TUNNEL & UNDERGROUND SPACE Vol.30, No.2, 2020, pp.136-148
https://doi.org/10.7474/TUS.2020.30.2.136 ISSN: 1225-1275(Print) ISSN: 2287-1748(Online)

TECHNICAL NOTES

고준위방사성폐기물 심층처분 부지조사를 위한 암반공학적 요소: 국내외 현황 및 사례 조사

최승범[1], 김유홍[2], 김은경[3], 천대성[4*]

[1]한국지질자원연구원 방사성폐기물지층처분연구단 박사후 연수자, [2]한국지질자원연구원 방사성폐기물지층처분연구단 책임연구원,
[3]한국지질자원연구원 방사성폐기물지층처분연구단 연구원, [4]한국지질자원연구원 방사성폐기물지층처분연구단 책임연구원

Rock Mechanical Aspects in Site Characterization for HLW Geological Disposal: Current Status and Case Studies

Seungbeom Choi[1], You Hong Kihm[2], Eungyeong Kim[3], and Dae-Sung Cheon[4*]

[1]Post doctor Researcher, Center for HLW Geological Disposal, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources
[2]Principal Researcher, Center for HLW Geological Disposal, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources
[3]Researcher, Center for HLW Geological Disposal, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources
[4]Principal Researcher, Center for HLW Geological Disposal, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

*Corresponding author: cds@kigam.re.kr

Received: March 25, 2020
Revised: April 17, 2020
Accepted: April 24, 2020

ABSTRACT

Nuclear power plants have been operated in Korea since 1978, thus the high-level radioactive waste (HLW) produced from the plants has been accumulated accordingly. Hence, it is urgent to secure a final repository for HLW disposal, however, siting process should be preceded, which usually takes long time, as it requires broad and precise investigation. The investigation is generally carried out in stages, which consists of multidisciplinary approaches. In this study, the case studies mainly pertaining to rock mechanics were conducted. Rock mechanical aspects required in each stage and their applications were investigated and corresponding R&D researches were presented as well. At the same time, current research status in Korea was presented, followed by a brief future research plan with regard to the site investigation. The future research aims to produce fundamental information for siting process, and the compiled cases in this study will be utilized as references in the research.

Keywords: High level radioactive waste repository, site investigation, rock mechanical aspects, case study

초록

우리나라는 1978년부터 원자력발전소를 운영해왔으며 그에 따른 고준위방사성폐기물 발생이 누적되고 있다. 이를 안전하게 처분하기 위한 영구 처분시설이 시급한 실정이나 처분 부지를 선정하는 과정에서 광범위하고 정밀한 부지조사가 요구되기 때문에 장기간에 걸친 조사가 선행되어야한다. 이러한 부지조사는 단계별로 진행되는 것이 일반적이며 이 과정에서 다학제적 평가가 이루어진다. 본 논문에서는 부지조사 과정에서 요구되는 암반공학적 요소를 중점으로 사례조사를 수행하였다. 단계별로 고려되는 암반공학적 평가요소와 그 적용 사례를 정리하였으며 이 과정에서 수행된 해외 연구 사례를 조사하였다. 동시에 국내 연구현황을 정리하였고 부지조사와 관련된 향후 연구 계획을 간략히 보고하였다. 향후 연구를 통해 부지조사 시 참고할 수 있는 기반자료를 생산하고자 하며 본 논문에서 수집된 사례 역시 활용할 예정이다.

핵심어: 고준위방사성폐기물 처분장, 부지조사, 암반공학적 요소, 사례조사

© The Korean Society for Rock Mechanics and Rock Engineering 2020. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/ licenses/by-nc/4.0/) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서 론

국내 원자력 발전 현황은 1978년 4월 고리1호기 가동이래, 원전의 수 및 발전량이 지속적으로 증가해왔으며 그에 따른 방사성폐기물의 양도 누적되고 있다. 2019년 4분기 기준, 사용후핵연료는 경수로형 원전에서 19,268 다발, 중수로형 원전에서 463,324 다발, 연구용 원자로에서 510 다발이 발생하였다(한국수력원자력, 2020.3.23; 한국원자력연구원, 2020.3.23). 또한, 추가적인 신규원전 2기를 포함하여 모든 원전이 최초 설정된 가동 연한까지만 운영된다고 가정할 때, 2016년 기준 경수로형 원전에서 73,110 다발, 중수로형 원전에서 255,840 다발, 연구용 원자로에서 1,600 다발의 사용후핵연료 발생이 예상되었다(산업통상자원부, 2016).

국내 사용후핵연료 관리는 지난 30년간 해결되지 못한 과제이다. 1983년부터 사용후핵연료 관리시설 부지확보를 시도하였으나 9차례 무산되었으며, 2005년 경주에 중저준위 처분시설만 확보하여 2015년 7월부터 가동 중이다. 현재 사용후핵연료는 각 원전 내 임시저장시설에 저장 중이며 향후 발생량을 고려할 때, 2021년 월성원전을 시작으로 각 원전 임시저장시설의 순차적인 포화가 예상된다. 따라서 조속한 대책 마련이 시급한 실정이나, 2016년 예고되었던 고준위방사성폐기물 관리법 입법이 중지되고 재검토-공론화위원회가 출범하는 등, 향후 사용후핵연료 관리 정책 수립 및 연구 진행에 난항이 예상된다.

방사성폐기물의 처분이란 '방사성폐기물을 인간의 생활권으로부터 영구히 격리시키는 것'으로 정의되며, 고준위방사성폐기물, 즉 사용후핵연료는 처분 시스템에 적치되어 최소 10만 년 이상의 기간 동안 격리되어야 한다. 현재까지 제안된 다양한 처분 개념 중, 심층 암반에 구조물을 건설하여 지층에 처분하는 방식이 가장 현실적인 방안으로 여겨지고 있으며, 이를 위해 자세하고 정밀한 부지조사가 선행되어야 한다(IAEA, 2011).

방사성폐기물처분 부지선정을 위한 부지조사는 단계적으로 수행되는 것이 일반적이다. 먼저, 전국 규모의 조사를 수행하여 부적합 지역을 배제하고 남은 후보지에 대한 기본조사를 수행한다. 기본조사를 통해 부지 특성화 및 적합성 평가를 수행하고 대상 지역의 주민의사를 확인하여 다음 단계인 상세조사를 수행한다. 핀란드의 경우, 1980년대부터 부지선정에 착수하여 전국 규모 조사, 예비 후보지 특성화, 상세조사에 각각 3년, 7년, 8년의 연구를 수행하였다(Posiva, 2000). 그 결과, 2001년 Olkiluoto 지역을 최종 처분부지로 선정하였으며, 2015년 세계 최초로 고준위방사성폐기물 영구처분시설 건설을 승인 받아 현재 건설 중에 있다. 산업통상자원부에서 제시한 단계별 기본계획에 따르면, 인허가용 지하연구실험실(Underground Research Laboratory, URL), 중간저장시설, 영구처분시설은 한 부지에 건설하며 해당 부지는 기본조사, 부지공모, 상세조사 등 12년에 걸친 조사를 통해 선정되도록 계획되었다(산업통상자원부, 2016). 이처럼 장기적인 부지조사가 요구되는 만큼, 정책 환경 변화에 무관하게 관련 연구는 지속적으로 수행될 필요가 있다.

방사성폐기물지층처분 시스템은 처분용기, 완충재 등의 공학적 방벽과 심부 암반인 천연 방벽으로 구성된 다중 방벽 개념을 적용하여 고준위폐기물을 인간 생활환경에서 격리시킨다. 이 중, 천연 방벽은 그 대상인 심부 암반의 특성과 거동에 지대한 영향을 받기 때문에 세심한 부지조사가 요구된다. 천역 방벽은 폐기물의 잠재적인 위해성을 충분히 지연/저감시킬 수 있는 특성을 지녀야하며, 따라서 처분장을 위한 부지조사는 300~500 m 수준의 심부 암반까지를 고려하여 수행된다. 또한, 다학제적(multidisciplinary) 관점에서 부지를 조사/평가해야 하기 때문에 조사 과정이 매우 광범위하고 복잡하게 진행된다.

본 논문에서는 국내외 고준위방사성폐기물처분 부지조사와 관련된 연구사례를 조사하여 정리하였다. 특히, 기본조사 및 상세조사에서 요구되는 다양한 분야 중 암반공학적 요소를 중심으로 조사를 수행했으며, 이를 통해 향후 연구 및 사업 진행 시 참고할 수 있는 기반자료를 제공하고자 하였다. 마지막으로 처분부지 선정과 관련하여 국내 연구현황을 정리하고 현재 한국지질자원연구원에서 수행 중인 부지조사 연구와 향후 계획을 소개하고자 하였다.

2. 단계별 부지조사 과정에서의 암반공학적 요소

2.1 단계별 부지조사

부지조사란 특정 목적에 적합한 부지를 선정하고 그 부지가 목적에 부합하는 특성을 지녔음을 입증하는 과정이다. 체계적이고 효율적인 부지조사를 위하여 IAEA(1994)는 단계별 부지조사 과정을 제안하고 있으며(Table 1), 현재 전 세계적으로 심층처분을 고려중인 국가의 대다수는 이러한 단계별 접근법을 따르고 있다. 이 과정을 간략히 정리하며 아래와 같다.

Table 1. Stepwise siting process for a HLW disposal repository (IAEA, 1994)

	Stage	Remarks
1	Conceptual and planning	: Define overall plan, guiding principles, and criteria
2	Area survey	: Select one or more potential sites
		2-1 Regional mapping phase on large regions
		2-2 Potential site screening phase
3	Site characterization	: Collect site-specific information and assess suitability of the sites
4	Site confirmation	: Select a final repository site

처분 개념 및 계획 단계(conceptual and planning stage)에서는 부지선정과 관련된 전반적인 계획(처분량, 일정, 예산 등)을 수립하고 다음 단계에서 고려될 잠재적 후보 암종, 지질조건을 도출한다. 장기 안정성을 비롯한 기술적 실현 가능성뿐만 아니라 사회, 정책, 환경적인 요소를 포괄적으로 검토한다. 지역적/광역적 조사 단계(area survey stage)에서는 주 혹은 도 단위의 광역적 부지에 대한 적합성 검토를 수행한다. 기존 문헌자료들을 적극 활용하고 동시에 법령, 규제 등을 고려하여 부적합 지역을 배제한 후, 단수 혹은 복수의 후보 부지를 선정한다. 1차 선정된 후보 부지에 대한 부지 특성화 단계(site characterization)에서는 부지 적합성 검토에 필요한 상세정보를 수집한다. 실내시험과 현장시험 결과를 포함한 다양한 정보를 수집하고 예비 안정성 평가를 수행하여 가장 적합한 부지를 선정한다. 부지 확정 단계(site confirmation stage)에서는 이전 단계에서 수집, 생산된 조사결과를 종합하여 처분장 건설 허가에 필요한 결과를 도출한다. 상기 과정은 IAEA가 제안하고 있는 전반적인 가이드라인으로, 각 국가의 지질학적, 사회적, 정책적 특성을 반영하여 단계별 부지조사를 수행한다. 따라서 세부적인 구성이나 용어에서 일부 차이를 보일 수 있으며, 본 논문에서는 광역/기본조사 단계, 상세조사 단계로 대별하여 정리하였다.

2.2 광역/기본조사 단계

초기 단계에서는 참고문헌 및 기존 자료 위주의 조사 외에 지표 지질조사와 시추공을 활용한 조사가 주를 이룬다. 예를 들어 핀란드의 경우, 1983년에 부지조사에 착수하여 1987년에 예비조사를 위한 5개 지역(Romuvaara, Veitsivaara, Kivetty, Syyry, and Olkiluoto)을 선정하였다. 각 부지에는 총 5개의 시추공이 시추되었으며 이는 약 1,000 m급 1공과 500 m급 4공으로 구성되었다. 시추공의 위치 및 방향은 조사를 통해 도출하고자 하는 요소를 획득하기에 최적화된 조건을 반영하여 설정했으며, 이 때 고려된 요소는 모암의 물성, 절리/단층대 구조 및 물성, 지질학적 요소, 수리지질학적 요소 등이다. 이 단계에서 수행한 암반공학적 요소로는 시추공 로깅(logging), 불연속면 분석, 수압파쇄를 통한 현지응력 측정, 수리시험을 통한 지하수위 및 수리전도도 측정 등이 있다(Posiva, 2000).

한편, 스웨덴은 총 6개 지역(Finnsjön, Fjällveden, Gideå, Kamlunge, Kliperås, and Sternö)에 대한 기본조사를 수행하였고, 이 조사 내

역을 간략히 정리하면 Table 2와 같다. 지역별로 수행한 조사내역 중 다수가 중복되었는데 이는 동일 혹은 유사한 기준을 통해 부지조사가 수행되어야 하기 때문으로 판단된다. 부지 특성화(S in Table 2)와 관련된 연구는 지질/수리지질/지구물리 조사가, 지구조/역학(B in Table 2) 관련 연구는 지질구조 조사/지반 물성 조사/지반 모델링, 수리지질(H in Table 2) 관련 연구는 지하수 유동 모델링/지화학 조사, 단층대(F in Table 2) 관련 연구는 단층대 특성화/수리-화학적 조사 등이 대표적이다.

Table 2. Descriptions of site characterization studies using boreholes in Sweden (SKB, 2002)

Region	Total no. of borehole	No. of borehole (≥ 500 m)	Total drill run (m)	Scope of investigation activities
Finnsjön	11	7	6,000	S / B / H / F
Fjällveden	15	8	7,500	S / B / H
Gideå	13	11	8,000	S / B / H
Kamlunge	16	8	7,750	S / H
Kliperås	14	7	6,935	S / H
Sternö	5	5	3,300	S / H

* S, B, H, and F in the last column denote Site characterization (S), Bedrock structure and geomechanics (B), Hydrogeology (H), and Fracture zone (F), respectively

이 단계에서 수행한 암반공학적 요소로는 시추공 로깅, 불연속면 분석, 수압파쇄를 통한 현지응력 측정, 역학적 물성 측정 및 이를 통한 모델링, 수리시험을 통한 지하수위 및 수리전도도 측정 등이 있다. 스웨덴은 상기 6개 이외 다수의 지역에서 부지조사를 수행했으며 대표적으로 Äspö URL이 위치한 Oskarshamn 지역과 원전이 위치한 Forksmark 지역 등이 있다.

2.3 상세조사 단계

광역/기본조사를 통해 조건에 적합한 단수 혹은 복수의 부지로 후보지를 압축한다. 선정된 후보지에 대해 보다 정밀한 조사가 수행되며 특히, 심부지질 특성을 중점적으로 조사하기 때문에 선행 단계에 비해 더 많은 수량, 심도의 시추공 조사를 수행한다. 다시 핀란드의 예를 들면, 기본조사를 수행한 5개 부지의 조사 결과와 추가 선정된 부지를 포함하여 상세조사를 수행할 4개(Romuvaara, Kivetty, Hästholmen, and Olkiluoto)의 부지를 선정하였다. 이 중, Olkiluoto의 경우, 1970년대에 원전 건설을 위해, 1980년대에 중저준위폐기물처분장 건설을 위해 수행한 선행 조사 결과가 다수 존재하며, 2007년에는 URL인 Onkalo 건설을 위한 추가 시추를 수행하였다(Posiva, 2008). Olkiluoto 지역에 천공된 시추공의 위치는 Fig. 1과 같다.

1993년에서 2000년까지 수행된 상세조사 내역은 구조적 지질 모델 구성, 지화학 조사, 수리 조사, 암반 분류 및 시공성 평가 등으로 구성된다. 이 중 암반공학적 요소를 포함한 마지막 두 조사 내용은 다음과 같다. 먼저 수리 조사는 각 부지 전역의 수리전도도 측정을 위해 광범위하게 수행되었으며, 수리 시험 유닛(Hydraulic Testing Unit, HTU)을 이용한 더블 패커 주입 시험과 유량계를 사용한 정수두 시험을 병행하였다. 주입 시험은 부지 당 수 백회, 정수두 시험은 이 보다 많은 수량을 수행하였으며 두 시험 결과는 양호한 호환성을 보였다. 무결암과 불연속면 부분의 수리전도도 차이를 조사하기 위해 2 m 간격의 패커 시험을 수행했으며, 동시에 심도에 따른 수리전도도 변화 양상을 파악하였다. 이러한 수리물성은 지반 모델링뿐만 아니라 그라우팅 성능 평가 등에 활용되었다. 불연속면망의 연결성을 파악하기 위한 장기 양수시험(long term pumping, interference test)을 수행하였고 지하수위를 측정하였다. 상기 자료들을 종합하여 지하수 유동 모델링을 수행했으며 이는 지역적 규모(regional scale, ~10 km)에서 부지 규모(site scale, ~3 km), 처분용기 규모

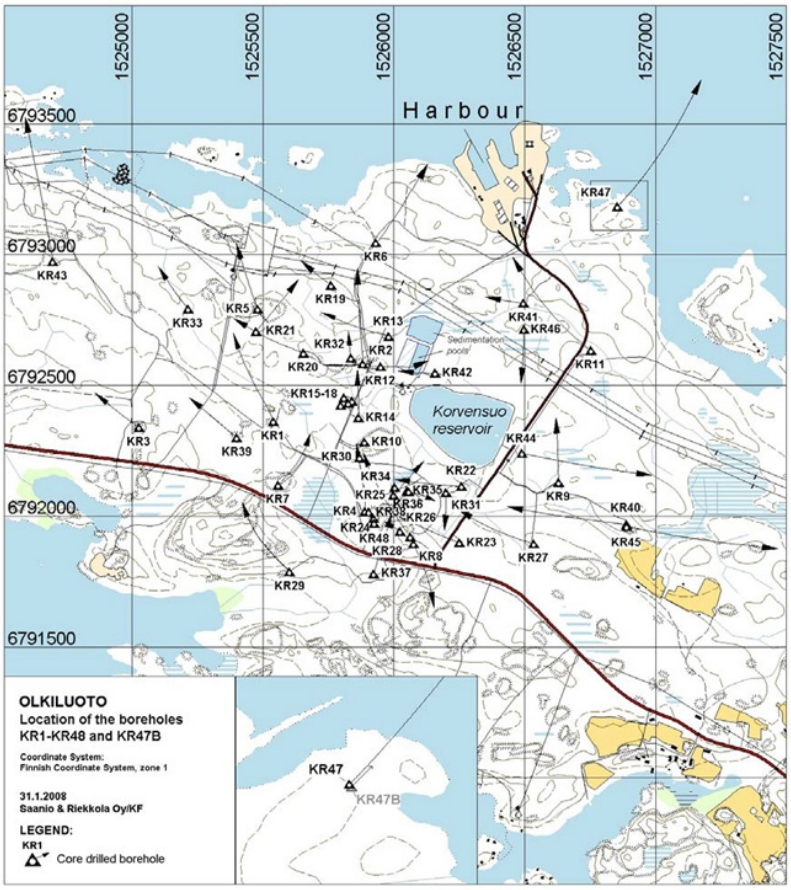

Fig. 1. Location of deep boreholes in Olkiluoto area (Posiva, 2008)

(canister scale, ~10 m) 수준까지를 포함하였다.

핀란드는 시공성(constructability) 평가를 위해 Q-system과 함께 새로운 암반 분류법을 사용하였다. 이 분류법은 크게 네 가지 평가 인자로 구성되었으며 상세한 구성은 Table 3과 같다. 이 암반 분류법을 적용하면 양호(normal), 불량(demanding), 매우 불량(very demanding) 세 가지 분류가 가능하다. 상세조사 대상 부지들의 경우, 400~700 m 심도에서 시공성이 대체로 양호하게 평가되었으며 따라서, 불연속면으로 구획되는 충분한 부피의 블록이 존재하는 부지가 선호되었다.

Table 3. Rock mass classification system used in Finland (Posiva, 2000)

Rock quality	Lithological properties	:	Mineral composition, degree of schistosity, grain size, degree of weathering, strength and deformation properties, and thermal properties
	Fracture properties	:	Number of fracture sets, fracture frequency, fracture trace length, frictional properties, fracture width
	Hydrogeological properties	:	Hydraulic conductivity, sealing and grouting properties
	Structural rock type	:	Intact, fractured or crushed rock, hydraulically conductive rock
State of stress		:	Principal stresses, strength/stress ratio
Ground water chemistry		:	pH, sulphate content, free carbon dioxide, ammonium content, magnesium content, chloride content, radon content
Rock engineering properties		:	Drillability, blasting properties, crushing properties, rock support

이 외에도 상세조사 단계에서는 수리전도도 측정, 시추공 로깅, 현지응력 측정을 위한 장비 및 기법 개발이 함께 수행되었다.

URL은 처분 모암의 다학제적 특성화, 특성화 결과 및 처분 개념에 대한 평가, 새로운 기법 및 장비의 개발, 개발된 기술의 시연 및 검증 용도로 활용된다(NEA, 2001). 이는 크게 부지 독립적 URL(generic or off-site URL)과 부지 종속적 URL(site-specific or on-site URL)로 구분되며, 현재 우리나라를 포함한 세계 각국에서 URL을 활용한 다양한 연구를 수행 중이다. 부지 독립적 URL은 대체로 새로운 기술 개발 및 검증에 중점을 두는 반면, 부지 종속적 URL은 처분장 부지 혹은 잠재적 가능성이 높은 후보부지에 건설되기 때문에 기술 개발뿐만 아니라 모암의 특성화, 즉 광의적인 상세조사의 역할도 수행한다고 볼 수 있다. 전 세계 주요 부지 종속적 URL의 기본 제원 및 수행된 연구를 간략히 정리하면 Table 4.와 같다. 기본적인 부지조사와 THMC 조건 하에서의 암석/암반 특성화 내용을 포함하고 있으나, 대개 시추공 단위에서 할 수 없는 부지 규모(site scale)의 실험, 또는 처분장 설계 및 시공 단계에서 활용할 수 있는 기술 개발 등이 수행된다.

Table 4. Specification and important R&Ds of site-specific URLs (after, NEA, 2001, KIGAM, 2007, Wang et al., 2018)

Year	URL / Country	Host rock	Depth (m)	Important R&D	Remarks
1980~	Konrad / Germany	Limestone	800		
1981~ 1998	Morsleben / Germany	Salt dome	~525		
1982~	WIPP / USA	Salt dome	655	• Thermal-structure interaction • Heated pillar test • Geomechanical evaluation	
1985~ 1990	Gorleben / Germany	Salt dome	843, 933		
1993~	Yucca Mt. / USA	Tuff	300	• Excavation investigations • In-situ measurement (M, TM) • Laboratory tests (M, TM, and on fractures)	
2000~	MHM / France	Shale	450~500	• Rock mechanics • Containment characteristics • EDZ evaluation	
2004~	Onkalo / Finland	Crystalline	420~520	• Construction techniques • Grouting and drainage • Excavation techniques • Rock mechanics and site investigations	Licensed as a repository
2015~	Beishan / China	Crystalline	~560	(Test plan) • Site characterization • Engineering technology • Geological disposal chemical behavior	under construction

2.4 부지 선정을 위한 암반공학적 평가 인자와 관련 연구

고준위방사성폐기물 처분부지는 처분 시설의 장기적 안정성, 실현 가능성, 운영상의 편의성, 사회적 수용성 등 다양한 요소를 고려하여 선정되어야 한다. 따라서 정교하게 수립된 절차에 따라 조사가 수행되어야 하며 이를 통해 도출된 부지 특성화 정보를 바탕으로 관련 인자를 평가해야 한다. 스웨덴은 부지조사를 통해 결정해야 하는 주요 인자를 6개 연구분야(지질학, 암반공학, 열물성, 수리

지질, 지화학, 핵종이동) 별로 제시하였다(SKB, 1998). 이중 암반공학과 관련된 인자를 정리하면 Table 5와 같다. 이외에 열물성, 수리지질 관련 인자는 Table 6, Table 7과 같다.

Table 5. Important parameters regarding rock mechanics (SKB, 1998)

Parameter	Detailed properties	Method
Discontinuities	Geometry	Geological survey
	Geological parameters	Geological survey
Mechanical properties of fractures	Deformation properties in normal direction	Lab. test
	Deformation properties in shear direction	Lab. test
	Fracture properties (shear strength, JRC, JCS, etc.)	Lab. test & Field test
Mechanical properties of intact rock	Young's modulus	Lab. test
	Poisson's ratio	Lab. test
	Uniaxial compressive strength	Lab. test
	Tensile strength	Lab. test
	Indentation index, DRI, wear index	Lab. test
	Blastibility	Lab. test
Mechanical properties of rock mass	Deformation modulus	Mapping drill core
	Poisson's ratio	Lab. test
	Rock mass classification	Drill core
	Wave velocity (P-& S-wave)	Field test
	Strength	Mapping drill core
Density and thermal properties	Density	Lab. test
	Coefficient of thermal expansion	Lab. test
	Thermal conductivity	Lab. test
	Specific heat	Lab. test
Boundary conditions and supporting data	In-situ stresses (magnitude and direction)	Field test
	External loads	
	Observed deformation and seismic activity	Mapping

Table 6. Important parameters regarding thermal properties (SKB, 1998)

Parameter	Detailed properties	Method
Thermal properties of rock	Coefficient of thermal expansion	Lab. test
	Thermal conductivity	Lab. test
	Specific heat	Lab. test
Temperature	Temperature in rock and ground water	Field test
	Thermal condition (boundary, gradient)	Field test

Table 7. Important parameters regarding hydrogeology (SKB, 1998)

Parameter	Detailed properties	Method
Discontinuity model	Geometry	Geological survey
	Permeability distribution	Field test
	Porosity	Lab. test & Field test
Stochastic model of discontinuities and rock mass	Discontinuity distribution	Geological survey
	Permeability distribution	Field test
	Porosity and storage coefficient	Lab. test & Field test
	Compressibility of rock	Lab. test
Hydraulic properties of ground water	Salinity	Lab. test & Field test
	Temperature	Field test
Soil layer, etc.	Identification of receptor	Mapping
	Meteorological and hydrological data	Mapping
	Conductivity, thickness, storage coefficient, etc.	Field test
Boundary conditions and supporting data	Regional boundary conditions (historical and future)	
	Pressure or head distribution	Field test
	Recharge/discharge area	Mapping
	Breakthrough curves	Field test
	Ground water flow	Field test

Table 5~7과 같이 부지조사 과정에서 평가해야할 인자들은 매우 다수이며 또한 다양한 방법에 의해 측정된다. 암반공학적 측면에서만 고려해도 시추공 시추 및 로깅, 실내시험, 현장시험 등이 기본적으로 요구되며 물리적, 역학적, 열적, 수리적 특성이 요구되기 때문에 장기적이고 다양한 연구 수행이 필수적이다. 방폐장 관련 분야의 기술 선도국인 핀란드의 경우 1980년대부터 조사를 실시하여 현재까지 수많은 연구를 수행해 왔다. 핀란드는 부지 종속적 URL Onkalo 건설 단계였던 2005년까지 발간된 암반공학 관련 연구 보고서 80여 편을 무결암 물성, 불연속면 물성, 암반 분류 등 13가지 주제로 분류하였다. 이를 다시 년도 별로 분류하여 정리하면 Table 8

Table 8. R&D works related with rock mechanics conducted in Finland (Posiva, 2006)

stage	Regional survey	Preliminary site characterization				Detailed site characterization								Site confirmation					Onkalo construction			No. of reports
year	83~85	86~89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	00	99	00	01	02	03	04	05	~	
R&D subject																						
Rock stress state			■						■			■		■			■	■	■	■		9
Intact properties					■		■	■		■	■		■		■		■	■			■	12
Fracture properties						■				■						■						3
Thermal properties					■			■			■	■	■		■	■		■	■			11
Rock mass classification													■		■		■	■		■		4
Site conditions												■		■				■				2
Rock mass analyses				■	■	■	■	■										■	■			7
Site specific analyses								■				■	■	■	■		■	■				8
Stress damage and stress mapping												■		■			■					3
EDZ										■									■			3
In-situ measurement and monitoring							■	■										■	■	■		6
Long term behavior			■		■														■			3
Investigation planning												■			■		■	■				6
No. of reports	0	7				29								16			26		11			

과 같다. 분류된 년도는 보고서 발행 연도를 기준으로 했기 때문에 실제 연구를 수행 기간은 그 전 수년으로 볼 수 있다.

추세를 간략하게 정리하면 우선, 1990년대 이전 초기조사 단계에서는 암반공학과 관련하여 진행된 연구가 없는 것으로 정리되었다. 이 단계에서는 문헌조사 위주로 연구가 수행되었기 때문으로 판단되며, 1990년 예비조사 단계에서부터 관련 연구의 보고서가 발행되기 시작하였다. 단계별로 살펴보면, 예비조사 단계에서 총 7편의 보고서가 발행된 데 비해 상세조사 단계에서는 그 수가 29편으로 증가하였고, 부지 확정 후에는 더욱 증가한 것을 확인할 수 있다. 보고서의 주제별로 살펴보면 무결암, 불연속면, 열물성 조사 연구는 전 조사 단계별로 비교적 균등하게 수행되었으며, 이에 비해 암반분류, 부지 특성, 응력특성, 현지 측정 및 모니터링 관련 연구는 비교적 후반부에 집중적으로 분포하고 있는 것을 확인할 수 있다. 이는 Olkiluoto 지역 확정 및 Onkalo를 활용한 연구를 수행하면서 나타난 추세로 파악된다. 핀란드는 상기 연구 결과와 1989년부터 2011년까지 Olkiluoto 지역 시추된 시추공 자료 70여개를 종합하여 암반공학적 부지 모델을 구축하였다(Posiva, 2012). 이러한 연구 동향은 국내 방폐장 부지선정 관련 연구를 수행하는데 참고할 수 있을 것으로 판단된다.

3. 국내 연구 현황

2016년 정부는 "고준위방사성폐기물 관리 기본계획"을 발표했으며, 이에 따르면 최종 처분 부지선정은 12년 간 3단계에 걸쳐 수행되도록 권고되었다(산업통상자원부, 2016). 체계적이고 효율적인 단계별 조사를 수행하기 위하여 적절한 조사 및 분류체계 수립이 선행되어야 하고, 이를 위해 한국지질자원연구원에서는 부지선정 단계별 조사요소 분류체계를 제안하였다(한국지질자원연구원, 2016). 이는 문헌조사, 기본조사, 심층조사 3단계로 구성되며 다학제적 평가를 통해 최종적인 후보지를 선정하게 된다(Table 9).

Table 9. Stepwise site characterization for a HLW disposal repository (한국지질자원연구원, 2016)

Stage I (literature survey)	Stage II (preliminary site characterization)	Stage III (detailed site characterization)
• Regional site survey based on mainly preexisting references	• Preliminary survey on a site or sites remaining from the previous stage	• Detailed survey on a site or sites remaining from the previous stage
• Exclude unfavorable sites	• Focus on surface geological mapping (with minimum boreholes if required)	• Focus on subsurface characteristics
• Evaluating items	• Evaluating items	• Evaluating items
- Geology/structural geology	- Geology/structural geology	- Geology/structural geology
- Earthquake	- Uplift/subsidence	- Earthquake
- Uplift/subsidence	- Hydrogeology/geochemistry	- Hydrogeology/geochemistry
- Hydrogeology	- Engineering geology/rock mechanics	- Engineering geology/rock mechanics
- Thermal distribution		- 3D modelling

이 분류체계는 평가부문(aspect), 평가항목(item), 평가인자(parameter)로 세분되며 기본적으로 정부안에 기반하여 제안되었다. 그러나 일부의 경우, 평가항목과 평가인자의 정의가 명확하지 않은 문제가 있기 때문에 이를 보완한 분류체계를 다시 제안하였다(KIGAM, 2019). 여기서 평가항목이란 조사의 대상 혹은 그 매체, 평가인자란 대상 항목의 정량적, 정성적 특징을 의미한다. 총 17개 항목(암종, 광상, 선형구조, 단층, 지진, 화산, 융기/침강, 지하수, 지열, 지구화학, 핵종거동, 미생물, 토질, 불연속면, 무결암, 암반, 재

해)에 대한 평가인자를 제시하였으며, 이는 조사 단계별로 각각 20, 99, 99개이다. 단계별로 중복되는 인자가 있으나 이는 단계가 심화될수록 그 정밀도 및 조사 수량을 높여 측정하는 방식으로 구성되어, 독립적인 인자는 총 103개이다. 평가항목 및 인자 선정은 국내외 선행연구 결과를 종합적으로 고려하고 전문가 자문의견을 수렴하여 선정하였다. 무결암, 암반 항목을 예로 들면 각각 Table 10, Table 11과 같다.

Table 10. Evaluation item and corresponding parameters excerpted from 'intact rock' item (KIGAM, 2019)

Item	Parameter		
	Stage I	Stage II	Stage III
Intact rock	-	Water content	Water content
		Specific gravity	Specific gravity
		Porosity	Porosity
		Seismic velocity	Seismic velocity
		Young's modulus	Young's modulus
		Poisson's ratio	Poisson's ratio
		Uniaxial compressive strength	Uniaxial compressive strength
		Tensile strength	Tensile strength
		Cohesion, friction angle	Cohesion, friction angle
		Creep constants	Creep constants
		Crack initiation/damage stress	Crack initiation/damage stress
		Fracture toughness	Fracture toughness
		Permeability	Permeability

Table 11. Evaluation item and corresponding parameters excerpted from 'rock mass' item (KIGAM, 2019)

Item	Parameter		
	Stage I	Stage II	Stage III
Rock mass	-	Deformation modulus	Deformation modulus
		Poisson's ratio	Poisson's ratio
		Tensile strength	Tensile strength
		Compressive strength	Compressive strength
		Shear strength	Shear strength
		Rock mass classification (RQD, RMR, Q, etc.)	Rock mass classification (RQD, RMR, Q, etc.)
		In-situ stress	In-situ stress
		Anisotropy and heterogeneity	Anisotropy and heterogeneity

무결암과 암반의 다양한 물성을 파악할 수 있도록 평가인자를 선정하였으나, 이는 상세조사 단계, 즉 대부분 시추공을 활용한 단계에서 수행되는 실내/현장시험 항목임을 염두에 둘 필요가 있다.

한편, 고준위방사성폐기물 처분시설의 세부 설계사양은 처분 암종의 특성에 따라 결정된다. 예를 들어, 스웨덴과 스위스의 처분시스템은 세부적인 면에서 차이를 보이는데, 이는 각 국가의 처분 모암이 각각 결정질암과 퇴적암으로 결정되었기 때문이다. 현재 전 세계적으로 잠재적인 방폐장 처분 모암으로서 고려되는 암종은 결정질암, 퇴적암, 응회암, 암염 등이 있다. 고준위방사성폐기물의

안전한 처분이라는 관점에서 볼 때, 결정질암의 장점은 높은 강도, 낮은 투수성 및 화학 반응도 등이며 단점은 낮은 굴착성(excavatability), 복잡한 지질 구조 등을 들 수 있다. 반면에 셰일 등의 퇴적암은 낮은 투수성, 자체 밀폐 및 높은 흡착성능이 장점이며 낮은 강도 및 그에 따른 역학적 안정성 저하가 단점이다. 이처럼 암종에 따라 상이한 특성을 보이기 때문에 처분부지의 선정 시, 처분 모암은 모든 가능성을 고려하여 결정될 필요가 있다.

고준위방사성폐기물처분과 관련된 국내의 연구 동향은 크게 처분분지 조사에 대한 정책적, 방법론적 연구(Chae et al., 2017; Park et al., 2017; Jeon et al., 2019), 국제공동 연구 참여를 통한 모델링 연구(Kwon et al., 2015; Park et al., 2019), 한국원자력연구원 내 KURT를 활용한 현장시험/검증 연구(Lee et al., 2011; Cho et al., 2012) 등을 들 수 있다. 선행 연구들은 결정질암을 처분 모암으로 가정 혹은 염두에 둔 경우가 많은데, 이는 국내에서 관련 연구가 가장 활발히 진행 중인 기관 및 시설이 결정질암에 기반하고 있기 때문으로 사료된다. 2018년까지 수집/분류된 국내 지질조건의 면적분포를 암종별, 시대별로 분류하면 Fig. 2와 같다.

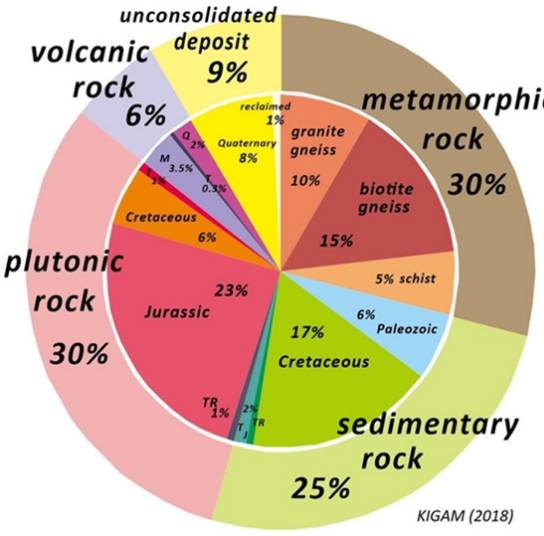

Fig. 2. Areal distribution of rock types in domestic geological condition (KIGAM, 2019)

Fig. 2에서 확인할 수 있듯, 결정질암에 비해 퇴적암 및 변성암의 비율이 결코 낮지 않다. 국토의 효율적인 활용이 중요하다는 점을 고려하면, 처분 후보 부지를 결정질암으로 예단할 필요가 없으며 다양한 암종과 그 지역적 특성을 종합적으로 고려하여 판단하여야 한다. 따라서 한국지질자원연구원에서는 이러한 국내 지질학적 조건을 고려하여 다양한 지체구조별, 암종별 특성화 연구를 수행하고 있으며, 다수의 대심도 시추공 시추를 통해 다학제적 심부 암반 특성 연구를 수행할 계획이다. 이를 통해 향후 실제 부지 선정 과정 시 활용할 수 있는 폭 넓고 신뢰도 있는 기반자료를 생산하고자 하며 연구가 진행됨에 따라 연구 결과를 순차적으로 발표할 예정이다.

4. 결 론

본 논문에서는 고준위방사성폐기물 처분 부지조사와 관련된 연구사례를 조사하였다. 국내외적으로 통용되는 조사절차는 단계별로 진행되며 대개 3, 4단계를 거친다. 이는 문헌조사를 시작으로 광역/지역적 조사를 걸쳐 상세조사 단계로 진행되며 후보 부지의 특

성을 다학제적으로 평가한다. 단계별로 진행되는 다양한 조사항목 중, 암반공학적 요소를 중점으로 사례를 정리했으며, 이 과정에서 요구되는 암반공학적 평가인자와 관련된 연구동향을 정리하였다. 방사성폐기물처분 분야 기술 선도국들의 사례를 중심으로 하여 향후 국내 방폐장 부지선정을 위한 연구를 수행할 때 참고할 수 있을 것으로 판단된다. 동시에 부지선정과 관련된 국내 연구 현황을 정리하였다. 2016년 발표된 정부안에 따른 일련의 연구 동향을 정리하였고, 향후 한국지질자원연구원에서 수행할 연구 계획을 간략히 기재하였다. 고준위방사성폐기물의 안전한 처분을 위하여 종합적인 부지 특성화, 특히 심부 암반의 특성화가 요구되며 이를 위해 다양한 지체구조별, 암종별 심부 암반 특성화 연구를 수행할 계획이다. 이를 통해 향후 활용도가 높은 기반자료를 생산하고자 하며 이는 연구 진행에 맞추어 발표될 예정이다.

ACKNOWLEDGMENTS

본 논문은 한국지질자원연구원 2020년 주요사업의 하나인 “HLW 심층처분을 위한 지체구조별 암종 심부 특성 연구 (GP2020-002; 20-3115)” 사업의 지원을 받아 수행하였습니다.

REFERENCES

산업통상자원부, 2016, 고준위방사성폐기물 관리 기본계획(안).

한국수력원자력, 2020.1.23., 2019년 4사분기 사용후핵연료 저장현황, 2020.03.23. 검색, http://www.khnp.co.kr/

한국원자력연구원, 2020.1.28., 사용후핵연료 보관 현황(2019년 4분기), 2020.03.23. 검색, http://www.kaeri.re.kr/

한국지질자원연구원, 2016, 사용후핵연료 처분연구관련 지질조사 방법론 개발.

Chae, B.G., Choi, J., Kihm Y.H., and Park, S.I., 2017, Geological structural parameters to be considered for siting of HLW repository: A review for case studies of foreign countries. Journal of the Geological Society of Korea, 53(1), pp. 207-219.

Cho, W.J., Kim, J.S., Lee, C., Kwon, S., and Choi, J.W., 2012, In situ experiments on the performance of near-field for nuclear waste repository at KURT. Nuclear Engineering and Design, 252, pp. 278-288.

IAEA, 1994, Siting of geological disposal facilities: A safety guide. Safety series No. 111-G-4 1, IAEA, Vienna, Austria.

IAEA, 2011, Geological disposal facilities for radioactive waste. Specific safety guide No. SSG-14, IAEA, Vienna, Austria.

Jeon, B., Choi, S., Lee, S., and Jeon, S., 2019, A conceptual study for deep borehole disposal of high level radioactive waste in Korea. Tunnel & Underground Space, 29(2), pp. 75-88.

KIGAM, 2007, Construction of deep underground research laboratory and core technology development. GP2007-005-2007(1), KIGAM, Daejeon, Korea.

KIGAM, 2019, Development of nationwide geoenvironmental maps for HLW geological disposal. GP2017-009-2019, KIGAM, Daejeon, Korea.

Kwon, S., Lee, C., and Park, S.H., 2015, THM coupling analysis for Decovalex-2015 Task B2. Tunnel & Underground Space, 25(6), pp. 556-567.

Lee, C.S., Kwon, S.K., Choi, J.W., and Jeon, S,. 2011, An estimation of the excavation damaged zone at the KAERI underground research tunnel. Tunnel & Underground Space, 21(5), pp. 359-369.

NEA, 2001, The role of underground laboratories in nuclear waste disposal programmes. OECD.

Park, J.W., Guglielmi, Y., Graupner, B., Rutqvist, J., and Park, E.S., 2019, Numerical modelling of fault reactivation experiment at Mont Terri underground research laboratory in Switzerland: DECOVALEX-2019 TASK B (Step 2). Tunnel & Underground Space, 29(3), pp. 197-213.

Park, K.W., Kim, K.S., Koh, Y.K., Jo, Y., and Ji, S.H., 2017, Review of site characterization methodology for deep geological disposal of radioactive waste. Journal of Nuclear Fuel Cycle and Waste Technology, 15(3), pp. 239-256.

Posiva, 2000, The site selection process for a spent fuel repository in Finland- Summary report. Posiva 2000-15, Posiva, Helsinki, Finland.

Posiva, 2006, Summary of rock mechanics work completed for Posiva before 2005. Posiva 2006-04, Posiva, Helsinki, Finland.

Posiva, 2008, Core drilling of deep drillhole OL-KR47 at Olkiluoto in Eurajoki 2007-2008. Working report 2008-13, Posiva, Helsinki, Finland.

Posiva, 2012, ONKALO rock mechanics model (RMM) version 2.0. Working report 2012-07, Posiva, Helsinki, Finland.

SKB, 1998, Parameters of importance to determine during geoscientific site investigation. TR-98-02, SKB, Stockholm, Sweden.

SKB, 2002, Swedish deep repository siting programme: Guide to the documentation of 25 years of geoscientific research (1976-2000). TR-02-18, SKB, Stockholm, Sweden.

Wang, J., Chen, L., Su, R., and Zhao, X., 2018, The Beishan underground research laboratory for geological disposal of high-level radioactive waste in China: Planning, site selection, site characterization and in situ tests. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 10, pp. 411-435.