

# 원전에서 발생하는 주요 방사성핵종들이 방사선작업종사자와 원전 주변주민의 피폭방사선량 평가에 미치는 영향

김희근, 공태영, 정우태, 김석태  
한전 전력연구원

2010년 1월 12일 접수 / 2010년 2월 11일 1차수정 / 2010년 3월 1일 2차수정 / 2010년 3월 12일 채택

원전 일차계통은 복잡한 수질환경으로 방사화생성물과 부식생성물 등 다양한 방사성핵종이 생성되고 있다. 이 방사성핵종 중에서 원전종사자 피폭방사선량평가와 방사성유출물관리 측면에서 중요한 핵종으로는  $^3\text{H}$ ,  $^{14}\text{C}$ ,  $^{58}\text{Co}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{131}\text{I}$ 를 들 수 있다. 본 논문은 원전 방사선작업종사자와 원전 주변주민의 피폭방사선량에 기여가 큰 방사성핵종에 대해 살펴보고, 이들 핵종에 의한 선량평가 과정을 소개하였다. 특히 국내 원전에서 발생하였던  $^{131}\text{I}$  내부피폭사건과 일차계통 냉각수의 탈염수 오염사건 등을 포함한 원전의 운영과정에서 일어났던 종사자와 원전주변주민에 대한 피폭방사선량 평가 사례를 제시하였다. 또한 최근 이슈로 떠오른 삼중수소와  $^{14}\text{C}$ 의 선량평가에 대한 잠재적인 현안 등도 간단히 기술하였다.

중심어 : 방사성핵종, 피폭방사선량평가, 원전종사자 및 주변주민, 방사성유출물, 원자력발전소, 삼중수소, Carbon-14

## 1. 서론

원자력발전소에서는 다양한 방사성핵종이 생성되고, 그중에 일부는 작업공간이나 환경으로 방출되고 있다. 이에 따라 정상운전과 계획예방정비기간 중에 수행되는 운전(Operation)이나 보수(Maintenance) 과정에서 방사선작업종사자는 방사선피폭을 받을 수 있다. 이러한 방사선피폭은 일차계통의 펌프나 증기발생기에 부착되어 있는 방사성핵종으로부터 발생된 방사선에 의한 외부피폭이나 작업공간의 공기 중에 부유하는 방사성물질의 체내 섭취에 의한 내부피폭 등으로 나누어진다. 한편 계통에서 누설된 방사성핵종은 방사성폐기물처리계통 등을 거쳐 대부분 제거되거나 일부는 환경으로 배출되고 있다. 이에 따라 원전 주변에 거주하는 주민은 이러한 방사성유출물에 의한 외부 방사선피폭이나 방사성물질이 식물이나 동물로 전이되어 오염된 음식을 섭취하는 경우 내부피폭이 발생할 수 있다.

일반적으로 원전종사자의 경우 원자로 계통의 운전이나 기기나 장비의 보수 작업과정에서 방사선 피폭을 받게 된다. 이 경우 대부분은 기기나 장비에 부착되어 있는 방사성핵종에서 발생하는 방사선에 의한 외부피폭이 주류를 이루나, 극히 일부는 공기 중으로 부유된 방사성핵종의 체내섭취에 따른 내부피폭이 발생하기도 한다.

원전종사자의 피폭방사선량 평가는 다양한 방사성핵종으로부터 여러 장소에서 발생하는 넓은 범위의 에너지를 가진 방사선에 의한 피폭방사선량을 평가하여야하기 때문에 선량계나 측정장비를 이용한 개인중심으로 평가를 수행한다. 이에 비해 방사성유출물을 기본으로 하는 원전주변주민 선량평가의 경우 원전에서 배출된 방사성핵종과 방출량을 정확히 알고 있기 때문에 이들 핵종의 피폭경로를 고려한 선원중심의 평가를 수행한다. 한편 원전주변주민의 피폭은 원전종사자의 방사선피폭과는 다르게 방사성물질에 의해 오염된 식물섭취와 같은 내부피폭이 주류를 이룬다[1].

원전에서 발생하는 방사성핵종은 많지만 원전종사자나 원전주변주민에게 주로 방사선피폭을 일으키는 주요 핵종은 그리 많지 않다. 이 논문은 방사선작업종사자와 원전 주변주민의 피폭방사선량에 기여가 큰 방사성핵종에 대해 살펴보고, 이들 핵종에 의한 선량평가 과정을 소개하였다. 특히 국내원전의 운영과정에서 종사자와 원전주변주민에 대한 피폭방사선량 평가 사례를 소개하였다. 여기에는 국내 원전에서 발생하였던 핵분열생성핵종인  $^{131}\text{I}$ 에 의한 종사자의 내부피폭, 일차계통 냉각수의 탈염수 계통으로 누설, 중수로원전에서의 삼중수소 누설 내용 등을 포함하고 있다. 특히 ICRP(International Commission on Radiological Protection), NRC(Nuclear Regulatory Commission) 및 Health Canada 등에서 최근 이슈로 떠오른 삼중수소와  $^{14}\text{C}$ 의 피폭방사선량 평가에 대한 잠재적인 현안 등도 간략히 기술하였다.

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

## 2. 피폭방사선량 평가 기준

피폭방사선량 평가 기준은 국제방사선방호위원회(ICRP)의 방사선방호에 대한 권고와 국제원자력기구(International Atomic Energy Agency: IAEA)의 기준 등에 잘 제시되어 있다. ICRP의 대표적인 방사선방호에 관한 기준은 1990년의 ICRP-60 권고와 2007년의 ICRP-103 권고에 상세히 규정하고 있다[2,3]. 이외에 외부피폭에 대한 방사선방호에 대한 환산과정(Conversion)을 규정한 ICRP-74, 작업종사자의 내부피폭감시에 관한 감시지침인 ICRP-78 등도 자주 이용되는 기준이라 할 수 있다[4,5]. 한편 1996년에 발간된 IAEA의 방사선방호에 관한 기본안전기준(Basic Safety Standards) BSS-96 등도 실무에서 유용하게 이용되는 기준이다[6]. 이외에 1999년에 발간된 방사성물질의 섭취에 따른 내부피폭 방사선량 평가지침과 방사선에 대한 외부피폭 방사선량 평가지침을 들 수 있다[7,8]. 한편 IAEA는 ICRP-103 등을 근거로 1996년에 개정된 방사선방호에 관한 기본안전기준을 개정하는 작업을 진행 중에 있다[9].

ICRP-60에서는 방사선방호 목적의 단위(Protection quantities)로 유효선량(Effective dose)을 채택하였다[2-4]. 이는 1977년 ICRP-26에서 제시된 유효선량당량(Effective dose equivalent)을 발전시킨 단위이다[3]. 이 양은 방사선계측기 등을 이용한 직접 측정이 불가능하기 때문에 실용량(Operational quantities)을 이용하여 측정한다. 따라서 국제방사선도량형위원회(International Commission on Radiation Units and Measurements: ICRU)에서는 외부방사선피폭에 대해 개인선량계를 이용하여 측정되는 Hp(10)이라는 개인선량당량(Personal dose equivalent)을 이용하여 유효선량을 측정하도록 규정하고 있다[4]. 미국의 국립표준기술협회(American National Standards Institute: ANSI)의 ANSI N13.11에서도 동일하게 Hp(10)을 측정하여 이를 유효선량으로 평가하도록 규정하고 있다[10]. 따라서 개인에 대한 방사선감시에서는 Hp(10)은 모든 조건에서 유효선량을 적절히 평가하거나 또는 보수적인 평가치를 제공할 수 있어야 한다고 판단된다. 특히 ICRP-74 보고서에서는 유효선량당량( $H_E$ ), 유효선량( $E$ ), 개인선량당량(Hp(10))의 상관관계를 자세히 제시하고 있다[3,4]. 여기에 의하면 고에너지 광자나 전자에 대해  $E/H_E$ ,  $E/Hp(10)$ 이 1.0에 접근하고 있다. 이러한 내용을 통해 유효선량당량, 유효선량, 개인선량당량이 개념에서 차이는 있으나 일반적인 방사선조건과 환경에서 Hp(10)을 이용하여 별 차이 없이 유효선량을 평가할 수 있음을 추론할 수 있다[4].

한편 국내 원자력법령에 의하면 원자력관계사업자는 방사선장해를 방지하기 위해 방사선량 및 방사성오염의 측정, 건강진단, 피폭관리 및 방사성물질의 방출량 및 피폭방사선량을 가능한 합리적으로 낮게 유지하기 위해 필요한 조치를 취하도록 규정하고 있다[11]. 특히 원자력법의 하위규정인 고시에서는 개인선량의 측정과 관독에 관해 자세히 기술하고 있다[12]. 그 대표적인 기술기준으로

교육과학기술부고시 제2008-48호로서 관독업무 등록기준 및 검사에 관한 규정 고시, 제2008-49호로서 외부피폭선량 관독에 관한 품질보증계획서 작성 기준 고시, 제2008-50호로서 개인 피폭방사선량의 평가 및 관리에 관한 규정 고시, 제2008-51호로서 내부피폭방사선량의 측정 및 산출에 관한 규정 고시 등을 들 수 있다. 이외에 제2008-31호로서 방사선방호 등에 관한 기준 고시 등을 들 수 있다.

## 3. 주요 방사성핵종과 에너지

국내에서 운전되고 있는 가압경수로 원전을 대상으로 휴대용 고성능반도체 다중과고분석기(Portable HPGe spectrometer)를 이용하여 감마 방사선장을 측정하였다[13]. 그 결과 감마선의 평균에너지 값의 분포는 가동정지 중인 격납건물내에서는 440-780 keV, 가동 중인 보조 건물내에서는 280-760 keV로 나타났다. 한편 가동 중인 원전의 격납건물내에서는 Operation deck을 중심으로 5개 지점에 대해 BMSS(Bonner Multiple Spectrometry System)를 이용하여 중성자 선장을 측정하였는데, 평균 에너지 분포는 20-210 keV로 나타났다. 한편 베타방사선 오염원을 규명하기 위해 가동정지 상태의 원전의 격납건물 내부와 보조건물 내부의 다수 지점에 대해 스메어(Smear) 방법에 의한 시료를 채집하여 표면장벽형 Si 반도체 검출기를 이용하여 에너지 스펙트럼을 측정한 결과 부식생성물인  $^{60}Co$ 에 의한 베타에너지가 지배적인 것으로 나타났다.

원전의 대표적인 고피폭 작업인 증기발생기 작업의 경우  $^{58}Co$ 과  $^{60}Co$ 이 방사선량율에 95% 이상 기여하는 것으로 나타났다[14,15]. 특히 방사선량의 구배(Dose gradients)는 수실 위에 있는 U-tubes에서 위에서 아래로 형성되며, 방사선량율은 최소 수  $mSv h^{-1}$ 에서 수십  $mSv h^{-1}$  이상으로 높게 나타났다[16]. 그림 1에 증기발생기 수실의 크기와 작업개요를 나타내었다[17]. 이러한 증

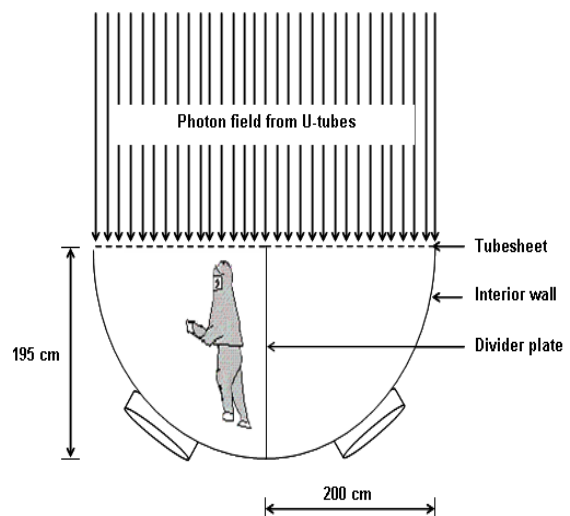


Fig. 1. Maintenance on the steam generator in a nuclear power plant.

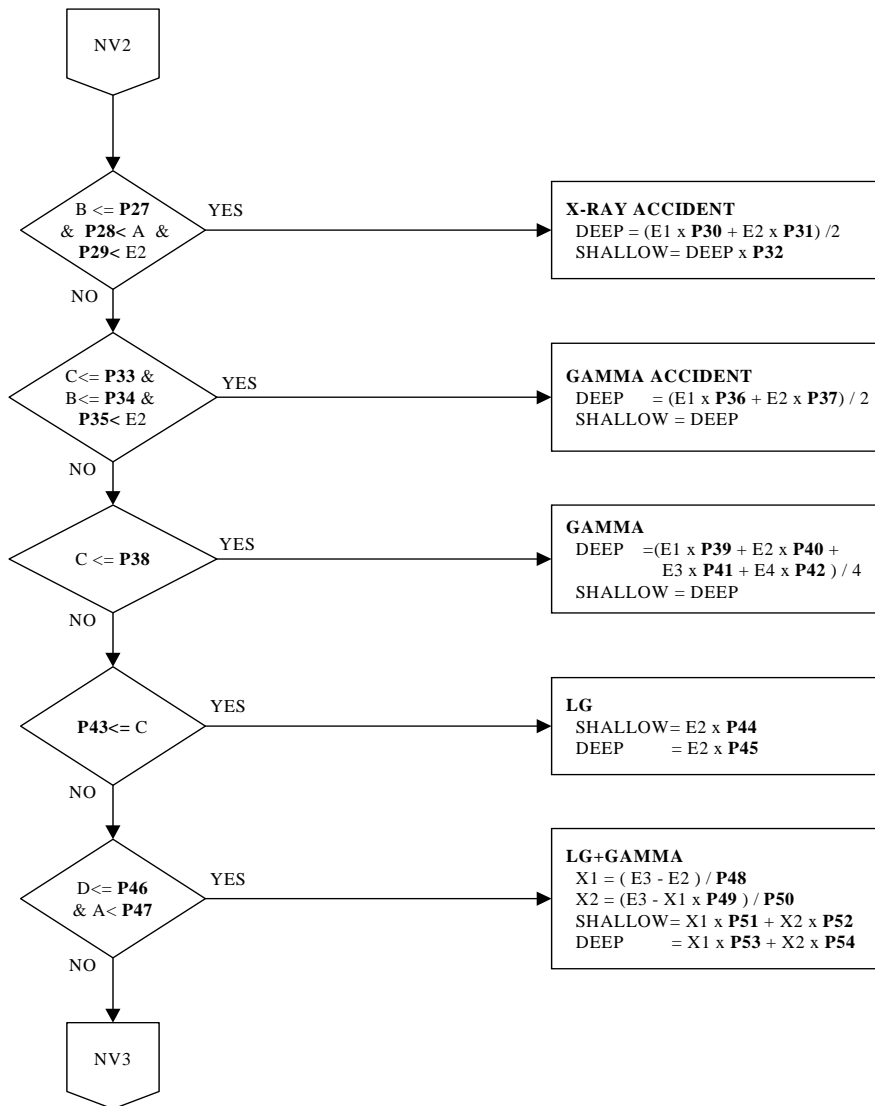
**Table 1.** TLD Readouts of Radiation Workers for the Steam Generator.

Name	Card ID	Zone 1 (gU)	Zone 2 (gU)	Zone 3 (gU)	Zone 4 (gU)
A	21262	103.0	102.6	100.6	98.0
B	19749	251.6	246.2	243.7	236.5
C	18658	131.7	134.0	132.9	128.8
D	21063	164.0	159.8	160.7	156.2
E	22488	154.9	154.3	148.8	144.2
F	20732	128.2	126.3	123.3	122.3

기발생기 보수작업에서 가슴과 등에 두개의 열형광선량계(Thermoluminescent dosimeter: TLD)를 패용한 말단 선량계 현장시험이 국내 원전에서 수행되었다. 이 현장 시험 결과의 TLD 4개 소자의 판독값을 분석하고 TLD 선량평가 알고리즘을 이용하여 해석한 결과, 4개 소자의

값이 각각 유사하여 입사방사선장이 고에너지 광자로 판단되었다[18]. 표 1에 Harshaw TLD를 이용한 대표적인 증기발생기 정비작업자의 TLD 판독 값을 나타내었다. 한편 국내 원전의 증기발생기 정비작업과 중수로원전의 압력관 교체작업 등 또 다른 고피폭작업에서도 손목에 TLD를 패용한 말단선량계 현장시험 결과, TLD 4개소자의 판독값이 유사하게 나타나 입사방사선장이 고에너지 광자로 판단되었다[19,20]. 그림 2에 Panasonic TLD를 이용한 현장시험 과정에서 감마방사선장 분석을 위해 이용되었던 TLD 선량평가 알고리즘 중에서 감마 Branch를 소개하였다.

한편 중수로원전에서는 상기와 같은 외부방사선 피폭 외에 삼중수소에 의한 저에너지 베타 방사성물질에 의한 내부방사선 피폭이 전체 피폭방사선량의 20-40%를 점유하는 것으로 나타났다[21]. 이외에 내부피폭 발생 가능성은 낮으나 잠재적인 핵종으로 <sup>14</sup>C가 중요한 핵종으로 조사되었다[22]. 그림 3에 중수로원전에서 내부피폭을 일으



**Fig. 2.** Gamma branch of dose calculation algorithm. The details of each parameter or equation in algorithm are in reference 23 or "User's manual for the Panasonic UD-706 and UD-716 TLD Readers" of Panasonic Industrial Company.

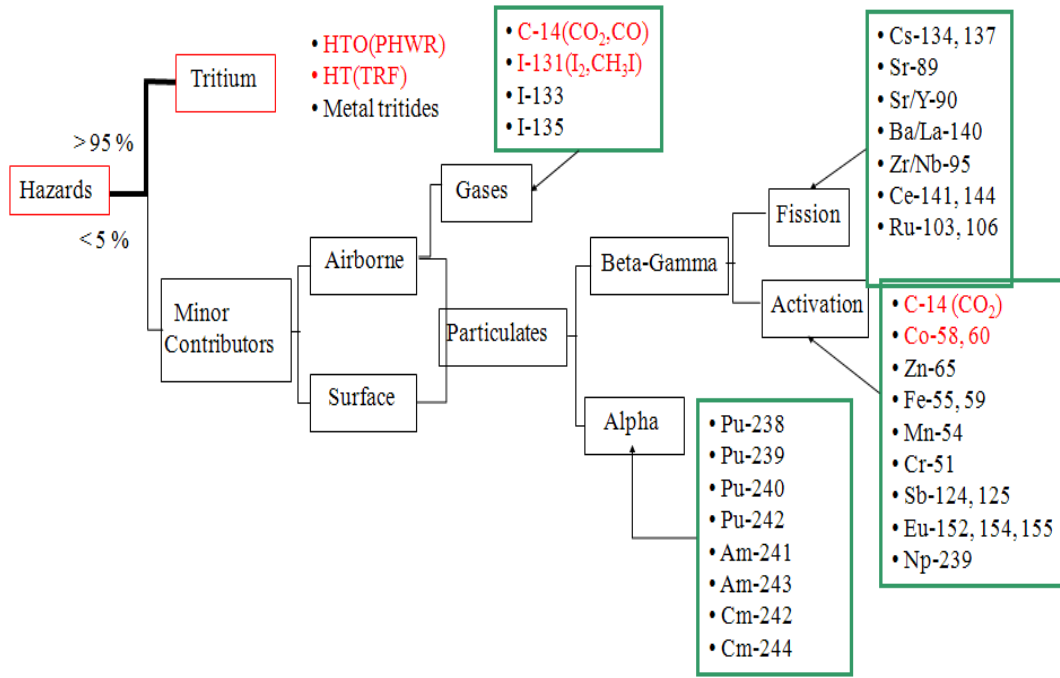


Fig. 3. Dominant contributors to radiation exposure in a pressurized heavy water reactor and its risk.

키는 주요 방사성핵종의 발생현황을 정리하였다.

#### 4. 원전종사자 선량평가

원전종사자에 대한 피폭방사선량은 앞서 언급한 바와 같이 종사자 별로 지급한 선량계나 휴대용 계측기를 이용한 개인중심의 평가로 이루어진다. 종사자는 방사선관리구역에 출입하기 위해 개인선량계인 TLD를 착용하며, 월단위로 TLD를 판독하고 개인선량당량인 Hp(10) 평가하여 유효선량으로 보고하고 있다. 이 경우 전자식 보조선량계인 ADR(Auto Dosimetric Reader)를 동시에 착용하여 방사선작업과정 중에 자신이 받은 선량을 점검하도록 규정하고 있다. 한편 증기발생기나 가압기와 같이 신체 특정부위 간에 선량율이 30% 이상 차이가 나고, 1 mSv<sup>-1</sup> 이상인 고방사선구역에서 단일작업에서 2 mSv 이상 피폭이 예상되는 경우 가슴과 등 부위에 복수선량계를 착용하여 유효선량을 평가하고 있다[18,23]. 이외에 운전 중인 원전의 격납건물을 출입함에 따라 중성자 피폭이 예상될 때는 추가로 중성자 측정기(Neutron survey meter)나 중성자 측정용 전자식보조선량계를 착용하고 있다. 그림 4는 원전종사자의 개략적인 방사선량 평가체계를 보여주고 있다[24].

원전종사자의 외부피폭 방사선량은 원전의 형태나 운전 연수에 따라 약간씩 다르기는 하나 대략 80% 정도가 계획예방정비기간 중에 발생한다[21]. 따라서 원전종사자의 피폭을 줄이기 위해서는 계획예방정비기간의 단축이 요구되고 있고, 원전에서는 방사선피폭을 줄이기 위한 다양한 계획을 수립하여 운영 중에 있다. 이러한 방사선피폭원은 고에너지 감마선을 방출하는 <sup>58</sup>Co과 <sup>60</sup>Co

에 의한 방사선피폭이 대부분이다[14,15]. 한편 원전종사자의 피폭방사선량을 줄이기 위해 1991년 이후 고강도의 원전방사선량 저감화 계획을 시행중에 있다[25].

한편 방사선작업 과정에서 방사성물질의 체내 섭취가 예상될 때는 전신계측기(Whole Body Counter: WBC)를 이용하여 방사성물질의 내부방사능오염 검사를 실시하고 내부피폭 방사선량을 평가하고 있다[26]. 이 과정을 그림 5에 나타내었다. 이러한 전신계측은 모든 종사자에 대해 1년에 한번 확인목적으로 감시를 실시하고 있다. 또한 계획예방정비의 시작과 종료시점에 대부분 종사자에 대해 전신계측을 실시한다. 또한 증기발생기 또는 가압기와 같이 고피폭 또는 방사성물질의 내부섭취가 예상되는 작업을 수행한 경우 수시로 특별감시(Special monitoring)를 실시한다. 이러한 전신계측기는 NaI 검출기 형태의 대형 검출기로서 빠른 시간내에 종사자의 내부피폭 방사능을 측정할 수 있는 특징이 있다. 원전종사자의 내부방사능계측에 사용되는 전신계측기의 특성은 다른 논문에서 자세하게 기술되어 있다[27].

이러한 내부피폭 방사성핵종은 일반적인 환경에서는 대부분 <sup>58</sup>Co과 <sup>60</sup>Co과 같은 부식생성물이 주류를 이룬다. 핵연료 손상과 같은 특별한 이벤트가 있는 경우 <sup>131</sup>I과 같은 핵분열생성물에 의한 내부피폭이 발생하기도 한다[27]. 특히 2002년 울진3호기 계획예방정비기간 중 발생한 <sup>131</sup>I에 의한 원전종사자의 내부방사능오염으로 인한 WBC를 이용한 전신계측, 공기중 <sup>131</sup>I 농도를 이용한 섭취량의 점검, KIDAC(KHNP's Internal Dosimetry Code) 내부피폭 선량평가 전산코드를 이용한 섭취량산정(Intake estimation)과 예탁유효선량(Committed effective dose) 평가 과정을 통해 내부피폭 선량평가 과정을 한단계 향상시키는 계기가 되었다. 이러한 내용은 2009년 대

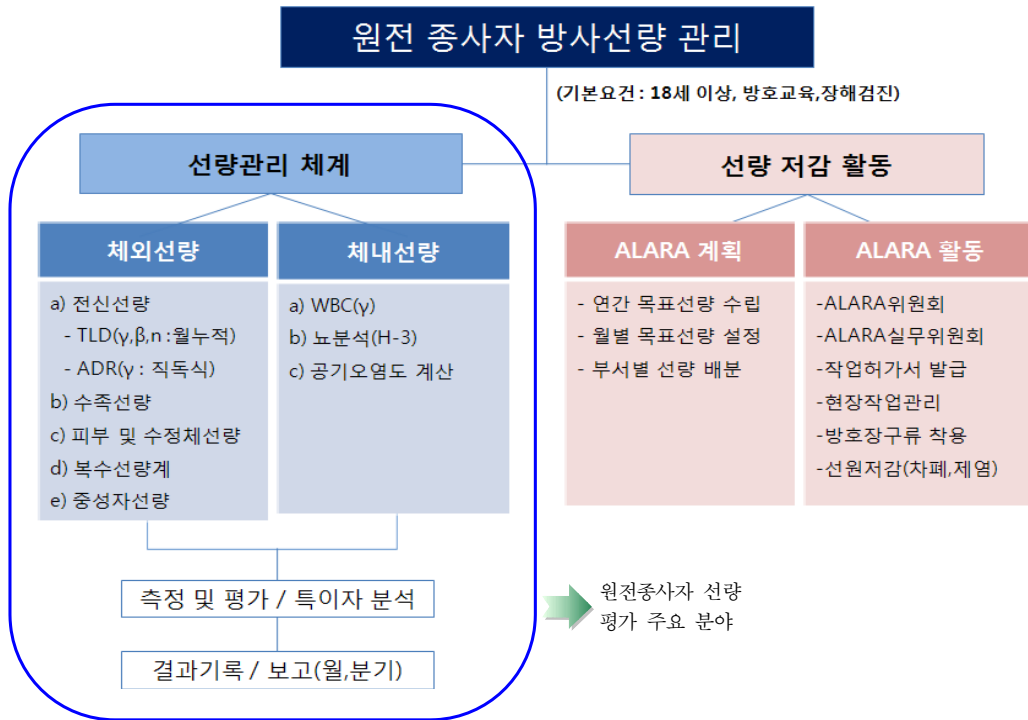


Fig. 4. Radiation management system for NPP workers (WBC: Whole Body Counter, ALARA: As Low As Reasonably Achievable).

한방사선방어학회지에 게재된 다른 논문에 자세히 기술되어 있다[27,28]

원전종사자의 내부방사능오염의 경우 실질적인 내부 피폭이라기보다는 신체 외부 표면에 부착된 외부오염이 대부분이었다. 이 경우 신체 제염을 실시하여 재측정을 수행하나 제염이 안 되는 경우 내부방사능오염으로 간주하여 내부피폭 방사선량으로 평가한다. 그러나 이 경우 방사성물질이 신체 표면에 위치하므로 선원과 검출기 거리가 짧아지고, 신체 내부에 위치하는 경우 신체에 의한 차폐가 이루어지나 외부오염인 경우 차폐없이 계속되므로 측정된 내부방사능은 매우 보수적으로 나타나게 된다. 이러한 점을 고려하여 WBC를 이용한 신체 내부와 외부방사능오염 측정 값의 비율을 이용하여 신체 외부와 내부오염을 구분하도록 내부방사능측정 체계를 개선한 전신계측방법을 원전에 적용 중에 있다[29].

중수로원전의 경우 감속재와 냉각재로 중수를 사용하고 있어 중성자의 방사화 과정에 의해 다량의 삼중수소가 생성되고 그 중에 일부는 방사선작업 공간의 공기중으로 누설되고 있다. 이에 따라 중수로원전에서는 삼중수소에 의한 내부피폭 방사능을 측정하기 위해 노시료를 15일 간격으로 제출하도록 규정하고 있다[30]. 이렇게 15일 간격으로 노시료를 제출함으로써, 외부피폭 방사선량 측정과 평가과정에서 요구되는 피폭방사선량 평가의 허용준위 0.5와 상호 조화를 이루도록 추구하고 있다 [31-33]. 한편 제출된 노시료는 형광체(Scintillator)와 섞어 혼합용액(Cocktail)을 제조하여 액체섬광계수기(Liquid scintillation counter: LSC)로 단위 방사능을 측정한다. 이 과정을 그림 5에서 나타내었다.

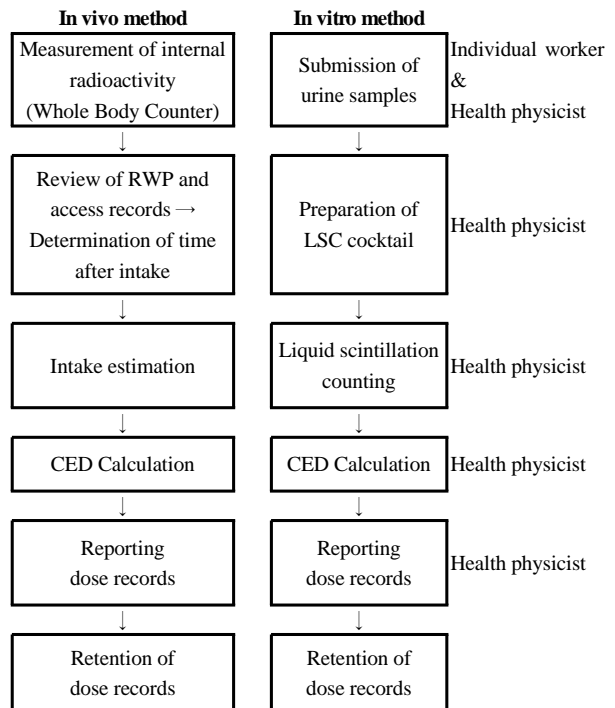


Fig. 5. Process of internal dose estimation for NPP workers (CED: Committed Effective Dose, LSC: Liquid Scintillation Counter).

이 방사능을 신체 전체의 방사능으로 환산하고 여기에 선량환산계수를 곱하여 삼중수소에 의한 내부피폭 방사선량을 산출하고 있다[30]. 한편 이렇게 산출된 내부피폭 방사선량은 외부피폭 방사선량과 합산하여 유효선량으로 관리된다. 한편 중수로원전의 잠재적인 내부방사능



오염 핵종인  $^{14}\text{C}$ 에 의한 내부방사능오염 가능성이 월성1호기 주기적안전성평가(Periodic Safety Review: PSR) 과정에서 제기되었다[34]. 이에 따라 중수로원전 종사자의 뇨시료중의  $^{14}\text{C}$  내부방사능오염을 측정하기위한 삼중수소와  $^{14}\text{C}$  동시측정방법을 개발하였고, 이를 방사선관리 실무에 적용 중에 있다[22]. 한편 개발된 방법을 적용하여 중수로원전 종사자의  $^{14}\text{C}$  내부피폭 가능성을 평가한 결과 내부오염 가능성은 없는 것으로 확인되었다[22].

한편 중수로원전 종사자는 방사선작업 종료 후에도 뇨시료를 제출하여 공기중 삼중수소의 섭취에 따른 내부피폭선량을 평가하고 있다. 이 경우 종사자가 제출한 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 수시간 이후 평형에 도달한다고 기술하고 있다[35]. 그런데 원전에서는 계획예방정비기간 동안 일시에 많은 작업이 진행되고 빈번한 종사자의 출입으로, 방사선작업 종료 후 제출하는 뇨시료를 섭취 후 평형에 도달하는 약 2시간 경과 이전에 제출하거나, 지연하여 제출하는 경우가 발생할 수 있다. 이러한 상황을 고려하여 방사선작업 종료 후 종사자가 제출하는 시간대별 뇨시료중의 삼중수소 농도를 측정하였고, 이를 근거로 체내 삼중수소의 농도에 대한 변화추이와 선량평가에 미치는 영향을 분석하였다. 그 결과 종사자의 뇨시료는 대부분 삼

중수소 섭취 후 2시간 정도에 신체 내에서 평형에 도달하는 것으로 확인되었다[35]. 그림 6에 중수로원전 종사자의 뇨시료 제출시간에 따른 농도변화를 나타내었다.

이러한 내부피폭 방사선량은 중수로원전 고피폭 예상 작업종사자의 삼중수소와  $^{14}\text{C}$ 의 내부방사능오염 가능성을 평가한 결과, 원전종사자의 내부피폭이 전체 피폭에서 차지하는 비율은 중수로원전에서 발생하는 삼중수소를 제외하면 1% 미만으로 나타나고 있다. 중수로원전의 삼중수소에 의한 내부피폭선량은 연도별로 계획예방정비의 수준에 따라 다르기는 하나 대략 20-40% 수준으로 나타나고 있다. 한편 이러한 점을 종합적으로 고려하면 국내 원전에서 내부피폭방사선량은 전체 피폭방사선량의 약 7% 수준으로 집계되고 있다[21].

### 5. 방사성유출물관리와 원전주변주민의 선량평가

원전에서는 다양한 방사성핵종이 생성되고, 그중에 일부는 계통에서 작업공간으로 누설된다. 이렇게 누설된 핵종은 방사성폐기물처리계통이나 감쇄계통에서 제거되거나 일부는 배기굴뚝(Stack)의 방출감시 시스템을 통해 환경으로 배출되고 있다. 일반적인 기체 방사성물질 감시시스템은 방출유량을 적산하고 대표시료를 채집하여 방사능을 계측한다. 한편 액체 방사성폐기물의 경우 배출 가능한 농도인가를 판단하여 냉각수로 희석하여 바다로 흘려보낸다. 그림 7에 원전의 배기굴뚝에서 방출과정을 개략적으로 나타내었다. 이에 따라 원전 주변에 거주하는 주민은 이러한 방사성물질에 의한 직접적인 외부 방사선피폭이나 방사성물질이 식물이나 동물로 전이되어 오염된 음식을 원전주변주민이 섭취하는 경우 내부피폭이 발생한다. 따라서 원전의 방사성유출관리와 원전주변주민에 대한 선량평가로 바로 이어지게 된다. 이 경우 종사자 선량평가와는 다르게 배출된 방사성물질의 양을 정확히 알고 있는 경우로 개인중심의 측정과 평가보다는 확산과 복잡한 피폭경로를 고려한 선원중심의 평가가 주류를 이룬다[1].

원전주변주민에 대한 선량평가는  $^3\text{H}$ ,  $^{14}\text{C}$ ,  $^{133}\text{Xe}$ ,  $^{135}\text{Xe}$ ,  $^{41}\text{Ar}$ ,  $^{131}\text{I}$  등이 주요 방사성핵종이라 할 수 있다 [36]. 한편 방출된 핵종에 의한 피폭방사선량의 비율은  $^3\text{H}$ 와  $^{14}\text{C}$ 에 의한 저준위 방출핵종에 의한 오염된 음식물

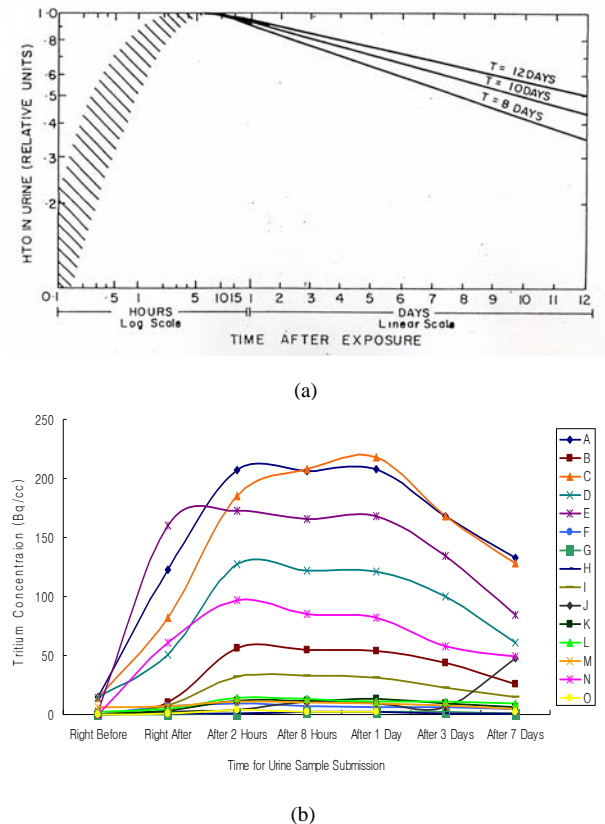


Fig. 6. Change of tritium concentration (based on each effective half-life) in urine after exposure at Canadian NPPs (a) and change of tritium concentration for radiation workers(A-O) at Korean Wolsong NPPs (b).

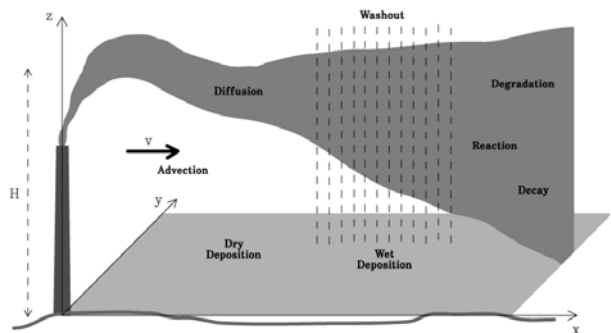


Fig. 7. Discharge process of radioactive effluents from NPP stacks.

섭취로부터 일어나는 내부피폭이 전체 피폭방사선량의 80% 이상으로 대부분을 차지하고 있다[36]. 그런데 2002년 말 울진3호기 계획예방정비기간중에는 핵분열생성물인  $^{131}\text{I}$ 의 환경방출에 따라 원전주변주민의 피폭방사선량이 높게 나타나기도 하였다[27,28]. 한편 2004년 말 영광 5호기에서 발생한 일차냉각수의 탈염수계통으로 누설과 같이 특별한 이벤트가 있는 경우  $^{58}\text{Co}$ ,  $^{60}\text{Co}$  등 부식생성물에 의한 피폭방사선량이 높게 나타났다[37]. 원전주변주민에 대한 전체 피폭방사선량은 연간 부지별로 대략 6-8  $\mu\text{Sv}$  정도이며, 기체 방사성물질에 의한 피폭이 대부분이다. 액체 방사성물질에 의한 원전주변주민의 피폭은 전체 피폭방사선량의 5-10% 수준으로 나타나고 있다[36].

최근 원전 방사성유출물관리에서 관심을 끄는 것은 원전 지하로 삼중수소의 비계획누설(Unplanned release)을 들 수 있다. 2005년 미국 엑슬런(Exelon)사의 브레드우드(Braidwood) 원전에서는 순환수 블로우다운(Blow-down)계통에서 지하를 통해 소외로 삼중수소가 누설되어 큰 이슈를 일으키기도 하였다. 누설된 삼중수소 농도는 우려할 만큼 높은 수준은 아니었으나 비계획누설이 일어났다는 점을 중시하고 있다. 이에 따라 미국 NRC를 중심으로 상세한 조사와 방지대책을 시행중에 있다[38].

한편 원전 방사성유출물관리에서 잠재적인 방사성핵종의 하나가  $^{14}\text{C}$ 이다[39]. 이 핵종에 대해 미국에서 1970-80년대 Carbon-14의 방사선학적 위해를 인지하고 US EPA(Environmental Protection Agency)와 US NRC에서  $^{14}\text{C}$  감시의 필요성이 제기되었으나, 피폭방사선량 평가결과 규제요구 수준이 아닌 것으로 나타났다. 이 결과에 의하면 BWR(Boiling Water Reactor) 원전에서 Carbon-14 배출로 인해 원전주변주민이 받을 수 있는 최대 개인선량(Maximum individual dose)은  $0.0086 \text{ mSv}^{-1}$  ( $0.86 \text{ mrem}^{-1}$ )라고 평가하였다. 당시 이러한 평가결과를 반영하여 1970년대 Regulatory guide 1.21의 개정 과정에서  $^{14}\text{C}$ 가 감시항목에서 제외되었다. 이에 따라 당시 미국의 대부분 원전에서  $^{14}\text{C}$ 를 방사성유출물로서 감시하지 않았으며, 방출과 주민선량 평가를 연계시키지 않았다. 그런데 일부 원전에서는 1980년대  $^{14}\text{C}$  측정결과를 기반으로 주민선량 평가에 연계하고 있음을 확인하였다. 최근에 미국에서는  $^{14}\text{C}$ 의 감시 필요성을 다시 논의하기 시작하였으며, 그 결과 2009년에 발간된 USNRC의 방사성유출물 관리기준인 Regulatory guide 1.21 개정판에서 Carbon-14 감시에 대해 시설운영자의 자발적인 평가결과를 근거로 감시여부를 결정하도록 유도하고 있다. 이러한 조치에 따라 미국 원전에서는  $^{14}\text{C}$ 에 대한 감시여부를 결정하는데 필요한 기초조사가 원전과 관련기관을 중심으로 진행 중에 있다[39]. 따라서 국내 원전에서의  $^{14}\text{C}$  감시방안의 결정에 미국 원전의 감시 기술 동향을 면밀히 추적하여 반영할 필요가 있다고 판단된다.

## 6. 맺는 말

원전에서는 다양한 핵종이 발생하나 원전 종사자와 방사성유출물관리 측면에서 중요한 핵종은  $^3\text{H}$ ,  $^{14}\text{C}$ ,  $^{58}\text{Co}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{131}\text{I}$  등으로 많지 않다. 따라서 이들 핵종에 대한 관심과 적절한 관리가 핵심이라고 말할 수 있다. 한편 방사선피폭관리에서는 이벤트에 의해 발생하는 예상치 못한 방사선피폭에 유의하여야 한다. 특히  $^3\text{H}$ 와  $^{14}\text{C}$ 는 배출관리 측면에서 중요한 핵종으로 관심과 저감에 노력이 필요한 실정이다.

## 감사의 글

본 논문은 한국수력원자력(주)와 한전 전력연구원의 전력사 공동중장기 연구개발사업에 의해 수행되었습니다. 이 논문은 2009년 원전 방사선관리워크샵 발표 자료를 토대로 작성되었습니다.

## 참고문헌

1. 김희근. 원전의 주요 방사성핵종과 피폭방사선량 평가. 원전 방사선관리워크샵. 2009.
2. International Commission on Radiological Protection. 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 60. Pergamon Press, 1991.
3. International Commission on Radiological Protection. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103. Pergamon Press, 2007.
4. International Commission on Radiological Protection. Conversion Coefficients for Use in Radiological Protection against External radiation. ICRP Publication 74. Pergamon Press, Oxford, UK, 1997.
5. International Commission on Radiological Protection. 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. Basic Safety Standards for Protection against Ionizing Radiation and for the Safety of Radiation Sources. IAEA Safety Series No. 115, Vienna, 1996.
7. International Atomic Energy Agency. Methods for Assessing Occupational Radiation Doses Due to Intakes of Radionuclides. IAEA Safety Report Series RS-G-1.2, 1999.
8. International Atomic Energy Agency. Methods for Assessing Occupational Radiation Doses Due to External Sources of Radiation. IAEA Safety Report Series RS-G-1.3, 1999.
9. International Atomic Energy Agency. Draft Report of Basic Safety Standards for Protection against Ionizing Radiation and for the Safety of Radiation Sources. IAEA, Vienna, 2009.
10. American National Standards Institute. An American National standard for Dosimetry - Personnel Dosimetry performance - Criteria for Testing. Health

- Physics Society, HPS N13.11, 2001.
11. 한국원자력안전기술원. 원자력법령집. 2009.
12. 한국원자력안전기술원. 원자력관계고시집(방사선 안전규제 분야). 2009.
13. 송명재, 김희근, 김봉환, 장시영. PWR 발전소에서의 방사선장 특성. 방사선방어학회지 1992;17(2): 61-77.
14. Korea Electric Power Research Institute, Development of Technology for Reducing Radiation Exposure in Primary System at Nuclear Power plants, KRC-90N-J04, 1993.
15. Electric Power Research Institute, Techniques for Controlling Radiation Exposure. Nuclear News (February) 1993:43-47.
16. Yoon YH. Shielding Establishment inside Steam Generator. In: proceedings of Information System on Occupational Exposure Asian ALARA Symposium, Seoul, 2007.
17. 한국전력공사. 영광3,4호기 최종안전성분석보고서. 2000.
18. 김희근, 공태영. 원전 불균일 방사선장하에서 유효선량 평가를 위한 복수선량계 알고리즘 적용방안 연구. Journal of Radiation Protection 2008;33(4): 151-160.
19. 김희근, 공태영. 원전종사자의 말단선량 평가를 위한 고피폭 접촉 방사선장 특성분석. Journal of Radiation Protection 2009;34(4):176-183.
20. 김희근, 공태영. 원전 계획예방정비기간 고피폭 예상 접촉작업에서 방사선작업종사자의 말단선량 평가 현장시험. Journal of Radiation Protection (in press).
21. 한국수력원자력(주). 2008 방사선관리연보. 2009.
22. Kim HG, Kong TY, Han SJ, Lee GJ. Development of the Dual Counting and Internal Dose Assessment Method for Carbon-14 at Nuclear Power Plants. Journal of Radiation Protection 2009;34(2):55-64.
23. 한국수력원자력(주) 영광 제2발전소. 피폭 방사선량 평가 및 관리절차서. 방사-201, 2004.
24. 한국수력원자력(주) 영광 제2발전소. 원전종사자 방사선관리체계 적합성 자체진단보고서(초안). 2009.
25. 이상구. 원전 방사선량 실적분석 및 증장기 방사선량 저감화 계획. 원전 방사선관리 워크샵. 2008.
26. 한국수력원자력(주). 원자력발전소 표준 기술행정 절차서-내부피폭 방사선량 측정 및 평가. 표준기행 방사선-06, 2008.
27. 김희근, 공태영. 전신계측기를 이용한 원전종사자의 <sup>131</sup>I 내부방사능 측정경험 및 개선방향에 대한 연구. Journal of Radiation Protection 2009;34(3): 121-128.
28. 김희근, 공태영. 국내원전에서 <sup>131</sup>I 내부흡입에 따른 섭취량 산정과 내부피폭 방사선량 평가경험 및 개선방향에 대한 연구. Journal of Radiation Protection 2009;34(3):129-136.
29. 김희근, 공태영. 전신계측기를 이용한 원전종사자 방사성오염 위치확인 및 내부방사능 측정개선에 관한 연구. Journal of Radiation Protection 2009;34(1):37-42.
30. 한국수력원자력(주) 월성 제1발전소. 종사자 피폭선량 관리절차서(Rev.7). 방0-60105, 2006.
31. Johnson JR. Estimation, Recording, and Reporting of Whole Body Doses from Tritium Oxide Exposure at Chalk River Nuclear Laboratories (CRNL). AECL-5507, CRNL, 1976.
32. 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.
33. 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.
34. 한국수력원자력(주). 월성1호기 주기적안전성평가. 2004.
35. 김희근, 공태영. 중수로원전 종사자의 공기중 삼중수소 섭취 후 뇨시료 배출시간이 체내 삼중수소 농도에 미치는 영향분석. Journal of Radiation Protection 2009;34(4):184-189.
36. 한국수력원자력(주). 원자력발전소 주변 환경방사능 조사 및 평가보고서. 2009.
37. 과학기술부, 한국원자력안전기술원. 제45-1호 영광 5호기 탈염수 공급모관 오염 및 방사성물질 환경방출. <http://www.kins.re.kr>. 2004.4.13.
38. RETS/REMP Steering Committee. The Proceedings of 16th Annual RETS/REMP Workshop, Overview of the EPRI Groundwater Assessment Program. 2006.
39. 김희근, 공태영. 원자력시설의 Carbon-14 방사성유출물에 대한 감시배경의 조사. Journal of Radiation Protection 2009;34(4):195-200.



# An Effects of Radiation Dose Assessment for Radiation Workers and the Member of Public from Main Radionuclides at Nuclear Power Plants

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

**Abstract** - In a primary system at nuclear power plants (NPPs), various radionuclides including fission products and corrosion products are generated due to the complex water conditions. Particularly,  $^3\text{H}$ ,  $^{14}\text{C}$ ,  $^{58}\text{Co}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ , and  $^{131}\text{I}$  are important radionuclides in respect of dose assessment for radiation workers and management of radioactive effluents. In this paper, the dominant contributors of radiation exposure for radiation workers and the member of public adjacent to NPPs were reviewed and the process of dose assessment attributable to those contributors were introduced. Furthermore, the analysis for some examples of radiation exposure to radiation workers and the public during the NPP operation was carried out. This analysis included the notable precedents of internal radiation exposure and contamination of demineralized water occurred in Korean NPPs. Particularly, the potential issue about the dose assessment of tritium and carbon-14 was also reviewed in this paper.

**Keywords** : Radionuclide, Dose assessment, Radiation worker, and Public Effluents, Nuclear power plants, Tritium, Carbon-14