

원자력이용시설 해체 후 부지 재이용 안전성평가 시 부지 특성인자 민감도 분석

류강우¹ · 이세종¹ · 김혁재¹ · 김광표^{1,*}

¹경희대학교 원자력공학과

Site Specific Parameters Sensitivity Analysis for Site Reuse after Decommissioning Nuclear Facilities

Gang Woo Ryu¹, Se Jong Lee¹, Hyeok Jae Kim¹ and Kwang Pyo Kim^{1,*}

¹Department of Nuclear Engineering, Kyung Hee University 1732 Deokyoungdae-ro, Giheoung-gu,
Yongin-si, Gyeonggi-do, Republic of Korea

Abstract - In Korea, in order to complete the decommissioning of the nuclear facility, radiation dose due to residual radioactivity in the site or remaining buildings following (dose based) decommissioning satisfy site reuse criteria. When safety assessment of site reuse after decommissioning, site specific parameter should be used for reliable assessment. In this study, the sensitivity analysis of the distribution coefficient, transfer factors, and bioaccumulation factor, which are the major site specific parameter for the safety assessment were performed. The nuclides were selected based on decommissioning cases of overseas NPP, and 12 of the total 13 nuclides were selected as the target nuclides. Resident farmer scenario was applied as an exposure scenario. Distribution coefficient, transfer factors, and bioaccumulation factor were selected for sensitivity analysis. NDD (Normalized Dose Difference) was used as a sensitivity analysis method. For the application of NDD, the statistical distribution presented in NUREG/CR-6697 was used. The 5th percentile was applied as the low value, the mean value was applied as the base value, and the 95th percentile was applied as the high value. As a result of sensitivity analysis, it was found that the contaminated layer distribution coefficient was sensitive to ⁹⁹Tc and ⁹⁰Sr. The distribution coefficients of the unsaturated and saturated layers were found to be insensitive to all nuclides. When the site has one soil texture, the distribution coefficient was sensitive to ¹⁴C, ⁹⁰Sr, ⁹⁹Tc, and ²⁴¹Am. In the case of plant transfer factor, it was sensitive to ⁶³Ni, ⁹⁰Sr, ⁹⁹Tc, ²³⁸Pu, ²⁴¹Am, and ²⁴¹Pu. Meat transfer factor was sensitive to ⁵⁵Fe, and milk transfer factor was sensitive to ⁶³Ni. The bioaccumulation factor for fish was insensitive to all nuclides. As a result of the sensitivity analysis, it was found that the degree of sensitivity of the distribution coefficient and the transfer factor varies depending on the nuclide. And distribution coefficient and the transfer factor have a large influence on the change in the maximum dose overall. Therefore, in order to evaluate the safety of site reuse after decommissioning of nuclear facilities, it is considered that reliable results can be derived only when the site-specific parameters are obtained and reflected in the evaluation.

Key words : Nuclear facility, Site reuse, Sensitivity analysis, Site specific parameter

* Corresponding author: Kwang Pyo Kim, Tel. +82-31-201-2560,
Fax. +82-31-273-3592, E-mail. kpkim@khu.ac.kr

서 론

국내에서는 과거 연구용원자로 1, 2호기, 우라늄변환시설 해체를 시작으로 최근 고리1호기 영구정지 이후 원자력 이용시설 해체를 위하여 다양한 분야에서 연구가 수행되고 있다. 원자력안전법 제2조제24항에서는 해체를 시설의 운영을 영구적으로 정지한 후, 해당 시설과 부지를 철거하거나 방사성오염을 제거함으로써 이 법의 적용대상에서 배제하기 위한 모든 활동으로 정의하고 있다(원자력안전위원회 2020). 해체 부지의 경우 규제해제된 폐기물 등의 일반적인 물질과 비교하여 잠재적으로 재이용될 개연성이 높아 일반적으로 녹지, 산업시설 등으로 재이용된다(IAEA 2006). 원자력이용시설을 해체하고 해당 부지를 재이용하기 위해서는 해체 부지 및 잔존건물 내 잔류방사능으로 인한 방사선량이 원자력안전위원회고시 제2016-33호 제4조에 제시되어 있는 부지 재이용을 위한 선량 기준을 만족하여야 한다. 그리고 동 고시 제5조에 따라 잔류방사능에 의한 방사선량 평가 시 시설 및 부지의 특성을 적절하게 고려하여야 한다(원자력안전위원회 2016). 따라서 안전성평가 결과의 신뢰도를 확보하기 위해서는 부지 특성 입력인자가 최대한 활용되어야 한다.

국제원자력기구(IAEA)에서는 해체 후 부지 재이용 기준을 제시하였으며, 각 국가는 국내 실정에 맞는 기준을 설정하였다(IAEA 2006). Yankee Rowe, Rancho Seco, Humboldt bay 원전 등 각 원전 운영자는 부지 재이용 기준에 따라 해체 후 부지 재이용 안전성평가를 수행하였다(YAEC 2004; SMUD 2008; PG & E 2014). 아르곤국립연구소(ANL)에서는 원전 이외 실험건물, 중수시험로 시설 등 다양한 시설에 대한 안전성평가를 수행하였다(ANL 1996; ANL 1997; ANL 2011). Kamboj 등, Park 등은 RESRAD-ONSITE 전산코드 내 민감한 입력인자 식별을 위하여 결정론적 및 확률론적 분석 결과를 비교하였다(Kamboj *et al.* 2005; Park *et al.* 2020). Hong 등은 국내 연구용원자로 1, 2호기 및 우라늄변환시설에 대한 안전성평가를 수행하였다(Hong *et al.* 2011; Hong *et al.* 2014). 서형우 등은 고리1호기 해체를 위하여 평가대상 핵종 선정, 부지특성 시나리오 선정 방법, DCGL 예비평가 등 해체 후 부지 재이용 안전성평가와 관련된 연구를 수행하였다(Seo and Sohn 2019a; Seo and Sohn 2019b; Seo *et al.* 2021).

해체 후 부지 재이용 안전성평가와 관련된 연구는 일부 수행되었으나, 부지특성 입력인자 민감도 분석에 대한 연구는 부족한 실정이다. 과거 연구에서 수행된 민감도 분석의 경우 소수의 핵종에 대하여 수행되었다. 아르곤국립연구소에서는 RESRAD-ONSITE 전산코드 내 입력인자의 우선순위를 분류하였다. 우선순위 1, 2로 분류된 입력인자 중 대표적인 부지특성 입력인자로 핵종별 분배계수

(Distribution coefficient), 전이계수(Transfer factor), 농축계수(Bioaccumulation factor)가 있다(NRC 2000). 그리고 해당 입력인자 이외의 부지특성 입력인자는 모든 핵종에 대해서 동일한 값을 적용할 수 있으나, 분배계수, 전이계수, 농축계수는 핵종 및 원소에 따라 특정값을 가지는 특성이 있다. 원전 해체 시 부지 내 잔류할 가능성이 있는 핵종은 다양하며, 핵종에 따라 지배적인 피폭경로가 상이하다. 분배계수의 경우 외부피폭, 내부피폭 관점 모두에서 주요한 입력인자이며, 전이계수 및 농축계수는 섭취로 인한 내부피폭 관점에서 주요한 입력인자이다. 따라서 피폭관점에서 주요한 부지특성 입력인자인 분배계수, 전이계수, 농축계수에 대한 민감도 분석이 필요하다.

본 연구에서는 해체 후 부지 재이용 안전성평가 시 주요한 부지특성 입력인자 중 핵종 및 원소에 종속된 입력인자의 민감도 분석을 수행하였다. 민감도 분석을 위하여 해체 후 부지에 잔류할 가능성이 높은 방사성핵종 선정, 해체 후 부지 재이용 시나리오를 선정하였다. 민감도 분석 방법으로 NDD를 활용하였으며, 민감도 분석 시 RESRAD-ONSITE 전산코드를 활용하였다.

재료 및 방법

1. 평가 대상 핵종 선정

본 연구에서는 민감도 평가 대상 핵종 선정을 위하여 국외 원전 해체 사례를 조사하였다. 2019년 12월 기준 미국에서는 16기의 원전 해체가 완료되어 전 세계적으로 해체에 대한 경험이 가장 풍부하다(IAEA 2020). 따라서 미국의 원전 해체 사례를 중심으로 조사를 수행하였다.

국내의 경우 크게 가압형경수로(PWR; Pressurized Water Reactor)와 가압중수로(PHWR; Pressurized Heavy Water Reactor) 두 가지 유형의 원자력발전소가 운영중이다. 국내의 원전은 월성원전을 제외하고 모두 가압형경수로이다. 따라서 미국의 대표적인 원자력이용시설 중 가압형경수로 유형의 원전인 Yankee Rowe, Connecticut Yankee, Rancho Seco, SONGS 1 원전에서 해체 후 부지 재이용 안전성평가에 고려된 핵종을 조사하였다.

Table 1에 본 연구에서 고려한 평가 대상 핵종을 나타내었다. 국외 해체 사례에서 공통적으로 고려된 13개의 핵종 중 12개의 핵종을 평가 대상 핵종으로 선정하였으며, 방사능농도는 $1 \text{ Bq} \cdot \text{g}^{-1}$ 으로 가정하였다. 일반적으로 분배계수, 전이계수, 농축계수는 핵종 및 원소의 물리·화학적 특성으로 동위원소 관계 사이에는 동일한 값이 적용된다. 따라서 동위원소 관계인 ^{238}Pu , ^{239}Pu , ^{241}Pu 중 ^{239}Pu 는 평가 대상에서 제외하였다. 그러나 ^{241}Pu 의 경우 ^{238}Pu 과는 다르게 베타

Table 1. Radionuclides for site-specific parameter sensitivity analysis

Nuclides	Yankee Rowe	Connecticut Yankee	SONGS 1	Rancho Seco	This study
³ H	✓	✓	✓	✓	✓
¹⁴ C	✓	✓	✓	✓	✓
²² Na				✓	
⁵⁴ Mn		✓	✓		
⁵⁵ Fe	✓	✓	✓	✓	✓
⁵⁹ Ni				✓	
⁶⁰ Co	✓	✓	✓	✓	✓
⁶³ Ni	✓	✓	✓	✓	✓
⁹⁰ Sr	✓	✓	✓	✓	✓
⁹⁴ Nb	✓	✓		✓	
⁹⁹ Tc	✓	✓	✓	✓	✓
^{108m} Ag	✓	✓		✓	
¹²⁵ Sb	✓			✓	
¹²⁹ I			✓		
¹³⁴ Cs	✓	✓		✓	
¹³⁷ Cs	✓	✓	✓	✓	✓
¹⁴⁷ Pm				✓	
¹⁵² Eu	✓	✓	✓	✓	✓
¹⁵⁴ Eu	✓	✓		✓	
¹⁵⁵ Eu	✓	✓		✓	
²³⁷ Np				✓	
²³⁸ Pu	✓	✓	✓	✓	✓
²³⁹ Pu	✓	✓	✓	✓	
²⁴⁰ Pu	✓			✓	
²⁴¹ Pu	✓	✓	✓	✓	✓
²⁴² Pu				✓	
²⁴¹ Am	✓	✓	✓	✓	✓
²⁴³ Cm	✓	✓			
²⁴⁴ Cm	✓			✓	

붕괴 핵종으로 평가 대상에 포함하였다.

2. 피폭시나리오 및 피폭경로 선정

선원향을 결정한 이후에는 피폭자가 어떠한 방식으로 잔류방사능에 직·간접적 영향을 받게 되는지 결정해야 한다. 즉, 적절한 피폭시나리오는 무엇이며 이에 따른 피폭경로에는 어떠한 것들이 포함되는지 결정해야 한다.

미국 아르곤국립연구소(ANL; Argonne National Laboratory)에서는 해체 후 부지 재이용에 적용 가능한 일반적인 시나리오로 거주경작(Resident farmer), 산업작업자(Industrial worker), 교외거주자(Suburban resident), 여가활동자(Recreationist) 시나리오를 제시하였다(ANL 2001). 미국 원자력규제위원회(NRC; Nuclear Regulatory Commission)에서는 해체 후 부지 재이용 안전성평가 심사 시 기본 시나리오로 거주경작 시나리오를 채택하였으며, 해체 후 부지 재

이용 안전성평가 시 거주경작 시나리오 적용에 대한 정당성을 인정하였다(NRC 2002). 따라서 본 연구에서는 다수의 피폭시나리오 중 농산물, 육류, 우유, 어류 등을 모두 섭취하는 거주경작 시나리오를 대상 시나리오로 선정하였다.

Table 2에 본 연구에서 가정한 거주경작 시나리오에서 고려되는 피폭경로와 해당 피폭경로의 주요 입력인자를 나타내었다(ANL 2011). 피폭경로는 외부피폭, 흡입으로 인한 내부피폭, 농산물, 육류, 우유, 수산물, 토양, 음용수 섭취로 인한 내부피폭을 모두 고려하였다. 그러나 흡입으로 인한 피폭경로 중 라돈 흡입으로 인한 피폭의 경우 기존피폭에 해당하여 본 평가에서는 제외하였다(ICRP 2007). 농산물, 육류, 우유 섭취로 인한 내부피폭경로의 경우 전이계수와 분배계수가 모두 주요한 입력인자로 나타났으며, 어류 섭취로 인한 내부피폭경로의 경우 어류 농축계수와 분배계수가 주요한 입력인자로 나타났다.

Table 2. Exposure pathways and key parameters for resident farmer scenario

Exposure pathway	Resident farmer scenario	Key parameter
Ingestion of plant	○	Plant transfer factor, plant ingestion rate, water dilution factor, and release rate from the source
Ingestion of meat	○	Plant transfer factor, meat transfer factor, meat ingestion rate, water dilution factor, and release rate from the source
Ingestion of milk	○	Plant transfer factor, milk transfer factor, milk ingestion rate, water dilution factor, and release rate from the source
Ingestion of fish	○	Fish bioaccumulation factor, aquatic food contaminated fraction, surface water dilution factor, and release rate from the source
Ingestion of soil	○	Soil ingestion rate and time spent onsite
Ingestion of water	○	Water ingestion rate, infiltration rate, distribution coefficient, and hydrogeological parameters for the site
External gamma exposure	○	Time fraction spent onsite, external gamma shielding factor
Inhalation of dust	○	Inhalation rate, time fraction spent onsite, mass loading for inhalation, and indoor dust filtration factor
Radon inhalation	×	Inhalation rate, time fraction spent onsite, mass loading for inhalation, and indoor dust filtration factor

Table 3. Parameter dependent on nuclides and elements

	Parameter Name	Priority	Unit
Nuclide specific	Radionuclide concentration	2	$\text{Bq} \cdot \text{g}^{-1}$
	Distribution coefficients	1	$\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$
	Groundwater concentration	3	$\text{Bq} \cdot \text{L}^{-1}$
	Leach rate	3	$\text{l} \cdot \text{yr}^{-1}$
	Solubility limit	3	$\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$
	Inhalation dose conversion factors	3	$\text{mSv} \cdot \text{Bq}^{-1}$
	Ingestion dose conversion factors	3	$\text{mSv} \cdot \text{Bq}^{-1}$
	Slope factor - external	3	$(\text{risk} \cdot \text{yr}^{-1}) \cdot (\text{Bq} \cdot \text{g}^{-1})^{-1}$
	Slope factor - inhalation	3	$\text{risk} \cdot \text{Bq}^{-1}$
	Slope factor - ingestion	3	$\text{risk} \cdot \text{Bq}^{-1}$
Element specific	Plant transfer factor	1	$(\text{Bq} \cdot \text{g}^{-1}) \cdot (\text{Bq} \cdot \text{g}^{-1})^{-1}$
	Meat transfer factor	2	$(\text{Bq} \cdot \text{g}^{-1}) \cdot (\text{Bq} \cdot \text{d}^{-1})^{-1}$
	Milk transfer factor	2	$(\text{Bq} \cdot \text{L}^{-1}) \cdot (\text{Bq} \cdot \text{d}^{-1})^{-1}$
	Bioaccumulation factor for fish	2	$(\text{Bq} \cdot \text{g}^{-1}) \cdot (\text{Bq} \cdot \text{L}^{-1})^{-1}$
	Bioaccumulation factor for crustacean	3	$(\text{Bq} \cdot \text{g}^{-1}) \cdot (\text{Bq} \cdot \text{L}^{-1})^{-1}$

3. RESRAD-ONSITE 전산코드 내 민감도 분석 대상 입력인자 선정

3.1. RESRAD-ONSITE 전산코드 분석

본 연구에서는 해체 후 부지 재이용 안전성평가 입력인자 민감도 분석을 위한 수단으로 RESRAD-ONSITE 전산코드를 활용하였다. RESRAD-ONSITE 전산코드는 방사능으로 오염된 부지 위에 있는 개인의 방사선량을 평가하고 특정 선량 기준에 해당하는 방사성핵종의 잔류방사능 유도농

도를 도출하기 위해 아르곤국립연구소에서 개발하였다.

RESRAD-ONSITE 전산코드 내 입력인자는 약 150개로 이루어져 있다. 이 중 130개의 입력인자는 핵종과 독립된 입력인자이며, 10개는 핵종에 종속된 입력인자, 5개는 원소(element)에 종속된 입력인자이다. 입력인자는 물리적(Physical) 입력인자, 거동(Behavioral) 입력인자, 대사(Metabolic) 입력인자 3가지 유형으로 구분할 수 있다(NRC 2000). 이 중 부지특성 입력인자는 물리적 입력인자에 해당된다. 물리적 입력인자는 선원 및 부지에 따라 결정되는 입

력인자이며, 피폭자 집단에는 영향을 받지 않는 입력인자이다. 거동 입력인자는 피폭시나리오 내 피폭자 행동특성에 영향을 받는 입력인자이다. 대사 입력인자는 피폭자의 대사 특성을 나타내며, 피폭시나리오와는 무관하나 피폭자 집단에 영향을 받는 입력인자이다.

3.2. 입력인자 선정

Table 3에 핵종 및 원소에 종속된 입력인자를 나타내었다. 본 연구에서는 물리적 입력인자 중 핵종 및 원소에 종속된 분배계수, 전이계수, 농축계수를 민감도 분석 대상으로 선정하였다. 단, 농축계수 중 갑각류에 대한 농축계수는 우선순위 3으로 분류되어 본 연구에서는 제외하였다. 분배계수의 경우 토양에 잔류하는 방사성핵종의 비율과 관계가 있어 핵종에 따라 외부피폭, 내부피폭 관점 모두에서 주요한 영향을 미친다. 전이계수 및 농축계수의 경우 방사성핵종의 해당 매체로의 전이, 농축되는 비율과 관계가 있어 내부피폭 관점에서 주요한 영향을 미친다.

민감도 분석 대상 입력인자인 분배계수, 전이계수, 농축계수의 경우 미국 원자력규제위원회의 NUREG/CR-6697에 제시된 확률분포 내 값을 활용하였다(NRC 2000). 이 외 오염층 면적, 밀도, 총공극률 등의 입력인자의 경우 국내에서 수행된 해체 후 부지 재이용 안전성평가 연구에 제시된 데이터를 인용하였다(Seo *et al.* 2021). 국내 연구에서도 제시된 데이터가 부재한 경우 RESRAD-ONSITE 전산코드 내 기본값을 활용하였다.

Table 4에 본 연구에서 민감도 분석에 적용한 핵종별 분배계수, 전이계수, 농축계수를 나타내었다. NUREG/CR-6697 기술보고서에서 제시된 확률분포는 다년간의 조사, 실험, 측정 등의 결과를 바탕으로 도출된 결과물로, 분포, 평균값, 표준편차 등 통계변수에 대한 값으로 제시되어 있다. NDD법 적용을 위하여 분배계수, 전이계수, 농축계수의 각 확률분포에서 5백분위, 평균값, 95백분위 값을 선정하였다(Kamboj *et al.* 2005). 핵종별 5백분위 대비 95백분위 값은 분배계수의 경우 약 5~38,000배, 농산물 전이계수는 약 20~40배, 육류 전이계수는 약 2~30배, 우유 전이계수는 약 5~20배, 어류 농축계수는 약 1~40배 높게 선정되었다.

4. 민감도 분석 방법론 선정

본 연구에서는 분배계수, 전이계수, 농축계수에 따른 민감도 분석을 수행하기 위하여 NDD(Normalized Dose Difference)를 이용하였다. 분배계수 민감도 분석 시 오염층, 불포화층, 포화층 각각에 대하여 분배계수 값을 적용하여 NDD를 분석하는 경우와 오염층, 불포화층, 포화층 전체에 동일한 분배계수 값을 반영하여 NDD를 분석하는 경우로 구분하였다. 그리고 전이계수, 농축계수 민감도 분석 시 각각에 대해 전이계수 값과 농축계수 값을 적용하여 NDD를 분석

Table 4. Distribution coefficient, transfer factor, accumulation factor applied to sensitivity analysis

Nuclide	Distribution coefficient			Plant transfer factor			Meat transfer factor			Milk transfer factor			Fish bioaccumulation factor		
	Low (5%)	Base (Mean)	High (95%)	Low (5%)	Base (Mean)	High (95%)	Low (5%)	Base (Mean)	High (95%)	Low (5%)	Base (Mean)	High (95%)	Low (5%)	Base (Mean)	High (95%)
³ H	2.65 × 10 ⁻²	6.02 × 10 ⁻²	1.36 × 10 ⁻¹	7.92 × 10 ⁻¹	4.81 × 10 ⁰	2.90 × 10 ¹	2.34 × 10 ³	1.20 × 10 ²	6.18 × 10 ²	2.30 × 10 ³	1.01 × 10 ²	4.37 × 10 ²	8.48 × 10 ⁻¹	1.00 × 10 ⁰	1.18 × 10 ⁰
¹⁴ C	5.60 × 10 ⁻²	1.10 × 10 ¹	2.12 × 10 ³	1.60 × 10 ⁻¹	6.98 × 10 ⁻¹	3.04 × 10 ⁰	6.06 × 10 ⁻³	3.11 × 10 ⁻²	1.60 × 10 ⁻¹	2.81 × 10 ⁻³	1.23 × 10 ⁻²	5.34 × 10 ⁻²	8.02 × 10 ³	4.90 × 10 ⁴	2.99 × 10 ⁵
⁵⁵ Fe	2.63 × 10 ⁰	2.09 × 10 ²	1.65 × 10 ⁴	2.28 × 10 ⁻⁴	9.98 × 10 ⁻⁴	4.35 × 10 ⁻³	1.55 × 10 ⁻²	2.99 × 10 ⁻²	5.75 × 10 ⁻²	9.55 × 10 ⁻⁵	3.01 × 10 ⁻⁴	9.43 × 10 ⁻⁴	3.28 × 10 ¹	2.00 × 10 ²	1.22 × 10 ³
⁶⁰ Co	3.70 × 10 ⁰	2.35 × 10 ²	1.47 × 10 ⁴	1.82 × 10 ⁻²	7.97 × 10 ⁻²	3.47 × 10 ⁻¹	5.82 × 10 ⁻³	2.99 × 10 ⁻²	1.53 × 10 ⁻¹	6.39 × 10 ⁻⁴	2.01 × 10 ⁻³	6.30 × 10 ⁻³	4.89 × 10 ¹	2.99 × 10 ²	1.82 × 10 ³
⁶³ Ni	3.87 × 10 ¹	4.24 × 10 ²	4.61 × 10 ³	1.14 × 10 ⁻²	4.98 × 10 ⁻²	2.17 × 10 ⁻¹	1.14 × 10 ⁻³	4.99 × 10 ⁻³	2.18 × 10 ⁻²	6.37 × 10 ⁻³	2.00 × 10 ⁻²	6.29 × 10 ⁻²	1.63 × 10 ¹	9.95 × 10 ¹	6.07 × 10 ²
⁹⁰ Sr	9.73 × 10 ⁻¹	3.15 × 10 ¹	1.01 × 10 ³	5.85 × 10 ⁻²	3.01 × 10 ⁻¹	1.55 × 10 ⁰	5.17 × 10 ⁻³	9.95 × 10 ⁻³	1.91 × 10 ⁻²	8.86 × 10 ⁻⁴	2.01 × 10 ⁻³	4.55 × 10 ⁻³	9.87 × 10 ⁰	6.03 × 10 ¹	3.68 × 10 ²
⁹⁹ Tc	2.87 × 10 ⁻³	5.12 × 10 ⁻¹	8.94 × 10 ¹	1.14 × 10 ⁰	5.00 × 10 ⁰	2.18 × 10 ¹	3.18 × 10 ⁻⁵	1.00 × 10 ⁻⁴	3.14 × 10 ⁻⁴	3.17 × 10 ⁻⁴	9.98 × 10 ⁻⁴	3.13 × 10 ⁻³	3.28 × 10 ⁰	2.01 × 10 ¹	1.22 × 10 ²
¹³⁷ Cs	9.75 × 10 ⁰	4.46 × 10 ²	2.01 × 10 ⁴	7.76 × 10 ⁻³	4.00 × 10 ⁻²	2.05 × 10 ⁻¹	2.59 × 10 ⁻²	4.98 × 10 ⁻²	9.58 × 10 ⁻²	4.39 × 10 ⁻³	9.95 × 10 ⁻³	2.25 × 10 ⁻²	6.31 × 10 ²	2.00 × 10 ³	6.31 × 10 ³
¹⁵² Eu	4.21 × 10 ⁰	8.29 × 10 ²	1.60 × 10 ⁵	3.31 × 10 ⁻⁴	2.01 × 10 ⁻³	1.21 × 10 ⁻²	3.91 × 10 ⁻⁴	2.01 × 10 ⁻³	1.03 × 10 ⁻²	1.38 × 10 ⁻⁵	6.01 × 10 ⁻⁵	2.61 × 10 ⁻⁴	8.08 × 10 ⁰	4.94 × 10 ¹	3.01 × 10 ²
²³⁸ Pu	4.32 × 10 ¹	9.53 × 10 ²	2.10 × 10 ⁴	2.28 × 10 ⁻⁴	9.98 × 10 ⁻⁴	4.35 × 10 ⁻³	7.21 × 10 ⁻⁵	1.00 × 10 ⁻⁴	1.39 × 10 ⁻⁴	4.39 × 10 ⁻⁷	9.96 × 10 ⁻⁷	2.25 × 10 ⁻⁶	4.90 × 10 ⁰	3.00 × 10 ¹	1.82 × 10 ²
²⁴¹ Pu	4.32 × 10 ¹	9.53 × 10 ²	2.10 × 10 ⁴	2.28 × 10 ⁻⁴	9.98 × 10 ⁻⁴	4.35 × 10 ⁻³	7.21 × 10 ⁻⁵	1.00 × 10 ⁻⁴	1.39 × 10 ⁻⁴	4.39 × 10 ⁻⁷	9.96 × 10 ⁻⁷	2.25 × 10 ⁻⁶	4.90 × 10 ⁰	3.00 × 10 ¹	1.82 × 10 ²
²⁴¹ Am	8.27 × 10 ⁰	1.45 × 10 ³	2.49 × 10 ⁵	2.28 × 10 ⁻⁴	9.98 × 10 ⁻⁴	4.35 × 10 ⁻³	3.62 × 10 ⁻⁵	5.02 × 10 ⁻⁵	6.96 × 10 ⁻⁵	6.37 × 10 ⁻⁷	2.00 × 10 ⁻⁶	6.29 × 10 ⁻⁶	4.90 × 10 ⁰	3.00 × 10 ¹	1.83 × 10 ²

하였다.

일반적인 민감도 분석 방식은 입력인자 값의 범위가 매우 광범위하고, 각 입력인자마다 범위가 상이할 경우 적절한 지표로 활용하기에는 한계가 존재한다(Kamboj *et al.* 2005). 따라서 민감도 분석 방법으로 NDD를 활용하였으며, NDD는 아래의 식으로 계산한다.

$$NDD = \left[\frac{D_{high} - D_{low}}{D_{base}} \right] \times 100\%$$

아르곤국립연구소에서는 RESRAD 전산코드 내 입력인자의 우선순위를 결정하는 방법의 한 단계로 NDD 값을 활용하고 있다. NDD 값에 따라 차등적으로 점수를 부여하여 우선순위 선정에 반영하고 있다. 우선순위(priority) 1 입력인자로 분류되기 위해서는 NDD 값에 따른 점수가 최대 4점 이하여야 한다(NRC 2000). 따라서 본 연구에서는 민감한 입력인자의 기준으로 NDD 값이 50을 초과한 경우로 가정하였다.

결과 및 토의

본 연구에서는 국외 원전 해체 사례를 기반으로 평가 대상 핵종을 선정하였다. 모든 피폭경로를 포함하는 시나리오인 거주경작 시나리오를 피폭시나리오로 선정하였다. 민감도 분석 입력인자로 분배계수, 전이계수, 농축계수를 선정하였다. NUREG 문헌에 제시된 정보를 기반으로 민감도 분석 입력인자 값을 선정하였다. 민감도 분석 방법으로 NDD를 활용하였으며, RESRAD-ONSITE 전산코드를 활용하여 민감도 분석을 수행하였다.

1. 분배계수 민감도 분석

Fig. 1에 분배계수 NDD 분석 결과를 나타내었다. 오염층 분배계수만 NDD를 분석한 경우 ^{99}Tc , ^{90}Sr 에 대해서 각각 358, 63으로 민감한(NDD > 50) 것으로 나타났다. 이어서 ^{55}Fe , ^{241}Pu , ^{60}Co , ^{14}C 순으로 37, 32, 31, 31로 NDD 값이 높게 평가되었다. 95백분위와 같이 분배계수가 큰 경우 방사성핵종이 주로 오염층에 존재하게 된다. 이에 따라 ^{14}C , ^{55}Fe , ^{90}Sr , ^{99}Tc , ^{241}Pu 등 베타 및 알파선 방출 핵종은 농산물, 육류, 우유 섭취로 인한 피폭방사선량이 증가하며, ^{60}Co , ^{137}Cs 등 감마선 방출핵종은 외부피폭으로 인한 피폭방사선량이 증가하는 것으로 나타났다. 불포화층과 포화층 분배계수 각각에 대한 NDD 분석 결과 모든 핵종에 대해서 3 이하로 나타났다. 따라서, 오염층, 불포화층, 포화층 분배계수 중 방사성핵종의 침출률을 결정하는 오염층 분배계수가 가장 주요한 입력인자인 것으로 나타났다. 부지를 구성하는 오염

층, 불포화층, 포화층 토양의 특성 및 토질특성이 모두 동일한 경우 분배계수 NDD 분석 결과 ^{241}Am , ^{99}Tc , ^{14}C , ^{90}Sr 에 대해서 1,479, 337, 297, 63으로 민감한 것으로 나타났다. 특히, ^{241}Am 과 ^{14}C 은 분배계수 값이 작을수록 최대선량이 증가하는 것으로 나타났다. ^{241}Am , ^{14}C 의 경우 분배계수 값이 작을수록 침출의 정도가 증가함에 따라 어류, 음용수 섭취 등 지하수 경로 선량이 크게 증가하기 때문인 것으로 나타났다.

핵종별 분배계수 변화에 따른 피폭방사선량 평가 결과 분배계수에 따라 최대선량이 나타나는 시기에 영향을 받는 핵종이 존재하였다. ^{14}C , ^{90}Sr , ^{99}Tc , ^{241}Pu , ^{241}Am 이 영향을 받는 것으로 나타났다. ^{14}C , ^{90}Sr , ^{99}Tc , ^{241}Am 의 경우 분배계수에 따라 주요 피폭경로 변화에 의한 것으로 나타났으며, ^{241}Pu 은 자핵종인 ^{241}Am 선량기여 증가로 인한 것으로 나타났다. Fig. 2에 ^{241}Pu 의 분배계수 변화에 따른 시기별 방사선량을 나타내었다. ^{241}Pu 의 경우 베타방출 핵종이며, 반감기가 14년으로 부지 재이용 관점에서 상대적으로 짧다. ^{241}Pu 의 자핵종은 ^{241}Am 로 ^{241}Am 은 알파, 감마 방출 핵종이며, 반감기가 432년으로 상대적으로 길다. 따라서 ^{241}Pu 의 경우 시간이 경과함에 따라 ^{241}Pu 로 인한 선량보다 ^{241}Am 로 인한 선량이 지배적이다. Base와 95백분위의 경우, 높은 분배계수 값에 따라 포화층으로 이동하는 ^{241}Pu 의 양이 감소하여 오염층 내 잔류하는 ^{241}Pu 의 붕괴로 인해 생성된 ^{241}Am 의 외부피폭 기여도가 증가하는 것으로 나타났다. 반면 5백분위의 경우 포화층으로 이동하는 ^{241}Pu 의 양이 증가함에 따라 ^{241}Am 의 외부피폭 기여도 증가가 낮은 것으로 나타났다. 결과적으로, 분배계수 값이 증가할수록 포화층으로 이동되는 ^{241}Pu 의 양이 감소하며, 이에 따라 오염층 내에서 ^{241}Am 로 붕괴하는 ^{241}Pu 의 양이 증가하게 된다. 해당 과정에서 생성된 ^{241}Am 로 인한 선량이 증가함에 따라 최대선량이 나타나는 시기가 지연되는 것으로 나타났다.

2. 전이계수 및 농축계수 민감도 분석

Fig. 3에 농산물, 육류, 우유 전이계수, 어류 농축계수 NDD 분석 결과를 나타내었다. 전반적으로 농산물, 육류, 우유 전이계수, 어류 농축계수 순으로 NDD 값이 높은 것으로 나타났다. 농산물 전이계수 NDD의 경우 베타방출 핵종인 ^{90}Sr , ^{99}Tc , ^{63}Ni , ^{241}Pu 에 대하여 471, 386, 308, 104, 알파 방출 핵종인 ^{238}Pu , ^{241}Am 에 대하여 216, 153으로 민감한 것으로 나타났다. 육류 전이계수 NDD의 경우 베타방출 핵종인 ^{55}Fe 에 대하여 131로 민감한 것으로 나타났다. 우유 전이계수 NDD의 경우 베타방출 핵종인 ^{63}Ni 에 대하여 112로 민감한 것으로 나타났다. 어류 농축계수 NDD의 경우 모든 핵종에 대하여 3 이하로 민감하지 않은 것으로 나타났다. NDD는 입력인자로 인한 최대선량을 기반으로 계산되기 때

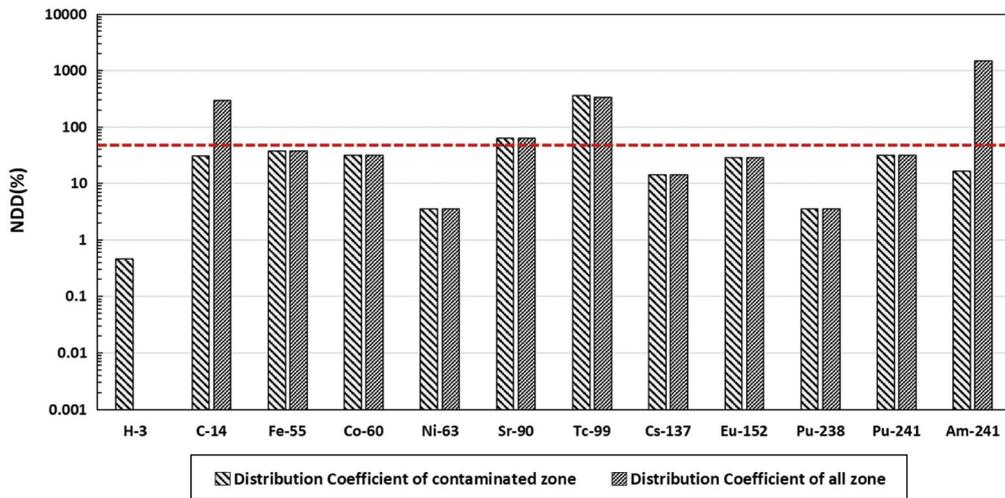


Fig. 1. NDD analysis results of distribution coefficient.

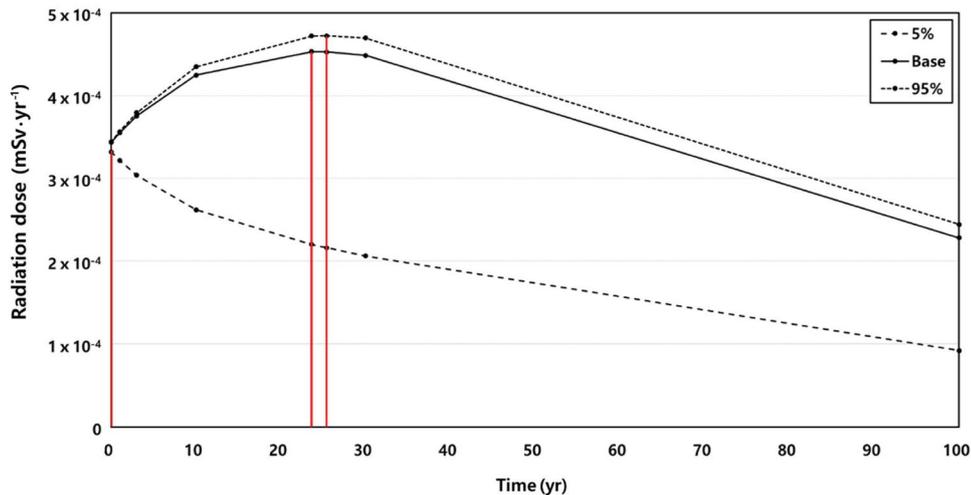


Fig. 2. Radiation dose according to distribution coefficient of ^{241}Pu .

문에 상대적으로 선량기여가 낮은 어류 섭취경로는 모든 핵종에 대하여 민감하지 않은 것으로 나타났다.

^3H , ^{14}C 의 경우 입력되는 전이계수가 아닌 토양 특성, 섭생 특성을 기반으로 전이계수가 계산되기 때문에 NDD 결과는 3 이하로 나타났다. ^3H , ^{14}C 의 경우 환경상에 안정된 동위원소들이 만연해 있으며, 이동성이 강하기 때문에 RESRAD-ONSITE 전산코드에서는 해당 두 핵종의 매체간 이동을 평가하기 위한 세부 모델을 개발하였다(ANL 2001). ^3H 의 경우 농산물 전이계수는 단순 입력되는 값이 아닌, 토양 특성을 기반으로 전이계수가 계산되도록 개발되었다. 즉, 토양의 밀도, 공극률, 지연인자 등을 기반으로 계산되도록 개발되었다. 육류 및 우유 전이계수는 가축의 물, 사료, 토양 섭취량, 사료 내 수분함량을 기반으로 계산되도록 개발되었다. ^{14}C 의 경우 RESRAD-ONSITE 전산코드 내 방사

성핵종의 농산물로의 전이는 뿌리를 통한 흡수와 광합성을 통한 흡수로 구분할 수 있다. 두 가지 경로 중 광합성을 통한 흡수가 약 98%로 지배적이기에 농산물 전이계수 즉, 뿌리를 통한 흡수에 변화를 주어도 최대선량은 큰 변화가 없는 것으로 나타났다(Sheppard *et al.* 1991). 육류 및 우유 전이계수는 ^3H 와 유사하게 가축의 물, 사료, 토양 섭취량, 사료 내 탄소함량을 기반으로 계산되도록 개발되었다.

감마방출 핵종인 ^{60}Co , ^{137}Cs , ^{152}Eu 의 경우 모든 전이계수, 농축계수로 인한 방사선량 영향이 미미한 것으로 나타났다. 그러나 3가지 핵종 중 ^{137}Cs 의 경우 자핵종인 $^{137\text{m}}\text{Ba}$ 이 감마를 방출하며, 모핵종인 ^{137}Cs 은 베타방출 핵종이기에 ^{60}Co , ^{152}Eu 와 비교하여 상대적으로 높은 NDD 결과를 나타내었다.

Fig. 4에 농산물 전이계수 변화에 따른 섭취피폭경로별

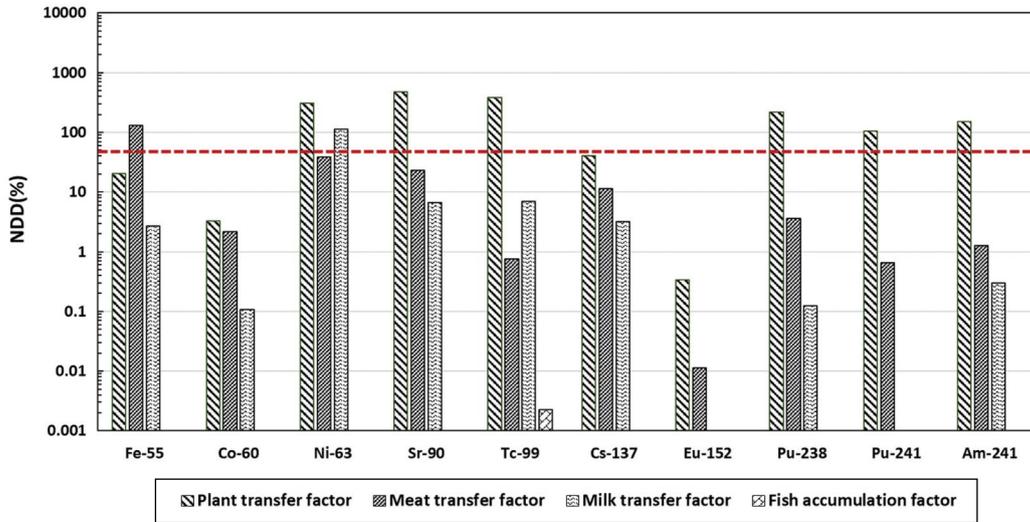


Fig. 3. NDD analysis results of transfer and accumulation factor.

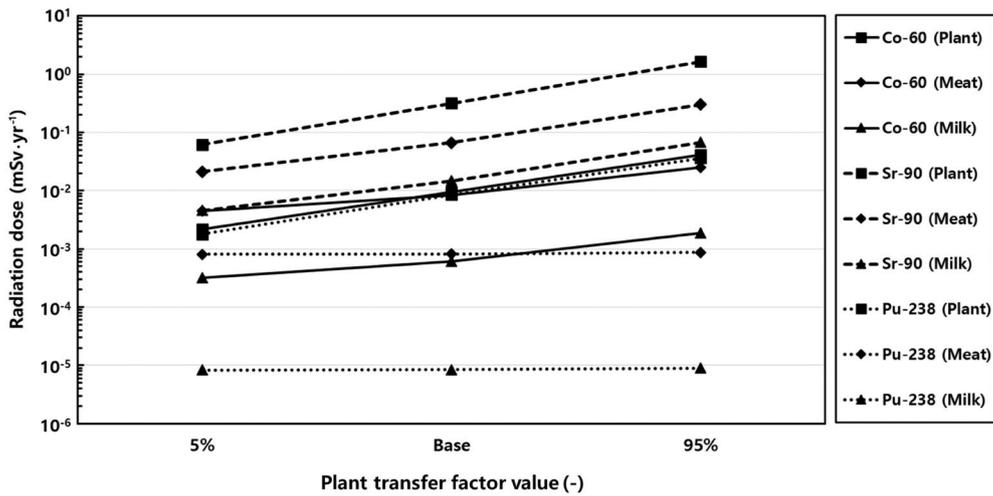


Fig. 4. Radiation dose by intake exposure pathway according to plant transfer factor.

방사선량을 나타내었다. 농산물 전이계수가 증가함에 따라 농산물 섭취경로 외 육류, 우유 섭취로 인한 방사선량도 증가하는 것으로 나타났다. 이는 육류 섭취경로에 해당하는 가축의 사료로 농산물이 사용되며, 농산물 전이계수가 증가함에 따라 가축이 소비하는 사료의 방사능농도가 같이 증가하기 때문이다. 그리고 육류 섭취경로와 동일하게 우유 섭취경로에 해당하는 젖소의 사료로 농산물이 사용되기에 농산물 전이계수가 증가함에 따라 우유 섭취로 인한 방사선량도 증가하는 것으로 나타났다. 따라서 농산물, 육류, 우유 전이계수 중 일반적으로 농산물 전이계수의 NDD가 가장 높게 평가된 것으로 나타났다.

농산물 전이계수에 따라 최대선량이 나타나는 시기에 영향을 받는 핵종이 존재하였다. ²⁴¹Pu의 경우 앞선 분배계수

민감도 분석과 동일하게 ²⁴¹Pu, ²⁴¹Am로 인한 방사선량 중 Plutonium의 농산물 전이계수가 증가함에 따라 ²⁴¹Pu 농산물 섭취로 인한 선량이 증가하기 때문인 것으로 나타났다. ²⁴¹Pu의 농산물 전이계수가 증가할수록 최대선량이 나타나는 시기가 당겨지는 것으로 나타났다.

결론

본 연구에서는 해체 후 부지 재이용에 따른 안전성평가 시 부지특성 입력인자에 대한 민감도 분석을 수행하였다. 이를 위하여 첫 번째, 평가 대상 핵종을 선정하였다. 두 번째, 피폭시나리오 및 피폭경로를 선정하였다. 세 번째, 다수

의 부지특성 입력인자 중 핵종 및 원소에 종속된 물리적 입력인자인 분배계수, 전이계수, 농축계수를 민감도 분석 대상 입력인자로 선정하였다. 마지막으로 민감도 분석 방법론으로 NDD를 활용하였다.

부지 재이용 안전성평가의 민감도 분석을 위해 NDD를 이용하여 평가한 결과 오염층의 분배계수에 대한 NDD는 ^{90}Tc , ^{90}Sr 에 대해서 각각 358, 63으로 민감한 것으로 나타났다. 불포화층 및 포화층 분배계수 NDD의 경우 모든 핵종에 대해서 3 이하로 민감하지 않은 것으로 나타났다. 해당 부지가 하나의 토성을 가지는 경우 분배계수 NDD는 ^{241}Am , ^{99}Tc , ^{14}C , ^{90}Sr 에 대해서 63-1,479으로 민감한 것으로 나타났다. 농산물 전이계수 NDD의 경우 ^{90}Sr , ^{99}Tc , ^{63}Ni , ^{238}Pu , ^{241}Am , ^{241}Pu 에 대하여 104-471, 육류 전이계수 NDD의 경우 ^{55}Fe 가 131, 우유 전이계수 NDD의 경우 ^{63}Ni 에 대해서 112로 민감한 것으로 나타났다. 어류 농축계수 NDD의 경우 모든 핵종에 대해서 3 이하로 민감하지 않은 것으로 나타났다. 농산물 전이계수 값이 증가함에 따라 육류 및 우유 섭취 피폭경로 방사선량이 증가하는 것으로 나타났다. 분배계수, 전이계수 민감도 분석에서 ^{241}Pu 의 경우 자핵종인 ^{241}Am 로 인한 선량기여가 높아 분배계수 및 전이계수 값에 따라 선량평가 결과에 영향을 주며, 최대선량이 도출되는 시기도 핵종의 거동과 연계하여 영향이 있는 것으로 평가되었다.

분배계수, 전이계수, 농축계수 민감도 분석결과 분배계수 및 전이계수는 핵종에 따라 민감한 정도가 상이하며, 전반적으로 최대선량 변화에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 농축계수는 최대선량의 변화에는 영향이 미미하나, 어류 섭취로 인한 내부피폭 선량변화에는 영향이 높은 것으로 나타났다. 분배계수는 토성에 따라 광범위한 값을 가진다. 농산물 전이계수의 경우 엽채류, 비엽채류, 곡류 등 농산물 종류에 따라, 육류 전이계수의 경우 소, 돼지, 닭 등 가축의 종류에 따라, 우유 전이계수의 경우 젖소, 염소 등 생산원에 따라, 어류 농축계수의 경우 수질의 특성에 따라 광범위한 값을 가진다. 따라서 향후 원자력이용시설 해체 후 부지 재이용 안전성평가를 위해서는 해당 부지의 특성값을 확보해 이를 평가에 반영하여야 적절한 결과를 도출할 수 있을 것으로 판단된다. 본 연구의 결과는 향후 국내 원자력이용시설 해체 후 부지 재이용 안전성평가 시 부지특성 입력인자 중요도 분석의 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 원자력안전위원회의 재원으로 한국원자력안전재단의 지원을 받아 수행한 원자력안전연구사업의 연구결

과입니다(No. 1805016).

참 고 문 헌

- 원자력안전위원회. 2016. 원자력이용시설 해체완료 후 부지 및 잔존건물의 재이용을 위한 기준. 원자력안전위원회고시 제2016-33호.
- 원자력안전위원회. 2020. 원자력안전법. 법률 제17359호.
- ANL. 1996. Postremediation Dose Assessment for the Formal Alba Craft Laboratory Site, Oxford, Ohio. ANL/EAD/TM-55.
- ANL. 1997. Radiological Dose Assessment for the Dismantlement and Decommissioning Option for the Heavy Water Components Test Reactor Facility at the Savannah River Site, Aiken, South Carolina. ANL/EAD/TM-77.
- ANL. 2001. User's Manual for RESRAD Version 6. ANL/EAD-4.
- ANL. 2011. Derived Concentration Guideline Levels for Argonne National Laboratory's Building 310 Area. ANL/EVS/TM/11-4.
- Hong SB, Lee KW, Park JH and Chung US. 2011. Application of MARSSIM for Final Status Survey of the Decommissioning Project. *J. Nucl. Fuel Cycle Waste Technol.* 9(2):107-111.
- Hong SB, Hwang DS, Seo BK and Moon JK. 2014. Practical application of the MARSSIM process to the site release of a Uranium Conversion Plant following decommissioning. *Ann. Nucl. Energy* 65:241-246.
- IAEA. 2006. Release of Sites from Regulatory Control on Termination of Practices. IAEA Safety Guide No. WS-G-5.1.
- IAEA. 2020. Nuclear Power Reactors in the World. Reference Data Series No. 2.
- ICRP. 2007. The 2007 Recommendations of the international commission on radiological protection. ICRP Publication 103. *Ann. ICRP* 37 (2-4)
- Kamboj S, Cheng J and Yu C. 2005. Deterministic vs. probabilistic analyses to identify sensitive parameters in dose assessment using RESRAD. *Health Phys.* 88(5):104-109.
- NRC. 2000. Development of Probabilistic RESRAD 6.0 and RESRAD-BUILD 3.0 Computer Codes. NUREG/CR-6697.
- NRC. 2002. Consolidated NMSS Decommissioning Guidance, Characterization, Survey, and Determination of Radiological Criteria. NUREG-1757 Vol. 2.
- Park SJ, Byon JH and Ahn SY. 2020. Comparative Analysis of Probabilistic Analysis and Deterministic Analysis by RESRAD Code. *Energies* 13(8):1983-1995.
- PG & E. 2014. Humboldt Bay Power Plant, Unit 3, License Termination Plan, Revision 1.

- Seo HW and Sohn W. 2019a. Calculation of preliminary site-specific DCGLs for nuclear power plant decommissioning using hybrid scenarios. *Nucl. Eng Technol.* **51**(4):1098-1108.
- Seo HW and Sohn W. 2019b. Scenario options to calculation of Derived Concentration Guideline Levels for a multi-unit decommissioning site. *Ann. Nucl. Energy* **133**:347-358.
- Seo HW, Oh JY and Shin WG. 2021. Proposal for the list of potential radionuclides of interest during NPP site characterization or final status surveys. *Nucl. Eng. Technol.* **53**(1):234-243.
- Sheppard MI, Sheppard SC and Amiro BD. 1991. Mobility and Plant Uptake of Inorganic ^{14}C and ^{14}C -labelled Pcb in Soils of High and Low Retention. *Health Phys.* **61**(4):481-492.
- SMUD. 2008. Rancho Seco Nuclear Generating Station License Termination Plan, Revision 1.
- Yankee Atomic Electric Company. 2004. Yankee Nuclear Plant Station License Termination Plan.

Received: 28 April 2021

Revised: 18 May 2021

Revision accepted: 26 May 2021