

## 공학적방벽 구성물질 자연유사 Safety Case 적용방안에 대한 사례 연구

김인영, 백민훈, 정종태, 박태진, 최종원, 최경우\*

한국원자력연구원, 대전광역시 유성구 대덕대로 989번길 111

\*한국원자력안전기술원, 대전시 유성구 과학로 62

[iykim@kaeri.re.kr](mailto:iykim@kaeri.re.kr)

### 1. 서론

사용후핵연료 직접처분의 경우 수백만년, 파이로 고준위폐기물의 경우 수백년이 경과해야 폐기물의 독성이 천연우라늄 수준으로 감소되므로 이 기간 이상 처분시설의 건전성이 유지됨을 입증하는 것이 매우 중요하다. 그러나 실험실 연구에서 초장기적으로 처분시스템과 유사한 환경을 유지해 실험을 수행하는 것은 매우 어렵다. 이에 처분시스템과 유사한 자연시스템 및 고고학적 유물을 통해 처분시스템의 거동을 예측하는 자연유사 연구의 중요성이 점차 커지고 있으며, 이를 적용한 Safety Case 개발의 필요성이 증대되고 있다[1]. 본 연구에서는 공학적방벽 구성물질에 관한 자연유사 사례연구를 통해 Safety Case 개발 시 자연유사 적용방안을 모색해보고자 한다.

### 2. 공학적방벽 구성물질의 자연유사 연구

한국형기준처분시스템 및 선진핵주기 고준위폐기물 처분시스템은 사용후핵연료 또는 파이로 고준위폐기물, 폐기물을 장입해 밀봉 및 차폐하는 처분용기, 처분용기를 보호하고 실패 시 핵종의 이동을 지연시키는 완충재로 구성된 공학적 방벽과 장심도, 환원환경의 천연암반으로 구성된 천연방벽으로 구성된다. 공학적방벽의 자연유사 연구는 크게 1) 폐기물, 2) 처분용기, 3) 완충재에 대한 연구로 구분할 수 있으며, 공학적방벽 구성품의 기계적·화학적 열화, 핵종이동 및 지연특성이 주요 연구 대상이 된다.

#### 2.1 사용후핵연료 및 고준위폐기물 고화체

사용후핵연료의 자연유사연구에는 결정학적 구조 동질성을 갖는 uraninite와 pitchblende가 이용되며, 금속 또는 세라믹 고화체의 경우 zirconolites와 pyrochlores가 이용된다[2].

고체폐기물은 방사성핵종을 구조 내에 가둬 밀봉하는 역할을 하며, 기계적 손상 또는 부식에 의

한 침출이 발생하는 경우 핵종이 누출되게 된다. 환원조건에서  $UO_2$ 의 부식침출은 매우 느리게 진행된다. 방사분해에 의해 발생된 산소 및 우라늄산소가 증대로 인한 국부적 침출을 증대 및  $U_3O_8$  상태로의 천이에 따른 결정 격자구조의 급격한 변화로 핵종의 누출이 매우 심각해질 수 있음이 알려져 있다.

Oklo와 Cigar lake에서 암반 추적자 핵종으로  $^{99}Tc$ 를 이용해 측정된  $UO_2$ 침출율은  $1.5 \times 10^{-6}$ ,  $1.1 \times 10^{-6}$ , 지하수 추적자 핵종으로  $^{129}I$ 을 이용해 측정된 침출율은  $1.5 \times 10^{-9}$ ,  $1.1 \times 10^{-9}$ 으로 알려져 있다. 산화환원전위의 경우 Cigar lake의 pyrite/siderite 기반 실험에서는 200 mV, Pocos de caldas에서는 300 mV 이하에서는 uraninite의 산화침출이 발생하지 않는 것이 확인되었다. 또한 Pena Blanca에서 1,2차 광물화 연대에 대한 연구로 방사성핵종의 누출율이 평가되었다. 부식에 대한 영향을 평가하기 위한 Sinkolobwe에서의 연구에서 uraninite의 변성물인 50종 이상의 uranyl이 규명되었으며, 이 uranyl 부식피막은 부동태화막을 형성해 부식을 늦추는 효과가 있음이 확인되었다[1].

한편, 폐기물 손상으로 핵종이 이동될 수 있으나, Oklo 원자로영역에서 핵분열 반응에 의해 생성된 핵종이 다량 발견된 점을 통해 처분시스템에서 핵종이동 지연효과가 있음이 입증되었다[2].

#### 2.2 처분용기

폐기물의 밀봉 및 차폐를 위해 고안된 처분용기는 내력이 뛰어난 주철과 내식성이 뛰어난 구리로 구성된다. 이에 대한 유사물로는 자연발생 금속 또는 고고학적 유물 등이 주로 이용된다.

유물의 부식에 대한 유사 연구를 통한 철의 부식율은  $0.1 \sim 10 \mu\text{m/yr}$ 인 것으로 알려져 있다. 한편, Inchtuthil 못 보관소에 대한 유사연구는 다량의 철 존재 시 외곽에서 급격한 반응으로 인해 형성된 무산소 조건으로 중심부에서 부식지연효과가 있음을 시사하고 있다. 또한 Buhl에서 유사연구는 암반의 높은 비투과성으로 인해 이류성 물질전달이 제한되

는 경우 철의 산화 제한효과를 입증하고 있다[1].

고고학적 유물을 이용한 유사연구에서 측정된 구리의 부식율은 0.025~1.27  $\mu\text{m}/\text{yr}$ 로 알려져 있으며, 구리 유물의 점식인자는 3이하, 자연 구리광물의 점식인자는 2-6이하로 측정되었음이 알려져 있다. 또한 구리수도관의 점식 연구에 의하면 미생물에 의한 점식이 매우 심각하며, 처분장에서 방사선분해로 인한 산화환경이 형성되는 경우 영향을 미칠 수 있음이 확인되었다. 특히, 침몰된 전투선 Kronan의 대포는 공극수가 흐르는 montmorillonite를 함유한 해양점토층에 매장되어 처분장 유사연구에 중요한 연구대상으로, 이 연구에서 부식율은 0.15  $\mu\text{m}/\text{yr}$ 로 측정되었으며, redox front의 존재에도 산화물의 변화가 없는 것으로 구리의 산화 시 산소가 주요 산화제가 아님 등에 대한 결론이 도출되었다[1,3].

한편, 철은 유산소 조건에서  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 를 무산소 조건에서 Magnetite 부식 피막을 생성하며, 이와 같은 피막은 부동태화를 갖는 것으로 알려져 있다. 또한 Pocos de Caldas에서의 자연유사연구에서 redox front에서 철의 2차 산화물에 의한 핵종 흡착이 관찰되어 부식 피막의 핵종이동 지연능이 확인되었다[1].

### 2.3 완충제

완충제로는 스펙타이트를 주성분으로 하는 벤토나이트가 주로 사용되며, 벤토나이트는 높은 팽윤성, 가소성, 내력을 가져 처분용기를 보호하고, 물의 이동과 이류 물질전달을 제한하며, 콜로이드 및 미생물의 이동을 제한한다. 중국에서 발견된 2,000년 된 시체 및 Dunarobba의 나무에 대한 유사연구를 통해 점토질에 의한 차수 및 콜로이드, 미생물 이동 차단효과를 확인할 수 있다[1].

한편, 온도증가에 따라 벤토나이트가 일라이트화될 수 있으며, 지하수와 벤토나이트의 양이온 교환으로 인해 완충제의 완충효과가 감소할 수 있다. 이에 따라 속성작용과 교대작용에 의한 일라이트화에 대한 유사연구가 수행되었으며 일라이트화 개시에너지가 도출되었다. 또한 이탈리아 Orciatico에서 수행된 연구에 의하면 극한 온도 및 압력조건에서 용암의 작용에 의해 벤토나이트가 시멘트화될 수 있으며, 이의 균열에 의한 대류 물질전달이 확인되었다. 그리고 Stripa 광산에서 수행된 유사연구에 의하면 측정할 수 있는 수준의 벤토나이트 침몰이 발생하는 것이 확인되었다[1].

### 3. Safety Case 적용 방안

표 1은 자연유사 결과에 대한 Safety Case 적용 방안의 예를 도출한 것이다.

Table 1. Example application of analogues to safety case[2].

	Analogue observation	Application
waste	Dissolution of waste (Oklo, Cigar lake)	Data provision & Model validation
	Radiolytic oxidation of SF (Oklo)	Conceptual model development
	etc.	
Canister	Maximum pitting corrosion factor of Cu (Bresle(1983) etc.)	Data provision
	Retardation effect of secondary alteration product (Pocos de Caldas)	Conceptual model development
	etc.	
Buffer	Canister Sinking (Stripa mine)	Data provision
	Buffering effect of bentonite (China cadaver, Dunarobba)	Communication evidence
	etc.	

### 4. 결론

자연유사를 통해 물질의 건전성 및 기능실패에 대한 정량적·정성적 평가가 가능하며, 유사물은 처분시스템의 안전성을 입증하는데 가시적인 증거로 사용될 수 있다. 따라서 처분시스템의 안전성에 대한 모든 증거물 모음인 Safety Case에 유사연구를 적용한다면 안전성 입증 논리 강화에 큰 역할을 할 수 있을 것으로 사료된다. 단, 국내 처분환경에 적합한 자연유사 사례의 선택적 적용이 필요하며, 자연유사물이 존재하는 환경이 처분시스템과 완벽하게 동일하지 않기 때문에 자연유사의 결과를 처분시스템의 안전성평가에 직접적으로 사용하기보다는 정성적인 자료 또는 간접적인 안전여유도 입증 자료로 제공하는 것이 합당할 것으로 생각된다.

### 5. 감사의 글

본 논문은 원자력안전연구개발사업의 일환으로 한국원자력안전기술원의 지원을 받아 수행되었습니다.

### 6. 참고문헌

- [1] Miller et al., Geological Disposal of Radioactive Waste and Natural Analogues, Pergamon pp.53-152 (2000).
- [2] Miller et al., Network to review natural analogue studies and their application to repository safety assessment and public communication(NAnet), HIKW-CT-2002-20204, pp. 10-39 (2003).
- [3] SKB, Long-term safety for the final repository for spent nuclear fuel at Forsmark, TR-11-01, Vol. 3, pp.785-795 (2011).