

2002 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

중수로원전에서 발생하는 3H 및 ^{14}C 의 작업자 선량평가를 위한
인체대사모델 연구

Studies on Metabolism Models to Evaluate Worker's Exposure Dose for
Tritium and Carbon-14 Released in PHWR NPPs

이형석, 김은주, 양양희, 김희근, 김위수

전력연구원
대전광역시 유성구 문지동 103-16

요 약

3H 와 ^{14}C 은 중수로 원전에서 작업자에게 내부피폭을 유발시키는 중요한 핵종들이다. 그러므로 방사선 피폭저감 및 합리적으로 선량평가를 위해서는 삼중수소와 ^{14}C 에 대한 광범위한 인체대사 정보가 요구된다. 따라서 본 연구에서는 한국인에 적합한 삼중수소와 ^{14}C 에 대한 인체대사모델을 수립하는데 필요한 정보중 그 일부를 국내외 자료를 통해 비교하고자 한다.

Abstract

Both tritium and carbon-14 represent the radioactive isotopes that may bring about internal exposure to the workers for PHWRs. Therefore, it is necessary to obtain detailed information on the metabolism of tritium and carbon-14 in order to reasonably evaluate radiation reduction and dose assessment. This study herewith compared with the relevant information from both domestic and abroad each other, so as to establish a metabolism model of tritium and carbon-14 in human body for Korean.

1. 서론

3H 와 ^{14}C 은 우주선의 반응에 의해 대기 중에 자연적으로 생성되며 핵실험 및 원자력시설 등과 같은 인위적인 발생원에 의해서도 생성된다. 3H 와 ^{14}C 는 저에너지 베타방출핵종으로 물리적 반감기는 각각 12.3년과 5,370년이며 3He 과 ^{14}N 로 붕괴한다. 중수로 원전의 경우 감속재와 냉각재에서 많은 양의 삼중수소가 생성되며 존재하는 삼중수소의 화학형은 대부분

중수원전에서 HTO로 존재한다. 또한 ^{14}C 은 주로 감속재 계통의 중수내에서 $^{17}\text{O}(n, \alpha)^{14}\text{C}$ 반응에 의해 생성된다. ^{14}C 의 주요 화학적 형태는 $\text{CO}_2/\text{HCO}_3^-$ 를 보이며, 생성된 ^{14}C 의 대부분이 이온교환수지에 의해 제거된다. 하지만 정상운전 중 불가피한 중수누설을 통해 삼중수소와 ^{14}C 의 주요 화학형인 HTO와 $^{14}\text{CO}_2$ 가 방사선관리 구역내의 공기중으로 누설될 가능성이 있다. 따라서 중수로원전에서 이들 방사성핵종들은 원전작업자 방사선피폭관리 측면에서 중요한 방사성 동위원소이다. 국내 중수로 원전인 월성 원전의 가동 경험으로 볼 때, 원전 주변주민의 경우 전체 피폭선량의 약 80 % 이상이 삼중수소에 의한 것이며 ^{14}C 은 약 5 % 이상을 차지한다. 그리고 원전작업자 피폭선량의 경우에는 약 30 ~ 50 % 정도가 삼중수소의 화학형인 HTO에 의한 것으로 조사되고 있다[1, 2]. 그러므로 방사선 피폭저감 관리 및 합리적인 선량평가 측면에서 삼중수소와 ^{14}C 에 대한 광범위한 인체대사 정보가 요구된다. 그러나 현재 국내에서는 삼중수소와 ^{14}C 의 선량평가에 필요한 대사정보를 단지 국제방사선방호위원회(ICRP)에서 권고하는 값에만 의존하고 있으며 한국인 현실에 맞는 대사정보를 연구하지 못하고 있는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 한국인에 적합한 삼중수소와 ^{14}C 에 대한 인체대사모형을 수립하는데 필요한 정보중 그 일부를 국내외 자료를 통해 비교하고자 한다.

삼중수소에 대한 작업자 선량평가지 중요한 대사정보로는 유입된 삼중수소의 체내 거동과 이에 따른 체내에서 제거되는 시간 즉, 유효반감기를 들 수가 있다. 현재 체내에 유입된 삼중수소는 체액에 급속히 용해되어 체액과 유사한 거동을 보인다고 보고되고 있다[3]. 이러한 연구결과를 바탕으로 중수로원전 작업자를 대상으로 삼중수소의 체내 유효반감기를 최소자승법을 통해 평가하였다. 그리고 중수로 원전에서 발생되는 ^{14}C 의 화학형은 $^{14}\text{CO}_2$ 가 약 95 % 이상을 차지하며 나머지 약 5 %는 탄화수소(C_xH_x)로 존재한다[4]. 따라서 폐기물저장 및 처리 계통 등에서 $^{14}\text{CO}_2$ 가 작업자에게 피폭을 유발시킬 수 있다. 하지만 현재 작업자의 방사성 핵종 섭취에 대한 개인 모니터링에 관한 국제방사선방호위원회(ICRP) 권고 지침인 ICRP 권고(Publication) 78에서는 ^{14}C 에 대해서 구체적으로 권고 지침을 내놓지 않고 있다. 따라서 본 연구에서는 중수로원전 작업자에 대한 ^{14}C 의 흡입에 따른 피폭선량을 평가하기 위해 필요한 $^{14}\text{CO}_2$ 의 인체 대사모형을 검토하였다. 또한 국외의 $^{14}\text{CO}_2$ 체내 잔류함수를 이용하여 작업자 유효선량환산계수와 연간섭취한도 및 체내 평균잔류시간을 계산해 보았다.

2. 삼중수소 및 ^{14}C 의 생물학적 특성

삼중수소는 물리적 반감기가 12.3년이고, 저-에너지 베타선을 방출하며 ^3He 로 붕괴된다. 이 때 방출되는 베타선은 18.6 keV의 최대에너지와 5.7 keV의 평균에너지를 가지며, 수중(사람의 조직과 유사)에서 베타선의 최대 비정은 6 μm 를 갖는다. 삼중수소에서 발생하는 저-에너지 베타선은 분자를 이온화시킬 수 있는 충분한 에너지를 갖고 있지만, 짧은 베타 비정을 가지고 있기 때문에 외부 피폭의 위험은 주지 못한다. 왜냐하면, 피부암 등을 유발시킬 수 있는 표적 세포는 외피층(20~100 μm)과 진피층(1~3 mm)에 존재하기 때문이다. 따라서 삼중수소로부터 방출되는 베타선은 표적세포에 도달할 수가 없다. 삼중수소는 다른 순수 베타 방출 핵종인 ^{32}P 와 ^{90}Sr 그리고 베타-감마 방출 핵종인 ^{131}I , ^{137}Cs 과 비교할 때 상대적으로 낮은 방사화학적인 독성을 갖고 있다. 하지만 생물학적계에서 수소와 결합하여 체내에서 존재할 수 있기 때문에 잠재적으로 내부 피폭의 위험도를 고려해야 한다. 만약 삼중수소가 환경으로 배출된다면, 대기중에서 다양한 화학적 변환을 거쳐 체내로 유입될 수 있다. 그러므로 삼중수소 화합물중 생물학적계에서 이동성과 중요성을 고려해 볼 때 H_2O 와 반응하여 생성되는 HTO는 체내 유입이 용이한 중요 화합물이다.

^{14}C 는 탄소의 방사성 핵종으로서 평균에너지 49.5 keV와 최대에너지 156 keV의 저에너지 베타선을 방출하며 5,730 년의 물리적 반감기를 가지고 ^{14}N 로 붕괴한다. 탄소는 환경에서 다량 존재하며 CO_2 및 모든 유기조직들에서 발견된다. 저 에너지 β 선 방출체인 ^{14}C 는 음식물 섭취와 호흡을 통해 인체에 흡수된다. ^{14}C 의 경우, 평형상태에서 흡수선량의 99 % 이상은 섭취 경로를 통해 이루어진다. ^{14}C 의 섭취와 보유 그리고 신체에서의 제거 과정은 안정된 탄소의 대사와 동일하다. 체내로 유입된 탄소는 대부분은 CO_2 나 요소의 형태로 제거되며 소량은 신체에 남아있게 된다. 중수로원전의 경우, 발생하는 ^{14}C 의 화학형은 약 95 % 이상이 $^{14}\text{CO}_2$ 를 차지하며 나머지 약 5 %는 탄화수소(C_xH_x)로 존재한다[4]. 일부 존재하는 탄화수소들은 체내에서 거의 흡수가 이루어지지 않으며 CO 는 매우 짧은 기간동안 체내에 존재한다[5, 6]. 또한 체내로 유입된 $^{14}\text{CO}_2$ 는 혈액속에서 중탄산염으로 즉시 변환되며, 호흡을 통해 유입된 CO_2 의 99 % 이상은 약 4 시간 이내에 배출된다[7]. 따라서 중수로 원전 작업자 피폭선량에 주로 영향을 미치는 화학형은 $^{14}\text{CO}_2$ 라 할 수 있다.

3. 삼중수소 인체대사모델

3.1 삼중수소에 대한 ICRP 권고 30 모델[3]

ICRP 권고 30에서는 표준인이 HTO로 오염된 공기에 노출되었을 때 전체 섭취량의 2/3는 호흡을 통해 이루어지며 1/3는 피부를 통해 이루어진다고 가정하고 있다. 또한, 호흡을 통해 체내로 들어오는 HTO의 경우는 호흡기관에서 100 % 흡수되며 흡수된 HTO는 체액(Body water)과 연조직(Soft tissue)에 약 2 시간후에 균일하게 분포된다고 보고 있다. 따라서 평형 상태에서, 뇨를 통해 배출되는 삼중수소 농도가 체내의 삼중수소 농도와 동일하다는 것을 의미하는 것이다. 체내에 존재하는 삼중수소 중 일부는 유기조직분자들(Organic molecule)과 매우 적은 비율로 결합하여 OBT(Organically bound tritium)를 형성한다. 이렇게 생성된 OBT는 피폭에 적은 비율로 영향을 미치는데 ICRP에서는 OBT 기여분 만큼을 추가하여 피폭선량을 평가하도록 권고하고 있다. 또한 HTO 피폭 후 체내 삼중수소 잔류량 예측에서는 수분의 대사율과 체액의 삼중수소 농도만을 고려하는 단일 지수항(10일의 유효반감기)으로 표현하고 있다.

3.2 체내에서의 물과 삼중수소의 거동 평가식 유도

삼중수소의 체내 거동평가를 위해 1984년 Etnier 등이 음식물섭취에 의한 HTO와 OBT의 체내 거동을 6개의 격실(Compartment)로 구분하여 모델링 하였다[8]. 그 후 1987년 Johnson 등은 이보다 더 단순화하여 체액과 2개의 OBT 격실로 이루어진 대사모델을 발표하였으며, 캐나다 AECL에서 개발한 체내선량평가 코드인 GENMOD에 그대로 반영되었다[9]. Johnson의 대사모델에서는 각기 다른 평균 잔류시간과 모든 연조직에 걸쳐 균일하게 분포된다는 가정을 갖는 두 개의 OBT 격실로 구분하여 표현하였지만, 체액과 OBT 격실들이 물리적인 구조나 다른 화합물 등으로 결합되는 특성은 고려되지 않았다.

본 연구에서는 그림 1에서 보듯이 GENMOD의 HTO 대사모델에 사용되는 전달계수 등이 어떤 물리적인 의미를 갖는지를 알아보기 위해 각 격실별로 물과 삼중수소의 보존방정식을 유도하였다.

정상상태의 경우, 체내로 유입되는 물의 보존방정식은 아래 식과 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{\partial M_{OBT1}}{\partial t} = \dot{m}_2 - \dot{m}_3 = 0 : \text{정상상태} \quad (1)$$

$$\frac{\partial M_{OBT2}}{\partial t} = \dot{m}_4 - \dot{m}_5 = 0 : \text{정상상태} \quad (2)$$

$$\begin{aligned}\frac{\partial M_{body}}{\partial t} &= +\dot{m}_1 - \dot{m}_6 + (\dot{m}_3 - \dot{m}_2) + (\dot{m}_5 - \dot{m}_4) \\ &= \dot{m}_1 - \dot{m}_6 = 0\end{aligned}\quad : \text{정상상태} \quad (3)$$

여기서, M_x = 격실(체액, OBT1, OBT2)에서 수분의 질량 (kg)

\dot{m}_x = 격실으로 수분의 전달률(kg/day)

위 식들을 정리하면, $\dot{m}_1 = \dot{m}_6$, $\dot{m}_2 = \dot{m}_3$, $\dot{m}_4 = \dot{m}_5$ 같이 표현된다. 이는 정상상태의 경우, 각 격실로 유입되는 물의 대사량은 그 격실에서 배출되는 물의 대사량과 같다. 결과적으로 물의 대사방정식에서 체외로 배출되는 물의 대사량 \dot{m}_6 이 체내로 유입되는 물의 대사량 \dot{m}_1 과 동일함을 알 수 있다.

이와 유사하게 삼중수소에 대한 체내 보존방정식을 유도하면 아래 식과 같이 표현된다.

$$\frac{\partial T_{OBT1}}{\partial t} = \dot{m}_2 \frac{T_{body}}{M_{body}} - \dot{m}_3 \frac{T_{OBT1}}{M_{OBT1}} \quad (4)$$

$$\frac{\partial T_{OBT2}}{\partial t} = \dot{m}_4 \frac{T_{body}}{M_{body}} - \dot{m}_5 \frac{T_{OBT2}}{M_{OBT2}} \quad (5)$$

$$\frac{\partial T_{body}}{\partial t} = -\dot{m}_2 \frac{T_{body}}{M_{body}} + \dot{m}_3 \frac{T_{OBT1}}{M_{OBT1}} - \dot{m}_4 \frac{T_{body}}{M_{body}} + \dot{m}_5 \frac{T_{OBT2}}{M_{OBT2}} - \dot{m}_6 \frac{T_{body}}{M_{body}} \quad (6)$$

여기서, T_x = 격실 x 에서 삼중수소의 방사능(Bq)

그 결과 식 (4) ~ (6)을 Johnson의 삼중수소 대사방정식과 비교하면 전달 상수 λ_i ($i=2, \dots, 6$)은, 물리적으로 다음과 같은 의미를 지닌다.

$$\lambda_2 = \frac{\dot{m}_2}{M_{body}}, \lambda_3 = \frac{\dot{m}_3}{M_{OBT1}}, \lambda_4 = \frac{\dot{m}_4}{M_{body}}, \lambda_5 = \frac{\dot{m}_5}{M_{OBT2}} \quad (7)$$

$$\lambda_6 = \frac{\dot{m}_6}{M_{body}}$$

즉, HTO의 대사 모델에 사용되는 전달상수(λ)는 식 (7)과 같이 각 격실에서 물의 대사량(\dot{m})과 질량(M)의 비로 표현된다. 따라서, 동서양인 간의 삼중수소 체내 잔류량 및 유효반감기 차이는 대사량(\dot{m})과 각 조직의 질량(M)에 의한 것임을 알 수 있다. 특히, 단기 피폭의 경우는 λ_6 에 의해서 피폭선량이 결정되는데, 이 값은 개인의 일일 수분 섭취량과 체내 수분질량에 의해 결정된다. 따라서 위 식 (1)에서 식 (7)을 이용하여 체내 각 구획 내의 HTO의 잔류량을 충분히 예측하고 평가하기 위해서는 예측하고자 하는 대상에 적합한 전달상수(λ)를 사용해야 한다. 이 전달상수는 식 (7)을 근거로 실험을 통해 결정할 수 있다.

3.3 유기적으로 결합된 삼중수소(OBT)의 기여도 평가

체내에서 유기적으로 결합된 삼중수소(OBT)의 체내 기여도를 평가하기 위해 Implicit 방법(Backward Time Central Space)을 이용하여 식(4)~(6)의 1차 연립미분방정식의 해를 구했다. 그 결과 그림 2에서 보듯이 체액과 두 개의 OBT 격실에서 시간별 삼중수소 잔류량은 약 35일 정도에서 체액과 OBT_2 의 값이 교차하였다. 이는 HTO 피폭 후 약 35일 미만의 기간 동안 OBT의 기여도는 체내 삼중수소 농도에 크게 영향을 미치지 않는다는 것을 의미한다. 또한 그림 3은 OBT 격실을 삼중수소 대사방정식에 포함시킬 경우와 제외시켰을 경우, 체액 격실에서의 삼중수소 농도를 계산한 것이다. 그 결과 OBT가 체내 삼중수소 잔류량 변화에 미치는 영향은 약 40미만의 단기간 피폭일 경우 매우 낮음을 알 수 있다.

4. 월성원전 작업자의 삼중수소 유효반감기 평가

4.1 월성원전 작업자 뇨시료 측정 자료

월성원전 작업자의 평균 삼중수소 유효반감기를 평가하기 위해 월성 1발전소 작업자의 뇨시료 내 삼중수소 농도를 실측자료로 사용하였다. 현재 월성 원전의 작업자에 대한 삼중수소 피폭관리절차는 방사선관리구역 작업 후 뇨시료 농도를 측정하도록 되어있다. 만일 뇨시료의 삼중수소 농도가 $3.7 MBq/l(100 \mu Ci/l)$ 이상을 보인 작업자의 경우는 $0.74 MBq/l(20 \mu Ci/l)$ 이하가 될 때까지 방사선관리구역의 작업을 금지시키고, 작업금지 조치 후 작업자 뇨시료의 삼중수소 농도가 $0.74 MBq/l$ 이하가 될 때까지 지속적으로 측정한다. 본 연구에서는 이 때 측정된 15명의 작업자의 뇨시료 농도를 이용하였다.

4.2 최소자승법에 의한 측정자료 보정 및 유효반감기 계산

표 1에서 보듯이, 본 연구에서 사용된 측정 자료는 40일 이내의 단기간 동안 작업자의 뇨시료에서 삼중수소 농도 변화를 측정한 것이다. 특히 이 자료는 발전소 운영 중 작업자 피폭 관리 목적으로 측정된 자료이기 때문에 측정 시점의 연속성이나 신뢰도는 다소 떨어진다. 그러므로 초기와 최종 삼중수소 농도를 이용하여 삼중수소 유효 반감기를 산출하는 것은 다소 오차를 수반하게 된다. 따라서 본 연구에서는 최소자승법을 이용하여 각 측정 대상별 삼중수소 제거상수와 초기 시점의 체내 삼중수소 농도를 보정하였다. 우선 그림 2와 3의 OBT의 기여도를 평가한 결과, 작업자 체내의 삼중수소 농도변화는 단기 피폭일 경우 OBT가 제외된 단일 지수항으로 표현된 아래의 해를 따를 것이다.

$$T_{body}(t) = T_{body}(0) e^{-\lambda_6 t} \quad (8)$$

식 (8)에 자연로그를 취하여 선형화 한 후에 최소자승법을 사용하여 뇨시료 측정 자료에 대한 $T_{body}(0)$ 와 λ_6 를 산정하였다. 그 결과 표 1에서 보듯이 월성원전 작업자의 삼중수소 평균유효반감기는 7.43 ± 2.22 일(90% 신뢰도)을 보였다. 이 결과는 1965년 Butler 등이 310명을 대상으로 측정한 유효반감기인 9.5 ± 4.1 일(90% 신뢰도)과 ICRP에서 권고하는 10일 보다 하회하였다[10].

5. $^{14}\text{CO}_2$ 의 인체대사모델

체내에 유입된 탄소의 분포 및 거동은 일반적으로 그림 4과 같이 도식화 할 수 있으며 ^{14}C 농도는 대표적인 격실인 $\text{CO}_2/\text{HCO}_3^-$ 에서 음식물 섭취와 CO_2 의 흡입을 통해 결정된다. 통상 원전 작업자의 주요 ^{14}C 피폭경로는 음식물 섭취보다 호흡을 통해서 이루어진다고 가정할 수 있다. 본 연구는 향후 ^{14}C 에 대한 체내분석 프로그램의 범제화에 대비해 국내 중수로 원전에 필요한 기술확보 차원에서 캐나다 OPG(Ontario Power Generation) 원전의 방사선방호 프로그램과 ICRP의 권고한 내용을 근거로 ^{14}C 선량평가에 필요한 대사모델에 대해서 고찰해 보았다.

5.1 ICRP 인체대사모델

ICRP에서는 $^{14}\text{CO}_2$ 의 섭취에 따른 선량평가를 위해 탄소의 대사모델에 관해 매우 단편적인 지침만을 권고하고 있다. ICRP 권고 10에서는 섭취된 CO_2 의 30%가 뼈에 침적되며 0.4일의 반감기를 갖고 체내에 잔류된다고 가정하고 있다[11]. 이 모델은 일차적으로 동물실험과 소수의 인체 실험지원자를 대상으로 6시간미만의 단시간동안 체외로 배출된 사례에 근거를 두고 있다.

또한 ICRP 권고 30에서는 연간섭취한도를 유도하기 위한 목적으로 ICRP 권고 10에 제시된 모델과 다른 ^{14}C 모델을 권고하고 있다[3]. ICRP 권고 30 모델에서는 체내에 섭취된 $^{14}\text{CO}_2$ 의 99%에 대해 각각 5분과 60분의 짧은 반감기를 갖고 있으며 나머지 1%는 체내에서 60,000분(약 40일)의 평균 반감기를 갖고 있다고 권고하고 있다. 이때, 1%에 해당하는 $^{14}\text{CO}_2$ 는 동물실험을 통해 장기간 잔류하는 방사능 양의 측정에 근거하여 평가된 것이다. 하지만 최근에 발표된 탄소 모델에서는 섭취된 CO_2 는 체내 전체에 걸쳐 분포된다는 점을 강조하고 있다[12].

다음 식은 ICRP 권고 30에서 제시된 $^{14}\text{CO}_2$ 의 체내 잔류함수이다. 이때 유효선량환산계수는 식 (10)와 같이 계산된다.

$$R(t)_{ICRP30}^{^{14}\text{CO}_2} = 0.18e^{-0.693 t/5} + 0.81e^{-0.693 t/60} + 0.01e^{-0.693 t/60000}, [t=\text{min}] \quad (9)$$

$$e(50), \text{SvBq}^{-1} = \left(\frac{\bar{E} Q_F f_1}{m} \right) \int_0^{50\text{yr}} R(t)_{ICRP30}^{^{14}\text{CO}_2} dt \quad (10)$$

여기서, \bar{E} 는 평균 베타에너지이며, m 은 피폭을 받는 연조직 질량을 나타낸다. 마지막으로 Q_F 와 f_1 은 ^{14}C 의 베타에너지의 선질계수(Quality factor)와 흡수분율(Absorption fraction)을 나타낸다. 그리고 식 (10)에서 구해진 1 Bq 섭취당 예탁유효선량과 연간선량한도를 이용하여 작업자의 연간섭취한도를 구할 수 있다.

$$ALI = \left(\frac{\text{Annual Dose Limit}}{e(50)\text{SvBq}^{-1}} \right) \quad (11)$$

즉, ICRP 권고 30에서는 연간 50 mSv의 작업자선량한도를 근거하여 연간섭취한도를 $8 \times 10^9 \text{ Bq}$ 로 제시하였다. 그러나 ICRP 권고 60 권고 이후 연간 작업자 선량한도가 연평균 20 mSv로 변경됨에 따라 ICRP 권고 61에서는 $^{14}\text{CO}_2$ 에 대한 연간섭취한도(ALI)를 $3 \times 10^9 \text{ Bq}$ 로 권고하고 있다.

5.2 캐나다 인체대사모델

캐나다 Pickering 원전에서는 1980년대 Feeder관 보수작업시 소량이나마 $^{14}\text{CO}_2$ 흡입을 경험한바 있다. 그리고 $^{14}\text{CO}_2$ 흡입한 작업자에 대해서 ^{14}C 피폭선량을 평가하기 위해서 약 3 주 동안 지원자를 대상으로 뇨와 호흡을 통해 배출되는 ^{14}C 의 방사능 준위를 측정하는 실험을 수행하였다[13]. 그 결과 대부분의 ^{14}C 은 피폭후 초기 몇 시간만에 호흡을 통해 배출되었으며 이는 Winchell 등이 수행한 실험결과와 유사함을 보였다[7]. 이 실험 기간동안 뇨로 배출되는 ^{14}C 의 화학적 형태는 대부분 중탄산염(bicarbonate) 형태로 존재함을 확인하였고, 3 주후 부터는 뇨시료의 ^{14}C 은 대부분 요소와 같은 안정된 유기물형태로서 존재함을 확인하였다.

캐나다 OPG(Ontario Power Generation)에서 ^{14}C 의 체외배출 실험을 통해 얻어진 결과를 종합하면 호흡과 뇨의 배출률은 각각 0.4일, 1.2일, 그리고 40 일의 반감기를 가진 3개의 지수함의 합으로 표현된다. 실험결과에 근거하여 흡입된 $^{14}\text{CO}_2$ 은 체내 연조직에 고루 분포한다고 가정하며 체내로 유입된 $^{14}\text{CO}_2$ 의 90 %는 피폭후 몇 시간내에 배출이 이루어지며 나

머지 2 ~ 6 %는 체내에 0.4일, 1.2일, 40일의 지수함수적인 반감기를 갖고 체내에 잔류하게 된다. 이러한 실험 결과는 캐나다의 내부피폭 측정에 관한 AECB Working Group에 의해서 발행된 Radiocarbon Bioassay Guideline의 대사모델에 그대로 반영되었다[14].

$$R(t)_{Canada}^{14CO_2} = 0.06e^{-1.7t} + 0.02e^{-0.58t} + 0.02e^{-0.017t}, [t=\text{day}] \quad (12)$$

$$E_b'(t) = 0.1e^{-1.7t} + 0.01e^{-0.58t} + 0.0003e^{-0.017t} \quad (13)$$

$$E_u'(t) = 0.02e^{-1.7t} + 0.002e^{-0.58t} + 0.00004e^{-0.017t} \quad (14)$$

위 식 (12)에서 (14)은 캐나다 Ontario Power Generation에서 인체 실험에 의해 결정된 식들이다. 여기서 $R(t)_{Canada}^{14CO_2}$ 은 체내 잔류함수를 나타내며 $E_b'(t)$ 와 $E_u'(t)$ 는 호흡과 뇨를 통해 배출되는 ^{14}C 양을 추정하는 배출함수이다. 이 식들은 섭취후 0.5일 이상이 지난 후에 체내 존재하는 ^{14}C 양과 배출량을 계산할 수 있다. 그림 5는 식(12) ~ (14)들을 이용하여 0.5일부터 100일 동안 ^{14}C 의 체내 잔류율과 배출률을 계산한 것이다. 이 그림에서 보듯이 탄소 배출은 대부분 호흡 경로를 통해 이루어짐을 알 수 있다.

5.3 ICRP와 캐나다 모델 비교

ICRP 권고 30에서 제시된 $^{14}CO_2$ 의 잔류함수와 캐나다 AECB에서 발행한 Radiocarbon Bioassay Guideline에 반영된 잔류함수는 모두 소수의 인체실험 및 동물 실험을 통해서 얻어진 결과들이다. 따라서 ICRP와 캐나다의 $^{14}CO_2$ 잔류함수를 비교하기 위해 우선 체내에서 $^{14}CO_2$ 의 평균잔류시간과 섭취후 100일 동안 체내에서 $^{14}CO_2$ 의 잔류율을 계산해 보았다.

$$T_{mean}^{14CO_2} = \frac{\int_0^{\infty} t R(t)_{ICRP30}^{14CO_2} dt}{\int_0^{\infty} R(t)_{ICRP30}^{14CO_2} dt} \simeq 55.547 \text{ day} \quad (15)$$

$$T_{mean}^{14CO_2} = \frac{\int_0^{\infty} t R(t)_{Canada}^{14CO_2} dt}{\int_0^{\infty} R(t)_{Canada}^{14CO_2} dt} \simeq 55.594 \text{ day} \quad (16)$$

그 결과 위 식(15), (16)에서 보듯이 두 식의 평균잔류시간은 각각 55.55일과 55.59일로 유사하였다. 그리고 그림 6에서 보듯이 두 함수의 시간에 따른 잔류율 변화는 초기에 급격하게 차이를 보였지만, 10일이 경과한 후에는 약 2 배 정도의 차이를 유지하였다.

또한 ICRP와 캐나다 모델을 이용하여 작업자 유효예탁선량과 연간섭취한도를 식 (10)와 (11)에서 정의한 방법으로 계산하였다. 이때 체내에 유입된 탄소는 모든 연조직에 고루 분포된다는 가정을 적용하였다.

그 결과 표 2에서 보듯이, 작업자의 연간선량한도(ALI)를 50 mSv로 적용하고 캐나다의 잔류함수를 사용하였을 경우 $^{14}\text{CO}_2$ 에 대한 연간섭취한도는 $4 \times 10^9 \text{ Bq}$ 로 계산되었다. 이는 과거 캐나다에서 적용했던 값이며 2000년부터는 방사선방호의 신개념인 ICRP 권고 60을 적용하고 있다. 따라서 작업자 연간선량한도를 20 mSv로 하향 조정하여 $^{14}\text{CO}_2$ 에 대한 연간섭취한도를 계산할 경우, $1.5 \times 10^9 \text{ Bq}$ 로 ICRP 권고 61의 $3 \times 10^9 \text{ Bq}$ 에 비해 약 2 배 정도 낮은 값이다. 또한 ICRP와 캐나다 잔류함수를 이용하여 1 Bq의 $^{14}\text{CO}_2$ 섭취시 작업자의 예탁유효선량을 계산하였을 경우 각각 $7.06 \times 10^{-12} \text{ Sv}$ 와 $1.35 \times 10^{-11} \text{ Sv}$ 로 캐나다 모델이 ICRP 모델에 비해 더 보수적인 임을 알 수 있었다.

6. 결론 및 향후계획

본 연구에서는 중수로원전에서 중요한 핵종인 삼중수소와 ^{14}C 에 대한 인체대사모델을 국내의 문헌을 통해 조사하고 비교하였다. 삼중수소의 경우 월성 원전의 작업자의 뇨시료 농도를 이용하여 실제 원전작업자의 평균 유효반감기를 산출하였다. 그 결과 15명의 작업자 뇨시료 측정을 통해 평균 7.43 ± 2.22 일(90% 신뢰도)의 유효반감기를 얻었으며, ICRP 권고 30에서 권고하는 유효반감기 10일을 하회하는 것으로 나타났다. 이는 한국인의 식생활 습관과 연관되는 사항으로 실제 삼중수소 선량은 평가된 값보다는 낮을 것으로 예상된다. 또한 체내에 유입된 $^{14}\text{CO}_2$ 에 대한 선량평가지 필요한 인체대사모델 중 ICRP와 캐나다 모델을 검토하였다. 그 중 $^{14}\text{CO}_2$ 의 체내 잔류함수를 이용하여 작업자에 대한 $^{14}\text{CO}_2$ 의 예탁유효선량 및 연간섭취한도를 계산하였고, 그 결과 캐나다의 선량평가 방법이 ICRP 방법 보다 약 2 배정도 보수적인 평가가 이루어짐을 알 수 있었다.

향후 한국인에 대한 각종 특성 자료와 유효반감기 측정 결과를 더욱 보완하여 보다 신뢰성 있는 결과를 도출할 계획이며, $^{14}\text{CO}_2$ 의 흡입에 대비한 작업자 선량평가 절차를 보완해 나갈 계획이다.

7. 참고 문헌

1. 원자력발전소 주변 환경방사선 조사 보고서, 한국수력원자력(주), (2001).
2. 원자력발전소 방사선관리 연보, 한국수력원자력(주), (2001).
3. International Commission on Radiation Protection. Limits for intakes of radionuclides by workers. New York : Pergamon Press; ICRP Publication 30, 1979 - 1982.
4. M. J. Kabat and D. J. Gorman, Carbon-14 in Ontario Hydor's Nuclear Stations : Production, System and Effluent Levels, Dosimetry and Environmental Data, SSD-IR-81-24, 1980.
5. A. W. Phipps, G. M. Kendall, T. P. Fell, and J. D. Harrison, "Doses from Radioactive Material," *Rad. Prot. Dosi.* **30**, 191, 1988.
6. J. E. Peterson and R. D. Stewart, "Absorption and Elimination of Carbon Monoxide by Inactive Young Men," *Arch. Environ. Health*, **21**, 165, 1970.
7. H. S. Winchell and H. Stahelin, et at, "Kinetic of CO₂-HCO₃ in Normal Adult Males," *J. Nucl. Med.* **11**, 711, 1970.
8. E. L. Etnier, C. C. Travis, D. M. Hetrick, "Metabolism of Organically Bound Tritium in Man," *Radiat. Res.* **100**, 487, 1984.
9. D. W. Dunford and J. R. Johnson, GENMOD-A Program for Internal Dosimetry Calculation, AECL-9434, 1987.
10. H. L. Butler and J. H. Leroy, "Observation of the Biological Half-life of Tritium," *Health Physics* **11**, 283, 1965.
11. International Commission on Radiation Protection, *Evaluation of Radiation Doses to Body Tissues from Internal Contamination Due to Occupational Exposer*, New York : Pergamon Press; ICRP Publication 10.
12. D.W. Whillans and M. J. Hayes, Dose Assessment Programme for Exposure to Carbon-14 Dioxide, Ontario Power Generation 1995.
13. D. W. Whillans and J. R. Johnson, Interpretation of Urinary Excretion Rate Data in the Assessment of Uptake of Carbon-14, IAEA-SM-276/50, 1985.
14. AECB, Bioassay Reference Technical Criteria - Radiocarbon Bioassay - Report of the AECB Working Group on Internal Dosimetry, 1994.

Table 1. Effective Half-lives based on urine bioassay results of Wolsong NPPs' workers

No	Sample	Weight (kg)	Duration of Observation (Days)	Number of Measurement	Initial Concentration (MBq/l)	Final Concentration (MBq/l)	Half-Life (Days)
1	A	68	16	8	5.39	0.540	5.06
2	B	60	36	13	9.24	0.463	8.14
3	C	90	40	10	8.57	0.477	9.66
4	D	63	18	7	3.31	0.585	7.11
5	E	73	17	9	3.50	0.500	6.14
6	F	60	21	5	3.31	0.540	7.99
7	G	62	16	5	3.20	0.429	5.55
8	H	68	23	6	2.34	0.518	8.42
9	I	67	12	4	4.29	0.108	5.85
10	J	60	26	9	6.90	0.551	6.98
11	K	64	32	11	5.68	0.259	7.21
12	L	72	13	8	2.19	0.681	7.80
13	M	74	27	6	4.08	0.566	9.33
14	N	60	19	6	2.86	0.592	8.48
15	O	63	29	6	6.63	0.459	7.73
						Avg. $\pm 1.645\sigma$	7.43 ± 2.22

Table 2. Calculation of dose conversion factors and annual intake limits for $^{14}CO_2$

	Function and Parameters				Dose Conversion Factor $e(50), Sv Bq^{-1}$	Annual Dose Limit (mSv)	ALI(Bq)
	Retention Function	$\bar{E}(keV)$	Q_F	f_1			
ICRP	$R(t)_{ICRP30}^{14CO_2}$	49.47	1.0	0.9	6.35×10^{-12}	50	7.8×10^9 $\approx 8 \times 10^9$
				1.0	7.06×10^{-12}	20	2.8×10^9 $\approx 3 \times 10^9$
캐나다	$R(t)_{Canada}^{14CO_2}$	49.47	1.0	0.9	1.22×10^{-10}	50	4.1×10^9 $\approx 4 \times 10^9$
				1.0	1.35×10^{-11}	20	1.48×10^9 $\approx 1.5 \times 10^9$

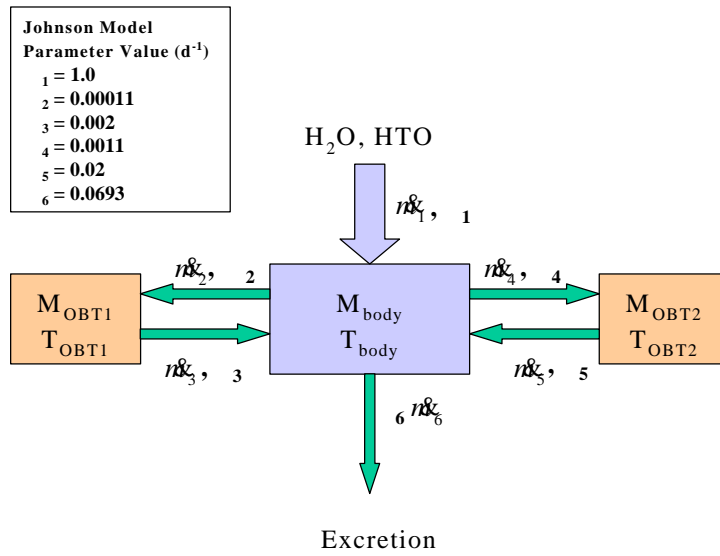


Figure 1. Balance model for water and tritium intake.

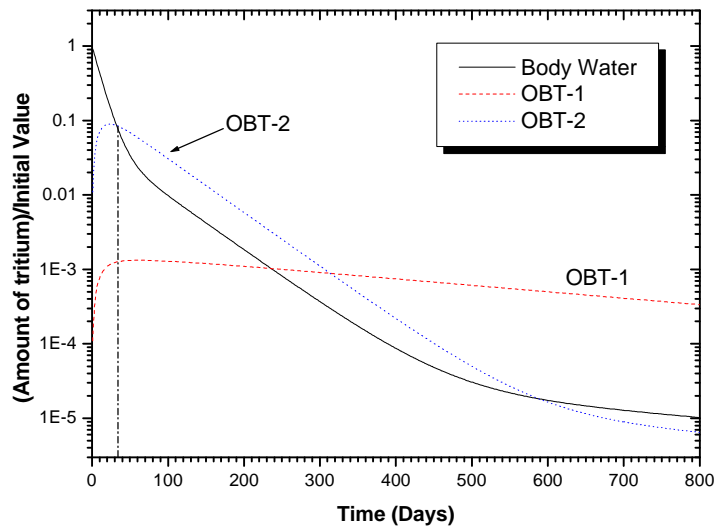


Figure 2. Retention rate in body water and OBTs.

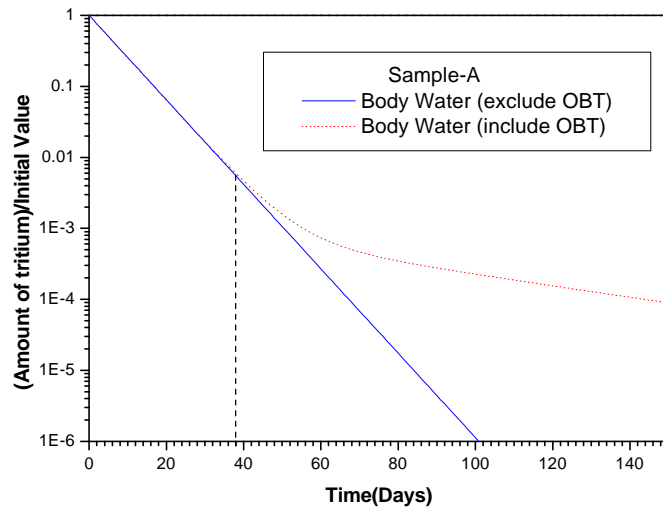


Figure 3. Retention rate for HTO in body water according to considering OBTs.

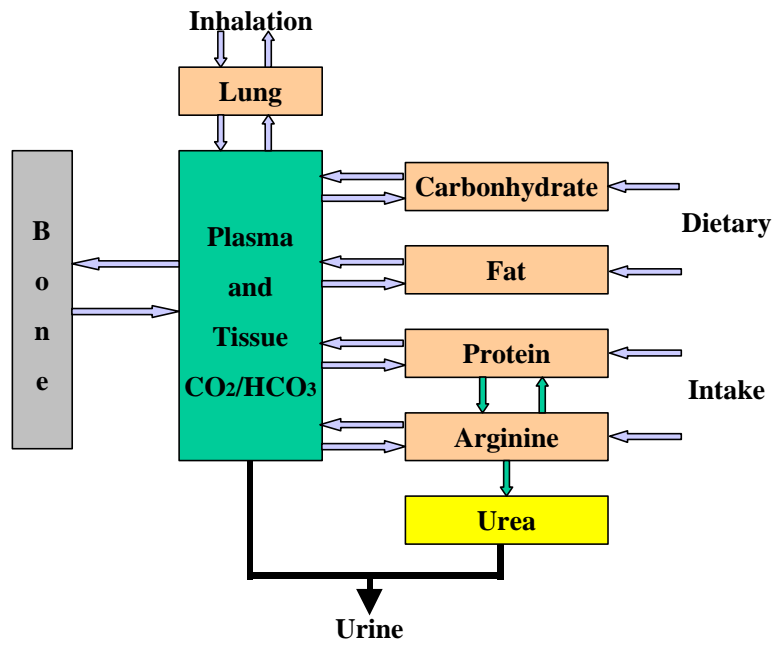


Figure 4. General model for carbon transport in the human body

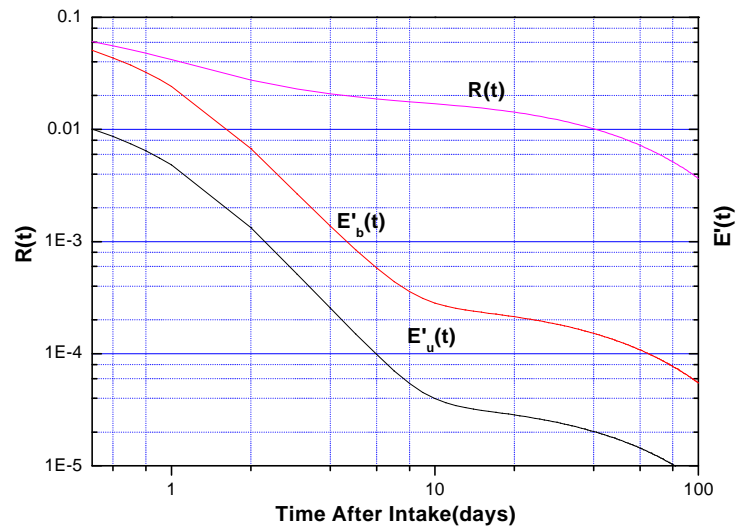


Figure 5. Excretion through urine & breathing and retention in the body after $^{14}\text{CO}_2$ intake.

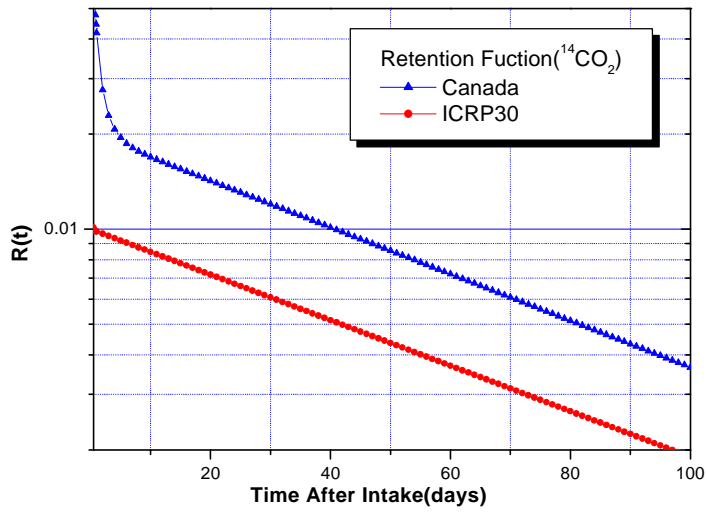


Figure 6. Comparison of ICRP and Canada for $^{14}\text{CO}_2$ retention function.