Journal of RADIATION INDUSTRY
Vol. 18, No. 3, pp. 183-193, 2024
https://doi.org/10.23042/radin.2024.18.3.183

Original article

NORM 폐기물 매립 시 NDD 분석을 활용한 부지 내 주요 피폭인자 도출

임지현[1] · 이신동[1] · 손건우[1] · 김광표[1,*]

[1]경희대학교 원자력공학과

Derivation of On-site Major Exposure Factor using NDD Analysis when Landfilling NORM Waste

Ji Hyeon Lim[1], Shin Dong Lee, Geon Woo Son[1], and Kwang Pyo Kim[1,*]

[1]Department of Nuclear Engineering, Kyung Hee University, 1732 Deokyoungdae-ro, Giheung-gu, Yongin-si, Gyeonggi-do 17104, Republic of Korea

ABSTRACT As part of the social response to the radon bed incident in 2018, the Nuclear Safety and Security Commission took measures to collect and dispose of all radon beds. The Waste Management Act provides landfill disposal as one of the disposal methods for natural radioactive product waste, which is one of the NORM wastes. When NORM wastes are landfilled, workers and the public at the landfill site are exposed to radiation through various pathways, such as leaching of radionuclides through soil and groundwater, and multiple exposure factors are involved simultaneously. In order to improve the reliability of radiological impact assessment, the values of main exposure factors should be selected more accurately. Therefore, before developing the main exposure factors for site characteristics, it is necessary to prioritize main exposure factors reflecting domestic characteristics of NORM waste landfills. Therefore, in this study, the main exposure factors for NORM waste landfill were derived using NDD analysis. To derive the main exposure factors, the analysis tool was first selected as RESRAD-ONSITE computer code, and the exposure scenarios were mainly selected as a resident farmer and suburban resident scenario, recreation scenario, and industrial worker scenario. Then, the priority 1 and 2 factors were selected for sensitivity analysis, and a Korean standard model was established to reflect Korean characteristics. Finally, the sensitivity analysis was conducted through NDD, and the main exposure factors were derived based on this. In the resident farmer scenario, the contaminated zone distribution coefficients of ^{226}Ra, ^{210}Pb, ^{232}Th, ^{228}Ra, ^{234}U, and ^{238}U, as well as precipitation and evapotranspiration factors, were derived as the main exposure factors. In the suburban resident scenario, the contaminated zone distribution coefficients of ^{226}Ra, ^{210}Pb, ^{232}Th, ^{228}Ra, ^{234}U, and ^{238}U, as well as precipitation and evapotranspiration coefficients, were derived as the main exposure factors. In the recreation scenario, the contaminated zone distribution coefficient of ^{232}Th was derived as the main exposure factor. For the industrial worker scenario, the erosion rate was derived as the main exposure factor. The main exposure factors for each scenario were analyzed to be different depending on the scenario characteristics. The results of this study can be utilized as a basis for radiological environmental impact assessment of NORM waste landfill in Korea.

Key words: Exposure factor, NDD, NORM waste, RESRAD-ONSITE, Sensitivity analysis

1. 서 론

원자력안전위원회는 2018년에 발생한 라돈침대 사건에 대한 사회적대응의 일환으로 라돈침대를 전량 수거하여 폐기하도록 조치하였다. 현재 국내에서는 라돈침대 등과 같은 NORM (Naturally Occurring Radioactive Material) 폐기물이 다량으로 발생하였다. 라돈침대는 폐기물관리법 시행규칙 제14조에 따라 천연방사성제품폐기물로서 처리·처분될 예정이며, 이에 따라 NORM 폐기물의 처리·처분 시 발생하는 방사선학적 영향에 대한 국민의 관심도가 높아지고 있다. 폐기물관리법 시행규칙

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

Copyright© 2024 by Korean Society of Radiation Industry

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

Received 24 July 2024 **Revised** 16 August 2024 **Accepted** 19 August 2024

제14조에서는 NORM 폐기물 중 하나인 천연방사성제품폐기물에 대한 처리·처분 방식 중 하나로 매립처분을 제시하고 있으며, 일반 NORM 산업 공정에서 발생하는 공정부산물도 매립을 통해 최종처분된다[1,2]. NORM 폐기물 매립 시, 매립 부지 내·외의 작업자와 일반인은 토양 및 지하수를 통한 방사성핵종의 침출 등과 같은 다양한 경로에 의해 방사선 피폭이 발생할 개연성이 존재한다. 또한, 방사성오염의 확산 과정에서 여러 피폭경로에 따른 다양한 피폭인자도 수반된다.

미국원자력규제위원회(U.S Nuclear Regulatory Commission; NRC)는 지르콘 모래, 토륨, 백열성 가스 맨틀, 마그네트론 및 진공관, 토륨이 함유된 램프를 소각 및 매립하는 과정에서 발생하는 방사선학적 영향을 평가하였다[3]. Khairuddin Mohamad Kontol 등은 RESRAD 전산코드를 활용하여 석유 및 가스산업 내 NORM 폐기물 처분에 대한 방사선 영향 평가 및 복토층에 대한 방사선학적 민감도 분석을 수행하였다[4]. Zeni Anggraini 등은 RESRAD 전산코드를 활용하여 최종 주석 슬래그 처리 시설인 인도네시아 방카섬 제 3종 매립장에서 발생하는 방사선학적 영향을 평가하였다[5]. Kamboj 등은 민감한 피폭인자를 식별하기 위해 RESRAD 전산코드를 사용하여 결정론적 및 확률론적 방법을 분석하였다[6]. Reis R.G. 등은 RESRAD 전산코드를 활용하여 브라질 인산석고 적치 시 모든 피폭인자에 대한 방사선학적 민감도 분석을 수행하였다[7]. Amanda Gomes Lopes 등은 RESRAD 전산코드를 활용하여 브라질 석유 및 가스 생산 산업 폐기물 매립 시 복토 두께에 대한 방사선학적 민감도 분석을 수행하였다[8]. Nazhira Shadrina 등은 RESRAD 전산코드를 활용하여 인도네시아 주석 산업 폐기물 매립 시 복토층 두께에 대한 방사선학적 민감도 분석을 수행하였다[9]. 류강우 등은 RESRAD 전산코드를 활용하여 원자력이용시설 해체 후 부지 특성인자 민감도 분석을 수행하였다[10].

이처럼 국내외에서 다양한 NORM 폐기물 매립에 의해 발생하는 방사선학적 영향 평가와 민감도 분석과 관련된 연구가 수행되어 왔다. 하지만 NORM 폐기물 매립 시 국내 특성을 반영한 민감도 분석에 대한 연구는 부족한 실정이다. 매립으로 인해 발생하는 방사선학적 영향에 대한 피폭인자는 지하수 침출, 대기확산 등 경로에 따라 다양할 뿐만 아니라 분석 대상 환경, 기후적 특성에 따라 상이하게 결정된다. 방사선학적 영향 평가의 신뢰성을 높이기 위해서는 주요 피폭인자의 값을 보다 정확하게 선정해야 한다. 따라서 부지특성에 맞는 주요 피폭인자를 개발하기에 앞서, NORM 폐기물 매립 시 국내 특성을 반영하여 주요 피폭인자를 우선적으로 선별할 필요성이 있다.

본 연구에서는 NORM 폐기물 매립 시 NDD(Normalized Dose Difference) 분석을 활용한 부지 내 주요 피폭인자를 도출하였다. 이를 위해 먼저 분석도구를 선정하고, NORM 폐기물 매립 시 고려할 수 있는 피폭시나리오를 수립하였다. 이후 민감도 분석을 위한 대상을 선정하였다. 최종적으로 주요 피폭인자를 도출하기 위해 활용할 수 있는 민감도 분석 모델을 수립하고 RESRAD-ONSITE 전산코드를 사용하여 주요 피폭인자를 도출하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 분석도구 및 피폭시나리오 선정

본 연구에서는 NORM 폐기물 매립으로 발생하는 잠재적인 피폭경로를 고려할 수 있는 RESRAD-ONSITE 전산코드를 분석도구로 선정하였다. Fig. 1에 RESRAD-ONSITE 전산코드에서 고려하고 있는 피폭경로 개요도를 나타내었다. RESRAD-ONSITE 전산코드는 토양 내 존재하는 방사성물질로 인해 발생하는 방사선학적 영향을 평가할 수 있도록 미국 아르곤

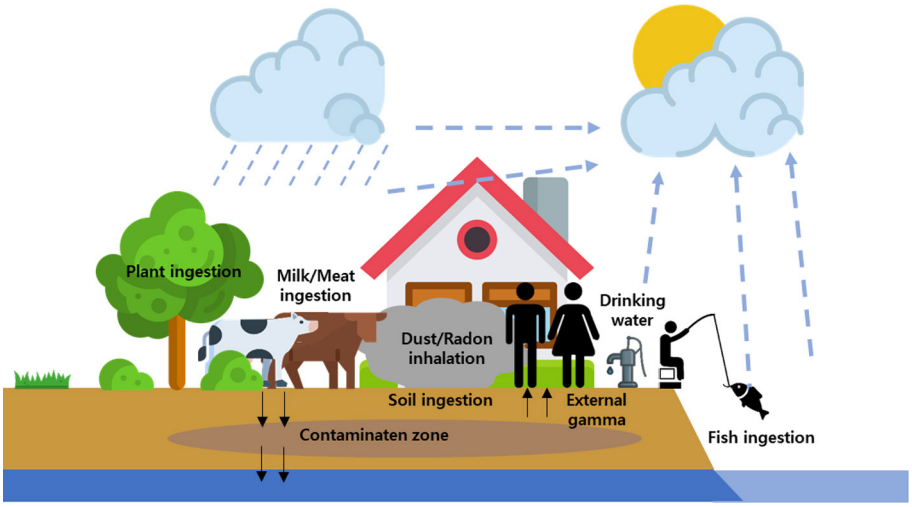

Fig. 1. Exposure pathway considered in RESRAD-ONSITE computer code

Table 1. Exposure pathways for different scenario

Exposure pathway	Scenario			
	Resident farmer	Suburban resident	Recreation	Industrial worker
External gamma	Yes	Yes	Yes	Yes
Inhalation of dust	Yes	Yes	Yes	Yes
Inhalation of radon	Yes	Yes	Yes	Yes
Ingestion of plant foods	Yes	Yes	No	No
Ingestion of meat	Yes	No	No	No
Ingestion of milk	Yes	No	No	No
Ingestion of fish	Yes	No	No	No
Ingestion of soil	Yes	Yes	Yes	Yes
Ingestion of water	Yes	No	No	No

국립연구소(Argonne National Laboratory; ANL)에서 개발되었다[11]. 해당 전산코드는 토양 내 직접 피폭, 호흡으로 인한 내부피폭, 섭취로 인한 내부피폭 등 총 9가지의 피폭경로에 대해서 방사선학적 영향평가가 가능하다. NORM 폐기물 매립 시, 토양 및 지하수를 통한 방사성핵종 유출, 부지 내 지표수체의 오염 등과 같은 수리지질학적 상호작용들이 존재하게 되며, 이에 따른 다양한 피폭경로들이 고려된다.

NORM 폐기물 매립 시, 피폭대상은 방사성물질의 흡입, 섭취 및 외부피폭 등과 같은 다양한 경로에 의해 직·간접적인 영향을 받으며, 피폭경로에 따라 방사선량은 상이하다. 따라서 정밀한 민감도 분석을 위해서는 평가환경에 적합한 피폭시나리오와 피폭경로를 결정해야 한다. ANL에서는 RESRAD-ONSITE 전산코드를 활용한 방사선학적 영향 평가 시 적용가능한 일반적인 피폭시나리오로 거주농부, 교외 거주자, 여가활동자, 산업작업자 시나리오를 제시하고 있다. 거주농부 시나리오는 부지 내에서 작물 및 가축을 길러 자급자족하는 것뿐만 아니라, 음용수도 부지 내에서 지하수를 통하여 섭취하는 시나리오이다. 즉, 모든 섭취를 부지 내에서 해결하기 때문에 모든 피폭경로인 외부피폭, 흡입으로 인한 내부피폭, 농산물, 육류, 우유, 수산물, 토양, 음용수 섭취 경로를 고려한다. 따라서 가장 보수적인 방사선학적 영향 평가 시 고려할 수 있는 시나리오이다. 교외 거주자 시나리오는 육류. 수산물, 우유, 음용수 섭취를 부지 외에서 해결하기 때문에 거주 농부 시나리오에서 고려하고 있는 피폭경로 중 육류, 수산물, 우유, 음용수 섭취 경로를 제외한다. 산업 작업자 시나리오는 작업자가 부지 내에서 섭취를 해결하지 않고 작업을 수행하는 시나리오로, 외부 피폭, 흡입으로 인한 내부피폭, 라돈 흡입, 토양 섭취 경로만 고려한다. 여가활동자 시나리오는 부지 내에서 낚시 및 수렵 활동 등 다양한 여가생활을 즐기는 일반인을 포함한다. 해당 시나리오는 산업작업자 시나리오 내 고려하는 피폭경로에서 낚시로 인한 부지 내 수산물 섭취와 수렵으로 인한 부지 내 육류 섭취를 추가로 고려한다.

Table 1에 본 연구에서 고려한 최종 피폭시나리오와 피폭경로를 나타내었다. 본 연구에서는 ANL에서 제시하고 있는 피폭시나리오 및 피폭경로를 고려하고 국내 환경을 반영하여 거주 농부 시나리오, 교외 거주자 시나리오, 산업작업자 시나리오, 여가활동자 시나리오를 최종 피폭시나리오로 선정하였다. NUREG-1549에서는 부지 사용 용도 및 평가 대상에 따라 피폭경로가 변경될 수 있음을 언급하고 있다[12]. 국내에서는 폐기물관리법 제 54조에 따라 폐기물 매립시설의 사용종료 혹은 폐쇄 이후 30년의 기간 동안에는 그 부지의 이용을 공원시설, 체육시설, 문화시설 등으로 제한하고 있다[1]. 본 연구에서는 폐기물관리법 제 54조를 기반으로, 여가활동자 시나리오에서의 낚시 및 수렵 활동의 개연성이 매우 낮기 때문에 해당 부지 사용 용도를 고려하여 육류, 어류 섭취 경로를 제외하였다.

2.2. 민감도 분석 대상 선정

Table 2에 NUREG/CR-6697에서 제시하고 있는 우선순위 1, 2위 인자들을 나타내었다[13]. 우선순위가 높은 인자일수록 일반적으로 방사선량에 영향을 미칠 개연성이 더 높고, 부지에 따라 상이하게 결정될 수 있다. 따라서 본 연구에서는 부지에 따른 중요인자를 식별하기 위해 방사선량에 큰 영향을 줄 수 있는 우선순위 1, 2위 인자를 민감도 분석 대상으로 선정하였다. 이 중 NORM 폐기물 내 존재하는 핵종과 무관한 인자인 C-14 탈출 두께인자를 제외하였다. 분석 대상 이외의 인자는 RESRAD-ONSITE 전산코드에서 제공하고 있는 기본값을 사용하였다. 평가핵종의 경우, NORM 폐기물의 특성을 반영하기 위해 천연방사성핵종인 ^{238}U, ^{232}Th, ^{235}U 계열 핵종을 평가핵종으로 선정하였다. ^{40}K의 경우, 일반적인 NORM 폐기물에 함유되어 있는 40K의 방사능농도와 선량환산계수가 상대적으로 낮다는 점을 고려하여 평가핵종에서 제외하였다[4,5,7,8].

Table 3에 국내 표준 모델에 해당되는 인자별 값을 나타내었다. NDD를 활용한 민감도 분석 시, 분석대상 이외의 인자들은 고정

Table 2. List of the priority 1, 2 for RESRAD parameter

Rank	RESRAD Parameter	
Priority 1	Distribution coefficients	Saturated zone effective porosity
	Density of cover material	Saturated zone hydraulic conductivity
	Density of contaminated zone	Unsaturated zone thickness
	Density of saturated zone	Depth of roots
	Saturated zone total porosity	Transfer factors for plants
Priority 2	Nuclide concentration	Weathering removal constant
	Area of contaminated zone	Wet-weight crop yields for non-leafy vegetables
	Thickness of contaminated zone	Wet foliar interception fraction for leafy/non-leafy vegetables
	Length parallel to aquifer flow	Unsaturated zone, soil-b parameter
	Cover depth	Unsaturated zone hydraulic conductivity
	Cover erosion rate	Mass loading for inhalation
	Contaminated zone total porosity	Indoor dust filtration factor
	Contaminated zone erosion rate	External gamma shielding factor
	Contaminated zone hydraulic conductivity	Fruit, vegetables, and grain consumption
	Contaminated zone b parameter	Milk consumption
	Evapotranspiration coefficient	Soil ingestion rate
	Wind speed	Drinking water ingestion rate
	Precipitation rate	Aquatic food contaminated fraction
	Runoff coefficient	Depth of soil mixing layer
	Saturated zone hydraulic gradient	Transfer factors for meat
	Saturated zone b parameter	Transfer factors for milk
	Well pump intake depth	Bioaccumulation factors for fish
	Well pumping rate	C-14 evasion layer thickness in soil
	Unsaturated zone density	
	Unsaturated zone total porosity	
	Unsaturated zone effective porosity	

시켜야 한다. 본 연구에서는 분석 대상 이외의 인자들에 대해 국내 매립 환경을 반영하기 위해 표준모델을 수립하였다. 본 연구에서 고려한 표준모델은 매립장 특성 인자, 섭취량 관련 인자, 거주 및 호흡 관련 인자를 대상으로 하였으며, NORM 폐기물 매립환경 및 국내 섭식 특성에 대한 통계자료를 조사하여 수립하였다.

2.3. 민감도분석 방법론 수립

본 연구에서는 NORM 폐기물 매립 시나리오에 대한 주요 피폭인자를 도출하기 위해 결정론적 민감도분석 모델인 NDD (Normalized Dose Difference)를 사용하였다. NDD는 입력인자의 확률분포 95백분위 값과 5백분위 값을 사용하여 도출된 방사선량의 차이를 인자의 기본값 및 중간값을 사용하여 도출된 방사선량으로 나누어 백분율로 나타낸 것이다[6]. NDD는 다른 모든 입력 매개변수를 고정한 상태에서 민감도를 분석하고자 하는 인자를 변화시켜 선량에 미치는 영향을 계산한다. 즉, 단일 매개변수에 의한 영향을 용이하게 분석할 수 있다. 본 연구에서는 NUREG/CR-6697에 제시되어 있는 확률분포 내 백분위 값을 사용하여 피폭방사선량을 도출하였다.

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

- D_{high} = 입력인자의 확률분포 95백분위 값을 사용하여 도출한 방사선량 (mSv y^{-1})
- D_{low} = 입력인자의 확률분포 5백분위 값을 사용하여 도출한 방사선량 (mSv y^{-1})
- D_{base} = 입력인자의 확률분포 50백분위 값을 사용하여 도출한 방사선량 (mSv y^{-1})

Table 4에 NUREG/CR-6697에서 제시한 NDD 값 범위에 따른 우선순위 점수를 나타내었다. ANL에서는 RESRAD 전산코드 내 입력인자의 우선순위를 결정하는 과정 중 하나의 수행 단계로 NDD 값을 활용하고 있다. NDD 값이 클수록 우선순위가 낮아지는 데 기여하며, 낮은 우선순위 점수를 부여할 수 있다. NDD 값이 1,000초과일 경우, 우선순위 점수 1을 부여하며 NDD 값이 300초과 1000이하일 경우 우선순위 점수 2점을 부여한다. 우선순위 1,2 위 입력인자로 분류되기 위해서는 NDD 값에 따른 점수가 최대 2점 이하여야 한다. 따라서 본 연구에서는 민감한 입력인자를 선정하는 기준으로 NDD 값이 300을 초과한 경우로 설정하였다.

Table 3. List of the domestic characteristic factor

Classification	Factor	Unit	Value				Reference
			Resident farmer	Suburban	Recreation	Industrial worker	
Landfill characteristic factors	Area of contaminated zone	m^2	41,700				[14]
	Thickness of contaminate zone	m	0.00016				Density, area, weight of waste considered
	Length parallel to aquifer flow	m	230				Calculated from area of contaminated zone
	Cover depth	m	0.6			0	[1]
	Cover of density	g/cm^3	1.51				[15]
Ingestion factors	Non-leafy vegetable consumption	kg/y	283	283	-	-	[16]
	Leafy vegetable consumption	kg/y	195	195	-	-	
	Milk consumption	L/y	66	-	-	-	
	Meat / Poultry consumption	kg/y	117	-	-	-	
	Fish consumption	kg/y	24	-	-	-	
	Other seafood consumption	kg/y	19	-	-	-	
	Soil consumption	g/y	36.5	36.5	20	82.5	[17]
	Drinking water	L/y	196	-	-	-	[18]
Occupancy/ Inhalation factor	Inhalation rate	m^3/y	8,100	8,100	10,600	10,512	[19]
	Mass loading for inhalation	g/m^3	0.000006	0.000006	0.000006	0.0005	[20]
	Indoor fraction	-	0.7451	0.7451	0	0	[21]
	Outdoor fraction	-	0.2549	0.2549	0.0118	0.2347	

Table 4. RESRAD parameter ranking results

Classification	Value						
Numeric Score	1	2	3	4	5	6	7
Range of NDD value	>1,000	300 ~1,000	100~300	50~100	10~50	3~10	≤3

3. 결 과

본 연구에서는 NDD 분석을 기반으로 거주 농부 시나리오, 교외 거주자 시나리오, 산업작업자 시나리오, 여가활동자 시나리오에 대한 주요 피폭인자를 도출하였다. 이를 위하여 ANL에서 제시하고 있는 시나리오를 기반으로 여러 피폭경로를 고려한 피폭시나리오를 선정하였고, 민감도 분석을 위한 대상 인자를 선정하였다. 그리고 민감도 분석을 수행하기 위한 모델을 선정하였으며, 최종적으로 NUREG/CR-6697에서 제시하고 있는 기준을 토대로 NORM 폐기물 매립 시, 주요 피폭인자를 도출하였다. 이후, 민감도에 따른 선량 변화를 파악 및 비교를 위해 입력인자 백분위에 따른 선량분포를 도출하였다.

3.1. 피폭시나리오별 민감도 분석

Table 5에 본 연구에서 고려한 피폭시나리오에 대해 도출한 주요 피폭인자를 나타내었다. 거주농부 시나리오에서의 주요 피폭인자는 ^{226}Ra, ^{210}Pb, ^{232}Th, ^{228}Ra, ^{234}U, ^{238}U, ^{230}Th의 오염층 분배계수(K_d)와 강수량, 증발산계수로 나타났다. 또한 가장 민감한 인자인 ^{226}Ra 오염층 분배계수의 NDD 값은 주요 피폭인자 중 가장 민감도가 낮은 인자인 증발산계수보다 약 337배 큰 122,648로 나타났다. 주요 피폭인자들의 NDD 값은 ^{210}Pb의 오염층 분배계수, 강수량, ^{232}Th, ^{228}Ra, ^{234}U, ^{238}U, ^{230}Th의 오염층 분배계수, 증발산계수 순으로 높게 나타났으며, 이들의 NDD 값은 각각 9,305, 3,115, 2,900, 1,559, 773, 736, 402, 364로 나타났다.

교외 거주자 시나리오에서의 주요 피폭인자는 거주농부 시나리오에서 도출된 인자와 마찬가지로 ^{226}Ra, ^{210}Pb, ^{232}Th, ^{228}Ra, ^{234}U, ^{238}U, ^{230}Th의 오염층 분배계수와 강수량, 증발산계수로 나타났다. 또한 가장 민감한 인자인 ^{226}Ra 오염층 분배계수의 NDD 값은 주요 피폭인자 중 가장 민감도가 낮은 인자인 증발산계수보다 약 673배 큰 271,225로 나타났다. ^{210}Pb, ^{232}Th의 오염층 분배계수, 강수량, ^{228}Ra, ^{230}Th, ^{234}U, ^{238}U의 오염층 분배계수, 증발산계수의 NDD 값은 각각 20,362, 6,332, 2,520, 2,056, 904, 777, 749, 403로 나타났다.

여가활동자 시나리오에서의 주요 피폭인자는 ^{232}Th의 오염층 분배계수로 나타났으며 NDD 값은 1,909로 나타났다. 산업작업자 시나리오에서의 주요 피폭인자는 침식률로 나타났으며 해당 인자에 대한 NDD 값은 965로 나타났다.

3.2. 피폭시나리오별 주요 피폭인자 선량분포 도출

Fig. 2에 피폭시나리오별 주요 피폭인자에 대한 선량분포를 나타내었다. 거주농부 시나리오의 경우 ^{226}Ra, ^{210}Pb의 오염층 분

Table 5. The value of NDD for different scenario

Scenario	Factor		NDD
Resident farmer	Contaminated zone distribution coefficient	Ra-226	122,648
		Pb-210	9,305
		Th-232	2,900
		Ra-228	1,559
		U-234	773
		U-238	736
		Th-230	402
	Precipitation		3,115
	Evapotranspiration coefficient		364
Suburban	Contaminated zone distribution coefficient	Ra-226	271,225
		Pb-210	20,362
		Th-232	6,332
		Ra-228	2,056
		U-234	777
		U-238	749
		Th-230	904
	Precipitation		2,520
	Evapotranspiration coefficient		403
Recreation	Contaminated zone distribution coefficient	Th-232	1,909
Industrial worker	Erosion rate		965

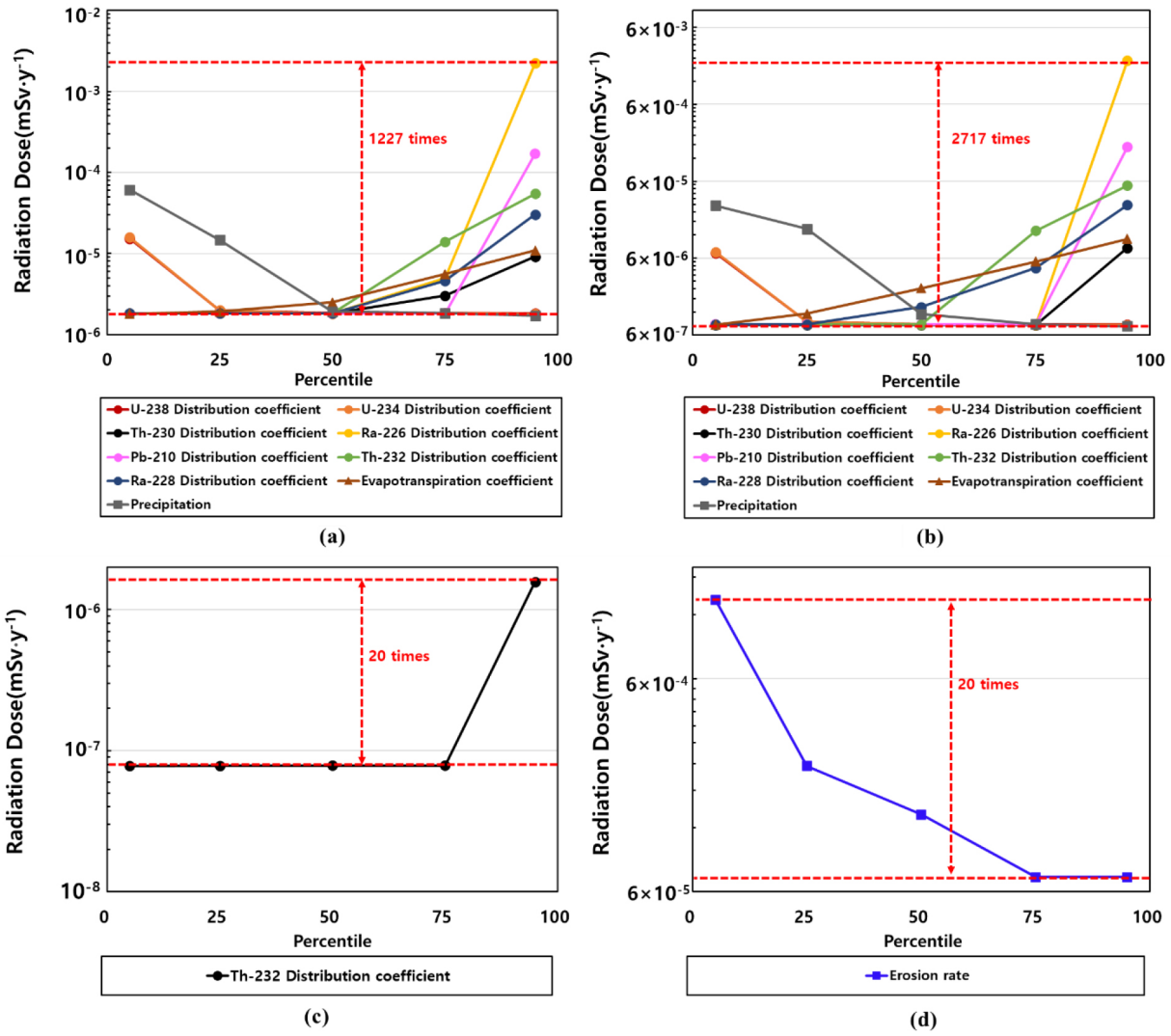

Fig. 2. Radiation dose of major exposure factor by scenario (a: Resident farmer, b: suburban resident, c: recreation, d: industrial worker)

배계수, 강수량, ^{232}Th, ^{228}Ra 오염층 분배계수의 선량분포는 백분위수에 따라 각각 1.82×10^{-6}~2.23×10^{-3}, 1.82×10^{-6}~1.71×10^{-4}, 1.71×10^{-6}~6.12×10^{-5}, 1.82×10^{-6}~5.46×10^{-5}, 1.82×10^{-6}~3.02×10^{-5} mSv·y^{-1} 수준으로 나타났다. NDD 값이 가장 큰 ^{226}Ra 오염층 분배계수의 피폭방사선량은 백분위수에 따라 최대 1,227배 차이나는 것으로 나타났다. ^{238}U, ^{234}U의 오염층 분배계수, 강수량은 백분위수가 증가함에 따라 피폭방사선량이 감소하는 추이를 보였다. 반면에, 이외의 인자들은 증가하는 추이를 보였다.

교외 거주자 시나리오에서 ^{226}Ra, ^{210}Pb, ^{232}Th의 오염층 분배계수, 강수량, ^{228}Ra 오염층 분배계수의 선량분포는 백분위수에 따라 각각 8.22×10^{-7}~2.23×10^{-3}, 8.22×10^{-7}~1.68×10^{-4}, 8.22×10^{-7}~5.29×10^{-5}, 7.80×10^{-7}~2.90×10^{-5}, 8.22×10^{-7}~2.94×10^{-5} mSv·y^{-1} 수준으로 나타났다. NDD 값이 가장 큰 ^{226}Ra 오염층 분배계수의 피폭방사선량은 백분위수에 따라 최대 2,717배 차이나는 것으로 나타났다. 거주농부 시나리오와 마찬가지로 ^{238}U, ^{234}U의 오염층 분배계수, 강수량은 백분위수가 증가함에 따라 피폭방사선량이 감소하는 추이를 보였다. 반면에, 이외의 인자들은 증가하는 추이를 보였다.

여가활동자 시나리오에서 ^{232}Th의 오염층 분배계수 선량분포는 백분위수에 따라 각각 7.79×10^{-8}~1.57×10^{-6} mSv·y^{-1} 수준으로 나타났다. NDD 값이 가장 큰 ^{232}Th 분배계수의 피폭방사선량은 백분위수에 따라 최대 20배 차이나는 것으로 나타났다. ^{232}Th의 오염층 분배계수는 백분위수가 증가함에 따라 피폭방사선량이 증가하는 추이를 보였다. 산업작업자 시나리오에서 침식 속도의 선량분포는 백분위수에 따라 7.02×10^{-5}~1.41×10^{-3} mSv·y^{-1} 수준으로 나타났으며 백분위수에 따른 피폭방사선량은 최대 20배 차이나는 것으로 나타났다. 침식 속도는 백분위수가 증가함에 따라 피폭방사선량이 감소하는 추이를 보였다.

4. 고 찰

본 연구에서는 NDD 분석을 기반으로 거주농부 시나리오, 교외 거주자 시나리오, 여가활동자 시나리오, 산업작업자 시나리오에 대한 주요 피폭인자를 도출하였다. 이후, 민감도에 따른 선량 변화를 알아보기 위해 백분위수별 선량분포를 도출하였다. 주요 피폭인자는 시나리오별로 상이하게 나타났으며, 도출된 주요 피폭인자의 백분위수별 선량은 최대 2,717배 차이나는 것으로 나타났다. 이와 같이 시나리오별 주요 피폭인자는 상이하며, 동일한 주요 피폭인자가 도출되었다 하더라도 시나리오별로 고려되는 인자에 따라 피폭방사선량이 상이할 개연성이 존재한다. 따라서 본 연구에서는 시나리오 내 주요 피폭인자와 시나리오 특성 인자에 따른 주요 피폭인자를 분석하였다.

4.1. 시나리오 내 주요 피폭인자 분석

Fig. 3에 거주농부, 교외 거주자, 여가활동자, 산업작업자 시나리오에서 가장 민감한 피폭인자의 5, 25, 50, 75, 95백분위 값에 대한 시간에 따른 피폭방사선량을 나타내었다. 거주농부 및 교외 거주자 시나리오에서 가장 민감한 피폭인자인 ^{226}Ra의 오염층 분배계수의 값이 증가할수록 최대피폭선량은 이른 시기에 나타난 것으로 분석되었으며, 이때 주요 피폭 경로는 식물 섭취에서 라돈 흡입 경로로 상이하게 나타났다. 분배계수는 흡착이 평형 상태에 도달했을 때 두 매체 각각에 존재하는 물질의 농도비를 나타내는 계수이다. 즉, 수중 오염물질의 농도와 토양 입자에 흡착된 물질의 농도 비를 의미하며 방사성핵종의 침출률을 결정하는 중요한 인자이다. 분배계수 값이 작을수록 방사성핵종이 오염층에 잔류하는 시간은 짧아진다. 따라서 백분위수가 낮을수

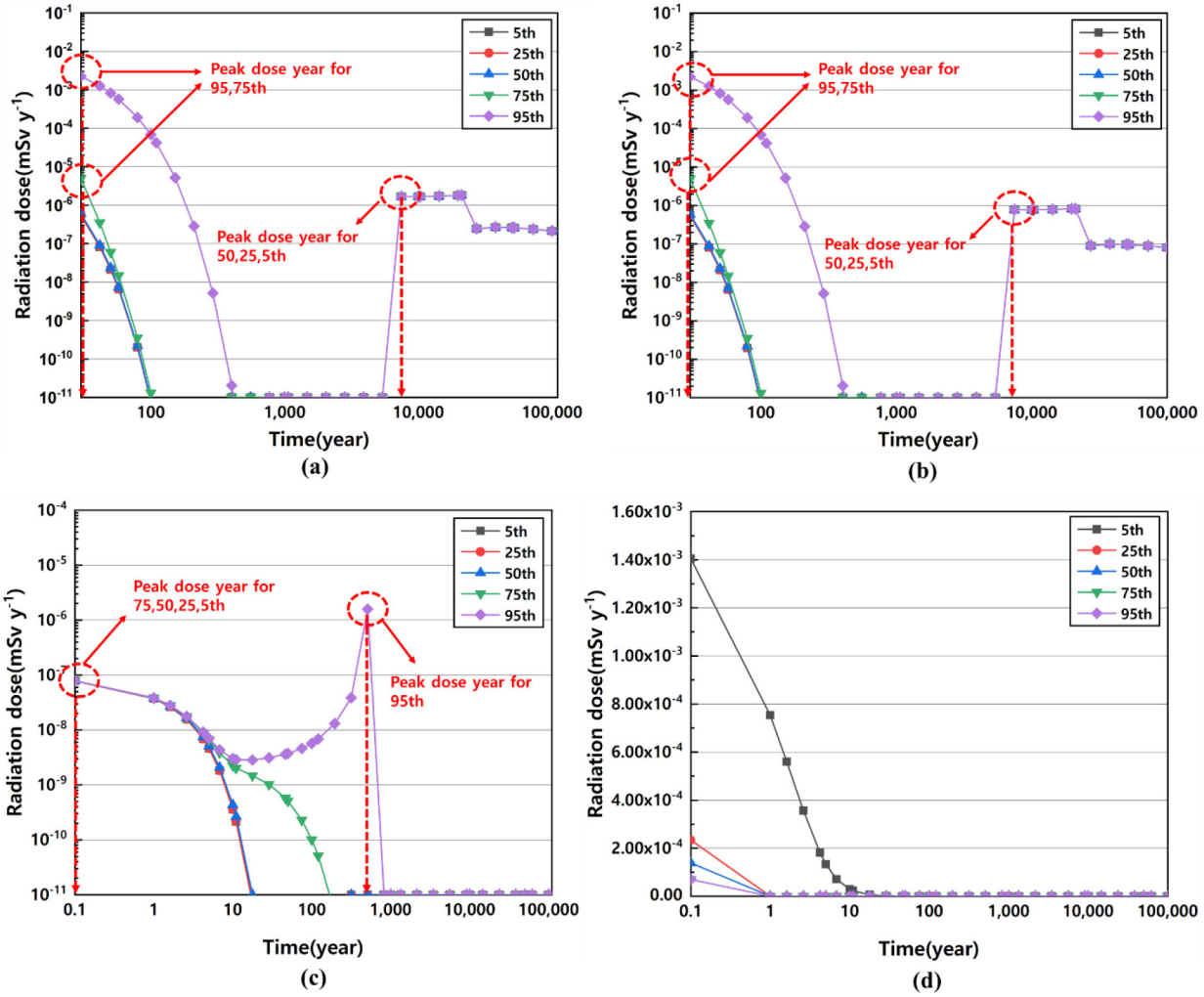

Fig. 3. Radiation dose of the most sensitive exposure factor by percentile (a: Resident farmer, b: suburban resident, c: recreation, d: industrial worker)

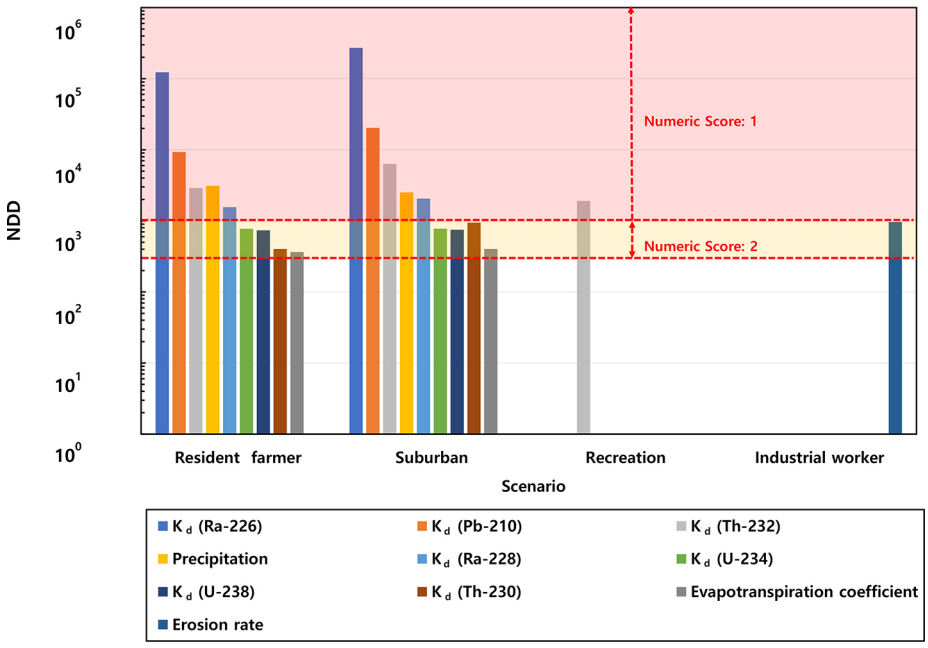

Fig. 4. List of the major exposure factors by scenario

록 방사성핵종은 불포화층으로 빠르게 침출되어 지하수 경로를 통한 농산물 섭취 경로의 영향이 주요한 것으로 분석되었다. 또한, 지하수경로를 통해 방사성핵종이 확산됨에 따라 최대피폭선량이 발생하는 시기가 늦춰지는 것으로 분석되었다. 반면에 분배계수가 증가할수록 방사성핵종이 오염층에 더 오래 잔류하게 되어 최대피폭선량 시기까지 지하수 경로를 통한 유출이 발생하지 않은 것으로 나타났다. 따라서 라돈 흡입 경로가 주요한 것으로 분석되었고, 상대적으로 빠른 시일 내에 최대피폭선량이 나타난 것으로 분석되었다.

여가활동자 시나리오에서는 가장 민감한 인자로 도출된 ^{232}Th의 오염층 분배계수의 값이 증가할수록 최대피폭선량이 발생하는 시기가 지연되는 것으로 나타났다. 백분위 값 별 최대피폭선량은 ^{232}Th 분배계수 값과 비례하는 것으로 나타났다. 여가활동자 시나리오는 지하수 침출과 관련된 섭취 경로와는 무관하기 때문에 외부피폭이 주요한 경로로 나타났다. ^{232}Th 분배계수의 값이 작아질수록 ^{232}Th 핵종이 빠르게 유출되어 해당 핵종이 외부피폭 경로에 대한 피폭방사선량에 주는 영향이 미미한 것으로 분석되었다. 반면에 ^{232}Th 분배계수의 값이 증가할수록 해당 핵종이 오염 부지에 오래 잔류하게 되어서 외부피폭 경로에 대해 중요한 영향이 나타났으며, ^{232}Th로부터 붕괴되어 생성된 ^{228}Ra, ^{228}Th 핵종의 기여도가 가장 큰 것으로 분석되었다.

산업작업자 시나리오에서 가장 민감한 인자로 도출된 침식속도의 백분위 값에 따른 최대피폭선량의 시기는 0년으로 동일한 것으로 나타났다. 침식 속도가 증가할수록 피폭방사선량은 감소하는 것으로 나타났다. 침식속도는 강우, 바람 등에 의해 오염층 토양이 깎이는 정도를 의미한다. 침식 속도가 낮을수록 오염층 토양의 침식정도가 낮아, 토양 내 방사성핵종이 더 많이 잔류하게 되어 외부피폭 경로가 주요한 것으로 나타났다. 반면에 침식속도가 높을 경우, 오염층이 빠르게 침식되기 때문에 외부피폭으로 인한 선량이 크게 감소하는 것으로 분석되었다.

4.2. 시나리오 특성 인자에 따른 주요 피폭인자 분석

Fig. 4에 시나리오별 주요 피폭인자들을 나타내었다. 본 연구에서 고려한 시나리오는 피폭경로, 호흡률, 거주비율 등과 같은 특정 피폭상황 및 피폭대상의 활동을 고려한 인자들을 반영하였다. 거주농부 및 거주자 시나리오는 여러 시나리오별 특성 인자들 중 음식물 섭취 경로, 라돈 흡입 경로, 실내거주비율에 큰 영향을 받은 것으로 분석되었다. 음식물 섭취 경로 및 라돈 흡입 경로를 고려하지 않고 실내거주비율을 0으로 설정 시 주요 피폭인자가 9개에서 6개로 줄어든 것으로 나타났다. 이때 ^{238}U, ^{234}U, ^{210}Pb의 오염층 분배계수가 주요 피폭인자에서 제외된 것으로 나타났다. 해당 인자들의 백분위수에 따른 주요 피폭경로는 외부피폭으로 나타났으며, 주요 피폭핵종은 ^{232}Th로부터 발생한 ^{228}Th으로 나타났다. 백분위수에 따른 ^{238}U, ^{234}U, ^{210}Pb의 오염층 분배계수 값은 다른 원소의 오염층 분배계수 값에 비해 상대적으로 작아 백분위수에 따른 최대피폭선량의 변화에 큰 영향을 주지 않는 것으로 분석되었다.

거주농부 및 교외 거주자 시나리오는 본 연구에서 고려한 피폭시나리오 중 부지 내에서 머무는 시간의 약 70%를 실내에서 보내는 시나리오이다. 일반적으로, 실내거주비율은 라돈흡입 경

로로 발생하는 피폭방사선량에 큰 영향을 미친다. 거주농부 및 교외 거주자 시나리오 내 실내거주비율을 0으로 설정하여 동일하게 95백분위수에 대한 피폭방사선량과 피폭경로를 분석한 결과, 피폭방사선량은 약 20배 정도 낮아졌으며 주요 피폭경로는 식물섭취로 분석되었다. 따라서 실내에서 거주하지 않을 경우, 거주농부 및 교외 거주자 시나리오에서 가장 민감한 인자는 ^{226}Ra의 오염층 분배계수가 아닌 ^{210}Pb의 오염층 분배계수로 나타났으며, 실내거주비율이 ^{226}Ra의 오염층 분배계수가 가장 민감한 피폭인자로 도출되는 원인에 기여한 것으로 분석되었다.

산업작업자와 여가활동자 시나리오의 경우, 실외거주비율이 가장 민감한 피폭인자로 도출되는 원인에 기여한 것으로 분석되었다. 두 시나리오는 실내거주비율이 존재하지 않으며 오로지 실외에서만 모든 활동이 이루어진다. 산업작업자 시나리오의 실외거주비율은 여가활동자에 비해 약 20배 정도 높다. 여가활동자 시나리오 내 실외거주비율을 산업작업자 시나리오 내 실외거주비율과 동일하게 설정 시, ^{232}Th의 오염층 분배계수는 민감하지 않는 것으로 나타났고 이에 따라 주요 피폭인자에서 제외되었다. 이러한 결과를 바탕으로, 시나리오의 특성 인자인 실내거주비율, 실외거주비율은 시나리오별 주요 피폭인자를 결정하는 주요한 원인으로 분석되었다.

5. 결 론

본 연구에서는 NORM 폐기물 매립 시 NDD 분석을 활용한 부지 내 주요 피폭인자를 도출하였다. 이를 위하여 첫 번째, 분석 도구와 매립부지에서 고려될 수 있는 적절한 피폭시나리오 및 피폭경로를 선정하였다. 두 번째, 민감도 분석을 위해 우선순위 1, 2위 인자를 분석 대상 인자로 선정하였다. 마지막으로 민감도 분석을 수행하기 위한 모델로 NDD를 선정하였고, 해당 모델 기반으로 RESRAD 전산코드를 이용하여 부지 내 주요 피폭인자를 도출하였다.

거주농부 시나리오에서는 ^{226}Ra, ^{210}Pb, ^{232}Th, ^{228}Ra, ^{234}U, ^{238}U의 오염층 분배계수와 강수량, 증발산계수가 주요 피폭인자로 도출되었다. 이 중 ^{226}Ra의 오염층 분배계수의 NDD는 122,648로 가장 민감한 인자로 나타났으며, 백분위수에 따른 피폭방사선량은 1.82×10^{-6}~2.23×10^{-3} mSv·y^{-1}로 나타났다. 교외 거주자 시나리오에서는 ^{226}Ra, ^{210}Pb, ^{232}Th, ^{228}Ra, ^{234}U, ^{238}U의 오염층 분배계수와 강수량, 증발산계수가 주요 피폭인자로 도출되었다. 이 중 ^{226}Ra의 오염층 분배계수의 NDD는 271,225로 가장 민감한 인자로 나타났으며, 백분위수에 따른 피폭방사선량은 8.22×10^{-7}~2.23×10^{-3} mSv·y^{-1}로 나타났다. 거주농부 및 교외 거주자 시나리오에서는 ^{226}Ra 오염층 분배계수의 백분위수가 증가할수록 최대피폭방사선량은 이른 시기에 나타나는 것으로 분석되었다. 여가활동자 시나리오에서는 ^{232}Th의 오염층 분배계수가 주요 피폭인자로 도출되었다. 해당 인자의 NDD는 1,909로 가장 민감한 인자로 나타났으며, 백분위수에 따른 피폭방사선량은 7.79×10^{-8}~1.57×10^{-8} mSv·y^{-1}로 나타났다. 또한, 백분위수가 증가할수록 최대피폭방사선량이 나타나는 시기가 지연되는 것으로 분석되었다. 산업작업자 시나리오에서는 침식속도가 주요 피폭인자로 도출되었고, NDD는 965로 나타났다. 그리고 백분위수에 따른 피폭방사선량은 7.02×10^{-5}~1.41×10^{-3} mSv·y^{-1}로 나타났다. 침식속도의 백분위수와 관계없이 최대피폭방사선량이 나타나는 시기는 0년으로 일정한 것으로 나타났다. 시나리오별 주요 피폭인자는 시나리오 특성인자에 따라 상이하게 도출된 것으로 분석되었다.

본 연구 결과는 NORM 폐기물 매립 시 국내 특성에 대한 방사선 환경영향평가의 기초자료와 국내 부지특성인자 개발 시 배경자료로 활용할 수 있을 것으로 판단되며, 부지 특성인자 개발을 통한 DB 구축에 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 원자력안전위원회의 재원으로 한국원자력안전재단의 지원을 받아 수행한 원자력안전연구사업의 연구결과입니다. (No. RS-2021-KN048610).

참고문헌

1. Waste Control Act. Article 20172.
2. Radiation in the Natural Environment Safety and Control Act. Article 20141.
3. NRC. 2001. Systematic Radiological Assessment of Exemptions for Source and Byproduct Materials. NUREG-1717.
4. Mohamad Kontol K, Sulaiman I and Abdul Razalim FA. 2015. Radiological Impact Assessment in Disposal of Treated Sludge. *Junal Sains Nuklear Malaysia* **27**(2):23-30.
5. Anggraini Z, Setiawan B, Shadrina N, Iskandar D. 2021. Radiological Impact Assessment of Class 3 Landfill of TENORM Waste from Tin Industry in Bangka Island. *Environment and Natural Resources Journal* **19**(5):337-347. https://doi.org/ 10.32526/ennrj/19/2021020.
6. 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. https://doi.org/10.1097/01.HP.0000156058.46817.2c.
7. Reis R.G., Lauria D.C., 2012. A Prospective Radiological Risk Assessment for a Phosphate Industry Project. INIS-BR-17357.
8. Lopes AG, Da Silva FCA, Lopes RT. 2023. Radiological assessment of the disposal of bulk oil NORM waste: Case study from Brazil. *Journal of Environmental Radioactivity*. Volume 261. 2023. 10713. https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2023.107139.
9. Shadrina N, Anggraini Z, Setiawan B, Iskandar D. 2022. Effect of Cover Layer on Radiological Impact of Landfill for TENORM Waste from Tin Industry in Bangka Island. AIP Conf. Proc. 2 August 2022; **2501**(1):020003. https://doi.org/10.1063/5.0095664.
10. Ryu GW, Lee SJ, Kim HJ, Kim KP. 2021. Site Specific Parameters Sensitivity Analysis for Site Reuse after Decommissioning Nuclear Facilities. *Journal of Radiation Industry* **15**(2):107-116. https://doi.

org/10.23042/radin.2021.15.2.107.
11. ANL. 2001. User's Manual for RESRAD Version 6. ANL/EAD-4.
12. NRC. 1998. Decision Methods for Dose Assessment to Comply with Radiological Criteria for License Termination. NUREG-1549.
13. NRC. 2000. Development of Probabilistic RESRAD 6.0 and RESRAD-BUILD 3.0 Computer Codes. NUREG/CR-6697.
14. Korea Waste Association. 2021. Current state of waste management.
15. ANL. 2015. Data Collection Handbook to Support Modeling Impact of Radioactive Material in Soil and Building Structures. ANL/EVS/TM/14/4.
16. Korea Health Industry Development Institute. 2021. Intake by food group.
17. EPA. 2017. Update for Chapter 5 of the Exposure Factors Handbook. EPA/600/R-17/384F.
18. KINS. 2011. Research on ways to improve the INDAC system. KINS/RR-808.
19. ICRP. 1994. Human Respiratory Tract Model for Radiological Protection. ICRP Publication 66. Ann. ICRP 24 (1-3).
20. KAERI. 2003. Radiological Dose Assessments for Clearance of the Concrete Waste from KRR-1&2. KAERI / TR-2578/ 2003.
21. Statistics Korea. 2019. Life Time Survey.