

## 체내선량평가를 위한 삼중수소농도의 기록준위 타당성 검토

### Consideration of Propriety for Recording level to Evaluate the Internal Dose

이의동, 곽호중

하나검사기술주식회사  
울산시 남구 삼산동 1377-19

#### 요 약

삼중수소에 의한 체내선량 평가시 적용하는 삼중수소농도 기록준위  $1\mu\text{Ci}/\ell$ 의 타당성을 검토하기 위하여, 종사자들의 뇨시료 분석 data를 토대로, 미국과 캐나다, 그리고 ICRP 권고에 근거하여 산출한 기록준위인  $2.6\mu\text{Ci}/\ell$ 를 비교하였다. 기록준위가 삼중수소의 내부피폭선량 평가에 미치는 영향을 비교 검토한 결과, ICRP 권고나 미국, 캐나다의 적용 기준보다 훨씬 낮게 기록준위를 설정, 운영하고 있기 때문에 사소한 정보의 과다로 불필요한 분석 노력이 많이 요구되지만, 원전 운영기간이 상대적으로 짧은 우리의 현실에서 자료 확보와 갑작스런 기록준위 상향에 따른 불필요한 오해의 소지를 없애고, 피폭관리의 신뢰성 향상을 위하여, 현재 적용하고 있는 기록준위  $1\mu\text{Ci}/\ell$ 가 타당한 것으로 판단된다.

#### Abstract

To investigate the propriety of  $1\mu\text{Ci}/\text{L}$  recording level which is applied to the evaluation of internal dose for tritium,  $2.6\mu\text{Ci}/\text{L}$  recording level which is calculated by the information of USA, Canada and recommendation of ICRP is compared. It is required a lot of labor to manage a trifling information, because  $1\mu\text{Ci}/\text{L}$  recording level used in Korea is managed lower than USA or Canada, Therefore it is considered that  $1\mu\text{Ci}/\text{L}$  recording level is more reasonable to clear the misunderstanding of rapid control to raise the recording level and to improve the reliability of exposure management and to keep the information considering a short period operating time of nuclear power plant.

## 1. 서 론

삼중수소에 의한 종사자의 내부피폭 선량은 종사자의 뇨시료를 액체신틸레이션으로 분석하여, 체내 HTO 상태의 잔류농도를 측정함으로써 피폭선량을 산출하고 있다.

삼중수소에 의한 내부피폭선량이 국내 중수로 원전에서 종사자 총 피폭 선량의 30~40%를 차지하고 있고, 과학기술부가 최근에 “내부피폭방사선량의 측정 및 산출에 관한 규정”을 고시(2002-20) 하였으므로 현재, 국내 중수로 원전에서 1 $\mu$ Ci/ $\ell$ 로 운영중인 삼중수소의 기록준위에 대하여 그 적정성을 검토해야 할 필요성이 대두 되었다고 본다. 이에 규정을 토대로 기록준위를 산출하고 외국의 운영 현황을 비교하여 적용 타당성에 대한 의견을 제시하고자 한다.

## 2. 삼중수소의 개요

### 가. 삼중수소의 특성

삼중수소는 수소의 동위원소로서 화학적 성질은 수소와 유사하며, 12.3년의 방사학적 반감기를 갖는 베타선 방출체로서 베타선의 최대에너지는 18.6Kev (평균에너지 5.7 Kev)이며, 자연계의 지표수중에 0.7 Bq/ $\ell$ , 공기 중에 0.167 Bq/ $m^3$  가 존재한다.

삼중수소는 우주선(Cosmic ray)이 대기 중의 질소, 산소와 반응하여 천연적으로 생성되거나 원자로 내에서 핵분열이나 냉각재 또는 감속재와 중성자가 상호 반응하여 생성된다. 중수로형 원전에서 냉각재 및 감속재내에 생성된 삼중수소는 물과 같은 화학적 결합형태를 가지는데 압력이 높은 냉각재 계통이나 감속재 계통으로부터 공기 중으로 쉽게 빠져 나오며 이때 삼중수소는 수증기와 동일한 형태의 거동을 보인다.

### 나. 삼중수소와 인체와의 작용

삼중수소는 평균에너지 5.7Kev의 약한 베타선을 방출하므로 인체 조직내 투과거리가 8 $\mu$ m 미만으로 피부표면 아래에 위치하는 기저 세포층 두께 70 $\mu$ m에 훨씬 못 미치므로 외부 피폭 영향은 없으나 인체내로 흡입되면 내부피폭을 유발한다. 체내로 흡입된 삼중수소는 몸속에서 물과 동일한 거동을 보여 전신이 삼중수소로부터 발생하는 베타선 피폭을 받게 되는데 몸무게 70Kg인 성인의 경우 연조직이 63Kg으로서 이 연조직이 주로 삼중수소에 의한 피폭대상이 된다.

호흡기로 흡입된 기체 삼중수소(HT)는 인체내에서 거의 용해되지 않으며 한번 흡입된 기체의 0.004% 이하가 흡수되고 대부분 체외로 배출된다.

공기 중 증기형태의 액체 삼중수소(HTO)는 호흡과 피부를 통한 흡수에 의해 인체내로 유입되는데 2/3는 호흡으로 1/3은 피부를 통해 흡수된다. 그리고 흡입량의 98~99%가 인체에 흡수되어 물의 형태로 전신에 퍼져 내부피폭을 주게 된다. 물의 형태로 존재하는 체내의 삼중수소는 신진대사 작용에 의하여 소변 등으로 배출되며 생물학적 반감기는 10일이다.

### 3. 삼중수소의 체내선량평가에 관련된 물리량

가. 유도한도(과기부고시 2002-20호)

1) ALI :  $1 \times 10^9 \text{Bq}$

$$\begin{aligned} &= \frac{0.02 \text{ J/kg}}{(5.7 \text{ keV/H}^3) (1.6 \times 10^{-16} \text{ J/keV}) (14.43 \text{ day} \times 86,400 \text{ sec/day}) (1/63 \text{ kg})} \\ &= 1.1 \times 10^9 \text{ Bq} \approx 1 \times 10^9 \text{ Bq} \end{aligned}$$

2) 선량환산계수 :  $1.8 \times 10^{-11} \text{Sv/Bq}$

$$= \frac{0.02 \text{ Sv}}{1.1 \times 10^9 \text{ Bq}} = 1.8 \times 10^{-11} \text{ Sv/Bq}$$

3) 실제 삼중수소 평가 : 체내 H-3 농도  $1 \mu\text{Ci/L} = 3.09 \text{ mrem}$

$$\begin{aligned} &= \frac{3.09 \times 10^{-5} \text{ Sv}}{46.2 \mu\text{Ci} \times 3.7 \times 10^4 \text{ Bq}/\mu\text{Ci}} \\ &= \frac{3.09 \times 10^{-5} \text{ Sv}}{1.709 \times 10^6 \text{ Bq}} = 1.8 \times 10^{-11} \text{ Sv/Bq} \end{aligned}$$

### 4. 삼중수소에 의한 선량평가 방법

가. 내부피폭 평가 절차

삼중수소에 의한 내부피폭 선량평가는

- 1) 뇨시료 제출
- 2) 뇨시료의 조제(형광체 첨가)
- 3) 액체 섬광계수기를 이용한 농도측정
- 4) 피폭선량의 평가
- 5) 선량준위에 따른 조치 등 5단계로 수행된다.

나. 선량평가 산식

삼중수소에 의한 내부 선량평가 산식은 다음과 같다.

1) 만성피폭 - 공식 1

$$D = 0.214 [ ( C_1 + C_2 ) / 2 \times T ]$$

가) 적용 : 종사중인 방사선 작업 종사자 및 수시 출입자에 대한 유효선량평가

나) 근거 : ANSI N13.14 및 캐나다 82-EHD-87

2) 예탁유효선량 - 공식 2

$$D = 3.09 C_2$$

가) 적용 : 종사해제 및 파견전출자에 대한 예탁선량평가(예탁유효선량)

나) 근거 : ANSI N13.14 및 캐나다 83-EHD-87

3) 시료채취 기간중 삼중수소 미흡입의 경우 (급성피폭) - 공식 3

$$D = 0.214 \times T(C_1 - C_2) / \ln(C_1/C_2)$$

가) 적용 : 만성피폭이 아닌 것으로 명확히 판명된 방사선 작업 종사자로 만성피폭 평가를 가정한 피폭평가결과가 과도하게 과 평가된 경우 수계산에 의한 선량 보정시 적용

나) 근거 : ANSI N13.14

4) 시료분석 사이에 일회 흡입하고 흡입시간을 알고 있는 경우 - 공식 4

$$D = 3.09 [C_1 (1 - e^{-0.0693 \times t}) + C_2 (e^{0.0693(T-t)} - 1)]$$

가) 적용 : 뇨시료 분석기간중 일회(1일) 방사선관리구역 출입으로 추가피폭을 수반한 것으로 명확히 판명된 방사선 작업 종사자로 만성피폭평가를 가정한 피폭평가 결과가 과도하게 저평가 또는 과평가된 경우 수계산에 의한 선량 보정시 적용

나) 근거 : ANSI N13.14

D = 삼중수소에 의한 체내피폭 선량(mrem)

T<sub>1</sub> = 급회 뇨시료 제출일,

T<sub>2</sub> = 전회 뇨시료 제출일

T<sub>eff</sub> = 삼중수소의 유효반감기 (10일),

T = 뇨시료 제출간격(T<sub>1</sub> - T<sub>2</sub> : day)

C<sub>1</sub> = 전회 삼중수소 농도(μCi/l),

C<sub>2</sub> = 급회 삼중수소 농도(μCi/l)

#### 다. 체내선량 평가 산식의 비교

평가 항목	월성원전	미 국*)주1	카 나 다*)주2
공식 1	$D = 0.214 \times \frac{C_1 + C_2}{2} \times T$	$H = 29T(C_1 + C_2)$	$H_E = 5.8 \times 10^{-11} \times \frac{(C_i + C_{i+1})}{2} \times (t_{i+1} - t_i)$
공식 2	$D = 3.09C_2$	$H = 830C$	$H_{50,E} = 8.4 \times 10^{-10} \times C$
공식 3	$D = \frac{0.214T(C_1 - C_2)}{\ln(C_1/C_2)}$	$H = \frac{58T(C_0 - C_T)}{\ln(C_0/C_T)}$	-
공식 4	$D = 3.09 [ (C_1(1 - e^{-0.0693 t}) + C_2(e^{0.0693(T-t)} - 1)) ]$	$H = 830 [ C_1(1 - e^{-\lambda_{avg} t}) + C_2(e^{\lambda_{avg}(T-t)} - 1) ]$	-
단 위	D : mrem C : μCi/L T, t : days	H : μSv C : MBq/L, MBq/kg λ <sub>avg</sub> : ln2 / T <sub>eff</sub> T, t : days	H : Sv C : Bq/kg t : days

주1) ANSI N13.14

주2) Bioassay Guideline 2(Guidelines for Tritium Bioassay)

## 5. 삼중수소에 의한 피폭선량의 기록준위

### 가. 기록준위

기록준위란 운영관리자나 국가당국에 의해 설정되며, 권고이기는 하나 일관성 있게 적용되어야 한다.

\* 기록준위의 운영은 사소한 정보를 피하여 불필요한 해석노력을 없애준다.

\* 기록준위는 선량한도의 약 10% 정도의 연간 등가선량으로부터 유도 [ICRP-75 6.9.1 기록준위]

### 나. 국내외 기록준위

국내 중수로원전	미국	캐나다*) <sup>주1</sup>	비 고
1.0 $\mu\text{Ci}/\ell$	(0.004 ALI) 7.6 $\mu\text{Ci}/\ell$	3.0 $\mu\text{Ci}/\ell$	노시료 제출주기 14일 기준

주1) The Ontario Hydro Radiation Dosimetry Program

### 다. 유효선량으로부터 유도 산출한 기록준위 [ICRP-75 6.9.1 근거]

- 1) 기록준위 = (유효선량  $\div$  감시기간)  $\times$  10%  
 $= [2,000\text{mrem} \div (365\text{일} \div 14.43\text{일})] \times 10\%$   
 $= 7.9\text{mrem}$
- 2) 기록준위 농도 =  $7.9\text{mrem} \times (1\mu\text{Ci}/\ell \div 3.09\text{mrem}) = 2.6\mu\text{Ci}/\ell$
- 3) 삼중수소에 의한 총 피폭 점유율 고려시 =  $2.6\mu\text{Ci}/\ell \times (30\sim 40\%)$   
 $= 0.81\mu\text{Ci}/\ell \sim 1\mu\text{Ci}/\ell$

[총 피폭선량에 대하여 삼중수소에 의한 피폭선량 점유율을 고려한 보수적인 기록준위]

### 라. 과학기술부 고시와 비교한 기록준위

- 1) 과학기술부 고시2002-20 내부피폭방사선량의 측정 및 산출에 관한 규정  
 제4조(측정대상) 내부피폭으로 인한 예탁유효선량이 연간 200 mrem을 초과할 우려가 있는 종사자
- 2) 현재 국내월성원전의 기록준위(1.0  $\mu\text{Ci}/\ell$ ) 의 상태로 계속적 연간 유지한다고 볼 때  
 $D = 0.214 [ ( C_1 + C_2 ) / 2 \times T ]$  : 만성피폭 적용  
 $= 0.214 [ 1.0 \mu\text{Ci}/\ell + 1.0 \mu\text{Ci}/\ell ) / 2 \times 365 ] = 78 \text{ mrem}$  으로 규정의  
 “측정대상”의 40% 선량에 해당

### 마. 국내 기록준위의 변천

원전 가동 후 관리구역 출입여부에 따라 출입자에 한하여 약  $0.3\mu\text{Ci}/\ell$  ( $\approx 1\text{mrem}$ ) 까지 기록관리하다. 현재는  $1\mu\text{Ci}/\ell$  이상 기록 관리하고 있다

바. 국내 기록준위 관리 현황 및 검토

1) 국내 원전종사자의 체내 삼중수소 잔류농도 분포

구 분	국내 중수로원전					계
	0.1 $\mu$ Ci/l ~0.3 $\mu$ Ci/l	0.4 $\mu$ Ci/l ~1 $\mu$ Ci/l	1.1 $\mu$ Ci/l ~3 $\mu$ Ci/l	3.1 $\mu$ Ci/l ~7.5 $\mu$ Ci/l	$\geq$ 7.5 $\mu$ Ci/l	
자료수	44	62	138	48	8	300
총 종사자에 대한 분율(%)	14.7	20.6	46.0	16.0	2.7	100
집단선량 (man-rem)	0.018	0.102	0.425	0.562	0.311	1.418

2) 신규종사자의 체내 삼중수소 잔류농도 분포

삼중수소 보유농도	0.05~0.1 $\mu$ Ci/l	0.1~0.3 $\mu$ Ci/l
인원(명)	26명	24명

주1) 신규종사자 50명 통계자료 임.

3) 종사자의 뇨시료 농도에 따른 배출주기

뇨시료 배출주기	국내 중수로원전	미국	캐나다	비 고
7일	50 $\mu$ Ci/l 이상	76 $\mu$ Ci/l 이상	27 $\mu$ Ci/l 이상	-
14일	2.5 $\mu$ Ci/l 이상	정기 시료	정기 시료	-
30일	2.5 $\mu$ Ci/l 미만	2.5 $\mu$ Ci/l 미만	6.0 $\mu$ Ci/l 미만 <sup>*)</sup> 주1	-

주1) The Ontario Hydro Radiation Dosimetry Program

주2) 내부피폭 오차생성의 해소를 위하여 시료채취빈도를 증가(균일연속섭취, 무작위 섭취 적용)  
유효반감기의 3배 초과 방지 프로그램 필요

6. 결 론

체내선량평가를 위한 삼중수소농도의 기록준위는 외국의 사례와 ICRP 75 에 근거하여 유도 산출한 기록준위의 10~40% 수준인 1 $\mu$ Ci/l 로 낮게 설정하여 운영되고 있다.

이는 운영중인 기록준위 1 $\mu$ Ci/l 농도로 1년간 보수적으로 유지한다고 볼 때, 연간 예탁 유효선량은 78mrem이지만, 실제적으로는 연간 2~3회 정도 보유하므로 약 10mrem 정도로 추정된다. 이는 고시 2002-20 “내부피폭방사선량의 측정 및 산출에 관한 규정” [측정 대상]의 연간 예탁유효선량 200mrem과 비하여 매우 낮은 수준이다.

하지만 신규종사자의 경우 0.3 $\mu$ Ci/l 이하로 낮아 기록준위를 현 설정치 1 $\mu$ Ci/l 보다 상향 조정할 경우 불신의 소지가 있을 수 있다. 실제 운영중인 기록준위를 원전 뇨시료 분

석 자료와 비교 검토하여 보면, 기록준위 이하가 35%로 총 집단선량 1.418man-rem의 8%인 0.12man-rem에 해당된다. 이는 현재 운영중인 기록준위도 분석 및 평가 자료의 1/3이 넘는 사소한 정보로부터 피하여 불필요한 해석노력을 많이 줄여주고 있다는 것을 의미한다.

확실히 원전의 삼중수소에 의한 피폭선량 기록준위는 외국의 사례와 국내 규정을 만족하기에 충분히 낮게 운영되어지고 있다. 그러나 현재의 1 $\mu$ Ci/l의 기록준위를 유지함으로써 다소 과다하고 불필요한 정보 분석에 노력이 많이 들어가지만, 상대적으로 짧은 원전 운영기간을 고려할 때, 보다 신뢰성 있고 정확한 선량평가를 위해 가능한 많은 분석 자료를 확보하고자 하는 노력은 필요하다고 본다.

## 7. 참고 자료

- 가. Technical manual for Ontario Hydro's HTO Internal Dosimetry
- 나. Internal Dosimetry Program for Tritium Exposure Minimum Requirement  
ANSI N13.14
- 다. performance criteria for Radiobioassay ANSI N13.30
- 라. General Guideline for Bioassay program(FPAC 1980)
- 마. Technical Basis for Tritium Dosimetry in Korea CANDU Reactor  
(KEPCO/AECL, 1996)
- 바. 선량환산계수의 변경과 규제영향(KINS, 1999)
- 사. 액체섬광측정법(KRISS)