JOURNAL OF RADIATION INDUSTRY

Original article

17(1) : 33-44 (2023)
https://doi.org/10.23042/radin.2023.17.1.33

KBS-3 방식 고준위방폐물 심층처분장 FEP 분석을 통한 국내 사용후핵연료 심층처분시설 방사선학적 안전성 평가용 지권영역 주요 프로세스 항목 및 상대적 중요도 도출

김석훈[1,*], 이동현[1], 박동극[2]

[1](주)미래와도전, [2]한국방사성폐기물학회

Draft List and Relative Importance of Principal Processes in the Geosphere to be Considered for the Radiological Safety Assessment of the Domestic Geological Disposal Facility through Analyzing FEPs for KBS-3 Type Disposal Repository of High-level Radioactive Waste (HLW)

Sukhoon Kim[1,*], Donghyun Lee[1] and Dong-Keuk Park[2]

[1]FNC Technology Co., Ltd., 32F, 13, Heungdeok 1-ro, Giheung-gu, Yongin-si, Gyeonggi-do 16954, Republic of Korea
[2]Korean Radioactive Waste Society, 111 Daedeok-daero 989beon-gil, Yuseong-gu, Daejeon 34057, Republic of Korea

Abstract The deep geological repository of high-level radioactive waste shall be designed to meet the safety objective set in the form of radiation dose or corresponding risk to protect human and the environment from radiation exposure. Engineering feasibility and conformity with the safety objective of the facility conceptual design can be demonstrated by comparing the assessment result using the computational model for scenario(s) describing the radionuclide release and transport from repository to biosphere system. In this study, as the preliminary study for developing the high-level radioactive waste disposal facility in Korea, we reviewed and analyzed the entire list of FEPs and how to handle each FEP from a general point of view, which are selected for the geosphere region in the radiological safety assessment performed for the license application of the KBS-3 type deep geological repository in Finland and Sweden. In Finland, five FEPs (i.e., stress redistribution, creep, stress redistribution, erosion and sedimentation in fractures, methane hydrate formation, and salt exclusion) were excluded or ignored in the radionuclide release and transport assessment. And, in Sweden, six FEPs (i.e., creep, surface weathering and erosion, erosion/sedimentation in fractures, methane hydrate formation, radiation effects (rock and grout), and earth current) were not considered for all time frames and earthquake out of a total of 25 FEPs for the geosphere. Based on these results, an FEP list (draft) for the geosphere was derived, and the relative importance of each item was evaluated for conducting the radiological safety assessment of the domestic deep geological disposal facility. Since most of information on the disposal facility in Korea has not been determined as of now, it is judged that all FEP items presented in Table 3 should be considered for the radiological safety assessment, and the relative importance derived from this study can be used in determining whether to apply each item in the future.

Key words: Radiological safety assessment, FEP, Geosphere, KBS-3 type disposal, Deep geological repository

http://www.ksri.kr/

Copyright © 2023 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 12 January 2023 **Revised** 23 February 2023 **Accepted** 8 March 2023

1. 서 론

우리나라에서 고준위방사성폐기물(이하 '고준위방폐물')은 관련법령[1,2]에 의거하여 '반감기 20년 이상인 알파선을 방출하는 핵종으로 방사능농도가 4,000 Bq g^{-1} 이상이며, 열 발생률이 2 kW m^{-3} 이상인 것'으로 정의되며, 대부분의 경우 '사용후핵연료'와 동일한 의미로 사용되고 있다. 현재까지 국내에서 발생된 사용후핵연료는 발생지인 원전 내 임시저장시설에서 저장·관리되고 있다. 이러한 임시저장시설은 한빛 본부를 시작으로 순차적으로 포화될 것으로 예상되며, 향후 원전 해체의 본격적 추진으로 인한 사용후핵연료 반출 및 안전관리 전략 수립이 요구됨에 따라 이에 대비한 근본적인 대책을 조속히 수립해야 한다.

국내의 경우 2021년 산업통상자원부에서 수립·발표한 '제2차 고준위 방사성폐기물 관리 기본계획(안)[3]'에 따르면 부지선정 절차 착수 이후 37년 내 고준위방폐물 영구처분시설 확보를 추진하며, 그 방식으로는 핀란드식 심층처분에 활용되고 있는 다중방벽시스템을 우선 고려하되 기술적 대안(심부시추공 등)도 병행 고려하여 선택하는 방안으로 추진될 예정이다.

사용후핵연료 관리시설은 일반적으로 취급·운반·저장·처분을 위해 필요한 단독 또는 다수의 지상·지하구조물로 구성되며, 대부분의 국외 기술선도국에서는 이미 부지선정 이전 관리시설 확보를 위한 개념설계를 완료한 후 동 기술을 기반으로 기본설계 단계로 진입하거나 지하연구시설(Underground Research Laboratory, 'URL')을 활용한 자국 심부조건에서의 실증연구를 통해 해당 시설의 건설·운영을 위한 인허가를 진행 중에 있다. 그러나, 현재까지 국내에서는 사용후핵연료 관리시설에 대한 개념설계 및 전주기 관리단계의 연계성을 검토하기 위한 연구가 수행된 바 없다. 이에 따라 사용후핵연료 관리단계별 필요 핵심기술의 적기 확보를 위한 사전 준비의 일환으로 한국원자력환경공단 주도로 기초·기반기술 개발이 추진되고 있다.

사용후핵연료 관리시설, 특히 심층처분시설의 경우 방사선피폭으로부터 인간 및 환경을 보호하기 위해 방사선량 또는 이에 상응하는 위험도 형태로 설정되는 안전목표치를 충족하도록 설계되어야 하며, 이에 따라 처분시설 폐쇄 후 정상적 자연현상 또는 인간침입 등으로 초래될 수 있는 방사선 영향은 대표인에 대한 총 위험도 또는 연간 선량한도 이하로 제한되어야 한다[4]. 관리시설 개념설계의 공학적 타당성 및 안전목표치에 대한 부합성은 일반적으로 처분장으로부터 최종 생태계까지 방사성핵종의 거동을 기술하는 시나리오를 대상으로 전산모델을 활용하여 평가한 결과를 참조기준 또는 제한치와 비교함으로써 입증할 수 있다.

앞서 언급한 바와 같이 향후 국내 영구처분시설의 처분방식으로는 KBS-3 개념에 따라 설계된 핀란드식 심층처분과 다중방벽시스템이 우선적으로 고려되고 있다[3]. 이에 본 논문에서는 우선적으로 KBS-3 처분 개념을 개괄적으로 정리하였으며, 전 세계 원전 운영국 중 직접처분 정책을 채택하고 있는 국가 중 해당 개념의 도입을 추진하고 있는 핀란드 및 스웨덴의 고준위방폐물 처분정책·계획, 안전성 평가사례 및 이에 적용된 단위현상, 사건·공정(Features, Events, and Processes, 'FEPs') 목록 선별과정 등을 검토 및 분석하였다. 또한, 이를 토대로 국내 사용후핵연료 관리시설 설계기술 개발의 일환으로 수행되어야 하는 방사선학적 안전성 평가에 적용하기 위한 지권(Geosphere) 영역의 주요 프로세스 항목 및 항목별 상대적 중요도를 도출하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. KBS-3 처분개념

'심층처분'이란 방사성폐기물을 사람의 접근과 방사성핵종의 생태계 유입이 제한될 수 있도록 지하 깊은 곳의 안정한 지층구조에 처분하여 인간 생활권으로부터 영구히 격리시키는 것[4]으로 고준위방폐물의 경우 심지층 암반 내 처분터널(Deposition Tunnel)에 대구경 처분공(Deposition Hole)을 굴착한 후 처분공 내에 처분용기를 정치하는 개념이 가장 널리 채택되고 있다. 이러한 개념 중 스웨덴의 처분 시행주체인 SKB (Svensk Kärnbränslehantering Aktiebolag)에서 사용후핵연료 영구처분을 위해 개발한 다중방벽시스템 기반의 KBS-3 방식(Fig. 1)[5]이 가장 대표적이다.

해당 방식에서는 고준위방폐물을 처분용기 내에 장입하여 처분공 내에 정치시킨 후 처분공 벽면과 처분용기 사이의 환형 공간을 완충재로 충전하며, 처분터널 내에 굴착된 모든 처분공이 처분용기로 채워지면 처분터널을 뒤채움한 후 터널 입구를 콘크리트 플러그로 막아 밀폐시킨

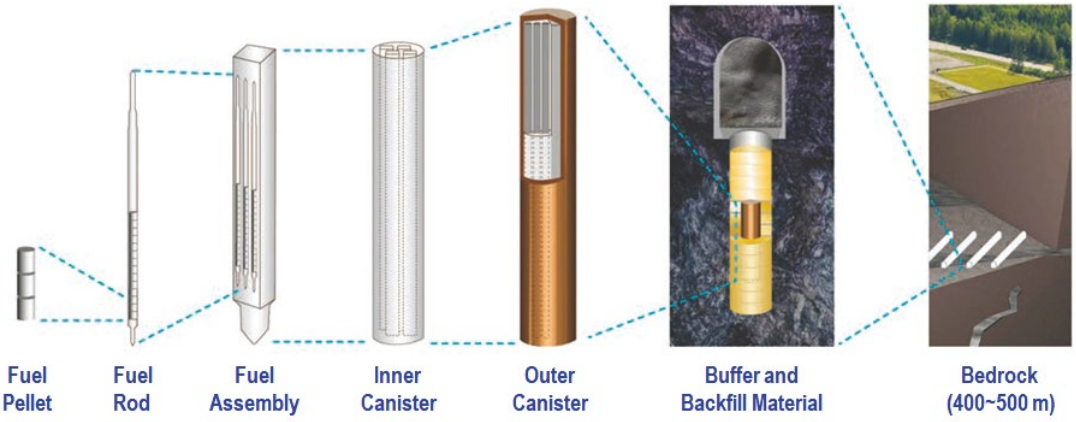

Fig. 1. Schematic diagram for multiple-barrier system incorporated in the KBS-3 type disposal concept.

다. 동 처분개념의 주요 특징[6]은 다음과 같으며, 처분터널 굴착 및 처분용기 정치방향에 따라 수직공처분(KBS-3V) 및 수평공처분(KBS-3H) 방식으로 세분된다.

- 지질학적 안정성이 입증된 모암 선정: 지질학적으로 안정성이 입증된 결정질 암반을 후보 매질로 영구 처분장 건설
- 심지층 처분 환경: 사용후핵연료를 인간 및 환경으로부터 안전하게 격리하여 커다란 위해를 야기하지 않고, 장기적인 암반 풍화로 인한 영향과 공학적 안전 여유도를 충분히 고려하여 심도 결정
- 다중 방벽 도입: 사용후핵연료를 다중 방벽에 거치하여 충분한 안전여유도 보장. 기본적으로 사용후핵연료는 구리 처분용기에 격납되며, 처분용기는 벤토나이트 층에 둘러싸여 장기간 안전 성능 유지. 또한, 공학적 방벽과 천연 방벽 구조가 유기적으로 결합하여 안전성을 더욱 향상. 일부 방벽의 기능이 예기치 않게 상실되는 경우에도 잔여 방벽의 역할로 인해 안전성이 충분히 보장.
- 장기간 안전성 확보: 최소 10만년 이상의 장기간에 걸쳐 안전성이 충분히 확보되어야 하며, 이를 위해 사용후핵연료 유출을 최대한 억제할 수 있는 심부 지하수의 환원환경이 장기간 유지. 또한, 예기치 못한 사건이 발생하는 경우에도 그 안전성은 충분히 보장

2.2. 고준위방폐물 처분정책 및 계획

2.2.1. 핀란드

핀란드에서 처분 대상이 되는 고준위방폐물은 Olkiluoto 및 Lovisa 원자력발전소에서 발생한 사용후핵연료이다. 원자로에서 인출된 사용후핵연료는 격납건물 임시저장조에서 수년간 냉각한 후 발전소 부지 내에 별도 설치된 습식저장시설로 이송하여 중간저장하고 있으며, 향후 재처리하지 않고 캐니스터에 밀봉하여 지하 심부 결정질암층에 지층처분할 방침이다.

핀란드의 고준위방폐물 처분 시행주체인 Posiva사에서는 스웨덴에서 개발한 'KBS-3'와 거의 동일한 처분개념을 검토하고 있다. 즉, 사용후핵연료를 이중구조의 캐니스터(내측 주철용기, 외측 구리용기), 완충재(벤토나이트), 뒤채움재, 심층 등으로 구성된 다중 방벽시스템에 의해 장기간에 걸쳐 격리할 계획이다. 심층처분 방식으로는 수직공처분을 우선적으로 고려하고 있으나, 스웨덴의 SKB와 공동으로 수평터널 처분에 대한 연구개발도 추진하고 있다.

Posiva는 2001년에 Olkiluoto 지역을 최종 처분부지로 선정한 후 2012년에 '캐니스터 밀봉시설' 및 '사용후핵연료 심층처분장'에 대한 건설 인허가를 신청하여 2015년에 핀란드 정부로부터 건설허가를 획득하였다. 이에 따라 Posiva는 2016년에 처분장 건설에 착수하여 2021년에는 운영허가를 신청하였으며, 2023년 시범 운영을 거쳐 2025년부터 본격 운영을 목표로 하고 있다. 동 처분장에는 최대 6,500 MTU (Metric Ton Uranium) 상당의 사용후핵연료를 지하 약 400~450 m 깊이의 결정질암 내에 처분할 계획이다.

2.2.2. 스웨덴

스웨덴에서 처분 대상이 되는 고준위방폐물은 Barsebäck, Forsmark, Oskarshamn 및 Ringhals 원자력발전소에서 발생한 사용후핵연료이다. 노심에서 인출된 사용후핵

연료는 각 발전소에서 약 1년간 냉각한 후 중앙집중식 중간저장시설(Centralt Mellanlager för Använt Kärnbränsle, 'CLAB')로 운송하여 저장하고 있으며, 향후 재처리하지 않고 캐니스터에 밀봉하여 지하 심부 결정질암층에 지층처분할 방침이다.

스웨덴의 고준위방폐물 처분 시행주체인 SKB에서는 사용후핵연료를 이중구조의 캐니스터(내측 주철용기, 외측 구리용기)에 장입·밀봉한 후 그 주변을 완충재(벤토나이트)로 충진하여 역학적 또는 화학적으로 안정한 암반 내에 정치하는 KBS-3 개념을 검토하고 있다. 해당 처분개념은 사용후핵연료를 복수의 천연 및 공학적방벽(처분용기, 완충재 및 뒤채움재)을 조합한 다중 방벽시스템에 의하여 장기간에 걸쳐 격리시키는 방법이며, 심층처분 방식으로 수직공 처분(KBS-3V)을 우선적으로 고려하고 있으나 앞서 기술한 바와 같이 핀란드의 처분 시행주체인 Posiva사와 공동으로 수평터널 처분(KBS-3H)에 대한 연구도 추가적으로 수행하고 있다.

SKB가 KBS-3 개념에 따라 심층처분을 이행하기 위해서는 사용후핵연료를 캐니스터에 밀봉하기 위한 '캐니스터 밀봉시설' 및 사용후핵연료가 장입된 캐니스터를 처분하기 위한 '사용후핵연료 심층처분장' 등 2개의 시설이 추가적으로 필요하다. 전자의 시설은 현재 운영되고 있는 중앙집중식 중간저장시설(CLAB) 부지에 신규로 건설하여 CLINK 시설로 통합할 계획이다. 후자의 시설에 대해 SKB는 2009년에 Forsmark 지역을 건설 예정지로 선정한 후 2011년에 처분장 입지·건설 인허가를 신청하였으며, 2022년 1월 스웨덴 정부로부터 건설허가를 획득하였다. 동 처분장에는 약 6,000개의 캐니스터를 지하 약 500 m 깊이의 결정질암 내에 처분할 계획이다.

2.3. 고준위방폐물 심층처분시설 방사선학적 안전성 평가사례

앞서 기술한 바와 같이, 사용후핵연료 관리시설 특히 심층처분시설의 경우 폐쇄 후 정상적 자연현상 또는 인간침입 등으로 초래될 수 있는 방사선 영향은 안전목표치를 충족하도록 설계되어야 하며, 일반적으로 처분장으로부터 최종 생태계까지 방사성핵종 거동을 기술하는 시나리오를 대상으로 전산모델을 활용하여 평가한 결과를 참조기준 또는 제한치와 비교하여 안전목표의 부합성을 입증할 수 있다.

심층처분된 고준위방폐물에 포함된 방사성핵종은 처분장 폐쇄 후 시간이 경과함에 따라 단위현상(Feature), 사건(Event) 및 공정(Process) 등에 의해 처분장으로부터 유출되어 주변 생태계에 영향을 미칠 수 있다. 단위현상(Feature)은 폐쇄 후 심층처분장의 성능에 영향을 미칠 수 있는 물체, 구조 및 조건, 사건(Event)은 독립적 또는 복합적으로 작용하여 처분장 방벽의 기능을 비교적 단기간에 저하시키거나 상실시키는 현상, 공정(Process)은 폐쇄 후 방벽의 성능이 점진적으로 저하되어 최종적으로 방사성핵종의 유출을 초래하는 현상을 의미한다. 심층처분장 외부로 방사성핵종이 유출되도록 하는 이러한 인위적 또는 자연적 요인을 포괄하여 FEPs (Features, Events, and Processes)라 하며, 해당 시설에서 발생 가능성이 높은 FEP 목록을 선별·조합하여 개발된 시나리오를 대상으로 방사선학적 안전성 평가를 수행해야 한다.

이에 따라, 핀란드 및 스웨덴의 고준위방폐물 심층처분시설 건설허가 신청과정에서 수행된 방사선학적 안전성 평가사례에 적용된 안전목표 및 허용기준, FEP 목록 선정과정을 우선적으로 검토하였다.

2.3.1. 핀란드

2.3.1.1. 안전목표 및 허용기준

핀란드의 원자력 및 방사선 안전 관련 규제기관(STUK)에서는 5개의 주제로 구분된 총 47개의 규제지침(YVL Guides)을 마련하고 있으며, 이 중 YVL D.5 [7]에서 핵폐기물의 처분에 관한 지침을 명시하고 있다. 동 지침에서 처분 안전성 관련 요건 중 방사선방호에 대한 기준은 2가지 시간 범위(즉, 시설 운영 및 장기 단계)로 구분하여 제시되며, 주요 내용을 요약하면 다음과 같다.

- 처분시설 정상운영으로 인한 집단 내 개인의 연간선량 제한치: 0.01 mSv yr^{-1}
- 처분시설 운영중 대표인에 대한 연간선량 제한치

	운영중 예상사고	1등급 가상사고	2등급 가상사고
연간선량 [mSv yr^{-1}]	0.1	1	5

- 처분시설 장기 진화를 고려한 대표인에 대한 연간선량 제한치: 0.1 mSv yr^{-1} (기타 주민의 평균 연간선량은 가능한 낮은 수준으로 유지)

- 방사성핵종별 환경으로의 방사능 누출 제한치: 다음 표에 제시된 기준값 대비 핵종별 방사능 누출(최대 100년 간의 이동평균값) 비율의 합이 1 미만

방사성핵종	제한치 [GBq yr^{-1}]
장수명 알파방출 동위원소: Ra, Th, Pu, Am, Cm	0.03
^{79}Se, ^{94}Nb, ^{129}I, ^{237}Np	0.1
^{14}C, ^{36}Cl, ^{135}Cs, 장수명 우라늄 동위원소	0.3
^{126}Sn	1
^{99}Tc, ^{93}Mo	3
^{93}Zr	10
^{59}Ni	30
^{107}Pd	100

- 평가기간: 최소 수천 년(평가결과에 대한 충분한 신뢰성 확보 필요)

2.3.1.2. FEP 목록 선정과정

2.3.1.2.1. FEP 선별(Screening)

Posiva의 TURVA-2012 종합 안전성 입증(Safety Case)은 KBS-3V 방식 Olkiluoto 처분시설의 장기진화를 총체적으로 나타내는 일련의 시나리오에 대한 분석결과에 기반을 둔다. 이러한 시나리오는 처분시스템에서 발생 가능한 모든 현상 및 특정 조건에서 장기 안전성을 위협할 수 있는 요인(즉, FEP)을 식별·고려하여 구성되며, 이에 따라 Safety Case 개발 초기에 FEP 목록 도출 및 선별작업이 수행된다.

FEP 초기 목록은 스웨덴 SKB에서 후보 부지를 대상으로 수행한 안전성 평가보고서, Posiva에서 기존에 발행된 프로세스 보고서 및 생태계 기술보고서, NEA International FEP 목록 및 데이터베이스를 종합적으로 고려하여 도출하였으며, 해당 목록에서 다음과 같은 요소 및 잠재적 중요성을 평가하여 TURVA-2012와 관련된 항목을 선별하였다[8].

- 사용후핵연료 처분을 위한 KBS-3V 유형 처분장 설계와의 관련성
- 부지 특성과의 관련성: 현재, 기후 변화 및 기타 외부 요인에 따른 변화 가능성 고려
- 국가 규제요건 및 지침과의 관련성
- FEP 선별 및 Safety Case 개발에 대한 기존 경험
- Posiva 및 SKB의 연구기술개발(RTD) 프로그램을 통해 식별된 지식 및 정보
- KBS-3V 유형 처분장 설계에 대한 기존 Safety Case 및 성능평가 결과
- 기타 국내·외 RTD 및 Safety Case 프로그램에 대한 전문지식 및 인식
- 이전 Safety Case 보고서 및 Posiva의 RTD 프로그램에 대한 규제기관의 피드백

이러한 과정을 통해 제외된 FEP를 예시하면 다음과 같다.

- 고 pH(pH＞10) 지하수로 인한 사용후핵연료 열화: 시멘트계 기반 물질의 열화로 인해 발생하는 고 pH의 지하수가 완충재를 통과하여 사용후핵연료와 접촉할 정도로 생성되기는 어렵다고 판단
- 인간의 의도적 침입: 침입이 의도적인 경우 적절한 대책을 통해 인간 및 환경을 보호할 것이라고 가정

2.3.1.2.2. FEP 구성(Organization)

상기 과정을 통해 선별된 FEP는 처분시스템의 주요 구성요소(즉, 사용후핵연료, 캐니스터, 완충재, 뒤채움재, 보조 구성요소, 지권, 지표환경) 및 외부 요인에 따라 분류된다. 각 구성요소에 대해 처분시스템의 진화에 영향을 미치는 FEP(즉, 진화 관련 FEP)와 방사성핵종 수송(즉, 이동 관련 FEP)에 대한 FEP도 구별된다.

2.3.1.2.3. FEP 기술(Description)

FEP 기술 목적은 각 항목의 간략한 특성, 그와 관련된 불확실성, 처분시스템 내에서 발생될 것으로 예상되는 시기 및 위치, 다른 FEP와의 연관성 등을 제시하는 것이다. 각각의 설명에는 현재의 기본적인 과학적 이해 및 Olkiluoto 부지 내 처분시스템과의 관련성이 포함되어 있다.

2.3.1.2.4. FEP 연결(Coupling)

FEP 간 연계사항을 식별하고, 방사성핵종 이동을 제어하는 중요 FEP를 판별하기 위해 처분시스템 내 주요 구성요소에 대한 FEP 간 상호관계를 개발하였다. 관련 전문가의 공학적 판단을 통해 잠재적으로 중요한 FEP 간 연결방법을 결정하였다. 일례로, '완충재의 지하수 흡수'와 '완충재의 팽창'은 분리된 과정이지만 매우 밀접하게 연관되어 있으며, 이에 따라 FEP 목록에서는 이러한 2가지 과정

을 단일 FEP로 포함하였다. 이와 달리, 시나리오 개발 및 성능 평가 모델에서 상이한 취급이 필요한 경우 밀접하게 연관된 2가지 과정('방사성붕괴' - '방사성 발열' 등)이 별도로 설명된 경우도 존재한다.

2.3.2. 스웨덴

2.3.2.1. 안전목표 및 허용기준

스웨덴의 원자력 규제기관인 방사선 안전청(Swedish Radiation Safety Authority, 'SSM')에서는 원자력 안전 및 방사선 방호와 관련하여 총 50개의 규정(Swedish Radiation Safety Authority Regulatory Code, 'SSMFS')을 발행하였다. 이 중 SSMFS 2008:21 [9] 및 SSMFS 2008:37 [10]에서 사용후핵연료 처분 및 인간·환경 보호와 관련된 내용을 제시하고 있으며, 주요 내용을 요약하면 다음과 같다.

- SSMFS 2008:21 [9]
  - 각 방벽의 기능: 방벽 시스템 내 다른 방벽을 보호함으로써 직·간접적으로 방사성물질의 확산을 억제, 방지 또는 보유하는데 단일 또는 다수의 방법으로 기여
  - 방벽 시스템: 다수의 방벽으로 구성되어 방벽의 단일 사고에서도 가급적 필요한 안전기능 유지·폐쇄 후 처분장 성능에 영향을 미칠 수 있는 FEP에 대한 저항성 확보
  - 안전성 평가: 폐쇄 후 방사성물질의 누출·확산의 원인이 되는 FEP를 고려하여 처분장 건설, 운영 및 폐쇄 전 수행
  - 평가기간: 최소 10,000년(단, 방벽 기능의 필수 기간으로 구성)

- SSMFS 2008:37 [10]
  - 사용후핵연료 및 핵폐기물의 최종 관리 시에는 최적화를 수행해야 하며 최상의 가용 기술 고려. 사용후핵연료 또는 핵폐기물 처분 후 1,000년 동안 방사성물질의 예상 유출로 인한 집단선량은 연간 집단선량의 10,000년을 초과하는 합으로 산정
  - 처분장 폐쇄 후 최대 피폭집단 내 대표인에 대한 유해영향(즉, 잠재암 및 유전적 영향)의 연간 위해도가 10^{-6}을 초과하지 아니하도록 설계
  - 폐쇄 후 최초 1,000년간 방호 능력 평가: 인간 건강 및 환경 영향에 대한 정량적 분석에 기초
  - 폐쇄 후 최초 1,000년 이후 기간에 대한 방호 능력 평가: 처분장 특성, 환경 및 생태계 개발을 위해 가급적 다양한 시나리오에 대해 수행
  - 개인 위험도: 모든 개인에 대해 모든 관련 피폭경로의 생애 위험도 추정치에 기초하여 연간 평균으로 계산
  - 위험도 평가기간: 최대 100만년

2.3.2.2. FEP 목록 선정과정

2.3.2.2.1. FEP 데이터베이스(Database)

FEP 선별과정의 첫 번째 단계는 FEP 데이터베이스를 구축하는 것으로 Forsmark 처분시설의 안전성 평가(SR-Site)에 필요한 목록을 도출하기 위해 기존에 스웨덴 SKB에서 후보 부지를 대상으로 수행한 안전성 평가과정(SR-Can)에서 도출된 FEP 및 NEA International FEP 데이터베이스(버전 2.1)를 활용하였다[11]. 이러한 FEP 목록은 전문가의 심사과정을 거쳐 구축되었으며, 일반적인 평가 방법론, 처분시스템의 초기 상태, 내부 프로세스(공학적 방벽 및 지권), 외부 프로세스(생태계, 기후, 미래 인간 활동) 등을 포함한다.

2.3.2.2.2. FEP 검사(Audit)

FEP 검사는 FEP 데이터베이스와 KBS-3 처분개념과의 연관성을 확인한 후 그 특성을 고려하여 처분시스템의 초기 상태, 시스템 내부 프로세스, 외부적 요인 등으로 분류하기 위해 수행된다. SKB 처분시스템에 대한 FEP 목록 중 다수의 국가에서 수행된 처분 관련 연구를 통해 도출된 FEP를 통합한 결과인 NEA 프로젝트 FEP와의 연관성을 고려하여 다음 기준 중 하나 이상이 충족되는 FEP는 고려대상에서 제외하였다.

- 실제 폐기물, 캐니스터 설계, 처분장 설계, 지질학적 또는 지리적 환경에 부적합
- 표제의 해석에 따라 다른 NEA 프로젝트 FEP가 적용되어야 할 것으로 판단되는 경우
- 매우 일반적이며, 보다 구체적인 NEA 프로젝트 FEP에 포함되는 경우

그러나, FEP가 스웨덴에서 고려중인 처분시설과 실질적으로 상이한 시스템에 주로 관련되는 경우라 하더라도 FEP의 특정 측면이 안전성 평가를 위해 정의된 시스템과 관련될 수 있으므로 반드시 제외되지는 않는다. 즉, 본 단계에서는 일반적으로 FEP가 대상 시스템의 안전성 평가와 무관하다는 것이 명확하지 않은 한 우선적으로 관련성이 있는 것으로 판단하였으며, 최종 포함 여부는 추가적인

처리과정에서 다양한 전문가에게 위임되었다.

2.3.2.2.3. FEP 분류(Catalogue)

SR-Site에서는 이전 SR-Can에서 정의된 처분시스템 구성요소 중 완충재 외부의 구성요소를 보다 세분화하여 안전성에 대한 중요도를 차별화하였으며, 이러한 시스템 구성요소 개선결과는 다음과 같다.

- 사용후핵연료
- 캐니스터
- 완충재
- 처분공 바닥판(콘크리트판 및 구리판 포함)
- 뒤채움재
- 처분터널 플러그
- 중앙구역(Central Area)
- 상부 밀봉
- 처분공 밀봉
- 지권(Geosphere)
- 생태계

2.4. 지권영역 프로세스 항목 검토

핀란드 및 스웨덴에서는 선별된 FEP를 처분시스템 구성요소에 따라 분류하였으며, 공통 및 특정 국가에서만 고려하고 있는 요소를 요약하면 다음과 같다.

- 공통: 캐니스터, 완충재, 뒤채움재, 지권
- 핀란드 고유: 보조 구성요소(밀봉, 플러그 등), 지표 환경, 외부적 요인
- 스웨덴 고유: 처분터널 플러그. 중앙구역, 처분공 바닥판, 상부 밀봉, 처분공 밀봉

상기 공통 요소 중 캐니스터, 완충재 및 뒤채움재의 경우 방사성물질 누출에 영향을 미치는 요인 및 그 정도가 고유 설계특성에 따라 매우 가변적일 것으로 판단된다. 지권영역의 경우 기반암 및 지하수 등의 특성에 종속적이기는 하지만 영향 정도는 상대적으로 작을 것으로 예상되므로 해당 영역에 대해 선정된 FEP 항목을 일반론적 관점에서 검토·분석하였다.

2.4.1. 핀란드

핀란드의 Olkiluoto 고준위방폐물 심층처분시설 건설허가 신청을 위해 수행된 방사선학적 안전성 평가에서 지권

Table 1. Treatment of processes for the geosphere in the radiological safety assessment for the KBS-3 type deep geological repository in Finland

Feature	Process	Treatment in AOS
Geosphere	Heat transfer	△
	Stress redistribution	X
	Reactivation-displacements along existing fractures	▣
	Spalling	△
	Creep	X
	Erosion and sedimentation in fractures	X
	Rock-water interaction	△
	Methane hydrate formation	X
	Salt exclusion	X
	Microbial activity	△
	Aqueous solubility and speciation	O
	Precipitation and co-precipitation	O
	Sorption	O
	Diffusion and matrix diffusion	O
	Groundwater flow and advective transport	O
	Colloid transport	▣
	Gas transport	△/□

Notes) O Explicitly modelled or accounted for in the data definition
▣ Explicitly modelled only in part of scenarios
△ Implicitly modelled or accounted for in the data definition
□ Implicitly accounted for in part of scenarios
◎ Assumption
X Not modelled, omitted, or negligible
AOS Assessment of Radionuclide Release Scenarios for the Repository System

영역에 대해 선별된 FEP 전체 목록을 요약하면 Table 1과 같다. 해당 표에는 처분시스템에서의 핵종 방출 및 이동에 대한 평가에서 각 FEP에 대한 취급방법을 다음과 같은 기호로 구분하여 표기하였다.

- O: 모델링 또는 입력변수 정의에서 명시적으로 고려
- ▣: 일부 시나리오에서만 명시적으로 고려
- △: 모델링 또는 입력변수 정의에서 함축적으로 고려
- □: 일부 시나리오에서만 함축적으로 고려
- ◎: 가정사항 적용
- X: 모델링에서 제외 또는 보수성 확보를 위해 무시

Table 1을 통해 지권영역에 대한 FEP 중 다음 5개 프로세스가 방사성핵종 방출 및 이동에 대한 평가에서 제외

Table 2. Treatment of processes for the geosphere in the radiological safety assessment for the KBS-3 type deep geological repository in Sweden

SR-Site FEP ID	SR-Site FEP name	Phase and/or Condition				
		Excavation/ Operation	Temperate	Periglacial	Galacial	Earthquakes
Ge01	Heat transfer	X	O	O	O	X
Ge02	Freezing	X	X	O	O	X
Ge03	Groundwater flow	O	O	O	O	X
Ge04	Gas flow/dissolution	X	O/X	X	X	X
Ge05	Displacements in intact rock	O	O	O	O	O
Ge06	Reactivation–Displacement along existing discontinuities	O/X	O	O	O	O
Ge07	Fracturing	O	O	△/O	O	X
Ge08	Creep	X	X	X	X	X
Ge09	Surface weathering and erosion	X	X	X	X	X
Ge10	Erosion/sedimentation in fractures	X	X	X	X	X
Ge11	Advective transport/mixing of dissolved species	O	O	O	O	X
Ge12	Diffusive transport of dissolved species in fractures and rock matrix	O	O	O	O	X
Ge13	Speciation and sorption	X	O	O	O	X
Ge14	Reactions groundwater/rock matrix	X	X	X	O	X
Ge15	Dissolution/precipitation of fracture-filling minerals	O	O	O	O	X
Ge16	Microbial processes	O	O	O	O	X
Ge17	Degradation of grout	X	O	X	X	X
Ge18	Colloidal processes	O	O/X	O/X	O/X	X
Ge19	Formation/dissolution/reaction of gaseous species	O	O	O	O	X
Ge20	Methane hydrate formation	X	X	X	X	X
Ge21	Salt exclusion	X	X	O	X	X
Ge22	Radiation effects (rock and grout)	X	X	X	X	X
Ge23	Earth currents	X	X	X	X	X
Ge24	Transport of radionuclides in water phase	X	O	O	O	O
Ge25	Transport of radionuclides in the gas phase	X	O	O	O	X

Notes) O Quantified by modelling in the safety assessment
△ Neglected subject to a specified condition
X Neglected or irrelevant for the time period of concern

또는 무시되었음을 알 수 있다.

- 응력 재분포(Stress Redistribution)
- 크리프(Creep)
- 균열 내 침식 및 침적(Erosion and Sedimentation in Fractures)
- 메탄 하이드레이트 형성(Methane Hydrate Formation)
- 염분 배제(Salt Exclusion)

2.4.2. 스웨덴

스웨덴의 Forsmark 고준위방폐물 심층처분시설 건설허가 신청을 위해 수행된 방사선학적 안전성 평가에서 지권영역에 대해 선별된 FEP 전체 목록을 요약하면 Table 2와 같다. 일반적으로 120,000년간 처분시스템에 발생 가능한 변화에 대한 프로세스로 구성된 시나리오를 대상으로 굴착 및 운영(Excavation/Operation), 완만한 후속기(Temperate), 주빙기(Periglacial), 빙하기(Glacial) 등 4개

의 시간대 및 지진에 의한 영향을 각각 구분하여 평가가 수행되었으며, 각 시간대 및 지진에 대한 핵종 방출 및 이동 평가에서 각 FEP에 대한 취급방법을 Table 2에 다음과 같은 기호로 구분하여 표기하였다[13].

- O: 모델링에 의해 정량화
- △: 특정 조건에서 무시
- X: 해당 시간대 동안 무시 또는 제외

Table 2를 통해 지권영역에 대한 FEP 중 다음 5개 프로세스가 방사성핵종 방출 및 이동에 대한 평가에서 제외 또는 무시되었음을 알 수 있다.

- 크리프(Creep)
- 지표 풍화 및 침식(Surface Weathering and Erosion)
- 균열 내 침식 및 침적(Erosion/Sedimentation in Fractures)
- 메탄 하이드레이트 형성(Methane Hydrate Formation)
- 암반 및 그라우트에 대한 방사선 영향(Radiation Effects (Rock and Grout))
- 지전류(Earth Current)

3. 결과 및 고찰

전 세계 원전 운영국 중 직접처분 정책을 채택하고 있는 국가 중 KBS-3 방식의 심층처분시설에 대한 인허가를 진행중인 핀란드 및 스웨덴의 방사선학적 안전성 평가과정에서 수행된 FEP 선별과정 및 지권영역에서 각 FEP 항목의 취급방법을 일반론적 관점에서 검토·분석하였으며, 그 결과는 Table 1 및 Table 2와 같다.

Table 1에 제시한 바와 같이 핀란드의 경우 지권영역에 대한 FEP 중 방사성핵종 방출 및 이동에 대한 평가시 5개 프로세스가 제외 또는 무시되었으며, 이에 대한 근거를 요약하면 다음과 같다.

- 메탄 하이드레이트 형성(Methane Hydrate Formation), 염분 배제(Salt Exclusion): Olkiluoto 지역의 처분시설 심도에서 발생할 확률이 낮으므로 제외[12]
- 응력 재분포(Stress Redistribution), 크리프(Creep), 균열 내 침식 및 침적(Erosion and Sedimentation in Fractures): 사유가 명확히 제시되어 있지는 않으나 굴착 및 처분시설 운영 초기 단계에만 영향을 미친다는 판단하에 제외한 것으로 추정

Table 3. Comparison of FEP list for the geosphere applied to the radiological safety assessment in Finland and Sweden

FEP	Finland	Sweden
Heat transfer	O	O
Colloid transport	O	O
Salt exclusion	O	O
Reactiviation-displacements along existing fractures	O	O
Methane hydrate formation	O	O
Creep	O	O
Erosion/sedimentation in fractures	O	O
Sorption	O	O
Microbial activity	O	O
Rock-water interaction	O	O
Spalling	O	X
Fracturing	X	O
Stress redistribution	O	X
Displacements in intact rock	X	O
Freezing	X	O
Degradation of grout	X	O
Radiation effects (rock and grout)	X	O
Earth currents	X	O
Surface weathering and erosion	X	–
Transport of radionuclides in the gas phase	△	O
Gas flow/dissolution	△	O
Formation/dissolution/reaction of gaseous species	△	O
Advective transport/mixing of dissolved species	△	O
Groundwater flow	△	O
Transport of radionuclides in water phase	△	O
Groundwater flow and advective transport	O	△
Aqueous solubility and speciation	O	△
Precepitation and co-precipitation	O	O
Diffusion and matrix diffusion	O	O
Dissolution/precipitation of fracture-filling minerals	O	O
Diffusive transport of dissolved species in fractures and rock matrix	O	O

Notes) O Included
△ Partly included
X Not included
– Moved to other category

Table 2에 제시한 바와 같이 스웨덴의 경우 지권영역에 대한 총 25개의 FEP 중 모든 시간대 및 지진 조건에 대해

Table 4. Draft list and relative importance (determined in this study) of principal processes in the geosphere to be considered for the radiological safety assessment of the domestic geological disposal facility

FEP	Finland	Sweden			Relative Importance
		Excavation/ Operation	Temperate	Earthquakes	
Heat transfer	△	X	O	X	High
Colloid transport	▣	O	O/X	X	High
Salt exclusion	X	X	X	X	Low
Reactiviation-displacements along existing fractures	▣	O/X	O	O	High
Methane hydrate formation	X	X	X	X	Low
Creep	X	X	X	X	Low
Erosion/sedimentation in fractures	X	X	X	X	Low
Sorption	O	X	O	X	High
Microbial activity	△	O	O	X	High
Rock-water interaction	△	X	X	X	Medium
Spalling	△	O	O	X	High
Fracturing	△	O	O	X	High
Stress redistribution	X	O	X	X	Low
Displacements in intact rock	X	O	O	O	High
Freezing	X	X	X	O	Low
Degradation of grout	X	X	O	X	Medium
Radiation effects (rock and grout)	X	X	X	X	Low
Earth currents	X	X	X	X	Low
Transport of radionuclides in the gas phase	△/□	X	O	X	High
Gas flow/dissolution	△/□	X	O/X	X	High
Formation/dissolution/reaction of gaseous species	△/□	O	O	X	High
Advective transport/mixing of dissolved species	O	O	O	X	High
Groundwater flow	O	O	O	X	High
Transport of radionuclides in water phase	O	X	O	O	High
Groundwater flow and advective transport	O	O	O	X	High
Aqueous solubility and speciation	O	O	O	X	High
Precepitation and co-precipitation	O	O	O	X	High
Diffusion and matrix diffusion	O	O	O	X	High
Dissolution/precipitation of fracture-filling minerals	O	O	O	X	High
Diffusive transport of dissolved species in fractures and rock matrix	O	O	O	X	High

Notes) O Explicitly modelled or included in the safety assessment
▣ Explicitly modelled only in part of scenarios
△ Implicitly modelled or partly included in the safety assessment
□ Implicitly accounted for in part of scenarios
◎ Assumption
X Not modelled, omitted, or negligible

6개 프로세스가 제외 또는 무시되었으며, 이에 대한 근거는 다음과 같이 요약할 수 있다[13].

- 크리프(Creep): 처분시설 운영 이후 열이 발생하는 시점에 처분공 주변 온도 변화는 크리프 발생에 영향을 미칠 만큼 크지 않으므로 무시 가능
- 지표 풍화 및 침식(Surface Weathering and Erosion): 기후에 대한 프로세스 항목으로 재분류
- 균열 내 침식 및 침적(Erosion/Sedimentation in Frac-

tures)
  - 침식은 주로 굴착과정 및 처분시설 운영 초기 단계에서 잠재적으로 발생할 가능성이 높지만 그라우트를 통해 대비 가능
  - 완만한 후속기 (Temperate): 수리구배 (Hydraulic Gradient)가 낮으므로 잠재적 침식현상 미고려
  - 주빙기 (Periglacial) 및 빙하기 (Glacial): 수리구배가 증가하지만, 지하수로 인한 전단력 (Shear Force)이 매우 낮으므로 미고려
- 메탄 하이드레이트 형성 (Methane Hydrate Formation)
  - 완만한 후속기 (Temperate): 형성 조건에 부합하지 않으므로 미고려
  - 주빙기 (Periglacial) 및 빙하기 (Glacial): 영구동토 (Permafrost) 환경에서의 시뮬레이션을 통해 위험도를 확인한 결과 메탄 농도 및 지하수 염분 환경으로 인해 메탄 하이드레이트 형성 제한
- 암반 및 그라우트에 대한 방사선 영향 (Radiation Effects (Rock and Grout))
  - 굴착/운영 (Excavation/Operation) 및 완만한 후속기 (Temperate): 중성자로 인한 시멘트의 역학적 성질 변화는 제한적
  - 사용후핵연료가 처분공에 삽입된 후 감마선이 최대치로 방출되는 시점에서의 온도 변화 또한 무시 가능한 수준이므로 미고려
- 지전류 (Earth Current): 처분시설 근계영역에서 고려할 필요가 없을 정도의 적은 영향이므로 미고려

Table 1 및 Table 2에 제시된 내용을 바탕으로 핀란드 및 스웨덴의 방사선학적 안전성 평가에서 지권영역에 대해 선정된 포괄적인 FEP 목록 및 각국에서의 고려 여부를 Table 3에 제시하였으며, 핀란드의 기체 수송 (Gas Transport)과 같이 포괄적인 프로세스의 경우 스웨덴의 FEP 목록 중 관련 있는 항목으로 세분하였다.

지권영역에 대한 통합 FEP 목록 (안) (Table 3)을 대상으로 핀란드 및 스웨덴의 평가사례 검토결과를 토대로 국내 사용후핵연료 심층처분시설에 대한 방사선학적 안전성 평가시 각 항목의 상대적 중요도를 산정하였으며, 그 결과는 Table 4와 같다. 상대적 중요도 평가에서는 스웨덴 FEP 항목 중 다른 범주로 재분류된 지표 풍화 및 침식 (Surface Weathering and Erosion)은 배제하였으며, 국내 기후에서 발생 가능성이 매우 낮을 것으로 예상되는 주빙기 (Periglacial) 및 빙하기 (Glacial)에 대한 기존 평가사례는 고려하지 않았다.

현 시점에서는 국내 고준위방폐물 심층처분시설에 대한 대부분의 정보가 결정되지 않았으므로, 방사선학적 안전성 평가시 지권영역에 대해 우선적으로 Table 3에 제시된 모든 FEP 항목을 적용 대상으로 고려해야 할 것이며, 각 FEP 항목별 적용 여부를 결정하기 위해 Table 4에 제시된 상대적 중요도 도출결과를 참고할 수 있을 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 국내 고준위방폐물 심층처분시설에 대한 방사선학적 안전성 평가를 수행하기 위한 사전 연구로서 KBS-3 방식의 심층처분시설에 대한 인허가를 진행중인 핀란드 및 스웨덴 사례를 통해 지권영역에 대해 선별된 FEP 전체 목록 및 각 FEP에 대한 취급방법을 일반론적 관점에서 검토·분석하였다.

핀란드의 경우 지권영역에 대한 FEP 중 방사성핵종 방출 및 이동에 대한 평가시 5개 프로세스 (즉, 메탄 하이드레이트 형성, 염분 배제, 응력 재분포, 크리프, 균열 내 침식 및 침적)가 제외 또는 무시되었다. 또한, 스웨덴의 경우 지권영역에 대한 총 25개의 FEP 중 모든 시간대 및 지진 조건에 대해 6개 프로세스 (즉, 크리프, 지표 풍화 및 침식, 균열 내 침식 및 침적, 메탄 하이드레이트 형성, 암반 및 그라우트에 대한 방사선 영향, 지전류)가 고려되지 않았다. 이러한 결과를 토대로 지권영역에 대한 통합 FEP 목록 (안)을 도출하였으며, 이를 대상으로 국내 사용후핵연료 심층처분시설에 대한 방사선학적 안전성 평가시 각 항목의 상대적 중요도를 산정하였다.

국내 고준위방폐물 심층처분시설에 대한 대부분의 정보가 결정되지 않은 현 시점에서는 방사선학적 안전성 평가시 지권영역에 대해 Table 3에 제시된 모든 FEP 항목을 모두 고려하되 추후 각 FEP 항목별 적용 여부를 결정하는데 있어 본 연구를 통해 도출된 상대적 중요도 정보를 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

사 사

이 논문은 2021년도 정부 (산업통상자원부)의 재원으

로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구임 (2021171020001A, 사용후핵연료 관리시설 설계기술 개발).

참고문헌

1. Nuclear Safety and Security Commission. 2021. Enforcement Decree of the Nuclear Safety Act. Presidential Decree No. 31824.
2. Nuclear Safety and Security Commission. 2019. Standards for Radiation Protection, and etc. Notice No. 2019-10.
3. Ministry of Trade, Industry and Energy. 2016. Master Plan for Management of High-level Radioactive Waste (Draft).
4. Nuclear Safety and Security Commission. 2021. General Standards for the Deep Geological Disposal Facility of High-level Radioactive Waste. Notice No. 2021-21.
5. Finnish Energy. 2021. Safely in the ancient bedrock (First in the World–Final Disposal of Spent Nuclear Fuel to Begin in Finland).
6. Hwang YS and Hwang JH. 2020. Introduction to Disposal Technology for Spent Nuclear Fuel. Han's House.
7. STUK (Radiation and Nuclear Safety Authority). 2018. Disposal of Nuclear Waste. GUIDE YVL D.5.
8. Posiva Oy. 2013. Safety Case for the Disposal of Spent Nuclear Fuel at Olkiluoto – Synthesis 2012. POSIVA 2012-12.
9. SSM (Swedish Radiation Safety Authority). 2008. The Swedish Radiation Safety Authority's Regulations and General Advice Concerning Safety in Connection with the Disposal of Nuclear Material and Nuclear Waste. SSMFS 2008:21.
10. SSM (Swedish Radiation Safety Authority). 2008. The Swedish Radiation Safety Authority's Regulations and General Advice Concerning the Protection of Human Health and the Environment in Connection with the Final Management of Spent Nuclear Fuel and Nuclear Waste. SSMFS 2008:37.
11. SKB (Svensk Kärnbränslehantering AB). 2010. FEP Report for the Safety Assessment SR-Site. SKB TR-10-45.
12. Posiva Oy. 2013. Safety Case for the Disposal of Spent Nuclear Fuel at Olkiluoto - Models and Data for the Repository System 2012. POSIVA 2013-01.
13. SKB. 2010. Geosphere Process Report for the Safety Assessment SR-Site. SKB TR-10-48.