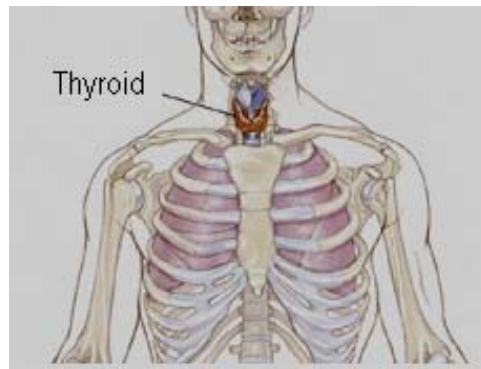




국제방사선방호위원회 간행물 94

# 비밀봉 방사성핵종으로 치료받은 환자의 퇴원

Release of patients  
after therapy with unsealed radionuclides



한양대학교  
방사선안전신기술연구센터

ICRP Publication 94

# 비밀봉 방사성핵종으로 치료받은 환자의 퇴원

Release of patients  
after therapy with unsealed radionuclides

ICRP 승인: 2004년 3월

이 ICRP 간행물의 우리말 번역본은  
ICRP의 허락을 받아 번역하고 ICRP  
정신에 따라 무료로 배포합니다.

국제방사선방호위원회

## 역사 서문

인류가 방사선을 발견한 후 가장 먼저 의료 이용을 시도했고 지금도 가장 널리, 가장 유용하게 이용하고 있다. 방사선의 위험이 많은 사람들의 입에 오르내리지만, 지난 100여 년 동안 방사선으로 인해 목숨을 잃은 사람의 수는 쉽게 헤아릴 수 있는 정도임에 반해 방사선 덕분에 생명을 구한 사람 수는 헤아릴 수 없을 만큼 많다. 분명히 방사선은 항생제와 함께 현대의학을 굴리는 두 바퀴 중 하나이다.

원자력발전소나 방사성물질 이용 과정에 수반되는 방사선피폭은 매우 위험한 것으로 생각하여 민감하게 반응하는 사람들이 환자로서 의료기관에서 피폭하는 방사선량(의료상피폭)에 대해서는 비교적 관대하거나 무관심하기도 하다는 점은 특이하다. 사회가 민감한 원자력 방사선에 대해서는 규제도 대단히 까다롭지만, 의료방사선에 대해서는 많은 부분을 의료인의 전문적 판단에 맡기고 있다.

그러나 국민의 인공방사선 피폭 중 거의 대부분을 차지하는 피폭원은 의료방사선이다. 2006년 현재 가동되는 20기의 원자력발전소를 비롯하여 수많은 병원과 산업 현장에서 직업상 방사선을 취급하는 5만여 명의 방사선작업종사자가 피폭하는 방사선량을 모두 합하더라도 하나의 대형 대학병원에서 환자들이 진료를 위해 피폭하는 방사선량(의도적으로 매우 높은 선량을 부여하는 암치료 환자의 선량을 제외하고)의 20~30% 정도이다. 더욱이 소득 수준의 향상으로 진료의 빈도가 늘어나고 정교한 의료방사선 기술이 추가됨에 따라 환자가 진료과정에서 피폭하는 의료상피폭은 증가하는 추세에 있다.

생명을 위협하는 질병의 진료를 위해 방사선 피폭을 감수하는 것이지만, 의료 목적 달성을 저해하지 않고도 환자의 피폭을 상당히 절감할 수 있는 여지가 있다. 의료상 피폭을 1%만 줄여도 직업상피폭의 총량보다 많은 방사선량을 국민이 덜 받게 된다.

이와 같은 관점에서 환자의 방사선량을 최적화할 필요성에 공감대가 형성되어 있고, 구체적 실천방안도 축적되고 있다. 이러한 실천방안의 일부는 이미 의료현장에서 다양한 형태로 이행되고 있다. 워낙 의료상피폭의 규모가 크기 때문에, 보다 적극적인 환자선량 감축을 유도하기 위한 노력들이 국제방사선방호위원회(ICRP)를 비롯한 여러 국제기구에서 진행되고 있다. 지난 10년여에 ICRP가 발간한 간행물의 거의 절반이 의료상피폭과 관련된 주제이다. 이 번역물은 이러한 ICRP의 노력을 국내에 보다 적극적으로 파급하기 위해 준비된 것이며, 같이 준비한 번역물 시리즈의 하나이다.

이 보고서는 의료상 목적으로 비밀봉 방사성물질을 투여 받은 환자의 퇴원과 관련한 안전문제를 다룬다. 현재의 분위기에서 방사성물질이나 방사선 피폭에 대한 일반 대중의 관심은 첨예하지만, 체내에 방사능이 잔류한다는 이유만으로 환자를 장기간 격리된 상태로 관리하는 것은 환자에게 경제적, 심리적 부담을 증가시키므로 적절한 선에서 타협이 필요하다. 일단 환자가 퇴원하고 나면 방사선 안전에 관련된 일들이

환자 자신 또는 그 보호자에 의존하는 특성이 있으므로 퇴원조치에는 어떤 기준과 조건이 필요하다. 의료 목적으로 사용되는 대부분의 비밀봉 방사성물질은 반감기가 길지 않고 투여 방사능 양도 대체로 낮으나, 갑상선 질환의 치료에 사용되는  $^{131}\text{I}$ 은 투여량이 많고 반감기도 8일로 상대적으로 길어 수십일 동안 유의한 양이 환자 체내에 잔류하므로 특별한 관심의 대상이 된다. 이 특별한 핵종의 경우, 비록 리스크는 의미 있는 수준이 전혀 아니더라도 일반 환경의 지표수에서 극미량의 방사능이 검출될 수 있는 수준이다. 나아가, 9/11 사태 이후 강화된 외국의 입국 보안검색에서 방사성물질 검색기의 경보를 울리게 만드는 일도 가끔 발생하고 있다. 이 번역물이 이 분야 방사선방호 발전에 도움이 되기를 기대한다.

의학기술의 발전은 매우 빠르다. 비록 이 번역작업에서 지난 몇 년 사이에 발간된 ICRP 간행물을 대상으로 선정했지만, 내용 중 일부는 이미 낡은 기술일 지도 모른다. 그러나 번역이라는 제약이 있으므로 새로운 기술이 이미 가용하더라도 원문을 수정하지는 않았다. 다만, 난해하거나 보충 설명이 필요한 곳에는 일부 <역주>를 달았다. 또, 사용한 우리말 의학용어는 전문가 그룹에서도 통일되지 않은 경우도 있어, 때로는 좋은 용어가 선정되지 않았을 수도 있음을 밝혀 둔다. 영문 용어의 병기가 바람직한 곳에는 작은 글씨로 병기했다. ‘진단방사선의학diagnostic radiology’에 대해 국내 전문 단체는 방사선을 사용하지 않는 수단들의 신장과 함께 ‘영상의학’으로 변경했지만 이 번역물 시리즈에서는 전통적인 표현을 사용했다. 이 밖에도 비슷한 경우들이 있다.

2006년 4월, 이 간행물 번역 인쇄본의 국내 보급은 물론 웹을 통한 전자문서 파급까지 ICRP의 승인을 받았다. ICRP의 정신에 따라 번역물은 무료로 제공된다. ICRP는 종종 매우 엄밀한 표현을 갖는 간행물을 다른 언어로 옮기는 일의 어려움을 고려하여 번역의 품질에 유념하고 있다. 역자 나름대로는 원문의 의미를 손상하지 않기 위해 노력했지만 미진한 부분이 있을 것으로 본다. 그러므로 용어를 포함하여 수정이 필요한 내용을 발견한 독자는 적극적 피드백을 통해 적어도 전자문서가 계속 개선될 수 있도록 도움을 주기 바란다. 전자문서는 한양대학교 방사선안전기술연구센터(iTRS) 홈페이지(<http://itrs.hanyang.ac.kr>)를 포함한 관련 전문단체의 웹에 게시할 것이다.

끝으로 이 번역물의 보급을 승인해 준 ICRP와 소요 비용을 지원한 한국과학재단에 감사드리고, 번역 작업에 동참해 준 박상현, 권정완, 박동욱 등 한양대학교 방사선안전연구실 학생들의 노고에 감사한다.

2006년 5월

이 재기

## 객원 편집기

방사성물질은 100년 이상 의료분야에서 사용되어 왔다. 오늘날 의학적 방사선 이용은 가장 큰 인공 방사선원이며 점점 증가하고 있다. 핵의학은 진단과 치료분야에서 점점 중요해졌고, 100종에 가까운 절차들이 인체 내 거의 모든 중요 기관계통의 정보를 제공하고 있다.

유엔 방사선영향과학위원회(UNSCEAR)는 전 세계적으로 방사성의약품을 이용한 3천만 건 이상의 핵의학 진단절차와 40만 건에 가까운 치료절차가 매년 실시되고 있다고 추산했다(UNSCEAR, 2000). 방사성 옥소는 1940년대에 소개되었는데, 다른 많은 방사성의약품들이 핵의학에서 이용되고 있지만  $^{131}\text{I}$ 은 여전히 가장 중요한 방사성핵종이다.

비밀봉 방사성핵종 사용은 환자뿐만 아니라 다른 사람들에게도 피폭을 야기할 수 있어서 그런 피폭에 대한 공중의 구성원, 친척 및 간병인의 방사선방호에 관한 지침이 필요하다. 지금까지 국제방사선방호위원회(ICRP)는 비밀봉 방사성핵종으로 치료받은 환자를 퇴원 조치함에 따라야 할 기준, 또는 환자를 입원조치해야 할 방사능 준위에 관한 권고를 제공하지 않았다. 대신 ICRP는 대중에 대해서는 1mSv/y 선량한도에, 친척, 방문객, 간병인에 대해서는 사건 당 5mSv 선량 제약에 의지해왔다(ICRP, 1991, 1996). 이러한 권고가 여러 나라에서 다르게 해석되어왔고, 종종 선량제약도 엄격한 연간 선량한도로 부적절하게 해석되어 왔다.

환자의 입원이나 퇴원에 관한 결정은 개인별로 결정되어야 하고, 환자의 잔여 방사능, 환자의 희망, 직업상피폭 및 일반인피폭, 가정상황, 비용, 환경적인 측면과 같은 인자들이 고려되어야만 한다. 제3분과위원회는 1999년 이 주제를 검토하기 위한 작업반을 발족시켰다. 이 보고서는 ICRP가 방사선방호에 관한 차기 권고를 구성함에 참고하도록 제3분과위원회가 마련한 문서 세트 중 하나이다.

이 보고서는 진단과 치료 절차를 모두 포함하지만  $^{131}\text{I}$ 에 초점이 맞추어져 있는데, 이 핵종이 비밀봉 방사성핵종에 의한 치료에서 친척이나 의료진에게 주된 피폭원이다. 진단절차 후에는 일반인을 위한 주의가 거의 필요하지 않지만, 어떤 치료절차들 후에는 일반인이나 친척에 대한 선량을 제한할 필요가 있을 수 있다.

ICRP는 2004년 4월 비엔나 회의에서 작업반의 보고서와 그 권고들을 채택했다.

방사선 피폭으로 인한 갑상선암은 태아, 유아, 아동에게 있어 유의한 위협으로 나타난다. 그 때문에 이들 그룹의 피폭을 예방하기 위한 특별한 노력이 경주되어야 한다.

방사성옥소 치료를 받은 환자로부터 다른 사람이 받는 선량은 주로 외부피폭

의 결과이다. 기타 일반적으로 사용되는 치료용 비밀봉 방사성핵종에 의한 선량은 고려하는 방사성핵종이나 환경 피폭경로에 관계없이 일반인 선량한도나 간병인에 대한 선량제약보다 충분히 작다.

제3분과위원회의 이 보고서는 환자의 입원 또는 퇴원 조치에 대해 가치 있는 지침을 제공한다. 입원하고 있으면 일반인이나 친척의 피폭을 줄일 수 있지만 의료진 피폭은 증가할 것이고, 분석과 정당화가 필요한 상당한 비용을 초래할 것이다. 방사성옥소 치료 후 이동하는 환자도 이동시간이 수 시간으로 제한된다면 다른 승객들에게 미치는 피해는 거의 없어, 환자 퇴원에 따른 제한은 유아나 아동에게 초점이 맞추어져 있다. 이제 ICRP는 유아나 아동 그리고 임의 방문자에 대해 사건 당 5mSv 선량제약보다 1mSv/y 선량한도를 권고한다.

많은 방사성의약품들은 모유를 통해 아이에게 전달될 수 있다. ICRP는 대부분의 핵의학 치료 후에는 최소 단기간이나 모유수유를 쉬고, 방사성옥소 치료 후에는 완전히 모유수유를 중지할 것을 권고한다. 그렇게 하지 않으면 방사성옥소가 영구적 갑상선항진증을 야기하거나 유아 갑상선 암의 위험을 증가시킬 수 있다.

여러 연구에 의하면 환자 소변에 접촉하는 것을 제외하면 방사성옥소에 의한 오염의 위험이 무시할 수는 없지만 대체적으로 낮다는 것을 보여주고 있다. 이 보고서는 적절히 조절하면 오히려 소변저장 없이 환자의 배설물을 하수 처리하는 것이 직업상피폭과 일반인피폭 모두의 선량한도를 충족하고 남음을 보여준다. 방사성옥소로 치료받은 환자의 소변을 모아두는 것은 거의 이득이 없는 것으로 보인다. 현대 하수설비로 방출된 방사성핵종들은 하수계통 근로자나 대중의 피폭을 야기하지만 그 선량은 일반인 선량한도보다 매우 낮다.

ICRP는 높은 방사능의 방사성의약품으로 치료받은 환자들은 입원시켜야 한다거나 소변을 저장해야 한다고 명확하게 제시하지는 않는다. 대신, ICRP는 일반인의 선량한도와 타인에 대한 선량제약이 준수되어야 한다고 권고한다. 다음으로 최적화를 수행해야 한다. 핵의학 치료를 받은 환자의 퇴원에 관해서 최적화와 필요한 행동제약에 미치는 최적화의 영향은 개개인에 따라 다를 수 있다.

최근의 검출기기는 고도로 민감하여 건강에 고려되어야 할 수치보다 훨씬 아래 수준에서도 방사선을 검출 할 수 있다. 잔류 방사능은 여러 날 혹은 여러 주 동안 검출 될 수 있고, 방사성옥소 치료를 받은 환자는 이후 여러 주 동안 검출기에 적발될 것이다. 그런 검출기들을 다루는 인원은 핵의학 환자들을 식별하고 다루는 특별한 훈련을 받아야 한다. 의사들은 환자가 받아온 의학적 치료들에 관한 내용의 안내카드를 환자에게 제공하지만 이것이 보안담당자에게 인정되지 않을 수도 있다. 이러한 불편을 피하려면 환자들이 주요 공공장소를 다니지 말라고 제안하는 것이 가장 좋을 지도 모른다.

제3분과위원회의 이 보고서는 비밀봉 방사성의약품으로 치료받은 환자의 퇴원에 관하여 명확하게 권고하고 있다. 또한 치료준위 비밀봉 방사성핵종 투여 후 환자 퇴원에 관한 원칙을 제공하고 있다.

Las-Erik Holm(제1분과위원장, 2006년 현재 ICRP 위원장)

## 서 문

국제방사선방호위원회(ICRP)는 수년에 걸쳐 의학에서 방사선방호와 안전에 관한 조언을 제공하는 많은 보고서들을 발행해왔다. 간행물 73(ICRP, 1996)은 이 분야의 일반적인 개관이다. 이들 보고서는 방사선방호의 일반 원칙을 요약하고, 의약과 의생명연구 분야에서 전리방사선의 다양한 이용에 이러한 원칙을 적용함에 관한 조언을 제공하고 있다.

이들 보고서의 대부분은 일반사항에 관한 것이어서 ICRP는 어려움이 발견되는 몇몇 특정 상황들에 접근하고자 한다. 문제가 되는 영역에 관한 보고서는 일상 업무에서 직접적으로 관련된 사람들의 접근이 용이한 방향으로 기술되고, 또 그 보고서가 널리 파급되도록 노력을 경주하는 것이 바람직하다.

이 방향으로 첫발은 1997년 9월 영국 옥스퍼드에서 열린 ICRP 회의에서 채택되었다. 당시, 제3분과위원회의 요청에 따라 ICRP는 의료방사선 방호에 관한 문제 주제에 관한 보고서를 발간하기 위한 여러 작업그룹을 설치하였다.

그 보고서들의 일부는 이미 간행물 84~87, 93으로 발간되었다. 이 보고서는 이러한 간명한 집중문서 시리즈의 일환이다. 이 밖에도 여러 조언 보고서들이 준비 중에 있다.

비밀봉 방사성핵종을 이용하여 치료받은 환자의 퇴원에 관한 이 보고서를 기안한 작업그룹은 1999년 9월 러시아 연방, St. Petersburg ICRP회의에서 발족되었다. 작업그룹에 위임사항은 다음과 같다.

- (i) 친척과 중요한 상황에 대한 선량제약을 검토한다.
- (ii) 현재의 적용과 선량을 선량률과 견주어 검토한다.
- (iii) 상충되는 접근의 사용 중요성 및 선량에 대비한 비용을 분석한다.
- (iv) 방사선원인 환자에 의존하는 아동에 대해 일반인 선량한도 적용을 고려한다.
- (v) 사망, 부검, 화장 및 매장에 관한 권고를 고려한다.
- (vi) 여러 나라의 상이한 접근방법이 각기 다른 현실적 해결안을 필요로 할 수 있다는 것을 고려하여, 여러 나라에서 다른 유형의 치료에 대해 쉽게 적용 가능한 권고를 제공한다.
- (vii) 레늄(Re), 사마륨(Sm), 인(P), 이트륨(Y)을 포함하는 모든 해당 선원을 고려한다.

2000년 10월 미국 Bethesda(MD)에서 열린 ICRP 회의에서 위임사항을 수정하여, 저변의 이론적 근거 확장, 환경 피폭경로에 대한 논의, 대안 접근의 비용과 이익에 관한 논의, 그리고 관련된 윤리적 문제에 관한 검토를 포함시켰다.



작업그룹 위원은 다음과 같다.

L.K. Harding(그룹장)	A. Aarkrog	D. Ash
J.-M. Cosset	S. Ebdon-Jackson	Y. Sasaki
B. Westerholm		

객원위원은 다음과 같다.

K. Endo	A. Martinez	K. Parthasarathy
---------	-------------	------------------

이 보고서 준비기간 동안 제3분과위원회 위원은 다음과 같다.

F.A. Mettler, Jr. (위원장)	J.-M. Cosset	C. Cousins
M.J. Guiberteau	I. Gusev	L.K. Harding(간사)
M. Hiraoka	J. Liniecki (부위원장)	S. Mattsson
P. Ortiz-Lopez	L.V. Pinillos-Ashton	M.M. Rehani
H. Ringertz	M. Rosenstein	C. Sharp
E. Vano	W. Yin	

이 보고서는 위에 기술된 목적에 도움이 될 것을 목표로 한다. 이러한 목적에 가능한 부합하기 위해서 보고서 형식을 ICRP 연보와 같은 ICRP 간행물들의 일반적 형식과 몇 가지 면에서 달리했다.

보고서는 2004년 3월 우편 투표로 ICRP의 출판 승인을 받았다.

# 목 차

역자 서문 .....	i
객원 편집기 .....	iii
서 문 .....	vi
비밀봉 방사성핵종으로 치료받은 환자의 퇴원 .....	1
요 점 .....	3
1. 서 론 .....	5
2. 보고서의 목적 .....	6
3. 핵의학 절차의 유형과 빈도 .....	7
3.1. 갑상선항진 치료 .....	8
3.2. 갑상선암 치료 .....	9
3.3. 뼈전이 치료 .....	9
3.4. 강내 치료 .....	9
3.5. 진성 적혈구증다증 치료 .....	10
3.6. 동맥관내 치료 .....	10
3.7. 방사선면역치료법 .....	10
4. 치료용 방사선의약품 사용 후의 방사선방호 .....	11
5. 선량한도와 선량제약에 관한 최근의 국제 권고 .....	13
6. I-131의 주요 피폭경로 .....	16
6.1. 총론 .....	16
6.2. 환자로부터 외부선량률 .....	18
6.3. 다른 사람의 오염 .....	20
7. 친척, 간병인 및 일반인에 대한 I-131 피폭 위험의 크기와 특성 .....	24
8. 방사성옥소의 환경 경로 .....	28
9. 비밀봉 방사성핵종에 의한 치료에서 방사성폐기물의 처분 .....	31
9.1. 일반사항 .....	31
9.2. 붕괴를 위한 억류 .....	32
9.3. 하수, 오니 및 소각 .....	33
9.4. 매립식처리 .....	36
10. 입원과 퇴원의 결정 .....	38
10.1. 일반 .....	39
10.2. 의료진의 직업상 선량 .....	42
10.3. 입원의 심리적 비용 .....	43

10.4. 입원의 편의 분석 .....	44
10.5. 환자 여행으로 타인의 선량 .....	45
10.6. 국경, 공항 등의 방사선 검출기 .....	46
10.7. 가정환경에서 피폭 .....	47
<b>11. 퇴원 기준의 국제 또는 국가 지침 .....</b>	<b>53</b>
<b>12. 항체 치료 .....</b>	<b>59</b>
<b>13. 기타 문제 .....</b>	<b>60</b>
13.1. 기록 .....	60
13.2. 죽음, 검시, 매장 및 화장 .....	60
13.3. 모유수유 .....	63
13.4. 임신 여성 .....	64
13.5. 방사성핵종 치료 후 뒤이은 임신 .....	66
<b>부록 A. 갑상선항진 환자를 위한 정보쪽지 예 .....</b>	<b>69</b>
<b>부록 B. 치료용 방사성옥소 투여 후 방사선방호를 위한 지침의 예시 .....</b>	<b>71</b>
<b>부록 C. 방사성핵종 치료환자 카드의 예시 .....</b>	<b>75</b>
<b>참고문헌 .....</b>	<b>77</b>

# 비밀봉 방사성핵종으로 치료받은 환자의 퇴원

## ICRP 간행물 94

2004년 3월 위원회 채택

**개요**-비밀봉 방사성핵종을 이용한 진단 절차에서는 거의 그런 경우가 없으나 일부 치료 핵의학절차를 거친 뒤에는 다른 사람에게 주는 선량을 제한하기 위한 주의가 필요할 수 있다.  $^{131}\text{I}$ 이 의료진, 대중, 간병인, 또는 친척들에게 가장 많은 선량을 야기한다. 치료에 사용되는 다른 방사성핵종들은 보통 위험이 덜한 단순 베타방출체(예를 들면  $^{32}\text{P}$ ,  $^{89}\text{Sr}$ ,  $^{90}\text{Y}$ )이다. 환자가 대중과 의료진에 주는 피폭에는 선량한도가 적용된다. 이전에 ICRP는 집에서 친척, 방문자, 간병인에게 주는 선량으로 사건 당 수 mSv를 한도라기보다 최적화를 위한 선원중심 선량제약으로 적용할 것을 권고했다. 이 보고서는 직접적인 간호나 돌보기에 종사하지 않는 방문객뿐만 아니라 유아나 아동도 공중의 구성원으로 간주할 것을 권고한다.

다른 사람에게 주는 피폭의 모드는 외부피폭과 오염이나 환경경로를 통한 내부피폭이 있다. 환자로부터 성인이 받는 선량은 주로 외부피폭에 기인한다. 환자의 침에 의한 유아나 아동의 오염은 갑상선에 유의한 선량을 야기할 수 있다. 임신여성이나 아동의 오염을 피하는 것이 중요하다. 방사성옥소 치료 후 어머니는 모유수유를 즉시 중단해야 한다. 비밀봉 방사성핵종을 이용한 많은 종류의 치료가 임신여성에게는 금기이다. 여성은 방사성동위원소 치료 후 얼마간 임신을 해서는 안 된다. 핵의학 치료 환자의 배설물을 통한 환경방출의 대부분을  $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 이 차지하지만 짧은 반감기 덕분에 중요성은 낮다. 두 번째로 많이 방출되는  $^{131}\text{I}$ 은 의료이용에 따라 환경에서 검출되지만 측정 가능한 환경영향은 없다. 치료 환자의 소변을 모아둠은 이점이 거의 없는 것으로 나타났다. 현대 하수설비로 방출된 방사성핵종들은 하수계통 근로자나 대중의 피폭을 야기하지만 그 선량은 일반인 선량한도보다 매우 낮다.

치료환자를 입원상태로 둘 것인지 퇴원시킬 것인지는 사안별로 결정되어야 한다. 그 결정에는 환자의 잔여 방사능과 함께 기타 여러 인자들도 고려해야 한다. 입원해 있으면 대중이나 친척의 피폭을 줄겠지만 의료진 피폭은 증가할 것이다. 입원은 돈과 기타 비용뿐만 아니라 종종 심리적 부담도 동반하는데 이에 대한 분석과 정당화가 필요하다. 방사성옥소 치료 환자의 이동은 이동시간이 수 시간이내라면 다른 승객에게 위해를 주는 일은 거의 없다.

방사성옥소 치료를 받은 환자들을 치료 뒤 수 주일동안 환경감시기 혹은 기타 방사선 검출장치들에 의해 감지될 수 있다. 그런 검출기를 다루는 사람은 특별히 핵의학환자들을 식별하고 다루는 훈련을 받아야 한다. 비밀봉 방사성핵종으로 치료한 구체적 기록을 병원에 유지하고 또 환자에게 서면 주의사항과 함께 제공해야 한다. 지난 수개월 사이에 비밀봉 방사성핵종으로 치료받은 사람이 사망한 경우 특별한 주의가 요구될 수도 있다.

## 요 점

- 진단 핵의학절차 후에는 일반인을 위한 주의가 거의 필요치 않다. 하지만 몇몇 치료절차 후에는 일반인, 환자의 친척 및 기타 사람들에게 대한 선량 제한이 필요할 수 있다.
- I-131은 자주 이용되는 고에너지 감마 방출체이고 반감기가 8일이기 때문에 비밀봉 방사성핵종 투약치료 절차 후 의료진이나 일반인 및 친지들에게 가장 많은 선량을 야기한다. 치료에 사용되는 다른 방사성핵종들(예: P-32, Sr-89, Y-90)은 주로 베타방출체로서 훨씬 위험이 작다.
- 방사성옥소로 치료를 받은 환자를 퇴원시킬 때 관리가 필요한 주요 관점은 다른 사람들이 받는 외부피폭이다. 그러나 이런 환자들로부터 성인이 받는 통상적 선량으로 암 유발 위험은 매우 낮다.
- 방사선 피폭으로 인한 갑상선 암은 태아, 유아 및 20세 이하 청소년에게 유의한 위험으로 나타난다. 그렇기 때문에 유아, 아동 및 임신여성의 오염을 피하도록 각별한 주의가 필요하다. 친척의 내부오염은 주로 치료 후 17일 동안 발생하기 쉽다. 다른 사람의 내부오염 위험은 외부피폭으로 인한 위험보다 덜 중요하다. 성인 간병인이나 친척이 갑상선부전증을 일으킬 정도로 많은 I-131 방사능을 섭취하는 일은 거의 있을 수 없다.
- 의학적 이용의 결과로서 매우 낮은 I-131 방사능이 환경에서 검출된다. 상대적으로 짧은 물리적 반감기로 인해 하수설비로 직접 방출해도 대중이나 하수계통 근로자 선량이 일반인 선량한도보다 훨씬 낮고 다른 선원과 비교해서도 낮다. 비밀봉 방사성핵종의 의학적 이용으로 인한 결과로 방출된 방사성핵종의 수준과 환경영향이 관련된 바 없다.
- 비밀봉 방사성핵종으로 치료받은 환자의 퇴원에 관련된 선량한도와 선량제약에 대한 ICRP 권고는 여러 나라에서 각기 다르게 해석되어 왔다. ICRP 권고는 일반인 선량한도를 적용하지 않는 간병인이나 친척에 대하여 사건 당 수 mSv의 선량제약 개념을 포함한다. 이 선량제약은 곧잘 엄격한 연간 선량한도로 해석되곤 했는데 이는 합당하지 않다 .
- 이제 ICRP는 사건 당 수 mSv라는 선량제약을 유아, 아동 및 부정기적 방문객에게 적용하는 것을 권고하지 않는다. 대신 이들에게 1mSv/y의 일반인 선량한도를 적용해야 한다.

- 일부 당국은 단지 잔류하는 방사능만을 근거로 환자 입원을 요구하고 있어 적절한 최적화를 포함하는 다른 중요한 인자들이 고려되지 않는다. ICRP 권고는 소변을 저장해야 한다거나 고방사능 핵의약품으로 치료받은 환자들이 입원해야 한다고 명백히 제시하지 않는다. 대신 ICRP는 다른 사람에 대한 일반인 선량한도와 선량제약이 준수되어야 한다고 권고하고 있다. 이것은 최적화에 따른 것이다.
- 최근 간행물들은 일부 당국에서 환자의 입원이나 퇴원을 결정하기 위해 사용되는 가정이나 모델들이 일반인과 간병인의 실제 선량을 과대평가할 수 있다고 지적해왔다.
- 환자를 입원시킬지 퇴원시킬지에 관한 결정은 개인 기준으로 결정되어야 한다. 결정에는 환자의 잔여 방사능과 더불어 환자 희망, 직업상피폭 및 일반인 피폭, 가족의 배려, 아이의 존재, 비용, 환경적인 인자를 포함한 많은 요소들에 대해서도 고려해야 한다.
- 방사성옥소 치료 후에 모유수유를 계속하는 것은 절대적 금기이다.

# 1. 서론

- 핵의학 방사선치료는 공중의 구성원, 친척 및 간병인을 피폭시킬 잠재성이 있는 비밀봉 방사성핵종을 사용한다.

(1) 방사성물질은 악성이나 양성 상태의 진단과 치료에서 100년 이상 사용되어 왔다. 비밀봉 방사성핵종은 주입, 경구섭취 또는 흡입되어 체내에서 이동하는 방사성의약품이다. 이들은 그들이 붕괴할 때까지 신체 조직에 분포할 수도 있고 혹은 소변과 같은 경로들을 통해 제거될 수도 있다. 이 보고서는 비밀봉 방사성핵종, 특히 치료에 사용되는 것을 다룬다.

(2) 핵의학 기술들은 잘 확립되어 있지만 친척, 간병인 및 일반공중을 위해 필요한 주의는 추가적 지침을 필요로 하는데, 특히 ICRP 1990년 권고에서 일반인에 대한 연간 유효선량한도를 1mSv/y로 감축한 관점에서 더욱 그러하다(ICRP, 1991, 1996).

(3) 인접해 있는 국가들 사이에서조차 ICRP 1990 권고(ICRP, 1991)의 이행에 관해 전혀 다른 해석들이 있어왔다. 더구나 최근의 많은 과학적 연구들은 환자 외의 다른 사람들에 대한 선량을 평가하기 위해 과거에 수립된 가정의 적정성에 의문을 제기하고 있다.

(4) 방사성 핵종의 환경 경로와 그 잠재적 영향에 대한 인식이 높아졌듯이 사회적 비용 그리고 환자와 가족의 사회적 쟁점에 대한 인식도 증가해왔다. 규제는 방사선 피폭에 대한 실질적 모델은 물론 다른 중요한 인자들에 근거해야 한다.

(5) 이 보고서의 목적에서 몇 가지 관심 있는 방사선량들이 있다. 장기흡수선량은 그레이(Gy)나 밀리그레이(mGy)로 표현된다. 그레이는 100 rad와 같다. 직업상피폭 선량한도와 일반인 선량한도, 선량제약은 유효선량으로 나타내는데 이 선량은 방사선과 조직 모두에 대해 가중된 양이다. 유효선량은 시버트(Sv)로 표현된다. 시버트는 100 rem과 같다.<sup>1)</sup> 대부분의 의학적 결정이 이루어지는 적용에서 1Gy는 1Sv와 동일하다.<sup>2)</sup>

1) <역주> 1 Sv는 100 rem과 정확히 같지는 않으나 의료방사선 실제에서는 대등한 것으로 간주해도 좋다.

2) <역주> 원문에서도 같은 것으로 표현하고 있으나 역시 같은 것은 아니며 그 수치가 같은 값을



## 2. 보고서의 목적

- 비밀봉 방사성핵종을 투여 받은 환자의 퇴원에 관련한 규정은 전 세계에 걸쳐 매우 다양하다. 규정은 현재 상황을 정확하게 반영한 가정이나 ICRP 권고에 대한 적절한 해석에 근거해야 한다.

(6) 이 보고서의 목적은 비밀봉 방사성의약품 투여 후 환자의 퇴원과 관련해 방사선 방호의 문제를 밝히는 것이다. 이 문서는 또한 ICRP 권고(특히 유연한 선량제약)에 대한 통일된 이해와 실질적 이행을 고취함도 목적으로 하고 있다. 이 보고서는 규제자, 의사, 의학물리사, 간호사, 기사 및 해당 행정요원을 위한 것이다. 이 원리들은 진단과 치료 목적 모두에 비밀봉 방사성핵종을 이용함에 적용된다. 하지만 진단 이용에서는 다른 사람의 피폭 정도가 매우 낮기 때문에, 이 보고서는 비밀봉 방사성핵종의 치료 이용에 따른 피폭에 초점을 맞추고 있다.

(7) 이 보고서는 치료를 위해 방사성핵종을 투여한 후 병원에서 환자를 퇴원시키는 데 관한 원칙을 제시한다. 그 근거의 바탕이 되는 과학적 연구에 대해 검토했는데 특히 기존 법규를 구성하는 이전의 가정을 실제 측정과 어떻게 연계할 것인지에 대해 검토했다.

(8) 이 보고서는 처방된 입원환자의 병원 체재에 관련된 모든 문제를 상술하지는 않지만 엄격히 관리되는 환경으로부터 환자의 퇴원과 관련된 문제에 주목한다. 일반인, 친척 및 간병인에 대한 흡수선량의 주된 원천 즉, 외부방사선에 대해 심층 조사했다. 다른 사람을 오염시키는 경로와 정도에 대한 문제도 포함한다.

(9) 이 보고서는 방사성옥소의 사용으로 야기되는 피폭경로와 선량에 집중하는데, 이 핵종이 비밀봉 방사성핵종으로 치료하는 의료진, 친척 및 간병인 피폭의 주된 근원이기 때문이다. 이 보고서는 또한 의료적 원천으로부터 환경으로 방사성옥소 방출을 조사하고, 의료진, 친척 및 간병인에 대한 위험의 잠재적 영향을 평가한다. 다양한 기관과 조직에 대한 방사성옥소 선량에 대한 정보는 간행물 53(ICRP, 1987)에서 찾을 수 있다.

---

갖는다는 의미이다.

### 3. 핵의학 절차의 유형과 빈도

- 갑상선항진증과 갑상선 암에 대한 방사성옥소 치료는 비밀봉 방사성핵종을 투여 받은 환자로부터 일반인이나 친척이 피폭하는 주된 원천이다.

(10) 핵의학은 환자의 진단이나 치료에 방사성의약품을 사용하는 전문 의료이다. 진단 절차는 적절한 약품에 표지할 때 특정 조직에 모이는 단수명의 감마 방출체를 사용한다. 얻는 영상은 기능적 정보와 해부학적 정보 모두를 준다.

(11) 통상의 진단절차는 전이 상태를 평가하기 위한 뼈 스캔과 심장의 기능적 능력과 함께 심장근육의 관류를 검사하는 심장 스캔을 포함한다. UNSCEAR는 전 세계적으로 대략 3200만 건의 진단 핵의학 절차가 매년 수행된다고 추정한다 (UNSCEAR, 2000). 진단에 사용되는 대부분의 방사성핵종들은 짧은 물리적, 생물학적 반감기를 갖기 때문에, 방사성의약품으로 진단 절차를 수행한 때는 일반 대중과 환자 친척에 대한 주의는 보통 요구되지 않는다. 두 가지 예외는 환자가 모유수유를 하는 경우와 갑상선 암 재발을 살펴보기 위해 I-131로 전신을 스캔하는 환자의 경우이다.

(12) 진단 이용과 비교할 때 치료는 빈도 면에서는 훨씬 적지만 높은 방사능과 생물학적, 물리적으로 장반감기인 방사성핵종을 자주 이용한다. 치료용 방사성의약품은 보통 베타 방출체이지만 감마선을 방출하는 것도 여럿 있다. 그러므로 그것들은 진단절차보다 큰 선량으로 다른 사람을 피폭시킬 가능성이 있다.

(13) 방사성의약품의 이용은 지난 십년간 거의 두 배가 되었다. UNSCEAR는 선진국에서 방사성의약품 치료의 빈도가 1985~1990년에 0.10/1000건에서 1991~1996년에는 0.17/1000건으로 증가했다고 평가했다. UNSCEAR는 또한 전 세계적으로 1985~1990년에는 방사성의약품 치료가 대략 210 000건 시행되었으나 1991~1996년에는 약 380 000건의 비밀봉 방사성핵종 치료 절차가 있었다고 평가했다. 특정 국가에서는 절차의 실제 빈도가 세계적인 수치와 크게 다를 수 있으므로 그러한 실제빈도가 국지적 혹은 지역적 방사선 방호를 평가하는데 더 유용할 것이다.

(14) 비밀봉 방사성핵종 치료의 일반적 형태는 액체나 캡슐을 경구 혹은 정맥주사로 투입(전신적 치료systemic therapy)하거나 폐쇄 체강 안에 현탁액을 점적(강내치료intra-cavitary therapy)한다. 전신적 치료의 예로는 갑상선항진증이나 갑상선 암을 위한 NaI-131이나 뼈 전이에 대한 Sr-89가 있다. 강내치료의 예로는 흉강이나 복막강의 악성종양에 대한 P-32 인산크롬과 활막절제술synovectomy을 위한 관절내intra-articular 주입이 있다. 표3.1은 1991년과 1996년 사이에 평가된 비밀봉 방사성핵종을 이용한 연간 통상 치료절차 수를 보여주고 있다.

표3.1. 핵의학 치료: 1991~1996년 기간 추정 연간 절차 수

상태	방사성의약품과 경로	선진국 절차/백만인구	전 세계 절차/백만인구
갑상선암	<sup>131</sup> I Na iodide(oral or i.v. <sup>a</sup> )	35	15
갑상선항진증	<sup>131</sup> I Na iodide(oral or i.v. <sup>a</sup> )	110	42
진성적혈구증가증	<sup>32</sup> P phosphate(oral or i.v. <sup>a</sup> )	3	1
골 전이	<sup>89</sup> Sr chloride(i.v. <sup>a</sup> )	5	2
윤희막염	<sup>153</sup> Sm ethylene diaminomethylene phosphoric acid(i.v.)		
	<sup>90</sup> Y colloid	7	2
	<sup>169</sup> Er colloid(intra-articular)		
악성 질환(갑상선암 과 진성적혈구증 증 외)	<sup>131</sup> I m-iodo-benzylguanidine(i.v.) <sup>90</sup> Y colloid(intra-cavitary)	<i>b</i>	<i>b</i>

출처 : United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (2000).

<sup>a</sup> 정맥내투여

<sup>b</sup> 미상

(15) 비밀봉 방사성핵종을 이용한 방사성의약품 치료의 다양한 기술들이 아래에 간결하게 요약되어 있다.

### 3.1. 갑상선항진 치료

(16) 갑상선의 항진은 보통 자가면역병Graves's disease에 기인한다. 덜 일반적으로는 중독성단순결절single toxic nodule(자가 갑상선종)이나 다발결절성종괴 multinodular goitre에 기인할 수도 있다. 이런 상태 모두는 후속 증후군인 갑상선 호르몬 생산과잉으로 이어진다. 치료는 항갑상선 약제나 외과수술 혹은 방사성옥소로 한다. 많은 나라에서 갑상선항진 환자의 3분의 2 이상이 궁극적으로 방사

성옥소 치료를 받고 있다. 방사성옥소는 갑상선에 집중되어 갑상선 세포를 파괴하여 갑상선 호르몬 생산을 여러 주 혹은 여러 달 감소시킨다. 이는 핵의학 치료의 가장 일반적인 형태다. 명백하게 기술한 서면으로 치료에 대해 환자에게 설명해야 한다.

## 3.2 갑상선암 치료

(17) 갑상선암은 폐나 뼈뿐만 아니라 종종 인근 림프절로도 전이된다. 많은 갑상선암은 일반 갑상선 조직보다는 작지만 옥소를 축적할 것이다. 갑상선암에 대한 전형적인 치료는 암과 갑상선의 완전한 외과적 절제술이다. 그 다음에 남아서 옥소를 축적하는 암세포들을 파괴하기 위해 방사성옥소를 투여할 수 있다. 방사성옥소 치료는 병의 경감이나 완치를 위해 종종 여러 과정이 필요하다. 이것은 비밀봉 방사성핵종을 사용하는 치료 중 두 번째로 흔한 형태이다.

## 3.3 뼈전이 치료

(18) 많은 암들(예를 들면 전립선과 유방)이 전체골격으로 확산하는 성향을 갖고 있다. 이러한 전이암은 매우 고통스러울 수 있고 그 광범위한 성질 때문에 외부 방사선 빔 치료로는 정복되지 않는다. 이 암들의 화학요법에 대한 반응은 다양하다. 정맥으로 주입되면 전이손상부에 모여 치료는 아니지만 통증완화를 제공하는 여러 방사성의약품이 있다. 일반적으로 사용되는 방사성의약품은 Sr-89 염화스트론튬, Re-186 HEDP hydroxyethylidene diphosphonate, Sm-153 EDTMP ethylenediamine-tetramethylenephosphonate 및 Sn-117m DTPA diethylene triaminepentaacetic acid이다. 이들은 골수 저하를 일으킬 수 있으므로 주의 깊게 사용하지 않으면 안 된다. 이들은 상대적으로 긴 반감기를 갖기 때문에 일반적으로 말기환자들에게는 주어지지 않는다.

## 3.4. 강내치료

(19) 강내치료는 일반적으로 격실형 해부학적 공간, 관절염, 활액막염에서 넓게 퍼진 종양을 치료하기 위해 사용한다. 여러 방사성핵종들이 이런 형태의 치료를 위해 사용된다. 종양 치료를 위해서 격실형 해부학적 공간(예를 들면 늑막 공간이나 복막강) 안에 S-32 인산 나토륨 또는 크롬, Au-198 콜로이드, 심지어

I-131이나 Y-90을 표지한 항체를 직접 주입한다. 관절염이나 활액막염 치료를 위해서는 연결공간joint space 안으로 Y-90 FHMA ferric hydroxide macroaggregates, Dy-165 FHMA 혹은 Er-169 콜로이드를 직접 점적으로 주입한다. 이들은 베타 방출체이므로 환자가 사망하거나 방사성핵종이 공간으로부터 누출되지 않는다면 방사선방호 문제는 거의 없다.

(20) 다음은 방사성의약품에 의한 치료 중 일반적이지 않은 방식들이다.

### 3.5 진성 적혈구증다증 치료

(21) 진성 적혈구증다증polycythaemia은 골수에서의 적혈구와 백혈구 과다생산이 특징인 상대적으로 희귀한 질병이다. P-32를 정맥 주사하여 뼈 속에 집중시키면 방출되는 베타가 경미한 골수억제를 일으켜 여러 혈액요소의 생산을 감소시킨다. P-32는 순수 베타방출체이므로 방사선방호 요구는 미미하다.

### 3.6. 동맥관내 치료Intra-arteria Therapy

(22) 간암hepatomas과 같은 어떤 종양들은 고도로 혈관이 발달되어 있어서 외과 수술이나 화학요법으로 치료하지 못할 수 있다. 이런 조건하에서 동맥에 공급 카테터를 두어 종양의 세동맥이나 모세혈관에 침적하는 방사성 표지된 불용성 입자들을 주입함으로써 국소 방사선조사가 가능하다. 이는 통상 완화책으로 쓰이고 치료법으로는 거의 쓰이지 않는다. I-131 표지 조영유oil contrast와 Y-90 유리 미립구glass microsphere 혹은 수지가 가장 일반적으로 이용된다.

### 3.7. 방사선면역치료법

(23) 방사선면역치료법은 종양 특유의 항원을 지향하는 방사성표지 항체를 사용한다. 이러한 작용제들이 높은 관심을 끌고 있고 현재 림프종 치료에 사용되고 있다. 항체는 I-131이나 Y-90으로 표지되고 상대적으로 높은 방사능이 정맥주사로 주입된다.

## 4. 치료용 방사성의약품 사용 후의 방사선방호

- 비밀봉 방사성핵종을 사용한 치료에 따르는 방사선방호의 논점은 의료진, 간병인 및 일반인의 선량에 대한 권고를 포함한다. 진단 핵의학절차 후에 일반인을 고려한 주의는 거의 필요치 않으나, 일부 치료절차 후에는 일반인, 환자의 친척 및 다른 사람들에 대한 선량을 제한할 필요가 있다.
- I-131은 자주 사용되는 고에너지 감마 방출체로서 의료진, 일반인, 간병인 및 친척에 대해 가장 큰 선량을 야기하는 방사성핵종이다. 치료에 사용되는 기타 방사성핵종들은 통상 위험이 훨씬 적은 단순 베타 방출체(예를 들면 P-32, Sr-89, Y-90)이다.

(24) 치료 목적으로 이용되는 방사성의약품들은 방사선방호 주의에 대한 요구가 광범위하다. 일부 방사성의약품은 상대적으로 배설이 거의 없이 인체 내부에 고착되고 본질적으로 환자의 조직에 모두 흡수되는 베타선을 위주로 방출한다. 이런 경우는 환경이나 다른 사람에 대한 위험이 거의 없다. 이런 종류의 방사성 핵종의 예로 Sr-89, P-32, Re-186, Y-90, Sm-153 및 Au-189이 있다. 200 MBq 이하의 베타 방출체(P-32, Sr-89, Y-90)로 치료받은 환자들은 다른 사람의 피폭과 관련하여 특별히 주의해야 할 필요는 없다. 예외라면 뼈 전이암 통증 치료를 위해 P-32, Sr-89 혹은 Sm-153 lexicidronam을 받는 환자의 경우다. 이들 화합물의 대략 60~70%가 뼈에 집중되지만 일부는 투여 후 소변을 통해 배출되므로(대략 초기 6시간 이내에 배출가능량의 35%, 초기 48시간 이내에 80~90%) 소변으로부터 오염을 피하기 위해 주의 깊은 위생관리 필요가 있다.

(25) 일부 방사성핵종은 그들이 붕괴되기 전에 인체 외부로 배출되는 다양한 경로가 있고 베타 외에도 감마선을 방출하는 핵종도 있다. 예방조치를 강구하지 않으면 이러한 종류의 방사성의약품은 바람직하지 않은 방사선이나 오염으로 다른 사람이나 환경을 피폭시킬 수 있다. 이런 종류로 가장 대표적인 방사성핵종은 I-131이다.

(26) 비밀봉 방사성핵종을 사용한 다양한 형태의 핵의학 치료 빈도는 표3.1에 나타나 있다. 갑상선 상태에 대한 처치가 그러한 절차의 90%이상임이 분명한데 이는 모두 I-131을 이용하여 수행된다. 따라서 치료목적으로 비밀봉 방사성핵종

을 받은 환자로부터 일반인이나 친척의 방사선방호에 관련된 대부분 문제는 현실적으로 I-131에 집중된다.

(27) 갑상선항진증을 치료받는 환자에 투여되는 I-131 방사능은 대략 100 MBq에서 1000 MBq정도 된다. 갑상선암 치료를 위해 투여하는 방사능은 대략 4000 MBq에서 8000 MBq 사이이다. I-131 투여에 따라 공중의 구성원이나 하수계통 근로자에 대한 주된 피폭원은 외부피폭이다. 의료진이나 친척 및 간병인에 대해서도 주요 피폭원은 외부피폭이지만 이들은 환자로부터 오염에 의해 피폭될 가능성도 있다. 권고나 요건을 구성할 때에는 두 피폭경로 모두를 고려하여야 한다.

## 5. 선량한도와 선량제약에 관한 최근의 국제 권고

- 기존 ICRP 권고에 따르면 선량한도는 일반인과 의료진이 환자로 부터 받는 피폭에 적용한다. 사건 당 수 mSv의 선량제약(선량한도가 아니다)은 집에서 친척, 방문자 및 간병인에 대해 적용한다. 선량제약은 개인의 피폭에 대한 선원 중심 관리체계로서 그 아래에서 최적화를 수행한다.
- 선량한도와 선량제약에 관한 ICRP 권고가 나라마다 매우 다르게 해석되어왔다. 일부 나라에서는 선량제약을 엄격한 연간선량한도로 이해했다. ICRP 권고는 환자가 핵의학 치료 후에 입원해야 한다고 명시적으로 언급하고 있지 않다.
- 이 문서는 직접적으로 간병에 종사하지 않는 방문객은 물론 아동과 유아는 공중의 구성원(즉, 일반인 선량한도의 적용을 받는)으로 간주해야 한다고 권고한다.

(28) 1991년, ICRP는 선량한도와 선량제약에 관련한 권고를 발표했다. 선량한도는 표5.1에 요약되어있다.

표5.1 ICRP에서 권고한 선량한도<sup>a</sup>

적용	직업상피폭	일반인피폭
유효선량	지정된 5년간 평균하여 20mSv/y <sup>b</sup>	1mSv/y <sup>c</sup>
연간등가선량		
눈의 수정체	150mSv	15mSv
피부 <sup>d</sup>	500mSv	50mSv
손과 발	500mSv	

출처 : ICRP 1990년 권고(1991).

a) 선량한도는 지정된 기간 동안 외부피폭으로 인한 선량과 같은 기간에 섭취로 인한 50년(아동은 70년까지) 예탁선량의 합을 적용한다.

b) 보충 조항으로 유효선량은 어느 단일 년도에 50 mSv를 초과해서는 안 된다. 임부의 직업상피폭에는 추가 제약이 적용된다.

c) 만일 5년 평균선량이 1mSv/y를 초과하지 않는다면 특별한 상황에서는 1년에 보다 높은 유효선량이 허용될 수 있다.

d) 유효선량 한도는 확률적 영향에 대해 피부를 충분히 방호한다. 보충 한도는 국소피폭에 대해 결정적 영향을 방지하기 위해 필요하다.

(29) ICRP 1990권고는 ‘직업상피폭이나 일반인피폭에 적용하는 선량한도 부합을 고려할 때 진단검사나 치료 과정에서 환자가 피폭한 선량을 포함하는 것은



적절치 않다.’고 밝힌다. 또한 ‘의료상피폭은 자신에 대한 진료의 일부로서 받는 피폭과 진료를 받는 환자를 도우는 사람이 알면서 기꺼이 받는 피폭(직업상피폭 제외)에 한정한다.’고 설명한다(ICRP, 1991).

(30) 간행물 73(ICRP, 1996)은 의료에서 자발적 피폭 문제를 다음과 같이 언급했다:

‘환자의 부양과 평안을 돕는 친구나 친척들도 역시 자원자이지만, 환자와 환자를 보살피는 이들에게 직접적인 이익이 있다. 그들의 피폭은 의료상 피폭으로 정의되지만 핵의학 환자가 병원에서 퇴원했을 때 집에서 환자를 찾는 방문자와 가족에 대한 방호정책을 규정하는데 필요한 선량제약이 수립되어야 한다. 그러한 그룹은 아동을 포함할 수 있다. ICRP는 그러한 제약의 수치를 권고하고 있지는 않지만 사건 당 수 밀리시버트 수준의 값은 합리적일 것이다. 이 제약은 엄격하게 적용되지는 않는다. 예를 들어 심하게 앓는 아이의 부모에 대해서는 더 높은 선량이 보다 적절할 수 있다.’

(31) 선량제약에 관한 기존 권고는 환자와 동거하는 유아나 아동을 포괄한다. 유아나 아동을 인지동의를 구할 수 없고, 통상 환자를 보살피거나 평안하게 함에 관련되지 않으며, 방사선 유발 감상선암(특히 섭취를 통한, 6.3절 참조)에 민감하기 때문에, 이제 그들은 환자를 돌보거나 위안함에 핵심이 아닌 방문자처럼 공중의 구성원으로 간주해야 할 것으로 본다. 즉, 이들 그룹은 1 mSv/y인 일반인 선량한도의 적용을 받아야 한다.

(32) 선량제약은 개인 피폭을 관리하는 선원중심 체계이며 그 아래서 최적화가 수행됨을 강조할 필요가 있다. 최적화는 선량제약을 충족한 후에 시행된다.<sup>3)</sup> 공식적 비용편익분석이 사용될 때 최적화는 본질적으로 선량의 크기, 피폭하는 사람의 수, 비정상 상태에서 피폭이 발생할 가능성을 포함하는 판단 절차이다. 핵의학 치료를 받은 환자의 퇴원에 관련하여 최적화와 필요한 행동제한에 미치는 최적화 영향은 개인별로 다를 수 있다.

(33) 국제원자력기구(IAEA, 2002a)는 기본안전기준(BSS) II-9항에서 환자 도우미와 방문자에 대한 선량제약과 선량한도에 대한 실질 값을 권고하면서 ‘이 절에서 설정한 선량한도는 환자의 위안자, 예를 들어 방사선 피폭을 알고도 의료 진단이나 치료를 받는 환자의 간병, 보조 및 위안을 위해 자발적으로 돕는 사람(

3) <역주> 이 표현에는 이의가 제기될 수도 있다. 대부분 경우에는 문제가 없겠지만 여건의 특성으로 최적화된 선량이 제약치보다 높을 수 있는 경우도 상정할 수 있기 때문이다.

고용되거나 직업상이 아닌 경우)이나 방문자에게는 적용되지 않는다.'라고 밝히고 있다. 그러나 어떤 위안자나 방문자의 선량은 그 환자가 진단검사나 치료 기간 동안 5 mSv를 초과하는 일이 일어나지 않도록 제약되어야 한다. 마찬가지로 방사성물질을 섭취한 환자를 방문하는 아동의 선량도 1mSv 이하로 제약되어야 한다.

(34) IAEA 요건은 섭취된 방사성물질을 언급하지만 유추에 의해 이는 방사성물질을 정맥투여 받은 환자에게도 적용되어야 한다. 그러므로 IAEA 요건이 비록 직업 형태로 다수의 방사선치료 환자를 위안하거나 보살피는 개인이 과도한 선량을 피하도록 명시하지는 않으나 IAEA 요건이 기본적으로 ICRP 권고와 일치한다.

## 6. I-131의 주요 피폭경로

### 6.1. 총론

- 방사성옥소로 치료받은 환자로부터 다른 사람이 받는 피폭은 중요도가 큰 순으로 외부피폭, 오염으로 초래되는 내부피폭, 그리고 일반 환경 경로이다.
- 방사성옥소 치료 후 초기 며칠 동안 치료받은 환자의 침에 의한 유아와 아동의 오염은 아이의 갑상선에 상당한 선량을 야기하고 이후 방사선유발 갑상선암 위험을 잠재적으로 증가시킬 수 있다.
- 일반적으로 사용되는 다른 비밀봉 치료용 방사성핵종들에 의한 선량은 방사성핵종이나 고려하는 환경경로에 관계없이 일반인 선량한도와 간병인에게 적용되는 선량제약보다 충분히 낮다.

(35) 친지, 간병인 및 일반인의 피폭은 다음과 같은 여러 경로로 발생할 수 있다.

- (i) 환자에게 근접한 사람들의 외부 피폭
- (ii) 배설되거나 내린 방사성옥소에 의해 환자에 근접한 사람들의 체내 오염
- (iii) 하수, 수계 방출, 소각 슬러지, 사체 화장을 포함하는 환경경로를 통한 피폭

(36) I-131을 제외하고 일반적으로 사용되는 기타 비밀봉 치료용 방사성핵종들은 방사성핵종이나 고려된 환경경로와 관계없이 권고된 선량한도나 선량제약보다 충분히 낮은 선량을 일반인과 간병인에게 초래한다. 그 때문에 이 보고서는 방사성옥소에 집중할 것이다.

(37) NaI-131은 흡입, 피부를 통한 흡수 혹은 경구섭취를 통해 인체로 들어갈 수 있다. 갑상선항진증이나 갑상선암 치료를 위해 통상 액체나 캡슐 형태로 경구를 통해 이를 투여한다. 옥화물은 소화관에서 혈류로 빠르게 흡수되고, 기능갑상선조직에 포착되어 유기화된다. 방사성옥소 표지 갑상선 호르몬은 간과 근육에 의해 신진 대사되는 혈장결합 단백질로 순환한다. 일부 방사성옥소는 간에서 결합되어 담즙을 통해 창자내강으로 배출된다.

(38) 침샘, 위 및 수유 유방은 혈장의 수준보다 대략 1520배 정도로 무기옥화물

의 농도구배를 유지할 수 있는 피막조직epithelia을 포함하고 있다.

(39) 방사성옥소는 주로 소변으로 배출되나 침, 땀 및 변에도 소량 포함된다. 작은 양이 날숨으로도 나온다.

(40) 환자 체내에 잔류하는 방사능은 방사성의약품, 갑상선 유무, 수분섭취 및 콩팥기능을 포함하는 여러 인자들의 함수이다. 갑상선암과 갑상선항진 환자에 대한 NaI-131 치료에서 전형적인 잔류곡선을 그림6.1에 보여주고 있다.

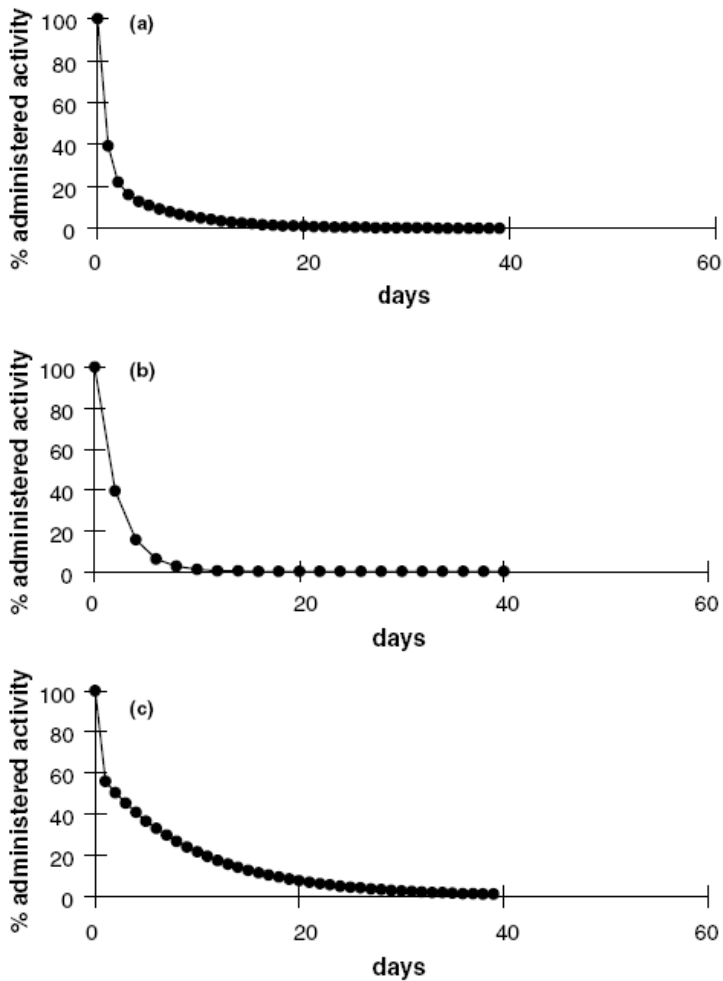


그림 6.1. 환자에 따른 투여된 I-131 방사능의 전형적 유효 잔류곡선.  
 (a) 암치료 환자 (b) 암 후속치료 환자 (c) 갑상선중독증 환자.  
 출처 : Barrington 등(1996a) 및 Hilditch 등(1991).

(41) 하수 계통으로 배출되는 방사능 비율을 다양한 방사성핵종에 대해 표6.1에 보였다. Driver와 Parker(2001)는 갑상선 암종으로 방사성옥소 치료를 받는 174명의 환자로부터 측정된 방사능의 배출을 보고했다. 그들은 투여된 방사능의 대략 55%가 치료기간 초기 24시간 이내에, 그 다음 24시간에 22%, 셋째 24시간에는 6%가 배출되는 것을 밝혔다. 전체 85%가 초기 5일간 하수계통으로 배출되었다. 규제 목적으로 종래에는 투여된 방사능의 100%가 배출된다고 가정해왔다. 그러한 가정치 사용은 약간 보수적이고 잠재적 환경 영향을 대략 15%정도 과대평가할 수 있다.

표 6.1. 하수로 배출된 투여 방사능 비율<sup>a</sup>

핵종 및 형태	치료 대상 질병	하수설비로 배출된 비율(%)
<sup>198</sup> Au colloid	악성 질환	0
<sup>131</sup> Iodine	갑상선항진	54
<sup>131</sup> Iodine	갑상선암	84 ~ 90
<sup>131</sup> I MIBG	크롬친화성세포종Phaeochromocytoma	89
<sup>32</sup> P phosphate	진성적혈구증다증	42
<sup>89</sup> Sr chloride	뼈 전이암	92
<sup>90</sup> Y colloid	관절염	0
<sup>90</sup> Y antibody	암	12
<sup>169</sup> Er colloid	관절염	0

a 완전 소멸할 때까지 총 배출량 기준.

## 6.2. 환자로부터 외부선량을

- 방사성옥소 치료를 받은 환자로부터 다른 사람이 받는 선량은 지배적으로 외부피폭에 기인한다.

(42) 방사성 환자로부터 타인에 대한 흡수선량을 계산하는 많은 경우에 방사능 분포는 무감쇠<sup>4)</sup> 점선원으로 가정한다. 인근 사람에 대한 외부선량 평가는 보통 역자승의 법칙을 이용한다. 이는 갑상선항진 환자나 국부전이가 있는 갑상선암

4) <역주> 환자 신체의 의한 자체 차폐효과를 고려하지 않는다는 의미이다.

환자에서 옥소가 집중해있는 경우에는 본질적으로 들어맞는다.

(43) 하지만 방사능이 환자 체내에 넓게 분포되어있다면 무감쇠 점선원 모델 사용은 근접해있는 사람들의 선량을 과대평가할 것이다. 선형선원 감쇠보정 모델이 더 정확하고 일상적으로 적용될 수 있다. 이 모델은 뼈 전이암(osseous metastases)의 통증치료나 방사선면역치료를 받은 환자에 대해서 보다 적합할 것이다(Lubin, 2002; Siegel 등, 2002a).

(44) I-131 방사능을 투여 받은 환자로부터 누적 외부피폭은 환자가 정상 갑상선기능인지, 갑상선중독증인지 혹은 갑상선암 치료를 받았는지에 따라 2~3 배 달라질 것이다. 그 때문에 많은 저자들이 다른 유형의 환자에 대해 시간별로 선량률을 측정해왔다. Culver 와 Dworkin(1991)은 갑상선항진 치료를 위해 I-131 투여 후 811일까지 여러 거리에서 선량률을 측정했다(표6.2).

표6.2. 갑상선항진 치료(I-131)를 받은 환자로부터 다양한 거리에서 투여 후 여러 시간에 측정된 선량률( $\mu\text{Sv/h}/\text{MBq}$ -투여방사능)

거리(m)	0일	24일	57일	811일
0.6		0.059	0.034	0.024
1.0	0.046	0.022	0.014	-

출처 : 미국 NCRP(1995).

(45) O'Doherty 등(1993)도 갑상선항진에 대해 방사성옥소를 투여 받은 환자로부터 선량률에 대한 연구를 수행했다. 그 결과는 대체로 유사하며 표6.3에 나타나 있다.

표6.3. 갑상선기능항진 치료(I-131)를 받은 환자로부터 다양한 거리에서 투여 후 여러 시간에 측정된 평균 선량률( $\mu\text{Sv/h}/\text{MBq}$ -투여방사능)

거리(m)	0일	1일	3일	6일	8일	10일
0.1	1.3	0.4	0.3	0.2	0.2	0.1
0.5	0.2	0.1	0.1	0.07	0.05	0.04
1.0	0.06	0.05	0.04	0.03	0.02	0.02

출처: O'Doherty 등(1993).

(46) Barrington 등(1996a)도 갑상선암에 대해 절제나 후속 I-131 치료를 받았던 환자로부터 실제 외부선량률을 측정했다. 결과는 표6.4와 표6.5에 나타나 있다.

표6.4. 갑상선암으로 절제치료를 받은 환자로부터 거리와 투여 후 시간에 따라 측정된 선량률( $\mu\text{Sv/h/MBq}$ -투여방사능)

거리(m)	0일	1일	2일	3일	4일	7일
0.1	0.665	0.187	0.088	0.069	0.053	0.016
0.5	0.114	0.049	0.025	0.019	0.014	0.007
1.0	0.046	0.019	0.009	0.007	0.007	0.004

출처: Barrington 등(1996a).

표6.5. 갑상선암 후속치료를 받은 환자로부터 거리와 투여 후 시간에 따라 측정된 선량률( $\mu\text{Sv/h/MBq}$ -투여방사능)

거리(m)	0일	1일	2일	3일	4일	7일
0.1	0.746	0.274	0.085	0.030	0.026	0.001
0.5	0.126	0.051	0.017	0.006	0.002	0.0003
1.0	0.046	0.019	0.007	0.003	0.002	0.004

출처: Barrington 등(1996a).

(47) 표6.4와 표6.5는 투여된 방사능 단위 당 외부선량률이 갑상선암 환자에서는 시간에 따라 매우 급속하게 감소함을 보여준다. 갑상선암 환자에게서 갑상선이 제거되었기 때문에 방사성옥소가 역류되지 않는다. 그 결과 대부분의 투여 방사성옥소가 치료 후 초기 2일 안에 소변으로 배설된다. 일부 저자는 기하학적 영향을 최소화하기 위해서는 외부선량측정이 환자로부터 2~3 m 거리에서 이루어져야 한다고 제안했다. 환자가 상당량의 방사성의약품을 축적하는 종양의 잔여병소들을 갖고 있다면 사정이 다르다.

### 6.3. 다른 사람의 오염

- 성인에게서 오염은 외부피폭 관리보다 덜 중요하다. 그러나 태아와 아동 갑상선의 갑상선암 유발 민감도 때문에 아동이나 임부의 오염을 피하는 것은 매우 중요하다. 방사성옥소 치료를 받는 어머니의 모유수유는 즉시 중단되어야 한다.

(48) 일반적 경험 규칙은 다루고 있는 방사능의 백만분의 1을 초과하지 않는 양이 그 방사성물질을 취급하는 개인에게 섭취될 것으로 가정한다. 이는 작업장의 일상적 활동과 사고 피폭에서 작업자들의 섭취는 물론 사고 시 시설로부터 공기

중으로 유출된 방사능에 의한 대중의 섭취에 대하여 개발되었다. 적어도 두 연구(Buchan과 Brindle, 1970; Jacobson 등, 1978)에서 환자에게 노출된 개인의 섭취가 이와 같은 규모로 나타났다. 몇몇 나라에서는 훨씬 더 보수적인 값들이 사용되고 있는데, 예를 들면 네덜란드에서는 다루는 양의 1%가 내부 섭취된다고 가정하고 있다. 환자 소변에 접촉함을 제외하면 많은 연구에서 방사성옥소에 의한 오염 위험이 무시할 정도는 아니지만 대체적으로 낮게 나타났다. 성인인 친지들에게 오염에 의한 내부선량은 보통 외부선량의 10%미만이다. 날숨, 침, 땀, 소변 혹은 모유를 통해 환자로부터 방출되는 방사성옥소는 잠재적으로 친지 및 간병인에게 피폭을 줄 수 있다. 피부와 갑상선 선량을 측정 한 한 연구에서 외부피폭은 내부피폭 갑상선 선량당량을 100배 이상이었다(Jacobson 등, 1978).

(49) 여러 연령의 사람에 대한 I-131 섭취 및 흡입의 선량환산계수를 표6.6에 보였다. 이는 기대되는 잠재 선량을 계산하는데 유용하다. 체액의 방사능 측정이나 환자 외 사람들의 방사능 측정은 보다 많은 정보를 준다.

표6.6. 방사성옥소의 흡입과 섭취에 대한 선량환산계수(Sv/Bq)

연령그룹(나이)	흡입	섭취
<1	7.2E-8	1.8E-7
1-2	7.2E-8	1.8E-7
2-7	3.7E-8	1.0E-7
7-12	1.9E-8	5.2E-8
12-17	1.1E-8	3.4E-8
성인	7.4E-9	2.2E-8

출처 : ICRP(1996).

(50) 200~600 MBq의 I-131로 치료받은 갑상선항진 환자의 다양한 체액에서 방사능도 측정하였다(O'Doherty 등, 1993). 치료 후 초기 24시간동안 모은 침의 평균 방사능은 86.7[Bq/g/MBq-투여방사능]<sup>5)</sup>이었다(변동범위 0.6~208 [Bq/g/MBq-투여 방사능]). 치료 후 3일에는 이 값은 대략 27 Bq/g/MBq로 감소했다. 침의 최대 방사능은 대략 치료 후 24시경에 발생한다. 몇몇 저자들은 치료 후 초기 48시간 동안은 환자와 친지 사이에 구강-대-구강 접촉을 말도록 권하고 있다.

5) 1MBq 투여 시 침 1g 당 방사능(Bq)을 의미한다.



(51) 치료 후 초기 24시간 동안 손바닥의 땀을 통한 방사능 분비는  $170 \text{ Bq/cm}^2$  (변동범위  $13 \sim 1027 \text{ Bq/cm}^2$ )이고, 손바닥의 평균 분비는 24시간 이내에  $45 \text{ kBq}$  이었고 투여된 방사능이나 신체 크기와는 관련성이 작았다. 따라서 땀의 I-131 오염에 의한 위험은 적다.

(52) Nishizawa 등(1980)은 많은 수의 갑상선항진 환자들로부터 옥소 분비를 관찰하여 몇 가지 흥미 있는 결과를 얻었다.  $925 \text{ MBq}$ 을 투여 받은 환자에서, 투여 후 초기 수 시간을 제외하고는 침의 ml 당 방사능이 가장 높았다(대략  $370 \text{ kBq/ml}$ ). 혈액에서는 이보다  $1/20$  정도로 작았고(대략  $18 \text{ kBq/ml}$ ), 땀에서는  $1/1000$ 정도로 작았다(대략  $0.37 \text{ kBq/ml}$ ). 또, 환자 침의 방사능은 매우 급격하게 감소하는데 치료 후 3일째에는 초기 최대치의 약 1%정도이다.

(53) Lassmann 등(1998)은 방사성옥소 치료의 경우 투여된 I-131 방사능의 0.1%까지가 치료실 공기 중으로 방출됨을 보였다. 방사성옥소 치료 후 이틀 동안 입원한 환자의 친지들 중  $2/3$ 는 그들의 갑상선에 갑상선축정으로 검지될만한 방사능을 갖고 있을 것이다. 이 방사능이 날숨의 방사성옥소에 의한 것인지 다른 오염에 의한 것인지는 분명치 않다. 최대 방사능은 전신에서  $4 \text{ kBq}$ , 갑상선에서  $0.2 \text{ kBq}$ 로 측정되었는데 이는  $2 \text{ mSv}$ 의 갑상선 선량을 야기할 것이다. 평균 갑상선 선량은  $0.2 \text{ mGy}$ 이다. 최대로 노출된 친지의 내부 오염에 의한 유효선량은  $1 \text{ mSv}$ 인 일반인 선량한도 미만이다.

(54) Hanscheid 등(2003)은 핵의학 치료병실 직원에 대한 일일 갑상선 I-131 모니터링을 수행했다. 갑상선 선량은 구하여 평균한 값은  $0.35 \text{ mGy/월}$ 이었는데 실내공기 교환이 충분할 경우 섭취위험이 낮음을 나타내고 있다.

(55) Schomaecker 등(2000)은 갑상선항진증과 갑상선암에 대해 치료 받은 환자들을 연구했는데 Lassmann 등(1998)에 의해 보고된 값보다 낮은 값을 보여, 내린 방사성옥소의 양이 투여된 방사능의 0.008%에서 0.03% 범위에 분포함을 발견했다. 내린 방사성옥소의 백분율 값은 갑상선암 환자보다 갑상선항진 환자 경우가 더 컸다. 내린 방사성옥소의 대부분은 유기결합형이었다.

(56) Wellner 등(1998)은 갑상선항진 환자에 의한 방사성옥소 내림과 그에 따른 친지들의 섭취를 연구했다. 그들은 만일 환자가 3일 동안 입원한다면 친지 중  $0.1 \text{ mSv}$ 를 초과한 유효선량을 받는 사람은 아무도 없을 것으로 결론지었다. 그들의 가정과 모형에 근거하면, 환자가 통원치료를 받을 경우 친지에게 예상되는 유

효선량은 6.5 mSv에 이르러 1 mSv인 일반인 선량한도를 초과할 것이다.

(57) 갑상선암 환자로부터 오염은 방사성옥소 투여 후 대략 24시간이 경과한 시점에서 가장 크고, 갑상선항진 환자에 의한 오염보다도 크다. Ibis 등(1992)은 이러한 환자들에 의한 오염패턴을 연구했다. 피부에서 유리성 오염을 투여 후 4, 24, 48시간이 경과한 시점에서 측정된 결과 방사능은 10Bq/cm<sup>2</sup>에서부터 250 Bq/cm<sup>2</sup>이상까지의 범위에 있었다. 유리성 오염과 투여된 방사능 사이에는 상관관계가 있었다. 자주 씻는 환자는 유리성 오염이 상당히 낮았다. 환자가 접촉한 표면의 유리성 오염은 매우 변동이 심하여 1미만에서 190Bq/cm<sup>2</sup>까지 범위를 가졌다. 치료 후 초기 48시간동안 좌변기 테 가장자리의 유리성 방사능은 여자 환자(약 20Bq/cm<sup>2</sup>)보다 남자 환자(약 1000Bq/cm<sup>2</sup>)가 훨씬 컸다. 침의 방사능은 투여된 방사능에 비례하고 치료 후 24시간 경과 시점에서 가장 높았다. 11GBq의 방사능을 받은 환자의 경우, 24시간 경과 시 침의 방사능은 대략 4MBq/ml이었다.

(58) 치료 후 초기 이틀 동안 내원 I-131 방사능과 평균 공기농도도 측정되었다. 날숨 방사능은 20~190 Bq/l의 분포를 가졌다. 치료 후 첫날 동안 시간 당 평균 내원 방사능은  $1.5 \times 10^{-6}$  [Bq/h/Bq-투여방사능]이었다. 4 명의 갑상선암 환자의 경우 공기 중으로 내원 총 방사능은 2.2~4.9 MBq이었고 평균 실내 공기 농도는 0.08~0.44 Bq/l이었다. 측정이 이루어진 실내의 공기는 하루에 190 교환이 이루어졌다. 미국의 경우 관리구역에서 최대허용농도는 0.33 Bq/l이다.

## 7. 친척, 간병인 및 일반인에 대한 I-131 피폭 위험의 크기와 특성

- 방사성옥소로 치료받은 환자로부터 성인이 받는 전형적 선량에서 암 유발 위험은 매우 낮다. 성인에게 갑상선부전증을 유발할 만큼 충분한 방사성옥소에 오염되는 일은 거의 있을 수 없다.
- 20세 미만자에게는 오염(특히 침에 의한)에 의한 갑상선암은 유의한 위험이 될 수도 있다.
- 유아 및 아동은 오염으로 높은 갑상선 흡수선량을 받을 수 있고(비록 기존에 권고된 선량제한 이내로 유지된다 하더라도), 아이들의 갑상선은 발암에 관해 방사선에 매우 민감하기 때문에 ICRP는 이제 이들 집단은 1mSv/y인 일반인 선량한도로 제한되어야 한다고 권고한다.

(59) 선량한도와 선량제한은 위험을 기반으로 한다. 따라서 이 값들과 관련된 위험의 크기와 본질을 밝히는 것이 유용하다. 앞서 언급된 바와 같이 비밀봉 방사성핵종으로 치료받은 환자로부터 받는 다른 사람들의 위험은 주로 외부피폭이며 내부오염으로 인한 위험은 작다.

(60) I-131은 364 keV 감마선을 방출하고, 환자로부터 나오는 이러한 방사선은 대체로 주위 사람에게 전신에 균일하게 피폭을 줄 것이다. 선량률이 상대적으로 낮기 때문에 그 위험은 암 유발에만 관계된다. 일반 대중에 대한 치명적인 암 위험은 대략 5%/Sv이다(ICRP, 1991)<sup>6)</sup>.

(61) ICRP의 일반인 선량한도는 1mSv/y이며, 선량제한은 건 당 수 mSv이고 특정 상황에서는 더 높은 값이다. 문턱 없는 선형비례 접근을 적용하면 1mSv에서 모든 치명적인 암 위험은 일반인에 대해 대략 0.005%가 된다. 이것은 잠재 위험이며 이 선량준위에서 암의 증가는 있더라도 현재로서는 검출하기 어려울 정도로 낮다. 이러한 잠재적 위험은 생애 20~30%인 자연발생적 치명적 암 위험과 비교될 수 있다. 아동은 암 유발에 대해 성인들보다 2~3배 더 민감하여 1mSv 유효선량의 위험은 아이들에게는 0.01~0.02%가 된다.

---

6) <역주> 2006년 현재 재평가된 암 위험은 약 4%/Sv에 상당하다.

(62) 방사성옥소에 진단 선량을 받은 36 000명에 대한 스웨덴의 연구는 이전에 목에 외부방사선 치료를 보고한 환자에서만 갑상선암 증가를 발견했을 뿐이다. 방사성옥소에 의한 진단 환자들의 갑상선선량은 0.94 Gy였지만 환자의 대부분은 피폭당시 20세 이상이었다(Dickman 등, 2003).

(63) 체내 오염으로 인한 위해는 성인과 아동이 매우 다르다.

(64) 성인은 외부 방사선이나 방사성옥소에 의한 갑상선암 유발에 대해 꽤 저항력이 있어 보인다(Ron 등, 1995). 체르노빌 복구 작업자에서도 선량과 관련하여 갑상선암의 증가는 현재까지 발견되지 않고 있다(UNSCEAR, 2000). 다른 연구에서도 성인에 대해 유일하게 측정 가능한 상해는 갑상선에 고선량(3 Gy 영역) 노출 후에 임상적으로 중요하지 않는 정도로 갑상선기능부전이 발생한 것이다(Larsen과 Conard, 1978). 이러한 변화는 방사성옥소 치료 환자의 친지들에게 실측으로 나타나는 방사능보다 여러 자릿수 큰 규모의 방사능 섭취 이후에서나 발생할 수 있다.

(65) 체르노빌 이후 보여 온 갑상선암 증가에 비추어볼 때 방사성옥소에 의한 아동의 오염은 관심사다. 방사성옥소 섭취나 체르노빌 경험에 따른 아동에 대한 위험 평가치는 초과절대위험(EAR)으로  $1.6\sim 2.3/10^4$ 인-년 Gy(PYGY), 초과상대위험(ERR)으로 23~38/Gy이었다(UNSCEAR, 2000). 추정 갑상선 선량이 0.46 Gy 인 미국 서부 핵실험 낙진지역의 아동에 대한 대규모 연구에서는 갑상선암의 유의한 증가는 발견되지 않았다(Rallison 등, 1974). 나중의 한 연구는 일반적 갑상선 종양에 대해 0.7%/mGy의 ERR로 나타났지만, 갑상선 암종과 결절 모두에서 선량-반응 관계에 유의한 기울기가 없었다(Kerber 등, 1993).

(66) 일반인에 대한 ICRP 권고는 오로지 유효선량과 관련되어 있다. 특별한 상황 외에는 아동은 연간 1mSv의 유효선량한도를 적용받는 공중의 일원으로 간주한다. 이는 일반적 권고이고 방사성옥소와 아동의 민감도 문제를 특별히 다루고 있지는 않다. 나이든 아동의 경우 그들이 동의할 능력이 있다면 가정 병상에서 환자를 보살피거나 평안을 도우는 일은 있음직하다. 이 보고서에서 논의한 상황에서 피폭은 주로 방사성옥소에 관한 것이고 아동 갑상선은 암 유발에 민감한 것으로 나타나므로 이 문제는 더 조사를 필요로 할 수 있다. 갑상선 조직가중치가 0.05이므로 이론적으로는 아동의 갑상선은 방사선옥소로부터 20 mSv를 받더라도 아직은 ICRP 권고에 만족하고 있다. 이 정도 선량에서 아동 갑상선암 유발은 나타나고 있지 않다. 나이든 아동이 외부피폭 없이 이런 많은 오염을 받게 될

일은 거의 없다. 그 결과로서 아동에 대한 유효선량이 1mSv 이하로 유지된다면 갑상선 선량은 20mGy보다 상당히 낮을 것이다. 이점은 친지들을 대상으로 한 갑상선 실측으로도 입증된다.

(67) 어머니가 방사성옥소 치료 후 모유수유를 계속하고 아이의 갑상선이 제거되지 않는다면 갑상선암 위험은 매우 높을 수 있다.

(68) 부모가 방사선방호 지침을 따르지 않은 경우에 구체적 오염 시나리오의 결과로서 아이의 갑상선 선량을 평가할 수 있다. 예를 들면 갑상선항진 환자에 대해 치료 후 첫날 침의 방사능은 대략 100 Bq/g침/MBq-투여방사능으로 평균화되는 경향이 있다. 부모가 555 MBq를 받았다면 침의 방사능은 대략 55500Bq/g(ml)-침이 될 것이다.

(69) I-131의 섭취 후 유아나 아동의 갑상선에 대한 선량은 대략  $4.3 \times 10^{-7}$  Gy/Bq이다. 예를 들면 부모가 예방조치를 따르지 않고 유아가 그 부모에게 입맞춤에 의해 침 1mg을 받는다면 추정되는 갑상선 선량은 대략  $2.4 \times 10^{-2}$  Gy 혹은 24 mGy가 될 것이다(ICRP, 1999). 체르노빌 아동들의 예비 데이터를 이용하면 방사성옥소로부터 상대위험계수는 20~30 ERR/Gy의 범위에 있으므로 위 선량으로 인한 갑상선암 유발 ERR은 대략 1.0(즉, 자연적 위험의 두 배가 된다)이 된다. 적절한 예방조치들을 따를 때 아동에 대한 실측은 위의 예에서 나타난 선량보다 적은 갑상선 선량(따라서 보다 적은 암 위험)을 나타낸다. 한 연구에서 옥소 방사능이 89명의 대상 아동 중 25명에게 검출되었다. 검출 가능한 방사능을 지닌 아동들의 갑상선 선량은 0.4~29.1 mGy 범위에 분포하였다(Barrington 등, 2003). 이 연구는 어떤 부모들은 예방조치에 대한 주의를 받지 않았거나, 이해하지 못했거나 또는 따르지 않았음을 발견했다.

(70) 내부 오염으로부터 아동 선량을 외부피폭으로부터 잠재적 선량과 비교할 수 있다. 방사성옥소 투여 후 하루가 지난 후 잔류하는 옥소 방사능이 555 MBq인 부모가 한 시간 동안 0.1m 거리로 아이를 안고 있다면 외부 선량률은 내부피폭 우려보다 적다(대략  $0.4 \mu\text{Sv/h/MBq}$ 투여방사능. 혹은 부모가 555 MBq의 잔류 방사능을 갖는다면 아동의 외부선량은 0.2mSv가 된다). 이 계산은 아동이나 유아의 내부 오염을 예방하거나 감소시키기 위한 예방조치의 중요성을 보여준다.

(71) 기존에 권고된 수 mSv/사건의 선량제약 이내로 유지된다 하더라도 유아나 아동이 오염으로부터 많은 갑상선 흡수선량을 받을 수 있고 또, 아동의 갑상선이

발암에 대해 매우 민감하기 때문에, ICRP는 이제 아동과 유아는 1mSv/y인 일반 인선량한도로 제한할 것을 권고한다.

## 8. 방사성옥소의 환경 경로

- 핵의학 환자의 배설물을 통해 환경으로 방출되는 방사능의 주종은 Tc-99m 방사성의약품이며 다음이 I-131이다. Tc-99m의 반감기(6시간)는 환경 피폭 선원으로서 Tc-99m의 중요성을 크게 감소시킨다. 8일의 반감기 때문에 I-131은 의학적 이용 후에 일반 환경에서 검출될 수 있다. 이러한 의료관행으로 인한 환경영향은 측정 가능 수준 이하이다.

(72) 많은 최근 문헌들이 방사선방호 체계가 환경에 대한 잠재적 영향의 세부사항까지 포함할 필요성을 강조한다(Copplestone 등, 2000; ICRP, 2003; Nuclear Energy Agency, 1995; Pentreath, 2002). 이에 ICRP는 현재 이 분야 정책을 개발하는 작업그룹task group을 갖고 있다. 이 보고서의 목적으로는, 환경으로 방출된 I-131의 영향은 미미할 수밖에 없는데 여기에는 몇 가지 이유가 있다. I-131의 물리적 반감기는 상대적으로 짧고(8일) 환자의 배설물이 처리되고 생태계로 되돌려지는 데 걸리는 시간은 상대적으로 길다.

(73) 환경에서 방사성옥소의 이동은 수십 년간 연구되어 왔다(Eisenbud, 1973; Ilyin 등, 1972). 사고, 핵실험 및 의도적 방출 등 다양한 방사성옥소 방출의 결과에 대한 방대한 정보가 가용하다. 이러한 상황에서 환경과 먹이사슬로 막대한 양의 방사성옥소 방출이 있어왔다. 환경으로 유입은 일반적으로 대기에 직접 방출을 통하지만 관개에 사용되는 강과 수로로 하수 방출과 같은 다른 경로들도 포함된다.

(74) 상대적으로 짧은 반감기 때문에 I-131은 토양흡수 관점에서는 유의한 오염이 아니다. 그 붕괴속도는 작물의 성장 기간에 비해 빠르다. 잎에 침적되는 방사성옥소는 공기로부터 초본으로 전달되는 침적속도의 함수이다. 방사성옥소는 풍화 및 기타 메커니즘에 의해 잎으로부터 제거되고, 제거의 유효 반감기는 3.5일이다. 식물 표면에 침적된 방사성옥소는 소가 섭취할 수 있고, 섭취된 방사성옥소의 대략 5% 정도가 우유에 나타난다.

(75) 병원에서 핵의학환자 퇴원과 관련해서는 상황이 크게 다른데 이는 체내의 방사성옥소가 붕괴하거나 주로 소변을 통해 배출되어 환경 경로로 가기 때문이다. 하수관리 과정에서, 수로나 진창에 방출된 액체폐기물로부터 하수관리 종사

자나 폐수처리 운전자가 피폭할 수 있다. 일반적으로 방사능이 매우 낮고, 희석, 확산 및 먹이사슬로 돌아가는 데 걸리는 시간이 이 경로의 중요성을 미미하도록 낮춘다.

(76) 방사성옥소가 하수 오니 형태로 토양에 침적될 수 있다. 오니는 미처리, 처리, 그리고 고도처리로 특징지을 수 있다. 이러한 용어들은 주로 박테리아나 기타 병원체를 줄이는 과정과 관련이 있고, 방사능 제거와는 관련이 없다. 다만, 처리가 더 많은 과정을 포함하면 더 시간이 걸리고, 따라서 유출되는 방사능도 줄어든다.

(77) 미처리 오니는 박테리아와 관련된 위생상 이유 때문에 보통 경작지에 버리지 않는다. 처리 오니는 소의 사료로 공급되는 작물에 직접 침적될 수도 있지만 사용에 앞서 6개월까지 하수를 억류한다면 해당되지 않는다. 어떤 나라에서는 모든 경작지에 대해 미처리 하수 오니 사용을 금지하고, 처리 오니도 깊이 시비하는 조건으로 목장 목초지에 적용할 수 있도록 규제하고 있다. 나아가 어떤 작물이 생으로 먹는 것이라면 시비로부터 수확까지 시간을 작물에 따라 12~30개월을 두도록 규정한다.

(78) 방사성옥소가 수계로 방출되면 많은 수생 생물들에게 축적될 수 있다. 축적계수는 해조류에 대해서 200~500이고 연체동물과 갑각류에는 10~70, 그리고 물고기 살에는 10~15이다. 일부 동유럽국가에서는 담수어 양식장 옆에 하수를 저장하면서 어육 생산을 증가시키기 위해 물에 주입하기도 한다. 하수처리에서부터 어류에 공급까지 시간도 관리하지 않는다.

(79) 방사성옥소가 금붕어의 갑상선 기능에 미치는 영향에 관한 문헌이 적어도 한 편 있다(Chavin와 Cukrowski, 1968). 방사성옥소를 직접 복막 내 주입한 결과 0.37 kBq부터 뇌하수체 세포에서 세포학적 외양에 영향을 주는 것이 알려졌고, 복막 내 0.37 MBq(2.2 MBq/kg) 주입은 부분 갑상선절제에 미치고, 3.7 MBq(22 MBq/kg)은 전체 갑상선절제를 야기했다. 대서양의 연어(LaRoche와 LeBlond, 1954)와 송어(LaRoche 등, 1965; Norris와 Gorbman, 1965)에 대해서도 연구되었다. 방사선 갑상선절제를 야기하기 위해 사용된 방사능은 37~185 MBq/kg이었다. 1 MBq/ml의 방사능을 띤 물속에 2~3개월 동안 산 짧은 무지개 송어에게 갑상선절제가 일어난다는 것도 알려졌다. 유사한 연구와 결과가 북태평양산 큰연어 Chinook salmon, 송사리, 뱀장어에 대해서도 또한 보고되었다(Harris, 1959; Olivereau, 1957; Olivereau와 LaRoche, 1965). 모든 보고된 영향들은



비밀봉 방사성핵종의 의학적 이용과 하수계통 및 후단 배수로 환자 소변 배출에 의한 방사능보다 여러 자릿수 높은 방사능에서 발생했다. 담수어 양식장에서 하수 이용은 8일이라는 방사성옥소의 반감기를 고려할 때 어류의 갑상선에 영향을 미칠 지도 모르나, 공중위생에 미치는 영향은 미미할 것으로 생각한다.

(80) 잠재적 해로움과 관련하여 방출점에서 농도, 높은 회석계수, 혼합, 물-해조류-동물성플랑크톤-(사람의)식용 유기체에 이르는 사슬을 거치는 동안 방사성옥소의 상당한 붕괴를 고려해야만 한다. I-131이 인체로 갈지 모르는 수상경로는 육상경로보다 훨씬 덜 중요하다.

## 9. 비밀봉 방사성핵종에 의한 치료에서 방사성폐기물의 처분

- 적절히 규제하면, 소변을 저장하지 않고 비밀봉 방사성핵종으로 진단받거나 치료받은 환자의 배설물을 하수 처분하더라도 직업상 및 일반인 선량한도 모두에 대해 충분히 아래에 있는 것으로 나타났다.
- ICRP 권고는 소변을 저장할 것을 요구하지 않는다. 방사성옥소 치료를 받은 환자의 소변을 저장하는 이득은 거의 없는 것으로 나타났다.
- 현대 하수계통으로 방출된 방사성핵종은 하수계통 종사자나 일반인에게 일반인 선량한도보다 충분히 낮은 선량을 야기할 것으로 보인다.
- 분실선원 또는 불법 방사선원을 색출하기 위해 매장에서 사용하는 방사선 검출기는 방사성옥소 치료 환자들로부터 온 오염 혹은 하수 오니의 오염을 검출할 수도 있다.

### 9.1. 일반사항

(81) 방사성폐기물 처분에 관한 여론은 많은 저자들에 의해 연구되어왔고, 최근의 연구는 폐기물 원천에 관한 여론을 일부 통찰하였다(Kelly와 Finch, 2002). 일반적으로 원자력 시설이나 재처리과정으로부터 오는 방사성폐기물에 대해서는 회의적인 반면, 의학적 이용으로 발생한 방사성폐기물은 제공받는 이득의 본질로 인해 수용 가능한 것으로 나타났다.

(82) 방사성폐기물과 관련한 방사선방호와 처분에 대한 일반 골격은 ICRP 77로 발간되었다(ICRP, 1997). 전략은 두 형태로 나누어 질 수 있는데, 하나는 희석과 분산이고 다른 하나는 농축과 억류이다. 폐기물 관리는 방출된 방사성핵종으로부터 일반인의 피폭을 제한하기 위한 공중보건 수단으로 볼 수도 있다. 방사선방호의 기본 목표는 방사선 피폭의 증가를 가져오지만 유익한 행위를 부당하게 제한하지 않으면서 사람을 위한 적절한 방호 표준을 제공하는 것임을 기억해야 한다. ICRP의 정책은 위험을 완전히 제거하는 것이 아니라 모든 합리적 수단으로 확률적영향의 위험을 제한함에 기반을 둔다.

(83) 방사성옥소 치료환자로부터 나오는 대부분의 방사성 배설물 관리 방안도 위와 유사한 여러 카테고리로 나눌 수 있다. 첫째로, 폐기물을 수집하고, 붕괴하도록 저장한 다음 이후 어떤 시점에 (통상 하수계통으로) 방출한다. 이는 환자가 입원할 경우에 일부 나라에서 시행되고 있다. 환자가 퇴원하고 나면 소변 저장은 현실적 해결책이 못된다. 둘째 방안은 방사성 배설물을 붕괴시키지 않고 바로 하수계통에 처리하는 것이다. 몇몇 나라에서는 붕괴를 위한 소변의 저장 없이 병원 자체적으로 이를 시행하고 있다. 마지막으로 적은 양의 배설된 방사능이 하수로 처리할 수 없는 물체의 안이나 표면에 있을 수 있다. 이런 물체들은 매몰이나 저장 붕괴시킬 수 있다(Evdokimoff 등, 1994). 아래에서 이들 각 방법에 대해 좀 더 상세하게 논의한다.

(84) 방사성옥소 치료를 받는 어머니의 오염된 모유는 직접 하수처리 하는 것이 아마도 최선이다.

(85) 다른 문제는 병원들이 절수에 매우 노력하고 있는 점이다. 이는 시설이 방사능을 수용 가능한 농도로 희석시키지 못할 수도 있음을 의미한다. 캐나다에서는 수용 가능 농도가 연간 평균 200 Bq/l 범위이다. 그 결과 적어도 한 병원이 다수 저류탱크를 이용한다(Leung 및 Nikolic, 1998). 탱크 형태에 따라 단위 방사능 당 선량률은 0.5~4.0 $\mu$ Sv/h/GBq의 범위로 분포한다. 이런 탱크들은 통상 자동이 아니고 따라서 적절한 직원의 배치나 보수를 필요로 한다. 이와 같은 개혁적 접근이 항상 필요하지는 않다. 환경 경로에 관해서는 현실적으로 가정하는 것이 중요하다.

## 9.2. 붕괴를 위한 억류

(86) 붕괴를 위해 소변을 억류하는 것은 쟁점이 되는 주제이다. 어떤 국가는 이를 시행하고, 어떤 국가에서는 시행하지 않고 있다. 궁극적인 질문은 그 실행의 이점과 비용이 무엇인가이다.

(87) 환자 입원의 한 이유는 소변을 저장하여 붕괴 이후에 하수로 방출할 수 있다는 것이다. 많은 나라에서 친지와 다른 사람들의 외부피폭을 감소시키기 위해 환자를 입원 조치하지만 많은 병원이 환자 소변을 저장하지는 않는다. 대신 인정 한도<sup>7)</sup> 이내에서 적절히 희석하여 직접 방출한다.

---

7) <역주> 규제기관이 설정하거나 규제기관과 사용자가 협의하여 정한 기준이다.

(88) 붕괴를 위해 소변을 저장하는 것은 여러 문제들을 야기한다. 첫째는 붕괴가 충분한 시기의 결정이다(Meck, 1996). ‘완전한’ 붕괴를 요구하는 것은 방사능의 본질 때문에 불합리하다. I-131에 대해 10 반감기 동안 붕괴시킨다 해도 수개월 동안 소변을 저장하는 것을 의미한다. Erlandsson과 Mattsson(1978)은 방사선 치료 환자의 모든 소변을 저장 없이 직접 하수로 처리하기를 권했다.

(89) 또 다른 사안은 병원에 좋은 설비체계가 없다면 잠재적으로 줄어든 일반인의 피폭은 그 때문에 증가하는 직업상 피폭과 비용에 의해 상쇄될 것이라는 점이다. 결국 어느 한 병원이 치료 후 1~2일 동안 환자를 입원시킨다 하더라도 상당한 방사능이 환자 체내에 남아있을 것이고, 그 이후의 수일동안 배설되어 그들의 집으로부터 하수계통으로 들어갈 것이다.

(90) 영국에서 수십 년간의 전략연구(UK Department of the Environment, 2002)는 병원에서 저류조를 통한 배출 감축은 그 비용이나 의료진의 피폭 잠재성, 그리고 여전히 상당한 비율이 환자 퇴원 이후에 발생한다는 사실 때문에 대부분의 병원에서 현실적이지 않은 것으로 평가했다.

### 9.3. 하수, 오니 및 소각

(91) 현재 도심지역에서 방사성옥소 치료 환자로부터 나온 배설물 처리의 지배적 방법은 폐수 처리시설을 갖춘 도시 하수계통을 이용하는 것이다. 현대의 하수 처리설비는 통상 1차와 2차 처리 과정을 갖는다. 1차 처리는 모래와 큰 부유물을 제거한 다음 침전지를 거친다. 2차 처리는 응집이나 산화처리에 이은 침전 공정으로 부유 입자와 용해된 유기물질을 제거한다. 대부분의 경우 그 상등액은 강이나 연해에 방출된다. 분리된 고체는 ‘오니sludge’라 불리고 소각된 다음 비료로 경작지에 이용되거나 매몰된다.

(92) 전원지역에서는 배설물이 지역 분뇨처리장이나 분뇨 저류조에 처리될 수도 있다. 이 과정에 관한 데이터는 거의 없지만, 합리적으로 설계된 분뇨처리장 또는 저류조에 의한 처분은 물의 침투율이나 8일인 방사성옥소의 반감기로 인해 일반인에게 측정 가능한 피폭을 일으킬 것 같지는 않다.

(93) 환자의 집으로부터 하수설비로 방출되는 방사성옥소 농도는 환자의 일일 소변 방출량과 집에서 모든 용도에 의해 하수로 방출되는 물의 부피로부터 계산

될 수 있다. 영국에서 한 사람에게 의해 하수로 방출하는 물의 양은 대략  $1\text{ m}^3/\text{week}$ 이고 4인 가족에 대한 값은 대략  $3\text{ m}^3/\text{week}$ 이다. 대략 투여된 방사능의 55%가 치료 후 첫날에, 17%가 둘째 날에 배출되고, 셋째와 넷째 날에는 5%, 다섯째 날에는 2%가 배출된다. 같은 하수계통을 이용하는 다른 집들에 의한 상당한 희석이 있기 때문에 이 값들을 단독으로 고려해서는 안 된다.

(94) 폐수처리장에서 처리된 상등액에서 의료 방사성핵종(특히 방사성옥소) 방사능은 수십 년간 연구되어왔다(Erlandsson과 Mattsson, 1978; Prichard 등, 1981; Sodd 등, 1975). 하수시설로부터 방출되는 방사능 양은 유입, 처리시설의 설계 및 최종 처분방법에 크게 의존한다. 의료센터 근처 하수 처리장으로부터 방사성옥소 일일 방출은  $150\sim 370\text{ MBq}$ 의 범위에 있는 것으로 평가된다. 많은 폐수처리시설의 배출수는 농축방법을 사용하지 않고는 옥소의 감마선 피크를 검출할 수 없을 만큼 충분히 희석되어 있다.

(95) 어떤 평가는 하수관 근로자들에 대해 연간 200시간의 점유도를 가정했지만, 현대의 폐수시설 운영에서 점유도는 대략  $2\text{ h/y}$  근처이다. 폐수처리시설 근로자들에 대해 평가된 직업상 선량은 시설에 들어오는 방사능뿐만 아니라 실제 처리과정에도 의존한다. 하수처리 근로자가 하수구 보수유지 근로자보다 더 높은 선량을 받는다. 하수구 근로자의 직업상 선량에 기여하는 가장 중요한 방사성핵종은 Tc-99m인 한편으로 I-131은 강물의 가장 큰 오염원이다.

(96) 하수계통으로 방출이 여러 자릿수 크기로 희석될지라도 폐수처리장의 공정은 쉽게 검출 가능한 방사능을 갖는 오니를 발생시킬 수 있다. 하수관을 통한 그리고 결국 오니 속으로 방사성옥소 이동에 대한 정확한 시간은 계통 디자인과 구축에 따라 상당히 달라질 수 있다. 스웨덴의 한 연구에서는 최대 방사능이 방사성옥소가 방출된 2~3주 후에 오니에서 나타났다(Erlandsson 및 Mattsson, 1978년).

(97) 도시 하수처리장에서 NaI-131과 MIBG meta(I-131)iodobenzylguanidine 거동 특성이 연구되었다(Fenner와 Martin, 1997; Martin과 Fenner, 1997). 여기서 오니를 경작지에 이용 가능하지 않으면 소각해야 할 것인데, 소각은 방사성핵종을 다시 농축하여 그 재가 매립지 방사능검출기를 작동시킬 수 있다는 사실이 제기되었다. 투여된 MIBG 방사능의 17%가 1차 오니에서 나타났음에 비해 NaI-131은 투여 방사능의 1.1%만 나타났다. 상대적으로 짧은 I-131의 물리적 반감기 덕분에 슬러지를 경작지에 사용하더라도(마초에 시비 전에 일정기간 보관

하거나 오니를 갈아엎는다면) 방사선학적 문제는 거의 없다. 오니 소각에 따라 최대 피폭하는 근로자는 (제진기 고장 2시간 후에) 대략  $1.7\mu\text{Sv}$ 를 받는다. 전형적으로 피폭하는 근로자와 일반인(소각로로부터 500m 거리에 사는)에 대한 예탁유효선량은 22주의 소각기간에 각각 1.2 및  $0.06\mu\text{Sv}$ 이다.

(98) 1998년 ‘오슬로파리위원회Oslo and Paris Commission’ 회의에서 ‘북동대서양 해양환경 보호를 위한 1992년 협정’의 협약당사국들이 방사성물질에 대한 전략에 동의했다. 최종 목표는 인공 방사성핵종에 대해서는 환경 중 농도를 0에 가깝게 만드는 것이다. 영국은 비의학적 원자력산업을 대상으로 2020년까지 이 목표를 달성하기 위해 ‘장기전략multidecade strategy’을 개발하였다(UK EA, 2002). 의학적 방출의 대부분이 짧은 반감기의 Tc-99m과 I-131인데 둘 모두 환경으로 유입되기 전에 매우 낮은 준위로 붕괴하고, 따라서 환경에서 측정 가능한 영향이 없을 것이 거의 분명하다. 병원에 근거하는 핵종 중 이슈가 되는 두 가지 방사성핵종은 트리튬H-3과 C-14이었다. 의료시설이 시설의 인정한도 수준으로 방출한다면 하수처리 근로자는 대략  $0.24\text{mSv/y}$ 를 받고, 하수처리장 배출구 하류에서 잡힌 많은 물고기를 취식하는 공중의 구성원은  $0.18\text{mSv/y}$  정도를 받을 수 있다는 결론에 이른다. 이 값들은 명백히 비관적 가정에 근거한 상한 평가이다. 영국 환경청은 증가하는 하수 오니 소각과 같이 하수 설비와 처분 관행의 변화를 감안하여 액체 방사성폐기물을 공공 하수설비에 처분함에 대한 연구용역을 발주하였다. 두 곳의 하수체계에 대한 결과는 최대 방출량에서 일반인의 선량이 연간  $1\text{mSv}$ 인 선량한도 아래였다. 또, 보고서는 배출 감소대책의 전반적 도입은 현재의 관행에 근거해 정당화되지 않는다는 결론을 내렸다(UK EA, 2002).

(99) Crockett(2000)은 영국의 두 도시하수처리장의 방사능 실측값을 보고했고, 폐수 중의 방사성핵종 거동과 하수 근로자 및 일반인의 잠재적 선량을 평가하기 위해 영국방사선보호원UK National Radiological Protection Board이 개발한 전산 모델을 이용했다. Crockett은 하수처리장 방사능 대부분이 Tc-99m와 이를 뒤따르는 I-131에 기인함을 발견했다. 만일 모든 병원 등이 허용 한계로 방출한다면 일반 하수 근로자와 오니압축 근로자에 대한 선량은 각각  $40\sim 80$ 과  $150\sim 240\mu\text{Sv/y}$ 의 분포를 갖는다. 전형적으로 병원들은 대략 최대 허용한계의 30%로 방출했다. 처리된 오수의 방출로부터 일반인 선량은 최대 허용한계 병원 방출에 대해서는  $30\sim 180\mu\text{Sv/y}$ , 전형적 방출에 대해서는  $1\sim 19\mu\text{Sv/y}$ 가 된다. 오니 소각에 따른 대기 중 방출로부터 일반인 선량은 훨씬 적다( $<2\mu\text{Sv/y}$ ). 또한 Crockett(2000)은 폭우로 하수처리장 용량이 초과되었을 경우 처리되지 않은 방출이 물로 유입되어도 일반인의 선량은 폭우에 의한 높은 준위의 희석 때문에 현저하게 영향

받지 않음을 지적했다.

## 9.4. 매립식처리<sup>8)</sup>

(100) 최근 개정된 미국 원자력규제위원회 USNRC 규정은 갑상선암에 대해 높은 준위의 I-131을 필요로 하는 대부분 환자들을 외래로 다루는 것을 가능케 한다. 규정 개정 이전에는 환자에 의해 오염된 물건들을 병원이 수거하여 지연 붕괴시켰지만, 현재는 이러한 물건들이 흔히 외래환자의 집으로부터 쓰레기로 수집되어 매립식처리장으로 보내진다. 많은 매립식처리장은 현재 분실된 선원을 찾기 위한 방사선검출기들을 보유하고 있는데, 이러한 검출기들은 매우 민감하여 방사성옥소를 검출해 낼 수 있다. 검출기들은 통상 지극히 낮은 방사능 준위 검출에도 경보를 발하여 경보 원인을 찾기 위한 값비싼 수색을 초래할 수도 있다. 어떤 경우에는 해당 폐기물 발생자를 역추적하여 관련 비용을 환자에게 청구하기도 한다. 미국의 일부 지역에서는 허가사용자 licensee에게 책임이 부과되기 때문에, 일부 병원에서 법률적으로 가능성에도 불구하고 환자를 퇴원시키지 않는 이유가 된다. 붕괴가 빠른 저준위 물질의 처분에 관한 규제개혁 필요와 아마도 분광분석 능력의 필요가 제기되었다.

(101) 침출수 처리를 갖춘 현대식 매립식처리장에서는 의료분야에서 사용되는 단수명 방사성핵종이 완벽히 붕괴하기 전에 지하수에 도달하기는 지극히 어렵다. Siegel과 Sparks(2002)는 퇴원하는 핵의학 환자들은 안전하다고 간주되지만 매립식처리장에서 환자의 폐기물이 위해한 것으로 간주되는 모순을 강조했다. Marcus와 Aldrich(1997)은 이 이슈가 해소될 때까지 다음을 포함하여 문제를 최소화하기 위한 여러 제안을 했다.

- 종이 용지나 냅킨보다는 씻을 수 있는 재료 이용
- 치료 후 첫째 주에는 침에 의한 오염을 줄이도록 전체를 먹을 수 없는 음식 (예: 사과, 갈비 등) 회피
- 하수로 처리하거나 씻을 수 없는 물건들의 저장.

---

8) <역주> landfill을 의미하는 우리 용어로 통상 ‘매립’이 사용되어 왔으나 매립은 지형이 낮은 땅에 토사 등을 메워 토지의 용도를 개선할 목적으로 이루어지는 것으로서 토지의 관점에서 보는 말이다. 폐기물을 묻어 처분하는 것은 토지의 입장이 아니라 폐기물의 입장에서 보는 것이므로 ‘매장’이나 ‘매몰’을 사용할 수 있겠으나 기존 사용 관행을 고려하여 ‘매립식처리’라는 용어로 바꿔 사용하기를 시도한다.

(102) 매립식처리장의 방사선 검출기는 또한 많은 병원의 운영정책에 변화를 가져온다. 방사성옥소에 의한 치료를 위해 입원한 환자들은 관리될지라도 혈액 샘플(통상 Tl-201, Ga-67 및 I-131에 의해 오염됨)과 기타 물품(예, 귀저기) 형태의 방사성폐기물은 의료폐기물로 처리된다. 이 폐기물들이 감지되어 다시 병원으로 돌아온다. 한 병원을 조사한 결과 대략 20%의 폐기물에서 방사능이 검출되었다(Evdokimoff 등, 1994). 그 결과 많은 병원들은 쓰레기통이나 의료폐기물이 수송되어 병원의 나가는 구역에 방사선검출기를 설치하였다. 방사선이 감지되면 선원을 색출하여 좀 더 붕괴시키기 위해 보관하거나 방사성폐기물로 처리한다.



## 10. 입원과 퇴원의 결정

- 환자의 입원과 퇴원 결정은 개별 근거로 결정해야 한다. 결정은 환자 체내의 잔류방사능에만 연계해서는 안 되며, 환자가 다른 사람과 접촉하는 양상, 환자의 바램, 직업상 또는 일반인 피폭, 가족 고려, 비용 및 환경적 인자를 포함하는 많은 인자들을 고려해야 한다.
- ICRP 권고는 높은 방사능 방사성의약품을 이용한 치료 후에는 환자들이 입원해야 한다고 명확히 말하지는 않으나, 다른 사람들을 위한 일반인 선량한도와 선량제약은 존중되어야 한다고 권고한다. 추가하여 최적화가 따라야 한다.
- 최근 문헌들은 일부 당국이 환자를 입원시키는 데 사용하는 가정이 일반인과 간병인에 주는 잠재적 선량을 과대평가할 수 있음을 지적해 왔다.
- 환자를 며칠 입원시키면 일반인이나 친지의 피폭을 줄일 수 있을 것이나 직업상피폭은 증가할 것이다.
- 격리와 입원은 종종 환자와 가족들에게 상당한 심리적 부담을 줄 수 있다.
- 방사성옥소를 이용한 치료 후 입원은 상당한 금전적, 금전 외적 비용을 초래하는데 이러한 비용은 분석되고 정당화 되어야 한다.
- 수 시간 정도로 제한된다면, 방사성옥소 치료를 받은 환자의 나들이는 다른 사람들에게 위해를 거의 주지 않는다.
- 환경방사선 감시기 또는 다른 방사선 검출장치들은 여러 주 전에 방사성옥소 치료를 받았던 환자들을 검출할 수 있을 정도로 충분히 민감하다. 이러한 검출기를 다루는 사람은 핵의학 환자를 식별하고 다루기 위한 특별한 훈련을 받아야 한다.
- 환자 행동제한에 대한 제안들은 모델과 가정들이 다르기 때문에 문헌마다 상당히 다르다.
- 방사선방호 주의사항을 지킨 환자의 친지 및 간병인에 대해 실측한 선량은 ICRP가 권고한 사건 당 수 mSv인 선량제약에 도달 또는 초과하는 일이 거의 없음을 보여준다.
- 환자 퇴원에 따르는 제한은 유아나 아동과 같은 민감한 부분집단에 초점을

맞춰야 한다.

## 10.1. 일반

(103) 비밀봉 방사성핵종을 이용한 치료 후 환자 퇴원에 관한 현재의 권고들은 세계적으로 매우 다르다. 퇴원 기준으로서 다음이 사용되고 있다.

- (i) ICRP 선량한도와 선량제약
- (ii) ICRP 권고와 다른 선량의 제약
- (iii) 환자 체내 잔류 방사능(외부선량을 측정으로부터 평가된)
- (iv) 환자로부터 특정 거리에서 선량률
- (v) 특정 질환의 방사성옥소 치료가 이유인 입원(갑상선항진 또는 갑상선암)
- (vi) 가정의 아동이 이유인 입원

(104) 실용적 목적에서 퇴원시점에 환자 체내에 남아있는 방사능과 일반인 또는 친지의 피폭을 연계시키는 것이 편리하다(표10.1). 만일 이것을 따른다면, 일반인의 선량 측정까지 추적될 수 있는 현실적 모델과 최근 간행물에 기반을 두어야 한다. 의문은 많은 환자들이 불필요하게 입원 처리되고 있는가 하는 점인데 이러한 견해는 러시아와 영국, 그리고 미국의 저자들이 제기해 왔다(Barrington 등, 1996a; de Klerk, 2000; NCRP, 1995; Shiskanov 등, 2001; Siegel, 1999). Saenger과 Kereiakes(1980)는 방사능에 기반을 둔 입원 때문에 의사들이 환자가 입원하는 것을 피하기 위해 선호하는 양보다 작은 방사성의약품을 투약한다고 보고했다. 준수를 위한 유일한 기준으로서 잔류 방사능을 사용하는 것은 이것이 그 이후의 환자 행동과 친지나 일반인의 궁극적인 선량과 거리가 멀다는 문제점을 갖고 있다.

(105) 환자의 입원이나 퇴원과 관련해서 고려해야 할 사항을 표10.2에 보였다.

(106) 비밀봉 방사성핵종을 이용한 치료 후 입원하게 되는 환자들은 다음 이유들 때문일 것이다.

- (i) 환자의 제한이나 격리는 일반인과 친지의 선량을 감소시키지만 의료진의 직업상 선량을 증가 시킬 것이다. 이는 옥소-131에만 관련된 문제이며 순수 베타 방출체로 치료받은 환자는 입원할 필요가 없다.
- (ii) 병원에서는 방사능을 감소시키기 위해 소변을 정화계통으로 수집하거나 저장할 수 있다. 위에서 언급한 바와 같이, 일부 병원은 환자를 제한하거나

격리하지만 그들의 소변은 수집하거나 저장하지 않는데, 이 관행이 현실적이지 않고 많은 비용을 발생시키며, 병원 직원의 선량을 증가 시키고, 배수의 실측과 그 잠재적 영향의 견지에서 불필요한 것으로 간주하기 때문이다. 일부 저자들은 대변의 수집과 저장도 제안하지만 대변은 배설의 작은 경로이므로 이의 수집은 일반적으로 수행되지 않는다.

- (iii) 비밀봉 방사성핵종을 이용한 치료를 받은 심각한 질환자(예: 광범위하게 전이된 암환자의 복막강에 투여하는 P-32).
- (iv) 방사선방호 지침과 주의를 지킬 수 없도록 정신적으로 무능하거나 자제력이 없는 환자.

표10.1. 타인에 대한 외부선량(mSv 유효선량)에 근거한 퇴원환자 방사능(MBq)

핵종	반감기	5mSv 기준 방사능 (MBq)	1mSv 기준 방사능 (MBq)
<sup>111</sup> Ag	8일	19 000	3800
<sup>198</sup> Au	65시간	3500	690
<sup>51</sup> Cr	28일	4800	960
<sup>64</sup> Cu	13시간	8400	1700
<sup>67</sup> Cu	61시간	14 000	2900
<sup>67</sup> Ga	78시간	8700	1700
<sup>123</sup> I	13시간	6000	1200
<sup>125</sup> I	60일	250	50
<sup>131</sup> I	8일	1200	240
<sup>111</sup> In	67시간	2400	470
<sup>32</sup> P	14일	a	a
<sup>186</sup> Re	90시간	28 000	5700
<sup>188</sup> Re	17시간	29 000	5800
<sup>47</sup> Sc	80시간	11 000	2300
<sup>75</sup> Se	120일	89	18
<sup>153</sup> Sm	47시간	26 000	5200
<sup>117m</sup> Sn	14일	1100	210
<sup>89</sup> Sr	51일	a	a
<sup>99m</sup> Tc	6시간	2800	5600
<sup>201</sup> Tl	74시간	16,000	3100
<sup>90</sup> Y	64시간	a	a
<sup>169</sup> Yb	31일	370	73

출처 : US Nuclear Regulatory Commission (1997b).

a 일반인에 대한 선량이 거의 없어 그 값이 주어지지 않았다.

(v) 물리적 또는 사회적 제약으로 인해 아동과 가깝게 접촉하는 가정환경. 만일 소변이 병원에서 수집, 저장되지 않는다면 일반적으로 논의되지 않는 한 가지 대안은 환자가 며칠 동안 호텔 같은 비의료 주거시설에 머무는 것이다. 이것이 병원에 머무는 것보다 비용이 적게 소요되지만, 명백히 모든 국가가 아닌 몇몇 국가에서만 가능하다.

표10.2. 비밀봉 방사성핵종으로 치료받은 환자의 입원과 퇴원여부 결정에 사용되는 일반적 논점

논점	입원	퇴원
환자 환경의 관리	높음	낮음
직업상 선량 잠재성	있음	극소
친지에 대한 선량 잠재성	최소	존재
일반인에 대한 선량 잠재성	최소	존재
폐기물 처리 방법	하수나 저장	하수
폐기물로 인한 일반인 피폭	저장하지 않을 경우 존재	옆과 같다
금전적 비용	잠재적으로 높다	극소
심리적 영향	격리로 인해 상당함	극소
환자의 죽음	장래직원 피폭 화장 제한 가능	옆과 같다

(107) 거의 언급되지 않지만 상당한 이슈는 입원의 다른 잠재적 위험으로서 양호한 환자를 항생물질에 내성을 갖는 감염에 노출되는 환경에 두는 것이다. 몇몇 전문가들은 입원의 장점으로 I-131의 생물역동학을 평가하고 정확한 흡수선량을 계산하는 것을 제안했다. 그러나 생물역동학적 연구는 외래환자를 통해서도 수행될 수 있기 때문에 이것만으로는 입원을 정당화하지 못할 것 같다.

(108) 아동이나 동의를 구하기 어려운 성인들의 경우에는 의사는 누구에게 방사선방호 지침을 제공하고 권고해야 하는지를 결정해야 한다.

(109) ICRP가 모든 다양한 환자들과 가정환경에 대한 기준을 제공할 수는 없다. 환자를 치료하는 의사가 위의 인자들을 평가하여 방사선방호 이슈를 고려할 때 각 환자의 상황에서 무엇이 가장 적절한지 결정해야 한다.

## 10.2. 의료진의 직업상 선량

(110) 환자가 병원에 억류되어 있을 때 직업상피폭의 주요 선원은 외부 방사선이다(Castronovo 등, 1986 ; Ho와 Shearer, 1992). Barrington 등(1996a)은 갑상선 암의 제거와 후속추적을 위해 I-131을 투여한 환자를 돌보는 7일 동안 간호진의 직업상 선량을 계산했는데 그 결과를 표10.3에 보였다. 실측은 Barrington 등에 의해 수행된 평가가 매우 보수적이라는 것을 말해준다. 예를 들어 Denman과 Martin(2001)은 800MBq의 방사성옥소를 투약 받은 말기 암 환자 간병인의 실제 값을 보고했는데 여기에서 간호사가 최대 250  $\mu$ Sv의 유효선량을 받은 것으로 나타났다.

표 10.3. I-131을 이용한 갑상선 절제치료<sup>a</sup> 후 7일 동안 환자로부터 받는 간호요원의 계산된 누적선량(mSv)

방사능(MBq)	간호 없음	부분적 간호	병상환자	준 보행환자	보행환자
1850	6.2	2.4	1.0-1.1	0.2	0.08
3700	12.6	4.8	2.1	0.4	0.16
5550	19.0	7.1	3.1	0.6	0.25
7400	25.3	9.5	4.2	0.8	0.33

출처 : Barrington 등(1996a).

a 암 추적 환자의 값은 이 값들의 10%이내이다

(111) 예를 들면 심장질환이 있는 전이 갑상선암 또는 갑상선항진 환자처럼 일부 환자들은 의료상 불안정하여 비밀봉 방사성핵종을 이용한 치료 후 퇴원할 수 없다. 이러한 환자들은 일반적으로 격리 병실에 입원되지만 수술이나 의식회복 절차를 요구하는 긴급한 상황이 생길 수 있다. Griffiths 등(2000)은 이러한 한 경우에서 직업상 방사선 피폭과 오염에 대해 보고했다. 환자가 3011 MBq의 NaI-131을 투여 받은 6일 후에 수술이 필요했다. 환자는 결국 사망했고, 부검을 거쳐 화장되었다. 외과의사는 20 $\mu$ Sv의 선량을 받았고, 중환자실 담당 간호사는 40 $\mu$ Sv를, 그리고 영안실 관리자는 14 $\mu$ Sv를 받았다. 만일 외과수술이 다급한 상황이 I-131을 투약한 직후에 발생되었다면 의료진의 선량은 0.8 mSv까지 높아질 수 있다고 평가되었다. 중환자실의 채액 용기와 세탁실에 상당한 오염(대략 6 MBq)이 있었다.

(112) 병원에 격리되어 있는 환자들은 접촉하는 표면, 특히 화장실 주변 지역의 표면을 오염시킨다. 이러한 지역은 종종 다른 환자들이 사용하기 전에 제염을 필

요로 할 것이다. I-131은 침 속에서 발견된다. 따라서 간호사들은 구토, 기침 또는 콧물을 흘리는 환자를 다룰 때 주의해야한다. I-131로 치료받은 환자는 호흡을 통해 방한 공기로 얼마정도를 배출한다. 하나 이상의 보고서에서 갑상선 암 환자는 치료 후 최초 하루 동안은 최대 허용농도를 넘기기에 충분한 방사능을 내준다고 했다(Ibis 등, 1992). 때로는 방사성옥소로 치료받은 환자가 그들의 혈액과 관련된 절차(특히 혈액투석haemodialysis)를 필요로 한다. I-131로 치료받은 환자가 혈액투석을 받는 뒤, 투석 장치에 유의한 방사능 오염은 보고되지 않았다. 이는 Tc-99m 같은 다른 방사성핵종을 투여 받은 환자에서도 확인되었다. I-131로 치료받은 환자 투석 후, 1회용 도관, 폐기물 주머니와 필터에 경미한 오염이 있어 폐기에 앞서 대략 8주 정도 보관하여 붕괴시킬 필요가 있었다. 투석을 하는 갑상선항진 환자에서 I-131의 평균 유효반감기는 약 7일로 나타났는데 이는 투석을 하지 않는 갑상선항진 환자에서 보다 길다(Homer와 Smith, 2002).

### 10.3. 입원의 심리적 비용

(113) 병원에서 고립은 비록 환자 퇴원 관점에서 거의 고려되지 않지만 환자에게 특유하고 의기소침하게 만드는 환경으로 널리 인식된다. 많은 경우에 병실 고립이 환자들로 하여금 치료가 실제보다 매우 위험한 것으로 느끼게 만든다. 방호적 수단이 강화될수록 환자들은 더 불안해한다. 환자들을 격리시키는 주된 이유가 많은 환자들로부터 의료진이 받는 누적된 직업상 피폭을 제한하고 ALARA(주어진 사회 경제적 여건에서 합리적으로 도달 가능한 선량을 낮게 유지함)원칙을 위해서임을 깨닫지 못한다. 방사성핵종 치료를 받은 후 권고에 따라 많은 제한을 받는 환자는 큰 방사선위험이 있다고 느낀다. 격리의 근본 이유가 설명되지 않는다면 심리적 불안을 증가시킨다(Garcia, 2001). 심리적 불안은 환자를 입원시킬 것인지 퇴원시킬 것인지를 결정하는데 있어서 중요하게 고려되어야 한다.

(114) 방사성옥소로 치료받은 환자의 가정에 유아나 아동이 있을 때는 외부 피폭과 환자의 침에 의한 오염 모두 위험이 있다. 그러나 아이에게 부모의 역할은 매우 중요하므로 아이와 부모를 떼놓는 것을 고려할 때는 이러한 분리의 심리적 비용도 고려해야 한다.

## 10.4. 임원의 편익 분석

(115) 방사선방호 이슈의 일부로서, 행위나 절차의 정당화와 최적화 모두의 관점에서 비용이 고려되어야 한다. 비밀봉 방사성 핵종으로 치료 받은 환자의 퇴원과 관계되는 다양한 방법들에 수반되는 비용을 결정하기 위해 노력한 연구자나 기관은 거의 없다. 이상적으로는 ‘비용’은 금전적 비용뿐만 아니라 심리적 그리고 부정적 건강 영향을 포함해야 한다. 구체적 이슈를 위한 비용-편익 분석은 나라마다 상당히 다를 수 있으나 그러한 분석이 최적화 절차를 도울 수 있는 수단을 제공한다.

(116) 미국 원자력규제위원회는 다음의 세 가지 대안을 검토했다.

- (i) 대안1: 환자 자신이 아닌 모든 사람들에 대해 연간 1mSv의 유효선량한도 달성하도록 규정을 수정함.
- (ii) 대안2: 환자체내에 잔류 방사능이 1100 MBq 이하 또는 환자로부터 1m 거리에서 선량률이 시간 당 0.05 mSv 이하로 될 때까지 환자 격리를 요구함.
- (iii) 대안3: 환자에 의해 피폭하는 사람에 대해 5 mSv의 유효선량한도를 명시함.

(117) I-131을 사용하여 수행되는 몇 가지 진단절차를 제외하고는 진단절차는 대안 선택에 의한 영향을 받지 않고 단지 일부 치료절차가 대안 선택에 의한 영향을 받았다. 분석의 결과는 표10.4에 나타나 있다. I-131의 짧은 물리적 반감기 때문에, 그리고 다른 사람의 피폭 대다수는 외부피폭에 기인하므로 집단 선량은 방사성옥소 투여 후 약 1주 동안에 환자 주위에 있는 사람 수의 함수이다. 이러한 분석을 위해 환자에게 투여한 평균 방사능을 평가하고 환자 외에 최대로 피폭하는 사람의 선량을 추정하였다. 점유율에 근거하여 절차 당 집단선량은 최고

표10.4 미국에서 비밀봉 방사성핵종 투여환자 퇴원에 관한 대안의 연간 비용에 대한 평가

대안	집단선량 (man-Sv)	입원 유지 (일)	입원비용 (백만달러)	시간비용 (백만달러)	기록유지비 (백만달러)	심리적비용 (상대평가)
1	184	427000	427	256	0	높음
2	298	16000	16	10	0	중간
3	325	0	0	0	2.3	낮음

대안1은 가장 낮은 집단선량, 가장 높은 비용 및 가장 높은 심리적비용과 관련된다. 이것과 대안3을 비교하면 집단선량의 감소는 비용으로 대략 2백만 달러/인/Sv이다.

출처 : US Nuclear Regulatory Commission (1997a).

로 피폭하는 개인 선량의 대략 3배로 가정하였다. 갑상선절제와 갑상선암 치료에 대해서 절차 당 집단선량은 각각 4.7 man-mSv와 15 man-mSv으로 평가되었다. 금전적 비용은 나라마다 다르지만 비용은 절차의 빈도와 관련된다. 표10.4는 미국에서 대안 선택의 영향을 보여준다.

## 10.5. 환자 여행으로 타인의 선량

(118) 투여방사능이 800 MBq 미만인 갑상선항진 환자에 대한 최근 영국의 연구에서, 퇴원하여 집으로 가는 중 여행 선량률은  $49 \mu\text{Sv/h}$  ( $4 \sim 252 \mu\text{Sv/h}$  범위)로 평균된다. 이 평가와 다른 측정들에 근거하여 일부 저자는 자가용 여행에 대한 시간제한은 필요하지 않고, 제약은 단지 대중교통 이동에 대해서만 가끔 필요하다고 지적했다(Barrington 등, 1996b; Gunesequera 등, 1996). O'Doherty 등 (1993)은 방사성옥소로 치료받은 갑상선항진 환자의 여행에 대한 지침을 제안했는데, 이를 표10.5에 보였다.

표10.5. 일반인 선량을 5와  $1\text{mSv/y}^a$ 로 제한하기 위한 성인 갑상선항진 환자에 대해 제안되는 일일 여행시간(단위: h/일)

방사능(MBq)	자가용 여행		대중교통 여행	
	첫 주	둘째 주	첫 주	둘째 주
200	24(24)	24(24)	24(3.5)	24(24)
400	24(24)	24(24)	12(1.5)	24(14)
600	24(24)	24(24)	7(1.0)	24(9)
800	24(24)	24(24)	4(0.5)	24(7)

자가용 여행은 파트너 외 사람과 1m에서 있고, 대중교통 여행은 파트너 외 사람과 0.1m에서 접촉하는 것으로 가정하였다.

출처 : O'Doherty 등(1993).

a) 괄호 안의 값은 일반인 선량을  $1\text{mSv/y}$ 로 제한하기 위해 제안된 시간이다.

(119) 실측 선량률에 근거해서 Barrington 등(1996a)은 절제를 위해서나 후속추적을 위해 I-131로 치료받은 갑상선암 환자가 주는 일반인 선량을  $1\text{mSv/y}$ 로 제한하기 위한 여행 지침을 계산했다. 표10.6은 그 결과이며, 표10.7은 제안된 제약들을 비교하고 있다.



표10.6. 일반인 선량을 1mSv로 제한하기 위한 갑상선암환자에 대한 자가용 여행시간 (단위: h)

방사능(MBq)	투여 후 24시간까지	투여 24시간 이후	투여 48시간 이후
1850	8	20.5	24
3700	4	10	18.5, 24 <sup>a</sup>
5550	2.5	6.5	12.5, 17 <sup>a</sup>
7400	2	5	9, 13 <sup>a</sup>

출처 : Barrington 등(1996a).

a) 첫 값은 절제 환자에 대한 것이고, 둘째 값은 후속추적 환자에 대한 값이다.

표10.7. I-131 투여환자와 접촉하는 사람의 피폭을 1mSv/y로 제한하는 여행제약을 상이한 모델로 도출한 결과의 비교

방사능(MBq)	1일 자가용 여행 시간(h)	1일 대중교통 여행 시간(h)
200	24(24)	8.0(3.5)
400	24(24)	4.0(1.5)
600	24(24)	2.5(1.0)
800	24(24)	2.0(0.5)

출처 : Leslie 등(2002) 및 O'Doherty 등(1993). 괄호 안의 값이 O'Doherty 등(1993)의 값이다.

## 10.6. 국경, 공항 등의 방사선 검출기

(120) 감마선이 측정될 만한 체내 방사성핵종을 가진 환자를 퇴원시킬 때 한 가지 고려할 점은 방사선계측 시스템이 있는 국경, 공항 또는 기타 지역에서 그런 환자가 예기치 않게 검출되는 문제이다(IAEA, 2002b). 방사선계측 시스템이 있는 지역(원자력발전소나 연구실과 같은)으로 직무에 복귀할 경우에서도 환자의 퇴원에 동일한 고려가 필요하다. 일터로 복귀하는 환자는 신분이 대체로 잘 알려져 있고, 소정 수준의 보안 승인을 받고 있는 상황이므로 큰 어려움은 없다.

(121) 환자가 공항 등에서 검지되었을 경우에는 상황이 보다 어려운데, 이러한 검출장치들은 불법 방사성물질의 이송을 제한하고 분실선원의 부주의한 이동을 검출하기 위한 장소에 있기 때문이다. 많은 의료 방사성핵종들이 짧은 반감기를 갖는다 하더라도, 수 일 혹은 여러 주 동안은 잔여 방사능이 현대 검출시스템에 검지될 수 있다. 국경 검출기가 울리는 대부분의 경보는 불법 물질에 의해서가 아닌 의료 방사성핵종이나 천연방사성물질에 의한 '결백한' 것이다. 사람에게 대해 경보가 울리면, 통상 그 사람을 검출기로 재차 보낸다. 경보가 다시 울리면 그

사람은 휴대품과 격리하고 수색 및 조사를 받게 된다. 검출장치가 감마선 스펙트럼을 측정하고 방사성핵종을 식별한다면 크게 편리할 것이 분명하다.

(122) 많은 의사들이 수행한 치료내용을 기록한 정보 카드를 환자에게 제공하지만 이것이 어설프게 훈련된 보안 요원에게 인정되지 않을 지도 모른다. IAEA는 합법적 방사성핵종들과 함께 불법 물질의 수송 가능성을 지적해왔고, 그 결과로 많은 환자들이 제지되고 심문을 받을 것이다(Buettner와 Surks, 2003). 이러한 불편함을 감수하기 싫다면 그러한 환자들은 주요 공공장소(공항, 국경 관문, 지하철, 선박 및 공공건물)로 여행을 자제하는 것이 좋다. 환자에게 그러한 조언을 할 때는, 검출 장치가 고도로 민감하여 건강에 우려되는 정도보다 훨씬 낮은 준위에서도 잘 검출한다는 것을 명확히 해야 한다. 현재의 기술로는 2~3m 거리에서 대략 0.01MBq의 I-131 방사능도 검출 가능하다.

## 10.7. 가정환경에서 피폭

(123) 방사성옥소를 투여 받은 환자의 친지 및 간병인에 대해 제안된 제한은 매우 다양한데 여기에는 많은 이유가 있다. 어떤 거리에서 짧은 시간 측정된 선량을 유효선량 대용으로 보면 제안된 제한은 두 배 이상 과하게 엄격할 것이다. 어떤 연구자들은 점선원 혹은 선형선원 중 하나에 대해 팬텀에서 측정을 했는데 여기서도 차이가 난다. 환자로부터 방사성옥소 제거의 역동학에 대한 많은 모델에도 가정들이 있다. 마지막으로 여행 방식, 함께 자는 시간, 친지와 거리 등에 관한 가정에도 차이가 있다. 많은 이러한 인자들이 나라들 사이에서, 같은 나라에서도 집마다 상당히 다르다. 모텔을 사용하고 습관에 대해 가정할 때 평균값이 아니라 67과 95 사이의 백분위 값을 사용하는 것이 아마도 신중할 수 있다. 결국 친지와 간병인에 대한 선량의 실측값이 모델보다 더 가치가 있을 것이다.

(124) Hilditch 등(1991)은 갑상선항진 환자에게 NaI-131 투여 후 각기 다른 시간에서 백분비로서 평균 갑상선 방사능을 측정했는데, 이 값들을 일반인이나 아동에 대해 환자와 제한된 접촉 지속시간을 결정하는 데 사용할 수 있다고 제안했다. 미국 NRC 규칙(USNRC1997b) 개정판에서는 치료 후 환자 퇴원은 더 이상 잔여 방사능에 근거하는 것이 아니라 일반인과 간병인에 대해 평가된 선량에 근거한다. 환자로부터 오염이 타인에게 심각한 선량을 야기하지 않을 것이라는 가정에 따른다. Johnson 등(2002)은 방사성옥소로 치료 받은 갑상선암 환자 친지의 갑상선 방사능을 측정했는데, 가장 큰 갑상선 섭취는 유효선량 0.08mSv를

야기했다. 신생아였다면 그 최대값은 1.4mSv의 유효선량을 야기했을 것이다.

(125) 방사성옥소 치료 환자가 가정에 주는 손해는 수십 년간 연구되어왔다. NaI-131이 740 MBq 미만으로 낮아진 후에 퇴원한 갑상선항진 환자에 대한 초기 연구에서 매우 낮은 옥소 방사능만 친지에게서 검출되어 외부 방사선량이 더 중요한 것으로 나타났다(Buchan과 Brindle, 1970, 1971). 외부 방사선량도 여전히 당시 권고된 선량한도 이내로 잘 유지되었다. 다른 초기 연구도 대부분의 경우에 친지에 대한 외부선량이 교차오염으로 인한 선량보다 매우 큰 것으로 결론을 내렸다. 하지만 많은 친지들에게서 측정 가능한 갑상선 방사능은 발견된다(Jacobson 등, 1978).

(126) 가정의 환자들에게 부과되는 제한들은 공표된 문헌들에서 매우 넓게 제안되는데 여기 몇 가지 예가 있다(부록B 참조). Leslie 등(2002)은 대부분의 모델이 근접한 거리에서 방사성옥소로부터 선량률을 과대평가하고 있다고 지적했다. 그들은 성인과 유아팬텀을 사용했는데 성인팬텀이 받는 선량은 환자와 접촉, 1m 및 2m의 거리에서 측정되었고 유아팬텀이 받는 선량은 두 가지 자세(환자가 어깨 위 또는 허리에 유아를 안은 상태)로 접촉에 대해 측정되었다. 팬텀에서 측정된 선량은 달리 모델에 의해 예측한 선량보다 상당히 낮았다. 이것이 맞다면 환자의 접촉제한이 현재 널리 적용되고 있는 것보다 완화될 수 있음을 시사한다. 표10.8은 O'Doherty 등(1993)과 Leslie 등(2002)의 결과를 비교한 것인데 특히 파트너와 잠자리 분리나 결근에서 커다란 차이를 보이고 있다. 친지에 대한 선량의 실측값이 가장 현실적이다. O'Doherty 등(1993)이 제안한 지침을 표10.9에 나타내었다.

표10.8 I-131 환자와 접하는 사람의 피폭을 1mSv/y로 제한하도록 상이한 모델로 개발하여 제안한 직장과 가정에서 제한의 비교<sup>a)</sup>

방사능(MBq)	직장 결근(일)	파트너와 잠자리 분리(일)	유아와 근접을 제한한 시간(일)
200	0(0)	0(15)	10(15)
400	0(4)	0(20)	15(21)
600	0(6)	0(24)	18(25)
800	0(8)	0(26)	20(27)

a) 출처 : O'Doherty 등(1993)과 Leslie 등(2002). 괄호 안의 값은 O'Doherty 등(1993)에 의한 값이다.

표10.9. 동료와 친지 선량을 5와 1mSv로 제한하기 위한 I-131 갑상선항진 치료환자 지침<sup>a</sup>

방사능 (MBq)	직장결근 (일)	잠자리 분리 <sup>b</sup> (일)	아동과 접촉 제한(일)		
			2세 미만	2~4세	5~10세
200	0(0)	1(15)	2(15)	0(11)	0(5)
400	0(3)	7(20)	8(21)	3(16)	0(11)
500	0(6)	11(24)	11(24)	6(20)	1(14)
800	0(8)	13(26)	14(27)	9(22)	3(16)

출처 : O'Doherty 등(1993).

a) 팔호안의 값은 선량을 1mSv로 제한하기 위해 제안된 지침

b) 하루 8시간 1m 거리에서 자는 가정

(127) 갑상선암 치료 다음 2일간 입원 후 퇴원한 환자에 대한 벨기에의 한 연구는 2주 동안 동반자의 선량당량 중간값이 8일간 따로 잠자리를 가진 동반자는 0.17 mSv(범위 0.02~0.49 mSv)이고 같은 잠자리를 가진 경우는 0.24 mSv(범위 0.05~0.53 mSv)임을 보였다. 갑상선항진 환자에 대해서는 상응하는 선량이 각각 1.07mSv(범위 0.22~1.27 mSv)와 1.01mSv(범위 0.05~5.23 mSv)였다. 이는 함께 자는 것이 파트너 선량을 0~40%까지 증가시킬 수도 있음을 시사한다(Mathieu 등, 1997).

(128) 벨기에의 많은 병원에 대한 연구는 방사능 중간값이 759 MBq이고 평균이 370MBq(185~1665 MBq 범위)를 갖는 갑상선항진 치료 환자 52명의 친지들에 대한 데이터를 보고했다. 외래환자와 입원환자의 친지들에 대한 평균 선량은 각각 0.6mSv(0~2.0mSv 범위)와 0.8mSv(0.4~1.7mSv 범위)였다. 입원환자는 1m 거리에서 선량율이 20  $\mu$ Sv/h미만일 경우에 퇴원했다. 잠자리 조정도 연구되었는데 환자가 21일 동안 떨어져 잠졌을 경우, 파트너의 총 선량은 1mSv 미만이었다.

(129) 영국의 다섯 센터에서 388 MBq(200~608 MBq 범위)의 중간값 방사능을 갖는 갑상선항진 환자에 대한 연구는 모든 성인 가족에게서 외부선량이 5.3mSv 미만임을 보고했다(Barrington 등, 1999). 저자는 또한 잠자리 조정의 효과를 연구했다. 두 종류 조연(A와 B)이 주어졌다. 조연A에서는 잠자리 분리 기간이 200 MBq에 대하여 1일, 400 MBq에 대해 5일, 600 MBq에 대해 9일 그리고 800 MBq에 대해 12일이었다. 조연B에서 잠자리 분리는 200 MBq에 대해 15일, 400 MBq에 대해 20일, 600 MBq에 대해 24일, 800 MBq에 대해 26일이었다. 조연B를 따른 사람의 성인 선량은 조연A를 따른 사람 선량의 32%였다(표10.9 참조).

(130) Barrington 등(1996a)은 갑상선암 환자가 제한을 따르지 않는 경우 동료나 친지들이 받을 수 있는 잠재적 선량 평가를 발표했다. 이를 표10.10에 보였다.

표10.10. 제한이 준수되지 않을 때 갑상선암 환자로부터 동료와 친지가 받는 누적선량 (mSv) 평가

방사능(MBq)	동료	파트너	2세 미만 아동	2~4세 아동	5~10세 아동
1850	1, 2 <sup>a</sup>	18, 26	25, 33	13, 17	7, 9
3700	3, 5	35, 52	50, 66	26, 35	13, 18
5550	4, 7	53, 78	75, 99	38, 52	19, 26
7400	5, 9	71, 104	100, 132	51, 69	26, 35

출처 : Barrington 등(1996a).

a) 첫 번째는 암 추적조사 환자에 대한 값이고, 두 번째는 절제환자에 대한 값이다.

(131) 덧붙여 Barrington 등(1996a)은 동료나 친지들에 대한 선량을 1mSv로 제한하기 위한 지침을 발표했다. 표10.11에 이를 보였다.

표10.11. 동료와 친지 선량을 1mSv로 제한하도록 갑상선암 환자에 대해 제안된 지침

방사능 (MBq)	직장 결근 (일)	파트너와 잠자리 분리(일)	아동과 접촉 제한(일)		
			(2세 미만)	(2~4세)	(5~10세)
200	1, 3 <sup>a</sup>	3, 16	4, 16	3, 13	2, 10
400	2, 7	4, 20	4, 20	4, 17	3, 13
500	2, 10	4, 22	5, 22	4, 19	3, 16
800	2, 12	5, 23	5, 24	4, 21	4, 17

출처 : Barrington 등(1996a).

a) 첫 번째는 암 후속추적 환자에 대한 값이고, 두 번째는 절제환자에 대한 값이다.

(132) 더 최근에 영국 방사선의학연구소British Institute of Radiology(1999)가 낸 권고에서는 표10.12에서 보는 바와 같이 제한 기간이 다소 짧아졌다.

(133) 동의능력이 부족한 아동의 경우에는 아동에 대해 부모 책임이 있는 사람에게 방사선방호 조언을 주어야 한다. 일부 나라에서는 부모가 그들의 아이를 대신하여 동의할 수 있지만 그렇지 않다면 일반인 선량한도를 적용한다. ICRP 간행물 60(ICRP,1991)은 5년간 평균이 1mSv/y를 초과하지 않는다면 특수한 상황에서 단일 1년에 더 높은 유효선량을 허용할 수도 있다고 했다. 이전의 ICRP 권고들은 아동의 방사선 피폭에 대한 부모의 동의에 관한 문제를 언급하지 않았다.

표10.12. 갑상선항진증 I-131 치료 후 행동에 대해 권고된 제한

제한	30~400MBq	400~600MBq	600~800MBq
아동/임부와 모든 근접 기간(일)	9	12	14
아동/임부와 근접기간 확장(일)	21	25	27
성인과 잠자리 분리(일)	-	4	8
수미터 거리 타인 근접 회피(일)	-	-	1

출처 : British Institute of Radiology(1999).

모유수유는 방사성옥소 치료 후에는 즉시 중단되어야 한다.

(134) 퇴원한 갑상선항진 환자 친지에 대한 외부선량 실측에 관한 영국의 연구는 모든 아동의 89%가 1 mSv 미만이었다고 나타났다. 하지만 3세 미만 아동의 35%가 1mSv 이상 피폭했음은 흥미로우며 어린 아동에게 특별한 주의가 필요함을 나타낸다(Barrington 등, 1999). 벨기에의 연구 데이터는 갑상선암 환자가 병원에서 퇴원한 후 8일 동안 아동이 집에서 떨어져 지낸다면 아동 선량은 0.08mSv(0~0.35mSv 범위)이고 갑상선항진 환자 경우에는 0.13mSv(범위 0.04~3.12mSv)임을 보여준다(Mathieu 등, 1999). Mathieu 등(1999)은 다른 성인의 선량이 1 mSv를 초과하지 않으려면 갑상선 방사능이 300 MBq 이하가 되기까지는 환자와 근접한 접촉이 없어야 한다고 지적한다. 그들은 또한 갑상선 방사능이 100 MBq 이하가 되기까지는 어린 아동과 근접하게 접촉하지 말 것을 권고한다. 유아나 임부와 접촉에 대해서는 50 MBq을 제시했다. 일부 저자는 짧은 기간 병원 체류는 아이와 함께 사는 환자에 대해 바람직할 수 있다고 권고해왔다(Reiners와 Lassmann, 1999). 이는 잠들어 있는 모친의 침대 속으로 기어가는 어린 아이의 시나리오를 피할 수 있다.

(135) 유럽위원회European Commission(1998)는 간병인의 서로 다른 범주에 대한 선량제약을 제안했다. 표10.13에 나타낸 이 제약은 ICRP에서 권고한 것보다 좀 더 세분되어 있다.

표10.13. 간병인 범주별 선량제약

간병인 형태	선량제약 이유(위험, 습관)	선량제약(mSv)
제삼자	대중에 대한 선량한도의 분율	0.3
친지와 가까운 친구		
임산부	태아에 대한 방호	1
2세까지 아이	부모와의 근접한 신체적 접촉	1
3-10세 아동	태아와 같은 위험	1
60세까지 성인	어린 아이들보다 2~3배 덜한 위험 파트너에 대한 소정의 권고 중증 입원환자를 돌보는 경우에는 적용되지 않음	3
60세 이상 성인	평균 인구보다 3~10배 덜한 위험	15

출처 : European Commission(1998).

## 11. 퇴원기준의 국제 또는 국가 지침

- 퇴원기준의 토대는 일반인에 대한 선량한도와 친지 및 간병인에 대한 선량 제약이다. 그럼에도 불구하고 환자를 퇴원시킬지 입원시킬지를 결정하는 데 적용되는 기준에는 넓은 편차가 있다. 현재 퇴원기준의 두 가지 일반적 형태는 개개 상황과 예상되는 다른 사람의 선량에 근거한 것과 잔여 방사능(통상 보수적인 가정에 따름)에 근거한 것이 있다.
- 생활습관은 국가에 따라 심지어 같은 국가에서조차도 서로 다르기 때문에 퇴원기준을 위한 단일 모델은 적절한 최적화가 아닐 것이다. 환자 퇴원은 (잔여 방사능이나 최악의 시나리오보다도) 가족의 상황에 기반을 둘 것을 권고한다. 또한 많은 인접 국가들이 있을 경우에는 환자 퇴원에 대해 균일하거나 유사한 접근을 개발할 것을 권고한다.

(136) 비밀봉 방사성핵종을 이용한 치료 후에 환자 퇴원에 관해 따라야 할 기준에 대한 권고를 ICRP가 제공하지는 않는다. 대신 권고들은 병원에서 직업상 피폭하는 근로자에 대한 선량한도와 공공에 대한 선량한도, 그리고 간병인에 대한 선량제약을 제시한다. 그러므로 ICRP는 입원조치를 요하는 특정 잔여 방사능 준위도 책정하지 않는다. 선량한도와 선량제약의 이슈가 충족되면 환자는 잔여 방사능 크기와는 상관없이 퇴원할 수 있다.

(137) 아래에서 각기 다른 나라와 지역에서 사용되고 있는 여러 퇴원 기준들을 고찰한다. 여러 다른 접근들이 시도되고 있다. 가장 일반적인 접근은 친지, 간병인 및 일반인이 받을 것으로 기대할 수 있는 선량에 따라 계산, 평가한 방사능이나 선량율에 근거한 퇴원 기준이다. 모델과 사용된 가정의 차이는 환자에 대한 퇴원 기준에 폭 넓은 차이를 가져온다. 그 결과 매우 보수적인 퇴원기준을 가진 나라에 사는 일부 환자들은 치료를 위해 다른 나라로 이동할 수도 있다(소위 ‘핵여행nuclear tourism’).

(138) 최근 많은 간행물들이 오염 잠재성과 외부 선량률에 대한 실측을 보고해왔다. 이러한 발견에 비추어 볼 때 일부 국가에서 사용되는 퇴원기준은 과잉규제 측면이 있고 적절한 정당화와 최적화는 없이 방사선방호에만 집중되어 있음을 시사한다. Beierwaltes와 Widman(1992)는 방사성옥소로 치료받은 환자로부터 외부선량률과 오염이 측정 가능하지만 매우 낮기 때문에, 유해한 영향의 실질 위



험은 입증되지 않는다고 지적했다.

(139) 방사선방호에 관한 국제기본안전기준International Basic Safety Standards: BSS(IAEA, 1996)은 병원에서 퇴원하는 환자의 최대 방사능을 포함하고 있다. BSS는 다음과 같이 설명한다. ‘... 환자 체내 방사성물질의 방사능이 별표III의 표 III-VI에 정의된 준위 이하로 떨어지기 전까지는 병원에서 퇴원시켜서는 안 된다.’ 일부 나라에서 400 MBq 준위가 모범관행의 척도로 사용된다는 각주가 있기는 하지만 지침 준위는 I-131에 대해서만 1100 MBq을 주고 있다.

(140) IAEA는 방사성핵종 치료를 받은 환자는 남아있는 방사능이 수용 가능한 준위로 진정되기 전까지는 퇴원하지 못하고, 규제기관은 지역적 조건과 환자 가족의 다른 구성원에 대한 잠재적 피폭을 고려하고 국제기준(특히 BSS의 별표 III, 표 III-VI)에 따라 수용준위를 설정해야 한다고 지적한다. 덧붙여서 환자 체내의 방사능은 퇴원 이전에 평가되거나 측정되어야 하고 그 결과는 기록되어야 한다. 환자에게는 접촉할 수 있는 친지나 다른 사람들의 방호에 필요한 예방조치에 대해 서면과 구두 지침을 주어야 한다. 노약자나 아이에게는 특별한 예방조치가 필요할 수도 있다(IAEA, 2002a).

(141) 유럽 국가들은 유럽 BSS(European Union, 1996)와 의료상피폭 기준(European Union, 1997)을 채택했거나 채택하는 과정에 있다. I-131 치료 후 방사선방호에 대한 EURATOM(1997) 지침은 매우 통제적이어서, 400 MBq 방사능을 투여 받은 환자 가족에 아동이 있으면 통제가 2~3주에 이를 수 있다. 유럽 연합 회원국들은 95 MBq에서 800 MBq에 이르는 유도 잔여 방사능 제약을 적용하고 있지만, 대부분의 회원국에서는 400~600 MBq에 설정되어 있다.

(142) 현재, 유럽갑상선협회는 환자들이 그러한 약간의 제약을 준수한다면 I-131을 800MBq까지 투여하는 환자를 외래환자 방식으로 치료함에 호의적이다(European Thyroid Association, 1996). 1 mSv/y로 유효선량을 제한하는 EURATOM BSS 96/29는 ‘의학적 진료를 받는 입원환자나 외래환자를 돌보고 위안함에 있어서 직업으로서가 아니고 알면서 기꺼이 돕는 사람의 피폭’에는 적용되지 않는다(European Union, 1996).

(143) 유럽위원회(European Commission)(1998)는 ‘일반 법칙으로 방사성옥소를 사용하는 갑상선암 환자의 치료는 환자의 입원과 연계되어 시행되어야만 한다’라고 언급하고 있다.

(144) 다음 선량제약은 많은 유럽 간행물에서 제안되었다: 아동 및 태아, 1mSv; 60세까지 성인, 3mSv; 60세 이상 성인, 15mSv; 제삼자/일반인, 0.3mSv(European Commission, 1998). 이는 스웨덴 규제와 동일하다. 스웨덴에서는 환자 체내 방사능이 I-131은 600 MBq, P-32는 1200 MBq 그리고 Y-90은 1200 MBq 미만이라면 입원이 필요하지 않다(Swedish Radiation Protection Institute, 2000).

(145) 독일에서는 기본적으로 방사성옥소 치료를 받은 모든 환자는 최소 48시간은 입원해야 한다. 퇴원기준은 일반인에 대해 1mSv로서 이는 2m 거리에서 측정값으로  $3.5\mu\text{Sv/h}$ 에 상응한다. I-131 유효반감기 7일을 고려할 때 환자 퇴원 방사능 한계량은 250 MBq에 해당한다. 1mSv를 초과되지 않는다면 생물역동학이 다른 환자에 대해서, 또는 어려운 심리상태에 있는 환자에 대해서는 이 방사능이 더 높아 질 수 있다.

(146) 일본에서는 I-131을 투여 받은 환자는 체내 방사능이 500 MBq 미만 혹은 환자 표면으로부터 1m 거리에서  $30\mu\text{Sv/h}$ 미만이라면 퇴원할 수 있다. Sr-89를 받은 환자는 체내 방사능이 200 MBq미만이면 퇴원할 수 있다. 현재 러시아의 환자 퇴원기준은 일반인에 대해 1mSv의 선량을 초과 하지 않음을 근거로 하고 있다.

(147) 호주와 뉴질랜드의 여러 그룹이 치료용 비밀봉 방사성핵종으로 치료받은 환자와 관련된 방사선방호와 안전 문제를 연구하고 있다. 이들 그룹은 호주뉴질랜드핵의학회Australian and New Zealand Society of Nuclear Medicine를 비롯하여 South Australian병원과 대학 방사선안전관리자 그룹University Radiation Safety Officers Group을 포함하고 있다. 현재 퇴원 권고의 초안은 본질적으로 일반인, 아동 및 임부에 대한 1mSv/y의 한도와 환자를 돌보는 일에 동의한 친구와 친척에 대해서 5mSv/y의 한도에 기반을 두고 있다. 선량한도에 추가로 ALARA 원리가 적용된다. 1m 거리에서 외부 선량률이  $25\mu\text{Gy/h}$ 를 초과하면 관리지역에서 관리되지 않는 지역으로 환자를 퇴원시켜서는 안 된다는 규정이 있다(ARPANSA, 2002). 나아가 예상되는 방사능 배설량을 특정 방사성의약품에 대한 연간섭취한도와 비교하여 퇴원시키자는 제안도 있다.

(148) 영국에서는 자문위원회가 최근 국내 권고 또는 국제 권고에 기반을 둔 지침을 제공하고 있다. 이 지침은 본질적으로 모범 임상관행으로 연계되지만 환자 퇴원에 관한 어떠한 지침도 포함하고 있지 않다(Administration of

Radioactive Substances Advisory Committee, 2000). 이는 의학물리공학연구소Institute of Physics and Engineering in Medicine의 “의료 및 치의료 지침”에서 찾을 수 있다(NRPB, 2000). 다양한 그룹에 대한 잠재적 선량을 기초로 하여 환자를 퇴원시킬 수 있다. 간병인comforters and carers에 대해 권고된 절차 당 선량제한은 5 mSv이며 선량한도는 없다. 기타 선량제한과 선량한도는 가족 구성원에 대해서 각각 연간 1 mSv와 5년에 5mSv, 일반인에 대해서는 각각 연간 0.3 mSv와 5년에 5mSv이다.

(149) 미국에서는 환자 퇴원을 위해 선량에 근거한 접근이 30년 전부터 제안되었다. 1970년에 국가방사선방호추진회의NCRP는 다양한 방사성핵종의 선량률과 반감기가 크게 다르기 때문에, 병원으로부터 환자 퇴원에서 더 의미 있는 근거는 환자와 관련되기 쉬운 다른 사람들에게 가능한 피폭이라고 말했다(NCRP, 1970).

(150) 1997년에 USNRC는 방사성물질을 이용한 치료를 받은 환자의 퇴원에 관한 규정을 방사능에 근거한 한도에서 선량에 근거한 한도로 수정했다(USNRC, 1997b). 새로운 규정은 최대 피폭할 것으로 보이는 개인이 유효선량당량<sup>9)</sup> 5 mSv를 초과하지 않음에 기반을 두었다(표11.1). 한도 선량이 준수됨은 방사능 혹은 선량률에 대한 기본값 표를 이용하거나 환자 고유의 선량계산을 수행하여 입증할 수 있다. 임신한 여성의 피폭에 관한 특정 지침은 없지만, 키우는 아이의 유효선량이 1mSv를 초과할 우려가 있다면 서면지침을 제공하도록 하고 있다.

(151) 구체적 지침은 다른 사람과 거리를 유지, 공공장소에 머무르는 시간 최소화, 방사성오염 확산을 줄이기 위한 예방조치, 그리고 이러한 지침의 유효기간을 포함해야 한다. 표11.1에서 보인 퇴원 기준값의 20% 이상에서는 구체적 지침을 주어야 한다.

(152) 방사성핵종의 유효반감기보다 물리적반감기에 기반을 두었기 때문에 표 11.1의 방사능과 선량률은 보수적이다. 이는 친지와 간병인은 물론 일반인에 대한 선량을 과대평가한다. 환자 고유의 선량계산을 이용하면 선량평가가 더 현실적이고 적절해져, 더 높은 방사능에서도 환자가 퇴원할 수 있다. 실제로 이제 미국에서는 건전하고 협력적인 환자는 무려 8000 MBq나 되는 높은 I-131 방사능을

---

9) <역주> 미국은 ICRP 권고와 약간 다른 선량명칭을 사용한다. 여기서 말하는 유효선량당량(effective dose equivalent)은 개념상으로 ICRP의 유효선량과 상통하나 구체적 산출절차에서 약간 달리한다.

표11.1 미국 원자력규제위원회USNRC가 환자퇴원을 인가하는 방사능 및 선량률

방사성핵종	방사능(GBq)	1m에서 선량률(mSv/h)	방사성핵종	방사능(GBq)	1m에서 선량률(mSv/h)
Au-198	3.5	0.21	Re-188	29	0.20
Ga-67	8.7	0.18	Sm-153	5.2	0.06
I-123	6.0	0.26	Sr-89	a	
I-131	1.2	0.07	Tc-99m	28	0.58
In-111	2.4	0.2	Tl-201	16	0.19
P-32	a	a	Y-90	a	
Re-186	28	0.15	Yb-169	0.37	0.02

a) 공중에 대한 극소의 피폭으로 값이 주어지지 않음

가지고도 일상 퇴원하고 있다.

(153) Coover 등(2000)은 최근 USNRC 규제와 합치하기 위한 단순화된 모델을 제안했다. 수학 모델을 사용하고 점유도를 고려한 선량표 dosing chart가 개발되었다(표11.2). 이 결과는 갑상선암에 대해 외래로 방사성옥소 치료를 받는 대부분 환자들이 7400 MBq 혹은 그 이상까지 받을 수도 있음을 나타낸다. 방법론은 의사에게 3 단계 기간에 대해 점유도 OF를 결정하기를 요구하는데 다음과 같다. 평형상태 이전 기간인 복용 후 8시간의 OF<sub>p</sub>, 2일간인 관리기간의 OF<sub>c</sub>, 그리고 이후 자유로운 기간의 OF<sub>uc</sub>이다. OF는 친지나 간병인이 환자로부터 1m 거리에 있는 시간의 백분율로 결정된다. 관리기간 동안 환자는 별도 침실을 사용하게 될 것이다. 이 방법의 이용 예를 아래에 보인다.

표11.2 방사성옥소로 갑상선암을 치료받는 환자가 친지나 간병인에게 5mSv의 선량을 주는 최대 투여방사능(MBq)<sup>a</sup>을 세 점유인자의 상이한 값을 근거로 평가한 결과

OF <sub>p</sub>	OF <sub>c</sub> = 0.125		OF <sub>c</sub> = 0.25	
	OF <sub>uc</sub> = 0.25	OF <sub>uc</sub> = 0.50	OF <sub>uc</sub> = 0.25	OF <sub>uc</sub> = 0.50
0.0	20600	12700	15000	10300
0.25	13200	9800	11100	8300
0.75	8400	6400	7300	6000

출처 : Coover et al. (2000).

a) 흡수분율 0.05와 2일의 제약된 활동을 가정한다. 값들은 반올림되었다.

(154) 6세 딸과 함께 사는 29세 여성이 잔여 갑상선 절제를 받게 된다. 딸은 하루 8h 동안 학교에 있다. 어머니는 월요일 오전에 방사성옥소를 받을 것이고 집으로 이동해 8시간 동안 혼자 있게 될 것이다. 상담으로, 억제된 기간과 자유로

운 기간 모두에 대한 OF는 0.25가 될 것이다. 이에 대해 표11.2의 투여 최대 방사능은 15000 MBq이지만, 선량한도가 1mSv 인 아이가 있기 때문에 표11.2의 값을 5로 나누어야 하며 결국 3000 MBq로 된다. 유사한 방법론이 갑상선항진 환자 치료에도 적용될 수 있다.

(155) 새로운 규제 발표 이후 곧바로 발간된 규제분석은 입원이 더 짧아지거나 없어졌다고 결론지었다. 이로써 비용을 현저하게 감소시켰고, 환자와 친자에게 정서적 이득을 제공할 수도 있고, 의료진의 직업상피폭도 줄어들었다. 적어도 한 명의 저자는 미국의 접근이 다른 나라에도 적용되어야 한다고 제안해 왔는데, “5 mSv 선량 준위에서 다른 사람의 위험은 입증할 수 없으며 있더라도 극히 낮은 반면, 환자에게는 유익”하기 때문이다(Lubin, 2002).

## 12. 항체 치료

- 방사성옥소를 이용한 항체 치료가 점차 일반화 되어가고 있다. 방사선방호 문제는 다른 형태의 방사성옥소 치료와 유사하다.

(156) 지금까지 문헌은 갑상선항진증이나 갑상선암 치료를 위한 NaI-131을 주로 다루어왔다. 근년에는 비호지킨림프종을 위한 면역요법이 급속히 보급되고 있다. 방사선치료는 면역 글로블린 G, kappa monoclonal antibody ibritumomab 이 악성 및 정상 B 림프구 표면에서 발견되는 C20 항원과 특정하게 결합함에 의한다. 항체는 I-131 또는 더 일반적으로 Y-90으로 표지할 수도 있다.

(157) I-131 표지가 이용되는 경우에는 갑상선은 통상 KI 포화로 차단된다. 분해된 모든 I-131은 빠르게 소변으로 배설된다. 소변으로 배설은 첫 주 동안 대략 7%이다. 치료 시작부터 1주 기간 동안 성관계에서는 콘돔을 사용하고 진한 키스나 기타 체액 전달 행위를 피할 것을 권고한다. 환자에게 화장실을 사용한 후 손을 철저히 씻도록 조언한다. 항체가 Y-90으로 표지되었을 때에는, Y-90이 5mm(100~200 세포 직경)의 베타선 비정을 갖는 순수 베타 방출체이기 때문에 방사선방호 문제는 최소화된다.

(158) 항체 치료환자의 선량률에 대한 최근 연구에서 평균 3100 MBq 투여방사능에 대해 투여 즉시 1m 거리에서 측정된 평균 선량률은 대략 0.11mSv/h이다. 이는 점선원 모델을 이용하여 계산된 선량률의 대략 60%이다. 근처에서 최대로 피폭한 사람(1m에서 0.25의 점유도)에 대해 계산된 평균 선량은 대략 3 mSv이다(Siegel 등, 2002b). 0.94~4.77 GBq의 방사능으로 항B1 면역치료를 받은 환자의 친지에 대한 실측은 0.17~4.09 mSv 범위에 있었다(Rutar 등 2001). 측정된 선량이 USNRC 방법론을 사용하여 계산한 선량의 약 1/3인 점은 흥미롭다.

## 13. 기타 문제

- 비밀봉 방사성핵종을 이용한 치료의 구체적 기록은 병원에 유지되고 서면 예방지침과 함께 환자에게도 주어져야 한다.
- 과거 수개월 이내에 비밀봉 방사성핵종으로 방사선치료를 받은 환자가 사망한 경우에는 국가 법규에 따라 무슨 예방조치가 필요한지를 결정하기 위해 방사선방호 전문가나 환자를 치료한 병원과 연락하는 것이 바람직하다.
- 비밀봉 방사성핵종을 이용한 많은 종류의 치료가 임부에게는 금기이다.
- 여성은 방사선방사성핵종 치료 후 적절한 기간에는 임신해서는 안 된다. 그 기간은 치료의 종류에 따라 다른데, 인체로부터 방사성핵종이 제거되고 원래의 질환이 다스려졌음을 확인하는 역할이다.

### 13.1. 기록

(159) 비밀봉 방사성핵종을 이용한 치료 후 퇴원할 때, 환자에게 투여된 방사성핵종, 물리적 화학적 형태, 방사능 및 치료한 의사 이름과 전화번호에 대한 상세 사항을 서면(예를 들면 지갑용 크기)으로 주어야 한다. 나아가 서면으로 된 방사선안전 예방조치와 이 예방조치가 언제 종결되는지에 관한 정보도 환자에게 주어야 한다. 그런 카드의 예는 부록C에 나타나있다.

### 13.2. 죽음, 검시, 매장 및 화장

(160) 방사성핵종 치료를 받아온 환자를 알리는 서면정보를 발행하는 일반적 관행이 있더라도, 응급이나 사망에서 환자가 항상 그 서면정보를 가지고 있을 것으로 가정할 수는 없다.

(161) Denman과 Martin (2001)은 방사성옥소 800 MBq를 받은 환자의 부검에 대해 실측결과를 보고했다. 말기에 있던 환자는 방사성옥소 투여 후 3일 후에 사망했고 부검은 2주 동안 늦춰졌다. 병리학자는 전신에 최대  $400\mu\text{Sv}$ 를 받은 것으로 평가되었다. 오염측정에서는 병리학자의 손  $5\text{Bq}/\text{cm}^2$ ; 수건,  $1.8\text{Bq}/\text{cm}^2$ ; 톱,  $5\text{Bq}/\text{cm}^2$ ; 계기,  $0.5\text{Bq}/\text{cm}^2$ ; 플라스틱 시트,  $0.8\text{Bq}/\text{cm}^2$ ; 저울,  $0.4\text{Bq}/\text{cm}^2$ ;

그리고 마루와 벽에  $1.1\text{Bq}/\text{cm}^2$ 로 나타났다.

(162) 갑상선암에 대해 방사성옥소 치료를 받은 환자의 검시에 대해 적어도 두 보고서가 있다. 한 환자는 갑상선암 전이에 대해 방사성옥소  $1850\text{MBq}$ 를 받았다(Parthasarathy 등, 1982). 환자는 소변에서 매우 적은 양의 방사성옥소를 배출한 채 7일 후에 사망했다. 사망 후의 방사선량 준위는 인체 표면으로부터  $10\text{cm}$  거리에서  $0.1\sim 0.5\text{mGy}/\text{h}$  범위였다. 개인별 선량을 낮추기 위해 여러 병리학자들이 나누어 부검을 실시하였다. 가장 많이 피폭된 병리학자는 전신에  $220\mu\text{Sv}$ 의 선량을, 손에는  $5.5\text{mSv}$ 의 선량을 받았다.

(163) 두 번째 보고는 I-131  $7.4\text{GBq}$ 을 받은 환자의 부검에 관한 것이다. 환자는 체내에  $1.85\text{GBq}$ 를 남긴 채 치료 후 10일 뒤에 사망했다(Johnston 등, 1979). 그런 환자에서 대부분의 배설 곡선은 실제보다 낮은 잔여방사능을 예상한다. 미흡한 수분섭취나 부실한 신장 기능이 정상적인 배설을 발생을 방해할 것이다. 가슴 표면에서 측정된 선량률은 대략  $0.6\text{mSv}/\text{h}$ 였다. 적절한 방사선방호 예방지침과 90분의 최대 시간한도를 갖고서 부검을 수행한 병리학자의 포켓선량계는 약  $0.2\text{mGy}$ 였고 손의 선량은 이의 약 3배로 측정되었다.

(164) 시체의 안전한 취급법에 관련된 지침은 거의 없다. 호주의 지침Code of Practice(National Health and Medical Research Council, 1987)은 다음 정보를 포함하고 있다. “경구, 정맥주사 및 강내 경로로 투여된 방사성물질은 몸 전체에 분포하거나 특정 장기에 선택적으로 잡힐 수도 있다. 환자가 주는 가능한 위해 정도는 방사성물질 투여시점으로부터 시간 경과와 함께 감소한다. 감소는 부분적으로는 사용된 물질의 정상적 방사능 붕괴로부터, 부분적으로는 인체에서 물질의 배설에 의해 일어난다. 진단이나 추적자 시험을 위해 사용된 매우 적은 양의 방사성물질을 받은 환자는 그 시체에 접근할 필요가 있는 어느 누구에게도 위해를 부과하지 않으므로 더 이상 고려하지 않는다.” 지침은 검시에 관해서 다음과 같이 말한다. “다음 값보다 낮은 방사능을 포함하고 있는 사체는 만일 그러한 검사가 동일 기관에서 빈번히 행해지지 않는다면 검시에서 일상적으로 있는 절차로 검사해도 무방하다.

150 MBq Rn-222, Y-90 콜로이드, Au-198 콜로이드;

300 MBq P-32;

450 MBq I-131, 밀봉 Y-90, 밀봉 Au-198.

방사능이 위 값보다 크거나, 크지는 않더라도 그러한 검시가 같은 기관에서 빈번히 이루어진다면 병리학자는 방사선 안전관리자와 상담하도록 조언한다.” 나아가



호주의 지침(National Health and Medical Research Council, 1987)은 만일 치료를 위해 사용된 방사성물질이 특정 장기에 선택적으로 흡수되었다면(예를 들어 갑상선의 I-131) 검사를 진행하기 전에 해당 장기를 적출하여 작업장에서 치워야 한다고 적시한다. 그 장기는 나중에 몸과 같이 처리될 수 있다. 방사성물질이 어떤 체액 내에 분포한다면 검사를 시작하기 전에 적절한 장치를 이용하여 그 액체를 배액하고, 법률 요건에 따라 하수계통을 통해 안전하게 처분할 수 있다.

(165) 시체의 매장에 대해서 호주의 지침(National Health and Medical Research Council, 1987)은 다음과 같이 언급한다. “방부처리하지 않은 직접 매장에 요구되는 특별한 예방조치는 없다. 방사능이 위에서 언급한 준위를 초과하지 않는다면 방부처리에 대해 요구되는 특별한 예방조치는 없다. 방사능이 그것보다 크면 정상적으로는 시체를 방부처리하지 말아야 하나, 방부처리 해야 한다면 방사선 안전관리자와 상담해야 한다.”

(166) 화장에 관해서 호주의 지침(National Health and Medical Research Council, 1987)은 시체가 Y-90, I-131, Au-198, I-125 혹은 Rn-222를 1000 MBq 혹은 P-32를 400 MBq보다 많이 포함하지 않는다면 특별한 예방조치는 요구되지 않는다고 말한다. 이 준위를 초과하는 시체는 이 제한에 도달할 때까지 보관해야 한다.

(167) I-131 치료 후 화장과 매장에 대한 영국 규정은 방사능이 400 MBq를 넘지 않아야 한다고 제시하고 있다(NRPB, 1988). 더 최근 지침도 400 MBq 값을 재확인했지만, 방사능이 400 MBq보다 큰 경우에도 역시 시체를 묻거나 태우는 것이 가능하지만 방사선방호 전문가로부터 조언을 구해야 한다고 제시하고 있다.

(168) 스웨덴 규정도 호주 규정과 매우 유사하다. 스웨덴 규정은 방사선방호 측정 없이도 검사를 수행할 수 있는 최대 방사능은 I-131 600 MBq, P-32 400 MBq, Y-90 200 MBq이라고 규정하고 있다. 방사선방호 측정 없이 소각할 수 있는 방사능은 I-131 1200 MBq, P-32 400 MBq, Y-90 1200 MBq를 초과해서는 안 된다(Swedish Radiation Protection Institute, 2000)

(169) 일본과 같은 일부 나라에서는 화장이 매장보다도 훨씬 일반적이다. 그 결과 환경으로 방사성핵종 잠재적 방출에 관해 관심이 더 높아진다. UNSCEAR(2000)는 1991년에서 1996년 사이에 인구 1000명 당 0.0073의 I-131 갑상선 암 치료가 있었고, 1000명 인구 당 0.023의 I-131 갑상선항진 치

료가 있었다고 보고했다. 그 시기의 인구가 대략 1.1억 명이라고 가정하면 대략 2300명의 갑상선항진증 환자와 730명의 암 환자가 매년 치료받았다. 이 환자들의 1% 이상(대략 30명의 환자)이 치료 후 수 주 내에 죽었을 것으로 보이지는 않으므로, 공공으로 방출된 방사성옥소 양은 매우 작았을 것이다.

(170) 뼈 전이 통증완화를 위해 사용하는 항골성 방사성핵종을 포함하는 시체의 소각은 방사성핵종이 상대적으로 긴 반감기를 갖기 때문에 보다 문제가 된다 (Aerts, 2000). 전형적으로 이러한 치료는 수명기대가 3개월 미만일 경우엔 사용되지 않지만 환자가 이 기간 전에 죽는다면 Sr-89의 방사능이 1 MBq로 붕괴하기 위해서는 일 년까지 걸릴 수 있다. 물리적 반감기가 50.5일이므로 시체의 보관은 비현실적이다. 호주에서 소각에 대한 여러 연구는 방사능의 전부는 아니지만 대부분이 뿔가루에 남음을 보였다. 재에 대한 가족들 의사에 따라, 현장 규정을 준수하기 위해 저장이 필요할지도 모른다. 미국에서는 시체가 I-131을 제외한 모든 방사성핵종에 대하여 74 MBq 미만을 포함한다면 화장에 문제는 없으며, I-131에 대해서는 특정 화장장에서 연간 7400 MBq의 한도를 적용한다 (Silberstein 등, 2003).

(171) 최근 장의사의 요구와 관련한 흥미 있는 일화적 논의가 있다. 납 2.6mm 층을 가진 관은 무게가 1000 kg 이상일 것이고 이는 많은 점에서 비현실적이 될 것이라고 지적되었다(Osborn 등, 2002). 적어도 한 보고에서 갑상선암에 대해 방사성옥소 치료를 받던 환자가 죽어서 1.6mm 강관이 깔린 관에 넣은 경우가 있다. 시체의 가슴 표면에서 측정된 선량률이 0.6mSv/h였는데 이 관에 넣은 후 관 표면 선량률이 0.5mSv/h로서 차폐 효과를 거의 보이지 않았다.

### 13.3. 모유수유

(172) 많은 방사성의약품들이 모유를 통해서 아이에게 전달 될 수 있으므로 대부분 의료기관이 모든 여성에게 그들이 모유수유를 한다면 알릴 것을 요구한다. 최소한의 짧은 기간이나마 모유수유를 중단할 것이 대부분의 핵의학 연구에서 권고되고 있다. 방사성옥소 치료선량 후에는 모유수유는 완전히 중단되어야 한다. 그렇지 않으면 유아는 영구적 갑상선항진이 되거나 혹은 이후에 높은 갑상선암 위험에 처하게 될지도 모른다. 모유수유 결과 유아에 대한 선량이 표13.1에 나타나 있다.

표13.1 I-131을 단일 섭취한 어머니로부터 모유수유에 의한 유아 선량

섭취 시기	유효선량(Sv/Bq)
임신 전 26주	0
임신 5주	0
임신 15주	3.4E-16
임신 35주	1.3E-10
산후 1일	5.4E-08
산후 10일	5.4E-08
산후 20일	5.4E-08

출처 : 모유 중 방사능으로부터 유아 선량에 대한 ICRP 제2분과위원회 작업반 보고서 참조.

(173) 여성이 방사성옥소 치료를 받기 전 2~3주부터 모유수유를 중단하는 것이 유의할 수도 있다. 장점은 유방이 모유 생산을 멈출 것이고, 유방 조직에 대한 선량이 줄어들 것이며, 불이행 위험이 없고, 오염된 브래지어나 가슴 바인더 문제도 없을 것이다.

## 13.4. 임신 여성

(174) 2000년에 ICRP는 임신과 직업상 방사선에 관련된 논제에 대한 문서를 출판했고 ‘태아에 대한 선량한도는 일반인 선량한도와 대체로 대등하다’고 했다 (ICRP, 2000). 또한 임신이 선언된 후 수태물의 선량은 남은 임신기간 동안 대략 1mGy를 초과해서는 안 된다고 했다.

(175) I-131과 P-32를 포함하는 어떤 방사성의약품들은 빠르게 태반을 통과할 수 있기 때문에, 치료를 위해 혹은 갑상선 암에 대해 전신 I-131 스캔을 위해 그런 방사성핵종이 투여하기 전에 임신가능성을 매우 조심스럽게 고려해야 한다. 만일 방사성핵종이 어머니의 목숨을 구하기 위해 요구되는 것이 아니라면 대체로 방사성물질로 치료되어서는 안 된다. 극히 드물게 치료하는 경우에는 태아의 잠재적 흡수선량과 위험을 평가하고 환자와 주치의에게 전달하여야 한다.

(176) 여성에게 갑상선 암은 15세와 45세 사이에 머리와 목 부위 암의 80% 이상을 차지한다. 갑상선암은 기타 대부분의 암들과 비교하여 상대적으로 덜 공격적이다. 그래서 흔히 외과수술과 방사성옥소 치료가 출산 이후까지 늦춰진다. 일반적으로, 만일 어떤 치료가 임신기간에 필요하다면 임신 제2삼분기 또는 제3삼

분기에 수행될 것이다.

(177) 방사성옥소는 태반을 쉽게 통과할 수 있고 태아 갑상선은 대략 임신령 10주에 옥소를 축적하기 시작한다. 방사성옥소 치료는 임신한 환자에게는 본질적으로 금기이다. 만일 갑상선암의 방사성옥소 치료가 필요하다면 분만 이후까지 연기해야 한다. 치료가 이루어지면 의사는 방사성옥소가 모유를 통해 배출됨을 유의해야 하고, 치료선량 이후에는 모유수유는 완전히 중지되어야 한다.

(178) 임신이 아닌 것으로 생각한 여성이 갑상선 암 치료를 받게 되어 방사성옥소 투여 뒤에 임신 사실이 밝혀지면 어려운 문제가 된다. 종종 월경력을 통해서 환자가 임신하지 않았다는 사실을 확신할 수 없다. 대부분의 선진국에서는 난관결찰술이나 자궁절제술 등에 의해 임신이 불가능한 상황이 아니라면, 가임연령 여성에게 고선량  $^{131}\text{I}$  스캔이나 치료를 하기 전에 임신 테스트를 실행하는 것이 일반 관행이다. 그럼에도 불구하고 임신 여성의 방사선 치료가 행해지고 있는데, 이는 잘못된 이력 때문이거나 임신 테스트가 아직 양성반응을 보이지 않는 초기 임신단계로 인한 경우이다.

(179) 대개의 경우 임신 초기이고 주요 문제는 모체의 방광에 있는 방사성옥소에서 방출되는 감마에 의한 수태물의 전신 피폭이다. 임신 기간 동안, 투여된 방사능에 의한 태아의 전신 선량은 50~100  $\mu\text{Gy}/\text{MBq}$ 이다. 어머니의 I-131 섭취로 인한 배아나 태아 선량은 표13.2에 나타나 있다.

(180) 이 선량은 환자에게 경구 수분공급을 늘이고 잦은 배뇨로 낮출 수 있다. 이는 임신했든 아니했든 모든 환자들에 대한 일반적이 권고이다

(181) 만약 수태 8주 이후(태아 갑상선에 옥소가 축적될 가능성이 있다) 옥소 투여 12시간 이내에 임신 사실이 밝혀졌을 경우, 산모에게 60~130 mg의 안정한 옥화칼륨(KI)을 투여하면 태아의 갑상선 흡수를 부분적으로 차단하여 갑상선 선량을 줄일 수 있다. 방사성옥소 투여 12시간이 지난 뒤에는 이 요법이 별 효과를 보지 못한다.

(182) 임신 기간 중에 어머니의 갑상선항진증이 발생할 수 있다. 이 경우 진단은 방사성옥소 섭취검사나 방사성옥소 섬광조영술scintigraphy보다는 혈청 호르몬 측정법으로 이루어져야 한다. 방사성옥소 치료는 종종 출산 이후까지 연기될 수 있으며, 임신 중간의 약물 치료를 받을 수 있다. 역시 중요한 문제는 환자가 방

표13.2. 임신 기간 및 출산 후 어머니의 급성 I-131 섭취에 의한 태아의 선량상수 (Sv/Bq)

시간(주) <sup>a</sup>	최대 피폭 장기	최대 장기선량	자궁 내 유효선량	생후 유효선량	아이의 총 유효선량
-130	-	<1E-15	<1E-15	<1E-15	<1E-15
-26	-	<1E-15	<1E-15	<1E-15	<1E-15
임신 5	모두	7.8E-11	7.8E-11	<1E-15	7.8E-11
10	갑상선	2.4E-11	8.1E-11	<1E-15	8.1E-11
15	갑상선	3.2E-09	2.1E-10	<1E-15	2.1E-10
25	갑상선	2.4E-07	1.2E-08	4.3E-15	1.2E-08
35	갑상선	6.8E-07	3.4E-08	3.3E-12	3.4E-08
	갑상선	1.1E-06	5.5E-08	5.3E-09	6.0E-08

출처 : ICRP (2002).

a) 지시된 시간에 섭취; 음수 시간은 임신 이전을 의미.

사성옥소에 의한 치료 투여량을 받은 뒤에 임신이 밝혀지는 경우이다.

(183) 방사성옥소로 치료받은 환자는 임신한 친척에게 외부 방사선원이 될 수 있다. 보다 중요하게는 이러한 환자는 직접적인 접촉이나 간접적 수단을 통해 임신한 친척에게 방사성옥소 오염을 전파하지 않도록 주의를 기울여야 한다.

### 13.5. 방사성핵종 치료 후 뒤이은 임신

(184) 가끔 핵의학 검사나 치료 후에 임신함에 대한 권고 여부에 의문이 있다. 대부분의 여성 환자는 방사성옥소 치료 후 적어도 6개월 동안은 임신하지 않도록 조언을 받는다. 이는 잠재적인 유전성 방사선 영향이나 방사선방호 고려 그 자체에 기인한 것이 아니라 기본적으로 (1) 갑상선항진증 혹은 암이 제어되었고 (2) 환자가 임신했을 경우 방사성옥소를 이용한 다른 치료가 필요하지 않을 것임을 확신하기 위한 필요에 기반을 둔다.

(185) 때때로 P-32, Sr-89 또는 MIBG를 치료에 사용하는 경우가 있다. 태아 선량을 1mGy 이하로 유지하기 위하여 각각 3, 24, 그리고 3개월간 임신을 피해야 한다. ICRP는 여성이 잔여 방사성핵종 선량으로부터 잠재적 태아선량이 1mGy를 초과하지 않을 때까지 임신해서는 안 된다고 권고한다. 이는 방사성옥소 치료나 Fe-59(신진대사 연구를 위한) 혹은 Se-75(부신 영상화를 위한)이 표지된 방사성의약품을 제외하고는 통상 고려하지 않는다. Fe-59와 Se-75에 대해서는 긴 물리적 반감기와 긴 체내 잔류시간의 결과로 임신은 각각 6개월 및 12개월 동안 피해야 한다고 권고한다. 영국의 조언은 표13.3에 나타나 있다

(Administration of Radioactive of Substances Advisory Committee, 2000).

표13.3. 태아선량이 1mSv를 초과하지 않도록 하기 위해 방사성옥소 치료 후 임신을 피해야 할 기간

핵종 및 형태	병명	총 방사능 한도(MBq)	임신 회피기간(월)
<sup>98</sup> Au colloid	악성 질병	10000	2
<sup>131</sup> I Na iodide	갑상선항진증	800	4
<sup>131</sup> I Na iodide	갑상선암	6000	4
<sup>131</sup> I-MIBG	크롬친화세포종	7500	3
<sup>32</sup> P phosphate	진성적혈구증가증	200	3
<sup>89</sup> Sr chloride	골 전이	150	24
<sup>90</sup> Y colloid	관절염	400	0
<sup>90</sup> Y colloid	암	4000	1
<sup>169</sup> Er colloid	관절염	400	0

출처 : Administration of Radioactive Substances Advisory Committee (2000).



## 부록A. 갑상선항진 환자를 위한 정보쪽지 예

### 갑상선항진 환자의 방사성옥소 치료

#### 질문에 대한 답변

##### 나는 무엇 때문에 치료가 필요한가?

당신은 갑상선항진증이라 불리는 상태에 있다. 이는 당신의 갑상선이 과도하게 활동함을 의미한다. 만약 이것이 적절하게 치료되지 않는다면, 후일 당신의 건강에 영향을 미칠 수 있다.

##### 방사성옥소 치료는 무엇인가?

방사성옥소 치료는 방사성인 옥소의 한 형태를 이용한다. 옥소는 갑상선에 잘 흡수되므로 매우 작은 양의 방사능만 필요하다. 의사는 방사성옥소 치료가 당신의 치료에 가장 적합한지를 고려한다.

##### 방사능은 어디로 가는가?

대부분의 옥소는 갑상선에 흡수된다. 흡수되지 않은 나머지는 주로 소변을 통해 밖으로 배출된다.

##### 어떻게 옥소가 투여되는가?

방사성옥소는 무색무취이다. 당신은 방사성옥소를 함유한 액체나 캡슐을 삼키기를 요구 받을 것이다.

##### 부작용은 없는가?

목 따가움 같은 경미한 부작용이 치료에 따를 수 있다.

##### 복용 중인 약은 어떻게 하나?

의사가 당신이 복용하고 있는 약물에 관한 설명해 줄 것이다.

##### 방사성옥소 치료는 안전한가?

방사성옥소는 갑상선항진 치료를 위해 40년 이상 사용되어 왔다. 이 방법으로 치료한 환자들은 주의 깊게 연구되었다. 이 치료형태는 안전하고 효과적인 것으로



로 간주된다.

### **치료 후 아이를 가지면 다른 추가 위험은 없는가?**

방사성옥소를 투입했던 환자의 아이들에게 어떠한 건강상 영향도 나타나지 않았다. 그러나 치료 후 수개월 동안 임신이나 수유를 피하기를 요구하는데, 이는 단지 당신이 또 방사성옥소 치료를 필요로 할 경우를 고려한 것이다.

### **다른 사람에게 위험이 있는가?**

아니다. 당신의 주치의가 설명한 방사선에 관한 주의를 따르면 위험은 없다. 치료에 들어가면 지켜야할 간단한 지시사항이 주어질 것이다. 이 주의사항은 단지 다른 사람들의 불필요한 피폭을 줄이기 위해서이다. 다른 사람들에게도 피폭 위험에 대한 주의가 필요할 수도 있다.

### **방사성옥소 치료 후 의사를 찾을 필요가 있는가?**

치료 후 당신의 주치의를 찾아가 혈액검사를 받아야 한다. 이는 당신의 갑상선이 어떻게 반응하는지 확인하기 위해서이다. 방사성옥소가 효과를 내는 데에는 2~3개월 정도가 소요된다.

### **방사성옥소 치료를 몇 번 받는가?**

경우에 따라서 두 번 또는 심지어 세 번까지 치료가 필요하다. 첫 치료 후 혈액검사가 또 다른 치료가 필요한지를 보여준다.

### **어떤 장기적 영향이 있는가?**

방사성옥소치료는 매우 안전하다. 그러나 치료 후 당신의 갑상선 기능이 아마도 저하될 것이다. 이는 몇 달 또는 수년 후에 일어날 수도 있다. 이 때문에 당신의 갑상선 기능을 감시하기 위한 혈액검사가 중요하며, 이 검사는 당신의 일생동안 정기적으로 수행되어야 한다. 만일 당신의 갑상선 기능이 저하된다면 당신은 갑상선 호르몬 치료를 시작해야 할 것이다. 이는 어떠한 부작용도 없으며 하루에 한 번만 복용하면 된다.

우리는 당신이 치료와 관계된 사항에 대해 이해하길 바란다. 만일 다른 의문이 있다면, 치료를 위해 병원에 올 때 우리가 당신의 의문에 대한 토론 기회를 언제 줄 것인지를 질문해 주기 바란다.

## 부록B. 치료용 방사성옥소 투여 후 방사선방호를 위한 지침의 예시

### 대략 1주일동안 따르게 된다.

출처 : European Commission (1998).

#### 즉시

방사성옥소 구강 투여 후 한 시간 동안은 먹지 마시오. 만일 4시간 이내에 구토가 나면 폐기물통에 토하고 즉시 핵의학과에 알리세요.

#### 여행

가능한 대중교통은 피하세요. 불가피하다면 대중교통 여행은 약 2시간 이내로 하세요. 친지나 간병인과 함께 6시간 이상의 긴 여행은 삼가세요. 다른 사람과 최소 1m 거리를 유지하여 앉도록 하세요.

#### 가정에서

장기적 신체 접촉은 피하세요. 가능한 한 모든 사람으로부터 항상 1m 이상, 장시간 있다면 2m 이상 떨어지세요. 하루 6시간 이상 어느 누구와도 1m 거리 안에 함께 있지 마세요.

분리된 침대에서, 가능하다면 독립된 방에서 주무세요.

충분한 양의 음료를 마시세요.

음식을 타인과 나누지 마세요. 일회용 접시 및 식기를 사용할 것을 권하기도 하지만 쓰레기 처리 어려움을 고려하면 이럴 필요까지는 없습니다. 접시들을 잘 씻어 재사용하셔도 좋습니다.

키스나 성교는 피하세요.

처음 2일 동안은 특히, 가능하다면 매일 샤워를 하세요. 사용 후 샤워설비나 욕조를 잘 행구세요.

당신의 의류나 잠옷은 다른 세탁물과 분리하여 세탁하세요.

가능하다면 욕실은 단독으로 사용하세요. 남자도 앉아서 소변을 보세요. 용변 후 화장지로 비뇨기를 말리고 화장지는 변기에 씻어 내리세요. 가능하다면 화장실 안에서 손을 씻으세요. 가족과 구분하여 개인 수건과 칫솔을 사용하세요.

### **아기, 아이 및 임산부**

아이가 있다면 아이를 돌볼 사람이 있는 것이 좋습니다. 그렇지 못하다면 아이를 너무 당신 가까이 두지 마세요(예를 들어 잠을 같이 자지 말고, 아주 짧은 시간 이상 당신 무릎에 앉히지 마세요).

아이들이나 임산부 방문은 자제하세요. 필요하다면 아이나 임산부로부터 최대의 거리에서 최소로 접촉하기 위해 노력하세요.

당신의 아이와 키스는 방사성옥소를 전달하고 아이에게 불필요한 위험을 야기할 수 있으니 수 주 동안은 이를 피하는 것이 중요합니다.

### **모유수유**

당신의 아이에게 모유수유를 해왔다면 방사성치료 이전에 반드시 수유를 중단해야 합니다.

### **연로한 동반자**

60세 이상의 나이든 사람에 대해 방사선 위험은 작으므로 이러한 동반자에게는 쉽게 따를 수 있는 방법만 권고해도 무방하다.

### **사회행사**

여러 시간동안 다른 사람들과 근접한 접촉이 있는 영화관이나 기타 사회행사에 참가하는 것은 피하세요.

### **직장복귀**

환자는 치료 후 최소 이틀 동안은 근무지로 복귀해서는 안 됩니다. 만일 당신이 타인들과 근접한 접촉이 없다면 2일 후에 복귀할 수 있습니다. 타인들과 근접한 접촉이 있더라도 일주일 후면 충분할 것입니다. 그러나 당신이 다른 사람을 위한 음식을 다루거나 아이나 임산부와 함께 하는 경우라면 몇 주 동안은 일을 중지해야 할 필요가 있습니다. 얼마동안 일을 중단해야 할 필요가 있을지에 대해서 주치의에게 문의하세요.

### **위급상황**

만일 당신이 교통사고나 의료적 위급상황에 처했다면, 의료 종사자에게 당신이 받은 방사성핵종 치료의 날짜, 형태, 그리고 양을 알려주세요.

### **임신**

만일 당신이 임신했다고 생각하는데 방사성옥소 치료를 받은 당시에는 그 사실

을 알지 못했다면, 즉시 당신 주치의에게 알려세요. 갑상선항진이나 갑상선암 치료를 위해 방사성옥소 치료 후 임신에 앞서 얼마나 기다려야 하는지도 주치의와 논의하세요. 일반적으로 4~6개월 정도는 임신을 피해야 합니다.



## 부록 C. 방사성핵종 치료환자 카드의 예시<sup>10)</sup>

### Radionuclide Instruction Card

Radionuclide:	<b>Iodine-131</b>
Activity	<b>MBq</b>
Administered on	...../...../.....

Name:
Address:
Hospital No.:
Hospital:
Consultant:

방사성핵종: I-131
방사능: MBq
투여일: MM/DD/YYYY

방사성핵종 지침 카드	
성명:	
주소:	
병원번호:	
병원명:	
관계자:	

10) <역주> 이것은 예시일 뿐이므로 형식은 가변적이거나 내용은 기본적으로 예시의 항목이 포함될 필요가 있다. 해외여행에서 문제가 될 소지가 크므로 영문으로 하거나 적어도 한글과 영문이 병기된 형식이라야 한다.

1) Refrain from *all* close contact with children or pregnant women until:  
.....

2) Refrain from *extended periods* of close contact with children or pregnant women until:  
.....

3) Avoid prolonged personal contact at home until:  
.....

4) Avoid prolonged close contact with other people away from home until.....

5) You may return to work on  
.....

6) Do not sleep with an adult in the same bed until.....

Signed:  
  
(Doctor)

**This card should be carried at all times until latest date shown on page**

**2**

In case of difficulty, please contact

**Telephone**

**Or** the consultant mentioned on page 1

Please contact the hospital if vomiting or incontinence of urine occurs within 24 h of treatment.

1) ....까지 아이나 임신여성과 근접을 피하십시오.

2) .....까지 장시간 아이나 임신여성과 근접을 삼가세요.

3) ..... 까지 집에서 다른 사람과 장시간 근접을 삼가세요.

4) ..... 까지 외부에서 장시간 다른 사람과 근접을 삼가세요.

5) 직장 복귀는 .....부터 가능합니다.

6) ..... 까지 성인과 한 침대에서 잠자지 마세요.

(서명)

의사:

**2페이지에 나타난 마지막 날까지 이 카드를 항상 휴대하십시오**

문제나 의문이 있을 때는 아래 연락처나 1페이지 관계자에게 연락하십시오.

전화:

치료 후 24시간 이내에 구토하거나 요실금이 있으면 병원에 연락하세요.

## 참고문헌

- Administration of Radioactive Substances Advisory Committee (2000) UK notes for guidance on the clinical administration of radiopharmaceuticals and use of sealed radioactive sources. *Nucl. Med. Commun.* 21 (Suppl.), S1-S91.
- Aerts, M.G. (2000) Cremation of Corpses Containing Bone-seeking Radionuclides Following Medical Treatment. In: *Proceedings of the IRPA 10 Meeting*, International Society of Radiation Protection, Hiroshima, 14-19 May.
- Australian Radiation Protection and Nuclear Safety Agency (2002) Discharge of Patients Undergoing Treatment with Radioactive Substances. Radiation Protection Series No. 4. ARPANSA. <http://www.arpansa.gov.au/rps-pubs.htm>.
- Barrington, S.F., Kettle, A.G., ODoherty, M.J., et al. (1996a) Radiation dose rates from patients receiving iodine-131 therapy for carcinoma of the thyroid. *Eur. J. Nucl. Med.* 23, 123-130.
- Barrington, S.F., Kettle, A.G., Thompson, W.H., et al. (1996b) RCP guidelines on radiation protection following radioiodine therapy for hyperthyroidism: are they appropriate?. *Nucl. Med. Commun.* 17, 275.
- Barrington, S.F., ODoherty, M.J., Kettle, A.G., et al. (1999) Radiation exposure of families of outpatients treated with radioactive iodine (iodine-131) for hyperthyroidism. *Eur. J. Nucl. Med.* 26,686-692.
- Barrington, S.F., Anderson, P. Kettle, A.G., et al. (2003) Does significant contamination occur in families of patients treated with 131-I for hyperthyroidism?. *Eur. J. Nucl. Med.* 30 (Suppl. 2), S164(Abstract 69).
- Beierwaltes, W.H., Widman, J. (1992) How harmful to others are iodine-131 treated patients: an editorial. *J. Nucl. Med.* 33, 2116-2117.
- British Institute of Radiology (1999). Patients leaving hospital after administration of radioactive substances. *Br. J. Radiol.* 72, 121-125.
- Buchan, R.C.T., Brindle, M.A. (1971) Radioiodine therapy to out-patients - the radiation hazard. *Br. J. Radiol.* 44, 973-975.
- Buchan, R.C.T., Brindle, M.A. (1970) Radioiodine therapy to out-patients - the contamination hazard. *Br. J. Radiol.* 43, 479-483.
- Buettner, C., Surks, M. (2003) Police detainment of a patient following treatment with radioactive iodine. *JAMA* 288, 2687-2688.
- Castronovo, F.P., Beh, R.A., Veilleux, N.M. (1986) Iodine-131 therapy patients: radiation dose to staff. *Radiat. Prot. Dosim.* 15, 45-49.
- Chavin, W., Cukrowski, C.A. (1968) Effects of iodine-131 on the thyroid and pituitary of goldfish(carassius auratus). *Radiat. Res.* 34, 170-199.
- Copplestone, D., Toal, M.E.D., Johnson, M.S., et al. (2000) Environmental effects of radionuclides - observations on natural ecosystems. *J. Radiat. Prot.* 20, 29-40.
- Coover, L.R., Silberstein, E.B., Kuhn, P.J., et al. (2000) Therapeutic 131iodine in outpatients: a simplified method of conforming to the Code of Federal Regulations, Title 10 Part 35.75. *J. Nucl. Med.* 41, 1868-1875.
- Crockett, G. (2000) Sources and fate of discharges of liquid radioactive waste to public sewers. *Radiol. Prot. Bull.* 226, 19-24.



- Culver, C.M., Dworkin, H.J. (1991) Radiation safety considerations for post-iodine-131 hyperthyroid therapy. *J. Nucl. Med.* 32, 169-173.
- deKlerk, J.M.H. (2000) Iodine-131 therapy: inpatient or outpatient?. *J. Nucl. Med.* 41, 1876-1878.
- Denman, A.R., Martin, S. (2001) Care of a terminally ill patient following a thyroid ablation dose of  $^{131}\text{I}$  sodium iodide. *Br. J. Radiol.* 74, 1077-1078.
- Dickman, P, Holm, L., Lundell, G., Boice, J., Hall, P. (2003) Thyroid cancer risk after thyroid examination with  $^{131}\text{I}$ : a population-based cohort study in Sweden. *Int. J. Cancer* 106, 580-587.
- Driver, I., Packer, S. (2001) Radioactive waste discharge quantities for patients undergoing radioactive iodine therapy for thyroid carcinoma. *Nucl. Med. Commun.* 22, 1129-1132.
- Eisenbud, M. (1973) *Environmental Radioactivity*, 2nd ed. Academic Press, New York.
- Erlandsson, B., Mattsson, S. (1978) Medically used radionuclides in sewage sludge. *Water Air Soil Pollut.* 9, 199-206.
- Environment Agency(2000) UK *Investigation of the Sources and Fate of Radioactive Discharges into Public Sewers*. R&D Technical Report P288. Environment Agency, London.
- European Commission (1998) Radiation Protection 97, *Radiation Protection Following Iodine-131(Exposures due to Outpatients or Discharged Inpatients)*. European Commission, Luxembourg.
- European Thyroid Association (1996)  $^{131}\text{I}$  Therapy for hyperthyroidism towards 2000. *Eur. J. Nucl. Med.* 23, BP13-BP15.
- European Union (1996) Council of the European Union: Guideline 96/29 EURATOM to determine basic directions of health protection of public and workers against ionizing radiation related dangers. *Official J. Eur. Community* No. L, 159/1.
- European Union (1997) Council of the European Union: Council directive 1997/43/EURATOM on health protection of individuals against ionizing radiation in relation to medical exposure. *Official J. Eur. Community* No. L, 180.
- EURATOM (1997) Expert Group ex.art 31 *Guidance of Radiation Protection Following Iodine Therapy Concerning Doses due to Outpatients or Discharged Inpatients*. EURATOM, Brussels.
- Evdokimoff, V., Cash, C., Buckley, K., Cardenas, A. (1994) Potential for radioactive patient excreta in hospital trash and medical waste. *Health Phys.* 66, 209-211.
- Fenner, F.D., Martin, J.E. (1997) Behavior of  $\text{Na}^{131}\text{I}$  and meta ( $^{131}\text{I}$ ) iodobenzylguanidine (MIBG) in municipal sewerage. *Health Phys.* 73, 333-339.
- Griffiths, P.A., Jones, G.P., Marshall, C., Powley, S.C. (2000) Radiation protection consequences of the care of a terminally ill patient having received a thyroid ablation dose of  $^{131}\text{I}$ sodium iodide. *Br. J. Radiol.* 73, 1209-1212.
- Gunasekera, R., Thompson, W.H., Harding, L.K. (1996) Use of public transport by  $^{131}\text{I}$  therapy outpatients. *Nucl. Med. Commun.* 17, 275.
- Hanscheid, H., Lassmann, M., Reiners, C.H.R., Aulbach, F. (2003) Monitoring of  $^{131}\text{I}$  incorporation in nuclear medicine personnel by self accomplished measurements. *Nuklearmedizin* 42, 45-49.
- Harris, P.J. (1959) A study of thyroid function in *Fundulus heteroclitus* (killifish).

- Biol. Bull.* 117, 91–98.
- Hilditch, T.E., Connell, J.M.C., Davies, D.L., et al. (1991) Radiological protection guidance for radioactive patients – new data for therapeutic  $^{131}\text{I}$ . *Nucl. Med. Commun.* 12, 485–495.
- Ho, S.Y., Shearer, D.R. (1992) Radioactive contamination in hospitals from nuclear medicine patients. *Health Phys.* 62.
- Homer, L., Smith, A.H. (2002) Radiation protection issues of treating hyperthyroidism with  $^{131}\text{I}$  in patients on haemodialysis. *Nucl. Med. Commun.* 23, 261–264.
- Ibis, E., Wilson, C.R., Collier, B.D., et al. (1992) Iodine-131 contamination from thyroid cancer patients. *J. Nucl. Med.* 33, 2110–2115.
- Ilyin, L., Arkhangelskaya, G.V., Konstantinov, O., Likhtarev, I.A. (1972) *Radioactive Iodine in the Problem of Radiation Safety*. Atomizdat, Moscow.
- International Atomic Energy Agency (1996) *Basic Safety Standards*. IAEA, Vienna.
- International Atomic Energy Agency (2002a) *Radiological Protection for Medical Exposure to Ionizing Radiation*, Safety Guide No. RS-G-1.5. IAEA, Vienna.
- International Atomic Energy Agency (2002b) *Detection of Radioactive Materials at Borders*, IAEATECDCOC-1312. IAEA, Vienna.
- International Commission on Radiological Protection (1987) Radiation dose to patients from radiopharmaceuticals. ICRP Publication 53, *Ann. ICRP* 18(1–4).
- International Commission on Radiological Protection (1991) *1990 Recommendations of the International Commission of Radiological Protection*. ICRP Publication 60, *Ann. ICRP* 21 (1–3).
- International Commission on Radiological Protection (1996) Radiological protection and safety in medicine. ICRP Publication 73, *Ann. ICRP* 26 (2).
- International Commission on Radiological Protection (1997) Radiological protection policy for the disposal of radioactive waste. ICRP Publication 77, *Ann. ICRP* 27 (Suppl.).
- International Commission on Radiological Protection (1999) *ICRP Database of Dose Coefficients. Workers and Members of the Public*, CD-ROM Distributed by Elsevier Ltd, Oxford.
- International Commission on Radiological Protection (2000) Pregnancy and medical radiation. ICRP Publication 84, *Ann ICRP* 30 (1).
- International Commission on Radiological Protection (2002) Doses to the embryo and fetus from intakes of radionuclides by the mother. ICRP Publication 88, *Ann. ICRP* 31 (1–3).
- International Commission on Radiological Protection (2003) A framework for assessing the impact of ionising radiation on non-human species. ICRP Publication 91, *Ann. ICRP* 33(3).
- Jacobson, A.P., Plato, P.A., Toeroek, D. (1978) Contamination of the home environment by patients treated with iodine-131: initial results. *Am. J. Public Health* 68, 225–230.
- Johnson, T.K., Lin, E., Haugen, B. (2002) Contamination as a route for  $^{131}\text{I}$  uptake in family members: implications for public health. *J. Nucl. Med.* 43 (Suppl.), abstract.
- Johnston, A.S., Minarcik, J., Rossi, R., et al. (1979) Autopsy experience with a

- radioactive cadaver. *Health Phys.* 37, 231–236.
- Kelly, J., Finch, H. (2002) *Benchmarking Public Opinion on the Management of Radioactive Waste*. A Report for the Radioactive Substances Division of the Department for the Environment, Food and Rural Affairs.
- Kerber, R., Till, J., Simon, S., et al. (1993) A cohort study of thyroid disease in relation to fallout from nuclear weapons testing. *JAMA* 270, 2076.
- Larsen, P.R., Conard, R. (1978) *Thyroid hypofunction appearing as a delayed manifestation of accidental exposure to radioactive fallout in a Marshallese population*. Brookhaven National Laboratory Report BNL-24104.
- LaRoche, G., LeBlond, C.P. (1954) Destruction of the thyroid gland of Atlantic salmon by means of radioiodine. *Proc. Soc. Exp. Biol. Med.* 87, 273–276.
- LaRoche, G., Johnson, C.L., Woodall, A.N. (1965) Thyroid function in the rainbow trout: biological and histological evidence of radiothyroidectomy. *Gen. Comp. Endocrinol.* 5, 145–159.
- Lassmann, M., Hanscheid, H., Schelper, L.F. (1998) Measurement of incorporation in family members of patients with benign thyroid disease after radioiodine therapy. *Nuklearmedizin* 37, 120–123.
- Leslie, W.D., Havelock, J., Palser, R., Abrams, D.N. (2002) Large-body radiation doses following radioiodine therapy. *Nucl. Med. Commun.* 23, 1091–1097.
- Leung, P.M., Nikolic, M. (1998) Disposal of therapeutic iodine-131 waste using a multiple holding tank system. *Health Phys.* 75, 315–321.
- Lubin, E. (2002) Definitive improvement in the approach to the treated patient as a radioactive source. *J. Nucl. Med.* 43, 364–365.
- Martin, J.E., Fenner, F.D. (1997) Radioactivity in municipal sewerage and sludge. *Public Health Rep.*, 308–316.
- Marcus, C.S., Aldrich, R. (1997) Avoiding solid waste contamination problems from iodine-131 patients. *J. Nucl. Med.* 38, 26N.
- Mathieu, I., Caussin, J., Smeesters, P., Wamberseie, A., Beckers, C. (1997) Doses in family members after 131I treatment. *Lancet* 350, 1074–1075.
- Mathieu, I., Caussin, J., Smeesters, P., et al. (1999) Recommended restrictions after iodine-131 therapy: measured doses in family members. *Health Phys.* 76, 129–136.
- Meck, R.A. (1996) Complete decay of radionuclides: implications for low-level waste disposal in municipal landfills. *Health Phys.* 70, 706–711.
- Monsieurs, M., Thierens, H., Dierckx, R.A., et al. (1998) Real-life radiation burden to relatives of patients treated with iodine-131: a study in 8 centers in Flanders (Belgium). *Eur. J. Nucl. Med.* 25, 1368–1376.
- Moreno Garcia, L. (2001) Expectations of Patients Advocates, Radiological Protection of Patients in Diagnostic and Interventional Radiology, Nuclear Medicine and Radiotherapy. In: Proceedings of an International Conference, Malaga, 26–30 March 2001. International Atomic Energy Agency, Vienna.
- National Council on Radiation Protection and Measurements (1970) *Precautions in the Management of Patients who have Received Therapeutic Amounts of Radionuclides*. Report 37. NCRP, Bethesda.
- National Council on Radiation Protection and Measurements (1995) *Dose Limits for Individuals who Receive Exposure from Radionuclide Therapy Patients*. NCRP Commentary No. 11. NCRP, Bethesda.

- National Health and Medical Research Council (1987) *Australian Code of Practice for the Safe Handling of Corpses Containing Radioactive Materials* (1986). Australian Government Publishing Service, Canberra.
- National Radiation Protection Board (1988) *Guidance Notes for the Protection of Persons Against Ionising Radiations Arising from Medical and Dental Use*. NRPB, Oxon.
- National Radiation Protection Board (2000) Institute of Physics and Engineering in Medicine, National Radiological Protection Board, Health and Safety Executive, The Health Departments 2000 Medical and Dental Guidance Notes – a Good Practice Guide to Implement Ionising Radiation Protection Legislation in the Clinical Environment.
- Norris, D.O., Gorbman, A. (1965) Radiothyroidectomy of larval steelhead trout. *Proc. Soc. Exp. Biol. Med.* 119, 1205–1207.
- Nishizawa, K., Ohara, K., Ohshima, M., et al. (1980) Monitoring of I excretions and used materials of patients treated with <sup>131</sup>I. *Health Phys.* 38, 467–481.
- Nuclear Energy Agency (1995) *The Environmental and Ethical Basis of Geological Disposal of Long-lived Radioactive Wastes*. A Collective Opinion of the Radioactive Waste Management Committee of the OECD Nuclear Energy Agency. NEA, Paris.
- O'Doherty, M.J., Kettle, A.G., Eustance, C.N.P., et al. (1993) Radiation dose rates from adult patients receiving <sup>131</sup>I therapy for hyperthyroidism. *Nucl. Med. Commun.* 14, 160–168.
- Olivereau, M., LaRoche, G. (1965) Effects of low iodine intake or destructive doses of iodine-131 on pituitary histochemistry of young Chinook salmon. *Am. Zool.* 5, 234.
- Olivereau, M. (1957) Radiothyroidectomie chez l'anguille. *Arch. Anat. Microscop. Morphol. Exptl.* 46, 39–59.
- Osborn, S., Greaves, C., Tindale, W. (2002) Care of a helpless patient and handling of the radioactive corpse. *J. Radiol. Protect.* 22, 185–187.
- Parthasarathy, K.L., et al. (1982) Necropsy of a cadaver containing 50 mCi of sodium 131 iodide. *J. Nucl. Med.* 23, 777–780.
- Pentreath, R.J. (2002) Radiation protection of people and the environment: developing a common approach. *J. Radiol. Protect.* 22, 45–46.
- Prichard, H.M., Gesell, T.F., Davis, E. (1981) Iodine-131 levels in sludge and treated municipal wastewaters near a large medical complex. *Am. J. Public Health* 71, 47–52.
- Rallison, M.L., Dobyns, B.M., Keating, F.R., et al. (1974) Thyroid disease in children: a survey of subjects potentially exposed to fallout radiation. *Am. J. Med.* 56, 457–463.
- Reiners, C., Lassmann, M. (1999) Radioiodine (<sup>131</sup>I) treatment of hyperthyroidism: radiation protection and quality assurance. *Eur. J. Nucl. Med.* 26, 683–685.
- Ron, E., Lubin, J.H., Shore, R.E., et al. (1995) Thyroid cancer after exposure to external radiation: a pooled analysis of seven studies. *Radiat. Res.* 141, 259–277.
- Rutar, F.J., Augustine, S.C., Colcher, D., et al. (2001) Outpatient treatment with iodine-131 anti-B1 antibody: radiation exposure to family members. *J. Nucl. Med.* 42, 90–915.

- Saenger, E.L., Kereiakes, J.G. (1980) Reflections on cancer treatment and the federal agency regulations. *Radiology* 137, 865-866.
- Schomaecker, K., Fischer, T., Gaidouk, M., et al. (2000) Exhalation of iodine-131 after radioiodine therapy: time dependence and chemical form. *J. Nucl. Med.* 41 (Suppl.), 251P.
- Shishkanov, N.G., Bakun, Y.M., Roziev, R.A., et al. (2001) Radiation protection of members of the public contacting patients after therapeutic treatment with radioiodine. *Med. Radiol. Radiat. Protect.* 5, 34-46 (in Russian).
- Siegel, J.A. (1999) Outpatient Radionuclide Therapy. In: *Proceedings of the Thirty-Fifth Annual Meeting of the National Council on Radiation Protection and Measurements*, Proceedings No. 21, 7-8 April 1999, Arlington VA. NCRP, Bethesda.
- Siegel, J.A., Marcus, C.S., Sparks, R.B. (2002a) Calculating the absorbed dose from radioactive patients: the line-source versus point-source model. *J. Nucl. Med.* 43, 1241-1244.
- Siegel, J.A., Kroll, S., Regan, D., et al. (2002b) A practical methodology for patient release after tositumomab and iodine-131 tositumomab therapy. *J. Nucl. Med.* 43, 354-363.
- Siegel, J.A., Sparks, R.B. (2002) Radioactivity appearing at landfills in household trash of nuclear medicine patients: much ado about nothing? *Health Phys.* 82, 367-372.
- Silberstein, E.B., Taylor, A.T. Jr. (1996) Society of Nuclear Medicine Guideline for Bone Pain Treatment. *J. Nucl. Med.* 37, 881-884.
- Silberstein, E.B., Buscombe, J.R., Taylor Jr., A.T. (2003) *Society of Nuclear Medicine Procedure Guideline for Palliative Treatment of Painful Bone Metastases*. Version 3.0. Available at [www.snm.org](http://www.snm.org).
- Sodd, V.J., Velten, R.J., Saenger, E.L. (1975) Concentrations of the medically useful radionuclides, technetium-99m and iodine-131 at a large metropolitan waste water treatment plant. *Health Phys.* 28, 355-359.
- Swedish Radiation Protection Institute (2000) *Regulations and General Advice on Nuclear Medicine*. SSI FS 2000-3.
- Thompson, W., Williams, N.R., Harding, L.K. (1994) A model of excreted activities of radiopharmaceuticals from patients to the drains. *Eur. J. Nucl. Med.* 21, 876.
- UK Department of the Environment (2002) *UK Strategy for Radioactive Discharges 2001-2020*. Department for Environment, Food and Rural Affairs, London.
- United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (2000) *Sources and Effects of Ionizing Radiation*. 2000 Report to the General Assembly with Annexes, United Nations, Vienna.
- US Nuclear Regulatory Commission (1997a) *Regulatory Analysis on Criteria for the Release of Patients Administered Radioactive Material*, NUREG-1492. USNRC, Washington.
- US Nuclear Regulatory Commission (1997b) *Release of Patients Administered Radioactive Materials*. Regulatory Guide 8.39. USNRC, Washington.
- Wellner, U., Eschner, W., Hillger, W., et al. (1998) The exposure of relatives to patients of a nuclear medicine ward after radioiodine therapy by inhalation of <sup>131</sup>I in their home. *Nuklearmedizin* 37, 113-119.