

처분 안전성평가 내 자연유사연구 현황분석: 원계영역

박태진, 백민훈, 정종태, 김인영, 최종원

한국원자력연구원, 대전시 유성구 대덕대로 989번길 111

etipark@kaeri.re.kr

1. 서론

최근 원자력선진국의 고준위방사성폐기물 처분 안전성 연구는 Safety Case 개발의 차원에서 매우 다양한 문제들로부터 야기될 수 있는 불확실성을 감소하여 신뢰도를 향상하는 연구에 초점을 두고 있다. 이들 중 특히 자연유사연구는 최근 OECD/NEA와 IAEA 등의 국제기구를 중심으로 Safety Case가 강화되면서 다시 주목받고 있다. 현재 대다수 선진각국의 시행기관과 인허가 규제 기관은 주요지표(primary indicator)와 더불어 상호보완지표(complementary indicators)를 Safety Case의 중요한 필요요소로 선택했으며, 자연유사는 상호보완지표기준(indicator criteria)의 선정에 고려되는 대표적인 분야 중 하나이다.

자연유사연구(natural analogue study)는 방사성폐기물 처분장 및 그 주변 환경과 어느 정도 유사성을 가진 자연의, 생태의, 고고학적, 또는 산업적 시스템을 조사하여 처분장의 구성 요소들, 또는 처분장 변화를 제어하는 과정들의 단기적 및 장기적 거동에 대한 이해를 제공하는 것이다. 자연유사연구는 안전성평가에 있어 특히 큰 불확실성을 초래하는 시간과 복잡성에 대해 기존의 실험실 및 현장시험 조사를 보완하는 역할을 할 수 있다. 각 방법의 장단점을 표 1에 정리하여 비교하였다. 실질적으로 두 방법이 상호보완적이며 모두 필요하다.

본 연구의 목적은 방사성폐기물 처분분야의 자연유사연구의 현황을 검토·분석하여 해당 분야에 대한 이해도를 높이고, 필요 자료를 구축하고, 대한민국 내 특정적 조건에 맞는 자연유사연구의 적용 및 활용에 대한 전망을 분석하는 것이다.

2. 본론

2.1 자연유사연구의 종류 및 적용범위

자연유사연구의 분야는 유사화학(chemical analogues)에서 고고학적 시스템에 이르기까지 매우 다양하고, 적용 범위는 처분장 구성요소에서

생태계에 이르기까지 매우 광범위하다. 유사연구는 역사적으로 소수의 자연 시스템에 집중하여 연구하는 경향이 있기에 처분장 시스템의 주요 요소 또는 그 요소의 장기적 변이과정(long-term evolution)의 특성을 대표하는 몇몇 광범위한 그룹으로 분류할 수 있다. 이는 유사화학, 자연의 지질학 및 지화학 시스템, 고고학적 시스템, 인위 생성적 오염 부지 등을 포함한다. 처분안전성 연구와 관련한 유사연구의 주제를 분류하면 유사부지 연구, 처분장 물질 연구, 이동 및 자연 과정에 관한 연구 등을 포함한다[1].

Table 1. The advantages and disadvantages of laboratory and analogue studies.

불확실성 원인	실험실 및 현장시험 조사	자연유사
시간	몇 주에서 최대 한두달의 상대적으로 짧은 기간임.	전혀적으로 몇 년에서 백년에서 더더러는 매우 오랜 기간임.
공간	실험실 또는 현장시험 장소에 국한된 상대적으로 좁은 지역에서 연구가 수행됨.	유사 시스템은 실제 반응이 일어난 지역이 매우 넓고 규모가 매우 큼.
복합성	결과에 대한 모델링이 용이하도록 연구자에 의해 설정된 매우 단순한 실험 시스템임.	자연 시스템은 복잡하고 연계된 다양한 과정들이 포함됨. 따라서 현실에 가깝지만 모델링이 어려움.
경계조건	잘 정의된 경계조건이 존재하며 실험을 위해 설정이 가능함.	경계조건이 종종 정의되지 않음.
물질	실제 처분장에 사용된 물질이 연구에 사용됨.	유사 시스템의 물질은 처분장 물질의 특성을 단지 근사적으로 접근할 수 있음.
과정	온도를 올리거나 공격적인 반응물 사용이 가능하여 반응을 촉진시킬 수 있음.	유사 시스템 내에선 과정들이 자연의 반응속도 및 조건 하에서 진행됨.
열역학적 가정	열역학적 가정에 반응 속도론(reaction kinetics)을 거의 고려하지 않음.	유사 시스템 내의 과정들은 고유 반응속도에 따라 일어난다. 따라서 유사연구 결과는 반응물 고유의 반응 속도 제약을 설정함.

유사연구를 보다 세부적으로 처분시스템에 대한 근계영역과 원계영역으로 나누어 살펴보면, 근계영역 관련분야는 처분장 근계영역에서 방사성 핵종의 이동, 방사선 분해(radiolysis)에 의한 산화, redox front의 형성과 전달, 부식생성물 등과 방사성 핵종의 공침 등의 주제를 포함하는 반면, 원계영역 관련분야는 저투수층 내 지하수 흐름평가, 원계영역에서 방사성 핵종의 이동, 이동과 관

련한 channelling, matrix 확산의 역할, 콜로이드의 역할, 염도(salinity), 평형, 흡착, 변성 등의 주제를 포함한다.

2.2 원계영역 자연유사 연구

안전성평가 모델에서 원계영역의 성능은 크게 근계영역에서 방출된 핵종이 지질계를 통해 이동하는 속도와 궁극적으로 핵종이 생태계(지상환경)에 도달하는 농도를 계산함으로 평가된다. 처분장 안전성평가의 일환으로 원계영역의 안정성에 영향을 미치는 과정과 이에 따른 원계영역을 통해 이동하는 방사성핵종의 속도 역시 고려되어야 한다.

많은 자연 시스템에선 위와 같은 이동의 과정이 계속 벌어지고 있다. 처분장 시스템과 주요한 차이점이라면 자연적으로 발생하는 원소들만이 영향을 받는다는 점이다. 원계영역의 성능을 ‘예측’한다는 의미로 자연유사에선 처분장 환경과 유사한 지질학적 환경에서 자연발생의 방사성원소에 대한 이동을 우선 고려하게 된다. 이런 자연 방사성핵종의 이동 시스템에 대한 많은 유사연구가 진행되었고, 통상적으로 이동과 지연의 과정을 이해하기 위해 우라늄 광상 부근에서 연구가 수행되었다. 일부 연구는 정량적인 정보(예: matrix 확산 길이)를 제공하였지만 대다수는 모델 개념 개발과 검증에 유용한 정성적인 정보를 제공하였다. 원계영역에서 방사성핵종의 이동과 지연을 제어하는 주요한 과정들은 다음과 같다[2]:

- 방사성핵종의 이동 (확산 및 균열과 다공 매질에 의한 이류를 포함)
- 방사성핵종의 지연 (화학적(수착, 침전/공침, 고정화) 과정 및 물리적(여과, 이온배제) 과정 등 포함)
- 지질안정성 및 구조지질학적 과정 (응기, 침하, 화산활동, 지진활동 포함)
- 고대수리지질학 및 고대수리지화학

방사성핵종의 이동과 지연을 제어하는 원계영역의 대표적 과정들에 대한 주요 유사연구를 정리하면 표 2와 같다.

3. 결론

자연유사연구는 처분 안전성평가에 있어 모델 개념 개발 및 구성, 입력자료의 제공 및 검증, 모델의 검증 및 인증 등에 효과적인 역할을 수행하

기에 최근 Safety Case의 주요 필요요소로 고려되고 있다. 본 연구에선 처분장시스템의 근계영역, 원계영역, 생태계 등의 분류 중 원계영역 과정들에 대한 자연유사연구를 정리하고 특히 결정질암에 대한 핵종의 이동과 지연 과정에 관련된 유사연구를 살펴보았다.

Table 2. A summary of the main analogue observations with regard to processes in the far-field that control radionuclide transport and retardation.

유사현상	유사시스템	주요 관찰사항(참고문헌)
핵종 동위원소	천연 방사성 핵종	<ul style="list-style-type: none"> - 동일한 핵종은 지질학적 환경에서 이동하는 속도가 다를 수 있다 - 우라늄 동위원소 비율은 방사성 핵종의 이동 속도에 영향을 미친다. 산성/알칼리성 환경은 이온 교환, 흡착, 용해, 침전, 분해 등 다양한 과정을 통해 핵종의 이동에 영향을 미친다. - 천연 방사성 핵종은 지질학적 환경에서 이동하는 속도가 다를 수 있다. - 천연 방사성 핵종은 지질학적 환경에서 이동하는 속도가 다를 수 있다.
	인공 방사성 핵종	<ul style="list-style-type: none"> - 인공 방사성 핵종은 지질학적 환경에서 이동하는 속도가 다를 수 있다. - 인공 방사성 핵종은 지질학적 환경에서 이동하는 속도가 다를 수 있다.
유사현상	지질학적 환경	<ul style="list-style-type: none"> - 지질학적 환경은 방사성 핵종의 이동에 영향을 미친다. - 지질학적 환경은 방사성 핵종의 이동에 영향을 미친다.
	수문학적 환경	<ul style="list-style-type: none"> - 수문학적 환경은 방사성 핵종의 이동에 영향을 미친다. - 수문학적 환경은 방사성 핵종의 이동에 영향을 미친다.
유사현상	지질학적 환경	<ul style="list-style-type: none"> - 지질학적 환경은 방사성 핵종의 이동에 영향을 미친다. - 지질학적 환경은 방사성 핵종의 이동에 영향을 미친다.
	수문학적 환경	<ul style="list-style-type: none"> - 수문학적 환경은 방사성 핵종의 이동에 영향을 미친다. - 수문학적 환경은 방사성 핵종의 이동에 영향을 미친다.

4. 감사의 글

본 연구는 원자력안전연구개발사업의 일환으로 원자력안전기술원의 지원을 받아 수행되었습니다.

5. 참고문헌

[1] Miller W., Alexander R., Chapman N., McKinley I. and Smellier J. (2000). Geological disposal of radioactive wastes and natural analogues. Waste Management Series. Volume 2. Pergamon. Elsevier Science Ltd., Oxford, UK.

[2] Miller, B.; Hooker, P.; Smellie, J.; Dalton, J.; Degnan, P.; Knight, L.; Noseck, U.; Ahonen, L.; Laciok, A.; Trotignon; L.; Wouters, L.; Hernán, P.; Vela, A. (2006). NAnet Network to review natural analogue studies and their applications to repository safety assessment and public communication. Synthesis Report. EUR 2, 1919.