

Preliminary Evaluation of Domestic Applicability of Deep Borehole Disposal System

심부시추공 처분시스템의 국내적용 가능성 예비 평가

Jongyoul Lee*, Minsoo Lee, Heuijoo Choi, Kyungsu Kim, and Dongkeun Cho

Korea Atomic Energy Research Institute, 111, Daedeok-daero 989beon-gil, Yuseong-gu, Daejeon, Republic of Korea

이종열*, 이민수, 최희주, 김경수, 조동건

한국원자력연구원, 대전광역시 유성구 대덕대로989번길 111

(Received July 27, 2018 / Revised October 2, 2018 / Approved November 8, 2018)

As an alternative to deep geological disposal technology, which is considered as a reference concept, the domestic applicability of deep borehole disposal technology for high level radioactive waste, including spent fuel, has been preliminarily evaluated. Usually, the environment of deep borehole disposal, at a depth of 3 to 5 km, has more stable geological and geo-hydrological conditions. For this purpose, the characteristics of rock distribution in the domestic area were analyzed and drilling and investigation technologies for deep boreholes with large diameter were evaluated. Based on the results of these analyses, design criteria and requirements for the deep borehole disposal system were reviewed, and preliminary reference concept for a deep borehole disposal system, including disposal container and sealing system meeting the criteria and requirements, was developed. Subsequently, various performance assessments, including thermal stability analysis of the system and simulation of the disposal process, were performed in a 3D graphic disposal environment. With these analysis results, the preliminary evaluation of the domestic applicability of the deep borehole disposal system was performed from various points of view. In summary, due to disposal depth and simplicity, the deep borehole disposal system should bring many safety and economic benefits. However, to reduce uncertainty and to obtain the assent of the regulatory authority, an in-situ demonstration of this technology should be carried out. The current results can be used as input to establish a national high-level radioactive waste management policy. In addition, they may be provided as basic information necessary for stakeholders interested in deep borehole disposal technology.

Keywords: High-level waste, Spent fuels, Deep geological disposal, Deep borehole disposal, Domestic applicability, Disposal container, Performance assessment

* Corresponding Author.

Jongyoul Lee, Korea Atomic Energy Research Institute, E-mail: njylee@kaeri.re.kr, Tel: +82-42-868-2071

ORCID

Jongyoul Lee <http://orcid.org/0000-0001-8482-9008>

Heuijoo Choi <http://orcid.org/0000-0001-9253-7697>

Dongkeun Cho <http://orcid.org/0000-0003-4152-8605>

Minsoo Lee <http://orcid.org/0000-0001-7928-2415>

Kyungsu Kim <http://orcid.org/0000-0002-0399-2653>

현재 기준개념으로 개발하여 상용화 단계에 있는 심층 동굴 처분기술에 대한 대안으로서 지질학적 조건이 더 안정적인 지하 3~5 km의 심도에 사용후핵연료를 포함한 고준위폐기물을 처분하는 심부시추공 처분기술의 국내 적용 가능성을 예비 평가 하였다. 이를 위하여 심부시추공 처분개념의 기술적 적용성 분석에 필요한 국내 기반암 분포특성 및 심부시추공 처분부지 적합성 평가 기술 분석과 대구경 심부시추기술을 평가하였다. 이들 분석결과를 바탕으로 심부시추공 처분시스템 설계 기준 및 요건에 적합한 심부시추공 처분용기 및 밀봉시스템 개념을 설정하여 예비 기준 심부시추공 처분 개념을 도출하였다. 그리고 도출된 예비 기준 처분시스템에 대하여 열적 안정성 및 그래픽 처분환경에서의 처분공정 모사 등 다양한 성능평가를 수행하고 이들을 종합하여 심부시추공 처분시스템의 국내 적용성에 대하여 다양한 관점에서의 예비평가를 수행하였다. 결론적으로, 심부시추공 처분시스템은 처분심도와 단순한 방법으로 인하여 안전성 및 경제적 타당성 측면에서 많은 장점이 있지만, 불확실성을 줄이고 인허가를 획득하기 위해서는 이 기술에 대한 현장실증이 필수적이다. 본 연구결과는 사용후핵연료 관리 국가정책 수립을 위한 공학적 근거자료로 활용이 가능하며, 심부시추공 처분기술에 관심을 갖는 방사성폐기물 관리 이해당사자들에게 필요한 정보자료로 제공될 수 있다.

중심단어: 고준위폐기물, 사용후핵연료, 심층 동굴 처분, 심부 시추공 처분, 국내 적용성, 처분용기, 성능 평가

1. 서론

국내 원자력발전소에서 전기를 생산하고 난 후 발생된 사용후핵연료는 지속적으로 누적되고 있다. 이들 사용후핵연료는 유용한 물질을 함유하고 있어 재활용하는 방안을 고려하거나 고준위폐기물로 분류하여 직접처분을 고려하고 있다. 현재 심층 동굴 처분(DGD : Deep Geological Disposal) 기술은 500 m 심도의 지하 지질환경에 고준위폐기물 또는 사용후핵연료를 처분하는 기술이다. 스웨덴, 스위스, 프랑스 등 처분선진국에서는 처분환경과 유사한 지하처분연구 시설(URL : Underground Research Laboratory)에서 실증 연구를 수행하여 이 개념에 대한 처분 안전성을 입증하였다. 특히, 핀란드에서는 사용후핵연료 심층 동굴 처분시설에 대한 건설 인허가를 획득하여 상용화 단계에 있다. 이에 대한 대안개념인 심부시추공처분기술(DBD : Deep Borehole Disposal)은 지하 3~5 km의 심도에 고준위폐기물을 처분하고 처분구간 위쪽부터 지표까지 (3 km ~ 지표)의 구간은 벤토나이트, 콘크리트 등으로 밀봉하여 생태계와 완전하게 격리시키는 개념이다[1]. 이 개념은 지각변동에 의한 영향이 적고, 지질구조가 균질하며 단순하여 지질학적 특성이 보다 안정적인 조건이라는 장점이 있다(Fig. 1.).

이러한 심부시추공 처분개념은 미국에서 1950년대부터 고려해온 개념[2]으로서 근래 석유시추산업과 이산화탄소

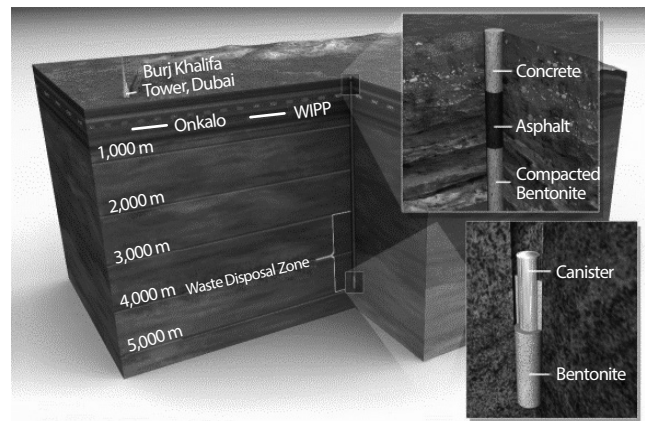


Fig. 1. Generalized concept for deep borehole disposal of high-level radioactive waste [1].

저장사업, 지열발전사업 및 지구과학 탐구목적의 시추공 굴착기술이 획기적으로 발전함에 따라 최근 미국과 스웨덴 등을 중심으로 심부시추공 처분 연구개발을 수행하고 있다. 미국의 경우 자국에 적합한 기준개념 및 관련 기술을 도출하고 이에 대한 현장실험 단계에 있으며, 현재 현장실험 부지 선정 절차를 수행하던 중 미국 정부의 예산지원 중지로 인하여 연구수행에 어려움이 있지만, 지속적인 연구를 재개하기 위한 다양한 노력을 하고 있다[3]. 스웨덴의 경우 NGO 기관들이 심부시추공처분기술에 대한 지속적인 연구수행을 요구함에

따라 SKB를 중심으로 관련 연구를 수행하고 있다[4-6].

심부시추공 처분기술과 관련된 국내에서의 기술현황으로는 지열활용을 목적으로 심도 4 km 정도까지의 심부시추공을 굴착한 경험은 있으나 심부환경에 대하여 지온검층 등 지열목적 이외의 상세 지질조건에 대한 조사 사례와 경험은 없다[7]. 또한, 고준위폐기물 심층 동굴 처분기술 개발을 위해 최대 1,000 m 심도까지의 심부환경 조사, 평가기술을 확보하고 있으며, 기술현황 분석수준의 심부시추공 처분연구를 수행하였다[8,9].

심부시추공 처분기술의 적용을 위해서는 지하 5 km 심도의 지질 및 지화학조건이 심부시추공 처분에 적합한가를 우선 확인하여야 하며, 이를 위해서는 대구경 장심도 굴착장비 및 조사장비, 장비의 운용기술이 확보되어야 하므로, 이에 대한 가능성 분석이 필요하다. 또한, 실제 공학적 현장실증 사례는 없으나 심부시추공 처분개념은 심층 동굴 처분개념 대비 기술성, 안전성, 경제성, 수용성 측면의 비교 분석과 국내 환경에서의 적용성에 대한 평가가 수행되어야 한다.

따라서, 본 연구에서는 현재 수행하고 있는 지열산업에서의 시추 및 탐사기술과 심층 동굴 처분시스템 개발기술과 연계하여 지질학적 조건이 더 안정적인 지하 3~5 km의 심도에 고준위폐기물을 처분하는 심부시추공 처분기술의 국내 적용 가능성 및 타당성을 예비 평가하고자 하였다. 이를 위하여 국내 기반암 분포특성 및 심부시추공 처분부지 적합성 평가 기술을 분석하고 심부시추기술을 평가하였다. 이들 분석결과를 바탕으로 심부시추공 처분시스템 설계 기준 및 요건에 적합한 심부시추공 처분용기와 밀봉개념을 설정하고, 이를 종합하여 예비 기준 심부시추공 처분 개념을 도출하였다. 도출된 예비 기준 처분시스템에 대하여 열적 안정성과 심부시추공 간격 분석 및 3차원 그래픽으로 구축한 처분환경에서의 처분공정 분석 등 다양한 성능 평가를 수행하고 이들을 종합하여 심부시추공 처분시스템의 국내 적용성에 대한 예비평가를 수행하였다.

2. 심부시추공 처분시스템 기술적 적용성 분석

2.1 국내 기반암 분포특성 분석

지열을 이용한 난방 및 발전을 목적으로 심부시추공을

굴착한 포항 및 강화 석모도의 지질 및 지온 특성자료를 수집하였으며[10,11], 지열발전 목적의 심부시추기술 실증을 수행하는 광주지역의 관련 자료도 수집하여 분석하였다[7]. 또한, 소규모이지만 국내 유일의 지하처분연구시설(KURT: KAERI Underground Research Tunnel)의 지질 및 지하수 조사를 수집하여 분석하였다. 상기 4개 지역은 한반도 중남부지질을 대표하는 경기복합체, 옥천지구대, 영남 복합체 및 경상 분지 지질 구역에 대한 각각의 대표 지역(Fig. 2)의 특성을 분석한 것으로 지극히 예비적인 평가이고 지열이용 목적의 자료로서 한계가 있지만 한반도 중남부 지질 전반에 대한 예비분석자료로서 그 의미가 큰 것으로 평가된다.

4개 지질구역에 대한 분석결과 심부시추공 처분구역으로 고려되는 결정질 암반의 심도는 지하 2,000 m 이하에 위치한 포항지역을 제외하고 대부분 지역에서 지하 수백 미터 내에 위치하는 것으로 나타났다. 또한, 지온경사는 지표층이 두껍게 분포하고 있는 포항($35\sim 45^\circ\text{C}\cdot\text{km}^{-1}$)를 제외하고 약 $25\sim 30^\circ\text{C}\cdot\text{km}^{-1}$ 로 측정되었으며, 암반의 생성연대는 중생대 쥐라기에서 백악기(110-170 백만 년 정도)로 평가되었다(Table 1).

2.2 국내 심부시추공 처분 부지적합성 평가 기술 분석

심부시추공 처분장의 위치 결정을 위한 초기 단계부터 시추공 탐사와 적합성 평가를 수행한다. 일반적으로 결정질 기반암에 대한 지하 3~5 km 깊이의 지질학적 정보가 부족한 경우가 많으므로 첫 번째 시추공은 그 깊이에서의 지질, 수리지질, 지사(地史) 등을 특성화하는데 활용된다. 심부시추공 처분개념은 비교적 낮은 심도에서 이루어지는 심층 동굴 처분개념보다 폐기물을 더 확실하게 격리시키는 기술이다. 따라서, 부지적합성 평가의 폭과 세부 사항에서 심층 동굴 처분에 비하여 필요조건이 상대적으로 많지는 않을 것으로 판단된다. 예를 들어 지하수의 침투, 상부 수백 미터 층에서의 지하수 흐름, 배출 등 천부 수리지질시스템의 특성은 안정적인 대륙의 지하 3 km 이상 깊이의 수리지질시스템과 크게 연계되지 않는다. 또한, 그 깊이의 수리지질시스템의 주요 특징인 매우 높은 염도의 지하수 성분은 큰 밀도로 인하여 누출된 폐기물이 상부로 이동하는 것을 어렵게 하고, 처분용기 부식을 늦출 수 있는 지구화학적 환원 조건 등은 안전성을 향상시키는 폐기물의 고립에 매우 중요한 인자이다. Fig. 3은 심부시추공 처분을 위한 부지적합성 평가에 필요한 탐사방안과

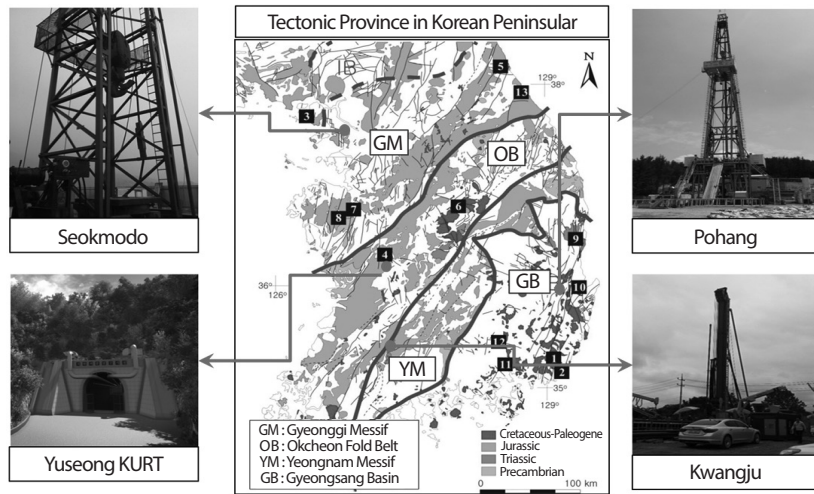


Fig. 2. Tectonic province and geothermal sites [12].

Table 1. Results of preliminary deep geoenvironmental analyses for 4 sites

	Seokmodo Geothermal site	Yuseong KURT site	Kwangju Geothermal site	Pohang Geothermal site
Crystalline rock depth	120 m	100 m	50 m	2,235 m
Geothermal Gradient (°C · km ⁻¹)	33~49	22~30	25	35~45

부지적합성 평가기술의 관계를 보여주고 있다.

국내에서 심부시추공탐사기술 현황은 방사성폐기물 처분 연구를 수행하는 한국원자력연구원에서는 심도 1,000 m 정도까지의 시추공 탐사가 가능하며, 한국지질자원연구원의 경우 심도 3,000 m 정도까지 탐사할 수 있고 향후 추가적인 기술을 확보하여 5,000 m 이상 심도의 시추공 탐사가 가능하도록 할 계획에 있다[13]. 또한, 심부에서의 지질 및 지하수 화학특성 분석 기술은 심부시추 시 채취한 코어에 대한 탄소 및 우라늄 등 동위원소 분석을 통하여 확보하고자 하였다. Fig. 4에서 보여주는 바와 같이 우라늄 계통 동위원소 분석결과를 이용하여 암반 파쇄대에서의 핵종 거동범위와 속도를 계산하고, 단열대 충전광물의 탄소 동위원소를 이용한 지하학 특성 분석을 통하여 주변의 지하학진화과정 도출이 가능하다. 따라서, 지열 이용을 위한 심부시추 부지인 포항, 광주, 나주와 KURT 부지에서의 심부시추공 굴착시 수집한 코어 및 굴착암 시편에 대한 탄소 및 우라늄 등 각종 동위원소 분석을 통하여 심부지하에서의 지질 및 지하수 화학 특성

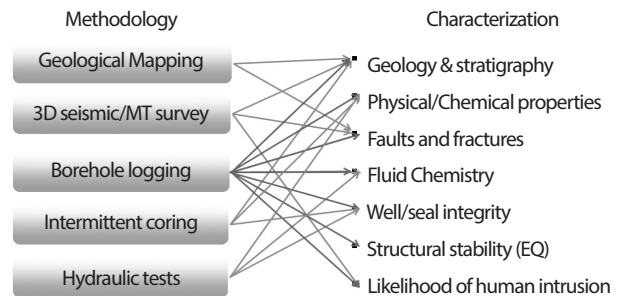


Fig. 3. Relationship between site characterization and methodology [13].

분석 기술을 확보하여 심부지하의 지하학 진화과정 분석방안을 도출하였다.

2.3 심부시추 기술 평가

석유산업과 지열산업 분야에 있어서의 심부시추기술은 100년 이상 동안 축적된 성숙한 산업분야이며, 지구과학 탐구,

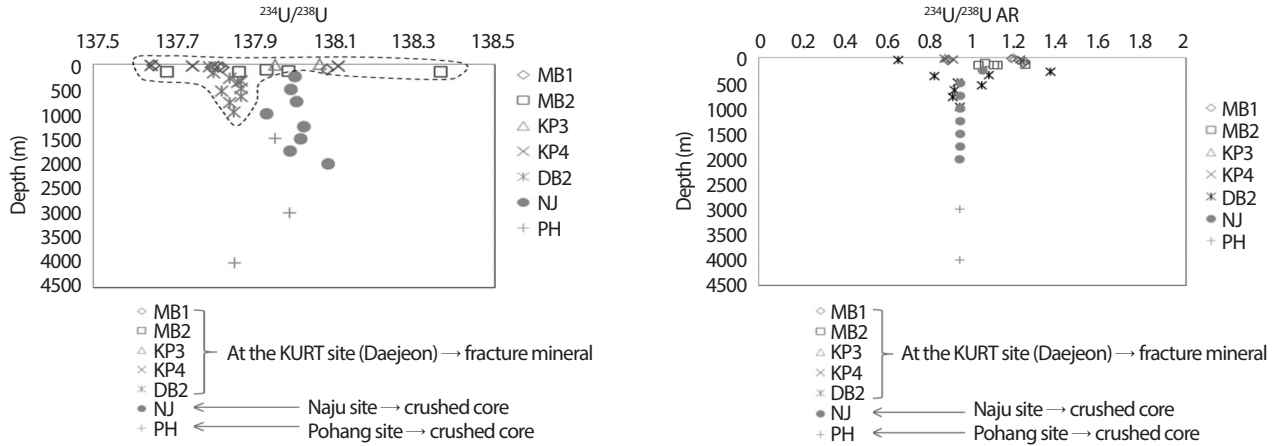


Fig. 4. Radio isotope analyses for borehole rock cuttings.

광물탐사 및 방사성폐기물 처분 등 다양한 목적을 위하여 심부시추공을 굴착하여 왔다. 시추방법은 시추공 형성방법에 따라 암석의 파쇄(percussion)와 천공(boring)으로 구분하며, 시추방식 중 장비와 굴진 방식에 따른 구분이 일반적으로 아래에 기술하는 바와 같이 크게 로터리, 퍼커션, 오거 방식으로 구분하고 있다.

- 로터리(Rotary) : 비트를 회전시켜 지층을 분쇄와 동시에 순환 유체로 암편을 제거하는 방식으로 석유가스 시추에 가장 보편적으로 사용
- 퍼커션(Percussion) : 중량 비트로 충격력을 가하여 파쇄 시추하는 방식으로 에너지전달 및 암편 제거 방식에 따라 에어해머(air hammer) 및 워터해머(water hammer)로 구분
- 오거(Auger) : 끝이 뾰족하고 나선형 날개를 지닌 오거를 회전시켜 지층을 천공하는 방식

실제 굴착된 심부시추공 사례들에 대한 심도와 구경과의 관계를 보여주고 있는 Fig. 5에서 나타내고 있는 바와 같이, 최고 심도인 12 km 이상의 시추공의 경우 구경이 소규모이고, 구경이 커질수록 심도는 낮게 시추하였다. Fig. 6은 현재까지의 심부시추기술에 대한 분석을 통하여 심부시추공 처분에 필요한 구경과 심도를 갖는 시추공 시추기술 확보 가능성을 보여주고 있다. 그림에 나타난 바와 같이 시추공 구경 500 mm의 경우 심도 5 km까지 굴착이 가능하고, 구경

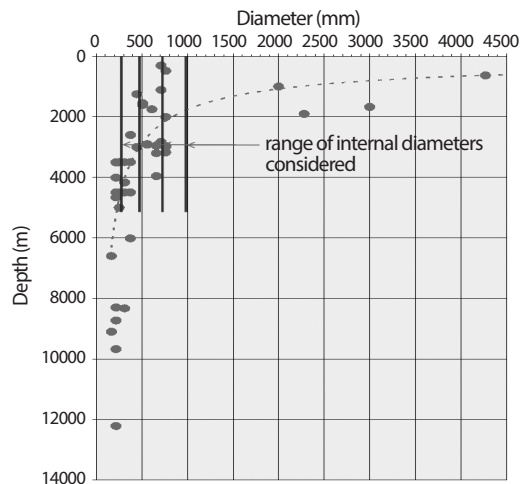


Fig. 5. Relationship between depth and diameter generated by actual practice [14].

Depth (km)	Diameter of terminal depth (mm)			
	300	500	750	1000
2	feasible with current technology	feasible with current technology	feasible with current technology	feasible with current technology
3	feasible with current technology	feasible with current technology	feasible with current technology	feasible with current technology
4	feasible with current technology	feasible with current technology	DBD	feasible with current technology
5	feasible with current technology	DBD	feasible with current technology	feasible with current technology

Legend:
 [Diagonal lines /] = feasible with current technology
 [Diagonal lines \] = may be achievable with tool and process development
 [Cross-hatch] = considered impractical in the foreseeable future

Fig. 6. Possibility of borehole drilling.

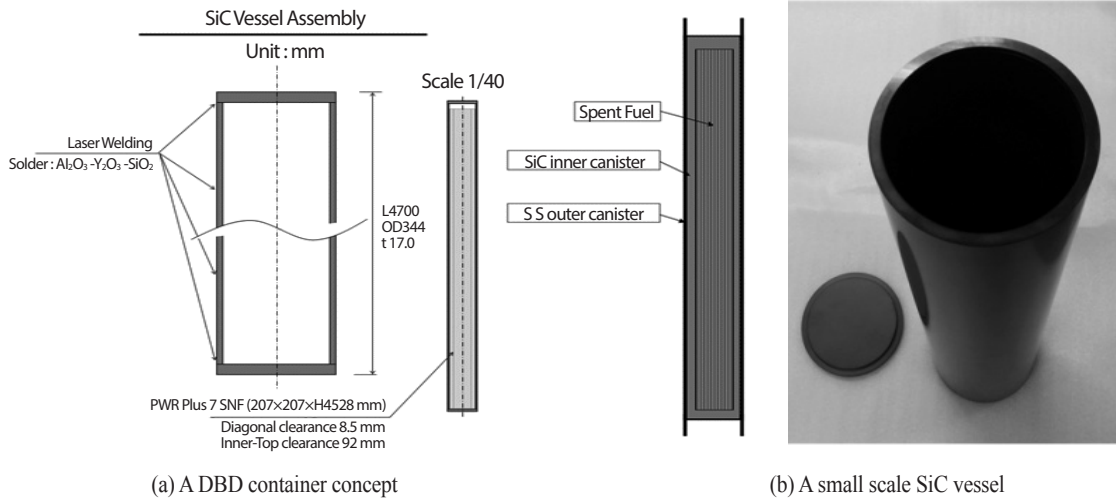


Fig. 7. A DBD container concept & a small scale SiC vessel [16].

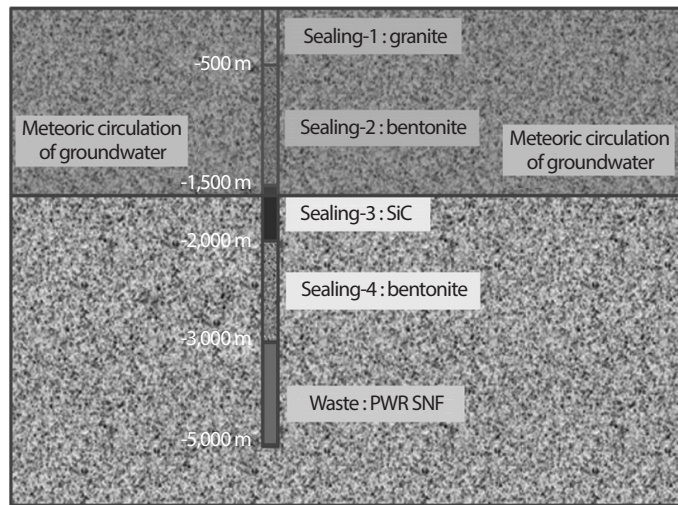


Fig. 8. A Concept of deep borehole sealing [17].

700 mm의 경우 심도 4 km까지 굴착할 수 있을 것으로 판단하고 있다[14].

국내의 심부시추공 굴착의 경우 지열발전소 건설을 위하여 포항에서 로터리 방식으로 구경 8.5 인치(216 mm), 심도 4 km 이상의 시추공 2개를 굴착하였고[11, 13], 지열을 활용하기 위한 시추기술 실증을 위하여 광주에 워터해머 방식의 기술로 8.5 인치(216 mm) 구경으로 심도 3.5 km까지 굴착한 바 있다[7].

3. 예비 기준 심부시추공 처분개념 및 성능 평가

3.1 예비 기준 심부시추공 처분시스템 개념

국내 기반암 특성, 부지적합성 평가 및 시추기술 현황 분석 결과를 바탕으로 국내에서 발생하는 사용후핵연료 또는 발생 가능한 고준위폐기물에 대한 붕괴열, 독성 등 특성을 분석하여, 심부시추공 처분시스템 예비개념을 도출하였다.

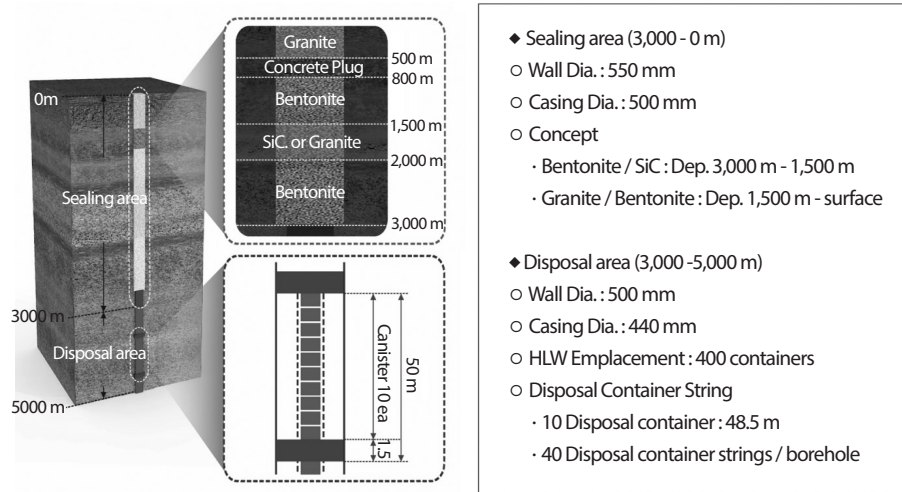


Fig. 9. Preliminary reference deep borehole disposal concept.

이를 위하여 SiC (Silicon Carbide) 이중구조 심부시추공 처분용기 개념과 시추공 밀봉 개념을 설정하고, 이를 종합하였다.

3.1.1 기준사용후핵연료 및 처분용기 개념. 국내에서 고려할 수 있는 심부시추공 처분 대상으로는 원자력발전소에서 발생하는 PWR 및 CANDU 사용후핵연료와 사용후핵연료의 파이로프로세싱 공정으로부터 발생하는 고준위폐기물이다. 본 논문에서는 예비 기준 심부시추공 처분개념 및 성능평가를 위하여, 국내 사용후핵연료 발생특성에 대한 연구[15]결과를 근거로 향후 국내에서 주로 발생될 것으로 예상되는 초기농축도 4.5wt% 방출연소도 55 GWD/MtU을 갖는 Plus7 16×16 핵연료를 기준핵연료로 선정하였으며, 이에 대한 심부시추공 처분용기 개념을 설정하였다.

심부시추공 처분용기는 처분환경에서의 설계요건[12]에 적합하도록 구조적 건전성과 내부식성을 갖는 SiC 세라믹 내부용기에 취급용이성 향상을 위한 스테인리스 외부용기 이중구조 개념으로 사용후핵연료 집합체 1개를 적재할 수 있도록 하였다. Fig. 7은 처분용기개념과 제작성 분석을 위하여 국내 관련 기업과 협력하여 제작한 약 1/5규모의 SiC 세라믹 내부용기를 보여주고 있다[16].

3.1.2 밀봉시스템 개념. 심층 동굴 처분개념과는 달리 심부시추공 처분개념에서 밀봉시스템은 다양한 기능을 하는 중요한 방법으로 처분된 폐기물이 지하수와 접촉을 억제

하기 위한 기능이 있어야 할 뿐만 아니라 폐기물로부터 누출된 핵종의 이동을 지연시켜야 하는 기능도 있어야 한다. 또한, 미래 인간의 우연한 침입(inadvertent intrusion)도 막아야 하며, 이러한 인간 침입의 방지를 위해서는 시추공 굴착 이전 상태로의 복원도 고려하여야 한다[17]. 이러한 심부시추공 밀봉시스템의 성능을 고려하여, Fig. 8에서 보여주는 바와 같이 심도에 따라 서로 다른 기능을 갖는 밀봉시스템 개념을 설정하였다. 제안한 밀봉시스템의 특징은 처분구역 상부 약 3 km 심도에서 지표까지의 밀봉 구역을 4개의 구역으로 나누고 지하수의 특성을 고려하여 각 구역별 특성을 구분하고 밀봉 물질을 특성화하는 개념이다.

3.1.3 예비 기준 심부시추공처분시스템 개념. 이상 설정된 처분용기 및 취급, 밀봉 및 폐쇄개념을 바탕으로 설정한 심부시추공 예비 기준 처분시스템 개념을 Fig. 9에 나타내었으며, 다음에 기술하는 바와 같다.

- 심부시추공 처분시스템은 크게 처분구역(3~5 km)과 밀봉구역(3 km ~ 지표)으로 구분된다.
- 처분구역에는 처분용기 10개씩 또는 40개씩 연결하여 구성된 처분용기 스트링을 취급하여 적치하며, 처분공당 총 400개의 처분용기를 처분한다.
- 심부시추공 처분구역에 처분용기 스트링 적치시 각 스트링이 적치된 상부에는 콘크리트 브릿지 플러그를

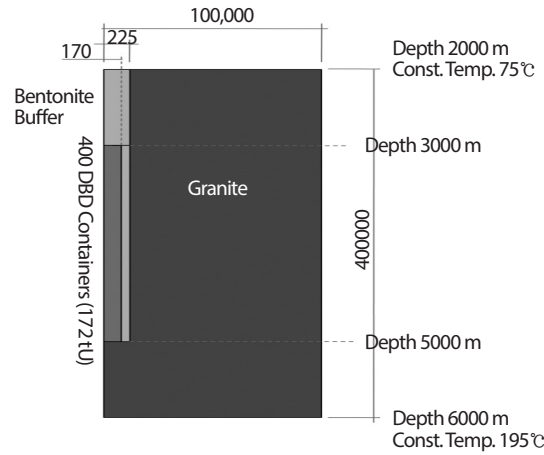


Fig. 10. A DBD model for thermal analyses.

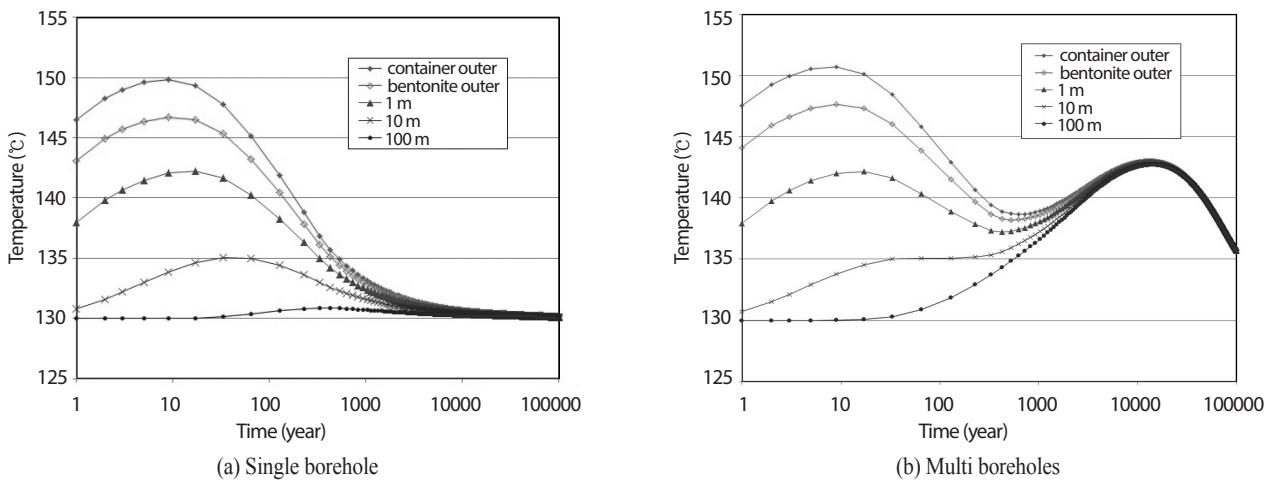


Fig. 11. Results of thermal analyses.

설치하여 상부의 처분용기 스트링 하중이 하부 처분용기 스트링에 부담되지 않도록 한다.

- 밀봉구역에는 벤토나이트, SiC 및 굴착암을 이용하여 밀봉하며, 지표에는 콘크리트 플러그 등을 사용하여 폐쇄한다.

4. 기준 심부시추공 처분시스템 예비 성능 평가

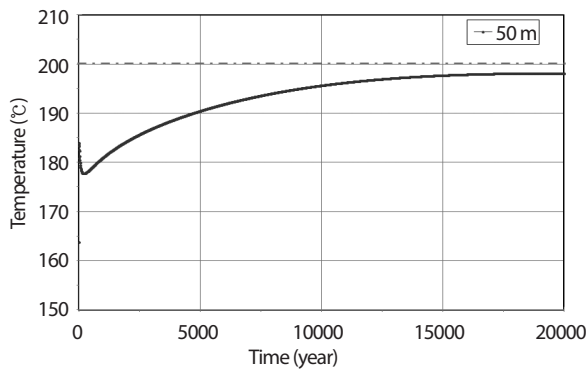
4.1 열적 안정성 평가

심부시추공 처분 안전성 확보를 위한 법적 근거 및 안전

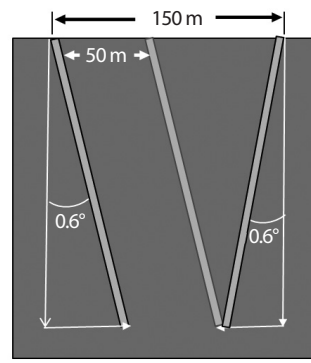
성확보 기본요건을 분석하여 처분환경에서의 처분용기 및 처분시스템의 열적 안정성평가 방안을 설정하고, 이에 따른 예비평가를 수행하였다. Fig. 10은 국내 경수로형 사용후핵연료를 대상으로 한 심부시추공 처분시스템에 대한 열적 안정성 평가를 위한 기하학적 모델을 나타내고 있다. 해석 영역은 심도 2~6 km로 처분구역인 심도 3~5 km의 상하부로 1 km를 추가한 영역이며, 처분시추공 간격은 기본적으로 시추공간의 열적 영향을 적게 받는 간격인 200 m로서[18] 대칭인 점을 고려하여 1/2로 해석모델을 설정하고, 2D 축대칭 모델을 이용하였다. 또한, 국내 소규모 지하처분연구시설인 KURT 부지 조건인 지표온도 10°C, 지온경사 30°C·km⁻¹를

Table 2. Deviation of deep borehole drilling

Average Deviation (deg)	Departure (m)	Average deviation (deg)	Departure (m)
0.6	50	2.5	220
1.0	90	3.0	165
1.5	135	3.5	310
2.0	180	4.0	350



(a) Result of thermal analysis : 50 m spacing (5 km depth, Container surface)



(b) Borehole spacing (50 ~ 150 m)

Fig. 12. Result of thermal analyses (5 km depth) and borehole spacing.

Table 3. Comparisons of disposal area between DBD and DGD

Total spent fuels : PWR 20,000 tHM (45,000 Assemblies)			
Deep Geological Disposal (DGD)		Deep Borehole Disposal (DBD)	
Disposal Tunnel Length	250	No. of Deep Boreholes	112
No. of Disposal Tunnels in a Pannel	54	Array	11 × 11
No. of Pannels	6	Spacing	150 m 50 m
Disposal area (km ²)	4.1	Disposal area (km ²)	2.73 0.3

고려하였으며, 해석 틀은 아바쿠스를 활용하였다. 열적 안정성 해석결과는 Fig. 11에 나타내었으며, 그림에서 보여주고 있는 바와 같이 단일 처분공인 경우와 다중 처분공일 경우 모두 암반에 대한 열적 최고온도 제한치인 200°C는 [18, 19] 넘지 않는 것으로 나타나 열적 안정성을 유지하는 것으로 판단된다.

4.2 심부시추공 간격 분석

심부시추공 처분개념에 있어서 처분효율에 영향을 주는 인자인 심부시추공 간격 설정 인자를 도출하고 이에 대한 예비 평가를 수행하여 처분면적 측면에서 심층 동굴 처분개념과 비교를 수행하였다.



Fig. 13. Graphic environment for deep borehole disposal process simulation.

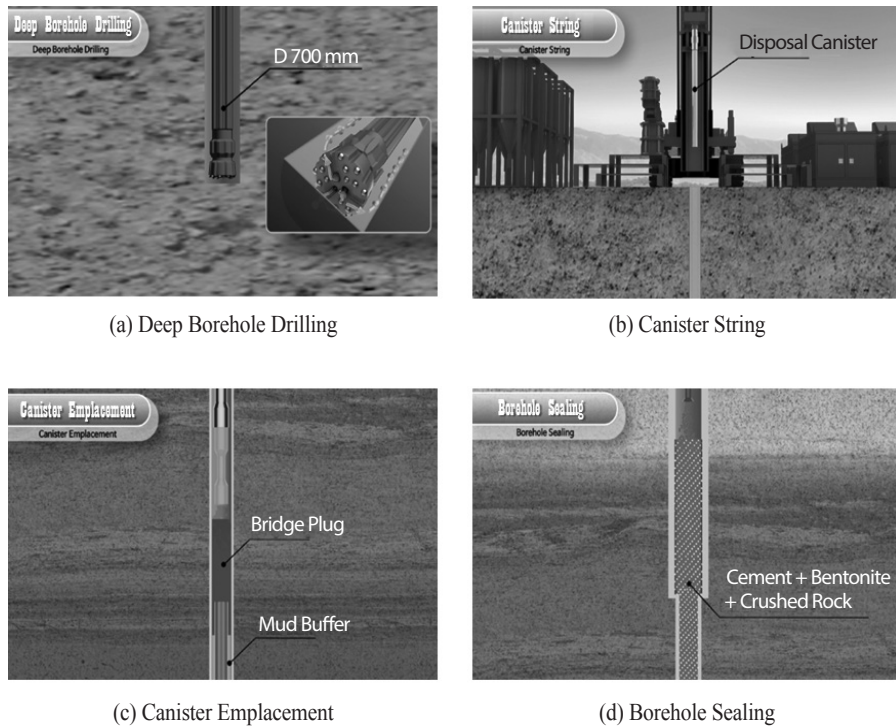


Fig. 14. Graphic simulation of deep borehole disposal process.

심부시추공 처분개념에서 시추 처분공간 간격설정은 처분효율을 결정하는데 있어서 매우 중요한 인자이므로 고준위폐기물을 처분하는 심부시추공 간격은 최적화 되어야 한다. 이러한 심부시추공 간격을 설정하는데 있어서 중요한 인자는 시추처분공간의 열적 영향과 시추처분 공 굴착에

있어서의 수직도로서 아래에 기술한 바와 같다[1].

- 심부시추공 처분시스템에 있어서 시추처분공은 처분된 폐기물로부터 발생하는 열에 의하여 암반에 역학적 영향을 받지 않도록 간격을 설정하여야 함.

- 심부시추공 처분시스템의 처분구역(심도 3~5 km)에 설치된 콘크리트 브릿지 플러그의 건전성을 유지하기 위하여 고준위폐기물로부터 발생하는 붕괴열로 인한 온도는 약 400°F (204°C) 이하로 유지되어야 한다.
- 또한, 심부시추공은 최대한 수직도를 유지하여야 한다.

심부 시추처분공 배열에 대한 PWR 사용후핵연료를 대상으로 열해석을 수행한 결과 Fig. 12는 심부시추처분공의 처분 구역인 심도 5km에서의 시추공과 시추공사이의 간격이 50m 인 경우에 있어서의 처분용기 표면에서의 온도를 보여주고 있다. 또한, Table 2는 현재의 제어시추 기술로 수직도 실현이 가능한 0.6°의 경우[1]에 5 km의 심도에서 이격 거리는 50 m 정도임을 나타내고 있다.

이상의 심부시추공 처분개념에 있어서 시추공 간격을 설정에 필요한 열적 및 수직도 요건에 대한 열해석 수행 및 수직도에 대한 검토 분석 결과 현재기술로 가능한 시추공 간격은 Fig. 12에서 보여주는 바와 같이 최소 50 m (동일방향 Deviation인 경우)에서 150 m (반대방향 Deviation인 경우)로 판단된다. 이러한 판단 결과에 따라 사용후핵연료 처분을 대상으로 하여 심부시추공 처분개념과 심층 동굴 처분 개념에 있어서의 처분면적 측면에서 비교하여 보면, Table 3에서 보여주는 바와 같이 심부시추공 처분 면적은 심층 동굴 처분 면적과 비교하여 시추공 간격이 150 m 인 경우 약 50% 정도로 감소하고, 시추공 간격인 50 m 인 경우 약 1/10 정도까지 감소하는 것으로 평가되었다.

4.3 심부시추공 처분공정에 대한 그래픽 전산모사

국내 원자력환경 등을 고려하여 설정된 예비 심부시추공 기준 처분시스템 구성요소들에 대한 개념과 지상 및 심부 처분 환경에서 처분공정 흐름의 적합성을 분석하기 위하여 Fig. 13에서 보여주는 바와 같이 3차원 그래픽 모델로 구축한 가상 환경에서 심부시추공 처분공정을 구현하였다.

심부시추공 처분공정은 심부시추공 굴착 및 고준위폐기물을 적재한 처분용기 인수공정, 심부시추공 지표 상부에서의 처분용기 행렬구멍 및 지하처분을 위한 준비공정, 심부시추공 내 처분용기 적치 및 처분구역 상부의 밀봉/폐쇄공정으로 구성되며 상세 공정에 대한 그래픽 전산모사는 Fig. 14에서 보여주고 있다.

5. 심부시추공 처분시스템 적용 타당성 예비 평가

국내의 원자력환경, 지질 및 산업환경 등에 대한 분석 결과에 따른 예비 기준 심부시추공 처분개념 및 성능평가 결과를 바탕으로 국내 처분대상 폐기물, 지질환경, 굴착기술, 심부환경 조사분석 기술 및 경제성 측면에서 심부시추공 처분기술의 적용 가능성에 대한 예비적인 평가를 수행하였다.

5.1 원자력환경 측면

국내에서는 상용으로 PWR형과 CANDU형 원자로를, 연구용 원자로로 하나를 운전하고 있으며, 사용후핵연료 관리를 위한 다양한 연구를 수행하고 있다. 현재 PWR 사용후핵연료 집합체를 심부시추공 처분하기 위한 대구경의 심부시추공 굴착은 이론적으로는 가능한 것으로 판단하고 있으나, 이에 대한 실제 굴착경험은 없다. 하지만 PWR 사용후핵연료 집합체를 해체하여 연료봉을 밀집시키는 경우는 실제 시추경험이 있는 시추공 구경으로 축소할 수 있으며, 미국 SNL (Sandia National Laboratory)에서 이에 대한 표준설계를 제시하고 있다[1]. 또한, 국내에서는 소형의 사용후핵연료인 CANDU 사용후핵연료와 하나로 사용후핵연료가 있어 이들에 대하여 심부시추공 처분 방안을 고려할 수 있으며, PWR 사용후핵연료 파이로공정에서 발생하는 다양한 폐기물 중 고준위폐기물, 고방열폐기물 및 고이동성 장반감기 폐기물에 대하여 심부시추공 처분기술 적용이 가능할 것으로 판단된다.

5.2 지질/지하수 측면

심부시추공 처분이 결정질 암반(주로 화강암)에 심도 5 km의 시추공을 굴착하고 하부 2 km에 고준위폐기물을 처분하고 상부를 밀봉하며 처분구역 상부 최소 1 km 정도의 결정질 암반 두께가 필요하다[18]. 이를 고려할 때, 한반도의 경우 남동부 지역을 제외하고는 1 km 심도 이전에 결정질암반이 나타나고 있다. 한반도 남동부인 포항의 경우도 2 km 심도 내외에서 결정질 암반이 나타나므로[20] 심부시추공 처분개념에 적합한 것으로 평가되고 있다. 다만, 국내 지질전문가에 따르면, 산악지형이 많은 한반도 특성상 처

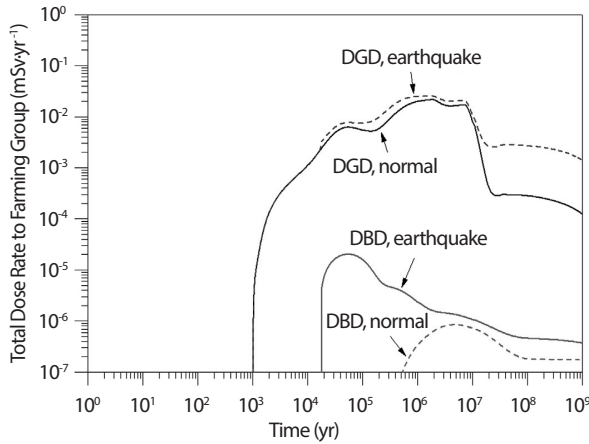


Fig. 15. A comparison of safety between DBD and DGD [24].

분심도에 처분안전성을 높일 수 있는 염수(Brine)의 존재 가능성이 없어 안전성측면에서 외국의 경우에 비하여 불리할 것으로 평가하는 의견도 있다. 따라서, 한반도 천부에서도 지하수 염도에 의해 지하수가 증상을 이루는 것으로 분석이 되고 있으나, 심부지하 처분심도에서의 염수 존재에 대한 상세한 조사 분석이 필요하다. 또한, 심부지하수에서의 염수 유무에 의한 안전성 유리/불리 정도가 크지 않다는 분석도 있다[21].

5.3 안전성 측면

심부시추공 처분환경이 심도 5 km이므로 이보다 1/10정도 500 m 심도에 처분하는 심층 동굴 처분환경보다 안전성이 높을 것이라는 것은 쉽게 추론할 수 있다. 실제, 미국 SNL에서 암반 투수도 민감도를 반영한 예비 평가한 결과에 따르면 가장 높은 투수도의 경우에도 심층 동굴 처분 개념의 10 배 정도는 안전한 것으로 평가하고 있다[22, 23]. 국내에서도 심층 동굴 처분 개념에 대한 안전성평가 결과와 심부시추공 처분개념에 대한 예비안전성평가 결과에 따르면, 그림15에서 보여주는 바와 같이 심부시추공 처분개념이 보다 더 안전할 것으로 평가되고 있다[24].

5.4 핵심기술 측면

심부시추공 처분을 위한 핵심기술로는 대구경 굴착기

술, 심부환경 조사/분석기술, 시스템 개발 기술, 안전성 평가 기술 및 현장실증 기술이 있다. 처분시스템 기술과 안전성 평가 기술은 심층 동굴 처분을 위한 연구개발을 지속적으로 수행해 왔으므로, 이 기술을 적용하는 것이 가능할 것으로 판단된다. 현장 실증기술도 4개 기술이 완성되면 부지 확보여부에 따라 수행이 가능하다.

심부시추공 굴착기술과 관련하여 현재 국내기술과 해외 시추기를 도입하여 국내 포항과 광주, 나주 등에서 지열발전을 위한 8 inch에서 17 inch 구경의 심부시추공을 2~4.2 km 심도까지 굴착한 경험을 확보하고 있어 굴착기술에 따른 제약은 크지 않을 것으로 판단된다. 다만, 수직도 및 시추공 건전성관련 기술 확보와 실제 심부시추공 처분기술의 현장실증을 위한 굴착 경험이 필요하다. 심부시추공 조사/분석 기술은 한국지질자원연구원에서 다양한 목적으로 심부지하 조사분석기술을 확보하기 위한 프로젝트(In-DEPTH)를 수행하고 있다[12]. 이 프로젝트가 완료되면, 심부시추공 처분에 필요한 상당부분의 조사/분석기술이 확보될 것으로 기대된다.

5.5 경제성 측면

미국 SNL에서 수행한 심부시추공 처분 기준개념에 따른 처분시스템 처분공당 약 253 MtU (밀집 고려)의 사용후핵연료가 처분되면 이때 비용은 약 450 억원으로 평가되고 있어, tU 당 약 1.8 억 원이다[1]. 이는 국내 비용평가의 경우 고시에 따르면(산업통상자원부 고시 제2017-195호), 단위발생인 집합체 당(약 0.5 tU) 약 3.2 억 원으로 경제성 측면에서도 유리한 것으로 평가되고 있다.

6. 결론

다양한 산업의 발전에 따른 에너지 수요를 충족시키기 위하여 비교적 효율적이고 청정한 에너지로 고려되고 있는 원자력발전을 이용하여왔으며, 이를 위하여 안전을 최우선으로 하였다. 원자력발전에 따라 필수적으로 발생하게 되는 방사성폐기물 또한 안전을 가장 중요하게 고려하여 인간 및 자연환경으로부터 완전하게 격리시키고자 하는 노력이 있어왔다. 고준위폐기물의 경우도 핀란드의 경우 처분시

스텝 개념에 대한 실증을 완료하고 건설 인허가를 획득하여 상용화 단계에 있는 심층 동굴 처분(Deep Geological Disposal) 기술을 확보하였으며, 이에 대한 대안으로서 보다 안전한 처분방안으로 미국을 중심으로 유럽 국가 등에서 심부 시추공 처분(Deep Borehole Disposal)기술에 대한 연구를 수행하여 왔다.

본 연구에서는 지하 5 km 심도까지 시추공을 뚫어 3~5 km 구간에 공학적방벽 개념으로 사용후핵연료를 포함하는 고준위 방사성폐기물을 처분하고, 처분구간 상부부터 지표까지 (3 km ~ 지표)의 구간은 벤토나이트, 콘크리트 등으로 밀봉하여 지표 생태계와 완전하게 격리시키는 개념인 심부 시추공 처분기술의 국내 적용성을 예비평가 하였다. 즉, 심부 시추공 처분기술을 적용하기 위해서는 원자력환경과 지하 5 km 심도의 지질 및 지화학 조건이 심부시추공 처분에 적합한가를 우선 확인하여야 하며, 대구경 장심도 굴착장비 및 조사장비와 이들 장비의 운용기술이 확보되어야 한다. 따라서, 본 연구에서는 이러한 적합성과 관련 기술의 확보 가능성에 대한 분석을 수행하였다.

심부시추공 처분시스템의 기술적 적용성 분석을 위하여 국내 지열개발 산업과의 협력을 통하여 수집한 연구자료를 바탕으로 국내 기반암 분포특성 및 심부시추공 처분부지 적합성 평가 기술을 분석하고 대구경 장심도 심부시추공 처분 기술에 대한 가능성을 평가하였다. 이들 결과를 바탕으로 심부시추공 처분시스템 설계 기준 및 요건에 적합한 심부시추공 처분 용기 및 밀봉/폐쇄 개념을 설정하여 예비 기준 심부시추공 처분 개념을 도출하였다. 또한, 도출된 예비 기준 처분시스템에 대하여 열적 안정성 평가 및 심부시추공 간격 설정 등 다양한 성능 평가와 그래픽 가상환경에서의 심부시추공 처분공정을 모사하여 설정된 개념의 적절성을 확인하였다. 그리고 이들을 종합하여, 국내 원자력환경, 지질 및 지하수, 안전성, 핵심기술 및 경제성 측면에서의 심부시추공 처분시스템의 국내 적용성에 대한 예비평가를 수행하였다.

결론적으로 심부시추공 처분기술은 5 km 심도 결정질 암반에 고준위폐기물을 격리시키는 처분방식과 심도에 따른 안전성, 경제성 등 다양한 측면에서 유리할 것으로 판단되고 있다. 하지만, 이 기술은 현재까지 개념개발 수준의 단계로서 실제 적용을 위해서는 상급 핵심기술 확보 후 현장 실증이 절대적으로 필요하며, 규제기관으로부터 인허가 획득을 위해서는 관련 요소기술 및 안전성에 대한 검증을 통하여 불확

실성을 줄여야 한다.

심부시추공 처분기술 개발 방향으로는 세부 핵심기술에 대한 장기적인 확보전략을 수립하고, 원자력 관련 전문 연구기관뿐 만 아니라 지구과학 관련 전문 연구기관, 시추 및 조사분석 산업체, 규제기관 기관 및 정부 관련 부처로 구성된 컨소시엄을 구성하여 수행하는 것이 바람직하다. 또한, 필요한 분야에 대해서는 외국 관련 전문기관과의 협력도 필수적이다.

본 연구결과는 사용후핵연료 관리 국가정책 수립을 위한 공학적 근거자료로 활용이 가능하며, 심부시추공 처분기술에 관심을 갖는 방사성폐기물 관리 이해당사자들에게 필요한 기초적인 설명자료로 활용될 수 있다.

감사의 글

본 연구는 미래창조과학부 지원에 의한 원자력기술개발사업 처분시스템 성능평가체계 개발(NRF-2017M2A8A5014856)의 일환으로 수행되었습니다.

REFERENCES

- [1] B.W. Arnold, P.V. Brady, S.J. Bauer S. Pye, C. Herrick, and J. Finger, Reference design and operations for deep borehole disposal of high-level radioactive waste, Sandia National Laboratories Report, SAND2011-6749, 13-38 (2011).
- [2] National Academy of Sciences, The Disposal of Radioactive Waste on Land (1957), Accessed Jun. 29 2017. Available from: <https://www.nap.edu/catalog/10294/the-disposal-of-radioactive-waste-on-land>.
- [3] K.A. McMahon, Deep Borehole: Disposal Concept and Field Test, Developing Spent Fuel Strategies: Regional Workshop, May 29 – June 1, 2017, Tokyo (2017).
- [4] Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB), Project on Alternative Systems Study (PASS) Final Report, SKB Technical Report, TR 93-04, 96-102 (1993).
- [5] Karl-Inge Åhåll, Final Deposition of High-level

- Nuclear Waste in Very Deep Boreholes, MKG Report 2, 11-16 (2006).
- [6] Swedish National Council for Nuclear Waste (KASAM), Deep boreholes ; An alternative for final disposal of spent nuclear fuel, Report from KASAM's question-and-answer session, 49-55 (2007).
- [7] H. Yoon, S. Shin and S. In, A Study on Demonstration of Deep Geothermal Drilling Technology, HJ D&B Report-2013, 72-114 (2013).
- [8] S.H. Ji, Y.K. Ko and J.W. Choi, "The State-of-the Art of the Borehole Disposal Concept for High Level Radioactive Waste", J. Nucl. Fuel Cycle Waste Technol., 10(1), 55-62 (2012).
- [9] K.S. Kim, D.G. Cho, S.H. Ji and J.W. Choi, State-of-the-Art Report on the Very Deep Borehole Disposal Concept for High-level Radioactive Waste, Korea Atomic Energy Research Institute report, KAERI/AR-929/2012 (2012).
- [10] T.J. Lee and Y.H. Song, Development of Exploitation Technologies for Geothermal Resources, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources report, KIGAM GP2007-002-03-2 (2008).
- [11] K.Y. Kim, "Current Status and Perspectives in Drilling Technology for Enhanced Geothermal System", KSCE 2011, 59(9), 16-25 (2011).
- [12] J.Y. Lee, M.S. Lee, H.J. Choi, G.Y. Kim and K.S. Kim, Preliminary Evaluation for Domestic Applicability of Deep Borehole Disposal Technology, Korea Atomic Energy Research Institute report, KAERI/RR-4314/2017, 83-93 (2017).
- [13] T.J. Lee, Status of Well logging and investigation for Deep borehole, July 2016 Seminar at Korea Atomic Energy Research Institute (2016).
- [14] J. Beswick, STATUS OF TECHNOLOGY FOR DEEP BOREHOLE DISPOSAL, Contract No. NP 01185, 5-11, April 2008.
- [15] D.K. Cho, J.W. Choi and P.S. Hahn, "Current Status and Projection of Spent Nuclear Fuel for Geological Disposal System Design", J. Nucl. Fuel Cycle Waste Technol., 4(1), 87-93 (2006).
- [16] M.S. Lee, J.Y. Lee, H.J. Choi, and S.H. Ji, "Evaluation of Silicon Carbide (SiC) for Deep Borehole Disposal Canister", J. Nucl. Fuel Cycle Waste Technol., 16(2), 233-242 (2018).
- [17] H.J. Choi, M.S. Lee and J.Y. Lee, New Concept of EBS for HLW Deep Borehole Disposal, Proceeding of Korean Radioactive Waste Society spring 2014 Conference, 12(1), 163-164, May 7-9, 2014, Pyeongchang, Republic of Korea.
- [18] P.V. Brady, B.W. Arnold, G.A. Freeze, P.N. Swift, S.J. Bauer, J.L. Kanney, R.P. Rechar, and J.S. Stein, Deep Borehole Disposal of High Level Radioactive Waste, Sandia National Laboratories Report, SAND2009-4401 (2009).
- [19] US Department of Energy, Yucca Mountain Science and Engineering Report, DOE/RW-0539-1, US DOE, 2-16 (2002).
- [20] J.Y. Lee, M.S. Lee, H.J. Choi, G.Y. Kim and K.S. Kim, "Preliminary Analyses of the Deep Geoenvironmental Characteristics for the Deep Borehole Disposal of High-level Radioactive Waste in Korea", J. Nucl. Fuel Cycle Waste Technol., 14(2), 181-190 (2016).
- [21] B. Arnold and T. Hagdu, THERMAL-HYDROLOGIC MODELING OF A DEEP BOREHOLE DISPOSAL SYSTEM, Presentation at the International High-Level Radioactive Waste Management Conference, April 28-May 2, 2013, Albuquerque, NM.
- [22] T. Hadgu, B. Arnold, J. Lee, G. Freeze, P. Vaughn, Sensitivity Analysis of Seals Permeability and Performance Assessment of Deep Borehole Disposal of Radioactive Waste, Sandia National Laboratories Report, SAND2012-1118C (2012).
- [23] E.J. Bonano and G. Appel, PERFORMANCE ASSESSMENT AS A MANAGEMENT TOOL FOR PRIORITIZING NUCLEAR WASTE PROGRAM RESEARCH AND DEVELOPMENT ACTIVITIES, Sandia National Laboratories Report, SAND2011-5949C (2011).

- [24] Y.M. Lee, H.J. Choi, and K.S. Kim, “A preliminary comparison study of two options for disposal of high-level waste”, *Progress in Nuclear Energy*, 90, 229-239 (2016).