

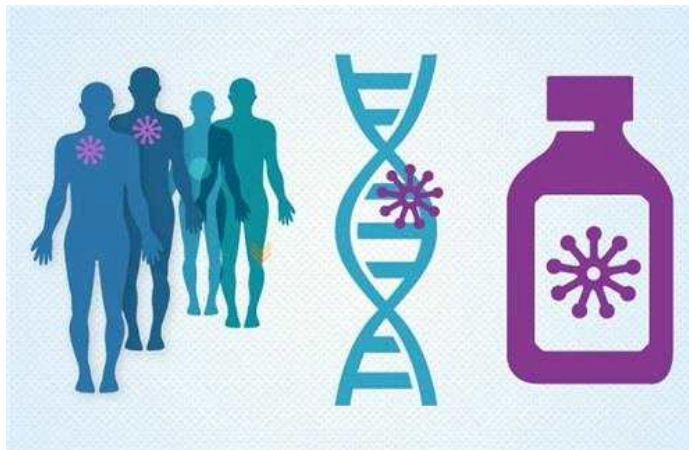


IRSC/TR/20-01

ICRP 간행물 140

방사성의약품 치료에서 방사선방호

Radiological Protection in Therapy with
Radiopharmaceuticals



대한방사선방어학회
방사선안전문화연구소 iRKK

이 번역본 발간은 방사선안전문화연구소 자체사업의 일환으로 이루어졌습니다. 학회는 이 번역본 배포를 승인해준 ICRP 호의에 감사합니다.

<표지그림> 방사성의약품을 이용한 암 표적치료 이미지 도시. (그림원본: 미국 국립암연구소 NCI)

ICRP Publication 140

방사성의약품 치료에서 방사선방호

Radiological Protection in Therapy with
Radiopharmaceuticals

ICRP 승인: 2018년 11월

이 ICRP 간행물의 우리말 번역본은
ICRP의 허락(2019년 12월)을 받았으며
ICRP 정신에 따라 무료로 배포합니다.

국제방사선방호위원회

Ann. ICRP 48(1), 2019

편집인

C.H. CLEMENT

부편집인

H. FUJITA

ICRP를 위한 저자

Y. Yonekura, S. Mattsson, G. Flux, W.E. Bolch,
L.T. Dauer, D.R. Fisher, M. Lassmann, S. Palm,
M. Hosono, M. Doruff, C. Divgi, P. Zanzonico

역사서문

방사성핵종 표지화합물을 암치료에 이용하기 시작한 지는 오래되었다. 기본적인 아이디어는 암세포 친화적인 화합물에 방사성핵종을 표지하여 암 환자에게 투여하면 생물역동학적 과정으로 방사성 표지화합물이 암세포로 집결하고, 거기서 표지 방사성핵종이 붕괴하면서 비정기적인 짧은 방사선을 내면 그 방사선을 많이 피폭한 암세포가 사멸하는 것이다. 근래에 분자생물학과 세포생물학, 유전자공학이 비약적으로 발전함에 따라 단클론 항체나 펩타이드로 암세포를 선택적으로 표적화하고, 방사선학적 특성이 좋은 핵종도 개발됨으로써 요법의 치료지수를 높일 수 있다는 기대가 커져 방사성핵종 표적치료(targeted radionuclide therapy; TRT/TRNT)가 재조명받고 있다.

임상이 아니라 방사선방호 입장에서 TRT를 보면, 주된 이슈는 환자에게는 정상조직이나 장기의 보호이며, 다른 사람 방호나 환경보호 관점에서는 다량의 비밀봉 방사성물질을 취급함에 따르는 피폭과 오염 관리 문제이다.

환자 정상조직 보호 관점에서는 방사성핵종의 선정, 표지화합물인 방사성의약품 제조, 그리고 환자 맞춤 선량계측이 개입되는 치료계획이 중요하다. 이상적인 핵종은 비정기적인 짧은 알파입자를 내며 촬영수단을 제공하도록 약간의 광자(바람직하게는 양전자 붕괴에 이은 소멸광자)를 방출하면서, 반감기가 수십 시간 정도로 방사성의약품 제조와 공급에 충분하되 장기적 방사능 오염문제가 없는 것이다. 낮은 비용으로 방사화학적 고순도 물질을 얻을 수 있으면 금상첨화이다.

환자 맞춤 선량계측은 필요하고 중요하지만 도전을 수반한다. 불확도가 큰 부분이 환자 고유의 생물역동학이다. 진단준위 시험을 통해 환자 고유 데이터를 얻어 치료계획에 반영하는 것이 원론이지만, 다양한 방사성의약품에 대해 충분한 지침이 정립되어 있지 못하다. 실용가치가 큰 것부터 절차를 개발, 보급하는 것이 필요하다.

의료진을 포함한 다른 사람 방호의 원론은 다른 분야 비밀봉 방사성물질 취급과 같으나 간병인/위안자(직업적 간병인은 제외), 퇴원 후 가족 구성원의 피폭 문제는 특별한 상황이다. 이 간행물에서도 ICRP는 간병인/위안자 피폭을 의료피폭으로 규정하면서도 선량한도와 연계되는 선량제한치를 적용하기를 권고한다. 논리가 영긴 권고이지만 ICRP 103의 방호체계에서 간병인의 피폭을 달리 분류할 대안이 없었다. 의료피폭이 아니면 직무피폭이나 일반인피폭이어야 하는데, 의미상 전자일 수는 없고 후자로 분류하면 선량한도 초과 문제로 간병이나 위안 자체가 어렵게 된다. 피폭상황이나 피폭자 분류체계를 재고할 여지가 있다.

비밀봉 방사능물질 처치를 받은 환자가 퇴원하거나 통원진료를 하는 경우 병원 밖에서 방사선방호와 관련한 이슈가 있다. 일반적으로 이들 환자나 보호자에게 방사선 안전지침을 제공함에도 불구하고, 일부 환자는 가정으로 귀가하지 않고 숙박업소나 특정 요양병원으로 가는 경향이 있는 것으로 알려져 있다. 다수 환자가 소수 특정 요양기관으로 집중되면 그 시설은 상시로 방사능 오염이 예상된다.

이 문제를 개선하려면 제도적으로 이러한 시설을 규제권 안으로 들여 오염관리 책무를 부과하는 대안을 생각할 수 있으나, 이는 결국 환자를 일반 숙박시설로 재배치하는 결과가 될 것이 예상된다. 가정의 오염과 가족의 방사선피폭을 생각해 숙박시설로 가는 환자를 막을 수는 없으므로, 처치한 의료기관에서 보다 친절한 설명을 통해 가능하면 환자가 귀가하도록 유도할 필요가 있다.

가정 여건 때문에 부득이 외부 시설을 이용하기로 결정한다면, 환자나 보호자도 시설의 오염을 최소화하는 데 협조할 필요가 있다. 개인용 시트나 깔개 타월, 욕실 물품 등을 사용함으로써 시설의 오염을 최소화하도록 노력하는 성의가 요구된다.

오염 예방과 관리에는 방사선측정기가 크게 도움이 된다. 환자가 어떻게 행동할 때 그로 인해 얼마나 오염이 발생하는지 체득할 수 있기 때문이다. 퇴실할 때도 오염 부위를 확인하여 제염할 수 있다. 따라서 TRT 처치 의료기관은 이러한 환자를 위해 사용법이 단순한 방사선측정기를 임대하는 서비스를 제공하는 것이 바람직할 것 같다. 자체로 측정기를 확보하기 어렵다면 외부 서비스 업체를 소개할 수도 있겠다.

가끔 이러한 환자가 이웃에 기거하거나 대중교통을 이용한다고 시비하고 신고하는 경우도 있다. 환자의 퇴원을 승인하는 것은 그로 인해 다른 시민의 보건에 위해가 우려되지 않는다는 판단에 따른 것이므로 과민반응은 자제할 필요가 있다. 내가 환자일 때 타인에게 위험이 되지 않는 수준인데 내 몸속에 약간의 방사능이 남아 있다고 의료 없이 1~2주 동안 높은 입원비를 부담하며 격리병실에서 지내야 한다면 어떻게 입장을 바꿔 생각해 볼 일이다. 더욱이 현재 격리병실 부족으로 암을 치료하려는 환자가 불안 속에서 오랫동안 치료를 기다려야 하는 문제도 있다.

2019년 12월

역자 이재기

(대한방사선방어학회 방사선안전문화연구소장, 전 ICRP위원)

객원논설

방사성의약품 치료에서 방사선방호

핵의학은 의료에 방사성 추적자를 적용하는 기술로서 1913년 Hevesy와 Paneth가 발명했다. 방사성의약품이란 방사성동위원소를 표지한 화학/생물 물질로서 사람 의료에 적용하도록 국가 당국이 약품으로 승인한 것이다.

생리학적 또는 대사학적 과정을 통해 어떤 조직, 장기 또는 병소에 선택적으로 모이는 약품을 선정하고 방사성동위원소로 표지한다. 매우 많은 방사능을 표지하지만 약품은 극소량이어서(높은 비방사능), 방사성의약품은 약품으로서 효과를 내지는 않는다. 즉, 약품 자체는 방사선에 의한 진단이나 치료 목적으로 신체의 특정 부위까지 방사성동위원소를 전달하는 데 사용하는 것이다.

체내에서 방사성동위원소의 분포와 시간변화는 방출하는 감마선을 체외에서 측정하여 추적할 수 있다. 체내 분포는 정량적 방사능과 함께 영상으로 전시할 수 있는데 이로써 진단, 치료계획 또는 치료효과 평가에 사용된다. 암과 같은 병소에 모이는 베타 또는 알파 방사선을 방출하는 방사성동위원소는 병리조직에 집중적으로 조사하여 그 세포를 파괴할 수 있는데, 이 기전이 치료에 이용된다. 알파, 베타 및 감마 방사선을 사용하여 진단과 치료를 동시에 겨누는 효율적 방사성의약품 사용법을 ‘진단겸치료(테라노스틱스)’라 한다.

1940년대에 갑상선질환 치료에 방사성요드 이용과 백혈병 치료에 방사성 인산염 이용에 관한 첫 보고서를 의료인은 물론 일반인도 크게 반긴 바 있다. 이 고전적 발견은 곧 유사한 일련의 방사성 ‘마술총알magic bullet’ 이용의 선두주자로 간주되었다(Wagner 2006). 오늘날에도 갑상선과민증이나 갑상선암 치료에 방사성요드 요법 적용은 일본과 다른 나라에서 증가하고 있다. ^{89}Sr 이나 ^{153}Sm 을 표지한 항골성 제제는 난치성 뼈 통증 완화에 사용되고 있다. 알파입자를 내는 ^{223}Ra -2염화물은 다중 뼈 전이암 환자의 통증 완화와 생존기간 연장 효과를 내고 있다. 성장호르몬억제인자 somatostatin 수용체와 같은 호르몬 수용체에 결합한 방사성의약품을 사용한 내분비계 전이암 치료는 유럽에서는 널리 이용되는데, 일본에서도 승인될 것 같다.

^{131}I , ^{90}Sr , ^{153}Sm , ^{177}Lu 과 같은 베타 방출체나 ^{211}At , ^{213}Bi , ^{225}Ac 등 알파 방출체

로 표지한 항원을 이용해 전립선 특화막 항원prostate-specific membrane antigen과 같은 암 관련 항원을 겨누는 방사면역치료도 임상적용이 연구되고 있다. 광자 방출 방사성핵종 및 베타나 알파 방출 방사성핵종으로 표지한 항원의 진단기능과 치료 기능을 결합한 진단겸치료는 새로운 의과학이 되고 있다.

세계적으로 암치료에서 병리조직을 겨누는 방사성의약품 기술의 의료이용은 늘어나고 있다. 일본에서 지난 10년 동안 방사성의약품 치료를 받은 환자 수는 두 배로 되었다.

진단 핵의학에서 보편적으로 사용되는 양보다 훨씬 많은 방사능이 비밀봉 방사성 동위원소로 사용되기 때문에 방사성의약품 치료에서 방사선방호는 특수성이 있다. 높은 방사능 때문에 특별히 설계되고 특수 차폐와 오염관리 대책을 갖춘 병실에 환자를 입원시켜야 한다. 환자의 퇴원이나 외래환자로 취급은 가족이나 친지에게 줄 수 있는 잠재적 선량에 근거하여 결정되어야 한다.

치료목적으로 방사성의약품을 투여받은 환자는 진단목적으로 투여받은 환자에 비해 더 긴 시간 동안 더 많은 선량을 줄 수 있는 방사선원이 된다. 다른 사람 특히, 아동이나 임신여성과 접촉에서는 특별한 방호대책이 요구된다. 이런 환자가 방사선 감시기를 지나면 경보를 작동시킬 수 있다. 따라서 이런 환자는 병원이 발급한 관련 증명서를 소지해야 한다. 일정 기간동안은 모유수유나 수태를 중지해야 한다. 방사성 환자가 투석을 받을 때는 방사선방호에 특별한 고려가 요구된다.

비밀봉 방사성동위원소에 의한 오염을 방지하기 위해 방사성의약품을 다루는 의료진은 안전대책을 위해 일반 방사선작업자를 위한 것에 추가로 특별한 훈련과 경험이 필요하다. 오염이 발생한 때 제염법도 알아야 한다. 오염을 관리구역 내로 제한하도록 특별한 주의도 필요하다.

수십 년간 ICRP는 방사성의약품을 사용하는 절차를 거치는 환자의 선량을 계산하는 선량계수와 기타 지침을 개발해 왔다. 최근에는 간행물 128(ICRP 2015a)에 이러한 자료를 요약했다.

이 간행물에서 ICRP는 방사성의약품 치료와 관련해 환자, 의료진 및 일반인의 방사선방호에 관한 권고를 제공한다. 방사성의약품 치료를 시술하는 핵의학전문이나 이를 처방하는 의사, 기타 관계 의료진은 환자와 종사자에 대한 방호 고려사항에 익숙해야 한다.

원자력/방사선 사고나 악의적 행위 사태에서는 방사성물질에 의해 내부피폭을 받은 사람들이 선량 평가나 처치를 위해 병원에 오게 될 것이다. 이 목적에 가장 적합한 시설은 방사성의약품치료를 위해 특별히 설계된 방들이 될 것이다. 마찬가지로 치료환자를 돌보도록 훈련받은 의료인은 다른 유형의 방사선 비상을 다루는 데 우수한 전문인이 될 것이다. 이런 의료진은 예기치 않은 원자력/방사선 비상사태에 대비할 수 있도록 훈련을 받고 정규 연습을 거치게 해야 한다.

YASUHITO SASAKI

전 ICRP 위원(2001-2009)

〈역주〉치료용 방사성핵종의 물리적 특성

원소	방사성핵종	반감기	유용 방사선: [에너지(MeV)/방출률(%)]
인	P-32	12.27 일	베타: [1.71/100]
스트론튬	Sr-89	50.56 일	베타: [1.50/99.99]
이트륨	Y-90	64 시간	베타: [22.80/100]
테크네슘	Tc-99m	6 시간	감마: [0.141/89.0]
인듐	In-111*	2.81 일	감마: [0.245/94.1], [0.171/90.6]
주석	Sn-117m	14 일	감마: [0.159/86.4], [0.156/2.113]
요드	I-123	13.2 시간	감마: [0.159/83.3], [0.529/1.39]
	I-124	4.18 일	베타+: [0.687/11.7], [0.975/10.7] 감마: [0.511/44.8], [0.603/62.9], [1.691/11.15], [0.723/10.36], [1.509/3.25]
	I-131	8.025 일	베타: [0.606/89.6], [0.334/7.23], [0.248/2.08], [0.304/0.65], [0.807/0.39] 감마: [0.364/81.5], [0.637/7.16], [0.284/6.12], [0.723/1.77], [0.080/2.62]
사마륨	Sm-153	46.28 시간	베타: [0.694/49.3], [0.641/31.3], [0.803/18.4] 감마: [0.103/29.25], [0.070/4.73], [0.097/0.77]
어븀	Er-169	9.392 일	베타: [0.351/55], [0.343/45]
루테튬	Lu-177	6.65 일	베타: [0.498/79.4], [0.177/11.61], [0.385/9.0] 감마: [0.208/10.36], [0.113/6.17]
레늄	Re-186	3.72 일	베타: [1.072/71.0], [0.934/21.54] 감마: [0.137/9.47], [0.767/0.03]
	Re-188	17 시간	베타: [2.120/70.7], [1.965/25.8], [1.487/1.85], [1.034/0.683],[0.658/0.492],[0.355/0.205]. [0.179/0.11] 감마: [0.155/15.49], [0.633/1.37], [0.478/1.08]
금	Au-198	2.694 일	베타: [0.961/99.0], [0.285/0.986] 감마: [0.412/95.62], [0.676/0.81]
비스무트	Bi-213	45.59 분	알파: [5.875/1.959], [5.558/0.181] 감마: [0.324/0.167], [0.545/0.017]
라듐	Ra-223	11.43 일	알파: [5.716/51.6], [5.606/25.2], [5.539/9.0], [5.747/9.0], [5.433/2.22], [5.871/1.0] 감마: [0.269/13.9], [0.154/5.7], [0.323/3.99], [0.144/3.27], [0.338/2.84]
악티늄	Ac-225	9.92 일	알파: [5.830/50.7], [5.793/18.1], [5.790/8.6], [5.732/9.3], [5.637/4.4], [5.724/3.1], [5.682/1.3], [5.580/1.2], [5.609/1.1] 감마: [0.10/1.7], [0.150/0.60], [0.188/0.45]

* 촬영목적 꼬리표로 사용.

목차

역자서문	iii
객원논설	v
치료용 방사성핵종의 물리적 특성	viii
사용 두자어 및 두자성어	xi
요지	1
요점	3
제1장 서론	5
제2장 방사성의약품 치료 기법: 정당화 및 최적화	7
2.1. 서론	7
2.2. 갑상선과민증 및 기타 양성 갑상선 질환 처치	8
2.3. 진행 갑상선암의 치료	10
2.4. 진성적혈구증가증과 본태 고혈소판증의 치료	14
2.5. 뼈 전이암 치료	16
2.6. 아동 및 청소년의 신경모세포종 치료	19
2.7. 방사표지 펩타이드 수용체로 치료	21
2.8. 방사면역치료	24
2.9. 선택적 내부방사선요법에 의한 간세포 암종과 간 전이암의 동맥내 치료	28
2.10. 관절염 치료(방사성핵종 유탄막절제)	30
제3장 생물역동학 자료 수집	33
3.1. 전신 방사능	33
3.2. 혈액 방사능	33

3.3. 장기 및 종양 방사능	34
3.4. 정량적 프로토콜	36
제4장 흡수선량 계산법	38
4.1. 흡수선량 계산 목적	38
4.2. 흡수선량 계산을 위한 데이터	39
4.3. 흡수선량	40
4.4. 선원영역의 시간적분 방사능 계수	44
4.5. 흡수선량 산출의 불확도	45
4.6. 생물실효선량(BED)	46
제5장 구체적 방사선방호 이슈	51
5.1. 서론	51
5.2. 방사성의약품 치료실과 병실 요건	52
5.3. 환자의 의료피폭	53
5.4. 의료진의 직무피폭	57
5.5. 위안자와 간병인(의료피폭) 및 일반인 피폭	63
제6장 요약 및 권고	67
참고문헌	69
용어집	89
사사	97

사용 두자어 및 두자성어

ALT alanine aminotransferase	알라닌 아미노전달효소
ANC absolute neutrophil count	절대 중성구수
AST aspartate aminotransferase	아스파라진산 아미노 전달효소
BED biologically effective dose	생물실효선량
CD20 B세포에서 나타나는 항체	unglycosylated phosphoprotein
CML chronic myelogenous leukemia	급성골수성 백혈병
CNSC Cannadian Nuclear Safety Commission	캐나다 원자력안전위원회
CT computed tomography	전산화단층촬영
CTCAE Common Terminology Criteria for Adverse Events	암치료 약물의 표준화 분류 범주
DNA deoxyribonucleic acid	디옥시리보핵산
DOTATOC (DOTA ⁰ -Phe ¹ -Tyr ³)octreotide.	제품명 Edotreotide으로 표지화합물 형성 착화제
DOTATATE oxodotreotide	양기능 착화제 DOTA와 공유결합한 아미노산 펩타이드
DTPA diethylenetriamine pentaacetic acid	표지화합물에 이용되는 착화물
EANM European Association of Nuclear Medicine	유럽핵의학연합
EDTMP ethylenediamine tetramethylene phosphonate	표지화합물 제조에 이용되는 포스 폰산
ESTIMABL Etude Stimulation Ablation	방사성요드 갑상선절체에 관한 프랑스 연구
EU European Union	유럽연합
Hb haemoglobin	혈색소 기호
HEDP hydroxyethylidene diphosphonic acid	에티트론산. 표지화합물 재료로 이용.
HiLo trial	영국에서 수행한 갑상선 치료에 방사성요드 투여량 차이에 따른 효과 비교 연구
IAEA International Atomic Energy Agency	국제원자력기구
ICRP International Commission on Radiological Protection	국제방사선방호위원회
ICRU International Commission on Radiation Units and Measurements	국제방사선단위측 정위원회
LET linear energy transfer	에너지전달선밀도
LLN lower limit of normal	정상 하한
MAA macro aggregated albumin	대응집 알부민
mIBG metaiodobenzylguanidine	요벤구안. 아드레날린성 신경전달물질 유사체

MIRD Medical Internal Radiation Dose committee 미국 핵의학분자영상학회(SNMMI)의
내부피폭선량 전문위원회

MRI magnetic resonance imaging 자기공명촬영

NCRP National Council on Radiation Protection and Measurements 미국 방사선방호측
정위원회

PET positron emission tomography 양전자방출단층촬영

PLT platelet count 혈소판수

PSMA prostate-specific membrane antigen 전립선 고유 막항원

QA quality assurance 품질보증

QC quality control 품질관리

RBE relative biological effectiveness 생물학적효과비

RCP Royal College of Physicians 영국 왕립의학협회

SIRT selective internal radiation therapy 선택적 내부 방사선요법

SIRTEX SIRT용 수지구를 생산하는 호주 회사

SPECT single photon emission computed tomography 단일광자방출 CT

ULN upper limit of normal 정상 상한

방사성의약품 치료에서 방사선방호

ICRP 간행물 140

2018년 11월 ICRP 승인

요지 - 뛰어난 방사성핵종, 화합물, 추적자 분자 및 투여기법으로 다양한 암을 치료하는 데 방사성의약품 사용이 늘어나고 있다. 방사성의약품 치료를 포함하는 방사선치료의 목표는 종양관리 확률과 정상 조직/장기의 잠재적 부작용 사이 관계를 최적화하는 것이다. 이 최적화에서 요점은 종양과 정상조직에 전달되는 선량을 정량화하는 능력이다. 이 간행물은 치료절차를 개괄하고 여러 치료 접근에서 방사선량을 계산하는 기틀을 제공한다. 방사성의약품 치료에서 특정 조직/장기의 흡수선량은 방사성핵종의 물리적 반감기와 함께 방사성의약품의 흡취, 신체의 여러 조직/장기에서 체류 및 제거에 의해 지배된다. 생물역동학적 변수는 복잡도가 다양한 기법을 이용한 측정으로부터 직접 구한다. 치료계획에서 흡수선량 계산은 보통 표지추적자 투여를 통한 선량계측을 이용해 치료에 앞서 수행하거나, 때 치료투여에서 이미 투여된 방사능에 근거하여 회귀적 선량계측으로 수행한다. 불확도 분석은 편향과 우발 요동의 원인과 크기에 관한 추가 정보를 제공하는데, 이러한 분석은 흡수선량 계산의 품질과 신뢰도를 보여준다. 유효선량은 방사선 피폭의 확률론적 영향(대개 암)으로 인한 위해의 개략적 생애위험 척도를 제공할 수 있다. 그러나 유효선량은 개인의 장래 암 발생 예측에도, 방사성의약품 치료에 수반되는 조기 결정론적 영향의 판단에도 적용되지 않는다. 방사성의약품 치료에서 사고예방은 시설, 기기 및 절차의 설계에 필수 요소로 되어야 한다. 의료진 피폭 최소화에는 기기설계, 합당한 차폐, 선원 취급, 개인 방호용구, 그리고 방사선방호에 대한 주의와 헌신을 조장하는 교육훈련에 대한 고려가 포함된다. 방사성의약품 치료 후 환자의 입퇴원 결정은 환자 몸의 잔류방사능으로 인해 일반인이나 보호자가 받을 수 있는 잠재적 방사선량을 고려해야 한다. 이때 환자와 보호자에게 구체적 방호지침을 제공해야 한다.

중심어: 방사성의약품 치료, 방사성핵종, 선량평가, 방사선방호

요점

- 방사성의약품에 의한 치료는 처치를 정당화하고 최적화하는 프로토콜을 요구한다. 치료계획을 위해, 그리고 투여 후 종양과 정상조직의 선량을 평가하기 위해 개별 흡수선량 평가가 필요하다.
- 임신여성과 아동의 방사선 피폭에는 각별한 고려가 있어야 한다. 일반적으로 임신은 방사성의약품 치료에서 금기이다. 방사성의약품 치료를 받는 환자는 모유수유를 중지해야 한다.
- 방사성의약품 치료에 사용하는 방사선원은 그 선원이 있는 방이나 주변에 있는 의료인과 기타 관계자의 피폭을 초래할 것이다. 관계자의 방사선방호에 대한 주의와 헌신을 고취하는 교육훈련과 함께, 차폐를 포함한 적절한 절차, 시설 및 방의 설계가 방사선량이나 오염을 유의하게 감축할 수 있다. 방사성의약품 치료에서 사고 예방과 안전관행에 대한 검토는 시설, 기기 및 투여절차 설계의 필수 요소가 되어야 한다.
- 의사는 모든 가료가 방사선방호의 정당화 및 최적화 원칙과 일관되게 해야 한다. 구멍 의료절차나 수술인 경우, 환자가 그러한 가료를 필요로 할 때 방사선방호 조치가 이를 방해하거나 지연시켜서는 안 된다. 의료진은 환자선량 수준에 대해 훈련을 받고 이해해야 한다.
- 치료 후 환자의 입퇴원은 개별 환자의 상태와 함께 기존 지침이나 법규에 근거하여 결정하되, 환자 체내 잔류 방사능, 환자의 희망, 가족 상황(특히 아동이나 임신여성 존재 여부)을 감안해야 한다. 환자와 간병인에게 방사선방호를 안내하는 정보를 제공해야 한다.

제1장 서론

(1) 방사선치료는 환자 생명을 보전하고 삶의 질 향상을 위해 암을 치료한다. 방사선치료는 악성질환 치료에 초점을 맞추면서 조직반응을 제한하기 위해 정상 조직/장기에 전달되는 흡수선량을 최소화해야 한다. 방사성의약품에 의한 치료에 관한 현행 ICRP 권고는 ICRP 73(1996a), ICRP 94(2004), ICRP 103(2007a), ICRP 105(2007b) 등에서 찾을 수 있다.

(2) 의료계는 아직 그러한 절차를 위한 유용한 생물역동학적 자료와 선량계측 자료의 수집에 적절한 자원을 갖고 있지 않다. 그러나 외부빔 방사선치료에서도 그렇듯이 정량적 영상과 선량계측이 방사성의약품 치료¹⁾에서 치료계획의 기반이 되어야 한다.

(3) 방사성의약품, 특히 새로운 접근에 대한 기존 정보와 문헌을 수집하고 검토하면 방사성의약품의 치료 사용을 최적화하는 데 도움이 될 것이다. 치료준위 방사능에서 환자 생물역동학 차이에 대해 의료계가 주의하게 하는 것이 요긴하다. 이 정보는 특히 처방 방사능의 투여 수준과 관련하여 새로운 방사성의약품의 도입을 조정할 수 있다.

(4) 종양이나 결정장기에 전달되는 흡수선량을 다루는 간행물은 많은데, 여기에는 흡취²⁾와 체류의 생물역동학에 관한 상세가 포함된다. 수행된 많은 연구가 제공하는 방대한 생물역동학 정보가 편리하게 가용하다면 좋을 것이다. 또, 그런 데이터

1) 방사성의약품에 의한 치료는 '방사성핵종 표적 치료'targeted radionuclide therapy, '비밀봉선원 치료'unsealed source therapy, '전신방사선치료'systemic radiation therapy, 또는 '분자방사선치료'molecular radiotherapy 등을 포함하여 여러 동의어로 불린다. 이 간행물에서는 ICRP나 ICRU의 다른 간행물과 일관성을 위해 일반 용어인 '방사성의약품 치료'radiopharmaceutical therapy를 사용한다.

2) <역주> uptake. 사전적 의미는 흡수, 섭취 등이지만 방사선방호에서 '섭취'는 방사성핵종을 경구나 호흡기를 통해 체내로 들어오는 것을 의미한다. uptake는 체액이 소화관이나 호흡기관에 있는 방사성핵종을 받아들이는 것 또는 특정 관심조직이 체액의 방사성핵종을 받아들이는 것을 의미하므로 이 번역본에서는 uptake를 다소 특별한 표현으로 '흡취'로 적는다.

의 획득에 사용된 방법의 설명에서 수집된 데이터 완결성을 평가하는 것도 가치가 있을 것이다.

(5) 이 간행물은 치료절차를 계획하고 전달된 흡수선량을 검증하기 위한 개인별 선량계측을 수행하는 기틀에 대해 상세히 다룬다.

(6) 방사성의약품 치료는 종종 한 환자와 다른 환자 사이에 큰 생물역동학 차이에 직면한다. 후속 치료 투여가 조직/장기의 감내수준을 넘기지 않음을 확신하기 위해서는 개인별 선량계측이 필요하다. 의료업무와 방사성의약품 치료 관행의 최적화, 그리고 방호최적화는 서로 다른 전문인을 요구하는데, 의학물리사, 핵의학기사, 핵의학전문의, 내분비전문의, 종양전문의가 포함된다.

(7) 이 간행물이 겨누는 독자는 핵의학전문의, 종양전문의, 의학물리사, 임상역, 진료의 및 처방의, 의뢰의, 핵의학사³⁾, 핵의학기사, 방사선사, 방사선안전역⁴⁾, 규제자, 의과학 학회, 산업계, 환자, 환자옹호 그룹⁵⁾patient advocacy group, 공중보건 담당관 등 다양하다.

3) <역주> radiopharmacist. '방사약사'라는 표현도 사용되고 있다.

4) <역주> 원어는 radiation protection officer이다. 직역하면 과거 우리 법규에서 사용하던 '방사선안전관리책임자'처럼 인식되지만 안전관리의 궁극적 책임은 경영주에 있다. 이 책임소재에 혼선을 초래하기 때문에 원자력안전법규에는 현재 '방사선안전관리자'라는 용어를 사용하고 있다. 그러나 '안전관리자'라는 용어는 방사선방호 업무를 전문으로 하는 여러 직제 사람을 모두 지칭하는 것처럼 오해할 수 있다. radiation protection officer는 소정 자격(면허)을 갖춰 경영주를 자문하거나 위임받은 권한을 행사하는 사람이므로 이 번역본에서는 다소 생소하지만 '방사선방호역'이란 용어로 적는다. 그러나 현행 국내 법규 체계에서는 이를 '방사선안전관리자'로 이해할 수 있다.

5) <역주> 환자의 권리를 옹호하는 목적의 사회단체로서 우리나라의 경우 한국환자단체연합회와 각종 질환별 환우회 등이 있다.

제2장

방사성의약품 치료 기법: 정당화 및 최적화

2.1. 서론

(8) 방사성의약품치료는 광범한 방사성핵종, 상이한 표적화 기전, 여러 투여 방법을 포괄하는 복잡한 절차다. 매 방사성의약품 치료 절차마다 정량화 촬영, 흡수선량 계산, 정상조직 위해 고려 때문에 선량계산에 고유한 도전 목록이 제기된다. 치료환자는 소수인데 다분야 전문성 수요 때문에 외부법 방사선치료에 비해 개발이 부진하다(NCRP 2006).

(9) 방사성의약품 치료의 목적은 뼈 전이암에 대한 베타 방출체 사용처럼 대체로 통증관리이다. 완전반응⁶⁾은 갑상선 절제 후 갑상선 잔존물 제거 사례와 같은 제한적인 경우에서만 통상적이다. 대부분 치료에서는 반응 폭이 넓다.

(10) 갑상선중독증이나 갑상선암 치료에 ¹³¹I 요드화물 사용, 다혈구증 polycythaemia 치료와 뼈 통증완화에 ³²P 인산염 사용과 같은 방사성핵종 치료는 70년 이상 실시해 왔다. 이제 다양한 고가의 방사성핵종과 그 화합물, 추적자 분자와 적용 기술을 사용해 다양한 종양의 처치에 방사성핵종 치료 이용이 늘어나고 있다. 근래에 개발되어 임상 실무에 적용되는 예로는 내분비계 종양 치료를 위한 ¹⁷⁷Lu 표지 펩타이드와 전립선암의 뼈 전이암 치료에 사용하는 ²²³Ra 2염화물이 있다.

(11) 새로운 방사성의약품 치료 기법의 도입은 처치를 정당화하고 최적화하는 프로토콜 개발을 수반한다.

(12) 많은 새로운 방사성의약품 치료가 개발되고 있다. 새 제제마다 개별적으로 고려해야 하고, 효과와 안전에 대해 잠재적 이득과 위험, 그리고 환자 상태, 처치의

6) <역주> complete response. 종양이 완전히 소실되는 것. '완전관해'로 적기도 한다.

목표를 고려해야 한다.

(13) 비밀봉 방사성핵종으로 수행한 치료의 구체적 사항은 기록으로 유지해야 한다. 흡수선량 계획, 투여 방사성의약품 방사능에 관한 데이터는 환자 의료기록에 반드시 포함되어야 한다.

(14) ICRP 106(2008), ICRP 128(2015a), ICRP 80(1998)에 제공된 선량계수는 진단 핵의학을 위한 것이지 치료 적용을 위한 것이 아니다. 치료에 방사성의약품 사용은 더 상세해야 하고 치료계획을 위한 환자 맞춤 선량계측을 요구한다. 선량계측은 종양과 정상 조직/장기 모두에 대해 이루어져야 한다.

2.2. 갑상선과민증 및 기타 양성 갑상선 질환 처치

(15) 1940년대에 처음 사용된(Sedlin 등 1946) ^{131}I 요드화물은 확산갑상선종이나 결절 독성 갑상선종, 갑상선과민증, 또는 비독성 갑상선종의 일상 치료제이다 (Leiter 등 1946). 처치는 ^{131}I 요드화물을 내장한 캡슐을 경구투여하는 방식으로 수행되지만 개인별 방사능 투여에는 ^{131}I 용액도 사용된다. 방사성요드는 갑상선에 집적되고 ^{131}I 이 방출하는 베타입자가 갑상선 세포를 파괴한다. 비록 이 방법이 일선 처치로 정립되어 있지만, 투약계획에 관한 합의는 거의 없으며 치료 목표에 대한 논쟁도 계속되고 있다.

2.2.1. 치료 목표

(16) 치료 목표는 갑상선 세포를 파괴하여 갑상선 과반응을 낮춰 환자를 정상 갑상선 또는 저조 갑상선으로 만드는 것이다.

2.2.2. 치료 프로토콜

(17) 치료 목적에 따라 치료 프로토콜은 다음 세 범주로 된다.

- 단기간에 환자를 저조 갑상선으로 만들 목표로 일정 방사능을 투여. 이후 환자 에게는 여생 동안 갑상선 대체 호르몬 공급을 계속해야 한다(RCP 2007).
- 필요한 최소한 방사능 투여이지만 즉각적 반응으로 갑상선저하증이 되게 하는 개인 맞춤 접근(Kobe 등 1994, Stokkel 등 2010, Schiavo 등 2011).
- 가능한 한 환자를 정상 갑상선으로 만들어 부가적 투약 요구를 지연시키는 것을 목표로 하는 개인 맞춤 접근(Flower 등 1994, Howarth 등 2001).

2.2.3. 친지나 가족의 방사선량

(18) 방사성요드는 주로 소변으로 배출되지만 대변이나 날숨으로도 배출된다(Hänscheid 등 2013, ICRP 2015a,b). 상당한 편차는 있지만 갑상선으로부터 ^{131}I 의 평균 유효반감기는 약 5일이다. 방사선량 평가는 환자 고유인자를 고려하여 개별 치료마다 수행해야 한다. 환자로부터 받는 피폭을 줄이기 위한 구체적 서면지침을 환자와 가족에게 제공해야 한다.

2.2.4. 의료진의 방사선량

(19) 양성 갑상선 상태의 치료를 위해 투여하는 방사능 수준은 절제나 치료 절차를 위한 투여량보다는 크게 낮지만, 진단 연구를 위해 투여하는 양보다는 높다. ^{131}I 을 다루는 의료진의 직무피폭을 평가해야 하며, ^{131}I 을 취급하는 핵의약사의 갑상선 선량을 감시하는 것도 중요하다.

2.2.5. 환자 장기선량 계측

(20) 방사성요드로 양성 갑상선질환을 관리할 때 내부피폭 선량계측의 역할은 논란으로 남아 있다. 때로는 선량계측 고려 없이 방사능을 투여하기도 하며, 다른 경우는 치료를 안내하기 위해 선량계측을 수행한다(Stokkel 등 2010). 정량적 촬영이나 선량계측의 발전은 보다 정교한 선량계산을 가능하게 하는데, 이때는 조직 체적 고려와 함께 ^{131}I 이나 ^{123}I 은 단일광자방출 단층촬영(SPECT), ^{124}I 은 양전자방출 단층촬영(PET)으로 후속 체류를 측정한다(Merril 등 2011). 유럽핵의학연합회 European Association of Nuclear Medicine(EANM)는 선량계측 지침을 발행하고 있다(Hänscheid 등 2013).

2.2.6. 환자의 위험

(21) 모든 치료절차에서 그러하듯, 임신과 모유수유는 이러한 치료에서 금기이다. 환자는 4~6주 동안은 수태를 피해야 한다(소절 5.5.3 및 5.5.4 참조). 태령 8~10주부터 태아 갑상선이 ^{131}I 요드화물을 받아들인데, 태아 갑상선의 피폭은 영구 갑상선저하증을 초래할 수 있고 갑상선 호르몬 결핍으로 심각한 신체적 또는 정신적 지체 위험이 있으므로 임신했을 수 있는 환자의 식별은 필요하다(Berg 등 1998). 요드 차단이나 방사성 요드 흡취 저조 우려가 있으므로 방사성요드로 치료하려는 환자는 치료 2개월 이내에는 요드화물 조영제를 사용하는 검사를 받지 않게 해야 한다(Luster 등 2008).

2.2.7. 권고

(22) 현재로서는 갑상선질환 치료를 위한 표준화 프로토콜이 없는데, 이는 최선 관행을 위한 증거기반이 부족함을 의미한다. 선량계측 없는 일정 방사능 투여는 많은 병원에서 편리하게 사용될 수는 있지만, 양성 갑상선질환의 효과적 치료에 필요한 이상으로 방사능을 투여하게 할 수 있다(Jönsson과 Mattsson 2004, Sisson 등 2007).

(23) 원칙적으로 환자 고유 측정에 근거한 개인 맞춤 접근이 최소한의 유효 방사능 투여를 보장하고 장기적 잠재위험을 최소화하며 의료진, 가족, 간병인이나 위안자⁷⁾의 방사선량을 줄인다. 개인 맞춤 선량계측 접근은 필요할 때 환자의 정상 갑상선을 유지할 잠재력을 제공한다. 아직은 개인 맞춤 치료 접근 가능성을 조사하기 위한 시도는 제한적이며(Leslie 등, 2003), 갑상선과 정상조직에 전달되는 흡수선량과 결과 사이 관계를 얻기 위한 추가 시도가 필요하다. 그러한 시도는 갑상선 체적, 초기 흡취 및 체류에 따라 계층화되어야 한다(Howarth 등 2001, Reinhardt 등 2002).

2.3. 진행 갑상선암의 치료

(24) ¹³¹I 요드화물은 유두상papillary 갑상선암이나 소포follicular 갑상선암의 절제나 치료에서 선호 처치가 되었다. 보통은 투여에 앞서 환자에게 저요드 식이를 제공한다(Haugen 등 2016). 지금의 일부 지침은 심하게 진행된 갑상선암에 대해 전부 또는 거의 전부 갑상선절제를 받은 환자나 원거리 전이 갑상선암 증거가 있는 환자 체내의 갑상선 잔유물 조직의 방사성요드 절제를 위한 흡취를 조장하기 위한 부수 치료로서 재조합 인간 갑상선 자극호르몬(Thyrogen, Genzyme Corp, Cambridge, MA, USA) 사용을 지시하기도 한다. 재발 암이나 지속 암의 추가 치료를 위해 후속 투여도 실시되는데, 특히 전이된 경우에 그러하다. 환자가 요드를 거부하거나 치료반응을 보이지 않을 때까지 투여는 6~8개월까지 계속된다.

(25) 갑상선 결절과 진행 갑상선암이 있는 성인 환자를 위한 관리지침이 발간되어

7) <역주> carer and comforter. 이 간행물에서 ‘간병인/위안자’라고 말하는 간병인은 직업적 간병인이 아닌 가족이나 친지로서 환자를 돌보는 사람을 말한다. 직업적 간병인이 방사선 의료절차를 거치는 환자를 돌볼 때 받는 피폭은 직무피폭에 해당하며 그런 사람은 방사선작업종사자로 간주된다.

있으며(Silberstein 등 2012, Haugen 등 2016), 임신과 분만 후 갑상선 질환의 진단과 관리를 위한 지침도 있다(Alexander 등 2017).

2.3.1. 치료 목표

(26) 절제에서 치료 목표는 잔류하는 정상 갑상선세포와 악성조직을 뿌리뽑는 것이다. 여러 전문 의학회가 갑상선절절과 진행 갑상선암이 있는 환자를 위한 관리지침을 제공하고 있다(Luster 등 2008, Haugen 등 2016). 일부 계층범주에서는 방사성요드의 치료효과와 관련해 의견이 상이하다(Perros 등 2014). 어떤 경우에는 지속성이지만 안정병변⁸⁾stable disease이 예상된다.

2.3.2. 치료 프로토콜

(27) 수십 년간 이 치료의 광범한 이용에도 불구하고 최적 방사성요드 치료의 증거 수준은 낮다(Luster 등 2008). 절제나 후속 치료절차를 위한 최적 투여 방사능을 설정하기 위한 다수 병원 차원의 시험은 없었다. 결과적으로 최적 투여 준위에 관한 강력한 권고를 제공하는 지침은 없다.

(28) 근년에 영국의 HiLo 시험과 프랑스의 ESTIMABL 시험은 낮거나 중간 정도 위험 환자에게서 ^{131}I 1.1 GBq이 3.7 GBq만큼 효력이 있음을 입증했지만⁹⁾ 그 결과의 해석에는 논란이 있다. 위험이 낮은 환자에게 방사성요드 투여가 정녕 필요한지 논의도 진행되고 있다(Mallick 등 2012b, Schlumberger 등 2012, Haugeb 등 2016).

(29) 시험기반 증거 없이는 치료효과를 극대화하고 2차암 가능성을 최소화하기 위한 방사능 계획표가 제안된 바 있다.

(30) 지금까지 진행 갑상선암이 있는 아동의 치료를 위한 무작위 대조시험은 없으며, 단 한 세트 지침만 제시되었다(Francis 등 2015). 아동에게서 방사성요드 절제를 위한 투여 범위는 넓다. 방사능을 체중(보통 1.85~7.4 MBq/kg)이나 신체 표면

8) <역주> 고형암의 치료에 대한 반응으로, 암이 악화 또는 개선되지 않고 유지되는 상태를 의미한다.

9) <역주> 이 보고서에서 제시하는 투여량 값은 MBq 단위로 1.1, 3.7, 7.4 등 특이한 값으로 주어지는데 이는 과거 방사능 단위인 μCi 나 mCi 를 사용할 때 각각 30, 100, 200 μCi 로 표현된 값을 현재의 표준단위인 Bq로 환산한 값이다. 본래 30, 100, 200 등의 값이 단순화된 것이 듯이 환산된 값의 표현도 가령 1, 4, 7 등과 같이 단순화하여 제시하는 것이 바람직하다. 그러나 이 번역본은 원본의 표기를 그대로 적는다. 요점은 이러한 지침은 근삿값이므로 숫자에 정확히 구속될 필요는 없다는 것이다.

적 또는 연령에 따라 조정한다(Jarzab 등 2005, Luter 등 2008). 독일 절차지침 (Franzius 등 2007)은 체중과 24시간 흡취 측정량을 결합한 하이브리드 접근을 선호하고 있다.

(31) 치료투여의 치료 프로토콜도 다양하다. 아동에 대해 1.1~11.0 GBq의 고정 방사능을 투여하기도 하고, 체중에 따라 조정된 방사능을 적용하기도 한다(Jarzab 등 2005, Franzius 등 2007, Luster 등 2008, Verburg 등 2011).

2.3.3. 친지 및 가족의 선량

(32) 방사성요드의 체류와 배설은 환자에 따라 다르다. 갑상선 절제 후 ¹³¹I 배설의 평균 반감기는 갑상선과민증의 경우보다 짧다(Hänscheid 등 2006, Remy 등 2008). 환자 가족 상황을 고려하여 환자에게 서면지침을 제공해야 하며, 환자와 근접할 간병인이나 위안자는 이해동의를 구해야 한다.

(33) 치료를 받는 환자는 국가의 환자 퇴원 규제에 따라 투여 후 입원이 요구될 수 있다. 환자 입퇴원 결정은 가족이나 일반인에게 줄 잠재적 선량을 계산한 결과에 따라 사안별로 이루어져야 한다.

2.3.4. 의료진의 선량

(34) 방사선치료 관련 절차에서와 마찬가지로 선량제한 원칙과 함께 표준 주의¹⁰⁾를 기울여야 한다. 환자가 입원하면 간호사, 방사선사, 의학물리사 및 의사를 포함한 여러 그룹의 의료진이 위험에 노출된다. 이들 의료진 선량은 감시해야 한다.

2.3.5. 환자 장기선량 계측

(35) 일정 방사능 투여 프로토콜은 표적 갑상선 조직에 넓은 범위의 흡수선량을 전달하게 된다(Flux 등 2010).

(36) Seidlin 등(1946)은 전이암의 누적 흡수선량을 계산했다. 후속연구는 갑상선 잔유물 조직을 절제하는 데 300 Gy, 림프샘 전이암을 박멸하는 데 80 Gy를 전달할 때(Benua 등 1962) 골수 독성에 대한 대체 생물표지자로서 혈액 흡수선량 2 Gy를 사용한 바 있다(Maxon 등 1992).

10) <역주> standard precaution. 일반적으로 정형화된 방사선방호 대책을 의미한다. 예를 들면 외부피폭에 대해서는 거리, 시간, 차폐의 활용 등이며, 내부피폭에 대해서는 격납, 오염관리 등이 된다.

(37) 선량계측 연구는 전달한 흡수선량과 치료반응 사이에 유의한 상관관계가 있음을 보이며(Stigari 등 2014), EANM은 선량계측 지침을 발간하고 있다(Lassmann 등 2008).

2.3.6. 환자의 위험

(38) 모든 치료절차에서와 마찬가지로 임신과 모유수유는 금기이다. 수태에 대한 조언은 국가 지침¹¹⁾에 따라 주어진다(소절5.3.6 참조). 방사성요드 투여로 여러 부작용이 발생할 수 있는데, 가장 흔한 것은 침샘염과 위염이다(Luster 등 2008). 치료준위 방사성요드 1회 투여도 영구 구강건조증을 초래할 수 있고 침샘 암 위험을 증가시킬 수 있다(Klubo-Gwiedzinska 등 2010, Lee 2010). 백혈구나 혈소판 감소도 관찰될 수 있다. 갑상선 기원 폐암 환자에게는 폐포섬유증도 관찰되었다(Haugen 등 2016). 요드 차단으로 방사성요드 흡취 저하를 초래할 위험이 있으므로 방사성요드 치료를 받으려는 환자는 치료 2개월 전부터는 요드화물 조영제를 사용하는 검사를 받지 않아야 한다(Luster 등 2008).

(39) 비록 2% 정도의 장기적 원인고유 사망률은 있지만, 진행 갑상선암을 방사성요드로 치료한 아동이나 젊은이는 성인의 경우보다 상당히 오래 생존할 것으로 보인다. 폐 전이암이 있는 아동 환자는 방사성요드 투여 후 안정병변이 발생할 수도 있다(Vassilopoulou-Sellin 등 1993, Pawelczak 등 2010). 진행 갑상선암을 방사성요드로 치료한 아동의 장기 추적연구는 2차암 증가를 보였다(Rubino 2003, Brown 등 2008, Hay 등 2010, Francis 등 2015). 누적 투여방사능에 따라 백혈병 위험이 증가했으며, 방광, 결장직장계, 유방 및 침샘에 2차암 발생 가능성도 높게 나타난다.

2.3.7. 권고

(40) 연령, 환부 체적 및 전이 상태에 따라 다르지만(Mallick 등 2012a), 진행 갑상선암의 전반적 원인고유 10년 생존율은 약 85%이다(Luster 등 2008). 반대로 원거리 전이암의 10년 생존율은 25~40%에 불과한데 이는 치료계획에서 증화가 필요함을 의미한다. 재발률은 10~30% 정도로 높다. 미흡한 치료는 진행의 계속이나 요드 소극성화 위험을 안고 추가 치료를 요구하게 된다. 정상조직에 과도한 선량은 부작용이나 2차암 위험을 수반한다.

(41) 완치의 명백한 이득이나 2차암 잠재성을 최소화할 필요성은 매 치료에서 선

11) <역주> 아직 이에 대한 우리나라의 명시적 지침은 없다.

량계측의 중요성을 드러낸다. 이는 아동이나 청소년 또는 고위험 환자에게서 특히 그러하다. 치료 방사능 흡취가 감소하는 갑상선 기절stunning 가능성을 감안하면서 치료 전 선량계측의 역할을 조사하는 추가 연구가 필요하다. 갑상선 기절은 진단량 ^{131}I 에 노출된 환자에게서 진행 갑상선암이나 갑상선 절제 후 잔여 갑상선 조직이 투여된 ^{131}I 를 동화하는 능력의 변화로 나타나는 임상 소견이다.

2.4. 진성적혈구증가증과 본태 고혈소판증의 치료

(42) 진성적혈구증가증과 본태 고혈소판증 치료에 ^{32}P 인산염을 처음 사용한 것은 약 70년 전이다. 진성적혈구증가증은 각각 적혈구와 혈소판 과다생산으로 특징지어지는 만성 골수증식질환이다. 다른 질환 특성은 백혈구증가증, 비장비대증, 혈소판성출혈 부작용thrombohaemorrhagic complication, 혈관운동장애vasomotor disturbances, 가려움증, 그리고 급성 골수성백혈병이나 골수섬유증으로 진행 위험을 포함한다. 하이드록시카바마이드¹²⁾hydroxycarbamide, 인터페론, 애너그레라이드¹³⁾anagrelide 등과 같은 약품의 출현으로 ^{32}P 의 역할은 줄어들었다. 이제 진성적혈구증가증과 본태 고혈소판증은 ^{32}P 인산염으로 치료하는 유일한 골수증식성 질환으로 남아 있다.

2.4.1. 치료 목표

(43) ^{32}P 는 빠르게 증식하는 세포의 DNA에 활발하게 편입되어 골수를 조사함으로써 혈액세포 생산을 억제하여 치료한다. ^{32}P 가 방출하는 베타 방사선이 과다증식성 세포계를 억제한다. 대안 요법에도 불구하고 고령의 진성적혈구증가증이나 본태 고혈소판증 환자는 ^{32}P 인산염의 경구투여나 정맥투여로 치료한다(Tennvall과 Brans 2007).

2.4.2. 치료 프로토콜

(44) ^{32}P 인산염은 경구나 정맥으로 투여한다. 투여 방사능은 신체 표면적 기준으로 74~111 MBq/m²로서 최대 방사능 한도는 185 MBq, 또는 체중 기준으로 3.7 MBq/kg으로서 최대 방사능 한도 260 MBq로 한다. 80세 이상 고령 환자에게는 25% 경감한 방사능을 권고하는 연구자도 있다. 대안적인 선량증가식 접근은 처음

12) <역주> $\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}_2$, 제품명 Hydreia. 항암제로 만성 골수성백혈병(CML), 자궁경부암 등의 치료에 사용된다. DNA 합성을 방해한다.

13) <역주> $\text{C}_{10}\text{H}_7\text{Cl}_2\text{N}_3\text{O}$, 제품명 Agrylin. 본태 고혈소판증 치료제이다.

에는 111 MBq로 낮은 방사능을 투여한다. 적절한 반응이 없으면 3개월 후 방사능을 25% 높여서 2차 치료를 한다. 방사능을 증가시키는 이 절차를 적절한 치료 반응을 얻을 때까지 3개월마다 반복한다. 단일 투여의 최대 방사능 한도는 260 MBq이다(Tennvall과 Brans 2007).

2.4.3. 친지나 가족의 선량

(45) 외래 치료환자와 가족에게는 1) 소아나 임신여성과 장시간 근접을 피하고, 2) 귀가 후 수일 동안은 배우자나 아이들과 다른 침대를 사용하며, 3) 치료 후 2~3주 동안은 ^{32}P 가 소변으로 배설되므로 외부 오염을 피하도록 개인 위생관리를 철저히 하도록 지침을 주어야 한다.

2.4.4. 의료진의 선량

(46) ^{32}P 는 고에너지 베타 방출체이므로 약품의 분배나 주사를 할 때는 플라스틱이나 금속 차폐를 활용하는 것이 중요하다.

2.4.5. 환자 장기 선량계측

(47) 가장 높은 선량을 받는 장기는 뼈속막과 활성 조혈골수인데 이들은 투여 방사능 MBq 당 약 11 mGy를 받는다(ICRP 1987). 전형적 투여 방사능 100 MBq은 이들 조직에 1 Gy 이상을 부여한다.

2.4.6. 환자의 위험

(48) 임신과 모유수유는 금기이며 환자는 수태를 피해야 한다. 가임여성에게는 방사성의약품 사용은 권고되지 않는다. ^{32}P 치료 후 10년간 급성 골수성백혈병 발생은 약 10%이다(Brandt와 Anderson 1995). 그래서 ^{32}P 치료는 보통 65~70세 이상 환자에게 적용한다.

2.4.7. 권고

(49) ^{32}P 인산염은 고령 환자나 하이드록시우리아¹⁴⁾hydroxyurea, 부설판¹⁵⁾busulphan, 인터페론- α , 또는 애너그레라이드와 같은 대체 치료가 적합하지 않은 환자에게 사용된다.

14) <역주> 수산화요소산, $\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}_2$. 하이드록시카바마이드와 같은 성분. 제품명 Hydreia, Droxia, Mylocel 등.

15) <역주> $\text{CH}_3\text{SO}_2\text{O}(\text{CH}_2)_4\text{OSO}_2\text{CH}_3$. 1,4-Butanediol dimethanesulfonate. 제품명: Myleran, Busilvex, Busulfex. 주로 만성 골수성백혈병(CML) 치료에 사용한다.

2.5. 뼈 전이암 치료

(50) 진행단계에 있는 암 환자의 관리에서 고통스런 뼈 전이암 치료는 중요하며 통증치료가 필요하다. 고통스런 뼈 전이암은 일상생활의 제약, 기동성 제한, 우울증, 근심 등으로 삶의 질을 저하시킨다. 뼈 통증 관리는 복수 전문분야를 필요로 하는데 진통, 방사선, 호르몬, 화학요법, 비스포스포네이트¹⁶⁾bisphosphonate, 수술 등을 포함한다. 국소 전이암은 보통 외부빔 방사선치료나 수술로 치료한다 (Pandit-Taskar 등 2004).

(51) ⁸⁹Sr 염화물이나 ¹⁵³Sm-EDTMP¹⁷⁾(ethylenediamine tetramethylene phosphonate)와 같은 베타 방출 방사성의약품이 통증치료로서 고통스런 뼈 전이암 환자의 통증완화를 위해 투여되고 있다. 알파 방출 방사성의약품으로 ²²³Ra-2염화물이 뼈 전이 증상이 있는 거세저항성 전립선암 환자를 위한 방사성의약품 치료제로 출현했으며 전반적 생존연장(3~6 개월)을 보였다(Parker 등 2013, Pandit-Takar 등 2014).

2.5.1. 치료 목표

(52) 베타 방출 방사성의약품을 사용한 치료 목표는 전이암으로 인한 뼈 통증을 관리하고 뼈 전이암 환자의 삶의 질을 높이는 것이다. 이런 제제는 치료효과는 거의 없다. ⁸⁹Sr 염화물과 ¹⁵³Sm-EDTMP가 일부 국가에서 고통스런 뼈 전이암의 통증완화를 위해 승인을 받았으며, ¹⁸⁶Re-HEDP¹⁸⁾(hydroxyethylenediphosphonate), ^{117m}Sn-DTPA¹⁹⁾(diethylenetriamine pentaacetic acid) 및 ¹⁷⁷Lu-EDTMP도 연구 중에 있다(Finley 등 2005, Liepe 등 2005b, Liepe와 Kotzerke 2007, Shinto 등 2014, Yousefnia 등 2015). 이들 방사성의약품의 통증완화 기전은 뉴런 감압 때문인 것으로 믿고 있다. 뼈 전이가 있는 전립선암 환자에 대한 ²²³Ra 2염화물 치료의 목표는 습관성 진통제를 사용하지 않고 통증을 완화하여 삶의 질을 개선하고 전반적 생존기간을 늘이는 것이다.

16) <역주> 두 개의 포스포네이트 그룹을 가지는 물질로서 골다공증 치료제로 널리 쓰이며, 뼈암 관리에도 이용된다. 제품명으로는 Fosamax Plus D, Didronle, Zometa 등 여럿이 있다.

17) <역주> 제품명: Sm 153 Lexidronam. EDTMP는 EDTA의 포스포네이트 유사체로 착화 기능이 있다.

18) <역주> HEDP: 에티드론산, C₂H₈O₇P₂. 비스포스포네이트의 일종으로 약물, 세제, 수처리 및 화장품에 사용된다.

19) <역주> DTPA: 펜테탄산, C₁₄H₂₃N₃O₁₀. EDTA의 확장물로서 착화성이 세제, 탈색제, 약품, 화장품, MRI 조영제 등에 다양하게 이용된다.

2.5.2. 치료 프로토콜

(53) ^{89}Sr 염화물과 ^{153}Sm -EDTMP는 여러 나라에서 승인되었고 잘 수립된 치료 프로토콜이 있다. ^{89}Sr 염화물의 권고된 투여량은 148 MBq이다. 대안으로 체중 기준으로 1.5~2.2 MBq/kg을 단일 정맥주사로 투여할 수 있다. ^{153}Sm -EDTMP는 체중 기준으로 37 MBq/kg을 투여한다. 두 방사성의약품 치료 모두에서 치료가 유의한 효과를 내는지, 그리고 백혈구감소증이나 혈소판감소증 등 원치 않은 영향이 없는지 점검하기 위해 정기적으로 의사를 방문해야 한다. ^{186}Re -HEDP ^{188}Re -HEDP, $^{117\text{m}}\text{Sn}$ -DTPA 및 ^{177}Lu -EDTMP에 대해서는 치료 프로토콜이 연구 중이다 (Pandit-Taskar 등 2004, Liepe와 Kotzerke 2007, Bodei 등 2008, D'Angelo 등 2012, Jie 등 2013, Thapa 등 2015).

(54) ^{223}Ra 2염화물은 체중 기준으로 55 kBq/kg인 인가된 방사능을 1회 정맥 투여하고, 6개월간 매 4주마다 반복한다.

2.5.3. 친지와 가족의 선량

(55) ^{89}Sr 염화물과 ^{153}Sm -EDTMP 방사능은 주로 소변을 통해, ^{223}Ra 2염화물 방사능은 대변을 통해 배설되므로 환자가 가정에 있을 때 모든 배설물은 반드시 수세식 오수처리계통으로 내보내도록 주의를 기울여야 한다. 기저귀나 기타 오염 우려가 있는 물품은 폐기물 처리용 백에 수집해야 한다. 규정 쓰레기백은 누설이 없어야 하며 그 치료자가 정한 방법으로 치료시설로 반송할 수도 있다(Sisson 등 2011).²⁰⁾ 정신적으로 불안정하거나 대소변 실금이어서 방사선 안전 지침이나 주의를 지키기 어려운 환자는 더 장기간 입원하게 해야 한다(ICRP 2004).

2.5.4. 의료진의 선량

(56) ^{89}Sr , ^{153}Sm -EDTMP 및 ^{223}Ra 의 경우 환자는 외래기반으로 치료받을 수도 있는데 이는 의료진 피폭을 낮추는 장점이 있다. ^{186}Re -HEDP나 ^{188}Re -HEDP는 감마선 방출 때문에 피폭이 더 높다. 모든 경우 의료진 선량은 주의하여 감시해야 한다. ^{223}Ra 2염화물은 일반적 핵의학 기기로 취급하고 투여할 수 있을 만큼 안전하고 단순한 것으로 평가되었다(Dauer 등 2014).

20) <역주> 반드시 병원으로 반송해야 하는 것은 아니다. 방사성의약품은 대체로 반감기가 짧으므로 10 반감기 이상 보관 후 일반 폐기물로 배출할 수도 있다. 규제기관이 구체적인 방법을 정할 수도 있다.

2.5.5. 환자 장기선량 계측

(57) ^{89}Sr 은 전이암 사이트 주변 뼈표면과 적색골수에 각각 0.2~2 Gy/MBq과 0.05~0.3 Gy/MBq의 흡수선량을 전달하는데(Breen 등 1992) 반해 $^{153}\text{Sm-EDTMP}$ 는 각각 5.3~8.8 mGy/MBq과 1.2~2.0 mGy/MBq을 전달한다(Eary 등 1993). 개별 환자의 생물역동학과 대사에 따라 흡수선량은 달라질 수 있다. 한 제1상 임상연구에서 계산한 ^{223}Ra 2염화물로 인한 흡수선량의 범위는 뼈표면에는 2~13 Gy/MBq, 적색골수에는 뼈표면 방사능으로부터 177~994 mGy/MBq, 혈액 방사능으로부터 1~5 mGy/MBq였다(Chittendsen 등 2015).

2.5.6. 환자의 위험

(58) 뼈 전이암 치료에 사용되는 방사성의약품은 골수억제를 초래할 수 있는데, 앞서 반복된 화학치료를 받아 골수예비력이 저하된 환자에게는 특히 그러하다. 어떤 환자에게는 투여 수일 후 뼈 통증이 일시적으로 증가할 수 있다. 신장 장애가 있는 환자는 골수저하를 포함한 부작용이 더 심각할 수 있으므로 치료 전에 신중하게 평가해야 한다. 임신과 모유수유는 금기이다.

(59) ^{223}Ra 은 알파입자의 짧은 비정 덕분에 많은 골수를 피폭으로부터 피하게 하는 장점이 있다. 일반적으로 혈액학적 독성보다 비혈액학적 독성이 보편적이며, 강도는 경미하거나 보통이다. 이런 영향에는 설사, 피로, 오심, 구토 및 뼈 통증을 포함하는데 그 일부는 선량과 관련된다(Pandit-Taskar 등 2014). 오래 생존한 환자에게서 ^{223}Ra 의 장기적 부작용은 알려진 것이 없다.

2.5.7. 권고

(60) 항골성 방사성의약품은 고통을 줄이고 삶의 질을 개선하여 고통스런 뼈 전이암 관리에 중요한 역할을 한다. 1회 주사 후 여러 달 동안 통증완화가 유지될 수 있다. 각 제제에 대해 정량, 체중 기반, 1회 투여 또는 복수 투여 등 매우 다른 투여 프로토콜이 가용한데, 이는 최적 치료 프로토콜이 아직 수립되지 않았으며 따라서 이를 향한 추가연구가 필요함을 시사한다. 부작용에 대해서는 골수 피폭으로 인한 혈액학적 독성을 고려해야 한다. ^{223}Ra 에 대해서는 전달할 최적 흡수선량에 대한 연구가 최적 치료제제를 결정하거나, 치료이득이 없거나 미미한 환자를 식별하는 것을 도울 것이다. 이 방사성의약품은 보통 외래기반으로 투여하므로 방사선방호에 대한 표준 주의가 필요하다.

2.6. 아동 및 청소년의 신경모세포종 치료

(61) 1980년대에 도입된 메타아이오도벤질구아니딘²¹⁾(mIBG)은 구아네티딘과 노르아드레날린 유사물로서 노르아드레날린 전달체 분자가 관련된 활동적 전달과정에 의해 교감신경계 세포에 흡취된다.

(62) 신경모세포종은 신경계와 기타 조직의 발달에 관계하는 신경능선세포neural crest cell에서 발생한다. 이 암은 보통 부신이나 신경세포에 발생하고 뼈나 간으로 전이된다. 신경모세포종은 아동 암의 6%를 차지하며 5년 이상 생존율은 67%에 불과하다. 가장 일반적으로 화학요법 저항성 또는 재발 환자에게 ¹³¹I-mIBG를 투여한다. 결과는 30~58% 범위이다(Hoefnagel 등 1991, Garaventa 등 1999, Matthay 등 2007).

2.6.1. 치료 목표

(62) 치료 목표는 주로 통증완화이다. 반응은 완전반응과 단계하락을 포함해 다양한데, 이로써 후속 수술이나 외부법 치료를 가능하게 한다(George 등 2016).

2.6.2. 치료 프로토콜

(64) ¹³¹I-mIBG를 위한 치료요법은 폭넓다. 투여 방사능 수준을 결정하는 수립된 지침은 아직 없다. 전형적으로 선형적 일정 방사능이 투여되고 있는데, 3.7 GBq씩 반복되지만(Hoefnagel 등 1991, Tristam 등 1996), 체중기반 방사능 투여도 종종 이루어진다. 단기 독성은 전신 흡수선량과 연계되는 것 같기에 전신 흡수선량을 적색골수에 전달되는 흡수선량의 대체로 활용할 수 있다. 이로써 일정 방사능 투여에 대한 대안접근으로 이어져, 처방된 전신 흡수선량을 전달하도록 방사능을 맞춘다(Gaze 등 2005, Buckley 등 2009). 이는 말초혈액 줄기세포를 지탱하면서 총 전신 흡수선량 4 Gy를 전달하기 위해 555~666 MBq/kg으로 2회 투여를 수반한다(Giammarile 등 2008). 마찬가지로 치료전달 횟수를 결정하는 프로토콜이 없어, 비록 1회 투여 위주이지만 때로는 투여가 반복되고 최다 5회까지 투여가 보고되어 있다(George 등 2016).

21) <역주> 아이오벤구안. C₈H₁₀IN₃ 치료용 제품명: Azedra. 투여되면 부신속질 친크롬세포와 연결된 아드레날린 뉴런과립에 집적되는 성질을 이용해 주로 신경모세포종, 부신결절종과 같은 내부비계 종양의 촬영과 치료에 사용한다.

2.6.3. 친지와 가족의 선량

(65) 가정 사정을 고려하여 개별 환자별로 주의를 기울여야 한다. 집에 형제가 있을 수 있는 아동이나 청소년의 경우 특별히 그러하다. 배설은 주로 소변으로 이루어지므로 모든 배설물은 확실히 수세식 오수계통에 폐기하도록 주의를 기울여야 한다. 퇴원할 때는 환자와 가족에게 서면지침을 제공해야 한다.

2.6.4. 의료진의 선량

(66) 선원과 투여받은 환자로부터 방사선을 최소화하기 위해 세심한 방호절차가 필요하다. 의료진이나 핵의약사의 손 선량을 최소로 유지하도록 정맥주사 투여시 차폐 주사기를 사용해야 한다(Rushfirth end 2017). 투여 프로토콜은 신중히 고려해야 한다. 개인 맞춤 프로토콜(Gaze 등 2005, Buckley 등 2009)은 다른 치료에 비해 극히 높은 수준까지 방사선을 수반한다. 특히 간호진은 소정의 방사선방호 훈련을 받아야 한다. 아동에게 고선량 ^{131}I -mIBG 치료 투여와 관련해 Chu 등(2016)이 훌륭한 조언을 제공하고 있다.

2.6.5. 환자 장기선량 계측

(67) ^{131}I -mIBG를 제공하는 병원 수가 비교적 제한적인데도 방사성의약품을 사용하는 다른 치료절차에 비해 많은 선량계측 연구가 수행된 편이다(Tristram 등 1996, Matthay 등 2001, Sudbrock 등 2010, Flux 등 2011). 전신, 결정장기 및 종양에 전달되는 흡수선량이 10배 정도까지 변동한다고 보고되는데(Matthay 등 2001, Flux 등 2011), 이는 개별 선량계측의 중요성을 지시한다.

2.6.6. 환자의 위험

(68) 급성 독성은 주로 호중구감소증, 저혈소판증, 백혈구감소증을 초래하는 혈액학적인 것이다(Buckley 등 2009). 갑상선 차단은 필수이지만, 10% 이상에서 갑상선저하증이 발생할 수 있고 75% 환자에게서 간 독성이 보고되었다(Quach 등, 2011). 약 5%까지 2차암이 보고되었다(Weiss 등 2003).

2.6.7. 권고

(69) 종종 환자들이 진행암 상태로 오지만 장기간 생존도 더러 있다. 급성 골수독성 확률, 장기간 2차암 잠재성, 아동과 청소년에게 고방사능 투여를 정당화할 필요성 등은 개인 맞춤 선량계획과 검증 필요성을 강조한다.

2.7. 방사표지 펩타이드 수용체로 치료

(70) 신경내분비암은 성장억제호르몬 수용체를 표현한다. ^{90}Y -DOTATOC (^{90}Y -DOTA⁰,Tyr³]-octreotide)²²⁾와 ^{177}Lu -DOTATATE(^{177}Lu -DOTA⁰,Tyr³, Thr⁸]-octreotide 또는 [^{177}Lu -DOTA⁰,Tyr³]-octreotate)²³⁾를 포함한 방사능 표지 성장억제인자 유사물이 치료 목적으로 개발되었는데 이들은 성장억제호르몬 수용체 아형 2를 표적으로 한다. 제한적인 지침이 발간되기도 했고(Ramage 등 2012), 국제원자력기구(IAEA), EANM(유럽핵의학회연합), 핵의학분자영상학회가 공동으로 전문가 의견에 근거하여 마련한 지침문서도 있지만(Bodei 등 2013) 아직은 무작위 임상시험이 부족해 증거기반 지침을 막고 있다.

(71) 이상적 방사성핵종이 지정된 것은 없으며 ^{90}Y 과 ^{177}Lu 을 지지하는 데도 논란이 있다. 비정이 상당히 긴 베타입자를 내는 ^{90}Y 은 흡취가 비균질할 때도 다수 세포 스케일에서 균질한 에너지 분포를 낼 수 있는데, 반면 이것이 피질까지 조사하여 신장 독성을 높일 수 있다는 주장도 있다(Luster 등 2008). ^{177}Lu 은 선량계측을 위한 정량 촬영에 유용한 광자 방사선을 방출하는 장점이 있는데, 이에 비해 ^{90}Y 은 그 목적으로 종종 미량의 ^{111}In 으로 꼬리표를 붙인다. 두 방사성핵종의 물리적 반감기(^{90}Y 는 64 h, ^{177}Lu 은 6.7 d)는 흡취 후 생물학적 체류와 양립할 수 있다. ^{177}Lu -DOTATATE나 ^{90}Y -DOTATATE 모두 병원에서 방사표지가 가능한데, 이때는 표지 절차에서 의료진의 통상적 주의가 필요하다.

2.7.1. 치료 목표

(72) 반응은 다양하며 치료목표는 주로 통증완화이다. 30%까지 환자에게서 부분적이거나 완전한 목적 반응이 보고되었는데, 특히 소화기궤장연결부 종양 gastroenteropancreatic tumour 환자의 26%에서 완전반응이 보고되었다(Bodei 등 2013). 한 임상시험에서 신경모세포종이 있는 아동과 청소년에서 ^{177}Lu -DOTATATE 치료 가능성을 연구한 바 있지만(Gains 등 2011), 치료는 보통 성인을 대상으로 한다.

22) <역주> DOTATOC. 제품명: Edotrotide. C₆₅H₉₂N₁₄O₁₈S₂.

23) <역주> DOTATATE, DOTA-TATE, 또는 oxodotreotid. C₆₅H₉₀N₁₄O₁₉S₂. 양기능 착화제 DOTA와 공유결합한 아미노산 펩타이드로서 PET 촬영과 방사성의약품 치료 등에 이용된다.

2.7.2. 치료 프로토콜

(73) 약간 변동은 있지만 치료 프로토콜이 표준화되었다. ^{90}Y -DOTATATE나 ^{90}Y -DOTATOC을 신체 표면적 기준으로 3.7 GBq/m^2 로 2 사이클 투여하거나, 2.78~4.44 GBq 범위의 일정 방사능을 2~4 사이클 투여한다. ^{177}Lu -DOTATATE는 보통 5.55~7.4 GBq 범위의 일정 방사능을 3~5 사이클 투여한다. 투여 간격은 6~12 주 범위에서 가변적이다(Bodei 등 2013). 신장기능이 저하된 환자에게는 방사능을 낮춰야 할 수도 있다. 일반적으로 혈액학적 독성은 낮지만 골수예비력이 낮아진 환자에 대해서는 후속 재투입을 위해 줄기세포를 획득해 뒤야 할 수도 있다. ^{90}Y -과 ^{177}Lu -DOTATATE를 교차로 투여하는 조합 치료도 연구 중이다(Kunikowska 등 2011, Savolainen 등 2012, Seregni 등 2014). 투여량 증가 시험으로 최적 투여 프로토콜을 얻지는 못하고 있다.

(74) 신경내분비암이 있는 아동과 청소년에게서 높은 수준으로 성장억제호르몬 수용체가 관찰되었지만, 몇몇 예외를 제외하고는 불명확한 안전 특성을 이유로 이들 환자 집단의 임상시험은 배제되었다(Menda 등 2010, Schmidt 등 2010, Fains 등 2011).

2.7.3. 친지와 가족의 선량

(75) 방사능은 주로 소변과 땀으로 체액으로부터 배설된다. 따라서 환자가 퇴원할 때는 주의가 필요하며 가정환경을 고려해야 한다. 환자가 퇴원한 경우에는 친지나 가족과 접촉에 어떤 제한을 둘 것인지 판단에는 개별적 위험평가가 필요할 수 있다.

2.7.4. 의료진의 선량

(76) ^{90}Y 과 ^{177}Lu 을 포함하는 베타 방출 방사성핵종에 대해서는 방사성의약품을 준비하거나 다루는 의료진을 보호하는 데 특별한 주의를 기울여야 한다. 손 선량을 직무피폭 선량한도 이내로 유지하려면 필요에 따라 방사성의약품을 정맥투여 할 때 차폐 주사기를 사용해야 한다. 방호가 최적화된 경우에는 준비와 투여에서 손가락의 전형적 등가선량은 1회 투여에서 5~10 mSv 범위에 있지만, 부주의하면 100 mSv를 넘을 수도 있다. 방사선방호를 위해, 믿을만한 손가락 선량 지시를 위해서는 취급을 주도하는 손가락에 대해 반지선량계를 사용하여 손가락의 등가선량을 감시하기를 권고한다(Cremonsei 등 2006b, ICRP 2008, Grassi 등 2009, Vanhavere 등 2012).

2.7.5. 환자 장기선량

(77) 일부 병원에서만 내부선량 측정이 정기적으로 수행되고 있는데, 종양이나 신장, 간을 포함하는 위험에 처하는 장기에 적용하는 것 같다. ^{90}Y -DOTATATE 투여 방사능 당 활성 골수, 신장 및 간에 주는 흡수선량은 각각 0.03~0.07 Gy/GBq, 1.71~2.73 Gy/GBq, 0.27~0.92 Gy/GBq로 보고되었다(Cremonesi 등 2006a, 2010, Bodei 등 2008). ^{177}Lu -DOTATATE 투여 방사능 당 활성 골수, 신장 및 간에 주는 흡수선량은 각각 0.02~0.07 Gy/GBq, 0.32~1.67 Gy/GBq, 0.05~0.21 Gy/GBq로 보고되었다. 아직 흡수선량과 반응 상관성이 임상 시험의 귀착점은 아니지만, 그러한 상관성이 반응(Pauwels 등 2005, Ilan 등 2015)과 독성(Barone 등 2005, Walrand 등 2011, Strigari 등 2014) 모두를 포괄하는 증거는 증가하고 있다. 흡수선량은 환자마다 상당히 다르다(Hindorf 등 2007, Sundlöv 등 2017).

2.7.6. 환자의 위험

(78) 모든 방사선치료에서와 마찬가지로 임신과 모유수유는 금기이며, 환자는 수태를 피해야 한다. 주로 소변을 통해 배설되므로 신장을 보호하기 위해 아미노산을 병행 투여한다. 일부 환자는 신장 독성을 보이며(Barone 등, 2005, Imhof 등 2011), ^{90}Y -DOTATATE로 치료하는 고위험군 환자에게는 28 Gy를 넘지 않는 생물학적 실효선량²⁴⁾biologically effective dose(BED, 제4.7절 참조)을 권고하고 있다(Bodei 등, 2008). 환자 10~13%까지 등급 3~4 골수독성²⁵⁾이 관찰되었으며 골수형성이상증후군myelodysplastic syndrome이나 명백한 급성 골수성백혈병 사례들도 보고된 바 있다(Valkema 등 2002, Barone 등 2005, Kwekkeboom 등 2005,

24) <역주> 방사선가중치는 낮은 선량률로 전달된 낮은 선량에서 방사선질에 따른 효과의 차이를 보정한 양이므로 높은 선량률로 받는 높은 선량에서 적용되지 않는다. 생물학적 실효선량은 치료 방사선 분야에서 생물학적 작용력 차이를 표현하기 위해 흡수선량에 생물학적 상대효과를 보정한 선량으로 나타낸다(정의를 제4.6절 참조). 원문 용어 'biologically effective dose'를 직역하면 '생물학적 유효선량'처럼 되겠지만 이는 '유효선량'과 혼동을 줄 우려가 있어 구분을 위해 의도적으로 '실효선량'으로 했다.

25) <역주> CTCAE 2010 지침에 따른 독성 등급

골수독성 등급	1	2	3	4
Hb(g/L)	LLN-10	8-10	<8	생명위험 빈혈
ANC($\times 10^9$ /L)	LLN- 1.5×1	1.5-1	1-0.5	<0.5
PLT($\times 10^9$ /L)	LLN-75	75-50	50-25	<25
AST 및 ALT(IU/L)	>ULN- $3 \times$ ULN	3-5 \times ULN	5-20 \times ULN	>20 \times ULN

Hb: 헤모글로빈, ANC: 절대 중성구수, PLT: 혈소판수, AST: 아스파라진산 아미노전달효소, ALT: 알라닌 아미노전달효소, LLN: 정상 하한, ULN: 정상 상한.

Bushnell 등 2010, Strisberg 등 2017).

2.7.7. 권고

(79) 데이터는 주로 신장과 골수에 급성 독성 증거를 보인다. 종양에 전달되는 흡수선량의 차이와 급성 방사선 유발 신장독성이나 골수저하 잠재성은 모든 환자에 대해 환자 맞춤 전망적 장기/조직 선량계측을 수행해야 함을 의미한다. 신중하게 설계된 선량계측 프로토콜에 근거한 개인 맞춤 치료의 기대는 상당하다. BED와 같은 생물학적 변수가 위험 장기의 독성위험을 추정하는 데 이점이 있다는 증거가 있으므로 이 연구를 계속해야 한다(Barone 등 2005, Wessels 등 2008).

2.8. 방사면역치료

(80) 방사면역치료는 종양 고유 항원을 겨냥 결합하는 방사표지 항체를 이용하는 데, 신생물에 높은 치료 방사선을 전달한다(Barbet 등 2012). 항체는 생쥐 단클론 항체이거나 많은 경우 사람에게 면역원성을 낮추도록 유전공학기법으로 얻는 인간/생쥐 키메라 또는 인간화 항체일 수 있다. 흔히 사용되는 방사성핵종에는 ^{131}I , ^{90}Y , ^{186}Re , 및 ^{153}Sm , 그리고 알파 방출체로는 ^{225}Ac 와 ^{213}Bi 등이 포함된다(Sgouros 등 2010, Larson 등 2015).

(81) 일반 용도로 보건당국이 승인한 제제는 ^{131}I -토시투모맵(^{131}I -tositumomab과 ^{90}Y -이브리튜모맵 튜세탄(^{90}Y -ibritumomab tiuxetan이다(Goldsmith 2010). 둘 다 CD20(28)-양성인 재발성 또는 불응성, 저등급 또는 소포형 B세포 비호지킨 림프종을 겨냥한다. 두 제제 모두 높은 반응률을 보여 많은 환자가 오랫동안 암으로부터 자유로운 생존을 경험한다. ^{90}Y -이브리튜모맵 튜세탄은 일선 화학요법에 부분적 또는 완전 반응을 달성한 환자에게 효과적으로 적용되고 있다(Chatal 등 2008). 많은 방사면역 치료제가 현재 개발 중이거나 초기 단계 임상시험 중인데, 신경모세포종(Kramer 등 2007), 백혈병(Miederer 등 2004), 난소암(Andersson 등 2009)을 포함한 다른

26) <역주> 제품명: Bexxar. 포유동물 세포에서 생성된 CD20 항원에 대한 뮤린 IgG2a 램다 모노클로날 항체이다. 주로 치료 후 재발성 또는 불응성 일부 비호지킨 림프종 치료에 이용된다.

27) <역주> 제품명: Zevalin. 재발성 또는 불응성, 저등급 또는 형질 전환된 B세포 비호지킨 림프종, 림프 증식장애에 대한 단클론 항체 방사면역 치료제이다.

28) <역주> 항체로서 항체를 생산하는 림프구인 B세포(정상 또는 신생물)에서 나타나지만 백혈구에서는 나타나지 않는다.

지시를 겨누고 있다.

(82) 아직 방사면역치료제가 고형암을 치료하도록 충분히 높은 흡수선량을 달성하는 데 유효하게 입증된 것은 없다. 사전 표적화pretargeting나(Goldenberg 등 2012) 알파 방출체 사용 증가로 치유비therapeutic ratio를 높이려는 노력과 함께 방사면역 치료 효과에 대한 연구는 계속된다.

2.8.1. 치료목표

(83) 방사면역치료는 다양한 절차들을 포괄하는데, 치료목표는 일반적으로 종양 관련 항원을 표출하는 종양조직을 박멸하는 것이다.

2.8.2. 치료 프로토콜

(84) 방사면역치료 절차에서 치료체제는 폭 넓다. ^{90}Y -이브리튜모맵 튜세탄 치료는 잘 수립된 치료 프로토콜이 있다. 리톡시맵²⁹⁾rituximab을 4시간에 걸쳐 250 mg/m^2 로 주입 후, ^{90}Y -이브리튜모맵을 체중 기준으로 14.8 MBq/kg (총 1184 MBq 이하)을 주입한다. 국가나 지역에 따라서는 ^{90}Y -이브리튜모맵 튜세탄 치료에 앞서 예상 생체분포를 검증하거나 간, 췌장 또는 골수의 현저한 흡취와 함께 혈액 체적으로부터 신속한 제거처럼 생체분포의 변화를 보이는 환자를 배제하기 위해 ^{111}In -이브리튜모맵 튜세탄을 사용한 촬영을 수행한다(Hanaoka 등 2015).

2.8.3. 친지나 가족의 선량

(85) 친지와 가족의 피폭은 사용한 방사성핵종에 따라 달라지므로 적절한 절차를 따라야 한다. 방사능은 체액(대부분 소변과 땀)을 통해 배설된다. 따라서 환자가 퇴원한 때에는 주의가 필요하며 가정환경을 고려해야 한다.

2.8.4. 의료진의 선량

(86) 앞 절에서와 마찬가지로 베타 방출 방사성핵종의 취급에 조심해야 한다. 특히 ^{90}Y -이브리튜모맵 튜세탄을 준비하는 데는 높은 선량이 보고되고 있으므로 손 등 가선량에 주의해야 한다(ICRP 2008, Vanhavere 등 2012).

29) <역주> 제품명: Rituxan, MabThera 등. $\text{C}_{6416}\text{H}_{9874}\text{N}_{1688}\text{O}_{1987}\text{S}_{44}$. 비호지킨 림프종, 만성 림프성백혈병, 류마티스관절염, 다발혈관염 동반 육아종증granulomatosis with polyangiitis, 특질 저혈소판자색반병idiopathic thrombocytopenic purpura, 보통천포창pemphigus vulgaris 등 특정 암이나 자가면역질환 치료에 사용된다.

2.8.5. 환자 장기 선량계측

(87) 방사면역치료 절차에 대해서는 많은 선량계측 연구가 수행되었다(Cremonsei 등 2007, Fisher 등 2009). ^{90}Y -이브리튜모맵 튜세탄 3단계 시험에서 활성 골수와 종양의 흡수선량 중앙값은 각각 0.71 Gy와 14.84 Gy였다(Wieseiman 등 2001). 방사면역치료에서 방사능표지 항체와 관련하여 임상시험과 촬영기법을 활용하여 간, 폐, 장, 신장을 포함하는 위험장기의 선량을 신중하게 평가해야 한다.

2.8.6. 환자의 위험

(88) ^{131}I -토시튜모맵이나 ^{90}Y -이브리튜모맵 튜세탄과 같은 방사능표지 항체의 경우 급성독성은 주로 혈액학적인 것으로 혈소판감소증이나 백혈구감소증을 초래한다. 앞선 화학요법 반복으로 골수예비력이 미약한 환자에 대해서는 골수독성을 신중하게 관리해야 한다. 항체에 대한 면역반응도 잠재적 우려이므로 주의 깊게 감시해야 한다. 모든 방사선치료가 그러하듯 임신과 모유수유는 금기이며, 환자는 방사능이 해소될 때까지 수태를 피해야 한다.

2.8.7. 권고

(89) 치료계획과 투여 후 선량계측 검증을 위해서는 환자 맞춤 흡수선량 평가를 실시해야 한다. 촬영에는 ^{90}Y 대체로 ^{111}In 을 보통 사용한다.

2.8.8. 방사면역치료의 신기술

(90) 여러 새로운 방사면역치료가 개발중에 있는데, 일부는 이미 사람에게서 안전성과 효용성을 평가하기 위한 임상시험 단계에 있다. 근래 세계적으로 주목받는 새로운 방법의 예는 전립선암 치료를 위한 전립선고유 막항원prostate-specific membrane antigen(PSMA) 표적화, 급성 골수성백혈병을 위한 ^{213}Bi 또는 ^{225}Ac 를 표지한 항CD-33 항체와 같은 혈액학적 악성질환을 위한 알파 방출체 방사면역치료이다(Jurcie와 Rosenblat 2014). 방사면역치료의 또다른 접근은 선평적화 기법인데, 이는 정상조직 대비 종양 집적비를 높일 수 있어 치료의 항암효과를 높인다. 선평적화 기법은 기존 기술보다 복잡하므로 안전하고 효과적으로 적용하기 위해서는 맞춤 치료에 더 배려가 필요하다. 임상연구를 통해 방사선량과 위험, 그리고 환자 관리에 관한 충분한 데이터가 축적될 때까지 시간이 걸리겠지만, 이러한 새로운 기법에 대한 방사선방호 표준을 수립해야 한다.

2.8.8.1. 항PSMA 방사성의약품으로 치료

(91) PSMA는 전립선암 특히 역분화dedifferentiated되었거나 거세내성 사례에서 과다 표현된다. 그러한 PSMA 촬영을 위한 방사능 표지 항PSMA 구성물은 근래 많은 연구 주제가 되었고 1차암, 재발암, 전이암에 대해 훌륭한 검출률과 높은 진단 정확도를 보였다. 전립선암의 PSMA 표출은 치료를 위한 새로운 방사성의약품에 대한 접근을 제공한다. 어떤 항PSMA 방사면역접합체immunoconjugate는 양호한 정상조직-종양 대비를 제공하고 촬영을 위한 ^{68}Ga 또는 치료를 위한 ^{177}Lu 으로 표지할 수 있는 역량에서 친화도가 높다는 장점이 있다. 여러 연구가 거세내성 전이 전립선암 환자에게서 ^{177}Lu -PSMA-617로 치료 후 반응률과 바람직한 안전단면에 관해 우호적 결과를 얻었다고 보고한다(Rahbar 등 2017). 방사성의약품 치료에 항PSMA 구성물의 다른 적용은 초기 경험으로서 제한된 수의 환자에서 표적화 ^{225}Ac -PSMA-617 알파 치료가 보고된 바 있다(Kratochwil 등 2016). 그러한 알파 방출체 표지 항PSMA 구성물은 전립선암 치료에 잠재력이 커 보인다.

2.8.8.2. 알파 방출체 방사면역치료

(92) 알파입자는 비정이 짧고 에너지전달선밀도가 높기 때문에 알파 방출체 방사면역치료는 주변 정상세포를 보전하면서 종양세포를 효과적으로 죽일 잠재력을 제공한다(Jurcie와 Rosenblat 2014). 지금까지 급성 골수성백혈병에 대한 알파입자 면역치료의 임상연구는 단클론항체를 이용하는 표적으로서 골수세포 표면 항원 CD33에 집중해 왔다. 임상연구는 ^{213}Bi 표지 항CD33 항체의 항백혈병 효과와 안전성 및 가능성도 입증했다. 46분이라는 짧은 반감기 때문에 ^{213}Bi 사용이 제한적이므로 ^{225}Ac (물리적 반감기 10일) 결합체도 개발되었다(Jurcie와 Rosenblat 2014).

2.8.8.3. 선평적화 기법

(93) 방사성핵종 치료에서 종양흡취비specific tumour uptake를 높이기 위해 선평적화 전략이 도입되었다. 선평적화 기법의 한 예는 방사면역치료인데 여기서는 항체를 표지하지 않고 분자량이 적은 방사성 벡터에 결합 사이트를 제공하기 위해 사용된다. 이러한 기법은 비표적 대비 종양의 흡취비를 높이는데, 임상연구에서 항암 효용이 입증된 바 있다(Chatal 등 1995, Kraeber-Bodere 등 2006). 선평적화의 다른 예는 어피바디affibody³⁰⁾(수많은 표적 단백질에 결합되도록 가공한 소형 단백질) 분자 기반 펩타이드핵산 매개 선평적화로서 전임상 연구에서 방사성핵종의 종양 흡취를 높이는 것으로 나타났다(Honarvar 등 2016).

30) <역주> 단클론항체를 모방한 것으로서 단클론항체 의사군 구성원의 하나로 볼 수 있다.

2.9. 선택적 내부방사선요법(SIRT)에 의한 간세포 암종과 간 전이암의 동맥내 치료

(94) 간세포 암종이나 간 전이암은 방사선치료 물질을 간동맥으로 직접 주입하고 종양에 공급하는 간동맥 가지에 선택적 도관삽입으로 치료할 수 있다. 정상 간은 압도적으로 간문맥을 통해 공급을 받지만 간 암종은 간동맥으로부터 혈류 공급을 선호한다. 근년에 ^{90}Y 으로 방사능 표지한 두 상품이 이 치료의 기둥이 되고 있는데, 유리 미세구(Therasphere, BTG Plc, Ontario, Canada)와 수지 미세구(SIR-Spheres, SIRTex Medical Limited, Sydney, Australia)이다. 이들 제품은 특성이 비슷하지만 입자크기와 방사능농도는 다르다(Giammarile 등 2011). ^{166}Ho 미세구는 현재 개발 중이다(Smits 등 2012). 미세구 근접치료는 미세구 주입에 앞서 혈관촬영과 종양에 공급하지 않는 갈래의 색전을 요구한다.

(95) 미세구 근접치료는 크고 작은 간 병변에 정확한 표적화로 높은 흡수선량을 전달하는 잠재력을 제공한다. 상대적으로 침습적 절차이며 치명적 결과 우려가 있는 정상조직(주로 정상 간조직, 폐 및 창자) 조사 가능성은 잠재적 단점이다(Giammarile 등 2011).

2.9.1. 치료목표

(96) 처치의 주목표는 치유인데, 완전반응과 장기간 완화가 보고되기도 했다.

2.9.2. 치료 프로토콜

(97) 투여할 방사능 수준을 결정하는 데는 여러 수식을 사용한다. 단격실 모델과 구획 모델을 포함하는 현행 치료 프로토콜은 투여 방사능이나 신체 표면적 당 방사능을 기반으로 한다. 주된 위험은 정상 간에 바라지 않게 또는 우발적으로 미세구가 배치되는 것이다. 폐 단락화 위험도 있어서 치료에 앞서 $^{99\text{m}}\text{Tc-MAA}$ macro aggregated albumin 스캔을 수행하여 이에 따라 투여 방사능을 조정한다. 폐 단락이 너무 크면 ^{90}Y 미세구 투여는 금기이다. 창자, 위 또는 췌장에 재분배될 가능성도 고려해야 한다(Lambert 등 2010). 흡취를 확인하기 위해 보통 투여 후 간 스캔을 수행한다. ^{90}Y 제동복사 촬영이 종종 사용되지만, 근래에는 비록 ^{90}Y 의 양전자 방출률이 낮지만³¹⁾ 종양이나 정상 간에 분포하는 방사능농도가 충분히 높아 PET 촬

31) <역주> 보통은 ^{90}Y 를 순수 베타 방출체로 보지만 작은 분률로 양전자 붕괴를 일으킨다. ^{90}Y 의 양전자 붕괴율은 3.6×10^{-5} 으로서 일반적으로는 무시된다. 그러나 치료준위 투여

영법이 개발되고 연구에 성공적으로 적용된 바 있다(Lhommel 등 2010).

2.9.3. 친지 및 가족의 선량

(98) ^{90}Y 는 순수 베타 방출체이고 치료환자로부터 방출되는 제동복사선도 치료 후 가족이나 친지에게 방사선 위해를 주기에는 충분하지 않다.

2.9.4. 의료진 선량

(99) ^{90}Y 미세구는 방사성의약품이라기보다는 의료도구이다. 가장 중요한 방사선 안전 우려는 환자에게 합당하게 투여하는 것과 투여 전 병원 환경의 오염관리이다. 미세구는 비밀봉선원처럼 취급해야 하며, 치료와 촬영에서 표준 주의를 기울여야 한다.

2.9.5. 환자 장기선량 계측

(100) 치료를 안내하기 위해 선량계측이 수행된다. 아직 발표된 표준 방법론은 거의 없지만, 종양이나 정상 간에 전달되는 흡수선량의 계산에 근거한 방법들(구획이나 다격실 모델)이 개발되어 있는데(Cremonsei 등 2014) 종종 개괄적 가정에 따른다. 예를 들면, 유리구에 대해 개발된 선량계측법은 종양을 포함하는 간 전체의 평균 흡수선량을 계산하는 데 사용된다. 근년에는 ^{90}Y 의 낮은 양전자 방출률을 이용해 촬영과 선량계측을 가능하게 하는 치료 후 촬영과 선량계측법이 개발된 바 있다(Willowson 등 2015).

2.9.6. 환자의 위험

(101) 미세구는 의료 근접치료 기구로 지정된다. 간 내 분포로부터 또는 간 종양으로부터 교차조사를 통한 정상 간 실질의 피폭이 유의한 위험인자이다. 아직 방사선 유발 간 질환은 명확히 규정된 것이 없다. 간경화 초기 상태가 방사선색전술 감내도에 영향을 미치는 증거는 있다(Chiesa 등 2011). 췌장에 선량이 전달되면 복통, 급성 췌장염 또는 소화성 궤양을 초래할 수 있다. 투여 방사능이 폐 순환계로 들어가면 폐 단락이 일어나고 방사선 폐렴이 될 수 있다. 쓸개에 우발적 선량전달은 담낭염을 초래할 수 있다. 폐, 소화관 또는 췌장으로 단락은 한 절차와 다음 절차에서도 달라지므로 치료전 생체분포 스캐닝 없이는 독성을 한계짓는 흡수선량을 예측할 수 없다. 주입 위치를 보장할 수 없고 치료전 정밀검사에서 수정될 수 있으므로 치료투여 후에는 치료검증이 필수이다. 모든 치료절차와 마찬가지로 임신과

에서는 방사능이 높아 여기서 방출되는 소멸감마선으로 PET 영상을 얻을 수 있다.

모유수유는 금기이고, 환자는 수태를 피해야 한다.

2.9.7. 권고

(102) 다수 환자를 치료부족으로 만들 확률과 함께, 심한 독성이나 심지어 사망까지를 초래할 가능성은 치료계획을 위해 개인 맞춤 선량계측 사용을 요구한다. 치료에서 전달되는 흡수선량 분포를 예측하기 위해 치료전 ^{99m}Tc -MAA 촬영 연구 능력에 관한 확신 부족은 추적자 연구에 사용된 곳과 다른 위치에 치료를 투여할 가능성 때문에 심화되므로, 치료효과를 이해하려면 치료 후 검증을 필수로 만든다.

2.10. 관절염 치료(방사성핵종 윤활막절제)

(103) 류마티스나 뼈관절염 치료에 방사성의약품 투여는 40여 년 동안 사용되었고 (Ansell 등 1963), 잘 수립되고 널리 이용될 뿐만 아니라 혈우병성 윤활막염 치료에도 사용된다. 윤활막절제는 수술, 동맥내 스테로이드 투여나 화학적 절제에 비해 상당한 장점이 있는 잘 참는 방안이다.

(104) 초기에는 대개 ^{198}Au 을 투여했으나, 이제 무릎처럼 큰 관절에 대해서는 ^{90}Y 과 ^{32}P 콜로이드를 포함해 베타입자 에너지가 더 높아 비정이 더 긴 방사성핵종이 보통 사용된다. 팔꿈치나 발목처럼 작은 관절에는 ^{186}Re 콜로이드를, 중족지관절에는 ^{169}Er -구연산염을 사용한다.

2.10.1. 치료목표

(105) 방사선 윤활막절제의 목표는 염증과 부품을 줄여 통증을 완화하는 것이다. 40% 이상의 환자에게서 무릎관절 부품 감소를 보았고 통증완화는 88%에 이른다. 손목, 팔꿈치, 어깨, 발목 및 고관절에도 상당한 개선이 있어 정상기능이 회복되었으며, 손가락 관절의 약 70%에서 통증완화가 달성되었다. 혈우병성 관절염에서는 60% 환자에게서 완전 지혈을, 75%에서 거동 개선을 보았다(Das 2007).

2.10.2. 치료 프로토콜

(106) 윤활막절제를 위한 방사성의약품은 첫 치료가 성공적이면 전형적으로 3개월 간격으로 투여할 수 있다. 높은 방사능으로 1회 치료하는 것보다 반복치료가 더 효과적이다. 현행 투여 방사능의 증거기반은 약하며 실험적으로 도출된 것이다

(Johnson 등 1995).

2.10.3. 친지와 가족의 선량

(107) 방사선 윤활막절제에서 친지와 가족의 선량은 우려할 수준이 아니다.

2.10.4. 의료진 선량

(108) 진단 투여처럼 절차가 표준화되어 있다. 필요하다면 차폐 주사기를 사용하는 등 주의가 필요하다. 방사약사와 간호사의 피폭은 직무로 피폭하는 의료진의 선량 한도 이내로 나타났으며, 치료환자 수가 매우 많은 의사의 선량도 낮게 보고되고 있다(Lancelot 등 2008).

2.10.5. 환자 선량계측

(109) 과거에 흡취나 표적 위치 구체화, 방사능 정량, 체류의 감시에 대한 도전이 과학적으로나 행정적으로 어려울 때는 흡수선량 계산이 주목을 받았다(Bowring과 Keeling 1978). 방사선 윤활막절제에서 선량계측에 대한 포괄적 접근은 이상적으로 몬테칼로 기법을 요구하는데, 이는 임의의 주어진 방사성핵종에 대해 선량 깊이 분포 단면을 얻을 수 있게 한다(Johnson 등 1995).

2.10.6. 환자의 위험

(110) 동맥내 주입 방사성핵종의 제한된 비정 때문에 핵종이 제자리에 있는 동안은 인접 조직의 조사로 인한 해로운 조직반응을 초래할 우려는 없다. 보고된 부작용은 드물고 일반적으로 투여절차(예: 동맥외 투여로 인한 관절 염증, 피부 괴사)와 관련된 것이다. 베타 방출 핵종은 베타의 짧은 비정 때문에(^{90}Y 은 10 mm, ^{169}Er 은 1 mm 이하) 환자의 전신선량은 매우 낮다. 혈우병성 윤활막염이 있는 아동에게 ^{90}Y -구연산염 투여 후 말초혈액에서 유전자독성은 발견되지 않았다(Klett 등 1999, Turkmen 등, 2997). 림프절, 간, 비장 및 전신의 흡수선량은 각각 619(154~1644) mGy, 62(15~165) mGy, 62(15~165) mGy, 37(9~99) mGy로 계산되었고 순차적 촬영에서 누설률도 <2%로 보고되었다(Klett 등 1999). ^{90}Y 방사선 윤활막절제를 받은 환자에 대한 캐나다의 대규모 연구에서 기저 조건이 다양한 성인 환자 2412명에게서 암 증가는 관찰되지 않았다. 그러나 어린 환자에 대한 절차에 관해서는 추가연구가 필요하다고 결론 짓는다(Infante-Rivard 등 2012). 다른 치료절차와 마찬가지로 임신과 모유수유는 금기이며, 환자는 수태를 피해야 한다.

2.10.7. 권고

(111) 환자에게 치료 방사성핵종을 투여하기 전에 동맥내 바늘 위치를 확인하는 것이 중요하다. 동물모델에서 후속 감마카메라 촬영으로 입자의 누설이 낮음이 입증되어 사람에서도 낮을 것으로 보인다(Noble 등 1983). 그러나 이 가정을 확인하기 위한 연구가 필요하다.

제3장

생물역동학 자료 수집

3.1. 전신 방사능

(112) 치료용 방사성핵종은 표적조직 내에 선량을 집중해 전달하도록 방출하는 방사선의 비정이 짧아야 하지만 장기나 조직의 흡취와 체류의 전신 감시는 투과력이 강한 광자방사선을 방출하는 핵종에 의존한다. 투과성 광자나 제동복사선을 내는 핵종에 대해서는 전신 방사능을 2 m 이상 거리에서 검출기로 측정할 수 있다. 환자가 배뇨하기 전에 첫 데이터 점을 얻는데, 이 값을 100%로 해 정규화하는 데 사용할 수 있다. 모든 후속 측정은 동일 기하배열에서 수행해야 한다. 이 절차는 검출기 감도가 환자 체내의 방사능 분포와 독립적일 때만 옳다. 해당 방사성핵종의 광전피크만을 포함하는 분광분석 측정으로 환자 신체에서 산란된 광자를 소거하는 경우에는 이 조건이 대개 성립한다(Lassmann 등 2008).

(113) 감마카메라로 전신 스캔을 반복하여 전신 방사능을 구할 수도 있다. 치료 후에는 감마카메라의 불감시간 보정이 적절히 이루어져야만 한다(Hänscheid 등 2006, Lassmann 등 2008).

3.2. 혈액 방사능

(114) 이 방법은 전형적으로 혈액 흡수선량(Lassmann 등 2008, Hänscheid 등 2009) 또는 골수 흡수선량(Hindorf 등 2010)을 구하는 데 적용된다. 보통 일련의 헤파린화 혈액 표본을 교정된 우물형 계수기로 계수하여 혈액에서 방사능의 역동학 자료를 측정한다. 고려하는 화합물의 생물역동학에 따라 후속 단계(예: 투여 후 96 시간 또는 이후)에서 적어도 혈액표본 하나는 취해야 한다(Lassmann 등 2008).

3.3. 장기 및 종양 방사능

3.3.1. 정량촬영

(115) 방사성의약품 치료의 계획과 평가를 위해서는 정량적으로 정확한 촬영이 필요하다. 지난 몇 년 동안, 핵의학 영상의 정확한 정량화 기법 개발에 발전이 있었다. 그러나 이들 기법의 임상으로 연장은 느리다.

(116) 정량화 달성은 적절한 기기, 소프트웨어 및 인력을 요구한다. 이러한 수요의 수준은 정량적 촬영의 구체적 요건에 따라 달라진다. 예를 들면, 폐 암종의 방사능 정량화는 전신 방사능 계량보다 복잡한 자원을 필요로 한다.

(117) 일반적으로는, 다수의 정교한 촬영장치를 사용하면 방사성의약품의 생물역동학을 더 잘 구할 수 있지만 그 이득은 현실적으로 달성가능한 것과 견주어 봐야 한다. 반대로 한두 차례 탐측 측정도 개별 환자의 전신 체류에 관한 가치 있는 통찰을 제공할 수도 있다. 다수의 SPECT/CT 또는 PET/CT 세션은 새로운 치료용 방사성의약품의 생물역동학을 결정하는 데 도움이 될 것이다.

(118) 방사성의약품 치료를 거칠 특정 환자에게 필요한 촬영 세션의 유형과 회수는 최적화되어야 한다. 인력, 기기, 예산 및 행정 비용의 가용성, 정량화의 예상 정확도, 촬영 기사의 방사선량, 있을 수 있는 환자의 불편 등을 고려해야 한다.

(119) 이 절에서는 정량적으로 정확한 촬영과 관련된 기법에 대한 개괄만 제공한다. 보다 세부 내용은 IAEA 사람보건보고서 9(IAEA 2014b)처럼 보다 상세한 설명서를 참조할 수 있다.

3.3.2. 평면 촬영

(120) 오늘날, 선량계측 목적에서 감마카메라 평면촬영이 장기 흡취와 제거 생물역동학을 구하는 데 종종 사용되는데, 감쇠, 산란 및 백그라운드 보정을 통해 개별 장기의 겹침을 정교하게 분석해야 한다(Siegel 등 1999).

(121) 평면영상은 쌍머리 카메라 dual-head camera로 촬영하는 것이 일반적이다(Siegel 등 1999, Glatting 등 2005). 마주 보는 섬광검출기로서 관심 선원장기 내 픽셀 기반 계수의 기하평균이 해당 픽셀 내 방사능의 1차 근사를 제공한다(짝상법 conjugate view method). 측정된 계수를 I_{PQ} (매 초 계수)의 한 점선원 PQ 방사능

A_{PQ} (MBq)에 의존성은 다음과 같다.

$$I_{PQ} = CA_{PQ} e^{-\mu_e x} \quad (3.1)$$

여기서 C 는 카메라 머리의 교정계수(계수 $\text{MBq}^{-1} \text{s}^{-1}$), μ_e 는 유효 선형감쇠계수 (cm^{-1}), x 는 점선원의 체내 깊이(cm)이다. 두 마주하는 검출기 머리와 신체 두께 D (cm)에서 계수율의 기하평균 $G(\text{s}^{-1})$ 은 다음처럼 계산된다.

$$G = \sqrt{I_a I_b} = A_{PQ} C \sqrt{e^{-\mu_e x} e^{-\mu_e (D-x)}} = A_{PQ} C e^{-\mu_e D/2} \quad (3.2)$$

여기서 I_a 와 I_b 는 전방과 후방 검출기의 계수율이고 $C = \sqrt{C_a C_b}$ 는 두 카메라 머리의 교정인자 기하평균이다. 식(3.2)를 미지수 A_{PQ} 에 대해 풀면

$$A_{PQ} = \frac{\sqrt{I_a I_b}}{C} e^{\mu_e D/2} \quad (3.3)$$

로 된다.

(122) 그래서 마주 보는 두 카메라 머리를 사용해 점선원의 방사능을 결정하기 위해서는 검사하는 대상이나 환자의 두께와 선형감쇠계수를 알아야 한다. 이 식은 감마 검출기의 감도가 선원으로부터 거리와 무관할 때 성립한다. 이것은 근사적으로만 사실이므로 방사성핵종이나 에너지 창, 그 점선원의 중심에 대비한 콜리메터 등에 따라 오차는 100% 이상일 수도 있다(Glatting과 Lassmann 200).

3.3.3. SPECT/CT

(123) 촬영기법을 통해 집적형 장거나 종양의 방사능을 측정하는 데는 적어도 한 데이터 점에서 SPECT/CT에 의한 정량화가 최신 기법이다. 산란과 감쇠 보정이 이루어지면 모의체 측정에서는 정확도가 10%까지 갈 수 있다(Dewaraja 등 2012, 2013).

(124) SPECT/CT 정량화를 위한 최적 변수를 결정하고 교정하기 위해서는, 방사능물질로 채운 큰 체적의 공기나 물 선원을 스캔하고 재구성하여 적절한 값을 구해야 한다. 최선의 정량화를 위해서는 다음 조건을 충족해야 한다(Dewaraja 등 2012, 2013, Fernández Tomás 등 2012, Zimmerman 등 2017).

- 성근 그리드보다 미세 그리드에서 스캔 시간을 줄이는 것이 좋다(Dewaraja 등 2012).
- 의료내부서량위원회(MIRD) 팜프렛 26(Ljungberg 등 2016)은 용인 가능한 영상을 얻으려면 반복계산법으로 몇 번 업데이트가 필요하다고 적고 있다. MIRD 팜프렛 23(Dewaraja 등 2012)은 수렴을 90% 복구에 도달한 점으로 정의하는

데 이는 고정밀도 재구성을 나타낸다. 더 복잡한 재구성 문제(알고리즘에 더 많은 보정을 포함)는 수렴에 이르려면 더 많은 반복계산을 필요로 한다. 재구성 변수는 모의체 연구, 시뮬레이션, 그리고 대표적 방사능 분포와 계측통계를 갖는 환자 표본 데이터를 이용해 최적화할 수 있다. CT 체적이나 관심체적 그리기의 고정 문턱을 사용할 때는 SPECT/CT의 공간분해능 한계 때문에 부분체적 효과에 대한 보정을 수행하는 것이 바람직하다. 계수의 넘침을 경험적으로 보정하기 위해서는 CT 체적 측정에 비해 SPECT/CT의 공간분해능을 고려해 관심체적을 증가시킬 수도 있다(Ljungberg 등 2016).

(126) 원칙적으로 단층 방출 측정으로부터 요구되는 장기체적을 구할 수 있다. 그러나 상대적으로 부족한 공간분해능 때문에 특히 작은 구조물에서 이 방법의 정확도는 한계가 있다. 나아가 움직임 인공물이 참 장기체적을 가릴 수 있다. 따라서 장기나 종양 체적을 구하는 데는 CT 스캔이나 자기공명촬영과 같은 고분해능 해부학적 절차의 사용이 유용할 것이다.

3.3.4. PET/CT

(127) 치료 방사성의약품에서 PET/CT 역할은 ^{131}I 을 위한 ^{124}I , ^{90}Y 을 위한 ^{86}Y 처럼 치료용 방사성핵종의 양전자 방출 대체물을 이용하는 데 초점을 맞춰왔다.

(128) 그러나 ^{90}Y 의 정량적 PET/CT 촬영 적용성은 SIRT(Carlier 등 2015)와 기타 ^{90}Y 방사성의약품에서 입증된 바 있다. 수지 미세구로 방사선색전 후 선량계측 목적을 위한 정량적 ^{90}Y PET/CT의 여러 병원 비교는 현대 비행시간 스캐너가 ^{90}Y 농도를 일관되게 재구성함을 보였지만, 부분체적 효과³²⁾와 재구성 알고리즘의 제약 때문에 백그라운드 방사능 안에서 작은 구조물(직경 37 mm 이하) 방사능농도를 과소평가했다(Willowson 등 2015).

3.4. 정량적 프로토콜

3.4.1. 정량화 촬영 프로토콜

(129) 프로토콜(또는 표준 운영절차)은 데이터 획득과 처리의 일관성을 보장한다.

32) <역주> partial volume effect. 일부 촬영 방향에서 관심장기의 체적 일부가 시야를 벗어남으로 인한 영향.

프로토콜은 만족할 임상자료와 측정을 얻는 데 필요한 단계를 설명해야 한다.

(130) 프로토콜을 쓰는 데 필요한 전문성은 그것을 이행하는 데 요구되는 것과 다르다. 전형적으로 프로토콜은 훈련된 의학물리사와 의료진이 작성해야 한다.

(131) 기기가 의도대로 작동되게 하려면 명시된 빈도로 품질보증/품질관리(QA/QC) 업무를 수행해야 한다. QA/QC 절차 계획은 프로토콜에 명시되어야 한다. QA/QC 결과는 프로토콜과 관련된 모든 데이터와 함께 체계적으로 제공되어야 한다.

3.4.2. 약품역동학 및 시간-방사능 커브의 적분

(132) 어떤 장거나 특정 관심영역에 방사능의 흡취나 체류를 결정하기 위한 데이터 획득 시간의 선택은 정량분석 신뢰도에 영향을 미친다(Glatting과 Lassmann 2007). 최적 획득시간은 선원영역에 대한 시간-방사능 데이터를 그래프로 그린 다음, 데이터의 적절한 맞춤 함수 아래 면적을 적분하여 계산할 수 있다. MIRD 팜프렛 21의 명명(Bolch 등 2009)에 따르면, 시간-방사능 함수의 적분은 선원영역에서 시간적분 방사능이다(과거 용어 '누적 방사능'을 대체함). 필요한 데이터 점 수는 해당 장거나 조직의 생물역동학에 따라 다르다. 경험으로 보면 함수의 각 지수항을 바르게 맞추려면 최소 3점이 필요하다(Siegel 등 1999). 지수항 수는 맞춤 과정에서 용인하는 오차에 강하게 의존한다.

(133) 시간-방사능 데이터를 수학적 함수에 맞추는 데 사용하는 다양한 수학 및 곡선 맞춤 소프트웨어가 상용으로 가용하다. 이들 소프트웨어 패키지는 보통 최적 맞춤 곡선을 적분하는 기능을 제공하며 맞춤의 적합성을 확인하기 위해 해당 통계적 변수도 제공한다(Kletting 등 2013).

(134) 환자에 대해 무난히 수행할 수 있는 촬영 스캔 수는 현실적 고려로 제한되는데, MIRD 팜프렛 16(Siegel 등 1999)은 5회 측정을 권고한다. 고려하는 장거나 조직에서 유효반감기를 T_e 라 할 때 $T_e/3$, $2T_e/3$, $3T_e/2$, $3T_e$, $5T_e$ 에서 측정한다.

제4장

흡수선량 계산법

(135) 암치료에 방사성의약품 사용은 정상 장기나 종양의 흡수선량을 평가하기 위한 상세하고 환자 맞춤형 선량계측을 요구한다. 치료계획에서 체내 장기, 조직 및 전신에 주는 흡수선량 계산은 임상목표의 성공적 달성을 위해 기본적으로 중요한 속성이다. 방사성의약품은 보통 전신이나 경구투여로 이루어지므로 방사성핵종 치료는 필연적으로 모든 정상 장기나 조직에 일부 방사선에너지를 전달한다. 투여 방사능은 신생물을 효과적으로 치료하는 데 충분하면서 정상조직에 유해 선량을 최소화해야 한다. 방사선치료에 적용되는 원칙은 정상조직 감내 값을 초과하지 않으면서 암에 전달되는 방사선을 극대화하는 것이다. 따라서 암 치료를 위해 안전하게 투여할 수 있는 방사능은 가장 중요하고 독성 제한적 정상조직³³⁾에 각별한 주의를 기울이면서 체내 장기의 흡수선량을 평가함으로써 결정될 수 있다.

(136) 시간에 따른 장기 방사능과 장기 무게의 정량적 측정은 흡수선량 계산에 필수이다. 방사성의약품 처치의 치료계획과 환자 안전을 위해서는 보통 종양 선량 평가보다 정상조직 선량을 정확히 평가하는 것이 더 중요하다. 그렇지만 종양 선량이 안전과 효용 모두의 척도인 치료지수(therapeutic index)를 결정하는 데 필요한 인자이다. 치료지수는 제한적 정상장기 선량에 대한 표적영역 선량의 비이다 ($D_{\text{tumour}}/D_{\text{normal}}$).

4.1. 흡수선량 계산 목적

(137) 흡수선량 계산은 추적자 준위 진단주입 후 수행한 측정에 근거해 치료전에, 또는 치료투여 후속 측정에 근거해 치료 후에 수행된다. 내부피폭 선량계측은 방사성의약품 치료와 방사선방호 모두에서 여러 기본목적을 가지며 다음을 포함한다.

- 치료제제의 안전성과 효용성을 평가

33) <역주> limiting normal tissue/organ. 부작용 관점에서 가장 민감하여 약물 투여량을 제한하는 근거가 되는 조직/장기.

- 환자와 예상 흡수선량에 관해 논의할 정보원을 제공
- 방사성의약품 치료를 위한 적절한 처치를 계획
- 방사선치료와 관련된 단기/장기적 방사선 영향이나 선량 관련 생물학적 귀착점을 예측하고 생물학적 영향을 방사선량과 연계
- 방사성의약품으로부터 체내 장기들의 추정 방사선량에 관해 요구되는 목록을 제공
- 법적 요건을 충족하고 규제순응을 과시
- 환자의 완전한 의료기록 일부를 제공.

4.2. 흡수선량 계산을 위한 데이터

(138) 방사성의약품 치료에서 섭취 시간과 투여 방사능 양은 유의한 치료 결과를 달성하는 데 필요할 방사선량의 사전 추정에 근거하여 처방으로 결정되는 기지의 또는 정립된 양을 대표한다.

(139) 방사선량 평가에서 주된 어려움은 정상조직 및 종양의 방사성핵종의 흡취, 체류 및 제거의 시간과정(생물역동학)의 정확한 평가이다. 방사능 표지 약품의 약물역동학적 거동은 직접 측정(핵의학 촬영)이나 직접 생물검정(혈액이나 배설물 계측, 조직생검 계측)으로 분석하고 평가된다(제3장 참조). 직접측정은 집단 변수값 population parametric value을 사용하는 약물역동학 모델링으로 보완될 수도 있다. 치료계획이나 주입후 추적에서는 개별 환자 측정이 집단 생물역동학 모델에 따른 추정보다 믿을 만하다. 방사성의약품의 생체분포와 생리적 거동은 보통 환자마다 다르므로 환자별 생물역동학 변수를 구하려면 환자별 측정이 필요하다.

(140) 장기나 조직 방사능의 직접측정은 기하배열, 선원 조직/장기의 밀도, 장기 크기 및 중량, 잠재적 겹침, 장기와 검출기 사이 조직의 두께, 조직 내 방사능의 공간분포 등을 고려해야 한다. 직접측정의 정확도에 영향을 미칠 수 있는 신체와 검출기의 백그라운드, 검출기 불감시간, 광자의 감쇠와 산란에 대해 보정한다.

(141) 어떤 핵종이든 흡수선량 계산에 필요한 정보에는 환자에 투여한 총 방사능과 투여 시점, 고려하는 선원 각 조직/장기가 흡취한 투여 방사능의 비, 완전한 방사성 붕괴까지 각 주요 선원장기 방사능의 시간 종속 체류 및 제거가 포함된다.

(142) 의료 기반에서 장기 방사능 측정은 교정된 핵의학 체계를 이용해 수행할 수 있다. 여기에는 평판 감마카메라(전방/후방) 촬영, SPECT, PET, 단결정 광자계수기(NaI나 기타 섬광검출기)가 포함된다. 환자는 흉부나 복부 정량 측정 시야에 위치시키거나, 대안으로 관심영역에 대해 전신 스캔을 받게 한다. 촬영 절차는 기저 계수(주입 전)나 방사성의약품 주입 직후 촬영(약 시간 0) 이후 프로토콜에 따라 예정한 시간마다 반복한다. 반복측정을 위해 환자를 바른 위치에 두도록 표기한다. 기사는 주요 장기나 조직 영역의 윤곽을 잡아 관심영역을 선정한다. 모든 관심영역에 추가하여 기타 모든 비선원 장기나 조직('잔여조직³⁴')이라 한다)에 있는 잔여 방사능을 결정하기 위해 시간에 걸쳐 전신 방사능을 측정하는 것도 중요하다.

(143) 선정된 관심영역에서 계수는 방사성핵종 표준, 측정된 환자 몸 두께, 백그라운드 차감, 감쇠보정, 산란선 보정 기법을 통해 방사능 단위(Bq)로 환산된다. 그러한 기기 계수는 정량 계수를 위해 광자 방출 가용성을 필요로 한다. 시간에 따른 장기나 조직의 방사능 농도를 정교하게 구하는 것이 불가능할 때는 생물역동학이나 약물역동학 모델을 이용해 추산할 수도 있다. 평가의 품질은 가정한 모델 변수의 적합성에 의존한다. 모델은 데이터가 부족한 데 대해 중요한 정보를 제공할 수 있지만, 모델이란 환자 고유성이 거의 없으므로 개입되는 잠재적 오차를 고려해야 한다.

4.3. 흡수선량

(144) 흡수선량은 흡수하는 매질에 전리방사선이 부여하는 에너지를 나타하는 기본적인 방사선 양이다(ICRU 2016). 흡수선량은 모든 방사선피폭, 모든 유형 전리방사선, 모든 흡수 매질, 그리고 모든 생물표적과 기하배열에 적용된다. 방사성핵종 섭취로 인한 흡수선량 계산은 완전한 붕괴나 제거까지 시간대에 걸쳐 존재하는 방사능 양, 표적조직의 질량과 기하배열, 그리고 모든 방사성핵종 붕괴 후 에너지 부여를 지배하는 모든 물리적 인자에 관한 정보를 필요로 한다(ICRP 2015a,b).

(145) 방사성의약품 치료에서는 섭취 시점이나 투여 방사능 양은 기지 또는 정립된 양으로 표현된다. 투여 후 장기나 조직에 존재하는 방사능 양은 직접적 정량 촬영이나 시료 측정 또는 약물역동학 모델을 통해 구할 수 있다. 의료 내부선량계

34) <역주> 여기서 말하는 잔여조직은 유효선량 산출에 사용되는 조직가중치를 부여할 때 지정하는 잔여조직(남녀 각 지정된 13개 조직)과는 다르다.

측을 위해 수립된 방법론(MIRD)은 핵심 세부사항을 침해하지 않으면서 선량평가 업무를 단순화한다. 핵의학 촬영, 영상 묘사 및 전산 역량은 정확하고 믿을 만한 내부선량계측 수요를 충족하도록 발전해 왔다. 현행 방법론은 전체 장기로부터 세포나 다세포 수준까지 확장되었고 장기나 조직 내 균질 또는 비균질 방사성핵종 분포에까지 적용할 수 있다. 일반모델 가정보다는 환자 맞춤 방법이 선호된다.

(146) 방사성핵종 치료에서 방사성의약품 치료의 즉각적인 결정론적 영향과 관련되는 해당 선량계측량은 흡수선량(J/kg 단위)이다. 가장 기본형으로 장기나 조직의 흡수선량 D 는 단순히 표적조직 질량에 기여하는 모든 전리방사선 성분으로부터 조직 단위질량 당 부여된 평균에너지이다.

$$D = \frac{d\bar{\epsilon}}{dm} \text{ Gy (J/kg)} \quad (4.1)$$

여기서 D 는 전리방사선에 의해 질량소에 부여되는 평균에너지($d\bar{\epsilon}$)를 질량소 질량(dm)으로 나눈 몫이다.

(147) 살아있는 생물체계에 투여된 방사성핵종에 적용하고, 선원영역과 표적영역이 동일할 때 흡수선량 일반식은 방사성핵종의 대사와 제거를 고려하기 위한 생물체 류함수 biological retention function와 표적영역에 포획되거나 흡수되는 에너지 분율을 포함하게 된다.

$$D = \left(\frac{AEY\phi}{m} \right) \int_0^{\tau} B(t) dt \text{ Gy (J/kg)} \quad (4.2)$$

여기서 D 는 평균 흡수선량, A 는 방사성핵종의 방사능(Bq), EY 는 방사성핵종이 장기나 조직 내에 방출하는 총 에너지(J)[입자 에너지와 방출분율의 곱], ϕ 는 그 에너지가 표적영역에 흡수되는 분율, m 은 표적조직의 질량(kg), 그리고 $\int_0^{\tau} B(t) dt$ 는 시간 $t=0$ 부터 완전한 붕괴나 제거($\tau=\infty$)까지 또는 주어진 시간 τ (s 또는 h)까지 적분한 생물학적 체류이다. 표적장기 질량은 의료 촬영으로부터 결정해야 하지만 구체적 자료가 가용하지 않으면 장기질량의 표준모델 값을 사용할 수도 있다. 식 (4.2)를 재배열하여 다음과 같이 쓸 수도 있다.

$$D = A \int_0^{\tau} B(t) dt \left(\frac{EY\phi}{m} \right) \text{ Gy (J/kg)} \quad (4.3)$$

이렇게 쓰면 식(4.4)에 보인 MIRD 도식의 일반형으로 바로 연계된다.

(148) 환자의 여러 장기와 조직은 다수 선원영역과 표적영역을 구성한다. 어떤 장기나 조직의 흡수선량은 1) 그 조직 내에 함유된 방사능과 2) 전신의 기타 모든 장

기나 조직의 방사능으로부터 오는 모든 에너지 부여 사상 기여를 포함한다. 전자에 의한 선량을 자체장기 선량self-organ dose, 후자에 의한 것을 교차장기 선량 cross-organ dose이라 부른다. 평균 흡수선량은 주어진 방사성핵종의 물리적 반감기, 생물학적 체류, 모든 방사선 방출, 그리고 인체에서 구체적 선원-표적 기하배열에서 그 방사성핵종이 내는 에너지의 개별 흡수분율³⁵⁾을 고려하여 계산된다. 연령, 성별, 키, 체중, 장기 크기 차이, 조직 밀도 차이(뼈, 연조직, 폐) 등이 종합적으로 제시하는 인체의 복잡한 기하배열은 특정 표적영역의 ϵ/m 을 결정하는 모든 중요한 요소를 고려한 포괄적 계산에 상당한 도전을 제기한다. 선량계산은 개별 환자의 고유한 대사율과 건강상태를 결정할 뿐만 아니라 환자마다 다른 약물역동학 차이를 내는 인자와 함께, 관심 방사성의약품에 대한 각 장기나 조직에 고유한 방사성핵종의 생물역동학 차이(흡취, 체류, 제거)를 고려해야 한다.

(149) MIRD 도식(Lowvinger와 Berman 1968)은 다수의 선원장기와 잔여조직에 있는 방사성핵종으로부터 어떤 표적조직의 흡수선량에 기여하는 모든 에너지에 대한 모든 물리적, 생물학적, 기하학적 인자를 고려하도록 개발되었다. 1968년 이래, MIRD 도식은 CT나 MRI와 같은 현대 해부전시, 체적소 수준 방사능 분포, 몬테칼로 수송코드, 약물역동학 격실모델 및 방사선생물학적 반응 변수를 수용하도록 발전해 왔다.

(150) 정맥주사로 방사성의약품을 투여 후, 약제는 신체의 장기나 조직에 빠르게 재분배되고 모든 장기나 조직이 어떤 정도든 방사선량을 받는다. 그러나 MIRD 도식의 정의에 따라 선원 장기나 영역 r_s 는 시간-방사능 곡선을 구할 데이터가 가용한 임의의 조직 질량, 장기, 종양 또는 전신으로 정의한다. 표적 장기나 영역 r_T 는 흡수선량이 계산되는 장기나 조직으로 정의한다.

(151) 업데이트된 MIRD/ICRP 수식과 명명(Bolch 등 2009, ICRP 2015b)을 사용하면, 환자에게 방사성물질을 투여 후 규정된 선량 적분기간 τ 동안 표적영역 r_T 의 평균 흡수선량 $D(r_T, \tau)$ 는 다음과 같다.

$$D(r_T, \tau) = \sum_{r_s} \int_0^{\tau} A(r_s, t) S(r_T \leftarrow r_s, t) dt \text{ Gy (J/kg)} \quad (4.4)$$

여기서 $S(r_T \leftarrow r_s, t)$ 는 투여 후 시간 t 에서 선원영역 r_s 에 있는 방사능 당 표적영역 r_T 에서 평균 흡수선량률을 나타내는 방사성핵종 고유 양³⁶⁾이다(Snyder 등

35) <역주> absorbed fraction. 한 선원조직에서 방출된 특정(종류 및 에너지) 방사선 에너지가 관심 표적장기에 흡수되는 분율. 식(4.3)의 ϕ 에 해당한다.

1969, Bolch 등 2009). 특정 방사성핵종과 선원-표적 쌍에 대해 정립된 기하배열에 대해서 이 양은 다음과 같다.

$$S(r_T \leftarrow r_S, t) = \frac{1}{m(r_T, r)} \sum_i E_i Y_i \phi(r_T \leftarrow r_S, E_i, t) = \frac{1}{m(r_T, t)} \sum_i \Delta_i \phi(r_T \leftarrow r_S, E_i, t) \quad (4.5)$$

여기서 E_i 와 Y_i 는 방사성핵종이 내는 각 방사선 입자나 광자 i 의 에너지와 방출률(핵변환 당 수)이고, Δ_i 는 이들의 곱(또는 핵변환 당 평균 에너지 방출량), $\phi(r_T \leftarrow r_S, E_i, t)$ 는 시간 t 에서 선원영역 r_S 에서 방출된 방사선 에너지 E_i 중 표적영역 r_T 에 흡수되는 흡수분율이다.

(152) 만약 양 $A(r_S, t)$ 를 투여 방사능 A_0 에 정규화하고 이를 $a(r_S, t)$ 로 정의하면 표적조직의 흡수선량 계수 $d(r_T, \tau)$ 는 다음처럼 된다(Bolch 등 2009).

$$d(r_T, \tau) = \sum_{r_S} \int_0^\tau a(r_S, t) S(r_T \leftarrow r_S, t) dt \quad \text{Gy (J/kg)} \quad (4.6)$$

여기서 $a(r_S, t) = A(r_S, t)/A_0$ 는 주입 후 시간 t 에서 선원조직 r_S 에 잔류하는 방사능의 분율이다. 분율 $a(r_S, t)$ 는 환자 방사선량 계측을 위해 임상 핵의학 기기를 사용해 관심영역 정량촬영으로 측정하는 양이다.

(153) S 의 시간종속성을 무시하면 식(4.4)는 시간독립적 표현으로 단순화된다.

$$D(r_T, \tau) = \sum_{r_S} \tilde{A}(r_S, \tau) S(r_T \leftarrow r_S) \quad \text{Gy} \quad (4.7)$$

여기서 양 $\tilde{A}(r_S, \tau)$ 는 선량적분 기간 τ 동안 선원영역 r_S 에서 일어나는 시간적분 방사능(또는 총 핵변환 수)을 나타내며 다음처럼 쓸 수 있다.

$$\tilde{A}(r_S, \tau) = \int_0^\tau A(r_S, t) dt \quad \text{Bq s.} \quad (4.8)$$

(154) 완전히 적용한다면 식(4.7)로 제시되는 MIRD/ICRP 형식은 모든 선원영역, 모든 표적장기, 모든 선원-표적 기하배열, 그리고 흡수선량에 기여하는 모든 방사성 방출을 고려한다. 단순한 선원-표적 기하배열에 대해 내부선량 계산을 단순화하기 위해 S 값 표가 발간되었다. 기타 모든 경우에 대해서는 전산 모의체 모델과

36) <역주> 방호목적 선량계측에서는 이 S 값(흡수선량 단위)에 방사선가중치를 가중한 인자를 ' S_w 계수'로 불렀다(ICRP 133, 2016 참조). 이는 특정 선원조직에 있는 특정핵종 한 붕괴 당 특정 표적조직에 전달할 등가선량에 해당한다. 그러나 치료에 사용되는 높은 선량에서는 등가선량이 적절하지 않으므로 이 간행물에서는 방사선가중치 없는 흡수선량 단위로 S 값을 표현한다. 그러나 특별한 명칭은 부여하지 않았다.

몬테칼로 입자수송코드를 이용해 개별 기하배열, 조직 조성, 흡수체 밀도 등을 고려하여 방사성핵종의 고유흡수분율을 계산해야 한다. 선량계측 계산은 가용한 여러 상용 소프트웨어 꾸러미나 자체 개발된 소프트웨어로 수행할 수 있다(Guy 등 2003, McKay 등 2003, Glatting 등 2005, Stabin 등 2005). ICRP가 장기선량이나 유효선량을 산출하는 데 사용한 소프트웨어도 가용하다(Andersson 등 2014, ICRP 2015a, www.idac-dose.org).

4.4. 선원영역의 시간적분 방사능 계수

(155) 시간적분 방사능계수 $\tilde{a}(r_s, \tau)$ 는 시간-방사능 곡선 아래의 면적으로서 식 (4.6)에서 적분량 $\int_0^\tau a(r_s, t)dt$ 를 나타낸다. 과거 MIRD 간행물에서는 이 양을 '체류시간(residence time)'으로 불렀는데 총 투여방사능 A_0 에 대한 시간적분 방사능의 비와 같다. 즉,

$$\int_0^\tau a(r_s, t)dt = \tilde{A}(r_s, \tau) / A_0 \text{ Bq s Bq}^{-1} \text{ or s} \quad (4.9)$$

(156) 시간적분 방사능 계수는 흡수선량 산출을 위한 MIRD/ICRP 도식을 이행하는 소프트웨어 프로그램의 공통 입력값이다. 어떤 선원영역의 시간적분 방사능 계수는 시간에 따른 선원영역의 투여방사능 분율을 그래프로 그리고 그 곡선 아래 면적을 평가하여 구할 수 있다. 그림표로 된 데이터를 가장 잘 표현하는 시간-방사능 곡선을 구성하는 데는 수학적 함수 형태에 따라 여러 측정점 데이터가 필요할 수 있다(Siegel 등 1999).

(157) 관심 장기/조직에서 얻은 계수는 일일 품질관리, 환자 정위, 환자 체격 측정, 백그라운드 차감, 감쇠 보정 및 산란 보정을 포함해 적절한 측정법과 교정 표준을 이용해 방사능 단위로 환산해야 한다. 평면 촬영에서는 전방과 후방의 시각에서 얻은 계수의 기하평균을 구한다. 선원영역에서 측정된 투여방사능 분율을 주입 후 시간의 함수로 그린다. 다음으로 구성된 데이터를 해석함수나 시간-방사능 곡선에 최소자승 회귀분석으로 맞춘다. 물리적 붕괴는 지수함수를 따르고 생물학적 흡취와 제거도 보통 지수함수 양상이므로 구성된 데이터를 표현하는 데는 보통 하나 이상의 항을 갖는 지수함수가 적절한 함수이다. 맞춤 함수를 수치적 또는 해석적으로 적분하여 시간적분 방사능 계수를 구할 수 있다.

(158) 달리는, 모델 격실(선원영역)과 관련된 약물역동학 변수와 해당 전이계수 transfer coefficient를 알거나 반복계산으로 구할 수 있다면 선원영역의 시간적분 방사능 계수를 산출할 수 있다. 선량계측 부프로그램과 결합하고 일반 MIRD/ICRP 도식을 따라 생물역동학 모델도 표적영역에서 흡수선량을 직접 계산하는 데 사용될 수도 있다.

4.5. 흡수선량 산출의 불확도

(159) 불확도 분석은 흡수선량 계산의 신뢰도와 품질을 반영하는 편중(정확도)과 무작위 요동(정밀도)의 근원과 크기에 관한 정보를 제공한다. 내부선량 계산은 많은 측정과 복잡한 해부학적 기하배열, 그리고 투여 방사성의약품에 적용될 때는 여러 생물학적 인자와 관련된다. 따라서 측정과 모델링 오차원의 세부사항을 고려해야 한다. 불확도 분석에 관한 EANM 지침서는 선량계측 불확도에 관한 주원인을 모델링하는 기틀을 제공한다(Gear 등 2018). 계산된 흡수선량의 신뢰도를 높이려면 불확도를 인식, 인정하고 가능한 최소화해야 한다.

(160) 환자에 투여된 치료 방사성의약품으로부터 조직이나 장기의 평균 흡수선량 추정치의 총 불확도는 여러 불확도 원천을 반영하는데, 1) 주 선원영역의 절대 방사능을 측정하는 데 사용한 정량촬영법에 수반되는 측정 불확도, 2) 장기나 조직의 적분 방사능 평가 불확도, 3) 살아있는 개체의 해부학적 기하배열을 표현하는 데 수학적 모의체나 기준모델을 사용함에 따른 불확도 등이다.

(161) 현대 방사능 측정기(선량교정기)로는 투여 방사능은 수 % 이내로 정확히 알 수 있다. 일상 품질관리가 수행된다면 계획한 방사능과 실제 투여 방사능의 차이는 총 불확도에 미미하게 기여할 뿐이다(IAEA 2006a). 환자 CT와 3차원 체적 재구성을 사용하면 표적장기의 추정 질량에 수반되는 불확도를 최소화할 수 있을 것이다.

(162) 주 선원장기의 시간적분 방사능의 변동은 방사성의약품이 조직에 흡취, 체류, 재분배를 측정하고 정량화하는 데 따르는 본질적 어려움에서 발생한다(Norrgrén 등 2003, Jönsson 등 2005). 시간-방사능 곡선의 불확도는 시간-방사능 곡선 함수를 구축하는 데 충분한 데이터를 얻고 데이터의 통계적 맞춤을 최적화함으로써 최소화할 수 있다. 가장 중요한 데이터점은 투여나 주입 직후 시간 0 근처에서 초기 장기 흡취, 그리고 장시간 체류의 기울기를 결정하게 하는 데 비중

이 큰 최종 데이터점이다. 곡선 아래 면적과 관련된 불확도를 최소화하기 위해서는 전형적으로 적절한 수집시간 간격으로 최소 4~5 데이터점이 필요하다.

(163) 선원영역으로 광자의 장기간cross-organ 기여 평가치의 변동은 선원장기와 표적장기 사이 거리에 의존하며 S값 표의 불확도에 기여한다. 표적장기에 대한 흡수분을 계산에 적용하는 방사성핵종의 방출 에너지와 방출률과 같은 물리적 데이터는 잘 특성화되어 있어 총 불확도에 의미 없이 기여하지는 않는다.

(164) 기준 인형모의체와 수학적 모델을 사용해 계산한 흡수선량의 실험적 측정 검증은 실험대상자가 계산에서 가정한 신체 크기와 형상에 비견되는 정도에 따라 20~60% 범위에서 일치함을 보였다(Roedler 등 1980).

4.6. 생물신효선량(BED)

(165) 에너지전달선밀도(LET)가 낮은 방사선에 의해 낮은 흡수선량률로 흡수선량이 전달될 때는 방사선생물학적 영향이 같은 선량이 높은 선량률로 전달된 같은 흡수선량에서 영향보다 감소할 것으로 믿는다. 감소는 DNA 손상 수선과 관련되는데, 조직의 수선역량과 선량이 전달되는 시간에 대비한 수선속도에 의존한다. 세포 반응을 수정하는 다른 시간종속 인자에는 증식(재증식), 세포주기의 재분배, 재산소화reoxxygenation 등이 있다(Joiner와 van der Kogel 2009).

(166) 방사성의약품 치료에서 조직이나 장기의 흡수선량률은 방사성핵종의 물리적 반감기와 함께 그 조직 자체로 방사성의약품의 흡취와 체류에 의해 지배된다. 방사선 전달은 상당 기간(며칠에서 몇 주까지)까지 지속할 수 있다(Gleisner 등 2015). 흡수선량률은 시간에 따라 변하는데 평균 흡수선량률은 다른 대부분 형태의 방사선치료에서보다 상당히 낮다. 방사성의약품 누적의 분자기전, 방사성 붕괴시 방출 입자의 비정에 지배되는 것과 같은 공간적 비균질성도 반응에 영향을 미친다.

(167) 방사성의약품 치료에 대해 선형-2차 방사선생물학적 모델의 적용은 앞서 설명했는데(Millar 등 1991, Howell 등 1994, Dale 1996) 조사에 생존하는 세포 분을 SF 는 다음처럼 표현된다.

$$SF = e^{-[\alpha D + G(T)\beta D^2]} \quad (4.10)$$

여기서 D 는 조사 시작부터 시간 T 까지 전달된 흡수선량이고, α, β 는 세포생존곡

선 형태를 특성화하는 방사선생물학적 변수이다.

(168) 지수의 첫항(D 에 선형)은 낮은 선량에서 세포생존곡선을 지배하는데, 이 첫항은 단일 입자비적에 의해 초래되는 치명적 DNA 손상과 관련되는 것 같다(Dale 1996). 둘째 2차항은 높은 흡수선량에서 SF 의 점증 하향 곡률을 나타내는데, 이는 두 입자비적에 의해 초래되는 미치사 손상의 짝형 상호작용에 의한 영향으로 설명하고 있다. ‘Lea-Catcheside 인자’로 불리는 함수 G 는 둘째 항의 감쇄로 작용하는데 둘째 DNA 손상이 초래되기 전에 첫 손상이 수선될 확률이 있다는 전망으로부터 도출된다. $G(T)$ 는 공식적으로 다음처럼 정의된다(Lea와 Catcheside 1942, Keller와 Rossi 1974).

$$G(T) = \frac{2}{D^2} \int_0^T R(t) \left[\int_0^1 R(w) \phi(t-w) dw \right] dt \quad (4.11)$$

여기서 $R(t)$ 는 시간의 함수로서 흡수선량률이다. 함수 $\phi(t)$ 는 수선에 의한 미치사 손상의 상실로서, 반수선시간repair halftime T_{rep} 과 시간률 상수 $\mu = \ln 2 / T_{rep}$ 을 가지는 단일단계 과정으로 종종 가정된다. 그러면

$$\phi(t) = e^{-\mu t} \quad (4.12)$$

그러나 다단계 수선과정이 보고된 바도 있다(Joiner와 van der Kogel 2009). 함수 $G(T)$ 는 세포손상 초래율과 관련한 수선율에 의존하며 흡수선량률에 비례하여 0과 1 사이값을 가진다.

(169) 대부분 방사성핵종 치료에서 조사는 방사성핵종이 붕괴하거나 배설될 때까지 계속된다. 유효붕괴상수 λ 로 나타낸 흡수선량률 함수를 위해 식(4.12)와 결합하고 식(4.11)을 무한대까지 적분하면 $G(T)$ 는 다음과 같이 된다.

$$\lim_{T \rightarrow \infty} G(T) = \frac{\lambda}{\lambda + \mu} \quad (4.13)$$

더 복잡한 흡수선량률 패턴이나 수선함수에 대해 식(4.11)의 해석하는 더 어려운데 식(4.11)의 꺾쇠표 안의 적분은 합성곱convolution으로 표현할 수 있다(Gustafsson 등 2013a). 이러한 형식화가 수치 기법을 허용하여 단일 지수가 아닌 보다 복잡한 흡수선량률 함수와 수선함수에 적용하는 길을 틈다(Gustafson 등 2013b).

(170) BED는 선형-2차 모델 기틀에 포함된 개념이다(Barendsen 1982, Fowler 1989, Dale 1996, Joiner와 van der Kogel 2009). BED 개념은 등효력 치료 equieffective treatment[특정 임상(생물학적) 결과를 낼 확률이 같은 치료] 아이디어에 따른다(Bentzen 등 2012). BED가 주로 사용되는 분야는 외부빔 치료와 근접치료인데, 여기서는 다른 분할 계획이나 흡수선량률 패턴 사이 변환이 임상적으로 수용

된 방법이다. 방사성의약품 치료에서는 임상적으로 관찰된 효과를 표현하는 데 BED의 유용성을 보인 바 있다(Barone 등 2005, Wessels 등 2008, Strigari 등 2010). Barone 등(2005)은 신장 독성이 흡수선량보다 BED와 더 잘 상관됨을 발견했고, MIRD 팜플렛 20(Wessels 등 2008)에서는 신장 부작용 발생과 BED 사이 관계가 외부빔 치료에서 얻은 것과 비견될 정도였다. Strigari 등(2010)은 BED와 간 정상조직 부작용 사이 관계를 설명했다.

(171) 장기나 조직에서, 생물학적 영향은 식(4.10)에서 세포사멸의 대수 $[\ln S]$ 와 대등한 함수형태로 표현될 수 있다. 그러면 BED는 다음처럼 산출된다.

$$BED = D + \frac{G(T)}{\alpha/\beta} D^2 = D \left(1 + \frac{G(T)D}{\alpha/\beta} \right) = D \cdot RE \quad (4.14)$$

여기서 α/β 값은 장기나 조직, 그리고 관찰된 귀착점의 특성이다. BED를 D 와 상대효력(RE)의 곱으로 나타내는 형식은 Barendsen(1982)와 Dale(1996)에 주어졌다. 이들의 표기에 의하면 RE 는 주어진 동등영향을 내는 데 필요한 흡수선량의 비인데, 여기서 BED 는 모한소 분할선량이나 무한소 선량률로 주어지는 흡수선량이다. BED 는 D 보다 크거나 같으므로 RE 는 1 이상이 된다.

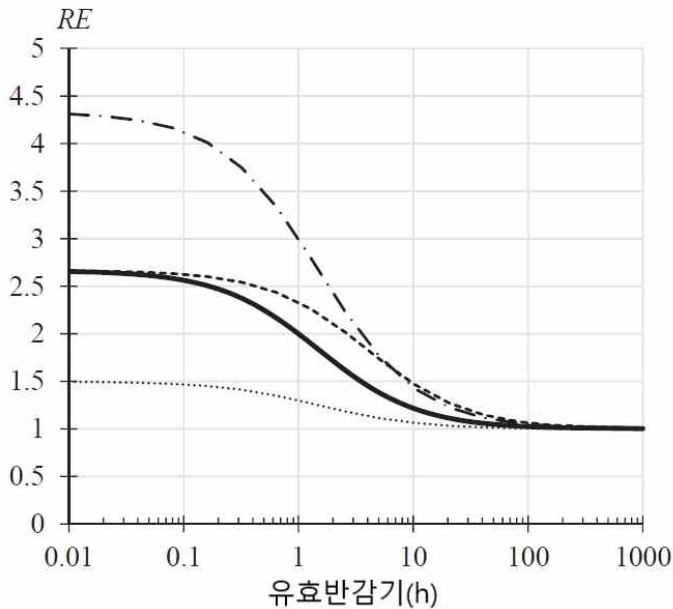


그림 4.1. 식(4.14)와 (4.13)으로부터 얻는 상대효력(RE). 굵은 선으로 보인 기저값에 사용된 변수는 $D=5\text{ Gy}$, $\alpha/\beta=3\text{ Gy}$, 그리고 $T_{rep}=1.5\text{ h}$ 이다. 1점쇄선은 흡수선량이 10 Gy으로 바뀐 때이며, 점선은 α/β 가 10 Gy로 변한 때, 그리고 쇄선은 수선반감기가 4시간으로 바뀐 때이다.

(172) 그림4.1은 식(4.14)와 (4.13)의 상이한 변수의 선정된 값에 대해 RE 값을 보인다. 유효반감기가 짧을 때 G 는 1에 접근하며 RE 는 흡수선량의 순간적 전달에서 맞는 값으로 접근한다. 유효반감기가 길 때는 G 는 적어지고 RE 는 1에 접근한다. D 나 α/β 의 변동은 모두 RE 를 종축에 따라 변동하게 하며, 수선 반감기의 변동은 가로 방향을 따라 변위를 일으킨다.

제5장

구체적 방사선방호 이슈

5.1. 서론

(173) 방사성의약품 치료로 방사선 사용은 규제관리 아래에 있는 계획피폭상황으로서, 어떤 절차가 개시되기 전에 규제기관으로부터 적절한 인가를 받아야 한다(ICRP 2007a). 오투여, 쏟음, 기타 사건/사고는 잠재피폭을 유발할 수 있지만³⁷⁾ 그런 일의 발생은 인가받는 과정에서 전제되므로 계획피폭상황의 일부로 본다(Carlsson과 LeHeron 2014). 방사성의약품 치료에서는 사람 피폭의 매 범주(의료, 직무, 일반인)에 대한 고려가 필요하다. 나아가 방사선방호의 3 원칙(정당화, 최적화, 선량한도)도 적용될 수 있다(ICRP 2007a). 핵의학 시설에서 직무피폭과 일반인피폭은 세 원칙 모두 적용되지만, 환자의 의료피폭에는 첫 두 원칙만 적용되고 셋째 원칙은 적용되지 않는다(ICRP 2007b).

(174) 방사성의약품 치료에 방사선방호 적용은 의료기관에서 품질의료업무를 이행하는 체계의 필수요소이다. 가장 중요한 측면은 방호와 사고예방을 일상 활동에서 중요하게 고려하도록 의료진의 안전문화가 정립되어야 한다. 핵의학 시설에서 방사선방호를 이행하는 여러 지침이 개발되어 있는데(IAEA 2005a,b, 2009, 2014a, Sissin 등 2011), 프로그램 요소, 책임, 교육훈련, 시설 설계, 감시, 폐기물 관리, 보건감시 등을 다룬다.

37) <역주> 잠재피폭 개념은 '일어나지 않을 것으로 보는 심각한 사건' 즉, 확률은 매우 낮지만 만약 일어난다면 피해가 심각한 사고의 '위험'을 관리하기 위해 정의한 것이다. 전형적인 예는 원전 중대사고이다. 잠재피폭 위험을 줄이기 위해 사고 예방 대책이 강구된다. 이에 비해 오투여나 쏟음과 같은 사건은 종종 일어나는 '피해는 크지 않지만 확률은 높은 사건'이어서 잠재피폭 개념에 부합하지 않고 좀 특별한 일상의 일부일 뿐이다. 그렇다고 오투여를 계획피폭의 일부로 간주하는 것도 애매하다. 계획해서 다른 환자에게 방사성의약품을 투여하지는 않는다. 즉, ICRP 현행 권고 체계에서 이런 피폭을 개념적으로 명확히 분류하기 어렵다. 역자가 방호체계의 개선이 필요하다고 보는 이유 중의 하나이다.

5.2. 방사성의약품 치료실과 병실 요건

(175) 방사성의약품 치료실과 병실의 설계에는 다음 목표를 고려해야 한다. 외부 방사선 피폭과 오염을 줄이기 위한 방호 최적화, 촬영기기와 간섭을 막기 위한 낮은 방사선 백그라운드 준위 유지, 약품 요건 준수, 폐기물의 적합한 격리, 선원의 안전보안(시건 및 출입관리) 확보 등이다.

(176) 전형적으로 고방사능 환자를 위한 병실은 별도 변기와 세척설비를 갖춰야 한다. 바닥이나 기타 표면은 매끄럽고 이음매 없이 흡수성이나 다공성이 아닌 소재로 덮어 청소나 제염이 쉽도록 해야 한다. 벽도 매끄럽고 세척 가능한 표면으로 마감한다(예: 물청소가 가능하고 기공이 없는 페인트 칠). 제한구역에는 방사능이 오염된 리넨이나 폐기물을 임시로 저장하는 통을 갖춰야 한다.

(177) 다량의 방사성요드 저장소에는 합당한 차폐와 배기가 필요하다. 방사성요드 투여 방사능 준비는 의료진을 방호하기에 적절한 공기 유량률을 가지고 배출 전에 오염을 흡수하는 탈염계통을 갖춘 후드 안에서 수행해야 한다. 방사성요드 폐기물이나 잔류오염이 있는 물품의 저장소에는 적합한 격납과 배기를 갖춰야 한다.

(178) 방사성의약품 치료환자가 병원 내 차폐 없는 장소에 있을 때는 방사선원이 되며 인접 구역에 있는 사람들에게 일반인 선량한도를 초과하는 수준으로 피폭을 줄 수 있다. 인접 구역 일반인 선량을 합리적으로 낮게 유지하려면 인접 구역이나 방을 비우거나 차폐체(영구 콘크리트 타설, 콘크리트 벽돌, 철판, 납 시트, 이동형 차폐 등) 설치가 필요할 것이다(Chu 등 2016). 같은 층 방뿐만 아니라 환자 병실 바로 위/아래층 구역도 고려해야 한다. 표5.1은 가장 강력한 차폐를 요구하는 ¹³¹I에 대해 전형적 차폐 효력 값을 보인다. 그러한 피폭이 선량한도를 초과하지 않음을 확인하기 위해 매 방사성의약품 투여 후 피폭선량이나 선량률을 측정해야 한다.

표5.1. ¹³¹I에 대한 전형적 차폐 효력 값(CNSC 2017)

차폐재	반가층*(mm)	10가층†(mm)
납	3.9	12
철	32	64
콘크리트	118	226

* 선량률을 절반으로 낮추는 데 필요한 차폐체 두께.

† 선량률을 본래의 1/10로 낮추는 데 필요한 차폐체 두께.

(179) 의료진과 일반인 방호를 고려해 시설에 감시계통을 설치해야 한다. 관리구역과 감시구역의 예상 선량률을 고려하여 구조차폐를 적절히 설계하는 것이 중요하다(IAEA 2006b). 방사성핵종 취급실에 인접한 구역에서 방사선량률을 감시하고 기록하여 선량제약치를 초과하지 않고 방호가 최적화되도록 한다.

(180) 환자 치료실은 1인실로 하고 서로 붙여 배치함이 이상적이다.³⁸⁾ 의료진과 일반인 피폭을 최소화하기 위해 인접 치료실 사이(예: 종사자 피폭을 줄이도록) 또는 치료실과 다른 구역 사이에 적절한 차폐가 필요하다. 필요하다면 간호사나 방사성의약품 환자 방문자를 보호하기 위해 추가 차폐를 제공한다. 필요에 따라 환자를 돌보는 간호사 피폭을 최소화할 수 있도록 매 치료 전에 환자 침상 근처에 이동형 차폐를 배치한다. 간호사의 업무, 위치 및 실내 움직임을 예상해 배치해야 방호가 달성된다.

5.3. 환자의 의료피폭

5.3.1. 정당화와 방호최적화

(181) 방사선치료에서 목표는 암 치료나 환자 통증관리이다. 모든 방사선치료에서 도전은 종양관리 확률과 정상조직 부작용 위험 사이 관계를 최적화하는 것이다. 표적조직 선량이 너무 낮으면 치료가 효력이 없어 피폭이 충분히 정당화되지 못한다(ICRP 2007b). 표적체적 밖의 장기나 조직 보호는 치료계획의 필수요소이다. 그래서 정당화된 핵의학 치료절차에도 방호최적화 원칙을 적용하여 적절한 방사성의약품과 방사능을 선정하고, 바르게 계산하고 측정, 투여하여 방사능이 주로 관심표적에 분포하고 신체 다른 부위의 방사능은 부정적 조직반응 관점에서 용인할 수 없는 수준 아래로 유지되도록 해야 한다(ICRP 2001b).

5.3.2. 치료 전 고려

(182) 방사성의약품 치료에 앞서 위험평가를 실시해, 환자가 자기돌봄이 가능하고 격리를 견딜 수 있으며(필요하다면) 방사선 주의사항을 따를 수 있는지(요구가 있

38) <역주> 1인실이 '이상적'임은 분명하다. 그러나 현실 의료여건에서 충분한 수의 1인실을 확보하기 어렵다면 2인실 정도는 용인할 수 있다고 본다. 한 치료실에 유사한 치료를 받는 2인 환자가 있더라도 옆 환자의 방사능 때문에 받는 선량은 자신에게 투여된 방사성의약품으로 인한 선량에 비해 무시할 정도로 작다. 그러나 한 병실에 여러 명 환자를 입원시키는 것은 오염관리를 어렵게 해 적절하지 않을 것이다.

을 때) 확인해야 한다.

5.3.3. 임신

(183) 치료가 생명 구조가 아니라면 임신은 방사성의약품 치료에 금기이다. 이 조언은 방사성요드 치료뿐만 아니라 태아 조직에 집적될 잠재성이 있는 다른 방사성 핵종에도 유효하다. ¹³¹I 요드화물을 사용한 치료에서는 태령 10~13주를 넘은 태아의 갑상선은 매우 높은 선량을 받게된다(Watson 등 1989, Berg 등 1998, ICRP 2008). 투여에 앞서 임신 가능성을 배제해야 한다. 그래서 그러한 치료가 예정되거나 가능성이 높다면 환자는 치료 전에 적절한 피임대책을 강구하기를 권고한다.

(184) 방사선을 사용하는 어떤 절차라도 초경부터 폐경 후 2년 사이에 있는 모든 가임 여성환자에 대해서는 그 시행 전(보통 72 시간 이내)에 혈액 임신검사를 실시하는 것이 중요하다(Berg 등 2008). 자궁절제술을 받았다면 임신 불가 증거이고 따라서 임신검사는 필요하지 않다(Sisson 등 2011).

(185) 발달 중인 배태아의 방사선 감수성 때문에 임신 중 방사선 의료절차의 가능성과 성과에 대해서는 특별한 고려가 필요하다(ICRP 2001a, 2007a). ICRP는 간행물 84(ICRP 2000)과 105(ICRP, 2007b)에서 상세한 지침을 주고 있다. 태내피폭에 따른 방사선 위험은 간행물 90(ICRP 2003)에서 상세히 논의했다.

(186) 자신이 임신하지 않았다고 생각한 여성환자가 갑상선암 치료를 받아 방사성 요드 투여 후에야 임신이 발견되면 문제가 된다. 만약 치료 방사성요드 투여 직후 환자가 임신임이 발견되었다면, 어머니에게 수액공급과 잦은 소변을 조장하여 모체의 방사능을 제거하고 방사성요드의 방광 체류시간을 줄여야 한다. 임신이 방사성 요드 투여 몇 시간 후에 발견되었고 태아 갑상선이 기능하기에 충분한 기간이라면 요드화칼륨(KI)으로 갑상선 차단을 고려해야 한다. 그보다 뒤에 임신이 발견되었다면 방사성요드의 태반전달이 태아 갑상선에 매우 높은 흡수선량을 전달해 상당한 손상을 입힐 수 있다. 태아 전신선량은 보통 100 mGy 미만이어서 기형이나 지능 저하와 같은 잠재적 악영향 때문에 임신중절을 실시할 근거는 없지만, 어머니가 대체 갑상선 호르몬을 받아야 하므로 이로 인한 치명적 갑상선 영향이나 후일 암 위험은 고려해야 한다.

5.3.4. 모유수유

(187) 방사성핵종의 치료투여 후 모유수유는 금기임을 여성환자에게 조언해야 한

다. 경구투여든 정맥이나 동맥 주입이든 아동에게 잠재적으로 유해하므로 모유수유를 중지해야 한다. ⁹⁰Y 실리케이트와 같은 부유입자의 강내투여는 미세구가 모유에 들어갈 유해 위험이 거의 없다. 그렇지 않으면 방사성의약품 치료를 받는 환자는 모유수유를 중단해야 하는데 두 가지 이유가 있다. 모유 중 방사성핵종이 유아에게 전달됨을 방지하는 것과, 젖 분비 기간에 어떤 방사성핵종이 농축될 수 있는 유방 조직의 피폭을 제한하는 것이다. 제한기간은 치료에서 투여하는 방사성핵종에 따라 다르다. ¹³¹I 치료에서는 환자는 투여 방사능이 완전히 붕괴할 때까지 모유수유를 중지해야 한다(Sisson 등 2011).

5.3.5. 방사성 환자의 투석

(188) 투석 중인 환자가 방사성의약품 치료를 받은 때는 가료에 추가 고려가 필요한데, 방사선방호 전문가나 의학물리사의 조언을 구해야 한다. 전신 치료일 때, 이런 환자에게서 제거는 거의 투석 세션 계획에 달려있어 전형적 환자와 같은 방식으로 방사성물질을 생물학적으로 제거하지 못할 수 있다.

5.3.6. 수태

(189) 방사성의약품 치료에 이은 4~12월 기간에는 여성이든 남성이든 수태를 피하도록 명확히 조언해야 한다. 간행물 106(ICRP 2004)에서 가져온 표5.2는 여성에 대한 수태회피 주의기간을 구체적 방사성핵종 치료에 대해 제시한다. 성공적 임신과 건강한 발달을 위해서 호르몬 반응이 정상화될 필요에 근거하여, 또 추가 방사선치료가 임박하지 않음을 확신하기 위해서 임신을 미뤄야 할 수도 있다(Sisson 등 2011).

표5.2. 태아 선량이 1 mGy를 초과하지 않도록 하는 방사성의약품 치료 후 피임 기간

방사성핵종과 형태	치료유형	총 방사능 최고 (MBq)	임신회피 (개월)
¹³¹ I-iodide	갑상선과민증	800	4
¹³¹ I-iodide	갑상선암	6000	4
¹³¹ I-mIBG	신경내분비 종양	7500	3
³² P-phosphate	골수증식질환	200	3
⁸⁹ Sr-chloride	뼈 전이암	150	24
⁹⁰ Y-colloid	관절염	400	0
⁹⁰ Y-colloid	악성신생물	4000	1

* ICRP 94(2004)의 표13.3에서 발췌된 데이터.

(190) 일반적 신중 바탕으로 남성 환자는 치료 직후 수개월 동안 피임하도록 권고된다. 그러나 이에 대한 과학적 근거는 없다(Sawaka 등 2008a,b).

5.3.7. 방사성의약품 의료사건 예방

(191) 방사선치료에서 사고예방은 시설, 기기 및 업무절차 설계의 필수 고려사항이다(ICRP 2007b). 오랫동안 사고예방의 핵심특성은 업무절차뿐만 아니라 설비의 설계를 통해 실패 결과에 대비한 복수의 안전대책을 적용하는 것이었다. 특히 방사선 치료에서 업무절차는 주요 결정이 독립적 확인을 거치게 요구해야 한다. 모든 해당 의료기관은 치료 의뢰, 계획, 최적화 및 방사성의약품 전달의 중요 안전단계마다 점검을 위한 요건을 개발하고 채택해야 한다. 모든 의료진과 환자 사이 효과적 소통은 이러한 과정의 결정적 요소이다. 프로그램 개시에 앞서 치료에 방사성물질 사용과 관련한 비상상황에서 완화조치를 식별할 필요가 있다[예: 과투여나 오투여로 인한 선량은 안정 요드화칼륨(KI)이나 칼륨요드산염(KIO₃)을 조기에 투여하여 갑상선의 방사성요드 흡취를 줄이면 감축할 수 있다].

(192) 치료 방사성의약품의 주입은 투여 안전성을 보장하고 혈관외유출을 예방하기 위해 적절한 정맥 접근도구를 통해 이루어져야 한다(Tennvall 등 2007). 주입 중에는 혈관외유출을 감시해야 하며, 유출이 발생하면 즉시 주입을 멈춰야 한다. 혈관외유출은 심각한 조직손상을 초래할 수도 있다(van der Pol 등 2017). 특별한 처치는 정해져 있지 않고 국소 온열요법, 손발 위치 높임, 부드러운 마사지 등이 방사성의약품의 퍼짐을 도와 국부 흡수선량을 낮출 것이다. 사건은 기록하고 추적하기를 권고한다.

(193) 방사성의약품을 다른 환자에게 오투여를 방지하는 데 주의가 필요하다. 나아가 투여에 앞서 다음에 관하여 처방과 합치함을 검증해야 한다.

- 상이한 두 방법으로 환자를 식별
- 방사성핵종 정체
- 방사성의약품 정체
- 총 방사능
- 투여 날짜 및 시간
- 환자에게 안전 정보 제공.

(194) 환자기록에는 치료 방사성의약품에 대한 기록, 선량계획에서 나온 데이터,

투여 방사능, 투여 일시, 초기 및 잔여 분석의 검증, 그리고 퇴원 시점에서 환자 체내 잔류방사능을 기록해야 한다(ICRP 2007b).

5.4. 의료진의 직무피폭

(195) 비밀봉선원으로부터 종사자 피폭은 신체의 외부조사나 체내로 방사능물질이 들어가 발생할 수 있다. 의료 종사자를 포함해 방사선으로부터 종사자를 보호하는 원칙은 ICRP 75(1997)과 ICRP 103(2007a)에서 논의했다. 일반적으로 최적화된 방호를 갖추고 핵의학에 전일 일하는 종사자의 연간 유효선량은 5 mSv 미만이다. 설비 설계와 합당한 차폐, 선원 취급, 개인방호용구가 방호에 중요하다(ICRP 2008, Carlsson과 LeHeron 2014). 최적화는 또한 교육훈련을 통해서도 이루어진다(ICRP 2009). 여러 간행물이 핵의학 시설에서 직무피폭을 위한 요건을 제시하고 있으며(ICRP 2007a,b, IAEA 2011, 2014a), 이러한 요건을 충족하기 위한 권고가 IAEA 안전지침(IAEA 1999a,b,c)과 특히 IAEA 안전보고서 시리즈 40(IAEA 2005a)으로 제공되고 있다.

(196) 임신여성과 18세 미만자는 치료 준위 방사성의약품 절차에 참여하지 말아야 한다.

5.4.1. 방호용구

(197) 방사성오염 우려가 있는 방사성의약품 치료에 참여자는 방호피복을 착용해야 한다. 방호피복은 착용자 신체를 방호함과 동시에 다른 구역으로 오염 전이를 예방한다. 의국과 같은 다른 구역으로 가기 전에 방호피복을 벗어야 한다. 방호피복에는 실험실 가운, 방수 장갑, 덧신('부티'), 모자 및 무균 작업을 위한 마스크 등이 포함된다. 베타 방사선으로부터 눈을 보호하고 눈의 오염을 예방하기 위해 방사선 보안경을 써야 한다. 베타 방출체를 취급할 때는 피부 오염 방지를 위해 두 겹으로 장갑을 끼야 한다. 바이얼, 주사기 또는 오염물을 맨손으로 다루지 않게 하고, 피폭을 최소화하도록 차폐, 도구, 작업관행의 사용을 강조해야 한다.

(198) 방사성의약품 치료에서 대부분 직무피폭은 364 keV 광자를 방출하는 ¹³¹I로부터 온다. 이 에너지에서 납치마에 의한 감쇠는 크지 않아(2배 이내) 상당한 선량 감축은 기대되지 않으므로, 그러한 방호복 착용의 불편함과 추가 하중을 정당화하지 못할 것 같다. 납치마 착용자가 방호되고 있다고 스스로 생각하여 선원이나 환

자 가까이 오려 머무른다면 실제로 납치마 착용자 선량의 증가로 나타날 수도 있다. 상황이 허용한다면 두터운 영구 또는 이동형 납차폐가 더 효과적이다. 자동 주입장치를 사용하면 의료진 선량을 감축할 수 있다(Rushforth 등 2017).

(199) 투여는 보통 경구투여, 정맥주사(전신), 또는 닫힌 체강 안(강내)에 콜로이드 현탁액을 채우는 방식으로 이루어진다. 손 선량을 줄이도록 방사성의약품을 정맥 투여할 때에는 차폐 주사기를 사용해야 한다. 주사나 주입 사이트 아래에는 흡수재 나 패드를 깔아야 한다. 시설의 방사선방호역은 상황에 따라 이들 및 기타 방호용 구(예: 덧신, 안면 차폐) 필요성을 판단해야 한다.

(200) 방사성의약품의 경구투여에서 방사성물질은 차폐된 옆지름 방지 용기 안에 두어야 한다. 액체를 흘리거나 캡슐을 떨어뜨릴 기회를 최소화하도록 주의해야 한다. 차폐되지 않은 방사성물질을 다룰 때는 적절한 긴팔도구를 사용해야 한다. 일시주사bolus injection로 정맥투여를 위해서는 주사기를 주사기 내 물질을 볼 수 있도록 투명창이 있는 주사기 차폐(보통 베타 방출 방사성핵종에 대해서는 제동복사를 최소화하도록 플라스틱을 쓰며, 감마 방출 방사성핵종에 대해서는 원자번호가 높은 물질을 씌) 안에 넣어야 한다. ^{90}Y 방사성의약품에 대해서는 5 mm 두께 텅스텐 주사기 차폐가 10 mm 두께 플라스틱 차폐보다 방호가 근소하게 클 뿐인 것으로 나타났다(Vanhavere 등 2012). 느린 점적이나 주입에서는 방사성의약품 용기를 차폐 안에 넣어야 한다. 에너지가 높은 광자의 경우에는 납이나 기타 원자번호가 큰 물질이 필요할 것이다.

(201) 방사성의약품 투여 절차는 처방한 방사능의 배달체계도 포함해야 한다. 주사기, 주입관, 필터, 기타 기구는 잔여 방사능을 조사해야 한다. 주입펌프는 등장 식염수isotonic salin(또는 다른 생리학적 완충액)로 헹구거나 씻어야 한다. 방사성핵종 투여에 사용된 모든 재료는 의료폐기물이자 방사성폐기물로 간주해야 하며, 방사선 주의표지와 함께 방사성핵종을 표기하여 해당 법규에 부합하는 방법으로 저장/폐기해야 한다.

5.4.2. 개인감시

(202) 방사성의약품 치료를 받는 환자를 관리하는 동안, 그리고 방사성의약품을 준비하고 투여하는 동안은 외부피폭의 일상감시를 수행해야 한다. 방사성의약품을 다루는 사람에 대해서는 손 감시도 이루어져야 한다(Rimpler 등 2011, Sans-Merce 등 2011).

(203) 방사성의약품 준비와 투여에서는 손이 상당한 선량을 받을 수 있다. 적절한 방호 없이는 손가락 선량이 매우 높을 수 있는데, ^{90}Y 처럼 고에너지 베타 핵종을 다룰 때는 특히 그렇다(Barth와 Mielcarek 2002, Liepe 등 2005a, Rimpler와 Barth 2007). 바늘을 잡는 데 잡이검자grasp forcep를 사용하면 손 선량을 상당히 줄일 수 있다(ICRP 2008). ICRP(<http://icrp.org/page.asp?id=35>)나 기타 기관들 (<http://www.oramed-fp7.eu/en/Training%20material>)이 교육훈련에 관한 자료를 제공하고 있다.

(204) 핵의학에서 개인감시를 받아야 할 의료진에는 일상적으로 방사성핵종을 다루는 모든 사람, 치료환자와 시간을 보내는 간호사나 기타 의료진이 포함된다(ISO 2016). 많은 섭취가 의심되지 않는 일반 핵의학 절차에서 내부 오염의 감시가 필요한 경우는 거의 없다(Carlsson과 LeHeron 2014). 내부피폭 감시가 권고되는 상황은 치료를 위해 의료진이 상당량 ^{131}I 를 사용하는 상황이다. 이러한 의료진은 정규 갑상선 흡취 측정 프로그램에 포함되어야 한다.

5.4.3. 오염관리 절차

(205) 방사성의약품이나 혈액, 소변 또는 구토물을 많이 쏟은 사건이라면 의사나 의료진은 우선 흡수재로 쏟은 물질을 덮고, 적절한 청소나 구체적 지시를 위해 방사선방호 전문가나 의학물리사와 접촉해야 한다. 그런 쏟음 사건에서는 다음 조치를 취해야 한다.

- 방사선방호역에게 즉시 알려 직접 감독하에 제염한다.
- 오염의 확대 방지를 위해 쏟음 위에 흡수재 패드를 덮는다.
- 쏟음과 관계없는 모든 사람은 즉시 구역을 벗어난다.
- 오염구역으로 출입을 제한한다.
- 쏟음과 연관된 사람이 그 방을 나갈 때는 모두 오염 감시를 받는다.
- 방호피복이 오염된 경우는 벗어 방사능 표지가 있는 비닐백에 수거한다.
- 피부가 오염되면 그 부위를 즉시 씻는다.
- 눈이 오염되면 다량의 흐르는 물로 세척한다.

(206) 환자가 옮기거나 퇴원하면 모든 잔류폐기물과 오염물품을 제거하여 폐기할 것과 세탁할 것을 구분하여 백에 담는다.

5.4.4. 방사선 탐사 및 감시

(207) 유효선량 평가를 위한 지역감시용 실용량은 주위선량당량 $H^*(10)$ 이다(ICRU

1993, ICRP 1996b,2010).³⁹⁾ 환자로부터 주위선량당량률은 교정된 서베이미터⁴⁰⁾로 측정해야 한다. 이 정보는 방문객이나 의료진의 병실 출입을 위해서 또는 환자 퇴원을 위해 적절한 대책을 도출하게 한다. 방사성의약품 치료환자가 있는 병실은 관리구역이어야 한다. 선량률 감시와 함께 작업장 오염감시도 수행되어야 한다.

5.4.5. 응급환자 가료

(208) 의사는 환자 안전 및 적합한 의학적 관리와 일관되게 필요한 의료를 제공해야 한다. 병원의 방사선방호역이 따로 명시하지 않는다면 간호사, 의사, 기타 보건관리자는 환자와 직접 접촉을 포함한 모든 일상 업무를 정상적으로 수행해야 한다.

(209) 환자가 방사능 위해에 처할 수 있을 때는 병상 간호사에게 이를 알려야 하며, 이들에게 정기적으로 조언과 훈련을 제공해야 한다.

(210) 수술이 필요할 때 방사선방호 고려가 구멍 수술을 방해하거나 지연시켜서는 안 된다. 다음과 같은 주의가 필요하다.

- 수술실 의료진에게 통보한다.
- 피폭을 최소화하고 오염 전파를 방지하기 위해 방사선방호역 감독 아래 수술절차를 조정한다.
- 효율과 속도를 저해하지 않는 범위에서 방호용구를 사용한다.
- 수술절차가 길어지면 의료진 교체가 필요할 수도 있다.
- 방사선방호역은 모든 관계자를 감시한다.
- 기관 허가조건에서 요구하는 바에 따라 의료진 구성원의 선량을 평가한다.

(211) 환자의 의학적 상태가 집중가료가 필요한 정도로 악화된다면 그 가료가 우선이므로 지연시켜서는 안 된다. 그러나 즉시 방사선방호역의 조언을 구해야 한다. 환자의 의학적 상태가 악화된 경우에는 환자에 대한 빈번하거나 지속적인 감시가 필요할 수 있다(예: 패혈쇼크, 폐부종, 뇌졸중, 심근경색).

(212) 구멍 노력은 의료진이 받는 방사선피폭에 대한 고려보다 우선한다. 이점은 다량의 방사능을 내장하는 치료환자의 경우 더욱 중요하다. 따라서 의료진은 오염 확산과 외부피폭에 대해 주의하면서 응급 의료를 진행해야 한다(예: 환자가 뇌졸중 증상을 보일 때). 의료진은 환자 입에 직접 접촉을 피해야 하고 모든 응급팀 구성

39) <역주> 방사선측정기가 주위선량당량을 지시하도록 교정하는 것은 방사선방호역과 교정기관의 책임이다. 측정기 사용자는 교정이 유효한 기기로 측정하면 된다.

40) <역주> 원문은 개인선량계personnel dosimeter로 잘못 적었다.

원은 방호장갑을 꺼야 한다. 의료진은 방사능 환자를 다루는 법에 대해 훈련을 받고 이해해야 한다. 절차에 대한 예행연습도 주기적으로 실시해야 한다.

5.4.6. 타 의료기관으로 환자 전원

(213) 일부 환자는 방사성의약품 치료 후 다른 병원, 요양병원, 요양원 또는 호스피스 시설 등으로 전원이 요구될 때도 있다. 그런 경우, 다른 의료진의 안전을 위한 실전적 방법이나 조언에 추가하여 수용 기관에 적용되는 법률적 요건의 준수가 보장되는지 주의해야 한다(IAEA 2009).⁴¹⁾ 다른 보건관리기관으로 환자 전원은 무제한적 해제 기준을 충족해야 한다. 치료한 기관의 방사선방호역이 저준위 방사성 폐기물 발생 가능성을 평가해야 하며, 어떤 이슈가 있다면 전원 환자를 받는 기관과 논의해야 한다. 타 보건의료기관으로 전원하는 환자가 무제한 해제 기준을 충족하지 못하는 특별한 경우에는, 방사선방호역은 전원 환자를 받는 보건관리기관이 치료 준위 방사성물질을 투여받은 환자를 입원시킬 수 있는 적절한 등록이나 허가를 받았음을 확인해야 한다. 방사선방호역은 필요한 방사선안전 정보와 주의사항을 환자와 수용 보건관리기관에 제공해야 한다.

5.4.7. 방사성의약품 치료 후 환자 사망

(214) 치료 준위 방사성물질이 잔류하는 상태에서 치료 보건관리기관에서 환자가 사망한 경우에는 즉시 치료 담당 의사와 방사선방호역에게 알려야 한다. Espenan 등(1999)은 환자 사망 사건에서 취해야 할 방사선방호 대책에 관한 경험과 지침을 제공했다.

(215) 병원에서 방사성핵종을 다량 투여한 환자가 사망하면, 사망 환자가 입원했던 병실은 제염하고 측정이 완료될 때까지 출입을 관리해야 한다. 시체가 방사성물질을 내장했을 가능성의 식별은 환자기록, 정보카드, 또는 친지나 기타 사람들로부터 수집한 정보에 의존한다. 방사성물질의 누설을 방지하도록 시체 백을 사용할 수도 있다. 외부피폭을 최소화하기 위해서는 시체를 관리구역 안에 존치해야 할 수도 있다.⁴²⁾

41) <역주> 핵의학 의료 허가가 없는 의료기관으로 전원하면 후일 두 의료기관 모두 처벌받을 수 있다. 특히 현행 국내 규정은 구체적 핵종을 지정하고 한도를 정하여 허가하므로 (좋은 제도로 보기는 어렵지만) 핵의학 허가가 있더라도 해당 핵종을 포함하고 한도량에 적합한지 확인하는 것도 필요하다.

42) <역주> 방사능 관리 원론에 매인 대응은 망자에 대한 예를 강조하는 우리 풍습과 마찰을 일으킬 우려가 크다. 관련된 핵종과 잔류방사능 준위에 따라 필요에 따라 방사선방호 전문가, 규제당국, 유족 등이 이슈를 조율할 필요가 있을 것이다.

(216) 사망 환자를 다루야 하는 방사선작업 종사자나 일반인에게 선량한도가 적용된다.⁴³⁾

(217) 비밀봉 방사능물질이 특정 신체 강내나 장기에 존재할 수 있고 전신 투여 후 밀집될 수도 있다(예: 갑상선 잔류¹³¹I). 부검한다면 시작할 때 먼저 체강을 비우거나 해당 장기를 절제함으로써 피폭을 줄일 수 있다. 많은 방사능을 함유한 장기를 조심해야 한다. 환자가 베타 방출 현탁액이나 미세구를 투여받은 경우(체강의³²P 인산염 또는 간의⁹⁰Y 미세구)에는 강내 체액이나 색전된 장기에 많은 방사능이 있을 수 있다. 베타 방사선원인 신체 조직이나 체액에 근접 접촉하면 손에 많은 선량을 줄 수 있다(NCRP 2006). 부검 및 임상병리 의료인은 표준 방호피복(예: 장갑, 실험실 가운 및 보안경)을 착용해야 하며 개인감시도 고려해야 한다. 베타 방출체에 대해 이중 수술장갑은 피부 접촉을 줄이는 데 도움이 된다. 액체가 얼굴에 튀는 것을 예방하기 위해 안면 차폐를 사용할 수도 있다.

(218) 잔류방사능 일부는 화장 잔류물에 나타날 수 있는데, 장수명 방사성핵종의 경우는 관리를 명시해야 할 정도로 방사능이 많을 수도 있다. 투여 직후 화장된다면 용기에 접촉 선량률이 고려대상이 될 수도 있지만, 주된 관심사는 재를 뿌리는 문제이다.

(219) 화장장 종사자는 방사능 시체로부터 또는 화장재 오염으로부터 외부피폭을 받을 수 있고, 재를 다룰 때 방사성 입자의 흡입으로 내부피폭도 받을 수 있다(Wallac과 Bush 1991). 감마선 방출 방사성핵종을 내장한 시체는 화장장 종사자에게 약간의 외부피폭을 초래할 수 있다.

(220) 화장장 인근의 일반인에게 있을 법한 잠재적 우려는 굴뚝 배기로 방출되는 방사성핵종의 흡입이다.⁴⁴⁾

43) <역주> 시신과 관련한 매우 특수한 경우이므로 경직된 선량한도 적용은 무리할 수 있다. 장의사처럼 직무로 시신을 다루는 사람이라면 직무피폭 선량한도를 적용하는 것이 마땅하다. 시신을 다루는 '일반인'이 어떤 사람인지 예를 들기 어렵다. 운구하는 가족이나 친지라면 '일반인'으로 간주하는 것은 적절하지 않다. 피폭이 자의에 따른 것이기 때문이다. 상당한 잔류 방사능이 있다고 해서 시신을 방사성폐기물로 처리할 수 없듯이 특수상황을 고려할 필요가 있다.

44) <역주> 일반적으로 화장장은 주거지역과 이격된 위치에 있고 잔류 방사능이 상당한 시신을 화장하는 일은 간헐적으로만 발생하므로 주민의 선량이 선량제약치에 근접할 우려는 없을 것이다.

5.5. 위안자와 간병인(의료피폭) 및 일반인 피폭

(221) ICRP 94(2004)는 직접 간병하거나 위안하지 않는 방문자와 함께 소아나 아동은 일반인으로 간주하여 일반인 선량한도 연간 1 mSv를 적용해야 한다고 권고한다. 등록자나 허가를 받은 사람은 핵의학 행위에 의한 일반인 피폭을 관리할 책임이 있다(IAEA 2011).

(222) 의료피폭은 대부분 환자 개인에게 전달되지만 환자를 간호하거나 위안하는 다른 사람도 방사선을 피폭한다. 이런 사람들에게는 부모, 그리고 보통은 가족이나 가까운 친지와 같은 다른 사람이 포함되는데, 이들은 방사성의약품 투여 후 환자 가까이 갈 수 있다. 이들의 피폭도 의료피폭으로 간주한다(ICRP 2007a). ICRP 94(2004)는 간병이나 위안에 직접 참여하는 사람(소아나 아동이 아닌)에 대해서는 사안 당(치료 후 병원에서 퇴원할 때까지 기간동안) 5 mSv의 선량제약치가 합리적이라고 권고한다.⁴⁵⁾

5.5.1. 환자 퇴원

(223) 치료 핵의학절차를 거치는 환자는 그 환자에 근접하는 다른 사람에게는 잠재적 방사선원이 된다. 배설물이나 토사물은 환자 주변의 오염 가능성을 제기한다.

(224) 직무로 피폭하는 사람이 아닌데 알면서 기꺼이 환자를 돌보는 사람은 간병인이나 위안자로 분류된다. 이들의 피폭은 의료피폭의 일환으로 간주하여 선량한도가 아니라 선량제약치를 적용한다(ICRP 2007b). 핵의학과에서 일하지만 방사선 작업에 종사하지 않는 사람을 포함해서 단순한 일반인이라면 그들의 피폭은 일반인 피폭의 일종이다.

(225) 모든 방사성핵종 치료 후라고 해서 환자를 자동으로 입원시킬 필요는 없다. 국가의 해당 선량한도를 준수하고, 해당 선량제약치 적용을 포함해 방호최적화 원칙이 적용되어야 한다. 환자의 입퇴원 결정은 선량률계로 측정된 환자의 방사선 준위, 환자 체내 잔류방사능, 환자의 희망, 가족에 대한 고려(특히 아동 포함 여부), 환경 인자, 그리고 현행 지침이나 법규와 같은 여러 인자를 고려하여 개인별 기반

45) <역주> 혼란스런 권고이다. 선량제약치란 선량한도가 적용되는 계획피폭을 초래하는 선원에 대해 최적화의 경계조건으로서 선량한도 이내에 설정하는 관리목표 성격의 지침이다. 정의에 따라 의료피폭은 선량한도의 적용대상이 아니다. 그런데 위안자의 피폭을 특별히 의료피폭으로 분류하면서 선량제약치를 적용한다니 개념이 뒤틀린다. ICRP 103에서 신설한 방호체계의 태생적 문제로서 재고가 필요하다.

에서 이루어져야 한다. 입원은 일반인이나 친지의 피폭을 줄이지만 전체적 비용을 증가시키고 의료진 피폭을 증가시킬 수 있다. 입원은 분석해서 정당화해야 할 금전이나 기타 비용을 증가시키는 물론, 종종 상당한 심리적 부담도 초래한다. ICRP 94(2004)는 비밀봉 방사성핵종으로 치료한 환자의 퇴원에 관해 상세한 권고를 제공한다.

(226) 비밀봉 방사성핵종으로 치료한 후 환자의 퇴원에 관한 현행 권고는 세계적으로 상당히 다르다. 그러나 환자 퇴원 결정은 환자가 가정으로 돌아갔을 때 위험을 관리할 수 있다는 가정에 근거해야 한다. 이는 일반적으로 적절한 퇴원기준과 환자가 잠재적 위험을 효과적으로 다루도록 환자에게 잘 맞춤형 지침과 정보를 결합함으로써 달성될 수 있다.

(227) 적절하다면 환자에게 접촉하는 사람의 선량을 합리적으로 달성 가능한 범위에서 제한한다는 관점에서, 환자나 법정 보호자에게 서면과 말로 지침을 제공해야 한다. 구체적 지침은 오염 확산 최소화, 가족 구성원 피폭의 최소화, 모유수유 중지, 치료 후 수태의 연기를 포함해야 한다. 방사선방호역의 자문을 구해 간병인이나 위안자에게 조언하는 절차를 개발해 두어야 한다. 등록자나 허가받은 사람은 방사성핵종으로 치료 과정에 있는 환자의 간병인이나 위안자가 해당 방사선방호 주의사항(예: 환자 근처에 체류 시간)에 대해 충분한 서면지침을 받도록 해야 한다. 주의 기간 요건을 평가하는 방법론의 예가 발간되어 있다(Zanzonico 등 2000, NCRP 2006, IAEA 2009, Sisson 등 2011).

5.5.2. 방문객

(228) 고선량 방사성핵종 치료 후 환자 병실에는 일반적으로 방문객을 허용하지 않는다. 허가받은 기관은 일반인이 출입 가능한 구역의 오염에 의한 일반인 피폭을 제한하는 수단을 강구해야 한다.

5.5.3. 여행

(229) 치료 후 여행은 어느 정도 제한해야 하며, 환자는 의학적 긴급사태에 대비해 관련 문서를 지녀야 한다. 여행한다면 보안목적 방사선감시기(예: 공항 감시기)가 저준위 방사선을 쉽게 탐지할 정도로 민감하다는 것을 알아야 한다.

(230) 환자가 다른 사람과 자동차에 동승한다면 거리와 시간을 제한한다. 승합차와 같은 대형차량을 사용하면 이격을 늘여 다른 사람의 피폭을 줄일 수 있다. ICRP는

이전에 환자 여행에서 다른 사람의 잠재적 선량을 평가하고 핵의학 치료환자가 대중교통을 이용할 수 있는 권고를 발행한 바 있다(ICRP 2004, 표10.7). 방사성핵종의 특성과 방사능을 고려해야 한다. 예를 들면 갑상선과민증을 치료받은 환자가 800 MBq로 치료했다면 대중교통 탑승을 30분까지 이용할 수 있고, 200 MBq로 치료했다면 3.5시간까지 이용할 수 있다(ICRP 2004).

(231) 방사성요드 치료환자의 여행을 수 시간 이내로 제한한다면 다른 승객에게 해독을 끼칠 일은 거의 없다. 치료 직후 1~2 시간 여행은 환자가 동승자로부터 1 m 이상 거리를 유지할 수 있을 만큼 자동차가 크다면 허용될 수 있다. 장거리 여행, 특히 대중교통 이용에서는 개별 환자의 실제 여행제한을 결정하려면 경우별 분석이 필요하다. 일반인피폭으로 전개될 잠재성을 평가하지 않고 핵의학 치료를 받은 후 호텔이나 모텔에 머무르는 것은 권고하지 않는다.⁴⁶⁾

(232) 공항이나 국경과 같은 곳에는 국제 보안대책으로 극히 민감한 방사선검출기를 갖출 수 있다. 방사능이 남은 퇴원 환자의 방사능은 경보를 울릴 수 있다. 현행 기술은 2~3 m 거리에서 0.01 MBq 수준으로 낮은 ¹³¹I 방사능을 검출 가능하다(Dauer 등 2007a). 방사성핵종으로 치료받은 환자는 95일 이상까지 경보를 울릴 수 있다(Dauer 등 2007b,c). 검출기들이 사람 보건을 우려할 수준보다 훨씬 낮은 방사능을 검출하도록 설계되기 때문에, 경보가 울렸다고 환자가 위험한 수준으로 방사선을 낸다는 의미는 아니다. 검문소 보안요원은 퇴원 환자가 경보를 울릴 수 있음을 이해하고 있다. 그러한 검출기 운영자는 핵의학 환자를 식별하고 처리하는 구체적 훈련을 받아야 한다. 병원은 비밀봉 방사성핵종으로 치료받은 구체적 기록을 유지하고 환자에게도 서면 주의사항과 함께 제공해야 한다(ICRP 2008).

(233) 방사성의약품 치료를 받은 후 4개월 이내에 여행이 계획되고 특히 국경을 거치거나 공항, 주요 터널이나 교량 등 검색이 있을 것 같은 곳을 지나려면 환자에게 소정 서식이나 카드를 제공해야 한다(Sisson 등 2011). 서식에는 치료 날짜, 투여 방사능, 치료기관, 그리고 사안을 아는 담당자의 성명과 전화번호를 명시해야 한다.

5.5.4. 방사성폐기물

(234) 허가 사용자는 방사선방호 최적화를 통해 선원으로부터 방사능물질의 환경 방출을 고려함을 확인할 책임이 있다(IAEA 2000, 2004, 2005a). 단반감기 의료용

46) <역주> 이와 관련된 역사서문을 참조하기 바란다.

동위원소 방사성폐기물은 완전히 붕괴할 때까지 적절한 장소에 저장해야 한다. 투여 방사능의 많은 부분은 궁극적으로 공공 하수계통으로 배출된다. 환자 배설물을 저장할 필요는 없지만(ICRP 2004), 방사능 배출에 대한 현지 제한이 적용될 수는 있다. 일단 환자가 병원에서 퇴원하면 배설하는 방사능 수준이 충분히 낮아서 일반인 선량한도에 근접하지 않고도 가정 변기를 통해 배출할 수 있다.

제6장 요약 및 권고

(235) 암치료에서 증가하고 있는 방사성의약품 사용은 환자에게 새로운 치료방안을 약속한다. 모든 방사선치료에서 도전은 잠재적 악영향이나 정상조직 부작용에 대해 암을 성공적으로 치료할 역량(종양 관리확률)을 최적화하는 것이다. 방사성의약품 치료는 효력과 안전 모두에 대한 적도인 치료지수를 극대화할 기회를 제공한다.

(236) 방사성의약품 치료에서 조직이나 장기의 흡수선량은 환자마다 크게 다를 수도 있는 개별 환자의 생물역동학(흡취, 체류 및 제거)에 의해 지배된다. 방사성의약품의 생물역동학 측정은 내부선량 평가에 필요한 핵심 정보를 제공한다.

(237) 생물역동학 차이 때문에 개별 환자에 대한 맞춤 선량계측을 수행해야 한다. 원론적으로는 개인 고유 측정에 근거한 완전한 개인 맞춤 접근이 정상조직이나 장기의 독성 문턱을 넘지 않는 치료를 보장할 수 있다.

(238) 임신 여성은 특별히 고려해야 한다. 구멍 치료가 아니라면 방사성의약품 치료는 임신에 금기이다. 치료용 방사성핵종 투여 후에는 모유수유가 금기임을 여성 환자에게 알려야 한다.

(239) 방사성의약품으로 치료한 환자에 추가하여 피폭 위험이 있는 사람에는 병원 의료진, 환자 가족 구성원(아동 포함), 간병인, 근접한 사람 및 일반인이 포함된다. 이러한 피폭 위험은 훈련된 의료진, 적절한 설비, 그리고 환자 맞춤 방사선안전 주의지침을 통해 효과적으로 관리되고 완화될 수 있다.

(240) 의료진 피폭을 최소화하기 위한 방사선방호 대책은 적절한 기기와 차폐, 방사선원의 안전 취급, 개인방호용구 사용, 안전 관행에 대한 인식과 다짐을 고취하는 교육훈련 등이다. 방사성의약품 치료환자 관리과정이나 방사성의약품의 준비와 투여 중에는 종사자 선량과 손 선량의 개인감시를 고려해야 한다.

(241) 의사는 환자 안전과 적절한 의학적 관리에 부합하는 모든 필요한 의료를 제공해야 한다. 수술이 필요한 사건에서, 방사선방호 고려가 구멍을 위한 수술을 방

해하거나 지연시켜서는 안 된다. 수술환자가 피폭원 역할을 할 때는 의료진에게 알려야 한다. 훈련은 의료진이 위험 우려를 합당한 균형적 시각에서 보도록 돕는다.

(242) 치료 후 환자의 입퇴원은 환자 몸의 잔류방사능, 기존 지침과 법규와 같은 인자들을 고려하여 결정해야 한다. 환자와 간병인에게 구체적 방사선방호 주의사항을 제공해야 한다.

(243) 방사성의약품이 관련된 의료과실의 예방은 시설 설비나 업무절차 설계에서 필수요소가 되어야 한다.

참고문헌

- Alexander, E.K., Pearce, E.N., Brent, G.A. et al, 2017. 2017 Guidelines of the American Thyroid Association for the diagnosis and management of thyroid disease during pregnancy and the postpartum. *Thyroid* 27, 315-389.
- Andersson, H., Cederkrantz, E., Bäck, T. et al, 2009. Intraperitoneal alpha-particle radioimmunotherapy of ovarian cancer patients: pharmacokinetics and dosimetry of ^{211}At -MX35 F(ab')₂ - a phase I study. *J. Nucl. Med.* 50, 1153-1160.
- Andersson, M., Johansson, L., Minarik, D., et al., 2014. An internal radiation dosimetry computer program, IDAC 2.0, for estimation of patient doses from radiopharmaceuticals. *Radiat. Prot. Dosim.* 162, 299-305.
- Ansell, B.M., Crook, A., Mallard, J.R., et al., 1963. Evaluation of intra-articular colloidal gold Au-198 in the treatment of persistent knee effusions. *Ann. Rheum. Dis.* 22, 435-439.
- Azizi, F., Smyth, P., 2009. Breastfeeding and maternal and infant iodine nutrition. *Clin. Endocrinol.* 70, 803-809.
- Barbet, J., Bardies, M., Bourgeois, M., et al., 2012. Radiolabeled antibodies for cancer imaging and therapy. *Methods Mol. Biol.* 907, 681-697.
- Barendsen, G.W., 1982. Dose fractionation, dose rate and iso-effect relationships for normal tissue responses. *Int. J. Radiat. Oncol. Biol. Phys.* 8, 1981-1997.
- Barone, R., Borson-Chazot, F.O., Valkerna, R., et al., 2005. Patient-specific dosimetry in predicting renal toxicity with Y-90-DOTATOC: relevance of kidney volume and dose rate in finding a dose-effect relationship. *J. Nucl. Med.* 46 (Suppl. 1), 99S-106S.
- Barth, I., Mielcarek, J., 2002. Occupational Beta Radiation Exposure During Radiosynoviorthesis. Sixth European ALARA Network Workshop in Occupational Exposure Optimization in Medical Field and Radiopharmaceutical Industry, 23-25
October 2002, Madrid, Spain, pp. 43-46. Available at: http://www.eu-alara.net/images/stories/pdf/program6/Session%20B/I_Barth.pdf (last accessed 8 April 2019).

- Benua, R.S., Cicale, N.R., Sonenberg, M., et al., 1962. The relation of radioiodine dosimetry to results and complications in the treatment of metastatic thyroid cancer. *Am. J. Roentgenol. Radium Ther. Nucl. Med.* 87, 171-182.
- Bentzen, S.M., Dorr, W., Gahbauer, R., et al., 2012. Bioeffect modeling and equieffective dose concepts in radiation oncology - terminology, quantities and units. *Radiother. Oncol.* 105, 266-268.
- Berg, G., Nystrom, E., Jacobsson, L., et al., 1998. Radioiodine treatment of hyperthyroidism in a pregnant woman. *J. Nucl. Med.* 39, 357-361.
- Berg, G., Jacobsson, L., Nyström, E., et al., 2008. Consequences of inadvertent radioiodine treatment of Graves' disease and thyroid cancer in undiagnosed pregnancy. Can we rely on routine pregnancy testing? *Acta Oncol.* 47, 145-149.
- Bodei, L., Cremonesi, M., Ferrari, M., et al., 2008. Long-term evaluation of renal toxicity after peptide receptor radionuclide therapy with Y-90-DOTATOC and Lu-177-DOTATATE: the role of associated risk factors. *Eur. J. Nucl. Med. Mol. Imaging* 35, 1847-1856.
- Bodei, L., Mueller-Brand, J., Baum, R.P., et al., 2013. The joint IAEA, EANM, and SNMMI practical guidance on peptide receptor radionuclide therapy (PRRNT) in neuroendocrine tumours. *Eur. J. Nucl. Med. Mol. Imaging* 40, 800-816.
- Bolch, W.E., Eckerman, K.F., Sgouros, G., et al., 2009. MIRDO Pamphlet No. 21: a generalized schema for radiopharmaceutical dosimetry - standardization of nomenclature. *J. Nucl. Med.* 50, 477-484.
- Bowring, C.S., Keeling, D.H., 1978. Absorbed radiation dose in radiation synovectomy. *Br. J. Radiol.* 51, 836-837.
- Brandt, L., Anderson, H., 1995. Survival and risk of leukaemia in polycythemia vera and essential thrombocythemia treated with oral radiophosphorus. *Eur. J. Haematol.* 54, 21-26.
- Breen, S.L., Powe, J.E., Porter, A.T., 1992. Dose estimation in strontium-89 radiotherapy of metastatic prostatic carcinoma. *J. Nucl. Med.* 33, 1316-1323.
- Brown, A.P., Chen, J., Hitchcock, Y.J., et al., 2008. The risk of second primary malignancies up to three decades after the treatment of differentiated thyroid cancer. *J. Clin. Endocrinol. Metabol.* 93, 504-515.
- Buckley, S.E., Chittenden, S.J., Saran, F.H., et al., 2009. Whole-body dosimetry for individualized treatment planning of ¹³¹I-MIBG

- radionuclide therapy for neuroblastoma. *J. Nucl. Med.* 50, 1518-1524.
- Bushnell, D.L. Jr, O'Dorisio, T.M., O'Dorisio, M.S., et al., 2010. ^{90}Y -edotreotide for metastatic carcinoid refractory to octreotide. *J. Clin. Oncol.* 28, 1652-1659.
- Carlier, T., Willowson, K.P., Fourkal, E., et al., 2015. ^{90}Y -PET imaging: exploring limitations and accuracy under conditions of low counts and high random fraction. *Med. Phys.* 42, 4295-4309.
- Carlsson, S., LeHeron, J., 2014. Radiation protection. In: Bailey, D., Humm, J., Todd-Pokropek, A., et al. (Eds.), *Nuclear Medicine Physics: a Handbook for Teachers and Students*. International Atomic Energy Agency, Vienna.
- Chatal, J.F., Faivre-Chauvet, A., Bardies, M., et al., 1995. Bifunctional antibodies for radioimmunotherapy. *Hybridoma* 14, 125-128.
- Chatal, J.F., Kraeber-Bodere, F., Barbet, J., 2008. Consolidation radioimmunotherapy of follicular lymphoma: a step towards cure? *Eur. J. Nucl. Med. Mol. Imaging* 35, 1236-1239.
- Chiesa, C., Maccauro, M., Romito, R., et al., 2011. Need, feasibility and convenience of dosimetric treatment planning in liver selective internal radiation therapy with Y-90 microspheres: the experience of the National Cancer Institute of Milan. *Q. J. Nucl. Med. Mol. Imaging* 55, 168-197.
- Chittenden, S.J., Hindorf, C., Parker, C.C., et al., 2015. A phase 1, open-label study of the biodistribution, pharmacokinetics, and dosimetry of ^{223}Ra -dichloride in patients with hormone-refractory prostate cancer and skeletal metastases. *J. Nucl. Med.* 56, 1304-1309.
- Chu, B.P., Horan, C., Basu, E., et al., 2016. Feasibility of administering high-dose ^{131}I -MIBG therapy to children with high-risk neuroblastoma without lead-lined rooms. *Pediatr. Blood Cancer.* 63, 801-807.
- CNSC, 2017. Radionuclide Information Booklet. Canadian Nuclear Safety Commission, Ottawa. Available at: https://nuclearsafety.gc.ca/pubs_catalogue/uploads/Radionuclide-Information-Booklet-2016-eng.pdf (last accessed 8 April 2018).
- Cremonesi, M., Ferrari, M., Bodei, L., et al., 2006a. Dosimetry in peptide radionuclide receptor therapy: a review. *J. Nucl. Med.* 47, 1467-1475.
- Cremonesi, M., Ferrari, M., Paganelli, G., et al., 2006b. Radiation protection in radionuclide therapies with ^{90}Y -conjugates: risk and safety. *Eur. J. Nucl. Med. Mol. Imaging* 33, 1321-1327.

- Cremonesi, M., Ferrari, M., Grana, C.M., et al., 2007. High-dose radioimmunotherapy with ^{90}Y -ibritumomab tiuxetan: comparative dosimetric study for tailored treatment. *J. Nucl. Med.* 48, 1871-1879.
- Cremonesi, M., Botta, F., Di Dia, A., et al., 2010. Dosimetry for treatment with radiolabelled somatostatin analogues. A review. *Q. J. Nucl. Med. Mol. Imaging* 54, 37-51.
- Cremonesi, M., Chiesa, C., Strigari, L., et al., 2014. Radioembolization of hepatic lesions from a radiobiology and dosimetric perspective. *Front. Oncol.* 4, 210.
- Dale, R.G., 1996. Dose-rate effects in targeted radiotherapy. *Phys. Med. Biol.* 41, 1871-1884.
- D'Angelo, G., Sciuto, R., Salvatori, M., et al., 2012. Targeted "bone-seeking" radiopharmaceuticals for palliative treatment of bone metastases: a systematic review and meta-analysis. *Q. J. Nucl. Med. Mol. Imaging* 56, 538-543.
- Das, B., 2007. Role of radiosynovectomy in the treatment of rheumatoid arthritis and hemophilic arthropathies. *Biomed. Imaging Interv. J.* 3, e45.
- Dauer, L.T., St. Germain, J., Williamson, M.J., et al., 2007a. Whole-body clearance kinetics and external dosimetry of ^{131}I -3F8 monoclonal antibody for radioimmunotherapy of neuroblastoma. *Health Phys.* 92, 33-39.
- Dauer, L.T., Williamson, M.J., St. Germain, J., et al., 2007b. TI-201 stress tests and homeland security. *J. Nucl. Cardiol.* 14, 582-588.
- Dauer, L.T., Strauss, H.W., St. Germain, J., 2007c. Responding to nuclear granny. *J. Nucl. Cardiol.* 14, 904-905.
- Dauer, L.T., Williamson, M.J., Humm, J., et al., 2014. Radiation safety considerations for the use of $^{223}\text{RaCl}_2$ in men with castration-resistant prostate cancer. *Health Phys.* 106, 494-504.
- Delpon, G., Ferrer, L., Lisbona, A., et al., 2002. Correction of count losses due to deadtime on a DST-XLi(SMVi-GE) camera during dosimetric studies in patients injected with iodine-131. *Phys. Med. Biol.* 47, N79-N90.
- Dewaraja, Y.K., Frey, E.C., Sgouros, G., et al., 2012. MIRD Pamphlet No. 23: quantitative SPECT for patient-specific 3-dimensional dosimetry in internal radionuclide therapy. *J. Nucl. Med.* 53, 1310-1325.
- Dewaraja, Y.K., Ljungberg, M., Green, A.J., et al., 2013. MIRD Pamphlet

- No. 24: guidelines for quantitative ^{131}I SPECT in dosimetry applications. *J. Nucl. Med.* 54, 2182-2188.
- Eary, J.F., Collins, C., Stabin, M., et al., 1993. Samarium-153-EDTMP biodistribution and dosimetry estimation. *J. Nucl. Med.* 34, 1031-1036.
- Espenan, G.D., Nelson, J.A., Fisher, D.R., et al., 1999. Experiences with high dose radiopeptide therapy: the health physics perspective. *Health Phys.* 76, 225-235.
- Fernández Tomás, M., Preylowski, V., Schlögl, S., et al., 2012. Influence of the reconstruction parameters on image quantification with SPECT/CT. *Eur. J. Nucl. Med. Mol. Imaging* 39, S254.
- Finlay, I.G., Mason, M.D., Shelley, M., 2005. Radioisotopes for the palliation of metastatic bone cancer: a systematic review. *Lancet Oncol.* 6, 392-400.
- Fisher, D.R., Meredith, R.F., Shen, S., 2009. MIRD dose estimate report No. 20: radiation absorbed dose estimates for ^{111}In - and ^{90}Y -ibritumomab tiuxetan (ZevalinTM). *J. Nucl. Med.* 44, 465-474.
- Flower, M.A., Al-Saadi, A., Harmer, C.L., et al., 1994. Dose-response study on thyrotoxic patients undergoing positron emission tomography and radioiodine therapy. *Eur. J. Nucl. Med. Mol. Imaging* 21, 531-536.
- Flux, G.D., Haq, M., Chittenden, S.J., et al., 2010. A dose-effect correlation for radioiodine ablation in differentiated thyroid cancer. *Eur. J. Nucl. Med. Mol. Imaging* 37, 270-275.
- Flux, G.D., Chittenden, S.J., Saran, F., et al., 2011. Clinical applications of dosimetry for mIBG therapy. *Q. J. Nucl. Med. Mol. Imaging* 55, 116-125.
- Fowler, J.F., 1989. The linear-quadratic formula and progress in fractionated radiotherapy. *Br. J. Radiol.* 62, 679-694.
- Francis, G.L., Waguespack, S.G., Bauer, A.J., et al., 2015. Management guidelines for children with thyroid nodules and differentiated thyroid cancer. *Thyroid.* 25, 716-759.
- Franzius, C., Dietlein, M., Biermann, M., et al., 2007. [Procedure guideline for radioiodine therapy and ^{131}I -iodine whole-body scintigraphy in paediatric patients with differentiated thyroid cancer]. *Nuklearmedizin* 46, 224-231.
- Gains, J.E., Bomanji, J.B., Fersht, N.L., et al., 2011. ^{177}Lu -DOTATATE molecular radiotherapy for childhood neuroblastoma. *J. Nucl. Med.* 52, 1041-1047.

- Garaventa, A., Bellagamba, O., Lo Piccolo, M.S., et al., 1999. I-131-metaiodobenzylguanidine (I-131-MIBG) therapy for residual neuroblastoma: a mono-institutional experience with 43 patients. *Br. J. Cancer* 81, 1378-1384.
- Gaze, M.N., Chang, Y.C., Flux, G.D., et al., 2005. Feasibility of dosimetry-based high-dose ¹³¹I-meta-iodobenzylguanidine with topotecan as a radiosensitizer in children with metastatic neuroblastoma. *Cancer Biother. Radiopharm.* 20, 195-199.
- Gear, J.I., Cox, M.G., Gustafsson, J., et al., 2018. EANM practical guidance on uncertainty analysis for molecular radiotherapy absorbed dose calculations. *Eur. J. Nucl. Med. Mol. Imaging* 45, 2456-2474.
- George, S.L., Falzone, N., Chittenden, S., et al., 2016. Individualized ¹³¹I-mIBG therapy in the management of refractory and relapsed neuroblastoma. *Nucl. Med. Commun.* 37, 466-472.
- Giammarile, F., Chiti, A., Lassmann, M., et al., 2008. EANM procedure guideline for ¹³¹I-meta-iodobenzylguanidine(¹³¹I-mIBG) therapy. *Eur. J. Nucl. Med. Mol. Imaging* 35, 1039-1047.
- Giammarile, F., Bodei, L., Chiesa, C., et al., 2011. EANM procedure guideline for the treatment of liver cancer and liver metastases with intra-arterial radioactive compounds. *Eur. J. Nucl. Med. Mol. Imaging* 38, 1393-1406.
- Glattig, G., Landmann, M., Kull, T., et al., 2005. Internal radionuclide therapy: the ULMDOS software for treatment planning. *Med. Phys.* 32, 2399-2405.
- Glattig, G., Lassmann, M., 2007. Nuklearmedizinische dosimetrie. In: Krause, B-J., Schwaiger, M., Buck, A.K.(Eds.), *Nuklearmedizinische Onkologie*. Hu" thig Jehle Rehm, Landsberg.
- Gleisner, K.S., Brodin, G., Sundlov, A., et al., 2015. Long-term retention of ¹⁷⁷Lu/^{177m}Lu-dotatate in patients investigated by gamma-spectrometry and gamma-camera imaging. *J. Nucl. Med.* 56, 976-984.
- Goldenberg, D.M., Chang, C.H., Rossi, E.A., et al., 2012. Pretargeted molecular imaging and radioimmunotherapy. *Theranostics* 2, 523-540.
- Goldsmith, S.J., 2010. Radioimmunotherapy of lymphoma: Bexxar and Zevalin. *Semin. Nucl. Med.* 40, 122-135.
- Grassi, E., Sghedoni, R., Asti, M., et al., 2009. Radiation protection in ⁹⁰Y-labelled DOTA-DPhe1-Tyr3-octreotide preparations. *Nucl. Med. Commun.* 30, 176-182.

- Gustafsson, J., Nilsson, P., Gleisner, K.S., 2013a. On the biologically effective dose (BED) - using convolution for calculating the effects of repair: I. Analytical considerations. *Phys. Med. Biol.* 58, 1507-1527.
- Gustafsson, J., Nilsson, P., Gleisner, K.S., 2013b. On the biologically effective dose (BED) - using convolution for calculating the effects of repair: II. Numerical considerations. *Phys. Med. Biol.* 58, 1529-1548.
- Guy, M.J., Flux, G.D., Papavasileiou, P., et al., 2003. A dedicated package for ¹³¹I SPECT quantification, registration and patient-specific dosimetry. *Cancer Biother. Radiopharm.* 18, 61-69.
- Hanaoka, K., Hosono, M., Tatsumi, Y., et al., 2015. Heterogeneity of intratumoral ¹¹¹Inibritumomab tiuxetan and ¹⁸F-FDG distribution in association with therapeutic response in radioimmunotherapy for B-cell non-Hodgkin's lymphoma. *EJNMI Res.* 5, 10.
- Hänscheid, H., Lassmann, M., Luster, M., et al., 2006. Iodine biokinetics and dosimetry in radioiodine therapy of thyroid cancer: procedures and results of a prospective international controlled study of ablation after rhTSH or hormone withdrawal. *J. Nucl. Med.* 47, 648-654.
- Hänscheid, H., Lassmann, M., Luster, M., et al., 2009. Blood dosimetry from a single measurement of the whole body radioiodine retention in patients with differentiated thyroid carcinoma. *Endocr. Relat. Cancer* 16, 1283-1289.
- Hänscheid, H., Canzi, C., Eschner, W., et al., 2013. EANM Dosimetry Committee series on standard operational procedures for pre-therapeutic dosimetry. II. Dosimetry prior to radioiodine therapy of benign thyroid diseases. *Eur. J. Nucl. Med. Mol. Imaging* 40, 1126-1134.
- Haugen, B.R., Alexander, E.K., Bible, K.C., et al., 2016. 2015 American Thyroid Association management guidelines for adult patients with thyroid nodules and differentiated thyroid cancer: the American Thyroid Association Guidelines Task Force on Thyroid Nodules and Differentiated Thyroid Cancer. *Thyroid* 26, 1-133.
- Hay, I.D., Gonzalez-Losada, T., Reinalda, M.S., et al., 2010. Long-term outcome in 215 children and adolescents with papillary thyroid cancer treated during 1940 through 2008. *World J. Surg.* 34, 1192-1202.
- Hindorf, C., Chittenden, S., Causer, L., et al., 2007. Dosimetry for ⁹⁰Y-DOTATOC therapies in patients with neuroendocrine tumors. *Cancer Biother. Radiopharmaceut.* 22, 130-135.
- Hindorf, C., Glatting, G., Chiesa, C., et al., 2010. EANM Dosimetry Committee guidelines for bone marrow and whole-body dosimetry. *Eur.*

- J. Nucl. Med. Mol. Imaging 37, 1238-1250.
- Hoefnagel, C.A., Voute, P.A., De Kraker, J., et al., 1991. [¹³¹I]metaiodobenzylguanidine therapy after conventional therapy for neuroblastoma. J. Nucl. Biol. Med. 35, 202-206.
- Honarvar, H., Westerlund, K., Altai, A., et al., 2016. Feasibility of affibody molecule-based PNA-mediated radionuclide pretargeting of malignant tumors. Theranostics 6, 93-103.
- Howarth, D., Epstein, M., Lan, L., et al., 2001. Determination of the optimal minimum radioiodine dose in patients with Graves' disease: a clinical outcome study. Eur. J. Nucl. Med. 28, 1489-1495.
- Howell, R.W., Goddu, S.M., Dandamundi, V.R., 1994. Application of the linear-quadratic model to radioimmunotherapy: further support for the advantage of longer-lived radionuclides. J. Nucl. Med. 35, 1861-1869.
- IAEA, 1999a. Occupational Protection. IAEA Safety Standards Series No. RS-G-1.1. International Atomic Energy Agency, Vienna.
- IAEA, 1999b. Assessment of Occupational Exposure Due to Intakes of Radionuclides. IAEA Safety Standards Series No. RS-G-1.2. International Atomic Energy Agency, Vienna.
- IAEA, 1999c. Assessment of Occupational Exposure Due to External Sources of Radiation. IAEA Safety Standards Series No. RS-G-1.3. International Atomic Energy Agency, Vienna.
- IAEA, 2000. Regulatory Control of Radioactive Discharges to the Environment. IAEA Safety Standards Series No. WS-G-2.3. International Atomic Energy Agency, Vienna.
- IAEA, 2004. Applications of the Concepts of Exclusion, Exemption and Clearance. IAEA Safety Standards Series No. RS-G-1.7. International Atomic Energy Agency, Vienna.
- IAEA, 2005a. Applying Radiation Safety Standards in Nuclear Medicine. Safety Reports Series No. 40. International Atomic Energy Agency, Vienna.
- IAEA, 2005b. Management of Waste from the Use of Radioactive Material in Medicine, Industry, Agriculture, Research and Education. IAEA Safety Standards Series No. WS-G-2.7. International Atomic Energy Agency, Vienna.
- IAEA, 2006a. Application of the Management System for Facilities and Activities: Safety Guide. IAEA Safety Standards Series No. GS-G-3.1. International Atomic Energy Agency, Vienna.

- IAEA, 2006b. Radiation Protection in the Design of Radiotherapy Facilities. Safety Report Series No. 47. International Atomic Energy Agency, Vienna.
- IAEA, 2009. Release of Patients After Radionuclide Therapy. Safety Reports Series No. 63. International Atomic Energy Agency, Vienna.
- IAEA, 2011. Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards – Interim Edition. IAEA Safety Standards Series No. GSR Part 3 (Interim). International Atomic Energy Agency, Vienna.
- IAEA, 2014a. Nuclear Medicine Physics: a Handbook for Teachers and Students. International Atomic Energy Agency, Vienna.
- IAEA, 2014b. Quantitative Nuclear Medicine Imaging: Concepts, Requirements and Methods. IAEA Human Health Reports No. 9. International Atomic Energy Agency, Vienna.
- ICRP, 1987. Radiation dose to patients from radiopharmaceuticals. ICRP Publication 53. Ann. ICRP 18(1-4).
- ICRP, 1996a. Radiological protection and safety 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, 1997. General principles for the radiation protection of workers. ICRP Publication 75. Ann. ICRP 27(1).
- ICRP, 1998. Radiation dose to patients from radiopharmaceuticals (Addendum 2 to ICRP Publication 53). ICRP Publication 80. Ann. ICRP 28(3).
- ICRP, 2000. Pregnancy and medical radiation. ICRP Publication 84. Ann. ICRP 30(1).
- ICRP, 2001a. Doses to the embryo and fetus from intakes of radionuclide 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, 2003. Biological effects after prenatal irradiation (embryo and fetus). ICRP Publication 90. Ann. ICRP 33(1/2).
- ICRP, 2004. Release of patients after therapy with unsealed radionuclides. ICRP Publication 94. Ann. ICRP 34(2).
- ICRP, 2007a. The 2007 Recommendations of the International Commission

- on Radiological Protection. ICRP Publication 103. Ann. ICRP 37(2-4).
- ICRP, 2007b. Radiological protection in medicine. ICRP Publication 105. Ann. ICRP 37(6).
- ICRP, 2008. Radiation dose to patients from radiopharmaceuticals - Addendum 3 to ICRP Publication 53. ICRP Publication 106. Ann. ICRP 38(1/2).
- ICRP, 2009. Education and training in radiological protection for diagnostic and interventional procedures. ICRP Publication 113. Ann. ICRP 39(5).
- ICRP, 2010. Conversion coefficients for radiological protection quantities for external radiation exposures. ICRP Publication 116. Ann. ICRP 40(2-5).
- ICRP, 2015a. Radiation dose to patients from radiopharmaceuticals: a compendium of current information related to frequently used substances. ICRP Publication 128. Ann. ICRP 44(2S).
- ICRP, 2015b. Occupational intakes of radionuclides: Part 1. ICRP Publication 130. Ann. ICRP 44(2).
- ICRU, 1993. Quantities and Units in Radiation Protection Dosimetry. ICRU Report 51. International Commission on Radiation Units and Measurements, Bethesda, MD.
- ICRU, 2016. Key data for ionizing-radiation dosimetry: measurement standards and applications. ICRU Report No. 90. J. ICRU 14(1).
- ISO, 2016. Radiological Protection – Monitoring and Internal Dosimetry for Staff Members Exposed to Medical Radionuclides as Unsealed Sources. ISO 16637. International Organization for Standardization, Geneva.
- Ilan, E., Sandstrom, M., Wassberg, C., et al., 2015. Dose response of pancreatic neuroendocrine tumors treated with peptide receptor radionuclide therapy using ¹⁷⁷Lu-DOTATATE. J. Nucl. Med. 56, 177-182.
- Imhof, A., Brunner, P., Marincek, N., et al., 2011. Response, survival, and long-term toxicity after therapy with the radiolabeled somatostatin analogue [⁹⁰Y-DOTA]-TOC in metastasized neuroendocrine cancers. J. Clin. Oncol. 29, 2416-2423.
- Infante-Rivard, C., Rivard, G.E., Derome, F., et al., 2012. A retrospective cohort study of cancer incidence among patients treated with radiosynoviorthesis. Haemophilia 18, 805-809.
- Jarzab, B., Handkiewicz-Junak, D., Wloch, J., 2005. Juvenile differentiated

- thyroid carcinoma and the role of radioiodine in its treatment: a qualitative review. *Endocr-Relat. Cancer* 12, 773-803.
- Jie, Y., Congjin, L., Xingdang, L., et al., 2013. Efficacy and safety of ^{177}Lu -EDTMP in bone metastatic pain palliation in breast cancer and hormone refractory prostate cancer: a phase II study. *Clin. Nucl. Med.* 38, 88-92.
- Joiner, M.C., van der Kogel, A., 2009. *Basic Clinical Radiobiology*. CRC Press, Boca Raton, FL.
- Johnson, L.S., Yanch, J.C., Shortkroff, S., et al., 1995. Beta-particle dosimetry in radiation synovectomy. *Eur. J. Nucl. Med.* 22, 977-988.
- Jönsson, H., Mattsson, S., 2004. Excess radiation absorbed doses from non-optimised radioiodine treatment of hyperthyroidism. *Radiat. Prot. Dosim.* 108, 107-111.
- Jönsson, L., Ljungberg, M., Strand, S.E., 2005. Evaluation of accuracy in activity calculations for the conjugate view method from Monte Carlo simulated scintillation camera images using experimental data in an anthropomorphic phantom. *J. Nucl. Med.* 46, 1679-1686.
- Jurcic, J.G., Rosenblat, T.L., 2014. Targeted alpha-particle immunotherapy for acute myeloid leukemia. *Am. Soc. Clin. Oncol. Educ. Book* 34, e126-e131.
- Kellerer, A.M., Rossi, H.H., 1974. The theory of dual radiation action. In: Ebert, M., Howard, A.(Eds.), *Current Topics in Radiation Research*. Vol. III. North Holland Publishing Co., Amsterdam, pp. 85-158.
- Klett, R., Puille, M., Matter, H.P., et al., 1999. Activity leakage and radiation exposure in radiation synovectomy of the knee: influence of different therapeutic modalities. *Z. Rheumatol.* 58, 207-212.
- Kletting, P., Schimmel, S., Kestler, H.A., et al., 2013. Molecular radiotherapy: the NUKFIT software for calculating the time-integrated activity coefficient. *Med. Phys.* 40, 102504.
- Klubo-Gwiedzinska, J., Van Nostrand, D., Burman, K.D., et al., 2010. Salivary gland malignancy and radioiodine therapy for thyroid cancer. *Thyroid* 20, 647-651.
- Knut, L., 2015. Radiosynovectomy in the therapeutic management of arthritis. *World J. Nucl. Med.* 14, 10-15.
- Kobe, C., Eschner, W., Sudbrock, F., et al., 2008. Graves' disease and radioiodine therapy. Is success of ablation dependent on the achieved dose above 200 Gy? *Nuklearmedizin* 47, 13-17.

- Kraeber-Bodere, F., Rousseau, C., Bodet-Milin, C., et al., 2006. Targeting, toxicity, and efficacy of 2-step, pretargeted radioimmunotherapy using a chimeric bispecific antibody and ^{131}I -labeled bivalent hapten in a phase I optimization clinical trial. *J. Nucl. Med.* 47, 247-255.
- Kramer, K., Humm, J.L., Souweidane, M.M., et al., 2007. Phase I study of targeted radioimmunotherapy for leptomeningeal cancer using intra-Ommaya ^{131}I -3FB. *J. Clin. Oncol.* 25, 5465-5470.
- Kratochwil, C., Bruchertseifer, F., Giesel, F.L., et al., 2016. ^{225}Ac -PSMA-617 for PSMA-targeted alpha-radiation therapy of metastatic castration-resistant prostate cancer. *J. Nucl. Med.* 5, 1941-1944.
- Kunikowska, J., Krolicki, L., Hubalewska-Dydejczyk, A., et al., 2011. Clinical results of radionuclide therapy of neuroendocrine tumours with ^{90}Y -DOTATATE and tandem $^{90}\text{Y}/^{177}\text{Lu}$ -DOTATATE: which is a better therapy option? *Eur. J. Nucl. Med. Mol. Imaging* 38, 1788-1797.
- Kwekkeboom, D.J., Mueller-Brand, J., Paganelli, G., et al., 2005. Overview of results of peptide receptor radionuclide therapy with 3 radiolabeled somatostatin analogs. *J. Nucl. Med.* 46 (Suppl. 1), 62S-66S.
- Lambert, B., Mertens, J., Sturm, E.J., et al., 2010. $^{99\text{m}}\text{Tc}$ -labelled macroaggregated albumin (MAA) scintigraphy for planning treatment with ^{90}Y microspheres. *Eur. J. Nucl. Med. Mol. Imaging* 37, 2328-2333.
- Lancelot, S., Guillet, B., Sigrist, S., et al., 2008. Exposure of medical personnel to radiation during radionuclide therapy practices. *Nucl. Med. Commun.* 29, 405-410.
- Larson, S.M., Carrasquillo, J.A., Cheung, N-K., et al., 2015. Radioimmunotherapy of human tumours. *Nat. Rev. Cancer* 15, 347-360.
- Lassmann, M., Hanscheid, H., Chiesa, C., et al., 2008. EANM Dosimetry Committee series on standard operational procedures for pre-therapeutic dosimetry I: blood and bone marrow dosimetry in differentiated thyroid cancer therapy. *Eur. J. Nucl. Med. Mol. Imaging* 35, 1405-1412.
- Lea, D.E., Catcheside, D.G., 1942. The mechanism of the induction by radiation of chromosome aberrations in *Tradescantia*. *J. Genet.* 44, 216-245.
- Lee, S.L., 2010. Complications of radioactive iodine treatment of thyroid carcinoma. *J. Natl. Compr. Canc. Netw.* 8, 1277-1286; quiz 1287.
- Leiter, L., Seidlin, S.M., Marinelli, L.D., 1946. Adenocarcinoma of the thyroid with hyperthyroidism and functional metastases; studies with

- thiouracil and radioiodine. *J. Clin. Endocrinol. Metab.* 6, 247-261.
- Leslie, W.D., Ward, L., Salamon, E.A., et al., 2003. A randomized comparison of radioiodine doses in Graves' hyperthyroidism. *J. Clin. Endocrinol. Metab.* 88, 978-983.
- Lhommel, R., van Elmbt, L., Goffette, P., et al., 2010. Feasibility of ^{90}Y TOF PET-based dosimetry in liver metastasis therapy using SIR-spheres. *Eur. J. Nucl. Med. Mol. Imaging* 37, 1654-1962.
- Liepe, K., Andreeff, M., Wunderlich, G., et al., 2005a. Radiation protection in radiosynovectomy of the knee. *Health Phys.* 89, 151-154.
- Liepe, K., Runge, R., Kotzerk, J., 2005b. The benefit of bone-seeking radiopharmaceuticals in the treatment of metastatic bone pain. *J. Cancer Res. Clin. Oncol.* 131, 60-66.
- Liepe, K., Kotzerke, J., 2007. A comparative study of ^{188}Re -HEDP, ^{186}Re -HEDP, ^{153}Sm -EDTMP and ^{89}Sr in the treatment of painful skeletal metastases. *Nucl. Med. Commun.* 28, 623-630.
- Ljungberg, M., Celler, A., Konijnenberg, M.W., et al., 2016. MIRD Pamphlet No. 26: joint EANM/MIRD guidelines for quantitative ^{177}Lu SPECT applied for dosimetry of radiopharmaceutical therapy. *J. Nucl. Med.* 57, 151-162.
- Loevinger, R., Berman, M., 1968. A schema for absorbed-dose calculations for biologically distributed radionuclides. MIRD Pamphlet No. 1. *J. Nucl. Med.* 9 (Suppl. 1), 7-14.
- Luster, M., Clarke, S.E., Dietlein, M., et al., 2008. Guidelines for radioiodine therapy of differentiated thyroid cancer. *Eur. J. Nucl. Med. Mol. Imaging* 35, 1941-1959.
- Mallick, U., Harmer, C., Hackshaw, A., et al., 2012a. Iodine or not (IoN) for low-risk differentiated thyroid cancer: the next UK National Cancer Research Network randomised trial following HiLo. *Clin. Oncol.* 24, 159-161.
- Mallick, U., Harmer, C., Yap, B., et al., 2012b. Ablation with low-dose radioiodine and thyrotropin alfa in thyroid cancer. *N. Engl. J. Med.* 366, 1674-1685.
- Matthay, K.K., Panina, C., Huberty, J., et al., 2001. Correlation of tumor and whole-body dosimetry with tumor response and toxicity in refractory neuroblastoma treated with ^{131}I -MIBG. *J. Nucl. Med.* 42, 1713-1721.
- Matthay, K.K., Yanik, G., Messina, J., et al., 2007. Phase II study on the

- effect of disease sites, age, and prior therapy on response to iodine-131-metaiodobenzylguanidine therapy in refractory neuroblastoma. *J. Clin. Oncol.* 25, 1054-1060.
- Maxon, H.R. 3rd, Englaro, E.E., Thomas, S.R., et al., 1992. Radioiodine-131 therapy for well-differentiated thyroid cancer - a quantitative radiation dosimetric approach: outcome and validation in 85 patients. *J. Nucl. Med.* 33, 1132-1136.
- McKay, E., 2003. A software tool for specifying voxel models for dosimetry estimation. *Cancer Biother. Radiopharm.* 18, 61-69.
- Menda, Y., O'Doriso, M.S., Kao, S., et al., 2010. Phase I trial of ⁹⁰Y-DOTATOC therapy in children and young adults with refractory solid tumors that express somatostatin receptors. *J. Nucl. Med.* 51, 1524-1531.
- Merrill, S., Horowitz, J., Traino, A.C., et al., 2011. Accuracy and optimal timing of activity measurements in estimating the absorbed dose of radioiodine in the treatment of Graves' disease. *Phys. Med. Biol.* 56, 557-571.
- Miederer, M., McDevitt, M.R., Sgouros, G., et al., 2004. Pharmacokinetics, dosimetry, and toxicity of the targetable atomic generator, ²²⁵Ac-HuM195, in nonhuman primates. *J. Nucl. Med.* 45, 129-137.
- Millar, W.T., 1991. Application of the linear-quadratic model with incomplete repair to radionuclide directed therapy. *Br. J. Radiol.* 64, 242-251.
- NCRP, 2006. Management of Radionuclide Therapy Patients. NCRP Report No. 155. National Council on Radiation Protection and Measurements, Bethesda, MD.
- Noble, J., Jones, A.G., Davies, M.A., et al., 1983. Leakage of radioactive particle systems from a synovial joint studied with a gamma camera: its application to radiation synovectomy. *J. Bone Joint Surg. Am.* 65, 381-389.
- Norrgren, K., Svegborn, S.L., Areberg, J., Mattsson, S., 2003. Accuracy of the quantification of organ activity from planar gamma camera images. *Cancer Biother. Radiopharm.* 18, 125-131.
- Pandit-Taskar, N., Batraki, M., Divgi, C.R., 2004. Radiopharmaceutical therapy for palliation of bone pain from osseous metastases. *J. Nucl. Med.* 45, 1358-1365.
- Pandit-Taskar, N., Larson, S.M., Carrasquillo, J.A., 2014. Bone-seeking radiopharmaceuticals for treatment of osseous metastases. Part 1:

- alpha therapy with ^{223}Ra -dichloride. *J. Nucl. Med.* 55, 268-274.
- Parker, C., Nilsson, S., Heinrich, D., et al., 2013. Alpha emitter radium-223 and survival in metastatic prostate cancer. *N. Engl. J. Med.* 369, 213-223.
- Pauwels, S., Barone, R., Walrand, S., et al., 2005. Practical dosimetry of peptide receptor radionuclide therapy with Y-90-labeled somatostatin analogs. *J. Nucl. Med.* 46, 92S-98S.
- Pawelczak, M., David, R., Franklin, B., et al., 2010. Outcomes of children and adolescents with well-differentiated thyroid carcinoma and pulmonary metastases following I-131 treatment: a systematic review. *Thyroid* 20, 1095-1101.
- Perros, P., Boelaert, K., Colley, S., et al., 2014. Guidelines for the management of thyroid cancer. *Clin. Endocrinol.* 81 (Suppl. 1), 1-122.
- Quach, A., Ji, L., Mishra, V., et al., 2011. Thyroid and hepatic function after high-dose ^{131}I -metaiodobenzylguanidine (^{131}I -MIBG) therapy for neuroblastoma. *Pediatr. Blood Cancer* 56, 191-201.
- Rahbar, K., Ahmadzadehfar, H., Kratochwil, C., et al., 2017. German multicenter study investigating ^{177}Lu -PSMA-617 radioligand therapy in advanced prostate cancer patients. *J. Nucl. Med.* 58, 85-90.
- Ramage, J.K., Ahmed, A., Ardill, J., et al., 2012. Guidelines for the management of gastroenteropancreatic neuroendocrine (including carcinoid) tumours (NETs). *Gut* 61, 6-32.
- RCP, 2007. Radioiodine in the Management of Benign Thyroid Disease: Clinical Guidelines. RCP Report of a Working Party. Royal College of Physicians, London.
- Reinhardt, M.J., Brink, I., Joe, A.Y., et al., 2002. Radioiodine therapy in Graves' disease based on tissue-absorbed dose calculations: effect of pre-treatment thyroid volume on clinical outcome. *Eur. J. Nucl. Med. Mol. Imaging* 29, 1118-1124.
- Remy, H.L., Borget, I., Leboulleux, S., et al., 2008. ^{131}I effective half-life and dosimetry in thyroid cancer patients. *J. Nucl. Med.* 49, 1445-1450.
- Rimpler, A., Barth, I., 2007. Beta radiation exposure of medical staff and implications for extremity dose monitoring. *Radiat. Prot. Dosim.* 125, 335-339.
- Rimpler, A., Barth, I., Ferrari, O., et al., 2011. Extremity exposure in nuclear medicine therapy with ^{90}Y -labelled substances - results of the ORAMED project. *Radiat. Meas.* 46, 1283-1286.

- Roedler, H.D., 1980. Accuracy of internal dose calculations with special consideration of radiopharmaceutical biokinetics. In: Watson, E.E., Schlafke-Stelson, A.T., Coffey, J.L., et al. (Eds.), Third International Radiopharmaceutical Symposium. U.S. Department of Human Services, Oak Ridge, TN, pp. 1-20.
- Rubino, C., de Vathaire, F., Dottorini, M.E., et al., 2003. Second primary malignancies in thyroid cancer patients. *Br. J. Cancer* 89, 1638-1644.
- Rushforth, D.P., Pratt, B.E., Chittenden, S.J., et al., 2017. InfuShield: a shielded enclosure for administering therapeutic radioisotope treatments using standard syringe pumps. *Nucl. Med. Commun.* 38, 266-252.
- Sans-Merce, M., Ruiz, N., Barth, I., et al., 2011. Recommendations to reduce hand exposure for standard nuclear medicine procedures. *Radiat. Meas.* 46, 1330-1333.
- Savolainen, S., Konijnenberg, M., Bardies, M., et al., 2012. Radiation dosimetry is a necessary ingredient for a perfectly mixed molecular radiotherapy cocktail. *Eur. J. Nucl. Med. Mol. Imaging* 39, 548-549.
- Sawka, A.M., Lea, J., Alshehri, B., et al., 2008a. A systematic review of the gonadal effects of therapeutic radioactive iodine in male thyroid cancer survivors. *Clin. Endocrinol. (Oxf.)* 68, 610-617.
- Sawka, A.M., Lakra, D.C., Lea, J., et al., 2008b. A systematic review examining the effects of therapeutic radioactive iodine on ovarian function and future pregnancy in female thyroid cancer survivors. *Clin. Endocrinol. (Oxf.)* 69, 479-490.
- Schiavo, M., Bagnara, M.C., Calamia, I., et al., 2011. A study of the efficacy of radioiodine therapy with individualized dosimetry in Graves' disease: need to retarget the radiation committed dose to the thyroid. *J. Endocrinol. Invest.* 34, 201-205.
- Schlumberger, M., Catargi, B., Borget, I., et al., 2012. Strategies of radioiodine ablation in patients with low-risk thyroid cancer. *N. Engl. J. Med.* 366, 1663-1673.
- Schmidt, M., Baum, R.P., Simon, T., et al., 2010. Therapeutic nuclear medicine in pediatric malignancy. *Q. J. Nucl. Med. Mol. Imaging* 54, 411-428.
- Seidlin, S.M., Marinelli, L.D., Oshry, E., 1946. Radioactive iodine therapy: effect on functioning metastases of adenocarcinoma of the thyroid. *JAMA* 132, 838-847.

- Seregni, E., Maccauro, M., Chiesa, C., et al., 2014. Treatment with tandem [⁹⁰Y]DOTATATE and [¹⁷⁷Lu]DOTA-TATE of neuroendocrine tumours refractory to conventional therapy. *Eur. J. Nucl. Med. Mol. Imaging* 41, 223-230.
- Sgouros, G., Roeske, J.C., McDevitt, M.R., et al., 2010. MIRD Pamphlet No. 22(abridged): radiobiology and dosimetry of alpha-particle emitters for targeted radionuclide therapy. *J. Nucl. Med.* 51, 311-328.
- Shinto, A.S., Shibu, D., Kamaleshwaran, K.K., et al., 2014. ¹⁷⁷Lu-EDTMP for treatment of bone pain in patients with disseminated skeletal metastases. *J. Nucl. Med. Technol.* 42, 55-61.
- Siegel, J.A., Thomas, R., Stubbs, J.R., et al., 1999. MIRD Pamphlet No. 16: techniques for quantitative radiopharmaceutical biodistribution data acquisition and analysis for use in human radiation dose estimates. *J. Nucl. Med.* 40, 37S-61S.
- Silberstein, E.B., Alavi, A., Balon, H.R., et al., 2012. The SNM practice guideline for therapy of thyroid disease with ¹³¹I 3.0. *J. Nucl. Med.* 53, 1633-1651.
- Sisson, J.C., Avram, A.M., Rubello, D., et al., 2007. Radioiodine treatment of hyperthyroidism: fixed or calculated doses; intelligent design or science? *Eur. J. Nucl. Med. Mol. Imaging* 34, 1129-1130.
- Sisson, J.C., Freitas, J., McDougall, I.R., et al., 2011. Radiation safety in the treatment of patients with thyroid diseases by radioiodine ¹³¹I: practice recommendations of the American Thyroid Association. The American Thyroid Association Taskforce on Radioiodine Safety. *Thyroid* 21, 335-346.
- Smits, M.L., Nijssen, J.F., van den Bosch, M.A., et al., 2012. Holmium-166 radioembolisation in patients with unresectable, chemorefractory liver metastases(HEPAR trial): a phase 1, dose-escalation study. *Lancet Oncol.* 13, 1025-1034.
- Snyder, W.S., Ford, M.R., Warner, G.G., et al., 1969. Estimates of absorbed fractions for monoenergetic photon sources uniformly distributed in various organs of a heterogeneous phantom. MIRD Pamphlet No. 5. *J. Nucl. Med.* 10(Suppl. 3), 7-52.
- Stabin, M.G., Sparks, R.B., Crowe, E., 2005. OLINDA/EXM: the second-generation personal computer software for internal dose assessment in nuclear medicine. *J. Nucl. Med.* 46, 1023-1027.
- Stokkel, M.P., Handkiewicz, J.D., Lassmann, M., et al., 2010. EANM procedure guidelines for therapy of benign thyroid disease. *Eur. J.*

- Nucl. Med. Mol. Imaging 37, 2218-2228.
- Strigari, L., Sciuto, R., Rea, S., et al., 2010. Efficacy and toxicity related to treatment of hepatocellular carcinoma with Y-90-SIR spheres: radiobiologic considerations. *J. Nucl. Med.* 51, 1377-1385.
- Strigari, L., Konijnenberg, M., Chiesa, C., et al., 2014. The evidence base for the use of internal dosimetry in the clinical practice of molecular radiotherapy. *Eur. J. Nucl. Med. Mol. Imaging* 41, 1976-1988.
- Strosberg, J., El-Haddad, G., Wolin, E., et al., 2017. Phase 3 trial of ^{177}Lu -dotatate for midgut neuroendocrine tumors. *N. Engl. J. Med.* 376, 125-135.
- Sudbrock, F., Schmidt, M., Simon, T., et al., 2010. Dosimetry for ^{131}I -MIBG therapies in metastatic neuroblastoma, pheochromocytoma and paraganglioma. *Eur. J. Nucl. Med. Mol. Imaging* 37, 1279-1290.
- Sundlöf, A., Sjögreen-Gleisner, K., Svensson, J., et al., 2017. Individualised ^{177}Lu -DOTATATE treatment of neuroendocrine tumours based on kidney dosimetry. *Eur. J. Nucl. Med. Mol. Imaging* 44, 1480-1489.
- Tennvall, J., Fischer, M., Bischof Delaloye, A., et al., 2007. EANM procedure guideline of radio-immunotherapy for B-cell lymphoma with ^{90}Y -radiolabeled ibritumomab tiuxetan (Zevalin). *Eur. J. Nucl. Med. Mol. Imaging* 34, 616-622.
- Tennvall, J., Brans, B., 2007. EANM procedure guideline for ^{32}P phosphate treatment of myeloproliferative diseases. *Eur. J. Nucl. Med. Mol. Imaging* 34, 1324-1327.
- Thapa, P., Nikam, D., Das, T., et al., 2015. Clinical efficacy and safety comparison of ^{177}Lu -EDTMP with ^{153}Sm -EDTMP on an equidose basis in patients with painful skeletal metastases. *J. Nucl. Med.* 56, 1513-1519.
- Tristram, M., Alaamer, A.S., Fleming, J.S., et al., 1996. Iodine-131-metaiodobenzylguanidine dosimetry in cancer therapy: risk versus benefit. *J. Nucl. Med.* 37, 1058-1063.
- Turkmen, C., Ozturk, S., Unal, S.N., et al., 2007. The genotoxic effects in lymphocyte cultures of children treated with radiosynovectomy by using yttrium-90 citrate colloid. *Cancer Biother. Radiopharm.* 22, 393-399.
- Valkema, R., De Jong, M., Bakker, W.H., et al., 2002. Phase I study of peptide receptor radionuclide therapy with [In-DTPA]octreotide: the Rotterdam experience. *Semin. Nucl. Med.* 32, 110-122.

- van der Pol, J., Vöö, S., Bucerius, J., et al., 2017. Consequences of radiopharmaceutical extravasation and therapeutic interventions: a systematic review. *Eur. J. Nucl. Med. Mol. Imaging* 44, 1234-1243.
- Vanhavere, F., Carinon, E., Gualdrini, G., et al., 2012. ORAMED: Optimisation of Radiation Protection for Medical Staff. EURADOS Report 2012-02. European Radiation Dosimetry e. V., Braunschweig.
- Vassilopoulou-Sellin, R., Klein, M.J., Smith, T.H., et al., 1993. Pulmonary metastases in children and young adults with differentiated thyroid cancer. *Cancer* 71, 1348-1352.
- Verburg, F.A., Biko, J., Diessl, S., et al., 2011. I-131 activities as high as safely administrable(AHASA) for the treatment of children and adolescents with advanced differentiated thyroid cancer. *J. Clin. Endocrinol. Metab.* 96, E1268-E1271.
- Wagner, H.N. Jr, 2006. *A Personal History of Nuclear Medicine*. Springer, New York.
- Wallace, A.B., Bush, V., 1991. Management and autopsy of a radioactive cadaver. *Australas. Phys. Eng. Sci. Med.* 14, 119-124.
- Walrand, S., Barone, R., Pauwels, S., et al., 2011. Experimental facts supporting a red marrow uptake due to radiometal transchelation in ⁹⁰Y-DOTATOC therapy and relationship to the decrease of platelet counts. *Eur. J. Nucl. Med. Mol. Imaging* 38, 1270-1280.
- Watson, E.E., Stabin, M.G., Eckerman, K.F., 1989. A model of the peritoneal cavity for use in internal dosimetry. *J. Nucl. Med.* 30, 2002-2011.
- Weiss, B., Vora, A., Huberty, J., et al., 2003. Secondary myelodysplastic syndrome and leukemia following ¹³¹I-metaiodobenzylguanidine therapy for relapsed neuroblastoma. *J. Pediatr. Hematol. Oncol.* 25, 543-547.
- Wessels, B.W., Konijnenberg, M.W., Dale, R.G., et al., 2008. MIRD Pamphlet No. 20: the effect of model assumptions on kidney dosimetry and response - implications for radionuclide therapy. *J. Nucl. Med.* 49, 1884-1899.
- Willowson, K.P., Tapner, M., Team, Q.I., et al., 2015. A multicentre comparison of quantitative ⁹⁰Y PET/CT for dosimetric purposes after radioembolization with resin microspheres: the QUEST phantom study. *Eur. J. Nucl. Med. Mol. Imaging* 42, 1202-1222.
- Wiseman, G.A., White, C.A., Sparks, R.B., et al., 2001. Biodistribution and dosimetry results from a phase III prospectively randomized controlled

trial of Zevalin radioimmunotherapy for low-grade, follicular, or transformed B-cell non-Hodgkin's lymphoma. *Crit. Rev. Oncol. Hematol.* 39, 181-194.

Yousefnia, H., Zolghadri, S., Jalilian, A.R., 2015. Absorbed dose assessment of ^{177}Lu -zoledronate and ^{177}Lu -EDTMP for humans based on biodistribution data in rats. *J. Med. Phys.* 40, 102-108.

Zanzonico, P.B., Siegel, J.A., St. Germain, J., 2000. A generalized algorithm for determining the time of release and the duration of post-release radiation precautions following radionuclide therapy. *Health Phys.* 78, 648-659.

Zimmerman, B.E., Grosev, D., Buvat, I., et al., 2017. Multi-centre evaluation of accuracy and reproducibility of planar and SPECT image quantification: an IAEA phantom study. *Z. Med. Phys.* 27, 98-112.

용어집⁴⁷⁾

간병인 및 위안자 carers and comforters

의료진 외에 환자를 돌보거나 위안하는 사람. 이에는 진단절차 동안 아이를 잡고 있거나 방사성의약품 투여 후 또는 근접치료 중에 환자에게 접근하는 부모나 가족, 기타 친지가 포함된다(ICRP 2007a).⁴⁸⁾

개인선량당량 personal dose equivalent

실용량의 하나. 몸체의 특정 지점 아래 적절한 깊이 d에서 연조직의 선량당량. 개인선량당량의 단위는 킬로그램 당 줄(J kg^{-1})이며, 그 특별명칭은 시버트(Sv)이다. 특정 지점은 일반적으로 개인선량계가 위치한 부위이다. 유효선량 감시를 위해서는 실용량 $H_p(10)$ 을 사용하며 피부, 손발의 선량을 평가하는 데는 $H_p(0.07)$ 을 사용한다. 눈 수정체 선량 감시에는 깊이 $d = 3\text{mm}$ 가 적절하다. 그러나 실제 많은 국가에서 선량계가 $H_p(3)$ 을 측정하도록 설계되어 있지 않은데⁴⁹⁾, 방사선 촬영 안내 중재에서 해당되는 광자 방사선에 의한 수정체 감시목적에서는 $H_p(0.07)$ 을 사용할 수도 있다.

결정론적 영향 deterministic effect

문턱선량이 있고 그 이상에서 선량의 증가에 따라 반응의 심각도가 증가하는 특성을 갖는 세포 무리의 손상. 결정론적 영향을 ‘조직반응 tissue reaction’이란 용어로 부르기도 한다. 생물학적 반응 수정자를 포함해 피폭 후속 절차에 따라 때로는 결정론적 영향이 수정될 수도 있다.

고용주 employer

상호 합의에 따라 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.

47) <역주> 편의를 위해 용어를 가나다순으로 재배열했다. 몇몇 용어는 다른 ICRP 간행물에서 가져와 추가했다.

48) <역주> 개념 문제는 있지만 현행 ICRP 권고에서는 간병인이나 위안자의 피폭은 의료피폭으로 간주한다. 직업적 간병인은 여기서 말하는 간병인으로 보지 않으며 이들의 피폭은 일종의 직무피폭으로 봐야 한다.

49) <역주> 원문은 선량계가 $H_p(3)$ 에 대해 교정되어 있지 않다고 표현하고 있으나 교정 이전에 설계되어 있지 않기에 표현을 수정했다.

자영업자는 고용주와 종사자 모두에 해당된다(ICRP 2007a).

그레이gray (Gy)

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

등가선량equivalent dose

조직이나 장기 T의 선량이며 다음과 같이 주어진다.⁵⁰⁾

$$H_T = w_R D_T$$

여기서 D_T 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.

방사선가중치radiation weighting factor, w_R

낮은 LET 방사선에 비해 높은 LET 방사선의 생물학적 효력이 높음을 반영하기 위해 조직이나 장기의 흡수선량에 곱하는 무차원 인자.

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 수명 연수와 같은 몇 가지 인자의 함수로 정의한다.

방호원칙principles of protection

모든 관리 가능한 피폭상황에 동일하게 적용되는 일련의 원칙. 정당화 원칙과 방호최적화 원칙은 선원중심이며 모든 피폭상황에 적용된다. 선량한도 적용 원칙은 개인중심이며 계획상황에만 적용된다(ICRP 2007a).

방호최적화optimization of protection(and safety)

피폭 및 잠재피폭의 확률과 크기를 경제사회적 인자를 고려해 합리적으로 달성 가능한 낮은 수준으로 유지하기 위해 방호와 안전의 수준을 결정하는 절차. 의료 촬영 및 방사선치료 절차에서는 방호최적화는 방사선량을 ‘경제사회

50) <역주> 용어의 의미를 정의하자면 “다른 선질의 방사선이 미치는 생물학적 효력 차이를 반영하기 위해 조직이나 장기의 평균 흡수선량에 그 흡수선량을 유발한 방사선의 방사선가중치를 가중한 선량”으로 표현할 수 있다. 식에서 합산기호는 역자가 삭제했다.

적 인자를 고려하여 합리적으로 달성 가능한 최소'로 유지하는 것을 의미하며, 환자 선량 관리가 의료목적과 부합하도록 관리하는 것으로 설명하면 적절하다.

생물신효선량biologically effective dose (BED)

선형-2차 세포 생존모델의 개념으로서, 상이한 분할 계획이나 상이한 흡수선량을 유형으로 흡수선량이 전달될 때, 동일 확률로 특정 생물학적 귀착점을 내는 데 필요한 다른 흡수선량을 계산하는 데 사용한다. 이론적으로 BED는 흡수선량이 무한소 분할 또는 극히 낮은 선량률로 전달될 때 특정 생물학적 귀착점에 이르는 데 필요한 흡수선량이다.

생물학적효과비relative biological effectiveness RBE

동일한 생물학적 효과를 내는 고려 방사선 선량에 대한 낮은 LET 기준방사선 선량의 비. RBE값은 선량, 선량률 및 생물학적 종점에 따라 달라진다.

선량계수dose coefficient

피폭의 원인이 되는 양과 종점인 선량 사이의 관계를 짓도록 모델과 기준값을 사용하여 평가한 계수.⁵¹⁾ 방사성핵종 단위 방사능 섭취 당 선량을 표현하는 데 사용하지만, 표면에 분포하는 어떤 방사성핵종의 단위면적 당 방사능으로부터 일정 거리 떨어진 지점에서 외부선량률과 같이, 선량이나 선량률을 방사능의 양이나 농도와 연계하는 계수를 설명하는 데에도 사용한다(ICRP 2007a).

선량당량dose equivalent H

조직 내 한 점에서 흡수선량 D 와 그 흡수선량을 생성하는 방사선의 선질계수 Q 의 곱.

$$H = DQ$$

선량당량의 단위는 $J\ kg^{-1}$ 이며 그 특별명칭은 시버트(Sv)이다.

선량제약치dose constraint

하나의 피폭원으로부터 받는 개인선량에 적용되는 전망적이고 선원중심적인 제한으로서, 한 선원으로부터 가장 높이 피폭하는 사람들을 위한 기본 방호준위 역할과 선원에 대한 방호최적화에서 상한 역할을 한다. 직무피폭에서는 최적화 과정에서 고려하는 방안의 범위를 한정하는 데 사용되는 개인선량 값이

51) <역주> 원문에 없는 설명이지만 이해를 돕기 위해 용어의 의미를 역자가 정의했다.

된다. 일반인피폭에서는 선량제약치가 관리되는 선원의 계획된 운영으로부터 일반인이 받는 연간 선량의 상한이 된다.

선량한도 dose limits

계획피폭상황에서 일정 기간 동안 초과해서는 안 되는 개인 유효선량이나 등가선량 값(ICRP 2007a). 선량한도 적용은 ICRP가 본래 정의한 방사선방호 3 기본원칙의 하나이다.

선질계수 quality factor, $Q(L)$

조직에서 하전입자 비적을 따라 형성되는 전리밀도에 근거하여 방사선의 생물학적 효력을 특성화하는 인자. Q는 물속에서 하전입자의 제한 없는 에너지전달선밀도 L_{∞} (종종 LET 또는 L로 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 Q가 방사선가중치로 대체되지만, 감시에 사용하는 선량당량 양 계산에는 계속 Q를 사용한다.

실용량 operational quantity

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.⁵²⁾

에너지전달선밀도 linear energy transfer (LET)

어떤 물질에서 하전입자 방사선의 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 몫.

$$L = \frac{dE}{dl}.$$

52) <역주> 의미를 정의하자면 “실측이 불가능한 방호량을 대신하여 사람의 선량을 평가할 수 있는 체계를 제공하도록 도입한 측정 가능한 선량”이다. 실용량은 적절한 등가선량으로 정의된다.

L 의 단위는 Jm^{-1} 이며, 흔히 $keV\mu m^{-1}$ 로 나타낸다.

유효반감기 effective half-life

생명체에 침착된 방사성핵종의 방사능이 방사성 붕괴와 생물학적 제거의 복합 작용의 결과로 절반으로 감소하는 데 걸리는 시간. 유효반감기 T_{eff} 는 생물학적 반감기 T_b 와 물리적 반감기 T_p 로부터 다음처럼 계산된다.

$$\frac{1}{T_{eff}} = \frac{1}{T_b} + \frac{1}{T_p}.$$

유효선량 effective dose (E)

단일 양으로 방사선에 피폭한 사람의 종합 위험을 근사적으로 나타내기 위해 도입한 방호량.⁵³⁾ 인체의 모든 특정 조직과 장기에서 등가선량을 조직가중치로 가중평균한 값으로서 다음과 같이 표현된다.⁵⁴⁾

$$E = \sum_T w_T H_T = \sum_T w_T w_R D_T$$

여기서 H_T 나 $w_R D_T$ 는 조직이나 장기 T 의 등가선량, w_T 는 조직가중치, w_R 는 방사선가중치이다. 유효선량의 단위는 흡수선량 단위와 같이 킬로그램 당 줄 (Jkg^{-1})이지만, 그 특별명칭은 시버트(Sv)이다.⁵⁵⁾

위험 risk

위험은 해로운 결과가 나타날 확률과 관련된다. 상대위험(RR)은 피폭집단에서 질병률을 비피폭집단에서 질병률로 나눈 값이다. 초과상대위험(ERR)은 상대위험에서 1을 뺀 값으로서 종종 Sv 당 초과상대위험으로 표현된다.

위험 장기 organ at risk

방사선 피폭으로 손상 받는 장기. 이 용어는 방사선치료에서 방사선장에 놓이는 정상조직을 지칭하는 데 종종 사용된다.

53) <역주> 원문에 없지만 역자가 의미를 부여한 것이다.

54) <역주> ICRP는 $E = \sum_T w_T \sum_R w_R D_{T,R}$ 로 적고 있는데 개념적 오류라고 생각해 역자가 고쳐 적었다. 유효선량 정의에 방사선 종류에 대한 합을 적용할 이유가 없다. 서로 다른 방사선에 의한 유효선량은 단순히 각각을 합하면 되기 때문이다.

55) <역주> 평균은 인체에서 확률론적 영향에 민감한 것으로 간주해 규정한 모든 장기와 조직에 대해 수행된다. 조직가중치는 성별과 연령에 대한 평균으로서 모든 연령 남녀 집단에 근사값으로 적용하는 것이다.

의료진^{staff}

이 간행물의 어떤 맥락에서는 의료진은 방사선절차 동안 환자관리에 참여하거나(예: 의사, 간호사, 방사선사) 직무 과정에서 의료촬영기기로부터 방사선을 피폭하는(예: 기기 유지관리자, 건물 관리자) 보건관리인이다.

의료피폭^{medical exposure}

자신의 의료 또는 치과 진료의 일부로 환자가 받거나, 직무로 피폭하는 사람이 아니면서 자발적으로 환자를 보좌 또는 위안하거나, 피폭이 수반되는 의생명연구 프로그램의 연구대상 자원자가 받는 방사선 피폭.⁵⁶⁾

정당화^{justification}

원래 ICRP가 정의한 방사선방호 기본 3원칙의 하나. 정당화 과정은 1) 방사선이 관련된 계획된 활동이 전반적으로 유익한지(활동의 도입이나 계속으로부터 오는 개인이나 사회의 이로움이 그 활동이 초래하는 해로움을 상회), 2) 비상 피폭이나 기존피폭 상황에서 의사결정이 전반적으로 유익한지(즉, 조치가 주는 개인이나 사회의 이로움이 그것이 초래하는 비용이나 해로움을 상회)에 따라 결정된다.

조직가중치^{tissue weighting factor}

신체가 균질하게 피폭할 때 총 보건위해에 대한 조직이나 장기 T의 상대적 기여를 나타내기 위해 그 등가선량에 가중하는 인자.⁵⁷⁾ 가중치의 합은 1이다 (ICRP 2007).

$$\sum_T w_T = 1.$$

조직반응 문턱선량^{threshold dose for tissue reaction}

1%에게 조직반응을 유발할 것으로 추정되는 선량(ICRP 2007a).

56) <역주> 뒤에 열거된 그룹의 사람이 받는 피폭은 원론적으로는 의료피폭이 아니다. 그러나 현재 ICRP의 피폭유형 분류가 직무피폭, 의료피폭, 일반인피폭의 셋만으로 구성되는데 이들 특별한 그룹의 피폭은 정의상 직무피폭이 아니며, 일반인피폭으로 분류하면 관리가 어려워져 편의상 의료피폭에 편입시킨 것에 불과하다. 따라서 이 간행물에서 논의하는 진단참조준위는 이들 그룹의 피폭과는 무관하다. 이들에게는 최적화 도구로 선량제약치 개념을 적용한다.

57) <역주> 보건위해의 상대적 기여를 나타내기 위해 등가선량에 가중하는 인자라는 설명보다 '전신 위해를 표현하기 위해 조직 등가선량을 위해가중평균하기 위한 가중치'로 설명하는 것이 적절하다고 본다.

조직/장기 평균 흡수선량 mean absorbed dose in a tissue or organ (D_T)

조직 또는 장기 T에서 평균한 흡수선량 D_T .

$$D_T = \frac{\varepsilon_T}{m_T}$$

여기서 ε_T 는 조직 또는 장기 T에 전달된 평균 총에너지이고, m_T 는 그 조직 또는 장기의 질량이다(ICRP 2007a).

종사자^{worker}

전일제, 시간제 또는 임시직 여부에 관계없이 고용주가 고용한 사람으로서 직무 방사선방호와 관련하여 분명한 권리와 의무가 있는 사람. 방사선과 관련된 의료전문업 종사자는 직무피폭을 받는다(ICRP 2007a).

주위선량당량^{ambient dose equivalent, $H^*(d)$}

정렬 방사선장의 한 점에 ICRU구의 중심을 둘 때 방사선장 방향을 맞보는 반경 위 표면으로부터 깊이 d mm에서 형성될 선량당량. 주위선량당량의 단위는 Jkg^{-1} 이고 그 특별명칭은 시버트(Sv)이다.⁵⁸⁾

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. 그러나 방사선의 만연성 때문에 ICRP는 '직무피폭'이란 용어의 사용을 운영관리자의 책임으로 합리적으로 간주되는 상황의 결과로 발생하는 방사선피폭으로 한정한다. 배제된 피폭이나 면제된 행위나 선원으로부터 피폭은 일반적으로 직무 방호에서 고려할 필요가 없다(ICRP 2007a).

체적소형 모의체^{voxel phantom}

의료 단층영상에 근거한 계산용 가상 인형 모의체로서 인체의 다양한 조직과 장기의 밀도와 원자구성을 구체화하는 작은 3차원 체적소 voxel(복셀)로 나타낸다.

58) <역주> 원문은 특정 주위선량당량인 $H^*(10)$ 을 정의하고 있지만 여기서는 일반 정의를 적었다. 10 mm 깊이 주위선량당량은 유효선량 대체 측정량으로 사용되며 '심부선량당량 deep dose equivalent'라 부르기도 한다. 여기서 정렬 방사선장이란 방사선장의 관심점에서 방사선장을 확장하고 한 방향으로 정렬한 넓고 평행한 방사선장을 말한다.

확률론적 영향stochastic effect

방사선방호 목적에서 영향이 발생할 확률(심각도가 아님)이 문턱치 없는 선량 함수로 간주되는 악성질환과 유전영향.

흡수선량absorbed dose (D)

전리방사선이 질량 dm 에 부여한 평균에너지 $d\bar{\varepsilon}$ 를 dm 으로 나눈 몫. 즉,

$$D = \frac{d\bar{\varepsilon}}{dm}.$$

흡수선량은 기본적인 물리적 선량계측량이며 모든 종류 방사선과 모든 종류 물질에 적용된다. 흡수선량의 단위는 킬로그램 당 줄(Jkg^{-1})이며, 그 특별명칭은 그레이(Gy)이다.

사 사

ICRP는 방사성의약품 사용에 대한 여러 간행물을 발간했지만 이 보고서가 방사성의약품 치료에 특정한 것으로서는 처음이다. 2011년 미국 버데스다 회의에서 제3분과위는 이 주제에 대한 간행물의 필요성에 대해 논의하고 준비작업을 수행할 작업반을 구성했다. 2016년 ICRP 본위원회는 방사성의약품 치료에서 방사선방호에 관한 작업그룹 101을 출범시켰다.

ICRP는 이 간행물 개발에 참여한 모든 이에게 다년간에 걸친 노력과 헌신에 감사한다.

작업그룹 101 위원(2016~2019)

Y. Yonekura (위원장)	C. Divgi*	S. Palm*
S. Mattsson(공동의원장)	M. Doruff*	P. Zanzonico*
W.E. Bolch	D.R. Fisher*	
L.T. Dauer	M. Hosono*	
G. Flux	M. Lassmann*	*객원위원

제3분과위 작업반 위원(2011~2016)

Y. Yonekura (위원장)	C. Divgi*	M. Lassmann*
S. Mattsson(공동의원장)	D.R. Fisher*	S. Palm*
W.E. Bolch	G. Flux*	P. Zanzonico*
L.T. Dauer	M. Hosono*	*객원위원

제3분과위 검토위원은 다음과 같다.

K. Kang	C.J. Martin
---------	-------------

제2분과위 검토위원은 다음과 같다.

J. Hunt	J.D. Harrison	N. Petoussi-Henns
---------	---------------	-------------------

본위원회 검토위원은 다음과 같다.

C. Cousins	J. Harrison
------------	-------------

편집인

C.H. Clement (ICRP 과학서기 겸 ICRP 연보 편집장)

H. Fujita (과학서기보 겸 ICRP 연보 부편집인) (2018~)

H. Ogino (과학서기보 겸 ICRP 연보 부편집인) (2016~2018)

이 보고서를 준비하는 기간의 제3분과위 위원은 다음과 같다.
(2009~2013)

E. Vañó(위원장)	I. Gusev	H. Ringert
D.L. Miller(부위원장)	J.W. Hopewell	M. Rosenstein
M.M. Rehani(서기)	P-L. Khong	Y. Yonekura
K. Åhlström Riklund	S. Mattsson	B. Yue
M.R. Baeza	D.L. Miller	
L.T. Dauer	P. Ortiz López	

(2013~2017)

E. Vañó(위원장)	L.T. Dauer	P. Ortiz López
D.L. Miller(부위원장)	S. Demeter	P. Scalliet
M.M. Rehani(서기)	K. Kang	Y. Yonekura
K. Åhlström Riklund	P-L. Khong	B. Yue
K. Applegate	R. Loose	
M. Bourguignon	C.J. Martin	

(2017~2021)

K. Applegate(위원장)	M.C. Cantone	J.M. Marti-Climent
C.J. Martin(부위원장)	S. Demeter	Y. Niu
M.M. Rehani(서기)	M. Hosono	W. Small
K. Åhlström Riklund	K. Kang	D. Sutton
J.S. Alsuwaide	R. Loose	L. Van Blade
M. Bourguignon		

제3분과위 명예위원

S. Mattsson	M. Rosenstein
-------------	---------------

이 간행물 승인 당시 본위원회 위원

위원장: C. Cousins 영국

부위원장: J. Lochard 프랑스

K. Applegate 미국

S. Bouffler 영국

K.W. Cho 한국

D.A. Cool 미국

J.D. Harrison 영국

M. Kai 일본

C-M. Larsson 호주

D. Laurier 프랑스

S. Liu 중국

S. Romanov 러시아

W. Rühm 독일

명예위원

R.H. Clarke 영국

F.A. Mettler 미국

R.J. Pentreath 영국

R.J. Preston 미국

C. Streffer 독일

E. Vañó 스페인

과학서기: C.H. Clement 캐나다.

ICRP와 작업그룹 101 위원들은 이 간행물에 크게 기여한 Katarina Sjögren Gleisner에게 감사한다.

끝으로 이 간행물 초안에 대해 의견수렴 기간에 시간을 들여 의견을 제시한 사람들과 기관에도 깊이 감사한다.