JOURNAL OF RADIATION INDUSTRY

Original article

16(2) : 135-143 (2022)
https://doi.org/10.23042/radin.2022.16.2.135

원자력발전소 해체 부지의 방사성오염 분포에 따른 조사설계 오차 한계 분석

김민성[1], 이세종[1], 류강우[1], 박종혁[1], 김광표[1,*]

[1]경희대학교 원자력공학과

Analysis of Survey Design Error Limit According to Radioactivity Concentration Distributions of Nuclear Power Plant Decommissioning Site

Min Seong Kim[1], Se jong Lee[1], Gang Woo Ryu[1], Jong Hyok Park[1] and Kwang Pyo Kim[1,*]

[1]Department of Nuclear Engineering, Kyung Hee University, Yongin 17104, Republic of Korea

Abstract When decommissioning a nuclear power plant, it is necessary to prove that the residual radioactivity is lower than DCGL in order to release the site. If the site is released by mistake, time and resources may be wasted, or it may have a radiological effect on people who use the site in the future. Therefore, for reasonable release of the site, it is necessary to derive the error limit for determining whether the radioactivity concentration of the soil sample is appropriate. The purpose of this study is to analyze the survey design error limit according to radioactive concentration distributions of nuclear power plant decommissioning site. To achieve the purpose of the study, the source terms, exposure scenario, and input parameters were selected. Each element was selected by domestic and foreign references, and the RESRAD-ONSITE code was used for exposure dose assessment. Source terms were selected as ^{14}C, ^{60}Co, ^{63}Ni, ^{90}Sr, and ^{137}Cs, and the exposure scenario was selected as a resident farmer scenario considering all ingestion pathways. For input parameters, the domestic soil environment information system and KINS regulation guideline 2.2 were used to select input parameters reflecting the domestic characteristics. Based on the selected source term, exposure scenario, and input parameters, we derived the soil $DCGL_w$ using the RESRAD-ONSITE results and site reuse criteria. Finally, based on the $DCGL_w$ and LBGR selected in this study, the gray region according to the change of the distribution of radioactivity concentration was derived. As results of performing the RESRAD-ONSITE code, ^{14}C, ^{63}Ni, ^{90}Sr, which are beta emitting nuclides were found to be dominant in exposure dose through ingestion pathways, and ^{60}Co, ^{137}Cs, which are gamma emitting nuclides, were dominant in exposure dose by external exposure from the surface of the site. As results of deriving the soil $DCGL_w$ based on the exposure doses, ^{63}Ni was the largest value at 5.41×10^{1} Bq g^{-1}, and ^{60}Co was the smallest value at 4.42×10^{-2} Bq g^{-1}. Finally, as results of deriving the values of relative shift based on the standard deviation of radioactivity concentration, LBGR, and $DCGL_w$, it was found that the values of relative shift exceed 3 for all radionuclides. And as the values of LBGR were modified, the width of the gray areas were changed to be narrower. Furthermore, it was found that the smaller the standard deviation values of the radioactivity concentration distribution,

http://www.ksri.kr/

Copyright © 2022 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 13 June 2022 **Revised** 15 June 2022 **Accepted** 22 June 2022

the higher the values of the relative shift in the gray area. As the values of standard deviation decreased, it was expected that the number of samples required in the site survey design will decrease. It is judged that the results of this study will be used in deriving the error limit of radioactivity concentration according to soil sample measurement when decommissioning a domestic nuclear power plant in the future.

Key words: Nuclear power plant decommissioning, Exposure dose assessment, Soil DCGL, Radioactivity concentration distribution, Error limit

1. 서 론

일반적으로 원자력발전소의 해체가 완료되면 해체 후 부지를 거주, 산업적 이용 등을 목적으로 재이용할 수 있다. 해체 후 부지를 거주, 산업 등의 목적으로 재이용하기 위해서는 오염된 부지의 잔류방사능을 조사하여 잔류방사능 유도농도(DCGL, Derived Concentration Guideline Level)보다 낮음을 입증해야 한다. 원자력안전위원회고시 제2021-11호에서는 원자력발전소의 해체 수행 시 부지의 잔류방사능을 조사하여 통계적인 방법을 통해 부지의 규제해제 만족 여부를 판단해야 한다고 제시하고 있다[1].

전여령 등은 고리1호기의 DCGL 값을 기반으로 회색영역(Gray region)을 도출하였다[2]. 이기원 등은 국내 연구용 원자로 시설 해체 후 부지의 최종현황상태 조사 연구를 수행하였다[3]. 황주호 등은 TRIGA 연구로 해체에 따른 원자력시설의 부지 재이용 기준 평가 연구를 수행하였다[4]. Yankee Rowe 전력회사에서는 Yankee Rowe 원자력발전소의 해체 후 부지를 재이용하기 위해 토양 DCGL을 도출하였다[5]. Pacific 가스 및 전력회사에서는 Humboldt Bay 원자력발전소의 해체 후 부지를 재이용하기 위해 토양 DCGL을 도출하였다[6]. Sacramento Municipal Utility District (SMUD) 사는 Rancho Seco 원자력발전소의 해체 후 부지를 재이용하기 위해 토양 DCGL을 도출하였다[7].

원자력발전소의 해체 후 부지 규제해제를 위한 DCGL 도출 관련 연구는 일부 수행되었으나, DCGL과 토양 시료의 방사능농도를 비교하여 부지의 규제해제가 적절한지 입증하는 연구는 부족한 실정이다. 잘못된 의사결정으로 해제되어야 할 부지가 해제되지 않으면 불필요한 제염활동 등으로 인한 시간, 자원의 낭비를 초래할 수 있다. 반대로 해제 불가능한 부지가 해제된다면 향후 부지를 이용하는 사람들에 대해 일정 수준 이상의 방사선학적 영향을 미치게 된다. 합리적인 부지 개방을 위해서는 토양 시료의 방사능농도가 DCGL을 초과하지 않는지, 즉 최종현황상태 조사 설계 결과의 적절성을 만족하는지 판단하는 오차 한계를 도출해야 한다. 그러나 현재 국내 해체 후 원자력발전소 부지의 규제해제 시 활용되는 토양 시료 방사능농도의 오차 한계에 관한 연구가 부족한 실정이다. 따라서 DCGL 기반의 토양 시료 방사능농도 분포 변화에 따른 오차 한계 분석이 필요하다.

본 연구의 목적은 국내 원자력발전소 해체 시 DCGL 기반 토양 시료 방사능농도 분포에 따른 오차 한계를 분석하는 것이다. 피폭방사선량 평가는 RERSAD-ONSITE 전산코드를 기반으로 수행하였다. 평가를 수행하기 위하여 국외 원자력발전소 해체 사례와 국내·외 참고문헌을 기반으로 평가 대상 선원항, 피폭시나리오, 평가 입력인자를 선정하였다. 그리고 RESRAD-ONSITE 전산코드로 도출한 피폭방사선량 결과값과 국내 부지 재이용 기준을 기반으로 토양 DCGL을 도출하였다. 최종적으로 토양 DCGL을 활용하여 방사능농도 분포에 따른 오차 한계를 분석하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 평가 대상 선원항, 피폭시나리오, 입력인자 선정

본 연구에서는 평가 대상 선원항, 피폭시나리오, 입력인자를 선정하기 위해 국내·외 참고문헌을 조사하였다. 국내 문헌을 참고할 수 있는 경우 이를 기반으로 각 대상을 선정하였으며, 국내에 부족한 자료에 대해서는 국외 문헌을 참고하였다.

Table 1에 본 연구에서 피폭방사선량 평가를 위해 선정한 선원항을 나타내었다. 현재 국내에서는 원자력발전소에 대하여 해체를 진행한 바 없으며, 이에 따라 국내 해체 원전에 대한 선원항 실측 데이터가 없는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 국외 해체 원자력발전소의 안전성평가 시 고려한 선원항을 조사하였다. 국외 원자력발전소의 경우, 국내에 가장 많이 운영되고 있는 경수로형 원자력발전소를 기준으로 선정하였다. 국외에서 대표적으로 해체

Table 1. Radionuclides used for exposure dose assessment

Nuclides	Rancho Seco	Yankee Rowe	Humboldt Bay	This study
^{3}H		√	√	
^{14}C	√	√	√	√
^{55}Fe		√		
^{59}Ni			√	
^{60}Co	√	√	√	√
^{63}Ni	√	√	√	√
^{90}Sr	√	√	√	√
^{94}Nb		√	√	
^{99}Tc		√	√	
^{108m}Ag		√		
^{125}Sb		√		
^{129}I			√	
^{134}Cs	√	√		
^{137}Cs	√	√	√	√
^{152}Eu		√	√	
^{154}Eu		√	√	
^{155}Eu		√		
^{237}Np			√	
^{238}Pu		√	√	
^{239}Pu		√	√	
^{240}Pu		√	√	
^{241}Pu		√	√	
^{241}Am		√	√	
^{243}Cm		√	√	
^{244}Cm		√	√	
^{245}Cm			√	
^{246}Cm			√	

완료된 경수로형 원자력발전소인 Rancho Seco, Yankee Rowe, Humboldt Bay 원자력발전소를 조사하였으며, 해당 원전에서 공통적으로 고려하고 있는 ^{14}C, ^{60}Co, ^{63}Ni, ^{90}Sr, ^{137}Cs을 최종 평가 대상 선원항으로 선정하였다[5-7]. $DCGL_w$을 평가하기 위해서는 단위농도당 피폭방사선량의 값이 필요하기 때문에 각 핵종의 방사능농도는 1 Bq g^{-1}으로 가정하였다[8].

Table 2에 본 연구에서 선정한 피폭시나리오 및 주요 입력인자를 나타내었다. 본 연구에서는 해체 후 부지에 적용 가능한 피폭시나리오를 선정하기 위해 국외 문헌을 조사하였다. 미국 원자력규제위원회(NRC, Nuclear Regulatory Commission)에서는 원자력이용시설 해체 시 안전성평가에 관한 문헌으로 NUREG/CR-5512, NUREG-1757 등의 문헌을 발간하였으며, 해당 문헌에는 해체 후 부지에 적용 가능한 피폭시나리오가 제시되어 있다[9,10]. 피폭시나리오로는 거주경작 시나리오, 거주자 시나리오, 건설작업자 시나리오, 산업작업자 시나리오, 여가활동자 시나리오 등 다양한 시나리오가 제시되어 있다. 모든 시나리오는 토양에 의한 직접적인 외부피폭, 흡입 피폭 등을 공통적으로 고려하지만 부지 내에서 생활하는 개인의 행동특성에 따라 고려하는 섭취 피폭경로는 상이하다. 섭취 대상으로는 농산물, 육류, 우유, 수산물, 음용수 등이 있으며, 각 시나리오는 개인의 행동특성에 적합한 섭취 피폭경로를 고려한다. 본 연구에서는 평가의 보

Table 2. Input data used for exposure dose assessment

Category		Unit	Selection
Exposure Scenario		–	Resident Farmer Scenario
Soil parameters	Density	g cm^{-3}	1.51
	Total porosity	–	0.43
	Effective porosity	–	0.352
	Field capacity	–	0.28
	Hydraulic conductivity	m yr^{-1}	219
	b parameter	–	5.39
Ingestion rate	Fish	kg yr^{-1}	32.4
	Crustacea and mollusks	kg yr^{-1}	15.3
	Fruit, grain, non-leafy vegetables	kg yr^{-1}	257
	Leafy vegetables	kg yr^{-1}	100
	Meat	kg yr^{-1}	71.1
	Milk	L yr^{-1}	73.2
Inhalation rate		m^3 yr^{-1}	8100
External gamma penetration factor		–	0.7

수성을 확보하기 위해 모든 섭취 경로를 고려하는 거주경작 시나리오를 최종 피폭시나리오로 선정하였다[11,12].

본 연구에서는 토양 $DCGL_w$을 도출하기 위해 RESRAD-ONSITE 전산코드를 활용하였다[13-15]. RESRAD-ONSITE 전산코드는 아르곤 국립 연구소(ANL, Argonne National Laboratory)에서 개발한 선량평가 코드로 토양에 존재하는 방사성핵종으로 인한 작업자와 주민의 피폭방사선량을 평가할 수 있는 전산코드이다. RESRAD-ONSITE 전산코드 내에는 원전 부지 내 잠재적 핵종을 평가할 수 있도록 방사성핵종의 데이터가 내장되어 있으며, 방사성물질의 환경 내 거동 및 주요 피폭경로를 고려한다. 그리고 다양한 입력인자를 고려하며, 각 입력인자에 대한 불확실성 평가가 가능하다. 따라서 원자력발전소의 해체 후 오염된 부지의 안전성평가 시 활용될 수 있다.

토양 $DCGL_w$은 원자력발전소별 부지 특성 값에 따라 매우 상이할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 RESRAD-ONSITE 전산코드의 입력인자로 국내 원자력발전소의 특성을 반영한 입력인자를 선정하였다. RESRAD-ONSITE의 입력인자는 부지 토양 특성, 개인의 섭취량, 호흡률 등이 있다. 부지 토양 특성 관련 입력인자에는 토양 밀도, 공극률, 수리전도도 등이 존재하며, 해당 특성은 토성(Soil texture)에 따라 상이하다. 본 연구에서는 국내 토양환경정보시스템을 활용하여 고리, 월성, 한울, 새울 원자력발전소 부지의 토성을 분석하였고, 각 원자력발전소 부지에서 가장 주된 토성의 토양 특성을 분석하여 최종 부지 토양 특성 관련 입력인자를 선정하였다. 섭취량, 호흡률 등의 개인 특성 입력인자를 선정하기 위하여 KINS 규제지침 2.2를 활용하여 선정하였다[16]. 그리고 문헌에 제시되어 있지 않는 입력인자는 RESRAD-ONSITE에서 제공하는 기본값을 활용하였다. 최종적으로 시간의 흐름에 따른 피폭방사선량을 도출하였으며, $DCGL_w$의 도출을 위해 최대 선량이 나타나는 시기에 해당하는 피폭방사선량 값을 도출하였다.

2.2. 토양 $DCGL_w$ 도출

본 연구에서는 앞서 선정한 선원항, 피폭시나리오, 입력인자를 기반으로 피폭방사선량을 도출하였으며, 최종적으로 토양 $DCGL_w$를 도출하였다. DCGL은 해체 후 부지의 재이용을 위한 각 핵종별 방사능농도 제한치를 의미한다. 토양 $DCGL_w$는 RESRAD-ONSITE 전산코드의 피폭방사선량 평가 결과값과 국내 부지 재이용 기준을 활용하여 도출할 수 있다.

$$DCGL_{wi} = \frac{0.1\ mSv\ yr^{-1}}{DSR_i}$$

- $DCGL_{wi}$ = 방사성핵종 i의 토양 $DCGL_w$ ($Bq\ g^{-1}$)
- 0.1 $mSv\ yr^{-1}$ = 부지 재이용 기준
- DSR_i = 방사성핵종 i의 단위 방사능농도당 피폭방사선량 ($(mSv\ yr^{-1})\ (Bq\ g^{-1})^{-1}$)

2.3. 토양 시료 방사능농도 분포에 따른 오차 한계 분석

본 연구에서는 앞서 도출한 $DCGL_w$ 값을 기반으로 토양 시료의 방사능농도 분포에 따른 오차 한계를 분석하였다. 방사능농도의 오차 한계는 회색영역을 통해 파악할 수 있다. 회색영역은 잘못된 판단으로 부지를 개방할 확률이 상대적으로 미미한 오차 한계의 범위를 의미한다[17,18]. 회색영역의 범위는 상한 경계선으로 $DCGL_w$을 설정하고, 하한 경계선으로 LBGR (Lower Boundary of Gray Region)을 설정한다[19]. 미국의 원전 해체 지침서인 MARSSIM (Multi-Agency Radiation Survey and Site Investigation Manual) 문헌에서는 LBGR의 초기값으로 DCGL의 50% 값을 적용할 수 있다고 제시하고 있다[8].

도출한 오차 한계가 적합한지 판단하기 위해서는 측정값의 불확실성을 나타내는 매개변수인 relative shift의 값이 합리적인지 판단해야 한다. 이에 대하여 MARSSIM 문헌에서는 relative shift의 값이 1~3 사이에 존재해야 하며, 이 범위를 벗어난다면 해당 범위 내에 존재하도록 LBGR 값을 수정해야 한다고 제시하고 있다[8,20,21]. Relative shift는 DCGL, LBGR, σ의 함수로써 표현된다.

$$Relative\ shift\ (\Delta\ \sigma^{-1}) = \frac{DCGL - LBGR}{\sigma}$$

- Relative shift = 측정값의 불확실성을 나타내는 매개변수(−)
- DCGL = 토양 DCGL ($Bq\ g^{-1}$)
- LBGR = 회색영역의 하한계 ($Bq\ g^{-1}$)
- σ = 토양 시료 방사능농도의 표준편차 ($Bq\ g^{-1}$)

본 연구에서는 MARSSIM 문헌을 기반으로 먼저 토양 시료의 평균 방사능농도를 LBGR로 가정하였다[8]. 그리

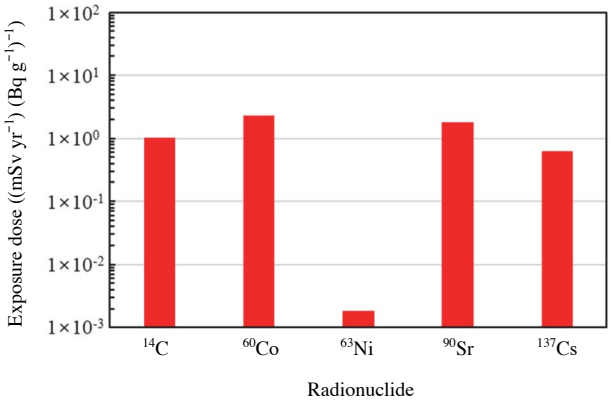

Fig. 1. Exposure doses according to radionuclides.

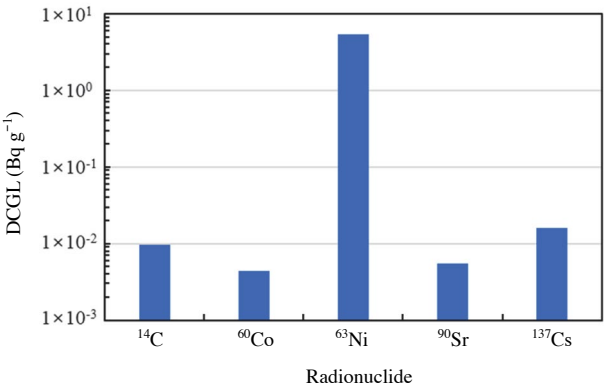

Fig. 2. $DCGL_w$ according to radionuclides.

고 방사능농도의 분포는 통계적 가설검정 시 일반적으로 사용하는 상대 표준편차가 10%인 정규분포를 선정하였으며, 방사능농도 분포의 변화에 따른 결과 분석을 수행하기 위해 상대 표준편차가 5%, 20%인 정규분포를 추가로 선정하였다[2]. 최종적으로 각 분포에 따른 relative shift를 도출한 뒤 relative shift가 3을 초과하는 분포에 대해서는 3의 값을 적용한 조사설계를 수행하기 위해 LBGR을 수정하였다. 그리고 각 핵종별 오차 한계에 해당하는 회색영역을 도출하였다.

3. 결 과

본 연구에서는 국내 원전 해체 후 부지의 방사성오염 분포에 따른 조사설계의 오차 한계를 분석하였다. 피폭방사선량 평가 수행에 앞서 평가하고자 하는 선원항, 피폭시나리오, 입력인자를 선정하였다. 그리고 RESRAD-ONSITE 전산코드를 사용하여 피폭방사선량 평가에 따른 $DCGL_w$를 도출하였다. 최종적으로 도출한 $DCGL_w$과 토양 시료의 방사능분포 표준편차의 변화에 따른 회색영역을 도출하여 조사설계에 미치는 영향을 분석하였다.

3.1. 토양 $DCGL_w$ 도출

본 단계에서는 앞서 선정한 선원항, 피폭시나리오, 입력인자를 기반으로 피폭방사선량을 수행하였으며, 최종적으로 $DCGL_w$를 도출하였다.

Fig. 1에 본 연구에서 도출한 피폭방사선량 평가 결과를 나타내었다. 각 핵종별 피폭방사선량 분석 결과, ^{60}Co, ^{90}Sr, ^{14}C, ^{137}Cs, ^{63}Ni 순으로 큰 것으로 나타났으며, 약 1.85×10^{-3}~2.26×10^{0} mSv yr^{-1}로 나타났다. ^{14}C을 제외한 각 핵종은 0년에서 피폭방사선량이 최대값으로 나타났으며, 시간이 흐름에 따라 감소하는 것으로 나타났다. 그러나 ^{14}C의 경우 초기에는 피폭방사선량이 증가하는 경향성을 보였으며, 7.87년에서 최댓값을 가진 뒤 감소하는 것으로 나타났다.

Fig. 2에 본 연구에서 도출한 토양 $DCGL_w$ 결과를 나타내었다. 핵종별 $DCGL_w$ 분석 결과, 피폭방사선량이 가장 작은 것으로 나타난 ^{63}Ni의 $DCGL_w$이 5.41×10^{1} Bq g^{-1}으로 가장 큰 것으로 나타났으며, 피폭방사선량이 가장 큰 ^{60}Co의 $DCGL_w$의 경우 4.42×10^{-2} Bq g^{-1}으로 가장 작은 것으로 나타났다.

3.2. 토양 시료 방사능농도 분포에 따른 오차 한계 분석

본 단계에서는 앞서 도출한 $DCGL_w$ 값을 기반으로 회색영역을 도출하였다. 부지 방사성오염 분포에 따른 LBGR은 핵종별로 $DCGL_w$의 50%를 선정하였고, 상대 표준편차가 5%, 10%, 20%인 정규분포를 방사능농도 분포로 가정하여 표준편차 변화에 따른 relative shift 및 조사설계의 영향을 분석하였다.

Table 3와 Fig. 3에 본 연구에서 $DCGL_w$을 기반으로 도출한 토양 시료의 방사능농도 분포에 따른 회색영역을 나타내었다. 선정한 LBGR과 상대 표준편차가 5%, 10%, 20%인 방사능농도 분포를 기반으로 relative shift를 도출한 결과, 5~20의 값을 가졌으며 모두 해당 범위를 초과하는 것으로 나타났다. 따라서 relative shift의 값을 수정하기

Table 3. Results of gray regions according to radionuclides and σ.

Radionuclides	Gray region (Bq g^{-1})		
	σ = 5%	σ = 10%	σ = 20%
^{14}C	8.89×10^{-2}~9.62×10^{-2}	8.17×10^{-2}~9.62×10^{-2}	6.73×10^{-2}~9.62×10^{-2}
^{60}Co	4.09×10^{-2}~4.42×10^{-2}	3.76×10^{-2}~4.42×10^{-2}	3.10×10^{-2}~4.42×10^{-2}
^{63}Ni	5.00×10^{1}~5.41×10^{1}	4.59×10^{1}~5.41×10^{1}	3.78×10^{1}~5.41×10^{1}
^{90}Sr	5.14×10^{-2}~5.56×10^{-2}	4.72×10^{-2}~5.56×10^{-2}	3.89×10^{-3}~5.56×10^{-2}
^{137}Cs	1.48×10^{-1}~1.59×10^{-1}	1.36×10^{-1}~1.59×10^{-1}	1.12×10^{-1}~1.59×10^{-1}

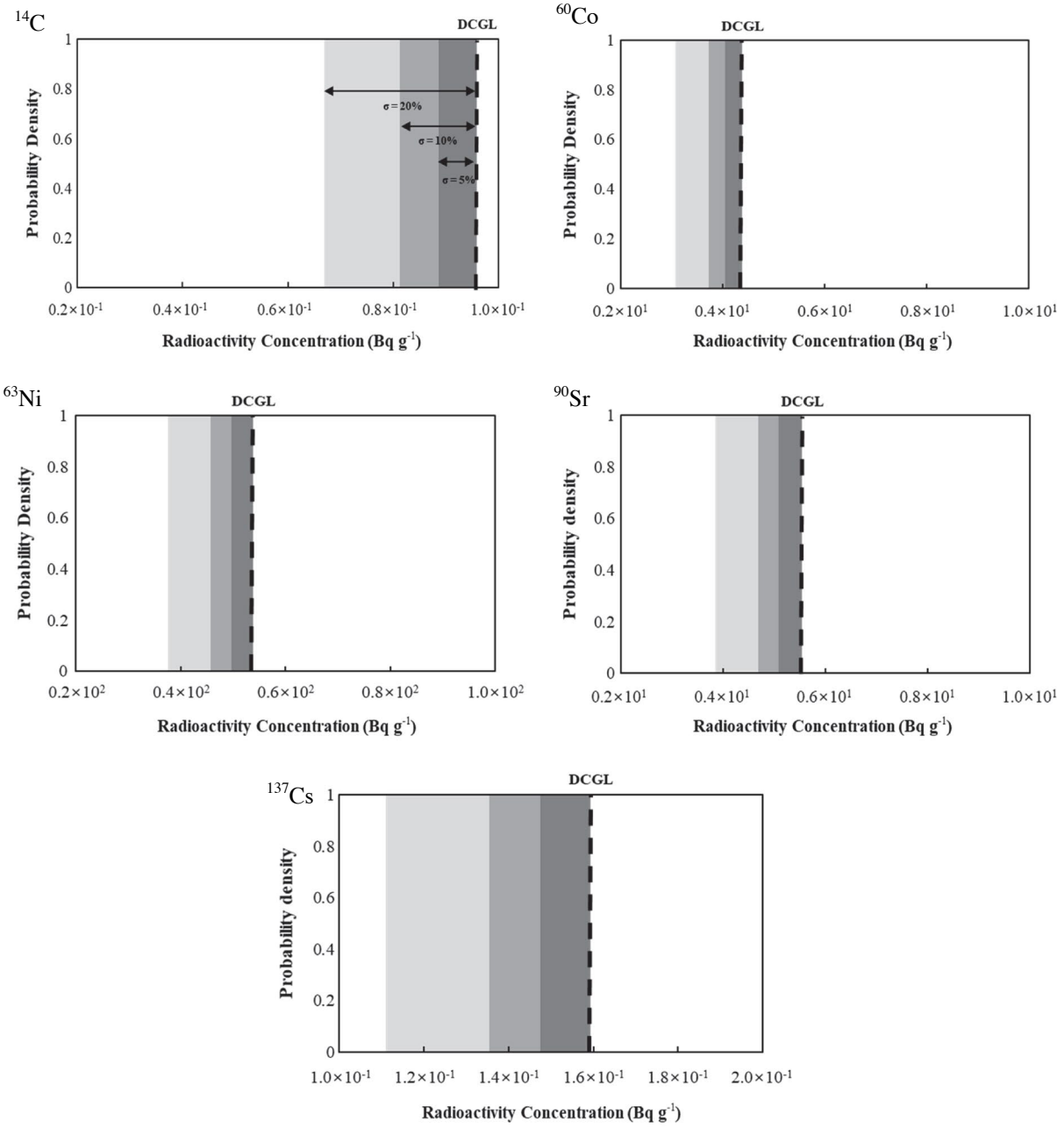

Fig. 3. Gray regions according to radionuclides.

위해 최종 수정된 LBGR 값을 도출하였다. Relative shift 값의 수정에 따른 LBGR 도출 결과, 상대 표준편차가 5%, 10%, 20%인 모든 분포에 대하여 초기 가정 값인 $DCGL_w$의 50% 값보다 약 40~85% 정도로 증가하는 것으로 나타났다. 이에 따라 회색영역의 너비는 모든 방사능농도 분포에 대하여 초기값에 비해 감소하는 것으로 나타났다.

선정한 각 정규분포에 대하여 표준편차의 크기에 따른 LBGR 값의 변화를 분석한 결과, 표준편차가 20%인 방사능농도 분포에서 LBGR 값이 가장 작았으며, 표준편차가 작을수록 LBGR 값이 증가하는 것으로 나타났다. 이에 따라 표준편차가 작을수록 회색영역의 너비가 감소하는 것으로 나타났다.

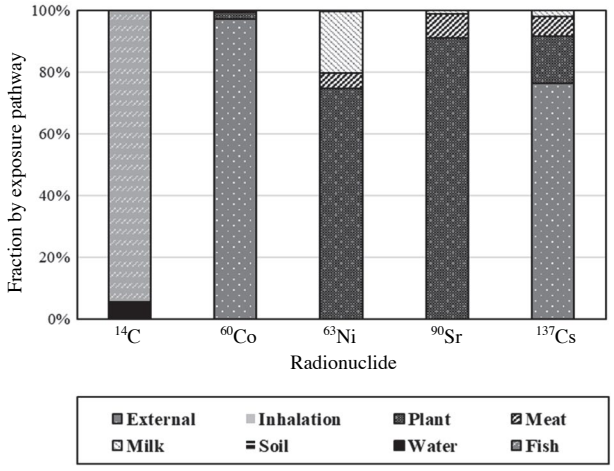

Fig. 4. Exposure dose according to radionuclides and exposure pathways.

4. 고 찰

4.1. 토양 $DCGL_W$ 도출

Fig. 4에 각 핵종별 피폭경로에 따른 피폭방사선량을 나타내었다. 베타 방출 핵종에 해당하는 ^{14}C, ^{63}Ni, ^{90}Sr의 경우 섭취를 통한 선량이 지배적인 것으로 나타났다. ^{63}Ni과 ^{90}Sr의 경우에는 섭취 대상 중에서도 농산물 섭취에 의한 피폭이 가장 지배적인 것으로 나타났으며, ^{14}C은 수산물 섭취에 의한 피폭이 가장 지배적인 것으로 나타났다. 감마 방출 핵종에 해당하는 ^{60}Co과 ^{137}Cs은 지표면에 의한 외부피폭이 지배적인 것으로 나타났다.

Fig. 5에 ^{14}C의 피폭경로별 시간에 따른 피폭방사선량을 나타내었다. ^{14}C의 경우 0년에서 최대 피폭방사선량이 나타나는 다른 핵종과 다르게 7.87년에서 1.04 mSv yr^{-1}로 최대 피폭방사선량을 갖는 것으로 나타났다. 시간에 따른 피폭경로 분석 결과, 0년에서는 ^{14}C이 다른 베타 방출 핵종인 ^{63}Ni과 ^{90}Sr과 동일하게 농산물 섭취에 의한 피폭이 3.53×10^{-1} mSv yr^{-1}로 가장 지배적인 것으로 나타났다. 그러나 시간이 흐름에 따라 농산물 섭취에 의한 피폭방사선량은 감소하였으며, 수산물 섭취에 의한 피폭방사선량은 증가하는 것으로 나타났다. 최종적으로 7.87년에서의 수산물 섭취에 의한 피폭방사선량이 0년에서의 농산물 섭취에 의한 피폭방사선량보다 약 2.67배 큰 것으로 나타났고, 이에 따라 7.87년에서 ^{14}C에 의한 최대 피폭방사선량을 갖는 것으로 나타났다.

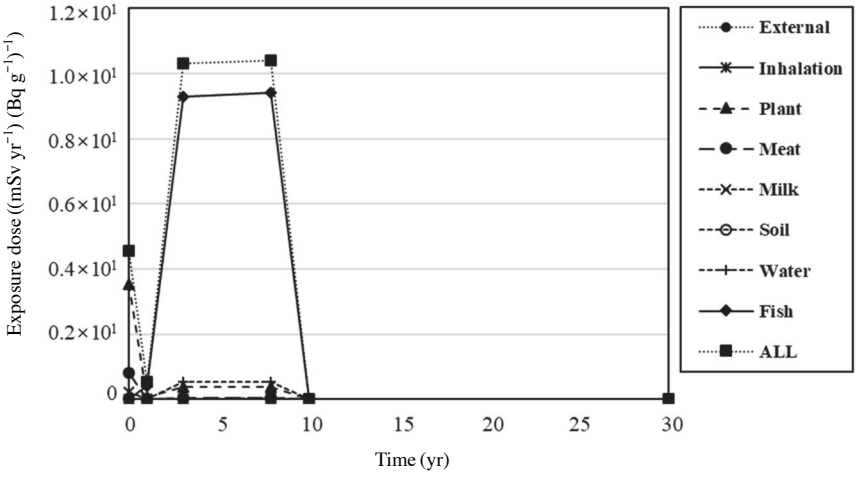

Fig. 5. Exposure doses according to time by exposure pathways of ^{14}C.

4.2. 토양 시료 방사능농도 분포에 따른 오차 한계 분석

본 연구에서는 모든 방사능농도 분포에 대하여 LBGR 도출 결과 초기 가정 값인 $DCGL_w$의 50% 값보다 증가하는 것으로 나타났다. 이러한 경향성이 나타난 이유는 초기 LBGR 값과 선정한 각 방사능농도 분포를 기반으로 relative shift를 도출한 결과, 모든 방사능농도 분포에 대하여 1~3 사이의 범위에서 벗어났으며 3보다 큰 값으로 나타났기 때문이다. Relative shift가 3을 초과하게 되면 조사설계 단계에서는 relative shift가 3의 값을 갖도록 LBGR을 수정해야 한다. 본 연구에서는 표준편차를 5%, 10%, 20%로 선정하였고 각 핵종별로 $DCGL_w$ 값을 도출하였으므로 relative shift의 값을 감소시키기 위해서는 LBGR의 값이 증가하여야 한다. 따라서 LBGR의 값은 방사능농도 분포에 따라 초기값보다 40~85% 증가하는 것으로 나타났다.

Relative shift의 값은 작을수록 향후 최종현황상태 조사 수행 시 채취해야 하는 시료 수가 증가하며, 특히 1보다 작게 되면 시료 수가 급격하게 증가하는 경향이 있다. 반대로 relative shift의 값이 증가하면 향후 채취해야 하는 시료 수가 감소하게 된다. 최종현황상태 조사에서는 채취 시료수에 따라 조사 기간, 분석 비용, 인적 자원 등의 소요 정도가 상이하므로, 적절한 relative shift의 값을 적용하기 위한 수정이 필요하다. 본 연구에서는 표준편차의 크기에 따른 LBGR 값의 변화를 분석한 결과 표준편차가 작을수록 LBGR 값이 증가하는 것으로 나타났는데, 이는 표준편차의 값이 작을수록 relative shift 값이 증가하기 때문이다. relative shift는 측정값의 불확도를 나타내는 매개변수이며, 표준편차의 값이 작으면 방사능농도 오염 분포의 변화가 낮기 때문에 relative shift 값이 증가하게 된다. 최종적으로 조사설계에서 요구되는 시료의 수가 감소하게 되며, 이는 곧 향후 해체 수행 절차에서 최종 부지의 규제해제를 판단하는 마지막 단계인 최종현황상태 조사 수행 시 소요되는 조사 기간, 분석 비용, 인적 자원 등을 줄일 수 있음을 의미한다.

5. 결 론

본 연구에서는 원자력발전소 해체 시 토양 시료 방사능농도 분포에 따른 오차 한계 분석을 수행하였다. 이를 위하여 첫 번째, 국내·외 문헌을 기반으로 선원항, 피폭시나리오, 입력인자를 선정하였다. 두 번째, 토양 $DCGL_w$을 도출하였다. 마지막으로 토양 시료 방사능농도 분포에 따른 오차 한계를 분석하였다.

선원항은 국외 해체 원전의 안전성평가 시 고려한 선원항을 조사하였으며, ^{14}C, ^{60}Co, ^{63}Ni, ^{90}Sr, ^{137}Cs을 선정하였다. 피폭시나리오는 NUREG/CR-5512, NUREG-1757에서 제시한 가장 보수적이며 모든 섭취 피폭경로를 고려하는 거주경작 시나리오로 선정하였다. 입력인자는 국내 토양환경정보시스템, KINS 규제지침 2.2에서 제시하는 값과 RESRAD-ONSITE 전산코드에 내장된 기본값을 활용하였다.

RESRAD-ONSITE 전산코드 수행 결과, ^{60}Co의 피폭방사선량이 2.26×10^{0} mSv yr^{-1}로 가장 크게 나타났으며, ^{63}Ni의 피폭방사선량이 1.85×10^{-3} mSv yr^{-1}로 가장 낮은 것으로 나타났다. 베타 방출 핵종에 해당하는 ^{14}C, ^{63}Ni, ^{90}Sr은 섭취를 통한 선량이 지배적인 것으로 나타났으며, ^{63}Ni, ^{90}Sr은 농산물에 의한 섭취 피폭이 가장 높은 것으로 나타났고, ^{14}C는 수산물에 의한 섭취 피폭이 가장 높은 것으로 나타났다. 그리고 감마 방출 핵종에 해당하는 ^{60}Co, ^{137}Cs은 지표면에 의한 외부피폭으로 인한 선량이 지배적인 것으로 나타났다. 피폭방사선량 평가 결과를 기반으로 토양 $DCGL_w$을 도출한 결과, ^{63}Ni이 5.41×10^{1} Bq g^{-1}으로 가장 큰 것으로 나타났으며, ^{60}Co의 $DCGL_w$이 4.42×10^{-2} Bq g^{-1}으로 가장 작은 것으로 나타났다.

회색영역 도출 결과, 모든 분포에 대하여 relative shift의 값을 수정함에 따라 초기 LBGR 값보다 커지는 것으로 나타났다. 그리고 방사능농도 분포의 상대 표준편차 값이 5%일 때 회색영역의 너비가 가장 좁은 것으로 나타났으며, 상대 표준편차가 20%일 때 가장 큰 것으로 나타났다. 이러한 경향성은 표준편차의 값이 작을수록 도출되는 relative shift 값이 커지기 때문인 것으로 판단된다.

해체 후 부지의 규제해제를 적절하게 수행하기 위해서는 해체 대상 원자력발전소의 부지 특성 인자, 토양 시료 방사능농도의 분포 등을 중점적으로 고려하여 회색영역을 도출하고, 향후 조사설계에 미치는 영향을 분석해야 한다. 본 연구결과는 향후 국내 원자력발전소 해체 시 토양 시료 측정에 따른 방사능농도의 오차 한계를 도출을 위한 배경자료로서 활용될 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 원자력안전위원회의 재원으로 한국원자력안전재단의 지원을 받아 수행한 원자력안전연구사업의 연구결과입니다(No. 1805016).

참고문헌

1. Nuclear Safety and Security Commission. 2021. Criteria for Reuse of Site and Remaining Buildings after Completion of Decommissioning of Nuclear Facilities. NSSC Notice No.2021-11.
2. Jeon YR, Park SJ, Ahn SY and Kim YM. 2018. Designation the Gray Region and Evaluating Concentration of Radionuclide in Kori-1 by Using Derived Concentration Guideline Level. *JKSR* **12**(3):297-304.
3. Lee KW, Hong SB, Park JH and Chung US. 2010. Final Status of the Decommissioning of Research Reactors in Korea. *JNST* **47**(12):1227-1232.
4. Whang JH and Lee KJ. 2000. A Study on Site Release Criterion Assessment of Nuclear Power Facilities for TRIGA Research Reactor Decommissioning. Nuclear Engineering and Technology.
5. YAEC. 2004. Yankee Nuclear Plant Station License Termination Plan.
6. PG&E. 2014. Humboldt Bay Power Plant License Termination Plan.
7. SMUD. 2007. Rancho Seco Nuclear Generating Station License Termination Plan.
8. NRC. 2000. Multi Agency Radiation Survey and Site Investigation Manual (MARSSIM), NUREG-1575.
9. NRC. 1992. Residual Radioactive Contamination from Decommissioning, NUREG/CR-5512 Vol. 1.
10. NRC. 1999. Residual Radioactive Contamination from Decommissioning Parameter Analysis, NUREG/CR-5512 Vol. 3.
11. NRC. 2007. Consolidated NMSS Decommissioning Guidance, Characterization, Survey, and Determination of Radiological Criteria, NUREG-1757 Vol. 2.
12. Ryu GW, Lee SJ, Kim HJ and Kim KP. 2021. Site Specific Parameters Sensitivity Analysis for Site Reuse after Decommissioning Nuclear Facilities. *KSRI* **15**(2):107-116.
13. ANL. 2001. User's Manual for RESRAD-ONSITE Version 6, ANL/EAD-4.
14. ANL. 2018. User's Guide for RESRAD-ONSITE Version 7.2, ANL/EVS/TM-18/1.
15. NRC. 2000. Development of Probabilistic RESRAD 6.0 and RESRAD-BUILD 3.0 Computer Codes, NUREG/CR-6697.
16. KINS. 2016. Assessment of Residents Exposure Dose. KINS/GR-N02.02.
17. EPA. 2000. Guidance for Data Quality Assessment: Practical Methods for Data Analysis. EPA QA/G-9.
18. EPA. 2006. Guidance on Systematic Planning Using the Data Quality Objectives Process. EPA QA/G-4.
19. NRC. 2004. Multi Agency Radiological Laboratory Analytical Protocols Manual (MARLAP), NUREG-1576.
20. Sohn W, Seo HW and Jeong KH. 2019. An Approach for Determining Reasonable Sample Sizes of MARSSIM Final Status Surveys in Decommissioning of Nuclear Facilities. *Annals of Nuclear Energy* **131**(2019): 378-384.
21. Sohn W and Hong EH. 2021. Monte Carlo Simulation for Verification of Nonparametric Tests Used in Final Status Surveys of MARSSIM at Decommissioning of Nuclear Facilities. *NET* **53**(2021):1664-1675.