Journal of RADIATION INDUSTRY
Vol. 19, No. 2, pp. 121-127, 2025
https://doi.org/10.23042/radin.2025.19.2.121

Original article

원전종사자 피폭에 기여하는 선원항 고찰 및 감마상수를 활용한 방사선원항 간략 산출에 관한 연구

최건규[1,*] · 정형권[1] · 김명호[1] · 김민수[1]

[1]새빛이엔이(주)

A Study on the Radionuclides Contributing to the Exposure of Nuclear Power Plant Workers and the Brief Calculation of the Sources of Radionuclides Using Gamma Constant

Kun-kyu Choi[1,*], Hyung-kwon Jeong[1], Myeong-ho Kim[1], and Min-su Kim[1]

[1]Saebitene Co., Ltd., 219, Gasan digital 1-ro, Geumcheon-gu, Seoul 08501, Republic of Korea

ABSTRACT In domestic nuclear power plants (NPPs), the materials used for reactor coolant pipes and steam generators are largely similar, which means the sources of radionuclides generated during their operation can also be similar. The primary sources of radionuclides are fission products and corrosion products. Identifying a universal radionuclide source that contributes to worker exposure can help optimize exposure management for workers. To confirm the radionuclide sources, the behavior of radionuclides based on the operational status of the NPP was analyzed in the final stability analysis report. This report also identified the current status of major radionuclides for contamination management and worker exposure management at both domestic and international nuclear facilities. As the operation of NPPs continues over time, steam generators are being replaced. The radionuclides present in the steam generators exhibit similar behavior over a certain period. Consequently, the radionuclide sources in the steam generators and reactor coolant pipes were inferred from the distribution of those identified during steam generator replacements. Seven radionuclides were identified as the major contributors to radiation exposure for workers in NPPs: ^{137}Cs, ^{60}Co, ^{58}Co, ^{51}Cr, ^{95}Zr, ^{54}Mn, and ^{59}Fe. Additionally, measuring radiation sources at NPPs is quite challenging. If we can express a derived nuclide that contributes to exposure simply based on measured doses, it would be beneficial for worker exposure management and radioactive waste transport management. To achieve this, we derived a straightforward formula, referred to as the 'dose-radionuclide source' term, which calculates the exposure contribution by inversely relating the measured dose from a radiation meter to the gamma constant.

Key words: Radiation worker, Exposure, Radionuclide, Gamma constant

1. 서 론

원전내 방사선작업종사자들은 방사선작업을 수행하면서 다양한 방사선원에 노출되어 적지 않은 피폭을 받고 있다. 방사선작업종사자들의 피폭에 기여하는 원인은 크게 세가지이다. 첫째, 원자로에서 발생하는 중성자에 의한 직접 피폭이다. 둘째는 원자로내에서 발생한 핵분열생성물이 냉각재 흐름에 따라 배관 곳곳에서 피폭원으로 작용한다. 또 하나는 중성자로 인해 생성된 방사화된 부식생성물에 의한 피폭이다.

만약 피폭에 기여하는 보편적인 선원항을 확인할 수 있다면 종사자 피폭관리에 최적화를 기할 수 있을 것이다. 피폭에 기여하는 선원항을 확인하기 위한 국내외 연구도 다양하게 진행되고 있다[3,4]. 피폭에 기여하는 선원항을 확인하기 위해, 국내 여러 원자력발전소의 최종안정성분석보고서에서 도출한 원전 운영 경과에 따른 핵분열생성물과 부식생성물의 선원항을 검토하였고, 국내 및 외국 발전소의 피폭에 기여하는 선원항 관리 현황도 살펴보았다.

ISSN 1976-2402 **http://www.ksri.kr/**

Copyright© 2025 by Korean Society of Radiation Industry

***Corresponding author:** Kun-kyu Choi
Tel: +82-2-2039-6875, E-mail: vagabond_01@hanmail.net

Received 1 April 2025 **Revised** 27 May 2025 **Accepted** 27 May 2025

원전내 작업자 피폭의 대부분(90%)는 발전소 연차보수기간에 발생한다[1,2]. 그리고 원전 방사선작업종사자들의 피폭은 내부피폭보다는 외부 피폭이 대부분(95~100%)이다[1,5]. 즉, 발전소 연차보수기간 중 감마를 발생하는 선원에 의한 피폭이 대부분이다. 그렇다면 피폭에 기여하는 보편적인 선원항을 도출하고, 방사선계측기로 측정된 선량을 감마상수를 활용하여 선량-선원항을 단순하게 역산한다면 피폭에 기여하는 선원항도 간략하게 도출할 수 있을 것이다. 또한 이를 단순화한다면 현장에서 유용하게 활용될 것이다.

2. 재료 및 방법

2.1. 연구 대상

2.1.1. 원전 방사선작업종사자의 피폭에 기여하는 선원항 도출

원전내 방사선작업자의 피폭선량은 예측하기가 쉽지 않다. 작업 내용도 작업장소도 다양하고, 원자로건물이나 보조건물의 구조와 각종 배관도 복잡하기 때문이다. 작업자 피폭에 기여하는 방사성크러드인 핵분열생성물과 부식생성물의 종류도 매우 다양하다[6].

그러나 이러한 방사성크러드는 대부분 단반감기이어서 실제적으로 피폭에 기여하는 핵종은 많지 않다. 이러한 피폭에 기여하는 선원항을 도출할 수 있다면 종사자피폭관리에 획기적인 전기를 마련할 수 있다. 증기발생기 등의 설비와 냉각재계통에 침착된 크러드 등을 분석하면 피폭에 기여하는 선원항 도출이 가능하다.

2.1.2. 선량에 따른 선원항 간략 산출 방법론 개발

2.1.1.에서 원전내에서 방사선작업종사자의 피폭에 기여하는 선원항을 도출해서 특정할 수 있다면, 역으로 방사선계측기로 측정된 선량을 방사선원으로 간략하게 산출 할 수 있다. 방사선계측기만으로 선량을 측정해서 방사선원을 예측할수 있다면 종사자 피폭관리 그리고 방사능총량을 산출하여야 하는 방사성물질운반체계에서 유용하게 활용할 수 있다. 방사성물질에 대한 핵종분석을 통해 핵종분율을 아는 경우도 동일하게 적용가능하다. 더욱이 고선량 지역에서 방사능 측정/분석하기가 용이하지 않아 선량-선원항 간략 산출 방법을 통해 피폭선원항을 알 수 있다면 원전내 종사자 피폭관리 및 방사성폐기물관리에도 편리하다.

2.2. 연구 방법

2.2.1. 피폭에 기여하는 선원항 도출

원전은 매년 방사선관리 연보를 통해 총방사선량/작업별 종사자 방사선량 등을 발표하고 있다. 본 연보를 참조하면, 지난 40여간 원전운영에서 방사선작업종사자 피폭은 외부피폭이 대부분(95~100%)이다. 그리고 피폭선량의 대부분이 원자력발전소의 원자로와 증기발생기 그리고 원자로냉각재 계통 관련 작업이 대부분이다[1, KHNP 연보 중 작업별 방사선량 현황]. 원전 내부의 고선량 지역과 부위도 대부분 원자로 및 원자로 냉각재 계통의 배관이다. 이와 연관된 작업에서 대부분 피폭이 이루어지고 있다. 또한 원전 연료는 UO^2이고 원자로 및 배관의 재질은 탄소강으로 모든 원전이 동일하다. 따라서 방사화 부식생성물도 비슷하다. 따라서 원자로의 출력 운전으로 인한 중성자에 의한 피폭을 제외하면 원전 내 피폭에 기여하는 선원은 전 발전소가 대동소이하고 대부분 핵분열생성물과 부식생성물에 의한 피폭이다. 크러드(CRUD)는 증기발생기 전열관 및 배관의 부식으로 인해 표면에서 용출되는 금속 이온이 노심으로 이동하고 노심 피복관 고온부에 침적되어 발생한다[7,8]. 이러한 크러드 등이 다시 원자로냉각재계통을 따라 이동한다. 증기발생기나 배관내에 침적된 크로드 및 표면오염물질 등을 분석함으로써 피폭에 기여하는 선원항의 경향을 알 수 있다. 또한 발전소 운영에 따른 부식생성물 등 오염의 양에 대한 지표로 증기발생기 내부가 최적이다. 증기발생기는 맨웨이 개방을 통해 내부의 선량 및 선원에 대한 측정이 용이하기 때문이다, 따라서 원전 운영시 피폭에 기여되는 선원항을 관리하고 있는 국내외 발전소의 실태를 파악하고, 최종안전성 분석보고서의 선원항 분석 그리고 원전 운영의 경과로 노후화되어 교체된 증기발생기에 침적된 선원항을 파악하면, 방사선작업종사자의 피폭에 기여하는 원자로냉각재계통에 부류하는 선원항을 파악할 수 있다. 다만 발전소 정지 기간이 길어지면 반감기가 긴 ^{60}Co가 뚜렷하게 검출될 수 있음도 유의해야 한다[4].

2.2.2. 선량에 따른 선원항 간략 산출 방법론 개발

2.2.2.1. 감마상수 배경

감마상수는 특정 선원의 방사능을 알 때, 그 선원 앞에 사람이 있을 경우 거리당 그 사람이 피폭되는 시간당 선량을 나타내는 상수로서 핵종별로 일정한 값이다. 감마상수의 단위는 [$R \cdot m^2/Ci \cdot h$] 또는 [$Sv \cdot m^2/TBq \cdot h$] 등이다.

흡수선량률 D 에서

$$D\ (\text{흡수선량률}) = \frac{CE}{4\pi r^2}\left(\frac{\mu_{en}}{\rho}\right)\ [\text{C는 1Ci, E는 MeV}]$$

감마선 60 keV에서 2 MeV 사이의 $(\mu_{en}/\rho) = 0.0027\ m^2\ kg^{-1}$ 적용가능하므로

$$D\ (\text{흡수선량률}) = \frac{CE\ 0.0027}{4\pi r^2} = \frac{2.15 \times 10^{-4} CE}{r^2}$$

단위를 정리하고, 조사선량률로 변환하면

$$D\ (\text{흡수선량률}) = \frac{2.15 \times 10^{-4} \times C \times 3.7 \times 10^{10} \times E \times 1.6 \times 10^{-13}}{r^2}$$

$$D\ (\text{흡수선량률}) = \frac{1.27 \times 10^{-6} \times CE}{r^2} Gys^{-1}$$

$$X\,(\text{조사선량률}) = \frac{1.27\times10^{-6}\times CE}{r^2}\frac{Gy}{s}\times\frac{3600s}{h}\times\frac{1R}{0.0087Gy}$$

$$X\,(\text{조사선량률}) = \frac{0.5\times CE}{r^2}Rh^{-1}$$

$$X\,(\text{조사선량률}) = \Gamma\frac{C}{r^2}Rh^{-1}$$

간략적으로 Γ = 0.525E이다.

이 때 선량은 감마상수와 선원의 방사능의 함수로 표현할 수 있고, 감마상수는 구형 선원에서 구표면적 전체($4\pi r^2$)에서 피폭대상자로 다가오는 관점이다.

2.2.2.2. 감마상수 평균 산출

방사선원이 혼재되어 있는 방사성물질을 핵종분석을 통해 핵종과 비방사능을 파악한 후, 방사성물질에서 검출된 핵종의 감마상수와 각각의 핵종분율을 곱한 후 더하면 감마상수 평균을 산출할 수 있다.

2.2.2.3. 선량-선원항 환산

$X\,(\text{조사선량률}) = \overline{\Gamma}\,(\Gamma\text{ 평균})\frac{C}{r^2}Rh^{-1}$ 에서
방사능 $C = \frac{Xr^2}{\overline{\Gamma}}(Ci)$ 이다.

방사선측정기를 통해 선량을 측정하고, 그 측정 거리를 알면, 방사능으로 역산하면 방사선원의 방사능(C)을 개략적으로 구할 수 있다. 방사선원별 방사능은 방사성물질에 대해 핵종 분석을 한 후, 핵종별 방사능으로 분율을 정하고, 총방사능을 이 분율로 배분하면 된다. 또한 2.2.1.에서 원전내 방사선작업종사자의 피폭에 기여하는 보편적인 주요 핵종이 도출되었다면, 피폭에 기여하는 선원등이 대부분 감마 방출핵종이므로 방사선계측기로 측정된 선량을 평균감마상수를 활용하여 선량-선원항으로 역산한다면, 피폭에 기여하는 선원항의 방사능도 단순하게 도출할 수 있을 것이다.

3. 결 과

3.1. 원전 방사선작업종사자의 피폭에 기여하는 선원항

3.1.1. 철거된 증기발생기(Old Steam Genernater 이하 OSG) 선원항

노후화되어 철거된 여러 증기발생기의 선원항을 분석하였다. 노후화된 증기발생기 교체시 평가된 핵종별 방사능양을 분석하여 피폭선량에 기여하는 주요 핵종을 파악하였다. 교체된 증기발생기 중 표준형 원전인 한빛 5,6호기 및 프로마톰형 원전인 한울 1,2호기를 선정하였다.

증기발생기 교체시 산출된 OSG내 표면 오염 방사능 양, OSG 내부 표면에 부착된 표면오염물질의 방사능양, 한빛 OSG 내 총 방사능 재고량(15일 방사능붕괴 고려), OSG 방사선원항 등을 검토하였다. 이 자료를 통해 증기발생기내 방사선 핵종의 분포를 파악할 수 있었다[9,10]. 표면에 침적되는 방사선핵종은 두 호기의 증기발생기 모두 ^{60}Co, ^{58}Co, ^{51}Cr, ^{95}Zr, ^{54}Mn, ^{59}Fe 동일하였다. 또한 한빛 5,6호기 OSG내 장반감기 방사성크러드의 방사능재고량의 평가에서도 Table 1에서와 같이 ^{60}Co, ^{58}Co, ^{51}Cr, ^{95}Zr, ^{54}Mn, ^{59}Fe 동일하였다. 한울 1,2호기도 동일하다 [11]. 이러한 방사성크러드들이 원자로냉각재 계통 및 증기발생기 등 설비에 침적하여 방사선작업시 피폭을 유발한다 [6]. Table 2의 한빛 5,6 OSG 내 총 방사능 재고량의 비율을 살펴보면, ^{51}Cr 53%, ^{58}Co 43% 등으로 전체 재고량의 96%를 차지하였다. 총방사능 재고량 분석에서도 ^{60}Co, ^{58}Co, ^{51}Cr, ^{95}Zr, ^{54}Mn, ^{59}Fe 6핵종의 기여가 대부분이다. 핵분열생성물 핵종의 경우는 반감기가 짧은 I-131/132 등 I을 제외하면 ^{137}Cs이 대부분을 차지하였다.

3.1.2. 최종안정성분석보고서(FSAR) 원자로냉각재계통 내 방사선원항 재고량

한빛 3,4호기/한빛 5,6호기/한울 1,2호기/한울 5,6호기 등 한국원전의 최종안정성분석보고서(FSAR) 11항의 장반감기 방사성크

Table 1. Radioactivity inventory of long-winded radioactive cruds in Hanbit 5,6 OSG

Crud's Isotope	Bq/g	Radioactivity in OSG (Bq)		
		Lower Chamber	Heat Transfer Tube	Total
^{51}Cr	4.80×10^{9}	1.21×10^{12}	4.57×10^{13}	4.69×10^{13}
^{54}Mn	3.00×10^{7}	7.54×10^{9}	2.86×10^{11}	2.93×10^{11}
^{59}Fe	4.40×10^{7}	1.11×10^{10}	4.19×10^{11}	4.30×10^{11}
^{60}Co	3.10×10^{9}	7.79×10^{11}	2.95×10^{3}	3.03×10^{13}
^{58}Co	7.00×10^{7}	1.76×10^{10}	6.66×10^{11}	6.84×10^{11}
^{95}Zr	7.80×10^{7}	1.96×10^{10}	7.43×10^{11}	7.62×10^{11}
Total	-	-	-	7.94×10^{13}

Table 2. Percentage of total radioactivity inventory within Hanbit 5,6 OSG

Isotope	Half-life (hr)	Surface contamination Object (Bq)	Deposited Radioactive Crud (Bq)	Total (Bq)	Ratio
^{131}I	1.93×10^{2}	2.04×10^{11}	-	2.04×10^{11}	0%
^{132}I	2.30×10^{0}	1.85×10^{-36}	-	1.85×10^{-36}	0%
^{133}I	2.08×10^{1}	7.20×10^{6}	-	7.20×10^{6}	0%
^{135}I	6.61×10^{0}	2.87×10^{-5}	-	2.87×10^{-5}	0%
^{134}Cs	1.81×10^{3}	8.36×10^{10}	-	8.36×10^{10}	0%
^{136}Cs	3.14×10^{2}	6.38×10^{9}	-	6.38×10^{9}	0%
^{137}Cs	2.63×10^{5}	1.06×10^{11}	-	1.06×10^{11}	0%
^{89}Sr	1.21×10^{3}	8.08×10^{8}	-	8.08×10^{8}	0%
^{90}Sr	2.55×10^{3}	4.94×10^{7}	-	4.94×10^{7}	0%
^{91}Sr	9.50×10^{0}	6.54×10^{-3}	-	6.54×10^{-3}	0%
^{91m}Y	1.40×10^{3}	1.15×10^{8}	-	1.15×10^{8}	0%
^{93}Y	1.01×10^{1}	7.28×10^{-4}	-	7.28×10^{-4}	0%
^{95}Zr	1.54×10^{3}	1.70×10^{8}	6.48×10^{11}	6.48×10^{11}	1%
^{95}Nb	8.44×10^{2}	1.13×10^{8}	-	1.13×10^{8}	0%
^{99}Mo	6.60×10^{1}	2.02×10^{9}	-	2.02×10^{9}	0%
^{99m}Tc	6.02×10^{0}	4.61×10^{-8}	-	4.61×10^{-8}	0%
^{103}Ru	7.03×10^{2}	3.71×10^{7}	-	3.71×10^{7}	0%
^{106}Ru	8.84×10^{3}	2.02×10^{7}	-	2.02×10^{7}	0%
^{129m}Te	8.06×10^{2}	1.32×10^{9}	-	1.32×10^{9}	0%
^{129}Te	1.16×10^{0}	8.37×10^{-85}	-	8.37×10^{-85}	0%
^{131m}Te	3.00×10^{1}	2.25×10^{-6}	-	2.25×10^{-6}	0%
^{132}Te	7.82×10^{1}	2.47×10^{9}	-	2.47×10^{9}	0%
^{140}Ba	3.06×10^{2}	5.32×10^{8}	-	5.32×10^{8}	0%
^{51}Cr	6.65×10^{2}	2.36×10^{9}	3.22×10^{13}	3.22×10^{13}	53%
^{54}Mn	7.50×10^{3}	4.62×10^{8}	2.83×10^{11}	2.83×10^{11}	0%
^{59}Fe	1.07×10^{3}	7.18×10^{7}	3.41×10^{11}	3.41×10^{11}	1%
^{58}Co	1.70×10^{3}	1.90×10^{9}	2.62×10^{13}	2.62×10^{13}	43%
^{60}Co	4.62×10^{3}	1.52×10^{8}	6.80×10^{11}	6.80×10^{11}	1%
^{140}La	4.03×10^{1}	7.24×10^{5}	-	7.24×10^{5}	0%
^{141}Ce	7.80×10^{2}	3.33×10^{7}	-	3.33×10^{7}	0%
^{143}Ce	3.30×10^{1}	7.01×10^{3}	-	7.01×10^{3}	0%
^{144}Ce	6.82×10^{3}	1.16×10^{8}	-	1.16×10^{8}	0%
Total	-	4.12×10^{11}	6.04×10^{13}	6.08×10^{13}	

러드의 방사능 재고량, 원자로냉각재계통의 방사성크러드의 평균 비방사능, 고유량 취출수내 방사성크러드 농도 등을 검토하였다 [12]. 대부분의 FSAR에서 장반감기 방사성크러드의 방사능 재고량을 분석한 Table 3 핵종과 유사하였다.

Table 3 한울1,2호기의 FSAR 11.1-3의 한울1,2호기 방사능크러드에 평가에서는 ^{51}Cr, ^{58}Co, ^{60}Co, ^{59}Fe, ^{54}Mn 등 5개 핵종만을 적시하고 있듯이, 이들이 피폭에 기여하는 주요 핵종임을 알 수 있다. 한울 5,6호기 원자로냉각재계통의 방사성크러드의 평균 비방사능 평가에서는 ^{51}Cr, ^{58}Co, ^{60}Co, ^{59}Fe, ^{54}Mn, ^{95}Zr 6개 핵종만을 평가함으로써 이 핵종이 피폭에 기여함을 명확히 나타내고 있다. Table 4 한빛 5,6호기 FSAR의 장반감기 크러드핵종 분석에서는 ^{51}Cr, ^{58}Co, ^{60}Co, ^{59}Fe, ^{54}Mn, ^{95}Zr 6개 핵종만을 평가하고 있다. 이처럼 방사선작업종사자의 피폭에 기여하는 핵종은 6개 핵종으로 귀결됨을 알 수 있다.

Table 3. Radioactivity inventory of Hanul's 1, 2 long half-life radioactive cruds

Isotope	Activity (Ci/t)		
	Steady-state operation	Transient	Cold shutdown
^{51}Cr	3.3×10^{-3}	9.6×10^{-3}	9.9×10^{-2}
^{54}Mn	8.4×10^{-3}	5.2×10^{-3}	7.8×10^{-1}
Fe^{59}	3.9×10^{-3}	2.0×10^{-3}	9.6×10^{-2}
^{58}Co	9.0×10^{-3}	2.2×10^{-2}	1.3×10^{-1}
^{60}Co	6.9×10^{-3}	1.3×10^{-2}	4.8×10^{-1}

Table 4. A long half-life radioactive crud nuclides of Hanul's 5, 6

Isotope	Half-life	Decay Constant (d-1)	Mother's Reaction	Number of γ per Collapse	Energy (MeV)
^{51}Cr	27.70 d	2.50×10^{-2}	Cr^{50} (n,γ)	0.1	0.32
^{54}Mn	312.2 d	2.22×10^{-2}	Fe^{54} (n,p)	1	0.84
^{59}Fe	44.51 d	1.56×10^{-2}	Fe^{58} (n,γ)	1	1.18
^{60}Co	5.272 y	3.60×10^{-4}	Co^{59} (n,γ)	2	1.25
^{58}Co	70.91 d	9.77×10^{-3}	Ni^{58} (n,p)	1	0.81
^{95}Zr	64.03 d	1.08×10^{-2}	Zr^{94} (n,γ)	2	0.75

Table 5. Crud specific radioactivity maximum measured at domestic and international power plants (Bq/g)

Nation	Plant \ Isotope	^{51}Cr	^{54}Mn	^{59}Fe	^{58}Co	^{60}Co	^{181}Hf	^{95}Zr	^{64}Cu
Korea	신고리 3,4 FSAR	2.78×10^{9}	2.34×10^{7}	3.28×10^{7}	2.36×10^{9}	4.91×10^{7}			3.68×10^{7}
	울진 1,2	3.1×10^{6}	2.6×10^{5}	9.8×10^{4}	5.5×10^{6}	6.5×10^{5}		1.9×10^{4}	
USA	Conn. Yankee	3.83×10^{7}	1.65×10^{9}	2.17×10^{8}	1.65×10^{9}	1.52×10^{8}			
	San Onofre	2.33×10^{7}	3.67×10^{8}	5.17×10^{7}	3.67×10^{8}	3.33×10^{7}			
	Yankee Rowe	7.50×10^{7}	5.50×10^{8}	2.83×10^{8}	5.50×10^{8}	1.12×10^{8}		1.10×10^{7}	
	Sa×ton, b	6.50×10^{7}	4.50×10^{8}	1.50×10^{9}	4.50×10^{8}	7.17×10^{7}			
	Shipping port,a	2.17×10^{7}	4.67×10^{7}	3.67×10^{7}	4.67×10^{7}	3.83×10^{8}	8.67×10^{6}	1.17×10^{7}	
	Indian Point I,a	1.28×10^{7}	7.67×10^{7}	9.50×10^{7}	7.67×10^{7}	3.00×10^{7}	2.50×10^{6}	3.83×10^{6}	5.17×10^{10}
	Maine-Yankee,a	1.62×10^{7}	7.55×10^{8}	7.07×10^{8}	7.55×10^{8}	3.67×10^{7}		2.15×10^{7}	
	Oconee,a	9.17×10^{6}	8.50×10^{8}	4.83×10^{8}	8.50×10^{8}	4.67×10^{7}		9.33×10^{7}	
	WEP	2.02×10^{9}	2.48×10^{8}	2.74×10^{8}	1.49×10^{9}	2.37×10^{8}			
Switzerland	NOK	1.75×10^{9}	7.03×10^{7}	1.07×10^{8}	1.09×10^{9}	7.40×10^{7}			

3.1.3. 국내외 발전소의 피폭에 기여하는 선원항 관리 현황

국내 원자력발전소는 피폭원에 기여하는 핵종을 제어할 목적으로 RCS내 핵종분석을 주기적으로 하고 있다. 이 때 파악하는 주요 핵종은 거의 모든 발전소에서 ^{51}Cr, ^{54}Mn, ^{59}Fe, ^{58}Co, ^{60}Co, ^{95}Zr 6개 핵종만을 분석하고 있음을 확인하였다. 대부분의 발전소에서 6개 핵종에 대해 주기적으로 분석하여 비방사능, 크러드무게를 주요 샘플별로 정리하고 있다[13]. KHNP의 원전설계 고유기술개발을 위한 원자로냉각재계통 운전환경에서 크러드 거동평가 연구에서도 ^{51}Cr, ^{54}Mn, ^{59}Fe, ^{58}Co, ^{60}Co, ^{95}Zr가 주요 피폭선원임을 확인하고 있다[13].

Table 5은 국내외 발전소에서 측정된 크러드비방사능 최댓값(Bq/g)에서도 계통내 피폭원으로 기여하는 핵종으로 ^{51}Cr, ^{54}Mn, ^{59}Fe, ^{58}Co, ^{60}Co이었으며, ^{95}Zr도 주요 핵종임을 나타내고 있다. Table 5 현재까지 알려진 국내외 발전소별 데이터로 크러드 획득시기, 포집 방법, RCS 계통 내 환경 등 크러드 조건이 모두 다르지만 높은 수준의 비방사능으로 주요한 핵종의 최대 비방사능 값을 정리한 결과이다.

3.1.4. 원전내 방사선작업종사자의 피폭에 기여하는 방사선원 선정

원자력냉각재 계통내 크러드의 주요핵종, OSG 방사능 재고량,

국내 원전의 최종안전성보고서에서 적시한 장반감기 방사성크러드 핵종, 그리고 원전의 주요 핵종 관리 현황 등을 분석한 결과 작업종사자의 피폭에 기여하는 핵종으로 ^{60}Co, ^{58}Co, ^{51}Cr, ^{95}Zr, ^{54}Mn, ^{59}Fe으로 선정하였다. 그리고 핵분열생성물의 대표 핵종이기도 하거니와 반감기도 긴 ^{137}Cs을 추가로 선정하였다. 이에 따라 최종적으로 ^{137}Cs, ^{60}Co, ^{58}Co, ^{51}Cr, ^{95}Zr, ^{54}Mn, ^{59}Fe를 도출하였다. 일부 자료에서 Sr-90의 분율이 높은 부분이 있으나, 베타방출체이므로 자연스럽게 제외되었다.

3.2. 원전 계통내 선량에 따른 선원항 간략 산출 방법

3.2.1. 평균 감마상수 산출

방사선원이 혼재되어 있는 방사성물질을 핵종분석을 통해 핵종과 비방사능을 파악한다. 방사성물질에서 검출된 핵종이 3가지라고 하고, 이 때 A/B/C 핵종의 비방사능을 각각 ⓐ/ⓑ/ⓒ라 하면

A핵종의 분율 $a = \frac{ⓐ}{ⓐ+ⓑ+ⓒ}$,

B핵종의 분율 $b = \frac{ⓑ}{ⓐ+ⓑ+ⓒ}$

C핵종의 분율 $c = \frac{ⓒ}{ⓐ+ⓑ+ⓒ}$ (이 때 분율의 합은 1)이다.

분율을 파악했다면,

A핵종의 분율 a, 감마상수 Γ_a/B핵종의 분율 b, 감마상수 Γ_b/C핵종의 분율 c, 감마상수 Γ_c라고 하면

$\overline{\Gamma}$ (Γ 평균) = a*Γ_a + b*Γ_b + c*Γ_c이다.

일례로, 3.1항에서 도출한 방사선작업종사자의 일반적인 피폭에 기여하는 핵종 7종을 Table 2 한빛 5,6호기 방사능 재고량의 비율로 계산하면

^{137}Cs, ^{60}Co, ^{58}Co, ^{51}Cr, ^{95}Zr, ^{54}Mn, ^{59}Fe 핵종의 감마상수는 각각 0.32/1.32/0.55/0.016/0.41/0.54/0.64[Rm^2/Cih]이다.

총방사능값에 대한 해당 핵종의 분율은 1.75E-03/1.12E-02/4.33E-01/5.33E-01/1.07E-02/4.68E-03/5.64E-03이다. 해당 핵종의 분율과 감마상수를 각각 곱한 후 합산하면 평균 감마상수는 0.272이다.

3.2.2. 선량-선원항 간략 산출 방법론 도출

방사성물질에 대해 핵종분석을 통해 핵종과 분율이 정해지면, 감마방출 핵종에 대해 감마상수 평균이 산출할 수 있다. 이 때 선량이 측정되었으면, 측정 거리로 총방사능 C (Bq)와 각 핵종별 방사능으로 개략적으로 역산할 수 있다(조사선량률과 유효선량률 등 단위는 계산시 환산).

X (조사선량률) = $\overline{\Gamma}$ (Γ 평균) $\frac{C}{r^2}Rh^{-1}$ 에서 $C = \frac{Xr^2}{\overline{\Gamma}}(Bq)$,

각 핵종별 방사능

Ca (A핵종 방사능) = $\frac{Xr^2}{\overline{\Gamma}}$ *a (A핵종 방사능분율)(Bq)

Cb (B핵종 방사능) = $\frac{Xr^2}{\overline{\Gamma}}$ *b (B핵종 방사능분율)(Bq) 이다.

예를 들어, 작업 전 작업위치에서 원자로냉각재 계통 배관(증기발생기)의 선량을 측정하였다면, 3.1.1.에서 산출된 평균 감마상수(Γ)를 활용하여 서베이메터로 측정된 원자로냉각재 계통 배관(또는 증기발생기) 선량을 기 도출된 선원핵종 ^{137}Cs, ^{60}Co, ^{58}Co, ^{51}Cr, ^{95}Zr, ^{54}Mn, ^{59}Fe의 방사능값으로 개략적으로 역산할 수 있다. 만약 선원과 방사선계측기와의 측정 거리가 0.5m, 방사선계측기로 측정된 선량이 13mSv 라고 하면, 총방사능은 4.40*10^{10}Bq 이고, ^{137}Cs, ^{60}Co, ^{58}Co, ^{51}Cr, ^{95}Zr, ^{54}Mn, ^{59}Fe 각 핵종별 개략적인 방사능값은 7.73*10^7/4.96*10^8/1.91*10^{10}/2.35*10^{10}/4.74*10^8/2.06*10^8/2.49*10^8(Bq)이다. 필요시 배관의 자체차폐 효과를 고려한다면 배관 안쪽의 방사선원항을 개략적으로 예측 할 수 있다.

이 모든 절차는 엑셀로 계산식화 하면 현장에서 사용하기도 용이하다.

4. 고 찰

원전내 방사선작업종사자들의 피폭에 관여하는 주요 핵종은 관리의 편리성을 위해 단순화 할 필요가 있다. 국내 원전은 동일한 핵연료 구조, 유사한 원자로 및 증기발생기 등의 재질 등으로 원전 1차측에서 종사자 피폭에 기여하는 핵종은 유사하다. 원전 운영에 따른 핵분열생성물이나 부식생성물의 추이도 비슷하다. 작업자 대부분의 피폭이 원자로 정지 후 연차보수기간에 발생하므로 단반기 핵종을 제외할 수 있다. 이러한 종합적인 판단으로, 원전내 방사선작업종사자들의 피폭에 관여하는 주요 핵종으로 ^{137}Cs, ^{60}Co, ^{58}Co, ^{51}Cr, ^{95}Zr, ^{54}Mn, ^{59}Fe을 도출하였다. 또한 주요 고피폭작업인 증기발생기내 노즐댐 설치 등에서 실질적으로 주요 피폭원으로 기여하는 것은 90% 이상의 방사능 양을 차지하는 ^{58}Co, ^{51}Cr이다.

그러나, ^{58}Co과 ^{51}Cr의 방사능의 양이 비슷하더라도 감마상수의 값이 0.55/0.016 로서 약 34배 차이가 나고, 반감기도 2.6배정도 차이가 나므로 발전소 정지 후 시간이 흐를수록 방사선작업종사자의 주요 피폭원으로 ^{58}Co이 작용할 것이다. 원전의 발전소 연차보수 기간은 20~30일 정도였으나, 2011년 후쿠시마 원전 사고 이후 원전 안전을 강조함에 따라 연차보수기간이 상당히 길어지는 추세여서 주요 피폭원으로 ^{58}Co이 될 수 밖에 없을 것이다. 그리고 발전소가 노후화(운영개시 후 5년 경과)될수록 반감기가 긴 ^{60}Co가 상당한 피폭원으로 작용한다 [15, 16]. 나아가 연차보수기간 시작 이후 작업시간의 경과와 방사선작업종사자의 피폭에 기여하는 핵종의 추세를 함수(연차보수기간 시작일과 각 핵종의

반감기를 고려)로도 표현해서 연차보수 기간 시작 이후 피폭에 기여하는 선원의 윤곽을 파악할 수 있다.

핵종별 감마상수를 기반으로 다음과 같은 선원-핵종별 방사능 간략 산출 방법론을 도출하였다.

$$Ca\ (A\text{핵종 방사능}) = \frac{Xr^2}{\Gamma} * a\ (A\text{핵종 방사능분율})(Bq)$$

방사성물질 등에 대해 핵종분석 등의 방법으로 핵종을 파악하고 분율이 정해지면 선량을 통해 핵종별 방사능을 간략하게 파악할 수 있다.

5. 결 론

원전내 방사선작업시 피폭에 기여하는 선원항을 도출함으로써 특정 선원항에 대한 관리를 통해 종사자 피폭관리가 진일보할 수 있다. 또한 반감기를 고려하면 원자로 정지 후 작업종사자들의 피폭선원을 좀 더 세밀하게 파악할 수도 있다. 종사자 피폭선량을 예측함으로써 종사자 보호를 위해 차폐체 교체 ,작업시간 단축 등 다양한 방호조치를 취할 수 있을 것으로 기대된다.

또한 원자로냉각재계통 등 원자로건물내부에서 방사선항을 측정하기 위해 무거운 핵종분석장비로 측정하기도 접근하기도 어렵고, 고선량 지역내에서 기술적으로 방사능 측정/분석이 어려우므로 선량 측정만으로 방사선원항을 간략하게 파악 할 수 있다면 종사자의 피폭관리 뿐 아니라 원전 방사선(능) 관리에도 도움이 될 것이다. 또한 운반물 구분/방사능내용물 등의 기재시 방사능 총량을 확인하여야 하는 방사능물질운반관리에서도 유용하게 활용할 수 있다[14]. 나아가 현재 원전의 증기발생기나 원자로 헤드 운반시 방사능 총량은 측정이나 분석을 통해 파악하는 것이 아니라, 원전 FSAR에서 분석한 크러드두께를 각종 방사선원항 산출 프로그램을 활용한 보수적 평가로 산출되기에 실제 핵종별 방사능과는 현격한 차이가 날 수밖에 없다[9,10]. 핵종별 방사능 파악에 차폐 등을 추가로 고려한다면 선량-선원항 간략 산출 방법이 부가적이고 보완적인 방법이 될 수 있다.

사 사

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단 의지원을 받아 수행된 연구임(No. RS-2022-00144506).

참고문헌

1. Korea Hydro & Nuclear Power Co. Ltd., 2018/2019/2020/2022, Annual Report on Radiation Management of Nuclear Power Plant.
2. Kim HG, Kong TY, Jeong WT, Kim ST. 2010. An effects of radiation dose assessment for radiation workers and the member of public from main radionuclides at nuclear power plants. *J Radiat Prot*. **35**(1):12-20.
3. Kim JY, Kim JW, Lee DH, Kim KP. 2024. Assessment of Radiation Dose during the Installation and Removal of Steam Generator Primary Nozzle Dam in Overhaul Period.
4. Kim JH, Jeon HM, Yu JH, Jeong SG, Kim SH, Han KH, Seo JS. 2020. Evaluation of the Nuclide Inventory for the SG Crossover Leg in Kori Unit 1, Korean Radioactive Waste Society.
5. Lim YK. 2015. Radiation exposure on radiation workers of nuclear power plants in Korea: 2009-2013. *J Radiat Prot Res*. **40**(3):162-167 Korean.
6. Kim HG, Kong TY. 2009. An analysis of radiation field characteristics for estimating the extremity dose in nuclear power plants. *J Radiat Prot*. **34**(4):176-183 Korean.
7. KAERI. 2006. CRUD Characteristic Analysis Technology Development, CR-270.
8. EPRI. 2011. Evaluation of Fuel Cladding Corrosion and Corosion, Product Deposits from Ulchin Unit 1 Cycle 17, 1022898.
9. KHNP. 2016. Application for approval of special approval measures for radioactive materials, etc for Regulatory Agency approval document for OSG transport approval of Hanbit 5&6.
10. KHNP. 2011. Application for approval of special approval measures for radioactive materials, etc for Regulatory Agency approval document for OSG transport approval of Hanul 1&2.
11. KOPEC. 2012. Evaluation of OSG radiation source in Unit 1 and 2 in Hanul.
12. KHNP. Final safety analysis report of Kori/Hanbit/Hanul/Wolsong 11.1 (a radiation source) & 12.4 (Dose assessment).
13. KHNP. 2022. A Study on Crud Behavior Evaluation in the Operating Environment of the Nuclear Coolant System for the Development of Unique Technology for Nuclear Power Plant Design.
14. Nuclear Safety Commission notice. 2024. Regulations on the packaging and transportation of radioactive materials, etc [Korea, Nuclear Safety Commission notice No. 2024-13, 2024].
15. Kang SK, Kang HY, Lee BG, Kim JI. 2014. Analysis of Source Terms at Domestic Nuclear Power Plant with CZTSemiconductor Detector, Korean Association for Radiation Protection.
16. Bonnefon J, Ranchoux G, Guinard L, Rocher A, Piotrowski L, Blond S, Cordier G. 2012. CZT technology applicaion at EDF. ISOE European ALARA Symposium. Prague. Czech Republic.