



ICRP 간행물 126

라돈 방사선피폭으로부터 방호

Radiological Protection against Radon Exposure



대한방사선방어학회
방사선안전문화연구소



이 번역본 발간은 원자력안전위원회 원자력안전연구사업(과제번호:
2016년-26호)의 일환으로 이루어졌습니다.

ICRP Publication 126

라돈 방사선평폭으로부터 방호

Radiological Protection against Radon Exposure

편집장

C.H. CLEMENT

부편집자

N. HAMADA

ICRP를 대신한 저자

J-F. Lecomte, S. Solomon, J. Takala, T. Jung, P. Strand,
C. Murith, S. Kiselev, W. Zhuo, F. Shannoun, A. Janssens

역주: 이재기

이 ICRP 간행물의 우리말 번역본은 ICRP의
허락(2016년 3월)을 받았으며 ICRP 정신에
따라 무료로 배포합니다.

국제방사선방호위원회

역자 서문

“폐암 주세요.”

우리 정부가 흡연을 억제하기 위해 2015년부터 실시하고 있는 공익광고의 한 카피이다. 그래서 흡연이 폐암의 주된 원인이 됨은 어린 아이도 이해할 것으로 본다. 흡연 다음으로 폐암 원인 2등은 라돈이라고 세계보건기구는 지목한다. 그런데도 라돈 문제는 가끔 마스크 보도나 기획 프로그램에서 다룬 적이 있지만 일과성이어서 대부분 국민은 라돈에 대해 관심을 두지 않는다.

라돈은 땅속 토석에 존재하는 우라늄이나 토륨이 방사성 붕괴하여 생성되는 천연 방사성핵종의 하나이다. 라돈은 불활성기체이어서 땅속에서 스며나와 우리가 호흡하는 공기 중에 존재한다. 그러니까 라돈은 생활주변 어디나 있다. 옥외 공기 중에도 20 Bq/m^3 내외의 라돈은 존재하며 실내 공기 중에는 $50\text{-}100 \text{ Bq/m}^3$ 정도가 된다. 그래서 평균적 수준으로 존재하는 라돈에 대해서는 딱히 방호대책을 강구하기 어려워 방호대상으로 보지 않는다.

문제는 지역 지질이나 건물의 특성 때문에 평균적 수준보다 주거환경 공기 중 라돈 농도가 유난히 높은 경우이다. 라돈유역지역에는 수천 Bq/m^3 에 이르는 건물도 가끔 발견된다. 아직 표본조사가 충분하지는 않지만, 대체로 화강암 기반을 가진 우리나라의 평균 실내 라돈 준위는 약 50 Bq/m^3 로서 국제적 평균보다 다소 높다. 이 간행물에서 보는 것처럼 라돈의 선량계수가 상향 조정된 결과를 적용하면 이 평균 농도는 유효선량으로 연간 약 2.8 mSv 에 해당한다.

나아가 이 간행물에서 권고하는 일반 참조준위 200 Bq/m^3 를 넘는 가옥이 약 1.5% 수준으로 나타나는데 이 농도는 연간 8 mSv 라는 결코 무시하지 못할 선량이 된다. 연간 0.1 mSv 수준의 사소한 피폭이 예상되는 사건에도 놀라는 현실과 비교하면 분명 라돈 문제에 대해 국가차원 입장을 정립할 필요성이 있음을 보여준다.

2016년 현재 우리나라에서는 환경부가 주택 및 다중이용시설에 대해 라돈 조사와 정보제공 업무를 담당하고 있으나, 국가 라돈 수준에 비해서는 소극적인 편이다. 자칫 발생할 수 있는 사회적 물의에 대한 우려 때문으로 생각되지만 결국 다뤄야 할 문제이므로 보다 적극적인 정책과 프로그램이 요구된다.

직장 라돈 문제도 있다. 이 간행물에서 ICRP가 취하고 있는 입장은 다소 애매해서 참조준위를 넘거나 국가 당국이 직무피폭으로 결정한 경우에는 직무피폭으로 다뤄야 한다고 권고하고 있지만, 역자는 직장에서 라돈 피폭은 본질적으로 계획피폭상황에 있는 직무피폭이고 따라서 여느 직무피폭과 같은 방호정책이 적용되어야 한다고 본다.

물론 현실적 어려움은 있다. 전국의 수십만 직장에 대해 라돈 방호대책을 이행한다

는 것은 아마 가능하지도 않고 해로움보다 이로움이 커야 한다는 정당화 원칙에도 부합하지 않을 수도 있다. 가능한 해법은 방호대상에서 배제하거나 일부 규제를 면제하는 개념을 적용하는 것이다. “전형적 자연방사선 피폭은 방호대상에서 배제한다.”는 원론을 상기하면 우리나라의 경우 대략 80 Bq/m^3 (라돈농도 분포의 80 백분위 수준)까지는 배제할 수 있어 보인다. 나아가 100 Bq/m^3 (약 90 백분위)까지는 면제할 수도 있을 것이다. 그러면 대부분 직장이 배제나 면제 범위에 들게 되고 라돈유역지역의 일부 직장만 적극적인 관리대상이 될 것으로 예상된다.

이러한 정책이 이행되기 위해서 먼저 할 일은 라돈유역지역을 설정하여 알리고, 이 지역의 직장에 대해서는 고용주가 작업장 라돈 수준을 측정하도록 해야한다. 측정 결과 연평균 라돈농도가 100 Bq/m^3 를 넘는 직장에 대해서는 직무피폭 관리대책을 강구하도록 요구할 수 있다. 고용주 입장에서는 직무피폭으로 관리하거나 라돈 감축대책을 강구하여 면제기준 이하로 낮춰 규제를 벗어나는 방안에서 선택하게 될 것이다. 직무피폭으로 관리한다면 일반 방사선작업종사자 피폭관리에서 백그라운드 선량을 제외하듯이 면제수준을 제한 초과 농도에 대한 피폭량을 종사자 직무피폭 선량으로 관리할 수 있다.

방사성폐기물 처분장 갭도에서 종사자의 피폭처럼 직장에서 라돈피폭은 다른 방사선 피폭과 결합될 수도 있으므로 라돈 직무피폭은 원자력안전위원회가 관찰함이 옳다. 그러나 현재 개념으로는 원자력안전법 소관은 아니므로 생활주변방사선관리법을 개정을 통해 직장 라돈을 관리할 수 있도록 제도를 보완해야 할 것이다. 국가는 라돈에 대한 정보를 보다 적극적으로 알리는 외에, 자기 집이나 직장의 라돈을 측정하고자 하는 국민이 합리적인 비용으로 측정 서비스를 받을 수 있는 체계를 제공해야 한다.

극단적이지만 라돈농도가 1000 Bq/m^3 인 건물에서는 연간선량으로 무려 40 mSv 에 해당하는 피폭을 받는다. 이러한 예는 직장 라돈에 대한 명확한 국가 정책이 꼭 필요함을 드러낸다. 둘째이긴 하지만 ‘폐암 주세요’는 흡연 뿐만 아니라 라돈도 해당된다.

2016년 7월

역주자 이 재 기
대한방사선방어학회 부설 방사선안전문화연구소장
ICRP 위원

서문

2009년 포르투갈 포르토 회의에서 ICRP는 제4분과위원회에 라돈 피폭의 방호에 대한 지침을 개발할 새 작업그룹을 구성할 것을 승인하였다.

작업그룹의 사업계획은 가옥, 작업장 및 기타 다른 유형 장소에서 라돈피폭으로부터 방호에 ICRP 2007년 권고를 어떻게 적용할 것인가를 설명하고 명백히 하는 간행물을 준비하는 것이었다. 간행물은 이 기존피폭상황의 특성을 제시하고 라돈 피폭이 계획피폭 상황으로 간주되어야 하는 경우를 논의하도록 했다. 또, 방사선방호 원칙의 적용과 선량 제한, 그리고 국가 조치계획을 통해 라돈 위험을 관리하는 방법에 대한 지침도 제공하도록 했다.

간행물은 주택과 직장에서 라돈-222 방호에 대한 ICRP 65(1993), 방사선방호 최적화에 관한 ICRP 101 제1부(2006b), ICRP의 최신 일반권고인 ICRP 103(2007), 라돈과 자손에 의한 폐암 위험과 2009년 11월에 채택된 라돈에 관한 ICRP 성명을 신고 있는 ICRP 115(2010) 등 관련된 ICRP의 이전 간행물은 물론 여러 기관과 국가가 습득한 라돈피폭의 관리 경험까지 고려하여 개발하도록 했다.

작업그룹 위원은 다음과 같다.

J-F. Lecomte (그룹장)	T. Jung	C. Murith
J. Takala	S. Solomon	S. Kiselev
P. Strand	W. Zhuo	

객원위원은 다음과 같다.

R. Czarwinski(2009-2012)	A. Janssens	B. Long
S. Niu	F. Shannoun	T. Colgan(2012-2013)

조언을 제공한 자문위원은 다음과 같다.

F. Bocchichio	L. Tomášek	D. Chambers
---------------	------------	-------------

제4분과 주검토자는 다음과 같다.

J. Simmonds	W. Zeller	S. Liu
-------------	-----------	--------

ICRP 본위원회 주검토자는 다음과 같다.

J. Cooper(2009-2012)	A. Gonzalez(2009-2012)	J. Harrison(2013)
E. Vaňo(2013)		

또한 작업그룹의 서기로 활동한 Céline Bataille과 Sylvain Andrez가 많은 과학적 도움을 주었다. André Poffijn, Ludovic Vaillant, 유사한 일을 수행한 프랑스 그룹과 영국 공중보건국의 여러 전문가가 ICRP 공개자문 과정에서 많은 유용한 의견을 주었다. 작업그룹은 이 모든 분에게 감사드리며, 아울러 회의장과 도움을 준 프랑스 Centre d'étude sur l'Evaluation de la Protection dans le domaine Nucléaire(CEPN)에도 감사를 표한다. 또한 ICRP 첫 부편집자인 Michiya Sasaki의 기여에도 감사한다.

작업그룹은 주로 교신을 통해 일했으며 두 차례 회의를 2010년 4월 28-30일과 2010년 9월 19-21일 프랑스 폰타네이오호스에 있는 CEPN에서 가졌다.

이 보고서를 준비하는 기간 동안 제4분과 위원은 다음과 같다.

(2009-2013)

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

(2013-)

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

목 차

역자 서문	iii
서문	v
사용 약어	viii
객원논설	ix
요지	1
요약	3
요점	9
용어집	11
제1장 서론	17
1.1. 배경	17
1.2. 범위	18
1.3. 구조	20
제2장 라돈피폭의 특성	23
2.1. 역사적 개관	23
2.2. 라돈 원천과 전이	24
2.3. 라돈 위험	26
2.4. 라돈피폭 관리의 난제	29
제3장 라돈피폭에 대한 ICRP 방사선방호 체계	33
3.1. 피폭상황과 피폭범주	33
3.2. 방호전략의 정당화	36
3.3. 방호최적화	37
3.4. 선량한도 적용	45
3.5. 요약	45

제4장 방호전략의 이행.....	47
4.1. 국가 조치계획.....	47
4.2. 예방.....	49
4.3. 완화.....	50
4.4. 건축재	52
4.5. 종사자 방호.....	52
4.6. 우라늄 광산업에서 라돈으로부터 종사자 방호	53
4.7. 이해당사자 상호작용.....	54
제5장 결론.....	57
참고문헌.....	59

<역주> 사용 약어

ALARA	as low as reasonably achievable	합리적으로 달성 가능한 범위에서 낮게
AMAD	activity median aerodynamic diameter	방사능중간 공기역동학 중간직경
BEIR	Biologic Effects of Ionizing Radiation(Committee)	
	(미국)전리방사선생물학적영향(위원회)	
DRL	derived reference level	유도참조준위
EEC	equilibrium equivalent concentration	평형등가농도
EPA	Environmental Protection Agency	미국환경청
ERR	excess relative risk	초과상대위험
HRTM	human respiratory tract model	사람호흡기모델
IARC	International Agency for Research on Cancer	국제암연구국
ICRP	International Commission on Radiological Protection	국제방사선방호위원회
NEA	Nuclear Energy Agency	경제협력개발기구(OECD) 원자력국
NORM	naturally occurring radioactive material	천연방사성물질
UNSCEAR	UN Scientific Committee on Effects of Atomic Radiation	
	유엔방사선영향과학위원회	
WHO	World Health Organization	세계보건기구
WL	working level	워킹레벨
WLM	working level month	WLM

라돈

방사성 라돈 가스(라돈-222)는 만연한 피폭원이며 흡연 다음으로 폐암 유발원으로 인식된다. 라돈은 모든 건물과 지하 공간에 존재하지만 그 준위는 하부 지질이나 건물 유형에 따라 크게 차이난다. 일부 흡연자를 포함하여 많은 사람에게 라돈은 방사선피폭에 주된 기여자이다.

라돈의 중요성에도 불구하고 그 방호는 ICRP 규범에서 비교적 느리게 나타났다. 이는 부분적으로는 이전에 방호의 초점이 원자력이나 의료방사선 사용과 같은 공개적인 인공방사선에 맞춰왔기 때문인 것으로 보인다.

1991년 ICRP 1990년 권고(1991)에서 중요한 진전이 있었는데, 여기서 주택과 직장에서 천연 방사선원으로부터 방호 필요성에 대해 주의를 환기했다. ICRP는 이 주제를 추구하고 가정과 직장에서 라돈-222로부터 방호에 대한 권고를 ICRP 65(1993)로 발행했다. ICRP 65는 방호 재원에 주목하여 라돈 유의구역을 구획하고 측정된 라돈 가스 준위 형태로 기준을 적용하여 완화조치 필요에 대한 의사결정을 돕도록 하는 것을 포함하여 라돈으로부터 방호하는 일부 핵심 전략을 발전시켰다. 연간 유효선량으로 3-10 mSv에 해당하는 측정된 준위를 가옥에서 개입점으로 권고했다. 그러나 직장에서 방호는 주택에서 방호와 별도로 고려했다. 흥미롭게도 라돈은 내부피폭원이지만 라돈 피폭의 평가와 관리에 사람 호흡기 선량계측모델 사용을 ICRP는 권고하지 않았다. 대신, 단위 유효선량 당 수반 위해와 단위 피폭 당 위해를 직접 비교함으로써 라돈피폭을 유효선량으로 환산하였다(선량환산합의).

2007년, ICRP는 방사선방호체계에 대한 새로운 권고를 발행했다(ICRP, 2007). 이 권고는 1990년 권고(ICRP, 1991)로부터 발전하여 크기나 원천과 무관하게 모든 선원으로부터 모든 전리방사선 피폭에 적용되는 방호체계를 제공한다. 2007년 권고(ICRP, 2007)는 계획피폭상황, 비상피폭상황 및 기존피폭상황을 구분한다. 대부분 라돈 피폭은 방호 의사결정이 이루어질 때 피폭이 진행되고 있기 때문에 기존피폭상황이다. 방호는 참조준위와 최적화를 통해 이루어진다.

2010년에 발행된 ICRP 115는 라돈과 자손 피폭으로 인한 폐암 위험에 대한 평가를 업데이트 했다(ICRP, 2010). 중요한 결론의 하나는 라돈 피폭에 대한 위해조정 명목 위험계수가 이전에 가정했던 값보다 약 2배로 되어야 한다는 것이다. ICRP 115는 '라돈에 대한 ICRP 성명'을 동반했는데, 여기서 다른 이슈도 있지만 폐암 위험에 대한 새로운 발견을 고려하여 라돈 참조준위 상한 값을 수정했다. 또한 성명은 ICRP가 그 선량계측 모델을 사용해 계산한 선량계수를 제공할 의사를 밝혔다.

시기를 같이하여, 폐암 위험에 대한 보고서를 고려하여 라돈으로부터 방호에 구체적

으로 적용될 원칙을 발전시키도록 제4분과 작업그룹을 설치했다. 이 작업그룹 보고서가 ICRP연보 이번 호로 발간되는 것이다. 이 보고서는 라돈 방호를 위한 ICRP 권고 진화의 또 다른 단계를 제시한다. 보고서는 주택, 직장 및 기타 장소에서 라돈피폭으로부터 일반인과 종사자를 방호하는 데 2007년 방호체계를 적용함에 대해 설명하고 명확히 한다. 이전 권고로부터 발전함에 있어 보고서는 목적이나 거주자가 누구이든 모든 건물에서 라돈 방호에 대해 통합적 접근을 권고한다. 라돈피폭 관리는 대체로 참조준위를 적용한 최적화에 근거한다. ICRP는 유효선량 단위로 나타낸 참조준위의 한 값으로 이전 권고와 일관되게 10 mSv y^{-1} 를 계속 권고한다. 천연방사능 준위가 높은 작업장에서 피폭 관리 근거는 특별한 문제를 제기한다. 이 보고서는 일단 다른 건물이나 장소에 같은 유도참조준위를 사용하되 작업장에 대해 차등접근을 권고한다. 모든 합리적 노력에도 불구하고 피폭이 참조준위 위에 있으면 직무피폭에 대한 방호체계의 해당 요건을 적용해야 한다.

이 보고서는 최적화 원칙을 중심 역할로 하면서 모든 선원과 상황에 적용할 수 있는 일관된 방호체계로 발전함에 의미 있는 발걸음을 떼었다. 보고서에서 제시하는 일반 방호전략은 다른 높은 자연방사선 피폭 환경을 거누는 모델이 될 수 있고 그래야 할 것이다.

ICRP는 라돈에 대한 완전한 방호체계를 제공하기 위해 추가 작업도 진행하고 있다. 구체적으로, 다양한 상황에 적용할 수 있는 라돈 선량계수를 조만간 발행할 것이다.

John Cooper
전 ICRP 본위원회 위원

참고문헌

- ICRP, 1991. The 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, 2007. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103. Ann. ICRP 37(2-4).
- ICRP, 2010. Lung cancer risk from radon and progeny and Statement on Radon, ICRP Publication 115, Ann. ICRP 40(1).

라돈 방사선 피폭으로부터 방호

ICRP 간행물 126

ICRP 승인: 2014년 4월

요지- 이 보고서에서 ICRP는 라돈 방사선 피폭으로부터 방호에 대한 지침을 제공한다. 보고서는 ICRP의 방사선방호체계에 대한 최신 권고, 라돈 위험에 대한 모든 가용한 과학적 지식, 라돈피폭 관리에서 여러 국가나 기관이 얻은 경험을 고려하여 개발되었다. 보고서는 선원과 전이 기전, 라돈과 연계된 보건위험, 라돈피폭 관리의 도전까지 걸치는 라돈피폭의 특성을 설명한다. ICRP는 건물의 용도가 무엇이든 라돈피폭이 일어나는 건물이나 장소의 관리에 최대한 의존하도록 라돈피폭 관리에 통합적 접근을 권고한다. 이 접근은 최적화 원칙에 입각하여 특히 작업장에서는 핵심 이해당사자의 책임과 라돈피폭을 관리하는 국가당국의 의사를 반영하여 차등화 한다. 보고서는 또한 종사자의 피폭이 직무로 인한 것으로 보는 경우 ICRP의 해당 요건이 적용되어야 한다는 권고를 제시한다.

중심어: 라돈피폭, 예방, 완화, 가옥, 건물, 직장

ICRP를 대신한 저자:

J-F. LECOMTE, S. SOLOMON, J. TAKALA, T. JUNG, P. STRAND, C. MURITH,
S. KISELEV, W. ZHUO, F. SHANNOUN, A. JANSSENS

요약

(a) 이 보고서의 목적은 가옥, 직장 및 기타 장소에서 라돈피폭으로부터 일반인과 종사자를 보호하기 위한 ICRP 체계의 적용을 설명하고 밝히는 것이다.

(b) 라돈의 주요 동위원소는 둘이다. 라돈-222는 라듐-226의 붕괴생성물로서 지각에 다양한 농도로 존재한다. 라돈은 가스여서 토양으로부터 실내로 이동할 수 있다. 이동은 토양이나 건물의 형태, 그리고 지역에 따라 달라진다. 라돈-220은 토륨-232 붕괴연쇄에 속하는 라듐-224의 붕괴생성물로서 역시 지각에 존재한다. 라돈-222와 라돈-220은 건축재로부터 실내공기로 방출될 수도 있다. 이 건물과 저 건물 사이 실내 라돈농도는 수 천 배 이상 차이 날 수도 있다. 이 보고서는 라돈-222에 초점을 맞춘다.

(c) 라돈도 흡입하지만 불활성이어서 흡입한 거의 모든 가스가 날숨으로 나온다. 그러나 흡입한 단위당 라돈자손 에어로졸은 호흡기 기관에 흡착될 수 있다. 에어로졸의 확산 특성에 따라 공기 중에 있는 붕괴생성물은 비강, 기관지 내벽, 그리고 폐 깊은 곳에 흡착된다. 단위당 자손 중 폴로늄-218과 폴로늄-214 둘은 알파입자를 방출하며 이 알파입자에 의해 부여된 에너지가 보건영향으로 이어지는 방사선피폭에 주로 기여한다.

(d) ICRP 115(2010)에서 ICRP는 라돈 피폭과 폐암 사이 관계에 대한 역학연구를 분석하고 검토하였다. 지하 광산과 가정 모두에서 라돈과 그 자손이 폐암을 유발할 수 있음에 대한 강력한 증거가 있다. 그래서 ICRP는 방사선방호 목적에서 자손과 평형에 있는 라돈-222 노출에 대해 흡연자와 비흡연자 혼합 성인의 위해조정 폐암 명목위험계수로 Bq h m^{-3} 당 8×10^{-10} (워킹레벨월[WLM] 당 5×10^{-4})을 권고했다. 이 값은 ICRP 65(1993)에서 사용한 값의 약 2배이다. 폐암이 아닌 고형암이나 백혈병에 대해서는 라돈과 그 자손 피폭으로 발병이 증가한 일관된 증거가 지금까지 없다.

(e) 라돈은 그 선원이 지각 어디에나 있는 시원pridmodial 천연방사능으로 변경 없는 농도로 있어서 방사선방호체계에서 기존피폭상황의 특성을 가진다(ICRP, 2007). 건물이나 광산 운영과 같은 인간활동이 피폭경로를 생성하거나 변경하여 라돈과 자손 피폭을 증가시킬 수 있다. 이러한 경로는 예방이나 완화 조치로 관리할 수 있다. 그러나 선원 자체는 변경할 수 없으므로 관리를 결정할 때 기존 상태이다. 그렇더라도 어떤 작업장에서는 라돈피폭 상황을 국가 당국에 의해 처음부터 계획피폭상황으로 볼 수도 있다. 핵연료 주기와 관련된 우라늄 광산은 그러한 작업장에 속한다.

(f) 어떤 장소에서 심하게 높은 농도가 발견되어 방호조치를 즉각 취해야 할 수도 있지만 라돈이 비상피폭상황을 초래하지는 않을 것이다.

(g) ICRP 60(1991)과 비교할 때 ICRP 103(2007)의 철학은 모든 유형의 피폭상황의 관리에 일관된 접근을 권고한다. 이 접근은 개인선량 제한 즉, 선량제한치와 참조준위를 사용해 이행되는 최적화 원칙의 적용에 기반을 둔다. 최적화는 초기 피폭수준과 무관하게 제약치나 참조준위보다 훨씬 아래 합리적으로 달성 가능한 한 수준까지 선량을 감축하기 위한 노력에 해당한다.

(h) 가정이나 직장에서 일상생활은 어느 정도 라돈피폭으로 이어진다. 다른 많은 기존피폭상황과 마찬가지로 라돈피폭은 매우 다양할 수 있다. 피폭수준은 개인의 습관에도 크게 의존한다. 따라서 자가방호 조치의 역할이 중요하다. 피폭상황의 특성화는 라돈 관리에 전제조건이다. 국가 라돈피폭 관리는 폭넓은 이해당사자와 관련되는 많은 이슈(예: 환경, 보건, 경제, 건축, 교육 등)를 겨냥야 한다.

(i) 실내 라돈피폭 관리는 많은 도전을 직면한다. 동일 지역에서도 사람들은 여기저기로 이동하므로 라돈 방호전략은 국가 당국이 개발하고 여러 장소에 대해 일관되고 종합적으로 실시해야 한다. 가정에서도 많은 라돈피폭이 발생하므로 라돈 방호전략은 공중보건 차원에서 가옥에서 라돈피폭을 겨냥야 한다. 많은 건물에서 농도가 잠재적 보건위험을 주는 것으로 나타난 농도보다 훨씬 높을 수도 있으므로 일반 집단의 전반적 피폭과 가장 높이 피폭하는 사람의 피폭을 줄이기 위한 개입이 필요하다. 이러한 전략은 솔직하고 다른 보건 해독과 적절히 조율되고, 장기적 차원에서 유효하게 이행되며 모든 이해당사자가 참여하는 것이어야 한다.

(j) 국가 라돈방호 전략은 또한 책임 차원에서 이러한 도전을 다뤄야 하는데, 이러한 책임에는 거주자에 대한 개인 주택소유주 책임, 건물 구매자에 대한 건축자 또는 판매자의 책임, 차지인에 대한 지주의 책임, 피고용인에 대한 고용주의 책임, 그리고 일반적으로 말해 모든 건물 사용자에게 대한 그 건물 관리자의 책임 등이 있다. 이러한 모든 인자가 라돈 전략의 집행성에 영향을 미친다.

(k) 책임의 범위가 유효성과 현실성에 근거한 라돈 전략의 필요를 이끈다. 어떤 라돈방호 전략이든지 실내 라돈을 완전히 제거할 수는 없음을 염두에 두고 합리적으로 가능한 수준까지 라돈 농도를 줄이거나 유지함을 목표로 해야 한다.

(l) ICRP는 라돈이 도처에 있고 중대한 피폭원이며 흡연 다음으로 폐암을 유발하며 대부분 상황에서 관리할 수 있다는 점에서 국가 라돈 방호전략이 대부분 상황에서 정당화될 수 있을 것으로 본다. 또한 라돈 방호전략은 담배 관리와 실내 공기질과 같은 다른 공중보건 정책에 긍정적 영향을 미칠 수도 있다. 라돈농도 평가와 라돈 유의지역의 식별과 같은 상황의 특성화와 공중보건 우선순위나 경제사회적 인자의 고려가 국가 당국이 라돈 방호정책을 구축하고 이행하는 데 필요하다. 비록 흡연자가 비흡연자에 비해 라돈 피폭으로 인한 폐암의 절대위험이 크게 높지만 ICRP의 라돈방호에 관한 권고는 흡연자와 비흡연자를 구분하지 않는다.

(m) 피폭상황의 특성화도 최적화 원칙 적용에 전제조건이다. 최적화 원칙은 지배적인 경제사회적 여건을 고려하여 피폭을 합리적으로 달성 가능한 한 낮게 줄이거나 유지하기 위해 라돈피폭을 관리하는 운전자이다. 다른 방사선원 관리와 마찬가지로 ICRP는 방호최적화와 연계하여 선원중심 선량제한을 사용하기를 권고한다.

(n) 다른 방사선원에서처럼 국가의 선량 참조준위나 유도참조준위 농도를 설정하고 방호 최적화 과정을 적용하는 것은 적절한 국가 당국의 책임이다. 목적은 일반 집단의 전반적 위험과 평등 관점에서 높이 피폭하는 사람들의 위험을 줄이는 것이다. 두 경우 모두에서 그 과정은 개인피폭 자체보다는 주로 건물관리를 통해 이루어지며, 그 결과는 실내 공기 중 라돈농도가 국가 참조준위 아래에서 합리적으로 최소로 되어야 한다.

(o) 라돈피폭은 피폭경로에 대한 조치로만 관리된다. 개인은 그 상황으로부터 이득을 얻고 있기에 사회는 개인이 자신의 선량을 줄이도록 지원한다. 이를 고려하면 적절한 참조준위 범위는 기존피폭상황에 대해 ICRP가 권고한 것(ICRP, 2007 표5)처럼 연간 선량으로 1-20 mSv에 해당한다. ICRP는 ICRP 65(1993)에서 적시한 것과 같이 10 mSv 정도 값이 라돈피폭에 대한 참조준위 설정을 위한 기준점이 되어야 한다고 생각한다.

(p) 대부분 라돈 관리수단은 건물에 적용되므로 공기 중 농도로 표현한 라돈 유도참조준위를 설정하는 것이 적절하다. 공기 중 농도는 측정 가능한 양이며 입방미터 당 베크렐(Bq m^{-3})로 나타낸다. ICRP 103에서 ICRP는 참조준위의 상한으로 가정에서는 600 Bq m^{-3} , 직장에서는 1500 Bq m^{-3} 을 권고한 바 있다. 간행물 115(ICRP, 2010)의 라돈 역학 검토와 명목 위험계수가 약 2배 증가한 것을 반영하여 ICRP는 '라돈 성명'에서 가정의 라돈 참조준위 상한을 300 Bq m^{-3} 으로 낮췄다. 가정에서 라돈농도 300 Bq m^{-3} 은 개정된 명목 위험계수(ICRP, 2010)를 근거로 한 선량환산 합의를 적용하면 연간 선량 약 10 mSv에 해당한다. 나아가 라돈 성명은 직장에서 참조준위 상한 1500 Bq m^{-3} 을 대체하여 직무피폭 방호를 적용할 진입점으로 1000 Bq m^{-3} 을 언급했다.

(q) 라돈 성명에서 ICRP는 기준 생리학 및 선량계측 모델을 사용하여 계산한 라돈 및 자손의 섭취 선량계수를 발행할 의사를 밝힌 바 있다. 새로운 선량계수에 근거하면 300 Bq m^{-3} 은 더 높은 연간선량에 해당하지만 1-20 mSv 범위에 있다.

(r) 라돈방호 전략의 현실적 이행을 위해 ICRP는 가옥에서 라돈-222에 대해 300 Bq m^{-3} 을 유도참조준위의 상한으로 계속 권고한다. ICRP는 지배적 경제사회 여건을 고려하여 국가 유도참조준위를 $100\text{-}300 \text{ Bq m}^{-3}$ 범위에서 합리적으로 낮게 설정하기를 강력히 촉구한다. 이 촉구는 ICRP 라돈 성명(2010)이나 세계보건기구(WHO)의 '실내 라돈 핸드북(WHO, 2009)'과 일관된다. 유도참조준위에 부합함을 평가할 때 측정치는 건물이나 장소에서 연간 평균 라돈농도를 대표해야 한다.

(s) 일상생활에서 사람들은 같은 지역에서 여기저기를 옮겨 다니는데 같은 근거로 이들을 보호해야 함을 고려하여, ICRP는 단순화를 위해 장소와 관계없이 일반인과 종사자 모두 사용하는 복합식 건물에서 참조준위 상한으로 300 Bq m^{-3} 을 권고한다.

(t) ICRP는 이제 라돈피폭 관리에 차등으로 접근하기를 권고한다. 이 접근에서 라돈방호 전략은 해당 의사결정자가 측정, 그리고 필요하면 완화와 같은 자가방호 조치를 조장함을 겨누는 프로그램으로부터 출발한다. 이 과정은 정보, 조언, 지원, 그리고 필요하다면 공식적 요건을 통해 이행될 수 있다. 이러한 다양한 조치를 사용하고 이행하는 수준은 상황에 대한 법률적 책임의 정도와 국가 라돈방호 전략의 희망 수준에 달려있다.

(u) 직무피폭 방호요건이었던 1000 Bq m^{-3} 을 대체하여 직장에서는 구체적 차등접근이 이행되어야 한다. 종사자 라돈피폭이 직무피폭으로 간주되지 않는 곳(예: 사무실)에서 첫 걸음은 가옥에 대해 설정된 유도참조준위 아래에서 합리적으로 낮은 수준으로 라돈농도를 줄이는 것이다. 가정에서 보내는 시간보다 작업장에서 보내는 시간이 짧으므로 이에 해당하는 연간 선량은 주택에서보다 일반적으로 낮다. 첫 단계에서 어려움이 있다면 둘째 단계로서 보다 현실적 접근이 권고되는데 이때는 점유도와 같은 피폭상황의 변수에 실제 값을 사용하고 10 mSv 수준의 참조준위와 함께 최적화한다.

(v) 작업장에서 라돈피폭을 줄이려는 모든 합리적 노력에도 불구하고 피폭이 선량 참조준위 이상에 머무르면 종사자는 직무피폭자로 간주한다. 이 경우 직무피폭에 대한 해당 요건을 적용할 것을 ICRP는 권고한다(ICRP, 2007 소절5.4.1).

(w) 국가 당국이 처음부터 종사자의 라돈피폭을 직무피폭으로 간주하는 작업장에서는

동일한 요건을 적용하기를 ICRP는 권고한다. 온천, 동굴, 기타 지하 작업장이 그러한 작업장이 될 수 있다.

(x) 종사자가 직무피폭자로 간주되든 아니든 그 피폭은 기존피폭상황의 범위의 상한(20 mSv y^{-1}) 아래로 유지해야 한다. 국가 당국이 라돈피폭 상황을 계획피폭상황으로 관리되어야 한다고 생각한다면 직무피폭 선량한도가 적용되어야 한다.¹⁾

(y) 국가 라돈방호 전략이 유효하려면 장기적 관점에서 수립되어야 한다. 일반 집단에 대한 라돈 위험을 의미 있게 낮추는 과정은 수년이 아니라 수십 년 일관된 노력이 필요하다. 명확히 하기 위해 ICRP는 특히 신축 건물에서처럼 지배적 여건에서 피폭을 합리적으로 달성 가능한 낮은 수준으로 유지함을 목표로 하는 '예방'과 기존 건물에서 피폭을 합리적으로 달성 가능한 수준으로 낮춤을 목표로 하는 '완화'를 구별하고자 한다.

(z) 따라서 라돈방호 전략은 예방조치를 포함해야 한다. 실내 장소, 거주하는 사람의 범주, 피폭상황의 유형과 관계없이 건물의 계획, 설계 및 건설 단계에서 라돈피폭 문제를 고려함으로써 라돈피폭을 다루는 것이 가능하다. 신축 건물에서는 대지계획과 건축코드를 통해, 오래된 건물에서는 수리를 통해 예방조치가 이행된다. 이는 라돈방호 전략을 실내 공기질이나 에너지 절약과 같은 건물과 관련된 다른 전략과 일관된 방법으로 통합해서 시너지를 얻고 마찰을 피해야 함을 의미한다.

(aa) 국가 라돈방호 전략의 완화 부문은 기존 건물이나 장소를 겨냥한다. 이 경우 가능하다면 거주하는 사람의 범주가 무엇이든 피폭관리는 건물이나 장소, 그리고 그 사용 조건에 대한 관리를 통해 확보되어야 한다. 주요 단계는 측정, 그리고 필요시 피폭 완화를 위한 시정조치이다.

(bb) 국가 라돈방호 전략은 국가 당국이 해당 이해당사자의 참여 아래 국가 라돈 조치 계획을 통해 이행한다. 조치계획은 국가의 라돈을 다루기 위해 명확한 단계가 있는 기틀을 마련해야 한다. 피폭조건에 따라 계획은 피폭자와 지원이나 이행조치를 제공하는 사람과 같은 이해당사자를 식별하고, 특히 책임과 관련된 윤리적 이슈를 감안하며 정보, 지침, 지원 및 지속성을 위한 조건 등을 제공하는 것을 포함해야 한다.

1) <역주> 이 설명에는 자기모순이 있다. ICRP 103은 기존피폭상황에서 직무피폭은 없는 것으로 분류했다. 그럼에도 불구하고 국가 당국이 라돈피폭을 직무피폭으로 간주한다면 이를 따르도록 권고하는 것은 ICRP 권고의 모호성을 드러내는 것이다. 이 문제는 ICRP 103에 이은 일부 간행물이 피폭상황을 일관되지 않게 해석한 탓이다.

(cc) 국가 조치계획은 라돈 측정기술과 프로토콜, 라돈 유의지역 식별을 위한 라돈 조사, 라돈 완화 수단 및 상이한 상황에서 그 적용성, 정보, 훈련 및 이해당사자 참여를 포함하는 지원정책, 성과평가도 다뤄야 한다. 일반인이 출입하는 건물이나 작업장 이슈는 법률적 책임을 반영한 구체적 차등접근을 겨냥해야 한다. 유도참조준위를 포함한 국가 조치계획은 주기적으로 평가하고 검토해야 한다.

요점

- 사람들은 가정, 직장, 그리고 복합용도 건물에서 라돈을 피폭한다. 실내 라돈농도의 가변성은 매우 비균질한 피폭분포를 낸다. 일반적으로 옥외 라돈은 이슈가 아니다.
- 라돈과 그 자손 피폭이 폐암을 초래할 것이라는 강력한 증거가 있다. 라돈피폭은 흡연 다음으로 폐암을 유발하는 둘째 원인이다.
- 라돈피폭은 지각에 만연한 천연 시원핵종의 변경 없는 방사능 농도가 그 원천이므로 기존피폭상황이다. 피폭경로만 관리될 수 있다.
- 국가 당국은 피폭상황을 특성화 하고 국가 라돈방호 전략을 수립해야 한다. 상당한 라돈피폭이 가정에서도 발생하므로, 국가 전략은 공중보건 관점에서 가옥에서 피폭을 다뤄야 하며 일반 집단의 전반적 피폭과 높이 피폭하는 사람들의 피폭을 줄일 책임을 포함해야 한다.
- 전략은 솔직하고 현실적이며 모든 건물에 일관되도록 통합되고, 상황과 책임에 따라 차등화 되어야 한다. 흡연자와 비흡연자를 구분하지 않는다. 전략은 에너지 절약, 흡연 억제, 실내 공기질과 같은 다른 공중보건 정책과 연계하여 고려해야 한다.
- 라돈방호 전략은 신축 건물에서는 예방조치를, 기존 건물에서는 완화조치를 포함해야 한다.
- 라돈피폭 관리는 주로 적절한 참조준위와 함께하는 최적화 원칙의 적용을 바탕으로 한다. 참조준위는 ICRP가 권고하는 1-20 mSv 범위의 연간 선량에 해당해야 한다. ICRP는 연간 선량 10 mSv 수준이 라돈피폭을 위한 참조준위 설정의 기준점이 되어야 한다고 여전히 생각한다.
- 라돈방호 전략의 현실적 이행을 위해 ICRP가 가옥에 대해 권고한 유도참조준위의 상한 값은 계속 연평균 농도로 300 Bq m^{-3} 이다. 같은 값이 다른 모든 건물이나 작업장에 대해 권고된다.
- ICRP는 국가 당국이 지배적인 경제사회적 여건을 고려하여 $100\text{-}300 \text{ Bq m}^{-3}$ 범위에서 합리적으로 가능한 낮게 국가 유도참조준위를 설정할 것을 강력히 촉구한다.
- 대부분 작업장에서는 종사자의 라돈피폭은 우발적이어서 직무피폭으로 간주되지 않는다. ICRP는 작업장에서 다음과 같이 차등접근을 권고한다.
 - (i) 모든 건물과 작업장에 대해 공통 참조준위를 적용하여 방호를 최적화한다.
 - (ii) 연간 선량 10 mSv 참조준위와 함께 점유도와 같은 피폭상황의 실제 변수를 사용하여 방호를 최적화한다.
 - (iii) 모든 노력에도 불구하고 직장에서 피폭이 참조준위 이상이면 직무피폭의 해당 요건을 적용한다.

- 국가 당국이 처음부터 종사자의 라돈피폭을 직무피폭으로 간주한 작업장에는 해당 직무피폭 요건을 적용한다.
- 국가 당국이 라돈 피폭상황을 계획피폭상황으로 관리해야 한다고 하면 직무피폭 선량한도를 적용해야 한다.

용어집

피폭범주category of exposure

ICRP는 방사선피폭 범주를 직무피폭, 일반인피폭, 의료피폭으로 구분한다.

유도참조준위derived reference level

선량으로 선정된 참조준위에 해당하는 운영 목적 측정가능한 양으로 표현된 수치.

고용주employer

국가 법률에 따라 상호 합의한 관계에 의거 고용된 종사자에 대해 인정된 책임, 약속 및 의무를 지는 기관, 회사, 조합, 기업, 협회, 기업합동, 공립/사설 기관, 그룹, 정치적/행정적 실체, 또는 다른 개인. 자기고용자는 종자자이면서 고용주가 된다.

평형등가농도equilibrium equivalent concentration

동일한 잠재알파에너지를 가짐을 근거로 어떤 주어진 비평형혼합 상태의 라돈농도²⁾를 단수명 자손과 평형상태에 있는 라돈가스의 방사능 농도로 환산한 농도.³⁾

평형인자equilibrium factor

라돈가스 농도에 대한 평형등가농도의 비. 달리 말하면, 라돈 붕괴생성물의 실제 혼합에서 잠재알파에너지 농도와 방사평형에 있을 때 적용될 잠재알파에너지 농도에 대한 비.⁴⁾

기존피폭상황existing exposure situation

관리에 대한 의사결정이 이루어질 당시 이미 존재하는 선원⁵⁾으로부터 피폭상황. 기존피폭상황에는 자연 백그라운드 방사선, 원자력사고나 방사선사건 후 장기적 오염구역, ICRP 방호체계 밖에서 이루어진 운영에서 기인된 잔류물로부터 피폭을 포함한다.⁶⁾

2) <역주> '라돈농도'는 라돈 가스 농도를 의미한다.

3) <역주> 원문표현이 난해하여 일부 수정했다.

4) <역주> 딸핵종 혼합비율이 다양한 실제 농도를 기준비율(즉, 방사평형상태 비율) 농도로 통일하여 표현하기 위한 인자로서 평형등가농도(EEC_{Rn}) = 라돈농도(C_{Rn}) × 평형인자(F)와 같이 연계된다.

5) <역주> ICRP 103의 본래 정의는 '존재하는 선원'이 아니라 '존재하는 피폭'이다.

6) <역주> 혼란을 피하기 위해 약간의 보충설명이 필요할 것 같다. 통상 수준의 자연 백그라운드 방사선은 방호대상에서 배제되므로 여기서 말하는 백그라운드란 유의하게 높은 자연방사선으로

피폭경로exposure pathway

방사선이나 방사성핵종이 사람에게 도달하여 피폭을 초래하는 경로.

차등접근graded approach

국가체계 또는 안전계통과 같은 관리체계에서 관리 수단의 엄격성과 적용되는 조건을 가능한 범위에서 관리상실의 가능성과 그 영향, 또는 관련 위험 수준에 상응하게 하는 과정이나 방법.

의료피폭medical exposure

자신의 의료적 또는 치과적 진료의 일부로 환자가 알면서 받는 피폭. 편의상 환자의 보조자나 위안자, 의생명연구 프로그램의 자원자가 알면서 받는 피폭도 의료피폭으로 간주한다.⁷⁾

일반인member of the public

직무피폭이나 의료피폭이 아닌 피폭을 받는 사람.⁸⁾

국가 라돈조사national radon survey

한 국가에서 집단의 라돈피폭을 대표하는 라돈 농도분포를 결정하기 위해 수행하는 조사.

천연방사성물질naturally occurring radioactive material(NORM)

천연방사성핵종이 아닌 방사성핵종을 유의하게 포함하지 않은 방사성물질.

직무피폭occupational exposure

직장에서 합리적으로 운영관리자의 책임으로 간주되는 상황의 결과로서 일어나는 종사자의 모든 피폭.

이해해야 한다. 모든 NORM 피폭, 잔류물 피폭 또는 오염구역 피폭이 기존피폭은 아니다. 그 피폭이 의도된 것이라면 계획피폭상황이 된다. 즉, 기존피폭인지 계획피폭인지 구분하는 핵심은 그 선원 유형의 문제가 아니라 피폭하는 행위가 의도적인가 자연적(또는 우발적)인가 하는 것이다.

7) <역주> 원문 표현이 난해하여 역자가 약간 수정하였다.

8) <역주> 종사자나 환자가 아니어도 ‘일반인’으로 보기 어려운 경우가 있다. 역자는 일반인을 ‘이해동의 없이 방사선을 피폭하는 사람’으로 정의하는 것이 보다 그 속성을 정확히 표현하는 것으로 본다.

운영관리자operational management

최고 지위에서 기관을 지휘, 관리, 평가하는 사람이나 그룹. 최고경영자, 일반관리자, 경영관리자, 경영진 등 다양한 명칭이 사용된다.

방호최적화optimisation of protection

어느 수준 방호가 피폭이나 잠재피폭의 크기와 확률을 경제사회적 인자를 고려하여 합리적으로 낮게 만드는가를 결정하는 과정.

계획피폭상황planned exposure situation

선원의 의도된 도입과 운영에 따른 피폭상황으로서 일어날 것으로 예상한 피폭(정상피폭)과 그렇지 않은 피폭(잠재피폭)을 포함한다.⁹⁾

잠재알파에너지 농도potential alpha energy concentration

공기 중 라돈-222이나 라돈-220의 단위명 자손핵종의 임의혼합 농도로서 단위체적 당 납-210까지의 라돈-222 자손, 또는 납-208까지 라돈-220 자손이 완전히 붕괴하는 동안 내는 알파 에너지¹⁰⁾로 표현한 것. 잠재알파에너지 농도의 SI 단위는 $J m^{-3}$ 이다.

일반인피폭public exposure

직무피폭이나 의료피폭 외에 방사선원으로부터 일반인이 받는 피폭.¹¹⁾

9) <역주> 전혀 만족스럽지 않은 설명이다. 역자는 다음과 같이 계획피폭상황을 설명하고 싶다.

계획피폭상황: 피폭이 잘 예상되어 방호를 계획함으로써 선량을 충분히 낮게 유지할 수 있는 피폭상황.

잠재피폭은 일어나지 않은 피폭으로서 계획피폭상황과 다른 범주에 있다. 계획피폭상황이 잠재피폭을 포함한다고 표현한 것은 잘못으로 본다.

10) <역주> 평형등가농도 C_{eq} 는 다음과 같이 산출할 수 있다. 즉, 방사평형 상태에 있다면 ^{218}Po , ^{214}Pb , ^{214}Bi , ^{214}Po 의 방사능이 모두 같으므로

$$\sum_{i=1}^4 C_i \frac{\epsilon_{p,i}}{\lambda_i} = C_{eq} \left(\sum_{i=1}^4 \frac{\epsilon_{p,i}}{\lambda_i} \right)$$

이고 핵종별 단위방사능 당 잠재알파에너지 값을 대입하면

$$EEC_{Rn} = \frac{5.79 C_{Po18} + 28.6 C_{Pb14} + 21.2 C_{Bi14}}{55.6}$$

이 된다. 여기서 C는 $Bq m^{-3}$ 단위의 농도이다. 그러면 평형인자 F는 다음과 같이 정의된다.

$$F \equiv \frac{EEC_{Rn}}{C_{Rn}}$$

공기중 라돈농도와 평형인자를 알면 평형등가농도는 다음과 같이 산출된다.

$$EEC_{Rn} = F C_{Rn}$$

11) <역주> 일반인 정의와 마찬가지로 '본인의 이해동의 없이 받는 피폭'을 일반인피폭으로 이해하는 것이 적절하다.

라돈-220 자손radon-220 progeny

이 보고서에서 보다 협의로 사용하는 라돈-220의 붕괴생성물로서 폴로늄-216부터 폴로늄-212 또는 Tl-208까지 단수명 붕괴생성물.

라돈-222 자손radon-222 progeny

이 보고서에서 보다 협의로 사용하는 라돈-222의 붕괴생성물로서 폴로늄-218부터 폴로늄-214까지 단수명 붕괴생성물. 라돈자손은 때로는 '라돈 붕괴생성물' 또는 전통적으로 '라돈 딸핵종'으로도 불린다.

라돈유역지역radon-prone area

조사결과 국가의 다른 지역에 비해 상당히 높은 라돈농도가 나타나는 지리적 구역 또는 행정 구역.

참조준위reference level

관리 가능한 기존피폭상황에서 참조준위란 그 이상에서는 피폭이 일어나도록 계획하는 것이 부적절하고 그 이하에서는 방호 최적화가 이행되어야 하는 선량이나 위험 준위이다. 참조준위로 선정되는 값은 고려하는 피폭의 지배적 여건에 따라 달라질 수 있다.

위험risk

위험이란 어떤 유해한 결과(예: 폐암)가 일어날 확률 또는 기회와 관련된다. 위험과 관련된 용어들은 다음과 같다.

- 상대위험RR
피폭집단에서 관심 질환(예: 폐암)의 발생률 또는 그로 인한 사망률의 비피폭집단의 해당률에 대한 비.
- 초과상대위험ERR
상대위험-1.
- 위험계수risk coefficient
단위피폭 또는 단위선량 당 위험 증가. 일반적으로 WLM 당, mJh/m³ 당, 100 Bq/m³ 당 또는 Sv 당 ERR로 나타낸다.
- 위해detriment
ICRP의 개념으로서 그룹의 방사선원 노출 결과로 그 그룹 및 후손에게 나타나는 보건상 총 해로움을 의미한다. 위해는 다차원 개념이며 그 주성분은 확률론적 양으로서 기인 치명적 암 확률, 기인 비치명적 암의 가중 확률, 심각한 유전질환의 가중 확률, 그리고 그 해로움이 발생한 경우 수명손실 기간이 된다.

종사자^{worker}

고용주에 의해 전일제나 시간제 또는 임시로 고용된 사람으로서 직무와 관련된 권리와 의무를 인식하는 사람.

워킹레벨¹²⁾working level(WL)

공기 1 m³에 1.3×10⁸ MeV의 잠재알파에너지를 내는 임의 조합의 단수명 라돈자손 농도로서 전통적 단위. 1WL = 2.08×10⁻⁵ J/m³.

WLM¹³⁾working level month

1 WM 농도의 공기를 한 달 작업시간인 170 시간 호흡한 누적피폭.

사용 단위

- 줄(J): 1 J = 6.242×10¹² MeV
- 잠재알파에너지 농도
 - 라돈자손 경우: 1 Bq/m³ 평형 라돈 = 3.47×10⁴ MeV/m³ = 5.56×10⁻⁹ J/m³
 - 토론자손 경우: 1 Bq/m³ 평형 토론 = 4.72×10⁵ MeV/m³ = 7.56×10⁻⁸ J/m³
- 워킹레벨
 - 1 WL = 1.3×10⁸ MeV/m³ = 2.08×10⁻⁵ J/m³
- WLM
 - 1 WLM = 3.54×10⁻³ Jh/m³ = 6.37×10⁵ Bqh/m³ 평형등가 라돈농도
 - = 6.37×10⁵/F Bqh/m³ 라돈 농도, F: 평형인자
 - 1 Bq/m³ 라돈농도 1년 노출 = 4.4×10⁻³ WLM(가정)¹⁴⁾
 - = 1.26×10⁻³ WLM(직장)¹⁵⁾
 - 1 WLM = 4.68×10⁴ Bqh/m³ 평형등가 토론농도.

12) <역주> working level(WL)을 직역하면 '작업준위'로 적을 수 있겠지만 WL이 라돈과 자손의 농도를 나타내는 단위와 같은 개념으로 사용되기 때문에 평범한 말인 '작업준위'로 적어서는 의미전달이 어렵다. 따라서 외래어 표기를 단순히 적용하여 '워킹레벨'로 표현함으로써 개념을 명확화하고자 했다.

13) <역주> working level month는 라돈과 자손 노출량을 나타내는 특수단위로 사용된다. ICRP 65 번역에서 역주자는 '누적워킹레벨'을 사용할 것을 제안했지만 1 WL에서 1개월 작업시간(170 시간) 노출된 특정 노출량을 의미하기에 부적절하므로 'WLM'를 직접 사용하는 것이 적절한 것으로 판단하여 여기 수정한다. 다만 단위처럼 사용되지 않고 누적 노출량을 포괄적으로 의미할 때는 '누적 워킹레벨'처럼 표현해도 무방할 것이다.

14) 연간 7000시간 실내 체류, F=0.4 가정.

15) 연간 2000시간 근무, F=0.4 가정.

제1장 서론

1.1. 배경

(1) ICRP는 이전에도 라돈피폭으로부터 방호에 대한 권고를 발행한 바 있다. ICRP 65(1993)에서 ICRP는 라돈과 자손의 보건영향에 대한 기존 지식을 검토하고 주택과 직장에서 라돈피폭 관리를 위한 기틀을 그 2년 전에 발간한 일반권고(ICRP, 1991)와 일관되게 개발했다.

(2) ICRP 101 제2부(2006b)에서는 방사선방호 최적화에 관한 권고를 업데이트 했다. ICRP 101 제2부는 라돈피폭에 대해 구체적인 방안을 수록한 것은 아니며, 모든 피폭상황에 적용될 수 있는 방사선방호에서 최적화 원칙의 중요성을 강화했는데 이해당사자 참여를 포함하여 그 과정을 넓히도록 권고했다. 동시에 ICRP는 ICRP 103(2007)으로 일반권고를 개편했는데 여기서 한 절이 주택과 직장의 라돈을 다루고 있다. 여기서 ICRP는 ICRP 65(1993) 권고를 대체로 뒷받침하면서 조치준위를 대체하여 참조준위 개념을 도입했다.

(3) 보다 최근에 ICRP는 라돈으로 인한 위험에 관한 가용 정보를 검토했다. 2009년에 ICRP는 개정된 위해 값 및 참조준위와 함께 가정과 직장에서 라돈피폭에 대한 개정된 입장을 요약한 성명을 채택했다. 라돈에 관한 이 ICRP 성명은 ICRP 115(2010)에 실렸는데, 그 보고서는 라돈과 자손에 의한 폐암 위험에 대한 검토결과를 제공한다.

(4) ICRP 65(1993) 이래 많은 나라에서 라돈피폭 관리를 위한 라돈 정책이 이행되어 경험이 쌓였다. 나아가 국제기구들도 이 이슈에 관한 과학적 정보와 지침을 제공해 왔다. 특히 유엔 방사선영향과학위원회(UNSCEAR)는 라돈 피폭과 위험에 관한 보고서(UNSCEAR, 2009)를 출간했고, 세계보건기구(WHO)는 공중보건 관점에서 실내 라돈피폭 관리를 다룬 핸드북을 발간했다(WHO, 2009). 최근에는 ICRP 라돈 선언의 핵심 권고가 국제 기본안전표준(IAEA, FAO, 2011)과 유럽 기본안전표준(EURATOM, 2014)에 통합되었다.

(5) 이 보고서의 목적은 위에서 설명한 간행물을 고려하여 라돈피폭 관리에 대한 권고를 개정하는 것이다. 보고서는 또 라돈과 자손을 포함한 방사성핵종 취식이나 흡입에 대한 개정된 선량계수도 고려하는데 이 계수는 따로 ICRP 간행물에 제공될 것이다.¹⁶⁾

1.2. 범위

(6) 라돈은 우라늄-238, 우라늄-235 및 토륨-232의 방사성 붕괴생성물이다. 우라늄-238 시리즈의 경우 생성되는 핵종이 라돈-222인데 바로 라듐-226의 붕괴생성물이다(그림 1.1 참조). 우라늄-235 시리즈의 경우는 생성 핵종이 라돈-219이다(그림 1.2 참조). 토륨-232 시리즈에서는 생성 핵종이 라돈-220으로서 바로 라듐-224의 붕괴생성물이다(그림 1.3 참조). 사람의 라돈피폭은 주로 라돈-222, 보다 구체적으로는 그것의 단수명 자손에 의한 것이다. 짧은 반감기 때문에 실내 공기 환경에서 라돈-220에 의한 피폭은 일반적으로 낮다. 매우 짧은 반감기 때문에 라돈-219의 피폭 기여는 유의하지 않으므로 이 간행물에서는 고려하지 않는다.

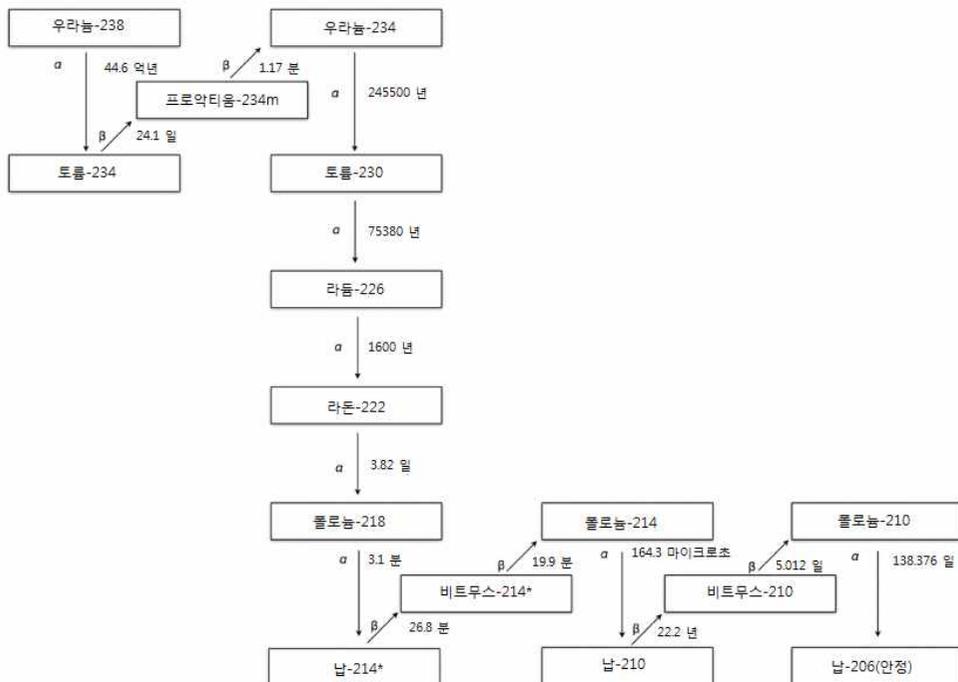


그림 1.1. 우라늄-238 붕괴생성물. *표한 핵종은 유의한 감마방출체이다.

16) <역주> 2016년에 발행예정인 소위 OIR 제3부가 된다.

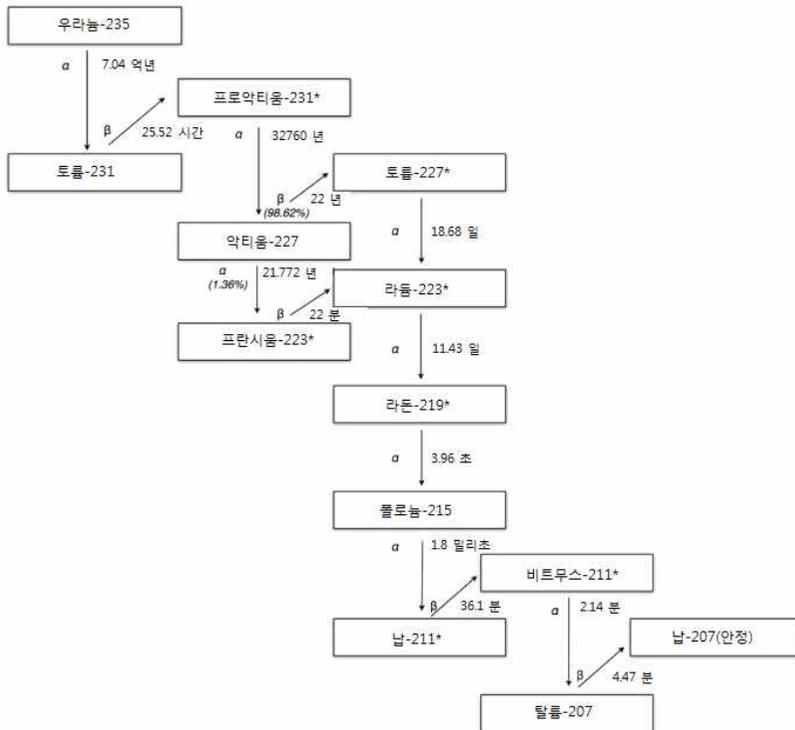


그림1.2. 우라늄-235 붕괴생성물. *표한 핵종은 유의한 감마방출체이다.

(7) 사람들은 가옥에서 일반인으로서 라돈-222과 라돈-220에 피폭하며 직장에서는 종사자로서 피폭한다. 또, 사적 장소는 물론 시청, 우체국, 학교, 병원, 요양원, 감옥, 상점, 유흥장처럼 공공에 개방된 장소에서 일반인으로서(예: 고객, 사용자, 방문객, 학생) 또는 종사자로서(예: 직원, 집꾼, 점원, 안내자, 경비원, 교사, 간호원) 라돈에 피폭한다. 간병인처럼 기거하는 종사자도 있을 수 있다. 이 보고서는 모든 장소에서 모든 사람의 라돈-222 피폭관리에 적용할 수 있다. 보건 우려가 낮은 라돈-220 피폭에 관련된 지침은 주로 건축재에 관한 대책에만 집중된다(제4.4절 참조).

(8) 이 보고서의 목표는 라돈피폭에 ICRP 방호체계 적용을 설명하고 명확히 하는 것이다. 보고서는 직무피폭으로 간주되지 않는 종사자와 일반인을 보호하기 위해 주택, 복합 건물 및 대부분 직장과 같은 건물의 관리에 초점을 맞춘다. 대개 종사자를 직무피폭자로 간주하는 우라늄 광산처럼 특별한 작업장에 대해 개인피폭 관리를 위한 새로운 대책을 권고하지는 않는다.

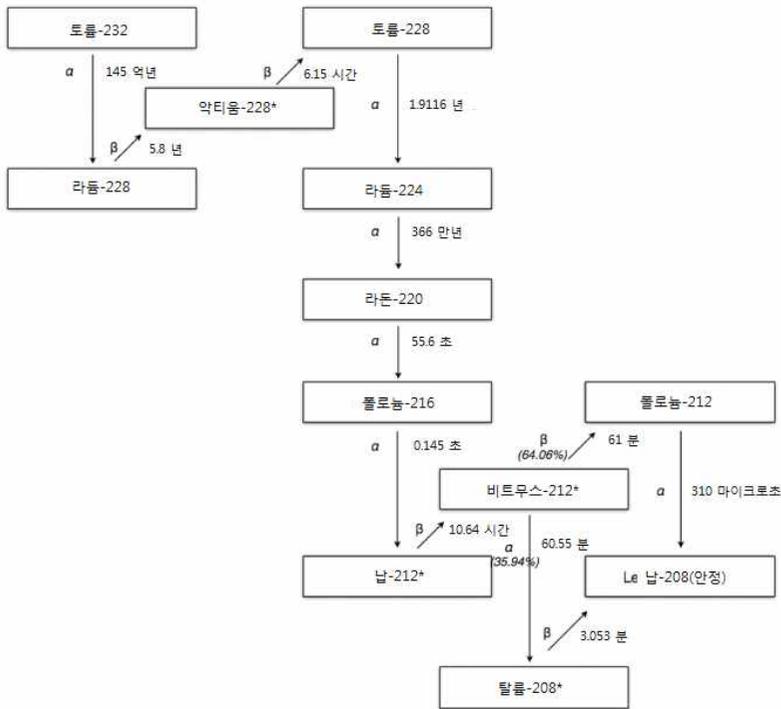


그림1.3. 토륨-232 붕괴생성물. *표한 핵종은 유의한 감마방출체이다.

1.3. 구조

(9) 제2장은 라돈-222에 집중하여 라돈피폭의 특성을 설명한다. 라돈 원천과 전파 기전, 그리고 관련된 보건위험의 본질과 정량화에 대한 설명과 함께 라돈-222 관리의 간략한 역사를 제시한다. 국가 라돈방호 전략 개발에서 주된 어려움에 대해서도 개괄했다.

(10) 제3장은 라돈피폭에 대한 방호체계를 제시한다. 상이한 피폭상황에 노출되는 사람의 범주를 어떻게 다루는지 설명한 다음, 세 소절에서 각각 방호전략의 정당화, 방호의 최적화, 그리고 해당될 때 선량한도 적용을 다룬다.

(11) 제4장은 피폭상황에 따라 라돈피폭 관리를 위한 방호전략의 이행에 관한 지침을 제공한다. 소절4.1은 국가 조치계획을 통한 건물 내 피폭관리를 겨눈다. 소절4.2와 소절

4.3은 각각 예방과 완화에 집중하며, 소절4.4는 건축재에 초점을 맞춘다. 소절4.5와 4.6은 각각 일반 작업장과 우라늄 광산에서 종사자의 라돈방호를 다룬다. 끝으로 소절4.7은 이해당사자 관계를 주로 다룬다.

제2장 라돈피폭의 특성

2.1. 역사적 개관

(12) 중부 유럽 광부의 높은 사망률은 17세기 이전부터 인지되었는데 19세기 후반에야 그 주된 사인이 폐암으로 식별되었다(Haerting과 Hesse, 1879). 1924년 이 폐암이 라돈피폭과 관련될 수 있음이 제안되었다(Ludewig와 Lorenzer, 1924).

(13) 이 첫 고찰은 라돈을 측정하게 한 동기가 되었다. 초기 라돈 측정은 대기 전하, 대기 수송, 토양가스 방출 등 다양한 환경현상 연구에 국한되었다. 우라늄 광산에서 라돈 자손 피폭에 대한 감시 프로그램은 1950년대에 종사자 피폭을 관리하기 위해 개발되었다.

(14) 실내 라돈 첫 측정은 1950년대에 수행되었지만(Hultqvist, 1956) 별로 주목받지 못했다. 그러나 1970년대부터 몇몇 국가에서 주택의 높은 라돈준위 발견이 늘어났다. 최근 10여 년 동안에는 많은 나라에서 주택과 직장에 대한 포괄적 라돈조사와 관리전략이 이행되어 왔다.

(15) 1986년 라돈은 공식적으로 폐암 원인으로 인식되었다(WHO, 1986; IARC, 1988). 당시 라돈 유발 폐암에 대한 주된 지식원은 지하 광부에 대한 역학연구였다(ICRP, 1993).

(16) 1990년대부터 여러 연구가 낮은 수준 피폭에서 위험에 관한 유익한 데이터를 제공해왔고 만성적 낮은 준위 라돈노출에서 위험 증가를 보였다(예: Lubin 등, 1997; NRC, 1998; EPA, 1999, 2003; Tomášek 등, 2008). 나아가 최근의 주택 라돈피폭에 대한 증례-대조연구로부터 폐암 데이터 결합분석은 낮은 수준 피폭에서도 위험 증가를 입증했다(Lubin 등, 2004; Darby 등, 2005, 2006; Krewski 등, 2006).

(17) 라돈피폭 관리 역사에 대한 보다 상세한 검토는 ICRP 65(ICRP 1993)에 주었다.

2.2. 라돈 원천과 전이

(18) 라돈-222는 우라늄-238의 방사성붕괴 생성물인데 우라늄은 지각에 서로 다른 농도(ppm 수준)로 존재한다. 라돈-222의 반감기는 3.82 일이고 바로 라듐-226의 붕괴생성물이다.

(19) 방사성 붕괴 과정에서 생긴 생성물은 일반적으로는 붕괴가 일어난 암석 속에 머무른다. 붕괴생성물이 가스인 경우에는 그 원자가 이동할 수 있다. 만약 붕괴생성물이 암석 내 파쇄선이나 불연속선 근처의 기공 가까이서 생성된다면 가스가 생성 위치로부터 이동할 수 있다. 토양 중 공기는 라돈으로 차있는데 보통 표토로부터 0.5-1 m 깊이에서 측정된 농도는 $2000-10^6 \text{ Bq m}^{-3}$ 범위에 있다(Cothern과 Smith, 1987; Winkler 등, 2001). 기공에 있는 라돈은 주로 확산에 의해 수송되는데 수송률은 토양의 공극률과 투과율(permeability)에 의존한다. 대류로 이동하는 경우도 있는데 대류는 파쇄선이나 단층의 존재에 의존한다. 지하수를 통한 용존 라돈의 이동은 또 다른 중요한 운송 기전이다.

(20) 라돈 가스 일부는 붕괴하기 전에 토양을 통과하여 대기로 들어올 수 있다. 보통 토양으로부터 라돈 방출량은 적고 공기 중에서 빠르게 희석되는데 희석은 대기안정도, 바람, 와류 수준(연직방 온도구배와 연계됨)에 따라 달라진다. 그래서 대기 중 라돈-222 농도는 일반적으로 낮지만 차이는 있다. 육상에서 측정된 값은 $1-100 \text{ Bq m}^{-3}$ 수준이다. 라돈-222의 전형적 옥외 농도는 10 Bq m^{-3} 이며 해변이나 작은 섬에서는 낮은 편이다(UNSCEAR, 2000, 2009).

(21) 라돈-220은 토륨-232의 붕괴생성물인데 토륨도 지각에 다양한 농도로 분포한다. 라돈-220은 반감기($T_{1/2} = 55 \text{ s}$)가 라돈-222보다 훨씬 짧아 그 생성 위치로부터 많이 이동하기 어렵다. 환경에서 라돈-220 거동은 라돈-222과 매우 다르다. 실내 공기 중 라돈-220의 주된 원천은 건축재인데, 장소에 따라 라돈-220 농도 수준은 상당한 차이가 있다. 일반적으로 실내 공기 중 평균 라돈-220 가스 농도는 나라에 따라 $0.2-12 \text{ Bq m}^{-3}$ 범위에 있다(UNSCEAR, 2000, 2009). 라돈-220 피폭은 보통은 방사선방호 문제가 되지 않지만 전통적 가옥¹⁷⁾과 같은 일부 장소에서는 예외이다.

17) <역주> 전통적 가옥이란 특히 중국 지방의 토굴형 주거지로서 토론 농도가 현저히 높다. 흙벽으로 된 우리나라 전통가옥의 토론은 아파트에 비해 평균적으로 2배 수준이지만 지역과 주택에 따라 편차가 크다. 우리나라 가옥 전체적 실내 토론농도는 $20-60 \text{ Bq/m}^3$ 이지만 소수 주택에서는 훨씬 높은 농도도 발견된다(Chang-kyu Kim 등, ²²⁰Rn and its progeny in dwellings of Korea, Radiation Measurement, 42, 1409, 2007).

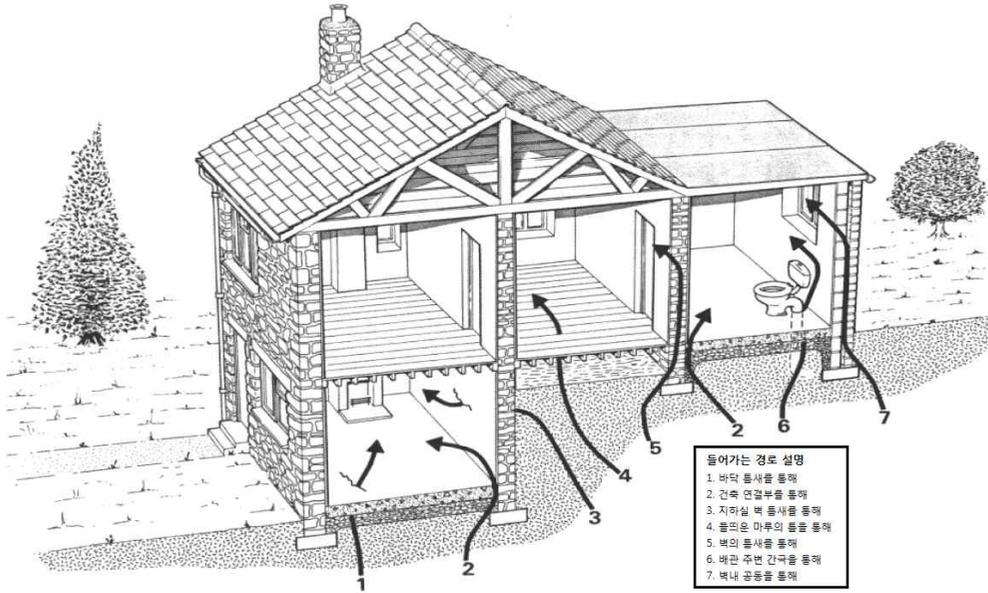


그림2.1. 실내 라돈의 침입경로.

(22) 토양으로부터 옥외 공기로 이동한 라돈 농도는 빠르게 희석되지만 주택처럼 폐쇄된 건물로 흘러든 경우는 사정이 다르다(그림2.1 참조). 건물의 공기 순환률에 따라 옥외에 비해 라돈 가스가 누적될 수 있다. 기상변수에 따라 특히 옥내외 온도차에 따라 토양과 건물 기반 사이에 압력차가 생긴다. 이로 인해 라돈이 높은 토양공기가 더 스며드는데 그 정도는 토양 상부 바닥 슬러브의 침투도나 슬러브 밑 공간(있다면) 공기의 환기율에 따라 달라진다. 이러한 압력 유도 유입이 확산에 의한 라돈 이전보다 훨씬 크게 기여한다. 표토보다 견고한 바닥 구조의 밀도가 높기 때문에 압력차가 없으면 확산에 의한 라돈 이전은 감소한다.

(23) 토양으로부터 건물로 라돈 이전은 다음과 같은 여러 변수의 영향을 받는다.

- 토양 조성(화학특성, 지질, 습분, 라돈에 대한 침투도)
- 토양 중 라돈 농도
- 고려하는 건물이나 장소 내외의 압력차, 토양과 건물주변 대기의 압력차, 그리고 토양과 건물 하층 공간 사이 압력차
- 건물이 지면과 접하는 면적
- 균열 여부, 배관 덕트, 배선 덕트 등을 포함한 건물 외곽면의 기밀성(특히 건물 바닥과 기초의 기밀성).

(24) 건물 내 라돈의 이전도 다음 여러 인자의 영향을 받는다.

- 환기와 공기조화 영향을 받는 건물 내 공기 순환
- 주로 실내외 온도차로 귀착되는 기상학적 및 계절적 변수
- 바닥의 높이 및 공간의 크기
- 방문이나 창문을 열어두는 것과 같은 거주자의 생활 스타일이나 작업 습관.

(25) 건축재는 다양한 수준으로 우라늄이나 토륨을 함유한다. 이런 건축재로부터 라돈이 공기 중으로 방출된다. 방출 방사능은 라돈 생성률과 재료의 다공도(porosity)에 의존한다. 통상적 건축재에서 스며드는 체적류는 $0.05\text{--}50\text{ Bq (m}^3\text{h)}^{-1}$ 이고 이에 따른 농도(평균적 공기치환율 0.7 h^{-1} 에서)는 $0.03\text{--}30\text{ Bq m}^{-3}$ 범위이다. 라돈 농도가 1000 Bq m^{-3} 에 이르는 상황도 있다(예: 라듐을 다량 함유한 콘크리트를 사용한 경우). 그러나 대부분 경우에는 건축재 기여는 토양으로부터 스며든 라돈만큼 중요하지는 않다(EC, 1999).

(26) 지하수 라돈 농도는 크게 변하는데 라돈의 수중 용해도가 낮음에도 불구하고 상당히 높을 수 있다. 그 값은 수-몇 천 Bq L^{-1} 범위에 있다(Skeppström과 Olofsson, 2007). 일부 사설 우물, 시추공 및 온천에서 비교적 높은 라돈 농도가 관측되었다. 라돈을 함유한 물을 가정용으로 사용하면 라돈이 탈기되어 실내 공기에 라돈 준위가 올라갈 수 있다. 대부분 공공 상수도는 송수 중 붕괴나 탈기효과로 인해 라돈 준위가 비교적 낮다.

(27) 라돈 원천(토양, 건축재, 물)이 무엇이든 건물 내 라돈 농도는 여러 자리까지 차이가 있는데 UNSCEAR(2009)에 따르면 10에서 70000 Bq m^{-3} 까지 이른다. 세계 평균 실내 라돈 값은 약 40 Bq m^{-3} 이다.

2.3. 라돈 위험

(28) 전통적으로 라돈피폭 위험 평가는 주로 지하 우라늄 광부를 추적한 역학연구에 바탕을 두었다. 이 접근은 워킹레벨(WLM), J h m^{-3} 또는 Bq h m^{-3} 으로 표현하는 피폭 수준 당 상대위험을 계산할 수 있게 한다(ICRP, 1993). ICRP 65(1993)에서 라돈 및 자손 단위 노출 당 위험을 단위 유효선량 당 총 위험과 직접 비교에 근거하여 선량환산합의(dose conversion convention)를 정의했다. 전자는 광부 역학에서 구했으며 후자는 대체로 감마선에 피폭한 일본 원폭피해 생존자 역학연구로부터 주로 얻었다. 이 비교는 WLM 당 mSv , 또는 Bq h m^{-3} 당 mSv 단위로 피폭 당 유효선량을 계산할 수 있게 하

며 Bq m^{-3} 으로 표현하는 조치준위를 도출할 수 있게 한다. 다른 모든 핵종에 대해서는 제공되는 방사선가중치와 조직가중치와 함께 생물역동학 및 선량계측 기준모델을 사용하여 유효선량이 계산된다. ICRP 115(2010)에서 ICRP는 장차 선량계수 산출에 다른 방사성핵종처럼 라돈도 포함할 의사를 표명한 바 있다.

2.3.1. 역학적 증거

(29) 실내 라돈 핸드북(WHO, 2009)에서 WHO는 주택에서 라돈피폭의 보건영향을 평가하여 다음 결론을 도출하였다.

- 역학연구가 가정에서 라돈이 일반인 집단에서 폐암 위험을 증가시킴을 확인했다. 다른 보건영향은 일관적으로 입증되지 않았다.
- 모든 폐암 중 라돈의 기여는 3-14% 범위에 있는 것으로 평가되는데 국가 평균 라돈 농도와 계산방법에 따라 차이가 있다.
- 많은 나라에서 라돈이 흡연에 이어 두 번째 중요 원인이다. 라돈은 일생 비흡연자보다 흡연자나 흡연 이력자에게 폐암을 유발할 가능성이 훨씬 높다. 비흡연자에게는 라돈이 폐암의 주된 원인이다.
- 그 아래서는 위험이 없는 라돈 문턱농도는 알려지지 않는다. 낮은 라돈농도에서도 폐암의 작은 증가는 있을 수 있다.

(30) 라돈과 그 자손 피폭과 관련된 폐암 위험에 관한 간행물 115(ICRP, 2010)에서 ICRP는 종사자(지하 광부)와 일반인 집단에 대한 라돈 역학연구를 자세히 검토, 분석했다. 주요 결론은 다음과 같다.

- 지하 광부에 대한 코호트연구와 주택 라돈피폭의 사례대조연구에서 라돈과 그 자손 피폭이 폐암을 유발한다는 강력한 증거가 있다. 폐암 외 고형암과 백혈병에 대해서는 라돈과 자손 피폭과 관련한 초과위험에 대한 확실하거나 일관적인 증거가 없다.
- 광부 연구와 실내 피폭 연구의 위험 평가치를 비교한 결과 잘 일치하는 것으로 나타났다. 세 집단(유럽, 북미, 중국) 병합 사례대조연구(Darby 등, 2005)도 비슷한 결과를 냈다. 라돈농도 측정에서 우발오차를 보정한 유럽 병합 사례대조연구는 100 Bq m^{-3} 당 16%(95% 신뢰구간: 5-32%)의 초과상대위험을 보고했다. 이 위험이 적어도 25년 피폭기간을 근거로 하므로 그 값은 가정에서 비교적 낮은 라돈농도로 장기적으로 피폭한 경우에 위험관리 목적으로 적합한 평가치일 것이다.
- 일생 비흡연자의 경우 75세까지 누적 폐암위험은 라돈농도 0, 100 및 400 Bq m^{-3} 에 대해 각각 0.4%, 0.5%, 0.7%로 평가된다. 일생 흡연자에게서는 이 위험이 각각 10%, 12%, 16%에 가깝다(Darby 등, 2005, 2006). 흡연이 폐암의 가장 중요한 원인으로 남는다.

- 비교적 낮은 수준 피폭을 포함한 지하 광부 역학연구 검토에 근거하여 위해조정 명목 위험계수 WLM 당 5×10^{-4} ($J h m^{-3}$ 당 0.14)이 단위 피폭 당 폐의 위해 값으로 채택되었다. 이 값은 성인기 피폭을 고려한 최근 연구로부터 도출된 것인데 ICRP 65(1993)에서 계산한 값의 2배에 가깝다.

(31) 이 검토 결과로, ICRP는 라돈성명에서 모든 연령 집단(흡연자와 비흡연자 혼합 성인 집단)에 대해 위해조정 명목 위험계수로 자손과 평형인 라돈-222 가스 피폭 $Bq h m^{-3}$ 당 8×10^{-10} 을 권고했다(ICRP, 2010). ICRP의 이 결정은 UNSCEAR(2009)가 유엔총회에 제출한 보고를 포함한 다른 포괄적 평가와 일치하는 것이다.

2.3.2. 선량계측 접근

(32) 라돈자손 흡입에 따른 등가선량이나 유효선량을 사람 호흡기모델(ICRP, 1993, 2014b), 사람 소화기모델(ICRP, 2006a), 폴로늄, 납 및 비트무스 전신생리모델(ICRP, 2014b)을 포함하는 ICRP 기준 생물역동모델 및 선량계측모델로 계산할 수 있다. 라돈 가스에 대한 전신 생리모델도 개발되어 라돈 가스 흡입으로 인한 유효선량을 계산할 수 있게 되었다(ICRP, 2014b).

(33) 라돈-222는 붕괴하여 폴로늄-218 원자 하나를 만든다. 그림 1.1에 보였듯이 폴로늄 원자는 다시 다른 핵종으로 붕괴한다. 단수명 라돈 붕괴생성물(폴로늄-218, 납-214, 비트무스-214)은 공기 중에 비부착 상태 또는 에어로졸 입자에 부착 상태의 방사성핵종으로 존재하는데 비부착분율은 현장 조건에 의존한다. 이들 방사성핵종은 표면에 침적하거나 환기에 의해 제거될 수 있다.

(34) 라돈은 불활성기체이므로 흡입한 양의 거의 대부분이 날숨으로 나온다. 그러나 라돈자손은 많은 비율이 폐의 기도에 침적된다. 라돈자손의 반감기가 짧아서 침적 입자가 혈액으로 흡수되거나 후두를 통해 소화관으로 이송됨으로써 제거되기 전에 붕괴하여 폐 조직에 선량을 전달한다. 단수명 자손핵종 중 둘 즉, 폴로늄-218과 폴로늄-214는 알파 입자를 방출하여 에너지를 부여하는데 이것이 폐 선량을 지배한다. 이에 비해 전신 장기나 소화관 영역에서 선량은 낮다. 결과적으로 라돈자손 흡입에서 폐의 등가선량이 유효선량의 95% 이상을 기여한다. 라돈가스만 흡입한 경우 유효선량은 전형적으로 라돈자손 흡입으로 인한 선량의 10% 미만이다.

(35) 선량은 주로 라돈자손 농도, 노출 시간, 호흡률, 그리고 라돈자손 에어로졸의 방사능 입자크기 분포 및 비부착분율 등 에어로졸 특성에 의존한다. 만약 피폭이 라돈 가스

측정으로 특성화된다면 공기 중 라돈자손 농도를 평가하기 위해 평형인자 F 값이 필요하다. 방사선방호 목적에서 호흡률과 같은 선량계측 모델의 대부분 변수는 기준 종사자 또는 기준인 값에 해당한다. ICRP가 고려하는 선량계측모델(2014b)을 위해 두 종류 직 무피폭 상황을 고려하는데 광산과 일반 실내 작업장이다. 이 두 상황에 대해 계산된 선량계수는 흡연자와 비흡연자를 구분하지 않는다. 방사선방호 목적에서 이러한 접근이 적절하다고 본다.

(36) 주택에서는 선량계수가 WLM 당 13 mSv로 계산되었다(Marsh와 Bailey, 2013). 이 선량계수와 평형인자 $F=0.4$, 점유도 7000 h y^{-1} 를 적용하면 연평균 라돈농도 300 Bq m^{-3} 는 기준피폭상황의 참조준위 1-20 mSv 범위의 상단 쪽에 있다. 비교하자면 가정에서 300 Bq m^{-3} 의 라돈농도는 ICRP 115(2010)와 Marsh 등(2010)의 개정된 명목위험계수를 사용하여 역학적으로 도출되는 선량환산합의(제27항 참조)를 적용할 때 약 10 mSv에 해당한다. 광산에서 피폭에 대해서는 WLM 당 11 mSv라는 선량계수를 얻었는데 이는 선량환산합의로 얻는 것과 같다.

2.4. 라돈피폭 관리의 난제

(37) 실내 라돈피폭 관리는 국가 라돈 방호전략 특히, 공중보건과 책임에 대해 다뤄야 할 여러 난제를 제기한다.

2.4.1. 공중보건 고려

(38) 사람들은 주택에서 일반인으로서, 그리고 직장에서 종사자로서 라돈에 노출된다. 또, 복합용도 건물에서는 일반인이나 종사자로서 라돈에 노출된다. 사람들은 평소 여러 장소를 이동하므로 이상적으로는 라돈 방호전략은 주어진 지역에서 다른 장소의 관리에 일관성을 제공해야 하며, 장소마다 점유시간이 다른 사실에도 불구하고 통합된 접근을 제공해야 한다.

(39) WHO에 따르면 다른 암과 비교할 때 라돈 기인 폐암 사망률 평가치 때문에 공중보건에 상당한 해독을 미친다(WHO, 2009). 사람들은 실내에서 많은 시간을 보내는데 주로 가정이다. 공중보건 관점에서 가정에서 라돈 피폭이 가장 중요하므로 라돈 방호전략은 시설이 공식 관리 아래 있고 규제가 더 용이한 공공장소나 직장에서보다 가정에서 피폭에 주로 초점을 맞춰야 한다.

(40) 비록 가정에서 아동의 라돈피폭에 대한 역학연구는 없지만 일반적으로 아동은 성인보다 방사선에 더 민감할 것으로 가정한다. 그러나 위험이 일생을 통해 누적됨을 고려하고 통합접근과 조화시키기 위해 ICRP는 아동에 고유한 지표나 조연의 사용을 권고하지는 않는다. 그렇지만 어떤 건물에 아동 점유가 상당하다면 주의를 높이고 우선적으로 예방 또는 완화를 위한 조치를 이행하는 논의가 있어야 한다.

(41) 공중보건 관점에서 라돈 감축은 장기적 목표가 된다. 라돈피폭 예방은 신규 건물에서 쉽게 이루어진다. 건축코드를 적용하고 경험을 통해 비용효과성을 높이면 신축 또는 개수하는 건물에 예방적 수단의 이행은 훌륭한 부분 대책이 된다(STUK, 2008). 이는 건설 분야에 종사하는 전문가의 주의를 높이는 데도 도움이 된다.

(42) 라돈농도가 높은 건물에 대해서는 기존 건물에 대한 치료도 대개 유효하다. 그런 상황에서는 아마도 라돈 침입의 주된 원천이 있을 것인데 치유를 통해 라돈 수준이 1/10 이하로 줄어든기도 한다.

(43) 개인의 라돈피폭 분포는 넓은데 장기적 평균 라돈농도 200 Bq m^{-3} 미만에서도 폐암 위험에 대한 증거가 있다(ICRP, 2010). 결과적으로 목표는 집단 전체의 위험과 함께 평등을 위해 최고 개인피폭도 합리적으로 달성 가능한 수준까지 낮추는 것이어야 한다. 그러나 라돈의 완전한 제거는 불가하다.

(44) 라돈피폭이 집단의 위험에 유일한 원천은 아니다. 라돈 방호전략은 고려하는 국가에서 식별된 다른 보건해독과 우선순위에 따라 적절히 균형을 맞춰야 한다. 나아가 라돈 방호전략과 금연이나 실내 공기질과 같은 다른 공중보건 정책 사이에 불일치를 피하고 효과성을 높이기 위해 비교 및 통합을 추구해야 한다.

(45) 라돈피폭의 만연과 상황 및 의사결정자의 다양성을 고려할 때 동일 접근으로 대부분 상황을 다룰 수 있는 단순하고 현실적이며 통합된 라돈 방호전략이 적절하다. 방호전략은 장기적으로, 잠재적으로 영구적 차원에서 지원되고 이행되어야 하며 모든 이해당사자가 참여하도록 해야 한다.

2.4.2. 이해당사자 책임

(46) 국가 라돈 방호전략은 책임, 특히 주택 거주인에 대한 소유주 책임, 건물 구매자에 대한 건축자나 판매자 책임, 임차인에 대한 임대인 책임, 피고용인에 대한 고용주 책임,

그리고 일반적으로 말해 임의 건물의 사용자에 대한 그 책임자의 책임에 관련한 여러 난제도 다뤄야 한다.

(47) 라돈피폭은 주로 주택에서 문제이므로 라돈 방호전략의 성공은 상당 부분 개인이 자기 집에서 필요할 때 위험을 줄이기 위해 취하는 의사결정(자가방호)에 달려 있다. 개인이 자신의 책임을 지도록 일반 대중에게 라돈에 의한 위험에 대해 분명히 인식시키는 것이 필요하다. 특히 라돈 유의지역에서는 더욱 그러하다. 현재 라돈 정책이 수립되어 있는 일부 국가가 아니면 이러한 자각이 부족하므로 이를 높여야 함을 인식해야 한다. 라돈 위험과 이를 다루는 데 필요한 조치를 설명하는 조치계획을 개발하여 개선할 수 있다. 정보를 위한 좋은 인프라와 지원, 측정 및 치유를 위한 대책은 전제 조건이다.

(48) 정당화되는 조치를 강제하는 수준은 상황에 대한 법적 책임의 정도와 관련된다. 집을 팔거나 임대할 때 주택 소유주에게 그러한 책임이 있다. 고용주는 피고용인의 보건안전에 법적 책임을 진다. 학교 관리자(또는 지방관청)는 직원은 물론 학생의 건강에 법적 책임이 있다. 기타 공공 건물과 작업장에도 같은 고려가 적용된다. 그러한 책임과 관련된 요건은 해당 국가의 폭넓은 공중보건 정책과 조화를 이뤄야 한다.

(49) 책임 문제는 라돈 방호전략을 규정하고 이행하는 데 차등접근이 필요함을 분명히 보여준다. 그러한 차등접근은 의욕과 현실에 근거해야 한다.

제3장

라돈피폭에 대한 ICRP 방사선방호 체계

(50) ICRP 방사선방호체계는 간행물 103(ICRP, 2007)에서 설명했다¹⁸⁾. 그 간행물 제44항에 따르면 “방호체계는 크기나 원천에 관계없이 모든 선원으로부터 방사선피폭에 적용된다. 권고는 피폭원이나 사람이 받는 선량으로 이어지는 경로를 제어할 수 있는 합리적 수단이 있는 상황에만 완전히 적용될 수 있다. 이러한 선원을 제어가 가능한 선원이라 한다.”

(51) 선원으로부터 피폭자에 이르는 경로를 대체로 제어하거나 영향을 미칠 수 있기 때문에 실내 라돈피폭은 제어가능하다. 옥외의 지표 라돈농도는 높을 수 있지만 일반적으로 라돈가스가 대기 중에 확산되면서 희석되므로 라돈 방출률이 매우 높은 특정 지역이 아니라면 주위 공기 중 농도는 낮아서 수십 Bq m^{-3} 이하이다(UNSCEAR, 2009). 이 경우는 선원도 피폭경로도 제어하기 어렵기 때문에 ICRP는 옥외 라돈에 의한 사람의 피폭은 관리할 합리성이 없다고 본다. 다만, 인간활동으로 인해 증가된 선원으로부터 매우 높은 옥외 라돈농도가 발생하는 경우는 예외이다.¹⁹⁾

3.1. 피폭상황과 피폭범주

3.1.1. 피폭상황의 유형

(52) 피폭상황이란 천연이나 인공 방사선원, 여러 피폭경로를 통한 방사선의 전달로 사람의 피폭이 일어나는 것이다. 간행물 103(ICRP, 2007)의 권고는 세 유형 피폭상황에 따라 방사선방호를 구성하는데 계획피폭상황, 비상피폭상황, 기존피폭상황이다. 계획피폭상황은 선원을 의도적으로 도입함에 따라 발생하는 상황으로서 피폭이 예상되고 충분히 관리할 수 있는 상황이다. 비상피폭상황은 선원의 관리상실에서 발생하고 바람직하지

18) 간행물 103의 용어집에 일부 미흡한 점과 불일치가 있어서 이 보고서를 작성하는 시기에 ICRP는 그 개정을 준비하고 있다. 그래서 이 간행물에서는 간행물 103의 용어집 대신 간행물 자체를 인용하고 있다.

19) <역주> 전형적인 예는 라듐 함량이 높은 광산폐기물을 대량으로 집적한 장소이다. 이로 인해 높은 옥외 라돈농도가 발견된다면 그 원인이 사람의 행위 때문이므로 그 피폭에 대한 책임이 있는 사람이 있다. 이 책임 때문에 비록 방호수단이 비합리적 비용을 초래하더라도 완화조치를 강구해야 할 수도 있다.

않은 결과를 피하기 위해 응급조치를 필요로 한다. 비상피폭상황은 악의적 행위나 기타 예기치 않은 사건으로 인한 피폭도 포함한다. 기존피폭상황은 관련된 피폭에 대한 관리를 결정하고자 할 때 이미 그 선원이 존재하는 상황이다. 여기에는 천연 방사선원으로부터 피폭이나 과거 사건이나 사고, 행위로 인한 피폭도 포함된다. 이들 피폭상황에서 피폭의 패턴을 특성화하는 것이 피폭관리의 전제이다.²⁰⁾

(53) 선원이 지각에 만연한 천연 방사능의 변경되지 않은 농도이므로 라돈 피폭상황은 기존피폭상황의 특성을 갖는다. 인간 활동이 경로를 생성하거나 수정함으로써 실내 라돈 농도가 옥외 백그라운드에 비해 높아질 수 있다. 이러한 경로를 예방조치나 완화조치로 변경할 수 있다. 그러나 선원 자체는 변경할 수 없고 관리를 결정할 당시 이미 존재한다. ICRP 103(2007, 제284항)에서 주택과 직장에서의 라돈은 기존피폭상황으로 설명된다.²¹⁾

(54) 우라늄광산에서 라돈피폭은 우라늄 채광이 핵연료주기의 일부이고 종사자가 라돈뿐만 아니라 다른 방사선원(감마선에 의한 내부피폭, 분진의 흡입 및 취식)에도 직무를 피폭하기 때문에 종종 계획피폭상황과 같은 방식으로 관리된다. 기타 라돈피폭에 대해 관련 종사자를 계획피폭상황으로 간주할 것인가는 국가 당국이 결정할 일이다.²²⁾

20) <역주> ICRP 103에서 피폭상황의 정의의 표현이 애매한 면이 있어 점점 그 큰 방향으로 해석이나 변형된 정의가 늘어나고 있다. 계획피폭상황이란 선원의 의도적 도입에서 발생하는 피폭상황이라기보다는, 피폭 과정이 계획된 상황으로 해석하는 것이 적절하다. 비상 피폭상황은 심각한 사태를 예방하거나 인명구조 등 매우 큰 가치를 위해 자원자가 위험을 무릅쓰고 특별한 임무를 수행하기 위해 피폭하는 상황이다. 기존피폭상황은 선원이 아니라 피폭이 의사결정 당시 이미 진행되고 있는 상황으로 보면 적절하다. 추가 설명은 ICRP 103 번역본을 참조하기 바란다.

21) <역주> 가정에서 라돈피폭은 전형적인 기존피폭상황으로 보아 무방하다. 그러나 직장에서 라돈피폭은 계획피폭상황으로 보는 것이 옳다고 역자는 생각한다. 광산이나 관광동굴, 또는 지하 작업장 종사자는 선원이 거기 있었다라도 피폭을 초래한 직접적 원인은 종사자가 직무를 위해 그곳으로 들어가기 때문이다. 즉, 이러한 종사자의 피폭은 계획에 의한 것이다.

22) <역주> 역자는 직장에서 라돈 피폭은 직무피폭이고 계획피폭상황으로 본다. ICRP가 피폭상황의 분류를 국가 당국으로 넘긴 것은 이상한 접근인데 여기에는 고민이 깔려 있다. 직장에서 라돈 피폭을 모두 직무피폭으로 간주하면 현실적으로 라돈은 어디나 있기 때문에 결국 모든 종사자가 직무피폭자가 된다. 일부 외국은 방사선작업종사자를 A, B 등급으로 나누고 있지만 우리나라에서는 등급이 없으므로 원론적으로 모든 직장인이 방사선작업 종사자로 관리되어야 한다는 어려움이다. 물론 이렇게 관리할 수는 없다. 이 문제를 해소하는 방법은 전형적인 라돈 피폭은 체내 K-40에 의한 피폭처럼 불가피한 것으로 간주하여 면제(또는 배제)하고 국가의 라돈 준위에 따라 국가 당국이 설정하는 면제준위 이상의 라돈피폭에 대해서만 직무피폭으로 관리하는 것이라고 역자는 생각한다. 우리나라 상황이라면 아마도 연간 라돈 선량 4 또는 5 mSv 정도를 면제기준으로 설정할 수 있을 것으로 본다. 그러면 이를 초과하여 직무피폭으로 관리해야 할 대상은 우려할 규

(55) 어떤 장소에서 즉각적인 방호조치의 이행을 요구할 정도로 높은 농도가 발견될 수 있는데, 특히 피폭이 의사결정자가 보호할 의무가 있는 다른 거주자에게도 영향을 미칠 경우에는 더욱 그러한 조치가 필요하다. 그렇더라도 라돈이 비상피폭상황을 초래할 가능성은 낮다.

(56) 간행물 60(ICRP, 1991)과 비교할 때 간행물 103(ICRP, 2007)의 철학은 모든 피폭 상황에 대해 일관된 관리 접근을 권고하는 것이다. 이러한 접근은 적절한 선량 제한(즉, 선량제한치 또는 참조준위) 아래에서 최적화 과정을 적용하는 데 근거를 둔다.

3.1.2. 피폭범주

(57) ICRP는 세 범주 피폭을 구분하는데 의료피폭, 직무피폭, 일반인피폭이다.

(58) 직무피폭은 직무수행의 결과로서 일어나는 종사자의 방사선피폭이다. 그러나 방사선은 어디나 있기 때문에 이 정의를 방사선에 그대로 적용하면 모든 종사자가 방사선방호의 상황에 들게 된다. 그래서 ICRP는 ‘직무피폭’을 직장에서 방사선피폭으로서 합리적 관점에서 운영관리자 책임으로 간주되는 것으로 그 한정하여 사용한다(ICRP, 2007, 제 178항). 대부분 작업장에서 라돈피폭은 우발적이다(피폭이 수행하는 업무에서 유발되거나 관련되는 것이 아니라, 종사자나 다른 사람이 고용주의 시설에 있음으로 해서 발생한다).²³⁾

(59) 간행물 65(ICRP, 1993, 제86항)는 “직무로 피폭하는 것으로 보지 않는 종사자는 보통 일반인과 같이 취급된다.”고 적시했는데 이는 여전히 유효하다. 그러나 종사자의 보건안전은 계속 고용주의 책임으로 남는다. 달리 말하면, 라돈피폭이 우발적인 일반 작

모는 되지 않을 것이다. 이러한 시스템이 작동하기 위해서는 무엇보다 직장 라돈 준위에 대한 조사가 이루어져야 한다. 기존에 가용한 전국 라돈조사 결과를 바탕으로 라돈 유의 지역을 설정하고 그 유의지역에 대해 라돈 측정을 촉구하여 면제준위를 넘는 직장을 식별하는 과정이 필요하다.

23) <역주> 역자는 이렇게 라돈 피폭이 우발적이라고 해서 직무피폭으로 볼 수 없다고는 보지 않는다. 피폭원 자체는 천연적이고 만연한 것이지만 라돈을 피폭하는 그러한 장소에 피고용인을 있게 한 것은 고용주이므로 고용주가 방호에 책임이 있다. 다만, 라돈의 경우 그 만연성을 고려하여 위에서도 언급했듯이 국가에서 전형적인 수준까지는 방호를 배제하거나 규제요건을 면제함으로써 과도한 관리를 피하는 것이 원론적이고 일관된 접근이다. 이 같은 배제는 다른 분야 방사선 관리에서 보편적인 백그라운드 방사선에 의한 피폭을 배제하는 것과 같은 원리이다. 즉, 여기서 말하는 백그라운드에는 라돈피폭도 포함된다고 보면 된다.

업장에서는 라돈은 개인피폭 제어를 통해 관리되지 않고 거주자의 포괄적 방호를 보장하기 위한 건물이나 장소의 관리로 이루어진다.

(60) 라돈피폭이 계획피폭상황에 부수하는 경우(예: 원자력시설이나 병원 방사선과), ICRP는 실용적 접근을 권고한다. 소절3.3.5에서 설명했듯이 작업장에 대한 특정 차등접근에서 필요하다면 종사자의 라돈피폭은 전체 직무피폭의 일부가 되어야 한다.

(61) ICRP의 라돈피폭 관리 접근은 장소 유형에도 직접 관련된다. 간행물 65(ICRP, 1993)는 주택과 직장에서의 라돈피폭 접근을 차별한다. 사람들이 같은 지역에서도 주택, 직장, 복합용도 건물을 왕래함을 고려하여 이제 ICRP는 일반인피폭에 대한 요건을 적용하여 모든 건물에서 방호에 통합적인 차등접근을 권고한다. 나아가 ICRP는 정량적 기준으로는 참조준위를, 정성적 기준으로는 활동이나 시설의 목록을 근거로 하여 식별되는 특정 작업장에서는 직무피폭 요건을 적용함이 적절할 것으로 본다(소절 3.3.5 참조).

(62) 이러한 새로운 접근 때문에 ICRP는 간행물 103(ICRP, 2007, 제298항)에서 소개했던 '진입점entry point'이라는 용어를 더 이상 사용하지 않는다. 여기서 진입점이란 그 이상에서는 작업장에서 라돈피폭에 직무피폭 방호요건을 적용하는 농도를 말한다.

3.2. 방호전략의 정당화

(63) ICRP 방호체계에서 정당화 원칙은 선원중심 기본원칙 둘 중 하나이다(ICRP, 2007, 제203항). 이 원칙은 방사선 피폭상황의 모든 변경은 해로움보다 이로움이 많아야 한다는 것이다. 이는 새 선원을 도입하거나 기존피폭을 감축하거나 잠재피폭 위험을 줄이기 위한 행위로 야기되는 피해를 상회하기에 충분한 개인적 또는 사회적 이득을 달성해야 함을 의미한다.

(64) 라돈피폭은 보통 선원에 대한 직접 작용보다는 주로 그 피폭경로에 대한 조치로 관리될 수 있다. 이런 여건에서 라돈에 대한 방호전략 이행 여부를 의사결정 하는 데 정당화 원칙이 적용된다. 어떤 불이익을 주기 마련인 그런 결정은 그것이 해로움보다 이로움이 커야 한다는 관점에서 정당화되어야 한다(ICRP, 2007, 제207항). 사회에 전체적 이득을 확신하여 라돈 방호전략의 정당화를 판단할 책임은 정부나 당국에 있다. 한 국가에서 어떤 라돈 방호전략의 정당화 여부를 판단하기 위해 당국은 라돈농도 평가, 라돈유역지역 식별, 공중보건 우선순위, 그리고 경제사회적 인자와 같은 상황의 특성화를 필

요로 한다.

(65) ICRP는 국가 라돈 방호전략 이행의 광범한 정당화를 제공하는 다음과 같은 여러 주장이 있음을 고려하고 있다.

- 라돈은 방사선피폭의 주된 선원으로서 일반인 집단에서 흡연 다음으로 폐암을 유발한다.
- 높은 실내 농도를 예방하거나 완화하는 기법이 가용하므로 라돈피폭은 관리할 수 있다.
- 라돈 방호전략은 실내 공기질, 금연정책과 같은 다른 공중보건 정책에 긍정적 효과를 줄 수 있다. 라돈 농도를 줄이면 흡연의 보건영향을 완화하는 데 도움이 된다.

(66) 라돈이 일생 비흡연자에 비해 흡연자나 흡연이력자에게 훨씬 더 많이 폐암을 유발할 것으로 보이며 따라서 생애 비흡연자에게는 라돈이 가장 큰 폐암 원인일 것임을 의미한다(WHO, 2009). 초과상대위험은 흡연자와 비흡연자가 비슷하다. 실제에서 흡연자, 비흡연자, 간접흡연자, 흡연이력자 등을 구분하여 달리 라돈 이슈를 다루기는 어렵다. 예를 들어 어떤 건물 내에서 흡연을 제한할 수는 있지만 개인의 흡연상태에 따라 사람의 건물 출입을 제한할 수는 없을 것이다. 작업장 맥락에서 흡연자와 비흡연자의 차별은 윤리적, 사회적 문제를 초래할 수 있는데 이는 ICRP의 권한 밖이다. 라돈피폭 관리에 관한 ICRP 권고는 흡연자와 비흡연자를 구분하지 않는다.

3.3. 방호최적화

(67) 방호최적화는 방사선방호의 제2 기본원칙이다. 최적화 원칙은 정당화 원칙과 같이 선원중심이고 계획, 비상, 기존의 모든 피폭상황에 적용된다. 최적화 원칙에 따르면 피폭자 수, 개인선량 크기, (잠재)피폭 가능성²⁴⁾을 경제사회적 인자를 고려하여 합리적으로 가능한 한 낮게 유지해야 한다. 이는 방호수준이 여건에서 가능한 최선이어서, 해로움을 앞서는 이득의 여유를 극대화하는 것이다. 이 최적화 절차에서 심각하게 불평등한 결과를 피하기 위해 특정 선원으로부터 개인의 선량이나 위험에 제한(선량이나 위험 제약치 또는 참조준위)을 두어야 한다(ICRP, 2007, 제203항 및 제211항).

24) <역주> 원문은 순차적이라는 관점에서 ‘피폭가능성’을 제일 먼저 열거했는데 여기서 말하는 피폭가능성은 일상 피폭이 아니라 낮은 확률의 잠재피폭에 대한 것이다(ICRP 103의 본래 정의 참조). 따라서 본래 정의처럼 제일 뒤로 옮겼고 혼란이 없도록 잠재피폭 가능성임을 명시했다.

(68) 방호최적화 원칙의 이행은 성공적 방사선방호 프로그램의 중심에 있는 과정이다. 최적화는 피폭상황의 해당 속성을 고려하도록 신중하게 구성해야 한다. 나아가 피폭상황에 적합하다면 해당 이해당사자의 참여를 포함해야 한다. ICRP는 이 두 요소가 최적화 과정의 중요한 성분으로 생각한다(ICRP, 2006b, 제23항)

3.3.1. 참조준위

(69) 간행물 65(ICRP, 1993)에서 ICRP는 주택에서 라돈에 대한 어떤 치유 수단은 계속 되는 연간 유효선량 10 mSv 이상에서는 거의 항상 정당화된다고 했다. 주택에서 조치 준위와 같은 수준에 있는 작업장에 대해 개입을 위한 조치준위를 채택하는 것은 논리적이라고 ICRP는 생각한다. 그렇다면 단순한 치유수단에 대해서는 비교적 낮은 값이 고려될 수 있는데 ICRP는 주택과 직장에서 개입을 위한 조치준위를 채택하는 근거로 약 3-10 mSv 범위를 사용할 것을 권고한다.

(70) 간행물 103에서 ICRP는 조치준위 개념을 폐기하고 대신 최적화 원칙과 연계한 참조준위 개념을 도입했다. 참조준위는 비상피폭상황과 기존피폭상황에서 어떤 준위를 제시하여 그 아래에서 모든 선량을 경제사회적 인자를 고려하여 합리적 최소인 수준까지 감축함을 목표로 하는 것이다. 또, 참조준위는 그 이상으로 피폭이 일어나게 하는 것은 적절치 않다고 판단하는 수준이다.

(71) 조치준위 개념 대신 참조준위 개념을 사용하면 최적화가 그 준위 위뿐만 아니라 필요에 따라 참조준위 아래에서도 적용되어야 한다는 것이 차이이다. 참조준위가 '안전'과 '위험'의 경계선을 의미하지 않으며 사람들의 관련 보건위험에 정성적 변화를 반영하지도 않음에 유의해야 한다.

(72) 간행물 103에 따르면 참조준위로 선정된 값은 고려하는 피폭상황의 여건에 의존한다(ICRP, 2007, 제234항). 적절한 값의 선정을 안내하기 위해 ICRP는 위험의 연속선에서(문턱 없는 선형 모델) 어떤 사람이 용납할 의사가 있는 위험은 피폭상황에 의존한다는 사실을 반영하여 하나의 선량 잣대(ICRP, 2007, 표5)를 규정했다. 이 잣대는 선원의 제어성, 상황으로부터 개인이나 사회의 이득, 정보제공, 훈련, 선량계측 및 의학적 조사와 같은 피폭상황 특성에 따라 달라지는 조치 필요성의 크고 작음을 반영하여 세 밴드로 나뉜다. 수치로 말하면 세 밴드는 급성 선량이나 연간 선량으로 <1 mSv, 1-20 mSv, 그리고 20-100 mSv이다.

(73) 간행물 103에 따르면 기존피폭상황에 대한 참조준위는 전형적으로 1-20 mSv 밴드

에 설정해야 한다. 이 밴드는 개인이 피폭상황으로부터 직접 이득을 얻고, 선원에서 또는 피폭경로에 조치로써 피폭이 제어되며, 가능하면 사람들에게 일반 정보가 가용해 스스로 선량을 줄일 수 있어야 한다. 일반적으로 라돈피폭은 선원에서 제어할 수 없지만 (일부에서는 예외) 불합리하게 파괴적이 아닌 예방이나 완화 조치를 통해 많은 피폭경로를 관리할 수는 있다. 사람들은 실내에 있음으로써 명백한 이득을 얻는다. 다른 건물이나 다른 지역으로 이사하는 것에 비해 하나의 건물에 계속 거주하는 데는 이득이 있다.

(74) 간행물 103에서 ICRP는 개인 참조준위로서 ICRP 65(1993)에서 채택한 상한값 유효선량 10 mSv를 유지하였다. 이 값은 1-20 mSv 밴드의 중점으로 간행물 103에서 제시한 이론적 근거와 일관된다. 지속성과 실용성을 위해 ICRP는 10 mSv y⁻¹ 수준의 참조준위를 계속 권고한다. 또, ICRP는 측정가능한 양인 실내 라돈 농도(Bq m⁻³ 단위)로 주어지는 유도참조준위derived reference level 사용을 권고한다.

3.3.2. 라돈 유도참조준위

(75) 라돈선언(ICRP, 2010)에서 ICRP는 역학적 고려를 바탕으로 주택의 라돈가스에 대한 유도참조준위를 600 Bq m⁻³(2007년 권고로 발간된)로부터 300 Bq m⁻³로 낮췄다. ICRP는 주택에서 라돈가스에 대한 유도참조준위로 계속 300 Bq m⁻³을 권고한다. 300 Bq m⁻³와 고유하게 연계되는 연간 선량 값은 없지만 이 수준 라돈으로 유발되는 연간 선량의 대부분은 ICRP가 해당 기존피폭상황에 적합할 것으로 확인한 범위(1-20 mSv y⁻¹)에 들어간다.

(76) ‘라돈 핸드북’에서 WHO는 주택에 대한 국가 참조준위로 100 Bq m⁻³가 공중보건 관점에서 정당화된다고 설명했지만 이 준위를 이행하기 어려운 나라가 많다(WHO, 2009). 농도 값 300 Bq m⁻³은 최근에 개정된 국제기본안전표준(IAEA, FAO, ILO, OECD/NEA, PAHO, WHO, 2011)과 EU 기본안전표준(EURATOM, 2014)와 같은 표준에 이미 도입되어 있다. 간행물 103(제295항)에서 설명했듯이 한 국가에서 지배적인 경제사회적 여건을 고려하여 국가의 유도참조준위를 수립하고 방호최적화 과정에 적용하는 것은 다른 관리되는 선원에서와 마찬가지로 적절한 국가 당국의 책임이다. ICRP는 국가 당국에게 국가의 유도참조준위를 100-300 Bq m⁻³ 범위에서 합리적으로 낮게 설정하기를 강력히 권고한다. 유도참조준위는 건물이나 장소에서 연간 평균농도에 연계됨에 유의하는 것이 중요하다. 나아가 라돈피폭으로 인한 폐암의 절대위험은 비흡연자보다 흡연자가 크게 높지만 라돈에 대한 방호를 위한 ICRP 권고는 흡연자와 비흡연자를 구분하지 않는다.

(77) 사람들은 한 지역에서 여기저기를 이동하므로 국가 당국은 라돈 방호전략을 여러 장소에 대해 통합적이고 일관되게 수립하고 이행해야 한다. 결과적으로 ICRP는 선형적으로 주택, 일반인과 종사자 모두 사용하는 복합건물(예: 학교, 병원, 상점, 극장), 나아가 라돈피폭이 직무피폭으로 간주되지 않을 때는 일반인 출입이 없는 작업장(예: 사무실 건물, 전형적 일터)에서 동일한 유도참조준위를 사용할 것을 권고한다.

3.3.3. 최적화 과정

(78) 간행물 101 제1부(ICRP, 2006b, 제22항)에서 “여건에서 최선의 방호를 제공하기 위해 선량 제한 아래서 최적화 과정이 이행되어야 하는데 이는 지속적이고 순환적인 과정으로서 조치 필요를 식별하기 위한 피폭상황의 평가, 피폭을 합리적으로 낮게 유지하기 위한 가능한 방호방안의 식별, 여건에서 최선 방안의 선정, 효과적인 최적화 프로그램을 통해 선정 방안의 이행, 여건이 시정 방호조치의 이행을 요구하는지를 평가하기 위해 피폭상황의 정기적 검토 등이 된다.”

(79) 최적화와 관련하여 ICRP는 예상되는 피폭을 여건에서 합리적으로 달성할 수 있는 한 낮은 수준으로 유지함을 겨누는 예방과, 잔여선량²⁵⁾을 합리적으로 달성할 수 있는 수준까지 낮춤을 겨누는 완화를 구분해야 한다고 본다(그림3.1 참조). 라돈피폭에서는 예방은 신축건물에서 높은 실내 라돈농도를 막기 위한 건축코드의 적용에 초점을 맞추며, 완화는 기존 건물에서 관리되는 환기와 같은 기법을 사용해 높은 라돈농도를 감축하는데 초점을 둔다.

(80) 최적화 과정의 목적은 일반인 집단의 전반적 위험과 평등을 위해 최대 피폭자 즉, 개인피폭 분포의 상단 측에 있는 사람의 개인 위험을 줄이는 것이다(그림3.2 참조). 두 경우에서 최적화 과정은 건물이나 장소의 관리를 포함하며, 주위 실내공기의 라돈농도를 국가 유도참조준위 아래에서 합리적으로 달성 가능한 한 낮춰야 한다. 주어진 건물에서 관리조치를 성공적으로 이행한 후에는 유일한 계속 요건은 완화계통의 정기적 점검과 유지, 그리고 라돈 준위가 낮게 유지됨을 확인하기 위한 주기적 감시를 수행하는 것이다.

(81) 일반인 집단의 라돈 위험을 유의하게 낮추는 목표의 시간대는 수년이 아니라 수십 년이 된다.

25) <역주> 잔여선량: 기존피폭상황에서 개입을 통해 감축한 선량을 제하고 남은 선량을 말한다.

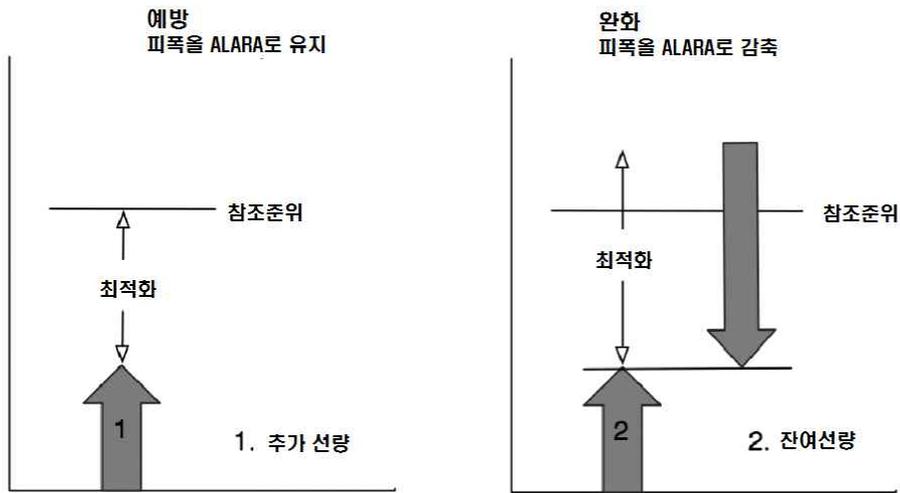


그림3.1. 최적화 원칙의 이행. ALARA는 경제사회적 인자를 고려하여 합리적으로 달성 가능한 최소이다.

(82) 건물과 장소에서 라돈피폭 방호최적화는 비용편익분석이나 다속성효용분석을 포함한 표준 최적화기법의 도움을 받을 수 있다. 기술적, 경제적, 사회적, 윤리적 속성과 같은 모든 속성을 고려해야 하는데, 평등에 대한 신중한 배려와 진행되고 있는 높은 피폭에도 특별한 주의가 필요하다. 그래서 상이한 피폭수준에서 기인 폐암 사례 수와 관련된 경제적 비용, 주어진 집단에 대한 예방/완화조치의 선택, 라돈 피폭을 줄이기 위한 그러한 조치의 비용을 비교할 수 있다(HPA, 2009; WHO, 2009). 그러한 분석은 신축건물이나 기존시설에서 라돈 수준을 낮추기 위한 수단의 비용효과에 대한 이해결정에 활용될 수 있다.

3.3.4. 국가 유도참조준위

(83) 앞서 말했듯이 다른 제어 가능한 선원과 마찬가지로 경제사회적 여건을 고려하여 실내 라돈농도($Bq\ m^{-3}$ 단위)에 대해 국가의 유도참조준위를 설정하고 그 나라의 방호 최적화에 적용하는 것은 해당 국가 당국의 책임이다. 소절3.3.2에서 밝혔듯이 ICRP는 $100-300\ Bq\ m^{-3}$ 범위에서 합리적으로 달성 가능한 한 낮게 국가 유도참조준위를 설정할 것을 강력히 권고한다.

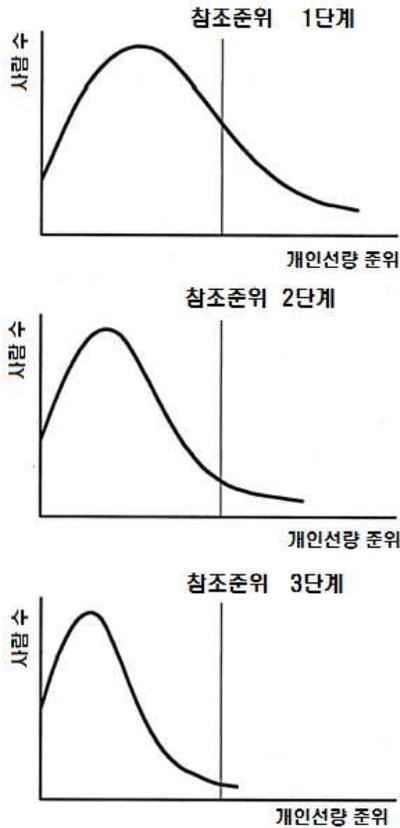


그림3.2. 기존피폭상황에서 참조준위의 적용.

(84) 첫 단계는 해당 국가에서 개인이나 일반인 집단의 피폭을 특성화하는 것으로서 기타 경제사회적 기준, 피폭을 예방하거나 완화함의 현실성까지 포함한다. 다음으로 해당 된다면 국제적 지침과 모범관행을 고려하고 국가나 지역의 속성과 선호를 고려한 일반적 최적화 과정에 의해 유도참조준위의 적절한 값을 선정할 수 있다. 라돈 평균농도와 분포와 같은 여러 인자를 고려해야 한다.

(85) 국가 유도참조준위가 설정되면 필요에 따라 라돈피폭의 현저한 감축을 위해 예방 또는 완화 조치를 추진해야 한다. 라돈 농도를 국가 유도참조준위 바로 아래까지만 감축하는 목표로 약간의 개선을 도모하는 것은 충분하지 않다. 신축건물에 대해서는 그 용도가 무엇이든 국가 유도참조준위를 적용해야 한다.

(86) 라돈피폭에 대한 국가 유도참조준위는 주기적으로 검토하여 그 적정성을 확인해야 한다.

3.3.5. 차등접근

(87) ICRP는 이제 라돈피폭 관리에 차등접근을 적용할 것을 권고한다. 이 접근은 라돈 방호전략이 해당 의사결정자로 하여금 측정, 필요할 경우 치유와 같은 자가 방호조치를 권장하는 프로그램에서부터 시작해야 한다. 이 과정은 정보제공, 조언, 보조, 현실적 지원, 그리고 필요하다면 보다 공식적인 요건을 통해 이행될 수 있다. 이러한 여러 조치의 집행 수준은 상황에 대한 법적 책임 정도와 국가 라돈 방호전략의 희망 수준에 따라야 한다.

(88) 라돈 방호전략은 라돈 거동과 위험에 대한 일반 정보, 대상 일반인의 관심 증대를 겨냥 캠페인, 측정과 치유 조치를 지원할 기술적, 재정적 조직에 대한 대책에 관한 조치 프로그램을 포함해야 한다(제4장 참조). 이러한 조치는 라돈 유의지역이나 점유도가 높은 건물에 우선하여 이행될 수 있다. 점유도가 높은 건물에는 다중이용시설 또는 주거용 처럼 많은 시간 거주하는 사람들이 있는 건물이 해당된다.

(89) 법적 책무가 있는 상황(예: 고용주/피고용인, 임대인/임차인, 건축주/매수자, 매도인/매수인, 점유도 높은 공공건물)에서는 일부 필수적 대책이 요구될 수 있다. 여건에서 권장기조 대책보다 필수적 대책이 효과적일 것으로 평가되는 경우에는 책임의 유형과 정도에 상응하는 필수적 대책이 적절할 수도 있다. 모범적 추적성, 기록유지, 유도참조 순위 준수를 보장하는 것이 그러한 대책이 될 수 있다.

(90) 라돈 방호전략은 그 요건이 책임 있는 사람이나 기관에게 가용한 수단과 상응해야 하고 위험 감축이라는 이득이 불이익을 초과함을 보장해야 한다. 예를 들면, 요건이 사람들의 초기 라돈측정을 막거나 재산 가치를 감소시키거나 과도한 절차를 요구하지 말아야 한다. 건물의 라돈농도가 높은 경우에는 그 대응에는 건물 사용자와 같은 해당 이해당사자와 소통을 포함해야 한다. 참조준위에 부합하지 못할 경우 상황에 순응하는 것이 필요하다. 예를 들면, 주택에 책임 있는 사람에게 필요한 것은 측정 결과를 제공하거나(예: 당국이나 구매자에게) 치유조치를 취할 책무가 될 수 있다.

(91) 대부분 직장에서는 종사자의 라돈피폭이 우발적이고 직무보다는 장소에 더 관계된다. ICRP 정의에 따르면 그러한 피폭은 직무피폭으로 간주되지 않는다.²⁶⁾ 이러한 고려는 고용주의 피고용인에 대한 법적책무를 침해하지는 않는다. 이러한 범주의 작업장에는

학교, 병원, 우체국, 교도소, 상점, 극장, 사무실 건물, 일반 공장 등과 같은 복합용도 건물이 포함된다.

(92) 라돈피폭이 우발적이어서 직무피폭으로 간주되지 않는 모든 작업장에서는 차등접근의 첫 단계는 국가 참조준위(300 Bq m^{-3} 이하)를 사용해 작업장을 관리하고 최적화 과정을 이행하는 것이다. 국가 라돈전략 이행의 일부로서 건물의 라돈피폭 관리를 위해 펼칠 수 있는 규제요건, 합의표준, 또는 다른 표준을 적용함으로써 피고용인에 대한 고용주의 법적책무를 행사해야 한다.

(93) 측정된 라돈농도와 유효선량 사이 관계는 평형인자, 노출시간 등 장소에 따라 크게 다를 수 있는 여러 변수에 의존한다. 따라서 어떤 장소에서 유도참조준위를 넘는다고 그것이 반드시 연간 선량 약 10 mSv 로 제시되는 선량 참조준위를 초과함을 의미하지는 않는다.

(94) 결과적으로 작업장에서 라돈농도를 유도참조준위 아래로 유지하는 데 어려움이 있다면 라돈 방호전략은 차등접근의 둘째 단계로서 보다 현실적 접근을 통해 추가 조사를 수행해야 한다. 이는 피폭상황의 실제 변수(실질 점유시간, 라돈자손 측정 등)를 고려하여 라돈피폭을 평가함을 의미한다. 이런 방법으로 산출된 선량을 10 mSv y^{-1} 인 선량 참조준위와 비교하여 추가 조치의 필요성이나 유형을 결정해야 한다. 이 단계에서 목표는 여전히 특정 개인에 대한 선량을 관리하는 것이 아니라 건물 사용자에 대한 전반적 방호를 보장하는 것이다.

(95) 라돈피폭을 줄이기 위한 모든 합리적 노력에도 불구하고 개인 선량이 10 mSv y^{-1} 이상에 머무른다면 종사자는 직무피폭을 받는 것으로 간주하여 직무피폭에 대해 수립된 해당 방사선방호 요건(피폭자 등록, 정보제공, 훈련, 선량[선량 또는 잠재알파에너지] 감시 및 기록, 건강감시)을 적용하여 관리해야 한다. 어떤 경우든 개인 연간 선량은 기존 피폭상황에 대해 설정한 참조준위 1-20 mSv 밴드의 상단 값을 넘지 않아야 한다. 이것이 차등접근의 셋째 단계이다.

(96) 일부 특정 작업장에서는 종사자는 작업 활동 때문에 부득이 상당한 피폭을 받고 그

26) <역주> 우발적이고 장소 때문이라는 것이 직무피폭으로부터 배제할 사유는 아니라고 역사는 본다. 어쨌든 고용주가 피고용인을 라돈피폭이 높은 장소에서 근무하게 만든 것이므로 직무피폭으로부터 방호를 제공해야 할 책임이 고용주에게 있다. 이 보고서는 우라늄 광산과 같은 일부 작업장만 직무피폭으로 간주한다고 설명하지만 라돈피폭 관점에서 우라늄 광산이든 구리 광산이든 다른 지하 작업장이든 방사선방호를 차별해야 할 근거는 없다.

라돈피폭이 깊숙히 그리고 명확히 작업과 관련되므로, 국가 당국이 종사자의 라돈피폭을 참조준위 위, 아래와 무관하게 직무피폭으로 결정할 수도 있다. 그러한 작업장의 목록(예: 광산이나 기타 지하 작업장, 온천)은 국가가 정해야 한다.

(97) 종사자 라돈피폭이 직무피폭으로 간주되는 작업장에서는 해당 장소를 식별할 것을 ICRP는 권고한다. 그러한 장소는 건물의 일부 구역, 개별 건물, 부지의 일정 구역일 수 있다. 그러한 구역 내에서는 해당 직무피폭 요건을 준수하고 최적화 원칙을 적용해야 한다. 국가 당국이 라돈 피폭상황을 계획피폭상황으로 간주한다면 직무피폭 선량한도를 통해 선량제한이 확보될 것이다(제3.4절 참조).

(98) ICRP 견해는 종사자의 라돈피폭을 직무피폭으로 간주 여부는 국가 당국이 결정해야 한다고 본다.²⁷⁾

3.4. 선량한도 적용

(99) 간행물 103(ICRP, 2007, 제203항)에 따르면 선량한도 적용 원칙이 ICRP 방호체계의 셋째 기본원칙이다. 이 원칙은 개인중심이며 계획피폭상황에만 적용된다. 선량한도 적용 원칙은 어떤 개인이 규제되는 선원으로부터 의료피폭²⁸⁾이 아닌 계획피폭상황으로 받는 총 선량이 ICRP가 권고하는 해당 선량한도를 초과하지 않아야 함을 의미한다. 일관성을 위해 종사자가 직무로 피폭하는 것으로 간주될 때 국가 당국이 처음부터 계획피폭상황으로 결정한 라돈 피폭상황에는 선량한도를 적용해야 한다. 직무피폭에 대해 ICRP가 권고하는 선량한도는 유효선량으로 지정된 5년에 평균하여 20 mSv y^{-1} (5년에 100 mSv)으로 하되 어떤 단일 년에 50 mSv를 초과하지 않아야 한다는 단서가 있다(ICRP, 2007, 제244항).

27) <역주> 역자의 견해는 모든 직무피폭은 계획피폭상황에서 일어난다. ICRP가 라돈 피폭의 만연성과 서로 다른 기존의 국가 정책들 때문에 그 분류를 국가 당국으로 위임한 것은 적절한 입장이 아니라고 본다. ICRP는 방호체계의 개념 틀에서 원론을 제시하되 국가 당국이 상황에 따라 변형된 형태를 취할 수는 있다.

28) <역주> 원문은 '환자의 의료피폭'으로 적고 있지만 의료피폭 일반에 해당하므로 '환자'를 삭제했다. ICRP가 의료피폭을 말할 때 버릇처럼 '환자'라는 수식어를 붙여 적는 것은 의료기관에서 종사자나 일반인이 받는 피폭을 의료피폭으로 혼동하는 것에 대한 노파심 때문이다.

3.5. 요약

(100) 여러 라돈 피폭상황의 관리에 대해 지금 권고하는 일반 접근을 그림3.3에 보였다.

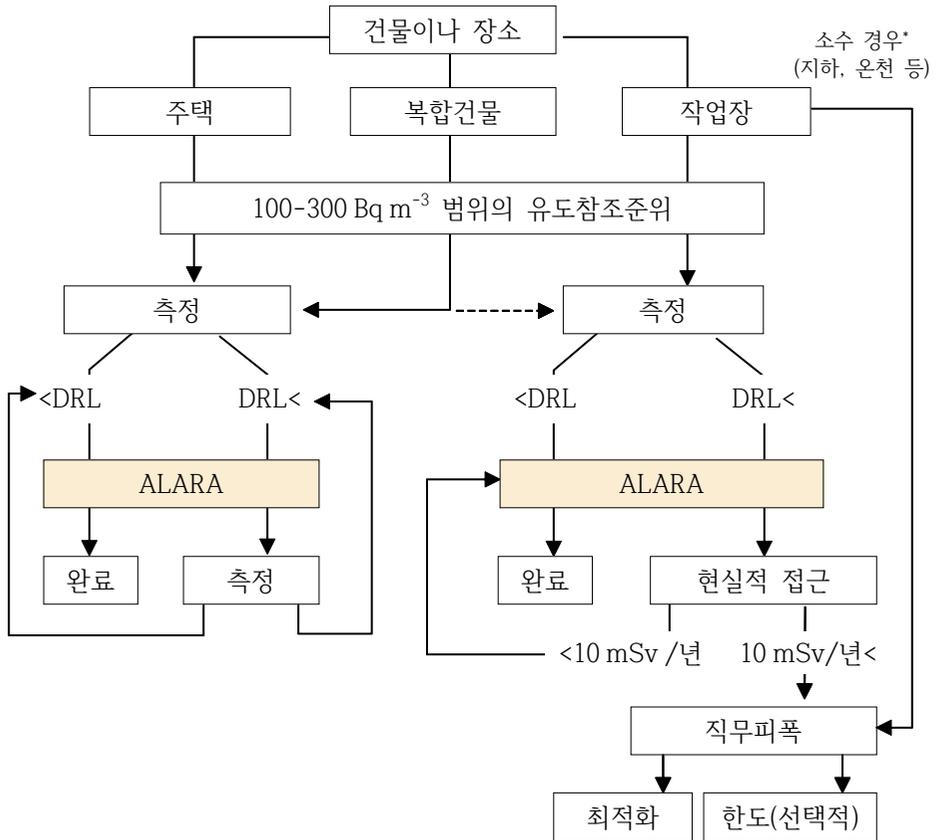


그림3.3. 라돈피폭 관리의 일반 접근. ALARA는 경제사회적 인자를 고려하여 합리적 범위에서 최소를 의미한다. DRL: 유도참조준위.

*처음부터 국가 당국이 라돈피폭을 직무피폭으로 간주하는 작업장.

제4장

방호전략의 이행

4.1. 국가 조치계획

(101) 국가 라돈 조치계획은 국가 당국이 해당 이해당사자 참여 아래 수립해야 한다. 목표는 최적화 원칙을 적용하여 실내 라돈피폭으로 인한 집단이나 개인의 위험을 감축하는 것이다.

(102) 조치계획은 명확한 하부구조와 골격을 설정하고 우선순위와 책임을 결정하고 국가의 라돈을 다루는 단계를 설명해야 한다. 피폭 여건에 따라 계획은 다양한 이해당사자를 확인해야 하는데 피폭하는 사람과 지원이나 조치를 취해야 하는 사람은 분명히 포함된다. 나아가 조치계획은 윤리문제-특히 책임과 관련된 문제-를 거둬야 하고 정보, 지침, 지원 및 지속성을 위한 조건도 제공해야 한다. 국가 라돈 조치계획은 시너지를 높이고 충돌을 피하기 위해 가능하면 실내 공기질이나 에너지 절약 등 건축에 관한 다른 전략과 부합하도록 통합되어야 한다.

(103) 국가 라돈조치계획의 이행은 국가, 지역, 지방의 영역이 다른(즉, 방사선방호, 공중보건, 노동, 토지계획, 주택, 건축 등) 당국들, 분야가 상이한 전문가(즉, 건축 및 기타 건물 전문가, 방사선방호 전문가, 공중보건 검사원, 의학전문가 등), 상이한 지원조직(즉, 전문가, 지원기관, 협회 등), 그리고 책임 있는 상이한 개인이나 기관들 사이 협력을 필요로 한다.

(104) 조치계획은 유인성 대책과 의무적 대책 모두를 포함할 수 있다. 라돈에 대한 조치를 취할 책임이 종종 상세한 최적화를 수행하지 못하는 사람에게 있으므로 조치계획은 적절한 정보를 제공함은 물론 그런 사람이 자가 측정, 적절한 측정 서비스 접촉, 건물의 바람직한 사용, 간단한 치유기법과 같은 자조 방호조치를 통해 라돈문제를 거눌 수 있도록 지원해야 한다.

(105) 국가 라돈 조사는 인정된 라돈 측정기와 프로토콜을 사용하여 수행하여 국민의 대표적 라돈피폭이 되는 라돈 농도분포를 구해야 한다. 국가 라돈 조사의 핵심 목표 둘

은 다음과 같다.

- 실내 라돈에 의한 집단의 평균 피폭과 피폭의 분포를 평가함. 이는 대표적으로 선발된 주택에 대해 장기간 측정하는 인구가중 조사로 달성할 수 있다.
- 유의하게 높은 실내 라돈농도가 발견될 것으로 보이는 지역(라돈유의지역)을 식별함. 이러한 지역의 스크리닝은 선정된 주택에 장기 라돈 측정을 통해 달성할 수 있다.

(106) 라돈 농도가 높은 주택이나 건물을 쉽게 찾거나 새 건물을 계획하거나 건축할 때 특별한 예방조치가 필요한 지역을 식별하는 데 라돈지도를 활용할 수 있다. 그러나 라돈 유의구역으로 의심되는 지역에서 선발된 건물에 대해 측정을 지속함으로써 조사에서 얻은 평가치를 재확인해야 한다.

(107) 라돈유의지역은 토양 중 라돈가스 농도를 이용해 간접적으로(건물 기초 아래 토양 중 라돈가스 농도와 가정에 라돈 사이 전이인자transfer factor가 정립되어 있다면), 또는 실내 라돈 측정을 통해 직접 식별할 수 있다. 유의지역 식별에 지질정보도 일부 활용될 수 있다. 그러나 국가에 따라 라돈유의지역에 대한 정의가 여럿 있다. 행정구역과 같은 수립된 지리적 구획을 사용하여 정의할 수도 있고 평균농도(즉, 산술평균, 기하분포일 경우 중앙값), 유도참조준위를 넘는 건물의 비율, 참조준위를 넘을 확률 등 다른 기준을 근거로 할 수도 있다. 라돈유의지역의 정의는 국가 라돈 조치계획에 명시되어야 한다.

(108) 확인된 라돈유의지역에서조차 건물의 라돈농도 분포는 꽤 넓고 대부분 건물에서는 농도가 낮을 수 있다. 역으로, 라돈유의지역이 아닌 곳에서도 확률은 낮지만 라돈농도가 높은 건물이 발견될 수 있다. 따라서 라돈유의지역 식별과 함께 높은 라돈농도와 관련될 수 있는 건물특성을 찾기 위한 노력도 어느 정도 필요하다.

(109) 국가 라돈 조치계획은 의무성 대책도 포함할 수 있는데 법적 책임이 있는 경우에는 특히 그러하다. 예를 들어 측정, 결과의 소통, 기록유지 및 유도참조준위 준수는 강제할 수 있다. 그러나 국가 라돈 조치계획은 측정 캠페인 조직, 적절하면 주택개량 프로그램에 재정지원이나 세제 혜택과 함께 라돈 방호를 포함하는 등, 유인 기반 지원 대책도 포함해야 한다. 이러한 대책은 정기적으로 반복되어야 한다.

(110) 국가 조치계획에는 일반인이 출입하는 건물을 배려해야 하는데 학교, 유치원, 유아원, 병원, 교도소와 같이 체류시간이 긴 건물에는 우선순위를 두어야 한다. 이러한 건물에 있는 사람은 선택권 없이 사용해야 하는 경우가 많고 일시적이긴 하지만 그러한 실내에서 그들 일과의 상당 부분을 보내야 한다. 사람들은 자신이 높은 라돈농도에 노출되는지를 알지 못할 수도 있고, 그들이 스스로 피폭수준을 감축할 입장에 있지도 않다.

(111) 종사자와 일반인이 공동으로 사용하는 건물에 대해서는 유도참조준위로 주택에 대한 것을 사용해야 한다. 하나의 구획된 장소에서 다른 유도참조준위를 사용하는 것은 권고하지 않는다.

(112) 나아가 예방조치나 치유조치는 유도참조준위를 준수하도록 이행되어야 한다. 라돈 농도의 감시와 기록유지가 요구될 수 있다. 건물을 사용하는 일반인과 건물에서 일하는 종사자에게 적절한 정보를 제공해야 한다. 이러한 유형의 건물에 책임이 있는 사람에게는 그들이 책임이나 의무를 다하기를 보장하기 위해 적절한 지원 대책도 제공해야 한다.

(113) 국가 조치계획은 국가 당국의 관리 아래 있는 작업장과 같이 일반인이 출입하는 건물에 적용할 수 있는 차등접근을 제공할 수 있다(소절3.3.5 참조).

4.2. 예방

(114) 라돈 방호전략은 미래의 라돈피폭을 관리하기 위한 예방조치를 포함해야 한다. 실내 장소, 거주하는 사람의 범주와 피폭상황의 유형과 무관하게 건물의 계획, 설계, 건축 단계에서 라돈피폭 이슈를 고려하여 라돈피폭을 다루는 것이 가능하다. 예방조치는 신축 건물에 대해서는 토지계획과 건축코드로, 기존 건물에 대해서는 개수를 통해 가능하다.

4.2.1. 지역 및 지방 토지계획

(115) 어떤 건물이 실내 라돈농도가 높을 잠재성은 매우 가변적인데 주로 지질학적 조건이 크게 변동하기 때문이다. 적어도 라돈유역지역에서는 지역/지방 토지계획 과정에서 이러한 가변성을 고려해야 한다. 지질 데이터, 토양 중 라돈 측정, 또는 기존 건물에서 실내 라돈 측정을 통해 지역 라돈지도를 만들 수 있다(제4.1절 참조). 라돈지도는 건물 내 또는 굴착 우물에서 급수되는 수중 라돈 농도 등 데이터로 보완되어야 한다.

(116) 라돈지도와 적절한 데이터는 해당 지방/지역/국가 당국, 건축 전문가, 주택 건설자 및 일반인에게 가용하여 건물의 계획, 건설 및 개축을 돕도록 해야 한다.

(117) 라돈지도가 유용한 수단이 되는 경우 토지계획은 필수이지만 그것이 확정적 결과를 제공할 것이라고 생각할 수는 없다. 어떤 건물의 라돈농도를 건물이 지어지기 전에는

정확히 예측할 수는 없지만 토양 측정과 같은 추가적 연구는 도움이 된다. 건물의 라돈 농도는 여러 인자에 의존하므로 완공되어 입주한 건물에서 측정만이 적절한 결과를 준다. 매우 예외적인 경우를 제외하고는, 라돈 때문에 건축이 금지된 지역을 보이는 것으로 라돈지도를 오해하는 결과가 되어서는 안 된다.

4.2.2. 건축규제와 기준

(118) 국가/지역/지방 당국은 신축 또는 개축하는 주택과 건물에 라돈 예방대책을 요구하는 건축 규정이나 기준을 이행할 것을 고려해야 한다. 건물 설계와 건설 단계에서 라돈 예방대책을 이행하는 것이 전체적 집단을 보호하는 데 가장 비용효과적으로 간주된다. 바르게 시행된다면 그러한 방법은 시간이 지나면서 국가 평균 라돈준위를 낮추고 국가 유도참조준위를 넘거나 근접하는 신축건물의 수를 줄일 것이다.

(119) 건축 규정이나 기준의 준수를 보장하는 것이 중요하다. 필요에 따라 품질보증 프로그램을 전문분야나 규제 차원에서 이행해야 한다. 이러한 건축 규정이나 기준만으로 신축건물의 라돈농도가 유도참조준위 미만일 것을 보장하지는 못함을 이해하는 것이 중요하다. 따라서 건물 소유주나 관리자가 건물의 라돈 상황을 아는 유일한 방법은 측정이라는 것을 이해하도록 해야 한다. 필요하다면 건축 후 라돈 완화대책을 고려할 수도 있다.

4.3. 완화

(120) 국가 라돈 방호전략은 밀폐된 공간이 있는 기존건물이나 장소에 대한 완화조치도 포함해야 한다. 거주하는 사람의 범주와 관계없이 가능한 한 건물 관리와 그 사용조건을 통해 피폭관리가 확보되어야 한다. 주된 단계는 측정과 필요에 따른 방호조치이다.

4.3.1. 라돈 측정기법과 프로토콜

(121) 주어진 건물이나 장소의 라돈 측정은 건물 점유도, 농도의 일일 및 계절 변화 등 여러 인자를 고려하여 거주자의 장기간 라돈피폭에 대한 믿을 만한 평가를 얻음을 목표로 해야 한다. 라돈 측정에서 일관성과 품질보증은 중요한 전제이다. 따라서 라돈측정 프로토콜을 수립하고 주기적으로 검토하여 필요에 따라 업데이트해야 한다. 표준화된 측정법이 개발되어 있다(ISO, 2012a-g).

(122) 이상적으로는 단기 측정보다는 1년 전체 계절에 걸쳐 장기간 측정하는 것이 좋다. 그러나 기간이 너무 길면 검출기를 이동시키거나 분실하는 등 어려움이 발생하므로 수주-수개월 정도의 단기간도 종종 사용된다. 믿을만한 측정은 연평균 농도를 대표해야 하고 계절에 대한 조정을 적용할 수도 있다. 측정은 중저가로 수행되어야 한다. 측정기기는 구하기 쉽고 명확한 사용지침이 있어야 한다. 완화조치 후에는 완화체계의 효과를 시험하기 위해 처음 측정과 같은 조건에서 재측정이 필요하다. 상황이 악화되지 않음을 확인하기 위해 주기적으로 측정을 반복해야 한다.

(123) 주택이나 일반 직장에서 라돈-222 자손을 측정할 때, 특별한 증거가 없다면 실내 라돈가스와 그 자손 사이에 일반 평형인자로 0.4를 가정하여 라돈 농도로부터 환산한다.

4.3.2. 라돈피폭 완화 방법과 상황에 따른 적용성

(124) 라돈피폭의 완화를 달성하는 주된 방법은 수동적 또는 능동적 기법으로 주거 공간으로 라돈의 유입을 막고 실내로부터 라돈을 빼내는 것이다.

(125) 핵심 라돈 완화기법은 건물 아래 토양으로부터 대류나 확산에 의한 라돈의 유입을 줄이는 것을 겨누어 다음에 초점을 맞춘다.

- 건물 외각의 기밀성을 강화한다(예: 라돈 유입로를 봉함).
- 여러 토양 감압기술을 사용하여 실내 거주공간과 옥외 토양 사이 기압차를 역전시킨다(예: 건물 아래 토양을 감압, 라돈 섹프 설치, 실내 가압 등).

(126) 외부 공기와 희석으로 실내 라돈농도를 줄이는 것도 주택에서 사용되는 또 다른 완화기법이다. 주거 공간의 환기를 관리하는 능동적 또는 피동적 방법으로 완화를 달성한다. 실내 환경의 난방이나 냉방에 균형 환기(balanced ventilation)를 사용할 수 있다. 균형 환기는 토양이나 외기 압력에 비해 실내 공기 조건을 가압하지도 감압하지도 않는다. 이러한 환기 기법은 건물 내로 들어온 라돈을 희석한다. 팬 동력 배기는 건물로 들어온 라돈을 희석하고 토양과 거주공간의 압력차를 줄인다. 어떤 해법은 일부 건물에는 적절하지 않을 수도 있고 모든 준위 라돈에 적합하지 않을 수도 있다. 여러 경우에 이들 기법의 조합으로 라돈농도를 가장 잘 줄일 수 있다.

(127) 관정 지하수를 용수원으로 사용하는 건물에서는 물이 잠재적 라돈 원천이 될 수 있다. 물이 실내 공기로 탈기하면(특히 물을 살수할 때) 일시적으로 상당한 피폭이 일어날 수도 있다. 물로부터 대기로 라돈 유입을 완화하는 기법은 물을 사용하기 앞서 탈기

하거나 활성탄 베드로 정수하는 것이다.

(128) 국가 또는 국제기구가 개발한 여러 완화기법에 대한 상세한 지침이 가용하다 (WHO, 2009).

4.4. 건축재

(129) 건축재는 일반적으로 라돈피폭에서 부차적 중요도를 갖지만 라돈-222 선원으로서는 무시할 수 없는 특수한 경우가 있을 수 있다. 나아가 일반적으로 건축재(콘크리트, 벽돌 등) 중 토륨 농도는 실내 공기 중 라돈-220의 유일한 선원이 된다. 따라서 벽, 천장 및 바닥 표면 드레싱용 건축재(석고 등) 중 토륨 농도의 관리로 건물 내 높은 라돈-220 농도 확률을 감소시킬 수 있다. 건축재 영향을 예방하거나 최적화하기 위해 라듐-226과 토륨-232 준위가 낮은 물질을 선호해야 한다. 특정 건축재가 내는 감마선에 따른 위험을 특성화하고 그 사용 조건을 명시하기 위해 벤치마크 체계가 수립되었다(EC, 1999). 일반적으로 감마 방사선에 대해 건축재를 관리하면 라돈 방출은 유도참조준위와 비교할 때 유의한 실내 라돈농도를 유발하지 않는다. 많은 양의 라돈-220이나 라돈-222을 방출하는 건축재의 사용은 정당화를 필요로 할 것이다.

4.5. 종사자 보호

(130) 종사자의 라돈피폭이 직무피폭으로 간주되지 않는 작업장에서는 종사자를 방사선 보호 목적의 일반인과 같은 방법으로 다룬다. 그러나 작업장에 일반인이 접근할 수 없다면(또는 일반인 접근이 매우 제한적 시간에만 있다면) 차등접근 적용의 일부로 어떤 특정한 대책이나 보완적 대책을 최적화 과정에서 수립할 수 있다. 다음은 그러한 대책이 될 수 있다.

- 구체적 측정 프로토콜(예: 종사자가 있는 시간과 장소에서 측정)
- 선량 참조준위 값으로 10 mSv/년을 유지할 때 점유시간, 평형인자와 같은 실질 피폭인자에 따른 유도참조준위의 구체적 사용
- 작업조건의 조정(예: 특정 건물에 점유시간 제한에 의한)
- 측정, 그 결과의 소통, 기록유지 및 참조준위 준수의 이행과 관련된 요건.

(131) 그러한 구체적 대책을 이행하기 위해서는 국가 당국의 감독과 함께 외부 전문가

가 필요할 수도 있다.

(132) 종사자 라돈피폭이 직무피폭으로 간주되는 작업장에서는 운영 관리자와 국가 당국은 어떤 요건을 만족해야 하는지를 결정할 필요가 있을 것이다. 일반적으로 라돈피폭과 관련된 요건은 다음과 같다.

- 점유시간을 고려한 적절한 참조준위를 유효선량, 라돈농도 또는 잠재알파에너지 항으로 설정
- 고려하는 작업 구역의 결정. 비록 관리구역이나 감시구역으로 분류는 잘 맞지 않지만 직무피폭이 일어날 수 있는 구역을 결정하고 필요에 따라 출입을 관리하는 것은 여전히 중요하다.
- 종사자에 대한 적절한 정보 및 지침 제공과 훈련
- 예외적인 경우 개인방호용구의 사용
- 개인감시, 집단감시를 통한 피폭감시 또는 직접 감시가 적절하지 않거나 불가하면 작업장 감시로부터 추론
- 피폭기록
- 종사자 건강감시
- 방사선방호문화 조장
- 참조준위 준수. 이는 특정 작업 위치에서 시간 추적과 결합한 작업장 지역감시를 필요로 한다. 개인 라돈감시기를 개인별 또는 그룹 평균 개념으로 사용할 수 있다. 어느 경우든 선량이 20 mSv/년을 초과하지 않아야 한다.

4.6. 우라늄 광산업에서 라돈으로부터 종사자 보호

(133) 국가 당국은 직무로 받는 라돈피폭의 일부를 당초부터 계획피폭상황으로 관리하기로 결정할 수도 있다. 특히 이에 해당하는 것이 우라늄광산 산업이다. 이 선택에 영향을 미치는 인자에는 광산에서 감마 방사선 외부피폭, 방사성 먼지의 흡입이나 취식 등 다른 선원에 의한 피폭이 포함된다. 장수명 방사성 먼지는 채광이나 초기 정련 과정의 우라늄 광 먼지, 정련된 우라늄 제품으로 보통인 산화우라늄 분말일 수 있다. 또한 공정에 따라 다른 우라늄 붕괴시리즈 핵종에 의한 피폭 잠재성도 있다. 우라늄 광산에서는 라돈자손이 주된 방사선 피폭원일 것이다. 우라늄이나 토륨 광산에서 라돈피폭에 대한 종사자 방호는 운영관리자의 책임으로 간주된다.

(134) ICRP 체계에 따르면 계획피폭상황에서 피폭은 선량한도 적용과 함께 선량제약치

를 이용한 최적화 과정에 의해 관리되어야 한다. 이상적으로는 선량제약치를 운영의 설계단계에서 설정해야 한다. 방사성 광상의 속성은 매우 가변적인데 이는 자원을 성공적으로 추출하려면 여러 채광기법이나 접근이 필요함을 의미한다. 결과적으로 선량제약치나 최적화 과정의 결과는 광산마다 달라지고 때로는 물리적 조건이 바뀌므로 시간에 따라서도 변할 것이다.

(135) 우라늄광산에서 라돈과 자손에 의한 직무피폭을 관리하는 데 적용하는 원칙은 계획피폭상황에 있는 다른 작업장에서 적용하는 것과 유사하다.²⁹⁾ 관리는 작업장의 신중한 설계와 라돈피폭 관리와 제한을 위한 적절한 공학적 관리의 사용부터 시작한다. 우라늄광산에서는 때로는 라돈과 자손의 피폭이 매우 가변적이거나 높을 수 있는 잠재성이 증가하는데 선원향의 상대적 강도와 기타 물리적 제약(예: 지하 작업) 때문이다. 이러한 경우에는 감시 프로그램이 작업장 조건이나 종사자 선량을 적절히 평가하는지를 확인하기 위해 감시계획 세부에도 주의를 기울여야 한다. 라돈농도가 높거나 매우 변동이 심한 상황에서는 실시간 감시기나 개인선량계와 같은 전략도 고려해야 한다. 역으로 라돈과 자손 농도가 낮고 안정적인 경우는 주기적인 작업장 감시로 충분할 것이다. 일반적으로 작업장에 대한 능동적 환기는 라돈 가스 농도가 평형인자 근사화 문제와 함께 라돈자손 피폭을 평가함에 믿을 만하지 않음을 의미한다. 결과적으로 라돈자손 농도(즉, 잠재알파 에너지 농도)를 측정해야 한다.

(136) 라돈자손 피폭을 선량으로 환산하는 데는 선량환산인자 사용이 필요하다. 과거에는(ICRP, 1993), 라돈자손 선량환산인자는 역학연구에 근거를 두었다. ICRP는 이제 라돈자손 피폭에 따른 유효선량계수를 ICRP의 생물역동학 및 선량계측 기준모델과 명시된 방사선가중치 및 조직가중치를 사용하여 계산하기를 제안한다(ICRP, 2010). 새 선량계수는 역학에 근거한 선량환산합의를 대체할 것이다.

4.7. 이해당사자 상호작용

(137) 국가 라돈전략에 대한 지원을 확보하는 첫 단계는 주의를 끄는 것인데 많은 나라에서 이것이 취약하게 나타난다. 라돈이 어떻게 밀폐된 공간에 갇히며 관련된 위험, 높은 농도를 어떻게 식별하고 완화할 것인지 등 라돈에 관한 용이하게 가용한 정보를 일반 시민에게 알려야 한다. 그 주된 통로는 선출직 대표자, 행정부 공무원, 주택 소유자,

29) <역주> ‘유사한’ 것이 아니라 ‘같아야’ 한다. 애매한 표현은 독자에게 혼란을 초래할 수 있다.

지주, 고용주, 그리고 어린 학생 등이 된다³⁰⁾.

(138) 라돈 이슈에 대한 전문가 훈련은 권고된 예방 또는 완화 수단의 바른 설계, 계획, 설치를 확보하는데 도움이 될 것이다. 라돈농도가 유도참조준위를 넘거나 근접하는 주택 소유주나 시설 소유주가 라돈 예방 및 완화 제도에 접근할 수 있도록 전문가 훈련 프로그램은 국가 라돈 조치계획의 일부가 되어야 한다. 관심있는 다른 전문가(예: 보건, 부동산)에게도 적절한 정보와 훈련이 제공되어야 한다.

(139) 폐암 위험 평가에서 라돈과 흡연의 시너지가 입증되어 있으므로 적어도 경고 수준에서는 라돈 감축과 금연정책 사이에 연계가 정당화된다.

(140) 국가 라돈 조치계획은 예방조치나 완화조치의 비용과 효과에 대한 정보 대책도 포함해야 한다. 여러 수준(예: 지방, 지역, 국가)에서 정기적으로 데이터를 수집하여 여러 이해당사자에게 가용하게 만들어야 한다.

30) <역주> 학생을 제외한 사람들은 의무와 관련된 사람이며 학생은 쉽게 집중하는 장점이 있어 정보전달 효율이 높다.

제5장 결론

(141) 이 보고서의 목적은 방사선방호체계의 진화(ICRP, 2006b, 2007), 라돈피폭으로 인한 보건 위험에 대한 지식의 발전(UNSCEAR, 2009; WHO, 2009; ICRP 2010), 그리고 근년에 여러 국가나 국제기구에서 얻은 경험을 고려하여 라돈피폭에 대한 방사선방호 지침을 업데이트하는 것이다.

(142) 동일한 주제에 대한 이전 권고(ICRP, 1993, 2007)에서 ICRP는 주택과 작업장을 구분하여 전략을 권고하였다. 이제 ICRP는 그 목적과 거주 상태가 어떠한 모든 건물에서 라돈 방호에 통합접근을 권고한다. 건물에서 방호전략은 국가 조치계획을 통해 이행되는데 공기 중 농도 향으로 설정되는 유도참조준위 아래에서 최적화 원칙의 적용을 바탕으로 한다. ICRP는 국가 당국이 경제사회적 인자를 고려하여 100-300 Bq m⁻³ 범위에서 가능한 한 낮은 유도참조준위를 설정하기를 권장한다.

(143) 피폭상황에 따라 차등화 하는 이 새로운 접근의 목표는 적어도 라돈유역지역에서는 공중보건 관점에서 모든 건물(주택, 복합용도 건물, 작업장 일반)을 포괄하는 것이다. ICRP는 모든 유형의 건물에서 주로 건축기준을 통한 예방조치의 역할을 강조한다.

(144) 이 보고서는 종사자의 라돈피폭이 직무피폭으로 간주되는 특정 라돈 피폭상황의 관리를 위한 지침을 제공한다. 여기에는 참조준위 준수가 달성되기 어렵거나 국가 당국이 설정한 활동이나 시설의 목록에 포함된 경우를 포함한다. 그러면 방호전략은 최적화 원칙과 직무피폭 해당 요건의 적용을 바탕으로 한다. 국가 당국이 라돈 피폭상황을 계획 피폭상황으로 관리해야 한다고 생각하면 직무피폭 선량한도도 적용된다.

(145) 대부분 라돈 피폭상황에 대해 단순하고 통합적인 차등접근을 권고함으로써 ICRP는 세계적으로 주된 일반인 피폭원인 라돈피폭의 감축을 기대한다.

참고문헌

- Cothorn, C.R., Smith, Jr, J.E., 1987. Environmental Radon. Plenum Press, New York, pp. 98-107.
- Darby, S., Hill, D., Auvinen, A., et al., 2005. Radon in homes and risk of lung cancer: collaborative analysis of individual data from 13 European case-control studies. *BMJ* 330, 223-227.
- Darby, S., Hill, D., Deo, H., et al., 2006. Residential radon and lung cancer - detailed results of a collaborative analysis of individual data on 7148 persons with lung cancer and 14,208 persons without lung cancer from 13 epidemiological studies in Europe. *Scand. J. Work Environ. Health* 32 (Suppl. 1), 1-84.
- EC, 1999. Radiological Protection Principles Concerning the Natural Radioactivity of Building Materials. Radiation Protection 112. European Commission, Luxembourg.
- EPA, 1999. Proposed Methodology for Assessing Risks from Indoor Radon Based on BEIR VI. Office of Radiation and Indoor Air, United States Environmental Protection Agency, Washington, DC.
- EPA, 2003. Assessment of Risks from 1106 Radon in Homes. Publication EPA 402-R-1107 03-003. Office of Air and Radiation, United States Environmental Protection Agency, Washington, DC.
- EURATOM, 2014. Council Directive 2013/59/EURATOM of 5 December 2013 laying down basic safety standards for the protection against the dangers arising from exposure to ionising radiation. *Off. J. Eur. Union* L 31, 1-73. Available at: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2014:013:0001:0073:EN:PDF> (last accessed 3 May 2014).
- Haerting, F.H., Hesse, W., 1879. Der Lungenkrebs, die Bergkrankheit in den Schneeberger Gruben. *V. gericht. Med. Öff. Gesund Wes.* 30, 296-309 and 31, 102-132, 313-337 (in German with English abstract).
- HPA, 2009. Radon and Public Health. Report of the Independent Advisory Group on Ionising Radiation. Health Protection Agency, Chilton.
- Hultqvist, B., 1956. Studies on Naturally Occurring Ionising Radiations. Thesis. *K. svenska VetenskAkad. Handl.* 6(3). Almqvist u. Wiksells Boktryckeri, Stockholm.

- IAEA, FAO, ILO, OECD/NEA, PAHO, UNEP, WHO, 2011. Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards - Interim Edition.
- IAEA Safety Standards Series No. GSR Part 3 (Interim). International Atomic Energy Agency, Vienna. Available at: http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/p1531interim_web.pdf (last accessed 3 May 2014).
- IARC, 1988. Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risk to Humans: Man-made Fibres and Radon. IARC Vol. 43. International Agency for Research on Cancer, Lyon.
- 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, 2006a. Human alimentary tract model for radiological protection. ICRP Publication 100. Ann. ICRP 36(1/2).
- ICRP, 2006b. The optimisation of radiological protection: broadening the process. ICRP Publication 101, Part 2. Ann. ICRP 36(3).
- ICRP, 2007. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103. Ann. ICRP 37(2-4).
- ICRP, 2009. 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, 2010. Lung cancer risk from radon and progeny and Statement on Radon. ICRP Publication 115. Ann. ICRP 40(1).
- ICRP, 2014a. Occupational intakes of radionuclides Part 1. Ann. ICRP (in press).
- ICRP, 2014b. Occupational intakes of radionuclides Part 3. Ann. ICRP (in preparation).
- ISO, 2012a. 11665 - Part 1: Radon-222 and its Short-lived Decay Products in the Atmospheric Environment: their Origins and Measurement Methods. International Standardisation Organisation, Geneva.
- ISO, 2012b. 11665 - Part 2: Radon-222: Integrated Measurement Methods for the Determination of the Average Potential Alpha Energy Concentration of Short-lived Radon Decay Products in the Atmospheric Environment. International Standardisation Organisation, Geneva.
- ISO, 2012c. 11665 - Part 3: Radon-222: Spot Measurement Methods of the

- Potential Alpha Energy Concentration of Short-lived Radon Decay Products in the Atmospheric Environment. International Standardisation Organisation, Geneva.
- ISO, 2012d. 11665 - Part 4: Radon-222: Integrated Measurement Methods for the Determination of the Average Radon Activity Concentration in the Atmospheric Environment Using Passive Sampling and Delayed Analysis. International Standardisation Organisation, Geneva.
- ISO, 2012e. 11665 - Part 5: Radon-222: Continuous Measurement Methods of Radon Activity Concentration in the Atmospheric Environment. International Standardisation Organisation, Geneva.
- ISO, 2012f. 11665 - Part 6: Radon-222: Spot Measurement Methods of Radon Activity Concentration in the Atmospheric Environment. International Standardisation Organisation, Geneva.
- ISO, 2012g. 11665 - Part 7: Radon-222: Methods for Estimation of Surface Exhalation Rate by Accumulation Method in the Environment. International Standardisation Organisation, Geneva.
- Krewski, D., Lubin, J.H., Zielinski, J.M., et al., 2006. A combined analysis of North American case-control studies of residential radon and lung cancer. *J. Toxicol. Environ. Health Part A* 69, 533-597.
- Lubin, J.H., Tomasek, L., Edling, C., et al., 1997. Estimating lung cancer mortality from residential radon using data for low exposures of miners. *Radiat. Res.* 147, 126-134.
- Lubin, J.H., Wang, Z.Y., Boice, Jr, J.D., et al., 2004. Risk of lung cancer and residential radon in China: pooled results of two studies. *Int. J. Cancer* 109, 132-137.
- Ludewig, P., Lorenzer, E., 1924. Untersuchungen der Grubenluft in den Schneeberger Gruben auf den Gehalt von Radium-Emanation. *Z. Phys.* 22, 178-185.
- Marsh, J.W., Bailey, M.R., 2013. A review of lung-to-blood absorption rates for radon progeny. *Radiat. Prot. Dosim.* 157, 499-514.
- Marsh, J.W., Harrison, J.D., Laurier, D., et al., 2010. Dose conversion factors for radon: recent developments. *Health Phys.* 99, 511-516.
- NRC, 1998. Health Effects of Exposure to Radon. BEIR VI Report. National Research Council, Washington, DC.
- Skeppström, K., Olofsson, B., 2007. Uranium and radon in groundwater: an overview of the problem. *Eur. Water* 17/18, 51-62.
- STUK, 2008. Indoor Radon Mitigation. STUK-A229. Radiation and Nuclear

Safety Authority (STUK), Helsinki (in Finnish).

Tomášek, L., Rogel, A., Tirmarche, M., et al., 2008. Lung cancer in French and Czech uranium miners - risk at low exposure rates and modifying effects of time since exposure and age at exposure. *Radiat. Res.* 169, 125-137.

UNSCEAR, 2000. UNSCEAR 2000 Report: Annex B. Exposure from Natural Radiation Sources. United Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, New York.

UNSCEAR, 2009. UNSCEAR 2006 Report: Annex E: Source-to-effects Assessment for Radon in Homes and Workplaces. United Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, New York.

WHO, 1986. Indoor Air Quality Research: Report on a WHO Meeting, Stockholm, 27-31 August 1984. World Health Organization, Copenhagen.

WHO, 2009. WHO Handbook on Indoor Radon. A Public Health Perspective. World Health Organization, Geneva.

Winkler, R., Ruckerbauer, F., Bunzl, K., 2001. Radon concentration in soil gas: a comparison of the variability resulting from different methods, spatial heterogeneity and seasonal fluctuations. *Sci. Total Environ.* 272, 273-282.