

한국인 뇨시료 측정결과에 근거한 삼중수소 대사모델 검토
Review of Tritium Metabolism Based on Urine Bioassay Results

이형식, 김희근, 이경진*
전력연구원
대전광역시 유성구 문지동 103-16
*조선대학교
광주광역시 동구 서석동 375

요 약

본 연구에서는 월성 원전 작업자 뇨시료의 삼중수소 농도 측정결과를 이용하여 한국인에 대한 삼중수소 유효 반감기를 산출하였다. 그 결과 측정 대상에 대해 약 5 ~ 9일의 유효 반감기를 얻었으며, 이는 ICRP-30에서 권고한 유효반감기 10일을 하회하는 것으로 나타났다. 한국인의 일일 수분 섭취량을 고려하여 체액에서 삼중수소의 제거 반감기를 물리적인 방법으로 계산해 보았으며, 이 결과에 근거하여 삼중수소 대사모델에 대한 검토를 수행하였다.

Abstract

The effective half-life based on urine bioassay results of Wolsong NPP's workers was calculated. The effective half-life for tritiated water vapour obtained was 5 ~ 9 days. In comparison to 10 days reported for ICRP-30, it is lower than the corresponding half-life for Reference Man. Also, the half-life was calculated based on intake amount of daily water. According to this result, the metabolism was reviewed.

1. 서 론

삼중수소는 우주선의 반응에 의해 대기 중에 자연적으로 생성된다. 또한 핵실험 및 원자력시설 등과 같은 인위적인 발생원에 의해서도 생성된다. 삼중수소는 물리적 반감기가 12.3년이며, 저-에너지 베타선을 방출하면서 ^3He 로 붕괴한다. 대기중에는 HT와 HTO 형태의 삼중수소가 존재하는데, 이 중에서 인체에 대한 피폭은 주로 HTO에 의해서 이루어진다. 따라서 본 연구에서는 HTO에 대한 연구를 중점적으로 수행하였다. 중수로 원전의 경우 감속재와 냉각재에서 많은 양의 삼중수소가 생성되며, 정상운전 중 불가피한 중수누설을 통해

HTO 형태의 삼중수소가 방사선 관리 구역으로 확산되게 된다.

월성 원전의 가동 경험으로 볼 때, 발전소 주변 주민의 경우 전체 피폭의 약 70 % 이상, 작업자 피폭의 경우 약 30 ~ 50 % 정도가 삼중수소인 HTO에 의한 것으로 나타나고 있다 [1, 2]. 따라서 방사선 피폭저감의 관리 측면에서 HTO에 대한 상세한 정보가 매우 중요함을 알 수 있다. HTO에 의한 피폭을 계산하기 위한 중요한 파라미터는 인체에서 HTO의 유효 반감기이다. ICRP-30에서는 인체에서 HTO의 유효반감기를 10일로 가정하고 있다. 이는 ICRP-30의 표준인 자료인 하루 수분 섭취량 3 l/day 와 체액의 부피 42 l 를 기준으로 산정된 값이다.

본 연구에서는 월성 원전의 측정자료를 사용하여 HTO에 대한 한국인의 유효반감기와 HTO의 대사 모델을 검토하였다.

2. 삼중수소의 생물학적 특성

삼중수소는 물리적 반감기가 12.3년이며 저-에너지 베타선을 방출하며 ${}^3\text{He}$ 로 붕괴된다. 이 때 방출되는 베타선은 18.6 keV 의 최대에너지와 5.7 keV 의 평균에너지를 가지며, 수중(사람의 조직과 유사)에서 베타선의 최대 비정은 $6\ \mu\text{m}$ 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($20\sim 100\ \mu\text{m}$)과 진피층($1\sim 3\text{ mm}$)에 존재하기 때문이다. 따라서 삼중수소로부터 방출되는 베타선은 표적세포에 도달할 수가 없다.

3. HTO의 체내 대사 모델

3.1 ICRP-30 모델[3,4]

ICRP-30에서는 표준인이 HTO로 오염된 공기에 노출되었을 때 전체 섭취량의 2/3는 호흡을 통해 이루어지며 1/3는 피부를 통해 이루어진다고 가정하고 있다. 또한, 호흡에 통해 체내로 들어오는 HTO의 경우는 호흡기관에서 100 % 흡수되며, 흡수된 HTO는 체액(Body water)과 연조직(Soft tissue)에 약 2시간후에 균일하게 혼합된다고 보고 있다. HTO의 체내 보유량은 섭취량과 동일하다고 가정하고 있는데, 이는 체내로 HTO가 유입된 후 소변에서 배출되는 삼중수소 농도는 체액의 삼중수소 농도와 동일하다 것이다. 체내에 존재하는 일부 삼중수소는 유기조직분자들(Organic molecule)과 매우 적은 비율로 결합하여 OBT(Organic bound tritium)를 형성한다. 이렇게 생성된 OBT는 피폭에 적은 비율로 영향을 미치는데

ICRP에서는 OBT 기여분 만큼을 추가하여 피폭량을 평가하도록 권고하고 있다. 또한 HTO 피폭 후 체내 삼중수소 잔류량 예측에서는 모든 경로로 배출되는 수분의 대사율과 체액의 삼중수소 농도만을 고려하는 단일 지수항으로 표현하고 있다.

3.2 물과 HTO의 체내 보존식

HTO에 대한 체내 잔류량 평가는 인체를 탱크 형태로 가정하여 모델할 수 있다[4]. 그림 1에서 보듯이, 이 모델에서는 체내에서 HTO의 거동 특성을 고려하여 체액(Body water)과 두 개의 OBT로 구획(Compartment)을 구분하였다. 체내의 OBT 화합물들에 대한 삼중수소 체류 모델은 각기 다른 평균 잔류시간과 모든 연조직에 걸쳐 균일하게 분포된다는 가정을 갖는 두 개의 OBT 구성객체에 의해 적절하게 모사 될 수 있다. 이 체액과 OBT 구획들은 물리적인 구조나 다른 화합물 등으로 결합되는 특성이 고려되지는 않는다.

Johnson은 체액과 두 개의 OBT가 고려된 탱크 모델을 바탕으로, 물과 삼중수소의 체내 대사를 그림 1와 같이 모델하였다. 정상상태의 경우, 체내로 유입되는 물의 대사 방정식은 아래 식과 같이 표현된다.

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

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

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

M_x = 기관(Body water, OBT1, OBT2)에서 수분의 질량 (kg)

\dot{m}_x = 기관으로 수분의 전달율(kg/day)

위의 식을 정리하면, $\dot{m}_1 = \dot{m}_6$, $\dot{m}_2 = \dot{m}_3$, $\dot{m}_4 = \dot{m}_5$ 같이 표현된다. 위 식에서 보듯이 정상상태의 경우, 각 기관으로 유입되는 물의 대사량은 그 기관에서 배출되는 물의 대사량과 같다. 결과적으로 물 보존식에서 체외로 배출되는 물의 대사량 \dot{m}_6 은 체내로 유입되는 물의 대사량 \dot{m}_1 과 동일함을 알 수 있다.

이와 유사하게 삼중수소에 대한 체내 보존식은 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, $T_x = x$ 기관에서 삼중수소의 양 (Bq) 이다.

일반적으로 HTO의 대사 모델에 사용되는 전달 상수 $\lambda_i (i=2, \dots, 6)$ 는 (4)~(6)식을 보며, 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 기관에서 물의 대사량 (\dot{m})과 질량(M)의 비로 표현된다.

따라서, 동서양인 간의 반감기 차이는 대사량 \dot{m} 과 각 조직의 질량 M 에 의한 것임을 알 수 있다. 특히, 단기 피폭의 경우는 λ_6 에 의해서 피폭량이 결정된다. 이 값은 개인의 일일 수분 섭취량과 체내 수분질량에 의해 결정된다.

위 식 (1)에서 (7)식을 이용하여 체내 각 구획 내의 HTO의 잔류량을 충분히 예측하고 평가하기 위해서는 예측하고자 하는 대상에 적합한 전달상수(λ)를 사용해야 한다. 이 전달상수는 실험을 통해 결정하거나 물리적인 (7)식을 사용하여 구할 수 있다.

그림 2는 Johnson 모델을 사용하여 체액과 OBT에서 HTO 체내 잔류량을 시간별로 계산한 것이다. 이 결과에서 보듯이, 약 35일 정도에서 체액의 삼중수소의 값과 OBT_2 의 값이 교차하는 경향을 볼 수 있다. 이 결과는 HTO 피폭 후 약 40일 미만의 기간 동안 OBT의 기여도는 체내 삼중수소 농도에 크게 영향을 미치지 않는다는 것을 보여준다.

4. ICRP-30과 측정 자료와 비교

본 연구에서는 ICRP-30에서 제시한 HTO의 제거 반감기와 현장 자료를 통해 얻어진 제거 반감기에 대해 비교하였다.

4.1 삼중수소에 대한 현장 측정 자료

본 연구에서는 월성 1발전소 작업자의 뇨시료 내 삼중수소 농도를 실측자료로 사용하였다. 현재 월성 원전의 작업자에 대한 삼중수소 피폭관리절차는 방사선관리구역 작업 후 뇨시

료 농도를 측정하도록 되어있다. 만일 뇨시료의 삼중수소 농도가 $100 \mu\text{Ci/l}$ 이상을 보인 작업자의 경우 $20 \mu\text{Ci/l}$ 이하가 될 때까지 방사선관리구역의 작업을 금지시킨다. 작업금지 조치 후 작업자 뇨시료의 삼중수소 농도가 $20 \mu\text{Ci/l}$ 이하가 될 때까지 지속적으로 측정한다. 본 연구에서는 이 때 지속적으로 측정된 삼중수소 농도를 참고 자료로 사용하였다. 표 2에서 보듯이 본 연구에서는 4명의 작업자에 대한 측정 자료를 사용하였고, 각각 선정된 자료의 초기 삼중수소 농도는 각각 145.8, 249.8, 231.6, 89.5 $\mu\text{Ci/l}$ 이며, 관찰 기간은 각각 16, 36, 40, 18 일이다.

Table 2. Measurement data used in this study

Samples	Weight (Kg)	Duration of Observation (Days)	Number of Measurement	Initial Concentration ($\mu\text{Ci/l}$)	Final Concentration ($\mu\text{Ci/l}$)
A	68	16	8	145.8	14.6
B	69	36	13	249.8	12.5
C	90	40	10	231.6	12.9
D	63	18	7	89.5	15.8

4.2 최소자승법에 의한 측정자료 보정

표 2에서 보듯이 본 연구에서 사용된 측정 자료는 40일 이내의 단기간 동안 작업자의 뇨시료에서 삼중수소 농도 변화를 측정한 것이다. 이 자료는 발전소 운영 중 작업자 피폭 관리 목적으로 측정된 자료이기 때문에 측정 시점의 연속성이나 신뢰도가 다소 떨어진다. 그러므로, 각 측정 대상의 제거 반감기를 산출할 때 초기의 삼중수소 농도와 최종 농도를 이용하는 것은 다소 오차를 수반하게 된다. 따라서 본 연구에서는 최소자승법을 이용하여 각 측정 대상별 삼중수소 제거상수와 초기 시점의 체내 삼중수소 농도를 계산하였다.

측정 자료들은 삼중수소 피폭 후 모두 단기간 관찰한 자료이므로, 작업자 체내의 삼중수소 농도 변화는 OBT가 제외된 단일 지수항으로 표현된 아래의 해를 따를 것이다.

$$T_{body}(t) = T_{body}(0) e^{-\lambda_0 t} \quad (8)$$

식(8)에 자연로그를 취하여 선형화 한 후에 최소자승법을 사용하여 뇨시료 측정 자료에

대한 $T_{body}(0)$ 와 λ_6 를 산정하였다.

측정자료의 유효반감기를 계산한 결과, Sample-A의 경우는 5.060일을 보였고, Sample-B, C, D에서는 각각 8.144, 9.658, 7.114일을 보였다.

4.3 ICRP-30과 보정된 측정자료의 비교 결과

본 연구에서는 측정 자료를 바탕으로 최소자승법에 의해 보정된 제거 반감기와 초기량을 이용하여 체내 삼중수소 잔류량을 계산하였고, 이 계산 결과를 ICRP-30에서 제시된 체내 잔류식에 의해 구해진 값과 비교해 보았다. 그 결과, 그림 3과 그림 6에 보듯이, 보정된 측정자료는 Sample-A, B, C, D의 경우 최대 상대오차가 각각 195.3 %와 76.6 %, 10.3 %, 그리고 65 %를 보였으며, Root Mean Square 오차는 각각 103.9, 42.1, 5.99, 37.3 %를 보였다.

특히, Sample-A의 경우 나머지 결과에 비해 매우 큰 오차를 유발 시켰다. 이는 최소자승법에 의해 보정된 Sample-A의 HTO 제거 반감기가 ICRP-30의 반감기보다 약 2 배정도 더 작기 때문이다. 따라서 Sample-A의 경우는 체내에서 삼중수소의 제거가 ICRP-30 모델의 예측보다 더 빨리 이루어짐을 의미한다.

5. 물리적인 방법에 의한 수분 섭취량 평가

단기피폭의 경우 체내 삼중수소 잔류량은 체액에서 삼중수소의 배출에 직접 관련이 있는 제거상수(λ_6)에 좌우된다. 표 2의 ICRP-30에서 기술된 표준인(Reference Man) 자료를 이용하여, 식(7)을 계산하면, 체액에서 배출되는 HTO의 제거상수를 구할 수 있다. 이는 ICRP-30에서 권고한 HTO의 제거 반감기 10일과 동일한 값이다.

$$\lambda_6 = \frac{3 \text{ l/day}}{42 \text{ l}} = 0.0714 \text{ day}^{-1} \quad (12)$$

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda_6} = 9.68 \approx 10 \text{ day} \quad (13)$$

Table 2. Metabolism data of HTO in Reference Man (ICRP-30)

Parameter	Value
Weight	70 kg
Mass of soft tissue	63 kg
Water content of body	42 l
Total intake and excretion of water/day	3 l/day
Daily excretion of water in urine	1.4 l/day

식 (12)에서 보듯이 체액에서 HTO의 유효반감기를 결정하는 중요한 인자는 일일하루 수분 섭취량과 인체의 체액의 양이다. 따라서 본 연구에서는 측정자료에서 얻어진 HTO 제거 상수(λ)를 근거로, 월성원전 작업자의 일일 수분섭취량을 평가하였고, ICRP-30의 표준인의 하루 수분섭취량을 이용하여 실제 대사에 관련된 수분의 유효체적을 검토하였다.

우선, 측정자료에서 얻어진 HTO 제거 상수를 이용하여 작업자의 하루 수분섭취량을 계산하였다. 이때 각 대상의 체액의 양은 다른 연구결과에서 제시했듯이 체중의 60 %를 보인다고 가정하였다[5, 6]. 그 결과 표 3에서 보듯이, 작업자의 일일 수분섭취량은 약 3.5 ~ 5.6 *l/day*로, 평균 4.2 *l/day*로 계산되었다. 이 결과는 한국인과 같은 동양권인 인도인의 하루 수분섭취량 4.5 *l*의 결과와 유사함을 보였으며, ICRP-30에서 권고한 일일 수분섭취량 3 *l/day*보다는 다소 높은 값을 보였다.

Table 3. Intake water volume for Korean workers based on measurement data

Sample	Fitted rate constant λ_6 (day^{-1})	Actual weight	Water volume	Intake water (<i>l/day</i>)	Half-life
A	0.13695	68 kg	40.8 L	5.59	5.06
B	0.08509	69 kg	41.4 L	3.52	8.14
C	0.07175	90 kg	54.0 L	3.86	9.66
D	0.09741	63 kg	37.8 L	3.68	7.11

표 3의 체내에서 체액의 부피는 실제 HTO 대사와 관련된 HTO의 유효체적(Effective volume)이 아니기 때문에 식 (11)으로 평가된 일일 수분 섭취량은 과대하게 평가될 수 있다.

6. 결 론

본 연구에서는 월성 원전의 작업자의 뇨시료에서 측정된 삼중수소 농도를 이용하여 한국인의 삼중수소 제거 반감기를 산출하였다. 그 결과, 4명의 측정 대상에 대해 약 5 ~ 9일의 제거 반감기를 얻었으며, ICRP-30의 유효반감기 10일을 하회하는 것으로 나타났다. 이는 한국인의 식생활 습관과 연관되는 사항으로 실제 삼중수소 피폭 거동은 계산값 보다는 낮은 것으로 예상된다.

월성 원전 작업자의 뇨시료 측정자료에서 얻어진 HTO 제거상수를 이용하여 작업자의 하루 수분섭취량을 계산하였다. 작업자의 일일 수분섭취량은 약 3.5 ~ 5.6 *l/day*로, 평균 4.2 *l/day*로 계산되었다. 이 결과는 한국인과 같은 동양권인 인도인의 하루 수분섭취량 4.5 *l*의 결과와 유사함을 보였으며, ICRP-30에서 권고한 일일 수분섭취량 3 *l/day*보다는 다소 높은

값을 보였다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부가 시행한 가동중 중수로 원전 안전성 향상기술개발 과제의 결과입니다.

7. 참고 문헌

1. 원자력발전소 주변 환경방사선 조사 보고서(2000년도 상반기), 한국전력공사.
2. 원자력발전소 방사선관리 연보, 한국전력공사(2000).
3. *International Commission on Radiation Protection. Limits for intakes of radionuclides by workers.* New York : Pergamon Press; ICRP Publication 30, 1979 - 1982.
4. Robin L. Hill and John R. Johnson, Metabolism and Dosimetry of Tritium, *Health Physics*, Vol 65, p628, 1993.
5. E. A. Pinson and W. H. Langham, *J. Appl. Physiol.* **10(1)**, 108 (1957).
6. *Radiological Health Handbook, The Standard Man*, p.192. U.S. Dep. of Health, Education and Welfare (1960).
7. Johnson, J. R, The estimation of the effective dose equivalent from tritiated water exposures using tritium concentration in urine. *Radiat. Prot. Dosim.* vol. 2 (1982)

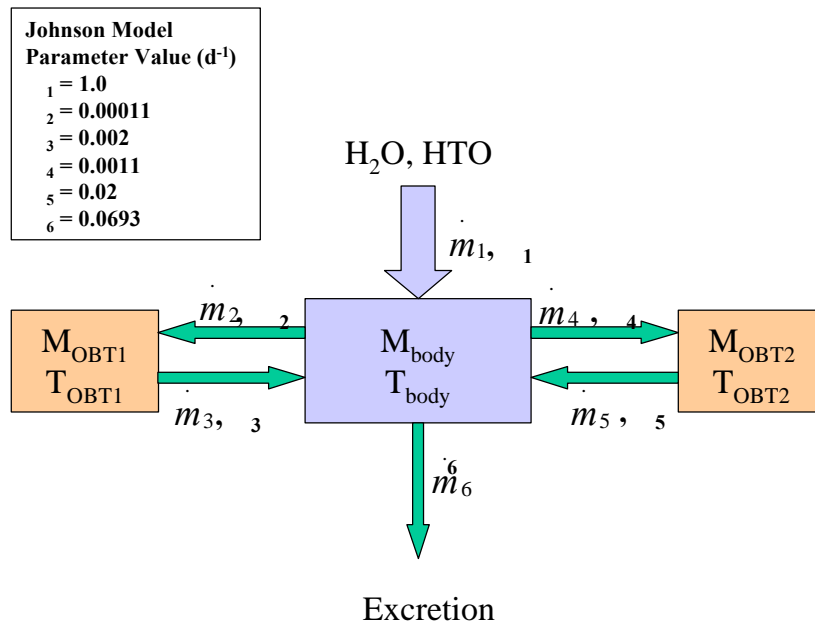


Fig 1. Balance model for water and tritium intake.

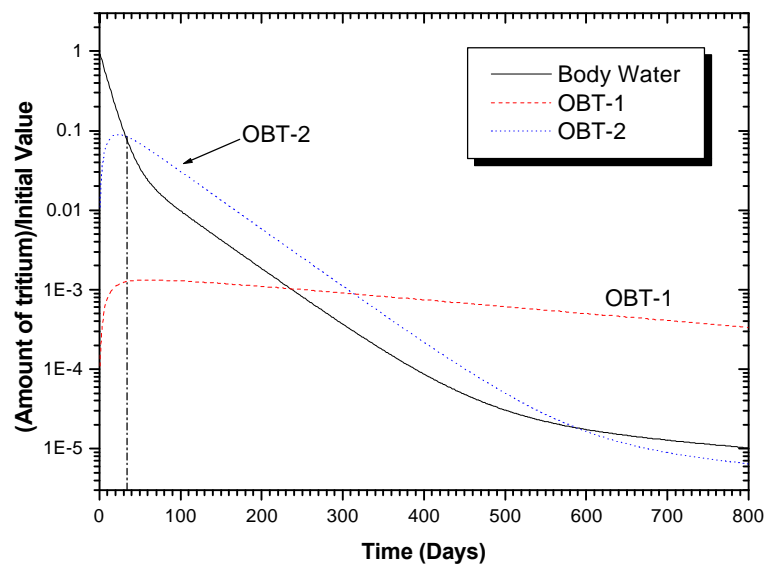


Fig 2. Retention rate in body water and OBTs

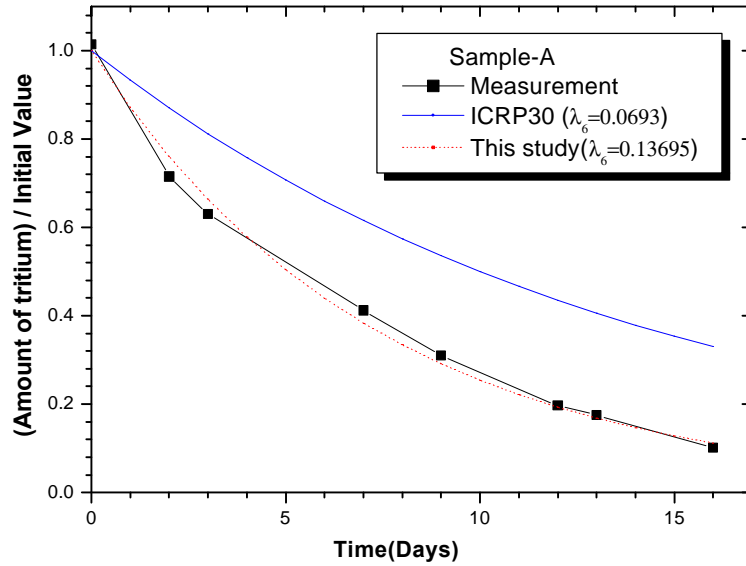


Fig 3. Retention rate of HTO for ICRP-30 and fitted measurement(Sample-A).

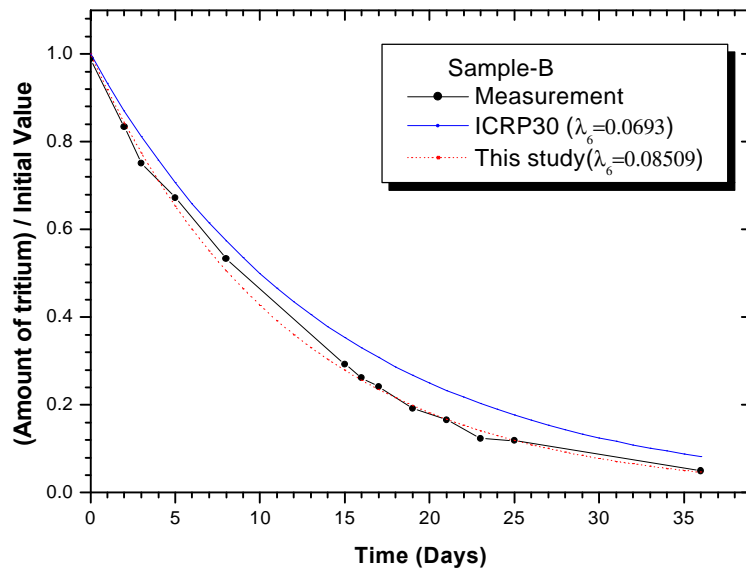


Fig 4. Retention rate of HTO for ICRP-30 and fitted measurement(Sample-B).

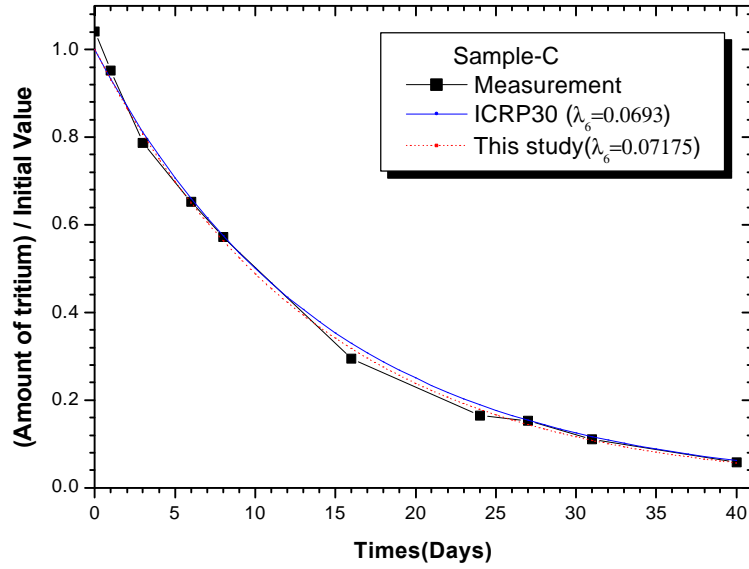


Fig 5. Retention rate of HTO for ICRP-30 and fitted measurement(Sample-C)

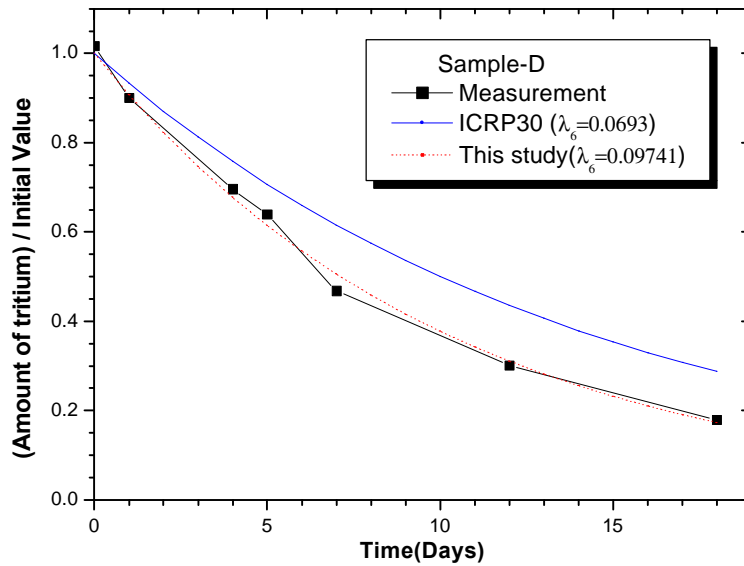


Fig 6. Retention rate of HTO for ICRP-30 and fitted measurement(Sample-D).

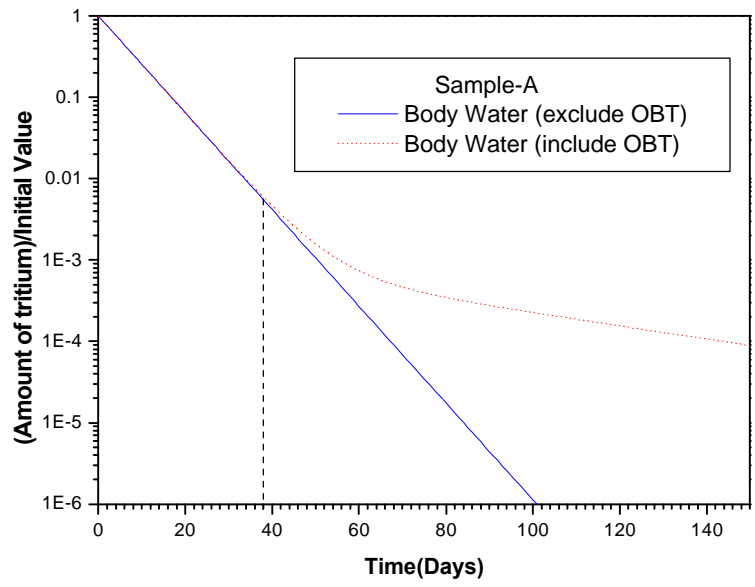


Fig 7. Retention rate for HTO in body water according to considering OBT.