

바이오-나노우라늄 형성과 고준위폐기물처분에서의 중요성

이승엽, 백민훈, 손우정

한국원자력연구원, 대전광역시 유성구 대덕대로 1045

seungvlee@kaeri.re.kr

1. 서론

원자력발전의 부산물인 고준위폐기물 처분 문제는 원자력발전을 에너지로 사용하는 나라들의 공통적인 관심사이다. 원자력에서 필연적으로 발생하는 고준위폐기물을 처분하는데 가장 안전한 방법중의 하나가 결정암질 암석의 지하심부에 처분하는 방법이다. 이 방법을 대부분의 원자력 선진국들이 수용하고 있으며, 지난 수십 년간 관련 연구들을 수행하여 왔고 많은 연구성과도 달성하였다. 그렇지만, 아직까지 핵종들의 장기거동 및 안전성 확보는 쉽지않은 과제로 남아있다. 특히, 수 천, 수 만년 이상 지하심부 조건의 지화학작용 및 핵종 거동을 이해한다는 것은 쉽지 않다. 또한, 이렇게 오랜세월동안 지하심부 처분장의 환경을 관리하고 조절할 수 있는 확실한 방법을 찾는 것도 여간 어렵지 않다.

지하심부에는 다양한 미생물들이 살고 있으며, 지하 깊숙이 내려갈수록 산소가 희박한 곳에서 성장하는 혐기성박테리아가 번식하고 있다. 특히, 금속환원 미생물들이라고 일컫는 혐기성박테리아들이 지하 깊숙한 곳에 생존하고 있으며, 이들은 중금속 혹은 핵종원소들을 환원시켜 용존상태의 이온들을 황화광물 및 기타 금속광물로 광물화시킬 수 있다. 우리들의 관심은 우라늄과 같은 핵종들이 미생물에 의해 광물화되고 낮은 용해도로 인해 지하수를 따라 원거리로 이동될 수 있는 가능성이 획기적으로 감소되는 부분이다. 이는 고준위폐기물의 장기안전성과 매우 밀접한 관련을 가지고 있다. 이에 본 실험은 지하심부 박테리아를 실험실에서 배양하여 우라늄과의 반응을 통해 바이오-나노우라늄광물의 형성 및 기작을 살펴보고자 하였다. 이를 통해 고준위폐기물처분에서의 미생물의 중요성을 새롭게 인식하고 향후 이들의 효과적인 이용방안을 도출하는 것을 목표로 하고 있다.

2. 실험 및 결과

실험에 사용된 박테리아는 *S. putrefaciens* CN32로써 금속환원미생물이며, 산소가 없는 극한 환경에서 생존가능한 혐기성미생물이다. 이 박테리아를 TSB(tryptic soy broth) 배양액을 이용하여 증식하였으며, 증식한 이후 증류수 및 NaHCO_3 버퍼용액으로 세척한 후 실험에 사용하였다. 실험조건은 8 mg/L protein의 미생물을 투입하였고 우라늄의 농도는 $5 \times 10^{-5} \text{M}$ 로 맞추었다. 30 mM NaHCO_3 용액조건에서 Ca, Mg, K, P, Fe, Mn 원소가 수십 ppm 수준으로 첨가되어 일반 지하수의 용존성분 조건을 충족하였다. 실험은 약 2개월간 진행되었고 30°C조건에서 120 rpm으로 교반하면서 주기적인 간격으로 용액시료를 채취하여 분석하였다.

CN32와 반응하는 용존 우라늄(U(VI))은 U(IV)로 환원되면서 나노광물을 형성하였고, 초기의 용존 우라늄의 농도는 점차 감소하였다. 약 10일 이후에는 용액상의 U(VI) 농도가 거의 제로에 가까웠으며, 대부분의 우라늄은 용액상의 다른 양이온들과 반응하면서 다양한 나노광물을 형성하였다.

용액상의 다른 양이온들의 농도가 높지 않을 때에는, 우라늄이 미생물에 의해 환원되면서 나노 크기의 uraninite(UO_2)를 형성하였다. 형성되는 과정은 처음 미생물의 외벽에 작은 핵에서 출발하였고 점차 성장하면서 uraninite 광물이 형성되었다. 또한, 미생물 바깥 주변에서도 비슷한 과정으로 형성된 바이오-나노우라늄이 관찰되었으며, 이들은 독립적으로 존재하기 보다는 각 결정체들이 상호 연결된 모습으로 관찰되었다. 반면, 인(P)과 같은 성분이 용액상에 존재할 때, 이들은 우라늄과 상호반응 및 결합하면서 미생물 표면 및 주변부에 환원된 나노우라늄광물인 ningyoite($\text{CaU}(\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$)라는 우라늄인산염 광물을 만들었다. 우라늄인산염 광물들의 가장 큰

특징중의 하나는 용해도가 매우 낮은 불용성에 가까운 광물이라는 점이고, 지하수에 쉽게 녹지 않고 오랫동안 안정하게 존재할 수 있는 물질이라는 점이다. 결론적으로, 지하심부 미생물 작용에 의해 우라늄과 같은 핵종들은 빠르고 쉽게 광물화될 수 있으며, 이렇게 형성된 바이오-나노광물들은 지하수 성분들과 결합하여 불용성 광물로 존재하면서 폐기물처분장의 핵종의 장기 안정성에 기여할 것으로 보인다.

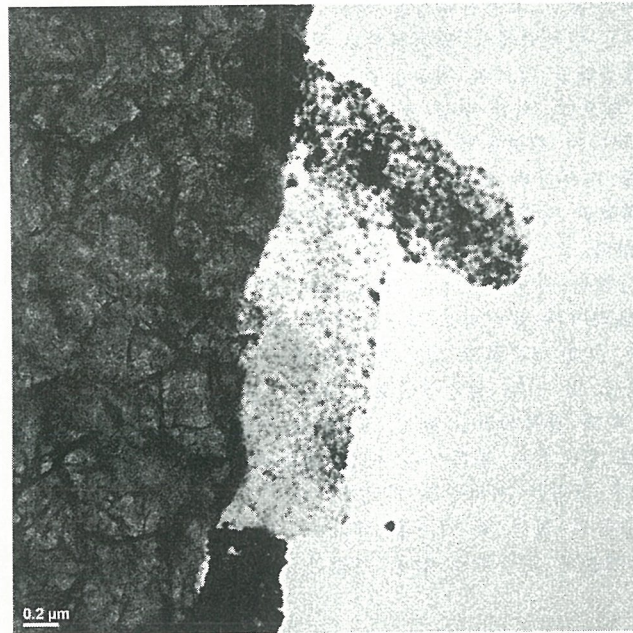


Fig. 1. CN32 bacterium with nano-uranium particles aggregated on its surface

3. 결론

고준위폐기물의 지중처분시 장기적인 안전성을 예측하기 힘든 상황에서 지하심부미생물의 역할은 매우 클 것으로 기대된다. 이들의 핵종과의 상호작용 및 바이오-광물화작용이 새롭게 그리고 분명하게 밝혀지고 그들의 기작이 적절히 처분시스템에 활용된다면, 오랜 기간 능동적으로 핵종의 장기거동을 제어할 수 있는 요소기술을 개발할 수 있을 것으로 사료된다.

사 사

본 실험을 위해 도움을 주신 전남대학교 노열 교수님과 기초과학지원연구원의 이영부 박사님께 감사의 뜻을 전합니다. 본 연구는 원자력중장기연구개발의 일환으로 교육과학부의 지원을 받아 수행되었습니다.