

삼중수소 피폭방사선량 평가의 경향과 이슈에 대한 고찰

김희근, 공태영, 정우태
한수원(주) 원자력발전기술원

2011년 3월 7일 접수 / 2011년 5월 3일 1차 수정 / 2011년 5월 4일 채택

원전에서 발생하는 방사성핵종 중에서 방사선작업종사자와 원전주변에 거주하는 일반인에 대한 피폭방사선량평가 측면에서 중요한 핵종 중에 하나가 삼중수소이다. 삼중수소는 인간의 체내로 섭취되어 내부피폭을 일으킨다. 원전 종사자 전체 피폭방사선량의 약 7%, 원전주변 일반인 피폭방사선량의 약 60-90%가 삼중수소에 의한 피폭으로 발생하고 있다. 이에 따라 국내외 연구소에서는 삼중수소에 대한 정확한 피폭방사선량 평가를 위해 많은 연구를 진행하고 있다. 본 논문은 삼중수소의 인체대사모델과 피폭방사선량 평가와 관련한 국내외 연구개발 동향을 정리하였고, 현안사항을 정리하였다.

중심어 : 삼중수소, 인체대사모델, 내부피폭 선량평가, 원자력발전소

1. 서론

원전에서 삼중수소(Tritium)는 중성자 방사화 과정(Neutron activation process)이나 삼중핵분열 과정(Ternary fission process) 등에 의해 생성되며, 계통에서 누설되어 종사자나 일반인에게 방사선피폭을 일으킨다. 이러한 삼중수소의 주된 화학형(Chemical form)은 증기형 삼중수소(Tritiated water vapour: HTO)이다[1]. 한편 삼중수소제거시설(Tritium removal facility: TRF)이나 삼중수소저장시설(Tritium storage facility: TSF)에서는 HTO 외에 원소형 삼중수소(Elemental tritium: HT)가 추가로 발생되고 있다[2].

삼중수소는 반감기(Half life)가 12.3년으로 붕괴과정에서 베타 입자(Beta particles)를 방출하는데, 최대에너지(Maximum energy)는 18.6 keV이며, 평균에너지(Average energy)는 약 6 keV이다. 따라서 삼중수소의 신체 내에서 최대 비정(Range)은 약 6 μm 정도로서, 외부피폭에 의한 장애는 일어나지 않는다. 다만 원전종사자나 일반인이 호흡이나 음식물섭취 등에 의해, 신체 내부로 섭취되었을 경우에만 방사선장애를 일으킨다. 이러한 삼중수소는 일반적으로 호흡(Inhalation), 피부 흡수(Skin absorption)나 음식물섭취(ingestion) 등의 피폭경로를 통해 신체 내부로 들어오게 된다. 일반적으로 원전 방사선관리구역의 작업장(Workplace)에서는 호흡과 피부흡수가 주된 피폭경로(Exposure pathway)이다[2]. 이에 비해 원전주변에 거주하는 일반인(Public)의 경우 음식물섭취

가 주된 피폭경로이다[3].

국내원전 전체 종사자 피폭방사선량의 약 7% 정도가 삼중수소에 의해 발생하는데, 이는 중수로원전에서 삼중수소에 의한 피폭에 의한 것으로, 종사자 방사선피폭의 약 30% 가량이 삼중수소에 의해 발생하고 있다[4]. 반면에 경수로원전에서 삼중수소에 의한 종사자의 피폭은 거의 발생하지 않고 있다. 한편, 중수로원전이나 경수로원전의 경우, 모두 원전주변에 거주하는 일반인 피폭방사선량의 경우 약 60-90%가 삼중수소에 의해 일어나고 있어 피폭방사선량평가 측면에서 중요한 방사성핵종이다[3]. 따라서 이 논문은 원전 종사자와 일반인을 대상으로 하고 있으나, 중수로원전에 보다 초점을 맞추고 있다.

이러한 삼중수소 핵종의 방사선안전관리에서 중요성을 고려하여 보다 정확한 피폭방사선량 평가를 위한 연구가 국내외적으로 많이 진행되고 있다. 이 논문은 삼중수소로 인한 인체대사모델과 피폭방사선량 평가에 관한 연구개발 동향과 이슈 등을 정리하였다.

2. 삼중수소 피폭방사선량 평가의 현황

국내원전에서 삼중수소에 의한 종사자 피폭은 대부분 중수로원전에 발생하고 있다. 중수로원전에서는 냉각재와 감속재로 중수(Heavy water)를 사용하기 때문에 1차 계통 내에서 중성자의 방사화 과정에 의해 삼중수소가 다량으로 생성된다. 원전 일차계통 내에 생성된 삼중수소는 원자로의 운전이나 보수 작업과정에서 작업공간의 공기중으로 누설된다. 이 경우 대부분 증기형태의 삼중수소(Tritiated water vapour)로 작업장의 공기 중에 존재한다

책임저자 : 김희근, hkkim1@khnp.co.kr
대전시 유성구 장동 25-1

[1]. 이에 따라 중수로원전 방사선관리구역 내에 출입하였거나, 방사선작업을 수행한 종사자는 삼중수소의 체내 흡입과 피부흡수에 따른 방사선피폭을 받게 된다. 중수로원전의 경우 연도별로 차이는 있으나 전체 피폭방사선량의 20~40% 정도가 삼중수소에 의한 내부피폭에 의해 일어나고 있다[4].

중수로원전 방사선안전관리를 위해 삼중수소에 의한 피폭방사선량을 평가하여야 한다[5]. 이를 위해 원전종사자의 인체내부로 섭취된 삼중수소의 총 방사능을 알아야 한다. 삼중수소는 저에너지 베타방출체로서 전신계측기(Whole body counter)를 이용하여 신체보유 방사능을 측정할 수 없다. 이에 따라 방사선작업 종료 후에 뇨시료(Urine sample)를 제출하여 간접 측정방법으로 방사능을 계측하고 있다[5]. 이는 인체로 들어온 삼중수소는 물과 같은 거동을 보이기 때문에 일정시간이 경과하면 전신에

고르게 퍼지고, 뇨를 통해 외부로 배설되기 때문이다. 종사자가 제출한 뇨시료는 액체섬광계와 혼합하여 액체섬광계수기(Liquid scintillation counter: LSC)를 이용하여 뇨시료 중에 포함된 삼중수소의 방사능 농도를 측정할 수 있게 된다[5-7]. 최종적으로 종사자의 피폭방사선량은 삼중수소 방사능농도에 삼중수소의 선량환산계수(Dose conversion factor: DCF)를 곱하여 평가하고 있다[8]. 이처럼 삼중수소에 의한 내부피폭 방사선량을 평가하기 위해서는 삼중수소의 체내 섭취까지의 피폭경로, 인체 섭취 후 인체내 거동과 대사모델, 뇨시료를 이용한 계측시료 조제와 방사능계측, 섭취시점과 뇨시료 제출시점의 차이와 다수 시료에 의한 선량평가의 불확도의 고려 등 복잡한 과정을 필요로 한다. 원전종사자의 삼중수소에 의한 내부피폭 선량평가 현황을 그림 1에 나타내었다[9].

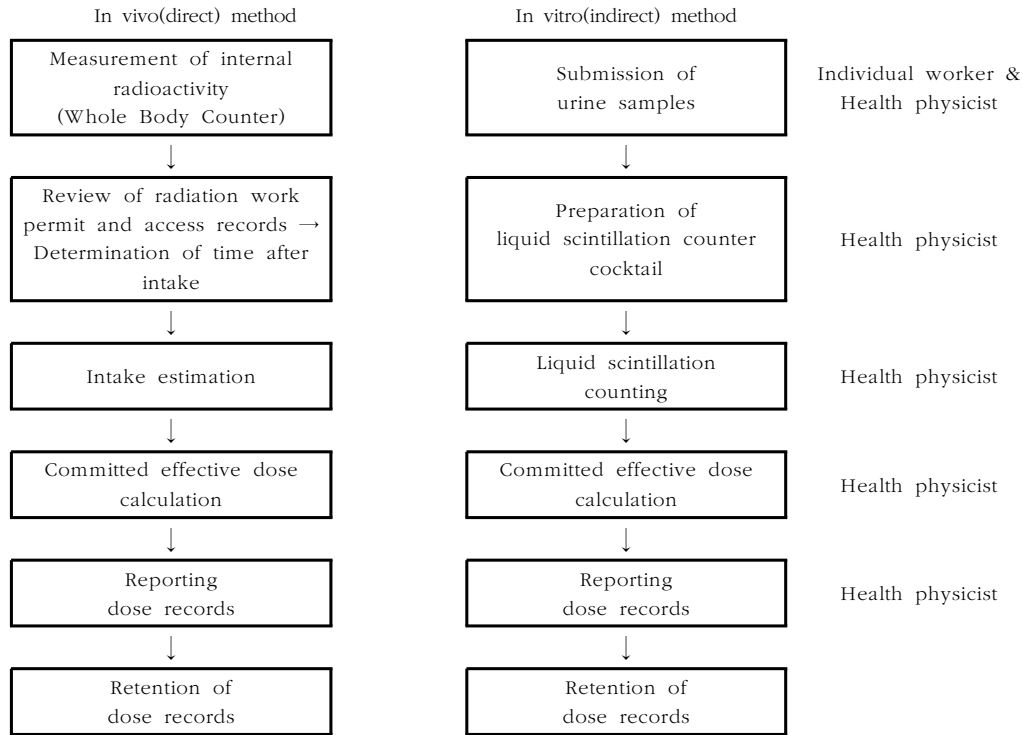


Fig. 1. Process of measurement and dose assessment of tritium intake for workers in nuclear power plants[9].

한편 경수로원전에서는 삼중핵분열 과정 등에 의해 삼중수소가 생성되나, 계통 내에서 삼중수소 농도가 매우 낮기 때문에 원전종사자의 체내로 흡입이나 피부를 통한 섭취는 거의 일어나지 않는 실정이다. 이에 비해 원전에서 환경으로 배출된 삼중수소는 식물이나 동물로 전이되며, 결과적으로 삼중수소에 의해 오염된 동식물을 인간이 섭취하게 되고, 이에 따라 원전주변에 거주하는 일반인은 삼중수소로 인한 방사선피폭을 받게 된다. 이러한 삼중수소에 의해 오염된 음식물섭취는 중수로원전과 경수로원전 주변에 거주하는 일반인에게서 공통적으로 일어나는 피폭경로이다. 이러한 일반인에 대한 주민선량 평가는 원

자력발전소 주변 주민선량 계산지침서나 한국원자력안전기술원(Korea Institute of Nuclear Safety: KINS) 규제지침의 주민피폭선량평가에 상세히 제시되어 있다[10,11].

3. 삼중수소 피폭방사선량평가의 이슈

가. 삼중수소의 인체 내 거동과 대사모델

삼중수소의 인체 내 확산과 거동은 1970~80년대 캐나다 초크리버 원자력연구소(Chalk River Nuclear Laboratories: CRNL)의 Osborne에 의해 실험적인 연구가

많이 수행되었다[12]. 체내로 들어온 삼중수소는 인체의 연조직 막(Membranes of the soft tissue)을 통과하여 인체의 물속(Body water)에 분포하게 된다. 인체의 물속에서 삼중수소는 빠른 속도로 균일하게 확산되며, 수 시간 이내에 신체 내에서 평형에 도달하여 피폭을 일으킨다[13]. 신체 내에서 평형에 도달한 삼중수소는 일정한 속도로 신체로부터 제거가 일어난다.

한편 삼중수소가 평형에 도달하고 신체로부터 제거되는데 걸리는 시간에 대한 인체대사모델은 Osborne의 뒤를 이어 Johnson에 의해 대부분 확립되었다[12,14]. 여기에 따르면 삼중수소의 인체 섭취 후 수 시간 내에 체내 삼중수소 농도가 가파르게 증가하여 평형에 도달한 후 인체로부터 제거되고 있다. Johnson은 삼중수소의 인체 내 유입과 제거속도를 인체 내의 격자(Compartment)에서 물질 수지방정식을 유도하고, 삼중수소 농도를 계산할 수

있는 인체대사모델을 완성하였다. 인체 내에서 삼중수소는 대부분 인체 내 물탱크 격자에 머무르다 약 10일의 반감기로 외부로 배설되나, 극히 일부는 보다 장기간 체류하는 별도의 격자에서 약 40일 정도의 반감기를 가지고 외부로 제거되고 있다[14,15]. 이러한 Johnson의 삼중수소 인체대사모델은 국제방사선방호위원회(International Commission on Radiological Protection: ICRP) 및 국제원자력기구(International Atomic Energy Agency: IAEA)의 피폭 방사선량 평가 지침의 토대를 이루었으며, 삼중수소에 의한 내부피폭 선량평가의 근간을 이루고 있다[14,15]. 이러한 Johnson의 인체대사모델과 ICRP와 IAEA의 삼중수소 피폭선량평가 개념은 국내원전의 삼중수소 선량평가 절차에서 적절히 반영하고 있다[5,16]. Johnson의 삼중수소 인체대사모델을 그림 2에 나타내었다[15].

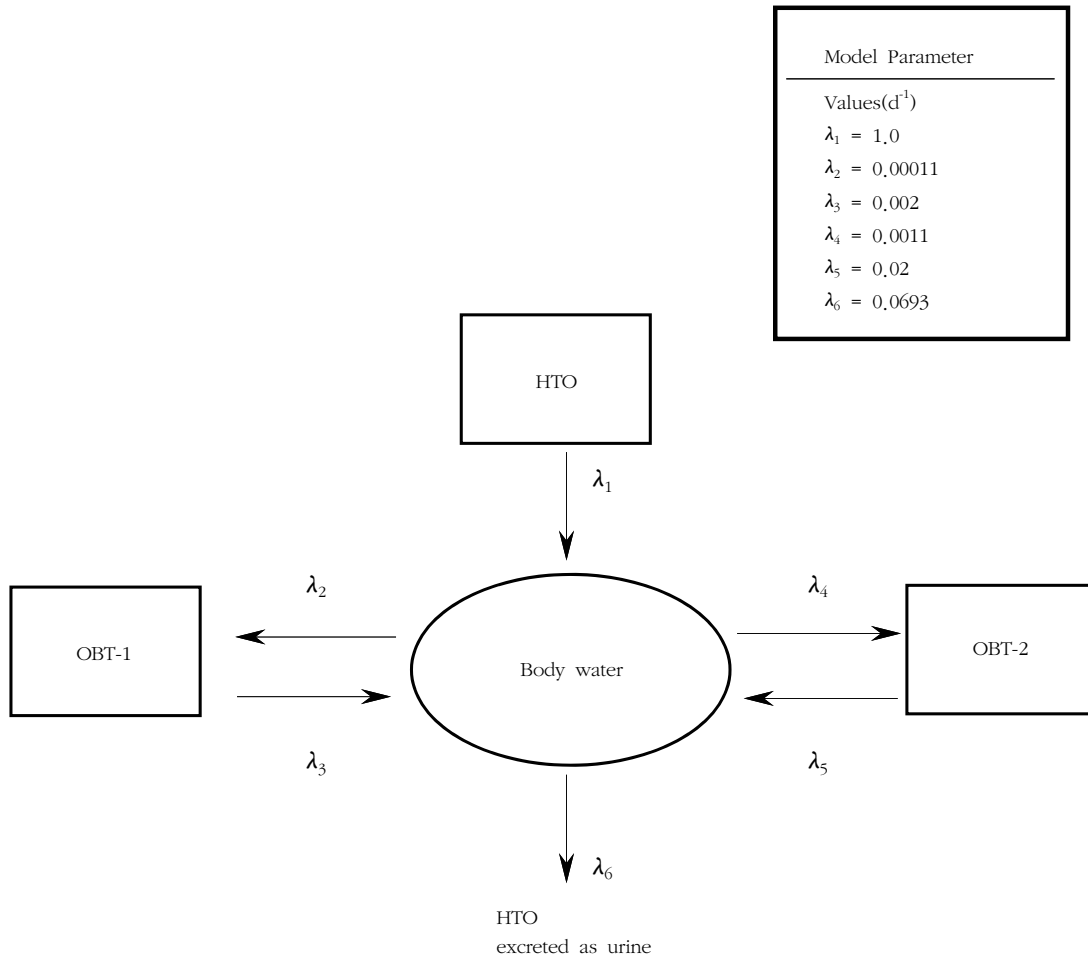


Fig. 2. HTO compartment metabolism[16].

한국인 성인 방사선작업종사자의 삼중수소 인체대사모델과 유효반감기에 대한 연구 등도 국내에서 부분적으로 수행되었다[16]. 이 연구에서는 인체 내에서 삼중수소는 물을 따라 거동하기 때문에 신체로부터 배설은 방사선작

업종사자가 매일 섭취한 물의 양과 크게 연관되는 점을 착안하였다. 즉, 보다 많은 물을 섭취하게 되면 인체 내의 삼중수소는 그만큼 빨리 배설이 일어나는 특징이 있다. 이러한 점을 고려한 결과 삼중수소의 생물학적 반감

기는 국제방사선방호위원회(ICRP)에서 제시하고 있는 10 일보다 2~3일 정도 짧은 것으로 나타났다[16]. 한편 이런 연구결과가 있음에도 국내원전에서 종사자의 삼중수소에 의한 내부피폭 방사선량 평가에서는 감소된 생물학적 반감기를 적용하지 않고 국제방사선방호위원회 지침에서 규정하고 있는 10일의 유효반감기를 적용하여 보수적이고 신뢰성 있는 피폭방사선량평가를 수행하고 있다.

나. 뇨시료 제출시점이 피폭방사선량 평가에 미치는 영향

인체 뇨시료 중 삼중수소 농도를 이용하여 내부피폭 방사선량을 평가하기 위해서는 종사자가 제출한 뇨시료 중 삼중수소 농도가 체내에서 평형(Equilibrium)에 도달한 대표시료(Representative sample)라는 전제를 필요로 한다. 만약 종사자가 제출한 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 제출하도록 규정하고 있다[2,5,6]. 그런데 원전의 계획예방정비기간동안에는 많은 방사선작업이 동시에 진행되고, 이들 작업에 투입되는 종사자의 빈번한 출입으로 뇨시료 제출시점이 변동될 수 있다. 또한 종사자에 따라 일부는 자연하여 뇨시료를 제출하거나, 반복 제출하는 경우도 일어날 수 있다. 이런 경우 종사자가 제출한 시료에서 체내 삼중수소 농도는 그 만큼 변화할 가능성이 있으며, 따라서 내부피폭 방사선량의 평가 값에도

차이가 발생할 수 있게 된다.

이러한 변동 가능한 상황을 고려하여 국내 중수로원전 종사자가 제출하는 시간에 따른 뇨시료 중 삼중수소의 방사능 농도를 측정하였다[18]. 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[18]. 이러한 뇨시료 제출시간별 삼중수소 농도를 도식하면 그림 3과 같다[18]. 한편 외국 연구결과와 비교를 위해 캐나다 초크리버 원자력연구소(CRNL)의 뇨시료 제출시간별 삼중수소 농도 결과를 그림 4에 나타내었다[17]. 국내원전의 뇨시료 중 삼중수소 농도의 경향과 국외 뇨시료 중의 삼중수소 농도 측정시험 결과를 비교하면 초기 단계에서는 종사자에 따라 약간의 차이를 보이나, 경향은 아주 유사한 것으로 나타났다. 특히 국내 원전의 뇨시료 중 삼중수소 섭취 후 평형에 도달하는 시간은 캐나다의 연구결과에 비해 상대적으로 짧은 것으로 나타나고 있다. 따라서 국내 원전의 방사선피폭관리절차에서 규정한 뇨시료 제출시점 2시간을 준수한다면, 뇨시료 채집과정에서 충분히 대표시료를 얻을 수 있는 것으로 판단되었다. 특히 삼중수소 섭취 후 뇨시료를 조금 일찍 제출하거나 또는 약 1일 정도 지연하여 제출하더라도 신체내의 삼중수소 농도에 별로 차이가 없으며, 결과적으로 삼중수소에 의한 내부피폭 선량을 크게 과소평가하지 않는 것으로 나타났다.

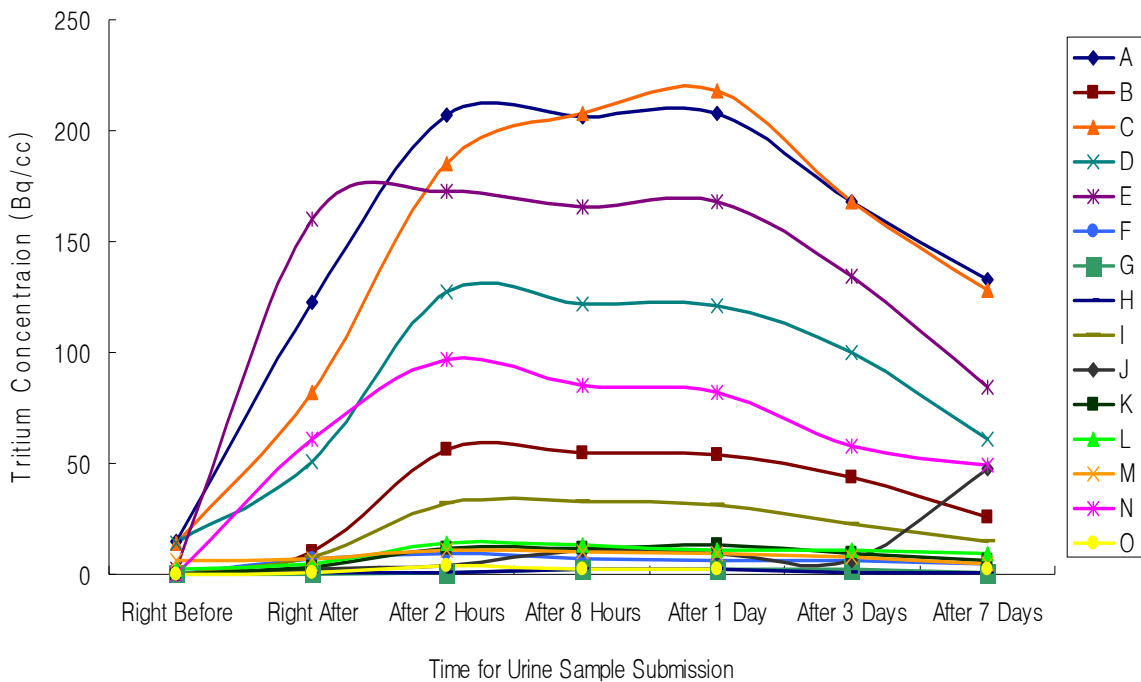


Fig. 3. Change of tritium concentration for radiation workers at Korean nuclear power plants[18]. Letters A to O indicate the participants of urine sample submission.

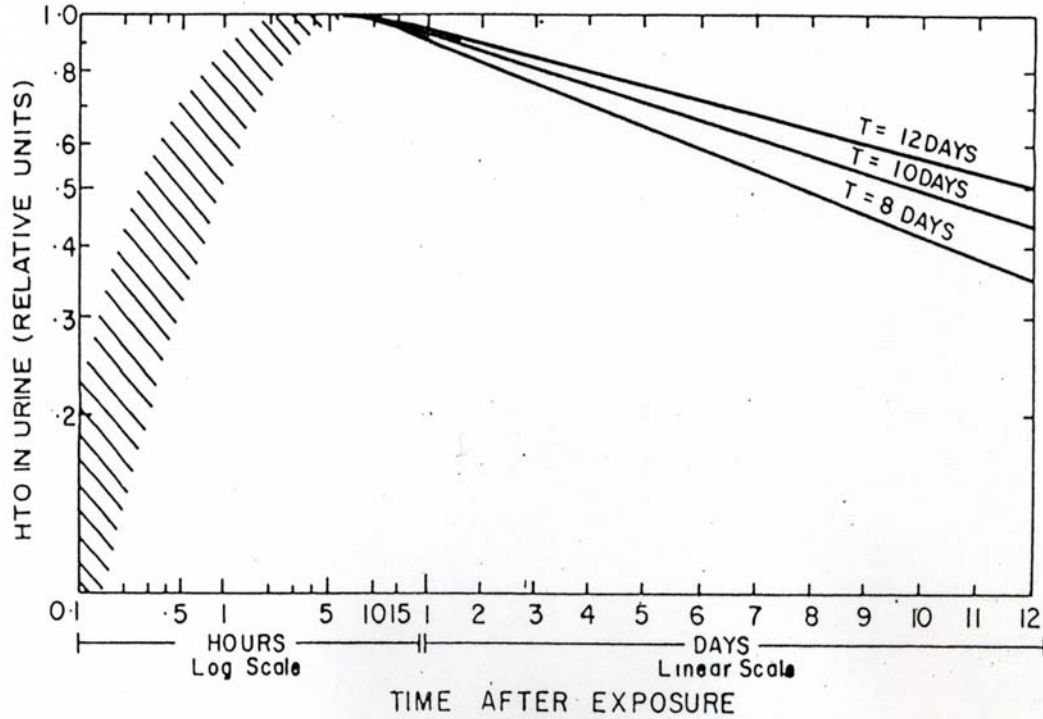


Fig. 4. Change of tritium concentration in urine after exposure at Canadian nuclear power plants[17]. 'T = 12, 10, 8 DAYS' indicates the biological half lives of tritium.

다. 삼중수소의 생물학적 효과와 RBE

1980~90년대 외국에서는 삼중수소로 인한 암(Cancer) 발생, 유전적 효과(Genetic effects), 염색체 이상(Chromosome aberrations), 세포사(Cell killing) 등에 대한 방사선 생물학적 효과에 관한 많은 연구가 이루어 졌다[19]. 이 연구결과에 의하면 증기형 삼중수소는 기준이 되는 엑스선이나 감마선에 비해 생물학적효과비(Relative biological effectiveness: RBE)가 2~3 정도로 더 크게 나타나고 있다. 또한 삼중수소가 유기분자와 결합하는 경우 RBE는 더욱 증가할 수 있는 것으로 알려져 있다. 이러한 삼중수소의 RBE에 대한 내용은 Straume와 Carsten의 리뷰논문인 Tritium radiobiology and relative biological effectiveness에서 체계적으로 다루고 있다[19].

한편 ICRP에서도 삼중수소의 RBE의 연구결과를 근거로 방사선가중계수(Radiation weighting factor)의 증가에 대해 검토한 바 있으나, 피폭방사선량 평가의 일관성과 불확실성을 고려하여 방사선가중계수의 상향 조정을 결정하지 않았다[20]. 한편 2008년 유엔방사선과학위원회(United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation: UNSCEAR)에서 방사선가중계수를 2로 올리자는 의견이 제시되기도 하였으나, 대부분 회원국의 반대로 채택되지 못한 바 있다[21]. 그럼에도 불구하고 일부 국가에서는 방사선피폭을 보상과 연계하는 경우 삼중수소의 방사선가중계수를 상향하여 적용하고 있다. 이러한 ICRP의 검토 동향과 UNSCEAR의 회의 동향 등을 종합적으로 고려해볼 때 잠재적이지만 영향이 큰 내용으로 판단된다. 특히 국내원전의 종사자와 일반인의 피폭방사

선량 평가에서 삼중수소가 차지하는 비율을 고려해볼 때 이에 대한 기초적인 연구가 필요하다고 판단된다.

라. 유기결합 삼중수소의 방사선량 평가

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 치환 가능한 삼중수소(Exchangeable bound tritium)라 부른다. 반면에 삼중수소가 인체의 탄소와 결합하면 쉽게 치환이 일어나지 않는 삼중수소 형태로 존재하는데, 이를 치환 불가능한 삼중수소(Nonexchangeable bound tritium) 또는 유기결합 삼중수소(Organically bound tritium: OBT)라 부른다[22]. 이러한 유기결합 삼중수소는 인체 내에서 오랫동안 체류하기 때문에 존재하는 비율은 극히 낮으나, 방사선피폭에 미치는 영향은 상대적으로 크다 할 수 있다. 이러한 점을 고려하여 ICRP에서는 OBT의 선량환산인자를 HTO 보다 2배 이상 큰 4.1×10^{-11} Sv Bq⁻¹로 제시하고 있다[23].

인체 내에서 유기결합 삼중수소는 인체의 효소 분해과정을 거쳐 신체 외부로 배설된다[22]. 현재의 인체대사모델에서는 40일의 생물학적 반감기를 갖는 OBT를 고려하고 있다. 이에 따라 ICRP에서는 삼중수소의 체내 섭취에 따른 방사선피폭평가에서는 일정 비율의 OBT 기여를 기본적으로 고려하고 있다[15]. 이러한 점은 국제원자력기구(IAEA)의 피폭방사선량평가 지침이나 국내원전의 삼중수소 피폭방사선량평가 절차에 그대로 반영되었다 [8,24,25].

Robin과 Johnson의 연구결과에 의하면 OBT는 HT에 의해 오염된 표면과 접촉으로 인한 피부흡착의 과정, 음식물 섭취 과정, 유기분자에 의한 과정 등 복잡한 경로를 거쳐 생성되거나, 체내로 유입되는 것으로 결론내리고 있다[22]. 이러한 OBT는 체내에서 수십일(21~76일) 또는 수백일(280~550일) 체류하는 것으로 알려져 있다. 이러한 OBT의 피폭방사선량평가에서의 중요성을 고려하여 ICRP Committee 2의 Task group 21 INDOS에서는 수백일 반감기를 가진 OBT를 선량평가에서 고려하는 방안을 검토하는 중으로 알려져 있다[26]. 그러나 이 경우 그 양이 상당히 낮아 피폭방사선량평가에 미치는 영향은 미미한 것으로 판단되고 있다.

마. 다른 형태 삼중수소에 의한 피폭방사선량평가와 배출관리

원전에서 삼중수소의 주된 화학형은 증기형 삼중수소

이다. 이외에 삼중수소제거시설이나 삼중수소저장시설에서는 HTO 외에 원소형 삼중수소가 추가로 발생되고 있다[1]. 따라서 원소형 삼중수소에 의한 원전종사자의 내부 피폭 선량평가에 의한 인체대사모델을 새로이 정립할 필요가 있다. 원소형 삼중수소에 의한 내부피폭에 대해 1990년의 ICRP-60 권고 이전에는 HT로 인한 폐선량을 별도로 고려하였으나, 이제는 HTO 선량에 포함하여 평가하고 있다[23]. 이러한 점은 Robin과 Johnson이 제시한 원소형 삼중수소의 인체대사모델에서도 그대로 확인되고 있다[22]. 즉, HT 대사모델은 증기형 삼중수소의 인체대사모델에 비해 HT가 폐로 섭취(Intake)되어 혈액으로 흡수(Uptake)되는 과정이 추가 구성되어 있다. 그 외 인체대사모델의 격자의 구성이나 각종 인자의 값은 증기형 삼중수소의 인체대사모델 값과 동일하다. 이를 그림 5에 상세히 나타내었다[22].

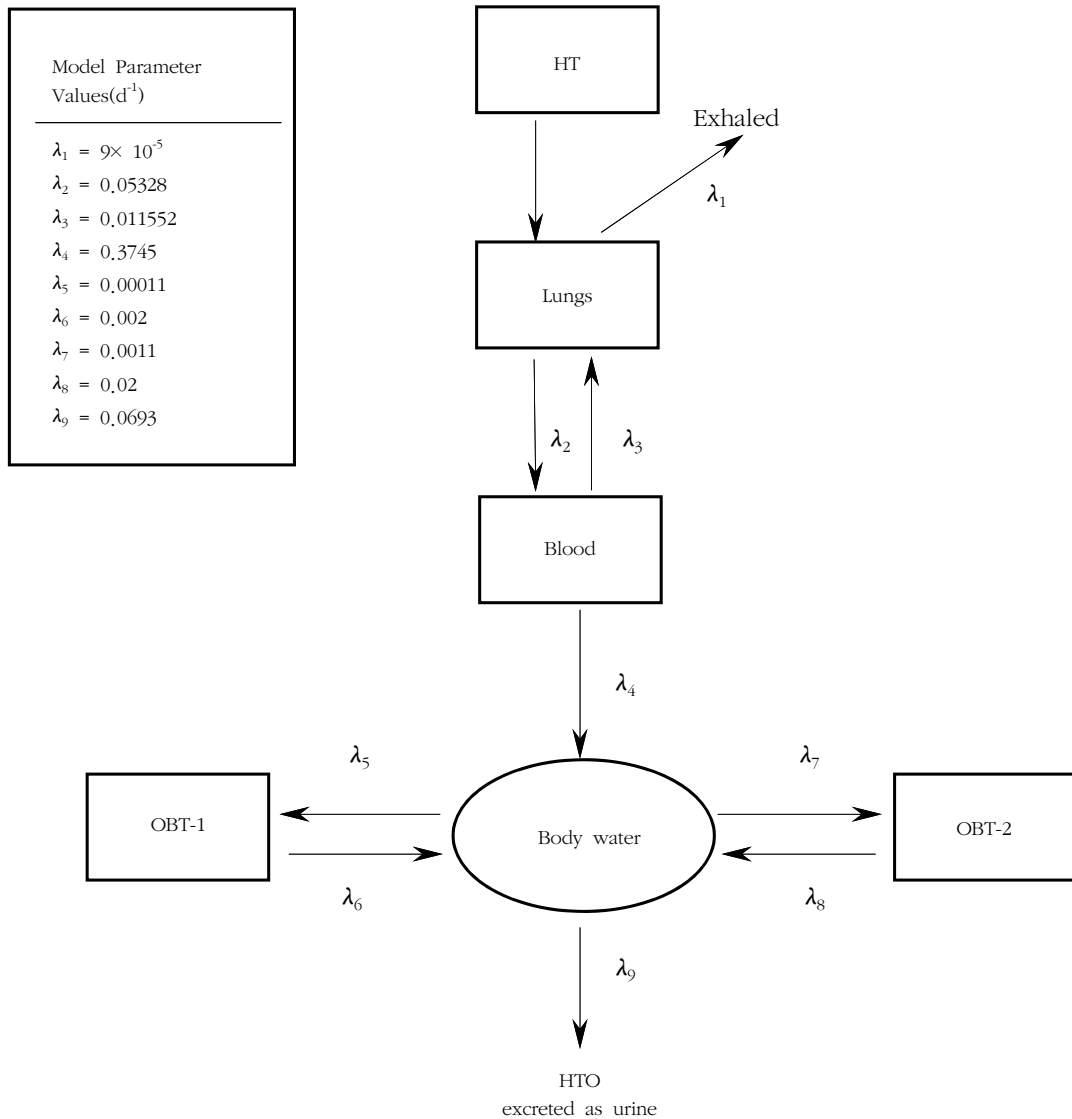


Fig. 5. Elemental tritium metabolism[22].

이외에 드물게 삼중수소를 저장, 가공, 재처리하는 시설에서는 삼중수소화 금속먼지(Tritiated metal dust)나 금속삼중수소화물(Metal tritide) 등이 발생할 수 있는데, 이들은 체내에서 HTO에 비해 보다 오래 체류하고 입자형태로 체내로 섭취되는 특성이 있다[2,26]. 이러한 물질의 섭취에 따른 피폭평가 방법은 아직도 명확히 정립되어 있지 않은 실정이다. 이러한 내용에 대해서는 추가적인 연구가 필요하다고 판단된다.

한편 중수로원전은 방사성유출물을 연속 배출하는 설계와 운전 개념을 채택하고 있어, 방사성유출물관리가 더욱 중요하다. 이에 따라 중수로원전에서 각 방사성핵종별로 정하는 월간 또는 연간 배출할 수 있는 방사성유출물의 배출총량을 유도배출한계(Derived release limits: DRLs)라고 정의한다[27]. 이러한 방사성핵종별로 설정된 유도배출한계는 일반인에 대한 법적 선량한도에 이르게 할 수 있는 단일 방사성핵종에 대한 연간 최대 배출량을 의미한다. 그런데 원전에서 배출되는 방사성핵종은 혼합핵종이므로, 다수 혼합 방사성핵종의 동시 배출에 따른 일반인 선량한도를 초과하지 않도록, 각 방사성핵종별로 유도배출한계의 1~5% 범위에서 별도로 운전 목표치(Operating targets)나 월간 또는 연간 목표배출량을 설정하여 운영하고 있다[27]. 이러한 중수로원전의 유도배출한계 설정과 운영은 연속배출 등을 고려한 중수로원전 고유의 특성으로, 보다 엄격한 방사성유출물의 관리를 위한 조치로 여겨진다. 한편 삼중수소제거설비는 월성원전의 추가시설로 인허가를 받았기 때문에, 삼중수소제거설비에서 주로 발생하는 원소형삼중수소의 유도배출한계에 대해 월성원전 최종안전분석보고서 등에서는 유도배출한계를 별도로 정하고 있지 않은 실정이다[1,28]. 따라서 이러한 원소형 삼중수소의 유도배출한계에 대해 국외 기술동향을 참조하고, 국내 인허가 기준에 따라 정할 필요가 있다고 판단된다.

4. 맺는 말

국내원전 종사자와 원전주변에 거주하는 일반인에 대한 피폭방사선량평가 측면에서 삼중수소는 중요한 방사성핵종으로 철저한 관리가 요구된다. 이런 관점에서 삼중수소에 대한 피폭방사선량평가와 관련된 생물학적 반감기, 뇨시료 제출시점, RBE, 유기결합 삼중수소 및 다른 형태의 삼중수소에 대한 선량평가 등에 대한 현황과 이슈 등 연구개발 동향을 정리하였다. 이러한 내용은 삼중수소에 관심을 갖고 있는 연구자에게 도움을 줄 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 한국수력원자력(주)의 전력사 공동 중장기 연구개발 사업에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

1. Korea Hydro and Nuclear Power Co., Ltd (KHNP). Final Safety Analysis Report for the Wolsung Nuclear Power Plants Unit 3 and 4. 2000.
2. 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.
3. 한국수력원자력(주). 원자력발전소 주변 환경방사능 조사 및 평가보고서. 2006-2009.
4. 한국수력원자력(주). 방사선관리연보. 2006-2009.
5. 한국수력원자력(주). 원자력발전소 표준 기술행정 절차서-내부피폭 방사선량 측정 및 평가. 표준기행 방사선-06. 2008.
6. 한국수력원자력(주) 월성 제1발전소. 종사자 피폭선량 관리절차서(Rev.7). 방0-60105. 2006.
7. 한국수력원자력(주) 월성 제2발전소. 액체섬광계수기 운영. 방사-12(Rev.6). 2007.
8. International Atomic Energy Agency (IAEA). Methods for Assessing Occupational Radiation Doses Due to Intakes of Radionuclides. Safety Report Series No. 37. 2004.
9. 김희근, 공태영. 전신계측기를 이용한 원전종사자의 ^{131}I 내부방사능 측정경험 및 개선방안에 대한 연구. Journal of Radiation Protection 2009;34(3): 121-128.
10. 한국수력원자력(주). 원자력발전소 주변 주민선량계 산지침서. 2006.
11. 한국원자력안전기술원. 방사선/폐기물 분야 규제지침(안) 개발. KINS/RR-733, 2009.
12. Osborne RV. Absorption of Tritiated Water Vapour by People. Health Physics. 1966;12:1527-1537.
13. 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.
14. Johnson JR. Estimation, Recording, and Reporting of Whole Body Doses from Tritium Oxide Exposure at Chalk River Nuclear Laboratories (CRNL). AECL-5507, CRNL, 1976.
15. Johnson JR. The Estimation of the Effective Dose Equivalent from Tritiated Water Exposures Using Tritium Concentration in Urine. Radiation Protection Dosimetry 1982;2:245-247.
16. 김희근, 공태영. 중수로원전 종사자의 삼중수소 체내 섭취에 따른 인체대사모델과 유효반감기 분석. Journal of Radiation Protection 2009;34(2):87-94.
17. Bush, WR. Assessing and Controlling the Hazards from the Tritiated Water. AECL-4150, 1972

18. 김희근, 공태영, 정우태, 김석태. 중수로원전 방사선 작업종사자의 공기중 삼중수소 섭취후 뇨시료제출시간이 체내 삼중수소 농도에 미치는 영향 분석. *Journal of Radiation Protection* 2009;34(4): 184-189.
19. Straume T, Carsten AL. Tritium Radiobiology and Relative Biological Effectiveness. *Health Physics* 1993;65(6)657- 672.
20. ICRP Task Group 37 Report. Relative Biological Effectiveness(RBE), Radiation Weighting Factor (W_R), and Quality Factor(Q). Draft December 02 for Review.
21. 한국원자력안전기술원. 우리나라 UNSCEAR 회원국 가입활동과 국가대표 전문가 역할수행 해외파견보고서. KINS/DR-1924. 2008.
22. Robin L, Johnson JR. Metabolism and Dosimetry of Tritium. *Health Physics* 1993;65(6)628-647.
23. International Commission on Radiological Protection. ICRP 68 : Dose Coefficients for Intakes of Radionuclides by Workers. Pergamon Press, 1994.
24. International Atomic Energy Agency (IAEA). Safe Handling of Tritium. Technical Report Series No. 324, IAEA, 1991.
25. Canadian Nuclear Safety Commission (CNSC). Radiobioassay and Dose Assessment for Intakes of Tritium. RSP-0182B. CNSC. 2005.
26. Personal Communication with Dave Whillans of Ontario Power Generation (OPG). Tritium Compound and Dosimetry. 2010.
27. 김희근, 공태영, 정우태, 김석태. 중수로원전 방사성 유출물 관리와 유도배출한계 설정방법에 대한 고찰. *Journal of Radiation Protection* 2009;35(4): 172-177.
28. 한수원(주). 월성원전 삼중수소제거설비 안전성분석 보고서. 2007

Trends and Issues in Metabolism and Dosimetry for Tritium Intake

Hee Geun Kim, Tae Young Kong, and Woo Tae Jeong
KHNP NETEC

Abstract - Tritium is the one of the most important radionuclide for workers in nuclear power plants (NPPs) and the public, from the dosimetric point of view. Humans are likely to have internal radiation exposure by tritium inhalation. Radiation exposure by tritium accounts for approximately 7% and 60~90% of the total radiation exposure of NPP workers and the public during normal operation, respectively. Thus, many researches have been conducted to estimate the internal dose by tritium precisely in the world. In terms of tritium dosimetry, this paper provides the current status of research for tritium metabolism and dosimetry.

Keyword : Tritium, Human metabolism for tritium, Internal dosimetry, Nuclear power plants