과 의료피폭은 이 보고서에서 고려하지 않는다.

(b) 규제나 관리 목적을 위해 계획피폭상황¹⁾과 기존피폭상황에서 일반인에 대한 선량제약치는 연간선량으로 명시된다. ICRP는 일반인선량 평가의 불확실성과 대부분 극단적 피폭상황의 과도적 속성을 이해한다. 이러한 내재하는 불확실성 때문에 정상 상황에서도 준수에 있어 어떤 사람의 선량은 선량제약치를 초과할 가능성이 있음을 ICRP는 인정한다. 그러나 ICRP 권고를 충족한다면, 어떤 개인의 선량이 해당 제약치를 초과할 확률은 작을 것이다.

(c) ICRP는 세 가지 유형의 피폭상황을 인식하는데 계획상황, 기존상황, 그리고 비상상황이다. 나아가 선량평가는 전망적일 수도 있고 회구적일 수도 있다. 전망적 선량은 미래에 피폭할지 모르는 개인의 선량이며, 회구적 선량은 과거에 받은 선량이다.

(d) 선량평가는 다단계 과정으로 생각할 수 있다. 첫 단계는 방사성핵종이나 방출되는 방사선의 형태와 양을 포함한 선원 정보를 얻는 것이다. 둘째 단계는 환경에 대한 정보, 구체적으로는 문제의 선원에 기인한 환경매체 중 방사성핵종 농도를 얻는 것이다. 과정의 셋째 단계는 이 농도를 피폭 시나리오에 정의된 습관 자료와 결합하는 것이다. 넷째 단계는 공기나 토양 중 농도를 외부피폭 선량률과 연계(외부선량)하거나 단위 섭취량을 선량으로 변환(내부선량)하는 계수를 사용하는 것이다. 선량계수는 방사성핵종의 거동과 체내 흡수 모델을 통해 평가되는데 ICRP가 산출하여 발간한다. 마지막 단계는 필요에 따라 외부와 내부 선량의 기여를 합한다. 선량평가가 반복적 과정임을 인식하는 것이 중요하다. 특히 방사성핵종의 섭취에 대해서는 명료성을 높이기 위해 그 단계를 나누어 고려하는 것이 유용하다.

1) <역주> 이 보고서는 2007년 ICRP 권고에 선행하여 간행되었기 때문에 원문은 'normal situation(정상상황)'으로 적고 있으나 새로운 권고의 체계와 혼란을 예방하기 위해 '계획피폭상황(또는 계획상황)'으로 고쳐 썼다. 이하 이 번역본에서 같다.

(e) 개인 특성을 정의하고 선량을 예측하는 모든 과정에는 가변성과 불확실성이 내재하는 것으로 본다. 가변성은 실제 또는 식별할 수 있는 본성적 불균질성 또는 다양성을 의미한다. 불확실성은 평가에서 불가피한 한계로부터 발생한다. 선량이 측정된 데이터와 모델을 적용하여 계산되는 측정과 계산을 결합하여 평가되든, 가변성과 불확실성은 가능한 값의 분포에 기여한다. 선량평가의 불확실성을 준수 목적에 어떻게 포함할 것인지 최종결정은 규제기관의 권한이라고 ICRP는 믿는다.

(f) ICRP는 측정되거나 예측된 값을 갖는 양과 ICRP 또는 다른 기관에 의해 선택된 값을 갖는 양을 구별하는 선을 긋는다. 예를 들어 준수를 평가하는 과정이나 의사결정에 사용하는 선량제한치, 가중치, 그리고 선량계수는 고정값으로 선택된 것이고 불확도가 없는 것으로 본다. 그러나 선량과 위해를 연계하는 모델에는 불확실성이 있음을 ICRP도 인정한다. 이러한 불확실성은 한도나 제약치 같은 양의 선택된 값을 정할 때 고려된다.

(g) 이러한 평가에 관련된 통상적 불확도를 고려할 때, 일반인에 대한 전망적 선량 평가를 위해 6개 연령범주에 대한 선량계수 권고가 제공하는 상세성은 필요 이상임을 ICRP는 인정한다. 그래서 ICRP는 지속적 피폭에 대한 전망적 평가 목적에서는 이제 3개 연령범주가 대표인의 연간 선량을 평가하는 데 충분하다고 권고한다. 세 범주는 0-5세(유아), 6-15세(아동), 그리고 16-70세(성인)이다. 어린 연령그룹 선량에 함축된 중요성의 부당한 축소를 피하기 위해 선량계수 특성이 가장 빨리 변하는 0-5세 연령범주에 대해서는 기간을 짧게 선택했다. 이 권고의 실제 이행에서는 1세 유아, 10세 아동, 그리고 성인을 위한 선량계수와 해당 습관자료가 세 연령범주를 대표하도록 사용되어야 한다.

(h) 만약 태어나 모유수유 유아에게 상대적으로 높은 선량을 주는 것으로 알려진 방사성핵종이 세 연령범주에 대해 평가된 선량에 상당히 기여하고 해당 선량제한치에 근접한다면, 정량적 권고의 준수를 확신하기 위해 태어나 모유수유 유아에 대한 선량을 따로 평가해야 한다. 이러한 섭취는 개인 생애의 매우 한정된 부분만 차지한다는 사실을 감안하면, 태어나 모유수유 유아에 대해 평가된 선량을 일반인 선량제한치와 비교함으로써 적절한 방호수준을 달성할 수 있다고 ICRP는 생각한다.

(i) 일반인 선량은 상당한 어려움 없이는 직접 측정할 수 없으며 대부분의 경우

전혀 측정할 수 없다. 그러므로 일반인 방호 목적으로는 집단에서 높게 피폭하는 사람들을 대표하여 선량을 받는 개인을 특징짓는 것이 필요하다. 이 개인을 ‘대표인’으로 정의한다. 이 용어는 이전 ICRP 권고에서 설명된 ‘결정집단의 평균 구성원’과 대등하며 이를 대체한다.

(j) 대표인에 대한 선량값이 선량제약치보다 낮고 방사선방호가 최적화되었다면 ICRP의 목표는 달성된다.

(k) 대표인 선량을 고려함에 있어, 여러 인자들이 다음과 같이 고려되어야 한다.

- (1) 해당 피폭경로를 선량평가에 모두 고려해야 한다.
- (2) 가장 높은 선량을 피폭하는 그룹이 평가에 포함되도록 방사성핵종의 공간적 분포를 선량평가에 고려해야 한다.
- (3) 습관자료는 피폭하는 그룹이나 집단에 근거하되 합리적이고 지속 가능하며 균질적이어야 한다.
- (4) 구체적인 연령범주에 따른 선량계수를 적용해야 한다.

이러한 인자들이 고려되면 이용하는 접근방법(결정론적, 확률론적, 또는 복합적)에 따라 대표인을 정의할 수 있고 기준 준수를 판단할 수 있다.

(l) 대표인 선량은 단순한 결정론적 방법부터 확률론적 방법까지 여러 접근법을 통해 계산될 수 있다.

(m) 두 경우 모두 적합한 습관자료가 필요하다. 만약 피폭집단에 대한 구체적인 습관자료가 가용하지 않다면 적절한 국가 또는 지역 집단의 자료로부터 도출할 수 있다. 이러한 자료의 분포는 확률적인 평가에 사용될 것이고, 분포에서 특정 값을 선택하여 결정론적 계산에 사용할 수 있다. 확립된 데이터베이스는 많은 주요 식품 소비율의 95백분위 수준이 평균 소비율의 약 3배임을 보이고 있다. 결정론적 계산에서 거동의 95백분위 값을 사용하면 섭취율을 결정하는 데 신중한 가정일 것으로 ICRP는 본다.

(n) 평가에서 지나친 보수성을 피하기 위해서는 모든 변수에 극단적 백분위 값을 적용하는 것은 주의해야 한다. 그 결과는 대표인 선량을 비현실적이고 유의한 과대평가로 이어져, 의료시설 등의 설계에 지나친 부담을 줄 수 있다. 종합적으로, 변수값의 선택은 합리적이고 지속가능한 피폭 시나리오를 제공해야 한다.

(o) 결정론적 방법은 환경 농도와 변수의 선정된 특정 값을 직접 곱하는 것에 해

당한다. 결정론적 방법의 가장 단순한 형태는 스크리닝인데 여기서는 환경으로 내보내는 방출점에서 방사성핵종의 농도부터 시작하여 선량을 예측하는 데 매우 보수적인 가정들을 적용한다. 어떤 상황에서는 부지 고유의 피폭자료가 가용하고 습관정보가 알려져 있어 높은 선량을 피폭하는 사람들을 쉽게 확인할 수 있다. 다른 상황에서는 이러한 사람들을 확인하는 것이 주요 피폭경로와 선원으로부터 피폭하는 집단을 고려하는 반복작업이 된다. 궁극적으로 높은 선량을 받을 것으로 보는 그룹이 식별된다. 이 그룹의 평균적인 특성이 대표인 선량을 평가하는 데 사용된다.

(p) 선량을 예측하는 데 확률론적 방법도 사용될 수 있다. 확률론적 방법은 변수의 분포들을 결합하여 그 발생확률에 따른 가능한 선량 범위를 제공하는 합성분포를 얻는 것이다. 선량분포는 (1) 환경매체 내 추정 농도(예: 공기, 물, 토양, 식품 중 방사성핵종 농도)의 불확실성과 자연적 변동성, (2) 습관 자료(예: 호흡율, 식품과 물 섭취율, 여러 활동에 쓰는 시간)의 불확실성을 포괄한다.

(q) 계획된 시설이든 기존피폭상황이든 전망적 확률론적 개인선량 평가에서는 집단에서 임의로 추출한 사람이 대표인보다 큰 선량을 피폭할 확률이 5%보다 작도록 대표인을 정의하도록 ICRP는 권고한다. 만약 그러한 평가에서 수십 명이상이 해당 제약치를 넘어 피폭할 것으로 나타나면 이 사람들의 특성을 조사할 필요가 있다. 만약 이후 분석에서도 몇 십 명에 해당하는 선량이 확실히 관련된 선량제약치를 초과할 것 같다면 피폭을 수정하기 위한 조치를 고려해야 한다.

(r) 확률론적 평가에서는 대표인을 정의하기 위해 평가하는 지역과 그 인구에 특별한 주의가 필요하다. 높은 선량을 받는 사람들을 대표할 수 있는 모든 사람들을 포함하도록 주의를 기울여야 한다.

(s) 준수를 판단할 목적으로 시설의 과거 운영기간이나 기존상황에서 특정 사람들에게 대해 소급적으로 평가할 때는 선량제약치 이상으로 추정된 선량에 대해서는 경우별로 평가해야 한다고 ICRP는 본다. 어떤 경우에는 이러한 선량이 단지 짧은 시간만 유지될 수도 있고 전혀 실현되지 않을 수도 있다. 그러나 특정 사람들의 선량이 선량제약치를 초과하고 오랫동안 지속될 것으로 보이면 선원에서 감축이 필요한지 운전자와 규제자가 결정해야 한다. 그러한 상황은 선량 평가치의 불확도를 줄이거나 선량 크기를 입증하기 위한 추가적 감시를 정당화할 수도 있다. 위 고려들은 과거 설계나 운전이 인허가 기준을 준수하는지 여부 판단과는 구별해야 한다.

(t) ICRP는 방사선 방호목적을 위해 대표인을 정의하고 특징짓는 데 일반인이 도움을 주는 역할을 할 수 있다고 본다. 이해당사자 참여 정도는 나라와 상황마다 다를 것이다. 이해당사자는 자신들 위치의 구체적인 습관자료에 입력을 제공할 수 있다. 특히 이해당사자는 자료의 합리성, 지속성, 그리고 균질성을 결정하는 데 도울 수 있다. 이해당사자와 협력은 대표인 특성의 품질, 방어가능성, 그리고 수용성을 상당히 향상시킬 수 있고, 준수 평가나 의사결정 과정에서 이해당사자의 호응을 높일 수 있다.

(u) 준수 판단을 위한 접근과 상관없이, 방사선방호를 위해 정량적 제약치 준수와 방호최적화를 활용하는 총체적 방호체계의 적용 필요성을 ICRP는 강조한다.

제1장 서론

(1) ICRP 방호체계는 방호수준의 최적화 달성으로 보완되는 정량적 방호기준의 원칙을 근간으로 한다. 방호체계는 개인에 대해 전리방사선 노출의 위험으로부터 적절한 방호수준을 제공함을 도모한다.

(2) ICRP는 2007년에 수정되는 기본권고가 단순함을 기반으로 하지만 목표가 명확하고 널리 적용 가능하며, 운영관리자와 규제자에게 필요한 보다 공식적인 체계의 기반을 제공하는 일반 방호체계를 기반으로 해야 한다는 결론을 얻었다. 기본권고는 주어진 선원으로부터 연간 개인선량에 대해 정량화된 제약치와 총 개인선량에 대한 한도²⁾를 설정하였다. 이 제한은 실제 혹은 가상 개인의 피폭에 적용된다. 이러한 관점에서 ICRP는 일반인피폭에 대한 수치 제한을 포함시켰다.

(3) 기본권고를 적용할 목적으로 이전에 ICRP는 특정 선원이나 선원 세트로부터 가장 높게 피폭하는 사람들을 규정하는 데 결정집단 개념을 사용해왔다. 이 보고서의 권고는 일반인에 대한 연간선량을 평가하는 이전 지침을 업데이트한다. 보고서의 주안점은 전망적 피폭상황(즉, 장래의 일반인 선량)이지만, 회구선량(이미 받는 선량)에 대한 지침도 일부 제공한다.

(4) 주어진 선원으로부터 특정 개인이 받는 선량³⁾은 시간, 위치, 방사성핵종의 환경 중 수송, 개인 특성과 같은 여러 인자들에 영향을 받는다. 개인 특성은 생리학적 변수(예: 호흡률), 식이정보(예: 여러 음식의 소비율), 거주 데이터(예: 주택형태), 지역자원 사용(예: 농작물), 여가활동(예: 수영), 그리고 연간선량 평가에 필요한 기타 개인 고유 정보를 포함한다. 선량평가에서 이러한 변수⁴⁾와 특성의 구체적 세트를 ‘피폭 시나리오exposure scenario’라 한다. 일반적으로 ICRP는 식습관, 거주지, 그리고 피폭을 예측하는데 필요한 다른 정보를 ‘습관자료habit data’로 부른다.

2) <역주> 원문은 주어진 선원으로부터 개인선량에 대한 제약치와 한도를 설정한다고 적고 있으나 선량한도는 선원중심이 아니라 개인중심 평가에 적용되므로 표현을 맞췄다.

3) 따로 언급하지 않는다면 이 보고서에서 ‘선량’은 ‘유효선량’으로 간주하며 필요에 따라 외부피폭으로부터 기여와 방사성핵종 섭취로부터 70년 기간까지 예탁선량을 포함한다.

4) <역주> 원문은 개인특성의 세트를 피폭 시나리오인 것처럼 설명하고 있지만 통상 피폭 시나리오의 피폭을 결정하는 모든 인자를 포괄하므로 변수를 추가했다.

(5) 이 보고서 제1장은 보고서의 목적을 설명하고, 배경정보를 제공하며, 원론적 원칙과 개념들을 설명한다. 제2장은 선원으로부터 야기되는 일반인 선량을 평가하는 과정을 검토한다. 제3장은 대표인을 위한 특성 선택에 대해 논의한다. 제4장은 대표인과 관련된 기타 고려사항을 제시한다. 부록A는 연령범주 분석에 관한 기술정보를 제공하며, 부록B는 확률론적 방법을 사용하여 준수를 평가하는 정보를 제공한다.

1.1. 목적

(6) 이 보고서의 목적은 일반인 방호를 위한 ICRP 권고를 준수하기 위한 목적으로 개인선량을 어떻게 평가할 것인지에 대한 지침을 제공하는 것이다.

(7) ICRP 방호체계가 지속적으로 진화하고 많은 나라에서 ICRP 권고가 규정의 요소로 되어 있으므로 개선된 지침이 필요하다. ICRP 자체 진화와 함께 지난 20여 년간 크게 발전한 컴퓨터와 소프트웨어 도구를 이용한 평가 능력도 괄목하게 개선되었다. 이제 선량의 점평가보다 불확도를 포함하는 선량분포를 얻을 수 있게 하는 확률론적 평가도 더욱 용이해졌다. 이 보고서는 또한 개인선량 평가에 사용되는 방법들과 일관되도록 ICRP 방호체계의 이행에 필요한 원칙들도 업데이트한다. 보고서는 선량제약치와 비교하고 방호를 최적화하며 비상상황을 위한 계획과 의사결정을 돕기 위해 일반인 선량을 평가하는 방법에 주력하고 명확히 한다.

(8) 선원과 피폭자는 직무, 의료, 일반인 어느 것이든 각 피폭범주에서 기본 요소이다. 선량이 평가되는 개인에 대해 명확히 이해하고 특성화해야 한다. 직장에서 주로 직무의 결과로 일어나는 직무피폭에서는 선원과 피폭자를 특성화하는 것은 일반적으로 간단하다. 이들 피폭자에 대해서는 기록이 존재하며, 피폭은 개인마다 감시되고 평가된다. 마찬가지로 자신의 의학적 진료의 일부로 원론적으로 의도적 피폭을 받는 의료피폭에서도 선원과 피폭은 대체로 분명하다. 따라서 직무피폭이나 의료피폭은 이 보고서에서 더 언급하지 않겠다.

(9) 장수명 방사성폐기물 처분에서 미래 사람들을 위한 방호지침은 ICRP 81(2000a)에 제공되었고 계속 유효하다.⁵⁾

5) <역주> 이 주제에 대해 업데이트된 간행물이 2012년 현재 출판 준비 중에 있다.

(10) 개정 기본권고(ICRP 2007)는 피폭상황을 세 종류 넓은 그룹 즉, 계획피폭 상황, 기존피폭상황, 비상피폭상황으로 분류했다. ICRP는 방사선피폭을 초래하거나 잠재적으로⁶⁾ 초래할 인간활동의 의도적으로 도입 또는 유지에 해당하는 피폭 상황을 겨누어 계획피폭상황을 사용한다. 기존피폭상황은 이미 존재하는 피폭으로서 그 선원은 자연적이거나, 비의도적이고 부적절하게 도입되었거나⁷⁾ 혹은 방치된 과거 인간활동에 의한 것일 수 있다.⁸⁾ 많은 경우 기존피폭상황은 피폭경로를 개선하는 활동으로만 관리될 수 있다. 비상피폭상황은 대책 도입을 고려할 만큼 충분한 피폭을 야기할 수 있는 의도하지도 예상하지도 않은 사건과 관련된다.⁹⁾ 보고서의 제2장에서 세 피폭상황 각각에 대한 지침을 제공한다.

(11) 여러 피폭상황에서 일반인 방호를 평가할 때 선량은 결정론적이거나 확률론적으로 평가할 수 있다. 어느 경우든 관련 변수 값은 불확실하므로 그 불확도를 살펴야 한다. 결정론적 접근에서는 선량의 점추정치를 얻는다. 대체로 선량을 저평가하지 않도록 하는 변수 값을 선택함으로써 불확실성을 감안한다. 확률론적 접근에서는 변수의 가능한 범위를 포함하고 선량분포를 구성함으로써 불확실성을 고려한다.

(12) 기존피폭상황에서 피폭을 결정하는 데는 그 장소에 구체적인 측정 데이터와 기타 습관자료를 사용할 수도 있을 것이다. 이러한 장소 고유 자료는 평가된 선량의 불확도를 상당히 줄일 수도 있다. 그러나 일반인 선량의 회구적 평가에서도 여전히 불확실한 부분이 있어 선량이 분포로 나타날 것으로 보인다.

6) <역주> 여기서 ‘잠재적으로 피폭을 초래한다(potentially cause)’는 의미는 잠재피폭(potential exposure)와는 달리 보는 것이 적절하다. 잠재적으로 초래한다는 의미는 경미한 사고처럼 일상적은 아니지만 충분히 일어날 수 있는 피폭을 의미한다. 이에 비해 잠재피폭은 일어날 것 같지 않은 사고에 해당한다.

7) <역주> 비의도적 도입에 해당하는 예는 사고로 인한 환경오염이다. 부적절하게 도입된 예는 방사능 공격으로 인한 오염상황이다.

8) <역주> 이 부분 설명에 혼선이 있다. 원문은 선원이 이미 존재하면 기존피폭상황인 것처럼 표현되어 있으나, 기존피폭상황을 형성하는 것은 선원의 존재가 아니라 ‘피폭’의 존재이다. 따라서 원문 표현을 약간 수정했다. 추가 논의에 대해서는 ICRP 103 번역본의 해당부분에 보인 역자의 논의를 참조하라.

9) <역주> 비상피폭상황은 의도하지도 예상하지도 않은 사건(예: 사고)과 관련된다는 표현은 잘못이 아니나 비상피폭상황 자체는 ‘예상하고 의도된 것’임에 유의하라. 예를 들어 후쿠시마 원전 사고 초기에 수백 명 비상작업자를 높은 선량 피폭을 알면서 ‘의도적으로’ 긴급작업에 투입했는데 이런 것이 비상피폭상황이다. 즉, 비상피폭상황은 사고 자체가 아니라 고선량 피폭 환경에 의도적으로 사람을 투입함에 따르는 피폭상황이다.

1.2. 배경

(13) 결정집단(critical group¹⁰) 개념은 ICRP 권고의 준수를 평가하기 위한 수단을 제공하기 위해 ICRP 7(1965)에서 처음 도입되었다. ICRP 7 제15항은 다음과 같이 기술한다.

‘어떤 핵심 경로에 중요한 핵종이 존재하더라도 시설 주변 집단 구성원 개인에 동일한 피폭을 초래하지는 않을 것이다. 그리고 대개 운영 전 조사는 시설 주변에서 습관, 위치, 또는 연령 특성 때문에 다른 사람들에 비해 높은 선량을 받는 한두 그룹 사람들의 존재를 정할 수 있을 것이므로 그들을 따로 중요하게 고려함이 필요하다. 실제 그러한 그룹을 정의하는 데는 큰 판단이 필요하며 다음 속성들을 고려해야 한다. 속성 중 일부는 일상 조사를 계획함에 영향을 미치는 인자이므로 결정집단에서 유의할 것만 아래에 열거한다.

- 잠재적 피폭 그룹의 위치와 연령분포
- 식이습관(예: 특별한 식품이나 소모량)
- 특별한 직업습관(예: 어구 사용)
- 주거형태(예: 차폐 특성)
- 가정 습관(예: 실내 거주 시간, 목욕이나 세탁 빈도)
- 취미(예: 낚시 또는 일광욕)

집단에서 그러한 그룹은 시설 인근에 있을 수도 있고 때로는 다소 원거리에 있을 수도 있다. 또, 그 그룹은 성인남성, 성인여성, 임신 여성, 그리고 아동을 포함할 수도 있고, 특별한 방법이나 특별한 위치에서 생산된 식품을 섭취할 수도 있다. 특별한 산업에 종사하는 사람일 수도 있다... 결정집단 개념은 일반인에 관한 ICRP 권고를 준수하는 건설하고 실질적인 방법을 제공한다’.

(14) 이어서 ICRP 7(1965) 제16항은 다음과 같이 기술하고 있다.

‘결정집단은 집단에서 보다 높은 선량을 피폭하는 사람들을 대표하고 방사선량에 대해 즉, 고려하는 구체적 경우에 선량에 영향을 미치는 제15항에서 고려한 인자들에 대해 가능하면 균질하도록 설정되어야 한다.’

10) <역주> ‘결정집단’이란 원문 ‘critical group’에 해당하는 우리 용어이지만 의미가 다소 모호함은 사실이다. 또, ‘집단’이란 표현이 이 번역본에서 ‘population’을 의미하도록 사용하고 있는 것과 혼선 우려도 있다. 그러나 오랫동안 결정집단이란 용어를 사용해왔고 이제 대표인으로 대체될 것이므로 지금 용어의 적합성을 논의하는 것은 중요하지 않아 이 번역본에서는 ‘결정그룹’으로 고치지 않고 사용하던 용어 그대로 적는다.

(15) ICRP 7 제17항은 또 다음과 같이 서술한다.

‘이러한 방법으로 결정집단이 규정되면, 그로부터 알맞은 대표 표본을 선택하고 그들의 실제 또는 잠재적 피폭을 평가하도록 연구해야 한다. 이 표본의 평균 피폭을 보다 높게 피폭하는 사람들 피폭의 전형으로 간주하며, 일반인에 대한 최대허용선량¹¹⁾에 관한 ICRP 권고는 그 평균에 적용된다. 표본에서 값의 분산은 피폭선량에 영향을 미치지 측정되지 않는 개인특성(예: 신진대사)에 대한 균질성의 척도 역할도 한다. 이러한 개인차는 결정집단 내에서 개인선량의 분산을 증가시키는 경향을 보일 수 있다. 결정집단 밖에는 극단적으로 독특한 특성과 습관을 가지는 사람들이 소수 있을 수 있음도 고려해야 한다. 그러한 특이성은 때때로 그 사람들이 결정집단보다 높은 선량을 피폭함을 의미하는 것일 수도 있다.’

(16) 결정집단 개념은 ICRP 간행물에 사용되어 왔고 방사선방호에 널리 적용되어 왔다. ICRP 43(1985) 제67항은 다음과 같이 적시했다.

‘극단적인 경우, 예를 들면 자세히 특징지을 수 없는 미래상황을 다룰 때 가상적 한 개인으로 결정집단을 정의하는 것이 편리할 수도 있다. 그러나 일반적으로 결정집단은 한 개인으로 구성되지도 않고 균질성을 상실하도록 매우 크지도 않을 것이다. 결정집단 크기는 대개 몇 십 명까지 일 것이다. 큰 집단이 균등하게 피폭하는 소수 경우에는 결정집단 크기가 훨씬 클 수 있다. 크기에 대한 이 지침은 분명한 의미를 가진다. 예를 들면 습관 조사에서 한 사람 관리 근거를 위해 결정집단 내에서 가장 많이 피폭하는 사람을 찾을 필요는 없다. 특정 시점에서 조사 결과는 기저 분포의 한 지시로 간주되며, 한두 명의 극단적 습관 발견으로 평균에 반영된 값이 심하게 영향을 받지 않는다.’

(17) ICRP 60(1990)의 1990년 권고는 다음과 같이 적고 있다.

‘결정집단은 검토 대상인 선원으로 인해 가장 높게 피폭하는 사람들의 대표가 되도록 선발된다. 그들은 그 선원으로부터 선량에 영향을 미치는 특성에 대하여 대체로 균질함이 필요하다. 이렇게 되면 개인선량 제약이 결정집단 평균치에 적용될 것이다. 이것은 결정집단 내 일부 개인은 집단 평균보다 높거나 낮은 선량을 피폭한다는 것을 암시한다.’

11) <역주> ICRP 7(1965) 당시에는 현재의 선량한도 개념을 최대허용선량maximum permissible dose로 표현했다. 이 선량까지는 무조건 ‘허용’된다는 오인을 완화하기 위해 1977년 ICRP 26부터 선량한도로 수정했다.

(18) ICRP는 선량제약치 준수를 평가하기 위한 목적으로 ICRP 7, ICRP 43, 그리고 ICRP 60(1965, 1985, 1991)에서 개발한 사람의 선발에 관한 원칙을 계속 견지한다. 이 보고서의 목적은 일반인에 대한 선량평가에서 최근의 경험과 발전을 고려하여 이들 원칙의 적용을 명확히 하고 자세히 설명하기 위한 것이다.

1.3. 근본 원칙과 개념

(19) 규제와 관리 목적을 위해 계획피폭상황과 기존피폭상황에서 일반인 선량 제약치는 연간 유효선량으로 명시된다. ICRP는 일반인 선량평가의 불확실성과 많은 극단적 피폭상황의 과도적 속성을 인정한다. 이렇게 내재하는 불확실성 때문에 계획피폭상황에 대해 준수를 판단할 때 어떤 사람의 피폭은 선량제약치를 초과할 가능성도 있음을 ICRP는 안다. 그러나 ICRP 권고에 충실히 따른다면 어떤 사람의 선량이 해당 제약치를 초과할 확률은 작을 것이다.

(20) 계획피폭상황에서 일반인에 대해 ICRP가 권고하는 선량제약은 부분적으로는 사람들의 피폭이 미래에 다년간 계속 일어날 것이라는 가정에 근거하여 설정된다(ICRP 2007). 어떤 주어진 시간 동안 피폭하는 집단은 여러 연령 사람들의 스펙트럼으로 구성되며, 집단 내 개인은 피폭이 일어날 것으로 예상되는 기간에 나이가 들어감에 따르는 방호를 제공받아야 한다.

(21) 대부분 경우 일반인 선량을 직접 감시하는 것은 가능하지 않으므로 그보다는 사람의 피폭을 일으키는 환경 중 방사성핵종 농도에 감시 초점을 맞춰야 한다. 일반인 선량은 직접 측정할 수 없기 때문에, 방사성핵종 섭취의 경우 환경 농도, 적절한 습관자료 및 선량계수를 적용하여 선량을 평가해야 한다. 점추정(결정론적)에서부터 선량분포(확률론적)까지 선량을 계산하는 방법은 다양하다. 어느 방법 또는 그 혼합을 적용할 때 의사결정자는 언제 준수되는 지를 어떻게 판단할 지에 대한 지침을 필요로 한다.

(22) ICRP는 1980년대 중반부터 일반인에 대해 연령중속 선량계수를 개발하기 시작했다. 생물역동학적 모델과 선량계측 모델 기준에 근거하여 6개 연령군에 대한 선량계수를 일련의 간행물로 발표했다(ICRP 1989, 1993, 1995, 1996a,b). 적절한 습관자료와 결합하여 이들 선량계수를 환경 방출로부터 선량을 평가하는 데 사용할 수 있다.

(23) 사고나 과거 행위로 인해 이미 존재하는 경우처럼 어떤 상황에서는 환경 농도와 구체적 습관자료를 사용해서 일반인 선량을 추론할 수 있다. 체르노빌 사고로부터 선량 재구성(IAEA 1991)이 한 예인데 여기서는 집단에 속하는 사람들에게 연계할 수 있는 선량분포를 얻었다. 일반적으로 이러한 분포는 집단 대부분이 받는 선량을 훨씬 초과하는 선량을 포함하게 되는데 이는 습관자료의 극단적 값 때문에 발생한다.

(24) 제안된 환경방출을 고려하는 다른 상황에서는 피폭자 습관에 대한 가정이 불가피할 수 있다.

(25) 그러므로 일반인 방호 목적으로는 집단에서 더 많이 피폭하는 사람들을 대표할 선량을 받는 사람을 특징짓는 것이 필요하다. 이 개인을 ‘대표인’이라 부른다. 대표인 선량은 이전 ICRP 권고에서 설명된 ‘결정집단’의 평균선량과 대등하며 이제 이를 대체한다.

(26) 이후의 장, 절들은 선량평가 과정의 기본요소를 설명한다. 나아가 계획피폭상황에서 준수 판단과, 비상사태에 대비한 계획수립, 그리고 일반인 방사선방호의 다른 속성을 결정하기 위해 대표인을 어떻게 특징짓고 규정하는지에 대해 설명한다.

제2장 선량평가

2.1. 선량평가 목적

(27) 일반인 선량평가는 해당 선량제약치 준수를 판단하거나, 피폭관리 수준에 대한 판단을 안내하거나 피폭을 감축하기 위해 취할 조치의 식별을 돕기 위해 수행될 수 있다. 예를 들어 환경으로 방출관리에서 선량제약치와 비교 결과는 배출물 추가 관리가 필요한지를 결정하게 된다. 사고상황에서 계획을 위해, 또는 사고 사태에서 대응수단을 이행할 조건을 결정하기 위해 여러 기간에 대해 선량을 평가할 수도 있다. 나아가 방호최적화 과정에서도 선량을 평가하는데 이 때는 선량제약치를 만족하는 것만으로는 충분하지 않고 사회경제적 인자를 고려하여 방사선방호가 최적화됨을 보일 필요가 있다(ICRP 2007).

(28) 수행하는 평가의 유형과 구체적 정보를 포함하는 정도는 목적에 따라 달라진다. 많은 상황에서 계획, 최적화 및 준수는 서로 다른 평가를 요구할 수 있다. 예를 들어 계획과 최적화는 다양한 피폭여건을 고려하고 추가 방호수단의 기회가 있을지를 평가한다. 이에 반해 준수평가는 사전 설정된 조건의 만족여부를 구체적으로 내보이기 위해 설계된다. 이후 이 보고서에서는 ICRP가 권고하는 해당 선량제약치 준수를 어떻게 내보일 것인지에 대해 초점을 맞춘다.

2.2. 선량평가 유형

(29) ICRP는 세 유형 피폭상황을 인식하는데 계획피폭상황, 비상피폭상황, 기존피폭상황이다. 선량평가는 전망적으로 또는 회구적으로 수행할 수 있다(표2.1 참조). 선량이 장래 연도들을 위한 것(전망평가)인지 지난 연도들을 위한 것(회구평가)인지에 따라 연간 선량평가는 두 유형으로 분류된다.

(30) 전망적 선량은 아직 피폭하지 않은 사람들에 대해 평가하는 것임에 비해 회구적 평가는 피폭을 받은 것으로 알려진 사람들 그룹에 대해 평가하는 것이다. 전망적 피폭을 평가함에 있어서는 어떤 습관특성을 가진 특정 사람들의 유무에 불문하고 그러한 습관특성을 가지는 사람들이 있는 것으로 가정한다.

표2.1. 피폭상황별 선량평가 예시

상황	평가 유형	
	전망적	회구적
계획피폭	해당 선량제약치 준수 판단	과거 운영으로부터 일반인 선량 평가
기존피폭	장래의 중장기 피폭(예: 완화 조치 후)	과거 피폭(예: 오염지역 거주)
비상피폭	비상계획	사태 후 실제 영향

(31) 전망적 평가는 미래 피폭을 추정하고 제안된 행위과정(예: 새로운 선원의 도입 또는 기존 선원의 유지)이 용인 가능하고 최적화되었는지 보이기 위해 수행된다. 이러한 평가는 미래 여건을 가정해야 한다. 이러한 전망적 평가결과는 선원이 도입된 경우 준수를 판단하는 근거를 제공한다.

(32) 유지되는 상황이 이후 연도에도 준수될 것인지를 알기 위해서도 전망적 평가를 수행한다. 보다 먼 미래를 위한 전망적 평가보다 여건을 더 잘 알기 때문에, 이 평가는 현재의 부지 고유 여건에 대한 보다 상세한 정보를 내포할 것이다. 특별히 선원에 대한 인가나 준수의 입증을 위해 전망적 평가가 사용될 때는 평가의 형태나 범위를 요건의 근거에 연관시켜 명시해야 한다.

(33) 방사성물질이 환경으로 방출되어 일반인이 피폭할 수 있는 비상상황에서도 전망적 평가가 수행된다. 가용한 현장 데이터와 측정치가 평가에 사용되며, 단기 방호조치 의사결정자를 위해 권고하는 사람들을 위해 선량으로 환산된다.

(34) 전망적 평가는 사건이 통제되고 조기 방호조치들이 이행된 후의 비상대응 후기단계에서도 사용될 수 있다. 잔류 방사능이 부과하는 상황은 본질적으로 계속되는 피폭이어서 개념적으로 기존피폭상황이다.

(35) 끝으로 이미 알고 있던 기존피폭상황의 평가에도 전망적 평가가 사용된다. 평가결과는 피폭을 감축하기 위해 방호조치를 도입해야 할지를 결정하는 데 사용되는 정보의 일부가 된다.

(36) 기존피폭상황에서 제안된 조치의 의의를 결정하기 위해 전망적 또는 회구적 평가가 필요하다. 이러한 사례에서 선량평가는 조치를 취하지 않을 때 장래의 영향을 이해하거나 어떤 조치를 취했을 때 회피하는 선량을 추정하는 기반

을 제공한다. 평가는 피폭하는 사람들과 소통할 정보와 가용한 방안도 제시하게 된다.

(37) 회구적 평가는 해당 선량제약치를 준수함을 내보이기 위해 수행될 수 있고 역학연구 근거로 사용될 수도 있다(예: 역사적 선량 재구성에서 처럼). 일반적으로 회구적 평가는 전망적 분석보다는 계산 정보가 많다. 나아가 회구적 평가는 비상상황 초기단계 이후 보다 정확히 파악하여 이행했을 수 있는 방호조치의 영향과 실제 피해를 보고하기 위해서, 또는 사람들에게 정보를 제공하기 위해서, 그리고 추가 대책이 적합한지를 판단하기 위해 수행될 수 있다.

(38) 비상상황에서는 비교적 단기간에 상당히 높은 선량이 전달될 가능성이 크다. 비상계획을 수립할 때 방호수단을 사전에 계획할 수 있도록 잠재적 선원항과 주변 주민을 모델링하여 전망적 평가를 할 수 있다. 이러한 평가는 비상 시나리오 상황이 발생한 경우 조치를 위한 선량 참조준위¹²⁾ 적용을 받을 사람들이나 집단을 식별하는 데도 사용된다. 비상 대응수단은 짧은 시간동안 선량을 제한하거나 관리하려는 것이다.

(39) 급성 비상상황에서 방호조치는 종종 아동과 같은 특별한 집단을 방호함에 근거를 둔다. 이런 상황에서는 해당 선량을 평가하고 대응수단을 결정하기 위해 연령별 습관과 연령별 선량계수를 사용한다. 비상대응에서는 피폭하는 연령 그룹 또는 집단에 대한 정보가 평가에 명시적으로 포함되어야 한다.

2.3. 선량평가 절차의 개괄

(40) 그림2.1에 보인 것처럼 선량평가는 다단계 과정으로 생각할 수 있다. 첫째 단계는 방사성핵종의 종류와 양, 방출 방사선 데이터를 포함한 선원에 대한 정보를 얻는 것이다. 둘째 단계는 환경 즉, 구체적으로 문제 선원에 의한 환경 매체 중 방사성핵종 농도 정보를 얻는 것이다. 외부피폭 선량평가를 위해서는 공기나 토양, 또는 수중 농도나 외부 선량률이 필요하다. 내부피폭 선량평가를 위해서는 체내로 섭취될 수 있는 식품, 음용수 및 공기 중 농도를 알 필요가 있다. 절차의 셋째 단계는 해당 개인이나 집단의 피폭 시나리오에 근거하여 선발한 습관 데이터를 농도와 결합하는 것이다. 외부피폭에서는 여러 방사선장에서

12) <역주> 원문은 선량제약치로 표현되어 있으나 비상상황에는 제약치가 아닌 참조준위가 고려된다.

체류한 시간이 필요하며, 내부피폭에서는 방사능 섭취량을 평가할 수 있도록 취식한 식품이나 물의 양과 흡입한 공기량에 대한 정보가 필요하다. 다음 단계에서는 공기나 토양 중 농도를 외부 선량률과 연계하는 계수나, 섭취를 선량으로 변환하는 선량계수를 사용한다. 최종 단계는 필요에 따라 외부피폭과 내부피폭의 기여를 합산한다. 각 단계를 구분하여 고려하는 것도 유용하다.

(41) 첫째 단계에서는 피폭원을 특성화해야 한다. 환경으로 방출하는 경우, 이 특성화는 관심 방사성핵종의 방출, 방출고도, 인근 건물들과 거리 관계, 물질의 물리화학적 형태 및 기상조건을 포함한다. 선원에서 차폐를 투과하거나 대기 물질에서 산란하거나 반사된 직접 외부피폭도 검토해야 한다.

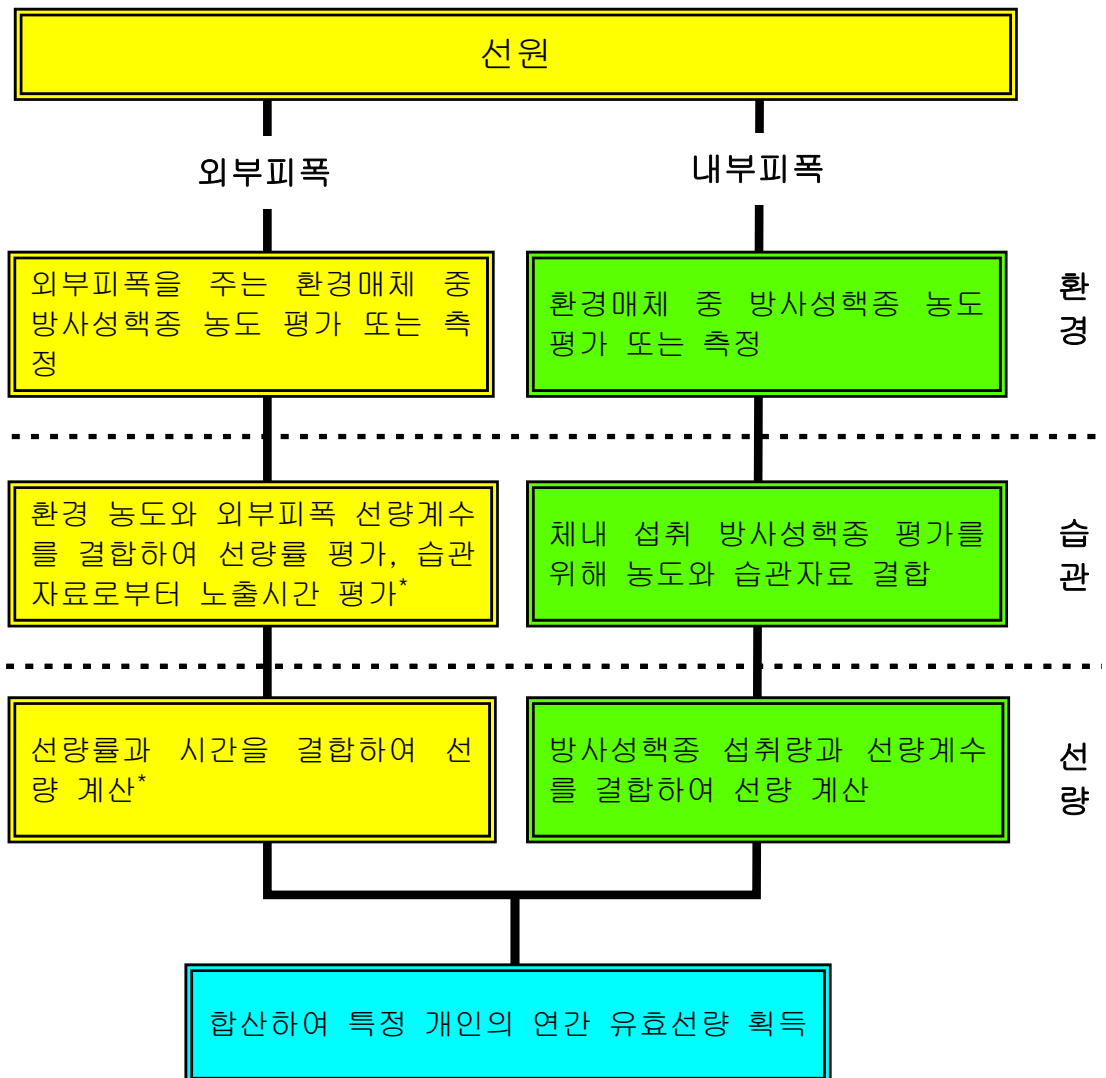


그림 2.1. 선량평가 절차. *〈역주〉 외부선량계수를 적용하는 단계를 조정했다.

(42) 둘째 단계에서는 여러 위치에 대해 측정하거나 환경매질에서 방사성핵종의 확산, 침적 및 수송을 모델링하거나 둘을 결합하여 환경 농도를 얻어야 한다. 측정이든 모델링이든 수반되는 불확실성이 있다. 각 위치에서 결과는 선원으로 인한 각 방사성핵종과 환경 경로별로 방사능 농도분포가 된다. 이 단계에서 분포의 형성은 사람의 존재 여부와는 독립적이며 어떤 잠재적 피폭경로의 존재여부에 근거하게 된다.

(43) 과정의 셋째 단계는 환경매체 중 농도와 습관자료 및 피폭 시나리오에서 정의하는 기타 정보를 결합이다. 고려할 정보에는 위치, 식이, 방사선피폭을 초래하는 생활방식, 그리고 연령이나 호흡률처럼 연령에 의존하는 생리학적 인자가 포함된다. 이들 정보의 선발에 대해서는 제3장에서 상세히 기술한다. 많은 경우 이들 데이터는 지역 인구에 관한 정보로부터 얻을 수 있다. 그러나 부지구체적 데이터가 없거나 그 자료를 보완하거나 증명하기 위해 국가 또는 지역 정보를 필요로 하는 상황도 있다.

(44) 선량평가 과정의 넷째 단계는 선량계수와 기타 관련 양을 적용하는 것이다. 방사성핵종 섭취에서 선량계수는 (단위 섭취 당) 예탁유효선량이나 장기에 대한 예탁등가선량으로 표현된다. 내부피폭과 외부피폭 결과를 합하여 총 연간 선량을 얻는다.

(45) 선량평가는 반복적 과정일 수 있음을 이해하는 것이 중요하다. 평가는 보통 선원, 변수 값, 습관자료 및 집단 크기에 대한 보다 보수적 가정에서 시작한다. 매 반복계산의 결과는 부지에 보다 고유하고 실질적인 정보를 필요로 하는지 판단에 사용된다. 계산된 선량 크기가 해당 선량제약치에 근접하는 경우에는 상세정보 사용이 특히 중요하다.

(46) 이 보고서는 주로 셋째 및 넷째 단계에 대해 지침을 제공한다.

2.4. 선량평가에서 불확실성 처리

(47) 개인 특성을 규정하거나 선량을 평가하는 모든 과정에는 본질적 가변성 variability과 불확실성 uncertainty이 존재한다. 가변성이란 실제 또는 식별 가능한 본성적 이질성 또는 다양성을 의미한다. 예를 들면 토양 유형에 따라 뿌리흡수 인자 차이는 가변성이 된다. 가변성 원천은 공간적 가변성, 시간적 가변성, 개체

별 가변성의 세 범주로 나눌 수 있다(Tschurlovist 2004). 불확실성은 평가에서 불가피한 한계로부터 발생한다. 예를 들면 농도측정은 정밀도에서 본질적 한계를 갖는다. 선량 평가에 측정 데이터를 쓰거나 모델을 적용하거나 또는 측정과 계산을 결합하더라도 가변성과 불확실성이 가능한 값의 분포에 기여한다. 가변성 및 불확실성의 정도는 그 분포의 양상이나 범위로 표현된다. 이런 맥락에서 중요 변수를 식별하는 데는 민감도분석이 유용할 것이다. 이 보고서는 용어 ‘불확실성’이 위에서 설명한 가변성과 불확실성 모두의 기여를 의미하도록 사용한다.

(48) ICRP는 평가의 일부로서 측정되거나 평가된 값을 갖는 양과 ICRP나 다른 기구가 선정한 값을 갖는 양을 구분한다. 예를 들어 의사결정이나 준수 평가 과정에 사용할 때 선량제한치, 가중치, 선량계수는 고정 점 값으로 선별되고 불확실성이 없는 것으로 본다. 선량을 위해 연계하는 모델에서는 불확실성을 ICRP도 인정한다. 이 불확실성은 선량한도나 제한치 값을 선정할 때 고려된다.

(49) 변수에 대해 적절한 단일 값을 선정할 때는 결정론적으로, 변수 값의 분포를 반영할 때는 확률론적으로 선량평가에 수반되는 불확실성은 고려할 수 있다. 어느 방법이든 방사선방호에 관한 판단이나 의사결정을 지원하기 위한 선량평가를 충분히 견고하게 수행하는 것이 목표이어야 한다.

(50) 준수 목적의 선량평가에서 불확실성을 어떻게 포함할 것인가에 대한 최종 결정은 규제당국이 행해야 한다고 ICRP는 믿는다.

2.5. 결정론적 및 확률론적 선량평가 방법

(51) 위에서 설명했듯이 대표인 선량은 결정론적으로나 확률론적으로 계산할 수 있고 이들을 혼합해 적용할 수도 있다. 사용하는 방법은 특정 상황, 역량, 그리고 데이터 가용성에 달려있다. 이들 방법 사이 차이를 이해하는 것이 ICRP 권고의 준수를 어떻게 결정하는지에 대한 지침을 적용함에 중요하다. 따라서 아래에서 그러한 방법에 대해 간략히 설명한다.

(52) 결정론적 방법과 확률론적 방법이 반드시 대등한 결과를 내지는 않음에 유의해야 한다. 그러나 두 방법의 결과는 요구되는 일반인 방호를 결정하는 근거를 제공한다는 ICRP 목표를 달성하는 데 사용될 수 있다. 두 경우 모두에서

평가과정이 투명하고 가정이 명확히 이해되고 습관 선발에 지침을 고려한다는 것이 중요하다. 과정의 성공에는 평가에 대한 동료검토와 이해당사자 참여도 중요하다.

(53) 준수 평가를 위한 가장 단순한 방법은 스크리닝 평가이다. 이 방법은 예를 들면 선원으로부터 방출 위치에서 방사성핵종 농도에 근거하여 매우 보수적 선량 평가치를 얻도록 가정을 단순화하는 방식을 전형적으로 사용한다. 다른 단순 가정은 선량제약치와 비교하기 위해 일반인 선량 평가에서 하나의 단일 집단(예: 성인)을 고려하는 것이다(ICRP 2000). 만약 상대적으로 보수적인 스크리닝 평가의 결과가 선량이 해당 선량제약치보다 충분히 낮음을 내보인다면 선량을 더 상세히 평가할 필요가 없어진다. 여러 스크리닝 방법이 개발되어 적용 가능하다(IAEA 2001, NCRP 1996).

(54) 결정론적 평가의 다른 유형에서는 전문가 의견, 측정 데이터 또는 단순계산을 이용하여 높은 선량을 받는 그룹이나 그룹들을 식별하기 위해 관련 집단, 피폭경로 및 방사성핵종에 대한 일반적 평가가 이루어진다. 어떤 경우에는 부지 고유의 피폭 데이터를 쉽게 알 수 있고 습관정보를 알기 때문에 높은 선량을 받는 사람들을 쉽게 식별할 수 있다. 다른 경우에는 이러한 사람들을 식별하는 것이 선원으로부터 선량을 받는 집단과 핵심 피폭경로를 고려하는 반복계산이 된다. 반복과정은 보통 각 경로로부터 최대 피폭을 받을 것으로 보이는 지역을 지시하게 될 것이다. 이런 지역들에 대해 상세히 조사하게 된다. 궁극적으로 모든 피폭경로를 고려할 때 최고 피폭을 받는 한 그룹이 식별된다. 이 그룹의 평균선량을 선량제약치와 비교하여 준수를 판단한다. 이 방법은 ICRP가 이전에 권고했던 결정집단 방법과 동일하다.

(55) 오늘날 컴퓨터 기술 덕분에 선량평가 과정을 통한 불확도 과급분석은 과거보다 쉽게 달성될 수 있다. 확률론적 방법은 변수 값의 분포를 조합하여 선량 발생확률에 따른 선량 범위를 보이는 조합분포를 만든다. 계산된 선량의 분포는 (1) 평가된 환경매체 농도(즉, 공기, 물, 토양 또는 식품 중 방사성핵종 농도)의 불확실성과 가변성과 (2) 습관자료(즉, 호흡률, 음식물 취식률, 여러 활동에 보내는 시간)의 불확실성과 가변성을 내포한다. 결정론적 방법에서와 같이 피폭 집단이나 관심 피폭 시나리오의 식별은 반복계산 과정이 될 것이다. 그러나 확률론적 방법을 사용했을 때는 ICRP 권고의 준수를 어떻게 결정할 지에 대해 의사결정자에게 지침이 필요하게 된다.

(56) 때로는 결정론적 방법과 확률론적 방법의 혼합도 사용된다. 한 예는 개인 선량을 구하기 위해 기존피폭상황에서 측정데이터를 사용하는 것이다(IAEA 1991). 이 경우에 습관자료나 측정자료의 불확실성과 가변성 때문에 선량이 분포로 나타날 것이며 이 분포가 준수를 결정하는 근거가 된다.

제3장 대표인

3.1. 대표인 정의

(57) 일반인 선량은 환경 농도나 선량률과 함께 적절한 습관자료를 사용하여 평가해야 한다. 따라서 일반인 방호 목적을 위해서는 선량제약치 준수를 결정하는 데 사용할 사람을 정의하는 것이 필요한데 이것이 대표인이다. 거의 항상 가상적으로 구성되는 이 사람은 집단에서 보다 많이 피폭하는 사람들의 대표가 된다. 대표인은 ICRP가 이전에 권고했던 결정집단(ICRP 1985)의 평균적 구성원에 해당하며 이제 그것을 대신한다.

(58) 대표인에 대한 선량을 고려할 때 다음과 같은 여러 인자를 고려해야 한다. (1) 선량평가는 모든 해당 피폭경로를 겨냥해야 한다. (2) 높은 선량을 받는 사람들이 평가에 포함되도록 방사성핵종의 공간분포를 선량평가에 고려해야 한다. (3) 습관자료는 피폭집단에 근거해야 하며 합리적이고 지속가능하며 균질해야 한다. (4) 구체적 연령범주에 적절한 선량계수를 적용해야 한다. 이러한 인자들이 고려되면 적용하는 평가 접근(결정론적, 확률론적 또는 이들의 혼합)에 따라 대표인이 식별되고 준수 판단에 사용된다. 이들 각 인자에 대한 추가적 규명이 뒤따른다.

3.2. 피폭경로, 시간대 및 방사성핵종의 공간분포

(59) 대표인 선량이 모든 피폭 모드(예: 대기방출, 수계방출 및 직접 외부피폭)로부터 기여를 적절히 포함해야 함은 중요하다. 어떤 평가에서는 한두 피폭경로가 피폭을 지배할 수 있다. 피폭에 중요하게 기여하는 피폭경로만 고려되도록 가정할 수도 있다. 어떤 피폭경로를 포함해야 할지 하는 열쇠는 평가 유형에 따라 다르지만 전반적 목표는 중요한 피폭경로가 생략되지 않도록 하는 것이다.

(60) 앞으로 약 50년 동안 개인의 특성이 현행 습관자료에 근거할 수 있다고 가정하는 것은 합리적이다. 따라서 연간 개인선량의 전망적 평가는 이 정도 기간에 대해 유효한 것으로 본다.

(61) 전망적 상황에 대해 선량을 평가할 때 토지 사용에 대한 제도적 관리(예: 국립공원이나 야생보호구역으로 지정)가 유효할 것으로 보는 것은 적절할 것이다. 이로써 지정 구역에서 활동 유형을 미리 배제하여 이 구역으로부터 주산 식품을 얻지 못할 수도 있다. 기후조건도 미래 거주나 지역 생산 식품 가능성을 배제하거나 금지할 수도 있다(예: 건조대에서 물 가용성이 장기간 거주나 식품생산을 배할 수 있다). 따라서 적절한 특성 선정에는 이러한 조건들을 고려해야 한다.

(62) 방사성핵종 방출의 공간, 시간적 분포와 시설 수명에 걸쳐 장수명 방사성핵종의 축적도 고려해야 한다. 이러한 축적의 한 예는 수계 방출에서 방사성핵종이 강이나 호수 바닥 퇴적물에 누적되는 것이다. 이러한 축적은 가장 많이 피폭하는 사람들이 시설로부터 원거리에 있거나 시간적으로 후일 피폭하는 사람이 되게 할 수도 있다.

(63) 토지사용의 미래 변동 가능성도 전망적 평가에 고려할 필요가 있다. 예를 들면 제안된 시설 인근에 현재로는 농업생산이 없지만 예상 시설수명 기간에 생산이 개시될 수 있다. 전망적 평가에 이러한 농업생산을 가정해야 할지는 규제당국이 결정해야 한다. 그렇더라도 인구학적 자료나 생활양식에 유의한 변동을 고려하기 위해 선정된 특성을 시설 수명동안 가끔씩 재평가하는 것이 중요하다.

3.3. 대표인 특성

(64) 제4항에서 지적했듯이 개인 특성은 연령종속 생리학적 변수와 식이정보, 거주 자료, 지역 자원 사용 및 기타 선량평가에 필요한 정보를 포함하는 습관자료로 설명된다.

(65) 결정론적 접근에서 사용되는 개인 습관(예: 식품소비, 호흡률, 현지자원 사용)은 집단의 한 개인 구성원의 극단적 습관이 아니라 보다 높이 피폭하는 사람들을 대표하는 소수 사람들의 평균적 습관이라는 것이 중요하다. 어느 정도 극단적이거나 비정상적 습관에 대해 고려할 수는 있지만, 그런 습관이 반드시 고려하는 사람들의 특성을 결정하지는 않는다. 한 예외는 어떤 개인의 습관이 오랜 기간 그 사람 또는 다른 사람들에 의해 지속될 것이 합리적으로 예상되는 경우이다.

(66) 확률론적 접근에서 습관자료 분포를 사용한다면 고려하는 습관자료는 해당 인구집단에서 발견될 모든 가능한 값의 범위를 포함해야 한다. 습관의 분포는 고려하는 지역과 상황에 적합해야 한다. 예를 들면 해안 환경으로 방출이 평가대상이 된다면 습관분포는 적어도 해안 공동체 주민의 행동을 반영해야 한다.

(67) 만약 지역 집단의 구체적 습관자료(예: 해양환경으로 방사성핵종 방출이 있는 해안지역으로부터 온 어류 소비)가 가용하지 않다면 적절한 국가 또는 지역 자료를 사용할 수도 있다. 이들 자료의 분포는 확률론적 평가에 사용될 수 있고 그러한 분포의 한 습관 값이 결정론적 계산용으로 선정될 수 있다. 국가에서 수립된 분포를 보면 많은 주산물 식품소비의 95백분위는 분포 평균값의 3배 이상인 경향이다(Byrom 등 1995). 행동의 95백분위를 결정론적 계산에 사용하는 것은 지역의 구체적 자료가 없을 때 섭취율을 정의하는 신중한 가정이라고 ICRP는 생각한다.

(68) 특정 피폭원에 대해 하나의 피폭경로가 일반적으로 그 피폭원으로부터 대표인 선량을 지배할 것이다. 만약 둘 이상의 방사성핵종 섭취경로가 선량에 상당히 기여한다면 95백분위 습관자료가 모든 경로에 적용 가능하다고 가정하는 것은 적절하지 않을 것이다. 더 지배적 경로에는 95백분위 섭취를 배정하되 다른 경로에는 보다 낮은 값을 적용하는 것이, 합리적이고 지속가능한 습관의 세트를 대표하는 평가여야 한다는 요건에 부합할 것이다. 둘 이상 피폭경로가 합산 유효 선량에 상당히 기여하더라도 가장 높이 피폭하는 사람들은 습관에서 비교적 균질한 경향을 보일 것이다(Hunt 등 1982, Hunt 2004).

(69) 대표인에 대한 습관자료를 선정할 때는 합리성, 지속성 및 균질성을 고려해야만 한다.

(70) 합리성이란 습관자료가 실질적으로 사람들에게 적용되고 사람들이 일상생활에서 접하는 범위 안에 있음을 의미한다. 확률론적 방법을 적용하든 결정론적 방법을 적용하든 습관자료의 합리성이 고려되어야 한다.

(71) 지속성과 균질성은 합리성의 속성들이다. 결정론적 접근에서 습관자료 선정의 합리성 여부는 균질성 속성과 연계되는데 합리적으로 균질한 그룹에서 평균 습관자료로부터 도출되는 선량에 선량제약치를 적용하려는 것이기 때문이다. 균질성은 특정 습관자료 극단치가 평가에 포함되거나 되지 않는 정도를 설명한다.

(72) 결정론적 평가에 대해 ICRP는 이전에 가장 높이 피폭하는 그룹 습관자료에 필요한 균질성 정도는 해당 선량한도나 제약치의 분율로서 그 그룹의 평균선량 크기에 의존한다고 설명했다(ICRP 1985). 만약 분율이 약 0.1보다 작고 개인선량의 분포가 10배 되는 전체 범위(즉, 평균의 양쪽으로 각각 약 3배) 내에 대체로 존재한다면 그 그룹은 균질한 것으로 간주된다. 분율이 0.1보다 크면 전체 범위는 더 작아야 하는데 3배 이내가 바람직하다.

(73) 지속성은 평가하는 시간대에서 선정된 습관이 지속되는 정도를 설명한다. 습관자료는 지속가능할 필요가 있다. 예를 들면 총 식이섭취는 신뢰성 있는 영양 수요와 부합해야 한다. 습관은 사람들의 개인적 수요에 상당해야 한다. 예를 들면 동일인이 일일 영양수요를 여러 경로(예: 농경과 어업) 각각으로부터 얻는다고 가정하는 것은 적절하지 않다. 마찬가지로 위치와 가용한 토지면적이 가정한 식이섭취량을 공급하지 못함이 분명한데 그 지역에서 소비되는 모든 식품이 그 지역에서 생산된다고 가정하는 것도 부적절하다. 또, 한 지역에서 사냥으로 섭취량은 있음직한 사냥물을 초과해서는 안 된다. 외부피폭의 선량 기여가 상당한 경우에는 선량률이 높은 지역에서 소비하는 시간을 합리적으로 추정하는 것이 필요하다. 일반적으로 피폭상황을 적어도 5년 이상 유지한다면 지속가능한 것으로 간주된다.

(74) 평가에서 지나친 보수성을 방지하기 위해서는 각 변수에 대해 극단 백분위 선정은 피하도록 주의해야 한다. 그러한 결과는 대표인에 대한 선량을 유의하고 비현실적으로 과대평가 하게 되고 의료나 기타 시설의 설계에 부당한 부담을 지울 수 있다. 종합하면 변수 값의 선정은 합리적이고 지속가능한 피폭 시나리오를 대표해야 한다.

3.4. 연령별 선량계수

(75) 환경 외부피폭에서는 연령에 따라 단위 노출 당 선량의 변화가 작다 (Golikov 등 1999, 2000). 그러나 방사성핵종 섭취에 대해서는 ICRP가 유아기부터 70세까지 시간대에 걸쳐 여섯 연령대 일반인에 대한 연령별 선량계수(단위 섭취량 당 선량, Sv/Bq)를 제공했다(ICRP 1996a,b). 나아가 어머니의 방사성핵종 섭취로 인한 배태아 선량계수도 제공했고(ICRP 2001a,b), 모유 중 방사성핵종으로부터 신생아 선량계수도 제공한 바 있다(ICRP 2005). 이들 선량계수는 집단에서 특정 그룹의 선량계산을 가능하게 한다. 이 절은 대표인을 위해 내부피폭

에서 연령별 선량계수를 묶는 데 대한 추가 지침을 제공하고 상이한 상황에서 선량계수의 용도를 구분하고자 한다. 준수를 판단할 때, 연령별 선량계수 사용을 이해하기 위한 바탕으로서 ICRP 권고 저변의 여러 목표와 기본개념을 논의할 필요가 있다.

(76) 여섯 연령군에 대한 선량계수의 적용은 한 방출원에 의한 환경 중 농도를 예측할 수 있는 역량과 피폭자 습관자료의 불확도를 평가할 수 있는 역량과 연계하여 가늠해야 한다. 특히 전망적 계산에서는 선량 평가치의 불확실성은 선량계수를 제공하는 연령군 수를 늘인다고 해서 유의하게 줄어들지 않는다. 개재된 불확실성 때문에 일반인 선량의 전망적 평가에서 선량계수 전체 세트 사용이 합축하는 정밀도는 보장되지는 않을 것으로 ICRP는 여전히 생각한다.

(77) 제20항에서 적어도 부분적으로는 사람들의 피폭이 미래에 여러 해 동안 계속될 것이라는 가정에 근거하여 선량계약치가 설정된다고 적시했다. 많은 시설이 적어도 50년 동안 운영될 것으로 예상된다. 따라서 준수를 판단하는 대상이 되는 사람은 여러 해 동안 피폭하는 바로 그 사람이 된다. 이러한 동일인의 계속 피폭 개념은 사람 생애의 여러 해에 걸치는 몇 개 연령범주를 사용하는 것을 정당화한다. 먼 미래에 개인의 생애에 걸쳐 일반인 선량이 발생하게 될 장수명 방사성폐기물 처분의 경우에는 ‘...그래서 개인 생애에 걸쳐 평균한 연간 선량/위험을 계산하는 것이 합리적이며 이는 연령군별로 선량을 계산할 필요가 없음을 의미한다. 이 평균은 성인에 대한 연간 선량/위험에 의해 적절히 대표된다.’고 ICRP는 설명한 바 있다(ICRP 2000).

(78) ICRP가 제공하는 선량계수는 한 해 섭취량으로부터 예탁선량을 준다. 이 보수적 선량계량은 피폭 연수에 무관하게 피폭자를 피폭 수명에 걸쳐 방호하도록 보장한다. 예를 들어 (반감기가 긴) 악티나이드의 경우 선량계수는 피폭수명 동안 누적 예탁을 고려하는데 이는 특정 연도의 개인선량을 과대평가 한다.

(79) ICRP는 선량계약치 준수를 평가할 때 5년 기간에 평균함을 인정하는데 (ICRP 1991), 지속되는 피폭의 전망적 평가에서 고려해야 할 연령군 수를 설정할 때도 유사한 접근이 무방하다. 지금까지 경험은 이러한 상황에서 일반인 방호에 영향을 주지 않으면서 연령범주를 묶을 수 있음을 보이고 있다.

(80) 위에서 논의한 바와 같이 ICRP 권고의 기저 목표와 개념 관점에서 내부피폭의 연령별 선량계수를 어느 정도 묶는 것을 정당화한다. 부록A에 그러한 뭉침

의 의미에 대해 논의한다. 이 계산에서 악티나이드를 제외하고는 연령군 사이 선량 차이(보통 3배 이내)는 일반인 선량평가에서 통상 발견되는 불확도에 비해 일반적으로 작다.

(81) 따라서 지속 피폭에 대한 선량제약치 준수 목적에서 대표인에 대한 연간 선량은 세 연령범주 즉, 0-5세(소아), 6-15세(아동), 16-70세(성인)로 정의할 것을 ICRP는 권고한다. 선량계측학적 특성이 가장 빨리 변하는 소아 연령범주에 대해서는 보다 짧은 기간을 설정하여 어린 연령군의 선량과 결부된 중요성을 부당하게 축소하지 않도록 했다. 이 세 연령범주의 사용은 어떤 선원의 방사선학적 영향을 특성화하는 데 충분하고, 보다 어리고 더 민감한 집단에 대한 고려를 보장한다. 이 권고의 실제 적용을 위해서는 1세(소아), 10세(아동), 성인의 습관자료와 선량계수가 이들 세 연령범주를 대표하도록 사용해야 한다. 표3.1에 이 권고를 요약했다.

표3.1. 선량제약치 준수 판단에 권고하는 선량계수

연령범주(세)	연령범주 명칭	사용할 선량계수 및 습관자료
0-5	소아	1세
6-15	아동	10세
16-70	성인	성인

(82) 연령범주 0-5세는 태어나 모유수유 유아를 포함하지는 않는다. 대부분 경우 태어나 모유수유 유아의 선량은 0-5세 연령범주 소아에 대해 평가한 선량과 크게 다르지 않다(부록 A 참조). 그러나 일부 방사성핵종-주로 인(P)이나 알칼리 토금속류 동위원소-은 태어나 모유수유 유아에게 어머니보다 유의하게 높은 선량을 전달할 수 있다(ICRP 2001a,b). 통상 이들 핵종은 소아에게도 상대적으로 높은 선량을 전달하므로, 소아 선량계수를 사용한 소아 연령군 선량에 준수 근거를 두면 보통은 어머니나 태아 선량도 준수될 것으로 확신할 수 있다. 그럼에도 태아는 합당한 수준의 방호를 받을 자격이 있음을 ICRP는 인식한다. 따라서 만약 다른 연령군에 대해 평가한 선량에 태아에게 상대적으로 높은 선량을 주는 핵종이 상당히 기여하고 그 선량이 해당 선량제약치에 근접한다면, 정량적 권고가 준수됨을 보장하기 위해 태어나 모유수유 유아 선량을 따로 평가해야 한다. 그러한 섭취는 개인 생애의 매우 제한적 분율 기간에만 발생한다는 사실의 관점에서 태어나 모유수유 유아에 대해 평가한 선량을 정규적으로 일반인에게 적용하는 것보다 높은 값을 갖는 선량제약치와 비교할 수 있다고 ICRP는 생각한다.

그러나 태어나 모유수유 유아에 적용되는 선량제한치는 일반인 선량한도를 넘지는 않아야 한다.¹³⁾

(83) 이와 같은 연령별 선량계수 묶음은 견고한 일반인 방호체계 제공을 돕고 과학이 진보함에 따라 연령별 선량계측 정보를 계속 개발할 수 있게 한다. 세 연령범주를 사용하는 것은, ICRP가 사람들이 어떤 선원으로부터 다년간 계속 피폭함에 근거를 두고 계획피폭 및 기존피폭 상황에서 일반인에 대한 선량제한치를 도출하는 것과 일관된다고 ICRP는 믿는다.

(84) 그러나 선량재구성에서처럼 회구적 상황에서 보건영향을 평가할 때는 ICRP의 연령별 생물역동학 모델과 데이터 모두를 계속 사용할 수 있다. 이 경우 선량 평가에 필요한 장기 데이터의 구체성 정도나 품질이 ICRP가 발간한 연령별 계수가 선량의 품질을 높이고 불확실성을 줄일 지를 결정하게 된다.

(85) 사고에 대비한 계획이나 대응에서는 모든 가용한 연령별 선량계수를 사용하기를 ICRP는 계속 권장한다. 그러나 이 보고서에서 ICRP가 제안하는 뭉친 연령범주도 어떤 사고상황에는 적용 가능할 것인데 특히 사고로 인한 미래 영향을 전망적으로 평가하거나 치유 대안들을 결정할 때에 그러하다. 그 적용은 규제당국이 결정하는 것이 적절하다.

3.5. 준수 판단

(86) 결정론적 방법에서는 평가가 해당 선량제한치와 비교할 단일 선량값을 제공한다. 대표인에 대한 선량이 선량제한치보다 낮고 방사선방호가 최적화되었다면 ICRP의 목표가 달성된다.

(87) 확률론적 평가에서는 대표인을 설정하고 준수를 결정하는 것이 대체로 더 복잡하다. 부록B에 선량의 여러 분포와 함께 준수를 결정하는 목적으로 그러한 분포가 어떻게 사용되는가에 대해 설명한다. 위에서 언급했듯이 채택할 수 있는 여러 방법이 있고 다양한 선량분포를 얻을 수 있다. 따라서 확률론적 평가를 위해서는 ICRP가 특정한 방법의 사용을 처방하지는 않는다.

13) <역주> 가령 일반인 선량제한치가 0.3mSv일 때 단지 수년만 해당되는 태어나 모유수유 유아에 대해 그 수년 동안 적용하는 선량제한치는 연간 0.3mSv를 넘더라도(1mSv 미만) 방사선방호 관점에서 부당하지는 않다는 의미이다.

(88) 어떤 확률론적 선량평가에서는 분포의 모든 선량이 본질적으로 해당 선량 제약치보다 낮게 예측될 수도 있다. 이때는 준수가 쉽게 입증될 수 있을 것이다.

(89) 계획된 시설이든 기존 상황이든 개인에 대한 전망적 선량의 확률론적 평가에서는 집단에서 무작위로 선발된 사람이 대표인보다 높은 선량을 받을 확률이 약 5%보다 작도록 대표인을 정의할 것을 ICRP는 권고한다.

(90) 그러한 평가에서 수십 명 이상 사람들이 해당 선량제약치보다 높게 피폭할 것으로 나타난다면 이 사람들의 특성을 재조사할 필요가 있다. 가장 적절한 분포가 사용되었는지 알기 위해 선정된 변수에 대한 민감도분석도 고려해야 한다. 기존 피폭상황이나 집단의 극단을 반영할 수도 있는 그럴듯한 피폭상황에 있는 일반인의 의견에도 유의할 필요가 있다. 이러한 기여는 운영자 분석에는 반영되지 않았을 수 있다. 비록 이러한 기여는 대체로 낮은 피폭과 연관되겠지만, 때로는 그러한 의견이 겨누지 않았지만 추가 조사가 합당한 중요한 잠재적 피폭경로를 적시하기도 한다. 추가 분석 결과 수십 명의 선량이 해당 선량제약치를 초과할 것 같다면 피폭을 수정하기 위한 조치가 고려되어야 한다.

(91) 이전 운영에 대한 준수 평가나 기존피폭상황에서 특정 사람들에 대한 선량

표3.2. 대표인 선량을 평가하는 방법의 요약

항목	계산방법	
	결정론적	확률론적
환경농도 자료	평가 또는 측정된 농도의 분포	단일 값 변수
습관자료	범위 또는 고정값	높이 피폭하는 그룹의 평균값 또는 적절한 지역 또는 국가 데이터의 95백분위
선량계수	연령에 근거한 고정값	연령에 근거한 고정값
대표인에 대한 선량	운영자나 규제자가 선정한 방법. 집단에서 무작위로 선발된 사람이 더 높게 피폭할 확률이 약 5% 미만 이 되도록 대표인을 설정.	위 값들의 곱

의 전망적 평가를 위해서는 선량제약치 이상으로 추정된 선량은 경우별로 평가되어야 할 것으로 ICRP는 본다. 때로는 그러한 선량이 단기간만 지속되거나 전혀 일어나지 않을 수도 있다. 그러나 특정 사람들의 선량이 선량제약치를 넘고 그러한 선량이 상당기간 지속될 것으로 예상된다면, 운영자와 규제자는 선원의 감축이 필요한지를 결정해야 한다. 이러한 상황은 불확실성을 줄이거나 선량 크기를 검증하기 위한 추가 감시를 정당화 할 것이다. 이상의 고려는 이전 설계나 운영이 인가 근거를 준수하는 지를 결정하는 것과는 별개이어야 한다.

(92) 준수를 판단하는 접근과 무관하게, 해당 제약치의 준수 및 방호 최적화를 동반하는 총체적 방호체계 적용이 방사선방호를 위해 필요함을 ICRP는 강조한다. 표3.2는 이 절에서 설명한 선량평가 방법을 요약하고 있다.

제4장 대표인에 대한 기타 고려사항

4.1. 환경감시 및 모델링과 대표인의 관계

(93) 전망적 평가는 통상 환경으로 제안된 관리방출의 수용성을 판단하기 위해 수행된다. 전망적 평가는 거의 항상 모델을 사용하는데 이 모델들은 주로 환경매체 중 방사성핵종 농도를 평가하는 수단만을 제공한다. 대표인은 높은 선량을 주는 환경농도가 예상되는 장소에 있고 전술한 합리성, 지속성 및 균질성 요건을 따르는 것으로 가정해야 한다. 이 말은 그 장소가 실질적으로 사람이 있거나 있을 수 있는 곳이어야 함을 의미한다. 모델이 제시하는 시간이나 공간 범위도 이러한 의도된 용도에 적합해야 한다.

(94) 선원이 이미 존재하는 경우(지속되는 계획상황, 기존상황 또는 비상상황)에는 환경 중에서 방사성핵종의 농도 준위를 감시하는 것이 그러한 핵종의 환경농도를 구하는 가장 견실한 방법일 것이다. 이러한 감시는 ICRP 43(1985)의 주안점이었다. 감시 프로그램은 방사성핵종의 원천과 검출한계를 고려하여 지배적 피폭경로나 방사성핵종을 식별하는 목적을 따라야 한다. 환경 모델링도 중요하고 보완적인 감시 요소이다. ICRP 43은 선량을 평가하는 데 감시와 모델링의 용도 및 한계에 대한 지침을 제공한다.

4.2. 잠재피폭 상황

(95) 계획피폭상황에서는 연간 선량은 일어나거나 미래에 확실히 발생할 것으로 본다. 그러나 피폭이 일어날 것이 불확실하고 작은 발생확률로만 선량이 기인하는 상황도 있다. 이러한 상황을 ‘잠재피폭’이라 부른다.¹⁴⁾ 잠재피폭은 사람실수, 기기고장, 방사선원이 관련된 사고, 매우 불균질한 방사성 잔류물 등 광범한 여건을 포괄한다.

(96) ICRP가 권고한 바에 따르면 잠재피폭은 어떤 방사선피폭이 발생할 확률과

14) <역주> 잠재피폭은 실제로 피폭도 아니고 피폭상황도 아니다. 잠재피폭이란 확률이 낮은 사고가 발생하여 심각한 피폭을 줄 ‘가능성’을 의미하는 것으로서 ‘위험’ 또는 ‘리스크’로 이해하는 것이 적절하다.

그러한 피폭이 일어난 경우 특정 해로움이 발생할 확률¹⁵⁾의 결합에 근거하여 평가되어야 한다(ICRP 1993). 이들 확률의 곱은 그 보건영향이 일어날 무조건부 확률이다. 그러나 의사결정 목적에서는 어떤 선량을 초래할 확률은 선량 자체와는 분리하여 제시하는 것이 더 내용이 있을 수 있음에 주의할 필요가 있다(ICRP 2000a).

(97) 잠재피폭상황에 대해 대표인을 식별하는 데는 평가에서 다른 인자들과 함께 피폭확률을 고려해야 한다. 피폭이 실제로 발생한 경우 그러한 사람이 받을 연간 선량은 비록 그 선량 크기가 어떤 위험인자를 사용할지 결정에 중요할지라도 충분한 지표는 못된다. 따라서 습관, 위치, 방사성핵종 환경농도를 특성화하는 외에 사람들이 피폭할 확률도 산정하는 것이 필요하다. 사실 이 확률은 피폭이 발생되게 하는 특정 위치에 사람이 있을 확률, 특정 활동에 종사할 확률을 포함하는 여러 확률의 조합일 것이다. 결정론적 평가에서는 계산에 포함해야 할 피폭 확률 값의 선정을 필요로 한다. 확률론적 평가에서는 정보가 가용하다면 어떤 분포를 사용할 수도 있다.

(98) 환경 잠재피폭의 한 예는 드물게 분포하는 매운입자hot particle에 의해 지역이 오염된 경우가 되는데, 프랑스령 폴로네시아 뉴루로아 산호초에 있는 작은 섬들 Colette, Arial 및 Vesta에서 발견되는 플루토늄 매운입자에 의해 형성되는 방사선상황의 평가에서 적시된 바 있다(IAEA 1998). 상대적으로 균일한 오염이라는 가정에 반해 사람이 하나의 매운입자에 노출될 작은 확률이 있을 수 있지만 그 입자가 내부피폭을 초래할 확률은 더욱 작다. 그러한 시나리오가 일어날 것 같지는 않지만, 사람들이 그 오염지역에 노출되고 매운입자 하나가 상처를 통해 들어간다면 그로 인한 국부선량은 매운입자가 부근에 마이크로 퀘사와 같은 국부 결정론적 영향을 초래할 수 있을 정도로 높아진다. 이러한 피폭의 잠재성은 매운입자들이 환경에 존재하는 한 남게 된다.¹⁶⁾

15) <역주> 원문은 단순히 ‘해로움 확률’로 적고 있지만 해로움을 구체화하지 않으면 확률을 평가할 수 없다. 그래서 ‘특정 해로움(예: 조기사망)이 발생할 확률’로 풀어 적었다.

16) <역주> 이러한 피폭을 잠재피폭으로 분류해야 하는지 의문이 제기될 수도 있다. 정상적 방사선 방호 개념에서는 사람들이 이러한 매운입자에 피폭할 가능성이 현존한다면(비록 그 확률이 낮더라도) 방호를 위한 조치가 요구될 것이므로(원전에서 매운입자 관리처럼) 계획피폭 또는 기존피폭 상황으로 간주할 수도 있어 보인다. 그 확률이 충분히 낮아 어떤 방호대책의 강구를 정당화하지 못할 수준이라면 면제위험의 범위에 있다고 볼 수 있으므로 잠재피폭상황도 아니기 때문이다.

(99) 잠재피폭에 대한 정량적 접근법은 피폭이 간헐적이거나 드문 다른 피폭상황에도 적용할 수 있다.

4.3. 대표인 특성화에 이해당사자 입력의 가치

(100) ICRP 82(2006)에서 밝혔듯이 광의의 의사결정 과정에서 이해당사자 역할을 인정해야 한다. ICRP 82에서는 지속되는 피폭상황에서 이해당사자 역할을 일반인 방호 맥락에서 설명했다. ICRP 82 발간 이후 ICRP는 방호체계에서 이해당사자 역할을 계속 생각하고 지지해 왔다. 그러나 이 역할이 다른 상황까지 포함하도록 확장하여 정의하고 명확히 할 필요가 있다고 ICRP는 믿는다. 이 주제에 대한 추가 정보는 이 간행물 ICRP 101B편 ‘방사선방호 최적화: 과정의 확장’에서 제공된다. 그러나 이 보고서에서 설명하는 개인의 특성화에서 이해당사자 참여와 관련한 여러 핵심 원칙을 제공하는 것은 중요하다.

(101) 의사결정자와 운영자는 개인을 특성화하고 준수를 판단하는 데 명확히 정의된 역할과 책임이 있다. 그 밖에도 다른 부류 사람들이나 그룹도 관여된다. 이들이 이해당사자인데 자신들의 안녕에 직접 영향을 미치는 정책이나 권고에 개인적, 경제적, 보건적 또는 법적 이해관계가 있거나 자신들의 환경과 이해관계가 있는 사람들을 포함한다. 대부분 경우 이해당사자 역할은 의사결정 과정에서 돕거나 정보를 제공하는 것이다. 이해당사자가 의사를 결정하거나 권고할 권한이나 책임을 가지는 경우도 있다(예: 국가에서 지명한 위원회나 이사회). 그러나 일반적으로는 운영자와 규제자가 의사결정자이고 이해당사자는 결정할 의사와 관련한 정보나 지침을 제공하는 것을 돕는다.

(102) 대표인 특성을 규정하는 경우에도 이해당사자 참여가 중요한 역할을 할 수 있다. 이해당사자는 그들 지역에 고유한 습관자료와 관련한 중요한 입력을 제공할 수 있다. 특히 이해당사자는 습관자료의 합리성, 지속성, 균질성을 결정하는데 도움이 될 수 있다. 이해당사자와 협력은 대표인 특성의 품질과 이해, 그리고 수용성을 크게 개선할 수 있고 또, 과정과 결과에 대한 지원을 견고하게 한다.

(103) 만약 이해당사자 참여가 전반적 의사결정 과정의 일부로 활용된다면 그 과정이 모든 당사자에게 효율적이고 의미가 있도록 지침을 수립할 필요가 있다. 전부는 아니지만 일부 지침은 (1) 과정의 시작부터 이해당사자 역할에 대한 명확한 규정, (2) 참여 계획에 대한 합의, (3) 이해당사자 참여에 대한 문서화와 회신

에 대한 규정, (4) 이해당사자 참여는 복잡하고 이행에 추가 자원을 필요로 할 수 있음에 대해 운영자나 규제자가 인지하는 것 등이다.

(104) 이해당사자 참여 개념은 문화적, 사회적, 정치적 이유 때문에 국가마다 상당히 다를 수 있음을 ICRP는 이해한다. 따라서 이해당사자 참여의 범위와 가치는 각국의 각개 당국별로 고려되어야 한다. 그럼에도 이해당사자 참여가 ICRP 방호체계의 이행, 이해 및 수용성에 중요한 역할을 한다고 ICRP는 믿는다.

부록 A

일반인 선량평가에 사용하기 위한 연령범주의 분석

A.1. 서론

(A1) ICRP는 선량계수를 배태아, 유아, 그리고 집단의 6개 연령그룹에 대해 제시해 왔다. 이 부록은 해당 선량제약치와 비교 목적에서 특히, 전망적 평가에서 연령군 수를 3개로 묶을 수 있을지를 검토한다(소절 3.4 참조). 세 연령군은 0-5세(유아), 6-15세(소아), 그리고 16-70세(성인)이다. 권고의 실질 이행을 위해서는 1세 유아, 10세 소아, 성인의 선량계수와 습관자료를 이 세 연령범주를 대표하여 사용하게 된다.

A.2. 배경

(A2) 1980년대 중반, 집단의 모든 연령그룹에 대해 흡입과 취식에 의한 방사성 핵종 섭취로부터 받는 선량을 평가할 때 사용할 수 있는 선량계수(단위 섭취량 당 선량, Sv/Bq)의 필요성이 있음이 분명해졌다. ICRP 제2분과위원회 작업그룹은 상이한 연령대를 위한 선량계수를 산출하는 데 사용하도록 연령별 생물역동학 모델을 개발하였다. 그 결과로서 31개 원소의 선발된 핵종들에 대해 연령별 선량계수들을 간행물 시리즈(ICRP 1989, 1993, 1995, 1906a,b)에 주었다. 연령 증가와 함께 체중 영향이나 선량계측 또는 방사성핵종의 생물역동학 변화를 수용하기 위해 제2분과위원회는 6개 대표 연령그룹 즉, 3개월 영아, 1세, 5세, 10세, 15세 아동, 그리고 성인에 대한 선량계수를 제공했다. 상이한 연령군에 대해 선량계수가 필요한 여건에서는 다음과 같이 해당 연령범위에 대한 선량계수를 사용할 수 있다고 권고했다.

- 0~1세: 3개월 영아
- 1~2세: 1세 소아
- 2~7세: 5세 소아
- 7~12세: 10세 아동
- 12~17세: 15세 아동
- 17세 이상: 성인.

(A3) 근래에 배태아 선량계수가 ICRP 88(2001a,b)로 발간되었다. 모유수유 유아의 방사성핵종 섭취에 대한 선량계수도 개발되었다(ICRP 2005).

(A4) ICRP가 발간한 6개 연령범주에 대한 선량계수는 유럽 기본안전기준(EU 1996) 및 국제안전기준(IAEA 1996)을 비롯하여 여러 나라의 규정이나 지침에 채택되었다.

(A5) 어떤 선량재구성 연구, 사고 대응 계획수립이나 대응에서 선량평가처럼 사람들 선량에 대한 구체적 정보가 필요한 경우에는 이들 선량계수를 사용하는 것이 적절하다. 그러나 많은 경우 이 정도 상세수준이 필요하지 않으므로 보다 소수 연령범주의 선량계수를 사용하는 것이 편리할 수 있다. 그렇게 소수 연령범주에 대한 연령별 선량계수가 선량평가에 적절한지를 결정하는 데는 집단 내 상이한 연령군에서 방사성핵종 섭취에 기인하는 선량을 검토하는 것이 중요하다. 선량계수만 비교하는 것은 충분하지 않다. 평가결과를 비교할 방사선학적 기준은 기본적으로 선량으로 명시되기 때문에 습관자료도 고려되어야 한다. 연령그룹별로 식품 소비량이 다르므로 동일 식품에 대해서 상이한 연령그룹에 의한 방사성핵종 섭취는 같지 않을 것이다. 따라서 다른 연령그룹에 의한 동종 식품 소비에서 상대적 선량은 연령별 선량계수뿐만 아니라 연령별 소비율과 기타 생물리적 변수에 따라서도 달라질 것이다.

(A6) 이 부록에서는 식품 중 방사성핵종 취식이나 공기 중 방사성핵종 흡입으로 인한 집단의 선정된 세 연령그룹에게 주는 선량을 계산함으로써 소수 연령범주 선량계수를 사용하는 대안을 검토한다. 그 결과를 6개 범주 선량계수 모두를 사용하여 얻은 선량과 비교한다.

A.3. 방법

(A7) 식품 취식에 대해 단위 방사능 농도의 우유, 야채, 쇠고기 취식, 그리고 공기 중 단위 농도 흡입에 대해 4개 연령군(1, 5, 10, 15세 아동)의 선량을 따로 산출하였다. 사용된 섭취율을 표 A1에 보였다. 이 예시 값은 영국 자료를 이용했고 Smith와 Jones(2003)로부터 인용한 것이다. 특정 식품의 소비율은 국가마다 다를 수 있지만 그런 자료는 대체로 일반경향을 따른다. 예를 들어 우유는 어린 층에서 더 소비하고 고형 음식은 성인이 더 소비한다. 따라서 이 분석의 전반적 결론은 일반적으로 적용 가능할 것으로 예상된다. 선량계산은 ICRP가 선량계수

표 A1. 선량계산에 사용된 습관자료 예시

연령	연간 소비량(kg)			공기 흡입률 (m ³ /h)
	우유	야채	쇠고기	
3개월	350	15	10	0.12
1세	320	30	20	0.22
5세	280	32.5	25	0.37
10세	240	35	30	0.64
15세	260	45	35	0.84
성인	240	80	45	0.92

를 제공한 모든 방사성핵종들에 대해 수행되었다. 나아가 어머니의 방사성핵종 섭취로부터 9개월간 태아 선량과 후속 3개월간 모유수유에 의한 선량도 일반인 중 여성에 대해 선량계수가 주어진 방사성핵종(단, 표 A2-A4에 밝힌 핵종은 제외)에 대해 계산되었다. 방사성핵종 흡입에 대한 비교를 위해서는 어머니가 9개월간 흡입한 방사성핵종으로부터 태아가 받는 선량과, 후속 3개월간 3개월 유아가 흡입하여 받는 선량, 그리고 같은 3개월간 어머니의 흡입에 따른 모유수유로 인한 선량을 계산하였다. 이 계산은 가능한 결과의 범위를 결정할 것으로 간주되는 핵종 세트에 대해 수행했다(표 A6 참조).

A.4. 결과

(A8) 각 피폭경로에 대해 선정된 방사성핵종들의 결과를 표A2 ~표A6에 선량비로 주었다. 1세 소아 선량이 태아부터 5세까지 연령 범위 소아의 선량을 대표할 수 있는지를 보이기 위해, 태아/3개월 모유수유 유아 선량에 대한 1세 소아 선량의 비와 5세 소아 선량에 대한 1세 소아 선량의 비를 표에 제시하였다. 마찬가지로 10세 아동 선량이 6-15세 아동 선량을 대표할 수 있는지를 보이기 위해 15세 아동 선량에 대한 10세 아동 선량의 비를 제시하였다. 이 계산결과에서 악티나이드를 제외하고는 서로 다른 연령군 사이 선량 차이가 일반인 선량의 전망적 평가에서 전형적으로 발견되는 불확도에 비해 대체로 작음(일반적으로 3배 이내)이 분명하다. 악티나이드에서 선량계수는 생애피폭의 누적예탁을 고려하고 있는데, 이는 주어진 한 해 동안 선량을 과대평가하는 경향이 있다. 한정된 연령군 수를 사용함으로써 야기되는 최대 과소평가는 태아/모유수유 유아의 흡입 피폭경로, 그리고 같은 연령군에 대한 야채 취식 피폭경로 모두에서 약 4배이다.

A.5. 결론

(A9) ICRP가 선량계수를 발행한 모든 방사성핵종에 대한 결과를 표 A7에 요약하였는데 선량비가 약 3-4배 이내에 있음을 알 수 있다. 따라서 많은 경우 1세 소아에 대해 계산한 선량이 태아부터 5세까지 연령군 범위의 선량을 적절히 대표할 수 있다고 결론지을 수 있다. 마찬가지로 10세 아동 선량은 6-15세 연령 범위 아동의 선량을 적절히 대표할 수 있다.

(A10) 유아(1세 선량계수), 아동(10세 아동 선량계수) 및 성인을 대표하는 보다 한정된 세트의 연령별 선량계수 사용은 소비율 자료의 가용성과 일치한다.¹⁷⁾ ICRP가 선량계수를 제시해 왔던 6개 연령군에 대해 식품소비율 자료는 대부분 경우 가용하지 않을 것 같다. 3개 광범군(유아, 아동, 성인)에 대한 소비율 자료가 국가 단위에서 더 가용할 것으로 보인다. 그러나 6개 연령군에 대한 선량도 선량 재구성 연구, 사고에 대한 계획이나 대응에서는 필요할 수 있다.¹⁸⁾

17) <역주> 즉, 식품 소비율 자료도 대체로 1세, 10세, 성인 그룹으로 제공되는 경우가 많다.

18) <역주> 선량재구성 연구나 비상대책은 주로 상당히 높은 선량과 관련된다. 일상적으로 낮은 선량에서는 연령군 축소로 초래될 수 있는 3-4배의 과소/과대 평가가 중요한 의미를 지니지는 않지만 상당히 높은 선량(예: 50 mSv)에서 3-4배는 주의가 필요한 수준 선량(150-200 mSv)까지 이르게 되므로 가능하다면 기존처럼 6개 연령군 계수를 적용하여 보다 구체적으로 평가할 가치가 있음을 의미한다.

표 A2. 예시적 습관자료를 사용하여 계산한 우유 섭취로 인한 선량비

방사성핵종	1세 소아 : 태아 [†] 및 3개월 모유수유 유아	1세 소아 : 5세 소아	10세 아동 : 15세 아동
H-3	2.27	1.77	1.18
H-3(유기결합)	2.92	1.88	1.25
C-14	3.21	1.85	1.30
Na-22*	6.61	2.04	1.37
Mg-28*	32.05	2.16	1.54
P-32*	1.32	2.31	1.58
S-35(유기물)	5.71	2.29	1.55
K-42*	22.73	2.29	1.47
Ca-45	0.94	2.15	1.28
Fe-59	17.47	1.98	1.40
Co-60	18.7	1.82	1.29
Ni-63	21.02	2.09	1.44
Zn-65	6.51	1.89	1.31
Se-75	6.3	1.79	1.79
Sr-90	2.7	1.78	0.69
Zr-95	25.44	2.13	1.46
Nb-95	15.37	2.03	1.37
Mo-99	13.43	2.22	1.34
Tc-99m	10.67	2.06	1.42
Ru-106	198.0	2.24	1.61
Ag-110m	11.43	2.05	1.41
Sb-125	22.24	2.05	1.38
Te-127m	22.22	2.17	1.60
I-131	7.74	2.06	1.41
Cs-137	3.25	1.43	0.71
Ba-133	15.9	1.82	0.58
Ce-144	2203.	2.35	1.56
Po-210	56.55	2.29	1.50
Np-237	102.9	1.71	0.92
Pu-239	78.32	1.45	1.04
Am-241	241.1	1.57	1.02
Cm-242	284.8	2.23	1.48

† 지속 섭취에서 여성 일반인에 대한 선량계수에 근거(ICRP 2001a,b)

* 태아 계산에서 이들 방사성핵종에 대한 선량계수는 종사자 어머니에 대한 것이다 (Phipps 등 2001).

표 A3. 예시적 습관자료를 사용하여 계산한 야채 취식으로 인한 선량비

방사성핵종	1세 소아 : 태아 [†] 및 3개월 모유수유 유아	1세 소아 : 5세 소아	10세 아동 : 15세 아동
H-3	0.64	1.43	0.99
H-3(유기결합물)	0.82	1.52	1.06
C-14	0.90	1.49	1.09
Na-22*	1.86	1.65	1.16
Mg-28*	9.01	1.75	1.30
P-32*	0.37	1.87	1.33
S-35(유기물)	1.61	1.85	1.31
K-42*	6.39	1.85	1.24
Ca-45	0.26	1.74	1.08
Fe-59	4.91	1.60	1.18
Co-60	5.26	1.47	1.08
Ni-63	5.91	1.69	1.21
Zn-65	1.83	1.52	1.11
Se-75	1.77	1.45	1.51
Sr-90	0.76	1.43	0.58
Zr-95	7.15	1.72	1.23
Nb-95	4.32	1.64	1.16
Mo-99	3.78	1.79	1.13
Tc-99m	3.00	1.67	1.19
Ru-106	55.7	1.81	1.36
Ag-110m	3.22	1.66	1.19
Sb-125	6.25	1.66	1.17
Te-127m	6.25	1.75	1.35
I-131	2.18	1.66	1.19
Cs-137	0.91	1.15	0.60
Ba-133	4.47	1.47	0.49
Ce-144	620	1.89	1.32
Po-210	15.9	1.85	1.26
Np-237	28.9	1.38	0.78
Pu-239	22.0	1.17	0.88
Am-241	67.8	1.26	0.86
Cm-242	80.1	1.80	1.24

† 지속 섭취에서 여성 일반인에 대한 선량계수에 근거(ICRP 2001a,b)

* 태아 계산에서 이들 방사성핵종에 대한 선량계수는 종사자 어머니에 대한 것이다(Phipps 등 2001).

표 A4. 예시적 습관자료를 사용하여 계산한 쇠고기 취식으로 인한 선량비

방사성핵종	1세 소아 : 태아 [†] 및 3개월 모유수유 유아	1세 소아 : 5세 소아	10세 아동 : 15세 아동
H-3	0.76	1.24	1.10
H-3(유기결합물)	0.97	1.32	1.16
C-14	1.07	1.29	1.20
Na-22*	2.20	1.43	1.27
Mg-28*	10.7	1.51	1.43
P-32*	20.4	1.62	1.47
S-35(유기물)	1.90	1.60	1.44
K-42*	7.58	1.60	1.37
Ca-45	0.31	1.51	1.19
Fe-59	5.82	1.39	1.30
Co-60	6.23	1.27	1.19
Ni-63	7.01	1.46	1.33
Zn-65	2.17	1.32	1.22
Se-75	2.10	1.25	1.66
Sr-90	0.90	1.24	0.64
Zr-95	8.48	1.49	1.36
Nb-95	5.12	1.42	1.27
Mo-99	4.48	1.56	1.24
Tc-99m	3.56	1.44	1.32
Ru-106	66.0	1.57	1.50
Ag-110m	3.81	1.44	1.31
Sb-125	7.41	1.44	1.29
Te-127m	7.41	1.52	1.49
I-131	2.58	1.44	1.31
Cs-137	1.08	1.00	0.66
Ba-133	5.30	1.27	0.54
Ce-144	734	1.64	1.45
Po-210	18.9	1.60	1.39
Np-237	34.3	1.20	0.86
Pu-239	26.1	1.02	0.96
Am-241	80.4	1.10	0.94
Cm-242	95.0	1.56	1.37

† 지속 섭취에서 여성 일반인에 대한 선량계수에 근거(ICRP 2001a,b)

* 태아 계산에서 이들 방사성핵종에 대한 선량계수는 종사자 어머니에 대한 것이다(Phipps 등 2001).

표 A5. 예시적 습관자료를 이용하여 계산한 흡입에 의한 선량비

방사성핵종	폐흡수율*	1세 소아 : 3개월 유아	1세 소아 : 5세 소아	10세 아동 : 15세 아동
H-3(화합물)	F	1.41	1.08	1.06
H-3(화합물)	M	1.46	1.15	1.18
H-3(화합물)	S	1.53	0.94	1.03
H-3(OBT)		1.83	0.93	1.02
C-14	F	2.01	1.11	1.16
C-14	M	1.46	0.98	0.85
C-14	S	1.64	0.92	0.88
Na-22	F	1.38	1.14	1.22
Mg-28	F	1.63	1.27	1.36
Mg-28	M	1.81	1.22	1.17
P-32	F	1.15	1.39	1.4
P-32	M	1.25	1.11	1.01
S-35(SO ₂)		1.29	1.15	1.23
S-35(CS ₂)		1.28	1.19	1.24
K-42	F	1.15	1.35	1.32
Ca-45	F	0.96	1.27	1
Ca-45	M	1.34	0.99	0.85
Ca-45	S	1.47	0.99	0.84
Fe-59	F	1.13	1.09	1.23
Fe-59	M	1.32	0.98	0.91
Fe-59	S	1.4	0.95	0.87
Co-60	F	1.41	0.98	1.11
Co-60	M	1.48	0.96	0.95
Co-60	S	1.71	0.87	0.9
Ni-63(카보닐 니켈)		1.54	0.99	1.04
Ni-63	F	1.59	1.08	1.11
Ni-63	M	1.39	1.03	1.01
Ni-63	S	1.64	0.95	1
Zn-65	F	1.22	1.04	1.16
Zn-65	M	1.4	1.04	0.96
Zn-65	S	1.62	0.91	0.92
Se-75	F	1.41	1.05	1.59
Se-75	M	1.53	1.07	1
Se-75	S	1.54	0.96	0.95

표 A5. (계속)

방사성핵종	폐흡수율*	1세 소아 : 3개월 유아	1세 소아 : 5세 소아	10세 아동 : 15세 아동
Sr-90	F	0.73	1.00	0.59
Sr-90	M	1.34	1.01	0.78
Sr-90	S	1.75	0.88	0.86
Zr-95	F	1.68	1.02	1.14
Zr-95	M	1.47	0.98	0.88
Zr-95	S	1.45	0.94	0.87
Nb-95	F	1.39	1.15	1.22
Nb-95	M	1.40	1.00	0.88
Nb-95	S	1.40	0.97	0.87
Mo-99	F	1.36	1.31	1.38
Mo-99	M	1.34	1.19	1.04
Mo-99	S	1.28	1.19	1.08
Tc-99m	F	1.33	1.26	1.22
Tc-99m	M	1.40	1.15	1.08
Tc-99m	S	1.41	1.14	1.07
Ru-106(RuO ₄)		1.26	1.07	1.28
Ru-106	F	1.38	1.23	1.33
Ru-106	M	1.44	1.02	1.01
Ru-106	S	1.62	0.98	0.98
Ag-110m	F	1.47	1.11	1.17
Ag-110m	M	1.47	0.98	0.99
Ag-110m	S	1.63	0.94	0.91
Sb-125	F	1.43	1.09	1.17
Sb-125	M	1.47	0.95	0.89
Sb-125	S	1.66	0.94	0.87
Te-127m(증기)		1.28	1.16	1.25
Te-127m	F	1.22	1.28	1.33
Te-127m	M	1.36	1.03	0.91
Te-127m	S	1.48	0.98	0.89
I-131(CH ₃ I)		1.83	1.04	1.17
I-131(I ₂)		1.73	1.01	1.18
I-131	F	1.83	1.16	1.32
I-131	M	1.25	1.09	1.05
I-131	S	1.29	1.05	0.91
Cs-137	F	1.13	0.89	0.64
Cs-137	M	1.48	0.96	0.90
Cs-137	S	1.67	0.85	0.87

표 A5. (계속)

방사성핵종	폐흡수율*	1세 소아 : 3개월 유아	1세 소아 : 5세 소아	10세 아동 : 15세 아동
Ba-133	F	0.75	1.03	0.47
Ba-133	M	1.22	0.93	0.71
Ba-133	S	1.66	0.86	0.90
Ce-144	F	1.38	1.15	1.24
Ce-144	M	1.54	1.08	1.02
Ce-144	S	1.57	0.97	0.96
Po-210	F	1.19	1.30	1.29
Po-210	M	1.34	0.98	0.88
Po-210	S	1.43	0.97	0.88
Np-237	F	1.74	0.92	0.81
Np-237	M	1.67	0.85	0.76
Np-237	S	1.59	0.91	0.82
Pu-239	F	1.75	0.79	0.83
Pu-239	M	1.76	0.76	0.78
Pu-239	S	1.66	0.86	0.85
Am-241	F	1.83	0.89	0.83
Am-241	M	1.73	0.80	0.76
Am-241	S	1.59	0.88	0.85
Cm-242	F	1.43	1.25	1.16
Cm-242	M	1.50	0.97	0.87
Cm-242	S	1.45	0.94	0.86

* F: 빠름; M: 보통; S: 느림.

표 A6. 태아 시기 어머니 흡입과 유아 시기 모유수유 및 흡입으로 인한 선량과 1세 소아 선량비 예시

방사성핵종	폐 흡수등급	1세 소아 : 태아, 모유수유 및 흡입*
P-32	F(가정)	0.22
Ca-45	M	1.01
Sr-90	M	1.73
I-131	F	0.78
Cs-137	F	0.53
Pu-239	M	5.25

* 9개월간 어머니 흡입에 의한 선량에 3개월 모유수유(어머니 흡입) 및 3개월 유아 흡입에 의한 선량의 합. 1세 소아 선량은 12개월간 소아가 등급 F, M 물질 흡입을 가정한 것임.

표 A7. 피폭경로별 모든 방사성핵종에 대해 예시적 습관자료를 사용하여 계산한 선량비의 최소 및 최대값

피폭경로	비율	최소	최대
우유섭취	1세 유아 : 태아와 3개월 모유수유 유아*	0.94	313000
	1세 소아	1.14	2.51
	10세 아동	0.49	3.15
야채 취식	1세 유아 : 태아와 3개월 모유수유 유아*	0.26	88000
	1세 유아 : 5세 소아	0.92	2.03
	10세 아동 : 15세 아동	0.41	2.66
쇠고기 취식	1세 유아 : 태아와 3개월 모유수유 유아*	0.31	104000
	1세 유아 : 5세 소아	0.80	1.76
	10세 아동 : 15세 아동	0.46	2.93
흡입	1세 유아 : 3개월 유아	0.55	2.51
	1세 유아 : 5세 소아	0.54	1.65
	10세 아동 : 15세 아동	0.41	2.84

* 일반인 여성에 대해 선량계수가 발행된 핵종들(ICRP 2001a,b).

부록 B

확률론적으로 평가한 일반인 선량의 준수 판단

B.1. 서론

(B1) 일반인 선량을 확률적으로 평가하고 불확도를 고려하게 되면 가능한 선량 분포를 얻게 된다. 기술발달에 따라 선량평가에 내재하는 불확도를 고려하는 능력이 향상되면 장차 확률론적 방법이 더욱 빈번히 이용될 것이다. 또한, 확률론적 평가의 적용기술이 규제자, 작업자 및 이해당사자에게 보다 친숙해지면 그러한 평가가 널리 파급될 것으로 기대된다. 그래서 ICRP는 준수 판단 목적으로 선량의 결정론적 평가(점추정)보다는 선량분포를 사용하는 지침을 제공할 필요가 있다. 이 부록은 확률론적 평가에서 얻은 선량분포를 논의한다.

(B2) 어떻게 선량을 확률론적으로 평가할 것인지를 처방하는 것은 ICRP 업무 범위 밖이며, 다양한 방법들이 존재한다. 어떤 선량분포에서는, 선량분포의 극단적 상단도 선량제한치¹⁹⁾보다 충분히 낮을 수 있다. 이때는 준수가 충분하다고 바로 판단할 수 있다. 그러나 확률론적 평가는 선량분포의 상단이 선량제한치를 초과하는 분포도 보일 수 있다. 이 경우, 선량제한치를 준수하여 일반인이 보호됨을 확신할 수 있도록 추가 지침이 필요하다.

(B3) 선량의 확률론적 평가를 고려함에 있어 평가가 회구적retrospective인지 전망적prospective인지 또, 상황이 계획피폭인지 기존피폭인지를 구분하는 것이 중요하다. 사람의 전망적 피폭은 계획상황 또는 기존상태일 수 있다. 회구적 피폭은 통상 특정 사람들의 기존피폭상황(또는 이전의 계획피폭상황)에 적용된다. 다음 절에서 이들 피폭상황에 대해 설명한다.²⁰⁾

19) <역주> 원문은 ICRP가 설정한 선량제한치로 적고 있으나 수정했다. 선량제한치는 특정 선원에 대해 설정되는 것이므로 운영자나 해당 규제자가 설정한다. ICRP는 선량제한치의 가능한 범위만 제시한다.

20) <역주> 이 보고서는 2007년 권고(ICRP 103)에서 수립된 새로운 방사선방호체계 이전에 발행되었기 때문에 피폭상황에 대한 표현이 기본권고와 일치하지 않는 부분들이 있다. 따라서 역주자가 부분적으로 내용을 약간 수정하였다.

B.2. 회구선량과 전망선량

(B4) 방사선원에 대한 위험평가와 그 해석 방법은 영향이 과거에 있었는지(회구적 평가) 미래에 대한 것인지(전망적 평가)에 따라 달라진다. 전망평가는 새로 설계되는 시스템, 장치, 시설, 혹은 기존 선원의 장래 운영에 적용될 수 있다. 어떤 시간 틀이든 유사한 수학적, 확률론적 기법이 사용될 수 있으나, 해석이 추구하는 의문은 다른 것이 보통이다.

(B5) 회구적 평가는 과거의 급성피폭이나 오래 지속된 만성피폭에 적용될 수 있다. 회구적 평가는 피폭집단에 대한 역학연구를 지원하기 위해 선량이나 위험 평가를 추구할 수 있다. 또, 오염지역 치유와 관련한 의사결정이나, 건강 또는 재산 손실을 주장하는 사람에게 보상하는 의사결정을 위한 정보도 제공할 수도 있다. 이 경우 피폭은 이미 발생한 상태이다(때로는 피폭이 계속되고 있을 수도 있음). 원칙적으로 피폭자 개개인을 확인 가능하고, 비록 단편적이고 불확실한 정보일 수도 있지만 그 선량을 재구성할 수도 있다. 피폭자는 특정 사람들이며, 그 평가 결과는 확률론적 불확도 분석 맥락에서 제공된다. 이러한 분석의 요소는 선원, 환경에서 수송, 그리고 결국 사람이 시간에 걸쳐 피폭할 환경매체 중 방출된 방사성핵종의 농도의 불확도를 포함할 것이다. 다른 불확도 성분으로서 평가에 영향을 미치는 개인 습관에 대한 자료와 연관되는 것도 있다(예: 오염지역에서 보내는 시간, 소비하는 오염식품의 양, 당해 피폭 시 연령). 이러한 정보는 전문가가 고안하고 분석하는 설문조사로 획득하게 되고 설문조사의 불확도는 그 분석에 근거할 것이다. 선량과 위험의 불확도는 이들 요소(선원, 환경 및 개인 습관)에 의해 영향을 받을 것이다.

(B6) 회구적 평가에서 특정 사람들의 선량분포는 여러 목적에서 필요하다. 우선적으로, 그 정보는 역학연구에 사용될 수 있고 또, 만약 선원이 계속 존재한다면 피폭 감소를 위한 추가 조치가 합당한지 의사결정자에게 알리는 데도 사용될 것이다. 회구적 선량은 이미 발생했으므로 그 선량은 ICRP의 방호 범위 밖에 있다. 그러나 그러한 평가를 위한 유용한 지침을 ICRP 권고가 제공할 수는 있다.

(B7) 전망적 평가는 종종 계획된 시설의 설계 및 부지 계획에 관한 질문에 답을 돕고 규정을 준수함을 목표로 한다. 이 경우에는 피폭집단이 불분명하므로 분석은 다양한 가정에 근거해야 한다. 이와 관련하여 대표인 개념은 임시로 설정한 설계, 위치, 운영 가정에 근거하는 예비평가에 대해 지침을 제공할 수 있다. 이러

한 대표인은 피폭집단에서 일부 사람들에게서 합리적으로 기대되는 습관, 물리적 특성 및 위치에 각각 근거한 피폭 시나리오에 의해 정의된다. 그러나 대표인의 위치, 물리적 특성, 습관은 피폭집단에서 발생이 거의 불가능한 최악의 조합에 해당해서는 안 된다. 분석을 현존하는 시설의 현재 및 미래 운영에 적용할 때는 지금 있는 피폭집단을 알 것이고 잠재적으로 높은 선량의 실재를 조사하는 것도 가능하다. 이 경우에도 1차 운영지침을 제공하는 데 개인의 습관 분석을 적용할 수 있으며, 만약 비정상적 피폭 그룹이 발견되거나 일반인에 대한 ICRP의 선량 제약치를 넘는 어떤 선량이 발견되면 조정하게 된다.

(B8) 제 B5항과 B6항에 설명했듯이 전망적 평가의 불확도 분석은 회귀적 평가에서 불확도 분석과는 구분해야 한다. 전망적 평가를 위한 대표인은 피폭집단의 실제 구성원이 아니며 구체적 개인과 유사하지 않을 수도 있다. 그보다는 운영지침의 기준을 정의하기 위한 수학적 조립으로 볼 수 있다. 이 대표인은 집단 대부분에 대해 평가된 선량에 비해 높을 것으로 예상되는 선량을 받을 수 있다는 가정에 기초한다. 계산된 이 선량은 피폭집단에서 전혀 현실화되지 않을 수도 있다. 그러므로 선원이나 환경과 관련된 불확도를 개인을 정의하는 인자(예: 호흡률, 나이, 식습관, 특정 피폭상황에 처하는 시간분율)에 대해 해석자가 부여한 값의 범위와는 구분하는 것이 중요하다.

(B9) 개인에 대한 이들 변수의 변동범위는 불확도 분포를 구성하지 않으며 그 변수들은 해석자가 설정하는 인자일 뿐이다. 이들 변수의 변역이 선원으로부터 방출, 수송, 방출된 방사능의 환경매질 내 농도를 나타내는 불확도 분포와 확률론적으로 결합될 때는 인위적 변역과 실제 불확도의 복합분포 해석은 단순하지 않다. 개인은 영향을 받는 집단에서 무작위 선발된 사람으로 해석하는 것이 합리적이지 않게 된다. 선량의 최종 불확도 분포가 실제 선원과 환경적 불확도를 반영하도록 남겨두고, 개인을 정의하는 인자에 대해 약간 보수적인 값이나 고정된 중앙값으로 명시하는 것이 바람직할 것 같다. 만약 인자들에 대한 잠재적 선량의 민감도 분석이 필요하다면, 각 분포가 그 개인에게서 관심 대상 인자에 해당하는 다중 선량분포를 생성할 수 있을 것이다. 이를 실행하면 잠재적 선량분포의 높은 백분위(아마도 95백분위)의 거동을 지시할 것이며, 잠재적 선량이 최대 민감도를 보이는 개인 인자들의 조합도 나타낼 것이다. 이러한 유형의 접근법은 실제 양과 관련된 불확도나 인자의 민감도를 설명하는 데 혼란을 피하도록 돕는다.

B.3. 선량에 관련된 분포

(B10) 개인이나 집단에 대한 선량의 분석에서, 두 가지 주요 맥락과 확장된 셋째 맥락에서 분포의 개념이 발생한다.

- 유형 1. 모델 계산이나 오염 측정으로부터 평가된 개인 선량의 불확도가 고려될 때, 선량분포의 가중은 보통 확률로 설명되어 ‘특정인의 연간 선량이 1 mSv를 초과하지 않을 확률이 0.95(혹은, 95%)이다.’와 같이 말할 수 있다. 이러한 분포는 확률 가중치를 각 선량구간에 부여하며, 분포는 평가에 영향을 주는 불확도에 대한 해석자 견해를 정량화한다. 제 B7항에 정의된 것처럼 이 유형 분포는 개인과 연관하여 유용할 것이다.
- 유형 2. 피폭집단의 모든 사람들에 대해(혹은, 모르거나 각 범주에 대해 추정된 사람 수를 갖는 피폭범주에 대해) 선량의 점 추정(결정론적)이 수행될 때, 각 선량구간에 대한 가중은 총 피폭집단 중 해당 구간 선량을 받은 사람의 비율이 될 것이다. 이러한 분포는 연간 선량이 예를 들면 1 mSv와 같은 어떤 특정 준위를 초과하지 않는 피폭집단의 비율을 평가하는 데 사용될 수 있다. 혹은 집단의 95%가 초과하지 않는 연간 선량(즉, 분포의 95백분위)을 평가하는 데도 사용될 수 있다. 이 유형 선량 분포는 집단의 절대 다수에 적용될 선량제한 지침을 정량화하는 데 유용할 것이다.
- 유형 3. 유형 1과 유형 2가 결합될 때, 가중 개념은 위 유형 2에서 각 개인선량의 점 추정을 사람들의 주어진 피폭조건에서 개인선량의 불확도를 나타내는 주변확률분포(marginal probability distribution)로 대체한다. 총 집단을 대표하는 분포는 피폭집단에서 무작위 선발된 일원의 선량 확률로 해석하는 것이 필요하다. 방출 방사능 선원의 공통 영향이나 위치와 같은 인자들의 해당 상관도를 고려하는 보다 복잡한 피폭과 선량의 결합분포에 비해 개인들과 관련된 불확도 분포는 사소할 것이다.

(B11) 분포는 이론이나 보편적 가정(즉, 다소 임의이지만 합리적으로 볼 수 있는) 또는 실험에 기초한 가정 데이터로부터 평가된다. 특정 사람들이 선량을 받았고 재구성을 위한 상당한 기록이 있는 회귀적 연구에서는, 유형 2 분포를 위해 집단이나 피폭인자에 대한 정보를 지원하는 데이터베이스가 가용하거나 개발할 수 있을 것을 기대할 수 있다. 어려운 점은 피폭집단이나 피폭에 기여하는 환경 과정에 대한 정보가 불완전하고 불확실하여 역사적 데이터 평가나 수학적 모델링을 결합하여 재구성해야 한다는 것이다. 그래서 유형 3 분포의 요소가 중요하

다. 선원항과 환경 수송 해석을 위한 모델이 사용되면, 피폭과 선량으로 불확도 확산을 평가하기 위한 모델의 변수와 구조에 불확도 도입이 필요할 것이다. 선원항과 환경수송의 불확도를 나타내는 방법은 모델에서 변수를 대신하는 확률 분포 형태를 취한다.

(B12) 제안된 분포가 측정에 근거할 수 있으나(이러한 측정이 해당 시간, 위치, 과정에 대해 존재할 때는 명실상부한 자료가 사용된다), 종종 다른 시간이나 지역에 근거한 대응 자료를 사용하게 된다. 어느 경우든, 자료 히스토그램에 직접 바탕을 둔 경험적 분포와 그 히스토그램을 이상적으로 처리한 이론적 분포(아마도 연속 곡선으로 나타낸) 중에서 선택할 것이다. 이론적 분포의 수학적 형태는 이론이나 경험에 근거를 둔(그리고 통상 편의를 위한) 가정인데 해당 자료와 부합함에 대해 입증할 수도 있을 것이다. 데이터가 이론적 분포형태를 제시하기에 불충분할 정도로 단편적이면 그 가정은 일반적이 된다. 즉, 환경 자료를 나타내는 분포로 통상적 선택은 정규분포나 대수정규분포이지만, 다른 것들 또한 가능하며 실용적일 수도 있다. 때때로 주어진 경우에 대해 이론이 표준분포를 암시하거나 이론적 정당성이 없더라도 자료의 경향이 특정 이론적 분포 형태를 보일 수 있는 데 이런 경우에 선택은 경험적으로 볼 수 있다.

(B13) 피폭집단 구성원에 대한 선량의 전망평가에 있어, 비록 연구할 때에 존재하는 실제 집단(이 집단이 미래에 알 수 없는 방법으로 변할 수도 있지만)에 근거하였더라도 대개 집단은 가상에 지나지 않는다. 전망평가의 목적은 원전이나 기타 원자력 시설의 설계나 위치의 영향을 평가하는 것일 수도 있으며, 기존상황(예: 오염된 토지)에 대한 미래 관리 영향을 알기 위한 것일 수도 있다. 이러한 전망적 연구에서 비록 집단 구성원 개인의 세부사항은 알 수 없더라도(연구 당시 존재하는 집단에 근거한 가정이나 외삽을 제외하고는) 선원항과 방출 방사능의 환경 수송에 관련된 불확도는 적용 가능하다. 목표는 선량제약치를 초과할 가능성이 거의 없도록 하는 것이다.

(B14) 이 목적에서 집단의 대부분에 비해 높은 선량이 예상되는 사람들의 피폭 시나리오를 평가하고 이해하는 것은 중요하다. 그러한 대표인에 대한 선량의 제한은 집단의 대부분에 대한 방호를 보장한다. 주어진 피폭 시나리오에서 선원과 환경 수송만으로 인한 불확도 성분과 함께 개인 연간선량의 유형 1 확률분포를 고려할 수 있다. 예를 들어 그 분포를 근거로, 주어진 피폭 시나리오에서 개인의 연간 선량이 0.3 mSv를 초과할 확률은 단 2%라고 판단할 수 있다. 만약 피폭 시나리오가 명목 습관이나 특성의 극단은 아니더라도 높은 꼬리로 간주된다면,

이 결론은 집단 대부분에 적합한 방호를 의미할 것이다. 이러한 판단에서는 고정된 피폭 시나리오만 고려하는 것은 유용할 것이다(즉, 호흡률이나 개인 습관과 관계된 빈도와 같은 변수는 고정된 값으로 하되 보수적 값이어야 한다). 피폭 시나리오에 확률분포를 도입하고 이를 선원항이나 환경 수송과 관련된 불확도 요소와 결합하는 시도는 해석하기 어렵거나 잘못된 결과를 생산할 수도 있다.

(B15) 유형 2 선량분포(사람 수 가중)는 전망적 연구의 가상집단에 대해 도출될 수 있으나, 분포의 정보는 여러 범주 사람들의 선량을 평가하는 방법(예: 피폭 시나리오)이나 집단의 정의에 대한 세부사항에 의해 제한될 것이다. 예를 들어, 점 선원으로부터 공기 중 방사능에 의한 피폭만을 고려하고, 선원으로부터 1 km 부터 15 km 사이의 22.5도 부영역에 반경 1 km마다 거주하는 인구수로서 선원으로부터 반경방향 1 km마다 16개의 풍향각의 공간적 인구분포를 안다고 하자. 그러면 선원항 자료(또는 방출모델)와 대기 수송 모델을 통해 각 부영역에서 방출된 방사성핵종의 지표 공기 중 방사능 농도를 평가할 수 있다(편의를 위해 한 종류 방사성핵종만 방출된다고 가정). 이 간단한 피폭 시나리오에서는 부영역간 주민의 이동이 없으며 호흡률은 평균으로 일정하고, 실내/외 공기 중 농도차가 무시되는 것으로 가정한다. 그러면 부영역 점 추정(구역 평균으로 가정)은 연간 방출(Bq)과 부영역 중심에서 확산인자(χ/Q , s/m³), 호흡률(m³/s), 흡입 선량계수 (Sv/Bq)의 곱이 된다. 그러면 각 부영역 인구 수와 함께 평가된 부영역 평균 선량을 올림차순으로 표를 만들면 인구가중 분포를 구축할 수 있다. 많은 경우, 각 부영역 인구수를 피폭집단의 총 인구수로 나눠 분포를 정규화하는 것이 유용하다.

(B16) 선원항과 χ/Q 의 불확도가 고려되면 제 B15항에서 설명한 것과 비슷한 처리가 유형 3 분포를 낼 수 있다. 유형 3 분포의 해석은 ‘가상 집단으로부터 무작위로 선발한 사람이 연간선량 0.3mSv를 초과하여 받을 확률은 2%보다 낮다.’와 같은 설명이 될 것이다.

B.4. 선량분포의 구체적 형식

(B17) 환경 선량평가 맥락에서 발생하는 분포를 위한 수학적 형태의 적절한 가정은 그 분포가 분석에서 가질 역할에 따라 달라진다. 선택에 영향을 주는 분석자의 경험과 판단이라는 한 요소가 있음이 강조되는데, 실로 선택의 성공은 정량적 분석을 계획하고 수행하는 경험 많고 숙련된 사람의 가용성에 의존한다. 이

주제는 수십 년간 통계와 전산 이론 및 실제에서 명심된 것이지만 여기서 어떻게 요약할 수는 없다.

(B18) 최고 전문수준에서는, 선원향과 방출 방사성핵종의 환경 수송모델의 인자들을 나타내는 분포들이 있다. 피폭 매질(예: 공기, 토양, 음식, 물) 내에서 방사성핵종의 농도 평가치에 불확도 파급을 모사하기 위해서는 모델의 복잡성 때문에 몬테칼로 방법이 요구된다. 수백 개는 아니더라도 수십 개 변수가 있을 수 있는데 어떤 것은 선원향 관련 과정의 기본 또는 대체 데이터에 의존하고, 어떤 것은 방출된 물질의 공기 중 농도 예측 확산모델의 불확도 평가에 의존하며, 또 어떤 것은 지하수를 감시하는 조사 우물에서 취한 시료에 의존한다. 일부 변수에 대해서는 지침을 제공하는 문헌이 있지만 다른 변수들에 대해서는 분석자가 연구의 맥락에서 논거를 만들어야 한다.

(B19) 수송 모델은 종종 환경 측정에 따라 조율된다. 이 경우, 그 변수는 직접 관측한 양을 말 그대로 대표하지는 않을 것이다. 대신, 변수의 분포는 모델 예측치와 그 모델 양(예: 공기나 토양 중 농도)의 해당 측정치의 차로 계산되는 잔차로부터 회귀분석으로 추론될 수 있다. 이 설정에서 잔차(혹은 잔차의 어떤 변환된 형태)는 종종(항상 그렇지는 않음) 평균이 0이고 회귀법에 의해 결정되는 분산을 가지는 정규분포로부터 표본으로 취급된다. 이 방법은 회귀법의 이론적 배경에 의해 종종 제안된다. 그 과정은 복잡하나 결과는 매우 강력하고 설득력이 있다. 모델은 연구하는 변수에 대해 종종 비선형인데, 이 주제는 ‘비선형 변수 추정’이라는 이름으로 문헌에 나타난다.

(B20) 환경 자료 세트는 기존시설에 대한 논의에서 종종 제시된다. 비록 실제 획득 절차는 특성화와 일치하지 않을 수 있지만, 그런 데이터 세트를 하나의 참조 분포로 요약하고 그 자료를 분포로부터 무작위 표본으로 해석하는 것이 일반적이다. 아마도 재래 자료를 위한 가장 일반적 가정은 정규분포 가정인데 이 가정은 평균의 신뢰구간(전통적 교과서 방법에 따른다면 이는 ‘Student's t 분포와도 관련됨’)을 나타내는 데 사용된다. 정규분포는 준무한 음·양의 구간에 대칭인 확률을 할당하는데, 이 성질은 물리적으로 양수 값만 고려되는 상황에서는 물리적 설명이 거북한 문제를 야기한다. 기본 자료의 히스토그램은 정규분포의 특징인 대칭성이 부족한 경우가 종종 있다. 한 접근법은 정규분포의 절단형에 의해 이러한 문제를 해결하는 것이다(즉, 분포의 한 쪽 혹은 양 쪽 꼬리를 일정 점에서 자름). 절단 분포는 자료에 더 나은 맞춤도를 제공하나, 불행하게도 비절단 분포가 가지는 수학적 소급성을 많이 잃는다.

(B21) 편향된 분포를 위한 통상적 이론 모델은 대수정규분포이다. 만약 무작위 변수 y 의 자연대수 $\ln y$ 가 정규분포를 따른다면 무작위변수 y 가 대수정규분포를 따른다고 말할 수 있는데, 이 분포는 원본 데이터에 자연대수를 취해 변환하고 정규분포를 적용함으로써 발생하는 것으로 생각할 수 있다. 그러나 많은 편향된 분포는 대수정규분포에 잘 맞지 않으므로, 표본 크기가 충분할 때는 자료에 직접적으로 근거하는 경험분포가 최고로 만족할만한 표현이라는 이의가 종종 제기된다. 만약 수학적 또는 다른 편의를 위해 부드러운 도수 곡선으로 표현되는 분포가 요구되고 표준 분포의 직접 적용이 배제되어야만 한다면, 경험 있는 전문가는 도수 히스토그램에 요구되는 특성에 맞게 경험적 도수곡선을 맞추는 것이 일반적으로 가능하다. 맞춤에는 누적 표현을 사용하는 것이 가능하다.

B.5. 정규분포와 중심극한정리

(B22) 중심극한정리는 관찰과학에서 정규분포의 산재성에 대한 주요 합리화로 통상 인용된다. 매우 근사적인 형태로 말하면 중심극한정리는 적절한 가정 아래서 독립 무작위변수 $\{x_i\}_{i=1}^{\infty}$ 무한수열의 표준화 합의 확률분포 수열은 표준정규분포로 된다고 한다. 즉,

$$P \left[\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \mu_i)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \sigma_i^2}} < y \right] \rightarrow \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^y e^{-\frac{t^2}{2}} dt, \quad n \rightarrow \infty$$

여기서 x_i 의 평균은 μ_i 이고 표준편차는 σ_i 이다. 화살표 다음의 적분은 y 에서 평가된 표준정규분포의 누적확률분포함수를 나타낸다. 이 수렴이 옳은 것으로 나타나는 가설에 대한 연구 참고문헌은 수없이 많다. 그러한 제약을 제외하면 무작위변수 $\{x_i\}_{i=1}^n$ 은 어떤 규정된 분포일 필요도 없고 동일한 형태를 가질 필요도 없다(Wilks 1962).

(B23) 중심극한정리는 환경 무작위변수가 비교적 적은 샘플 수 n 에서도 근사적 정규분포를 따른다는 주장을 지원하는 데 흔히 사용된다. 그러나 어떤 환경에서는 그러한 근사가 상당히 큰 n 에서도 부적절할 수도 있다. 대수정규분포에 중심극한정리의 적용은 대수함수로 변환된 무작위변수 $\{\ln x_i\}_{i=1}^{\infty}$ 수열을 사용한다. 환경선량 연구에서는 대수정규분포가 보통이므로 환경 및 기타 분야에서 이러한

사용에 이르는 과정의 일부 이론적 지원에 대해 다음절에서 검토한다.

B.6. 대수정규분포의 발생

(B24) 과학문헌에는 대수정규분포의 근원과 응용에 대한 많은 논의가 있다. Aitchison과 Brown(1969, 제3장)은 예들과 참고문헌을 제공한다. 아래 식(1)부터 식(4)까지는 이들의 전개에 준한다.

(B25) 대수정규분포를 내는 기본 수학적 모델은 다음 식을 만족하는 확률론적 과정이다.

$$X_k - X_{k-1} = \epsilon_k X_{k-1}, \quad k = 1, 2, \dots \quad (1)$$

여기서 ϵ_k 는 상호독립이고 수열에서 선행하는 X_k 와도 독립이다. 만약 이 과정이 n 단계 내려가면 식(1)의 회귀는 다음과 같이 풀린다.

$$\begin{aligned} X_n &= (1 + \epsilon_n)X_{n-1} = (1 + \epsilon_n)(1 + \epsilon_{n-1})X_{n-2} = \dots \\ &= (1 + \epsilon_n)(1 + \epsilon_{n-1})\dots(1 + \epsilon_1)X_o. \end{aligned} \quad (2)$$

(B26) 만약 ϵ_k 가 충분히 작다면 식(2)에서 근사치 $1 + \epsilon_k \approx e^{\epsilon_k}$ 를 사용하면 다음을 얻는다.

$$X_n = X_o e^{\epsilon_1} e^{\epsilon_2} \dots e^{\epsilon_n} = X_o \exp\left(\sum_{k=1}^n \epsilon_k\right). \quad (3)$$

(B27) 식(3)에 대수를 취하면

$$\ln X_n = \ln X_o + \sum_{k=1}^n \epsilon_k \quad (4)$$

와 같은 독립적으로 분포하는 무작위변수의 합을 얻는데 중심극한정리에 의하면 이는 점근적 정규분포를 따르고(즉, 위에서 설명했듯이 n 이 무한대로 갈 때 정규분포로 간다.) 따라서 그 X_n 분포는 대수정규분포에 접근한다. 만약 인수 k 가 시계열을 지시한다면 식(1)의 모델은 ϵ_k 로 표현되는 다양한 독립적 증배효과로 인한 유기체의 성장과정을 나타내게 된다. 이러한 해석에서 X_n 은 성장의 n 단계 후 예를 들면 유기체의 질량, 신장 또는 다른 물리적 특성을 나타내게 된다. 이론상 시간단계는 임의여서 맥락에 따라 초부터 여러 해까지를 나타낼 수 있다. 또, 식(1) 모델은 무작위로 변동하는 경제상태에 따라 변하는 시간 단계별 복리이율로 투자한 돈의 합을 나타낼 수도 있다(예를 들어 인수 k 가 년을 나타내면

ϵ_k 는 무작위로 요동하는 연간 이율을 나타낸다). 예를 들어 $n = 30$ 년 후 투자가치 전망이 대수정규분포를 따르는 것으로 합리적 모델을 만들 수 있다. 다른 응용에서는 인수 k 를 시간과 무관한 영향을 나타낼 수도 있다.

(B28) 대수정규분포는 에어로졸 물리학에서 입자크기에 적용하는 데 유용한 것으로 알려져 왔다. 실제로 상대적 입자크기 특성을 논의할 때 대수정규분포는 일반 가정이 되어 있는 듯하다. Aitchison과 Brown(1969)은 어떤 입자집단에 해당할 것으로 보이는 파열모델을 제시했다. 그들은 양수 차원(예: 질량이나 유효 직경)을 갖는 임의 요소(예: 입자)를 고려했다. 그 집단은 요소가 무작위로 파열되는 일련의 독립적 작용의 지배를 받는다.

(B29) 여기서는 보다 구체적 입자모델을 고려한다. 즉, 이진과정(binary process)으로서 각 입자는 정확히 두 개로 분할되는데 그 중 하나는 원래의 '작은' 분율이 되는 경우이다. 원본 입자집단이 균질 밀도를 가진다고 가정하면 관심량은 입자의 질량이 된다. 여기서 '작은' 분율이란 0.5보다 작은 어떤 일정 분율 ϕ (이 예시에서는 ϕ 는 0.125와 같다.)을 넘지 않도록 제한된다. 이 작은 분율 무작위변수는 0과 ϕ 사이(0은 제외) 균일분포에서 선발된다. 나머지 분율은 큰 부분을 나타내게 된다.

(B30) 만약 파열단계 n 후에 한 입자를 선발하면 그 입자는 원본 집단에서 어떤 입자 P_o 까지 거슬러 올라가는 고유한 입자계보를 갖게 된다. 따라서 그 입자의 질량은 P_o 의 질량으로부터 독립적 무작위 인자들의 곱의 수열로 구할 수 있다. 즉,

$$mass(P_n) = mass(P_o)\eta_1\eta_2\cdots\eta_n \quad (5)$$

여기서 η_k 는 다음과 같이 독립적이고 동일하게 분포한다.

$$\eta_k = \begin{cases} \zeta & (\text{확률 } 0.5) \\ 1-\zeta & (\text{확률 } 0.5) \end{cases}$$

여기서 무작위변수 ζ 는 구간 $(0, 0.125]$ ²¹⁾에서 균일분포한다. 확률 0.5는 단계 k 의 한 입자가 어미 입자(단계 $k-1$)의 파열에서 나온 큰 것 또는 작은 것일 기회가 같다는 사실을 반영한다. 그러면 식(5)로부터

$$\ln(mass(P_n)) = \ln(mass(P_o)) + \ln\eta_o + \ln\eta_1 + \dots + \ln\eta_n \quad (6)$$

과 같이 된다.

21) <역주> 이 구간은 0은 포함하지 않으며 0.125는 포함한다.

(B31) 입자 P_n 질량의 대수값이 점근적 정규분포를 따라 질량 P_n 이 대수정규 분포에 접근한다는 결론을 내리는 데 중심극한정리가 사용된다. 그림 B1은 구간 (0,1)에서 균일분포로부터 무작위 추출한 질량을 갖는 초기 입자 집단에서 시작한 첫 5 단계와 10단계 파열에 대한 대수확률분포를 보인다. 10단계에서 거의 직선인 그래프는 파열 단계가 대수정규분포로 접근함을 암시한다. 이 분포는 위에서 설명한 모델에 따라 단계마다 200 시행하는 몬테칼로 모사로 얻었다.

(B32) 그림 B1에 예시된 그러한 모델은 어떤 유형 토양의 풍화에도 적용될 수 있을 것이다.

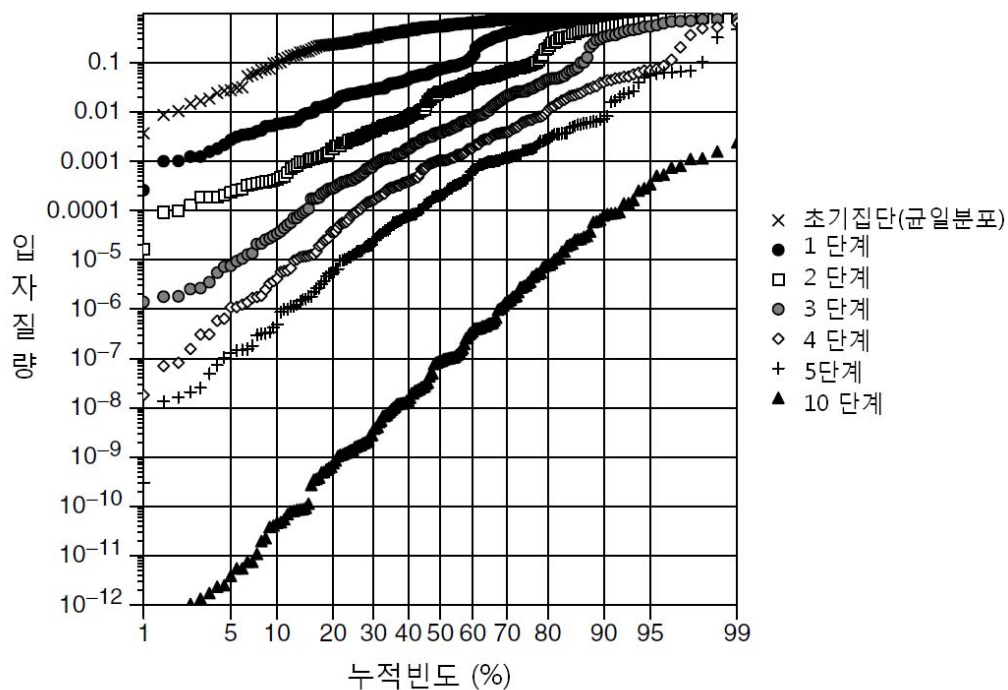


그림 B1. 질량이 0와 1 사이에 균일분포하는 입자 집단으로부터 시작하여 2진 파열의 점근적 수열. 분포는 입자질량을 나타낸다. 파열물 중 작은 입자의 질량은 구간 (0, 0.125)에서 균일분포하는 경우이다. 10 단계에서 직선에 가까운 경향은 중심극한정리의 효과를 암시한다.

(B33) 다른 유형의 입자모델은 작은 입자들이 응축핵에 응집하여 형성하는 입자 집단에 대한 것이다. 증분 입자 크기가 포착입자보다 충분히 작을 때는 그러한 과정은 식(1) 모델의 견지에서 설명할 수 있다. 이 경우 충분한 수 포착 후 집단이 점근적 대수정규분포로 간다는 결론을 모델로부터 얻을 수 있다.

(B34) 실제에서는 여기서 제시된 단순한 모델로부터 이탈시켜 대수정규분포로 접근함을 방해하는 여러 영향들이 있다. 때로는 조사하는 입자집단이 둘 이상의 상이한 부집단의 혼합으로 보는 것이 더 합리적인 경우도 발견되는데, 이때는 각 부집단은 근사적 대수정규분포를 따르더라도 그 총 집단은 대수정규분포를 따르지 않게 된다. 예를 들면 바람에 날리는 입자들은 종종 모래(직경 10~수백 μm), 진흙, 침니silt(직경 1 μm 이하부터 수십 μm) 및 연소산물(재)처럼 미세한 입자(직경 수십~수백 nm)로 구성될 수 있다. 이들 상이한 부집단(각각은 대체로 대수정규분포를 따른다고 보는 것이 합리적인)의 결합은 대수정규분포를 닮은 분포로 뭉쳐지지 않을 것이다. 에어로졸 학자들은 종종 대수정규분포로 입자크기를 분석하는데 대수정규분포가 잘 맞지 않는 특별한 경우들이 있다. 이러한 경우에는 학자들은 특별한 분포를 적용한다. 이러한 예는 광범한 크기의 직경에 걸친 거친 먼지들(예: 분쇄한 석탄)과 특정 분말들이다(Hinds 1982 제4장의 부록).

(B35) 또 흥미 있는 양은 보다 기본적인 무작위변수의 합인데 이들은 대수정규분포를 보일 수도 있고 그렇지 않을 수도 있다. 대수정규분포를 따르는 무작위변수의 합은 대수정규분포를 따르지 않는다고 일반적으로 알려져 있지만, 대수정규분포하는 무작위변수의 합이 무난히 대수정규분포로 근사되는 때도 있다. 이것은 보다 일반적 현상 즉, 그러한 결론을 지시하는 알려진 이론은 없지만 관심 데이터를 그림표로 나타낼 때 그 데이터가 대수정규분포로부터 취한 표본인 것처럼 나타나는 현상의 한 경우가 된다. 어쨌든, 선택을 지시하는 것은 경험밖에 없지만 편중된 실험적 분포를 보통 대수정규분포 모델에 맞추는 것은 일반 관행이다. 환경매체 중 방사능 측정치도 종종 대수정규분포로 간주하는데 그러한 가정에 대한 이론적 뒷받침은 거의 없다.

(B36) 특정 인구집단에 대한 방사선량이나 위험도 때때로 위에서 설명한 실험적 대수정규분포에 맞는다(예: 앞서 설명한 유형 1, 2, 3의 분포). 그 대수확률도표가 직선 경향을 보였더라 하더라도 그러한 분포가 나올 길은 많으며, 분명히 대수정규분포를 암시하는 경우는 거의 없을 것이다. 대기 중 방사능 방출점으로부터 풍하 집단의 간단한 선량분포를 구성하는 것은 간단한데 이 분포는 인구수에 대해 대수정규분포를 따르지 않는다(다음 절 예 2를 참조).

B.7. 예시

(B37) 이 절에서는 이 부록에서 논의한 분포유형의 비교적 단순한 예 들을 전개

한다. 실제 예는 여기서 보이는 것보다 훨씬 복잡할 것이지만 복잡성을 더하면 주제를 흐릴 수 있다.

B.7.1. 예시 1: 분포유형 1

(B38) 가상으로 존재하는 원전이 대기로 방사성핵종을 방출한다고 본다. 공기감 시소에서 측정된 데이터에 대한 분석과 방출량 예측치를 비교한 결과는 방사능 분포가 부지경계에서 최대에 가까울 것으로 나타난다. 시설로부터 거리가 더 멀어지면 농도가 줄어든 것이라는 이론이 있고 증거도 있다. 이 경계에 사람을 두되 그 사람은 그 위치에 살고 대부분 낮 시간 동안 옥외에 있으며 대부분 시간을 그 지역에서 보낸다고 가정하는 것은 무난하다. 편의를 위해 방사성핵종을 1회 방출한다고 본다. 흡입으로 인한 선량을 평가하는 데는 다음과 유사한 식을 만들 수 있다.

$$H_{inhal} = \left(\frac{X}{Q}\right)_{annual} Q_{annual} (B_{out} U_{out} + B_{in} U_{in} R) D_{inhal}$$

여기서 H는 흡입에 의한 연간선량(mSv)이고 $\left(\frac{X}{Q}\right)$ 는 단위 방출률 당 지표농도 (s/m^3), Q는 방출률(Bq/s), D는 흡입에 의한 선량계수(mSv/Bq), B는 운동과 휴식에서와 같이 옥외와 실내에서 전형적 흡입률(m^3/s), U는 옥외와 실내에서 보내는 시간분율, R은 실내공기 중 감소된 방사성핵종 농도 평가에 사용되는 분율 인자이다.

(B39) 공기 중 방사성핵종에서 방출된 광자에 의한 외부선량을 나타내는 식도 유사하다.

$$H_{extern} = \left(\frac{X}{Q}\right)_{annual} Q_{annual} (U_{out} + U_{in} S) D_{extern} \times 3.156 \times 10^7$$

여기서 H는 공기 중 방사성핵종으로부터 연간 외부선량(mSv), D는 공기 중 방사성핵종에 의한 외부피폭의 유효선량률 계수($mSv s^{-1} Bq^{-1} m^3$), S는 실내 공기 중 농도의 감소 및 옥외 농도로부터 방사선의 차폐효과를 반영하는 분율인자²²⁾, 3.156×10^7 은 초로 표현한 1년이다.

(B40) 시설 주변에서 운영되는 텃밭이나 농업활동이 주어지지 않았으므로 모든 식품은 오염되지 않은 공급처에서 온다고 가정한다.

22) 실내공기 중 농도 저하와 외부 감마선의 건물에 의한 차폐효과는 서로 다른 과정이므로 본래는 따로 항을 두어야 하나 이 예시는 개념만 설명하는 것이므로 항을 줄이기 위해 하나로 묶어 설명하고 있다.

(B41) 위 식을 합하고 재정리하면 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$H_{total} = H_{inhal} + H_{extern} = \left(\frac{X}{Q}\right)_{annual} Q_{annual} K$$

여기서 K는 피폭 시나리오 인자에 따라 달라지는 상수로 표현된다. 방출률 Q와 대기확산인자 $\left(\frac{X}{Q}\right)$ 는 불확실성의 영향을 받는다. 대기 데이터로부터 $\left(\frac{X}{Q}\right)$ 가 대수정규분포를 따르고 기하표준편차(GSD) 추정치가 1.8이며, 운영자가 과거 방출 데이터를 분석하여 방출률 Q도 GSD=1.3인 대수정규분포를 따르는 결과를 얻었다고 가정한다. 독립적으로 분포하는 이 두 무작위변수의 곱도 대수정규분포를 따르고 그 GSD는 다음과 같다.

$$GSD = \exp[\sqrt{\ln^2 1.8 + \ln^2 1.3}] = 1.9$$

(B42) 대수정규성은 H_{total} 의 기하평균(GM)은 $\left(\frac{X}{Q}\right)$ 및 Q의 기하평균과 상수 K의 곱이 됨을 암시한다. 데이터와 변수가 이들 곱이 GM=0.4 mSv로 된다고 가정한다. 그림 B2는 이 연간선량 분포의 누적 대수확률 그림표이다. 그림은 연간선량의 95백분위가 1.15 mSv임을 보이므로 이 피폭 시나리오에서 연간선량이 1.15 mSv를 넘을 확률은 5%이다. 조사결과 피폭집단 구성원의 소수가 이 정도 피폭을 받을 것 같다면(즉, 대표인 정의로 이어지는 가정) 그 집단 구성원이 장차 시설 운영으로부터 연간 약 1 mSv 이상 피폭할 가능성은 낮다.

(B43) 선원향과 울타리에서 공기농도 데이터의 시간 속성이 변하지 않는다면 이를 20년에 1년 정도 1.15 mSv를 넘을 확률로 확장 해석할 수도 있다. 그러나 수년에 지나지 않는 제한된 데이터로부터 그러한 해석에는 주의가 필요하다.

B.7.2. 예시 2: 분포 유형 2와 3

(B44) 두 번째 가상 원자력시설도 대기로 방사성핵종을 방출한다(여기서도 편의를 위해 한 핵종만 가정한다). 피폭집단은 시설 배출 굴뚝으로부터 22.5도 단일 풍향 영역 내 1 km부터 15 km 사이 거리에 들어 있다. 면적에 대한 인구의 분포는 균등하다. 여기서 도출할 정규화된 분포를 위해서는 집단의 총 인구수를 알 필요가 있다. 풍향 영역을 각각 1 km 반경거리를 갖는 15개 부영역으로 나누는데 선원으로부터 반경 거리 1 km부터 14개 부영역에 사람이 산다. 방출된 방사성핵종 농도는 다음의 풍향 영역 평균 가우시안 플룸모델로 평가한다.

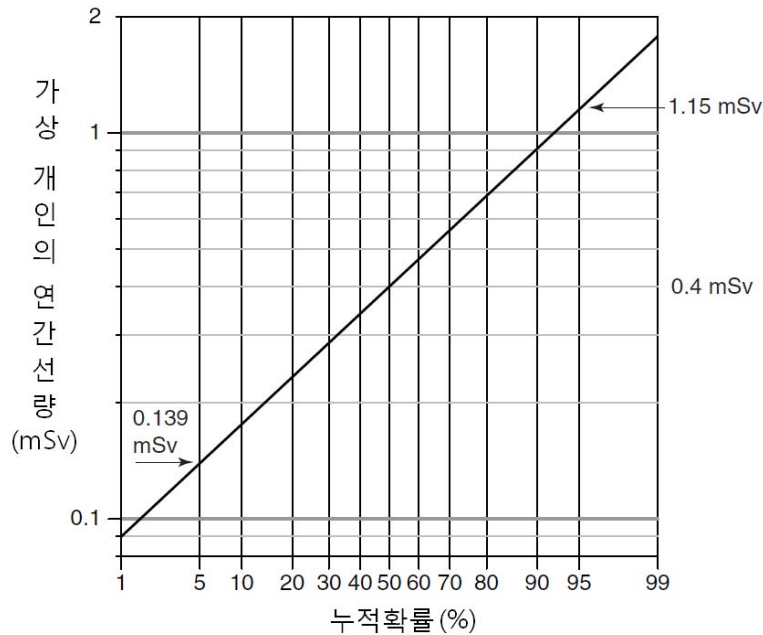


그림 B2. 예시 1 사람들의 유형 1 대수확률분포. 개인을 정의하는 변수가 일정하다면 대기오 방사성핵종 방출의 정량적 불확도와 사람 위치 인근 시설 울타리에서 관찰된 농도의 변동에 근거하여 이 분포는 선량구간에 확률을 부여한다. 이 위치에서 공기 중 농도는 거의 대부분 피폭집단이 접하는 값을 넘을 것으로 보인다. 95백분위 선량(1.15 mSv)은 개인이 이 연간선량을 넘을 확률이 5%임을 의미한다.

$$\frac{\chi}{Q} = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{fn}{2\pi\sigma_z ur} \exp\left(-\frac{h^2}{2\sigma_z^2}\right)$$

여기서 f는 선원으로부터 풍하에 집단이 있는 시간 분율, n=16은 전체 풍향영역 수(그 중 한 영역만 예에서 사용됨), u는 평균풍속, r은 선원으로부터 ($\frac{\chi}{Q}$)가 산출되는 위치까지 반경 방향 거리이다. 또, σ_z (m)는 전원지역 대기안정도 D에 대한 연직방향 확산계수(평균)으로서 다음과 같이 주어진다(Hanna 등 1982).

$$\sigma_z = \frac{0.06r}{\sqrt{1+0.0015r}}$$

통상적 지형과 기상조건에 대해 이 모델에 의한 연간 평균 농도 예측치의 불확도는 Miller와 Hively(1987)이 평가한 바 있는데 10 km 이내에서는 GSD=1.53인 대수정규분포로, 10 km부터 150 km까지는 GSD=2.32인 대수정규분포로 대체로 설명된다. Killough와 Schmidt(2000)은 다년간 복합 기상자료를 사용하여 불

확도에 대해 GSD=1.53인 대수정규분포를 제안했다. 이 두 불확도 분포가 유형 3 분포에 사용되었는데 유형 2 분포에는 영향을 미치지 않는다.

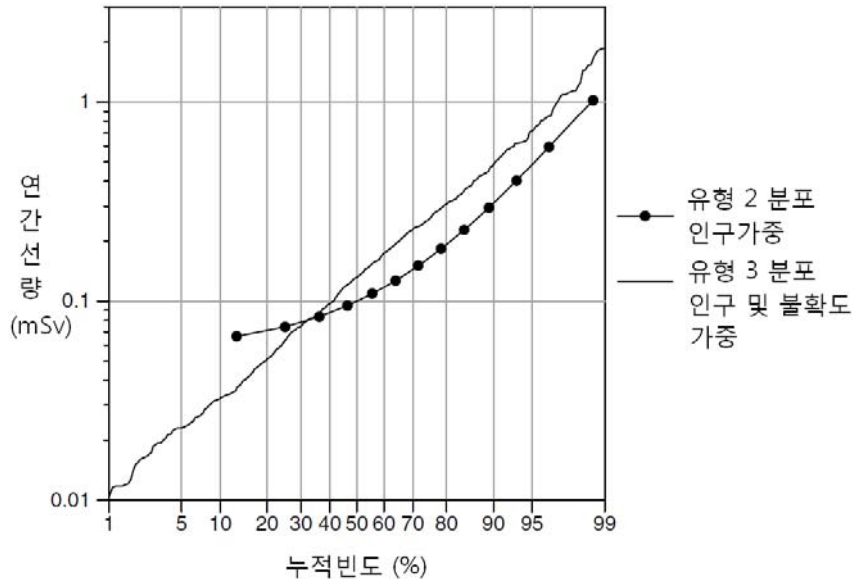


그림 B3. 예시 2의 유형 2 및 유형 3 분포. 유형 2 분포는 결정론적으로 평가한 연간선량에 그 선량을 받는 인구 분율을 가중했다. 유형 3 분포는 인구분율에 추가하여 선량평가에 내재하는 불확도도 포함하여 선량구간에 대한 해석이 피폭집단에서 무작위로 선발된 사람이 구간 내 연간선량을 받을 확률이 된다.

(B45) 유형 2 분포에서는 각 1 km 부영역에 대해 평균한 연간선량을 결정론적으로 산출한다. 그 분포를 그림 B3에 선분으로 연결한 흑색 원으로 표현했다. 이 유형 분포는 각 연간선량 구간에 대해 그 연간선량을 받을 인구의 분율을 지시한다. 그 50백분위는 0.1 mSv이고 95백분위는 0.5 mSv이다. 따라서 이 집단의 5%는 0.5 mSv를 초과하는 연간선량을 받을 것이다. 여기서는 정량적 불확도에 대한 시사가 없으므로 해석은 확률적이지 아니다.

(B46) 유형 3 분포 계산은 위에서 설명한 플룸모델과 기상자료의 불확도 분포를 필요로 한다(연간 방출에 대한 불확도 분포도 필요할 것이지만 예에서는 생략되었다). 유형 3 분포는 선량평가 불확도에 근거하여 연간선량 확률 구간을 제시한다. 인구집단이 가상일 때는 유형 3 분포는 선원향과 대기수송에만 불확실성이 수반된다. 소급적 경우는 집단의 불확도도 고려될 것이다. 그림 B3은 유형 3 분포를 거친 선으로 보이고 있는데(1000회 시행에 근거함), 각 개인 선량 불확도에 적용되는 대수정규분포로부터 근사적 선형성이 도출된다.

(B47) 유형 3 분포의 95백분위는 0.72 mSv인데 이는 피폭집단에서 무작위로 선발된 한 사람이 이 연간선량을 초과할 확률 5%를 가진다는 해석을 의미한다. 그러나 그림에서 그 무작위 선발 개인이 연간선량 1 mSv를 초과할 확률이 3%임을 추정할 수 있다. 1 mSv의 10배(즉 10 mSv)인 연간선량은 그림의 범위를 넘는데(99백분위보다 훨씬 위) 이는 ‘극히 가능성 낮음’ 정의를 무난히 만족할 것으로 보인다. 예를 들면 유형 3 분포에서 주어진 1 mSv 초과할 확률 3%는 집단의 3%만 이 연간선량을 넘을 것이라고 단언하는 것과는 다름을 기억해야 한다. 유형 2 곡선(그리고 계산의 출력 파일도)을 고찰하면 결정론적으로 평가했을 때 집단의 2% 이내만 이 선량을 초과할 수 있는 것으로 추정할 수 있다. 낮은 선량 영역에서는 분포 사이 차이가 증가한다. 예를 들면 유형 3 곡선의 90백분위(0.5 mSv)는 대체로 유형 2 곡선의 95백분위(외삽됨)와 같다.

B.8. 결론

(B48) ICRP는 확률론적 평가에 사용할 특정한 방법을 제시하지는 않는데 이는 단일한 수학적 접근이나 백분율 기준을 선량의 확률론적 평가에서 접하는 다양한 분포에 적용할 수 없기 때문이다. 그러나 확률론적 평가를 사용할 때 언제 준수되는지를 결정함에 운영자나 규제자를 도울 약간의 지침은 필요하다.

(B49) 어떤 전망적 확률론적 선량평가에서는 분포상의 본질적 모든 선량이 ICRP가 설정한 선량제한치²³⁾보다 작게 예측될 수도 있다²⁴⁾. 그렇다면 준수는 이미 충족된 것이다.

(B50) 개인에 대한 전망적 확률론적 선량평가에서는 계획된 시설이든 기존피폭 상황이든 피폭집단에서 무작위로 선발된 사람이 선량제한치(또는 참조준위)를 넘을 확률이 약 5% 이하가 되도록 대표인을 정의할 것을 ICRP는 권고한다. 대규모 집단에서는 확률론적 평가의 분포특성 때문에 여러 사람이 대표인보다 높은 선량을 받을 수도 있다. 선량이 제한치보다 낮다면 이는 문제가 되지 않는다. 그러나 평가에서 수십명 이상이 해당 제한치(참조준위)보다 높게 피폭한다면 이 사

23) <역주> ICRP는 선원중심 선량제한치가 설정될 수 있는 범위만 제안하지 선량제한치 자체를 설정하지는 않는다. 주어진 선원에 대한 선량제한치는 운영자 또는 당해 규제기관이 설정한다.

24) <역주> 원문은 예시 1을 그 예로 적고 있지만 예시 1은 연간 1 mSv를 넘는 개인도 소수 있어 바른 예로 보기 어려워 번역문에서는 적지 않았다. 또, 연간 1 mSv는 선량제한치가 아니라 선량 한도이다. 단일 선원에 대한 선량제한치는 선량한도의 일부(예: 연간 0.3 mSv) 수준으로 설정하는 것이 일반적이다.

람들의 특성을 조사할 필요가 있다. 추가 분석에서도 수십명의 선량이 해당 제약치를 넘을 것으로 나타난다면 피폭을 수정할 조치를 고려해야 한다.

(B51) 대표인을 정의하기 위해 평가를 수행하는 지역과 그 인구집단에 대해서는 특별한 주의가 필요하다. 높은 선량을 받는 사람들을 대표할 것 같은 선량을 받는 모든 사람들이 포함되도록 유의한다. 그러나 너무 큰 지역(따라서 너무 많은 인구)을 포함하면 높은 선량을 받는 소수의 영향을 희석하여 분포를 왜곡할 수 있음이 명백하다. 따라서 점진적으로 작은 지역과 인구를 대상으로 하는 반복적 접근이 일반적으로 필요하다.

참고문헌

- Aitchison, J., Brown, J.A.C., 1969. The Lognormal Distribution with Special Reference to its Uses in Economics. Cambridge University Press, Cambridge.
- Byrom, J., Robinson, C., Simmonds, J.R., Walters, B., Taylor, R.R., 1995. Food consumption rates for use in generalised radiological dose assessments. *J. Radiol. Prot.* 15, 335-341.
- EU, 1996. Council Directive (96/24/EURATOM) of 13 May 1996 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. *Off. J. Eur. Commun.* L159, 1-29.
- Golikov, V., Balonov, M., Erkin, V., Jacob, P., 1999. Model validation for external doses due to environmental contaminations by the Chernobyl accident. *Health Phys.* 77, 654-661.
- Golikov, V., Balonov, M., Jacob, P., 2000. Model of external exposure of population living in the areas contaminated after the Chernobyl accident and its validation. In: Harmonization of Radiation, Human Life and the Ecosystem, Proc. of 10th International Congress of the IRPA, International Conference Centre, Hiroshima, Japan, 746-T-19(1)-2.
- Hanna, S.R., Briggs, G.A., Hosker Jr., R.P., 1982. Atmospheric Diffusion Handbook. Report DOE/TIC-11223. US Department of Energy, Washington, DC, USA.
- Hinds, W.C., 1982. Aerosol Technology. John Wiley and Sons, New York.
- Hunt, G.J., 2004. On homogeneity within the critical group. *J. Radiol. Prot.* 24, 265-272.
- Hunt, G.J., Hewett, C.J., Shepard, J.G., 1982. The identification of critical groups and its application to fish and shellfish consumers in the coastal area of the Northeast Irish Sea. *Health Phys.* 43, 875-889.
- IAEA, 1991. The International Chernobyl Project: Technical Report. Part E, Annex 3: 239. International Atomic Energy Agency, Vienna.
- IAEA, 1996. International Basic Safety Standards for Protection against Ionising Radiation and for the Safety of Radioactive Sources. Jointly sponsored by FAO, IAEA, ILO, OECD/NEA, PAHO, WHO, IAEA Safety Series No. 115. International Atomic Energy Agency, Vienna.
- IAEA, 1998. The Radiological Situation at the Atolls of Mururoa and

- Fangataufa: Main Report, Radiological Assessment Report Series, STI/PUB/1028, International Atomic Energy Agency, Vienna.
- IAEA, 2001. Generic Models for Use in Assessing the Impact of Discharges of Radioactive Substances to the Environment. IAEA Safety Report Series No. 19. International Atomic Energy Agency, Vienna.
- ICRP, 1965. Principles of Environmental Monitoring Related to the Handling of Radioactive Materials. ICRP Publication 7, Pergamon Press, Oxford.
- ICRP, 1966. Principles of Environmental Monitoring Related to the Handling of Radioactive Materials. ICRP Publication 7. Pergamon Press, London, UK.
- ICRP, 1985. Principles of monitoring for the radiation protection of the population. ICRP Publication 43, Ann. ICRP 15 (1).
- ICRP, 1989. Age-dependent doses to members of the public from intake of radionuclides. Part 1. ICRP Publication 56, Ann. ICRP 20 (2).
- ICRP, 1991. 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 60, Ann. ICRP 21 (1-3).
- ICRP, 1993. 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, 1995. 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, 1996a. Age-dependent doses to members of the public from intake of radionuclides. Part 4. Inhalation dose coefficients. ICRP Publication 71, Ann. ICRP 25 (3).
- ICRP, 1996b. 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, 2000a. Radiation protection recommendations as applied to the disposal of long-lived solid radioactive waste. ICRP Publication 81, Ann. ICRP 28 (4).
- ICRP, 2000b. Protection of the public in situations of prolonged radiation exposure. ICRP Publication 82, Ann. ICRP 29 (1/2).
- ICRP, 2001a. Doses to the embryo and 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. Also includes: Diagnostic Reference Levels in medical imaging – review and additional advice. ICRP Supporting Guidance 2, Ann. ICRP 31 (4).
- ICRP, 2005. Doses to infants from ingestion of radionuclides in mothers' milk. ICRP Publication 95, Ann. ICRP 34 (3/4).
- ICRP, 2007. Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication XX, Ann. ICRP 37 (in press).
- Killough, G.G., Schmidt, D.W., 2000. Uncertainty analysis of exposure to radon released from the former feed materials production center. *J. Environ. Radioactivity* 49, 127–156.
- Miller, C.W., Hively, L.M., 1987. A review of validation studies for the Gaussian plume atmospheric dispersion model. *Nuclear Safety* 28, 522–31.
- NCRP, 1996. Screening Models for Releases of Radionuclides to Atmosphere, Surface Water, and Ground. NCRP Report No. 123 (1–). National Council on Radiation Protection and Measurements, Bethesda, Maryland.
- Phipps, A.W., Smith, T.J., Fell, T.P., Harrison, J.D., 2001. Doses to the Embryo/Fetus and Neonate from Intakes of Radionuclides by the Mother. Part 1. Doses Received in Utero and from Activity Present at Birth. HSE Contract Research Report, 397/2001. Health and Safety Executive, London, UK.
- Smith, K., Jones, A.L., 2003. Generalised Habit Data for Radiological Assessments. NRPB-W41. National Radiological Protection Board, Chilton, UK.
- Tschurlovits, M., Taghizadegan, R., Engelbrecht, R. 2004. Handling Uncertainty and Variability in Risk Communication. Proc. IRPA 11, Madrid. International Radiation Protection Association, www.irpa.net.
- Wilks, S.S., 1962. *Mathematical Statistics*. John Wiley and Sons, Inc, New York