

# 중수로원전 방사선작업종사자의 공기중 삼중수소 섭취 후 뇨시료 배출 시간이 체내 삼중수소 농도에 미치는 영향 분석

김희근, 공태영, 정우태, 김석태  
한전 전력연구원

2009년 10월 11일 접수 / 2009년 11월 23일 1차수정 / 2009년 11월 27일 채택

중수로원전의 방사선작업종사자는 방사선작업 종료 후에 뇨시료를 배출하여 공기중 삼중수소의 섭취에 따른 내부피폭 선량을 평가하고 있다. 이 경우 종사자가 배출한 뇨시료는 삼중수소가 체내에서 평형에 도달한 대표시료(Representative sample)라는 전제를 필요로 한다. 국제방사선방호위원회(ICRP)의 간행물과 삼중수소의 인체평형에 대한 캐나다의 실험결과에 의하면 체내로 유입된 삼중수소는 약 2-3시간 후에 평형에 도달한다고 기술하고 있다. 그런데 원전에서는 계획예방정비기간 동안 일시에 많은 작업이 진행되고 빈번한 종사자의 출입으로, 방사선작업 종료 후 배출하는 뇨시료는 섭취 후 평형에 도달하는 약 2시간 경과 이전에 배출하거나, 지연하여 배출하는 경우가 발생할 수 있다. 따라서 이 논문에서는 방사선작업 종료 후 종사자가 배출하는 시간대별 뇨시료 중의 삼중수소 농도를 측정하였고, 이를 근거로 체내 삼중수소의 농도에 대한 변화추이와 선량평가에 미치는 영향을 분석하였다. 그 결과 종사자의 뇨시료는 대부분 삼중수소 섭취 후 2시간 정도에 신체 내에서 평형에 도달하는 것으로 확인되었다.

중심어: 뇨시료중 삼중수소 농도, 뇨시료, 섭취후 시간, 배출시간, 내부피폭평가, 기압중수로원전

## 1. 서론

중수로원전에서는 냉각재와 감속재로 중수를 사용하기 때문에 1차 계통 내에서 중성자의 방사화 과정에 의해 삼중수소가 다량 생성된다. 소량이기는 하나 계통에서 누설된 삼중수소는 작업 공간 내의 공기 중에 수증기(Tritiated water vapour)의 형태로 존재한다. 이에 따라 중수로원전 방사선관리구역 내에 출입하거나 이곳에서 작업을 수행한 방사선작업종사자는 삼중수소의 체내 섭취에 따른 방사선피폭을 받게 된다. 따라서 중수로원전 종사자는 방사선작업 종료 후 삼중수소의 체내 섭취에 의한 내부피폭 방사선량을 평가할 목적으로 뇨시료(Urine sample)를 배출하고 있다[1]. 종사자가 배출한 뇨시료는 섬광체와 혼합하여 액체섬광계수기(Liquid scintillation counter: LSC)를 이용하여 뇨시료 중에 포함된 삼중수소의 방사능 농도를 측정하고 있다[2-4]. 한편 내부피폭 방사선량은 뇨시료 중의 삼중수소 농도에 삼중수소의 선량환산계수(Dose conversion coefficient: DCF)를 곱하여 평가하고 있다[5,6].

이러한 체내 삼중수소 농도를 이용하여 내부피폭 방사선량을 평가하기 위해서는 방사선작업종사자가 배출한 뇨시료 중의 삼중수소 농도가 체내에서 평형(Equilibrium)에 도달했다는 전제를 필요로 한다. 즉, 삼중수소의 방사능농도 분석을 위해 배출된 뇨시료가 대표시료(Representative sample)로서 하루 동안 채집된 시료(24-hr sample)의 삼중수소 방사능 농도와 차이가 없다는 사실에 근거한다. 국제방사선방호위원회(ICRP)와 국제원자력기구(IAEA) 보고서 등에 의하면 체내에 들어온 삼중수소는 약 2-3 시간 경과 후에 평형에 도달하는 것으로 알려져 있다[5,6]. 만약 방사선작업종사자가 배출한 뇨시료의 삼중수소 농도가 인체 내에서 평형에 도달하기 전이거나 평형을 지난 시점이라면 대표시료를 얻을 수 없고, 결과적으로 내부피폭 선량평가는 부정확해지게 된다. 이런 이유로 국내 원전 방사선관리 절차에서는 뇨시료를 방사선작업종료 후 2시간이 지난 후에 배출하도록 규정하고 있다[2-4].

그런데 원전의 계획예방정비기간동안에는 많은 방사선작업이 동시에 진행되고, 이들 작업에 투입되는 방사선작업종사자의 방사선관리구역에 대한 빈번한 출입으로 뇨시료 배출시점에 변동이 일어날 수 있다. 또한 종사자 개인에 따라 일부 지연하여 뇨시료를 배출하거나, 반복 제

책임저자: 김희근, hkkim@kepri.re.kr, 한전 전력연구원  
대전시 유성구 문지동 103-16

출하는 경우도 일어날 수 있다. 따라서 방사선작업 종료 후 2시간을 경과하기 이전에 노시료를 제출하거나 또는 방사선작업 종료 후 수 시간에서 수일 경과 후에 지연하여 제출하는 경우가 발생할 수 있다. 이런 경우 방사선작업종사자가 제출한 시료에서 체내 삼중수소 농도는 그 만큼 변화할 가능성이 있으며, 따라서 내부피폭 방사선량의 평가 값에도 차이가 발생할 수 있게 된다.

이 논문에서는 중수로원전의 방사선작업과정에서 섭취한 삼중수소로 인해 방사선작업종사자가 제출하는 시간에 따른 노시료 중 삼중수소의 방사능 농도를 측정하였다. 이를 바탕으로 체내 삼중수소 농도의 변화 정도와 내부피폭 선량평가에 미치는 영향을 분석하였다. 이 측정시험에서는 방사선작업에 투입한 방사선작업종사자 개인의 노시료를 시간대별로 채집하여 삼중수소 농도의 변화를 추적하였다. 이러한 삼중수소 농도 측정결과를 근거로 원전 방사선작업관리 과정에서 삼중수소 피폭선량평가 절차의 적절성을 입증하고, 개선방향을 모색하고자 하였다.

## 2. 삼중수소의 인체 내 거동

중수로원전의 1차 계통 내에서 중수의 일부는 중성자의 방사화 과정을 통해 삼중수소로 치환된다. 고온 고압으로 유지되는 1차계통의 운전 또는 원자로 정지 후 예방정비기간 중 삼중수소는 극히 일부이지만 계통에서 누설되어 수증기의 형태(Tritiated water vapour: HTO)로 방사선작업 공간 내에 존재하게 된다. 따라서 공기 중의 삼중수소는 방사선작업종사자의 체내로 쉽게 유입될 수 있다. 보통 방사선작업종사자의 체내로 섭취되는 삼중수소의 2/3은 호흡을 통해 일어나며, 1/3은 피부를 통해 섭취되고 있다[5-7].

체내로 들어온 삼중수소는 인체 연조직 막(Membranes of the soft tissue)을 통과하여 인체의 물속(Body water)에 분포하게 된다. 인체 물속에서 삼중수소는 빠른 속도로 균일하게 확산되며, 수 시간 이내에 신체 내에서 평형에 도달한다. 따라서 인체 내에서 삼중수소는 인체 내의 물과 연조직에 균일하게 분포하기 때문에 전신에 균일한 피폭을 일으킨다. 이러한 삼중수소의 인체 내에서 확산과 거동은 캐나다 초크리버 원자력연구소(Chalk River Nuclear Laboratories)의 Osborne에 의해 실험적인 연구가 많이 수행되었다[7].

인체 내에서 평형에 도달한 삼중수소는 일정한 속도로 신체로부터 제거가 일어난다. 삼중수소가 평형에 도달하고 신체로부터 제거되는데 걸리는 시간에 대한 인체대사 모델은 Osborne의 뒤를 이어 Johnson에 의해 대부분 확립되었다[8]. 여기에 따르면 삼중수소의 섭취 후 수 시간 내에 체내 삼중수소 농도가 가파르게 증가하여 평형에 도달한 후 약 10일의 반감기로 인체로부터 제거되고 있다. Johnson에 의해 확립된 삼중수소의 인체 내 평형 도달과 제거시간에 관한 실험적 연구결과를 그림 1에 제시하였다[7,8].

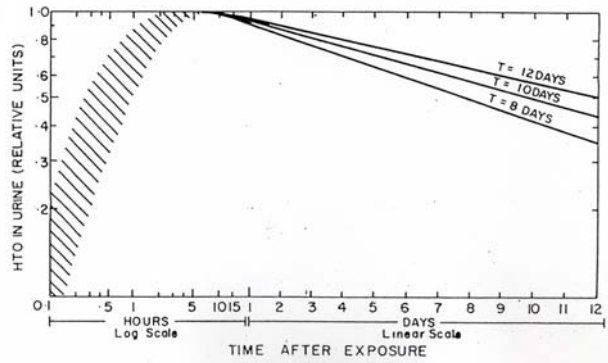


Fig. 1. Change of tritium concentration in urine after exposure at Canadian NPPs.

Johnson은 삼중수소의 인체 내 유입과 제거속도를 인체내의 격자(Compartment)에서 물질 수지방정식을 유도하고, 삼중수소 농도를 계산할 수 있는 인체대사모델을 완성하였다. 여기에 따르면 삼중수소는 대부분 인체 내 물탱크 격자에 머무르다 약 10일 정도의 반감기로 외부로 배설되나, 극히 일부는 보다 장기간 체류하는 별도의 격자에서 약 40일 정도의 반감기를 가지고 외부로 제거되고 있다[8,9]. 인체 내에서 삼중수소는 물을 따라 거동하기 때문에 신체로부터 배설은 방사선작업종사자가 매일 섭취한 물의 양과 크게 연관된다. 즉 보다 많은 물을 섭취하게 되면 인체 내의 삼중수소는 그만큼 빨리 배설이 일어나는 특징이 있다. 이러한 Johnson의 삼중수소 인체대사모델은 국제방사선방호위원회(ICRP) 및 국제원자력기구(IAEA)의 피폭 방사선량 평가 지침의 토대를 이루었으며, 삼중수소에 의한 내부피폭 선량평가의 근간을 이루고 있다[8,9]. 이러한 Johnson의 인체대사모델과 ICRP와 IAEA의 삼중수소 피폭선량평가 개념은 국내원전의 삼중수소 선량평가 절차에서도 적절히 반영하고 있다[2,3,10]. 한편 한국인 성인 방사선작업종사자의 삼중수소 인체대사모델과 유효반감기에 대한 연구 등도 국내에서 부분적으로 수행되었다. 그 결과 유효반감기는 ICRP가 피폭방사선량 평가를 위해 제시하는 10일보다 짧은 것으로 나타났다[10]. 그림 2에 삼중수소의 인체대사모델에 대해 나타내었다.

한편 인체 내의 물속에 존재하는 삼중수소는 수소원자와 쉽게 치환이 일어난다. 이러한 삼중수소는 산소, 질소, 인 또는 황 원자 등과 쉽게 교환되며, 물과 동일한 거동을 보인다. 이러한 삼중수소를 치환가능한 삼중수소(Exchangeable bound tritium)라 부른다. 반면에 삼중수소가 인체의 탄소와 결합하면 쉽게 치환이 일어나지 않는 삼중수소가 존재하는데, 이를 치환 불가능한 삼중수소(Nonexchangeable bound tritium) 또는 유기결합 삼중수소(Organically bound tritium; OBT)라 부른다. 이러한 유기결합 삼중수소는 인체 내에서 오랫동안 체류하기 때문에 존재하는 비율은 극히 낮으나 방사선피폭에 미치는 영향은 상대적으로 매우 크다. 삼중수소의 체내 섭취에 따른 방사선피폭평가에서는 OBT에 대해 일정 비율을 기본적으로 고려하고 있다. 유기결합 삼중수소는 인체의 효소 분해과정을 거쳐 신체 외부로 배설된다[11].

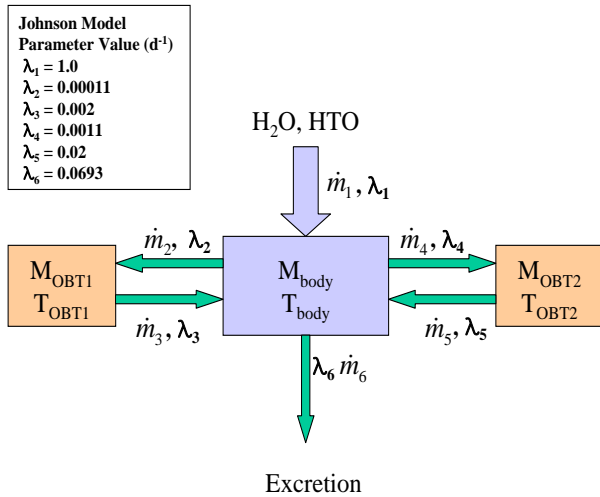


Fig. 2. Balance model for water and tritium intake (여기에서 Mx는 격실에서 수분의 질량(kg),  $\dot{m}_x$ 는 격실로의 수분의 전달율(kg/day),  $\lambda_x$ 는 전달상수(day<sup>-1</sup>)로서 각 격실에서 물의 대수량( $\dot{m}$ )과 질량(M)의 비로 표현된다.)

### 3. 삼중수소 피폭방사선량 평가

방사선작업종사자의 체내로 유입된 삼중수소에 대해 인체 내 기관이나 조직에서의 피폭방사선량을( $H_T$ , mrem/day)은 다음과 같이 계산된다[12-14].

$$H_T(\text{mrem/day}) = K \times Q \times N \times E \times C_T(t) \quad (1)$$

여기에서 K는 비례상수, Q는 선질계수, N은 보정계수(Modifying Factor), E는 삼중수소 붕괴당 방출되는 입자의 평균에너지,  $C_T(t)$ 는 기관이나 조직에서의 삼중수소 농도( $\mu\text{Ci/l}$ )를 나타낸다. 한편 비례상수 K는 삼중수소의 베타입자에 의해 조직이나 기관에 흡수된 에너지를 피폭 선량당량률(mrem/day)로 환산하는 과정에서 발생하는 상수로서 다음과 같이 계산된다.

$$K = 1\mu\text{Ci} \times \frac{3.7 \times 10^4 / \text{sec}}{1\mu\text{Ci}} \times \frac{86,400 \text{ sec}}{\text{day}} \times \frac{1.6 \times 10^{-13} \text{ J}}{\text{MeV}} \times \frac{100 \text{ rem}}{\text{J/kg}} \times \frac{1,000 \text{ mrem}}{\text{rem}} = 51.1 (\text{mrem} \cdot \text{kg} / \text{MeV} \cdot \text{day}) \quad (2)$$

한편 선질계수(Quality factor)는 국제방사선방호위원회의 1977년 권고 ICRP-26에서 도입되었으며, 1990년 권고인 ICRP-60에서는 방사선가중계수(Radiation weighting factor)로 정의되었다. 선질계수는 삼중수소에 대해서 1을 적용한다. 또한 기타 보정계수도 삼중수소에 대해 1을 적용한다. 이를 대입하면 위 식은 다음과 같이 정리된다.

$$H_T(\text{mrem/day}) = 51.1 \times 1 \times 1 \times 0.057 \times C_T(t) = 0.292 C_T(t) \quad (3)$$

한편 중수로원전의 환경과 같은 현장에서는 방사선작업종사자가 방사선관리구역을 빈번하게 출입하므로 삼중

수소가 한번 섭취되는 것만으로 끝나지 않고 계속해서 섭취가 일어난다. 이런 경우 지수함수적인 계산보다는 선형적인 평균 방법(Linear interpolation method)이 더 효율적으로 이용되고 있다[6]. 이 경우 50년 에탁선량은 아래와 같이 계산한다.

$$H_{50,E}(\text{mrem}) = 0.292 \times F \times \sum \frac{(C_i + C_{i+1}) \times (t_i - t_{i+1})}{2} \quad (4)$$

여기에서  $C_i$ 는 전회 노시료 중의 삼중수소 농도( $\mu\text{Ci/l}$ ),  $t_i$ 는 전회 삼중수소 농도 제출일(day),  $C_{i+1}$ 는 금회 노시료 중 삼중수소 농도( $\mu\text{Ci/l}$ ),  $t_{i+1}$ 는 금회 삼중수소 농도 제출일(day)을 나타낸다.

그런데 여기에서 중요한 인자가 전환인자 F이다. 이는 인체 물속에 존재하는 삼중수소의 붕괴로 인해 피폭되는 인체 물속과 인체 연조직까지 피폭을 고려한 인자이다. 즉, 방사선작업종사자가 방사선작업종료 후에 제출하는 노시료 중의 삼중수소 농도는 인체 물속에 존재하는 삼중수소 농도이다. 그런데 삼중수소에 의한 피폭은 인체에 존재하는 물, 또한 이와 접촉하고 있는 인체의 연조직도 피폭을 받게 된다. 따라서 물속에 존재하는 삼중수소로 인해 물과 연조직이 동시에 피폭을 받게 되는 과정을 고려하여 산출한 인자가 인체연조직 전환인자이다[12-15]. 즉, 기관이나 조직에서의 삼중수소 농도  $C_T(t)$ 는 노시료 중의 삼중수소 농도  $C_U(t)$ 와는 아래 관계가 성립된다.

$$C_T(t) = F(t) \times C_U(t) \quad (5)$$

우리 몸으로 유입되어 신체 내에서 평형에 도달한 삼중수소는 거의 대부분이 몸의 물 속에 존재하나 아주 일부분은 몸의 유기적으로 결합된 삼중수소로 존재한다. 이러한 유기결합 삼중수소 농도가 매우 낮고 그 비율이 차이가 없기 때문에 일정한 값을 고려하여 내부피폭 선량평가에 반영이 가능하다. 미국방사선방호위원회의 간행물 NCRP-63에 따르면 연조직에서의 삼중수소 농도는 인체 물 속에 존재하는 삼중수소 농도의 최대 20% 정도로 알려져 있다[14,15]. 또한 표준인(Standard man)은 인체 연조직의 질량이 63 kg이며, 물의 질량이 42 kg이므로 평형에서 전환인자  $F(\alpha)$ 는 다음과 같이 계산된다.

$$F(\alpha) = \frac{42}{63} \times (1 + \frac{63-42}{42} \times 0.2) = 0.733 \quad (6)$$

### 4. 국내원전의 삼중수소 선량평가 절차

국내 중수로원전에서 방사선작업종사자 또는 수시출입자로 지정하거나 해제할 경우 노시료를 제출한다. 또한 방사선작업종사자가 고방사선관리구역에 출입하거나 고피폭 방사선작업을 수행한 경우는 그때마다 노시료를 제출하도록 규정하고 있다. 한편 삼중수소의 섭취로 인한

정기 노시료(Routine urine sample) 제출은 14일 이내 1회 이상, 방사선작업허가서(Radiation work permit) 승인 과정에서 작업 전·후 노시료 제출을 요구받은 자는 작업 전·후 삼중수소 노시료를 제출하고 있다. 한편 체내 삼중수소를 보유하고 있는 방사선작업종사자로서 체내 삼중수소 농도가 1,850 Bq/cm<sup>3</sup> 이상인 종사자는 삼중수소 농도가 740 Bq/cm<sup>3</sup> 이하 될 때까지 주 1회 이상 제출하도록 규정하고 있다[2,3]. 한편 노시료 제출시기는 국내 원전 방사선방호 절차서에서 방사선작업 종료 후 2시간 경과 후에 제출하도록 규정하고 있다[3].

노시료 중의 삼중수소 농도 측정결과를 이용한 방사선 작업종사자와 수시출입자의 내부피폭 선량평가는 식(4)에 SI 단위를 고려하면 아래와 같이 계산된다. 이 경우 삼중수소에 의한 내부피폭 선량은 기록준위 37 Bq/cm<sup>3</sup> 이상인 자에 대해서만 계산한다[2,3].

$$E(mSv) = 0.292 \times \frac{1}{37} \times 10^{-2} \times 0.733 \times \left( \frac{C_1 + C_2}{2} \times T \right) \quad (7)$$

여기에서 E는 삼중수소에 의한 내부피폭 방사선량(mSv), T는 노시료 제출일의 차이(days)로서 T<sub>2</sub>-T<sub>1</sub>로 나타낸다 (T<sub>1</sub>: 전회 노시료 제출일, T<sub>2</sub>: 금회 노시료 제출일). C<sub>1</sub>은 전회 노시료 농도(Bq/cm<sup>3</sup>), C<sub>2</sub>는 금회 노시료 농도(Bq/cm<sup>3</sup>)를 나타낸다.

만약 중수로원전에 근무하는 종사자가 방사선작업종사자를 해제하거나 다른 사업소로 파견 또는 이동 시에는 예탁유효선량을 아래 식을 이용하여 계산한다.

$$E(mSv) = 3.09 \times \frac{1}{37} \times 10^{-2} \times C_3 \quad (8)$$

여기에서 C<sub>3</sub>은 최종 노시료 농도(Bq/cm<sup>3</sup>)를 나타낸다.

### 5. 노시료 중의 삼중수소 농도 측정시험

방사선작업종사자의 노시료 중의 체내 삼중수소 농도 측정시험을 위해 원전 계획예방정비기간 중에 방사선작업을 수행하였거나 출입한 경험이 있는 종사자를 시험 대상으로 선정하였다. 시험에 참여한 대상자는 주로 급성섭취(Acute intake) 대상자를 중심으로 선정하였고, 증기발생기 맨웨이(Man-way) 개방과 같은 단위 방사선 작업 후 1주 이상 공기중 삼중수소를 흡입하지 않은 방사선작업 종사자를 대상으로 하였다. 이들의 방사선작업 시간은 대략 2시간 내외였으며, 최대 4시간 정도로 나타났다. 특히 방사선작업종사자의 예상 삼중수소 섭취 농도를 고려하여 시험 대상자를 선정하였는데, 첫 번째 그룹으로 감속재 보수작업 등을 수행하는 높은 삼중수소 농도 작업자, 두 번째 그룹으로 중간 농도 작업자 그리고 마지막 그룹으로 단순히 원자로건물을 순회 점검하는 낮은 삼중수소

농도 작업자 등 3개의 농도 준위로 구분하였다. 즉, 삼중수소의 농도준위는 각각 기록준위 37 Bq/cm<sup>3</sup>를 기준으로 각각 1~37 Bq/cm<sup>3</sup>, 38~370 Bq/cm<sup>3</sup>, 370 Bq/cm<sup>3</sup> 이상 등 3단계의 농도 수준으로 구분하였다.

이들 시험에 참여하는 방사선작업종사자에 대해 사전에 본 시험의 목적과 방법에 대해 설명을 하였으며, 모두 본 시험의 취지에 대해 동의를 구하였다. 공기 중 삼중수소의 섭취에 따른 노시료 제출은 노시료의 제출시점이 체내 삼중수소 농도에 미치는 영향을 정량적으로 평가하기 위해 방사선관리구역 출입 전(직전), 방사선작업 종료 후 즉시 30분 이내 제출(직후), 방사선관리구역 출입 후 2시간, 8시간, 1일, 3일, 7일 경과 후 제출 등으로 구분하였다[16].

방사선작업을 완료한 방사선작업종사자에게 노시료를 시간대별로 주기적으로 제출하도록 요구하였다. 이들 시험에 참여한 종사자는 삼중수소 농도의 평형 도달시간과 제거 메카니즘을 해석하기 위해 시험기간 중에는 추가 작업을 가능한 수행하지 않도록 요청하였다[16]. 제출된 노시료는 원전 방사선관리 절차에 따라 액체섬광계수기(LSC)로 계측하고 국내 중수로원전에서 규정하고 있는 삼중수소 피폭선량평가 절차에 따라 내부피폭 방사선량을 계산하였다[2,3].

### 6. 측정시험 결과의 분석과 비교

방사선작업에 참여한 15명에 대해 방사선작업 종료 후 노시료 제출시기에 따른 체내 삼중수소 농도의 변화추이를 분석하였다. 그 결과 개인별로 약간의 차이는 있으나 대체로 삼중수소 체내 섭취 후 2시간 이전에 평형에 도달하는 것으로 나타나고 있다. 일부 종사자는 섭취 후 1일 정도에 최대 피크를 보인 후 점차 감소하는 추세를 보이고 있으나 섭취 후 2시간 제출 농도와 큰 차이를 보이지 않는 것으로 나타났다. 이를 삼중수소 농도 측정대상자의 제출시간대별 노시료중의 체내 삼중수소 농도변화를 표 1에 나타내었다. 한편 이를 제출시간대별로 삼중수소 농도를 도식하면 그림 3과 같다.

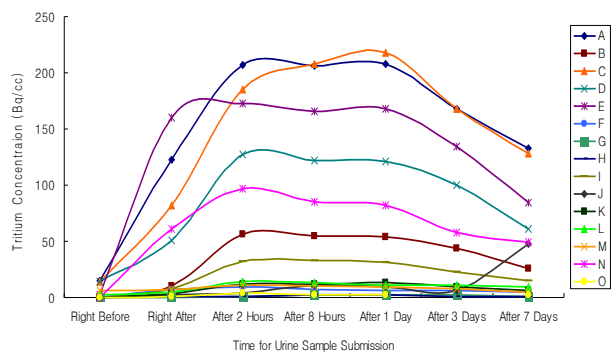


Fig. 3. Change of tritium concentration for radiation workers at Korean NPPs.



**Table 1.** Tritium concentration in urine samples as a function of time of submission at Korean PHWRs (Unit: Bq/cc).

Name	Right Before	Right After	After 2 Hours	After 8 Hours	After 1 Day	After 3 Days	After 7 Days
A	15	123	207	206	208	168	133
B	0	10	56	55	54	44	26
C	14	82	185	208	218	168	128
D	14	51	127	122	121	100	61
E	2	160	173	166	168	134	84
F	0	7	9	7	6	6	5
G	0	0	1	2	2	2	1
H	0	1	1	2	2	1	1
I	0	8	32	33	31	23	15
J	0	2	4	11	9	6	48
K	0	3	12	12	13	9	6
L	2	5	14	13	11	11	9
M	6	7	11	10	9	8	5
N	0	61	97	85	82	58	49
O	0	1	4	2	2	2	2

캐나다의 초크리버 원자력연구소(CRNL)에서 섭취 후 시간대별로 체내 삼중수소 농도에 대해 연구하였던 결과는 그림 1에 나타나 있다. 그림 1의 뇨시료 중 삼중수소 농도의 경향과 그림 3의 국내 원전 종사자의 뇨시료 중의 삼중수소 농도 측정시험 결과를 비교하면 초기 단계에서는 개인에 따라 약간의 차이를 보이나 경향은 아주 유사한 것으로 나타났다. 또한 삼중수소 섭취 후 2-3 시간 경과 이전에 평형에 도달하는 것으로 공통적으로 나타나고 있다. 특히 국내 원전의 측정시험 결과는 섭취 후 평형에 도달하는 시간이 캐나다의 연구결과에 비해 상대적으로 짧은 2시간 이전에 평형에 도달하는 것으로 나타나고 있다. 이러한 이유를 정량화할 수는 없지만 물과 채식류를 주로 섭취하는 동양인의 식생활 습관에 의한 것으로 추정되며, 이에 대한 체계적인 연구가 필요하다고 판단된다. 따라서 국내 원전의 방사선피폭관리절차에서 규정한 뇨시료 제출시점 2시간을 준수한다면 뇨시료 채집과정에서 충분히 대표시료를 얻을 수 있는 것으로 판단되었다. 또한 신체로부터 제거시간도 삼중수소의 유효반감기에 따라 약간 차이를 보이나 그 경향은 일치하는 것으로 나타났다[9,17,18].

이러한 현장에서의 뇨시료중 삼중수소 측정시험 결과를 기준으로 판단하면 방사선작업종료 후 방사선피폭관리 절차에 따라 삼중수소 섭취 후 2시간 경과 후 뇨시료를 제출하는 과정은 적절하다고 판단된다. 또한 삼중수소 섭취 후 뇨시료 제출을 조금 일찍하거나 또는 지연하여 1-2일 경과 후 제출하더라도 신체내의 삼중수소 농도에 별로 차이가 없어 삼중수소에 의한 내부피폭 선량을 크게 과소평가하지 않는 것으로 나타났다. 이러한 점을 고려하여 볼 때 원전 계획예방정비기간 중 빈번한 출입으로 인한 종사자의 뇨시료 제출은 섭취 후 2시간 지난 시점에 제출하여 피폭방사선량을 평가하는 것이 바람직하나, 불가피할 경우 1-2일 경과 후 뇨시료 제출하고 이 측정값을

이용해 피폭방사선량을 평가할 수도 있을 것으로 판단되었다.

한편 국내원전 종사자의 삼중수소 유효반감기는 단편적이기는 하나 지금까지 연구결과를 종합하여 판단할 때 국제방사선방호위원회에서 제시하고 있는 10일보다 2-3일 정도 짧은 것으로 나타났다[10,19,20]. 그림에도 불구하고 국내원전에서 방사선작업종사자의 삼중수소에 의한 내부피폭 방사선량 평가에서는 감소된 유효반감기를 적용하지 않고 국제방사선방호위원회 지침에서 규정하고 있는 10일의 유효반감기를 적용하고 있어 보수적인 선량 평가가 이루어지고 있다. 따라서 이러한 뇨시료 제출시간에 대해 체내 삼중수소 농도의 대표성과 보수적인 유효반감기 적용을 고려한다면 국내 원전에서의 삼중수소 내부피폭 방사선량 평가는 국제적인 지침을 따르고 있어, 충분히 신뢰성을 갖고 있는 것으로 재확인되었다.

## 7. 맺는 말

국내 중수로원전 작업종사자를 대상으로 수행한 뇨시료 제출시간대별 측정결과에 대한 분석을 통해 뇨시료 제출시기와 삼중수소 선량평가에 대한 신뢰성을 평가해보는 계기가 되었다. 또한 국제방사선방호위원회와 국제원자력기구 기준, 외국의 논문과 기술 자료와의 비교분석을 통해 국내원전 종사자의 삼중수소의 체내 섭취에 따른 신체 내에서 평형이 외국의 지침과 일치하거나 오히려 2시간 이전에 더 빨리 이루어짐을 확인하였다. 또한 섭취 후 1-2일 정도 경과후의 농도가 섭취 후 2시간 경과시점의 최대 삼중수소 농도와 큰 차이를 보이지 않는 것으로 확인되었다. 이러한 실험과 분석을 통해 뇨시료 제출시간대별로 삼중수소 섭취에 따른 내부피폭선량이 크게 차이가 날 수 있다는 우려를 불식시킬 수 있었고, 신뢰성을 확인

하는 계기가 되었다.

### 감사의 글

본 논문은 한국수력원자력(주)의 기술지원 사업에 의해 수행되었습니다.

### 참고문헌

1. Korea Hydro and Nuclear Power Corporation (KHNP). Final Safety Analysis Report for the Wolsung Nuclear Power Plants Unit 3 and 4. 2000.
2. 한국수력원자력(주). 원자력발전소 표준 기술행정 절차서-내부피폭 방사선량 측정 및 평가. 표준기행 방사선-06, 2008.
3. 한국수력원자력(주) 월성 제1발전소. 종사자 피폭선량 관리절차서(Rev.7). 방0-60105, 2006.
4. 한국수력원자력(주) 월성 제2발전소. 액체섬광계수기 운영. 방사-12(Rev.6), 2007.
5. International Commission on Radiological Protection (ICRP). Individual Monitoring for Internal Exposure of Workers. Replacement of ICRP publication 54, ICRP Publication 78. Pergamon Press, Oxford, UK, 1997.
6. International Atomic Energy Agency (IAEA). Methods for Assessing Occupational Radiation Doses Due to Intakes of Radionuclides. Safety Report Series No.37, 2004.
7. Osborne RV. Absorption of Tritiated Water Vapour by People. Health Physics 1996;12:1527-1537.
8. Johnson JR. Estimation, Recording, and Reporting of Whole Body Doses from Tritium Oxide Exposure at Chalk River Nuclear Laboratories (CRNL). AECL-5507, CRNL, 1976.
9. Johnson JR. The Estimation of the Effective Dose Equivalent from Tritiated Water Exposures Using Tritium Concentration in Urine. Radiation Protec-

- tion Dosimetry 1982;2:245-247.
10. 김희근, 공태영. 중수로원전 종사자의 삼중수소 체내 섭취에 따른 인체대사모델과 유효반감기 분석. Journal of Radiation Protection 2009;34(2):87-94.
11. Kim HG, Linauskas SH, Trivedi A, Richardson RB. Technical Basis for Tritium Dosimetry in Korean CANDU reactors. Atomic Energy Canada Limited (AECL) Technical Report, RC-1554, 1996.
12. International Atomic Energy Agency (IAEA). Safe Handling of Tritium, Technical Report Series No. 324, IAEA, 1991.
13. Atomic Energy Canada Limited (AECL). Tritium Dosimetry-A Practical Session. AECL, CRNL-2737-6, 1986.
14. Health Physics Society (HPS). American National Standards for Dosimetry-Internal Dosimetry programs for Tritium exposure-Minimum Requirements, 1983.
15. National Council on Radiation Protection and Measurements (NCRP). Tritium and Other Radionuclides Labelled Organic Compounds Incorporated in Genetic Materials. NCRP-63, NCRP, 1979.
16. 김희근. 월성원전 노시료의 제출시간대별 삼중수소 농도 변화(현장 기술지원 요청 검토결과 보고서). 전력연구원 기술간행물, 2005.
17. Whillans DW, Thind KS. Internal Dosimetry for Short-Range Emitters. Health Physics Society 1995 Summer School (Radiation Protection at Nuclear Reactors), Medical Physics Publishing Madison, Wisconsin, 1995.
18. Wolodarsky B. OPG Tritium Dosimetry. Radiation Protection Workshop, 2005.
19. 김희근. 삼중수소 인체대사모델 및 유효반감기 검토. 대한방사선방어학회 춘계학술발표회, 2001.
20. 김희근. 한국인 노시료측정에 근거한 삼중수소대사 모델 검토. 한국원자력학회 춘계학술발표회, 2001.

## An Internal Tritium Concentration Analysis in Urine Samples as a Function of Submission Time after Airborne Tritium Intake at Korean Pressurized Heavy Water Reactors

Hee Geun Kim, Tae Young Kong, Woo Tae Jeong, Seok Tae Kim  
Korea Electric Power Research Institute

**Abstract** - In pressurized heavy water reactors, workers who enter radiation controlled areas must submit their urine samples to health physicists after radiation work; these samples are then used to monitor internal radiation exposure from tritium intake. This procedure assumes that the samples submitted represent tritium concentration inside the body at equilibrium. According to both technical reports from the International Commission on Radiological Protection and experimental results from Canadian nuclear utilities, tritium inside the body generally reaches equilibrium concentration after approximately 2-3 hours of intake. In practice, urine samples can be submitted either before the 2 hours mark or after several hours of radiation work because of the numerous tasks that workers must perform and their frequent entries during nuclear power plant maintenance. In this paper, tritium concentration in workers' urine samples was measured as a function of time submitted after radiation work. Based on the measurement results, changes in the tritium concentration inside the body and its effect on internal dose assessment were then analyzed. As a result, it was found that tritium concentration reaches equilibrium concentration before the 2 hours mark for most workers' urine samples.

**Keywords** : Tritium Concentration, Urine Sample, Time after Intake, Submission Time, Internal Dose Assessment, Pressurized Heavy Water Reactor