

ICRP 간행물 149

근접치료에서 직무피폭 방호

Occupational Radiological Protection in Brachytherapy



이 번역본 발간은 2021년 한국원자력안전기술원의 위탁연구 사업의 일환으로 이루어졌습니다.

<표지 그림>

전립선암 근접치료를 위해 이식한 ^{125}I 씨알선원의 모습(그림 원본: ICRP)

ICRP Publication 149

근접치료에서 직무피폭 방호

Occupational Radiological Protection in Brachytherapy

편집장

C.H. CLEMENT

부편집장

H. FUJITA

ICRP를 대신한 저자

L.T. Dauer, C. Baureus Koch, J.M. Cosset, M. Doruff,
A. Damato, F. Guedea, P. Scalliet, B. Thomadsen,
L. Pinillos-Ashton, W. Small

역주: 이재기

이 ICRP 간행물의 우리말 번역본은 ICRP의
허락(2021년 9월)을 받았으며 ICRP 정신에 따라
무료로 배포합니다.

국제방사선방호위원회

역사 서문

근접치료는 점선원으로부터 방사선장 강도가 거리의 제곱에 반비례한다는 ‘역자승 법칙’을 이용하는 오래된 방사선치료 기법이다. 역자승 법칙에 따르면, 선원과 거리가 가까울 경우 선원 강도가 높지 않더라도 매우 높은 선량률을 형성한다. 따라서 종양 내부나 표면의 설계된 여러 위치에 작은 선원을 배치하면 선원 주변은 빠르게 치료 선량을 전달할 수 있음에 비해, 수 cm 이상 거리에 있는 정상조직의 선량은 낮게 유지할 수 있다. 덕분에 유방암 치료에서 치료 후 미용에 유리한 결과를 얻을 수 있다. 이에 비해 감마선이나 X선 외부빔 치료는 정교한 조형기법을 동원하더라도 빔 경로상 표적 전후에 있는 정상조직 선량이 상당히 높다. 근접치료는 대개 1회로 완료되므로 간편성도 장점의 하나이다. 근접치료용 치료계획 시스템이 발전함에 따라 다른 치료기법에 대한 경쟁력도 높아졌고, 강도변조치료(IMRT)와 씨알 이식을 복합하여 효과를 높이기도 한다.

반면, 근접치료 약점은 외부에서 환부에 용이하게 접근하여 선원을 배치하고 제거할 수 있어야 한다. 그래서 전통적으로 자궁/경부암이나 유방암, 전립선암, 식도암, 피부암 등에 시도되었다. 현재는 접근이 복잡한 폐암, 눈 종양, 일부 뇌종양을 위한 절차도 개발되어 있다. 환부에 선원 바늘이나 씨알 선원(리본 포함) 또는 노출지를 삽입해야 하므로 국부마취나 전신마취가 필요하다. 전립선 치료에서는 배뇨 어려움과 후유 통증을 동반하는 경우도 있다.

전통적 약점은 시술 의사가 선원을 환부에 삽입하는 작업을 수행해야 했기에 시술자 피폭이 높고, 가끔 작은 선원이 의도하지 않은 곳에 남겨지거나 분실하는 사건도 발생했다. 그래서 의료진의 직무피폭 관리는 물론, 선원 재고관리와 절차 후 철저한 방사선 탐사가 긴요하다. 현재 주로 이용되는 HDR 치료에서는 노출지를 배치한 후 컴퓨터 제어 원격 후장전 기법으로 선원을 배치하고 회수하므로 직무피폭은 크게 낮아졌다.

당연하지만 근접치료에도 새로운 기술이 개발된다. HDR 후장전기나 이를 이용한 펄스모드 조사(PDR 치료)도 그랬고, 새로운 방사성핵종을 이용한 씨알 영구이식도 개발되었다. 이제 전통적 바늘 선원은 역사가 된다. 안과용 플라크나 수술 치료에 사용하는 용해성 선원 매트릭스처럼 판상 선원도 시도된다. 근래에는 탄소 나노튜브를 이용한 초소형 X선원(ELS)도 개발되어 임상 적용이 늘어나고 있다. X선은 배치 후 작동시킬 수 있어 의료진 피폭을 경감하고 선원 재고관리 부담을 없앤다. 새로운 방사성핵종도 시도된다. ^{169}Yb (반감기 32일)은 높은 비방사능 선원 제조가 가능하며, 전자포획 핵종으로 베타 입자 방출 없이 40~200 keV 감마선과 X선을 방출한다.

근접치료 기술 적용이 경쟁력을 갖는 암 유형이 명확한 만큼 그 가치는 분명하다. 그

러나 근접치료에 혁신 없이는 암치료 점유율이 증가할 것 같지는 않다. 2018년 기준으로 외부빔 치료 시장 규모 53억 달러에 비하면 근접치료는 7% 수준이며, 연간 증가 추이도 외부빔 치료 4.2%에 비해 1.5%로 낮다. 추산 기관에 따라 데이터 편차가 있지만, 2018년 Report and Data 보고서에 따르면 세계 근접치료 시장은 약 3.7억 달러이다. 근접치료 기술별로 연간 시장을 보면 씨알 이식이 약 53%를 차지하며, 후장전이 34%, ELS가 12%이다. 기술별 연간 성장 예측은 후장전 기술이 약 2%로 다른 기술 1.5%보다 약간 앞선다.

더욱이 국내에는 근접치료가 활발하지 않고 현황도 정확히 파악되지 않는다. 2020년 현재 인허가 자료를 보면 허가한 HDR 기기는 32대인데 ^{192}Ir 30대, ^{60}Co 2대이다. 씨알 이식 허가를 받은 기관은 6개 기관이지만 임상에 활발히 이용하는 기관은 한두 기관으로 보인다. 이식에 사용하는 핵종은 ^{125}I 과 ^{106}Ru 정도이다. 치료 환자 수나 그 경제 가치는 자료가 부족하다. 방사선종양학회와 규제 당국은 국내 현황을 주기적으로 조사할 필요가 있다.

이 간행물의 주제는 근접치료에서 직무피폭 방호이다. 그러나 의료방사선 관련 여러 ICRP 간행물이 그러했듯이, 보고서가 명확히 직무피폭에 초점을 맞추지 않고 환자피폭이나 주변 일반인 피폭 문제도 섞어 논의하고 있어 혼란한 점이 있다. 직무피폭 방호 원론에서 볼 때 이 간행물의 내용이 ICRP 97(HDR), ICRP 98(씨알 영구이식) 및 ICRP 113(교육훈련)에서 권고한 내용과 유의한 차이는 없다. 강력한 선원이 관련된 HDR 후장전기 사용에서는 선원교체 작업과 기기 고장(안전금고 이탈 등)에 대응하는 일에 특별한 주의가 필요한 부분이다. 씨알 영구이식 절차에서는 선원 준비작업(누설 검사 포함)과 이식 작업의 숙련이 요구되며, 특히 선원 재고관리에 유의해야 한다. 공통적으로, 차폐되지 않은 선원을 가까이서 다루는 일인 만큼 취급자가 수동형 공식 선량계 외에 경보 기능이 있는 능동형 전자선량계를 병용하는 것이 중요하다.

국내는 물론 국제적으로도 근접치료 사건은 충실히 보고되지 않고 있다. 그러나 미국 Mayor 클리닉의 자체 사건보고학습체계(ILS) 운영 경험을 보면 2013~2015년 기간에 근접치료 환자 당 특이사항 보고 건수가 약 1.6이다. 작고 매운hot 선원을 사례가 다양한 환자에게 적용하는 절차인 만큼 사건/사고 기회가 많음을 드러내면서, 많은 사건이 묻히고 있음을 암시한다. 처벌 우려로 사건을 은폐하여 학습 기회가 상실되는 사회적 손실을 피하도록, 사회와 규제기관이 현명한 정책을 모색해야 하는 이유이다.

2021년 11월

역주자

방사선안전문화연구소장 이재기

목 차

역자 서문	iii
사용 두자어	vii
논설	ix
요지	1
요점	3
제1장 서론	5
1.1. 이 간행물의 목적	10
제2장 방사선학적 이슈	13
2.1. 근접치료 절차	13
2.2. 직무피폭	16
제3장 근접치료에 직무 방사선방호체계의 적용	19
3.1. 방사선방호 원칙	19
3.2. 비정상 선량의 조사	21
3.3. 구역과 작업장 분류	22
3.4. 배태아	22
제4장 개인감시와 선량평가	25
4.1. 개인피폭 감시	25
4.2. 개인선량계 특성과 사용	26
4.3. 직무피폭 평가	30
제5장 방사선방호 방법 및 프로그램	33
5.1. 의료진 방호	33
5.2. 외부피폭 방호	34

5.3. 방사능선원 일생의 안전	34
5.4. 근접치료 적용에서 방사선방호 특별 고려	37
5.5. 교육훈련 및 자격증명	54
5.6. 직무피폭 방호 관련 기록	58
5.7. 품질경영체계	58
제6장 근접치료에서 비상계획과 대응	65
6.1. 비상계획과 준비태세 필요성	65
6.2. 치료 전후 비상절차	66
6.3. 방사성 LDR 이식 근접치료 환자의 수술이나 사망	67
6.4. 비상과 사고의 예방	68
참고문헌	71
사 사	83

〈역주〉 사용 두자어

AAPM	American Association of Physicists in Medicine	미국의학물리사협회
APD	active personal dosimeter	능동형 개인선량계
CT	computed tomography	전산화단층촬영
ELS	electronically generated low-energy radiation sources	전자식 낮은 에너지 X선원
EPD	electronic personal dosimeter	전자개인선량계
GM	Geiger-Muller	가이거뮐러 (검출기)
HDR	high dose rate	고선량률
IAEA	International Atomic Energy Agency	국제원자력기구
ICRP	International Commission on Radiological Protection	국제방사선방호위원회
ICRU	International Commission on Radiation Units and Measurement	국제방사선단위측정위원회
IRPA	International Radiological Protection Association	국제방사선방호학회연합
LDR	low dose rate	저선량률
LET	linear energy transfer	에너지전달선밀도
LNT	linear non-threshold (model)	문턱없는 선형모델
MIRD	Medical Internal Radiation Dose (Committee)	미국 핵의학회 의료내부피폭위원회
MRI	magnetic resonance imaging	자기공명촬영
ORAMED	optimization of radiation protection of medical staff	의료인 방사선방호 최적화에 관한 유럽연합 연구 프로그램
OSL	optically stimulated luminescence dosimeter	광자극발광 선량계
PDR	pulsed dose rate	펄스선량률
PMMA	polymethyl methacrylate	폴리메틸 메타크릴레이트(플라스틱 일종)
QAP	quality assurance and management program	품질보증경영 프로그램
RPLG	radiophotoluminescent glass (dosimeter)	유리선량계
SIRT	selective internal radiation therapy	선택적 내부방사선치료
TLD	thermoluminescence dosimeter	TL선량계
UNSCEAR	UN Scientific Committee on Effects of Atomic Radiation	유엔방사선영향과학위원회
WHO	World Health Organization	세계보건기구

<역주> 근접치료에 사용되는 핵종 특성

원소	방사성핵종	반감기	방출 방사선: [에너지*(MeV)/방출률(%)]
인	P-32	12.27 일	베타: [1.71/100]
코발트	Co-60	5.26년	베타: [0.318/100] 감마: [1.17/100], [1.33/100]
스트론튬	Sr-90	28.8년	베타: [0.546/100]
이트륨	Y-90	64 시간	베타: [22.80/100]
팔라듐	Pd-103	17일	X선: [0.021/88]
요드	I-125	59.4일	감마: [0.036/6.7] X선: [0.027/113], [0.031/47]
세슘	Cs-131	9.69일	X선: [0.030/60], [0.034/25]
	Cs-137	30년	베타: [0.512/95], [1.17/5] 감마: [0.662/85]
이터븀	Yb-169	32 일	감마: [0.063/44], [0.110/17.4], [0.131/11.4] [0.177/22.3], [0.197/35.9] X선: [0.050/144], [0.058/135]
이리듐	Ir-192	73.8 일	베타: [0.240/5.6], [0.535/41.4], [0.672/48] 감마: [0.300/58.4], [0.316/82.7], [0.468/47.8] [0.608/17]
금	Au-198	2.694 일	베타: [0.961/99.0], [0.285/0.986] 감마: [0.412/95.62], [0.676/0.81]
라돈**	Rn-222	3.8일	알파: [5.49/100]
라듐	Ra-226	1600년	알파: [4.784/93.8], [4.601/6.2] 감마: [0.186/3.64]

* 베타는 최대에너지임.

** 단수명 자손핵종으로부터 추가 알파입자와 베타, 감마 방사선이 방출됨.

논설

근접치료: 치료를 전달하는 의료진 방호가 필요한 구멍 치료기법

1928년 세계 곳곳의 방사선의학 전문가 1천 명이 스톡홀름에 모여 제2차 국제방사선의학총회를 개최했는데, 핵심 동력은 병원의 X선 및 라듐 취급자 방호였다. 라듐 선원으로 근접치료는 일찍이 1901년에 시작했으므로(Gupta 1995), 여기에는 그러한 근접치료를 수행하는 종사자 방호도 포함했을 것이다. 그 창시적 결과가 방호분야의 첫 국제권고였는데(ICR 1929), 이것이 현재 국제방사선방호위원회(ICRP)라는 긴 여정의 출발이었다.

오늘날은 ICRP 업무가 많이 넓어져서 모든 전리방사선 선원으로부터 환자, 종사자, 일반인 및 환경의 방호를 포괄하지만, ICRP 업무의 약 1/3은 의료에서 방사선방호에 초점을 맞춘다. 의료에서 방호는 환자뿐만 아니라 의료진, 환자의 친지나 가족, 관련된 일반인까지 포함한다. 한 가지 이유는 의료에서 방사선 사용의 반대함인데, 세계적으로 방사선을 이용한 진료는 매초 100건을 훨씬 넘고 근접치료도 매분 1건 정도 이루어진다. 또 다른 이유는 모든 인공 방사선피폭의 98% 정도가 의료피폭이라는 점이다(UNSCEAR 2008).

의료에서 방사선 사용은 지속적으로 발전하므로 진료를 개선하는 새로운 기법과 기술에 방사선방호도 계속 적응해야 한다. 근래의 이 분야 ICRP 간행물은 방사성의약품 치료, 중재방사선 절차, 의료촬영, 콘빔CT, 이온빔 치료 등이 있다(ICRP 2014,2015,2017,2018,2019).

이 간행물도 비슷한 맥을 따르는데, 근접치료라는 특정 치료양식에서 의료진 방호에 초점을 맞춘다. 근접치료에서는 치료하고자 하는 신체 부위 내부 또는 근접하여 작은 방사선원을 배치한다. 근접치료는 치료체적에 방사선량을 직접 전달하는 장점이 있어, 신체 밖으로부터 방사선을 전달하는 치료양식에 비해 종종 주변 조직의 피폭을 경감한다.

근접치료는 현대 방사선종양학과에서 중요한 치료양식으로서, 1세기에 걸쳐 독자치료나 외부 빔치료와 조합으로 임상결과를 제공해 사회적 가치를 입증해 왔다. 근접치료를 거치는 환자를 다루는 종사자의 직무위험 인자는 상당하지만, 적절한 품질관리와 품질보증 대책을 이행하면 그 위험은 작다.

ICRP는 근접치료에서 환자의 방사선방호에 대한 권고를 제공한 바 있는데, 방사선치료 절차를 거치는 환자의 사고예방(ICRP 2000), 고선량을 근접치료에서 사고예방(ICRP 2005a), 영구이식 선원을 이용한 전립선암 근접치료의 방사선방호 특성(ICRP 2005b),

의료에서 방사선방호의 일반 권고(ICRP 2007) 등이다.

이번 간행물은 현대 의료기관에서 사용되는 모든 유형의 근접치료 절차와 방사선원을 포괄한다. 주안점은 광자 방출 선원으로 고선량률 및 저선량률로, 수동 및 후장전 전달 시스템에 둔다. 베타, 중성자 또는 알파 방출 선원과 같은 기타 선원도 논의한다. 특히, ^{90}Y 미소구를 이용한 선택적 내부방사선치료(SIRT)에서 방사선방호를 다루는 절은 근래 간암에 이 유형 근접치료 적용 추세에 비춰 시의적절하다.

이 간행물은 방사선종양학자, 의학물리사, 치료기사, 간호사, 병원 행정원, 방사선안전역, 직장 안전책임자, 근접치료 물품 공급자, 규제자, 병원 안전문화에 관련된 모든 사람을 포함해 근접치료에 관련된 사람들의 직무피폭 방호에 유용한 지침이 될 것이다. 저선량률과 고선량률 근접치료 프로그램을 위한 품질보증 프로그램 수립의 요건도 충실하다. 계획피폭상황에 대한 ICRP 권고를 고려할 때, 근접치료 의료진이 품질보증 프로그램에 적극적으로 참여하는 것이 필요하다. 근접치료 임상관행이 환자와 관계자 모두에게 안전하려면 일상적인 내부감사 및 외부감사가 도움이 될 것이다. 이 간행물을 현행 또는 새로운 근접치료 프로그램에서 방사선방호 특성을 발전시키는 지침으로 사용해야 한다. 미국 원자력규제위원회처럼 규제기관에서 그러한 관행이 이미 잘 정의된 경우에도, 이 간행물은 근접치료에서 방사선방호의 모든 고려사항에 관해 참조할 종합 보고서가 될 것이다.

Firas Mourtada, PhD, FAAPM, 미국 근접치료학회장
Christopher Clement, 편집장

참고문헌

- Gupta, V.K., 1995. Brachytherapy - past, present and future. J. Med. Phys. 20, 31-38.
- ICR, 1929. International Recommendations for X-ray and Radium Protection. A Report of the Second International Congress of Radiology. P.A. Nordstedt & So"ner, Stockholm, pp. 62-73.
- ICRP, 2000. Prevention of accidents to patients undergoing radiation therapy. ICRP Publication 86. Ann. ICRP 30(3).
- ICRP, 2005a. Prevention of high-dose-rate brachytherapy accidents. ICRP Publication 97. Ann. ICRP 35(2).
- ICRP, 2005b. Radiation safety aspects of brachytherapy for prostate cancer using permanently implanted sources. ICRP Publication 98. Ann. ICRP 35(3).

- ICRP, 2007. Radiological protection in medicine. ICRP Publication 105. Ann. ICRP 37(6).
- ICRP, 2014. Radiological protection in ion beam radiotherapy. ICRP Publication 127. Ann. ICRP 43(4).
- ICRP, 2015. Radiological protection in cone beam computed tomography (CBCT). ICRP Publication 129. Ann. ICRP 44(1).
- ICRP, 2017. Diagnostic reference levels in medical imaging. ICRP Publication 135. Ann. ICRP 46(1).
- ICRP, 2018. Occupational radiological protection in interventional procedures. ICRP Publication 139. Ann. ICRP 47(2).
- ICRP, 2019. Radiological protection in therapy with radiopharmaceuticals. ICRP Publication 140. Ann. ICRP 48(1).
- UNSCEAR, 2008. Report to the General Assembly, Volume I, Sources, Scientific Annex A. Medical Radiation Exposures. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, New York.

근접치료에서 직무피폭 방호

ICRP 간행물 149

ICRP 승인: 2021년 3월

요지- 일부 의료기관에서는 근접치료가 의료에서 직무피폭의 상당한 몫을 차지한다. 나아가 근접치료 시설에서 방호용구를 적절히 사용하지 않으면 종사자(의료진)가 높은 선량을 받을 수 있다. ICRP는 ICRP 97과 ICRP 98(2005a,b)에서 근접치료에서 방사선방호 특성에 대해, ICRP 113(2009)에서 진단 및 중재 절차에서 방사선방호 훈련에 대해 권고를 제공했다. 이 간행물은 구체적으로 근접치료에서 직무피폭에 집중하여 ICRP 간행물들에서 근접치료와 직장 안전에 대해 제공한 정보를 종합한다. 이 간행물의 자료와 권고는 ICRP의 최근 권고를 반영하기 위해 갱신한 것이다. 적절히 차폐된 시설에서는 외부빔 방사선치료가 작은(또는 거의 없는) 직무피폭 선량을 보이지만, 근접치료는 적극적인 관리가 필요할 정도로 의료진이 선량을 받을 가능성을 고유하게 조성한다. 현대 근접치료 센터에서도 의료진은 피폭을 받는다(예: 씨알선원이나 플라크 장전, 세슘 이식, 수반 형광투시). 세계적으로는 근접치료 기술에 큰 편차가 있어서, 여러 시설에서는 아직 높은 의료진 선량 잠재성이 높은 구식 기법으로 시술한다(예: ^{226}Ra 이나 ^{192}Ir 바늘 사용). 나아가 기술발전이나 신기술은 의료 공동체에 대해 구체적 권고로 다룰 필요가 있는 의료진 방호의 새로운 문제도 제기한다. 이 간행물은 방사선의 생물학적 영향, 방사선방호 원칙, 근접치료 절차에서 의료진 방호, 그리고 품질보증 프로그램의 수립을 포함하며, 훈련, 감시 및 견고한 품질보증 프로그램에 대한 구체적 권고도 포함한다.

중심어: 근접치료, 직무피폭 방호, 중재방사선 절차, 피폭감시

요점

- 근접치료 처치는 의료진, 환자 및 일반인에게 상당한 피폭을 수반하며, 방사선방호가 합당하게 이행되지 않으면 조직반응(결정론적 영향)도 초래할 수 있는 방사선원을 사용한다.
- 수반되는 영상안내(예: CT촬영이나 형광투시)를 포함하여 근접치료를 거치는 환자의 방호는 희망하는 임상 결과 달성과 일관되게 최적화해야 한다.
- 직무 방호 책임이 있는 의료진은 방사선방호 일반에 지식이 필요하고 근접치료 임상 관행에도 익숙할 필요가 있다. 마찬가지로 근접치료를 수행하는 사람도 환자와 의료진 선량을 줄이는 통상적 방법에 숙달해야 한다. 의료진은 적합한 교육훈련과 자격을 갖춰야 한다.
- 직무 방호에 책임이 있는 의료진이나 근접치료를 수행하는 사람은 환자 가족, 간병인 및 일반인에 대해 질문에 답하고 그런 사람들이 자신의 방사선방호를 이해하도록 도와야 한다.
- 근접치료 시설에서 직무피폭을 평가하기 위해서는 합당한 개인감시가 필요하다. 의료진과 관계자는 개인선량계 패용이 필수이다. 매우 가변적인 방사선장에서는 피폭할 때마다 말단 선량계를 포함한 개인선량계로 감시하지 않고는 개인선량을 합리적으로 평가할 수 없다.
- 근접치료 절차에서는 고품질 선량관리 및 품질보증 프로그램이 필수적이다. 모든 의료진이 의학물리사 도움을 받을 수 있어야 하고, 구체적인 비상대응 절차, 역할과 책임, 품질보증 프로그램이 항상 적용할 수 있도록 준비되어야 한다. 방호를 계속 발전시키기 위해서는 기관 내는 물론 의료공동체 범위까지 사건에 관한 정보와 경험의 공유가 요긴하다.

제1장 서론

(1) 근접치료에서는 밀봉선원을 사람 신체 내에 배치하는데, 선원을 표적조직 안에 심거나 접촉시킨다. 흡수선량(이하 '선량'으로 줄여 적기도 한다.)은 선원으로부터 거리에 따라 급속히 감소하므로 짧은 시간에 국부 표적이거나 영역에 충분히 높은 선량을 안전하게 전달할 수 있다. 이 간행물은 근접치료에 특별히 집중하여 근접치료에서 직무피폭 방호에 관해 ICRP의 여러 간행물에서 제시된 정보를 종합한다. 이 간행물에서 갱신된 자료와 권고는 ICRP 최근 권고를 반영한다.

(2) 20세기 초부터 외부 방사선치료의 발전과 함께 방사선원을 종양에 직접 삽입하거나 단순히 접촉하는 적용을 개척해왔다. 이 기법을 근접치료(brachy는 희랍어로 '짧다'는 뜻)라 부르는데, 영어권에서는 '짧은 거리에서 치료'라는 의미가 되며 프랑스에서는 라듐 발견자인 마리와 피에르 큐리를 기려 큐리치료curietherapie라 부른다.

(3) 근접치료를 위해서는 치료하려는 부위가 접근 가능해야 하고 종양이나 표적 위치가 기하학적으로 제한적이며 크지 않아야 한다. 때로는 접근을 위해 약간의 수술적 개입이 있을 수 있다. 종양은 선원이 위치하는 동안에는 지속적으로 피폭하여 처방된 총 치료선량을 받게 된다.

(4) 20세기 첫 10년 기간에는 대개 ^{226}Ra 세관이나 바늘을 환부에 꽂거나 접촉해 치료했지만, 선원 영구이식에 대한 관심도 1910년대까지 거슬러 올라간다. ^{226}Ra 의 첫 자손(방출물)인 ^{222}Ra 가스의 장점[높은 비방사능, 매우 짧은 반감기(몇 주면 방사능이 미미해져 영구이식이 가능)]에 관심을 가졌다. 초기에 영구이식은 주로 직경 0.3 mm, 길이 3 mm 정도의 유리 모세관에 장입한 라돈 방출물을 사용해 실시했다. 이처럼 미세 유리관을 제작하고 이식하는 어려움과 함께, 대부분 선량이 비정기 짧은 베타입자(전자)에 의해 전달되어 선원에 접촉하거나 근접한 조직에 상당한 '과피폭'을 문제도 있었다.¹⁾ 두 번째 문제를 해소하기 위해 금박밀봉 미세 씨알을 개발했고, 금박이 베타입자나 연질 X선을 걸러 크게 개선된 선량분포를 얻었다.²⁾

1) <역주> 당시의 근접치료 선량전달은 라듐이나 라돈 자손인 Pb-214 및 Bi-214가 방출하는 감마선에 의한 것이었다. 따라서 베타를 적절히 차폐하지 않으면 많은 선량이 베타에 의해 형성된다.

(5) 주로 자궁/경부암 또는 전립선암을 진단받은 많은 환자가 ‘라돈 씨알’(때로는 그 외장 때문에 ‘금씨알’이라고도 불렀음) 영구이식으로 치료를 받았고 일부에서 우호적 결과를 얻었다. 흥미롭게도 전립선암에 대해 1920년대에 수행된 라돈 씨알 이식 후 골반부 영상이 오늘날 ^{125}I 씨알을 사용한 이식 영상과 별반 다르지 않다(Aronowiz 2002). 그러나 이 기법은 점차 폐기되었는데, 주된 이유는 라듐 방출 관리의 복잡성과 당시로서는 대부분 암이 이식기술로 치유할 가능성을 넘을 정도로 널리 진전된 상태에서 진단되었기 때문이다.

(6) 여러 그룹이 ^{198}Au 씨알(참 금씨알) 선원 영구이식 기술을 재할한 것은 1950년대에 와서다. 이 선원의 짧은 반감기(2.7일)는 영구이식을 가능하게 한다. ^{198}Au 씨알은 자궁 경부암을 비롯한 여러 종양에 사용된다. 그러나 1970년대에 ^{125}I 씨알이 가용한 후에는 점차 폐기되었다. ^{198}Au 선원과 비슷한 크기(길이 4 mm)인 ^{125}I 씨알은 약간 긴 반감기(60일)를 갖는데 이는 전립선암처럼 느리게 자라는 암에 유리한 것으로 보며 감마선 에너지가 낮아(^{198}Au 감마선 420 keV에 비해 약 28 keV) 방사선방호가 용이하다.

(7) 이후에는 ^{125}I 이 영구이식 방사성물질의 표준이 되었으며, 근래에야 일부 지역에서 ^{103}Pd , 최근에는 ^{131}Cs 의 도전을 받고 있다.³⁾ ^{125}I 씨알은 다양한 종양에 이식 경험이 있다. 예를 들면 많은 환자에게 폐암 절제 후 종양상에 이식했고, 뉴욕 메모리얼 병원에서는 1970년대 초기부터 전립선암에 이식했다(Hilaris 등 1975, Aronowiz 2012). 뇌종양 치료에 ^{125}I 씨알 적용이 제안되기도 했다(Marchese 등 1984).

(8) 지금까지 씨알 영구이식으로 인해 의료진이나 환자 가족에게 부정적 영향은 보고된 바 없다. 이는 이미 많은 환자와 관련된 이 기술이 매우 안전함을 내보인다.

(9) 병행하여, 종종 외부조사와 연계하여 고선량률(HDR, 위에서 설명한 낮은 선량률 근

2) <역주> 초기 근접치료사에 대해서는 Gönül Kemikler, 2019. History of Brachytherapy, Turkish J. Oncol. 34, 1-10에서 잘 정리하고 있다.

3) <역주> ^{125}I : 반감기 60.2일, 전자포획으로 붕괴하며 소량의 감마선을 방출하나 특성X선이 주된 광자 방사선이다. 천연(0.1% 존재비) ^{124}Xe 을 농축하여 중성자 포획으로 ^{125}Xe (반감기 17시간)를 만들어 그 딸핵종으로 ^{125}I 를 생산한다.

^{103}Pd : 반감기 17일, 전자포획으로 붕괴하며 약간의 감마선보다 20 keV 부근의 특성X선이 더 강하다. ^{102}Pd (1% 존재비) 중성자 포획으로 생산한다.

^{131}Cs : 반감기 9.7일, 전자포획으로 붕괴하며 30 keV 정도의 특성X선이 주된 광자 방사선이다. ^{130}Ba (35% 존재비) 중성자 포획으로 ^{131}Ba (반감기 12일)을 만들고 그 딸핵종으로 ^{131}Cs 를 생산한다.

여기서 보듯이 씨알 선원으로 전자포획 핵종을 사용하는 것은 근거리 선량을 지배하는 베타 방출이 없어 표적조직의 선량분포 균질화가 용이하기 때문이다.

접치료의 반대 개념으로서) 원격 후장전 근접치료가 널리 채택되고 있다(ICRP 2005a). 이 기술은 이제 초기 전립선암에 대해 단일치료로 사용이 증가하고 있다.

(10) 외부 빔치료가 적절히 차폐된 시설에서 경미한(아니면 없거나) 직무피폭을 내는 반면, 근접치료는 치료를 수행하는 의료진에게 유의한 선량 가능성을 제기한다. 현대 근접치료 센터에서 의료진이 예를 들면 씨알이나 방사선원 장전, 플라크 취급, 관련된 형광투시로 상당한 방사선량을 받는다. 근접치료 프로그램은 적극적 관리를 필요로 하는 계획피폭상황을 형성한다. 이러한 계획피폭상황은 그러한 행위에서 전형적인 일상피폭(예: 환자의 의료피폭, 간병인/위안자의 피폭, 영구이식 선원으로부터 일반인피폭, 선원 취급 및 영상안내 과정에서 직무피폭)은 물론 비상사태나 사고 후 조치로부터 잠재피폭을 포함한다.⁴⁾

(11) 세계적으로는 근접치료 관행에 큰 차이가 존재하며, 의료진이 높은 선량을 받을 수 있는 구식 기술(예: ^{226}Ra 이나 ^{192}Ir 바늘 사용)을 적용하는 시설도 있다.⁵⁾ 나아가 기술발전이나 신기술은 의료 공동체에 대해 구체적 권고로 다룰 필요가 있는 의료진 방호의 새로운 문제도 제기한다.

(12) ICRP는 근래의 역학적 증거를 검토했는데, 일부는 매우 지발성이고 그 문턱선량이 이전에 고려했던 값보다 낮거나 그럴 것 같은 조직반응이 있을 수 있음을 암시했다. 눈 수정체가 그런 경우이다(ICRP 2011). 근래 연구는 일부 형광투시 사용자가 방호장구를 적절히 사용하지 않고 방사선방호 원칙을 잘 준수하지 않을 때 방사선 유발 수정체 혼탁 발생이 증가함을 보였다(Vánö 등 1998,2010,2013; Ciraj-Bjelac 등 2010, Rehani 등 2011, Jacob 등 2012). 중재방사선 의사의 손과 다리에 높은 선량이 보고된 바 있고, 방호용구로 보호되지 않은 다리 부위에 탈모가 관찰되기도 했다(Balter 2001). 동일 유형 절차에서 운영자 선량의 상당한 차이는 방호 관행을 개선할 수 있음을 지시한다(Kim과 Miller 2009).

(13) 근접치료 절차에 참여하는 의사의 방사선방호 훈련 수준이 다양하다. 예를 들면 많

4) <역주> 혼란을 초래하는 설명이다. 계획피폭상황이 잠재피폭을 포함하는 것이 아니라 그러한 특별한 선원이 잠재피폭을 내포하는 것으로 이해하는 것이 옳다. 계획피폭상황은 실제 피폭이 일어나는 상황이지만 잠재피폭은 일어나지 않은 피폭이다(확률은 낮지만 발생하면 피폭이 심각할 사건 리스크). 나아가 HDR 근접치료기 선원 고착과 같은 사건이 발생하더라도 그 수습 전문가가 '비상피폭'으로 간주해야 할 정도의 피폭(유효선량 약 50 mSv 초과)을 받을 것 같지 않다. 사고로 부지 중에 높은 선량을 받았다면 이는 이미 방호대상이 아니어서 계획피폭상황이 될 수 없다.

5) <역주> 오해 소지가 있어 '요약'의 내용을 참조하여 표현을 약간 수정했다.

은 나라에서 모든 영상의학자는 방사선의학 교육과정에서 방사선물리, 방사선생물학 및 방사선방호 훈련을 받지만, 다른 전공 의사는 방사선 관련 주제에 교육 수준이 다르고 자격인증 과정에서 방사선 분야에 대해 시험이 있을 수도 아닐 수도 있다. ICRP 113(2009)에 최소 교육훈련과 훈련을 받아야 하는 다양한 전문가, 교육 목적과 내용, 교육 관리 접근, 대략적 시수, 인증과 자격부여에 대해 권고와 조언을 제시했다.

(14) ICRP는 ICRP 86(2001)에 방사선치료(근접치료 포함)에서 사고 예방을, ICRP 97(2005a)에 HDR 근접치료에서 사고 예방을, ICRP 98(2005a,b)에 영구이식 선원을 사용한 전립선암 근접치료에서 방사선안전 특성을, ICRP 105(2008)에서 의료에서 방사선 방호에 대한 포괄 권고 등 여러 간행물에서 근접치료와 관련된 환자 중심의 방사선안전 측면을 구체적으로 다뤘다.

(15) 대부분 근접치료 선원은 광자 방사선을 방출하지만, 소수 특별한 상황에서는 알파, 베타 또는 중성자 방출 선원도 사용한다. 강내치료는 종양체적에 근접한 신체 강내에 선원을 배치한다. 조직간질interstitial 치료는 선원을 일시적 또는 영구적으로 배치하지만 강내치료는 항상 일시적 또는 짧은 기간만 배치한다. 일시 이식물은 수동이나 원격 후장전 절차로 삽입한다. 다른 형식의 근접치료로는 표면 프라크, 관내근접치료, 수술중 치료, 혈관내 치료에 감마나 베타 방출 선원을 사용한다(IAEA 2005). 근래에는 고유하게 베타 (Cohen 등 2014, Daufel 등 2015)나 알파(Arazi 등 2007, Cooks 등 2012) 선원도 사용한다.

(16) 표1.1부터 표1.4까지는 근접치료 처치에 대해 이식 유형, 이식 기간, 선원장전 방법 및 선량률을 요약하였다(IAEA 2005).

표1.1. 근접치료의 보편적 용도

질환 사이트

유방암

식도암

자궁/경부암

두경부암

간세포암

재발성 및 재협착 동맥 혈관

폐암

안구 흑색종ocular melanoma

전립선암

피부암

연조직 육종

표1.2. 이식 유형에 따른 근접치료 처치 구분

이식 유형	설명
강내	종양에 근접한 강내에 선원 배치
간질	종양체적 안에 수술로 선원 이식
표면(거푸집)	치료할 조직 위에 선원 배치
관내	관 내부에 선원 배치
수술중	수술 중 표적조직 안에 선원 이식
혈관내	대동맥이나 소동맥 안에 선원 배치

표1.3. 선원 배치 기간에 따른 근접치료 처치 구분

이식 유형	설명
임시	선량을 짧은 기간(수 분부터 수일)만 전달하고 처방선량이 전달되면 선원을 제거한다.
분할	선량을 짧은 기간 동안 일련의 임시 이식으로 전달한다. 총 처방선량에 이를 때까지 분할 전달한다.
영구	선원이 완전히 붕괴할 때까지 선량이 전달된다.

표1.4. 선원 장전방법에 따른 근접치료 처치 구분

장전 방법	설명
핫장전hot loading	선원이 든 노출지를 환자에게 배치한다.
후장전afterloading	먼저 노출지를 표적 위치에 배치한 후 선원을 수동(수동 후장전)이나 기계(자동 후장전)로 장전한다.

(17) ICRU 보고서 38(1985)은 선량률에 따라 근접치료를 구분하는 방법(즉, 저선량률 LDR, 중선량률, 고선량률HDR)으로 선량 명세점dose specification point에서 선량률 값을 규정하였다(표1.5 참조). 중/저 선량률 치료에 비해 HDR 치료는 12 Gy/h 이상의 매우 높은 선량률로 주어진다. 예를 들면 현행 HDR 장비에 적용하는 보편적 선량률은 100~300 Gy/h 또는 1.6~5.0 Gy/min 정도이며(Wakabayashi 등 1971, Arai 등 1992, Nay 등 1999), 몇몇 현대 원격 HDR 후장전기는 조직 내 1 cm 거리에서 0.12 Gy/s까지 높은 선량률을 내는 선원을 내장한다. 방사선생물학적 복잡성 때문에 중선량률 근접 치료는 보통 적용되지 않는다. 중선량률을 적용한 소수 사례에서 치료 결과는 HDR이나 LDR 치료에 비해 나뉘었다(IAEA 2005).

표 1.5. 선량률에 따른 근접치료 처치 구분(ICRU 1985)

선량률	선량명세점에서 선량률 값
저선량률*LDR	0.4~2 Gy/h
중선량률	2~12 Gy/h
고선량률HDR	>12 Gy/h

* 근접치료 임상에서 사용하는 전통적 저선량률 구분은 방사선방호에서 전형적으로 정의하는 낮은 선량률(즉, 낮은 LET 방사선에 대해 약 1 시간 동안 평균한 때 0.1 mGy/h 미만)과는 다름에 유의하라.

1.1. 이 간행물의 목적

(18) 이 간행물의 목적은 방사선종양학자, 의학물리사, 치료기사, 간호사 등 근접치료에 관여하는 의료진, 병원 경영자, 방사선안전역⁶⁾, 기타 직무방호에 책임이 있는 사람, 근접치료 물품 공급자, 규제자 및 기타 병원의 방사선안전문화에 영향을 미치는 모든 사람에 대해 직무방호에 관한 지침을 제공하려는 것이다.

(19) 지침은 직무방호와 피폭감시 전략을 위한 수단과 방법, 방호복 사용과 시험, 방사선방호 프로그램 개발, 그 프로그램 이행을 위한 교육훈련 및 품질관리, 비상대응을 포함한다.

(20) 근접치료에서 환자는 근접치료, 방사선촬영, 형광투시, CT 등 여러 기법으로부터 방사선을 피폭한다. 이러한 기법은 수행되는 빈도, 환자가 받는 선량, 환자에게 방사선이 부여되는 방법, 그리고 의료진과 운전원의 선량에서 상당히 다르다. 이 간행물에서는 관련되는 방사선촬영이나 형광투시, CT는 다루지 않지만, 이에 관해서는 ICRP 85, 117, 120, 139(ICRP 2000b,2010a,2013a,2018)에서 구체적으로 다룬 바 있다.

6) <역주> 원문은 radiological protection officer와 radiation safety officer(RSO)를 혼용하고 있는데 의미는 같다. 과거 국내 제도에서 '안전관리책임자'라는 용어를 사용했으나 실제로는 경영주에 있는 방호책임이 마치 이 전문가에게 있는 것으로 오해가 많아 현재는 '안전관리자'로 부르고 있다. 국제적으로 보면 RSO라 부르는 나라는 주로 미국이며, 유럽 국가는 radiation protection experts(방사선방호전문가)가 주로 사용된다. 미국에서 부르는 'officer'라는 표현은 상당한 집행권이 있는 직무에 해당하는데, 유럽 국가는 물론 우리나라에서도 책임에 상응하는 권한은 정규로 부여되지 않는 경향이다. 단순히 방사선방호전문가로 부르기는 너무 광범한 느낌이어서 여기서는 모두 '방사선안전역'으로 적는다.

(21) 이 간행물은 근접치료에 수반되는 구체적 방사선치료 방법론을 다루지는 않으며 근접치료 기법에 대한 자세한 논의도 제공하지 않는다. 임상 기법이나 고려사항에 대한 구체적 정보에 대해서는 가용한 지침(예: ICRU 1997,2013; IAEA 2002,2005)을 참조하기 바란다. 이 간행물은 의료진을 위해 근접치료에 수반되는 방사선방호 이슈를 강조하려 한다.

(22) 이 간행물에 제공되는 지침은 이식 유형, 기간, 선원 장착 방법, 선량률에 따라 구분되는 모든 유형 근접치료에 적용된다.

(23) 방사선의 생물학적 영향에 대해서는 여러 ICRP 간행물에서 다뤘고, ICRP 105(2007b)에서 의료에서 방사선방호에 관해 요약했다. 방사선방호에서 방사선량 적용은 ICRP 147(2021)에서 논의했다.

제2장 방사선학적 이슈

2.1. 근접치료 절차

2.1.1. 선원에 관한 실전적 고찰

(24) 근접치료 선원은 통상 캡슐형인데, 이로써 선원 견고성을 확보하고 알파입자를 흡수하며, 광자 방출 선원에서는 선원 붕괴에서 오는 베타입자도 흡수한다. 일부 근접치료 기술(예: ^{32}P 플라크나 필름)은 금속이나 플라스틱으로 밀봉하지 않고 실리콘화 에폭시로 가볍게 코팅되어 있고(Cohen 등 2014, Deufel 등 2015), ^{224}Ra 이 든 와이어에서 방출되는 알파 방출 핵에 의존하는 다른 기법도 있다(Cohen 등 2007, Cooks 등 2012).

(25) 임상적으로 유용한 근접치료 선원의 방사선속은 보통 방출 방사선의 치료 성분을 형성하는 광자와 베타입자, 그리고 선원이나 캡슐에서 기인하는 부수적 특성X선이나 제동복사선으로 구성된다.⁷⁾

(26) 특정 근접치료 처치를 위한 적절한 방사성핵종 선택은 에너지, 선량 깊이, 차폐물질, 반감기, 차폐 반가층, 비방사능, 선원 강도 등 물리적, 선량계측적 여러 해당 특성에 따른다. 사용 선원과 관계없이, 근접치료는 선원으로부터 거리에 따라 선량의 급락 fall-off으로 특성화된다.

(27) 선원의 에너지는 조직에서 투과도뿐만 아니라 방사선방호 요건에도 영향을 미친다. 근접치료에서 관심 있는 짧은 치료 거리에서 조직내 선량분포는 광자에너지가 300 keV 이상일 때 광자 산란에 크게 영향을 받지 않는다⁸⁾. 그러나 광자 에너지가 약 30 keV 이하면 조직에서 감쇠가 매우 빨라진다(IAEA 2005).⁹⁾

7) <역주> 씨알 선원으로 종종 이용되는 I-125, Pd-103 등은 주로 전자포획으로 붕괴하므로 방출하는 주된 방사선이 특성X선이 된다. 이런 선원을 이용하면 (1) 베타 방출이 없어 선원 차폐 캡슐이 얇아도 되며, (2) 흡수계수가 커서 조직 선량률이 높고, (3) 방출 X선 투과력이 약해 차폐가 용이한 등 상당한 장점이 있다.

8) <역주> 산란 광자로 인한 선량선 기여분은 매질 투과깊이(선형감쇠계수와 투과깊이의 곱: μt)가 작을 때는 투과깊이에 비례하므로 거의 0에 가깝다.

9) <역주> 선량 감쇠가 급격해 바람직한 선량분포를 얻는 데 어려움이 있다는 의미이다.

(28) 고에너지 광자로부터 방호하기 위한 차폐는 납 수십 mm나 된다. 저에너지 광자에 서는 소요 두께가 크게 줄어들어 전형적으로 납 0.1 mm 미만이다.

2.1.2. 선원의 물리적 특성

(29) ^{226}Ra 과 ^{222}Rn 사용은 안전성 특성 때문에 대체로 퇴출되었지만 그 오랜 임상 이용 역사는 여전히 현대 근접치료에 영향을 미치고 있다. 12종이 훨씬 넘는 핵종이 근접치 료 이용 이력이 있다. 몇몇 근접치료 선원의 물리적 특성을 표2.1에 보였다. 표2.2는 밀 봉선원 근접치료 절차에 보통 사용되는 핵종들이다.

표2.1. 근접치료에 사용되는 몇몇 핵종의 물리적 특성

핵종	평균* 광자에너지 (MeV)	반감기	납 반가층(mm)	Γ_{AKR}^\dagger ($\mu\text{Gy cm}^2$) /(GBq h)	A^\ddagger (cGy/h)/ (cGy cm ² /h)
^{60}Co	1.25	5.26년	11	309	1.11
^{137}Cs	0.66	30년	6.5	77.3	1.11
^{198}Au	0.41	2.7일	2.5	56.2	1.13
^{192}Ir	0.38	73.8일	3	108	1.12
^{125}I	0.028	60일	0.02	-¶	-
^{103}Pd	0.021	17일	0.01	-	-

* 선원 제작사나 필터에 따라 다르므로 이 값은 근사치임.

† 공기커마울 상수. <역주> 1 GBq 점선원으로부터 1 cm 거리에서 $\mu\text{Gy/h}$ 단위 공기커마울.

‡ 물선량률 상수. <역주> 선원 중심 반경방향 1 cm에서 물흡수선량률을 같은 위치에서 공기커 마울에 정규화한 값.

¶ 저에너지 광자선원에 대한 일반적 선량인자 사용은 선량계산에서 큰 오차를 낼 수 있어서, I-125나 Pd-103에 대해서는 그 값을 제시하지 않음.

(30) 광자방출 선원의 강도, 환자 조직의 흡수선량 산출에 관한 지침문서나 간행물이 여럿 있으므로(예: ICRU 1997), 근접치료 임상 적용에 이들을 참조해야 한다.

2.1.3. 선원의 기계적 특성

(31) 근접치료 선원은 씨알이나 플라크 형태로 가용한데, 그림2.1에 여러 형식을 보였 다.

(32) ^{192}Ir 은 전통적으로 금속선 형태로 제공되는데, 그 중심은 이리듐-백금 합금이고 외 피막은 0.1 mm 두께의 백금이다. 이제 LDR ^{192}Ir 선원도 가용한데, 나일론 리본 안에 씨알들이 줄지어 있다. HDR 후장전 기기는 특수설계된 씨알과 유사한 ^{192}Ir 선원을 사

표2.2. 이식에 사용되는 전형적 핵종

기법	전통 핵종	현행 핵종
저선량률	^{226}Ra	^{137}Cs , ^{192}Ir
고선량률	^{60}Co	^{60}Co , ^{192}Ir
기장전	-	^{137}Cs
저선량률 후장전	-	^{192}Ir
고선량률 후장전	-	^{192}Ir
통상 선량률	^{222}Rn	^{198}Au
극저선량률	-	^{125}I , ^{103}Pd , ^{131}Cs
선택적 내부방사선치료	-	^{90}Y 미소구

용하는데 초기 방사능은 약 370 GBq이다.

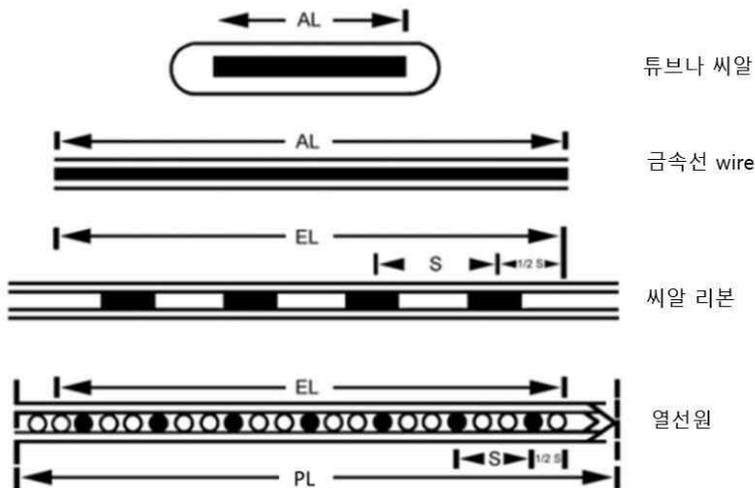


그림2.1. 근접치료 선원의 기계적 특성(ICRU 1997). AL: 활성길이, EL: 등가 활성길이, PL: 물리적 길이, S: 선원 간격.

(33) ^{125}I , ^{103}Pd , ^{131}Cs 및 ^{198}Au 선원은 씨알(예: 개별, 카트리지 또는 줄)로 공급되는데, 보통 특수한 전달 장전기로 종양에 삽입한다.

(34) ^{60}Co 근접선원은 HDR 기기용으로 가용한데 전형적 초기 방사능은 80 GBq 정도다.

(35) ^{90}Sr 근접치료 선원은 봉 끝에 얇게 부착하여 딸핵종 ^{90}Y 베타 방사선으로 가끔 눈의 양성 익상편¹⁰⁾pterysium(결막 위에 자라는 비악성 조직) 치료에 사용한다.

(36) ^{32}P 플라크는 에폭시폴리머판 위에 ^{32}P 를 판상으로 배치하고 실리콘으로 코팅한 선원이다.¹¹⁾¹²⁾

(37) ^{224}Ra 원자들이 단단히 부착한 금속선 바늘 노출지로 구성된 참신한 기기도 개발된 바 있다(Arzari 등 2007).¹³⁾ 이 금속선의 ^{224}Ra 에서 방출된 ^{220}Rn 원자와 그 자손원자가 주변 조직에 수 mm 정도까지 확산되어 내는 알파입자가 선량을 전달한다.¹⁴⁾

2.1.4. 선택적 내부방사선치료(SIRT)를 위한 개입

(38) 현재 간의 1차암 또는 전이암 환자의 20% 미만만 치료된다. 따라서 절제 불가능한 간암에 순수 베타 방출체인 ^{90}Y 표지 미소구로 방사선색전술radioembolization 개입절차와 같은 통증치료나 기타 국소치료가 대안 요법으로 되어 왔다(Camacho 등 2015). 간동맥에 도관 설치 후 형광투시 안내 아래 ^{90}Y 미소구를 배치한다. SIRT의 이론적 근거는 정상 간은 주로 문맥으로 공급되는 반면, 악성 환부는 간동맥이 공급한다는 것이다. 몇몇 저자들은 상당한 SIRT 효용을 제시하고 있다(Bester 등 2012).

2.2. 직무피폭

2.2.1. 유효선량

(39) ICRP가 계획피폭상황에 대해 권고한 직무피폭 유효선량한도는 지정된 5년에 평균하여 20 mSv/y이되, 추가 규정으로 한 해에 50 mSv를 초과하지 않아야 한다(ICRP 2007a). 임신 여성의 직무피폭에는 추가 요건이 적용된다.

10) <역주> 안구 전면 결막 위에 안쪽에서부터 섬유 혈관이 날개 모양으로 확장되는 비악성 안과 질환(다른 용어는 '군날개'이며 속칭 '백태'임). 원인은 불확실하나 햇빛, 바람, 모래 등을 지목함. 심하면 수술로 걷어내는데 완전 제거가 어려워 재발하는 문제가 있음.

11) <역주> 주로 수술중 치료기법으로 플라크를 환부에 삽입한다.

12) <역주> 안과 종양을 치료하기 위해 안구 외벽에 접시형 판에 I-125 씨알선원 여러 개를 배치한 프라크를 시술하기도 한다.

13) <역주> 양극 ^{228}Th 판 위 음극에 바늘을 배치하여 ^{228}Th 알파붕괴에서 반도하는 ^{224}Ra 이 음극으로 끌려가 바늘 끝에 부착되도록 하여 제작한다.

14) <역주> ^{224}Ra 원자 하나가 최종 자손인 ^{206}Pb 까지 붕괴하는 동안 알파입자 넷 외에 베타입자 둘을 방출하지만 베타 선량은 비교적 멀리까지 분산되고 방사선가중치도 낮으므로 선량 기여는 수% 수준이다.

(40) 의료진이 받는 연간 유효선량은 근접치료 팀에서 해당 의료인(종양학자, 방사선기사, 간호사, 마취사, 의학물리사 등)의 기능과 역할, 근접치료 절차의 유형, 사례의 의학 적 특성과 복잡성, 환자 집단 유형(예: 소아 환자, 비만 환자), 기타 업무팀의 숙달, 가 용한 기기, 수반되는 방사선촬영의 상대적 사용량 등과 같은 인자에 따라 달라진다. 개 인피폭 감시에 대한 구체적 지침은 제4장에 제공된다.

(41) 근접치료에 동반되는 형광투시나 개입절차와 관련된 직무피폭에 대한 요약과 편집 물을 ICRP 139(2018)에 제시한 바 있으며, 기타 문헌에도 가용하다(Kim 등 2008,2012; ICRP 2010a, NCRP 2010).

2.2.2. 등가선량

(42) 계획피폭상황에서 직무피폭에 대해 ICRP가 권고한 피부 등가선량한도(피폭 면적에 관계없이 높이 피폭하는 1 cm²에 평균함)는 500 mSv이다(ICRP 2007a). 일부 근접치료 선원은 높은 단말선량을 전달할 수 있어(표1.5와 표2.1 참조) 각별한 방사선방호 고려가 필요하다(제5.4절 참조).

(43) ICRP는 일부 매우 지발성이고 그 문턱선량이 이전에 고려했던 값보다 낮거나 그럴 것 같은 조직반응이 있을 수 있음을 암시하는 역학적 증거를 검토하여 2011년 ICRP 118(2012)의 일부로 성명을 발표했다. 눈 수정체에서 혼탁 문턱선량은 이제 0.5 Gy 정 도로 간주한다. 계획피폭상황에서 직무피폭에 대해 ICRP는 눈 수정체 등가선량한도로 지정된 5년간 평균하여 20 mSv/y로 하되 한 해에는 50 mSv를 초과하지 않도록 권고했 다. 일반적 근접치료에서 눈 수정체 선량은 전신선량에 비해 우려가 낮지만,¹⁵⁾ 근접치료 절차에서 형광투시 사용과 관련해서는 주의해야 한다.¹⁶⁾ 수반되는 고체적 형광투시가 수반되는 사례에서는 보안경 없이는 수정체 선량이 운영에 제약적일 수 있고(Lie 등 2008, Korir 등 2012) 갱신된 선량한도를 초과할 수 있다. ICRP 139(2018)에 눈 수정 체 등가선량에 대한 추가 정보와 수반된 대책을 제공했다.

15) <역주> 에너지가 높은 광자와 같은 강투과성 방사선의 경우는 표층선량(피부나 수정체 선량 지표)이 심부선량(유효선량 지표)보다 낮은 경향이므로 유효선량한도를 준수하면 수정체 선량한도도 충족할 것으로 본다.

16) <역주> 형광투시에서는 침상 아래 X선관에서 방출된 X선이 환자 몸에서 산란하여 에너지가 낮아진 X선이 시술자 안면으로 입사되면 수정체 방호를 고려해야 하는 약투과성 선 질이 될 수 있다.

제3장

근접치료에 직무 방사선방호체계의 적용

3.1. 방사선방호 원칙

3.1.1. 일반론

(44) ICRP 방사선방호체계는 주로 사람 건강의 방호를 겨눈다(ICRP 2007a). 방호목적은 방사선피폭을 관리하여 조직반응(결정론적 영향)을 방지하고 확률론적 영향의 위험을 경제사회적 인자를 고려해 합리적으로 달성 가능한 범위에서 줄이는 것이다. 이 목적을 달성하기 위해 ICRP는 방사선방호의 세 원칙을 권고하는데, 정당화, 방호최적화 및 개인선량 제한이다(ICRP 2007a). 정당화 및 최적화 원칙은 모든 유형의 피폭(직무피폭, 일반인피폭 및 의료피폭)에 적용되지만, 선량한도 적용 원칙은 종사자와 일반인에게만 적용되고 환자, 간병인이나 위안자, 의생명 연구대상 자원자의 의료피폭에는 적용되지 않는다.

3.1.2. 행위나 절차의 정당화

(45) 정당화 원칙은 방사선 피폭상황을 변경하는 모든 결정은 해로움보다 이로움이 커야 한다는 것이다. 이는 새로운 방사선원을 도입하거나, 기존피폭을 줄이거나 잠재피폭 위험을 줄이려 할 때는 그러한 일이 수반하는 위해를 상쇄하는 충분한 개인적, 사회적 이득이 있어야만 한다는 의미이다(ICRP 2007a,b). 의료피폭 맥락¹⁷⁾에서는, 정당화의 목표는 환자에게 해로움보다 이로움을 주고, 부수적으로 의료 방사선작업 종사자나 기타 사람들의 피폭으로 인한 위해도 고려한다(ICRP 2007a).

3.1.3. 방호최적화

(46) 방호최적화 원칙은 “피폭 발생 가능성, 피폭자 수, 개인선량의 크기는 경제사회적 인자를 고려하여 합리적으로 달성 가능한 범위에서 낮게 유지해야 한다. 이는 여건에서 방호수준이 최선이고 해로움을 초과하는 이로움 여분을 극대화하는 것을 의미한다”(NCRP 1993, ICRP 2007a,b). 방호최적화는 방사선을 사용하는 시설의 설계, 기기의

17) <역주> 환자만 겨누는 의료피폭 맥락보다는 관련된 모든 사람을 겨누는 ‘의료방사선 맥락’이 더 포괄적이다. 이 간행물의 관심 주제는 환자보호가 아니라 직무피폭 방호이다.

선정, 설치 및 사용, 그리고 일상 작업절차에 적용되어야 한다(ICRP 2007a,b).

3.1.4. 선량한도

(47) 선량한도 적용 원칙은 “환자의 의료피폭이 아닌, 계획피폭상황에서 모든 관리되는 선원으로부터 특정인의 총 선량은 ICRP가 권고하는 적절한 한도를 초과하지 않아야 한다.”고 말한다(ICRP 2007a,b). 의료분야 종사자에게는 이 원칙이 적용된다.

(48) 근접치료 절차에서 직무 종사자는 ICRP가 권고하는 선량한도가 적용된다. 계획피폭상황에서 종사자에 대해 권고한 선량한도는 ICRP 103(2007a)에 설정되어 있고 ‘조직 반응에 대한 ICRP 성명서(ICRP 2012)’에서 눈 수정체 한도를 갱신한 바 있다.

(49) 적용할 선량한도는 다음과 같다.

- 전신: 규정된 5년간 평균하여 유효선량 20 mSv/y. 다만, 단일 1년에는 50 mSv를 초과하지 않아야 한다.
- 사지 및 손발: 등가선량 500 mSv/y.
- 피부: 피폭 면적과 무관하게 1 cm²에 평균한 등가선량 500 mSv/y.
- 눈 수정체: 지정된 5년간 평균하여 등가선량 20 mSv/y. 다만, 단일 1년에는 50 mSv를 초과하지 않아야 한다.

3.1.5. 선량제약치

(50) 방호최적화에서는 예상선량에 적용되는 경계를 정해 최적화를 도모한다(ICRP 2007a). 계획피폭상황에서는 이 경계를 ‘선량제약치’라 부르며, 계획목적에서 현행 피폭 분포를 고려하여¹⁸⁾ 최적화 과정을 효과적으로 보조하기 위해 선정한다. 후속 운영에서 초과하는 것으로 나타나면, 방호가 최적화되었을 것 같지 않으므로 상황을 이해하기 위한 조사를 실시해야 한다. 당연히 선량제약치는 선량한도 낮아야 한다. 선량제약치는 선원중심이며 최적화 과정에서 전망적으로 수립된다. 의료진이 둘 이상의 시설에서 일한다면 각 시설에서 발생한 모든 개인선량의 합에 선량한도나 선량제약치를 적용해야 한다.¹⁹⁾ 수정체 선량제약치에 대해서는 국제방사선방호학회연합(IRPA)가 제안한 바 있다

18) <역주> 계획목적으로 적용한다는 설명과 ‘현행 피폭분포’는 모순 같다. 운영 중 지속적 최적화는 운영경험에서 얻는 현행 피폭분포 자료가 가용하다. 신설이라도 다른 곳에서 경험이 있으면 그것을 참조할 수 있다. 전혀 새로운 행위(절차)라면 추정과 판단을 통해 초기 제약치를 설정, 운용하고 경험이 축적되면 갱신해 나가게 된다.

19) <역주> 선량제약치를 둘 이상의 시설에서 받은 선량의 합에 적용해야 한다는 설명과 선량제약치가 선원중심이라는 설명은 일치하지 않는다. 선량제약치는 개별 피폭원을 겨냥한다. 예를 들어 HDR기기 공급사의 기사가 여러 병원의 HDR 서비스 업무를 수행한다면 개별 병원 방사선종양학과와 선량제약치와는 무관하게 ‘HDR 서비스’라는 행위를 하나의

(IRPA 2017).²⁰⁾

3.2. 비정상 선량의 조사

(51) 방호가 최적화되지 않았음을 알기 위해 연간 선량한도나 선량제약치를 초과할 때까지 기다릴 필요는 없다. 최적화되지 않은 방호는 1개월에 받은 유효선량이나 등가선량에 대해 조사준위를 설정하거나, 납치마 위 목깃선량계²¹⁾ 읽음값과 같은 관련된 변수값에 근거하여 발견할 수 있다.

(52) 월간 조사준위 초과²²⁾는 그 기간에 방호가 최적에 미치지 못하며 따라서 기존 방호의 검토가 필요하다는 경보를 준다. 선량계 판독치의 증가는 행위 수의 상당한 증가 또는 절차 복잡성 증가나 방호대책 준수의 저하로 인한 것일 수 있는 절차 당 선량의 증가 때문일 수도 있다.

(53) 2000년에 세계보건기구(WHO)는 월간 유효선량은 0.5 mSv, 눈 수정체 선량은 5 mSv, 손발 선량도 5 mSv에 이르면 조사를 실시하도록 권고했다(WHO 2000). 눈 수정체에 대한 새 연간 선량한도를 따른다면 수정체 조사준위는 낮춰야 할 것이다. 목깃선량계 읽음값을 이용하면 조사준위 월간 2 mSv가 근접치료 절차에 관련된 의료진에 대해 적합할 할 것이다(ICRP 2018).

(54) 월간 선량으로 정한 조사준위는 1년으로 외삽했을 때 선량이 선량한도나 선량제약치를 초과하지 않게 하는 것이어야 한다. 또, 개인선량계를 항상 패용하지 않기도 하고 부적절하게 패용하기도 한다(Padovani 등 2011, Sanchez 등 2012). 이런 상황에서 조

선원으로 보아 거기에 적합한 선량제약치를 선정해야 한다. 물론 이때는 여러 병원을 서비스한 피폭 경험자료가 반영된다. 선량한도는 개인중심이므로 어디에서 받은 직무로 인한 피폭이면 합산하는 것이 당연하다.

20) <역주> IRPA는 직무피폭자 수정체 등가선량 제약치로 잠정적으로 선원 구분 없이 연간 15 mSv를 제안하고 있다.

21) <역주> 납치마를 착용한 종사자가 납치마 안에 패용하는 정규 선량계만으로는 차폐되지 않는 신체부위(머리, 팔다리) 선량의 유효선량 기여를 반영하지 못한다. 목깃 선량계는 이를 보완하기 위한 것이다. 이 선량계는 눈 수정체 등가선량에 대한 1차 지표(수정체 선량의 바른 지표는 3 mm 깊이 선량당량)가 될 수 있다. 이 목깃 선량계는 차폐가 없으므로 최적화되지 않은 방호에 더욱 민감하게 반응한다.

22) <역주> 상대적으로 높이 피폭하는 근접치료 의료진은 직독식 경보 전자선량계를 보조 선량계로 활용할 것을 권고한다. 이에 따른 일일 선량이 월간 조사준위보다 신속하고 분명하게 비정상 피폭을 지시하게 될 것이다.

사준위는 납치마 위 선량계와 손 선량계에 대해 최소선량값을 설정하면 도움이 되는데, 이는 선량계 패용 절차를 적절히 준수하지 않을 가능성에 대해 경보를 주게 된다.

3.3. 구역과 작업장 분류

(55) ICRP 57(1990) 제129항에서 개인감시 필요성과 관련해 종사자를 범주로 구분할 가능성을 논의하고 중재방사선 의사와 심장학자는 범주 A에 속할 것으로 말한 바 있다. 그러나 ICRP 60(1991) 제184항은 종사자 등급 분류를 지지하지 않고 “ICRP는 종사자 분류보다는 작업장 분류를 계속 권고한다.”고 말했다. 따라서 개인감시 기구의 지급은 작업장, 종사자의 업무, 방사선장에서 피폭하는 장소와 시간, 그리고 방호도구가 제공하는 차폐에 근거하여 분석해야 한다.²³⁾

3.4. 배태아

(56) ICRP는 ICRP 84(2000a)에서 임신한 의사와 기타 종사자 관리에 대한 조언을 제공했다. 임신 초기(임신을 선언하기 전)에는 종사자의 정규 방호로 관리하는데, 이때는 성별 차등이 없다. 배태아 방호의 1차 책임은 어머니 본인에게 있으므로 임신이 확인되면 최대한 빨리 고용주에게 알려야 한다(ICRP 2000a). 일단 임신을 선언하여 고용주에게 알리고 나면, 임신 종사자의 작업조건은 잔여 임신기간 동안 배태아 추가 선량이 1 mSv를 초과하지 않게 해야 한다(ICRP 2000a).

(57) 임신 종사자에 대해 불필요한 차별은 피해야 한다. 배태아 선량에 대한 제한이 임신 종사자가 방사선작업을 완전히 피해야 한다거나 방사선 지정구역을 출입하거나 거기서 일하는 것을 금지해야 한다는 것은 아니지만(ICRP 2000a), 고용주가 임신 종사자의 피폭조건을 신중하게 검토해야 함을 의미한다. 특히 임신 종사자²⁴⁾의 직무는 사고 성격의 높은 피폭을 받을 확률이 유의한 수준이어서는 안 된다.

23) <역주> 종사자 분류를 권고하지 않는다는 ICRP 입장에도 불구하고 여전히 EUBSS는 종사자를 A, B군으로 구분하고 있다. 요점은 피폭 잠재성이 높은 직무피폭자와 피폭이 사소한 직무피폭자는 교육훈련, 개인감시, 건강관리, 기록관리 등에서 차등관리가 필요하다. ICRP 의도는 ‘중재방사선의사나 심장학자는 A군’처럼 직종에 따라 획일적으로 규정하는 것이 적절하지 않다는 것으로 이해할 수 있다.

24) <역주> 임신한 종사자뿐만 아니라 하더라도 임신할 수 있는 ‘가임 여성’도 마찬가지다.

(58) 전문학회 지침의 예로, ‘중재방사선 및 심혈관 학회’와 ‘유럽 중재방사선학회’는 임신했거나 가능성이 있는 종사자의 직무 방사선방호 실무지침을 개발한 바 있다(Blake 등 2006). 이 지침은 배태아의 위험만을 근거로 임신 종사자를 형광투시 절차로부터 배제하는 것은 과학적 근거에서 정당화될 수 없다고 말한다(Blake 등 2006, Best 등 2011, Dauer 등 2015).²⁵⁾

(59) 비록 전형적인 직무피폭은 낮지만 근접치료 절차에서는 임신 종사자를 위한 어느 정도 배려가 필요하다. 임신을 선언한 종사자는 HDR 선원과 관련된 비상대응 활동에 참여하는 것을 기대해서는 안 된다.²⁶⁾

25) <역주> 원론적으로는 옳은 말이지만, 현실적으로는 임신 종사자를 ‘근접치료’ 절차에 참여시키는 것은 이의가 제기될 여지가 높다. 필수 기능 인력이 아니라면 다른 사람으로 대체하는 것이 무난하다.

26) <역주> 여기서 비상대응이란 기기 오작동으로 고착된 선원의 회수 등 민감한 작업을 의미한다. 이런 작업에 임신 종사자를 투입한다는 것은 상식적이 아니다.

제4장

개인감시와 선량평가

4.1. 개인피폭 감시

4.1.1. 피폭감시와 선량한도 준수 확인

(60) 피폭감시는 연간 선량한도 준수 입증과 방호최적화에 필요하다. 선량한도 준수 감시는 유효선량과 피부, 눈 수정체, 손발의 등가선량 평가를 요구한다. 유효선량이나 등가선량을 인체 조직에서 직접 측정할 수는 없고, 피폭감시 양으로 직접 사용할 수도 없다. 그래서 방호체계는 측정 가능한 실용량을 포함하며, 이로부터 유효선량이나 등가선량을 평가할 수 있다(ICRP 2007a).²⁷⁾

(61) 직무피폭 관리는 선량계로 측정된 양과 사람이 받은 선량 사이 관계에 관한 일련의 가정에 의지한다. 해당 표준은 선량계측 시스템의 정확도와 불확도 요건을 포함하여 이러한 가정이 실용량과 방호량 관계를 성립하게 한다. 종사자가 작업 시간 동안 항상 선량계를 바르게 착용함을 보장하는 것이 이러한 가정과 관계에서 매우 중요한 요소이다. 모든 피폭시간 동안 종사자에 대한 어떤 개인감시 없이는 매우 가변적인 방사선장에서 사람 선량을 합리적으로 평가할 수 없다. 절차준수 감사는 종사자가 선량계를 일상으로 바르게 착용함을 검증하기 위해 필요하다.

4.1.2. 피폭감시와 방호최적화

(62) 전립선에 선원 이식에서 차폐와 핸들이 긴 노출이나 도구 사용에 대한 근접치료 의사의 경험량이 낮은 선량과 상관된다(Schiefer 등 2009). 경험이 풍부한 센터에서는 손 선량한도(Schiefer 등 2009, van Haaron 등 2011)나 유효선량 한도(Schwartz 등 2003)를 초과하지 않고 연간 수백 절차를 수행할 수 있다. 마찬가지로, 눈 플라크 절차에서 손 선량도 측정 가능하지만 매우 낮게 나타났다(Laube 등 2000, Classic 등

27) <역주> 일반적 경우에는 측정된 실용량을 방호량(유효선량, 등가선량)으로 '같은한다'. 그러나 정규 방향에서 피폭하지 않거나 신체 일부만 피폭하는 등 특별한 경우(복수선량계 사용 등)에는 선량계로 측정된 값으로부터 특정한 절차를 통해 방호량을 평가해야 할 수도 있다. 실용량은 근접치료가 해당되는 외부피폭에 대해서만 정의된다.

2012). ^{192}Ir 을 이용한 혈관내 근접치료에서 전신선량 측정치 상한은 절차 당 수십 μSv 였다(Balter 등 2000). 이제 거의 사용하지 않지만, 근접치료 절차에서 형광투시를 사용할 때는 유효선량과 손 선량 증가가 예상되지만, 기기, 도구 및 기법을 합당하게 이용하면 유효선량은 ICRP가 권고하는 20 mSv/y보다 충분히 낮게 유지할 수 있다(Tsapaki 2004, ICRP 2007a,2018; Dendy 2008, Miller 등 2010).

(63) 사람 피폭을 감시하는 외에도 선량계를 활용하면 방사선방호 경각심을 높일 수 있다. 방사선방호에 관한 정규 훈련이 없으면 의사는 선임자의 관행을 받아들이는 경향이 다(Rehani와 Ortiz-Lopez 2006). 개인선량계 일상 사용에 대한 엄격한 정책이 모든 근접치료 품질 프로그램의 일부여야 한다. 감시 선량계 미패용은 고용주 절차 및 국가 규제나 법령 위반이 될 것이다.

(64) 준수 검증은 개별 근접치료 절차에서 선량을 점검해서 수행되는 것이 아니라 규정된 감시 기간에 수행된 많은 절차에서 받은 선량을 합해 적용된다. 감시 주기는 규제자가 정하며 보통 1개월이다.²⁸⁾ 이 주기가 연간 선량한도 준수를 점검하는 데는 적절하지만 구체적 절차에서 방호최적화 목적으로는 충분하지 않다.²⁹⁾

(65) 수반되는 형광투시에서 환자선량을 줄이기 위해 취하는 조치는 종종 산란방사선 수준이나 산란이 높은 시간을 줄여 종사자 선량을 줄이는 것으로 풀이될 수 있다. 구체적으로 종사자를 겨누는 다른 조치도 취할 수 있다. 방호차폐의 적절한 사용, 선원 주변에서 선량률이 낮은 위치에 자리하기가 최적화 조치의 예이며,³⁰⁾ 그 결과는 개인감시로 검증될 수 있다. 시간이 지나면 최적화 효과는 상응하는 업무량이나 수행한 사례의 유형에 비해 낮은 직무피폭 선량으로 나타날 것이다.

4.2. 개인선량계 특성과 사용

4.2.1. 선량계 유형: 수동형과 능동형

(66) 개인선량계는 다양한 피폭조건에서 적절한 정확도를 가지되 작고 가벼워서 편리하

28) <역주> 근접치료 시술자라면 정규 개인선량계 외에 전자 경보선량계를 병용하는 것이 바람직하다. 그렇다면 수동형 정규 선량계 판독 주기는 3개월 정도여도 무방하다.

29) <역주> 이 목적으로는 피폭이 집중되는 세부절차의 식별이 필요하므로 직독식 전자선량계의 도움을 받는 것이 적합하다.

30) <역주> 이런 예는 방사선방호 ‘모범관행good practice’으로 보면 적당하다. 모범관행이 모이면 방호최적화가 달성되겠지만 이를 ‘최적화 조치의 예’라고 부르는 것은 어색하다..

게 사용하며 의료진의 직무 역량을 방해하지 않을 필요가 있다.³¹⁾ 수동형 선량계³²⁾는 보통 작고 가벼우며 전원이 필요 없다. 그래서 의료진 행동에 거추장스럽지 않고 편안한 포장에 넣기 용이하여 선량한도 준수를 입증하기 위해 가장 널리 이용된다. 그러나 직독 기능이 없으면 최적화 감시에서 모든 수동형 선량계의 단점이며 특히 근접치료에 관련된 종사자의 교육에도 불편하다.

(67) 손 감시에는 수술장갑 안에 쉽게 낄 수 있도록 반지에 올린 작은 선량계가 사용된다. 반지는 여러 손가락 굵기에 맞출 수 있지만, 장시간 절차에서는 손가락이 부풀 수도 있음에 주의가 필요하다. 나아가 멸균처리 가능성이나 시술자가 도관이나 기기를 정밀하게 조작하는 역량을 위한 접촉감각을 방해하지 않아야 하는 등 추가 특성도 중요하다. 손톱에 붙이는 작은 주머니 형식이 반지선량계 대안으로 사용되기도 한다.

(68) 선량계의 물리적 형상은 의도하는 패용 위치와 양립해야 한다. 반지선량계는 보통 감염관리가 필수적인 절차에서 끼는데, 어떤 선량계는 멸균처리를 견디지 못하므로 반지 선량계의 감염관리가 특별한 관심사이다. 이때는 수술장갑 안에 낀다.

(69) 능동형 개인선량계(active personal dosimeter(APD) 또는 전자선량계(EPD)는 최적화 감시나 절차별 선량을 분석하거나 절차의 특성을 분석하기 위한 특별 연구에 사용될 수 있다. 능동형 선량계는 선량률에 대한 즉각적 정보를 제공할 수 있어서, 의료진에게 즉각 피드백을 제공하여 의료진이 낮은 선량률을 내고 그래서 낮은 누적 선량을 주는 자신의 행동변화를 평가할 수 있게 한다. 능동형 선량계는 매 피폭의 시점에 관한 정보를 제공하여 직무피폭과 환자피폭의 상관관계를 볼 수 있게 하며, 근접치료 중 개인선량계 패용 감사를 가능하게 한다.

(70) 최적화 감시³³⁾는 준수감시에 필요한 엄격한 선량 양을 확인할 필요는 없다. 최적화는 선량 감축을 위한 여러 조치의 효용을 평가하기 위해 조건의 변동에서 오는 상대치 비교를 추구한다. 통상 전자선량계는 근접치료 절차 동안 신체의 불균질한 피폭을 고려

31) <역주> 다른 인자는 비용이다. 개인선량계는 많은 수가 필요하므로 단가가 저렴하다는 것도 무시할 수 없는 인자이다.

32) <역주> 수동형, 능동형을 구분하는 개념은 명시적이지 않다. 동력(전원)을 필요성도 한 특성이지만 반도체검출기를 이용한 USB형 선량계, 일부 라돈 측정기(예: E-perm), 이온 저장형 개인선량계(예: DIS-1)은 전기(저장전하)를 필요로 하지만 분류한다면 수동형이다. 이렇게 보면 측정결과를 실시간으로 직접 보이는 기능, 따라서 선량률도 지시할 수 있는 것이 핵심 인자로 생각된다.

33) <역주> ‘최적화 감시’는 일반적으로 사용하는 용어는 아니다. 특정 작업 과정에서 피폭하는 패턴을 분석하여 개선점을 도출하기 위한 감시는 일반적으로 ‘작업감시(task-related monitoring)’라 부른다.

하지 않고 실용량을 평가하도록 교정된다. 즉, 전자선량계는 다른 선량계들과 마찬가지로 한 점에서 선량을 지시하며, 유효선량이나 선량계로부터 어느 정도 떨어진 선량을 추론하지 않는다.³⁴⁾ 개념적으로는 복수 전자선량계를 패용하고 그 결과를 결합하여 준수 목적 선량 정보를 얻는 방법을 사용하지 않을 기술적 이유는 없지만, 현실적 문제가 조사감시(investigatory monitoring)나 최적화 감시에 전자선량계 사용을 제한하는 경향이다.³⁵⁾

4.2.2. 선량계 특수성

(71) 체내에서 발생하는 선량을 추정하기 위해 신체 밖에서 이루어지는 측정을 사용함에 신뢰도를 형성하려면 선량계측 체계가 해당 실용량에 대해 정확성, 정밀성 및 재현성에 대한 표준 요건을 충족해야 한다. 대부분 높은 에너지 근접치료 선원은 표준 선량계로 적절히 감시할 수 있지만, 낮은 에너지 선원(예: ^{125}I , ^{103}Pd)은 저에너지 선량계와 특별 고려가 필요하다(ICRP 2005b 부록B). 베타입자, 알파입자 또는 중성자 방출 선원에 대해서도 같다.

4.2.3. 선량계 신뢰성과 단순성

(72) 선량계 시스템은 신뢰할 수 있고 안전장치(fail-safe)를 가져야 한다.³⁶⁾ 달리 말하면 선량계는 방사선장을 측정하는 지속적인 능력이 있어야 한다. 나아가 사용자의 조작은 단순하고 효율적이어야 한다. 사용자가 선량계에 에너지를 부여해야 하는 전자선량계는 의료진이 선량계를 패용할 때 참조할 메모를 절차에 포함할 필요가 있다. 의료진에게 요구하는 조치나 결정이 적을수록 감시 준수 가능성이 높아진다. 필름, TL선량계(TLD), 광자극발광 선량계(OSL), 또는 유리선량계(RPLG)를 내장한 누적식 수동형 선량계가 일반적으로 준수 감시용으로 근접치료에 사용된다.

4.2.4. 선량계 교체 주기

(73) 수동형 선량계는 사용 기간에 걸친 누적 총 선량을 제공하는데, 매 사용 주기말에 새 선량계로 교체해야 한다. 교체 주기는 사전 결정된 일정으로 하여 의료진에게 습관적 일상이게 해야 한다. 일반적으로 형광투시 의료진에 대해서는 비정상적 사건을 발견하여

34) <역주> 이는 전자선량계만의 문제는 아니다. 방사선의 공간분포가 매우 비균질한 방사선장에서 피폭이라면 복수선량계로 보완하는 방안을 고려해야 한다.

35) <역주> 조사감시나 최적화 감시 목적에 직독식 선량계 기능이 바람직하지만 현실적으로 전자선량계의 크기가 말단 선량계로는 부적절한 한계는 있다.

36) <역주> 'fail-safe'와 같은 복잡한 개념까지 동원할 이유는 없다고 본다. 예상되는 방사선량을 성공적으로 측정하고 결과를 최선으로 보호해야 하지만 완벽해야 한다는 의미는 아니다. 가령 전자선량계 표준은 예상되는 충격이나 전자기장이 결과값을 무산시키지 않도록 요구한다.

적절한 대응을 할 수 있도록 충분한 빈도로 선량 데이터를 제공하기 위해 월간 주기로 감시한다. 따라서 방사선 검출물질은 최소 사용 주기 동안 최소한의 해당 선량을 검출할 감도를 가지고, 예상 사용 최대 주기 동안 그 선량 정보를 보존할 수 있어야 한다.³⁷⁾

4.2.5. 근접치료 절차에서 부적절한 선량계 패용을 발견하는 접근

(74) 선량계 패용의 문제는 높은 선량 판독뿐만 아니라 매우 낮은 선량 판독에서도 해당 되며, 이는 선량계의 오사용이나 미패용을 암시할 수 있다. ICRP 139(2018)에 납치마 아래 패용할 선량계를 납치마 위에 패용하거나, 반지선량계를 다른 손에 끼거나, 다른 사람에게 지급된 선량계를 패용하는 등 부적절한 사용 사례를 보였다. 개인선량계 패용 미준수를 식별하거나 개인선량계를 분실했거나 사용하지 않은 경우 직무피폭 선량을 추산하는 데는 간접적 접근(예: 지역감시나 피폭 이력)이 유용할 수 있다.

4.2.6. 형식시험이나 교정과 실제 근접치료 절차에서 산란조건 차이

(75) 예를 들어 전신 선량계가 차폐물 영향에 대한 고려 없이 교정되고 평가되었을 때, 선량계 하나나 둘을 사용해 유효선량을 평가하려는 감시를 수행해 왔다. 형식시험 표준은 조직등가 모의체 위에 놓은 선량계로 단순한 조건³⁸⁾에서 성능평가를 규정하는 경향이다. 실용량 측정이 정상 사용과 유사한 조건에 대해 예상되는 선량계 성능요건 범위에 있는지 확인하기 위해 공급자에게 보증을 요구할 필요가 있다.³⁹⁾

4.2.7. 눈 수정체 선량계

(76) 선량계를 부착할 수 있는 장치를 눈 가까이 배치하는 어려움 때문에 눈 수정체 감시는 특수한 도전을 제기한다. 소형 선량계가 눈 가까이 보안경 아래에 배치할 기회를 제공한다. 눈 선량은 납치마 위 목 높이의 목깃에 배치한 선량계나 X선관에 가장 가까운 관자놀이에 근접한⁴⁰⁾ 선량계처럼 머리띠에 부착한 플라스틱 조각에 배치한 선량계로 평가할 수 있다. 눈 감시의 다른 방법으로 눈 가까이 머리에 쓴 탄성밴드에 쓴 TLD칩을 사용한다(Bilski 등 2011). 어느 경우든 눈 가까이 배치한 선량계가 패용자의 시각을 방해해서는 안 된다. 근접치료 절차에서는 특히 동반되는 형광투시가 사용될 때 구체적

37) <역주> 현행 사용 서비스 개인선량계는 10 μ Sv 수준의 최소측정량(LLD)을 갖는다. 통상적 감시주기인 1~3개월 사이 측정값 감퇴fading도 무시할 수준이다.

38) <역주> 가령 산란선 영향이 작은 넓고 평행한 방사선장에서 시험.

39) <역주> 개인선량계 형식시험이나 판독 숙련도 시험은 국가 규정과 국제표준이 수립되어 있다. 선량계측 서비스 기관은 이 기준에 적합하면 서비스를 제공할 수 있다.

40) <역주> 이 설명은 형광투시에서 수정체 감시에 적합하다. 이 문항에서는 수정체 감시를 열심히 설명하지만 실제 수정체 선량계를 따로 패용할 피폭자는 드물다. 그 판단은 방사선방호 전문가를 자문할 수 있다.

눈 감시가 요구되는지를 결정하기 위해 눈 수정체 선량의 시험평가를 수행해야 한다(ICRP 2018).

4.2.8. 선량계와 사용자의 식별

(77) 개인선량계는 사용자가 자신의 선량계를 식별할 수 있는 수단을 갖춰야 한다. 선량계 결과가 특정 개인에게 적용하려는 것이라면, 선량계와 사용자 사이 일 대 일 관계가 불가결하다. 라벨과 같은 식별 수단은 다른 사람의 선량계 사용을 방지하도록 쉽게 읽을 수 있어야 한다. 선량계를 사용하지 않을 때 보관하는 랙을 두고, 선량계와 랙 모두에 시각적 인식표를 붙이는 것이 적절한 방법이다.

4.2.9. 능동형 선량계 교정

(78) 유럽연합 사업 ORAMED 진행 과정에서 Clairand 등(2011)과 Sánchez 등(2011)은 선량률과 펄스 주파수와 폭⁴¹⁾이 APD 반응에 미치는 영향을 시험했다. 펄스 모드에서는 전혀 신호를 내지 못하는 GM관형 APD를 제외한 다른 APD의 반응은 개인선량당량률에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 이는 적절한 보정인자를 도입한다면 일상감시에 이들 APD를 사용할 수 있음을 의미한다. APD와 지역감시기의 형식시험과 교정은 고선량률 펄스 모드에서 시험을 포함해 대표적 중재방사선 절차⁴²⁾의 방사선장을 포함해야 한다(Chirioti 등 2011, Clairand 등 2011, Sánchez 등 2014).

4.3. 직무피폭 평가

4.3.1. 유효선량 평가

(79) 일반적으로 유효선량은 개인선량당량 $H_p(10)$ 으로 교정된 개인선량계 읽음값으로부터 평가한다.⁴³⁾ 비교적 균질한 전신피폭 가정에서 선량계를 대표적으로 피폭하는 신체 부위 위에 패용한다면 이러한 유효선량 평가는 방사선방호 목적에서 충분히 근사하다(ICRP 2007). 형광투시 안내 아래 근접치료가 수행되는 드문 경우에 대해, 두 선량계

41) <역주> 펄스형 X선장치를 형광투시 등에 사용할 때 선량계나 선량률계가 출력펄스 주파수나 펄스폭에 따라 영향을 받는지를 시험한 것이다.

42) <역주> ICRP 139(중재방사선 절차에서 방호)의 기술 내용을 적절한 맞춤 없이 옮겨 적어 어색함이 있다. 근접치료 선원은 아직 방사성물질을 사용하므로 그 방사선에 대한 감시는 범용 감시와 차이가 없다고 보고 근접치료에서 보조적으로 적용되는 중재방사선 절차에 대한 주의사항을 나타낸 것으로 이해할 수 있다.

43) <역주> 아직은 개인선량당량을 실용량으로 적용할 수 있지만 ICRP와 ICRU는 새로운 실용량으로 신체선량 H_p 를 정의해 장래에 사용할 것을 권고했다.

접근, 형광투시가 사용될 때 감시 알고리즘, 눈 수정체 등가선량 평가에 관한 특별지침을 ICRP 139(2012)에서 다루었다.

4.3.2. SIRT에서 피폭 평가

(80) SIRT 절차⁴⁴⁾를 위해 베타 방출체를 사용할 때 어려움 하나는 의료진 손가락 선량계측이다. 방사선원에 가까운 손의 검지에 TLD 손가락 선량계를 부착해야 한다. 베타 선원과 피부와 매우 근접한 거리와 동반되는 큰 선량구배 때문에 선량을 과소평가할 수 있다. Rimpler와 Barth(2007)는 일부 작업장에서 직접 베타입자에 의한 손가락 끝에서 국부 피부선량 $H_p(0.07)$ 을 측정했는데, 작업일 당 100 mSv 이상에서 약 700 mSv까지 나타났다.⁴⁵⁾

4.3.3. 배태아 피폭 평가

(81) 근접치료 절차를 수행하거나 돕는 임신 종사자의 경우, 배태아⁴⁶⁾ 선량은 보통 어머니 허리 부근 하복부 위 방호복 아래에 패용한 선량계를 이용해 평가된다(Miller 등 2010, NCRP 2010). 어머니 조직에 의한 방사선 감쇠를 고려하지 않기 때문에 이 선량계는 실제 배태아 선량을 과대평가한다. 근접치료에 사용되는 선원에 따라 구체적 평가가 필요할 수 있다. 동반 형광투시 촬영에서 배태아 선량은 어머니 하복부 벽과 전방 자궁벽에서 감쇠 때문에(Trout 1977, Faulkner와 Marshall 1993, NCRP 2010) 종사자가 패용한 선량계에 기록된 선량의 절반을 초과하지 않음이 보통이다(Daur 등 2015). 따라서 두 선량계를 사용할 때 납치마 아래 선량계의 개인선량당량 $H_p(10)$ 이 0.2 mSv/월 미만이고 고에너지 광자 선원을 많이 사용하지 않는다면 9개월 임신기간에 걸쳐 배태아 등가선량은 선량한도 미만일 것이다. 선량계는 매일 평가해야 하고, 데이터의 신속한 평가를 위해 전자선량계를 사용할 수도 있다(Balter와 Lamont 2002).

44) <역주> 원문은 SIRT 중재방사선 절차로 적고 있지만 SIRT를 ‘중재술’로 보는 것이 의문이어서 수정했다.

45) <역주> 업무량에 의존하겠지만 전문 센터라면 며칠에 피부 등가선량한도를 초과할 수 있음을 보인다.

46) <역주> 공식 용어는 아니지만 사람의 배아와 태아를 묶어서 ‘배태아’라고 표현한다. 배아와 태아의 발생학적 경계선이 명확하지 않아 원문도 대개 ‘embryo and fetus’로 묶어 적고 있다. 원문은 다른 용어로 ‘conceptus(직역하면 수태물)’도 사용하고 있지만 사람을 ‘수태물’로 적는 것도 느낌이 나빠 이 번역본에서는 같이 배태아로 적는다.

제5장 방사선방호 방법 및 프로그램

5.1. 의료진 방호

5.1.1. 피폭관리(시간, 거리, 차폐, 계획)

(82) 직무 방사선방호에서 피폭을 줄이기 위해 시간 최소화, 거리 최대화 및 적절한 차폐 이용을 위한 계획이 필요하다. 의료진 방호와 환자 보호가 여러 과정으로 연계되기 때문에 의료진 방호를 분리하여 다루기는 어렵다. 선원이나 환자로부터 어느 정도 떨어져 자리하는 것, 사례의 복잡성에 맞춰 절차를 신속히 수행할 수 있도록 미리 계획하는 것과 같은 단순한 방법이 직무피폭 선량을 감축하는 데 매우 효과적이다.

(83) 근접치료 절차에서는 네 유형 차폐가 있는데, 건축 차폐, 이동형 차폐, 기기 장착 차폐, 그리고 인체 차폐이다. 건축 차폐는 치료실 벽으로 구축된다. 납, 철, 납유리 또는 아크릴로 만든 굴림형 또는 정치형 차폐는 의사를 포함한 관계 의료진에게 추가 방호를 제공하는 데 유용하다. 이러한 이동형 차폐는 특히 간호사나 의학물리사, 마취사에게 적합하다. 때로는 납치마, 납안경, 갑상선보호대와 같은 개인방호장구와 천장걸이 차폐도 효과적 방호를 제공하므로 그 사용을 평가해야 한다.

5.1.2. 근접치료 절차 중 보조 형광투시 사용

(84) 보조 형광투시 촬영을 이용하는 근접치료 절차는 도관, 노출지applicator, 기타 기구를 조작하기 위해 일부 의료진이 환자 가까이 머물게 한다. 보조하는 다른 의료진도 환자 근처에 있어야 할 수도 있다. 형광투시실에서 환자로부터 산란선 때문에 환자 근처에 높은 선량률이 형성된다.

(85) 수반 형광투시를 위한 지침은 ICRP 139(2018)에 제공한 바 있다. 나아가 여러 전문학회, 방사선방호 기관 및 다른 주체가 준수할 관행을 발행하고 수반 형광투시를 위한 방호용구 사용에 대한 권고를 제공하고 있다(Miller 등 2010, NCRP 2010, Chambers 등 2011, Sauren 등 2011, Durán 등 2013, ICRP 2013a,b, Hiles 등 2016).

5.2. 외부피폭 방호

5.2.1. 환자 주변 방사선준위에 대한 지식

(86) 환자 주변 방사선준위 분포나 여러 인자가 방사선준위에 미치는 영향의 이해와 방호용구의 효과적 이용에 관한 지식은 근접치료에 관계된 모든 의료진에게 필수이다 (ICRP 2009). 환자로부터 방사선 방출과 관련된 직무피폭은 사용하는 근접치료 선원, 가용 차폐, 절차 복잡성, 환자 체격, 기기에 가용한 운용 모드 및 시술자 손기술에 따라 결정된다.

5.2.2. 개인방호용구

(87) 간호사나 마취사와 같이 환자 근처에 머물러야 하는 의료진은 그들과 근접치료 선원 중간에 두는 이동형(굴림형) 차폐로 추가 방호 이득을 볼 수 있다. 차폐효과는 사용하는 선원 특성에 크게 의존하므로 의학물리사나 방사선안전역이 평가해야 한다. 형광투시용 납치마는 ^{125}I , ^{103}Pd , ^{131}Cs , ^{90}Y (독립적 또는 ^{90}Sr 과 함께), ^{32}P 선원이 방출하는 방사선에 대해 상당한 방호를 제공한다. 에너지가 더 높은 선원에 대해서는 형광투시 납치마는 기껏 미미하게 방호할 뿐이며, 실제로는 피부선량을 증가시킬 수도 있다.⁴⁷⁾

(88) 근접치료 의사의 손은 선원에 접근하게 되고 영상유도를 이용할 때는 X선 1차빔에 들어갈 수도 있다. 형광투시 안내에서 환자를 투과한 빔에 시술자 손이 들어가면 환자 상부 선량률은 보통 $2\sim 5\ \mu\text{Gy/s}$ 여서 1분 피폭으로 $100\sim 300\ \text{mGy}$ 선량을 받을 수 있다. 형광투시 빔으로부터 방호를 위해 납장갑을 고려할 수 있으나 근접치료 방사선원을 다루는 데 필요한 손재주를 저해한다.

5.3. 방사능선원 일생의 안전

(89) 근접치료에 사용하는 방사능 선원은 그 생산, 포장, 배송, 수취, 교정, 사용, 퇴역, 그리고 폐기물로 붕괴 또는 적합한 처분에 이르는 선원 일생을 따라 안전관리가 필요하다.

47) <역주> 전형적인 납치마 두께(0.25 또는 0.3 mm 납당량)로는 투과력이 강한 ^{192}Ir 감마선 감쇠율은 수%에 불과하다. 한편, 이렇게 납에 흡수되는 방사선은 주로 광전효과로 흡수되는데 K각 전자가 이탈한 후 여러 낮은 에너지 특성X선이 방출되는데 이처럼 낮은 에너지 X선은 후방 피부선량에 효과적으로 기여한다.

(90) 근접치료 프로그램을 위한 물리적 시설로는 환자 치료실 또는 절차실(수술실일 수도 있음), 촬영시설 및 선원 실험실이 필요하다(IAEA 2008, Papagiannis와 Veselaar 2014). 방사선방호 목적으로 예상 피폭 크기나 피폭 잠재성에 따라 관리구역이나 감시 구역으로 지정할 필요가 있다(IAEA 2006, ICRP 2007). 근접치료 시설 설계특성은 여러 문헌에서 검토하고 있다(IAEA 2001,2006,2008; NCRP 2006, CEC ESTRO 2018).

(91) 근접치료 선원에 접근은 현재 그 업무를 위해 인가된 사람으로 한정해야 한다. 보통 인가된 사용자, 해당 종양학의사, 의학물리진 및 방사선안전관리자로 한정한다. 방사선안전역은 선원에 접근을 인가한 사람의 명단을 유지해야 한다. 근접치료 선원의 재고 장부를 유지하고, 장부에는 저장고에 추가하거나 꺼낸 선원의 수와 방사능, 환자 성명 및 병실 번호, 선원 반출 일시, 선원을 반출하거나 반환한 수와 방사능 등을 포함해야 한다.

(92) 근접치료 선원은 적절히 차폐하여 시건장치를 갖춘 방 또는 보통 관리구역 내 시건 장치를 갖춘 저장고(금고)에 보관해야 한다. 일부 단수명 선원은 제조사 운송용기에 저장하기도 한다. 저장실은 방사선관리구역으로 지정하고 해당 표지를 해야 한다.

(93) 예를 들어 치료실로 가고 오는 등 기관 내에서 운반하는 모든 선원은 방사선종양학과나 의학물리 직원의 상시 감독 아래 차폐된 수레나 제조사 운송용기⁴⁸⁾로 이동해야 한다. 운반용기는 떨어지거나 부주의로 충돌하더라도 선원이 나오지 않도록 잠그거나 견고하게 빗장을 질러야 한다. 운반용기는 사용 개시할 때 방사선 측정해 차폐 적절성을 확인해야 한다.

(94) 수동 근접치료에 사용하는 선원은 방사선종양학 직원의 직무피폭에 가장 중요한 선원이며(NCRP 2006), 선원이나 여러 유형 방사선원을 시술받은 환자가 있는 방 안이나 근방에 머무르는 의료진과 기타 사람에게 상당한 선량을 줄 잠재성이 있다. 선원의 접수, 운반, 준비, 근접치료 노출지에 선원의 장착 및 탈착, 치료 중인 환자의 돌봄에서 직무피폭이나 일반인피폭이 발생할 수 있다. 준비 또는 저장되거나 입원환자나 외래환자에 시술된 상태인 선원과 관련해 적절한 시설설계를 통해 피폭을 크게 줄일 수 있다.

(95) 시설설계는 환자의 의료적, 물리적 안녕뿐 아니라 의료진, 방문객, 기타 일반인의

48) <역주> ‘운송용기’로 운반한다는 것이 통상 말하는 ‘방사성물질 안전운송 규정’을 준수해야 한다는 의미는 아니다(예: 운송표지 부착). 안전운송 규정은 사업소 바깥의 공공 운송로를 통하는 경우에만 적용된다. 제조사 운송용기를 사용하는 것은 현장에 가용한 차폐용기를 이용한다는 의미이다.

실제 피폭과 잠재적 방사선 해악으로부터 방호를 고려해야 한다.

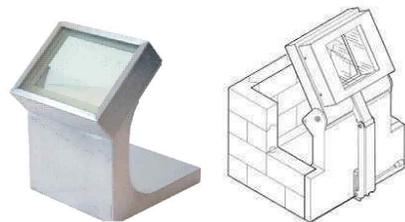
(96) 모든 근접치료 시설에는 치료실에 선원 응급 용기로 사용할 차폐 저장용기, 팔이 긴 집게, 이동형 방사선감시기 및 방사선 지역감시기를 갖춰야 한다(ICRP 2005a). 방사선감시기 경보가 발생한 때 대응하여 모든 선원의 재고와 저장상태의 적절성을 확인하는 필요한 절차를 갖춰야 한다.

(97) 근접치료 처치는 방사능 선원 준비(예: 선원 선정, 계측, 교정, 리본 재단, 강내 선원 삽입물 장전)가 필요하고, 특별히 지정하고 설계된 방에서 수행해야 한다. 선원 준비실(혹은 선원 실험실)은 출입을 제한하고, 모든 밀봉선원을 안전하게 저장하는 구역, 차폐 공간에 선원을 식별하여 표시하는 방법, 선원의 반출 및 반납, 선원 교정, 균질성 평가, 재고관리 및 품질관리 시험을 위한 공간과 설비, 개별 환자 치료를 위해 선원을 준비하는 공간과 설비, 기록 보관 구역, 치료 보조를 위한 공간, 단반감기 선원 저장소, 미사용 선원이나 사용종료 선원을 위한 공간을 포함해야 한다. 선원 준비실은 다른 용도와 공유해서는 안 된다. 이런 방은 방사선 경고표지를 하고 무단출입을 제한하는 시건장치를 갖춰야 한다. 차폐나 선원 금고 하중을 지탱할 수 있는 강도를 가진 작업대도 필요하다. 선원 관찰이 용이하고 전신이나 눈 피폭을 줄이는 데 충분한 두께의 차폐(예: 납유리 창이 있는 납벽돌)도 가용해야 한다. 그 구역 출입은 선원 준비와 직접 관계자만으로 제한해야 한다.

(98) 선원 취급은 집게나 집게팔을 사용해야 하며 손으로 직접 잡아서서는 절대 안 된다. 맞물리는 납벽돌 동굴이나 L형 납벽돌⁴⁹⁾ 같은 적절한 사람 방호수단을 제공해 이용하도록 해야 한다. 선원 누설이나 지역 오염에 대비한 문지름 시험을 주기적으로 실시하고 결과를 기록해야 한다.

(99) 방호최적화를 위해 방 배치를 신중하게 계획하고 평가해야 한다. 작업대 위 맞물림 납벽돌이나 벽 차폐는 계획의 일부로 평가해야 한다. 취급자나 주변 구역에 적합한 방호 평가는 사용 개시 전에 실시해야 한다. 차폐의 변경은 신중하게 평가해야 한다.

49) 납유리창을 갖춘 L형 납차폐(좌: Norer shield)와 맞물림형 납벽돌 동굴과 결합한 모양(우: Ultraray medical).



5.4. 근접치료 적용에서 방사선방호 특별 고려

(100) 근접치료에 공통적, 구체적 적용을 위해 아래 소절들이 방사선방호 고려사항을 다루는데, 시설설계 및 차폐, 절차 중이나 후의 방호고려 예비절차, 대응 준비를 다룬다.

5.4.1. 수동 장전 일시 이식

(101) 수동으로 장전하는 일시 이식(예: LDR) 근접치료 절차, 때로는 조직간질 근접치료나 플라크 설치가 여러 종양 특히 전립선암, 폐암, 뇌종양 및 안과 종양에 대해 사용된다. 선원은 직접 종양 안이나 위에 설치된다. 이러한 절차는 먼저 노출지를 배치하고 후장전으로 방사능선원을 장전한다. 다른 경우는 방사능선원을 표적 위나 주변에 배치하는데, 노출지를 쓰거나 노출지 없이도 한다. 노출지 사전설치는 의료진의 불필요한 방사선 피폭을 최소화하는 데 도움이 된다(Papagiannis와 Venselaar 2014).

(102) 최적 치료 결과를 위해 이들 선원의 신중한 배치는 다양한 계획 선량계측 시스템(Manchester 시스템이나 Paris 시스템 포함)을 바탕으로 평가한다(Thomadsen 등 2005).⁵⁰⁾ 많은 현행 시스템은 종양선량 적용범위에 대해 최적 선원배치를 평가하는 데 역선량계획⁵¹⁾을 이용한다(Lessard와 Pouliot 2001, Dewitt 등 2005).

(103) 의료진 피폭은 방사능선원 자체, 연간 시술 수와 같은 기타 최적화 주제, 절차를 수행하는 의료진 수, 간호진 교대를 포함한 여러 인자에 의존한다.

(104) 장전후 이식loaded-implant은 수술실 내 모든 사람에게 피폭을 주며, 방사선종양학자나 기타 치료에 관련된 사람의 손에 높은 선량을 전달할 수 있다.

(105) 방사선 탐측radiation survey(예를 들어 전리함이나 GM 검출기를 갖는 적절한 기기를 이용)은 근접치료 전, 중, 후 모두에서 실시해야 한다. 환자에게 선원을 이식한 직후에 의료진은 환자와 사용실의 방사선 탐측을 수행해 선원이 엉뚱한 곳에 있거나 분실되지 않았는지 확인해야 한다. 방 전체, 쓰레기통, 기기, 의료진, 방호복 모두를 측정해야 한다. 적절한 방사선 탐측 없이는 아무것도 시술실을 나가서는 안 된다.

(106) 이식 근접치료 후에는 침상 옆, 침상 옆으로부터 1 m 거리, 방문자 구역, 출입구

50) <역주> Paris 시스템이나 Stockholm 시스템은 자궁암 근접치료에서 선량 기준점과 평가절차를 정하는 표준이다.

51) <역주> reverse dose planning. inverse dose planning이 보편적으로 사용된다. 전산 프로그램을 이용해 장점을 최적화하는 치료계획을 도출한다. 최적화 제약조건으로 표적 조직이나 결정조직의 선량, 선량체적 적분 등에 대한 최고값이나 최저값을 둔다.

및 주변 구역에 대해 선량률을 측정하고 기록해야 한다. 인접한 일반구역의 선량률은 국가 규정이나 요건에 적합해야 한다.

(107) 선원이 환자와 관련되어 있는 동안은 환자차트에 '주의. 방사성물질'이란 표지나 표기를 해야 한다. 선원이 방 안에 있는 동안은 입원실 문에도 '주의. 방사성물질'을 게시해야 한다.⁵²⁾

(108) 방문객 방문 장소와 시간을 제한해 일반인 선량이 연간 1 mSv를 초과하지 않고⁵³⁾ 합리적으로 최소가 되게 해야 한다(ICRP 2007a). 방문객은 항상 방문객이 안전하도록 지정한 구역에만 머물러야 한다. 환자 지시서나 간호 지시서에 방문객 시간제한을 명기해야 한다.

(109) 노출지 삼입은 환자 상태를 평가하고 이식 부위를 개방하거나 접근할 수 있게 하는 수술절차를 지원하는 수술실이나 절차실에서 보통 수행된다. 이런 절차 대부분은 선원 배치나 기하배열을 수술 중 검사하도록 촬영시스템(예: 투과촬영, 투시 또는 CT 기기)을 필요로 한다.

(110) 처치실이나 구역의 설비는 필요한 보조용 방과 설비에 근접성, 차폐에 필요한 바닥 공간의 기능적 적합성, 주변 일반구역의 점유도, 필요한 구조물이나 이동형 차폐 하중을 지탱하는 데 요구되는 건축의 구조적 견고성, 실내 출입을 관리하는 기능을 고려하여 설계해야 한다.

(111) 일반적으로 근접치료 절차에는 지정구역을 적용해야 한다. 이식한 환자가 있거나 방사능선원 물품이 있는 모든 방은 관리구역이나 제한구역으로 지정하고 게시해야 한다. 인근 방들은 방사선 탐측 후 방사선안전역의 결정에 따라 사용해야 한다. 환자실은 모범 의료에 부합되게 가능하면 간호사실이나 이동이 많은 복도로부터 멀리 있어야 한다. 이상적으로는 최상층이나 최하층 구석 방이 될 것이다.

(112) 치료 중에는 환자를 독방에 두고, 이식 환자가 있는 방 전체를 관리구역으로 보아

52) <역주> 경고를 위한 표지는 눈에 띄는 색깔(예: 황색 바탕에 적색 글씨)로 하고, 가능하면 방사선 '삼엽표지'를 동반하는 것이 적절하다.

53) <역주> 방문객(문병자)를 '일반인'으로 간주하는 데는 의문이 있다. 일반인이라면 단일 행위(진지 문병)에 대한 선량제약치로 연간 0.1 mSv 정도를 적용해야 한다. 사전에 방사선피폭에 대한 정보를 제공하고 주의사항을 전달한다면 이러한 방문객은 더 이상 타의로 피폭하는 일반인이 아니라 자의로 피폭을 감수하는 사람이므로 일반인 기준을 적용하는 것은 적절하지 않다. 핵의약품 투여 환자 퇴원기준은 사안 당 5 mSv를 적용하고 있음과 대비해 불 필요가 있다.

야 한다.⁵⁴⁾

(113) 개별 치료실들을 병원 전반에 여기저기 두지 말고 한 두 구역에 치료실들을 그룹으로 두는 것이 직무피폭자 방호가 비용효과적이게 할 것이다. 그러나 때로는 이식 환자에게 고품질 의료를 제공하는 목표가 구체적 가료에 따라 특정 층이나 구역에서 이루어지는 것이 최선일 수 있다. 예를 들면 구강, 혀, 목에 이식한 환자는 특별 상처 치료가 필요할 것이어서, 임상 문제에 신속히 대응할 필요성이 다른 간호단위에서는 보통 볼 수 없는 간호기술을 요구할 수 있다(NCRP 2006). 업무량이 많은 부서(예: 부인과 종양학, 이비인후과, 흉부외과)에서는 2~3개 특수시설을 설치할 수 있다.

(114) 건물 구석에 치료실을 두면 종종 지정구역 방의 모든 벽을 차폐할 필요를 면제하는데, 치료실이 1층에 있지 않다면⁵⁵⁾ 특히 그렇다. 최선으로는 막다른 복도 끝 양쪽 이웃 방들을 근접치료 전용으로 지정할 수 있다(NCRP 2006). 그 상하층 방들은 바닥이나 천장 차폐를 필요로 할 수 있고, 민감한 환자(예: 임신 여성이나 아동)의 점유를 피해야 할 수도 있다.

(115) 근접치료 환자를 기존의 차폐되지 않은 병실에 배정하면, 인근 구역 사람들이 연간 1 mSv를 넘는 유효선량을 피폭할 수 있다. 국가마다 지켜야 할 일반구역에서 선량을 제한하는 구체적 법규 요건이 있을 것이다.⁵⁶⁾ 이웃 구역 사람의 피폭을 최소화하기 위한 여러 조치가 가능한데, 이웃 병실을 비우거나 이동형 차폐를 사용하는 등이다. 차폐하지 않은 병실에 대해서는 이식한 때마다 방사선 측정을 수행하여 잠재적 선량이 요건을 만족함을 확인해야 한다. 이웃 방을 비울지, 이동형 차폐를 이용이나 다른 조치가 이웃 구역에서 방사선피폭을 허용 가능한 수준으로 줄일지 대해서는 방사선안전역을 자문해야 한다(NCRP 2006). 차폐되지 않은 병실의 사용은 억제하고 긴급시(피크 점유)에만 인정해야 한다.

(116) 이식 환자 주변에 불필요하게 머무름을 피해 피폭을 줄이는 데 인터콤이나 비디

54) <역주> 독방에 두되 환자와 의료진이 원격으로 교류할 수 있는 오디오, 비디오 시스템을 갖추는 것이 환자 안정은 물론 직무피폭 감축에도 필요하다.

55) <역주> '1층'을 적시한 것은 위층이나 아래층이 없는 방을 의미하는 것으로 이해된다.

56) <역주> 우리 현행규정은 방사선관리구역으로 지정할 기준을 두고 있다. 원자력안전법이 위임한 '방사선안전관리 등의 기술기준에 관한 규칙'(원자력안전위원회 고시 제29호) 제3조는 외부방사선량률이 주 400 μ Sv(0.4 mSv)를 초과할 우려가 있는 구역을 방사선관리구역으로 지정하도록 요구한다. 현재 국내 규정은 '방사선감시구역' 제도는 없으므로 관리구역이 아니면 '일반구역'이 된다. 이때 주 0.4 mSv란 10 μ Sv/h 의미는 아니다. 시간 당 선량률에 선원 노출시간(가동하중)과 관심 장소의 사람 점유도를 반영하여 주간 선량으로 평가한다.

오 감시계통이 유용할 수 있다(Papagiannis와 Venselaar 2014).

(117) 일시 이식을 받은 환자는 환자와 치료실에 대한 방사선 탐측과 이식한 선원, 선원 열, 리본 계수로 모든 선원이 환자로부터 제거되어 숫자가 확인된 후가 아니면 퇴원해서는 안 된다. 이 점검은 선원을 제거한 즉시 수행해야 한다. 선원 계수와 방사선 탐측을 확인한 기록을 보존해야 한다.

(118) 때로는 비방사능이 높은 ^{125}I 씨알이 일시 간질 이식(예: 안과 치료)에 사용된다. ^{125}I 는 낮은 에너지 광자를 방출하기 때문에, 납 박막 차폐, 금속 노출지, 또는 심지어 이식부위를 덮는 조직도 주위선량을 현저히 줄여 담당 의료진이나 일반인의 잠재적 방사선 해독을 줄이거나 배제할 수 있다.

(119) 어떤 기법은 악성 절제 후 강 절제면 resection cavity margin 치료를 위해 풍선 노출지를 사용한다. 일부 뇌종양, 특히 신경아교종 glioma을 위한 치료 방안의 하나는 외부 방사선치료로 하되 ^{125}I 씨알 이식 치료를 추가하기도 한다. 대안인 풍선기법은 18.5 GBq까지의 ^{125}I 방사능으로 표지한 유기물 기반 액체를 종양 절제시 수술강에 미리 배치한 풍선에 설치하는 방법을 쓴다(Dempsey 등 1998). 치료 며칠 후 풍선과 유기액체를 제거한다. 이 치료에서 방사선방호 고려는 방사성의약품 치료에서 전형적으로서 오염 우려와 폐기물 처분을 포함한다. 다른 고려는 터진 풍선 밖으로 누설된 방사성 분자가 풍선 박막을 확산하여 강내로 들어가 탈요드로 방사성요드를 발생하고, 이것이 갑상선으로 이전, 농축될 가능성이다(DeGuzman 등 2003, Strzelczyk와 Safadi 2004). 풍선박막을 확산해 들어간 용액의 일부는 환자 소변으로 가서 오염을 초래한다(Adkinson 등 2008).

(120) 치료실이나 환자 병실은 '주의. 방사성물질'과 '방사선관리구역' 표지나 유사 표지를 게시해야 한다. 나아가 방문자를 위한 정보를 입구에 게시해야 한다. 환자 체내 이식물 중앙으로부터 기준 거리(예: 1 m, 30 cm 및 접촉)에서 선량률, 공기커마울 등을 휴대형 전리함과 같은 적절히 교정된 서베이미터로 측정해야 한다.

(121) 시설의 방호최적화 프로그램과 일관성을 위해 이식 선원의 수명 동안 의료진은 물론 방문객을 포함한 감독을 받지 않는 사람의 총 피폭도 평가해야 한다. 의료진, 간병인 또는 일반인에 대한 선량한도나 제약치를 충족하도록 요구하는 바에 따라 추가적 특별 주의사항을 서면으로 환자차트에 포함해야 한다.

(122) 치료에 관계하지 않는 병원 직원(또는 일반인)의 근접치료 처치실 출입은 관리해

야 한다. 보통 간호사에게 환자차트에서 규정하는 제한의 준수를 확인할 책임이 부여된다(NCRP 2006). 선원의 분실, 이탈, 이식 부위의 유의한 변화 또는 기타 안전을 위협하는 상황을 발견하면 간호사는 방사선안전역이나 방사선종양학자에게 알려야 한다.

(123) 이식 치료 중에는 이탈할 수 있는 선원을 안전하게 담을 수 있는 크기와 차폐능이 있는 용기, 선원이나 선원열 또는 선원이 든 노출지를 원격으로 다룰 수 있는 도구가 치료실에 항상 가용해야 한다.

(124) 환자복, 침대 시트, 식품, 식기류, 쓰레기, 배설물 등은 오염되지 않아야 하지만, 환자복이나 침대 시트, 쓰레기는 탐측으로 이탈 선원 존재 여부를 확인하지 않고는 병실을 나가지 않도록 해야 한다.

(125) 선원을 제거할 때는 이식 노출지나 선원 주변의 수술 드레싱은 이식한 선원을 이탈시키지 않도록 신중하게 제거하고 적절히 훈련된 의료진이 점검해야 한다. 선원은 원격취급 도구로 제거하고 즉시 차폐용기에 담아야 한다. 서면 처방이나 지시서에 기록된 모든 선원이 제거되었는지 확인하기 위해 선원 재고를 관리해야 한다(선원 건전성과 수를 시각으로 확인). 2차로 선원 준비구역에서 개별 선원마다(씨알마다) 계수해야 한다. 선원 저장실은 보안 재고관리와 차폐를 갖춰야 한다. 언제든지 선원 분실이 발견되면 방사선종양학자, 의학물리사 및 방사선안전역에게 즉시 연락하고 관련된 방들을 통제해야 한다.

(126) 환자실로부터 선원 제거를 확인한 후에는 환자, 치료실, 제거한 노출지를 적절한 방사선탐사기(예: GM 탐사기)로 신중히 측정하고 결과를 기록해야 한다.

(127) 선원이 확실히 제거되고 재고가 일치하며 방사선 탐측으로 치료실에 선원이 없음을 확인하기 전에는 치료실을 청소하거나 다른 환자가 사용하게 해서는 안 된다.

5.4.2. 고선량률 및 펄스형 선량률

(128) 원격 후장전 기술을 사용하면 선원 장전 또는 치료 중 이식 환자를 돌보는 의료진의 방사선피폭을 현저히 줄이거나 없앨 수도 있다(Glasgow와 Corrigan 1995, Papagiannis와 Venselaar 2014). 후장전 기술과 관련된 의료진 또는 보조 인력의 방사선피폭을 최소화하는 로봇 후장전 시스템도 여럿 개발되었다. 나아가 후장전 기기 사용은 수동절차보다 환자 치료 역량 증가, 일관되고 재현 가능한 치료 전달 등 여러 실질적 장점을 제공한다. 그러한 후장전 기기가 간질 또는 강내 임상 적용에 사용되고 있다.

(129) 가장 보편적 HDR 근접치료 지시는 자궁경부, 자궁내막, 식도, 유방, 전립선 및 폐의 암과 성인이나 아동의 피부 및 연조직 육종의 치료이다. 일부 대형 시설에서는 수술중 HDR 근접치료도 실시되고 있다.

(130) HDR 근접치료에서는 비방사능이 중요한 선원 선정 기준이 된다. 원격 후장전 기기의 방사선원으로 사용되는 보편적 선원 셋은 ^{60}Co , ^{192}Ir , 그리고 전통적 ^{137}Cs 이다 (IAEA 2005). 현재 후장전에 가장 널리 사용되는 선원은 ^{192}Ir 인데, 그 광자 평균 에너지가 중간이고(~400 keV) 높은 비방사능 때문이다. 그러나 비교적 짧은 반감기는 현저한 약점인데, 선원을 빈번히 교체해야 하므로(보통 연간 3~4회)(ICRP 2005a) 자원과 비용 부담이 있다. 그래서 이제 일부 국가의 여러 기관에서는 반감기가 긴 ^{60}Co 를 사용하고 있다.⁵⁷⁾

(131) 대부분 HDR 시스템은 전형적 방사능 370~500 GBq인 ^{192}Ir 선원 하나를 사용하여 1 cm 거리에서 4 Gy/min 이상(8 Gy/min까지)의 치료선량률을 전달한다. 구동 케이블/강선 끝에 붙인 작은 선원 하나(직경 0.6~1.1 mm, 길이 4~12 mm)가 프로그램된 매 치료위치 또는 '정류소'dwell position에 순차적으로 배치된다. 이 방법은 기술적으로 탄력성을 제공하는데 도관 궤적을 따라 여러 위치에 정류소를 둘 수 있고 매 정지 시간을 개별로 프로그램할 수 있기 때문이다.

(132) HDR의 순간 선량률은 대단히 높아서(1 cm에서 450 Gy/h까지) 이 기법은 잘 구성된 절차와 훈련된 기술진, 포괄적 안전 프로그램, 품질보증 및 비상절차를 요구한다. HDR 근접치료에는 상세한 서면 절차, 점검표, 서면 소통 및 인력 훈련이 특히 긴요하다. 여러 단체가 안전한 치료전달 절차를 개발하고 유지하기 위한 포괄적 프로토콜을 개발했다(Kutchur 등 1994, Nath 등 1997, Kubo 등 1998, Kaulich 등 1999, NCRP 2006).

(133) 모든 원격 후장전 치료에 앞서 24시간 이내에 치료시스템과 부수 안전도구에 대해 표준화 품질보증 시험을 통해 확인해야 한다. 원격 후장전은 반드시 서면 절차에 따라야 하고, 서면 처방이나 처방된 치료절차를 규정하는 치료계획에 따라야 한다.

(134) HDR 치료는 방사선종양학자, 치료기사, 선량계측사, 의학물리사를 포함하는 치료방사선 인력으로 수행해야 한다. 오류로 이어지는 혼동을 피하고 발생하는 오류를 즉시

57) <역주> 환자 치료에는 ^{192}Ir 이나 ^{60}Co 가 상호 경쟁적이다. ^{60}Co 이 선원비용 측면에서는 유리하나 차폐 부담이 증가한다.

발견하여 시정할 수 있도록 관계자는 사용할 그 HDR 원격 후장전 시스템에 적절히 훈련을 받아야 한다.

(135) HDR 시설에는 전용으로 사용할 수 있는 HDR 치료실, 선형가속기실, 기타 방사선치료에 보통 사용되는 CT 스캐너(소위 CT 시뮬레이터)실이 필요하며, 이런 방들은 HDR 사용에 적합한 차폐를 갖춰야 한다(Glasgow와 Corrigan 1995). HDR 기기를 수용하려면 CT실에 벽차폐에 더해 천장이나 바닥에 차폐가 필요할 수 있다. 다양한 치료 지시에서 치료 계획과 검증을 위해 방사선 촬영시스템 이용이 유용하다. 자궁경부암이나 전립선암 근접치료에서처럼 삽입을 수행하기 위해 수술실이나 절차실도 필요하다.

(136) 원격 후장전 근접치료기 사용에서는 선원 재고관리 요구나 날개 선원 분실 우려는 낮다. HDR이나 펄스선량률 pulsed dose rate(PDR) 근접치료는 선원이 하나뿐이고 후장전기 안에 들어있으며 관리구역 안에 시건장치를 갖추고 있으므로 선원 분실 위험은 극히 낮다. 그러나 HDR장치에 사용되는 이동형 선원이 절취되고 소위 '방사능폭탄'에 사용될 잠재성 때문에 HDR 시설설계에 해당 구역의 보안수준을 고도화하는 고려를 포함해야 한다.⁵⁸⁾ 보안시설은 HDR 기기 자체에 손대는 사람의 우발적 피폭을 방지하는 데는 도움이 된다. 필요에 따라 HDR 시설에는 장치 작동열쇠, 시건장치, 카메라 및 무단 손댐 지시를 포함해 보안계획을 개발해야 한다. HDR 장치 제어반 열쇠 사용은 방사선 종양학 직원이 관리해야 하며 훈련되고 지정된 사람만으로 제한해야 한다.

(137) 모든 원격 후장전 시스템의 필수 구성은 방사선원(하나 또는 복수)을 내장하는 차폐격실(또는 금고), 현장 또는 원격 제어반, 선원 구동 및 조종 기전, 선원 안내관, 치료 노출지이다. 원격 후장전기는 프로그램된 치료시간(갭이나 중단을 보정한) 동안 투여하고 나면 자동으로 선원을 회수하는 계시기를 갖고 있다. 또한 방사선원을 전개하기에 앞서 관내강lumen으로 방해 없는 진입을 확인하기 위한, 방사선원을 내장한 와이어와 기계적으로 동등한 무방사능 와이어도 보통 갖추고 있다.

(138) HDR 인프라에 대한 전반적 요건은 IAEA 문서(IAEA 1998,2001)에서 찾을 수 있다.⁵⁹⁾ HDR 시설설계는 (i) 선원이 저장고 밖에 있을 때 사람이 치료실로 들어오면 선원

58) <역주> IAEA 선원보안 규정이 HDR 선원을 범주2에 포함하고 있으나 이 선원에 강력한 보안을 요구하는 것은 과잉일 수 있다. 대부분 HDR 선원인 ¹⁹²Ir은 분말형인 ¹³⁷Cs이나 ⁹⁰Sr과는 달리 작은 금속 알갱이여서 폭발로 방사능을 분산시켜야 하는 방사능폭탄 용도로는 적합하지 않다. 더욱이 선원 방사능이 1 TBq 미만이고 반감기가 74일로 짧은 편이어서 영향의 확대와 장기화를 피하는 테러리즘 관점에서는 매력적이지 않다.

59) <역주> IAEA 2015. Implementation of HDR Brachytherapy in Limited Resource Settings, Human Health Series 30도 유용한 현실적 지침을 제공한다.

을 자동으로 회수하는 문 인터록(치료실 문에 있는 인터록 스위치의 작동으로 선원이 회수됨), (ii) 출입구에 후비 전원을 갖춘⁶⁰⁾ 독립적 방사선감시기, (iii) 적절한 방사선 경고 표지와 방사선원이 노출 중일 때는 항상 켜지는 ‘방사선 노출 중’⁶¹⁾ 지시등, (iv) 치료 중 환자와 시각과 청각으로 교감을 유지하는 계통(예: 텔레비전 감시체계와 양방향 인터콤 시스템), (v) 비상절차를 포함하는 운전원 매뉴얼과 같은 공학적, 행정적 관리를 포함해야 한다.

(139) HDR 기기나 시설설계는 선원 회수실패, 선원과 케이블 분리, 프로그램된 선원 위치로부터 계획하지 않은 이탈을 감지하는 실패검출 논리를 포함해야 한다. 시스템은 문제를 사용자에게 경고하고 계속 치료를 방지해야 한다. HDR 후장전기가 갖춘 오류 감지 및 복구 시스템은 취역 전에 철저히 시험하고 이후 적절한 주기로 시험해야 한다.

(140) HDR 선원 회수실패를 신속히 검출하여 선원을 제어상태로 되돌리기 위한 비상절차를 개발해야 한다. 절차는 방사선탐측기와 선원 안전취급 및 필요시 노출지 제거용 도구의 사용을 포함해야 한다. 장치가 사용 중일 때는 항상 비상대응 도구가 가용해야 하는데, 선원이 차폐된 저장고 위치로 돌아오지 못할 때 선원을 담을 차폐용기도 포함한다.

(141) 치료실 방사선준위를 감시하기 위해 HDR 치료실에는 HDR 기기와 독립적인 방사선감시계통을 설치해야 한다.⁶²⁾ 문에 설치된 감시계통은 주의를 환기하기 위해 시각적, 청각적 경보를 제공해야 한다. 지역감시거나 치료기가 선원회수 실패를 지시하면 책임 있는 의료진은 즉시 대응해야 한다. 후장전기나 부수 안전계통의 오작동은 즉시 해당 절차를 다루는 방사선종양학과와 의학물리사에게 알려야 한다. 비상절차에 대한 추가 고려는 제6장에서 논의한다.

(142) 치료 종료 후에는 선원의 완전 회수를 확인하기 위해 적절히 교정된 방사선탐측기(예: GM 측정기)를 이용해 환자, 치료실, 제거한 노출지, 후장전기 외장에 대해 신중

60) <역주> HDR 장치는 정전에 대비해 비상전원을 내장한다. 이에 추가하여 안전 표준은 HDR치료실은 정전에 대비한 비상조명을 갖출 것을 요구한다. 방사선 감시기를 위해 독립적 후비전원을 보장해야 하는지는 규제입장에 따라 다를 수 있다. 치료실을 위한 무정전 장치(UPS)가 있다면 방사선감시기도 이 전원을 이용할 수 있다.

61) <역주> 원문은 ‘beam on’인데 ‘빔 켜짐’과 같은 표현보다는 ‘방사선 노출 중’이 경고로서는 더 적절할 것 같다.

62) <역주> 표준은 HDR 기기도 선원의 정상 위치를 감지하도록 자체 방사선감시기를 갖추기를 요구한다. 치료시설에는 이 감시기 외에 실내 방사선준위를 감시하는 감시기가 필요하다.

한 방사선탐측을 실시해야 한다. 측정 결과는 환자 치료기록에 기록해야 한다. 방사선탐측이 완료되어 불안전하게 회수된 선원이 없음을 확인하기 전에는 치료실을 청소하거나 다른 환자가 사용하지 않게 해야 한다.

(143) 선원 포장에서부터 선량 전달까지 전체 절차 사슬에서 HDR 사고(사망 1건 포함)가 500 건 이상 보고된 것으로 추산된다(ICRP 2005a).⁶³⁾ 이런 방사선 사건에서 사람 실수가 주된 원인이었다. 작동하는 감시기가 가용하고 의료진이 감시결과에 주의를 기울였다면 많은 사고를 예방할 수 있었다. ICRP 97(2005a)는 구체적으로 그런 오류의 방지와 전반적인 근접치료 방사선방호의 중요한 특성을 다뤘다. 기관들이 안전한 계획 및 치료 전달의 분석과 안전관련 사건을 공유할 목적으로 IAEA의 방사선치료 및 방사성핵종 치료 사건이나 아차사례에 대한 ‘방사선종양학 자발 보고 및 학습 체계’에 참여를 고려해야 한다.

(144) 비록 HDR 절차에서(합당하게 차폐된 시설에서) 사람 피폭은 거의 완전히 배제되지만, 절차실 차폐, 회수 위치에 있는 선원의 상시차폐, 절차 복잡성 증가로 인한 심각한 오류(Thomadsen 등 2003)나 높은 사고피폭 잠재성, 그리고 선원 회수실패와 같은 문제에 관한 요건을 포함해 HDR 후장전에서 고려할 방사선방호가 많이 있다.

(145) HDR 치료에서는 방사선측정기가 높은 방사선장에서 포화되지 않도록 신중하게 측정기를 선정해야 한다. 강한 방사선장에서 오지시가 일어날 수 있다면, 선량을 범위 상위 극단을 감당할 수 있도록 전리함형 탐사기를 사용해야 한다. HDR 치료 개시 전에 방사선측정기의 기능을 점검해야 한다.

(146) PDR기기는 HDR기기와 유사한 설계이지만 방사능은 HDR 근접치료기에 사용되는 것의 1/10 정도이다. PDR 치료는 대형 이식(예: 육종, 두경부암, 부인과 암 등)에 사용된다. 우호적인 방사선생물학을 모사하도록 LDR 치료와 같은 치료시간에 걸쳐 적용한다. 그래서 선원 투여 동안 환자의 입원이 필요하며, 하루 이상 환자가 머물 수 있는 적절히 차폐된 전용 치료실이 필요하다.

(147) PDR기기는 37 GBq ¹⁹²Ir 선원을 사용하며, 1 cm에서 45 Gy/h까지 이르는 높은

63) <역주> 오래전 보고 자료이다. 불행히도 국제적으로 종합된 사건/사고 보고 통계는 거의 없다. Mayo클리닉 보고(Deufel C. et al. 2017. Patient safety is improved with an incident learning system - Clinical evidence in brachytherapy, Radiotherapy and Oncology, 125, 94-100)에 따르면 근접치료에서 절차 당 보고 건수가 0.6 정도에 이른다. 이 건수는 아차사례 뿐 아니라 각종 비정상적 사건까지 포함하므로 반드시 심각한 경우는 아니다.

선량률로 짧은 펄스 지속시간으로, 연속 LDR치료를 모의하도록 보통 한 시간 간격으로 (예: 선원이 매 시간 10분 정도 노출 후 회수됨) HDR 치료를 전달하도록 프로그램된다. 그런 분할을 ‘펄스’라 부르고 후속 펄스 사이 시간 간격(이때는 선원이 안전금고safe⁶⁴)에 머문다)을 ‘침묵quiescent’ 주기라 부른다. $Gy\ m^2\ h^{-1}$ 단위의 매시 평균 흡수선량률과 $Gy\ m^2$ 단위의 총 기준 공기커마가 거의 같으므로 PDR 후장전에서 방사선방호 고려는 LDR 이식에서와 유사하다. 그러나 며칠간 넓은 펄스폭으로 사용하면 치료기간 동안 관리구역 밖 의료진 피폭이 1 mSv를 넘을 수도 있다.⁶⁵) 따라서 PDR 근접치료를 실시하기 전에 사용자는 제안된 펄스 당 정류시간과 누적 정류시간이 적절한 차폐설계 목표를 초과하지 않음을 확인하기 위해 평균적 시간 당, 주간 노출을 평가해야 한다. 그러한 요건을 이행하기 위한 예시적 절차가 발간되어 있다(Williamson과 Li 1995).

(148) PDR 근접치료의 장점은 생물학적 영향 관점에서 LDR 근접치료를 모의하며, 선량 분포를 최적화하고 펄스 사이 선원이 안전금고에 있는 시간을 이용해 의료진이나 방문자가 환자와 접촉할 수 있는 점이다. PDR의 단점은 LDR 치료와 유사한 치료 과정 동안 노출지의 안정성 부족이다. PDR 근접치료에서 가능한 방사선방호 단점은 환자 체내에 선원의 고착이라는 잠재적 방사선 위험인자와 관련된다. LDR 근접치료는 전형적으로 방사능이 낮은 선원을 사용하므로 이탈한 선원을 다룸에 허용 여유를 제공한다. HDR 근접치료에서는 치료 중 방사선 비상에 신속히 대응하기 위해 의학물리사나 다른 의료진이 대기한다. PDR 치료에서는 충분히 훈련받은 사람이 항상 가용할 것을 보장할 필요는 없다. 그러나 현장 의료진에 대해 비상대응 절차에 대한 교육과 계속 훈련은 PDR에서도 핵심 방사선방호 프로그램 요소이다.

(149) HDR 근접치료 시설에는 근접치료 절차로 인해 다른 환자를 포함한 일반인의 연간 유효선량이 1 mSv 이내로 제한하도록 설계한 적절히 차폐된 구역이 필요하다. 인접한 관리구역에 대해서는 직무피폭을 기관의 피폭관리 프로그램이 명시하는 연간 선량값으로 관리하도록 차폐를 설계해야 한다. HDR 시설에서는 이 목적으로 이동형 차폐를 사용하지 말아야 한다.⁶⁶) 제안하거나 기존에 있는 차폐의 적합성은 유자격 전문가가 검

64) <역주> HDR/PDR 기기에 노출 중이 아닐 때 선원이 위치하는 차폐된 공간이다. 준비실이나 치료실에 사용하지 않는 선원을 보관하는 저장고(실제 금고를 사용하기도 하지만)와는 구분하기 위해 ‘안전금고’라 적는다.

65) <역주> 관리구역 정의에 따라 상황이 달라진다. 유럽연합처럼 관리구역을 연간 6 mSv를 초과할 우려가 있는 구역으로 정의하면 관리구역 밖에서 연간 1 mSv를 초과할 수 있다.

66) <역주> 이동형 차폐를 이용한 일시적 요건 충족은 차폐 이동으로 침해될 수 있으므로 고정차폐로 기준을 충족하고 피폭 추가 감축을 위해 적절한 이동 차폐를 이용하는 것이 좋다.

토해야 한다. HDR 치료를 개시하기 전에 적절히 교정된 방사선탐사기⁶⁷⁾로 주변 구역의 선량률을 측정해야 한다(NCRP 2005). 측정 결과가 적용하는 기준 유효선량 값을 초과하면 시설은 치료환자 수를 제한하거나 차폐 보강, 또는 주변 구역의 점유도를 제한하여 기준 초과를 방지해야 한다.

(150) 방사선차폐는 필요한 방호수준을 확보하도록 유자격 전문가가 설계해야 한다. 차폐 수요가 위치 선정이나 건축 형식에 영향을 미치므로 유자격 전문가 자문은 계획단계 초기에 이루어져야 한다. 방사선기기와 그 사용, 건축 유형, 인근 구역의 점유도에 관한 모든 필요 정보를 전문가에게 제공해야 한다.

(151) 이 장에서는 그러한 시설에 관할권이 있는 여러 당국의 규제나 인허가 요건에 대해 요점을 제시하지는 않는다. 그런 문제에 대해서는 유자격 전문가가 충분히 인지하고 있을 것이며 최종 차폐 설계에 고려할 것이다.

(152) 자유공간에서 점선원(근접치료 선원에서 전형적임)으로부터 선량률은 선원으로부터 거리의 제곱에 반비례한다. 선원이 차폐된 안전금고(또는 '안전 저장고')에서 나오면 방사선장은 본질적으로 등방성이다. 따라서 모든 방벽이 선원에 노출되며 치료실 내 환자나 주변 물체에서 산란선에도 노출되므로 본질적으로 2차방벽⁶⁸⁾이 없다.

(153) 노출시간은 선원이 자체차폐 안전금고 밖에 존재하는 총 시간과 관련된다.

(154) 어떤 구역의 점유도는 선원이 자체차폐 안전금고 밖에서 사용될 때 최대로 피폭하는 사람이 그 구역에 있는 평균시간 분율이다. 예를 들면, 대기실은 근무일 동안은 항상 점유될 것이지만 특정 개인이 주어진 대기실에서 연간 50 시간 이상 시간을 보낼 것 같지는 않으므로 점유도는 매우 낮다(NCRP 2005,2006).⁶⁹⁾ 그러나 사람이 계속해서 점유하는 특별한 구역은 점유도가 1에 근접하게 된다. 대부분 경우 최대 피폭자는 보통 시설 피고용인이 될 것이다. 관리구역의 점유도는 보통 1로 부여된다.

(155) 필요한 차폐를 계산할 때 가동하중⁷⁰⁾workload은 보수적으로 평가해야 하며(즉, 안

67) <역주> 원문은 전리함형 측정기로 한정하고 있지만 이 목적 측정에 반드시 전리함형일 당위성은 없다. 전리함이 아니라도 현재 시판되는 여러 모델이 100 mSv/h 이상까지 측정 가능하므로 HDR 선원에 지나치게 근접하지 않으면 측정 범위에 있다. 전리함 탐측기는 낮은 선량률에 민감하지 않고 유지관리도 어렵다.

68) <역주> X선 사용실에서는 X선빔은 창을 통해서만 방출되므로 이에 노출되는 1차방벽과 기타 누설선이나 산란선에만 노출되는 2차방벽을 구분하여 차폐를 설계한다.

69) <역주> NCRP 147에 의하면 대기실 점유도는 1/20이다.

전여유도를 포함), 품질보증, 선원 교정, 기타 측정에 예상되는 선원 노출도 포함해야 한다. 예를 들어 HDR 치료에서 상당히 높은 가동하중은 연간 100명 환자에 대해 환자 당 평균 3~5회 분할로 평가된다(NCRP 2006). 가동하중은 연간 균등하게 배분되는 것으로 가정하는 것이 보통이다.

(156) 차폐설계는 선원 종류와 방사능을 신중히 고려해야 한다. 근접치료를 위한 적절한 차폐 설계에는 반가층이나 1/10가층 표가 유용할 것이다. 예를 들면 표5.1은 전형적 HDR 선원에 대한 해당 정보를 열거한다. 납 밀도는 전형적으로 11.36 g/cm^3 이고 보통 콘크리트 밀도는 2.3 g/cm^3 으로 평가한다.

표5.1. 핵종 ^{60}Co , ^{192}Ir , ^{169}Yb 에 대한 추정 차폐변수(NCRP 1976, Delacroix 등 1998, Granero 등 2006, Lymperopoulou 등 2006, CNSC 2017)

	반가층	1/10가층
납 두께(mm)		
^{60}Co	14	40
^{192}Ir	6	20
^{169}Yb	1.6	5.3
보통콘크리트 두께(cm)		
^{60}Co	8.1	21.1
^{192}Ir	4.2	14.1
^{169}Yb	3.4	11.4

(157) 전용 HDR 치료실에 대해서는 고려하는 구역과 선원의 상대적 위치, 인접 구역의 점유도에 따라 전형적으로 40~60 cm 콘크리트, 5~7 cm 납이 일반구역을 차폐에 필요할 것이다. HDR 치료실의 모든 벽과 천장 및 바닥이 1차방벽이 된다. HDR 기기를 기존의 지하 선형가속기실에 둔다면 아마 추가 차폐가 필요하지 않을 것이다. 원격치료 1차벽 차폐는 HDR 치료에 적합 이상일 것이지만,⁷¹⁾ 2차 산란선 차폐나 출입문은 적절하지 않을 수도 있다. HDR 선원 위치의 영향은 유자격 전문가가 평가해야 한다. 차폐설계 요구가 치료실 내 선원 위치를 제약하는 경우에는, 바닥에 그 위치를 명확히 표시하거나 고정해야 한다. 나아가 그러한 이중용도실은 HDR 절차를 위한 인터록을 갖추도록

70) <역주> 선원이 노출되는 시간(치료시간 뿐 아니라 품질관리, 교정 등에 필요한 시간 포함)으로서 주간 사용시간(보통 분 단위)으로 나타낼 수 있다.

71) <역주> 선형가속기 원격치료실의 1차벽은 보통콘크리트 180~200 cm나 되므로 HDR에 필요한 두께 50~60 cm보다 훨씬 두텁다.

보완해야 하며, HDR 절차 수행 중에는 외부빔 시스템 잠금을 보장하는 방법도 강구해야 한다.

(158) 치료실 차폐는 결합부, 덕트, 배관, 기타 방벽을 지나는 물체에 의해 또는 차폐방벽에 매몰된 암거, 점검구, 기타 구조 요소에 의해 차폐가 훼손되지 않도록 건축해야 한다.

5.4.3. 영구이식

(159) 영구이식에서 의료진이나 일반인 방사선피폭을 최소화하는 목적은 방사성핵종 선정에 크게 경향을 미쳤다. 고전적으로는 수일의 반감기를 가지며 고에너지 감마선을 내는 방사성핵종이 사용되었다. 금 박막관에 봉입한 ^{222}Ra 가스(반감기 3.8일) 다음으로는, ^{198}Au 씨알(반감기 2.7일)이 영구이식에 이용되었다. 선원이 붕괴하여 주위선량률이 용인 가능한 수준까지 감소할 때까지 환자를 계속 관리구역 안에 머물게 했다. 그러한 고전적 이식 유형은 방사선종양학자의 손에 많은 선량을 주었고 입원 병원 사람들에게 고에너지 방사선을 노출했다.

(160) 현재는 영구이식에 수명이 더 길지만 매우 낮은 에너지 광자 방출체(즉, ^{125}I , ^{103}Pd , ^{131}Cs)가 사용된다. 환자 신체의 조직이나 얇은 납 포일이 방사선종양학자의 손이나 손가락 피폭을 제한하는 데 대개 충분하게 되며, 환자를 방사선방호 목적만으로 입원시킬 필요를 없앴다.

(161) 전립선 씨알 이식에서는 전형적으로 초음파, 형광투시 또는 CT 안내 경회음(폐쇄식) 수술절차를 이용하며, 보통 외래 기반 하루 절차로 수행된다.

(162) 여러 형식의 날개 씨알, 씨알열 또는 줄씨알 이식 기기가 씨알 이식에 사용된다. 날개 씨알 적용에서는 10~15 씨알을 사전 충전한 카트리지를 노출지 안에 배치하고, 개별 씨알을 제어된 거리에 사출하여 줄로 세워 이식한다. 약간 뻗뻗한 흡수용합사 물질 안에 내장한 줄 씨알도 가용하다. 전립선 전체에 처방대로 선원 분포를 만들도록 바늘 안에 선원과 여러 길이의 방사능이 없는 간격물을 배치한 선원열을 연결 끈이 있거나 없이 조립할 수도 있다.⁷²⁾

(163) LDR 전립선 이식절차에서 의료진 피폭에 관한 연구는 건 당 전신선량 약 90 μSv , 손에 약 600 μSv 를 받는 것으로 나타났다(Schwartz 등 2003). 형광투시 시간이

72) <역주> 그림2.1 참조.

지배인자였는데, 형광투시 활성화 중에 방사선종양학자의 전신선량은 약 $8 \mu\text{Sv}/\text{min}$, 손 선량은 약 $50 \mu\text{Sv}/\text{min}$ 로 나타났다. 초음파 안내만을 사용한 그룹은 더 낮은 직무피폭이 예상된다.

(164) 씨알 영구이식 중에 고려할 방사선방호 사항이 여럿 있는데, 시술자 손 선량 감축, 선원 재고관리, 전달선량의 큰 오차 방지, 오염되거나 누설되는 씨알 검출, 씨알 취급 후 장전 쟁반의 방사선측정 등이다. 이러한 여러 조치는 근접치료 전반적 품질관리체계의 필수 요소이다(제5.7절 참조).

(165) 사용한 씨알 수 검증은 영구이식에서 공통된 문제로 드러났다(Stutz 등 2003). 치료전 계획부터 이식까지 전체 과정에서 재고관리는 필수이다. 이식절차가 진행되면 이식 팀원 중 한 사람(예: 의학물리사, 전공의 또는 치료기사)이 씨알 수와 방사능을 독립적으로 검증할 수 있다. 선원 수에 차질이 있으면 방사선안전 요원에게 알려 선원 분실에 대비해 방을 검사해야 한다. 검사는 GM측정기나 NaI 섬광측정기와 같은 휴대형 방사선 측정기로 수행할 수 있다. 계속 숫자가 불일치하면 이식 후 또는 퇴원 전 환자를 촬영한 CT 영상이 씨알 수 추가 검증에 활용될 수 있다.

(166) 이식절차 완료 후에는 이식 팀원 한 사람은 환자 신체 표면과 이식물 근사적 중심에서 1m 거리에서 선량률을 측정해야 한다. 이 측정은 교정된 전리함형 방사선탐사기⁷³⁾로 수행해야 한다. 측정결과는 환자차트와 방사선 주의가 더 필요하지 않을 날짜를 보이는 꼬리표나 표지에도 기록해야 한다.

(167) 전형적으로 영구이식은 낮은 에너지 방출 방사성핵종을 사용해 수행되므로, 선원이나 영구이식을 받은 환자로부터 선량률도 역시 낮다(표5.2 참조). 여러 연구자가 환자로부터 선량률 직접 측정치를 보고했다. Michalski 등(2003)은 44 환자 가족 구성원에게 총 선량을 평가했는데, 환자, 배우자, 자녀 및 반려동물에게 선량계를 지급하고 환자가 자주 점유하는 방 넷의 방사선준위를 감시했다. 낮은 준위 피폭이 나타났는데, 예를 들면 ^{125}I 이식에서 배우자의 평균 생애선량은 0.1 mSv 였다. Dauer 등(2010)은 데이터베이스 기반 지침을 개발할 목적으로 전립선 근접치료 이식 후 환자로부터 받는 잠재적 선량을 평가했다. 전형적 ^{125}I 이식 후 동료 작업자나 임신 여성이 아닌 성인(환자와 동침하는 사람까지)도 전혀 주의가 요구되지 않았다. 그들의 선량률 중간값 $5 \mu\text{Sv}/\text{h}$ 로서는, 제안된 주의사항은 예들 들어 환자는 84일 동안 임신한 배우자와는 잠자리를 '접촉하지 말 것'과 42일 동안은 아이를 오랫동안(하루 1~3시간) 무릎에 안지 말 것 정도였

73) <역주> GM이나 반도체검출기를 적용한 현대 방사선탐사기도 믿을만한 측정치를 제공한다. 다만, 비교적 높은 선량률에서 포화되지 않는 모델을 사용하는 것은 중요하다.

다. Kono 등(2011)도 이식환자로부터 선량을 보고했는데, 20, 50, 100 cm에서 일련의 측정으로부터 전립선 근접치료 후 일반인이 환자로부터 받는 선량은 매우 낮다고 결론지었다. 이러한 측정과 평가는 의료진 선량이 매우 낮아서 전신이나 수족에 선량한도 보다 확실히 낮고 환자 위안자나 보호자에 대한 선량제약치보다도 낮을 것임을 보였다.

표5.2. 낮은 선량을 영구이식 환자로부터 직접 측정 선량률*(ICRP 2005b, Dauer 등 2010)

선원과 의료기관	환자 수	전방 $\mu\text{Gy}/\text{h}$ 평균(범위)					측방 $\mu\text{Gy}/\text{h}$ 평균(범위)	
		표면	20 cm	30 cm	50 cm	100 cm	표면	100 cm
^{125}I UW Medicine	19	50 (22-89)				<0.3	0.06	<0.3
^{125}I Leeds	62	26.8 (2-67)			2.6 (0.2-5.1)	0.75 (0-1.6)	1.43 (0.1-17.4)	0.1 (0-0.5)
^{125}I Curie	47	115 (17-350)	22 (4-61)				0.8 (0.2-1.5)	
^{125}I MSKCC	1127	29.7 (1-196)		5 (0.1-32)		<0.9		<0.9
^{103}Pd UW Medicine	19	17 (5-49)				<0.3	0.19	<0.3
^{103}Pd MSKCC	152	10.4 (1-66)		2.1 (0.02-15)		<0.3		<0.3

MSKCC: Memorial Sloan Kettering Cancer Center

* <역주> 선량률이 $\mu\text{Gy}/\text{h}$ 로 주어진 것은 측정량이 공기커마이기 때문이다. 근접치료에 사용되는 감마(X) 선원에 대해서는 보수적으로 공기커마율이 유효선량률과 근사하다고 간주해도 무방하다.

(168) ICRP는 이전에 ICRP 98(2005b)에서 영구이식 후(구체적으로 전립선 근접치료) 환자 퇴원에 관한 방사선방호 권고를 제공한 바 있다. 상세한 추가 정보를 위해서는 독자는 그 간행물을 참조하기 바란다. 영구이식을 받은 환자는 퇴원에 관한 국가 규제요건을 충족할 때까지는 퇴원할 수 없다.

5.4.4. 수술중 근접치료 절차

(169) 바쁜 근접치료 프로그램을 가진 의료기관은 수술중 방사선치료를 위해 차폐된 수술실에서 HDR 기기를 사용할 수 있는데, 이러한 프로그램은 수술과 방사선종양학을 결합한다. 종양을 노출시키고 개방 부위를 통해 한 분할로 선량을 전달한다. 이러한 프로그램은 근접치료를 위한 전용 수술실을 건축하는 데 필요한 재원을 약속할 수 있는 기관에서만 가능하다. 그러한 시설의 독특한 방사선안전 이슈와 수반되는 차폐설계는 문헌에서 논의하고 있다(Anderson 등 1999, Sephton 등 1999, NCRP 2006).

5.4.5. 혈관내 근접치료

(170) 혈관성형 처치 또는 스텐트 설치 후 재협착 방지에 방사선의 잠재적 역할을 근접 치료 기법으로 연구한 바 있다. 전임상 및 임상 연구에서 해당 관상동맥 혈관벽에 선량을 전달하도록 도관기반 방사선원이나 방사성 스텐트를 사용하였다. 사용한 선원은 중간 에너지 감마 방출 선원으로는 ^{192}Ir 이, 베타 방출 선원으로는 $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$, ^{90}Y , ^{32}P 등이었다(Nath 등 1999).

(171) 전형적 혈관내 선량 분할 크기는 관내강 표면이나 외부 탄성층(elastic lamina)에 관상동맥에서는 도관 중심으로부터 2~3 mm 점에서, 말초동맥에서는 도관 중심으로부터 5 mm까지 10~20 Gy였다. 선량률이 자그만치 $4000 \text{ Gy m}^2/\text{h}$ 에 이르는 ^{192}Ir 리본이 사용되었다(Teirstein 등 1997).

(172) 혈관내 근접치료에서는 여러 방사선방호 고려가 필요한데, 적절한 선량률을 내기에 필요한 높은 방사능 준위가 상당한 피폭을 수반하며, 치료 동굴에 도관을 단 환자를 옮길 수 없는 것 등이다.

(173) 혈관내 근접치료를 위해서는 차폐와 주변 구역 선량률의 평가를 수행해야 한다. 평가는 주변 구역의 허용 선량을 초과하지 않고 가능한 절차 수를 고려해야 한다. 구조 차폐를 보완하기 위해 이동형 차폐가 필요할 수 있다(Balter 등 2000, Bohan 등 2000, Folkerts 등 2002).

(174) 혈관내 근접치료 장치에서 밀봉선원의 안전금고로 회수실패가 비정상적 사건 원인으로 식별되었다(NRC 2004). 따라서 비상시를 대비해 추가 차폐용기가 가용해야 한다.

5.4.6. 전자적으로 발생시키는 낮은 에너지 방사선원

(175) 전자적으로 발생시키는 낮은 에너지 방사선원(electronically generated low-energy radiation source: ELS)이란 120 kVp까지 꼭지전압으로 임상표적에 치료 방사선량을 전달하는 X선원을 이용하는 기기를 말한다(Devlin 등 2017).⁷⁴⁾ ELS 장치는 두 범주로 나뉘는데, Grenz선⁷⁵⁾ 피부과치료기의 현대판과, 50 kVp X선을 이용한 강내 근접치료와 유사한 방법으로 치료를 전달하는 장치(전자적 근접치료)이다.

74) <역주> 핵심은 탄소나노튜브를 이용한 직경 수 mm 미니 X선관이 가용해진 것이다. ELS 근접치료에 대한 최근 정보는 Thomadsen 등(2020)을 참조하라.

75) <역주> 10~30 keV 에너지를 갖는 연질 X선을 말한다.

(176) ^{192}Ir HDR 근접치료나 MV 전자빔에 대비한 ELS의 장점은 방출하거나 후속 산란한 에너지가 낮아 방사선차폐 수요가 훨씬 적다는 것이다. 이들 모든 기기가 짧은 선원-표면 거리로 콜리메이션하여 사용할 수 있고, 피부암 치료를 위해 표면 노출지를 사용할 수도 있다. 전자적 근접치료기기는 유방, 질 또는 뇌와 같은 강내치료에도 사용할 수 있다(Bhatnagar 2013, Vaidya 등 2014, Alvarado 등 2015, Ouhib 등 2015, Safigholi 등 2015).

(177) 낮은 에너지 방사선 사용이 ELS가 환자나 의료진에게 위험이 없다는 의미는 아니다. 일부 수술중 ELS 적용은 치료 부위로부터 약 30 cm 정도에서 수술실 의료진에게 2 mSv/h 정도 선량률을 보였다(Mobit 등 2015). 모든 유형 근접치료에서 그러하듯, ELS도 모든 치료팀에게 인력, 기기, 환자 및 사람 안전에 구체적 주의를 포함하는 초기훈련과 계속훈련을 요구한다(Devlin 등 2017).

(178) 미국 의학물리사협회(AAPM) 작업반은 작업반 100의 원칙에 근거하여 전자적 근접치료를 위한 위험분석 기법과 품질관리 프로그램을 개발하였다(Huq 등 2017, Thomadsen 등 2020).

5.4.7. 선택적 내부 방사선치료(SIRT)

(179) SIRT는 간의 암이나 전이암에 방사선치료를 전달하는 기법으로서, 일반적으로 중재방사선의사, 핵의학의사 또는 방사선종양학자가 시술한다. ^{90}Y 표지 미소구를 내장한 바이얼은 적절한 차폐 아래서 포셉으로 취급해야 한다. 높은 에너지 베타 방출 때문에 차폐로는 PMMA처럼 원자번호가 낮은 물질이 가장 좋다. SIRT 미소구 공급자는 의료진, 환자 또는 취급실 오염을 최소화하기 위한 조언과 훈련재료를 제공해야 한다(SIRTEX Medical 2013). 여기에는 준비와 주입을 위한 특수 차폐상자 사용도 포함된다. 나아가 장갑을 이중으로 착용하여 장갑 낀 손으로 외부 장갑을 벗기도록 권고한다. 미소구 이식에 대해서는 공급자가 아크릴 전달상자와 전달도구 세트를 제공한다. 이로써 ^{90}Y 바이얼이나 모든 정지변이나 튜브에 직접 접촉을 예방한다. 표5.3는 단일 SIRT 절차에서 여러 의료진 구성원의 전형적 피폭에 대한 대표적 소견을 보인다. 실제 선량은 사용하는 미소구 유형에 따라 다르다. ICRP는 ICRP 140(2019)에서 SIRT에 관련된 추가 지침을 개발한 바 있다.

(180) SIRT에서 직무피폭에 대해 발표한 논문은 몇몇뿐이다. SIRT절차에서 직무피폭은 비교적 낮은 선량률의 X선과 베타입자 직접 피폭으로 주로 손과 손가락에 발생하지만, 부주의하면 높은 선량률에 노출될 수 있다. 개별 환자 투여량을 준비하는 종사자나 미소

표5.3. SIRT에서 전형적 환자 투여를 준비하는 기사와 약사, 준비된 양을 이식하는 의사에 대해 측정된 환자 당 전형적 선량

피폭자	실용량	선량당량(mSv)		
		몸통	눈	손
약사	H _p (0.07)	0.027	0.026	0.35
	H _p (10)	0.003	0.004	
방재방사선 의사	H _p (0.07)	0.038	0.12	0.32
	H _p (10)	0.004	0.054	
방사선관리자	H _p (0.07)	<0.02	0.04	0.1
	H _p (10)	0.01	0.017	

구를 이식하는 의사의 손 선량에 추가하여, 상당한 잠재적 오염 위험요소가 있다. 선량을 자료를 보면, 5 mL 주사기에 접촉한 피부 등가선량률은 $43.5 \text{ mSv MBq}^{-1} \text{ h}^{-1}$, 1 cm^2 에 $50 \mu\text{L}$ 오염으로부터는 $1.35 \text{ mSv MBq}^{-1} \text{ h}^{-1}$ 이다(Kemerink 등 2012). 이 위험인자를 줄이는 구체적 조언을 ICRP 140(2019)에 주었다.

(181) 방사선방호를 위한 모든 기술적 수단에 추가하여, 절차의 모든 단계를 효율적으로 수행하기 위한 훈련은 직무피폭을 괄목하게 줄인다. Aubert 등(2003)은 ^{90}Y 주입기술 최적화로 말단선량 감축을 내보였는데, 절차 최적화 후 말단선량 감축인자가 10 이상이 었다.

(182) SIRT 후 환자에 대해서는 관찰, 일반 간호 및 입원이 필요하다. McCann 등 (2012)은 143 SIRT 절차(124 절차는 수지구, 19 절차는 유리구)에 근거하여, 1m에서 수지구는 $1.1 \mu\text{Sv/h}$, 유리구는 $2.4 \mu\text{Sv/h}$ 로 보고했다. $2 \text{ GBq } ^{90}\text{Y}$ 이식 6시간 후 (SIRTEX Medical 2013) 여러 거리에서 전형적 선량당량률을 표5.4에 보였다.

5.5. 교육훈련 및 자격증명

(183) ICRP는 ICRP 113(2009)에서 중재방사선 의사, 핵의학 전문가, 의학물리사, 간호사, 방사선기사 등에 대한 최소 수준 훈련에 대해 구체적으로 다룬 바 있다.

표5.4. ^{90}Y 2 GBq 이식 6시간 후 거리별 전형적 주위선량당량률

선원으로부터 거리(m)	주위선량당량률($\mu\text{Sv/h}$)*
0.25	18.8
0.5	9.2
1	1.5
2	0.4
4	<0.1

* <역주> ICRP 95에서 새 실용량으로 '주위선량'을 정의했지만 아직은 기존 주위선량당량률과 병용이 허용됨. 이 표의 자료는 과거 자료이므로 문헌에 주어진 대로 기존 실용량을 적용.

(184) 많은 국가의 법령은 의료피폭에 책임이 있는 사람이 적합한 방사선방호 훈련을 받도록 요구하지만, 일부 국가에서는 훈련체계나 자격증명 기전이 여전히 불충분하다.

(185) ICRP 97(2005a)은 일반적으로 모든 근접치료 시설에 적용할 수 있는 인력요건과 훈련에 대한 명세를 제공했는데 이를 참조해야 한다. 분명히 안전한 근접치료 시설 구축을 위한 주요 전제의 하나는 적절히 훈련된 의료진이다(ICRP 2005a). 최소한 방사선종양학자, 의학물리사, 방사선기사, 간호사 각각 1인을 포함해 다양한 전문성을 가진 팀이 필요하다.

(186) 모든 근접치료 팀 구성원은 그 절차 수행이나 참여를 인가받기 전에 근접치료 절차에 대해 적절한 훈련(필요하면 자격증명까지)을 받아야 한다. 훈련 프로그램은 진입하는 의료진에 대한 초기훈련과 주기적 갱신이나 재훈련을 포함해야 한다.

(187) 방사선방호 구체적 훈련도 실시해야 한다. 훈련 활동은 훈련받은 사람에게 자격을 부여하기 전에 역량을 시험하기 위해 훈련 프로그램에서 습득한 지식의 평가가 따라야 한다. 어떤 의료 전문분야에 방사선방호 자격부여가 요구된다면, 그 사람이 해당 전문성을 수행하기 전에 자격을 획득해야 한다. 일관된 접근을 위해, 그리고 교육훈련을 조장하고 지원하기 위해 과학 및 전문학회는 훈련 과정을 개발하는 데 역할을 해야 한다. 과학 학회는 방사선방호에 관한 재교육 강습 과정을 두어 그 참여가 방사선을 사용하는 전문인을 위해 계속적 전문성 개발을 위한 요건이 되게 해야 한다(ICRP 2009).

(188) 근접치료를 수행하는 시설은 근접치료와 관련된 환자관리에 참여하는 모든 사람에게 구두 및 서면 방사선안전 지침을 제공해야 한다. 주기적 재교육 훈련도 제공해야 한다. 방사선안전 지침은 최소한 근접치료 선원의 크기와 형상, 안전 취급, 선원이 이탈한

사건이 발생한 때 차폐 방법, 환자가 사망하거나 의료 응급사태가 발생한 때 방사선종양 학자와 방사선안전역에게 통보하는 절차를 포함해야 한다.

(189) 방사선촬영 안내 근접치료 절차에 참여하는 모든 의료진은 방사선방호에 관한 일반 지식에 추가하여, 환자 주변 산란방사선준위 분포에 유의하고 여러 인자가 어떻게 선량분포에 영향을 미치는지 이해하며 방호수단(예: 차폐, 납안경, 차폐 커튼이나 가림막)의 효율적 사용에 익숙해야 한다. 이러한 지식은 초기훈련으로 달성하고, 기술발전에 맞춘 계속 교육을 통해 유지하고 갱신해야 한다.

(190) 근접치료는 의료처치이므로 방사선종양학자는 전체 절차에 책임이 있으며, 국가 법령에 따라 적절히 자격을 부여받아야 한다. 방사선종양학자, 중재방사선과의사, 핵의학 의사 또는 종양외과 의사의 구체적 책무는 다음을 포함한다(Kutcher 등 1994):

- 환자 평가
- 환자 선별
- 치료 프로토콜 선정
- 치료 처방
- 노출지 삽입
- 영상 검토
- 종양, 표적 또는 치료체적 선별
- 치료계획 승인
- 노출지 제거
- 종양 반응 및 부작용 평가
- 방사선안전 지침 및 응급절차 이행
- 환자 추적.

(191) 방사선종양학자가 HDR, PDR 또는 LDR 근접치료에 경험이 있더라도 다른 유형 근접치료에 대해서는 추가 훈련이 필요하다(ICRP 2005a). 실습훈련hands-on training이 필수이다.

(192) 근접치료 시설을 지원하는 의학물리사나 방사선방호 전문가는 근접치료 절차에 관계하는 종양학자나 기타 보건 전문가의 훈련자로서 부가적 책임도 있으므로 방사선방호의 최고 수준 훈련을 받아야 한다(ICRP 2009). 의학물리사의 구체적 책무는 적어도 다음을 포함한다:

- 새 기기를 인수하거나 중요한 보수 후 기기의 시험을 포함해 기기 생애 관리
- 선원 교정의 검증

- 필요시 선원 교체 수행
- 치료기 점검: 선원의 위치, 색인, 내장 감마경보 등 확인
- 노출지 배치를 포함한 환자 설정 점검
- 촬영 감독
- 치료계획 및 선량계산
- 방사선 안전 교육 및 비상절차 이행
- 방사선기사가 수행하는 치료 행정의 감독.

(193) 의학물리사는 촬영에 앞서 노출지가 삽입된 후 환자 준비에 참여해야 하는데, 필요에 따라 노출지 내에 X선 표지선을 배치하는 것도 그러한 준비에서 이루어지기 때문이다. 방사선 촬영 각도의 선정, CT나 MRI로 검증할 때는 평면의 선정 역시 필요하다.

(194) HDR 치료에서 의학물리사는 HDR 계획시스템 사용 훈련도 받아야 하며, 노출지 영상 재구성에 완전히 익숙해야 한다. 기기 사용, 보안계통, 비상절차에 대한 훈련도 필수이다. 의학물리사는 방사선방호 기본원칙과 절차에 대해서도 훈련을 받아야 한다.

(195) 개인감시 서비스 전문가는 근접치료나 필요한 형광투시 사용(예: 방사선질, 산란방사선장, 펄스형 방사선)에 적절한 선량계 교정과 비정상적 선량 값의 조사에 대해 백그라운드 지식이 있어야 한다.

(196) 방사선기사가나 근접치료 기사는 보통 다음 업무를 담당한다:

- 노출지와 구체적 보조물품 점검(대안: 간호사)
- 치료기의 일일 점검
- 이식 중 방사선종양학자 보조(대안: 간호사)
- 위치잡기를 위한 영상획득
- 의학물리사 감독 아래 치료계획 수행
- 치료 전달(HDR이나 LDR 후장전 기기에서)
- 제어반에서 매 치료의 감시
- 방사선안전 지침과 비상절차 이행
- 적절한 문서에 치료 기록.

(197) 간호사는 매 절차에서 의사를 보조하는 일을 맡는다. 구체적 책무는 다음을 포함한다.

- 치료실/환자실의 일일 점검
- 일회용품, 부인과용 이식키트 등 물품 준비

- 환자 예약(대안: 기사 또는 다른 의사)
- 환자접수 및 퇴원
- 방사선안전 지시 및 비상절차를 포함한 서면 퇴원지침 이행
- 이식 중 방사선종양학자나 중재방사선의학사의 보조.

(198) 제조사 역할의 중요성이 증가하고 있다(ICRP 2010c). 구축된 안전공학, 신중히 시험한 소프트웨어, 정보가치 있는 경보의 설계, 자체 점검 기능, 자명한 사용자 인터페이스, 사고피폭으로 이어질 수 있는 부당한 사용을 방지하는 내부 안전 인터록 등을 설계할 필요가 있다. 사용자는 물론 설치나 유지 기사에 대해서도 기술이나 기법별 훈련이 중요하다.

5.6. 직무피폭 방호 관련 기록

(199) 보존할 기록은 표준이나 법령 요건으로 규정된다. 직무피폭 기록은 종사자가 직무 피폭 감시 대상인 업무의 특성에 관한 정보를 포함하는데, (중재방사선 의료진의 경우)⁷⁶⁾ 방사선피폭과 관련된 다른 고용주를 위한 일에 관한 정보, 건강진단 결과, 재훈련 과정을 포함한 방사선방호 교육훈련, 비정상 피폭에 대한 조사결과를 포함한 피폭감시 및 선량평가 결과 등이다. 고용주는 의료진에게 각자 자신의 직무피폭 기록에 접근할 수 있게 해야 한다.

(200) 연간 수행 절차 수로서 업무량에 관한 정보는 방호최적화와 비정상적 피폭의 비교나 조사에 유용하다.

5.7. 품질경영체계

(201) 근접치료 절차를 수행하는 모든 시설은 표준 모범관행 부합을 보장하도록 명확히 정의된 목적과 함께 포괄적 품질보증과 품질경영 프로그램quality assurance and quality management program(QAP)을 수립해야 한다. 근접치료에서 QAP는 전체 진료 과정에서 최적 품질 달성에 신뢰를 부여함에 필요한 모든 계획적이고 체계적인 조치를 포괄해야 한다. QAP는 적절한 직무피폭 관리를 보장하도록 최선의 방사선방호 관행을 유지하는

76) <역주> 오용된 것으로서 삭제함이 적절하다.

목표를 포함해야 한다(ICRP 2007, IAEA 2014). 계획피폭상황에 대한 ICRP 권고를 고려하면, 방사선 사용에 관련된 의료진의 능동적 참여를 권장할만하다. 정규적이고 독립적인 감사(대내외적)를 포함해 QAP는 기관 차원에서 이행되는 경영체계의 일부여야 한다.

(202) 근접치료 QAP는 환자 및 의료진 방사선방호 측면과 통상적 임상 측면 모두를 포함한다. QAP는 근접치료 기법에 적용되는 물리적, 임상적, 조직적 측면을 포함한다. 전체 임상 QAP에 대한 세부사항은 이 간행물 범위 밖이므로 독자는 다른 자료(예: IAEA 1998,2001; Kubo 등 1998, NCRP 2006)를 참조할 수 있다.

(203) 대부분 임상 QAP가 갖는 주목적은 치료 투여에 앞서 의사의 서면 지시의 준비, 명확한 환자 식별, 치료 및 관련 계산의 문서화, 각 치료의 서면 지시 준수, 의도하지 않게 발생한 처방과 차이의 식별이다.

(204) 국가 당국이 규정하는 방사선 안전과 방호에 관한 규정의 준수를 보장하기 위해 방사선방호 프로그램을 수립해야 한다(IAEA 2001,2008). 방사선방호 프로그램의 이행을 책임질 유자격 방사선안전역을 식별하여 공식적으로 선임하고, 프로그램을 감독하는 데 충분한 행정적 권한을 서면으로 부여해야 한다. 방사선방호위원회⁷⁷⁾도 설치하되 최소한 허가에서 승인한 각 사용유형마다 사용자, 방사선안전역, 간호부서 대표자, 경영관리측 대표자 각 1인을 포함해야 한다.

(205) 방사선방호 QAP의 기본목적 둘은 주기적으로 환자선량을 평가하는 것과 방사선이 사용되는 근접치료 시설 종사자의 직무피폭 선량을 감시하는 것이다. 특정 의료기관에서 근접치료에서 QAP의 방사선방호 성분은 영상의학, 방사선종양학 및 핵의학 시설에 대한 전반적 QAP의 독립된 부분이어야 한다.

(206) 방사선방호 자문역이나 방사선안전역은 직무피폭 선량 감시에 참여해야 한다. 근접치료 QAP는 갱신이나 주기적 추적을 위해 적어도 매년 검토해야 한다. QAP에 대한 자체감사도 권장한다.

(207) 새로운 근접치료 시설의 설계나 기존 기기의 선정과 향상은 모두 복잡하고 큰 비용이 필요한 공정이다. 이러한 공정의 계획에는 방사선방호를 포함해야 한다. 선임의사, 의학물리사 및 방사선안전역이 계획에 참여해야 한다. 새로운 시설을 사용할 모든 의료

77) <역주> 명칭은 다를 수 있다.

진을 대표하는 의사가 시설의 기기 명세 작성에 참여해야 한다.

(208) 아래에서 QAP가 요구하는 주요 활동에 대해 논의한다.

5.7.1. 선원 취역 - 문지름시험

(209) 방사성물질 포장 운송물은 접수 즉시 물리적 손상이나 방사선준위 증가 여부를 확인해야 한다. 오염 여부 검사를 위해 포장 표면에 대해 문지름시험을 수행한다. 포장 표면과 1 m 거리에서 방사선준위를 측정하여 기록하고, 운송표지 값과 비교한다.⁷⁸⁾ 개별 밀봉선원에 대해 누설이나 오염 확인을 위한 문지름시험을 실시해야 한다. 시험은 새 원원 수령시, 그리고 저장실에 있는 수명이 긴 선원은 6개월마다 실시한다.⁷⁹⁾ 약 200 Bq 유리성 오염이 측정되면 선원에 누설이 있는 것으로 간주한다. 보통 측정은 민감한 우물형 섬광검출기나 액체섬광계수기로 수행한다.⁸⁰⁾ 멸균 상태로 공급되는(보통 멸균된 카트리지 형태) 영구이식용 씨알선원은 이식할 모든 선원을 시험(선량계측이나 문지름시험)하는 것은 현실적이지 않다. 이 경우는 공급시 씨알을 담은 바이얼과 바이얼 개봉 후 그 뚜껑에 대해 시험하도록 권고한다.

5.7.2. 교정사슬

(210) 근접치료 선원은 국가 표준기관에 소급되는 선원 강도 교정을 따른다. 때로는 교정된 동종 선원과 비교를 통해 2차 소급을 수립할 필요도 있다. 측정할 선원 표본 수에 관한 지침은 Butler 등(2006)에서 볼 수 있다.

5.7.3. 교정된 방사능계의 항상성 점검

(211) 교정된 방사능계⁸¹⁾의 항상성 반응은 우물형 전리함인 경우 ¹³⁷Cs(혹은 다른 인정할만한 선원)과 같은 장반감기 선원을 정기적으로 측정하여 점검할 수 있다. 그러한 주

78) <역주> 1 m 거리에서 측정한 선량률(mSv/h로 측정한 값)의 10배를 운송표지의 운송지수(TI)로 기록하도록 규정한다. 근접치료 선원을 운송하는 A형 포장의 경우 표면 선량률은 2 mSv/h 미만이어야 한다.

79) <역주> HDR용 강력한 밀봉선원은 근접 취급의 위험을 고려할 때 직접 문지름시험을 권장하지는 않는다. 처음 수령시에는 운송용기의 선원 출입구 주변이나 선원이 있는 자리에 대한 간접적 문지름시험으로 대체해도 무방하다. 사용 중인 HDR 기기의 경우에도 선원 노출에 대해 문지름시험으로 갈음할 수 있다. 현재 사용하는 ¹⁹²Ir이나 ⁶⁰Co 모두 금속편 선원이므로 선원 자체의 누설 우려는 낮다.

80) <역주> 차폐를 갖춘 GM계수기도 이 목적으로 사용할 수 있다.

81) <역주> 원문은 dosimeter인데 이는 방사선량을 측정하기보다 방사선원의 강도(방사능)를 계량하는 기기로 이해된다. 즉, 여기서 dose란 구체적 방사선량이 아니라 투여량 의미로 보면 된다.

기적 측정은 전반적 계측체계에 대한 양호한 품질보증 점검도 제공한다.

5.7.4. 선원과 노출지의 정기 점검⁸²⁾

(212) 장수명 선원의 기계적 건전성은 육안점검, 문지름시험, 방사능 측정으로 정기적으로 점검해야 한다. 선원 강도와 문지름시험은 주기적 빈도로(가령 반기마다) 수행해야 한다. 모든 노출지는 구조적 건전성을 포함해 집게, 나사, 유지장치가 모두 기능적으로 적합하고 선원 삽입 운반자가 바르게 자리잡는지를 육안검사와 방사선촬영으로 평가하여야 한다.

(213) QAP의 중요 측면 하나는 사람의 역할과 책임을 명시하는 것이다. 전문가 당 절차 수 과다를 피하도록 충분한 의료진과 간호진 및 기술진 지원이 필요하다. 네트워크 전문가(신형 디지털 시스템의 경우), 유지보수 인력 및 의학물리 전문가의 지원도 요구된다. 근접치료 현장에서는 의학물리사의 활발한 활동이 필요하며, 합당한 기기가 구매, 사용 되도록 방사선종양학과 협력해야 한다.

(214) 근접치료에⁸³⁾ 참여할 예정인 신규 의료진을 위한 절차가 마련되어, 그들의 방사선 방호 교육훈련, 이전 선량 이력 및 건강진단 결과의 확보 및 평가 대책, 두 곳 이상에서 일하는 사람일 경우 그 고용주와 정보 공유 대책 등을 확립해야 한다.

(215) 적절한 방사선측정기와 선량계측 기기의 선정을 위한 절차도 있어야 한다. 방사선 방호 프로그램에 규정한 바에 따라 의료진의 전신, 눈 및 손 피폭과 작업장 감시를 포함하는 방사선방호와 건강진단 대책도 필요하다. 납치마, 갑상선 보호대, 보안경 및 천장걸이 차폐, 침상걸이 커튼과 같은 개인 방호장구도 적절히 가용해야 한다.

(216) QAP는 의료진 방사선량 분석도 포함해야 한다. 의료진을 위한 교정된 선량계가 가용해야 한다. 근접치료에 참여하는 사람은 적절한 선량계를 패용하도록 엄격한 정책이 시행되어야 한다. 부가적 전자선량계가 유용한데, 학생이나 경험이 부족한 사람의 방사선방호 훈련에서 특히 유용하다. QAP는 개인선량계의 일상적 사용을 보장하고, 모든 비정상적 선량에 대한 검토를 포함해야 한다. 개인 피폭감시나 작업장 감시 결과는 기록하고 특이한 결과에 대응하여 검토가 따라야 한다. 개인선량 계측 공급자는 공급하는 개인선량계에 대해 선량평가의 인가와 성능을 문서화하고, 관련 정보를 규제가 요구하는 동

82) <역주> 이 소절의 기술 내용은 소제목 “선원과 노출지 정기점검”과 어울리지 않는 부분이 많고, 일부 기술은 근접치료가 아닌 중재방사선 행위에 대한 내용을 잘못 인용한 사례도 보인다. 독자의 양해를 구한다.

83) <역주> 원문은 ‘방사선촬영으로 안내되는 중재술’로 잘못 적고 있어 수정했다.

안 보존해야 한다. 절차에는 조사, 결과의 보고와 기록, 직무 선량의 감사 및 사건/사고의 경우 시정조치를 포함해야 한다.

(217) 의료진의 모든 사고피폭이나 예상하지 않은 사건에 대해 즉각적 보고와 분석은 대단히 중요하다. 그 원인, 기여 인자 및 여건의 식별이 따라야 하고 모두에 대해 시정조치가 있어야 한다. 다른 병원에서 유사한 문제를 피하도록 그러한 상황 대응 후에는 해당 정보를 신속하게 널리 파급해야 한다. 의료기관이 안전 계획, 선량전달 및 치료 개선을 위한 안전 관련 사건과 안전분석 공유를 위해 방사선치료나 방사성핵종 치료 사건 및 아차사례에 관한 IAEA의 '방사선종양학 자발적 보고학습시스템'⁸⁴⁾에 참여를 고려해야 한다.

(218) 천장걸이 차폐와 보안경 사용을 포함해 근접치료와 양립할 수 있고 성공적인 방호장구의 착용에 대한 요건과 지침을 절차가 다뤄야 한다. 절차는 방호복 착용에 대한 감사와 기록을 포함해야 하는데, 감쇠를 고려하기 위해 선량계 읽음에 선량감소인자⁸⁵⁾를 적용할 때는 특히 그러하다.

(219) 근접치료와 중재방사선 의료진의 방사선방호 훈련과 자격부여는 문서화하고 정해진 주기마다, 그리고 중요한 변화가 있을 때마다 재검토해야 한다. 품질보증 체계 운영에 훈련의 포함은 기관 전략의 일부여야 한다. 품질보증 조치와 방사선방호 대책의 전반적 효과를 검토하고, 평가를 위한 책임의 부여를 포함하는 행정절차가 수립되어 품질보증 매뉴얼의 일부가 되게 해야 한다.

(220) 형광투시나 CT 시스템의 경우⁸⁶⁾, 그러한 시스템을 구매하는 의료기관 기술인력 참여 아래 기기를 공급하는 회사 또는 기관 기술진이 수용시험을 수행해야 한다. 여기에는 기기의 방사선 안전특성의 기능성을 결정하기 위한 시험을 포함해야 한다. 임상 사용에 앞선 새로운 기기의 취역은 해당 병원 의료진의 책임이어야 한다.

84) <역주> IAEA가 운영하는 정보체계로서 SAFRON(Safety in Radiation Oncology)를 말한다. 불행히도 이 체계에 보고실적은 저조하다. 규제기관에 노출을 기피하는 현실을 고려하면 자국 시스템에 등록하는 대신 국제 시스템에 등록을 촉진하는 정책을 추진할 수도 있어 보인다.

85) <역주> dose reduction factor. 의료진이 X선이나 낮은 에너지 감마선(예: 씨알선원)에 노출되는 경우 납치마의 방호인자는 10 수준이다. 그러나 HDR이나 PDR에 사용하는 ¹⁹²Ir 감마선의 경우 납치마의 방호효과는 제한적이다. 이 문장 역시 다른 분야 간행물에서 옮겨 적은 탓이다.

86) <역주> 근접치료용 HDR/PDR 기기도 마찬가지다.

(221) 선량계 교정⁸⁷⁾을 포함해 주기적 품질관리는 국제표준, 국가 규제요건, 국가 권고 및 시스템 제조사의 권고를 고려하여 계획해야 한다. 방사선종양학자를 돕기 위해 여기에는 환자선량의 적절한 관리(예: 환자선량 분포, 여러 형광투시 모드 및 CT 스캔 프로토콜에서 선량률)에서 실질적 결과도 포함해야 한다.

(222) 형광투시나 CT 시스템에서, 영상품질과 절차 프로토콜 역시 QAP에 포함되어야 한다. 영상품질은 수용시험이나 항상성 시험에서 시험편으로 측정해야 한다. 디지털 촬영 검출기에서는 요구되는 영상품질 수준을 얻는데 필요한 선량값의 넓은 범위를 선정할 수 있다. 근접치료 계획, 처치 및 추적에서 필요한 영상품질과 선량 사이 적절한 균형을 달성하기 위해 방사선종양학자는 방사선기사, 의학물리사 및 산업기사와 함께 형광투시나 CT 프로토콜을 설정해야 한다.

(223) 사용하는 개별 촬영기술마다 적합한 진단정보를 얻는 데 필요한 선량을 알아야 한다.⁸⁸⁾

(224) 직무피폭 방호는 환자방호와 밀접하게 관계되고, 전반적 QAP는 방사선 기기의 품질관리, 수용시험과 취역, 방사선기기의 완전한 파악, 개인방호장구의 품질관리를 포함해야 한다.⁸⁹⁾

87) <역주> 개인선량계 교정은 계측서비스 제공사 책임이다. ‘선량계’를 외부 치료빔 품질관리를 위한 것으로 보면 이는 이 간행물과는 무관한 내용이다. 이 문항 전체가 그러하다.

88) <역주> 이 문항 역시 다른 의료절차에서 관심사이다.

89) <역주> 원문은 ‘공기커마면적곱 측정기 교정’도 포함하고 있으나 근접치료와 무관하여 삭제했다.

제6장

근접치료에서 비상계획과 대응

6.1. 비상계획과 준비태세 필요성

(225) 근접치료 관련 사고들이 보고되어 있고 그 일부, 특히 HDR 근접치료 관련된 사고는 의료진 안전에 중대한 영향을 미친다(ICRP 2005a). 실로 500건 이상의 HDR 근접치료 사고(1명 사망 포함)가 선원 포장에서부터 선량전달까지 전체 절차사슬을 따라 보고되어 있다. 방사선 사건의 주된 원인은 사람 실수이다. 의료진이 작동하는 감시기기를 사용하고 결과에 주의를 기울이고 신속하고 적절하게 대응했다면, 많은 사고를 예방할 수 있었다.

(226) 그러한 사건은 다음과 같은 다양한 근원이 있다(ICRP 2005a).

- 측정 오류로 인한 잘못된 선원 배치
- 선원 취급과 운송
- 부적절한 차폐
- 선원 위치 부적절(HDR 안전금고, 환자 체내, 이송관 내 선원의 잔류)
- 다른 환자 치료
- 다른 강이나 구멍의 치료
- 선량 처방 또는 전달 오류 및 동일 환자 중복 치료
- 운반용기 밖에 선원 방치
- 운송 중 손상 및 선원 운송포장 조사 미실시
- 근접치료실의 차폐 부족
- HDR 기기의 선원교체 사고
- 케이블 관련 기계적 사건, 노출지 내 꼬임, 선원 고착
- 노출지 탈락
- 치료계획 소프트웨어 오류
- 회수계통 실패
- 근접치료 시스템이나 선원의 적절한 교정과 재교정 미실시.

(227) 사고예방을 위해서는 품질보증 프로그램에 따라 특별히 훈련된 사람들의 협력팀이

필요하다(제5.7절 참조). 유지보수는 QAP의 필수 요소이다. 절차에 대한 외부감사가 건전하고 안전한 관행을 강화하며 잠재적 사고원인을 식별한다. QAP는 사례의 동료평가를 요구한다. 사건/사고는 보고하고 교훈은 다른 사용자와 공유하여 유사한 실수를 예방해야 한다(ICRP 2000c,2005a).

(228) ICRP 97(2005a)는 HDR 근접치료에서 그러한 피폭, 사건, 사고를 상당히 자세히 다룬 바 있으므로 예방 방법론의 식별을 위해 이를 참조해야 한다.

6.2. 치료 전후 비상절차

(229) 비상절차는 개별 근접치료 절차 유형마다 개발해야 한다(IAEA 1998,2001). 현장에 서면 절차서가 가용해야 하며, 필요에 따라 중요한 정보는 치료실과 제어실에 두드러지게 게시해야 한다. 의료진의 비상 준비태세 확립을 위해 이들 절차를 주기적으로 연습해야 한다. 근접치료실, 절차실 또는 수술실에 비상절차를 수행하는 데 필요한 품목이 모든 치료에 앞서 또는 치료 중에 가용해야 한다.

(230) 비상절차를 적용하지 않거나 더욱 나쁘게는 절차가 없으면, 사고로 환자와 의료진이 잠재적으로 받을 수 있는 선량은 매우 높다. 종종 '즉각적(단순히 빠리가 아니라)' 검출과 책임 방사선종양학자, 의학물리사 및 치료기사의 존재를 요구하는데, 특히 초 단위 시간에 환자나 의료진에게 높은 선량이 전달될 수 있는 HDR이나 PDR 근접치료에서는 더욱 그러하다. 환자와 의료진 안전을 위해, 사건을 인식하고 대응하고 해소하는 데 몇 분만 가용할 것이며(Kaulich 등 1999), 고도의 품질보증 표준이 필수적이다. 그러한 경우 의료진은 1~2분 내에 문제를 시정하도록 반응해야 한다. 완화를 위한 이러한 짧은 기회는 필요조건으로 특별 조직과 비상대응 훈련을 요구한다(Kaulich 등 1999). 비상시 최대한 빠른 환자 구조와 의료진 피폭 최소화는 명백한 책임의 정의를 요구한다. 바람직하게는 노출지를 설치하는 의사가 비상대응 의사가 됨이 적절하다(기관 조직체계가 용인한다면). 분명히 잘 훈련된 비상관리가 환자에게는 구멍이 되고 의료진 피폭을 최소화하고 완화하는 데 기여할 수 있다.

(231) HDR에서 가장 심각한 사고의 하나는 1992년 미국에서 항문직장암 치료에서 발생했다(USNRC 1993, ICRP 2005a). 선원의 계획된 회수 단계에서 선원(HDR 192Ir)이 구동 장치에서 분리되어 환자 체내에 남아 있었다. 지역감시기는 실제 방사선을 검출했지만 불운하게도 치료기(조사기)는 선원이 차폐된 것으로 지시했기 때문에 담당의사는 상

충하는 신호를 다뤄야 했다. 나아가 사고 때까지 몇 달 동안 빈번했던 방사선감시기의 고장은 의료진이 오해하여 그 지시를 믿지 않게 만들었다. 결과적으로 치료기의 오지시(‘선원 차폐됨’)를 받아들였고 환자, 의복 및 치료실에 대해 방사선감시기나 탐측기로 후속 점검을 수행하지 않았다. HDR 선원은 환자 체내에 4일간 남아서 총 종양체적 선량이 약 16000 Gy를 전달했다(참고로 처방은 18 Gy에 불과했다). 환자는 4일 후 사망했다. 선원이 든 도관이 환자에게서 제거될 때 궤사조직이 묻어 나왔으나 문제없이 처리되고, 당시 선원을 발견하지 못하고 쓰레기통에 폐기되었다. 5일 후 의료폐기물 처분회사가 쓰레기통을 수거해 소각로로 보냈는데, 여기서 방사선감시기가 선원을 검출했고 반출 병원을 역추적하여 의학물리사에게 알렸다. 이 기간 선원은 환자 몸속과 쓰레기통에 머물렀고 의료진 94명에게 다양한 수준의 외부피폭(대개 수 분간)을 주었다.

(232) 절차에 대한 외부감사는 건전하고 안전한 관행을 강화하며 오류의 잠재적 원인을 식별한다.

6.3. 방사성 LDR 이식 근접치료 환자의 수술이나 사망

(233) LDR 근접치료를 받은 환자에 대해 부득이 수술을 고려한다면, 방사선종양학자, 의학물리사 및 방사선안전역에게 즉시 알려야 한다. 임시 근접치료 이식은 필요한 수술에 앞서 제거해야 한다. 영구이식 환자에 대해서는 방사선종양학팀이 수술팀에게 수술 중 지침을 주어야 한다.

(234) 선원이 체내에 있는 동안 환자가 사망하면 방사선종양학자, 의학물리사 및 방사선 안전역에게 알리고, 이들이 도착하기 전에는 시신을 옮기지 말아야 한다. 부검을 실시해야 한다면, 먼저 선원을 제거해야 한다.

(235) ICRP 98(2005b)는 LDR 영구이식 선원을 함유한 시신의 화장에 관련한 추가 고려사항을 열거하고 있는데, 이식 후 12개월이 경과해야 화장이 허용될 수 있음을 알린다⁹⁰⁾(어떤 국가는 이 지연을 3년으로 규정한다). 그 전에 화장을 고려한다면 특별 조치를 취해야 한다.⁹¹⁾

90) <역주> 당연히 지연기간은 핵종의 반감기와 관련된다. 1년은 반감기 2개월인 125I의 경우이다(즉, 6 반감기 경과로 방사능이 약 1/100로 감소).

91) <역주> 과학적으로는 화장시설이나 주변 주민의 영향이 사소할 수 있더라도 방사선 위험에 대한 오해로 지역에 물의가 될 우려가 크다. 당시 잔류방사능에 따라 대책을 검토하겠지만, 잔류방사능이 많고 사용한 핵종의 반감기가 긴 경우는 영구이식 조직을 절제하여

6.4. 비상과 사고의 예방

(236) 근접치료 절차나 운영 개시와 함께 비상계획을 준비하고 연습해야 한다. 비상절차의 목록(방사선학적 및 의학적)을 근접치료실 내에 눈에 띄게 게시하고 필요한 모든 비상 물품을 두어야 한다. 모든 인원에 대해 훈련을 주기적으로 실시하고 특히 신규 인력이 팀에 참여할 때도 그러하다.

(237) 비상절차를 수행할 책무가 있는 사람은 전 절차 동안 근접치료실에 머물러야 한다. 일부 국가에서는 담당의사와 의학물리사도 남도록 요구한다.

(238) 환자, 일반인 또는 의료진에게 과피폭을 초래할 수 있는 비상이나 사고 예방에 관한 일반 권고는 서면 포괄적 QAP와 품질보증 준수와 같은 여러 고려를 포함한다(제5.7 절 참조). 법규로 반드시 요구하지는 않지만, 방사선안전위원회(그리고 아마도 품질보증 위원회)도 필요할 것이며 규제기관이나 보건당국과 협력해야 한다. 기기 유지보수는 극히 중요하다. 건전하고 안전한 관행을 강화하고 오류의 잠재적 원인을 식별하기 위해 절차에 대한 외부감사를 수행해야 한다. 처방부터 선량전달까지 모든 중요한 절차는 둘째 유사자격자가 점검하고 확인해야 한다.⁹²⁾ 목적은 바른 환자가 바른 부위에 바른 선량을 받음을 보장하는 것이다. 매 사례에 대한 동료검토가 품질을 높인다. 모든 사건/사고는 소관 당국의 요구에 따라 보고해야 한다.

(239) HDR실에서, 선원이 구동 케이블로부터 나와 환자 속 도관에 안착했다면 선원이 도관을 떠나 환자 조직에 들어갈 수 있으므로 환자를 통과하는 끝이 열린채 도관을 제거하지 말아야 한다.⁹³⁾ 의료기관은 환자를 치료하기 전에 그러한 사건에 접근법을 계획하고 비상절차를 연습해야 한다.

(240) 특정 근접치료 기기(예: LDR 또는 HDR)에 경험이 있는 센터에서 훈련은 기기 구매 전에 수행해야 하며 사용할 구체적 기법을 포함해야 한다.

(241) 훈련은 방사선종양학자, 의학물리사, 기사 및 간호사 각 1인이 참여하는 팀 접근을 보장하는 방향이어야 한다. 비상계획은 QAP에 따라 정기적으로 연습해야 한다.

별도로 처리하는 방안이 유력하다. 필요한 기간 임시 매장도 고려할 수 있다.

92) <역주> 고선량을 다루는 치료방사선 절차에서는 치료계획에 대한 다른 전문가 확인을 표준으로 본다.

93) <역주> AAPM은 이런 사고 예방을 위해 끝이 열린 도관 절차를 지양하도록 권고하고 대안 기술을 제시한다.

(242) 선원 운송은 모든 적용 규정을 준수해야 한다. 운송용기는 현장에서 손상을 점검해야 한다. HDR 근접치료 선원에 대해서는 오래된 선원의 제거 및 저장용기로 이송, 적절히 차폐된 안전금고에 새 선원의 설치는 제조사에서 훈련받은 유자격 운전원이 신중히 수행해야 한다.

(243) 소위 ‘오경보’나 인터록 ‘실패’는 심각하게 고려하여 철저히 조사해야 하며, 적절한 조치를 취해야 한다. 그렇게 하지 않으면 의료진이 바른 경보 신호를 무시하게 만든다.

(244) 매 치료 후 휴대형 방사선측정기로 환자에 대한 탐사는 필요하다.

(245) 선원이 고물상에 나타나거나 고철에 포함되는 일을 방지하기 위해 HDR 기기와 선원에 대해서는 시설이나 기기가 퇴역할 때 특별한 주의를 기울여야 한다.

(246) 모든 사고에 대해 즉각적 보고와 분석은 극히 중요하다. 그 다음으로 원인, 기여인자, 조건의 범위 규명이 따라야 하며 이 모두에 대해 시정조치가 필요하다. 그러한 상황에 대응 후에는 다른 의료기관에서 유사한 문제가 재발하는 것을 방지하기 위해 해당 정보를 신속하게 널리 파급해야 한다.

(247) 사건을 예방하기 위해 모든 절차는 위험분석을 수행하고 품질경영 절차를 두어야 한다(Huq 등 2016).

참고문헌

- Adkison, J.B., Thomadsen, B.R., Howard, S.P., 2008. Systemic iodine-125 activity after GliaSite brachytherapy: safety considerations. *Brachytherapy* 7, 43-46.
- Alvarado, M., Gallant, E., Rice, J., et al., 2015. A registry of targeted intraoperative radiation therapy following breast-conserving surgery. *J. Clin. Oncol.* 33, TPS634.
- Anderson, N.E., King, S.H., Miller, K.L., 1999. Variations in dose to the extremities of vascular/interventional radiologists. *Health Phys.* 76, S39 - S40.
- Arai, N., Naito, Y., Watanabe, M., et al., 1992. Activation of lymphokine genes in T cells: role of cis-acting DNA elements that respond to T cell activation signals. *Pharmacol. Ther.* 55, 303-318.
- Arazi, L., Cooks, T., Schmidt, M., et al., 2007. Treatment of solid tumours by interstitial release of recoiling short-lived alpha emitters. *Phys. Med. Biol.* 52, 5025-5042.
- Aronowitz, J.N., 2002. Buried emanation: the development of seeds for permanent implantation. *Brachytherapy* 1, 167-178.
- Aronowitz, J.N., 2012. Whitmore, Henschke, and Hilaris: the reorientation of prostate brachytherapy (1970-1987). *Brachytherapy* 11, 157-162.
- Aubert, B., Guilabert, N., Lamon, A., et al., 2003. Which Protection Against Radiation for New Protocols of Internal Radiotherapy by Yttrium-90? 6th European ALARA Network Workshop, 23-25 October 2002, Madrid, Spain.
- Balter, S., 2001. *Interventional Fluoroscopy: Physics, Technology, Safety.* Wiley-Liss, New York.
- Balter, S., Oetgen, M., Hill, A., et al., 2000. Personnel exposure during gamma endovascular brachytherapy. *Health Phys.* 79, 136-146.
- Balter, S., Lamont, J., 2002. Radiation and the Pregnant Nurse. *Cath Lab Digest.* Available at: <https://www.hmpgloballearningnetwork.com/site/cathlab/articles/Radiation-and-Pregnant-Nurse> (last accessed 21 June 2021).
- Best, P.J., Skelding, K.A., Mehran, R., et al., 2011. SCAI consensus document

- on occupational radiation exposure to the pregnant cardiologist and technical personnel. *EuroIntervention* 6, 866-874.
- Bester, L., Meteling, B., Pocock, N., et al., 2012. Radioembolization versus standard care of hepatic metastases: comparative retrospective cohort study of survival outcomes and adverse events in salvage patients. *J. Vasc. Interv. Radiol.* 23, 96-105.
- Bhatnagar, A., 2013. Nonmelanoma skin cancer treated with electronic brachytherapy: results at 1 year. *Brachytherapy* 12, 134-140.
- Bilski, P., Bordy, J-M., Daures, J., et al., 2011. The new EYE-D dosimeter for measurements of Hp(3) for medical staff. *Radiat. Measur.* 46, 1239-1242.
- Blake, M.E., Oates, M.E., Applegate, K., et al., 2006. Proposed program guidelines for pregnant radiology residents: a project supported by the American Association of Women Radiologists and the Association of Program Directors in Radiology. *Acad. Radiol.* 13, 391-401.
- Bohan, M., Yue, N., Nath, R., 2000. On the need for massive additional shielding of a catheterization laboratory for the implementation of high dose rate ¹⁹²Ir intravascular brachytherapy. *Cardiovasc. Radiat. Med.* 2, 39-41.
- Butler, W.M., Huq, M.S., Li, Z., et al., 2006. Third party brachytherapy seed calibrations and physicist responsibilities. *Med. Phys.* 33, 247-248.
- Camacho, J.C., Moncayo, V., Kokabi, N., et al., 2015. ⁹⁰Y radioembolization: multimodality imaging pattern approach with angiographic correlation for optimised target therapy delivery. *RadioGraphics* 35, 1602-1620.
- Chambers, C.E., Fetterly, K.A., Holzer, R., et al., 2011. Radiation safety program for the cardiac catheterization laboratory. *Catheter. Cardiovasc. Interv.* 77, 546-556.
- Chiriotti, S., Ginjaume, M., Vañó, E., et al., 2011. Performance of several active personal dosimeters in interventional radiology and cardiology. *Radiat. Measur.* 46, 1266-1270.
- Ciraj-Bjelac, O., Rehani, M.M., Minamoto, A., et al., 2012. Radiation-induced eye lens changes and risk for cataract in interventional cardiology. *Cardiology* 123, 168-171.
- Clairand, I., Bordy, J-M., Carinou, E., et al., 2011. Use of active personal dosimeters in interventional radiology and cardiology: tests in laboratory conditions and recommendations - ORAMED project. *Radiat. Meas.* 46, 1252-1257.
- Classic, K.L., Furutani, K.M., Stafford, S.L., et al., 2012. Radiation dose to the

- surgeon during plaque brachytherapy. *Retina* 32, 1900-1905.
- CNSC, 2017. Radionuclide Information Booklet. Canadian Nuclear Safety Commission, Ottawa.
- Cohen, G.N., Munro, J.J., Kirov, A., et al., 2014. 32P brachytherapy conformal source model RIC-100 for high-dose-rate treatment of superficial disease: Monte Carlo calculations, diode measurements, and clinical implementation. *Int. J. Radiat. Oncol. Biol. Phys.* 88, 746-752.
- Cooks, T., Tal, M., Raab, S., et al., 2012. Intratumoral 224Ra-loaded wires spread alpha-emitters inside solid human tumours in athymic mice achieving tumor control. *Anticancer Res.* 32, 5315-5322.
- Dauer, L.T., Kollmeier, M.A., Williamson, M.J., et al., 2010. Less-restrictive, patient-specific radiation safety precautions can be safely prescribed after permanent seed implantation. *Brachytherapy* 9, 101-111.
- Dauer, L.T., Miller, D.L., Schueler, B., et al., 2015. Occupational radiation protection of pregnant or potentially pregnant workers in IR: a joint guideline of the Society of Interventional Radiology and the Cardiovascular and Interventional Radiological Society of Europe. *J. Vasc. Interv. Radiol.* 26, 171-181.
- DeGuzman, A.F., Kearns, W.T., Shaw, E., et al., 2003. Radiation safety issues with high activities of liquid I-125: techniques and experience. *J. Appl. Clin. Med. Phys.* 4, 143-148.
- Delacroix, D., Guerre, J.P., Leblanc, P., et al., 1998. Radionuclide and radiation protection data handbook. *Radiat. Prot. Dosim.* 76, 1-126.
- Dempsey, J.F., Williams, J.A., Stubbs, J.B., et al., 1998. Dosimetric properties of a novel brachytherapy balloon applicator for the treatment of malignant brain-tumor resection cavity margins. *Int. J. Radiat. Oncol. Biol. Phys.* 42, 421-429.
- Dendy, P.P., 2008. Radiation risks in interventional radiology. *Br. J. Radiol.* 81, 1-7.
- Deufel, C.L., Courneyea, L.A., McLemore, L.B., et al., 2015. Experimental and theoretical dosimetry of the RIC-100 phosphorus-32 brachytherapy source for implant geometries encountered in the intraoperative setting. *Brachytherapy* 14, 734-750.
- Devlin, P.M., Gaspar, L.E., Buzurovi, I., et al., 2017. American College of Radiology-American Brachytherapy Society practice parameter for electronically generated low-energy radiation sources. *Brachytherapy* 16, 1083-1090.

- Dewitt, K.D., Hsu, I.C., Speight, J., et al., 2005. 3D inverse treatment planning for the tandem and ovoid applicator in cervical cancer. *Int. J. Radiat. Oncol. Biol. Phys.* 63, 1270-1274.
- Dura'n, A., Hian, S.K., Miller, D.L., et al., 2013. Recommendations for occupational radiation protection in interventional cardiology. *Catheter. Cardio. Interv.* 82, 29-42.
- Faulkner, K., Marshall, N.W., 1993. Personal monitoring of pregnant staff in diagnostic radiology. *J. Radiol. Prot.* 13, 259.
- Folkerts, K.H., Franz, A., Kiefer, A., et al., 2002. Radiation exposure of health personnel and patients in the heart catheterization laboratory during vascular brachytherapy. *Z. Kardiol.* 91, 493-502.
- GEC ESTRO, 2018. The GEC ESTRO Handbook of Brachytherapy, second ed. European Society for Radiotherapy & Oncology, Limbergen, E.V. Available at: <https://www.estro.org/about/governance-organisation/committees-activities/gec-estro-handbook-of-brachytherapy> (last accessed 21 June 2021).
- Glasgow, G.P., Corrigan, K.W., 1995. Radiation design and control features of a hospital room for a low dose rate remote afterloading unit. *Health Phys.* 69, 415-419.
- Granero, D., Perez-Calatayud, J., Ballester, F., et al., 2006. Broad-beam transmission data for new brachytherapy sources, 170Tm and 169Yb. *Radiat. Prot. Dosim.* 118, 11-15.
- Hiles, P.A., Hughes, H., Arthur, D., et al., 2016. Personal Protective Equipment. British Institute of Radiology, London.
- Hilaris, B.S., Whitmore, W.F., Batata, M.A., et al., 1975. Cancer of the prostate. In: Hilaris, B.S. (Ed.), Acton 2nd Edn. Handbook of Interstitial Brachytherapy. Publishing Sciences Group, Massachusetts, 219-234.
- Huq, M.S., Fraass, B.A., Dunscombe, B.A., et al., 2016. The report of Task Group 100 of the AAPM: application of risk analysis methods to radiation therapy quality management. *Med. Phys.* 43, 4209-4262.
- IAEA, 1985. Dose and Volume Specification for Reporting Intracavitary Therapy in Gynecology. ICRU Report 38. International Commission on Radiation Units and Measurements, Bethesda, MD.
- IAEA, 1998. Design and implementation of a radiotherapy programme: Clinical, medical, physics, radiation protection and safety aspects. IAEA-TECDOC-1040. International Atomic Energy Agency, Vienna.
- IAEA, 2001. Implementation of Microsource High Dose Rate (mHDR)

- Brachytherapy in Developing Countries. IAEA-TECDOC-1257. International Atomic Energy Agency, Vienna.
- IAEA, 2002. Calibration of Photon and Beta Ray Sources Used in Brachytherapy. IAEA-TECDOC-1274. International Atomic Energy Agency, Vienna.
- IAEA, 2005. Radiation Oncology Physics: a Handbook for Teachers and Students. International Atomic Energy Agency, Vienna.
- IAEA, 2006. Design of Radiotherapy Facilities. IAEA Safety Series No. 47. International Atomic Energy Agency, Vienna.
- IAEA, 2008. Setting up a Radiotherapy Programme: Clinical, Medical Physics, Radiation Protection and Safety Aspects. STI/PUB/1296. International Atomic Energy Agency, Vienna.
- IAEA, 2014. European Commission, Food and Agriculture Organization of the United Nations, International Atomic Energy Agency, International Labour Organization, OECD Nuclear Energy Agency, Pan American Health Organization, United Nations Environment Programme, World Health Organization. Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards. IAEA Safety Series No. GSR Part 3. International Atomic Energy Agency, Vienna.
- ICRP, 1990. Radiological protection of the worker in medicine and dentistry. ICRP Publication 57. Ann. ICRP 20(3).
- ICRP, 1991. 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 60. Ann. ICRP 21(1-3).
- ICRP, 2000a. Pregnancy and medical radiation. ICRP Publication 84. Ann. ICRP 30(1).
- ICRP, 2000b. Avoidance of radiation injuries from medical interventional procedures. ICRP Publication 85. Ann. ICRP 30(2).
- ICRP, 2001. Prevention of Accidental Exposures to Patients Undergoing Radiation Therapy. ICRP Publication 86. Ann. ICRP 30(3).
- 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, 2011. Statement on Tissue Reactions. International Commission on Radiological Protection, Ottawa.
- ICRP, 2012. ICRP statement on tissue reactions, and early and late effects of

- radiation in normal tissues and organs - threshold doses for tissue reactions in a radiation protection context. ICRP Publication 118. Ann. ICRP 41(1/2).
- ICRP, 2013a. Radiological protection in cardiology. ICRP Publication 120. Ann. ICRP 42(1).
- ICRP, 2013b. Radiological protection in paediatric diagnostic and interventional radiology. ICRP Publication 121. Ann. ICRP 42(2).
- ICRP, 2018. Occupational radiological protection in interventional procedures. ICRP Publication 139. Ann. ICRP 47(2).
- ICRP, 2019. Radiological protection in therapy with radiopharmaceuticals. ICRP Publication 140. Ann. ICRP 48(1).
- ICRP, 2021. Use of dose quantities in radiological protection. ICRP Publication 147. Ann. ICRP 50(1).
- ICRU, 1985. Dose and Volume Specification for Reporting Intracavitary Therapy in Gynecology. ICRU Report 38. International Commission on Radiation Units and Measurements, Bethesda, MD.
- ICRU, 1997. Dose and Volume Specification for Reporting Interstitial Therapy. ICRU Report 58. International Commission on Radiation Units and Measurements, Bethesda, MD.
- ICRU, 2013. Prescribing, Recording, and Reporting Brachytherapy for Cancer of the Cervix: Report 89. International Commission on Radiation Units and Measurements, Bethesda, MD.
- IRPA, 2017. IRPA Guideline Protocol for Eye Dose Monitoring and Eye Protection of Workers. International Radiation Protection Association, St Denis, Cedex. Available at: http://www.sppcr.pt/site/assets/files/1068/irpa_guidance_on_implementation_of_eye_dose_monitoring_-_2017.pdf (last accessed 21 June 2021).
- Jacob, S., Boveda, S., Bar, O., et al., 2012. Interventional cardiologists and risk of radiation-induced cataract: results of a French multicenter observational study. *Int. J. Cardiol.* 167, 1843-1847.
- Kaulich, T.W., Becker, G., Lamprecht, U., et al., 1999. Emergency rescue in accidents with HDR afterloading units. *Strahlenther. Onkol.* 175, 524-529.
- Kemerink, G.J., Vanhavere, F., Barth, I., et al., 2012. Extremity doses of nuclear medicine personnel: a concern. *Eur. J. Nucl. Med. Mol. Imaging* 39, 529-532.
- Kim, K.P., Miller, D.L., Balter, S., et al., 2008. Occupational radiation doses to

- operators performing cardiac catheterization procedures. *Health Phys.* 94, 211-227.
- Kim, K.P., Miller, D.L., 2009. Minimising radiation exposure to physicians performing fluoroscopically guided cardiac catheterisation procedures: a review. *Radiat. Prot. Dosimetry* 133, 227-233.
- Kim, K.P., Miller, D.L., Berrington de Gonzalez, A., et al., 2012. Occupational radiation doses to operators performing fluoroscopically-guided procedures. *Health Phys.* 103, 80-99.
- Kono, Y., Miyamoto, Y., Oohashi, S., et al., 2011. Radiation exposure to general public after permanent brachytherapy for prostate cancer. *Radiat. Prot. Dosimetry* 146, 229-230.
- Korir, G.K., Ochieng, B.O., Wambani, J.S., et al., 2012. Radiation exposure in interventional procedures. *Radiat. Prot. Dosimetry* 152, 339-344.
- Kubo, H.D., Glasgow, G.P., Pethel, T.D., et al., 1998. High dose-rate brachytherapy treatment delivery: report of the AAPM Radiation Therapy Committee Task Group No. 59. *Med. Phys.* 25, 375-403.
- Kutcher, G.J., Coia, L., Gillin, M., et al., 1994. Comprehensive QA for radiation oncology: report of AAPM Radiation Therapy Committee Task Group 40. *Med. Phys.* 21, 581-618.
- Laube, T., Fluhs, D., Kessler, C., et al., 2000. Determination of surgeon's absorbed dose in iodine 125 and ruthenium 106 ophthalmic plaque surgery. *Ophthalmology* 107, 366-368.
- Lessard, E., Pouliot, J., 2001. Inverse planning anatomy-based dose optimization for HDR brachytherapy of the prostate using fast simulated annealing algorithm: a dedicated objective function. *Med. Phys.* 28, 773-779.
- Lie, Ø.Ø., Paulsen, G.U., Wøhni, T., 2008. Assessment of effective dose and dose to the lens of the eye for the interventional cardiologist. *Radiat. Prot. Dosimetry* 132, 313-318.
- Lymperopoulou, G., Papagiannis, P., Sakelliou, L., et al., 2006. Comparison of radiation shielding requirements for HDR brachytherapy using ¹⁶⁹Yb and ¹⁹²Ir sources. *Med. Phys.* 33, 2541-2547.
- Marchese, M.J., Nori, D., Anderson, L.L., et al., 1984. A versatile permanent planar implant technique utilizing iodine-125 seeds imbedded in gelfoam. *Int. J. Radiat. Oncol. Biol. Phys.* 10, 747-751.
- McCann, J.W., Larkin, A.M., Martino, L.J., et al., 2012. Radiation emission from patients treated with selective hepatic radioembolization using yttrium-90

- microspheres: are contact restrictions necessary? *J. Vasc. Interv. Radiol.* 23, 661-667.
- Michalski, J., Mutic, S., Eichling, J., et al., 2003. Radiation exposure to family and household members after prostate brachytherapy. *Int. J. Radiat. Oncol. Biol. Phys.* 56, 764-768.
- Miller, D.L., Vanˆo, E., Bartal, G., et al., 2010. Occupational radiation protection in interventional radiology: a joint guideline of the Cardiovascular and Interventional Radiology Society of Europe and the Society of Interventional Radiology. *Cardiovasc. Intervent. Radiol.* 33, 230-239.
- Mobit, P.N., Rajaguru, P., Brewer, M., et al., 2015. Radiation safety consideration during intraoperative radiation therapy. *Radiat. Prot. Dosimetry* 164, 376-382.
- Nag, S., Beyer, D., Friedland, J., et al., 1999. American Brachytherapy Society (ABS) recommendations for transperineal permanent brachytherapy of prostate cancer. *Int. J. Radiat. Oncol. Biol. Phys.* 44, 789-799.
- Nath, R., Anderson, L.L., Meli, J.A., et al., 1997. Code of practice for brachytherapy physics: report of the AAPM Radiation Therapy Committee Task Group No. 56. American Association of Physicists in Medicine. *Med. Phys.* 24, 1557-1598.
- Nath, R., Amols, H., Coffey, C., et al., 1999. Intravascular brachytherapy physics: report of the AAPM Radiation Therapy Committee Task Group No. 60. *Med. Phys.* 26, 119-152.
- NCRP, 1976. Structural Shielding Design and Evaluation for Medical Use of X Rays and Gamma Rays of Energies up to 10 MeV. NCRP Report No. 049. National Council on Radiation Protection and Measurements, Bethesda, MD.
- NCRP, 2005. Structural Shielding Design and Evaluation for Megavoltage X- and Gamma-ray Radiotherapy Facilities. NCRP Report No. 151. National Council on Radiation Protection and Measurements, Bethesda, MD.
- NCRP, 2006. Management of Radionuclide Therapy Patients. NCRP Report No. 155. National Council on Radiation Protection and Measurements, Bethesda, MD.
- NCRP, 2010. Radiation Dose Management for Fluoroscopically Guided Interventional Medical Procedures. NCRP Report No. 168. National Council on Radiation Protection and Measurements, Bethesda, MD.
- NRC, 2004. U.S. Nuclear Regulatory Commission. Report to Congress on Abnormal Occurrences Fiscal Year (2003): Dissemination of Information, 69

- FR 24688. U.S. Government Printing Office, Washington, D.C.
- Ouhib, Z., Kasper, M., Perez Calatayud, J., et al., 2015. Aspects of dosimetry and clinical practice of skin brachytherapy: the American Brachytherapy Society working group report. *Brachytherapy* 14, 840-858.
- Padovani, R., Le Heron, J., Cruz-Suarez, R., et al., 2011. International project on individual monitoring and radiation exposure levels in interventional cardiology. *Radiat. Prot. Dosimetry* 144, 437-441.
- Papagioannis, P., Venselaar, J., 2014. Radiation protection in brachytherapy. In: Limbergen, E.V., Potter, R., Hoskin, P., Baltas, D. (Eds.), Part 1: The Basics of Brachytherapy in the GEC ESTRO Handbook of Brachytherapy, second ed. European Society for Radiotherapy and Oncology, Brussels.
- Rehani, M.M., Ortiz-Lopez, P., 2006. Radiation effects in fluoroscopically guided cardiac interventions-keeping them under control. *Int. J. Cardiol.* 109, 147-151.
- Rehani, M.M., Vañó, E., Ciraj-Bjelac, O., et al., 2011. Radiation and cataract. *Radiat. Prot. Dosimetry* 147, 300-304.
- Rimpler, A., Barth, I., 2007. Beta radiation exposure of medical staff and implications for extremity dose monitoring. *Radiat. Prot. Dosimetry* 125, 335-339.
- Safigholi, H., Song, W.Y., Meigooni, A.S., 2015. Optimum radiation source for radiation therapy of skin cancer. *J. Appl. Clin. Med. Phys.* 16, 5407.
- Sánchez, R.M., Vañó, E., Fernández, J.M., et al., 2012. Staff doses in interventional radiology: a national survey. *J. Vasc. Interv. Radiol.* 23, 1496-1501.
- Sánchez, R.M., Vañó, E., Fernandez, J.M., et al., 2014. Measurements of eye lens doses in interventional cardiology using OSL and electronic dosimeters. *Radiat. Prot. Dosimetry* 162, 569-576.
- Sauren, L.D., Van Garsse, L., Van Ommen, V., et al., 2011. Occupational radiation dose during transcatheter aortic valve implantation. *Cathet. Cardiovasc. Interv.* 78, 770-776.
- Schiefer, H., von Toggenburg, F., Seelentag, W., et al., 2009. Exposure of treating physician to radiation during prostate brachytherapy using iodine-125 seeds: dose measurements on both hands with thermoluminescence dosimeters. *Strahlenther. Onkol.* 185, 689-695.
- Schwartz, D.J., Davis, B.J., Vetter, R.J., et al., 2003. Radiation exposure to operating room personnel during transperineal interstitial permanent prostate brachytherapy. *Brachytherapy* 2, 98-102.

- Sephton, R., Das, K.R., Coles, J., Toye, W., et al., 1999. Local shielding of high dose rate brachytherapy in an operating theatre. *Australas. Phys. Eng. Sci. Med.* 22, 113-117.
- Sinclair, W.K., 1952. Artificial radioactive sources for interstitial therapy. *Br. J. Radiol.* 25, 417.
- SIRTEX Medical, 2013. SIR-Spheres (Yttrium-90 Resin Microspheres) Available at: <http://www.sirtex.com/media/8163/pi-ec-11.pdf> (last accessed 7 April 2021).
- Strzelczyk, J., Safadi, R., 2004. Radiation Safety Considerations In GliaSite 125I Brain Implant Procedures. *Health Phys.* 86(Suppl 2), S120-S123.
- Stutz, M., Petrikas, J., Radlowsky, M., et al., 2003. Seed loss through the urinary tract after prostate brachytherapy: examining the role of cystoscopy and urine straining post implant. *Med. Phys.* 30, 2695-2698.
- Teirstein, P.S., Massullo, V., Jani, S., et al., 1997. Catheter-based radiotherapy to inhibit restenosis after coronary stenting. *N. Engl. J. Med.* 336, 1697-1703.
- Thomadsen, B.R., Lin, S-W., Laemmrich, P., et al., 2003. Analysis of treatment delivery errors in brachytherapy using formal risk analysis techniques. *Int. J. Radiat. Oncol. Biol. Phys.* 57, 1492-1508.
- Thomadsen, B.R., Rivard, M., Butler, W.M. (Eds.), 2005. *Brachytherapy Physics*, second edition. Medical Physics Publishing, Madison, WI.
- Thomadsen, B.R., Biggs, P.J., Cardarelli, G.A., et al., 2020. Electronic intracavitary brachytherapy quality management based on risk analysis: the report of AAPM TG 182. *Med. Phys.* 47, e65-e91.
- Trout, E.D., 1977. Isodose curves in a phantom due to diagnostic quality x-radiation. *Health Phys.* 33, 359-367.
- Tsapaki, V., Kottou, S., Vañó, E., et al., 2004. Occupational dose constraints in interventional cardiology procedures: the DIMOND approach. *Phys. Med. Biol.* 49, 997-1005.
- UNSCEAR, 1993. *Sources and Effects of Ionizing Radiation*. Report to the General Assembly, with Scientific Annexes. E.94.IX.2. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, New York.
- USNRC, 1993. *Loss of an Iridium-192 Source and Therapy Misadministration at Indiana Regional Cancer Center Indiana, Pennsylvania, on November 16, 1992*. NUREG-1480. US Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC.
- Vaidya, J.S., Wenz, F., Bulsara, M., et al., 2014. Risk-adapted targeted

- intraoperative radiotherapy versus whole-breast radiotherapy for breast cancer: 5-year results for local control and overall survival from the TARGIT: a randomized trial. *Lancet* 383, 603-613.
- Van Haaren, P.M., van't Riet, A., Moerland, M.A., et al., 2011. Dose to fingertips of staff preparing stranded iodine-125 seeds for permanent prostate implants. *Radiat. Prot. Dosimetry* 145, 61-65.
- Vañó, E., González, L., Beneytez, F., et al., 1998. Lens injuries induced by occupational exposure in non-optimised interventional radiology laboratories. *Br. J. Radiol.* 71, 728-733.
- Vañó, E., Kleiman, N.J., Duran, A., et al., 2010. Radiation cataract risk in interventional cardiology personnel. *Radiat. Res.* 174, 490-495.
- Vañó, E., Kleiman, N.J., Duran, A., et al., 2013. Radiation-associated lens opacities in catheterization personnel: results of a survey and direct assessments. *J. Vasc. Interv. Radiol.* 24, 197-204.
- Wakabayashi, M., Osawa, T., Mitsuhashi, H., et al., 1971. High dose rate intracavitary using the RALSTRON. *Nippon Acta Radiol.* 31, 340-378.
- WHO, 2000. Efficacy and Radiation Safety in Interventional Radiology. World Health Organization, Geneva.
- Williamson, J.F., Li, Z., 1995. Monte Carlo aided dosimetry of the microselectron pulsed and high dose-rate ^{192}Ir sources. *Med. Phys.* 22, 809-819.

사 사

ICRP는 ICRP 97(2005a)과 ICRP 98(2005b)에서 근접치료 동안 방사성방호 측면에 대해, ICRP 113(2009)에서 진단과 중재방사선에서 방사선방호 훈련에 대한 상세한 권고를 제공한 바 있다. ICRP는 근접치료와 관련된 직무피폭 방호 중요성에 초점을 맞춘 지침으로 확장할 필요성을 인식했다. 이 일을 완료하기 위해 2012년에 ICRP는 ‘근접치료에서 직무피폭 방호’에 관한 작업그룹 89를 설치하였다. 작업그룹은 제3분과와 제4분과 위원을 포함했다.

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

작업그룹 89 위원(2012~2021)

L. Dauer(공동위원장)	A. Damato (2017-)	R. Pötter (-2017)
W. Small(공동위원장,2017-)	M. Doruff (2017-)	P. Scalliet (2017-)
M. Baeza (-2017)	E. Erickson (-2017)	B. Thomadsen
B.K. Catrin (2017-)	F. Guedea	E. Vañó (-2017)
J-M. Cosset	L. Pinillos-Ashton	

제3분과위 검토위원은 다음과 같다.

S. Sandor	C. Ruebe
-----------	----------

본위원회 검토위원은 다음과 같다.

D.A. Cool	C. Cousins
-----------	------------

편집인

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

H. Fujita (과학서기보 겸 ICRP 연보 부편집인)

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	

기관에도 깊이 감사한다.