

핀란드 고준위방폐물 심층처분장 장기진화 특성 분석을 통한 폐쇄 초기단계 공학적방벽 성능저하 메커니즘 및 중요도 도출

김석훈¹ · 이정환^{2*}

¹(주)미래와도전 SNF처분엔지니어링사업단 단장, ²한국원자력환경공단 고준위기술개발원 차장

Derivation of Engineered Barrier System (EBS) Degradation Mechanism and Its Importance in the Early Phase of the Deep Geological Repository for High-Level Radioactive Waste (HLW) through Analysis on the Long-Term Evolution Characteristics in the Finnish Case

Sukhoon Kim¹ · Jeong-Hwan Lee^{2*}

¹General Manager, SNF Disposal Engineering Group, FNC Technology Co., Ltd.

²Principal Researcher, HLW Technology Development Institute, Korea Radioactive Waste Agency

Abstract

The compliance of deep geological disposal facilities for high-level radioactive waste with safety objectives requires consideration of uncertainties owing to temporal changes in the disposal system. A comprehensive review and analysis of the characteristics of this evolution should be undertaken to identify the effects on multiple barriers and the biosphere. We analyzed the evolution of the buffer, backfill, plug, and closure regions during the early phase of the post-closure period as part of a long-term performance assessment for an operating license application for a deep geological repository in Finland. Degradation mechanisms generally expected in engineered barriers were considered, and long-term evolution features were examined for use in performance assessments. The importance of evolution features was classified into six categories based on the design of the Finnish case. Results are expected to be useful as a technical basis for performance and safety assessment in developing the Korean deep geological disposal system for high-level radioactive waste. However, for a more detailed review and evaluation of each feature, it is necessary to obtain data for the final disposal site and facility-specific design, and to assess its impact in advance.

Keywords: disposal system, deep geological facility, long-term evolution, performance assessment, engineered barrier

OPEN ACCESS

*Corresponding author: Jeong-Hwan Lee
E-mail: oathway@korad.or.kr

Received: 31 October, 2023

Revised: 8 December, 2023

Accepted: 12 December, 2023

© 2023 The Korean Society of Engineering
Geology



This is an Open Access article
distributed under the terms of
the Creative Commons Attri-
bution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits
unrestricted non-commercial use, distribution, and
reproduction in any medium, provided the original
work is properly cited.

초 록

고준위방사성폐기물 심층처분시설의 안전목표치에 대한 부합성을 판단하기 위해서는 처분시스템의 시
간적 변화에 따른 불확실성을 고려해야 한다. 이에 따라 심층처분시설의 폐쇄 이후 장기진화 특성에 대

한 종합적 검토 및 분석을 통해 다중방벽 및 생태계에 미치는 영향을 규명해야 한다. 이에 본 논문에서는 우선적으로 핀란드의 심층처분시설에 대한 운영허가 신청과정에서 처분시스템 장기 성능평가의 일환으로 검토된 폐쇄 초기단계 진화 특성을 분석하였다. 또한, 이를 토대로 공학적방벽 성능평가를 위해 고려되어야 하는 장기진화 현상 및 발생요인을 종합하여 한국형 고준위방폐물 심층처분시스템 개발 시 중요도(안)를 도출하였다. 이러한 결과는 향후 한국형 고준위방폐물 심층처분시설 개발을 위한 성능 평가 및 안전성 평가 수행과정에서 기술적 근거자료로 활용할 수 있을 것으로 예상된다. 단, 각 특성에 대한 보다 세부적인 현상학적 검토 및 평가를 위해서는 최종 처분부지 특성 및 시설 고유 설계자료 등을 확보하여 그 영향을 사전에 검토해야 한다.

주요어: 처분시스템, 심층처분시설, 장기진화, 성능평가, 공학적방벽

서론

고준위 방사성폐기물(이하 ‘고준위방폐물’)을 인간 생활권으로부터 영구히 격리시키기 위해 1950년대부터 해양처분, 빙하처분, 우주처분, 심층처분 등 다양한 방식이 연구되어 왔다. 이 중 현재의 기술로는 고준위방폐물을 지하 깊은 곳의 안정한 지층구조에 처분하여 장기적 안정성을 확보할 수 있는 심층처분 방식이 가장 안전한 관리방법으로 고려되고 있다.

국내의 경우 ‘제2차 고준위 방사성폐기물 관리 기본계획(안)(MOTIE, 2021)’을 통해 부지선정 절차 착수 이후 37년 내에 영구처분시설 확보를 목표로 핀란드식 심층처분에 활용되고 있는 KBS-3 방식의 다중방벽시스템을 우선 고려하되 심부시추공 등의 기술적 대안도 병행하여 추진하는 방안을 제시하였다.

고준위방폐물 심층처분시설에 대해서는 국민 건강 및 환경의 보호를 위해 안전목표치가 설정되며, 안전성 평가를 통해 해당 처분시스템의 전체 단계(즉, 기초연구, 부지조사, 설계, 건설, 운영, 폐쇄 및 폐쇄 후 관리 등)에 걸쳐 해당 시설이 안전 목표치에 부합함을 입증해야 한다(NSSC, 2021). 동 고시에 의거 안전목표치에 대한 부합성을 판단하기 위한 평가기간은 해당 처분시스템의 성능기간을 포함하되 심층처분시설의 폐쇄 시점으로부터 최소 1만년으로 설정해야 하며, 이 과정에서 처분시스템의 시간적 변화에 따른 불확실성에 관한 정량적 정보를 포함해야 한다(NSSC, 2021). 이에 따라 심층처분시설의 폐쇄 이후 예상되는 현상 및 시간 경과에 따른 진화특성을 규명하고, 이를 통해 다중방벽의 성능 저하 및 궁극적으로 근계·원계영역 및 생태계로의 누출에 미치는 영향을 판단해야 한다.

이에 본 논문에서는 우선적으로 KBS-3 방식을 활용한 핀란드의 심층처분시설에 대한 운영허가 신청과정에서 처분시스템 장기 성능평가의 일환으로 검토된 폐쇄 초기단계 진화 특성을 분석하였다. 또한, 이를 토대로 국내 사용후핵연료 관리시설 설계기술 개발과정에서 공학적방벽 성능평가를 위해 고려되어야 하는 장기진화 현상 및 발생요인을 종합하여 공학적방벽 주요 구성요소별 중요도(안)를 도출하였다.

연구방법

핀란드 정부는 2015년 11월 사용후핵연료 심층처분시설의 건설허가를 최종 승인하였으며, 이에 따라 향후 처분 실시 주체인 POSIVA는 2016년에 처분장 건설에 착수하여 2021년 운영허가를 신청하였다(Posiva Oy, 2021a). 이 과정에서 심층처분시설의 종합안전성 입증을 위한 다수의 문서가 발행되었으며, 본 논문에서는 이 중 처분시스템 성능평가의 일환으로 검토된 완충재, 뒤채움재, 플러그 및 밀봉(Closure) 영역의 장기진화 특성에 대한 분석을 수행한 후 이를 기초로 고준위방폐물 심층처분시설의 공학적방벽에서 일반적으로 예상되는 성능저하 메커니즘을 도출하였다.

폐쇄 초기단계 장기진화 특성 검토

고준위방폐물 처분시스템의 주요 구성요소인 완충재, 뒤채움, 플러그 및 밀봉은 다양한 단위현상, 사건 및 프로세스(수리적, 역학적, 열적 및 화학적 등)의 영향을 받아 시간이 경과함에 따라 진화한다. 핀란드의 심층처분시설 운영허가 신청 과정에서는 기후 변화를 고려하여 이러한 장기진화 특성을 초기단계(Early phase), 나머지 온대기간(Remaining temperate period), 이후 영구동토 및 빙하기(Next permafrost and glaciation), 미래 빙하주기(Future glacial cycles)로 구분하여 제시하였다(Posiva Oy, 2021b). 본 논문에서는 이 중 향후 국내 기후조건의 불확실성을 감안하여 현재 기후와 유사한 폐쇄 초기단계의 진화 특성에 대해서만 중점적으로 분석을 수행하였다. 해당 단계에서 검토가 필요한 장기진화 특성은 총 21가지로 확인되었으며, 각 현상에 대한 보다 자세한 검토결과는 다음과 같다.

Ⓐ 열적진화

처분된 사용후핵연료에서 발생하는 봉괴열 및 지열로 인해 천연방벽 및 공학적방벽(완충재, 뒤채움재, 플러그, 밀봉 등)의 온도가 상승하거나 계절 및 기후 변화로 인해 밀봉의 온도가 변화될 수 있으며, 이러한 특성을 열적진화로 정의한다. 동 현상은 천연방벽 및 공학적방벽의 열물성치, 사용후핵연료 잔열 등의 영향을 받으며, 처분시설 폐쇄 이후 시간이 지남에 따라 사용후핵연료 봉괴열이 낮아지므로 영향이 점차 감소한다.

Ⓑ 수분흡수 및 팽윤

완충재 및 뒤채움재의 주요 소재로 사용되는 벤토나이트는 암반 내 공극 및 균열을 통해 시설 내부로 유입되는 지하수를 흡수함에 따라 부피 증가로 인한 팽윤압이 발생하며, 이를 수분흡수 및 팽윤으로 정의한다. 수분흡수는 벤토나이트가 포화될 때까지 일어나며, 완전 포화상태의 벤토나이트 조건에서 최대 팽윤압에 도달한다.

Ⓒ 밀도차의 균일화

압축블록 및 펠렛 형태 벤토나이트의 건조밀도는 각각 $1,600\sim1,800 \text{ kg/m}^3$ 및 $1,200\sim1,400 \text{ kg/m}^3$ 로 상이한 범위에 있으므로, 완충재 및 뒤채움 영역에서 밀도차가 발생한다. 이러한 밀도차는 설치 초기에 가장 크게 나타나지만 지하수에 의한 벤토나이트의 수분흡수 및 팽윤과정에 따라 점차 낮아지며, 이를 완충재-뒤채움재의 밀도차 균일화로 정의한다.

Ⓓ 완충재 융기

완충재 벤토나이트가 처분시설 내부로 유입된 지하수를 흡수하여 팽윤함에 따라 완충재 상부 영역 벤토나이트의 일부가 뒤채움재 영역으로 이동하게 되며, 이를 완충재 융기로 정의한다. 완충재가 융기되는 정도는 완충재로의 지하수 유입률에 비례하며, 완충재와 뒤채움재의 팽윤압이 동일해질 때까지 발생한다. 이러한 과정에는 많은 시간이 소요되므로 주로 뒤채움 이후에 나타난다.

Ⓔ 뒤채움재 크라운 효과

처분터널 상부 영역 뒤채움재가 설치과정에서 충분히 압축되지 않은 경우 시간이 경과함에 따라 점차 침하되며, 이러한 특성을 뒤채움재 크라운 효과로 정의한다. 이러한 현상은 폐쇄 이후 균열을 통한 침식으로 인해 뒤채움재의 압축성, 밀도, 팽윤압이 점차 감소함에 따라 가속화된다.

⑨ 벤토나이트의 침식

완충재-암반 경계면에서 지하수의 높은 수압 및 중앙터널 내에서의 동결(Freezing) 및 응해(Thawing) 과정을 통한 기계적 마모로 인해 완충재 영역 표면의 벤토나이트 또는 중앙터널 내 밀봉 뒤채움재가 제자리에 유지되지 못하고 이동하게 되며, 이를 벤토나이트의 침식으로 정의한다. 이러한 침식속도는 경계면에서의 지하수 유속(완충재로의 지하수 유입률)에 비례하며, 침식량은 처분시설 폐쇄 직후부터 완충재가 포화됨에 따라 점차 감소하여 완전 포화상태에 도달할 때까지만 발생한다.

⑩ 수분교환

처분시설 내부로 유입된 지하수와 완충재, 뒤채움 및 밀봉 영역을 구성하는 벤토나이트 내 기공수의 상호작용 과정에서 각각의 성분이 교환될 수 있으며, 이를 수분교환으로 정의한다. 처분시설 부지의 지하수 성분은 심도, 기후, 지형 등 다양한 요인에 의해 변화하며, 이에 따라 수분교환 특성이 달라진다.

⑪ 기공수의 화학적 진화

지하수와의 수분교환 과정 및 부속광물 용해 등 다양한 화학적 반응에 의해 벤토나이트 내 기공수 조성(양이온, 광물 등)이 변화되며, 이를 기공수의 화학적 진화로 정의한다. 동 현상은 주로 벤토나이트 내부로 유입되는 지하수 성분에 의해 영향을 받으며, 이에 따라 벤토나이트의 팽윤능, 방사성핵종 수착 특성 등이 결정된다.

⑫ 산소 소모

대기로부터 유입되어 처분시설 폐쇄 이후 벤토나이트 기공 및 시설 내부 영역에 존재하는 산소 기체가 처분시설 내부를 이동하는 과정에서 다양한 화학적 반응(부식, 미생물 활동, 벤토나이트 내 광물과의 상호작용 등)을 통해 점차 감소되는 현상을 산소 소모로 정의한다. 이 과정에서 산소가 처분용기 영역에 도달하는 경우 부식을 통해 처분용기 건전성이 저하됨에 따라 방사성핵종 유출에 영향을 미치며, 부식생성물 생성량을 토대로 산소 소모량을 추정할 수 있다.

⑬ 방사분해

처분된 사용후핵연료 내 방사성핵종 붕괴과정에서 방출되는 방사선으로 인해 완충재 벤토나이트 내 기공수가 이온화되어 산화제(H_2O_2 , $HO\cdot$, $HO_2\cdot$, O_2) 및 환원제(e^-_{aq} , $H\cdot$, H_2)로 분해되며, 이를 기공수의 방사분해로 정의한다. 방사분해 정도는 방출되는 방사선의 종류 및 에너지에 의해 결정되며, 알파선 및 베타선의 낮은 투과력, 처분용기 표면에서 중성자선의 매우 낮은 선량률로 인해 주로 감마선에 의해 발생된다.

⑭ 벤토나이트의 변질

처분시설 폐쇄 이후, 사용후핵연료에서 방출되는 붕괴열과 기반암으로부터의 지하수 유입으로 인한 완충재 및 뒤채움재 영역의 열-수리적 변화에 따라 벤토나이트 내 몬모릴로나이트 및 부속광물이 각각 화학적으로 진화하며, 이를 완충재 및 뒤채움재의 변질로 정의한다. 한편, 처분시설로 유입되는 지하수에 의한 밀봉 플러그의 열화로 생성된 시멘트 침출수와 밀봉 뒤채움재의 화학적 반응에 의해 밀봉 뒤채움재 내 벤토나이트 및 쇄석이 각각 진화하게 되며, 이를 밀봉의 변질로 정의한다.

① 미생물 활동

처분시설에는 지하수에 의한 해당 부지 토착미생물의 유입, 공학적방벽 설치 등으로 인해 매우 다양한 종류의 미생물이 존재하며, 이 중 지하수 내 미생물은 벤토나이트의 수분흡수 및 팽윤현상에 의해 완충재 내로 이동할 수 있다. 이러한 처분 시설 내 미생물은 구리 처분용기 부식 유발 및 그로 인한 방사성핵종 유출 등에 따라 공학적방벽의 성능에 영향을 미치며, 이를 미생물 활동으로 정의한다. 처분시설로 유입되는 지하수는 기반암 내 깊은 심도에 위치하고 있어 낮은 산소 용해도로 인해 미생물에 공급되는 산소의 양은 제한적이며, 이러한 환원환경에서는 주로 혐기성 미생물에 의해 미생물 활동이 발생한다.

② 시멘트에 의한 화학적 부하

굴착손상영역(Excavation Damaged Zone, EDZ)을 보강하기 위한 처분터널 그라우트 및 밀봉 플러그 등의 재료로 사용되는 시멘트가 기반암으로부터 유입된 지하수에 의해 용해됨에 따라 생성된 강염기성 시멘트 침출수는 벤토나이트를 화학적으로 진화시키며, 이러한 특성을 시멘트에 의한 화학적 부하로 정의한다. 벤토나이트 기공수와 시멘트 침출수의 수분교환이 발생되면 벤토나이트의 물성(팽윤능, 수리전도도)이 변화되며, 이는 궁극적으로 공학적방벽의 안전기능 및 장기적 안정성에 영향을 미치게 된다.

③ 실리카-졸(Silica-sol)에 의한 화학적 부하

그라우트 재료 등으로 사용되는 시멘트는 강염기성 침출수를 생성할 뿐만 아니라 심지층 조건 내 미세균열(50~100 μm)을 보강하기에는 입자 크기가 부적합하다. 이에 따라 미세균열을 보강하기 위한 그라우트 재료로 검토되고 있는 약염기성 및 미세입자(10~170 μm) 형태의 실리카-졸(Silica-sol)은 유입된 지하수에 의해 용해되어 주변 벤토나이트를 화학적으로 진화시키며, 이를 실리카-졸에 의한 화학적 부하로 정의한다.

④ 강재 및 철재에 의한 화학적 부하

처분시설에서 구조적 안전성을 보장하기 위한 목적으로 사용되는 다양한 강재 및 철재는 기반암으로부터 유입되는 지하수에 의해 부식되며, 이 과정에서 부식조건(산화성 또는 환원성, 호기성 또는 혐기성, 미생물 활동, 지하수 조성 등)에 따라 다양한 형태의 부식생성물이 형성된다. 이러한 물질은 완충재 및 뒤채움 영역에서 화학적 반응을 통해 주변 벤토나이트를 진화시키며, 이를 강재 및 철재에 의한 화학적 부하로 정의한다.

⑤ 수착 및 확산

제작·검사과정 등에서의 문제로 인해 처분용기에 결함 또는 파손부가 존재하는 경우 방사성핵종이 비교적 단기간 내에 지하수를 통해 유출되어 천연방벽으로 확산될 수 있다. 이 과정에서 벤토나이트의 건조밀도 및 기공 크기, 처분시설 내부 콜로이드 안정성 등 다양한 조건에 따라 방사성핵종이 벤토나이트 기공 내에 수착될 수 있으며, 이러한 특성을 수착 및 확산으로 정의한다.

⑥ 이류

처분시설로 유입되는 지하수의 유동으로 인해 시설 내부 방사성핵종이 밀봉 영역을 거쳐 외부로 유출될 수 있으며, 이를 이류로 정의한다. 이러한 현상은 벤토나이트가 완전 포화상태에 도달할 때까지만 발생하지만, 밀봉 뒤채움재로 인해

처분시설 내부에서 장거리 유로 형성이 불가능하므로 시설 폐쇄 이후의 영향은 미미하다.

⑧ 밀봉 뒤채움재의 변형

중앙터널 상부 영역 뒤채움재가 설치과정에서 충분히 압축되지 않은 경우 시간이 경과함에 따라 점차 침하하며, 이러한 특성을 밀봉 뒤채움재의 변형으로 정의한다. 해당 현상은 폐쇄 이후 균열을 통한 침식으로 인해 밀봉 뒤채움재의 압축성, 밀도, 팽윤압이 점차 감소함에 따라 가속화된다.

⑨ 기체 생성 및 이동

처분시설 폐쇄 이후 밀봉 영역에는 지하수 또는 운영기간 중 대기로부터 유입되거나 시설 내 콘크리트 구조물 및 암반의 열화에 의해 생성된 기체가 존재하며, 이러한 기체는 압력 구배에 따라 밀봉 영역에서 처분터널을 거쳐 처분공으로 확산된다. 이러한 과정을 기체 생성 및 이동으로 정의하며, 벤토나이트가 완전히 포화될 때까지 발생한다.

⑩ 암반으로의 침출수 이동

굴착손상영역(EDZ) 보강 등에 사용된 시멘트가 지하수에 의해 용해되어 생성된 침출수는 처분시설의 수리지질학적 특성(즉, 높은 수리적 구배 및 낮은 수리전도도)에 따라 균열을 통해 기반암으로 이동하며, 이를 암반으로의 침출수 이동으로 정의한다. 이러한 과정에서 기반암 균열 내 광물의 진화가 발생할 수 있다.

⑪ 밀봉 플러그 내 철 구조물 부식

밀봉 플러그 내 철재 구조물(볼트, 철근 등)은 처분시설로 유입된 지하수로 인한 표면 산화막 파괴 이후 주변의 산소 및 물과 직접 반응하며, 이를 밀봉 플러그 내 철 구조물 부식으로 정의한다.

공학적방벽 성능저하 메커니즘 도출

심층처분시설은 처분된 방사성폐기물이 생태계에 미치는 악영향을 최소화하기 위해 다중방벽으로 구성되며, 이는 천연방벽과 인공적으로 설치되는 다수의 공학적방벽으로 이루어진다. 공학적방벽은 포장용기, 처분용기, 완충재, 처분구조물, 뒤채움재 등을 포함하며, 처분환경에서 방사성폐기물의 유출, 처분시설로의 지하수 침투 또는 인간의 침입을 제한하기 위해 설치된다(NSSC, 2021). 앞서 기술한 심층처분시설 폐쇄 이후 장기진화 특성은 여러 과정을 통해 공학적방벽의 성능을 저하시킬 수 있다. 본 논문에서는 총 21가지의 폐쇄 초기단계 진화특성에 대한 분석결과를 토대로 공학적방벽에서 예상되는 성능저하 메커니즘을 총 8가지로 그룹핑하였으며, 이에 대한 보다 자세한 내용은 이하에 순차적으로 기술하였다. 성능저하 메커니즘별로 이를 유발하는 주요 장기진화 특성을 도식화하면 Fig. 1과 같다. (이하 내용 중 영문 알파벳 원문자(Ⓐ~⑪) 표기는 앞서 제시한 폐쇄 초기단계 장기진화 특성에 대한 기호를 의미한다.)

스멕타이트의 일라이트화

벤토나이트의 주요광물인 스멕타이트는 2개의 규산염층 및 내부층위로 구성된 2:1형 점토 광물군의 일종이다. 내부층 위에 존재하는 다양한 교환성 양이온(Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} 등)이 이온교환 반응에 의해 계속적으로 치환되는 과정에서 고착성 양이온(K^+)으로 치환·고착되는 경우 해당 광물은 일라이트로 변환된다. 이러한 현상을 일라이트화로 정의하며, 발생 메커니즘을 도식화한 결과는 Fig. 2와 같다. 이에 따라 벤토나이트의 팽윤능 감소 및 수리전도도 증가를 초래하여 공학적방

벽의 성능이 저하되며, 다음 조건에서 일라이트화가 가속화된다: i) 높은 온도, ii) 주변(지하수 등)의 높은 K^+ 함량, iii) 스멕타이트의 층전화 증가.

이러한 스멕타이트의 일라이트화를 야기하는 주요 장기진화 특성은 밀도차의 균일화(Ⓐ), 수분교환(Ⓑ), 기공수의 화학적 진화(Ⓗ), 방사분해(Ⓓ), 변질(Ⓚ), 미생물 활동(Ⓛ), 시멘트에 의한 화학적 부하(Ⓜ), 강철 및 철재에 의한 화학적 부하(Ⓞ) 등이다.

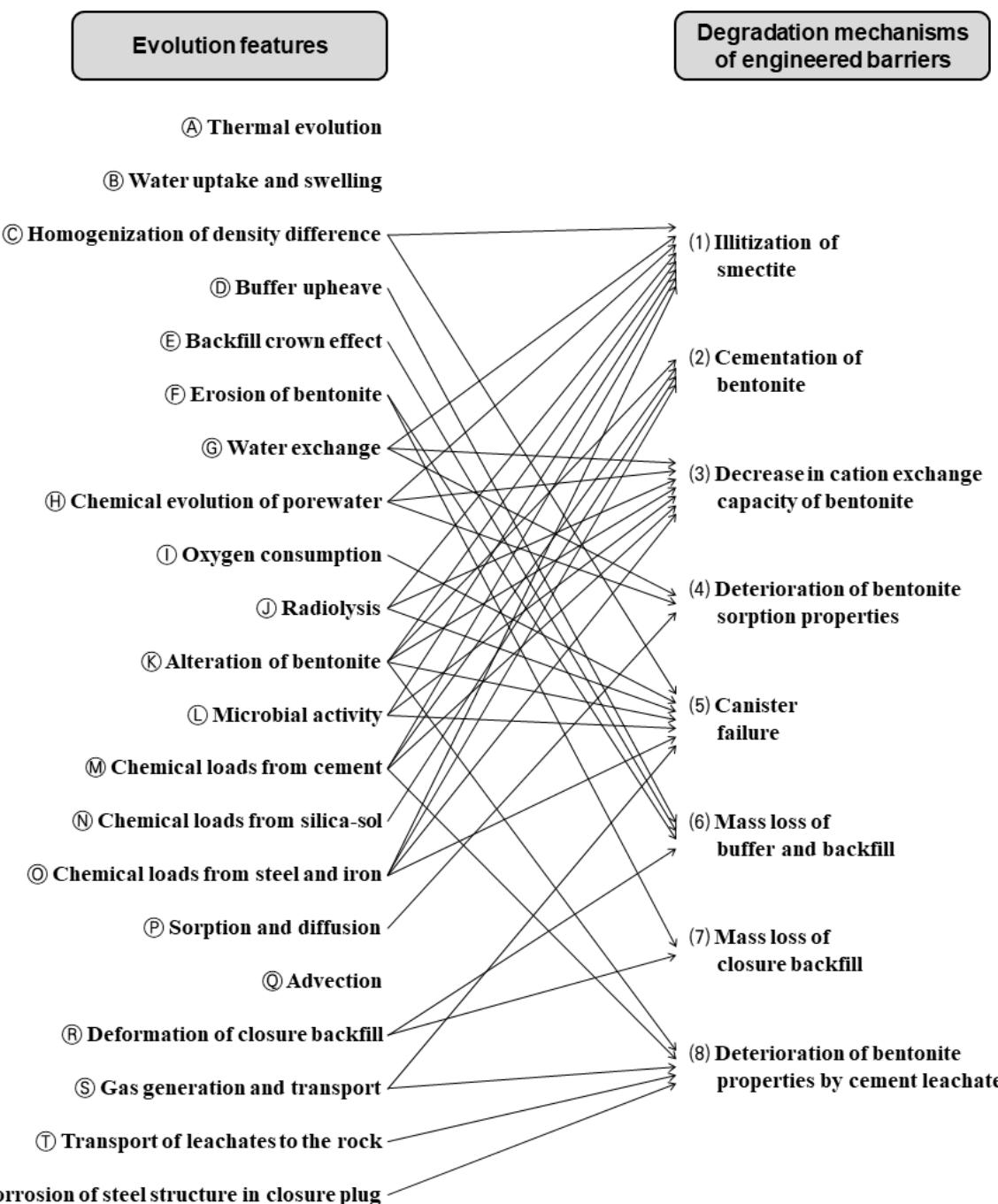


Fig. 1. Links between the long-term evolution features and degradation mechanisms of engineered barriers.

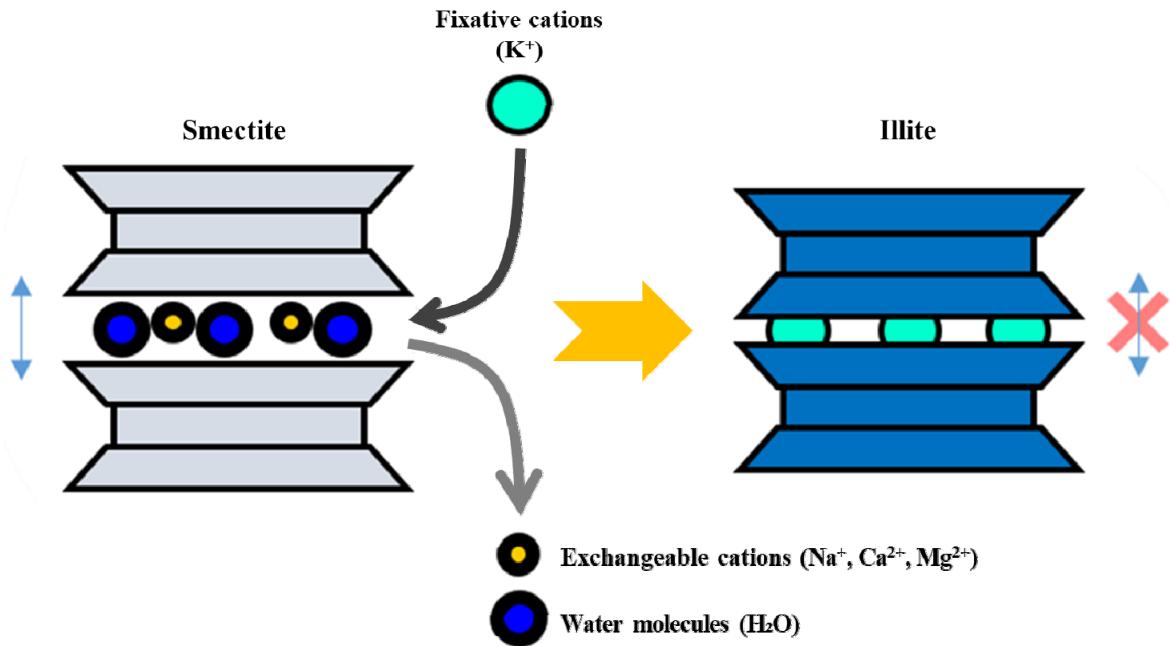


Fig. 2. Schematic diagram for 'Illitization of smectite' mechanism.

벤토나이트의 시멘트화

처분시설 폐쇄 이후 사용후핵연료의 붕괴열 및 기반암으로부터의 지하수 유입으로 인한 열-수리적 변화에 따라 벤토나이트 부속광물 및 그라우트의 재료의 일종인 실리카-졸이 벤토나이트 기공수에 용해되어 처분시설 내부를 이동하는 과정에서 벤토나이트 기공 내에 침전물이 형성되며, 이로 인해 주변 벤토나이트 입자가 경화되는 시멘트화 현상이 발생된다. 이러한 발생 메커니즘을 도식화한 결과는 Fig. 3과 같다. 이에 따라, 벤토나이트의 팽윤능 감소 및 수리전도도 증가를 초래하여 공학적방벽의 성능이 저하될 수 있다. 한편, 스멕타이트의 일라이트화 과정에서 방출된 실리카(SiO_2)가 열-수리적 구배에 따라 용해 및 확산되는 과정에서 벤토나이트 기공 내에 침전되는 경우에도 시멘트화가 발생될 수 있다.

이러한 벤토나이트의 시멘트화를 야기하는 주요 장기진화 특성은 변질(®, 시멘트에 의한 화학적 부하(ℳ), 실리카-졸에 의한 화학적 부하(ℳ), 강철 및 철재에 의한 화학적 부하(ℳ) 등이다.

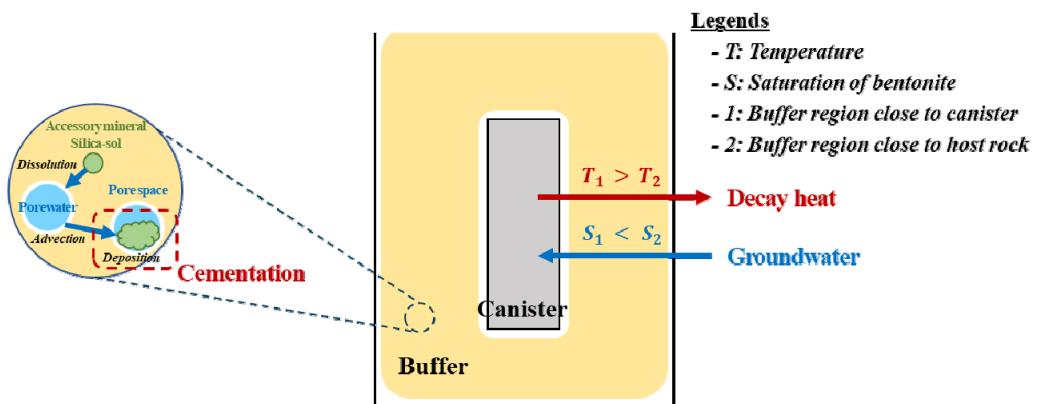


Fig. 3. Schematic diagram for 'Cementation of smectite' mechanism.

벤토나이트의 양이온 교환능(Cation Exchange Capacity, CEC) 감소

양이온 교환능(CEC)은 벤토나이트 내 광물(스멕타이트, 일라이트, 카올리나이트 등)이 양이온 교환반응을 발생시키는 능력을 의미하며, 광물의 층전하 크기 및 층간 팽창 정도에 비례하여 증가한다. 벤토나이트 내 광물의 내부층위에 존재하는 양이온이 지하수와의 이온교환 반응에 의해 치환되는 과정에서 광물의 층전하 크기 및 층간 팽창 정도가 감소할 수 있으며, 이로 인해 벤토나이트의 전체 CEC 값이 감소되어 팽윤능 감소 및 수착 특성 약화를 초래하여 공학적방벽의 성능을 저하 시킬 수 있다.

이러한 벤토나이트의 CEC 감소를 야기하는 주요 장기진화 특성은 수분교환(◎), 기공수의 화학적 진화(●), 방사분해(○), 변질(◎), 미생물 활동(○), 시멘트에 의한 화학적 부하(◎), 강재 및 철재에 의한 화학적 부하(○) 등이다.

벤토나이트의 수착 특성 약화

열화 또는 파손된 처분용기 외부로 유출된 방사성핵종이 주변 벤토나이트 영역으로 이동하는 과정에서 벤토나이트 기공 내에 수착되어 원계영역 및 생태계로의 방사성물질 유출이 지연 또는 감소될 수 있으며, 이를 벤토나이트의 수착 특성으로 정의한다. 벤토나이트 내 기공수 조성 변화, 기공 크기 및 CEC 감소 시 이러한 수착 특성이 약화되는 것으로 간주하며, 이 경우 방사성핵종의 수송 저지 또는 지연 정도가 감소하므로 공학적방벽의 성능이 저하된다.

이러한 벤토나이트의 수착 특성 약화를 야기하는 주요 장기진화 특성은 수분교환(◎), 기공수의 화학적 진화(●), 수착 및 확산(◎) 등이다.

처분용기 파손

처분용기가 역학적 충격(주로 벤토나이트의 과도한 팽윤압으로 인해 발생) 및 다양한 화학적 반응(부식, 수소취화 등)에 의해 파손되는 경우 주요 성능목표(즉, 방사성물질 격납, 지하수 접촉 최소화, 방사성핵종 유출 방지)를 충족할 수 없게 된다. 처분용기 파손의 결과로 내부의 방사성핵종이 벤토나이트 영역으로 유출되며, 방사성붕괴 과정에서 방출되는 방사선과 벤토나이트의 반응이 가속화되는 등 공학적방벽의 성능이 저하될 수 있다.

이러한 처분용기 파손을 야기하는 주요 장기진화 특성은 밀도차의 균일화(◎), 산소 소모(○), 방사분해(○), 변질(◎), 미생물 활동(○), 강재 및 철재에 의한 화학적 부하(○), 기체 생성 및 이동(◎) 등이다.

완충재 및 뒤채움재 질량손실

완충재 및 뒤채움재의 주요 성능목표는 처분용기를 역학적으로 지지하고, 유입된 지하수와의 접촉을 제한하여 처분용기를 보호하는 것이다. 또한, 처분용기가 파손되는 경우에도 용기 외부로 유출된 방사성핵종의 이동을 저지 또는 지연시켜 생태계로의 유출을 최소화해야 한다.

처분시설 폐쇄 이후, 벤토나이트가 유입된 지하수를 흡수하여 팽윤됨에 따라 발생하는 역학적 변화로 인해 Fig. 4와 같이 이 처분용기 주변 영역의 벤토나이트 질량손실이 발생할 수 있다. 이 경우 완충재 및 뒤채움재의 주요 성능목표(즉, 처분용기의 역학적 지지, 유입된 지하수와의 접촉 제한을 통한 처분용기 보호, 처분용기 파손 시 유출된 방사성핵종의 이동 저지 또는 지연을 통한 생태계로의 유출 최소화)를 충족하지 못하게 된다.

이러한 완충재 및 뒤채움재 질량손실을 야기하는 주요 장기진화 특성은 완충재 응기(○), 뒤채움재 크라운 효과(◎), 침식(◎), 밀봉 뒤채움재의 변형(◎) 등이다.

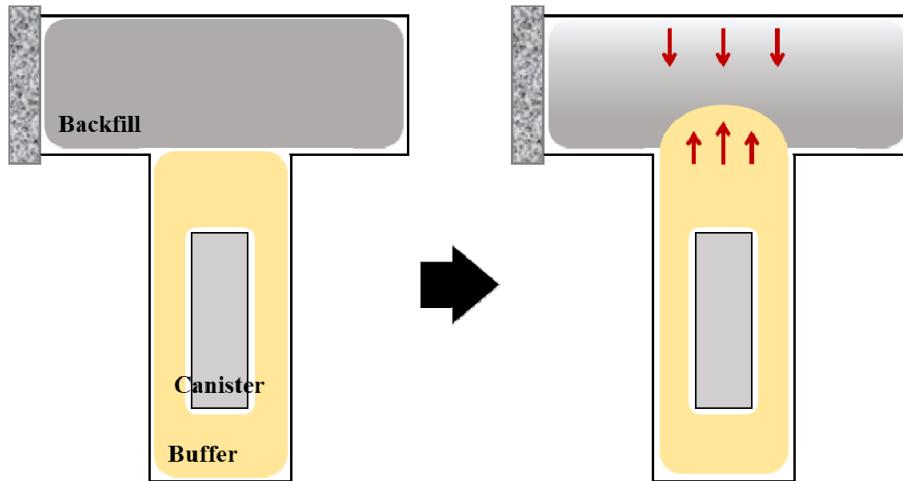


Fig. 4. Schematic diagram for ‘Mass loss of buffer and backfill’ mechanism.

밀봉 뒤채움재 질량손실

벤토나이트의 지하수 흡수 및 팽윤 과정에서 발생하는 처분시설 내 역학적 변화로 인해 밀봉 뒤채움재의 질량손실이 발생할 수 있다. 이 경우 완충재 및 뒤채움재의 질량손실, 처분용기 파손을 초래하여 밀봉 뒤채움재의 주요 성능목표(즉, 처분터널 및 처분공의 역학적 지지, 처분시설로의 의도치 않은 인간 침입의 방지)를 충족하지 못하게 된다.

이러한 밀봉 뒤채움재 질량손실을 야기하는 주요 장기진화 특성은 침식(F), 밀봉 뒤채움재의 변형(R) 등이다.

시멘트 침출수에 의한 벤토나이트 물성 악화

플리그, 암반 균열 보강 그라우트 등의 재료로 사용된 시멘트가 폐쇄 이후 열-수리적 변화로 인해 열화되는 과정에서 생성된 침출수는 처분시설 내부를 이동하며, 주변 영역의 벤토나이트와 화학적으로 반응하게 된다. 이러한 반응은 크게 수분교환, 부속광물의 용해 및 침전으로 구분된다. 전자의 경우 이온교환 반응으로 인해 스詈타이트가 다른 광물로 변환되어 벤토나이트의 팽윤능 감소를 야기하며, 후자의 경우 벤토나이트 시멘트화로 인한 공학적방벽의 성능 저하를 야기하거나 천연방벽의 성능에 영향을 미칠 수 있다.

이러한 시멘트 침출수에 의한 벤토나이트 물성 악화를 야기하는 주요 장기진화 특성은 변질(R), 시멘트에 의한 화학적 부하(M), 기체 생성 및 이동(S), 암반으로의 침출수 이동(T), 밀봉 플리그 내 철 구조물 부식(U) 등이다.

연구결과

핀란드에서 폐쇄 초기단계에 대해 검토된 총 21가지의 장기진화 특성을 대상으로 각 특성별로 관련 프로세스 요인(즉, 열적(T), 수리적(H), 역학적(M), 화학적(C)), 관심영역(즉, 완충재, 뒤채움, 플리그, 밀봉)을 정리한 후 국내 처분시스템 개발 시 중요도를 평가하였으며, 그 결과를 요약하면 Table 1과 같다. 특성별 ‘중요도’를 설정하기 위해서는 선행 연구결과, 설계특성에 따른 영향 정도, 성능저하 가능성 등을 종합적으로 고려해야 하며, 이러한 기준에 따라 다음과 같은 6가지의 정성적 범주로 분류하여 해당 표의 최우측 열에 제시하였다. 일부 특성의 경우 관심영역에 따라 중요도가 상이할 수 있으며, 이러한 사항은 해당 표에 모두 포함되어 있다.

Table 1. Relevant processes, region of interest, and importance for the evolution feature expected in the early phase during the post-closure period of the deep geological disposal system

Code	Evolution feature	Early phase								
		Relevant processes ¹⁾				Region of interest ²⁾				Importance ³⁾
		T	H	M	C	BUF	BAC	PLU	CLO	
A	Thermal evolution	○				○	○			Medium-B
								○	○	Low-B
B	Water uptake and swelling	○	○			○	○			Medium-A
C	Homogenization of density difference	○				○	○			Low-A
D	Buffer upheave	○	○			○	○			Medium-B
E	Backfill crown effect	○	○			○	○			Medium-B
F	Erosion of bentonite	○	○					○		Medium-B
								○		Low-B
G	Water exchange	○		○		○	○			High-B
									○	Low-B
H	Chemical evolution of porewater	○		○		○	○			High-B
I	Oxygen consumption	○		○		○	○			Medium-B
J	Radiolysis	○		○		○	○			Low-A
K	Alteration of bentonite	○	○			○	○			Medium-B
L	Microbial activity	○	○	○	○	○	○			Low-A
						○	○			Low-B
M	Chemical loads from cement	○		○				○	○	Medium-B
								○	○	Low-B
N	Chemical loads from silica-sol	○		○		○	○			Low-B
O	Chemical loads from steel and iron	○		○		○	○			Medium-B
P	Sorption and diffusion	○		○		○	○			Low-A
Q	Advection	○							○	Low-B
R	Deformation of closure backfill	○	○				○		○	Low-B
S	Gas generation and transport	○		○					○	Low-B
T	Transport of leachates to the rock	○		○		○	○			Low-B
		○		○					○	Low-A
U	Corrosion of steel structure in closure plug	○	○	○				○		Low-A

Note: 1) T, H, M, and C represent ‘Thermal’, ‘Hydraulic’, ‘Mechanical’, and ‘Chemical’ processes, respectively.

2) BUF, BAC, PLU, and CLO represent ‘Buffer’, ‘Backfill’, ‘Plug’, and ‘Closure’ regions, respectively.

3) Importance of each evolution feature was classified into one of six categories. The meaning of each category is as follows.

- High-A: Expected to have a significant impact regardless of the disposal system design.
- High-B: In case that possibility of performance degradation is assessed to be significant in the Finnish case.
- Medium-A: Expected to have some impact regardless of the disposal system design.
- Medium-B: In case that it is necessary to review the domestic design in the future even though possibility of performance degradation is assessed to be significant in the Finnish case.
- Low-A: Expected to be negligible regardless of the design of the disposal system design.
- Low-B: In case possibility of performance degradation is assessed to be significant in the Finnish case and review on the domestic design is not required in the future.

- High-A: 처분시스템 설계와 무관하게 상당한 영향을 미칠 것으로 예상되는 경우
- High-B: 핀란드 사례를 통해 성능저하 가능성이 상당히 높은 것으로 평가된 경우

- Medium-A: 처분시스템 설계와 무관하게 어느 정도 영향을 미칠 것으로 예상되는 경우
- Medium-B: 핀란드 사례를 통해 성능저하 가능성이 낮은 것으로 평가되었으나 향후 국내 설계에 대한 검토가 필요한 경우
- Low-A: 처분시스템 설계와 무관하게 영향이 미미할 것으로 예상되는 경우
- Low-B: 핀란드 사례를 통해 성능저하 가능성이 낮은 것으로 평가되었으며, 향후 국내 설계에 대한 검토가 필요하지 않은 경우

결론

고준위방폐물 심층처분시설의 경우 성능기간을 포함하여 폐쇄 시점으로부터 최소 1만년 동안 안전목표치에 대한 부합성을 판단해야 하며, 이 과정에서 처분시스템의 시간적 변화에 따른 불확실성을 고려해야 한다. 이에 따라 심층처분시설의 폐쇄 이후 예상되는 현상 및 시간 경과에 따른 진화 특성에 대한 종합적 검토·분석을 통해 다중방벽 및 생태계에 미치는 영향을 규명해야 한다.

이에 본 논문에서는 우선적으로 KBS-3 방식을 활용한 핀란드의 심지층 처분시설에 대한 운영허가 신청과정에서 처분시스템 장기 성능평가의 일환으로 검토된 폐쇄 초기단계 진화 특성을 분석하였다. 또한, 이를 토대로 공학적방벽 성능평가를 위해 고려되어야 하는 장기진화 현상 및 발생요인을 종합하여 한국형 고준위방폐물 심층처분시스템 개발 시 중요도(안)를 도출하였다.

이와 같은 결과는 향후 심층처분시설 개발을 위한 성능 평가 및 안전성 평가 수행과정에서 기술적 근거자료로 활용할 수 있을 것으로 예상된다. 단, 각 특성에 대한 보다 세부적인 현상학적 검토 및 평가를 위해서는 최종 처분부지 특성 및 시설 고유 설계자료 등을 확보하여 그 영향을 사전에 검토해야 한다.

사사

이 논문은 2023년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 사용후핵연료관리핵심기술개발사업단 및 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구사업(No. 2021040101003C)의 지원으로 수행되었습니다.

References

- MOTIE (Ministry of Trade, Industry and Energy), 2021, The second basic plan for high-level radioactive waste management (Draft) (in Korean).
- NSSC (Nuclear Safety and Security Commission), 2021, General standards for geological disposal facility of high-level radioactive waste, Notice No. 2021-21 (in Korean).
- Posiva Oy, 2021a, Operating license application - Spent nuclear fuel encapsulation plant and disposal facility, 362p.
- Posiva Oy, 2021b, Buffer, backfill and closure evolution, POSIVA Working Report 2021-08, 401p.