

# 삼중수소의 인체영향에 관한 과학적 분석

2016. 07.



사단  
법인 한국원자력학회  
KOREAN NUCLEAR SOCIETY



대한방사선방어학회  
The Korean Association for Radiation Protection

한국원자력학회장      귀하  
대한방사선방어학회장

본 보고서를 한국원자력학회와 대한방사선방어학회가 공동으로 수행한 “삼중수소인체영향에 관한 과학적 분석” 보고서로 제출합니다.

2016. 7. 30.

**보고서 발간위원회**

**공동위원장:**

김교윤 (한국원자력연구원)

박우윤 (충북대학교)

**발간위원:**

강건욱 (서울대학교)

강창모 (원자력의학원)

금동권, 김진규, 정근호 (한국원자력연구원)

김광표 (경희대학교)

김수근 (성균관대학교)

이경진 (조선대학교)

정규환, 정승영 (원자력안전기술원)

# 목 차

|                           |    |
|---------------------------|----|
| I. 서론                     | 1  |
| II. 본론                    | 3  |
| 1장. 방사선의 인체영향             | 3  |
| 1.1 절 방사선의 개념             | 3  |
| 1. 방사선의 정의                | 3  |
| 2. 방사선량의 종류 및 단위          | 4  |
| 3. 방사선 발생원                | 7  |
| 1.2 절 자연방사선과 인공방사선        | 8  |
| 1. 자연방사선                  | 8  |
| 2. 인공방사선                  | 15 |
| 1.3 절 저선량 방사선이 인체에 미치는 영향 | 24 |
| 1. 방사선 피폭                 | 24 |
| 2. 저선량 방사선이 인체에 미치는 영향    | 26 |
| 1.4 절 선량한도의 의미            | 30 |
| 1. 선량한도의 의미               | 30 |
| 2. 선량한도 권고                | 30 |
| 3. 일반인 선량한도 1 mSv의 특징     | 34 |
| 1.5 절 참고문헌                | 36 |
| 2장 삼중수소의 방사선학적 특성 및 이용    | 37 |
| 2.1 절 삼중수소의 기원 및 방사선학적 특성 | 37 |
| 1. 삼중수소의 특성               | 37 |
| 2. 삼중수소의 생성반응             | 38 |
| 3. 삼중수소의 특징 및 인체내 거동      | 40 |
| 2.2 절 생리역동학 모델 및 선량평가 방법  | 46 |
| 1. 연간섭취한도기준               | 46 |
| 2. 생리역동학 모델               | 47 |
| 3. 체내피폭방사선량 평가            | 50 |
| 2.3 절 삼중수소의 이용            | 56 |
| 1. 의료 분야                  | 56 |
| 2. 연구 분야                  | 57 |
| 3. 산업 분야                  | 57 |
| 4. 원자력 분야                 | 59 |
| 2.4 절 참고문헌                | 60 |

|                                  |                |
|----------------------------------|----------------|
| <b>3장 국내·외 원자력시설 삼중수소 방사선 관리</b> | <b>61</b>      |
| 3.1 절 국내 원자력발전소의 삼중수소 관리         | 61             |
| 1. 원전 삼중수소 배출 관리 및 현황            | 61             |
| 2. 삼중수소 제거설비 (TRF)               | 62             |
| 3. 원전 삼중수소 환경 관리                 | 64             |
| 3.2 절 국내 연구용 원자로의 삼중수소 관리        | 74             |
| 1. 연구로의 삼중수소 배출관리 및 현황           | 74             |
| 2. 연구로의 삼중수소 환경관리                | 75             |
| 3.3 절 캐나다 삼중수소 방사선 관리            | 79             |
| 1. 삼중수소의 생산 및 배출 현황              | 79             |
| 2. 원자력발전소 주변 환경에서의 삼중수소 농도       | 83             |
| 3. 삼중수소 배출에 의한 주민선량              | 90             |
| 3.4 절 삼중수소관리 결과                  | 94             |
| 3.5 절 참고문헌                       | 95             |
| <br><b>4장 삼중수소의 인체영향</b>         | <br><b>97</b>  |
| 4.1 절 삼중수소의 위해도 평가               | 97             |
| 1. 생물학적효과비(RBE)                  | 97             |
| 2. 삼중수소로 인한 건강상의 영향              | 108            |
| 4.2 절 국외 삼중수소 역학연구 사례            | 115            |
| 1. 저선량방사선에 대한 역학연구               | 115            |
| 2. 삼중수소의 인체영향에 대한 역학연구           | 116            |
| 3. 역학 연구 사례 결과                   | 126            |
| 4.3 절 참고문헌                       | 127            |
| <br><b>III. 결론</b>               | <br><b>135</b> |
| <br><b>부록: 전문용어</b>              | <br><b>138</b> |

## 표 목차

|  |     |
|--|-----|
| 표 1-1. 국제방사선방호위원회 2007권고의 방사선가중치             | 5   |
| 표 1-2. 국제방사선방호위원회 2007권고의 조직 가중치             | 6   |
| 표 1-3. 우주방사선의 종류별 존재 비율                      | 10  |
| 표 1-4. 피폭방사선량에 따른 급성피폭의 증상                   | 26  |
| 표 1-5. 국제방사선방호위원회(ICRP) 26 및 60 권고에 따른 선량 한도 | 31  |
| 표 1-6. 국내 원자력안전법에서 정하고 있는 선량 한도              | 34  |
| 표 2-1. 자연 방사성동위원소의 생성률 및 지구 총량               | 39  |
| 표 2-2. 삼중수소의 물리 화학적 및 방사선학적 특성               | 44  |
| 표 2-3. 삼중수소의 주요 핵적 특성                        | 44  |
| 표 2-4. 삼중수소의 생물학적 특성                         | 45  |
| 표 2-5. HTO 섭취에 따른 인체 내에서의 삼중수소 제거 반감기 연구 결과  | 45  |
| 표 2-6. 삼중수소의 연간섭취한도(ALI) 및 유도공기중 농도(DAC)     | 47  |
| 표 2-7. 성인 기준, 흡입에 의한 선량환산인자 비교               | 48  |
| 표 2-8. 성인 기준, 경구섭취에 의한 선량계수 비교               | 48  |
| 표 2-9. 어린이 (3세 ~ 7세) 기준, 흡입에 의한 선량계수 비교      | 49  |
| 표 2-10. 어린이 (3세 ~ 7세) 기준, 경구섭취에 의한 선량계수 비교   | 49  |
| 표 2-11. 세계 주요 나라의 음용수 중 삼중수소 농도 한도           | 50  |
| 표 2-12. 삼중수소의 분야별 이용예시                       | 56  |
| 표 3-1. 월성 삼중수소 제거 설비 개요                      | 63  |
| 표 3-2. 발전소별 삼중수소 조사 빈도 및 조사지점 수              | 65  |
| 표 3-3. 최근 10년간 물시료 중 삼중수소 방사능 농도             | 67  |
| 표 3-4. 원자력발전소 주변 해수 중 삼중수소 농도                | 69  |
| 표 3-5. 원자력연구원내 원자력시설 주변 삼중수소 조사계획            | 75  |
| 표 3-6. 환경상의 위해 방지를 위한 기준치                    | 77  |
| 표 3-7. 캐나다의 원자력발전소                           | 79  |
| 표 3-8. 캐나다 원자력발전소에서 연 삼중수소 배출량               | 80  |
| 표 3-9. 캐나다 삼중수소 가공 시설에서 연간 삼중수소 배출량          | 80  |
| 표 3-10. 캐나다 삼중수소 연구시설에서 연간 삼중수소 배출량          | 81  |
| 표 3-11. 캐나다 화학연구소에서 연간 삼중수소 배출량              | 81  |
| 표 3-12. 캐나다 삼중수소 방출 시설 주변의 공기중 삼중수소 농도       | 84  |
| 표 3-13. 캐나다 원자로 주변의 물과 우유중 삼중수소 농도           | 85  |
| 표 3-14. 캐나다 원자로 주변의 채소 및 해산물에서의 삼중수소 농도      | 86  |
| 표 3-15. 캐나다 연구로 및 삼중수소처리설비 주변에서의 삼중수소 농도     | 87  |
| 표 3-16. 초크리버 폐기물관리시설 주변에서의 지표수중 삼중수소 농도      | 88  |
| 표 3-17. 캐나다 삼중수소 방출 시설 주변의 지하수에서의 삼중수소 농도    | 89  |
| 표 4-1. 다양한 실험 조건에서 삼중수소의 RBE 연구결과            | 100 |
| 표 4-2. 방사선의 물속에서의 평균 LET 값                   | 106 |

## 그림 목차

|  |    |
|--|----|
| 그림 1-1. 우라늄계열 및 토륨계열 핵종의 붕괴도                     | 9  |
| 그림 1-2. 전 세계 기준 피폭원별 자연방사선 피폭 수준                 | 12 |
| 그림 1-3. 국내 지역별(좌) 및 국가별(우) 평균 실내 라돈 농도           | 13 |
| 그림 1-4. 피폭원별 인공방사선에 의한 전 세계 평균 연간 유효선량           | 20 |
| 그림 1-5. 방사선원별 미국인의 연간 피폭방사선량                     | 21 |
| 그림 1-6. 국내 진단방사선 검사별 일인당 유효선량                    | 21 |
| 그림 1-7. 방사선의 신체적 영향 및 유전적 영향                     | 25 |
| 그림 1-8. 방사선의 인체유해성에 대한 선량반응 모델                   | 28 |
| 그림 1-9. 직업상 피폭의 선량한도를 설정하기 위한 방사선량에 따른 위험도 평가    | 32 |
| 그림 1-10. 일반인의 선량한도를 설정하기 위한 방사선량에 따른 위험도 평가      | 33 |
| 그림 2-1. 삼중수소의 핵과 원자 모형                           | 37 |
| 그림 2-2. 수소, 중수소, 삼중수소 동위원소의 핵과 원자 모형 및 삼중수소 붕괴모형 | 37 |
| 그림 2-3. 삼중수소 붕괴과정 모형                             | 38 |
| 그림 2-4. 삼중수소의 붕괴 곡선                              | 38 |
| 그림 2-5. 삼중수소의 생리역동학 모델                           | 47 |
| 그림 2-6. 섭취시기에 따른 소변 시료 농도 변화                     | 53 |
| 그림 2-7. 기체형 삼중수소 발광선원의 발광 원리                     | 58 |
| 그림 2-8. 다양한 종류의 삼중수소 발광제품 예                      | 59 |
| 그림 2-9. 핵융합반응                                    | 59 |
| 그림 2-10. 핵융합로 ITER와 수소폭탄 실험                      | 59 |
| 그림 3-1. 국내 원전 삼중수소 배출량 연도별 추이                    | 62 |
| 그림 3-2. 월성 TRF 전경                                | 63 |
| 그림 3-3. 월성발전소 삼중수소 배출량 연도별 추이                    | 64 |
| 그림 3-4. 월성 발전소 공기 중 삼중수소 농도 연도별 추이               | 66 |
| 그림 3-5. 연도별 월성발전소 빗물 중 삼중수소 농도 추이                | 67 |
| 그림 3-6. 월성발전소 주변 농작물 삼중수소 농도 연도별 추이              | 68 |
| 그림 3-7. 발전소 배수구 주변 해수 중 삼중수소 농도 연도별 추이           | 69 |
| 그림 3-8. 삼중수소 환경 이동 경로                            | 70 |
| 그림 3-9. 발전소별 주민 방사선량 연간 추이                       | 73 |
| 그림 3-10. 최근 5년 동안 전체핵종과 삼중수소에 의해 야기되는 주민 방사선량 비교 | 73 |
| 그림 3-11. 연구용원자로 하나로의 삼중수소 배출량 연도별 추이             | 75 |
| 그림 3-12. 연구용원자로 하나로 주변 환경시료 중의 삼중수소 농도 연도별 추이    | 77 |
| 그림 3-13. 대덕 원자력시설 주변 연간 주민 방사선량                  | 78 |
| 그림 3-14. 캐나다에서 공기중 삼중수소 배출량과 규제제한치의 비교           | 82 |
| 그림 3-15. 캐나다에서 액체중 삼중수소 배출량과 규제제한치의 비교           | 82 |
| 그림 3-16. 캐나다 삼중수소배출 시설 주변에서의 주민삼중수소피폭량과 선량제한치 비교 | 90 |
| 그림 3-17. 2005년도 SRBT 주변 농산물에서의 거리에 따른 삼중수소 농도    | 91 |
| 그림 3-18. 2007년도 SRBT 주변 농산물에서의 거리에 따른 삼중수소 농도    | 92 |
| 그림 3-19. SRBT 주변지역의 거리별 삼중수소에 의한 성인 피폭선량         | 93 |
| 그림 3-20. SRBT 주변지역의 거리별 삼중수소에 의한 성인 및 유아 피폭선량    | 93 |

## I. 서론

2015년 6월 “원전주변주민과 갑상선에 관한 과학적 분석”이라는 전문 보고서를 한국원자력학회와 대한방사선방어학회가 공동으로 발간한 바 있다. 원자력발전소 운영과 발전소 주변에 거주하는 주민의 갑상선암 발병의 연관성을 과학적으로 분석하고자 국내의 해당 전문가들이 건전한 시민의 입장에서 보고서를 발간한 것이다. 원자력발전소는 안전하게 관리되고 있고, 원자력발전소 운영과정에서 배출되는 미미한 방사능, 즉 자연 방사선량보다 극히 낮은 수준의 방사선량으로부터 갑상선암이 발생할 가능성은 희박하다는 것이 도출된 주요 결론이었다.

최근 원자력발전소 주변 지역에 거주하는 주민의 소변에서 삼중수소가 검출되어 지역 주민의 건강에 대한 우려가 점증하고 있으며, 삼중수소의 인체 영향이 중요한 사회적 이슈로 부각되고 있다. 이에 따라 한국원자력학회와 대한방사선방어학회는 공동으로 관련 전문가 그룹을 구성하고 삼중수소의 인체 영향에 대한 과학적 분석 보고서 발간을 추진하게 되었다. 보고서 발간의 기본 취지는 객관적이고 과학적 관점에서 삼중수소가 인체에 어떤 영향을 미치며, 국내 원자력시설로부터 삼중수소는 인체에 유해할 수준으로 배출되고 있는지 또 어떻게 관리되고 있는지, 실제로 삼중수소가 인체에 영향을 준 사례가 있는지의 분석을 통해 일반 주민이 막연하게 생각하는 삼중수소의 인체영향에 대한 과학적 사실들을 객관적으로 정리하여 이해당사자들에게 알리는데 있다.

삼중수소 인체영향에 대한 과학적 분석을 다룬 본 보고서의 본론은 4개 부분으로 구성된다.

1장에서는 방사선과 인체 영향에 대한 일반적 사항들을 기술한다. 방사선의 정의, 종류 및 단위, 발생원을 통해 방사선의 개념을 설명하고, 자연계에 존재하는 자연 방사선과 인공방사선의 차이, 저선량 방사선의 인체영향, 선량한도의 개념 등에 알아본다.

2장에서는 삼중수소의 방사선학적 특성과 삼중수소의 산업적 이용에 대해 기술한다. 삼중수소의 생성과 인체 내 거동, 체내 피폭선량 평가, 의료/연구/산업/원자력 분야에서의 삼중수소 이용 현황 등을 알아본다.

3장에서는 국내외 원자력시설에서의 삼중수소 방사선 관리 현황을 살펴본다. 삼중수소 배출량 및 환경준위, 주민피폭선량 등에 대해 알아본다.

4장에서는 삼중수소의 인체 영향에 대해 기술한다. 삼중수소의 생물학적 효과비와 건강상 영향에 대해 알아보고, 외국에서의 삼중수소 역학연구사례를 알아본다.



## II. 본론

### 1장. 방사선의 인체영향

#### 1.1 절 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 X-선, 감마선 등의 전자기파 형태가 있다.

###### 나. 방사선의 종류

방사선은 크게 원자 내의 전자에 대한 전리능력 유무, 방사선 자체의 전하 유무, 형태, 발생원리 등에 따라 다양하게 구분할 수 있다. 알파선, 베타선, 양성자, 중성자, 감마선, X-선 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(X-선, 감마선, 중성자선)으로 구분할 수 있다.

알파선은 두 개의 양성자와 두 개의 중성자로 이루어진 원자핵 입자의 흐름이다. 이는 헬륨 원자핵과 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. 중

성자선은 전하를 가지고 있지 않아 전기적으로 중성이기 때문에 물질을 쉽게 뚫고 지나갈 수 있다. X-선은 원자에서 방출되는 전자기파의 일종이다. X-선은 빛에 비해 파장이 매우 짧고 에너지가 높지만, 빛과 유사한 성질을 가지고 있다. 감마선은 X-선과 마찬가지로 전자기파의 일종이다. X-선은 원자수준에서 방출되는 반면 감마선은 원자핵 수준에서 방출된다. 감마선은 방사성물질에서 자연 방출되며, 일반적으로 X-선에 비해 에너지가 높다. 또한 투과성이 높아 두꺼운 납이나 콘크리트를 이용해서 차폐한다.

## 2. 방사선량의 종류 및 단위

방사선의 양을 나타내는 방사선량에는 다양한 종류가 있다. 각각의 방사선량은 의미하는 바가 다르며, 그에 상응하는 단위를 사용한다. 방사선 이용 초기에는 방사선량의 측정 단위로서 피부의 홍반 발생 정도를 나타내는 피부 홍반 단위를 사용하였다. 하지만 이는 생물학적 영향만을 고려한 단위로서, 방사선방호 등 기타 측면에서는 이용되지 못했다. 국제방사선방호위원회(ICRP : International Commission on Radiological Protection)<sup>1)</sup>와 국제방사선단위위원회(ICRU)에서는 방사선의 에너지, 종류 등을 고려하여 다양한 분야에서 사용할 수 있는 방사선량 단위를 도입하였다. 도입된 방사선량은 크게 물리적인 양, 방사선방호에 사용되는 양으로 나눌 수 있다. 물리적 방사선량은 조사선량(exposure), 흡수선량(absorbed dose), 커마(kerma) 등이 있으며, 방사선방호 목적의 방사선량으로는 조직 또는 장기의 평균흡수선량(mean absorbed dose), 등가선량(equivalent dose), 유효선량(effective dose), 집단유효선량(collective effective dose) 등이 있다[1.1, 1.2].

흡수선량은 방사선생물학, 임상방사선학, 방사선방호에 사용되는 방사선량들의 기본이 되는 물리량이며, 광자, 전자, 중성자 등 모든 종류의 직·간접 전리방사선에 대해 사용된다. 흡수선량(D)은 모든 전리 방사선에 의해 질량  $dm$ 에 부여된 평균에너지  $d\bar{\epsilon}$ 를  $dm$ 으로 나눈 값으로 정의된다.

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

1) 방사선방호에 관한 기준을 권고하고, 지침을 제공하는 국제위원회. ICRP의 권고는 국제적으로 권위 있는 것으로 각국의 방사선방호 기준으로 채택되고 있음

흡수선량의 단위는 J/kg이며, 그 특별 명칭은 그레이(Gy: Gray)이다.

실제 적용에 있어 흡수선량은 일정한 부피가 있는 장기나 조직의 체적에 대해 평균한다. 하나의 장기 또는 조직 T 영역의 평균 흡수선량( $D_T$ )은 조직 또는 장기에 전달된 총에너지( $\varepsilon_T$ )를 조직 또는 장기의 질량( $m_T$ )으로 나눈 값으로 정의된다.

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

어떤 장기나 조직이 피폭되어 동일한 흡수선량 즉 동일한 방사선 에너지를 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. 표 1-1에 방사선 유형별 방사선 가중치를 정리하였다. 방사선가중치를 고려하여 새롭게 정의된 양을 등가선량( $H_T$ )이라 하며, 장기나 조직의 평균 흡수선량( $D_{T,R}$ )에 방사선가중치를 곱한 값으로 정의된다.

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

방사선가중치는 무차원이므로, 등가선량의 단위는 흡수선량 단위와 같이 J/kg이며, 그 특별명칭은 시버트(Sv: Sievert)이다.

표 1-1. 국제방사선방호위원회 2007권고의 방사선가중치

| 방사선 유형            | 방사선가중치 ( $w_R$ )       |
|-------------------|------------------------|
| 광자                | 1                      |
| 전자 또는 뮤온          | 1                      |
| 양성자 및 하전 파이온      | 2                      |
| 알파 입자, 핵분열파편, 중이온 | 20                     |
| 중성자               | 중성자 에너지의 연속함수 (2.5~20) |

동일한 방사선량이 서로 다른 장기 또는 조직에 피폭되었을 때, 인체에 미치는 영향은 피폭된 장기 또는 조직에 따라 다르다. ICRP 60 권고에서 유효선량 개념이 도입되었으며, ICRP 103 권고에서도 방호목적의 방사선량으로 사용하고 있다[1.1]. 유효선량( $E$ )은 인체 내의 특정 장기 또는 조직의 등가선량( $H_T$ )을 조직가중치( $w_T$  : tissue weighting factor)로 가중한 합이다.

$$E = \sum_T w_T \cdot \sum_R w_R \cdot D_{T,R} = \sum_T w_T \cdot H_T$$

조직가중치는 무차원이므로, 유효선량의 단위는 J/kg이며, 그 특별명칭은 시버트(Sv)이다. 조직가중치는 인체 장기 또는 조직마다 다른 방사선의 민감도를 수치로 나타낸 것이다(표 1-2 참조). 예를 들어 골수와 같은 조직은 방사선에 민감하기 때문에 다른 조직보다 높은 가중치를 두고, 골조직과 같이 상대적으로 민감하지 않은 부위는 낮은 가중치를 두었다. 유효선량을 사용하면 방사선에 의한 내부피폭과 외부피폭, 다수의 방사선 피폭 등 매우 다양한 상황의 피폭을 조합해 단일 값을 도출할 수 있다. 따라서 기본 피폭한도 등을 단일 양으로 표현할 수 있다. 따라서 유효선량은 선량 제한 체계와 기록유지를 한층 편리하게 한다.

표 1-2. 국제방사선방호위원회 2007권고의 조직 가중치[1.2]

| 장기 또는 조직                               | 조직가중치 ( $w_T$ ) | 가중치 합계 ( $\sum w_T$ ) |
|--|-----------------|-----------------------|
| 적색골수, 결장, 폐, 위, 유방, 잔여조직 <sup>1)</sup> | 0.12            | 0.72                  |
| 생식선                                    | 0.08            | 0.08                  |
| 방광, 식도, 간, 갑상선                         | 0.04            | 0.16                  |
| 뼈표면, 뇌, 침샘, 피부                         | 0.01            | 0.04                  |
| 합계                                     |                 | 1.00                  |

<sup>1)</sup> 잔여조직 : 부신, 흉외기도, 쓸개, 심장, 신장, 림프절, 근육, 구강점막, 췌장, 소장, 비장, 흉선, 전립선(남성) 또는 자궁/자궁경부(여성)

방사선방호는 직무로 피폭하는 개인뿐만 아니라, 집단의 방사선 피폭을 최적화하고 감축하는 것을 포함한다. 따라서 국제방사선방호위원회(ICRP)는 방사선방호 최적화 목적을 위해 주요 직무피폭 상황에 대해 집단선량(S) 개념을 도입하였는데, 이는 피폭과 그 영향의 관점에서 대체로 균질한 집단의 개인선량 합으로 정의된다[1.1, 1.3]. 특정 선원에서 일정 기간  $\Delta T$  기간에  $E_1$ 과  $E_2$  사이 개인 유효선량 값으로 인한 집단유효선량은 다음과 같다.

$$S(E_1, E_2, \Delta T) = \int_{E_1}^{E_2} E \left( \frac{dN}{dE} \right)_{\Delta T} dE \quad \text{또는} \quad S = \sum_i E_i \cdot N_i$$

여기서  $E_i$  는 소집단  $i$ 의 평균 유효선량이며,  $N_i$ 는 이 소집단의 사람 수이다. 유효선량이 합산되는 시간과 사람 수는 항상 지정되어야 한다. 집단유효선량의 단위는 J/kg이며, 그 특별명칭은 인·시버트(man·Sv)이다. 집단유효선량은 방사선 기술이나 방호 절차들을 비교하기 위한 최적화의 한 도구이지, 역학 연구에 사용하려는 도구가 아니며, 따라서 위험 투사에 사용하는 것은 적합하지 않다[1,2]. 특히 사소한 피폭을 대규모 집단에 적용한 집단유효선량에 기초한 암 사망 계산은 타당하지 않으며 피해야 한다. 장기간 또는 넓은 지리적 지역에 대해 매우 낮은 개인선량을 부적절하게 합산하는 것을 피하기 위해서는 제한조건을 설정할 필요가 있는데, 집단유효선량 평가에는 방사선량 범위와 피폭기간을 고려한다.

### 3. 방사선 발생원

방사선원은 크게 방사성물질, 방사선발생장치로 나눌 수 있다. 방사성물질은 방사성핵종을 일정 농도 이상으로 함유하고 있는 물질을 말하며 핵연료물질, 사용후핵연료, 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, 토륨 핵종 등이 포함되어 있다. 위와 같은 방사성물질은 자연계에 존재할 수도 있으나, 원자로 혹은 가속기 등을 이용하여 인공적으로 생산되기도 한다. 인공적으로 생산된 방사성물질을 인공 방사성물질이라고 일컫는다.

방사선발생장치란 방사성물질 또는 방사성동위원소를 사용하는 대신에 다른 형태의 에너지를 인위적으로 방사선에너지로 변환하여, 방사선을 방출하는 장치이다. 대표적으로 X-선 발생장치가 있으며, 그 밖에도 다양한 종류의 가속기가 포함된다. 가장 널리 사용되는 방사선발생장치인 X-선 발생장치에서는 고전압 하에서 가속된 전자가 양극과 충돌할 때 전자의 운동에너지가 X-선으로 변환되어 방출된다.

## 1.2 절 자연방사선과 인공방사선

### 1. 자연방사선

자연방사선이란 우리 주위의 자연계에 존재하는 방사선을 총칭하는 용어이다. 자연방사선은 우리 주위에 항상 존재한다. 자연방사선원은 지각을 구성하는 토양, 암석 등에 포함된 천연방사성핵종에서 방출되는 지각방사선, 대기권 밖에서 지구로 입사하는 우주방사선, 우주방사선과 대기 중 원소와의 반응으로 생성되는 방사선 등이 있다. 이처럼 자연방사선은 주위환경 어디에든 항상 존재하기 때문에, 인간은 방사선의 바다에 살고 있고, 그로 인해 일상생활 중에서 항상 방사선 피폭을 받으며 살아가고 있다.

#### 가. 자연방사선의 종류

##### (1) 지각방사선

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

천연방사성핵종 중 대표적인 핵종들로는 우라늄계열, 토륨계열, 악티늄계열, 넵튠계열 핵종들이 있다. 그림 1-1에 우라늄계열 및 토륨계열 핵종들의 붕괴도를 나타내었다. 우라늄계열은 반감기가 약 45억년인  $^{238}\text{U}$ 을 모핵종으로 하는 계열로서,  $^{238}\text{U}$ 이 붕괴하여 최종적으로 안정된 상태의 핵종인  $^{206}\text{Pb}$ 으로 붕괴할 때까지 생성되는 모든 핵종들을 포함한다. 토륨계열은 140억 년의 반감기를 가지는  $^{232}\text{Th}$ 를 모핵종으로 최종적으로 안정된 핵종인  $^{208}\text{Pb}$ 로 붕괴할 때까지 생성되는 모든 핵종들을 포함한다. 악티늄계열은 약 7억 년의 반감기를 가지는  $^{235}\text{U}$ 를 모핵종으로 하여, 최종적으로  $^{207}\text{Pb}$ 로 붕괴한다. 넵튠계열은  $^{241}\text{Pu}$ 이 붕괴하여 최종적으로  $^{209}\text{Bi}$ 에서 끝나는 붕괴계열을 의미한다. 우라늄계열, 토륨계열, 악티늄계열 핵종들과는 다르게 넵튠계열 핵종들은 상대적으로 짧은 반감기

를 가지고 있기 때문에 그 붕괴계열의 원소 중 긴 반감기를 가지는  $^{209}\text{Bi}$ 만이 현재 지구에서 발견된다.

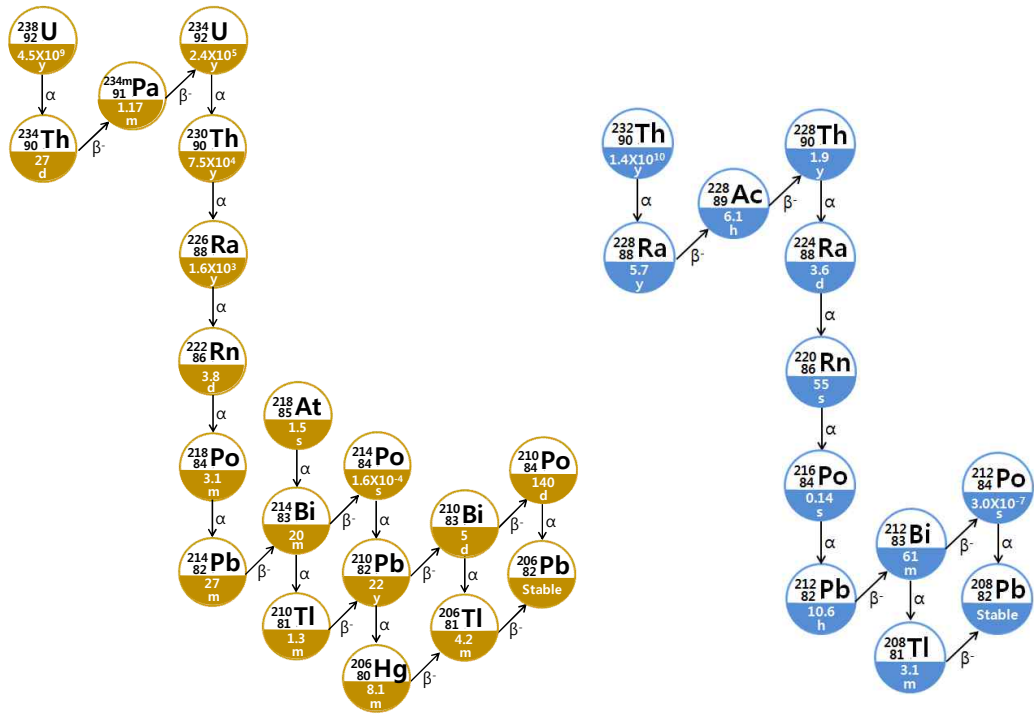


그림 1-1. 우라늄계열 및 토륨계열 핵종의 붕괴도

## (2) 라돈

라돈은 자연방사선 피폭의 50% 이상을 차지하는 주요한 천연방사성핵종이다. 라돈은 우라늄과 토륨계열 핵종의 붕괴과정에서 발생하기 때문에 지각방사선이 일종이라 할 수 있다. 약 45억 년의 매우 긴 반감기를 가지는  $^{238}\text{U}$ 이 붕괴하여 중간 생성물인  $^{230}\text{Th}$ 과  $^{226}\text{Ra}$  등과 같은 핵종들이 생성되고,  $^{226}\text{Ra}$  핵종의 붕괴에 의해서  $^{222}\text{Rn}$ 가 생성된다. 우라늄과 토륨계열 핵종의 붕괴과정에서  $^{222}\text{Rn}$ 와  $^{220}\text{Rn}$ 과 같은 기체상태의 방사성핵종들이 발생하는데, 이러한 기체상태의 핵종들은 지각에서 생성되어 대기 중으로 방출될 수 있다. 대부분의 라돈 방사성동위원소의 반감기는 수초 단위로 짧은 반면  $^{222}\text{Rn}$ 은 반감기가 3.8일로 상대적으로 긴 편이다. 따라서  $^{222}\text{Rn}$  외에 다른 라돈 방사성동위원소들의 자연 환경에서 존재비율은 매우 낮은 수준이다. 따라서 대기 중의 라돈에 의한 주된

피폭은  $^{222}\text{Rn}$ 에 기인한다. 라돈의 밀도는 공기의 약 8배 정도로 높다. 따라서 고도가 낮을수록 농도가 더 높게 나타나며, 특히 밀폐된 지하에서 라돈의 농도가 높게 나타난다. 공기 중으로 확산된 라돈은 공기 중에서 붕괴하여 폴로늄(Po), 납(Pb)과 같은 자핵종을 생성한다. 생성된 자핵종은 호흡을 통해 인체 내로 유입되어 내부피폭을 야기한다. 실외 공기 중에서 존재하는 라돈 가스의 농도는 낮기 때문에 실외에서는 라돈가스에 의한 영향이 크게 문제가 되지 않는다. 하지만 밀폐된 공간이나 실내로 라돈가스가 유입되는 경우 문제가 될 수 있다.

### (3) 우주방사선

우주방사선이란 우주공간에서 지구로 입사하는 자연방사선을 의미한다. 우주선은 높은 에너지를 가지고 은하계와 태양으로부터 방출된다. 지구에 살고 있는 인간이 받는 모든 자연방사선 피폭 중 우주방사선에 의한 피폭 정도는 약 16% 정도이다. 우주방사선의 주를 이루는 물질로는 고에너지의 양성자, 헬륨 이온 등이 있으며, 이외에도 높은 원자번호를 가지는 원자, 전자 등이 있다(표 1-3 참조). 우주방사선을 구성하는 양성자, 헬륨 이온 등이 지구로 입사하면 지구의 대기를 구성하는 물질인 질소, 산소 등의 원자들과 반응을 하게 되는데, 이때 우주방사선과 대기와의 반응으로 수많은 종류의 방사성핵종이 생성된다. 이때 지구 외부로부터 입사하는 방사선을 일차 우주방사선이라고 하며, 우주선과 대기가 반응하여 생성되는 중성자, 양성자, 파이중간자 등을 이차 우주방사선이라고 한다.

표 1-3. 우주방사선의 종류별 존재 비율

| 입자             | 평균 존재 비율 (%) |
|----------------|--------------|
| 양성자            | 87           |
| 헬륨 원자핵         | 11           |
| 원자번호 2 이상의 원자핵 | 1            |
| 전자             | 1            |



#### (4) 인체 내 방사성핵종

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

인간의 호흡작용이나 음식물의 섭취 등을 통하여 천연방사성핵종이 체내로 유입될 수 있다. 체내 유입된 방사성핵종들 중 대표적인 핵종으로는  $^{14}\text{C}$ ,  $^{40}\text{K}$ ,  $^{87}\text{Rb}$ ,  $^{210}\text{Po}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{238}\text{U}$  등이 있으며, 앞서 나열한 핵종들 중에서  $^{40}\text{K}$ 이 다른 핵종들에 비하여 상대적으로 인간의 피폭에 가장 큰 영향을 주는 핵종으로 알려져 있다.

#### 나. 자연방사선에 의한 일반인의 피폭방사선량

자연방사선 피폭은 천연방사성핵종에서 방출되는 방사선과 우주선에 의한 피폭을 의미한다. 인간은 일상생활 중에서 항상 자연방사선에 피폭을 받으며 살아가고 있다. 방사선 피폭은 방사선원의 위치에 따라 외부피폭과 내부피폭으로 분류할 수 있다. 자연방사선에 의한 외부피폭은 토양, 해수, 지표수, 공기 등에 존재하는 천연방사성 핵종에서 방출되는 방사선과 우주선에 의해 인체가 피폭하는 것을 의미한다. 내부피폭은 생활환경 도처에 존재하는 천연방사성핵종이 호흡을 통한 흡입과 음식물 등을 통한 섭취 등으로 인하여 체내로 유입되어, 이로 인해 체내에서 방출되는 방사선에 의해서 피폭하는 것을 의미한다.

자연방사선에 의해 인간이 받는 피폭방사선량에 대해 유엔방사선영향과학위원회(UNSCEAR : United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation)<sup>2)</sup>에서는 주기적으로 자료를 수집하여 보고하고 있다[1.4]. 유엔방사선영향과학위원회의 보고에 의하면 자연방사선에 의한 전 세계 인구의 일인당 평균 연간 피폭방사선량(유효선량)은 2.4 mSv이다(그림 1-2 참조). 이러한 자연방사선에 의한 영향은 지역의 특성과 환경에 따라 차이를 보이는

2) 국제연합(UN) 산하 기구로 방사능이 인간과 환경에 미치는 영향에 대한 자료를 수집하여 주기적으로 보고서를 발간함

데, 주로 대지에 포함된 우라늄, 토륨, 칼륨 등의 천연방사성핵종의 함량의 차이에 기인한다. 지각에서 방출되는 자연방사선이 많은 지역에 거주하는 사람은 세계 평균보다 10배 정도 많은 자연방사선에 피폭되며 살아가고 있다. 유엔 방사선영향과학위원회(UNSCEAR)의 보고를 토대로 피폭원별 자연방사선 피폭의 기여도를 살펴보면 라돈 흡입에 의한 피폭방사선량이 약 52%로 가장 높게 나타났다. 다음으로 지각방사선(약 20%), 우주방사선(약 16%), 음식물 섭취(약 12%)순으로 나타났다.

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

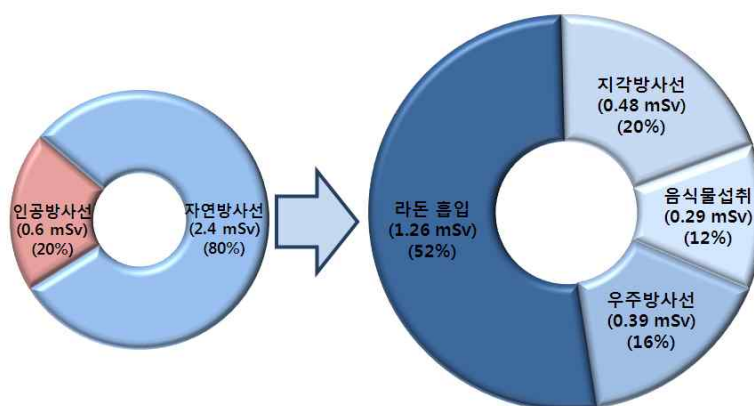


그림 1-2. 전 세계 기준 피폭원별 자연방사선 피폭 수준[1.4]

자연방사선으로부터 우리나라 국민이 일상적으로 받고 있는 유효선량은 지역 그리고 생활 습관에 따라 차이가 있으나, 평균적으로는 연간 3.08 mSv로 평가되었다[1.5]. 피폭원별로 분류하면 라돈 자손핵종 흡입에 의한 방사선량은 1.40 mSv으로 가장 높게 나타났고, 지각방사선에 의한 방사선량은 1.04 mSv, 음식물 중 방사능에 의해 방사선량은 0.38 mSv, 우주방사선에 의한 방사선량은 0.26 mSv이었다.

## (1) 라돈에 의한 피폭

라돈은 모든 자연방사선 중 최대 방사선 피폭원이며, 자연방사선에 의한 전체 피폭방사선량의 50% 이상 기여한다. 자연 중에 널리 존재하는 라돈은 일반적으로 토양, 건축자재, 상수도 등에 다양하게 존재하고 있고, 이중 일부가 대기 중으로 방출되어 피폭을 유발한다. 라돈의 인체 내 유입경로는 대기에 방출된 라돈을 흡입하거나, 라돈이 함유된 음용수 섭취 등이 있다. 최근 라돈 피폭이 방사선방호 분야의 주요 이슈로 대두되고 있다. 이러한 이유 중에 하나는 최근 건물들이 에너지 절약형으로 개선되어, 실내 공기의 환기율이 낮아짐에 따라 실내 공기 중 라돈의 양이 증가하였으며 또한 지하공간의 이용이 증가하였기 때문이다. 일반적으로 실내 공기 중 라돈의 농도는 우려할 수준은 아니다. 그러나 균열이 많은 오래된 건축물 또는 밀폐도가 높고 환기시설이 부족한 경우 실내에서의 라돈 농도가 높을 수 있으므로 주의를 기울여야 한다.

우리국민의 라돈에 의한 연간 피폭방사선량은 전국 평균 1.27 mSv로 나타났다. 총 집단선량은 약 60,000 man·Sv로 평가되었다[1.5]. 그림 1-3은 우리나라 지역별 그리고 국가별 평균 실내 라돈 농도를 나타내었다. 전국 평균에 비해 전북, 충남지역의 라돈 농도가 다소 높게 나타났으며, 이로 인해 예상되는 연간 유효선량은 약 1.7 mSv 수준이다. 울산, 부산 등은 전국 평균에 비해 약간 낮은 수준으로 나타났으며, 이는 연간 약 1 mSv의 피폭을 유발할 수 있다. 우리나라의 실내 라돈 농도는 해외에 비해 평균수준인 것으로 나타났다.

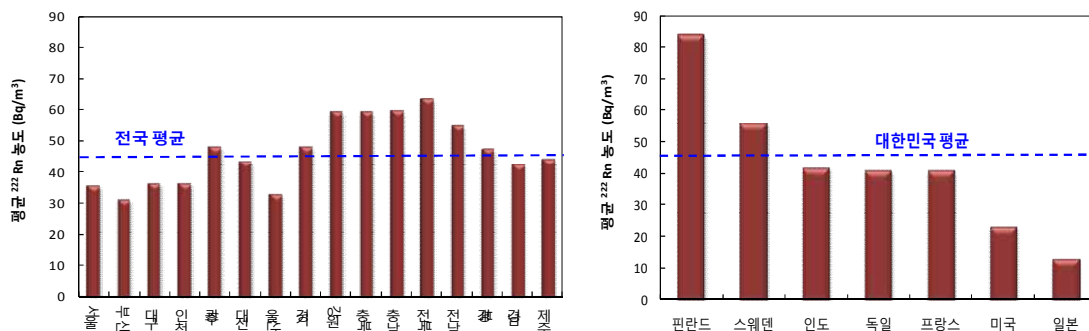


그림 1-3. 국내 지역별(좌) 및 국가별(우) 평균 실내 라돈 농도[1.5]

## (2) 지각방사선에 의한 피폭

지각방사선에 의한 피폭은 주로 지각을 구성하는 주요 핵종인 우라늄계열, 토륨계열, 악티늄계열 핵종에서 방출되는 감마선에 기인한다. 여기에는 토양이나 암석에서 방출되는 감마선에 의한 외부피폭, 공기 중에 부유하는 천연방사성핵종을 흡입하거나 천연방사성핵종이 함유된 음식을 섭취함에 따르는 내부피폭이 포함된다. 지각에서 방출되는 방사선 수준은 지역에 따라 차이가 있다. 인도의 케랄라 지방의 거주민은 지각방사선에 의해 연간 평균 약 4 mSv의 피폭을 받으며, 브라질 가라바리 지역에 거주하는 사람들은 연간 약 2~80 mSv의 피폭을 받고 있다. 우리나라 옥외에서 지각감마선에 의한 공간감마선량률은 20~500 nSv/h(평균 108 nSv/h)의 범위에 있으며, 실내에서의 방사선량률은 126~347 nSv/h(평균 214 nSv/h)로 실외에 비해 평균적으로 2배 정도 높게 나타났다[1.5]. 공간감마선량률을 기반으로 평가한 우리나라 국민의 평균 연간 유효선량은 1.04 mSv이다.

## (3) 음식물 섭취에 의한 피폭

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

---

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

#### (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 우리나라민의 연간 유효선량은 0.25 mSv이다. 우주선 강도는 공중으로 올라갈수록 강해지므로 항공여객은 지상에 있는 사람보다 더 많은 우주선을 피폭한다. 국제선 항로도 북극에 가까운 항로, 예를 들면 우리나라에서 유럽이나 미국을 왕래하는 항로일수록 우주선 피폭이 높아진다. 항공기 여행 시 북미의 경우 평균 0.06 mSv, 유럽의 경우 평균 0.042 mSv 정도에 피폭한다.

## 2. 인공방사선

인공방사선은 원자력시설 등에서 발생하는 인공방사성핵종에서 방출되는 방사선, 의료 또는 산업목적을 위해 인위적으로 발생시킨 방사선을 말한다. 방사성핵종은 다양한 목적을 위해 사용되지만 자연에 존재하는 천연방사성핵종은 그 종류가 제한적이다. 따라서 인공적으로 방사성핵종을 생산하는 방법들이 개발되었다.

### 가. 인공방사선의 이용

과학기술이 발달함에 따라 인공방사선의 사용분야가 다양해지고, 그 사용기술이 향상되어 왔다. 우리나라에서 방사선발생장치 또는 방사성동위원소 이용 인·허가 받은 기관수는 1999년 약 1,500기관이었으나, 2014년 말 6,600기관 이상으로 크게 증가하였다. 인공방사선 이용 분야는 크게 원자력시설, 의료분야, 산업분야 등으로 구분할 수 있다.

#### (1) 원자력시설

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

우리나라는 1978년 4월 고리원전 1호기의 가동을 시작으로 2016년 현재 미국, 프랑스, 일본, 러시아, 중국에 이어 발전 설비 기준으로 세계 6위의 원자력 강국이 되었다. 현재 국내에는 총 24기의 원전이 가동되고 있으며, 4기의 원전이 건설 중에 있다. 가동 중인 24기의 원전 중 20기는 가압경수로형(18,937 MW<sup>4)</sup>)이고, 4기는 가압중수로형(2,779 MW)이다. 2014년 기준 원자력 발전량은 국내 전체 발전량의 약 33%를 차지하였다.

발전용 이외에 연구용 원자로인 하나로가 운영되고 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 <sup>192</sup>Ir, 의료용 방사성동위원소인 <sup>131</sup>I 등의 인공방사성동위원소는 국내 시장의 높은 점유율을 차지하고 있다.

핵연료주기란 우라늄의 채광, 핵연료로 사용하기 위한 <sup>235</sup>U의 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 핵분열생성물과 남아있는 핵연료물질은 고준위 폐기물이라고 하고, 원자력발전소의 운영 중에 사용했던 작업복, 덧신, 장갑, 폐부품 등과 방사성동위원소를 이용하는 산업체, 병원, 연구기관 등에서 발생하는 동위원소 폐기물 등이 중·저준위 폐기물에 속한다. 대부분의 원자력 선진국에서는 처분 시설을 오래전부터 운영 하고 있으며, 우리나라에서도 경주시에 중·저준위 폐기물 처분시설을 건설하여, 운영하고 있다.

---

4) MW: Mega Watt, 10<sup>6</sup> Watt

## (2) 의료분야

1930년대 후반 싸이클로트론에서 생산된  $^{24}\text{Na}$ ,  $^{32}\text{P}$  등 인공 방사성동위원소의 공급을 시작으로 인공방사선 및 인공방사성 동위원소가 의료분야에 사용되었다. 의료분야의 인공방사선은 크게 진단방사선과 치료방사선으로 구분할 수 있다.

방사선진단은 방사선의 특성 중 투과성을 이용한 것으로서 크게 X-선 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 방사선을 조사하여 투과한 방사선량 정보를 이용하여 판독영상을 얻어내는 기술을 말한다. 또한 단층방식으로 촬영된 이미지를 컴퓨터 기술을 이용하여 3차원으로 이미지를 재구성하는 기술인 전산화단층촬영(CT: Computed Tomography)이 개발되어 사용되고 있다.

핵의학진단이란 인공방사성 동위원소를 이용하여 진단하는 의료분야 중 하나이다. 핵의학진단은 신티카메라로 신체 장기의 형태 및 대사 정보 또는 조직의 기능 정보를 제공하는 이미지를 얻어 진단하는 방법이다. 인공방사성동위원소를 함유한 특정 화합물 형태의 방사성의약품을 인체에 투여한 후 방사성 핵종이 모여드는 표적영역의 결합량을 외부에서 방사선측정을 통해 알아낸다. 핵의학진단법에서 흔하게 사용되는 촬영술은 단일광자방출 단층촬영술(SPECT: Single Photon Emission Computed Tomography)과 양전자방출 단층촬영술(PET: Positron Emission Tomography)이 있다. 단일광자방출 단층촬영술은 감마선 방출 핵종을 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 회전하는 검출기로 분석하는 검사방법이면, 주로 암, 심근경색, 치매의 진단에 사용된다.

방사선치료는 국소 치료방법으로서 고에너지의 방사선을 이용하여 암세포

를 사멸시키는 치료방법이다. 방사선치료는 방사선발생장치의 중심부에서 병소까지의 거리를 일정하게 유지하여 치료하는 원격치료와 밀봉된 방사선원을 환부에 삽입 또는 노출시키는 근접치료로 분류할 수 있다. 원격치료는 대용량 감마선원이나 가속기를 이용하여 방사선이나 빔을 환자에게 조사하는 방사선 치료 방법이다. 고에너지 X-선과 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. 근접 치료에는 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 체관 내 치료, 또는 종양에 직접 침등을 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. 2014년 말 기준 국내에서 인·허가 받은 방사성동위원소 또는 방사선발생장치 이용 기관 중 76%가 산업분야에 속하였다.

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

산업용 방사선촬영 즉 방사선 투시검사는 방사선의 투과성을 이용하는 대표적인 기술이다. 방사선촬영을 통해 물체를 파괴하지 않은 채 외관상으로는 알 수 없는 결함 등 내부 상태를 알아낼 수 있으며, 주로 비파괴검사와 공·항만, 주요시설에서의 검색대에서 주로 사용하고 있다. 비파괴검사는 제품, 재료, 주물이나 용접, 대형 탱크, 배관의 건전성 또는 내부 결함 점검이나 중요 문화재의 수리 및 복원에 사용하고 있다. 공·항만, 주요시설의 검색대는 컨테이너



운송차량, 여행객이나 출입자의 불법물질의 반출입 관리에 사용하고 있다.

방사선가공은 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. 방사선가공의 대표적인 이용에는 고분자 재질가공, 반도체 성능개선, 방사선육종 등이 있다.

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

현대 산업현장에서 방사선발생장치는 첨단 분석기술에 이용된다. 방사선발생장치를 이용한 분석에는 가스 크로마토그래피, 산란·회절 분석, 형광 X-선 분석, 방사화분석 등 이 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 생산되었다. 그리고 시계나 항공기와 선박의 필수 계기판, 비상구 표지, 군용 야간장비에 사용되는 야광물질은 방사성물질이 방출하는 방사선이 형광물질과 작용하여 발광하는 특성을 이용한 것이다. 방사선은 식품에도 이용되는데, 방사선조사를 통해 식품 내의 미생물을 제거하고, 견과류나 근채류 등의 발아를 억제하여 식품을 장기적으로 안전한 위생 상태를 유지할 수 있다. 방사선은 주사기, 붕대 등의 의약품이나 화장품, 건강식품 등의 멸균에도 사용되는데 방사선 멸균은 열이나 화학물질에 약한 재료에 적용할 수 있다.

#### **나. 인공방사선에 의한 일반인의 피폭방사선량**

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

[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 일인당 인공방사선에 의한 평균 연간 유효선량은 0.6 mSv 이다[1.4]. 피폭원별 인공방사선 피폭 수준을 살펴보면, 인공방사선에 의한 피폭의 대부분은 진단 및 치료목적의 의료피폭에 기인한다. 이 외에 핵실험, 직무피폭, 체르노빌 사고 등이 인공방사선 피폭에 기여하는데, 그 양은 극히 미미한 수준이다.

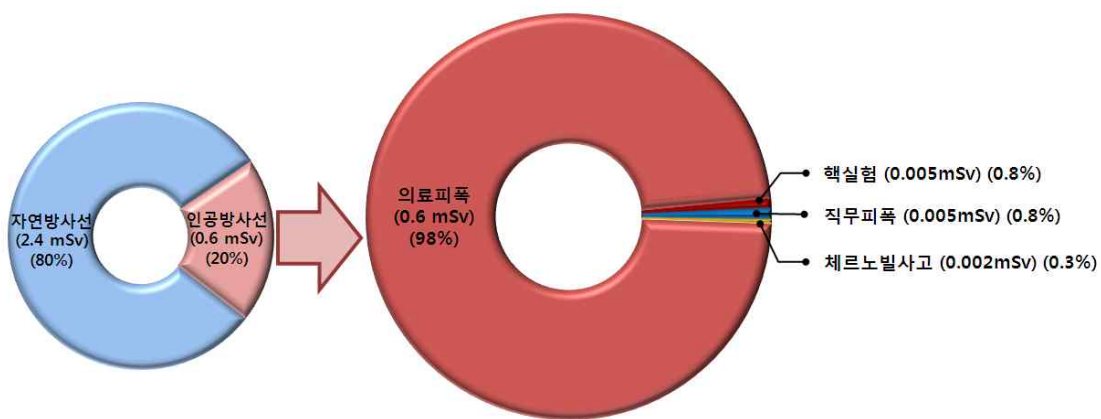


그림 1-4. 피폭원별 인공방사선에 의한 전 세계 평균 연간 유효선량[1.4]

### (1) 의료방사선 피폭

의료방사선 피폭은 질병의 진단 및 치료과정에서 발생하는 방사선피폭을 의미한다. 진단방사선은 그 적용범위가 다양하며 사용건수도 해마다 증가하는 추세이다. 연구 보고에 의하면 1980년대 미국인 일인당 연간 유효선량은 3.6 mSv이었으며, 그 중 약 15%인 0.53 mSv가 의료방사선에 기인하였다[1.6]. 하지만 2006년에는 유효선량이 6.2 mSv로 증가하였으며, 그 중 약 절반인 3.0 mSv가 의료 목적에 의한 것이었다(그림 1-5 참조).

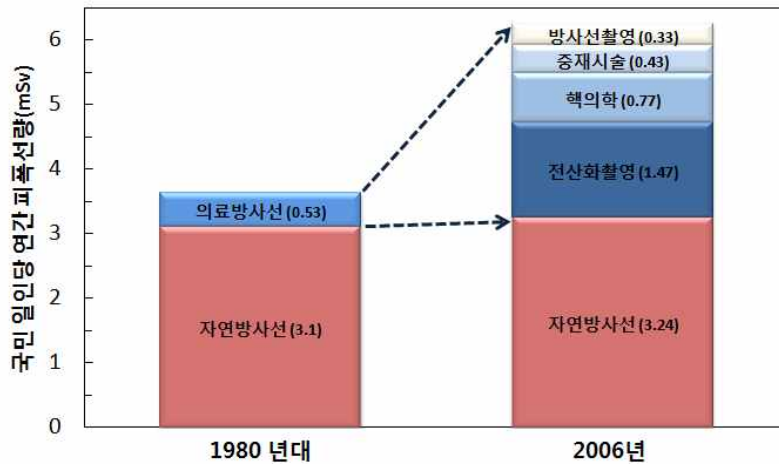


그림 1-5. 방사선원별 미국인의 연간 피폭방사선량[1.6]

식품의약품안전처에서 2007년부터 2011년까지 5년간 국내 의료기관에서 환자들에게 진단을 목적으로 실시한 방사선검사 건수 및 검사 종류별 방사선량 등의 자료를 조사한 결과 크게 증가한 것을 확인하였다[1.7]. 우리나라의 연간 진단용 방사선검사 건수는 2007년 1억6천만 건에서, 2011년 2억2천만 건으로 5년간 약 35% 증가했다. 진단용 방사선에 의한 국민 일인당 연간 유효선량은 2007년 0.93 mSv에서 2011년 1.4 mSv로 5년간 약 51% 증가하였다(그림1-6 참조).

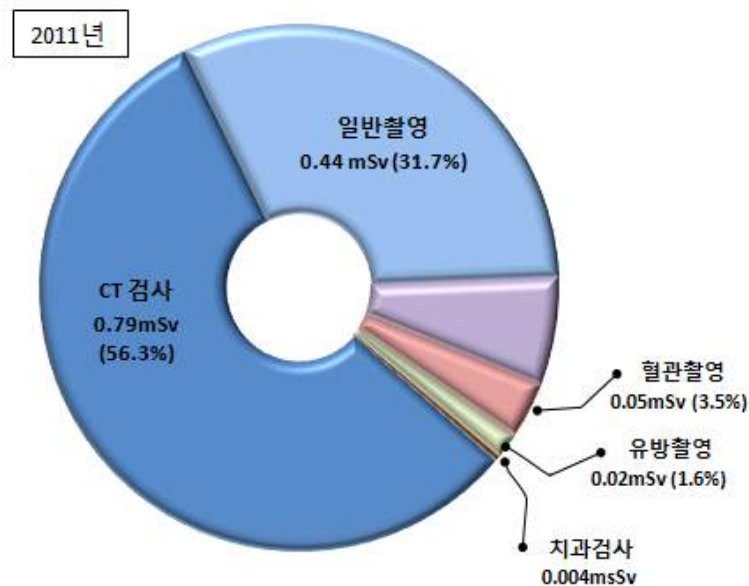


그림 1-6. 국내 진단방사선 검사별 일인당 유효선량[1.7]

## (2) 방사성 낙진에 의한 피폭

방사성낙진이란 핵무기로 인해 대기권으로 방출된 방사성핵종이 환경으로 유입되는 것을 의미한다. 지상에서 핵실험이 이루어졌을 경우 방사성물질은 낙진의 형태로 지표로 떨어진다. 이러한 방사성낙진은 지표에서의 방사선량을 증가시키며, 호흡과 음식물을 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 수백 종류에 달하지만, 대부분은 반감기가 짧거나, 생성량이 적어 실제로 사람들의 피폭에 관여하는 핵종은 한정되어 있다. 이 중에서 방사성낙진에 대해 고려해야할 핵종으로는  $^{14}\text{C}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{95}\text{Zr}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{106}\text{Ru}$ ,  $^{144}\text{Ce}$ ,  $^3\text{H}$ ,  $^{131}\text{I}$ 이 있다. 현재 방사성낙진에 의한 피폭은 1960년대와 비교하여 1/100수준이며 자연방사선 피폭원에 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 일반 국민의 일인당 피폭방사선량은 무시할만한 수준이다.

## (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 방사선작업종사자가 받는 피폭으로서 직업상 피폭으로 부르기도 한다. 원자력발전소 종사자는 물론이고, 의료기관의 의사, 방사선사, 간호사의 피폭도 모두 직무피폭이다.

국내의 경우 2012년 기준으로 직업상 피폭하는 종사자들은 원자력분야, 의료분야, 산업분야, 기타 분야에서 약 42,290명이었다[1.5]. 종사자 분포를 분야

별로 보면 의료분야 종사자가 53%로 가장 많았고, 원자력종사자 21.3%, 산업 분야 종사자 17.5%, 기타 8.3%이다. 가장 많은 피폭을 받은 직군은 핵의학 종사자로서 연간 평균선량이 3.5 mSv이었고, 다음으로 비파괴검사 종사자의 연간 평균선량은 2.6 mSv이었다. 항공승무원도 연간 평균 2.6 mSv의 방사선량을 받는 것으로 평가되었다. 진단방사선 종사자가 1.5 mSv를 받았으며, 원전운영이나 핵연료 가공 종사자의 연간 평균선량은 1.0 mSv이었다. 모든 종사자에 대해 평균한 연간 평균 유효선량은 1.48 mSv이었다. 모든 종사자의 총 집단선량은 연간 92.3 man-Sv이었다. 이에 해당하는 방사선량을 국민 일인당 선량으로 환산하면 연간 개인 평균 방사선량은 0.002 mSv가 된다.

### 1.3 절 저선량 방사선이 인체에 미치는 영향

#### 1. 방사선 피폭

##### 가. 방사선 피폭 유형

방사선 피폭은 방사선원의 위치에 따라 외부피폭과 내부피폭으로 분류한다. 외부피폭은 토양, 해수, 지표수, 공기 등에 존재하는 방사선과 우주선, 즉 인체 외부에 존재하는 방사선원으로부터 피폭하는 것을 의미한다. 외부피폭은 선원 근처를 떠나거나 선원을 다른 곳으로 옮기면 발생하지 않는다. 내부피폭은 생활환경 도처에 존재하는 방사성핵종이 호흡을 통한 흡입과 음식물 등을 통한 섭취 등으로 인하여 체내로 유입되어 체내에서 방출되는 방사선에 의해서 장기, 기관, 조직 등이 피폭하는 것을 의미한다. 방사성물질이 체내에 존재하므로 그 방사능물질이 체외로 완전 배출되거나, 체내에서 완전 붕괴될 때까지 인체는 지속적으로 피폭한다.

##### 나. 방사선 피폭이 인체에 미치는 영향

##### (1) 결정론적 영향 및 확률론적 영향

사람이 일정 수준 이상의 높은 방사선량에 노출될 때 세포 사멸이나 기능장애 등의 유해한 조직반응이 일어남으로써 위해를 입게 되는데, 이를 방사선의 결정론적 영향이라 한다. 결정론적 영향이 일어나기 위해서는 문턱선량 이상의 방사선에 노출되어야 한다. 문턱선량이란 그 방사선량까지는 방사선 영향이 나타나지 않는 최대한의 방사선량을 의미한다. 결정론적 영향의 구체적 증상은 피폭 부위에 따라 다르며, 피폭부위마다 문턱선량 값도 달라진다. 신체적으로 우려할 수준의 문턱선량 값은 1 Sv 이상이다. 이 값은 방사선작업종사자가 일생 동안 받는 방사선량보다 매우 높은 값으로 사고와 같은 특별한 경우가 아니면 결정론적 영향이 발생하긴 힘들다.

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

## (2) 신체적 영향 및 유전적 영향

그림 1-7은 방사선의 생물학적 영향을 신체적 영향과 유전적 영향으로 분류하여 나타내었다. 방사선이 체세포를 손상시켜, 방사선 영향이 피폭 받은 사람에게만 한정적으로 발생하는 것을 신체적 영향이라 한다. 방사선이 생식세포를 손상시켜, 방사선 영향이 다음 세대에 발생하는 것을 유전적 영향이라 한다.

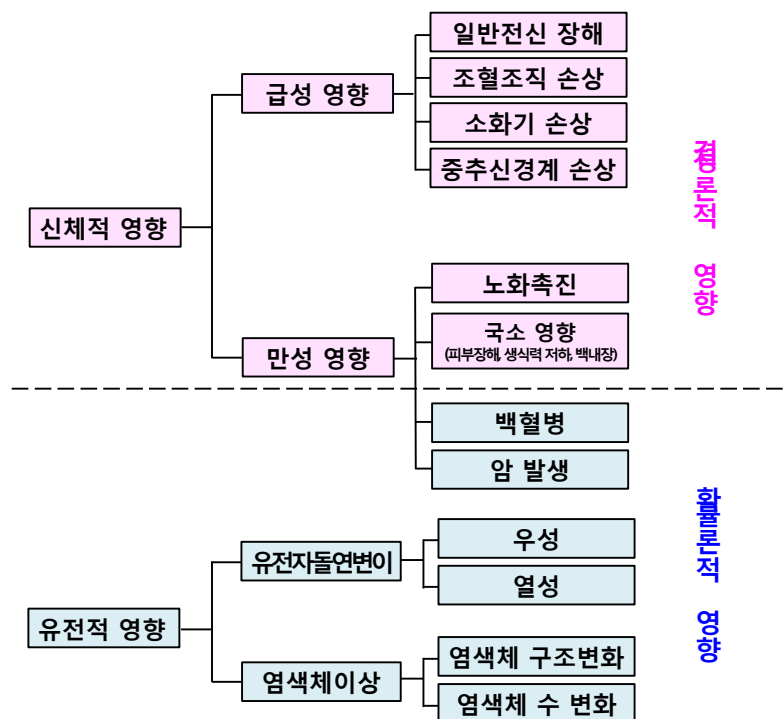


그림 1-7. 방사선의 신체적 영향 및 유전적 영향

신체적 영향은 방사선에 의한 효과가 조기에 나타나는 급성효과와 잠복기 후에 나타나는 만성효과로 분류된다. 수십 일 이내의 짧은 시간동안 전신 또는 이에 필적하는 넓은 신체부위가 비교적 대량의 방사선량을 받는 경우를 급성 피폭이라 한다. 급성피폭에 의한 급성효과들은 피폭 후 수개월 이내에 발생한다. 일반적으로 방사선량에 따라 조혈기장애, 위장장애, 중추신경장애 등이 나타나고, 이는 결정론적 영향에 속한다. 방사선량에 대한 급성효과의 증상은 표 1-4에 나타내었다.

표 1-4. 피폭방사선량에 따른 급성피폭의 증상[1.5]

| 선량 (Sv)   | 증 상   |
|-----------|---|
| 0.25~0.5  | 백혈구, 림프구 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<br>피폭자 30~60%에서 무력증<br>피폭자 20~35%에서 혈구 생산감소 |
| 3~5       | 조혈기능 장애로 수개월 내 100%사망 (LD <sub>50/60</sub> *)               |
| 7~10      | 위장관계 증후군으로 수주~수개월에 100%사망 (LD <sub>100/60</sub> **)         |
| 15이상      | 중추신경계 증후군으로 수주 내에 사망  |

\* LD<sub>50/60</sub> : 전신조사로 인해 피폭한 사람이 60일 이내에 50%가 사망하는 방사선량

\*\* LD<sub>100/60</sub> : 전신조사로 인해 피폭한 사람이 60일 이내에 100%가 사망하는 방사선량

저선량의 방사선을 수개월에서 수년 동안 받는 경우를 만성피폭이라 한다. 만성 영향은 확률론적 영향에 속하는데, 종양, 노화, 수명단축, 유전적 영향 등이 이에 해당한다. 일반적으로 생물학적 영향은 만성피폭이 급성피폭보다 작다. 이는 방사선을 조금씩 장기간 동안 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 의미하며, 일반적으로 100 mSv 이하의 방사선을 의미한다. 국제방사선방호위원회(ICRP)는 100 mSv 또는 그 이하, 미국국립과학원 방사선영향연구회(BEIR : Biological Effects of Ionizing Radiation) VII 보고서<sup>6)</sup>에 의하면 0 mSv에 가까운 방사선량부터 약 100 mSv 사이를 저선량으로 명시하고 있다[1.8]. 1970년대 이전에는 다수의 관련 위원회에서 저선량의 범위를 200 mSv 이하로 규정하였으나, 1974년 미국국립과학원이 방사선의 물리적 생물학적 측면 등을 고려한 결과 100 mSv의 수치가 자연적인 방사선 노출의 수준으로 간주될 수 있다는 결론을 내

5) Lethal Dose

6) 미국과학원이 발표한 저선량 방사능의 인체영향에 관한 보고서



렸으며, 현재까지 이 기준이 일반적인 기준으로 간주되고 있다. 저선량 방사선의 기준으로 사용되는 100 mSv는 연간 자연방사선에 의한 피폭방사선량인 2.4~3.0 mSv의 30~40배에 해당하며, 일반적인 흉부 CT 검사 10~20회를 실시하였을 경우에 해당하는 방사선량이다.

#### 나. 저선량 방사선 영향에 대한 모델

유엔방사선영향과학위원회(UNSCEAR), 국제방사선방호위원회(ICRP), 미국국립과학원(NAS: National Academy of Sciences)<sup>7)</sup> 등의 기구에서 방사선 위해에 대하여 과학적 검토와 평가를 수행하고 있다. 지금까지의 근거에 의하면 대략 100 mSv 이하의 저선량 방사선 구간에서 암 발생 위험에 대해 연구한 여러 문헌이 있으나 그 위험에 대한 근거는 불확실성을 안고 있다.

일반인 피폭 및 의료방사선 노출에 따른 피폭은 대부분 100 mSv 이하의 범위 내에서 발생한다. 현재까지 진행된 대부분의 역학연구에서는 100 mSv 이하의 방사선 피폭에 따른 직접적인 암 발생을 증명하지 못하였으나, 다수의 학회 및 연구기관에서는 저선량 방사선의 영향에 대한 다양한 모델을 제시하고 있다.

미국국립과학원 방사선영향연구회(BEIR)에서는 저선량 방사선의 건강 위해와 관련하여 100 mSv 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 단위 용량 당 위험을 보수적으로 예측하는 모형의 하나로서 매우 적은 피폭도 인체에 위해를 끼칠 수 있다는 것이다. 따라서 이 경우 모델을 통하여 예측된 위험의 불확실성에 대한 부분을 고려해야 한다. 어떠한 방사선량에서도 안전하지 않다는 개념은 근거 없는 두려움을 낳을 수 있으며 제한적인 규제를 증가시킬 수 있다. 국제원자력기구(IAEA)에 따르면 체르노빌 원전 사고 이후 서유럽 전역에서 사고의 영향으로 100,000~200,000 건의 유산이

---

7) 미국 과학자 조직으로 국가발전을 위한 과학 분야의 연구와 조사를 목적으로 설립. 주로 정부 각 부처에 대한 과학과 기술자문을 실시함

이루진 것으로 알려졌다. 국제방사선방호위원회(ICRP)에서는 LNT 모델을 이용한 가정이 방사선방호의 최적화를 위해 필요하다고 인정하지만, 이 모델을 이용하여 큰 인구 집단이 저선량 방사선에 장기간에 피폭하는 것을 가정하여 암 발생률을 예측하여서는 안 된다고 권고하였다[1.1, 1.2].

그림 1-8은 방사선량과 그로 인한 암 발생 위험 관계를 나타내는 방사선의 인체유해성에 대한 선량반응 모델이다. 그림에서 우측 부분은 높은 방사선량 구간을 나타내는데, 일본 원폭 생존자에 대한 추적연구의 결과로 방사선 노출에 따른 암 발생의 위험성이 증명이 된 구간이다. 그래프의 좌측 부분인 낮은 방사선량 구간은 아직 근거가 불충분하여 암 발생과의 연관성이 밝혀지지 않은 부분이다.

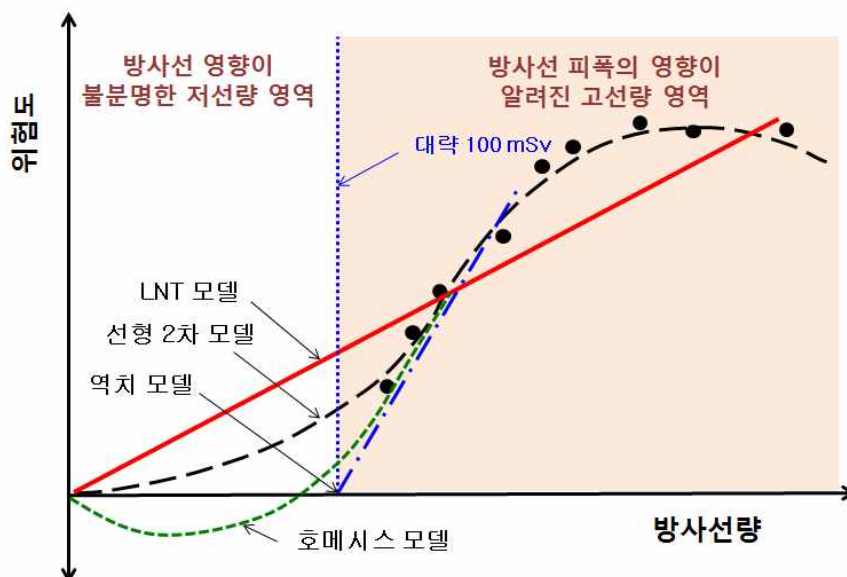


그림 1-8. 방사선의 인체유해성에 대한 선량반응 모델

방사선량 반응모델에서 선형 이차방정식 모델은 방사선량이 증가함에 따라 암 발생의 위험도도 증가하나 타 모델에 비해 완만한 증가 경향을 보인다. 선형 문턱치<sup>8)</sup> 모델은 문턱 없는 선형 모델과 상반된 모델이다. 문턱치 모델은 어떤 문턱치가 존재하여 그 이하에서는 암 발생이 증가하지 않지만 이 수치를 넘어서는 피폭을 받는 경우에는 암 발생 위험도가 방사선량에 비례하여 증가한

8) 생물체가 자극에 대한 반응을 일으키는데 필요한 최소한도의 자극 강도

다는 모델이다. 호메시스 모델은 저선량의 이온화 방사선이 생물에 유익하며, 생체 방어력을 증가시켜 오히려 건강에 유익한 영향을 준다는 것이다.

방사선량과 위험의 관계, 즉 방사선 영향 모델의 형태는 위험을 관리하고 소통하는 방법에 크게 영향을 미친다. LNT 이론에 의하면 방사선량이 증가할수록 위험이 증가하게 되므로 위험관리의 전략은 위험을 최소화하기 위하여 방사선량을 줄이는 것에 집중하게 된다. 실제 완전한 안전을 위하여 위험을 영으로 하는 것은 불가능하므로 위험 감소 접근을 하게 된다. 이것이 현재 방사선 안전관리의 근본 철학인 ALARA(As Low As Reasonably Achievable)<sup>9)</sup>이며, 이 때 방사선량 감소를 위하여 소요되는 사회적, 경제적 요소의 비용과 기대되는 이득은 균형을 이루어야 한다.

방사선 피폭이 초래하는 위험에 문턱치가 존재한다면 방사선 안전관리는 훨씬 용이해질 것이다. 왜냐하면 문턱치 이하의 방사선량에서는 위해가 없다는 것이 확실하기 때문이다. 저선량 방사선에 대한 인체영향 자료가 과거 수십 년 동안 축적되면서 100~700 mSv 사이에 문턱치가 존재할 것이라고 일부 전문가들이 예측하고 있다.

---

9) 국제방사선방호위원회(ICRP)가 권고한 방사선방호의 기본 철학으로 사회적 경제적인 요소들을 감안하여 방사선 피폭의 수준을 합리적으로 달성 가능한 한 감소시킨다는 뜻

## 1.4 절 선량한도의 의미

### 1. 선량한도의 의미

선량한도란 방사선방호 체계의 일환으로서 계획피폭상황<sup>10)</sup>에서 초과해서는 안 되는 방사선량 의미하며, 개인 유효선량이나 등가선량 값으로 나타낸다 [1.2]. 선량한도는 환자 의료피폭이 아닌 직업상 피폭과 일반인 피폭과 같은 계획피폭상황에만 적용된다.

선량한도는 보편적 판단에서 용인 가능한 피폭 수준이며, 한도를 초과하면 위험하고 초과하지 않으면 안전하다는 경계선을 의미하는 것은 아니다. 방사선방호의 기본 논리는 피폭으로 인한 위해는 문턱이 없고 방사선량에 비례함을 가정한 LNT 모델을 기반으로 하고 있다. 단, 이 가정이 매우 작은 방사선량에서도 위험이 실제로 있음을 의미하는 것이 아님에 주의해야한다. 연간 1 mSv를 포함한 100 mSv 이하 저선량의 범위에서 방사선 피폭이 인체에 해로운 영향을 초래하는지 아니면 이로운 영향을 초래하는지 아직 명확한 과학적 근거는 없는 실정이다. 다시 말해서 선량한도는 위해가 없거나 또는 위해를 최소화 하는 방사선방호 목적을 달성하기 위해 적극적으로 피폭방사선량을 관리하기 위하여 설정하는 하나의 지표인 것이다.

### 2. 선량한도 권고

#### 가. 선량한도 권고치의 변화

국제방사선방호위원회(ICRP)에서 1928년 발표한 방사선방호에 대한 권고는 의료용 선원의 취급시간을 제한하는 방법을 통한 의료인 보호에 관한 것이었다 [1.2]. 이 권고에 제시된 방사선량 제한치를 현재 통용되는 단위로 환산하면 연간 약 1,000 mSv 상당의 방사선량으로 평가된다. 초기에 발표된 권고들은 문턱 영향 방지에 대한 정성적 방법으로 시작하였다. 1934년에는 현재 종사자 선량한도의 대략 10배에 해당하는 연간 500 mSv를 권고하였으며, 1951년에는 주당 3 mSv (연간 150 mSv)로 평가되는 선량한도를 제안하였다.

---

10) 방사선 피폭이 충분히 예측되어 사전에 적절한 방호 조치를 강구할 수 있어 계획에 따라 개인선량을 일정 제한치 이내로 관리할 수 있는 피폭상황

군사와 산업 분야에서 원자력 에너지 사용이 확대됨에 따라 1950년대 초기에 일반인 방호를 위한 권고를 도입하였다. 1956년에는 종사자에 대해 50 mSv, 일반인에 대해 5 mSv의 연간 선량한도를 설정하였다. 하지만 확률론적 영향의 가능성과 그러한 유형의 영향에 문턱치 존재 여부를 확인할 수 없다는 사실을 인식하여, 1954년도에는 모든 종류의 전리방사선 피폭을 가능한 최소 준위로 감소시키기 위해 노력해야 한다고 권고하였다. 그 후에는 ‘실행 가능한 낮게’, ‘용이하게 달성할 수 있는 한 낮게’, ‘경제적, 사회적 인자를 고려하여 합리적으로 달성 가능한 낮게<sup>11)</sup>’ 등으로 계속 개선하였다.

1977년 국제방사선방호위원회 권고(ICRP 26 권고)에서 처음으로 방사선의 확률론적 영향 위험을 정량화하였으며, ‘개인선량한도’라는 새로운 원칙을 제안하였다[1.3]. 그 이후 유엔방사선영향과학위원회(UNSCEAR) 및 미국국립과학원 방사선영향연구회(BEIR)에서 수행한 히로시마, 나가사키의 원폭 방사선량 재평가 사업(DS 86 : Dosimetry System 86)에 의해 원폭피폭 데이터의 암사망 확률이 수정되었다. 이로 인해 1990년 국제방사선방호위원회 권고(ICRP 60 권고)에서는 ICRP 26 권고 내용에서 방사선 피폭으로 인한 위험 평가치의 상향조정 등을 수행하여 권고를 대대적으로 개정하였다.

표 1-5. 국제방사선방호위원회(ICRP) 26 및 60 권고에 따른 선량 한도

(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 방사선량 값

11) ALARA(As Low As Reasonably Achievable)

으로 선량한도를 설정하였다[1.1]. 그러나 1980년대에 수행된 일본 원폭피해 생존자에 대한 방사선량 재평가 사업(DS86)의 결과 방사선 위험도가 과거 평가치에 비해 크게 증가하였고, 일반 산업현장에서의 위험도 수준도 변화하였다. 또한 방사선에 의한 치명적 위험만을 고려하는 것이 적절하지 않다는 판단에서 ICRP 60 권고에서는 그 접근방식을 수정하였다. 방사선에 의한 확률론적 영향으로 인한 치명적 위험은 물론 비치명적 위험까지를 고려한 위해계수를 도출하였고, 이를 이용하여 일정 수준의 피폭이 지속될 경우 생애 위험을 평가하여 그 위험이 사회적으로 용인되기 어려운 수준보다 낮게 되는 방사선량 값을 채택하였다.

직업상 피폭의 경우 그림 1-9에 나타난 것처럼 ICRP 26 권고의 선량한도인 50 mSv는 직업상 피폭이 인정되는 18세부터 퇴직까지 계속해서 매년 피폭하는 것을 가정할 때 생애 위험의 추세가 60세 이후 노년기에 용인할 수 있다고 보는 수준인  $10^{-3}/y$ 에 비해 현저히 높아 부적절한 것으로 나타나고 있다. 이보다 낮은 방사선량에 대해 동일한 평가를 반복한 결과 연간 20 mSv의 피폭은 비록 노년기 수년간은  $10^{-3}/y$  수준을 조금 상회하지만 직선이나 곡선 아래의 면적에 해당하는 전체 위험은 충분히 낮기 때문에 20 mSv/y가 새로운 선량한도로 채택되었다.

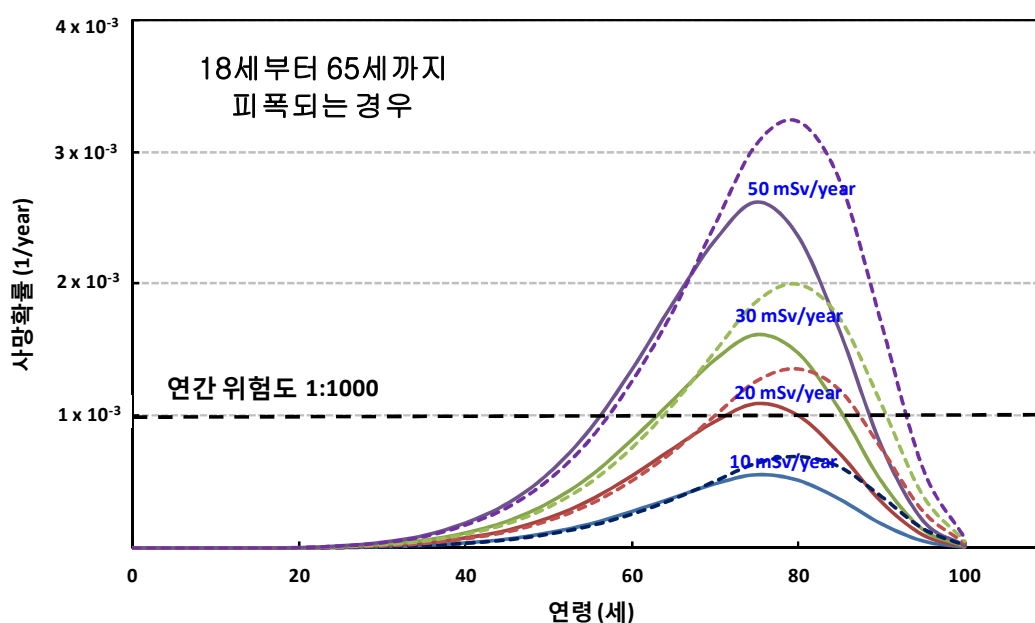


그림 1-9. 직업상 피폭의 선량한도를 설정하기 위한 방사선량에 따른 위험도 평가  
(점선은 남성, 실선은 여성) [1.1]

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. 이를 기반으로 설정한 선량한도는 연간 1 mSv이다.

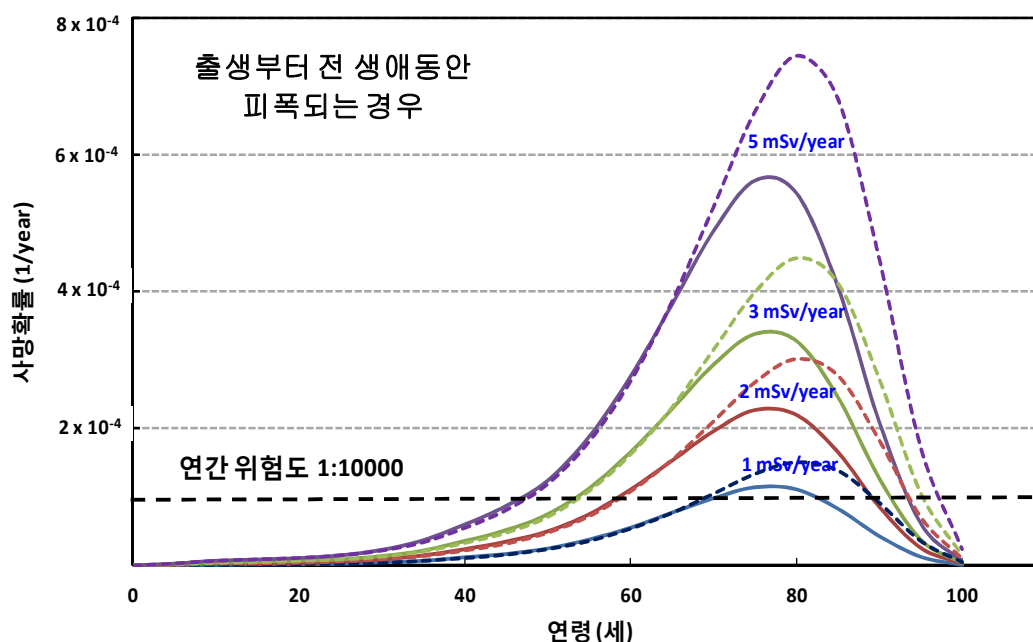


그림 1-10. 일반인의 선량한도를 설정하기 위한 방사선량에 따른 위험도 평가  
(점선은 남성, 실선은 여성) [1.1]

다른 접근 방법으로 누구나 피할 수 없는 자연방사선에 피폭하는 경우를 고려하여 선량한도를 정한다. 유엔방사선영향과학위원회(UNSCEAR)는 공식의 견으로 현재까지의 과학지식과 임상자료를 검토한 결과를 바탕으로 자연방사선에 피폭하여 암이 발생하지는 않는다고 발표하였다. 자연방사선 수준의 피폭에 의해서는 확률론적 영향이 발생하지 않는다고 평가하였다. 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. 이 경우 과학기술적 근거가 불충분하다고 할 수 있으나 방사선방호 목적은 충분히 달성할 수 있다. 저선량 피폭으로 인하여 인체에 위해가 발생하였음을 임상학적으로 분명히 증명할 수 없는 현재의 과학지식과 아무리 작은 방사선량이라도 위해를 줄 수 있다고 가정하는 LNT 가설을 방사선방호의 근거로 하고 있는 현재의 상황에서는 이러한 방법으로 선량한도를

설정하는 것도 가능한 것이다.

### 다. 국내 선량한도

선량한도는 국제방사선방호위원회(ICRP)가 그 값을 권고하고 이를 국가의 규제기관이 받아들여 규정화함으로써 강제규범이 된다. 선량한도 수치는 각 국가의 규제기관이 조정할 수 있으나 일반적으로 국제방사선방호위원회가 권고한 값을 그대로 사용하고 있으며, 국내에서는 ICRP 60 권고를 도입하고 있다. 표 1-6에 국내 원자력안전법에서 정하고 있는 선량한도를 나타내었다. 유효선량만으로는 관리가 미흡한 일부 조직에 대해서는 별도로 등가선량 한도를 부여하고 있다. 일반인에 대해 유효선량 한도를 연간 1 mSv로 하고 있고, 방사선작업종사자와 동일한 방식으로 5년간 평균 1 mSv를 초과하지 않는 범위에서 특별한 1년에 대해서는 1 mSv를 초과함이 인정된다.

표 1-6. 국내 원자력안전법에서 정하고 있는 선량한도

| 구분         |          | 방사선<br>작업종사자                              | 수시출입자 및<br>운반종사자 | 일반인       |
|------------|----------|---|------------------|-----------|
| 유효선량 한도    |          | 연간 50 mS를<br>넘지 않는<br>범위에서 5년간<br>100 mSv | 연간 12 mSv        | 연간 1 mSv* |
| 등가선량<br>한도 | 수정체      | 연간 150 mSv                                | 연간 15 mSv        | 연간 15 mSv |
|            | 손·발 및 피부 | 연간 500 mSv                                | 연간 50 mSv        | 연간 50 mSv |

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

### 3. 일반인 선량한도 1 mSv의 특징

직업상 피폭과 일반인 피폭을 따로 구분하고, 일반인의 연간 선량한도를 1 mSv로 직업상 피폭의 선량한도에 비해 낮게 적용하는 이유는 일반인의 피폭이 다음과 같은 특징을 지니고 있기 때문이다[1.10]. 일반인은 직업상 피폭과 달리 적극적인 방사선 관리 아래 놓여있지 않다. 직업상 피폭의 경우 피폭방사선량 관리 및 건강관리 등을 받고 있으며, 이에 따라 이상 사태가 발생할 경우



그것을 조기에 발견하고 상황에 따라 대처하는 것이 가능하다. 하지만 일반인 피폭의 경우에는 개개인에 대한 관리를 한다는 것이 현실적으로 불가능하다. 일반인에게는 피폭에 따른 직접적인 이익이 돌아가지 않는다. 직업상 피폭의 경우 방사선을 취급하는 업무에 종사함에 따라 급여와 같은 형태의 직접적인 이익이 있지만 일반인에게는 그러한 혜택이 없다. 따라서 일반인 피폭은 직업상 피폭과는 다르게 위험을 감수하는 수준이 낮아야 한다.

직업상 피폭은 특정한 소규모 집단을 대상으로 하지만 일반인 피폭은 그 대상이 불특정 다수이다. 일반인의 구성원에는 어린이도 포함한다. 방사선 작업을 하는 종사자들은 모두 법적으로 만 18세 이상의 성인이지만, 일반인 중에는 상대적으로 방사선에 대한 감수성이 높은 소아나 유아 그룹이 포함되어 있다. 일반인은 피폭에 대한 선택의 자유가 없다. 직업상 피폭은 당사자가 방사선 작업에 종사할 것인가 아닌가에 대해 어떤 식으로든 판단하여 선택할 수 있는 자유를 가지고 있으나, 일반인은 원칙적으로 선택의 자유가 없다. 일반인은 대다수가 자기 자신의 직업과 연관된 위험에도 노출되어 있다. 직업에는 정도는 다르지만 모두 위험이 뒤따르며 일반인의 대부분은 자기 자신의 직업에 종사하고 있다. 따라서 일반인 피폭은 방사선을 취급하지 않는 각 개인의 직업에 따르는 위험에 방사선 피폭으로 인한 위험이 추가된다고 할 수 있다. 따라서 직업상 피폭과 같은 수준으로 선량한도를 설정하는 것은 불합리하다. 일반인의 선량한도를 설정하는 방법으로 자연방사선의 변동 폭인 1 mSv를 사용하는 것은 현재의 활용가능한 과학적 지식과 방사선방호목적의 달성이라는 측면에서 오히려 합리적일 수 있다.

일반인에 대한 선량한도의 대상에서 사고 상황에 따른 피폭, 라돈을 포함한 자연방선 피폭, 우주선 피폭, 진단 및 치료목적의 의료방사선 피폭 등은 제외된다. 주변에 원자력시설(원자력발전소, 방사성폐기물 저장고, 가속기 등)을 운영함에 따라 방사성물질이 시설외부로 방출되어 받게 되는 방사선량만을 고려한다. 국내 모든 원자력시설은 원자력안전법에 의하여 그 운영으로 인하여 일반인이 피폭하는 수준이 선량한도에 크게 못 미치는 일정 기준 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] 한국동위원소협회, 2012년도 방사선이용통계, 2013.
- [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] 한국동위원소협회, 한권으로 끝내는 방사선 장애방어, 2011

## 2장 삼중수소의 방사선학적 특성 및 이용

### 2.1 절 삼중수소의 기원 및 방사선학적 특성

#### 1. 삼중수소의 특성

삼중수소는 수소의 일종이며 핵에 플러스(+) 전기를 띤 양성자 하나와 중성자 두 개가 결합되어 있는 물질로서 전자 1개가 핵 주변궤도를 돌고 있다. 삼중수소의 원자번호 1이지만 원자량은 3인 수소의 가장 무거운 방사성동위원소이다(그림 2-1).

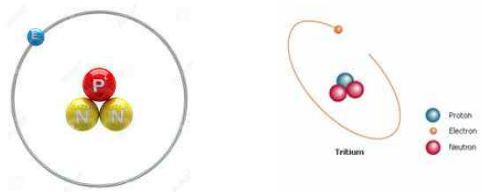


그림 2-1. 삼중수소의 핵과 원자 모형

중수소는 핵에 하나의 양성자와 하나의 중성자가 결합되어 있는 물질로서 방사선을 방출하지 않는 안정동위원소이다. 하지만 삼중수소는 베타(-)붕괴를 하는 방사성동위원소이며 약 12.3년의 물리적인 반감기를 가지고 하나의 베타선과 반중성미자를 방출하며 붕괴하여 안정된 헬륨(He) 원소로 바뀌게 된다.

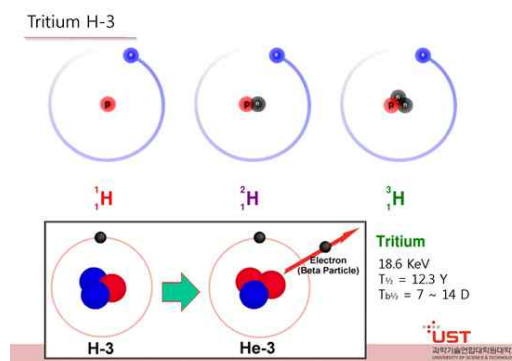


그림 2-2. 수소, 중수소, 삼중수소 동위원소의 핵과 원자 모형 및 삼중수소 붕괴모형

삼중수소의 붕괴식은 다음과 같으며 붕괴 과정을 모형으로 나타낸 것은 아래의 그림 2-3과 같다.

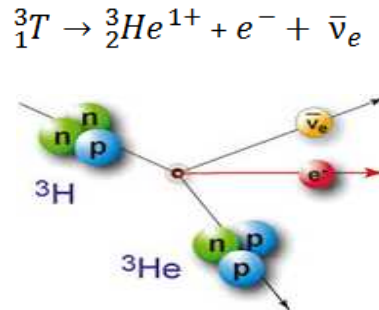


그림 2-3. 삼중수소 붕괴과정 모형

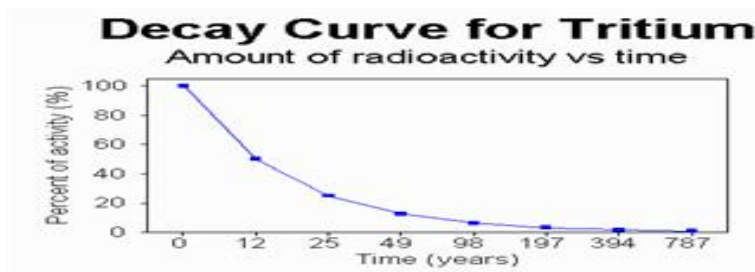
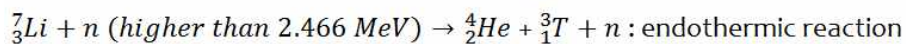
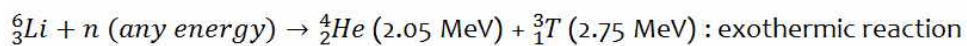


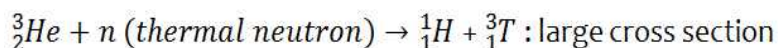
그림 2-4. 삼중수소의 붕괴 곡선

## 2. 삼중수소의 생성 반응

리튬-6, 리튬-7, 붕소-10, 중수소에 의한 삼중수소의 생성반응은 다음과 같다.



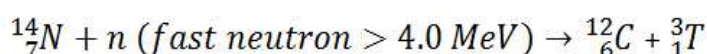
헬륨-3와 열중성자 반응에 의해 생성되는 삼중수소 생성반응은 다음과 같다.



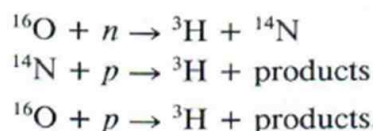
한편 삼중수소는 우라늄과 플루토늄의 핵분열( ${}^{233}\text{U}$ ,  ${}^{235}\text{U}$ ,  ${}^{239}\text{Pu}$ )에 의해서

도 생성이 될 수 있는데 약 1만 번의 핵분열 당 하나의 삼중수소가 생성되는 것으로 알려져 있다. 이때 핵분열 조각은 보통의 두 조각이 아닌 세 조각의 파편 중 하나가 삼중수소가 된다.

우주, 특히 태양으로부터 날아오는 우주선인 고에너지의 중성자가 대기 중의 질소와 반응하여 삼중수소와 탄소-12가 생성되기도 하는데 이때 고속 중성자의 에너지는 4.0 MeV 이상이 되어야만 삼중수소를 생성할 수 있는 것으로 알려져 있다. 우주선(중성자)과 질소에 의한 삼중수소 생성반응은 다음과 같다.



또한 삼중수소는 태양 (solar flare)이나 별에서 직접 분출되기도 하는데 그 생성률은 0.1 tritium/cm<sup>2</sup>/sec이다. 한편, 양성자가 존재할 경우 산소 또는 질소 원소와 반응하여 삼중수소가 생성되기도 한다.



산소 및 질소와 중성자가 반응하여 대기 중에서 생성되는 양은 연간 2,500 atoms/m<sup>2</sup>이며 2011년 기준 지구 삼중수소의 총량은 1,275 PBq이다(표 2-1).

표 2-1. 자연 방사성동위원소의 생성률 및 지구 총량

| Nuclides         | Global Production Rate                                   |                         | Global inventory<br>(P.Bq) |
|------------------|--|-------------------------|----------------------------|
|                  | Per unit area (atoms. m <sup>-2</sup> .s <sup>-1</sup> ) | (PBq .y <sup>-1</sup> ) |                            |
| <sup>3</sup> H   | 2500   | 72                      | 1275                       |
| <sup>7</sup> B   | 810  | 1960                    | 413                        |
| <sup>10</sup> B  | 450  | 0.000064                | 230                        |
| <sup>14</sup> C  | 25000  | 1.54                    | 12750                      |
| <sup>22</sup> Na | 0.86   | 0.12                    | 0.44                       |
| <sup>26</sup> Al | 1.4  | 0.000001                | 0.71                       |
| <sup>32</sup> Si | 1.6  | 0.00087                 | 0.82                       |
| <sup>32</sup> P  | 8.1  | 73                      | 4.1                        |
| <sup>33</sup> P  | 6.8  | 35                      | 3.5                        |
| <sup>35</sup> S  | 14   | 21                      | 7.1                        |
| <sup>36</sup> Cl | 11   | 0.000013                | 5.6                        |
| <sup>37</sup> Ar | 8.3  | 31                      | 4.2                        |
| <sup>39</sup> Ar | 56   | 0.074                   | .6                         |
| <sup>81</sup> Kr | 0.01   | 1.7 × 10 <sup>-8</sup>  | 0.005                      |

연간 대기 중에서 생성되는 삼중수소의 생성량은 약 148,000 TBq/y이며 지구 전체적으로 현재 2,590,000 TBq의 삼중수소가 존재하는 것으로 알려져 있다. 하지만 수소의 원자가 워낙 많으므로 지구상 수소의  $1/10^{18}$  만이 삼중수소(T)이며 이러한 삼중수소는 주로 산소와 반응하여 물과 수증기 형태인 HTO 형태로 존재한다.

### 3. 삼중수소의 특징 및 인체내 거동

#### 가. 유기결합삼중수소 (OBT)

기체형태인 삼중수소 HT는 확산 또는 호흡 과정을 통해, 그리고 액체 형태인 HTO 및  $T_2O$ 는 흡입, 확산 또는 섭식에 의해 생물체 내로 유입된다. 호흡이나 확산을 통해 생물체 내로 유입된 삼중수소의 대부분은 혈액 등 조직 자유수에 함유된 조직자유수삼중수소(TFWT; Tissue Free Water Tritium)의 형태로 존재한다. 그러나 생물체에 유입된 삼중수소의 일부는 탄수화물, 지질, 단백질, 핵산 등의 유기물질과 결합하여 유기결합삼중수소(OBT; Organically Bound Tritium)을 이룬다[2.1]. 삼중수소 원자가 산소, 황, 질소 또는 인과 결합된 경우를 치환가능유기결합삼중수소(Exchangeable OBT)라 하는데, 이는 조직수 또는 세포수에 존재하는 수소와 쉽사리 치환이 일어날 수 있기 때문이다. 반면에 삼중수소 원자가 효소반응을 통하여 탄소 원자와 결합되는 경우 그 분자가 대사과정을 거쳐 분해 및 변환될 때까지 고정되어 있게 되므로 이를 고정유기결합삼중수소(Fixed OBT)라 부른다. 고정유기결합삼중수소는 생물체 내에 머무는 시간이 길어짐에 따라 피폭선량에 대한 기여도가 높다.

한편, 식물이 광합성으로 유기물을 합성하는 과정에서 고정된 OBT가 식물의 가식부로 전이된 것이나 OBT를 함유하고 있는 동물(조직)을 섭식할 경우 직접적으로 체내에 OBT를 축적시키는 결과를 가져올 수 있다. 섭취를 통해 체내에 유입된 OBT는 HTO에 비해 체내에 오래 머물 뿐 아니라 더 많은 피폭을 일으킬 수 있기 때문에 관심의 대상이 되고 있다.

### 나. 인체 내 삼중수소의 유효 반감기 (Biological Half-Life)

HTO의 인체 생물학적 반감기는 세 개의 요소로 구성된다, 첫 번째 요소는 약 9일, 두 번째 요소는 30일, 그리고 세 번째 요소는 450일에 상응한다 [NCRP 1979]. 표준인간(Reference Man) 물 수치를 이용하면 다음과 같은 반감기 계산이 나온다[ICRP 1978].

$$T = 0.693 \times (\text{체액량: } 42 \text{ kg}) / (1\text{일물섭취량: } 3 \text{ kg}) = 9.7 \text{ 일.}$$

유효반감기의 첫 번째 요소가 위 계산결과와 거의 같다는 점을 감안한다면 이 요소는 인체의 물 대사와 직결되어 있다는 것을 알 수 있다.

OBT는 상대적으로 체내에 머무는 기간이 길기 때문에 유효반감기 또한 길다. 표준인간 탄소수치를 이용하여 반감기를 계산해 보면 다음과 같은데 이 값은 유효반감기의 두 번째 요소와 거의 유사한 값을 나타낸다.

$$T = 0.693 \times (\text{총 탄소량: } 16 \text{ kg}) / (1\text{일 탄소 섭취량: } 0.3 \text{ kg}) = 37 \text{ 일.}$$

한편, 실험자료에 따르면 뇌와 지방조직의 지질과 콜라겐 분획에 함유된 삼중수소의 경우 훨씬 긴 반감기를 나타내는데 이것이 유효반감기의 세 번째 요소에 상응하는 것으로 판단된다[2.2].

### 다. 삼중수소의 인체내 거동

삼중수소의 비방사능은  $3.56 \times 10^{14}$  Bq/g이며 방출하는 베타선의 평균에너지는 5.7 keV이다. 베타선의 낮은 에너지로 인해 공기 중 비정은 약 6 mm로 피부의 각질층을 통과할 수 없으므로 외부피폭은 문제가 되지 않을 뿐 아니라 체내에서도 여타의 방사성원소에 비해서 붕괴 당 방사선량 기여도가 매우 낮다. 생체조직 내에서 삼중수소 베타 입자의 비정은 약 6  $\mu\text{m}$ 이며 일반적인 세포의 크기인 7~30  $\mu\text{m}$ 에 비하면 매우 짧은 비정이다[2.3].

인체 세포핵 크기와 유사한 직경 5  $\mu\text{m}$ 의 구체를 삼중수소 베타 입자가 1회 적중했을 때의 평균 방사선량은 11.2 mSv에 해당한다. 삼중수소 농도 20 Bq/L의 방사능으로 인한 예탁선량(committed dose)은 0.286  $\mu\text{Sv}$ 이며 이에

따른 세포핵 적중 빈도는 2.5/100,000 cells이다[2.4].

삼중수소의 세포핵 적중 빈도를  $^{40}\text{K}$ 의 것과 비교하면 다음과 같다. 인체에 존재하는  $^{40}\text{K}$  방사능으로부터 연조직이 받는 선량은 연간 180  $\mu\text{Sv}$ 이므로 이에 따른 세포핵 적중 빈도는 2/100 cells이다. 따라서 20 Bq/L의 삼중수소에 의한 영향은 자연적으로 인체에 존재하는  $^{40}\text{K}$  영향에 비하면 매우 미미한 수준 (1/630)이다.

삼중수소( $^3\text{H}$ )는 독성이 강한 방사성 핵종은 아니지만 중수를 냉각·감속제로 사용하는 CANDU (CANadian Deutrium Uranium)형 원자로에서 다량으로 생성되며 주로 물이나 수증기(HTO)의 형태로 작업장에 분포하게 되므로 제거나 회수가 완전히 이루어질 수 없어 작업자들의 체내피폭에 기여하게 되고 이에 따라 삼중수소에 의한 중수로 원전 작업자의 피폭선량은 연간 총 집단피폭선량의 약 20~30% 정도를 차지한다. 삼중수소의 체내 잔류시간은 나이와 계절에 따라 약간의 영향을 받으며 개인차도 커서 동일한 조건에서도 개인에 따라 두 배 이상의 차이가 날 수도 있다. 보통 나이가 많아질수록 생물학적 반감기는 길어지며 여름보다는 겨울에 생물학적 반감기가 더욱 길어지는 경향이 있다. 삼중수소의 생물학적 반감기는 실험적으로 구해졌는데 90%의 신뢰도에 따른 분석 결과 9.5 ( $\pm 4.1$ )일로, 95%의 신뢰구간에서는 5일에서 14일까지로 알려져 있다.

삼중수소는 화학적 특성이 물과 같으므로 호흡과 피부를 통해 섭취와 흡수가 이루어지며 섭취 후 수 시간이 지나면 전신의 체액에 골고루 분포한다. 체액으로 흡수된 삼중수소의 일부는 세포조직을 구성하는데 사용되며 조직에 흡수된 삼중수소는 체액내의 삼중수소보다 훨씬 긴 생물학적 반감기를 갖게 된다. 삼중수소에서 발생되는 베타선은 비정(range)이 짧기 때문에(물에서 maximum track length는 6.0  $\mu\text{m}$ ) 외부피폭에는 거의 기여하지 않는다. 즉 사람의 피부는 20~100  $\mu\text{m}$  두께의 표피(epidermis)와 1~3 mm 두께의 진피(derma)로 구성되어 있는데 피부암을 일으키거나 기타의 피부손상을 야기하는 표적세포(target cell)는 표피의 기저층과 진피층에만 존재하므로 삼중수소의 비정으로는 표적세포에 도달할 수 없기 때문이다.

체액내의 삼중수소는 체내의 생체분자중의 수소원자와 대사적으로 (metabolically) 치환된다. 체내 삼중수소의 대사와 보류는 화학적 결합 형태



에 따라 좌우되는데 체액내의 수소원자와 결합되어 있는 산소, 질소, 인, 또는 황 원자와 쉽게 치환되어 결합된다. 이러한 형태로 치환된 삼중수소는 치환가능 삼중수소결합(exchangeable bound tritium)이라고 한다. 삼중수소는 또한 생체분자의 탄소와 결합되어 있는 수소와 대사적으로 치환될 수 있다. 탄소와 결합되면 삼중수소는 쉽게 제거되지 않는데 이러한 결합을 쉽게 치환불가 삼중수소 결합(nonexchangeable bound tritium) 또는 유기결합삼중수소(OBT - Organically bound tritium)라고 한다. 이렇게 결합된 삼중수소는 효소적인 붕괴(enzymatic breakdown) 방법으로만 분리될 수 있다. OBT 형태의 치환은 개념적인 설명만 가능하며 실험적으로 정량화 할 수 있는 방법이 아직 확립되어 있지 않았다.

삼중수소는 특정 결정장기가 없으므로 인체 내의 모든 연조직(Soft tissue)이 표적조직이 되고 삼중수소에서 방출되는 베타선과 제동복사 방사선이 인체의 내부 피폭에만 기여한다.

삼중수소 화합물은 Tritiated Water (HTO), Tritium Gas (HT, T<sub>2</sub>), Tritium Compounds - Insoluble Compounds, Labeled Organic Compounds, Labeled DNA Precursors의 3가지 범주로 구분할 수 있으며 이중 Tritiated Water (HTO)에 의한 피폭이 삼중수소 피폭방사선량의 거의 대부분을 차지한다.

다음의 표 2-2는 삼중수소의 물리, 화학적 및 방사선학적 특성을 요약한 것이다. 그리고 표 2-3은 삼중수소의 주요 핵적특성을 나타내었다.

표 2-2. 삼중수소의 물리 화학적 및 방사선학적 특성\*

| 특 성                              | 수 치  |
|----------------------------------|--|
| Half-life                        | 12.35 y  |
| Decay constant                   | $5.6 \times 10^{-2} \text{ y}^{-1}$<br>$1.780 \times 10^{-9} \text{ s}^{-1}$ |
| Nuclear recoil ( $^3\text{He}$ ) |  |
| Recoil energy                    | 0 - 3 eV   |
| Excitation energy                | ~ 11 eV  |
| Characteristic of $\beta^-$      |  |
| Average energy                   | 5.685 keV  |
| Maximum energy                   | 18.6 keV   |
| Average track length (water)     | 0.56 $\mu\text{m}$   |
| Maximum track length (water)     | 6.0 $\mu\text{m}$  |
| Maximum track length (air)       | 5 mm   |
| Lineal energy (peak)             | ~ 3 keV $\mu\text{m}^{-1}$   |
| Lineal energy (range)            | 0.03 - 8 keV $\mu\text{m}^{-1}$  |

\*Modified from Okada and Momoshima (1993).

표 2-3. 삼중수소의 주요 핵적 특성\*

| 특 성                             | 수 치                      |
|---------------------------------|--------------------------|
| Half-life                       | 12.43 y                  |
| Specific Activity               | 9,545 Ci/g               |
| Power Density                   | 0.328 W/g                |
| Activity Density                |                          |
| T <sub>2</sub> gas, 1atm, 0 °C  | 2.589 Ci/cm <sup>3</sup> |
| T <sub>2</sub> gas, 1atm, 25 °C | 2.372 Ci/cm <sup>3</sup> |

\* <http://www.hfbr.bnl.gov/hfbrweb/h1079t2.gif>

표 2-4. 삼중수소의 생물학적 특성\*

| 특 성                         | 수 치  |
|-----------------------------|------|
| Effective half-life (human) |      |
| First component             | 10 d |
| Second component            | 40 d |
| Quality factor              | 1.0  |

\*ICRP 56 (1989).

위의 표 2-4는 삼중수소의 생물학적 특성을 요약한 것이며 아래의 표 2-5는 HTO 형태의 삼중수소 인체 섭취 시 생물학적 반감기 연구결과를 요약한 것이다.

표 2-5. HTO 섭취에 따른 인체 내에서의 삼중수소 제거 반감기 연구 결과\*

| Reference                 | Number of Cases | Duration of the study | Biological Half-life (d)* |                  |                  |
|---------------------------|-----------------|-----------------------|---------------------------|------------------|------------------|
|                           |                 |                       | TBW                       | OBT <sub>1</sub> | OBT <sub>2</sub> |
| Butler and Leroy (1965)   | 310             | –                     | 4-18                      | – –              |                  |
| Osborne (1966)            | 30              | –                     | 6.4-14.4                  | – –              |                  |
| Sanders and Reinig (1968) | 1               | 415                   | 6.1                       | 23.4             | 344              |
| Snyders et al. (1968)     | 1               | 255                   | 8.7                       | 34.0             | –                |
| Balanov et al. (1974)     | 6               | 300                   | 12                        | 32-76            | –                |
| Pinson and Langham (1980) | 9               | –                     | 11.3                      | – –              |                  |
| Rudran (1988)             | 8               | 280                   | 3.3-7.7                   | 31-131           | –                |
| Trivedi et al. (1995a)    | 8               | 300                   | 5.0-12.8                  | 58-104           | –                |

\* Modified from Trivedi et al. (1995a); TBW, tritium in body water; OBT<sub>1</sub>, tritium in OBT(Organic Bound Tritium) fraction 1; OBT<sub>2</sub>, tritium in OBT fraction 2.

## 2.2 절 생리역동학 모델 및 선량평가 방법

### 1. 연간섭취한도기준

현재 국내 원자력법령 체계에서는 ICRP 60 권고의 제도 반영으로 원자력 관계시설에 종사하는 방사선 작업종사자에 대한 선량한도 적용 시 유효선량 개념을 적용하도록 규정하고 있으며 2003년부터 체외피폭선량과 체내피폭선량을 합산하여 정부에 보고하고 있다.

삼중수소뿐만 아니라 방사선방호를 위한 모든 방사성 핵종의 체내피폭 선량평가 방법은 크게 In-vivo 측정법과 In-vitro 측정법으로 나눌 수 있으며 두 가지 방법은 상호 보완적으로 사용하여야 하나 인체 외부에서 방사선검출기로 체내의 방사능을 직접 측정하는 방식인 In-vivo 측정법으로 평가할 수 없는 방사성 핵종에 대해서는 생체시료 등을 분석하는 In-vitro 측정법(bioassay)을 사용하여 피폭방사선량을 평가해야 한다. 인체에 섭취(intake)된 삼중수소(Tritium,  $^3\text{H}$ )는 In-vitro 측정법으로만 평가할 수 있는 가장 대표적인 방사성 핵종이며 현재 국내 방사선작업자의 체내피폭선량에 가장 많은 기여를 하는 핵종이기도 하다.

우리나라에서는 678.7 MWe 용량의 가압중수로(CANDU)인 월성 1호기가 83년부터 상업운전을 시작하여 가동 중에 있고 700 MWe급의 월성 2, 3, 4호기가 건설되어 각각 1997, 1998, 1999년부터 상업운전을 개시하였으며 이에 따라 삼중수소에 의한 작업자의 총 집단선량은 가동연수가 증가할수록 늘어났으나 2007년 삼중수소 제거설비의 본격 가동으로 환경으로의 삼중수소 방출량과 작업자의 피폭량은 감소하는 경향을 나타내고 있다.

우리나라의 원자력안전위원회 고시 제2014-34호 “방사선방호등에 관한 기준”의 별표 3에는 방사성물질의 연간섭취한도와 유도공기중농도 그리고 배출관리기준이 제시되어 있으며 아래의 표 2-6에 삼중수소에 관한 기준을 나타내었다.

표 2-6. 삼중수소의 연간섭취한도(ALI) 및 유도공기중 농도(DAC)

| 핵 종 | 흡 입                        |            |             |                | 섭 취               |            |                |
|-----|----------------------------|------------|-------------|----------------|-------------------|------------|----------------|
|     | 화학적 형태                     | 연간<br>섭취한도 | 유도<br>공기중농도 | 배기중의<br>배출관리기준 | 화학적 형태            | 연간<br>섭취한도 | 배수중의<br>배출관리기준 |
|     |                            | Bq         | Bq/m3       | Bq/m3          |                   | Bq         | Bq/m3          |
| H-3 | G,삼중수소가 결합된 물<br>(피부흡수 포함) | 1E+09      | 3E+05       | 3E+03          | 삼중수소가 결합된 물       | 1E+09      | 4E+07          |
|     | G,유기적으로 결합된<br>삼중수소        | 5E+08      | 2E+05       | 2E+03          | 유기적으로 결합된<br>삼중수소 | 5E+08      | 2E+07          |
|     | G,원소상태의 삼중수소               | 1E+13      | 5E+09       | 4E+07          |                   |            |                |
|     | G,삼중수소가 결합된 메탄             | 1E+11      | 5E+07       | 4E+05          |                   |            |                |

※ 원자력안전위원회 고시 제2014-34호 ‘방사선방호 등에 관한 기준’ 별표 3

## 2. 생리역동학 모델

삼중수소에 의한 내부피폭 선량평가를 위해서는 삼중수소의 생리역동학 모델이 필요하며 ICRP 78에서 제공하고 있는 삼중수소의 생리역동학 모델은 아래의 그림 2-5와 같다.

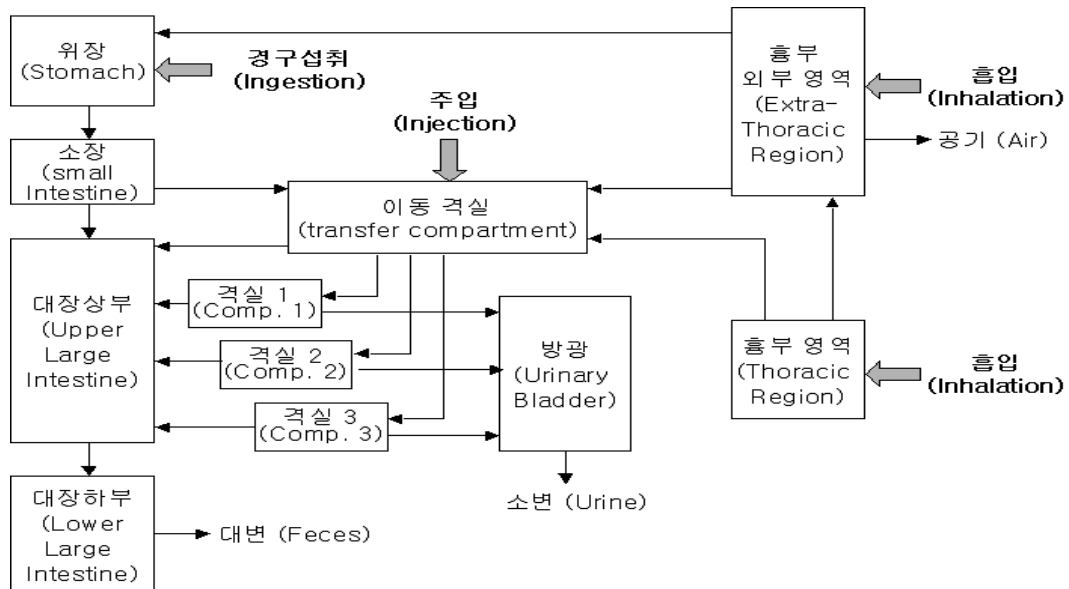


그림 2-5. 삼중수소의 생리역동학 모델 (ICRP 78)

수소, 코발트, 루테튬, 세슘, 캘리포늄에 대한 일반화된 격실 모델

국제방사선방호위원회에서는 선량평가를 손쉽게 할 수 있도록 삼중수소의 단위섭취에 따른 유효선량 값을 선량계수(dose coefficient)로 제시하고 있으며 성인 및 유아의 경우에 대하여 호흡에 의한 흡입과 경구섭취에 의한 인체 내 섭취의 선량계수를 아래 표에 제시하였다. 아울러 성인의 경우 체내에 보통 4,000~8,000 Bq을 보유하고 있는 자연방사성물질  $^{40}\text{K}$ 과 인공방사성물질인  $^{131}\text{I}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  등의 선량계수와도 비교하였다. 이 값은 모두 급성 단일섭취의 경우를 가정한 값이다.

표 2-7. 성인 기준, 흡입에 의한 선량계수 비교

| 핵종        | 선량계수 [ $\text{mSv}\cdot\text{Bq}^{-1}$ ] | H-3과 비교 [times] |
|-----------|--|-----------------|
| H-3       | 6.20E-09                                 | 1.00E+00        |
| K-40      | 2.10E-06                                 | 3.39E+02        |
| Co-60     | 1.00E-05                                 | 1.61E+03        |
| Sr-90     | 1.60E-04                                 | 2.58E+04        |
| I-131     | 7.40E-06                                 | 1.19E+03        |
| Cs-137    | 4.60E-06                                 | 7.42E+02        |
| Th-232(F) | 1.10E-01                                 | 1.77E+07        |
| Pu-239(F) | 1.20E-01                                 | 1.94E+07        |

표 2-8. 성인 기준, 경구섭취에 의한 선량계수 비교

| 핵종     | 선량계수 [ $\text{mSv}\cdot\text{Bq}^{-1}$ ] | H-3과 비교 [times] |
|--------|--|-----------------|
| H-3    | 1.80E-08                                 | 1.00E+00        |
| K-40   | 6.20E-06                                 | 3.44E+02        |
| Co-60  | 3.40E-06                                 | 1.89E+02        |
| Sr-90  | 2.80E-05                                 | 1.56E+03        |
| I-131  | 2.20E-05                                 | 1.22E+03        |
| Cs-137 | 1.30E-05                                 | 7.22E+02        |
| Th-232 | 2.30E-04                                 | 1.28E+04        |
| Pu-239 | 2.50E-04                                 | 1.39E+04        |

표 2-9. 어린이 (3세 ~ 7세) 기준, 흡입에 의한 선량계수 비교

| 핵종        | 선량계수 [ $\text{mSv} \cdot \text{Bq}^{-1}$ ] | H-3과 비교 [times] |
|-----------|--|-----------------|
| H-3       | 1.10E-08                                   | 1.00E+00        |
| K-40      | 7.50E-06                                   | 6.82E+02        |
| Co-60     | 2.10E-05                                   | 1.91E+03        |
| Sr-90     | 2.70E-04                                   | 2.45E+04        |
| I-131     | 3.70E-05                                   | 3.36E+03        |
| Cs-137    | 3.60E-06                                   | 3.27E+02        |
| Th-232(F) | 1.60E-01                                   | 1.45E+07        |
| Pu-239(F) | 1.50E-01                                   | 1.36E+07        |

표 2-10. 어린이 (3세 ~ 7세) 기준, 경구섭취에 의한 선량계수 비교

| 핵종     | 선량계수 [ $\text{mSv} \cdot \text{Bq}^{-1}$ ] | H-3과 비교 [times] |
|--------|--|-----------------|
| H-3    | 3.10E-08                                   | 1.00E+00        |
| K-40   | 2.10E-05                                   | 6.77E+02        |
| Co-60  | 1.70E-05                                   | 5.48E+02        |
| Sr-90  | 4.70E-05                                   | 1.52E+03        |
| I-131  | 1.00E-04                                   | 3.23E+03        |
| Cs-137 | 9.60E-06                                   | 3.10E+02        |
| Th-232 | 3.50E-04                                   | 1.13E+04        |
| Pu-239 | 3.30E-04                                   | 1.06E+04        |

한편 국제 식품규격위원회의 규격과 지침에서는 삼중수소에 대한 식품 방사능 지침 준위 및 예상선량을 제시하고 있다. 개입면제준위 연간 1 mSv, 식품의 오염비율 0.1, 연간 식품섭취량은 성인의 경우 550 kg, 영아의 경우 연간 200 kg을 가정하였을 때 삼중수소가 포함되어 있는 IV 군(H-3)의 지침 준위(GL) 조정값 및 조정값 적용 시 예상선량은 다음과 같다.

- 영아 : 1,000 Bq/kg (0.0024 mSv/y)
- 성인 : 10,000 Bq/kg (0.0231 mSv/y)

여기서 지침준위 조정값은 지침준위(GL) 값으로부터 도출되었으며 지침준위는 다음의 식으로부터 유도되었다.

$$GL\left(\frac{\text{Bq}}{\text{kg}}\right) = \frac{\text{개입면제준위 선량 } [\text{mSv} \cdot \text{y}^{-1}]}{\text{연간식품총 섭취량 } [\text{kg} \cdot \text{y}^{-1}] \cdot \text{오염식품비율} \cdot \text{선량계수 } [\text{Sv} \cdot \text{Bq}^{-1}]}$$

세계 주요 나라의 음용수 중 삼중수소 농도 한도에 대한 기준은 다음의 표 2-11과 같다. 일반적으로 특정 농도의 삼중수소가 함유된 물을 매일 계속해서 마실 경우, 소변중의 삼중수소 농도 또한 섭취한 물의 농도와 비슷한 농도가 될 수 있을 것으로 예상할 수 있으며 오히려 방광에서의 농축현상에 의해 섭취 시 물의 농도보다 약간 높게 측정될 수 있다.

표 2-11. 세계 주요 나라의 음용수 중 삼중수소 농도 한도

| 국가         | 삼중수소 농도 한도(Bq/L) |
|------------|------------------|
| 호주         | 74,103           |
| 핀란드        | 30,000           |
| WHO        | 10,000           |
| 스위스        | 10,000           |
| 러시아        | 7,700            |
| 캐나다 (온타리오) | 7,000            |
| 미국         | 740              |

### 3. 체내피폭방사선량 평가

#### 가. 소변시료를 이용한 체내피폭방사선량 평가

##### (1) 소변시료의 분석<sup>12)</sup>

일반적인 생체시료로 사용되는 시료의 종류는 혈액, 혈장 & 혈청, 뇨(尿), 분(糞), 조직 시료 등이 있다. 소변시료 분석의 가장 큰 단점은 이동성 핵종만이 예측가능한 방법과 양으로 소변을 통해 배설된다는 것이다. 흡입에 의한 방사성 핵종의 대부분은 이동성 핵종이 아니다. 즉, 폐로부터 혈액으로의 전이가 아주 일부분에 대해 큰 변수를 가지고 일어나고 이로 인해 소변시료의 분석으로부터 체내 보유량의 평가를 불가능하게 하거나 신뢰할 수 없게 한다. 따라서 소변시료 분석을 통한 선량평가에는 비 이동성 핵종 여부의 확인이 선행되어야 한다.

삼중수소는 소변을 포함해서 체액 내에 균일하게 분포하는 이동성 핵종이다. 이러한 경우 예탁선량은 소변의 삼중수소 농도를 측정하여 직접적으로 평가할 수 있으며 이러한 방법은 통상 액체섬광계수법을 이용하여 결정된다.

12) Noel Giffin Web Feb 7 15:55:12 PST 1996,  
[http://www.triumf.ca/safety/rpt/rpt\\_8/node16.html](http://www.triumf.ca/safety/rpt/rpt_8/node16.html)



## (2) 시료준비와 생체시료의 측정<sup>13)</sup>

액체섬광계수기를 이용한 계측에서 생체시료의 준비는 특별한 경우로 취급되어 왔다. 일반적으로 모든 생체시료에는 다른 종류의 시료에는 포함되어 있지 않은 성분들을 포함하고 있기 때문이다. 따라서 이러한 시료들의 구성물 및 특징을 정확히 이해하여야 시료의 측정에 대한 정확성을 향상시킬 수 있다.

## (3) 액체섬광계수기에 의한 측정

삼중수소( $^3\text{H}$ )는 12.3년의 물리적 반감기를 가지고 베타 입자를 방출하며 ( $E_{\max} = 18.7 \text{ keV}$ ) 안정한 원소인 헬륨( $^3\text{He}$ )으로 붕괴하고 감마선의 방출은 동반하지 않는다. 방출되는 베타 입자의 에너지는 매우 낮으므로 HTO의 섭취 평가법에 소변시료의 액체섬광계수법(LS)이 주로 이용되는데 이 기술은 비교적 빠른 시료의 준비와 높은 효율을 제공하는 것으로 알려져 있다.

### 나. 만성섭취시에 따른 선량평가 방법 및 여러 가지 선량평가 모델

미국의 HPS-13.14와 캐나다의 Bioassay Guideline 2에서는 일련의 Bioassay 결과로부터 섭취형태에 따른 선량평가 방법을 개발하여 사용하고 있다. 선량평가에서 가장 근본적인 문제는 두 번의 시료측정 사이에 체내의 삼중수소 평균 농도가 얼마인가를 결정하는 것이다. 어떠한 경우에는 삼중수소에 의한 피폭선량이 선형내삽법을 사용하여도 충분히 만족되는 시료채취 주기가 있고 다른 한편으로는 Exponential 곡선 보정을 해야 하는 경우도 있다. 이러한 방법상의 오차는 시료채취 주기와 시료의 농도, 개인별 신진대사 특성에 따라 좌우된다. 정확도 요건을 만족시키기 위해 서로 다른 섭취 형태별 가정에 따라 다양한 평가 방법이 사용되며 섭취 형태는 다음의 네 가지 범주로 구분할 수 있다.

- ① 시료채취 주기 사이에 섭취가 일어나지 않을 경우
- ② 시료채취 주기 사이에 단 한 번의 섭취가 발생했으며 그 섭취시기를 알고 있는 경우

---

13) Packard 2000. 4. 7 by Jock Thomson, Packard Instrument Company; 800 Research Parkway; Meriden; Connecticut 06450  
<http://www.packardinstrument.com/cgi-bin/hazel.exe?a.../an9002-csr.ht>

- ③ 시료채취 주기 사이에 한번 또는 그 이상의 섭취가 발생했으며 그 섭취시기를 모를 경우
- ④ 시료채취 후 최종 예탁선량을 평가해야 할 경우

여기서 시료채취와 측정에 따른 오차는 무시한다. 이러한 오차는 피폭시간과 체내잔류함수(retention function) 특성에 따른 오차나 불확실성에 비하면 무시할 만큼 작기 때문이다. 위의 4가지 상황에 따른 선량평가식은 다음과 같이 유도할 수 있다.

#### 다. 시료채취 주기 사이에 섭취가 일어나지 않을 경우

만일 시간 0와 T에서 각각 채취한 소변시료의 농도  $C_0$ 와  $C_T$  (MBq/kg) 사이에 한 번의 삼중수소의 섭취도 없었다면

$$C_T = C_0 e^{-\lambda T} \quad (1)$$

가 되고 작업자가 받게 될 유효선량( $H_{exp}$ )은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$H_{exp} = C_0 R \int_0^T e^{-\lambda t} dt = \left( \frac{C_0 R}{\lambda} \right) (1 - e^{-\lambda T}) \quad (2)$$

여기서  $R = 58 \mu\text{Sv day}^{-1}/(\text{MBkg}^{-1})$ 은 선량계수이고 식 (1)으로부터  $\lambda = (1/T) \ln(C_0/C_T)$ 로 표시할 수 있으므로 식 (2)는

$$H_{exp} = \frac{RT(C_0 - C_T)}{\ln(C_0/C_T)} \quad (3)$$

로 다시 쓸 수 있다. 이 식은 다시 시료채취 주기가 짧은 경우 다음과 같은 식으로 대치할 수 있다.

$$H_{lin} = \frac{RT(C_0 + C_T)}{2} \quad (4)$$

만일 시료채취 주기가 길어진다면 위 식에 의해 구해진 피폭선량은 과대 평가 된다. 미국의 HPS-13.14에서는 시료채취 주기 사이에 섭취가 없다는 것이 확실할 경우(Single Intake or Acute Intake)에는 식 (3)을 사용하여 선량을 평가하도록 권장하고 있다.

#### 라. 시료채취 주기 사이에 단 한 번의 섭취가 발생했으며 그 섭취시기를 알고 있는 경우

만일 시료채취 주기 T 사이의 시간 t에서 한 번의 섭취가 발생했다면 선량평가 모델(exponential 모델)은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$H_{\text{exp}} = H_1 + H_2 = \left( \frac{RC_0}{\lambda_1} \right) (1 - e^{-\lambda_1 t}) + \left( \frac{RC_T}{\lambda_2} \right) (e^{\lambda_2(T-t)} - 1) \quad (5)$$

이때  $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_{\text{avg}} = \ln 2 / 10 \text{ days} (= 0.0693/\text{day})$ 라고 가정한다면 위 식은 다시 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$H_{\text{exp}} = \left( \frac{R}{\lambda_{\text{avg}}} \right) [C_0 (1 - e^{-\lambda_{\text{avg}} t}) + C_T (e^{\lambda_{\text{avg}}(T-t)} - 1)] \quad (6)$$

#### 마. 시료채취 주기 사이에 한 번 또는 그 이상의 섭취가 발생했으며 그 섭취시기를 모를 경우

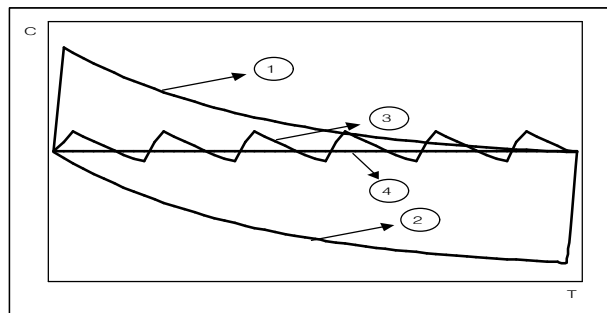


그림 2-6. 섭취시기에 따른 소변 시료 농도 변화 (가로축 : 시간, 세로축 : 소변시료의 농도)

그림 2-6에서  $C_0$ 와  $C_T$ ,  $T$ 만을 알고 있고 시료채취 사이  $C$ 의 변화는 알 수 없다면 다음과 같은 가정을 할 수 있다. 처음의 시료채취 후 곧이어 섭취가 발생한 경우(곡선 1) 섭취량은 최대가 될 것이고 피폭선량은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$H_{\max} = \left( \frac{RC_T}{\lambda_{\text{avg}}} \right) (e^{\lambda_{\text{avg}} T} - 1) \quad (7)$$

그러나 위의 선량평가 식은 매우 보수적인 가정에 근거한 것이므로 보다 합리적인 가정으로 섭취가 전 기간 동안 균일하게 발생했다고 가정하면 피폭선량 평가식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$H_{\text{avg}} = \frac{1}{T} \int_0^T H_{\text{avg}}(t) dt \quad (8)$$

$$H_{\text{avg}} = RC_0 \left[ \frac{1}{\lambda_{\text{avg}}} - \frac{(1 - e^{-\lambda_{\text{avg}} T})}{\lambda_{\text{avg}}^2 T} \right] - RC_T \left[ \frac{1}{\lambda_{\text{avg}}} - \frac{(e^{\lambda_{\text{avg}} T} - 1)}{\lambda_{\text{avg}}^2 T} \right] \quad (9)$$

대개의 경우는 삼중수소의 섭취가 여러 번 있을 것이므로 곡선 3의 형태가 될 것이다. 만일 섭취가 만성적일 경우 적절한 선량평가식은  $C_0$ 와  $C_T$ 의 선형내삽 방법을 이용한 식(4)이 사용될 수도 있다. 일반적으로 선형내삽을 사용하기 위한 시료채취 사이의 주기는 14일을 초과하지 않아야 규제기관에서 요구하는 정확도 요건을 만족시킬 수 있다.

#### 바. 시료채취 후 최종 예탁선량을 평가해야 할 경우

예탁유효선량( $H_C$ )의 최대값은 삼중수소의 체내 유지 시간이 가장 긴 사람에게서 나타날 수 있다. 즉 생물학적 반감기는 최대, 붕괴상수는 최소일 때로 정의할 수 있으므로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$H_{C, \max} = \frac{RC_0}{\lambda_{\min}} \quad (10)$$

평균붕괴상수( $\lambda_{\text{avg}}$  ; 0.0693/day)와 최소붕괴상수( $\lambda_{\min}$  ; 0.05/day)의 정확도

차이는 50% 이내이므로 예탁유효선량( $H_C$ )는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$H_C = \frac{RC_o}{\lambda_{avg}} \quad (11)$$

연간 유효선량당량,  $H_A$ 는 주기적으로 감시된 모든 선량을 합하여 계산된다.

$$H_A = \sum_{i=1}^n H_i \quad (12)$$

여기서  $H_i$  = 감시주기 I 기간 동안 평가된 유효선량당량

$n$  = 연간 평가된 회수

캐나다와 미국의 선량평가 알고리즘은 매우 유사하며 차이가 있다면 캐나다의 경우 일회성 급성 섭취 시 삼중수소의 평균 유효반감기 10일에 근거하여 식 (2)를 이용, Exponential retention curve에 따라 선량을 평가하고 미국의 경우에는 측정된 시료 농도 결과에 근거하여 개인별 고유 유효반감기를 고려하여 선량평가를 한다는 점이 차이가 있다. 또한 미국의 규제 기준은 시료채취 주기사이에 단 한 번의 일회성 섭취가 있으며 그 시기를 알고 있을 경우에는 평균 유효반감기 10일에 근거한 식 (6)을 사용하여 선량을 평가한다는 점이 추가로 기술되어 있다.

## 2.3 절 삼중수소의 이용

삼중수소는 의료, 연구, 일반산업, 원자력 등의 분야에서 다양한 목적을 가지고 이용되고 있다. 표 2-12에 삼중수소의 이용 예시를 나타내었고 삼중수소의 분야별 이용 목적에 대해 간단히 소개하고자 한다.

표 2-12. 삼중수소의 분야별 이용예시

| 분 야           | 이용 예시                             |
|---------------|-----------------------------------|
| 의료            | 호르몬 분석, 에이즈 진단 시약 제조, 백혈구 검사      |
| 연구            | 의약품 합성 연구, 지하수 연대 측정, 해류 분석, 분석화학 |
| 일반산업<br>(군사용) | 삼중수소 발광제품                         |
| 원자력           | 핵융합 연료, 핵무기 원료와 재료                |

### 1. 의료 분야

의료 분야에서 삼중수소는 병을 진단하거나 어떠한 기질을 분석하는데 이용되고 있다. 이를 위한 목적으로 사용되는 대표적인 예로써 섬광근접측정법(scintillation proximity assay)등이 있다.

면역측정법의 변형된 형태인 섬광근접측정법을 통해 삼중수소를 이용한 에이즈진단법이 사용되고도 있다. 에너지를 받으면 빛을 내는 형광체와 짧은 비거리를 가지는 방사성동위원소를 이용하여 경합적 방법으로 적은 양의 물질 농도를 측정하는 방법이 고안되었다. 비특이적 측정치를 줄이기 위하여 비거리가 아주 짧게 사용되는 방사성동위원소를 사용해야 하는데 이에 적절한 것이 삼중수소이다. 섬광근접측정법은 경합적 방사면역측정법의 특수한 형태로 방사선에 조사되면 섬광을 방출하는 형광미세구슬(fluomicrosphere)을 사용한다. 삼중수소 표지 항원은 형광미세구슬의 항체에 결합하여 비정거리 내 형광미세구슬의 형광체를 여기시켜 광자를 방출시키는데, 이 빛을 감지하여 에이즈를 진단할 수 있다.

## 2. 연구 분야

연구분야에서 삼중수소는 약물동태시험, 지하수 연대측정, 핵융합 발전 연구 등 다양한 목적으로 이용되고 있다. 여기서 삼중수소의 이용형태는 주로 방사성추적자(radioactive tracer)로 사용되는데, 이는 방사성동위원소의 성질을 이용하여 물질의 존재유무 또는 물질의 이동경로 등을 파악하는데 유용하다.

약물동태시험(AMDE)은 시험물질의 체제 및 약물의 특성을 기초로 흡수, 분포, 대사, 배설에 대해 약물학적 동태를 평가하는 시험이다. 약물학적 동태를 평가하기 위해 화합물을 이루고 있는 수소를 삼중수소로 치환한 표지화합물을 이용한다. 삼중수소를 표지한 표지화합물을 체내에 투입한 후 삼중수소가 방출하는 베타선을 계측함으로써 화합물의 체내 거동을 관측할 수 있다. 이를 통해 약물에 대한 표적을 규명하고 약물의 동태를 파악할 수 있다.

지하수 연대는 강수나 지표수가 지하로 침투한 이후 경과된 평균 체류시간을 의미한다. 지하수 연대를 측정하는 것은 지하수의 개발과 관리에 중요하며, 오염된 지하수의 복원과 영향을 평가하는 것에도 중요한 자료로 활용될 수 있다. 국내에서는 지하수 연대측정을 제주도 지하수에 대해서 삼중수소를 이용하여 처음 시도하였으며, 최근 들어 다양한 지역의 지하수의 연대측정을 실시하고 있다. 지하수 연대를 측정하는 방법은 크게 두 가지가 있다. 하나는 1950년대부터 계속된 수소폭탄 실험의 영향으로 대기 중 삼중수소의 농도가 1963년에 가장 높았던 것을 이용하는 것이다. 지하수 내 삼중수소의 최대농도를 알아냄으로써 지하수의 연대측정이 가능하다. 다른 하나는 삼중수소와 헬륨의 양을 동시에 측정하여 헬륨 보정식을 만들어 지하수의 연대를 측정하는 것이다. 이 방법의 장점은 강수로부터 지하수에 유입되는 삼중수소의 초기 유입량에 대한 자료가 없어도 지하수 연대측정이 가능하다.

## 3. 산업 분야

일반 산업 분야에서 삼중수소가 가장 일반적으로 활용되는 예로는 삼중수소 발광제품이 있다. 삼중수소 발광제품은 삼중수소의 베타 붕괴 시 발생하는 전자와 형광물질과의 상호작용을 이용하여 별도의 에너지원 교체 없이 십 년 이상 발광한다는 장점을 가지고 있다. 방사성 발광을 이용한 제품 중 삼중수소

의 발광을 이용한 제품은 기체형 삼중수소 발광선원(gaseous tritium light sources; GTLS)과 방사성 발광페인트(radioluminous paint)를 이용하는 것으로 나눌 수 있다.

기체형 삼중수소 발광선원의 발광원리는 크게 세 가지 과정으로 설명할 수 있다(그림 2-7). 발광선원 내에서 베타붕괴에 의해 전자가 방출된다. 방출된 전자로부터 붕괴산 유리관 내에 코팅된 인광물질이 에너지를 흡수하여 인광물질에 포함된 활성인자의 중심에서 에너지 준위가 여기 되는 과정이 일어난다. 여기상태의 활성체가 기저상태로 천이하면서 빛을 방출하게 되는 과정을 거친다. 이러한 일련의 과정으로 인해 삼중수소 발광선원은 꾸준한 빛을 방출하게 된다. 기체형 발광선원은 긴급표지판, 손전등, 낚시찌 등의 일반 생활제품에 흔하게 사용되며, 무기가늬자, 독도경(랜턴)과 같이 군사용으로도 널리 사용된다.

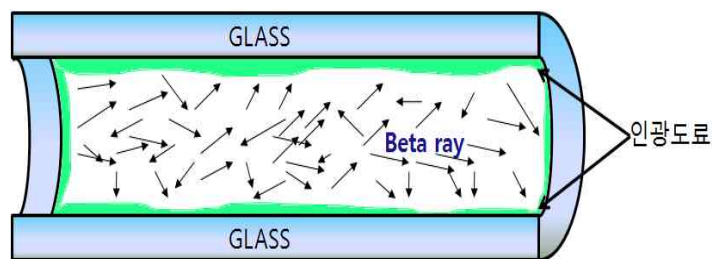


그림 2-7. 기체형 삼중수소 발광선원의 발광 원리

방사성 발광페인트는 방사성동위원소를 방사선에 발광하는 물질인 섬광체와 혼합하여 방사성동위원소에서 방출되는 방사선을 빛으로 바꾸어 사용한다. 방사성동위원소로 삼중수소 외에도  $^{226}\text{Ra}$  및  $^{147}\text{Pm}$  등이 사용되는 것으로 알려져 있지만, 경제성과 안전성 측면에서 삼중수소가 장점을 가지고 있기 때문에 대부분 삼중수소로 교체되고 있다. 섬광체로는 주로 황화아연이 사용되고 있다. 발광페인트 또한 일반용 및 군사용으로 흔하게 사용되고 있으며, 대표적인 제품으로는 시계, 나침반 등이 있다.



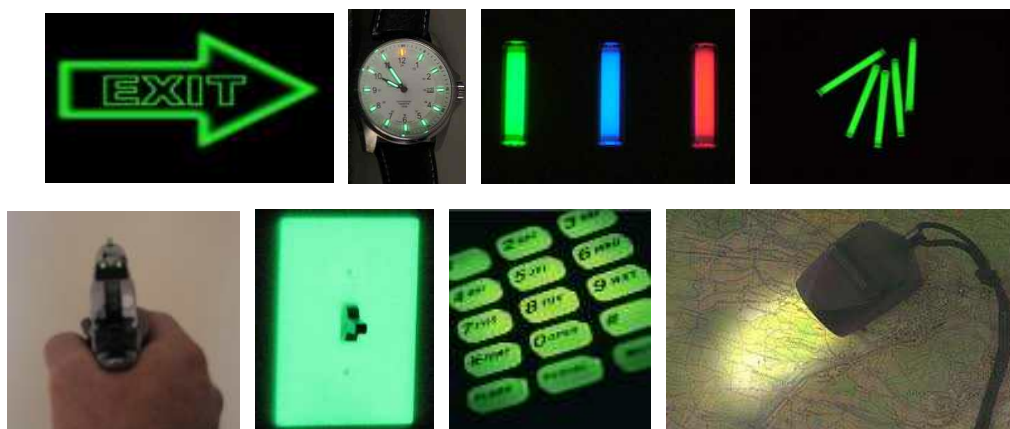


그림 2-8. 다양한 종류의 삼중수소 발광제품 예

#### 4. 원자력 분야

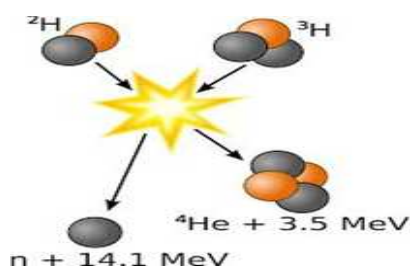


그림 2-9. 핵융합반응

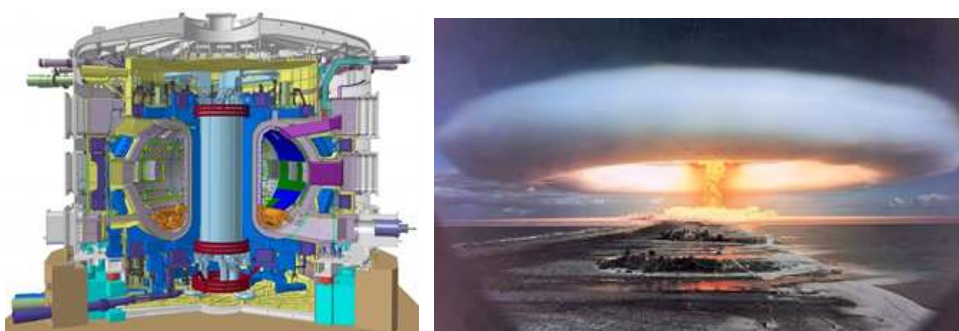


그림 2-10. 핵융합로 ITER와 수소폭탄 실험

삼중수소는 지구상에서 흔한 물질이라고 할 수 있지만 아이러니하게도 농축이 쉽지 않아 가격은 매우 높은 물질이다. 삼중수소의 가격은 2016년 1월 기준 1 g당 US \$24,000이다.

## 2.4 절 참고문헌

- [2.1] S. Diabate et al., Organically Bound Tritium, Health Physics, 65:698-712, 1993.
- [2.2] H. Takeda et al., Biological Behavior of Tritium after Administration of Tritiated Water in the Rat, J. Radiation Research, 20: 174-185, 1979.
- [2.3] A.L. Carsten, Tritium in the Environment Advances in the Radiation Biology, 8:419-458, 1979
- [2.4] S. Dingwall et al., Human Health and Biological Effect of Tritium in Drinking Water, Dose Response, 9:6-31, 2011.

### 3장 국내외 원자력 시설 삼중수소 방사선 관리

#### 3.1 절 국내 원자력발전소의 삼중수소 관리

##### 1. 원전 삼중수소 배출 관리 및 현황

###### 가. 삼중수소 배출 관리

우리나라는 국민건강 및 환경보전을 위해 원자력발전소 운영 과정에서 발생하는 방사성물질의 배출관리를 엄격하게 하도록 원자력안전법에 규정하고 있다. “방사선안전관리 등의 기술 기준에 관한 규칙”에 따라 원전 사업자인 한수원은 삼중수소를 포함한 방사성물질 배출 관리프로그램을 수립, 이행하고 있다. 방사성물질 배출 관리는 환경배출량의 최소화 및 ALARA (As Low As Reasonably Achievable) 원칙 적용, 환경배출량에 대한 정확한 평가, 감시·통제된 상태에서 계획적으로 배출, 배출경로(배수구 및 배기구) 이외의 유출경로 통제 등이 기본 요소이며, 이와 같은 기본 요소를 반영하여 배출물 감시기 운영방안, 배출물에 대한 시료채취 분석 계획 및 관련 세부절차가 관리 프로그램에 포함된다. 삼중수소를 포함한 방사성물질 환경배출 현황은 주기적으로 규제기관에 보고되어야 하며, 이를 통해 관련 법적 요건의 만족여부를 검증한다. 현재 원자력안전법 시행규칙 제127조(보고)에서는 관련 내용을 매분기마다 보고하도록 규정하고 있다.

원자력발전소에서 삼중수소는 원자로 내에서 중성자 반응에 의해서 생성되고, 특히 냉각재와 감속재로 중수를 사용하는 중수로에서 상대적으로 많이 발생한다. 원전에서 발생하는 삼중수소를 안전하게 관리하게 위해 원자력안전법(원자력안전위원회 고시 제2014-34호: 방사선 방호 등에 관한 기준)에 삼중수소의 화학적 형태에 따라 연간섭취한도, 배기 및 배수의 배출관리기준을 정해 놓고 있다(표 2-6). 동 고시에서 규정한 배출관리기준은 일반인 연간 선량한도 1 mSv를 기준으로 유도된 것이며, 운영 중 모든 운전모드에서 상기 배출관리기준을 만족하여야 한다.

### 나. 삼중수소 배출 현황[3.1]

그림 3-1은 우리나라 원전의 삼중수소 연도별 배출량 추이를 보여준다. 국내 전체 원전 삼중수소 배출량은 2009년까지 600 TBq 이상을 유지하다가 2010년부터 감소하기 시작하여 2013년부터 최고치 대비 약 45% 감소한 360 TBq 수준을 유지하고 있다. 고리, 한빛, 한울 발전소의 삼중수소 배출량은 연도별로 큰 폭의 변화 없이 100 TBq 이하를 유지하고 있다. 반면 월성발전소의 삼중수소 배출량은 2010년을 기점으로 큰 폭으로 감소하여 현재는 국내 원전 전체 삼중수소 배출량의 약 50% 수준으로 떨어졌다. 월성발전소 삼중수소제거설비(TRF) 운영(2007년 7월)으로 인한 삼중수소의 배출량 감소 및 계속운전 준비를 위한 월성 1호기 가동정지(2012년 10월 29일~2015년 6월 9일)가 삼중수소 배출량을 줄이는데 큰 기여를 한 것으로 보인다.

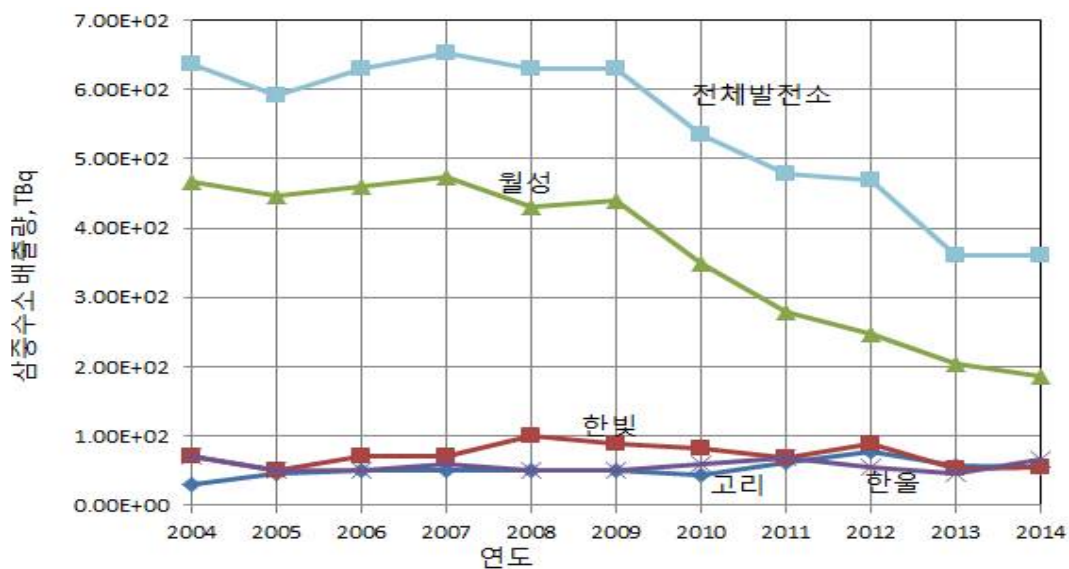


그림 3-1. 국내 원전 삼중수소 배출량 연도별 추이[3.1]

## 2. 삼중수소 제거설비 (TRF) [3.2]

### 가. TRF 개요

원자로 냉각재와 감속재로 중수(D<sub>2</sub>O)를 사용하는 월성 원전은 중수 중의 중수소와 중성자의 반응에 의해 삼중수소가 생성된다. 생성되는 삼중수소의 양은 소멸되는 양보다 더 커서 시간이 경과할수록 원자로 계통 내에 축적되므로 방사선 안전 관리에 문제를 야기할 수 있다. 이에 정부는 월성 2~4호

기 건설 인허가 과정에서 삼중수소 배출 저감화 대책을 요구하였고, 이에 따라 한수원은 2005년 사업을 착수 약 1,400억 원의 예산을 들여 2007년 6월에 삼중수소제거시설을 완공하였다(그림 3-2).



그림 3-2. 월성 TRF 전경 (자료제공 한수원)

TRF는 월성 2호기와 3호기의 중간지점에 위치하고 있으며 시설은 크게 삼중수소에 오염된 중수로부터 삼중수소를 백금촉매반응으로 가스로 분리하는 분리공정, 분리공정에서 생성된 삼중수소와 중수소 혼합가스에서 삼중수소만을 초저온증류법으로 분리하는 농축공정, 농축공정에서 생성된 삼중수소를 티타늄 금속 수화물 형태로 저장하는 저장공정의 3단계 공정으로 구성되어 있다. 월성 삼중수소 제거설비 개요는 표 3-1과 같다. 중수 처리량은 100 kg/h이며, 연간으로 0.7~4 kg의 삼중수소를 제거할 수 있다.

표 3-1. 월성 삼중수소 제거설비 개요

| 개요                | 내용                       |
|-------------------|--------------------------|
| 중수 급수의 중수소 동위원소 비 | >99.82 wt%               |
| 중수 급수의 삼중수소 농도    | 0.37 TBq/kg ~ 2.2 TBq/kg |
| 중수 처리량            | 100kg/hr                 |
| 삼중수소 제거율          | 97%                      |
| 생산물 중 삼중수소 농도     | 99% 이상                   |
| 설계 수명             | 40년                      |
| 설계 이용률 목표         | 80%                      |

## 나. TRF 삼중수소 저감 효과

월성발전소 삼중수소제거설비는 2007년 7월부터 운영하기 시작하여 2015년 말까지 약 510만 kg의 중수를 처리하였고, 시설 이용률은 약 70% 수준인 것으로 알려지고 있다. 그림 3-3은 월성발전소 삼중수소 배출량 연도별 추이를 보여준다. 2007년 TRF 가동 후 삼중수소 배출량이 지속적으로 감소되고 있는 것이 관찰된다. 2014년 월성발전소 삼중수소 전체 배출량은 2007년 대비 약 40% 수준으로 감소하였다.

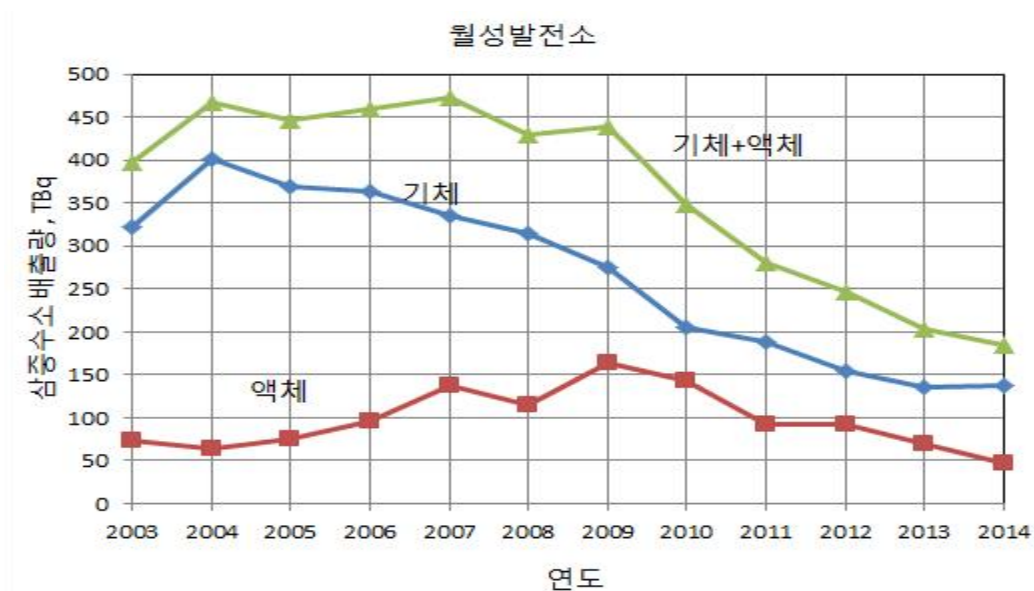


그림 3-3. 월성발전소 삼중수소 배출량 연도별 추이 [3.1]

## 3. 원전 삼중수소 환경 관리

### 가. 삼중수소 환경 조사 및 결과

원자력발전소 주변 환경방사능 감시는 원자력안전위원회고시<sup>14)</sup>에 근거하여 사업자인 한수원에서 수립하고 원자력안전위원회의 승인을 받은 “원자력발전소 주변 환경방사선조사계획[3.3]”에 따라 수행하고 있으며 이 조사계획 내에 감시 핵종의 하나로 삼중수소가 포함되어 있다. 삼중수소는 원래 환경 감시 핵종 대상에서 빠져 있었으나 삼중수소를 상대적으로 많이 방출하는 월성발전소 중심으로 1992년부터 감시 핵종에 포함되었다. 표 3-2에 한수원

14) 원자력안전위원회 고시 제2014-12호(원자력이용시설 주변의 방사선환경조사 및 방사선환경영향 평가에 관한 규정)

의 환경방사선조사계획서에 반영된 발전소별 삼중수소 조사 빈도 및 조사지점 수를 나타내었다.

표 3-2. 발전소별 삼중수소 조사 빈도 및 조사지점 수

| 조 사 대 상 | 빈도<br>(회/년) | 시료채취 지점수 |    |    |    |    |
|---------|-------------|----------|----|----|----|----|
|         |             | 고리       | 한빛 | 월성 | 한울 | 계  |
| 공 기     | 24          | -        | -  | 10 | -  | 10 |
| 식 수     | 4           | 4        | 2  | 4  | 3  | 13 |
| 지 하 수   | 4           | 3        | 2  | 4  | 3  | 12 |
| 지 표 수   | 12          | 4        | 2  | 5  | 3  | 14 |
| 빗 물     | 12          | 5        | 4  | 8  | 5  | 22 |
| 곡 류     | 1           | 3        | 4  | 6  | 4  | 17 |
| 채소 · 과일 | 1~2         | 8        | 8  | 5  | 4  | 25 |
| 우 유     | 12          | 2        | 2  | 2  | 1  | 7  |
| 육 류     | 2           | 2        | 2  | 2  | 2  | 8  |
| 해 수     | 12          | 13       | 4  | 6  | 4  | 27 |

### (1) 공기 중 삼중수소

삼중수소 발생이 경수로 보다 많은 중수로 특성으로 인해 중수로를 운영 중인 월성원자력발전소는 공기 중 삼중수소를 추가로 조사하고 있다. 월성발전소 공기 삼중수소 조사지점은 발전소 부지 내 6곳과 부지 외 두 곳, 비교지역 두 곳 총 10개 지역이다. 그림 3-4는 월성발전소 공기 중 삼중수소 연도별 추이를 보여준다. 부지 내 공기 중 삼중수소 농도는 2008년을 기점으로 최근으로 갈수록 점차 감소하는 경향을 보여주고 있다. 이는 앞 절에서 언급한 것처럼 삼중수소 제거시설(TRF) 운영으로 인한 삼중수소 배출량 감소에 기인한다고 볼 수 있다. 현재까지 관찰된 최대 공기 중 삼중수소 농도는 2008년 월성 제 1 발전소 내의 17 Bq/m<sup>3</sup> 이었다. 이를 호흡에 의한 연간 유효선량으로 환산하면 0.00226 mSv<sup>15)</sup> 이다. 이는 일반인 연간 선량한도의 0.2% 수준이다.

부지 외 비교지점의 삼중수소 농도는 전체적으로 0.05 Bq/m<sup>3</sup> 이하로 세계 평균농도인 0.1 Bq/m<sup>3</sup> 보다 작은 것으로 나타났다.

15) 호흡선량=공기농도(Bq/m<sup>3</sup>) x 호흡량 (7400 m<sup>3</sup>/yr) x 선량환산계수 (1.8E-8 mSv/Bq)

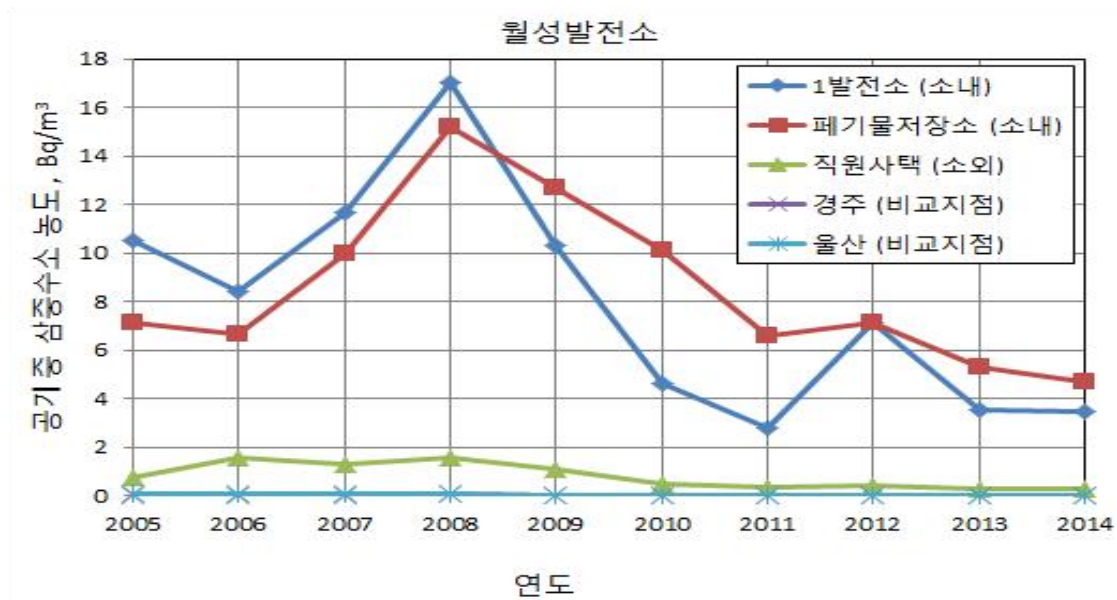


그림 3-4. 월성 발전소 공기 중 삼중수소 농도 연도별 추이[3.4]

원전 사업자인 한수원과는 별도로 원자력안전기술원에서 검증 차원에서 조사된 월성발전소 직원사택 지점에서의 공기 중 삼중수소의 최근 5년간 농도 범위는 0.084~2.59 Bq/m<sup>3</sup> (KINS, 원자력이용시설 주변 방사선환경조사 및 평가보고서, 2014)로 한수원 결과와 크게 다르지 않았다[3.5~3.9].

## (2) 육상 물 시료 중 삼중수소

최근 10년(2005~2014년)간 4개 원전부지 주변에서 채취된 육상 물 시료 중에 포함된 삼중수소의 연평균 농도 범위는 표 3-3와 같다. 모든 원전에서 부지 내부의 빗물 중 삼중수소는 일반 환경보다 높은 수준으로 검출되고 있는 것을 확인할 수 있다. 부지 내부에서 관찰된 최대값은 2012년 월성 2 발전소 지점의 817 Bq/L 이었다(그림 3-5 참조). 고리, 한빛, 한울발전소 주변의 지표수, 식수, 지하수에서의 삼중수소는 낮은 준위이거나 거의 검출되지 않고 있다. 반면에 월성원전 주변에서 이들 시료의 삼중수소 농도는 상대적으로 높다. 이는 월성발전소 빗물 중 삼중수소 농도가 타 지역에 비해 상대적으로 높은 것이 그 원인으로 추정된다. 빗물을 직접적으로 식수로 사용하는 경우는 없지만 식수로 사용하였다는 가정 하에 부지외부에서 관찰된 최대 빗물 농도(2009년 직원사택 지점에서 관찰된 146 Bq/L) 기준으로 연간



섭취선량을 계산하면 0.0019 mSv 이다. 이는 일반인의 연간 선량한도의 0.19% 수준이다. 지하수에서 검출된 삼중수소 농도는 최대 17.0 Bq/L (2010년 봉길) 이었는데, 이를 식수로 사용하였을 경우 연간 선량한도 0.02% 수준이다.

표 3-3. 최근 10년간 물시료 중 삼중수소 방사능 농도(Bq/L)

| 원 전 |      | 고 리        | 한 빛        | 월 성        | 한 울        |
|-----|------|------------|------------|------------|------------|
| 구분  |      |            |            |            |            |
| 빗물  | 부지내부 | 5.42~57.9  | 6.66~45.8  | 16.2~817   | 1.73~19.4  |
|     | 부지외부 | <1.74~3.76 | <1.99~3.65 | 1.18~146   | <0.98~2.61 |
| 지표수 | 부지외부 | <1.83~3.33 | <1.26~3.46 | <1.03~15.7 | <1.19      |
| 식수  | 부지외부 | <1.84      | <2.48      | <1.01~16.9 | <1.86      |
| 지하수 | 부지외부 | <1.79      | <2.49      | <1.03~17.0 | <1.89      |

\* 부지외부는 비교지역 포함

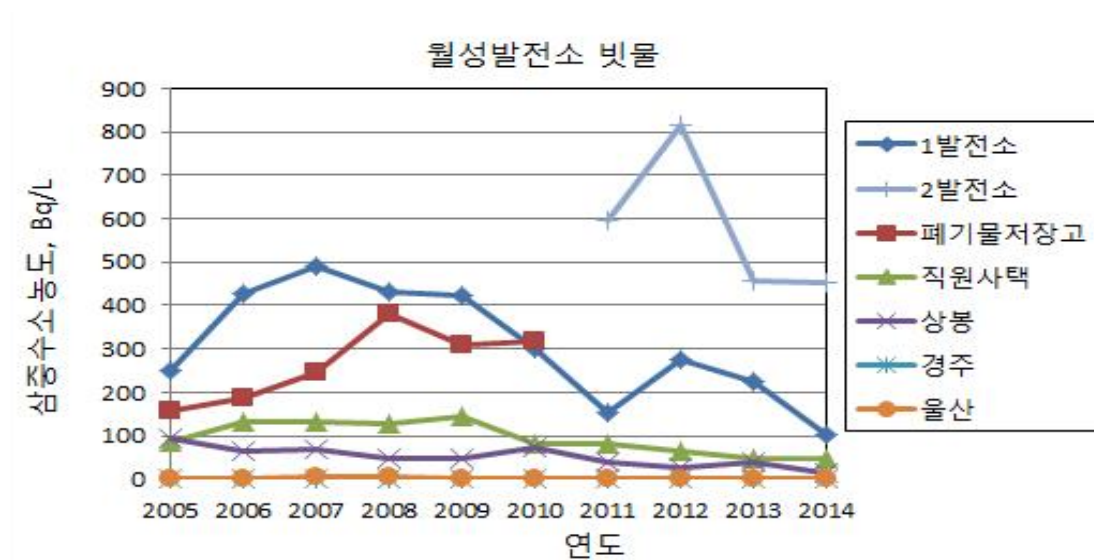


그림 3-5. 연도별 월성발전소 빗물 중 삼중수소 농도 추이

### (3) 농작물 중 삼중수소

대기로 방출된 삼중수소는 기류를 따라 주변 환경으로 확산된다. 토양이나 하천에 침적된 삼중수소는 뿌리흡수나 농업용수 사용 등 다양한 경로를 통해 농작물로 전이될 수 있으며, 작물이 생육중인 경우는 광합성 작용에 의

해 직접 농작물에 흡수된다. 그림 3-6은 월성발전소 주변 농작물의 삼중수소 연도별 추이를 보여준다. 수분함량이 많은 채소나 과일의 경우 삼중수소는 조직자유수삼중수소(TFWT) 형태로, 쌀과 보리 같은 곡물은 유기결합삼중수소(OBT) 형태로 주로 존재한다. 농작물의 삼중수소 농도는 월성발전소 읍천 지역의 배추 시료를 제외하고는 전체적으로 50 Bq/kg fresh 이하의 낮은 농도를 보여주고 있다. 읍천 지역의 배추 중 삼중수소가 상대적으로 높게 나타났지만 최대값을 연간 섭취선량으로 환산하면 0.00045 mSv 이다. 이는 일반인의 연간 선량한도의 약 0.05% 수준이다.

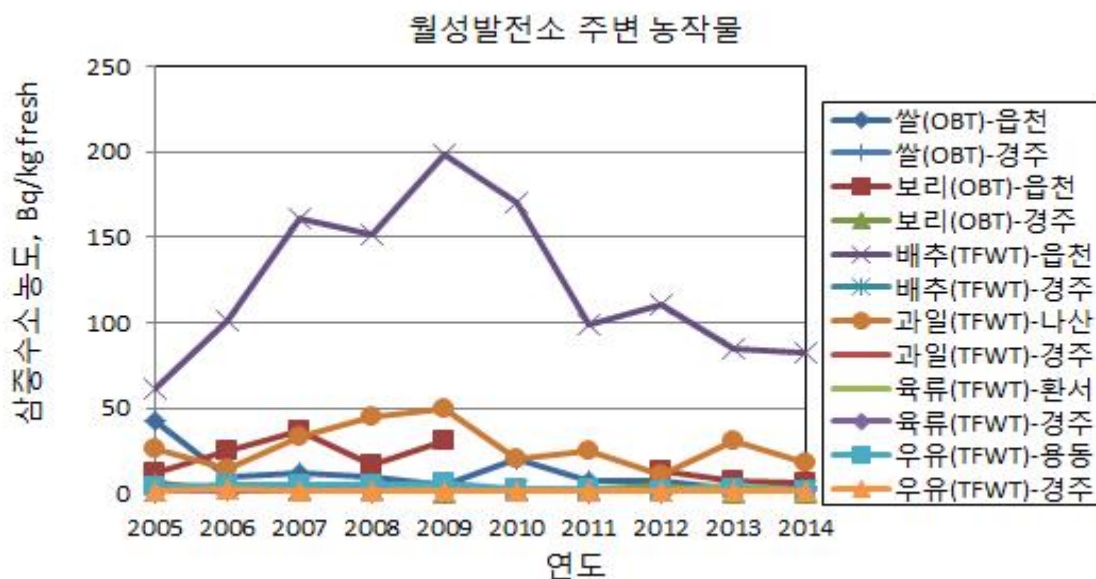


그림 3-6. 월성발전소 주변 농작물 삼중수소 농도 연도별 추이

한편 원자력안전기술원(KINS)에서 조사된 월성발전소 주변 지역 우유 중 최근 5년간 삼중수소 농도범위는 1.27~6.59 Bq/L 로 한수원 조사 결과와 비슷하였다[3.8].

#### (4) 해수 중 삼중수소

액체폐기물은 처리규정에 따라 처리된 후 바다로 방류하게 된다. 방류하는 액체폐기물에 포함되어 있는 핵종의 대다수는 삼중수소이다. 그림 3-7은 연도별 각 발전소 배수구에서 측정된 삼중수소 농도 추이이다. 전체적으로

발전소별 해수 중 삼중농도는 큰 차이를 보이지 않으나 2009년, 2010년, 2013년 월성발전소 배수구에서 평시보다 다소 큰 삼중수소 농도를 보여준다. 2013년에 월성발전소에서 측정된 해수 중 삼중수소 농도 최대값 90 Bq/L는 표 3-1에서 고시한 배출관리기준 40,000 Bq/L의 약 0.22%에 해당하는 수준이다.

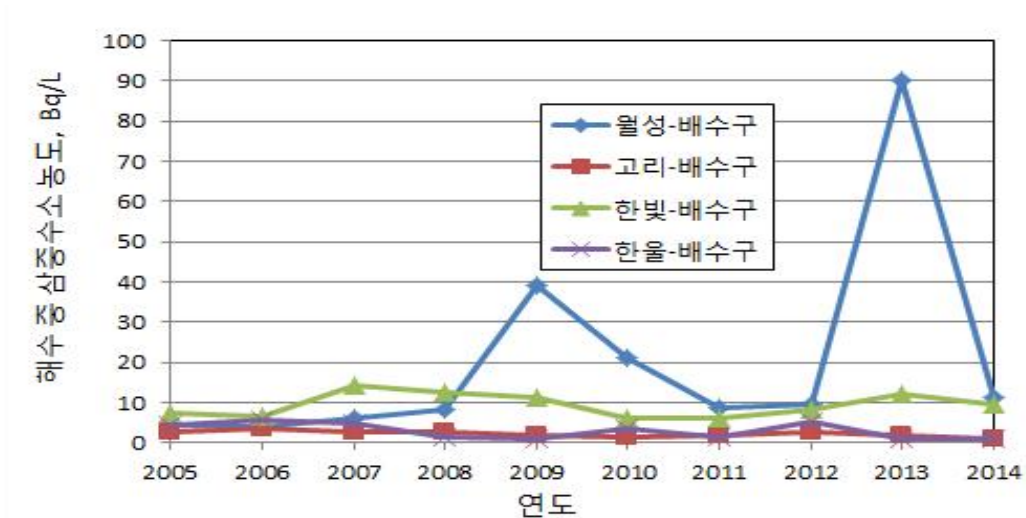


그림 3-7. 발전소 배수구 주변 해수 중 삼중수소 농도 연도별 추이

표 3-5에 KINS에서 조사된 해수 중 삼중수소 농도를 보여준다. 최근 5년간 변동 폭 내에 해수 중 삼중수소 농도가 존재한다.

표 3-4. 원자력발전소 주변 해수 중 삼중수소 농도(Bq/L)

| 발전소<br>(배수구 및<br>취수구) | KINS         |               |                | 한수원                        |
|-----------------------|--------------|---------------|----------------|----------------------------|
|                       | 2014년        |               | 최근 5년간         | 2014년 부지주변<br>평균 (최소 ~ 최대) |
|                       | 평균           | 농도 범위         |                |                            |
| 고리                    | 0.328±0.228  | <0.122 ~ 1.05 | <0.0605 ~ 9.84 | 1.46(<1.01~2.3)            |
| 월성                    | 6.98± 20.52  | 0.239 ~ 95.6  | 0.103 ~ 144    | 4.72(<1.12~88.9)           |
| 한빛                    | 1.75± 0.56   | 0.832 ~ 2.84  | 0.394 ~ 14.2   | 5.97(<1.63~94.3)           |
| 한울                    | 0.511± 0.348 | <0.16 ~ 1.16  | <10.113 ~ 91.5 | <1.0                       |

## 나. 원전 주변주민 방사선량

원자력시설로부터 누출된 삼중수소는 침적, 광합성, 호흡의 과정을 거쳐 육상 생태계의 토양이나, 동식물로 전이된다(그림 3-8). 동식물로 전이된 삼중수소는 신진 대사 작용을 통해 유기 화합물인 탄수화물이나, 단백질, 지방의 구성원자로 변환된다. 이와 같이 유기화합물에 포함된 삼중수소를 유기결합삼중수소(OBT)라 한다. 동식물 세포 조직의 자유수 내에 존재하는 HTO는 호흡이나 증산작용으로 외부로 쉽게 배출되지만, 화학적으로 변환된 유기결합삼중수소는 대체적으로 비활성이며 배설작용이나 생분해에 의해 천천히 감소된다. 따라서 대사 작용으로 생성된 유기결합삼중수소는 농작물 섭취 시 방사능 내부 피폭의 주요 원인이다. 대기의 삼중수소는 침적(deposition)에 의해 토양으로 전이되고, 토양으로 전이된 삼중수소는 뿌리흡수를 통해 작물로 전이되어 인간이 섭취하면 내부 피폭에 기여하게 된다. 대기에서 토양으로 침적된 가스 성분의 HT(g)는 토양 미생물에 의해 급격히 산화되어 HTO 전환되어 HTO 순환 사이클에 동참한다. 침적된 HT(g)중 토양의 수분 증발에 의해 약 20%는 대기 중으로 재유입 되는 것으로 알려지고 있다.

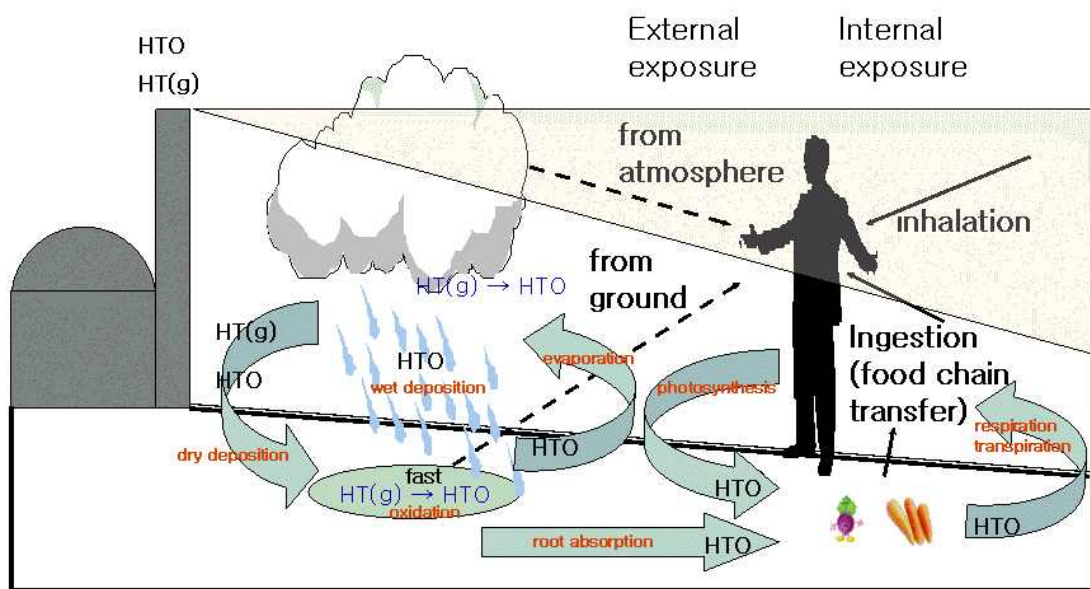


그림 3-8. 삼중수소 환경 이동 경로

삼중수소 섭취모델은 삼중수소로 오염된 음식물 소비로 인한 내부 피폭 선량 계산을 위한 것으로 농작물, 육류 등 일상생활을 영위하는데 필요한 식

품군이 삼중수소에 오염되었을 경우, 오염된 식품의 삼중수소의 농도를 선량계수로 환산함으로써 피폭의 정도를 평가한다. 따라서 삼중수소 누출에 의한 농작물오염 평가는 선량계산을 위해 필수적이다. 원자력발전소의 정상 가동 시에는 평형모델인 비방사능모델로부터 주변 환경 및 농작물에 대한 삼중수소 오염 정도를 평가하고, 사고 유출 시에는 동적모델(dynamic model)을 이용하여 시간에 따른 삼중수소 변화를 평가하는 것이 일반적이다[3.10].

우리나라 원자력안전법에서는 측정을 통한 원자력발전소 주변 환경 방사선/능 조사와는 별도로 매년 원자력시설로부터 환경으로 배출되는 방사능 양을 토대로 시설 주변 주민의 방사선량을 이론적으로 평가하여 법에서 정한 호기 당 설계목표치 및 부지당 운영기준치를 만족 하는지 여부를 제시하도록 사업자에게 요구하고 있다.

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 입지 환경 특성 등을 고려하여 가상적 개인을 설정하는데 국가별로 가상적 개인의 개념은 조금씩 상이하며 대표개인, 결정집단, 최대개인, 평균개인 등으로 표현된다. 우리나라에서는 상대적으로 보수적인 개념인 미국 원자력규제위원회(NRC)<sup>16)</sup> 규제지침[3.11]을 준용하여 다음과 같이 정의하여 적용하고 있다.

**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 지점은 실제 거주성과 관계없이 부지 경계선으로 정하고 있는데

16) NRC(Nuclear Regulatory Commission) : 미국의 원자력 규제기관

이는 일반인이 자유롭게 접근 가능한 원전으로부터의 최단거리를 고려하기 위해서이며, 이는 상상할 수 있는 최대 피폭지점에서 선량이 기준치를 만족하면 원거리에 있는 모든 다른 지점에서도 저절로 기준치를 만족하게 된다는 방사선 방호원칙에 입각한 것이다. 부지 경계선에 거주하면서 음식물을 생산하여 섭취하는 가상적인 개인을 대상으로 선량을 평가한 후, 그 중 최대인 값을 그 부지의 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. 따라서 계산된 주민선량은 주민이 실제로 피폭된 크기를 나타내는 것이 아니라 이론적으로 최대 그 값 정도 수준의 방사선에 피폭될 수 있다는 가상의 참조 값이다. 모델에 도입된 가정의 보수성 등을 감안할 때 실제 주민이 받는 피폭선량은 이보다 매우 낮을 것이다. 앞 절에서 예시한 것처럼 실제로 일부 지점에서 측정된 환경 방사능 농도를 사용하여 계산된 선량이 매우 작은 것이 이를 뒷받침한다. 주민선량평가 방법은 참고문헌[3.12~3.14]에 상세하게 기술되어 있으므로 여기서는 생략하기로 한다.

그림 3-9는 수학적 방법으로 계산된 발전소별 연도별 전체핵종에 의한 주민 방사선량 추이를 보여준다. 모든 발전소에서 주민 방사선량은 법에서 정한 일반인의 연간 선량한도 뿐 아니라 동일부지 다수호기 운영기준인 0.25 mSv 이하로 잘 유지되고 있음을 알 수 있다.



그림 3-9. 발전소별 주민 방사선량 (모델에 의한 예측값) 연간 추이  
(2010년 이후 유아기준, 2010년 이전 성인기준)

그림 3-10은 최근 5년 동안 발전소별 전체핵종과 삼중수소에 의해 야기되는 주민 방사선량의 비교를 보여준다. 2012년 이후 연도별 주민 방사선량의 전반적인 증가 경향에도 불구하고 삼중수소에 의한 방사선량은 월성발전소를 제외하고는 오히려 감소하고 있다. 월성발전소의 경우 2012년 이후부터 이전에 비해 다소 증가하였으나 그 이후에는 안정적인 경향을 보여주고 있다.

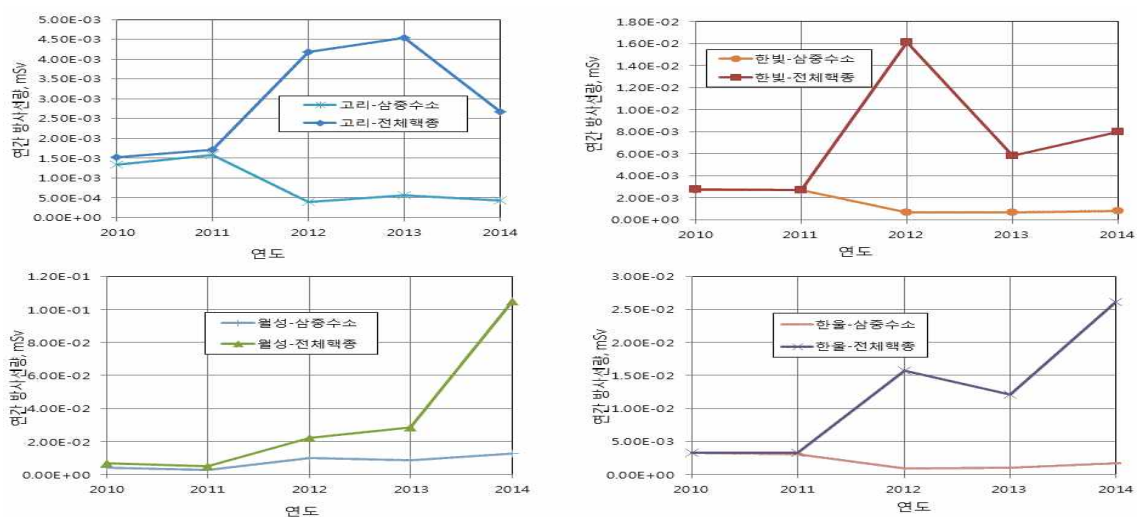


그림 3-10. 최근 5년 동안 전체핵종과 삼중수소에 의해 야기되는 주민 방사선량 비교



## 3.2 절 국내 연구용 원자로의 삼중수소 관리

### 1. 연구로의 삼중수소 배출관리 및 현황

한국원자력연구원의 다목적 연구용원자로인 ‘하나로’ 시설 주변에 대한 방사선환경 조사 및 평가는 원자력이용시설의 운영으로 인해 연구원 주변 주민이 받게 되는 방사선량이 연간 선량한도 이내로 유지되고 있는지를 확인함으로써 주민의 건강과 안전을 확보하고, 시설 주변 환경의 방사능 오염을 사전에 예방하며, 시설로부터 예기치 않은 방사성물질의 배출에 의한 주변 환경 변화의 영향을 판단할 수 있는 기초 자료를 확보하기 위한 목적으로 수행되고 있다. 또한, 원자력이용시설 주변 방사선환경을 지속적이고 과학적으로 조사, 평가하여 원자력에 대한 국민의 올바른 이해를 구하고 안정적 연구 환경을 조성하고자 하는 목적으로 수행되고 있다. 방사선환경 조사 및 평가는 구체적으로 원자력이용시설 주변 주민의 방사선량 추정 및 평가, 환경에서 방사성 물질의 축적경향 평가, 원자력이용시설로부터 예기치 않은 방사성 물질 방출로 인한 주변 환경의 영향 유무 평가를 목적으로 하고 있다.

다목적 연구용원자로인 ‘하나로’를 운영하는 사업자로서 한국원자력연구원은 원자력안전법 제104조(환경보전)의 1항, 원자력안전법 시행규칙 제136조(방사선환경 조사 및 평가), 원자력안전위원회 고시 제2014-12호(원자력이용시설 주변의 방사선환경조사 및 방사선환경영향평가)에 따라 방사선환경조사 계획[3.15]을 수립하여 원자력안전위원회로부터 승인 받아 이를 이행하고 그 결과를 정기적으로 정부에 보고하고 있다.

그림 3-11은 다목적 연구용원자로의 지난 10년간 삼중수소 연도별 배출량 추이를 보여 준다[3.16]. 삼중수소 배출량 추구간은 그림 3-1의 국내 원전과 비교하기 위하여 같은 구간크기로 나타내었다. 하나로의 삼중수소 배출량은 연도별로 큰 폭의 변화 없이 1.5~19.5 TBq (평균  $4.64 \pm 5.16$  TBq)로 국내 원전에 비해서는 현저히 낮은 수준으로 배출된다.



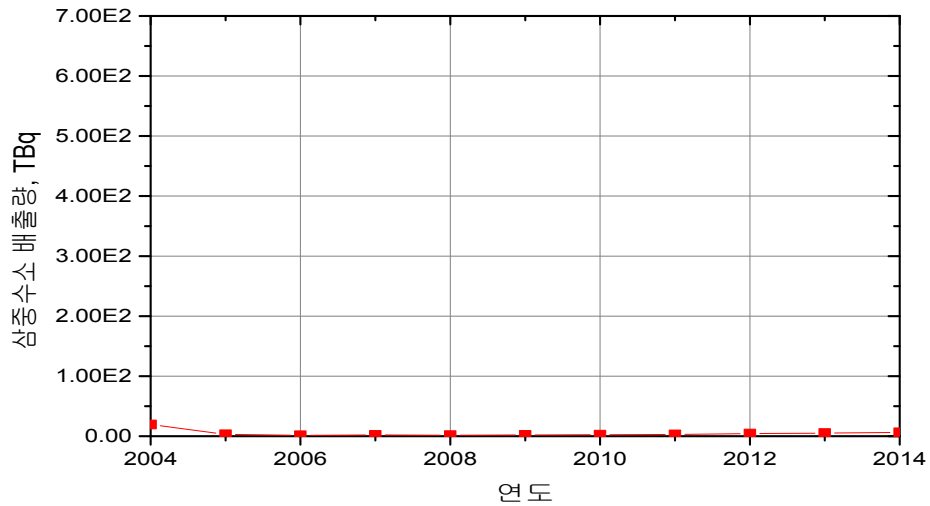


그림 3-11. 연구용원자로 하나로의 삼중수소 배출량 연도별 추이

## 2. 연구로의 삼중수소 환경관리

### 가. 삼중수소 환경 조사 및 결과

표 3-5에 대덕 원자력시설 주변 방사선환경 조사계획서에 반영된 삼중수소에 대한 조사항목, 조사빈도, 조사지점 수를 나타냈다[3.14].

표 3-5. 대덕 원자력시설 주변 삼중수소 조사계획

| 구분   | 조사대상    | 시료종류        | 조사빈도           | 조사 지점 수 |      |
|------|---------|-------------|----------------|---------|------|
|      |         | 수분          | 월 1회<br>(연속채취) | 부지 내    | 부지 밖 |
| 육상시료 | 공기 중 수분 | 빗물          | 월 1회           | 4       | 1    |
|      |         |             |                | 4       | 1    |
|      | 물       | 지표수         | 월 1회           | 4       | 2    |
|      |         | 지하수<br>(식수) | 분기 1회          | 1       | 2    |
|      |         | 채소<br>(배추)  | 수확기            | -       | 4    |

공기 중 수분 시료의 채취는 대덕 원자력시설 부지 4개 지점 및 비교지점 1개 소 등 모두 5개 지점에서 월 1회로 실시되었으며 이에 대한 삼중수소 분석이 수행되었다. 빗물시료의 채취는 대덕 원자력시설 부지 내 4개 지점과 비교지점 1곳에서 실시하였으며 빗물의 시료 채취 빈도는 월 1회이었다. 지

표수시료는 대덕 원자력시설의 배수로를 따라 동화천에 이르기까지의 4개 지점을 포함한 모두 6개 지점에서 채취되었다. 지표수시료 채취 빈도는 월 1회이다. 지하수시료의 채취는 대덕 원자력시설 부지 내 및 주변지역 3개 지점에서 실시하여 삼중수소분석을 수행하였으며, 시료 채취 빈도는 분기 1회이었다. 대덕 원자력시설 주변지역의 농산물에 대한 삼중수소 방사능 조사는 채소류에서 배추를 대상으로 하였다. 시료는 부지 밖 4개 지점에서 수확기에 현지에서 채취하였다.

공기 중 수분, 물시료에 대한 삼중수소 방사능 농도의 최근 10년간 추이를 그림 3-12에 나타내었다. 지하수 시료의 최근 10년간 삼중수소 농도 분석결과를 보면 부지 내 1개 지점, 부지 밖 2개 지점(비교지점 1개 포함)에서 모두 MDA 이하를 유지하고 있었다. 농산물(채소) 시료의 최근 10년간 삼중수소 농도 분석결과를 보면 부지 밖 4개 지점 비교지점 1개 포함)에서 모두 MDA 이하를 유지하고 있었다. 부지 내 4개 및 주변지역 1개 조사 지점에서 실시된 공기 중 수분의 삼중수소의 최근 10년간 추이를 살펴보면 부지 내에서는  $0.060 \sim 0.128 \text{ Bq/m}^3$  그리고 부지 밖 비교 지점에서 MDA 이하를 유지하고 있었다. 빗물에 대한 삼중수소의 최근 10년간 추이를 살펴보면 부지 내에서는  $2.31 \sim 9.52 \text{ Bq/L}$  그리고 부지 밖 비교 지점에서 MDA 이하를 유지하고 있었다. 지표수에 대한 삼중수소의 최근 10년간 추이를 살펴보면 부지 내 4개 조사 지점에 대한 농도의 연평균을 살펴보면  $2.52 \sim 5.84 \text{ Bq/L}$  그리고 부지 밖 비교 지점에서 MDA 이하를 유지하고 있었다[3.15].

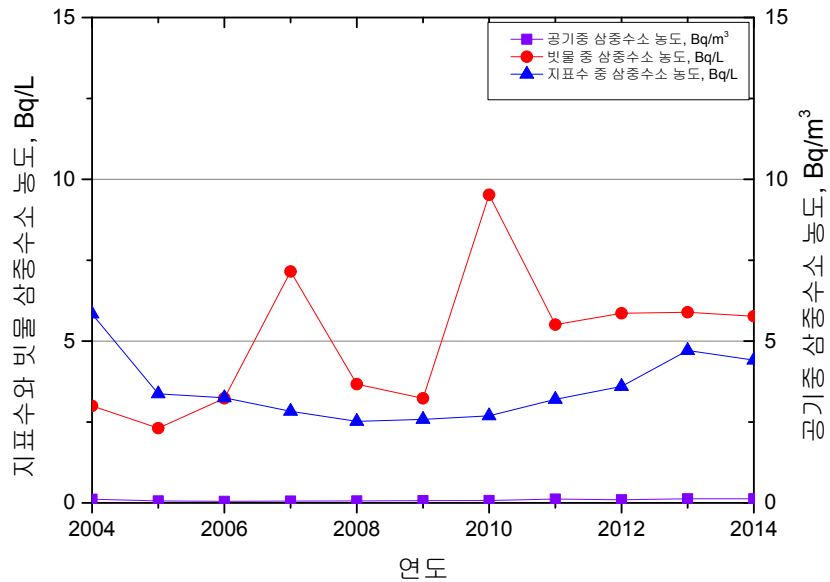


그림 3-12. 연구용원자로 하나로 주변 환경시료 중의 삼중수소 농도 연도별 추이 [3.15]

#### 나. 대덕시설 주변주민 방사선량

한국원자력연구원 다목적 연구용원자로 및 부대 운영시설을 포함하여 대덕부지에 위치한 원자력관련시설의 운영으로 기체상 및 액체상 배출물에 의한 방사선환경 영향평가를 계산하여 수행함으로써 시설운영에 대한 건전성과 부지에 대한 환경 안전성을 확인하고 있다. 기체상 및 액체상 배출물에 대한 기준치는 아래와 같이 원자력안전위원회고시 제2014-34호(방사선.01) “방사선방호 등에 관한 기준”, 제16조(환경상의 위해방지)에 제시되어 있다 (표3-6 참조).

표 3-6. 환경상의 위해 방지를 위한 기준치

| 구분 | 항목  | 시설당 기준치     | 부지당 기준치   | 비고                       |
|----|---|-------------|---|--------------------------|
| 기체 | 감마선에 의한 공기의 흡수선량                          | 0.1 mGv/yr  | ◦ 유효선량<br>0.25 mSv/yr<br>◦ 갑상선등가선량<br>0.75 mSv/yr | ◦ 일반인<br>선량한도<br>1mSv/yr |
|    | 베타선에 의한 공기의 흡수선량                          | 0.2 mGv/yr  |   |                          |
|    | 외부피폭에 의한 유효선량                             | 0.05 mSv/yr |   |                          |
|    | 외부피폭에 의한 피부등가 선량                          | 0.15 mSv/yr |   |                          |
|    | 입자상 방사성물질, H-3, C-14 및 방사성 옥소에 의한 장기 등가선량 | 0.15 mSv/yr |   |                          |
| 액체 | 유효선량                                      | 0.03 mSv/yr |   |                          |
|    | 장기 등가선량                                   | 0.1 mSv/yr  |   |                          |

환경으로 배출된 기체상 및 액체상 방사성 물질은 다양한 경로를 거쳐 최종적으로 인체에 대한 방사능 피폭영향을 주게 된다. 기체 배출물에 의한 주민선량평가에서는 방사성 플룸에 의한 외부피폭, 오염 토양으로부터 외부피폭, 오염 공기흡입에 의한 내부피폭, 오염 음식물 섭취에 의한 내부피폭 등의 피폭경로를 고려하여 평가한다. 액체 배출물에 의한 주민선량평가에서는 농작물 및 식수 섭취에 따른 내부피폭, 수생식품 섭취에 따른 내부피폭, 강변 침적물에 의한 외부피폭, 수영에 의한 외부피폭 등의 피폭경로를 고려하여 평가한다. 그림 3-13은 대덕부지에 위치한 모든 원자력시설의 운영으로 인한 삼중수소 포함 전체핵종에 의한 최대 피폭연령군(소아)에 대한 최대 유효선량 추이를 나타낸다[3.15]. 부지 당 기준치(유효선량: 0.25 mSv/yr) 및 일반인에 대한 선량한도(1 mSv/yr) 이하로 잘 유지되고 있음을 알 수 있다.

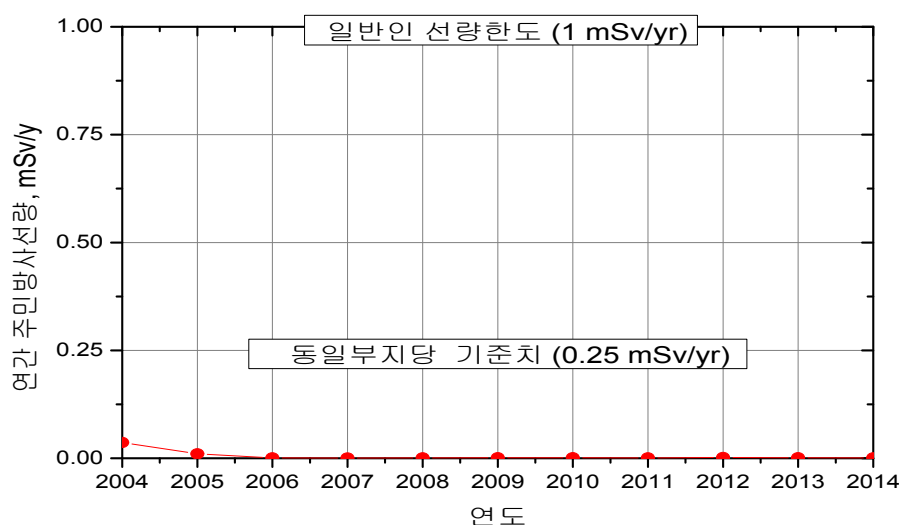


그림 3-13. 대덕 원자력시설 주변 연간 주민 방사선량 (모델에 의한 소아 유효선량)

### 3.3 절 캐나다 삼중수소 방사선 관리

삼중수소는 자연적으로 생성되거나, 원자력발전소의 가동으로 인해 생성되는 방사성원소이다. 삼중수소는 식수나 음식물의 섭취, 또는 호흡을 통한 공기 중 수분의 호흡이나 피부 흡수를 통해 인체로 유입된다. 캐나다에서는 CANDU 원자로를 22개 호기를 건설, 운영하여 왔기 때문에 삼중수소의 배출과 환경영향, 그리고 인체에 미치는 영향에 대한 관심이 매우 높다. 중수를 감속재로 사용하는 CANDU형 원자로의 경우, 타 원자로에 비해 많은 양의 삼중수소를 발생하는 것은 잘 알려진 사실이다.

본 절에서는 중수소 운전 경험이 우리나라보다 훨씬 많은 캐나다에서의 삼중수소 관리 현황을 살펴보고자 한다. 본문은 캐나다원자력안전위원회(CNSC)에서 2009년에 발간한 “2006년 캐나다에서의 삼중수소 방출량과 선량”이라는 제목의 INFO-0793 보고서[3.17]와 CNSC에서 2009년에 발간한 “펄브로크 지역의 농산물 중 삼중수소 농도와 주민선량 평가”라는 제목의 INFO-0798 보고서[3.18] 자료를 기초로 작성하였다.

#### 1. 삼중수소의 생산 및 배출 현황

캐나다에는 온타리오, 퀘벡, 그리고 뉴브런즈윅의 세 지역에 지금까지 24개 호기의 CANDU 원자로가 건설되어 현재는 22개 호기가 가동 중에 있으며 CANDU 원자로 가동 경험은 거의 50여년에 이르고 있다(표 3-7).

표3-7. 캐나다의 원자력발전소(2006년)

| Ontario                                |             |             |                          |                          |                          | Quebec       | New Brunswick           |
|--|-------------|-------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------|-------------------------|
| Plant                                  | Bruce A     | Bruce B     | Pickering-A              | Pickering-B              | Darlington               | Gentilly-2   | Point Lepreau           |
| Licensee                               | Bruce Power | Bruce Power | Ontario Power Generation | Ontario Power Generation | Ontario Power Generation | Hydro-Québec | Brunswick Power Nuclear |
| Reactor Units                          | 4*          | 4           | 4*                       | 4                        | 4                        | 1            | 1                       |
| Gross Electrical Capacity/Reactor (MW) | 904         | 915         | 542                      | 540                      | 935                      | 675          | 680                     |
| Start-up                               | 1976        | 1984        | 1971                     | 1982                     | 1989                     | 1982         | 1982                    |

\* Two of the Pickering A reactors are permanently shut down. Only two reactors are operating at Bruce A.

캐나다에서는 원자로안전 및 관리법 및 관련법들에 의해 환경 및 인체への

위해 방지 등을 위해 삼중수소의 환경 배출량을 규제하고 있다. 원자력발전소 주변 일반주민에 대한 방사선방호한계치는 연간 1mSv 이며, 이를 달성하기 위한 수단으로 핵종별로 유도방출한도(DRL)를 설정하고 있다. 연간방사선방호한계치와는 별개로 “합리적으로 달성 가능한 낮게”(ALARA) 개념 적용으로 실제 배출량은 유도방출한도의 10% 이내의 낮은 수준을 유지하도록 한다.

표 3-8에는 캐나다의 원전에서의 삼중수소 배출량을 제시하였다. CANDU 원자로 한 기에서는 대략 연간  $2.4 \times 10^{16}$  Bq의 삼중수소가 생성되는데, 이 중의 2% 이내인  $(1 \sim 9) \times 10^{14}$  Bq의 삼중수소가 환경으로 배출된다.

표 3-8. 캐나다 원자력발전소에서 연 삼중수소 배출량(2006년)

| Locations     | Facilities                                 | Gaseous Emissions Bq/yr* |       | Liquid effluents Bq/yr* |       |
|---------------|--|--------------------------|-------|-------------------------|-------|
|               |  | Tritium Oxide (HTO)      | % DRL | Tritium Oxide (HTO)     | % DRL |
| Ontario       | Darlington Nuclear Generating Station      | $1.3 \times 10^{14}$     | 0.3   | $1.9 \times 10^{14}$    | 0.004 |
|               | Pickering Nuclear Generating Station**     | $5.7 \times 10^{14}$     | 0.8   | $3.3 \times 10^{14}$    | 0.194 |
|               | Bruce Nuclear Generating Station           | $9.0 \times 10^{14}$     | 1.0   | $7.3 \times 10^{14}$    | 0.226 |
| Québec        | Gentilly-2 Nuclear Generating Station**    | $1.8 \times 10^{14}$     | 0.04  | $2.3 \times 10^{14}$    | 0.019 |
| New Brunswick | Point Lepreau Nuclear Generating Station** | $1.7 \times 10^{14}$     | 0.04  | $1.6 \times 10^{14}$    | 0.001 |

\* Based on 2006 Annual Reports [3.19~3.22]

표 3-9. 캐나다 삼중수소 가공 시설에서 연간 삼중수소 배출량

| Facilities*                | Gaseous Emissions Bq/yr |            |                      |              | Liquid Effluents Bq/yr |       |
|----------------------------|-------------------------|------------|----------------------|--------------|------------------------|-------|
|                            | Tritium Oxide (HTO)     | %DRL OLC   | Tritium Gas (HT)     | % DRL        | Tritium Oxide (HTO)    | % OLC |
| SRB Technologies**         | $7.2 \times 10^{13}$    | 4.8 (OLC)  | $2.1 \times 10^{14}$ | 0.23 (OLC)   | $4.3 \times 10^{10}$   | 21.6  |
| Shield Source Incorporated | $1.3 \times 10^{13}$    | 13.0 (LOD) | $9.8 \times 10^{13}$ | 0.0003 (LOD) | $2.4 \times 10^9$      | ***   |

\* Based on 2006 Annual Reports [3.18~3.21]

\*\* SRB Technologies Inc. operated only for a period of 11 months and did not operate during the occurrence of any type of precipitation late in 2006. SRB Technologies has a more stringent operating licence condition (OLC) for tritium release limits in lieu of DRLs.

\*\*\* Liquid releases from Shield Source Inc. are so small that it is not required to calculate DRLs for liquid releases.

원자력발전소 이외에 삼중수소 가공시설, 연구로, 화학연구소에서도 삼중수소가 환경으로 배출된다. 표 3-9~표 3-11에 원자력발전소 이외의 시설에서의 삼중수소 배출 현황을 나타내었다.

표 3-10. 캐나다 삼중수소 연구시설에서 연간 삼중수소 배출량(2006년)

| Facilities*              | Gaseous Emissions Bq/yr |                       |                      |                      | Liquid Effluents Bq/yr |       |
|--------------------------|-------------------------|-----------------------|----------------------|----------------------|------------------------|-------|
|                          | Tritium Oxide (HTO)     | %DRL                  | Tritium (HT)         | %DRL                 | Tritium Oxide (HTO)    | %DRL  |
| Chalk River Laboratories | $3.2 \times 10^{14}$    | 0.10                  | $9.6 \times 10^{11}$ | $6.4 \times 10^{-6}$ | $9.5 \times 10^{13}$   | 0.006 |
| Whiteshell Laboratories  | $7.3 \times 10^9$       | $1.84 \times 10^{-5}$ | 0                    | 0                    | 0                      | 0     |

표 3-11. 캐나다 화학연구소에서 연간 삼중수소 배출량(2006년)

| Facilities*             | Gaseous Emissions Bq/yr |              |                      |       | Liquid Effluents Bq/yr |      |
|-------------------------|-------------------------|--------------|----------------------|-------|------------------------|------|
|                         | Tritium Oxide (HTO)     | %DRL/OLC     | Tritium (HT)         | %DRL  | Tritium Oxide (HTO)    | %DRL |
| Kinectrics Incorporated | $7.6 \times 10^{11}$    | 0.3 (LOD)    | $1.7 \times 10^{11}$ | 0.004 | $6.6 \times 10^{10}$   | 6.6  |
| Limited Monserco        | $1.7 \times 10^{10}$    | 15.5 (OLC)** | 0                    |       | 0                      |      |

\* Monserco is not required to calculate DRLs since it has been determined that their releases are very small; however, Monserco does have to comply with the operating licence condition (OLC).

캐나다에서 삼중수소의 환경 배출은 엄격한 규제에 의해 관리되고 있으며, 실제 배출량은 규제수준에 비해 낮은 수준을 유지하고 있다. 그림 3-14와 그림 3-15에는 실제 원자력발전소등 삼중수소 배출 시설에서의 삼중수소 배출량과 규제기준치인 유도방출한도(DRL)를 비교하여 나타내었다. 모든 원자력발전소에서 삼중수소의 실제 배출량이 유도방출한도에 비해 1% 이내로 매우 낮게 관리됨을 알 수 있다.

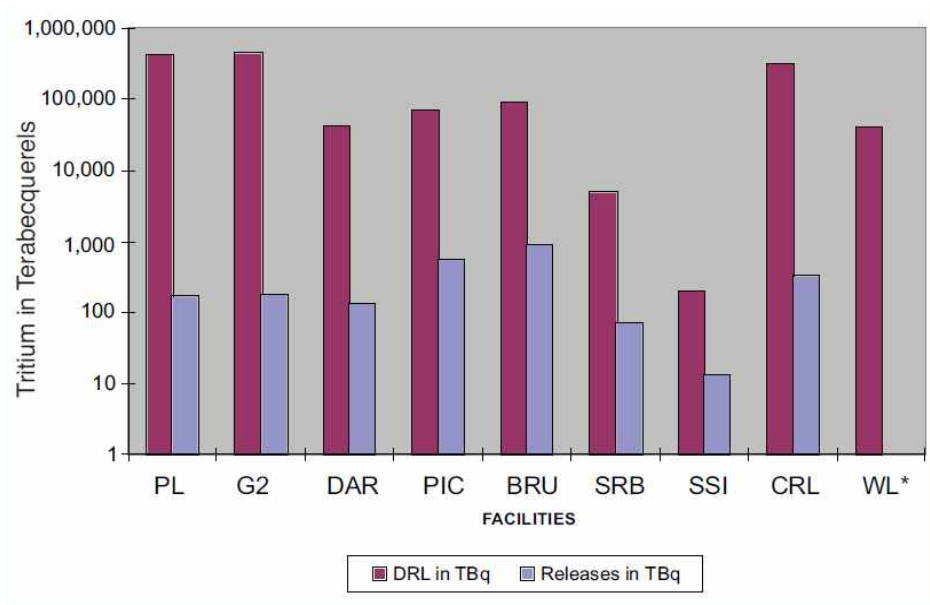


그림 3-14. 캐나다에서의 공기중 삼중수소 배출량과 규제제한치의 비교

\* Whiteshell released 0.0076 TBq in 2006 (far below the scale).

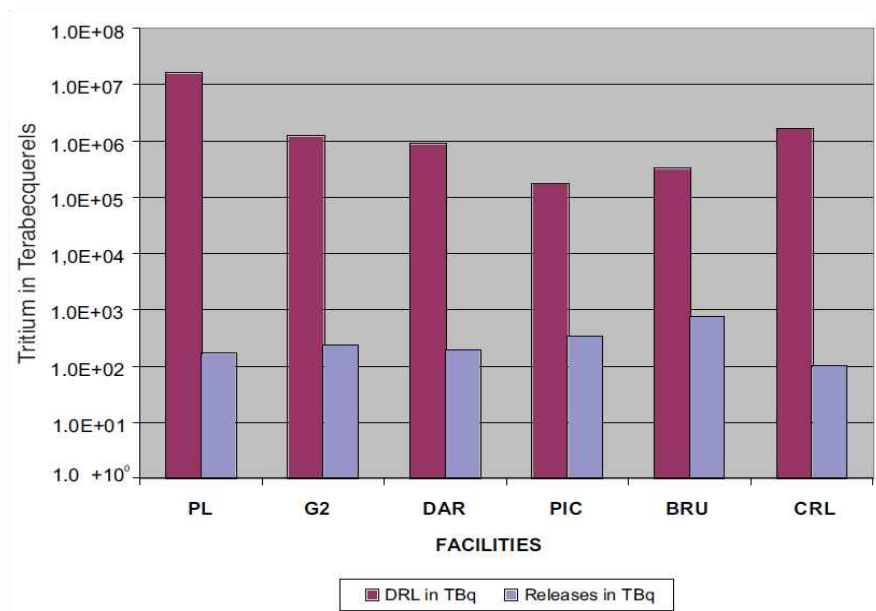


그림 3-15. 캐나다에서의 액체중 삼중수소 배출량과 규제제한치의 비교

\* SRBT, SSI, WL, Kinectrics and Monserco release only very small amounts of tritium in liquid form to the environment (less than 1 TBq; below the scale).



## 2. 원자력발전소 주변 환경에서의 삼중수소 농도

캐나다원자력안전위원회(CNSC)에서는 자국의 원자력발전소 및 삼중수소 처리 시설 등의 주변 환경에 대해 사업자가 지속적으로 적절한 모니터링과 감시를 수행하도록 하고 있다. 이러한 자료는 환경 중으로 배출된 삼중수소의 환경에서의 확산 및 축적 경향, 그리고 더 나아가서 지역민에 대한 피폭선량을 평가하는 기초 자료로 사용된다.

표 3-12~표 3-17에는 캐나다 삼중수소관련시설 주변 환경에서의 삼중수소 농도 측정 결과를 다른 비교지점과 대비하여 제시하고 있다. 삼중수소관련시설 주변지역의 삼중수소 농도가 비교지점보다 상당히 높다.

표 3-12. 캐나다 삼중수소 방출 시설 주변의 공기중 삼중수소 농도

| Facility                      | Distance/Location                              | Tritium<br>Concentration in Air<br>Bq/m <sup>3</sup> (Annual Averages)<br>(a) | Range Bq/m <sup>3</sup> |
|-------------------------------|--|---|-------------------------|
| Bruce Power Site              | Bruce Power Main Gate Exit                     | 2.29  | 1.3 - 3.4(b)            |
|                               | Close Residence Baie du Doré                   | 2.66  | 2.3 - 3.25(b)           |
|                               | Bruce Power Site Average                       | 2.75  | 0.08 - 3.6(b)           |
| Pickering Nuclear Site        | Boundary Sites                                 | 6.2   | 1.3 - 31.2 (d)          |
|                               | Area Sites: Ajax Hospital                      | 1.1   | (c)                     |
|                               | OPG Health Physics Laboratory                  | 1.4   | (c)                     |
| Darlington Nuclear Site       | Boundary Sites                                 | 0.7   | 0.3 - 3.3 (d)           |
|                               | Area Sites: Oshawa                             | 0.2   | (c)                     |
|                               | Bowmanville                                    | 0.5   | (c)                     |
|                               | <b>Ontario Provincial Average</b>              | <b>0.08</b>   | <b>0.05 - 0.10</b>      |
| Gentilly-2 Nuclear Site       | Regional Site                                  | (b)   | 0.05 - 1.8              |
|                               | Reference Site                                 | Less than detection level (0.10)  |                         |
| Point Lepreau Nuclear Site    | All Air Monitoring Stations 45 km from Station | 0.8<br>Below Detection Level: 0.096   | 0.05 - 4.8              |
| AECL Chalk River Laboratories | On Site  | 19.0  | 2.6 - 50.0              |
|                               | Site Boundary                                  | 1.7   | 0.17 - 3.9              |
|                               | Off Site                                       | 0.5   | 0.4 - 0.6               |
| SRB Technologies Inc.         | 62 Meters                                      | 35.66   | 1.6 - 139.0             |
|                               | 220 Meters                                     | 19.05   | 3.9 - 56.4              |
|                               | 1050 Meters                                    | 3.42  | 1.3 - 7.2               |
|                               | 9480 Meters (Petawawa)                         | 0.38  | 0.2 - 1.7               |
| Shield Source Inc.            | 74 Meters                                      | 4.94  | Less than 0.05 to 0.32  |
|                               | 210 Meters                                     | 2.21  | 0.34 - 3.75             |
|                               | 870 Meters                                     | 0.76  | Less than 0.05 to 2.5   |
|                               | 1600 Meters                                    | 0.61  | Less than 0.05 to 1.0   |
| Background*                   | Ottawa, Ontario                                | 0.04  | 0.01 - 0.08             |

(a) Where two methods - active and passive sampling - are used, only the highest value of the two methods is shown.

(b) Numbers extracted from graphs in the source reports.

(c) Missing entries represent data not given in the report.

(d) Range at sampling sites for combined active and passive sampling data values.

\* CRMN, Health Canada, Monitoring Nuclear Power Plants, 2006 data average of six positive measurements.

표 3-13. 캐나다 원자로 주변의 물과 우유중 삼중수소 농도

| Facility                   | Precipitation                                   |                           | Municipal Water Supply   |                                       | Off-Site Wells   |                                       | Surface Water  |                           | Milk                                 |                                   |
|----------------------------|---|---------------------------|--|---------------------------------------|--|---------------------------------------|--|---------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------|
|                            | Location  | Bq/L <sup>(1)</sup>       | Location   | Bq/L <sup>(1)</sup>                   | Location   | Bq/L <sup>(1)</sup>                   | Location   | Bq/L <sup>(1)</sup>       | Location                             | Bq/L <sup>(1)</sup>               |
| Bruce Power Site           | Bruce Power Main Gate (B2)                      | 258.0                     | Kincardine (15 km)   | 6.4                                   | Deep Wells (Highest Avg., Bruce Site)                                  | 19.0                                  | Baie du Dore - Highest   | 143                       | Highest Avg. at Indicator Dairy Farm | 8.7                               |
|                            | Background Value                                | Less than 3.7 - 6.8       | Port Elgin (17 km)   | 17.4                                  | Shallow Wells (Highest Avg., Bruce Site)                               | 58.2                                  | On-site Creek  | 101                       | Provincial Sites                     | Less than 3.7                     |
|                            |   |                           | Southampton (22 km)  | 12.0                                  |  |                                       | Provincial Background (Burlington)   | Range: 3.7 to 6           |                                      |                                   |
| Pickering Nuclear Site     |   |                           | Provincial Background in Drinking Water  | 4.7                                   |  |                                       |  |                           |                                      |                                   |
|                            | Indicator Sites <sup>++</sup>                   | 240                       | Annual Highest Avg. (Whitby WSP - 12 km)   | 6.4                                   | Annual Highest Avg. in Well Water Samples Critical Group Locations     | 115                                   | Annual Highest Avg. in Frenchman's Bay   | 29.8                      | Average for all Farms                | 24.4                              |
|                            | Range   | 121 - 493                 |  |                                       |  |                                       |  |                           | Range for all Farms                  | 18 - 28                           |
| Darlington Nuclear Site    | Indicator Sites - Avg.                          | 28                        | Annual Highest Avg. (Oshawa WSP - 8 km)  | 7.1                                   | Annual Highest Avg. in Well Water Samples Critical Group Locations     | 21.6                                  | Annual Highest Avg. McLaughlin Bay   | 24.2                      | Average for all Farms                | 5.8                               |
|                            | Range   | 14 - 45                   |  |                                       |  |                                       |  |                           | Range                                | 4.0-7.4                           |
|                            | Background (Calgary, Saskatoon and Fredericton) | Less than 1.9             | Provincial Background - Drinking Water (including Lakes Superior, Huron and Ontario) | Less than 1.9 to 4.8                  |  |                                       | Provincial Background - Drinking Water (including Lakes Superior, Huron and Ontario) | Less than 1.9 to 4.8      | Provincial Background                | Less than 1.9                     |
| Gentilly-2 Nuclear Site    | Nearest to Site                                 | 910                       | Drummondville Gentilly Champlain Trois-Rivières                                      | All Samples Below Detection Level: 18 | 4 km south Sector  | Below Detection Limit: 18             | Spent Fuel waste Disposal Area   | Range: 50-892             | 4 Farms (2-8 km)                     | Range: 21-48                      |
|                            | Drummondville                                   | Below Detection Limit: 18 |  |                                       |  |                                       | St. Lawrence River; operation  | Below Detection Limit: 18 | K.D. Farm (8 km)                     | Below Detection Limit: 18         |
| Point Lepreau Nuclear Site | On Site   | 1.5 - 4.6                 |  |                                       | 11 Locations <sup>(2)</sup> Average and Range: 45 km away from Station | 28, 11-61 Below Detection Limit of 24 | All Surface Water Samples  | 77.0 Range: 17-160        | All Farms and Fredericton            | At or below detection level of 24 |

(1) Annual Averages unless noted.

(2) On site, outside the exclusion boundary and belongs to the local residents.

(3) This category includes ponds, lakes, streams and runoff and most of them are from on site locations and two off site locations (freshwater supply reservoirs for Saint John and PLGS, at Spruce Lake and HansonStream).

\*\* Blanks denote data not available.

++ Indicator locations are used to assess the potential dose to the public. These locations are outside the facility perimeter, at points where the most significant public exposure (direct or indirect) occurs or is "predicted to occur".

표 3-14. 캐나다 원자로 주변의 채소 및 해산물에서의 삼중수소 농도

| Facility                | Vegetables and Fruits (1)   |   | Terrestrial Animals*                              |     | Aquatic Samples*   |   | Honey*                                       |                             |
|-------------------------|---|---|---|-----|--|---|--|-----------------------------|
| Bruce Power Site        | Bruce Power Sites: Fruits and Vegetables Background: Provincial Sites | 62<br>2.7                                     | Deer Meat on site<br>No background data available | 810 | Baie du Dore - White Sucker  | 44.6-HTO**<br>16.8-OBT***                                 | Surrounding Areas<br>No other data available | 43.7                        |
|                         |   |   |   |     | White Fish   | 16.1-HTO<br>10.7-OBT                                      |  |                             |
|                         |   |   |   |     | Background: Lake Huron - White Sucker                                | 7.7-HTO<br>7.3-OBT  |  |                             |
|                         |   |   |   |     | Background: Lake Huron White Fish                                    | 8.2-HTO<br>12.9-OBT                                       |  |                             |
| Pickering Nuclear Site  | Fruits, Vegetables and Silage   | 91 HTO Range: 13-1194<br>77 OBT Range: 37-144 |   |     | Pickering Outfall Fish Samples (White Sucker and Round Whitefish)    | 10.2 HTO Range: less than 1.9-26<br>31.0 OBT Range: 25-36 | Surrounding Areas                            | 68 Range: 31-86             |
| Darlington Nuclear Site | Fruits, Vegetables and Silage   | 22.5 Range: 4.6-61                            |   |     | Darlington Outfall Fish Samples (White Sucker and Round Whitefish)   | 8.1 HTO Range: 4-19 33 OBT Range: 22-44                   | Surrounding Areas                            | 48 Range: 27-81             |
|                         |   |   |   |     | McLaughlin Bay, Assorted Pan Fish Samples                            | 23.0 HTO Range: 21-25<br>26.0 OBT                         |  |                             |
|                         | Provincial Background (Vegetables)                                    | 2.7 HTO Range: 1.9-3.8                        |   |     | Lake Ontario Fish Samples (White Sucker and White Fish)              | 5.0 HTO Range: 2.7-7.4<br>18.0 OBT Range: 16-20           |  |                             |
|                         |   | 29 OBT Range: 25-36                           |   |     | Far field: Lake Huron Fish Samples (White Sucker and Lake Whitefish) | 4.2 HTO Range: 1.8-7.8<br>16.0 OBT Range: 14-17           |  |                             |
| Gentilly-2              | Vegetables (at 20 km)   | Below Detection Limit of 18                   |   |     |  |   | Bécancour (Maple Syrup)                      | Below Detection Limit of 18 |
| Point Lepreau           | Garden Vegetables Dipper Harbour                                      | Below Detection Limit                         |   |     | Sea Food and Sea Plants  | Below Detection Limit                                     |  |                             |

(1) Vegetables and fruits are sampled during the growing season. Values are averages for all Vegetables and/or all fruit samples from all farms.

(2) Annual Vegetables unless noted otherwise.

\* Blanks denote data not available.

\*\* HTO: Tritiated Water or Vapour. Tritium Oxide: Tritium incorporated into water.

\*\*\* OBT: Organically Bound Tritium - Tritium incorporated into organic compounds such as proteins, in nature (fruits and vegetables, organisms, humans, etc.).

표 3-15. 캐나다 연구로 및 삼중수소처리설비 주변에서의 삼중수소 농도

| Facility*                     | Well Water                         |        | Surface Water   |                      | Milk and Meat                                |                                 | Vegetables and Fruits (Averages)                        |  |
|-------------------------------|------------------------------------|--------|---|----------------------|--|---------------------------------|---|--|
|                               | Location                           | Bq/L   | Location  | Bq/L                 | Location                                     | Bq/L                            | Location  | Bq/Kg (fresh weight)                   |
| AECL Chalk River Laboratories |                                    |        | #Onsite, east side stream discharging to Ottawa River                               | 207.0                | Milk Deep River                              | 26.0                            | Garden Produce Deep River                               | 28.0 (25-32)++                         |
|                               |                                    |        | Ottawa River - Deep River (9 km upstream)   | 3.1                  | Milk Pembroke                                | 16.0                            | Chalk River   | 16.5 HTO (11-21)<br>0.6 OBT (0.3-0.7)  |
|                               |                                    |        | Ottawa River Water at the boundary  | 14.0                 | CRL Site Area animals                        | 28-1447 HTO**<br>4.0-322 OBT*** | Pembroke  | 141 HTO (126-169)++                    |
|                               |                                    |        | CRL Downstream 9 km   | 114.0                | Meat deer buck within 25km radius            | 15.0 HTO<br>9.0 OBT             | Balmer Bay  | 76.0 HTO (21-126)<br>1.5 OBT (0.6-2.2) |
|                               |                                    |        | Petawawa Downstream 18 km   | 6.0                  | (50 km) Meat deer, buck outside 50km radius  | 3.0 HTO<br>2.2 OBT              | Killaloe (Background location)                          | 32 HTO<br>0.4 OBT                      |
|                               |                                    |        |   |                      | Local Farms Beef (Chapeau, Que)              | 13.0 HTO<br>13.0 OBT            |   |  |
| SRB Technologies Inc.         | Residential well 465 m             | 1,875  | Ottawa River at Westmeath   | 5.0                  | Average, Locally Produced Milk from a Market | 13.0                            | Nearest Local Garden Produce                            | Range: 738-500-949                     |
|                               | Residential well 650 m             | 455    | Madawaska River at Arnprior   | 4.0                  |  |                                 | Background: Local Grown Vegetable Samples (from Market) | Range: 141-113-163                     |
|                               | Residential well 1,100 m           | 406    |   |                      |  |                                 |   |  |
|                               | Residential well 2,200 m           | 3      |   |                      |  |                                 |   |  |
|                               |                                    |        |   |                      |  |                                 | Fruits: Apples  | 1,257                                  |
| Shield Source Inc.            | Well water - house opposite to SSI | 302+++ | Highest in Pond Water at 220 m  | 1,490                | Nearest Dairy Farm (2,860 m)                 | Less than Detection Limit       | 250 m from stack (grapes)                               | 1,529 Bq/l                             |
|                               |                                    |        | Water Sample at 870 m   | 106                  |  |                                 | 220 m from stack (apples)                               | 3,091 Bq/l                             |
|                               |                                    |        | Water Sample at 1,600 m   | 51,0++               |  |                                 | 1,000 and 2,500 m from stack (grapes and berries)       | Below detection level                  |
|                               |                                    |        | Provincial Background: Drinking Water (including Lakes Superior, Huron and Ontario) | Less than 1.9 to 4.8 |  |                                 | Provincial Background: Vegetables                       | 2.7 HTO<br>Range: 1.9-3.8              |

\* Tritium was not measured in the environmental media around Whiteshell Laboratories.

\*\* HTO: Tritiated Water or Vapour. Tritium Oxide: Tritium incorporated into water.

\*\*\* OBT: Organically Bound Tritium - Tritium incorporated into organic compounds in nature fruits and vegetables, organisms, humans, etc.).

++ OBT Not Monitored.

+++ One monthly sample above the detection limit of 50 Bq/l. All other monthly samples were less than detection limit in 2006.

표 3-16. 초크리버 폐기물관리시설 주변에서의 지표수중 삼중수소 농도

| Waste Management Area        | Location  | Average (Bq/L)         |
|------------------------------|---|------------------------|
| Liquid Waste Management Area | East Swamp (ESW)  | 547                    |
| Waste Management Area A      | South Swamp (SSW)<br>Main Stream (MSC)<br>Perch Lake (PL2)                          | 1,560<br>689<br>6,530  |
| Waste Management Area B      | Spring Disposal B (SDB)<br>Perch Lake (PL1)   | 2,310<br>3,130         |
| Waste Management Area C      | Duke Stream Weir (DSW)<br>Maskinonge Lake Outlet (MLO)<br>Chalk Lake                | 20,400<br>1,220<br>127 |
| Perch Lake System            | Perch Creek Weir (PCW)  | 6,670                  |
|                              | Provincial Background in surface waters including Lakes Superior, Huron and Ontario | Less than 1.9 to 4.8   |

표 3-17. 캐나다 삼중수소 배출 시설 주변의 지하수에서의 삼중수소 농도

| Facility  | Number of Monitoring Wells   | Maximum Concentration (Bq/L)                         | Comments on the Contamination Sources   | Data Year | Ref.     |
|---|--|--|---|-----------|----------|
| SRB Technologies  | 15   | 108,879  | Stack emission washout by precipitation   | 2007      | [17]     |
| Shield Source Inc.  | 4  | 6,996  | Stack emission washout by precipitation   | 2007      | [18]     |
| Darlington Nuclear Site                                   | 8  | Below detection limit                                |   | 2005      | [19]     |
| Bruce A   | 12   | 667  | Airborne emission washout by precipitation  | 2005      | [20, 21] |
| Bruce B   | 14   | 1,593  | Airborne emission washout by precipitation  | 2005      | [20, 21] |
| Bruce Western Waste Management Facility                   | 18   | 41,000   | Foundation and subsurface drainage  | 2005      | [22]     |
| Point Lepreau Plant and Waste Management Facility Area    | 11   | 1,100  | Emission washout by precipitation   | 2006      | [11]     |
| Point Lepreau Solid Radioactive Waste Management Facility | 34   | 400  | Airborne emission washout by precipitation  | 2006      | [11]     |
| Gentilly-2  | 7  | 20,553   | Emission washout by precipitation   | 2006      | [10]     |
| Pickering Nuclear (PN)                                    | Most tritium in groundwater at the site is captured by the foundation drains that are the lowest points acting as a hydraulic sink |  |   | 2006      | [23]     |
| PN Unit 1-4 Area  | 30   | 128,800,000  | Sources: (1) Leaking concrete pit in the Moderator Purification room. The pit gets tritium from spills on the floor; (2) Leaking RAB sumps receiving tritium from spent resin storage tank. Problem fixed. Tritium concentration is decreasing. |           |          |
| PN UPP (Upgrading Plant Pickering Area)                   | 32   | 888,000  | Past practice of discharging tritiated water onto the ground. Practice stopped. No new releases. Tritium concentration in ground is decreasing.   |           |          |
| PN Irradiated Fuel Bay A&B (Wells and Sumps)              | 13   | 21,100,000   | Due to tritium migration from Unit 1 area and sump leaking. Repairs underway in 2007.   |           |          |
| PN Vacuum Building Area                                   | 11   | 1,200,000  | Due to tritium migration from Unit 1 area and sump leaking. Repairs underway in 2007.   |           |          |
| PN Catchbasin-97  | 6  | 108,410  | Historical sources in 70's and 80's from Moderator Upgrader (Sulzer).   |           |          |
| PN "B" Reactor Auxiliary Bay (Sumps)                      | 4  | 10,200,000   | Leaking sump pipes. Repaired at Units 5 and 7. Repairs at Unit 6 were completed in 2007. Sump tritium concentration is decreasing. Unit 8 is normal.  |           |          |
| Chalk River Laboratories - NRU Reactor Site               | 8 monitoring wells are around the fuel rod bay room and 21 monitoring well between the NRU building and Ottawa River               | Between the NRU Building and Ottawa River: 3,240,000 | AECL identified the Rod Bay leakage as the source. AECL is in the process of addressing the leakage issue.  | 2006      | [24]     |
| Chalk River Laboratories - NRX Fuel Bay Area              |  | 3,000,000  | Due to Fuel Rod Bay leaking. The Bay water was emptied in June 2006.  | 2005      | [25]     |

### 3. 삼중수소 배출에 의한 주민 피폭선량

그림 3-16에 캐나다 삼중수소배출 시설 주변에서의 연간 주민 피폭선량을 보여준다. 방출되는 방사성 핵종들 중 삼중수소가 주민피폭선량기여분의 거의 대부분을 차지하고 있다. 그러나 삼중수소 배출에 의한 주민선량은 연간 선량 제한치인 1 mSv의 1% 이내로 낮게 유지되고 있다.

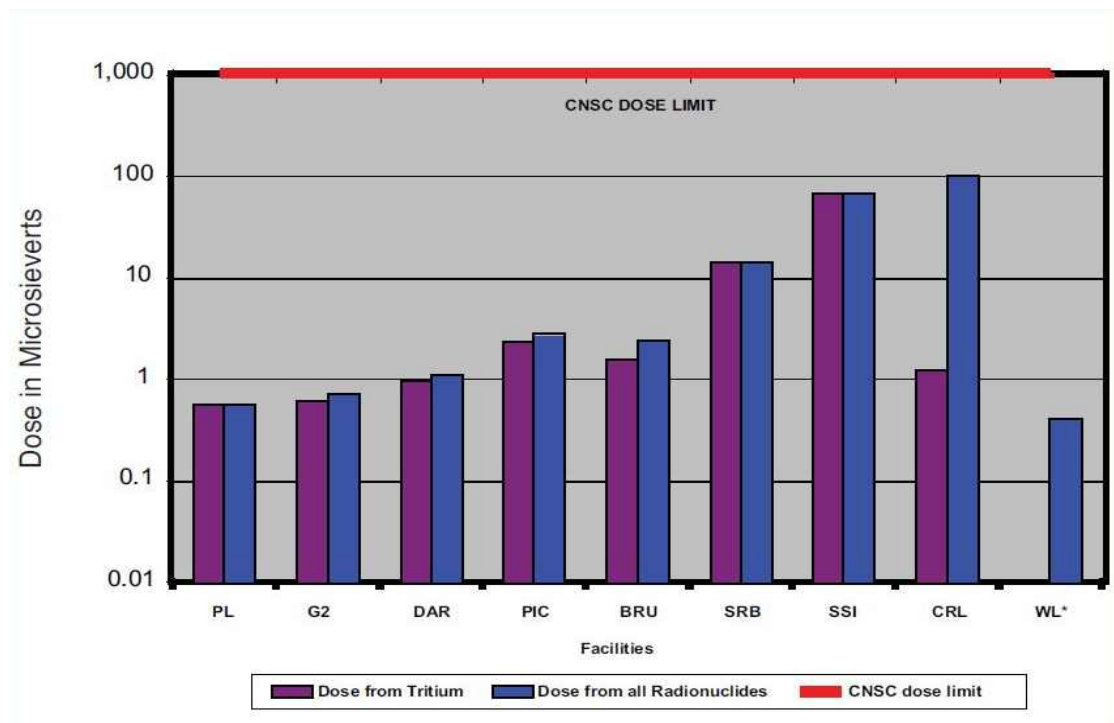


그림 3-16. 캐나다 삼중수소배출 시설 주변 주민삼중수소피폭량과 선량제한치의 비교

캐나다 켈브록 지역에 있는 SRBT는 1991년부터 삼중수소를 이용하여 광원(light source)을 생산해 왔으며, 2007년에 공장이 폐쇄되었다. 2005년도와 2007년도에 캐나다 규제기관인 CNSC는 켈브록 지역에 대한 삼중수소 정밀 측정 조사를 수행하였다. 이 조사의 주된 내용은 환경중의 삼중수소농도, 그리고 주민에 대한 피폭선량 평가이다.

그림 3-17~그림 3-18에 각각 2005년도와 2007년 말의 켈브록의 SRBT 시설 주변에서 거리에 따른 농산물에서의 삼중수소 비방사능을 나타내었다. 농산물의 삼중수소 농도는 2.7 km 지점에서 급격히 떨어지는 것을 알 수 있다.



지표식물과 지하식물간의 삼중수소농도는 큰 차이는 거의 없었으며, 삼중수소는 식물의 대사에 의해 공기로부터 식물로 빠른 속도로 전이되어 평형을 이루는 것을 알 수 있다. 운영 중지된 2007년 이후의 삼중수소 농도는 시설이 가동 중인 2005년에 비해 1/100 수준으로 감소되었다. 이 결과가 주는 의미는 16년 동안 시설을 장기 가동했음에도 불구하고, 환경에서의 삼중수소의 축적은 일어나지 않았으며, 시설의 가동정지 후에 확산 및 희석에 의해 삼중수소농도는 빠르게 감소한다는 것을 확인시켜주었다는 점이다.

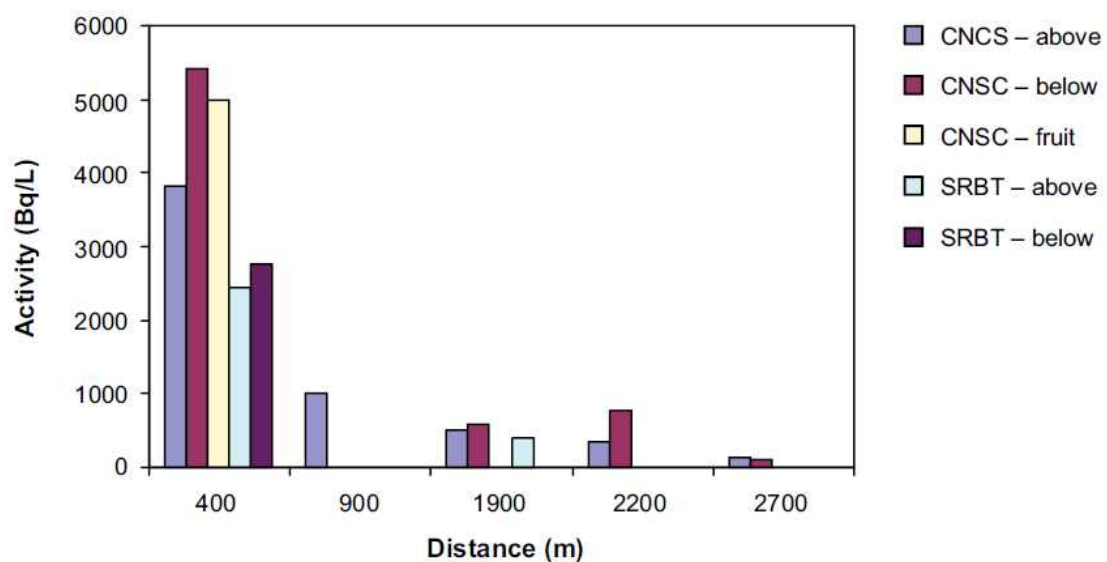


그림 3-17. 2005년도 SRBT 주변 농산물에서의 거리에 따른 삼중수소 농도

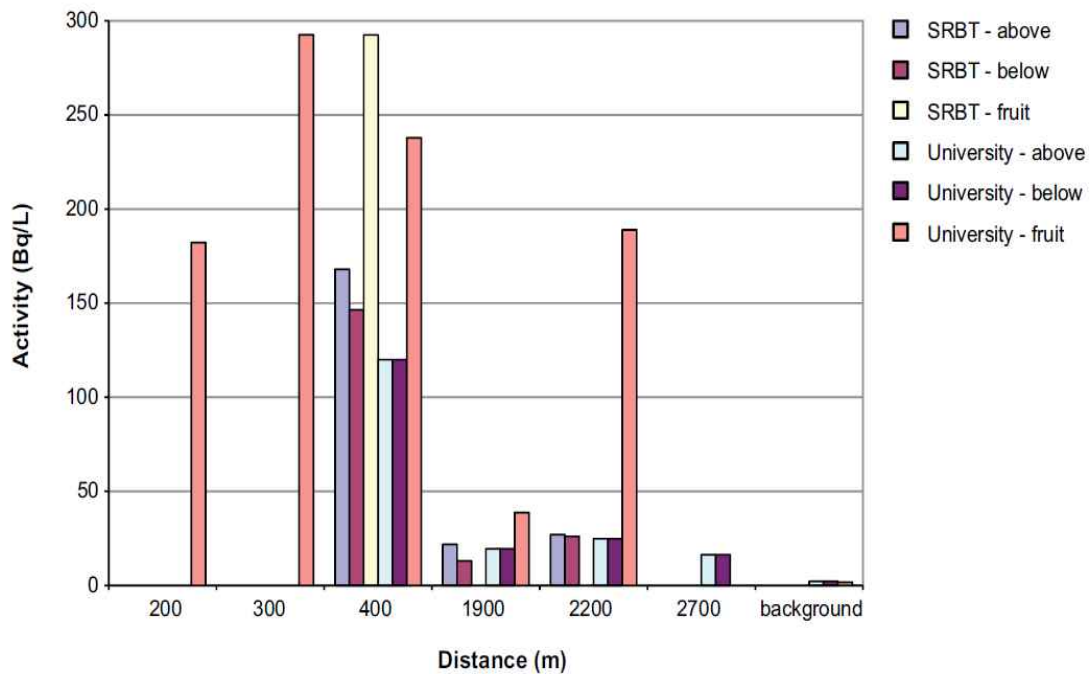


그림 3-18. 2007년도 SRBT 주변 농산물에서의 거리에 따른 삼중수소 농도

오타와 대학에서는 2007년 SRBT 시설 주변에서의 환경중의 삼중수소농도와 주민의 섭식 형태를 고려하여, 주민의 피폭선량을 추정하였다. 그림 3-19에는 성인에 대한 거리별 주민피폭선량을 나타내었다. 시설로부터 2.7 km 떨어진 지점의 피폭선량이 백그라운드 수준(연간 0.0002 mSv 이내)으로 떨어지는 것을 보여준다. 시설 주변에서 가장 높은 피폭의 경우도 연간 0.004 mSv 이내로서 캐나다의 일반인 피폭제한치인 연간 1 mSv의 1/250의 낮은 수준을 보여주고 있다.

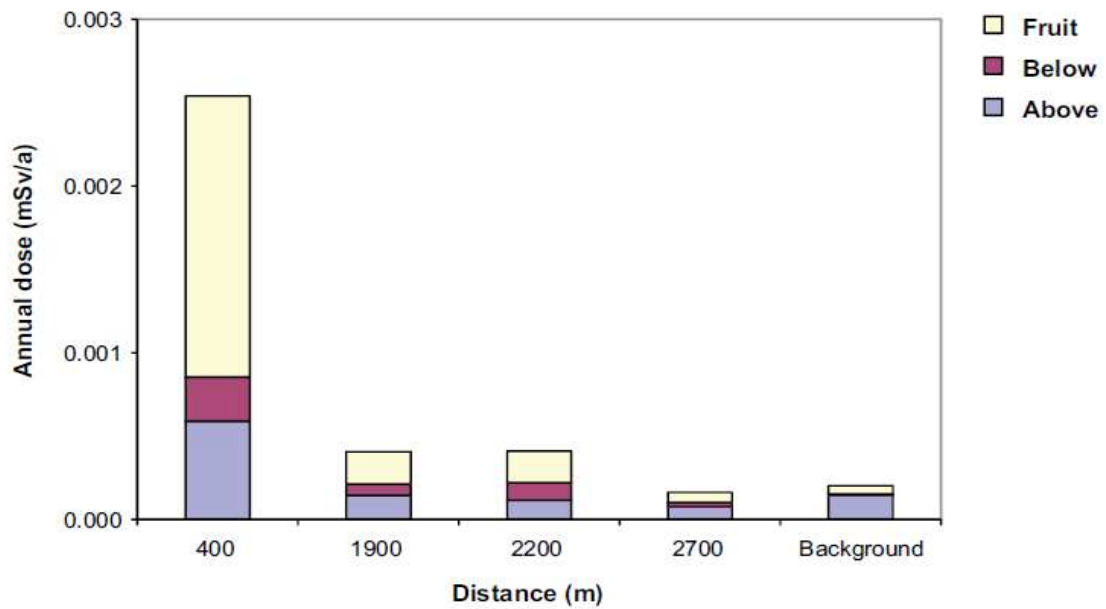


그림 3-19. SRBT 주변지역의 거리별 삼중수소에 의한 성인 피폭선량

그림 3-20에는 유아를 포함한 삼중수소 피폭선량을 나타내고 있다. 유아의 경우는 타 지역에서 생산하는 우유를 주로 섭취하는 관계로 성인에 비해 피폭선량이 낮은 결과를 보여 주었다.

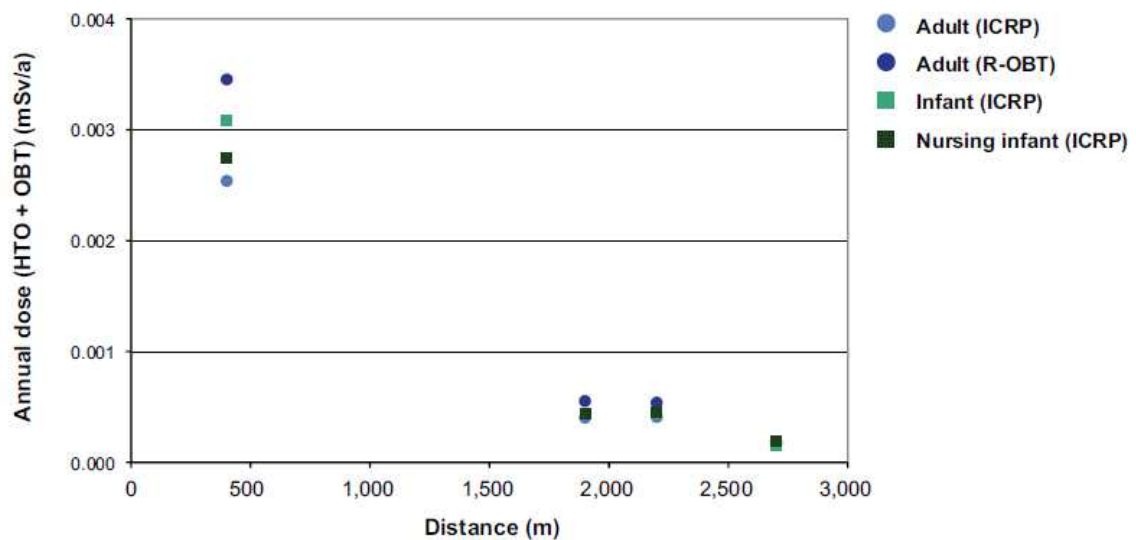


그림 3-20. SRBT 주변지역의 거리별 삼중수소에 의한 성인 및 유아 피폭선량

### 3.4 절 삼중수소관리 결과

국내 원자력발전소에서 배출되는 삼중수소의 양은 법에서 규정한 배출 기준보다 매우 낮은 수준으로 안전하게 잘 관리되고 있다. 그러나 원전 주변 환경 시료에서 삼중수소 농도 준위가 비교지역보다 높게 검출되고 있고, 주민의 뇨시료에서도 삼중수소가 검출되고 있어 지역 주민의 건강에 대한 우려와 불안감이 상존하는 것도 현실이다. 현 수준의 삼중수소 배출관리가 법적으로 기술적으로는 문제가 없어 보이지만 윤리적 측면에서 지역 주민의 불안과 우려를 보듬을 수 있는 정책적 배려가 필요해 보인다. 원전 사업자인 한수원은 삼중수소를 포함한 모든 핵종의 환경 배출을 줄이는데 더 많은 노력과 투자를 아끼지 말아야 하겠고, 동시에 주민 건강의 지속적 모니터링 및 장기적 삼중수소 인체 영향 연구 지원을 통해 삼중수소 인체 영향에 대한 객관적이고 과학적인 정보를 계속 축적할 필요가 있겠다. 최근 발전소 주변 지역 주민에 대한 삼중수소 인체 영향연구가 대규모로 추진될 계획이 알려지고 있어 가까운 시일 내에 주민과 소통할 수 있는 과학적 자료를 확보할 수 있을 것으로 보인다.

다목적 연구용원자로인 하나로의 지난 10년간 삼중수소 배출량은 연도별로 큰 폭의 변화가 없이 국내 원전에 비해서는 현저히 낮은 수준으로 배출 관리되고 있으며, 시설운영으로 인한 삼중수소 포함 전체핵종에 의한 최대 피폭선량은 일반인에 대한 선량한도 이하로 안전하게 잘 관리되고 있다.

우리나라보다 중수소 운전 경험이 오래된 캐나다의 경우도 우리나라와 유사하게 원자력 시설 주변 환경에서의 삼중수소 농도는 일반 환경에서의 삼중수소농도에 비해 수십~수천 배까지 높은 수치를 보여 주었으나 실제 피폭선량은 연간선량한도(1 mSv) 보다 매우 낮은 것으로 알려져 있다. 또한 시설 가동이 장기화되어도 삼중수소가 환경에 축적되는 경향은 나타나지 않았다.

### 3.5 절 참고문헌

- [3.1] 한국수력원자력주식회사, 원자력발전소 주변 환경방사능 조사 및 평가 보고서 (2004년~2014년 연보), 한국수력원자력연구소,
- [3.2] 이철연, 월성 원전 삼중수소 제거설비 (TRF), 원자력산업학회지 (3월), p35-41, 2003.
- [3.3] 한국수력원자력(주), 원자력발전소 주변 방사선 환경감시 및 영향평가 체계 개선- part : 주민방사선량 평가분야 (최종보고서), 2009,
- [3.4] 한국수력원자력(주), 원자력발전소 주변 환경방사능 조사 및 평가보고서
- [3.5] 한국원자력안전기술원, 원자력이용시설 주변 방사선 환경 조사 및 평가 보고서, KINS/AR-140, Vol.25, 2014.
- [3.6] 한국원자력안전기술원, 원자력이용시설 주변 방사선 환경 조사 및 평가 보고서, KINS/AR-140, Vol.24, 2013.
- [3.7] 한국원자력안전기술원, 원자력이용시설 주변 방사선 환경 조사 및 평가 보고서, KINS/AR-140, Vol.23, 2012.
- [3.8] 한국원자력안전기술원, 원자력이용시설 주변 방사선 환경 조사 및 평가 보고서, KINS/AR-140, Vol.22, 2011.
- [3.9] 한국원자력안전기술원, 원자력이용시설 주변 방사선 환경 조사 및 평가 보고서, KINS/AR-140, Vol.21, 2010.
- [3.10] 금동권 등, 삼중수소 농작물 오염 평가 모델 및 검증, KAERI/TR-3166/2006, 2006
- [3.11] 한국원자력학회-대한방사선방어학회, 원전주변주민과 갑상선암 발생에 관한 과학적 분석, 2015 (ISBN 979-11-9555566-0-1)
- [3.12] U.S Nuclear Regulatory Commission (NRC), "Calculation of Annual Doses to Man from Routine Releases of Reactor Effluents for the Purpose of Evaluating Compliance with 10CFR Part 50 Appendix I", Reg.Guide 1.109 Rev. 1, 1977
- [3.13] 한국원자력안전기술원, "방사능 방재 환경 규제기술 개발 최종보고서. 별책부록: 주민피폭선량 평가지침 및 INDAC 사용자 지침서", KINS/GR-199 별책 1, 2000

- [3.14] 이갑복, 국내외  $^3\text{H}$  및  $^{14}\text{C}$  주민방사선량평가방법 비교 분석, ODCMUG, 워크숍, 2011, 11, 목포 신안비치 호텔
- [3.15] 한국원자력연구원, 방사선환경 조사계획서, 2013.
- [3.16] 한국원자력연구원, 원자력시설주변 환경방사선 평가 보고서 (2004년~2014년 연보).
- [3.17] CNSC, 2009, Tritium Releases and Dose Consequences in Canada in 2006, INFO-0793.
- [3.18] CNSC, 2010, Tritium Activity in Garden Produce from Pembroke in 2007 and Dose to the Public, Part of the Tritium Studies Project, INFO-0798.
- [3.19] Letter, T.N. Mitchell, OPG to T.E. Schaubel and G.R. Schwarz, CNSC, April 30, 2007, "Ontario Power Generation 2006 Results of Radiological Environmental Monitoring programs, E-Doc #3039651.
- [3.20] Letter from Frank Saunders to P. Webster, " Bruce Power Annual Summary and Assessment of Environmental Radiological Data for 2006", April 11, 2007, E-Doc #3037578.
- [3.21] Letter from Frank Saunders to K. Lafreniere, "Transmission du rapport annuel sur la surveillance de l'environnement de la Centrale Nucleaire de Gentilly-2: G2-RT-2007-00518-011", E-Doc #3039723, April 20, 2007.
- [3.22] Letter from D. Parker to K. Lafreniere, "Submission of Point Lepreau Generating Station Environmental Monitoring Program for 2006", E-Doc #3045960, April 27, 2007.

## 4장 삼중수소의 인체영향

### 4.1 절 삼중수소의 위해도 평가

지금까지 삼중수소에 의해 유발된 인체 암 보고는 없다. 다만 일반대중이 노출될 수 있는 농도보다 훨씬 높은 고농도의 삼중수소를 사용한 동물실험에서 세포사멸, 유전적 손상, 생식기능 저해 등의 효과를 보였다는 보고가 있으며, 고농도의 삼중수소에 노출되어 피폭선량이 500 mSv 이상일 때 생쥐에서 암을 유발하는 것이 확인되었다. 역학연구 결과를 종합적으로 분석한 결과에서도 기형출산, 암발생 또는 사망률 증가 등의 증거는 확인되지 않았다.

#### 1. 생물학적효과비(RBE)

##### 가. 개요

흡수선량은 단위질량당 조직 또는 개별 세포 내에 전달된 방사선 에너지의 양을 말한다. 그러나 생물학적 손상 정도, 방사선 유형, 방사성동위원소의 화학적 형태와 같은 요인 또한 중요한 역할을 한다. 따라서 서로 다른 방사선의 흡수선량을 통일하여 사용하려면, 방사선 효과를 정량화해야 하며, 이때 기준 방사선에 의한 효과와 관심 방사선의 효과를 엄격히 비교해야 하는데, 이러한 두 가지 형태의 방사선이 반응하는 비율을 생물학적효과비(RBE : Relative Biological Effect)라고 한다.

ICRP 103에서는 “동일한 생물학적 영향을 준다고 간주되는 방사선량에 대한 저-LET(선형에너지전달) 기준 방사선의 비”라고 RBE를 정의한다. 전통적으로 여기에는 감마선과 200~250 kVp X선이 모두 포함된다. 그러나 삼중수소 베타 방사선에 대해 어떤 기준 방사선을 선택하느냐에 따라 RBE는 달라진다. AGIR<sup>17)</sup>은 기준 방사선의 선량이 삼중수소 조사와 동일한 방식으로 전달되어야 한다고 권고하고 있다.

Straume과 Carsten은 삼중수소 피폭과 관련한 인체 영향에 대해 당시 구할 수 있는 문헌들에 대하여 광범위하고 포괄적인 종합분석을 제공했으며,

17) AGIR: Advisory Group on Ionising Radiation(Public Health England)

이들의 종합분석은 아직까지도 신뢰받고 있다[4.1]. 이들은 HTO와 200~500 kVp X선을 비교한 12건과  $^{137}\text{Cs}$  또는  $^{60}\text{Co}$ 의 감마선과 비교한 21건의 RBE 연구를 확인하였으며, 그 결과, 기준 방사선 X선에 대해 산술평균 RBE를 1.8, 감마선에 대해 2.3으로 계산하였다.

2004년 12월에 영국 방사선방호위원회(HPA)는 독립적으로 구성된 ‘전리 방사선 자문그룹(AGIR)’에 다음과 같은 임무를 부여하였다. “삼중수소의 선량추정에 대한 종합분석을 수행하며, 종합분석은 다양한 견해를 고려해야 하고 내부피폭에 대한 위험성 및 불확실성에 대해 과학적으로 건전한 합의를 제공해야 한다.”는 것이었다. 이에 따라 작성된 AGIR 보고서[4.2]에는 삼중수소 RBE 값을 추정했던 여러 논문을 비판적으로 검토하였으며, 아래와 같이 결론을 내리고 있다.

- a) 삼중수소 베타 입자와 유사한 LET 방사선에 대한 여러 이론 및 실험연구는 감마선과 비교한 삼중수소 RBE 값이 최소 2라고 판단된다.
- b) 핵변환 영향 등은 중요한 영향을 미치지 않지만, 어떤 영향은 관찰된 RBE 값을 증가시키는 방향일 것이다.
- c) 실험적으로 결정된 RBE 값은 기준 방사선의 선택에 따라 크게 달라질 수 있다. RBE 값을 보고하기 위해 고에너지 감마선을 선택하는 것이 바람직하다고 권장된다.
- d) HTO의 RBE 값은 기준 X선과 비교하면 1과 2 사이, 감마선과 비교하면 2와 3 사이에서 관찰되었다.
- e) 발표된 RBE 값이 사람에 대해서는 다소 과소평가할 수 있다는 증거가 있다. 왜냐하면 많은 연구가 사람들이 일반적으로 받는 것보다 더 높은 선량과 선량률로 전달된 방사선을 사용했기 때문이다.
- f) AGIR은 만성적으로 전달된 경질 감마선에 대해 가장 가능성이 높은 RBE 값이 2와 3 사이에 있고 2가 가장 적절한 값이라고 간주한다.

AGIR 보고서의 가장 중요한 권고사항은 국제적으로 합의된 값을 이용할 수 있을 때까지 삼중수소의 RBE를 임시적으로 2로 사용하자는 것이었다.

“ICRP는 ‘모든 저LET 방사선에 대해 계속  $w_R$ 을 1로 사용하는 것은 방사선 피폭에 따른 확률적 영향의 개별 위험을 후향적으로 평가하기 위한 것이 아니라고 언급했다(ICRP 권고, 2007a의 부록 B). 증거의 우월성이 1 보다 큰 RBE를 지지한다는 것이 우리의 견해이고 우리는 역학연구의 해석과 개별



후향적 위험 평가에서, 방사선 가중치( $w_R$ ) 1이 RBE의 대용물이라고 가정하는 대신 이용 가능한 과학적 증거와 더 일치하는 값을 사용해야 한다고 권장한다. 국제적으로 합의된 RBE를 사용할 수 있을 때까지 임시적으로 RBE 값을 2로 사용할 것을 제안한다. 우리는 모든 광자 방사선에 대해  $w_R$ 을 1로 선택해야 한다는 ICRP 권고의 논리를 이해하지만 일상적인 전향적 방사선방호 평가에서도 삼중수소의  $w_R$ 로 2를 사용할 것을 제안한다.”

## 나. 생물학적효과비 연구결과

표 4-1. 다양한 실험 조건에서 삼중수소의 RBE 연구결과

| 구 분                                  | 평균값<br>(95%신뢰구간) | 리틀과 램버트<br>재계산(2008)[4.4] | 리틀과 램버트<br>(2008)[4.4] | 스트라우스와<br>카스텐(1993)     |
|--------------------------------------|------------------|---------------------------|------------------------|-------------------------|
| 모든 체내                                | 1.84(1.49-2.18)  | 1.75(1.40-2.11)           | -                      | -                       |
| 모든 체외                                | 1.85(1.61-2.08)  | 2.14(1.45-2.84)           | -                      | -                       |
| 체내 급성 X선                             | 0.81(0.46-1.17)  | -                         | 0.56(0.31-0.96)        | -                       |
| 체내 만성 X선                             | 1.34(0.94-1.74)  | -                         | 1.17(0.96-1.39)        | -                       |
| 체내 만성<br>감마선                         | 2.36(2.03-2.68)  | 2.21(1.80-2.72)           | 1.63(1.49-1.77)        | -                       |
| 체외 감마선                               | 1.91(1.56-2.27)  | 2.11(1.50-2.72)           | 1.98(1.85-2.12)        | -                       |
| 체외 급성 X선                             | 1.80(1.39-2.20)  | 2.34(0.94-3.74)           | 1.45(1.32-1.58)        | -                       |
| 모든 만성 X선                             | 1.34(0.94-1.73)  | 데이터 불충분                   | -                      | 1.67*(1.31 - 2.03)<br>* |
| 모든 급성 X선                             | 1.28(0.93-1.63)  | 1.56(0.70-2.42)           | -                      | 1.69*(1.26-2.12)*       |
| 모든 만성<br>감마선                         | 2.15(1.89-2.41)  | 2.16(1.80-2.52)           | -                      | 2.36*(1.96-2.76)*       |
| 모든 급성<br>감마선                         | 데이터 불충분          | 데이터 불충분                   | -                      | 1.95*(1.14-2.77)*       |
| 모든 만성                                | 2.00(1.75-2.25)  | 2.01(1.69-2.33)           | -                      | -                       |
| 모든 급성                                | 1.28(0.53-1.64)  | 1.56(0.70-2.42)           | -                      | -                       |
| 모든 X선                                | 1.44(1.15-1.73)  | 1.69(0.97-2.42)           | 1.17(0.96-1.39)        | 1.8(1.44-2.16)*         |
| 모든 감마선                               | 2.15(1.90-2.41)  | 2.16(1.81-2.51)           | 2.19(2.04-2.33)        | 2.3 (1.94-2.67)*        |
| 모든 결합된<br>연구 RBE                     | 1.88(1.66-2.09)  | 2.01(1.66-2.37)           | -                      | 2.11*(1.82-2.4)*        |
| 만성 감마선<br>압 연구                       | -                | -                         | 2.49(2.00-2.98)        | -                       |
| 만성 X선<br>압 연구                        | -                | -                         | 1.19(0.88-1.49)        | -                       |
| 만성 감마선<br>(모든 생존 및<br>불활 성화연구<br>제외) | -                | -                         | 2.19(2.04-2.33)        | -                       |
| 만성 X선<br>(모든 생존 및<br>불활 성화연구<br>제외)  | -                | -                         | 1.17(0.96-1.39)        | -                       |

표 4-1은 급성 및 만성 피폭, 기준 방사선으로서 감마선 또는 X선, 체내 및 체외 등 다양한 실험조건에서 수행한 RBE 연구 결과이다. 평균값과 나머지 세 개의 종합분석 값들 간에 거의 차이가 없는데, 이는 동일한 방법으로 계산하였기 때문이다[4.3].

표 4-1의 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

- ① 체내와 체외 연구 간에는 유의한 차이가 없다.
- ② 기준 방사선이 X선인지 감마선인지 그리고 만성인지 급성인지에 따라 RBE 값에 상당한 차이가 있다.
- ③ 만성 감마선을 이용한 연구는 만성 X선보다 평균 RBE가 약 30% 높다. 다만, Straume과 Carsten (1993) 데이터를 이용한 것 이외에, 급성 감마선을 기준으로 만성 감마선을 비교한 충분한 연구가 없다. 아울러, 단 네 개의 연구만 이용 가능하기 때문에 신뢰구간이 크다.
- ④ 기준 방사선으로 X선을 이용한 경우 평균 RBE는 약 1.3~1.5이고, 감마선을 이용한 경우 RBE는 약 2.2이다. 모든 RBE 연구 결과, 삼중수소의 생물학적 효과는 약 2이다.

#### 다. RBE에 영향을 미치는 요인

RBE는 서로 다른 방사선의 영향을 비교하기 위해 보정계수를 제공한다. AGIR (HPA, 2007), Straume과 Carsten은 삼중수소 RBE의 적절한 단일 값 설정에 대하여 집중적으로 논의된다. 서로 다른 50개 이상의 추정치가 있지만, 분명히 상당한 차이가 존재하지만, 생물학 데이터의 불확실성과 결합되어 하나의 값을 선택하기 어렵게 만든다. 기준 방사선의 선택은 X선과 고에너지 감마선의 RBE 차이 때문에 이 변동성의 대부분을 차지한다. 관측 범위에 기여하는 다른 인자는 다음과 같다.

- ① 조직, 장기, 유기체의 방사선 민감성 차이
- ② 생물학적 최종 산물
- ③ 선량 및 선량률 효과 인자의 변화
- ④ 선량측정
- ⑤ 체외 또는 체내 시스템의 선택

가장 관련 있는 최종산물은 암이지만 대부분의 실험은 1 Sv 이상을 사용하였기 때문에 직업 선량 수준에서의 연구가 거의 없다. 그러나 표 4-1에서 검토된 가장 관련 있는 결과물을 조사한 연구를 비롯하여 모든 연구의 데이터를 합치면 삼중수소의 RBE가 최소 2라는 증거가 압도적이다.

### (1) 기준 방사선

특정 방사선의 RBE를 결정하기 위해 기준 방사선은 200~250 kVp X선이나  $^{60}\text{Co}$ (1,173, 1,332 keV) 또는  $^{137}\text{Cs}$ (662 keV)의 감마선 등 저LET 방사선이 선택된다. 삼중수소 RBE 결정에서 보듯이, 삼중수소 베타 입자의 상대적 효과에 큰 차이가 있으며, 이에 대하여 ICRP 92(2003)에는 다음과 같이 명시되어 있다. “ $^{60}\text{Co}$ (약 0.4 keV/ $\mu\text{m}$ ) 또는  $^{137}\text{Cs}$  감마선(약 0.8 keV/ $\mu\text{m}$ )의 LET와 200 kVp X선(약 3.5 keV/ $\mu\text{m}$ )의 LET 간에 상당한 차이는 어떤 광자 방사선을 기준으로 삼느냐에 따라 RBE 값이 크게 달라질 수 있음을 분명히 한다.”

ICRP 92는 고 에너지 감마선 선택에 대해 다음과 같이 권고한다. “베타적인 관례는 필요 없지만, 반대되는 명백한 문장이 없을 때에는 적용하였을 때 이해되는 기준 방사선을 채택하는 것이 편리하다.” 이 목적을 위해 감마선을 선호한다는 실제 주장이 있다. 특히 저선량률 감마선 대신 저선량률 X선으로 동물에서 암 유도 선량 반응의 초기 기울기를 결정하는 것은 어렵고 비용이 많이 든다.

위와 같은 사유뿐만 아니라 다음과 같은 이유로 경질 감마선이 기준 방사선으로 선호된다.

- ① 암 유도 및 수명 단축에 관한 실험동물 연구 대부분은 감마선으로 수행되었고, 저선량률 연구가 일부 있다는 것이다.
- ② 인간의 암 발생을 추정하기 위해 가장 중요한 신체 데이터는 주로 감마선에 피폭되었던 원폭피해자의 데이터를 사용한다.
- ③ 경질 감마선은 광자 방사선 중에서 가장 낮은 LET(0.4 keV/ $\mu\text{m}$  이하)를 갖는다.
- ④ 넓은 범위에서 감마선의 에너지 축적 분포가 X선보다 더 균일하다.

이러한 점에도 불구하고, ICRP 103(2007)에서 ICRP는 다음과 같이 권고하고 있다.

“**기준 방사선**. 실험적으로 얻은 RBE 값을 선택한 기준 방사선에 따라 달라진다. 이러한 목적을 위해 특정 에너지가 합의된 바 없지만 일반적으로, 저LET 광자 방사선을 기준으로 삼는다. ICRP 60에 대해 방사선 가중치를 선택했을 때, 약 200 kVp 이상의 고에너지 X선 또는  $^{60}\text{Co}$ 이나  $^{137}\text{Cs}$  감마선을 이용한 광범위한 실험 RBE 데이터가 고려되었다. X선과 고에너지 감마선(예:  $^{60}\text{Co}$ ) 사이의 기준 방사선 선택에 따라 실험적으로 다른 RBE 값을 얻을 수 있다는 사실을 인정해야 하지만 이 접근방식은 이러한 권고에도 사용된다.”

분명히 감마선과 X선의 효과 차이가 잘 알려져 있고 합리적으로 정량화되어 있다. 또한 ICRP는 방사선방호에 대한 접근방식에서 다른 것에 대해 하나의 기준 방사선을 사용할 필요가 있다고 보지 않는 것이 확실하다. 좀 더 구체적으로, ICRP는 다양한 방식을 이용하는데 권장 방호 시스템 내에서 사용하는  $w_R$  값을 선택하는데 입력 정보로 RBE 데이터를 이용한다.

## (2) 선량 및 선량률 영향

ICRP 60 권고에서 대부분의 방사선 피폭 위험 추정치는 높은 선량률에서 상대적으로 높은 방사선량을 받은 인구에서 도출되었다. ICRP가 제안한 방사능 위험 모델인 소위 문턱 없는 선형 모델은 위험을 직선으로 낮은 선량까지 외삽한다. 이 모델은 과학적 불확실성으로 인해 방사선 피폭에 의해 유발될 수 있는 영향을 명확하게 확인할 수 없는 선량에 대한 위험 추정치를 제공한다. 200 mSv 이하의 선량과 100 mSv/h 이하의 선량률의 경우, ICRP는 고선량과 고선량률에서 결정된 위험계수를 2배 낮추기로 결정하였다(선량 선량률효과-DDREF).

삼중수소 섭취에 따른 선량이 저LET이고 일반적으로 만성 조사로 간주되기 때문에, 삼중수소로 인한 선량을 계산할 때 DDREF를 2로 고려한다. 안타깝게도 삼중수소 피폭에 대해 DDREF 2의 값에 반박하거나 동의하는 실험 증거가 별로 없다.

Trabalka와 Kocher는 2007년 삼중수소를 비롯하여 저LET 방사선에 대한

DDREF 2의 값을 상당히 자세하게 설명했다[4.5]. 그들은 삼중수소에 의해 방출된 것 등 저LET 방사선에 대한 DDREF의 에너지 의존성 관련 데이터를 검토했고 암 위험 평가에 대한 영향을 논의했다. 그들의 종합분석은 데이터가 제한적이었지만, RBE 값 증가 외에도 광자 에너지 감소에 따라 DDREF 값이 감소하는 일반적인 추세의 증거가 있었다고 나타났다. 아울러, 삼중수소 베타 입자의 DDREF가 급성 200 kVp X선보다 약 20% 작다고 지적했다. 다양한 연구의 종합분석을 통해, Trabalka와 Kocher (2007)는 또한 선량을 효과인자(DREF)가 만성 또는 분할 피폭 하에서 저선량 효과인자(LDEF)와 상당히 다를 수 있다고 밝혔다.

아쉽게도 선량과 선량률이 RBE에 어떤 영향을 미치는지 충분히 알려진 바가 없다. 그러나, RBE 추정치를 도출할 때 직업 또는 일반 환경에서 RBE 추정치에 가장 가까운 선량과 선량률로 RBE 결정을 강조하는 것이 일리 있어 보인다.

### (3) 선량측정 고려사항

RBE를 결정하려면 흡수선량 추정치가 필요하다. 흡수선량은 흡수 물질의 단위 질량 당 전달된 방사선 에너지의 양으로 정의된다. HTO에 대한 흡수선량을 추정하는 것은 꽤 간단하다. HTO가 일반 물처럼 작용하고 체내와 세포에서 꽤 균일하게 분포한다고 규명되어 있기 때문이다. 세포 수분에서 삼중수소의 농도를 알면 특정 용량 내에서 방출되는 에너지의 양을 결정할 수 있다.

삼중수소 선량측정에 대한 불확실성의 주요 원인은 체내 연구에 대한 유기체의 물 함량 또는 체외 연구에 대한 세포의 물 함량 추정치이다. 미국 NCRP(1979)는 세포 물 함량에 대해 0.6~0.75의 인자를 제안했다. 연구원들은 일반적으로 물 함량에 대해 0.70 인자를 가정한다. 연구원들이 연구에서 사용한 선량 인자를 지정하는 한, 선량을 재계산하여 다른 연구 사이의 선량 효과를 비교하는 것이 가능하다. 아쉽게도 물 함량이 제시되지 않은 연구 논문들도 있는데, 이런 경우 RBE 추정에 10% 정도의 오차를 보일 수 있다.

#### (4) 실험 환경

일반적으로 인체 밖의 세포에서 수행되는 연구는 특정 세포 기능이나 메커니즘을 조사하는데 사용된다. 이러한 유형의 연구 조건을 제어하기 쉽기 때문에, 결과에 영향을 미칠 수 있는 변수가 거의 없다. 한편, 반응은 증폭될 수 있지만, 결과는 더 분명해질 것이다. 반대로, 인체 내에서 수행되는 연구는 유기체에 대한 처리의 전체 영향을 보여줄 것이고, 유기체 내의 다른 시스템(혈액 공급 등)은 영향을 완화할 수 있다.

방사선방호 목적을 위해, 유기체가 전체적으로 조사되기 때문에 체내 연구가 더 적합할 것이고, 이는 직업 또는 일반 환경에서 일반적인 경우를 더 가깝게 모사한다. 표 4-1과 같이 통계적으로 유의하지 않지만 전체 체외 RBE는 체내 연구에서 도출한 것보다 약간 더 높다. 또한 체내 연구에 사용된 동물의 종과 계통의 감수성에 따라 RBE 값의 차이를 예상할 수 있다. 체내 연구와 체외 연구 모두 장점이 있지만 체내 연구는 조직 환경과 세포-세포 상호작용의 영향을 개선하거나 강조하는 것을 포함할 수 있는 조직/장기 반응과 관련 있기 때문에 더 바람직하다.

#### (5) 생물학적 최종산물

방사선방호에서 가장 관심을 갖는 최종 산물은 직업 또는 일반 환경에서 방사선에 의해 유발되는 암과 같은 것이다. 많은 연구들은 방사선 민감 조직의 세포사를 조사했다. 실험동물의 암발생 유도 연구는 동물 계통의 변동성, 동물의 자연 수명을 초과할 수 있는 잠복 기간(암 결과가 검출될 때까지 피폭부터 발암까지의 시간)에 의해 복잡해진다. 단 3개의 연구만이 최종 산물로 암을 사용했다.

세포 돌연변이와 염색체 이상은 다른 조직에서 암으로 이어질 수 있는 염색체 손상을 나타낸다. 그러나 Little과 Lambert가 2008년 지적했듯이, 염색체 손상은 발암의 많은 단계 중 하나에 불과할 수 있다[4.4]. Hill도 2004년 생물학적 반응을 비교하기 위해 신뢰할 수 있고 반복 가능한 방법이기 때문에 많은 연구가 최종 산물로 이동원체 이상의 유도를 사용한다고 지적했다[4.6]. 염색체 이상의 방사선 반응은 선형 2차 선량-반응 모델의 가정과 중성자의 방사선 가중치에 대한 가정을 뒷받침한다. 그러나 방사선방호 관점에

서 이러한 영향은 세포에 치명적이므로 위험 평가와 관련이 적을 수 있다. 알려진 방사선 민감 조직(생쥐 난모세포, 정소세포 등)에서 세포사의 연구는 높은 선량 방식으로 인해 관련성이 더 적다. 그럼에도 불구하고 이러한 연구의 RBE 값은 다른 연구의 RBE와 유사하다.

## (6) 전자에너지와 이온화 경로길이

단위거리 당 손실된 에너지의 양은 keV/ $\mu\text{m}$  단위로 표현되는 선형에너지 전달(LET)이라 한다. 방사선과 분자간의 상호작용은 일부 분자에서 이온화를 유발할 것이다. 감마선, X선과 같은 전자기 방사선은 알파 입자보다 훨씬 낮은 LET를 갖는다. 표 4-2의 ICRU(1970)[4.7]에서 저에너지 광자와 전자는 고에너지 광자보다 마이크로미터 당 더 높은 에너지를 방출한다. 그러나 저에너지 광자는 고에너지 광자보다 훨씬 낮은 총 에너지를 방출하고 훨씬 짧은 거리를 이동한다.

표 4-2. 방사선의 물속에서의 평균 LET 값

| 방사선                              | $L_{\Delta, T}$ (keV/ $\mu\text{m}$ ) |
|----------------------------------|---------------------------------------|
| Cobalt-60 감마선 (1,173과 1,332 keV) | 0.22                                  |
| 200 kVp X선                       | 1.7                                   |
| 삼중수소 베타 방사선 (평균 5.7 keV)         | 4.7                                   |
| 50 kVp X선                        | 6.3                                   |

\*주) 100 eV의 컷오프에너지( $\Delta$ )에서 방사선의 물속의 평균 LET (ICRU, 1970)

광자(감마선과 X선)는 간접적으로 작용하고 상호작용의 유형은 에너지와 관련 있으며, 광전흡수(광전자 및 전자쌍 생성) 또는 산란 현상(컴프턴 상호작용)을 통해 분자의 이온화를 유발한다. 삼중수소의 베타 방사선과 같은 입자 방사선은 직접 및 간접적 상호작용을 통해 DNA와 같은 주요 분자를 손상시킬 수 있다. 이러한 손상은 물 분자 이온화에 의해 유발된 자유 라디칼(예: 하이드록실)의 생성으로부터 일어나고, 차례로 DNA를 손상시킬 수 있다.



방사선에 의해 유발된 가장 중요한 세포 손상은 DNA 분자 사슬의 절단이다. DNA는 이중 나선이며, 해당 핵산을 포함하는 두 개의 대응 및 연결 분자 사슬이 있다는 의미이다. 방사선 유도 DNA 손상은 보통 염기 분자 손상, 단일 가닥 절단(SSB), 이중 가닥 절단(DSB), DNA-단백질 교차 결합, 또는 이러한 것들의 복합적 손상도 될 수 있다. 손상 정도는 방사선 트랙의 밀도와 관련이 있다. DNA 분자 내 에너지의 큰 축적은 손상 클러스터를 유발할 수 있다. 손상이 크면, 완전히 돌이킬 수 없을 수 있고 세포사 또는 영구적 염색체 손상을 유발할 수 있다.

Moisseenko와 연구진은 2001년 몬테카를로 코드를 이용하여 삼중수소와 저에너지 광자에 피폭된 세포에서 DSB와 SSB를 모델링하였다[4.8]. 주요 결과는 직접 에너지 축적에 의한 10 eV 축적이 SSB를 초래할 수 있다는 것이었다. 그들은 DSB와 관련된 염기 손상을 추가로 연구하여 간단한 DSB와 복잡한 DSB를 구별할 수 있었고, 복잡한 DSB가 간단한 DSB에 비해 더 광범위한 염기 손상이 동반되었음을 알아냈다.

Moisseenko 외 연구진은  $^{137}\text{Cs}$  감마선과 상용 전압 X선(150~300 kVp), 삼중수소 베타 입자를 이용하여 DNA에서 DSB를 산출하기 위하여 몬테카를로 모델을 개발했다. 삼중수소에 대한 DSB 생성 RBE는 1.2~1.3으로 계산되었다(기준 방사선으로  $^{137}\text{Cs}$  이용). 삼중수소 베타 입자가  $^{137}\text{Cs}$  감마선에 비해 DNA DSB를 생성하는데 더 효과적이라는 결론을 내렸다. 삼중수소 베타 입자와 상용 전압 X선과 같은 70 keV 광자 사이에 관측된 차이는 없었다.

다른 중요한 측면은 붕괴될 때 삼중수소 원자의 위치이다. HTO는 조직과 세포에 걸쳐 상대적으로 균일하게 분포될 것이다. 그러나 유기결합삼중수소(OBT)는 DNA와 같은 분자에 통합될 수 있다. 그 위치에서 베타 입자의 방출은 예를 들어 세포액의 HTO 분자보다 손상을 일으킬 확률이 더 크다. OBT의 영향에 대해서 Chen은 2006년 지름이 10 nm ~ 2  $\mu\text{m}$ 인 구형 영역에서 HTO와 OBT 분자에 대한 LET(keV/ $\mu\text{m}$ )를 비교하기 위해 몬테카를로 코드를 사용하여 시뮬레이션 트랙을 생성했다[4.9]. 증가 정도가 세포 내 OBT 분자의 위치에 따라 달라질 것이라는 가정을 이용하여 OBT의 평균 선형 에너지가 HTO보다 1.7배 더 높았음을 나타냈다.

결론적으로 계산모델은 저에너지 방사선의 RBE뿐 아니라 삼중수소의

높은 RBE가 적어도 부분적으로 고LET와 그에 따른 삼중수소 베타 입자의 짧은 경로 길이에 기인한다. 매우 작은 부피 내에서 에너지의 비교적 큰 축적은 SSB, DSB를 유도하고 또한 회복 불가능한 복잡한 손상을 유발한다. 삼중수소가 DNA에 통합되면, 생물학적 손상 가능성이 높다.

## 2. 삼중수소로 인한 건강상의 영향

### 가. 개요

삼중수소 베타 방사선은 피부의 각질층을 뚫지 못해 삼중수소를 흡입, 섭취 또는 피부를 통해 체내에 흡수되는 경우에만 인체에 영향을 미칠 수 있다. 화학적 형태가 HTO인 경우, 몸 전체에 균일하게 분포하게 되고, OBT인 경우, 특정 분자나 조직과 결합할 수 있다. HTO와 OBT의 대부분의 형태는 신체 조직과 세포에 균일하게 분포하기 때문에 X선, 감마선과 같은 저LET 방사선에 전신이 피폭된 것과 유사한 결정론적, 확률적 영향이 나타난다.

저방사선량(100 mSv 이하)에서 기본 방사선방호 문제는 암 또는 유전적 영향이다. 고방사선량에서 삼중수소는 결정론적 영향의 원인이 된다. 지금까지 보고된 삼중수소 피폭의 결정론적 영향은 1953년에 러시아 첼랴빈스크에서 두 명의 근로자가 사망한 원인이 삼중수소였다고 보고되었으며, 선량은 10~12 Sv로 추정되었다[4.10].

### 나. 결정론적 영향

#### (1) 치사율

생쥐를 사망에 이르게 하는데 필요한 삼중수소의 방사선량은 X선이나 감마선에 의한 급성 외부조사보다 약간 크고, 삼중수소의 LD50/30은 약 6~9 Sv이다. 이는 삼중수소를 경구 투여한 경우 1 GBq 수준의 급성섭취나 약 11 Sv(~0.5 GBq)의 만성 선량과 일치한다.

Brues 외 연구진은 1952년 0.37~1.11 GBq의 삼중수소 주사를 1회 투여하여 생쥐의 죽음을 유도함으로써 삼중수소의 치사율을 보여주었다[4.11]. 연구진은 30일 이내에 50%가 사망하는 치사량(LD50/30)을 몸무게 기준으로 1.5 GBq/40g(생쥐무게)으로 분석하였다. 이 선량은 250 kVp X선 급성피폭의

LD50/30가 약 6 Sv인 것과 비교된다.

Yokoro 외 연구진은 1986년 LD50/30이 약 8 Sv라는 것을 확인하였으며, 연속 경구 투여에 의해 조혈성 사망을 유발하는 최저 총선량은 11.1 Sv으로 추정하였다[4.12]. Dose protraction effect 때문에 삼중수소는 급성 X선보다 사망을 유발하기 위해 더 큰 선량이 필요한 것으로 판단되는데, X선 피폭을 통해 단 몇 분 안에 전달되는 선량과는 대조적으로 삼중수소는 수일에 걸쳐 전달된다.

Yamamoto 외 연구진은 1990년 연속 투여한 HTO를 통해 생쥐에 치명적인 HTO의 만성 섭취량을 조사했다. 연구진은 약 7일 후에 삼중수소의 농도가 장기와 혈액에서 안정기에 도달했음을 발견했다[4.13]. 삼중수소 농도가 148~592 GBq/L인 식수를 섭취한 이후 대체로 2주가 지난 뒤 조혈성 사망이 일어났다. 148 GBq/L의 식수 농도에서 사망에 이르는 최저 총선량은 11 Sv였다.

## (2) 기형유발 영향

삼중수소 방사선 유도 기형유발 영향은 실험실 동물실험에서 입증되었고 외부 광자 조사의 유사한 영향과 일치했다. 동물실험에서 기형유발 영향은 HTO의 만성섭취에 따른 약 400~600 mSv의 선량에서 일어나기 시작한다.

기형유발 영향은 작용물질이 자궁 속 배아나 태아의 발달을 저해할 때 발생하며, 기형유발 영향은 유전되지 않는다. 다시 말해서 미래 세대에 전달되지 않는다. 일반적으로 조직의 방사선 감수성은 세포 증식 속도에 정비례한다. 따라서, 배아로부터 빠르게 성장하는 태아는 유아, 아이 또는 성인보다 방사선에 더 민감할 것이라고 예상된다. 이러한 추론은 동물 실험 결과와 100 mSv 이상(예: 의료상 피폭, 원폭 피해자)의 방사선량에 피폭된 사람의 경험, 아동이 자궁에서 10~20 mSv의 선량으로 조사된 경우에 관찰된 소아 백혈병 사례에 의해 뒷받침 된다[4.14].

Straume과 Carsten은 태아 발달기의 삼중수소 피폭에 관한 문헌을 검토한 결과, 일부 태아세포가 장기와 조직을 형성하기 위해 분화되지만 뉴런이나 난모세포 등의 태아세포는 세포증식이 거의 일어나지 않는 것을 확인하였다[4.1]. “장수” 분자에 결합하는 OBT는 세포 수명기간 동안 집적 선량이

클 수 있는데 삼중수소는 추가 세포 증식에 의해 희석되지 않기 때문이다. 영국 보건국 산하 전리방사선 자문그룹 AGIR(HPA, 2007)은 삼중수소가 임신 기간 동안 태아 난모세포의 DNA에 결합할 수 있고, 수십 년이 지난 후 수정될 때까지 그곳에 남아 있을 수 있다고 결론 내렸다[4.2]. 그러나 DNA는 안정적인 분자가 아니고 시간이 지나면서 분자가 전환되기 때문에 선량에 대한 순 영향은 작다고 결론지었다. DNA 안에 삼중수소가 축적되려면 DNA 분자의 일부인 특정 유기분자 (핵산 등)와 결합해야 한다. 모든 OBT 화합물은 환경에서 총 삼중수소의 일부(~13%)에 해당된다[4.15].

### (3) 생식 영향

난모세포 DNA에 결합된 삼중수소는 이론적으로 30년 이상에 걸쳐 난모세포에 방사선을 조사할 수 있다. 난모세포는 수정될 때까지 분열하지 않기 때문에, DNA 분자는 거의 전환되지 않으며, 이는 난모세포 DNA에 포함된 삼중수소의 생물학적 반감기가 삼중수소의 방사성반감기인 12.3년에 도달할 수 있다는 것을 의미한다. AGIR(HPA, 2007)은 생물학적 과정이 DNA 분자의 모든 구성요소를 서서히 치환하면서 DNA의 2~5%를 대체하는데 50년이 걸릴 것이라고 판단하였으며[4.2], 난모세포에 포함된 대부분의 삼중수소는 평생 동안 그 곳에 남아있게 된다.

여성의 경우, 휴식 난모세포에 대한 영향으로 2.5~6 Sv에 피폭되면 영구 불임으로 이어질 수 있다(ICRP, 1984; BEIR, 1990)[4.16, 4.17]. 생식력에 대한 일시적 영향의 문턱값은 급성 X선의 경우 최소 0.6 Sv, 장기적 또는 단발적 저LET 방사선의 경우 1.5 Sv으로 나타난다(ICRP, 1984)[4.16].

난모세포와 달리 정조세포는 성인기 내내 줄기세포에서 지속적으로 생성된다. UNSCEAR(1982)는 불과 0.15 Sv 급성 X선의 선량 이후 일시적 불임이 관찰되었고 3~5 Sv의 급성피폭 이후 영구 불임이 관찰되었다고 보고했다[4.18]. 지속적인 노출의 경우, 문턱값은 3~4 Sv/y이다. 정조세포의 수가 상당히 감소하려면 일상적인 직업 환경이나 현재 캐나다 보건부의 식수 가이드라인의 식수에 의한 피폭보다 100만 배 또는 훨씬 높은 삼중수소를 섭취해야 한다[4.3].

## 다. 확률적 영향

### (1) 암 발생

현재까지 삼중수소 유도 암을 입증하는 인간 연구는 전혀 없었고, 동물에 대한 연구 또한 삼중수소 연구는 감마선과 X선 연구보다 사례가 매우 작다. Yamamoto의 연구진은 1998년 HTO에 의한 종양 유도에 대한 문턱 선량률이 약 12 mSv/d이고,  $^{60}\text{Co}$  감마선에 대한 문턱 선량률이 삼중수소 베타선보다 더 높다고 결론 내렸다[4.19]. 존슨 외 연구진(1995)은 각각 0.85, 1.86, 3.04 Sv의 선량에 해당하는 HTO를 단일 주입한 750마리 생쥐를 이용하여 골수성 백혈병의 발병률을 추정하였는데, 골수성 백혈병의 발병률은 0.13% (대조군)에서 6~8%(노출군)로 증가하는 것을 확인하였다[4.20].

삼중수소의 베타 방사선이 암을 발생할 것이라는 것은 여러 연구에서 밝혀졌지만, 어떤 수준의 선량이 암을 유발하는지는 여전히 불확실하다. 생쥐에서 암을 유발한다고 관찰된 최저 선량은 약 1 mSv/d의 범위에 있다. Straume에 의한 1993년 연구는 아마도 삼중수소 유도 발암에 대해 가장 큰 통찰력을 제공하고 ICRP(1991), BEIR(1990), UNSCEAR(1988)가 제시한 위험 인자를 입증한 것으로 판단된다[4.21]. Straume는 몬테카를로 코드를 이용하여 HTO에 대한 만성, 저준위 피폭에 따른 초과 암 사망률의 발생빈도 분포를 분석하였는데, 그 결과 90% 신뢰구간에서 mSv 당  $38 \sim 185 \times 10^{-6}$ 인 것으로 확인하였다. 이 값은 각각 mSv 당  $50 \times 10^{-6}$ ,  $79 \times 10^{-6}$ ,  $70 \sim 110 \times 10^{-6}$ 인 ICRP(1991), BEIR(1990), UNSCEAR(1988)의 방사선 위험 추정치에 맞먹는 값이다.

### (2) 유전적 영향

난모세포 또는 정조세포의 염색체 손상이 돌연변이 발생률을 높일 수 있기 때문에 다음 세대에 전달될 수 있다는 것은 이론적으로 가능하다. 그러나 최근 ICRP 권고(ICRP 103, 2007)는 “부모의 방사선 피폭이 자손에서 초과 유전성 질병으로 이어진다는 어떠한 직접적 증거가 없다”고 주장한다. 그럼에도 불구하고, 동물 실험 결과를 바탕으로, ICRP는 최대 2세대(손자) 동안 약 1 Sv 당 0.2%의 유전적 위험을 추정한다. 저LET 방사선의 경우, 심각한 유전적 영향의 가능성에 대한 ICRP 값은 수컷 생쥐 데이터의 외삽법에 기초

하여 1 Sv 당 0.5%이다.

### (3) OBT의 건강상 영향

환경으로 배출된 일부 삼중수소는 수소원자가 삼중수소 원자로 대체되는 효소 촉매반응이나 자연 치환반응을 통해 자연적으로 유기분자와 결합한다. 삼중수소 원자가 효소 촉매반응으로 탄소원자에 붙어있는 경우, 삼중수소 원자는 기본적으로 해당 분자에서 떨어지지 않는다. 정반대로 산소, 황, 질소 또는 인 원자에 결합된 삼중수소 원자는 주변 세포질 수분의 수소 원자와 쉽게 치환되므로 치환성 삼중수소 화합물로 간주된다. Diabaté와 Strack의 1993년 연구에서 비치환성 및 치환성 화합물 모두를 유기결합삼중수소(OBT: Organically Bound Tritium)라고 하였다[4.22]. OBT는 삼중수소가 다당류, 지질(지방), 단백질, DNA 전구체 등 유기 분자와 결합하는 큰 화합물 그룹에 적용하는 일반 용어이다. OBT 분자에 의한 세포 손상 정도는 세포에 결합되는 경우와 삼중수소가 붕괴하기에 충분히 오래 머물러 있는지 여부에 달려 있다. 3HTdR과 같은 삼중수소 DNA 전구체는 이론적으로 세포 손상을 유발하는데 더욱 효율적이다. 왜냐하면 DNA 가닥의 기본 구성요소의 일부를 형성하기 때문이다. 반면에, 구조 단백질에서 삼중수소 지방 분자나 삼중수소 아미노산 등 세포에서 DNA와 더 멀리 떨어져 있는 삼중수소 분자는 더 적은 위험을 제기할 것이다.

Lambert는 1969년 쥐의 정조세포에 대한 HTO 및 3HTdR의 영향을 연구했고 3HTdR의 RBE를 1.3, HTO의 RBE를 2.3으로 결정했다[4.23]. Straume와 Carsten은 1993년 OBT에 대한 이용 가능한 연구의 종합분석에서 아미노산과 결합할 때 삼중수소의 RBE가 HTO보다 약간 크고, 티미딘과 같은 핵기저에 결합할 때 HTO보다 약 2배 이상 높다고 결론 내렸다[4.21].

OBT로 인한 건강 영향을 살펴본 연구는 제한적이다. 이용 가능한 연구에서 대부분의 유기 화합물이 HTO와 거의 같은 RBE를 갖는다고 보여준다. 그러나 3HTdR의 결합은 핵에서 삼중수소의 농축으로 이어질 수 있고, 그 결과 평균 세포/조직 선량을 기초로 계산한 HTO의 RBE보다 RBE 값이 약 두 배가 된다. DNA 전도체를 제외하고, HTO에 비해 OBT의 영향이 큰 것은 RBE 차이가 아닌 긴 체류 시간과 섭취량 당 비례적으로 커지는 선량 때

문이라고 결론지을 수 있다.

### 라. 핵변환에 의한 삼중수소의 영향

DNA 손상이 삼중수소의 핵변환으로 발생했다고 하더라도, 삼중수소의 베타 방사선 유도에 의한 손상평가에 이미 포함되어 있으므로 별도로 핵변환에 의한 건강영향을 논할 필요는 없다.

핵변환은 방사성붕괴를 통해 한 원소에서 다른 원소로 변환하는 것을 말한다. 삼중수소가 붕괴되면, 안정적인 불활성 기체인 헬륨-3( $^3\text{He}$ )가 된다. 삼중수소 원자가 붕괴할 때 DNA 분자에 결합되는 경우, 대부분의 운동 에너지는 핵에서 방출되면서 베타 방사선을 동반하지만 일부 에너지는 반도 에너지(recoil energy) 방출하는데, Kacena는 1967년 반도 에너지가 너무 작아서(약 3 eV) 스스로 DNA 분자의 이온화를 유발할 수 없다고 판단했다[4.24]. 그러나 그에 따른  $^3\text{He}$  원자는 매우 약한 결합을 가진 탄소 원자에 부착될 것이다. 이 결합은 자유 헬륨원자와 이온화된 DNA 분자를 만들게 된다. 이온화된 DNA 분자는 회복될 수 있거나 만약 회복할 수 없는 경우, DNA가 손상될 수도 있다.

Myers와 Johnson은 1991년 핵변환 영향을 종합적으로 검토하였는데, 하등 생물에서 관찰된 돌연변이가 포유류 세포에서 검출될 수 있고, 포유류에서 감지될 수 있는 돌연변이의 수는 5%를 초과하지 않을 것이라고 가정하는 것이 매우 보수적이라고 분석하였다[4.25]. Carsten은 1979년 HTO나 OBT를 음식으로 섭취한 후 DNA 수소의 단 2%만이 시토신 고리의 5번 자리에 위치해 있기 때문에 유해성을 제기할 만큼 위험이 크지 않다고 설명하였다[4.26]. Feinendegen과 Bond는 1971년 종합분석에서 “세포 내 삼중수소의 영향은 압도적으로 핵의 베타 조사에 기인하며,” “핵변환 영향은 측정 가능한 영향을 미치지 않는다.”고 분석하였다[4.27].

### 마. 결론

삼중수소는 베타입자를 방출하는 전리방사선이기 때문에 결정론적 영향 및 확률적 영향을 유발할 수 있다. 삼중수소 베타입자는 인체에 영향을 유발하려면 0.5 Sv의 방사선량이 필요한데, 이는 감마선과 X선이 인체영향 유발

에 필요한 선량과 동일하다.

일반적으로, HTO에 비해 OBT가 더 큰 생물학적 효과를 갖는 것은 RBE의 차이보다는 더 긴 체류 시간과 관련이 있다. 또한 핵변환 등 삼중수소의 비방사성 영향이 발생할 것으로 판단되지만, 비방사성 영향과 방사선의 영향을 구별하는 것이 불가능하므로 방사선의 인체영향에 포함되어 분석되기 때문에 삼중수소의 비방사성 영향만을 특별히 고려할 필요는 없다.

지금까지 검토된 삼중수소의 인체영향은 다음과 같이 요약할 수 있다.

- ① 현재까지 인체에서 삼중수소에 의한 암의 유발을 입증하는 연구는 없었다.
- ② 동물을 이용한 실험실 연구는 삼중수소가 배아나 태아의 발달을 저해할 수 있고, 일반인 피폭수준보다 수백만 배 이상의 선량으로 전달될 경우 유전학적 영향, 생식 영향, 세포사를 유발할 수 있음을 입증했다.
- ③ 원전에서 배출되는 삼중수소에 의한 일반인 선량은 일반인 선량한도인 연간 1 mSv보다 극히 낮다. 따라서 삼중수소가 인체에 미치는 영향은 없을 것으로 판단된다.



## 4.2절 국외 삼중수소 역학연구 사례

### 1. 저선량방사선에 대한 역학연구

삼중수소로 인한 건강영향은 최근에 많은 주목을 받고 있다. 많은 사람들은 방사능을 가진 물질에 조금이라도 노출되면 당장 큰 병이 걸릴지 모른다는 공포를 가지고 있다. 이러한 공포를 벗어나려면 방사성 물질과 방사선의 인체의 피해에 대한 개념이 필요하다.

대중 매체를 통해 정제 없이 전달되었던 수많은 정보는 심각한 방사능 공포심과 사회적 부작용을 초래하여 불필요한 소모적 논쟁을 유발하였다. 특히 가장 민감하게 생각하는 인체영향 부분에 있어 전문가적 소견이 부족한 대중에게 생소한 방사선 측정수치의 비교 제시는 더욱 큰 불안감만을 증폭시키는 결과를 가져왔다. 양질의 방사선 피폭 데이터에 기반한 역학 연구는 피폭에 의한 인간의 실제 건강영향을 평가하기 때문에 방사선 피폭에 따른 건강 위험을 추정하는데 있어 가장 좋은 증거이다. 핵 시설의 삼중수소 배출에 따른 방사선 피폭은 자연방사선에 기인한 것보다 훨씬 낮다. 삼중수소 배출에 따른 선량이 매우 낮고 역학 연구가 높은 선량에 피폭된 방사선작업종사자에서의 건강상 악영향을 보여주지 않는 점을 감안하면, 삼중수소 위험에 관한 의미 있는 결과를 생산할 가능성은 매우 희박하다. 이 글에서는 삼중수소에 의한 암 발생에 관한 역학연구 사례들을 살펴보았다.

역학이란 질병을 포함한 건강과 관련된 이슈들의 발생, 분포, 경향과 그들의 원인 및 위험요인 등을 조사하는 학문으로 일반적으로 인간 집단을 대상으로 한다. 방사선 피폭의 인체 영향에 대한 과학적인 견해는 생물학적 연구와 함께 역학적 연구를 토대로 이루어지며, 역학 연구의 일차적인 목적은 방사선 피폭 인구 집단의 다년간 추적조사를 통해 방사선과 질병의 관련성을 조사하고 이를 정량화하는데 있다. 저선량 방사선 영향은 고선량 피폭에서 주로 보이는 급성반응과 달리 오랜 잠복기(일반적으로 피폭 후 백혈병 2~5년, 고형암 5~10년)를 거쳐 나타나는 경우가 일반적이며 암 발생과 유전적장해가 대표적이다.

2012년도 제14차 일본 원폭생존자 사망률 연구보고서(추적기간 1950~2003년, 전체연구 대상 수 86,661명중 58% 사망)에 따르면, 0.2 Sv 이하에서 고형암 위험도( $ERR/Sv^{18})=0.56$  [95% CI<sup>19</sup>: 0.15, 1.04])의 유의성은 보고되었

지만 피폭군들의 지리적, 사회·인구학적 요인에 따른 기저 암 위험도의 차이로 인해 명확한 결론을 도출하지 못했다. 또한, 그 보다 더 낮은 저선량 구간에 대해서는 유의성이 관찰되지 않았다[4.29].

대표적인 저선량 방사선 역학연구 코호트로서 우리나라를 포함하여 15개국 407,391 (520만 person years)명의 원전 종사자들을 대상으로 한 국제 공동 연구에 따르면 장기간 저선량 방사선에 노출된 종사자에게 잠재적인 암 위험도(ERR/Sv for cancers excluding leukaemia=0.97 [0.14, 1.97])가 관찰되었다. 그러나 이 또한 불확실한 피폭선량 추정 가능성이 있는 캐나다를 제외하여 분석하였을 경우에는 유의성(ERR/Sv for cancers excluding leukaemia=0.58 [-0.22, 1.55])이 관찰되지 않았다[4.30].

세계적으로 평균적인 자연방사선 피폭량은 연간 2.4 mSv 정도로 보고되고 있지만 지역에 따른 편차가 상당하며 자연방사선 피폭량이 세계평균의 2배인 연간 5 mSv이상으로 보고된 지역도 있다. 대표적인 고자연배후방사능 지역으로 알려진 인도의 카루나가팔리(3~77 mSv/year)나 중국의 양장(1~5.5 mSv/year) 지역 주민들에 대한 역학 연구들에서 염색체 이상의 차이는 보고되었지만, 암 발생 및 수명단축 결과는 아직 발견된 바가 없다[4.31, 4.32].

이러한 저선량방사선 역학연구에서의 불확실성은 저선량방사선 피폭에 따른 질병 발생 위험이 상대적으로 크지 않아 이를 통계적으로 입증할 만한 코호트의 크기나 추적기간의 확보가 아직은 충분치 못하기 때문이다. 또한, 특정 질병에 민감한 개인의 유전적 취약성의 차이, 오랜 잠복기를 가진 질병의 복잡한 발병기전과 방사선외의 다양한 발암원에 노출 및 생활 식습관에 따른 질병발생 위해도와의 구별이 쉽지 않다는 것도 한 이유라 할 수 있겠다.

## 2. 삼중수소의 인체영향에 대한 역학연구

삼중수소는 주로 중수로형 원전에서 방출되는 방사성핵종으로 피폭경로는 주로 흡입을 통한 내부피폭이다. 삼중수소의 인체영향(특히, 암 위험도)을 살

---

18) ERR: Existing Risk Factor

19) CI(Confidence Interval, 신뢰구간):모수에 대한 추정치의 신뢰구간으로 모수의 범위를 확률로 보여주는 구간

펴보기 위해 삼중수소에 피폭된 인구집단(종사자 혹은 주변주민 등)을 대상으로 수행된 역학적 연구결과를 조사하였다.

### 가. 사망률 및 모든 암 사망률

영국의 방사선작업종사자로 원자력에너지기구 소속 근로자(1980년 이전), 핵무기개발기구 소속 근로자(1983년 이전), 셀라필드 지역 근로자(1976년 이전) 등 3군의 근로자를 대상으로 한 역학연구에서 40,961명의 근로자 중에서 4,111명이 삼중수소에 피폭되었다. 그러나 삼중수소에 대한 정보는 추적 관찰 여부만 관련 있었고, 삼중수소 선량은 평가되지 않았다. 삼중수소 추적 관찰 근로자의 경우 모든 사인, 모든 암, 암 이외의 모든 사인에 대한 SMR은 1.0보다 훨씬 낮았다. 이것은 일반 인구보다 사망률이 낮다는 것이다. 그리고 SMR이 상당히 높은 특정 암은 없었다. 삼중수소 추적 관찰 근로자와 그렇지 않은 방사선 작업종사자의 비교에서 모든 사인에 대한 위험은 0.92(95% CI: 0.83 - 1.01)로 통계적으로 유의하지 않았으나, 암 이외의 원인에 대한 위험은 0.88(95% CI: 0.78 - 0.98)로 삼중수소 추적 관찰 근로자에서 통계적으로 유의하게 사망률이 감소하였다[4.33].

Fraser 외 연구진은 1986년까지 추적 연구로 영국원자력에너지기구(UKAEA) 코호트의 사망률 분석을 실시했다[4.34]. 1946년부터 1986년까지 1,506명의 사망을 근거로 한 암 사망률은 국가 평균보다 20% 낮았다. 1971년부터 1984년까지 1,699명의 암 등록을 근거로 한 암 발병률은 국가 평균보다 12% 낮았다.

Atkinson 외 연구진은 1980년과 1997년 사이에 채용된 리슬리(Risley)와 쿨체스(Culcheth) 시설의 근로자를 추가하고 1997년까지 사망률 추적 연구를 연장하면서 업데이트된 UKAEA 코호트 분석을 제공했다[4.35]. 최종 연구 인원은 총 51,367명이었고, 그 중 51%가 방사선작업종사자였다. 내부 방사선에 대한 정보는 추적 관찰 여부에 관해서만 관련이 있었고, 내부선량은 평가되지 않았다. 평균 연간 외부선량은 새로 추가된 개인이 1.57 mSv인데 반해 기존의 코호트(1946~1979년)는 4.26 mSv였다. 삼중수소 추적 관찰 근로자에서 SMR은 크게 높지 않았고 일부는 특히 낮았다. 모든 사인에 대한 SMR은 0.69(95% CI: 0.62 - 0.76)였고, 모든 암에 대한 SMR은 0.71(95% CI: 0.59 -

0.85)이었다. 이러한 사망률은 잉글랜드와 웨일스의 일반인, 비방사선 종사자, 모든 방사선작업종사자의 사망률보다 훨씬 낮았다.

영국핵연료공사(British Nuclear Fuel Limited, BNFL)에서 1946년부터 1995년까지 케이프너허스트의 우라늄 농축 시설에 고용됐던 근로자 12,540명의 사망률(1946년부터 1995년까지)과 암 발병률(1971년부터 1991년까지)을 분석했다. 이들 근로자 중에서 삼중수소에 피폭된 근로자가 얼마나 되는지는 명확하지 않았다. 방사선작업종사자의 사망률은 잉글랜드 및 웨일스의 지역 사망률보다 낮았고, 일부는 통계적으로 유의하게 1.0 미만 이었다(예: 모든 사인, 모든 암, 순환기 질병, 호흡기 질병, 소화기 질병, 폐암, 방광암, 만성 림프구성 백혈병(CLL)을 제외한 백혈병, 골암, 피부암, 유방암)(양측검정,  $p < 0.05$ )[4.36].

삼중수소를 생산하는데 사용되었던 체플크로스 원전에서 1955년부터 1995년까지 고용된 적이 있는 영국핵연료공사(BNFL)와 영국원자력에너지기구(UKAEA) 근로자 2,628명의 사망률과 암 발병률을 평가했다. 얼마나 많은 근로자가 삼중수소에 피폭되었는지 명확하지 않았다. 사망률 데이터는 1955년부터 1995년까지, 암 등록 데이터는 1971년부터 1991년까지 제공되었다. 대부분의 방사선작업종사자와 마찬가지로, 사망률은 국가 전체의 사망률에 비하여 낮았다. 대부분의 암 표준화등록률(SRR)은 1.0 미만이었다[4.37].

1952년부터 1980년까지 서배너 리버 사이트(SRS)의 백인 남성 근로자 9,860명의 코호트에서 사망률을 평가했다. 근로자의 총 직업상 선량의 약 15%는 내부 축적된 방사성핵종에서 왔다. 안타깝게도 삼중수소나 다른 방사성핵종에 특정한 선량측정 정보는 분석에 사용할 수 없었다. 약 5,000명의 전·현직 근로자는 삼중수소에 대한 직업적 피폭을 경험했고, 약 800명의 직원이 삼중수소로부터  $>0.5$  mSv를 받았으며, 1명의 근로자는 원전관리지침인 연간 30 mSv를 초과했다. 이들은 미국 백인남성과 비교하여 모든 사인과 모든 암뿐 아니라 많은 원인별 카테고리에 대해 SMR은 1.0이하였다[4.38].

캐나다원자력공사(AECL) 근로자는 삼중수소에 대한 내부 피폭을 기록했다. 코호트의 총 인년은 157,100 이었고, 평균 추적 기간은 17.5년이었다. 전반적으로, 건강근로자 효과가 있었다. 모든 사인의 경우, SMR은 0.77(95% CI: 0.72 - 0.83)이었고 모든 암의 경우, SMR은 0.87(95% CI: 0.76 - 0.99)이었

다. 삼중수소 피폭은 이 연구에서 평가되지 않았지만, AECL 근로자는 삼중수소 선량의 기록을 가지고 있다. 이러한 근로자의 향후 추적 연구에서 삼중수소 위험을 조사할 수 있을 것이다[4.39][4.40].

Zablotska의 연구에서 캐나다의 방사선작업종사자에 대한 내부 선량은 주로 삼중수소에서 기인했고[4.41], 삼중수소 선량은 근로자의 정기 소변 검사에 의해 평가되었고, 등가선량(mSv)으로 전환되어 전신선량 추정을 위해 외부선량에 추가되었다. 이들의 평균 누적 등가선량은 13.5 mSv이었다. 이 연구에서 모든 사인의 경우 예상치 2,538명 대비 1,599명의 사망자가 관찰되었다(SMR=0.63, 95% CI: 0.60 - 0.66). 모든 암의 경우 예상치 721명 대비 531명의 사망자가 관찰되었다(SMR=0.74, 95% CI: 0.68 - 0.80).

## 나. 개별 암 사망률

### (1) 백혈병

영국핵연료공사(British Nuclear Fuel Limited, BNFL)에서 1946년부터 1995년까지 케이프 허스트의 우라늄 농축 시설에 고용됐던 근로자 12,540명에서 외부 선량과 백혈병 사이에 연관성은 없었다. 백혈병에 의한 사망률과 발병률은 일반 국민과 유사하였다[4.42].

세라필드 지역의 방사선작업 분석에서, 백혈병(CLL 제외)에서만 누적 외부선량에 따라 암 위험도가 통계적으로 유의하게 증가하는 경향성이 관찰되었다(잠재기간 2년, 단측검정,  $p=0.015$ , 13명 사망)[4.43]. 또한 CLL을 포함한 모든 백혈병은 통계적 유의성 경계에 해당하는 경향성을 보였다(잠재기간 2년, 단측검정,  $p=0.05$ , 16명 사망). 또한 다발성 골수종의 사망률에 대한 분석에서 잠재기간을 20년 두었을 때만 통계적으로 유의하게 증가하는 경향을 보였다(단측검정,  $p=0.017$ , 8명 사망). 세라필드 종사자에 대해 삼중수소 선량이 추정되었지만 그들은 분석결과에 삼중수소에 대한 논의를 하지 않았으며, 명시적으로 계산된 분석이 없기 때문에 이들 연구에서 삼중수소 위험에 대한 추론을 하기는 어렵다.

Cragle 외 연구진에 의하면, 서배너 리버 핵시설의 800명의 종사자가 0.5 mSv 정도의 삼중수소 선량을 받았고, 한명의 종사자는 연간 30 mSv 이상의 삼중수소에 피폭되었다[4.44]. Cragle 외 연구진의 코호트에서 백혈병 사망률

은 통계적으로 유의하지 않았지만(SMR=1.27, 95% CI: 0.82, 1.88), 누적외부선량에 관련된 분석 결과, 백혈병(CLL 제외) 사망률이 선량에 따라 통계적으로 유의하게 증가하는 경향성을 보였다(양측검정,  $p=0.049$ )[4.45].

Schubauer-Berigan 외 연구진은 미국의 4개 핵시설(Hanford, Oak Ridge National Lab., Savannah River, Los Alamos National Lab.)과 Portsmouth Naval Shipyard 시설의 종사자에 대해 급성백혈병과 만성 골수 백혈병의 사망률을 조사하였다[4.46]. 각각의 코호트 안에서 코호트 내 환자-대조군 연구를 수행하였으며, 전체 206명의 백혈병 환자와 연령으로 매칭된 823명의 대조군이 사용되었다. 삼중수소와 광자, 중성자, 플루토늄을 포함한 선량이 추정되었다. 잠재기간을 2년으로 두었을 때, 보정되지 않은 초과 교차비(Excess Odds Ratio, EOR)는  $5.96 \text{ Sv}^{-1}$  (95% CI: 0.32, 16.5)이었으나, 성별과 벤젠피폭이 보정되었을 때는  $2.60 \text{ Sv}^{-1}$  (95% CI:  $<-1.03$ , 10.3)로 유의하지 않았다. 5개 시설 중 삼중수소에 대한 피폭 가능성이 가장 높은 서배너 리버 시설 종사자에서 성별과 벤젠피폭이 보정되지 않은 EOR은  $30.6 \text{ Sv}^{-1}$  (95% CI: 4.77,  $>130$ )로 유의한 증가를 보였다.

캐나다원자력공사(AECL) 근로자 코호트에서는 모든 백혈병과 비-CLL 백혈병에 의한 사망이 없었다[4.47, 4.48]. Zablotska 외 연구진은 1957년-1994년 동안 캐나다 원자력시설 종사자 45,468명의 사망률에 관한 추적연구를 하였다[4.41]. 삼중수소 피폭 가능성이 있는 모든 종사자에 대해 뇨시료 자료를 이용하여 삼중수소 선량을 계산하였고, 외부선량에 더해졌다. 삼중수소 피폭량이 논문에 명시되지는 않았지만, 일부 종사자들은 실제 피폭 가능성이 있다. 이 코호트의 전체 평균 선량은  $13.5 \text{ mSv}$ 이고, 실질적인 선량값이 기록된 종사자들의 평균 선량은  $19.7 \text{ mSv}$ 로 나타났다. 백혈병(CLL 제외)은  $\text{SMR}=0.80$  (95% CI: 0.47, 1.26)으로 통계적으로 유의하지 않았으나, 백혈병(CLL 제외)의 ERR은  $52.5 \text{ Sv}^{-1}$  (95% CI: 0.205, 291,  $p=0.048$ )이었다. 모든 백혈병의 경우,  $18.9 \text{ Sv}^{-1}$  (95% CI:  $<-2.08$ , 138,  $p=0.25$ )로 통계적으로 유의하지 않았다. 이 연구에서 삼중수소의 영향을 살펴보기 위해 실시한 추가분석 결과, 삼중수소 선량을 제외한 모든 백혈병의  $16.3 \text{ Sv}^{-1}$ 이었으나 삼중수소를 포함했을 때  $18.9 \text{ Sv}^{-1}$ 이었다. 총 누적선량에서 삼중수소를 제외하거나 포함하는 경우 위험도의 결과는 크게 달라지지 않았다. 삼중수소와 다른 방사

선 피폭의 효과를 분리해서 분석하지 않았고 삼중수소 데이터가 없기 때문에 위의 연구로부터 삼중수소 위험에 대해 추측하는 것은 어렵다. 그러나 서배너 리버 시설 종사자들은 삼중수소 위험에 대해 잠재적으로 유의한 정보를 내포하고 있다.

## (2) 폐암

Hazelton 외 연구진은 감마선과 삼중수소 방사선의 직업상 저선량 피폭에 대한 개인의 연간 선량측정을 가진 대규모 캐나다 코호트(N=191,042)에서 폐암 발병률을 구하였다[4.49]. 1951년과 1988년 사이의 방사선 피폭은 캐나다 NDR에서 얻었고, 1969년과 1988년 사이의 암 발병률은 캐나다 암 데이터베이스와의 연계를 통해 확보했다. 연간 피폭 정보는 개인 배지 선량측정을 기반으로 했고 감마선과 삼중수소의 전신 및 피부 피폭의 누적 연간 값을 포함했다. 삼중수소 등가선량이 집단 선량의 9.0%를 차지했기 때문에 전신 삼중수소 피폭은 일반적으로 감마선 피폭에 비해 작았다. 전신 감마선 및 삼중수소 방사선의 누적 피폭이 0이 아닌 남성(N=60,677)과 여성(N=44,238)에 대한 평균 누적 피폭은 각각 18.2 mSv와 3.8 mSv였다. 남성은 유의한 용량-반응이 있었다. 322명의 폐암 환자 중 33명이 방사선에 기인했다. 남성 95,430명에서 폐암 발병률은 전신 감마선과 강한 연관성이 있었다. 별도로 고려된 삼중수소의 용량-반응은 아주 조금 의미가 있었다. 중성자 피폭이 없는 남성(N=69,826)의 제한된 분석에서, 삼중수소 용량-반응은 통계적으로 유의하지 않았다.

## (3) 전립선암

Beral 외 연구진은 1946년~1979년 동안 UKAEA(UK Atomic Energy Authority)의 종사자 39,546명(이중 방사선작업종사자는 52%)을 추적 관찰하여 사망률을 구한 연구를 수행했다[4.50]. 연구결과, 삼중수소에 피폭된 1,418명의 종사자들을 국가 통계와 비교했을 때, 전립선암 사망률이 통계적으로 유의하게 높았다(표준화 전립선암 사망비(SMR)=8.89, 6명 사망, 양측검정,  $p<0.001$ ). 이 그룹에서 삼중수소 선량자료는 주어지지 않았다. 또한 전체 코호트(삼중수소 피폭 종사자+그 외 종사자)에서 필름배지 선량에 따라 전립선

암 사망률이 통계적으로 유의하게 증가했다.

Atkinson 외 연구진은 위의 연구를 1997년 말까지 확장하여 51,367명을 대상으로 사망률을 구한 코호트 추적연구를 수행하였다[4.35]. UKAEA 종사자들 중 삼중수소에 피폭된 사람들만 별도로 분석하지는 않았으나 Beral 외 연구진의 결과를 입증할만한 것은 발견하지 못했다[4.50]. 특히 전립선암의 경향은 유의한 차이가 없었다(양측검정,  $p=0.13$ )[단, 1979년까지 추적 관찰했을 때는 유의한 차이가 있었음(양측검정,  $p<0.01$ )]. 그러나 삼중수소 선량의 부재로 인해 이 두 연구로부터 삼중수소의 위험에 대해 추론하기는 매우 어렵다.

Rooney 외 연구진에 의한 환자-대조군 연구에는 1946년부터 1986년까지 전립선암에 대한 UKAEA 근로자의 추적 연구가 포함됐다[4.51]. 136명의 전립선암 환자군(사망 또는 진단)과 404명의 대조군 데이터가 수집되었다. 삼중수소를 비롯하여 다수의 방사성핵종( $^{51}\text{Cr}$ ,  $^{59}\text{Fe}$ ,  $^{60}\text{Co}$  또는  $^{65}\text{Zn}$ )에 따른 내부 오염을 평가하기 위해서 각 환자군 또는 대조군의 근로 이력을 상세히 조사했다. 각 방사성핵종에 대한 잠재적 피폭은 각 근로자의 작업과 피폭 이력(직장, 업무 유형)을 보건물리학자가 평가한 4점 척도(없음, 가능, 가능하지만 낮은 수준, 상대적으로 높은 수준)를 기반으로 했다. 전립선암의 위험은 삼중수소로 내부 오염되었거나 삼중수소에 의해 잠재적으로 오염된 건물에서 일했던 남성에게서 크게 증가했다. 문서로 기록된 삼중수소에 의한 내부 오염에 따른 전립선암의 상대위험도(RR)는 14.26이었다(95% CI: 3.09 - 133.16,  $p<0.01$ ). 삼중수소에 의한 잠재적 오염의 정도(양측검증  $p<0.05$ )와 삼중수소로 오염될 가능성이 있는 건물에서 일한 기간(양측검정  $p<0.01$ )에 따라 증가하는 경향이 있었다. 전립선암의 위험은 원자로 환경, 특히 중수감속형 원자로에서의 작업과 매우 밀접한 관련이 있었다(RR=2.13, 95% CI: 1.0 - 4.52). 중수로에서 작업한 기간에 따라 위험이 증가했다(추세에 대한 카이제곱 검정= 8.94,  $p=0.003$ ).

그러나 이 연구의 중요한 문제점으로 적절한 삼중수소 선량의 부재를 들 수 있는데, 이런 수치를 이용하여 삼중수소의 위험을 추정하는 데는 문제가 있다. 더 확장된 코호트를 이용한 Carpenter 외 연구진의 연구에서도 확실한 위험도의 차이를 보였지만[4.33], 똑같은 문제점으로 삼중수소에 대한 위험을



추정하기엔 무리가 있다.

Atkinson 외 연구진은 UKAEA 코호트를 확장하여 전립선암 사망률을 분석하였다[4.52]. 1980~1997년 동안 추가적으로 전립선암에 의한 사망이 90명 발생했다. 전체 종사자에 대하여 1946~1979년 코호트(관찰된 수: 27, 기대 수: 23.46, SMR=1.15, 95% CI: 0.76, 1.67)와 1980~1997년 코호트(관찰된 수: 90, 기대 수: 116.37, SMR=0.77, 95% CI: 0.62, 0.95) 모두에서 전립선암 사망률은 유의하게 증가하지 않거나 오히려 감소하였다. 그러나 삼중수소에 피폭된 종사자들 사이에서는 1946~1979년 코호트에서 전립선암 사망률이 통계적으로 유의하게 높았으나(관찰된 수: 6, 기대 수: 0.77, SMR=7.81, 95% CI: 2.85, 17.00)[Beral 외 연구진[4.50]의 연구와 일관됨], 1980~1997년 코호트는 통계적으로 유의한 차이가 없었다(관찰된 수: 9, 기대 수: 10.16, SMR=0.89, 95% CI: 0.40, 1.68). 1946~1979년 동안 방사선업무를 한 종사자들 사이에서 누적 방사선량에 따른 전립선암 사망률이 통계적으로 증가하는 경향성(양측검정,  $p < 0.001$ )을 보였으나, 1980~1997년 코호트에서 방사선과 관련된 증가는 관찰되지 않았다(양측검정,  $p = 0.920$ ). 삼중수소에 피폭된 종사자 중 전립선암의 경향성도 없었다(1946~1979년 종사자들: 양측검정,  $p = 0.264$ ; 1980~1997년 종사자들: 양측검정,  $p = 0.862$ ). 이 그룹에서 삼중수소 선량 데이터가 주어지지 않았고, 삼중수소 선량에 대한 분석도 따로 실시하지 않았다.

Beral 외 연구진은 1951~1982년 동안 AWE(Atomic Weapons Establishment) 종사자 22,552명(이중 방사선작업종사자는 42%)의 사망률을 조사하였다[4.53]. 이 그룹들에서 삼중수소 선량 정보는 주어지지 않았다. 삼중수소 피폭 종사자에서 전립선암의 사망률은 통계적으로 유의하게 증가하지 않았으며, 전체 코호트에서 선량에 따른 전립선암 위험의 유의한 경향성도 없었다. 표준화암사망비(SMR)가 선량에 따라 증가하는 경향성을 보였으나, 단지 3명의 전립선암 사망에 근거하였다. 마찬가지로 삼중수소 선량의 부재로 인해 이 연구에서 삼중수소 위험에 대하여 추론하기는 어렵다. 이 연구에서 전립선암에 대해서 관찰된 유의성은 영국 모든 방사선작업종사자를 분석한 Carpenter 외 연구진[4.33]의 동일 부위 연구결과와 상반되는 결과를 보였다.

Fraser 외 연구진이 UKAEA 코호트를 이용한 연구에서 삼중수소 피폭에

대해 추적 관찰된 남성의 전립선암 SMR은 2.82였다(95% CI: 1.13-5.80,  $p=0.03$ ). 전립선암 사망률은 외부 방사선 피폭과 통계적으로 유의한 연관성을 보였지만, 대개 플루토늄 이외의 방사성핵종에 의한 내부 오염에 대해서도 추적 관찰된 남성에 국한되었다[4.34]. 전립선암 사망률은 윈프리스(Winfrith)의 방사선작업종사자가 가장 높았다.

McGeoghegan과 Binks의 연구에서 전립선암과 누적 외부선량 사이의 연관성을 보여주는 증거는 없었다[4.36]. 삼중수소 피폭량을 알 수 없기 때문에 이 연구로부터 삼중수소 위험에 대하여 추론하기는 어렵다. 그러나 Capenhurst 종사자들은 삼중수소에 아주 높게 피폭되었기 때문에 향후에 삼중수소 데이터를 이용할 수 있다면 이 코호트는 잠재적인 유익한 정보를 줄 것이다.

삼중수소를 생산하는데 사용되었던 채플크로스 원전에서 1955년부터 1995년까지 고용된 적이 있는 영국핵연료공사(BNFL)와 영국원자력에너지기구(UKAEA) 근로자 2,628명의 누적 외부선량에 따른 전립선암은 통계적으로 유의하게 증가추세를 보였다. 이는 8명의 사망자를 근거로 했다. 그러나 8명의 사망자 중 한 사람도 삼중수소에 대해 추적 관찰되지 않았다. 12명의 환자를 근거로, 누적 외부선량에 따른 전립선암 발병률이 증가 추세가 보였다. 그러나 이들 중에 한 사람도 삼중수소 피폭이 모니터되지 않았고, 전립선암으로 등록되거나 사망한 종사자 중 2명은 삼중수소를 생산하기 이전에 채플크로스를 떠난 것으로 밝혀졌다. 따라서 전립선암 위험의 증가는 삼중수소의 피폭 때문이라고 볼 수 없다[4.36].

Cragle 외 연구진에 의하면, 서배너 리버 핵시설의 800명의 종사자가 0.5 mSv 정도의 삼중수소 선량을 받았고, 한명의 종사자는 연간 30 mSv 이상의 삼중수소에 피폭되었다[4.44]. Cragle 외 연구진[4.45]의 코호트에서 전립선암 사망률의 증가에 대한 증거는 없었다.

AECL 코호트에서 전립선암의 SMR은 0.15 (95% CI: 0.00 - 0.85)이었다[4.39][4.40]. Atkinson 외 연구진은 UKAEA 근로자의 다양한 연구에서 얻은 전립선암 사망에 대한 일치하지 않는 결과에 대한 이유를 설명하였다[4.54]. 그들은 많은 수의 질병을 분석함에 따라 우연히 얻은 결과일 가능성이 높다고 결론 내렸다. 사실, 전립선암에 대한 추세만이 유의했고 방사선량과의 이

연관성은 예상된 결과가 아니었다. 이 점은 다른 핵 산업에서 전립선암의 위험 증가에 대한 증거 부족에 의해 뒷받침된다. 양성 결과는 간헐적이고 일관적이지 않으며 전립선암의 위험 증가는 의료 환경이나 원폭피해자에서 발견되지 않았다. UNSCEAR는 산업 근로자, 의료 환자, 원폭 피해자가 외부 또는 내부 방사선 피폭에 따라 전립선암의 위험이 증가된다는 것을 거의 보여주지 않는다고 하였다[4.55].

#### (4) 기타 암발생

세라필드 지역 방사선작업종사자에 대한 연구에서 여성 종사자들에서는 뼈암의 SMR이 통계적으로 유의하게 증가하였다[4.43]. 그러나 누적 외부선량에 대해 통계적으로 유의한 경향성은 없었다.

영국의 방사선작업종사자를 대상으로 한 역학연구에서 삼중수소 추적 관찰 근로자 중에서 구강암과 인두암의 경우 통계적으로 유의한 위험 감소가 있었다(RR=0.00, 95% CI: 0.00 - 0.90)[4.33]. 또한 삼중수소 추적 관찰 근로자 중에서 초과 사망률을 보이는 유일한 암 부위는 고환암이었고, 이에 대한 상대위험도는 8.37(95% CI: 1.48 - 43.14)이었다. 이는 3명의 사망자에 근거했고 우연히 발생했을 가능성이 있었다.

McGeoghegan과 Binks의 케이프 허스트의 우라늄 농축 시설에 고용됐던 근로자 12,540명을 대상으로 한 연구에서 늑막암의 SMR이 높았다(예상치 4.66명 대비 관측치 11명, SMR=2.36, 양측검정  $p < 0.05$ , RR=2.38)[4.37]. 그러나 표준화발생비(standardized incidence ratio, SIR)는 높지 않았고 외부 방사선의 누적에 따른 통계적으로 유의한 사망률 또는 암 질병률 상승 추세는 없었다[4.36]. Sellafield 지역의 방사선작업종사자에서 흉막암의 SMR이 통계적으로 유의하게 증가하였다[4.56].

Johnson 외 연구진은 AWE 종사자들을 1996년까지 추적 관찰하였다[4.57]. 삼중수소에 피폭된 종사자들을 포함하는 내부피폭 종사자에 대해 국가 통계치와 비교했을 때 신장암의 위험이 통계적으로 유의하게 증가했다(SMR=1.88,  $p=0.0161$ ). 삼중수소 선량을 추정하여 필름배지 선량에 더했지만 삼중수소 선량에만 관련된 위험을 따로 분석하지 않았다.

McGeoghegan과 Binks의 연구에서 누적 외부선량에 따라 통계적으로 유

의한 암 발병률의 유일한 상승추세를 보인 것은 방광암이었다[4.37]. 고형암의 잠복기를 고려하여 최초 노출 후 20년에 발병한 14명의 남성 환자를 근거로 했다. 그러나 방광암 사망률과 외부 선량의 연관성은 발견되지 않았다. AECL 코호트에서 방광암의 위험은 통계적으로 유의하게 감소했다( $p=0.02$ , 양측검정)[4.39, 4.40]. Johnson 외 연구진의 연구에서 잠재기간(lag time)을 고려하지 않았을 때 누적 선량에 대해 방광암의 사망률이 통계적으로 유의하게 증가하는 경향성을 보였다[4.57]. 잠재기간이 11년 일 때 누적선량에 대해 다발성 골수종, 방광암, 기관지와 폐암의 사망률이 통계적으로 유의하게 증가하는 경향성을 보였다. 삼중수소 선량을 추정하여 필름배지 선량에 더했지만 삼중수소 선량에만 관련된 위험을 따로 분석하지 않았다.

### 3. 역학 연구 사례 결과

앞에서 살펴본 바와 같이 직업상 삼중수소와 다른 유형의 방사선에 피폭된 방사선작업종사자의 여러 코호트 및 환자-대조군 연구가 수행되었다. 그러나 대부분의 연구에서 내부 피폭에 대한 삼중수소 특정 선량측정 데이터가 없어서 삼중수소 위험에 대해 추론할 수 없었다. 삼중수소는 근로자와 일반인에 대한 총 방사선 피폭 중에서 일부에만 해당되며 삼중수소 위험은 매우 낮은 전체 방사선 위험의 일부이다. Ashmore 외 연구진은 과거 선량기록 검토를 통해서 캐나다 NDR에 등록된 초기 AECL 기록의 완성도에 대해 우려를 제기하였다[4.58]. 따라서 CNSC는 과거 AECL 기록에 특별한 주의를 기울이면서 캐나다 근로자 코호트를 재분석하고 있다. 이렇게 개정되고 검증된 캐나다 코호트는 삼중수소 피폭에 특정한 관심을 두면서 캐나다 원자력 산업 종사자의 사망률을 평가하기 위해 재분석될 것이다. 이는 직업상 삼중수소 피폭의 건강 영향을 평가하기 위해 잠재적으로 중요한 코호트가 될 것이다[4.59]. 삼중수소에 특정한 피폭을 받은 근로자에 대한 역학 연구와 양질의 선량측정 정보는 미래 연구의 기초로 사용될 수 있을 것이다. 그러나 광범위한 역학 연구와 전체 방사선 피폭에서 초과 위험이 발견되지 않은 사실에 근거하여, 현재 환경이나 직업적 수준에서 삼중수소에 피폭된 사람들의 암 발병률 또는 사망률이 증가했다는 결과를 도출할 가능성은 없다.

### 4.3절 참고 문헌

- [4.1] Straume T and Carsten AL, Tritium radiobiology and relative biological effectiveness. *Health Physics* 65(6): 657-72, 1993.
- [4.2] Health Protection Agency (HPA), Review of risks from tritium with particular attention to tritiated water and organic compounds containing tritium. Report of AGIR subgroup on tritium risks, UK advisory group on ionizing radiation. 2007.
- [4.3] Canadian Nuclear Safety Commission, Health Effects, Dosimetry and Radiological Protection of Tritium (INFO-0799), 2010,
- [4.4] Little MP and Lambert BE, Systematic review of experimental studies of relative biological effectiveness of tritium. *Radiation and Environmental Biophysics* 47(1): 71-93, 2008.
- [4.5] Trabalka JR and Kocher DC, Energy dependence of dose and dose-rate effectiveness factor for low-LET radiations: Potential importance to estimation of cancer risks and relationship to biological effectiveness. *Health Physics* 93(1): 17-27, 2007.
- [4.6] Hill MA, The variation of biological effectiveness of X-rays and gamma rays with energy. *Radiation Protection Dosimetry* 112: 471-481, 2004.
- [4.7] International Commission on Radiation Units and Measurements (ICRU), Linear Energy Transfer. ICRU Report 16, Bethesda, MA, 1970.
- [4.8] Moiseenko VV, Waker AJ, Hamm RN, and Prestwich WV, Calculation of radiation-induced DNA damage from photons and tritium beta-particles Part II: Tritium RBE and damage complexity. *Radiation and Environmental Biophysics* 40(1): 33-38, 2001.
- [4.9] Chen J, Radiation Quality of Tritium. *Radiation Protection Dosimetry* 122(1-4): 546-8, 2006.
- [4.10] Soloviev V, Ilyin LA, Baranov AE et al, In: Medical Management of Radiation Accidents, Second edition (I.A. Gusev, A.K. Guskova

- and F.A. Mettler, eds.). CRC Press, Boca Raton) pp. 46 and 158, 2001.
- [4.11] Brues AM, Stroud AN, and Rietz L, Toxicity of tritium oxide to mice. Proceedings for the Society of Experimental Biology and Medicine 79(1): 174-6, 1952.
  - [4.12] Yokoro K, Yamamoto O, Seyama T, and Kinomura A, Acute and Chronic Effects of Tritiated Water in Mice with Special Reference to its Carcinogenicity: An Interim Report. Radiation Protection Dosimetry 16:165-168, 1986.
  - [4.13] Yamamoto O, Yokoro T, Seyama A, and Kinomura T, HTO Oral Administration in Mice. I: Threshold Dose Rate for Haematopoietic Death. International Journal of Radiation Biology 57(3): 543-549, 1990.
  - [4.14] Brenner DJ, Doll R, Goodhead DT, Hall EJ, Land CE, Little JB, Lubin JH, Preston DL, Preston RJ, Puskin JR, Ron E, Sachs RK, Samet JM, Setlow, RB, and Zaider M, Cancer risks attributable to low doses of ionizing radiation: Assessing what we really know. Proceedings of the National Academy of Science of the United States of America 100 13761-6, 2003.
  - [4.15] Brown RM, The measurement of tritium in Canadian food items. Atomic Energy Control Board (now the Canadian Nuclear Safety Commission) AECSB INFO 0499, 1995.
  - [4.16] International Commission on Radiological Protection (ICRP), A Compilation of the Major Concepts and Quantities in Use by the ICRP, ICRP Publication 42, Annals of the ICRP, Vol.14(4), Pergamon Press, New York, N.Y., 1984.
  - [4.17] National Research Council (NRC), Health Risks from Exposure to Low Levels of Ionizing Radiation. The Committee on the Biological Effects of Ionizing Radiations BEIR V. Washington, DC: National Academies Press, 1990.

- [4.18] United Nations Scientific Committee on the effects of ionising radiation (UNSCEAR), Ionising Radiation: Sources and Biological Effects. Vienna, 1982.
- [4.19] Yamamoto O, Seyama T, Itoh H, and Fujimoto N, Oral administration of tritiated water (HTO) in mouse. III: Low dose-rate irradiation and threshold dose-rate for radiation risk. *International Journal of Radiation Biology* 73(5): 535-541, 1998.
- [4.20] Johnson JR, Myers DK, Jackson JS, Dunford DW, Gragtmans NJ, Wyatt HM, Jones AR, and Percy DH, Relative biological effectiveness of tritium for induction of myeloid leukemia in CBA/H mice. *Radiation Research* 144(1): 82-89, 1995.
- [4.21] Straume T, Tritium Risk Assessment. *Health Physics* 65(6): 673-682, 1993.
- [4.22] Diabaté S and Strack S, Organically bound tritium. *Health Physics* 65(6): 698-712, 1993.
- [4.23] Lambert BE, Cytological damage produced in the mouse testes by tritiated thymidine, tritiated water and X-rays. *Health Physics* 17: 547-557, 1969.
- [4.24] Kacena V, Chemical effects of decay of incorporated radioisotopes. In *Proceedings: Conference on Biological Effects of Transmutation and Decay of Incorporated Radioisotopes*. Vienna, IAEA, 199-214, 1967.
- [4.25] Myers DK, and Johnson JR, Toxicity and dosimetry of tritium: a review. Ottawa, ON: Atomic energy Control Board; Advisory Committee on Radiological Protection; INFO-0377, 1991.
- [4.26] Carsten AL, Tritium in the Environment: Isotopic Effects and Transmutation. In *Advances in Radiation Biology* (John T Lett and Howard Adler, eds). New York, Academic Press, 1979.
- [4.27] Feinendegen LE and Bond VP, Transmutation versus beta irradiation in the pathological effects of tritium decay. In *Tritium*

- (AA Moghissi and MW Carter, eds). Nevada, Messenger Graphics, pp. 221-32, 1971.
- [4.28] The Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP publication 103. Ann ICRP, 37(2-4): p. 1-332, 2007.
- [4.29] Kotaro Ozasa et al. Studies of the Mortality of Atomic Bomb Survivors, Report 14, 1950 - 003: An Overview of Cancer and Noncancer Diseases. Radiation Research, 2012. 177(3): p. 229-243.
- [4.30] Cardis, E et al. Risk of cancer after low doses of ionising radiation: retrospective cohort study in 15 countries. BMJ 2005;331:77-80
- [4.31] S. Akiba. Cancer risk in high background areas in China and India. Proceedings of IRPA 10, held in Hiroshima, 14-19, May 2000.
- [4.32] Nair RR et al. Background radiation and cancer incidence in Kerala, India-Karanagappally cohort study. Health Phys ;96(1): p. 55-66, Jan. 2009.
- [4.33] Carpenter LM, Higgins D, Douglas AJ, Maconochie NES, Omar RZ, Fraser P, Beral V, and Smith PG, Cancer mortality in relation to monitoring for radionuclide exposure in three UK nuclear industry workforces. *British Journal of Cancer* 78: 1224-1232, 1998.
- [4.34] Fraser P, Carpenter L, Moconochie N, Higgins C, Booth M and Beral V, Cancer mortality and morbidity in employees of the United Kingdom Atomic Energy Authority, 1946-86. *British Journal of Cancer* 67: 615-24, 1993.
- [4.35] Atkinson WD, Law DV, Bromley KJ, and Inskip HM, Mortality of employees of the United Kingdom Atomic Energy Authority, 1946-97. *Occupational and Environmental Medicine* 61: 577-585, 2004.
- [4.36] McGeoghegan D and Binks K, The mortality and cancer morbidity experience of workers at the Capenhurst uranium enrichment facility, 1946-95. *Journal of Radiological Protection* 20: 381-401,



2000.

- [4.37] McGeoghegan D and Binks K, The mortality and cancer morbidity experience of employees at the Chapelcross plant of British Nuclear Fuels plc, 1955-95. *Journal of Radiological Protection* 21: 221-250, 2001.
- [4.38] Cragle DL, McLain RW, Qualters JR, Hickey JLS, Wilkinson GS, Tankersley WG, and Lushbaugh CC, Mortality among workers at a nuclear fuels production facility. *American Journal of Industrial Medicine* 14: 379-401, 1988.
- [4.39] Howe GR, Weeks JL, Miller AB, Chiarelli AM and Etizadi-Amoli J, A study of the health of the employees of Atomic Energy of Canada Limited IV. Analysis of mortality during the period 1950-1981. AECL-9442, 1987.
- [4.40] Gribbin MA, Weeks JL, and Howe GR, Cancer mortality (1956-1985) among male employees of Atomic Energy of Canada Limited with respect to occupational exposure to external low-linear-energy-transfer ionizing radiation. *Radiation Research* 133(3):375-80 1993.
- [4.41] Zablotska LB, Ashmore JP, and Howe GR, Analysis of mortality among Canadian Nuclear Power Industry Workers after chronic low-dose exposure to ionizing radiation. *Radiation Research* 161: 633-641, 2004.
- [4.42] McGeoghegan D, Binks K, The mortality and cancer morbidity experience of workers at the Capenhurst uranium enrichment facility, 1946-95. *Journal of Radiological Protection* 20: 381-401, 2000.
- [4.43] McGeoghegan D, Gillies M., Riddell AE, and Binks K, Mortality and cancer morbidity experience of female workers at the British Nuclear Fuels Sellafield plant, 1946-1998. *American Journal of Industrial Medicine* 44: 653-663, 2003.

- [4.44] Cragle DL, McLain RW, Qualters JR, Hickey JLS, Wilkinson GS, Tankersley WG, and Lushbaugh CC, Mortality among workers at a nuclear fuels production facility. *American Journal of Industrial Medicine* 14: 379-401, 1988.
- [4.45] Cragle DL, Watkins JP, and Robertson-DeMers K, Mortality among workers at the Savannah River nuclear fuels production facility. ASA 1998 proceedings of the section on statistics in epidemiology. Alexandria, VA American Statistical Association, pp 83-87, 1998.
- [4.46] Schubauer-Berrigan MK, Daniels RD, Fleming DA, Markey AM, Couch JR, Ahrenholz SH, Burphy JS, Anderson JL, and Tseng C-Y, Risk of chronic myeloid and acute leukemia mortality after exposure to ionizing radiation among workers at four U.S. nuclear weapons facilities and a nuclear naval shipyard. *Radiation Research* 167: 222-232, 2007.
- [4.47] Howe GR, Weeks JL, Miller AB, Chiarelli AM and Etizadi-Amoli J, A study of the health of the employees of Atomic Energy of Canada Limited IV. Analysis of mortality during the period 1950-1981. AECL-9442, 1987.
- [4.48] Gribbin MA, Weeks JL, and Howe GR, Cancer mortality (1956-1985) among male employees of Atomic Energy of Canada Limited with respect to occupational exposure to external low-linear-energy-transfer ionizing radiation. *Radiation Research* 133(3):375-80, 1993.
- [4.49] Hazelton WD, Suresh MH, Curtis SB, Zielinski JM, Ashmore PJ, and Krewski D, Biologically based analysis of lung cancer incidence in a large Canadian occupational cohort with low-dose ionizing radiation exposure, and comparison with Japanese a-bomb survivors. *Journal of Toxicology and Environmental Health (Part A)* 69:1013-1038, 2006.
- [4.50] Beral V, Inskip H, Fraser P, Booth M, Coleman D, and Rose G,

- Mortality of employees of the United Kingdom Atomic Energy Authority, 1946–1979. *British Medical Journal* 291: 440–447, 1985.
- [4.51] Rooney C, Beral V, Maconochie N, Fraser P, and Davies G, Case-control study of prostatic cancer in employees of the United Kingdom Atomic Energy Authority. *British Medical Journal* 307: 1391–1397, 1993.
- [4.52] Atkinson WD, Law DV and Bromley KJ A decline in the mortality from prostate cancer in the UKAEA workforce, In: Proceedings of the 4th International Conference on Health Effects of Low-level Radiation, September 2002, Oxford. Thomas Telford, London, Paper 08, 2002.
- [4.53] Beral V, Fraser P, Carpenter L, Booth M, Brown A, and Rose G, Mortality of employees of the Atomic Weapons Establishment, 1951–82. *British Medical Journal* 297: 757–770, 1988.
- [4.54] Atkinson WD, Law DV, and Bromley KJ, A decline in mortality from prostate cancer in the UK Atomic Energy Authority workforce. *Journal of Radiological Protection* 27(4): 437–45, 2007.
- [4.55] United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR), United Nations. Effects of Ionizing Radiation. 2006 Report to the General Assembly, with scientific annexes. United Nations, New York, 2008.
- [4.56] Omar RZ, Barber JA, and Smith PG, Cancer mortality and morbidity among plutonium workers at the Sellafield plant of British Nuclear Fuels. *British Journal of Cancer* 79: 1288–1301, 1999.
- [4.57] Johnson P, Atkinson WD, and Nicholls JL, Updated analysis of mortality in workers at UK atomic weapons establishments. Proceedings of the SRP Sixth International Symposium: Achievements & Challenges: Advancing Radiation Protection into the 21st Century, 1999.
- [4.58] Ashmore JP, Gentner NE, and Osborne RV, Analysis of the

results for the AECL cohort in the IARC study on the radiogenic cancer risk among nuclear industry workers in fifteen countries. Prepared for Atomic Energy of Canada Limited, Chalk River Laboratories, Chalk River, Ontario, 2007.

- [4.59] Canadian Nuclear Safety Commission Health Effects, Dosimetry and Radiological Protection of Tritium, 2010.

### III. 결론

1. 삼중수소(三重水素, Tritium, T,  $^3\text{H}$ )는 수소 원소의 유일한 방사성 동위 원소로서 자연적으로 생성되기도 하고 원자력발전소(이하 ‘원전’이라함), 연 구용 원자로 등의 운영에 따른 부산물로 발생되기도 한다. 지구에 존재하는 삼중수소는 전체 수소의  $1/10^{18}$ 이며 주로 산소와 반응하여 물과 수증기 형태 인 HTO로 존재한다. 원전에서 삼중수소는 원자로 내에서 중성자 반응에 의 해서 생성되고, 특히 냉각재 및 감속재로 중수를 사용하는 중수로(重水爐)에 서 상대적으로 많이 발생된다. 우리나라에서는 월성발전소 1, 2, 3, 4호기가 중수로이다.

2. 방사선은 자연방사선과 인공방사선으로 구분할 수 있는데, 방사선은 공 기 중, 토양, 지구, 우주, 인체 내 등 주위환경 거의 모든 곳에 존재하며, 우 리는 일상에서 매일 방사선에 노출되고, 방사성물질을 흡입, 섭취하고 살아 가고 있다. 자연방사선으로부터 우리나라 국민이 일상적으로 받고 있는 유효 선량은 지역 그리고 생활 습관에 따라 차이가 있으나, 평균적으로는 연간 3.08 mSv 정도이다. 인공방사선피폭은 의료방사선에 의한 것이 거의 대부분 을 차지하는데, 우리나라의 경우 일인당 연간 평균 1.4 mSv를 받고 있다. 즉 우리나라 국민의 경우 일상적으로 연간 4.45 mSv의 방사선량을 받으며 살아 가고 있다. 100 mSv 이하에서는 현재까지의 역학연구에서 직접적인 암 발생 을 증명하지 못하고 있다. 따라서 저선량에 대한 인체 영향에 대해 다양한 반응이 제시되어 왔는데, 문턱 없는 선형모형(LNT)모델은 방사선 방호목적 으로 가정한 것임을 인식하는 것이 중요하다. 선량한도는 보편적 판단에서 용인 가능한 피폭 수준이며, 위험과 안전의 경계선을 의미하지 않으며, 국내 의 경우 국제기구 등에서 제시한 선량한도에 조화를 맞추어 선량한도를 설정하고, 일반인 및 종사자에 대한 방사선 안전관리를 하고 있다.

3. 국내 원전에서 배출하는 삼중수소의 양은 고리, 한빛, 한울 발전소의 경 우 매년 100 TBq 이하로 유지되고 있다. 반면 중수로인 월성발전소의 경 우 400 TBq 수준이었다가 2007년 7월부터 삼중수소제거설비(TRF) 가동 후

200 TBq 수준으로 유지되고 있다. 이는 지난 50년 동안 중수로인 CANDU 원자로를 22개 호기를 운영해온 캐나다의 CANDU 원자로 1기에서 배출하는 삼중수소의 양(연간 100~900TBq)과 유사한 수준이다.

4. 모든 원전 부지의 빗물 중 삼중수소의 농도는 일반 환경보다 높다. 그러나 지표수, 식수, 지하수에서 삼중수소의 농도는 고리, 한빛, 한울발전소 주변에서는 낮거나 거의 검출되지 않고 있고, 월성 원전 주변에서는 상대적으로 높다. 삼중수소의 농도가 최대로 검출된 공기를 1 년 간 흡입하거나 빗물 또는 지하수를 1 년 간 식수로 사용한다고 가정하더라도 연간 섭취 선량은 0.00022~0.00226 mSv로 일반인의 연간 선량한도(1 mSv)의 0.02~0.2% 수준이다.

5. 원전으로부터 환경으로 배출되는 방사능 양을 토대로 계산한 주변 주민의 예측 피폭 방사선량은 0.0045~0.1 mSv로 부지 당 원전 운영 기준치(0.25 mSv) 및 일반인의 선량한도(1 mSv) 이하로 유지되고 있다. 삼중수소에 의한 방사선량은 전체 핵종에 의한 방사선량의 10~20% 이다.

6. 연구용 원자로인 하나로에서 배출되는 삼중수소의 양은 원전에 비해 낮은 수준이며, 전체 핵종에 의한 계산된 최대 피폭선량은 부지 당 기준치(0.25 mSv) 및 일반인의 선량한도(1 mSv) 이하이다.

7. 삼중수소는 베타선을 방출한다. 베타선의 공기 중 투과 거리는 약 6  $\mu\text{m}$ 로 일반적인 세포의 크기인 7~30  $\mu\text{m}$ 에 비해 매우 짧아 외부피폭에는 거의 기여하지 않고, 흡입 또는 섭취를 통해 체내에 흡수되어 내부 피폭에만 기여한다.

8. 동물실험에서 삼중수소에 의한 암의 유발 및 촉진은 500 mSv 이상의 고선량에서 관찰되었다.

9. 역학 연구는 방사선 피폭에 따른 건강 위험을 추정하는데 있어서 가장 좋은 증거이다. 우리나라를 포함하여 15개국 407,391 (520만 person years)명

의 원전 종사들을 대상으로 한 국제 공동 연구에서 장기간 저선량 방사선에 노출된 종사자에게 잠재적인 암 위험도(백혈병을 제외한 모든 암의  $ERR/Sv=0.97$  [0.14, 1.97])가 관찰되었다. 그러나 불확실한 피폭선량 추정 가능성이 있는 캐나다를 제외하고 분석하면 유의성(백혈병을 제외한 모든 암의  $ERR/Sv=0.58$  [-0.22, 1.55])이 관찰되지 않았다.

10. 영국, 캐나다, 미국 등의 우라늄 농축 시설, 삼중수소 생산 원전 종사자에 대한 역학 연구 결과를 종합적으로 분석한 결과 삼중수소에 의한 기형출산, 암 발생 또는 사망률 증가 등의 증거는 확인되지 않고 있다. 이는 대부분의 연구에서 삼중수소에 의한 내부 피폭의 선량 데이터가 불충분하여 삼중수소의 위험에 대한 결론을 내리기가 어렵기 때문이다. 그러나 광범위한 역학 연구와 전체 방사선 피폭에서 초과 위험이 발견되지 않은 사실에 근거한다면 현재 환경이나 직업적 수준에서 삼중수소에 피폭된 사람들의 암 발병률 또는 사망률이 증가한다는 결론을 얻을 가능성은 매우 적다.

11. 국내 원자력발전소에서 배출되는 삼중수소의 양은 법에서 규정한 배출 기준 보다 매우 낮은 수준으로 관리되고 있다. 그러나 원전 주변 환경 시료에서 삼중수소의 농도가 높고, 주민 몸에서도 삼중수소가 검출되고 있어 주민의 건강에 대한 우려와 불안감이 존재하는 것도 현실이다. 따라서 삼중수소를 포함한 모든 핵종의 환경 배출을 ALARA 관점에서 합리적으로 줄이기 위한 노력이 이루어져야 하겠고, 동시에 주민 건강의 모니터링과 삼중수소 인체 영향 연구를 통해 삼중수소의 인체 영향에 대한 객관적이고 과학적인 정보를 확보할 필요가 있다.

## 부록: 전문용어

**구경꾼효과 bystander effect** : 조사된 인접 세포에서 받는 신호에 의해 촉발되는 조사되지 않은 세포의 반응.

**결정론적 영향 deterministic effect** : 문턱선량이 있고 선량이 증가함에 따라 반응 심각도가 증가하는 특성을 지닌 세포 집단의 상해. 조직반응이라고도 한다. 생물학적 반응 수정자를 포함하여 피폭 후 절차로 결정론적 영향을 수정할 수 있는 경우도 있다.

**그레이 gray, Gy** : 흡수선량의 SI 단위에 대한 특별명칭:  $1 \text{ Gy} = 1 \text{ J kg}^{-1}$ .

**단일광자방출 단층촬영술 single hpton emission computed tomography, SPECT** :  $\gamma$ 선 방출 핵종을 검출하여 인체 장기의 질환을 진단하는 데 이용되는 방사형 컴퓨터 단층촬영법.

**등가선량 equivalent dose,  $H_T$**  : 다른 선질의 방사선이 미치는 생물학적 효력 차이를 반영하기 위해 조직이나 장기의 평균선량에 그 흡수선량을 부여한 방사선의 가중치를 가중한 선량. 조직이나 장기 T의 선량이며 다음과 같이 정의된다.

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

여기서  $D_{T,R}$ 는 조직이나 장기 T가 방사선 R로부터 받은 평균 흡수선량,  $w_R$ 은 방사선가중치이다.  $w_R$ 은 무차원이므로, 등가선량 단위는 흡수선량 단위와 같이 킬로그램 당 줄( $\text{J kg}^{-1}$ )이며, 그 특별명칭은 시버트(Sv)이다.

**문턱 없는 선형모델 linear-non-threshold model (LNT)** : 낮은 선량 영역에서 0보다 큰 방사선량은 초과 암 및 유전질환 위험을 단순 정비례로 증가시킨다는 가정에 기초한 선량-반응 모델.

**발생, 발생률 incidence, incidence rate** : 특정 기간에 집단에서 질병이 발



생한 비율. 일반적으로 연간 1십만 명(또는 1십만 인-년) 당 질병 사례 수로 표현한다.

**방사능 activity, A** : 물질의 특정 양에서 단위 시간 당 발생하는 핵변환 수의 기대치. 방사능의 SI 단위는 매초( $s^{-1}$ )이며, 그 특별명칭은 베크렐(Bq)이다.

**방사선가중치 radiation weighting factor,  $w_R$**  : 낮은 LET 방사선에 비해 높은 LET 방사선의 생물학적 효력이 높음을 반영하기 위해 조직이나 장기의 흡수선량에 곱하는 무차원 인자. 이 가중치는 조직이나 장기에 평균한 흡수선량으로부터 등가선량을 도출하는 데 사용한다.

**방사성물질 radioactive material** : 방사능과 방사능 농도를 모두 고려하여, 그 방사능 때문에 규제관리 대상이 되도록 국가법률이나 규제기관이 규정하는 물질.

**방사성추적자 radioactive tracer** : 방사능을 이용하는 트레이서.

**베크렐 becquerel, Bq** : 방사능 SI 단위의 특별명칭,  $1 \text{ Bq} = 1 \text{ s}^{-1}$  ( $2.7 \times 10^{-11} \text{ Ci}$ )

**비정 range** : 방사선 입자가 날아간 거리를 비정이라 하고, 그 자취를 비적이라고 한다. 알파선의 비적은 거의 직선이고, 베타선의 비적은 지그재그 모양이다. 일반적으로 입자의 에너지가 높을수록 비정이 길다. 생체 안의 비정은 전자가 수십 마이크로 이내이고, 뒤의 것은 수 mm (이를테면  $^{32}\text{P}$ )이다.

**생물학적효과비 relative biological effectiveness, RBE** : 동일한 생물학적 효과를 내는 고려 방사선량에 대한 낮은 LET 기준방사선 선량의 비. RBE 값은 선량, 선량률 및 생물학적 종점에 따라 결정된다. 방사선방호에

서 낮은 선량의 확률론적 영향에 대한 생물학적효과비(RBE<sub>M</sub>)가 특히 관심 대상이 된다.

**선량계수 dose coefficient** : 피폭의 원인이 되는 양과 종점인 선량 사이의 관계를 짓도록 모델과 기준 값을 사용하여 평가한 계수. 방사성물질 단위 섭취 당 선량과 동의어로 사용하지만, 표면에 분포하는 어떤 방사성핵종의 단위면적 당 방사능으로부터 일정 거리 떨어진 지점에서 외부선량률과 같이, 선량이나 선량률을 방사능의 양이나 농도와 연계하는 계수를 설명하는 데에도 사용한다.

**등가 선량 dose equivalent, H** : 조직의 한 지점에서 D와 Q의 곱. 여기에서 D는 흡수선량이며, Q는 그 지점에서 그 방사선의 선질계수이다. 즉,

$$H = DQ$$

등가 선량의 단위는 킬로그램 당 줄(J kg<sup>-1</sup>)이며, 그 특별명칭은 시버트(Sv)이다.

**섭취량 intake, I** : 환경에서 호흡기관 또는 소화기관을 통해 체내로 들어온 방사능.

- 급성 섭취: 짧은 시간에 일어난 흡입 또는 취식에 의한 단일 섭취.
- 만성 섭취: 일정한 기간에 걸쳐 일어난 섭취.

**시버트 sievert, Sv** : 등가선량, 유효선량 및 실용량의 SI 단위에 대한 특별명칭. SI 단위는 킬로그램 당 줄(J kg<sup>-1</sup>)이다.

**에너지전달선밀도 linear energy transfer (L, LET)** : 어떤 물질에서 하전입자 방사선의 평균 선형 에너지 손실률. 즉, 물질 내 경로의 단위 길이 당 방사선 에너지 손실. 하전입자가 물질 내 거리  $dl$ 을 지나면서 전자와 충돌하여 잃은 평균에너지 손실량  $dE$ 를  $dl$ 로 나눈 값.

$$L = \frac{dE}{dl}.$$

L의 단위는 J m<sup>-1</sup>이며, 흔히 keV μm<sup>-1</sup>로 나타낸다.

**양전자방출 단층촬영술 positron emission tomography, PET** : 양전자를 방출하는 방사성의약품( $^{11}\text{C}$ ,  $^{13}\text{N}$ ,  $^{15}\text{O}$ ,  $^{18}\text{F}$  등)을 인체 내에 주입한 후 목적 장기 안에서 소멸복사에 의한 감마선을 검출하여 영상을 기록하는 장치. 세포의 기능을 영상으로 평가할 수 있는 검사방법으로 함께 이용되며 최근에는 분자영상진단으로도 사용되고 있다.

**연간섭취량 annual intake, AI** : 1년 동안 취식 또는 흡입에 의해 체내로 들어간 특정 방사성핵종의 양

**예탁선량 committed dose** : 체내에 존재하는 방사성 핵종으로 인하여 그 사람이 일정기간 받게 되는 내부피폭선량을 말한다. 예탁선량은 예탁등가선량이나 예탁유효선량으로 나타낼 수 있으며, 피폭을 고려하는 기간이 지정되지 않을 경우에 일정기간은 성인은 50년, 아동에게는 70년을 기준으로 한다.

$$H_{50} = \int_0^{50} H(t) dt$$

**유효선량 effective dose, E** : 단일 양으로 방사선에 피폭한 사람의 종합위해를 근사적으로 나타내기 위해 도입한 방호량. 유효선량은 다음과 같이 인체의 모든 특정 조직과 장기에서 등가선량을 조직가중치로 가중한 합으로 표현된다.

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

여기서  $H_T$ 나  $w_R D_{T,R}$ 는 조직이나 장기 T의 등가선량,  $w_T$ 는 조직가중치이다. 유효선량은 기준인에 대해 평가되며 피폭자 개인 특성을 반영하지 않는다. 유효선량의 단위는 흡수선량의 단위와 같이 킬로그램 당 줄( $\text{J kg}^{-1}$ )이며, 그 특별명칭은 시버트(Sv)이다.

**전산화단층촬영 computed tomography, CT** : 1960년대 Oldendorf에 의해 처음으로 실시되었는데, 그 실용은 Hounsfield에 의해 임상에 적용되었으며 1972년 최초로 머리부 전용장치가 개발되었다. 기존의 단층영상에서

사용되는 필름 대신에 검출기를 사용하고 X-선관과 영상 수용체인 검출기의 회전범위를 넓혀(보통 360° 회전) 인체의 장축에 수직방향이며 일정한 두께를 갖는 횡단면 영상을 얻는다. 검출기에서는 인체의 횡단면을 투과한 후 감약된 X-선을 획득하여 빛 신호로 변환한다. 이를 전기신호로 바꾸어 디지털 신호화한 후 컴퓨터로 보내어 수학적 연산방법을 이용하여 영상을 재구성한다. 여러 가지 영상처리를 추가하여 구조물의 가시능력을 향상시켜 브라운관 또는 필름으로 나타내는 방법이다.

**조사선량 exposure** : 질량이  $dm$ 인 공기의 체적 안에서 광자에 의해 전리된 전하량  $dQ$ 를  $dm$ 으로 나눈 값이다.

$$X = \frac{dQ}{dm}$$

$dm$ 의 공기 중에서 광자에 의해 전리된 전자는 에너지를 잃지까지 많은 2차 전자가 생기는데, 2차 전자는 당연히  $dm$  밖에서도 생긴다. 이들 2차 전자의 전하를 모은 것이  $dQ$ 이다. 이 양이 측정되기 위해서는 전자평형조건을 필요로 하므로, 광자 에너지가 몇 MeV 이상 또는 몇 keV 이하일 때는 조사선량을 측정하기가 곤란하다. 조사선량의 단위는 킬로그램 당 쿨롬(C/kg)이며, 그 특별명칭은 뢰트겐(R)이다.

$$1R = 2.58 \times 10^{-4} \text{ C/kg}$$

1R의 X-선,  $\gamma$ 선이 1g 공기 중에서 만드는 이온쌍의 수는 다음과 같다.

$$\frac{1 \text{ esu}}{4.80 \times 10^{-10} \text{ esu}} \times \frac{1}{1.29 \times 10^{-3} \text{ g}} = 1.61 \times 10^{12} \text{ 이온쌍/g.}$$

**조직가중치 tissue weighting factor,  $w_T$**  : 신체가 균질하게 피폭할 때 (ICRP 1991b) 총 보건위해에 대한 조직이나 장기 T의 상대적 기여를 나타내기 위해 그 등가선량에 가중하는 인자. 가중치의 합은 1이다.

$$\sum_T w_T = 1.$$

**조직 또는 장기 T의 평균흡수선량 mean absorbed dose in a tissue or organ T,  $D_T$**  : 조직 또는 장기 T에서 평균한 흡수선량  $D_T$ .

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

$\varepsilon_T$ 는 조직 또는 장기 T에 전달된 평균 총에너지이고,  $m_T$ 는 그 조직 또는 장기의 질량이다.

**종사자 worker** : 전일제, 시간제 또는 임시직 여부에 관계없이 고용주가 고용한 사람으로서 직무 방사선방호와 관련하여 분명한 권리와 의무가 있는 사람.

**직무피폭 occupational exposure** : 작업 중 종사자에게 발생하는 모든 피폭. 다만, 1) 배제된 피폭 및 면제된 선원 또는 방사선에 관련된 면제된 활동으로부터 피폭과 2) 모든 의료피폭, 3) 지역의 정상적인 자연 백그라운드 방사선피폭은 제외한다.

**집단유효선량 collective effective dose, S** : 피폭과 그 영향의 관점에서 대체로 균질한 집단의 개인선량 합. 특정 선원에서 일정  $\Delta T$  기간에  $E_1$ 과  $E_2$  사이 개인유효선량 값으로 인한 집단유효선량은 다음과 같다.

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

이는  $S = \sum_i E_i N_i$  로 근사시킬 수 있다. 여기서  $E_i$ 는 소집단 i의 평균 유효선량이며,  $N_i$ 는 이 소집단의 사람 수이다. 유효선량이 합산되는 시간과 사람 수는 항상 지정되어야 한다. 집단유효선량의 단위는 킬로그램 당 줄 ( $J \text{ kg}^{-1}$ )이며, 그 특별명칭은 인-시버트(man Sv)이다. 유효선량  $E_1$ 과  $E_2$  범위에 해당하는 개인의 수  $N(E_1, E_2, \Delta T)$ 는 다음과 같다.

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

또한 개인선량  $E_1$ 과  $E_2$  범위와 시간  $\Delta T$ 에서 유효선량의 평균값  $\bar{E}(E_1, E_2, \Delta T)$ 는 다음과 같다.

$$\bar{E}(E_1, E_2, \Delta T) = \frac{1}{N(E_1, E_2, \Delta T)} \int_{E_1}^{E_2} E \left[ \frac{dN}{dE} \right]_{\Delta T} dE .$$

**체내잔류함수 retention function** : 체내에 들어간 방사성 물질의 신체부하량 또는 장기 내의 양 변화를 시간의 함수로 나타낸 것. 내부피폭선량의 평가에 있어 필요한 정보이다.

**커마 kerma, K** : 물질의 어떤 질량  $dm$ 에서 비전하입자에 의해 생성된 모든 하전입자 운동에너지의 합  $dE_{tr}$ 을  $dm$ 으로 나눈 값. 즉

$$K = \frac{dE_{tr}}{dm}$$

커마는 비확률적인 양으로 정의되며,  $dE_{tr}$ 은 운동에너지 합의 기대치이다. 커마의 단위는 킬로그램 당 줄( $J\ kg^{-1}$ )이며, 그 특별명칭은 그레이(Gy)이다.

**표준화발생비 standardized incidence ratio, SIR** : 전체 국민의 인구 구성 및 비율에 적용하여 비교한 질환 발생률

**흡수선량 absorbed dose, D** : 전리방사선이 질량  $dm$ 에 부여한 평균 에너지  $d\bar{\epsilon}$ 를  $dm$ 으로 나눈 몫으로서 기본 선량 양. 즉,

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

흡수선량의 SI 단위는 킬로그램 당 줄( $J\ kg^{-1}$ )이며, 그 특별명칭은 그레이(Gy)이다.

**Protraction Dose Effects** : 동일한 선량을 1) 한 번에 피폭 받을 때와 2) 여러 차례 혹은 일정 기간에 걸쳐 피폭 받는 경우 피폭 받은 선량으로 인한 영향이 2) 경우가 1) 경우보다 작다는 효과이다. 많은 역학연구와 실험 결과를 통해 효과가 확인되었다. 선량을 여러 차례 혹은 일정 기간에 걸쳐 피폭 받는 경우 세포의 생물학적 복구 기능이 작용할 수 있기 때문이다.

비대품

93060



ISBN 979-11-955566-1-8