Journal of Radiation Industry 15 (3) : 181 ~ 189 (2021) https://doi.org/10.23042/radin.2021.15.3.181

지하수 특성 변화에 따른 부지 주변 피폭방사선량 평가

이세종[1] · 류강우[1] · 김민성[1] · 김기훈[1] · 김광표[1,*]

[1]경희대학교 원자력공학과

Assessment of Offsite Radiation Dose according to Groundwater Characteristics

Se Jong Lee[1], Gang Woo Ryu[1], Min Seong Kim[1], Ki Hoon Kim[1] and Kwang Pyo Kim[1,*]

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

Abstract - Hundreds of residual radionuclides exist on the site after decommissioning nuclear facilities, which spread around the site through routes such as groundwater leaching, surface leakage, and atmospheric diffusion. Exposure of individuals living offsite of nuclear facilities after decommissioning is affected by the diffusion characteristics of radionuclides. Therefore, it is necessary to analyze the radiation dose due to changes in the diffusion characteristics of radionuclides. In this study, an analysis of radiation due to changes in groundwater characteristics was performed. Radionuclides of ^{3}H, ^{14}C, ^{99}Tc, and ^{129}I were selected as the source terms for the evaluation. Exposure scenario was selected as resident farmer scenario considering all intake pathways. Radiation dose assessment was conducted using RESRAD-OFFSITE, and groundwater characteristic input parameters were selected for groundwater flow direction, groundwater and surface water usage ratio. For other input parameters, literature review was performed. The flow direction of groundwater was divided into eight directions, groundwater and surface water usage ratio was divided into 0.1 units. Based on the selected conditions, the changes in the radiation dose due to changes in the flow direction of groundwater, groundwater and surface water usage ratio were analyzed. According to the analysis of the exposure radiation dose about the direction of groundwater flow, in case of the flow direction increases from 45° to 90°, the effect of groundwater is eliminated and the radiation dose decreased sharply by 10~10,000 times. From 270° to 315°, the radiation dose increased dramatically, increasing to the same level as the radiation dose in the flow direction of 0°. As a result of the radiation dose analysis according to the groundwater and surface water usage ratio, ^{3}H decreased by about 1,000 times, ^{99}Tc, and ^{129}I by about 10,000 times, as the ratio of groundwater decreased. However, for ^{14}C, there was no change in the radiation dose when the groundwater usage ratio reached zero. The results of this study can be used to select input parameters related to groundwater characteristics in the safety assessment around the site after nuclear facility decommissioning in the future.

Key words : Nuclear facility decommissioning, Offsite safety assessment, Residual radionuclide, Groundwater characteristic parameters, Radiation dose assessment

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

서 론

원자력이용시설은 핵분열 과정에서 생성된 중성자에 의하여 주변 구조물, 기기가 방사화되는 등 운영 상황에 따라 수백 가지의 방사성핵종이 발생한다(NRC 1984). 그리고 국제원자력기구(IAEA; International Atomic Energy Agency)에서는 원자력발전소 해체 후 존재하는 주요한 방사화핵종을 제시하고 있다(IAEA 1998). 이렇듯 원자력이용시설의 해체 후 부지에는 다양한 방사성핵종이 잔류하며, 부지 내 방사성핵종은 지하수 침출, 지표면 유출, 대기 확산 등의 경로로 인하여 부지 주변으로 확산된다. 그리고 확산된 방사성핵종에 의하여 원자력이용시설 부지 주변에 거주하는 개인은 방사선학적 영향을 받을 개연성이 존재한다. 따라서 원자력이용시설 부지 내 방사성핵종의 확산으로 인해 발생하는 부지 주변 개인의 방사선학적 영향을 평가하여 해당 영향을 확인할 필요가 있다.

미국 아르곤국립연구소(ANL; Argonne National Laboratory)에서는 연구소 내 실험건물, 중수시험로 시설 등 다양한 시설에 대하여 안전성평가를 수행하였다(ANL 1996; ANL 1997; ANL 2011). 그리고 아르곤국립연구소에서는 RESRAD-OFFSITE 전산코드를 검증하기 위해 동일한 피폭시나리오를 기반으로 RESRAD-OFFSITE 전산코드 평가 결과와 RESRAD-ONSITE 전산코드 평가 결과를 비교 및 분석하였다(ANL 2006). Daria 등은 Tessenderlo 사의 인산 이칼슘(Dicalcium-phosphate)을 처리하는 과정에서 발생한 방사성물질에 오염된 폐수가 부지 주변 주민에게 영향을 미치는 정도를 확인하기 위해 부지 주변 안전성평가를 수행하였다(Daria *et al*., 2018). Rafique 등은 파키스탄의 농업 및 생물학 원자력연구소(NIAB; Nuclear Institute for Agriculture and Biology)에서 농업개발을 위해 사용하는 방사성동위원소가 부지 주변의 개인에게 미치는 영향을 확인하기 위해 부지 주변 선량평가를 수행하였다(Rafique *et al*., 2017). Manny 등은 Wonderfontein spruit 금광 매립지에서의 금광 작업 시 발생하는 우라늄이 부지 주변 주민에게 미치는 방사선학적 영향을 평가하기 위해 부지 주변 선량평가를 수행하였다(Manny *et al*., 2016). Byon 등은 원자력발전소 해체 부지에 대하여 하층토 및 지하수 오염의 영향을 평가하기 위한 일반적인 지침을 제시하기 위해 고리1호기의 부지 주변 안전성평가를 수행하였다(Byon *et al*., 2020).

원자력이용시설 부지 주변 안전성평가와 관련된 연구는 일부 수행되었으나, 부지 주변 안전성평가 관련 입력인자 민감도 분석에 대한 연구는 부족한 실정이다. 그리고 미국 아르곤국립연구소에서는 RESRAD-ONSITE 전산코드 내 입력인자의 우선순위를 분류하고 있으나 RESRAD-OFFSITE 전산코드 내 입력인자의 우선순위는 분류하고 있지 않은 실정이다(NRC 2000). RESRAD-OFFSITE 전산코드에서는 부지 주변에 대한 안전성평가를 수행하기 위하여 RESRAD-ONSITE 전산코드 입력인자 외 대기 확산, 지하수 유출과 관련된 입력인자를 추가로 고려하고 있다(ANL 2006). 부지 주변에 존재하는 개인의 피폭방사선량은 방사성핵종이 확산되는 특성에 따라 지배적으로 영향을 받는다. 따라서 부지 주변 피폭관점에서 방사성핵종의 확산 특성 변화에 따른 피폭방사선량 분석이 필요하다.

본 연구에서는 원자력이용시설 해체 후 부지 주변에 대하여 방사성핵종의 확산경로 중 지하수 유출 특성 변화에 따른 피폭방사선량 평가를 수행하였다. 평가 대상 선원항 및 부지 재이용 시나리오는 참고문헌을 조사하여 선정하였다. 피폭방사선량 평가는 RESRAD-OFFSITE 전산코드를 기반으로 수행하였으며 지하수 특성을 반영하기 위한 평가 대상 입력인자로는 RESRAD-OFFSITE 전산코드 내 지하수와 관련된 입력인자인 지하수 유동방향, 지하수 및 지표수 사용비율을 선정하였다.

재료 및 방법

1. 평가 대상 선원항 선정

본 연구에서는 평가 대상 선원항을 선정하기 위해 참고문헌을 조사하였다. 지하수에 의한 영향을 분석하기 위해서는 지하수 특성의 변화에 따라 이동성에 영향을 받을 수 있는 핵종을 선원항으로 선정하여야 한다. 따라서 방사성핵종 중 이동성이 지하수에 큰 영향을 받는 핵종을 조사하였다.

Table 1에 본 연구에서 선정한 선원항을 나타내었다. 지하수에 의한 방사선학적 영향은 주로 농산물 재배 시 관개수 사용, 가축 사육 시 가축용수 사용, 음용수 섭취 등과 관련된 피폭에 의해 발생한다. 지하수에 의한 영향은 토양 내 방사성핵종이 지하수로 침출되는 정도와 지하수 내 방사성핵종의 이동성에 따라 지배적으로 영향을 받는다. 미국 아르곤국립연구소에서는 토양 내 방사성핵종에 대한 안전성평가 시 고려하는 여러 종류의 핵종에 대하여 토양 분배계수를 제시하고 있으며 ^{3}H, ^{14}C, ^{99}Tc 등 총 26개의 핵종에 대하여 토

Table 1. Radionuclides selected for source term and their distribution characteristics

Source term	Distribution coefficient	Characteristic
^{3}H	0	High mobility Low distribution coefficient
^{14}C	0	Long-lived nuclide Low distribution coefficient
^{99}Tc	0	Low distribution coefficient
^{129}I	0.01	Long-lived nuclide Low distribution coefficient

Table 2. Generic exposure scenarios

Exposure pathway	Exposure scenario			
	Resident farmer	Resident	Worker	Recreationist
External exposure	O	O	O	O
Inhalation	O	O	O	O
Soil ingestion	O	O	O	O
Plant ingestion	O	O[a)]	X	O[a)]
Meat ingestion	O	X	X	O[a)]
Milk ingestion	O	X	X	X
Fish ingestion	O	X	X	O[a)]
Crustacea and mollusks ingestion	O	O[a)]	O[a)]	O[a)]

[a)]Select appropriately based on site characteristics

Table 3. Input parameters used for radiation dose assessment

Input parameter		Unit	Value
Ingestion rate	Fish	$kg \cdot yr^{-1}$	32.4
	Crustacea and mollusks	$kg \cdot yr^{-1}$	15.3
	Fruit, grain, non-leafy vegetables	$kg \cdot yr^{-1}$	257
	Leafy vegetables	$kg \cdot yr^{-1}$	100
	Meat	$kg \cdot yr^{-1}$	71.1
	Milk	$L \cdot yr^{-1}$	73.2
Inhalation rate		$m^3 \cdot yr^{-1}$	8,100
Weathering removal constant		$1 \cdot yr^{-1}$	18.07
External gamma penetration factor		–	0.7

양에 대한 분배계수를 0으로 제시하고 있다(NRC 2000). 분배계수가 작을수록 토양에 흡착되는 방사성핵종의 양이 적어 지하수로 침출되는 양이 증가하기 때문에 평가 대상 선원항으로 분배계수가 작은 방사성핵종을 선정하였다. 그리고 미국 원자력규제위원회(NRC; Nuclear Regulatory Commission)에서는 토양에 존재하는 방사성핵종의 환경으로 방출되는 영향을 평가 및 분석하였으며, 지하수에 의한 영향이 민감할 것으로 예상되는 방사성핵종으로 ^{3}H, ^{14}C, ^{99}Tc, ^{129}I를 제시하였다(NRC 1981). 따라서 본 연구에서는 평가 대상 핵종으로 토양의 분배계수가 작고 지하수의 이동성에 큰 영향을 받는 ^{3}H, ^{14}C, ^{99}Tc, ^{129}I 를 선정하였다.

2. 피폭시나리오 및 피폭경로 선정

미국 아르곤국립연구소에서는 RESRAD-OFFSITE 전산코드에 대한 지침서를 발간하였다. 해당 문헌에서는 원자력이용시설 부지 주변 안전성평가 시 적용가능한 피폭시나리오를 제시하고 있다(ANL 2007; NRC 2020). 피폭시나리오는 선량평가 시 평가 대상의 특성을 반영하는 피폭경로에 따라 상이하며, 대표적으로 거주농부(Resident farmer), 거주자(Resident), 작업자(Worker), 여가활동자(Recreationist) 시나리오를 제시하고 있다. 모든 시나리오는 외부피폭, 토양 섭취 및 흡입에 의한 내부피폭을 고려하지만, 부지 주변에 존재하는 개인의 행동특성에 따라 고려하는 섭취 피폭경로는 상이하다. 섭취 대상으로는 농산물, 육류, 우유, 수산물, 음용수가 있으며, 각 시나리오는 개인의 행동특성에 적합한 섭취 피폭경로를 고려한다.

Table 2에 부지 주변 안전성평가 시 고려 가능한 일반적인 피폭시나리오를 나타내었다. 지하수에 의한 방사선학적 영향은 주로 오염된 지하수를 이용하여 생산된 농산물, 육류, 음용수 등 식품의 섭취로 인해 발생한다. 미국 원자력규제위원회에서는 해체 후 부지 재이용 안전성평가 시 거주농부 시나리오 적용에 대한 정당성을 인정하였다(NRC 2002). 따라서 본 연구에서는 미국 아르곤국립연구소에서 제시하는 일반적인 피폭시나리오 중 모든 섭취 피폭경로를 고려하는 거주농부 시나리오를 피폭시나리오로 선정하였다. 피폭

경로는 외부피폭, 흡입으로 인한 내부피폭, 농산물, 육류, 우유, 수산물, 토양, 음용수 섭취로 인한 내부피폭을 고려하였다. 그러나 흡입으로 인한 피폭경로 중 라돈으로 인한 피폭은 기존피폭에 해당하여 제외하였다(ICRP 2007).

3. 평가 대상 입력인자 선정

본 연구에서는 지하수 특성 변화에 따른 피폭방사선량 평가를 수행하기 위해 RESRAD-OFFSITE 전산코드를 활용하였다. RESRAD-OFFSITE 전산코드는 미국 아르곤국립연구소에서 개발하였으며 방사성물질로 오염된 부지 내부 또는 외부에 존재하는 개인에 대한 피폭방사선량과 초과 암 발생 위험도를 평가할 수 있는 전산코드이다(ANL 2001).

RESRAD-OFFSITE 전산코드는 약 30개의 입력인자로 이루어져 있으며 핵종과 관련된 입력인자, 매질과 관련된 입력인자들로 구성되어 있다(NRC 2015). 매질은 방사성핵종이 존재하여 방사선학적 영향을 일으킬 수 있는 물질로서 RESRAD-OFFSITE 전산코드에서 고려하는 매질로는 토양, 지하수, 대기 등이 있다. 핵종과 관련된 입력인자로는 핵종의 방사능농도, 전이계수, 농축계수 등이 있다. 매질과 관련된 입력인자로는 오염층 밀도, 분배계수, 공극률, 대기확산인자 등이 있으며 이 중 지하수 관련 입력인자로는 지하수 및 지표수 사용비율, 지하수 유동방향이 있다. 지하수 및 지표수 사용비율은 음용수, 생활용수, 관개수, 가축용수 등 오염 부지 내에서 사용할 수 있는 다양한 물에 대하여 지하수를 해당 목적으로 사용하는 비율을 의미한다. 그리고 지하수 유동방향은 오염층 하부에 오염된 지하수가 흘러가는 방향을 의미한다. 본 연구에서는 지하수 특성을 반영하기 위해 평가 대상 입력인자로 지하수와 관련된 입력인자인 지하수 유동방향, 지하수 및 지표수 사용비율을 선정하였다.

4. 지하수 특성에 따른 피폭방사선량 평가

Table 3에 본 연구에서 적용한 입력인자를 나타내었다. 본 연구에서는 지하수 특성 변화에 따른 피폭방사선량을 분석하기 위해 지하수 유동방향, 지표수 및 지하수 사용비율 변화에 따른 피폭방사선량을 평가하였다. RESRAD-OFFSITE를 이용한 피폭방사선량 평가 시 지하수 특성 관련 입력인자 외 필요한 입력인자에는 선원항, 부지 토양 특성, 부지 주변 개인의 섭취량, 호흡률, 거주비율 등이 있다. 평가대상인 지하수 유동방향, 지하수 및 지표수 사용비율을 제외한 입력인자는 국내 문헌을 참고하였다(KINS 2016). 국내 참고문헌에 제시되어 있지 않는 입력인자는 RESRAD-OFFSITE에서 제공하는 기본값을 활용하였다. 그리고 지하수 특성에 따른 피폭방사선량 평가 시 각 핵종의 방사능농도는 1 $Bq \cdot g^{-1}$으로 가정하여 평가하였다.

Fig. 1에 본 연구에서 설정한 지하수 유동방향을 나타내었다. RESRAD-OFFSITE 전산코드 내에서는 오염부지를 중심으로 지하수의 유동방향을 지정할 수 있다. 부지 내 방사성물질의 침출로 인하여 오염된 지하수는 오염 부지의 주변으로 유동하며, 유동방향에 따라 부지 주변 개인이 피폭하는 정도가 달라질 수 있다. 본 연구에서는 앞서 선정한 선원항, 피폭시나리오, 입력인자를 기반으로 지하수 유동방향 변화에 따른 피폭방사선량을 평가하였다. 지하수의 유동방향은 오염부지를 중심으로 8방위(0°, 45°, 90°, 135°, 180°, 225°, 270°, 315°)로 구분하였으며 지하수의 사용원인 우물을 통과하는 방향을 0°로 설정하였다. 최종적으로 지하수 유동방향의 변화에 따라 부지 주변 개인의 피폭방사선량 경향성을 분석하였다. 그리고 피폭경로에 따른 피폭방사선량을 분석하여 각 핵종별 지배적인 피폭경로를 분석하였다.

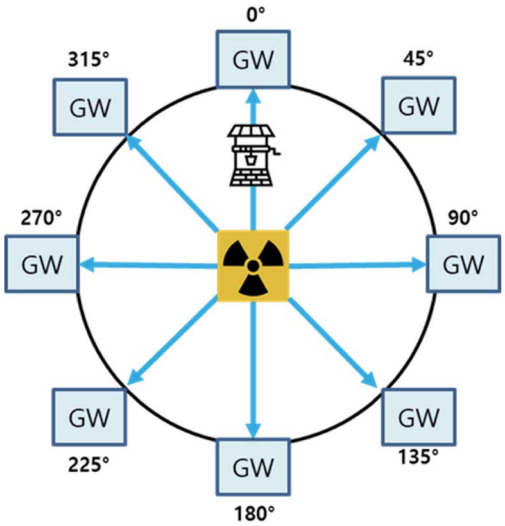

Fig. 1. Groundwater flow directions applied to radiation dose assessment.

다음으로 지표수 및 지하수 사용비율 변화에 따른 피폭방사선량을 평가하였다. 부지 주변에 대한 안전성평가 수행 시, 부지 주변에 존재하는 개인의 물 사용 용도를 고려하여야 한다. 사용하는 물의 용도에는 음용수, 생활용수, 관개수, 가축용수 사용 등이 있다. 부지 주변에 거주하는 개인은 물을 지하수와 지표수에서 취수하여 사용한다고 가정한다. 일반적으로 지하수는 우물을 통한 물 사용, 지표수는 주변 강, 하천 등을 통한 물 사용이 해당된다. RESRAD-OFFSITE 전산코드 내에서는 각 물의 사용 용도에 대하여 지하수와 지표수의 사용비율을 지정할 수 있다. RESRAD-OFFSITE 전산코드 내 지표수 및 지하수 사용비율은 합이 1이 되도록 설정하여야 한다. 본 연구에서는 지하수와 지표수의 사용비율을 0.1 단위로 분할하여 지하수는 1에서 0.1씩 감소시키고, 지표수는 0에서 0.1씩 증가시켜 피폭방사선량을 평가하였다. 그리고 피폭경로에 따른 피폭방사선량을 분석하여 핵종별 지배적인 피폭경로를 분석하였다.

결과 및 고찰

본 연구에서는 원자력이용시설 해체 후 부지 주변에 대하여 지하수 특성 변화에 따른 피폭방사선량 평가를 수행하였다. 평가에 앞서 평가하고자 하는 선원항, 피폭시나리오, 입력인자를 선정하였다. 선원항은 토양의 분배계수가 작고 지하수의 이동성에 큰 영향을 받는 ^{3}H, ^{14}C, ^{99}Tc, ^{129}I를 선정하였다. 피폭시나리오는 모든 식품의 섭취를 고려하는 거주농부 시나리오를 선정하였으며 피폭경로의 경우 외부피폭, 흡입으로 인한 피폭, 농산물, 육류, 우유, 수산물, 토양, 음용수 섭취로 인한 섭취피폭을 고려하였다. 평가를 위한 지하수 특성과 관련된 입력인자는 지하수 유동방향, 지하수 및 지표수 사용비율을 선정하였으며 이 외 선량평가 시 필요한 입력인자는 국내 참고문헌 및 RESRAD-OFFSITE 기본값을 사용하였다. 최종적으로 앞서 선정한 선원항, 피폭시나리오, 입력인자를 기반으로 RESRAD-OFFSITE 전산코드를 사용하여 지하수의 유동방향, 지하수 및 지표수 사용비율 변화에 따른 피폭방사선량을 평가하였다.

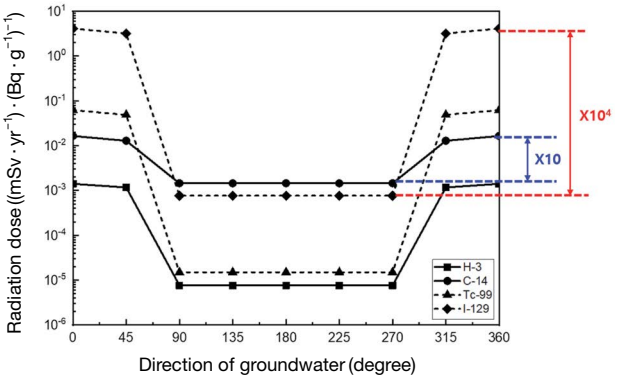

Fig. 2. Radiation dose by groundwater flow direction.

1. 지하수 유동방향 변화에 따른 피폭방사선량 평가

본 연구에서는 앞서 선정한 선원항, 피폭시나리오, 입력인자를 기반으로 지하수 유동방향에 따른 피폭방사선량을 평가하였다. 지하수의 방향은 오염부지를 중심으로 8방위로 나누어 적용하였으며, 방위에 따라 피폭방사선량이 변하는 정도를 분석하였다. 그리고 유동방향 변화에 따른 각 핵종

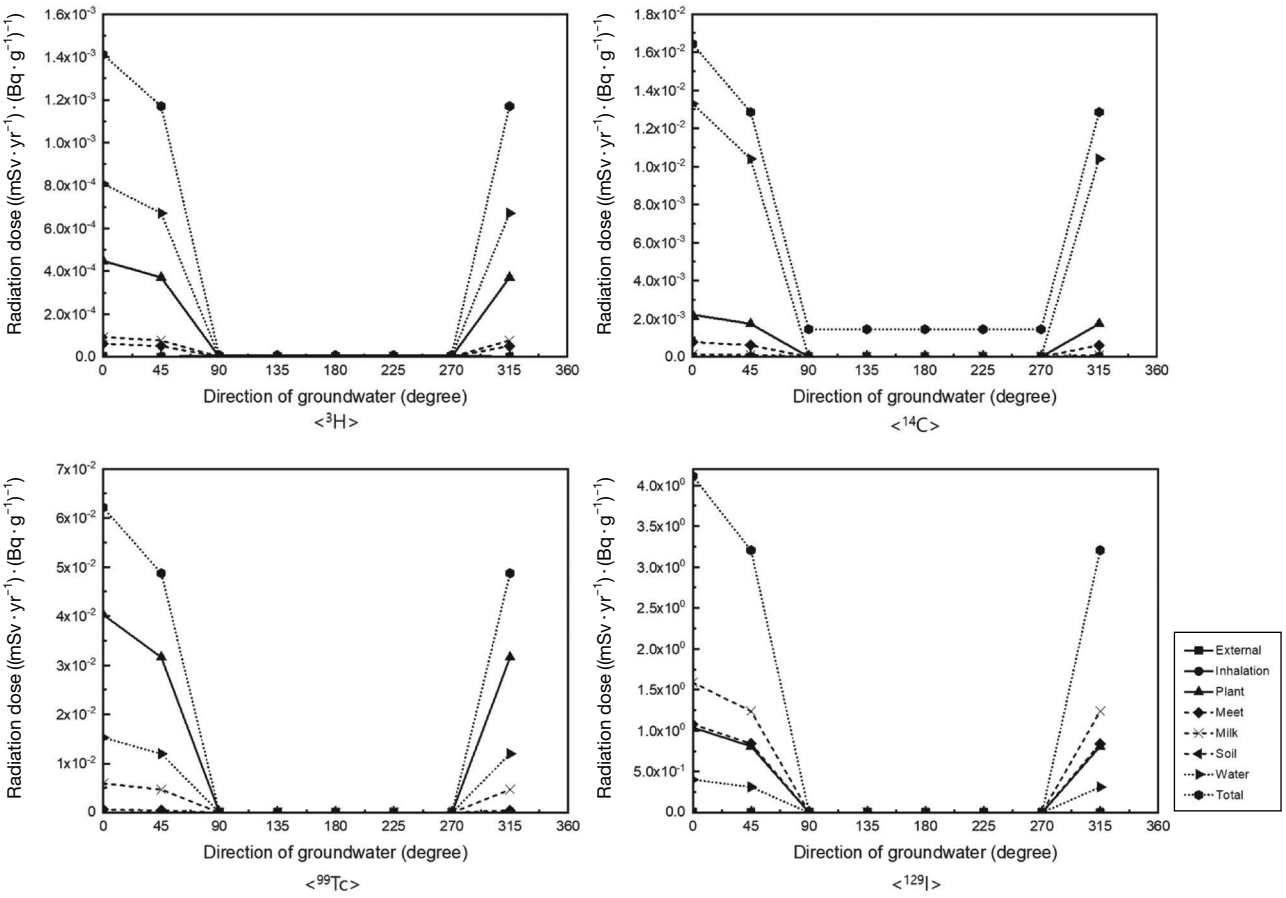

Fig. 3. Radiation dose by exposure pathway and groundwater flow direction.

의 피폭경로별 피폭방사선량을 분석하였다.

Fig. 2에 지하수 유동방향에 따른 피폭방사선량의 변화를 그래프로 나타내었다. 평가 결과, 모든 핵종에 대해 피폭방사선량이 변화하는 정도는 상이했으나, 전반적인 경향성은 동일한 것으로 나타났다. 지하수의 유동방향이 0°부터 45°까지 증가할 경우 핵종별로 피폭방사선량은 거의 변하지 않는 유사한 수준으로 나타났다. 그러나 45°에서 90°까지 증가할 경우 지하수에 의한 영향이 제거되어 10~10,000배까지 피폭선량이 급격하게 감소하는 것으로 나타났다. 이는 기존의 지하수 유동방향이 0°인 경우, 피폭방사선량은 오염된 지하수의 영향을 받은 음용수, 농산물, 우유 등의 식품 섭취로 인한 선량이 지배적이었으나 지하수 유동방향이 90°~270°인 경우 오염된 지하수가 식품에 주는 영향이 사라지게 되어 주요 피폭경로인 식품 섭취에 의한 피폭방사선량이 감소했기 때문인 것으로 나타났다. 그리고 유동방향이 90°부터 270°까지는 피폭방사선량이 일정하게 나타났으며 270°부터 315°까지는 피폭선량이 급격하게 증가하여 기존의 유동방향인 0°의 피폭방사선량과 동일한 수준까지 증가하는 것으로 나타났다. 최종적으로 피폭방사선량의 개형은 유동방향 180°를 기준으로 대칭의 형태를 띠는 것으로 나타났다. 그리고 동일한 조건에서 핵종별 피폭방사선량을 비교한 결과 ^{129}I, ^{99}Tc, ^{14}C, ^{3}H 순으로 높게 평가되었다. 이는 각 핵종별 내부피폭 선량환산인자 차이 때문인 것으로 나타났다. ^{129}I, ^{99}Tc, ^{14}C, ^{3}H의 주된 피폭경로는 식품 섭취에 의한 내부피폭이며 각 핵종의 섭취에 의한 내부피폭 선량환산

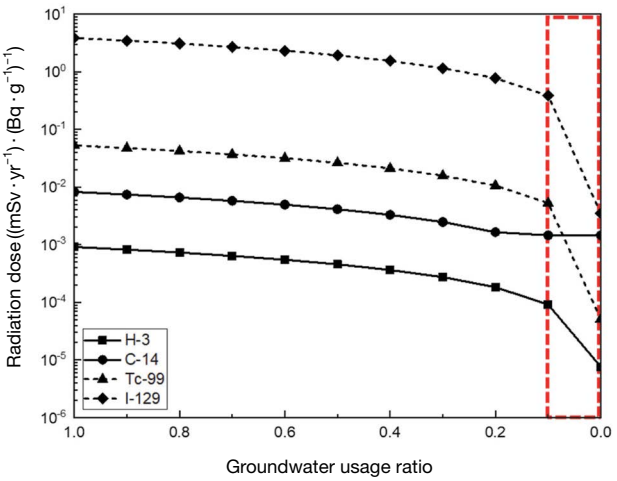

Fig. 4. Radiation dose by groundwater usage ratio.

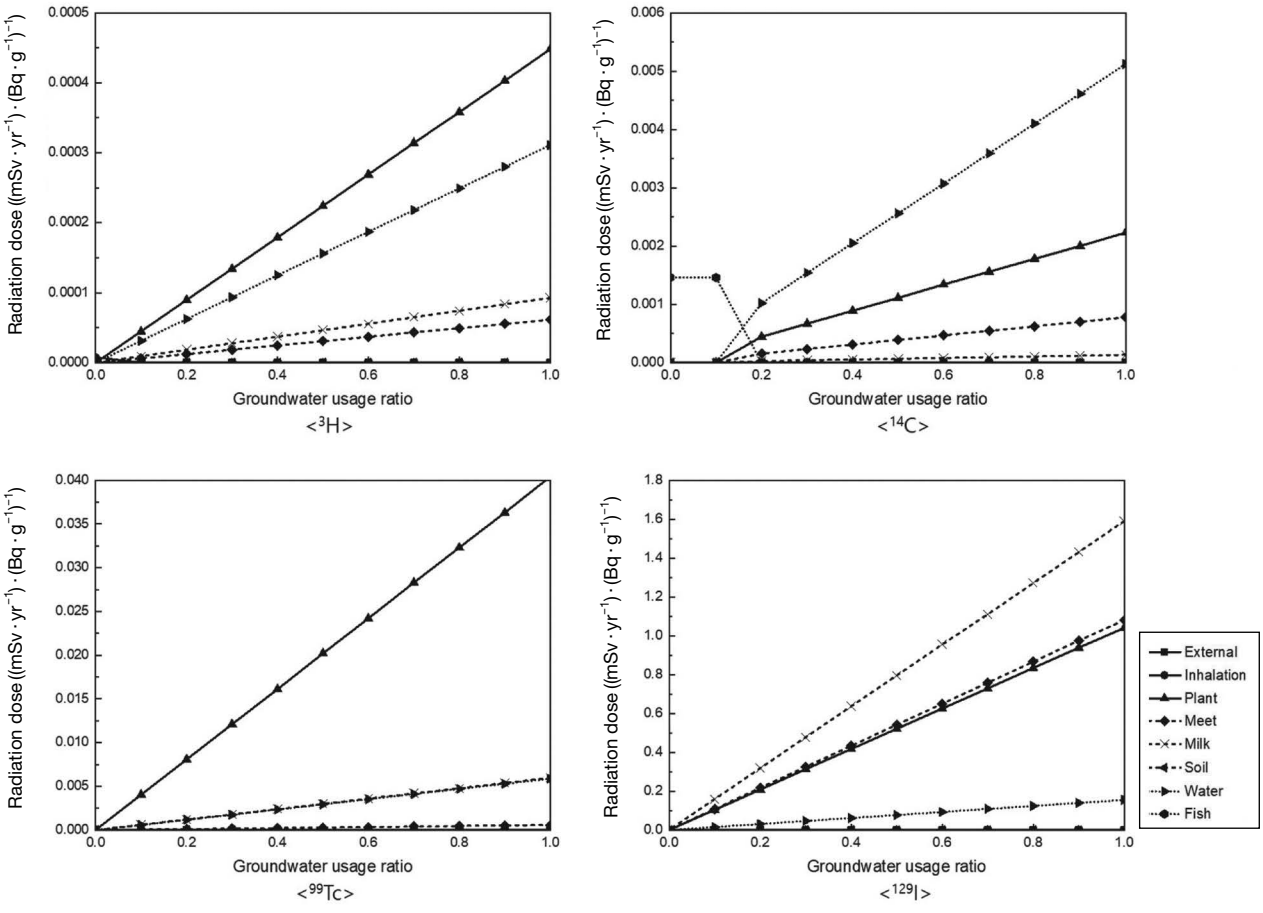

Fig. 5. Radiation dose by exposure pathway and groundwater usage ratio.

인자는 RESRAD-OFFSITE 전산코드에 내장된 1.08×10^{-4}, 6.42×10^{-7}, 5.81×10^{-7}, 4.91×10^{-8} $mSv\cdot Bq^{-1}$를 적용하였다. 이에 따라 동일한 조건에서 ^{129}I, ^{99}Tc, ^{14}C, ^{3}H 순으로 높게 평가된 것으로 나타났다.

Fig. 3에 핵종별 피폭경로에 따른 피폭방사선량을 나타내었다. 핵종별로 지하수 유동방향 변화에 따라 지배적으로 영향을 주는 피폭경로를 분석하기 위해 피폭경로에 따른 피폭방사선량을 분석하였다. 각 핵종은 지하수의 유동방향에 따른 선량 변화에 기여하는 주요 피폭경로가 상이하게 나타났다. 지하수에 의한 영향이 지배적인 0°부터 45°의 경우 ^{3}H, ^{14}C은 음용수 섭취, ^{99}Tc는 농산물 섭취, ^{129}I는 우유 섭취가 지배적인 것으로 나타났다. 지하수에 의한 영향이 제거되었던 90°부터 270°의 경우 ^{3}H는 흡입으로 인한 피폭, ^{14}C, ^{99}Tc, ^{129}I는 수산물 섭취로 인한 피폭이 지배적인 것으로 나타났다. 그리고 ^{14}C, ^{99}Tc, ^{129}I의 경우 수산물 섭취로 인한 피폭 이외의 피폭경로는 피폭방사선량의 기여가 없는 것으로 나타났다. 이는 지하수 유동방향 변화에 따른 피폭방사선량 평가 시 지하수 및 지표수 사용비율은 RESRAD-OFFSITE 전산코드 내 기본값을 적용하였기 때문인 것으로 나타났다. RESRAD-OFFSITE 전산코드 내 지하수 및 지표수 사용비율의 기본값은 지하수 사용비율 1, 지표수 사용비율 0으로 설정되어 있다. 따라서 지하수에 의한 영향이 제거된 유동방향에서는 방사선학적 영향이 나타나지 않은 것으로 나타났다. 그리고 ^{14}C의 경우 지하수의 영향이 지배적인 유동방향(0°~45°)보다 지하수의 영향이 제거된 유동방향(90°~270°)에서 수산물 섭취에 의한 피폭방사선량이 증가한 것으로 나타났다. 이는 지하수 유동방향에 따라 최대선량시기가 상이하게 나타났기 때문이다. ^{14}C의 경우 수산물 섭취에 의한 피폭선량은 9년까지 증가하다가 이후에 감소하는 것으로 나타났다. 지하수에 의한 영향이 지배적인 경우 수산물 섭취 이외 농산물, 육류 등의 섭취 피폭경로 영향이 존재하여 최대선량시기가 3년으로 나타났다. 그러나 지하수에 의한 영향이 제거된 경우 수산물 섭취 이외의 피폭경로의 영향이 제거되어 수산물 섭취가 최대인 9년이 최대선량시기로 나타났다.

2. 지하수 및 지표수 사용비율 변화에 따른 피폭방사선량 평가

본 연구에서는 지하수 및 지표수 사용비율 변화에 따른 피폭방사선량을 평가하였다. 지하수 및 지표수의 사용비율은 0.1 단위로 분할하여 적용하였으며, 지하수의 사용비율은 1에서 0.1씩 감소시키고, 지표수의 사용비율은 0에서 0.1씩 증가시켜 각 사용비율에 따른 피폭방사선량을 분석하였다. 그리고 사용비율 변화에 따른 각 핵종의 피폭경로별 피폭방사선량을 분석하였다.

Fig. 4에 지하수 및 지표수 사용비율에 따른 피폭방사선량을 그래프로 나타내었다. 평가 결과, 전반적으로 지하수의 사용비율이 감소함에 따라 피폭방사선량이 선형적으로 감소하는 것으로 나타났다. ^{3}H, ^{99}Tc, ^{129}I의 경우 지하수의 사용비율이 0이 되는 시점에서 피폭방사선량이 급격하게 감소하였다. 피폭방사선량이 감소되는 정도는 핵종마다 상이하게 나타났으며 ^{3}H은 약 1,000배, ^{99}Tc, ^{129}I는 약 10,000배 감소하였다. 이는 지하수 사용비율이 0이 됨에 따라 지하수에 의한 영향이 제거되었기 때문인 것으로 나타났다. 그러나 ^{14}C의 경우 지하수 사용비율이 0이 되는 시점에서 피폭방사선량의 변화가 없는 것으로 나타났다. 그리고 동일한 조건에서 핵종별 피폭방사선량을 비교한 결과 ^{129}I, ^{99}Tc, ^{14}C, ^{3}H 순으로 높게 평가되었다. 이는 앞선 지하수 유동방향 변화에 따른 피폭방사선량 평가 결과와 동일하게 각 핵종별 내부피폭 선량환산인자 차이 때문인 것으로 나타났다.

Fig. 5에 핵종별 피폭경로에 따른 피폭방사선량을 나타내었다. 핵종별로 지하수 및 지표수 사용비율 변화에 따라 지배적으로 영향을 주는 피폭경로를 분석하기 위해 피폭경로에 따른 피폭방사선량을 분석하였다. 모든 핵종에 대해 선량 변화에 기여하는 주요 피폭경로는 농산물 섭취, 우유 섭취, 음용수 섭취인 것으로 나타났다. ^{14}C의 경우 전반적인 경향성은 동일하나, 지하수의 비율이 0.1 이하일 때 선량 감소가 없는 것으로 나타났다. 이는 지하수 비율이 0.2 이상인 경우 지하수 오염에 의한 음용수 섭취 선량이 지배적이나 지하수 비율이 0.1 이하일 경우 지하수에 의한 영향은 대부분 제거되고 수산물 섭취로 인한 피폭방사선량이 지배적이기 때문이다. ^{14}C는 앞선 지하수 유동방향 변화에 따른 피폭방사선량 평가와 동일하게 지하수에 의한 영향이 제거되면서 최대선량시기가 달라지는 것으로 나타났다. ^{14}C의 경우 타 핵종보다 수산물 섭취에 의한 선량이 높으며 지하수 사용비율에 따라 농산물, 육류, 우유, 음용수 섭취에 의한 피폭방사선량은 변화하지만 수산물 섭취에 의한 피폭방사선량은 영향을 받지 않기 때문에 지하수 비율이 0.1 이하일 때 선량 감소가 없는 것으로 나타났다.

결 론

본 연구에서는 지하수 특성 변화에 따른 부지 주변 개인의 피폭방사선량에 대한 평가를 수행하였다. 이를 위하여 첫 번째, 문헌조사를 기반으로 지하수 이동성에 큰 영향을 받는 ^{3}H, ^{14}C, ^{99}Tc, ^{129}I를 선원항으로 선정하였다. 두 번째, 모든 섭취 피폭경로를 고려하는 거주농부 시나리오를 피폭시나리오로 선정하였다. 세 번째, 지하수 특성과 관련된 입력인

자로 지하수 유동방향, 지하수 및 지표수 사용비율을 선정하였다. 최종적으로 RESRAD-OFFSITE 전산코드를 활용하여 지하수의 유동방향, 지하수 및 지표수 사용비율 변화에 따른 피폭방사선량을 평가하였다. 평가 대상 입력인자 외 선량평가 시 필요한 입력인자는 국내 참고문헌에서 제시하는 값과 RESRAD-OFFSITE 전산코드의 기본값을 활용하였다.

지하수 유동방향 변화에 따른 피폭방사선량 평가 결과, 지하수의 유동방향이 0°부터 45°까지 증가하는 경우와 90°부터 270°까지 증가하는 경우에는 핵종별로 피폭방사선량은 거의 변하지 않는 것으로 나타났다. 그리고 45°에서 90°까지 증가할 경우 지하수에 의한 영향이 제거되어 10~10,000배까지 피폭방사선량이 급격하게 감소하는 것으로 나타났으며 270°부터 315°까지는 피폭방사선량이 급격하게 증가하여 기존의 유동방향인 0°의 피폭방사선량과 동일한 수준까지 증가하는 것으로 나타났다. 피폭경로에 따른 피폭방사선량 분석 결과, 지하수에 의한 영향이 지배적인 0°부터 45°의 경우 ^{3}H, ^{14}C은 음용수 섭취, ^{99}Tc는 농산물 섭취, ^{129}I는 우유 섭취가 지배적인 것으로 나타났다. 지하수에 의한 영향이 제거되었던 90°부터 270°의 경우 ^{3}H는 흡입으로 인한 피폭이 지배적이었으며, ^{14}C, ^{99}Tc, ^{129}I는 수산물 섭취로 인한 피폭이 지배적이고 이외 피폭경로는 피폭방사선량이 없는 것으로 나타났다.

지하수 및 지표수 사용비율에 따른 피폭방사선량 평가 결과, 전반적으로 모든 핵종에 대하여 지하수의 사용비율이 감소함에 따라 피폭방사선량이 선형적으로 감소하는 경향성이 나타났다. 피폭방사선량이 감소되는 정도는 핵종마다 상이하게 나타났으며 지하수 사용비율이 0.1과 0인 지점에서는 ^{3}H은 약 1,000배, ^{99}Tc, ^{129}I는 약 10,000배 감소하였다. ^{14}C의 경우 지하수 사용비율이 감소함에 따라 선형적으로 감소하였으나 지하수 사용비율이 0.1과 0인 지점에서는 피폭방사선량의 변화가 없는 것으로 나타났다. 이는 ^{14}C의 경우 타 핵종보다 수산물 섭취에 의한 선량이 높으며 지하수 사용비율에 따라 농산물, 육류, 우유, 음용수 섭취에 의한 피폭방사선량은 변화하지만 수산물 섭취에 의한 피폭방사선량은 영향을 받지 않기 때문인 것으로 나타났다.

부지 주변에 대한 방사선학적 영향은 지하수 특성에 지배적으로 영향을 받는다. 따라서 부지 주변에 대한 안전성평가 수행 시 지하수 특성은 부지 특성을 적절히 반영하는 값을 적용시켜야 한다. 본 연구의 결과는 향후 해체 후 부지 주변 안전성평가에서 지하수 특성 관련 입력인자 선정 시 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

사 사

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

참 고 문 헌

한국원자력안전기술원. 2016. 주민 피폭선량 평가. KINS/GR-N02.02.

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. 2006. Benchmarking of RESRAD-OFFSITE: Transition from RESRAD (onsite) to RESRAD-OFFSITE and Comparison of the RESRAD-OFFSITE Predictions with Peer Codes. ANL/EVS/TM/06-3.

ANL. 2007. User's Manual for RESRAD-OFFSITE Version 2. ANL/EVS/TM/07-1.

ANL. 2011. Derived Concentration Guideline Levels for Argonne National Laboratory's Building 310 Area. ANL/EVS/TM/11-4.

Byon J, Park S and Ahn S. 2020. Study on the soil evaluation methodology of on and offsite Kori Unit 1. *Ann. Nucl. Energy* **144**:107497.

IAEA. 1998. Radiological Characterization of Shut Down Nuclear Reactors for Decommissioning Purposes. IAEA TRS 389.

ICRP. 2007. The 2007 Recommendations of the international commission on radiological protection. ICRP Publication 103. Ann. ICRP37(2-4).

Koliabina D, Pepin S, Bugai D and Avila R. 2018. Comparison of RESRAD-OFFSITE and NORMALYSA software tools for the Tessenderlo test case.

Mathuthu M, Kamunda C and Madhuku M. 2016. Modelling of Radiological Health Risks from Gold Mine Tailings in Wonderfonteinspruit Catchment Area, South Africa. *Int. J. Environ. Res. Public Health 2016*, **13**:570.

NRC. 1981. Licensing, Requirements for Land Dissposal of Radioactive Waste. NUREG-0782.

NRC. 1984. Long-Lived Activation Products in Reactor Materials. NUREG/CR-3474.

NRC. 2000. Development of Probabilistic RESRAD 6.0 and RESRAD-BUILD 3.0 Computer Code. NUREG/CR-6697.

NRC. 2002. Consolidated NMSS Decommissioning Guidance, Characterization, Survey, and Determination of Radiologi-

cal Criteria. NUREG-1757 Vol. 2.
NRC. 2015. User's Guide for RESRAD-OFFSITE. NUREG/CR-7189.
NRC. 2020. User's Manual for RESRAD-OFFSITE Code Version 4. NUREG/CR-7268.
Rafique Q, Hussain M, Wazir Z and Khan F. 2017. Modeling Radiation Doses for a Hypothetical Contaminated Site Using RESRAD-OFFSITE Code Faisalabad, Pakistan. *The Nucleus* **54**:33-37.

Received: 30 August 2021
Revised: 20 September 2021
Revision accepted: 23 September 2021