

발 간 등 록 번 호

11-B551172-000010-14

WWW.NCC.RE.KR

VOL.1

전리방사선

IONIZING RADIATION

—
발암 요인 보고서



전리방사선

IONIZING RADIATION

발암 요인 보고서

KEY FINDINGS

- 엑스선과 감마선은 IARC(국제암연구소) 발암 요인 분류에서 사람에게 발암성이 확인된 요인으로 분류함(Group 1)
- 방사선은 입자나 전자파 형태로 불안정한 핵을 가진 원자나 원자핵이 안정화하기 위해 방출하는 에너지의 흐름이며, 어떤 물질과 상호작용할 때 이온화시킬 수 있는 에너지가 있는 방사선을 전리방사선이라 함
- 방사선은 어떤 과정으로 암을 유발하는지는 잘 알려져 있지 않지만, 만성림프구성백혈병, 흑색종, 호지킨 림프종, 악성중피종 등 일부를 제외하고 모든 암을 발생시킬 수 있는 것으로 보고되고 있음
- 자연에서 발생하는 방사선은 낮은 수준이며 일상생활에서나 의료 기기에서 사용되는 X선 기계와 방사성 의약품을 통해 노출되고 있으므로, 불필요한 방사선 검사는 가능한 한 피하고, 방사선 오염시 신체로부터 방사성 물질을 빨리 제거하는 것이 중요함

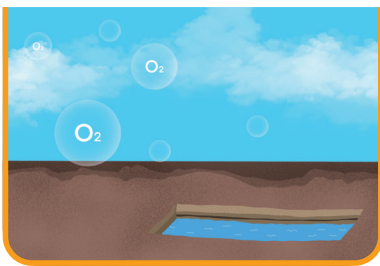
01 노출 현황

환경적 노출

방사선은 입자나 전자파 형태로 이동하는 에너지의 흐름을 뜻하며, 전리방사선은 어떤 물질과 상호작용할 때 이온화할 수 있는 에너지가 있는 방사선을 뜻합니다. 전리방사선에는 알파선, 베타선, 감마선, x선, 중성자 등이 있으며, x선의 경우 의료 분야와 비파괴 검사에 많이 쓰입니다. 따라서 의료기기에 사용되는 x선 기계와 방사성 의약품을 통해 의료방사선 노출이 발생할 수 있습니다.

자연에서 발생하는 방사선의 경우 일반적으로 낮은 수준이며, 대부분 지각, 토양, 물, 공기 음식 등과 같은 환경에서 발생합니다. 우주에서도 매우 빠른 속도로 지구의 대기권에 방사선을 쏟아내고 있으며, 대부분은 땅에 닿기 전에 사라지지만 일부는 빗물로 낙하여, 생태계 먹이 사슬을 통해 인체에 흡수될 수 있습니다. 또한 핵무기 또는 핵발전시설의 사고 시에도 노출될 수 있으며, 일상생활에서도 항공 여행, 공항 보안 검색대, 건축 자재, 흡연 등에서 발생할 수 있습니다. 일상생활에서 노출되는 방사선량은 전 세계 지역에 따라 다르게 나타나지만 연간 평균 2.4밀리시버트(mSv)정도 노출됩니다.

자연적 발생



우주 방사선



핵무기, 핵발전 시설의 사고현장



직업적 노출



전리방사선의 직업적 피폭은 의료 시설, 광산, 공장, 비행 승무, 핵발전소 및 핵무기와 관련된 일을 하는 다양한 근로자들에게서 주로 발생합니다. 국내에서 발생되고 있는 방사선 사고는 방사성 동위원소를 이동 사용하는 비파괴 검사 작업장에서 발생하거나 의료 분야에서 방사선 품질 관리나 선량 계산 오류에 기인한 과피폭이 대부분입니다.

02 연구에서의 인체 발암성

국제보건기구 산하의 국제암연구소(IARC)는 전리방사선을 인간에서 암을 유발하는 확실한 발암 요인으로 분류하고 있습니다. 전리방사선에 의해서 발생하고 있는 암은 침샘암(salivary gland), 식도암(oesophagus), 위암(stomach), 결장암(colon), 폐암(lung), 뼈암(bone), 피부 기저세포암(basal cell of the skin), 여성유방암(female breast), 신장암(kidney), 방광암(urinary bladder), 뇌암과 중추신경계암(brain and CNS), 갑상선암(thyroid) 및 백혈병(만성림프구성 백혈병은 제외)을 발생시킬 수 있다고 보고하고 있습니다.

03 방사선 피폭량 허용 기준

- 방사선 관계 종사자 : 5년간 100mSv(20mSv/년, 특정 1년에 한하여 50mSv까지 허용)
- 일반인: 연간 1mSv

04 방사선 오염시 대처방법

방사선 오염은 인체의 외·내부에 있는 불필요한 방사성 물질을 의미합니다. 가장 중요한 대처법은 신체로부터 방사성 물질을 가능한 빨리 제거하여 위해의 위험도를 낮추고, 오염 전파의 가능성을 줄이는 것이 중요합니다.

			
<p>겉옷을 벗고 옷을 비닐 봉지 또는 다른 밀봉 용기에 넣기</p>	<p>비누와 샴푸를 사용하여 깨끗하게 씻기. 샤워를 할 수 없는 경우에는 싱크대에서 노출된 손, 얼굴 및 신체 부위를 비누와 물을 충분히 사용하여 씻기 * 린스를 사용할 경우 방사성 물질이 머리카락에 달라 붙을 수 있으므로 사용 금지</p>	<p>깨끗한 의복으로 갈아입고, 다른 사람 및 애완동물을 도울 때 가능한 한 방수 장갑 및 방진 마스크를 착용하기</p>	<p>경구로 섭취시 즉시 구토 또는 위세척을 하고, 설사제를 사용하는 등 위장관 배출을 촉진시키기</p>

05 제언

전리방사선은 침샘, 식도, 위, 대장, 폐, 뼈, 피부, 유방, 방광, 뇌 및 중추 신경계, 갑상선 암 등 일부 암을 제외하고는 모든 암을 유발시킬 수 있는 발암 물질입니다. 방사선 작업 종사자에서 노출이 높으며, 일반인 경우에도 CT와 엑스선 검사 등의 의료방사선 검사를 시행할 경우 의료방사선에 노출될 수 있습니다. 불필요한 방사선 검사를 받지 않는 것만으로도 방사선 노출을 낮출 수 있으며, 방사선에 노출되어 오염이 발생할 시 방사성 물질을 신체로부터 가능한 빨리 제거해야 위해의 위험도를 낮출 수 있습니다.

전리 방사선

Ionizing Radiation

- 입자나 전자파 형태로 이동하는 에너지의 흐름을 말한다. 어떤 매질을 직접 또는 간접적으로 전리 할 수 있는 능력을 갖춘 에너지의 흐름을 전리방사선이라고 한다.
- 전리방사선에는 알파선, 베타선, 감마선, X-선, 중성자 등이 있으며 진단용 의료 방사선 기기에서는 주로 X-선을 사용한다(영상의학과외의 경우 대부분 X-선 사용, 핵의학은 방사성동위원소 종류에 따라 다양한 방사선 종류 사용).
- 전리방사선이 인체에 미치는 영향은 결정적 영향과 확률적 영향으로 구분하는데 확률적 영향은 생식세포 이상에 따른 유전적 이상과 체세포 변이에 따른 발암과 백혈병이 그 예다.
- 전리방사선에 의한 암종은 침샘암, 식도암, 위암, 결장암, 폐암, 뼈암, 피부 기저세포암, 유방암, 신장암, 방광암, 뇌암과 중추신경계암, 갑상선암 및 백혈병(만성림프구성 백혈병은 제외) 등이 있다.

전리방사선의 특징

방사선은 에너지의 흐름이며, 방사선이 물질과 반응했을 때 물질의 원자를 전리시킬 수 있으면 전리(이온화)방사선, 그렇지 못하면 비전리방사선으로 구분한다. 방사선이라 하면 전리방사선을 일컬으며, 전리방사선의 경우 종류가 다양해 크게 입자방사선과 전자기방사선으로 구분한다(이재기, 2016).

방사선의 종류	질량	전하량	투과력	전리 방법
광자	없음	없음	강함	간접 전리
베타(β)입자	(1/1837)amu	-1 또는 +1	약함	직접 전리
알파(α)입자	4amu	+2	아주 약함	직접 전리
중성자	1amu	없음	강함	간접 전리

전리방사선의 양과 단위

명칭	단위	정의	비고
플루언스 (Fluence, Φ, Ψ)	NO./cm ²	임의의 체적인 단면적 da를 통과하는 입자의 수(방사선, 에너지 등)	SI 단위
커마 (Kerma, K)	C/kg	임의의 매질에 간접 전리방사선(광자 또는 중성자)에 의해 전달된 에너지의 양	SI 단위
조사선량 (Exposure, X)	C/kg R(뢴트겐)	단위부피의 질량(Δm) 속에 입사된 X-선 또는 감마선에 의해 발생한 모든 전자가 공기 중에서 완전히 멈출 때 공기 속에서 발생한 한쪽 부호(+ 또는 -)의 이온에 대한 총 전하량	국제표준으로 사용하지 않지만 방사선 사용자에게 익숙하게 사용됨
흡수선량 (Absorbed Dose, D)	Gy(그레이) rad(라드)	모든 간접 또는 직접 전리방사선이 매질에 투여한 에너지	SI 단위 비 SI 단위 1Gy=100rad
유효선량 (Effective Dose, E)	Sv(시버트) rem(렘)	Tissue 또는 Organ의 등가선량의 합	SI 단위 비 SI 단위 1Sv=100rem
방사능 (Activity, A)	Bq(베크렐) Ci(큐리)	방사성 핵종의 단위시간당 방사성 붕괴 수	SI 단위 비 SI 단위 1Bq=2.7×10 ⁻¹¹ Ci

전리방사선의 핵종의 종류

방사성 물질이 '방사성 핵종'을 일정 농도 이상으로 함유한 물질을 말한다. 방사성 핵종은 에너지 준위가 불안정해 '붕괴(핵변환)'라는 과정을 통해 방사선을 방출하며 안정된 상태로 변화한다. 방사성 물질은 크게 자연적으로 존재하는 천연 방사성 물질과 강한 입자 가속기와 높은 에너지의 중성자를 이용해 인위적으로 발생시킨 인공 방사성 물질로 구분할 수 있다. 방사성 물질의 '반감기'란 방사선의 세기가 처음의 절반이 되는 데 걸리는 기간을 의미한다. 방사성 물질마다 그 값이 다른데, 어떤 것은 1초도 안 되지만 반감기가 긴 경우에는 몇백만 년, 몇억 년에 이르기도 한다. 그래서 반감기는 방사성 물질이 미치는 영향이나 위험성을 알아볼 수 있는 요소 중 하나이다(식품의약품 안전청, 2010).

핵종	반감기	방사선 종류	배출 에너지	핵종	반감기	방사선 종류	배출 에너지
트리튬(³ H)	12.3년	베타선	최대 18.6Kev	요오드(¹²³ I)	13.2시간	감마선	159Kev
탄소(¹¹ C)	20.4분	감마선	511Kev	요오드(¹²⁵ I)	약 59.4일	감마선	27Kev 35.5Kev
탄소(¹⁴ C)	5730년	베타선	최대 157Kev	요오드(¹³¹ I)	8.0일	베타선 감마선	606Kev 365Kev
불소(¹⁸ F)	1.83시간	감마선	511Kev	제논(¹³³ Xe)	5.2일	베타선	최대 0.42Kev
나트륨(²⁴ Na)	15시간	베타선 감마선	최대 1.39Kev 1.369Kev 2.75Kev	세슘(¹³⁷ Cs)	30.2년	감마선	66.2Kev
인(³² P)	14.3일	베타선	최대 1,710Kev	프로메튬(¹⁴⁷ Pm)	약 2.7년	베타선	225Kev
인(³³ P)	25.6일	베타선	최대 249Kev	유로퓸(¹⁵² Eu)	약 13.5년	감마선 베타선	344Kev 1.4Mev 699Kev
황(³⁵ S)	87.5일	베타선	최대 168Kev	사마륨(¹⁵³ Sm)	1.95일	베타선	최대 0.808Kev
칼륨(⁴² K)	12.4시간	베타선	3.52Kev	디스프로슘(¹⁶⁵ Dy)	2.33시간	베타선	최대 1.28Kev
철(⁵⁵ Fe)	2.68년	감마선	6Kev 7Kev	레늄(¹⁸⁸ Re)	17시간	베타선	최대 2.12Kev
코발트(⁵⁷ Co)	271.8일	감마선	122Kev 137Kev	이리듐(¹⁹² Ir)	74일	감마선 베타선	317Kev 684Kev 604Kev 672Kev
코발트(⁶⁰ Co)	5.26년	감마선	1.17Kev 1.33Kev	탈륨(²⁰¹ Tl)	3.04일	감마선	71Kev 135Kev 167Kev
니켈(⁶³ Ni)	100.1년	베타선	66Kev	탈륨(²⁰⁴ Tl)	3.8년	베타선 감마선	763Kev 69Kev
갈륨(⁶⁷ Ga)	3.26일	감마선	93Kev 184Kev 300Kev	폴로늄(²¹⁰ Po)	138.4일	알파선 감마선	5.304Kev 803Kev
게르마늄(⁶⁸ Ge)	288일	감마선	9Kev 10Kev	라듐(²²⁶ Ra)	1600년	알파선 감마선	약 4.8Kev 약 0.2Kev

핵종	반감기	방사선 종류	배출 에너지	핵종	반감기	방사선 종류	배출 에너지	
셀레늄(⁷⁵ Se)	119.8일	감마선	136Kev	토륨(²³² Th)	1.405× 10 ¹⁰ 년	알파선	4,010Kev	
			265Kev				감마선	59Kev
			401Kev					
크립톤(⁸⁵ Kr)	10.7년	베타선	최대 687Kev	우라늄(²³⁵ U)	7.04× 10 ⁸ 년	알파선	4,400Kev	
			감마선			186Kev		
스트론튬(⁹⁰ Sr)	27.7년	베타선	최대 2.28Kev	플루토늄/ 베릴륨 (²³⁸ Pu/Be)	87.7년	중성자선 알파선 감마선	-	
이트륨(⁹⁰ Y)	2.7일	베타선	최대 2.28Kev	플루토늄(²³⁹ Pu)	241× 10 ⁴ 년	알파선 감마선	5,156Kev 16Kev	
테크네튬 (^{99m} Tc)	6시간	감마선	141Kev	플루토늄/베릴륨 (²³⁹ Pu/Be)	241× 10 ⁴ 년	알파선 감마선	5,156Kev 16Kev	
몰리브덴 (⁹⁹ Mo)	66시간	베타선	133Kev	아메리슘 (²⁴¹ Am)	432.7년	감마선	최대 60Kev	
		감마선	0.442Kev				739Kev	알파선
파라디움 (¹⁰³ Pd)	16.99일	감마선	20Kev	아메리슘 (²⁴¹ Am/Be)	432.7년	중성자선	4,500Kev	
						알파선	최대 5,486Kev	
						감마선	최대 60Kev	
루테튬(¹⁰⁶ Ru)	372.6일	감마선	512Kev	퀴륨(²⁴⁴ Cm)	18.10년	베타선 감마선 알파선 엑스선	-	
		베타선	39Kev					
			3.5Kev					
카드뮴(¹⁰⁹ Cd)	462.6일	감마선	22Kev	칼리포르늄 (²⁵² Cf)	2.65년	중성자선 알파선 감마선	-	
			25Kev					
			245Kev					
인듐(¹¹¹ In)	2.80일	감마선	171Kev					

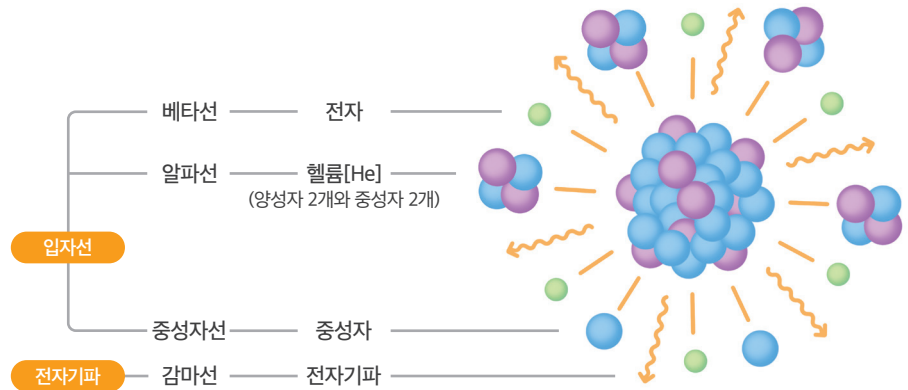
01

노출원 및 노출 경로

일반 인구에서 방사선 피폭

방사선은 입자나 전자파 형태로 이동하는 에너지의 흐름을 말한다. 그중에서 우리가 통상적으로 부르는 방사선은 어떤 물질과 상호작용할 때 이온화할 수 있는 에너지가 있는 전리방사선만을 말한다.

전리방사선에는 알파선, 베타선, 감마선, X-선, 중성자 등이 있으며 진단용 의료 방사선 기기에서는 주로 X-선을 사용한다. '자연방사선'은 대부분 지각, 토양, 해양, 먹거리 등 환경에서 발생하며, 우주에서도 마찬가지이다. 우주방사선은 매우 빠른 속도로 우주에서 지구의 대기권으로 쏟아지고 있다. 대부분은 땅에 닿기 전에 사라지지만 일부는 빗물로 낙하하거나 동식물이 흡수해 호흡이나 먹이사슬을 통해 인체에 흡수된다. 또한 우리가 사는 대지는 여러 가지 방사성 원소들을 포함하고 있어 암석이나 진흙, 공기 중 먼지에서도 방사선이 나오는데, 이것이 전체 피폭량의 대부분을 차지한다. 토양에서부터 발생하는 방사선은 토양의 지질학적 특성에 따라 달라지며, 이는 지역에 따라 매우 다양하게 나타난다. 나라와 지역에 따라 다르지만, 평균적으로 사람이 1년간 받는 자연 방사선의 양은 약 2.4mSv(밀리시버트)이다(UNSCEAR, 1993).



| 출처 | 한국원자력연구소(<https://www.kaeri.re.kr/board?menuId=MENU00455>)

직업에서 방사선 피폭

전리방사선의 직업적 피폭은 의료 시설, 광산, 공장, 비행 승무, 핵발전소 및 핵무기와 관련된 일을 하는 다양한 근로자들에게서 주로 일어난다(IARC, 2012). 특히 산업 현장에서는 공정이나 제품 상태를 관리할 때 비파괴 검사, 방사선 게이지 등을 이용한다. 비파괴 검사를 이용하면 비행기의 날개나 교량 등의 내부를 간단히 들여다보아 눈에 보이지 않는 결함을 쉽게 발견할 수 있으며, 방사선 게이지는 방사선이 투과하거나 반사되는 정도를 측정해 물질의 두께, 밀도, 수위, 성분 등을 파악할 수 있어서 철강, 제지, 음료 산업 등 각종 분야에서 이용된다.

의료에서 방사선 피폭

의료에서 방사선은 질병을 진단하거나 치료하기 위한 목적으로 사용된다. 원전 사고로 말미암아 나오는 방사능과 질병의 진단에 사용하는 방사선은 매우 다르다. 진단용 방사선은 최대 관전압이 60~140KVp인 저준위 방사선이며, 방사선 진단 검사 장비에 따라 환자나 피검자가 노출되는 방사선량이 다르다. 일반 엑스선 촬영에 비해 CT, PET-CT 촬영 시 상대적으로 더 많은 양의 방사선에 노출된다.

유엔 방사선영향과학위원회(UNSCEAR: UN Scientific Committee on the Effect of Atomic Radiation) 보고서에 의하면 의료 분야 방사선 작업 종사자의 피폭량은 미국 1940년 이전 연간 100mSv이었으나 1977년부터 1984년 사이에 2.3mSv로 감소했다. 전 세계적으로는 1980년~1984년에 연간 평균 피폭량이 연간 0.6mSv이었으나 1990년~1994년에는 0.33mSv로 감소했다(UNSCEAR, 1993).

핵폭발과 핵무기 생산

1945년 일본 히로시마와 나가사키에 투하된 원자폭탄으로 인해 수십만 명의 사람이 감마선으로부터 상당한 양의 외부 방사선에 피폭되었다. 폭발 당시 한 도시에 있었던 약 120,000명의 사람 중 일본의 수명 조사(LSS, Life Span Study)에 포함된 86,572명에 대해 피폭 방사선량을 계측했다. 그중 피폭 방사선량 계측이 가능했던 86,472명의 결장(colon)의 피폭 방사선량은 24,000person-Sv로 1인당 평균 약 300mSv였다. 진원지로부터 거리가 멀수록 피폭선량이 감소했다(Burkart, W. 1996).

핵무기를 만들기 위해 1945년에서 1980년 사이에 이루어진 대규모의 대기권 핵폭발(Atmospheric nuclear explosions) 실험에서는 다량의 방사성 물질이 환경으로 유출되었다. 이 기간 중 520회의 실험이 이루어졌으며 총 수율은 TNT 545Mt(megatonnes)에 달했다. 대기권 핵실험은 1945년 미국에 의해 처음 시행된 후 1962년까지 집중적으로 이루어졌다. 그러나 1963년 미국, 소련, 영국이 대기권과 수중, 우주에서의 핵실험을 금지하는 부분적 핵실험 금지 조약에 합의한 뒤부터 크게 감소해 이후에는 주로 지하 핵실험이 이루어지고 있다. 현재까지의 핵실험을 통해 발생한 엑스선과 감마선의 총 집단 유효선량은 약 2.2×10^6 person-Sv이며, 이 선량에 가장 많이 기여하는 방사성 핵종은 ^{137}Cs , ^{95}Zr , ^{54}Mn , ^{106}Ru , ^{95}Nb , ^{125}Sb , ^{140}Ba , ^{144}Ce , ^{101}Ru , ^{131}I , ^{141}Ce 이다(UNSCEAR, 1993).

핵무기 실험이 이루어진 곳에서 가까운 지역에 거주하는 사람들이 더 높은 선량의 방사선을 받은 것으로 확인되었으나, 이 수치는 실험이 이루어지던 당시의 여러 조건에 따라 차이가 있었다. 미국 네바다에서는 1951년부터 1962년까지 약 100회의 핵실험이 이루어졌는데 이때 약 180,000명의 지역 인구가 피폭된 집단선량은 약 500person-Sv로 추정되며(Anspaugh, 1990), 이는 1인당 평균 약 3mSv에 해당한다.

1954년 마셜 군도의 비키니 환초에서 미국의 핵실험이 이루어진 후에는 그곳에서 동쪽으로 각각 210km와 570km에 있는 룡겔라프 환초와 우티리크 환초에 거주하는 주민들이 가장 많은 외부 피폭을 받은 것으로 나타났다. 이는 주로 단 반감기 방사성 핵종에 의한 것이며 피폭선량은 룡겔라프에서 1,900mSv(67명, 태아 3명 포함), 룡겔라프 인근 아일링기나에 환초에서 1100mSv(19명, 태아 1명 포함) 및 우티리크에서 100mSv(167명, 태아 8명 포함)이었다(Conard, 1980).

원자력 발전으로 인한 피폭

UNSCEAR(1993)는 연간 1GW의 전기 에너지를 생산할 때 채광 및 제분, 농축 및 연료 제조, 원자로 작동, 연료 처리 및 폐기물 처리에 이르기까지 전 생산 과정에서 발생할 수 있는 피폭의 총 집단 유효선량을 추산했다.

X선과 감마선으로 인한 피폭은 대부분 내부 피폭으로 인한 것이므로 피폭선량을 정확히 추산할 수 없었으나, 외부 피폭선량만을 고려한 부분 집단유효선량은 대략 2person-Sv per GW-year 이었다. 전 세계의 원자로에서 연간 약 2,000GW의 전력이 생산된다고 가정하면 외부 피폭에 의한 부분 집단유효선량은 약 400person-Sv로 이는 세계 인구에 대해 1인 평균 약 0.1 μ Sv에 해당한다.

또한 원자로에서 배출되어 전 세계적으로 분포하고 있는 장 반감기 방사성 핵종으로 인한 피폭 또한 원자력 발전으로 인한 피폭의 한 요소이다. 이들 핵종 중에서는 반감기가 약 10년인 85Kr만이 유의미하게 외부 피폭에 기여하고 있다. UNSCEAR(1993)에 따르면 이로 인한 연간 유효집단선량은 2person-Sv per GW-year로 이는 1인당 평균 0.1 μ Sv에 해당한다.

사고로 인한 피폭

핵무기의 생산과 운송은 여러 사고를 초래했다. 그중 가장 심각한 두 사고는 모두 1957년 영국 윈드스케일(Windscale) 원자력 단지와 구소련의 키시팀에서 있었다. 원자력 발전소에서 발생한 사고 중 주요한 사고는 1986년 우크라이나 체르노빌 원전 사고와 후쿠시마 원전 사고이다.

키시팀 사고는 고방사성 핵분열 폐기물이 든 저장 탱크의 냉각 시스템 고장으로 폐기물이 비핵 폭발을 일으켜, 2~50메가퀴리의 방사성 물질이 누출된 사고였다(UNSCEAR, 1993; Burkart & Kellerer, 1994; Burkart, 1996).

1957년 영국 셀라필드(Sellafield) 원자력 단지 내 군수용 플루토늄 생산용 원자로인 윈드스케일 원자로 1호기에서 화재가 발생했다. 이때 발생한 화재로 방사성 물질인 우라늄, 흑연 등을 포함한 연기가 영국 일부 지역과 북유럽 일부로 퍼져나가 방사선피폭이 발생했다. 이 사고 후 방사성 물질 섭취의 주된 경로가 될 수 있는, 공장 주변에서 생산된 오염된 우유는 몇 주간 판매 금지되었다. 이 사고로 인한 북유럽 지역의 외부 피폭은 총 집단유효선량 300person-Sv 였고(Crick & Linsley, 1984), 전체 피폭의 총 집단유효선량은 2000person-Sv로 추산되었다(UNSCEAR, 1993).

역사상 최악의 원자로 사고로 불리는 체르노빌 사고는 4개의 원자로 중 하나에서 증기 폭발과 화재가 발생해 원자로가 파괴되었으며, 그에 따라 다량의 방사성 물질이 누출된 사고였다. 사고로 인한 집단유효선량은 약 600,000person-Sv로 추산되며, 그중 약 절반은 외부 피폭에 의한 것이었다(UNSCEAR, 1988). 외부 피폭은 주로 137Cs에 의해 발생했다. 북반구 전역에서 개인이 피폭된 선량은 매우 다양했는데, 사고 현장에서 근무했던 일부 직원과 구조 대원은 4Sv 이상으로 치사량에 해당하는 선량을 받았고, 대피 구역에서도 가장 많이 피폭된 사람들은 0.5Sv에 가까운 유효선량을 받았다(Savkin, M.N, 1996).

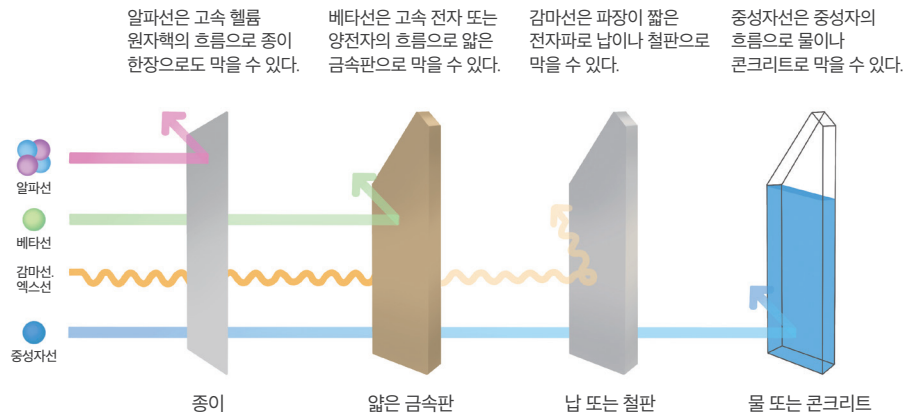
일본의 후쿠시마 원자력 발전소 사고는 도호쿠 지방 태평양 해역지진과 지진해일로 인해 도쿄 전력이 운영하는 원자력 발전소의 원자로에서 발생한 누출 사고다. 체르노빌 원자력 발전소 사고에 이어 국제 원자력 사고 등급의 최고 등급을 기록했다. 이 사고로 대기, 토양, 고인 물, 바다, 지하수에 방사성 물질이 누출되었다. 원전 부지 및 인근에서는 플루토늄, 요오드, 세슘, 코발트 등의 방사성 물질이 검출되었고, 세슘은 대지로 최대 2만 조 베크렐, 바다로 6천 조 베크렐이 방출된 것으로 추산되었다. 원전에서 200km 이상 떨어진 도쿄에서도 방사성 물질이 발견되었고, 각종 농수산물에서도 높은 수치의 방사성 물질이 검출되었다. 대기와 바다를 통해 세계 전역으로 퍼져나갔고, 우리나라 대기 중에서도 요오드, 세슘 등이 검출되었으나 유의미한 변화는 없었다.

02

방사선의 영향

방사선의 투과력

여러 종류의 방사선 중 알파선은 양성자 2개와 중성자 2개로 이루어진 알파입자의 흐름으로 물질과의 전자기적 상호작용이 강해 투과력이 떨어지므로 얇은 종이 한 장으로도 차폐시킬 수 있다. 베타선은 고속 전자 또는 양전자의 흐름으로 알파선보다 무게는 적고 투과력이 크지만 수 mm 정도의 얇은 금속판으로도 차폐시킬 수 있다. 중성자선은 중성자의 흐름으로 전기적으로 중성이기 때문에 투과력이 매우 큰 것이 특징이다. 하지만 수소와 충돌했을 때 에너지를 급격히 잃어버리는 특징이 있어 물로 차폐할 수 있다. 입자 방사선과 달리 감마선과 X-선은 질량과 전하가 없는 전자파로서 물질과의 상호작용이 매우 적어 투과력이 매우 큰 특성이 있다. 일반적으로 두꺼운 납이나 콘크리트같이 높은 원자번호와 밀도를 가진 물질로 차폐할 수 있다.



출처 | 한국원자력연구소(<https://www.kaeri.re.kr/board?menuId=MENU00455>)

방사선의 피폭 종류

01 외부 피폭

CT 검사같이 신체 외부에 있는 선원에서 방출된 전자파나 빛, 입자 형태의 방사선에 의한 피폭을 말한다. 외부 피폭으로 인해 신체 내에 방사성 물질이 새로 생겨나거나 남지는 않는다. 외부 피폭은 사람이 그 자리를 피하거나 선원을 다른 곳으로 옮기면 더 이상 발생하지 않는다. 밀봉 선원을 사용하거나 방사선 발생 장치를 이용하는 대부분의 산업체 등에서 일어나는 피폭은 이러한 외부 피폭이다. 외부 피폭에 의한 암 발생 사례로는 일본 원폭 피해자들에서 백혈병 증가가 있다.

방사선의 인체 영향

02 내부 피폭

방사성 물질에 오염된 공기를 코로 흡입하거나, 오염된 물 또는 음식물 등을 먹거나, 피부를 통해 신체 내부로 방사성 물질이 들어오는 것을 말한다. 방사성 물질이 붕괴 또는 소멸되거나 또는 배출될 때까지 계속 피폭된다. 내부 피폭에 의한 암 발생 사례로는 체르노빌 원전 사고 시 주변 지역의 소아갑상선암 증가가 있으며, 이는 방사성 옥소에 오염된 우유 섭취에 따른 것이었다.

01 급성 영향 - 급성 방사선 증후군(Acute radiation syndrome, ARS)

인체가 짧은 시간에 고선량의 방사선을 받으면 조직 및 기관에 손상이 일어나 질병이 발생할 수 있다. 이러한 장애 증상은 수 시간에서 수 주일 내에 나타난다. 급성 방사선 증후군은 약 1Gy 이상의 방사선을 전신 또는 신체의 많은 부분에 단시간 받는 경우 발생할 수 있으며, 드물게는 다량의 방사성 핵종을 섭취하는 사고 시에도 발생할 수 있다. 방사선에 민감한 세포들(빠른 재생주기를 갖는 림프구 등의 조혈세포, 장세포, 생식세포)이 주로 영향을 받으며, 전신에 4Gy를 받을 때 30일 내 사망률은 50%에 이르는 것으로 알려져 있다.

<노출 선량 등급별 급성 방사선 증후군 증상>

구분	경미(1~2Gy)	보통(2~4Gy)	심각(4~6Gy)	극심(6~8Gy)	치명적(>8Gy)
구토	2시간 후 (10~50%)	1~2시간 후 (70~90%)	1시간 이내 (100%)	30분 이내 (100%)	10분 이내 (100%)
설사	없음	없음	3~8시간, 10%미만, 경미	1~3시간, 10%이상, 심함	1시간 이내, 거의, 심함
두통	경미	약간	4~24시간, 50%, 보통	1~3시간, 10%이상, 심함	1~2시간, 거의, 심함
의식	정상	정상	정상	약간 이상	수십분 내, 50Gy에서 100% 혼수
체온	정상	1~3시간, (70~90%)	1~2시간, 80~100%, 발열	1시간 이내, 100%, 고열	1시간 이내, 100%, 고열
의료대응	외래관찰	일반병원 관찰, 필요 시 전문병원 치료	전문병원 치료	전문병원 치료	통증완화치료 (대증치료만)

출처 | 방사선방호원론, 한국방사선진흥협회(2016)

02 만성 영향 - 만성 방사선 증후군(Chronic radiation syndrome, CRS)

만성 영향의 방사선에 노출 후 생애 기간에 나타나는 증상으로 대표적인 예로는 암, 백내장 등이 있다. 잠복기간이 수십 년에 이르기도 하며 방사선 피폭에 따른 발암의 경우 잠복기간은 피폭된 기관 또는 조직의 종류, 연령에 따라 차이가 있으나 대체로 10~30년 정도로 추정하고 있다. 다만 방사선 피폭에 의한 영향과 동일한 증상은 방사선 이외의 원인에 의해서도 발생할 수 있으므로 암 또는 백내장 등이 방사선 피폭으로 발생한 것인지 다른 원인에 의해서 발생한 것인지를 판별하기 쉽지 않다.

03

발암성

암은 누구에게나 생길 수 있으므로 암 또는 백혈병의 발생이 방사선 피폭에 의한 것인지, 다른 원인에 의한 것인지를 판별하기란 쉽지 않다. 최초의 DNA 돌연변이로부터 세포 분열의 단계마다 무작위성이 개입되어 암이 발생하는 데에 대한 이러한 단계를 역으로 추정하기 어렵기 때문이다. 따라서 방사선 피폭과 암 발생의 상관관계는 개별적 추정이 아니라 통계적인 법칙이 성립하는 대규모 집단 간의 비교를 통해 추론하는 역학적 방법으로 도출할 수밖에 없다. 실제로 일본의 원폭 피해자 집단과 비피폭자 집단 간의 암 발병률을 비교한 연구에서 다량의 방사선에 노출된 경우 암 발생 확률이 높아지는 것으로 보고되었다.

구분	분류
IARC(국제암연구소)	Group 1(인간에게 발암성이 확인된 물질)
NTP(미국 국립 독성 프로그램)	K(인체에 대한 발암성물질로 알려진 물질)

인체 발암성

01 고형암

일본의 히로시마 원폭 피해자를 추적 조사한 수명 연구에서 방사선 관련 고형암 사망률에 대한 위험을 보고했다. 코호트 대상자 86,611명 중 47,529명이 사망했으며, 이 중 10,085명(21%)이 고형암으로 사망했다. 고형암으로 사망한 대상자 중 479명이 방사선 피폭과 연관성이 있는 것으로 보고되었다(Preston et al., 2004). 또 다른 원폭 피해자를 대상으로 진행한 연구에서는 히로시마와 나가사키의 원폭 피폭자 중에 1958년 시점에서 생존하고 있으며, 이전에 암에 걸린 적이 없는 사람들을 대상으로 연구를 진행했다. 피폭선량은 $DSO_2^{1)}$ 에 근거해 1958년부터 1998년까지 진단된 원발부위암 17,448명의 사례를 분석한 코호트 연구에서 결장 방사선량이 0.005Gy 이상인 암 환자 중 약 850건(약 11%)이 원폭 피폭과 관련된 것으로 보고되었다. 선량 반응 관계는 0~2Gy의 범위에서 선형이었으며, 방사선 관련 위험도는 유의하게 증가하는 것으로 나타났다(Preston et al., 2007).

러시아의 마약(Mayak) 핵 시설 근로자들을 대상으로 추적 관찰한 연구에서는 1948년에서 1997년까지 추적 기간에 마약 핵 시설 근로자 총 21,557명의 평균 누적 선량은 810mGy이었으며, 고형암에 대한 초과비교위험도 ERR/Gy는 0.15(90% CI: 0.09~0.2)로 통계적으로 유의한 것으로 나타났다(Shilnikova NS et al., 2003). 또 다른 근로자 대상으로 진행된 연구에서는 1948년부터 2004년까지 총 22,366명의 근로자를 대상으로 폐, 간, 골암을 제외한 고형암과 방사선 피폭 간의 연관성을 조사했다. 평균 누적 선량은 510mGy이었고, 고형암의 ERR/Sv은 0.07(95%CI: 0.01~0.15)였다. 16개의 암 부위에 대해서는 구강암에서만 ERR/Sv이 1.74(95% CI: 0.37~6.71)로 통계적으로 유의한 것으로 나타났다(Hunter N et al., 2004).

1) 원자폭탄의 방사선 피폭선량 측정 시스템은 피폭자 개개인의 피폭 시의 위치와 차폐 상황에 관한 정보에 근거해 피폭자들의 피폭선량 값을 추정한다. DSO_2 는 2002년에 도입된 선량 추정 방식이다.

02 위암

원폭 생존자 장기 추적 연구의 대상 집단 중 105,427명을 1958년부터 1998년까지 추적한 연구에서 30세에 피폭한 사람의 70세 위암 발생의 초과비교위험도(ERR)는 0.34/Gy(90%CI: 0.22-0.47)에서 초과절대위험도(EAR)는 9.5/10,000인년/Gy(90%CI: 6.1-14)이었다.

히로시마 대학 원폭 방사선 의과학연구소의 대상 집단 35,123명을 1968년부터 1989년까지 추적한

역학 조사에서 피폭선량 구분별 위험도를 분석했고, 피폭 선량이 2.0-2.99Gy군에서 위암 사망의 비교위험도(RR)가 1보다 유의하게 높은 것으로 나타났다.

03 갑상선암

갑상선암의 발생률은 한국과 뉴칼레도니아에서 가장 높게 나타났으며(Ferlay et al., 2010a, b), 많은 사람들이 갑상선암은 환경적이나 의학적인 원인으로 갑상선이 방사성요오드에 피폭되어 발생한다고 보고되고 있다. 특히 ¹³¹I에 대한 피폭은 대기 중 핵무기 실험, 원자력 발전소 및 핵무기 생산 시설의 우발적 또는 일상적 방출로 발생하므로 관심이 높은 암종이다(UNSCEAR, 2000a). 스웨덴과 미국에서 20세 미만방사선에 피폭된 사람들 602명 대상으로 평균 10년을 추적 관찰하여 암 발생 위험을 추산한 결과, 갑상선에 대한 평균 선량은 약 88Gy이었다. 갑상샘암은 총 2건이 보고되었고, Gy당 초과상대위험²⁾은 0.3(90%CI: 0.0-0.9)였고, Gy당 초과절대 위험³⁾은 0.1×10^{-4} 인년(90%CI: 0.0-0.2)였다.

20km 이내 거주자의 갑상선암 위험은 증가한 결과가 있었다. 원자력발전소 5km 이내에 거주하는 여성들의 갑상선암 발병률은 원전과 멀리 떨어진 지역에 사는 여성들에 비해 2.5(95%CI: 1.43-4.38)배 유의하게 높았고, 5~30km 거리에 거주하는 여성들의 발병률은 1.8(95%CI: 0.98-3.24)배 높은 것으로 나타났다(Ahn, Y. O. et al., 2012).



- 2) 피폭 집단의 질병 발생률을 피폭하지 않은 집단의 질병 발생률로 나누고, 그 값에서 1을 뺀 값
- 3) 피폭 집단의 질병 발생률과 사망률에서 피폭하지 않은 집단의 질병 발생률과 사망률을 뺀 값

04 식도암

일본의 수명 연구 결과에서는 식도암의 초과상대위험에 대한 연구 결과를 보고했다.(Preston et al., 2007). 식도암의 발생은 352건이었고, Sv당 초과상대위험은 0.52(90%CI: 0.15-1.0)로 보고했다. 수명 연구 사망 데이터에서 224명의 사망이 보고되었고, Sv당 초과상대위험은 남성의 경우 0.61(90%CI: 0.15-1.2)이었다.

05 침샘암

일본의 원폭 생존자 연구 데이터(Land et al., 1996)에서 두경부 양성 질환으로 어린 시절에 방사선 치료를 받은 환자를 대상으로 한 연구 결과를 보고했다. 그 결과 침샘암에 대해 통계적으로 유의한 양의 선량-반응 관계가 있었다(Schneider et al., 1998). 일본 원폭 생존자의 발생 데이터에서 31건이 보고되었고, Sv당 초과상대위험은 악성 종양의 경우 4.47(90%CI: 2.45-8.46)이고, 양성 종양은 1.71(90%CI: 1.13-2.71)이었다.

06 유방암

Boice et al. (1992)는 미국 코네티컷에서 1935년부터 1982년까지 유방암 진단을 받은 41,109명을 대상으로 환자-대조군 연구를 수행했다. 1,189명의 대조군과 원발성 유방암 진단받고 5년 이상 경과 후 두 번째 유방암 진단을 받은 환자군 655명을 대상으로 수행한 연구 결과, 방사선 치료(평균 2.8Gy)를 받은 45세 미만 여성들의 반대쪽 유방에서 암 발생 위험이 유의하게 증가하는 것으로 나타났다(RR, 1.6, 95%CI, 1.1-2.4, n=78). 하지만 14,000명의 캐나다의 코호트 내 환자-대조군 연구에서는 방사선 치료(평균 2.0~3.3Gy)를 받은 대상자들에게서 반대쪽 유방암에 대한 초과 위험은 나타나지 않았다(RR, 0.99; 95%CI, 0.76-1.3)(Basco et al., 1985).

07 기타 암(코호트 연구, 환자 대조군 연구, 메타 분석 등 연구 제시)

A. IARC 15개국 연구

IARC는 원자력 산업 종사자들의 암 발생 위험에 대한 공동 연구를 수행했다. 분석 시 외부 피폭(주로 γ 선)에 대해 개별적으로 모니터링 되고, 최소 1년 동안 업계에 고용된 407,391명의 원자력 산업 종사자를 포함했다(Cardis et al., 2007).

원전 종사자의 백혈병 위험도 증가는 없었으며 고형암 위험도가 약간 증가하는 것으로 나타났다. 하지만 15개국 자료의 통합 분석 과정에서 흡연에 의한 잠재 효과의 통제 실패, 캐나다 자료의 불확실성 등으로 인해 연구 결과의 신뢰성에 많은 의문이 제기되었으며 현재 15개국 연구를 보완하기 위한 후속 연구의 필요성이 제기되고 있다.

B. 영국 방사선 종사자 코호트

영국 NRRW(National Registry for Radiation Workers)에 포함된 많은 근로자가 IARC 15개국 연구에 포함되었지만 Muirhead의 연구에서는 NRRW를 기반으로 직업적으로 전리방사선에 노출된 174,541명의 사람들을 대상으로 사망률과 암 발생률에 대한 확장된 연구를 보고했다.

영국 National Registry for Radiation Workers에 등록된 방사선 종사자 연구에서 모든 암에 대한 사망이 일반 인구의 사망보다 낮다고 보고했다(SMR 0.84, 95%CI 0.82-0.86). 폐암은 유의하게 낮은 사망률을 보였고, 이것은 영국의 원전 노동자 연구 결과와도 유사했다(SMR 0.76, 95% CI 0.73 -0.80).





C. 일본 RERF(Radiation Effects Reserach Foundation)의 코호트 연구

일본의 방사선영향연구소(RERF)에서는 1950년대부터 원폭 생존자 코호트를 구축해 연구를 수행하며, 주기적으로 연구 결과를 발표하고 있다.

코호트는 1950년 일본의 인구 총조사 기준 히로시마와 나가사키에 거주했다고 확인된 사람 중 피폭자와 비피폭자로 구성된 수명 연구 코호트(Life Span Study, LSS), 태내 피폭자 코호트(In-utero exposure, IU), 피폭자 자녀 코호트(F1 generation)로 구성되었다.

수명 연구에서는 수명 연구 코호트의 사망률과 암 발생률을 추적 조사하며, 태내 피폭자 연구에서는 원폭 투하 당시 태내에 있었던 사람들의 건강 상태를 조사했다.

동물 실험에서 나타난 암

종류	실험결과
 <p>마우스(Mouse)</p>	<ul style="list-style-type: none"> 저선량 방사선 노출에서 방사선에 노출된 쥐에서의 발암을 실험한 연구 결과, 고형암에서 영향을 보였다. 표본 크기는 작았지만 연구는 저선량 방사선에서 핵분열 스펙트럼과 단일 에너지 중성자의 발암 효과에 대한 명확한 증거를 제공한다고 보고했다(Di Majo et al., 2003). 아르곤 국립 연구소에서 감마선과 중성자에 급성 및 부분적으로 노출된 쥐 15,975마리의 폐암 위험에 대해 연구한 결과, 저선량 중성자의 노출 효과가 감마선보다 약 10배 더 높은 것으로 나타났다(Heidenreich et al., 2006).
 <p>랫드(Rat)</p>	<ul style="list-style-type: none"> 총 191마리의 암컷 Sprague-Dawley 쥐(61~63일)에게 0.30 Gy min⁻¹의 선량률에서 0.28, 0.56 또는 0.85Gy의 250kVp X-선을 전신 단일 선량으로 노출시켜 연구를 수행했다. 연구 결과, 래트의 수명(1033-1053일) 동안 유선암화 과정을 관찰했으며 신생물은 조직병리학적으로 선암종 또는 섬유선종으로 확인되었다. 유선 종양의 발생률은 대조군에서 67%, 방사선 조사군에서 각 72%, 77% 및 79%였으며, 모든 유선 종양, 특히 섬유선종에서 용량 의존적 증가를 보였다(Shellabarger et al., 1980). 과거 데이터에서 Sprague-Dawley 암컷 쥐의 치사율이 높은 다양한 종양의 유도에 대해 엑스선 및 감마선과 비교해 핵분열 스펙트럼 중성자의 효과를 조사했다. 분석에 따르면 20mGy의 선량에서 중성자는 발암성과 관련해 감마선보다 약 50배 더 효과적이었다(Wolf et al., 2000).
 <p>토끼(Rabbits)</p>	<ul style="list-style-type: none"> 21마리의 수컷 및 암컷 네덜란드 토끼 그룹에 17.6Gy h⁻¹의 선량률에서 4.4-14.1Gy의 2.5MeV γ선을 조사했다. 대조군의 24%, 4.4Gy에서 75%, 8.8-10.6Gy에서 88%, 11.5-14.1Gy에서 56%에서 종양이 발견되었다. 종양에는 턱의 골육종 4개, 진피의 섬유육종 5개, 피부의 기저 세포 종양 6개가 포함되었다(Hulse, 1980).
 <p>원숭이 (Rhesus monkeys)</p>	<ul style="list-style-type: none"> 방사선 노출 후 원숭이의 종양 형성을 연구한 결과, 방사선 노출이 보고되었다. 20마리의 동물에게 2.8-8.6 Gy 범위의 선량이 노출되었고 평균 선량은 7.1Gy였다. 21명의 대조군(각각 30% 및 28.4년)과 비교해 악성 종양의 빈도 증가(50%) 및 감소된 잠복기(12년)가 관찰되었다. 보이는 종양은 매우 다양했으며, 신장 피질 암종의 특정 증가(대조군에서는 발견되지 않음)가 관찰되었고(38%, 8/21), 양성 종양 증가도 나타났다(Broerse et al., 2000; Hollander et al., 2003).

방사선으로 인한 역학 연구

역학이란 질병을 포함한 건강과 관련된 이슈들의 발생 분포 경향과 그 원인 및 위험 요인 등을 조사하는 학문으로 일반적으로 인간 집단을 대상으로 한다. 방사선 피폭의 인체 영향에 대한 과학적인 견해는, 생물학적 연구와 함께 역학적 연구를 토대로 이루어지며 역학연구의 일차적인 목적은 방사선 피폭 인구, 집단의 다년간 추적 조사를 통해 방사선과 질병의 관련성을 조사하고 이를 정량화하는 데 있다.

방사선 역학은 다른 역학 분야보다 상대적으로 풍부한 자료원과 정량적 지표들을 가졌으나, 역설적으로 불확실성에 대한 연구와 논의가 많이 진행되었다. 방사선 역학에서는 불확실성 연구 자체에 집중하는 것뿐 아니라 이것을 실제에 적용하는 것도 중요하다. 불확실성이 존재할 때 어떻게 해야 하는지에 대해서는 이미 몇 가지 원칙들이 보건학적 차원에서 제안되어 적용되고 있다.

방사선의 생물학적 영향

01 결정론적 영향(조직 반응)

기관 또는 조직에서 많은 세포가 사멸할 때만 결과가 발생하는 영향이라면, 방사선량이 어떤 문턱을 넘을 때만 영향이 관찰될 것이다. 문턱의 높이는 선량률(즉, 단위 시간당 선량), 방사선의 에너지 전달 선밀도, 피폭 조직이나 기관, 조직이나 기관 피폭 부위의 부피, 관심 임상 영향 등에 의존한다. 문턱을 넘어 선량이 증가하면, 발생 확률은 100%로 빠르게 치솟고(피폭당한 모든 사람에게서 영향이 나타난다), 선량 증가에 따라 영향의 심각도가 증가한다. ICRP는 이러한 영향을 '결정론적(조직 반응)'이라 부르는데, 결정론적 영향에 대한 상세한 토론과 정보를 ICRP 103(2007a)에서 제공했다. 이러한 영향은 방사선 치료나 중재적 시술, 특히 절차가 복잡해 긴 투시 시간을 요구하거나 영상을 다수 얻어야 하는 형광투시 유도 중재적 방사선 시술에 전리방사선을 사용하는 데서 발생할 수 있다.

02 확률론적 영향(암과 유전 영향)

단일 세포 DNA의 방사선 손상도 생식 능력이 있는 세포의 변형 원인이 될 수 있다는 데는 세포학적 또는 분자생물학적 증거가 충분하다. 일반적으로 매우 효과적인 신체의 방어에도 불구하고, 이러한 유형의 손상이 발생한 경우에는 방사선과 무관한 다른 작용제의 촉진 작용에 의해 악성 상태(신체적 영향)로 진행할 확률이 다소 있다. 확률이 낮은 만큼 이러한 영향은 피폭한 사람 중 극소수에서 발생한다. 처음 손상이 생식세포에 있었다면 유전 영향이 일어날 수 있다. 방사선이 원인인 확률론적 영향의 확률은 선량에 따라 증가하고 낮은 선량에서는 아마도 선량에 비례할 것이다. 높은 선량과 선량률에서는 확률이 단순 비례보다 높게 증가하기도 한다. 결정론적 영향의 문턱에 가까운 더 높은 선량에서는 경쟁 영향인 세포 치사 때문에 확률의 증가는 완만해지고 감소하기 시작한다. 신체적이거나 유전적인 이러한 영향을 '확률론적'이라 한다. 이러한 영향의 확률은 전리방사선을 의료 절차에 사용할 때에도 증가한다.

위험 관리 이슈 사례

01 직업 관련 노출

국내의 방사선 사고는 방사성 동위원소를 이동 사용하는 비파괴 검사 작업장에서 발생하거나 의료 분야에서 방사선 발생 장치의 품질 관리나 선량 계산 오류에 기인한 과피폭이 대부분이다.

우리나라에서 방사선을 처음 사용하기 시작한 것은 1960년대부터지만 방사선 사고 통계는 1970년대부터 시작되었다. 그러나 1970~1980년대의 모든 사고가 통계에 포함되지 못했고, 많은 수의 사고가 보고되지 않거나 대응했다 해도 통계에는 잡히지 않았다. 방사선 피폭에 의한 급성 장해를 제외한 방사선 사고의 유형은 방사선 조사기 분실 사고와 도난 사고가 압도적 다수를 차지했고 방사능 오염 사고와 화재 사고가 뒤를 이었다.

02 의료인 방사선 노출

의료 방사선 종사자는 방사선 종사자 중 가장 큰 그룹을 차지하며 전 세계적으로 빠르게 증가하고 있다. 저선량 방사선의 장기간 노출은 암, 백내장, 심혈관 질환, 갑상선 질환 등을 포함한 많은 만성 질환의 위험을 증가시키며, 한국 의료 방사선 종사자는 일반인보다 사망률이 더 높았다. 남성 종사자는 낮은 전체 사망률을 보정한 후 모든 암, 백혈병, 위암과 대장암, 순환계 질환에서 더 높은 사망률을 보였다.

05

방사선 피폭량의 허용 기준

세계 각국은 병원 등 의료기관에 설치된 방사선 의료기기에서 발생하는 방사선의 위험으로부터 방사선 관계 종사자들을 보호하기 위해, 종사자의 방사선 피폭선량을 주기적으로 모니터링하고, 그 결과를 국제방사선방어위원회(International Commission on Radiological Protection, ICRP)의 권고에 따라 관리하고 있다. 우리나라에서는 피폭선량관리센터(National Dose Registry, NDR)를 2004년부터 설치해 운영하고 있으며 이에 따라 관리되는 방사선 관계 종사자는 2011년 60,430명에 이른다.

구분	방사선 관계 종사자	일반인(자연방사선, 직업상피폭, 의료상피폭을 제외한 상황)
유효선량	5년간 100mSv (20mSv/년) (단 특정 1년에 한하여 50mSv까지 허용)	연간 1mSv
특정 장기의 등가선량 - 수정체 - 피부 - 손, 발	연간 150mSv 연간 500mSv 연간 500mSv	연간 15mSv 연간 50mSv -

06

비상 사태 시의 보호 방법

원자력 발전소 사고나 테러 사건같이 대규모 방사선이 방출된 경우, 그 심각성과 피해 예상 정도에 따라 백색비상, 청색비상, 적색비상으로 구분하고 각각의 비상 상황에 맞게 정부와 한국원자력 연구원은 방사선비상대응기구를 조직하고 관련 인력을 편성해 방사선 비상에 대비하고 있다.

백색비상



- 방사선 물질 누출의 영향이 원자력 시설 건물 내에 국한될 것으로 예상되는 경우

주민 행동요령

평상시와 같이 생활

정부

예비현장지휘센터 발족운영

지자체

언론 등을 통해 대국민공개

청색비상



- 방사선 물질 누출의 영향이 원자력 시설 부지 내에 국한될 것으로 예상되는 경우

주민 행동요령

상황을 예의주시하며 대피준비

정부

중앙방사능방재대책본부 발족 운영, 현장방사능방재지휘센터 발족 운영

지자체

주민보호조치 준비

적색비상



- 방사선 물질 누출의 영향이 원자력 시설 부지 밖까지 미칠 것으로 예상되는 경우

주민 행동요령

지자체 안내에 따라 질서 있게 대피

정부

주민보호조치 결정, 비상대응 및 사고수습 통제

지자체

주민보호조치 준비

| 출처 | 한국원자력연구소(<https://www.kaeri.re.kr/board?menuId=MENU00455>)

관계 법령

원자력안전위원회 고시「원자력안전법」은 원자력의 연구·개발·생산·이용 등에 따른 안전관리에 관한 사항을 통해 방사선에 의한 재해 방지와 공공의 안전에 필요한 사항을 규정하고 있다.

또한 원자력 시설의 방사선 비상 계획 구역에 관한 세부 기준(제 13조 관련)을 수립하고 시설 등의 방호 및 방사능 방제 대책법 시행규칙을 마련해 관리하고 있다.

방사선으로 인한 장애를 방지하기 위해 필요한 방사선 안전관리 등의 기술기준에 관한 사항을 ‘방사선 안전관리 등의 기술 기준에 관한 규칙’에 따라 관리하고 작업실, 공장 시설뿐 아니라 제3절에 의료 분야까지 기준에 맞게 관리하도록 하고 있다.

고용노동부에서는 「산업재해보상보험법」 제5조제1호에 따라 방사선 작업 종사자 등의 산업 재해(업무상 사고, 질병) 인정과 보상에 관한 사항을 규정해 관리하고 있다.

REFERENCES

- Anspaugh, L.R., Ricker, Y.E., Black, S.C., Grossman, R.F., Wheeler, D.L., Church, B.W. & Quinn, V.E. (1990) Historical estimates of external gamma exposure and collective external gamma exposure from testing at the Nevada test site. II. Test series after Hardtack II, 1958, and summary. *Health Physics*, 59, 525-532
- Ahn, Y. O., & Li, Z. M. (2012). Cancer risk in adult residents near nuclear power plants in Korea—a cohort study of 1992–2010. *Journal of Korean medical science*, 27(9), 999-1008.
- Aubert, Bernard, et al. *ICRP Publication 105. Radiological Protection in Medicine*. Elsevier; 2007
- Basco, V.E., Coldman, A.J., Elwood, J.M. & Young, M.E.J. (1985) Radiation dose and second breast cancer. *British Journal of Cancer*, 52, 319-325
- Boice, J.D., Jr, Harvey, E.B., Blettner, M., Stovall, M. & Flannery, J.T. (1992) Cancer in the contralateral breast after radiotherapy for breast cancer. *The New England Journal of Medicine*, 326, 781-785
- Broerse, J. J., Bartstra, R. W., van Bekkum, D. W., van der Hage, M. H., Zurcher, C., van Zwieten, M. J., & Hollander, C. F. (2000). The carcinogenic risk of high dose total body irradiation in non-human primates. *Radiotherapy and Oncology*, 54(3), 247-253.
- Burkart, W. & Kellerer, A., eds (1994) A first assessment of radiation doses and health effects in workers and communities exposed since 1948 in the Southern Urals. *Science of the Total Environment*, 142, 1-125
- Burkart, W. (1996) Radioepidemiology in the aftermath of the nuclear program of the former Soviet Union: Unique lessons to be learnt. *Radiation and Environmental Biophysics*, 35(2), 65-73
- Cardis, E., Anspaugh, L., Ivanov, V.K., Likh tarev, I.A., Mabuchi, K., Okeanov, A.E. & Prisyazhniuk, A.E. (1996) Estimated long term health effects of the Chernobyl accident, In: *One Decade after Chernobyl: Summing up the Consequences of the Accident*, Vienna, International Atomic Energy Agency, 241-279
- Charles, Monty W. (2008). *ICRP Publication 103: Recommendations of the ICRP*. 500-507.
- Conard, R.A., Paglia, D.E., Larsen, R.P., Sutow, W.W., Dobyns, B.M., Robbins, J., Krotosky, W.A., Field, J.B., Rall, J.E. & Wolff, J. (1980) *Review of Medical Findings in a Marshallese Population Twenty-six Years after Accidental Exposure to Radioactive Fallout*, Brookhaven National Laboratory Report BNL 51261.
- Crick, M.J. & Linsley, G.S. (1984) An assessment of the radiological impact of the Windscale reactor fire, October 1957. *International Journal of Radiation Biology*, 46:479-506
- Di Majo V, Coppola M, Rebessi S, Covelli V (1990). Age-related susceptibility of mouse liver to induction of tumors by neutrons. *Radiation Research*, 124, 227-234.
- Ferlay, J., Bray, F., Pisani, P., et al. (2002) GLOBOCAN 2002. Cancer Incidence, Mortality and Prevalence Worldwide, version 2.0. *IARC CancerBase*.
- Gilbert, Ethel S., et al. (2003) Lung cancer after treatment for Hodgkin's disease: focus on radiation effects." *Radiation Research*, 159(2), 161-173.
- Heidenreich WF, Carnes BA, Paretzke HG (2006). Lung cancer risk in mice: analysis of fractionation effects and neutron RBE with a biologically motivated model. *Radiation Research*, 166, 794-801.
- Hollander, C. F., Zurcher, C., & Broerse, J. J. (2003). Tumorigenesis in high-dose total body irradiated rhesus monkeys—a life span study. *Toxicologic pathology*, 31(2), 209-213.
- Hulse, E. V. (1980). Tumour incidence and longevity in neutron and gamma-irradiated rabbits, with an assessment of RBE. *International Journal of Radiation Biology and Related Studies in Physics, Chemistry and Medicine*, 37(6), 633-652.
- Hunter, N., Kuznetsova, I. S., Labutina, E. V., & Harrison, J. D. (2013). Solid cancer incidence other than lung, liver and bone in Mayak workers: 1948-2004. *British journal of cancer*, 109(7), 1989-1996.
- IARC Monographs Working Group. "Ionizing Radiation, Part 1 X-and Gamma (γ)-Radiation and Neutrons." IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, 2000(75).
- IARC. (2012). IARC Monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans. *Radiation. IARC Monogr Eval Carcinog Risks Hum*, 100D: 210
- IARC Monographs Working Group. "Radiation," IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, 2012(100D).
- Karlsson, P., Holmberg, E., Johansson, K.-A., Kindblom, L.-G., Carstensen, J. & Wallgren, A. (1996) Soft tissue sarcoma after treatment for breast cancer. *Radiotherapy And Oncology*, 38, 25-31
- Land, C.E., Saku, T., Hayashi, Y., Takahara, O., Matsuura, H., Tokuoka, S., Tokunaga, M. & Mabuchi, K. (1996) Incidence of salivary gland tumors among atomic bomb survivors, 1950-1987. Evaluation of radiation-related risk. *Radiation Research*, 146, 28-3
- MATSUJURA, M. HOSHI, N. HAYAKAWA, H. SHIMOKATA, M. OHTAKI, M. IKEUCHI and F. KASAGI, M. (1997). Analysis of cancer mortality among atomic bomb survivors registered at Hiroshima University. *International journal of radiation biology*, 71(5), 603-611.
- Muirhead, C. R., O'hagan, J. A., Haylock, R. G. E., Phillipson, M. A., Willcock, T., Berridge, G. L. C., & Zhang, W. (2009). Mortality and cancer incidence following occupational radiation exposure: third analysis of the National Registry for Radiation Workers. *British journal of cancer*, 100(1), 206-212.
- MS Jeong, YW Jin, KH Yang, YO Ahn, CY Cha. (2010). Radiation exposure and cancer incidence in a cohort of nuclear power industry workers in the Republic of Korea, 1992-2005. *Radiation and Environmental Biophysics*. 49(1), 47-55
- Preston, D. L., et al. (2007). Solid cancer incidence in atomic bomb survivors: 1958-1998. *Radiation Research*, 168(1), 1-64.
- Preston, Dale L., et al. (2004). Effect of recent changes in atomic bomb survivor dosimetry on cancer mortality risk estimates. *Radiation Research*, 162(4), 377-389.
- Savkin, M.N., Titov, A.V. & Lebedev, A.N. (1996). Distribution of individual and collective exposure doses for the population in Belarus in the first year after the Chernobyl accident. Bulletin of the All-Russian Medical and Dosimetry State Registry, *Radiation and Risk*, Issue 7, 87-113
- Schneider, G. & Burkart, W. (1998). Health risks of ionizing radiation. *Radiologe*, 38, 719-725.
- Shellabarger, C. J., Chmelevsky, D., & Kellerer, A. M. (1980). Induction of mammary neoplasms in the Sprague-Dawley rat by 430-keV neutrons and X-rays. *Journal of the National Cancer Institute*, 64(4), 821-833.

- Shilnikova NS, Preston DL, Ron E et al. (2003). Cancer mortality risk among workers at the Mayak nuclear complex. *Radiation Research*, 159, 787-798.
- Shore RE (1992). Issues and epidemiological evidence regarding radiation-induced thyroid cancer. *Radiation Research*, 131, 98-111.
- Simon SL, Weinstock RM, Doody MM et al. (2006). Estimating historical radiation doses to a cohort of U.S. radiologic technologists. *Radiation Research*, 166, 174-92.
- United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Sources and effects of ionizing radiation, united nations scientific committee on the effects of atomic radiation (UNSCEAR) 1993 report: report to the general assembly, with scientific annexes. United Nations, 1993.
- Wolf C, Lafuma J, Masse R et al. (2000). Neutron RBE for induction of tumors with high lethality in Sprague-Dawley rats. *Radiation Research*, 154, 412-420.
- EPA “방사선으로부터 자신을 보호하기” <https://www.epa.gov/lep/radiation-protection-korean>
- 김수근 (2014). 직업성 암 인정기준-전리방사선에 의한 직업성 암. 월간산업보건, 319, 43-52.
- 김수근 (2015). 직업성 암 인정기준-전리방사선에 의한 위암. 월간산업보건, 324, 47-57.
- 김수근 (2015). 직업성 암 인정기준-전리방사선에 의한 신장암과 방광암. 월간산업보건, 326, 37-46.
- 김수근 (2015). 전리방사선에 의한 대장암. 월간산업보건, 325, 43-54.
- 이상희 (2015). 현장작업자를 위한 방사선 작업안전, 안전보건공단
- 이재기 (2016). 방사선방호원론 V.1 제1장 방사선과 방사선 피폭, 한국방사선진흥협회
- 식품의약품안전청 (2010). 유해물질 총서(방사능오염), 식품의약품안전청
- 질병관리청. 의료방사선 안전관리 <https://www.kdca.go.kr/contents.es?mid=a20305010000>
- 질병관리청 건강위해정보. <https://www.kdca.go.kr/contents.es?mid=a20205100302>
- 하미나. (2011). 방사선 노출과 암. *임상이비인후과*, 22(2), 275-281.
- 한국원자력연구소 <https://www.kaeri.re.kr/board?menuId=MENU00455>

발암 요인 보고서 (전리방사선)

발간에 참여한 분들

국립암센터 연구진

김병미 국립암센터 암예방사업부

김호선 국립암센터 암예방사업부

최은정 국립암센터 암예방사업부

김세영 국립암센터 암예방사업부

김태월 국립암센터 암예방사업부

영역별 참여 전문가

배상혁 가톨릭대학교

하보람 한림대학교동탄성심병원

한은옥 한국원자력안전아카데미

전리방사선

IONIZING RADIATION

—
발암 요인 보고서

