

## 지화학적 관점에서 고찰한 핵종이동에 대한 이해

백민훈

한국원자력연구원, 대전시 유성구 대덕대로 1045

mhbaik@kaeri.re.kr

### 1. 서론

방사성폐기물을 인간과 환경으로 격리하여 안전하게 지하에 처분하기 위해서는 지하에 건설될 처분시스템의 성능평가 및 환경과 인간에 대한 안전성 평가를 통한 안전성 확보가 필수적이다. 특히 처분안전성 평가에서는 과학기술적으로 적절하고 타당한 가정 하에서 개발된 모델을 이용하여 처분시스템의 인공방벽 및 주변 암반의 천연방벽에서 유출된 핵종들의 거동을 예측하는 것이 가장 중요한 부분이라고 하겠다. 그러나 이러한 모델의 사용은 단순화된 가정, 제한된 변수 값들, 모델개발의 한계 등으로 인해 많은 불확실성을 포함하고 있다[1]. 특히, 고준위폐기물 처분과 관련하여 이러한 불확실성의 원인 중에서 가장 중요한 것들 중 하나가 바로 유출된 핵종들(특히, 악티늄 핵종들)의 복잡한 지화학적 반응특성에 기인한 것이라 하겠다. 따라서 본 연구에서는 핵종들의 다양한 지화학적 반응특성과 이들 반응들이 핵종이동 및 안전성 평가에 미칠 수 있는 영향과 역할들을 조사·정리하여 향후 안전성 평가의 불확실성 감소에 필요한 정보를 제공하고자 한다.

### 2. 본론

지하환경(특히, 지하수)에서 방사성 핵종의 다양한 거동 특성을 이해하기 위해서는 우선 핵종들의 화학적 특성에 대한 이해가 필수적이다. 일반적으로 핵분열생성물(Fission Product)이 주요 핵종들인 중·저준위 방사성폐기물과는 달리 사용후핵연료를 포함하는 고준위폐기물에서는 고독성, 장반감기의 악티늄 핵종들이 매우 중요하다. 사용후핵연료에 포함된 악티늄 핵종들의 함량은 약 1% 미만으로 매우 작지만, 환경에서 방사능적 독성(Radiotoxicity)은 수 백 만년의 기간 동안 지배적인 역할을 한다[2].

그림 1에 악티늄 핵종들의 주요 산화상태를 나타내었다. 몇몇 산화환원조건에 민감한 핵종들(즉, U, Np, Pu 등)의 지화학적 거동은 주어진 수용액 조건에서 pH에 의존적인 산화환원 전위(Eh)에 의존하게 된다[2]. 한 예로, 수용액이 중성의 pH에서 강산화 상태가 아니라면, Np는 Np(V)로 안정화되지만, 동일한 조건에서 Pu는 Pu(IV)가 지배적이기는 하지만, 불균등화반응(disproportion)에 의해 Pu(III), Pu(IV), Pu(V), Pu(VI) 등 4가지 상태로 존재하게 된다. 반면에 Am의 경우는 수용액의 산화환원 전위나 pH와 상관없이 Am(III)로 안정화되어 존재하게 된다.

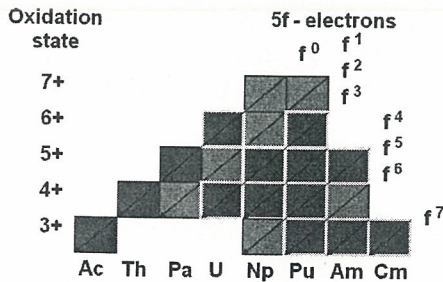


그림 1. 악티늄 핵종들의 산화상태 및 산화수

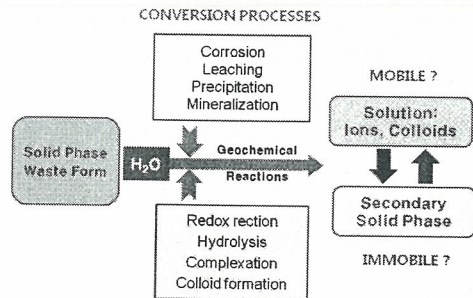


그림 2. 핵종유출 및 이동과 관련된 지화학반응들

지하 환경에서 방사성폐기물 처분장으로부터 유출된 핵종들의 지하매질을 통한 이동은 지하수에서의 핵종들의 화학적 특성뿐만 아니라 주어진 조건에서 화학종의 안정성 및 광물, 암석, 인공방벽 등 다양한 매질과의 지화학반응 특성에 의존한다. 그림 2는 핵종유출 및 이동과 관련된 다양

한 지화학반응들을 도식적으로 보여주고 있다. 보편적으로 지하매질에서 유동적인 화학종은 이온과 콜로이드라 할 수 있다. 이러한 화학종들의 유동성은 다양한 지화학적 변수들에 의해 영향을 받게 된다. 대표적인 지화학적 변수들로는 지하수 조성, pH, Eh, 탄산염 농도, 콜로이드, NOMs(Natural Organic Materials), 미생물(Microbes) 등이 있다. 이러한 변수들의 변화에 따라 핵종들은 산화환원, 침전-용해, 복합화, 콜로이드 형성, 광물화 등 다양한 지화학적 반응들을 수반하게 된다. 따라서 이러한 지화학적 변수들의 영향 및 역할을 이해하고, 특성화하고, 정량화 하는 것이 처분 안전성 평가에 내재된 불확실성을 줄일 수 있는 방안이라고 하겠다.

아울러 유출된 핵종들은 지하수를 따라 이동하면서 다양한 지하매질과 매우 복잡한 상호작용을 하게 되는데, 암석 및 토양 등은 다양한 광물들의 복합체이므로 지하매질과 핵종들의 상호작용은 매우 복잡하다. 특히, 고준위폐기물 처분장과 같이 수 십 만년 이상의 장기적인 관리기간이 필요한 경우, 광물들은 지하수와의 반응 등 다양한 작용에 의해 변화하게 되므로, 처분 안전성 평가를 위해 이를 정확하게 이해하고 정량화하는 것은 매우 힘든 일이다. 그러나 이러한 어려움에도 불구하고 자연 우라늄광이나 다른 고대의 유물들을 활용한 자연유사(Natural analogue) 연구를 통해 어느 정도의 정보를 얻을 수 있다. 특히 핵종이동에 영향을 미칠 수 있는 다양한 지화학적 상호작용들(그림 3 참조)에 대해서는 보다 심도 있는 실험적/이론적 연구와 함께 안전성 평가에 반영할 수 있는 정량적 평가방법이 개발되어야 할 것이다.

최근에는 콜로이드 및 미생물과 같이 핵종/지하매질과의 복합적인 지화학적 상호작용을 유발하는 매체들의 역할과 중요성에 대한 연구들이 다수 수행되고 있다. 비록, 이들 매체들이 핵종이동에 미치는 영향을 정량적으로 평가할 수 있는 충분한 자료와 평가 방법론들이 아직은 제시되고 있지 못하지만, 그 중요성은 점차 확대되고 있는 추세이다. 특히, 레이저분광법이나 X-선분광법과 같은 첨단 분석방법의 발달과 함께 그동안 많은 가정을 통해 무시되어 왔던 미시적 과정들에 대한 미시적 접근법은 처분이라는 거시적인 문제를 좀 더 과학적으로 풀어갈 수 있는 중요한 방법론을 제시하고 있다고 하겠다.

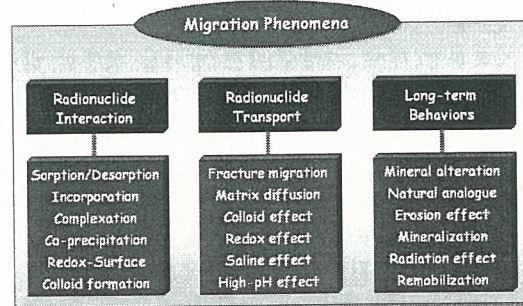


그림 3. 핵종이동과 관련된 다양한 지화학적 상호작용들

### 3. 결론

지하매질을 통한 핵종이동 특성을 규명하기 위해서는 고준위 폐기물의 화학적 특성과 지하 처분환경에서 핵종들의 복잡한 지화학적 반응들에 대한 이해가 필요하다. 또한 처분 안전성평가의 불확실성을 저감하기 위해서는 핵종이동에 영향을 미칠 수 있는 다양한 지화학적 반응특성들을 고려할 수 있는 정량적 평가방법의 개발이 필요하다.

### 사사

본 연구는 교육과학기술부의 원자력기술개발사업의 일환으로 수행되었습니다.

### 참고문헌

- [1] H. El-Ghonemy, L. Watts, L. Fowler, Treatment of uncertainty and developing conceptual models for environmental risk assessments and radioactive waste disposal safety cases, Environ. International, Vol.31, p.89-97, 2005.
- [2] J. I. Kim, Significance of Actinide Chemistry for the Long-Term Safety of Waste Disposal, Nucl. Eng. Technol., Vol.38, p.459, 2006.