Journal of RADIATION INDUSTRY
Vol. 20, No. 2, pp. 167-173, 2026
https://doi.org/10.23042/radin.2026.20.2.167

Original article

GoldSim을 활용한 복합시나리오 심층처분장 안전성평가에 관한 연구

한용희[1] · 심규진[1] · 이민호[2] · 송종순[1,*]

[1]조선대학교, [2](주)오리온이엔씨

A Study on The Safety Assessment of a Deep Geological Repository Using GoldSim for Complex Scenarios

Yong-Hee Han[1], Gyu-Jin Sim[1], Min-Ho Lee[2], and Jong-Soon Song[1,*]

[1]Department Nuclear Engineering, Chosun University, 10, Chosundae 1-gil, Dong-gu, Gwangju 61452, Republic of Korea
[2]ORION EnC, 1306, 37, Seongsui-ro 22-gil, Seongdong-gu, Seoul 04798, Republic of Korea

ABSTRACT South Korea operates multiple nuclear power plants, which continuously produce spent nuclear fuel and high-level radioactive waste (HLW). Due to their high radioactivity and long half-lives, HLW requires careful long-term management. However, establishing a permanent disposal facility has been challenging because of limited land availability and public acceptance. To address these issues, evaluating the long-term safety of disposal systems is essential. In this study, we performed a scenario analysis based on Features, Events, and Processes (FEPs) to identify potential risks at a repository. A combined scenario, accounting for both seismic activity and possible human intrusion, was developed. Using GoldSim, we simulated radionuclide migration within the disposal system and assessed the resulting radiological impacts on the environment. The results indicate that radionuclide release rates and the associated radiation doses remain well within regulatory limits. This study presents a practical framework for analyzing complex scenarios and provides baseline data to support future repository design and extended in-situ testing.

Key words: High-Level Waste (HLW), GoldSim, Deep Geological Repository (DGR), Complex Scenario, Safety Assessment

1. 서 론

전 세계적으로 운영이 종료된 상업용 원자력발전소는 200기를 넘어섰으며 국제원자력기구(International Atomic Energy Agency, IAEA)에 따르면 2025년 기준 영구정지 원전은 215기, 해체 진행 중인 원전은 25기, 해체 완료 원전은 9기이다[1]. 또한 신규 원전 건설, SMR 개발, 기존 원전의 계속운전, 운영정지 원전의 재가동 등 원자력발전은 전반적으로 확대되는 추세이다. 이러한 국제적 흐름에 발맞추어 국내에서는 총 26기의 원자력발전소가 운영 중이며 4기는 건설 예정에 있다[2]. 그러나 이와 같은 원전 운영 규모 확대에도 불구하고 고준위 방사성폐기물과 관련된 본격적인 부지 선정 및 처분장 구축은 아직 이루어지지 않았다.

고준위 방사성폐기물의 처분 방안은 지구상 처분(심층지질처분, 해저처분, 빙하지역 처분), 우주처분, 핵변환 등 국제적으로 다양한 형태로 제안되었으나 사회적·경제적 제약으로 인해 실질적인 합의에는 이르지 못한 상황이다. 대한민국의 경우 자국에서 발생한 고준위 방사성폐기물은 국내에서 처리 및 처분하는 방안을 기본 원칙으로 검토하고 있다[3]. 특히 심지층처분은 안전성과 경제성을 동시에 확보할 수 있는 방안으로서 가장 유력한 처분 방안으로 평가된다. 처분장 구축 시 고준위 방사성폐기물의 장기적 특성으로 인해 장기간에 걸친 관리가 요구되므로 처분장안전성평가는 필수적으로 수행되어야 한다.

처분안전성평가는 방사성폐기물 처분으로 인한 방사선적 위험도를 정량적으로 평가하고 처분장의 방호 성능을 검증함으로써 방사선 영향을 최소화할 수 있음을 입증하는 것을 목적으로 한다[4]. 이러한 평가는 미래에 발생할 수 있는 다양한 상황을 고려해

ISSN 1976-2402 http://www.ksri.kr/
Copyright© 2026 by Korean Society of Radiation Industry
*Corresponding author: Jong-Soon Song
Tel: +82-62-230-7165, E-mail: jssong@chosun.ac.kr
Received 13 May 2026 Revised 2 June 2026 Accepted 4 June 2026

야 하며 예측이 어려운 비정상적 상황에 대비하기 위해 정형화된 시나리오의 도출이 필요하다. 이에 본 연구에서는 FEPs 기반 분석을 통해 고준위 방사성폐기물 처분 시 발생 가능한 비정상 복합 시나리오를 도출하고 GoldSim을 활용한 시뮬레이션을 수행하여 규제 기준 충족 여부를 평가하였다.

2. 연구 대상 및 방법

2.1. 대상체 선정

심층처분장(Deep Geological Repository, DGR)은 사용후핵연료 및 고준위 방사성폐기물을 지표로부터 수백 미터 이상의 심부 지질 환경에 처분하여 장기간 인간 생활권으로부터 격리하는 시설이다. 이와 같은 처분 방안은 처분용기, 완충재 등 공학적 방벽과 주변 암반의 천연방벽을 결합한 다중방벽 개념을 기반으로 하며 IAEA는 이를 고준위 방사성폐기물 처분을 위한 가장 현실적이고 안전한 방법으로 제시하고 있다[5,6].

국외에서는 핀란드가 올킬루오토(Olkiluoto) 지역에 온칼로(ONKALO) 심층처분장을 구축하여 세계 최초의 사용후핵연료 처분을 목표로 하고 있다. 해당 시설은 약 400~500 m 심도의 결정질 암반에 건설되었으며 2024~2025년 전 공정 통합 시험을 완료한 후 2026년 기준 운영 인허가 최종 심사 단계에 있다[7]. 국내의 경우 아직 상용 심층처분장 부지는 확정되지 않았으나 2024년 태백 지역에 지하연구시설(Underground Research Laboratory, URL) 부지가 선정되어 심부 지질환경 조사 및 처분기술 검증이 진행중이다[8]. 이는 향후 국내 심층처분장 구축을 위한 실증 기반 확보 단계로 평가된다. 이와 같이 심층처분장은 핀란드의 ONKALO와 같이 운영직전 단계에 진입한 국가가 있으며, 스웨덴과 프랑스처럼 착공 또는 최종 인허가 단계를 진행 중인 국가도 있다. 또한, 국내의 경우 지하연구시설 건설을 위한 부지 선정을 통해 처분기술 검증이 진행되고 있다. 따라서 본 연구에서는 고준위 방사성폐기물의 최종 처분 대안으로서 심층처분장을 대상체로 선정하였다.

심층처분장은 수십만 년 이상의 장기 격리를 전제로 설계되므로 다양한 자연현상과 인간 활동을 고려한 처분안전성평가가 필수적이다. 특히 지진, 지하수 유동 변화, 인간 침입과 같은 비정상 시나리오는 장기 안전성에 중요한 영향을 미칠 수 있으므로 이를 정량적으로 평가하고 규제 기준 충족 여부를 검증하는 과정이 요구된다. 따라서 본 연구에서는 이러한 복합 시나리오를 고려한 심층처분장 처분안전성평가를 수행하였다.

2.2. 처분안전성 평가코드 선정

처분안전성평가를 위해 Table 1에 비교되어 있는 다양한 해석코드가 활용되고 있다. 특히 MASCOT-K는 국내 지질 환경과 처분개념(Korean Reference Disposal System, KRS)에 기반하여 개발된 통합 해석 도구로 처분시스템의 다중 방벽을 통한 방사성핵종 이동을 수치적으로 모사하여 Monte Carlo 기법을 활용한 평가 분석이 가능하여 입력 매개변수를 체계적으로 고려할 수 있어 국내 처분장 설계 및 안전성평가에 적합하다[12]. 그러나 본 연구에서는 지진과 인간침입이 결합된 복합시나리오를 대상으로 시간에 따른 시스템 거동과 불확실성을 함께 고려한 확률론적 평가가 요구된다. GoldSim은 객체지향 기반의 확률론적 모델링 도구로서 근계, 원계, 생태계를 포함한 전체 시스템을 통합적으로 모사할 수 있으며 다양한 사건 간의 상호작용과 시간적 변화를 유연하게 반영할 수 있다. 또한 유카마운틴(Yucca Mountain) 인허가 과정에 적용된 사례를 통해 국제적으로 신뢰성이 검증되었다[13]. 따라서 본 연구에서는 복합시나리오 기반의 장기 안전성평가를 수행하기 위해 GoldSim을 해석 도구로 선정하였다.

2.3. FEPs 기반 시나리오 분석

FEPs는 처분시스템 장기 거동에 영향을 미칠 수 있는 모든 특성(Features), 사건(Events), 과정(Processes)을 조합하여 구성되며 시스템의 안전성을 다양한 관점에서 평가할 수 있다. 본 연구에서는 한국원자력연구원(Korea Atomic Energy Research Institute, KAERI)에서 정량적으로 작성한 FEPs 목록을 분석하고 시나리오를 도출하였다[14]. 시나리오는 FEPs간 상호작용과 시간적 발생 순서를 고려하여 정상시나리오와 비정상시나리오로 구분된다. 이에 본 연구에서는 고준위 방사성폐기물 심층처분장의 장기 처분장안전성평가에서 고려되는 다양한 비정상 사건 중 지진 시나리오와 인간 침입 시나리오를 결합하여 복합시나리오를 설정하였다.

국내 지진 분석 결과에 따르면 처분장 규모를 고려한 연간 지진 발생률이 약 5.4×10^{-4} yr^{-1} 수준으로 제시된다[15]. 이에 따라 장

Table 1. Comparison of Disposal Stability Assessment Code Characteristics [9,10,11,12,13]

Code Name	Key Characteristics
AMBER	Visualization of temporal changes in radionuclide migration
GENII	Assessment of radionuclide environmental behavior and human radiation exposure
GWSCREEN	Simplified assessment of groundwater transport pathways
MASCOT-K	Integrated analysis code developed specifically for the Korean disposal environment
GoldSim	System analysis based on probabilistic and object-oriented modeling

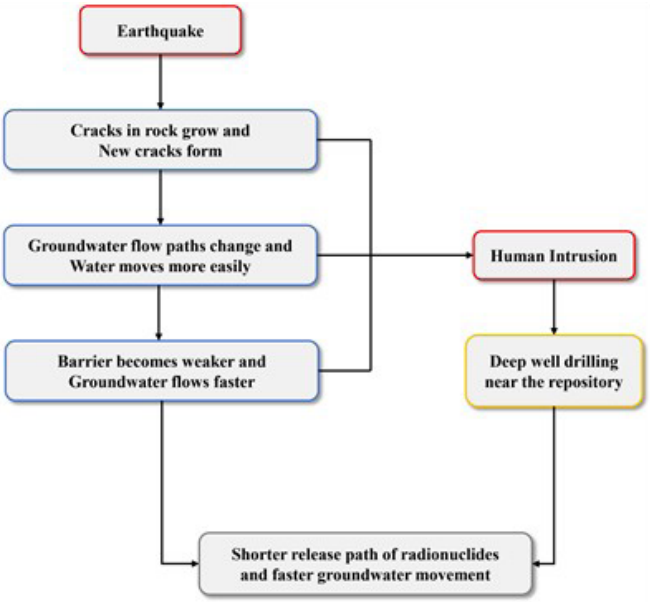

Fig. 1. Complex Scenario Diagram

기 처분기간을 고려할 때 지진 발생 가능성을 배제할 수 없으며 주요 외부 사건으로 평가된다. 지진은 암반 내 균열의 확장과 신규 파쇄대 형성을 유발할 수 있으며 이는 지하수 유동 경로를 변화시키고 수리전도도를 증가시키는 등의 천연방벽 기능 약화의 요인으로 작용된다.

인간 침입의 경우 미래 세대가 처분장의 존재를 인지하지 못한 상태에서 처분장과 그 인근에서 의도치 않은 인간의 침입이 발생하는 상황을 의미한다. 국내 우물 개발 통계를 보면 연간 약 0.8 well km^{-2} 수준으로 나타나며 이는 처분장 영향권인 1.5 km^2를 기준으로 할 때 처분장의 제도적 관리 종료 이후 연간 1 건의 우물 시추 발생 가능성을 의미한다. 시추 시 우물의 심도는 대부분 수십~수백미터 범위에 분포하지만, 일부 우물은 200 m를 넘어 심부 대수층까지 시추되는 사례가 있다[16]. 따라서 처분장 심도가 약 500 m임을 고려할 때 장기적 관점에서 심부 우물이 처분장 상부 암반 또는 오염된 지하수대를 관통할 가능성이 있다. 특히 장기적 처분기간 동안 누적되는 인간 활동의 불확실성을 고려한다면 심부 우물 시추 발생 가능성은 충분히 보수적으로 평가해야 한다. 따라서 본 연구에서는 지진에 의해 형성된 지하수 환경 변화가 인간 침입 시나리오에 미치는 영향을 평가하기 위해 복합시나리오를 도출하였다. 이는 단일 시나리오 대비 더 높은 위험도를 나타낸다. 결과적으로 장기 안전성의 보수적 평가를 위해 Fig. 1과 같이 지진–지하수 변화–인간 침입의 복합시나리오를 최종 평가 시나리오로 선정하였다.

2.4. 입력인자 구축

2.4.1. 핵종 선정 및 물성 구축

장기 처분안전성 평가에서는 반감기가 길고 지하수 환경에서 이동성이 큰 핵종이 장기 피폭량을 지배한다. IAEA 및 OECD/NEA에서 제시한 장기 영향 핵종 자료에 따르면 ^{129}I, ^{99}Tc, ^{79}Se와 같은 장반감기 비흡착성 핵종은 낮은 K_d (Distribution Coefficient; 분배계수) 값과 높은 지하수 이동성으로 인해 처분시스템을 통과하여 원계 및 생태계 확산 가능성이 높은 핵종으로 평가된다[17]. 이에 본 연구에서는 장기 이동성, 비흡착성, 확산 및 이류 지배성을 고려하여 ^{129}I, ^{99}Tc, ^{79}Se, ^{93}Zr, ^{137}Cs, ^{237}Np, ^{239}Pu, ^{241}Am을 주요 평가 핵종으로 선정하였다. 각 핵종의 세부 물성값은 Table 2에 제시하였다.

처분시스템을 구성하는 공학적 방벽은 캐니스터, 벤토나이트 완충재, 뒷채움재로 이루어진다. 캐니스터는 부식 메커니즘과 장기 모델링 결과를 바탕으로 장기 부식률을 10^{-5} mm yr^{-1}로 설정하였고[19] 해당 부식률을 고려하여 파손 시점은 약 10^5~10^6년 사이에서 발생하는 것으로 가정하였다. 또한 심층 암반의 수리전도도는 국내 심부 시추공 수리시험 및 한국원자력연구원 지하연구시설 (KAERI Underground Research Tunnel, KURT) 현장 시험 결과를 참고하여 10^{-9} m s^{-1}를 적용하였다[20]. 심부 결정질 암반의 유효 공극률은 0.2로 설정하였으며 지하수 유동 속도는 10^{-8} m s^{-1}를 적용하였다[21].

Table 2. Physicochemical properties of selected radionuclides [18]

Radionuclide	Half-life (y)	Waste K_d ($m^3 kg^{-1}$)	Bentonite K_d ($m^3 kg^{-1}$)	Effective Diffusion Coefficient ($m^2 s^{-1}$)
^{129}I	1.6×10^{7}	3×10^{-1}	0.0	2.0×10^{-11}
^{99}Tc	2.1×10^{5}	5×10^{-3}	5.0×10^{-3}	1.0×10^{-11}
^{79}Se	3.3×10^{5}	1×10^{-2}	1.0×10^{-2}	5.0×10^{-12}
^{93}Zr	1.6×10^{6}	1×10^{0}	5.0×10^{-1}	1.0×10^{-12}
^{137}Cs	30.1	1×10^{0}	1.0	1.0×10^{-11}
^{237}Np	2.1×10^{6}	1×10^{-1}	1.0	1.0×10^{-12}
^{239}Pu	2.4×10^{4}	5×10^{0}	5.0	1.0×10^{-12}
^{241}Am	4.32×10^{2}	2×10^{0}	5.0	5.0×10^{-13}

2.4.2. 지진 및 인간침입 시나리오 인자 구축

지진은 국내자료와 확률론적 지진 위험도 평가 결과를 기반으로 특히 심층처분장의 장기 안전성 확보를 위한 보수적인 상위 경계조건으로서 규모 M 6.0 이상의 지진은 약 10^{-3} yr^{-1} 수준의 발생확률을 적용하였으며[22] 처분공 주변 암반의 전단 거동 특성에 변화를 줄 수 있는 최대 전단 속도를 발생시킬 수 있어 본 연구에서는 이를 대표 지진 규모로 선정하였다. 지진은 미래 지질학적 변화의 불확실성을 충분히 포괄하여 보수적인 환경에서도 처분장의 장기 안전성을 검증하기 위해 10^4년부터 10^5년 사이에 총 10회 발생하는 것으로 설정하였다. 지진 발생 시 균열대 폭은 1 m 확대되고 지하수 유동 속도는 50% 증가하는 것으로 모델링하였다[23].

인간 침입 시나리오는 우물 시추를 가정하여 구성하였다. 우물 깊이는 500 m로 설정하였으며 이는 심층 처분시설의 일반적인 건설 심도(약 400~500 m)를 반영한 것이다. 시추 위치는 처분공과 수리적으로 연결될 수 있도록 단열대 및 균열대를 따라 형성되는 것으로 가정하였다. 우물 시추 사건의 발생확률은 국내 규제 기준을 참고하여 10^{-6} yr^{-1}로 설정하였다[24].

모델링 기간은 제도적 관리 기간 이후를 포함한 총 1,000,000년으로 설정하였다. 초기 수천년 구간에서는 캐니스터 열화 및 지질 변화가 크게 나타나므로 짧은 시간 간격을 적용하였으며 이후 장기 구간에서는 시간 간격을 점진적으로 증가시켰다.

3. 평가 결과

핵종별 유출량은 Fig. 2와 같이 피크 이후 장기적으로 감소하거나 안정화되는 경향을 나타냈다. ^{239}Pu는 모든 핵종 중 가장 큰 초기 유출량을 나타냈으며 최대값은 약 1.47×10^7 g 수준으로 확인되었다. 그러나 반감기에 따른 붕괴로 인해 시간이 경과함에 따라 급격히 감소하여 약 10^5년 이후에는 10^6 g 이하로 감소하였고 10^6년 시점에는 1.5×10^{-5} g 수준으로 수렴하였다. 장기 이동성이 큰 ^{129}I는 초기 대비 약 98.4%가 잔존하여 장기적으로 안정적인 거동을 나타냈다. ^{93}Zr과 ^{237}Np 역시 장기적으로 비교적 안정적인 잔존

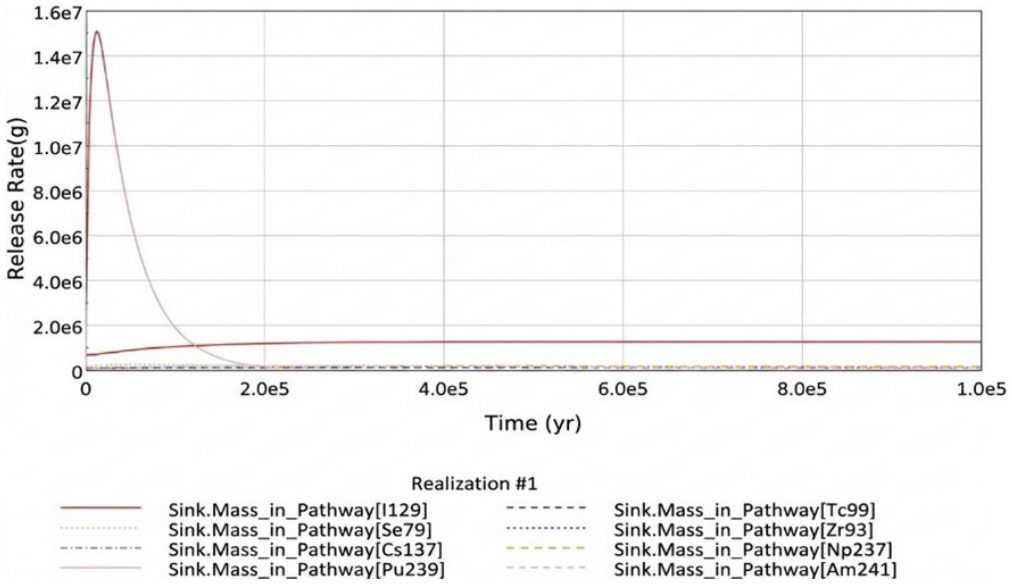

Fig. 2. Radionuclide release assessment results

Table 3. Summary of radionuclide-specific release trends

Radionuclide	Peak Release Rate (g yr^{-1})	Dose at 10^6 yr (g yr^{-1})	Remaining Fraction (%)
^{129}I	1.25×10^6	1.23×10^6	98.40
^{99}Tc	1.19×10^5	7.36×10^3	6.20
^{79}Se	1.32×10^5	2.45×10^4	18.60
^{93}Zr	1.71×10^5	1.30×10^5	76.00
^{137}Cs	1.32×10^{-3}	0	0
^{237}Np	1.77×10^5	1.44×10^5	81.40
^{239}Pu	1.47×10^7	1.50×10^{-5}	≈0
^{241}Am	1.75×10^4	0	0

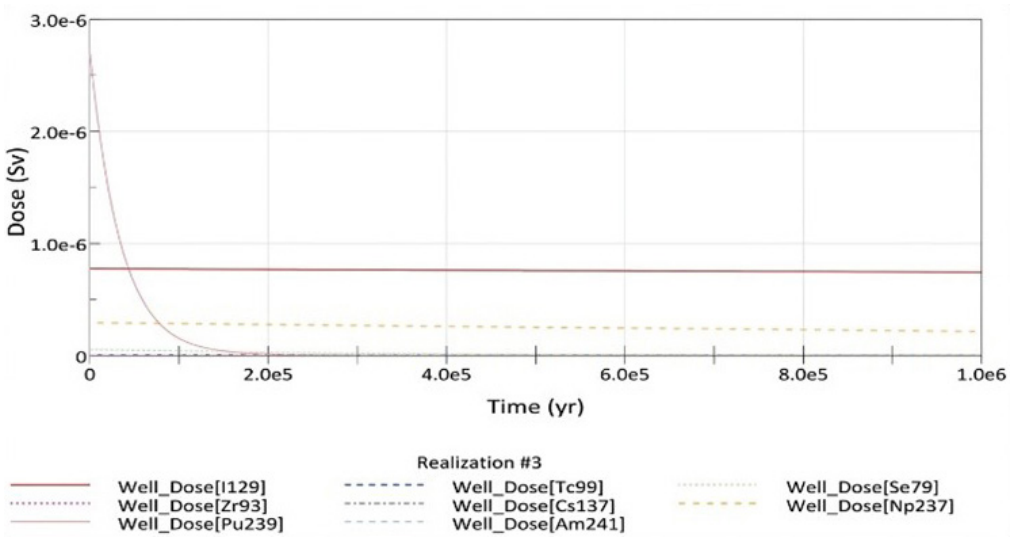

Fig. 3. Dose assessment results for the well pathway

Table 4. Summary of radionuclide-specific doses via the well pathway

Radionuclide	Peak Dose Rate (Sv yr^{-1})	Dose at 10^6 yr (Sv yr^{-1})	Fraction of Regulatory Limit (%)
^{129}I	7.70×10^{-7}	7.38×10^{-7}	0.77
^{99}Tc	3.88×10^{-10}	1.43×10^{-11}	0.00
^{79}Se	4.82×10^{-8}	5.91×10^{-9}	0.05
^{93}Zr	2.80×10^{-10}	1.82×10^{-10}	0.00
^{137}Cs	0	0	0
^{237}Np	2.93×10^{-7}	2.10×10^{-7}	0.29
^{239}Pu	2.70×10^{-6}	0	2.70
^{241}Am	0	0	0

경향을 보였으며 ^{79}Se와 ^{99}Tc는 상대적으로 낮은 이동성으로 인해 피크 이후 완만한 감소 경향을 나타냈다. 한편 ^{137}Cs과 ^{241}Am은 짧은 반감기 또는 낮은 초기 유출량으로 인해 장기적으로 0 g에 수렴하는 경향을 보였다. 핵종별 유출량 변화는 Table 3에 요약하여 제시하였다.

우물 경로에 대한 피폭 선량 평가 결과, Fig. 3과 같이 모든 핵종의 선량은 규제기준(10^{-4} Sv yr^{-1})을 충족하는 것을 확인하였다. ^{239}Pu가 초기 최대 기여를 나타냈으며 최대 선량은 규제기준의 약 2.7% 수준이었다. 그러나 방사성 붕괴에 따라 급격히 감소하여 10^6년 시점에는 선량 기여도가 0에 수렴하였다. ^{129}I는 평가 기간 동안 선량 변화가 거의 없었으며 초기부터 10^6년 시점까지 약 0.77% 수준을 유지하였다. 다른 핵종들 역시 전반적으로 낮은 선량 기여를 나타냈으며 ^{137}Cs과 ^{241}Am은 짧은 반감기와 낮은 이동성으로 인해 장기적으로 0에 수렴하였다. 결과적으로 모든 핵종의 피폭선량은 규제기준 대비 충분히 낮은 수준으로 장기 처분안전성이 확보됨을 확인하였다. 선량평가 결과는 Table 4에 요약하여 제시하였다.

4. 고 찰

본 연구에서는 FEPs 기반 분석을 통해 지진과 인간침입이 결합된 복합 시나리오를 도출하고 이를 바탕으로 고준위 방사성폐기물 처분장의 장기 안전성을 평가하였다. 핵종 거동 분석 결과, 장반감기 핵종(^{129}I, ^{93}Zr, ^{237}Np등)은 장기적으로 안정적인 잔존 특성을 보였지만 ^{239}Pu와 같은 핵종은 초기 유출량이 크게 나타났으나 방사성 붕괴에 의해 장기적으로는 급격히 감소하는 경향을 나타냈다. 이러한 결과는 핵종별 물리·화학적 특성이 장기 거동에 중요한 영향을 미침을 시사한다.

피폭 선량 평가 결과, 복합 시나리오를 고려한 경우에도 모든 핵종의 선량은 규제기준을 충분히 만족하는 수준으로 나타났다. 이는 보수적인 시나리오 설정에도 불구하고 처분시스템이 장기적으로 안정적인 방호 성능을 유지할 수 있음을 의미한다. 그러나 본 연구에서 적용한 시나리오 및 입력 인자는 특정 가정에 기반하고 있으며 실제 지질 환경의 복잡성과 인간 활동의 불확실성을 완전히 반영하지는 못한다. 특히 지진에 따른 수리적 특성 변화와

인간 침입 발생 확률은 다양한 변동성을 가지므로 이에 대한 추가적인 확률론적 접근이 필요하다. 따라서 향후 연구에서는 다양한 시나리오와 불확실성 분석을 포함한 보다 정교한 평가가 수행되어야 하며 이를 통해 처분장의 장기 안전성에 대한 신뢰도를 더욱 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 FEPs 기반 분석을 활용하여 고준위 방사성폐기물 처분 시 발생 가능한 지진 및 인간침입 복합 시나리오를 도출하고 GoldSim을 활용한 장기 처분안전성평가를 수행하였다. 분석 결과 모든 핵종의 선량은 규제 기준을 충분히 만족하는 수준으로 나타났으며 장기적으로 처분시스템의 방사선적 안전성이 확보됨을 확인하였다. 따라서 본 연구는 복합 시나리오 기반 장기 안전성평가의 필요성을 제시하며 향후 처분장안전성평가 부분에 있어서 본 연구에서 도출된 시나리오뿐만 아니라 다양한 비정상 시나리오를 반영한 복합시나리오를 고도화 해야하는 필요성이 있어 평가를 진행하는 연구로 확장될 필요가 있다.

사 사

본 연구는 한국에너지기술평가원 재원으로, 원전 안전운영을 위한 핵심소재, 부품, 장비 국산화 기술개발사업 '사용후핵연료 연소도 측정 설비 기술개발(과제번호: RS-2022-KP002854)'에 의해 수행되었으며, 그 지원에 감사드립니다.

본 논문은 한국원자력환경공단이 주관하는 고준위방폐물 관리 전문인력 양성사업의 지원을 받아 수행되었음.

참고문헌

1. International Atomic Energy Agency. 2023. Nuclear Power Reactors in the World. *Reference Data Series No. 2*, 2023 Ed.: 1-82. https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/RDS-2-43_web.pdf.
2. Ministry of Trade, Industry and Energy. 2024. Saneop-tong-sang-jayubu, Saeroun Wonjeon Sidae-reul Yeolda: Sinhanul 1, 2-hogu Jungong Mit 3, 4-hogu Chak-gong (Ministry of Trade, Industry and Energy, Opening a New Era of Nuclear Power: Completion of Shin-Hanul Units 1 & 2 and Groundbreaking for Units 3&4). *Korea Policy Briefing*, 1-5. https://www.korea.kr/archive/expDoc View.do?docId=41504.
3. Lee YM and Hwang YS. 2008. Current R&D Status of Research on High-Level Radioactive Waste Disposal in Advanced Countries. *Korea Atomic Energy Research Institute*, KAERI/AR-821/2008.
4. International Atomic Energy Agency. 2012. The Safety Case and Safety Assessment for the Disposal of Radioactive Waste. *IAEA Safety Standards Series No. SSG-23*, 1-120. https://www.iaea.org/publications/8790/the-safety-case-and-safety-assessment-for-the-disposal-of-radioactive-waste.
5. International Atomic Energy Agency. 2011. Disposal of Radioactive Waste. *IAEA Safety Standards Series No. SSR-5*, 1-62. https://www.iaea.org/publications/8522/disposal-of-radioactive-waste.
6. International Atomic Energy Agency. 2012. Storage of Spent Nuclear Fuel. *IAEA Safety Standards Series No. SSG-15*, 1-120. https://www.iaea.org/publications/8802/storage-of-spent-nuclear-fuel.
7. Kim J, Park S, Kim S and Yun J. 2024. Review of Domestic and International Regulatory Frameworks for the Near-surface Disposal of Very Low Level Waste. *Journal of Nuclear Fuel Cycle and Waste Technology* **22**(4):503-518. https://doi.org/10.7733/jnfcwt.2024.22.4.503.
8. Korea Institute of Energy Technology Evaluation and Planning. 2024. Planning Report on New Projects for Energy Technology Development in 2024: Development of Long-term Environment Change Prediction Technology for High-level Radioactive Waste Disposal Sites. *KETEP Research Report*, 1-46. https://grant-documents.thevc.kr/209942_8.pdf.
9. Lee YM, Hwang YS and Kang CH. 2006. A User's Guide for ACBIO and AMBER. KAERI/TR-3127/2006. 68pp. Korea Atomic Energy Research Institute, Daejeon.
10. Teodori F and Sumini M. 2014. GENII-LIN project: A multipurpose health physics code to estimate radiation dose and risk from environment contamination. *Radiation Physics and Chemistry* 104: 15-22. https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2014.03.005.
11. Rood AS. 1998. GWSCREEN: A Semi-Analytical Model for Assessment of the Groundwater Pathway from Surface or Buried Contamination Theory and User's Manual Version 2.5. 92pp. Idaho Falls, ID. Idaho National Engineering and Environmental Laboratory.
12. Kang CH and Hwang YS. 2006. Development of a Harmonized Outflow Module for the Comprehensive Safety Assessment Code (MASCOT-K) of Disposal. *Korea Atomic Energy Research Institute*, KAERI/TR-3138/2006.
13. Lee YM and Hwang YS. 2009. Evaluation and Verification through GOLDSIM Ecosystem Modeling. *Korea Atomic Energy Research Institute*, KAERI/TR-3987/2009.
14. Song JS and Park HM. 2007. FEP and External Scenario Evaluation. *Korea Atomic Energy Research Institute*, KAERI/CM-1286/2007.
15. Kim JW, Cho DG, Ko NY and Jung JT. 2015. Evaluation of Domestic Earthquake Characteristics for Safety Assessment of Deep Geological Disposal Systems. *J. Nucl. Fuel Cycle Waste Technol.*, **13**(2):87-98. https://doi.org/10.7733/jnwt.2015.13.2.87.
16. Joo HJ. 2018. A Study on the Risk Assessment of Future Human Intrusion into Deep Geological Repository of Radioactive Waste. *Ph.D. Thesis, Seoul National University*.
17. Volckaert G, Mallants D, Bush R and Lambers L. 1997. Long-term environmental impact of underground disposal of P&T waste. *Proc. Session VI, EC Project FI4I-CT95-0006*, 461-471.
18. Svensk Kärnbränslehantering AB. 2010. Spent Nuclear Fuel for Disposal in the KBS-3 Repository. *SKB*, TR-10-13.
19. Choi HJ, Lee J and Cho D. 2020. Assessment of Corrosion Lifetime of a Copper Disposal Canister Based on the Finnish Posiva Methodology. *J. Nucl. Fuel Cycle Waste Technol.*, **18**(S):51-62. https://doi.org/10.7733/jnwt.2020.18.S.51.
20. Lee HB, Park C, Cheon DS, Choi JH and Park ES. 2024. Study on Hydrogeological Characteristics of Deep Rock Aquifers by Domestic Rock Type. *Tunn. Undergr. Space*, **34**(4):374-392. https://doi.org/10.7474/TUS.2024.34.4.374.
21. So S, Jeong J, Park J, Lee H, Lee S, Kim S, Mbarki S and Jeong J. 2024. Evaluation of Hydrogeological Characteristic of Natural Barrier in Korea for Establishing Safety Guidelines of Deep Geological High-Level Radioactive Waste Disposal Site. *Econ. Environ. Geol.*,

57(4):397-416. https://doi.org/10.9719/EEG.2024.57.4.397.
22. Park S, Hong TK and Rah G. 2021. Seismic Hazard Assessment for the Korean Peninsula. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **111**(6):3012-3031. https://doi.org/10.1785/0120210081.
23. Sun X, Xiang Y and Shi Z. 2019. Changes in Permeability Caused by Two Consecutive Earthquakes—Insights From the Responses of a Well-Aquifer System to Seismic Waves. *Geophys. Res. Lett.*, **46**(17):10367-10374. https://doi.org/10.1029/2019GL083753.
24. Shin H. 2021. Additional Actinide Separation to Minimize Human Intrusion Radiological Risk of Pyroprocessing Waste. *Master's Thesis, Ulsan National Institute of Science and Technology (UNIST)*.