



방사선 방호의 기반 : 무엇이 변하는가?¹⁾

이 재 기

한양대학교 원자시스템공학과 교수

방사선 방호는 역동적이다. 위로는 방호의 개념과 틀에서부터 아래로는 사용하는 물리량과 수치 기준에 이르기까지 무엇 하나 불변인 것이 없어 보인다. 이와 같은 변화는 방사선의 작용과 생물보건학적 영향에 대한 우리 과학적 지식의 경고도도 관계되지만 방사선 방호가 본질적으로 과학의 문제만이 아니라 사회의 역동성과 연계되어 있기 때문이다. 방사선 위해도와 방호 체계에 상당한 변화가 있어 논의가 많았던 국제방사선방호위원회(ICRP)의 1990년 기본 권고(ICRP 60)가 발간된 지 10년이 경과한 지난 2000년경부터 기본 권고의 개정 방향을 두고 많은 제안과 논의가 계속 되어 왔다. '무엇이, 어떻게, 왜 바뀌는가?' 늘 따르는 의문도 있다. '우리가 바른 길에서 있는가?'

선량의 변화

방사선은 에너지의 한 형태이므로 에너지가 견고한 물리량이라면 방사선량도 견고해야 한다. 방사선량에 관련된 기본 양인 플루언스나 흡수선량은 대체로 그러하다.

흡수선량은 물질 단위 질량 당 흡수된 방사선의 에너지 양이므로 그 선량점을 한정함에 따르는 통계적 불확실성을 제외하고는 안정적인 양이다. 그러나 방사선질이 다르므로써 생물학적 작용의 상대적 크기가 차이가 있고 그 차이를 물리량에

병합하려는 시도로 인해 불확실성이 증가한다. 동일한 물리적 작용에 대한 생물학적 반응이 가변적이라는 속성이 개입되기 때문이다.

서로 다른 선질의 방사선에 의한 선량을 공통된 척도로 나타내기 위해 등가 선량을 정의하는데 이때 개입되는 방사선 가중치는 견고하지 못하다.

그래서 양성자의 방사선 가중치가 5에서 2로 바뀐다. 체외 세포 실험에서 관측된 양성자의 생물 작용력이 상당한 크기를 갖는 인체에서 양성자 에너지가 빠르게 감쇠되는

상황에서의 작용력과 같지 못함이 인정되었기 때문이다.

양성자 가중치가 바뀌니 조직과 상호 작용에서 양성자를 생성하는 중성자의 가치도 달라지고, 흡수선량에 기여하는 2차 광자의 효과를 고려하니 1MeV 이하의 중성자 가중치가 반감된다.

에너지가 낮은 X선이 감마선에 비해 생물학적 작용이 높은 것 같지만 복잡하게 구분함을 정당화할 수 있을 만큼 과학적 증거가 불충분하니 단순함을 높이 사서 같이 1.0의 가중치를 부여한다.

핵산(DNA)에 결합된 원자에서 방출되는 트리튬 베타나 오제전자는 분명히 상대적 가치가 클 것으로 보이지만 아직 정량적으로 구별할 준비가 불충분하니 더 살펴보기로 한다.

이렇게 불확실한 부분이 남아 있으니 방사선 가중치를 도입한 물리량과 거기서 도출된 양은 리스크를 평가하기보다는 피폭을 관리하는 목적에 한정하여 사용되어야 한다고 단서를 단다.

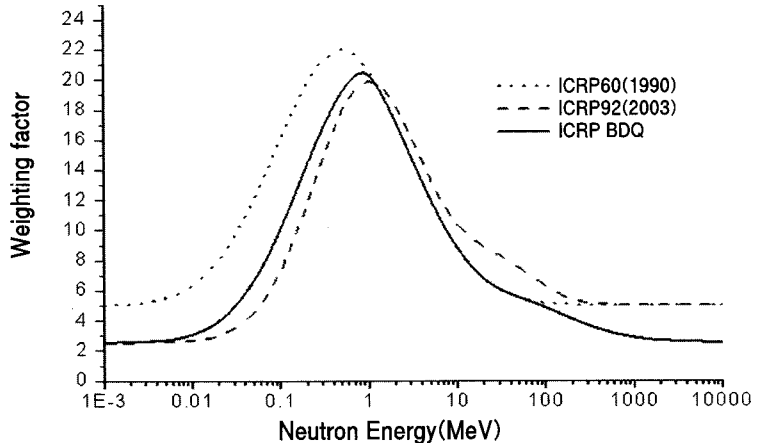
양이 견고하지 않으니 그 이름에도 이의들이 제기된다.

등가 선량(equivalent dose)은 영어로 선량 당량(dose equivalent)과 단어의 순서만 바꾼 것이고, 그러니 이 용어를 다른 언어로 번역했다가 다시 영어로 번역하면 어느 것이 어느 것인지 혼동되니 차제에 이름을 바꿔 방사선 가중 흡수 선량(radiation weighted absorbed dose)이라 부르기로 한다.

방사선을 가중하는 것이 아니라 방사선의 작용력을 가중하는 것임에도 방사선 가중 선량이란 용어를 용감하게 사용하려 한다.

방사선의 위험도와 조직 가중치

1980년대 중반 방사선 역학 자료



〈그림 1〉 중성자 방사선 가중치의 변화

2003년 발간된 ICRP 92의 값은 1MeV 이하 중성자의 가중치가 대략 반으로 감소했다. 2005년 BDQ(Basis for Dosimetric Quantities Used in Radiological Protection) 초안은 고에너지 중성자의 가중치 역시 반으로 줄인다.

의 핵심인 일본 원폭 피해 생존자에 대한 선량 재평가 사업 DS86²⁾의 결과는 과거 1960년대에 평가했던 T65D³⁾의 방사선량 특히 중성자 선량이 과대 평가된 것으로 결론짓는다.

이 선량의 감소와 역학 자료 업데이트로 얻은 암 사망 데이터를 반영한 결과, 방사선의 위험이 과거에 평가했던 것보다 괄목하게 높은 것으로 나타난다.

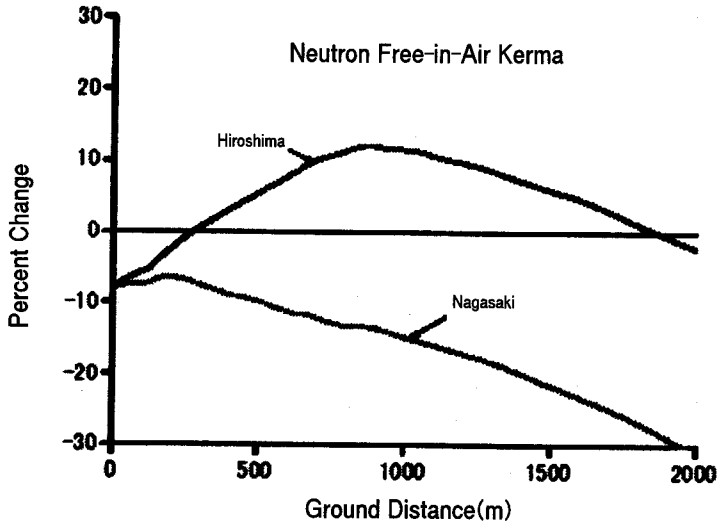
치명적 암 위험이 기존 평가치인 Sv 당 1.25%가 아니라 4.8%로 증가한다. 그러나 선량 제약 체계의 변경이 불가피했고, 그 결과 ICRP

60에서 새로 권고한 선량 한도가 종사자의 경우 과거의 연간 50mSv로부터 연간 20mSv 수준으로 큰 폭으로 감소하는 결과로 귀착된다.

그런데 ICRP 60이 발간된 직후인 1992년에 DS86의 선량 평가 결과가 폭심으로부터 원거리에서 선량의 계산치와 ³⁶Cl 방사화 분석 결과가 특히 원거리에서 불일치한다는 문제점이 제기된 바 있다.⁴⁾

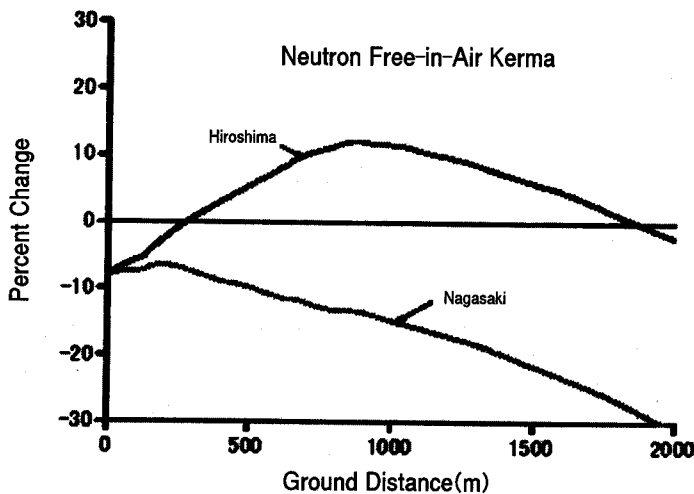
RERF를 중심으로 미국과 일본 연구자들이 새로운 선량 재평가 사업을 수행하였고 그 결과로서 체계를 얻는다.

1) 본고는 2005년 9월 1일 개최된 한국원자력안전기술원 주관 24회 방사선 안전 심포지엄에서 발표한 내용임.
 2) Dosimetry System 1986, Radiation Effect Research Foundation(RERF).
 3) Tentative 1965 Doses, Atomic Bomb Casualty Commission, National Academy of Science, USA.



〈그림 2〉 DS86과 DS02의 중성자 선량 평가 결과의 차이

히로시마에서는 원거리에서 중성자 선량이 증가한 편이며 나가사키에서는 대체로 감소하였다.



〈그림 2〉 DS86과 DS02의 감마 선량 평가 결과의 차이

히로시마와 나가사키 모두에서 감마 선량은 대체로 증가했다.

히로시마에 대해서는 DS02는 DS86에 비해 폭탄의 위력이 15kt에서 16kt로 증가되었으며 폭심의 위치가 20m 더 높고, 15m 서쪽으로 약간 수정된다. 나가사키 폭탄에 대해서는 DS86에 비해 차이가 없는 것으로 평가된다.

실험적 측정도 과거의 ^{32}P 방사능 분석 중심 체계를 확대하여 반감기가 길어 안정적인 ^{36}Cl , ^{60}Co , ^{152}Eu 등을 중심으로 분석함으로써 이론적 계산 결과와 실험적 측정 결과의 불일치가 해소된다.

DS86과 DS02의 중성자 선량 평가 결과의 변화를 보면 중성자 선량은 히로시마의 경우에는 폭심 아래 지상 거리 1000m 거리 내외에서 DS02이 약 10% 내외로 높게 나타난다. 나가사키의 경우는 전체적으로 DS02 선량이 낮게 나타나며 그 차이는 거리가 멀어질수록 커진다.

방사선량 기여가 큰 감마 선량의 경우 히로시마와 나가사키 모두에서 500m 이상의 거리에서는 DS02의 선량이 DS86에 비해 5~10% 정도 높다.

종합하면 원폭 피해 생존자 수명 연구의 주된 대상인 집단이 체류하였던 700~1500m 거리에서 선량이 DS86의 결과보다 DS02의 결과

4) T Staume, SD Egbert, WA Woolson, RC Finkel, PW Kubik, HE Gove, P Sharma and M Hoshi, Neutron discrepancies in the DS86 Hiroshima dosimetry system, Health Physics, 63:421-426(1992).

5) DS02 Dosimetry System 2002, RERF.

가 7% 내외로 높은 것으로 평가된다.

역학적 초과 상대 암 위험에 변화가 없다고 본다면 원인이 되는 선량의 증가는 단위 선량 당 위험 계수의 감소를 의미한다. 그러나 이 정도의 변화는 선량 외에 선량 선량률 효과 인자(DDREF), 역학적 자료 및 위험의 이전 및 투사에 내재하는 불확실성을 감안하면 중대한 변화는 아니다.

그럼에도 새로운 기본 권고의 기반 문서로 준비된 생물학 및 역학적 정보에 관한 ICRP 자료(초안)을 보면 방사선의 위험 계수가 다시 수정된다.

1997년까지의 역학 자료를 반영한 이유도 있지만 낮은 선량에서 주된 관심사인 방사선 유발암 위험을 평가하는 방법을 암 사망이 아니라 암 발생 중심으로 변경한 탓도 있다.

과거와 달리 암 발생 데이터 베이스가 충분히 가용하고 암 종별 치사 위험이 다르며 사망자보다는 발생자 수가 많아 통계적 분석력이 개선된다는 등 변경 이유가 있는 것이 당연하지만 그래서 또 방호 체계의 밑바닥에 수정이 가해진다.

암 위험의 인구 집단간 이전도 ICRP 60에서는 일본 원폭 피해 생존자 결과를 미국, 영국, 중국, 스웨덴, 푸에르토리코의 다섯 집단에 이전하여 평균하더니 새 평가에서

〈표 1〉 위해 조정된 암 및 유전 영향 확률 계수 명목치(Sv 당 %)

| 피폭자 집단 | 암 | | 유전 영향 | | 계 | |
|--------|---------|-------|---------|-------|--------|-------|
| | ICRP 60 | 현재 평가 | ICRP 60 | 현재 평가 | CRP 60 | 현재 평가 |
| 전체 | 6.0 | 5.9 | 1.3 | 0.2 | 7.3 | 6.1 |
| 성인 | 4.8 | 4.6 | 0.8 | 0.1 | 5.6 | 4.7 |

는 푸에르토리코 집단은 제외한다. 이러한 변경에도 불구하고 궁극적 암 위험은 ICRP 60 평가치와 차이가 거의 없이 나타나고 있다.

반면, 암과 함께 확률적 영향인 유전 결합 위험은 변화가 크다. 유전에 관한 학문적 발전도 있지만 우성, X염색체성 및 열성, 즉 멘델리안 유전 질환에 대해 UNSCEAR가 2001년에 재평가한 기저 빈도가 2.8%로서 1990년대 초반에 평가한 값 1.65%에 비해 현저히 높아졌다.

역학적 기저 빈도의 증가는 방사선 유발 유전 결합의 위험을 낮추는 결과가 된다. 나아가 피폭자의 모든 후손에게서 유전 결합이 발생할 빈도가 첫 두 세대에서 발생할 빈도의 2배가 된다는 ICRP 60에서의 추론을 반복하여 첫 두 세대에 대한 평가로 충분하다는 입장으로 바꾼다. 결과적으로 생식선의 방사선 피폭에 따르는 유전 결합 위험은 과거 평가치에 비해 현저히 낮은 값을 얻는다.

평가된 조직별 암(생식선의 경우 유전 질환) 위험 계수를 바탕으로 조직의 상대적 위해를 평가하고 이로부터 유효 선량 산출에 필요한 조

직 가중치를 얻는 접근법은 약간의 조정은 있으나 대체로 ICRP 60과 유사하다.

평가된 조직별 상대 위해도 ICRP 60과 비슷하지만 유전 질환 위험의 감소로 생식선 비중이 약 1/5로 줄었고 그 여분이 기타 조직의 증가(8%로부터 24%)로 나타난다.

그래서 조직 가중치를 0.12, 0.08, 0.05 및 0.01의 4개 군으로 배치하여 배분하는데, 생식선은 암 위험까지 합쳐서 0.08을, 갑상선은 아동의 취약성을 감안하여 0.05로 높여 잡는다. 유방의 상대 위해가 5%에서 8%로 증가한 점이 조직 가중치 0.08을 부여한 이유이다. 당연히 기타 조직의 비중을 ICRP 60에서 5%의 2배인 10%로 높인다.

이렇게 변경된 조직 가중치 체계가 2004년 기본 권고 개정안에 제시되었는데 2005년 초에 마련된 기반 보고서 FD-C-1⁶⁾에서는 다시 일부 수정을 가한다. 조직 가중치란 방호의 궁극적 양인 유효 선량을 결정하는 잣대인데 이것이 이렇게 불안정하다.



〈표 2〉 방사선 위험 계수 및 상대 위해도(일반 집단)

| 조직 | 10 ⁴ man-Sv당 명목 계수 | 치사율 | 치사율 반영 명목 위험 | 암 외 상대 수명 손실 | 위해 | 상대 위해 |
|------------|----------------------------------|-------|-----------------|-----------------|-------|-------|
| 식도 | 17 | 0.93 | 17 | 0.87 | 15.0 | 0.025 |
| 위 | 90 | 0.83 | 88 | 0.88 | 77.5 | 0.127 |
| 결장 | 121 | 0.48 | 92 | 0.97 | 88.8 | 0.146 |
| 간 | 19 | 0.95 | 19 | 0.88 | 16.7 | 0.027 |
| 폐 | 101 | 0.89 | 100 | 0.8 | 80.1 | 0.131 |
| 뼈 표면 | 7 | 0.45 | 5 | 1 | 5.1 | 0.008 |
| 피부 | 1000 | 0.002 | 4 | 1 | 4.0 | 0.007 |
| 유방 | 69 | 0.29 | 38 | 1.29 | 49.1 | 0.081 |
| 난소 | 13 | 0.57 | 11 | 1.12 | 11.7 | 0.019 |
| 방광 | 43 | 0.29 | 23 | 0.71 | 16.4 | 0.027 |
| 갑상선 | 24 | 0.07 | 7 | 1.29 | 9.2 | 0.015 |
| 골수 | 42 | 0.67 | 38 | 1.63 | 61.5 | 0.101 |
| 기타 고형암 | 189 | 0.49 | 145 | 1.03 | 148.9 | 0.244 |
| 생식선(유전 결함) | 20 | 0.80 | 19 | 1.32 | 25.4 | 0.042 |
| 계 | 1755 | | 605 | | 609.5 | 1 |

LNT 가설과 낮은 선량(률)의 위해 여부

지난 세기 말부터 방사선 방호계의 중요한 화두는 LNT 가설이었다. 문턱 없는 선형 비례 가정이 지나치게 확대 해석됨에 따라 정당하지 않은 방사선 방호 비용과 사회적 비용을 야기한다는 불만에 따른 것이다.

LNT 가설과는 달리 낮은 선량에서 암이 증가한다는 증거가 불충분하며 손상 받은 세포의 자살 기전(apoptosis)이나 면역 체계의 역량 나아가서는 호메시스 효과 등이 암

의 유발에도 어떤 문턱 선량을 형성할 수 있다는 주장들이 한편에서 설득력을 얻고 있었다.

IAEA 등 국제 기구나 학회에서 낮은 선량(가령 0.2Gy 이하)에서 위험 여부에 대한 심포지엄이나 학술 회의를 앞다퉈 개최하였고, 이때마다 LNT 가설을 견지하여 온 ICRP가 공격을 받곤 했다.

이러한 분위기는 미국을 위시한 여러 나라에서 낮은 선량에서의 위험 유무에 대한 과학적 증거를 보강하기 위한 연구 사업들을 발진시킨다.

시기를 같이하여 눈부시게 발전

한 분자생물학적 연구 기법들과 지식에 힘입어 방사선 영향에 대한 보다 정교한 연구들이 진행된다.

낙관적인 기대와는 달리 어떤 문턱 선량의 존재를 부정하는 결과들이 나타난다. 방사선에 직접 노출된 세포가 아니라 그 이웃 세포에서 영향이 나타난다는 구경꾼 효과(bystander effect)나 노출된 세포의 후손에서 영향이 나타나는 유전자 불안정성(genomic instability)은 작은 선량도 암을 유발할 수 있음을 시사하는 현상이다.

체의 세포 실험에서 관찰되는 구경꾼 효과가 체내 세포 생존 환경에서도 일어난다면 낮은 선량에서 초선형 반응을 유발할 수도 있다.

낮은 선량에서 예상되는 DNA 손상 빈도가 활성 산소(reactive oxygen species; ROS) 등에 의한 생화학 내재적 손상 빈도에 비해 비교되지 않을 정도로 작으므로 낮은 선량이 암의 증가에 기여하지 못할 것이라는 논리에 제동을 거는 현상도 발견된다.

미소 체적에서 방사선 에너지 분산 현상을 모의한 결과는 하나의 양가닥 절단(double strand break; DSB)을 일으키는 데 필요한 에너지 양이 과거의 평가치보다 크게 낮으며 따라서 낮은 에너지의 전자에

6) ICRP, Biological and Epidemiological Information on health Risks Attributable to Ionizing Radiation: A Summary Judgements for the Purposes of Radiological Protection of Humans, a draft foundation document DF-C-1, April, 2005.

〈표 3〉 조직 가중치의 변화

| 가중치 ^a | 해당 조직 | | |
|------------------|--|-----------------------------|------------------------------|
| | ICRP60(1990) | ICRP XX(2004) ^b | ICRP BDQD(2005) ^c |
| 0.2 | 생식선 | | |
| 0.12 | 적색 골수 | 적색 골수 | 적색 골수 |
| | 결장 위 폐 | 유방 결장 위 폐 | 결장 위 폐 |
| 0.1 | | 기타 조직 ^d | 기타 조직 ^e |
| 0.08 | | 생식선 | 유방 생식선 |
| 0.05 | 유방 방광 간 식도 갑상선 기타 조직 ^{d,e} | 방광 간 식도 갑상선 | 방광 간 식도 갑상선 |
| | 뼈 표면 | 뼈 표면 뇌 신장 침샘 피부 | 뼈 표면 뇌 |
| 0.01 | 피부 | 기타 조직 ^g | 침샘 피부 |

의해서도 많은 수의 DSB, 즉 하나의 DNA에 DSB(클러스터드 DSB)가 발생할 수 있는 것으로 나타난다.

DSB에 의한 복잡한 DNA 손상은 복구가 어려울 수밖에 없는데 DSB의 발생은 방사선에 의한 손상의 특징으로서 생화학적 과정에서는 잘 발생하지 않는다.

역학 부문에서도 원폭 피해 생존자 데이터 베이스를 낮은 선량 피폭자(즉, 피폭 당시보다 먼 거리에 있었던 사람들)까지 포함하여 다시 분석하였는데, 여기서도 더 낮은 선량까지 암 증가의 선량 비례 현상이 발견된다.

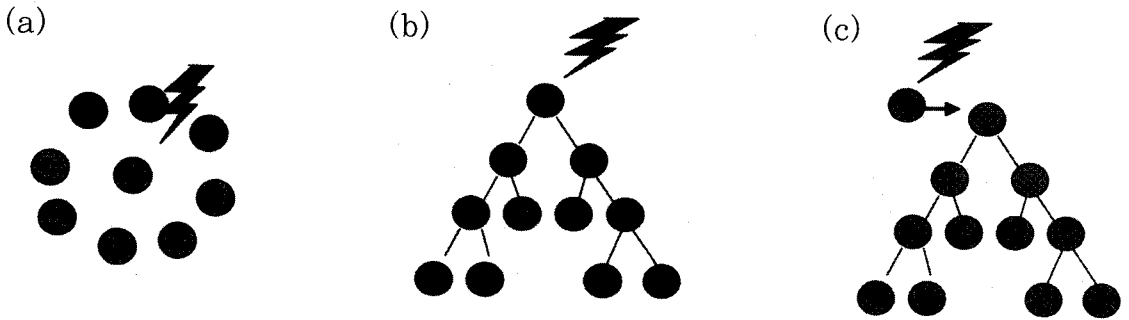
즉, 과거의 수명 연구 결과는 약 0.2Gy까지 통계적으로 유의한 선량 비례가 인정되었으나, 이제 0.1Gy 또는 그 이하까지도 유의한 증가가 확인된다.

ICRP는 이러한 결과들을 종합하여 평가한 결과를 정리하여 「방사선 연관 암 위험의 낮은 선량 외삽(Low-dose extrapolation of radiation-related cancer risk)」이라는 보고서 초안을 내놓는다.

결론은 LNT 가설이 수정되어야 할 과학적 근거가 없으며 방호 체계에서 편의를 위해서도 위험의 선량 비례 개념은 유지되어야 한다고 보고 있다.

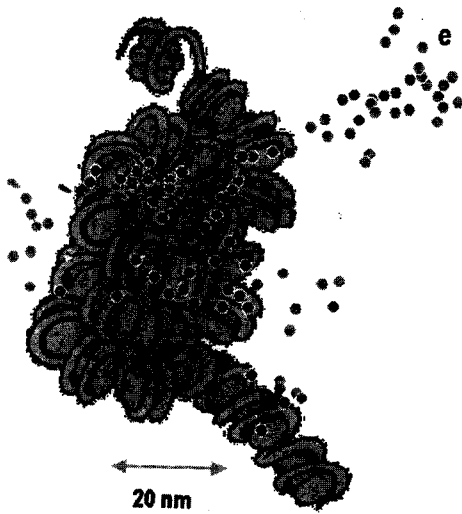
2005년 7월 국제암연구협회(International Agency for

- 이 수치들은 같은 수의 남자 및 여자 그리고 넓은 연령 범위를 갖는 기준 집단으로부터 유도된 것이다. 유효 선량의 정의에서는 이들 수치를 작업자, 전 집단 및 남자 여자 어느 경우에도 적용한다. 다만, 유방은 여성에게만 해당된다.
- 기본 권고 2005년 개정안.
- 기반 문서 "방사선 방호를 위한 선량 계측량 기반(Basis for dosimetric quantities for radiological protection)" 초안.
- 계산의 목적으로 기타 조직 장기는 다음의 추가 조직, 장기로 구성되는 것으로 한다: 부신, 뇌, 대장 상부, 소장, 신장, 근육, 췌장, 비장, 흉선 및 자궁. 이 목록은 선택적으로 조사되기 쉬운 장기를 포함한다. 또 목록 중 몇 개의 장기는 암 유발에 높은 감수성을 갖는 것으로 알려져 있다. 앞으로도 이외의 장기 조직이 발암에 현저한 리스크를 갖는 것으로 밝혀지면 이들에 특정의 WT를 부여하거나 또는 기타 장기·조직에는 선택적으로 조사되는 것도 포함될 수도 있다.
- 기타 장기·조직의 하나가 가장 계수가 정해진 12개 장기 중 어느 것보다도 높은 등가 선량을 받게 되는 예외적인 경우에는 그 장기·조직에 0.025를 적용하고 이외의 상기 목록 중 조직·장기의 평균 선량에 기중 계수 0.025를 적용한다.
- 지방 조직, 부신, 결합 조직, 후두 기도, 담낭, 심장벽, 림프샘, 근육, 비장, 전립선, 소장벽, 췌장, 흉선, 자궁/경부의 14개 조직의 평균선량에 0.1의 통합 가중치 적용.
- 위 f)의 조직에 신장이 추가된 15개 조직.



〈그림 4〉 구경꾼 효과(a)와 유전자 불안정성 효과(b), 두 효과의 복합 효과(c)

구경꾼 효과는 방사선 노출 효과가 공간적으로 전파되는 현상이며 유전자 불안정성 효과는 시간적으로 전파되는 현상이다.



〈그림 5〉 전자의 경로 주변에서 상호 작용의 밀도

하나의 전자도 DNA에 다수의 손상을 유발하여 복잡 손상이 일어날 수 있음을 보인다.

Research on Cancer; IARC)는 세계 15개국 방사선 작업 종사자 407,000명에 대한 역학 연구 결과, 이들의 90%가 생애 50mSv 이하의 선량을 받았지만 Sv당 초과 상대 위험이 고형암은 0.97, 백혈

병은 1.93으로 평가된다고 보고한 바도 있다.⁷⁾

선량 준위별 결과를 제시하지 않아 마치 방사선 작업 종사자가 일반적으로 암 위험은 2배, 백혈병 위험은 3배로 높아진다는 것처럼 오해될 수도 있다. 특히 백혈병 자료는 오차 범위가 커서 통계적 신뢰도가 불확실하다.

조직 반응

ICRP 60에서 방사선 피폭에 따르는 보건 영향을 결정적 영향과 확률적 영향으로 대별하여 15년 가까이 사용해온 결과, 이제 이들 용어에 익숙해지려는데 “결정적(deterministic)”이라는 어휘의 사전적 의미가 “선행 사상에 의해 우연히 결정된” 것임에 비해 방사선

7) E. Cardis et al., Risk of cancer after low doses of ionizing radiation: retrospective cohort study in 15 countries, British Medical Journal, 331(7508),77-81(2005).

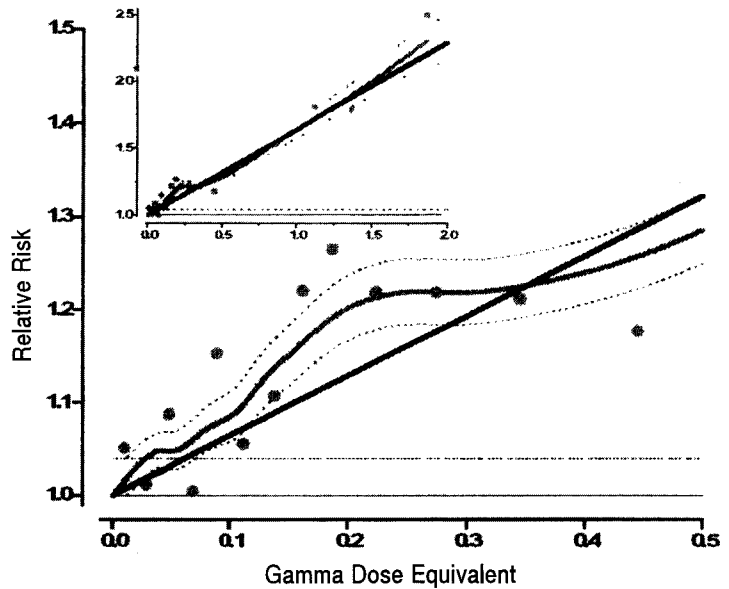
피폭에 따르는 이들 영향이 '반드시 사전에 결정된 것이 아닐 수도 있다'는 이유로 "조직 반응(tissue reaction)"이라는 평범한 용어를 내놓는다.

방사선 피폭으로 피부에 홍반이나 수종, 눈에 백내장, 폐에 폐수종이 발생한 것을 조직 반응이란 색깔 없는 말로 표현하는 것이 마땅한 것인지 의문이다.

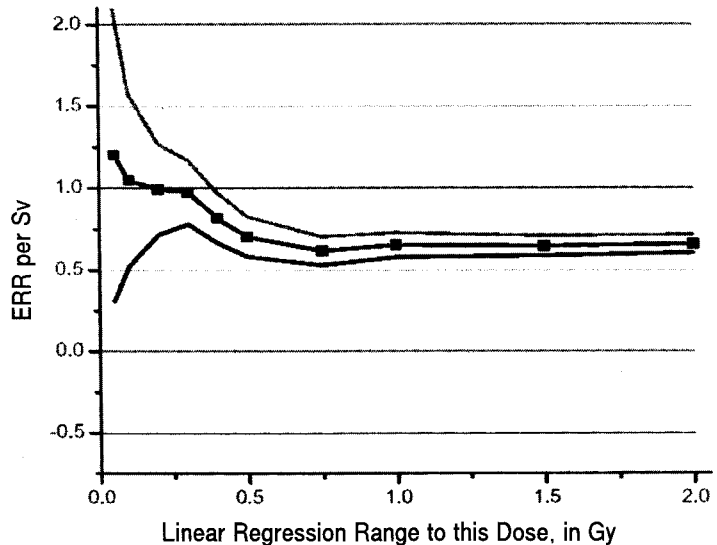
결정적 영향이든 조직 반응이든 그 스펙트럼이나 위험의 크기는 과거의 평가와 별다른 차이는 없다. 다만 문턱 선량의 개념을 1% 발생을 기준으로 함으로써 문턱 선량의 값이 과거에 제시했던 값에 비해 약간 낮아진 경우가 있다.

예를 들어 남성 생식선 피폭으로 인한 일시적 불임의 문턱 선량이 약 0.15Gy였음에 비해 1% 유발 문턱 선량은 약 0.1Gy로 주어진다. 백내장의 경우는 과거의 명목 문턱 선량은 5Gy였는데 새로운 평가치는 약 1.5Gy로 상당히 낮아진다.

태내 피폭으로 인한 조직 반응에서 정신 지체 장애의 문턱 선량은 여전히 0.1Gy 수준으로 본다. 다만 문턱 선량을 초과한 경우 선량에 따른 지능 저하의 정도는 과거의 평가치인 Sv 당 IQ 30점이 약간 축소되어 Sv 당 IQ 25점 정도로 평가한다.



〈그림 6〉 원폭 피해 생존자의 선량에 따른 상대 고형암 위험의 경향
0.1Gy 또는 그 이하 선량까지 통계적으로 유의한 증가가 보인다.



〈그림 7〉 단위 선량 당 초과 상대 위험(Excess Relative Risk).

가로축의 선량보다 작은 범위에서 평가한 ERR값임. 중간선은 평가치를 연결한 것이며 위-아래 선은 표준 오차의 범위임.



〈표 4〉 조직 반응(결정적 영향)의 문턱 선량

| 영향 | 장기/조직 | 진행 | 문턱 선량 | ICRP 41 문턱 선량 |
|------------|-----------|--------|-------------|---------------|
| | | 소요 시간 | (1% 기준, Gy) | (Gy) |
| 블구 | | | | |
| 일시 불임 | 정소 | 3-9주 | ~0.1 | 0.15 |
| 영구 불임 | 정소 | 3주 | ~6 | 3.5~6 |
| 영구 불임 | 난소 | (1주 | ~3 | 2.5~6 |
| 조혈 기능 저하 | 적색 골수 | 3-7일 | ~0.5 | 0.5 |
| 홍반 주증상 | 피부(넓은 면적) | 1-4주 | (3~6 | |
| 피부 화상 | 피부(넓은 면적) | 2-3주 | 5~10 | |
| 일시 탈모 | 피부 | 2-3주 | ~4 | |
| 백내장(시각 장애) | 눈 | 수년 | ~1.5 | 5 |
| 치사 | | | | |
| 골수 증후군 | | | | |
| -치료 소홀 | 골수 | 30-60일 | ~1 | |
| -적극 치료 | 골수 | 30-60일 | 2~3 | |
| 소화관 증후군 | | | | |
| -치료 소홀 | 소장 | 6-9일 | ~6 | |
| -적극 치료 | 소장 | 6-9일 | >6 | |
| 폐수종 | 폐 | 1-7월 | 6 | |

암 이외의 질환

방사선 위험의 새로운 정보로 주목할 것으로서 암 이외 질환의 위험이다. 관찰된 암 이외의 질환들은 심장병, 뇌혈관 질환, 폐렴, 만성 간질환 또는 간경변, 비뇨기계 질환 등이다.

원폭 피해 생존자 데이터를 지속적으로 보완하고 있는 수명 연구(life span study; LSS)의 최신 결과물인 LSS13에 의하면 0.5Sv 이

상 피폭자에게서 암 이외의 리스크의 증가도 확인되고 있다. 〈그림 8〉에 이러한 암 이외의 질환 위험을 암 및 백혈병 위험과 비교하여 보았다.⁸⁾

질환의 종류는 물론 피폭시 연령이나 발증 당시의 연령에 따라 차이가 있지만 종합적으로 Sv 당 14%의 초과 상대 위험이 있는 것으로 평가하고 있다.⁹⁾ 이 위험은 고행암의 초과 상대 위험이 평균적으로 Sv 당 50% 정도인 것과 비교할 때

유의한 증가이다.

다만, 이들 암 이외의 질환은 0.5Sv 미만 피폭자에게서는 그 증가가 확인되지 않고 있고 원폭 피해 생존자들이 초당 수 Sv 이상의 지극히 높은 선량률로 피폭한 점을 고려하면 일상적인 방사선 취급 과정에서 매우 낮은 선량률로 오랜 기간에 걸쳐 1Sv 미만의 선량을 피폭한 사람들에게서 발생할 가능성은 희박해 보인다.

그렇지만 이들 암 이외의 질환의 증가가 1970년대 이전까지의 자료에서는 약 1.5Sv 이하에서는 관찰되지 않았음에 비해 1997년까지 자료를 평가한 결과 0.5Sv까지 증가를 확인할 수 있음을 고려하면 아직 40% 이상이 생존하고 있는 잔여 코호트에 대한 노령기의 영향을 계속 관찰하는 일이 중요함을 시사하고 있다. ICRP는 UNSCEAR가 검토중인 이 이슈를 예의 주시한다.

방호 체계의 수정

1977년 발간되었던 ICRP 26에서부터 수립된 방사선 방호 체계(ICRP 26에서는 선량 제한 체계로 불렀다.)는 피폭의 정당화, 방호의 최적화, 개인 선량(위험) 한도의 3

8) RERF update, 14(1), Spring 2003

9) D.L. Preston, Y. Shimizu, D.A. Pierce, A. Suyama and K. Mabuchi, Studies of Mortality of Atomic Bomb Survivors. Report 13: Solid Cancer and Noncancer Disease Mortality: 1950-1997, Radiation Research, 160, 381-407(2003).

대 요소로 구성되고 30년 가까이 의도한 역할을 수행해 왔다.

기본 권고 개정 초안에 대한 이해 당사자들이 수많은 의견을 제시함에 따라 최종안이 어떻게 수정될지는 조금 더 기다려 보아야 하겠지만 개정안의 기본 틀은 정당화, 수치 기준, 최적화로 구성한다.

1. 정당화

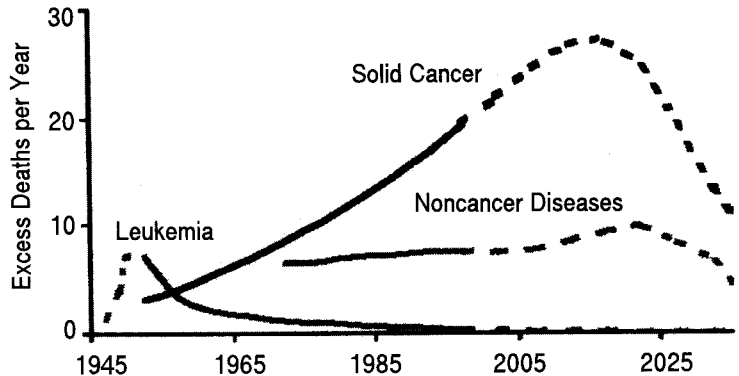
정당화는 가치 판단으로서 어떤 제안된 행위가 정당한가 아닌가는 방사선 안전 요소뿐만 아니라 여러 가지 사회적 여건들을 복합적으로 가능하여 의사를 결정하는 것이어서 국제적으로 통일된 어떤 규범을 설정하기는 어렵다고 보아 각국의 규제 기관 판단으로 유보한다.

특히 의료상 피폭의 정당화는 일반적 정당화와 개별 환자에 대한 정당화의 2단계로 나누어 고려한다. 일반적 정당화는 의료 분야에서 합당하다고 판단되어 널리 시행되는 방사선 의료 절차는 정당화된 것으로 간주한다.

일반적으로 정당화된 의료 절차라도 특정 환자에게 적용함이 합당한가는 담당 의사가 다시 판단한다.

2. 수치 기준

기존의 방호 체계에 비해 변화를 시도하는 부분이 수치 기준이다. 기존 체계에서는 방호 최적화가 핵심인데 최적화의 제약으로서 개인 선



〈그림 8〉수명 연구(LSS13)에서 도출된 암 및 암 이외의 질환의 위험.

암의 증가와 비교할 때 유의한 증가가 인정되지만 적어도 0.5Sv 이상의 높은 선량 피폭자에게만 관찰된다.(그림 자료: RERF)

량 한도가 작용한다.

즉, 주어진 행위에 대해 방호가 최적화되었다더라도 관련된 특정 개인의 선량이 부당하게 편중되어 선량 한도를 초과하지 않아야 한다는 관점이었으나, 새로 제안된 체계는 제안된 행위가 최소한 충족해야 할 안전 기준으로서 선량 제약(constraint)을 설정한다.

기존의 선량 제약은 지침의 성격이었으나 제안된 새로운 개념은 최소 안전 기준으로서 강제적 성격이다. 선량 제약은 '단일 선원'에 의한 '개인'에 대한 선량을 중심으로 전개되며 정상 상태나 긴급시 모두에 해당되며 행위뿐만 아니라 기존 피폭 상황에 대해서도 적용된다.

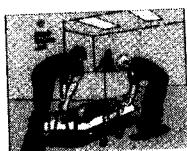
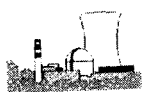
ICRP는 피폭 상황을 대별하여 각 상황마다 최대 선량 제약만을 제시하며 각 상황 안의 구체적 행위에

개입에 대해 필요하다면 각국의 규제 기관이 세부 선량 제약을 설정하도록 한다. 지금까지는 ICRP가 많은 종류의 제약치들을 권고했는데 그 역할을 각국 규제 기관으로 상당 부분 넘긴 셈이다.

ICRP가 제공하는 최대 선량 제약으로는 연간 유효 선량 기준으로 100mSv, 20mSv, 그리고 1mSv의 3종이 있다.

연간 100mSv라는 선량은 그 이상의 개인 선량은 사회적으로나 개인적으로 어떠한 경우에도 용인하기 어렵다고 보는 선으로서, 사고 등 긴급 상황이나 매우 높은 수준의 기존 피폭 상황에 대해 적용하는 제약이다.

다만 극심한 사고로 확대 방지 또는 인명을 구조하는 임무를 수행하는 종사자에 대해서는 제약을 두기



종사자 선량 제약

종사자 선량 한도

〈그림 9〉 종사자에 대한 선량 제약과 선량 한도의 적용 개념

선량 제약은 특정 단일 선원에 대해 긴급시를 포함한 모든 상황에 적용되는 반면 선량 한도는 개인이 노출되는 모든 선원에 대해 정상적 상태에 대해서만 적용된다. (그림 자료: ICRP)

어려우므로 제약치의 적용 대상에서 제외한다. 긴급시 주민의 소개나 이주 등 부작용도 무시하기 어려운 대응 조치를 고려하는 선량 상한도 이 제약치가 된다.

연간 20mSv라는 선량은 보통의 자연 방사선 선량의 10배 수준에 해당하며 직접 또는 간접적으로 이득이 있는 방사선 작업 종사자에 대해 적용하는 제약이다.

연간 1mSv는 기존의 일반인 선량 한도에 해당하는 수준으로 개인적 이득이 없는 피폭, 즉 일반인의 피폭에 대해 적용한다.

제안된 방호 체계도 개인 선량 한도를 유지한다. 개인 선량 한도는 단일 선원이 아니라 모든 선원으로

부터 피폭을 제한하는 보완적 기능을 갖지만 실제로 거의 모든 개인이 노출되는 선원은 단일 선원인 경우가 대부분이므로 선량 한도의 기능은 상대적으로 축소된다.

선량 한도의 값도 대체로 기존 한도와 같이 유지하지만 특별한 경우의 한도인 긴급 작업자에 대한 한도는 선량 제약으로 이전한다.

ICRP는 상황마다 따로 제시된 매우 복잡한 선량 제약 체계를 단순화한다고 설명하지만 본래 복잡한 선량 제한 체계를 단순화하는 데는 한계가 있다.

단일 선원을 정의하는 것도 간단하지는 않다. 단일 선원이란 단 하나의 선원이라는 의미는 아니며 방

호를 고려하는 대상으로서 하나로 취급함이 적절한 개별 선원 또는 연계된 개별 선원들의 묶음이다.

방호를 고려하는 중심이 개인임을 염두에 두고 생각하면, 가령 원전 1개 발전소(2호기 묶음)를 하나의 단일 선원으로 볼 수 있고¹⁰⁾, 어떤 병원 방사선영상학과에서 사용하는 여러 대의 진단 X선 장치들은 묶어서 하나의 단일 선원으로 간주할 수 있다.

‘개인’이라는 용어도 종사자 입장에서는 명확하지만 일반인 입장에서는 보충 설명이 필요하다.

가령 라돈과 같은 기존 선원에 노출되는 일반인 집단이나 원전 사고 시 방사선을 피폭하는 지역 주민 중



(그림 10) 일반인에 대한 선량 제약과 선량 한도의 적용 개념

선량 제약은 특정 단일 선원에 대해 모든 상황에서 적용되는 반면, 선량 한도는 가능한 여러 선원에 대해 정상적 상황에 대해서만 적용된다. (그림 자료: ICRP)

개인이란 누구인가는 구체적으로 정의할 필요가 있다.

ICRP는 “대표적 개인(representative individual)”으로 95 퍼센타일 개념을 도입한다.

즉, 집단에서 무작위로 선발된 사람의 95%가 이 대표적 개인보다 낮은 선량을 받을 것으로 보는 사람이 된다. 즉, 과거의 결정 집단 개념을 적용하되 정량적 기준을 제시한 셈이다.

일반인 집단이 노출되는 경우 개인의 설정과 관련된 사항으로 선량 계수 체계에도 수정이 따른다. 기존에는 0세, 1세, 5세, 10세 15세 및 성인의 6개 연령군에 대해 피폭 인자 및 선량 환산 계수들이 적용되고 있는데 지나치게 세분했다는 판단

에 따라 이를 1세 유아, 10세 아동 및 성인의 3개 연령군으로 단순화한다.

기존의 방대한 환산 계수 표들을 약간 줄이는 효과는 있는데 선량을 보다 정교히 평가하려는 다른 쪽에서의 노력과 조화 문제를 내포한다.

3. 최적화

1977년 ICRP 26에서 개념이 정립된 최적화는 ICRP60에 이르러서는 방호 체계의 핵심 요소로 자리를 잡는다. 정당화된 행위에 대해서도 방호를 경제적·사회적 인자를 고려하여 최적화한다는 ALARA는 방사선 방호의 슬로건이 되었다.

새로 제안된 체계에서도 최적화가 중요한 요소임은 분명하지만 이

를 강조하는 톤은 낮아진다. 즉, 제약치에 의해 기본적인 안전 요건이 충족된 후 최적화에 의해 최선의 수준으로 피폭자 수, 선량, 잠재 피폭의 위험을 낮추는 접근 방식을 취하고 있기 때문이다.

최적화의 접근 방식에도 변화가 있다. 기존의 방식은 비록 방사선 방호 요소가 최종 의사 결정의 부분적 입력임을 인정하면서도 정량적 최적화 절차에 비중을 두어 왔는데 이러한 접근이 현실적이지 않음이 경험에서 확인된다. 따라서 새로 제안된 체계에서는 최적화 절차에서 정량적 접근의 비중을 낮추고 대신 비정량적 인자를 포함한 다양한 인자를 고려하고 의사 결정에 이해 당사자(stakeholder)의 합의를 강조

10) 우리나라의 경우 2개 호기를 하나의 운영 단위(발전소)가 관리하는 체계이기 때문이다. 인허가 기준은 호기별로 되어 있어 약간의 혼란은 예상된다.



[표 5] 제안된 새로운 방호 체계에서 선량 제약치 위치

| 선량 준위 (연간 mSv) | | 최대 제약치 (연간 유효 선량, mSv) | 적용 상황 |
|-------------------|------|---------------------------|---|
| 명칭 | 값 범위 | | |
| 높음 | 100 | | <ul style="list-style-type: none"> * 이 준위에서는 개인 또는 사회적 이득 기대할 수 없음. |
| 증가 | 10 | 100 | <ul style="list-style-type: none"> ○ 긴급시 종사자(인명 구조 또는 심각한 사고 방지 활동 제외) ○ 긴급시 일반인의 소개 및 이주 ○ 제어 가능한 고준위 기존 피폭 |
| | | 20 | <ul style="list-style-type: none"> ○ 직업상 피폭 ○ 긴급시 대응(옥내 대피, 옥소제 복용 등) ○ 제어 가능한 기존 피폭(라돈 등) ○ 간병인 |
| 보통 | 1 | | |
| 매우 낮음 | 0.1 | 1 | <ul style="list-style-type: none"> ○ 정상적인 일반인 피폭 |
| | 0.01 | | |
| 없음 | | | <ul style="list-style-type: none"> * 방호 배제 수준 |

한다.

고려할 인자로서 피폭 선량뿐만 아니라 선량의 분포와 피폭 집단의 속성, 사회적 가치 판단, 경제, 환경 인자까지 폭넓은 인자들을 제시한다. 특히 선량 인자에서 기존에는 집단 선량 중심으로 운용되었는데 종종 집단 선량의 개념을 지나치게 확대하는 부작용이 있었다.

예를 들어 원자력 시설로부터 원거리에서 있는 사람들의 사소한 선량을 매우 큰 인구 집단에 적용함으로써 무시할 수 없는 집단 선량을 얻거나 방사성 폐기물 처분장 부지 주변에서 먼 미래에 예상되는 선량을 현재의 기준으로 판단하는 등 공간과 시간 축을 지나치게 확대하는 문제들이다.

이 문제를 완화할 목적으로 새로운 체계는 선량 매트릭스(dose

matrix)라는 개념을 도입한다. 선량 매트릭스란 선량을 구성하는 속성을 필요에 맞게 구성하여 피폭의 상황을 명확히 이해하고 이를 적절히 활용할 수 있도록 하려는 의도이다.

그러나 의도는 이해할 수 있고 매트릭스 개념도 맞지만 “선량 매트릭스”라는 어려운 용어를 사용하는 것은 적절하지 않아 보인다.

최적화에서 이해 당사자 합의를 강조한 것은 주목할 일이다. 방호 방안을 결정함에 있어 선량이나 비용뿐만 아니라 다양하고 종종 매우 주관적일 수 있는 가치 판단 인자들이 개입되는 만큼 당사자 합의는 중요하다.

또 이해 당사자 합의는 방사선 방호에서만 아니라 사회 일반적 추세이기도 하다. 그러나 이를 실천하는

데에는 어려움도 예상된다. 당사자를 정의하는 것에서부터 무난한 합의를 도출하는 과정에 우리 사회는 아직 익숙하지 못하다. 문제를 경험한 기관들이 정보를 적극적으로 교환하여 교훈과 간접 경험을 빠르게 축적함이 요망된다.

선량 계속

외부 피폭 선량 계측은 위에서 논의한 근본적인 양의 변화, 즉 방사선 가중치와 조직 가중치의 변화를 수용하는 외에는 기술적 불확실성은 많지 않다. 다만, 유효 선량을 산출할 때 사용하는 인형 모의 피폭체로서 MIRD형 모의 피폭체가 신체 내부 조직을 단순화함에 따르는 오차를 줄이기 위해 근래에 개발된 미소 체적 소형 모의 피폭체(voxel phantom)를 표준 환산 계수 산출에 도입하겠다는 입장이다. 어떻게든 ICRP 74에 주어진 외부 피폭 환산 계수는 거의 전부 다시 계산하여 제공된다.

비록 피폭자 수는 소수이지만 내부 피폭 선량 계측은 아직 정착된 단계가 아닌 만큼 변화도 빈번하다. 방사선 가중치나 조직 가중치의 변화는 외부 피폭에서와 마찬가지로 내부 피폭 환산 계수 재산출의 사유가 된다.

내부 피폭에서도 고유 흡수비 (specific absorbed fraction;

〈표 6〉 최선의 방호 방안을 선정하기 위한 고려 항목^a

| 속성 | 세부 항목 |
|--------------------|---|
| 피폭 집단의 특성 | 성별, 연령, 건강 상태, 민감 그룹(임신부 등), 습관 |
| 피폭 특성 | 선량의 시간과 공간 분포, 피폭자 수, 최소 개인 선량, 최대 개인 선량, 평균 선량과 분산, 총선량(집단 선량), 잠재 피폭 가능성, 기존 상황(백그라운드, 사고 영향 등) |
| 사회적 고려 및 가치 | 평등, 관리 수준(측정, 건강 감사 등), 공정성, 지속성, 후세대 배려, 개인 이득, 사회적 이득, 정보 수준, 신뢰, 반발, 감정 |
| 환경 | 생태계 영향 |
| 방호 방안의 기술적, 경제적 고려 | 실현성, 비용, 불확실성, 자원, 미래 기술 |

SAF) 또는 고유 유효 에너지 (specific effective energy; SEE)를 산출할 때 사용되는 모의 피폭체를 미소 체적 소형으로 대체할 수 있다.

물론 핵종이나 화학형에 따른 생리학적 데이터의 업데이트는 항상 부분적인 변경으로 이어진다.

주목할 변화의 하나는 ICRP 30에서 수립된 내부 피폭 선량 계측을 위한 소화관 모델을 정교하게 발전시킨 인간 소화관 모델(human alimentary tract model; HATM)이 최근 개발되어 발간중인 점이다.

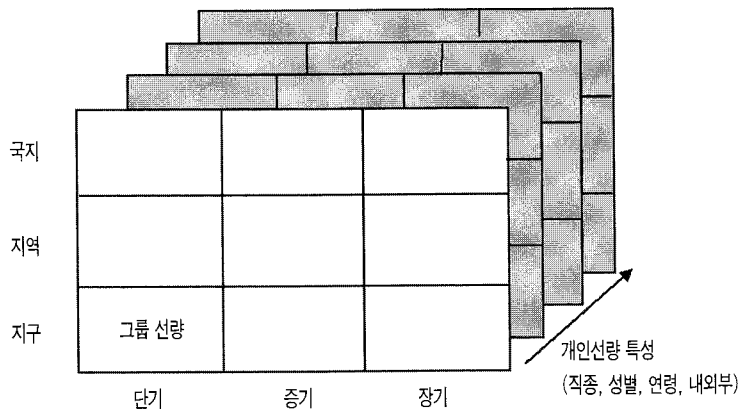
기존의 소화관 모델이 소장에서만 흡수가 일어나는 단순 모델인데 반해 새 HATM은 구강에서부터 섭취 경로가 설정되며 음식물의 종류에 따른 현실적 섭취율을 반영하고 위장관 벽의 피폭 모델을 정교하게 모의하는 등 변화가 있다.

호흡기 모델이 ICRP 66에 의해 발전되었듯이 소화관 모델도 발전 시킴이 요망되는 것은 분명하지만 방사선 방호에서 정교하지만 복잡해지는 선량 모델이 반드시 필요한가에 대해서는 보다 거시적 시점에서 논의가 요구된다.

방호 배제와 규제 면제

기존 체계에서는 리스크가 충분히 낮거나 추가적인 방호 활동이 비

a. 모든 항목을 열거한 것은 아님.



〈그림 11〉 선량 매트릭스의 개념

피폭 상황과 선량 분포를 활용 목적에 따라 여러 속성별로 분류한다.

현실적이라는 이유로 방호 또는 규제에서 면제한다는 기본 접근은 동일하면서 구체적 기준에서 차이가 있는 몇몇 용어들이 혼란스럽게 적용되고 있다.

배제(exclusion), 면제(exemption), 해제(clearance), scope defining level등인데 이렇게 상이한 용어를 정의한 데에는 이들의 개념이나 용도가 약간씩 차이난다는 이유가 있다.

배제는 그 피폭원으로 인한 리스

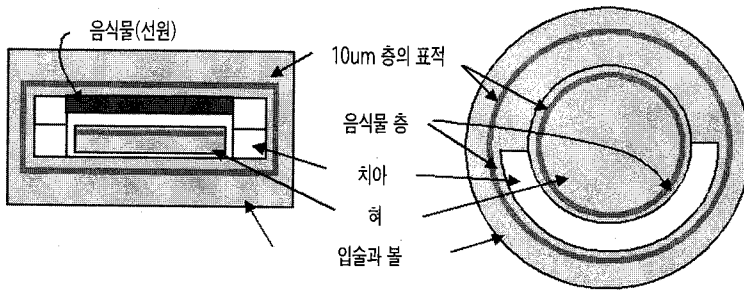
크의 준위와 무관하게 마땅한 방호 대책이 가용하지 않은 경우로서 이에 대해서는 방호를 원천적으로 고려하지 않는다는 의미이다. 달리 표현하면 피폭이 선원 또는 피폭 경로에 대해 제어되기 어려운 피폭원이다.

지표에서 일반적으로 존재하는 수준의 지각 방사선 준위나 우주 방사선 준위는 그것이 사람들에게 주는 선량은 유의한 수준이지만 이를 감축하기 위한 노력은 천문학적 비



〈표 7〉 새로운 HATM과 ICRP30 모델의 주요 차이점

| ICRP30 | HATM |
|---------------------------|---|
| 위를 도입부로 설정 | 구강과 식도 격실을 추가함 |
| 대장을 상부대장과 하부대장의 두 부분으로 구분 | 대장을 우측결장, 좌측결장 및 직장부의 세 개로 구획함 |
| 위와 소장 체류 시간 동안 붕괴를 고려함 | 소화관 벽 체류 시간 동안 붕괴를 고려하기 위한 격실 설정 |
| 소장에서만 흡수를 고려 | 구강에서 결장까지 모든 구간에서 흡수 경로 설정 |
| 격실별 하나의 음식물 체류 시간 사용 | 성별, 연령군별 체류 시간 차이 고려. 구강에서 위까지는 음식물 유형별 체류 시간 차이 고려 |
| SAF 산출에 단순 튜브 모델 사용 | 소화관 부위별 구체적 기하 모형 사용 |



〈그림 12〉 새 소화관 모델(HATM)에서 선량 평가를 위한 구강의 기하학적 모형
기존 ICRP 30 모델은 구강이나 식도는 생략했다.

용을 초래할 뿐만 아니라 자연적으로 존재해온 대상에 대해 감축 노력을 경주해야 할 이유가 정당화되기 어려우므로 이들에 대해서는 본질적으로 방호의 대상으로 간주하지 않는다. 인체 내에 거의 평형 상태로 존재하는 K-40새 등 천연 핵종에 의한 내부 피폭도 마찬가지이다.

공기 중 라돈 및 토론과 그 자손 핵종에 의한 피폭은 어느 선이 배제 대상인지 합의가 분명하지 않으나 일상적인 옥외 공기중 농도는 배제될 것이 틀림없다.

옥내 공기 중 라돈 농도는 인위적으로 증가시킨 피폭원(technically enhanced naturally occurring radioactive material; TEN-

ORM)이라는 관점에서 원칙적으로는 방호의 대상이 되는 것으로 간주되나 라돈이 널리 현존하는 천연 피폭원이며 그 선량 준위가 유의하게 높다는 점에서 특별한 배려가 필요할 것으로 보인다.

면제는 피폭을 줄일 수 있는 현실적인 방법이 있지만 그 비용과 이득의 관점에서 정당화가 어려워 방호의 대상에서 제외하는 것이다.

따라서 면제를 위해서는 개별 피폭원에 대해 피폭을 감축하기 위해 소요되는 비용과 그 결과로서 얻게 될 위해 감축의 대비를 통해 면제 수준이 결정되어야 하나 개별 대상에 대한 이러한 평가는 지극히 번잡하므로 “사소한 선량” 수준으로 간

주되는 선량보다 낮은 피폭을 유발할 것으로 평가되는 대상을 면제하는 포괄적 접근이 이루어진다.

그 선량 기준으로서 연간 개인 선량 0.01mSv, 연간 집단 선량 1man-Sv이 적용되어 왔다.

피폭원이 본질적으로 안전하여 이러한 선량 기준을 충족할 것으로 간주되는 특정 피폭원도 별도의 평가 없이 같은 개념으로 면제되는데, 최대 에너지가 5keV 미만인 발생장치나 외표면 선량률이 1μSv/h 미만인 발생 장치가 이러한 개념에서 면제된다.

이와 같은 일반 면제에 추가하여 규제 기관의 판단에 따라 특정 피폭원을 면제하는 경우가 있는데 내장 방사능이 일정 기준 미만인 야광 소자, 방사선 측정기 시험 목적의 소형 밀봉 선원, 토륨을 함유하는 가스 맨틀 등이다. 국내 규정은 군사용 야광 소자에 대해서는 일반 목적보다 더 많은 면제 방사능을 설정하고 있다.

해제는 규제 대상에 포함되어 있던 피폭원 또는 그 일부가 농도의 희석 등으로 준위가 낮아짐으로써 면제 대상에 준하게 되어 이를 규제 대상으로부터 해지하는 것이다.

원자력 시설 운영 중에 발생하는 기체상 또는 액체상의 공정 유출물에 함유된 방사성 핵종을 환경으로 방출하거나 매우 낮은 준위의 방사성 오염물을 폐기물로 처분하는 일,

〈표 8〉 HATM과 ICRP30 모델을 사용하여 성인의 90Sr 급성 취식에 대한 50년 총 붕괴 수 산출 결과 비교

| 소화관 영역 | 총붕괴 수 U(50) | | | | ICRP30 |
|---------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| | HATM | | | | |
| | 고형물 | 비칼로리 음료 | 칼로리 음료 | 총 식이 | |
| 구강 | 15 | 2 | 2 | 12 | - |
| 식도(빠른 음식) | 7.2 | 4.5 | 4.5 | 6.3 | - |
| 식도(느린 음식) | 4.5 | 3 | 3 | 4 | - |
| 위 | 4.5×10^3 | 1.8×10^3 | 2.7×10^3 | 4.2×10^3 | 3.6×10^3 |
| 소장 | 1.0×10^4 | 1.0×10^4 | 1.0×10^4 | 1.0×10^4 | 4.5×10^3 |
| 근거리 결장 | | | | | |
| 우측 결장(HAT) | 3.3×10^4 | 3.3×10^4 | 3.3×10^4 | 3.3×10^4 | - |
| 상부 대장(ICRP30) | - | - | - | - | 4.5×10^3 |
| 원거리 결장 | | | | | |
| 좌측 결장(HAT) | 3.3×10^4 | 3.3×10^4 | 3.3×10^4 | 3.3×10^4 | - |
| 직장(HAT) | 3.3×10^4 | 3.3×10^4 | 3.3×10^4 | 3.3×10^4 | - |
| 하부 대장(ICRP30) | - | - | - | - | 6.6×10^4 |

그리고 잔류 오염이 있는 원자력 시설 부지를 일반 용도로 개방하는 일 등이 해제 개념의 적용을 받는다.

해제의 기준이 면제 기준과 차이가 있어야 하는지 차이가 있어야 한다면 어떤 수준이어야 하는지는 근거가 확고하지는 않다.

해제의 경우 피폭원이 규제 대상에 포함되어 있을 때 발생한 이득 기여를 고려하면 편익 비교에서 면제보다 다소 높은 기준이 적용될 수 있다.

예로써 원자력 시설에서 방출하는 기체상의 방사성 유출물로 인해 주변 주민이 피폭할 수 있는 선량 기준은 연간 0.05mSv로서 일반 면제 기준인 연간 0.01mSv보다 높다.

Scope defining level은 상품에 의한 방사선 피폭에 대해 용인 수준을 정하려는 것으로서 특히 국가간 무역에 적용할 목적으로 제안되었다.

체르노빌 원전 사고 이후 미미하게 오염된 농산물 수출입에 대해 국가간 이해의 차이로 인해 마찰을 빚은 사례에서 이러한 기준의 설정 필요성이 본격 제기되었지만, 광물 등 천연 자원에 함유된 천연 방사능(naturally occurring radioactive material; NORM)과도 관련되는 자못 민감한 문제이다.

IAEA가 WTO와 연계하여 상품의 수출입에 적용할 이러한 기준안

을 마련하였지만 회원국의 환경 여건에 따라 견해가 대립되고 수치 기준의 근거에 대한 이견도 많아 아직 정착되지는 못하고 있다.

여기서 보듯이 배제, 면제, 해제, scope defining level이 각각 의미가 있으나 혼란을 초래하는 것은 사실이므로 단순화할 필요성이 인정된다.

배제는 이에 수반되는 리스크의 크기와 관계없다는 개념 근거에서 면제와는 차이가 있으므로 현행과 유사한 개념이 유지될 것으로 판단된다.

따라서 통합을 고려할 대상은 면제, 해제, 그리고 scope defining level이 된다.

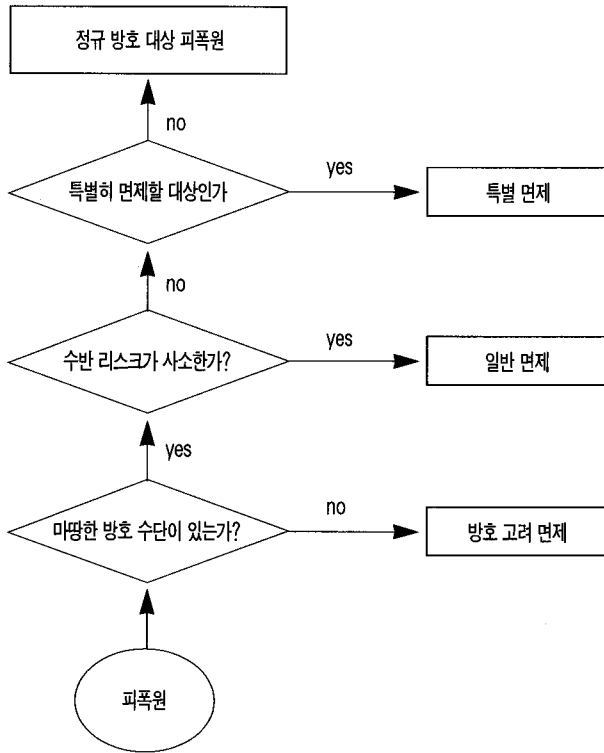
ICRP의 새방호 체계안에서는 면제 개념을 기존 체계보다 단순화하여 단일 기준을 제공하려 한다. 다만, 천연 핵종에 대해서는 대체로

인공 핵종보다 100배 높은 면제 기준을 제안한다.

즉, 인공 핵종에 대해서는 알파 방출 핵종은 0.01Bq/g, 베타-감마 핵종은 0.1Bq/g을 면제 기준으로 하고 우라늄과 토륨은 1Bq/g, ^{40}K 는 10Bq/g을 면제 기준으로 한다. 그러나 왜 인공 핵종에 대한 규제가 이렇게 차별화되어야 하는지 논의가 석연치 않다.

해제가 그 대상이 기존의 방호 체계 내에서 총체적인 위치에서 이득이 기여한 점을 고려하여 면제보다 높은 준위에서 설정될 수 있다는 개념적 근거를 들었지만 그 준위 차이가 크지는 않다는 점에서 합병이 가능하다.

특히 면제 준위를 설정할 때 근거로 한 연간 개인 선량 0.01mSv라는 기준도 기존 일반인에 대한 선량 한도 연간 1mSv의 1% 수준이라는



(그림 13) 피폭원의 배제 또는 면제 체계.

마땅한 방호 대책이 없으면 방호를 배제한다. 일반 면제되지 않은 피폭원에 대해 여건을 고려한 특별 면제가 가능하다.

다분히 자의적인 판단에 따른 것이므로 이 기준선은 견고한 것이 아니라 가변적이다.

Scope defining level 역시 이 기준이 경직되게 적용될 경우 통상에서 부당한 장벽으로 작용한 우려가 아니라면 면제와 개념적 통합이 가능하다.

환경 보호

ICRP 60까지의 권고에서는 사람이 아닌 생물종에 대한 방사선의 위해를 깊이 고려하지는 않고 사람

이 적절히 보호된다면 다른 생물종도 충분히 보호될 것이라고 전제하여 왔다.

그러나 인간의 활동으로 인한 환경에의 악영향에 대한 문제가 다방면에서 표출됨에 따라 환경 문제를 보는 시각에 큰 변화가 일고 있고 사람이 없는 곳에서도 위해 인자가 환경을 위협하는 상황도 생각할 수 있기 때문에 환경 또는 생태계를 방사선의 위해로부터 보호하는 정책적 배려에 대한 압력이 형성되어 왔다.

이에 ICRP는 2003년에 발간된

ICRP 91에서 사람이 아닌 생물종에 대한 방사선 방호의 기본 틀을 제시한 바 있다.

이러한 움직임은 방사선에 의해 어떤 생물종이 유의한 위협에 처하고 있어서가 아니라 윤리적·철학적 관점에서 방사선 방호 정책의 미비점을 보완할 필요성에 따른 것이다.

ICRP 91에 제시된 사람이 아닌 생물종에 대한 방사선 방호의 틀은 개념적으로 사람에 대한 방호와 조화를 모색하고 있다.

그러나 과거에는 특정 생물종의 집단이 위협받지 않으면 무방하다는 관점이 개별 생물종 개체의 치사 또는 생식 능력의 감퇴가 그 생물종의 보전, 생물 다양성의 유지, 자연 서식지의 건강에 미치는 영향이 무시할 정도가 되도록 방지하거나 빈도를 줄이는 것으로 한층 발전하고 있다.

동식물에 대한 영향을 평가하기 위해서는 선량을 어떻게 정의할 것인가도 고민해야 하고 주된 대상 동식물, 즉 “참조 동식물”도 선정해야 한다.

발간 과정에 있는 ICRP 보고서는 흡수 선량에 어떤 인자를 가중한 선량이 사람이 아닌 생물종에 적합한지 몇몇 제안이 있지만 아직은 폭넓은 공감을 받지 못하고 있으므로 현재로서는 흡수 선량을 기본으로 하고 필요하면 피폭한 방사선질에

관한 정보를 같이 고려한다는 입장이다.

동식물의 종이 다양하고 각개 종마다 생태학적·생리학적 특성 차이의 폭이 넓으므로 “전형적”이라고 볼 수 있는 참조 동식물을 선정하는 것이 필요하다.

생태학적 특성, 현행 보호 법규, 독성학 분야에서 적용, 자원 가치, 방사능 추적 자료 여부, 방사선 영향 자료 가용성, 후속 연구의 편의성, 대중 반응 등을 기준으로 평가하여 참조 동식물로 사슴·쥐·오리·개구리·잉어·넙치·벌·개·지렁이·소나무·잔디·미역을 선정한다.

선정된 참조 동식물을 이용한 영향 평가에는 사람의 방호와 평행 논리를 적용한다. 사람의 선량을 평가하기 위해 표준인을 선정하고 이에 대해 선량 환산 계수 등을 구하여 노출량으로부터 선량을 결정하고 그 결과를 방호 기준과 비교함으로써 안전을 확인하는 절차가 참조 동식물에 대해 적용된다.

선정된 참조 동식물의 모의 피폭체를 구성하여 예상되는 피폭 환경에서 선량을 산출하거나 측정한다.

아직 사람에게 대한 선량 한도나 제약치에 준하는 “유도 고려 준위(derived consideration level)”의 수준을 구체화하지는 못하고 있다.

유도 고려 준위는 원론적으로는

생물체에서 나타나는 영향에 대한 정보에 근거함이 마땅하나 아직 충분한 자료가 축적되어 있지 않으므로 우선은 백그라운드 방사선량을 참조하여 설정할 수도 있다.

백그라운드를 넘는다는 것은 고려하는 피폭원에 의한 선량 기여가 백그라운드에 상응하는 것을 말하는데 전형적 백그라운드 수준이 대략 한 자릿수 내에 걸쳐있으므로 백그라운드를 초과한다는 의미는 백그라운드 하단 값의 10배 정도에 해당한다.

21세기의 환경 보호 이데올로기의 원동력이 무엇인지 적시하기는 어렵다. 가장 힘있는 종으로서 인간이 기타 생물종에 대한 보호 책임(stewardship)을 과시하기 위해서 인지 윤리 논리를 앞세운 예방 원칙(precautionary principle)의 실천인지 생태계의 일부로서 인간이 생태계의 지속을 위한 방어 본능인지는 모호하지만 이러한 움직임은 시조이다.

상식선에서 판단하면 현재 원자력의 이용 과정에서 환경으로 방출하는 방사능은 천연 방사능에 비해 경미한 수준이므로 이로 인한 생태학적 위협은 과민한 반응으로 보인다.

그러나 시대적 요구는 이를 입증하기 바라므로 선량 개념과 참조 동식물이 설정됨에 따라 선량계측 및 영향 평가는 빠른 보조로 진행될 것

이며, 그 결과가 방호 체계에 피드백되어 방호 체계를 수정, 보완해 나갈 것이다.

그러나 환경 보호의 철학이 정립되어 있지 않고 또 이에 대한 시각도 주제에 따라 큰 차이가 있으므로 논란의 소지는 상존한다. 이해 당사자 참여와 합의 절차를 통한 조율 기능이 이 분야에서도 목마라다.

환경 보호에서 주목할 관점 중 하나는 환경으로 방출하는 오염원을 관리하는 데에는 소위 최선 기술(best available technology; BAT)을 사용한다는 철학이다.

방사능 방출도 예외가 아니어서 현장 기술이 BAT인지 의문이 계속 제기될 것이다.

현재 PWR 원전의 유출물 중 방사능 관리 설계에서 평가된 주민 예상 선량이 기체 유출물의 경우 연간 50 μ Sv를 넘지 않는다면 ALARA가 달성된 것으로 간주한다는 규제 입장도 도전을 받을 수 있다.

사회 변화

사회는 변한다. 국가를 위한 개인의 희생을 미덕으로 알고 최대 다수의 최대 행복을 추구하는 공리주의의 가치관은 월남전의 수렁과 1968년 프랑스 5월혁명의 여파로 개인을 중시하는 포스트 모더니즘 가치관으로의 변화를 겪는다.

거대 통제 체제보다는 작은 자율



〈표 9〉 참조 동식물 선정을 위한 고려 요소 및 평가 결과^a

| 선정 동식물 | 야생 보호 법규 | 독성학 사용 | 인간 자원 | 방사능 축적 자료 | 방사선 영향 자료 | 후속 연구 편의성 | 대중 반응 |
|--------|----------|--------|-------|-----------|-----------|-----------|-------|
| 사슴 | + | | ++ | + | + | + | +++ |
| 쥐 | + | +++ | | ++ | +++ | +++ | + |
| 오리 | +++ | | + | + | + | +++ | +++ |
| 개구리 | ++ | | + | + | + | ++ | ++ |
| 잉어 | ++ | +++ | +++ | + | +++ | +++ | +++ |
| 넙치 | | + | +++ | +++ | ++ | ++ | + |
| 벌 | + | + | ++ | ++ | + | +++ | ++ |
| 게 | | + | +++ | +++ | + | ++ | ++ |
| 지렁이 | | +++ | | ++ | + | +++ | ++ |
| 소나무 | + | | +++ | ++ | +++ | +++ | +++ |
| 잔디 | | + | +++ | ++ | +++ | +++ | ++ |
| 미역 | | | + | +++ | + | ++ | ++ |

a. 상관성 평가 결과 +: 낮음 ++: 보통 +++: 높음

체의 네트워크를 선호하고 개인의 권익을 적극적으로 추구한다.

‘침묵의 봄’이 뿌린 불씨는 1980년대에 오존층 파괴가 가시화되고 1990년대에 지구 온난화의 위협을 직시하면서 환경 보호가 종식된 동서 대립을 대신하여 이데올로기화된다. 쉽게 묻혀버렸을 작은 목소리도 인터넷을 매개로 하여 영향력을 발휘하게 된다.

그래서 방사선 방호의 논리도 변한다. 집단 선량 관점에서 보던 최적화는 개인 선량의 정당성과 평등성을 주목하게 되고 공리주의적 선(善)이 아니라 개개 구성원의 만족을 요구한다. 이해 당사자의 합의가 없는 선은 선으로 인정되지 않는다.

우리 사회는 급변하고 있다. 너무 빠른 변화에 가치관이 흔들린다. 무엇이 옳고 무엇이 그른지 모호해

진다. 정과 반이 합리적 조화를 찾는 것이 아니라 힘으로 압도하려는 경향이다.

싸움을 위한 전략에 대중을 이용한다. 대중을 끌기 위해서는 선명성이 필요하고 선명성을 위해서는 공격할 대상이 필요하다. 강한 이미지의 상대일수록 효과가 있다.

그래서 원자력은 좋은 표적이다. 공격받는 것은 추악(醜惡)이요 공격하는 자는 미선(美善)인 것처럼 대중에게 인식된다.

옳고 선한 것도 일단 대중에게 추악한 것으로 낙인찍히면 회생 불능이 될 수도 있고 회복하더라도 시간이 걸린다. 정책 의사 결정자는 외면하거나 분위기에 편승함으로써 우리가 탄 배를 엉뚱한 방향으로 끌고 간다. 원자력 산업의 위기를 몰고 올 수도 있다.

맺음말

시대가 지나면 많은 것이 바뀐다. 방사선 방호의 기반도 빠르게 변화하는 속성을 지닌다. 방사선 위해에 대해서는 다른 독성 물질의 위해에 비해 상대적으로 잘 알고 있는 것으로 평가하고 있다. 그러나 현재의 시점에서 방사선 방호 기반의 견고성을 들여다보면 여전히 불안정 요소들이 있다.

그렇지만 과학적 기반은 ICRP 26 권고에서 ICRP 60으로 이행한 때처럼 큰 변화요인은 없다. 방사선 리스크에 중대한 변화가 없고 무엇보다 논란이 많은 LNT 논리가 유지되기 때문이다.

비록 중성자를 비롯한 중하전입자의 방사선 가중치가 상당한 폭으로 수정되지만 그런 방사선을 피폭하는 경우는 특별한 경우에 한정된다.

생식선 피폭에 따르는 유전 결함의 위험 평가치가 크게 줄었지만 과거에도 유전 결함 위험이 차지하는 비중이 크지 않았기 때문에 전체적인 방호 체계에 미치는 충격은 작다.

방호 체계가 개인 선량 한도의 지원을 받는 최적화(ALARA) 중심에서 개인 선량 제약치 중심으로 이동한다는 것도 따져보면 과정의 차이일 뿐 방향은 같다.

단일 선원에 대해 제약치를 적용

하여 선원 특성에 따라 방호의 수준을 달리할 수 있다는 논리는 기존의 ALARA 개념에도 내재되어 있다. 제안된 제약치 골격도 기존 방호 기준과 대동소이하다.

많은 비용을 발생시키고 그 비용의 정당성에 의문을 초래하는 매우 낮은 준위의 선량에 대한 입장에 별다른 변화가 없다는 것은 실망스럽다.

규제 면제의 경계선이 왜 연간 0.01mSv이어야 하고 왜 0.1mSv 수준일 수 없는지 설명이 명쾌하지 못하다. 새로운 ICRP 기본 권고를 기획할 당시의 기대와는 다른 결과이며 태산명동 서일필(泰山鳴動風一匹)이다.

이처럼 과학적 기반 또는 기계적 수단의 변화는 작은 데 반해 사회적 요소는 많은 변화를 초래할 것으로 보인다. 이해 당사자 참여와 합의의 문제이다.

새로운 권고나 지침은 분야마다 이 요소를 강조한다. 최적화의 방향이 그렇고 환경 보호의 기본틀 구축도 그렇다.

각국 규제 당국이 구체적 제약치를 선정할 때는 물론이고 심지어 선량 평가를 위한 대표 개인을 선정하는 데도 이해 당사자 참여가 거론된다. 다양한 이해 당사자의 의견을 효과적으로 듣고 조율하면 크게 보아 많은 비용을 절감할 수도 있다.

우리가 안고 있는 문제는 아직 우

리가 이런 일에 익숙하지 못하다는 것이다. 이에 비해 현재 우리 사회에서 원자력이나 방사선에 대한 저항은 유난히 거세다.

방사선 방호를 위한 의사 결정 과정에 어떤 이해 당사자를 어떤 방식으로 참여시켜 슬기롭게 갈등을 해소해 나갈 것인가가 방사선 방호 체계의 변화 조류 대응에서 우리에게 가장 어려운 과제이다.

방사선 안전 문제가 원자력을 부당하게 공격하는 창이 되지 않아야 한다. 이미 이용당하고 있지만 더 악화되지 않도록, 나아가 바른 길로 갈 수 있도록 대안을 마련하고 실천에 옮겨야 한다.

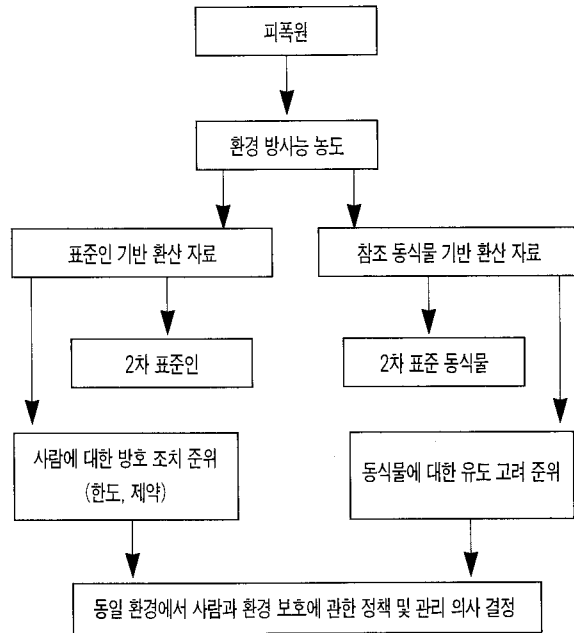
21세기 방사선 방호의 갈 길을

좌우하는 외력으로서 무엇보다 사회적 압력이 중요하다.

미국의 방사선 방호 정책은 법정이 결정한다는 불평이 있다. 혹독한 배상 책임을 피하기 위해서는 다소 과도한 방어적 관리가 낫다는 판단 때문에 방호 비용이 불필요하게 증가한다고 본다.

한국에서는 시민 단체가 방사선 방호를 좌우한다는 가설이 가설만으로 들리지 않는다.

위험의 평가, 관리, 그리고 의사소통에 보다 체계적 노력이 강구되어야 한다. 과학적으로 안전하다고 안전한 것이 아니다. 방사선 방호는 과학만이 아니다. ☻



(그림 14) 사람과 동식물에 대한 방사선 방호의 평행 개념