

Preliminary Analyses of the Deep Geoenvironmental Characteristics for the Deep Borehole Disposal of High-level Radioactive Waste in Korea

고준위 방사성폐기물 심부시추공 처분을 위한 국내 심부지질 환경특성 예비분석

Jongyoul LEE*, Minsoo LEE, Heuijoo CHOI, Geonyoung KIM, and Kyungsu KIM

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

이종열*, 이민수, 최희주, 김건영, 김경수

한국원자력연구원, 대전광역시 유성구 대덕대로 989번길 111

(Received November 24, 2015 / Revised January 20, 2016 / Approved April 5, 2016)

Spent fuels from nuclear power plants, as well as high-level radioactive waste from the recycling of spent fuels, should be safely isolated from human environment for an extremely long time. Recently, meaningful studies on the development of deep borehole radioactive waste disposal system in 3-5 km depth have been carried out in USA and some countries in Europe, due to great advance in deep borehole drilling technology. In this paper, domestic deep geoenvironmental characteristics are preliminarily investigated to analyze the applicability of deep borehole disposal technology in Korea. To do this, state-of-the art technologies in USA and some countries in Europe are reviewed, and geological and geothermal data from the deep boreholes for geothermal usage are analyzed. Based on the results on the crystalline rock depth, the geothermal gradient and the spent fuel types generated in Korea, a preliminary deep borehole concept including disposal canister and sealing system, is suggested.

Keywords: Geoenvironment, Characteristics, Deep borehole disposal(DBD), Spent fuels, High level waste, Application

* 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>

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

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

Geonyoung KIM <http://orcid.org/0000-0001-5502-178X>

원자력발전소에서 전기를 생산하고 난 후 발생하는 사용후핵연료 또는 이들 사용후핵연료의 재처리/재활용 공정으로부터 발생하는 고준위폐기물은 인간환경으로부터 안전하게 장기간 격리시켜야 한다. 최근 심부시추공 굴착기술의 획기적인 발전으로 인하여, 방사성폐기물의 심부시추공 처분기술에 대한 연구가 의미 있게 진행되고 있다. 본 논문에서는 이러한 심부시추공을 활용하여 고준위 방사성폐기물을 지하 3~5 km 심도에 격리시키는 심부시추공 처분기술의 국내 적용 가능성을 분석하기 위하여 국내 심부 지하환경 특성에 대하여 예비분석 하였다 이를 위하여, 미국 및 유럽권 국가 연구사례와 기술개발 현황을 검토하고, 실제 국내의 심부 지질조건을 검토하기 위하여 고지열 분포지역에 개발 중인 지열 탐사공을 대상으로 3~4 km 심도까지의 암석, 지온 등 특성 자료를 수집, 분석하였다. 결정질 암반 심도 및 지온경사 등 분석 결과와 국내 발생 사용후핵연료를 바탕으로 심부시추공 처분시스템 구성요소인 처분용기, 밀봉시스템 등에 대하여 예비단계의 개념을 제안하였다.

중심단어: 지반환경, 특성, 심부시추공처분, 사용후핵연료, 고준위폐기물, 적용

1. 서론

원자력발전소에서 전기를 생산하고 난 후 발생하는 사용후핵연료 또는 이들 사용후핵연료의 재처리/재활용 공정으로부터 발생하는 고준위폐기물은 인간환경으로부터 장기간 격리시켜야 한다. 현재의 기술수준으로 이들 폐기물의 가장 안전한 관리방법으로 고려되고 있는 방식은 지하 수백 미터 심도의 안정한 암반에 공학적방벽을 설치한 다중방벽개념을 도입한 심부층 동굴처분방식(DGD : Deep Geological Disposal)이다.

하지만, 근래 지하 심부에 시추공을 굴착하는 기술의 발달로 지표에서 지하 5 km 심도까지 시추공을 뚫어 3~5 km 구간에 공학적방벽 개념으로 사용후핵연료를 포함하는 고준위 장반감기 방사성폐기물을 처분하고, 처분구간 위쪽부터 지표까지(지표~3 km)의 구간은 벤토나이트, 아스팔트 등으로 밀봉하여 지표 생태계와 완전하게 격리시키는 개념인 심부시추공 처분(DBD : Deep Borehole Disposal) 기술에 대한 연구를 활발하게 진행하고 있다.

즉, 지질학적 조건이 더 안정적인 지하 3~5 km의 심도에 고준위폐기물을 처분하게 된다면, 생태계와의 이격거리 확보에 유리하고, 암반의 수리전도도가 매우 낮아 지하수의 생태계 도달 속도가 현저히 감소하고, 지하수가 환원상태에서 핵종의 용해도가 매우 낮으며, 연령이 오래된 지하수에서는 핵종이 흡착된 콜로이드의 생성과 이동이 극히 제한된다는 등의 장점이 있을 것으로 평가되고 있어, 이 심부시추공 처분 개념이 이상적인 처분 대안기술로 평가되고 있다[1].

본 논문에서는 이러한 고준위 방사성폐기물을 지하 3~5 km 심도에 심부시추공 격리기술을 활용한 심부시추공 처분기술의 국내 적용 가능성을 분석하기 위하여 국내 심부 지하환경에 대하여 예비분석 하였다. 이를 위하여, 미국 및 유럽권 국가 연구사례와 기술개발 현황을 분석하고, 실제 국내의 심부 지질조건을 검토하기 위하여 고지열 분포지역에 개발 중인 지열탐사공을 대상으로 3~4 km 심도까지의 암석, 지온 등 특성 자료를 수집, 분석하였다. 상기의 실측자료를 근거로 국내에서 가능한 예비 단계의 심부시추공 처분개념을 설정하였다.

2. 심부시추공 처분 개념

심부시추공 처분기술은 지표에서 결정질 암반의 지하 5 km 심도까지 하나의 시추공 또는 다수로 구성된 시추공 배열을 굴착하여 하부 심도 3~5 km인 2 km 구간에 공학적방벽 개념을 도입하여 사용후핵연료 또는 재처리로부터 발생한 고준위폐기물을 적재한 처분용기를 처분하고 처분구간 상부인 심도 3 km에서 지표까지는 벤토나이트, 아스팔트 등으로 밀봉하여 지표 생태계와 장기간 동안 안전하게 격리시키는 개념이다(Fig. 1).

심부시추공 처분시스템에서의 핵심기술은 대구경 시추공을 처분심도까지 굴착하는 기술, 심부지하의 지질특성을 조사, 분석하는 기술, 처분용기를 포함하는 공학적방벽 개념 도출과 처분용기 취급 방법/장비 등 처분시스템 개념개발

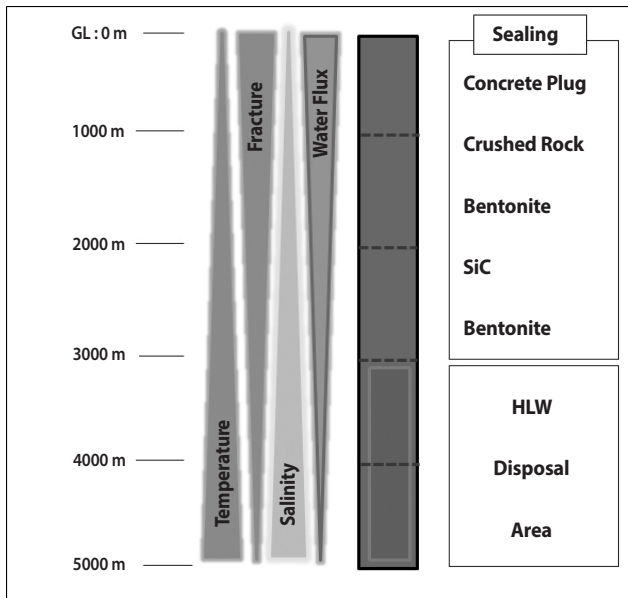


Fig. 1. Deep borehole disposal environment[2].

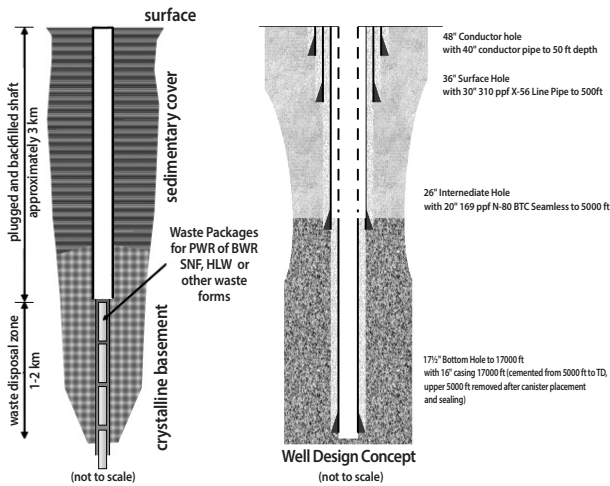


Fig. 2. Deep borehole disposal and well concept[1].

기술, 그리고 처분시스템에 대한 성능 및 안전성 평가 기술 등을 포함한다.

3. 심부시추공 처분기술 연구사례

고준위폐기물의 안전한 격리를 위하여 다양한 방법들이 고려되었으며, 근래 들어 심부시추공 굴착기술의 급속한 발달로

심지층 처분방안에 대한 대안으로서 심부시추공 처분에 대한 연구가 미국 및 유럽 일부 국가에서 활발하게 진행되고 있다.

3.1 미국

미국에서의 초기 심부시추공 처분에 대한 제안은 1957년 액체형태의 폐기물에 대하여 심부시추공 처분 또는 지층처분을 고려할 것을 권고한 미국 NAS(National Academy of Science)의 평가에 의해 제기되었다[3].

근래 들어 심부시추공에 방사성폐기물을 처분하는 개념은 결정질 암반의 수 킬로미터 깊이에 사용후핵연료 또는 고준위폐기물을 처분하기 위하여 제안되었다. 최근 샌디아국립연구소(SNL)에서는 2009년도에 심부시추공 처분개념에 대한 분석을 위하여 사용후핵연료 집합체를 처분대상으로 하여 석유산업 또는 지열발전을 위한 시추기술을 이용하여 수직으로 5 km 깊이까지 천공된 시추공에서 45 cm 직경의 3-5 km 구간인 하부 2 km 부분에서 드릴케이싱 내부에 처분용기를 하강시켜 적재하며, 적재가 완료되면 시추공 상부는 밀봉하는 개념을 도출하였다. Fig. 2는 샌디아국립연구소의 심부시추공 처분개념과 그에 따른 관정(Well) 설계 개념을 보여주고 있다[1].

또한, 2011년도에는 2009년도의 개념을 보다 구체화하고 모든 개념 요소들의 실행가능성을 좀 더 완전하게 평가할 뿐만 아니라 처분공 건설, 처분용기, 폐기물 적치, 처분공 밀봉 및 폐쇄에 관한 기준 설계안을 제안하였으며, 현재의 기술 수준으로 시행 가능한 방법으로 운반비용을 제외한 처분비용을 산출하였다[4]. 현재는 BRC(Blue Ribbon Commission)의 권고에 따라 미국 에너지성(DOE)과 샌디아국립연구소를 중심으로 일부 고준위폐기물을 심부시추공에 처분하기 위하여 현장실증시험 단계에 있다[5, 6].

3.2 스웨덴

스웨덴 방사성폐기물관리기관인 SKB(Svensk Kärnbränslehantering AB)는 1980년대말 사용후핵연료 영구처분 방안도출을 위한 연구개발 프로그램으로서 다양한 대안들에 대한 분석을 수행하였다. 이의 일환으로 심부시추공 처분에 대한 타당성평가를 바탕으로 하여 처분방안 결정을 위한 PASS(Project on Alternative System Study)프로젝트를

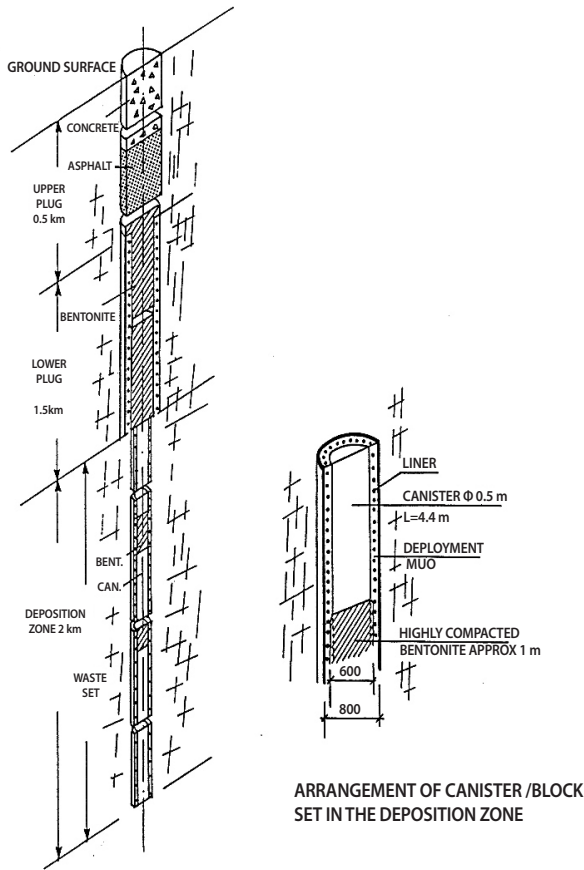


Fig. 3. Deep borehole disposal concept of SKB [7].

수행하였다[7]. Fig. 3은 위에서 기술한 스웨덴 초기의 타당성 분석을 위한 기술개발로부터 도출한 지하 4 km에서 2 km 심도 처분구역의 처분용기와 벤토나이트 블록 및 처분구역 상부의 밀봉/플러징 개념을 보여주며, Fig. 4는 PASS 프로젝트에서의 심부시추공 처분개념을 보여주고 있다[7].

2000년도에는 SKB가 제안한 심부시추공 처분개념의 시추공을 천공할 수 있는지 여부를 결정하기 위하여 공학적인 타당성 분석을 수행하였고, 2006년도에는 심부시추공 처분개념을 바탕으로 한 사용후핵연료 처분장에서의 심부지하수 조건의 안정성을 조사하기 위한 연구로서 심부지층 지하수의 열영향에 대한 해석 및 분석을 수행하였다[8].

2010년도에도 KBS-3방법에 따른 사용후핵연료 처분과 심부시추공에 처분하는 방법에 대한 비교가 수행되었으며 [9], 최근 2013년도에도 심부시추공 처분시스템의 열해석을 수행하고 기술적 문제점 등 분석하였다[10].

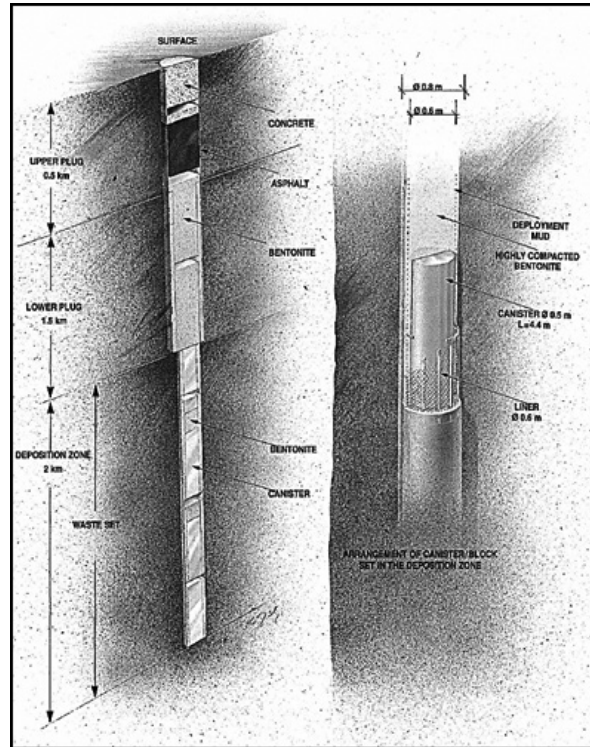


Fig. 4. Deep borehole disposal concept of PASS project [7].

3.3 기타 유럽국가

덴마크에서는 1980년대 초부터 암염돔에서의 처분기술에 관한 연구를 수행하였으며, 1999년에는 심부지층의 암염층에서의 심부시추공 처분기술을 적용하는 개념을 도출하여 장단점을 분석하였다[11]. 네덜란드에서도 동일한 시기에 대학을 중심으로 암염돔에서의 심부시추공 처분개념에 대한 연구를 수행한 바 있다[12]. 영국에서는 2004년 기초적인 현황분석 연구로서 심부시추공 처분개념에 대한 분석을 수행하였다[13]. 최근에는 영국 셰필드 대학을 중심으로 심부시추공 처분을 위한 밀봉개념 등에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다[14].

4. 국내 지반환경 예비 분석

국내에서 심부시추공 처분기술 적용성 분석에 필요한 심부지하환경에 대한 예비분석을 위하여 지열 연구개발

프로젝트[15, 16]에서 난방 및 발전을 목적으로 심부시추공을 굴착한 포항 및 강화 석모도의 지질 및 지온 특성자료를 수집하였으며, 지열발전 목적의 심부 시추기술 실증 프로젝트[17]가 수행된 광주지역의 관련 자료도 수집하여 분석하였다. 또한, 소규모이지만 국내 유일의 지하처분연구시설인 KURT(KAERI Underground Research Tunnel)의 지질, 지온 및 지하수 조사자료를 수집하여 분석하였으며, 결과는 아래에 기술한 바와 같다.

상기 네 지역은 각각 한반도 중남부지질을 대표하는 경기변성암복합체, 옥천대, 영남변성암복합체 및 경상분지 등 지질 구역(Fig. 5)에 해당된다. 이들은 각 구역 내에서 특정 지역의 특성을 분석한 것으로서 지극히 예비적인 평가이고 지열이용 목적의 자료로서 한계가 있지만, 심부환경의 개략적인 추정을 위해 그 의미가 큰 것으로 평가된다.

4.1 석모도 지역 : 경기 편마암 복합체 지역

석모도 지역은 선캠브리아기의 장봉편암 및 화강편마암, 쥐라기의 반상흑운모화강암 및 중립질 흑운모화강암, 백악기의 각섬석 흑운모화강암 및 세립질 흑운모화강암 등으로 구성되어[15], 이들 암층들이 석모도 일대의 기반암을 형성하고 있다. 석모도 내 다수의 심부시추공을 굴착하여 심도별 지온 경사를 측정한 결과 및 석모도 일대 각 지역에 대한 암석 그룹별 열물성 측정결과는 아래 Table 1, 2에 나타난 바와 같다.

4.2 포항 지역 : 경상분지

포항지역 일대는 크게 백악기 경상누층군의 하양층군에 속하는 가송동층 및 춘산층(대구층)의 퇴적암류, 유천층군에 속하는 중성~염기성 화산암류 및 산성화산 암류, 제3기

에오세의 석질결정질응회암, 흑운모화강암, 규장암 및 결정질응회암, 연일층군에 속하는 제3기 마이오세의 퇴적암류, 제4기의 충적층 등으로 대별되며, 상기 암층들은 포항분지의 기반암을 형성하고 있다[16].

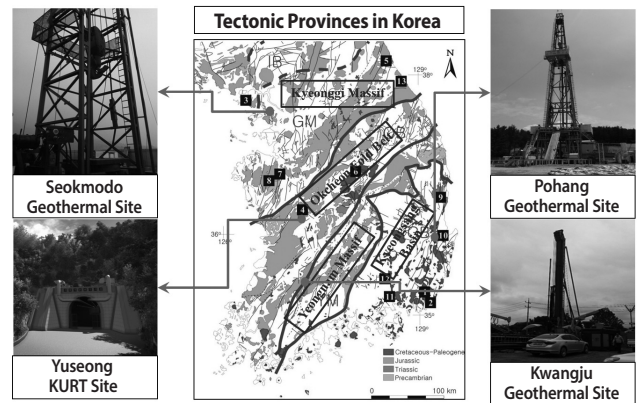


Fig. 5. Tectonic province in Korean peninsula and sites[15, 16, 17].

Table 1. Geothermal gradient of borehole in seokmodo

Borehole	Depth(m)	Initial temp. (°C)	Depth temp. (°C)	Thermal gradient (°C/km)
YG-1	750	13.7	72.14	76.8
YG-2	1,204	15.7	73.93	48.8
YG-3	450	13.4	35.2	48.2
YG-4	950	14.0	58.87	47.4
YG-5	490	12.7	38.03	51.6
YG-6	668	14.1	40.7	39.8
YG-7	994	13.4	46.7	33.8
YG-8	694	13.4	47.7	49.7

Table 2. Thermal properties of rock in seokmodo

Geology	Era	Density (g/cm ³)	Porosity (%)	Specific heat (J/kg.K)	Thermal conductivity in-situ (W/m.K)
Metamorphic rocks	Precambrian era	0.69~2.75	0.01	0.79~0.82	4.45~5.36
	Jurassic period	2.6~2.62	0.02	0.82~0.84	2.77~3.3
Igneous rocks	Cretaceous period	2.67	0.02	0.85	2.66

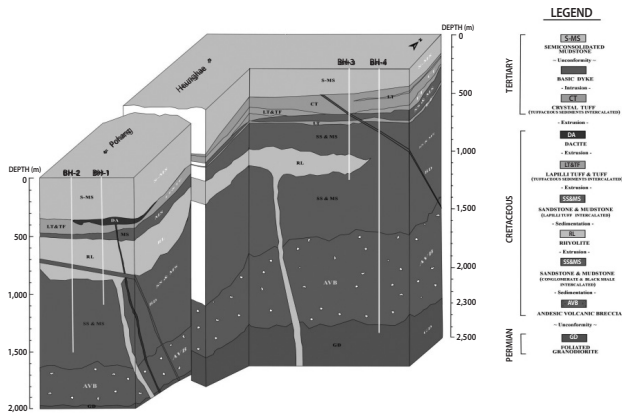


Fig. 6. Geology around Pohang[15].

Table 3. Pohang site rock properties

Borehole	No. of samples	Density (g/cm ³)	Porosity (%)	Specific heat (J/kg.K)	Thermal conductivity in-situ (W/m.K)
BH-1	14	2.42 2.19-2.63	6.28 3-18.7	0.915 0.87-0.98	2.16-4.05
BH-4	50	2.63 2.39-2.85	3.37 0.31-10.2	0.821 0.76-0.89	2.24-3.57

포항 지열을 위한 시추공 굴착 부지 주변(Fig. 6)의 주요 조사용 시추공으로부터 측정된 열물성 및 온도 검증자료는 Table 3에 나타난 바와 같다[18].

4.3 유성 KURT : 경기 변성암 복합체, 옥천 지구대에 위치함

유성 KURT 부지 주변은 주로 선캄브리아기의 편마암류와 중생대의 심성암과 맥암류로 구성되어 있으며, KURT 부지의 북서부에는 주로 선캄브리아기의 변성암류로서 흑운모 편마암 및 편암으로 구성되었다[19]. 유성지역 주요 시추코아 및 공내 검증에 따른 심도별 지질은 아래 Fig. 7에 나타난 바와 같다.

심도 1000 m 까지 굴착한 DB-02 시추공의 경우 지표 하 600 m 지점을 기준으로 상부와 하부의 지온경사에 근소한 차이를 나타내는데 이는 600 m 를 기준으로 그 상, 하부가 지온경사에 영향을 줄 수 있는 상이한 지질환경을 갖는 것으로 예측할 수 있다. 시추조사공을 이용한 KURT 주변 지역의

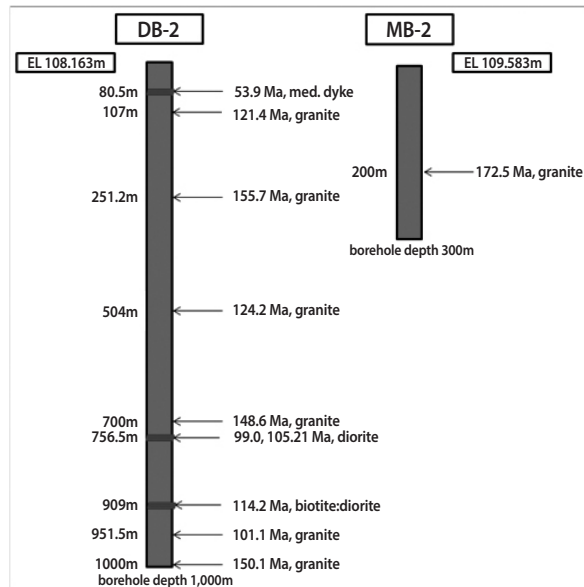
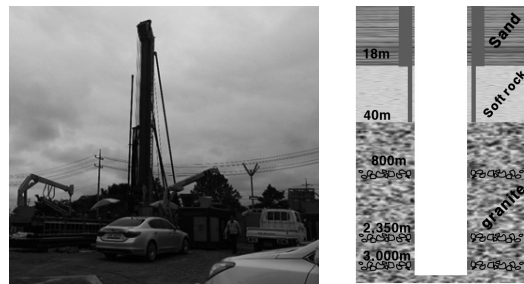


Fig. 7. Geology of 2 boreholes (DB-2 & MB-2) in Yuseong area.



(a) Drilling site in Kwangju (b) Geology

Fig. 8. Geothermal drilling site in Kwangju and geology of borehole[17].

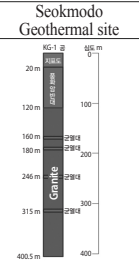
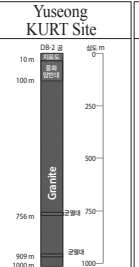
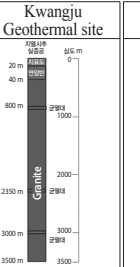
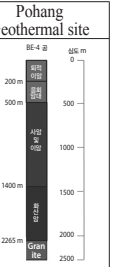
지온경사는 22~27°C/km로 확인되었으며, 심부 500 m 영역에서 24.42~25.9°C/km의 분포를 보이는 것으로 조사되었다.

4.4 광주 지열 심부시추 지역

광주 지열탐사 지역의 기반암은 선캄브리아기 화강암질 편마암, 시대미상의 변성퇴적암류, 쥐라기의 화강암류 그리고 백악기의 화산암류 및 심성관입암류로 구성되며, 제 4기 충적층이 발달하였다[17].

광주 지열탐사 심부시추공 실증은 워터햄머링 기법에 의하여 굴착하였으며, 3,500 m 심도까지의 지질은 쥐라기 화강암류가 분포한다(Fig. 8).

Table 4. Preliminary analyses results for 4 sites

	Seokmodo Geothermal site	Yuseong KURT Site	Kwangju Geothermal site	Pohang Geothermal site																						
Geological Stratification																										
Geothermal Gradient	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Borehole</th> <th>Depth (m)</th> <th>Geoth. G (C/km)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>YG-6</td> <td>668</td> <td>39.8</td> </tr> <tr> <td>YG-7</td> <td>994</td> <td>33.8</td> </tr> <tr> <td>YG-8</td> <td>694</td> <td>49.7</td> </tr> </tbody> </table>	Borehole	Depth (m)	Geoth. G (C/km)	YG-6	668	39.8	YG-7	994	33.8	YG-8	694	49.7	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Borehole</th> <th>Geoth. G (C/km)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>YS-01</td> <td>0.024</td> </tr> <tr> <td>YS-03</td> <td>0.027</td> </tr> <tr> <td>DB-1</td> <td>0.022</td> </tr> <tr> <td>DB-2</td> <td>0.025</td> </tr> </tbody> </table>	Borehole	Geoth. G (C/km)	YS-01	0.024	YS-03	0.027	DB-1	0.022	DB-2	0.025	<ul style="list-style-type: none"> • Demonstration of Geothermal Drilling ➢ Surface T. : 15°C ➢ Depth 3.5 km : 98°C • 25°C / Km 	<ul style="list-style-type: none"> • Based on BH-4 ➢ Surface : 17°C ➢ Depth 2 km : 85°C • 35°C / Km
Borehole	Depth (m)	Geoth. G (C/km)																								
YG-6	668	39.8																								
YG-7	994	33.8																								
YG-8	694	49.7																								
Borehole	Geoth. G (C/km)																									
YS-01	0.024																									
YS-03	0.027																									
DB-1	0.022																									
DB-2	0.025																									

심도 2,500 m까지의 온도 검증 결과 및 3,500 m까지 굴착한 후에 수직도를 검증한 결과 지온경사는 약 25°C/km로 평가되고 수직도는 3,500 m 심도에서 시추공 중심에서 남쪽 방향으로 134.19 m 편차를 보이는 것으로 측정되었다. 또한, 3,500 m 심도에서의 지온은 96°C로 검증되었다.

4.5 지질환경 예비 분석결과

우리나라 지질구조 분포에서의 4개 대표부지에 대한 기존 자료 분석에 따른 지질층상 구조 및 지온경사 등 결과는 Table 4에 나타낸 바와 같다. 실제 심부시추공 부지선정을 위한 부지자료는 지하수, 암석역학, 지화학 환경, 화산활동, 광물자원 분포 분석 등을 포함하여야 하며[4, 6], 추후 구체적인 지질조사를 통하여 관련자료를 확보하고 이에 대한 분석 및 평가를 수행할 필요가 있다.

5. 국내 심부 지질조건에서의 예비 심부시추공 처분개념 제안

5.1 기준 사용후핵연료

국내 원자력발전소에서 전력생산을 위해 사용 중인 핵연료 종류 분석 자료를 바탕으로 향후 사용후핵연료 발생 추이에 대한 분석과 제원 분석을 통하여 기준 사용후핵연료를 PLUS-7으로 결정[20]하고, 이 사용후핵연료의 특성을 심부시추공 처분기술에 대한 초보적인 예비 적용성 분석을 위한 예비개념을 제안하는데 활용하였다.

5.2 예비 시추공처분시스템 개념 설정을 위한 기준

기준 사용후핵연료인 PLUS-7을 대상으로 심부시추공 처분용기 개념을 설정하고 국내 지질환경 예비평가 결과를 바탕으로 예비 심부시추공 처분시스템 개념과 이에 적합한 공학적방벽 및 시추공 밀봉 개념을 도출하였다. 이들 예비개념을 위한 주요 기준은 아래에 기술한 바와 같다.

- 기준 사용후핵연료 : PLUS-7
- 지질 : 결정질 암반(화강암류)
- 심도 및 지온 경사 : 5 km, 25°C/km
- 처분용기 용량 : 1-PWR 집합체 또는 63-CANDU 번들

5.3 처분용기 개념

심부시추공 처분시스템을 구성하는 처분용기 설계의 개념 설정을 위한 전제조건(기본요건)은 아래와 같이 설정하였다.

- 처분용기 크기는 기준 PWR 사용후핵연료 한 다발을 적재할 수 있으며, 국내에서 예상되는 모든 사용후핵연료를 수용할 수 있어야 함.
- 처분용기는 이중구조로 내부용기는 외압을 충분히 견딜 수 있으며, 외부용기는 처분용기 정치누적중량 하중을 견딜 수 있어야 함.
- 외부용기의 기능은 처분공에 정착을 쉽게 하도록 여러 개의 처분용기를 연결하기 위한 것이며, 본 연구에서는 10개의 처분용기를 연결할 수 있도록 개념을 설정함.
- 외압은 지하 5 km에 해당하는 수압(염분을 고려한) 57 MPa(SNL 기준 설계와 동일)을 고려하며, 지열 경사(측정치 반영)는 25°C/km로 설정함.
- 처분용기 표면 온도는 최대 300°C(572°F)를 넘지 않도록 함.
- 처분 후, 처분용기의 부식에 의한 수명은 별도로 고려하지 않음.

심부시추공 처분용기의 구조는 Fig. 9에 나타낸 바와 같이 이중구조를 고려하고 있으며, 외부용기 후보재료로는 강구조물 또는 이에 준하는 재료이며, 내부용기는 처분환경에서의 외압 등 하중을 견딜 수 있는 다양한 후보 재료를 분석하여 선정하는 것이 바람직하다.

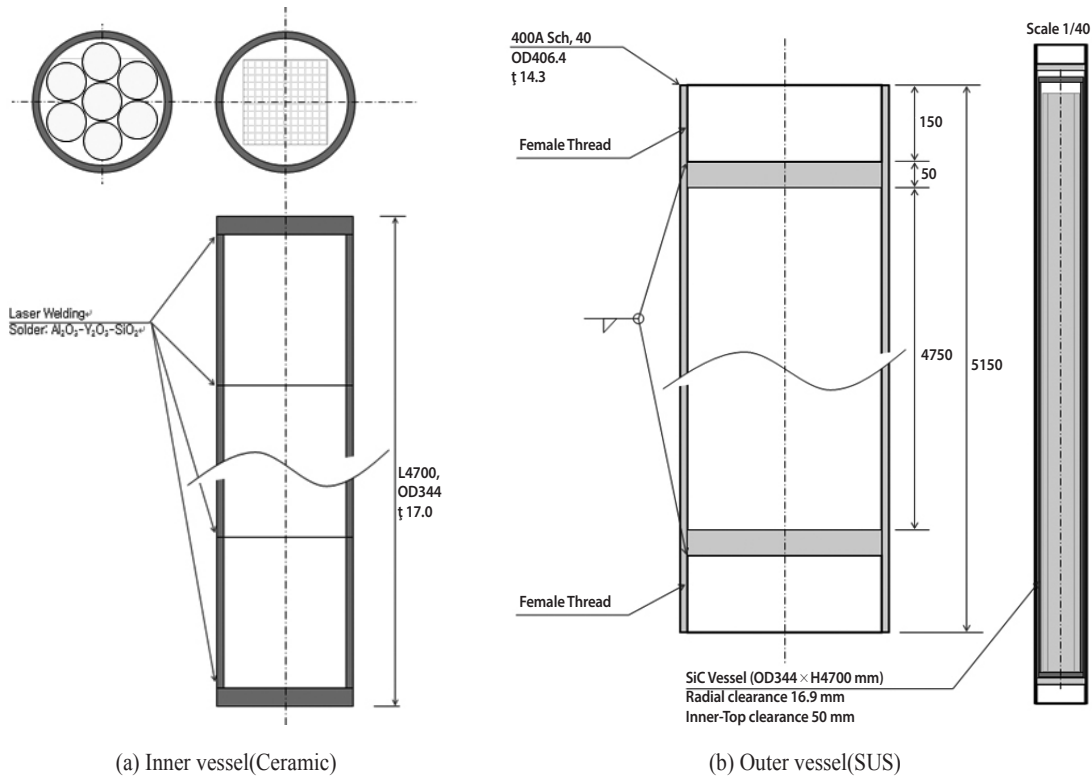


Fig. 9. A concept of deep borehole disposal canister.

5.4 심부시추공 처분시스템 예비 개념

기존 사용후핵연료와 예비 개념설정을 위한 압력, 지온 경사 등 처분환경 관련 조건 및 그에 따른 심부시추공 처분용기 개념을 바탕으로 PWR 사용후핵연료를 대상으로 예비 심부시추공 처분시스템 개념 설정하였다. 설정된 예비개념은 Fig. 10에 나타낸 바와 같으며, 지하심도 5,000 m에서 3,000 m까지의 처분구역 및 그 상부인 심도 3,000 m에서 지표까지의 밀봉구역에 대한 내용을 간략하게 아래 Table 5에 기술하였다.

6. 결론

근래 지하 심부에 시추공을 굴착하는 기술의 발달로 지표에서 지하 5 km 심도까지 시추공을 뚫어 3~5 km 구간에 공학적방벽 개념으로 사용후핵연료를 포함하는 고준위 장반감기 방사성폐기물을 처분하고, 처분구간 위쪽부터 지표까지(지표~3 km)의 구간은 벤토나이트, 아스팔트 등으로

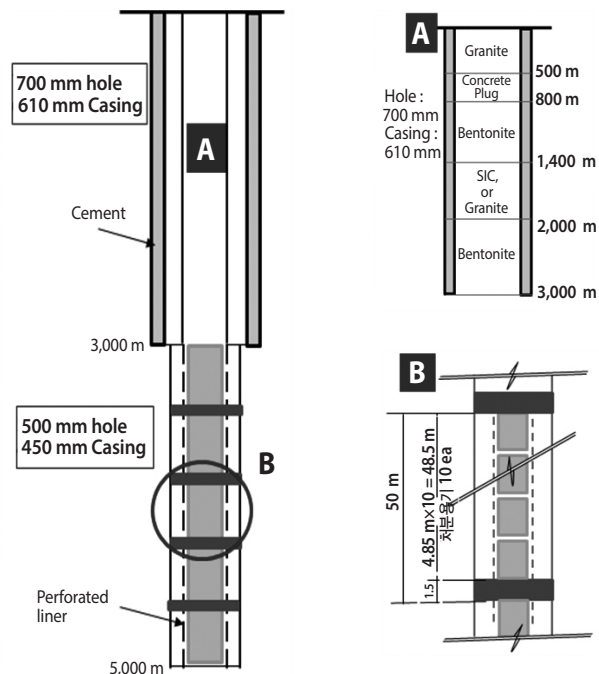


Fig. 10. A concept of deep borehole disposal system.

Table 5. A concept of deep borehole disposal

	Disposal area (3 – 5 km)	Sealing area (3 - 0 km)
Borehole wall dia.	500 mm	700 mm
Casing dia.	450 mm (Perforated casing)	610 mm
Concept	<ul style="list-style-type: none"> - Emplacement : 400 canisters/borehole - Canister strings <ul style="list-style-type: none"> • 10 canisters/string : 48.5 m • Concrete bridge plug : 1.5 m • 40 Strings/borehole 	<ul style="list-style-type: none"> • Depth 3 - 2.0 km : Bentonite • Depth 2.0 - 1.4 km : Crushed rock or SiC • Depth 1.4 km - 0.8 : Bentonite • Depth 0.8 - Surface : Concrete plug etc.

밀봉하여 지표 생태계와 완전하게 격리시키는 개념인 심부 시추공 처분 기술에 대한 연구를 미국과 유럽을 중심으로 활발하게 진행하고 있다.

이러한 고준위 방사성폐기물에 대한 심부시추공 격리기술 (지하 3~5 km 심도)의 국내 적용 가능성을 예비분석하기 위하여, 현재까지의 미국, 유럽권 국가 연구사례 및 기술개발 현황을 분석하였다. 그리고 실제 국내의 심부 지질조건을 검토하기 위하여 고지열 분포지역에 개발 중인 지열탐사공을 대상으로 3~4 km 심도까지의 암석, 지온경사 등 자료를 수집, 분석하였다. 이들 조사분석 결과를 바탕으로 하여 초보단계의 심부시추공 예비개념을 설정하여, 이에 대한 예비 성능 및 안전성 평가 기반을 구축하였다.

본 연구결과는 심부시추공 처분 예비개념에 대한 성능 및 안전성평가를 수행하기 위한 기초자료가 될 것이며, 그 결과는 심부시추공 처분기술개발 연구개발 과제 기획 시 입력자료로 활용될 것이다. 또한 본 결과를 바탕으로 연구개발 과제 수행을 위한 로드맵 작성 및 효율적인 연구방향을 설정하여 기술적 경제적으로 효율적인 연구개발을 수행하는데 활용할 수 있을 것이다. 그리고, 향후 국내 여건에 적합한 최적의 심층처분시스템 도출에 필요한 고준위폐기물 처분방식들에 대한 국내 적용성 평가와 비교 분석이 가능하도록 심부시추공 처분기술에 대한 지속적인 관심과 연구개발이 필요하다.

REFERENCES

[1] P. V. Brady, B. W. Arnold, and P. N. Swift, Deep Borehole Disposal of High-Level Radioactive Waste,

SAND2009-4401, Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM. (2009).

[2] J.Y. Lee, G.Y. Kim, D. B. Bae, H.J. Choi, and K. S. Kim, “An Analysis on the Borehole Spacing of Deep Borehole Disposal of HLW”, 2015 International High-Level Radioactive Waste Management, Charleston, SC (2015).

[3] National Academy of Sciences(NAS), “The Disposal of Radioactive Waste on Land”. <http://www.nap.edu/openbook.php> 10294 (1957).

[4] B. W. Arnold, P. V. Brady, and S. Pye, Reference Design and Operations for Deep Borehole Disposal of High-Level Radioactive Waste, SAND2011-6749, Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM. (2011).

[5] Blue Ribbon Commission, Blue Ribbon Commission on America’s Nuclear Future; Report to the Secretary of Energy (2012).

[6] B. W. Arnold, P. Vaughn, R. MacKinnon, and P. V. Brady, Research, Development, and Demonstration Roadmap for Deep Borehole Disposal, US DOE, FCRD-USED-2012-000269 (2012).

[7] Svensk Kärnbränslehantering AB(SKB), Project on Alternative Systems Study (PASS) Final Report, SKB TR93-04 (1993).

[8] Svensk Kärnbränslehantering AB(SKB), Very deep hole concept, Thermal effects on groundwater flow, SKB R06-59 (2006).

[9] Svensk Kärnbränslehantering AB(SKB), Jämförelse mellan KBS-3-metoden och deponering i djupa borrhål

- för slutligt omhändertagande av använt kärnbränsle, SKB Report R-19-13 (2010).
- [10] Svensk Kärnbränslehantering AB(SKB), Modelling of thermally driven groundwater flow in a facility for disposal of spent nuclear fuel in deep boreholes, P-13-10 (2013).
- [11] Elsam/Elkraft, “Disposal of High-level Waste from Nuclear Power Plants in Denmark Salt Dome Investigations”, 5 vols. ELSAM Frederica, Denmark and ELKRAFT Baler, Denmark (1981).
- [12] H. M. Montfrans, “Research program on geological disposal of radioactive waste in the Netherlands. In: Geological problems in radioactive waste isolation – A worldwide review”, Proceedings of the 28th International Geological Congress, 103-114, Washington (1989).
- [13] United Kingdom Nirex Limited(NIREX), A Review of the Deep Borehole Disposal Concept for Radioactive Waste, Nirex report no. N/108, Oxfordshire, UK (2004).
- [14] F. Gibb, N.A. McTaggart, K.P. Travis, D. Burley, and K.W. Hesketh, “High-density support matrices: Key to the deep borehole disposal of spent nuclear fuel”, Journal of Nuclear Materials, 370–377 (2008).
- [15] Korea Institute of Geoscience And Mineral Resource (KIGAM), Development of deep, low-enthalpy geothermal energy, KIGAM, OAA2003001-2006 (2006).
- [16] Korea Institute of Geoscience And Mineral Resource (KIGAM), Development of Exploitation Technologies for Geothermal Resources, GP2007-002-03-2 (2008).
- [17] Hanjin D&B, Demonstration of Drilling Technology for Enhanced Geothermal System (2013).
- [18] K. Y. Kim, “Current Status and Perspectives in Drilling Technology for Enhanced Geothermal System”, KSCE Journal of Civil Engineering Volume 59(9), 16-25 (2011).
- [19] Korea Atomic Energy research Institute (KAERI), Geological Disposal of Pyroprocessed Waste from PWR Spent Nuclear Fuel in Korea, KAERI/TR-4525/2011 (2011).
- [20] D. k. Cho, S. K. Yoon, H. J. Choi, and W. I. Ko, “Reference spent nuclear fuel for pyro-processing facility design”, J. of the Korean Radioactive Waste Society, Vol. 6(3), 225-232 (2008).