JOURNAL OF RADIATION INDUSTRY

Original article

16(2) : 115-127 (2022)
https://doi.org/10.23042/radin.2022.16.2.115

중저준위 방사성폐기물 복합처분시설 폐쇄 후 안전성평가용 골드심(GoldSim) 기반 생태계 모델 개발

김혜진[1], 김석훈[1,*]

[1](주)미래와도전

Development of the GoldSim-based Biosphere Model for the Post-closure Safety Assessment of the Low- and Intermediate-Level Waste (LILW) Complex Disposal Facility

Hyejin Kim[1] and Sukhoon Kim[1,*]

[1]FNC Technology Co., Ltd., 32F, 13, Heungdeok 1-ro, Giheung-gu, Yongin-si, Gyeonggi-do 16954, Republic of Korea

Abstract In accordance with the regulatory requirements for preventing radiological risks to the public health and environment, the radiological impacts on the public around the radioactive waste disposal facility should be evaluated to confirm whether the performance goal is satisfied. In this study, therefore, we developed the biosphere model for calculating the annual effective dose of the critical group during the post-closure period of the LILW (Low- and Intermediate-Level radioactive Waste) complex disposal facility using the GoldSim. The receptor and exposure pathways to be assessed, and the mathematical model by each exposure pathway were determined considering characteristics specific to the disposal facility, based on the Korean regulatory guideline that provides method and procedure for assessing the exposure dose from radioactive effluents released to the environment during the operation of the nuclear power plant. Data (such as dose conversion factors, bioaccumulation factors, transfer coefficients) required in the assessment were constructed as a database file in the format of MS-Excel and can be directly applied as input file for the GoldSim-based assessment tool. Through performing a case study for normal and human intrusion scenarios of the complex disposal facility on the basis of a specific emplacement scheme, it was confirmed that the GoldSim-based biosphere model implemented in this study is proper to calculate the exposure dose by pathway and the total effective dose for the critical group, which can be applied to demonstrate whether the disposal facility meets its performance goal. The Goldsim-based biosphere model proposed in this paper can be applied to both individual and complex disposal facility for LILW, linking with radionuclide transport model, groundwater flow model, and etc. In addition, it is expected to be utilized for more diverse purposes provided that it is improved and/or upgraded by reflecting various features of the radioactive waste management facility in the future.

Key words: Post-closure safety assessment, LILW disposal, Complex disposal facility, Biosphere model, GoldSim modeling

http://www.ksri.kr/

Copyright © 2022 by
Korean Society of Radiation Industry

***Corresponding author.** Sukhoon Kim
Tel. +82-31-8065-5181 Fax. +82-31-8065-5111 E-mail. kuni0808@fnctech.com

Received 9 June 2022 **Revised** 20 June 2022 **Accepted** 28 June 2022

1. 서 론

경주 방사성폐기물 처분장 부지에는 방사선적 및 물리·화학적 특성 등이 다양한 중저준위 방사성폐기물(Low- and Intermediate-Level radioactive Waste, LILW)이 처분될 예정이다. 최근 한국원자력환경공단은 처분시설 종합개발계획 수립과정에서 발생량 자료 및 가정사항을 토대로 총 71만 드럼(200 L 기준) 분량의 처분 방폐물이 발생할 것으로 예측한 바 있다[1]. 이를 처분하기 위해 세 가지 상이한 처분방식(즉, 동굴, 표층 및 매립)의 조합으로 구성된 복합처분시설을 단일 부지에서 여러 단계로 구분하여 순차적으로 운영할 계획이다. 1단계 동굴처분시설이 2014년 12월부터 운영중이며, 2단계 표층처분시설이 2023년 12월 준공을 목표로 하여 건설중에 있다. 후속 처분시설은 1단계 및 2단계 시설의 운영상황을 고려하여 단계적으로 구체화될 예정이다.

국내 규제기관(즉, 원자력안전위원회)에서는 LILW 처분시설로 인한 국민의 건강 및 환경상의 방사선 위해 방지를 위해 안전성 평가의 성능목표치 및 성능평가기간, 인간침입에 대한 방호 등과 관련된 주요 조항으로 구성된 고시[2]를 제정·시행하고 있다. 이러한 규제요건에 따라 방사성폐기물 처분시설 폐쇄 후 주변에 거주하는 일반 대중에게 미치는 방사선영향을 평가하여 성능목표의 충족여부를 입증해야 하며, 이는 일반적으로 수학적 예측모델 기반의 안전성 평가를 통해 확인할 수 있다.

처분시설 폐쇄 후 안전성 평가와 관련한 기존 연구는 주로 현재 운영 또는 인허가 중에 있는 1단계 동굴처분시설 또는 2단계 표층처분시설에 중점을 두고 수행되었다. 복합처분시설에 대한 연구도 진행된 바 있으나 동굴처분 및 표층처분의 2가지 처분방식만으로 구성된 시스템[3]을 대상으로 하였거나, 생태계 모델 구현에 대해 명확히 제시되어 있지 않다[4]. 이에 본 연구에서는 LILW 복합처분시설 폐쇄 후 피폭대상 수용체(Receptor)의 연간 개인유효선량을 평가하기 위해 골드심(GoldSim)[5] 내 오염물질 수송모듈(Contaminant Transport, CT)을 이용하여 안전성 평가도구를 개발하였다. 해당 평가도구는 시설별로 확정되지 않은 정보를 향후 유연하게 적용할 수 있도록 골드심 내 입력값을 단일값으로 고정하는 것이 아니라, 사용자에 의한 입력 및 수정이 가능한 형태로 구성하였다.

본 논문은 골드심 기반 폐쇄 후 안전성 평가도구에 구현된 생태계 모델에 중점을 두고 있으며, 해당 모델을 구성하는 피폭경로 및 각 경로에 대한 수학적 모델, 주요 입력자료 적용방법 등에 관한 내용을 정리하였다. 또한, 생태계 모델링 구현결과의 적용성을 검토하기 위해 복합처분시설을 대상으로 사례연구를 수행하였으며, 그 내용에 대해서도 기술하였다.

2. 재료 및 방법

한국원자력안전기술원(Korea Institute of Nuclear Safety, KINS) 규제지침 2.2절[6]에서는 원자력발전소가 방사선 영향 관련 요건을 준수하여 안전하게 설계·운영될 수 있음을 입증하기 위해 환경으로 배출되는 액체상 및 기체상 방사성유출물로 인한 주변 주민의 피폭선량 평가방법 및 절차를 규정하고 있다. 이에 따르면 주민 피폭선량 평가를 위해 피폭자의 위치를 포함한 피폭경로가 결정되어야 하며, 부지 고유 피폭경로를 확인하기 위해 부지 특성자료가 검토되어야 한다.

본 연구에서는 상기 지침에 제시된 평가방법을 기초로 LILW 복합처분시설의 고유 특성을 고려하여 피폭대상 및 피폭경로를 선정하였다. 각 피폭경로에 대해 합리적 가정 및 공학적 판단을 적용하여 수학적 모델을 설정한 후 이를 골드심 기반의 폐쇄 후 처분 안전성 평가도구를 구성하는 생태계 모델에 구현하였다.

2.1. 피폭대상 및 피폭경로 선정

복합처분시설의 위치 및 부지 주변 주요 지형 정보는 Fig. 1과 같다. 해당 시설은 동해에 근접한 위치에 있으며, 시설 북쪽 및 남쪽으로는 지표수로 각각 대종천 및 나산천, 시설 북서쪽에는 터널이 위치하고 있다[7]. 또한, 인근 주민은 시설 기준 북동쪽으로 직선거리 약 1 km 및 남서쪽으로 직선거리 약 2 km 이격된 지역에 주로 거주하고 있다. 원자력안전위원회고시 제2017-62호[2]에 따라 처분시설의 폐쇄 후 방사선 영향은 결정집단의 개인을 대상으로 평가해야 하지만 현 시점에서 복합처분시설과 관련한 많은 정보가 불확실하여 결정집단을 확정할 수 없다. 이에 본 연구에서는 부지 주변 해안까지의 거리 및 지하수 유동방향[4] 등을 종합적으로 고려하여 부지 북동쪽 방향

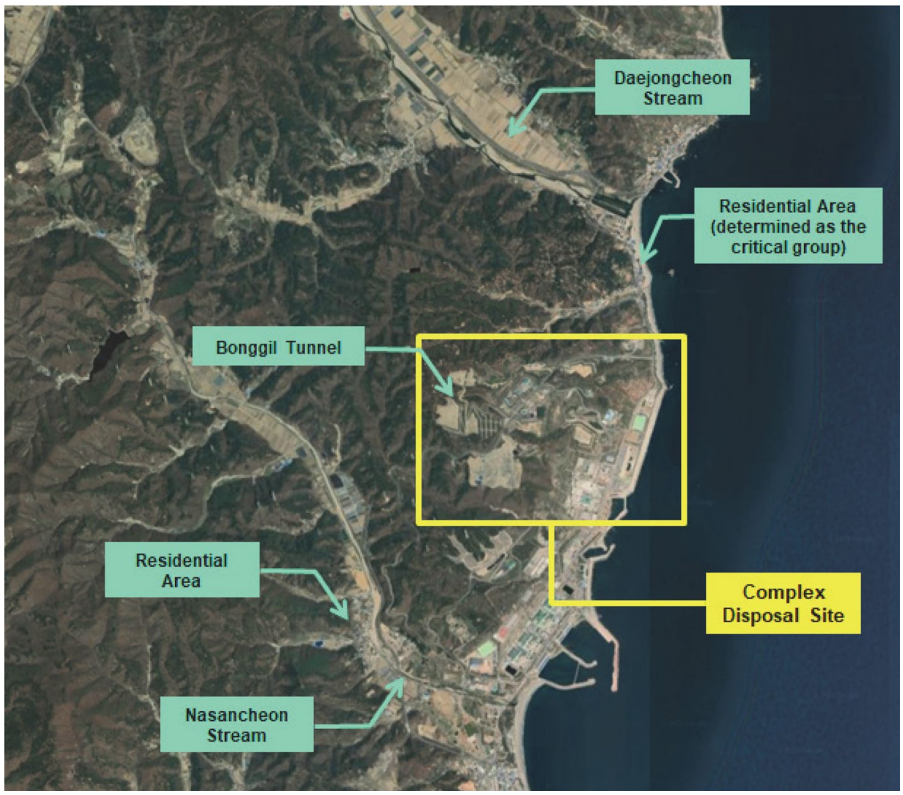

Fig. 1. Location of the complex disposal site in Gyeongju (General public living in the northwest residential area of the site were assumed as the critical group for the post-closure safety assessment).

에 위치한 주거지역을 생태계 모델 개발을 위한 결정집단으로 가정하였다.

폐쇄 후 처분시설로부터 누출된 방사성핵종은 최종적으로 해양 또는 우물로 대표되는 지질계-생태계 접점(Geosphere-Biosphere Interface, GBI)까지 이동하는 것으로 모델링하였다. 생태계 모델 개발을 위해 선정한 결정집단은 시설 부근 해양 및 대기와 균질성(Homogeneity)을 유지하며, 오염된 해수 또는 관개수(우물)의 영향을 받은 농·축·수산물 및 음용수를 섭취하는 것으로 가정하였다. GBI로부터 인간 피폭까지의 이동은 제도적 관리기간 이후 부지 주변 환경이 동일하게 유지된다고 확신할 수 없으므로 평가기간 내 실현 가능한 잠재적 피폭경로를 최대한 고려하여 특정 피폭집단의 피폭선량을 계산할 수 있도록 구성하였다. 본 연구에서 고려된 생태계 피폭경로를 Table 1[8]에 요약하였으며, 이를 도식화한 결과는 Fig. 2와 같다. 평가결과의 보수성을 확보하기 위해 각 경로에 대해 GBI로부터 인간 피폭시점까지의 방사성붕괴는 고려하지 않으며, 결정집단은 평가기간 전체에 걸쳐 피폭되는 것으로 가정하였다.

2.2. 피폭경로별 수학적 모델

결정집단의 피폭선량은 해양, 우물, 대기에서 각 핵종의 방사능 농도를 이용하여 Table 1에 제시된 피폭경로별로 계산되며, 각 피폭경로별 선량을 계산하기 위해 본 연구에서 개발한 수학적 모델에 대한 자세한 내용은 이하에 순차적으로 기술하였다. 다수의 수식에서 공통적으로 사용되는 기호는 Nomenclatures 부분에 설명을 추가하였다.

2.2.1. 외부피폭

2.2.1.1. 방사능운(Cloudshine)

불활성기체에 잠김상태(Submersion)에서 피폭되는 것으로 폐기물로부터 발생된 기체가 상부 뒤채움재, 공학적 방벽, 다층(Multi-layer) 처분덮개를 통해 대기중으로 확산되는 현상을 고려하여 표층 및 매립처분시설에 대해서만 평가된다. 폐기물 상부 대기영역의 체적은 골드심 개발사에서 제공하고 있는 모델링 정보[9]에 따라 처분시설 치수 및 피폭대상 크기를 고려하여 정의하였으며, 이를 토대로 해당 영역의 방사능 농도가 산출된다. 방사능운에 의한 피폭선량(R_c)은 다음 식 (1)을 이용하여 계산된다.

Table 1. Summary of exposure pathways considered for calculating the exposure dose of the critical group in the GoldSim-based biosphere model [7]

Exposure pathway			No.	Considerations	Assumption
External exposure	Cloudshine		①	• Noble gas	
	Groundshine		②	• Soil contaminated by irrigation water	• Leakage not taken into account • Irrigation water supply for entire period
	Shoreline sediment		②	• Radioactive contaminated shoreline sediment	
	Marine activity		③	• Swimming and boating	
Internal exposure	Inhalation		④	• Resuspended soil particle	• Leakage not taken into account • Irrigation water supply for entire period
	Ingestion	Drinking water	⑤-(1)	• Well water	• 100% contamination of livestock feed and drinking water • Soil-crop transfer coefficient • Fodder-livestock transfer coefficient • Irrigation water supply for entire period • ⑤-(5) is included in ⑤-(1) to ⑤-(4).
		Aquatic products	⑤-(2)	• Fish, invertebrates, crustaceans, algae	
		Agricultural products	⑤-(3)	• Grain, fruit, roots, leafy vegetables	
		Livestock products	⑤-(4)	• Meat, milk	
		Others	⑤-(5)	• Tritium	

$$R_c = C_{ia}\, t_e\, D_{aipj}\, \alpha \quad (1)$$

단, t_e: 연간 피폭시간[8,760 hrs yr^{-1}]

D_{aipj}: 방사능운에 의한 외부피폭 선량환산계수 [(Sv sec^{-1}) (Bq m^{-3})$^{-1}$]

2.2.1.2. 지표 침적물질(Groundshine)

방사성물질로 오염된 토양 주변에 위치하는 경우 피폭되는 것으로, 본 연구에서는 우물 관개수가 침적된 토양 및 해수에 의한 해변 축적물에 따른 피폭을 구분하여 평가하였다. 우물물을 관개수로 사용함에 따라 오염된 토양으로 인한 피폭선량(R_w)은 다음 식 (2)를 통해 계산되며, 방사성물질의 누출은 고려하지 않았다.

$$R_w = C_{iw}\, I\, T_i\, [1 - \exp(-\lambda_i\, t_b)]\, t_e\, D_{aipj}\, \alpha \quad (2)$$

단, t_e: 연간 피폭시간[8,760 hrs yr^{-1}]

D_{aipj}: 오염토양에 의한 외부피폭 선량환산계수 [(Sv sec^{-1}) (Bq m^{-2})$^{-1}$]

처분시설에서 누출되어 지하수 흐름을 따라 해양으로 이동하여 해변에 축적된 방사성물질은 축적물의 표층 2.5 cm 이내에만 존재하는 것으로 가정[6]하였으며, 이로 인한 피폭선량(R_s)은 다음 식 (3)을 사용하여 계산된다.

$$R_s = 100 C_{is}\, W\, T_i [1 - \exp(-\lambda_i\, t_b)]\, U_{ap}\, D_{aipj}\, \alpha \quad (3)$$

단, W: 해변넓이인자(방사선피폭의 기하학적 특성 고려)

U_{ap}: 연간 해변활동시간[hr yr^{-1}]

D_{aipj}: 해변 축적물에 의한 외부피폭 선량환산계수 [(Sv sec^{-1}) (Bq m^{-2})$^{-1}$]

2.2.1.3. 해상활동

수영 또는 수상활동으로 인한 피폭선량(R_m)은 해양의 방사능 농도에 비례하므로, 다음 식 (4)를 이용하여 계산된다.

$$R_m = C_{is}\, U_{ap}\, G_p\, D_{aipj}\, \alpha \quad (4)$$

단, U_{ap}: 연간 수영 또는 수상활동시간[hr yr^{-1}]

G_p: 피조사체의 기하학적 변수 (수영 = 1, 수상활동 = 2)

D_{aipj}: 해상활동에 의한 외부피폭 선량환산계수 [(Sv sec^{-1}) (Bq m^{-3})$^{-1}$]

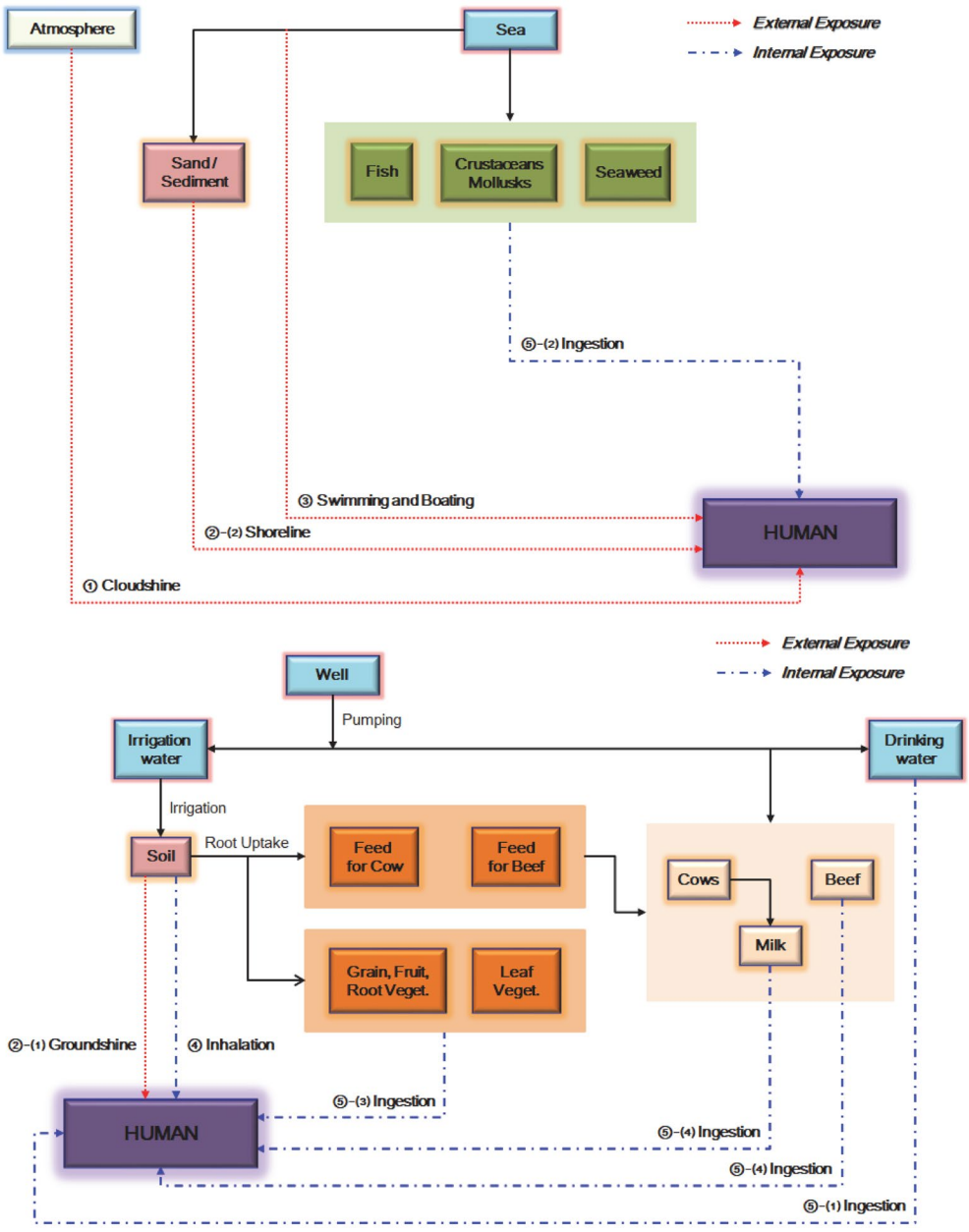

Fig. 2. Schematic diagram of exposure pathways considered in the biosphere model for the post-closure safety assessment of the LILW complex disposal facility.

2.2.2. 내부피폭

2.2.2.1. 호흡

호흡을 통해 흡입된 방사성물질은 호흡기 및 다른 내부 장기의 피폭을 야기한다. 이 중 불활성기체의 경우 호흡기에 침적되지 않을 뿐만 아니라 매우 소량만 혈액에 흡수되므로 해당 기체의 흡입에 의한 내부피폭은 고려하지 않았다[6].

앞서 언급한 규제지침[6]에는 불활성기체로 인한 호흡기 선량에 대해서만 언급되어 있으므로, 본 연구에서는 IAEA-ISAM[10]에 대한 추가 검토를 통해 관개수로 오염된 토양에서 대기중으로 재부유된 방사성물질의 흡입으로 인한 피폭을 내부피폭 경로로 정의하였다. 2.2.1.2절에서와 동일하게 토양에 침적된 방사성물질의 누출은 고려하지 않았으며, 평가기간 내내 관개수가 공급되는 것으로 가정하였다. 재부유 방사성물질의 호흡으로 인한 피폭선량(R_i)은 다음 식 (5)를 이용하여 계산된다.

$$R_i = C_{iw} I T_i\{1-\exp(-\lambda_i t_b)\} B R_r D_{aipj} \alpha \quad (5)$$

단, B: 연간 호흡률[$m^3\ yr^{-1}$]
R_r: 재부유인자[m^{-1}]
D_{aipj}: 호흡에 의한 내부피폭 선량환산계수[$Sv\ Bq^{-1}$]

2.2.2.2. 섭취

섭취를 통한 피폭경로는 음용수, 농작물(곡류, 과일류, 근채류, 엽채류), 축산물(육류, 우유), 수산물(어류, 연체류 및 갑각류, 해조류) 섭취로 구분된다. 이 중 방사성물질로 오염된 음용수(우물물) 섭취로 인한 피폭선량(R_d)은 다음 식 (6)을 이용하여 계산된다.

$$R_d = C_{iw} U_{ap} D_{aipj} \alpha \quad (6)$$

단, U_{ap}: 연간 음용수 섭취량[$L\ yr^{-1}$]
D_{aipj}: 음용수 섭취에 의한 내부피폭 선량환산계수 [$Sv\ Bq^{-1}$]

농작물은 관개수가 해당 작물의 표면에 침적되는 경우, 관개수로 오염된 토양 내의 물질을 뿌리를 통해 흡수하는 경우 등 두 가지 경로에 의해 방사성물질에 오염되는 것으로 가정하였다. 전자에 대해 잔류계수 및 기상에 의한 제거상수, 후자에 대해 토양-작물 전이계수를 고려하였다. 농산물 섭취로 인한 피폭선량(R_{ag})은 다음 식 (7)을 이용하여 계산된다.

$$R_{ag} = C_{iw} I U_{ap} r\left[1-\frac{\exp(-\lambda_i-\lambda_w)t_e}{Y_v(\lambda_i+\lambda_w)}\right] D_{aipj}\alpha_1 + \frac{B_{iv}[1-\exp(-\lambda_i t_b)]}{p\lambda_i}\alpha_2 \quad (7)$$

단, U_{ap}: 연간 농작물 섭취량[$kg\ yr^{-1}$]
r: 잔류계수
λ_w: 기상에 의한 농작물 표면 방사성물질 제거상수 [hr^{-1}]
t_e: 관개수 공급시간[hr]
Y_v: 단위면적당 수확량[$kg\ m^{-2}$]
D_{aipj}: 농작물 섭취에 의한 내부피폭 선량환산계수 [$Sv\ Bq^{-1}$]
B_{iv}: 방사성물질의 토양-농작물 전이계수 [$(Bq\ kg^{-1})\ (Bq\ L^{-1})^{-1}$]
p: 유효 표면토양 밀도[$kg\ m^{-2}$]

축산물 섭취로 인한 내부피폭은 방사성물질로 오염된 사료 및 물로 사육된 소(육우)·닭·돼지고기를 직접 섭취하는 경우와 젖소에서 생산된 우유를 섭취하는 경우 등 두 가지 경로에 의해 발생되는 것으로 가정하였다. 이로 인한 피폭선량(R_l)은 식 (8)을 이용하여 계산된다.

$$R_l = C_{iw} Ir\left[1-\frac{\exp(-\lambda_i-\lambda_w)t_e}{Y_v(\lambda_i+\lambda_w)}\right] F_{iA}\alpha_1 + \frac{B_{iv}[1-\exp(-\lambda_i t_b)]}{p} Q_f f_f \alpha_2 + C_{iw} Q_w f_w U_{ap} D_{aipj}\alpha_3 \quad (8)$$

단, r: 잔류계수
λ_w: 기상에 의한 농작물 표면 방사성물질 제거상수 [hr^{-1}]
t_e: 관개수 공급시간[hr]
Y_v: 단위면적당 수확량[$kg\ m^{-2}$]
F_{iA}: 방사성물질의 사료-축산물 전이계수 [$days\ L^{-1}$ 또는 $days\ kg^{-1}$]
B_{iv}: 방사성물질의 토양-농작물 전이계수 [$(Bq\ kg^{-1})\ (Bq\ L^{-1})^{-1}$]
t_b: 평가기간[yr]
p: 유효 표면토양 밀도[$kg\ m^{-2}$]
Q_f: 젖소 및 육우 일간 사료 섭취량 [$kg\ day^{-1}$]
f_f: 젖소 및 육우 사료 오염률(1로 가정)
Q_w: 젖소 및 육우 일간 음용수 섭취량 [$kg\ day^{-1}$]
f_w: 젖소 및 육우 음용수 오염률(1로 가정)
U_{ap}: 연간 육류 또는 우유 섭취량 [$kg\ yr^{-1}$ 또는 $L\ yr^{-1}$]
D_{aipj}: 축산물 섭취에 의한 내부피폭 선량환산계수 [$Sv\ Bq^{-1}$]

농·축산물 섭취로 인한 피폭경로에서 삼중수소는 거동특성을 반영하여 별도로 고려되었다. 농산물 및 축산물 내 삼중수소 농도는 각각 관개수 및 음용수에서의 삼중수소 농도와 동일한 것으로 가정하였다.

수산물 섭취는 어류, 연체류 및 갑각류, 해조류 등 세 가지 종류로 구분하며, 이로 인한 피폭선량(R_{aq})은 식 (9)을 이용하여 계산된다.

$$R_{aq} = C_{is} U_{ap} B_{ip} R_r D_{aipj}\alpha \quad (9)$$

단, U_{ap}: 연간 수산물 섭취량[$kg\ yr^{-1}$]
B_{ip}: 생체축적인자[$(Bq\ kg^{-1})\ (Bq\ L^{-1})^{-1}$]
D_{aipj}: 수산물 섭취에 의한 내부피폭 선량환산계수 [$Sv\ Bq^{-1}$]

Fig. 3. Input composition of the GoldSim-based biosphere model.

2.3. 주요 입력자료 적용방법

생태계 모델 구축 및 이를 이용한 결정집단 피폭선량 평가를 위해서는 식 (1)~(9)에 포함된 선량환산계수(Dose Conversion Factor, DCF), 생체축적인자, 전이계수, 생태계 특성 등에 대한 상세 데이터가 필요하다.

이러한 입력자료는 MS-Excel 형식의 DB 파일로 관리되며, 해당 파일은 골드심 기반 평가도구에서 직접 호출할 수 있는 구조로 Fig. 3과 같이 설계되었다. 2.2.1~2.2.2절에 제시한 수학적 모델 및 각 피폭경로별 입력데이터를 적용하여 생태계 모델을 구현한 결과는 Fig. 4와 같다. 해당 모델에 적용된 입력자료에 대한 보다 자세한 설명은 이하에 기술하였다.

2.3.1. 방사성핵종 및 선량환산계수(DCF)

원자력안전위원회고시 제2021-26호[11]에서 LILW 인도시 폐기물에 포함되어 있는 방사성핵종 중 농도가 규명되어야 한다고 명시하고 있는 14개 핵종(즉, ^{3}H, ^{14}C, ^{55}Fe, ^{58}Co, ^{60}Co, ^{59}Ni, ^{63}Ni, ^{90}Sr, ^{94}Nb, ^{99}Tc, ^{129}I, ^{137}Cs, ^{144}Ce, 전알파(Gross alpha))을 처분 안전성 평가에서 우선적으로 포함해야 한다. 이 중 전알파의 경우 정량적 평가를 위해서는 복수의 대표핵종으로 특정하여 입력해야 한다. 이에 따라 한국원자력환경공단에서 용해도, 분배계수, 선량환산인자 등에 따른 피폭선량 기여도를 종합적으로 고려하여 선정한 11개 핵종(즉, ^{239}Pu, ^{234}U, ^{235}U, ^{238}U, ^{238}Pu, ^{240}Pu, ^{241}Pu, ^{241}Am, ^{243}Am, ^{242}Cm, ^{243}Cm, ^{244}Cm)을 평가모델에 추가로 반영하였다. 추후 필요에 따라 전알파 대상 핵종을 추가·수정 또는 핵종별 분율을 설정하여 처분 안전성 평가를 수행할 수 있다.

관심영역(즉, 대기, 우물, 해양) 내 방사능 농도를 기반으로 피폭경로별 선량을 계산하는 과정에서는 상기 24개 핵종 이외에 이에 대한 딸핵종의 선량환산계수도 반영되어야 한다. 일례로, ^{238}Pu에 의한 피폭선량에는 그 딸핵종인 ^{234}U, ^{230}Th 등에 의한 기여분을 추가적으로 고려해야 한다. 이에 따라 각 딸핵종의 선량환산계수에 방사성붕괴분기율을 곱한 값을 모핵종의 선량환산계수와 합산하여 GoldSim 모델링에 포함하였다. 각 방사성핵종에 대해 수침(Water immersion) 및 기타 피폭경로에 의한 선량환산계수로는 각각 FGR 12[12] 및 FGR 13[13]에 제시된 값을 활용하였다.

2.3.2. 생체축적인자

수산물 섭취에 의한 피폭의 경우 해양 내 방사능 농도가 수산물 내 방사능 농도와 직접적으로 관련되는 것으로 가정하였다. 어류, 연체류 및 갑각류, 해조류 등에 의한 피

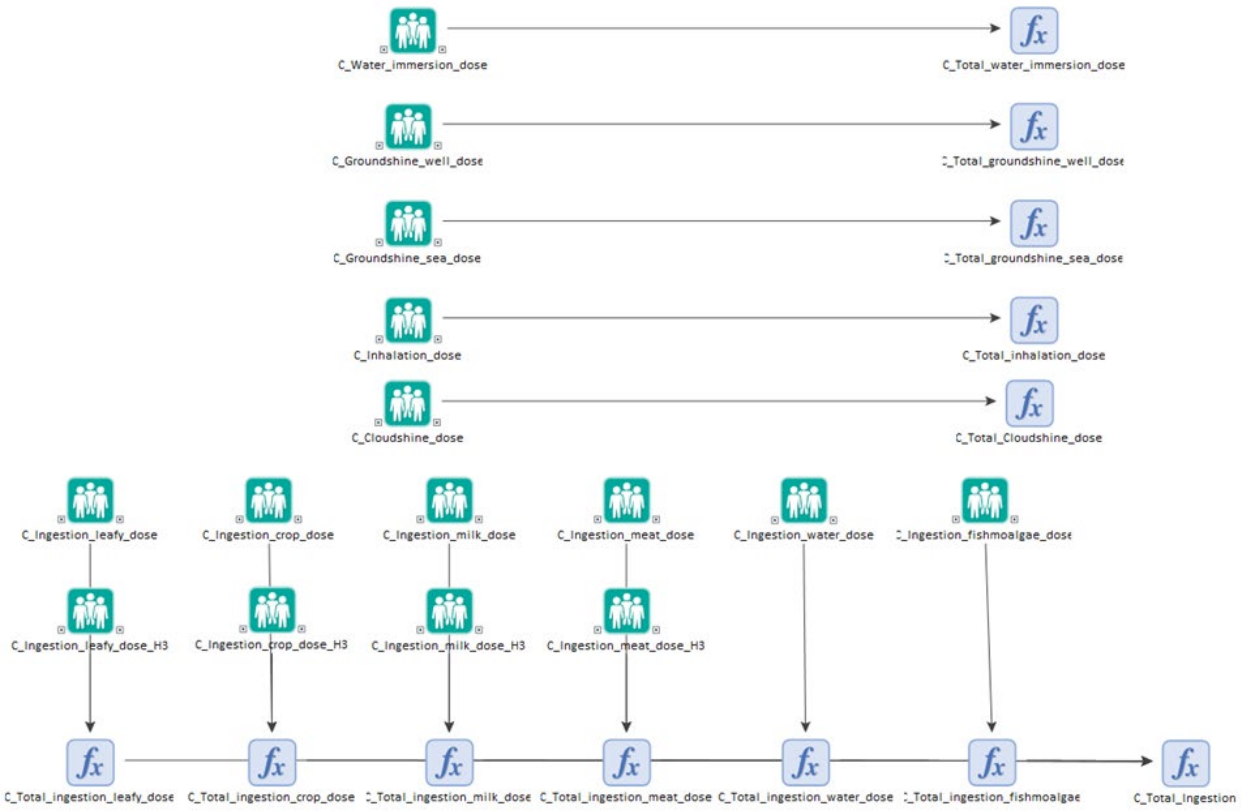

Fig. 4. A set of elements implemented in the GoldSim-based biosphere model.

폭선량은 생체축적계수(B_{ip})를 적용하여 계산된다. 본 연구에서는 INDAC 코드[14]에 제시된 핵종별 생체축적인자 값을 사용하였다.

2.3.3. 방사성물질 전이계수

농·축산물 섭취에 따른 피폭선량을 계산하기 위해 오염된 토양에서 농작물로 방사성물질이 이동하는 정도 및 오염된 사료에서 가축으로 방사성물질이 이동하는 정도를 각각 토양-작물 전이계수(B_{iv}) 및 사료-축산물 전이계수(F_{iA})로 반영하였다. 본 연구에서는 INDAC 코드[14]에 제시된 전이계수 값을 사용하였으며, 돼지 및 닭에 대한 사료-가축 전이계수는 소에 대한 값과 동일하다고 가정하였다.

2.3.4. 생태계 특성자료

앞서 기술한 데이터 이외에 처분시설의 폐쇄 후 안전성 평가를 위한 생태계 모델에는 결정집단의 섭생, 거주 및 활동 특성을 반영해야 한다. 이러한 특성에는 성인 및 가축 섭취량, 농작물 생산, 호흡률, 관개율, 해양활동 시간 등이 포함된다. 본 연구에서는 상기 언급한 KINS 규제지침[6] 및 INDAC 코드[14]에 제시된 값을 활용하였다.

3. 결과 및 고찰

한국원자력환경공단이 주관기관으로 수행중인 “복합처분시설 건설·운영 최적화 기술 개발 과제”를 통해 경주 방사성폐기물 처분장 단일 부지 내에 다수의 처분시설로 구성된 복합처분시설이 존재하는 상황에 대한 폐쇄 후 안전성 평가를 위한 골드심 기반의 통합 평가도구[7]가 개발되었으며, 그 메인화면을 예시하면 Fig. 5와 같다. 해당 평가도구의 핵심 구성요소 중 하나인 생태계 모델은 LILW 복합처분시설의 고유 특성을 고려하여 구현하였으며, 이 과정에서 적용된 주요 가정사항은 다음과 같다. 본 연구에서 채택한 방법론과 KINS 규제지침 2.2절[6]에 제시된 평가방법을 피폭경로별로 비교한 결과는 Table 2와 같다.

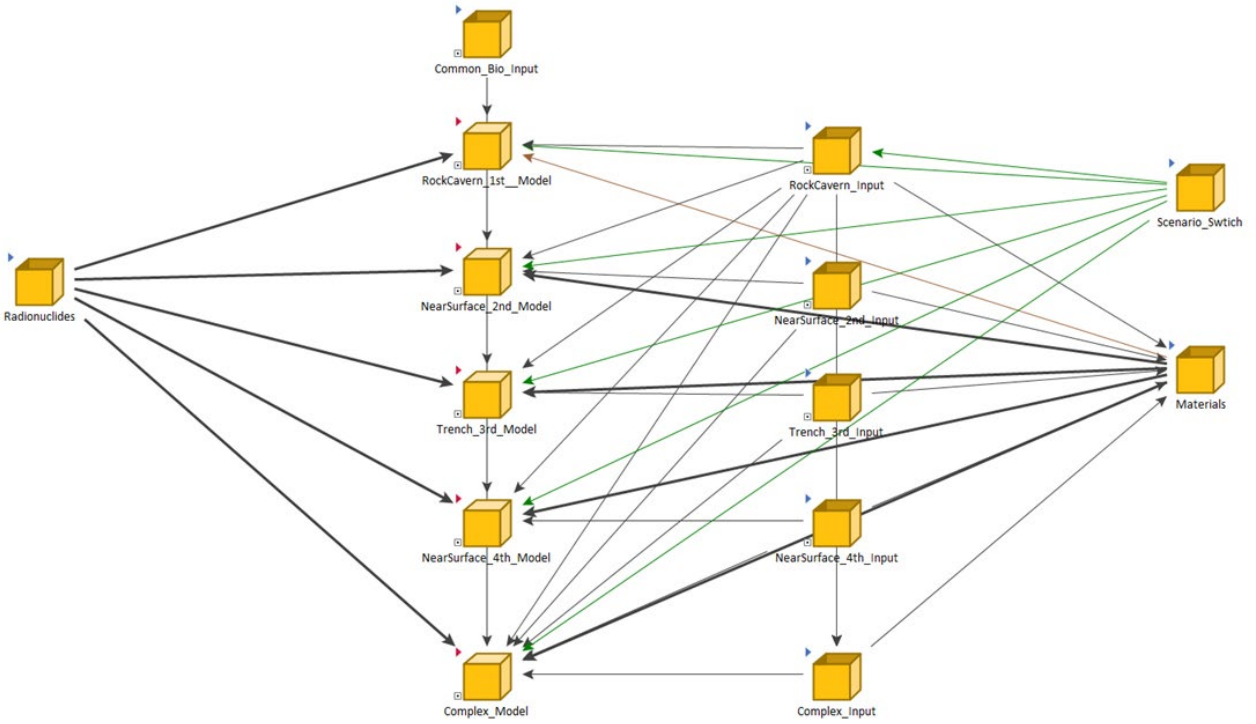

Fig. 5. Main screen of the GoldSim-based post-closure safety assessment tool for the LILW complex disposal facility.

- 방사능운
  - 대기중으로 확산된 폐기물 내 불활성기체에 의한 잠김피폭으로 고려
  - 처분시설 치수 및 피폭대상 크기를 고려하여 대기 영역의 체적 정의
- 지표 침적물질: 관개율을 적용하여 관개수를 경유한 방사성물질의 토양 표면 침적률 계산
- 해상활동: 선량계산 대상지점에서의 혼합계수 미적용
- 호흡
  - 관개수로 오염된 토양에서 대기중으로 재부유된 방사성물질의 흡입으로 인한 피폭에 대해 평가
  - 오염토양에 의한 피폭경로와 동일하게 관개수를 경유한 방사성물질의 침적률을 계산하여 반영
- 섭취
  - 음용수: 우물물(100% 오염)을 직접 섭취하는 것으로 고려하며, 선량계산 대상지점에서의 혼합계수 미고려
  - 수산물: 해양 방사능 농도와 직접적으로 관련된다는 전제하에 선량계산 대상지점에서의 혼합계수 미적용
  - 농산물: 전체 평가기간을 방사성물질이 토양에 축적되는 기간으로 반영
  - 축산물: 사료 내 농도가 아닌 우물에서의 방사능 농도에 기인한 평가식 활용
- 공통 가정사항
  - GBI로부터 인간 피폭시점까지의 방사성붕괴 미고려
  - 결정집단: 평가기간 전체에 걸쳐 피폭되는 성인(연령군 미구분)
  - 음용수 및 사료: 보수적으로 100% 오염

피폭선량 평가를 위한 기본식은 KINS 규제지침[6]에 기반하며, 평가식 수정과정에는 공학적 판단을 기초로 합리적 가정사항이 적용되었으므로 골드심 기반 생태계 모델을 구성하는 기본 알고리즘은 기술적으로 타당하다. 또한, 각 피폭경로 및 총 피폭선량에 대해서는 대기, 우물, 해양 내 방사능 농도를 기반으로 수계산을 수행하여 계산결과에 오류가 없음을 확인하였다. 즉, 기술적으로 타당한 알고리즘이 이상 없이 구현되었음을 '확인(Verification)' 하였으므로, 동 생태계 모델은 처분시설 폐쇄 후 안전성 평가 목적으로 활용하기에 적절하다고 판단된다.

Table 2. Summary of main features for exposure pathways considered in the GoldSim-based biosphere model developed in this study in comparison with the Korean regulatory guideline

Exposure pathway			Korean regulatory guideline [6]	This study
External exposure	Cloudshine		• Calculated from submersion in a semi-infinite plume with noble gases	• Calculated from submersion in an finite plume having a dimension determined using the size of the disposal facility and the receptor to be exposed
	Groundshine		• Considering exposure due to deposited materials from the radioactive plume to the soil	• Calculating the deposition rate of radioactive materials passing through irrigation water to soil surface
	Marine activity		• Applying dilution factor at the dose point to be calculated	• No dilution factor applied at the dose point to be calculated
Internal exposure	Inhalation		• Calculated from airborne concentration of radioactive materials • Considering only exposure dose due to beta radiation emitted from noble gases	• Assessing exposure due to radioactive material resuspended into the atmosphere from soil contaminated with irrigation water • Reflected by calculating the deposition rate of radioactive materials passing through irrigation water
	Ingestion	Drinking water	• Applying dilution factor at the dose point to be calculated	• Considering direct intake of well water (100% contamination) • No dilution factor applied at the dose point to be calculated
		Aquatic products	• Applying dilution factor at the dose point to be calculated	• Assumed to be directly related to radioactive concentration in the ocean • No dilution factor applied at the dose point to be calculated
		Agricultural products	• Considering exposure from deposited materials onto the plant foliage and from uptake from the soil of activity deposited on the ground	• The time period during which radioactive materials are accumulated in the soil is reflected as the entire evaluation period.
		Livestock products	• Calculated by a formula based on radioactive concentration in fodder	• Applying a formula based on radioactive concentration not in fodder but in well water

이러한 생태계 모델링의 적용성을 검토하기 위해 1개의 동굴처분시설, 2개의 표층처분시설 및 1개의 매립처분시설로 구성된 복합처분시설을 대상으로 정상 및 인간침입(우물) 시나리오에 대한 예비 폐쇄 후 안전성 평가를 통해 사례연구를 수행하였다. 현 시점에서 다수의 정보가 확정되지 않은 관계로 현재 고려되고 있는 처분시설 배치 옵션(안) 중 하나를 반영하였다. 정상 시나리오에서는 처분용기의 열화에 따라 누출된 방사성핵종이 처분시설로부터 해양까지 이동하여 생태계 피폭을 야기한다. 또한, 인간침입(우물) 시나리오에서는 각 처분시설로부터 유동하는 지하수가 합류하여 해양까지 흐르는 유동로 상에 단일 우물이 개발되는 것으로 가정하였다.

RADMAN 프로그램[15]의 기본 DB로 관리되고 있는 ㈜한국수력원자력 발생 포장물(2014년말 기준) 중에서 중준위폐기물 전체가 1단계 동굴처분시설에 처분된다는 가정하에 골드심 기반 처분 안전성 평가도구에 엑셀 형식의 DB 입력파일을 연동·호출하여 정상 및 우물 시나리오를 대상으로 결정집단의 개인에 미치는 피폭선량을 평가하였다. 선원항의 경우 모든 포장용기 유형별로 동굴처분시설 내 6개의 사일로에 균등수량을 배분하였으며, 전알파 재고량은 11개 구성핵종에 대해 동일한 분율을 할당하여 적용하였다.

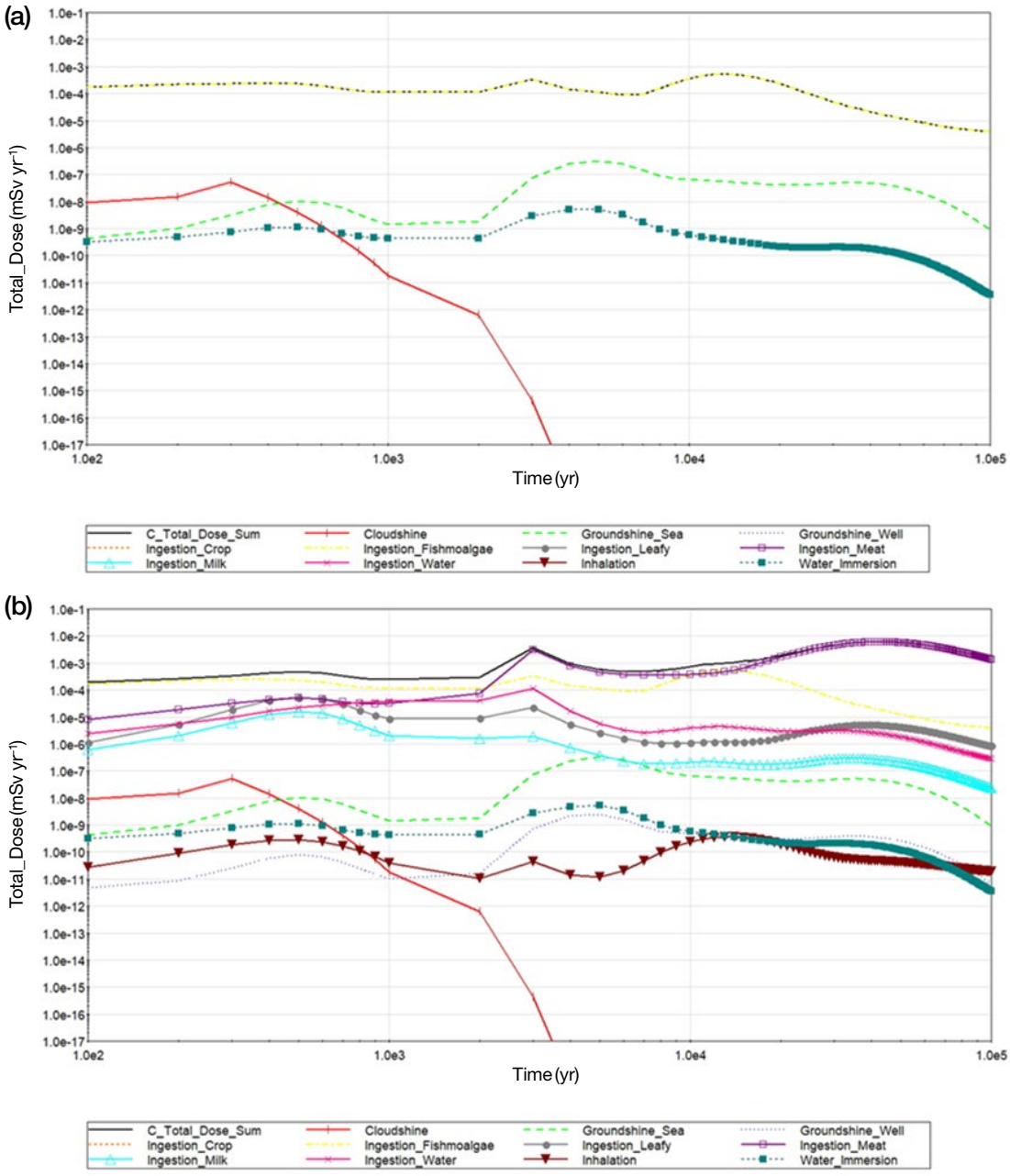

Fig. 6. Annual exposure doses by exposure pathway during a period of 100,000 years after closure of the LILW complex disposal facility - (a) Normal scenario, and (b) Human intrusion (i.e. well) scenario.

상기 사항을 반영하여 도출된 복합처분시설의 폐쇄 후 100,000년간 정상 및 우물 시나리오에 대한 결정집단 개인의 피폭경로별 연간선량 변화 추이 그래프는 Fig. 6과 같다. 해당 그림에 제시한 바와 같이 최대 연간 피폭선량은 정상 및 우물 시나리오에서 각각 5.13×10^{-4} mSv yr^{-1} (폐쇄 후 13,000년 경과) 및 6.06×10^{-3} mSv yr^{-1} (폐쇄 후 43,000년 경과)로 도출되었다. 이는 방사성폐기물 처분시설 폐쇄 후 정상적 자연현상 및 인간침입으로 인한 방사선 영향에 대해 설정되는 성능목표치[2] 대비 각각 0.51% 및 0.61% 수준에 해당한다. 또한, 정상 및 우물 시나리오에 대해 연간 피폭선량에 기여도가 가장 높은 피폭경로는 각각 수산물 섭취 및 육류 섭취로 나타났다.

이를 통해 본 연구에서 개발된 생태계 모델을 포함하는 골드심 기반의 처분 안전성 평가도구를 활용하여 특정 피

폭집단을 대상으로 피폭경로별 선량 및 이에 따른 연간 피폭선량의 변화 추이를 도출할 수 있음을 확인하였다. 또한, 이러한 결과는 해당 처분시설의 성능목표 충족 여부를 입증하는데 적용할 수 있다. 단, 이는 현 시점에서 미확정된 정보에 대해 가정사항 및 공학적 판단 등을 임의로 적용하여 도출된 결과이므로 추후 핵종 재고량, 지하수 유동 등에 대한 실질적인 입력자료를 확보하여 재평가를 수행할 필요가 있을 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 원자력발전소 운영과정에서 환경으로 배출되는 액체상 및 기체상 방사성유출물로 인한 피폭선량 평가방법 및 절차를 규정하고 있는 KINS 규제지침[6]의 내용을 기초로 LILW 복합처분시설의 고유 특성을 고려하여 생태계 모델을 개발하였다. 현 시점에서 복합처분시설에 대한 결정집단을 확정할 수 없으므로 해당 모델은 특정 피폭집단에 대해 해양, 우물, 대기에서의 방사능 농도를 기반으로 Table 1에 제시된 각 피폭경로별 피폭선량 및 이에 따른 연간 총 피폭선량을 계산할 수 있도록 골드심 기반 폐쇄 후 안전성 평가도구의 일부로 구현하였다. 각 피폭경로별로 설정된 수학적 모델을 이용한 피폭선량 평가과정에서는 방사성핵종 및 DCF, 생체축적인자, 방사성물질 전이계수, 생태계 특성자료 등이 추가적으로 요구된다. 이러한 자료는 MS-Excel 파일 형식의 DB로 구축하여 골드심 기반 평가도구에서 직접 호출할 수 있도록 구성하였다.

상기 골드심 기반 생태계 모델링의 적용성을 검토하기 위해 세 가지 상이한 처분방식의 조합으로 구성된 복합처분시설을 대상으로 특정 정치계획을 설정하여 사례연구를 수행하였다. 그 결과 피폭경로 및 각 경로에 대한 수학적 모델, 주요 입력자료 적용방법 등이 특정 피폭집단에 대한 피폭경로별 선량 및 연간 총 피폭선량의 변화 추이를 평가할 수 있도록 타당하게 구현된 것으로 판단된다.

본 연구에서 구현된 이러한 생태계 모델 및 이에 따른 피폭선량 평가개념은 방사성핵종 거동모델 및 지하수 유동모델과 함께 개별 또는 복합처분시설에 대한 예비 안전성 평가에 활용할 수 있을 것으로 기대된다. 또한, 향후 복합처분시설의 특성을 고려하여 결정집단 또는 대표인이 선정되는 경우 그에 적합한 선량환산계수 및 섭생자료 등을 본 연구에서 개발된 골드심 기반 생태계 모델에 직접적으로 적용하여 평가할 수 있다.

사 사

이 논문은 2021년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구임(20193210100110, 복합처분시설 건설·운영 최적화 기술개발).

Nomenclatures

C_{is}: 해양에서의 방사능 농도[Bq m^{-3}]
C_{iw}: 우물에서의 방사능 농도[Bq m^{-3}]
C_{ia}: 대기중에서의 방사능 농도[Bq m^{-3}]
I: 관개율[L m^{-2} hr^{-1}]
T_i: 핵종 반감기[day]
λ_i: 핵종 붕괴상수[hr^{-1}]
t_b: 평가기간[yr]
$\alpha, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$: 단위환산인자(각 평가식의 단위에 따라 상이하게 적용)

참고문헌

1. Son YH, Ha JC and Cho CH. 2021. A Study on the Development of a Predictive Model for the Amount of Radioactive Waste from Nuclear Power Plant Decommissioning Using a Multi-regression Analysis. *J. Radiati. Ind.* **15**(4):243-250. https://doi.org/10.23042/radin.2021.15.4.243
2. Nuclear Safety and Security Commission. 2017. Radiological Hazard Prevention Criteria on the Disposal Facility for the Low- and Intermediate-level Radioactive Waste. Notice No. 2017-62.
3. Korea Advanced Institute of Science and Technology. 2018. Development of Enhancement Technology for Radioactive Waste Disposal Safety (Project Final Report). Nuclear Safety and Security Commission.
4. Jung KI, Kim JH, Kwon MJ, Jeong MS, Hong SW and Park JB. 2016. Comprehensive Development Plans for the Low- and Intermediate-Level Radioactive Waste Disposal

Facility in Korea and Preliminary Safety Assessment. *J. Nucl. Fuel Cycle Waste Technol.* **14**(4):385-410. https://doi.org/10.7733/jnfcwt.2016.14.4.385
5. GoldSim Technology Group LLC. 2018. User's Guide GoldSim.
6. Korea Institute of Nuclear Safety. 2016. Regulatory Guide for Light Water Reactor Nuclear Power Plants (2.2 Exposure Dose Assessment for Residents around the Nuclear Facility). KINS/RG-N02.02 Rev.2.
7. FNC Technology Co., Ltd.. 2020. Development of the Post-closure Safety Assessment Tool for the Comprehensive Development Plan (Technical Report in the 2nd Year of the Project "Development of Construction and Management Optimization Technique for the Complex Disposal Facility"). FNC1931-TR20-001.
8. Kim SH, Ha BH, Kim HJ and Park TK. 2022. Development of the Post-closure Safety Assessment Framework for the LILW Complex Disposal Facility Linking with RADMAN. *J. Radiati. Ind.* **16**(1):1-12. https://doi.org/10.23042/radin.2022.16.1.1
9. https://support.goldsim.com/hc/en-us
10. International Atomic Energy Agency. 2004. Safety Assessment Methodologies for Near Surface Disposal Facilities: Volume 1 - Review and Enhancement of Safety Assessment Approaches and Tools.
11. Nuclear Safety and Security Commission. 2021. Delivery Regulation of the Low- and Intermediate-level Radioactive Waste. Notice No. 2021-26.
12. U.S. Environmental Protection Agency. 1993. External Exposure to Radionuclides in Air, Water, and Soil. Federal Guidance Report No. 12.
13. U.S. Environmental Protection Agency. 1999. Cancer Risk Coefficients for Environmental Exposure to Radionuclides. Federal Guidance Report No. 13.
14. FNC Technology Co., Ltd.. 2014. Supplementation and V&V of Integrated Dose Assessment Code Package (Project Final Report). KINS/HR-1357.
15. FNC Technology Co., Ltd.. 2019. Development of Radionuclide Inventory Management Program for Radioactive Waste Disposal Facility (Project Final Report). FNC1944-FR19-001.