



IRSC/TR/20-02

ICRP 간행물 142

# 산업공정의 천연방사능물질로부터 방사선방호

**Radiological Protection from Naturally Occurring  
Radioactive Material(NORM) in Industrial  
Processes**



대한방사선방어학회  
방사선안전문화연구소 

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

<표지그림> 2018년 라돈 방출 침대 매트리스 사건을 초래한 천연 방사성광물인 모나자이트 원광 모습(자료: 위키피디아).

ICRP Publication 142

# 산업공정의 천연방사능물질로부터 방사선방호

Radiological Protection from Naturally Occurring  
Radioactive Material(NORM) in Industrial  
Processes

ICRP 승인: 2019년 7월

이 ICRP 간행물의 우리말 번역본은  
ICRP의 허락(2020년 1월)을 받았으며  
ICRP 정신에 따라 무료로 배포합니다.

국제방사선방호위원회

Ann. ICRP 48(4), 2019

편집인

C.H. CLEMENT

부편집인

H. FUJITA(2018~)

H. Ogino(2016~2018)

ICRP를 위한 저자

J-F. Lecomte, P. Shaw, A. Liland, M. Markkanen, P. Egidi,  
S. Andresz, J. Mrdakovic-Popic, F. Liu, D. da Costa Lauria,  
H.B. Okyar, P.P. Haridasan, S. Mundigl

# 역사서문

이 간행물을 번역하는 내내 마음이 편치 않다. 2018년에 우리 사회가 겪은, 천연방사능물질(NORM) 관리 실패의 쓰린 기억 때문이다. ‘라돈 침대 사건’으로 불렸던, 모나자이트 오용으로 인해 많은 국민이 부지중에 상당 수준 토론( $^{220}\text{Rn}$ ) 피폭을 길게는 10년 이상 받은 사건이다. 주된 가공제품은 침대 매트리스(국내산 매트리스 및 수입 라텍스 매트리스)이지만 그밖에도 섬유제품, 위생용품, 미용상품, 공기정화기 등 다양한 가공제품에 모나자이트가 관리되지 않은 채 ‘음이온 가루’로 둔갑하여 사용된 것이다.

개별 가공제품이 사용된 환경에서 사용자가 흡입하는 공기의 토론/자손 농도나 이용인자 등 피폭평가에 필요한 구체적 인자나 변수에 대한 데이터가 가용하지 않아 정확한 피폭선량 추산은 불가하다. 그러나 표본에 대해 측정된 토론 농도를 근거로 다분히 보수적인 피폭 시나리오로 산출한 추정 선량은 매트리스 사용자의 경우 연간 유효선량이 수 mSv로부터 십여 mSv까지 이른다. 더욱이 피폭자 수가 10만 명 단위이니 ‘주먹구구’로 집단선량을 셈하면 5 mSv/년(어린 평균선량)  $\times$  5년(어린 평균 노출기간)  $\times 10^5$  명 =  $2.5 \times 10^6$  man-mSv = 2500 man-Sv(연평균 250 man-Sv) 규모가 된다. 이 연간 집단선량은 우리나라의 백그라운드 자연방사선 피폭량  $2 \times 10^5$  man-Sv/y에 비하면 약 0.1%에 지나지 않아 사소해 보이지만, 역으로 우리나라 모든 방사선작업자의 연간 집단선량 120 man-Sv와 비교하면 2배나 되어 상당해 보인다.<sup>1)</sup>

이 피폭은 정상적 피폭상황이 아니라 우발적으로 발생한 피폭사고이다. 이런 피폭사고가 발생한 데는 크게 3가지 원인이 작용했다. 첫째로 자연방사선이나 천연 방사능물질을 관리하는 법규가 미비했다. 우리나라의 방사선방호가 초창기 원자력법으로부터 현행 원자력안전법까지 ‘원자력규제법규’에 근거를 뒀었는데 이들 법규는 ‘원자력 이용 과정에 수반되는 방사선’을 규제하기 때문에 자연방사선은 그 규제관리 대상이 아닌 채로 방치되어 있었다. 2011년 후쿠시마 원전사고 이후 주변의 방사선에 대한 시민의 관심이 높아졌다. 이에 따라 2012년 자연방사선을 포함하는 ‘생활주변 방사선안전관리법(생활방사선법)’을 추가로 제정하여 시행했지만, 이때는 이미 ‘라돈 침대’ 사용자의 피폭은 진행되는 상황이었다. 더욱이 라돈 피폭에 대해서는 부처 합의 실패로 생활방사선법 규정에 포함되지 않았다.

---

1) <역주> 여기 보인 수치는 상황을 설명하기 위해 어림한 값일 뿐이므로 이를 인용하는 것은 부적절하다.

둘째로 자연방사선 관리제도의 미숙과 관리경험의 부족이다. 비록 생활방사선법을 시행했지만 천연 방사능물질에 의한 규제관리 경험이 없어, 모나자이트가 ‘음이온 가루’라는 가면을 쓰고 유통되고 그것이 일용품 제조에 사용되고 있음을 적시에 식별하여 시정하지 못했다.

여기에는  $^{232}\text{Th}$  자손인 토론은 반감기가 56초밖에 되지 않아 토양이나 건축재로부터 실내 공기중으로 들어올 시간적 여유가 없어 그 영향이 미미하다는 ‘상식’이 작용했다. 이 상식의 허점이 곧 셋째 이유가 된다. 즉, 토론이 일반적으로는 이슈가 아님은 분명하지만, 음이온 가루처럼 분말로 만들어 일용품에 처리하여 실내에서 사용하게 되니 피폭 시나리오가 완전히 달라진 것이다.

발생한 사고를 되돌릴 수는 없더라도 교훈을 통해 유사한 사고의 재발을 방지하는 것은 중요하다. 역자는 이 사건의 교훈으로 두 가지를 꼽는다.

첫째, 천연 선원이라고 안심할 일은 아니다. NORM은 비방사능이 낮아 급성 결정론적 영향을 초래할 우려는 없지만, 대중과 접촉면이 많아 자칫 큰 집단선량을 초래할 수는 있다.

둘째, 부적절한 제도는 언젠가 대가를 치른다. 포괄적 방사선방호법이 아니라 원자력규제 중심의 법규와 제도로 인해 천연 방사선원은 물론 진단X선도 장기간 안전관리를 방임했다. 뒤늦게 제도를 보완하려 했지만 서툴렀고 허점이 생겼다.

사건 후 부랴부랴 생활방사선법을 개정해 신체에 접하는 제품에는 원료물질(우라늄/토륨 0.1 Bq/g 이상) 사용을 원천적으로 금지했다. 이 원료물질 기준이 너무 낮아 모나자이트처럼 특별한 광물이 아니라 주변에서 흔히 보는 광물도 원료물질에 해당해 일부 상품이 애매하게 회수명령 처분을 받는 일이 발생하기도 했다. 규제의 정당성을 재검토할 일이다.

반면에 가장 중요한 피폭원인 라돈( $^{222}\text{Rn}$ ) 관리에 대해서는 별다른 정책변화가 보이지 않는다. 주택이나 다중이용시설의 실내 라돈은 환경부가 표본조사와 홍보를 병행하고 있지만 아직은 소극적이다. 직장 라돈에 의한 직무피폭은 노동부가 지하철 종사자와 같은 일부 특수한 종사자에 대해서 대책을 찾고 있을 뿐, 포괄적 라돈 직무피폭에 대해서는 여전히 정책이 모호하다. 적어도 1% 정도 가옥에서 라돈 피폭은 ‘라돈 침대’ 못지않을 것이므로 국가 라돈 방호정책을 계속 애매하게 둘 일이 아니다.

2020년 1월

역자 이재기

(대한방사선방어학회 방사선안전문화연구소장, 전 ICRP위원)

## 객원논설

# 천연 방사선원으로부터 피폭은 정상이지만 작업장에서 피폭은 그렇지 않다

이 논설을 읽고 있는 당신이 아침에 깨어났을 때, 당신 몸속에서 붕괴를 일으키고 있던 많은 K-40 원자나 지난밤 당신의 몸을 투과해 지나간 2차 우주방사선에 대해서 별로 생각하지 않았을 것으로 나는 확신한다. 당신은 감각으로는 이러한 방사선을 감지하지 못하고 체내 조직에 부여되는 에너지도 느끼지 못한다. 그러나 그 K-40과 우주방사선은 백그라운드 피폭원으로서 당신에게 연간 약 0.3 mSv를 줄 것이다. 우주방사선 선량은 당신 위치의 위도와 고도에 따라 약간씩 다르고 11년 태양주기의 어느 시점에 있는가에 따라서도 달라진다. 나아가 우리는 모두 지역의 흙과 바위 중에 또는 가정이나 직장의 건축재 안에 있는 천연적 우라늄과 토륨 계열 방사성핵종이 내는 감마선도 피폭한다. 사실은 당신 집에 화강암 탁자나 직장의 내장 석재도 당신이 받는 연간 선량에 기여한다. 그런데 이 모든 피폭보다 실내 라돈으로부터 받는 선량이 더 많을 수 있다. 그러니까 천연 방사선원으로부터 피폭은 일상이다.

방사선방호 전문가로서 우리는, 주변에는 여러 수준 방사선피폭이 있고 일부 피폭원은 일상생활에서 불가피하며 이런 상황은 수천 년 동안 이어 왔을 이해한다. 우주방사선은 투과력이 강하고 방사선장이 복잡한데, 항공기 안에서 우주방사선 피폭도 마찬가지이다. 항공운항 직무로 피폭하는 사람에 대해서는 방사선량을 계산하고 추적할 수 있다. 임신한 승무원에게는 이것이 특히 중요하다. 지난 50년간 일반인의 항공여행 급증과 함께 승객의 우주방사선 피폭도 '일상'이 되었는데 ICRP는 ICRP 132(2016)에서 이를 다뤘다.

근년에 우리는 가정에서 라돈 피폭도 폐암을 초래할 수는 유의한 위험인자임을 인지했고 주택, 학교 또는 직장 건물 기반 아래의 감압계통 사용이 잠재적 라돈피폭을 완화하는 데 매우 효과적인 것도 알게 되었다. ICRP는 라돈피폭으로 인한 폐암 위험에 대한 간행물(ICRP 2010)과 라돈 방호에 대한 간행물(ICRP 2014b)을 발간한 바 있다.

ICRP가 개발해 국가 규제기관이 시행하는 현행 방사선방호체계에 따르면 '계획',

‘기존’ 및 ‘비상’ 피폭상황이 있다. 위에서 내가 설명한 피폭은 우리 일상생활에서 분명히 있어 왔지만 급성 조직손상을 초래할 가능성이 없으며, 따라서 긴급 개입이나 조치를 요구할 수준은 아니다. 이 말이 그 위험이 영(0)이라는 것은 아니다. 여러 산업공정에서 직면하는 천연적인 우라늄/토륨 계열 방사성핵종도 종사자나 일반인에게 피폭을 유발할 수 있고 환경오염도 일으킬 수 있음을 인지하게 된 것은 근년의 한 도전이다. 그래서 ‘정당화’, ‘최적화’, 그리고 필요하다면 ‘선량한도 적용’이라는 방사선방호 원칙을 직장에서 천연방사능물질(NORM)에 대해 적용하는 문제를 직면하고 있다. 과거 산업시설은 평가와 완화가 필요한 오염 유산으로 등장할 수도 있다. 대량의 폐기물이 관련되면 제염, 퇴역 및 방사성폐기물 처분에 막대한 비용이 들 수 있는데, NORM 산업이 종종 이런 경우이다.

이 간행물은 여러 산업공정에서 NORM을 다루는 훌륭한 기틀을 제공한다. NORM이 종사자나 일반인에게 이전되거나 기술적으로 증가된 피폭을 초래할 수 있는 산업 분야에는 광산, 야금, 수처리, 인산염, 비료, 에너지(예: 석탄, 석유 및 가스) 산업 등이 있다. 관련된 피폭 수준이 낮고 일반적으로 부딪치는 NORM 농도도 낮으므로, 규제기관과 영향받는 산업 모두에게 ‘차등접근’이 권고된다. 안전 전문가나 경영주에게 핵심 사항은 증가된 수준의 NORM 존재를 인지하는 것이다. 일단 인지되면, 환경, 원료물질, 제품 및 폐기물을 특성화하는 것이 필요하다. 여기에는 외부 방사선장과 내부피폭 잠재성이 포함된다. 유자격 전문가는 이로부터 일어날 수 있는 종사자나 일반인의 피폭과 환경영향을 추정할 수 있다. 이 간행물에 수록된 정보는 여러 산업분야에서 전형적 방사선피폭에 대한 훌륭한 요약과 그러한 데이터를 떠받치는 참고문헌을 제공한다. 방사선피폭이나 방사능 준위가 요구한다면 ‘방사선방호 관리계획’을 갖기를 권고한다. 관리계획은 NORM 취급, 방사선 측정기, 일상 탐측이나 분석을 수행하는 상세절차, 그리고 NORM 함유 제품이나 폐기물의 포장, 목록작성, 표지 및 운송에 관해 적절히 개괄할 것이다.

NORM 물질은 사람이 만든 것이 아니므로 전통적으로 원자로나 가속기에서 생산된 물질에 적용되는 규제관리를 받지 않아 왔다. 근년에 국제 또는 국내 방사선방호 연구기관이나 규제기관은 이 간극에 다리를 놓으려 하고 있다. 이 간행물은 규제기관이나 방사선방호 업무자에게 유용할 풍부한 정보를 제공한다. 저자들은 이 간행물을 자랑스럽게 생각할만하다.

David J. Allard

펜실베이니아 환경보호국



# 목 차

역자서문 .....	iii
객원논설 .....	v
두자어 및 두자성어 .....	ix
요지 .....	1
요점 .....	3
제1장 서론 .....	5
1.1. 배경 .....	5
1.2. 범위 .....	8
1.3. 이 간행물의 구조 .....	10
제2장 NORM 피폭의 특성 .....	11
2.1. 편재성과 가변성 .....	11
2.2. 요람에서 무덤까지 NORM 조망 .....	13
제3장 NORM에 방사선방호체계의 적용 .....	19
3.1. 피폭상황 유형과 피폭범주 .....	19
3.2. 방호정당화 전략 .....	23
3.3. 방호최적화 .....	24
제4장 NORM 관련 산업에 방사선방호체계의 적용 .....	29
4.1. 종사자 방호 .....	29
4.2. 일반인 방호 .....	37
4.3. 환경보호 .....	43

참고문헌	47
<b>부록A: NORM 피폭 초래 활동</b>	<b>51</b>
A.1. 희토류 원소 추출	51
A.2. 금속 토륨 및 화합물 생산	51
A.3. 비우라늄 광물 채광 및 처리	52
A.4. 석유와 가스 채굴	52
A.5. 이산화티타늄 생산	53
A.6. 인산염 처리 산업	53
A.7. 지르콘과 지르코니아 산업	54
A.8. 금속 생산	55
A.9. 석탄 채굴 및 연소	55
A.10. 수처리	56
A.11. 건축재	56
A.12. 유산 부지	57
A.13. 참고문헌	57
사 사	59

## 사용 두자어 및 두자성어

BSS	Basic Safety Standards (방사선방호와 방사선원 안전을 위한) 국제기본안전표준
CEPN	Centre d'étude sur l'Evaluation de la Protection dans le domaine Nucléaire 프랑스 방사선방호연구센터
DCRL	derived consideration reference level 유도고려참조준위
EC	European Commission 유럽위원회
EURATOM	European Atomic Energy Community 유럽원자력공동체
IAEA	International Atomic Energy Agency 국제원자력기구
ICRP	International Commission on Radiological Protection 국제방사선방호위원회
ICRU	International Commission on Radiation Units and Measurements 국제방사선단위측 정위원회
ILO	International Labour Organization 국제노동기구
NCRP	National Council on Radiation Protection and Measurements 미국 방사선방호측 정위원회
NORM	naturally occurring radioactive material 천연방사능물질
PPE	personal protective equipment 개인방호용구
RAP	reference animal and plant 참조동식물
UNSCEAR	UN Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation 유엔방사선영향 과학위원회



# 산업공정의 천연방사능물질로부터 방사선 방호

## ICRP 간행물 142

2019년 1월 ICRP 승인

**요지** - 이 간행물의 목적은 천연방사능물질(NORM)<sup>2)</sup> 관련 산업에서 방사선방호를 위한 지침을 제공하는 것이다. 이런 산업은 복수의 해악을 끼칠 수 있는데 방사선 해악이 반드시 지배적은 아니다. 그런 산업은 광범하고, 방호조치가 필요할 정도로 사람과 환경의 피폭이 관련될 수 있다. 적절한 관리수단을 강구하지 않으면 종사자와 일반인 피폭이 일상적으로 상당할 잠재성도 있을 수도 있다. 대량의 NORM 배출은 방사선학적 또는 비방사선학적 성분에 의해 환경에 유해 영향을 미칠 수도 있다. 그러나 NORM 산업에서 조직반응이나 즉각적 생명 위협으로 이어지는 방사선 비상 가능성은 현실적으로 없다. NORM 관련 산업에서 방사선방호는 행위의 정당화와 참조준위를 이용한 방호최적화 기반에서 적절히 다룰 수 있다. 종사자, 일반인 및 환경의 방호를 위해 종합적이고 차등적 접근이 권고되는데, 이는 비방사선학적 해악과 방사선학적 해악을 종합해 고려하고, 방호 접근이 부당한 부담을 부과하지 않으면서 다양한 방사선방호 프로그램 요소를 해악과 일관되게 적용하도록 최적화(차등)해야 함을 의미한다. 종사자에 대해서는, 피폭상황의 특성화와 함께, 필요하다면 작업장의 기타 해악을 관리하기 위한 기존 또는 계획하는 방호전략을 보완하기 위한 구체적 방사선방호 조치로 접근을 시작하게 될 것이다. 피폭상황의 특성과 해악의 크기에 따라 해당 참조준위를 선정하고 적절한 개별 또

---

2) <역주> 원문용어 naturally occurring radioactive material을 바르게 번역하면 '천연 방사성물질'이다. '방사성물질'은 규제용어로서 그 방사능농도와 총 방사능이 기준인 면제준위를 초과하는 물질이다. 현행 국제규범에서는 우라늄이 토륨은 1 Bq/g, <sup>40</sup>K는 10 Bq/g이 면제농도이다. 그래서 '천연방사성물질'이란 용어는 모나자이트처럼 방사능이 현저히 높아 실제로 '방사성물질'인 경우에는 적합하다. 그러나 이 간행물에서 논의하는 NORM은 많은 경우 이 면제기준 미만으로서 방사성물질은 아니어서 이 번역본에서는 NORM을 '천연방사능물질'로 적는다. '방사능물질'은 명확한 기준이 없이 그 방사능이 방사선방호 관점에서 의미가 있는 수준인 물질을 의미한다.

는 집합적 방호조치를 취하게 된다. 라돈 피폭도 ICRP 126에 설명한 것처럼 먼저 전형적 라돈 예방 또는 완화 기법의 적용에 근거하여 차등접근으로 다룬다. 일반인 피폭에 대해서도 상황의 특성화 후 배출, 폐기물 및 잔류물의 관리를 통해 이행될 수 있다. 사람 아닌 생물종에 대한 방호가 정당화된다면 여건에서 모든 해악과 영향을 고려하여 적절한 방사선피폭을 평가한 후 다뤄야 한다. 여기에는 환경에서 피폭 생명체를 식별하고, 피폭 관리 방안의 이해결정을 위한 유도고려참조준위(DCRL)를 적용하는 것이 포함된다.

**중심어: 방사선방호, NORM, 최적화, 종합접근, 차등접근**

## 요 점

- 천연방사능물질(naturally occurring radioactive material(NORM) 관련 산업활동으로부터 피폭은 관리 가능하며, 취할 방호조치의 정당화와 방호최적화를 통해 방호를 달성할 수 있다.
- 조직반응이나 생명에 즉각적 위협으로 이어지는 방사선 비상<sup>3)</sup>의 현실적 가능성을 NORM이 초과하지는 않는다. 종사자와 일반인 방호를 위한 조치는 장기적 외부피폭, 방사성핵종<sup>3)</sup>의 섭취 및 라돈/토론의 흡입을 고려해야 한다.
- 종사자, 일반인 및 환경의 방호를 위해 종합적이고 차등적 접근이 권고되는데, 이는 비방사선학적 해악<sup>4)</sup>과 방사선학적 해악을 종합해 고려하고, 방호 접근이 부당한 부담을 부과하지 않으면서 다양한 방사선방호 프로그램 요소를 해악과 일관되게 적용하도록 최적화(차등)해야 함을 의미한다.
- 종사자 방호를 위한 참조준위<sup>5)</sup>(라돈/토론 피폭 제외)는 피폭분포를 고려해야 하는데, 대부분 경우 연간 유효선량 수 mSv 이하일 것이다. 매우 드물게는 연간 유효선량 10 mSv를 넘는 값이 될 수도 있을 것으로 본다.
- 일반인 방호를 위한 참조준위도 피폭분포를 고려해야 하며 일반적으로

3) <역주> 원문은 방사성물질(radioactive material)로 잘못 적고 있다. 법률용어인 '방사성 물질'은 농도와 총량이 법정 면제기준을 넘는 물질을 의미하는데, 음식물로 섭취하는 대상의 농도나 총 방사능은 면제기준보다 매우 낮은 것이 보통이다. 따라서 내부피폭 관리 대상을 표현할 때는 과학용어인 방사성핵종을 사용하는 것이 적절하다.

4) <역주> 원문 용어는 hazard인데 일반적으로는 '위험' 또는 '위험인자'로 번역한다. 그러나 ICRP 간행물에서 '위험'에 상응하는 용어는 'risk'이다. 이때 위험은 방사선의 보건영향과 그 발생 확률 개념을 종합한 특화된 개념이다. 그래서 이것과 혼선을 피하러 이 번역본에서 hazard는 '해악'으로 표현했다.

5) <역주> 이 간행물은 NORM에 의한 피폭은 '기준피폭상황'임을 전제로 하고 있다. 그러나 피폭원이 NORM이라도 그 피폭이 직무로 인한 것이라면 계획피폭상황으로 보는 것이 합당하다고 역자는 생각한다. 그렇다면 최적화를 안내하기 위한 이 지침은 참조준위라기보다 선량제한치가 되어야 한다.

연간 유효선량 수 mSv 이하일 것이다.<sup>6)</sup>

- 라돈/토론 피폭도 차등접근으로 관리해야 하며, ICRP 126(2014b)에서 기술한 것처럼 1차적으로 가옥에서 라돈 예방 및 완화에 의존해야 한다.

---

6) <역주> NORM 산업으로 인한 일반인 선량도 계획피폭상황에 대한 선량한도와 선량제약치의 적용을 받아야 한다고 역자는 생각한다. 석탄화력 발전소 주변 주민이 원전 주변 주민보다 더 높은 방사선량을 받는 것을 정당화하기는 어렵다.



# 제1장 서론

## 1.1. 배경

(1) 자연 지질의 모든 광물과 원료물질은 천연 기원 방사성핵종을 포함한다. 주요 관심핵종은  $^{40}\text{K}$ 와  $^{232}\text{Th}$  및  $^{238}\text{U}$  계열의 방사성핵종이다.  $^{232}\text{Th}$ 과  $^{238}\text{U}$ 은 각각 안정 핵종  $^{208}\text{Pb}$ 와  $^{206}\text{Pb}$ 에 이르는 계열을 따라 붕괴하는데, 그 과정의 핵종들을 ‘딸핵종’ 또는 ‘자손’이라 한다. 그 밖의 시원방사성핵종<sup>7)</sup>primordial radionuclide은 그 존재비나 방사선학적 유의성이 훨씬 낮다.

(2) 광물이나 원료물질과 관련된 대부분 인간활동에서, 시원핵종 붕괴로 인한 피폭 수준은 방사선방호의 관심사가 아니다. 그러나 천연 방사성핵종을 함유한 물질의 채광, 처리, 사용 또는 이동이 증가된 방사선피폭enhanced radiation exposure을 초래할 수 있는 여러 상황이 있다. 이러한 증가된 피폭을 초래하는 공정에 관련된 물질을 천연방사능물질(NORM)로 간주한다. 예를 들면 상업적으로 채광된 것을 포함하는 특정 광물은 칼륨(포타슘)이나 우라늄, 토륨 자손을 상당한 농도로 함유한다.

(3) 나아가 광물의 추출이나 처리 과정에서 이동하거나 물리화학적 특성이 변해 공정의 제품, 부산물, 배출물, 잔류물 또는 폐기물 사이 비균질 분포가 발생할 수도 있다. 그래서 방사성핵종 농도가 원래 광물보다 높아져(때로는 여러 자릿수까지) 종사자나 일반인 피폭을 크게 증가시키고 환경오염으로 이어질 수도 있다.

(4) 1896년 베크렐의 방사능 발견 후 2년이 지나지 않아 마리 퀴리가 우라늄 농도가 높은 광물인 역청pitchblende 몇 톤을 처리해 라듐과 폴로늄을 찾아냈다. 수년 후에는 채굴된 석유와 천연가스에서 라돈 - 당시에는 ‘라듐 방출물’로 불렸다 - 도 발견했다. 이후 여러 연구로 퇴적암, 석유, 지하수, 바닷물 등과 관계된 방사능에 대해 전반적 검토가 이루어졌다(Monicard와 Dumas 1952). 예를 들면 영국과 미

---

7) <역주> 지구 탄생부터 존재한 방사성핵종.  $^{40}\text{K}$ , U 및 Th 계열 핵종이 대표적이며 그 밖에도  $^{87}\text{Rb}$ ,  $^{138}\text{La}$ ,  $^{147}\text{Sm}$ ,  $^{176}\text{Lu}$  등이 발견되나 농도가 훨씬 낮다.

국에서 천연선원으로 방사성 관측scale 발견이 1950년대에 처음 언급되었다(Schmit 2000). 그러나 산업에서 NORM 피폭에 따른 보건, 안전 및 환경 위험 잠재성은 1980년대부터야 널리 인식되었다(Miller 등 1991).

(5) ICRP 26(1977)에서 ICRP는 어떤 행위는 자연 백그라운드 방사선으로부터 피폭을 증가시킬 수 있고(제235항) 인공선원에 대한 것과 같은 방식으로 관리해야 하는 자연방사선 준위가 있을 수 있음을 인정했다. 그러나 그때 ICRP는 그러한 관리의 원칙에 대해 현실적 지침을 제공하지는 않았다. 같은 해 유엔방사선영향과학위원회(UNSCEAR)는 유엔총회 보고서에 '기술적으로 증가된 자연방사선 피폭'에 관해 한 장을 도입했다(UNSCEAR 1977).

(6) ICRP 39(1984)와 이후 ICRP 60(1991)에서 ICRP는 종사자와 일반인의 자연방사선 피폭을 제한하는 원칙을 제안했는데, 주로 시월방사성핵종과 그 자손에 관한 것이었다. ICRP는 '보통은 방사성으로 간주하지 않지만 천연 방사성핵종을 상당히 함유한 물질의 취급이나 저장'에서 오는 일부 자연방사선 피폭에 대해서는 직무피폭의 일부로 포함하게 하는 요건이 있어야 한다고 말했다(ICRP 1991 제136항).

(7) 장기적 피폭으로부터 방호를 다룬 ICRP 82(1999)에서 ICRP는 '산업발전이 천연방사능물질(NORM)의 방사성핵종 농도를 기술적으로 증가시킴으로써 사람의 "자연"방사선 피폭을 더욱 증가시키고 있음'을 지적하여(제6항) 처음으로 'NORM'이란 용어를 인정했다. 그리하여 ICRP 82는 장기적 피폭을 초래하는 '행위'에서 방사선 방호를 위해 ICRP 60(1991)에서 수립한 방호체계의 적용에 초점을 맞췄다. 경제사회적 인자를 고려해 선량의 '합리적 최소'를 보장하도록 최적화를 적용할 것을 기대했다. 이후 ICRP 101(2006)에서 ICRP는 최적화 원칙의 적용에 관한 상세 지침을 제공했다. 이 간행물은 NORM 피폭에 대해서도 행위를 위한 선량제약치와 선량한도를 적용하되 '주의와 유연성'이 필요하다고 권고했다.

(8) ICRP 103(2007a)에서 ICRP는 ICRP 60(1991)의 방사선방호체계를 개정했다. 이제 이전에 도입된 과정기반 접근 대신 방사선피폭상황의 특성을 기반으로 접근한다. 이 방호체계는 크기나 근원과 관계없이 어떤 선원이든지 모든 관리 가능한 방사선피폭에 적용되지만, 피폭원이나 사람이 받는 선량으로 연계하는 피폭경로가 어떤 합리적 수단으로 관리 가능한 상황에 대해서만 방호체계 전체를 적용하게 된다. 이 개정의 주요 의의는 NORM으로부터 피폭을 포함한 모든 피폭이 방호체계의 범위 안에 들게 되며, 정당화와 최적화 원칙은 언제나 적용된다는 것이다. ICRP 103(2007a, 제284항)은 NORM과 관련된 많은 산업으로부터 사람과 환경의

피폭은 기존피폭상황의 예라고 적시했다.<sup>8)</sup>

(9) ICRP 104(2007b)는 NORM 피폭 관리에 대해 국제적 합의가 필요하며, NORM 관련 산업의 운영 개시 후 방사선방호체계가 도입되었고, 기존의 산업안전 관리(예: 공기 분진 관리)가 방사선피폭 잠재성을 이미 제한하고 있는 부분이 있어서 그런 산업에서 방사선방호는 다양하게 관리되고 있음을 인정했다. 수치 기준을 사용해 NORM 관련 산업이나 활동을 배제하거나 면제하는 것이 유용할 수 있으나 종종 필요할 수도 있는 정성적 판단을 막는다.<sup>9)</sup> 따라서 ICRP 104(제137항)는 여건과 사람의 위험을 고려하여 NORM 피폭 관리에서 종사자 방호와 공중보건을 증진하는 거시적 목표에 따른 차등접근을 옹호했다.

(10) 2007년 권고(ICRP 2007a)에 이어 여러 간행물이 환경보호를 보다 명시적으로 포괄하려 했는데, 특히 참조동식물(reference animal and plant(RAP))을 도입한 ICRP 108(2008), 상이한 피폭상황에서 환경보호의 적용을 다루는 ICRP 124(2014a)이 그러하다.

(11) 근래에 ICRP는 기존피폭상황에 방사선방호체계 적용에 전념한 일련의 간행물에 관심을 가져왔다. ICRP 126(2014b)은 라돈 피폭으로부터 방호를 업데이트 했고, ICRP 132(2016)는 비행에서 우주방사선으로부터 방호에 집중했다.<sup>10)</sup> 비상피폭 상황과 방사선 비상 후 장기적 오염지역에서 생활에 관한 ICRP 109(2009a)와 ICRP 111(2009b)는 현재 업데이트 중이다. 과거 산업이나 군사, 원자력 활동으로 오염된 부지로부터 발생하는 피폭에 전념하는 간행물도 준비 중이다.

---

8) <역주> ICRP 103 제284항은 “주택이나 작업장의 라돈과 NORM은 기존피폭상황의 잘 알려진 예이다.”라고 적고 있다. 그러나 이는 기존피폭상황에 대한 개념이 정립되지 않는 탓으로 본다. 배제준위를 넘는 작업장 라돈에 의한 종사자 피폭이나 NORM 작업장의 종사자 피폭은 선량한도의 적용을 받는 계획피폭으로 보는 것이 합당하다.

9) <역주> 정성적 판단을 방해하므로 수치기준이 적절치 않다는 말은 아니다. 기본적인 수치 기준을 두고 특정 행위에 정성적 고려가 필요하다면 예를 들어 ‘특별 면제준위’와 같은 보완 수단을 활용할 수 있다. 직장 라돈피폭에 대해 이런 개념을 활용할 필요가 있을 것 같다.

10) <역주> 방호체계를 적용하고자 할 때 이미 진행되고 있었다고 직장에서 라돈 피폭이나 항공승무원의 우주방사선 피폭을 ‘기존피폭상황’으로 보아 일반 직무피폭과 달리 다루려 하는 이 접근은 의문이다. 법규의 소급적용 일반원칙이 그렇듯이 종사자의 피폭 문제를 인지하기 전에 기왕에 발생한 피폭에 대해서는 특례를 인정할 수 있다. 그러나 문제가 인지된 후에 발생하는 종사자의 라돈이나 우주방사선 피폭에 대해 원전 종사자의 피폭과 다른 방호접근을 적용할 당위성을 찾기 어렵다.

## 1.2. 범위

(12) NORM에 대한 ICRP 접근은 ICRP 103(2007a, 기본권고), ICRP 104(2007b, 방호체계 범위), ICRP 124(2014a, 환경보호), ICRP 124(2014b, 라돈과 토론으로부터 방호)를 바탕으로 수립된다. 방사선방호 고려가 필요한 것으로 확인된 채광이나 추출과 같은 산업공정이나 기타 지질 기원 NORM으로부터 피폭을 초래할 수 있는 산업활동에 초점이 있다. 용어 ‘산업’은 소규모 사업활동도 포함한다. 많은 경우 원료물질(예: 화석연료)은 증가된 준위의 NORM을 갖지 않지만 후속 활동이나 공정이 제품, 부산물, 배출물, 잔류물 또는 폐기물에 높은 방사성핵종 농도를 발생시킬 수 있다. 산업공정은 종사자나 일반인 피폭을 증가시킬 수도 있고 방사능물질<sup>11)</sup>radioactive substance을 배출해 사람이나 기타 생물종의 후속 피폭을 초래할 수 있다. NORM 피폭과 관련되는 보다 상세한 활동에 대해서는 제2장과 부록A에서 제시한다.

(13) 이 간행물은 NORM 산업으로부터 발생하는 피폭을 취할 조치의 정당화, 방호 최적화 및 적절한 개인선량 기준을 사용해 어떻게 관리할 것인지를 개괄한다. 이 간행물은 피폭을 계획피폭상황으로 다루는 것이 더 적절한 NORM을 다루는 산업이나 활동까지 다루지는 않는다. 광물의 방사능, 핵분열성 또는 핵원료성 특성을 이용하려는 우라늄이나 토륨과 같은 물질을 추출할 목적으로 시설된 채광시설 등이 이런 경우에 해당된다.<sup>12)</sup>

(14) NORM 피폭에 한 기여자는 라돈(<sup>222</sup>Rn)가스(<sup>238</sup>U 붕괴로부터 옴), 그리고 다소 낮게는 토론(<sup>220</sup>Rn, <sup>232</sup>Th 붕괴로부터 옴)가스이다. ICRP는 근래에 역학연구를 검토하여 라돈/토론의 폐암 위험에 관한 정보를 제공했고(ICRP 2010), 종사자와 일반인의 방호를 위한 권고를 구성해 제시했으며(ICRP 2014b), 라돈에 대한 새 선량 계수를 제공했다(ICRP 2017b). ICRP 126(2014b)에서 ICRP는 가옥 용도가 무엇이든 건물과 장소 관리에 최대한 의존하여 라돈피폭을 관리하는 종합적 접근을 권고했다. 이 접근은 작업장의 여러 선원(예: 지반, 건축재 또는 NORM을 함유한 광물

---

11) <역주> 방사능물질: 방사선방호 관점에서 방사능이 유의한 물질을 통칭하는 일반적 용어이다. 방사능물질 중 방사능과 그 농도가 법정 면제기준을 초과하는 것은 ‘방사성물질’이 된다. 즉, 개념적으로 방사능물질은 방사성물질을 포괄하지만, 방사능물질은 주로 방사성물질에 미치지 않지만 방사선방호에서 관심 대상이 되는 물질을 표현할 때 사용된다.

12) <역주> 이 간행물이 기존피폭상황에 초점을 맞추기 때문에 발생하는 차별이다. 방사선방호 관점에서 보면 핵연료용 토륨을 얻기 위한 모나자이트 채광과 반도체 산업에 사용할 희토륨을 얻기 위한 모나자이트 채광을 달리 봐야 할 이유가 없다.

로부터)에서 발생하는 라돈/토론에 적용된다. 따라서 NORM 관련 산업에서 라돈/토론 피폭도 ICRP 126의 접근에 따라 관리해야 한다.

(15) NORM 관련 많은 산업의 오랜 역사 때문에 과거 활동(유산 부지)으로부터 NORM 잔류물이나 폐기물로 오염된 것으로 밝혀진 부지들이 있다. 2014년에 ICRP는 과거 산업활동으로 오염된 부지로부터 피폭에 ICRP 권고를 어떻게 적용하는지에 관한 보고서를 개발할 작업그룹을 설치했다.<sup>13)</sup> 따라서 이 주제는 여기서 깊게 다루지 않는다.

(16) 2007년 ICRP 권고(2007a)는 방사선방호체계를 환경보호, 명시적으로는 동식물 보호까지 확장했다. 이어서 ICRP 108(2008)에서 ICRP는 RAP 개념 도입을 통해 환경보호 기틀을 구체화하고 그것을 어떻게 방사선방호체계 안에서 적용해야 하는지를 설명했다. ICRP 124(2014a)는 상이한 피폭상황에서 환경보호에 적용을 다뤘다. 이 간행물은 2007년 권고(ICRP 2007a)에서 수립한 접근과 일관되게 NORM 피폭에 대한 환경보호를 구체적으로 다루려 한다. 보완적으로 ICRP 114(2009c)는 RAP에 대한 전이변수<sup>14)</sup>를 제시했고, ICRP 136(2017a)은 사람 아닌 생물종에 대한 선량계수를 권고했다. 나아가 RAP에 대한 선량평가에 적용할 방사선가중치 도출에 관한 보고서를 준비 중이다.<sup>15)</sup>

(17) 방사선방호체계를 받치는 윤리는 ICRP 138(2018)에서 설명하는 4 가지 핵심 윤리가치에 의존하는데, 선의/비악의beneficence/non-maleficence, 신중prudence, 정의justice, 존엄dignity이다. NORM 피폭에 대한 방호전략에 포괄되어야 할 중요한 윤리 이슈가 있다. 방사선방호체계 적용은 해로움보다 이로움을 행함(선의/비악의), 불필요한 위험의 회피(신중), 공평한 피폭분포의 달성(정의), 그리고 사람에 대한 존중(존엄)을 결정하는 항구적 모색이다.

(18) NORM으로부터 사람과 환경의 방호에서 방사선은 한 고려사항이지만, 일반적으로 방사선이 유일한 해악은 아니며 더욱이 지배적 해악은 아니다. 실로 NORM 잔류물과 폐기물은 사람 보건이나 환경에 유해할 수 있는 비방사선학적 독성 성분

---

13) <역주> 보고서는 아직 발간되지 않았다.

14) <역주> transfer parameter. 오염 환경에 노출된 참조동식물로 방사성핵종이 전이되는 비율을 의미한다.

15) <역주> 등가선량을 산출할 때 사용하는 방사선가중치는 가용하면 사람 세포에서 생물학 적효과비를 참조하여 값을 부여한 것이다. 동식물에서도 에너지전달선밀도(LET) 특성에 따라 생물학적 영향이 수정될 것은 분명하지만 아직 그 가중치를 공표하지는 않았다. 따라서 현재로서는 동식물의 선량은 기본량인 흡수선량을 기반으로 평가하고 있다.

(예: 중금속)도 포함할 것이다. 이 간행물은 이들 성분의 관리에 대한 지침을 제공하지는 않으며, 이는 산업위생이나 환경법규로 관리될 것이다. 그러나 방사선과 있을 수 있는 기타 모든 핵종의 관리에 종합적으로 접근하여 포괄적 방식에서 모든 우려에 대해 방호를 최적화할 것을 권고한다.

(19) NORM 관련 산업에서 방사선방호에 대한 이 간행물의 권고는 ICRP 103, 104, 124 및 126(2007a,b, 2014a,b)의 모든 관련 권고를 대체한다.<sup>16)</sup>

### 1.3. 이 간행물의 구조

(20) 제2장은 NORM 피폭의 특성을 설명하고 NORM 피폭이 발생할 수 있는 산업과 행위, 그리고 NORM 순환과 관련된 요소를 개괄한다. 제3장은 NORM 피폭에 적용되는 ICRP 방사선방호체계를 설명하는데, 피폭상황의 유형, 고려하는 피폭의 범주, 적용할 기본원칙을 포함한다. 제4장은 다양한 피폭자(종사자와 일반인)와 환경에 대해 종합적이고 차등적 접근을 통한 방사선방호체계의 적용에 관한 지침을 제시한다.<sup>17)</sup> 부록A는 NORM 피폭이 관련될 수 있는 활동에 관한 상세를 제공한다.

---

16) <역주> 이 간행물은 여러 선행 간행물 내용을 인용하고 있다. 그러면서 이 간행물의 권고가 모든 선행 간행물의 NORM 관련 권고를 대체한다니 혼란한 면이 있다. 그러니까 선행 간행물의 NORM 관련 내용 모두를 이 간행물이 대체하는 것은 아니며 구체적 '권고'만 대체하는 것으로 이해해야 한다.

17) <역주> 원문은 제5장에 결론을 실는다는 언급이 있으나 제5장이 없어(실수?) 삭제했다.

## 제2장 NORM 피폭의 특성

### 2.1. 편재성<sup>遍在性</sup><sup>18)</sup> 과 가변성

(21) 천연기원 방사성핵종은 어디나 있고 지구상 거의 모든 물질에 존재하지만, 일반적으로 방사선학적 관심사는 아니다. 그러나 어떤 인간활동은 이러한 물질로부터 방사선피폭을 증가시킬 잠재성이 있다.

(22) 여러 기관이 NORM 관련 종사자, 일반인 및 환경의 방사선피폭을 초래할 수 있는 산업에 관한 포괄적 검토를 발행한 바 있다(UNSCEAR 1982,2008, IAEA 2006, EURATOM 2013). 그런 산업의 예들은 아래와 같다. 나아가 과거 산업부지가 NORM과 관련되었을 수 있는데, 이러한 유산 부지에 주목할 필요도 있다. 이러한 활동에 관한 상세는 부록A에 실는다.

- 희토류 원소 추출
- 금속 토륨 및 그 화합물 생산이나 사용(즉, 그 핵분열성, 핵원료성 또는 방사성 특성이 아니라 금속적 특성을 위한 것)
- 광물의 채광과 처리(핵주기 공정을 위한 우라늄이나 토륨이 아닌)
- 석유나 가스 채굴공정
- 이산화티타늄 안료 생산<sup>19)</sup>
- 인산염 채광 및 처리산업
- 지르콘 및 지르코니아 산업
- 금속생산(주석, 구리, 철, 강철, 알루미늄, 니오븀/탄탈륨, 비스무트 등)
- 화석연료 연소(주로 석탄)
- 수처리
- 지열에너지 생산

---

18) <역주> ubiquity. 어디나 존재하는 속성을 의미한다. ‘편재성’이란 생소한 표현이지만 사전에 설명한 대로 적었다.

19) <역주> TiO<sub>2</sub>. 밝은 흰색 분말이어서 백색 도료나 물감으로 널리 사용되고, 다른 색깔 도료의 바탕물질로도 사용된다.

- 시멘트 생산 및 클링커<sup>20)</sup> 오븐 보수유지
- 건축재(잔류물이나 부산물로 만든 건축재 포함).

(23) NORM 관련 전형적 산업은 방사능농도가 상이한 다양한 원료물질을 처리하여 많은 종류의 제품, 부산물, 배출물, 잔류물 및 폐기물을 발생시킨다. 이러한 산업은 취급하는 원료물질의 방사능농도, 최종 제품의 용도, 잔류물의 재이용 또는 재순환, 그리고 폐기물 처분에 따라 방사선학적 관심사가 될 수도 아닐 수도 있다.

(24) 다양한 공정이 작업장에서 다음을 포함하는 넓은 스펙트럼의 방사선피폭 시나리오로 이어질 수 있다.

- 광물이나 원료물질로서 대량 물질, 잔류물 또는 폐기물 더미
- 무기물 농축물, 관석, 슬러지처럼 방사성핵종이 농축된 소량 물질
- 슬래그, 침전 분진 또는 용광로증기와 같이 고온공정에서 증발했던 물질.

(25) NORM 관련 작업은 외부 및 내부 방사선피폭을 초래할 수 있다. 외부피폭은 기기 내부 보수, 슬래그, 관석 또는 슬러지 취급 등에서 낮은 (감마)선량률로 장기간, 또는 높은 선량률(감마, 때로는 베타)로 단기간, 또는 둘의 조합으로 발생할 수 있다. 내부피폭 잠재성은 주로 작업장에서 NORM이 출현하는 방식과 종사자가 착용하는 개인방호용구personal protective equipment(PPE)에 따라 좌우된다. 실내나 지하 환경에서는 라돈이 중요한 선원일 것이다. 실내 라돈피폭은 토양, 처리된 NORM, 또는 시설의 건축재로부터 올 수 있다. 대규모 광산이나 제련소 운영에서는 공기 분진은 공통 산업위험이며, 특히 방사능농도가 높은 곳에서는(예: 약 수십 Bq/m<sup>3</sup> 이상) NORM 흡입으로 인한 내부피폭이 유의할 수 있다. 반대로, 물을 포함해 NORM 취식으로 인한 내부피폭은 보통 낮다(EC 1999a). 그러나 작업장 조건이나 해당 방사성핵종, 그리고 방사성핵종이 내포된 물리화학적 매트릭스에 따라 상당한 차이가 있을 수 있다(UNSCEAR 2016).

(26) 세계의 매우 많은 종사자가 NORM에 노출될 것이며, 비록 데이터는 인공선원의 직무피폭보다 제한적이지만 자연 방사선원에 노출되는 종사자(약 1천3백만 명) 피폭의 세계적 수준은 연간 3만 man-Sv<sup>21)</sup>로 추정된다(UNSCEAR 2008). 1996년

20) <역주> clinker. 포틀랜드 시멘트를 만드는 중간제품으로, 소성로에서 석회석과 점토 등이 혼합, 소성되어 나오는 직경 3~30 mm 정도 자갈 모양의 암녹색 덩어리. 분쇄하면 시멘트로 된다.

21) <역주> 이 선량은 보편적 백그라운드 피폭은 제외한 피폭 즉, 행위로 인한 추가 피폭이다. 백그라운드 피폭 집단선량은 훨씬 많아 1천7백만 man-Sv 수준이다.



의 전리방사선으로부터 방호를 위한 국제기본안전표준International Basic Safety Standards(BSS)(IAEA 1996) 이행 이전까지는 대부분 국가가 자연방사선 직무피폭에 별로 관심이 없었다. 일부 NORM 관련 산업에서 종사자 피폭의 범위를 표 2.1[(IAEA 2006)에서 채택]에 보였다. 대부분 작업장에서 종사자가 받은 평가된 선량은 연간 수 mSv 이내였지만 때로는 특정 작업장에서 수십 mSv까지 높은 선량도 발생할 수 있다(극소수 광산에서는 약 100 mSv/y까지).

(27) 일반인 피폭에 관해 보통 직접 외부피폭(즉, 부지에 있는 NORM으로부터)은 무시할 수준이지만 예외적인 경우는 있다. NORM 부지 관련 일부 특정 산업에 대해서는 공장에 근접한 일부 대표인이 mSv 수준의 연간 선량을 받을 수 있음이 보고된 바 있다(UNSCAER 2008). 일반적으로 NORM으로부터 일반인 선량은 주로 일상으로 공기나 수계로 배출된 방사성핵종으로부터, 그리고 건축재와 같은 일용품 속의 NORM 함유 부산물 사용에서 발생한다. 드물게는 음용수의 NORM이 이슈로 될 수 있다. 관련 산업의 다양성, 피폭에 관계된 현장 여건, 부지 고유 방사선평가의 전반적 결핍 때문에 완전한 검토는 어렵다. 표2.2는 NORM에 의한 일반인 피폭에 관한 일부 데이터를 보인다[IAEA(2010)에서 채택]. 이들 평가치에는 불확도가 따르며 대개 보수적이다. 표2.2에서 보듯이, 건축재로 인산석고를 두루 사용한 것처럼 드문 경우를 제외하고는 NORM으로부터 일반인의 연간 유효선량은 1 mSv보다 훨씬 낮게 평가된다.

(28) ICRP 103(2007a)에서 방사선에 대한 환경보호를 드러내는 기틀의 개발을 위한 접근을 도입했다. 그러나 아직은 우라늄광산 활동(또는 유사 활동) 외에는 환경에 미치는 영향을 평가한 예가 드물다. 각 경우를 개별 근거에 따라 종합적이고 차등적으로 평가해야 하는데, 이때는 존재하는 모든 해로움, 관심 종, 주요 환경조건, 기타 특성을 고려해야 한다.

## 2.2. 요람에서 무덤까지 NORM 조망

(29) NORM 관련 생산의 여러 단계를 다음처럼 구별할 수 있다. 어떤 산업은 거의 모든 단계에 관계되지만 어떤 산업은 일부 단계만 해당할 수 있다.

- 광물 채광
- 광물 선광 및 처리
- 제품 가공

표2.1. 종사자 선량평가 예(외부피폭 및 분진 내부피폭, 라돈피폭 제외)

활동	최고농도 방사성핵종	연간 유효선량(mSv)			
		최소	평균	최대	분포
토륨 농축물 공정*	$^{232}\text{Th}$ (공급원료 및 산물)	3.0		7.8	
토륨 화합물 생산†				82	67%<1
희토류광 채광‡	$^{238}\text{U}$ 및 $^{232}\text{Th}$ 계열(공급원료)		0.24~1		
희토류광석 선광‡			0.28~0.61		
모나자이트 취급	$^{232}\text{Th}$ 계열			0.3	
희토류 분리 및 정화	$^{228}\text{Ra}$ (잔류물)			0.3	
희토류 공장 퇴역§	$^{228}\text{Ra}$ (잔류물)	0.2	7.2	8.94	
우라늄 아닌 광석 채광	$^{238}\text{U}$ 및 $^{232}\text{Th}$ 계열(보통)	1.3	3	5	
석유/가스 생산(해양)	$^{226}\text{Ra}$ (관석/슬러지)			0.5	
석유/가스 생산(육지)				0.05	
석유 생산: 배관 청소¶			0.6	3	80%<1
산화티타늄 안료 생산	$^{232}\text{Th}$ (공급원료)			0.27	
	$^{226}\text{Ra}$ , $^{228}\text{Ra}$ (관석)				
인광석 저장	$^{238}\text{U}$ 계열			0.28	
인산비료 생산	$^{238}\text{U}$ (공급원료 및 제품)			0.5	
	$^{226}\text{Ra}$ (잔류물)				
지르콘 생산	$^{238}\text{U}$ 계열(공급원료)			0.4	
바스트나사이트(지르코니아) 생산	$^{210}\text{Pb}$ (분진 침적기)			0.4	
지르콘 제조 및 사용	$^{238}\text{U}$ (용해 지르코니아/제품)	0		2.3	87%<1
내화 세라믹 제품		~0.01		1.5	98%<1
지르콘/지르코니아 세라믹 제품			미미		

표2.1. (계속)

활동	최고농도 방사성핵종	연간 유효선량(mSv)			
		최소	평균	최대	분포
주석, 알루미늄, 티타늄 및 니오븀 광석 처리	<sup>232</sup> Th(공급원료, 제품 및 슬래그)	0		3.2**	69%<1
구리 용융	<sup>228</sup> Ra(잔류물)				
고철 재순환	<sup>226</sup> Ra(슬래그)			<1	
탄광	<sup>210</sup> Po, <sup>210</sup> Pb(침적기 분진)		미미		
	<sup>238</sup> U		2.75		
	<sup>226</sup> Ra, <sup>228</sup> Ra(Ra유입수 높은 석탄)				
석탄 연소	<sup>210</sup> Po(관석)	0		0.4	
석탄 연소				<1	
석탄 연소				0.13	
음용수 처리	<sup>226</sup> Ra(슬러지)			<1	
광물 단열재 <sup>††</sup>	NA	0.0011		0.0173	

NA: 데이터 없음.

\* 토론 흡입 기여 포함 선량.

† 주로 분진 흡입 때문에 조사한 6개 작업장 중 2개에서 선량이 1mSv/y 이상인 경우도 발견됨. 선량 감축 대책(종사자 호흡기보호 용구 착용, 정기적 작업장 청소, 공기 필터링) 이후 재평가했다.

‡ 외부피폭 선량만임.

§ 퇴역 기간 9개월 동안 피폭 선량.

¶ 5개월 개수기간 중 피폭 선량.

\*\* 2008년 이전 최대 선량은 6 mSv였다.

†† 광물은 석탄, 보키사이트, 현무암 및 시멘트였다.

표2.2. 일반인에 대한 선량평가 예(라돈피폭 제외)

활동	최고농도 방사성핵종	연간 유효선량 (mSv)
희토류 광석 채광	$^{232}\text{Th}$ (오염토양)	0.044
희토류광물 선광	$^{232}\text{Th}$ (오염토양)	0.043
희토류나 철 생산 슬래그의 주택용 벽돌 사용	$^{226}\text{Ra}$ , $^{232}\text{Th}$ (벽돌)	~0.2
토륨 용접봉 생산	NA	미미
우라늄 아닌 광물 채광		<1로만 주어짐
대량 광물 잔류물( $^{238}\text{U}/^{232}\text{Th}$ 1 Bq/g) 더미	$^{232}\text{Th}$ , $^{238}\text{U}$ 계열	0.05~0.26
석유 및 가스 생산	NA	<1로만 주어짐
인 생산		<0.04
디칼슘포스페이트 사료 사용	$^{210}\text{Po}$ , $^{210}\text{Pb}$ (닭고기)	<0.02
석고 농업사용	$^{226}\text{Ra}$ (비료)	미미
석고 주택건설 사용	$^{226}\text{Ra}$ (건축재)	
벽/천장 석고패널		0.02~0.2
벽/천장/바닥 공동패널		0.46
벽/천장/바닥 석고보드		4.5
벽 석고 회반죽 바름		0.15(인도), 사소(호주)
벽 석고벽돌 및 시멘트		$\leq 1.4$
철강 생산	$^{232}\text{Th}$ , $^{228}\text{Ra}$ (분진, 기체유출물)	<0.01
석탄 연소	NA	미미
음용수 처리	NA	alal
수처리 잔류물 매립처분	$^{226}\text{Ra}$	0.01
과거 우라늄광산 유출수	NA	<1로만 주어짐
일반 건축재 사용	NA	<0.3~1

NA: 데이터 없음.

- 제품이나 부산물 사용
- 잔류물 재이용 또는 재순환
- 폐기물 관리

- 해체, 치유 및 재이용.

(30) 방사성핵종 농도가 높은 NORM의 존재는 어느 단계에서든 이슈로 될 수 있고 적절히 관리하지 않으면 종사자와 일반인의 유의한 방사선피폭과, 환경오염 및 이에 따른 동식물군 피폭으로 이어질 수 있다.

(31) NORM 관련 산업으로부터 부산물이나 잔류물은 다른 NORM 관련 산업의 공급원료로 사용될 수도 있고 통상 관행이다(예: 건축재). 그런 여건에서는 표면화(또는 다른 방법으로 산업분야에 도입된)된 뒤에는 NORM이 무한할 수도 있는 순환 주기로 진입한다(즉, NORM이 이곳에서 저곳으로 이동하고 재가공될 수 있다). 따라서 NORM으로 증가된 피폭은 이 순환주기의 모든 단계에서 발생할 수 있다.



## 제3장 NORM에 방사선방호체계의 적용

### 3.1. 피폭상황 유형과 피폭범주

#### 3.1.1. 피폭상황 유형

(32) ICRP는 피폭상황을 인공이나 천연 방사선원에서 시작하여 다양한 경로로 방사선이나 방사능의 전달, 그 결과로 사람이나 환경이 피폭하는 ‘사건이나 상황의 네트워크’로 정의한다(ICRP 2007a, 제169항). 방호는 선원, 또는 피폭자에 이르는 피폭경로의 어떤 점에 작용하여 이루어진다.

(33) ICRP 103(2007a)의 제176항에 따르면 ICRP는 모든 피폭원과 모든 생각할 수 있는 여건을 겨누는 세 피폭상황 즉, 계획피폭상황, 비상피폭상황 및 기존피폭상황에서 피폭하는 개체<sup>22)</sup>에게 적용하려 한다.

(34) ICRP 방사선방호체계의 보건 목적은 결정론적 영향을 예방하고 확률론적 영향의 위험을 합리적으로 달성 가능한 수준으로 줄이는 것이다(ICRP 2007a, 제29항). 상황기반 접근은 예상 위험수준과, 결정론적 영향에 대해서는 그 가능성과 비례하는 차등접근의 기틀을 잡으려 설계된 것이다. 비상피폭상황은 결정론적 영향을 회피하기 위해 긴급 방호조치가 필요한 상황이다.<sup>23)</sup> 많은 계획피폭상황은 적절히 관리하지 않으면 결정론적 영향 가능성도 내재한다.<sup>24)</sup> 이는 주로 방사성핵종을 그 방사성, 핵분열성 또는 핵원료성 용도로 사용하거나 X선과 같은 방사선을 발생시키는 기기를 사용한 결과이다. 반대로, 기존피폭상황은 비상과는 거리가 있어 방사

22) <역주> ICRP 103 제176항은 사람 방호를 다룬 절에 속하므로 원문은 ‘사람’을 나타내는 것이지만, 여기서는 사람과 동식물을 같이 다루므로 ‘개체’로 표현했다.

23) <역주> 중요한 가치를 지키기 위해 소수 개인의 희생적 피폭을 인정하는 상황이 비상피폭상황의 바른 개념이다. 확률론적 위험 범위라도 대상이 매우 많으면 큰 가치가 되고 긴급작업자의 비상피폭이 정당화된다.

24) <역주> 계획피폭과 계획 선원을 혼동하고 있다. 결정론적 영향(사망까지 포함) 가능성을 포함하는 것을 ‘계획피폭’으로 설명하는 합리적이지 않다. 이를 계획해서는 안 된다. 계획 선원(예: 원전)에서 중대사고가 발생하면 사망자도 발생할 수 있다. 이것은 계획피폭이 아니라 그냥 ‘사고’일 뿐이다.

성핵종의 종류, 형태나 농도가 단기간에 결정론적 영향을 초래할 전망은 실제로 없다.

(35) ICRP는 NORM 관련 많은 산업에서 발생하는 피폭을 기존피폭상황의 예로 본다(ICRP 2007 제284, 288항). 대부분 NORM 산업에서 선원을 그 방사성 특성을 이용하려 의도적으로 산업공정에 도입한 것이 아니며, 일반적으로 방사선 비상이나 결정론적 영향 전망도 없다. 물리화학적 형태의 변화가 방사성 유출물이나 잔류물 또는 폐기물을 발생시켜 원료물질 중 방사능이 농축되는 공정도 새로운 방사선원을 도입하려는 목적이 아니다. 이는 관리할 대상이지만 우발적 사상이다. 그러나 NORM을 그 방사성, 핵분열성, 핵원료성 특성을 위해 처리한다면 ICRP는 이를 계획피폭상황으로 간주한다.

(36) NORM 관련 산업의 특별한 속성 하나는 선원이 때로는 의도적으로 그 본래 상태로부터 변경된다는 사실이다. 이 특성 때문에 규제자는 인공선원에 적용되는 것과 같은 규제과정을 적용하려는 경향인데, 특히 종사자 방호에 대해서 그러하다(EURATOM 2013, IAEA 2014). 이는 지속적 방사선방호 프로그램이 필요할 정도로 상당한 방사선학적 위험이 있는 기존 활동을 인지한 결과일 것이다. 마찬가지로 방사선학적 함의가 있다고 인식되는 새로운 활동에는 유사한 위험을 부과하는 인공선원에 대한 규제체계 및 방호 프로그램과 동일 수단을 적용할 필요가 있음을 시사할 수도 있다. 그렇지만 이 특성이 이 간행물에서 권고하는 종합적이고 차등적 접근의 타당성을 바꾸지는 않는다.

(37) 위 언급처럼 ICRP 60(1991)과 대비되는 ICRP 103(2007a)의 철학은 모든 유형 피폭상황에서 일관된 접근을 권고하는 것이다. 이 접근은 주로 적절한 선량기준을 사용한 최적화 원칙의 적용에 기반을 둔다. 기존피폭상황에 해당 선량기준은 참조준위이다. 그러나 방사선 해악에 대해 진행되는 관리를 적절히 과시하려 할 때는 기존피폭상황에도 선량한도처럼 보통은 인가된 계획피폭상황과 관련되는 규제수단의 사용이 적절할 수도 있다. 이러한 규제수단의 적용이 피폭상황의 특성이나 본성을 바꾸는 것은 아니지만, 편의를 위해 규제 의미를 바꿀 수는 있다. 피폭상황이 선원과 피폭 사이 관계와 해당 방사선방호 원칙의 이행을 고려하는 데 도움이 되지만, 방호를 효과적으로 달성하기 위해 ICRP는 규제수단의 사용에는 유연성을 권고한다. 사람 아닌 생물종 방호를 위해서는 유도고려참조준위(DCRL)에 근거한 환경보호 참조값<sup>25)</sup> 사용을 권고한다(ICRP 2014a). 피폭상황이 무엇이든 목표는 예상

---

25) <역주> 원문은 environmental reference level(환경참조준위)로 적고 있으나 그 출처인 ICRP 124에서는 reference value라는 용어를 사용했다. DCRL이 한 자릿수 범위에



위험수준과 균형 잡힌 방호표준을 달성하는 것이다.

(38) NORM 관련 산업의 경제적 중요성, 대량의 잔류물이나 폐기물, 관리 방안의 한계, 높지 않은 선량 수준, 피폭감축과 관련되는 높은 잠재적 규제비용 때문에 위험수준 및 기타 경제사회적 고려와 균형 잡힌 차등접근은 특히 NORM 관련 산업에서 적절하고 해당된다. NORM 관련 산업은 일반적으로 복수의 해악과 오염물이 존재하는 상황이다. 대체로 방사선학적 위험이 지배적 해악이 아니어서 방사선방호 인식이 결여되거나 제한적이었다. 이런 맥락에서 방사선방호체계가 안전에서 유일한 추진력이 아닐 수도 있으므로 모든 해악에 대한 종합적 접근을 고려해야 한다. 방호에 대한 차등접근은 먼저 이런 산업에서 산업해악 관리에 대한 기존 지식과 경험을 고려해야 하며, 그 다음 방사선방호 목적에서 필요한 추가수단을 실용적으로 종합해야 한다.

(39) NORM이 농축되는 공정으로부터 선량은 상황이 어떠한 비교적 낮게 유지될 것으로 예상된다. 같은 방식으로 NORM 관련 산업에서 방사성물질에 대한 관리 상실이라는 상상 가능한 시나리오도 조직반응이나 즉각적 생명 위협과 같은 후속 보건영향이나 선량 관점에서 제한된 영향만 준다. 결과적으로 NORM 관련 산업은 실제 방사선 비상 가능성이 없다. 그러나 배출이나 방출은 일반인이나 환경의 피폭을 초래할 수 있다.

### 3.1.2. 피폭범주

(40) ICRP는 세 범주category 피폭을 구분하는데 직무피폭, 의료피폭, 일반인피폭이다. 직무피폭은 직무로 인해 종사자가 받는 피폭이다. 그러나 방사선이 어디나 있는 속성 때문에 전통적으로 ICRP는 '직무피폭'의 정의를 경영주의 책임으로 간주되는 상황의 결과로 직장에서 발생하는 방사선피폭으로 한정해 왔다. 의료피폭은 의학적 진료 과정에서 받는 환자의 피폭이다. 일반인피폭은 직무피폭과 의료피폭을 제외한 사람의 모든 피폭을 포괄한다.<sup>26)</sup>

---

걸치는 밴드로 주어지므로 피폭상황에 따라 DCRL 상단이나 하단 수준의 값을 참조점으로 활용하도록 한 것이 '참조값'이다. DCRL이 ... reference level이므로 용어 개념의 중복을 피하러 reference value로 적은 것 같다.

26) <역주> 일반인피폭을 어떤 속성으로 정의하지 않고 직무피폭이나 의료피폭이 아니면 일반인피폭으로 정의한 것은 마땅하지 않다. 이 범주에 속하는 여러 그룹 사람들이 방사선 피폭을 이해하고 감내하는 수준이 상당히 다른데 동일한 관리 개념을 적용해야 하기 때문이다. 예를 들어 후쿠시마 사고로 소개했다가 복귀하는 주민은 직무피폭자도 의료피폭자도 아니므로 일반인으로 분류되기 때문에, 일반인 선량한도인 연간 1 mSv를 넘으면 복귀가 부당하다는 주장이 나온다.

(41) NORM 관련 산업은 의료피폭을 제외한 직무피폭과 일반인피폭을 야기한다.

(42) 대부분 경우, NORM 관련 산업에서 처리하는 물질에 NORM의 존재가 자연적 사실이고 그 방사성 특성을 의도적으로 첨가한 것이 아니므로 종사자 피폭은 우발적이다. 그래서 종종 직무로 피폭하는 것이 아니라고 간주한다.<sup>27)</sup> ICRP 65(1993)를 인용하는 ICRP 126(2014b 제59항)에서 적시한 것처럼<sup>28)</sup> 직무로 방사선을 피폭하는 것이 아니라고 간주하는 종사자는 일반적으로 공중의 구성원(일반인)과 같은 방식으로 다룬다. 그러나 이들의 피폭은 감안해야 한다. 방사선 위험을 다른 해악과 종합하고 합의된 직장 보건안전 표준에 부합되게 모든 해악을 겨냥 관리하는 것은 경영주 책임이다.

(43) 제4.1절에서 설명하듯이 NORM 관련 산업에서 참조준위 설정과 적합한 방호 조치의 선정과 이행에 근거하여 종사자 방호에 차등접근이 권고된다. 위에서 설명했듯이 차등접근은 모든 해악을 보다 포괄적이고 상승작용적 해악 관리 접근에 따라 다른 해악을 관리하기 위한 절차에 방사선방호를 종합하는 것을 고려해야 한다.

(44) 드물게는, 선량이 높거나 방사선방호 목적에서 특별한 작업절차의 적용이 요구될 수도 있다. 이런 경우에는 직무로 피폭하는 종사자에 대해 권고한 수단을 적용할 수 있다(ICRP 1997). 그렇다고 여건과 무관하게 모든 방호 프로그램 요소를 요구하는 것으로 ICRP 권고를 해석해서는 안 된다. 접근은 존재하는 해악에 근거해 차등화해야 한다.

(45) 제4.2절에서 설명하는 것처럼, 일반인피폭은 NORM 배출, 폐기물, 잔류물(재순환 및 재이용 포함), 그리고 가능한 유산 부지의 관리를 통해 다룬다.

(46) NORM 관련 산업은 추출, 운송, 저장, 처리, 유출물, 배출, 그리고 우발적 배출로 환경피폭도 초래한다. 제4.3절에서 적시하듯이 환경의 피폭도 공통 환경표준 근거 위에서 NORM 존재를 고려하여 차등접근으로 다룰 수 있다.

---

27) <역주> 피폭원이 무엇이든 직무로 인해 피폭하는 것을 '직무로 피폭하는 것이 아니라고 간주한다.'는 기술은 마땅하지 않다. 방호 개념의 기틀을 교란하기 때문이다.

28) <역주> ICRP 65는 현행 피폭상황 개념들을 적용하기 이전 행위와 개입 개념을 적용할 때 간행물이다. ICRP 65는 라돈피폭에 대한 방호는 전형적인 '개입'으로 간주했기 때문에 직무피폭 개념이 적용되지 않았다. 따라서 ICRP 65의 기술을 근거로 NORM 피폭이 직무피폭이 아닐 수도 있다는 논리는 적합하지 않다.

## 3.2. 방호정당화 전략

(47) 정당화 원칙은 모든 피폭상황에 적용되는 선원중심 원칙 둘 중 하나이다. ICRP 103(2007a) 제203항의 권고는 정당화 원칙을 통해 방사선 피폭상황을 변경하는 모든 결정은 해로움보다 이로움이 크도록 요구한다. 나아가 ICRP는 기존피폭 상황에 대해 피폭을 감축하거나 추가적 피폭을 회피하는 조치를 이행할 것인지 결정에 정당화 원칙을 적용한다고 강조한다. 모든 결정에는 어떤 단점이 있게 마련이어서 결정이 해로움보다 이로움이 크다는 점에서 정당화되어야만 한다. 이런 여건에서 ICRP 103(2007a) 제207항에서 말했듯이 NORM 관련 산업에서 피폭에 대한 방호전략을 이행할 것인지 결정할 때 정당화 원칙은 1차적으로 적용된다.

(48) 그래서 정당화는 사람의 안녕, 삶의 질, 그리고 생물다양성 보전 및 지속가능한 개발에 기여하는 전반적 사회적 목표에 도달하도록 이로움을 행하거나 증진하는 것을 의미하는 선의, 또는 해로움의 유발을 피함을 의미하는 비악의 윤리가지 아래 들게 된다(ICRP 2018).

(49) ICRP 103(2007a) 제208항에서 설명했듯이 넓은 의미에서 반드시 해당 개인이 아니라 사회에 전반적 이득이 되도록 정당화를 판단할 책임은 주로 정부나 기타 국가 당국에 있다. 그러나 정당화 판단의 입력은 NORM 관련 산업, 종사자, 일반인, 정부나 국가 당국 이외 기관에 의해 풍부해질 수 있는 다양한 측면이 있다. 그래서 방사선방호 전략과 관련한 정당화 판단은 이해당사자 참여절차를 통해 나아질 수 있다. 이런 맥락에서 보면 방사선방호 고려는 광범한 의사결정 과정의 한 입력만을 제공한다.

(50) NORM 피폭을 관리하는 방호전략 필요성은 피폭상황을 방사선학적으로 특성화하고 보건, 경제, 사회 및 윤리를 고려하면 이해가 쉬워진다. NORM 관련 산업이 대부분 이미 존재해 왔기 때문에, ICRP는 국가 차원에서 NORM 관련 산업 목록을 만들고 방호전략의 정당화를 판단하기 위해 방사선 위험평가를 수행할 것을 제안한다. 다음으로 최적화 원칙을 적용하여 관리 수위를 결정한다. 만약 국가 목록에서 이전에는 식별되지 않았던 진행되는 NORM 관련 산업공정이 우려 대상이 된다면 방호전략의 정당화는 해당 이해당사자 참여와 함께 사안별로 다루게 될 것이다.

(51) 국가 목록에 있는 NORM 관련 산업에 대해서는 NORM을 사용하는 새로운

공정을 실시하려면 정당화 원칙은 진행 공정에 적용하는 것과 같은 방식으로 적용해야 한다(즉, 1차로 방사선피폭에 대해 어떤 방호전략을 이행할지를 결정할 때). 산업공정은 보통 상당한 경제사회적 이득을 창출하기 때문에 수반되는 방사선 위험이 전반적으로 NORM 공정을 정당하지 않게 보도록 만들지는 않을 것이다. 예외적 상황은 사안별로 다를 수 있다.

### 3.3. 방호최적화

(52) 어떤 방호전략을 이행하는 의사결정이 이루어지면 방호최적화 원칙이 종사자, 일반인 및 환경을 보호하기 위한 가장 효과적 조치를 선정하는 동력 원칙이 된다. ICRP는 사람 방호에 관해서 방호최적화를 개인선량 크기, 피폭자 수, 잠재피폭 가능성을 적절한 개인선량 기준을 따라 경제사회적 인자를 고려하여 합리적으로 최소화하는 것으로 정의한다. 환경 영향 역시 합리적으로 낮게 유지해야 한다. 이는 신중하고 합리적인 성향을 반영하여 방호 수준이 여건에서 최선이어야 함을 의미한다(ICRP 2018).

(53) 정의의 윤리적 가치와 일관되게(ICRP 2018) 사람의 개인선량 분포에서 심각한 불평등을 피하도록 ICRP는 최적화 과정에서 개인선량 기준을 사용할 것을 권고한다(ICRP 2007a 제232항). 개인선량 크기의 감축에 추가하여 피폭자 수의 감축도 고려해야 한다. 집단유효선량은 방호전략에서 상이한 방안으로부터 예상되는 피폭을 비교함으로써 종사자 방호의 최적화를 위한 핵심 변수가 되어 왔고 계속 그러하다.

(54) 최적화 과정에는 환경보호도 고려해야 한다. 목표는 사람 아닌 생물종에게 유해한 영향을 회피하는 것이다. 그러한 접근, 특히 환경 배출의 최적화는 전반적 위험수준과 균형이 잡히고 환경보호의 공통표준과 양립할 수 있어야 한다. 사람 피폭에서 그러하듯, NORM 공정은 다른 성분으로부터도 환경 위험을 야기하는데, 방사선학적 측면도 종합 해악 접근으로 고려해야 한다. 실제로 방사선 영향은 환경영향 평가에 포함되어야 하고 필요에 따라 감시해야 한다. 한 세트 RAP과 DCRL 수치값을 통해 ICRP가 이미 개발한 접근(ICRP 2008,2014a)은 인간 아닌 생물종이나 그 다양성, 서식지, 그리고 생태계 일반에 대한 유해한 방사선 영향을 평가할 때 유용한 지침이다. 그 결과는 선원을 관리하는 가장 적절한 방안을 결정하는 데 기여한다.

(55) NORM 관련 산업에서도 최적화 과정은 일반적으로 다른 산업에서와 같은 방법으로 이행된다. 그러나 지배적 여건 때문에, 그리고 방사선 위험이 반드시 지배적이지도 않은 더 넓은 방호전략에 방사선방호를 종합하기 때문에, 선량을 감축하는 방안이 더 제한적일 수 있고 다른 자원을 요구할 수도 있다. 그러한 도전은 최적화 과정의 이행이나 규제체계의 적용에서 유연성이 필요함을 의미한다.

(56) 최적화 초기 단계에서 해당 이해당사자 참여는 실제 피폭상황의 특성을 고려하여 최선 방호방안을 선정하는 데 일조할 것이며 따라서 방호를 더 효과적이고 효율적으로 만들 것이다.

### 3.3.1. 선량기준

(57) ICRP는 기존피폭상황에서는 선량기준으로 참조준위를 사용하기를 권고한다. 참조준위는 최적화 과정을 안내하고 견인하는 데 사용되는 선량 값을 대표한다. 참조준위 선정은 특별한 주의를 정당화하는 피폭을 식별할 목적으로 실제 선량분포를 고려해야 한다. 참조준위는 최적화 과정에서 경제사회적 인자를 고려하면서 개인선량을 합리적으로 최소화하여 선량분포에서 불평등을 예방하거나 축소하는 방호방안을 선별하는 지침이다. 또한, 참조준위는 방호가 합리적으로 최적화되고 효과적임을 판단하고자 할 때 방호방안의 결과를 견줄 벤치마크이기도 하다.

(58) 사람 아닌 생물종 방호에 관해서는 DCRL을 사용할 것을 ICRP는 권고한다. DCRL은 해당 유형 RAP의 개체에서 방사선의 유해한 영향이 발생할 약간의 기회가 있을 것으로 보는 선량을 밴드라 생각할 수 있다(DCRL은 그 유형 생물에서 소정의 예상 생물학적 영향에 관한 지식으로부터 도출된다). 다른 해당 정보와 함께 고려된다면, DCRL은 환경보호에 들이는 노력의 수준을 최적화하기 위한 참조점으로 사용될 수 있는데, 이는 피폭상황과 전체적 관리목적에 의존한다(ICRP 2008). DCRL을 사용해 환경보호를 달성하는 방법은 제4.3절에서 설명한다.

(59) 기존피폭상황에서 사람의 방호에 대해, ICRP 103(2007a)의 표5에서 제시했듯이 전형적으로 1~20 mSv/y 밴드에서 참조준위를 설정하도록 ICRP는 권고하지만, 방호최적화를 위해 가장 적절한 참조준위는 연간 1 mSv 미만이 될 수도 있다는 단서도 있다.<sup>29)</sup> 연간 1~20 mSv 밴드는 선원이나 피폭경로가 일반적으로 관리될

---

29) <역주> 이 단서는 개념을 혼란스럽게 만든다. 본래 기존피폭상황을 정의하는 목적이 계획피폭상황의 선량제한(예: 일반인 선량한도 연간 1 mSv)을 충족하지 못할 합당한 사유가 있는 피폭에 대해 이 제한보다 어느 정도 높은 선량까지 인정하기 위해 구분하여 차등접근을 도모하는 것이다. 그런데 기존피폭상황의 참조준위를 1 mSv 미만에 설정하는

수 있고 피폭자가 피폭 자체라기보다 피폭상황과 관련된 활동으로부터 직접 이득이 있음을 전제로 한다. 그러나 특정 피폭상황에 대한 참조준위는 어떤 조치를 정당화할 수 있는 피폭을 식별할 목적에서 개인선량 분포를 고려하고 여건의 특성에 근거하여 선정되어야 하고 최적화 과정에 의미 있는 역할을 해야 한다.

(60) NORM 관련 산업에서는 일반적으로 개인선량이 낮거나 보통 수준이며, 대부분 경우 적절한 참조준위는 연간 수 mSv 이내일 것이다. 선정된 참조준위가 방호 목적에서 의미가 있으려면 어떤 추가 고려가 필요할 사람의 식별에 도움이 되지 않는 일반 값이어서는 안 된다.<sup>30)</sup> 따라서 피폭상황의 특성, 특히 실제 또는 잠재적 피폭경로, 개인선량 분포, 최적화 전망에 따라 적절한 참조준위는 대부분 경우 연간 유효선량 수 mSv보다 낮거나 훨씬 낮을 수 있다. 선량분포에서 높은 개인선량이 있는 드문 경우에는 수 mSv 이상에 참조준위를 설정할 수도 있지만, 그 수준이 연간 10 mSv를 초과할 필요는 거의 없을 것으로 ICRP는 예상한다. 참조준위는 자연 백그라운드에 추가된 선량에 적용한다.<sup>31)</sup>

(61) 제4장에 NORM으로부터 종사자와 일반인을 보호하는 데 권고된 참조준위의 구체적 밴드를 싣고 있다. 이 밴드는 ICRP 103(2007a)에 권고한 접근과 일관되며 위에 설명한 참조준위 설정 접근과도 일관된다.

(62) ICRP는 일부 규제기관이 NORM을 그 방사성, 핵분열성, 핵원료성 특성을 위해 처리하는 산업에 추가하여 특정 NORM 관련 산업에 대해서도 선량한도를 규정하고 있음을 알고 있다. 이것은 선원이 잘 특성화되고 상당한 수준 피폭 잠재성이 유지되는 여건에서는 특히 적절할 수 있다. 그러나 규제목적으로 선량한도를 규정하는 것이 계획피폭상황 관리를 위한 기틀 전체를 적용해야 한다는 것은 아니다. ICRP는 NORM 산업에서 방호에 쏟는 노력과 자원이 해악이나 위험과 균형 잡히도록 최적화된(차등) 접근을 적용할 것을 권고하며, 피폭 관리에 대한 의사를 결정

---

것은 본래 의도를 벗어난다. 역자 생각은 실제 최적화 결과는 연간 1 mSv 이하로 내려갈 수 있지만 그 최적화를 인도하는 참조준위는 1 mSv 위에 두는 것이 합리적이다.

30) <역주> 가령 개인선량 분포는 기껏 연간 2 mSv 이하인데 참조준위를 5 mSv에 설정하면 이는 방호최적화에 아무런 역할을 하지 못한다.

31) <역주> 과거 개념에서는 기존피폭의 감축분에 초점을 두었으므로 백그라운드는 고려할 필요가 없었다. 그러나 현행 방호체계에서는 잔여선량에 초점을 맞추므로 배제 대상이 되는 보편적 백그라운드 선량을 제외한 값을 잔여선량으로 해야 한다. 예를 들어 주택 라돈 참조준위의 경우 선량 참조준위를 6 mSv로 하면 선량계수 4.7 mSv/100 Bq/m<sup>3</sup>를 적용해 라돈농도로 환산하면 연평균 약 120 Bq/m<sup>3</sup>를 얻는다. 우리나라 전형적 실내 라돈 백그라운드를 80 Bq/m<sup>3</sup>로 본다면 측정농도로 라돈 참조준위는 120+80=200 Bq/m<sup>3</sup>로 선정할 수 있다.

할 때는 이를 고려할 것을 권고한다. 이는 규제체계가 부과하는 부담이 달성할 결과물과 균형을 이뤄야 함을 의미한다. 방사선학적 또는 비방사선학적 방호 달성에 유의미한 기여 없는 요건은 피해야 한다.

### 3.3.2. 최적화 과정

(63) NORM 관련 산업에서 사람 보건과 환경보호의 최적화는 (a) 피폭상황의 평가, (b) 가용한 방호방안의 식별<sup>32)</sup>, (c) 여건에서 최적 방호방안의 선정과 이행, (d) 시정조치가 필요하거나 방호를 개선할 새로운 기회가 있는지를 평가하기 위해 피폭상황의 주기적 검토로 순환하는 과정을 통해 이행된다.

(64) 이 반복 과정에서 개인피폭 분포의 평등을 추구하는 것이 중요한 측면이라고 ICRP는 생각한다(ICRP 2006). NORM 관련 산업에서 종사자와 일반인의 개인선량 분포는 매우 넓을 수 있음에 유의해야 한다. 방호 노력은 분포의 높은 선량 쪽 꼬리에 있는 사람(즉, 가장 많이 피폭하는 사람들)에게 초점을 맞춰야 하는데, 노력은 이들의 피폭을 낮추는 데 합리적이고 동시에 전체 피폭집단의 선량도 적절히 낮추는 것이어야 한다.

(65) NORM 관련 산업의 관리를 위한 의사결정은 공개적이고 투명해야 한다. 필요에 따라 종사자, 공동체 또는 적절한 다른 사람들을 포함한 이해당사자를 참여시켜 이들의 우려와 아이디어를 듣고 고려해야 한다. 의사결정의 투명한 체계는 모든 당사자의 완전한 합의는 아니더라도 쟁점 이슈를 합당하게 다루고 해결하게 할 것이다.

(66) 작업환경에 자연 또는 인공 방사선의 존재는 조직이나 공동체 내의 적절한 방사선방호 문화의 발전을 조장할 필요성을 강조하게 되는데, 이로써 실제 또는 잠재적 방사선피폭이 관련된 상황에서 각 개인이 유익한 선택을 하고 현명하게 행동하게 만들 수 있다(ICRP 2006). 이 문제는 존엄의 윤리개념과 밀접하게 연계된다(ICRP 2018).

(67) 행위에 최적화 원칙을 적용하는 상세한 조언은 앞서 제시했고(ICRP 1983, 1990, 1991, 2006) 여전히 유효하다.

---

32) <역주> 원문은 “경제사회적 인자를 고려해 피폭을 합리적 최소로 유지하기 위해 가능한”이란 조건을 달고 있으나 이 고려는 다음 (c)에서 최적 방호방안을 선정할 때 고려사항이어서 삭제했다. (b) 단계에서는 해당 피폭상황에 적용 가능한 모든 방안을 식별하는 것이 필요하다.





# 제4장 NORM 관련 산업에 방사선방호체계의 적용

## 4.1. 종사자 방호

### 4.1.1. 일반 고려사항

(68) NORM 관련 전형적 산업은 방사능농도가 다양한 광범한 원료물질을 처리한다. 여건에 따라 피폭을 적절히 관리하기 위해 특정 개인에게 관리의 직접 적용을 고려할 필요는 없을 수도 있다. 이 말이 방호가 정당하지 않다는 것이 아니라 종사자 개인이 아닌 작업장이나 작업조건에 대해 관리할 수 있다는 의미이다. 모든 상황에 적용 가능한 기준을 규정하는 것은 쉽지 않다. 따라서 종사자 방호에 차등 접근을 권고한다.

(69) NORM 작업에서 주된 피폭경로는 다음과 같다.

- 외부피폭(대개 감마 방사선이지만 때로는 베타 방사선에 의한 눈 수정체나 피부 피폭도 고려할 수 있음).
- 분진 흡입과 혈신 낮게는 분진 취식으로 인한 내부피폭, 지하 및 지상 작업장에서 발생할 수 있는 라돈가스와 그 자손 및 때로는 NORM으로부터 방출되는 토론에 의한 내부피폭(예: 지하 작업장에서 라돈가스 누적). 실제에서 NORM 물질로부터 방출되는 라돈이 기존 라돈(예: 땅으로부터)과 구분되지 않는다.

(70) ICRP는 작업장에서 라돈과 토론은 그 원천과 관계없이 단일선원으로 관리해야 한다고 생각한다[ICRP 126(2014b)에 설명한 것처럼]. 기거자 목적이나 상태가 어떠한 모든 건물에서 라돈 피폭에 대한 방호에는 차등접근을 권고한다. 국가 조치계획을 통해 이행되는 가옥에서 방호전략은 이행 편의를 위한 실용적 이유로서 공기농도로 표현하는 참조준위를 사용한 최적화 원칙의 적용에 근거해야 한다. ICRP는 국가 당국이 경제사회적 여건을 고려하여 100~300 Bq/m<sup>3</sup> 범위에서 합리적 최소인 유도참조준위를 설정할 것을 권고한다. 상응하는 유효선량은 호흡률과

같은 여러 인자에 따라 다르다[ICRP 137(2017b) 참조]. ICRP 126(2014b)에 설명했듯이 라돈 완화조치가 라돈 농도를 참조준위 아래로 낮추지 못하면 그 피폭은 직무피폭으로 고려할 필요가 있을 것이다.<sup>33)</sup>

(71) NORM 관련 산업 종사자는 방사선뿐만 아니라 다른 해악에도 노출됨을 인식하는 것이 중요하다. 이런 맥락에서 볼 때 종종 방사선방호에 관심과 방호를 지지하는 문화가 미진하다. 그러나 NORM 관련 산업은 일반적 직장 보건안전에 대해 전문성과 경험이 있어서, 방사선방호 문화를 종합적 방식으로 구축할 기회가 있다. 많은 경우, 공기 중 분진과 같은 작업장 해악을 줄이려는 조치는 방사선피폭도 감축할 수 있기에 종사자 보호에 종합적 접근이 권고된다.

(72) NORM 관련 산업에서 종사자 방호는 피폭이 예상되는 연간 유효선량(NORM 관련 활동에 의한)과 최적화를 통해 달성할 수 있는 선량감축 범위에 따라 방사선 피폭 관리에 차등접근을 기반으로 해야 한다.

(73) 실제로 차등접근은 적절한 선량 참조준위 설정, 요건(즉, 적절한 방호조치) 선정, 그리고 이들 요건의 종합적 이행을 통해 실현될 수 있다. 이 접근의 실제 이행은 종사자가 직무로 방사선을 피폭하는 것으로 간주할 수 있느냐 아니냐를 결정하는 데 도움이 될 것이다.<sup>34)</sup>

(74) 이 접근은 관련된 다양한 과정의 방사선학적 측면과 이들 측면을 합리적이고 효과적으로 다루는 방식에 대한 규제자와 기타 이해당사자(운영자, 종사자와 그 대표자, 안전/보건/환경 전문가 등) 사이 공통 이해를 증진하는 기반을 제공할 수 있다.

#### 4.1.2. 종사자를 위한 선량 참조준위 선정

(75) NORM 관련 산업은 대단히 다양해서 모든 산업에 적절한 단일 참조준위 값

---

33) <역주> 참조준위 이내면 직무피폭이 아니고 초과하면 직무피폭이라는 논리는 마땅하지 않다. 직장에서 보편적 백그라운드 초과분 라돈 농도에 의한 피폭은 어떠한 직무피폭으로 간주함이 합당하다. 다만, 라돈 피폭의 특수성을 고려하여 그 위 일정 수준(면제준위)까지는 직무피폭 관리 일반요건의 일부 또는 전부를 면제하는 제도적 장치를 두는 것이 합리적일 것이다.

34) <역주> 이 표현은 합당한 노력에도 불구하고 참조준위를 초과할 경우 직무피폭으로 간주한다는 제70항의 입장과 맥을 같이 한다. 그러나 역자의 생각은 종사자가 직무로 받는 모든 정상적 피폭(배제/면제 피폭 제외)은 계획피폭상황의 직무피폭이라고 본다(이때 특수임무를 수행하는 용사의 일은 직무가 아닌 특수임무mission로 보는 것이 합당하다).

은 없다. 실제 및 잠재적 피폭경로, 개인선량 분포, 그리고 최적화 전망 등 피폭상황의 특성에 따라 ICRP가 권고한 1~20 mSv 밴드를 기반으로 적절한 참조준위를 선정할 수 있다. 선정은 다음과 같을 수 있다.

- 대부분 경우 연간 수 mSv 자릿수<sup>35)</sup>나 그 미만
- 연간 수 mSv 자릿수 이상. 관련 여건 때문에 필요하다면 매우 드물게는 연간 10 mSv를 초과할 수도 있다.

(76) 많은 NORM 관련 산업에서 선량분포에 대한 현재 정보를 고려하면, 방사선방호 관점에서 10 mSv/y를 넘는 참조준위 선정은 필요하지 않을 것 같다.

(77) 위에서 적시했듯이 이 선량은 라돈/토론 피폭을 제외한다. ICRP 26(2014a)에서 ICRP는 국가 당국이 지배적 경제사회적 여건을 고려하여 100~300 Bq/m<sup>3</sup> 범위에서 합리적 최소인 라돈/토론 유도참조준위를 설정해야 한다고 권고했다. 라돈 예방 및 완화 수단 적용 후에도 농도가 참조준위를 초과한다면 차등접근에 따라 추가로 선량으로 피폭을 평가할 필요가 있는데,<sup>36)</sup> 이때 선량 참조준위로는 10 mSv 자릿수를 사용해야 한다.

(78) 대부분 경우, 특히 방호수단의 효과적 이행 후에는 참조준위를 초과하는 잔여 선량이 예상되지 않는다. 참조준위는 프로그램의 적절한 작용에 대해 판단하고 보완이 필요한지를 지시하는 데 여전히 유용하다.

### 4.1.3. 요건의 선정과 이행

(79) NORM 종사자 피폭을 최적화하기 위한 수단을 고려할 때 출발점은 항상 기존의 산업안전위생 관리(즉, 작업장의 비방사선학적 해악 관리)가 되어야 한다. 잘 관리된 안전우선 작업장은 이미 NORM으로부터 방사선피폭을 줄이기 위해 여러 가지를 해왔기 때문에, 추가 조치 없이도 사실상 방사선방호가 적절할 수 있다. 추가 방호조치가 필요하다고 생각될 때는 가능하면 포괄적 안전전략과 통합해야 한

---

35) <역주> order of a few mSv. 우리말 표현이 쉽지 않아 '수 mSv 자릿수'로 적었다. 단순히 '수 mSv'라면 원문도 'a few mSv'로 쉽게 썼을 것이다. 여건에 따라 의사결정자의 판단에 맡기려 애매의 범위를 넓은 표현으로 이해된다. 따라서 구체적 값으로는 5 mSv까지는 포함할 수 있을 것 같다.

36) <역주> 낮은 농도에서는 전형적 모델에 따라 선량 참조준위에서 도출된 농도로 관리하지만, 여기에는 라돈 피폭특성에 따라 상당한 오차가 내재하므로 농도가 높아지면 피폭 특성(평형인자, 호흡률, 노출시간 등)을 구체적으로 반영하여 선량으로 환산하여 선량 참조준위와 비교할 수 있다는 의미이다.

다.

(80) 국제노동기구(ILO) 협약(167호와 176호)에 규정된 방호전략은 다음 3 단계로 구성된다.

- 해악을 제거하여 결과적으로 위험을 낮춘다(예: 가능하면 유해물질을 무해하거나 덜 유해한 물질로 대체).
- 위험을 최소화한다(예: 공장, 기계, 기구 및 공정에 적용되는 기술적 수단을 통해).
- 그래도 위험이 남는다면 종사자 본인과 관련된 유효한 수단을 강구한다(예: 개인방호장구PPE 사용).

(81) 같은 책략이 NORM 관련 산업에서 종사자 보호에도 적절하다. 작업장이나 작업조건 관리는 위험을 제거하거나 최소화하려는 것인데, 충분한 방호가 달성되지 않았다면 개인 관리<sup>37)</sup>individual control가 필요하게 된다. 개인 관리는 비용 소모적이기 때문에 작업장 관리에서 개인 관리로 이동에는 신중한 고려가 필요하다. 그래서 개인 관리가 필요하지 않도록(간혹 간단한 PPE를 제외하고는) 충분한 작업장 관리에 우선해야 한다. 작업장과 작업조건에 관한 요건을 아래에 기술한다.

#### 4.1.3.1. 상황의 특성화

(82) 누가 언제 어디서 어떻게 피폭하는가를 파악하는 특성화는 종사자 보호를 위한 출발점이다. 이 특성화에는 산업공정에 걸쳐 NORM 방사성핵종과 그 방사능능도의 분포를 식별하는 목표와 함께, 운영과 유지보수 조건에서 피폭형식mode, 입자의 물리화학적 특성, NORM 분포, 산업공정의 모든 단계에서 방사능능도를 포함하는 선원의 특성화를 포함한다. 원료물질, 중간산물, 잔류물, 폐기물(공장의 오염 포함) 및 환경 배출을 고려하고 라돈과 토론도 고려해야 한다.

(83) 선원 특성화는 종사자의 주요 피폭경로를 식별하는 데 도움이 된다. 다음 단계는 종사자 피폭 관점에서 피폭 그룹이나 개인을 특성화하고 NORM 작업으로부터 받는 연간 선량(외부피폭과 흡입으로부터 발생하는 유효선량)의 초기평가를 수행하는 것이다.

---

37) <역주> 일반적으로는 방사선방호에서 ‘개인 관리’는 방호안전을 위해 개인에게 적용하는 모든 기술적(예: 선량측정, 방호복 착용, 방독면 착용 등), 행정적(종사자 등록, 교육훈련, 출입제한 등) 조치를 의미한다. 그러나 이 절에서 표현하는 개인 관리는 방호를 위해 개인에게 신체적 부담을 주는 방호조치(방독면 착용, 납치마 착용 등)로서 마지막 수단인 소극적 방호대책에 한정하는 것으로 이해하면 적절하다.

(84) 물론 해당 지배적 여건에 따라 피폭상황 특성화의 상세는 달라진다. 실제에서 두 관심 피폭경로는 외부 감마 피폭과 분진 흡입으로 인한 내부피폭이다. 특히, 라돈과 토론 흡입은 따로 다루도록 권고하고 있지만, 이것도 고려해야 한다. 여러 NORM 관련 산업에서 종사자의 연간 예상 방사선피폭을 고려할 때는 현실적 평가(즉, 작업장에서 실제 외부 방사선 및 공기 오염준위와 실제 작업 패턴과 절차를 고려)를 기반으로 하는 것이 중요하다. 방사선피폭을 평가할 때는 기존의 직장 보건안전대책(예: 산업위생, 산업안전, 작업장 공기분진 관리)을 고려해야 한다.

(85) 향후 추가 의사결정에 대비해 건전한 근거를 제공하도록 특성화 단계는 충실히 문서화 하는 것이 중요하다.

(86) 특성화는 방호전략의 정당화를 위한 근거, 특히 방사선방호 목적을 위한 구체적인 요건과 최적화 과정의 규모조정 필요성을 형성할 것이다.

(87) 특성화는 주기적으로 재검토되어야 한다. 이 주기적 검토의 상세와 주기는 위험수준과 걸맞아야 한다. 공급원료, 광물, 생산 관행 또는 선량에 영향을 미치는 다른 인자가 유의하게 변경될 때는 새로 특성화해야 한다.

#### 4.1.3.2. 방사선방호 전문가 자문

(88) 전문가 자문은 시작부터(즉, 피폭상황의 특성화를 돕기 위해) 필요하다. 전형적으로 NORM 관련 산업은 천연방사능 이슈가 표면화되기 이전부터 다년간 운영되어왔을 것이다. 그 결과 종종 방사능과 방사선방호에 관한 지식이 완전히 결여되기도 한다. 결과적으로 비록 NORM 관련 산업이 이미 다른 여러 분야에 자체 기술지원을 갖추고 있더라도 방사선 이슈에 대해 전문가 자문하는 것이 첫 단계가 된다. 그러한 구체적 전문성은 내부적으로 또는 외부 자문을 통해 뒷받침될 수 있다.<sup>38)</sup> 방사선방호 전문성은 경영주가 찾되 전문가가 없을 때는 국가 당국이 찾아

---

38) <역주> 현행 국내 법규는 방사선 취급은 원칙적으로 방사선취급면허 소지자가 수행하도록 규정한다. 그러나 면허 소지자 수가 제한적임을 감안해 면허 소지자 감독 아래 취급할 수 있다는 보조 규정을 두고 있다. 이러한 면허 소지자(또는 경미한 취급인 경우에는 소정 교육훈련을 받은 사람)를 '방사선안전관리자'로 선임하도록 한다. 이 방사선안전관리자가 여기서 말하는 '방사선방호 전문가'에 해당한다. 그러나 중요한 개념 차이는 이 간행물이나 국제관행은 필요할 때 전문성 지원을 받을 수 있으면 되지만, 국내 제도는 안전관리자 없이는 방사선을 취급하지 못하게 하는 것이다(예: 안전관리자가 휴가나 출장을 가면 유자격 대리자를 선임해야 한다). 이러한 현행 국내 제도는 불필요하게 경직된 제도로써 개선이 필요하다.

야 한다. 방사선방호 전문가 자문 수요는 한시적일 수도 있고(예: 초기 검토와 평가에서 피폭이 경미함을 보일 수 있는 경우) 계속 필요할 수도 있다.

#### 4.1.3.3. 해악 예방 또는 감축을 위한 초기조치

(89) 이는 ILO 접근의 1단계에 해당한다. 초기 단계에서는 NORM으로부터 해악을 제거하거나 충분히 감축할 방법이 있는지를 고려하는 것이 유용하다. 예를 들면 대체 원료물질(즉, 훨씬 낮은 농도의 NORM)의 선택, 방사성핵종의 우발적 집적 또는 농축을 예방하도록 공정 설계의 변경 등이다. 비록 이것이 비현실적이거나 가능하지 않다고 인식되더라도 특히 오래 지속된 NORM 관련 산업에서는 이에 대해 고려해 봐야 한다.

#### 4.1.3.4. 구역 구획

(90) 구역 구획은 계획피폭상황에서 잘 수립된 관리전략 요소이지만, 이는 또한 더 넓은 산업보건안전 전략의 일부이기도 하다(즉, 추가 안전대책(예: 작업절차, 환기 요건, 개인보호장구 사용, 출입제한 등)이 요구되는 구역의 식별을 위해). 주어진 관리 유형에 해당한다면 동일 시설에서 여러 구역을 구획할 수도 있다(예: 라돈 구역과 기타 구역). 효력을 위해 구역 구획에는 경고 표지, 그리고 때로는 출입제한이 필요하다. 같은 접근이 NORM 관련 산업에서도 적절하다. 종사자의 알 권리 프로토콜은 필요한 표지 유형을 결정할 것이다. 예를 들면 분진에 대한 경고나 관리 처럼 일부 산업에서는 이러한 개념이 이미 적용되고 있다.

#### 4.1.3.5. 공학적 관리

(91) 위에서 언급했듯이 NORM의 특성은 사고피폭에 의한 고선량 관련 시나리오는 일반적으로 수반되지 않으므로 사고피폭을 예방하기 위한 전통적 공학적 관리<sup>39)</sup>는 필요하지 않다. 대신, NORM에 장기간 피폭을 제한하는 수단이 더 중요한 고려가 된다. 이는 시설의 설계와 배치, 분진을 관리하기 위한 구체적 대책(예: 격납 및 환기)으로부터 시작한다. 광물 처리공장과 같은 NORM 관련 산업은 매우 분진이 많으므로 그런 시설에서는 분진 관리를 위한 전략과 프로그램이 이미 존재해야 한다. 격납과 환기계통의 개선은 전체론적으로 고려해야 한다(즉, 방사능물질과 기타 물질의 포괄적 영향 관점에서).

(92) 방사선 외부피폭을 제한하기 위한 구체적 공학적 수단(즉, 차폐)이 필요할 수도 있는데, 예를 들면 매우 농도가 높은 NORM을 내장하는 배관이나 용기 주위에

---

39) <역주> 예를 들면 차폐 격실 및 출입구 인터록 설치, 비상정지 장치 등.

부분 차폐를 고려할 수 있다. 보다 보편적으로는 작업 패턴을, 때로는 물질이나 공장, 또는 사람의 재배치(거리)를 통해 방호를 제공할 수도 있다.

#### 4.1.3.6. 작업절차

(93) 피폭시간 제한과 같은 작업절차는 피폭이 이미 낮은 경우에도 외부 및 내부 피폭 관리에 매우 효과적이다. 대개 필요한 것은 간단한 안전 작업절차와 모범 산업위생을 존중하는 것이 전부이지만, 적절한 양의 훈련과 감독(다음 소절 참조) 뒷받침이 있어야 한다.

(94) 최소한 종사자에 대한 일반적 정보제공 프로그램(다음 소절 참조)만 보완되면 위에 열거한 요건은 대부분 NORM 관련 산업에서 종사자 보호에 충분할 것이다. 그러나 필요에 따라 사람 관련 요건으로 보완해야 할 수도 있다.

#### 4.1.3.7. 정보제공, 지침 및 훈련

(95) 종사자에게 제공할 정보와 훈련은 방사선 위험 및 취할 필요가 있는 예방대책과 비례해야 한다. 정보를 공유하고 작업장 NORM에 대해 주의를 환기할 기본적인 필요가 있다. 특히 임신했거나 모유수유 중인 종사자에게는 해당 정보를 제공해야 한다. NORM 종사자는 이 과정에서 핵심 이해당사자인데, 초기 단계에 열린 소통과 약속 원칙이 적용되어야 한다. 방사선피폭을 제한하기 위해 특별한 조치가 필요한 데서는 종사자가 방사선 위험의 본질과 방호조치의 중요성, 그리고 그런 조치를 이행하는 실천적 지침을 이해하도록 구체적 훈련을 받아야 한다.

#### 4.1.3.8. 개인방호장구

(96) 개인방호장구에는 방호복, 호흡 보호구(예: 방진 마스크) 등이 포함되는데 이미 NORM 작업장에는 다른 해악으로부터 방호를 위해 널리 사용되고 있다. PPE는 관련된 해악을 신중히 고려하여 선정해야 한다. 보호장구는 적절한 방호를 제공할 뿐만 아니라 사용하기에 편리하고 편안해야 한다. 방사선방호 목적을 위한 PPE의 추가나 개선이 필요한지를 결정하기 전에 기존 PPE의 효과를 평가해야 한다. 작업절차와 함께 공학적 관리가 선호할 방안이며 추가 공학적 관리가 효과가 없거나 비현실적일 때만 최종적으로 호흡보호구를 고려해야 한다. PPE로 인한 추가 제약이 피폭을 증가시킬 가능성도 고려해야 한다.<sup>40)</sup>

---

40) <역주> NORM 작업장에서 납치마를 입는다면 외부피폭 감축보다 작업능률 저하로 더 많은 작업시간을 필요로 해 내부피폭을 훨씬 많이 증가시킬 수 있다.

#### 4.1.3.9. 선량평가

(97) 위에 설명한 초기 특성화 일환으로 종사자 피폭을 평가할 필요가 있는데, 개인선량 계측보다 작업장 측정이나 다른 정보(예: 공정이나 작업관행에 관한)에 기반을 둘 것으로 본다. 선량 수준이 유일한 기준은 아니지만, 실제로 연간 종사자 선량이 수 mSv보다 높을 것으로 평가될 때는 차등접근에 따라 선량평가를 계속 프로그램으로 이행해야 한다. 연간 선량이 수 mSv 약간 상회하는 수준일 때는 종사자 선량을 작업장 측정을 근거로 평가할 수도 있다. 개인선량 측정(예: 개인선량계를 이용해)은 피폭 최적화를 돕는 정보를 제공하는 수단으로 유용할 수 있지만, 일상적 수행을 예상하지는 않는다.

(98) 선량이 연간 수 mSv보다 현저히 높을 것으로 보이면 개인선량 평가를 수행해야 한다.<sup>41)</sup> 외부 방사선피폭에서는 개인선량계(수동형 또는 전자 선량계)로 감시한다. 분진 흡입으로 인한 내부피폭 평가는 훨씬 어렵지만, 분진이 매우 많은 NORM 작업장에서는 이미 분진 감시 프로그램이 있을 것인데 이를 방사선량 평가에 활용할 수 있을 것이다. 내부피폭이 높은데도 기존 감시 프로그램이 없다면 적절한 내부 선량계측 서비스와 협약을 고려할 필요가 있다. 그러나 그러한 피폭은 최적화된 것으로 보이지 않으며, 적절한 방호조치는 내부피폭을 감축할 수 있는 것만이 아님에 주목해야 한다.<sup>42)</sup>

(99) 라돈이나 토론에 대해서는 피폭을 평가하되 농도를 관리할 수 있다면 반드시 선량으로 평가해야 하는 것은 아니다. 라돈이나 토론 선량평가를 해야 할 때는 집단 감시 또는 개인감시로 수행하거나 작업장 감시로부터 추론할 수도 있다(ICRP 2014b).

#### 4.1.3.10. 선량기록

(100) 종사자 선량의 평가나 측정과 관련된 작업장 및 개인 데이터는 충분한 기간 동안 보존해야 한다. 상황에 따라 기록은 여러 방식으로 할 수 있다. 예를 들면 지정 작업장소에서 주위 방사선의 이력과 상시 다니는 사람의 행로를 기록해 필요할 때 주어진 종사자의 선량을 회귀적으로 평가할 수 있게 하는 방식도 있다.<sup>43)</sup> 또한,

---

41) <역주> 유럽 관행은 연간 선량이 6 mSv를 초과할 우려가 있는 종사자에 대해 개인선량계에 의한 감시를 요구한다.

42) <역주> 내부피폭을 감시하거나 줄이는 노력 이전에 비정상적으로 높은 내부피폭 발생 원인을 제거하는 것이 더 바람직하다.

43) <역주> 가령 어떤 작업장의 방사성핵종 공기농도를 감시한 기록과 종사자들이 그 작업장에 머무른 시간 기록이 있다면 언제든지 명목 흡입률과 기준 선량계수를 적용해 내부피폭 선량을 산출할 수 있다. 그러나 이는 원론이며, 현행 국내 규정은 선량으로 평가하여



매 관심 종사자에 대해 개인선량을 그 의요기록의 지정된 면에 등록하는 방식으로 수행될 수도 있다.

#### 4.1.3.11. 건강감시

(101) 일부 NORM 관련 산업에서는 이미 방사선 외적 이유로 건강감시 프로그램이 있다. 연간 선량이 반복적으로 수 mSv보다 훨씬 높은 매우 이례적인 경우를 제외하면, 엄밀히 말하면 방사선방호 목적의 건강감시가 요구될 것 같지는 않다.<sup>44)</sup> 만약 선량이 이처럼 높다면, 방사선 직무피폭자의 건강감시에 대한 기존 대책을 적용하면 충분할 것으로 예상된다.

(102) 위 대부분 요건은 용인 가능한 방호를 달성하는 데 요구되는 정도로만 이행할 필요가 있다. 요건을 이행하는 수단도 여건과 조화되어야 한다. 선량을 감축하기 위한 모든 합리적 노력에도 불구하고 높은 개인선량이 지속되고 일을 수행하는 데 특수 작업절차가 필요하다면, 종사자는 직무피폭자로 간주해야 할 것이다. 라돈 피폭의 경우, ICRP 126(2014b)은 불가피하게 종사자의 라돈 피폭이 많은 활동이나 시설에 관한 국가 목록에서 식별되는 일부 작업장에서 피폭하고, 그 피폭이 보다 직접적이고 분명하게 직무활동과 연계되면 종사자를 직무피폭자로 간주할 수 있다고 권고한다.

(103) 직무피폭자로 간주되는 경우 방사선방호 목적을 위한 교육훈련, 개인 방사선량 감시 및 기록, 보건감시는 모두 ICRP 75(1977)에서 설명한 대로 이행될 필요가 있을 것이다.

## 4.2. 일반인 방호

(104) 일반인 방호를 위한 일반적 접근은 피폭경로 해석과 선량평가를 포함한 피폭상황의 특성화(누가 언제 어디서 어떻게 피폭하나)로부터 시작한다. 이 특성화는 방호전략의 정당화 근거를 형성한다. 다음으로 최적화 과정이 이행되는데, 참조준

---

보고하도록 규정하고 있으며, 그 선량은 국가 방사선작업자 기록에 등록된다.

44) <역주> 유럽연합 회원국을 포함한 많은 나라가 연간 6 mSv 이상을 피폭할 우려가 있는 종사자(A군)에 대해서만 방사선방호 목적 건강검진을 요구한다. 이에 비해 우리나라는 방사선작업자로 등록만 되면 피폭이 사소해도 특수검진을 받도록 규정한다. 심지어 근래에는 방사선구역에 간혹 출입하는 수시출입자도 같은 검진을 받도록 강화했다. 역자는 이를 국제관행과 조화되지 않는 과잉 규제로 본다.

위 선정, 방호조치의 선정과 이행, 의사결정 과정에 이해당사자 참여, 그리고 필요에 따라 상황에 대한 장기적 감시 대책을 포함한다.

(105) 최적화 과정은 선의/비악의, 신중, 정의 및 존엄의 윤리가치를 유념하면서 합리적 방식으로 이행되어야 한다. 더 복잡한 상황에서는 각 윤리가치에 대한 이해당사자의 저변 관심을 알기 위해 이들과 함께 일하는 것이 용납되고 지속 가능한 답을 찾는 일에 매우 유용할 수 있다.

(106) 방호최적화 과정을 의미 있게 안내하려면 일반인 방호를 위한 참조준위는 연간 수 mSv 자릿수 이하에 선정해야 한다. 기존 선량분포를 고려할 때, 일부 NORM 관련 산업의 일반인피폭에서는 사실 연간 1 mSv 미만의 참조준위가 가장 적절할 수도 있다. 일반인 방호는 총체적으로 다뤄야 한다(즉, 상이한 피폭경로를 같이 고려해). 주어진 상황에서 피폭경로는 NORM 배출, 폐기물, 잔류물 및 있을 수 있는 유산부지에 대해 고려할 필요가 있다. 실제로 각 피폭경로에서 높이 피폭하는 사람들이 다른 그룹에 속할 수도 있으므로 일반적으로 참조준위는 주어진 피폭경로에 대해 적용될 수 있다. NORM 잔류물의 재이용이나 재순환은 새로운 NORM 공정의 시작점이 될 수도 있다.

(107) NORM 관련 산업에서 발생하는 일반인의 라돈/토론 피폭은 주로 잔류물의 재이용(예: 건축재료)으로부터 온다. ICRP 126(2014b)의 해당 권고는 소절4.2.4에 포함되어 있다.

#### 4.2.1. NORM 관련 산업으로부터 배출

(108) NORM 관련 산업의 정상운영에서는 액체나 기체 방사성/비방사성 유출물이 의도적으로 배출될 수 있다. 방사성핵종은 그 물리화학적 형태가 변할 수도 있다 [예: 일부는 액체 유출물이나 기체 유출물(에어로졸) 흐름에 있는 입자와 반응할 수도 있다]. 석유나 가스 채굴, 인산염 처리 산업, 석탄 연소와 같은 일부 경우에는 NORM 배출이 사람이나 환경 보호에 이슈로 되어 왔다. 따라서 유출물은 방사선학적/비방사선학적 영향을 고려하여 합당하게 관리해야 하며, 필요하다면 일반인과 환경 보호를 위해 배출을 제한해야 한다.

(109) 방사선방호 관점에서 부지 고유 포괄적 배출관리는 다음과 같은 단계를 포함한다.

- 배출물의 방사선학적 특성화

- 시간과 공간에서 방사성핵종의 환경분포와 환경조건에서 방사성핵종의 유동성을 고려한 잠재적 피폭경로의 식별
- 선량평가와 위험평가
- 배출관리를 위한 수단의 정당화
- 참조준위 선정
- 방호전략 내에서 최적화 과정(합리적 최소)을 통한 대책의 선정과 이행.

(110) 방호전략은 배출량과 농도의 예방이나 감축을 목표로 하는 예방조치, 일반인이나 환경 피폭 관점에서 배출 영향의 감축을 목표로 하는 완화조치 모두를 포함한다. 최적화 과정과 이해당사자 참여는 경우마다 다르고, 실제로 NORM 시설의 운영특성, 배출공정, 방사능 수준과 평가된 위험, 관련된 일반인 그룹, 그리고 대중 인식의 사회적/정치적 측면에 의존한다. 실제에서는 유출물 처리와 같은 일부 공정이 방사능농도가 증가한 폐기물의 추가 발생이나 전체적 폐기물 체적의 증가로 이어질 수도 있어서 최적화가 복잡할 수 있다.

(111) 음용수, 환경영향(아래 참조), 현재 및 장래의 지역 토지이용, 동일 지역에 다수 시설 존재 가능성 등에 대해서도 주의를 기울여야 한다.

(112) 측정 가능한 양(예: 총 방사능이나 방사능농도)으로 해석된 참조준위 사용이 NORM 관련 산업에 적절할 수 있다.

#### 4.2.2. 폐기물

(113) 액체든 고체든 폐기물은 더는 사용 계획이 없는 물질이다. NORM 관련 산업은 방사성/비방사성 오염물을 포함하는 폐기물을 발생시키는데, 둘 다 일관되게 관리해야 한다. 거시적으로 보면, NORM 관련 산업은 방사능농도가 높은 소량 폐기물로부터 방사능농도가 낮은 대량 폐기물까지 발생시킨다.

(114) 폐기물은 합당한 처분방식을 결정할 수 있도록 특성화되어야 한다. 폐기물을 고준위까지 농축에는 어려움이 따르지만, 폐기물 처리는 최적화 과정에서 고려하고 수행해야 한다. 새로운 사업을 개시하거나 설계할 때는 폐기물 이슈를 그 발생에서부터 최종 처분까지(요람에서 무덤까지) 고려해야 한다.<sup>45)</sup>

45) <역주> 과거에는 발생된 폐기물은 처분하면 된다는 생각이었으나, 처분에 대한 사회적 갈등으로 비용이 크게 증가함에 따라 이제 사업 계획에서부터 폐기물 발생을 줄이기 위한 설계와 운영 방식을 고려한다.

(115) NORM 폐기물 처분방식은 모든 오염물(방사성/비방사성)을 고려하여 해악의 유형과 수준에 비례해야 한다. 폐기물의 방사능이나 체적에 따라 차등접근을 적용해야 한다. 일부 폐기물은 산업폐기물이나 특수폐기물로 처리될 수 있으므로 근지표 매립장에 처분할 수 있다. 방사성핵종 농도가 더 높은 폐기물의 처분은 방사성 폐기물 관리와 일관되게 해야 한다.<sup>46)</sup>

### 4.2.3. 잔류물

(116) 잔류물은 재이용 또는 재순환 가능한 물질이다. 잔류물은 주로 NORM 사이클의 상류(물질의 탐사 및 채굴)에서 발생하는데, 그 방사능농도는 원료물질보다 상당히 증가할 수 있다. 폐기물과 마찬가지로 잔류물도 특성화하여 잠재적 재이용 전에는 합당하게 저장해야 한다. NORM 잔류물 용도를 찾는 데는 경제적, 생태학적 논란이 있다. 주어진 NORM 관련 산업에서 부산물이나 잔류물은 다른 NORM 관련 산업의 공급원료나 매립재(화학적 독성이나 지하수로 유입경로가 없다면), 또는 상품(예: 건축재)으로 사용될 수도 있다. 잔류물을 공급원료로 사용은 새로운 NORM 공정의 시작점이 될 수 있다. 재이용이나 재순환은 폐기물 체적을 줄이는데 도움이 된다. 그러나 때로는 이것이 종사자, 일반인 및 환경의 피폭을 초래할 수도 있다. 상당 기간 집적된 잔류물은 환경오염을 예방하기 위해 적절히 관리해야 한다.

(117) NORM 잔류물의 재이용이나 재순환을 위해서는 방호전략 이행을 고려해야 한다. 이 평가에는 피폭 수준, 환경오염, 대안, 제품의 장래, 사회적 수용 등과 같은 여러 요소를 고려해야 한다. 드물게는 이러한 평가에 근거하여 새 공정이 정당화되지 않아 잔류물을 폐기물로 처리해야 할 수도 있다.

(118) 방호전략이 정당화되면, 선량감축 여지가 한정될 수도 있음을 고려하면서 최적화를 고려해야 한다.

### 4.2.4. 건축재

(119) 건축재는 원료물질(예: 채석장에서 추출), NORM 관련 산업의 잔류물, 또는 일부가 자연히 방사성인 물질의 혼합물(예: 콘크리트) 등에서 오는 천연 방사성핵

---

46) <역주> 약간 의아한 표현이지만 NORM 폐기물도 방사능농도가 높으면 방사성폐기물이다. 따라서 방사성폐기물 처분 개념을 따르는 것은 당연하다. 다만, NORM 폐기물은 그 원천이 천연 광물이므로 다른 유해인자가 개입되지 않는다면 농도가 낮은 흙으로 희석하여 처분하는 것이 윤리적으로 부적절하지 않다. 인공 방사성핵종 폐기물에 대해서는 쉬운 처분을 목적으로 이런 의도적 희석은 허용하지 않는다.

종을 함유할 수 있다. 이들 건축재는 직접 외부 감마선을 내거나 실내 공기로 라돈/토론을 방출해 일반인피폭을 초래할 수 있다. 건축재 생산이나 취급에서 직무 피폭은 일반적으로 낮지만, 이것도 다른 NORM 관련 산업에서처럼 차등접근으로 관리해야 한다.

(120) NORM 함유 건축재 사용은 배출, 폐기물, 잔류물처럼 NORM에 의한 일반인 피폭의 한 피폭경로로 생각할 수 있는데, 이에 대해서도 위에서 설명한 것처럼 연간 수 mSv 정도인 일반인피폭에 대한 참조준위를 적용할 수 있다. 참조준위는 외부 감마선에 의한 일반인의 유효선량으로 표현한다. 일반적으로는 이 수준 참조준위는 건축재 중  $^{226}\text{Ra}$ 으로부터 라돈 방출이 실내 라돈농도에 대해 설정한 참조준위를 초과하지 않도록 할 것이다. 대부분 국가에서 건축재는 라돈피폭에서 덜 중요하지만, 그 선원을 무시하지 못할 경우도 있을 수 있다. 토론 방출 우려는 더 낮을 것으로 예상된다.<sup>47)</sup>

(121) 관심 대상이 되는 건축재, 원료물질 및 잔류물 목록은 여러 문헌에서 찾아볼 수 있다(EURATOM 2013, IAEA 2015). 관심 건축재를 스크리닝하거나 건축재로 인한 선량을 평가하는 여러 방법론도 있다(EC 1999b, IAEA 2005, EURATOM 2013). 그러나 건축재로 인한 실제 피폭에 관한 정보를 제공하기 위해서는 건물에서 특정 건축재의 실제 위치와 농도를 고려하는 보다 발전된 방법을 사용할 필요가 있다(EC 1999b, EURATOM 2013, IAEA 2015).

(122) 방호전략은 참조준위를 넘지 않는 건축재 사용을 권장할 목표로 수립되어야 한다. 전략은 여러 건축재로부터 받는 피폭의 수준에 관한 정보의 제공, 재료의 표지, 방사능농도가 낮은 물질 사용 권장, 유의한 피폭을 초래하는 특정 물질의 사용 제한과 같은 방법들을 포괄한다. 선의/비악의 윤리가치를 유지하는 데는 의사결정 전에 고려하는 대책이 실제로 합리적이고 이행 가능함을 확신하는 것이 중요하다.

(123) ICRP 126(2014b)에서 권고한 바에 따라 수립하는 국가 라돈 조치계획은 해당한다면 건축재로부터 라돈/토론 피폭을 포함해야 한다. 원천이 무엇이든 건물에서 그러한 피폭의 예방이나 완화를 겨누는 조치는 ICRP 126(2014b)에 주어져 있는데, 라돈피폭을 줄이는 데 필요하면 이를 이행해야 한다.

---

47) <역주> 건축재는 단단한 고체여서 반감기가 56초에 불과한 토론은 스며나올 기회가 낮아 일반적으로 문제되지 않는다. 2018년 우리 사회를 뒤흔든 음식온가루 처리 침대 매트리스는 분말형 물질이어서 토론이 쉽게 빠져나와 사용자에게 피폭을 주었다.

(124) 예외적으로 방사능농도가 높은 잔류물이 건축재에 포함되는 과정에 각별한 주의를 기울여야 한다. 그러한 잔류물의 적절한 관리에 대한 보다 엄격한 요건을 회피하거나 의도적 희석 목적으로 방호전략을 이행해서는 안 된다. 이는 건축재에 대한 참조준위 초과 여부와 무관하게 적용된다.<sup>48)</sup>

(125) 건물 지반, 마당 표면, 놀이터, 도로, 교량, 기타 유사한 구조물에 사용되는 건축재와 같은 다른 건축재에 대해서도 비슷한 접근을 적용할 필요가 있다. 선량평가나 별도의 유도 방사능농도지수<sup>49)</sup>를 고려할 필요가 있다.

#### 4.2.5. 유산부지

(126) NORM 관련 산업은 방사능 오염이 있는 많은 현존 유산부지의 원인이다. NORM 유산부지는 NORM 관련 산업 및 관련 방사선방호 이슈에 대해 부상하는 관심사로 자주 식별되고 있다. 시설이 폐쇄되고 해체될 때 종종 방사선방호가 충분히 고려되지 않은 상황으로 나타난다. 유산부지를 예방하려면 NORM 관련 공정의 운영에서 이미 존재하는 기술과 기법을 이행해야 한다.

(127) 유산부지에 대한 이슈는 준비 중인 ICRP 간행물의 범위이므로 이 간행물에서는 몇몇 일반적 고려사항만 제시한다. 시간 경과나 정보 상실 때문에 오래된 유산부지의 유지나 치유에 대한 책무나 책임의 부과가 가끔 이슈로 된다. 알려진 책임 당사자가 없는 부지는 종종 ‘고아부지’라 불린다. NORM 관련 산업의 적합한 해체와 필요에 따른 견고한 행정관리를 통해 새로운 유산부지를 예방해야 한다.

(128) 유산부지 치유의 정당화는 방사선방호 고려만으로 견인되는 것은 아니다. 활발한 NORM 관련 산업처럼 중금속 같은 다른 해악도 있을 수 있다. 참조준위는 1~20 mSv/y 범위에 있어야 한다. 참조준위는 치유의 종점이 아니다. 종점은 여건(교란 이전 상황도 포함하여), 부지의 장래 용도(예상할 수 있다면), 가능한 사용

---

48) <역주> 이 문제는 특히 현명한 접근을 요구한다. 주거용 건물 건축재라면 방사능농도가 높은 잔류물을 혼합하여 피폭을 유의하게 증가시키는 것은 비윤리적이다. 반면, 천연 방사능물질을 함유한 물질을 무조건 고비용 방사성폐기물 처분장으로 보내는 것도 합리적이지 않다. 건축재로 장점이 있다면 피폭경로가 제한적인 고속도로 기초나 교량 골재로 활용하는 것은 무방할 것이기 때문이다.

49) <역주> 건축재 천연방사능에 대한 대표적 방사능농도지수는 유럽연합(EURATOM 2013)이 규정하는 지수로서 선량 참조준위 연간 1 mSv를 근거로 다음처럼 정의된다.

$$I = \frac{C_{\text{Ra226}}}{300} \text{Bq/kg} + \frac{C_{\text{Th232}}}{200} \text{Bq/kg} + \frac{C_{\text{K40}}}{3000} \text{Bq/kg}$$

즉, Ra-226은 300 Bq/kg, Th-232는 200 Bq/kg, K-40은 3000 Bq/kg을 상한으로 한다.

조건(또는 제한)을 고려하여 참조준위 아래서 최적화된 선량준위가 되어야 한다.

(129) 최적화 원칙의 적용은 종종 어려움을 겪는데, 예를 들면 때때로 NORM 오염과 자연 백그라운드 방사능 사이 구분이 어렵다. 유산뿐만 아니라 그 관리까지 사회적 수용성 부족도 도전으로 될 수 있다. 그래서 의사결정 과정에 이해당사자 참여가 유산부지 관리에 대단히 중요하다.

(130) 치유과정에 참여하는 종사자는 방사선작업에 대해 특별하게 훈련받을 필요가 있다. 이 경우 작업자는 직무피폭자로 간주해야 한다.

(131) 일반 작업자나 일반인이 치유(자신의 가정이나 공공장소의)에 참여한다면, 필요에 따라 호흡보호구와 같은 방호장구는 물론 관련 정보와 권고사항을 이들과 소통해야 한다.

### 4.3. 환경보호

(132) 대량의 NORM이 다른 오염물과 혼합물 형태로 환경에 존재할 수 있다. 시간 경과에 따라 환경의 여러 지구화학적, 물리적 과정이 NORM 방사성핵종의 평형을 교란할 것이다. 선택적 확산, 침출 및 이전, 분지fractionation, 생물농축, 다른 오염물과 반응 등 기전이 시간에 따른 환경영향을 변경시킬 수 있음은 기지 사실이다. 이런 유형의 환경피폭에서 단순한 모델로 사람 아닌 생물종에 대해 가능한 위험과 영향을 알기 위한 위험평가를 수행하는 것은 어렵다.

(133) 환경 피폭경로를 통한 사람 피폭만 예방할 것이 아니라, 최적화 과정은 환경 보호(즉, 사람 아닌 생물종 보호)도 겨냥해야 한다(ICRP 2007a). 특히 유출물 관리 기법은 사람 아닌 생물종 선량의 예측을 반영할 수 있다. 선정된 관리는 생물종을 위한 방사선방호에 의해 구체적으로 도출될 수도 아닐 수도 있지만, 다양한 방안의 상대적 기여는 유용한 정보가 된다. 그러나 주어진 환경 격실에서 NORM 방사능 농도 증가에 관한 정보가 반드시 사람 아닌 생물종에 영향을 초래함을 의미하는 것은 아니므로, 영향평가는 추정 선량 외에 여러 인자를 고려해야 한다.

(134) 지난 수십 년간, 환경에 대한 방사선방호 접근을 개발하는 데 상당한 국제적/국가적 노력을 쏟았다. 산업활동에서 방사능에 관심을 높이는 것이 국가나 국제

수준에서 중요해졌다. NORM 관련 산업도 방사능 아닌 오염물로부터 환경을 보호하기 위한 공통 표준을 일반적으로 따르게 되었다.

(135) ICRP는 다음을 포괄하는 종합접근을 권고한다.

- 모든 관심 스트레스 인자(즉, 방사선학적/비방사선학적)
- 사람 피폭으로 인한 사람 보건 및 사람 아닌 생물종과 그 집단(즉, 종의 집단으로부터 공동체 및 생태계까지)의 환경 피폭으로 인한 생태학적 영향.

(136) 주된 이슈는 균형 잡히고 잘 정당화되고 종합된 접근으로 사람과 환경의 방호에 대해 조화되고 일관된 입증이다. 모든 환경영향평가에서 권고하듯, 일반적으로 이 접근은 매우 단순한 보수적 평가(신중한 피폭 시나리오의 가정 아래 일반적 입력자료를 사용하여 수행하는 스크리닝 단계)로부터 시작해 명확하고 방어 가능한 결론에 이를 때까지 필요에 따라 평가의 복잡성과 현실성을 높여 나가는 차등적 방법으로 이행될 수 있다(IAEA 2018).

(137) 무슨 산업이든 유사한 시설이나 행위 그룹에 대한 일반 논거를 공통 스크리닝 종합접근으로서 이행하는 것의 부가가치를 예견할 수 있다. 이 경우 입증은 설득력 있고 적절한 선원항과 피폭 시나리오에 근거해야 한다. 이때 목표는 한편으로는 사람과 생태학적 건강 우려, 다른 한편으로는 방사선학적/비방사선학적 건강 우려가 사소한 부지에 대해 이행 용이한 스크리닝 제외체계를 도출하는 것이다.

(138) 이해당사자가 참여하는 의사결정 과정을 유도하도록 문화적, 사회학적, 경제적 속성을 고려하여 부지 고유하게 반영하거나 일반논거를 보완함으로써 방호조치를 개발할 수도 있다.

(139) 복잡한 상황에서는 환경으로 방출된 NORM의 방사선학적 특성화를 선원과 관심 환경매체(예: 공기, 물, 침적물, 토양)에서 방사성핵종을 그 물리화학적 형태와 방사능농도에 대해 분석함으로써 수행할 수 있다. 사람 아닌 생물종의 피폭을 평가하기 위해서는, 방사성핵종의 이동도(mobility), 시공간적 변동, 동식물의 환경 피폭경로 및 생물존재도(bioavailability) 식별도 관련된다. RAP과 DCRL에 따른 접근이 개발되어 있다(ICRP 2008, 2014b). 선정된 방사성핵종, 생태계와 관심 생물체에 대한 고유 피폭선량을 계산하는 선량계측 모델도 부지고유 적용을 위해 가용하다. 부지나 서식지의 중요성, 또는 실제 존재하거나 존재할 것 같은 종의 중요성 때문에 일정 수준 주의가 필요할 것으로 본다. 많은 경우, 동식물에 해악을 끼치는 다른 내용물도 존재할 것임을 유의하는 것도 중요하다. ICRP는 전 해악 접근(all-hazard



approach을 따라야 한다는 권고를 다시 강조한다.

(140) 배출을 제한하는 결정은 모든 유형 피폭에 영향을 미치므로, 사람과 기타 생물종을 보호할 목적인 조치의 정당화 근거로 환경영향평가를 사용할 수 있다. 이해 당사자 참여를 권고한다. 환경의 장기적 보전은 범지구 사회적 관심사이며 여기에는 방사선방호의 윤리가치 적용이 유용하게 기여할 수 있다.

(141) 환경으로 NORM 방출을 다룰 때는, 방사성핵종, 분석 주기, 분석할 표본, 관심 생물체, 기록관리, 그리고 감시계획에 관한 특별한 요건들을 필요에 따라 명시해야 한다. 방호기준이 여전히 준수되는지를 점검하기 위해 장기적 환경감시를 정기적으로 수행해야 한다.



## 참고문헌

- EC, 1999a. Establishment of Reference Levels for Regulatory Control of Workplaces where Materials are Processed which Contain Enhanced Levels of Naturally Occurring Radionuclides. Radiation Protection 107. European Commission, Brussels.
- EC, 1999b. Radiological Protection Principles Concerning the Natural Radioactivity of Building Materials. Radiation Protection 112. European Commission, Brussels.
- EURATOM, 2013. Council Directive 2013/59/EURATOM of 5 December 2013 laying down basic safety standards for protection against the dangers arising from exposure to ionising radiation and repealing Directives 89/618/Euratom, 90/641/Euratom, 96/29/Euratom, 97/43/Euratom and 2003/122/Euratom. Off. J. Eur. Union, 13: 1-73.
- IAEA, 1996. International Basic Safety Standards for the Protection against Ionizing Radiation and for the Safety of Radiation Sources. Safety Series No 115. International Atomic Energy Agency, Vienna.
- IAEA, 2005. Environmental and Source Monitoring for Purposes of Radiation Protection. Safety Guide No. RS-G-1.8. International Atomic Energy Agency, Vienna.
- IAEA, 2006. Assessing the Need for Radiation Protection Measures in Works Involving Minerals and Raw Materials. Safety Reports Series No. 49. International Atomic Energy Agency, Vienna.
- IAEA, 2010. Proceedings of Naturally Occurring Radioactive Material Symposium (NORM VI). STI/PUB/1497, Marrakech, Morocco, March 2010. International Atomic Energy Agency, Vienna.
- IAEA, 2014. Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards. General Safety Requirements No. GSR Part 3. International Atomic Energy Agency, Vienna.
- IAEA, 2015. Protection of the Public against Exposure Indoors due to Radon and Other Natural Sources of Radiation. Specific Safety Guide No. SSG-32. International Atomic Energy Agency, Vienna.
- IAEA, 2018. Protective Radiological Environmental Impact Assessment for Facilities and Activities. General Safety Guide No. GSG-10. International Atomic Energy Agency, Vienna.
- ICRP, 1977. Recommendations of the ICRP. ICRP Publication 26. Ann.

- ICRP 1(3).
- ICRP, 1983. Cost-benefit analysis in the optimization of radiation protection. ICRP Publication 37. Ann. ICRP 10(2/3).
- ICRP, 1984. Principles for limiting exposure of the public to natural sources of radiation. ICRP Publication 39. Ann. ICRP 14(1).
- ICRP, 1990. Optimization and decision making in radiological protection. ICRP Publication 55. Ann. ICRP 20(1).
- ICRP, 1991. 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 60. Ann. ICRP 21(1-3).
- ICRP, 1993. Protection against radon-222 at home and at work. ICRP Publication 65. Ann. ICRP 23(2).
- ICRP, 1997. General principles for the radiation protection of workers. ICRP Publication 75. Ann. ICRP 27(1).
- ICRP, 1999. Protection of the public in situations of prolonged radiation exposure. ICRP Publication 82. Ann. ICRP 29(1/2).
- ICRP, 2006. The optimisation of radiological protection: broadening the process. ICRP Publication 101, Part 2. Ann. ICRP 36(3).
- ICRP, 2007a. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103. Ann. ICRP 37(2-4).
- ICRP, 2007b. Scope of radiological protection control measures. ICRP Publication 104. Ann. ICRP 37(5).
- ICRP, 2008. Environmental protection - the concept and use of reference animals and plants. ICRP Publication 108. Ann. ICRP 38(4-6).
- ICRP, 2009a. Application of the Commission's recommendations for the protection of people in emergency exposure situations. ICRP Publication 109. Ann. ICRP 39(1).
- ICRP, 2009b. Application of the Commission's recommendations to the protection of people living in long-term contaminated areas after a nuclear accident or a radiation emergency. ICRP Publication 111. Ann. ICRP 39(3).
- ICRP, 2009c. Environmental protection: transfer parameters for reference animals and plants. ICRP Publication 114. Ann. ICRP 39(6).
- ICRP, 2010. Lung cancer risk from radon and progeny, and statement on radon. ICRP Publication 115. Ann. ICRP 40(1).
- ICRP, 2014a. Protection of the environment under different exposure

- situations. ICRP Publication 124. Ann. ICRP 43(1).
- ICRP, 2014b. Radiological protection against radon exposure. ICRP Publication 126. Ann. ICRP 43(3).
- ICRP, 2016. Radiological protection from cosmic radiation in aviation. ICRP Publication 132. Ann. ICRP 45(1).
- ICRP, 2017a. Dose coefficients for nonhuman biota environmentally exposed to radiation. ICRP Publication 136. Ann. ICRP 46(2).
- ICRP, 2017b. Occupational intakes of radionuclides: Part 3. ICRP Publication 137. Ann. ICRP 46(3/4).
- ICRP, 2018. Ethical foundations of the system of radiological protection. ICRP Publication 138. Ann. ICRP 47(1).
- ILO, 1988. C167 - Safety and Health in Construction Convention. Entry into force: 11 January 1991. Adoption: Geneva, 75th ILC session (20 June 1988). International Labour Organization, Geneva.
- ILO, 1995. C176 - Safety and Health in Mines Convention. Entry into force: 5 June 1998. Adoption: Geneva, 82nd ILC session (22 June 1995). International Labour Organization, Geneva.
- Miller, H.T., Bruce, E.D., Cook, L.M., 1991. Management of Occupational and Environmental Exposure to Naturally Occurring Radioactive Materials (NORM). 1991 SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Pt. 2, Production Operations and Engineering. Society of Petroleum Engineers of AIME, 6-9 October 1991, Richardson, TX, USA, pp. 627-636.
- Monicard, R., Dumas, H., 1952. Radioactivite´ des Roches Se´dimentaires, du Pe´trole Brut et des Eaux de Gisements. Institut Franc¸ais du Pe´trole, Paris, pp. 96-102.
- Schmidt, A.P., 2000. Naturally Occurring Radioactive Materials in the Gas and Oil Industry. Origin, Transport and Deposition of Stable Lead and <sup>210</sup>Pb from Dutch Gas Reservoirs. Department of Geochemistry, Utrecht University, Utrecht.
- UNSCEAR, 1977. Report to the General Assembly. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, New York.
- UNSCEAR, 1982. Report to the General Assembly, Annexe C. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, New York.
- UNSCEAR, 2008. Report to the General Assembly, Annexe B. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, New

York.

UNSCEAR, 2016. Report to the General Assembly, Annexe B. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, New York.

# 부록A

## NORM 피폭 초래 활동

(A1) NORM 피폭을 초래하는 주된 활동은 다음과 같다.

### A.1. 희토류 원소 추출

(A2) 희토류 원소의 가장 중요한 원료는 모나자이트 (Ce,La,Nd,Th)PO<sub>4</sub>와 바스트네사이트<sup>50</sup>이다. 모나자이트는 결정구조가 우라늄이나 토륨 원자를 수용하며 지구 상에서 가장 흔한 천연방사능물질이다. 방사능농도는 토륨 5000~350000 Bq/kg, 우라늄 10000~50000 Bq/kg 범위에 있다(UNSCEAR 2008). 희토류 원소 추출 과정(기계적 또는 화학적 수단으로)에서 종사자가 감마선 외부피폭이나 분진을 흡입할 수 있다. 나아가 추출공정의 유출물, 잔류물 및 폐기물은 공급원료보다 더 높은 농도로 토륨, 라듐 및 우라늄을 함유할 수 있다(EC 1999a). 폐기물 형태의 광미 mill tailings는 매립재로 사용할 수 있어 특별한 관리가 필요할 수도 있다.

### A.2. 금속 토륨 및 화합물 생산

(A3) 산화물 형태의 토륨은 많은 광물, 특히 모나자이트에 들어있다. 토륨은 무기물을 농축하고 산으로 용해하여 토륨염 형태로 추출할 수 있는데, 이것이 금속 토륨을 생산하는 원료물질이다. 토륨은 첨가물[예: 토륨팅스텐 전기용접봉, 보통 10만 Bq/kg의 <sup>232</sup>Th 및 <sup>228</sup>Th 함유(EC 1999a)]이나 합금[예: 제트엔진에 사용되는 마그네슘-토륨, 방사능농도 약 7만 Bq/kg] 또는 질화토륨 형태[예: 가스맨틀]로 다양한 소재에 사용된다. 소량 토륨은 다양한 제품에서 볼 수 있는데, 유리, 공항 할 주로 조명등, 전등 스타터 등이다. 토륨 함유제품 생산에서는 외부 감마선 피폭이나 먼지 흡입을 통한 내부피폭이 발생할 수 있다. 이 공정은 감시와 관리가 필요한 고체폐기물과 유출물도 발생시킨다.

---

50) <역주> bastnaesite. RE(CO<sub>3</sub>)F 세륨계열 불화탄산염 광물. 가장 대표적 희토류 광물이다.

### A.3. 비우라늄 광물 채광 및 처리

(A4) 국제노동기구(ILO)에 따르면 채광은 세계 노동력의 약 1%(즉, 석탄 채광 1천 2백만 명을 포함해 약 3천만 종사자)를 차지하는 광대한 산업이다. 광산 운영에서 주된 피폭원은 라돈이지만, 어떤 상황에서는 장수명 방사성핵종에 의한 감마선 외 부피폭이나 광물 분진 흡입이나 취식으로 인한 내부피폭도 중요할 수 있다.

(A5) 광석 처리도 NORM 사용에 의해 영향을 받을 수 있는데, 종사자의 피폭상황은 산업 유형, 작업장 조건, 관련 방사성핵종과 그 물리화학적 형태 등에 따라 크게 다를 수 있다. 추출 산업에 관련된 천연 방사성핵종은 제품이나 유출물, 폐기물 등에 나타날 수 있다. 환경으로 배출되는 폐수의 침전물을 측정할 결과 방사능농도가  $^{226}\text{Ra}$  55000 Bq/kg,  $^{228}\text{Ra}$  15000 Bq/kg까지도 나타났다(IAEA 2003).

### A.4. 석유와 가스 채굴

(A6) 석유나 가스 지질구조에 있는 물은 모체암에서 녹아나온  $^{228}\text{Ra}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{224}\text{Ra}$  및 그 붕괴 자손핵종을 함유한다. 이런 물을 석유나 가스와 함께 지상으로 뽑아내면 온도와 압력 변화로 인해 라듐이 풍부한 황화물과 탄산칼슘으로 공정기기(배관, 밸브, 펌프 등)의 내벽에 관석scale으로 침전된다. 관석의 나이에 따라 많은 양의  $^{210}\text{Pb}$ 나  $^{228}\text{Th}$ 이 그 방사성 어미와 함께 쌓인다(IAEA 2006). 어느 경우든 관석의 방사능농도는 예측하기 어렵지만  $^{226}\text{Ra}$  방사능농도는 1000 Bq/kg 미만에서부터  $10^6$  Bq/kg까지 범위로 보고되고 있다(EC 1999a). 라듐 동위원소와 자손은 분리기와 거르개skimmer 탱크의 슬러지에도 나타날 수 있다[상세한 것은 문헌(IAEA 2003)의 표5에서 볼 수 있다]. 관석과 관련된 주된 방사선방호 이슈는 종사자의 외부 감마선 피폭과, 특히 관석이 심한 경우, 보수유지에서 관석 제거나 퇴역작업 수행 직원의 내부피폭이다. 석유, 가스, 관석 및 슬러지의 방사능농도에 관한 수치는 표A.1(IAEA 2003,2001)에 주었다.

(A7) 운영자는 물에 화학 관석방지제를 넣어 관석 침적 예방을 시도할 수 있다. 그러면 라듐 동위원소가 생산 계통을 통과하여 폐수와 같이 배출될 수 있다. 같은 방식으로 가스 생산에서는 새로운 프래킹fracking(수압파쇄) 기법이 시추암편drill cuttings이나 물의 NORM을 배출한다. 예를 들면 미국 지질조사US Geological Survey에서 처리수의 방사능농도 중앙값은 200 Bq/L 정도였다(Rowan 등 2011).



표A.1. 석유, 가스 및 부산물의 방사성핵종 농도

핵종	원유 Bq/kg	천연가스 Bq/m <sup>3</sup>	처리수 Bq/L	경질 관석 Bq/kg	슬러지 Bq/kg
<sup>238</sup> U	10 <sup>-4</sup> -10		3×10 <sup>-4</sup> -0.1	1-500	5-10
<sup>226</sup> Ra	0.1-40		2×10 <sup>-3</sup> -1.2×10 <sup>3</sup>	100-1.5×10 <sup>7</sup>	5-8×10 <sup>5</sup>
<sup>210</sup> Po	0-10	0.002-0.08		20-1500	4-1.6×10 <sup>5</sup>
<sup>210</sup> Pb		0.005-0.02	0.05-190	20-7.5×10 <sup>4</sup>	100-1.3×10 <sup>6</sup>
<sup>222</sup> Rn	3-17	5-2×10 <sup>5</sup>			
<sup>232</sup> Th	0.3-2		3×10 <sup>-4</sup> -0.001	1-2	2-10
<sup>228</sup> Ra	3-17		0.3-180	50-2.8×10 <sup>6</sup>	500-5×10 <sup>4</sup>
<sup>224</sup> Ra			0.5-40		

## A.5. 이산화티타늄 생산

(A8) 티타늄은 일미나이트ilmenite(불순물로 모나자이트를 포함)나 루타일rutile에서 추출할 수 있는데 둘 다 <sup>232</sup>Th과 <sup>238</sup>U을 상당히 포함한다. 이산화티타늄으로부터 방사선피폭은 광물 원천과 유형, 그리고 공정에 따라 달라진다. 광물의 <sup>232</sup>Th 및 <sup>238</sup>U 방사능농도는 7~9000 Bq/kg 범위에 있다(EC 1999a). 분리공정은 분진 흡입과 대량 공급원료 물질로부터 외부 감마선 피폭에 의한 방사선 해악을 초래한다. 공정에서 라듐 동위원소를 함유한 침전물이 발생할 수 있고, 폐기물에서도 라듐이 발견된다[방사능농도 1.6×10<sup>6</sup> Bq/kg까지(IAEA 2006)].

## A.6. 인산염 처리 산업

(A9) 인광<sup>51)</sup>은 모든 인산염 제품 생산의 시발 물질이며 비료용 인의 주 원천이다. 광석의 방사성핵종 농도는 그 산지에 따라 크게 다른데(IAEA 2003), 우라늄은 일반적으로 3000 Bq/kg 미만이다. 인산염 처리는 인광석의 채광과 선광(이 단계에서는 방사능농도의 유의한 증가는 없지만 외부피폭이나 흡입 피폭은 발생한다)과 습

51) <역주> 일명 인회암.

식 또는 열 공정으로 인산염을 생산하는 단계로 구분할 수 있다.

(A10) 대부분 인광은 황산으로 처리해 인산을 만든다(습식공정). 인산을 암모니아와 결합해 인산암모늄(ammonium phosphate)을 만들면 이것이 복합비료 기반이 된다. 인산 생산은 대량의 인산석고를 발생시키는데, 라듐 동위원소는 인산석고 쪽에 포함되기 쉬움을 보이는 증거가 있다(EC 1999a). 인산석고는 건축재나 농업용으로 사용된다. 환경보호 이슈(방사선 영향과 독성 관점에서)는 인산석고를 더미로 쌓거나 지표수에 방출하는 방식으로 폐기하는 데서 발생한다.

(A11) 나아가 습식공정 중에는 기기 내면에 라듐 관석이나 침적물이 형성될 수 있는데 관석의 라듐 방사능농도가 원광 농도와 비슷한 수준에서부터 1000 배 이상까지 변할 수 있어(IAEA 2006), 외부 감마선 피폭이나 보수유지 및 퇴역 과정에서 분진 흡입도 초래할 수 있다.

(A12) 열 공정에서는 인광을 분쇄하여 실리카 및 코크스와 섞어 노에서 1500°C로 태운다. 이 온도에서 인 증기가 나오면 응축하여 액체나 고체로 뽑아낸다. 원소형 인은 고순도 인산이나 기타 인 제품을 만드는 데 사용한다. 이 과정에서  $^{210}\text{Pb}$ 나  $^{210}\text{Po}$ 와 같은 휘발성 방사성핵종이 나와 침전기에 농축될 수 있다[전형적 농도는 5만~50만 Bq/kg(EC 1999a)]. 반대로 토륨과 우라늄은 슬래그에 남는다(방사능농도는 1~3000 Bq/kg 범위에 있다). 분진과 슬래그는 시멘트로 건축재로 사용하면 종사자와 일반인에게 NORM 피폭을 유발한다.

## A.7. 지르콘과 지르코니아 산업

(A13) 지르콘(또는 규산지르코늄  $\text{ZrSiO}_4$ )은 해안 모래에서 채굴된다. 모래를 중력이나 전자기력 선별법으로 대량 처리하여 중사(mineral sand)를 분리한다. 종사자의 NORM 피폭은 분진 흡입이나 대량 물질로부터 외부피폭으로 발생한다. 지르콘의 화학적 처리가 사용될 때는 유출물이 NORM을 함유할 수 있다. 규산지르코늄의 방사능농도는  $^{238}\text{U}$  200~74000 Bq/kg,  $^{232}\text{Th}$  400~40000 Bq/kg로 매우 광범하게 보고된다(EC 1999a, IAEA 2012). 대부분 지르콘 모래는 자기, 에나멜, 유약, 위생도기 등의 유백제로 사용된다. 또는 지르콘 모래를 알루미늄, 탄산나트륨과 섞어 녹여 내화소재를 만들기도 한다. 이때  $^{210}\text{Pb}$ 나  $^{210}\text{Po}$ 은 증발하여 증기 수집장치에 나타난다[ $^{210}\text{Pb}$ 는 20만 Bq/kg까지,  $^{210}\text{Po}$ 은 60만 Bq/kg까지(IAEA 2006)].

## A.8. 금속 생산

(A14) 금속 광물 산지에 크게 의존하지만 많은 금속 추출은 공정에서 고온 용융이나 제련으로  $^{210}\text{Pb}$ 나  $^{210}\text{Po}$ 을 증발시켜 흡입에 의한 피폭을 줄 수 있고 이후 핵종들이 침적하여 농축되므로[20만 Bq/kg까지(IAEA 2006,2013)] NORM 피폭을 초래할 수 있다. 휘발성 방사성핵종은 슬래그에 농축될 것이다(1천 Bq/kg 미만부터 1만 Bq/kg 이상까지). 이런 피폭은 주석, 구리, 철, 강철, 알루미늄, 니오븀/탄탈륨, 비스무트 등 금속 생산에서 발생할 수 있다.

## A.9. 석탄 채굴 및 연소

(A15) 대부분 화석연료, 특히 석탄은  $^{40}\text{K}$ 는 물론 우라늄, 토륨 및 이들의 자손핵종을 포함한다. 방사능농도는 높지 않지만 산지나 지질에 따라 차이가 있다[수치 예는 UNSCEAR(2016) 184쪽에 주어져 있다]. UNSCEAR는 2002~2003년 시점에서 탄광에서 직무피폭이 23000 man-Sv에 이를 것으로 추정했고, 중국에서 석탄 광부의 연간 평균 유효선량을 2.75 mSv로 보고했다. 사용하는 석탄의 양 때문에 관련 방사성핵종의 양은 주목할 수준이다. 예를 들면, 2014년에 80억 톤 이상의 석탄을 채굴했으므로(영국석유의 세계 에너지 통계 분석에 따름), 낮은 값으로 우라늄 4 ppm, 토륨 10 ppm을 적용해도 우라늄 32000 톤, 토륨 80000 톤이 채굴된 것으로 간주할 수 있다.

(A16) 난방과 발전을 위해 석탄 연료를 태우면 비산재와 무거운 바닥재 또는 슬래그가 발생한다. 바닥재나 슬래그의 방사성핵종 농도는 석탄 자체의 농도보다 높아지는 경향이지만(약 10배) 일반적으로는 5000 Bq/kg을 넘지 않는다. 석탄회에서 방사성핵종 방사능 범위는 표A.2에 보였다(UNSCEAR 1982). 납이나 폴로늄과 같은 휘발성 물질은 대기로 배출될 수 있는데, 현대 발전소에서는 억류되어 비산재나 연소기 내벽에 집적될 수 있다(침적된 관점에서  $^{210}\text{Po}$  방사능농도가 10만 Bq/kg을

표A.2. 석탄회 및 슬래그의 방사성핵종 방사능 범위

잔류물	방사능농도(Bq/kg)		
	$^{40}\text{K}$	토륨 계열	우라늄 계열
바닥재(슬래그)	240~1200	44~560	48~3900
비산재(수집분)	260~1500	30~300	30~2000
비산재(배출분)	260	100~160	20~5500

넘는 경우도 보고된 바 있다). 배기가스 탈황은 슬러지나 석고를 추가로 생성한다. 석탄 연소 잔류물(석탄회나 석고)을 시멘트나 콘크리트 원료로 활용하는 것은 세계적인 관행이다.

## A.10. 수처리

(A17) 지하수 처리는 염이나 기타 오염물을 제거하기 위한 보편적 관행이다. 필터나 이온교환 수지와 같은 다양한 공정이 이용된다. 지하수에 함유된 천연 방사성핵종이 수처리 폐기물(필터나 슬러지)에 농축될 수 있다. 이런 폐기물에서 방사능농도는 보통 수준이지만 1만 Bq/kg에 이를 수도 있다(IAEA 2006).

## A.11. 건축재

(A18) 증가된 방사성핵종, 특히  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$ 이나  $^{40}\text{K}$ 를 함유하는 건축재를 사용하면 실내 방사선준위를 높인다. 건축재는 천연기원인 것도 있고 산업공정에서 나온 것도 있다. 몇몇 건축재의 방사능농도 값을 표A.3(UNSCEAR 1982, IAEA 2003)에 주었다.

표A.3. 일부 건축재의 방사능농도 예

건축재	방사능농도(Bq/kg)		
	$^{226}\text{Ra}$	$^{232}\text{Th}$	$^{40}\text{K}$
콘크리트	1~250	1~190	5~1570
기포콘크리트	11000	1~220	180~1600
점토벽돌	1~200	1~200	60~2000
규회벽돌*과 사암	18000	11000	5~700
천연석고	<1~70	<1~100	7~280
화강암	100	80	1200
석질응회암lithoid tuff	130	120	1500
부석pumice stone	130	130	1100
시멘트	7~180	7~240	24~850
타일	30~200	20~200	160~1410
인산석고	4~700	19000	25~120
용광로 슬래그(돌이나 시멘트)	30~120	30~220	-

\* <역주> 규암 모래와 수산화칼슘을 물에 혼합하여 만든 점토질의 벽돌

(A19) 유럽에서는  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$ 를 대상으로 방사능농도지수activity concentration index를 이용해 건축재의 NORM에 대한 방사능농도 지침을 개발한 바 있다(EC 1999b, EURATOM 2013).

## A.12. 유산 부지

(A20) 세계적으로 과거 산업시설로부터 잔유물이 있는 많은 부지들이 있다. 대부분 이런 부지는 과거의 NORM 관련 산업으로 인해 천연방사성핵종으로 오염된 것들이다. 그러나 아직도 과거 NORM 관련 산업으로 인해 오염된 부지가 인식되지 않고 상당히 많이 존재할 것임은 분명하다.

(A21) NORM 관련 산업은 방사능농도가 큰 폭으로 다른 다양한 원료물질을 처리하여 방사능농도가 더 달라진 다양한 제품, 부산물, 폐기물을 발생시킨다. 취급하는 원료물질 중의 방사능농도, 채택한 공정, 최종 제품의 용도, 잔류물의 재이용이나 재순환, 폐기물 처분에 따라 이런 산업이 방사선방호의 관심대상이 될 수도 아닐 수도 있다.

## A.13. 참고문헌

EC, 1999a. Establishment of Reference Levels for Regulatory Control of Workplaces where Materials are Processed which Contain Enhanced Levels of Naturally Occurring Radionuclides. Radiation Protection 107. European Commission, Brussels.

EC, 1999b. Radiological Protection Principles Concerning the Natural Radioactivity of Building Materials. Radiation Protection 112. European Commission, Brussels.

EURATOM, 2013. Council Directive 2013/59/EURATOM of 5 December 2013 laying down basic safety standards for protection against the dangers arising from exposure to ionising radiation and repealing Directives 89/618/Euratom, 90/641/Euratom, 96/29/Euratom, 97/43/Euratom and 2003/122/Euratom. Off. J. Eur. Union. OJ L 13, 17.1.2014, p. 1-73.

IAEA, 2003. Extent of Environmental Contamination by Naturally Occurring Radioactive Material (NORM) and Technological Options for Mitigation. Technical Reports Series No. 419. International Atomic

Energy Agency, Vienna.

- IAEA, 2006. Assessing the Need for Radiation Protection Measures in Works Involving Minerals and Raw Materials. Safety Reports Series No. 49. International Atomic Energy Agency, Vienna.
- IAEA, 2011. Radiation Protection and NORM Residue Management in the Production of Rare Earths from Thorium Containing Minerals. Safety Reports Series No. 68. International Atomic Energy Agency, Vienna.
- IAEA, 2012. Radiation Protection and NORM Residue Management in the Titanium Dioxide and Related Industries. Safety Reports Series No. 76. International Atomic Energy Agency, Vienna.
- IAEA, 2013. Radiation Protection and Management of NORM Residues in the Phosphate Industry. Safety Reports Series No. 78. International Atomic Energy Agency, Vienna.
- Rowan, E.L., Engle, M.A., Kirby, C.S., Kraemer, T.F., 2011. Radium Content of Oil- and Gas-field Produced Waters in the Northern Appalachian Basin (USA). Summary and Discussion of Data. U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2011-5135. US Geological Survey, Reston, VA. Available at: <http://pubs.usgs.gov/sir/2011/5135/> (last accessed 12 September 2019).
- UNSCEAR, 1982. Report to the General Assembly, Annexe C. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, New York.
- UNSCEAR, 2008. Report to the General Assembly, Annexe B. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, New York.
- UNSCEAR, 2016. Report to the General Assembly, Annexe B. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, New York.

# 사 사

2007년 10월 독일 베를린 회의에서 ICRP는 NORM이 높은 물질을 처리, 생산, 사용 및 폐기하는 광범한 활동을 다루기 위한 권고를 개발하여 제4분과위에 보고하도록 작업그룹(TG) 76을 구성할 것을 승인했다. 결과물인 간행물은 NORM 관리를 위해 피폭상황 유형, 피폭범주 및 방호 기본원칙에 관한 이슈를 명확히 하도록 요구했다. 이 간행물은 TG 76의 결과물이다.

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

## 작업그룹 76 위원(2010~2013)

P. Burns (위원장)	M. Markkanen	Å. Wiklund*
A. Canoba	S. Romanov	D. Wymer*
A. Liland	L. Setlow	
G. Lorient		

\*객원위원

## 작업그룹 76 위원(2013~2019)

J-F. Lecomte(위원장)	F. Liu	P.P. Haridasan(~2015)*
D. da Costa Lauria	M. Markkanen	H.B. Okyar(~2017)*
P. Egidi	P. Shaw(~2017)	S. Mundigl*
A. Liland		

\*객원위원

제4분과위 검토위원은 다음과 같다.

A. Canoba	T. Pather(2013~2017)	G. Hirth(2017~)
-----------	----------------------	-----------------

본위원회 검토위원은 다음과 같다.

C-M. Larsson	S. Romanov
--------------	------------

## 편집인

C.H. Clement (ICRP 과학서기 겸 ICRP 연보 편집장)  
H. Fujita (과학서기보 겸 ICRP 연보 부편집인) (2018~ )  
H. Ogino (과학서기보 겸 ICRP 연보 부편집인) (2016~2018)

이 보고서를 준비하는 기간의 제4분과위 위원은 다음과 같다.

(2009~2013)

J. Lochard(위원장)	T. Homma	A. McGarry
W. Weiss(부위원장)	M. Kai	K. Mrabit
J-F. Lecomte(서기)	H. Liu	S. Shinkarev
P. Burns	S. Liu	J. Simmonds
P. Carboneras	S. Magnusson	A. Tesla
D.A. Cool	G. Massera	W. Zeller

(2013~2017)

D.A. Cool(위원장)	M. Doruff	A. Nisbet
K-W. Cho(부위원장)	E. Gallego	D. Oughton
J-F. Lecomte(서기)	T. Homma	T. Pather
F. Bochud	M. Kai	S. Shankarev
M. Boyd	S. Liu	J. Takala
A. Canoba	A. McGarry	

(2017~2021)

D.A. Cool(위원장)	A. Canoba	Y. Mao
K.A. Higley(부위원장)	D. Copplestone	N. Martinez
J-F. Lecomte(서기)	E. Gallego	A. Nisbet
N. Ban	G. Hirth	T. Schneider
F. Bochud	T. Homma	S. Shankarev
M. Boyd	C. Koch	J. Takala



이 간행물 승인 당시 본위원회 위원

위원장: C. Cousins 영국

부위원장: J. Lochard 프랑스

과학서기\*: C.H. Clement 캐나다

K. Applegate 미국	C-M. Larsson 호주	명예위원
S. Bouffler 영국	D. Laurier 프랑스	R.H. Clarke 영국
K.W. Cho 한국	S. Liu 중국	F.A. Mettler 미국
D.A. Cool 미국	S. Romanov 러시아	R.J. Pentreath 영국
J.D. Harrison 영국	W. Rühm 독일	R.J. Preston 미국
M. Kai 일본		C. Streffer 독일
C-M. Larsson 호주		E. Vañó 스페인
D. Laurier 프랑스		

\* 과학서기는 1988년부터 공식 위원은 아니나, 본위원회의 필수 구성원이다.

ICRP와 작업그룹 76 위원들은 TG 서기로 봉사한 S. Andrez(CEPN)에게 감사하며, ICRP 공개 자문을 통해 이 간행물에 도움을 준 L. Matta, J. Popic, B. Wang에게 감사한다.

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