

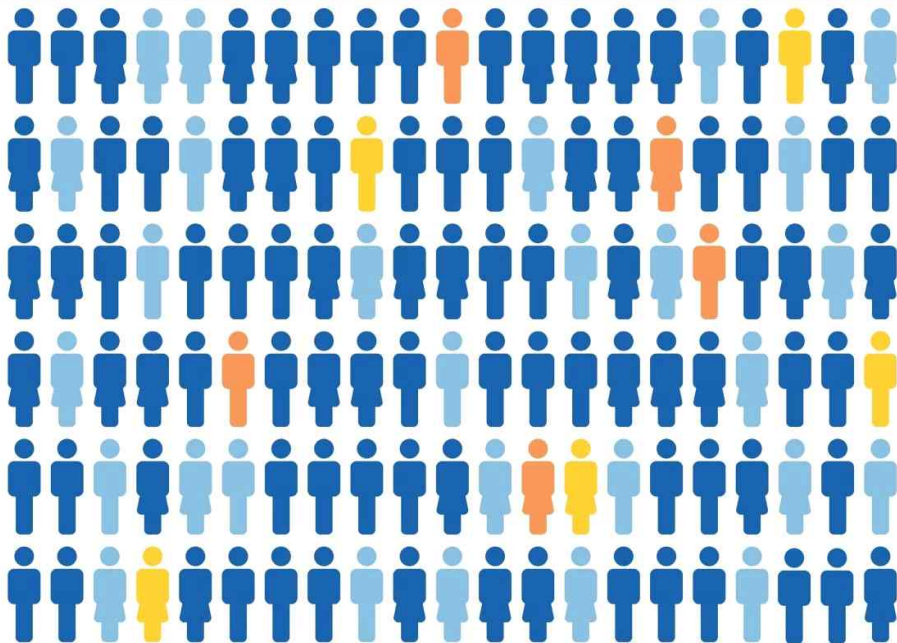


IRSC/TR/22-01

ICRP 간행물 152

# 방사선위해 산출 방법론

Radiation Detriment Calculation Methodology



대한방사선방어학회  
방사선안전문화연구소



이 번역본 발간은 2022년 원자력안전기술원 위탁연구사업의 일환으로 이루어졌습니다. 학회는 이 번역본 배포를 승인해준 ICRP 호의에 감사합니다.

<표지그림> 방사선피폭으로 인한 확률론적 위험 개념의 도시. 같은 피폭에서도 확률론적 영향(암이나 유전질환)의 발현은 우발적이며 지역, 성별, 연령, 유전소인 등 여러 인자에 따라 그 위험에 차이가 있음을 암시한다. 그림 원본: ICRP 152(작가: Charlotte White).

Ann. ICRP 51(3), 2022

ICRP Publication 152

# 방사선위해 산출 방법론

Radiation Detriment Calculation Methodology

편집인

C.H. CLEMENT

부편집인

T. YASUMUNE

H. FUJITA

ICRP를 위한 저자

E. Cléro, L. Vaillant, W. Zhang, N. Hamada,

D. Preston, D. Laurier, N. Ban

국제방사선방호위원회

이 ICRP 간행물의 우리말 번역본은  
ICRP의 허락(2022년 11월)을 받았으며  
ICRP 정신에 따라 무료로 배포합니다.

# 역사서문

이 간행물은 방사선방호의 기반이 되는 낮은 선량에서 발생할 수 있다고 가정하는 확률론적 방사선위험에 관한 과학적 평가를 다룬다. 주요 내용은 피폭집단의 사회(인종과 습관), 성별, 방사선피폭 당시 연령, 피폭 후 경과시간(도달연령)에 따라 사람 신체의 각 조직이나 장기에 미치는 '위해'가 어느 수준인지를 다룬다. 여기서 말하는 위하는 방사선피폭으로 특정 질환이 발생하거나 그로 인해 사망할 위험뿐만 아니라, 사망하지 않더라도 질환 자체나 그 치료 과정에서 겪게 되는 삶의 질 저하 영향까지 포괄하는 개념이다. 즉, 총체적 건강 저하 부담으로 볼 수 있다. 그러니 방사선위해를 다루는 보고서는 매우 과학적인 내용으로 구성될 수밖에 없다.

과학적 보고서는 굳이 우리말 번역본을 낼 필요 없이 관심 있는 사람이 원문을 찾아보는 것이 적절하다고 보아, 지금까지 정책적 함의가 있는 간행물만 선별해 번역본을 제공해 왔다. 이 방침에도 불구하고 이 간행물의 번역본을 내는 이유가 있다.

현재 국가를 막론하고 방사선위험에 대한 시민의 우려 수준이 높다. 특히 원자력발전소 등 원자력시설을 운영하는 국가에서는 '반핵' 정서와 엮여 방사선위험을 보는 시각 차이가 커서 사회적 갈등이 발생하고 불필요하게 막대한 비용을 초래하기도 한다.

2011년 후쿠시마 원전 사고 당시 방사선위험을 회피하려 대규모 집단을 무리하게 소개한 부작용으로 1천 명 이상의 사망자가 발생했다. 시간 여유를 갖고 계획을 세워 차분히 대응했다면 그로 인한 추가 개인선량은 수십 mSv 수준이었을 것이다. 수십 mSv는 우리나라민이 평균적으로 3~4년간 받는 자연방사선 수준이므로 중대한 문제로 보이지 않는다.

굳이 장기적 암 증가까지 고려해 위험을 추산해보자. 예를 들어 10만 명이 추가로 20 mSv를 피폭한다면 총 집단선량은  $2 \times 10^6 \text{ mSv} = 2000 \text{ Sv}$ 이다. 이 집단선량에 기준집단의 명목 위험계수 0.05/Sv를 곱하면 100명을 얻는다. 100명이라면 희생자가 많아 보이지만 10만 명 집단에서 일반적으로 암으로 사망하는 2만 명에 비하면 오차 수준이다. 더욱이 방사선피폭으로 인한 암 사망은 피폭 후 5년여 후부터 나타날 수 있지만 많은 경우는 자연적 암 발생률이 높은 노년기가 된다. 다시 말해 수십 년 후에 수십 년에 걸쳐 나눠 사망할 것으로 추정되는 100명을 구하기 위한 비상대응이 사고 당해 연도인 2011년에 실제 1천여 명을 사망에 이르게 했다고 말할 수 있다. 방사선위험에 대한 과잉대응 문제를 드러낸다.

후쿠시마 사망자와 관련된 해프닝도 있다. 2017년 9월 고리1호기 영구정지 기

념사에서 대통령은 “후쿠시마 사고로...2016년 3월까지 1386명이 사망했고.... 방사능 영향으로 인한 사망자나 암환자 발생 수는 파악조차 불가능한 상황”이라고 지적하며 탈원전 정책의 명분으로 내세웠다. 원자력계가 방사선피폭으로 인한 사망자가 1명도 없다는 반론을 제기하자 9월 27일 한겨레 신문은 후쿠시마대학이 제시했다는 몇몇 암과 기타 질환에 대한 자료를 보이며 사고 전인 2010년과 사고 후인 2012년 사이에 이들 질환이 크게 증가해(백내장 2.3배, 폐암 1.6배, 위암 1.3배, 소장암 4배, 대장암 3배 전립선암 3배 등) 기념사 내용이 근거가 있는 듯이 보도했다.

그러나 이 간행물에서 보듯이 과학적 지식은 방사선에 노출된 후 암이 진전되는 데는 최소 5년(백혈병은 2년)의 잠복기가 필요하다. 그러니까 작년에 어느 정도 방사선에 노출된 탓으로 올래 어떤 암이 몇 배 증가한다는 것은 과학과 일치하지 않는다. 후쿠시마대학의 자료는 아마도 모집단 수가 다르거나 사고 후 주민에 대한 집중 건강진단으로 암을 조기에 발견함으로써 일시적으로 진단 수가 늘어난 것으로 해석할 수밖에 없다. 일본 정부 보고는 물론 유엔 방사선영향과학위원회(UNSCEAR), 국제원자력기구(IAEA) 등이 발행한 후쿠시마 사고 영향에 대한 보고서의 과학적 판단은 장기적으로도 암 증가는 식별될 수준이 아닐 것으로 내다본다. 이처럼 원자력에 반대하는 것이 선봉이라는 신념 때문에 사실을 교묘히 편집하여 시민의 판단을 흐리는 일이 종종 있다.

호도된 방사선위험 때문에 사회가 괜한 비용을 치르지 않으려면 구성원이 방사선위험의 실체를 이해해야 한다. 사람들이 방사선을 심히 두려워하는 실태는 이미 수준에 오른 방사선방호를 더 발전시키는 노력보다 방사선위험에 관한 소통이 더 절실함을 적시한다. 즉, 방사선위험의 소통을 방사선방호의 주요부문으로 편입해야 할 형편이다. 이런 맥락에서 방사선위험에 관한 과학적 근거인 이 간행물의 번역본이 의미가 크다고 판단했다.

그렇다고 이 간행물이 일반인과 ‘소통’을 배려한 수준은 아니다. 복잡한 과학 보고서로서 용어는 생소하고 그 정의는 더욱 어렵다. 웬만큼 공들여 읽지 않으면 맥락을 놓칠 수도 있을 것 같다. 그래도 한 세기 가까이 집적된 과학적 정보가 집약된 자료로서 가치는 크다. 이러한 자료를 바탕으로 방사선위험의 실체를 대중과 효과적으로 소통하려면 정보를 어떻게 가공하고 어떻게 전달해야 하는지 고민하고, 시도하고, 평가하고, 발전시켜야 한다.

2022년 11월

역자 이재기

(대한방사선방어학회 방사선안전문화연구소장, 전 ICRP위원)

# 명료성, 투명성, 그리고 책임성

방사선위해 개념은 ‘방사선방호체계’(이하 방호체계)의 중심이다. 방사선위해는 낮은 선량률, 낮은 선량의 전리방사선 피폭에 따른 암과 유전영향으로 사람 건강이 받는 해로움의 척도이다. 위해는 선량한도 설정을 돕고 정당화와 방호최적화를 고려할 때 다른 해로움이나 이득과 비교를 가능하게 한다.

ICRP는 2007년 기본권고(ICRP 2007)에서 방사선위해를 갱신했고, 최근 방호체계 재검토를 준비하면서 이를 다시 살폈다. 2007년 권고에서 방사선위해 개발에 대해 비교적 자세히 다뤘지만, 계산을 재현하는 시도에서 때로는 ICRP 103의 값과 같은 값을 얻지 못했다.

이를 명확히 할 필요성을 인식하여, 이 간행물의 첫 목표는 방사선방호 목적을 위한 방사선위해 계산을 완전하고 상세하게 재현하는 것이다. 이러한 투명성은 다른 사람이 방법론과 분석에 들어간 모든 인자를 상세히 검토할 수 있게 한다. 투명성은 방사선위해의 개념과 계산에서 장래에 있을 수 있는 변화에 확고한 근거가 된다.

나아가 몇몇 민감도분석을 실시해 어떤 인자가 방사선위해 계산에 영향력이 큰지 살폈다. 이는 ICRP나 다른 사람이 가장 중요한 인자에 연구 노력을 집중하도록 도울 것이다.

2007년 권고를 위한 계산을 검토하는 중에 일부 프로그램 오류를 발견했다. 이 오류가 노동연령인구에서 몇몇 장기/조직의 명목위험 계수를 잘못 계산한 결과를 냈으나, 전체적 결과는 크게 영향을 받지 않았다. 다행히 이는 방호체계에 충격이 없음을 의미한다. 그렇더라도 이 간행물은 완전한 투명성과 책임성을 보장하도록 그 오류를 명확히 논의, 평가, 수정하였다. 투명성과 책임성은 아래의 ICRP 윤리강령(ICRP 2014)의 5원칙 중 둘에 해당한다. ICRP가 유념할 5원칙은 다음과 같다.

- 방사선의 해로운 영향으로부터 사람과 환경을 보호하도록 행동하고(공익에 헌신)
- 산업이나 기타 방사선 사용자를 포함한 조직이나 정부로부터 독립적으로 행동하고(독립성)
- 권고나 지침을 개발할 때 불편부당하게 행동하며(불편부당성)
- ICRP 조치나 판단에서 투명하도록 노력하고 이해당사자를 동참시키며(투명성)
- 공익단체 활동을 지배하는 기틀에 책임을 진다(책임성).

ICRP는 방호체계의 관리자로서 체계를 목적에 맞게 유지할 책임이 있음을 이해하지만, 방호체계의 주인도 이용자도 이득자도 아니다. 그러므로 방호체계의 지속적인 검토와 개정에서 추가적 현실 윤리원칙이 대두된다. 포괄성과 접근성이 그 요체로서 방호체계의 검토와 개선에 참여하고 싶은 사람 누구나 그렇게 할 수 있게 한다. ICRP가 공개논문 2편(ICRP 웹사이트에 있음)을 통해 방호체계 검토와 개정을 발진시키고, 2021년 10월에 '미래 방사선방호에 관한 워크숍'을 조직한 것은 이 원칙을 유념한 것이다. 그 워크숍은 인터넷이 접속되는 누구나 경제적 제약 없이 참석할 수 있도록 온라인으로 열렸으며, 무료로 등록할 수 있게 해 포괄성과 접근성을 높였다. 투명성을 상기하여 머지않아 워크숍의 모든 자료를 ICRP 웹사이트에 공개할 예정이다.

방호체계의 검토와 개선 기틀에서 방사선위해에 대해 할 일이 더 있다. 예를 들면 ICRP 작업그룹 91이 작업 중인 '방사선방호 목적에서 낮은 선량률, 낮은 선량 피폭의 방사선위험 추론'이 향후 방사선위해 계산에 중요한 입력이 될 것이다. 작업그룹 111과 작업그룹 119가 각각 다루고 있는 '개인의 방사선 감수성'과 '순환계 질환'과 같은 기타 영향을 포함할 것인지, 한다면 어떻게 할 것인지도 고려할 필요가 있다. 또한 ICRP는 암위험 모델과 위해에 방사선 외적 인자의 포함에 관한 작업그룹의 발족도 준비하고 있다. 2007년 권고를 대체할 권고가 완성되기 전에 이 모든 것을 고려하는 방사선위해에 관한 다른 간행물의 발간도 상상할 수 있다.

Christopher Clement

편집장

## 참고문헌

Clement, C., Rühm, W., Harrison, J., et al., 2021. Keeping the ICRP recommendations fit for purpose. *J. Radiol. Prot.* 41, 1390.

ICRP, 2007. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103. *Ann. ICRP* 37(2-4).

ICRP, 2014. ICRP Code of Ethics. Available at: <https://icrp.org/admin/ICRP%20Code%20of%20Ethics.pdf>(last accessed 10 January 2022).

Laurier, D., Rühm, W., Paquet, F., Applegate, K., Cool, D., Clement, C., on behalf of the International Commission on Radiological Protection (ICRP), 2021. Areas of research to support the system of radiological protection. *Radiat. Environ. Biophys.* 60, 519-530.



# 목 차

역자서문 .....	iii
객원논설 .....	v
두자어 .....	ix
<b>요 지</b> .....	<b>1</b>
<b>요 점</b> .....	<b>3</b>
<b>요 약</b> .....	<b>5</b>
<b>제1장 서 론</b> .....	<b>9</b>
1.1. 배경 .....	9
1.2. 범위 및 목적 .....	12
1.3. 이 간행물의 구조 .....	13
<b>제2장 방사선위해 산출 역사</b> .....	<b>15</b>
2.1. ICRP 26 .....	15
2.2. ICRP 27 및 ICRP 45 .....	17
2.3. ICRP 60 .....	18
2.4. ICRP 103 .....	20
<b>제3장 방사선위해 계산</b> .....	<b>23</b>
3.1. 명목위험 산출 .....	24
3.2. 심각도 보정 .....	43
3.3. 조직가중치 결정 .....	46
<b>제4장 방사선위해 계산의 민감도</b> .....	<b>49</b>
4.1. 기준집단 .....	50
4.2. 명목위험 계산 변수 .....	52
4.3. 심각도 보정 변수 .....	57
4.4. 몇몇 민감도분석 요약 .....	59

<b>제5장 잠재적 진화</b> .....	<b>63</b>
5.1. 위험모델 변수의 개정 .....	65
5.2. 성별과 연령에 따른 차이 .....	67
5.3. 피폭 시나리오 .....	69
5.4. 암의 영향의 고려 .....	70
5.5. 투명성 및 포괄성 .....	71
<b>제6장 요약 및 결론</b> .....	<b>73</b>
6.1. 방사선위해 계산 .....	73
6.2. 방사선위해 민감도 .....	74
6.3. 향후 개선을 위한 제안 .....	74
<b>부록 A. 기저율 및 인구학 데이터</b> .....	<b>77</b>
<b>용어집</b> .....	<b>85</b>
<b>참고문헌</b> .....	<b>91</b>
<b>사 사</b> .....	<b>97</b>

## 사용 두자어 및 두자성어

BEIR Biological Effectiveness of Ionizing Radiation 미국과학원 방사선영향위원회  
CLL chronic lymphocytic leukaemia 만성림프성백혈병  
DALY disability-adjusted life years 장애보정생활년  
DCS diseases of the circulatory system 순환계질환  
DD doubling dose 배가선량  
DDREF dose and dose-rate effectiveness factor 선량선량률효과인자  
DHHS Department of Health and Human Services 미국 건강복지부  
DS02 Dosimetry System 2002 선량계측체계 2002  
EAR excess absolute risk 초과절대위험  
ELR excess lifetime risk 초과상대위험  
ERR excess relative risk 초과상대위험  
Gy gray 그레이  
ICRP International Commission on Radiological Protection 국제방사선방호위원회  
LAR lifetime attributable risk 생애기인위험  
LET linear energy transfer 에너지전달선밀도  
LNT linear-non-threshold 문턱 없는 비례 모델  
LQ linear-quadratic 선형-2차  
LSS life span study 수명연구. 일본 원폭생존자 역학연구 프로그램  
NAS National Academy of Sciences 미국 과학원  
NCRP National Council on Radiation Protection and Measurements 미국 방사선방호측정위원회  
NRC National Research Council 미국 과학원 국가연구위원회  
QALY quality-adjusted life year 품질보정생활년  
QOL quality of life 삶의 질  
REIC/REID risk of exposure-induced cancer incidence/death 피폭기인 암 발생/사망 위험  
rem röntgen equivalent man 렘. 선량당량 단위(1 rem = 0.01 Sv)  
SEER: Surveillance, Epidemiology, and End Results 미국 암등록프로그램  
Sv sievert 시버트  
UNSCEAR UN Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation 유엔 방사선영향 과학위원회  
WHO World Health Organization 세계건강기구  
US DHHS United States Department of Health and Human Services 미국 건강복지부  
YLD years lost due to disability 불구기인 손실년  
YLL years of life lost 수명손실년



# 방사선위해 산출 방법론

## ICRP 간행물 152

2021년 11월 ICRP 승인

**요지** - 방사선위해(radiation detriment)는 사람 집단의 낮은 선량률, 낮은 선량 방사선피폭에 따른 해로운 확률론적 영향 부담을 정량화하려 ICRP가 개발한 개념이다. 위하는 한 세트 장기/조직에 대한 생애 암위험과 유전질환 위험을 영향의 심각도까지 고려하여 구한다. 이 보고서는 ICRP가 ICRP 26 이래 채택해 온 위해 산출 방법론의 이력을 검토하고, ICRP 103에서 사용한 전체 계산과정의 상세를 제공한다. 자료원, 위험 모델, 계산 방법 및 변수값 선정의 논거도 명확히 한다. 또, 일부 민감도분석을 통해 방사선위해 계산에서 변동과 불확실성의 주요 근원이 되는 변수와 계산 조건을 식별했다. 성별, 피폭연령, 선량선량률효과인자(DDREF), 생애위험 계산에서 선량 가정, 그리고 치사율이 방사선위해 값에 크게 영향을 미쳤다. 현행 위해산출 도식은 잘 수립된 것이지만, 인구 건강통계 변화와 방사선 건강영향에 관한 과학적 이해의 발전을 반영하여 진화할 필요는 있다. 이 관점에서 기준집단 데이터와 암 심각도와 같은 핵심 변수 평가를 갱신할 필요가 있다. 근래에 누적된 역학적 발견을 기반으로 암 위험 모델을 개선할 여지도 있다. 끝으로 방사선위해 개념의 이해 증진 중요성과 계산 방법론의 투명성도 강조한다.

중심어: 방사선위해, 확률론적 영향, 명목위험, 민감도분석



## 요 점

- 방사선위해는 낮은 선량률, 낮은 선량 방사선피폭으로 인한 확률론적 영향(암과 유전영향)을 정량화하는 데 사용하도록 ICRP가 개발한 개념인데, 이때 이들 영향의 발생 확률과 심각도 모두를 고려한다.
- 방사선위해 계산 방법은 크게 두 부분으로 구성되는데, 명목위험(방사선피폭과 관련된 생애 암 위험과 유전영향 위험의 평균 추정치) 계산, 그리고 비치사 조건에서 삶의 질 저하와 수명손실 길이로 표현하는 심각도에 대한 보정이다. 상세한 절차를 제시함으로써 ICRP 103(2007) 설명의 모호성을 해소하고 잘못을 바로잡았다. ICRP 103의 노동연령인구에 대한 명목위험 계산에서 프로그램 오류가 발견되었다. ICRP는 이 오류가 전체 위해에는 영향이 유의하지 않아 방사선방호체계에도 함의는 없음을 밝힌다.
- 몇몇 민감도분석은 성별, 피폭연령, 선량선량률효과인자(DDREF), 생애위험 계산에서 선량 가정, 그리고 치사율이 방사선위해 평가에 크게 영향을 미침을 보였다.
- 기준집단 데이터 및 암 심각도 변수의 변화, 성별, 연령 및 상이한 집단에서 암 위험의 차이, 암 위험 모델의 개선, 그리고 유전영향 위험 평가의 발전을 잘 반영하도록 방사선위해 계산을 갱신할 여지가 있다.





## 요 약

(a) 방사선위해 개념은 ICRP가 방사선방호 목적을 위해 개발했다. 방사선위해는 낮은 수준 방사선 피폭자와 그 후손 그룹에서 피폭하지 않은 그룹에 비해 확률론적 건강영향의 초과분으로 정의된다. 방사선위해는 한 세트 조직과 장기에 대해 성별과 피폭연령에 평균한 생애위험 평가치로 구하는데, 이때 비치사 조건에서 삶의 질 저하, 수명손실 길이로서 심각도가 고려된다.

(b) ICRP는 2007년 권고(ICRP 2007) 발행 이후 방사선 건강영향에 대한 과학적 이해의 발전과 실제 경험 축적을 고려하여 방사선방호체계의 철저한 검토를 최근에 시작했다. 이 간행물은 그 검토의 일부이다.

(c) 낮은 선량률, 낮은 선량에서 방사선위해는 확률론적 영향에 대한 문턱 없는 선량-반응 관계를 가정하고, 모든 고형암에 대해 선량선량률효과인자(DDREF) 2를 적용하여 정량화된다. 이는 방사선위해가 제한된 범위<sup>1)</sup>의 선량률이나 선량에 적용됨을 의미한다.

(d) 방사선위해 값은 집단에서 암이나 유전질환 증례의 절대 수 예측이 아니라 방사선 방호 목적에서 합리적 가정에 근거한 추론으로 봐야 한다.

(e) 방사선위해 산출 방법론은 ICRP 22(1973)에서 그 개념을 처음 도입한 이래 수십 년에 걸쳐 발전해 왔다. ICRP 103(2007)의 최신 방법론은 크게 두 부분으로 구성된다. 첫 부분은 명목위험 산출인데, 명목위험은 방사선피폭 관련 생애 암발생 위험과 유전영향 위험의 연령군에 걸친 평균 추정치이다. 생애 암유발 위험은 뼈암과 피부암을 제외하고는 4 기준집단(구미인 남자 및 여자 집단, 아시아인 남자 및 여자 집단)에 대해 따로 산출하고 그 결과를 성별과 지역에 걸쳐 평균한다. 계산 방법론의 둘째 부분은 영향의 심각도를 반영한 보정이다. 모든 계산 단계는 각개 조직/장기 또는 조직군에 대해 따로 수행하고 그 결과 값을 합산하여 총 방사선위해를 얻는다.

(f) 명목위험 계수 계산은 여러 순차적 단계를 거치는데, 요약하면 다음과 같다.

- 세계 여러 지역의 대표적 집단에 대한 암 발생률을 확보하기 위해 선발된 구미 및

---

1) <역주> 즉, 낮은 범위.

아시아 인구집단에 대해 암 발생률을 산출한다.

- 주로 히로시마와 나가사키 원폭생존자에 대한 수명연구(Life Span Study(LSS))로부터 얻은 암 발생 데이터 분석을 바탕으로 9개 장기/조직의 암과 하나의 기타 고형암 그룹 및 백혈병에 대해 위험 모델을 개발한다. 성별, 피폭연령 및 도달연령을 변수로 초과상대위험(excess relative risk(ERR)) 및 초과절대위험(excess absolute risk(EAR))을 모델링한다.
- 뼈와 피부의 암은 ICRP 60(1991)의 생애 발생위험을 명목위험 평가치로 사용한다.
- 백혈병을 포함한 모든 암의 최소 잠복기는 5년으로 가정한다.
- 각 암 사이트에 대해 피폭기인 암발생 위험(exposure-induced cancer incidence(REIC))을 0.1 Gy 단일 피폭에 대해 계산하고, Gy 당 생애위험을 얻기 위해 10을 곱한다. 이 위험은 전체집단에 대해서는 0~89세, 노동연령인구에 대해서는 18~64세의 매 피폭 연령에서 계산하고 도달연령 94세까지 그 위험을 합산한다.
- 각 피폭연령에 대해 REIC 가중평균을 계산하여 연령 평균 생애위험을 구하는데, 이때 가중치는 기준집단의 연령분포에 비례한다.
- ERR과 EAR 생애위험을 각 암 사이트에 대해 지정한 ERR:EAR 가중치에 따라 평균한다.
- 선형-2차 모델이 적용되는 백혈병을 제외하고 고형암에 대한 생애위험 추정치는 DDREF 2를 적용해 하향 조정한다.
- 그 결과값을 기준집단(구미인 남녀 및 아시아인 남녀) 사이에 단순평균하여 각 장기나 조직의 명목위험을 얻는다.
- 유전질환 위험은 따로 평가하여 위 결과와 합쳐 한 세트 명목위험 계수를 얻는다.

(g) 명목위험을 세 변수로 보정하는데 치사율, 삶의 질 저하, 수명손실년이다. 이 세 변수는 방사선량과는 거의 무관하다. 이들은 암통계의 객관적 데이터와 전문가 판단에 따라 결정되며, 사용된 값은 연령, 성별 또는 인구집단 간 차이를 고려하지 않는다.

(h) ICRP 103(2007)의 노동연령인구에 대한 명목위험 계산에서 프로그램 오류가 발견되었다. ICRP는 이 오류가 전체 위해에는 영향이 유의하지 않아 방사선방호체계에 함의는 없음을 밝힌다.

(i) 계산에 적용한 가정의 잠재적 영향을 평가하기 위해 9 가지 고형암과 나머지 고형암 그룹에 대해 방사선위해의 민감도분석을 몇몇 수행했다. 영향 수준에 따라 인자를 다음 세 범주로 구분했다.

- 경미한 영향(1.5배 이내 변화): 생애 위험 계산법, 최소 잠복기, 최대 도달연령, 최저 삶의 질 인자

- 보통 영향(일부 조직/장기에 1.5~2배 변화): 기준 인구집단, 이전<sup>移轉</sup> 모델, 암 없는 삶 손실 상대년수
- 큰 영향(일부 조직/장기에 2배 이상 변화): 성별, 피폭연령, DDREF, 생애위험 계산에서 선량 가정, 치사율.

(j) 방사선영향에 대한 과학적 이해와 건강관리 발전에 따라 암위해 계산 방법론도 발전해야 한다. 기준집단 데이터를 갱신하고 지리 영역을 확대할 필요가 있을 것이다. LNT 모델, DDREF, 위험이전 요강을 포함해 명목위험 계산을 위한 가정을 최신 과학적 발견 관점에서 검토해야 한다. 최신 역학 데이터에 근거하여 암위험 모델을 개선해야 한다. 질환 심각도를 정량화하는 다른 접근을 포함해 암 심각도 데이터도 갱신과 정제가 필요하다. 근래 연구를 참조하여 유전영향에 대한 위험 평가치를 재검토하는 것도 바람직하다.

(k) 성별과 연령에 따른 암위험 변동을 고려할 때, 성별과 선정된 연령(또는 연령군)에 대해 생애위험을 따로 계산한 다음 최종 단계에서 평균하여 집단평균 명목위험을 얻는 것이 바람직하다. 이러한 접근이 과학기반 위험평가와 뒤따르는 방호목적의 정보 통합을 구분되게 하며, 방사선위해 구축을 더 잘 이해할 수 있게 한다. 조직가중치  $w_T$  값을 구할 때 성별이나 연령에 따른 변동도 고려해야 한다. 여러 상대위해 세트와 함께, 조직가중치에 대한 상세 설명은  $w_T$ 의 분포 범위와 대표성에 대한 이해를 도울 것이다.

(l) 낮은 선량에서 순환계 질환과 백내장의 선량-반응 곡선의 형태에 상당한 불확실성이 있다. 이들 질환에 문턱이 있는지도 여전히 불확실하다. 이들 질환을 방사선위해 계산에 포함할지는 현재 열린 질문으로 남아 있다.

(m) 방사선위해 계산의 투명성과 추적성 보장이 점차 중요해진다. 방사선위해의 모든 계산 단계에 대해 충분한 설명이 필요하며, 이 계산을 수행하는 공개소스 소프트웨어 개발도 고려해야 한다. 비전문가도 방사선 건강 위험에 대해 균형된 관점을 갖도록 방사선위해를 표현하고 소통하는 방식을 개선하는 것도 바람직하다.



# 제1장 서론

## 1.1. 배경

(1) 방사선 건강 영향은 두 범주로 분류되는데 유해 조직반응(결정론적 영향)과 암/유전영향(확률론적 영향)이다. 방사선방호 목적에서 낮은 선량률, 낮은 선량 피폭에서 암과 유전영향은 문턱 없는 선량반응을 따르는 것으로 가정한다.

(2) 암은 일반적으로 긴 잠복기를 가지며, 수명손실 기간은 암 발병 연령의 분포에 따라 달라진다. 또, 사이트<sup>2)</sup>마다 암 치사율도 상당히 다르다. 방사선피폭 탓인 암 위험을 적절히 평가하려면 그 확률뿐만 아니라 심각도도 고려해야 한다. 유전영향도 광범한 비정상상을 포함하기에 같은 개념이 적용된다.

(3) 이런 요구에 따라 ICRP는 **위해**detriment 개념을 도입했다. 위해 개념을 방사선 피폭으로부터 어떤 그룹에 발생하는 해로움의 수학적 '기대치'로 정의했다(ICRP 1973, 1977a). 이 정의에서 해로움은 경제사회적 충격까지 포함하는 모든 종류의 악영향을 포괄하게 하려 했다. 그러나 실제로는 건강영향만 고려하기 때문에,<sup>3)</sup> 위하는 피폭 그룹이 겪게 될 가중 건강영향 기대치로 표현된다.

(4) ICRP 60(1991)에서 목적에 따라 여러 방법으로 표현할 수 있는 다차원 개념으로 위해를 새로 정의했다. 동시에 ICRP는 다양한 위해의 속성을 하나의 양으로 뭉치려 노력해, ICRP 103(2007)에서 방법론을 새로 정의했다. 그 방법론을 사용해 계산된 정량적 척도를 '**방사선위해**'라 불렀다. 방사선위해는 한 세트의 조직/장기에 대한 생애 암위험과 유전영향 위험을 상이한 집단, 성별 및 피폭연령에 걸쳐 평균해 산출되는데, 이때 질환의 심각도를 비치사 조건의 **삶의 질(QOL) 저하와 수명손실 길이**로 고려한다. 개별 장기/조직이나 조직 그룹에 대해 산출한 값을 합산

---

2) <역주> 인체에서 'site'는 '부위'로 종종 표현하지만 cancer site를 '암 부위'로 적으면 '인체에서 암이 발생하는 장기나 조직'이라는 본래 함의와 사뭇 달라지는 것 같아 외래어 형식으로 '사이트'로 적는다.

3) <역주> 경제사회적 파급영향의 광범성과 가변성 때문에 그 반영이 현실적으로 어렵다.

하여 총 방사선위해를 얻는다. 총 방사선위해를 1로 정규화하면 상대 방사선위해를 얻고, 이를 바탕으로 조직/장기를 그룹으로 분류한다. 이것이 **유효선량** 산출에 사용되는 **조직가중치** 값 책정 근거가 된다.

(5) ICRP는 방사선위해를 여러 목적으로 사용하는데, 선량한도를 권고하기 위한 방사선피폭의 영향평가, 체내 조직/장기 선량의 상이한 분포 영향의 비교를 통한 한 세트 조직가중치의 설정 등이다. 이 기본적 목적에 추가하여, 실제에서는 예를 들어 최적화 과정에서 피폭의 중요성 평가에도 방사선위해가 사용될 수 있다. 목적이 무엇이든, 방사선위해는 특정 개인의 위험을 구체적으로 표현하려 설계된 것이 아님을 유념해야 한다. 그보다는, 방사선위해는 최근 과학적 정보와 최신 인구건강 통계에 근거하여 대표집단에서 확률론적 영향의 전체적 부담에 대한 믿을 만하고 견고한 지표로 삼기 위한 것이다.

(6) 방사선위해는 고형암에 대해서는 **문턱 없는 선형(LNT) 선량-반응** 관계를, 백혈병에 대해서는 **선형-2차(LQ) 선량반응**을 가정하여 정량화된다. 높은 선량률, 높은 선량을 피폭한 역학 데이터로부터 평가한 위험을 조정하기 위해 고형암에는 **선량 선량률효과인자(DDREF)**를 적용한다. **에너지전달선밀도(LET)**가 낮은 방사선에 대해 0.2 Gy 미만 선량 또는 0.1 Gy/h 미만 선량률에서 DDREF 값 2를 제안했다 (ICRP 1991).

(7) 원론적으로 방사선위해는 선량과 후속 암위험이 비례한다고 가정한 낮은 선량률, 낮은 선량에서 DDREF를 참작하여 적용할 수 있다(ICRP 2005). 몇백 mSv 선량의 관리에 방사선위해나 유효선량을 사용하는 상황이 있을 수도 있다(ICRP 2021).<sup>4)</sup> 그러나 선량률이 0.1 Gy/h 미만이면 그러한 선량에서 낮은 LET 방사선에는 DDREF 값 2가 적용되지 않으며, 명목 위험계수가 암시하는 것보다 위험이 더 클 수 있다. 방사선위해는 심각한 조기 조직반응이 우려되는 고선량 피폭에 적용하는 것이 아니다. 그러나 이 말이 것처럼 높은 선량에서는 확률론적 영향이 일어나지 않음을 의미하는 것은 아니다(그림1.1 참조).

---

4) <역주> 수백 mSv를 초과하면 민감한 조직에서는 급성 조직반응(결정론적 영향)이 발생하기 시작한다. 선량이 더욱 높아지면 조직반응에 의한 세포사멸이 증가하여 장기적 확률론적영향(암)의 증가의 선량비례가 저하될 수 있지만, 수백 mSv까지는 세포사멸이 현저하지 않아 선량과 확률론적 위험의 비례성이 대체로 유지된다. 그래서 비상대응 계획 등 급성 피폭이 예상되는 상황에서 대응조치를 위한 참조준위를 유효선량으로 표현할 수 있는데 이 경우에도 대개 선량률이 100 mSv/h를 초과하지 않으므로 DDREF를 적용한 유효선량을 적용해도 무방하다. 그러나 선량률이 더 높다면 이 입장은 재고해야 한다.

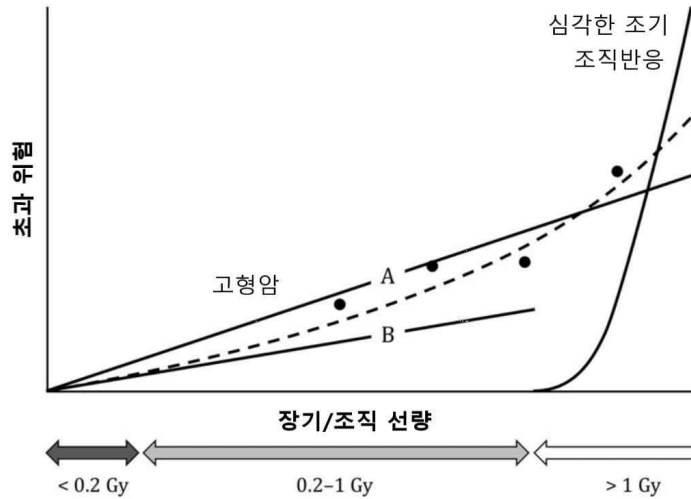


그림1.1. LET 낮은 방사선에 1회 급성피폭에서 선량-반응 곡선의 도시. 검정 점은 관찰된 고형암 유발 데이터를 표현하고 직선 A는 그 선형 맞춤이다. 직선 A에 DDREF 2를 적용하면 직선 B가 되며 이것이 낮은 선량을 낮은 선량에서 문턱 없는 선형모델이다. 점선 곡선은 선형2차 맞춤인데 이것이 참 선량-반응 관계일 수도 있다. 직선 B는 낮은 선량부터 보통 선량(<math>< 0.2 \text{ Gy}</math>)까지는 거의 점선 곡선과 일치하여 고형암 위험의 좋은 근사임을 보인다. 그러나 선량이 증가하면 위험의 과소평가가 유의해진다. 높은 선량(1 Gy 이상)에서는 심각한 조기 조직반응이 주된 우려이다.

(8) 방사선이 암 위험을 증가시킨다는 훌륭한 증거가 있지만 낮은 선량에서는 방사선 유발암 고유의 생물표지가 없고, 역학연구의 통계적 분석력 부족 때문에 그 증가를 명확하게 입증할 수는 없다. 이 사실은 암 위험의 증가가 입증되지 않았다고 볼 수 있는 낮은 선량 피폭에 대해 계산된 방사선위해의 해석에 신중한 배려를 요구한다. 실험동물에서는 방사선이 유전영향을 초래하는 명확한 증거가 있지만 사람에서 직접적 증거는 어느 선량에서도 없다. 그래서 방사선위해 계산 값을 집단에서 암이나 유전질환 증례 절대 수의 예측으로 간주해서는 안 되며, 비록 검증되지는 않았지만 합리적인 가정에 근거한 추론으로 봐야 한다. 방사선방호 목적에서 방사선위해를 사용할 수 있지만 그러한 추론은 불확실성을 내포함을 강조해 마땅하다 (UNSCEAR 2015).

(9) 방사선방호체계<sup>5)</sup>는 전리방사선을 피폭하는 모든 사람에게 적용되며, 피폭원을

5) <역주> 원문은 임의 체계가 아니라 ICRP가 방호의 근간으로 수립하여 권고하는 고유한

관리하는 방법은 피폭자 개인 특성을 참조하지 않고 적용함이 보통이다. 따라서 방사선위해는 명목집단에 대한 위험을 나타내도록 위험 추정치를 지리적 지역, 남녀 및 연령군에 걸쳐 평균하여 계산한다. 계산과정이 암 기저 발생률이 다른 집단 사이 위험 이전과 평균화를 포함하기에, 명목집단은 수정 불가능한 인자(예: 성별과 연령)뿐만 아니라 수정 가능한 인자(예: 흡연 등 생활양식)도 포함해 개인의 방사선 반응을 지배하는 인자가 서로 다른 사람들의 혼합으로 간주된다.

(10) 방사선위해는 방호목적에서 피폭상황에 대한 위험을 추론하거나 특정인의 피폭에 대해 소급적으로 위험을 평가<sup>6)</sup>하려는 목적이다. 그러나 남녀와 피폭연령 사이에 상당한 위험 차이가 있음에 유의해야 한다. 특정 개인이나 집단에서 피폭으로 인해 예상되는 영향의 추정을 위해서는 가용하다면 피폭자에 관한 구체적 데이터와 맞춤형 위험 모델을 사용하는 것이 바람직하다.

## 1.2. 범위 및 목적

(11) 2007년에 ICRP 103(2007)으로 기본권고를 발행한 이래, 방사선 건강영향에 대한 과학적 이해 발전과 실제 경험 축적을 고려하여 방사선방호체계를 갱신할 필요성을 평가하기 위해 ICRP는 방호체계에 대한 철저한 검토를 근래에 개시했다(Clement 등 2021). 검토의 일환으로 이 간행물은 방사선위해의 발전 역사를 되돌아보고, 그 계산 방법론을 철저히 분석했다. ICRP 103의 방사선위해 계산 과정을 암위험 계수 산출과정에 초점을 맞춰 상세히 보인다. 계산의 투명성과 재현성을 보장하려는 의도이다. 여기서 제공하는 정보는 ICRP 103 부록A.4를 보완한 수정판으로 볼 수 있다.

(12) 방사선위해는 방사선방호체계를 위한 정량적 기반이므로 방사선피폭의 건강 부담을 잘 표현하려면 지속적 개선이 필요하다. 다뤄야 할 이슈와 개선 방법을 이 간행물에서 논의하지만, 그것이 곧 변경하겠다는 ICRP의 결정으로 간주할 일은 아

---

체계임을 적시하기 위해 'the System of Radiological Protection'으로 대문자로 표현한다. 이 번역본에서는 이점을 밝히기 위해 이를 한 단어로 '방사선방호체계'로 적는다.

6) <역주> 특정인의 피폭으로 인한 위험을 소급적으로 평가한다는 것이 그 개인의 실질 위험을 평가한다는 의미는 아니다. 개인의 위험은 선량 크기뿐만 아니라 인종, 성별, 피폭연령에 따라 다르고 개인 유전소인도 중요한 인자이므로 이를 구체적으로 평가하기는 어렵다. 방사선위해도 보편적 지표일 뿐이어서 특정인에 대해서는 위해의 전형적 지시로만 의미를 가진다.



니다. 특별한 언급이 없으면 ICRP 103(2007)의 방사선위해 계산 방법과 그 계산 결과는 여전히 유효하다.

### 1.3. 이 간행물의 구조

(13) 서론인 제1장 이후 5개 장이 따른다.

- 제2장은 방사선위해의 정량적 표현에 대한 역사적 검토를 제시하는데, 계산법이 과학적 지식의 발전을 어떻게 수용했는지 조명한다.
- 제3장은 ICRP 103(2007)에서 사용한 계산과정을 상세히 보인다. 과정의 단계마다 자료원, 위험 모델, 계산방법, 그리고 채택한 변수값의 이론적 근거를 설명한다.
- 제4장은 몇몇 변수가 방사선위해에 미치는 민감도에 대한 일련의 분석 결과를 제시한다. 분석의 목표는 방사선위해 계산에서 변동과 불확실성의 주된 원인을 식별하려는 것이다.
- 제5장은 방사선위해 정량화 개선을 위한 핵심 이슈와 이를 다룰 수 있는 방법을 논의한다.
- 제6장은 주요 결론을 요약하고 향후 개선을 제안한다.



## 제2장 방사선위해 산출 역사

### 2.1. ICRP 26

(14) 위해 개념은 ICRP 22(1973)에서 처음 도입되었는데, 위해를 “각종 유해한 영향의 확률뿐만 아니라 영향의 심각도까지 고려한, 방사선량으로부터 발생하는 해로움의 ‘수학적 기대치’”로 정의했다.

(15) ICRP 26(1977a)에서 선형 선량-반응 모델에 따라 낮은 선량률, 낮은 선량에서 위해의 정량적 값을 평가했다. 선형 외삽은 낮은 선량률, 낮은 선량에서 방사선 위험을 과대평가할 수 있음을 적시하면서, 신중한 가정으로서 이를 인정했다.<sup>7)</sup> 나아가 ICRP는 몇몇 암 사이트에서 위험이 성별과 연령 의존적임을 인지하면서도, 종사자나 일반인 모두에서 연령과 성별에 무관하게 각 장기나 조직에 대한 평균값을 사용해도 방사선방호 목적으로 충분한 정확도를 가질 수 있다고 판단했다. 위해를 계산할 때 치사암과 심각한 유전영향의 가중치는 1로 했다.<sup>8)</sup> 기타 덜 심각한 영향에 대해서는 적은 가중치를 암시했지만 명시하지는 않았다. 따라서 ICRP 26에서 구체적으로 ‘위험인자 risk factor’로 부른 위해는 조직이나 장기의 단위 선량당량 당 치사 암과 심각한 유전영향의 성별과 연령 평균 확률로 표현되었고, 생식선(피폭자의 암 치사와 후손에서 유전영향 포함), 적색골수, 뼈, 폐, 갑상선, 유방 및 ‘잔여조직’에 대해 정량화했다.

(16) 백혈병에 대한 위험인자는  $20 \times 10^{-4} \text{ Sv}^{-1}$ 를 채택했다. ICRP 검토는 뼈는 유방, 적색골수, 폐 또는 갑상선보다 훨씬 덜 민감한 것으로 결론짓고 뼈암 위험인자

---

7) <역주> 위험을 과대평가할 가능성이란 위험계수의 크기 문제라기보다 수십 mSv 이하 수준에서 암 증가의 직접 증거가 없기 때문에 일부에서 제기하는 암 유발에도 문턱선량이 있을 가능성을 배제할 수는 없다는 의미이다. 그러나 방호목적에서는 문턱 없는 선량 정비에 위험을 가정한다.

8) <역주> 암과 유전영향(합) 가중치를 1로 하였다는 의미는 상이한 심각도를 가지는 영향에 대해 가중평균 개념을 적용하지만 실제로는 이 두 영향에 대해서만 위해를 평가했다는 의미이다.

로  $5 \times 10^{-4} \text{Sv}^{-1}$ 를 채택했다. 폐암 위험은 백혈병 발생 위험과 거의 같아(즉,  $20 \times 10^{-4} \text{Sv}^{-1}$ ) 동일한 위험인자를 부여했다. 방사선에 의한 암 유발에 대한 갑상선의 감수성은 백혈병 유발에 대한 적색골수 감수성보다 더 높은 것으로 나타났다. 그러나 갑상선암으로 인한 치사율은 백혈병 치사율보다 훨씬 낮아서 종합적 갑상선 치사 위험인자는  $5 \times 10^{-4} \text{Sv}^{-1}$  정도로 보았다. 방사선피폭 후 여성 유방암 발생에 관한 데이터에 근거하여 생식수명 동안에 여성 유방은 인체에서 방사선에 가장 민감한 조직의 하나일 것으로 제안했다. 이러한 여건에서 유방암 위험인자는 백혈병 위험인자보다 수 배 클 것이라는 지시가 있기에, 그 위험인자로  $25 \times 10^{-4} \text{Sv}^{-1}$ 를 채택했다. 위에서 논의한 조직 외에도 방사선이 암을 초래한다는 증거가 있는 조직들(예: 위, 하부대장, 침샘 및 간)이 있지만 이들의 위험인자는 적시되지 않았다. 기타 명시되지 않은 모든 조직에서 종합 암 위험은  $50 \times 10^{-4} \text{Sv}^{-1}$ 를 넘지 않을 것으로 추정했다. 생식선에 대해 첫 두 세대에 걸친 유전영향의 위험인자는 약  $40 \times 10^{-4} \text{Sv}^{-1}$ 으로 채택했다.

(17) 위에서 설명한 값을 토대로, ICRP는 방사선 유발 암의 치사 위험인자는 남녀 모든 연령에 평균하여 약  $125 \times 10^{-4} \text{Sv}^{-1}$ 이며, 유전영향에 대한 평균 위험인자는 약  $40 \times 10^{-4} \text{Sv}^{-1}$ 라고 결론지었다. 결과를 표2.1에 요약했다.

표2.1. ICRP 26(1977a)의 명목 치사위험계수 값

조직/장기	위험인자( $10^{-4} \text{Sv}^{-1}$ )
암	
골수	20
뼈 표면	5
유방	25
폐	20
갑상선	5
잔여조직*	50
(총 암)	(125)
유전영향	
생식선	40

\* 구체적 장기 목록은 없음.

## 2.2. ICRP 27 및 ICRP 45

(18) ICRP 27(1997b)은 일반권고 ICRP 26(1997a)에 대한 보충 지침을 제공했다. ICRP 27의 목표는 종사자 선량당량 한도<sup>9)</sup>의 적합성을 검증할 목적으로 방사선피폭과 기타 직업 유해인자의 총 해로움을 평가하는 것이었다.

(19) 상이한 유형의 질환과 부상의 해로움을 비교하기 위해 ICRP 27은 정량적 지표로 **수명손실년**(years of life lost(YLL))을 사용했다. 그래서 ‘**유해지표**(index of harm)’를 주어진 직무피폭 연간 선량에 대해 1000 인년 당 수명손실년으로 정의했다. ICRP 27은 ‘만약 치사 암이 치사/비치사 암으로 인한 질환 기간을 포함해 각 15년 상당의 수명손실년과 함께  $10^{-4}/\text{rem}$ 의 율로 초래된다면 신체적 영향으로 인한 수명손실은 1000 인년 당 rem 당 1.5 인년이 될 것이다.’라고 결론지었다.<sup>10)11)</sup> 방사선에 대한 유해지표의 계산은 치사 암뿐만 아니라 비치사 암 및 그로 인한 YLL을 고려한다.

(20) ICRP 27에서 유해지표 평가는 ICRP 45(1985)에서 더 포괄적 데이터를 근거로 재검토되었다. 직무 방사선피폭으로 초래된 암에 대해 ICRP 26의 위험인자가 단위 선량 당 치사 증례의 빈도로 사용되었고, 각 증례는 15년의 기대수명 손실과 추가로 사망까지 질환기간을 감안한 1년(즉, 증례 당 16년의 수명손실년)을 초래할 것으로 가정했다. 비치사(치유성) 성분의 유발률과 심각도를 평가하기 위해 다양한 유형의 암에 대해 치사율 데이터를 재검토했고, 이로부터 표2.2에서 보듯이 비치사 암에 대한 가중치로 0.29/1.26이 도출되었다. 결과적으로 모든 암 유발로부터 수명손실 위하는 남성에서는  $0.3 \text{ 년 Sv}^{-1}$ , 여성은  $0.2 \text{ 년 Sv}^{-1}$ 였다.

(21) 유전영향과 관련해서 유엔 방사선영향과학위원회(UNSCEAR)의 1982년 보고서는 지속적 피폭 후 **평형세대**<sup>12)</sup>에서 **유전유의선량** Gy인 당 0.63년의 수명손실이나 불구로 평가했다(UNSCEAR 1982). 노동인구 집단선량 중 유전유의 분율은 아버지 30.6세, 어머니 25.9세인 수태 평균연령으로부터 추정했다. 이들 변수를 바탕

---

9) <역주> 당시에는 등가선량이나 유효선량 개념이 도입되기 전이어서 선량제한이 전신에 대해서는 ‘유효 선량당량’, 특정 조직에 대해서는 ‘선량당량’을 기반으로 했다.

10) 참고문헌 원전에 보인 선량 단위를 사용한 것임. 아니라면 명목위험에 대해서는 Gy를, 방사선위험에 대해서는 Sv를 사용한다.

11)  $1 \text{ rem} = 10 \text{ mSv}$ .

12) 지속적 방사선피폭(세대 당  $10^{-2} \text{ Gy}$ )에서 집단은 이러한 질환의 발병에 대해 새로운 평형에 도달한다.

으로 일정을 직무피폭으로 인한 수명손실 위해는 암 위해 대비 여성은 1/3, 남성은 3/4로 평가되었다. 대부분 종사자의 대표적 피폭 시나리오로서 2 mSv/y의 선량률에서 1000 인년 당 손실년으로 표현한 발암과 유전영향 유해지표는 여성에서는 각각 0.6과 0.2였고, 남성에서는 0.4와 0.3이었다.

표2.2. ICRP 45(1985)에서 치유암의 위해 가중치\*

장기/조직	유발 위험(100인 당 Sv 당)		×	치유 심각도†	=	치유 암 (100인 당 Sv 당)
	치명 암	비치명 암				
유방	0.25	0.15	×	0.6	=	0.09
골수	0.20	0.01	×	0.95	=	0.01
폐	0.20	0.01	×	0.95	=	0.01
갑상선	0.05	1.0	×	0.05	=	0.05
뼈	0.05	0.01	×	0.85	=	0.01
피부	0.01	1.0	×	0.01	=	0.01
잔여조직	0.50	0.15	×	0.75	=	0.11
계	1.26	2.33				0.29

\* 단위 선량당량 당 성별과 연령 평균값

† 같은 유형 암에서 “치사+치유성”에 대한 ‘치사’의 비.

(22) 임신 중 피폭도 태내 사망, 지능저하, 암 및 유전영향이 문턱 없이 초래된다는 바탕에서 평가되었다.<sup>13)</sup> 고용된 여성집단 100 인년 당 임신빈도 6.5를 가정할 때, 유해지표는 2 mSv/y 피폭에서 1000 인년 당 1.0으로 계산되었다.

## 2.3. ICRP 60

(23) ICRP 60(1991)에서 ICRP는 사람 집단에서 방사선 유발 암 위험에 관해 1977년 이래 새로 나온 정보와 실험동물이나 배양세포에서 새로운 실험 데이터를 개괄하고, 이로부터 ICRP 26(1977a)의 위험 평가치를 재평가하게 되었다. 데이터 해석에서 DDREF 2를 적용하여 고선량률, 고선량에서 관찰하여 직접 얻은 치사암 확률을 경감하기로 결정했다. 중국, 일본, 푸에르토리코, 영국 및 미국에서 0~89세 범

13) <역주> 태내 사망과 지능저하에 대한 현재 평가는 조직반응으로서 높지 않더라도 문턱이 있다고 보지만 당시는 결정론적 영향의 개념이 정립되지 않는 시기여서 이들 영향에 대해서는 문턱을 설정하지 않았다.

위의 남녀에서 치사 암 상대확률(장기들 사이 확률의 분포)을 계산하여 평균하였다. 그 상대확률에 치사암 확률을 곱해 방광, 골수, 유방, 결장, 폐, 식도, 난소 및 위에 대해 표2.3의 둘째 열에 준 값을 얻었다.

(24) 갑상선, 뼈표면, 피부 및 간의 암에 대해서는 다음과 같은 다른 고려가 있었다.

- 갑상선에 대해서는, 1988년 UNSCEAR 보고서(UNSCEAR 1988)와 미국 과학원 방사선생물영향위원회(BEIR) 보고서 V(NAS/NRC 1990)가 갑상선 위험의 최선 평가치는 미국 방사선방호측정위원회(NCRP) 보고서 80(NCRP 1985)에 제공된 것임에 동의했다. 이 평가는 치사 갑상선암의 생애위험으로  $7.5 \times 10^{-4} \text{Gy}^{-1}$ 을 준다. 치사율은 0.1이라 말하므로 갑상선암 발생은  $75 \times 10^{-4} \text{Gy}^{-1}$ 가 된다.
- 뼈표면에 대해서는 BEIR IV 보고서(NAS/NRC 1988)가 에너지전달선밀도(LET)

표2.3. ICRP 60에서 위해 산출(ICPR 1991)

조직/장기	치사 암 확률 $F$ ( $10^4$ 인 당 Sv 당)	심각한 유전영향 ( $10^4$ 인 당 Sv 당)	수명손실 상대기간 $l/\bar{l}$	총(치명 및 비치명) 상대기여 ( $2-k$ )	위해* ( $10^4$ 인 당 Sv 당)	총 위해 상대기여
방광	30		0.65	1.50	29.4	0.040
골수	50		2.06	1.01	104.0	0.143
뼈표면	5		1.00	1.30	6.5	0.009
유방	20		1.21	1.50	36.4	0.050
결장	85		0.83	1.45	102.7	0.141
간	15		1.00	1.05	15.8	0.022
폐	85		0.90	1.05	80.3	0.111
식도	30		0.77	1.05	24.2	0.034
난소	10		1.12	1.30	14.6	0.020
피부	2		1.00	2.00	4.0	0.006
위	110		0.83	1.10	100.0	0.139
갑상선	8		1.00	1.90	15.2	0.021
잔여장기	50		0.91	1.29	58.9	0.081
생식선		100	1.33		133.3	0.183
계	500				725.3	1

$F$ : 치사 암 치사율  $l$ : 기대 수명손실년  $\bar{l}$ : 모든 암  $l$ 의 평균(15년)  $k$ : 치사율  
\* 위해는  $F(l/\bar{l})(2-k)$ 로 산출된다.

가 높은 방사선 데이터에 근거하여 생애 발암률 평가치로  $133 \times 10^{-4} \text{Gy}^{-1}$ 를 제시한다. 치사율 0.70을 적용하면 위험은  $93 \times 10^{-4} \text{Gy}^{-1}$ 으로 되고, 다시 선질 계수(Q) 20을 적용하면 약  $4.7 \times 10^{-4} \text{Sv}^{-1}$ 이 된다.

- 피부에 대해서는 ICRP 59(1992)에서 피부암 발생이  $1000 \times 10^{-4} \text{Sv}^{-1}$ 이며 치사율이 보수적으로 0.2%로 평가됨을 보였다. 이 치사 피부암 위험을 낮은 선량에 적용할 수 있을 것으로 보아  $2 \times 10^{-4} \text{Sv}^{-1}$ 을 채택했다.
- 간에 대해서는 서독, 폴투갈, 일본 및 덴마크의 토륨조영제 Throtrast<sup>14)</sup> 연구에서 얻은 데이터로부터 치사 암 위험으로  $300 \times 10^{-4} \text{Gy}^{-1}$ 을 얻었다. 선질계수 Q로 20을 적용하면 명목위험 평가치로  $15 \times 10^{-4} \text{Sv}^{-1}$ 를 얻고 이를 낮은 LET 방사선에 적용할 수 있다.

(25) 치사 암의 명목위험에 추가하여 ICRP 60에서 계산한 위해는 추가로 다음 세 성분을 포함한다.

- 상이한 장기에 발생한 치사암의 예상 수명손실 차이에 대한 구체적 참작
- 비치사 암 부담에 대한 참작
- 피폭자의 모든 후손 세대에서 심각한 유전질환 위험에 대한 참작.

(26) 비치사 암과 관련한 위해를 고려하도록 각 암 유형의 위해는 치사율  $k$ 에 따라 가중한 비치사 성분을 포함했다. 그래서 어떤 조직에서 치사 암이  $F$ 라면 총 암 수는  $F/k$ 이다. 그러면 비치사 암 수는  $(1-k)F/k$ 로 되고 가중 위해는  $F+k[(1-k)F/k] = F(2-k)$ 가 된다. 변수값과 이 식으로 산출된 위해는 표2.3에 요약되어 있다. 총 위해에 대한 각 장기의 상대기여(마지막 열)가 ICRP 조직가중치의 근거를 구성한다.

## 2.4. ICRP 103

(27) ICRP 103(2007)은 새로운 계산 방법론을 도입했는데, 제3장에서 상세히 다룬다. 사용한 방법은 전반적으로는 ICRP 60(1991)에서 사용한 방법과 유사하지만, 계산의 여러 측면에서 수정이 있었다. 그중 중요한 변화는 명목위험 계산을 암 사

---

14) <역주> 1930년대부터 1940년대까지 사용되던 X선촬영 조영제로서 이산화토륨( $\text{ThO}_2$ ) 콜로이드 용액이다. 토륨이 내는 방사선피폭 위험이 제기되고 Ba, I 등 대체 조영제가 개발되면서 1947년 이후에는 임상 조영제로 사용이 중지되었다. 지금은 세포생물학 연구용으로만 일부 사용된다.



망 데이터가 아닌 암 발생 데이터를 바탕으로 한 것이다. 명확히 하기 위해 여기서부터는 따로 밝히지 않으면 '위해'는 방사선위해를 의미하는 것으로 한다.



## 제3장 방사선위해 계산

(28) 방사선위해 계산 절차는 ICRP 103(2007) 부록A.4와 Cléro 등(2019)에서 설명했다. 암 위험 평가에 관한 백그라운드 정보는 ICRP 60(1991) 부록B에도 주어졌다.

(29) 이 계산 절차는 크게 두 부분인데, 각각 순차적 단계로 구성된다(그림3.1 참조). 첫 부분은 명목위험 즉, 암과 유전질환 위험을 포함해 방사선피폭과 관련된 생애위험의 계산이다. 암 위험 평가치는 각 암 사이트에 대해 성별, 피폭연령 및 지역<sup>15)</sup>에 걸쳐 평균한다. 둘째 부분은 심각도 보정인데, 치사율, QOL, YLL이 고려된다. 그림3.1에서 보듯이 첫 부분만 방사선량과 관련된다. 둘째 부분은 사실상 방사선피폭과 무관하며 해당 장기나 조직의 암(생식선에 대해서는 유전질환)의 심각도를 반영한다.



그림3.1. ICRP 103(2007)의 방사선위해 산출 절차.

15) <역주> ‘지역’은 기저율 데이터를 얻는 집단의 지리적 위치인데 암위험과 관련해서는 유전소인 차이가 있는 인종과 깊이 관련된다. 국가의 암 통계 자체는 인종을 구분하는 것은 아니지만 국가 인구를 구성하는 지배적 인종이 있고 그에 따른 생활습관과 문화 차이가 암 기저율에 영향을 미친다. 그러나 가령 미국 통계라면 백인이 주류이지만 흑인이거나 히스패닉, 아시아계 등 소수 집단도 포함하므로 ‘인종’이란 표현보다는 ‘지역’이 적절하다고 본 것이다.

(30) 이 간행물에서는 명목위험 계산(첫째 부분)에는 선량단위로 Gy를 사용하며, 방사선위해 계산(둘째 부분)에서는 Sv를 사용한다.

(31) 성별, 연령 및 지역에 걸친 평균은 위해 계산과정의 여러 단계에서 적용된다. 암의 생애위험은 소절 3.1.1.1과 소절 3.1.1.2에서 정의하는 두 집단의 남녀 각각에 대해 계산하고(뼈암과 피부암은 예외) 그 결과를 평균하여 명목위험을 평가한다. 뼈암, 피부암 및 유전영향의 초과위험 평가치를 통합한 후, DDREF, 치사율 및 QOL 관련 변수를 포함한 보정인자를 성별이나 인구집단 구분 없이 적용한다. 이러한 모든 단계는 각 조직이나 장기에 대해 따로 병렬로 수행되고, 그 결과를 합산해 총 방사선위해를 얻는다.

## 3.1. 명목위험 산출

### 3.1.1. 기저위험 변수

#### 3.1.1.1. 기준집단

(32) 조합 기저 발암률은 구미 및 아시아에서 장기간 운영한 암 등록소에 있는 선 발된 집단의 암 발생 데이터를 사용해 계산했다. 해당 등록소는 상하이(중국), 오사카, 히로시마 및 나가사키(일본), 스웨덴, 영국의 등록소, 그리고 미국 국립암센터의 암등록 프로그램 Surveillance, Epidemiology and End Results(SEER)이다. 선정된 집단 데이터의 단순평균을 산출해 구미와 아시아 조합집단 데이터를 구성했다. 목표는 세계 여러 지역의 대표적 집단에 대한 발생률을 구성(명시)하는 것이다.

#### 3.1.1.2. 기저 암발생률

(33) 집단기반 암 발생률은 '제8차 5대륙 암 발생' 8th edition of Cancer Incidence in Five Continents(1993~1997년 기간 등록소에서 평가된 암 발생률)에서 얻었다(Parkin 등 2002). 평균 발생률은 구미와 아시아 집단에 대해 남녀 따로, 5세 구간으로(0~4세부터 ≥90세까지) 식도, 위, 결장, 간, 폐, 여성 유방, 난소, 방광, 갑상선, 백혈병[만성림프성백혈병(CLL) 제외<sup>16)</sup>], 총 고형암, 그리고 모든 암에 대해 편집했다(부록 A 표A.1~표A.4). 나아가 모든 암 결합에 대한 사망율과 모든 원인 사망율도 제공했다[부록 A의 표A.5 및 표A.6].

---

16) <역주> 방사선피폭이 CLL을 유발한다는 증거가 없다.

표3.1. 각 장기/조직 범주에 사용된 암위험 모델(ICRP 2007)

장기/조직	정보원	선량-위험 관계	위험 이전을 위한 ERR:EAR 가중치 <sup>f</sup>
식도	LSS 발생 <sup>b</sup>	L	50%ERR : 50%EAR
위	LSS 발생 <sup>b</sup>	L	50%ERR : 50%EAR
결장	LSS 발생 <sup>b</sup>	L	50%ERR : 50%EAR
간	LSS 발생 <sup>b</sup>	L	50%ERR : 50%EAR
폐	LSS 발생 <sup>b</sup>	L	30%ERR : 70%EAR
뼈	ICRP 60 명목위험	L	100%EAR <sup>g</sup>
피부 <sup>a</sup>	ICRP 59 명목위험	L	100%ERR <sup>h</sup>
여성 유방	8 코호트 병합분석 <sup>c</sup>	L	100%EAR
난소	LSS 발생 <sup>b</sup>	L	50%ERR : 50%EAR
방광	LSS 발생 <sup>b</sup>	L	50%ERR : 50%EAR
갑상선	5 코호트 병합분석 <sup>d</sup>	L	100%ERR
골수	LSS 발생 <sup>e</sup>	LQ	50%ERR : 50%EAR
기타 고형암	LSS 발생 <sup>b</sup>	L	50%ERR : 50%EAR

L: 선형, LQ: 선형-2차, EAR: 초과절대위험, ERR: 초과상대위험, LSS: 원폭생존자 수명연구.

a. 흑색종의 피부암.

b. 고형암 발생, LSS 코호트 1958~1998(Preston 등 2007).

c. Preston 등(2002) 데이터.

d. Ron 등(1995) 데이터.

e. 백혈병 발생, LSS 코호트 1950~2000(미발표).

f. 집단 사이 위험 평가치 이전에 대한 상세는 소절3.1.4 참조.

g. 일정 절대위험 모델을 사용한 명목위험 평가치를 ICRP 60(1991)에서 가져옴.

h. 일정 상대위험 모델을 사용한 명목위험 평가치를 ICRP 59(1992)에서 가져옴.

### 3.1.2. 방사선 관련 암에 대한 위험 모델

(34) 방사선피폭으로 인한 암위험을 평가하기 위해 식도, 위, 결장, 간, 폐, 여성 유방, 난소, 방광, 갑상선, 골수(백혈병)에 대해 위험 모델을 개발했다. 뼈암이나 피부암에 대한 위험 모델은 수립하지 않고 ICRP 60(1991)의 명목위험 평가치를 사용했다. 기타 조직의 암은 '기타 고형암'으로 부르는 잔여 범주로 할당했다. 초과상대위험 excess relative risk(ERR)과 초과절대위험 excess absolute risk(EAR)을 모델링하여 생애위험 평가치의 ERR 및 EAR의 가중평균을 계산했다. 표3.1은 명목위험 계산에 사용된 암위험 모델의 기본 정보를 요약한다.

### 3.1.2.1. 고행암

(35) 일반적으로 방사선 관련 암 위험 모델은 일본 원폭생존자 코호트의 수명연구 Life Span Study(LSS)의 고행암 발생에 관한 보고서로부터 도출되는데, 고행암 발생은 1958년부터 1998년까지 진단된 첫 1차암 데이터(Preston 등 2007)에 근거한다. ‘선량계측체계 2002’(DS02)에서 도출된 개인선량 평가치의 불확도로 인한 위험 평가치의 편중을 줄이도록 위험 평가치를 보정했다.

(36) 위험 모델은 선형 선량-반응을 따르지만 성별, 피폭연령 및 도달연령<sup>17)</sup>의 영향으로 수정할 수 있게 한다. 이들 변수의 영향은 모든 고행암을 한 그룹으로 하여 얻은 값과 같도록 제약한다. 다만, 이 제약이 원인 고유 암 유형을 모델링할 때 맞춤 적합도에 상당한 저하가 발생한다는 지시가 있으면 적용하지 않는다.

(37) 초과상대위험(ERR)이나 초과절대위험(EAR)으로 모델링한다. 모델 식은 다음과 같다.

$$\text{초과위험} = \beta d \exp\left[\alpha_1 \left(\frac{e-30}{10}\right) + \alpha_2 \ln\left(\frac{a}{70}\right)\right]$$

여기서  $d$  = 선량(Gy),  $e$  = 피폭연령(세),  $a$  = 도달연령(세),  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ ,  $\beta$ 는 맞춤변수이

표3.2. 고행암에 대한 발생기반 ERR 모델의 변수값(ICRP 2007)

암 사이트	30세 피폭 후 70세에서 Gy 당 ERR( $\beta$ ) <sup>†</sup>		피폭연령에 따른 ERR 변화를 고려하는 변수( $\alpha_1$ ) <sup>†</sup>	ERR이 증가하는 도달연령의 지수 ( $\alpha_2$ ) <sup>†</sup>
	남	여		
총 고행암*	0.35	0.58	-0.19	-1.65
식도	0.40	0.65	-0.19	-1.65
위	0.23	0.38	-0.19	-1.65
결장	0.68	0.33	-0.19	-1.65
간	0.25	0.40	-0.19	-1.65
폐	0.29	1.36	0.16	-1.65
난소	-	0.32	-0.19	-1.65
방광	0.67	1.10	-0.19	-1.65
갑상선	0.53	1.05	-0.82	0
기타 고행암	0.22	0.17	-0.42	-1.65

\* 모든 고행암을 결합한 ERR 모델. 이 간행물에서는 예시목적용으로만 사용됨.

<sup>†</sup> ERR =  $\beta d \exp\left(\alpha_1 \frac{e-30}{10} + \alpha_2 \ln \frac{a}{70}\right)$  여기서  $e$ 는 피폭연령(세),  $a$ 는 도달연령(세)이다.

17) <역주> 도달연령이란 피폭 후 위험을 평가하는 시점의 연령이다.

다. 맞춤변수 값은 ERR용은 표3.2에, EAR용은 표3.3에 주어진다. 모든 고형암에서 피폭연령 및 도달연령이 ERR과 EAR에 미치는 영향을 각각 그림3.2와 그림3.3에 보였다.

표3.3. 고형암에 대한 발생 기반 EAR 모델의 변수값(ICRP 2007)

암 사이트	30세 피폭 후 70세에서 10 <sup>4</sup> 인년Gy 당 초과증례( $\beta$ ) <sup>†</sup>		피폭연령에 따른 EAR 변화를 고려하는 변수( $\alpha_1$ ) <sup>†</sup>	EAR이 증가하는 도달연령의 지수 ( $\alpha_2$ ) <sup>†</sup>
	남	여		
총 고형암*	43.20	59.83	-0.27	2.38
식도	0.48	0.66	0.49	2.38
위	6.63	9.18	-0.27	2.38
결장	5.76	2.40	-0.27	2.38
간	4.18	1.30	-0.27	2.38
폐	6.47	8.97	0.01	4.25
유방	-	제38항 참조		
난소	-	1.47	-0.27	2.38
방광	2.00	2.77	-0.12	6.39
기타 고형암	7.55	10.45	-0.27	2.38

\* 모든 고형암 결합한 EAR 모델. 이 간행물에서는 예시목적용으로만 사용됨.

<sup>†</sup>EAR =  $\beta d \exp(\alpha_1 \frac{e^{-30}}{10} + \alpha_2 \ln \frac{a}{70})$  여기서  $e$ 는 피폭연령(세),  $a$ 는 도달연령(세)이다.

(38) 여성 유방암에 대해서는 폐경 영향을 반영하도록 추가항을 도입했다.

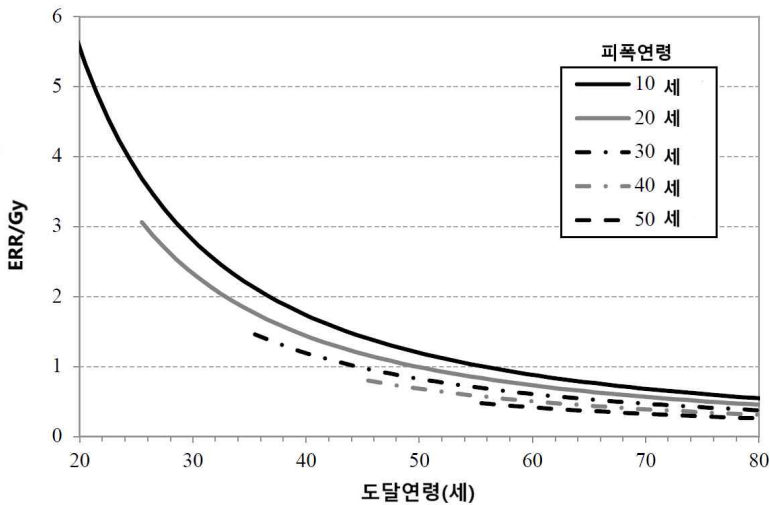


그림3.2. 피폭연령과 도달연령에 따른 모든 고형암 ERR의 변화.

$$EAR = \begin{cases} \beta d \exp\left(-0.5 \frac{e^{-30}}{10} + 3.5 \ln \frac{a}{70}\right), & a \leq 50 \\ \beta d \exp\left(-0.5 \frac{e^{-30}}{10} + 3.5 \ln \frac{a}{70} - 2.5 \ln \frac{a}{50}\right), & a > 50 \end{cases}$$

여기서  $\beta$ 는 피폭연령 30세일 때 70세에서 10,000 인년 당 Gy 당 25.3이다.

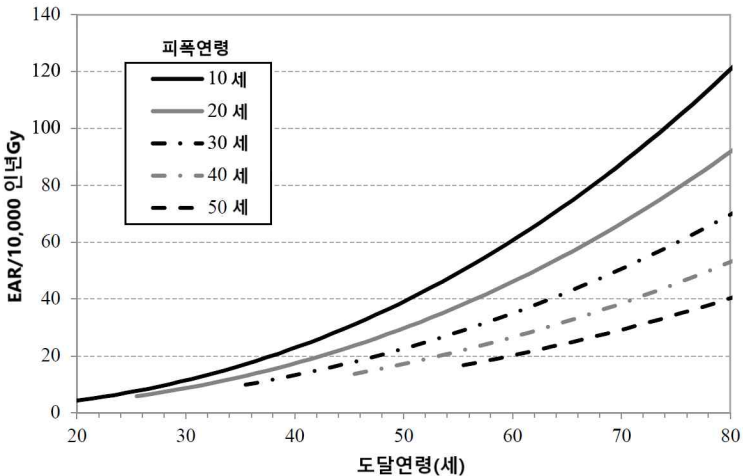


그림3.3. 피폭연령과 도달연령에 따른 모든 고형암 EAR의 변화.

(39) 최소 잠복기는 피폭 후 방사선 기인 특정 종양이 발생한 것이 알려졌거나 믿기는 최소 시간이다. 모든 고형암에 대한 최소 잠복기는 5년으로 가정했다.

### 3.1.2.2. 백혈병

(40) 백혈병 위험 평가치는 1950년부터 2000년까지 LSS 코호트에서 발생 데이터 분석(미발간)에 근거해 모델링했다. EAR 기반 모델은 1994년 LSS(Preston 등 1994)에서 도출된 모델과 유사한데, 선형-2차 선량-반응이 성별, 피폭연령, 피폭 후 경과시간의 영향을 수정할 수 있게 한다.

(41) 백혈병(이하에서 ‘백혈병’이란 특별한 언급 없다면 CLL 아닌 백혈병을 의미함)에 대한 EAR 모델의 수학적 표현은 다음과 같다.

$$EAR(10^4 \text{인년 당}) = (\beta d + 1.53d^2) \left(\frac{t}{25}\right)^a$$

여기서  $d$ 는 Gy 단위 선량,  $t$ 는 피폭 후 경과시간(즉, 도달연령-피폭연령, 년),  $a$ 와  $\beta$ 는 맞춤변수이다. 표3.4에 보였듯이 변수값은 성별과 피폭연령 범주에 따라 달라



표3.4. 백혈병에 대한 발생 기반 초과절대위험(EAR) 모델의 변수값

성별	피폭연령(세)	25세를 중심으로 한 피폭후 경과시간에 대한 Gy 단위 선량의 선형항 계수( $\beta$ )	EAR이 변화하는 피폭 후 경과시간의 지수( $\alpha$ )
남성	0-19	0.58	-1.54
	20-39	0.96	-0.69
	$\geq 40$	2.03	0.17
여성	0-19	0.41	-1.06
	20-39	0.69	-0.21
	$\geq 40$	1.45	0.66

진다. 선량의 2차항 계수는 성별이나 피폭연령 범주와 무관하게 상수를 유지했다. 최소 잠복기는 5년으로 했다.

(42) 백혈병에 대해서는 ERR 모델을 개발하는 대신 어떤 도달연령과 피폭연령에서 ERR은 기저율에 대한 EAR 비를 고려하여 계산했다. 이 목적에서 LSS 코호트의 백혈병 기저율은 다음 모델을 사용했다.

$$\text{기저율} = \begin{cases} \exp(\alpha_1 + \alpha_2(e - 30) + \alpha_3 \ln \frac{a}{50} + \alpha_4 (\ln \frac{a}{50})^2), & a < 70 \\ \exp(\alpha_1 + \alpha_2(e - 30) + \alpha_3 \ln \frac{a}{50} + \alpha_4 (\ln \frac{a}{50})^2 + \alpha_5 (\ln \frac{a}{70})^2), & a \geq 70 \end{cases}$$

여기서  $e$ 는 도달연령(세),  $a$ 는 피폭연령(세),  $\alpha_1, \dots, \alpha_5$ 는 맞춤변수이다. 변수값은 표 3.5에 보였다.

표3.5. 백혈병의 기저율 모델의 변수값\*

성별	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\alpha_3$	$\alpha_4$	$\alpha_5$
남	-0.28	-0.02	2.99	1.11	9.40
여	-0.82	0	1.40	0.73	7.87

\*  $10^4$  인년 당 증례 수

### 3.1.2.3. 뼈암

(43) 방사선이 뼈 종양을 유발할 수 있는 증거는 있지만, LSS 데이터가 없고 다른 데이터원도 극히 제한적이다. 뼈암에 대한 구체적 모델 개발의 어려움 때문에 뼈암 명목위험은 ICRP 60(1991)에서 가져왔는데, 이는 BEIR IV(NAS/NRC 1988)를 참조한 것이다. 알파방출체에 대한 평가치  $133 \times 10^{-4} \text{Gy}^{-1}$ 과 선질계수 20에 근거하여 낮은 LET 방사선  $10^4$  인년 당 Gy 당 명목위험을 7 가지 경우에 대해 남녀 동

일한 값으로 산출했다. 뼈암에 대한 ICRP 선량계측 모델은 뼈 표면 선량을 평가하지만 이 위험 평가치는 Ra-226으로부터 뼈 평균 흡수선량에 적용한 값을 근거로 하고 있음은 유의해야 한다. 보수적일 수 있음에 유의하면서 뼈 평균선량에 근거한 위험 평가치를 사용했다.

#### 3.1.2.4. 피부암

(44) LSS가 흑색종 외 피부암 위험에 대한 일부 정보를 제공하지만, 피부 색소와 관련된 위험 차이 때문에 LSS 모델이 일반 집단에게는 적절하지 않다고 판단했다. 따라서 ICRP는 ICRP 59(1992)의 피부암 명목위험 평가치를 사용했다. 이 평가는 ICRP 60(1991)에도 사용되었다. ICRP 59에서는 일정 가산加算 위험 모델 및 일정 상대위험 모델(피폭연령이나 피폭 후 경과시간 수정효과 없이)을 사용해 발생과 치사 위험을 평가했다. 그중에서, 상대위험 모델로 평가한 성평균 발생위험  $9.8 \times 10^{-2} \text{ Sv}^{-1}$ 을 채택해  $10^4$ 인년 당 Gy 당 1000 증례를 명목위험 계수의 근거로 했다.

### 3.1.3. 생애 초과 암위험 계산

#### 3.1.3.1. 생존함수

(45) 위험 모델의 주요 자료원인 LSS 데이터 해석이 첫 1차암 발생에 근거하므로, 암 없는 생존을 생애 암위험 계산에서 생존함수로 사용했다. 암 없는 생존은 4개 기준집단(아시아인 및 구미인 집단의 남과 여)에 대해 제8차 5대륙 암 발생 데이터 베이스로(Parkin 등 2002)부터 모든 원인 사망률, 암 사망률, 암 발생률을 사용해 계산했다.

(46) 연령  $a$ 에서 암 없는 생존은 다음과 같이 계산된다.

$$S(a) = \exp\left(-\int_0^a \mu(x)dx\right)$$

여기서  $\mu(x)$ 는 연령  $x$ 에서 암이나 암에 따른 감염이 아닌 모든 원인으로 사망률인데 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\mu(x) = \mu_m(x) - \mu_{mac}(x) + \mu_{iac}(x)$$

여기서  $\mu_m, \mu_{mac}, \mu_{iac}$ 는 각각 모든 원인 사망률, 모든 암 사망률, 모든 암 발생률이다. 연령이 연속되는 정수이므로 생존을 Kaplan-Meier 추산자estimator를 사용해 계산할 수 있다.

$$s(a) \approx \prod_{n=0}^a (1 - \mu(n)).$$

(47) 연령  $e$ 에 생존한 사람이 연령  $e$ 에서 선량  $d$ 를 피폭한 때 암 없는 생존은 암 없이 연령  $a$ 까지 생존할 조건부 확률이다( $a \geq e$ ). 이는 다음처럼 쓸 수 있다.

$$S(a, d|e) = \exp\left(-\int_e^a \mu(x, e, d) dx\right) \approx \prod_{n=e}^a (1 - \mu(n, e, d))$$

여기서

$$\mu(x, e, d) = \mu_m(x) - \mu_{mac}(x) + \sum_c \mu_{ic}(x, e, d)$$

이 식에서  $\mu_{ic}(x, e, d)$ 는 연령  $e$ 에서 선량  $d$ 를 피폭 후 연령  $x$ 에 사이트  $c$  암 발생률을 나타내는데, ERR 모델에서는

$$\mu_{ic}(x, e, d) = \mu_{ic}(x)(1 + \text{ERR}_{ic}(x, e, d))$$

EAR 모델에서는

$$\mu_{ic}(x, e, d) = \mu_{ic}(x) + \text{EAR}_{ic}(x, e, d)$$

이다. 여기서  $\mu_{ic}(x)$ 는 암 사이트  $c$ 에서 기저발생률,  $\text{ERR}_{ic}(x, e, d)$ 과  $\text{EAR}_{ic}(x, e, d)$ 는 피폭 후 연령  $x$ 에 암 사이트  $c$ 에서 암의 초과상대위험과 초과절대위험이다.

(48) ERR 모델(ERR 생애위험 평가치)을 사용해 각 암 사이트에 대해 생애위험을 계산할 때, 모든 사이트에 대해 ERR 모델을 적용해 암 없는 생존을 계산했다. 마찬가지로, EAR 생애위험 평가치를 위해서는 모든 암 사이트에 대해 EAR 모델을 적용해 암 없는 생존을 계산했다. 여성 유방암과 갑상선암은 예외인데, 이에 대해서는 각각 EAR 모델과 ERR 모델을 사용했다. 그림3.4는 기준집단이 0세에 0.1 Gy 피폭 후 EAR 평가에 따른 암 없는 생존을 예시한다. 이 수준 선량에서는 기저율에 비해 방사선피폭에 의한 위험 증가가 적어 ERR이나 EAR 평가치에 따른 생존곡선이 거의 동일하다.

### 3.1.3.2. 누적 기저 암위험

(49) **누적 기저 암위험** cumulative cancer baseline risk(CBR)은 방사선피폭 없이 어떤 연령까지 누적 암위험으로서 다음처럼 산출된다.

$$\text{CBR}_{ic}(a|a_{\min}) = \int_{a_{\min}}^a \mu_{ic}(x) S(x|a_{\min}) dx \approx \sum_{n=a_{\min}}^a \mu_{ic}(n) \prod_{m=a_{\min}}^n (1 - \mu(m))$$

여기서  $\text{CBR}_{ic}$ 는 암 사이트  $c$ 에서 누적 기저 발생위험이고  $a_{\min}$ 는 위험이 있는 최소 연령(즉, 전체집단일 때는 0세, 노동인구일 때는 18세)이다.

(50) 누적 기저위험은 명목위험 계산에 필수 성분은 아니지만 기저위험이 생애 초

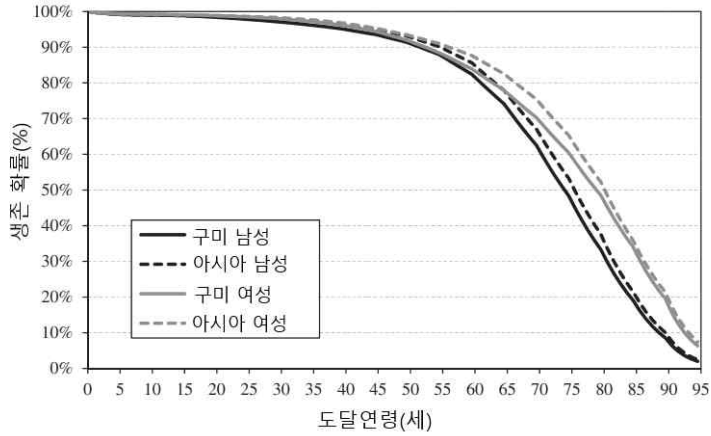


그림3.4. 0세에 0.1 Gy 피폭 후 기준집단의 암 없는 생존. <역주> 선이 겹쳐 보이지 않았지만 피폭 없는 각 집단의 기저 생존률도 거의 같다.

과암 위험의 크기 평가에 참조를 제공한다. 예시를 위해, 모든 고형암, 백혈병 및 여성 유방암에 대한 누적 기저위험을 그림3.5~그림3.7에 보였다. 여성이 중년까지는 모든 고형암 위험이 더 높지만 노년에는 남성이 더 높은 피크 위험을 보인다(그림3.5 참조). 이는 주로 여성 유방암이 상대적으로 일찍 공격하기 때문이다. 백혈병(그림3.6)에서 보듯이 대부분 암 사이트에서 누적 기저위험은 남성이 일관되게 높다. 여성 유방암은 아시아 집단보다 구미 집단에서 상당히 높다(그림3.7 참조).

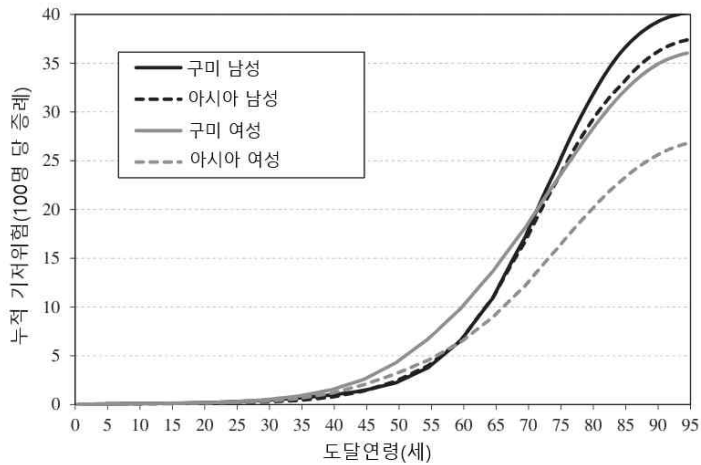


그림3.5. 기준집단에서 모든 고형암 발생 누적 기저위험.

### 3.1.3.3. 생애 초과암 위험

(51) 특정 질환이 생겨 그로 인해 사망하는 사람에 대해 생애위험을 나타내는 여러 방법이 있다. ICRP 103(2007)에서 명목위험 계수 얻으려 계산한 생애위험은 **피폭 기인암 발생 위험** risk of exposure induced cancer incidence(REIC)이다. 피폭연령  $e$ 에 선량  $d$ 를 피폭한 경우, 사이트  $c$ 의 REIC는 다음처럼 표현된다.

$$REIC_c(e,d) = \int_{e+L}^{t_{\max}} [\mu_{ic}(a,e,d) - \mu_{ic}(a)] S(a,d|e) da$$

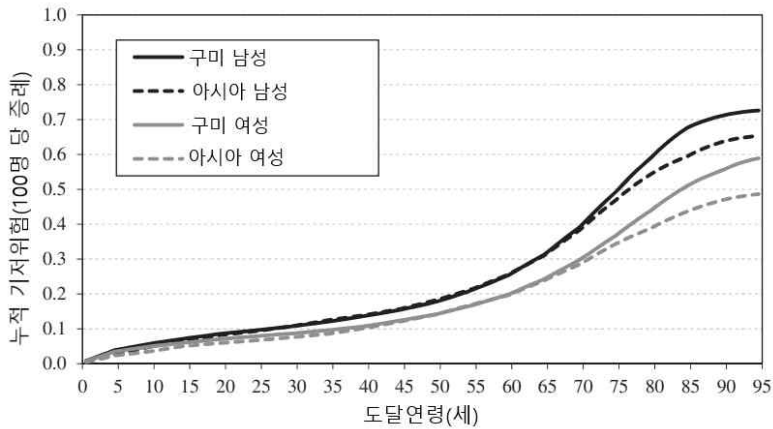


그림3.6. 기준집단에서 백혈병 발생 누적 기저위험.

여기서  $t_{\max}$ 는 최장 수명,  $L$ 은 최소 잠복기이다. ICRP 103에서는  $t_{\max}$ 를 95세로 했다. 연령을 이산변수로 하면 위 식은 ERR 모델일 때는

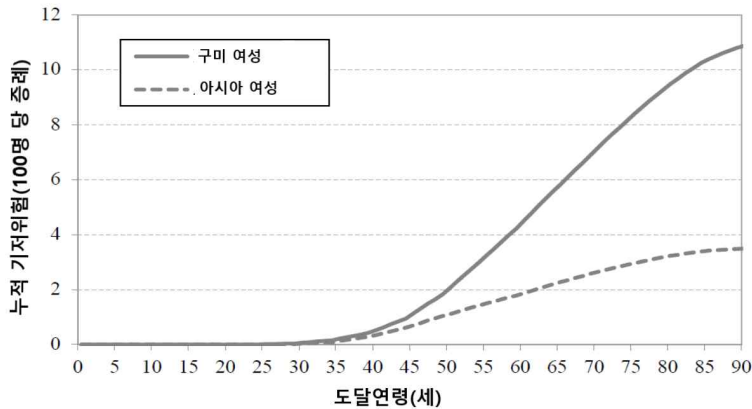


그림3.7. 기준 집단에서 여성 유방암 발생 누적 기저위험.

$$REIC_c(e,d) = \sum_{n=e+L}^{a_{\max}} ERR_{ic}(n,e,d)\mu_{ic}(n)S(n,d|e),$$

EAR 모델일 때는

$$REIC_c(e,d) = \sum_{n=e+L}^{a_{\max}} EAR_{ic}(n,e,d)S(n,d|e)$$

로 된다. 여기서  $a_{\max}$ 는 최장 도달연령(94세)이다.

(52) 위에서 설명한 위험 모델과 생존함수는 구미와 아시아 조합집단에 대한 성별 생애위험 평가치를 산출하는 데 사용되었다. 각 암 사이트에 대해 0.1 Gy에서 REIC를 계산하고 10을 곱해 Gy 당 값으로 표현했다. 0.1 Gy 피폭은 생존에 유의한 감소를 초래하지 않으므로 이 계산 방법론은 생애기인위험lifetime attributable risk(LAR)과 비슷한 결과를 낸다. LAR은 피폭으로 인한 생존 감소를 고려하지 않는다(Zhang 등 2020, 추가 논의는 제4.2절 참조).

(53) 두 명목 집단을 고려했는데 전체집단(피폭연령 0~89세<sup>18</sup>)까지)과 노동연령인구(피폭연령 18~64세)이다. 각 피폭연령에 대해 도달연령 94세까지 위험을 누적하여 REIC을 산출했다.

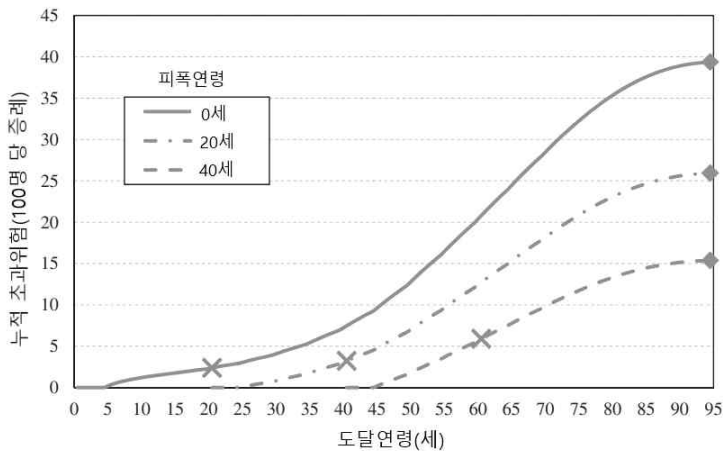


그림3.8. 구미 여성에서 피폭연령별 ERR 기반 모델로 산출한 1 Gy에서 모든 암 누적 초과위험. 다이아몬드 표기 데이터는 그림3.9의 상응 값이다. 가위표는 피폭 20년 후 누적 초과위험을 지시한다.

18) ICRP 103에서는 생애위험 평가치를 피폭연령 0~85세에 대해 5세 구간으로 계산한 다음 연령 분포를 반영한 가중치를 사용해 평균했다. 이는 90세 미만 집단의 피폭을 가정하게 된다.

(54) 백혈병 생애위험을 산출할 때, 구미 및 아시아 인구집단의 기준 기저발생율은 CLL 외 백혈병을 고려한 반면에 LSS에서 도출된 위험모델은 모든 백혈병(CLL 포함)을 포괄한다. 일본에는 CLL이 매우 드물어 이 차이는 거의 영향을 미치지 않는다.

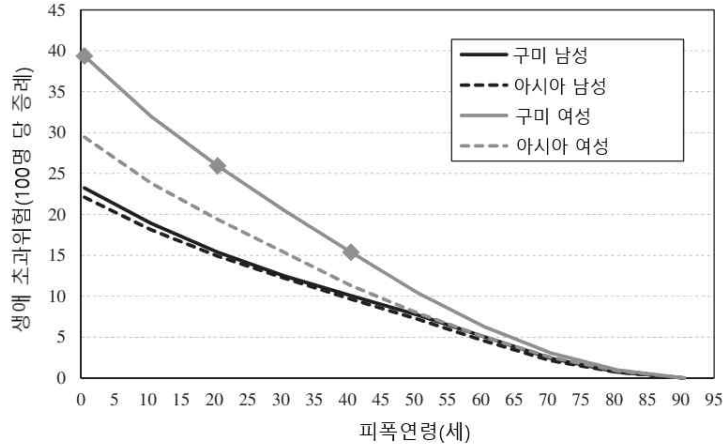


그림3.9. 1Gy 피폭 후 집단과 피폭연령에 따라 ERR 기반 모델로 산출한 모든 고형암의 생애 초과위험. 다이아몬드 표기 데이터는 그림 3.8의 상응하는 값을 보인다.

#### 3.1.3.4. 생애 초과위험의 연령 의존성

(55) 그림3.8과 그림3.10은 상이한 피폭연령(0, 20, 40세)에서 단일 피폭한 구미 여성에서 모든 고형암 누적 초과위험을 ERR 모델과 EAR 모델을 사용해 얻은 값을 각각 보인다. 그림3.9와 그림3.11은 각각 기준집단에서 ERR 모델과 EAR 모델로 얻은 생애 모든 고형암 초과위험 평가치를 피폭연령에 대해 보인다. 모든 평가치는 0.1Gy 피폭에 대해 계산한 값을 10배로 한 것이다.

(56) 그림3.8~그림3.11은 피폭연령과 도달연령에 따른 누적 초과위험의 변화를 보인다. 그림3.8에서 다이아몬드 점으로 보인 데이터는 구미 여성이 0, 20, 40세에 1Gy를 피폭한 경우로서 그림3.9에 같이 보인 데이터와 상응하는 것이다. 마찬가지로 그림3.10의 원 데이터 점은 구미 여성이 피폭연령 0, 20, 40세에서 1Gy를 피폭한 경우로서 그림3.11의 데이터와 상응한 것이다. 그림3.8과 그림3.10의 가위표는 피폭 20년 후 누적 초과위험을 보인다.

(57) 그림3.8과 그림3.10은 누적 초과위험이 피폭 5년 후부터 점차 증가함을 보이

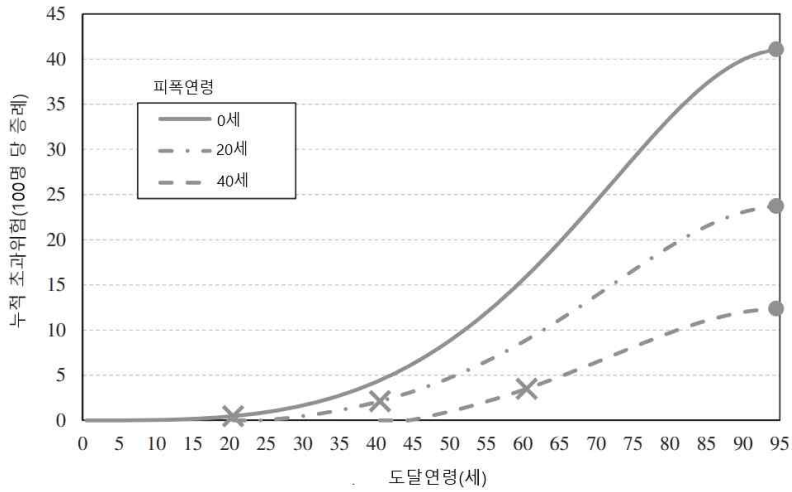


그림3.10. 구미 여성 피폭연령에 따라 1 Gy에서 EAR 기반 모델에서 모든 고형암의 누적 초과위험. 원으로 표시한 데이터 점은 그림3.11에서 원 표시 데이터와 상응한다. 가위표는 피폭 20년 후 누적 초과위험을 지시한다.

는데, ERR 및 EAR 평가치 모두에서 중년 이후 증가 경향이 두드러진다. 이 증가 양상은 그림3.5에 보인 누적 기저위험의 증가와 비슷하다. 피폭 후 20년에서 누적 초과위험(가위표로 보임)은 피폭연령 40세일 때가 젊은 피폭연령일 때보다 약간 높

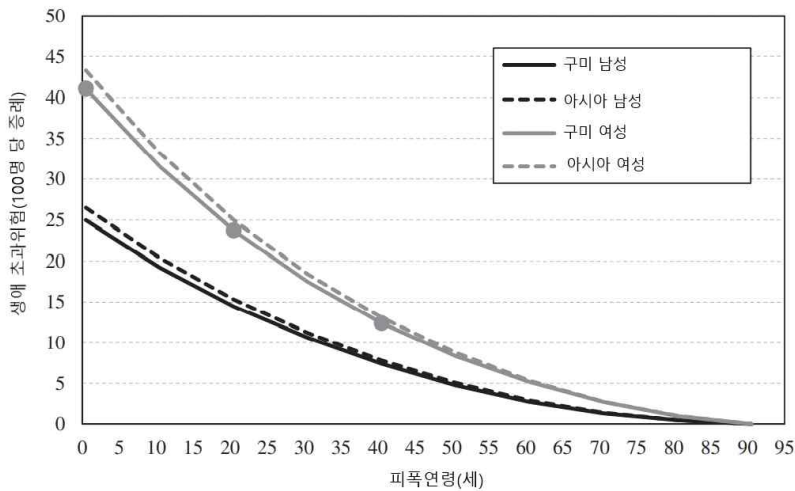


그림3.11. 1 Gy 피폭 후 집단과 피폭연령에 따라 EAR 기반 모델로 산출한 모든 고형암의 생애 초과위험. 원 표기 데이터는 그림3.10의 상응하는 값을 보인다.



음을 알 수 있다. 이는 도달연령에 따른 누적 기저위험의 증가와 ERR 모델일 때 도달연령에 따른 위험계수의 감소(그림3.2) 또는 EAR 모델일 때 피폭연령에 따른 위험계수의 감소(그림3.3) 사이의 반균형효과를 드러낸다. 누적 초과위험은 피폭연령 40세일 때가 젊은 피폭연령에 비해 일관되게 낮다. 이는 피폭연령이 높을수록 잔여 수명기간이 짧기 때문이다.

(58) 그림3.9와 그림3.11에서 생애 초과위험은 피폭연령이 증가하면 점차 감소함을 보인다. 이 감소는 주로 피폭연령 증가에 따라 여명 기간이 감소하기 때문이며 또, 부분적으로는 그림 3.2와 그림3.2에 보인 것처럼 ERR이나 EAR의 피폭연령 종속성 때문이기도 하다. 두 그림은 또 성별과 지역에 따른 차이도 보이는데, 인구집단이나 적용 모델을 불문하고 남성보다는 여성에서 생애 초과위험이 높다. ERR 기반 생애위험 평가치는 아시아 집단보다 구미 집단에서 높은 반면(그림3.9), EAR 기반 위험 차이는 현저하지 않다(그림3.11).

### 3.1.3.5. 생애 초과위험의 연령 평균

(59) 각 지역(아시아와 구미), 성별(남과 여) 및 모델(ERR과 EAR)의 조합에 대해 연령평균 생애초과위험을 전체 피폭연령에 대해 REIC의 가중평균으로 계산했다. 가중치는 조합 기준집단의 각 연령군 인구의 비율로 책정했다. 그림3.12는 구미와 아시아 인구의 분포를 5세 범주로 나타낸다(숫자는 부록A 표A.7에 있다). 인구 규모 데이터는 세계건강기구(WHO) 국제 사망률 통계 데이터베이스<sup>19)</sup>에서 얻었다. 표3.6은 전체집단(피폭연령 0~89세)에 대해 계산한 결과를 요약한다.

### 3.1.4. 위험 평가치의 집단간 이전

(60) 기저율이 다를 때 방사선 관련 암 위험 평가치를 한 집단에서 다른 집단으로 이전하는 데는 어려움이 있다. 이 문제를 다루기 위해 집단 위험을 EAR과 ERR 생애위험 평가치의 가중평균으로 계산하되, 그 가중치는 두 위험 평가치(표3.1)의 상대적 적용성을 감안한 판단을 바탕으로 했다. 일반원칙으로 선호 모델에 대한 과학적 증거가 없으면 ERR과 EAR 평가치 각각에 가중치 0.5를 동일하게 부여했다. 동일 가중치를 적용한 조직은 유방, 갑상선, 폐, 뼈 및 피부를 제외한 모든 암 사이트이다.<sup>20)</sup>

19) 인구 데이터는 2003년 4월 22일 [http://www.who.int/healthinfo/mortality\\_data/en/](http://www.who.int/healthinfo/mortality_data/en/)에서 내려받았다.

20) 골수암(백혈병)에 대해서도 동일 가중치를 적용했다. ICRP 103(2007)에서는 100% EAR 이전으로 잘못 기술했다.

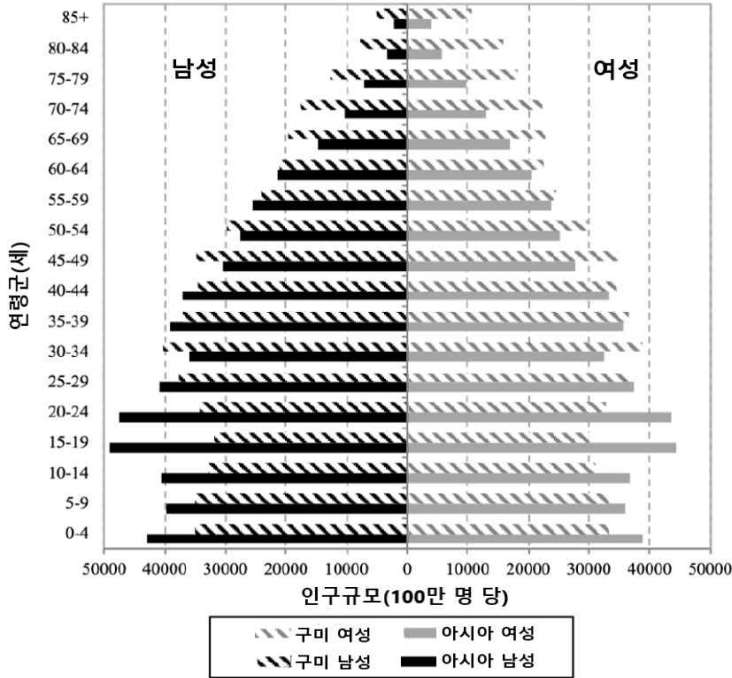


그림3.12. 구미 및 아시아 인구의 연령군별 규모.

(61) 여성 유방암에 대한 방사선 영향에 관한 병합분석(Preston 등 2002)이 통상적 ERR 기반 모델 사용에 부정적 증거를 제시했기에, 여성 유방암 위험은 EAR 모델에만 근거했다. 갑상선에 대해서는 검사강도(screening intensity) 차이가 방사선 관련 암 발생률에 큰 영향을 미치므로,<sup>21)</sup> EAR 기반 모델 적용이 곤란할 것으로 보였다. 그래서 갑상선암 위험은 ERR 모델에만 근거했다. 폐암에 대해서는, 원폭 생존자 데이터는 ERR 모델보다 EAR 기반 모델이 남녀에 걸쳐 잘 비교되고, 방사선량과 흡연력이 폐암 위험인자로서 덧셈형으로 작용함(Pierce 등 2003)을 암시했다. 그래서 ERR과 EAR 모델에 각각 가중치 0.3과 0.7을 주었다. ICRP 103(2007)에서는 뼈암과 피부암에 대해 생애위험을 계산하지 않았지만 앞선 간행물(ICRP 1991,1992)에서 명목위험 평가에 각각 일정 절대위험 모델과 일정 상대위험 모델을 사용했다.

21) <역주> 이 문제는 우리나라에서도 현안이었는데, 2000년부터 10년 사이에 여성 갑상선암이 10배 증가하는 기현상이 나타났다. 데이터를 분석하여 갑상선암 질병률이 검사빈도에 비례성을 밝혀냈고 이에 따라 대한갑상선학회가 증상 없는 환자의 갑상선 검사를 지양하도록 권고했는데 그 결과 2014년부터 여성 갑상선암 이환률이 급감했다.

표3.6. 전체집단에서 성별 및 연령 평균 생애 초과위험

암	ERR 근거 모델에서 Gy 당 100명 당 증례		EAR 기반 모델에서 Gy 당 100명 당 증례	
	구미인	아시아인	구미인	아시아인
	<b>남성</b>			
식도	0.27	0.53	0.16	0.15
위	0.28	1.73	1.58	1.86
결장	1.83	2.52	1.37	1.62
간	0.12	1.10	0.99	1.17
폐	1.58	1.78	1.25	1.39
방광	1.72	0.89	0.41	0.47
갑상선	0.17	0.18	-	-
기타 고형암	5.53	2.81	1.80	2.12
백혈병	0.53	0.59	0.46	0.50
<b>여성</b>				
식도	0.19	0.32	0.29	0.27
위	0.24	1.49	2.46	2.97
결장	0.82	0.91	0.64	0.78
간	0.10	0.69	0.35	0.42
폐	4.26	3.52	2.23	2.46
유방	-	-	3.97	4.94
난소	0.54	0.29	0.39	0.48
방광	0.89	0.43	0.78	0.89
갑상선	0.79	1.31	-	-
기타 고형암	2.27	1.76	2.80	3.38
백혈병	0.40	0.39	0.30	0.33

(62) 요약하면, ERR:EAR 가중치는 유방암과 뼈암은 0:100%, 갑상선암과 피부암은 100:0%, 폐암은 30:70%, 백혈병을 포함한 기타 암은 50:50%로 했다(표3.1 참조).

### 3.1.5. DDREF 적용

(63) 실험적 연구는 낮은 선량률, 낮은 선량 방사선피폭에서 생물학적 영향력이 높은 선량률, 높은 선량 피폭에 비해 통상 낮음을 보이는데, 이는 고선량 급성 데이터에 근거한 선량별 평가치를 지속적이거나 분할 피폭에 의한 낮은 선량에 적용하려면 축소해야 함을 암시한다. 1990년 권고에서 ICRP는 방사선방호를 위한 현실적 목적에서 축소인자로서 0.2 Gy 미만 선량, 그리고 0.1 Gy/h 미만 선량률에서는

더 높은 선량까지 DDREF 2를 적용하도록 포괄적 판단을 내렸다(ICRP 1991, Rühm 등 2016). ICRP는 이 결정을 2007년 권고에서도 변경 없이 유지하면서, DDREF 값 선택이 주관적 요소와 확률론적 불확도 요소를 포함한 개괄적 판단임을 강조했다(ICRP 2007).

(64) 생애위험 평가치는 성별이나 피폭연령을 불문하고 DDREF를 고려하여 1/2로 하향 조정했다. 다만, 백혈병은 선형-2차 선량-반응 모델이 이미 낮은 선량에서 위험을 수정하고 있으므로 골수암<sup>22)</sup>에 대해서는 DDREF를 적용하지 않았다. 뼈암과 피부암도 조정하지 않았다.

### 3.1.6. 유전영향의 통합

(65) 유전영향 위험을 평가하기 위해서는 전달 가능한 돌연변이 빈도뿐만 아니라 유전적 성분의 중요성도 고려할 필요가 있다. UNSCEAR 2001 보고서는 세대를 거쳐 낮은 선량 또는 만성적으로 피폭한 집단에서 Gy 당 100만 명 출생 당 여러 등급의 유전질환의 예상 추가(기저율 초과) 증례 수로 표현한 위험을 제시했다(UNSCEAR 2001). 선천성기형을 제외하고 다양한 등급의 유전질환에 대해 1 Gy **배가선량**doubling dose(DD)과 해당 기저 빈도값, 돌연변이 성분 및 회복잠재력 보정인자potential recoverability correction factor(PRCF)를 근거로 평가했다. 선천성기형에 대해서는 생쥐 데이터에서 온 추정치를 사용했는데 이는 배가선량법을 바탕으로 하지 않는다.

(66) UNSCEAR(2001)에 근거하여 ICRP는 멘델질환, 만성질환 및 선천성기형 등 모든 유전질환에 대한 위험을 평가했다[ICRP 103(2007)의 표A.6.4 및 표A.6.6]. 그 평가치가 이 분야 지식수준에 근거하지만 바탕의 여러 가정 관점에서 평가치의 강도와 한계는 유념할 필요가 있다.

(67) ICRP는 간행물 26(ICRP 1977a)에서는 첫 두 세대, 간행물 60(ICRP 1991)에서는 평형세대까지 위험 평가치를 사용했다. ICRP 103(2007)에서는 ICRP 60의 평형세대 평가치가 **선택계수**selection coefficient, 돌연변이 성분, 그리고 수백 년에 걸친 인구 변화에 관해 근거가 불충분한 가정에 집중했기 때문에 첫 두 세대까지 위험 평가치를 사용토록 결정했다. 그 결과 전체집단에서 생식선 선량과 관련된 유전질환 위험은  $10^4$  인 당 Gy 당 20 증례로 평가되었다. 남성과 여성 모두에 대해 동

---

22) <역주> 이 보고서에서 ‘골수암’은 뼈 피막(줄기세포)에서 발생하는 뼈암이 아니라 조혈 조직인 골수에서 기인하는 암으로서 백혈병, 다발골수종 등이다.

일 위험 평가치를 적용했다.

### 3.1.7. 명목위험 계수

#### 3.1.7.1. 전체집단에 대한 명목위험 계수

(68) 위에서 설명한 방법론으로 산출한 생애위험 평가치를 인구집단과 성별에 걸쳐 평균하여 14개 조직/장기에 대한 명목위험 계수를 얻었는데, 14개 조직/장기는 암 사이트 12개(식도, 위, 결장, 간, 폐, 뼈, 피부, 유방, 난소, 방광, 갑상선, 골수)와 '기타 고형암'으로 묶은 나머지 암 사이트, 그리고 유전질환에 대한 생식선으로 구성된다.

(69) 일부 방사선 관련 암은 성별 고유적이고 다른 많은 암에서 성별은 주요 수정자가 된다. 가장 극단적 예로서 난소암은 여성 고유적이며, 희귀한 발생 때문에 남성의 유방암 위험은 0으로 가정한다.<sup>23)</sup> 결과적으로 유방조직에 대한 성평균 명목위험 계수는 표3.7에서 보듯이 여성 값의 절반이다. 그렇지만 ICRP의 명목위험 평

표3.7. ICRP 103에서 전체집단의 명목위험 계수

조직/장기	명목위험 계수(1만 명 당 Gy 당 증례)		
	남	여	성평균
식도	15	16	15
위	68	91	79
결장	91	40	65
간	41	19	30
폐	76	153	114
뼈*	7	7	7
피부†	1000	1000	1000
유방	0	224	112
난소	0	21	11
방광	46	41	43
갑상선	12	53	33
골수‡	48	36	42
기타 고형암	157	131	144
생식선(유전질환)	20	20	20
계	1580	1851	1715

\* 뼈표면

† 흑색종 외 피부암

‡ CLL(만성골수성백혈병) 외 백혈병

23) LSS 최신 분석(Brenner 등 2018)은 남성 유방암에 대해 유의한 양성 반응을 암시하지만 매우 적은 증례를 고려하면 이 가정은 계속 타당할 것이다.

가치는 전형적 연령분포의 남녀 명목집단에 해당된다.

(70) 이 간행물을 위한 명목위험 재계산에서 지금까지 설명한 것처럼 ICRP 103(2007)의 절차를 따랐지만 데이터 처리나 계산 방법은 적절히 보완했다. 그 결과 재계산한 명목위험 계수(표3.6 값의 중간값으로 계산)가 ICRP 103 계수 값과 완전히 일치하지는 않았다. 이를 표3.7에 보였다. 그러나 그 차이가 크지는 않아 이 표에서 위험계수는 변동 없이 유지된다.

### 3.1.7.2. 노동연령인구에 대한 명목위험 계수

(71) 노동연령인구의 명목위험은 피폭연령 18~64세 사람으로 구성된 부분집단에 대해 같은 방법으로 계산했다. 전체집단에서와 마찬가지로 REIC를 계산하기 위해 초과위험을 94세까지 누적했다. 이렇게 ICRP 103(2007)의 명목위험 계산을 검증하는 과정에서 프로그램 오류가 발견되었다. 그림3.13에 보였듯이 오류를 수정하면 골수암(+91%), 유방암(+35%), 난소암(+29%)의 명목위험이 상당히 증가하지만 다른 장기/조직에서는  $\pm 20\%$  이내임을 재계산이 보여주었다.

(72) 표3.8은 ICRP 103(2007)과 재계산의 노동연령인구에 대한 명목위험 계수 전체를 비교한다. 계산 잘못은 불운이지만 오류가 전반적 명목위험에 주는 영향은 제한적(총 4%)이다. 더욱이 이 오류는 전체집단에 대한 방사선위해로부터 도출된 조직가중치에는 영향을 미치지 않는다.

(73) ICRP 103(2007)에서 명목위험은 암 발생을 근거로 당시 가장 최신 정보를 이용해 계산했다. 그렇지만 심각도를 보정한 결과 위해 값은 ICRP 60(1991)의 값과 상당히 비슷했다. 그래서 방사선안전 국제표준이 근거를 두는 Sv 당 5%라는 전체

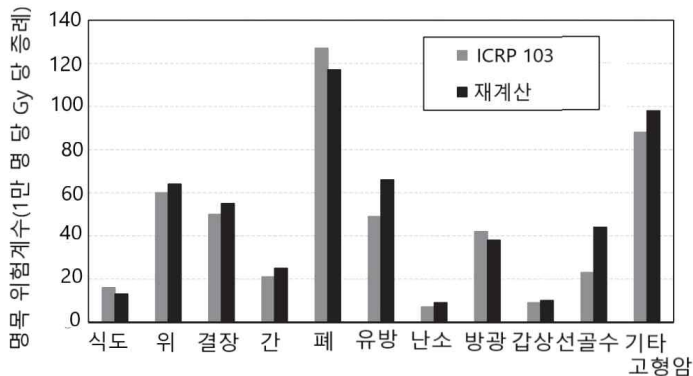


그림3.13. ICRP 103(2007)과 재계산한 노동연령집단의 명목위험 계수의 비교.

표3.8. 노동연령인구에 대한 명목위험 계수

장기/조직	명목위험 계수(1만 명 당 Gy 당 증례)	
	ICRP 103(2007)	재계산 <sup>¶</sup>
식도	16	13
위	60	64
결장	50	55
간	21	25
폐	127	117
뼈* <sup>§</sup>	5	5
피부 <sup>†§</sup>	670	670
유방	49	66
난소	7	9
방광	42	38
갑상선	9	10
골수 <sup>‡</sup>	23	44
기타 고형암	88	98
생식선(유전질환) <sup>§</sup>	12	12
계	1179	1226

\* 뼈표면

† 흑색종의 피부암

‡ CLL외 백혈병

§ 재계산 없음

¶ 프로그램 오류 수정하여 재계산

적 치명 위험계수는 방사선방호 목적에서 계속 적절하다고 결론지었다(ICRP 103 제87항 참조). 표3.8에서 예시하듯이 오류 수정이 이 결론을 바꾸지는 않는다. 따라서 ICRP는 명목위험 계수와 방사선위해 계산오류는 방사선방호체계의 운영에 중요한 함의를 갖지는 않는다고 결론지었다.

## 3.2. 심각도 보정

(74) 표3.9는 심각도 보정을 위해 명목위험을 방사선위해로 변환하는 데 적용된 변수를 요약한다.

### 3.2.1. 치사율에 대한 보정

(75) 명목위험이 초과발생률을 근거로 산출되었기 때문에 암 심각도를 고려하도록 치사율( $k$ )을 적용했다.

(76) 치사율은 판단기반 값에서 도출되었지만 몇 종류 암에 대해서는 치료영향을 반영했다. ICRP 60(1991)에서 치사율 값 선택은 미국 SEER 프로그램 두 데이터 세트[1980~1985년 기간 5년 생존률과 1950~1970년의 20년 생존률(U.S. DHHS, 1989)]의 분석에 바탕을 둔다. 치사율은 ICRP 103(2007)에서 갱신했지만 대부분 장기/조직에서 이전 값과 비슷했다. 남녀 모두에 같은 세트 값을 적용했다.

표3.9. 전체집단에 대한 명목 위험계수로부터 방사선위해의 도출(ICRP 2007)

장기/조직	명목 위험 계수 <sup>†</sup> $R$	치사분율 $k$	비치사암 최소 가중치 $q_{\min}$	비치사 증례 가중치 $q$	암 없는 생활 상대손실 $l$	방사선 위해 <sup>‡</sup> $D^*$	상대 방사선위해
식도	15	0.93	0.1	0.935	0.87	13.1	0.023
위	79	0.83	0.1	0.846	0.88	67.7	0.118
결장	65	0.48	0.1	0.53	0.97	47.9	0.083
간	30	0.95	0.1	0.959	0.88	26.6	0.046
폐	114	0.89	0.1	0.901	0.8	90.3	0.157
뼈	7	0.45	0.1	0.505	1.0	5.1	0.009
피부 <sup>c</sup>	1000	0.002	0.0	0.002	1.0	4.0	0.007
유방	112	0.29	0.1	0.365	1.29	79.8	0.139
난소	11	0.57	0.1	0.609	1.12	9.9	0.017
방광	43	0.29	0.1	0.357	0.71	16.7	0.029
갑상선	33	0.07	0.2	0.253	1.29	12.7	0.022
골수	42	0.67	0.1	0.702	1.63	61.5	0.107
기타 고형암	144	0.49	0.1	0.541	1.03	113.5	0.198
생식선(유전)	20	0.80	0.1	0.82	1.32	25.4	0.044
계	1715					574	1

\*  $D = [Rk + R(1-k)q]l$ ,  $q = k + q_{\min}(1-k)$

†  $10^4$  인 당 Gy 당 증례

‡  $10^4$  인 당 Sv 당 증례.

(77) 치사율에 대한 보정은 명목 위험계수  $R$ 에 치사율 인자  $k$ 를 곱해 수행된다. 이런 식으로 치사율이 높은 암(예: 간암은 0.95, 폐암은 0.89)이 치사가 거의 없는 암(예: 피부암은 0.002, 갑상선암은 0.07)보다 더 높은 가중치를 가진다(표3.9 참조).

### 3.2.2. 삶의 질에 대한 보정

(78) 암 생존자는 일반적으로 QOL에 부정적 영향을 겪는다. 그래서 ICRP는 암에



대해 치사율뿐만 아니라 암치료의 통증, 고통 등 모든 부정적 영향도 가중해야 한다고 판단했다. 이를 위해 암의 비치사 분율에 인자  $q_{\min}$ 을 적용하여 QOL 인자  $q$ 를 도출했다. QOL 인자는 다음 식으로 표현된다.

$$q = k + q_{\min}(1 - k)$$

여기서  $k$ 는 치사율,  $q_{\min}$ 은 비치사 암에 대한 최소 가중치를 나타내는 인자이다.

(79)  $q_{\min}$ 은 판단에 근거하는 변수인데, 그 값은 피부암과 갑상선암을 제외하고는 0.1로 설정했다.  $q_{\min}$  보정은 비치사 암 분율에 비례하여 방사선위해 계산에 영향을 미친다. 따라서 폐암이나 위암처럼 치사율이 높은 암은 유방암이나 갑상선암처럼 치사율이 낮은 암에 비해  $q_{\min}$ 의 영향을 덜 받는다.

(80) 방사선 유발 피부암은 거의 전적으로 기저세포형이고 대개 통증, 고통 또는 치료 후유증도 거의 없어 피부암에 대해서는  $q_{\min}$  보정을 하지 않는다. 갑상선암에 대해서는  $q_{\min}$ 으로 0.2를 책정했다.

### 3.2.3. 수명손실년에 대한 보정

(81) 암 사이트 사이에 진단연령 분포가 다르기 때문에, 국가 암 데이터로부터 여러 1차암 사이트에 대해 발병 평균연령을 평가하고 암이 발생한 때 수명손실년(YLL)으로 환산했다. YLL은 조합집단 성별마다 피폭연령과 잔여 수명기간의 후속 도달연령에 걸친 가중평균으로 산출했다. 사이트 YLL을 모든 암의 평균 YLL로 나눠 상대값(인자  $l$ )으로 변환했다. 인자  $l$ 은 암 없는 삶 손실의 상대연수relative years of cancer-free life lost인데 늦은 생애에 나타나는 암은  $<1$ (예: 방광암은 0.71, 폐암은 0.8)이고 이른 생애에 나타나는 암은  $>1$ (예: 골수암은 1.63, 갑상선암과 유방암은 1.29)이 된다.

(82) 뼈암과 피부암의 YLL은 같은 방식으로는 구할 수 없어서 임의로 모든 암의 평균 YLL로 설정했다. 따라서 이 두 사이트의  $l$ 값은 1이 된다.

### 3.2.4. 방사선위해 계산

(83) 표3.9에 보였듯이 각 조직/장기의 방사선위해  $D$ 는 명목위험 계수에 위에 언급한 인자들을 적용하여 다음 식으로 산출했다.

$$D = [Rk + R(1 - k)q]l.$$

(84) 전체적 방사선위해는 14 조직별 위해의 단순합으로 계산했다. 결과는 1만 명당 Sv 당 증례수로 보였다. 이것은 실제 수를 표현하는 것은 아니라, 단위 선량당 가중된 초과 증례수의 이론적 추정치를 표현하는 것이다. 방사선위해는 낮은 선량을, 낮은 선량에서 방사선방호 목적을 위한 것이므로 방사선량 표현에 'Sv'를 사용했다.

### 3.3. 조직가중치 $w_T$ 결정

(85) 전체집단에서 각 조직/장기의 방사선위해를 그 합에 대해 정규화한 상대 방사선위해가 유효선량 산출에 사용되는 조직가중치  $w_T$ 의 근거가 된다(ICRP 2021). 표3.9의 상대 방사선위해는 그 추정에 관련된 불확도 때문에 엄밀한 것은 아니므로 위해를 반영해 상대위해를 폭넓게 네 범주로 구분했다. 이와 함께 아래에서 요약하는 판단에 따라 ICRP는 남녀 모두와 모든 연령에 적용할 한 세트 조직가중치  $w_T$  값을 정의했다(표3.10 참조).

(86) 가장 방사선위해가 큰 장기/조직(폐, 유방, 위, 골수, 결장 및 잔여조직)에 대해서는  $w_T$ 로 0.12를 부여했다. 생식선에는 유전영향과 난소암의 상대 위해에 근거해  $w_T$  0.08을 부여했다. 중간 수준 방사선위해를 갖는 조직/장기(방광, 식도, 간, 갑상선)에 대해서는  $w_T$  0.04를 부여했다. 갑상선의  $w_T$ 는 아동기 암 위험의 비중을 고려해(즉, 아동이 갑상선암에 유난히 민감한 소그룹으로 간주된다.) 0.04를 부여했다. 방사선위해가 가장 낮은 조직(피부, 뼈)에는  $w_T$  0.01을 부여했다.

(87) 침샘과 뇌의 암 위험은 구체적으로 정량화하기 어렵지만 잔여조직에 속한 개별 조직보다는 위해가 클 것으로 판단하여<sup>24)</sup> 잔여조직과 별도로 각각 0.01의 조직가중치를 부여했다.

(88)  $w_T$ 합이 1이 되도록 나머지 값(0.12)는 '잔여조직'에 부여했다. 이 범주는 구체적 방사선위험 계산이 큰 의미 없는 조직/장기의 방사선위해를 고려하기 위해 포함했다. '잔여조직'으로 표현되는 이 범주는 남녀 각각 13개 조직/장기를 포함하

---

24) <역주> 잔여조직에는 남, 녀 각각 13개 조직/장기가 포함되며 이들에게 총 0.12의 조직가중치가 할당되므로 개별 조직에는 0.01에 근소하게 미치지 못하는 가중치가 할당되는 셈이다.

는데 그 중 전립선과 자궁/경부는 성별 고유하다. 잔여조직  $w_T$  값 0.12는 13개 조직 각각에 균등하게 할당되는 것으로 간주한다.<sup>25)</sup>

표3.10. ICRP 103(2007)에서 장기/조직 범주별 조직가중치(ICRP 2007)

장기/조직	상대 방사선위해	조직가중치 $w_T$
식도	0.023	0.04
위	0.118	0.12
결장	0.083	0.12
간	0.046	0.04
폐	0.157	0.12
뼈	0.009	0.01
피부	0.007	0.01
유방	0.139	0.12
난소	0.017	-
방광	0.029	0.04
갑상선	0.022	0.04
골수	0.107	0.12
잔여조직*	0.198	0.12
생식선†	0.044	0.08
뇌	-	0.01
침샘	-	0.01
계	1.00	1.00

\* '잔여조직'으로 부신, 흉외기도, 쓸개, 심장, 신장, 림프절, 근육, 구강 점막, 췌장, 소장, 비장, 가슴샘, 자궁/경부를 명시하지만 포함되는 조직 수는 필요에 따라 늘일 수 있다.

† 생식선의 조직가중치  $w_T$  값은 유전영향과 난소암의 상대위해에 근거한다.

25) <역주> 달리 말하면 13개 조직 산술평균 등가선량에 조직가중치 0.12를 부여하는 것과 같다.



## 제4장 방사선위해 계산의 민감도

(89) 암으로 인한 방사선위해 산출에 여러 변수가 관련되고, 이들 변수에 대해 채택한 값의 변동이 결과에 영향을 미칠 수 있어 결국 방사선방호 관행에서 의미를 가질 수 있다. 이러한 변동이 방사선위해에 미치는 영향을 평가하기 위해, 변수에 대해 대안 값을 부여하여 몇몇 민감도분석을 수행했다. 분석은 표3.6에 열거된 암에 초점을 맞췄다. 뼈암과 피부암은 제외했는데 이들 암의 위험은 다른 방법으로 평가되어 같은 수준 민감도분석을 적용할 수 없기 때문이다.

(90) 민감도분석에는 제3장에서 설명한 계산방법론을 사용하면서 변수 값을 표4.1에 보인 것처럼 변화시켰다. 대안 값이나 조건은 각 변수가 방사선위해에 미치는 영향을 살피도록 한 번에 하나씩 적용했다.

(91) 변수의 영향은 기준위해(기준 설정으로 계산)에 대한 변동 위해(대안 설정으로 계산)의 비를 바탕으로 평가했다. 미치는 효과를 평가해 다음의 범주로 분류했다.

- 경미한 영향: 1.5배 이내 변화(비가 1/1.5~1.5 범위)
- 보통 영향: 1.5 이상~2배 이내 변화(비가 1/2~1/1.5 또는 1.5~2 범위)
- 큰 영향: 2배 이상 변화(비가 1/2이하 또는 2 이상).

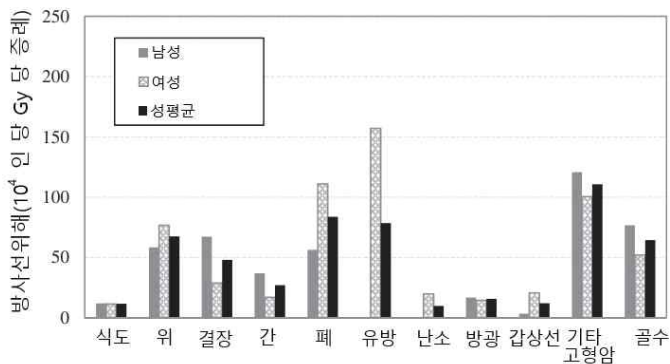


그림4.1. 남, 여 및 성평균 방사선위해의 비교. 기준 위해는 성평균 값이다.

표4.1. 민감도분석에 사용된 변수 값 및 계산 조건

항목	기본 값(기준 위해)	대안 값(변동 위해)
기준집단		
성별	평균	남성 여성
지역	평균	구미인 아시아인
피폭연령	0-89세	0-14세 18-64세
명목위험 계산을 위한 변수		
생애위험 척도	REIC	LAR
선량 가정	0.1 Gy	1 Gy
최소 잠복기	5년	고형암 10년, 백혈병 2년
최대 도달연령	94세	99세
이전모델	가중평균	ERR(유방암 제외) EAR(갑상선암 제외)
DDREF	2(백혈병 제외)	1
심각도 보정 변수		
치사율	암 사이트별	모든 사이트에 1
최소 QOL 인자	0.1(갑상선 0.2)	모든 사이트 0
암 없는 상대 수명손실	암 사이트별	모든 사이트에 1

REIC: 피폭기인 암 발생 위험, LAR: 생애 기인위험, ERR: 초과상대위험,  
EAR: 초과절대위험, DDREF: 선량선량률효과인자, QOL: 삶의 질.

\* 생애위험 계산에는 개인 구성원이 낮은 LET 방사선 선량을 피폭하는 것으로 가정했다.

## 4.1. 기준집단

(92) 방사선위해를 성별과 ICRP 103(2007)의 아시아인 세 집단과 구미인 네 집단으로 구성된 두 조합집단에 대해 평균했다. 비록 일부 암 발생은 인구집단 사이에 크게 차이가 있고, 일부 암은 성별 고유이지만 이 방법론을 모든 암 사이트에 적용했다. 그림4.1은 남녀를 구분하여 구한 방사선위해를 보이며, 그림4.2는 구미인과 아시아인을 따로 계산한 것을 보인다. 여성 고유 암 사이트를 제외하고도 결장, 간, 폐 및 갑상선 암은 성별 차이가 상당하다. 위암과 간암은 집단 사이 상당한 차이를 보이는데 아시아인 집단이 구미인 집단보다 높은 위해를 보인다. 유방암과 난소암은 집단 사이 위해 차이가 상대적으로 적다.

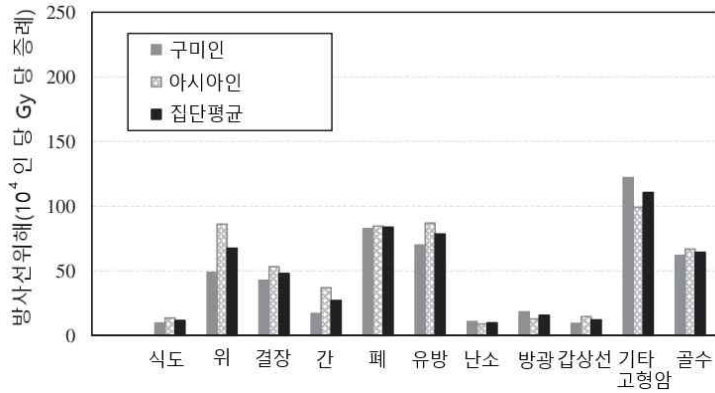


그림4.2. 구미인 집단, 아시아인 집단 및 두 집단 평균 방사선위해의 비교. 기준 위해는 두 집단 평균이다.

(93) ICRP 103(2007)에서는 명목위험을 피폭연령 0~84세에 걸쳐 평균하였다. 그림 4.3은 다른 세 피폭연령 그룹 즉, 어린이 집단을 나타내는 0~14세, 노동연령 집단인 18~64세, 그리고 전체집단인 0~84세에 대한 방사선위해를 보인다. 피폭연령이 수명손실에 영향을 미치지만, 명목위험의 변화를 조명하도록 전체집단의 암 없는 상대 수명손실을 세 그룹 모두에 적용했다. 대부분 암 사이트에서 어린 피폭연령 집단(0~14세)의 위해가 전체집단(0~84세) 위해보다 높다. 몇몇 경우(위암, 유방암, 갑상선암, 기타 고형암)에서는 0~14세의 위해가 0~84세 위해보다 2배 이상 높다.

(94) 집단 상황의 변동이 방사선위해에 미치는 영향을 표.4.2에 요약했다. 표의 둘째 열은 기준위해 즉, 제3장에서 설명한 방법론을 사용해 계산한 방사선위해를 보인다. 다른 열에는 수정된 상황으로 계산한 결과를 기준위해에 대한 상대값으로 보

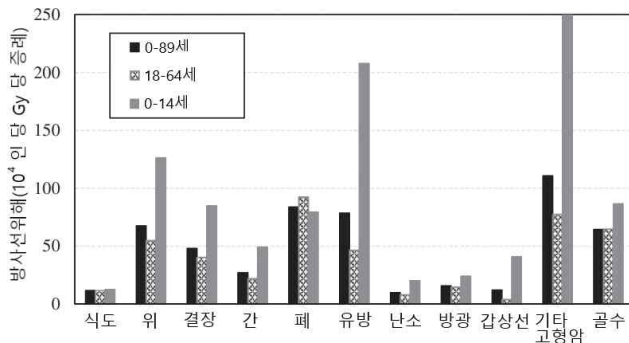


그림4.3. 상이한 피폭연령 그룹에 대해 계산한 방사선위해의 비교. 기준위해는 전체집단(피폭연령 0~89세)에 대한 값이다.

인다. 전반적으로 피폭연령 0~14세 집단의 방사선위해 증가가 두드러진다. 구미 여성의 유방암 기저율이 아시아 여성보다 높음에도 유방암 위해는 아시아 집단에서 더 높음은 유의할 일이다. 이는 EAR 모델이 두 집단에 같은 초과위험을 주기 때문이지만, 그림3.4에서 보듯이 생존확률은 50~75세의 아시아인 집단에서 더 느리게 감소한다.

표4.2. 대안 기준집단이 방사선위해에 미치는 영향\*

장기/조직	기준위해 <sup>†‡</sup>	기준위해에 대한 변동위해의 비율					
		남성	여성	구미인	아시아인	피폭연령 18-64세	피폭연령 0-14세
식도	11.8	1.02	0.98	0.84	1.16	0.99	1.07
위	67.6	0.86	1.14	0.72	1.28	0.81	1.87
결장	48	1.4	0.61	0.89	1.11	0.84	1.77
간	27.1	1.37	0.63	0.63	1.37	0.81	1.81
폐	83.8	0.67	1.33	0.99	1.01	1.1	0.95
유방	78.6	-	2	0.89	1.11	0.58	2.64
난소	9.9	-	2	1.1	0.9	0.81	2.02
방광	15.7	1.08	0.92	1.17	0.83	0.93	1.54
갑상선	12.1	0.28	1.72	0.78	1.22	0.33	3.37
기타 고형암	110.7	1.09	0.91	1.1	0.9	0.7	2.26
골수	64.4	1.19	0.81	0.96	1.04	1.01	1.34

\* 이 값은 이 간행물을 위해 다시 계산했으며 ICRP 103(2007)이나 Zhang 등(2020)의 값과 약간 다르다.

† 10<sup>4</sup> 인당 Sv 당 증례.

‡ 제3장에서 설명한 방법론으로 계산한 방사선위해.

## 4.2. 명목위험 계산 변수

(95) 1 Gy 당 명목위험은 0.1 Gy에서 REIC에 10을 곱한 값을 기반으로 계산했다 (소절 3.1.3.3 참조). LAR은 암 없는 생존곡선을 사용함에 반해(Thomas 등 1992), REIC는 방사선피폭으로 인한 추가 암 발생에 따른 암 없는 생존의 감소를 고려한다. 그림4.4는 이 두 생애위험 척도로 계산한 방사선위해를 비교하는데 REIC 대신 LAR을 사용해도 비슷한 결과를 얻는다. 이는 0.1 Gy가 생존곡선에 유의한 변화를 초래하지 않기 때문이다. 결과적으로 ICRP 103(2007)에서 Gy 당 REIC로 표현한 생애위험이 고형암에 대해서는 1 Gy에서 LAR과 거의 대등하다 (Zhang 등 2020).



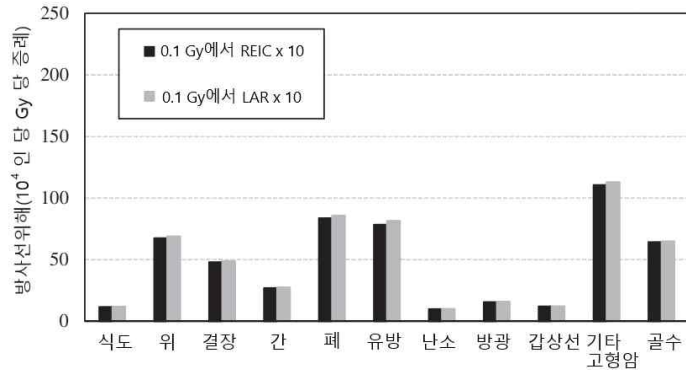


그림4.4. 상이한 생애위험 척도를 사용해 계산한 방사선위해의 비교. 기준위해는 0.1 Gy에서 피폭유발 암 발생 위험(REIC)에 10을 곱한 값에 근거한 것이다. LAR: 생애 기인위험.

(96) 선량이 높아지면, 암 없는 생존에서 피폭유발 변화가 유의해지므로 단위 선량 당 REIC는 감소한다. 이는 1 Gy에서 REIC에 근거한 방사선위해가 고형암에서 기준위해보다 21% 차이까지 상당히 감소함을 보이는 그림4.5에서 드러난다. 반대로 백혈병에서는 1 Gy에서 REIC에 근거한 위해가 기준위해보다 약 2.5배 높다. 이는 백혈병의 선량-반응 모델의 2차항 영향 때문인데 0.1 Gy에서는 이것이 사소하다.

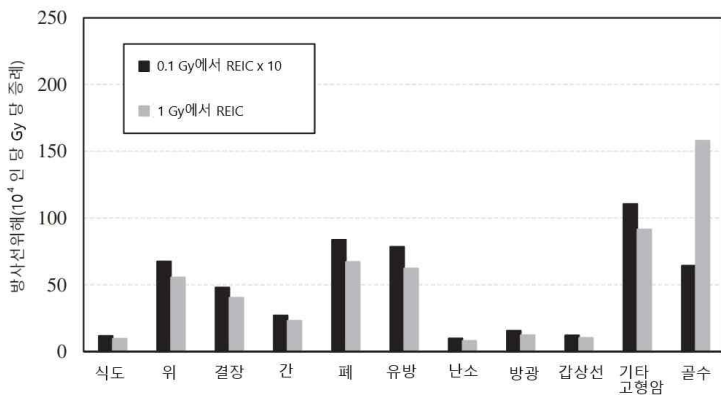


그림4.5. 상이한 선량 가정으로 계산한 방사선위해의 비교. 기준위해는 0.1 Gy에서 REIC에 10을 곱한 값을 근거로 한다.

(97) 암의 유발과 진단까지는 최소한 걸리는 시간이 있다. 이 잠복기는 암 사이트 별로 다를 것으로 보지만 그 정보는 소수 암에서만 가용하다. 잠복기는 가용한 진단기술과 역학연구에서 증가를 검출하는 분석력과 관련되므로 이 변수에 관련된 불확실성이 있다. 고형암의 경우 최소 잠복기는 5~10년, 백혈병은 2~5년으로 간주

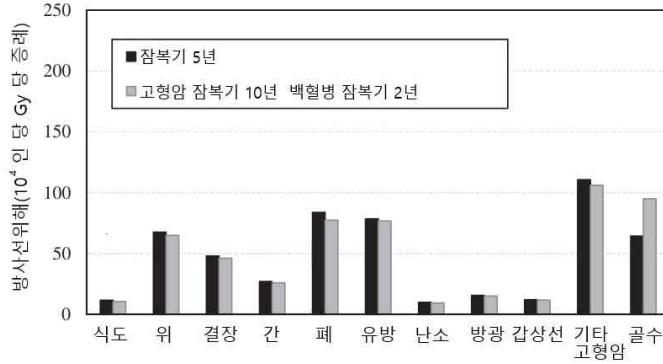


그림4.6. 상이한 잠복기를 사용해 계산한 방사선위해의 비교. 기준위해는 모든 암 사이트에 5년 잠복기를 가정한 것이다.

한다. 그림4.6은 잠복기를 달리할 때 방사선위해를 비교한 것이다. 고형암에서는 최소 잠복기가 5년이든 10년이든 위해 차이는 미미하지만, 백혈병은 잠복기가 5년에서 2년으로 줄면 백혈병 위해가 48% 늘어난다.

(98) 기대수명이 늘어남에 따라 방사선위험이 누적되는 기간도 증가하여 이로 인해 방사선 기인 추가 증례가 발생한다. 그림4.7은 그 영향을 보기 위해 최대 도달연령을 94세 대신 99세로 설정한 결과이다. 최대 도달연령이 99세일 때 모든 암 사이트에서 방사선위해 증가는 1~2%로 나타났다.

(99) ICRP 103(2007)에서는 명목위험을 ERR과 EAR 생애위험 평가치의 가중평균으로 계산했는데, ERR:EAR 가중치를 갑상선암에 대해서는 100%:0%, 유방암은

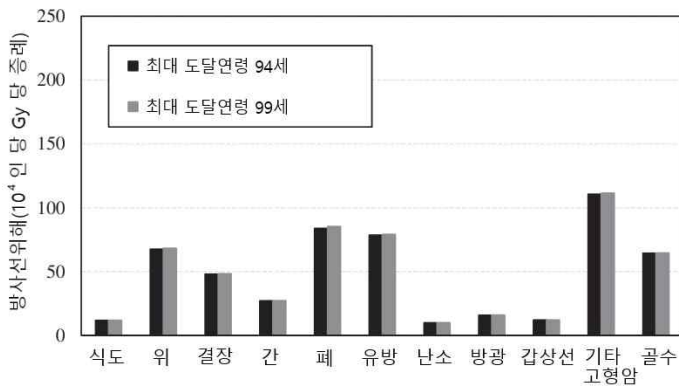


그림4.7. 최대 도달연령을 달리해 계산한 방사선위해 비교. 기준위해는 94세까지 누적한 위험이다.

0%:100%, 폐암은 30%:70%, 기타 고형암과 백혈병은 50%:50%로 했다(표3.1 참조). 이 가중체계는 암 기저율이 다른 집단 사이 위험 평가치를 이전하는 합리적 근거를 제공하기 위해 도입되었다. 이는 결과가 두 모델을 사용한 위험 평가치가 크게 다를 때 ERR:EAR 가중치에 민감할 것을 암시한다. 그림4.8은 100% EAR 모델과 100% ERR 모델로 계산한 방사선위해를 ICRP 103에서 설명한 방법에서 도출된 값(가중평균)과 비교한다. 위암과 폐암에서 상대적으로 큰 차이를 보인다.

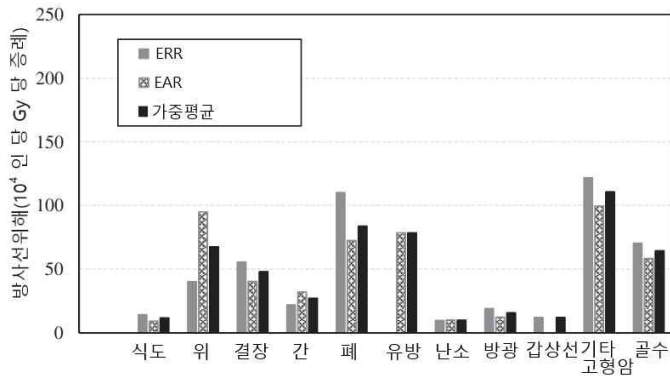


그림4.8. 상이한 위험 이전모델을 적용한 방사선위해의 비교. 기준위해는 초과상대위험(ERR)과 초과절대위험(EAR)의 가중평균에 근거한 값이다(ERR:EAR 가중치; 갑상선암 100%:0%, 유방암 0%:100%, 폐암 30%:70%, 나머지 고형암과 백혈병 50%:50%).

(100) 낮은 선량률, 낮은 선량 피폭의 가능한 영향을 고려하기 위해 고형암의 명목 위험을 DDREF 2로 낮췄다. 그러나 근년에 방사선방호 공동체에서 DDREF 값 선정이 논의 주제로 되어왔다(Rühm 등 2015,2016, Shore 등 2017, Hoel 2018, Wakeford 등 2019). 미국 과학원의 국가연구위원회(NRC)는 BEIR VII(NAS/NRC 2006)에서 DDREF 값으로 약 1.5를 제안한 바 있고, 심지어 DDREF를 사용하지 말아야 한다는 사람도 있다(SSK 2014). 이를 반영하여 DDREF를 1과 2로 하여 계산한 방사선위해를 그림4,9에 보였다. 방사선위해는 DDREF에 역비례하므로 DDREF 값을 2에서 1로 변화시키면 고형암 방사선위해는 2배 늘어난다. 백혈병에 대해서는 DDREF를 적용하지 않았으므로 골수의 암에는 변화가 없다.

(101) 표4.3은 그림4.4~그림4.9에 보인 명목위험 계산에서 변수 대안값의 영향을 요약한 것이다. 일견해서 DDREF를 2에서 1로 변경하면 가장 영향이 큰데 이 변경이 모든 고형암의 위해를 배가하기 때문이다. 개별 조직/장기에서는 REIC를 1

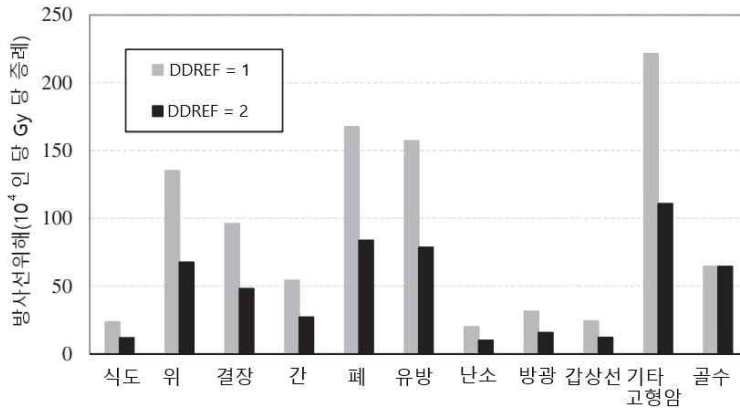


그림4.9. 다른 DDREF 값을 사용해 계산한 방사선위해의 비교. 기준위해는 DDREF 2에 근거로 한 값이다.

표4.3. 명목위험 계산에서 변수 대안 설정이 방사선위해 값에 미치는 영향\*

조직/장기	기준 위해 <sup>†</sup>	기준위해에 대한 대안 위해 비						DDREF 1
		10×0.1 Gy LAR	1 Gy REIC	최소 잠복기 고형암 백혈병 10년 2년	최대 도달연령 99세	ERR	EAR	
식도	11.8	1.02	0.83	0.90	1.01	1.21	0.79	2
위	67.6	1.02	0.82	0.96	1.01	0.59	1.41	2
결장	48	1.02	0.84	0.96	1.01	1.16	0.84	2
간	27.1	1.02	0.85	0.96	1.01	0.81	1.19	2
폐	83.8	1.03	0.80	0.92	1.02	1.31	0.87	2
유방	78.6	1.04	0.79	0.98	1.01	-	1.00	2
난소	9.9	1.02	0.81	0.94	1.01	0.98	1.02	2
방광	15.7	1.03	0.79	0.96	1.02	1.21	0.79	2
갑상선	12.1	1.02	0.85	0.97	1.00	1.00	-	2
기타 고형암	110.7	1.02	0.83	0.96	1.01	1.10	0.90	2
골수	64.4	1.01	2.45	1.48	1.00	1.09	0.91	1

\* 이 값은 이 보고서를 위해 새로 계산했는데, ICRP 103(2007)이나 Zhang 등(2020)의 값과 약간 다르다.

† 10<sup>4</sup> 인 당 Sv 당 증례.

‡ 제3장에서 설명한 방법론으로 계산한 방사선위해.

Gy에 대해 계산할 때 골수에서 가장 영향이 크게 나타난다.

### 4.3. 심각도 보정 변수

(102) 명목위험 평가치가 방사선위해의 중요한 성분이지만 적용되는 심각도 보정인자들도 위해 값에 영향을 미친다. 보정인자에는 치사율( $k$ ), 최소 QOL 인자( $q_{\min}$ ) 및 암 없는 삶 상대손실 연수( $l$ )가 포함된다. 치사율은 치사암 명목위험을 산출하는 데 사용되면서 동시에 비치사 암의 QOL을 보정하는 데도 역할을 한다. 변수  $q_{\min}$ 은 암 생존자가 보통 겪는 치료의 통증, 고통 및 기타 부정적 영향에 대한 최소한의 가중치를 표현한다. 소절3.2.2.에 따르면, 보정인자  $q$ 는 0과 1 사이 값으로 표현하는  $k$ 와  $q_{\min}$  값에 따라 증가한다.  $q_{\min}$  값을 최대( $q_{\min} = 1$ )로 두면  $k = 1$ 인 것과 같은 효과를 내는데, 이는 최악 QOL 수준이 수명 상실(치사암)과 대등할 정도임을 의미한다. 이러한 관점에서, 이 두 변수의 잠재적 영향을  $k = 1$ 과  $q_{\min} = 0$ 인 극단 시나리오로 시험하였다. 암 없는 삶 상대손실 값은 암 사이트에 따라 다른데 표3.9에서 보듯이 0.71에서 1.63까지 변동했다. 이 변수 변동 영향을 보이기 위해 모든 암 사이트에 대해  $l$ 을 1로 두고 계산했다.

(103) 그림4.10은 치사율을 1로 둔 경우 방사선위해를 기준위해와 비교한다. 결장, 유방, 방광, 갑상선 및 기타 고형암에서는 ICRP 103(2007) 치사율 데이터를 사용한 방사선위해에 비해 치사율을 1로 한 방사선위해가 분명한 증가가 있다.

(104) ICRP는 ICRP 103(2007)에서 갑상선암에는  $q_{\min}$ 을 0.2로 두고 다른 암에 대해서는 0.1을 사용했다. 그림4.11은 이 값을 사용한 때와  $q_{\min}$ 이 0일 때 위해를 비교하는데, 갑상선암을 제외한 대부분 암 사이트에서 그 차이가 작다. 갑상선암에

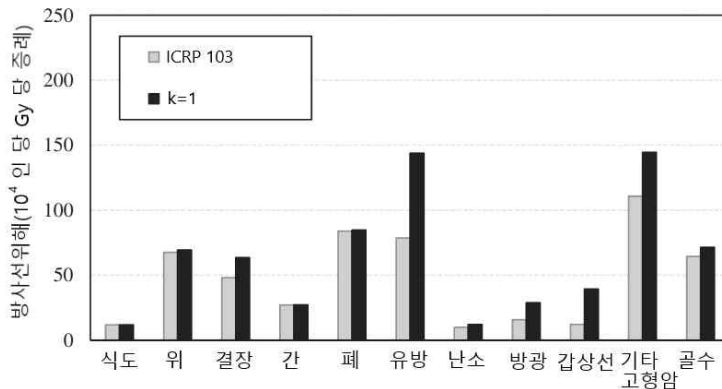


그림4.10. 치사율( $k$ )을 일률적으로 1로 둘 때 계산된 위해와 기준위해의 비교. 기준위해는 사이트별 치사율 값을 사용하는데 갑상선암의 0.07부터 간암의 0.95까지이다.

서는  $q_{min}$ 을 0으로 한 경우 위해를 50% 이상 줄였다.

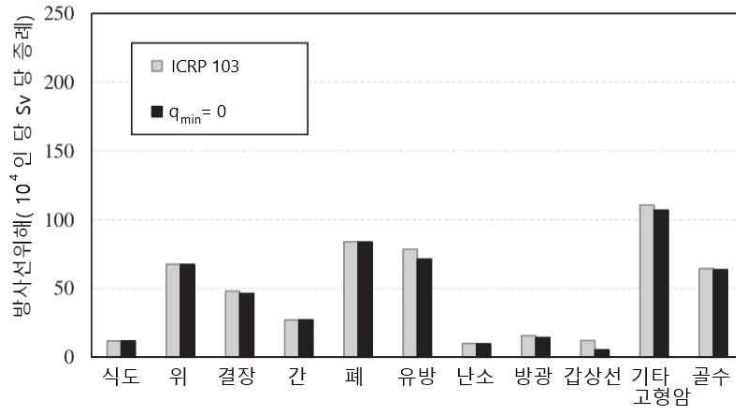


그림4.11. 최소 QOL을 0으로 하여 계산한 위해와 기준위해의 비교. 기준위해는  $q_{min}$ 을 갑상선암에는 0.2를, 나머지 암 사이트에는 0.1을 가정했다.

(105) 그림4.12는 암 없는 삶 상대손실 값이 일률적으로 1일 때 방사선위해를 기준위해와 비교해 보인다. 그 영향은 조직/장기에 따라 다른데, 위암, 폐암 및 방광암은 분명히 증가하는 반면 유방암과 골수암은 분명히 감소한다.

(106) 표4.4는 치사율, 최소 QOL 인자 및 암 없는 상대수명 손실 변수의 변화에 따른 방사선위해의 기준위해에 대한 비 값을 요약한다. 최소 QOL 인자를 0으로

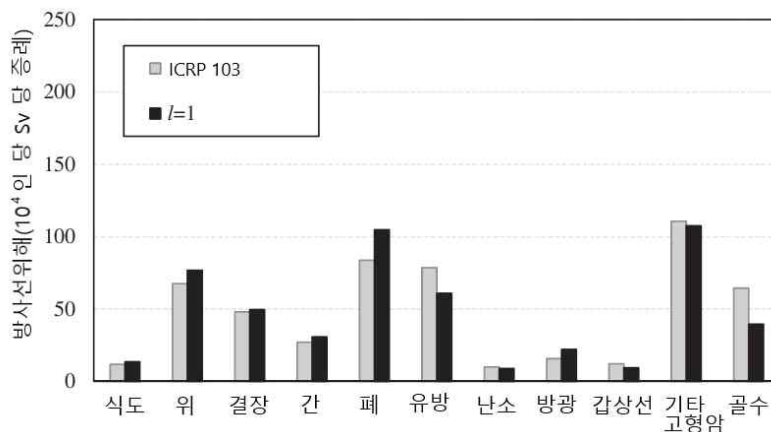


그림4.12. 암 없는 삶 상대손실( $l$ )을 일률적으로 1로 하여 계산한 위해와 기준위해의 비교. 기준위해는 사이트별 암 없는 삶 상대손실을 사용하는데 방광에서 0.71부터 갑상선에서 1.29까지 범위에 있다.

표4.4. 심각도 보정을 위한 변수 대안 설정이 방사선위해에 미치는 영향\*

장기/조직	기준위해	기준위해에 대한 대안위해의 비		
		치사율 $k=1$	최소 QOL 인자 $q_{\min}=0$	상대 수명손실 $l=1$
식도	11.8	1	1	1.15
위	67.6	1.03	1	1.14
결장	48	1.32	0.96	1.03
간	27.1	1	1	1.14
폐	83.8	1.01	1	1.25
유방	78.6	1.83	0.91	0.78
난소	9.9	1.20	0.98	0.89
방광	15.7	1.83	0.91	1.41
갑상선	12.1	3.24	0.44	0.78
기타 고형암	110.7	1.31	0.97	0.97
골수	64.4	1.12	0.99	0.61

QOL: 삶의 질

\* 이 값은 이 보고서를 위해 새로 계산했는데, ICRP 103(2007)이나 Zhang 등(2020)의 값과 약간 다르다.

†  $10^4$  인 당 Sv 당 증례.

‡ 제3장에서 설명한 방법론으로 계산한 방사선위해.

한 때 갑상선암에 분명한 영향이 있다. 암 사이트에 따라 방사선위해는 가변적이다. 암 없는 삶 손실을 모든 암의 결합한 경우와 같이 하면 식도나 방광과 같은 사이트에서는 위해가 증가하는 반면, 유방과 같은 다른 암 사이트에서는 감소한다.

(107) 진단기술과 치료의 발전에 따라 최근 수십 년 동안 암 사망률이 감소해 왔다. 미국 암통계 보고서(Siegel 등 2019)는 1991년부터 2018년 사이 암사망률이 31% 줄었음을 보인다. 감소는 치사율이 높은 암에서 현저한데, 폐암의 경우 1990년과 2016년 사이 남자 사망률은 54% 감소했고 2002년부터 2018년까지 여자 사망률은 30% 감소했다. 이런 상황은 민감도 보정 변수, 특히 치사율 값에 상당한 변화를 이어질 수 있으므로 장래에는 이를 고려해야 할 것이다. 이 이슈에 관한 상세한 논의는 Breckow 등(2018)과 Zhang 등(2020)에서 찾을 수 있다.

## 4.4. 몇몇 민감도분석 요약

(108) 위에서 설명한 계산에 근거하여 변수들을 제89항에서 설명한 기준에 세 범주로 구분했다.

(109) 경미한 영향을 미치는 변수는 생애위험 척도, 최저 잠복기, 최대 도달연령, 최소 QOL 인자이다. 이들 변수가 바뀌면 방사선위해에 1.5배 미만의 변화를 준다. 한 예외는 최저 QOL 인자가 갑상선암에 미치는 영향이지만 총 위해에는 거의 영향이 없다.

(110) 상당한 영향을 미치는 변수는 지역(기준집단의 지리적 위치), 위험 이전모델 및 암 없는 삶 손실년이다. 이들 변수를 바꾸면 일부 암 사이트에서 방사선위해가 1.5배 이상 2배 이하로 달라진다. 방사선위험을 한 집단에서 다른 집단으로 이전하는 데는 덧셈 투사와 곱셈 투사 모두 생물학적 기전 측면에서 무방하다. 그렇지만 대부분 암 사이트에서 방사선피폭으로 인한 위험 평가치를 집단 간 이전하는 최적 방법은 아직 알 수 없다(UNSCEAR 2012). 이전 모델 선택은 집단 사이 기저 위험이 차이가 큰 암에서는 특히 중요하다. 이 점에서 보면, 아시아인과 구미인 집단 사이에는 여성 유방암, 위암 및 간암의 기저율에 상당한 차이가 있다. 이들 암에서는 인구집단과 이전 모델의 조합에 따라 방사선위해가 상당히 달라질 수 있다.

(111) 큰 영향을 미치는 변수는 성별, 피폭연령, DDREF, 선량 가정 및 치사율이다. 이들 변수를 변경하면 어떤 암 사이트에서는 방사선위해가 2배 이상 달라진다. 여성 집단만 가정하면 유방암과 난소암 방사선위해는 성평균 위해에 비해 배가된다. 피폭연령도 영향력 있는 인자로서, 전체집단에 비해 0~14세 아동의 피폭은 갑상선암은 3배 이상, 유방암은 2.6배, 기타 여러 장기의 암은 2배 가까이 높인다. 이는 아동이 일반적으로 방사선에 더 민감하고 기대 잔여수명이 길어 유해한 방사선 영향이 진전될 기회가 많기 때문이다. DDREF 값 선정은 직접적 영향을 미쳐 2 대신 1로 하면 고형암 위해가 2배 증가한다. 포괄적 의미에서 이슈는 DDREF 값 선정에만 한정되는 것이 아니라 선량-반응 곡선의 모양과도 관련된다. UNSCEAR는 고형암 위험 평가에서 DDREF와 LNT 모델을 결합하는 대신 선형-2차 선량-반응 관계를 가정했다(UNSCEAR 2006). 그러나 선량의 2차항 영향 때문에 1 Gy에서 REIC에 근거를 둔 골수암 방사선위해가 기준위해보다 2.5배 높게 나타났다으므로 그러한 접근에서는 생애위험 계산에서 선량 가정이 중요해진다. 끝으로 치사율도 방사선위해에 큰 영향을 미칠 수 있다. 치사율을 1로 높이면 주로 갑상선암이나 방광암, 유방암처럼 상대적 비치사암 때문에 위해가 상당히 증가하게 된다. 역으로, 진단기법이나 치료의 발전은 이미 방사선위해의 감소를 가져왔을 것이며 장래에는 큰 감소로 이어질 수도 있다.

(112) 방사선위해 평가에서 주요 불확도원을 식별하고 그 영향을 정량화 하는 데 관심이 증가하고 있다(UNSCEAR 2020). 여기서 제시한 민감도분석은 완전한 포괄



적 불확도 평가를 위한 것이라기보다 방사선위해 계산에 관련된 여러 인자의 영향에 대한 예시로만 봐야 한다. 이 점에서 변수값 설정이 꼭 현실적인 것이 아님을 유념해야 한다. 예를 들면 분석에서 치명률과 암 없는 삶 손실 상대연수는 1로 두었고 최소 QOL인자는 0으로 두기도 했지만, 이는 실생활 시나리오를 과도하게 단순화한다. 시간에 따른 기저율 변화와 같이 분석에서 고려하지 않은 인자도 있다. 다른 변수 설정의 분석은 Zhang 등(2020)에서 찾아볼 수 있다.



## 제5장 잠재적 진화

(113) 제2장 및 제3장에서 설명했듯이 ICRP는 최신의 과학적 발견과 건강통계를 반영하기 위해 방사선위해 계산 방법론을 재정의했다. 표5.1은 ICRP 일반권고에 채택된 방사선위해의 방법론적 특성과 평가치를 요약한다. ICRP 26(1977a)에서는 치명적 암과 심각한 유전질환의 가능성에 대한 근사적 평가치로서 위해를 제공했다. ICRP 60(1991)에서는 암위험의 연령 및 성별 의존성을 고려했다. 원폭생존자에 대한 더 긴 기간 추적과 상대위험 모델의 도입으로 인해 치명적 암의 생애위험 평가치가 크게 증가했음은 유의할 일이다. ICRP 103(2007)에서는 발생 기반 암위험 모델을 도입했고, 사람 유전질환과 생식계열 돌연변이 과정에 대한 최신 지식을 바탕으로 유전질환 위험 평가의 근거를 갱신했다. 이러한 수정은 합리적이며, 평가치의 변화는 당시 가용한 과학적 이해와 데이터를 반영했다.

(114) 비치명적 성분을 평가하려는 노력에도 불구하고 치명적 암 위험이 방사선위해의 큰 부분을 차지한다(Breckow 2020). 암이 확률론적 영향의 대부분을 차지하고 현행 심각도 보정개념이 주로 치명률에 의존하기 때문이다. 그러나 방사선 영향에 대한 과학적 이해의 발전, 의료가료의 진보 및 생활방식의 변화와 함께 상황이 바뀔 수도 있다. 위해개념이 방사선피폭으로 인한 총체적 부담을 평가하려 도입되었음을 고려하면, 건강 영향의 다른 측면까지 통합하는 노력은 앞으로도 계속되어야 한다.

(115) 현행 방사선위해 계산 도식이 그 목표를 달성하도록 신중히 설계되었지만, 위에서 말했듯이 건강관리와 방사선영향에 대한 과학적 이해의 발전에 따라 진화할 필요가 있다. 당면할 도전에는 평가 품질을 개선하기 위해 위험 모델과 변수의 개정, 성별, 나이 및 피폭 시나리오에 따른 변화를 다루는 법 개선을 포함한다. 암 외 영향, 특히 순환계질환(DCS)과 백내장에 대한 과학적 데이터의 축적은 이들을 위해 계산에 포함할지 고려하도록 촉구할 것이다. 투명성과 포괄성의 추가 개선도 범위에 든다.

(116) 이 장은 이들 이슈를 다루는 방법을 논의한다. 목표는 새로운 수치를 제기하거나 계산 방법론을 고치는 것이 아니라 개선 가능한 방법을 찾는 것이다. 이러한

표5.1. ICRP 일반권고에서 방사선위해

조직/장기	ICRP 26(1977a)	ICRP 60 <sup>‡</sup> (1990)	ICRP 103 <sup>‡</sup> (2007)
식도		24.2	13.1
위		100.0	67.7
결장		102.7	47.9
간		15.8	26.6
폐	20	80.3	90.3
뼈표면	5	6.5	5.1
피부		4.0	4.0
유방	25	36.4	79.8
난소*		14.6	9.9
방광		29.4	16.7
갑상선	5	15.2	12.7
골수	20	104.0	61.5
잔여조직	50	58.9	113.5
생식선 <sup>†</sup>	40	133.3	25.4
계	165	725.3	574

방법론적 특성 ● 치명 암 및 심각한 유전결함을 평가했다. ● 첫 두 세대에 대해 유전영향을 고려했다.

● 장기에서 치명 암의 상대확률을 성별, 연령, 이전 모델 및 집단에 대한 평균으로 평가했다.

● 치명 암 위험을 예상 수명손실과 치명률에 따라 가중했다.

● 심각한 유전영향 위험을 모든 후손에 대해 평가했다.

● 성별, 연령 이전 모델 및 집단 평균 암 명목위험 평가에 발생 기반 암위험 모델을 사용했다.

● 치명률, 삶의 질 및 수명손실년에 대해 명목위험을 보정했다.

● 생존출산에서 회복성을 고려하도록 첫 두 세대에 대해서 유전 질환 위험을 평가했다.

\* 난소암.

† 유전영향

‡ 전체 집단에 대한 값.

논의는 방사선위해의 장래 진화를 위한 방향을 제시할 것인데 이는 ICRP 일반권고의 발전에 불가결한 부분이다.

## 5.1. 위험모델 변수의 개정

### 5.1.1. 기준집단 데이터

(117) 방사선위해 계산은 기저 암 발생률, 사망률 및 연령별, 성별 구조에 대한 기준집단 데이터를 필요로 한다.

- ICRP 103(2007)에 사용한 기저율은 1993~1997년 기간에 해당한다(Parkin 등 2002). 생활방식의 변화, 진단기법과 암치료의 발전 때문에 암 발생률과 사망률(특히 특정 암에 대해서는)은 그 이후에도 상당히 변해 왔다. 이러한 기저율의 갱신은 장차 방사선방호체계에 보다 현실적인 근거를 제공할 것이다(Breckow 등 2018). 나아가 ICRP 103에서는 피부암과 뼈암에 대해서는 기저율이 제공되지 않았다.
- 암 발생과 사망은 세계적으로 상당히 차이가 있는데, 유전소인과 생활방식 차이와 건강관리 대책의 차이를 반영하는 것이다. ICRP 103에서는 두 조합 기준집단을 고려했는데 아시아인(중국 상하이와 일본 오사카, 히로시마 및 나가사키의 조합)과 구미인(스웨덴, 영국 및 미국 암연구소의 SEER 프로그램 집단의 조합)이다. 다른 지역 집단을 포함하면 가용한 데이터에 근거하는 세계 인구에 대한 더 폭넓은 대표성을 제공할 것이다.

### 5.1.2. 암 위험 모델

(118) 방사선위해 계산은 구체적 암 사이트의 장기/조직 선량과 암 위험 사이 관계를 설명하는 모델을 사용해야 한다. 다음 요점은 ICRP 103(2007)의 암 위험 모델의 요약과 가능한 갱신 방법을 제시한다.

- 1958년부터 1998년까지 추적에 근거한 LSS로부터 방사선 관련 암 위험 모델이 도출되었다(Preston 등 2007). 그 이후 더 긴 추적기간에 대한 새로운 모델도 발표되고 있어 이를 위험 모델 갱신에 사용할 수 있을 것이다.
- 대부분 고형암에 대해, 위험 보정인자(예: 피폭연령과 도달연령)를 ‘모든 고형암’을 한 그룹으로 변수화했고 남녀 모두에게 같은 값을 사용했다. LSS의 추가 추적은 보다 상세정보를 제공해 각개 암 사이트에 대해 성별, 피폭연령 및 도달연령에 따른 위험의 변화를 더 잘 반영하는 모델을 수립할 수 있을 것이다.
- 현행 위험 모델은 성별, 피폭연령 및 도달연령에 의한 영향 수정을 고려한다. 위험 변동에 대한 더 정확한 그림을 얻으려면 일부 암 사이트에 대해서는 다른 보정인자도 고려할 가치가 있다. 예를 들면 과거에 흡연과 방사선은 폐암 위험인자로서 가산적으로 상호작용한다고 생각했으나, 최근 연구는 둘이 복합적으로 작용함을 밝혔다. 이 발견에 근거하여 흡연 영향을 고려하는 폐암 위험 모델들

이 제안되었다(Furukawa 등 2010, Cahoon 등 2017).

- 골수 범주는 CLL 아닌 백혈병을 포함한다. 이 범주를 림프종과 다발골수종과 같은 다른 유형 혈액암까지 확장할 가능성을 모색하는 것이 바람직하다.
- 뼈암과, 흑색종외 피부암에 대한 명목위험 평가치는 각각 ICRP 60(1991)과 ICRP 59(1992)에서 가져왔다. 이 위험 평가치는 불확도가 큰 오래전 연구를 바탕으로 하고 있고 성별이나 연령에 따른 차이를 알 수 없다. 계산에서 내적 일관성을 높이도록 이 두 조직에 대해 최신 위험 모델이 가용할지 조사할 가치가 있다.
- 뇌와 침샘에 대해서는 구체적 위험 모델이 도출되지 않았음에도 이 두 장기에 대한 조직가중치는 특별히 부여되어 있다. 조직가중치 논거를 명확히 하도록 이 두 장기의 위험 모델을 개발할 가능성을 모색하는 것도 바람직하다.
- ‘기타 고형암 사이트’ 범주는 총 방사선위해의 약 20%를 차지한다. 장래에 추가 데이터가 누적되면 이 비균질 범주의 기여를 줄이기 위해 일부 구성 암 사이트를 분리하여 위험을 정량화하는 것이 바람직하다.
- 대부분 위험 모델은 다른 정보원으로부터 발견은 반영하지 않고 LSS로부터 도출된 것이다. 지난 10여 년 동안 다른 역학연구, 특히 오래 피폭한 집단(예: 원자력종사자, 마야크Mayak 종사자, 테차강 유역 주민, 체르노빌 정화작업자)으로부터 도출된 위험 모델을 제시하는 많은 보고서가 있다. 이들 연구의 장점과 한계에 대한 상세분석과 연구결과의 일관성에 대한 논의를 바탕으로 하여, 이들 연구에서 도출된 모델의 평가를 수행해야 한다. 동시에 방사선에 만성 노출되고 암 발생과 사망에 대해 양호한 개인기록이 있는 집단의 역학연구를 장려할 필요가 있다.
- 명목위험을 산출하는 모델은 몇 가지 가정에 의존하는데, LNT 모델, DDREF 적용, ERR과 EAR 모델의 가중에 근거한 위험 이전 도식이 포함된다. 최신 과학적 발견 관점에서 이러한 가정의 타당성을 검토해야 한다. 이런 관점에서 미국 방사선방호측정위원회(NCRP)는 LNT 모델의 타당성을 평가하기 위해 최신 역학문헌을 검토했다(NCRP 2018, Shore 등 2018, 2019). ICRP는 역학, 동물 실험 및 세포생물학 관점에서 DDREF의 과학적 근거를 검토하기 위한 작업그룹을 발족시켰다. 이미 여러 논문이 발표되었고(Rühm 등 2015, Shore 등 2017, Little 등 2020) 조만간 전문 보고서가 발간될 것이다.

### 5.1.3. 암 심각도 변수

(119) 명목위험으로부터 방사선위해의 산출은 질환의 심각성을 반영하는 세 변수와 관련되는데 치사율, QOL, 그리고 YLL이다.

- 암 사이트별 치사율은 1980~1985년 및 1950~1970년 기간의 미국 인구집단 데이터(US DHHS, 1989)로부터 얻은 판단기반 값으로 제공된다. 남성이나 여성, 전체집단이나 종사자 모두에 같은 치사율 값이 사용되었다. 현재는 치사율에 대해 연령과 성별에 따라 훨씬 나은 평가치를 제공하는 새 데이터가 있다. 또, 세계의 여러 집단에서 치사율의 차이를 반영하도록 미국 밖의 다른 집단에서 치사율 평가치 수집도 바람직하다.
- 암 환자의 삶의 질에 대한 보정은 임의적 가치판단에 근거했다. 이제 **질보정 생활년** quality adjusted life-year(QALY)이나 **장애보정손실년** disability-adjusted life-year(DALY)과 같이 다양한 조건에서 삶의 질을 평가하고 특성화하는 보편적인 척도가 가용하다(Vergel과 Sculpher 2005, Chen 등 2015). 연령, 성별 및 지역에 따른 편차의 고려와 함께, 이런 방법들과 가용한 데이터를 검토하면 삶의 질 정량화에 도움이 될 것이다. 그런 방법은 심각도 보정을 더 단순화되 믿을 만하게 할 것이다.
- 암 없는 삶 상대년수는 암 사이트별 발병연령 분포 차이를 반영하는데, 생활방식의 변화나 진단기술 발전의 영향을 받는다. 치사율 경우처럼 최근 자료에 근거하여 계산하면 더 나은 평가치와 함께 성별, 연령 및 집단 사이 편차를 얻을 수 있을 것이다.
- 현행 심각도 보정 도식은 주로 치사율에 의존하기에 갑상선암과 같은 비치사암의 가중치가 매우 낮다. 각 유형 암의 특성에 근거를 두면 비치사 암을 더 잘 다룰 수 있을 것이다.

#### 5.1.4. 유전영향

(120) 방사선위해에서 유전영향 위험은 2001년 UNSCEAR 보고서(UNSCEAR 2001)에 주어진 첫 두 세대까지 모든 등급의 유전질환에 대한 평가치로부터 도출된다. 근년에 후생적 유전을 포함한 새로운 발견이 있다(Miska와 Ferguson-Smith 2016, Yeager 등 2021). 유전의 기전, 가용한 데이터 및 유전질환 위험 평가에 사용할 수 있는 방법에 관한 현재 문헌을 검토할 가치가 있다. 이 분야의 발전은 암에 대해 개발된 현행 방법론과 일관되게 위해 계산에 유전영향을 통합하게 도울 것이다.

## 5.2. 성별과 연령에 따른 차이

(121) ICRP 138(2018)에서 논의했듯이 선량제약치와 참조준위는 동일한 피폭상황

에 노출되는 사람들의 피폭 범위를 좁히고, 선량한도는 모든 일반인과 모든 직무피폭자가 감내 가능하다고 보는 위험 준위를 초과하지 않도록 한다. 이 기틀에서는 개인선량의 관리가 관심사이지만 엄밀한 의미에서 문제는 개인의 위험이다. 방호기준이 유효선량으로 표현되고 방사선위해가 주어진 선량에서 위험의 근사적 척도 역할을 함을 고려하면, 위험이 성별이나 연령에 따라 어떻게 변동하는지 이해하는 것이 중요하다.

(122) 제4장의 민감도분석과 ICRP 147(2021)의 암 위험평가는 피폭연령이 방사선 위해에 큰 영향을 미침을 보였다. 특히, 아동기 피폭은 대부분 암 사이트에서 성인 피폭에 비해 생애위험을 크게 높이며, 이로써 성인 피폭보다 큰 위해 산출 값을 준다. 일부 조직에서는 성별 차이도 상당한데 가장 극단적인 예는 난소와 유방이다. 생애 위험을 성별로, 그리고 선정된 연령(또는 연령군)별로 따로 계산하고 명목 값을 구하는 마지막 단계에서 평균하는 것이 바람직하다. 중간 단계에서 평균하는 것을 피하는 이 접근은 계산과정 끝까지(가능한 한) 성별, 연령별 값을 도출해야 하지만, 그 결과는 성별, 피폭연령, 도달연령에 따른 위험의 변동을 드러나게 한다.

(123) 같은 방법이 수정 가능한 생활방식을 포함한 기타 영향인자에도 적용될 수 있다. ICRP는 개인의 방사선 반응을 지배하는 인자를 달리하는 사람들의 혼합체로 명목집단을 정의한다. ICRP는 개인 반응 주제에 관한 과학적 정보를 검토할 새 작업그룹을 설립했다. 장차 암 감수성에 큰 영향을 미치는 인자가 식별되면, 수정 가능성과 관계없이 이에 따른 위험의 변화를 평가해야 할 것이다.<sup>26)</sup> 어떤 경우든, 언급한 접근은 과학기반 위험평가와 방사선방호 목적의 후속 정보 통합 사이 구분을 명확히 해서 방사선위해 구축에 대한 이해를 발전시킬 것이다.

(124) 특정 개인이나 특정 집단의 위험을 평가하기 위해서는 가용하면 피폭자가 해당하는 구체적 데이터를 사용해야 한다.<sup>27)</sup> 그렇지만 실제에서는 명목위험이나 방사선위해가 종종 근사적 위험평가에 사용된다(ICRP 2021). 이런 점에서 성별과 연령별 생애위험 평가치의 변화를 제시하는 것이 어떤 상황에서 개인 위험의 잠재

---

26) <역주> 위험의 차이에 대한 과학적 평가와 이를 방호 실체에 적용하여 개인을 차등 관리한다는 것은 다른 문제이고 쉽지 않은 문제이다. 이미 BRCA1 유전소인이 있는 사람은 유방암이나 자궁암에 현저한 민감도를 보임을 알고 있지만 이를 피폭관리에 적용하는 제도는 고려하지 않는다.

27) <역주> 방호를 위한 전망적 과정에 개인이나 소집단의 특성 차이를 반영하는 것은 방호 체계를 너무 복잡하게 만들 우려가 크다. 그러나 발생한 피폭(유의하게 높은 피폭)에 대해 위험을 평가할 때(예: 진단된 암의 인과확률 평가)는 국가, 성별, 연령 등 개인 특성을 최대한 반영할 필요가 있다.



적 편차에 대한 이해를 도울 것이다. 이는 특히 개인 환자나 특정 환자 그룹<sup>28)</sup>이 관련되는 건강관리 상황에서 그러하다.

(125) 현행 조직가중치 세트  $w_T$ 는 전체집단에서 사이트별 상대 방사선위해로 대표되는 민감도에 따라 장기/조직을 범주화하여 구했다(ICRP 2007). 상대 방사선위해 값을 직접 사용하지는 않았지만, 각 암 사이트의 상대적 위해 기여는 성별과 피폭 연령에 따라 상당히 다르다. 이에 대한 상세한 설명은 여러 세트의 상대 위해를 제시하여  $w_T$ 의 분포 범위와 대표성 수준을 이해하는 데 도움이 될 것이다.

### 5.3. 피폭 시나리오

(126) 아동기 피폭은 생애위험이 특히 높은데도 방사선위해 계산에 성인이 포함됨으로써 아동의 높은 생애위험을 희석하고 상쇄한다. 유사한 상황이 아동기를 넘어 지속되는 장기적 피폭에서도 발생할 수 있다. 아동기 피폭의 총 위험에 상대적 기여는 나이가 들수록 감소한다.

(127) 급성피폭에 대해 전체집단에 평균한 방사선위해는 기준집단과 고정집단static population 사이 연령분포에 큰 차이가 없다면 개인의 일생 지속적 피폭의 위해와 대등한 것으로 간주한다. 유사하게, 노동연령집단의 방사선위해는 노동수명에 걸친 일정한 직무피폭을 대표한다. 이 두 시나리오가 가장 전형적 양상이지만 다른 피폭 시나리오도 가능하다. 어떤 여건에서는 특별한 관심이 필요한 특정 그룹이 있을 수 있다. 예를 들면 사고 상황에서 방호대책을 계획하고 이행하는 데는 아동, 임신 여성, 노약자에 대해 특별한 배려가 필요하다. 이런 점에서 특정 기간에 걸쳐 늘어난 피폭 시나리오를 고려할 가치가 있다.

(128) 태내피폭은 아직 방사선위해 계산에서 고려하지 않는다. 태내피폭과 아동기 피폭 사이 암 위험의 차이가 크지 않다면, 배태아의 생애위험은 신생아의 생애위험과 대등하게 간주할 수 있다. 이는 태내피폭이 명목위험에 미치는 영향이 적음을 암시하지만 윤리 관점에서 특별한 고려가 필요할 수 있다.

---

28) <역주> 환자를 특별히 지목하는 이유는 직무피폭 수준의 낮은 선량에서는 개인 인자 차이로 인한 위험 차이는 미미한데 반해, 방사선치료나 중요 진단절차는 국부적이지만 훨씬 많은 선량이 관련되므로 개인 인자로 인한 영향의 편차가 유의한 수준이기 때문이다.

(129) 방사선위해 계산에 사용되는 생애위험 척도는 REIC이고, 그 계산과정에는 낮은 LET 방사선에 0.1 Gy 단일 피폭을 가정한다. 제4장에서 논의했듯이 REIC를 계산하기 위한 선량 가정은 최종 결과에 상당한 영향을 미친다. 방사선위해의 적용 선량 범위를 고려하면 선량을 0.1 Gy에 설정하는 것이 적절하다. 그래서 'Sv 당'으로 명목 위험계수와 방사선위해의 표현은 오도일 수도 있다. 그 표현을 더 낮은 선량 당 수로 보이는 것이 더 적절할 것이다.<sup>29)</sup>

(130) 민감도분석은 최대 도달연령의 증가는 방사선위해에 거의 영향을 미치지 않음을 보인다. 그러나 근래의 장수 추세를 반영하려면 수명을 95세 이상으로 연장하는 것도 합리적일 것이다. 추가적인 인구학적 변화도 기준집단의 연령분포를 바꿔 방사선위해에 영향을 미칠 수 있다.

## 5.4. 암외 영향의 고려

(131) ICRP 118(2012)에서 ICRP는 순환계질환(DCS)과 백내장이 과거에 생각했던 것보다 훨씬 낮은 선량에서 유발될 수 있음에 대한 누적되는 증거를 광범하게 검토하고, 심장, 뇌 및 눈 수정체에 대해 선량률과 무관하게 문턱선량 0.5 Gy를 권고했다. 몇몇 최근 역학연구는 0.5 Gy 아래에서도 이들 질환 위험이 선량에 따라 증가함을 암시하지만, 이 선량 아래에서 선량-반응 곡선의 모양이나 문턱 존재 여부에 대해서는 상당히 불확실하다(Baselet 등 2016, NCRP 2016).

(132) DCS에 대해, 낮은 선량에서 역학 데이터는 고려하는 건강 결과에 따라, 그리고 분석을 발생과 사망 어느 쪽에 근거를 두느냐에 따라 달라진다(Yamada 등 2004, Ozasa 등 2016, NCRP 2016). 기저위험을 정량화하는 데도 어려움이 있다. DCS로 인한 사망에 대한 건강통계는 국가에 따라 크게 다르고, 한 국가에서도 시간이 지나면서 달라졌다. 발생률이나 이환율에 관한 데이터원은 제한적이고 암 데이터원처럼 표준화되어 있지도 않다. 환자의 DCS 증상이나 상태에 상당한 차이가 있음을 고려하면 심각도 보정은 단순하지 않다.

(133) 백내장에 대해서는 방사선피폭에 의한 위험의 증거가 DCS보다 더 확실하다.

---

29) <역주> 이는 mks 표준단위에 근거한 방사선량 기본단위 Gy(=1 J/kg)나 Sv가 고선량에 해당하기 때문이다. 그 결과 '단위 선량(Sv) 당 위험이 5%'로 표현되어 방사선위험이 상당히 큰 것으로 오해하게 만든다. 실제 피폭은 mSv 단위이므로 위험도 이 수준에 맞춰 표현(예: 1 mSv 당 10만 명 당 5명)하는 것이 위험소통에도 의미가 있다.

그러나 수정체 혼탁에 대한 역학 데이터의 비균일성이 보고되어 있고(NCRP 2016), 귀착점이나 진단방법 선택이 선량-반응 곡선의 모양과 기술품에 크게 영향을 미친다. 시력상실 백내장에 대한 믿을 만한 기저통계가 없다. 나아가 수술이 어려운 많은 개발도상국에서 백내장이 실명의 주된 원인이어서 지역의 건강관리 수준이 QOL 보정에 큰 영향을 미치는 인자가 된다.

(134) 위에서 논의한 속성 외에도 이들 영향과 관련된 기저 생물학적 기전과 표적 조직에 대한 추가 논의는 필요하다. 이들을 방사선위해 산출에 포함할지 여부는 현재 열린 질문으로 남아 있다. DCS를 포함하여 방사선 유발 건강영향에 대한 과학적 정보를 검토하고 방사선방호체계에 현재 지식을 어떻게 반영할지에 대한 조언을 제공하도록 새로운 ICRP 작업반을 구성했다.

## 5.5. 투명성 및 포괄성

(135) 제3장에서 설명했듯이 방사선위해 산출은 여러 단계로 이루어지는데, 여기에는 위험 모델, 건강통계 및 기타 변수를 포함하는 광범한 정보를 처리하는 여러 단계가 있다. 방법론이 점차 복잡해지므로 투명성과 소급성을 보장하기 위해 계산 절차를 정확히 문서화하고 발행하는 것이 중요해졌다. 계산 단계에 대한 충실한 설명이 필요하며, 이러한 계산을 수행하는 공개소스 소프트웨어를 개발하여 공유하는 것이 바람직하다. 주요 불확도원을 식별하고 그 영향을 정량화하는 노력도 따라야 한다.

(136) 방사선위해는 확률론적 영향과 관련되고 확률론적 표현이 필요하다. 현행 방법에서는 심각도 보정 예상 증례수 형태를 취하는데, 이는 어떤 피폭집단에서 각 증례에 대해 질환의 심각도에 따라 다른 가중치를 준다. 그러나 결과값은 비전문가가 이해하기 어렵고 방사선이 아닌 다른 해독에 대한 위험평가와 양립하지 않는다. 가능한 다른 방법은 위해를 방사선의 유해한 영향으로 인해 정상 건강과 활동으로부터 시간상실 길이로 표현하는 것이다. 이 접근은 ‘유해지표Index of Harm’ 평가에서 시도한 바 있는데 종사자 1000 인년 당 손실년수로 정의했었다(ICRP 1977b, 1985). 그러나 이런 식으로 위해를 표현하면 질환 부담이 집단에 균일하게 분포하는 것같은 잘못된 인상을 줄 수 있다. 그렇지만 이는 광범한 건강상태 분야에도 적용할 수 있고 더 명료하다. 실제로 유사한 개념인 DALY는 복지나 공중보건, 의료서비스 분야에서 널리 사용되고 있다. DALY는 한 척도에 치사율과 이환률을 결

합하고, 폭넓은 비치사 상태와 불구에 합리적 가중치를 부여하기 위해 노력해 왔다 (Chen 등 2015). 이 접근을 방사선위해에도 적용 가능성이 밝혀졌다(Shimada와 Kai 2015).

(137) 다차원적인 위해를 표현하는 단순한 방법은 없으므로, 방사선위해의 속성을 이해하기 쉽도록 소통방법을 개선할 필요가 있다. 나아가 위해의 주요 성분에 대해 도식적 설명을 제공하는 것이 바람직한데, 이는 방사선의 건강위험에 대한 광범하고 균형된 이해를 제공할 것이다. 주요 성분에는 기준집단, 암 없는 삶 손실 절대연수, 방사선위해 계산의 기준선(생애 초과위험 대신 생애 기저위험을 사용한 계산)에 관한 정보가 포함된다.

## 제6장 요약 및 결론

### 6.1. 방사선위해 계산

(138) 위해 개념은 ICRP 22(1973)에서 처음 도입되었다. 넓은 의미로 위해는 모든 해로운 영향을 포함하지만 그 방법론은 낮은 선량률, 낮은 선량에서 방사선피폭의 유해한 건강영향을 정량화하기 위해 개발되었다. 위해의 주성분은 심각도가 가중된 기인암 확률, 부정적 유전영향의 확률, 그리고 이들 조건의 심각도를 보정하는 가중치이다. ICRP 방법론을 사용해 방사선피폭으로 인한 보정된 초과위험으로 계산한 위해를 특별히 '방사선위해'라 부른다.

(139) 방사선위해 계산 절차는 크게 두 부분으로 나뉘는데, 첫 부분은 성별, 피폭 연령 및 지역에 걸쳐 평균한 확률론적 영향의 생애위험 추정치인 명목위험을 계산하는 것이다. 둘째 부분은 심각도로 명목위험을 보정하는 것인데 이는 방사선량과 실질적으로 무관하다.

(140) 이 보고서 제3장은 현행 위해계산 절차를 충분히 상세히 제공하는데, 특히 다음을 명확히 하고 바로잡는다.

- ICRP 103(2007)에서는 보이지 않았던 백혈병 위험 모델에 대한 수식을 제공한다. 백혈병 생애위험 이전을 위한 EAR:ERR 가중치를 50%:50%로 변경했다. 백혈병의 최소 잠복기를 5년으로 한 것도 유의하다.
- ICRP 103에서 유방암의 EAR 모델이 옳게 설명되지 않아 수정된 모델 수식을 제공한다.
- Gy 당 생애위험을 평가하기 위해 각 피폭연령에서 0.1 Gy를 단일 피폭 후 94세까지 REIC를 계산한 다음 10을 곱했다.
- 생애위험 평가치는 전체집단의 피폭연령 0~89세에 대해 계산했다(ICRP 103에 설명한 0~85세가 아니다).
- 연령 평균 생애위험은 4 기준집단(아시아와 구미의 남과 여)마다 각 피폭연령에 대해 평가된 생애위험의 가중평균으로 계산했는데, 가중치는 연령분포에 비례한다.

(141) ICRP 103(2007)에서 노동연령인구에 대한 명목위험을 산출한 프로그램의 오류가 발견되었다. ICRP는 이 오류가 전체 위해 값에는 유의한 영향을 미치지 않아 방사선방호체계에 함의는 없음을 밝힌다.

## 6.2. 방사선위해 민감도

(142) 방사선위해는 명목집단의 위험을 대표하려는 것이다. 명목집단을 정의하는 속성 중에서 성별과 피폭연령이 방사선위해 값에 큰 영향을 미친다. 유방암과 난소암은 성평군이 위험을 절반으로 줄인다. 간, 결장 및 갑상선과 같은 장기에서도 남성과 여성의 생애위험에 상당한 차이가 있다. 어린 나이(0~14세)에 피폭한 집단의 방사선위해는 몇몇 장기(위, 유방, 갑상선, 기타 고형암)에서 전체집단(0~89세)의 위해보다 2배 이상 높다.

(143) 방사선위해 계산에 관계되는 변수로서, DDREF, 선량 가정 및 치사율이 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. DDREF 값의 선택은 위해에 직접 영향을 미치므로 DDREF를 기본값인 2 대신 1로 하면 고형암 방사선위해는 2배로 증가한다. 생애위험 계산에서 선량 가정은 0.1 Gy이지만 이를 1 Gy로 바꾸면 골수에 대해 2배 이상 방사선위해를 낸다. 몇몇 민감도분석은 치사율도 방사선위해에 큰 영향을 미침을 보였다.

(144) 민감도분석의 또 하나 중요한 결과는 이전 모델의 중요성이다. 제4장에서 보였듯이 이전 모델은 방사선위해 계산에 중간 정도 영향을 미친다. 이는 집단 사이 기저위험이 차이 나는 암에서 중요할 수 있다.

## 6.3. 향후 개선을 위한 제안

(145) 암 발생과 생존율의 변화와 방사선의 건강영향에 대한 과학적 이해의 발전에 따라 방사선위해도 진화할 필요가 있다. 이런 관점에서 기준집단 데이터와 암 심각도 변수를 갱신하고 발전시켜야 한다. 특히 암 발생 기저율과 사망률은 1990년대 데이터에 근거하는데 일부 암 사이트에서는 지난 수십 년에 이들이 상당히 변했다. 나아가 위해 계산에 현재 사용하는 치사율은 1980년대 미국 데이터에 의존하고 있다. 진단기술과 치료의 큰 발전이 치사율을 크게 줄였을 것이다(Breckow

등 2018, Siegel 등 2021)

(146) 또한 추적기간을 연장한 LSS 데이터, 다른 역학연구에서 도출된 모델(특히 늘어진 피폭을 받은 집단에 대해), 뼈, 피부, 뇌, 침샘 및 백혈병 외 조혈계 암에 대한 구체적 위험의 사용을 포함하는 암 위험 모델의 발전 여지도 있다. 방사선의 유전영향에 관한 근래의 발견도 고려할 필요가 있다.

(147) 방사선위험 평가에서 주요 불확도원을 식별하고 그 영향을 정량화하는 데도 관심이 높아지고 있다(UNSCEAR 2015,2020). 몇몇 민감도분석은 성별, 피폭연령, DDREF, 생애위험 계산에서 선량 가정, 치사율 및 이전 모델이 장차 방사선위험 평가를 개선하기 위한 주요 인자로 식별되었다. 이 맥락에서, 남성과 여성 사이 민감도 차이를 밝히는 것의 우선순위가 높다. 아동기 피폭의 위험평가를 다듬는 추가 연구도 필요하다. 낮은 선량률, 낮은 선량에서 각 암 사이트의 선량-반응 관계 특성화를 더 발전시키는 노력이 요구된다. 기준집단을 정의하는 방법과 함께 이전 모델의 선택도 계속해 방사선 관련 암 위험 평가에 근본 이슈일 것이므로 갱신된 정보로 추가 연구가 필요하다.

(148) 성별과 연령에 따른 암 위험 차이를 고려하면, 성별과 연령별로 생애위험을 따로 계산하고 마지막 단계에서 평균하는 것이 바람직하다. 이는 수정 가능한 생활 방식 인자를 포함해 다른 영향력 있는 인자에도 적용할 수 있다. 향후 암 감수성에 크게 영향을 미치는 인자가 식별되면 그에 따른 위험 변화를 평가해야 한다.

(149) 위험의 연령 의존성은 명목집단의 대표성과도 관련된다. 아동과 젊은 사람이 주로 피폭하는 상황이 발생하면 전체집단에 대한 방사선위해의 타당성에 대해 신중히 고려해야 한다.

(150) ICRP는 ICRP 118(2012)에서 DCS와 백내장이 과거에 생각했던 것보다 낮은 선량에서 발생할 수 있다고 주의를 환기했다. 그러나 낮은 선량에서 선량-반응 곡선의 형태와 이들 영향의 문턱 존재 여부에 상당한 불확실성이 있다. 이들을 방사선위해 계산에 포함 여부도 현재 열린 질문으로 남아 있다.

(151) 위해 계산 방법론이 변화하므로 투명성과 추적성을 보장하는 것이 중요하다. 계산 단계에 대한 완전한 설명이 필요하고, 방사선위해를 계산하는 공개소스 소프트웨어 개발을 고려해야 한다. 또한 비전문가도 방사선의 건강위험에 대해 균형 잡힌 이해를 갖도록 방사선위해를 표현하고 소통하는 방식의 개선도 바람직하다.

(152) 장래의 발전을 위한 이 제안을 ICRP 103(2007)의 방사선위해 기틀과 계산법을 대체하거나 수정하는 의사결정으로 해석해서는 안 된다. ICRP는 식별된 이슈를 심층 고려하도록 작업반과 작업그룹을 이미 발족시켰다. 이러한 모든 고려의 결과는 ICRP가 방사선방호체계를 검토하고 갱신하는 과정에 통합될 것이다(Clement 등 2021).



## 부록 A. 기저율 및 인구학 데이터

표A.1. 구미인 남성의 연령군별 사이트별 암 발생률\*

연령(세)	10 <sup>5</sup> 인 당 Sv 당 증례									
	모든 고형암	식도	위	결장	간	폐	방광	갑상선	기타 고형암	CLL외 백혈병
0-4	12.70	0.00	0.01	0.00	0.62	0.01	0.12	0.00	11.94	7.77
5-9	6.18	0.00	0.00	0.00	0.10	0.00	0.01	0.05	6.02	3.80
10-14	6.18	0.00	0.00	0.06	0.05	0.03	0.02	0.13	5.89	3.07
15-19	11.10	0.00	0.06	0.13	0.10	0.11	0.10	0.43	10.17	2.73
20-24	20.81	0.02	0.10	0.33	0.15	0.19	0.39	0.77	18.86	1.98
25-29	32.54	0.09	0.27	0.92	0.22	0.36	0.60	1.54	28.54	2.33
30-34	45.37	0.21	0.82	1.75	0.32	0.99	1.27	1.47	38.54	2.80
35-39	61.65	0.64	1.45	3.15	0.72	3.19	2.52	1.78	48.2	3.20
40-44	95.95	1.94	3.27	6.71	2.06	9.41	5.70	2.15	64.71	3.81
45-49	170.5	4.26	6.02	12.42	3.12	23.28	12.63	2.83	105.9	4.85
50-54	337.6	9.47	11.72	25.26	5.53	56.22	25.29	3.34	200.8	7.20
55-59	618.0	15.68	21.64	47.90	9.60	108.5	46.07	3.81	364.7	9.56
60-64	1053	24.79	36.02	84.67	15.0	189.0	79.67	4.16	620.0	14.06
65-69	1652	33.72	58.28	129.7	22.8	304.1	132.3	5.24	965.8	20.92
70-74	2255	46.59	87.72	185.4	30.88	400.8	184.5	5.69	1314	30.97
75-79	2681	49.57	114.5	248.9	36.7	456.2	229.9	5.98	1539	39.48
80-84	2983	55.88	145.0	310.4	36.96	460.0	275.6	6.26	1693	50.15
85-89	3166	59.36	165.8	316.7	37.73	404.1	266.4	6.26	1910	38.53
≥90	3291	49.36	137.8	335.2	39.21	337.8	376.3	6.26	2009	43.13

CLL: 만성 림프성 백혈병

\* ICRP 103(2007)의 표A.4.11을 수정.

표A.2. 구미인 여성의 연령군별 사이트별 암 발생률\*

연령(세)	10 <sup>5</sup> 인 당 Sv 당 증례											
	모든 고형암	식도	위	결장	간	폐	유방	난소	방광	갑상선	기타 고형암	CLL외 백혈병
0-4	10.95	0.00	0.01	0.01	0.32	0.01	0.02	0.05	0.06	0.01	10.46	6.92
5-9	5.28	0.00	0.01	0.03	0.03	0.04	0.00	0.23	0.00	0.08	4.86	3.05
10-14	6.57	0.00	0.04	0.11	0.04	0.02	0.01	0.69	0.00	0.54	5.12	2.15
15-19	11.03	0.01	0.08	0.25	0.07	0.04	0.12	1.77	0.07	1.80	6.82	2.19
20-24	21.96	0.02	0.09	0.36	0.09	0.19	1.19	2.89	0.19	3.87	13.07	1.59
25-29	43.58	0.04	0.27	0.83	0.17	0.39	7.17	4.03	0.31	5.60	24.77	1.61
30-34	76.06	0.10	0.75	1.27	0.24	1.04	23.53	5.82	0.50	6.38	36.43	1.86
35-39	129.3	0.13	1.17	3.27	0.39	3.20	54.12	9.00	0.98	7.00	50.07	2.27
40-44	215.5	0.50	2.28	6.00	0.64	8.29	107.6	13.73	1.85	7.20	67.41	3.41
45-49	355.2	1.07	3.31	11.90	1.42	20.20	183.3	24.54	4.05	8.48	96.90	3.72
50-54	512.4	2.42	5.02	21.92	2.43	40.44	243.6	34.33	7.90	8.07	146.3	5.28
55-59	663.3	5.27	8.76	41.98	4.07	67.32	263.2	41.39	13.25	7.97	210.1	6.59
60-64	851.8	7.92	14.26	63.80	6.73	106.0	298.1	49.35	22.38	7.16	276.1	9.82
65-69	1048	11.24	21.99	94.46	9.82	154.7	305.6	55.60	33.45	7.79	353.9	12.96
70-74	1280	16.96	33.48	138.1	14.11	190.7	328.6	62.04	47.83	8.53	439.2	17.72
75-79	1428	21.52	47.53	177.8	17.32	191.1	339.1	61.42	56.59	8.13	507.3	21.96
80-84	1565	26.77	65.22	234.1	22.02	166.8	366.0	56.31	68.67	8.73	550.7	26.88
85-89	1668	34.82	76.14	241.3	21.66	128.0	336.0	49.39	83.68	8.73	688.3	26.91
≥90	1707	23.34	73.73	266.5	16.94	76.51	382.2	38.63	54.69	8.73	765.3	44.90

CLL: 만성 림프성 백혈병

\* ICRP 103(2007)의 표A.4.10을 수정.

표A.3. 아시아인 남성의 연령군별 사이트별 암 발생률\*

연령(세)	10 <sup>5</sup> 인 당 Sv 당 증례									
	모든 고형암	식도	위	결장	간	폐	방광	갑상선	기타 고형암	CLL외 백혈병
0-4	10.30	0.00	0.08	0.00	0.74	0.03	0.03	0.00	9.42	5.09
5-9	4.54	0.00	0.05	0.00	0.24	0.05	0.00	0.02	4.18	4.73
10-14	5.48	0.00	0.06	0.06	0.33	0.07	0.00	0.23	4.73	3.31
15-19	7.20	0.00	0.33	0.10	0.13	0.14	0.06	0.59	5.85	3.51
20-24	9.68	0.00	0.81	0.50	0.70	0.41	0.31	0.74	6.21	2.30
25-29	16.88	0.10	2.29	0.91	1.67	0.51	0.59	0.99	9.82	2.89
30-34	31.17	0.13	5.05	3.54	3.60	2.30	0.81	1.16	14.58	3.49
35-39	65.58	0.80	14.96	5.45	11.41	5.09	2.20	1.67	24.00	2.93
40-44	131.6	2.94	29.51	12.43	21.68	14.83	3.59	2.15	44.42	3.71
45-49	213.8	7.05	47.43	24.55	36.58	23.27	5.14	3.17	66.56	5.30
50-54	339.2	14.35	76.73	39.96	54.82	44.64	10.69	2.82	95.22	6.67
55-59	564.4	25.49	127.2	72.34	95.29	80.55	17.08	2.86	143.6	9.07
60-64	1020	44.55	217.2	119.8	170.9	176.7	33.03	3.84	253.8	12.55
65-69	1469	58.10	316.7	162.1	195.6	317.2	55.42	5.13	358.4	18.61
70-74	1878	82.63	412.6	186.3	192.1	439.3	73.66	5.16	486.4	25.46
75-79	2181	92.66	488.1	214.6	183.3	509.8	108.1	4.68	579.6	28.83
80-84	2376	94.17	521.0	222.3	187.3	540.6	120.1	4.35	686.2	28.87
85-89	3224	69.75	716.9	326.5	232.6	682.2	159.0	4.35	1032	44.17
≥90	3742	68.97	863.5	422.0	215.1	608.8	264.3	4.35	1295	44.84

CLL: 만성 림프성 백혈병

\* ICRP 103(2007)의 표A.4.15를 수정.

표A.4. 아시아인 여성의 연령군별 사이트별 암 발생률\*

연령(세)	10 <sup>5</sup> 인 당 Sv 당 증례											
	모든 고형암	식도	위	결장	간	폐	유방	난소	방광	갑상선	기타 고형암	CLL외 백혈병
0-4	10.16	0.00	0.00	0.00	0.41	0.00	0.00	0.02	0.23	0.00	9.50	4.63
5-9	4.04	0.00	0.00	0.00	0.15	0.00	0.00	0.25	0.00	0.18	3.46	2.44
10-14	6.13	0.00	0.00	0.00	0.15	0.05	0.00	1.17	0.00	0.55	4.21	3.25
15-19	4.27	0.00	0.20	0.30	0.11	0.12	0.00	1.49	0.00	1.54	3.51	1.62
20-24	13.77	0.00	0.95	0.26	0.22	0.14	0.51	2.08	0.06	3.26	6.29	1.58
25-29	26.73	0.11	2.41	1.52	0.32	0.86	3.62	2.49	0.15	3.84	11.41	1.76
30-34	56.94	0.05	8.54	2.40	0.92	1.26	14.77	3.45	0.13	5.74	19.68	2.02
35-39	107.7	0.20	15.25	5.53	2.25	2.97	38.85	5.85	0.43	6.78	29.60	3.27
40-44	177.6	0.65	24.58	9.34	3.69	7.70	67.94	9.59	0.75	10.45	42.92	3.92
45-49	233.0	1.15	27.18	16.76	5.89	12.55	86.55	13.05	0.94	13.31	55.63	4.18
50-54	290.5	2.17	34.98	28.27	11.12	19.96	81.36	15.14	2.80	12.54	82.15	5.89
55-59	386.2	6.38	52.62	44.43	21.21	34.36	76.81	16.12	4.62	11.59	118.0	5.60
60-64	565.7	12.35	75.78	71.50	46.70	63.49	88.33	19.62	7.49	12.86	167.6	9.19
65-69	744.6	17.66	113.2	89.08	75.39	89.27	86.57	19.89	10.82	12.59	230.1	10.75
70-74	974.9	28.42	159.5	126.4	84.23	145.2	84.42	20.51	18.15	13.96	294.1	14.84
75-79	1127	34.69	195.4	138.6	96.89	171.2	82.73	20.27	25.43	13.00	348.4	13.56
80-84	1280	38.69	260.5	152.1	111.7	176.2	82.34	15.48	35.23	11.16	396.4	18.58
85-89	1401	28.65	284.7	174.6	114.5	184.6	52.17	21.20	50.41	11.16	478.8	19.69
≥90	1653	27.96	354.6	244.8	113.0	193.1	65.36	23.17	34.96	11.16	585.1	20.69

CLL: 만성 림프성 백혈병

\* ICRP 103(2007)의 표A.4.14를 수정.

표A.5. 지역, 성별, 연령군별 모든 원인 사망률\*

연령	연간 10 <sup>5</sup> 명 당 사망 수			
	구미인		아시아인	
	남성	여성	남성	여성
0-4	143.02	114.61	149.24	127.18
5-9	15.39	11.35	24.88	16.67
10-14	19.43	13.28	23.65	15.15
15-19	66.78	28.51	35.16	18.31
20-24	94.71	33.03	50.43	27.75
25-29	99.79	40.17	59.21	33.29
30-34	124.33	55.43	80.39	44.91
35-39	160.80	81.36	114.64	62.83
40-44	224.83	122.96	188.22	107.45
45-49	321.50	193.21	276.69	162.17
50-54	505.70	309.20	399.85	237.87
55-59	821.44	489.59	646.43	399.63
60-64	1378.1	801.25	1257.0	740.16
65-69	2241.1	1283.5	2107.5	1239.8
70-74	3590.1	2098.3	3550.3	2184.1
75-79	5634.2	3406.5	5749.9	3682.8
80-84	9122.8	5934.9	9662.0	6509.3
85-89	13879	9876.8	12800	8924.0
≥90	240299	19442	22367	17751

\* ICRP 103(2007)의 표A.4.12, A.4.13, A.4.16, A.4.17을 수정.

표A.6. 지역, 성별, 연령군별 모든 암 사망률\*

연령	연간 10 <sup>5</sup> 명 당 사망 수			
	구미인		아시아인	
	남성	여성	남성	여성
0-4	2.75	2.22	3.79	3.38
5-9	2.74	2.01	3.96	3.08
10-14	2.52	2.05	4.78	3.52
15-19	3.50	2.76	4.81	3.39
20-24	4.50	3.40	5.06	3.97
25-29	5.87	5.97	7.79	6.37
30-34	9.09	12.77	14.60	13.20
35-39	16.28	26.07	29.41	23.88
40-44	34.98	48.98	58.32	45.04
45-49	69.83	88.79	95.90	66.72
50-54	143.81	150.52	149.26	94.83
55-59	262.09	232.48	252.16	151.41
60-64	457.53	343.06	482.58	245.00
65-69	734.15	487.75	755.18	357.21
70-74	1065.7	654.11	1065.7	508.02
75-79	1427.8	801.53	1365.7	653.04
80-84	1881.0	988.90	1661.1	780.83
85-89	2208.9	1178.1	1586.6	712.91
≥90	2677.3	1220.7	1838.7	840.17

\* ICRP 103(2007)의 표A.4.12, A.4.13, A.4.16, A.4.17을 수정.

표A.7. 연령군별, 성별 인구 분포\*

연령군	구미인			아시아인		
	남성	여성	계	남성	여성	계
0-4	35,181	33,459	68,640	43,034	38,733	81,767
5-9	35,147	33,357	68,504	39,755	35,934	75,689
10-14	32,798	31,054	63,852	40,647	36,679	77,326
15-19	31,814	30,105	61,919	48,990	44,329	93,319
20-24	34,342	32,843	67,185	47,702	43,491	91,193
25-29	37,573	36,446	74,019	40,780	37,436	78,216
30-34	40,183	38,934	79,117	35,908	32,462	68,370
35-39	37,242	36,574	73,816	39,020	35,737	74,757
40-44	34,582	34,408	68,990	37,011	33,432	70,443
45-49	34,731	34,828	69,559	30,478	27,717	58,195
50-54	29,744	29,858	59,602	27,530	25,134	52,664
55-59	23,954	24,616	48,570	25,573	23,792	49,365
60-64	21,063	22,589	43,652	21,303	20,655	41,958
65-69	19,778	22,758	42,536	14,841	16,997	31,838
70-74	17,694	22,312	40,006	10,236	12,834	23,070
75-79	12,674	18,214	30,888	7,120	9,702	16,822
80-84	7,630	15,857	23,487	3,324	5,681	9,005
≥85	5,086	10,572	15,658	2,216	3,787	6,003
계	491,216	508,784	1,000,000	515,468	484,532	1,000,000

\* WHO 국제 사망률 통계 데이터베이스 데이터에 근거하여 구성했음(2003년 4월 22일 [http://www.who.int/healthinfo/mortality\\_data/en/](http://www.who.int/healthinfo/mortality_data/en/)에서 내려받음).





## 용어집<sup>30)</sup>

**기저 질병률** baseline disease rate

관심 제제 노출 없이 집단에서 관찰되는 연간 질병 발생

**기준집단** reference population

명목 암위험을 평가하기 위해 기저율과 집단 연령분포를 정의하는 데 집단의 건강통계가 사용되는 대표집단.

**명목위험계수** nominal risk coefficient

대표집단에서 성별 평균, 피폭연령에 평균한 단위 선량 당 생애위험 평가치.

**명목집단** nominal population

전형적 연령분포를 갖는 남녀 가상집단으로서 이에 대해 명목 위험계수를 산출함.

**문턱 없는 비례 모델** linear-non-threshold(LNT) model

낮은 선량 범위에서 0을 넘는 방사선량은 단순 비례 형식으로 초과암이나 유전질환을 증가시킬 것이라는 가정을 바탕으로 하는 선량-반응 모델.

**발생** incidence

어떤 집단에서 일정 기간에 질병의 발생률로서 종종 연간 10만 명 당(또는 10만 인년 당) 발생하는 질병의 신규 증례 수로 표현한다.

**발생률** incidence rate

'발생'과 같다.

**방사선위해** radiation detriment

사람 집단에서 낮은 수준 방사선피폭의 확률론적 영향 부담을 정량화하는 데 사용되는 복합지표. 방사선위해는 비치명 조건에서 삶의 질과 수명손실 길이를 고려하여

---

30) 이 용어집은 독자가 이 간행물에 나오는 기술용어를 이해하는 것을 돕기 위한 것이다. ICRP 용어집([http://icrpaedia.org/ICRP\\_Glossary](http://icrpaedia.org/ICRP_Glossary))은 ICRP 간행물에서 흔히 나타나는 용어를 포괄한다. <역주> 용어의 순서를 가나다순으로 재정리했다.

한 세트 조직/장기의 생애 암위험으로부터 구한다. 유전영향도 고려한다. 방사선위험은 조합 기준집단에서 성별과 연령에 평균한 값으로 계산된다.

**상대수명손실년** relative years of life lost

비피폭 집단에 비해 방사선피폭으로 인한 암이 발생한 사람의 년 단위 기대수명 평균 단축 즉, 수명손실년(YLL years of life lost)의 상대값. 상대 YLL은 모든 암 사이트에 평균한 YLL에 대한 특정 조직/장기의 암으로 인한 YLL의 비이다. 발생기반 계산에서는 YLL 대신에 암 없는 삶 손실년이 사용된다.

**생애위험** lifetime risk

한 사람의 수명동안 특정 원인으로 이환 또는 사망할 가능성.

**생애위험 평가치** lifetime risk estimates

주어진 방사선피폭으로 인한 생애위험을 평가한 값을 지칭하는 일반 용어. 방사선피폭에 의해 어떤 사람 생애에 초래되는 특정 질환 발생 또는 그로 인해 사망할 위험을 계산하는 데는 다음과 같이 여러 유형의 생애위험 평가치가 사용될 수 있다.

- (i) 초과생애위험 excess lifetime risk: 피폭집단에서 질병이 발생하거나 사망하는 사람의 비율과 피폭 없는 유사한 집단에서 해당 비율의 차이.
- (ii) 피폭유발사망위험 risk of exposure-induced death(REID): 집단에 추가 사망원인이 부과된 때 주어진 성별 및 주어진 피폭연령의 피폭/비피폭 집단의 원인별 사망률 차이로 정의됨.
- (iii) 피폭유발 암발생 위험 risk of exposure-induced cancer incidence(REIC): 암 사망률 대신 암 발생률을 사용해 REID와 같은 방법으로 계산한 값.
- (iv) 기대수명손실 loss of life expectancy: 관심 피폭으로 인한 기대수명 단축.
- (v) 생애기인위험 lifetime attributable risk(LAR): 어떤 추적기간에 피폭하지 않은 사람들의 경험에서 얻는 백그라운드 율을 넘는 초과사망(또는 질병 증례). 근사적 REID(또는 REIC).

**선량선량률효과인자** DDREF

낮은 선량률, 낮은 선량 피폭 시나리오에서 명목위험계수를 조정하는 데 사용하는 판단기반 인자. DDREF는 낮은 선량률, 낮은 선량 방사선피폭이 높은 선량률, 높은 선량 피폭에 비해 생물학적 효과(단위 선량 당)가 통상 낮음을 일반화한다. DDREF는 0.2 Gy 미만의 흡수선량에, 또는 선량률이 0.1 Gy/h 미만일 때는 더 높은 선량에도 적용된다.

**선형-2차 선량-반응 모델** linear-quadratic dose-response model

영향(질병, 사망, 비정상)의 빈도를 선량에 정비례하는 성분(선형항)과 선량의 제곱에 비례하는 성분(2차항)의 합으로 표현하는 통계 모델.<sup>31)</sup>

**수명손실년** years of life lost, YLL

방사선피폭으로 인한 암발생으로 평균적으로 예상되는 연 단위 기대수명 단축.

**수명연구** Life Span Study(LSS)

일본 히로시마와 나가사키 원폭생존자의 건강영향에 대한 장기적 코호트 연구.

**위해** detriment

그룹의 방사선피폭으로 그 그룹이나 후손에 겪게 될 총 건강 손해를 나타내는 다차원 개념. 위해의 여러 속성이 ICRP가 개발한 방법론에 따라 하나의 양으로 집약되면 '방사선위해'라 부름.

**위험** risk

개인이 해를 입을 가능성을 표현하는 정량적 개념. 위험은 유해한 영향의 크기와 특성을 포괄하는데, 암과 같은 특정 질환이나 조건의 발생 또는 그로 인한 사망 확률로 종종 표현된다.

**위험 이전** transfer of risk

한 집단에서 평가된 위험 모델을 취해 다른 특성을 갖는 집단에 적용하는 것. '위험 이송 transport of risk'라고도 함. 보통 이전 모드는 곱셈(초과상대위험에 기반), 덧셈(초과절대위험에 기반), 또는 가중평균이다.

**유해지표** index of harm

ICRP 27(1977b)와 ICRP 45(1985)에서 여러 산업(방사선피폭을 수반하는 산업 포함)의 상대적 안전을 비교하기 위해 사용한 정량적 지표. 유해지표는 모든 유형의 직장 해로움으로 인한 총 시간손실이며 위험에 처하는 1000 명 종사자 당 연간 건강수명 손실 연수로 나타낸다.

---

31) <역주> 데이터 '맞춤 모델'로 이해하면 된다.

**장애보정손실년<sup>32)</sup>** disability-adjusted life year

사망이나 이환으로 인한 질병의 부담을 정량화하는 척도. 집단에서 조기사망으로 인한 수명손실년과 건강 상태나 그 결과와 함께 사는 사람에게서 장애로 인한 손실년의 합으로 계산된다.

**조직가중치** tissue weighting factor

신체의 균질 피폭으로 인한 확률론적 총 건강 위해에 조직/장기 T의 상대적 기여를 표현하기 위해 조직/장기 T의 등가선량에 가중하는 인자  $w_T$ .<sup>33)</sup> 조직가중치는 다음과 같이 정규화된다.

$$\sum_T w_T = 1.$$

**조합 기준집단** composite reference population

세계 여러 지역의 대표집단에 걸쳐 집단 규모와 암 발생률을 평균해 구성한 기준집단

**조합집단** composite population

조합 기준집단과 같다.

**질보정생활년<sup>34)</sup>** QALY, quality adjusted life years

삶의 양(길이)과 질로 구하는 건강 성과의 척도. 1 QALY는 온전한 건강으로 산 1년이다. 손상된 건강으로 산 삶에 대해서는 그 건강 상태에 해당하는 경감인자를 곱한 연수가 된다.

---

32) <역주> 아직 우리말 용어가 표준화되지 않았지만 종종 ‘장애보정생존년(수)’로 적고 있다. 그러나 DALY는 질병 조기사망으로 인한 기대수명으로부터 수명단축년(YLL)과 상병으로 인한 삶의 질 저하를 상병 연수를 심각도로 보정한 불구손실년(YLD)을 합한 질병 부담으로서 기대수명으로부터 유효결손 기간을 의미한다. 따라서 이를 ‘생존년(수)’로 표현하는 것은 의미 전달에 혼선을 부른다. 이런 관점에서 이 번역본에서는 DALY를 ‘장애보정손실년’으로 적는다.

33) <역주> 실질적으로는 피폭이 비균질하여 조직/장기의 등가선량이 다를 때 위험을 하나의 지표로 나타낼 의도로 위해 가중 전신평균 등가선량(이를 유효선량으로 부른다)을 산출할 때 적용하는 조직별 가중치로 이해할 수 있다.

34) <역주> QALY는 건강하게 산 기간을 의미하는데 우리말 공식용어도 불확실하다. ‘질보정수명’ 또는 ‘질보정생활년(수)’로 적고있는데 ‘수명’이라고 적으면 죽음을 전제로 한다. 그러나 QALY는 건강하게 사는 삶의 기간을 의미하므로 죽음과 직결되지는 않는다. 예를 들어 지난 해에 매우 건강하게 잘 살았다면 1 QALY를 산 것이다. 1년을 생존해도 질이 70% 수준이면 0.7 QALY를 산 것이 된다. 이런 관점에서 질보정생활년이 바람직한 표현으로 보아 이 번역본에서는 이를 사용한다.

**초과상대위험** ERR

피폭집단에서 질병률을 비피폭집단에서 질병률로 나누고 1을 뺀 값. ERR은 종종 Gy 당(또는 Sv 당) 초과율로 나타낸다.<sup>35)</sup>

**초과절대위험** EAR

방사선피폭으로 인한 초과위험이 선량에 의존하지만 기저 백그라운드 또는 자연 위험과는 무관한 증분만큼 기저위험에 추가된다는 가정에 근거한 위험 표현. EAR은 종종 Gy 당(또는 Sv 당) 더하는 초과율로 표현된다.

**치사율** lethality fraction

특정 장기/조직에서 사망률과 이환률의 비를 반영하는 판단 기반 무차원 인자.

**해독** hazard

해로움(유해한 영향)을 초래할 잠재성. 해독은 위험과 다름에 유의해야 한다. 해독은 선원이나 사건의 본성인데 비해 위험은 규정된 여건 설정에서 오는 해로움의 가능성을 지시한다.

**DALY** disability-adjusted life year

‘장애보정손실년’ 참조

**DDREF** dose and dose-rate effectiveness factor

‘선량선량률효과인자’ 참조

**EAR** excess absolute risk

‘초과절대위험’ 참조

**ERR** excess relative risk

‘초과상대위험’ 참조

**LAR** lifetime attributable risk

생애기인위험.

---

35) <역주> 초과절대위험은 위험의 증분  $\Delta R$ 이 선량  $d$ 에 비례하되 기저위험과는 무관하다고 보는 모델로서  $\Delta R = \beta d f(e, a)$ 로 표현된다.  $\beta$ 는 상수,  $f(e, a)$ 는 피폭연령  $e$ 와 도달연령  $a$ 의 함수이다. 이에 비해 초과상대위험 모델은  $\Delta R$ 이 선량과 기저위험  $R_0$ 에 비례한다고 보는 모델로서  $\Delta R = \beta' d R_0 f'(e, a)$ 와 같이 표현할 수 있다.

**QALY** quality-adjusted life year

‘질보정생활년’ 참조.

**REIC/REID**

피폭유발 암 발생/사망 위험. ‘생애위험평가지’ 참조.

## 참고문헌

- Baselet, B., Rombouts, C., Benotmane, A.M., et al., 2016. Cardiovascular diseases related to ionizing radiation: The risk of low-dose exposure (Review). *Int. J. Mol. Med.* 38, 1623-1641.
- Breckow, J., Emami, S., Amalhaf, S., et al., 2018. Impact of updating the non-radiation parameters in the ICRP 103 detriment model. *Radiat. Environ. Biophys.* 57, 89-98.
- Breckow, J., 2020. Do we really need the 'detriment' for radiation protection? *Radiat. Environ. Biophys.* 59, 343-348.
- Brenner, A.V., Preston, D.L., Sakata, R., et al., 2018. Incidence of breast cancer in the Life Span Study of atomic bomb survivors: 1958-2009. *Radiat. Res.* 190, 433-444.
- Cahoon, E.K., Preston, D.L., Pierce, D.A., et al., 2017. Lung, laryngeal and other respiratory cancer incidence among Japanese atomic bomb survivors: an updated analysis from 1958 through 2009. *Radiat. Res.* 187, 538-548.
- Chen, A., Jacobsen, K.H., Deshmukh, A.A., et al., 2015. The evolution of the disability-adjusted life year (DALY). *Socioecon. Plann. Sci.* 49, 10-15.
- Clement, C., Rühm, W., Harrison, J.D., et al., 2021. Keeping the ICRP recommendations fit for purpose. *J. Radiol. Prot.* 41, 1390.
- Cléro, E., Vaillant, L., Hamada, N., et al., 2019. History of radiation detriment and its calculation methodology used in ICRP Publication 103. *J. Radiol. Prot.* 39, R19-R35.
- Cléro, E., Vaillant, L., Hamada, N., et al., 2022. Update: History of radiation detriment and its calculation methodology used in ICRP Publication 103(2019 *J. Radiol. Prot.* 39 R19-R35). *J. Radiol. Prot.* 42, 024502.
- Furukawa, K., Preston, D.L., Lönn, S., et al., 2010. Radiation and smoking effects on lung cancer incidence among atomic bomb survivors. *Radiat. Res.* 174, 72-82.
- Hoel, D.G., 2018. Nuclear epidemiologic studies and the estimation of DREF. *Int. J. Radiat. Biol.* 94, 307-314.
- ICRP, 1973. Implications of Commission Recommendations that Doses be

- Kept as Low as Readily Achievable. ICRP Publication 22. Pergamon Press, Oxford.
- ICRP, 1977a. Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 26. Ann. ICRP 1(3).
- ICRP, 1977b. Problems Involved in Developing an Index of Harm. ICRP Publication 27. Ann. ICRP 1(4).
- ICRP, 1985. Developing a Unified Index of Harm. ICRP Publication 45. Ann. ICRP 15(3).
- ICRP, 1991. The 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 60. Ann. ICRP 21(1-3).
- ICRP, 1992. The Biological Basis for Dose Limitation in the Skin. ICRP Publication 59. Ann. ICRP 22(2).
- ICRP, 2003. Relative Biological Effectiveness (RBE), Quality Factor ( $Q$ ), and Radiation Weighting Factor ( $w_R$ ). ICRP Publication 92. Ann. ICRP 33(4).
- 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).
- ICRP, 2012. ICRP Statement on Tissue Reactions / Early and Late Effects of Radiation in Normal Tissues and Organs - Threshold Doses for Tissue Reactions in a Radiation Protection Context. ICRP Publication 118. Ann. ICRP 41(1/2).
- ICRP, 2018. Ethical foundations of the system of radiological protection. ICRP Publication 138. Ann. ICRP 47(1).
- ICRP, 2021. Use of dose quantities in radiological protection. ICRP Publication 147. Ann. ICRP 50(1).
- Little, M.P., Pawel, D., Misumi, M., et al., 2020. Lifetime mortality risk from cancer and circulatory disease predicted from the Japanese atomic bomb survivor Life Span Study data taking account of dose measurement error. *Radiat. Res.* 194, 259-276.
- Miska, E.A., Ferguson-Smith, A.C., 2016. Transgenerational inheritance: models and mechanisms of non-DNA sequence-based inheritance. *Science* 354, 59-63.
- NAS/NRC, 1988. Health Risks of Radon and Other Internally Deposited Alpha Emitters: BEIR IV. National Research Council, National Academy of Sciences, Washington, DC.



- NAS/NRC, 1990. Health Effects of Exposure to Low Levels of Ionizing Radiation: BEIR V. National Research Council, National Academy of Sciences, Washington, DC.
- NAS/NRC, 2006. Health Risks from Exposure to Low Levels of Ionizing Radiation: BEIR VII - Phase 2. National Research Council, National Academy of Sciences, Washington, DC.
- NCRP, 1985. Induction of Thyroid Cancer by Ionizing Radiation. NCRP Report No. 80. National Council on Radiation Protection and Measurements, Bethesda, Maryland.
- NCRP, 2016. Guidance on radiation dose limits for the lens of the eye. NCRP Commentary No. 26. National Council on Radiation Protection and Measurements, Bethesda, Maryland.
- NCRP, 2018. Implications of recent epidemiologic studies for the linear-nonthreshold model and radiation protection. NCRP Commentary No. 27. National Council on Radiation Protection and Measurements, Bethesda MD.
- Ozasa, K., Takahashi, I., Grant, E.J., 2016. Radiation-related risks of non-cancer outcomes in the atomic bomb survivors. *Ann. ICRP* 45 (1 Suppl.), 253-261.
- Parkin, D.M., Whelan, S.L., Ferlay, J., et al. (Eds.), 2002. *Cancer Incidence in Five Continents Vol VIII*. IARC Scientific Publications No. 155. Lyon International Agency for Research on Cancer.
- Pierce, D.A., Sharp, G.B., Mabuchi K., 2003. Joint effects of radiation and smoking on lung cancer risk among atomic bomb survivors. *Radiat. Res.* 159, 511-520.
- Preston, D.L., Kusumi, S., Tomonaga, M., et al., 1994. Cancer incidence in atomic bomb survivors. Part III. Leukaemia, lymphoma and multiple myeloma, 1950-1987. *Radiat. Res.* 137, S68-S97.
- Preston, D.L., Mattsson, A., Holmberg, E., et al., 2002. Radiation effects on breast cancer risk: a pooled analysis of eight cohorts. *Radiat. Res.* 158, 220-235.
- Preston, D.L., Ron, E., Tokuoka, S., et al., 2007. Solid cancer incidence in atomic bomb survivors: 1958-98. *Radiat. Res.* 168, 1-64.
- Ron, E., Lubin, J.H., Shore, R.E., et al., 1995. Thyroid cancer after exposure to external radiation: a pooled analysis of seven studies. *Radiat. Res.* 141, 259-277.
- Rühm, W., Woloschak, G.E., Shore, R.E., et al., 2015. Dose and dose-rate

- effects of ionizing radiation: a discussion in the light of radiological protection. *Radiat. Environ. Biophys.* 54, 379-401.
- Rühm, W., Azizova, T.V., Bouffler, S.D., et al., 2016. Dose-rate effects in radiation biology and radiation protection. *Ann. ICRP* 45(1S), 262-279.
- Shimada, K., Kai, M., 2015. Calculating disability-adjusted life years (DALY) as a measure of excess cancer risk following radiation exposure. *J. Radiol. Prot.* 35, 763-775.
- Shore, R., Walsh, L., Azizova, T., et al., 2017. Risk of solid cancer in low dose-rate radiation epidemiological studies and the dose-rate effectiveness factor. *Int. J. Radiat. Biol.* 93, 1064-1078.
- Shore, R.E., Beck, H.L., Boice, J.D. Jr, et al., 2018. Implications of recent epidemiologic studies for the linear nonthreshold model and radiation protection. *J. Radiol. Prot.* 38, 1217-1233.
- Shore, R.E., Beck, H.L., Boice, J.D. Jr., et al., 2019. Recent epidemiologic studies and the linear no threshold model for radiation protection-considerations regarding NCRP Commentary 27. *Health Phys.* 116, 235-246.
- Siegel, R.L., Miller, K.D., Jemal, A., 2019. Cancer Statistics, 2019. *CA Cancer J Clin.* 69, 7-34.
- SSK, 2014. Dose- and dose-rate-effectiveness factor(DDREF), Recommendation by the German Commission on Radiological Protection with Scientific Grounds.
- Thomas, D., Darby, S., Fagnani, F., et al., 1992. Definition and estimation of lifetime detriment from radiation exposures: principles and methods. *Health Phys.* 63, 259-272.
- UNSCEAR, 1982. Ionizing Radiation: Sources and Biological Effects. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation 1982 Report to the General Assembly, with Annexes. New York: United Nations.
- UNSCEAR, 1988. Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation 1988 Report to the General Assembly, with Annexes. New York: United Nations.
- UNSCEAR, 2001. Heritable Effects of Radiation. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation 2001 Report to the General Assembly with Scientific Annex. New York: United Nations.
- UNSCEAR, 2012. Biological Mechanisms of Radiation Actions at Low

- Doses: a White Paper to Guide the Scientific Committee's Future Programme of Work. United Nations, New York.
- UNSCEAR, 2015. Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation 2012 Report to the General Assembly with Scientific Annexes. United Nations, New York.
- UNSCEAR, 2020. Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation 2019 Report to the General Assembly with Scientific Annexes. United Nations, New York.
- U.S. DHHS, 1989. Cancer Statistics Review 1973-86 including a report on the status of cancer control. NIH Publication No. 89-2789. US Department of Health and Human Services, PHS. NIH, NCI, Bethesda, Maryland.
- Vergel, Y.B., Sculpher, M., 2008. Quality-adjusted life years. *Pract. Neurol.* 8, 175-182.
- Wakeford, R., Azizova, T., Dörr, W., et al., 2019. The Dose and Dose-Rate Effectiveness Factor (DDREF). *Health Phys.* 116, 96-9
- Yamada, M., Wong, F.L., Fujiwara, S., et al., 2004. Noncancer disease incidence in atomic bomb survivors, 1958-1998. *Radiat. Res.* 161, 622-632.
- Yamada, M., Furukawa, K., Tatsukawa, Y., et al., 2021. Congenital malformations and perinatal deaths among the children of atomic bomb survivors: a reappraisal. *Am. J. Epidemiol.* 190, 2323-2333.
- Zhang, W., Laurier, D., Cléro, E., et al., 2020. Sensitivity analysis of parameters and methodological choices used in calculation of radiation detriment for solid cancer. *Int. J. Radiat. Biol.* 96, 595-605.



# 사 사

ICRP 작업그룹(TG) 102는 현행 위해계산 과정을 검토하고 문서화하여 계산이 재현 가능한 방식이어서 새 데이터가 가용할 때 다른 접근도 적용할 수 있는 길을 고려함으로써, 장래의 권고를 위한 근거를 마련하도록 2016년 3월에 설치되었다. 이 간행물은 TG 102가 준비한 것으로서 (i) 위해 계산의 구체적 절차를 설명하고 필요한 정보원을 식별하는 문서를 준비하고, (ii) ICRP 103(2007)의 계산을 재현하여 결과를 얻는 데 어떤 어려움이 있는지 확인하고 취한 접근에 대해 코멘트하며, (iii) 위해 계산 절차의 수정이나 개선 가능성을 식별하며, (iv) 장래의 위해 계산을 위한 방법론을 구상하여 제안한다.

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

## 작업그룹 102 위원(2016~2021)

N. Ban (위원장)	W. Dörr(-2019)	V. Vaillant
T.V. Azizova	N. Hamada	W. Zhang
S. Bouffler	J.D. Harrison	
E. Cléro	D. Laurier	
D.A. Cool	D.L. Preston	

\*객원위원

제1분과위 검토위원은 다음과 같다.

M. Hauptmann	S. Salomaa
--------------	------------

본위원회 검토위원은 다음과 같다.

M. Kai	J. Lochard	A. Wojcik
--------	------------	-----------

## 편집인

C.H. Clement (ICRP 과학서기 겸 ICRP 연보 편집장)  
T. Yasumune (과학서기보 겸 ICRP 연보 부편집인) (2022~ )  
H. Fujita (과학서기보 겸 ICRP 연보 부편집인) (2018~2022)

이 보고서를 준비하는 기간의 제1분과위 위원은 다음과 같다.

(2016~2017)

W. Rühm(위원장)	R. Chakraborty	D. Stram
S. Bouffler(부위원장)	W. Dörr	Q. Sun
D. Laurier(서기)	M. Hauptmann	M. Timarche
T.V. Azizova	P. Rajaraman	R. Wakeford
N. Ban	S. Solomaa	A. Wojcik

(2017~2021)

W. Rühm(위원장)	M. Hauptmann	D. Stram
A. Wojcik(부위원장)	K. Ozasa	Q. Sun
J. Garnier-Laplace(서기)	P. Rajaraman	R. Wakeford
T.V. Azizova	K. Sakai	G. Woloschak
R. Chakraborty(-2018)	S. Solomaa	
W. Dörr(-2019)	M. Sokolikov	

(2021~2022)

D. Laurier(위원장)	D. Bazyka	D. Richardson
G. Woloschak(부위원장)	A. Francois	Y. Shimada
C. Badie(서기)	M.P. Hande	M. Sokolikov
C. Adam-Guillermin	M. Hauptmann	Q. Sun
E. Ainsbury	K. Ozasa	L. Vaillant
T.V. Azizova	P. Rajaraman	R. Wakeford

이 간행물 승인 당시 본위원회 위원

위원장: W. Rühm 독일

부위원장: D.A. Cool 미국

과학서기\*: C.H. Clement 캐나다

K. Applegate 미국

F. Bochud 스위스

S. Bouffler 영국

K.W. Cho 한국

G. Hirth 호주

M. Kai 일본

D. Laurier 프랑스

S. Liu 중국

S. Romanov 러시아

T. Schneider 프랑스

A. Wojcik 스웨덴

명예위원

R.H. Clarke 영국

F.A. Mettler 미국

R.J. Pentreath 영국

R.J. Preston 미국

C. Streffer 독일

E. Vaňo 스페인

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

ICRP와 작업그룹 102 위원들은 이 간행물에 소중한 의견을 준 R. Wakeford에게 감사한다.

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