

유럽의 고준위폐기물 처분기술조사

- 인공방벽기술 -

박 준 범*1
전 관 식*2

원자력(atomic energy)은 화석에너지(fossil energy)를 대체 할 수 있는 가장 안전하고 효율이 높은 에너지이다. 원자력산업의 부산물로 방사성폐기물(radioactive wastes)이 얻어지는 바, 이의 처리가 원자력산업과 그의 관련 연구분야에서 해결하여야 할 과제로 대두되고 있다. 방사성물질 및 폐기물의 노출로 인한 인간과 주변환경의 피해는 구 소련의 체르노빌 원전사고 등의 경우를 고려 할 때 매우 심각한 것으로 우리가 이미 주지하고 있으며, 특히, 원자력발전으로 발생하는 연소 후의 핵연료(혹은, 사용후핵연료, spent fuel)는 고준위폐기물로(high-level wastes, HLW)분류되며 그 피해가 더 커질 수 있다. 따라서 고준위폐기물의 핵종별 방사성농도와 그의 붕괴로 발생하는 열은 고준위폐기물처분시 고려해야 할 가장 중요한 인자가 된다.

원자력산업에서 채택하는 방사성폐기물의 최종처분전략은 폐기물을 수용하는 인공방벽(engineered barriers)에 의한 핵종의 환경누출 저지능력과 지질환경에 의한 격리능력을 이용하는 것이다(natural barriers). 고준위폐기물의 처분시설이 지하에 건설되는 만큼 대심도지반조사기법, 암반역학, 응용지질학, 지하수리수문학, 대심도굴착이론 및 핵종의 지반내 흡착·이동·전이 모델링 등 이를 연구하는 지반공학자, 응용지질학자, 지구화학자 등의 역할이 매우 중요하리라 본다. 이 글에서는

고준위폐기물의 특성을 살펴보고 유럽의 처분 방법과 연구동향을 소개하고자 한다.

고준위폐기물은 중·저준위폐기물(low/intermediate level wastes)과는 달리 방사성농도와 붕괴열이 대단히 높기 때문에 주로 사람에게 미치게 될 방사선적 안전성과 처분장 주변 암반에 미치게 될 열-기계적(thermo-mechanical) 영향 및 인공방벽에 미치게 될 열적 변형 등 주변 구성재의 열에 대한 장기적 전진성이 대단히 중요하다. 또한 방사선에 대한 위해정도가 수만년에서 수백만년에 이르고 있으므로 이를 처분한 다음 적어도 수만년이상 폐기물을 안전하게 인간환경과 생태계로부터 격리시킬 수 있어야 한다. 따라서 이의 처분에 따른 안전성을 보장할 수 있는 최적의 처분방법을 마련하기 위하여 지질환경여건과 폐기물의 포장양상을 고려한 다양한 대심도처분 방법들이 활발히 연구·개발되고 있다.

대심도처분방법은 지표면으로부터 적어도 300m 이상의 지하에 위치하는 모암(host rock)내에 방사성폐기물 처분장을 건설하여 이곳에 폐기물을 처분하는 방법으로서 처분장이 갖추어야 할 기본조건은 다음과 같다: ① 의도적이건 의도적이지 아니건 외부로 부터의 침입을 방지할 수 있도록 충분히 깊어야 하고; ② 건조하거나 대단히 적은 지하수의 흐름이 형성되며, 극히 투수성이 낮은 모암에 위치하여야 하고; ③ 폐기물 포장물은 물리적 및 화

*1 정희원, 서울대학교 공과대학 토목학과 조교수

*2 한국원자력연구소 고준위핵폐기물 처분기술개발팀장

학적 특성이 적합하여야 하고; ④ 지질학적으로 안정된 지역(지진 등에 대하여)에 위치하여야 하며; ⑤ 방사성핵종의 이동을 방지하거나 지연시킬 수 있는 방벽(물리적 및 화학적)을 제공하여야 하고; ⑥ 모암은 요구되는 폐기물의 격리 기간보다 더 장기간 전달 수 있는 특성을 지녀야 하며; ⑦ 장래에 경제적 가치가 있는 장소이어서는 안된다.

방사성물질의 환경누출에 대한 억제 또는 지연 기능을 자연방벽, 즉 지질환경이 충분히 발휘한다면 더할 나위 없겠지만, 자연방벽의 비균질성과 그 성능에 대한 불확실성 때문에 이를 보완하기 위한 인공방벽의 필요성이 강력히 부각되고 있다. 이러한 인공방벽은 폐기물, 처분용기, 완충 및 뒤채움재, 기타 처분장의 공학적 구조물 등의 다중방벽형태(multiple safety barrier system)로 구성된다. 유럽의 고준위폐기물에 대한 처분방법과 연구동향은 다음과 같다.

영국의 고준위폐기물(이하 HLW) 처분방법은 다중방벽개념으로서, 먼저 HLW를 borosilicate glass로 유리화(vitrification)하고 이를 금속성처분용기에 넣는다. 처분용기는 강재(steel), 구리(copper), 티타늄(titanium) 등으로 만들어진다. HLW가 내장된 처분용기는 Na-Bentonite 완충재(buffer)로 둘러싸며, 처분작업이 끝나면 전체 처분장의 일정부분 혹은 전체를 뒤채움(backfill)한다. 영국의 AEA Technology(<http://www.aeat.co.uk>)에서는 HLW의 유리화와 관련하여 borosilicate의 부식저항도(corrosion resistance)와 침출과정(leaching processes)을 실험을 통하여 연구하고 있으며, HLW가 지하수와 접촉하게될 때 발생하는 지반내 오염에 대한 위험도 평가(risk assessment)도 진행중이다. 특히 핵종의 지반내 이동·흡착에 대한 연구가 활발하며, 이와 관련된 컴퓨터 모델링 S/W도 개발되어 있다(CONNECTFLOW, NAMMU, NAPSAC 등). 뒤채움재에 대한 물성조사는 팽윤성, 소성, 투수성, 강도, 흡착성 등 다양한 관점에서

이루어지고 있다.

국토의 대부분이 산악으로 구성되어있는 스위스의 경우도 NAGRA (<http://www.nagra.ch/>)를 중심으로 450미터 지하에 연구시설을 설치하고 고준위폐기물의 심지층처분기술개발에 박차를 가하고 있다. 융프라우요흐, 아이저 지역을 포함하는 화강암괴에 위치한 그림젤(Grimmel) 지하연구시설에서는 독일, 일본, 미국, 스웨덴, 프랑스, 스페인, 대만, 벨기에, 핀란드 등의 다국적협력연구가 진행되고 있다. HLW의 처분은 다중방벽체제를 택하고 있으며 그림1에 설명되어 있다. 그림에 표시된 바와 같이 유리화한 HLW는 낮은 용해도와 열에 대한 내구성을 가져야한다. 이 HLW를 내장하는 금속처분용기(canister)는 부식에 강하여야 하며 최소 1,000년은 완벽하게 HLW를 외부와 차단시켜 주어야 한다. 이 처분용기를 둘러싸는 완충제로는 영국과 마찬가지로 주로 bentonite가 사용된다. 이는 투수성이 낮고 HLW 유출시 핵종을 흡착시켜 외부로의 유출을 최소화시킬 수 있기 때문이다. 이와같은 인공방벽 시스템은 대심도에 위치하게 되는데, 인공방벽 주변의 지질은 가급적 지하수의 유동이 없고, 지질학적으로 매우 안정된(지진 등에 대하여) 지역에 위치하여야 하고, 핵종의 이동을 최소화시킬 수 있는 지반구조를 지녀야 한다.

그림젤 지하연구시설에서 현재 진행중인 연구로는 뒤채움재의 장기변형거동을 관측하는 것과 핵종의 흡착 및 이동에 관한 연구가 활발하며, 인공방벽의 하나인 처분용기에서 부식에 의하여 생성된 가스의 지반내 확산현상을 규명하려는 연구도 이루어지고 있다. 흥미있는 연구로는 FEBEX(Full-scale Engineered Barrier EXperiments) Project가 있다(그림 2). 이는 2020년 이후에 실제 고준위폐기물을 처분하게 될 때의 상황을 재현하여 실제로 발생하게 될지도 모르는 문제점을 파악하고 이에 대처하여 폐기물처분의 protocol을 만들려는 시도이다. 이 경우 고준위폐기물 대신 전기히터가 내장된 강철봉으로 이를 모사한다.

Safety barrier system for high-level waste

Glass matrix (in steel mould)

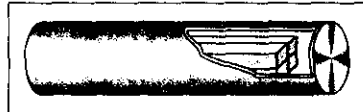
- Low corrosion rate of glass
- High resistance to radiation damage
- Homogeneous radionuclide distribution



or

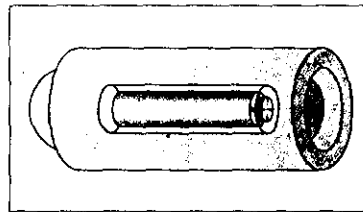
Spent fuel elements

- Low UO_2 dissolution rate
- High radiological / thermal stability of UO_2 -matrix



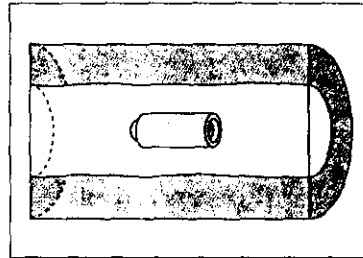
Steel canister

- Completely isolates waste for > 1000 years
- Corrosion products act as a chemical buffer
- Corrosion products take up radionuclides



Bentonite backfill

- Long resaturation time
- Low solute transfer rates (diffusion)
- Retardation of radionuclide transport (sorption)
- Chemical buffer
- Low radionuclide solubility in leachate
- Colloid filter
- Plasticity (self-healing following physical disturbance)



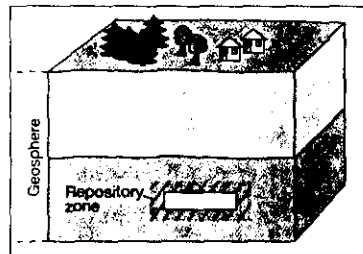
Geological barriers

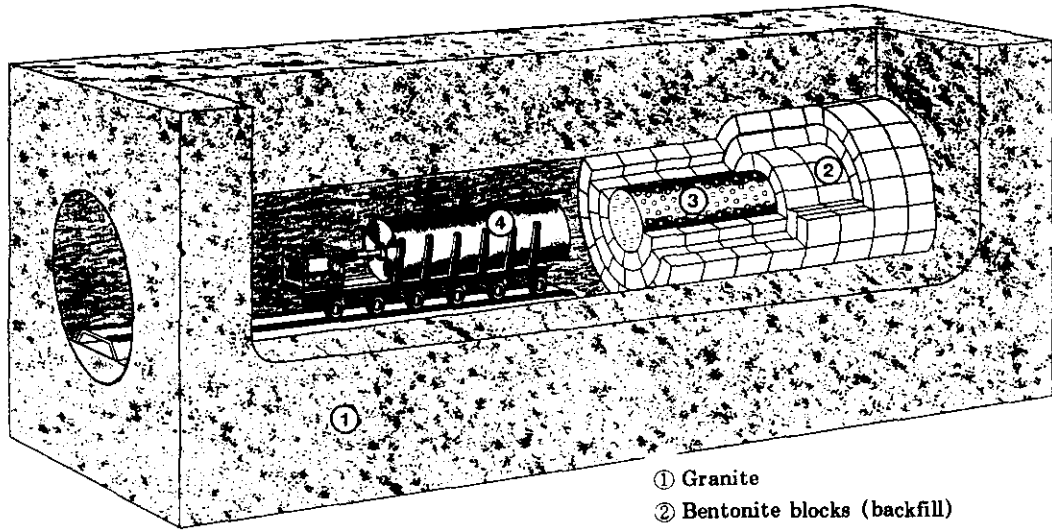
Repository zone:

- Low water flux
- Favourable geochemistry
- Mechanical stability

Geosphere:

- Retardation of radionuclides (sorption, matrix diffusion)
- Reduction of radionuclide concentration (dilution, radioactive decay)
- Physical protection of the engineered barriers (e.g. from glacial erosion)





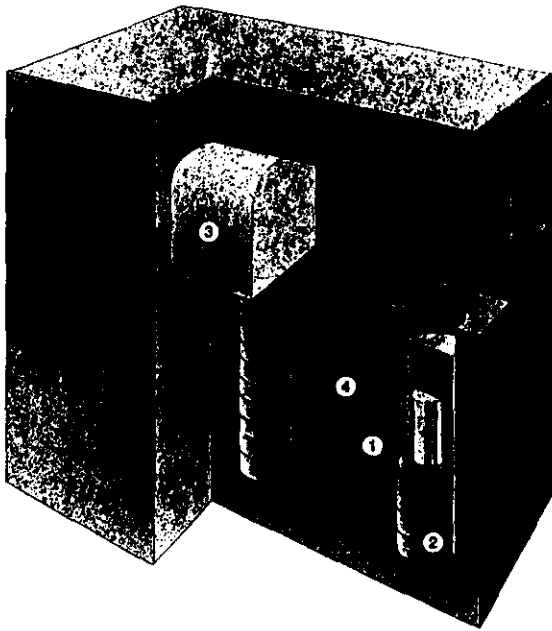
- ① Granite
- ② Bentonite blocks (backfill)
- ③ Liner
- ④ Steel canister with heater

고준위폐기물 관리에 있어서 최선진국이라 할 수 있는 스웨덴의 경우, 사용후핵연료는 재처리 하지않고 바로 고준위폐기물로 처분하는 정책을 취하고 있다. 1985년이후 사용후핵연료는 습식저장시설(CLAB)에 저장하며 저장된 사용후핵연료를 2020년경 까지 심지층처분시설을 건설하여 영구 매립한다는 계획을 세워놓고 있다. 심지층처분에 필요한 실증적인 연구를 진행시키기 위하여 SKB (the Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company, <http://www.skb.se/>)를 주축으로 1995년에 아스포섬에 Hard Rock Laboratory를 건설하였다. 이는 총연장 4 Km, 수직깊이 450 m에 달하는 터널로 건설공사시 굴착은 발파(blasting)와 TBM(Tunnel Boring Machine)을 이용하였다. 굴착시 발생하는 암석파편등은 bentonite와 혼합하여 뒤채움재로 사용가능하다.

스웨덴의 경우도 HLW는 다중방벽체제로 처분한다는 개념이다(그림 3). HLW는 겉면이 구리로 되어있고 내부는 강재로된 처분용기에 담는다. 이는 구리가 부식에 잘건디고 강재는

기계적인 강도가 우수하여 HLW를 외부와 효과적으로 차단할 수 있기 때문이다. 이 처분용기는 미리 만들어진(prefabricated) 파인애플 조각모양의 bentonite block 내부에 삽입시킨다. 처분동굴은 bentonite와 sand의 혼합체로 뒤채움하게되는데, 이 경우 뒤채움다짐을 어떻게 하여야 효과적인지에대한 연구가 진행되고 있었다. 이 연구시설에서는 심지층처분시설 부지선정을 위한 조사방법, 주변모암 및 지하수 문학적조건, 방사성핵종의 지반내 이동확산 등에 대한 다양한 연구가 이루어지고 있었다. 특히 완충재의 장기거동분석 실험은 매우 중요한 의미를 갖게 되는데 실제 HLW의 처분과 같은 물리·화학·생물학적인 조건을 모사하여 20년 이상의 장기 관측으로 완충재의 거동을 조사하는 실험이다.

이상과 같이 유럽의 고준위폐기물 처분연구 시설에서는 다국적연구기관의 협조아래 매우 활발한 연구가 이루어지고 있었다. 우리나라도 원자력발전이 시작된 이래로 사용후핵연료는 계속해서 발생, 누적되고 있다. 현재는 습식 혹은 건식저장하고 있으나 앞으로 30~40년 이후



- ① Copper canister with spent fuel
- ② Disposal borehole backfilled with bentonite
- ③ Tunnel with sand/bentonite backfill
- ④ Host rock

Figure from 1994 Annual Report of SKB, Stockholm

에는 실제로 이를 심지층에 처분하거나 재처리 하여야 한다. 앞으로 30년이라는 기간은 사람에게 따라서는 아직도 먼 훗날의 일이라고 생각

될수도 있겠으나 고준위폐기물의 처분기술은 단기간에 얻어지는 것이 아니고, 우리나라의 지반조건과도 매우 밀접한 관계가 있는만큼 이에 대한 연구가 심도있게 진행되어야 하겠다. 우리나라의 지질환경여건에 적합한 고준위폐기물의 심지층처분개념을 마련하기 위하여 한국원자력연구소를 중심으로 인공방벽특성, 지질환경특성, 안전성 평가, 지하해종거동, 처분모의시험 등 4개분야로 세분되어 연구가 진행되고있다. 우선 고준위폐기물의 제반특성 조사·분석결과를 토대로 국내산 점토광물 및 예상 국내지질환경여건을 고려하여 처분용기개념을 설정하고 이의 열해석을 통한 다양한 처분개념을 도출하고 총체적 안전성/기술성/경제성을 시나리오별로 비교·분석하여 궁극적으로 우리 고유의 처분개념을 마련하고자 노력하고있다. 특히, 국내에 축적되어 있는 관련기술수준과 향후동향에 대한 파악과 국내 심부의 지질환경조건은 물론이고 국내 자원의 활용성을 면밀히 분석하여 우리의 처분개념을 수립하는데 적극적인 노력을 경주하고있다. 아울러 선진기술의 효율적 습득을 위하여 많은 경험과 기술을 개발해 온 영국, 캐나다, 스웨덴, 프랑스, 미국 등과 국제협력 또는 국제공동연구를 활발히 추진·계획하고 있다.