Journal of RADIATION INDUSTRY
Vol. 19, No. 1, pp. 13-17, 2025
https://doi.org/10.23042/radin.2025.19.1.13

Original article

경수로 증기발생기 계획예방정비 작업자 피폭선량 전산해석 정확도 향상방안 분석

차길용[1,*] · 이성현[1] · 김준혁[2] · 배진형[2]

[1]㈜래드코어, [2]한국전력기술(주) 원전기술연구소

An Analysis of the Improvement Method for the Dosemap Calculation during Overhaul of PWR Steam Generator

Gil Yong Cha[1,*], Seong Hyeon Lee[1], Jun Hyeok Kim[2], and Jin Hyoung Bai[2]

[1]RADCORE, Co., Ltd., 17, Techno-4 ro, Yuseong-gu, Daejeon 34013, Republic of Korea
[2]KEPCO E&C, Nuclear Technology Research Department, 269 Hyeoksin-ro, Gimcheon-si 39660, Republic of Korea

ABSTRACT During the planning and overhaul of the PWR steam generator, a study was conducted to implement a highly accurate dose map. In the overhaul period, the worker is exposed to the CRUD on the inner surface of the steam generator chamber, and the coolant source remains in the pipe. A dose map was generated by performing MCNP computational analysis with the CRUD and coolant source term derived from the theoretical calculation. As a result of comparison with the measurement results, an average of 42% underestimation was confirmed. Based on the measurement results before and after the nozzle dam was installed at the maximum dose rate point of the steam generator's water chamber, the result of the computational analysis that corrected the influence of the CRUD and coolant source term was overestimated by 14% compared to the measurement results. In conclusion, due to correcting and evaluating the source term based on the field measurement data, the accuracy improved by 28% compared to the case without correcting.

Key words: ALARA, Monte Carlo, MCNP, CRUD, Steam Generator, Dose Map

1. 서 론

국내 경수로 원자력발전소는 약 18개월을 주기로 핵설계에 따라 연료를 재배치하는데, 이 때 지속적인 원전운영을 위해 기기와 계통의 오염 제거 및 검사 등의 계획예방정비를 실시한다. 계획예방정비 시 작업자 피폭관리를 위해 구성되는 ALARA 위원회에서는, 작업 직전에 주요 작업 위치에서의 방사선량률을 측정하고 과거의 작업이력에 근거하여 방사선작업종사자의 피폭선량을 예측/관리하고 있다[1].

경험에 전적으로 의존하는 기존의 작업자 피폭선량 관리 방식을 개선하기 위하여, 작업 시나리오에 따라 작업동선과 점유시간을 시뮬레이션하여 방사선작업종사자의 피폭선량을 예측하는 프로그램이 개발되고 있다. 이 프로그램의 주요 기능은 가상으로 구현된 작업구역 내에서 작업 시나리오에 따라 누적되는 작업자의 피폭선량을 평가하고 시각화하는 것이다. 이 때, 작업구역 내 모든 공간에 대한 선량률 데이터(이하 방사선장)가 요구되며, 방사선장의 현실성이 작업자 피폭선량 예측 정확도를 결정한다.

정확한 방사선장 전산해석 결과를 도출하기 위해, 전산모델 및 해석 방법의 적절성과 함께 전산해석 시 입력으로 사용되는 방사선원항의 정확한 정의가 필수적이다. 그러나 연료피복관의 열화 등으로 인해 핵분열생성물 중 일부가 원자로 냉각재로 이동한 '냉각재선원항'과, 계통 내에서 부식된 금속이 노심 내 중성자와의 방사화 반응(neutron induced activation)에 의해 생성되는 '부식생성물(이하 CRUD, Chalk River Unidentified Deposits)'에 대한 선원항의 공간적 분포와 핵종별 방사능을 정확하게 계산하거나 측정하는데 한계가 있다.

본 연구에서는, 계획예방정비 중 가장 피폭을 많이 받는 기기로 알려진 Steam Generator 주변의 방사선장을 몬테칼로 전산해석 방법을 이용하여 평가한 후, 측정결과와 비교분석하였다. 또

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

Copyright© 2025 by Korean Society of Radiation Industry

***Corresponding author:** Gilyong Cha
Tel: +82-42-934-4689, Fax: +82-42-710-7287, E-mail: mars1222@radcore.co.kr
Received 1 November 2024 **Revised** 27 December 2024 **Accepted** 17 March 2025

한, 방사선장 계산결과의 정확성을 향상시키기 위하여, 가용한 계산 및 측정자료를 활용하는 보정 방안을 도출하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 재료

2.1.1. 전산코드

본 연구에서 방사선장을 계산하기 위해 사용한 전산해석 코드는 MCNP ver. 6.1 [2]이다. MCNP 코드는 미국 LANL에서 개발되어 그 신뢰성을 인정받아 몬테칼로 방사선 수송해석 분야에 가장 널리 사용되고 있다. 광자 입자의 거동을 추적하기 위한 핵단면적 자료는 MCNP에 내장된 ENDF/B-VI 기반의 MCPLIB84 핵단면적 자료이며, ICRP 74에 제시된 선속선량환산인자를 사용하여 유효선량을 계산하였다[3]. 계산을 통해 도출된 모든 결과는 MCNP의 기본 Tally인 F4 Tally (track length estimation 방법)를 사용하였다. 방사선장 계산은 가로, 세로, 높이가 각각 10 cm인 영역으로 구분하여 계산하였으며, 증기발생기 중심을 기준으로 가로, 세로는 8 m, 높이 방향으로는 증기발생기실 바닥면으로부터 4 m까지 계산하여 약 26만개 영역에 대하여 방사선량률을 계산하였다.

2.1.2. 평가 대상 및 전산모델링

APR1400 원전의 증기발생기는 크게 수실 영역과 전열관 영역으로 분류될 수 있다, 고 피폭작업으로 간주되는 계획예방정비 작업은 수실 및 그 주변에서 수행되므로, ALARA 계획수립을 위한 비정기 방사선(능) 측정 또한 수실 주변에서 실시되었다. 측정결과와 비교하기 위해 수실 내/외부에서의 방사선량을 평가하고자 하였으며, 이를 위해 Fig. 1과 같이 모델링하였다.

2.1.3. 방사선원항

CRUD 선원항은 APR1400 설계문서[4]에 제시된 핵종별 비방사능과 평형 CRUD 두께를 고려하여 결정하였다. 제시된 핵종은 총 6개 핵종이고, CRUD의 평형두께는 1 μm이며, 수실의 Hot/Cold 지역의 내부 표면에 모두 고르게 분포함을 가정하였다. 이 때, CRUD의 평형상태로부터 7일간의 붕괴를 고려하여 47개 그룹으로 정리한 에너지 분포를 정규화하여 Fig. 2에 나타내었다. CRUD가 함유하고 있는 방사성 물질 중 피폭에 유의미하게 기여하는 핵종은 총 6가지이다. 방사능은 ^{51}Cr이 가장 높지만 상대적으로 낮은 감마에너지(0.32 MeV)가 발생하고 수실 외부 작업에서의 피폭은 ^{58}Co, ^{60}Co, ^{54}Mn 등에 의해 주로 발생한다. 냉각재선원항 중에서는 ^{134}Cs 및 ^{137}Cs에 의한 영향이 지배적

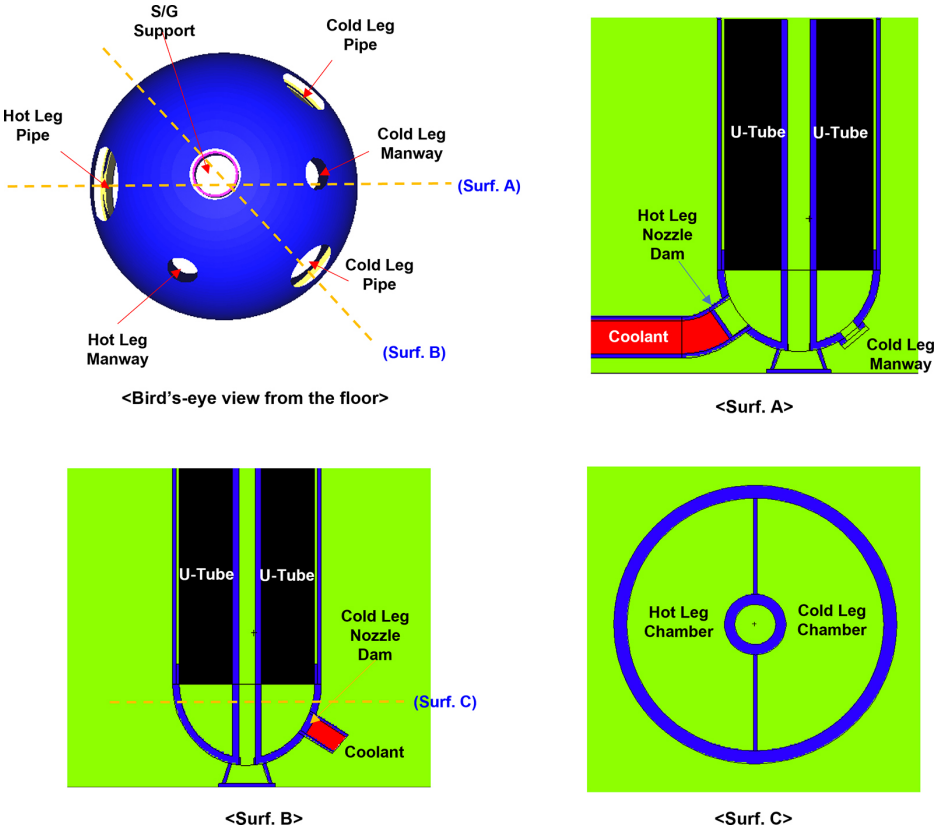

Fig. 1. MCNP 3D modeling for steam generator with reactor coolant system.

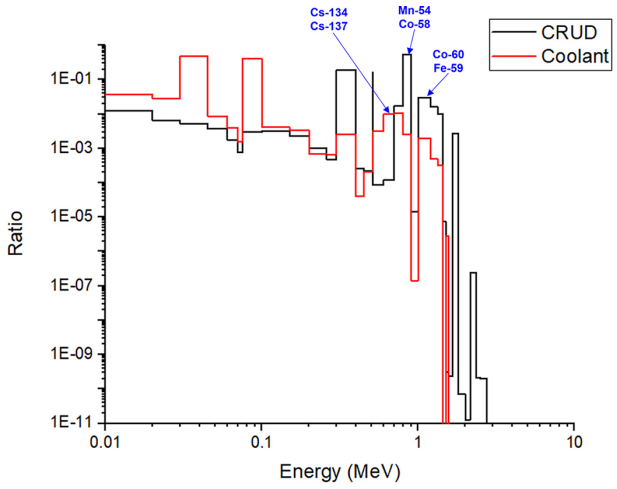

Fig. 2. Gamma energy spectrum of CRUD and coolant source term.

인 것으로 검토되었다. CRUD는 증기발생기 수실의 모든 표면에서 같은 면밀도로 침적되어있다고 가정하였으며, 냉각재는 증기발생기 노즐 입구까지 충수되어 있고, 냉각재 안에 방사선원항이 고르게 분포되었다고 가정하였다.

냉각재 선원항은 APR1400 노형을 대상으로 RADSTAR 코드[5]를 이용하여 계산하였다. 이를 위해, 대상 원전의 주기별 핵설계보고서를 참조하여 운영이력을 입력하고, 증기발생기 주변 작업 시점을 고려하여 26일 후의 냉각수 내 핵종별 방사능을 도출하였다. 이 계산으로 도출된 핵종의 광자에너지 분포는 Fig. 2과 같다.

2.2. 방법

2.2.1. 선원항 계산결과 적용 방사선장 전산해석

APR1400 설계 시 계산된 CRUD 함량과 RADSTAR로 계산된 냉각재 선원항을 보정 없이 그대로 입력하여 전산해석을 수

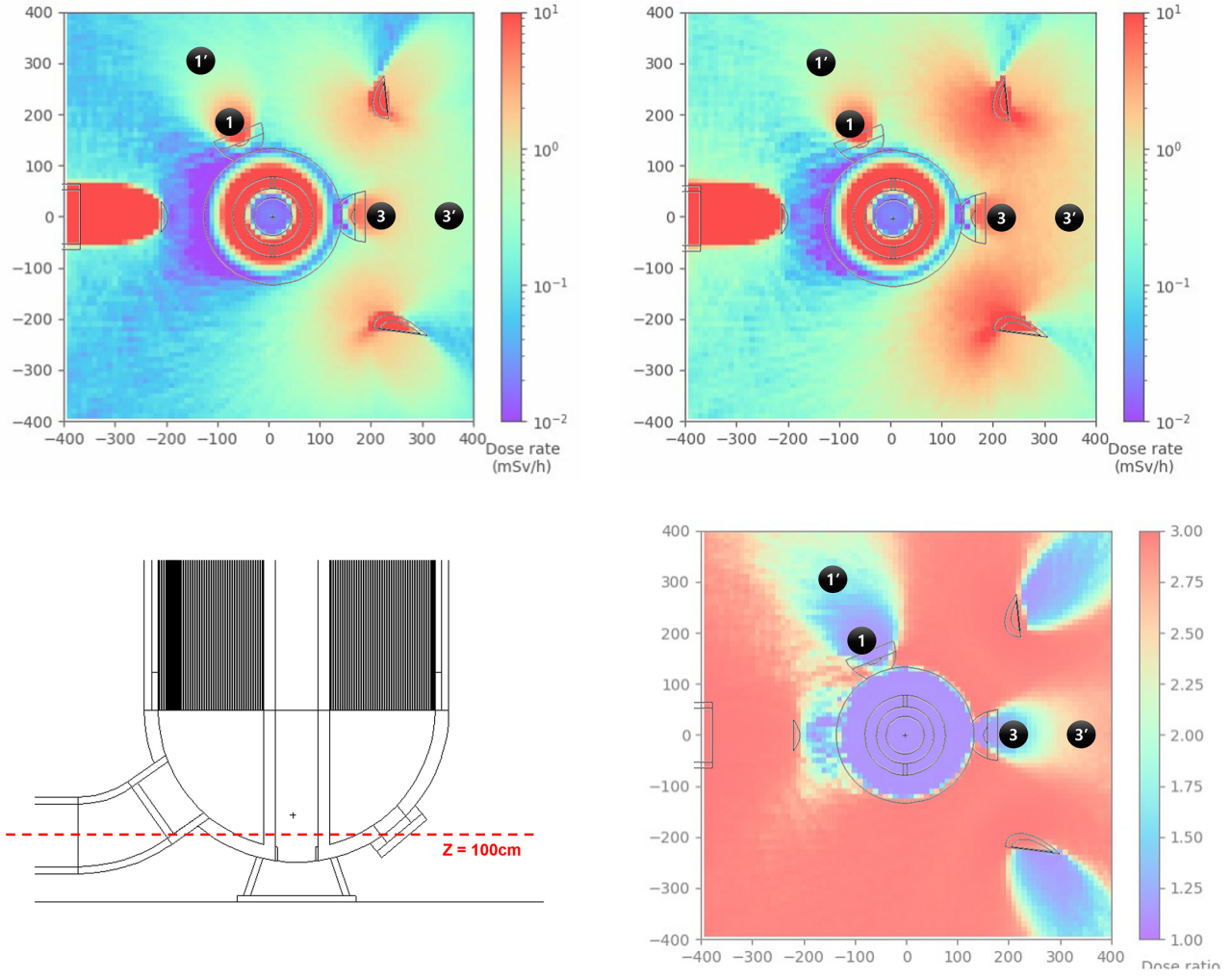

Fig. 3. Dose map for the calculation of non-corrected source term distribution at the height corresponding to a man-hole (left-up), Dose map for the calculation of corrected source term distribution (right-up), Location of the dose map section (left-bottom) and the dose ratio of the non-corrected calculation to the corrected calculation (right-bottom).

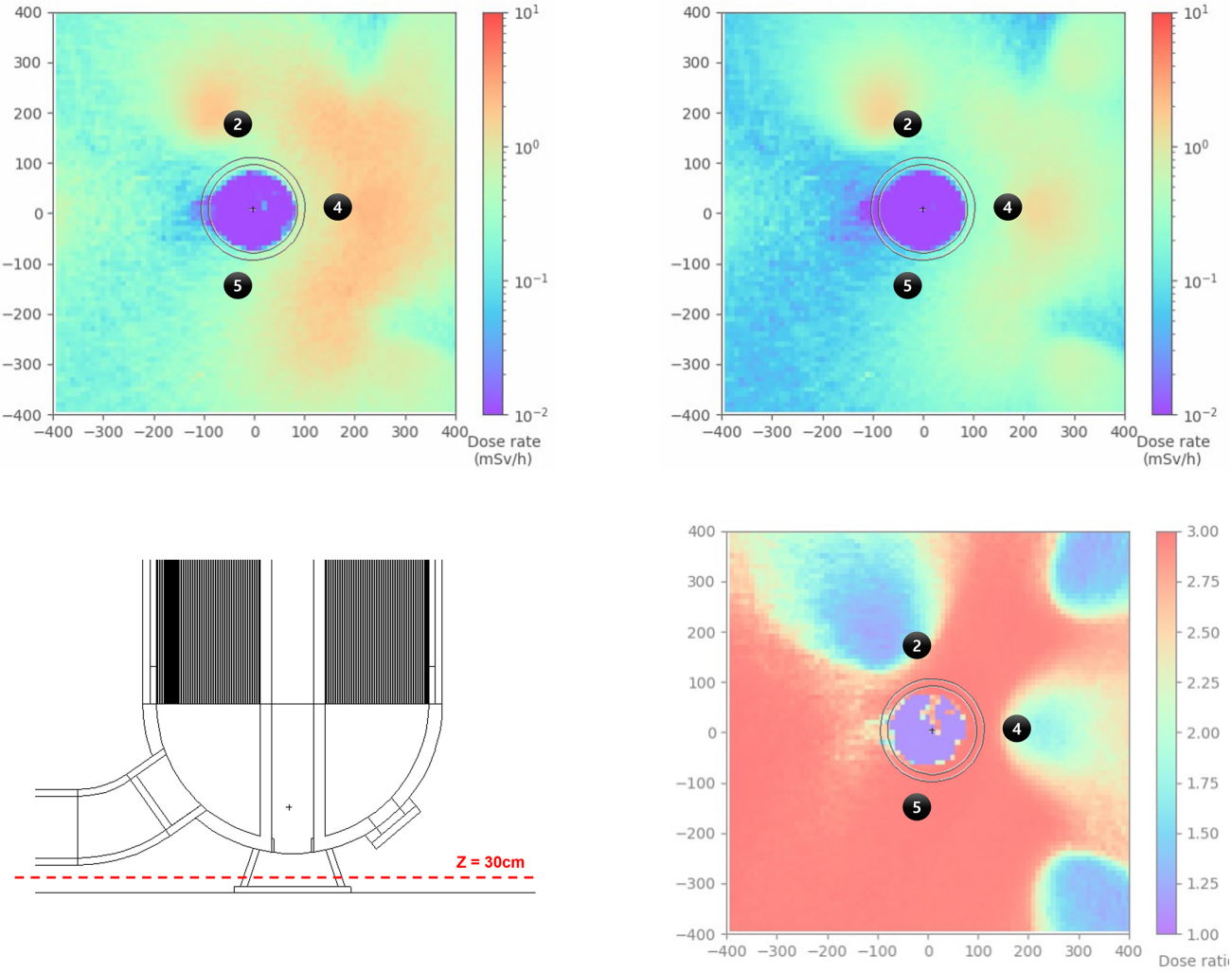

Fig. 4. Dose map for the calculation of non-corrected source term distribution at a height of 30 cm from the bottom of the steam generator room (left-up), Dose map for the calculation of corrected source term distribution (right-up), Location of the dose map section (left-bottom) and the dose ratio of the non-corrected calculation to the corrected calculation (right-bottom).

행하였다. 이 때 전산모델에서 CRUD가 침착되어있는 면적과, 냉각수가 위치한 부피를 고려하여 선원항을 결정하였다.

2.2.2. 선원항 보정 방법

APR1400 원전에서의 비정기 방사선(능) 측정결과에 따르면, 냉각수 선원항으로부터 작업자를 보호하기 위한 차폐체인 노즐댐(Nozzle Dam) 설치 전에는 작업자의 최대 피폭선량률이 60 mSv h^{-1}로 측정되었으며, 노즐댐 설치 이후에는 8 mSv h^{-1}로 감소한다. 동일 위치에서 노즐댐 설치 전 후의 선량률의 변화가 도출되는 방사선원항을 역산하면 CRUD 선원항은 1.1배, 냉각수는 3배 각각 증가시켜 입력했을 때, 최대 피폭선량률 측정결과와 일치한다. 따라서 이와 같이 선원항의 방사능을 보정하여 입력하였다.

3. 결 과

비정기 방사선(능) 측정결과와 선원항 보정 적용여부에 따른 전산해석 결과는 Table 1과 같다. 선원항 미보정 계산 시, 저온관측(Cold leg) 수실표면(③ 지점)에서 측정결과보다 12% 낮게 계산되어 측정결과 대비 가장 일치하는 결과가 도출되었다. 반면, 고온관측(Hot leg) 수실 표면으로부터 1 m 지점(② 지점)에서는, 측정결과보다 68% 낮은 값이 계산되었다. 결과적으로 선원항을 보정하지 않은 계산에서는 측정결과 대비 −12~ −67%로 계산되었다.

선원항을 보정한 계산에서는 측정결과 대비 −44~62% 범위로 계산되었는데, 수실의 고온관측에서는 측정결과 대비 낮은 값을 보였고, 저온관측에서는 측정결과보다 높은 선량률 값으로 계산되었다. 7개 지점의 측정 및 계산결과의 비율을 평균하면, 보정

Table 1. Dose rate comparison for calculations and measurements

Location		Measurement (A) [mSv h^{-1}]	Non-corrected Calculation (B) [mSv h^{-1}]	Corrected Calculation (C) [mSv h^{-1}]	[(B)-(A)]/(A)	[(A)-(C)]/(A)
Hot Leg	① – Surface	8.0	6.3	7.0	-21%	-13%
	①' - 1 m from ①	2.5	1.1	1.4	-56%	-44%
	② - 1 m for S/G*	1.2	0.5	1.0	-58%	-17%
Cold Leg	③ – Surface	5.7	5.0	6.1	-12%	7%
	③'- 1 m from ③	1.3	1.2	2.1	-31%	62%
	④ - 1 m for S/G	1.0	0.7	1.5	-50%	50%
⑤ - 1 m for S/G		0.09	0.04	0.14	-67%	56%
Average					-42%	14%

*S/G: Steam Generator

하지 않은 선원항 적용 시에는 측정값 대비 42% 낮게 계산되었고, 보정한 선원항 적용 시에는 14% 높게 계산되었다.

Fig. 3과 Fig. 4는 증기발생기 수실의 맨홀 입구 높이와 증기발생기실 바닥으로부터 30 cm 높이에 대해 계산한 방사선장을 나타낸 그림이다. 선원항 보정 적용여부에 따른 선량맵을 확인하면, 전반적으로 보정된 선원항 적용 계산에서의 선량률이 더 높게 계산되고 있으며, 특히, 맨홀 주변 및 냉각수 배관 근처에서 그 경향이 두드러진다.

Fig. 3과 Fig. 4의 우하단에 나타낸 선원항 보정 전 대비 후의 선량률 변화를 살펴보면, CRUD에 의한 피폭영향이 지배적인 수실 내부와 맨홀 입구까지는 CRUD 방사능 보정량(1.1배) 수준으로 피폭이 증가하였다. 맨홀과 방향이 다르거나, 맨홀로부터 거리가 멀어지면 냉각재 방사능 보정량(3배)에 가까운 수준으로 피폭이 증가함을 알 수 있다.

4. 결　　론

본 연구에서는 전산해석 방법에 기반하여 도출한 방사선원항을 입력으로, 계획예방정비 시 증기발생기 수실 주변 작업에서의 방사선장을 계산하고, 그 중 7개 지점에 대한 계산결과를 측정결과와 비교분석하였다.

이론적인 계산결과만을 반영한 방사선원항 입력 시 측정결과 대비 평균 42% 낮은 방사선량률이 계산되었으며, 측정결과에 기반하여 방사선원항의 분율을 역산 후 보정한 방사선원항을 입력하면, 측정결과 대비 평균 14% 높게 방사선량률이 계산되었다. 따라서, 측정결과와 더 잘 맞으면서도 ALARA 계획 수립 시 합리적인 보수성을 제공하기 위해서는 보정된 선원항 사용이 권장된다.

APR1400 노형은 아니지만, 고리1호기 증기발생기 교체 시 2개의 증기발생기의 수실에 대한 스메어 시료 채취 및 실험실 분석 시, 증기발생기 A에서는 고온관측과 저온관측이 각각 20.7과 21.1 Bq 100 cm^{-2}의 방사능이 측정되었으며, 증기발생기 B는 각각 36.6과 24.6 Bq 100 cm^{-2}로 측정된 바 있다[6]. 본 계산에서는 증기발생기 수실의 고온관측과 저온관측의 CRUD 방사능 농도를 동일하게 계산하였으나, 향후 APR1400 원전 증기발생기 CRUD 분포에 대한 가용한 측장자료를 확보하여 전산해석 시 반영한다면, 방사선장 전산해석의 정확도를 높일 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

1. OECD NEA. 2009. Work Management to Optimise Occupational Radiological Protection at Nuclear Power Plants, OECD Publishing, Paris.
2. DB Pelowitz, JT Goorley, MR James, TE Booth, FB Brown, JS Bull, LJ Cox, JW Durkee Jr., JS Elson, ML Fensin, RA Forster III, JS Hendricks, HG Hughes III, RC Johns, BC Kiedrowski, RL Martz, SG Mashnik, GW McKinney, RE Prael, JE Sweezy, LS Waters, TA Wilcox and AJ Zukaitis. 2013. MCNP6 User's Manual, rev.0.
3. ICRP. 1996. Conversion Coefficients for use in Radiological Protection against External Radiation, ICRP Publication 74 Ann. ICRP 26 (3-4).
4. KEPCO-ENC & KHNP. 2018. APR1400 Design Control Documnet Tier 2 – Chapter12. Radiation Protection, rev. 3.
5. KEPCO-ENC, Software User's Manual: RadSTAR (Radiation Source Term Analysis for Reactor Coolant System), ver. 2.0.
6. Shin SW, Son JK, Cho CH and Song MJ. 1998. Analysis of Dose Rates from Steam Generators to be Replaced from Kori Unit 1, *J. Korean Asso. Radiat. Prot*. vol **23**(3):175-0.