

사용후핵연료 심층처분 이슈와 대책



민기복

서울대학교 에너지자원공학과 교수

- 서울대학교 자원공학과 학사, 석사
- 스웨덴 왕립공과대학 암반공학 박사
- 서울대학교 에너지자원공학과 교수

사용후핵연료 관리대책의 필요성

원자력에너지는 우리나라의 주요 에너지원으로 가동 중인 24기의 원자력발전소는 2020년 기준 1차 에너지의 11.3%, 전력 비중의 29%를 담당하고 있다. 원자력 에너지는 장점과 단점이 있으나 가장 중요한 단점으로 사용후핵연료의 처리와 관련된 이슈를 꼽을 수 있겠다. 경수로의 경우 사용후핵연료의 방사성 독성은 천연우라늄 수준으로 떨어지는 데 약 30만 년 소요된다고 한다¹⁾. 우리나라에는 매년 750톤의 사용후핵연료가 발생하고 있으면 현 정부의 에너지전환 정책을 감안하더라도 앞으로 약 36,500톤 정도²⁾의 사용후핵연료가 발생할 것으로 예상된다. 우리나라의 경우 원자력발전소를 가동한 지 40

여 년이 지났지만 아직 사용후핵연료에 대한 확실한 관리방안이 수립되지 못한 것은 뼈아픈 현실이며 우리 사회가 보다 적극적으로 사용후핵연료 관리 방안을 마련해야 한다.

사용후핵연료의 심층 처분

사용후핵연료의 처분 방식은 우주처분, 빙하 처분, 해양처분 등의 방식이 논의된 바 있으나 국제원자력기구는 경제성과 기술성 등을 고려하였을 때 심층처분을 가장 유력한 방안으로 권고하고 있다. 심층처분개념 중 가장 널리 알려진 방식은 [그림 1]에 나타나 있는 KBS-3³⁾시스템으로 지하 약 500m 내외의 심도의 암반에 터널을 굴착하여 그 속에 처분공을 만들어 처분

1) 한국원자력안전기술원 방사성폐기물 안전관리 통합정보 시스템

2) 장흥, 조용준, 양명호, 우리 손으로 사용후핵연료를 안전하게 관리하는 기술 개발, 원자력정책 Brief Report, 2020-03호

3) 이는 스웨덴어로 K mBr nsleS kerhet (원자력연료안전, Nuclear Fuel Safety)의 줄임말로 스웨덴과 핀란드에서 채택하고 있다.

하는 개념이다. KBS-3 시스템에서는 직경 약 1.75m, 깊이 약 8m의 처분공에 사용후핵연료를 포함한 처분용기(캐니스터라 불림)를 적치하고 벤토나이트 완충재를 채운 후, 처분터널은 뒤 채움한다. 이 방식에서는 구리용기, 벤토나이트 및 뒤채움재로 구성된 공학적 방벽(Engineered Barrier), 그리고 지하암반으로 구성된 자연방벽(Natural Barrier) 등 2단계의 방벽이 사용후핵연료를 인간생태계로부터 최대한 격리시키는 것이다. 용기를 구리 성분으로 쓰는 것은 부식에 강하기 때문이며, 벤토나이트가 쓰이는 이유는 지하수가 통과하기 힘든 낮은 투수율과 높은 흡착특성 때문이다.

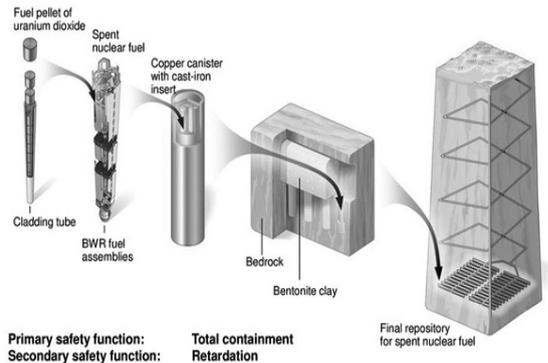
이외에도 지하 약 5km 심도의 시추공에 처분하는 심부처분공 기술⁴⁾이 있으며 심층처분 방식에서 구리용기를 다층으로 적치하거나 처분터널을 복층⁵⁾으로 설치하는 등 처분효율을 향상시키기 위한 연구가 진행되고 있다.

심층처분 개념의 장단점과 특징

심층처분 개념의 장점은 안전성, 경제성, 기술성 등의 측면에서 정리할 수 있다.

첫째, 심층처분은 인간생태계와 약 500m 이상 이격이 되어 있으므로 이 자체로 지표에서 관리하는 것에 비해 더욱 안전하다. 특히, 앞서

언급한 다중방벽 시스템이 모두 기능을 못하고 지하수 등을 따라 누출이 일어날 확률은 각종 사고, 테러, 지진 등에 의해 지상의 시설에서 방사능 오염이 일어날 확률보다 낮다고 보는 것이 합리적이다. 특히, 지하시설은 지표에 비해 지진에 상대적으로 안전한데 1995년 일본 고베에서 발생한 규모 7.3의 지진으로 인해 지상의 피해는 컸으나 터널에서는 매우 제한적인 피해가 발생하였음이 보고된 바 있다.



[그림 1] 스웨덴에서의 사용후핵연료 심지층 처분 개념

둘째, 사용후핵연료를 지표에서 초장기간 동안 관리를 할 가능성에 비해 심층처분시설의 경우 입구만 밀봉하고 나면 추가적인 관리 필요성은 최소화되므로 상대적으로 비용이 적을 것으로 예상된다. 일반적으로 지하 500m에 수 km의 터널을 시공하는 데 드는 비용은 수만 년 이상 관리하는 비용에 비할 바가 아니기 때문이다.

셋째, 심지층 동굴처분 방식에는 이미 검증이

4) 박보나, 권세하, 민기복, 고준위방사성폐기물 심부시추공 처분 기술의 현황과 전망 - 대구경 장성도 시추공 거동 특성을 중심으로, 한국자원공학회지, 2017, 54(4), 377-388

5) Cho, W. J., Lee, C., & Kim, G. Y. (2017). Feasibility Analysis of the Multilayer and Multicanister Concepts for a Geological Spent Fuel Repository. Nuclear Technology, 200(3), 225-240

된 기술이 적용된다. 남아프리카 공화국에는 심도 4km 이상의 광산이 존재하며, 지하 1-2km에서 존재하는 광물자원을 굴착을 통해 개발하는 기술 등은 이미 널리 활용이 되고 있으며 지하철, 터널 등 지하공간의 개발은 전 세계적으로 매우 활발하다. 따라서 사용후핵연료의 심층처분장에 대한 안전성 평가와 조사는 많은 연구개발을 필요로 하지만 지하 500m를 굴착하여 처분공을 만들고, 심층처분장을 만드는 것 자체는 난해한 기술이 아니며 이미 검증이 되어 있다.

이러한 심층처분 방식은 어려움 또한 엄연히 존재한다.

첫째, 초장기간의 처분 개념과 연관된 불확실성이다. 구리용기는 장기간 부식이 일어나지 않을 가능성이 크며, 낮은 벤토나이트의 투수율과 흡착특성은 방사성 핵종이 처분공 주변으로 벗어나는 것을 방지해 줄 것이다. 또한 견고하고 낮은 투수율을 갖는 암반에 의한 자연방벽은 다시 한 번 지하수를 통한 방사성 핵종의 유출을 막아줄 가능성이 크다. 하지만 이러한 용기-벤토나이트-암반에 이르는 다중방벽이 수만여 년 동안 온전히 기능하리라는 것을 직접 검증하는 것은 매우 어렵고, 간접적인 유추, 컴퓨터 모사, 자연유사 등의 방법에 의존한다.

둘째, 적합부지의 불확실성이다. 심지층 처분의 주요 개념은 공학적 방벽과 더불어 지하의 암반 자체가 방벽이 되어 방사성핵종이 지하수

를 통해 유출되는 것을 막는 것이다. 다만, 암반은 종류에 따라 매우 다른 특성을 갖고 있으며 심지층 처분장 건설을 위해 부지조사를 통해 적합한 암반을 찾는 것이 중요하다. 즉, 우리는 자연방벽을 '발명'할 수 없으며 '발견'하여야 한다⁶⁾. 심층처분장에 적합한 암종은 통상 셰일, 이암 등의 퇴적암 계열, 화강암, 편마암 등의 결정질 암 계열, 암염, 화산암 계열 등으로 구분할 수 있으며 해당 국가의 지질 특성에 따라 적합한 암종을 찾아야 한다.

위와 같은 어려움 때문에 60여 년간의 원전 운영 역사에도 불구하고 세계 어느 나라에서도 아직 사용후핵연료의 지층처분을 실시한 나라가 없다고 생각된다. 하지만 2015년 세계최초로 핀란드에서 고준위 방사성 폐기물 처분장 건설의 허가가 발급되었고, 스웨덴에서는 2009년 최종 부지를 확정하고, 관련 인허가 절차가 진행되고 있는 점은 고무적인 일이다.

지하암반구조물의 특징

심층처분개념은 앞서 언급하였듯이 이미 자원개발이나 유류비축기지 등 지하공간개발에서 활용된 기술을 많이 사용한다. 하지만 이러한 기술은 우리나라에서는 상대적으로 낯설게 느껴질 수 있고, 일반인 중 지하 500m에 내려가 본 사람은 드물 것이다. 심층처분개념의 주 대상으

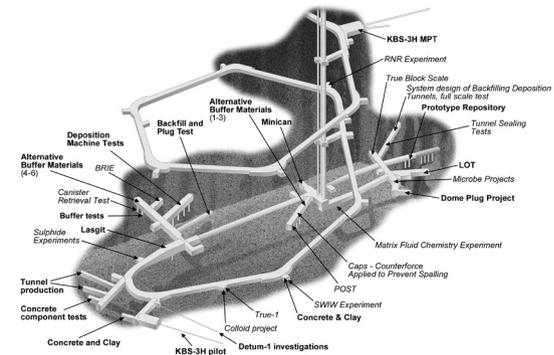
6) 배대석, 고용권, 이상진, 김현주, 최병일, 사용후핵연료 심층처분을 위한 지하연구시설(URL)의 필요성 및 접근 방안, 한국방사성폐기물학회지, 2013, 11(2), 157-178

로 삼는 암반과 관련 기술의 특징을 다음과 같이 설명할 수 있다.

첫째, 재료로서의 지하암반은 불균질하고, 서비스 하중 등 경계조건을 파악하기 상대적으로 어렵다. 룩데월드타워와 같은 고층 건물을 짓기 위해서는 콘크리트, 철근 등의 재료를 ‘제작’하며, 방문자의 숫자 등 하중에 대한 ‘계산’을 통해 기둥의 설계에 활용한다. 하지만 암반은 자연물 질로서 설계기준에 따라 제작된 것이 아니며 이의 역학적 수리적 열적 성질을 ‘조사’해야 한다. 암반에 가해지는 하중은 수 만 년 동안 이어진 지각작용의 결과이기에 ‘계산’할 수 없고, 이 역시 특수한 측정기술을 통해 ‘조사’되어야 한다. 특히, 암반의 성질은 크기에 따라 상이한 결과를 나타내는 경우가 많으며, 이에 따라 실내실험, 시추공 조사 등 다양한 방식의 조사가 필요하다.

둘째, 심층처분 관련기술은 의술에서의 임상과 같이 실증기술이 중요한 역할을 한다. 의사들이 수많은 임상경험을 통해서 양성되듯 실제 암반에 대한 관찰과 조사, 예측 및 확인 등의 과정을 거치며 지질학자, 지하수기술자, 암반공학 기술자 등이 양성이 된다. 따라서 심층처분 시설과 관련된 기술은 인수합병, 기술이전 등을 통해 확보할 수 있는 제조업 기술과 확연히 구분된다. 이러한 측면은 원전 수출 등 제조업 중심의 개념에 익숙한 우리나라 정책담당자와 기술자가 흔히 간과하기 쉬운 측면으로 선진국 등지에서

지층처분 관련 기술이 개발되었다 하더라도 우리나라 지질조건에 맞춘 우리 스스로의 기술역량이 반드시 필요하다.



[그림 2] 스웨덴 애스피 약 450 미터 심도 지하연구실의 다양한 실험 공간 (www.skb.se)

심층처분을 위한 제언

우리나라는 UAE에 원전을 수출하는 등 세계 최고의 원전기술을 갖고 있다고 한다. 하지만, 원전가동 후 필수적으로 발생하는 사용후핵연료를 관리하는 기술은 선진국 대비 75%⁷⁾ 내외에 머무르고 있어, “원전기술과 사용후핵연료 관리기술 수준의 비대칭성”이 매우 심각하다. 그중에서도 비대칭성이 가장 심각한 분야는 심층처분관련 기술이라 생각된다. 본인은 이러한 비대칭성을 극복하기 위한 첫 번째 단계가 지하연구실(Underground Research Laboratory)의 건설 및 운영이라 생각한다. 지하연구실은 심

7) 과학기술정보통신부 등, 2019, 사용후핵연료 저장 처분 안정성 확보를 위한 핵심기술개발 사업 기획보고서

층처분을 지원하기 위해 현장실증, 예비안전성 평가, 지하심부 지질특성 조사를 위해 유사 심도(약 400-500m)에 건설한 연구실을 말하며, 의술에 비유하면 핵심 임상시설이라 할 수 있다 (그림 2 참조). 미국, 일본, 프랑스, 스웨덴, 핀란드, 스위스 벨기에 등 원자력 이용국들은 대부분 20-30년 전인 1990년대부터 지하 400m 이하 지하연구실을 운영해 오고 있는 반면 아직 우리나라에는 지하연구실이 없다. 이는 원자력 선진국인 우리나라의 위상을 고려하면 놀라운 현실이라 생각된다. 사용후핵연료 심층처분은 원자력 선진국들도 어려움을 겪는 난제임에 분명하다. 하지만 지하연구실은 대부분 선진국에 비해 운영되는 반면에 우리나라에만 유일하게 존재하지 않아 선진국에 비해 부족한 심층처분 관련기술의 주요 원인으로 지목된다. 앞서 언급하였듯이 지하 암반을 대상으로 한 연구는 마치 의술과 같아서 실제 유사 조건에서의 지하연구실 운영은 처분장 안전평가, 연구진 양성, 대

중과의 소통 증대에 큰 기여를 할 수 있다. 우리나라에는 2006년 한국원자력연구원 내에 지하연구시설(KURT)를 건설하여 운영해오고 있으나 최고심도 120m, 총 터널 길이 551m로 스웨덴의 지하연구실의 심도 450m, 터널 총길이 3.5km에 비하면 심도는 약 4분의 1, 총 연장은 6분의 1 정도에 불과하다. 특히, KURT는 심도가 심층처분시설의 목표 심도가 아니라는 근본적인 제약이 있기에 본격적인 지하연구실 연구를 위한 사전 작업으로 큰 역할을 하였으나 선진국 기준에 맞는 지하연구실 건설이 이제는 반드시 필요하다.

사용후핵연료의 심층처분은 원자력에너지의 혜택을 받은 우리 세대가 그 책임을 후속세대에 떠넘길 수 없다는 측면에서 기술적 문제임과 동시에 윤리적인 문제이기도 하다. 사용후핵연료의 심층처분에 관한 우리 사회의 더욱 많은 관심이 필요하다. **KMIF**