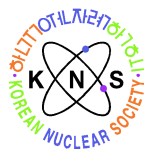


원전주변주민과 갑상선암 발생에 관한 과학적 분석



사단
법인 한국원자력학회
KOREAN NUCLEAR SOCIETY



대한방사선방어학회
The Korean Association for Radiation Protection

한국원자력학회장 귀하
대한방사선방어학회장

본 보고서를 한국원자력학회와 대한방사선방어학회가 공동으로 수행한
“원전주변주민과 갑상선암 발생에 관한 과학적 분석” 보고서로 제출합니다.

2015. 6. 15

보고서 발간위원회

공동위원장:

김교윤 (한국원자력연구원)

박우윤 (충북대학교)

발간위원:

강건욱 (서울대학교)

금동권, 김봉환 (한국원자력연구원)

김광표 (경희대학교)

김병일, 서성원, 진영우 (한국원자력의학원)

김수근 (성균관대학교)

김현정, 안형식 (고려대학교)

정규환, 조건우 (한국원자력안전기술원)

목 차

I. 서론	1
1장. 배경	1
2장. 과학적 분석	2
II. 본론	4
1장. 방사선의 인체영향	4
1.1절 방사선의 개념	4
1. 방사선의 정의	4
가. 방사선이란?	4
나. 방사선의 종류	4
2. 방사선량의 단위	5
3. 방사선의 발생원	7
1.2절 자연방사선 및 인공방사선	8
1. 자연방사선	8
가. 자연방사선의 종류	8
나. 자연방사선에 의한 일반인 피폭선량	11
2. 인공방사선	14
가. 인공방사선의 이용	14
나. 인공방사선에 의한 일반인 피폭선량	17
1.3절 저선량 방사선이 인체에 미치는 영향	20
1. 방사선피폭	20
가. 방사선피폭 유형	20
나. 방사선피폭이 인체에 미치는 영향	21
2. 저선량 방사선이 인체에 미치는 영향	22
가. 저선량 방사선의 정의	22
나. 저선량 방사선 영향에 대한 모델	23
1.4절 피폭선량한도의 의미	25
1. 피폭선량한도의 의미	25
2. 선량한도 권고	26
가. 선량한도 권고치의 변화	26
나. 선량한도 설정 방법	27
다. 국내 선량한도	29
3. 일반인 선량한도 1 mSv의 특징	29
1.5절 참고문헌	31

2장. 원자력발전소 방사선관리	32
2.1절 원자력발전소 방사성물질 배출관리	32
1. 개요	32
2. 방사성물질 배출관리 기본개념 및 원칙	32
가. 배출물의 종류	33
나. 배출물 관리의 대상	33
다. 운영 중 방사성물질 배출관리	33
라. 방사성물질 배출관리 관련 법 및 규칙	34
3. 국내원전의 방사성물질 배출현황	36
2.2절 원자력발전소 주변 방사선/능 환경 감시	37
1. 개요	37
2. 환경감시 조사 계획	38
가. 조사목적	38
나. 조사대상 및 방법	38
3. 환경감시 결과	42
가. 환경방사선	42
나. 환경방사능	44
다. 방사선 환경감시 결과 요약	49
2.3절 원자력발전소 주변 주민 방사선 영향	50
1. 개요	50
2. 주민 방사선량 평가방법	50
가. 인체 방사선 피폭 경로	50
나. 방사선량 평가 기준치	52
다. 방사선량 평가 대상 및 평가지점	53
라. 방사선량 평가 방법	56
3. 주민 방사선량 평가 결과	59
2.4절 참고문헌	61
 3장. 갑상선암 발생에 관한 의학적 분석	 63
3.1절 갑상선암의 일반적인 특징	63
1. 갑상선암의 발생부위	63
2. 갑상선암의 정의 및 종류	63
3. 갑상선암의 위험요인	67
3.2절 갑상선암 발생과 검진과의 관련성	71
1. 갑상선암의 특성	71

2. 갑상선결절과 갑상선암	72
3. 갑상선암의 증가와 검진과의 관련성	73
가. 갑상선암의 조직학적 특성	73
나. 초음파 진단법	74
다. 의료서비스 접근성의 향상	76
4. 우리나라의 문제	77
5. 결론	78
3.3절 참고문헌	80
 4장. 원전주변 역학연구 사례	81
4.1절 국내원전주변 주민 역학조사 배경 및 결과	81
1. 원전역학조사 배경	81
2. 원전역학조사 연구 방법	81
3. 지역주민 암 발생 양상 분석 결과	83
4. 주변주민 암 발생 위험도와 원전 방사선과의 인과관계 분석 결과	85
5. 원전역학조사 지역주민 연구의 최종 결론	89
4.2절 원전주변주민 갑상선암 국외 연구 사례	91
1. 사고로 인한 방사선 노출과 갑상선암 관련성 연구	91
가. 체르노빌	91
나. 후쿠시마	92
다. 스리마일 섬(TMI)	93
2. 원전시설 주변지역의 저선량 방사선 노출과 건강영향	94
가. 원전시설 방사선 노출과 건강영향에 대한 연구특성	94
나. 원전 주변 지역의 갑상선암 발생에 관한 개별 연구	96
다. 결론	98
4.3절 참고문헌	99
 5장. 원전주변 갑상선암 발생의 인과관계	101
5.1절 서론	101
5.2절 상당인과관계	101
5.3절 역학적 인과관계	103
5.4절 속성수준과 사건수준의 인과관계	103
5.5절 인과관계에서 상당성의 본질	104
5.6절 결론	106
5.7절 참고문헌	106
 III. 결론	107

부록. 방사성요오드의 생리역동학(Bio-kinetic) 모델	111
1장. 서론	111
2장. 호흡기 모델	113
3장. 소화기 모델	118
4장. 생리역동학 모델	120
5장. 방사성요오드의 특성	126

표 목차

표1-1 방사선가중치	6
표1-2 유효선량 계산을 위한 조직가중치	6
표1-3 우주방사선의 종류별 존재비율	10
표1-4 선량에 대한 급성피폭의 증상	22
표1-5 국제방사선방호위원회 26 및 60 권고에 따른 선량한도	26
표1-6 국내 원자력안전법에서 제시하는 선량한도	29
표2-1 원자력발전소 운영단계 배출물관리의 구성요소	34
표2-2 방사성물질 배출관리 관련 법 및 규칙	35
표2-3 주요 국가별 원전 액체 방사성물질 배출량 비교	37
표2-4 환경방사선/능 감시목적별 조사항목	38
표2-5 한수원의 환경방사선/능 조사항목별 조사빈도, 조사지점 및 측정항목	39
표2-6 환경방사능 분석을 위한 검출하한치	41
표2-7 식품의약품안전처에서 정한 식품 중 방사능 허용기준	42
표2-8 최근 10년간(2004~2013년) 공간감마선량률	43
표2-9 최근 10년간(2004~2013년) 공간집적선량	44
표2-10 최근 10년간(2004~2013년) 공기 미립자 전베타 방사능 농도	45
표2-11 최근 10년간(2004~2013년) 육상 물시료 중 삼중수소 방사능 농도	46
표2-12 표층토양 중 ^{137}Cs 농도	47
표2-13 표층토양 중 ^{90}Sr 농도	47
표2-14 국내원전의 주민선량 기준치, 원전 적용 피폭경로 및 핵종	53
표2-15 주요 국가별 선량평가 대상개인 설정현황	54
표2-16 부지별, 연도별 주민 방사선량	60
표3-1 갑상선암의 조직학적 형태에 따른 발생 빈도, 2009년 갑상선암 발생 건수	67
표3-2 갑상선암 발생률의 증가가 진단의 증가에 기인한다는 근거	73
표4-1 암 발생 주요 부위별 분포	83
표4-2 지역별 ‘모든 암’ 연령표준화 발생률(남자)	84
표4-3 지역별 ‘모든 암’ 연령표준화 발생률(여자)	84
표4-4 지역별 주민코호트 암 발생률 및 암 발병 상대위험도(남자)	85
표4-5 지역별 주민코호트 암 발생률 및 암 발병 상대위험도(여자)	85
표4-6 지역별 방사선 관련 암 발생률 및 상대위험도(남자)	87
표4-7 지역별 방사선 관련 암 발생률 및 상대위험도(여자)	87
표4-8 주민코호트 입적일까지 거주기간별 ‘모든 암’ 발생률 및 암 발병 상대 위험도(남자)	88
표4-9 주민코호트 입적일까지 거주기간별 ‘모든 암’ 발생률 및 암 발병 상대 위험도(여자)	88
표4-10 주민코호트 입적일까지 거주기간별 ‘방사선 관련 암’ 발생률 및 암 발병 상대 위험도(남자)	88
표4-11 주민코호트 입적일까지 거주기간별 ‘방사선 관련 암’ 발생률 및 암 발병 상대 위험도(여자)	88
표4-12 지역주민 코호트 연구 실적 총괄	89
표4-13 주변지역의 암 발병 상대위험도	90
표4-14 갑상선 초음파 검사 시 진단 기준	92
표4-15 미국 헨퍼드 원전 주변 지역의 방사선량(용량반응)과 갑상선암 누적발생률	97
표[부록-1] 참고인(Reference Worker)이 흡입한 공기입자의 호흡기내 영역별 침착	114
표[부록-2] 흡수형태 (type) F, M, S 물질의 기본적인 흡수율	116
표[부록-3] 소화기관 내에서의 방사성핵종의 이동특성을 기술하는데 사용된 모델의 주요 입력변수	119
표[부록-4] 인체내 장기 사이에 이동하면서 변화하는 방사성요오드 분율	123

그림 목차

그림1-1	우라늄계열 및 토륨계열 핵종의 붕괴도	9
그림1-2	전 세계 기준 피폭원별 자연방사선피폭	11
그림1-3	지역별(좌) 및 국가별(우) 평균 실내 라돈 농도 준위의 비교	12
그림1-4	전 세계 기준 피폭원별 인공방사선피폭	18
그림1-5	방사선원별 미국인의 연간 피폭선량	18
그림1-6	국내 진단방사선 검사별 일인당 유효선량	19
그림1-7	방사선의 신체적 영향 및 유전적 영향	21
그림1-8	방사선의 인체유해성에 대한 선량반응 모델	24
그림1-9	직업상피폭의 선량한도를 설정하기 위한 피폭 방사선량에 따른 위험도 평가	27
그림1-10	일반인의 선량한도를 설정하기 위한 피폭 방사선량에 따른 위험도 평가	28
그림2-1	국내원전 소외 환경방사선/능 조사지점	40
그림2-2	연도별 고리원전 주변 공간감마선량률 변화	43
그림2-3	기체상 유출물의 인체 피폭경로	51
그림2-4	액체상 유출물의 인체 피폭경로	52
그림2-5	피폭경로별 고리원전 부지 주변주민 방사선량 평가 지점	55
그림3-1	갑상선암의 종류	64
그림3-2	분화암과 미분화암	65
그림3-3	새로운 기술의 출현과 갑상선암의 발생률과 사망률(미국,1975-2009)	71
그림3-4	미국의 갑상선암(1973-2002)과 갑상선유두암(1988-2002) 크기별 발생률 경향	74
그림3-5	미국 갑상선암의 역학(2005-2009): 내분비전문의와 초음파의 역할	75
그림3-6	우리나라의 갑상선암, 갑상선유두암의 발생률과 갑상선암 사망률 추이(1993-2011)	77
그림3-7	우리나라 성인 갑상선암 검진율과 지역별 갑상선암 발생률	78
그림4-1	벨라루스 지역의 소아 갑상선암 발생	91
그림4-2	후쿠시마와 원거리 대조지역의 갑상선 초음파 결과	93
그림4-3	미국 햄퍼드 원전 주변 지역의 방사선량과 성별에 따른 갑상선암 누적발생률	96
그림[부록-1]	섭취 경로, 이동과 배설	112
그림[부록-2]	호흡기	113
그림[부록-3]	호흡기로부터의 제거 경로	115
그림[부록-4]	호흡기의 각 영역으로부터 시간에 따른 입자이동을 나타내는 격실 모델	115
그림[부록-5]	호흡기 내에서의 시간에 따른 용해도와 혈액흡수를 나타내기 위한 격실모델	117
그림[부록-6]	소화기관에서의 방사성핵종의 이동특성을 기술하기 위해 사용된 수학적 모델	119
그림[부록-7]	이 보고서에서 사용된 수소, 코발트, 루테튬, 세슘, 캘리포늄에 대한 일반화된 격실 모델	120
그림[부록-8]	방사성요오드의 생리역동학적 ICRP 모델	121
그림[부록-9]	ICRP 모델로 평가한 섭취후 시간에 따른 갑상선내 ^{131}I 의 잔류분율	121
그림[부록-10]	방사성요오드의 생리역동학적 MIRD-12 모델	122
그림[부록-11]	MIRD-12 모델로 평가한 섭취후 시간에 따른 갑상선내 ^{131}I 의 잔류분율	123
그림[부록-12]	A nonlinear bio-kinetic model	124
그림[부록-13]	A nonlinear bio-kinetic model로 평가한 섭취후 시간에 따른 혈관내 ^{123}I 의 잔류분율	125
그림[부록-14]	방사성요오드(^{131}I)의 붕괴도, LNE-LNHB/CEA Table de Radionuclides	126

I. 서론

1장. 배경

2011년 3월 11일 일본 후쿠시마에서 발생한 대지진과 쓰나미의 영향으로 발생한 후쿠시마 다이이치 원전 사고 이후 원자력과 방사선에 대한 국민적 관심이 증가되었다. 그러나 이런 원전 사고 이후의 폭증한 방사선에 대한 관심과 더불어 왜곡된 정보가 언론과 같은 대중 매체와 SNS 등을 통해 무차별적으로 국민 개인에게 전달되면서 방사선에 대한 막연한 공포가 형성되었다.

원자력안전위원회에 의해 허가되어 운영되고 있는 국내 원자력발전소에서 정상 운전 중 방사성물질의 환경배출은 불가피하게 수반되는 일상적인 행위이며, 엄격하게 관리하고 있어 배출되는 방사 성물질의 양은 매우 미미한 수준이다. 이는 국내법과 국제원자력기구(IAEA), 국제방사선방호위원회(ICRP)에서 권고하는 수준보다 훨씬 적은 양으로 매우 안전하게 관리되고 있다. 원자력안전위원회와 한국원자력안전기술원에 의해 원자력발전소의 방사성물질 누출이 철저하게 감시되고 있음에도 불구하고 일부에서의 왜곡된 정보의 전달과 후쿠시마 원전 사고 이후의 원전에 대한 불안감으로 인하여 원자력발전소 주변주민들로 하여금 잠재적인 건강상의 위험을 느끼게 하고 있다.

이런 가운데 2012년 7월 4일 고리 원전 인근주민 3명이 (주)한국수력원자력을 상대로 손해배상 소송을 제기하였다. 2014년 10월 17일 부산지방법원 동부지원은 1심 선고를 통해 원고중 남편의 직장암과 아들의 선천성 자폐증에 대해서는 청구를 기각하면서도 아내가 제기한 갑상선암에 대해서는 1500만원을 배상하라는 원고 일부 승소의 판결을 하였다. 1심 재판부의 판결 요지는 “원고가 원전 부근에 상당한 기간 거주하면서 발전소에서 내보낸 방사성물질에 노출되었고, 그로 인해 암진단을 받았다고 봄이 상당하여 피고에게 손해배상 책임이 있다.” 라는 것이다.

원전의 안전한 방사선 관리로 원전 주변에서의 방사선 선량이 국내 어느 지역의 자연 방사선량과 동일한 수준임에도 불구하고, 이번 1심 재판의 결과로 인해 원전 주변 주민에게 원전 주변에서의 거주에 대한 막연한 불안감을 조성하고 있다.

이런 막연한 불안감을 해소하기 위해 정부와 사업자인 (주)한국수력원자력과는 독립적인 위치에서 한국원자력학회와 대한방사선방어학회는 학계와 연구계의 전문학자로 구성된 위원회를 구성하여 갑상선암과 원전주변 방사선과의 상관관계를 사실에 입각하여 정확하게 진단하고자 한다.

2장. 과학적 분석

본론에서는 방사선 과학 및 의학 그리고 역학이라는 전문 연구 분야의 영역에서 학술적인 접근을 통해 방사선과 갑상선암과의 상관관계를 알아보 고자 한다.

본론의 1장에서는 저선량 방사선이 인체에 미치는 영향을 분석한다. 방사선이 인체에 미치는 영향을 알아보기 위해서 방사선이 무엇인지 알아보고, 자연계에 존재하는 자연방사선과 원자로 혹은 엑스선 발생장치와 같은 인공적인 장치에 의해 발생하는 인공방사선을 설명한다. 국제원자력기구(IAEA)나 국제방사선방호위원회(ICRP)에서 권고하고 있는 피폭선량한도가 무엇을 의미하는지 그리고 저선량 방사선이 우리의 인체에 미치는 영향은 어떠한지를 설명한다.

본론의 2장에서는 원자력발전소 주변에서의 방사선량에 대해 설명한다. 원전주변에서의 방사선량이 갑상선암에 영향을 미치고 있는지를 논하기 전에, 먼저 원자력발전소 주변에서의 방사선량을 파악할 필요가 있다. 원자력 발전소에서 수행하고 있는 방사성물질의 배출관리에 대한 기본 개념과 원칙 그리고 방사성물질 배출현황을 알아본다. 원자력발전소 주변의 방사선/능(방사선 및 방사능) 환경 감시를 위한 조사 계획과정과 환경감시 결과를 설명한다. 원자력발전소 주변주민의 방사선영향을 평가하기 위해서 인체 피폭경로, 선량평가 기준치, 선량평가 대상 및 평가지점, 선량평가 방법과 이러한 방법을 이용한 주민선량 평가결과를 알아본다.

본론의 3장에서는 갑상선암의 발생에 대해 의학적으로 분석한다. 우리나라에서의 갑상선암 발생을 논하기 위해 갑상선암의 일반적인 특징과 갑상선암 발생과 검진과의 관련성을 파악하여 갑상선암 발생을 의학적으로 분석한다. 갑상선암의 발생부위, 갑상선암의 정의 및 종류, 갑상선암의 위험요인을 통해 갑상선암의 일반적인 특징을 알아본다. 갑상선결절과 갑상선암, 갑상선암의 증가와 검진과의 관련성, 조기검진과 갑상선암 발생의 관련성을 파악하여 갑상선암 발생과 검진과의 관련성을 규명한다.

본론의 4장에서는 국내외 원전 주변의 연구 사례에 대해 역학적으로 분석한다. 원전주변에서의 갑상선암 발생 기전을 파악하기 위해서는 국내외 원전 주변의 역학 연구 사례를 수집하여 분석할 필요가 있다. 국내원전주변 주민 역학조사의 경우 원전역학조사 배경, 연구 방법, 지역주민 암 발생 양상 분석 결과, 주변주민 암 발생 위험도와 원전 방사선과의 인과관계 분석

결과를 통해 원전역학조사 결론을 도출한다. 국외 연구 사례로는 체르노빌, 후쿠시마, 스리마일 섬(TMI)과 같은 사고시의 방사선 노출과 갑상선암 관련성을 연구하고, 정상 운전 중인 원전시설 주변지역에서 저선량 방사선 노출로 인한 건강영향을 논의한다.

본론의 5장에서는 원전주변 갑상선암 발생의 인과관계를 분석한다. 원전 주변 갑상선암 발생의 인과관계를 알아보기 위해 상당인과관계, 역학적 인과관계, 속성수준과 사건수준의 인과관계, 인과관계에서 상당성의 본질을 논한다.

결론에서는 본론에서 제기되고 논의된 과학적 사실에 입각하여 원전주변 주민의 갑상선암 발생이 원전으로 부터의 방사선에 기인한 것인지를 판단한다.

II. 본론

1장. 방사선의 인체영향

1.1절 방사선의 개념

1. 방사선의 정의

가. 방사선이란?

방사선이란 에너지준위가 높아 불안정한 상태에 있는 분자, 원자, 원자핵 등이 안정된 상태로 변화하면서 방출하는 에너지의 흐름이다. 방사선은 알파선, 베타선, 중성자선 등의 입자형태와 엑스선, 감마선 등의 전자기파 형태가 있다.

나. 방사선의 종류

방사선은 크게 전자의 전리능력 유무, 방사선자체의 전하유무, 형태별, 발생원리 등에 따라 다양하게 구분할 수 있다. 알파선, 베타선, 양성자, 중성자, 감마선, 엑스선 등은 에너지가 커서 물질 안에서 이온을 만들 수 있는데, 이들을 전리방사선이라고 한다. 반면 가시광선, 적외선, 전자파 등과 같이 전리 능력이 없는 것은 비전리방사선이라 한다. 원자력분야에서 일반적으로 방사선이라 불리는 것은 전리방사선을 의미한다. 또한 방사선은 전하의 유무에 따라 하전입자선(알파선, 베타선 등)과 비하전입자선(엑스선, 감마선, 중성자선)으로 구분할 수 있다.

알파선은 2개의 양성자와 2개의 중성자로 이루어진 원자핵 입자의 흐름이다. 이는 헬륨원자핵과 같으며 양전하를 가지고 있다. 알파선은 주로 자연에 존재하는 방사성물질로부터 방출되는데, 투과력이 매우 약해 종이 한 장으로도 쉽게 막을 수 있다. 베타선은 방사성물질 내 원자핵으로부터 방출되는 전자를 말한다. 베타선의 투과력은 알파입자에 비해 상대적으로 강한편이지만, 얇은 금속판을 이용하여 차폐할 수 있는 수준이다. 중성자선은 원자핵을 이루는 핵자의 한가지이며, 원자로나 가속기 등을 이용하여 발생시킬 수 있다. 중성자선은 전하를 가지고 있지 않아 전기적으로 중성이기 때문에 물질을 뚫고 지나가는 능력이 매우 크다.

엑스선은 원자에서 방출되는 전자기파의 일종이다. 엑스선은 빛에 비해 파장이 매우 짧고 에너지가 높지만, 빛과 유사한 성질을 가지고 있다. 감마선은 엑스선과 마찬가지로 전자기파의 일종이다. 엑스선은 원자수준에서 방출되는 반면 감마선은 원자핵 수준에서 방출된다. 감마선은 방사성물질에서 자연 방출되며, 일반적으로 엑스선에 비해 에너지가 높은 편이다. 또한 투과성이 높아 두꺼운 납이나 콘크리트를 이용해서 차폐한다.

2. 방사선량의 단위

방사선의 양을 나타내는 방사선량에는 다양한 종류가 있다. 각각의 방사선량은 그 의미하는 바가 다르며, 그에 상응하는 단위를 사용한다. 방사선량은 크게 물리적인 방사선량과 방사선방호에 사용되는 방사선량으로 나눌 수 있다. 물리적인 방사선량의 예로는 **조사선량**(exposure dose), **흡수선량**(absorbed dose), **커마**(kerma) 등이 있으며, 방사선방호에 사용되는 방사선량으로는 조직 또는 장기의 **평균흡수선량**(mean absorbed dose), **등가선량**(equivalent dose), **유효선량**(effective dose), **집단유효선량**(collective effective dose) 등이 있다 [1.1, 1.2].

방사선방호에서 흡수선량은 기본적인 물리적 선량이며, 모든 종류의 전리방사선 및 조사형태에 사용된다. 흡수선량(D)은 전리방사선에 의해 부여된 평균에너지를 물질의 질량으로 나눈 값으로 정의된다.

$$D = \frac{d\bar{\epsilon}}{dm}$$

흡수선량의 단위로는 그레이(Gy)가 사용되는데, 1 Gy는 물질 1 kg에 1 Joule의 에너지가 흡수되었을 때의 흡수선량이다. SI 단위인 Gy 대신 고전단위인 rad가 종종 사용되기도 하는데, 1 rad는 물질 1 g당 100 erg¹⁾의 에너지가 흡수되었을 때, 즉 100 erg/g에 해당한다.

실제 방사선방호에서 흡수선량을 사용할 경우 선량은 조직이나 장기 전체의 흡수선량의 평균을 사용한다. 조직 또는 장기 T의 평균흡수선량(D_T)은 조직 또는 장기에 전달된 총에너지(ε_T)를 조직 또는 장기의 질량(m_T)으로 나눈 값으로 정의된다.

$$D_T = \frac{\epsilon_T}{m_T}$$

어떤 장기가 피폭되어 같은 흡수선량 즉 동일한 방사선에너지를 흡수하였을 경우, 방사선이 인체에 미치는 영향은 방사선의 종류와 에너지에 따라 다르다. 따라서 이러한 다른 선질의 방사선이 미치는 생물학적인 영향을 고려하기 위해 방사선가중치(w_R: radiation weighting factor) 개념을 도입하였다. 방사선가중치(w_R)는 각각의 방사선의 생물학적 효과비(RBE: Relative Biological Effectiveness)에 기초하여 설정하였다. 표1-1에 방사선 유형별 방사선가중치를 정리하여 놓았다. 방사선가중치를 고려하여 새롭게 정의된 선량을 등가선량(H_T: equivalent dose)이라 하며, 조직이나 장기의 평균 흡수선량(D_{T,R})에 방사선가중치를 곱한 값으로 정의된다.

1) 1 Joule = 10⁷ erg (에너지 단위)

$$H_T = \sum_R w_R D_{T,R}$$

방사선가중치(w_R)는 무차원이므로, 등가선량의 단위는 흡수선량 단위와 같은 J/kg이며, 그 특별명칭은 시버트(Sv)이다.

[표1-1 방사선가중치]

방사선 종류	방사선가중치 (w_R)
광자	1
전자 또는 뮤온	1
양성자 및 하전 파이온	2
알파 입자, 핵분열파편, 중이온	20
중성자	중성자 에너지의 연속함수

동일한 방사선량이 서로 다른 조직 또는 장기에 피폭되었을 때, 인체에 미치는 영향은 피폭된 조직 또는 장기에 따라 다르다. 방사선에 피폭된 사람의 종합 위험을 근사적으로 나타내기 위해 국제방사선방호위원회(ICRP: International Commission on Radiological Protection)²⁾는 권고 60에서 유효선량 개념을 도입하였다 [1.1]. 유효선량(E)은 인체의 모든 특정조직과 장기의 등가선량(H_T)을 조직가중치(w_T : tissue weighting factor)로 가중한 합으로 표현된다.

$$E = \sum_T w_T H_T \quad \text{또는} \quad E = \sum_T w_T \sum_R w_R D_{T,R}$$

유효선량의 단위는 등가선량과 마찬가지로 시버트(Sv)가 사용된다. 조직가중치는 다양한 장기마다 다른 방사선의 민감도를 수치로 나타낸 것이다 (표 1-2 참조). 예를 들어 골수와 같은 조직은 방사선에 민감하기 때문에 다른 조직보다 높은 가중치를 주고, 딱딱한 골조직과 같이 방사선에 상대적으로 민감하지 않은 부위는 낮은 가중치를 갖게 된다.

[표1-2 유효선량 계산을 위한 조직가중치[1.2]]

조직 또는 기관	조직가중치 (w_T)
적색골수, 결장, 폐, 위, 유방, 잔여조직 ³⁾	0.72
생식선	0.08
방광, 식도, 간, 갑상선	0.16
뼈표면, 뇌, 침샘, 피부	0.04

방사선방호는 직무로 피폭되는 개인뿐만 아니라, 집단의 방사선피폭을 최소화하고 감축하는 것을 포함한다. 따라서 국제방사선방호위원회는 방사선

2) 방사선 방호에 관한 기준을 권고하고, 지침을 제공하는 국제적인 위원회. ICRP의 권고는 국제적인 권위를 가지고 있어 IAEA 및 각국의 방사선 방호기준으로 채택되고 있음.

3) 잔여조직 : 부신, 흉외기도, 쓸개, 심장, 신장, 림프절, 근육, 구강점막, 췌장, 전립선, 소장, 비장, 흉선, 자궁/자궁경부

방호 최적화 목적을 위해 집단선량 개념을 도입했다 [1.1, 1.3]. 집단유효선량은 고려하는 일정한 기간 또는 작업에 대해 모든 개인 유효선량의 합으로 계산된다. 하지만 장시간, 넓은 지역에 대해 낮은 개인선량을 합치는 것을 피하기 위해 유효선량과 시간의 범위를 제한하고 명시해야 한다. 특정 선원에서 일정 ΔT 기간에 E_1 과 E_2 사이의 개인 유효선량 값으로 인한 집단유효선량은 다음과 같다.

$$S(E_1, E_2, \Delta T) = \int_{E_1}^{E_2} E \left[\frac{dN}{dE} \right]_{\Delta T} dE$$

집단유효선량 단위로는 인-시버트(man-Sv)가 사용된다. 최적화 과정의 예로 집단유효선량은 직무피폭에서 종사자 그룹에 대한 계획피폭상황의 최적화를 위해 사용된다. 계획된 작업이 개시되기 전에 다양한 운영 시나리오에 대해 집단유효선량과 개인선량 분포를 전망적으로 평가한 후, 운영 시나리오의 선택을 위한 의사결정 과정에서 해당 변수로서 집단선량을 사용된다.

집단유효선량은 방사선 기술이나 방호 절차들을 비교하기 위한 최적화의 한 도구이다. 따라서 집단유효선량을 위험 모사에 사용하는 것은 적합하지 않다 [1.2]. 국제방사선방호위원회에서는 특히 사소한 피폭을 대규모 집단에 적용한 집단유효선량에 기초한 암 사망 계산은 타당하지 않으며 피해야 한다고 권고하고 있다. 집단유효선량에 기초한 그러한 계산은 결코 의도한 바가 아니며, 생물학적으로나 통계학적으로 불확실성이 매우 크고, 전후 관계를 무시하고 평가치를 인용할 때 재현성이 없는 많은 단서를 전제로 하며, 집단유효선량이라는 방호량을 그르게 사용하는 것이라고 보고하였다.

3. 방사선의 발생원

방사선원은 크게 방사성물질, 방사선발생장치로 나눌 수 있다. 방사성물질은 방사성핵종을 일정 농도 이상으로 함유하고 있는 물질을 말하며 핵연료 물질, 사용 후 핵연료, 방사성동위원소, 핵분열생성물 등을 말한다. 일정 농도 이상이라는 조건이 붙는 이유는 자연계의 모든 물질에는 방사성핵종이 미량 함유되어 있기 때문에 농도 기준이 없으면 모든 물질이 방사성물질로 분류되기 때문이다. 일반적으로 자연계에 존재하는 방사성핵종은 원자번호가 비교적 큰 우라늄, 라듐 핵종 등이 포함되어 있으며, 이를 천연 또는 자연 방사성물질이라 부른다. 방사성물질은 원자로 혹은 가속기 등을 이용하여 인공적으로 생산되기도 하는데, 이를 인공 방사성물질이라고 일컫는다.

방사선발생장치란 방사성물질 또는 방사성동위원소 물질을 사용하는 대신에 다른 형태의 에너지를 인위적으로 방사선 에너지로 변환하여, 방사선을

방출하는 장치이다. 대표적으로 엑스선 발생장치가 있으며 그 밖에도 다양한 종류의 가속기가 포함된다. 가장 널리 사용되는 방사선발생장치인 엑스선 발생장치는 양극에 가속된 전자가 충돌할 때 전자에너지가 변환되어 엑스선을 발생시키는 엑스선관, 엑스선관 내에 고전압을 걸어주는 변압장치, 열을 식히는 냉각장치 등으로 구성되어 있다.

1.2절 자연방사선 및 인공방사선

1. 자연방사선

자연방사선이란 우리 주위의 자연계에 존재하는 방사선을 총칭하는 용어이다. 우리 주위의 환경에서 이러한 자연방사선은 항상 존재한다. 인간 주변의 환경에 존재하는 자연방사선원은 지구의 지각을 구성하는 토양, 암석 등에 포함된 천연방사성핵종으로부터 방출되는 지각 방사선, 지구의 대기권 밖에서 지구로 입사하는 우주방사선, 그리고 이러한 우주방사선과 대기 중 원소와의 반응으로 생성되는 방사선 등이 있다. 이처럼 자연방사선은 어디에든 존재하기 때문에, 인간은 방사선의 바다에 살고 있고, 그로 인해 일상생활 중에서 항상 피폭을 받으며 살아가고 있다.

가. 자연방사선의 종류

(1) 지각방사선

지각 방사선이란 지구의 지각에 존재하는 방사성핵종으로부터 방출되는 방사선을 의미한다. 지구의 지각에는 약 45억 년 전 지구가 생성될 시점에 생성된 수많은 종류의 방사성원소들이 존재하였다. 이러한 방사성핵종들 중 반감기가 짧은 단반감기 핵종은 붕괴되어 사라졌지만, 반감기가 대략 1억 년 이상인 장반감기 방사성핵종들은 현재까지도 지구의 지각에 남아 존재하며 끊임없이 방사선을 방출하고 있다.

천연방사성핵종 중 대표적인 핵종들로는 우라늄계열, 토륨계열, 악티늄계열, 넵튠계열 핵종이 있다. 그림1-1에 우라늄계열 및 토륨계열 핵종의 붕괴도를 나타내었다. 우라늄 계열은 반감기가 약 45억년인 ^{238}U 을 모핵종으로 하는 계열로써, ^{238}U 이 붕괴하여 최종적으로 안정된 상태의 핵종인 ^{206}Pb 으로 붕괴할 때까지 생성되는 그 붕괴계열 핵종들을 포함한다. 토륨계열은 140억년의 반감기를 가지는 ^{232}Th 를 모핵종으로 ^{232}Th 가 최종적으로 안정된 핵종인 ^{208}Pb 로 붕괴할 때까지 생성되는 모든 붕괴계열 핵종들을 포함한다. 악티늄계열은 약 7억년의 반감기를 가지는 ^{235}U 를 모핵종으로 하여, 최종적으로 ^{207}Pb 로 붕괴한다.

The diagram illustrates the three natural decay series, showing the sequence of isotopes and their half-lives. The series are color-coded: yellow for the Uranium-238 series, red for the Uranium-235 series, and blue for the Thorium-232 series.

Yellow Series (Uranium-238):

- $^{238}_{92}\text{U}$ (4.5×10^9 y) $\xrightarrow{\alpha}$ $^{234}_{90}\text{Th}$ (27 d)
- $^{234}_{90}\text{Th}$ $\xrightarrow{\beta^-}$ $^{234m}_{91}\text{Pa}$ (1.17 m)
- $^{234m}_{91}\text{Pa}$ $\xrightarrow{\beta^-}$ $^{234}_{92}\text{U}$ (2.4×10^5 y)
- $^{234}_{92}\text{U}$ $\xrightarrow{\alpha}$ $^{230}_{90}\text{Th}$ (7.5×10^4 y)
- $^{230}_{90}\text{Th}$ $\xrightarrow{\alpha}$ $^{226}_{88}\text{Ra}$ (1.6×10^3 y)
- $^{226}_{88}\text{Ra}$ $\xrightarrow{\alpha}$ $^{222}_{86}\text{Rn}$ (3.8 d)
- $^{222}_{86}\text{Rn}$ $\xrightarrow{\alpha}$ $^{218}_{84}\text{Po}$ (3.1 m)
- $^{218}_{84}\text{Po}$ $\xrightarrow{\alpha}$ $^{214}_{82}\text{Pb}$ (27 m)
- $^{214}_{82}\text{Pb}$ $\xrightarrow{\beta^-}$ $^{214}_{83}\text{Bi}$ (20 m)
- $^{214}_{83}\text{Bi}$ $\xrightarrow{\alpha}$ $^{214}_{82}\text{Pb}$ (27 m)
- $^{214}_{83}\text{Bi}$ $\xrightarrow{\beta^-}$ $^{214}_{84}\text{Po}$ (1.6×10^{-4} s)
- $^{214}_{84}\text{Po}$ $\xrightarrow{\alpha}$ $^{210}_{82}\text{Pb}$ (5 d)
- $^{210}_{82}\text{Pb}$ $\xrightarrow{\beta^-}$ $^{210}_{83}\text{Bi}$ (5 d)
- $^{210}_{83}\text{Bi}$ $\xrightarrow{\alpha}$ $^{210}_{82}\text{Pb}$ (5 d)
- $^{210}_{83}\text{Bi}$ $\xrightarrow{\beta^-}$ $^{210}_{84}\text{Po}$ (140 d)
- $^{210}_{84}\text{Po}$ $\xrightarrow{\alpha}$ $^{206}_{82}\text{Pb}$ (Stable)
- $^{210}_{82}\text{Pb}$ $\xrightarrow{\beta^-}$ $^{210}_{81}\text{Tl}$ (1.3 m)
- $^{210}_{81}\text{Tl}$ $\xrightarrow{\beta^-}$ $^{210}_{82}\text{Pb}$ (5 d)
- $^{210}_{81}\text{Tl}$ $\xrightarrow{\alpha}$ $^{206}_{81}\text{Tl}$ (4.2 m)
- $^{206}_{81}\text{Tl}$ $\xrightarrow{\beta^-}$ $^{206}_{82}\text{Pb}$ (Stable)
- $^{210}_{82}\text{Pb}$ $\xrightarrow{\alpha}$ $^{206}_{80}\text{Hg}$ (8.1 m)
- $^{206}_{80}\text{Hg}$ $\xrightarrow{\beta^-}$ $^{206}_{81}\text{Tl}$ (4.2 m)

Red Series (Uranium-235):

- $^{232}_{90}\text{Th}$ (1.4×10^{10} y) $\xrightarrow{\alpha}$ $^{228}_{88}\text{Ra}$ (5.7 y)
- $^{228}_{88}\text{Ra}$ $\xrightarrow{\beta^-}$ $^{228}_{89}\text{Ac}$ (6.1 h)
- $^{228}_{89}\text{Ac}$ $\xrightarrow{\beta^-}$ $^{228}_{90}\text{Th}$ (1.9 y)
- $^{228}_{90}\text{Th}$ $\xrightarrow{\alpha}$ $^{224}_{88}\text{Ra}$ (3.6 d)
- $^{224}_{88}\text{Ra}$ $\xrightarrow{\alpha}$ $^{220}_{86}\text{Rn}$ (55 s)
- $^{220}_{86}\text{Rn}$ $\xrightarrow{\alpha}$ $^{216}_{84}\text{Po}$ (0.14 s)
- $^{216}_{84}\text{Po}$ $\xrightarrow{\alpha}$ $^{212}_{82}\text{Pb}$ (10.6 h)
- $^{212}_{82}\text{Pb}$ $\xrightarrow{\beta^-}$ $^{212}_{83}\text{Bi}$ (61 m)
- $^{212}_{83}\text{Bi}$ $\xrightarrow{\alpha}$ $^{208}_{81}\text{Tl}$ (3.1 m)
- $^{212}_{83}\text{Bi}$ $\xrightarrow{\beta^-}$ $^{212}_{84}\text{Po}$ (3.0×10^{-7} s)
- $^{212}_{84}\text{Po}$ $\xrightarrow{\alpha}$ $^{208}_{82}\text{Pb}$ (Stable)
- $^{208}_{81}\text{Tl}$ $\xrightarrow{\beta^-}$ $^{208}_{82}\text{Pb}$ (Stable)

Blue Series (Thorium-232):

- $^{232}_{90}\text{Th}$ (1.4×10^{10} y) $\xrightarrow{\alpha}$ $^{228}_{88}\text{Ra}$ (5.7 y)
- $^{228}_{88}\text{Ra}$ $\xrightarrow{\beta^-}$ $^{228}_{89}\text{Ac}$ (6.1 h)
- $^{228}_{89}\text{Ac}$ $\xrightarrow{\beta^-}$ $^{228}_{90}\text{Th}$ (1.9 y)
- $^{228}_{90}\text{Th}$ $\xrightarrow{\alpha}$ $^{224}_{88}\text{Ra}$ (3.6 d)
- $^{224}_{88}\text{Ra}$ $\xrightarrow{\alpha}$ $^{220}_{86}\text{Rn}$ (55 s)
- $^{220}_{86}\text{Rn}$ $\xrightarrow{\alpha}$ $^{216}_{84}\text{Po}$ (0.14 s)
- $^{216}_{84}\text{Po}$ $\xrightarrow{\alpha}$ $^{212}_{82}\text{Pb}$ (10.6 h)
- $^{212}_{82}\text{Pb}$ $\xrightarrow{\beta^-}$ $^{212}_{83}\text{Bi}$ (61 m)
- $^{212}_{83}\text{Bi}$ $\xrightarrow{\alpha}$ $^{208}_{81}\text{Tl}$ (3.1 m)
- $^{212}_{83}\text{Bi}$ $\xrightarrow{\beta^-}$ $^{212}_{84}\text{Po}$ (3.0×10^{-7} s)
- $^{212}_{84}\text{Po}$ $\xrightarrow{\alpha}$ $^{208}_{82}\text{Pb}$ (Stable)
- $^{208}_{81}\text{Tl}$ $\xrightarrow{\beta^-}$ $^{208}_{82}\text{Pb}$ (Stable)

(2) 라돈

- 9 -

는 낮기 때문에 실외에서는 라돈 가스에 의한 영향이 거의 문제가 되지 않는다. 하지만, 밀폐된 공간이나 실내로 라돈 가스가 유입되는 경우 문제가 될 수 있다.

(3) 우주방사선

우주방사선이란 지구 밖의 우주공간에서 지구로 입사하는 자연방사선을 의미한다. 이러한 우주선은 높은 에너지를 가지고 은하계와 태양으로부터 방출된다. 지구에 살고 있는 인간이 받는 모든 자연방사선 피폭 중 우주방사선에 의한 피폭은 약 16% 정도이다. 주로 우주방사선은 고에너지의 양성자, 헬륨이온 등으로 이루어져 있으며, 이외에도 높은 원자번호를 가지는 원자, 전자 등이 있다 (표1-3 참조). 양성자, 헬륨 이온 등의 우주방사선이 지구로 입사하면 지구의 대기를 구성하는 물질인 질소, 산소 등의 원자들과 반응을 하게 되는데, 이때 우주방사선과 대기와의 반응으로 수많은 종류의 방사성핵종이 생성된다. 지구 외부로부터 입사하는 방사선을 1차 우주방사선이라고 하며, 우주선과 대기가 반응하여 생성되는 중성자, 양성자, 파이중간자 등을 2차 우주방사선이라고 한다.

[표1-3 우주방사선의 종류별 존재비율]

입자	평균 존재비율 (%)
양성자	87
헬륨 원자핵	11
원자번호 2 이상의 원자핵	1
전자	1

(4) 인체 내 방사성핵종

인체의 95% 이상은 산소, 탄소, 질소 등의 원소로 이루어져있으며, 이외에 인, 나트륨, 칼륨 등의 원소가 인체를 구성하고 있다. 인체를 구성하는 원소들의 대부분은 방사성을 띄지 않는 안정된 동위원소들이지만, 인체를 구성하는 핵종들 중 미량의 천연방사성핵종이 존재하며, 작은 양이지만 이러한 핵종들에서도 자연방사선이 방출되고 있다.

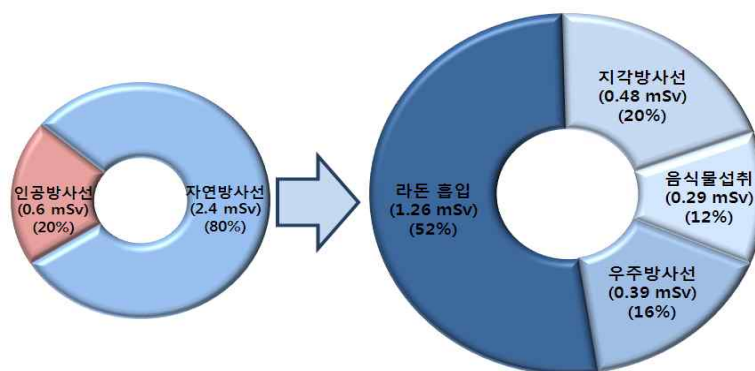
인체의 호흡작용이나 음식물 섭취 등을 통하여 천연방사성핵종이 체내로 유입될 수 있다. 체내에 유입되는 대표적인 방사성핵종으로는 ^{14}C , ^{40}K , ^{87}Rb , ^{210}Po , ^{226}Ra , ^{238}U 등이 있으며, ^{40}K 이 다른 핵종들에 비하여 상대적으로 인체피폭에 가장 큰 영향을 주는 핵종이다.

나. 자연방사선에 의한 일반인 피폭선량

자연방사선 피폭은 천연방사성핵종에서 방출되는 방사선과 우주선에 의한 피폭을 의미한다. 인간은 일상생활 중에서 항상 자연방사선에 피폭을 받으며 살아가고 있다. 방사선피폭은 방사선원의 위치에 따라 외부피폭과 내부피폭으로 분류할 수 있다. 자연방사선에 의한 외부피폭은 우주선과 토양, 해수, 지표수, 공기 등에 존재하는 천연방사성핵종에서 방출되는 방사선에 의해 인체가 피폭하는 것을 의미하며, 내부피폭은 생활환경 도처에 존재하는 천연방사성핵종이 호흡 또는 음식물 섭취 등을 통하여 인체내부로 유입됨으로써 체내에서 방출되는 방사선에 의해서 피폭되는 것을 의미한다.

자연방사선에 의해 인체가 받는 피폭선량에 대해 유엔방사선영향과학위원회(UNSCEAR: United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation)⁴⁾에서는 주기적으로 자료를 수집하여 보고하고 있다 [1.4]. 유엔방사선영향과학위원회의 보고에 의하면, 자연방사선에 의한 전 세계 인구의 일인당 평균 연간 피폭선량(유효선량)은 2.4 mSv이다(그림1-2 참조). 이러한 자연방사선에 의한 영향은 지역의 특성과 환경에 따라 차이를 보이는데, 주로 대지에 포함된 우라늄, 토륨, 칼륨 등 천연방사성핵종의 함량 차이에 기인한다. 지각에서 자연방사선이 많이 방출되는 지역에 사는 사람은 세계 평균보다 10 배 정도 많은 자연방사선에 피폭되며 살아가고 있다. 유엔방사선영향과학위원회의 보고를 토대로 피폭원별 자연방사선 피폭의 기여도를 살펴보면 라돈 흡입에 의한 피폭선량이 약 52%로 가장 높게 나타났다. 다음으로 지각방사선(약 20%), 우주방사선(약 16%), 음식물 섭취(약 12%) 순으로 나타났다.

자연방사선은 일반적으로 방사선 방호의 대상이 되지 않는다. 그 이유는 자연방사선은 인간이 생활하는 환경 주위의 거의 모든 곳에 존재하기 때문이다. 따라서 자연방사선에 의한 피폭을 인간이 인위적으로 제어하는 것이 쉽지 않기 때문에 일반적으로 방사선 방호의 대상에서 제외된다.



[그림1-2 전 세계 기준 피폭원별 자연방사선피폭 [1.4]]

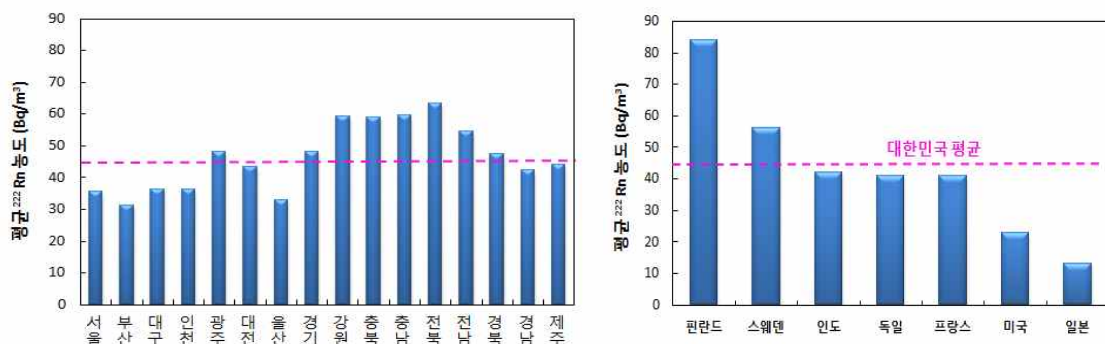
4) 국제연합 산하 기구로 방사능이 인간과 환경에 미치는 영향에 대한 자료를 수집하여 보고서를 발간함

자연방사선으로부터 우리나라 국민이 일상적으로 받고 있는 유효선량은 지역 그리고 생활습관에 따라 차이가 있으나, 평균적으로는 연간 총 3.08 mSv로 평가되었다 [1.5]. 라돈 자손핵종 흡입에 의한 방사선량은 1.40 mSv이고, 지각방사선에 의한 방사선량은 1.04 mSv이며, 음식물 중 방사능에 의해 0.38 mSv, 우주방사선에 의한 방사선량이 0.26 mSv으로 나타났다.

(1) 라돈에 의한 피폭

라돈에 의한 방사선피폭은 모든 자연방사선피폭의 50% 이상을 차지하며, 최대 방사선피폭원이다. 자연 중에 널리 존재하는 라돈은 일반적으로 토양, 건축자재, 상수도 등에 다양하게 존재하고 있고 이중 일부가 대기 중으로 방출된다. 라돈의 인체 내 유입경로는 대기에 방출된 라돈을 흡입하거나, 라돈이 함유된 음용수의 섭취 등이 있다. 최근 라돈 피폭이 방사선방호 분야의 주요 이슈로 대두되고 있는데, 이러한 이유 중에 하나는 최근 건물이 에너지 절약형으로 개선되어 실내 공기의 환기율이 낮아짐에 따라 실내 공기 중 라돈의 양이 증가하였고, 지하공간의 이용이 증가하였기 때문이다. 일반적으로 실내 공기 중 라돈의 농도는 우려할 수준은 아니다. 그러나 균열이 많은 오래된 건축물, 밀폐도가 높고 환기시설이 부족한 건물의 경우 실내의 라돈농도가 높을 수 있으므로 주의를 기울여야 한다.

우리 국민의 라돈에 의한 연간피폭 유효선량은 전국 평균 1.27 mSv로 나타났다으며 총 집단선량은 약 60,000 man-Sv로 평가되고 있다 [1.5]. 그림1-3은 지역별 및 국가별 평균 실내 라돈농도 준위를 나타내었다. 전국 평균에 비해 전북, 충남지역의 라돈농도가 다소 높게 나타났으며, 이로 인해 예상되는 연간 유효선량은 약 1.7 mSv 수준이다. 울산, 부산은 전국 평균에 비해 낮은 연간 약 1 mSv의 준위를 보였다. 우리나라의 실내 라돈농도는 해외와 비교하여 평균수준인 것을 알 수 있다.



[그림1-3 지역별(좌) 및 국가별(우) 평균 실내 라돈 농도 준위의 비교 [1.5]]

(2) 지각방사선에 의한 피폭

지각방사선에 의한 피폭은 주로 지각을 구성하는 주요 핵종인 우라늄계열, 토륨계열, 악티늄계열 핵종에서 방출되는 감마선에 기인하며, 토양이나 암석에서 방출되는 감마선에 의한 외부피폭을 대상으로 한다. 지각에서 방출되는 방사선 수준은 지역에 따라 차이가 있다. 인도의 케랄라지방의 거주민은 지각방사선에 의해 연간 평균 약 4 mSv의 피폭을 받으며, 브라질 가라바리지역에 거주하는 사람들은 연간 약 2~80 mSv의 피폭을 받고 있다. 우리나라 옥외에서 지각감마선에 의한 공간감마선량률은 20~500 nGy/h(평균 108 nGy/h)의 범위에 있었으며, 실내에서의 선량률은 126~347 nGy/h(평균 214 nGy/h)로 실외에 비해 평균적으로 2배 정도 높게 나타났다 [1.5]. 공간감마선량률을 기반으로 평가한 우리 국민의 연간 피폭 유효선량은 전국 평균으로 1.04 mSv 수준이다.

(3) 음식물 섭취에 의한 피폭

일반인의 음식물 섭취에 의한 피폭은 주로 식품의 원료나 동물, 식물 등에 함유되어 있는 방사성물질에 기인한다. 방사성물질에 오염된 음식물을 섭취하면 방사성핵종은 고유의 특성에 따라 인체 내로 흡수, 침착, 배설되며 이 과정에서 체내피폭이 발생한다. 우리나라의 음식물 섭취에 의한 내부피폭 유효선량은 연간 0.38 mSv 수준이다 [1.5]. 일반적으로 식품 내에 존재하는 천연 방사성핵종 중 피폭에 가장 크게 기여하는 핵종은 ^{40}K 으로서 방사능은 약 4,000 Bq 정도이다. 이외에 음식물 섭취를 통해 주로 수소, 탄소, 칼륨 등과 같은 원소를 섭취한다. 삼중수소(^3H)는 물과 함께 식물의 뿌리를 통해 흡수되며, 삼중수소에 의한 연간 유효선량은 약 1×10^{-5} mSv 정도이다. 탄소의 동위원소 중 하나인 ^{14}C 은 광합성 과정에서 이산화탄소 형태로 공기 중으로부터 섭취되며, 연간 유효선량은 약 0.012 mSv이다.

(4) 우주방사선 피폭

우리나라의 시도별 우주선에 의한 방사선량률은 32.7~34.2 nSv/h 수준이며, 전국 평균은 33.4 nSv/h이다 [1.5]. 이를 기반으로 평가된 우리국민의 연간 피폭 유효선량은 0.25 mSv이다. 우주선의 강도는 공중으로 올라갈수록 강해지므로 항공여객은 지상에 있는 사람보다 더 많은 우주선을 피폭한다. 국제선 항로도 북극에 가까운 항로, 예를 들면 우리나라에서 유럽이나 미국을 왕래

5) 수소의 동위원소 중 하나로서, 보통 수소(^1H)에 비해 질량이 3배. 삼중수소(tritium)는 천연에서 산출되며, 자연에 존재하는 모든 종류의 수소 중 보통 수소의 비율은 99.983%이고, 삼중수소가 차지하는 비율은 극히 낮음.

하는 항로일수록 우주선 피폭이 높아진다. 항공기 여행 시 북미의 경우 평균 0.06 mSv, 유럽의 경우 평균 0.042 mSv 정도 피폭한다.

2. 인공방사선

방사선은 그 출처에 따라 크게 자연방사선과 인공방사선으로 분류할 수 있는데, 인공방사선은 원자력시설 등에서 발생하는 인공방사성핵종에서 방출되는 방사선이나, 의료 또는 산업목적을 위해 인위적으로 발생시킨 방사선을 말한다. 방사성핵종은 다양한 목적을 위해 사용되지만 자연에 존재하는 천연 방사성핵종은 그 종류가 제한적이다. 따라서 인공적으로 방사성핵종을 생산하는 방법들이 개발되었다.

가. 인공방사선의 이용

과학기술이 발달함에 따라 인공방사선의 사용분야가 다양해지고, 그 사용 기술이 향상되어 왔다. 우리나라에서 방사선발생장치 또는 방사성동위원소 이용 인.허가를 받은 기관수는 2011년 말 기준 5,000 곳 이상이며, 10년 전과 비교하여 약 3배 정도 증가하였다. 인공방사선 이용분야는 크게 원자력시설, 의료분야, 산업분야 등으로 구분할 수 있다.

(1) 원자력시설

원자력시설이란 발전용 원자로, 연구용 원자로, 핵연료 주기시설, 방사성 폐기물의 저장·처분시설, 핵물질 사용시설 등 원자력 에너지를 이용하기 위한 설비의 통칭으로서 대표적인 예로 원자력발전소가 있다.

우리나라는 1978년 4월 고리원전 1호기의 가동을 시작으로 현재 미국, 프랑스, 일본, 러시아에 이어 발전 설비 기준으로 세계 5위의 원자력 강국이 되었다. 2013년말 기준으로 국내에는 총 23기의 원전이 고리, 영광, 울진 및 월성의 4개 부지에서 가동되고 있다. 23기의 원전 중 19기는 가압경수로형(17,937 MW⁶⁾)이고, 나머지 4기는 가압중수로형(2,779 MW)이다. 2013년 원자력 발전량은 국내 전체 발전량의 약 27%를 차지한다.

발전용 이외에 연구용 원자로인 하나로를 한국원자력연구원에서 운영 중에 있다. 하나로는 원자로에 사용되는 재료 및 핵연료 물성 연구, 방사성의약품 개발 및 방사성동위원소 생산, 방사화 분석과 산업적 이용 등의 목적으로 수많은 기관과 연구원들이 활용하고 있다. 하나로를 이용하여 생산되는 비파괴 검사용 방사성동위원소인 ¹⁹²Ir, 의료용 방사성동위원소인 ¹³¹I 등의 인공방

6) MW: Mega Watt, 10⁶ Watt

사성동위원소는 국내 시장의 높은 점유율을 차지하고 있다.

핵연료주기란 우라늄의 채광, 핵연료로 사용하기 위한 ^{235}U 의 농축, 농축된 우라늄을 펠릿 형태로 만들기 위한 성형 및 가공부터 핵연료의 사용·처분까지의 과정을 의미한다. 우리나라에는 우라늄광이 존재하지 않아 채광시설이 없고, 한·미 원자력협정에 의해 우라늄 농축시설이 없기 때문에 농축우라늄을 외국으로부터 전량 수입하여 국내에서 핵연료를 성형·가공한 후 원자력발전소에서 사용하고 있다.

방사성폐기물은 방사능의 높고 낮음에 따라 고준위, 중·저준위로 분류할 수 있다. 일반적으로 핵분열 생성물과 남아있는 핵연료 물질을 고준위 폐기물이라 하고, 원자력발전소의 운영 중에 사용했던 작업복, 덧신, 장갑, 폐부품 등과 방사성동위원소를 이용하는 산업체, 병원, 연구기관 등에서 발생하는 동위원소폐기물 등이 중·저준위 폐기물에 속한다. 대부분의 원자력 선진국에서는 처분시설을 오래전부터 운영하고 있으며, 우리나라에서도 경주시에 중·저준위 폐기물 처분시설을 건설하여 운영하고 있다.

(2) 의료분야

1930년대 후반 사이클로트론에서 생산된 ^{24}Na , ^{32}P 등 인공 방사성동위원소의 공급을 시작으로 인공방사선 및 인공방사성동위원소가 의료분야에 사용되었다. 의료 분야의 인공방사선은 크게 진단 방사선과 치료 방사선으로 구분할 수 있다.

방사선 진단은 방사선의 특성 중 투과성을 이용한 것으로서 크게 엑스선 검사처럼 외부에서 환자에게 방사선을 조사하여 촬영하는 방식과 핵의학 검사처럼 내부에 인공방사성동위원소를 주입하여 체외로 방출되는 방사선을 측정하여 데이터를 분석하는 방식으로 나눌 수 있다. 방사선촬영이란 사람의 신체와 같이 비균질하게 구성된 피사체의 내부를 보기위해 방사선을 조사하여 투과한 선량정보를 이용하여 판독 영상을 얻어내는 기술을 말한다. 또한 단층방식으로 촬영된 이미지를 컴퓨터 기술을 이용하여 3차원으로 이미지를 재구성하는 기술인 전산화단층촬영(CT: Computed Tomography)이 개발되어 사용되고 있다.

핵의학 진단이란 인공방사성 동위원소를 이용하여 진단하는 의료분야 중 하나이다. 핵의학 진단은 감마카메라로 신체 장기의 형태 및 대사 정보 또는 조직의 기능 정보를 제공하는 이미지를 얻어 진단하는 방법으로 인공방사성동위원소를 함유한 특정 화합물 형태의 방사성의약품을 인체에 투여한 후 방사성핵종이 모여드는 표적영역이나 결합량을 외부에서 신티스캐너 등으로 방사

선을 측정하는 방식을 사용한다. 핵의학진단법에서 흔하게 사용되는 촬영술은 단일광자방출 단층촬영술(SPECT: Single Photon Emission Computed Tomography)과 양전자방출 단층촬영술(PET: Positron Emission Tomography)이 있다. 단일광자방출 단층촬영술은 감마선 방출핵종을 함유하는 방사성물질을 환자에게 정맥주사한 후 심장이나, 뇌, 간 등 관심부위를 촬영하고 질병으로 인한 변화를 컴퓨터를 이용하여 진단하는 검사방법이며, 주로 뇌혈관 질환으로 인해 발생하는 각종 질병을 진단하는데 사용된다. 양전자방출 단층촬영술은 방사성의약품을 체내에 주입하여 방출된 양전자가 소멸할 때 방출되는 광자를 신체를 중심으로 둘러싸인 검출기로 분석하는 장치이다. 주로 암, 심근경색, 치매의 진단에 사용 된다.

방사선 치료는 국소 치료방법으로서 고에너지의 방사선을 이용하여 암세포를 사멸시키는 치료방법이다. 방사선 치료는 방사선 발생장치의 중심부에서 병소까지의 거리를 일정하게 유지하여 치료하는 원격치료와 밀봉된 방사선원을 환부에 삽입 혹은 노출 시키는 근접치료로 분류 할 수 있다. 원격치료는 대용량 감마선원이나 가속기를 이용하여 방사선이나 빔을 환자에게 조사하는 방사선 치료 방법이다. 고에너지 엑스선과 전자선, 양성자치료기와 중입자치료기는 가속기를 이용한 치료기이고, 사이버나이프, 세기조절 방사선치료기, 토모테라피, 감마나이프, 래피드 아크는 직접 방사선을 발생하는 장비를 사용하는 치료기이다. 근접치료는 밀봉 소선원을 종양에 근접시켜 치료하는 방법을 말한다. 근접치료에는 밀봉 소선원을 종양의 표면에 치료시간 동안만 직접 노출시키는 방법과 특별히 고안된 기구를 이용하여 체강 내에 삽입하여 치료하는 강내 치료, 인체 내의 여러 장기에 삽입하여 치료하는 체관내 치료, 또는 종양에 직접 침 등을 삽입하여 치료하는 조직 내 치료 등이 있으며 소형 방사성물질을 장기간 이식하는 방법도 있다.

(3) 산업분야

산업분야에서는 공정이나 제품의 상태를 감시, 관리, 검사, 가공, 추적자를 이용한 물질의 거동 분석, 환경기술, 분석 등에 인공방사성동위원소 및 인공방사선을 널리 사용하고 있다. 2011년 말 기준 국내에서 인.허가 받은 방사성동위원소 또는 방사선발생장치 이용 기관 중 74%가 산업분야에 속한다.

방사선 게이지는 방사선이 물체를 통과할 때 투과력이 저하되거나 반사되는 성질을 이용하여 공정이나 제품의 상태 검사, 제품 생산 절차에서 계측제어 수단으로 사용하는 장비이다. 방사선 게이지의 종류로는 수위계, 두께계, 성분계, 수분계 등이 있으며, 물질 내의 수분 함량을 측정하는 장비도 있다.

산업용 방사선 촬영 즉 방사선투과검사는 방사선의 투과성을 이용하는 대

표적인 기술이다. 방사선 촬영을 통해 물체를 파괴하지 않은 채 외관상으로는 알 수 없는 결함 등 내부 상태를 알아낼 수 있으며, 주로 비파괴검사 및 공항과 항만, 주요시설의 검색대에서 주로 사용하고 있다. 비파괴검사는 제품, 재료, 주물이나 용접, 대형 탱크, 배관의 건전성 또는 내부 결함 점검이나 중요 문화재의 수리 및 복원에 사용되고 있다. 공항과 항만, 주요시설의 검색대는 컨테이너 운송차량, 여행객이나 출입자의 불법물질의 반출·입 관리에 사용되고 있다.

방사선 가공은 방사선이 물질과의 반응을 통해 물질의 물리적, 화학적 특성을 변화시키는 특성을 이용한 기술로서 다른 물리적, 화학적, 열적 가공방법과 비교하여 유해한 첨가제가 필요 없기 때문에 경제적이고, 친환경적인 기술이다. 방사선 가공의 대표적인 이용에는 고분자 재질 가공, 반도체 성능개선, 방사선 육종 등이 있다.

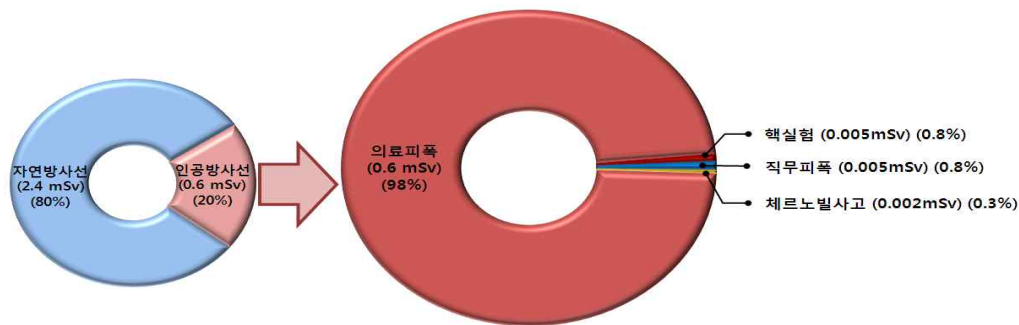
방사선을 이용한 환경보존 기술은 방사선을 수질이나 대기에 조사할 때 이온화하여 발생한 기단들의 강한 산화, 환원력 그리고 살균력 등을 이용하여 환경오염 물질을 원천적으로 제거하는 방법이다. 기존에 사용되어온 환경보존 기술보다 간편한 설비와 짧은 처리시간, 그리고 2차 환경오염 물질 발생이 없다는 장점을 가지고 있다. 특히 오폐물에 의한 수질오염과 대기 공해물질로 인한 대기오염 복원에 사용되고 있다.

이외에도 산업현장에서 방사선발생장치는 첨단 분석기술에 이용된다. 방사선발생장치를 이용한 분석에는 가스 크로마토그래피, 산란·회절 분석, 형광엑스선 분석, 방사화 분석 등이 있다. 또한 방사선의 대표적인 특성인 투과성과 산란·회절을 제외한 전리작용과 발광작용을 이용하기도 한다. 전자포획검출기, 점화기, 정전기제거, 용접봉 등의 제품이 알파입자, 베타입자와 같은 전리방사선이 가지는 전리 능력을 이용하여 생산되고 있다. 그리고 시계나 항공기와 선박의 필수 계기판, 비상구 표지, 군용 야간장비에 사용되는 야광물질은 방사성물질이 방출하는 방사선이 형광물질과 작용하여 발광하는 특성을 이용한 것이다. 방사선은 식품에도 이용되는데, 방사선 조사를 통해 식품내의 미생물을 제거하고, 견과류나 근채류 등의 발아를 억제하여 식품을 장기적으로 안전한 위생 상태로 유지할 수 있다. 방사선은 주사기, 봉대 등의 의약품이나 화장품, 건강식품 등의 멸균에도 사용되는데 방사선 멸균은 열이나 화학물질에 약한 재료에 적용할 수 있다.

나. 인공방사선에 의한 일반인 피폭선량

인공방사선 피폭은 인간 활동에 의하여 만들어진 방사선으로부터 받는 피폭을 의미하며, 생활방사선으로부터 받는 피폭 중 약 20%가 이에 속한다

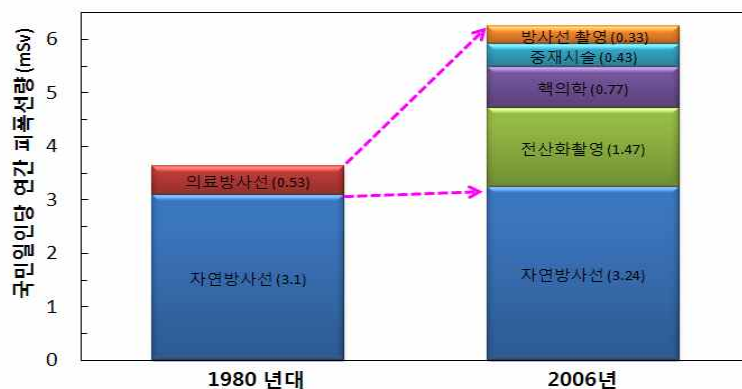
[1.4]. 인공방사선에는 의료목적으로 사용되는 방사선, 대기권 핵실험에 의하여 생성되어 환경으로 이행하여 방출되는 방사선, 원자력발전소로부터 방출되는 방사선 등이 있다. 최근 유엔방사선영향과학위원회(UNSCEAR)의 보고에 의하면, 전 세계 인구 1인당 인공방사선에 의한 평균 연간 피폭 유효선량은 0.6 mSv이다 [1.4]. 피폭원별 인공방사선 피폭의 기여도를 살펴보면 **인공방사선에 의한 피폭의 대부분이 진단 및 치료목적의 의료피폭에 기인한다**. 이 외에 핵실험, 직무피폭, 체르노빌 사고 등이 인공방사선피폭에 기여하는데, 그 양은 극히 미미한 수준이다 (그림1-4 참조).



[그림1-4 전 세계 기준 피폭원별 인공방사선피폭]

(1) 의료방사선 피폭

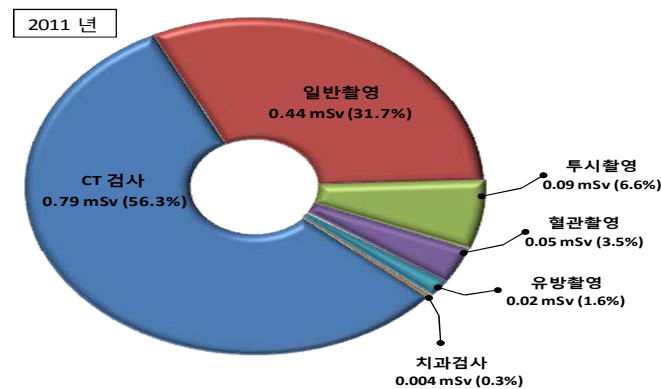
의료방사선 피폭은 의료적인 목적으로 질병의 진단 및 치료과정에서 발생하는 방사선피폭을 의미한다. 진단방사선은 그 적용범위가 다양하며 사용건수도 해마다 증가하는 추세이다. 최근 연구 보고에 의하면 1980년대 미국인 일인당 연간 유효선량은 3.6 mSv이었으며, 그 중 약 15%인 0.53 mSv가 의료방사선에 의한 것이었다 [1.6]. 하지만 2006년에는 유효선량이 6.2 mSv로 증가하였으며, 그 중 약 절반인 3.0 mSv가 의료상 피폭에 기인하였다 (그림1-5 참조).



[그림1-5 방사선원별 미국인의 연간 피폭선량 [1.6]]

최근 식품의약품안전처에서 2007년부터 2011년까지 5년간 국내 의료기관

에서 환자들에게 진단을 목적으로 실시한 방사선검사 건수 및 검사 종류별 피폭량 등의 자료를 조사·분석한 결과, 방사선검사 및 피폭량이 증가하고 있는 것으로 나타났다 [1.7]. 우리나라 국민의 연간 진단용 방사선검사 건수는 2007년 1억6000만 건에서, 2011년 2억 2천만 건으로 5년간 약 35% 증가했다. 국민 일인당 연간 진단용 방사선에 의한 유효선량은 2007년 0.93 mSv에서 2011년 1.4 mSv로 5년간 약 51% 증가하였다 (그림1-6 참조).



[그림1-6 국내 진단방사선 검사별 일인당 유효선량]

(2) 방사성낙진에 의한 피폭

방사성낙진이란 핵무기폭발로 인해 대기권으로 방출된 방사성핵종이 환경으로 유입되는 것을 의미한다. 지상에서 핵실험이 이루어졌을 경우 방사성 물질은 낙진의 형태로 지표로 떨어진다. 이러한 방사성낙진은 지표에서의 방사선량을 증가시키며, 호흡과 음식을 통해 체내로 섭취될 수 있다. 특히 1950년대와 1960년대에 서방국가들의 핵무기 경쟁으로 많은 핵무기실험이 대기권에서 수행되었고 그 결과 다량의 방사성핵종이 지구 전역으로 확산되었다. 핵폭발에 의하여 생성되는 방사성핵종은 수 백 종류에 달하지만, 대부분은 반감기가 짧거나, 생성량이 적어 실제로 사람들의 피폭에 관여하는 핵종은 한정되어 있다. 이 중에서 방사성낙진에 대해 고려해야할 핵종으로는 ^{14}C , ^{137}Cs , ^{95}Zr , ^{90}Sr , ^{106}Ru , ^{144}Ce , ^3H , ^{131}I 이 있다. 현재 방사성낙진에 의한 피폭은 1960년대와 비교하여 1/100 수준이며 자연 방사선피폭원에 비해 현저히 낮은 수준이다.

(3) 원자력발전 시설로부터의 피폭

원자력시설은 충분한 차폐가 이루어지도록 설계·건설되었기 때문에 시설에서 외부로 직접 방출되는 방사선은 없으며, 관심 대상은 방사능의 환경으로의 방출이다. 운영 중인 원자력시설에서 방출된 방사능에 대해 인근 주민을 대상으로 평가한 방사선량은 연간 0.01 mSv 이하 수준이다. 따라서 원자력

시설의 운영으로 인한 일반국민의 일인당 피폭선량은 무시할만한 수준이며, 자세한 내용은 2장에서 기술한다.

(4) 직무로 인한 피폭

국민이 피폭하는 방사선량은 피폭하는 사람의 속성에 따라 직무의 과정에서 방사선을 피폭하는 직무피폭, 질병의 진료나 건강진단을 받는 과정에서 피폭하는 의료피폭, 기타 의식적으로 또는 무의식적으로 피폭하는 일반인 피폭이 있다. 직무 피폭은 달리 표현하면 방사선작업 종사자가 받는 피폭으로서 직업상피폭으로 부르기도 한다. 원자력발전소 종사는 물론, 병원의 의사나 방사선사, 간호사의 피폭도 모두 직무피폭이다.

국내의 경우, 2002년 기준으로 직업상 방사선을 피폭하는 종사자들은 원자력분야, 의료분야, 산업분야, 기타 분야에서 총 62,554명이다 [1.5]. 종사자 분포를 분야별로 보면 의료분야 종사자가 53%로 가장 많았고, 원자력종사자 21.3%, 산업분야 종사자 17.5%, 기타 8.3%이다. 직군별 개인 평균선량 측면에서는 가장 많은 선량을 피폭하는 직군이 체내 핵의학 종사자로서 연간 3.5 mSv를 피폭하고 있고 다음으로는 비파괴검사 종사자가 평균 2.6 mSv를 피폭한다. 항공승무원도 평균 2.6 mSv를 피폭하는 것으로 평가된다. 다음으로는 진단방사선 종사자가 1.5 mSv를 받으며 원전운영이나 핵연료 가공 종사자는 약 1.0 mSv를 피폭한다. 모든 종사자에 대해 평균한 연간 평균 유효선량은 연간 1.48 mSv이다. 모든 종사자의 총 집단선량은 연간 92.3 man-Sv이며, 이 선량을 국민 일인당 선량으로 환산하면 개인평균 연간선량은 0.002 mSv이다.

1.3절 저선량방사선이 인체에 미치는 영향

1. 방사선피폭

가. 방사선피폭 유형

방사선피폭은 방사선원의 위치에 따라 외부피폭과 내부피폭으로 분류한다. 외부피폭은 우주선과 토양, 해수, 지표수, 공기 등에 존재하는 방사선, 즉 인체 외부에 존재하는 방사선원으로부터 피폭하는 것을 의미한다. 외부피폭은 선원 근처를 떠나거나 선원을 다른 곳으로 옮기면 발생되지 않는다. 내부피폭은 생활환경 도처에 존재하는 방사성핵종이 호흡이나 음식물 섭취 등으로 체내로 유입되어 체내에서 방출되는 방사선에 의해서 인체 장기, 기관, 조직 등이 피폭하는 것을 의미한다. 방사성물질이 체내에 있으므로 그 방사능이 붕괴, 소멸할 때까지 지속적으로 피폭이 발생한다.

나. 방사선피폭이 인체에 미치는 영향

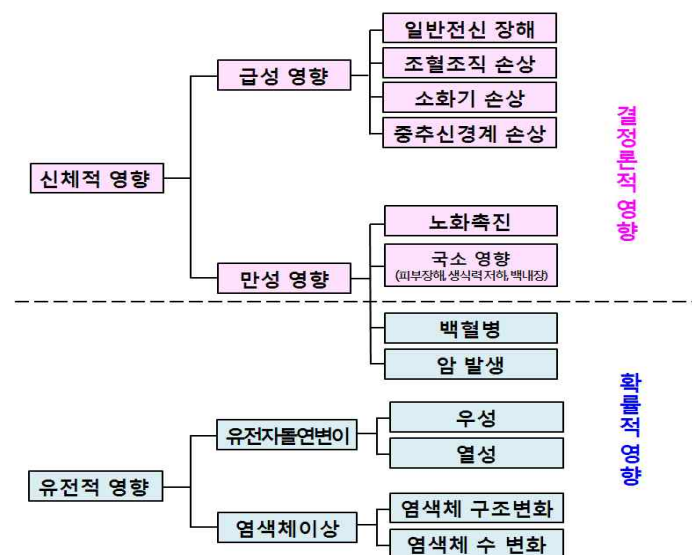
(1) 결정적 영향 및 확률적 영향

사람은 일정수준 이상의 높은 선량에 노출될 때 세포사멸이나 기능장애 등의 유해한 조직반응이 일어남으로써 피해를 입게 되는데, 이를 방사선의 결정적 영향이라 한다. 결정적 영향이 일어나기 위해서는 문턱선량 이상의 방사선에 노출되어야 한다. 문턱선량이란 그 선량까지는 방사선 영향이 나타나지 않는 최대 한의 선량을 말한다. 결정적 영향의 구체적 증상은 피폭부위에 따라 다르며 피폭부위마다 문턱선량값도 다르다. 신체적으로 우려할 수준의 문턱선량값은 1 Gy 이상이다. 1Gy는 사고와 같은 특별한 경우에만 받을 수 있는 선량이다.

전리방사선 피폭으로 인하여 피폭자의 체세포 돌연변이가 발생하고 이와 관련하여 암이 발생하거나, 생식세포 돌연변이로 인하여 자손의 유전질환이 발생하게 되는 영향을 방사선의 확률적 영향이라 한다. 방사선 노출로 인해 이러한 영향은 나타날 수도 있지만 그렇지 않을 수도 있는 확률적인 우연성을 따른다.

(2) 신체적 영향 및 유전적 영향

그림1-7은 방사선의 생물학적 영향을 신체적 영향과 유전적 영향으로 분류하여 나타내었다. 방사선이 체세포를 손상시켜 생기는 것을 신체적 영향이라 하며, 이는 피폭 받은 사람에게만 한정되어 나타난다. 방사선이 생식세포를 손상시켜 다음세대에 영향을 주는 것을 유전적 영향이라 한다.



[그림1-7 방사선의 신체적 영향 및 유전적 영향]

신체적 영향은 방사선에 의한 효과가 조기에 나타나는 급성효과와 잠복기 후에 나타나는 만성효과로 분류된다. 수십일 이내의 짧은 시간동안 전신 또는 이에 필적하는 넓은 신체부위에 비교적 대량의 선량을 받았을 때 이를 급성피폭이라 한다. 급성피폭에 의한 급성효과들은 피폭 후 수개월 이내에 발생한다. 일반적으로 선량에 따라 조혈기장해, 위장장해, 중추신경장해 등이 나타나고, 이는 결정적 영향에 속한다. 선량에 대한 급성효과의 증상은 표1-4에 나타내었다.

[표1-4 선량에 대한 급성피폭의 증상]

선량 (Gy)	증상
0.05~0.25	염색체 이상이 나타나는 최소선량
0.25~0.5	백혈구, 임파구 변화
0.5~0.75	혈액변화를 개별적으로 확인 가능
0.75~1.25	피폭자 10%에서 오심, 구토
1~2	피폭자 20~70%에서 구토 피폭자 30~60%에서 무력증 피폭자 20~35%에서 혈구생산 감소
3~5	조혈기능 장애로 수개월 내 100% 사망 (LD _{75/60} ⁸⁾)
7~10	위장관계 증후군으로 수주~수개월에 100% 사망 (LD _{100/60} ⁹⁾)
15이상	중추신경계 증후군으로 수주 내에 사망

저선량의 방사선을 수개월에서 수년 동안 받는 경우를 만성피폭이라 한다. 만성영향은 확률적 영향에 속하는데, 종양, 노화, 수명단축, 유전적 영향 등이 이에 해당한다. 일반적으로 생물학적 영향은 만성피폭이 급성피폭보다 작다. 이는 방사선을 조금씩 긴 시간동안 받을 경우 세포가 회복되어 영향이 적어지기 때문이다. 만성효과의 특징은 발생한 장애가 방사선에 의한 것인지, 다른 요인에 의한 것인지 구분이 쉽지 않다는 것이다.

2. 저선량 방사선이 인체에 미치는 영향

가. 저선량 방사선의 정의

저선량 방사선이란 자연방사선과 같이 낮은 선량의 방사선을 말하며 일반적으로 100 mSv 이하의 방사선을 의미한다. 국제방사선방호위원회(ICRP)는 100 mSv 또는 그 이하, 미국과학원(NAS: National Academy of Sciences)¹⁰⁾ 방사선영향연구회(BEIR) VII 보고서에 의하면 0 mSv에 가까운

7) LD : Lethal Dose

8) LD_{50/60} : 전신조사로 인해 피폭한 사람이 60일 이내에 50%가 사망하는 선량

9) LD_{100/60} : 전신조사로 인해 피폭한 사람이 60일 이내에 100%가 사망하는 선량

10) 미국 과학자조직으로 국가발전을 위한 과학 분야의 연구와 조사를 목적으로 설립. 주로 정부 각 부처에 대한 과학과 기술자문 실시.

선량부터 약 100 mSv 사이를 저선량으로 명시하고 있다 [1.8]. 1970년대 이전에는 다수의 관련 위원회에서 저선량의 범위를 200 mSv 이하로 규정하였으나, 1974년 미국 국립과학아카데미가 방사선의 물리적, 생물학적 측면 등을 고려한 결과 100 mSv의 수치가 자연적인 방사선 노출의 수준으로 간주될 수 있다는 결론을 내렸으며, 부분적 논란은 있으나 현재까지 이 기준이 일반적인 기준으로 간주되고 있다. 100 mSv의 저선량 방사선은 연간 자연방사선에 의한 피폭선량인 2.4~3 mSv의 30~40배에 달하며, 일반적인 흉부 CT 검사 10~20회를 수행한 정도의 선량이다.

나. 저선량 방사선 영향에 대한 모델

유엔방사선영향과학위원회(UNSCEAR), 미국과학원, 국제방사선방호위원회(ICRP) 등 국제적 전문기구에서는 방사선 위해에 관한 과학적 검토와 평가를 수행하고 있으며, 지금까지의 근거에 의하면 대략 100 mSv 이하의 저선량 방사선 구간에서 연구한 암 발생 위험에 관한 여러 문헌이 있으나 그 위험의 근거는 불확실성을 안고 있다.

일반인 피폭 및 의료방사선 노출에 따른 피폭은 대부분 100 mSv 이하의 범위 내에서 일어난다. 현재까지 진행된 대부분의 역학연구 결과에서는 100 mSv 이하의 방사선피폭에 따른 직접적인 암 발생을 증명하지 못하였으나 다수의 학회 및 연구기관에서는 저선량 방사선의 영향에 대한 다양한 모델을 제시하고 있다.

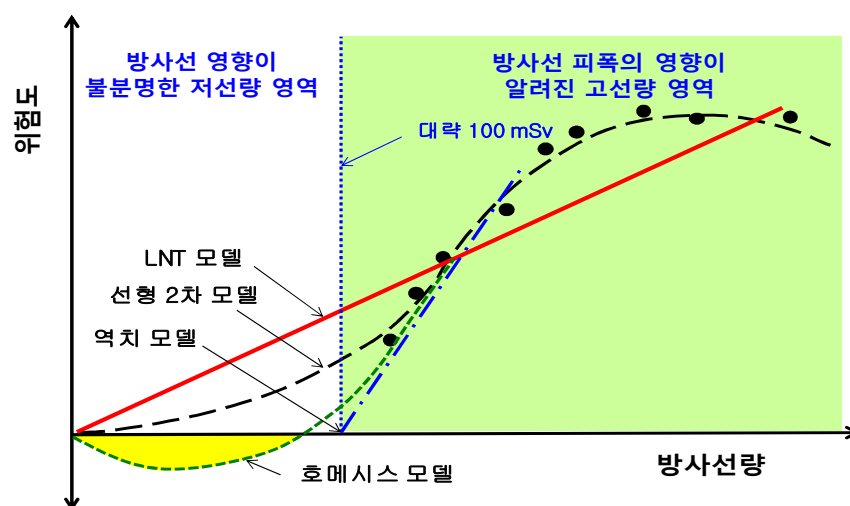
미국과학원 방사선영향연구회(BEIR: Biological Effects of Ionizing Radiation) VII 보고서¹¹⁾에 의하면 저선량 방사선의 건강 위해와 관련하여 100 mSv 선량 이하에서는 문턱 없는 선형(LNT: linear- non-threshold) 모델을 현재까지 가장 합리적인 모형으로 제시하였다 [1.8]. 반면, 프랑스 과학아카데미에서는 LNT 모델이 현재의 과학적 증거에 의해 지지할 수 없음을 밝힌 바 있다 [1.9].

LNT 모델은 단위용량 당 위험을 보수적으로 예측하는 모형의 하나로 '0' 이상의 어떠한 선량피폭도 인체에 위해를 끼칠 가능성이 있음을 의미하므로, 모형을 통하여 예측된 위험의 불확실성에 대한 부분을 고려해야 한다. 어떤 용량에서도 안전하지 않다는 개념은 근거 없는 두려움을 낳을 수 있으며, 규제를 강화시킬 수도 있다. 국제원자력기구에 따르면, 체르노빌 원전사고 이후 서유럽 전역에서 사고의 영향으로 100,000~200,000 건의 유산이 이루어진 것으로 알려졌다. 국제방사선방호위원회(ICRP)에서는 LNT 모델을 이용한 가정이 방사

11) 미국과학원이 발표한 저선량 방사선의 인체영향에 관한 보고서

선방호의 최적화를 위해 필요하다고 인정하지만, 큰 인구 집단이 저선량 방사선을 장기간에 걸쳐 피폭하는 것을 이 모델을 이용하여 암 발생률을 예측하여서는 안 된다고 권고하고 있다 [1.1, 1.2].

그림1-8은 피폭 방사선량과 그로 인한 암 발생 위험 관계를 나타내는 방사선의 인체유해성에 대한 선량반응 모델이다. 그림에서 우측 부분은 높은 선량 구간을 나타내는데, 일본 원폭 생존자에 대한 추적연구의 결과로 방사선 노출에 따른 암 발생의 위험성이 증명이 된 구간이다. 그래프의 좌측 부분인 방사선 저용량 구간은 아직 근거가 불충분하여 암 발생과의 연관성이 확립되지 않은 부분이다.



[그림1-8 방사선의 인체유해성에 대한 선량반응 모델]

방사선량 반응모델에서 선형 2차방정식 모델은 방사선 피폭량이 증가함에 따라 암 발생의 위험도도 증가하나 타 모델에 비해 완만한 증가 곡선을 보이는 모델이다. 선형 역치¹²⁾ 모델은 선형 무역치 모델과 상반된 모델이다. 역치 모델은 어떤 문턱치가 존재하여 그 이하에서는 암 발생이 증가하지 않지만 이 수치를 넘어서는 피폭을 받을 시에는 암 발생 위험도가 방사선 피폭량에 비례하여 증가한다는 모델이다. 호메시스 모델은 저선량의 이온화 방사선이 생물에 유익하며 생체 방어력을 증가시켜, 오히려 건강에 유익한 영향을 가져온다고 가정하는 모델이다

방사선량과 위험의 관계, 즉 방사선 영향 모델의 형태는 위험을 관리하고 소통하는 방법에 크게 영향을 미친다. LNT 이론에 의하면 용량이 증가할수록 위험이 증가하게 되므로 위험관리의 전략은 위험을 최소화하기 위하여 용량을 줄이는 것에 집중하게 된다. 실제 완전한 안전을 위하여 위험을 ‘0’ 으로 하는

12) 생물체가 자극에 대한 반응을 일으키는데 필요한 최소한도의 자극의 강도

것은 불가능하므로 위험 감소 접근을 하게 되고 이것이 현재 방사선 안전관리의 근본 철학인 ALARA(As Low As Reasonably Achievable)¹³⁾이며, 이때 방사선량 감소를 위하여 소요되는 사회적, 경제적 요소의 비용과 기대되는 이득이 균형을 이루어야 한다.

방사선이 일으킬 수 있는 위험에 문턱값이 존재한다면 방사선 안전관리는 훨씬 용이해질 것이다. 왜냐하면 역치 이하의 선량에서는 위험이 0이라는 것이 확실하기 때문이다. 저선량 방사선에 대한 근거의 축적이 이루어지면서 100~700 mSv 사이에 역치가 있을 것이라고 일부 전문가들은 예측하고 있다. 이러한 주장에는 100~700 mSv 이하의 정해진 역치 선량 이하에서는 인체의 항상성 유지 기전에 의해 방사선에 의한 세포 손상은 스스로 복구가 가능하다는 가설에 근거한다.

1.4절 피폭선량한도의 의미

1. 피폭선량한도의 의미

선량한도란 방사선방호체계의 일환으로써 계획피폭상황¹⁴⁾에서 초과해서는 안되는 피폭량을 의미하며, 개인 유효선량이나 등가선량 값으로 나타낸다 [1.2]. 즉, 선량한도는 환자의 의료피폭이 아닌 직업상피폭이나 일반인 피폭과 같은 계획피폭상황에만 적용된다. 법으로 정한 한도이어서 이를 위반할 경우, 곧 법률을 위반한 것을 의미한다. 피폭상황에 대하여 방사선방호를 적극적으로 이행하기 위하여 법으로 강제하고 있는 것이 선량한도이다.

선량한도는 보편적 판단에서 용인 가능한 피폭 수준이며, 한도를 초과하면 위험하고 초과하지 않으면 안전하다는 경계선을 의미하는 것은 아니다. 방사선 방호의 기본 논리는 피폭으로 인한 위험은 문턱 없이 선량에 비례함을 가정한 선형 모델(LNT)을 바탕으로 하고 있다. 단, 이 가정이 매우 작은 선량에서도 위험이 실제로 있음을 의미하는 것이 아님에 주의해야 한다. 연간 1 mSv를 포함한 100 mSv 이하 저선량의 범위에서는 어떤 해로운 영향이 있는지 아니면 이로운 영향이 있는지 명확한 과학적 근거가 없다. 다시 말해서 선량한도는 위험을 최소로 하거나 없게 하는 방사선방호 목적을 달성하고자 적극적으로 피폭선량을 관리하기 위하여 설정하는 하나의 지표일 뿐이다.

13) 국제방사선방호위원회(ICRP)가 권고한 방사선 방호의 기본 철학으로 사회적 경제적인 요소들을 감안하여 방사선피폭의 수준을 합리적으로 달성 가능한 한 감소시킨다는 뜻

14) 방사선피폭이 충분히 예측되어 사전에 적절한 방호 조치를 강구할 수 있어 계획에 따라 개인선량을 일정 제한치 이내로 관리할 수 있는 피폭 상황

2. 선량한도 권고

가. 선량한도 권고치의 변화

초기 국제방사선방호위원회에서 발표한 최초의 방사선피폭에 대한 일반 권고는 1928년 의료용 선원의 취급시간을 제한하는 방법을 통한 의료인 보호에 관한 것이었다[1.2]. 이 권고에 제시된 제한치를 현재 통용되는 단위로 환산하면 연간 약 1,000 mSv 상당 선량으로 평가된다. 초기에 발표된 권고들은 문턱영향 방지에 대한 정성적 방법으로 시작했다. 1934년에는 현재 종사자 선량한도의 약 10배에 해당하는 연간 500 mSv를 권고했으며, 1951년에는 주당 3 mSv(연간 150 mSv)로 평가되는 선량한도를 제안했다.

군사와 산업 분야에서 원자력 에너지 사용이 확대됨에 따라 1950년대 초기에 일반인 방호를 위한 권고를 도입했다. 1956년도에는 종사자에 대해 50 mSv, 일반인에 대해 5 mSv의 연간 선량한도를 설정하였다. 하지만 확률적 영향으로 정의하는 영향의 가능성과 그러한 유형의 영향에 문턱 존재여부를 확인할 수 없다는 사실을 인식하여 1954년도에는 모든 종류의 전리방사선 피폭을 가능한 최소 준위로 감소시키기 위해 노력해야 한다고 권고 했다. 그 후에는 ‘실행 가능한 낮게’, ‘용이하게 달성할 수 있는 한 낮게’, ‘경제적, 사회적 인자를 고려하여 합리적으로 달성 가능한 한 낮게’ 유지하도록 계속해서 개선되었다.

1977년 국제방사선방호위원회 권고(ICRP 26 권고)에서 처음으로 방사선의 확률적 영향 위험을 정량화했으며, ‘개인선량한도’ 라는 새로운 원칙을 제안했다[1.3]. 그 후 유엔방사선영향과학위원회(UNSCEAR) 및 미국 방사선영향평가회(BEIR)에서 수행한 히로시마, 나가사키의 원폭 피폭선량 재평가 사업(DS 86: Dosimetry System 86)에 의해 원폭 피폭데이터의 암사망 확률이 수정되었다. 이에, 1991년 ICRP 60 권고에는 ICRP 26 권고 내용에서 부분적으로 방사선피폭으로 인한 위험 평가치의 상향조정 등을 수행하여 권고를 대대적으로 개정하였다.

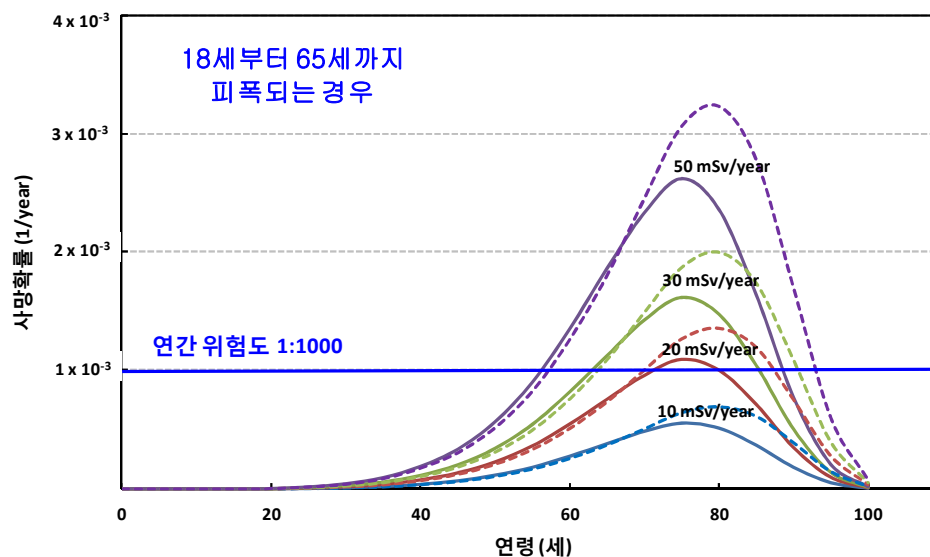
[표1-5 국제방사선방호위원회 26 및 60 권고에 따른 선량한도 (단위: mSv/y) [1.1, 1.3]]

구분		작업자		일반인	
		ICRP 26	ICRP 60	ICRP 26	ICRP 60
유효선량당량		50	20	5	1
등가선량	수정체	150	150	50	15
	단일 장기 또는 조직	500	-	50	-
	피부	-	500	-	50
	손, 발	-	500	-	50

나. 선량한도 설정 방법

1977년 국제방사선방호위원회에서는 방사선 위험수준을 평가하여, 비교적 안전한 산업과 비교했을 때, 대등한 위험 수준($10^{-3}/y$)에 해당하는 선량값으로 선량한도를 설정하였다 [1.1]. 그러나 1980년대에 수행된 일본 원폭피해 생존자에 대한 선량 재평가 사업인 DS86의 결과 방사선 위험도가 과거 평가치에 비해 크게 증가하였고, 일반 산업현장에서의 위험도 수준도 변화하였다. 또한 방사선에 의한 치명적 위험만을 고려하는 것이 적절하지 않다는 판단에서 ICRP 60에서는 그 접근방식을 수정하였다. 즉, 방사선에 의한 확률적 영향으로 인한 치명적 위험은 물론 비치명적 위험까지를 고려한 위해계수를 도출하고, 이를 이용하여 일정한 수준의 피폭이 지속될 경우 생애 위험을 평가하여 그 위험이 사회적으로 용인되기 어려운 수준보다 낮게 되는 선량 값을 채택하였다.

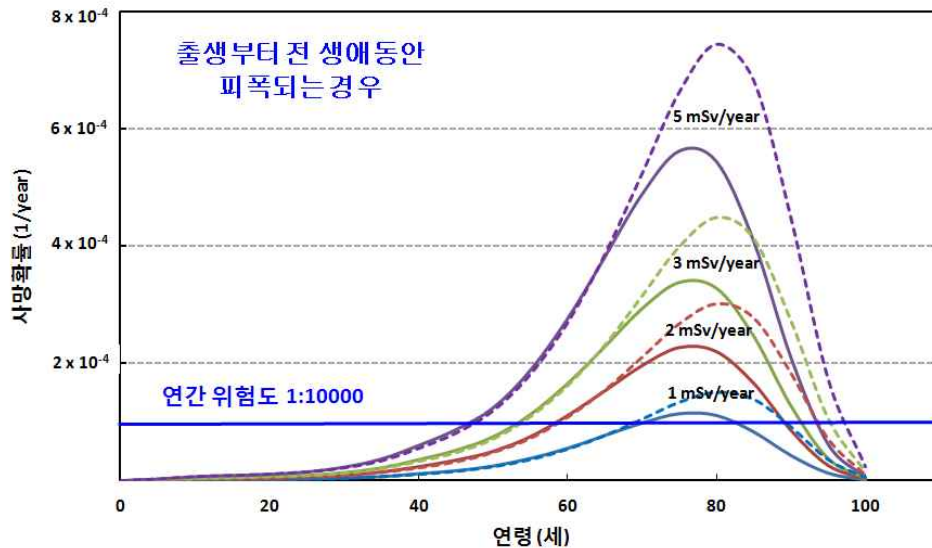
직업상피폭의 경우 그림1-9와 같이 ICRP 26 권고의 선량한도인 50 mSv는 직업상피폭이 인정되는 18세부터 퇴직까지 계속해서 매년 피폭하는 것을 가정할 때 생애 위험의 추세가 60세 이후 노년기에 용인할 수 있다고 보는 선인 $10^{-3}/y$ 에 비해 현저히 높아 부적절한 것으로 나타나고 있다. 이 보다 낮은 방사선량에 대해 동일한 평가를 반복한 결과 연간 20 mSv의 피폭은 비록 노년기 수년간은 $10^{-3}/y$ 수준을 약간 상회하지만 직선이나 곡선 아래의 면적에 해당하는 전체 위험은 충분히 작으므로 편리한 수인 20 mSv/y가 새로운 선량한도로 채택되었다.



[그림1-9 직업상피폭의 선량한도를 설정하기 위한 피폭 방사선량에 따른 위험도 평가¹⁵⁾]

15) 점선은 남성, 실선은 여성에 대한 위험도

일반인에 대한 선량한도를 채택함에도 같은 논리를 적용할 수 있다. 다만 일반인의 경우는 피폭의 시기를 0세부터 일생 동안으로 확장하고, 용인 불가한 위험의 수준은 $10^{-4}/y$ 으로 낮아졌다. 위와 같은 방법으로 설정한 선량한도는 연간 1 mSv이다.



[그림1-10 일반인의 선량한도를 설정하기 위한 피폭 방사선량에 따른 위험도 평가¹⁶⁾]

다른 접근 방법으로 누구나 피할 수 없는 자연방사선에 피폭하는 경우를 고려하여 선량한도를 정한다. 유엔방사선영향과학위원회는 현재까지의 과학 지식과 임상자료를 검토하여, 세계 평균 수준의 자연방사선에 피폭하였기 때문에 그로 인한 건강상의 영향이 확실하게 증가한다고는 할 수 없다고 보고하였다.[1-10] 즉 자연방사선 수준의 피폭에 의해서는 암발생과 같은 확률론적 영향이 없다는 의미이다. 즉 자연방사선 수준의 피폭에 의해서는 확률론적 영향이 없다고 생각한다. 전 세계적으로 자연방사선은 지역과 고도에 따라 다르나, 평균적으로 1~3 mSv 인 점을 고려하여 그 변동 폭이라 할 수 있는 연간 1 mSv를 일반인에 대한 선량한도로 정할 수 있는 것이다. 자연방사선과 인공방사선이 본질적으로 차이가 없기 때문이다. 이 경우 과학기술적 근거가 불충분하다고 할 수 있으나 방사선방호 목적은 충분히 달성할 수 있다. 저선량 피폭으로 인하여 인체에 위해가 있음을 임상학적으로 분명히 증명할 수 없는 현재의 과학지식과 아무리 작은 선량이라도 위해를 줄 수 있다고 하는 LNT 가설을 방사선방호의 근거로 하고 있는 현재의 상황에서 이러한 방법으로 선량한도를 설정하는 것도 가능하다.

다. 국내 선량한도

선량한도는 국제방사선방호위원회가 그 값을 권고하고 이를 국가의 규제 기관이 받아들여 규정화함으로써 강제규범이 된다. 선량한도 수치는 각 국가의 규제기관이 조정할 수 있으나 일반적으로 국제방사선방호위원회가 권고한 값을 그대로 사용하고 있으며, 국내에서는 국제방사선방호위원회 60 권고를 도입하고 있다. 아래의 표1-6에는 국내 원자력안전법에서 제시하고 있는 선량한도를 나타내었다. 또한 유효선량만으로 관리가 미흡한 일부 조직에 대해서는 별도로 등가선량한도를 부여하고 있다. 일반인에 대해 유효선량한도를 연간 1 mSv로 하고 있고, 방사선작업종사자와 동일한 방식으로 5년간 평균 1 mSv를 초과하지 않는 범위에서 특별한 1년에 대해서는 1 mSv를 초과함이 인정된다.

[표1-6 국내 원자력안전법에서 제시하는 선량한도]

구분		방사선작업종사자	수시출입자 및 운반종사자	일반인
유효선량한도		연간 50 mSv를 넘지 않는 범위에서 5년간 100 mSv	연간 12 mSv	연간 1 mSv ¹⁶⁾
등가선량 한도	수정체	연간 150 mSv	연간 15 mSv	연간 15 mSv
	손·발 및 피부	연간 500 mSv	연간 50 mSv	연간 50 mSv

3. 일반인 선량한도 1 mSv의 특징

직업상피폭과 일반인 피폭을 따로 구분하고, 일반인의 연간 선량한도를 1 mSv로 설정하여 직업상피폭의 선량한도에 비해 낮게 적용하는 이유는 일반인의 피폭이 다음과 같은 특징을 지니고 있기 때문이다 [1.11]. 일반인은 직업상피폭과 달리 적극적인 방사선 관리 아래에 놓여있지 않다. 직업상피폭의 경우 피폭선량 관리 및 건강관리 등을 받고 있으며, 이에 따라 이상사태가 발생할 경우 그것을 조기에 발견하고 상황에 따라 대처하는 것이 가능하다. 하지만 일반인 피폭의 경우에는 개개인에 대하여 관리한다는 것이 현실적으로 불가능하다. 일반인에게는 피폭에 따른 직접적인 이익이 돌아가지 않는다. 직업상피폭의 경우 방사선을 취급하는 일에 종사함에 따라 급여와 같은 형태의 직접적인 이익을 받지만 일반인에게는 그러한 혜택이 없다. 따라서 일반인 피폭은 직업상피폭과는 다르게 위험을 감수하는 수준이 낮아야 한다.

16) 일반인의 경우 5년간 평균하여 연 1 mSv를 넘지 않는 범위에서 단일한 1년에 대하여 1 mSv를 넘는 값이 인정될 수 있다.

직업상피폭은 특정한 소규모 집단을 대상으로 하나 일반인 피폭은 그 대상이 불특정 다수이다. 일반인의 구성원에는 어린이도 포함된다. 방사선작업을 하는 작업자들은 모두 법적으로 만 18세 이상의 성인이지만, 일반인 중에는 상대적으로 방사선의 감수성이 높은 소아나 유아 그룹이 포함되어 있다. 일반인은 피폭에 대한 선택의 자유가 없다. 직업상피폭은 당사자가 방사선작업에 종사할 것인가 아닌가에 대해 어떤 식으로든 판단하여 선택할 수 있는 자유를 가지고 있으나, 일반인은 원칙적으로 선택의 자유가 없다. 달리 말하면 일반인 피폭은 자신의 의사에 반하는 피폭이다. 일반인은 대다수가 자기 자신의 직업과 연관된 위험에도 노출되어 있다. 직업에는 크기는 다르나 모두 위험이 뒤따르며 일반인의 대부분은 자기 자신의 직업에 종사하고 있다. 따라서 일반인 피폭은 방사선을 취급하지 않는 각 개인의 직업에 따르는 위험에 방사선피폭으로 인한 위험이 추가되므로 직업상피폭과 같은 방법으로 한도를 설정하는 것은 불합리하다. 따라서 일반인의 선량한도를 설정하는 방법으로 자연방사선의 변동폭인 1 mSv를 사용하는 것은 현재의 활용가능한 과학적 지식과 방사선방호 목적의 달성이라는 측면에서 오히려 합리적일 수 있다.

일반인에 대한 선량한도의 대상에서 사고 상황에 따른 피폭, 라돈을 포함한 자연방선 피폭, 우주선 피폭, 진단 및 치료목적의 의료방사선피폭 등은 제외된다. 즉, 주변에 원자력시설(원자력발전소, 방사성폐기물 저장고, 가속기 등)을 운영함에 따라 방사성물질이 시설외부로 방출되어 생활환경에 존재하게 됨으로 해서 받게 되는 선량만을 고려한다. 국내 모든 원자력시설은 원자력안전법에 따라 그 운영으로 인하여 일반인이 피폭하는 선량이 선량한도에 크게 못 미치는 일정기준 이하를 유지하도록 관리되고 있다.

1.5 절 참고문헌

- [1.1] ICRP. 1990 recommendations of the international commission on radiological protection. International Commission on Radiological Protection; ICRP Publication 60; 1991.
- [1.2] ICRP. The 2007 recommendations of the International Commission on Radiological Protection. International Commission on Radiological Protection; ICRP Publication 103; 2007.
- [1.3] ICRP. Recommendations of the International Commission on Radiological Protection; ICRP Publication 26; 1977.
- [1.4] UNSCEAR. Sources and effects of ionizing radiation. Vol. I Sources. New York: United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation; 2000.
- [1.5] 원자력안전기술원. 우리나라의 방사선환경. KINS/GR-356, 2009.
- [1.6] NCRP. Ionizing radiation exposure of the population of the United States. [Bethesda, MD: National Council on Radiation Protection and Measurements; NCRP Report No. 160; 2009.
- [1.7] 식품의약품안전처. 진단용 방사선 사용에 따른 국민 방사선량 평가 연구, 13172방사선579, 2013.
- [1.8] NAS, Health Risks From Exposure to Low Levels of Ionizing Radiation: BEIR VII, Phase 2. Washington, DC: National Academy of Sciences, 2005.
- [1.9] Academy of Sciences and National Academy of Medicine. Dose-effect relationships and estimation of the carcinogenic effects of low doses of ionizing radiation. Académie des Sciences & Académie nationale de Médecine; 2005.
- [1.10] A.J. Gonzalez, Clarifying the Paradigm on Radiation Effects & Safety Management: UNSCEAR Report on Attribution of Effects and Inference of Risks, Nucl. Eng. & Tech. V.46, No.4, 467-474, 2014
- [1.11] 동위원소협회, 한권으로 끝내는 방사선 장애방어, 2011

2장. 원자력발전소 방사선관리

2.1절 원자력발전소 방사성물질 배출관리

1. 개요

원자력이용시설의 운영과정에서 필연적으로 방사성물질이 발생되며 이러한 방사성물질은 방사능 농도와 무관하게 원자력안전법에서는 방사성폐기물로 간주되어 관리되고 있다.

방사성물질의 환경 배출은 원자력이용시설의 운영과정에서 수반되는 일상적인 행위로서, 체르노빌, 후쿠시마 사고 후 방사선 위협에 대한 일반 국민의 우려가 점증되고 있어 원자력이용시설에 대한 국민수용성을 확보하기 위해 엄격한 관리 하에 방사성물질이 배출된다.

원자력발전소에서는 주변 주민의 안전을 위해 여러 단계의 방사선관리 정책을 수립하여 운영하고 있다. 첫 번째 단계가 방사성물질 배출량을 일정 기준 이하로 통제하는 배출관리 정책이다. 두 번째는 원전 주변 방사선 환경을 감시하여 예기치 않은 방사성물질의 배출과 장기적인 방사선(능) 준위를 지속적으로 확인하는 것이다. 마지막 세 번째 단계는 최종적으로 환경감시 결과와 원전으로부터 환경으로 배출된 방사성물질의 양을 토대로 주민의 방사선 영향을 평가하여 기준치 이내로 유지되고 있음을 확인하는 것이다. 본 절에서는 국내원전의 방사성물질의 배출관리 정책과 현황을 살펴보았다.

2. 방사성물질 배출관리 기본 개념 및 원칙

방사선관리구역¹⁷⁾에서 발생된 모든 고체방사성폐기물은 원칙적으로 임시저장 단계를 거쳐 최종적으로 방사성폐기물 처분시설로 이송·처분되지만, 방사선적 위험도가 원자력안전위원회가 정하는 기준 미만의 미미한 수준에 대한 고체폐기물은 예외적으로 자체처분 관련 규정에 따라 비방사성폐기물로서 매립·소각 또는 재활용할 수 있도록 허용하고 있다. 액체 및 기체상태의 방사성폐기물은 허가방출(authorized discharge) 개념에 따라 적절한 처리 과정을 거친 후 감시 및 통제된 상태에서 환경으로 배출¹⁸⁾되고 있다. 환경으로 배출되는 액체 및 기체상태의 물질을 배출물이라 하고, 배출물 내에 존재하는 방사성물질의 감시 및 통제를 위한 일련의 행위를 포괄적으로 “방사성

17) 방사선관리구역: 외부의 방사선량률, 공기 중의 방사능 농도 또는 방사성물질에 따라 오염된 물질의 표면의 오염도가 원자력안전위원회 규칙으로 정하는 값을 초과할 우려가 있는 곳으로 방사선의 안전관리를 위하여 사람의 출입을 관리하고 출입자에 대하여 방사선의 장해를 방지하기 위한 조치가 필요한 구역.

18) 배출: 방사성물질 또는 그로 인하여 오염된 물질로서 원자력이용시설에서 정상운영 중에 발생한 액체 또는 기체 상태의 방사성물질 등을 원자력안전위원회가 정하는 제한값 이내에서 배수시설 또는 배기시설을 통하여 계획적이고 통제된 상태에서 외부로 내보내는 것.

물질 배출관리” 라고 한다. 국내 원자력이용시설 방사성물질 배출관리는 미국 원자력규제위원회의(US/NRC) 및 국제기구의 규제기준에 따라 수립 및 운영되고 있다 [2.1~2.8].

가. 배출물의 종류

배출물은 발생원 또는 물리적 상태에 따라 액체배출물과 기체배출물로 분류된다. 액체배출물(Liquid effluent)은 주로 계통폐액 또는 액체방사성폐기물을 처리하는 과정에서 발생되며, 일반적으로 용존 또는 비용존 상태의 고체상 방사성물질을 함유하지만 용존 상태의 불활성기체(Noble gas)를 함유하기도 한다. 기체배출물(Gaseous effluent)은 주로 계통의 배기/탈기 또는 건물의 배기 과정에서 발생되며, 주로 불활성기체 및 에어로졸(Aerosol)¹⁹⁾ 상태의 방사성물질을 함유하게 된다.

나. 배출물 관리의 대상

원자력발전소에서 발생하는 모든 기체 및 액체상 물질은 방사성물질로 오염될 가능성이 있으므로 환경으로 배출되는 모든 기체 및 액체상 배출물은 원칙적으로 규제관리(Regulatory control)의 대상이다. 따라서 국내에서 운영 중인 모든 원자로의 액체방사성폐기물관리계통(Liquid radioactive waste management system) 배출폐액 이외에 증기발생기 취출수, 터빈건물 바닥배수, 복수탈염설비 재생폐액 등 환경으로 배출되는 2차 계통 폐액과 복수기 진공배기, 탈기기, 터빈축 밀봉계통 등 2차 배기계통을 통한 방사성물질 또한 관리 대상이다.

다. 운영 중 방사성물질 배출관리

방사성물질 배출관리는 원전의 설계, 시운전, 운영 및 해체 등 모든 과정에서 적용된다. 여기서는 원전 정상운영 중 방사선 환경 영향에 초점을 두고 운영단계의 방사성물질 배출관리 방안에 대해서만 기술한다.

원자력 발전 사업자는 원전의 안전 운영을 위해 배출물 관리프로그램을 수립, 이행하고 있다. 배출물 관리프로그램에는 표2-1에서 보여주는 배출물 관리의 기본 요소를 반영하여 배출물 감시기 운영방안, 배출물에 대한 시료채취분석 계획 및 관련 세부절차가 포함된다. 운영 중 모든 운전모드에서 방사능 배출관리기준(Effluent control limit)이 만족되고 장기적으로는 설계 목표치가 만족됨을 입증하는 프로그램이 이행되어야 한다. 방사성물질 환경 배출 현황은 주기적으로 규제기관에 보고되어야 하며, 이를 통해 관련 법적

19) 에어로졸: 대기 중에 떠도는 고체 또는 액체의 미세한 입자

요건의 만족여부를 검증한다. 현재 원자력안전법 시행규칙 제127조(보고)에서는 관련 내용을 매분기마다 보고하도록 규정하고 있다.

[표2-1 원자력발전소 운영단계 배출물관리의 구성요소]

- 환경배출량의 최소화 및 ALARA(As Low As Reasonably Achievable)
- 환경배출량에 대한 정확한 평가
- 감시.통제된 상태에서 계획적으로 배출
- 관련 요건에 대한 부합성의 입증(선원감시 및 환경감시)
- 배출경로(배수구 및 배기구) 이외의 유출경로 통제
- 피드백(배출특성 및 환경조건 변화여부에 대한 재검토)

원전 주변 환경의 방사선/능에 대한 감시는 배출물 관리와는 별도로 이행되고 있으며, 이는 배출물감시의 적합성을 검증하고 환경방사선/능의 변화 추이를 감시하는데 그 목적이 있다. 운영단계에서는 설계단계에서 고려된 계통 분류 및 배출물관리 설계개념을 유지하기 위한 절차가 수립.이행되어야 한다. 이와 관련하여 비정상 배출의 발생 가능성을 최소화하기 위한 절차 수립과, 설계 및 운전방법의 변경 시 기존 배출물관리 체계에 영향을 줄 수 있는 사항에 대해 평가되어야 한다. 또한 운영허가 시 확인된 배출조건 또는 부지 주변 환경 조건의 변동여부가 주기적으로 재검토되어야 한다.

기본적으로 원자력시설에서 환경으로 배출되는 방사성물질은 계획에 따라 감시 및 통제된 상태로 배출되어야 한다. 계획되지 않은 배출(Unplanned release), 통제되지 않은 배출(Uncontrolled release)을 비정상배출(Abnormal release)이라고 하며, 비정상 배출이 발생할 경우에는 사후 방사성물질의 환경 배출량을 평가해야 한다. 지정된 배출 경로를 벗어난 방사성물질의 배출 또한 비정상 배출의 일종이다. 방사성물질의 배출 경로에는 규제 제한값을 초과하는 방사성물질의 환경배출을 억제하기 위하여 경보 및 연동(자동차단) 기능이 확보된 방사성배출물감시기를 배출 경로에 설치하여 배출물이 연속적으로 감시되어야 한다. 배출물의 방사능 농도는 배출 전 또는 주기적인 시료채취 및 분석을 통해 정량화되어야 하며, 부지 주변 주민선량 평가를 통하여 관련 규제요건의 만족여부를 입증하여야 한다. 이러한 일련의 배출물관리 체계에 따른 배출을 감시.통제된 상태의 배출이라고 말할 수 있다.

라. 방사성물질 배출관리 관련 법 및 규칙

국내 원자력관계법령에서는 방사성물질 배출관리가 국민의 건강 및 환경상의 위해방지 요건을 만족하여야 함을 원전의 건설허가, 운영허가 및 정기검사 합격의 조건으로 규정하고 있으며, 배출 제한값과 관련 계측설비의

설치 등 최소한의 요건을 명시하고 있다. 이러한 법적인 요건을 이행하기 위한 세부적인 방안은 호기별 운영기술지침서 및 최종안전성분석보고서 등의 인허가 약정을 통하여 성문화되어 적용되고 있다. 표2-2에 방사성물질 배출 관리 관련 법 및 규칙을 정리하여 놓았다.

[표2-2 방사성물질 배출관리 관련 법 및 규칙]

종 류		내 용
원자력 안전법	제11조 (건설허가기준)	3. 발전용 원자로 및 관계시설의 건설로 인하여 발생하는 방사성물질로부터 국민의 건강 및 환경상의 위해를 방지하기 위하여 대통령으로 정하는 기준에 적합할 것
	제21조 (운영허가기준)	3. 발전용 원자로 및 관계시설의 운영으로 인하여 발생하는 방사성물질로부터 국민의 건강 및 환경상의 위해를 방지하기 위하여 대통령으로 정하는 기준에 적합할 것
원자력 안전법 시행령	제35조 (정기검사)	1. 법 21조 제1호부터 제3호까지의 규정에 따른 기술기준에 맞게 운영되고 있을 것
	제174조 (환경상의 위해방지)	1. 시설에서 배출되는 액체 및 기체 상태의 방사성물질의 농도가 위원회가 정하는 기준에 맞을 것 2. 그 밖에 방사선 위해 방지를 위하여 위원회가 정하는 기준에 맞을 것
원자력 안전법 시행규칙 ²⁰⁾	제2조 (정의)	3. 배수설비라 함은 액체상태의 방사성물질이아 그에 의하여 오염된 액체를 정화하거나 배출하는 설비로서 농축기.분리기.이온교환장치 등의 배출액 처리장치 또는 저장탱크.희석탱크.여과탱크 등 배출액 정화탱크의 배수관.배수구 등을 말한다.
	제10조 (처리 및 배출)	3.핵연료물질 등을 처리 및 배출함에 있어 기체상의 방사성폐기물은... 4.핵연료물질 등을 처리 및 배출함에 있어 액체상의 방사성폐기물은...
	제20조 (계측 및 제어장치)	① 계측장치 설치 7. 배기통의 출구 또는 이에 근접하는 곳에서의 배기중 방사성물질의 농도 8. 배수구 또는 이에 근접하는 곳에서의 배기중 방사성물질의 농도
	제32조 (방사성폐기물의 처리 및 저장시설)	기체 및 액체 방사성폐기물 처리 시설은 다음 각목의 기준에 적합할 것. 라. 원자로시설에서 발생하는 액체 또는 기체 방사성폐기물은 배기구 또는 배기구외의 곳에서 방사성폐기물이 배출되지 않도록 할 것.
	제38조 (경보장치 등)	① 원자로 시설에는 ... 운전현저한 지장을 미칠 우려가 발생한 때 ... 방사선량률이 현저하게 상승할 때 이들을 검출하여 자동적으로 경보하는 장치를 설치하여야 한다.
	제66조 (방사성폐기물 관리계획)	① 방사성폐기물관리계획을 수립하여 방사성폐기물 및 유출물의 발생을 최소화, 환경에 미치는 영향을 가능한 낮게 유지 ④ 방사성폐기물의 배출에 관한 요건을 방사선안전규칙 제10조에 위임
원안위 고시 ²¹⁾	제6조 (배출관리기준)	① ...원자력안전위원회가 정하는 제한값이란 다음과 같다. ② 배출관리 기준을 적용함에 있어 배기중 또는 배수중 방사성핵종의 허용농도는 1주간의 평균치로 한다. 다만, 부득이한 경우에는 3개월간의 평균치로 갈음할 수 있다.
	제16조 (환경상의 위해방지)	① 영 제174조 제1호로서 원자력안전위원회가 정하는 기준이란 기체 및 액체상태의 방사성물질의 제한구역 경계에서의 농도로서 별표3의 제1란의 방사성핵종에 대한 제5란 및 8란에서 정하는 농도를 말한다. ② 영 제174조 제2호에서 그 밖의 방사선위해 방지를 위하여 원자력안전위원회가 정하는 기준이란 다음 각 호와 같다. 1. 해당 시설의 설계에 적용할 기준 2. 동일부지 내에 다수의 원자력관계시설을 운영하는 경우

원자력안전위원회고시 제2014-34호²²⁾ 제6조(배출관리기준) 및 제16조(환경상의 위해방지)에서 규정한 액체 및 기체유출물에 대한 배출관리기준은 원자력안전법 시행령에 명시된 일반인 연간 **선량한도**²³⁾를 근거로 IAEA BSS No.115 [2.9]의 선량계수 등 국제기준을 반영하여 유도한 것이다. 제16조 제2항에 규정한 호기당 선량목표치와 동일부지 내에 다수의 원자력시설을 운영하는 경우에 대한 운영목표치는 환경상 위해방지를 위해 ALARA 방호원칙에 입각하여 더 엄격하게 방사선 관리를 하도록 원자력사업자에게 부과한 운영 목표치이다(표2-14 참조).

3. 국내원전의 방사성물질 배출 현황

한국수력원자력의 자료[2.10]에 따르면 최근 10년(2004년~2013년) 동안 국내 원자력발전소에서 약 5,946 TBq²⁴⁾의 방사능(액체방사능 2,431 TBq, 기체방사능 3,515 TBq)이 방출된 것으로 알려졌고, 이러한 내용이 언론을 통해 보도²⁵⁾됨으로써 논란이 된 적이 있다. 외형적으로 매우 큰 수치의 방출량이나 이는 현재 국제적으로 통용되는 방사능 단위인 Bq의 사용으로 인한 착시 현상이며 방사선 위험도 측면에서 보면 실제로는 매우 작은 수치이다. 연간 배출량은 4개 원전 전체에서 연간 배출되는 총량은 약 600 TBq 정도이며, 이 양의 약 2배 정도인 1,000 TBq가 모두 2013년도 한 해에 고리원전 부지에서 삼중수소 형태로 공기 중으로 방출되었다고 가정하더라도 고리부지 인근 주민의 방사선량(유효선량)은 최대 연평균인 유아를 기준으로 약 0.03 mSv/yr이다. 이는 일반인의 연간 선량한도(1 mSv)의 3% 정도에 지나지 않는다.

실제로 2008년도 유엔 방사선영향과학위원회(UNSCEAR) [2.11]에서 발표한 세계 주요 원전보유국의 연간 호기 당 액체 방사성물질 방출량을 비교하면 (표2-3 참조) 우리나라는 일본과 비슷하며, 미국의 약 절반 수준, 그리고 다른 나라에 비하면 매우 낮은 수준이다. 액체뿐만 아니라 원전에서 배출된 기체 방사성물질의 양도 상대적으로 적은 국가군에 속한다.

20) 방사선안전관리 등의 기술 기준에 관한 규칙

21) 원자력안전위원회고시 제2014-34호 : 방사선방호 등에 관한 기준

22) 원자력안전위원회고시 제2014-34호 : 방사선방호 등에 관한 기준

23) 선량한도: 외부에 피폭하는 방사선량과 내부에 피폭하는 방사선량을 합한 피폭방사선량의 상한값으로 원자력안전법 시행령 제2조 제4호에 규정된 값으로 일반인의 경우 유효선량한도는 연간 1밀리시버트(mSv) 임.

24) TBq: Tera Becquerel, 10^{12} Bq

25) 부산일보 2014년 11월 25일자, “총량기준 없는 원전 폐기물 규제-농도만 맞추면 무한 배출”

[표2-3 주요 국가별 원전 액체 방사성물질 배출량 비교]

구 분	연간 배출방사능(TBq)	운영호기	호기당 배출방사능(TBq)
한국	177	23	7.7
영국	2,600	16	162.5
캐나다	1,250	19	65.8
아르헨티나	950	2	475.0
프랑스	850	58	14.7
일본	400	50	8.0
스페인	200	7	28.6
독일	210	9	23.2
미국	1,400	100	14.0

※ 자료 출처 : 유엔 방사선영향과학위원회(UNSCEAR) 보고서[2.10, 2.11]

2.2절 원자력발전소 주변 방사선/능 환경감시

1. 개요

원전운영에 따른 주민 및 환경의 방사선 영향을 감시하기 위해 국내 각 원자력발전소에서는 원자력안전위원회고시 제2014-12호²⁶⁾에 따라 수립되어 원자력안전위원회로부터 승인받은 ‘원자력발전소 주변 환경방사선조사계획’에 따라 환경방사선/능을 주기적으로 조사하여, 그 결과를 인터넷 홈페이지 게시 등을 통해 대외에 공개하고 있다.

상기의 조사계획서에는 원자력발전소 운영이 환경에 미치는 방사선 영향을 평가하기 위한 조사항목, 조사지점, 조사주기, 조사방법 등이 제시되어 있다. 조사계획에 따라 수행되는 조사결과의 투명성 및 신뢰성 확보를 위해 환경감시는 한수원과 대학기관이 각각 독립적으로 수행하고 있다. 원자력발전소 부지 외부 조사지점에 대한 시료 채취 및 분석은 한국수력원자력이 대학에 위탁하여 수행하고 있으며, 부지 내부의 조사지점에 대한 분석은 한수원의 각 원자력발전소가 자체적으로 수행하고 있다. 이와 병행하여 환경방사능 분석 품질 검증을 위해, 일부 지점에 대해서는 대학과 원자력발전소가 중복하여 시료를 채취하여 분석하고 있다.

원전 사업자 이외에도 한국원자력안전기술원, 지자체 조례에 의해 구성된 민간환경감시기구도 원전 주변 방사선 환경감시를 독자적으로 수행하여 결과를 일반에게 공개하고 있어 원전 주변의 환경감시 결과에 대한 투명성 및 신뢰성은 충분히 확보되어 있다고 볼 수 있다.

26) 원자력안전위원회고시 제2014-12호: 원자력이용시설 주변의 방사선환경조사 및 방사선환경영향 평가에 관한 규정

2. 환경감시 조사계획

가. 조사목적

원자력발전소 주변의 환경방사선 조사 목적은 발전소 운영으로 인해 주민들이 받게 되는 방사선량이 연간 선량한도 이내로 충분히 낮게 유지되는지 확인하고, 또한 예기치 않은 사건으로 인해 원전으로부터 방사선/능이 주변 환경으로 방출되는 방사선 사고를 조기에 감지함으로써 주민의 건강과 안전을 확보하고 환경의 방사능 오염을 최소화하는데 있다. 표2-4에 환경방사선/능 감시목적별 조사항목을 요약하여 놓았다.

[표2-4 환경방사선/능 감시목적별 조사항목]

감시 목적	환경 매체
환경방사선의 단기적 변동 파악	공간감마선량률
외부 피폭선량 평가	공간감마선량률, 공간집적선량
내부 피폭선량 평가	<ul style="list-style-type: none"> • 공기시료(공기중 미립자, 방사성 옥소, 삼중수소 및 방사성탄소) • 물시료(식수, 지하수), • 섭취시료(곡류, 채소, 과일, 우유, 육류, 어류, 패류 및 해조류)
방사능 준위 파악	공기시료(공기중 미립자, 방사성 옥소, 삼중수소 및 방사성탄소), 물시료(지표수, 빗물 및 해수)
방사능 축적경향 파악	지표생물(솔잎, 쭉), 토양시료(표층토양, 하천토양 및 해저퇴적물), 저서생물(불가사리)

조사항목은 방사선과 방사능 분야로 대별된다. 방사선은 공간감마선량률을 감시하며 지상 공간 중의 감마방사선의 단기적 변동 상태를 파악하기 위해 실시간으로 감마선량률을 측정함과 동시에, 사람의 신체 외부로부터의 방사선에 의한 피폭선량을 추정하기 위해 일정기간 누적된 집적선량을 측정한다.

방사능은 주민의 내부방사선량 평가와 환경방사능의 농도 수준을 확인하기 위하여 측정한다. 호흡에 의한 영향평가를 위해 공기 중의 방사능을, 섭취에 의한 영향평가를 위해 식수, 지하수, 농축산물, 어·패류 및 해조류 중의 방사능을 분석한다. 또한 방사능 준위 파악을 위해 공기, 지표수 및 해수의 방사능을 측정하고, 환경 중 방사성물질의 축적경향을 파악하기 위해 지표생물과 표층토양, 해저퇴적물 및 저서생물 시료의 방사능을 분석한다.

나. 조사대상 및 방법

조사대상은 고리, 한빛, 월성 및 한울 원자력발전소 부지 주변의 육상 및 해양의 방사선량과 각종 시료의 방사능 농도이며, 육상은 발전소로부터 5km 이내를 집중 조사하며 해양은 발전소 배수구 주변을 집중 조사하고 있다. 또한, 원전의 영향이 없을 것으로 예상되는 지역을 비교지점(원전으로부터 일정거리

이상 떨어진 1곳 이상)을 선정하여 자연방사선/능 준위와 비교하고 있다. 원자력발전소별 시료종류, 조사빈도, 지점수, 측정방법 등은 표2-5와 같다.

각 원전별 조사지점은 원자력안전위원회 고시에 따라 원전으로부터의 거리, 방위, 인구밀도, 토지 및 해양 이용현황 등을 고려하여 선정하고 있다. 각 원전별 부지 외부의 조사지점 및 조사항목은 그림2-1과 같다.

[표2-5 한수원의 환경방사선/능 조사항목별 조사빈도, 조사지점 및 측정항목]

조 사 대 상	빈도 (회/년)	시료채취 지점수					측정수단, 측정항목 ²⁷⁾
		고리	한빛	월성	한울	계	
집 적 선 량	4	41	26	37	35	139	열형광선량계
감 마 선 량 률	연속	16	10	16	13	55	환경방사선감시기
미 립 자 (공기)	52	10	10	10	10	40	전베타, 감마
옥 소 (공기)	52	10	10	10	10	40	¹³¹ I
수 분 (공기)	24	0	0	10	0	10	³ H
이산화탄소 (공기)	12	0	0	3	0	3	¹⁴ C
식 수	4	4	2	4	3	13	감마, ³ H
지 하 수	4	3	2	4	3	12	감마, ³ H
지 표 수	12	4	2	5	3	14	감마, ³ H
빗 물	12	5	4	8	5	22	감마, ³ H, 전베타
표 층 토 양	2	5	5	4	6	20	감마, ⁹⁰ Sr
하 천 토 양	4	5	2	3	3	13	감마
곡 류	1	3	4	6	4	17	감마, ⁹⁰ Sr, (¹⁴ C, ³ H)
채소 . 과일	1~2	8	8	5	4	25	감마, ⁹⁰ Sr, (¹⁴ C, ³ H)
우 유	12	2	2	2	1	7	감마, ⁹⁰ Sr, (¹⁴ C, ³ H)
육 류	2	2	2	2	2	8	감마, (¹⁴ C, ³ H)
술 잎	2	5	5	5	4	18	감마, ⁹⁰ Sr
쭈	2	2	3	3	2	9	감마
해 수	12	13	4	6	4	27	감마, ³ H, 전베타, ⁹⁰ Sr
해 저 퇴 적 물	2	11	4	8	3	26	감마, ⁹⁰ Sr
어 류	2	6	5	8	3	22	감마, ⁹⁰ Sr
패 류	2	6	4	7	3	20	감마, ⁹⁰ Sr
해 조 류	2	8	4	7	3	22	감마, ⁹⁰ Sr
저 서 생 물	2	7	3	5	3	18	감마

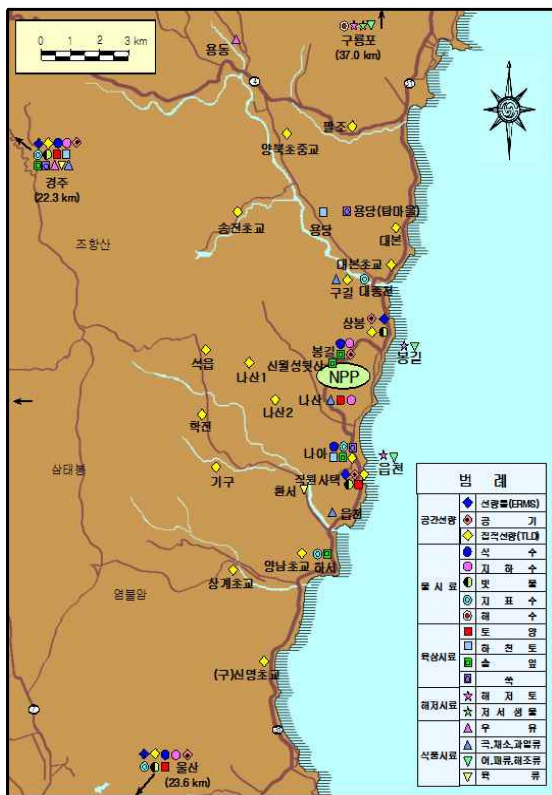
27) 감마는 고순도 게르마늄 검출기를 이용하여 정량분석하며, ¹⁴C, ³H는 월성원자력발전소만 일부시료에 대해 분석



<고리>



<한빛>



<월성>



<한울>

[그림 2-1 국내원전 소외 환경방사선/능 조사지점]

원자력안전위원회에서는 엄격한 환경감시를 위해 일정 수준 이하의 환경매질 방사능 농도를 측정할 수 있도록 검출하한치²⁸⁾를 규정해 두고 있다(표2-6 참조). 검출하한치는 방사선의 인체 위해도를 기준으로 설정된 값이 아니고 검출기 성능에 대한 최소한의 요건을 정한 것이기 때문에 검출하한치 이상의 방사능이 측정되었다고 하여 위험한 수준의 방사능에 오염되었다는 것을 의미하는 것은 아니다. 따라서 환경매질에서의 방사능 검출 여부 자체를 주민 건강에 위해가 된다는 뜻으로 받아들이면 안 된다. 식품의약품안전처에서는 인체 위해도를 고려하여 식품 중에 허용되는 방사성물질의 농도를 규정하고 있다(표2-7 참조). 예를 들어 방사성세슘의 경우 허용기준이 모든 식품에서 100 Bq/kg(또는 Bq/L)인데 비해 원안위에서 정한 검출하한치는 우유 0.2 Bq/L, 농축산물 0.1 Bq/kg으로 식품 중 방사능 허용농도의 0.2% 및 0.1%에 불과하다.

[표2-6 환경방사능 분석을 위한 검출하한치]

구분	공 기 (Bq/m ³)	물 (Bq/L)	토 양 (Bq/kg-dry)	우 유 (Bq/L)	농축산물 (Bq/kg-fresh)	해 수 (Bq/L)	수산물 (Bq/kg-fresh)	해저퇴적물 (Bq/kg-dry)
전 β	3×10 ⁻⁴	0.15	-	-	-	3	-	-
³ H	0.1	5	-	5	5 ²⁹⁾	5	-	-
¹⁴ C ³⁰⁾	0.25	-	-	-	0.25	-	-	-
⁵¹ Cr	5×10 ⁻³	1	15	1	3	5×10 ⁻²	6	15
⁵⁴ Mn	8×10 ⁻⁵	0.5	2	0.2	1	5×10 ⁻³	2	2
⁵⁸ Co	3×10 ⁻⁴	5×10 ⁻²	2	0.2	1	5×10 ⁻³	2	2
⁶⁰ Co	8×10 ⁻⁵	2×10 ⁻²	2	0.2	1	5×10 ⁻³	2	2
⁵⁹ Fe	5×10 ⁻⁴	3×10 ⁻²	5	0.5	2	5×10 ⁻³	3	5
⁶⁵ Zn	5×10 ⁻⁴	5×10 ⁻²	5	0.5	2	2×10 ⁻²	3	5
⁹⁰ Sr	5×10 ⁻⁶	1×10 ⁻³	0.5	0.1	0.1	1×10 ⁻³	0.1	0.5
⁹⁵ Zr-Nb	5×10 ⁻⁴	0.5	5	0.3	0.5	6×10 ⁻³	1	5
⁹⁹ Tc	2×10 ⁻⁴	1	0.1	-	5×10 ⁻³	-	-	0.1
¹⁰⁶ Ru	-	5×10 ⁻²	15	-	-	-	1	15
¹²⁹ I	5×10 ⁻²	-	1×10 ⁻²	0.5	2×10 ⁻⁵	1	-	1×10 ⁻²
¹³¹ I	1×10 ⁻²	0.1	3	0.2	0.5	0.1	1	1.5
¹³⁴ Cs	8×10 ⁻⁵	8×10 ⁻³	5	0.2	0.1	3×10 ⁻³	0.1	5
¹³⁷ Cs	8×10 ⁻⁵	8×10 ⁻³	5	0.2	0.1	3×10 ⁻³	0.1	5
¹⁴⁰ Ba-La	0.1	10	70	10	2	0.1	5	70
²³⁸ U	3×10 ⁻⁶	0.1	20	-	5×10 ⁻²	-	-	-
²³⁹⁺²⁴⁰ Pu	2×10 ⁻⁶	2×10 ⁻⁴	0.1	-	1×10 ⁻³	5×10 ⁻⁶	1×10 ⁻³	0.1

28) 검출하한치: 환경조사 방법으로 측정 가능한 최소한의 방사능 농도

29) 식품중 ³H 단위: Bq/L(조식자유수 중 ³H 농도 기준)

30) ¹⁴C의 단위: Bq/g-C

[표2-7 식품의약품안전처에서 정한 식품 중 방사능 허용기준]

핵종	대상식품	기준 (Bq/kg 또는 Bq/L)
요오드 (¹³¹ I)	영아용 조제식, 성장기용 조제식, 영·유아용 곡류 조제식, 기타 영·유아식, 영·유아용 특수 조제식품	100
	우유 및 유가공품	100
	기타 식품	300
세슘 (¹³⁴ Cs+ ¹³⁷ Cs)	모든 식품	370- >100 ³¹⁾

3. 환경감시 결과

원자력 발전 사업자는 매년 2회씩 반기별로 조사결과 보고서를 관련 기관에 배포하고 있으며, 연간 조사보고서는 원자력사업자 인터넷 홈페이지를 통해 공개하고 있다.

고리, 한빛, 월성 및 한울 원자력발전소 가동 이 후 각 발전소 부지 주변의 육상 및 해양 시료에서의 환경방사선/능은 매년 거의 일정한 수준을 유지하고 있는 것으로 알려져 있다. 원전 사업자인 한수원은 원자력안전법에 따라 호기별로 매 10년 주기로 주기적 안전성 평가를 통해 환경감시 결과를 종합적으로 분석하여, 환경감시 계획에 반영하고 있다. 주기적 안전성 평가 시에는 장기간에 걸친 방사선/능 추세분석을 통해 방사능 축적경향 여부를 평가하고 있다. 주기적 안전성 평가 결과 현재까지 각 원전 부지별로 환경방사선/능에 대한 축적경향은 일어나지 않았다[2.12].

가. 환경방사선

(1) 공간감마선량률

공간감마선량률은 환경방사선의 단기적인 변동상황을 파악하기 위해 4개 원전 주변에 부지별로 10~16개 총 55개소의 환경방사선감시기에서 측정되며, 시간당 감마선량률로 나타낸다. 공간감마선량률은 원자력시설로부터의 인공 방사선 뿐만 아니라 우주선, 지각방사선, 비파괴 검사에 사용되는 방사선 등 다양한 요인에 따라 변동될 수 있다. 특히 강우현상이 있을 경우에 공기중 방사성물질의 침적에 따라 일시적으로 방사선량이 증가하기도 한다.

2013년 고리, 한빛, 월성 및 한울 4개 원전 부지 내부 및 외부에서 측정된 공간감마선량률의 평균치는 부지 내부 9.0~13.4 μ R/h, 부지 외부 9.9~

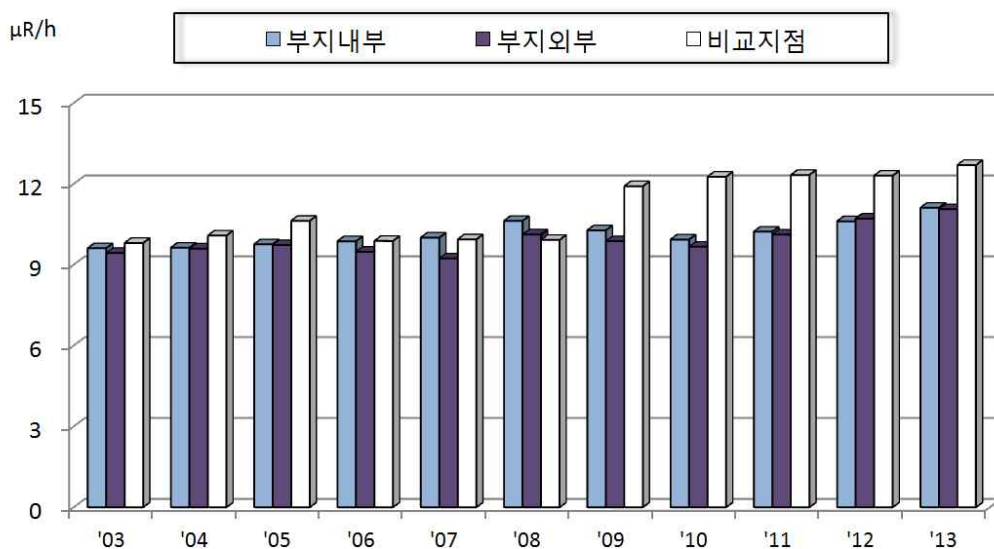
31) 후쿠시마 사고 이후 기준치를 370 Bq/kg(또는 Bq/L)에서 100 Bq/kg(또는 Bq/L)으로 임시로 기준을 강화함

13.8 $\mu\text{R/h}$ 로서[2.10], 같은 해 한국원자력안전기술원이 전국 122개 모니터링 포스트에서 측정한 지점별 연평균 공간감마선량률 범위인 3.8~23.2 $\mu\text{R/h}$ 이내에 있다[2.13].

표2-8과 그림2-2에 제시된 원전 부지 최근 10년간 측정된 결과도 부지 내부와 외부 그리고 비교지점에서 측정한 값이 원전으로부터의 거리에 따라 일정한 상관관계를 나타내고 있지 않는다는 것을 보여주고 있다. 상기와 같이 국내원전 주변의 공간감마선량률 변동 폭이 우리나라 전국 공간감마선량률의 변동 범위 내에 있는 것으로 보아 원전으로 인한 영향이 거의 없다는 것을 알 수 있다.

[표2-8 최근 10년간(2004~2013년) 공간감마선량률($\mu\text{R/h}$)]

구분 \ 원 전	고 리	한 빛	월 성	한 울
부지내부	9.5 ~ 1.9	9.6 ~ 11.1	8.8 ~ 11.9	10.5 ~ 13.3
부지외부 (비교지역 포함)	8.7 ~ 12.7	8.8 ~ 14.5	8.3 ~ 12.0	10.5 ~ 13.9



[그림2-2 연도별 고리원전 주변 공간감마선량률 변화]

(2) 공간집적선량

공간집적선량은 외부 피폭을 파악하기 위해 부지 내/외부에 인구출입도가 큰 장소를 중심으로 4개 원전 주변에서 부지별로 26~41개, 총 139개소에

서 측정하고 있다. 공간집적선량은 일정기간(일반적으로 분기) 동안 누적된 값으로 나타낸다. 4개 원전 부지별로 최근 10년간 측정한 분기별 공간집적선량은 표2-9에 나타난 것과 같이 부지 내부 집적선량은 99~254 $\mu\text{Gy}/\text{분기}$ 로 부지 외부 집적선량 97~298 $\mu\text{Gy}/\text{분기}$ 와 거의 유사하다[2.10]. 즉 원전으로부터의 거리에 따라 방사선 준위가 증가하거나 감소하는 상관관계가 나타나지 않는다는 것을 알 수 있다.

또한 원전주변에서 측정되는 공간집적선량은 2013년 한국원자력안전기술원이 전국 52개 지역에서 측정한 분기별 집적선량 범위인 156~335 $\mu\text{Gy}/\text{분기}$ 보다 전체적으로 낮은 수준이다[2.13].

[표2-9 최근 10년간(2004~2013년) 공간집적선량 ($\mu\text{Gy}/\text{분기}$)]

원 전 구분	고 리	한 빛	월 성	한 울
부지내부	99 ~ 214	152 ~ 208	104 ~ 192	147 ~ 254
부지외부 (비교지역 포함)	97 ~ 233	167 ~ 298	103 ~ 189	155 ~ 270

나. 환경방사능

환경방사능에 의한 호흡 및 섭취에 의한 내부피폭, 방사능 준위 및 측정경향 등을 파악하기 위해, 공기, 물, 토양, 음식물, 지표생물 등의 환경시료에 포함된 방사능을 감시하고 있다. 일부 환경시료에서 과거 핵실험 및 체르노빌, 후쿠시마 원전 사고 등으로 환경에 유입된 인공방사능 중 반감기가 긴 일부 핵종이 검출되고 있다. 또한 원전이 기원으로 추정되는 핵종이 일부 간헐적으로 검출되기도 한다.

(1) 공 기

공기시료에서는 공기 미립자의 시료를 채취하여 미립자의 전베타 및 인공 감마동위원소의 농도를 분석하고 있다. 이 중 미립자의 전베타는 주로 자연방사능의 하나인 라돈계열의 방사성 붕괴에 의한 기여도가 상대적으로 크다. 따라서 원전에서는 라돈계열의 영향을 최소화하고자 시료채취 후 72시간 경과 후에 방사능을 측정하고 있다. 최근 10년간 각 원전별 공기 미립자 전베타 방사능 농도 변동 범위를 표2-10에 제시하였다[2.10]. 원전 주변 공기 중 전베타 방사능 농도는 부지 외부와 차이가 없음을 알 수 있다. 기타 공기 중 인공 감마동위원소는 모든 원전에서 검출되지 않고 있다.

[표2-10 최근 10년간(2004~2013년) 공기 미립자 전베타 방사능 농도 (mBq/m³)]

원 전 구분	고 리	한 빛	월 성	한 울
부지내부	0.76 ~ 1.0	0.98 ~ 1.51	0.67 ~ 1.14	0.53 ~ 1.17
부지외부 (비교지역 포함)	0.65 ~ 1.13	1.01 ~ 1.66	0.65 ~ 1.13	0.26 ~ 1.12

중수로인 월성원자력발전소는 특성상 삼중수소(^3H)와 방사성탄소(^{14}C) 발생이 경수로보다 많아 공기 중 ^3H 와 ^{14}C 을 추가적으로 분석하고 있다. 공기 중 삼중수소 농도 측정지점은 월성원자력발전소 부지 내부 6개소, 부지 외부의 발전소 인근지역 2개소와 비교지점 2개소 등 총 10개소이다. 공기 중 삼중수소는 부지 내부에서 최근 10년(2004~2013년)간 연평균 0.405~15.2 Bq/m³이며, 부지 외부에서는 0.02~2.77 Bq/m³ 수준이었다[2.10]. 삼중수소 방사능농도가 최대치(15.2 Bq/m³)로 나타난 부지내부 폐기물저장고지점에서 호흡에 의한 연간 최대 피폭선량은 0.00203 mSv 으로 일반인 연간선량한도의 0.2% 수준이다.

공기 중 ^{14}C 는 월성원자력발전소 부지 주변에서 최근 10년(2004~2013년)간 연평균 0.23~0.34 Bq/g-C이며, 최대치를 나타낸 상봉지점 (0.34 Bq/g-C)에서의 공기 호흡에 의한 연간 최대 피폭선량은 3.41×10^{-6} mSv 으로 일반인 연간 선량한도의 0.00034 %수준이다. 이상과 같이 월성원전이 중수로 특성상 공기 시료에서 삼중수소 및 ^{14}C 의 농도가 일반 환경에 비해 상대적으로 높게 나타나지만, 이로 인해 주민이 받을 수 있는 방사선량은 무시할 수준이다.

(2) 육상 물(빗물, 지표수, 식수, 지하수)

육상 물시료는 주민이 섭취할 수 있는 음용수에 대한 방사능 오염을 감시하기 위한 것으로 빗물, 지표수, 식수 및 지하수 속의 전베타 방사능, 삼중수소 및 감마동위원소 방사능을 측정하고 있다.

4개 원전부지 주변에서 측정된 빗물 중 전베타 방사능은 부지 내부와 외부의 차이가 나타나지 않고 있으며 최근 10년(2004~2013년)간 연평균 값이 울산에서 최대 0.270 Bq/L 수준이었다[2.10]. 이는 한국원자력안전기술원에서 2013년도 전국 14개 감시소에서 측정한 0.079~0.494 Bq/L 수준에 비해 상대적으로 낮은 값을 보이고 있다[2.13].

최근 10년(2004~2013년)간 4개 원전부지 주변에서 측정된 육상 물 시료 중 연평균 삼중수소 농도의 분포는 표2-11과 같다[2.10]. 빗물 중 삼중수소는 부지 내부에서 4개 원전 모두 일반 환경보다 높은 수준으로 검출되고 있다. 그러나 지표수, 식수, 지하수에서의 삼중수소는 월성원전을 제외하고는 낮은 준위이거나 검출되지 않고 있다. 반면에 중수로 원전이 가동되고 있는 월성원전 주변에서는 삼중수소가 상대적으로 높게 관찰되고 있다. 식수로 사용 가능성이 있는 지표수, 식수, 지하수에서 검출된 삼중수소 농도는 최대 17.0 Bq/L(월성, 지하수)인데, 이를 식수로 사용하였을 경우 연간 0.000224 mSv 정도의 방사선량에 피폭되며, 이는 일반인 연간선량한도의 0.0224% 수준이다.

[표2-11 최근 10년간(2004~2013년) 육상 물시료 중 삼중수소 방사능 농도 (Bq/L)]

원 전 구분		고 리	한 빛	월 성	한 울
빗물	부지내부	5.42~57.9	6.66~45.8	16.2~490	1.73~19.4
	부지외부 (비교지역 포함)	<1.74~3.76	<1.99~3.65	1.18~143	<0.98~2.61
지표수	부지외부 (비교지역 포함)	<1.83~3.33	<1.26~3.46	<1.03~15.6	<1.19
식수	부지외부 (비교지역 포함)	<1.84	<2.48	<1.01~16.9	<1.86
지하수	부지외부 (비교지역 포함)	<1.79	<2.49	<1.03~17.0	<1.89

지표수에서 방사성요오드(^{131}I)가 간헐적으로 검출된 것을 제외하고 다른 육상 물 시료에서 감마 동위원소는 거의 검출되지 않고 있다. 지표수 중의 방사성요오드(^{131}I)는 2011년 고리원전 주변 효암천 부근에서 최대 6.04 Bq/L이 검출되었다[2.10]. 그러나 방사성요오드는 반감기가 7일로 짧고, 각 원전의 배기구 필터에서 거의 대부분 여과되어 환경으로 배출되지 않기 때문에 환경에서 검출되는 방사성요오드는 원전 이외의 요인으로 추정할 수 있다. 2014년 국회 정책토론회에서 발표한 자료[2.14]에 의하면 전국의 하천수에서 ^{131}I 이 광범위하게 검출되었으며(2006년 기준), 그 원인의 하나로 치료용 방사성요오드(^{131}I)를 복용한 환자의 배설물이 하수구를 통해 일반 환경으로 배출된 것으로 추정하고 있다.

(3) 표층토양 및 하천토양

표층토양 및 하천토양에 대한 환경감시는 주로 방사능 축적경향을 파악하기 위해 수행된다. 표층토양에 대한 시료는 방사능이 많이 침적될 것으로 예상

되는 풍하지역과 농산물 생산이 이루어지는 경작지를 대상으로 채취한다.

표충토양에 대한 분석결과 인공 방사성핵종인 ^{137}Cs 및 ^{90}Sr 이 원자력발전소 부지 주변과 비교지점에서 검출되었으나, 지역적 농도 차이가 없고 ^{134}Cs 가 검출되지 않는 것으로 보아 이는 과거 대기권 핵실험 등에 의해 지구 전역으로 퍼진 인공방사능의 잔유물로 보여 진다. 표충토양에 대한 최근 5년간의 ^{137}Cs 및 ^{90}Sr 분석결과를 표2-12 및 표2-13에 정리하였다[2.10]. ^{137}Cs 은 한울원전 주변에서 최대 14.7 Bq/kg-dry이었고, 2013년 한국원자력안전기술원이 전국 14개 모니터링 포스트 주변의 표충토양에 대해 측정된 ^{137}Cs 의 농도 <0.691~19.0 Bq/kg-dry 범위 이내였다[2.13]. 표충토양에 대한 ^{90}Sr 분석결과 최대 ^{90}Sr 은 월성원전 주변에서 최대 2.37 Bq/kg-dry 이었다.

하천토양에 대한 감마동위원소 분석결과 고리 주변 해수에서 낮은 농도 수준의 ^{131}I 이 검출되었으며, 기원은 치료용 ^{131}I 동위원소가 환자로부터 배출된 후 지표수로 유입, 하천토양에 침적되어 검출된 것으로 추정된다. 하천토양 중 ^{137}Cs 은 평상변동범위 수준이었으며, 최대치는 한빛원전의 비교지점인 광주 지역에서 2.11 Bq/kg-dry를 나타냈다.

[표2-12 표충토양 중 ^{137}Cs 농도 (Bq/kg-dry)]

시기 지역	'09년	'10년	'11년	'12년	'13년
고리주변	<0.139~8.43	<0.149~6.62	<0.166~7.97	<0.300~4.30	<0.311~3.39
한빛주변	<0.387~13.0	<0.206~10.0	<0.600~4.26	0.388~4.28	0.267~5.89
월성주변	<0.278~3.32	<0.289~3.11	<0.334~4.85	<0.333~4.18	<0.327~2.51
한울주변	<0.234~7.42	<0.266~14.7	<0.389~8.63	<0.293~1.72	<0.369~5.36

[표2-13 표충토양 중 ^{90}Sr 농도 (Bq/kg-dry)]

시기 지역	'09년	'10년	'11년	'12년	'13년
고리주변	0.151~1.65	0.721~2.36	0.966~2.11	0.145~0.275	0.112~0.163
한빛주변	<0.0954~0.351	<0.0893~0.479	0.143~0.198	0.217~0.963	0.127~0.573
월성주변	0.519~1.82	<0.180~0.969	0.809~2.37	0.702~1.96	0.651~1.51
한울주변	0.211~1.07	0.714~1.09	0.397~1.89	0.230~0.885	0.262~0.683

(4) 육상식품류(곡류, 채소류, 과일류, 육류, 우유)

방사능에 오염된 농축산물 섭취에 의한 주민 피폭선량을 파악하기 위

해 육상식품류에서 수확기에 시료를 채취하여 방사능을 분석한다. 최근 10년(2004~2013년)간 곡류(쌀, 보리), 채소류(배추, 열무, 무), 과일류(배, 포도, 감), 우유 등의 식품에서 감마동위원소는 거의 검출되지 않았으며, 일부시료에서 인공 방사성핵종인 ^{90}Sr 이 2.44 Bq/kg-fresh 이하로 검출되었는데[2.10] 이는 과거 대기권 핵실험으로 인해 지구 전역에 퍼진 방사성핵종 잔유물이다.

월성원자력발전소 주변에서는 중수를 냉각재로 쓰는 중수로 원전 특성으로 삼중수소와 ^{14}C 이 검출되고 있다[2.10]. 채소류(배추)의 조직자유수 중 삼중수소(TFWT) 최대치를 나타낸 읍천 지점의 방사능농도 198 Bq/kg-fresh를 기준으로 피폭선량을 평가한 결과, 0.000576 mSv/year로 일반인에 대한 연간선량한도의 0.0576% 수준이다. 곡류(보리)의 조직결합수 중 삼중수소(OBT) 및 ^{14}C 최대 농도값(각각 42.4 Bq/kg-fresh 및 0.27 Bq/g-C)을 보인 읍천 지역 주민의 삼중수소 및 방사성탄소에 의한 피폭선량은 각각 2.85×10^{-4} mSv, 1.01×10^{-2} mSv로 일반인 연간선량한도의 0.0285%, 1.01% 수준인 것으로 평가되었다.

(5) 해양(해수, 해저퇴적물, 어·패류, 해조류, 저서생물)

해양에서의 방사능 감시는 해양매질은 대기와 달리 환경매질에서의 이동이 상대적으로 느리고 확산범위도 작기 때문에 주로 액체폐기물이 환경으로 배출되는 배수구 주변에서 집중적으로 이루어지고 있다.

해수에서 전 베타 방사능이 지속적으로 검출되고 있으나 이는 국내 해수에서 전국적으로 검출되는 수준이며, 부지내부의 취/배수구에서의 농도와 원전의 영향이 거의 없는 비교지점의 농도가 10 Bq/L 수준에서 유사하게 나타나고 있다.

최근 10년(2004~2013년)간 해수 중 삼중수소 연평균 농도는 고리 <1.28~3.52 Bq/L, 한빛 2.19~14.4 Bq/L, 월성 1.11~90.0 Bq/L, 한울 <0.928~5.85 Bq/L로서 각 부지의 비교지점 값인 송정 <2.11 Bq/L, 함평 <2.08~4.63 Bq/L, 구룡포 <1.03~1.45 Bq/L, 광진 <1.17 Bq/L 보다 높게 나타났다[2.10]. 월성원자력발전소 연평균 최대치인 90.0 Bq/L는 원자력안전위원회고시 제2013-49호(방사선 방호 등에 관한 기준)에서 규정된 삼중수소 배출관리기준 40,000 Bq/L의 0.23%에 해당되는 낮은 수준이다.

^{137}Cs 및 ^{90}Sr 은 과거 핵실험 등에 의해 지구 전역에서 검출되고 있는 핵종으로 최근 10년(2004~2013년)간 대부분의 해수시료에서 최대 3.35 mBq/L 이하의 농도로 검출되었으며, 부지내부와 외부의 측정값이 거의 유사하였

다[2.10]. ^{137}Cs 최대값은 한빛원전 취수구에서 2004년도에 측정된 3.35 mBq/L 이며[2.10], 이는 2013년 한국원자력안전기술원이 우리나라 주변해역 22개 지점 표층 해수에 대해 측정한 결과인 $<1.16\sim 2.07 \text{ mBq/kg}$ 과 비슷한 수준이다[2.10]. ^{90}Sr 최대치는 2013년도 한빛원전 주변 합평(비교지점)의 2.03 mBq/L 이며, 이는 같은 해 한국원자력안전기술원이 우리나라 주변해역 16개 지점의 표층 해수에 대해 측정한 결과인 $0.610\sim 0.965 \text{ mBq/kg}$ 와 비슷한 수준이다[2.13].

^{137}Cs 및 ^{90}Sr 은 다른 해양시료(해저퇴적물, 어·패류, 해조류 등)에서도 원자력발전소 부지 주변과 비교지점에서 검출되었으나 그 농도 값은 매년 일상적으로 검출되는 정상변동범위를 벗어나지 않고 있다[2.10].

^{137}Cs 및 ^{90}Sr 이외 해양시료에서 검출된 인공방사능은 해조류에서의 ^{131}I 과 저서생물에서의 $^{110\text{m}}\text{Ag}$ 이다. 해조류의 경우 ^{131}I 이 고리원전 내부에서 최대 2.06 Bq/kg-fresh 이하로 검출되었으며, 비교지점인 고리원전으로부터 남쪽으로 16 km 정도 떨어진 송정에서도 최대 8.97 Bq/kg-fresh 이하로 검출되었다[2.10]. 이는 해조류에서 검출된 ^{131}I 의 기원이 원전이 아니라 다른 요인일 가능성을 확인시켜 주는 것이다. 2008년도에 한수원이 수행한 부지 주변 추가조사('08년도 6월~12월) 결과에서도 송정보다 원전으로부터 더 원거리에 있는 수영만 해역의 감태에서 ^{131}I 의 농도가 최대 43.9 Bq/kg-fresh 정도로 높게 검출되었다[2.10]. 유사한 조사 결과가 최근 개최된 국회 정책토론회의에서도 발표되었으며[2.14], 갑상선암 치료에 활용되는 의료용 ^{131}I 의 사용이 주된 원인 중의 하나로 고려되고 있다. 비록 원전으로부터 배출된 것은 아니지만 수영만 해역의 감태에서 검출된 최대 43.9 Bq/kg-fresh 의 방사성 요오드를 함유하고 있는 해조류를 일 년 동안 지속적으로 성인이 섭취했다고 가정해도 연간 $3.63\times 10^{-3} \text{ mSv}$ 정도 피폭되는데, 이는 일반인 연간 선량한도의 0.363% 수준이다.

저서생물의 경우 $^{110\text{m}}\text{Ag}$ 이 한울원전 배수구지점에서 2005년도에 연평균 최대 $0.540 \text{ Bq/kg-fresh}$ 로 검출되었다. 이 농도로 인한 연간 피폭선량은 최대 $2.32\times 10^{-6} \text{ mSv}$ 로 일반인 연간선량한도의 $2.32\times 10^{-4} \%$ 수준이다.

다. 환경감시 및 방사선량 결과 요약

공간감마선량률과 공간집적선량 등 국내 원자력발전소 주변의 환경방사선량은 일반지역과 비교하여 유의할 만한 차이가 발견되지 않았고 자연방사선 수준으로 유지되고 있다.

환경시료를 채취하여 방사능을 분석한 결과, 과거 대기 핵실험에 의해

지구 전역으로 확산된 방사성핵종 잔류물 중 반감기가 긴 ^{137}Cs , ^{90}Sr 이 환경에서 지속적으로 검출되고 있으며, 원자력발전소 운영에 기인하는 핵종인 ^3H , ^{14}C , $^{110\text{m}}\text{Ag}$ 등도 미량이나마 검출되었다. 그러나 환경시료에서 검출된 ^3H 와 ^{14}C 등 인공 방사능 핵종에 의해 주변 주민이 받는 방사선량을 모두 합쳐도 일반인에 대한 선량한도의 1% 내외로 매우 낮은 값을 보여주고 있다.

원자력발전사업자, 규제기관, 민감감시기구 등이 발표한 최근까지의 환경감시결과에 따르면 국내원전은 원자력안전법과 규정에 따라 방사성물질 배출물관리를 철저히 하고 있는 것으로 나타났다. 전술한 바와 같이 환경시료에 미량 존재하는 인공방사성핵종에 따른 주민선량을 평가한 결과로 보면, 원전 운영으로 인한 시설 주변 주민에 대한 추가적인 선량의 기여는 없거나 무시할 만한 수준이다.

2.3 절 원자력발전소 주변 주민 방사선 영향

1. 개요

앞 절에서 기술한 “원전 주변 방사선 환경감시”로부터 측정된 환경매질의 방사능 농도를 이용하여 인근 주민의 방사선량을 추정하는 방법은 계측된 환경방사능에는 원전에서 배출된 인공방사능 뿐 아니라 자연적으로 존재하는 자연방사능도 포함되어 있어 순수한 원전의 영향만을 평가하기에는 어려움이 있다. 따라서 원전으로부터의 환경으로 배출되는 방사능 양을 토대로 방사선량을 계산하여 주민의 안전을 확인하는 방법이 원전 운영에 활용되고 있다.

원전으로부터 배출된 방사성물질은 육상 또는 해양생태계에서 확산, 희석, 이동, 축적 등의 과정을 거쳐 인체에 도달되는데 원전 사업자인 한국수력원자력은 이러한 일련의 과정을 해석하는 지침을 관련 기술기준[2.15~2.20]에 따라 수립하여 평가에 활용하고 있다.

2. 주민 방사선량 평가방법

가. 인체 방사선 피폭경로

원전 주변 주민선량 평가에 적용되는 기체 및 액체 방사성물질의 인체 피폭 경로를 그림2-3 및 그림2-4에 각각 나타내었다. 기체상으로 배출된 방사성물질은 일차적으로 대기 중에서 확산 및 희석이 된다. 일반적으로 원전으로부터 멀어질수록 대기 중 방사성물질의 농도는 확산에 의해 감소하게 된다. 대기 중에서 희석된 방사성물질 일부는 지표면과 식물체(농작물, 목초)

의 표면에 침적된다. 지표면에 침적된 방사능은 다시 식물체의 뿌리를 통해 식물체 내부로 전이된다. 식물체로 이동한 방사성물질은 다시 식물체를 섭취하는 동물체(축산물)로 이동하는 과정을 거친다. 주변 주민은 야외활동 및 농축산물 섭취 등과 같은 다양한 경로를 통해 방사선피폭을 받게 되며 주요 피폭경로는 다음과 같다.

기체배출물에 의한 피폭경로

- 외부피폭
 - ① 대기-인체
 - ② 대기-지표면 침적-인체
- 내부피폭
 - ① 대기-호흡-인체
 - ② 대기-농작물 표면 침적-농작물 섭취-인체
 - ③ 대기-지표면 침적-농작물 뿌리흡수-농작물 섭취-인체
 - ④ 대기-사료 표면 침적-축산물 사료섭취-축산물 섭취-인체
 - ⑤ 대기-지표면 침적-사료 뿌리흡수-축산물 사료섭취-축산물 섭취-인체

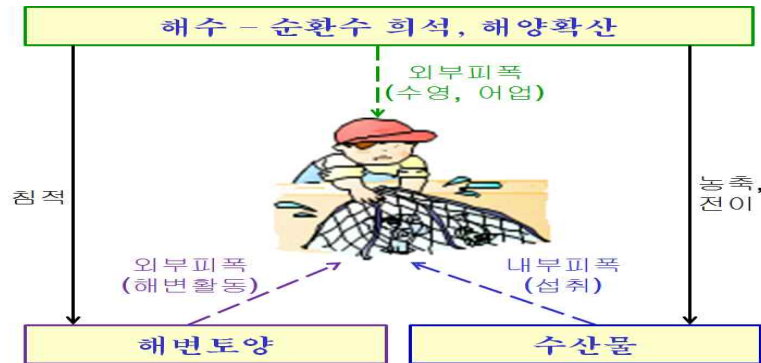


[그림2-3 기체상 유출물의 인체 피폭경로]

액체상으로 배출된 방사성물질은 일차적으로 해수 중에서 확산 및 희석이 된다. 대기와 마찬가지로 확산 효과에 의해 원전으로부터 멀어질수록 해수 중 방사성물질 농도는 감소하게 된다. 해수 중에서 희석된 방사성물질 일부는 해변 토양에 침적되거나 해수로부터 수산물로 전이·농축되는 과정을 거친다. 주변 주민은 해변활동 및 수산물 섭취 등과 같은 다양한 경로를 통해 방사선피폭을 받게 되며 주요 피폭경로는 다음과 같다.

액체배출물에 의한 피폭경로

- 외부피폭
 - ① 해수-수영/어업활동-인체
 - ② 해수-해변 침적-해변활동-인체
- 내부피폭
 - ① 해수-수산물(어류, 연체/갑각류, 해조류)-섭취-인체



[그림2-4 액체상 유출물의 인체 피폭경로]

액체상 폐기물에 의한 피폭경로 중 음용수 섭취에 의한 경로를 제외한 이유는, 국내원전이 모두 해안가에 위치하고 있어 액체 배출물이 모두 해양으로 배출되기 때문이며, 대기로 배출된 방사성물질 또한 지표수로 이동하는 비율은 매우 낮기 때문이다. 음용수 섭취에 의한 내부피폭선량은 음용수로 이용 가능한 물시료에서 방사능이 측정될 경우 환경감시 결과를 이용하여 별도로 평가한다.

나. 방사선량평가 기준치

전리방사선으로부터 인간을 방호하기 위해 국제원자력기구 (IAEA)에서는 국제방사선방호위원회(ICRP)의 권고[2.17]를 바탕으로 유효선량이 연간 1mSv를 넘지 않도록 기준치를 정하고 있으며, 우리나라 원자력안전법에서도 이 값을 일반인에 대한 선량한도로 정하고 있다. 일반인의 선량한도와는 별개로 원자력안전위원회 고시 제 2014-34호의 제 16조(환경상의 위해방지)에는 운영기준치를 일반인의 연간 선량한도 1/4 수준인 0.25 mSv으로 엄격하게 규정하고 있다(표2-14 참조). 이는 일반인의 연간 선량한도보다 엄격한 기준치를 발전소 운영에 적용함으로써 원전 운영에 따른 주변 주민에 대한 방사선 위해 방지를 보다 강화하기 위함이다.

[표2-14 국내원전의 주민선량 기준치, 원전 적용 피폭경로 및 핵종]

항목		소항목	기준치	원전적용 피폭경로 및 핵종
호기별 설계 목표치	기체 배출물	감마선에 의한 공기의 흡수선량	0.1 mGy/yr	방사능운(불활성기체)
		베타선에 의한 공기의 흡수선량	0.2 mGy/yr	“
		외부피폭에 의한 유효선량	0.05 mSv/yr	○ 방사능운 (불활성기체) ○ 지표면 침적(입자성)
		외부피폭에 의한 피부등가선량	0.15 mSv/yr	“
		입자성 방사성물질, ³ H, ¹⁴ C 및 방사성 옥소에 의한 인체장기 등가선량	0.15 mSv/yr	○ 지표면 침적(입자성) ○ 호흡, 섭취 : 불활성기체를 제외한 전핵종
	액체 배출물	유효선량	0.03 mSv/yr	전체경로 및 전체핵종
		인체 장기 등가선량	0.1 mSv/yr	“
부지당 운영기준치		유효선량	0.25 mSv/yr	“
		갑상선 등가선량	0.75 mSv/yr	“

다. 방사선량평가 대상 및 평가지점

방사성물질은 복잡한 이동 경로를 거쳐 인체에 도달되기 때문에 원전으로부터 배출된 방사능 양이 같더라도 개인별 생활습관, 행동양식 등 많은 요소에 따라 선량은 다르게 나타난다. 모든 특성을 고려하여 개인별 선량을 평가하는 것은 불가능하므로 주변 주민을 대표하는 가상적 개인을 설정하여 선량을 평가하는 것이 일반적인 접근법이다.

일반적으로 생활특성, 원전 입지환경 특성 등을 고려하여 가상적 개인을 설정하는데 국가별로 가상적 개인의 개념은 조금씩 상이하며 대표개인, 결정집단, 최대개인, 평균개인 등으로 표현된다. 주요 국가에서 적용 중인 가상적 개인의 개념을 표2-15에 정리하였다. 우리나라에서는 상대적으로 보수적인 개념인 미국원자력규제위원회(NRC : Nuclear Regulatory Commission) 규제지침[2.15]을 준용하여 다음과 같이 정의하여 적용하고 있다.

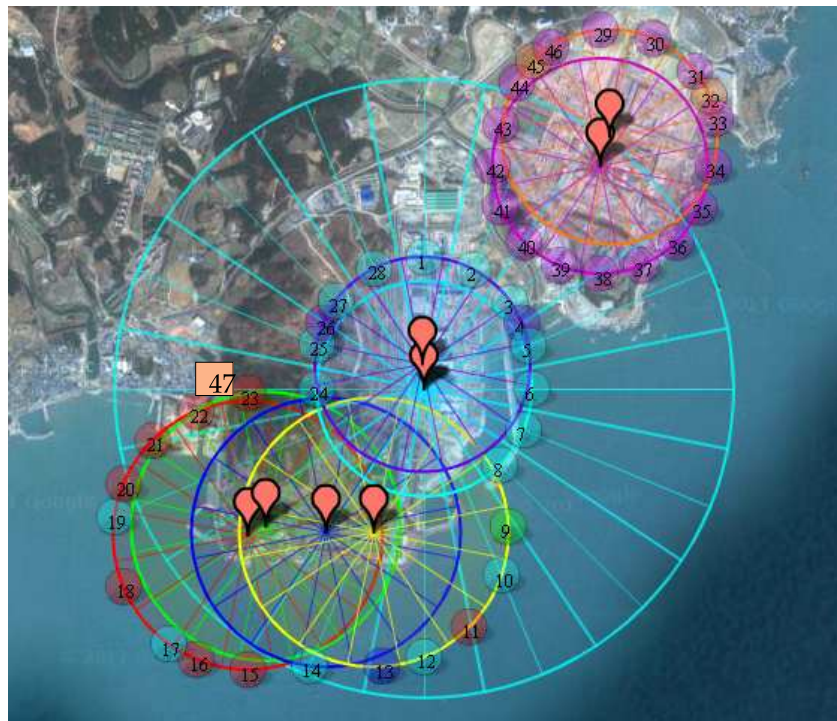
[표2-15 주요 국가별 선량평가 대상개인 설정현황]

국가		규제지침 및 원전 적용현황
국내		○ 최대개인 : 미국의 개념 준용 - 부지 제한구역경계(EAB)에 거주하면서 그 지역에서 생산된 식품을 섭취하는 최대개인
미국		○ 최대개인 : 음식물섭취량 등이 평균적인 사람과 합리적인 편차를 가지는 개인 - 외부피폭, 호흡 : 부지경계 또는 최인근 거주 최대개인 - 섭취 : 최인근 거주지 또는 최인근 생산지에서 생산된 식품을 섭취하는 최대개인
캐나다		○ 결정집단 : 지역, 습관, 식단 등 때문에 피폭인구의 다른 집단이 받는 평균 선량보다 많은 선량을 받는 동종의 인구집단 - 각 피폭경로별로 최대의 피폭이 예상되는 지점을 선정하여 그 지점의 구성원 - OPG에서는 5개 내.외의 발전소 주변의 집단 취락지 및 주요 식품 생산지
유럽	영국	○ 결정집단 : 원자력시설 운영으로 인해 최대로 피폭될 수 있는 대중 구성원 - 주된 피폭경로나 습성 측면에서 결정집단을 정의(아래 예시 참조) · 부지 주변의 야외에서 작업하는 농부 · 지역에서 생산되는 육상식품을 섭취하는 사람 · 해변에서 개를 산책시키는 사람 등 발전소별로 부지 특성에 따라 다양하게 결정
	프랑스	○ 별도의 법적 요건 없으며 유럽연합의 결정집단 개념 준용 - CEA : 기체, 액체 등 각 유형별로 최대피폭을 받는 집단취락지를 결정 집단으로 선정 - EDF : 대기확산인자가 최대인 경작지와 거주지 주민
	독일	○ ICRP의 결정집단 준용하여, 가장 많은 피폭이 이루어지는 지점의 주민 구성원으로 적용 - 적용가능한 현실적인 습관에 바탕을 두고, 개별주민들의 극단적인 방법들과 소비습성은 무시
일본		○ 표준 개인 - 외부 및 호흡선량 : 최대 피폭을 받는 지점에 거주하는 개인 - 섭취 : 현실에 존재하는 피폭경로 대해 집단취락지에서 생활/식습관이 표준적인(평균적인) 사람
IAEA		○ 대표개인 : 결정집단의 평균적인 구성원과 동등한 개념 - 결정집단 : 가장 많은 피폭을 받는 인구집단 - 음식물 섭취량 등 습관자료는 인구집단의 한 개인의 극단적 특성치가 아닌 소수의 개인들을 대표하는 소규모 인구집단에 대한 평균적인 특성자료 적용

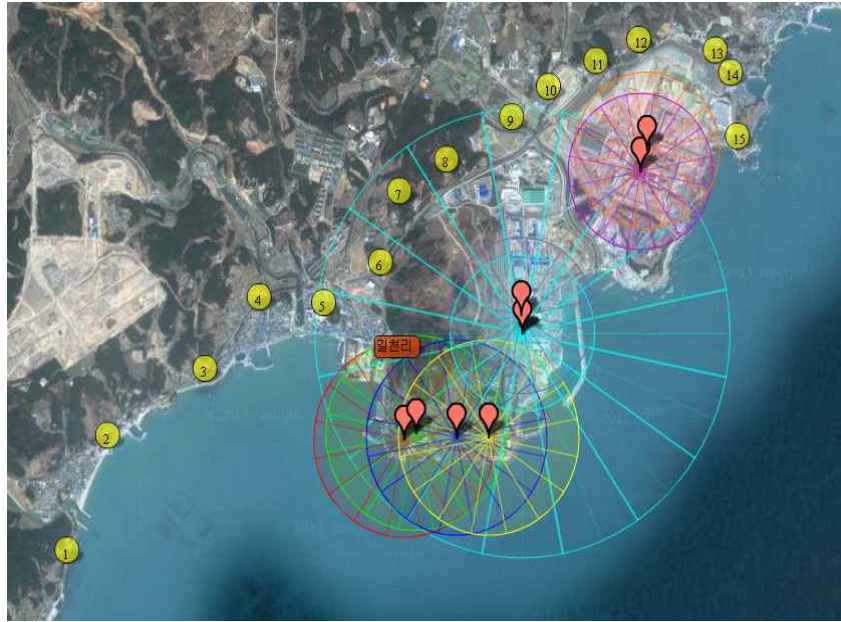
국내에서 주민선량평가를 위해 적용하고 있는 최대개인의 개념

- 음식물 섭취량, 활동시간 등이 일반 인구집단의 평균적인 값에 비해 합리적 편차를 가지는 최대 개인
- 실제 거주 여부와 상관없이 부지 제한구역경계에서 365일 거주한다고 가정
- 경로별로 최대오염이 발생할 가능성이 있는 지점에서 생산된 음식물을 섭취한다고 가정

선량평가 지점을 거주성과 관계없이 부지 제한구역으로 정한 것은 일반인이 자유롭게 접근 가능한 원전으로부터의 최단거리를 고려하기 위해서이며, 이는 상상할 수 있는 최대 피폭지점에서 선량이 기준치를 만족하면 원거리에는 있는 모든 다른 지점에서도 저절로 기준치를 만족하게 된다는 방사선 방호원칙에 입각한 것이다. 상기의 개념에 따라 선정된 평가지점의 한 예시로 고리원전 주변 주민선량평가 지점을 그림2-5에 제시하였다. 아래에 도시된 각 평가지점에서 거주 또는 음식물을 생산하여 섭취하는 가상적인 개인을 대상으로 선량을 평가한 후, 최대인 값을 그 부지의 최대 개인 선량으로 결정하여 기준치와 비교한다. 즉, 부지 주변의 주민 중 최대피폭을 받을 것으로 추정되는 개인의 피폭 선량이 기준치 이내이면 이 보다 원거리에 실제 거주하는 주민들 모두가 안전하다는 것을 의미한다.



[그림2-5 피폭경로별 고리원전 부지 주변주민 방사선량 평가 지점32]



[그림2-5(계속) 피폭경로별 고리원전 부지 주변주민 방사선량 평가 지점³³⁾]

라. 방사선량평가 방법

(1) 선량평가 기본식

원전 주변 주민의 방사선 안전성을 확인하기 위해, 앞에서 설명한 최대 개인을 대상으로 선량을 평가하여 피폭경로별 기준치와 비교한다. 각 피폭경로별로 선량을 평가하는 기본식은 아래와 같다.

$$D_{apj} = U_{ap} F_p \sum_i C_{ip} D_{aijp}$$

- D_{apj} : 최대개인에 대한 선량
- U_{ap} : 환경매질의 사용인자(음식물 섭취량, 호흡량 등)
- F_p : 사용인자의 지역생산분율
- C_{ip} : 환경매질의 방사성핵종 농도
- D_{aijp} : 선량계수(단위 방사능 농도에 대한 선량 환산값)
- $a/i/j/p$: 연령군/핵종/인체장기/경로를 나타내는 첨자

방사선량은 인체 전체에 대한 유효선량과 각 장기별 등가선량으로 구분하여 평가한다. 동일한 방사성물질 농도라 하더라도 유효선량과 장기등가선량은 피폭경로, 핵종, 연령군에 따라 다르게 계산된다.

32) 외부피폭 및 호흡에 의한 내부피폭

33) 농·축산물 섭취에 의한 내부피폭

특히 연령이 어릴수록 방사능에 대한 민감도가 크고, 신진대사가 성인에 비해 빠르기 때문에 폐나 위로 유입된 방사성물질이 인체에 빠르게 흡수되므로 높은 선량을 받게 된다. 따라서 신진대사의 정도에 따라 연령군을 일정한 범주로 나누어 선량을 평가하게 된다. 연령군은 국제방사선방호위원회(ICRP)에서는 6개 연령군, 미국 NRC에서는 4개 연령군을 적용할 것을 권고하고 있는데, 우리나라에서는 ICRP 60 권고[2.18, 2.20]에 따라 다음과 같이 6개 연령군으로 구분하여 평가하고 있다.

피폭 연령군 [괄호안은 NRC 권고 연령군]

- 3개월 : 신생아 ~ 1세 미만 [유아]
- 1 세 : 1세 ~ 2세 미만
- 5 세 : 2세 ~ 7세 미만 [소아]
- 10 세 : 7세 ~ 12세 미만
- 15 세 : 12세 ~ 17세 미만 [십대]
- 성 인 : 17세 이상 [성인]

등가선량은 장기별로 계산되는데 국내 원자력안전위원회 고시에서는 최소 12개 주요장기를 포함하도록 요구하고 있는데, 국내원전에서는 고시에서 요구하는 장기 보다 더 세분화하여 26개 장기에 대한 등가선량을 평가하고 있다.

(2) 주요 입력변수

가) 환경매질의 사용인자

식 2.3.1의 환경매질의 사용인자는 오염된 환경매질에 피폭자가 노출되거나 흡입/섭취하는 양을 의미한다. 피폭경로별로 다음과 같은 보수적인 인자가 사용된다.

피폭경로별 사용인자

- 기체상 배출물
 - 외부피폭 : 노출시간 (1년 365일 오염된 환경매질에 노출된다고 가정)
 - 호흡에 의한 내부피폭 : 연령군별 호흡량
 - 섭취에 의한 내부피폭 : 연령군별 농·축산물 최대 섭취량
- 액체상 배출물
 - 외부피폭 : 노출시간(연령군별 해변활동, 수영, 어업활동 시간)
 - 섭취에 의한 내부피폭 : 연령군별 수산물 섭취량

상기의 사용인자 중 기체상 배출물의 외부피폭에 대한 사용인자는 365일 노출된다고 가정하기 때문에 별도의 인자가 적용되지는 않는다.

호흡량은 연령군별로 연간 평균 호흡량을 적용한다. 농·축·수산물 섭취량은 연령군별로 연간 최대 섭취량을 적용하는데, 최대 섭취량은 보건복지부에서 수행한 2007년도 국민영양조사 결과[2.12]를 바탕으로 ICRP에서 권고[2.19]하는 95백분위 음식물 섭취량을 최대 섭취량으로 정하였다. 최대 섭취량은 평균섭취량에 비해 약 2배 정도 큰 값이다. 해양활동은 원전주변주민 총 800명을 대상으로 설문조사를 수행하여 응답자의 95백분위 값을 개인별 최대 활동시간으로 정하였다[2.21]. 최대 해양활동시간은 설문 응답자의 평균 값에 비해 성인 기준으로 약 6배에 해당되는 매우 보수적인 값을 적용하였다.

나) 사용인자의 지역생산분율

지역생산분율은 주민이 섭취하는 음식물 중 지역 생산 비율을 의미하며 지역생산 농수산물은 보수적으로 모두 오염되었다고 가정한다. 주민이 직접 재배하지 않더라도 거주 주변 지역에서 생산된 것을 소비하는 경우는 모두 오염된 음식물 소비로 가정한다.

농산물은 과일을 제외하고 모두 지역 생산물을 소비한다고 가정한다. 과일은 수입되는 것(열대 과일 등)이 약 30% 정도 소비되는 비율을 고려하여 70%가 지역에서 생산된다고 가정한다. 축산물은 대부분의 육류와 우유가 유통식품을 섭취하기 때문에 지역에서 생산된 음식물을 소비할 가능성은 크지 않다. 그러나 보수적인 선량평가를 위해 지역생산분율을 50%로 적용하고 있다. 수산물은 원전이 해안지역에 위치하고 있는 것을 감안하여 모두 지역 생산물로 가정한다[2.21].

(3) 선량계수

선량계수는 단위 방사성물질의 흡입, 섭취 또는 노출에 의하여 각 연령군을 대표하는 가상개인이 받는 유효 및 장기등가선량을 적절한 단위로 정량화한 것이다. 공기, 지표면, 해변, 해수 등으로부터의 외부피폭 선량계수는 연령군에 따른 피폭량의 크기가 차이가 크지 않기 때문에 모든 연령군에 동일하게 적용한다. 그러나 호흡 및 섭취에 의한 내부피폭 선량계수는 인체 신진대사의 차이를 반영하기 위해 6개의 피폭 연령군별로 세분하여 적용하는데, 피폭자가 70세가 될 때까지의 방사선 영향을 누적하여 선량을 평가한다. 예를 들면 성인의 경우는 20세를 기준으로 피폭 이후 50년간 누적되는 선량, 5세 연령군의 경우는 65년간의 누적 선량을 계산하게 된다[2.20].

3. 주민 방사선량평가 결과

원전 사업자인 한수원은 법적 요구에 따라 호기당 설계목표치 및 부지당 운영기준치 만족 여부를 매년 정기적으로 평가하여 환경방사선 조사보고서를 원자력안전위원회에 제출하고, 규제기관인 한국원자력안전기술원의 전문적인 검토를 거쳐 검증받는다. 검증 과정을 거친 보고서는 한수원 인터넷 홈페이지를 통해 일반에게 공개되고 있다.

원전 주변 주민이 받는 방사선량은 발전소 부지 전체에서 배출된 모든 방사성물질에 의한 주민 방사선량이다. 원전사업자인 한국수력원자력(주)의 2013년 환경방사선 조사보고서에 수록된 자료를 정리하여 최근 10년(2004~2013년)간 부지 제한구역경계에서 주민이 받는 유효선량을 표2-16에 제시하였다[2.10]³⁴⁾. 원전부지별, 연도별 주민 방사선량 분포는 부지 제한구역 경계에서 유효선량 기준으로 연간 0.000152 ~ 0.0286 mSv 범위로 원자력안전법에서 규정한 일반인 연간 유효선량한도의 0.02 % ~ 2.9 % 정도에 해당하는 미미한 수준이었다. 보다 엄격한 운영기준치인 연간 유효선량 0.25 mSv에 비해서도 최대 11.4 %에 불과하다. 최근 10년간 갑상선 등가선량의 최대값은 월성원전 부지에서 연간 0.0267 mSv로 부지당 운영기준치인 연간 0.75 mSv에 비해 3.6 %에 불과하다[2.10].

본 절의 배출량을 근거로 모델에 의해 평가한 방사선량이 앞의 “2.2절 원전 부지 주변의 방사선 환경감시” 부분에서 언급한 환경방사능 측정값을 이용하여 평가한 선량에 비해 유사하거나 다소 높게 평가되는 경향이 있는데, 이는 배출량에 근거하여 선량을 평가할 때 부지 선량이 가장 높게 평가되는 부지 제한구역경계에 거주하는 가상적인 개인을 대상으로 보수적인 가정을 도입하여 평가한 것이기 때문이다. 따라서 거주지에서의 주민이 받는 실제 피폭 선량은 본 평가결과에 비해 더 작을 것이다.

결론적으로 우리나라 원전부지 주변 주민이 받은 최근 10년간의 연간 최대 유효선량인 0.02859 mSv는 자연방사선에 의하여 개인이 1년 동안 받게 되는 유효선량 3.08 mSv의 0.93 % 수준이며, 개인 1인의 연간 의료피폭 유효선량 1.4 mSv의 2 % 수준이므로[2.22], 원전 운영으로 인한 주민에 대한 방사선 영향은 실제적으로 없다.

34) 표2-16에 기술된 고리원전주변주민 피폭선량이 부산지방법위 동부지원 사건번호 2012가합100370 손해배상(기)의 판결문에 인용된 수치와 소수점 5번째 자리에서 일부 차이가 있는데, 이는 자료 인용 과정에서 발생한 오기로 추정됨

[표2-16 부지별, 연도별 주민 방사선량(mSv/yr)³⁵⁾]

부지 연도	고리	월성	한빛	한울
2004	0.00520	0.00460	0.00600	0.00240
2005	0.00512	0.00285	0.00301	0.00338
2006	0.00664	0.00348	0.00485	0.00165
2007	0.01510	0.00579	0.00604	0.00209
2008	0.00460	0.00831	0.00957	0.00190
2009	0.00226	0.00154	0.00432	0.00207
2010	0.00152	0.00520	0.00273	0.00333
2011	0.00171	0.00481	0.00271	0.00330
2012	0.00418	0.02231	0.01612	0.01568
2013	0.00455	0.02859	0.01584	0.01205

35) 2009년까지는 성인 기준, 2010년 이후는 최대피폭 연령군(1세) 기준

2.4절 참고문헌

- [2.1] NUREG-0133, Preparation of Radiological Effluent Technical Specifications for Nuclear Power Plants, 1978.
- [2.2] NUREG-1301, Offsite Dose Calculation Manual Guidance: Standard Radiological Effluent Controls for Pressurized Water Reactors, 1991.
- [2.3] Reg.Guide 1.21, “Measuring and Reporting Radioactivity in Solid Wastes and Releases of Radioactive Materials in Liquid and Gaseous Effluents from Light-Water-Cooled Nuclear Power Plants.”
- [2.4] Reg.Guide 1.97, “Instrumentation for Light-Water-Cooled Nuclear Power Plants to Assess Plant Conditions During and Following an Accident.”
- [2.5] Reg.Guide 4.15, “Quality Assurance for Radiological Monitoring Programs(Normal Operation)-Effluent Streams and the Environemnt.”
- [2.6] ANSI N13.1, “Guide to Sampling Airborne Radioactive Materials in Nuclear Facilities,” American National Standards Institute
- [2.7] NUREG-0017, “Calculation of Releases of Radioactive Materials in Gaseous and Liquid Effluents From Pressurized Water Reactors”
- [2.8] Reg.Guide 1.143, “Design Guidance for Radioactive Waste Manageemnt Systems, Structures, and Components Installed in Light-Water-Cooled Nuclear Power Plants.”
- [2.9] IAEA Safety Series No. 115, “International Basic Standards for Protection against Ionizing Radiation and for the Safety of Radiation Sources” , 1996
Reg.Guide 1.143, “Design Guidance for Radioactive Waste Manageemnt Systems, Structures, and Components Installed in Light-Water-Cooled”
- [2.10] 한국수력원자력(주), “원자력발전소 주변 환경방사능 조사 및 평가보고서” , 2004 ~ 2013년도 연보
- [2.11] United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR), “Sources and Effects of Ionizing Radiation” , UNSCEAR 2008 Report Vol. 1, Annex A, Workbooks Table A1 ~ A14, 2008
- [2.12] 이갑복 등, “월성 원자력발전소 주변 환경방사선/능 장기경향 평가” , 2012한국방사성 폐기물학회 추계학술대회 논문요약집, pp459-460, 2012
- [2.13] 한국원자력안전기술원, “2013년 전국환경방사능조사” , 2014

- [2.14] 김용재, “국회의원 정호준 · 시민방사능감시센터 주관 원전주변 방사능 오염 저감 및 안전을 위한 정책토론회-원전주변 수산물 및 통양의 방사능 오염조사결과 발표”, 주제발표 2, “원전주변 환경방사능 조사현황”, pp30-42, 2014
- [2.15] Reg.Guide 1.109, “Calculation of Annual Doses to Man from Routine Releases of Reactor Effluents for the Purpose of Evaluating Compliance with 10CFR Part 50 Appendix I”, Rev. 1, 1977
- [2.16] IAEA Technical Report Series No. 472, Handbook of Parameter Values for the Prediction of Radionuclide Transfer in Terrestrial and Freshwater Environments, 2010
- [2.17] ICRP Publication No. 60, “1990 Recommendation of the International Commission on Radiological Protection”, 1990
- [2.18] 한국원자력안전기술원, “방사능 방재 환경 규제기술 개발 최종보고서. 별책부록: 주민피폭선량 평가지침 및 INDAC 사용자 지침서”, KINS/GR-199 별책 1, 2000
- [2.19] ICRP Publication No. 101, “Assessing Dose of the Representative Person for the Purpose of Radiation Protection of the Public”, 2006
- [2.20] ICRP Publication No. 72, “Age-dependent doses to members of the public from intake of radionuclides. Part 5. Compilation of ingestion and inhalation dose coefficients”, 1996
- [2.21] 한국수력원자력(주), “원자력발전소 주변 방사선 환경감시 및 영향평가 체계 개선 - Part B : 주민방사선량 평가 분야 (최종보고서)”, 2009
- [2.22] 한국원자력안전기술원, “우리나라의 방사선 환경”, KINS/GR-356, 2009

3장. 갑상선암 발생에 관한 의학적 분석

3.1절 갑상선암의 일반적인 특징

1. 갑상선암의 발생부위

가. 갑상선의 위치 및 구조

갑상선은 목의 앞부분에 있으며, 목 앞쪽 중앙의 튀어나온 부분(갑상선연골)을 기준으로 2~3cm 아래에 위치하고 길이는 4~5cm, 넓이는 1~2cm, 두께는 2~3cm, 무게는 15~20g이다. 갑상선의 모양은 나비 모양인데 2개의 엽(좌엽, 우엽)과 엽을 연결하는 협부로 구성되어 있다.

나. 갑상선의 기능

갑상선은 내분비 기관 중 하나로 갑상선호르몬을 생산, 저장해 두었다가 필요할 때마다 혈액으로 내보내는 일을 한다. 갑상선호르몬은 사람에게 없어서는 안 되는 물질로, 인체의 대사 과정을 촉진하여 모든 기관의 기능을 적절히 유지시키는 역할을 하는데, 예를 들어 열을 발생시켜 체온을 일정하게 유지시키거나 태아와 신생아의 뇌와 뼈의 성장 발달에 도움을 주는 역할 등을 한다.

2. 갑상선암의 정의 및 종류

가. 갑상선암의 정의

갑상선에 혹이 생긴 것을 갑상선 결절이라고 하며, 갑상선 결절은 크게 양성 결절과 악성 결절(암)로 나뉜다. 여기서 갑상선에 생긴 악성 결절을 총칭하여 갑상선암이라고 한다. 악성 결절을 치료하지 않고 방치할 경우 다른 곳으로 암세포가 퍼져서 생명을 잃을 우려가 있으며 전체 결절의 5% 내외를 차지한다.

나. 갑상선암의 종류

갑상선암은 기원하는 세포의 종류나 세포의 성숙 정도에 따라 분류한다. 갑상선암을 기원하는 세포 유형에 따라 분류하면, 여포세포에서 기원하는 유두암, 여포암, 역형성암 등과 비여포세포에서 기원하는 수질암, 림프종 등으로 나눌 수 있다. 한편 암세포의 성숙 정도를 암세포의 분화도라고 한다. 현미경으로 암세포를 관찰하면 성숙이 비교적 잘 된 분화암은 정상 세포를 많이 닮아 있고, 미분화암은 정상 세포와 거의 닮지 않고 미성숙한 형태를 보인다. 이 둘의 중간 단계인 암도 있을 수 있다. 분화암과 미분화암을 구분하는 이유는 미분화암과 분화암의 성질이 달라 분화도에 따라 치료 방법이 달라지기 때문이며, 또한 미분화암이 분화암에 비해 분열 속도나 퍼져나가는 속도가 더 빠르기 때문이다. 결과적으로 미분화암이 분화암에 비해 치료 성적이 좋지 않다.



[그림3-1 갑상선암의 종류]

(1) 여포세포 기원의 암

(가) 분화 갑상선암

○ 유두암

전체 갑상선암 중 가장 흔히 발견되는 암으로, 일반적으로 매우 천천히 자라며 예후도 갑상선암 중 가장 좋다. 종종 주변 조직을 침범하며, 석회화도 드물지 않게 발견된다. 조직학적 특성에 따라 여러 가지 아형으로 구분되기도 한다.

유두암은 한쪽 엽에만 있을 수도 있지만 전체의 20~45%의 경우에서 양쪽 엽을 다 침범한 형태로 나타나고, 갑상선 주변 림프절을 침범한 경우도 많기는 약 70%에서 관찰되는데, 이러한 경우에도 적절한 초기 치료를 받으면 잘 치유되는 경우가 대부분이다. 드물지만 폐나 뼈 등 다른 부위로 원격전이하는 예가 있으므로 초기 치료가 중요하다.

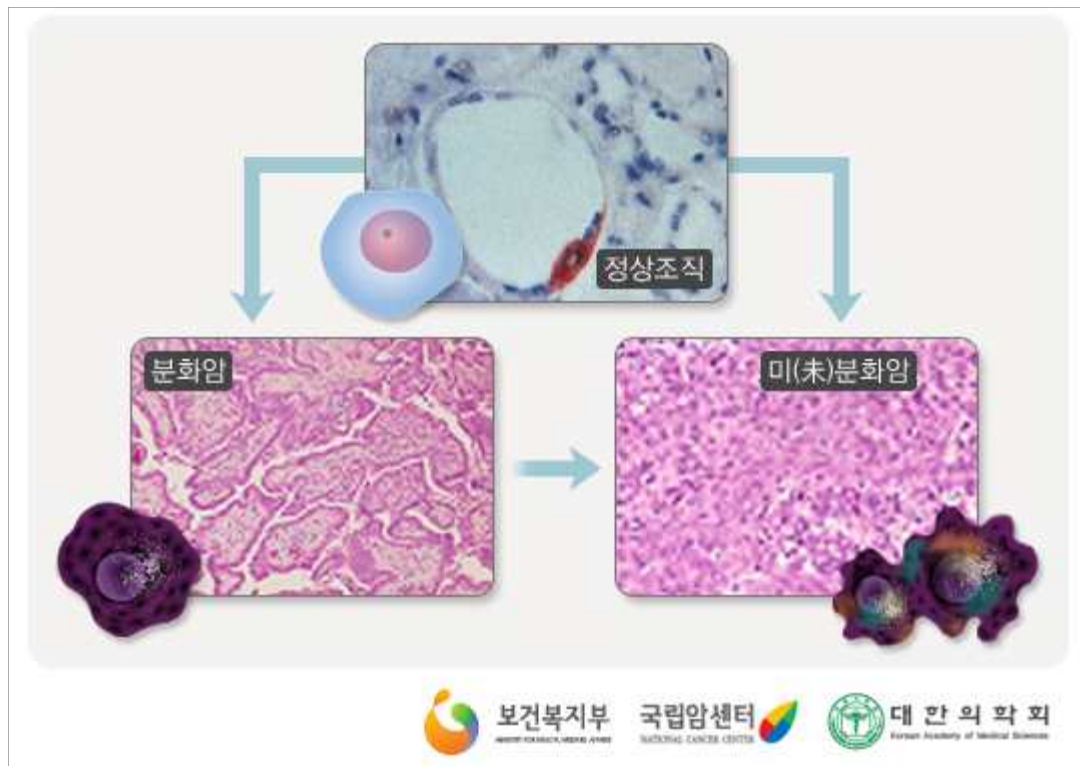
○ 여포암

여포암은 최근 유두암에 비해 상대적으로 빈도가 많이 줄어들고 있다. 여포암은 갑상선의 혈관들을 침범하는 경향이 있으므로 주변 림프절로 전이되는 경우는 흔치 않지만, 대신에 암세포가 혈액을 타고 폐, 뼈, 뇌 등의 부위로 퍼져나가는 원격전이를 갑상선유두암에 비해 흔히 볼 수 있으며, 유두암보다 예후가 약간 좋지 않은 것으로 알려져 있다.

허들세포암(Hurthle cell carcinoma)이라는 흔치 않은 종류도 있다. 갑상

선 세포 중 허들세포(oncocyte)에서 기원하는 암으로 여포암과 비슷한 행태를 보인다. 하지만 여포암과 다르게 허들세포암은 혈액을 타고 전이할 뿐 아니라 주변 림프절 전이도 흔하게 일으킨다.

이러한 분화암은 정상 갑상선 세포의 성질을 대부분 유지하고 있어 치료에 반응이 좋기 때문에 생존율이 높다.



[그림3-2 분화암과 미분화암]

(2) 저분화 갑상선암(poorly differentiated carcinoma)

드물게 발견되지만 분화 갑상선암에 비해 암의 분화 상태가 나쁘며 예후 역시 분화암에 비해 좋지 않다. 분화암이 세월이 지나면서 역분화되면서 발생하는 것으로 생각되며 저분화암과 분화암이 같이 발견되는 경우도 있다. 섬모양(insular type), 원주세포형(columnar cell type), 키큰세포변이(tall cell type), (trabecular type), 미분화(poorly differentiated) 등으로 구분된다.

(3) 역형성암(undifferentiated or anaplastic carcinoma)

전체 갑상선암의 약 2~5%를 차지하는데 한국인에게서는 더 낮은 빈도를 보인다. 이 암은 갑상선분화암(유두암, 여포암)이 오랜 시간이 지나면서 분화의 방향이 역전되어 생기는 것으로, 발병 시기도 분화암보다 약 20년 늦어

60대에 가장 발생 빈도가 높다. 역성형암은 성장 속도가 빠르고 처음 진단 시 수술이 불가능한 경우도 많으며, 방사성요오드 치료가 듣지 않는다. 현재까지는 특별히 알려진 효과적인 치료 방법이 없어 예후가 매우 나쁘고 진단받은 후 1년 이내에 사망하게 되는 경우가 많다.

(나) 비여포세포 기원의 암

○ 유두암

전체 갑상선암의 5-10%를 차지하며 서양에 비해 동양, 특히 한국인에서는 드물게 나타난다. 몸속의 칼슘량을 조절하는 칼시토닌이라는 호르몬을 분비하는 C-세포에 발생하며 대부분의 수질암이 칼시토닌을 분비하기 때문에 혈액 내 칼시토닌 측정은 수질암을 진단하고 치료 후 재발을 발견하는데 매우 중요하게 이용이 된다. 수질암의 또 다른 특징 중 하나는 일부 환자에서는 수질암이 부모로부터 물려받은 돌연변이된 ‘RET 원종양 유전자’에 의해 발병한다는 것이다. 또한 이러한 경우 다른 내분비 기관의 이상(부갑상선, 뇌하수체, 부신 등)이 같이 발생하는 경우도 있다. 따라서 갑상선수질암 환자에게 가족력이 있는 것으로 의심되면 RET 원종양 유전자의 돌연변이 유무를 검사하고, 환자가 가족성수질암으로 판명되면 환자의 가족들을 대상으로 모두 유전자 검사를 시행하여 조기 발견 및 예방적 수술 등의 적절한 처치를 해야 한다.

○ 기타

드물긴 하지만 갑상선에도 림프종이 발생하기도 한다. 주로 B세포 기원의 악성 림프종이 생기며, 만성 림프구성 갑상선염(하시모토 갑상선염chronic lymphocytic thyroiditis, Hashimoto ‘s thyroiditis)을 오랫동안 갖고 있던 환자의 갑상선의 크기가 갑작스럽게 커졌을 경우는 의심해 봐야 한다. 림프종은 일반적인 악성 림프종에 준해 진단하고 치료한다. 림프종의 기본 치료법은 항암 화학요법이지만, 갑상선에 생기는 림프종의 경우 미세침흡인세포검사나 조직 검사로도 진단에 어려움을 겪는 경우가 많기 때문에 수술 후 조직병리검사 결과를 보고 진단하는 경우도 적지 않다. 임상적인 상황을 포함한 고려가 중요하다. 이 외에 드물게 다른 암종이 갑상선으로 전이되는 경우가 있다. 갑상선에서 발견되는 암의 소수에서 전이암이 나타난다. 유방암의 전이가 가장 흔하고 이 외에 폐암, 신장암에서의 갑상선 전이가 흔한 것으로 보고된다.

다. 갑상선암 관련 통계

2011년에 발표된 중앙암등록본부 자료에 의하면 2009년에 우리나라에서는 연 192,561건의 암이 발생했는데, 그 중 갑상선암은 남녀를 합쳐서 연 평균

31,977건 발생하여 전체 암 발생 비율의 16.6%로 1위를 차지하였다. 인구 10만 명당 조발생률은 64.4건이다.

남녀의 성비는 0.19:1로 여자에게서 더 많이 발생하였다. 발생건수로 보면 남자의 경우 연 5,162건 발생하여 남성의 암 중에서 6위를 차지하였고, 여자의 경우는 연 26,815건으로 여성의 암 중에서 1위를 차지하였다. 남녀를 합쳐서 연령대별로 살펴보면 40대가 31.3%로 가장 많고, 50대가 25.7%, 30대가 20.1%의 순이다. 조직학적으로는 2009년의 갑상선암 전체 발생건수 31,977건 가운데 암종(carcinoma)이 99.4%를 차지하였다. 암종 중에서는 유두상암이 95.1%로 가장 많고, 그 다음으로 기타 명시된 암이 1.9%를 차지하였다.

[표3-1 갑상선암의 조직학적 형태에 따른 발생 빈도, 2009년 갑상선암 발생 건수]

조직학적 형태 (Histological group)	발생건수 (cases)	발생확률 (%)
1. 암종(Carcinoma)	31,774	99.4
1.1 여포성암(Follicular carcinoma)	494	1.5
1.2 유두상암(Papillary carcinoma)	30,419	95.1
1.3 수질성암(Medullary carcinoma)	152	0.5
1.4 역형성형암(Anaplastic carcinoma)	63	0.2
1.5 기타 명시된 암(Other specified carcinoma)	618	1.9
1.6 상세불명암(Unspecified carcinoma)	28	0.1
2. 육종(Sarcoma)	1	0.0
3. 기타 명시된 악성 신생물(Other specified malignant neoplasm)	1	0.0
4. 상세 불명의 악성 신생물(specified malignant neoplasm)³⁶⁾	201	0.6
총 계	31,977	100.0

3. 갑상선암의 위험요인

가. 갑상선암의 발생 기전

갑상선암뿐 아니라 모든 암의 발생 기전은 유사하다. 정상적인 세포는 성장, 분화, 사멸이 적절하게 조절되어 그 양이나 크기가 일정하게 유지된다. 이러한 과정 중에서 하나에서라도 이상이 발생하게 되면 암이 발생할 수 있다. 유전자 돌연변이 등으로 인해 비정상세포(암세포)의 생성 및 사멸 과정이 조절되지 않으며 비정상세포의 성장이 증가한다. 발암유전자(oncogene), 종양억제유전자(tumor suppression gene), DNA수선유전자(DNA repair gene) 등 여러 유전자의 변이에 의해 세포의 성장이 억제되지 않고 사멸이 억제되어 암세포는 비정상적으로 자라게 된다.

36) 14건의 DCO 포함(Death Certificate Only : 전체 암 등록환자 중 사망진단서에만 암으로 확인된 분율)
(보건복지부 중앙암등록본부 2011년 12월 29일 발표자료)

이 외에 세포의 성장에는 주변 혈관으로부터 산소 및 영양분 공급이 중요하고 이 과정에 관여하는 섬유아세포성장인자(FGF, fibroblast growth factor), 인슐린양성장인자(IGF-1, insulin like growth factor-1), 변형성장인자(TGF- α , transforming growth factor- α) 등 여러 성장 인자들과 혈관 생성에 관여하는 혈관세포 성장인자(VEGF, vascular endothelial growth factor)도 종양의 성장에 매우 중요하다.

갑상선암에 있어서도 위의 여러 인자가 복합적으로 암 발생 및 진행에 관여하는 것으로 생각되며, 특히 갑상선암에서 현재까지 알려진 중요한 인자는 갑상선자극호르몬(TSH)으로, TSH는 갑상선세포 및 분화갑상선암세포의 성장을 자극하는 것으로 잘 알려져 있다. 또한 최근 갑상선 유두암의 경우에 BRAF 유전자의 돌연변이가 중요한 역할을 하는 것으로 알려지고 있다.

(1) 갑상선 유두암

한 개의 유전자 돌연변이로 암이 발생한다고 보지 않으며 여러 과정의 연속적인 이상이 갑상선암 발병에 관여한다고 추론되고 있다. 세포의 대표적인 신호 전달 경로 중 하나인 타이로신 키나아제 경로(tyrosine kinase pathway)의 활성화가 초기 단계의 갑상선암 생성에 관여하는 것으로 알려져 있으나 다음 단계(세포의 성장, 암의 진행)에 관여하는 요인 및 기전에 대해서는 아직 충분히 알려져 있지 않다. 이러한 신호 전달 경로를 활성화시키는 유전자로는 RET/PTC, RAS, BRAF 등이 알려져 있다. 이들 유전자의 변이는 서로 배타적으로 나타난다. 즉, RAS 변이가 있는 경우 RET/PTC와 BRAF 돌연변이는 나타나지 않는 등 돌연변이가 동시에 나타나는 경우는 없다고 알려져 있다.

(2) 여포암

여포암은 유두암과 달리 요오드 결핍 지역에서 많이 발생하며 RAS 유전자의 변이가 발견된다. 이 외에 PAX8-PPAR γ 1 유전자 재배열도 흔히 나타난다.

나. 갑상선암의 원인

(1) 방사선

고선량의 방사선 노출은 갑상선암의 위험 인자로 알려져 있다. 방사선으로 인해 발생한 갑상선암의 95% 이상은 갑상선 유두암 형태이다. 고선량의 방사선은 치료적 방사선 노출과 원자력발전사고와 같은 환경 재해로 인한 방사선 노출이다. 노출된 고선량 방사선의 용량에 비례하여 갑상선암의 발병 위험도가 증가한다. 방사선이 0.1 Gy를 넘는 경우 암 발생이 증가했으며, 그 이하에서의 영향은 과학적으로 증명되지 않았다. 그리고 어릴 적 머리나 목 부위에

여러 이유로 방사선 치료를 받은 경우 갑상선암 위험이 증가한다는 보고도 있다. 또한 1986년 우크라이나 체르노빌이라는 도시에서 발생한 원자력 발전소 사고의 예를 보면 이 지역의 어린이에게서는 다른 지역에 비해 5-8배 많은 갑상선암이 발생하였으며 어린 나이에 방사선에 노출될수록 갑상선암의 발생 위험이 증가하였다.

암은 방사선 노출 후 빠르게는 4~5년 후부터 발생하지만, 노출 후 5년 이후부터 30년까지도 암 발생의 위험도는 높고, 30년이 지난 후에도 위험도가 감소하긴 하지만 암 발생의 위험이 정상인보다 높았다. 방사선은 DNA 구조를 파괴시켜 RET/PTC라는 유전자의 이상을 유도하여 갑상선암 발생률을 높인다. 과거에는 편도선염, 홍선비대, 천식, 여드름 등 양성 질환 치료에 방사선을 사용하여 갑상선암의 위험이 높았으나 최근에는 두경부의 악성 종양(악성 림프종, 후두암 등)에 방사선 치료를 하는 경우가 대부분이다. 이 경우에도 역시 갑상선기능저하증뿐 아니라 갑상선 결절 및 암 발생의 위험도가 증가한다. 반면, 유방암의 방사선 치료 시에는 치료하는 방사선량이 꽤 많음에도 불구하고 갑상선암의 위험도는 증가하지 않는 것으로 알려져 있다.

(2) 유전적 요인

여러 가족성 증후군이 있는 경우 갑상선암의 발생이 증가한다. 흔하게 알려져 있는 것은 가족성 갑상선암이다. 가족성수질암 증후군이라 하여 RET라는 유전자에 돌연변이가 발생하면 갑상선수질암이 발생할 수 있다. 이는 전체 수질암의 20%를 차지한다. 부모가 갑상선 유두암이나 여포암을 진단받은 경우 자녀에게서 갑상선암이 발생할 위험도는 아들의 경우 7.8배, 딸의 경우 2.8배 증가한다. 일반적으로 유두암은 약 4%에서 가족력을 가지는 것으로 보고되고 있다. 가족성 대장 용종증(FAP, familial adenomatous polyposis)은 상염색체 우성 유전 질환으로 이 환자들에서 갑상선암이 많이 발생한다. 하지만 발생률 및 사망률은 매우 낮으므로 선별검사를 권고하지는 않는다. 드문 상염색체 우성 유전 질환인 Cowden병(Cowden's disease)에서도 갑상선암을 포함한 갑상선의 이상이 많이 발생하는 것으로 알려져 있다.

(3) 이전의 기저 갑상선 질환(갑상선종, 양성 갑상선 결절)

갑상선종, 갑상선 결절, 만성 림프구성 갑상선염이나 그레이브스병 등 기존에 갑상선 질환을 가지고 있던 사람들에게서 갑상선암이 더 많이 생기는가에 대해서는 논란이 많다. 하지만 현재까지 축적된 여러 연구들을 종합해보면, 갑상선종의 병력, 양성 갑상선 결절은 강한 갑상선암의 위험 요인인 것으로 생각된다. 여성에게서는 각각 6, 30의 상대 위험도를 보였다. 그러나 이전의 갑상선

기능저하나 갑상선기능항진은 암의 위험도와는 관련이 없는 걸로 알려져 있다.

(4) 기타 원인

위의 몇 가지 요인이 알려진 갑상선암의 위험 요인이라 할 수 있겠으나, 대부분의 갑상선암 환자의 경우는 원인이 명확하지 않다. 즉, 여러 가지 요인들이 원인으로 거론되고 있으나 아직까지 명확하게 밝혀진 것은 없는 상태이며, 아래에서 간단히 살펴보고자 한다.

(가) 호르몬 요인

갑상선암은 남성보다 여성에게서 많이 발생하기 때문에 갑상선암과 여성 호르몬, 생식 요인(productive factors)과의 상관관계에 대한 많은 관심이 있었다. 다만, 에스트로겐 제제 투여(경구 피임약, 수유 억제제, 폐경기 여성의 호르몬 치료) 등이 갑상선암의 발생 위험을 증가시키는가에 대해서는 증거가 일반적으로 미약하며, 연구들의 결과가 일치하지 않는다. 최근에 이전 자료들을 모아 분석한 결과에 의하면, 인공 중절 및 첫 출산 당시의 나이는 미약하지만 유의하게 갑상선암의 위험도를 증가시키는 것으로 보고되었으며, 경구 피임약 역시 위험도를 약간 증가시켰다. 경구 피임제 중단 시 위험도는 점차 감소한다. 하지만 폐경 후의 여성호르몬제 보충 요법은 갑상선암의 위험을 증가시키지 않았다.

(나) 식이 요인

○ **요오드** : 요오드 결핍에 의한 장기간의 갑상선자극호르몬(TSH) 자극은 여포암의 발생과 연관이 있는 것으로 보인다. 하지만 요오드 결핍 지역이 아닌 지역에서는 연관성을 찾을 수 없었다. 또한 과다한 요오드의 섭취는 여포암보다 유두암과 연관성이 많은 것으로 알려져 있다. 우리나라는 요오드가 풍부한 지역이다. 이러한 지리적인 특성이 여포암에 비해 월등히 높은 유두암 발생에 일부 기여했을 거라 추정한다.

○ **십자화과 채소류** : 양배추, 브로콜리 같은 십자화과의 채소류는 갑상선종을 유발할 수 있는 물질을 함유하고 있는 것으로 알려져 있으나, 이들 채소에 같이 함유된 항산화제들이 암 예방 효과를 가지는 것으로 알려져 있어 이러한 채소류의 다량 섭취 시 갑상선암의 발생이 감소했다는 보고가 있다.

○ **커피** : 우리나라와 가장 가까운 일본의 연구에서는 커피 섭취가 갑상선암 발생을 감소시킬 수 있다고 보고하였으나, 여러 연구들의 결과를 종합하면 갑상선암과 커피 섭취는 관련이 없어 보인다.

○ **담배** : 이전에는 관련이 없다는 보고가 많았으나 최근의 연구들 중에는 담배가 갑상선암의 발생 위험을 낮춘다는 보고들이 있다. 이유는 확실치 않지만 흡연에 갑상선자극호르몬 농도를 낮추는 효과가 있는 것이 이와 관련 있을 것으로 생각된다.

○ **기타** : 그 외에도 파스타, 빵, 감자, 버터, 치즈 등의 음식 및 고칼로리 식이는 비만과 함께 갑상선암의 위험을 높인다는 보고들이 있다.

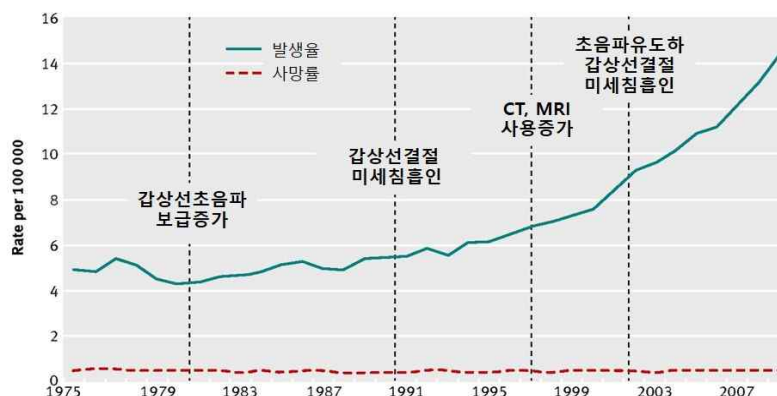
(다) 유방 질환

유방암이나 양성 유방 질환들과의 관련성에 대해서는 많은 논란이 있어 왔으나 증명되지는 않았으며, 최근의 일부 연구에 갑상선암의 위험도가 증가했다는 보고가 있어 앞으로 연관성을 확인할 연구가 더 필요하다.

3.2절 갑상선암 발생과 검진과의 관련성

1. 갑상선암의 특성

갑상선암은 내분비계에 발생하는 악성 종양 중 가장 흔하다. 주로 유두암 및 여포암이 대부분을 차지하며 여성에서 남성에 비해 2~3배(우리나라의 경우 약 5배) 정도 많이 발생하고, 다른 악성 종양에 비해 젊은 나이에 발병하고 있다. 최근 전 세계적으로 갑상선암의 발생률이 급증하고 있음이 보고되고 있는데 그에 대한 해석은 논란이 있다. 일부에서는 새로운 암 발생의 증가는 진단기술이 발달했기 때문이라 주장하고, 또 일부에서는 생활방식과 환경의 변화를 배제할 수 없다는 주장이 있다[3.1].



[그림3-3 새로운 기술의 출현과 갑상선암의 발생률과 사망률(미국,1975-2009)³⁷⁾[3.5]]

37) 낮은 위험도를 가진 암환자가 과잉치료가 되고 있다는 가장 확실한 증거는 지난 30년동안 갑상선유두암의 발생률이 3배로 증가했음에도 사망률은 안정적이라는 것이다.

진단의 증가를 뒷받침하는 사실 중 하나는 갑상선 초음파 검사 기술의 발달과 초음파 유도하 세침흡입 세포검사를 통한 미세 갑상선암의 진단유병률 증가가 있다. 임상적인 의미가 불분명한 잠재성 갑상선암의 발견과 이에 따른 불필요한 치료에 대한 논란이 야기되고 있다.

특히 우리나라의 경우 갑상선 우연종의 발견과 갑상선암 발생의 증가율이 매우 높으며, 현재 여성암 중 발생률 1위를 보이고 있어 중요한 사회 경제적 이슈로 대두되고 있다. 따라서 우리나라의 갑상선암 발생 증가를 규명함에 있어서 갑상선암과 검진과의 관련성을 규명하는 것이 매우 중요하다 [3.2].

2. 갑상선결절과 갑상선암

연령이 증가함에 따라 갑상선 결절의 빈도가 증가하며 결절의 크기가 커짐에 따라 암의 빈도도 증가한다고 알려져 있다.

갑상선 결절이 있는 환자는 대개 갑상선 초음파 검사를 시행하고, 경우에 따라 초음파 유도하의 미세침 흡인세포검사를 시행하기도 한다. 미세침 흡인세포검사는 갑상선 결절에서 양성과 악성종양을 구별하는 일차적인 검사법으로서 암 발견의 민감도는 약 85%, 특이도는 약 90~95%로 알려져 있다. 초음파 유도하의 미세침 흡인세포검사는 초음파를 이용하지 않고 시행하는 미세침 흡인세포검사보다 더 정확하며, 갑상선 결절의 약 3~10%에서 미세침 흡인세포검사나 병리조직소견으로 갑상선암을 진단할 수 있다고 한다 [3.3].

촉진으로 시행한 미세침 흡인세포검사보다는 초음파 유도하의 미세침 흡인세포검사가 갑상선암을 더 잘 발견해내는 것으로 알려져 있다. 촉진으로 미세침 흡인세포검사의 경우 갑상선 결절의 1~10% 정도 갑상선암을 진단해내고, 초음파 유도하에 미세침 흡인세포검사를 하는 경우는 갑상선 결절의 7~22% 정도 갑상선암이 진단되었다.

인구의 약 50% 내외가 갑상선 결절을 가지고 있고, 이 중 5~10% 정도가 실제 갑상선암이다.

[표3-2 갑상선암 발생률의 증가가 진단의 증가에 기인한다는 근거[3.1]]

1. 초음파나 미세침흡인과 같은 의료기술의 발달과 보급
2. 주로 미세암 발생률이 증가함
3. 아래의 경우로 미세암 발견이 늘어남
 - 양성 병변의 진갑상선절제술 증가
 - 더 세밀해진 병리학 검사
 - 다른 질병을 위한 진단검사로부터 우연한 발견이 혼함
4. 부검을 통해 무증상의 갑상선암이 높은 빈도로 발견됨
5. 암등록의 정확도 증가

3. 갑상선암의 증가와 검진과의 관련성

가. 갑상선암의 조직학적 특성

(1) 크기

갑상선암의 발생이 증가한 나라를 살펴보면 크기가 작은 종양의 진단 증가로 인해 전체 갑상선암 발생이 증가한 경우가 대부분이다. 그림3-4에서 보듯이 0~1.0cm 크기의 유두암이 가장 크게 증가한 것을 알 수 있다[3.4].

20년 전까지 가장 많은 갑상선암은 목에 압박 증상을 일으키는 결절, 눈에 보이는 목의 덩어리, 또는 갑상선 불편감이 없는 일반 환자의 신체검진을 통해 발견된 것이다. 1980년대에 들어와서 초음파 검사가 도입되고, 1990년대 후반 초음파 유도 생검법의 사용으로 인해 2mm이하의 작은 결절에 대한 검사와 생검이 가능하게 되었다. 초음파 검사 보험급여 정책과 함께 이동식 초음파기계의 보급으로 인해 내분비 관련 검사의 시행이 80%가량 증가되었다.

갑상선암으로 진단된 경우의 25%가 1cm미만이었고, 초음파를 이용한 세포검사는 크기가 작은 결절에서 암을 더 많이 발견하게 하고 있다.

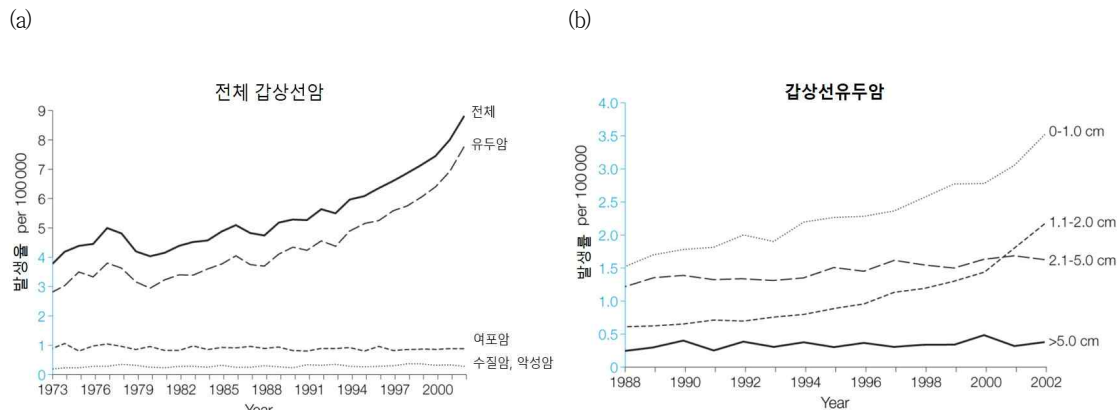
일부 연구보고는 1 cm 미만의 갑상선 결절의 4.2%에서 갑상선암이 발견되는 반면 1cm 이상의 결절 중 7.4%에서 암이 발견되었다고 한다. 실제로 미국의 경우 그림2에서 보듯이 1998년부터 2002년까지 0~1.0cm 크기의 갑상선유두암의 발생률이 가장 뚜렷하게 증가한 것을 알 수 있다.

최근에는 불필요한 치료를 예방하기 위해 1.0cm 이하의 결절은 위험요인으로 보지말 것, 혹은 미세암에 대해 치료 없이 기다리며 관찰하기 등의 권고안들이 나오고 있다[3.5].

(2) 조직

작은 갑상선유두암의 증가는 전체 갑상선암 진단유병률 증가분의 90% 이상을 차지한다. 이 사실은 그림2에서 확인할 수 있다. 여포암, 수질암, 악성암의 경우 1973년부터 2002년 사이에 발생률이 크게 증가하지 않았으나 갑상선유두암의 발생률이 크게 증가하였고, 갑상선유두암 발생률의 증가곡선과 거의 같은 형태로 전체 갑상선암의 발생률이 증가하였다.

작은 유두암이 발견된 환자들의 사망률은 증가하지 않아 과진단의 문제가 제기되고 있다. 유두암에 대한 과진단은 환자의 건강이나 생존에 크게 영향을 미치지 않는 질병을 발견하고, 이렇게 발견된 질병은 환자에게 도움이 되기보다는 정신적 스트레스나 불필요한 치료 등으로 오히려 해가되고 경제적 비용이 증가하게 된다. 갑상선암은 느리게 진행하고, 진행된 때에만 증상을 나타낼 뿐만 아니라 사망률이 낮기 때문에 미세유두암의 과진단은 일반적으로 득보다 실이 많다[3.4].



[그림3-4 미국의 갑상선암(1973-2002)과 갑상선유두암(1988-2002) 크기별 발생률 경향³⁸⁾ [3.4]]

나. 초음파 진단법

새로운 영상기술의 도입으로 질병에 대한 진단의 증가가 입증되고 있다.

38) 갑상선암의 발생은 1973년 10만명 당 3.6건에서 2002년 10만명당 8.7건으로 2.4배 증가하였다. 10만명 당 5.1건의 증가는 거의 갑상선유두암이 증가한 것이다. 갑상선유두암은 10만명 당 2.7건에서 7.7건으로 2.9배 증가하였다. 여포암, 수질암, 악성암의 발생률은 거의 변화가 없었다.

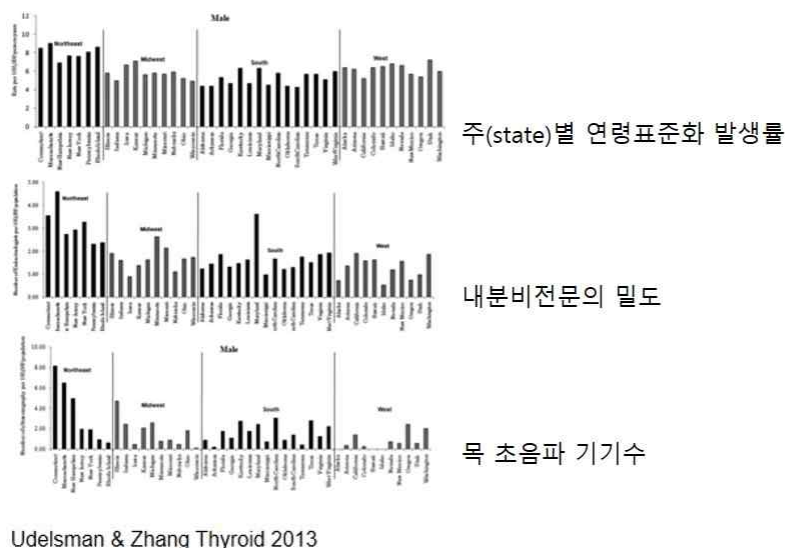
갑상선암으로 진단 받은 환자들 중 상당수가 초음파검사를 하는 과정에서 갑상선 결절을 부수적으로 발견한다.

CT와 MRI 검사에서 약 16% 정도 갑상선 결절이 발견되는데 이 중 3/4은 결절의 크기가 15mm미만이었다. 대부분은 폐쇄성폐색전증 등의 검사를 위해 흉부 CT를 시행하는 경우에 발견되었다.

경추신경근병증 검사를 위해 두경부 MRI를 시행하다 갑상선 생검을 한 경우가 1995년과 2005년 사이에 3배가 증가하였고, 이는 갑상선 결절 진단을 약 2.4배 증가시켰다.

미국의 경우 1995년과 2005년 사이에 컴퓨터 단층 촬영(CT) 사용은 3배가 늘었고 인구 1,000명당 173명이 수검하였다. 자기공명영상(MRI)의 경우 2배 이상이 증가해 인구 1,000명당 547명이 수검하였다.

또한, 내분비전문의 수가 많은 지역과 초음파 기기수가 많은 지역일수록 갑상선암 발생률이 높았다[3.6].



[그림3-5 미국 갑상선암의 역학(2005-2009): 내분비전문의와 초음파의 역할39) [3.6]]

39) 미국의 모든 주에 걸쳐 갑상선암 발생은 증가하였다. 특히 북동부에 위치한 코네티컷과 메사추세츠 주에서 높게 측정되었는데, 주목할 만한 점은 이 두 주(state)는 내분비 전문의의 밀도가 높고 목 초음파 기기수가 많은 지역이었다는 사실이다.

다. 의료서비스 접근성의 향상

영상검사로 인해 진단유병률이 증가한 사실은 의료서비스의 접근성이 향상된 것과 관련이 있다. 미국의 18개 지역을 분석해보니 의료서비스의 접근도가 향상된 것과 갑상선유두암 발생은 유의한 관련성이 있었다. 갑상선암 발생은 사회 경제적 수준이 높을수록 더 높았다. 미국 위스콘신의 경우 건강보험적용률이 5% 상승하였고, 갑상선암의 발생빈도가 증가하여 평균 1만명당 1.4건으로 증가하였다.

1980년부터 2004년까지의 조사에서 평균적으로 갑상선암의 발생률은 인구집단에서 도시의 평균소득이 각 10,000달러로 증가하면, 갑상선암 발생률은 평균 10,000명당 0.5건이 증가했다. 대학을 졸업한 주민의 높은 비율을 가진 위스콘신 지역에서 갑상선암의 발생률이 높아지는 경향이 있었다[3.6].

라. 부검연구

일련의 부검연구로 무증상 갑상선유두암의 존재가 확인되고 있다. 부검 결과를 보면 생전에 임상적으로 문제가 없었던 사람의 49~57%에서 갑상선결절이 발견된다.

일부 연구에서는 약 36%의 높은 갑상선암 진단유병률을 보고하였는데, 대부분이 크기가 2~3 mm 이하인 잠재암이었다. 과거 경부에 방사선조사를 받은 과거력이 있는 경우에서 갑상선암 발생의 위험도가 높고, 단일결절과 다발성 결절의 암 발생 위험도는 차이가 없다고 하였다. 또 다른 연구에서는 갑상선암이 아닌 다른 원인에 의한 사망자의 1/3에서 무증상의 갑상선암이 발견되었다고 보고하였다. 이때 발견된 종양은 대부분 1mm이하였으며 매 2~3mm 간격으로 절단하였을 때, 절단면 사이에 있는 부분은 놓치기가 좀 더 쉽다. 부검으로 발견한 암의 대부분은 무증상 갑상선유두암이 차지하고 있다.

마. 갑상선암의 명칭

명칭을 바꾸면 환자진료에서 지나친 치료를 피할 수 있고 즉각적인 치료보다는 지속적인 감시를 가능하게 한다. 명칭이 바뀐 예로는, 차별화된 지방육종에서 비정형적 지방성 종양으로, 1급 이행성 방광암에서 악성가능성이 낮은 유두상방광신생물로, 자궁 경부암에서 자궁경부상피 내 신생물질 등이

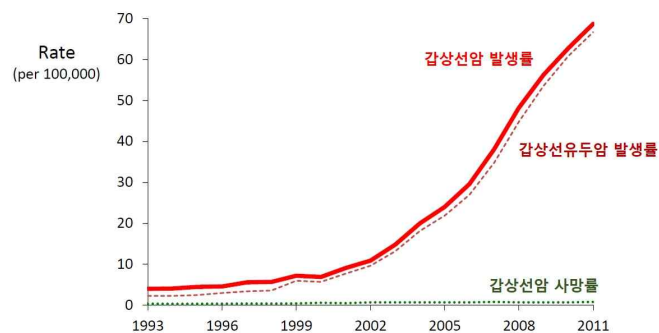
있다.

4. 우리나라의 문제

가. 우리나라 갑상선암의 검진과 진단유병률

1999년 정부는 국가암검진사업과 기타 건강검진을 국가사업으로 시행하였으며, 이 사업을 통해 유방암, 대장암, 위암, 간암에 대한 검진비용을 할인해주거나 무료로 제공하고 있다. 갑상선암의 경우는 국가암검진사업에 포함되지 않으나 일반 검진에 30,000-50,000원의 낮은 비용을 추가하면 초음파로서 검사를 수행할 수 있다.

많은 의료기관에서 건강검진 프로그램을 운영하고 있으며 여기에 갑상선에 대한 초음파 검사가 포함되어 있고, 자기공명검사 또는 양전자 방사 단층촬영 등의 고비용의 강도 높은 검사가 추가되기도 한다. 뿐만 아니라 많은 의원급 의료기관에서도 초음파를 보유하고 있으며 일반적으로 갑상선암 검진을 제공하고 있다.

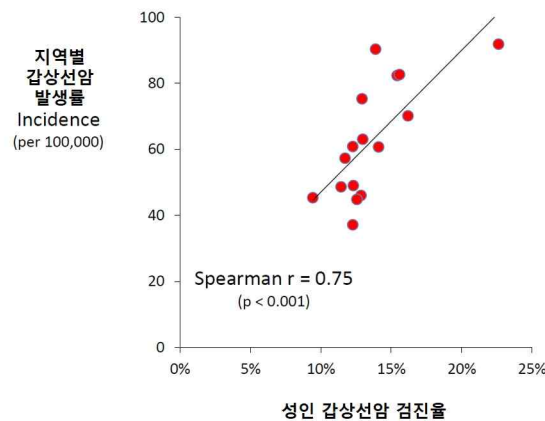


[그림3-6 우리나라의 갑상선암, 갑상선유두암의 발생률과 갑상선암 사망률 추이(1993-2011) [3.2]]

갑상선암의 발생은 1990년대 동안 경미한 증가가 있었으나 이후 급속도의 증가가 있었으며 2011년 갑상선 암의 진단은 1993년 대비 15배 증가되었다. 특히 유두암의 발견이 가장 중요한 증가분이며, 갑상선암 발생이 기하급수적으로 증가한데 반해 갑상선 암으로 인한 사망은 동일한 수준을 유지하고 있다.

갑상선 암의 발생은 16개 시도에 따라 차이가 있었는데 이는 갑상선암

의 지역별 검진율로 설명되어 진다. 2010년 지역사회건강조사에서는(전국 20여만 명 조사) 19세 이상의 성인을 대상으로 지난 2년 동안 갑상선암 검진을 수행한 경험이 있었는지 여부를 질문하였다. 국가암 등록자료에서 2008년, 2009년 지역별 갑상선암의 발생율과 지역사회 건강조사의 갑상선암 검진시행율과의 관련성을 지역에 따라 분석하였으며, 연령과 성별로 층화하여 분석한 결과 보다 강력한 연관성이 제시되었다.



[그림3-7 우리나라 성인 갑상선암 검진율과 지역별 갑상선암 발생률 [3.2]]

갑상선암은 현재 우리나라 국민에게 일반적으로 발생하는 암으로 2011년 40,000명 이상의 환자가 갑상선암으로 진단되었다. 갑상선암으로 진단된 모든 사람들은 치료되어지고 2/3는 전갑상선절제술, 1/3은 부분갑상선절제술을 시행한다. 한 개 의료기관에서의 자료에 의하면 1cm보다 작은 종양의 수술율이 1995년 14%에서 10년 이후 56%로 증가된 연구결과가 보고되었다. 이는 진료지침에서 0.5cm보다 작은 종양에 대한 검사와 수술을 하지 않도록 권고하는 내용과 반하는 결과이다.

갑상선암으로 인한 갑상선절제술은 환자의 여생동안 갑상선호르몬 치료를 받아야 하고, 일부 환자에서는 부작용을 가져오는 등의 부정적인 결과를 야기한다[3.2][3.7].

5.결론

크기가 작고 진행이 느린 갑상선암의 발생률은 여러 나라에서 증가하고 있다. 이러한 현상의 원인으로 실제 갑상선암 발생의 증가보다는 발견의 증가일 가능성이 대두 되고 있다. 갑상선암의 지속적인 증가에도 불구하고 갑상선암의 사망률은 10만명당 0.5케이스로 안정된 그래프를 보인다는 점은

발견의 증가를 뒷받침하는 근거이기도 하다[3.4].

초음파 미세침흡인과 같은 의료기술이 널리 보급되었다는 점, 주로 미세암의 발생률이 증가했다는 점, 다른 질병을 위한 검진에서 우연히 발견된 미세암이 증가했다는 점, 부검을 통해서 확인된 무증상의 갑상선암이 증가했다는 점을 미루어 볼 때 갑상선 암의 증가는 진단유병률의 증가로 인한 것으로 생각된다. 특히 우리나라에서 갑상선암의 급격한 증가는 초음파 검사의 보급 등 검진의 증가 경향과 일치한다. 따라서 갑상선암 증가 양상과 그 원인을 분석함에 있어 검진의 증가가 어떤 영향을 미쳤는지를 파악하는 것이 가장 중요한 요소라고 할 수 있다.

3.3절 참고문헌

- [3.1] Pellegriti G, Frasca F, Regalbuto C, Squatrito S, Vigneri R. Worldwide increasing incidence of thyroid cancer: update on epidemiology and risk factors. *Journal of cancer epidemiology*. 2013;2013:965212.
- [3.2] Ahn HS, Kim HJ, Welch HG. Korea's thyroid-cancer "epidemic" — screening and overdiagnosis. *The New England journal of medicine*. 2014;371(19):1765-7.
- [3.3] 정재훈. 건강검진 수진 성인에게서 초음파로 발견된 갑상선 결절 유병률과 미세침흡인세포검사 결과. *대한내분비학회지*. 2008;23(6):391-4.
- [3.4] Davies L, Welch H. Increasing incidence of thyroid cancer in the united states, 1973-2002. *JAMA*. 2006;295(18):2164-7.
- [3.5] Brito JP, Morris JC, Montori VM. Thyroid cancer: zealous imaging has increased detection and treatment of low risk tumours. *BMJ (Clinical research ed)*. 2013;347:f4706.
- [3.6] Udelsman R, Zhang Y. The epidemic of thyroid cancer in the United States: the role of endocrinologists and ultrasounds. *Thyroid : official journal of the American Thyroid Association*. 2014;24(3):472-9.
- [3.7] Lee J-H, Shin SW. Overdiagnosis and screening for thyroid cancer in Korea. *The Lancet*. 2014;384(9957):1848

4장. 원전주변 역학연구 사례

4.1절 국내원전주변주민 역학조사 배경 및 결과⁴⁰⁾

1. 원전역학조사 배경

1989년 영광원전(현재 한빛원전) 주변주민의 무뇌아 유산 언론보도를 계기로 원전 방사선에 대한 사회적 문제가 제기되었다. 영광원전 경비원의 부인이 두 번 무뇌아를 사산 또는 유산하였는데 이것이 남편의 원전 근무경력과 유관한 것인지에 대한 의문을 제기하는 기사가 게재되었다. 영광원전주변주민의 방사선 피해 여부가 사회적인 문제로 대두됨에 따라 정부 주무부처인 과학기술처는 대국민 발표와 국정감사 시 답변을 통해 원전 가동이 그 주변주민에게 미치는 건강상의 영향을 과학적으로 평가하고 인과관계를 규명하는 역학조사 연구를 실시하여 그 결과를 국민에게 알리기로 약속하였다.

1990년 영광원전주변주민에 대한 예비조사를 시작으로 1991년 12월부터 고리, 월성, 영광, 울진 4개 원전주변주민과 종사자에 대해 본격적인 역학조사가 착수되었다. 1991년부터 2000년 9월까지의 한국전력의 연구비 지원으로 연구가 진행되었으며 2000년 10월부터 2011년 2월 연구종료까지는 과학기술부의 연구비 지원을 받았다. 총 연구기간은 16년 7개월이었다. 연구주관기관은 서울대학교 의학연구원 원자력영향·역학연구소였으며 총 9개 기관이 연구에 참여하였다.

연구의 목적은 원전의 가동으로 인한 원전주변주민과 원전종사자의 암 발병 위험도를 평가함을 목적으로 하였다

2. 원전역학조사 연구 방법

원전역학조사는 전향적 코호트 연구로 수행되었다. 전향적 코호트 연구의 연구대상자(이하 ‘코호트’라 함) 자격조건의 첫 번째는 과거로부터 연구관찰 개시 시점까지 결과변수 사건발생(예: 암 발생)이 없었으며, 이후 연구관찰 기간 동안에 암 발생이 일어날 수 있는 잠재성이 있어야 하는 것이다. 예를 들어 암 기왕 경력자 또는 유병자는 코호트로 입적될 수 없으며, 위 절제수술을 받아 위 암 발생 가능성이 없는 경우도 대상자가 될 수 없다. 또한 원인변수와 결과변수 간의 관련성을 교란할 수 있는 제3의 공변수에 관한 자료도 수집되어야 한다.

따라서 코호트 연구 대상자를 선정하기 위해서 잠재적 대상자에 대해 자격여부를 확인하는 기준상황 조사(이하 ‘기반조사’라 함)를 시행하였으며, 과거

40) 교육과학기술부 원자력연구개발사업의 일환으로 서울대학교 의학연구원에서 2011년 제출한 ‘원전 종사자 및 주변지역 주민 역학조사 연구’ 최종보고서의 내용을 발췌·요약하였음

암 발생/유병 여부 및 암 발생 잠재성, 그리고 제3의 공변수 자료를 조사하는 기반조사를 시행하여 코호트를 구축하였다.

연구 대상지역은 원전 반경 5 km 이내를 원전 주변지역으로 정의하였으며, 원전 반경 5~30 km 이내를 근거리 대조지역, 30 km 밖의 함안, 양평, 충주를 원거리 대조지역으로 선정하였다. 주변지역, 근거리 대조지역 및 원거리 대조지역 등 모든 조사연구 대상지역에서 동일한 방식과 내용으로 기반조사를 시행하였다. 자발적으로 기반조사에 응하여 방문한 주민을 대상으로 임상신체 검사 및 역학 설문조사를 시행하였다.

연구대상 코호트는 주변지역, 근거리 대조지역, 그리고 원거리 대조지역 주민코호트로 구성되며 기반조사에서 아래의 조건을 충족한 경우에 연구대상 코호트로 입적하였다.

- 신체검사 및 역학조사 등의 기반조사를 받은 자
 - 2회 이상 중복 피검자는 첫 번째 조사 결과만을 반영함
- 만 20세 이상인 자
- 암 질환 유병/기왕력 없는 자
- 역학 설문 면접조사에서 충실한 응답을 한 자
- 연구대상 코호트로 입적된 이후 최소 1년 추구관찰이 시행된 자

기반조사는 1992년부터 2005년까지 수행되었으며 총 61,651건·명의 기반조사자 중에서 상기의 입적기준을 충족하여 연구대상으로 입적된 주민코호트는 총 36,176명이었다.

연구대상 코호트의 암 발생률 산출을 위해 필요한 암 발병 확인 추구관찰 조사는 다음과 같은 시행 원칙을 따랐다.

- 연구대상 코호트로 입적된 이후 1년 후부터 시행
- 년 1회 이상 암 발병여부를 추구 조사
- 암 발병 여부는 의무기록 내용에 근거함을 원칙으로 하며, 암등록자료 및 통계청 사망원인 자료를 근거할 수도 있음
- 추구관찰 조사가 종결되는 경우
 - 암 발병이 확인 된 경우
 - 사망한 경우
 - 해외 이주 등 국내에 거주하지 않는 경우
 - 기타 국내 생존 여부가 확인되지 않는 경우

- 연구가 종료된 경우(2010. 12. 31)

- 매년 차년도 추구관찰 조사 대상을 확정한다. 이전 년도까지 추구관찰 조사가 종결된 코호트를 대상에서 제외하고, 나머지 코호트에 대하여는 국내 거주, 생존을 확인하며, 이전 년도에 신규로 입적된 코호트를 추가한다.

암 발병/진단 여부 확인을 위해 수진 의료기관의 의무기록 조사, 국립암센터의 중앙암등록본부 또는 각 지역암등록본부의 암등록자료 조회, 통계청의 사망원인통계 자료 조회 등의 자료원을 이용하였고 이들 자료원 중 하나에서라도 암이 확인 되는 경우를 ‘암 발생’ 으로 하였다.

추구관찰 조사는 2010년 말까지 수행하였는데, 이는 2008년까지 발생/진단되는 암을 확인하는 조사였다. 대상자 개개인별로 암 발병 확인 관찰이 이루어진 ‘관찰기간(period at risk)’ 은 입적부터 중도 추구관찰 종료 또는 2008년 12월 31일까지이었다.

지역별 누적 관찰규모를 보면 주변지역이 101,183인·년, 근거리 대조지역이 88,707인·년, 원거리 대조지역이 113,652인·년이었다.

3. 지역주민 암 발생양상 분석결과

코호트 개개인에 대하여 입적 이후부터 2008년 12월 31일까지의 암 발병을 확인하는 추구관찰 조사를 수행하여 주변지역 코호트에서 705명(남: 393명, 여: 312명), 대조지역 코호트에서 1,593명(남: 941명, 여: 652명)의 암 발생자를 확인하였다. 근거리 대조지역 발생자는 721명(남: 421명, 여: 300명), 원거리 대조지역은 872명(남: 520명, 여: 352명)이었다.

[표4-1 암 발생 주요 부위별 분포]

발생부위	합계 (남/여)	주변지역 (남/여)	대조지역(남/여)		
			계	근거리	원거리
위암(C16)	481(292/189)	162(101/61)	319(191/128)	142(78/64)	177(113/64)
폐암(C33-34)	382(292/90)	87(67/20)	295(225/70)	137(103/34)	158(122/36)
간암(C22)	262(198/64)	80(67/13)	183(132/51)	69(53/16)	114(79/35)
대장암(C18-21)	261(126/135)	73(35/38)	187(91/96)	73(33/40)	114(58/56)
갑상선암(C73)	125(24/101)	54(10/44)	71(14/57)	41(11/30)	30(3/27)
담낭 및 기타 담도암(C23-24)	85(48/37)	16(8/8)	69(40/29)	34(20/14)	35(20/15)
유방암(C50)	80(2/78)	33(0/33)	47(2/45)	21(1/20)	26(1/25)
췌장암(C25)	67(37/30)	20(9/11)	47(28/19)	25(18/7)	22(10/12)
전립선암(C61)	65(65/0)	19(19/0)	46(46/0)	21(21/0)	25(25/0)
방사선 관련암⁴¹⁾	1,377(832/545)	429(250/179)	943(578/365)	420(248/172)	523(330/193)

41) 방사선 관련암 : 방사선피폭과 인과관계가 인정되는 위암, 간암, 폐암, 골암, 유방암, 갑상선암, 골수 및 백혈병 등

암 발생부위별 분포를 살펴보면, 위암이 전체의 20.8%(남: 21.8%, 여: 19.5%)를 차지하여 가장 많이 발생하였으며, 2위는 남자의 경우 폐암(21.8%), 여자의 경우 대장암(14.0%)이었으며, 3위는 남자의 경우 간암(14.8%), 여자의 경우 갑상선암(10.4%), 4위는 남자의 경우 대장암(9.4%), 여자의 경우 폐암(9.3%), 5위는 남자의 경우 전립선암(4.8%), 여자의 경우 유방암(8.1%)이었다.

암발생에 영향을 미치는 연령변수의 영향을 통제하기 위하여 세계표준인구 구조를 적용하여 ‘모든 암’의 연령표준화 암발생률(Age Standardized Rate, ASR)을 산출한 결과, 남자에서는 원거리지역이, 여자에서는 주변지역이 다른 지역에 비해 다소 높은 양상을 보이고 있으나 통계적인 유의성은 없었다($p>0.05$).

[표4-2 지역별 ‘모든 암’ 연령표준화 발생률(남자)]

구분	주변지역	대조지역		
		계	근거리	원거리
코호트 수(명)	4,491	10,503	4,443	6,060
관찰규모(인·년)	43,485	86,122	40,186	45,936
암 발생자 수(명)	393	941	421	520
연령표준화 발생률 ⁴²⁾	564.7	544.1	508.5	566.9

[표4-3 지역별 ‘모든 암’ 연령표준화 발생률(여자)]

구분	주변지역	대조지역		
		계	근거리	원거리
코호트 수(명)	6,876	14,306	5,880	8,426
관찰규모(인·년)	57,698	116,237	48,521	67,716
암 발생자 수(명)	312	652	300	352
연령표준화 발생률 ⁴⁵⁾	306.5	281.0	305.9	264.0

원전주변지역 주민의 암 발병위험도(발생률)가 대조지역 주민에 비하여 통계적으로 유의한 차이가 있는지를 분석하기 위하여 남녀를 구분하여 각기 따로 관련성 분석을 하였으며 연령변수를 보정하기 위해 Time-updated model을 이용하는 다변량 분석을 하였다. 관련성 지표로서 대조지역 주민의 Hazard rate(암 발생률)를 기준으로 한 주변지역 주민집단의 암 발병 상대위험도인 Hazard Ratio를 산출하였고 통계적 유의성을 분석하였다. Hazard ratio의 95% 신뢰구간(Confidence Interval, CI)이 1.0을 포함하고 있는 경우는 암 발병 상대위험도가 5% 유의수준에서 차이가 없음을 나타낸다.

42) 발생률은 100,000인·년 당, 연령표준화는 세계표준인구 적용함

[표4-4 지역별 주민코호트 암 발생률 및 암 발병 상대위험도(남자)]

암 부위	지표	주변지역	대조지역		
			계	근거리	원거리
모든 암	발생률 ⁴³⁾	564.7	544.1	508.5	566.9
	상대위험도 (95%CI)	1.1(0.91-1.36)	1.0	-	-
		1.2(0.94-1.57)	-	1.0	-
		1.0(0.84-1.32)	-	-	1.0
방사선 관련 암	발생률 ⁴⁶⁾	363.0	347.4	300.9	378.6
	상대위험도 (95%CI)	1.2(0.92-1.54)	1.0	-	-
		1.3(0.93-1.78)	-	1.0	-
		0.9(0.78-1.27)	-	-	1.0

[표4-5 지역별 주민코호트 암 발생률 및 암 발병 상대위험도(여자)]

암 부위	지표	주변지역	대조지역		
			계	근거리	원거리
모든 암	발생률 ⁴⁶⁾	306.5	281.0	305.9	264.0
	상대위험도 (95%CI)	1.2(0.94-1.60)	1.0	-	-
		1.1(0.96-1.50)	-	1.0	-
		1.2(0.90-1.63)	-	-	1.0
방사선 관련 암	발생률 ⁴⁶⁾	190.5	161.9	182.3	147.0
	상대위험도 (95%CI)	1.1(0.78-1.61)	1.0	-	-
		1.1(0.79-1.43)	-	1.0	-
		1.2(0.77-1.74)	-	-	1.0

주변지역 주민의 ‘모든 암’ 발병 상대위험도는 대조지역 주민의 그것에 비해 남자 1.1배, 여자 1.2배였으며 95% 신뢰구간(CI)은 각각 0.91~1.36 및 0.94-1.60으로 통계적인 유의성이 없었다. 다시 말하여 남녀 모두에서 ‘모든 암’ 발병 위험도는 주변지역과 대조지역 간에 차이가 없었다.

‘방사선 관련 암’ 으로 국한하여 분석한 결과에서도 주변지역 주민의 상대 위험도는 남자 1.2배(95% CI: 0.92-1.54), 여자 1.1배(0.78-1.61)이었으며, ‘모든 암’ 과 마찬가지로 남녀 모두에서 통계적으로 유의한 차이가 보이지 않았다.

대조지역을 근거리 및 원거리로 구분하여 각각 주변지역과의 비교분석에서도 통계적으로 유의한 차이는 나타나지 않았다.

4. 주변주민 암 발생위험도와 원전 방사선과의 인과관계 분석결과

주변지역 주민의 암 발생 수준이 대조지역과 차이가 없다는 연구결과가 원전 방사선의 영향이 없었다는 주장으로 연결되지는 않는다. 왜냐하면 ‘차이가

43) 세계인구 연령표준화 발생률임

없다’ 는 연구결과는 단지 두 지역의 암 발생수준이 같다는 것을 의미할 뿐, 암 발생에 관여하는 원인인자들의 점유율 분포가 두 지역에서 같다는 것을 뜻하지는 않기 때문이다. 다시 말하여 ‘원전 방사선’ 원인인자가 대조지역에는 없었으므로 주변지역에서도 영향을 미치지 않았다는 추론의 논거가 되지 못한다.

주변지역 주민의 암 발병위험도에 원전 방사선이 원인인자로 작용했을 것인가에 대한 분석, 추론이 필요하다. 원전 방사선이 주변지역 주민의 암 발병에 관여했다고 가정하였을 때 예측되는 상황이 있다. 예를 들어 주변지역의 환경 방사선 선량 또는 주민피폭선량이 대조지역보다 높았다는 측정결과가 예측되고, 또한 원전 방사선에의 노출 기회가 많아짐에 따라 방사선 관련 암의 발생 양상이 일정한 경향을 보일 것으로 예측된다. 예를 들어, 원거리 대조지역→근거리 대조지역→주변지역으로 이동됨에 따라, 또는 원전가동 후의 거주기간에 따라서 방사선 관련 부위 암들의 발생양상이 남녀 모두에서 일정한 경향, 즉 거주기간이 길수록 발생률이 증가하는 양상을 남녀 모두에서 보일 것으로 예측된다.

조사결과, 원전 주변지역의 환경 및 주민 방사선 선량은 국내 다른 지역 또는 일반인의 선량과 차이가 없었다.

지역에 따른 방사선 관련 부위 암들의 발병위험도 경향 분석 결과, 남자의 경우 주요 방사선 관련 부위 암(위암, 간암, 폐암)의 발병 상대위험도는 원거리 대조지역 → 근거리 대조지역 → 주변지역으로 이동하면서 일정한 공통된 경향이나 통계적으로 유의한 경향 등을 보이지 않았다. 특히 폐암의 지역에 따른 발병 상대위험도는 위암, 간암, 그리고 전체 방사선 관련 암의 경향과 달랐으며, 원전 주변지역에서 가장 낮았다. 여자의 경우 통계적으로 유의한 경향을 보인 것은 갑상선암이었고 다른 부위 암은 유의한 경향을 보이지 않았다. 그러나 갑상선암의 발병위험도 경향은 위암 및 폐암의 그것과 달랐으며, 남자에서의 경향과도 달랐다. 주변지역에서 원전 방사선이 암 발병 위험인자로 영향을 미쳤다면, 남녀 모든 부위에서 공통되는 일관된 경향이 관찰되어야 할 것이다. 예를 들어 방사선 관련 암의 모든 부위별 발병 위험도가 남녀 모두 주변지역에서 높은 일관된 경향을 보이는 것이다.

[표4-6 지역별 방사선 관련 암 발생률 및 상대위험도(남자)]

암 부위	지표	주변지역	대조지역	
			근거리	원거리
방사선 관련 암(전체)	발생률 ⁴⁴⁾	363.0	300.9	378.6
	상대위험도	1.2(0.86-1.54)	0.9(0.67-1.26)	1.0
위암	발생률 ⁴⁷⁾	143.8	98.1	112.3
	상대위험도	1.3(0.85-1.92)	0.9(0.61-1.44)	1.0
간암	발생률 ⁴⁷⁾	100.0	66.6	87.2
	상대위험도	1.4(0.73-2.85)	0.9(0.36-2.08)	1.0
폐암	발생률 ⁴⁷⁾	93.7	110.8	107.2
	상대위험도	0.9(0.61-1.42)	1.1(0.71-1.57)	1.0

[표4-7 지역별 방사선 관련 암 발생률 및 상대위험도(여자)]

암 부위	지표	주변지역	대조지역	
			근거리	원거리
방사선 관련 암(전체)	발생률 ⁴⁷⁾	190.5	182.3	147.0
	상대위험도	1.2(0.77-1.74)	1.1(0.69-1.68)	1.0
위암	발생률 ⁴⁷⁾	50.1	59.4	44.9
	상대위험도	1.2(0.83-1.68)	1.3(0.89-1.79)	1.0
폐암	발생률 ⁴⁷⁾	13.5	26.8	20.1
	상대위험도	0.8(0.38-1.74)	1.4(0.64-2.83)	1.0
유방암	발생률 ⁴⁷⁾	45.2	30.6	29.2
	상대위험도	1.5(0.90-2.60)	1.1(0.60-1.99)	1.0
갑상선암	발생률 ⁴⁷⁾	61.4	43.6	26.6
	상대위험도	2.5(1.43-4.38)	1.8(0.98-3.24)	1.0

원전 주변지역 거주기간에 따른 암 발병 위험도 분석 결과는 다음과 같다. 고리지역 원전의 최초 상업운전일은 1978년 4월 29일이었고, 월성 원전은 1983년 4월 40일, 영광 원전은 1986년 8월 25일, 그리고 울진 원전은 1988년 9월 10일이었다. 원전 가동일부터 코호트 입적일까지의 거주기간에 따른 방사선 관련 암의 발생양상을 분석하였는데, 거주기간이 길수록 방사선 관련 암 발생 상대위험도가 증가하는 경향은 남녀 모두에서 나타나지 않았다.

이상의 분석결과로부터 주변지역 주민의 암 발병 위험도에 원전 방사선이 원인인자로 작용했을 가능성, 즉 인과적 관련성을 시사하는 증거는 찾을 수 없다고 추론하였다.

44) 발생률은 100,000인·년 당, 연령표준화는 세계표준인구 적용함

[표4-8 주민코호트 입적일까지 거주기간별 ‘모든 암’ 발생률 및 암 발병 상대 위험도(남자)]

입적일까지 거주기간(년) ⁴⁵⁾	암 발생자 (명)	연령 표준화 발생률 (10만인·년당) ⁴⁶⁾	암 발병 상대 위험도 ⁴⁷⁾		
			RR	95%CI	P-value
<10	109	544.14	1.00		
10-	117	623.74	1.01	0.77-1.32	0.95
15-	151	493.72	0.89	0.68-1.16	0.38

[표4-9 주민코호트 입적일까지 거주기간별 ‘모든 암’ 발생률 및 암 발병 상대 위험도(여자)]

입적일까지 거주 기간(년) ⁴⁸⁾	암 발생자 (명)	연령 표준화 발생률 (10만인·년당) ⁴⁹⁾	암 발병 상대 위험도 ⁵⁰⁾		
			RR	95%CI	P-value
<10	95	300.88	1.00		
10-	83	321.33	1.12	0.91-1.37	0.29
15-	132	258.59	0.99	0.82-1.21	0.97

[표4-10 주민코호트 입적일까지 거주기간별 ‘방사선 관련 암’ 발생률 및 암 발병 상대 위험도(남자)]

입적일까지 거주 기간(년) ⁴⁸⁾	암 발생자 (명)	연령 표준화 발생률 (10만인·년당) ⁴⁹⁾	암 발병 상대 위험도 ⁵⁰⁾		
			RR	95%CI	P-value
<10	72	354.58	1.00		
10-	80	441.89	1.06	0.77-1.47	0.73
15-	89	303.75	0.83	0.60-1.16	0.28

[표4-11 주민코호트 입적일까지 거주기간별 ‘방사선 관련 암’ 발생률 및 암 발병 상대 위험도(여자)]

입적일까지 거주 기간(년) ⁴⁸⁾	암 발생자 (명)	연령 표준화 발생률 (10만인·년당) ⁴⁹⁾	암 발병 상대 위험도 ⁵⁰⁾		
			RR	95%CI	P-value
<10	58	193.17	1.00		
10-	51	215.73	1.17	0.91-1.51	0.22
15-	68	139.59	0.94	0.73-1.20	0.60

45) 원자로 상업운전일(고리:1978-04-29, 월성:1983-04-20, 영광:1986-08-25, 울진:1988-09-10)부터 입적일까지 거주기간

46) 세계 인구구조 연령표준화

47) 연령, 직업, TEE, BMI, 흡연, 음주, 방사선검사/치료여부, 암 가족력 등 보정

5. 원전역학조사 지역주민 연구의 최종 결론

원전 가동으로 인한 원전 주변지역 주민의 암 발병위험도를 역학적으로 평가할 목적으로 1991년 12월부터 2011년 2월까지 전향적 코호트 연구를 수행하였다. 원전 주변지역 주민의 ‘모든 부위 암’ 과 ‘방사선 관련 암’ 발병 위험도를 대조지역 주민의 그것과 비교, 평가한 상대위험도를 추정하여 지역변수와 암 발병위험도와의 관련성을 분석하였고, 또한 원전 방사선이 주변지역의 암 발병 위험도에 인과적으로 관련이 있는지를 추론하였다.

원전주변의 환경 방사선 선량과 주민 피폭선량을 1992-1994년 동안은 직접 측정, 평가하였으며 그 이후의 선량에 대하여는 관련 기관의 정례적 측정 및 평가 자료를 이용하였는데, 주변지역의 환경 방사선 선량과 주변지역 주민의 피폭선량은 다른 지역과 비슷한 수준으로 차이가 없었다.

전향적 코호트 연구의 연구대상자를 구축하기 위해 ‘코호트’ 자격 여부를 확인하는 기반조사를 1992-1995년 및 1998-2005년 동안 연차적으로 시행하였다. 최종적으로 구축된 연구 코호트는 주변지역 11,367명(남:4,491명, 여: 6,876명)과 대조지역 24,809명(남: 10,503명, 여: 14,306명), 총계 36,176명(남:14,994명, 여: 21,182명)이었다. 연구 코호트에 대하여는 입적된 후부터 암 발병 여부를 확인하는 추구관찰 조사가 년 1회 이상 2010년 12월까지 시행되었다. 입적부터 2008년까지 발생한 암을 확인하는 추구관찰 조사를 통하여 주변지역 코호트에서 705명(남: 393명, 여: 312명)과 대조지역 코호트에서 1,593명(남: 941명, 여: 652명), 총계 2,298명의 암 발생을 확인하였다. 암 발병을 확인하기 위해 추구 관찰한 총 기간은 303,542인.년(주변지역 코호트 101,183인.년, 대조지역 코호트 202,359인.년)이었다.

[표 4-12 지역주민 코호트 연구 실적 총괄]

지역	기준	코호트 수	총 관찰기간	암 발생자 확인 수	
		(남/여)	(인·년, 남/여)	‘모든 부위’	‘방사선 관련’
주변지역	반경 5Km이내	11,367 (4,491/6,876)	101,183 (43,485/57,698)	705 (393/312)	430 (251/179)
대조지역(계)	5Km 이외	24,809 (10,503/14,306)	202,359 (86,122/116,237)	1,593 (941/652)	947 (581/366)
근거리 대조	5-30Km	10,323 (4,443/5,880)	88,707 (40,186/48,521)	721 (421/300)	422 (250/172)
원거리 대조	양평, 함안, 충주	14,486 (6,060/8,426)	113,652 (45,936/67,716)	872 (520/352)	525 (331/194)
총 계		36,176 (14,994/21,182)	303,542 (129,607/173,935)	2,298 (1,334/964)	1,377 (832/545)

주변지역 코호트의 암 발병 상대위험도(Hazard Ratio)는 Time-updated Cox's model을 이용하여 추정, 분석하였다. 연령 및 다른 공변수들의 영향을 통제한 주변지역 및 대조지역의 암 발생률로부터 주변지역 암 발병 상대위험도를 추정하고 통계적 유의성을 분석하였다. 주변지역의 암 발병 상대위험도는 남녀 모두에서 대조지역과 통계적으로 유의한 차이가 없었다.

[표4-13 주변지역의 암 발병 상대위험도⁴⁸⁾]

암 부위	성별	(암 발생률/100,000) ⁴⁹⁾		주변지역의 암 발병 상대위험도(95% CI)
		주변지역	대조지역	
모든 부위	남자	564.7	544.1	1.11(0.91-1.36)
	여자	306.5	281.0	1.23(0.94-1.60)
방사선 관련	남자	363.0	347.4	1.19(0.92-1.54)
	여자	190.5	161.9	1.12(0.78-1.61)

원전 방사선이 주변지역의 암 발병 위험도에 인과적으로 관련이 있는지를 추론함에 있어, 첫째 이론적 관점에서 주변지역의 환경 방사선선량 또는 주민 피폭선량 평가 결과를 검토하였고, 둘째 원거리 대조지역 → 근거리 대조지역 → 주변지역으로 이동됨에 따라 원전 방사선에의 노출 기회도 많아질 것으로 가정하여 방사선 관련 암의 발생 양상이 주변지역으로 갈수록 증가하는 일관된 경향을 나타내는지 분석하였으며, 셋째로는 주변지역 연구대상 코호트의 방사선 관련 부위 암들의 발생양상이 원전가동 후의 거주기간에 따라 일정한 경향, 즉 거주기간이 길수록 모든 부위 암에서 남녀 모두 발생률이 증가하는 양상인지를 분석, 검토하였다.

이상의 연구수행 실적과 분석결과를 근거로 다음과 같은 최종 결론을 얻었다.

- 원전 주변지역의 ‘모든 부위 암’ 발병 위험도는 대조지역에 비하여 남, 여 모두에서 통계적으로 유의한 차이는 없었다.
- 원전 주변지역의 ‘방사선 관련 암’ 발병 위험도도 대조지역에 비하여 남, 여 모두에서 통계적으로 유의한 차이가 없었다.
- 원전 방사선과 주변지역 주민의 암 발병 위험도간에 인과적인 관련이 있음을 시사하는 증거는 찾을 수 없었다.

48) 연령 및 기타 공변수 영향을 통제한 adjusted hazard ratio

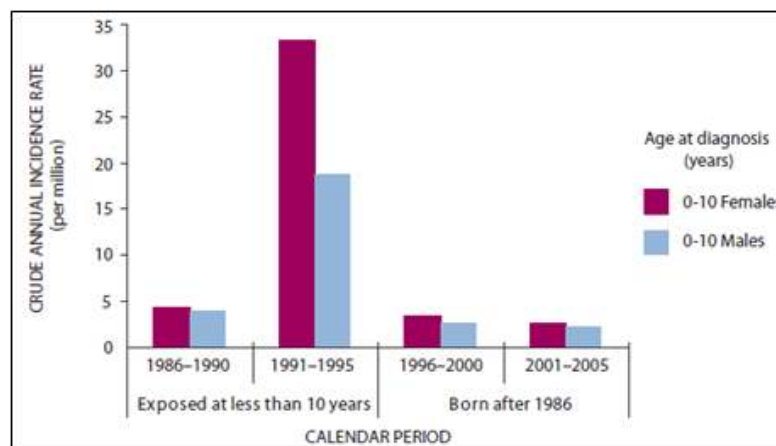
49) 세계인구 연령표준화율

4.2절 원전주변주민 갑상선암 국외 연구사례

1. 사고로 인한 방사선 노출과 갑상선암 관련성 연구

가. 체르노빌

1986년 4월 발생한 체르노빌 원전사고 이후 지역주민에 대한 건강영향 조사는 지속적으로 수행되고 있다. 현재까지 알려진 가장 명백한 건강영향은 소아의 갑상선암 발생이다. 사고당시 소개된 주민 116,131명의 평균 갑상선 흡수선량은 7세 이하는 1.82 Gy, 성인은 0.29 Gy로 추정된다[4.1]. 인근 지역(벨라루스, 우크라이나, 프리피야트) 주민의 갑상선 흡수선량 추정치는 7세 이하는 0.97~3.1 Gy, 성인은 0.07~0.68 Gy이다[4.1]. 갑상선 흡수선량의 주된 노출 경로로 요오드-131에 오염된 우유 섭취가 알려져 있다. 체르노빌 사고 영향을 조사하는 연구마다 일관되게 피폭선량과 소아의 갑상선암 발생 관련성을 보고하고 있다. 벨라루스와 우크라이나 지역의 피폭당시 18세 이하 소아를 대상으로 한 연구에서 1990~2001년의 관찰기간 동안 갑상선암의 초과상대위험도(ERR/Gy)는 8~19로 통계적으로 유의하게 높게 추정되었다[4.2, 4.3]. 1991~2005년 동안 벨라루스 지역의 피폭당시 18세 이하 소아 약 6,848명에서 갑상선암이 발생했으며, 특히 0~5세에 피폭이 10~14세 피폭보다 약 5배정도 갑상선암 발생률이 높은 것으로 보고된다[4.4]. 반면 피폭 당시 성인의 경우 피폭과 갑상선암과의 관련성은 발견되지 않았다[4.5].



[그림4-1 벨라루스 지역의 소아 갑상선암 발생(출처: UNSCEAR 2008)]

나. 후쿠시마

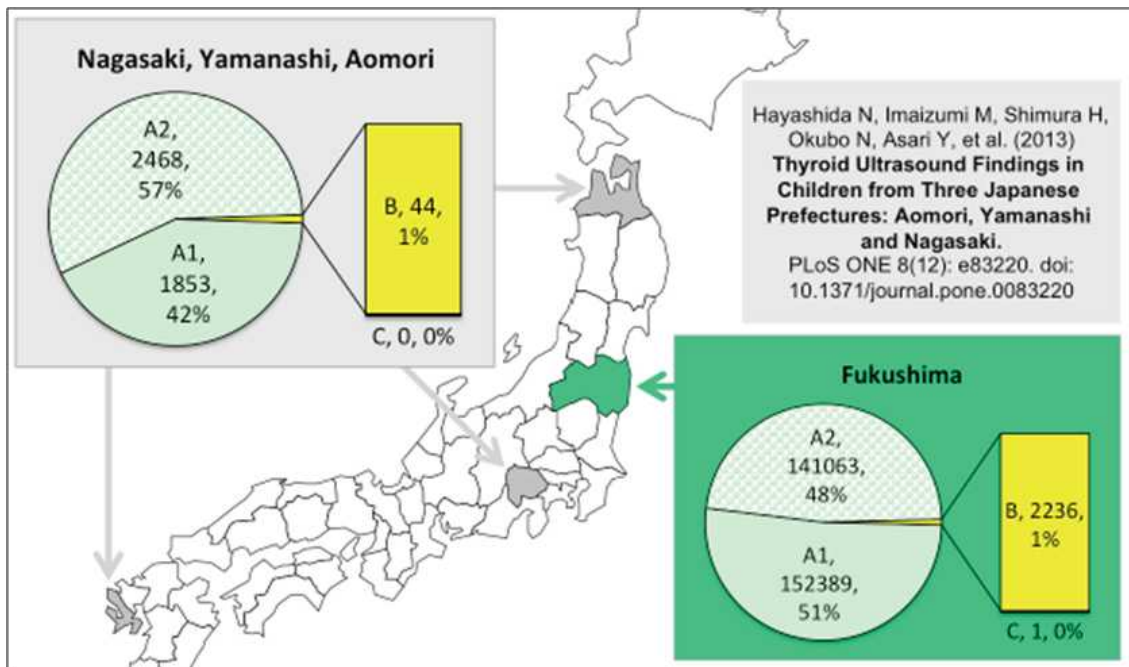
2011년 3월 발생한 후쿠시마 원전사고 이후 일본정부는 후쿠시마 주민의 건강관리를 위해 Fukushima Health Management Survey를 실시하고 있다. 사고 직후 반경 20 km 이내 주민의 1년간 갑상선 흡수선량은 성인 7.2~34 mGy, 소아 12~58 mGy, 1세 유아는 15~82 mGy로 추정된다[4.6]. 이는 체르노빌 사고 피폭의 약 3.3%에 해당하는 수준으로 피폭에 의한 건강영향은 미미할 것으로 예상된다.

사고 당시 18세 이하 주민 367,707명을 대상으로 갑상선 초음파 검사를 실시 중이며, 예비조사로 296,026명에 대한 갑상선 초음파 검사가 2014년에 완료되었다. 예비조사에서는 갑상선 결절 또는 낭종의 크기에 따라 A(A1/A2), B, C 로 분류하였다. 검사 결과 갑상선암 확진이 필요한 B그룹은 2,236명, C그룹은 1명이 관찰되었으며, 이는 전체 검사대상자의 1%와 0%에 해당한다. 동일한 방법으로 후쿠시마와 떨어진 3지역(나가사키, 야마나시, 아오모리)의 초음파 검사 결과 B그룹과 C그룹에 속하는 대상자는 각각 1%와 0%로 후쿠시마 검사 결과와 차이를 보이지 않았다[4.7]. 하지만 방사선피폭 영향의 잠재기간을 고려해서 계속적인 추적조사가 필요하다.

[표4-14 갑상선 초음파 검사 시 진단 기준⁵⁰⁾]

Judgement	Interpretation	Follow-up
A	Within normal limits	
A1	No nodule or cyst	Next primary examination
A2	Nodule ≤ 5 mm and/or cyst ≤ 20 mm	Next primary examination
B	Nodule ≥ 5.1 mm and or cyst ≥ 20.1 mm	Confirmatory examination
C	Other findings that warrant immediate follow-up	Urgent confirmatory examination

50) 출처: Fukushima Medical University's Office of International Cooperation



[그림4-2 후쿠시마와 원거리 대조지역의 갑상선 초음파 결과]

다. 스리마일 섬 (TMI)

1979년 3월에 발생한 미국 펜실베이니아주 헤리스버그시 인근의 스리마일 섬 원자력 발전소의 노심 용융 사고로 미국 상업 원자력 산업 역사상 가장 심각한 사고이다. 국제원자력사건등급(INES)체계에 의한 분류 등급5에 해당되며 [4.8], TMI 사고 후 펜실베이니아주 보건당국은 사고지역 5마일⁵¹⁾이내 주민 32,135명의 건강상태 추적을 위한 registry 구축하였다. 이는 5마일 이내 전체주민의 93%가 넘는 수이다[4.9].

사고 후 10일 동안 TMI 주변 5마일 이내 주민들의 갑상선 피폭선량 최소~최대 범위는 0.09~0.25 mSv로 추정되며, 평균 유효선량 추정치는 0.104 mSv 이다[4.9]. 최대 피폭선량 0.25 mSv는 저선량이라고 정의하는 100 mSv 보다 400배 낮은 수준이다. 현재까지의 역학연구로는 100 mSv 이하 구간에서의 방사선 영향은 과학적으로 증명되지 않았다. TMI 사고로부터 방출되는 방사성물질 대부분은 대기중으로 분산되었으며, 사고 후 48시간동안의 바람 방향은 주로 북동쪽이다[4.10].

사고 이후 인근 지역주민들의 건강영향 조사를 위한 대규모 추적 연구가 몇 차례 진행되었다. 대표적인 연구로 사고이후 구축된 TMI 주변 5마일 이내 32,135명의 주민에 대한 암 사망 추적 연구와 가장 최근에 보고된 TMI 주변 지

51) 1 mile은 1.609 Km로 5 mile은 약 8 Km에 해당한다.

역의 갑상선암 발생에 대한 단면조사연구(cross-sectional)이다. 암 사망 추적 연구에서 사고 이후 약 20년의 추적기간(1979~1998) 동안 9명의 갑상선암 발생 사례가 관찰되었고, 이중에 갑상선암으로 인한 사망은 1명으로 방사선 노출과 갑상선암과의 관련성은 밝혀지지 않았다[4.9]. TMI 인접 3개 지역(Dauphin, York, and Lancaster)과 주변 7개 지역(Perry, Adams, Cumberland, Lebanon, Schuylkill, Berks, Chester)주민을 대상으로 한 1990~2009년까지의 갑상선암 발생에 대한 단면조사에서는 TMI 사고 지역인 Dauphin에서의 평균 갑상선암 발생은 전체 펜실베이니아주 갑상선암 발생을 근거로 한 예상치 보다 약 9.3% 낮게 관찰되었다[4.11]. 반면 남쪽에 위치한 몇몇 지역들(Adams, York, Lancaster, and Chester)에서는 약 16-23% 높게 관찰되었다[4.11]. 이러한 연구 결과는 노출당시 바람의 방향이나 노출 수준과 상충하는 결과이며, 흡연이나 음주 등의 생활습관 인자를 연구에 고려하지 않음으로 정확한 결과 해석에 제한이 있다[4.11]. 따라서 TMI 사고로 인한 인근주민의 방사선 노출과 갑상선암의 관련성에 관한 역학적인 근거는 사고 이후 30년이 지난 지금도 여전히 불확실하다.

2. 원전시설 주변 지역의 저선량 방사선 노출과 건강영향

가. 원전시설 방사선 노출과 건강영향에 대한 연구특성

원전 주변 지역의 저선량 방사선이 암 발생에 미치는 영향에 관해 일정수의 역학적 연구가 수행되어왔다. 일반적으로 이 연구들은 관찰연구이기 때문에 인과관계에 대한 논란의 여지가 있다. 즉 방사선 노출량에 대한 위험도 추정치(estimation of radiation risk)를 제시하지 못하며 질적인 수준에 편차가 있다. 따라서 원전주변의 방사선 노출에 대한 위험의 인과관계는 신중하게 판단되어야하고 향후 엄격한 방법론으로 설계된 연구가 필요하다.

환경적 방사선 노출과 인체의 영향에 대한 연구는 생태학적 연구, 환자대조군 연구, 코호트연구 등으로 구분할 수 있다.

생태학적 연구는 집단 단위의 발생률과 사망률, 진단유병률을 구하고 방사선 노출도 집단단위의 노출 자료로서 분석이 이루어진다. 생태학적 연구가 많은 사례와 대규모 인구집단을 대상으로 이루어진다면 결과의 정확성이 높아진다. 또한 원전시설로부터의 거리나 지리학적 경계는 방사선 노출정도를 파악하는데 있어 중요한 요소이다. 하지만 생태학적 연구는 몇 가지 한계점이 있는데 우선 개인단위의 특성을 반영하지 못한다는 점을 들 수 있다. 즉,

개인의 방사선 노출정도를 알 수 있는 정보를 포함하고 있지 못한 경우가 대부분으로 방사선 노출정보는 거리나 지리적 위치와 같이 집단적 지표를 통하여 추산된 수치만을 나타낼 뿐이다.

또 다른 한계점은 원전시설로부터 근접거리에 오랜 기간 거주한 사람들은 먼 지역의 사람들보다 더 많은 방사선에 노출되었을 것이라고 가정하거나 해당 지역에 살고 있는 사람들은 비슷한 방사선 양에 노출될 것이라고 가정한다는 것이다. 그러므로 해당 연구들의 결론은 바이어스의 소지가 있고 연구결과에서 과대 혹은 과소추산을 야기한다.

질병의 발생률을 개인의 수준에서 제시하지 못한다는 점도 약점이다. 인구집단 단위의 사망률과 암 발생률 자료만을 제시하기에 해당 자료의 정확성에 따라 연구의 신뢰도에 의문이 제기될 수 있다. 또, 대상 인구집단의 이사와 이주 등의 변동을 반영하지 못하는데 이는 방사선 노출량에 따른 위험도를 잘못 추정할 소지가 있다. 이처럼 생태학적 연구는 자료의 정확성이 떨어져 방사선 노출과 암 발생률에 대한 잘못된 결론이 도출될 수 있다.

분석적 역학연구 방법으로는 환자 대조군 연구, 코호트 연구가 있다. 이들 연구는 개인의 방사선 피폭량을 제시하므로 생태학적 연구의 한계점을 보완할 수 있다. 하지만 환자 대조군 연구는 환자군을 선택 시에 선택바이어스가 존재할 수 있다는 점, 대조군에 속한 집단이 개인의 방사선 노출에 대한 회상바이어스가 있을 수 있다는 약점을 지닌다.

코호트 연구에서는 발생률이 낮은 질병은 인과관계를 파악하기 어려우며 추적 중 대상자 탈락이라는 변수가 존재하며 방사선 노출에 따른 질병의 상태를 명확히 정의내리기 어렵다. 분석적 역학연구의 약점은 저선량 방사선에 대한 노출량과 질병 위험의 관련성이 약한 경우에 더욱 크게 드러난다.

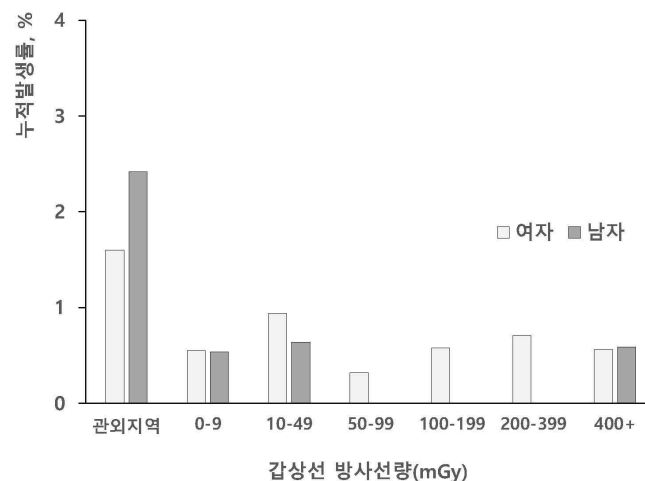
방사선 노출에 대한 연구의 대부분은 생태학적 연구로서 방사선 노출에 대한 위험을 분석하는데 한계가 있다. 이 연구들은 새로운 가설이나 후속 연구의 방향을 제안할 수 있으나 방사선 노출량에 따른 신체적 영향을 파악하는데 한계가 있다.

향후 후속 연구들은 분석 자료의 정확성을 지녀야하고 방사선 노출에 따른 위험도를 객관적인 수치로 나타내야한다. 또한 충분히 긴 기간 동안의 추적연구가 필요하고 바이어스가 없이 진행되어야 한다. 현재 출판 되어있는 문헌은 이러한 약점을 극복하지 못한 것이 대부분이다.

나. 원전 주변 지역의 갑상선암 발생에 관한 개별연구

(1) 미국 햄퍼드 지역 핵시설과 갑상선 질환 발생에 관한 연구

미국 햄퍼드지역 핵시설로부터 방출된 131-요오드에 노출된 아동이 성인이 되었을 때 갑상선 질환이 증가하는 지를 밝히기 위한 후향적 코호트 연구가 수행되었다. 1944년부터 1957년까지의 노출에 대해 1992년 12월부터 1997년 9월까지 건강검진이 실시되었다. 5199명의 대상자 중 3440명의 방사선 노출량과 갑상선 검진(건강검진, 갑상선 초음파, 결절 발견 시 미세침흡인 생검 포함) 자료를 통해 분석이 시행되었다. 분석결과 햄퍼드지역의 방사선량과 갑상선 질환(갑상선암, 갑상선 결절, 자가면역성 갑상선염, 갑상선기능저하증) 사이의 관련성의 증거는 없었다[4.12].



[그림4-3 미국 햄퍼드 원전 주변 지역의 방사선량과 성별에 따른 갑상선암 누적발생률[4.12]]

[표4-15 미국 헨퍼드 원전 주변 지역의 방사선량(용량반응)과 갑상선암 누적발생률⁵²⁾[4.12]]

	전체 누적 발생률						용량반응		
	여자		남자		전체		Gray당 추정치 (표준오차)	96% CI	P값
	환자수/전체수	%	환자수/전체수	%	환자수/전체수	%			
갑상선암	12/1747	0.7	7/1693	0.4	19/3440	0.6	0.002(0.004)	-0.001to0.017	0.25
갑상선 양성결절	170/1747	9.7	79/1693	4.7	249/3440	7.2	-0.008(0.015)	-0.022to0.041	0.68
전체 암	20/1747	1.1	13/1693	0.8	33/3440	1.0	0.001(0.006)	0.003to0.022	0.42
기타 결절	193/1747	11.0	88/1693	5.2	281/3440	8.2	-0.007(0.016)	0.023to0.043	0.65

(2) 벨기에의 핵시설 주변 거주민의 갑상선암에 관한 연구

벨기에의 원자력 발전소 인근 주민들에서 갑상선암 발생률이 증가하는가에 대한 생태학적 조사연구에서는 핵시설을 중심으로 반경 20km에 이르는 지역을 근접지역으로 정의하고, 반경거리에 따라 측정한 자료를 표준화 발생률과 포아송회귀모델을 이용해 분석하였다. 분석결과 벨기에의 원전주변의 경우 거리에 따른 갑상선암 발생률의 증가는 관찰되지 않았다. 원전외 핵시설 주변에서 일부 관찰된 갑상선암의 증가는 핵시설로 인한 것인지 아니면 지역의 특수성으로 인한 것인지는 입증되지 않았다[4.13].

(3) 이탈리아 보르고 지역 원전 주변 거주민의 암발생과 사망에 관한 연구

1960년대 초반부터 1980년대 후반까지 가동되었던 중앙 이탈리아 보르고 지역에 위치한 원자력 발전소의 잠재적인 건강상의 영향에 관한 연구로, 원자력 발전소 인근 주민에서 암발생률과 사망률 증가여부를 평가하였다.

1996년부터 2002년까지 원자력 발전소로부터 7km이내에 거주하는 주민에 대한 코호트 연구로 성별, 연령을 보정한 표준화 발생률과 표준화 사망률을 구하였다. 연령과 사회경제적 상태를 보정한 비교위험도는 발전소로부터 거리에 따라 3개의 그룹(0-2km, 2-4km, 4-7km)으로 나누었고, 포아송회귀모형을 사용해 계산하였다. 39,775명의 코호트에서 32%의 주민들이 원자력 발전소로부터 0-4km 거리에 거주하였다. 지역인구집단과 비교했을 때 이 코호트 내에서 사망률의 차이는 없었고, 원자력 발전소로부터의 거리를 기준으로 분석을 시행하였을 때, 방사선 노출과 관련 없는 질병으로 사망한 남성의 수가 통계적으로 유의하게 증가하였다. 원자력 발전소 주변에 거주

52) 대상자 중 관외지역 249명과 원전주변지역 3191명, 총 3440명을 대상으로 한 후향적 코호트연구 결과 원전 주변 지역의 방사선량과 갑상선암 누적발생률 증가 사이에 유의한 관련성은 없었다(P-value=0.25).

하는 여성에서는 사망률 증가가 관찰되지 않았다. 거리에 따라 갑상선암을 비롯한 암 발생은 남성과 여성 모두에서 통계적으로 유의하게 관찰되지 않았다.

결과적으로 원자력 발전소 주변에서 거주하는 것은 방사선 노출로 인한 사망률과 관련성이 없었다. 그러나 원자력 발전소 주변에 거주하는 주민에 대한 지속적인 역학적 감시는 필요하다고 고려된다[4.14].

다. 결론

저선량 방사선이 개인의 건강에 어떤 영향을 미치는지에 관한 기존 연구가 있다. 원전시설 근처에 거주하는 인구집단에 대한 생태학적 연구는 개인에게 노출되는 방사선의 양을 적절히 추산하지 못하고 있다.

생태학적 연구도 원전시설에서 대기로 방출되는 방사선의 양과 개인의 질병발생에 대한 연관성을 밝혀내지 못하였다. 또한 태아와 유아의 선천성 질병에 대한 환자 대조군 연구에서도 해당 질병들이 방사선 노출과 연관성이 있다는 근거를 제시하지 못하였다.

일부 코호트 연구가 수행되어 개인수준의 방사선 노출을 조사해오고 있지만 방사선 노출과 질병발생에 대한 위험이 증가하지는 않았고, 객관적인 수치도 제시하지 않았다. 자연유산, 선천적 기형, 신생아 사망률, 사산에 대하여 방사선 노출의 전후를 비교한 부분은 신뢰할만한 연구방법으로 설계되지 않았으며 방사선 노출과 질병발생의 상관관계에 대한 결론을 내릴 수 있는 근거가 부족한 것이 현재의 연구 수준이다.

4.3절 참고문헌

- [4.1] Cardis E, Howe G, Ron E *et al*. Cancer consequences of the Chernobyl accident: 20 years on. J. Radiol. Prot. 2006; 26:127-140
- [4.2] Likhtarov I, Kovgan L, Vavilov S *et al*. Post-Chornobyl Thyroid Cancers in Ukraine. Report 2: Risk Analysis. Radiat Res 2006; 166(2):375-386
- [4.3] Jacob P, Bogdanova T, Buglova E *et al*. Thyroid Cancer Risk in Areas of Ukraine and Belarus Affected by the Chernobyl. Radiat Res 2006; 165(1):1-8.
- [4.4] United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation(UNSCEAR 2008). Sources and effects of ionising radiation Vol I. New York, United Nations: UNSCEAR Publications; 2011.
- [4.5] Cardis E, Hatch M. The Chernobyl accident-an epidemiological perspective. Clin Oncol (R Coll Radiol) 2011; 23: 251-60.
- [4.6] United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation(UNSCEAR 2013). Sources, effects and risks of ionising radiation Vol I. New York, United Nations: UNSCEAR Publications; 2014.
- [4.7] Hayashida N, Imaizumi M, Shimura H *et al*. Thyroid Ultrasound Findings in Children from Three Japanese Prefectures: Aomori, Yamanashi and Nagasaki. PLoS ONE 2013; 8(12): e83220. doi:10.1371/journal.pone.0083220
- [4.8] Abe K, Dos Santos R, Gauvain J, *et al*. INES The International Nuclear and Radiological Event Scale User' 's Manual. Vienna, Austria: IAEA; 2009.
- [4.9] Talbott E, Youk A, Mc-Hugh-Pemu K *et al*. Long-term follow-up of the residents of the Three Mile Island accident area: 1979-1998. Environ Health Perspect 2013; 111:341-348
- [4.10] Woodard K. Assessment of off-site radiation doses from the Three Mile Island unit 2 accident. Report TDR-TMI-116. Pickard, Lowe, and Garrick, consultants. Middletown, PA: GPU Nuclear Corporation; 1979.
- [4.11] Levin R, Simone N, Slotkin J *et al*. Incidence of Thyroid Cancer Surrounding Three Mile Island Nuclear Facility: The 30-Year Follow-up. Laryngoscope 2013; 123:2064-2071
- [4.12] Davis S, Kopecky KJ, Hamilton TE, Onstad L, Hanford Thyroid Disease Study Team a. THyroid neoplasia, autoimmune thyroiditis, and hypothyroidism in persons exposed to iodine 131 from the Hanford nuclear site. JAMA. 2004;292(21):2600-13.

- [4.13] Bollaerts K, Fierens S, Van Bladel L, Simons K, Sonck M, Poffijn A, et al. Thyroid cancer incidence in the vicinity of nuclear sites in Belgium, 2000–2008. *Thyroid : official journal of the American Thyroid Association*. 2014;24(5):906–17.
- [4.14] Mataloni F, Ancona C, Badaloni C, Bucci S, Busco S, Cupellaro E, et al. [Cancer incidence and mortality in the cohort of residents close to the Italian nuclear power plants of Borgo Sabotino and Garigliano]. *Epidemiologia e prevenzione*. 2012;36(5):253–62.

5장. 원전주변 갑상선암 발생의 인과관계

5.1절 서론

전리방사선을 포함한 환경유해인자로 인한 건강피해에 대하여 피해자가 손해배상을 청구하였을 경우에 이에 대한 인과관계를 입증하여야 한다. 즉, 환경오염 유발자의 행위와 건강피해의 발생 간에는 인과관계가 존재하지 않으면 안 된다. 그러나 환경오염의 특수성으로 인하여 피해자가 환경유해인자와 건강피해 발생 사이의 인과관계를 입증하는 것은 쉬운 일이 아니다. 환경유해인자의 노출과 도달과정 및 건강피해 발생 등을 명확하게 입증하는 것은 곤란하다. 이에 인과관계의 입증정도를 완화하여야 한다는 요청이 있으며, 환경소송 사건에서는 인과관계의 입증완화가 점차 확대되고 있어서[5.1] 이것이 중요한 쟁점이 된다. 여기서 논하는 인과관계는 법적인과관계를 뜻하는 것이지만 이는 자연과학적 인과관계를 전제로 하는 것으로써 환경소송에서는 보다 더 자연과학적 인과관계가 중시된다. 그래서 이 글에서는 환경소송에서 인과관계를 판단하는 이론을 기초로 하여 전리방사선과 갑상선암의 인과관계에 대하여 살펴보고자 하였다.

5.2절 상당인과관계

상당인과관계는 환경유해인자와 질병발생 간의 인과관계를 입증하는 부담을 완화한 것이다. 즉, 환경유해인자로 인한 건강피해 소송에 있어서 인과관계의 입증은 자연과학적으로 엄격한 증명을 요하지 않고 환경유해인자와 건강피해 사이의 인과관계가 개연성이 있으면 된다는 것이다. 개연성은 법관으로 하여금 인과관계에 대한 확신내지는 이에 가까운 정도의 심증을 갖게 하는 것은 아니고, 그 보다 낮은 정도의 심증 전달로도 상당인과관계가 성립한다고 할 수 있으므로 원고의 입증부담을 낮춘 것이다. 그러나 개념이 모호하고 자의적인 해석이 가능하여 극단적인 조건만 있어도 개연성이 있다고 할 수 있는 문제가 있다.

원전주변 지역주민에게 발생한 갑상선암이 원전에서 발생하는 전리방사선의 영향 때문이라는 주장은 ‘전리방사선에 의하여 갑상선암이 발생한다’는 기존의 경험적 사실을 근거로 하고 있다. 그러나 이러한 사실이 원전주변 주민에게 갑상선암이 발생한 사건과 원자력 발전소의 운영과 곧바로 인과관계가 성립한다고 할 수는 없다. ‘전리방사선에 의하여 갑상선암이 발생한다’는 사실은 현재까지의 경험적 관찰 결과들을 체계화한 결과일 뿐이며, 개인에게 갑상선암이 발생한 사건은 그 원인이 매우 복잡하고 다양하기 때문이

다. 따라서 최소한 다른 원인에 의하여 갑상선암이 발생하지 않았다는 사실과 함께 전리방사선에 피폭되었다는 사실이 제시되어야 한다. 이때 전리방사선에 피폭되었다는 사실은 기존의 경험적 사실로서 제시된 피폭에 준하는 것이어야 한다. 왜냐하면 ‘전리방사선에 의하여 갑상선암이 발생한다’는 사실은 일정하게 전리방사선에 노출된 사람들에게서 발생한 갑상선암이 그렇지 않은 사람들에서보다 증가하였다는 경험적 사실을 근거로 한 것이기 때문이다. 일각에서는 이러한 기본적인 사실을 무시하고 전리방사선의 발암성만을 강조하여 피폭여부만 확인되면 인과관계가 성립한다고 주장하고 있으나 이는 과학적 사실과 경험적 사실에 의하면 명백한 오류이다.

개연성은 바로 경험적으로 상당한 관계가 있어야 한다는 것이고, 이때 경험법칙상 상당한 관계라고 하는 것은 바로 전리방사선과 갑상선암의 관계를 규명한 경험적 관찰에서 확인할 수 있는 전리방사선의 피폭수준에 준하는 피폭이 있어야 한다는 것이다. 그럼에도 불구하고 개연성을 개념적으로만 해석하여 단순한 조건관계만으로도 무한정 확대하여 적용하는 사례들이 있다.

따라서 원전주변주민에게 발생한 갑상선암이 원전으로부터 발생한 전리방사선에 의한 것이라는 개연성이 성립하려면 최소한 전리방사선피폭이 상당하였다는 것이 확인될 필요가 있다. 주변지역에 항시적으로 전리방사선량을 모니터링하고 있어서 주민의 피폭량을 확인할 수 있다. 그럼에도 불구하고 전리방사선의 피폭정도나 상황에 대한 사실의 확인도 없이 원전 주변에 거주하였다는 조건만으로 개연성이 있다고 할 수는 없다. 원전주변주민이 원거리 주민에 비하여 갑상선암 발생이 증가하였다는 사실만으로 인과관계가 성립한다고 하는 것은 단순하고 간접적인 조건만으로 인과관계를 인정하는 것인데, 이것은 ‘상당한 정도’나 ‘개연성’으로 인과관계를 추정하는 것에서는 판단기준의 객관성으로 볼 수 없고 사실을 오히려 소홀하게 한 결과라고 할 수 있다. 원전과의 거리라든가 특정 지역주민과의 비교에서 갑상선암의 발생이 증가하였다는 것은 모두 간접사실이다. 이러한 간접사실로부터 주요 사실을 추인하려면 간접사실과 직접사실사이에 고도의 개연성이 있어야 한다. 환경유해인자와 환경성질환의 인과관계의 입증을 완화된 개연성을 무한으로 확대하여 극단적인 조건관계만으로 인과관계를 인정하려는 것은 상당인과관계의 규범과 경험적 사실을 모두 도외시하는 것으로 오히려 신뢰를 받을 수 없게 한다.

5.3절 역학적 인과관계

환경소송은 역학적 인과관계가 문제되는 경우가 많다. 우리나라의 환경소송 관례에서도 상당부분 역학적 인과관계를 인정하고 있다. 이때 역학연구 결과를 어떻게 이해하고 분석하여 판정에 적용할 것인가 즉, 역학적 인과관계로부터 법적 인과관계를 어떻게 추론할 것인가가 문제이다.

역학에 있어서 어느 유해인자와 건강피해와의 인과관계의 존재는 통상 ① 특정 유해인자가 발병 이전에 작용하여야 한다. ② 그 유해인자가 작용하는 정도가 현저할수록 그 질병의 발생이 증가한다. 즉 유해인자의 양과 결과 사이에 양-반응관계가 존재한다. ③ 그 유해인자가 제거되거나 적어지면 질병의 발생이 감소한다.

역학적 인과관계는 인구집단을 대상으로 한 통계로서, 그 결과를 직접 개별 사건에서 인과관계를 증명하는 증거로 쓸 때에는 일정한 한계가 있다. 이러한 한계에도 불구하고 역학은 법적 인과관계를 판정하는 데 도움을 줄 수 있다.

증명부담을 완화하지 않고서 역학연구결과를 기초로 인과관계를 인정할 수 있으나 이때에는 관련성의 정도가 일정한 수준을 넘어야 할 것, 연구대상인 유해인자 노출과 질병이 원고의 그것과 동일 내지 유사할 것 등의 조건을 갖추어야 한다.

5.4절 속성수준과 사건수준의 인과관계

인과관계에는 두 가지가 있다. 하나는 개별적·구체적 사건에 관한 인과관계로 지역주민에게 암이 현실적으로 왜 발생했는가를 말하는 것이며, 다른 하나는 일반적·추상적인 원인-결과의 법칙적인 관계를 말하는 것으로 특정 발암인자에 의해서 특정 암이 발생한다는 것이다. 이때에 환경소송에서는 특정 발암인자가 해당 암 발생의 일반적·원칙적인 관계를 곧바로 개별사례에 적용하여 특정 암에 걸린 주민이 해당 발암인자에 의한다는 것이 성립할 수 있는지, 아니면 우연한 조건에 불과한 것인지를 판단해야 한다. 이를 이해하기 위하여 속성수준의 인과관계와 사건수준의 인과관계를 구분한다.

예를 들어 전리방사선이 갑상선암의 원인이라는 인과관계는 전리방사선이란 속성과 갑상선암이란 속성 간의 관계를 표현한다. 반면, 사건수준의 인과관계는 실제 발생한 구체적인 사건들 간의 관계이다. 전리방사선과 갑상선암 사이의 일반적인 인과관계는 인정하면서도 개별적으로 발생한 사건으로서 갑상선암이 바로 전리방사선 때문에 발생하였다는 인과관계를 곧바로 인정하지 못하는 것은 두 사건이 우연에 의하여 일어날 수 있다는 것을 부

인할 수 없기 때문이다. 갑상선암에 걸리는 사건은 전리방사선 이외의 다른 원인에 의해서도 발병할 수 있으므로 속성수준의 인과관계를 개별적 인과관계에 직접 적용할 수는 없다. 그렇다고 하더라도 주민에게 발생한 암이 어떤 발암인자 때문이라는 점을 인정하려면 우선 그 유해인자가 당해 암을 야기할 수 있다는 일반적·원칙적인 인과관계가 증명되어야 하고, 나아가 주민이 그 발암인자에 노출되어 실제로 그 질병이 발병하였다는 개별적 인과관계까지 증명되어야 한다. 이것은 지나치게 엄격한 인과관계를 요구하는 것이 된다. 따라서 일반적인 속성수준의 인과관계를 근거로 특수한 사건에서 인과관계를 설명할 때에는 인과성⁵³⁾이 아닌 개연성⁵⁴⁾을 사용할 필요가 있다. 일반적으로 알려진 특정 암과 해당 발암인자의 관계를 기초로 해당 발암인자가 얼마의 노출정도에서 암을 일으키는 강도(또는 위험도)를 알 수 있다면, 주민에게 발병한 암에 대하여 해당 발암인자의 노출정도에 따른 위험도를 이용할 수 있다. 따라서 주민에게 발생한 개별적인 사건으로써 암 발생에 대한 해당 발암인자의 기여정도를 평가할 수 있어야 한다. 이때 평가된 기여정도를 개연성의 표지로 활용하는 것이 합리적이고 객관적이다. 또는, 전리방사선이 갑상선암을 유발한다는 것은 전리방사선에 노출되는 경우를 관찰한 경험에 의하여 특정 발암인자와 해당 암 발병과의 인과관계를 알게 된 것이므로 경험적 관찰에서 노출정도나 상황이 유사한 경우에 해당한다는 추론과 입증정도로 인과관계를 인정할 수 있다. 갑상선암을 일으키는 전리방사선의 피폭상황에 대한 기존의 연구들에서 확인할 수 있으며, 원전주변지역에 거주한 주민의 피폭상황을 이와 비교하여 상당인과관계를 판정할 수 있다.

5.5절 인과관계에서 상당성의 본질

갑상선암은 일반적으로 다수의 원인 또는 조건이 관련된다. 전리방사선이 이와 같은 넓은 의미의 조건들 중 하나라는 것을 완전히 부정할 수 있는 경우는 드물다. 인과관계를 넓게 파악하는 경우에는 전리방사선과 갑상선암이 조금이라도 관련성이 있으면 인과관계를 인정할 수 있을 것이다. 그러나 지극히 단순한 조건관계가 있는 경우까지 인과관계를 인정한다면 사람에게 발생하는 다양한 암들의 원인들이 전리방사선 때문에 발생하지 않았다고 할 수 없게 된다. 따라서 환경성 질환을 판정하는 데에 있어서 중요한 것은 그 한계와 범위를 어떻게 정할 것인지 하는 것이다. 이때에 발생한 암과 환경성 발암인자 사이에 상당한 정도의 관계가 존재하여야 한다. 최소한 배경수준

53) 일반적으로 어떤 사실과 다른 사실 사이의 원인과 결과관계로 사건에는 반드시 그것을 발생시키는 근거가 있다는 것

54) 꼭 단정할 수는 없으나 대개 그러리라고 생각되는 것, 어떤 일이 일어날 수 있는 가능성

(일반 환경에서의 피폭수준) 정도의 전리방사선에 피폭된 경우에는 인과관계를 인정하지 않는다.

현재 문제가 되고 있는 갑상선암을 진단 받은 원전 주민들의 전리방사선피폭수준은 일반적인 배경수준의 전리방사선과 크게 다르지 않다는 것이 사실이다. 일부에서는 미지의 피폭가능성을 제기하고 있으나 이는 어디까지나 미지의 것이지 이를 근거로 인과관계가 성립한다고 할 수는 없다. 또한 그와 같이 미지의 불확실한 것을 근거로 추론하여 인과관계를 인정한다면 인간에게 발생하는 거의 모든 암들이 전리방사선에 의하여 발생하였다는 것을 인정해야 할 것이다. 갑상선암의 발생에 대한 전리방사선과 그 외의 원인이 동시에 존재하고 있어서 어느 정도이상 기여할 수 있는 전리방사선에 피폭되었다는 것이 확인되어야 한다. 이것이 개별적인 암 발병 사례에 대한 환경소송에서는 인과관계의 입증 부담을 줄이면서 일반적인 경험과 지식에 비추어 그 전리방사선에 피폭되지 않았다면 갑상선암에 걸리지 않았을 것이라고 인정되거나 전리방사선에 피폭되었다면 갑상선암이 발생하였다는 상당인과관계이다. 상당성은 일반적인 경험법칙상 단순한 조건이 아닌 상당한 조건만이 인과관계가 있다고 보는 것이다. 이것은 과학적 메커니즘으로 인과관계를 엄격하게 요구하는 것이 아니면서도 전리방사선과 갑상선암 발병 사이에 단순한 조건관계만으로는 인과관계가 충분하지 않다는 것이다. 따라서 상당성은 경험적인 사실뿐만 아니라 규범적인 측면도 함께 고려하고 있다. 이러한 규범은 존중되어야 한다.

따라서 원전주변지역 주민의 갑상선암이 원전에서 발생한 전리방사선에 의하여 발생하였다고 하려면 전리방사선에 피폭되었다는 것은 물론 피폭상황과 정도가 갑상선암을 유발할 정도이어야 한다는 것, 피폭으로 부터 시간경과가 암의 발병에 이를 정도의 기간이 걸려야 한다는 것 등의 요건은 최소한 충족할 필요가 있다. 이 요건들이 상당성에 해당하는 것이라고 할 수 있다. 그러나 원전으로부터 가까운 거리에 거주하였다는 것이나, 가까운 지역 주민들이 일부 비교한 원거리 지역 주민에 비하여 갑상선암의 발생이 높다는 사실을 인정요건으로 상당하다고 할 수는 없는데, 이러한 간접사실들은 비교집단을 달리하거나, 실제 전리방사선의 피폭수준을 비교하면 오히려 반대의 결과가 나올 수도 있는 일관성 없는 우연한 것일 뿐이기 때문이다.

상당성은 입증부담을 경감시키는 조치이며, 동시에 조건관계만으로는 보상의 범위가 너무 넓어지기 때문에 이를 규율하는 규범이다. 즉, 상당성은 결과귀속의 규범적인 한정요건이다. 암 발병 이전의 모든 조건에 대하여 인과관계를 인정하는 결과를 통제하기 위하여 상당성 판단은 환경성 발암인자

의 노출에 대한 모든 사정이 아니라, ‘객관적으로 암 발병을 증가시키는 근거’가 있는 사정만을 기초로 해야 한다. 객관적 근거란 해당 암의 발암요인으로 알고 있는 것에 노출되었으며 노출정도가 암 발생을 증가시킬 만하고, 경과기간도 암이 발생하기에 적절한 경우이다.

이것은 현재까지 전리방사선과 갑상선암에 관한 경험적 관찰로 확인할 수 있고 비교할 수 있다. 예를 들어 석면이 폐암을 일으킨다는 것은 집단적 관찰을 통해서 석면에 노출되는 위험군이 일정 정도 이상의 석면에 노출되고 일정기간 이상 기간이 경과하였을 때에 폐암이 증가한다는 결과를 기초로 한 것이지 단순히 석면에 노출된 사실만을 근거로 한 것이 아니다. 따라서 객관적 근거는 노출정도와 경과기간을 최소한으로 충족하는 것이 상당성의 판단기초가 되어야 한다.

5.6절 결론

과학은 원인에 의한 결과(effects of causes, EoC)를 관찰이나 실험을 통해서 밝혀내는 것에 관심을 두고 있는 반면에 환경소송은 결과에 대한 원인(causes of effects, CoE)을 추론하는 입장에 서 있다. 이러한 문제는 수세기동안 해결하려는 노력을 하고 있지만 여전히 모호한 것이 남아 있다. 여기에 대하여 상당성은 일반인의 사회생활 경험에 비추어 통상 그 행위로부터 그 결과가 발생하는 것을 말하는 것으로 인과관계를 규율하는 규범이며, 메커니즘으로 확인되는 엄격한 인과관계를 요구하는 것이 아닌 최소한의 인정요건으로서 암 발생을 증가시키는 피폭정도의 과학적 사실을 입증하면 된다는 정도로 입증부담을 완화시킨 것이다.

‘전리방사선이 갑상선암을 일으킨다’는 사실은 전리방사선에 피폭된 집단을 관찰한 역학적 연구결과로 도출된 것이다. 따라서 갑상선암이 전리방사선 때문에 발생하였다는 것을 인정하기 위해서는 최소한 갑상선암을 증가시킨 정도의 전리방사선에 피폭되었다는 것을 확인하여야 한다.

5.7절 참고문헌

- [5.1] 조민석. 공해소송에 있어서 입증책임- 입증경감을 중심으로 -, (社)韓國土地法學會土地法學第27-2號 2011年 12月 30日, pp. 141~162.

III. 결론

방사선은 과거 방사선생물학 및 방사선의 인체영향에 대해 잘 모르고 있던 시절에 방사선을 부주의하게 다루어 많은 양에 피폭되었거나, 질병의 치료를 위해 불필요하게 방사선을 조사받았거나 원자폭탄 또는 원자력발전소 사고로 인해 방사선에 피폭된 사람에서 발생된 암의 사례로부터 암 발생 원인의 하나로 지목되어 왔다. 그러나 이러한 역사적 경험과 100년 이상에 걸친 연구로 부터 방사선의 물리적 성질 및 생물학적 영향에 대한 많은 지식이 축적되어 인류는 이제 방사선을 관리할 수 있게 되었고 방사선은 각종 질병의 진단 및 치료, 문명의 유지와 발전에 없어서는 안 될 도구가 되었다.

암은 우리나라 사람에서 사망 원인의 1위이며, 평균수명이 늘어나고 진단기술이 발달할수록 암환자 수는 더 증가할 전망이다. 암 발생의 원인은 다양하다. 세계보건기구(WHO) 산하 국제암연구소에 따르면 암의 주요 원인으로 흡연, 음식 등 생활 습관과 관련된 요소가 60% 이상으로 대부분을 차지하며, 그 밖의 원인으로 환경오염, 직업, 유전, 방사선 등이 각각 3-5% 정도 차지하는 것으로 보고되고 있다.

최근 우리 국민에서 갑상선 암의 급격한 증가로 인해 갑상선 암은 우리나라에서 뿐만 아니라 세계적으로도 많은 관심의 대상이 되었다. 갑상선 암의 원인으로는 방사선, 유전자, 양성 갑상선 결절, 호르몬, 요오드 등이 거론되고 있다. 그러나 암의 발생에는 여러 요인들이 복합적으로 작용할 것이기 때문에 각 개인에서 암의 원인을 정확하게 밝히는 것은 매우 어려운 일이다.

방사선은 에너지의 흐름으로 정의할 수 있다. 방사선이란 에너지가 생명체를 투과하면 세포의 중요 구성성분들에 직접 작용하기도 하고, 물과 반응하여 라디칼이 만들어 지고 이 라디칼이 세포의 중요 성분과 작용하여 세포의 구조적 또는 기능적 손상을 초래하기도 한다. 다행스럽게 세포는 이를 수선하거나 제거할 능력을 가지고 있다. 그러나 손상이 너무 크거나 면역 기능의 저하 또는 유전자의 기능 이상 등 어떠한 이유로 세포가 이를 수선 또는 제거할 능력이 떨어져 있으면 암이 발생하거나 유전적인 이상이 초래될 수도 있다.

방사선에 의한 암 발생에서 가장 중요한 요소는 방사선의 양이다. 그러나 같은 양의 방사선이라도 나이, 피폭된 기간, 선량률, 방사선의 종류, 조직의 종류, 조직의 양, 유전적 요인, 생활습관, 화학물질 등 우리가 모르는 여

러 요소들이 암 발생에 작용할 수 있다. 따라서 방사선에 의한 암 발생을 평가할 때에는 방사선뿐만 아니라 다른 여러 요인들도 종합적으로 고려해서 판단해야 한다. 실제 소아암 환자에서 각종 치료 후 2차로 발생한 급성 백혈병이 방사선치료만 받은 경우에 비해 항암화학요법을 받은 경우에 더 증가했다는 보고도 있다. 이는 방사선보다 화학물질이 더 강력한 암 발생의 원인이 될 수 있음을 시사하는 것이다. 방사선에 의한 암 발생은 백혈병은 1년 이상, 기타 고형암은 10년 이상이 소요된다. 이 기간 동안 방사선에 의해 손상된 세포는 수복되거나 제거될 수 있고 다른 요인에 의해 암 발생이 더 촉진될 수 있다.

현재로서 방사선에 의해 발생한 암을 자연적으로 발생한 암과 구분할 수 있는 방법은 없다. 유일한 증거로 제시할 수 있는 것은 방사선에 피폭되었다는 사실이다. 따라서 방사선에 의해 발생한 암인 것을 입증하기 위해서는 정확한 피폭선량 및 선량률의 근거가 있어야하고, 방사선 이외의 다른 원인에 의한 암 발생의 가능성을 배제하기 위해 자연적인 암 발생률이 같은 집단과 비교 연구와 충분한 기간 동안 추적 관찰이 필요하다.

방사선에 의한 발암은 다른 어느 발암 요인보다도 광범위하게 잘 연구되어 왔으며, 그 중 가장 신뢰할 만한 연구 결과는 2차 세계대전 당시 일본에서 원자폭탄에 피폭된 사람들을 대상으로 한 수명연구(LSS)이다. 이 연구에서 보면 방사선과 발암의 관계가 선량에 따라 비례하여 증가하는 것으로 보이나 100 mSv 이하에서는 통계적인 의미가 관찰되지 않고 있다. 따라서 100 mSv 이하의 선량에서 방사선과 암 발생의 관계는 아직 과학적인 근거가 부족하다. 다만 국제방사선방호위원회(ICRP)에서는 100 mSv 미만의 경우 방사선 방호 목적의 편의상 100 mSv 이상에서 얻어진 모델을 이용할 수는 있지만 이를 100 mSv 미만에서 암 발생자수를 가상적으로 산출하는데 사용하는 것은 적절치 않다고 단서를 달고 있다.

본 위원회에서는 최근 논란이 되고 있는 원전 주변 주민의 갑상선암이 원전에 의한 것인지를 과학적으로 분석하여 국민들에게 보다 정확한 사실을 알려 막연한 불안감을 해소시키고 향후 발전 방향을 제시하고자 하였다. 본 위원회는 원전 주변의 방사선량 평가자료, 원전역학조사 결과, 해외 연구 사례, 갑상선암의 의학적 특성 등을 분석하여 다음의 결론을 얻었다.

1. 원전과 갑상선암 관련 주장의 근거가 된 ‘원전역학조사’ (서울대학교 의학연구원)에서도 원전과 주변지역 주민의 암 발생률 사이에는 인과 관계가 없다고

결론을 내리고 있다. 거주 지역이 원전으로부터 가까울수록 유의한 증가를 보인 여성 갑상선암도 ‘방사선 이외의 요인’으로 추론했다. 추론의 근거는, 만약 원전의 방사선 영향이라면 갑상선암 이외의 다른 암(유방암 등)도 증가하여야 하나 그렇지 않았고, 남·여 모두에서 갑상선암이 증가하여야 하나 여성에서만 높게 나타났으며, 갑상선암 발생률이 원전 주변 거주기간과 비례하지 않았다는 점 등이다. 또한 원전에서 0.5 km 이내 종사자의 상대 위험도는 1.06으로 오히려 주민보다 낮아 거리에 따른 암 발생은 전체적으로 일관성 없는 결과를 보이고 있다.

2. 원전 주변 방사선량은 0.01 mSv 정도 또는 그 이하로 관리되고 있다. 또한 실시간 전국 환경방사선 감시자료(<http://iernet.kins.re.kr>)에 의하면 원전 주변 지역의 방사선량률은 원전이 없는 다른 지역과 차이가 없다. 따라서 원전 주변 지역에 20년 이상 장기간 살았다고 하더라도 다른 지역 주민에 비해 더 많은 방사선에 노출되었다고 할 수는 없다.

3. 해외의 정상 운영되고 있는 원전 시설 주변 주민에 대한 여러 역학조사에서도 갑상선암의 증가가 보고된 바 없다. 우리나라는 미국과 같은 선진국 보다 먼저 국제 방사선방호위원회의 가장 엄격한 기준(ICRP-60)을 적용하고 있다.

4. 일본 원폭 생존자 연구와 체르노빌 원전 주변 주민 연구에 의하면 20세 이상의 성인에서 방사선 노출에 의해 갑상선암이 증가한다는 증거는 없었다. 다만, 방사선 피폭에 의한 갑상선암 발생은 방사성 요오드에 오염된 채소, 우유 등을 섭취한 소아에서 집단적으로 관찰되는 양상을 보였다.

5. 국가암등록통계에 의하면 2012년 기준 우리나라 여성의 갑상선암 발생률은 인구 10만명당 120.4명으로 세계 최고 수준이며 갑상선암 진단기술의 발달과 건강 검진의 보편화가 증가의 주된 원인으로 지목되고 있다. 원전 주변 주민들은 원전과 지자체에서 제공하는 건강검진 혜택으로 타 지역 주민들에 비해 갑상선 검진의 기회가 많았다. 그럼에도 불구하고 건강 검진을 받은 가장 군민의 갑상선암 진단유병률(1.3%)은 갑상선초음파 검사에 의해 발견된 한국 성인의 갑상선암 진단유병률(2.5%)보다 높지 않다.

위와 같이 정상적으로 운영되고 있는 원전과 주변 주민의 갑상선암 발

생 사이에는 인과관계가 있다고 할 수 없다. 정부와 관련 기관 및 단체는 방사선에 대한 근거 없는 불신을 해소시키기 위해 더 많은 노력을 기울여야 할 것이며, 정부는 방사선 영향에 대한 연구 지원도 늘려야 할 것이다.

방사성요오드의 생리역동학(Bio-kinetic) 모델

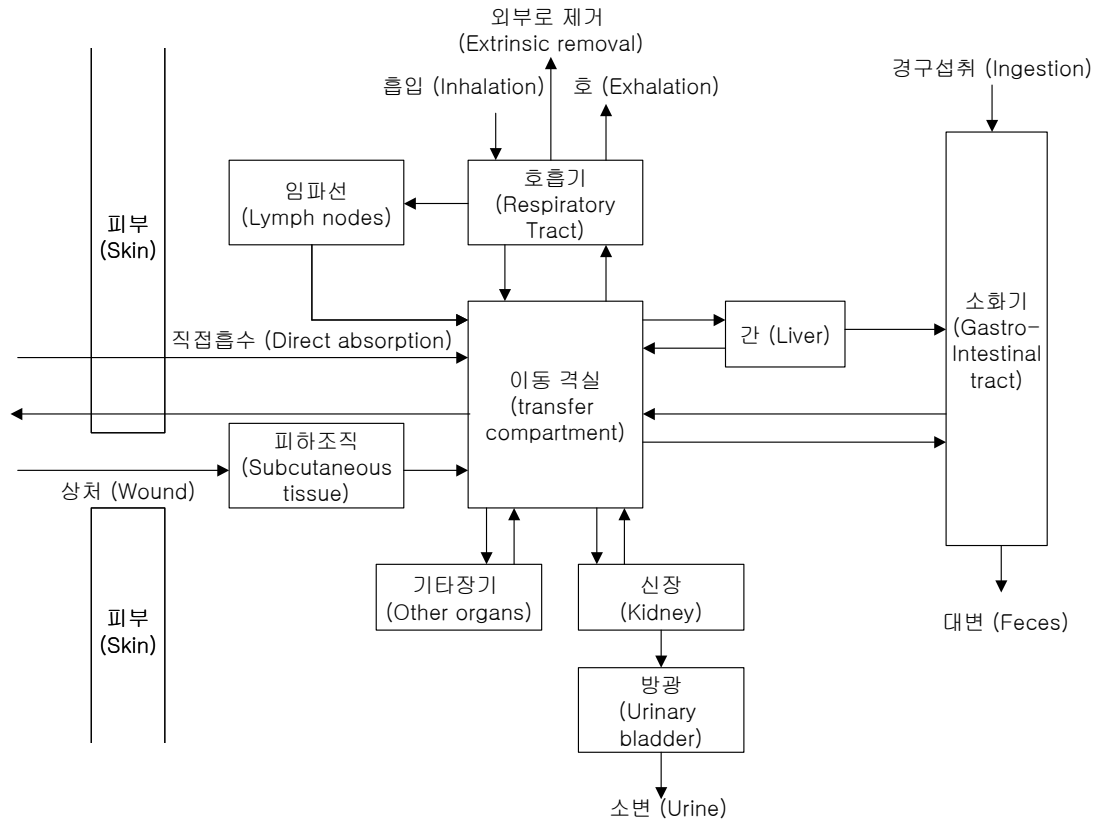
1장. 서론

인체 내 방사능의 측정이나 해석, 그리고 방사성물질의 섭취량이나 예탁유효선량을 평가하기 위해서는 인체 내 방사성물질 거동에 관한 지식이 필수적으로 요구된다.

생리역동학 모델들은 방사성물질의 섭취 후 특정 시점에서의 인체 또는 장기 내 보유량을 계산하고 일일 소변이나 대변 배설량중의 방사능을 계산하는데 사용되며 결국 내부피폭에 의한 장기의 등가선량이나 예탁유효선량을 계산하는데 사용된다. 특정 화학적 형태를 가지는 방사성핵종이 사람의 폐(肺, lung)에서 혈액으로 흡수되는데 이 흡수속도에 따라 Fast, Moderate, Slow의 세 가지 흡수형태 (type)로 구분되고, 소화기로 들어온 방사성물질은 소장에서 혈액으로 흡수가 되는데 섭취량에 따른 흡수분율을 f_1 값이라고 한다.

작업장내 방사성핵종의 물리적, 화학적 형태에 관한 정보를 잘 알고 있을 때에는 적절한 흡수 형태와 f_1 값을 선택하여 계산하여야 한다. 경우에 따라서는, 입자크기 분포나 호흡기 내에서의 침착 특성 등과 같은 부가적인 정보를 결정하기 위하여 보다 정확한 평가를 해 볼 필요가 있다. 국제방사선방호위원회에서 개발한 호흡기 모델은 흡입된 방사성핵종의 고유입력변수를 적용하기에 쉽도록 설계되었다. 하지만 어떤 특정 물질의 생체역학적 거동이 기존의 모델과 현저히 다르다는 것이 확실하고, 그 차이가 클 것으로 예상될 때에는 실제 데이터를 반영하여 모델 입력변수를 수정해야 한다.

그림[부록-1]에는 방사성물질의 섭취, 인체 내부에서의 이동, 그리고 배설 경로가 요약되어 있다. 호흡기, 소화기, 피부와 상처는 인체 내 주요 섭취 경로가 된다. 방사능 중 전부 또는 일부는 혈액에 흡수된다. 즉, 이동격실 (transfer compartment)에 도달한 방사능은 체액중의 방사성물질 (systemic material)이라고도 한다. 방사능은 다양하면서도 복잡한 이동을 하게 되는데 이러한 이동으로 인체 내에서의 분포와 경로 그리고 제거율이 결정된다. 체액 중 방사능은 삼중수소수 (tritiated water)와 같이 전신에 비교적 균질하게 분포할 수도 있으며 요오드 (갑상선에 침착), 알칼라인 토류금속 (alkaline earth metals) (뼈에 침착), 플루토늄 (뼈와 간에 침착)과 같이 특정 장기나 조직에 집중될 수도 있다.

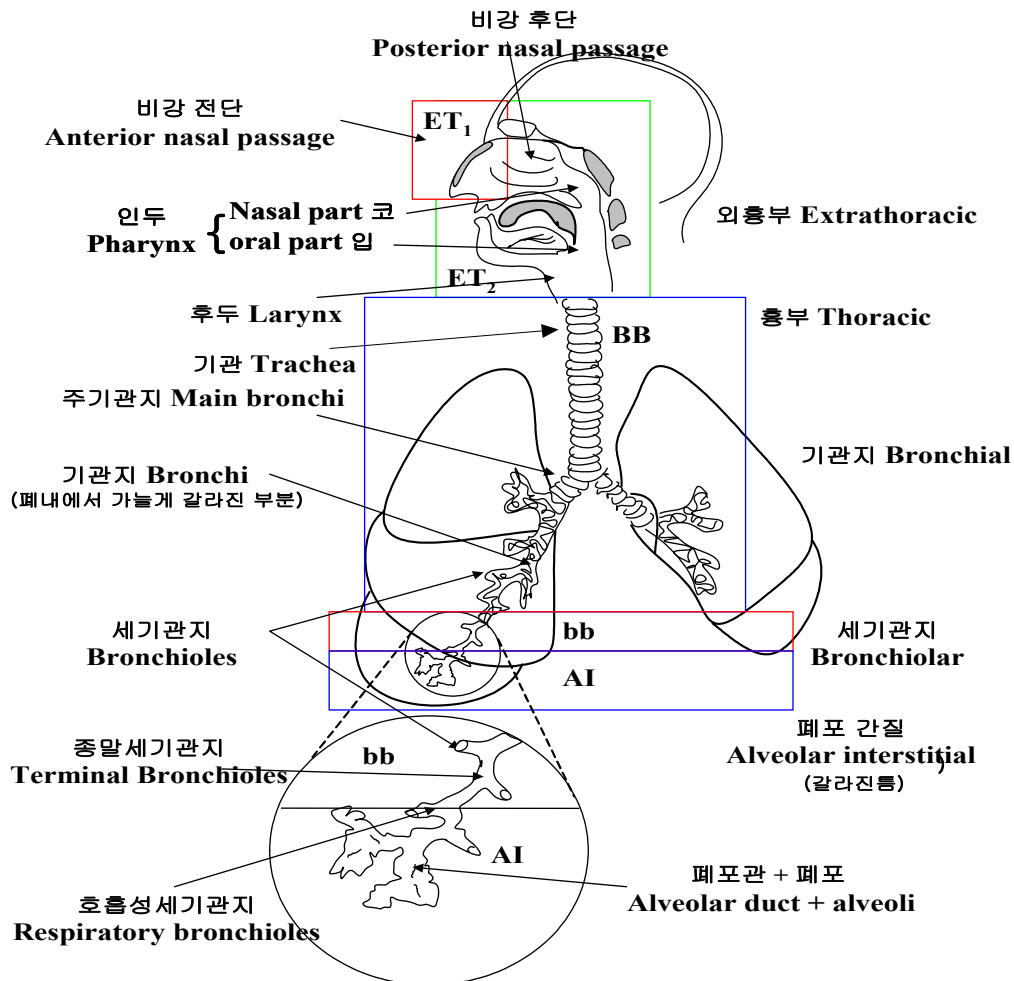


[그림[부록-1] 섭취 경로, 이동과 배설]

몸으로 들어온 방사성물질은 주로 소변과 대변을 통해 제거된다. 혈장(plasma)과 세포외부의 체액으로부터 생성된 소변은 방광을 통해 배설된다. 대변에 의한 배설은 두 개의 격실로 표현할 수 있다. 체액 중 방사능이 소화기를 거쳐 대변으로 배설되는 경우와 체액으로 흡수되지 않은 물질이 소화기를 거쳐 대변으로 배설되는 경우가 있을 수 있다. 오염된 피부로부터 직접 체액으로 흡수되는 것을 고려할 필요가 있는 방사성핵종도 있다. 의복이 피부오염의 주원인이 될 수 있으며, 특히 젖은 옷은 피부에 밀착되어 피부를 통한 체액흡수를 촉진시킬 수 있다. 방사성핵종이 피부를 통해 체내로 유입되는 상황은 일반적인 모델로 설명하기는 어렵다. 즉, 여러 가지 요인들을 고려해야만 한다: 화합물의 화학적 형태, 오염된 부위의 위치와 표면, 그리고 피부의 생리적인 상태 등도 고려해야 한다. 대개의 경우, 방사성물질은 접촉된 피부에서 심각할 정도로 체액에 흡수되지는 않지만, 몇몇 원소들은 빠르게 흡수된다: 이 중 가장 중요하게 여겨지는 핵종이 삼중수소수(HTO)이다. 방사성요오드도 피부를 통해 유입될 수는 있지만 정도는 그리 심하지 않다.

2장. 호흡기 모델

ICRP 66 (ICRP, 1994a)에 기술되어 있는 모델에는 호흡기가 다섯 개의 영역으로 나누어져 있다(그림[부록-2]).



[그림[부록-2] 호흡기]

외흉부(Extrathoracic)의 기도(airway, ET)는 비강통로 전단(Anterior nasal passage)인 ET₁ 영역과, 비강후단(Posterior nasal)과 인두(Pharynx; nasal & oral part) 및 후두⁵⁵⁾(Larynx)로 구성되는 ET₂ 영역으로 나눌 수 있다. 흉부 영역은 기관지(Bronchial, BB: 기관(Trachea)과 기관지(Bronchi)), 세기관지(Bronchiolar, bb) 그리고 폐포간질(Alveolar - interstitial, AI: 기체 교환영역)로 구성된다. 임파선 조직은 외흉부와 흉부기도(LN_{ET}과 LN_{TH})에 각각 연결되어 있다.

55) 혀의 기부(舌根)에 있는 후두개에서 기관까지 사이를 후두(喉頭)라 하며, 성대와 연골조직이 있다.

2-1절. 침착(Deposition)

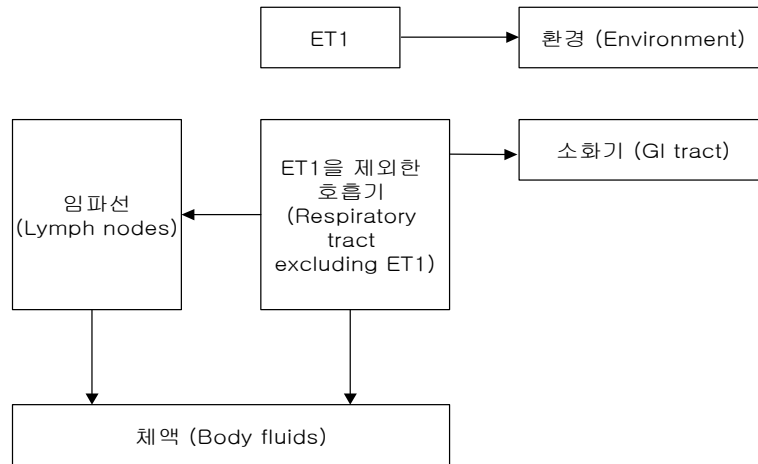
침착 모델에서는 실제로 관심의 대상이 되는 모든 입자 크기 (0.6 nm ~ 100 μm)에 대하여 각각의 영역에 대해 침착분율을 평가하게 된다. ET 영역에서 측정된 침착 효율은 입자크기와 공기 흐름에 관한 특징과 관련이 있는 것으로 밝혀졌다. 그리고 다른 조건(예, 성별, 인종별)에서의 침착을 예측하기 위해서는 해부학적인 규모(크기)에 따라 입력변수를 조정해 주어야 한다. 흉부 기도의 경우에는 BB, bb, 그리고 AI 영역에서의 입자 침착을 계산하기 위하여 기체 이동 및 입자 침착에 관한 이론적인 모델을 사용하고 폐의 크기, 호흡률에 의한 영향 등을 정량화 시켜야 한다. 입자의 침착을 모델링하기 위해서는 호흡 중의 각 영역들을 일련의 여과기(Filter)로 가정한다. 각각에 대한 효율은 공기역학(Gravitational settling, Inertial impaction)과 열역학(Diffusion) 과정을 교대로 고려하면서 평가한다. 영역별 침착 분율은 에어로졸(Aerosol)이 0.6 nm일 때 1.0에서부터 시작하여 약 1 μm 정도일 때는 2.5까지 증가하게 된다. 이 값은 입자지름의 중간 값으로부터 도출되는 기하학적인 표준편차(σ_g)로 계산된 것이다. 침착 매개변수는 작업자의 노동강도에 대해 3가지 준위로 주어진다.

방사성핵종을 흡입하는 경우, 고려 대상 작업자는 평상시 밝은 작업환경에서 코로 호흡하는 성인 작업자가 된다. 직업상 피폭의 경우 방사능 중간값의 공기역학적 지름(Activity Median Aerodynamic Diameter, AMAD)으로 주어지는 기본값은 5 μm (ICRP 68)이며, ICRP 30에서 권고하는 1 μm 보다 작업장의 공기입자에 대해 더 높은 대표성을 가지고 있다.

[표[부록-1] 참고인(Reference Worker)이 흡입한 공기입자의 호흡기내 영역별 침착(흡입된 방사능의 %)]

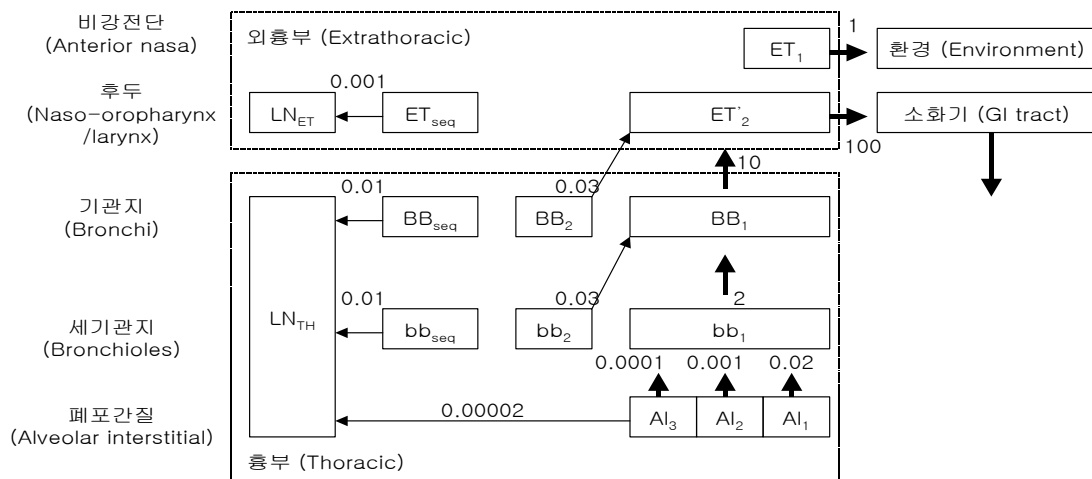
영역	5 μm AMAD의 침착 분율 (%)
ET ₁	34.0
ET ₂	40.0
BB	1.8
bb	1.1
AI	5.3
Total	82.0

2-2절. 제거



[그림[부록-3] 호흡기로부터의 제거 경로]

방사능이 호흡기로부터 제거되는 여러 경로에 대한 모델이 그림[부록-3]에 제시되어 있다. ET_1 에 침착된 물질은 코를 푸는 등 외부적인 방법으로 제거된다. 다른 영역에서의 제거 경로로는 소화기 및 임파선으로의 입자 이동과 호흡기로부터 혈액으로의 물질 흡수가 동시에 일어난다. 입자 이동과 혈액으로의 흡수는 독립적인 것으로 간주한다. 입자의 이동 비율은 모든 물질이 같다고 가정한다. 그림[부록-4]의 단일 격실 모델은 모든 물질의 입자 이동을 잘 기술하고 있다.



[그림[부록-4] 호흡기의 각 영역으로부터 시간에 따른 입자이동을 나타내는 격실 모델56)]

56) 화살표에 동반된 비율의 단위는 d^{-1} (ICRP, 1994a)

흡수(Absorption)는 침착된 물질의 물리적, 화학적 형태에 따라 달라진다. ET_1 을 제외(임파선을 포함)한 모든 영역에서 흡수는 같은 비율로 일어난다고 가정한다. ET_1 에서는 흡수가 일어나지 않는다. 흡수는 두 단계의 과정을 거친다: 입자가 해리하여 혈액에 흡수될 수 있는 물질로 바뀐 다음 용해성 물질이 혈액에 흡수된다(체액 흡수는 Uptake라고 한다).

시간에 따른 용해도를 고려하기 위하여 침착된 물질의 용해 분율이 상대적으로 빠른 물질과 느린 물질로 구분한다. 이러한 것을 모사하기 위해 *ICRP 66*에서는 그림[부록-5]에 제시되어 있는 모델을 사용하였다. 이 모델에서 호흡기내에 침착된 물질은 “초기 상태의 입자(Particles in initial state)”라고 표시된 격실에 할당된 후 일정한 비율 s_p 로 용해된다. 물질은 용해되면서 다른 용해도 s_t 를 가지는 ‘변형된 상태의 입자(Particles in transformed state)’라고 명명된 격실로(s_{pt} 의 비율로) 이동한다. s_{pt} 에 대한 s_p 의 비율은 대략 용해 속도에 비례한다. ‘변형된 상태의 입자’라는 것은 비교적 용해도가 높은 입자이거나, 장기의 표면층에만 존재하는 입자, 혹은 어떤 물질이 긴 과정에 걸쳐 흡수가 일어날 경우 그 잔류 물질을 일컫는다.

[표[부록-2] 흡수형태 (type) F, M, S 물질의 기본적인 흡수율]

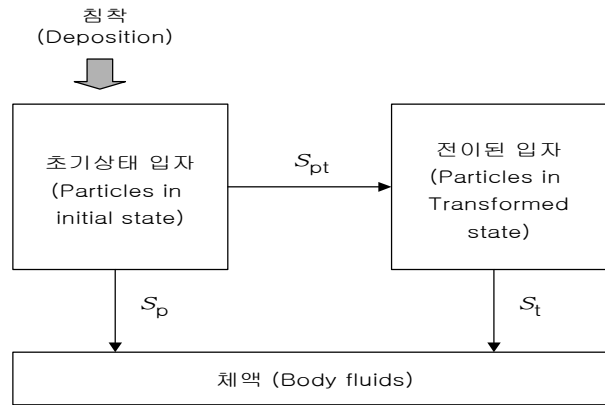
형태 Model Parameters (d^{-1})	F (fast)	M (moderate)	S (slow)
s_p	100	10	0.1
s_{pt}	0	90	100
s_t	-	0.005	0.0001

그림[부록-5]에 제시되어 있는 모델은 그림[부록-4](ET_1 제외)의 입자 이동에 관한 격실 모델의 각 격실에 적용할 수 있다. 즉, ‘초기 상태 입자’의 13개 격실에 포함되어 있는 물질이 일정한 비율 s_{pt} 로 ‘변형된 상태의 입자’로 이동한다고 가정한다. ‘변형된 상태의 입자’ 형태에 있는 물질은 입자 이동에 의해 ‘초기 상태의 입자’ 형태에 있는 물질과 같은 비율로 제거된다.

입자의 고유 흡수 비율은 각 화합물들에 대해 신뢰할만한 인체실험 또는 동물실험 데이터가 존재할 경우 호흡기 모델에 적용될 수 있다. 일반적으로 모든 화합물에 대해, 흡수형태가 Fast(F), Moderate(M), Slow(S)인지를 고려하여 결정하도록 권고되었다. *ICRP 30* 체계에서의 흡입 class D, W, Y가 이에 해당된다. 각각에 대해 권고된 값들은 표[부록-2]에 주어진 입력변수 s_p , s_{pt} , s_t 의 향으로 설명할 수 있다. ‘결합된(Bound)’ 상태는 기본적인 입력변수가

적용되지 않는다. 즉, 세 가지 형태 모두에 대하여 $f_b = 0$ 이 적용된다.

이러한 흡수율은 영역내에 침착된 물질의 양과 대략적인 반감기로 표현할 수 있으며 아래와 같이 정리할 수 있다.



[그림[부록-5] 호흡기 내에서의 시간에 따른 용해도와 혈액흡수를 나타내기 위한 격실모델 (ICRP, 1994a)]

흡수형태 F: 10분의 반감기로 100% 흡수된다. BB, bb, AI에 침착된 모든 물질과 ET₂내에 침착된 물질의 50%는 입자 이동에 의해 소화기로 빠르게 흡수된다.

흡수형태 M: 10%가 10분의 반감기로 흡수되고 90%는 140일의 반감기를 가진다. BB와 bb에 침착된 물질의 약 10% 정도와 ET₂에 침착된 물질의 5%는 빨리 흡수되며; AI 내에 침착된 약 70%의 물질이 결국 체액에 도달하게 된다.

흡수형태 S: 0.1%정도가 10분의 반감기로, 99.9%가 7000일의 반감기로 흡수된다. ET로부터는 흡수가 거의 없고, BB 또는 bb, 그리고 AI에 존재하는 물질의 약 10%만이 체액에 도달한다.

3가지 모두의 흡수형태에 대해, ET₁에 침착된 물질은 외부적인 요인에 의하여 모두 제거된다고 본다. 흡수되지 않고 남은 물질의 대부분은 입자 이동에 의하여 소화기로 제거된다. 임과절로 이동된 작은 양의 물질은 호흡기에서와 같은 비율로 체액에 흡수된다.

ICRP 30에서 제거등급 (Clearance Class) D, W, Y로 주어졌던 화합물들은 흡수형태 F, M, 또는 S로 다시 할당되었다. 이것은 ICRP 68 (ICRP, 1994b)에서 이전에 채택된 방식을 그대로 유지한 것이다.

2-3절. 기체와 증기

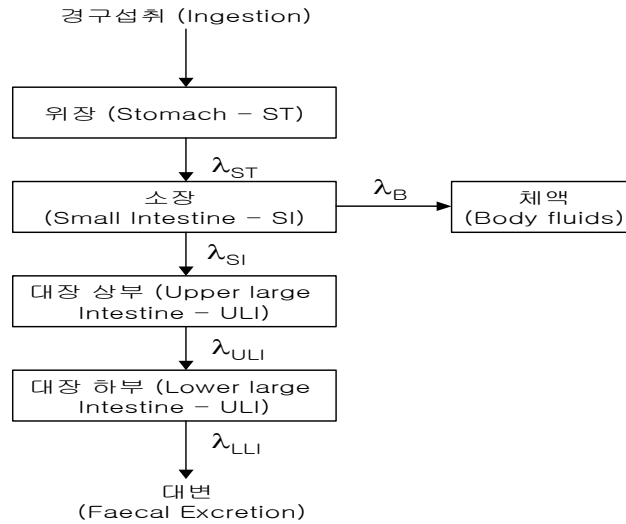
입자 형태로 흡입된 방사성핵종의 경우, 호흡기 내로의 섭취와 침착은 입자 크기 분포에 영향을 받는 것으로 가정한다. 기체와 증기는 호흡기로 섭취되는 지역에서의 방사성핵종 고유의 거동을 가지므로 입자와는 상황이 다르며 화합물의 화학적인 성질에 영향을 받는다. 기체와 증기의 거동은 *ICRP 30*에서 가정했던 방식을 적용하되 *ICRP 66*의 식을 사용하여 나타낸다. 즉, 세 가지 class의 기체와 증기에 대해 새로운 모델을 적용한다.

- Class SR-1(Soluble or reactive). 호흡기 조직에 보유된 물질 및 흡입된 방사능의 100%는 아니지만 체액에 흡수되는 물질을 고려한 것
- Class SR-2(Highly soluble or reactive). 흡입된 방사능이 완전하고 신속하게 체액으로 흡수되는 것을 고려한 것
- Class SR-0(Insoluble and non-reactive). 기체구름 내에서의 잠김(Submersion)으로부터 외부피폭을 고려하고, 기체에 의한 호흡기의 내부피폭을 고려한 것.

이 보고서에서 다루고 있는 방사성핵종 중 두 가지 핵종에 대해서는 입자뿐만 아니라 기체형태도 고려하고 있다. 삼중수소수 증기 형태의 삼중수소를 Class SR-2로 취급한다. 화학적인 형태변화 없이 완전하고 신속하게 체액으로 이동하는 물질을 Type V로 지정할 수 있다(ICRP, 1995b). 흡입된 삼중수소 기체중 작은 분율(0.01%)만이 체내로 직접 흡수되고 나머지는 삼중수소수로 변환된다(ICRP, 1994a). 증기 형태의 방사성요오드는 Class SR-1에 해당되며 10%가 ET₁에, 40%는 ET₂에, 그리고 50%가 BB 격실에 침착된다고 가정한다. 이후의 거동은 흡수형태 F에 준하는 것으로 취급된다. 피부를 통한 흡수도 고려할 필요가 있다; 삼중수소수 증기의 경우 흡입에 의한 예탁 유효선량에 50%를 추가하여 피부를 통해 흡수되는 것으로 고려할 수 있다(ICRP, 1979).

3장. 소화기 모델

방사성물질은 경구섭취에 의하여 바로 소화기관에 도달할 수도 있고 앞에서 기술한대로 입자 이동에 의하여 호흡기로부터, 또는 다른 신체기관으로부터 소화기로 이동할 수도 있다. 이 보고서에서는 *ICRP 30* (ICRP, 1979a)에 기술되어 있는 소화기의 격실 모델을 사용한다. 소화기관은 네 개의 영역



[그림[부록-6] 소화기관에서의 방사성핵종의 이동특성을 기술하기 위해 사용된 수학적 모델 (ICRP, 1979a)]

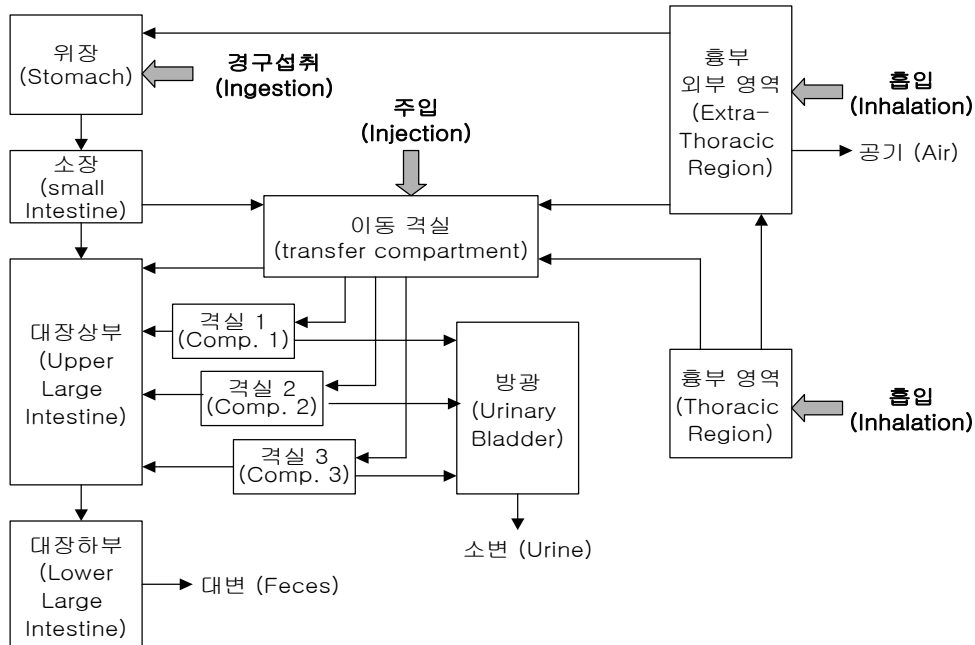
으로 나뉜다(그림[부록-6]). 각 영역은 단일 격실로 구성되고 한 격실에서 다음 격실로 이동하여 1차 동특성에 의해 지배된다고 가정한다. 격실 사이의 이동을 표시하는 비례상수, λ 는 표[부록-3]에 주어져 있다. 이 모델에서 소장(SI-small intestine)은 소화기로부터 체액으로의 흡수가 일어나는 단 하나의 영역으로 가정한다. 소장으로부터 전신 체액으로의 이동을 기술하는 비례상수, λ_B 는 흡입에 의해 체액에 도달하는 분율이며 f_1 으로부터 다음과 같은 식으로 계산될 수 있다. 각 원소의 화합물들에 대한 f_1 값은 ICRP의 간행물 부록에 제시되어 있다.

$$\lambda_B = \frac{f_1 \lambda_{SI}}{1 - f_1}$$

[표[부록-3] 소화기관 내에서의 방사성핵종의 이동특성을 기술하는데 사용된 모델의 주요 입력변수]

소화기관 영역	평균 잔류시간	λ (d ⁻¹)
위장 (ST - Stomach)	1	24
소장 (SI - Small intestine)	4	6
대장 상부 (ULI - Upper large intestine)	13	1.8
대장 하부 (LLI - Lower large intestine)	24	1

4장. 생리역동학 모델

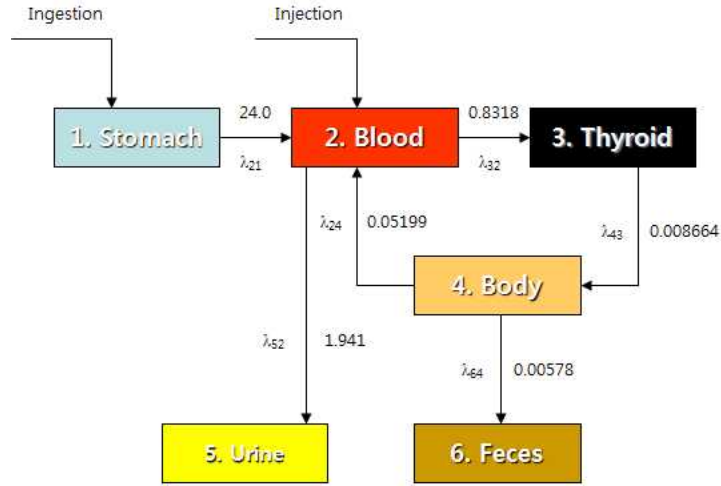


[그림[부록-7] 이 보고서에서 사용된 수소, 코발트, 루테튬, 세슘, 캘리포늄에 대한 일반화된 격실 모델]

수소, 코발트, 루테튬, 세슘 그리고 캘리포늄 모델은 ICRP 30에 제시되어 있는 모델들과 유사한, 단순선형 연쇄 격실 모델로 표현할 수 있다. 이 모델은 일반생리학에 근거하여 두 가지 모델이 개발되었다. 하나는 스트론튬, 라듐, 우라늄이고 다른 하나는 토륨, 넵투늄, 플루토늄, 아메리슘, 퀴륨 모델이다. 철(ICRP, 1995a), 요오드(ICRP, 1989) 등 특수한 모델들도 개발되었다.

특히, 갑상선에 영향을 주는 방사성요오드 핵종의 인체내 섭취경로, 그에 따른 인체내 장기에서의 이동, 그리고 이와 관련한 생리역동학 모델을 격실모델 형태로 기술하고 설명한다. 특히 지금까지 방사성요오드의 인체내 거동에는 여러 가지 모델들이 개발되었는데 그 중 가장 유력한 3가지 모델을 여기에 소개한다.

4-1절. ICRP 모델



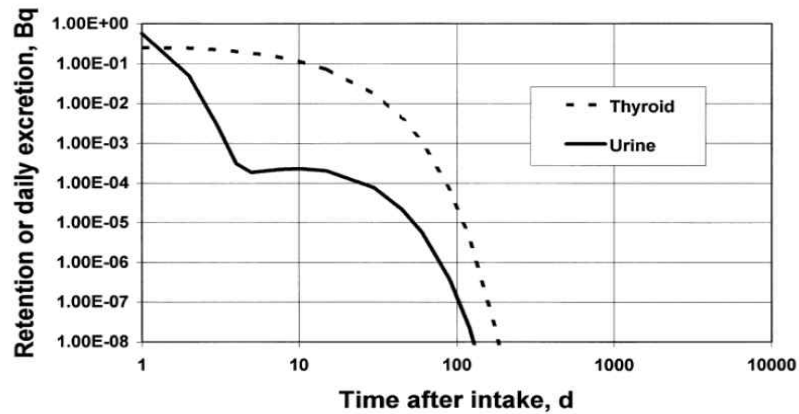
[그림[부록-8] 방사성요오드의 생리역동학적 ICRP 모델]

$$\frac{dA_1}{dt} = -(\lambda_r + \lambda_{21})A_1$$

$$\frac{dA_2}{dt} = -(\lambda_r + \lambda_{52} + \lambda_{32})A_2 + \lambda_{24}A_4 + \lambda_{21}A_1$$

$$\frac{dA_3}{dt} = -(\lambda_r + \lambda_{43})A_3 + \lambda_{32}A_2$$

$$\frac{dA_4}{dt} = -(\lambda_r + \lambda_{24} + \lambda_{64})A_4 + \lambda_{43}A_3$$

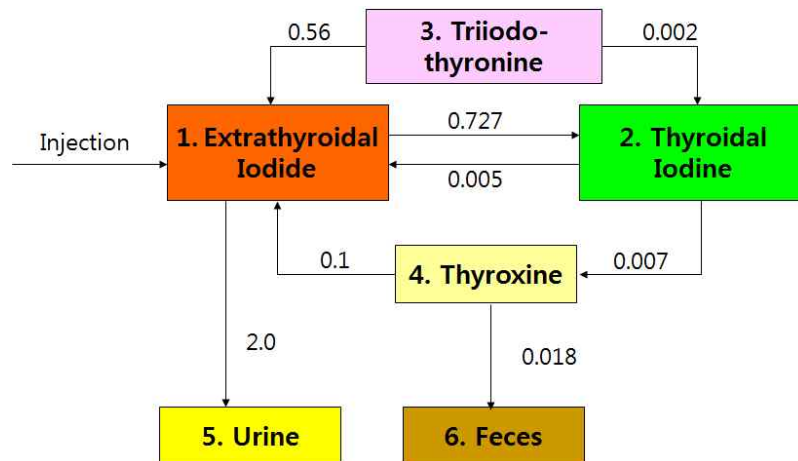


[그림[부록-9] ICRP 모델로 평가한 섭취후 시간에 따른 갑상선내 ¹³¹I의 잔류분율]

ICRP 모델은 방사성요오드의 이동을 장기의 해부학적 형태 입장에서 개발한 모델이다. 방사성요오드-131의 인체내 주요 장기에서의 시간에 따른 잔류율 그림은 다음과 같다. 그림에서 보듯이 갑상선내 최대 잔류율을 보이는 기간은 섭취 이후 약 1일부터 3일 사이가 됨을 알 수 있다.

4-2절. MIRD 모델

MIRD 모델은 ICRP와 다르게 해부학적 기준에 따른 것이 아니라 방사성요오드의 생리적 변화에 따른 이동을 중심으로 격실모델을 개발하였다. 즉, 각 장기에 분포하는 방사성요오드의 화학적, 생리적 변화를 중심으로 하고 이에 대해 각 장기의 해부학적 형태에 다시 배분하는 식의 격실모델을 개발한 것이다. 이러한 모델의 장점은 인체내 장기 사이에 이동하면서 변화하는 방사성요오드의 생리화학적 형태를 추적할 수 있어 보다 많은 정보를 제공하는 것이 가능하다. 하지만 선량평가는 결국 장기의 등가선량으로 나타내어야 하므로 장기의 해부학적 형태에 맞추어 미분방정식을 구성하여 ICRP와 같이 장기별 흡수선량을 구할 수 있도록 되어 있다.



[그림[부록-10] 방사성요오드의 생리역동학적 MIRD-12 모델]

[표[부록-4] 인체내 장기 사이에 이동하면서 변화하는 방사성요오드 분율]

Source Organ	Compartment			
	1	2	3	4
Red blood cells	0.045		0.013	
Salivary glands	0.05			
Plasma	0.099		0.061	0.245
Stomach	0.15			
GI system	0.17			
Extracellular, extravascular	0.423		0.826	0.336
Thyroid		1.0		
Liver	0.063		0.100	0.419

$$\frac{dA_1}{dt} = -(\lambda_r + \lambda_{21} + \lambda_{51})A_1 + \lambda_{12}A_2 + \lambda_{13}A_3 + \lambda_{41}A_4$$

$$\frac{dA_2}{dt} = -(\lambda_r + \lambda_{12} + \lambda_{32} + \lambda_{42})A_2 + \lambda_{21}A_1$$

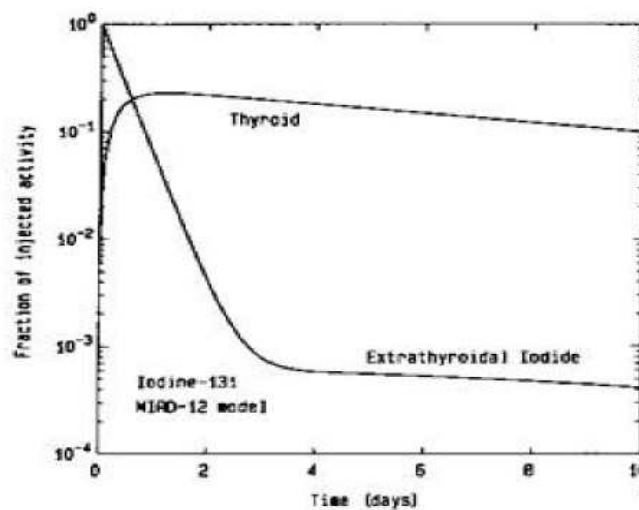
$$\frac{dA_3}{dt} = -(\lambda_r + \lambda_{13})A_3 + \lambda_{32}A_2$$

$$\frac{dA_4}{dt} = -(\lambda_r + \lambda_{14} + \lambda_{64})A_4 + \lambda_{42}A_2$$

$$U_t = U_2$$

$$U_h = 0.063U_1 + 0.1U_3 + 0.419U_4$$

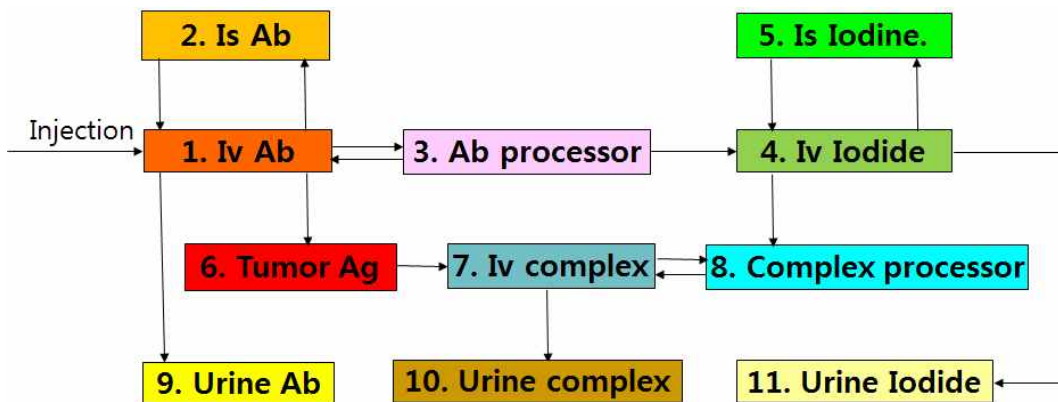
MIRD 모델에 따른 방사성요오드 I-131의 인체내 장기의 시간에 따른 분포도는 아래 그림과 같다.



[그림[부록-11] MIRD-12 모델로 평가한 섭취후 시간에 따른 갑상선내 ¹³¹I의 잔류분율]

4-3절. A nonlinear bio-kinetic model

한편 갑상선 치료에 사용되는 I-131의 blocking 현상을 설명할 수 있는 모델이 개발되었는데 편의상 고이즈미 모델로 부른다. 이 모델은 MIRD 모델과 유사한 형태를 보이지만 암세포로 대표되는 항원과 암세포 치료를 위해 투여되는 방사성요오드의 표지화합물의 단일클론 항체, 간의 역할과 혈액내와 세포간질에서의 방사성요오드 및 화합물의 거동을 중심으로 모델이 개발되었다. 이 모델의 가장 큰 장점은 I-123으로 표지된 방사성요오드를 사용하여 환자별 개인특성에 따른 안정요오드(요오드화합물)의 갑상선 blocking 현상을 설명할 수 있다는 것이다. 즉, 항체반응에 따른 방사성요오드의 화합물 변화량과 갑상선에서의 포화정도에 따른 혈액내 방사성요오드의 분포를 예측할 수 있도록 해 준다.



[그림[부록-12] A nonlinear bio-kinetic model(Koizumi et al. 1986)⁵⁷⁾

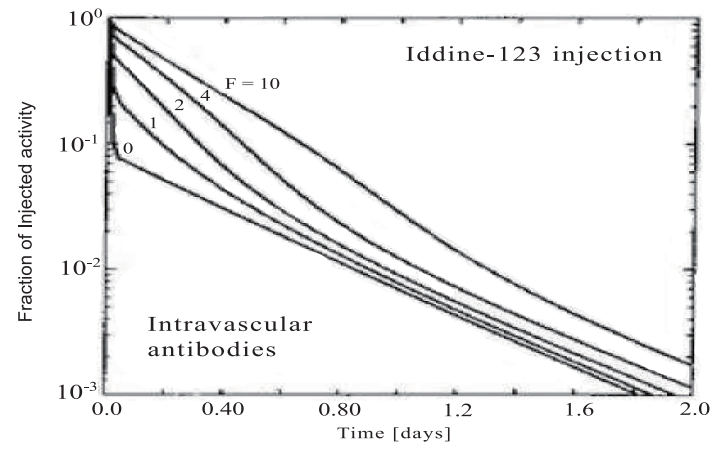
I-123으로 표지된 단일클론항체의 움직임에 대한 환자별 개인특성을 반영한 모델이 B세포림프종의 방사선치료에 사용되었다. 항체(Ab)는 혈관내에 주사되며 종양의 항원(Ag)에 작용한다. 항원항체 합성물이 혈관내로 들어와 요오드는 요오드화물 형태의 요오드-항체로 변환되고 요오드화물은 혈관내와 간질공간에 신속히 균질하게 분포한다. 갑상선이 “블록”화 되었다는 것은 항체를 투여하기 전에 갑상선이 요오드로 포화되었다는 것이다. 비선형성은 항체 처리기관인 간의 배위자-수용체 균형화 과정에서 발생한다.

$$\frac{dA_1}{dt} = -(\lambda_r + \lambda_{21} + \lambda_{61} + \lambda_{91})A_1 - \lambda_{31}(1 - FA_3)A_1 + \lambda_{12}A_2 + \lambda_{13}A_3$$

$$\frac{dA_3}{dt} = -(\lambda_r + \lambda_{13} + \lambda_{43})A_3 + \lambda_{31}(1 - FA_3)A_1$$

57) Ab = antibody, Ag = antigen, Iv = intravascular, Is = interstitial, complex = Ab bound to Ag

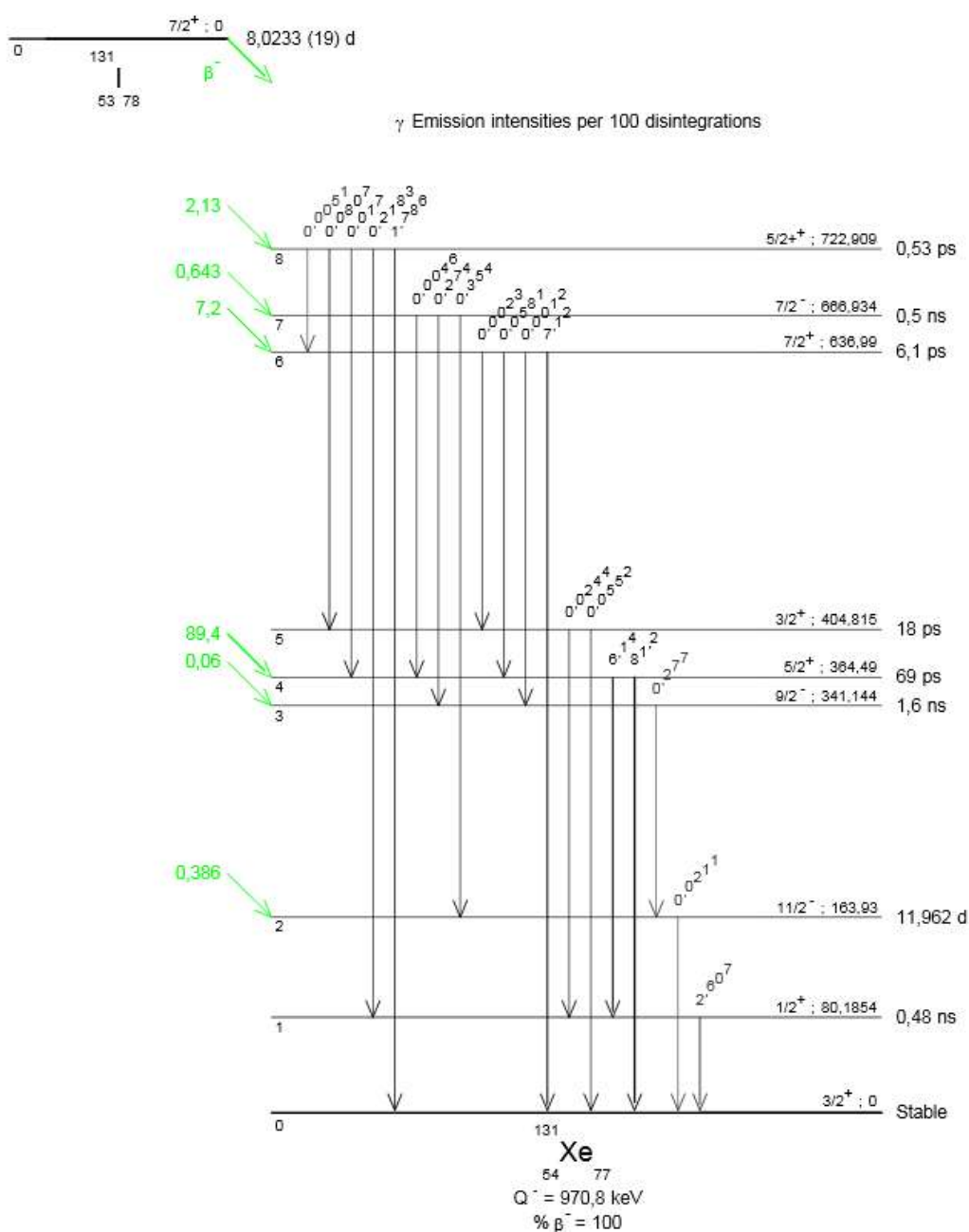
환자별로 특성에 따른 가능한 수용체의 수(數)가 존재한다. F는 가능한 수용체의 몰수에 대해 투여된 항체의 몰수의 비율이다.



[그림[부록-13] A nonlinear bio-kinetic model로 평가한 섭취후 시간에 따른 혈관내 ^{123}I 의 잔류분율]

5장. 방사성요오드의 특성

인체장기 중 갑상선에 영향을 미치는 방사성핵종은 방사성iodine 또는 방사성요오드라고 하며 여러 개의 동위원소가 존재한다. 이중 선량계수가 크면서 동시에 원전 핵연료 손상시 환경으로의 방출에 따른 피폭 기여도가 가장 큰 대표적인 핵종인 I-131의 붕괴도는 다음과 같다.



[그림[부록-14] 방사성요오드(^{131}I)의 붕괴도, LNE-LNHB/CEA Table de Radionucleides]

부록-참고문헌

- [부록.1] ICRP. Individual Monitoring for Internal Exposure of Workers. International Commission on Radiological Protection; ICRP Publication 78; 1997.
- [부록.2] Berman. MIRD-12 Model; 1977.
- [부록.3] Koizmi et al. A nonlinear bio-kinetic model; 1986.
- [부록.4] ICRP. Radionuclide Transformations – Energy and Intensity of Emissions. International Commission on Radiological Protection; ICRP Publication 38; 1983.

비매품

93060



9 791195 556601

ISBN 979-11-955566-0-1