

<Technical Report>

고준위 방사성 폐기물 및 사용후 핵 연료의 심부 시추공 처분

김준모

서울특별시 관악구 관악로 40길 60

요 약

가장 최근에 고준위 방사성 폐기물(HLW) 및 사용후 핵 연료(SNF)의 터널 또는 갱도 형태의 저장소 처분(TMRD)에 대한 하나의 대안으로서 심부 시추공 처분(DBD)이 제안되고 있다. 본 연구에서는 심부 시추공 처분의 개념과 더불어 그 잠재적 장점 및 기술적 도전이 함께 서술되었다. 그러한 심부 시추공 처분의 잠재적 장점 및 기술적 도전의 관점에서 심부 시추공 처분의 타당성 조사 및 의사 결정을 위한 부지 선정, 거동 예측, 성능 평가 및 안전성 분석에서 있어서 자연 방벽인 지층의 중요성 및 핵심 과학인 지질학의 필요성이 반드시 고려되어야 한다.

주요어: 고준위 방사성 폐기물(HLW), 사용후 핵 연료(SNF), 심부 시추공 처분(DBD), 개념, 잠재적 장점, 기술적 도전

Jun-Mo Kim, 2015, Deep borehole disposal of high-level radioactive waste and spent nuclear fuel. Journal of the Geological Society of Korea. v. 51, no. 4, p. 425-431

ABSTRACT: Most recently, deep borehole disposal (DBD) has been proposed as an alternative to tunnelled or mined repository disposal (TMRD) of high-level radioactive waste (HLW) and spent nuclear fuel (SNF). In this study, the concept of deep borehole disposal as well as its potential advantages and technological challenges are described together. From the view points of such potential advantages and technological challenges of deep borehole disposal, importance of geologic formations as natural barriers and necessity of geology as a core science have to be inevitably considered in site selection, behavior prediction, performance evaluation, and safety analysis for feasibility study and decision making of deep borehole disposal.

Key words: high-level radioactive waste (HLW), spent nuclear fuel (SNF), deep borehole disposal (DBD), concept, potential advantages, technological challenges

(Jun-Mo Kim, 60 Gwanak-ro 40-gil, Gwanak-gu, Seoul 08730, Republic of Korea)

1. 서 론

원자력 발전소로부터 나오는 사용후 핵 연료(spent nuclear fuel, SNF) 또는 사용후 핵 연료 재처리 과정에서 발생하는 고체화된 고준위 방사성 폐기물(high-level radioactive waste, HLW)의 심부 시추공 처분(deep borehole disposal, DBD)은 1970년대 중반에 처음으로 제안된 개념이다. 이 개념은 1990년대 초반에 스웨덴(Birgersson *et al.*, 1992) 및 2000년대 초반에 영국(Nuclear Industry

Radioactive Waste Executive, NIREX, 2004)에서 다시 고려되었다. 그리고 가장 최근에는 사용후 핵 연료 및 고준위 방사성 폐기물의 터널 또는 갱도 형태의 저장소 처분(tunnelled or mined repository disposal, TMRD)에 대한 하나의 대안으로서 심부 시추공 처분이 언급되고 있다(Beswick, 2008; Gibb *et al.*, 2008; Brady *et al.*, 2009; Arnold *et al.*, 2011; Clayton *et al.*, 2011). 2012년에 미국의 블루리본 위원회(Blue Ribbon Commission on America's Nuclear Future, BRC, 2012)는 심부 시추공 처분에

‡ Corresponding author: +82-2-871-2466, E-mail: junmokim@snu.ac.kr

수반되는 몇몇 불확실성의 해결을 돕기 위한 지속적인 연구개발을 추천하였다. 블루리본위원회는 특히 심부 시추공 처분이 본질적으로 재사용할 잠재성이 없는 특정한 형태의 폐기물 처분에 고려될 수 있음을 강조하였다. 한편 블루리본위원회는 심부 시추공 처분에 부적합할 것으로 판단되는 폐기물의 처분을 위한 터널 또는 갱도 형태의 저장소 처분의 필요성도 배제하지는 않고 있다.

본 연구에서는 심부 시추공 처분의 개념과 더불어 그 잠재적 장점 및 기술적 도전을 함께 서술함으로써 심부 시추공 처분의 타당성 조사 및 의사결정을 위한 부지 선정, 거동 예측, 성능 평가 및 안전성 분석에서 있어서 자연 방벽인 지층의 중요성 및 핵심 과학인 지질학의 필요성을 강조하고자 한다.

2. 심부 시추공 처분의 개념

미국에서 논의되고 있는 심부 시추공 처분(DBD)의 가장 최근 개념은 화성암(화강암, 응회암) 및 변성암(편암, 편마암)과 같은 결정질 기반암(crystalline basement rock) 내에 약 5,000 m (16,400 ft) 심도의 시추공을 뚫고 하부 약 2,000 m (6,600 ft)에 사용후 핵 연료(SNF) 또는 고준위 방사성 폐기물(HLW)이 담겨있는 일련의 폐기물 용기(waste package)를 적치(emplacement)한 후에 상부 약 3,000 m (9,800 ft)를 밀봉(sealing), 충전(plugging), 뒤채움(backfilling)하는 것이다. 폐기물 용기는 개별적으로 또는 10~20 개씩 연이어서 적치될 수 있다. 하나의 시추공은 약 5 m (16 ft) 길이의 폐기물 용기를 최대 400개까지 처분할 수 있다(Beswick, 2008; Gibb *et al.*, 2008; Brady *et al.*, 2009; Arnold *et al.*, 2011; Clayton *et al.*, 2011; Blue Ribbon Commission on America's Nuclear Future, 2012). 참고로 미국의 전망치인 109,300톤의 사용후 핵 연료 및 고준위 방사성 폐기물 재고를 처분하기 위해서는 대략 1,000개의 심부 시추공이 필요하며, 현재의 계획은 2~3 km²의 지역에 약 100개의 심부 시추공이 분포할 정도의 일련의 아주 조밀한 심부 시추공 배열을 필요로 하고 있다 (Brady *et al.*, 2009).

이러한 심부 시추공 처분의 개념에 대한 다양한 개략도가 그림 1, 그림 2, 그림 3, 그림 4, 그림 5 및

그림 6에 도시되어 있다. 그림 1은 고준위 방사성 폐기물 및 사용후 핵 연료의 심부 시추공 처분을 위한 일반적인 개념도이다(Arnold *et al.*, 2011). 우측 아래의 작은 그림은 3,000 m 심도 아래에 위치하는 폐기물 처분 지역(waste disposal zone)을 보여주며,

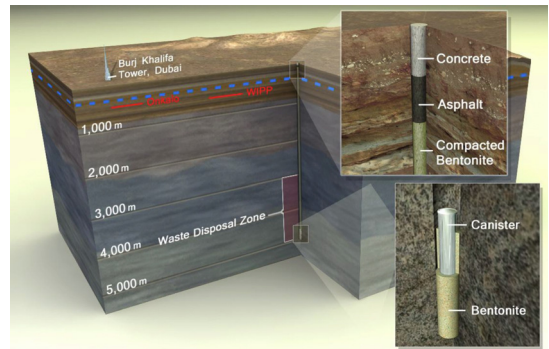


Fig. 1. Generalized concept for deep borehole disposal of high-level radioactive waste (HLW) and spent nuclear fuel (SNF) (Arnold *et al.*, 2011). The right lower small figure shows the waste disposal zone, which is located below the depth of 3,000 m, and the right upper small figure shows the borehole seal system, which is located above the depth of 3,000 m. The dashed blue line indicates a typical boundary between shallow fresh groundwater and deep saline groundwater. For reference, the Burj Khalifa Tower, Dubai is about 830 m high. The Onkalo spent nuclear fuel repository, Finland is about 520 m deep, and the WIPP (Waste Isolation Pilot Plant), USA is about 660 m deep.

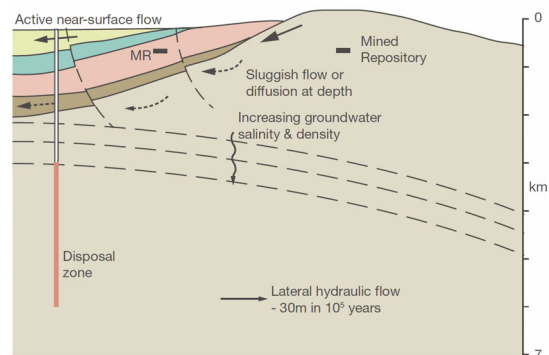


Fig. 2. Schematic section of crystalline basement rocks with overlying sedimentary rocks depicting the concept of deep borehole disposal of nuclear waste (vertical red cylinder) in contrast to disposal in a relatively shallow underground tunnelled or mined repository (horizontal black box) (Blue Ribbon Commission on America's Nuclear Future, 2012).

우측 위의 작은 그림은 3,000 m 심도 위에 위치하는 시추공 밀봉 시스템(borehole seal system)을 보여 준다. 그림에서 파란 점선은 천부 담지하수(shallow fresh groundwater)와 심부 염지하수(deep saline groundwater)의 전형적인 경계를 나타낸다. 참고로 두바이의 부르즈 할리파 타워(Burj Khalifa Tower) 높이는 약 830 m이다. 그리고 핀란드의 온칼로 사용후 핵 연료 저장소(Onkalo spent nuclear fuel repository) 깊이는 약 520 m이며, 미국의 폐기물 격리 시험 시설(Waste Isolation Pilot Plant, WIPP) 깊이는 약 660 m이다. 그림 2는 천부 터널 또는 갱도 형태의 저장소 처분(검은 수평 상자) 대비 심부 시추공 처분(빨간 수직 원통) 개념을 묘사하는 퇴적암 하부의 결정질 기반암의 개략도이다(Blue Ribbon Commission on America's Nuclear Future, 2012).

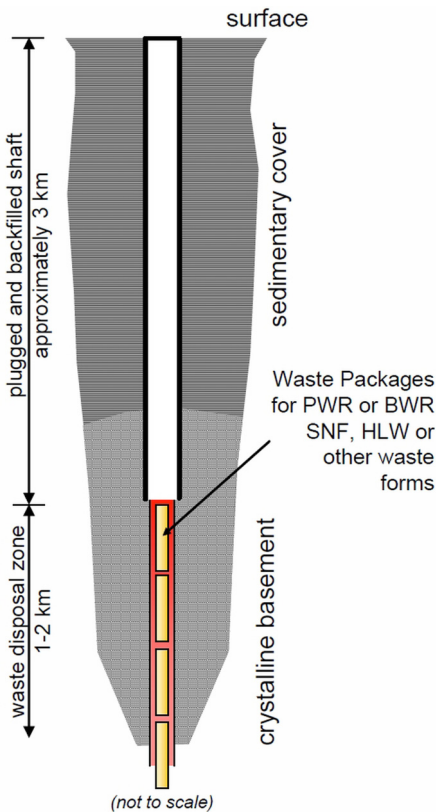


Fig. 3. Schematic section of deep borehole disposal of waste packages for pressurized water reactor (PWR) or boiling water reactor (BWR) spent nuclear fuel (SNF), high-level radioactive waste (HLW), or other waste forms (Brady *et al.*, 2009).

그림은 아주 깊은 적치 심도, 아주 깊은 심도에 존재하는 암석의 낮은 투수계수, 아주 깊은 심도에 존재하는 고염도 고밀도 지하수의 낮은 부력 및 아주 깊은 심도에 존재하는 환원 조건으로 인한 방사성 핵종의 낮은 용해도와 유동성 등과 같은 심부 시추공 처분의 잠재적 장점을 묘사하고 있다. 그림 3은 가압경수로(pressurized water reactor, PWR) 또는 비등경수로(boiling water reactor, BWR) 사용후 핵 연료, 고준위 방사성 폐기물 및 기타 폐기물 형태를 위한 폐기물 용기의 심부 시추공 처분의 개략도이다(Brady *et al.*, 2009). 그림에서 보듯이 일반적으로 폐기물 처분 지역은 심부의 결정질 기반암 내에 위치하고 시추공 밀봉 지역은 천부의 퇴적암 내에 위치하도록 심부 시추공 처분이 이루어진다. 그림은 폐기물을 적치한 상태의 배치를 보여준다. 따라서 그림에서 시추공 밀봉 시스템은 아직 존재하지 않는다. 그림 4는 심부 시추공 완결의 개략도이다(Arnold *et al.*, 2011). 그림은 폐기물을 적치하고 그 위에 시멘트 마감(cement plug)을 설치한 이후에 일련의 나머지 시추공 케이싱(borehole casing)을 절단하고 제거하기 이전 상태의 배치를 보여준다. 따라서 그림에서 시추공 밀봉 시스템은 아직 존재하지 않는다. 그림 5는 심부 시추공 밀봉 시스템(밀

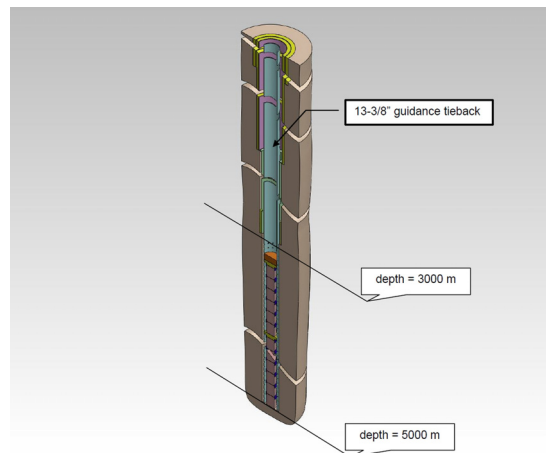


Fig. 4. Schematic view of deep borehole completion (Arnold *et al.*, 2011). The configuration shown is after emplacing waste and setting an overlying cement plug, but before cutting and removing a series of remaining borehole casing including guidance tieback. As a result, borehole seal systems are not yet present. Note that vertical dimensions are not to scale.

봉, 충전, 뒤채움) 기준 설계의 개략도이다(Arnold *et al.*, 2011). 그림에서 보다시피 시추공 밀봉 시스템은 하부의 무관 밀봉 지역(lower uncased sealing/plugging zone)과 상부의 유관 밀봉 지역(upper cased sealing/plugging zone)으로 나누어진다. 하부의 무관 밀봉 지역은 일련의 교량(가교) 충전재(bridge plug), 밀봉재(시멘트, 벤토나이트, 벤토나이트-모래), 충전재(시멘트) 및 뒤채움재(모래, 세립분쇄암) 등으로 구성되어 있으며, 시멘트와 벤토나이트를 분리함으로써 이들 사이의 화학 반응을 최소화하기 위한 규사(silica sand) 또는 세립분쇄암(finely crushed rock) 주머니(ballast)를 포함한다. 그리고 상부의 유관 밀봉 지역은 시멘트 케이싱 안에 API (American Petroleum Institute) 유형 충전재(하부로부터 2개의 교량 충전재와 2개의 시멘트 충전재가 교호) 및 뒤채움재(모래, 세립분쇄암) 등으로 구성되어 있다. 그림 6은 심부 시추공 일반(포괄) 처분 시스템(generic disposal system, GDS)

모델링에 사용되는 상업용 사용후 핵 연료, DOE 고준위 방사성 폐기물 및 상업용 고준위 방사성 폐기물의 심부 시추공 처분의 개략도이다(Clayton *et al.*, 2011). 그림에서 보다시피 심부 시추공 일반 처분 시스템 모델은 하부로부터 약 2 km 길이의 폐기물 처분 지역(waste disposal zone), 약 1 km 길이의 밀봉 지역(seal zone) 및 약 2 km 길이의 상부 시추공 지역(upper borehole zone)으로 구성된다. 이 중에서 상부 시추공 지역은 주변의 천부 대수층과 연결되어 있는 것으로 가정한다. 그리고 심부 시추공 일반 처분 시스템 모델에서 지하수 유동 및 방사성 핵종 이동은 방사성 폐기물의 붕괴열로 인한 열적 대류 및 천부 대수층 내의 지하수 양수에 기인하는 것으로 가정한다. 따라서 밀봉 지역 꼭대기까지 도달한 방사성 핵종은 천부 대수층에 들어갈 수 있으며, 천부 대수층 내 양수정(pumping well) 또는 급수정(water supply well)으로부터 양수되어 지표 및 생태계로 이동·노출될 수 있다.

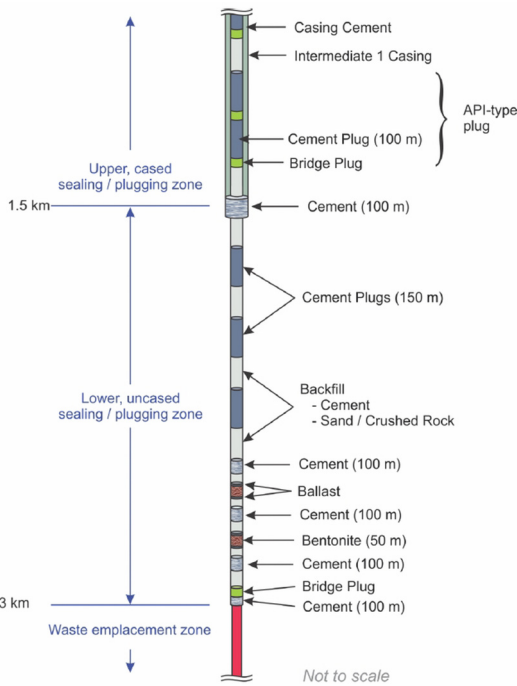


Fig. 5. Schematic view of deep borehole sealing, plugging, and backfilling reference design (Arnold *et al.*, 2011). The borehole seal system is separated into the lower uncased sealing/plugging zone and the upper cased sealing/plugging zone.

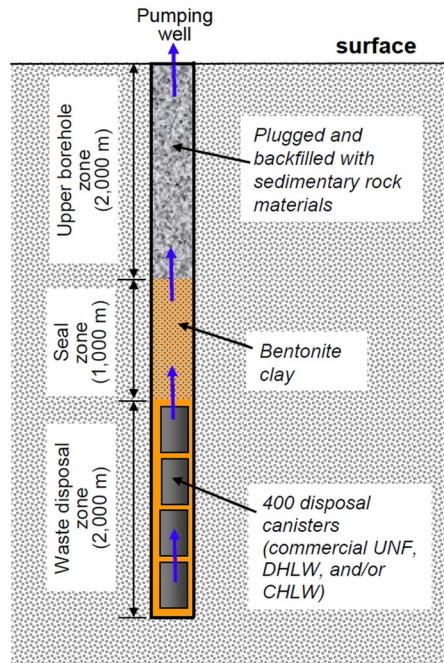


Fig. 6. Schematic illustration of deep borehole disposal of commercial used nuclear fuel (UNF), DOE high-level radioactive waste (DHLW), and/or commercial high-level radioactive waste (CHLW) used in deep borehole generic disposal system (GDS) modeling (Clayton *et al.*, 2011).

3. 심부 시추공 처분의 잠재적 장점

3.1 깊은 심도(Great Depth)

심부 시추공(deep borehole)의 처분 제안 심도가 터널 또는 갱도 형태의 저장소(tunnelled or mined geologic repository)의 처분 제안 심도보다 상당히 깊기 때문에 생물권(biosphere) 및 천부 지하수 시스템(shallow groundwater system)으로부터의 폐기물 격리(waste isolation)가 다음과 같은 몇 가지 요소에 의해서 증진된다(그림 1, 2).

- ① 아주 깊은 적치 심도(emplacment depth)
- ② 아주 깊은 심도에 존재하는 모암(host rock)의 낮은 투수계수 및 영향을 받기 쉬운 천부 환경(accessible shallow environment)까지의 먼 거리로 인한 아주 긴 이동 시간(travel time)
- ③ 아주 깊은 심도에 존재하는 고염도 고밀도 지하수의 낮은 부력으로 인한 폐기물로부터 천부 환경으로의 열적으로 유도된 지하수 대류(thermally induced groundwater convection) 저지
- ④ 아주 깊은 심도에 존재하는 환원 조건(즉, 낮은 산소 농도)으로 인한 액티나이드(actinide) 계열의 방사성 핵종의 낮은 용해도(solubility)와 이동성(mobility) 및 폐기물의 보다 큰 지구화학적 격리(geochemical isolation)

3.2 좁은 면적(Small Area)

하나의 심부 시추공이 차지하는 면적이 터널 또는 갱도 형태의 저장소의 면적보다 상당히 작기 때문에 적합한 지질 조건을 가지는 원자력 발전소 주변에 여러 개의 심부 시추공 처분 부지가 위치할 수 있으며, 따라서 사용후 핵 연료 및 고준위 방사성 폐기물 수송의 필요성 및 위험성이 줄어든다(그림 1, 2).

4. 심부 시추공 처분의 기술적 도전

4.1 대심도 시추(Great Depth Drilling)

5,000 m (16,400 ft) 심도까지 0.5 m (1.6 ft) 직경의 시추공 완결(completion)은 아직까지 이루어진 적이

없다. 결정질 암석에 그러한 시추공을 뚫기 위해서는 석유 산업의 경험(experience)과 수행(practice) 그 이상의 시추 기술(drilling technology)의 개발이 필요하다. 과학적인 조사를 위해 결정질 암석에 뚫은 더 작은 직경의 기존 심부 시추공들은 심부의 이방성 응력장에 기인한 시추공 벽면의 자발적인 변형과 관련된 복잡한 문제들로 어려움을 겪고 시달려 왔다.

4.2 폐기물 포장 및 밀봉(Waste Casing and Sealing)

폐기물을 포장(casing)하여 잠재적으로 변형이 발생할 수 있는 심부 시추공에 적치하고 금속 포장재와 주변 암석 사이를 밀봉(sealing)하는 것은 상당히 중요한 기술적 도전이다. 금속 포장재와 주변 암석 사이의 불충분한 밀봉의 잠재적 가능성은 심부 시추공 처분의 개념에서 주요한 관심 사항이다. 불충분한 밀봉은 검층(well logging, borehole logging)에 의해 감지되기 어려우며, 지표면까지 수리학적 경로를 제공할 수 있다.

4.3 폐기물 고화 및 재포장(Waste Consolidation and Repackaging)

원자력 시설 부지(nuclear utility site)에서 건조 저장 상태에 있는 상업용 사용후 핵 연료 어셈블리(assembly)의 분해(dismantling)는 심부 시추공 내 사용후 핵 연료 처분을 위해 사용되는 작은 크기의 폐기물 용기 수용을 필요로 한다. 이러한 경우에 사용후 핵 연료의 재포장(repackaging)은 연료 봉 파손(fuel rod breakage) 및 작업자에 대한 잠재적인 방사선 노출(potential radiation exposure)을 야기할 수 있는 광범위한 연료 취급(fuel handling)을 수반한다. 사용후 핵 연료 봉 고화(consolidation)의 임계성(criticality)과 열적 영향(thermal implication) 또한 고려되어야 한다. 게다가 고화하기가 어려운 다양한 크기의 많은 종류의 사용후 핵 연료가 있다. 또한 유리화된(vitrified) 고준위 방사성 폐기물을 위한 기존의 용기(canister)는 모두 직경이 0.61 m (2.00 ft)이며, 따라서 현재 제안되는 그 어떠한 심부 시추공 직경보다 커서 시추공에 맞지 않는다.

4.4 폐기물 용기 적치(Waste Package Emplacement)

수백 개의 폐기물 용기를 적치(emplacment)하는

과정에서 몇몇 폐기물 용기가 시추공에 들러붙을 (becoming stuck) 수 있는 가능성을 고려해야 한다. 그러한 폐색(obstruction)을 관통하는 시추를 하거나 용기를 아래 방향으로 강제로 미는 것과 같이 들러붙은 장애물(obstacle)을 취급하는 일반적인 전략은 고준위 방사성 폐기물을 적치하는 경우에는 사용될 수 없을 수도 있다(그림 3, 4).

4.5 시추공 밀봉(Borehole Sealing)

적치된 폐기물 상부의 시추공을 밀봉(sealing), 충전(plugging), 뒤채움(backfilling)하기 위하여 효과적이고 장기적으로 성능을 발휘하는 물질을 개발하고 검증해야 한다. 벤토나이트, 시멘트, 콘크리트 및 아스팔트 등과 같은 다양한 뒤채움재를 이용하거나 용융된 암석에 폐기물 용기를 봉지(encapsulation)하기 위해서 폐기물에 의해 발생하는 열(heat)을 이용하는 것과 같은 다양한 접근 방법이 제안되고 있다. 그러나 이렇게 제안된 접근 방법은 아직 원위치지하 실험을 거치지 않고 있다(그림 5).

4.6 적치 폐기물 회수(Emplaced Waste Retrieval)

심부 시추공에 적치되고 밀봉된 이후에 폐기물을 회수(retrieval)하는 것은 중대한 기술적 및 안전성의 도전을 제공할 수 있다. 현재 미국의 연방 규정은 심부 지질학적 저장소에서 폐기물 적치 이후에 회수 옵션(retrieval option)을 항상 유지할 것을 요구하고 있다. 하지만 사용후 핵 연료 또는 고준위 방사성 폐기물의 영구 처분을 위해서 밀봉된 심부 시추공을 사용하면 그러한 요구 사항을 만족시키는 것이 어렵거나 불가능할 수 있다.

4.7 부지 특성화의 복잡성(Complexity of Site Characterization)

심부 시추공 처분의 타당성의 대부분 분석에서의 암묵(implicit)은 깊은 심도에서는 조건이 보다 더 균질하기 때문에 보다 적은 부지 특성화가 필요하며, 잠재적으로 유리한 조건(즉, 낮은 등방성의 투수 계수, 높은 염도와 밀도 성층 조건, 환원 환경 등)이 모든 곳에서 발견될 것이라는 점이다. 그러나 과거에 깊은 심도에 있었던 지각 암석의 지질학적 지표 노출은 이러한 단순한 가정을 지지하지 않는다. 깊이 매몰된 기반암도 화학적 및 물리적 성질에 있어

서 상당한 공간적 변이성을 가질 수 있으며, 이러한 일반화를 만들 수 있을 만큼 특성화가 잘된 과학적 심부 시추공은 거의 없다. 심부의 균질한 지각 암석의 특성화는 심부 시추공으로부터 수십 미터 떨어져 있는, 특히 유체 유동을 일정한 방향으로 이끌 수 있는 단열대 암석의 성질을 측량할(mapping) 수 있는 새로운 지구물리 기법의 개발을 요구할 것이다.

4.8 다중 방벽의 역할(Role of Multiple Barriers)

핵 폐기물 처분의 주요한 주의(tenet) 또는 교의(doctrine)는 방사성 핵종의 장기적인 봉쇄(containment)를 보장하기 위하여 인공 방벽(artificial or engineered barrier)과 자연 방벽(natural barrier)을 함께 이용하는 다중 방벽(multiple barrier)을 사용하는 것이다. 사용후 핵 연료의 심부 시추공 처분을 위해서 미국에서 개발되고 있는 전략은 근본적으로 처분 심도까지의 지질(geology)과 매몰 심도(burial depth)에 의존하고 있다. 하지만 심부 시추공 처분에서 폐기물 용기(waste package)나 폐기물 형태(waste form)의 공적(credit)은 인정하지 않고 있다. 그만큼 자연 방벽인 지층의 중요성 및 핵심 과학인 지질학의 필요성을 강조하고 있다(그림 1, 2).

5. 결 론

가장 최근에 고준위 방사성 폐기물(HLW) 및 사용후 핵 연료(SNF)의 터널 또는 갱도 형태의 저장소 처분(TMRD)에 대한 하나의 대안으로서 심부 시추공 처분(DBD)이 제안되고 있다. 본 연구에서는 심부 시추공 처분의 개념과 더불어 그 잠재적 장점 및 기술적 도전이 함께 서술되었다. 심부 시추공 처분의 개념은 결정질 기반암 내에 아주 깊은 심도의 시추공을 뚫고 하부에 사용후 핵 연료 또는 고준위 방사성 폐기물이 담겨있는 일련의 폐기물 용기를 적치한 후에 상부를 밀봉, 충전, 뒤채움하는 것이다. 심부 시추공 처분의 가장 큰 잠재적 장점은 깊은 심도와 좁은 면적이다. 그리고 심부 시추공 처분의 기술적 도전은 대심도 시추, 폐기물 포장 및 밀봉, 폐기물 고화 및 재포장, 폐기물 용기 적치, 시추공 밀봉, 적치 폐기물 회수, 부지 특성화의 복잡성, 그리고 다중 방벽의 역할 등이다. 그러한 심부 시추공 처분의 잠재적 장점 및 기술적 도전의 관점에서 심부 시추공 처

분의 타당성 조사 및 의사 결정을 위한 부지 선정, 거동 예측, 성능 평가 및 안전성 분석에서 있어서 자연 방벽인 지층의 중요성 및 핵심 과학인 지질학의 필요성이 반드시 고려되어야 한다.

사 사

본 연구는 산업통상자원부 산하 한국에너지기술평가원의 방사성폐기물관리기술개발사업 연구비 지원에 의해 수행되었습니다. 본 연구는 또한 부분적으로 미래창조과학부 산하 한국연구재단의 Brain Korea 21 사업 지원에 의해 수행되었습니다. 아울러 본 논문의 심사 과정에서 발전적인 조언과 비판을 해주신 익명의 두 심사자님께 깊은 감사를 드립니다.

REFERENCES

- Arnold, B.W., Brady, P.V., Bauer, S.J., Herrick, C., Pye, S. and Finger, J., 2011, Reference design and operations for deep borehole disposal of high-level radioactive waste. Technical Report SAND2011-6749, Sandia National Laboratories, Albuquerque, New Mexico, USA, 66 p.
- Beswick, J., 2008, Status of technology for deep borehole disposal. Technical Report EPS International Contract No. NP 01185, UK Nuclear Decommissioning Authority (NDA), Harwell, Didcot, Oxon, UK, 91 p.
- Birgersson, L., Skagius, K., Wiborgh, M. and Widén, H., 1992, Project Alternative Systems Study - PASS, Analysis of performance and long-term safety of repository concepts. Technical Report 92-43, Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB), Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company, Stockholm, Sweden, 84 p, 6 appendices.
- Blue Ribbon Commission on America's Nuclear Future, 2012, Report to the Secretary of Energy. Technical Report, Blue Ribbon Commission on America's Nuclear Future (BRC), US Department of Energy, Washington, DC, USA, 158 p.
- Brady, P.V., Arnold, B.W., Freeze, G.A., Swift, P.N., Bauer, S.J., Kanney, J.L., Rechar, R.P. and Stein, J.S., 2009, Deep borehole disposal of high-level radioactive waste. Technical Report SAND2009-4401, Sandia National Laboratories, Albuquerque, New Mexico, USA, 74 p.
- Clayton, D., Freeze, G., Hadgu, T., Hardin, E., Lee, J.H., Prouty, J., Rogers, R., Nutt, W.M., Birkholzer, J., Liu, H.H., Zheng, L. and Chu, S., 2011, Generic disposal system modeling - Fiscal year 2011 progress report, Fuel cycle research and development. Technical Report FCRD-USED-2011-000184, SAND2011-5828P, Sandia National Laboratories, Albuquerque, New Mexico, USA, 443 p.
- Gibb, F.G.F., Taylor, K.J. and Burakov, B.E., 2008, The 'granite encapsulation' route to the safe disposal of Pu and other actinides. Journal of Nuclear Materials, 374, 364-369.
- Nuclear Industry Radioactive Waste Executive, 2004, A review of the deep borehole disposal concept for radioactive waste. Technical Report N/108, United Kingdom Nuclear Industry Radioactive Waste Executive (NIREX) Limited, Harwell, Didcot, Oxfordshire, UK, 78 p.

Received : June 22, 2015
 Revised : July 16, 2015
 Accepted : July 24, 2015