The Journal of Engineering Geology
pISSN : 1226-5268 eISSN : 2287-7169

Vol. 33, No. 4, December, 2023, pp. 611-626
https://doi.org/10.9720/kseg.2023.4.611

RESEARCH ARTICLE

고준위방사성폐기물 처분 부지선정을 위한 조사인자 및 조사기법에 대한 국외사례 분석

김효건[1] · 유시원[1] · 배대석[2] · 정수환[3] · 김기수[4] · 김준겸[5] · 한만호[6] · 최정해[7*]

[1]벽산엔지니어링(주) 지반사업팀 부장, [2]벽산엔지니어링(주) 지반사업팀 상무,
[3]벽산엔지니어링(주) 지반사업팀 차장, [4]벽산엔지니어링(주) 지반사업팀 과장,
[5]벽산엔지니어링(주) 지반사업팀 대리, [6]한국원자력환경공단 고준위기술개발원 주임연구원,
[7]경북대학교 지구과학교육과 교수

Case Studies of Site Investigation Factors and Methods for Site Selection for High-Level Radioactive Waste Disposal

Hyo Geon Kim[1] · Si Won Yoo[1] · Dae Seok Bae[2] · Soo Hwan Jung[3] · Ki Su Kim[4] · Jun Kyum Kim[5] · Man Ho Han[6] · Junghae Choi[7*]

[1]General Manager, Geotechnical Team, BYUCKSAN Engineering Co., Ltd.
[2]Managing Director, Geotechnical Team, BYUCKSAN Engineering Co., Ltd.
[3]Deputy General Manager, Geotechnical Team, BYUCKSAN Engineering Co., Ltd.
[4]Manager, Geotechnical Team, BYUCKSAN Engineering Co., Ltd.
[5]Assistant Manager, Geotechnical Team, BYUCKSAN Engineering Co., Ltd.
[6]Associate Researcher, HWL Technology Development Institute, Korea Radioactive Waste Agency
[7]Professor, Department of Earth Science Education, Kyungpook National University

Abstract

Overseas examples of the characterization stage of site selection proposed by the International Atomic Energy Agency were reviewed to highlight the factors necessary for consideration in the deep disposal of high-level radioactive waste. Studies in Sweden, Finland, the USA, and Canada were considered. Site investigations in Sweden and Finland commonly covered the fields of geology, hydrogeology, and hydrogeochemistry using similar field investigation techniques. The USA considered survey groups and factors under pre- and post-lockdown guidelines, as well as those for desaturated and saturated surveys. involving geophysical, hydrological, hydrogeological, hydrogeochemical, mechanical/physical, and thermal-characterization investigations. Canada provided a list of investigative methods for both preliminary and detailed site assessments including geological, physical, boring, hydrological, laboratory testing, and chemical analysis studies. Results of this study should elucidate site-selection investigation factors and survey methods applicable to Korea.

Keywords: deep disposal, site selection, investigation factors, investigation methods

초 록

본 연구에서는 심층처분 부지선정에 필요한 인자를 선정하기 위해서 IAEA에서 제안한 심층처분을 위한 부지선정 과정 중 부지특성화 단계를 대상으로 해외사례를 검토하였다. 심층처분 방식을 결정한 스웨덴, 핀란드, 미국, 캐나다의 조사인자를 대상으로 분석을 실시하였으며, 조사인자에 대한 조사기법을 분석 정리하였다. 스웨덴과 핀란드의 부지 조사 현황분석 결과 지질, 수리지질, 수리지화학 분야의 조사

OPEN ACCESS

***Corresponding author:** Junghae Choi
E-mail: choi.jh@knu.ac.kr

Received: 29 November, 2023
Revised: 14 December, 2023
Accepted: 19 December, 2023

Ⓒ 2023 The Korean Society of Engineering Geology

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.

인자는 공통적으로 포함되어 있으며, 스웨덴과 핀란드의 주요 현장조사 기법의 경우 각 나라에서 수행한 조사 기법이 유사하게 나타났다. 미국의 경우 폐쇄 전/후 지짐에 따른 조사그룹과 조사인자를 제시하고 있으며, 불포화대 조사와 포화대 조사에 대한 조사그룹과 인자를 각각 제시하고 있다. 조사기법에 대해서는 부지특성화 단계의 지구물리 조사기법, 수문 및 수리지질 조사기법, 수리지화학 조사기법, 역학적/물리적 및 열적 특성조사기법을 제시하고 있다. 캐나다의 경우 예비 적합성 평가와 상세부지 평가에 대한 조사인자를 제시하고 있으며, 조사 기법에 대해서는 지질조사, 물리탐사, 시추조사, 수문조사, 실내시험, 화학분석 등에 대해서 상세하기 제시하고 있다. 본 연구 결과는 추후 국내에 적용가능한 부지선정에 필요한 조사인자 및 각 조사인자에 대한 조사기법을 결정하는데 기여할 것으로 기대한다.

주요어: 심층처분, 부지선정, 조사인자, 조사기법

서 론

2021년 12월 산업통산자원부는 '제2차 고준위 방사성폐기물 관리 기본계획(안)'을 발표하고 고준위 방사성폐기물의 기본정책, 부지선정 등 시설계획, 기술개발 및 투자계획을 제시하였다. 심층처분 관리시설 확보를 위해 단계적 부지선정 절차를 제시하고 단계별 부지적합성 조사를 위한 목표 및 주요활동을 제시하였다. 부지 선정 추진원칙은 객관적이고 투명한 부지선정 절차 및 방식을 마련하여 사전에 공표하고 단계별 부지조사 및 평가결과는 투명하게 공개하여 국민 신뢰도를 제고함을 기본으로 한다. 이를 위해서 부적합지역에 대한 우선배제, 부지적합성에 대한 기본조사 및 심층조사 등의 부조조사 방법론, 부지조사 인자별 최적 기법 선정, 사업이행을 위한 조사 매뉴얼 및 품질관리 체계 등의 기술적 기반이 확보되어야 한다.

심층처분 부지확보를 위한 부지 조사가 진행된 스웨덴, 핀란드, 미국, 캐나다 등의 해외 선도국은 부지조사를 위한 체계나 일반적인 접근방식이 정립되어 있으며, 자국 고유의 정책 및 규제조건, 심층처분 개념 등에 따라 부지조사 수행전략 및 수행 우선순위 등을 선정하고 부지확보를 위한 절차를 진행 중이거나 완료한 상태이다. 따라서 심층처분 사업 후발 국가인 대한민국은 부지조사의 접근체계를 기반으로 조사 인자 도출, 조사 기법 및 도구의 고도화, 품질체계 확립, 최신 조사 기술적용 등으로 자국 고유의 단계적 부지조사 수행 체계 및 부지조사 매뉴얼이 필요하다.

본 연구에서는 이러한 확보기술 가운데 가장 중요시 여겨지는 부지조사에 대한 조사인자 및 조사기법을 선정하기 위해 해외 선도국의 부지조사에 대한 인자 및 기법을 조사하고 분석하여 추후 국내에 적용될 조사인자와 조사기법에 대한 기초를 마련함을 목적으로 한다. 단, 본 연구에서는 환경영향평가 관련 조사인자는 제외시켰다.

이를 위해서, 각 국가별 부지조사 프로그램을 분석하고 공통적으로 포함되어 있는 조사인자 및 조사기법을 재분류하였으며, 유사한 현장 조사 기법에 대해서 정리를 실시하였다. 부지 조사에 대한 신공법 및 개량공법에 대한 사항을 분석하여 적용사례를 파악하였으며, 예비부지조사 및 상세부지조사의 단계에 따른 조사인자의 세분화 및 조사 기법을 분석하였다.

국가별 현장 조사기법 정리

심층처분 부지특성 인자 선정 기법 분석을 위해 국제원자력기구(International Atomic Energy Agency, IAEA)에서 제안한 심층처분을 위한 부지선정 과정 중 부지특성화 단계를 대상으로 해외 사례를 검토하였으며, 특히 고준위방사성폐기물 최종 관리 방안으로 심층처분 방법을 결정한 스웨덴, 핀란드, 미국, 캐나다의 사례를 분석하여 조사인자 및 조사기법에 대한 정리를 실시하였다.

해외 주요 선도국은 오랜 처분연구를 통해 부지조사 및 부지평가와 관련된 기술력을 확보하고 있으며 다년간의 연구를 통해 처분부지의 특성 해석에 필요한 조사 인자를 도출하고 최종처분을 위한 단계적 부지선정 절차를 수립하였다. 본 연

구에서는 해외사례 분석을 통해 국가별 부지선정을 위한 조사인자와 최적 조사기법을 분석하고 재분류 하였다.

스웨덴

고준위 방사성폐기물 영구처분은 1972년을 시작으로 부지 특성에 대한 기초지식 습득을 목표로 지형, 기반암, 지질구조 및 지하수 유동 등을 대상으로 연구를 수행하였다. 특히 RD&D programme 92에서 부지 선정을 위한 원칙과 단계 확립 및 부지선정 절차를 수립하여 일반부지선정조사, 타당성 검토, 부지조사, 부지선정 및 상세 부지 특성화에 대한 절차를 수립하였다(SKB, 1992). 스웨덴의 부지조사 프로그램은 생태계, 지질, 암반역학, 수리지질, 수리지화학, 열적 특성 및 이동특성으로 구성되어 있으며, 프로그램별 부지특성모델 구축을 위한 입력인자인 부지고유의 지질환경 정보를 획득하고 있다(SKB, 2001).

각 프로그램별 조사인자와 조사기법에 대해서는 아래 Tables 1~6과 같이 정리된다.

Table 1. Investigation method for each factors of geology program in Sweden (SKB, 2001)

Factor	Method
Topography	
- Topography	Mapping, aerial/ground geophysical survey
Soil cover	
- Thickness of soil cover	Soil mapping, aerial photo interpretation, investigation of bottom sediments, sampling
- Soil distribution	
- Soil description	
- Soil type	
- Bottom sediment	
- Neotectonic indicators	Geological/topographical observation in soil
Bedrock: rock types	
Occurring rock types	Airborne geophysics (magnetic, eletromagnetic, radiometric methods)
- Rock type distribution (spatial and percentage)	Geological mapping, dating, ground geophysical surveys (gravimetry, magnetic, eletromagnetic, resistivity), seismic surveys, GPR
- Xenoliths	
- Dikes	
- Contacts	
- Age	
- Ore potential	
Rock type description	
- Mineralogical composition	
- Grain size	Microscope analysis
- Mineral orientation	
- Microfractures	
- Density	
- Porosity	Petrophysical analysis, borehole logging
- Susceptibility, gamma radiation etc	
- Mineralogical alteration/weathering	
Bedrock: structures	
Plastic structures	Geological mapping
- Folding (geometry)	
- Foliation	
- Lineation	
- Veining	

Table 1. Continued

Factor	Method
Shear zones	
- Age	Dating
- Extent, Properties	Geological mapping
Brittle structures (fracture zones)	Geological mapping, core mapping, Borehole radar, borehole geophysical logging (calliper, radiometric, electrical, magnetic methods, sonic), BIPS, investigation of drill cutting, dating
- Location	
- Orientation	
- Length	
- Width	
- Movements (size, direction)	
- Age	
- Properties (number of fracture sets, spacing, block size, fracture character, fracture filling materials, weathering/alteration)	

Table 2. Investigation methods used in the rock mechanical program of Sweden (SKB, 2001)

Factor	Method
Fracture zones	
- Geometry	See geological model
Mechanical properties of fractures in different rock masses	
- Deformation properties in normal direction	Uniaxial and trixial compression tests
- Deformation properties in shear direction	Direct shear test
- Shear strength JRC, JCS, φ_b (base friction), φ_r (post failure friction)	JRC and φ_b: tilt test, JCS: Schmidt hammer, φ_r: direct shear tests
Mechanical properties of intact rock in different rock masses	
- Young's modulus of elasticity	Uniaxial and triaxial compression tests
- Poisson's ratio (v)	
- Strength (σ_c, m_i, s etc)	
- Tensile strength	Brazilian test
- Indentation index	Normal loading test
Mechanical properties of different rock masses	
- Young's modulus of elasticity	Uniaxial and triaxial compression tests
- Poisson's ratio (v)	
- Strength	
- Rock classification (RMR, Q)	Drill-core logging
- S and P wave velocity	Uniaxial compression test, sonic logging
Density and thermal properties	
- Density	Lab test (drill core)
- Coefficient of thermal expansion	
Boundary conditions and supporting data	
- In-situ stresses, magnitude and directions	Over-coring, hydraulic fracturing
- Observed deformation and seismic activity	Mapping, seismic observations

Table 3. Investigation methods used in the hydrogeological program of Sweden (SKB, 2001)

Factor	Method
Deterministically modeled fracture zones	
- Geometry	See geological model
- Deterministic or statistical distribution of transmissivity or hydraulic conductivity	Pumping test during drilling, hydraulic injection tests, hydraulic interference tests
- Storage coefficient	
Stochastically modeled fracture zones, fractures and rock mass	
- Geometry (rock volumes with similar hydraulic properties)	See geological model
- Spatial distribution of fracture zones and fracture	Hydraulic injection tests, hydraulic interference tests
- Statistical distribution of hydraulic conductivity	
- Statistical distributions of specific storage, storage coefficient	
Soil layers	
- Geometry (soil volumes with similar hydraulic properties)	Hydrogeological mapping
- Hydraulic conductivity	Pumping test in soil layer
- Specific storage	
Hydraulic properties of groundwater	
- Density, viscosity, compressibility	Geophysical methods
- Salinity	(temperature, fluid resistivity, single-point resistance, caliper)
- Temperature	
Boundary conditions and supporting data	
- Meteorological and hydrological data	Documented methods (Lindell et al., 2000)
- Recharge/discharge areas	Analysis of existing hydrological, meterological data,
- Pressure and head	topography, long-term monitoring
- GW flow through borehole	Large-scale tracer tests
- Regional boundary conditions, historical and future evolution	From climate model, topography

Table 4. Investigation methods used in the hydrogeochemical program of Sweden (SKB, 2001)

Factor	Method
Variables	
- pH, Eh	Potentiometry
Main components	
- TDS, Na, K, Ca, Mg, HCO_3, SO_4, Cl, Si	ICP-AES Ion chromatography
Trace elements	
- Fe, Mn, U, Th, Ra, Al, Li, Cs, Sr, Ba, HS, I, Br, F, NO_3, NO_2, NH_4, HPO_4, REE, CU, ZR, Rb	Spectrophotometry ICP-MS and/or INAA
Dissolved gases	
- N_2, H_2, CO_2, CH_4, Ar, He, C_xH_{x1}, O_2	Gas chromatography
Stable isotopes	
- ^{2}H, ^{18}O, ^{13}C, ^{34}S, $^{87}SR/^{86}SR$, ^{3}He, ^{4}He, ^{11}B, ^{37}Cl	MS (mass spectroscopy), alpha/gamma spectrometry
Radioactive isotopes	
- T, ^{14}C, $^{234}U/^{238}U$, ^{36}Cl, Rn, ^{226}Ra	Chemical separation, alpha/gamma spectrometry

Table 4. Continued

Factor	Method
Other	
- DOC, Humic and Fulvic acids, Colloids, Bacteria	UV oxidation, IR, TR-90-29 EDXRF (with filters), counting
Fracture-filling minerals	
- Main and trace elements, Isotopes	ICP-AES, ICP-MS, INAA MS, alpha/gamma spectrometry

Table 5. Investigation methods used in the thermal-properties program of Sweden (SKB, 2001)

Factor	Method
Thermal properties of the rock	
- Thermal conductivity - Heat capacity	Laboratory method (TPS)
Temperatures	
- Temperature (rock, groundwater)	Thermal response test
- Thermal boundary conditions/gradient	Temperature logging

Table 6. Investigation methods used in the transport properties program of Sweden (SKB, 2001)

Factor	Method
Properties on deposition hole scale	
- Groundwater chemistry	See chemistry data
- Groundwater flow	Groundwater flow measurement
- Fracture aperture, geometry	Mapping, hydrogeological model
Properties of flow paths	
- Flow paths	From hydrological model
- Transport resistance along flow path	
- Dispersivity	Tracer test/hydrological
- Flow porosity	model, lab test
Properties of rock	
- Sorption coefficients	Batch sorption test
- Matrix diffusivity	Diffusion test
- Matrix porosity	
- Max. penetration depth	
- Groundwater chemistry	See chemistry data
Transport properties of soil layers/recipients	
- Water flux	Hydrological receptor model
- Flow porosity	Soil type model, batch test
- Sorption coefficients	
- Biological activity	
Supporting data	
- Breakthrough curves	Tracer test
- Chemical analysis of fracture filling materials and wall rock	Core logging, analysis
- Groundwater chemistry, colloids, gas etc	See chemistry data

핀란드

부지선정 절차는 최종 심층처분시설에 적합한 기반암을 평가하는 일반지질연구를 시작으로 부지식별 조사, 부지조사, 부지선정 및 부지 확정 연구로 단계별 구분되어 진다.

핀란드의 부지조사 프로그램은 1982년과 1985년 2차례에 걸쳐 개발되었으며 조사목적 및 조사기법과 기술 개발 및 부지조사 지침을 포함하고 조사를 통해 후보부지의 적합성을 판단하도록 한다(Äikäs and Laine, 1982; Äikäs, 1985). 부지조사는 문헌조사의 지질 및 수리학적 환경 평가의 일치 여부와 단열대, 광상 등의 위험 요소를 확인하며 주제 영역에 따라 지질 및 지구물리 조사, 수리지질 조사, 수리지화학 조사로 구분된다(McEwen and Äikäs, 2000).

각 프로그램별 조사인자와 조사기법에 대해서는 아래 Tables 7~9에 나타나 있다.

Table 7. Investigation methods used in the geological and geophysical program of Finland (McEwen and Äikäs, 2000)

Factor	Method
Geological mapping and sampling	
- Topography	Geological mapping
- Bedrock types	
- Bedrock structures	
- Fracture zones	
- Fold axial traces	
- Lineation	
- Deformation features (extent, length, width, strike, dip, continuity)	
Geophysics	
- Topography	Aerial photographs, airborne (magnetic, natural radiation), ground (VLF magnetic, resistivity), GPR survey
- Bedrock types	
- Bedrock structures	
- Thickness of unconsolidated deposits	
- Geological formation	Seismic refraction/reflection survey
- Distribution of seismic velocities	
- Electrical conductivity of bedrock	
- Location of fracture zones	GPR, AMT resistivity survey
- Location of lithological contact	Gravity survey
Deep borehole measurements	
- Electrical conductivity of drilling fluid	Fluid logging
- Temperature	
- Location and position of fracture zones	
- Fracture orientation	Borehole radar
- Lithology	Borehole TV measurements, vertical seismic profile
- Bedrock structure	
- Degree of weathering	
- In situ rock stress	Hydraulic fracturing, over-coring
Wireline logging	
- Bedrock resistivity	Electrical resistivity log
- Density	Gamma-gamma log
- Porosity	Neutron log
- Electrical potential	SP log
- Lithology	Caliper log

Table 7. Continued

Factor	Method
Testing and sampling	
- Petrophysical properties (strength, Young's modulus, Poisson's ratio, density etc)	Uniaxial compression test, point-load test, four-point bending test
- Mineral composition	XRF, NAA, AAS methods
- Fracture filling minerals	XRD
- Age of fracture filling minerals	Age dating
- Transport properties	Studies of solubility, diffusion, sorption
- Thermal properties (thermal conductivity, specific capacity, thermal diffusivity, coefficient of thermal expansion)	Study of thermal properties

Table 8. Investigation methods used in the hydrogeological program of Finland (McEwen and Äikäs, 2000)

Factor	Method
Hydrological investigations	
- Temperature	Multi-level piezometers
- Resistivity	
- Precipitation	
- Snow depth	Wild rain gauge
- Water equivalent of snow	
- Discharge	Current meter, weir measurement
Hydraulic testing	
- Hydraulic conductivity	Constant head injection test, pumping test, lugeon test
- Transmissivity of fracture zones	
- Natural groundwater pressure	Multi-level piezometers
- Groundwater table	
- Distribution of hydraulic head	Installation of multi-packer system
- Groundwater movement in bedrock	Trace test
- Location of hydraulic connections	
Wireline logging	
- Groundwater flow	Difference flow log, flowmeter log, temperature log
- Hydraulic gradient	Multi-level piezo-meters, multi-packer system

Table 9. Investigation methods used in the hydrogeochemical program of Finland (McEwen and Äikäs, 2000)

Factor	Method
Groundwater chemistry	
Physicochemical variables - pH, Eh - Density - Alkalinity/acidity	Water sampling (brooks and springs, water lines, domes-tic wells), and using PAVE, field measurements
- Uranine (tracer of drilling water) - Salinity	Groundwater monitoring
- Anions (HCO_3, CO_3, Cl, Br, F, I, SO_4, S^{2-}_{tot}, PO_4, NO_3, NO_2, N_{tot}, P_{tot}, B_{tot}, S_{tot}) - Cations (Na, Ca, Mg, K, Al, Fe_{tot}, Fe^{2+}, Mn, SiO_2, NH_4)	X-ray fluorescence (XRF), neutron activation analysis (NAA), atomic absorption spectroscopy (AAS)

Table 9. Continued

Factor	Method
- Trace elements (Sr, Cs, Li, Ba, Rb, Zr)	
- Isotopes (D, ^{3}H, ^{18}O, ^{222}Rn, ^{13}C, ^{14}C, $^{234}U/^{238}U$ and U_{tot})	Isotope analysis
- Redox condition	Field measurements
Organics	
- DOC, TOC	Water sampling in boreholes
- TDS	
- Colloids and microbes	

미국

미국의 고준위방사성폐기물 처분은 핵무기 개발을 위한 플루토늄 생산 시 발생하는 부산물을 처리하기 위해 AEC(Atomic Energy Commission)의 요청으로 심부 암반 내 영구처분하는 개념을 고안하여 처분 연구를 시작하였다. 미국의 부지선정 절차는 부지 선별, 부지 지명, 부지 추천, 부지 특성화, 면허 신청으로 진행된다. 부지 선별 단계에서 선정된 후보부지를 대상으로 지질학적 조사를 수행하며, 조사를 수행하는 단계는 '특성화에 적합한 부지 지명'과 '부지 특성화'로 구분된다. '특성화에 적합한 부지 지명'단계의 지질학적 조사는 폐쇄 후 지침 및 폐쇄 전 지침에 기반한다(DOE, 1984).

천연방벽과 공학적 방벽 개념을 포함하여 NRC(National Response Center) 및 EPA(U.S. Environmental Protection Agency) 규정에 기반한 기술 지침은 폐쇄 후 심층처분시설 성능에 영향을 미치는 특성, 프로세스 등에 대한 조건을 설정하며 각 기술지침에 대해 요구사항을 명시하고 있다. 폐쇄 전 예상되는 심층처분시설 성능을 기준으로 부지를 평가/비교할 때 고려해야 할 인자를 지정하여 폐쇄 전 지침이 작성되었다.

미국의 각 프로그램에 대한 조사인자 및 조사기법은 아래 Tables 10~13에 나타나 있다(BSC, 2003, 2004a, 2004b).

Table 10. Methods of geophysical investigation used in the site-characterization phase

Factor	Method
Regional	
Recharge/discharge area, stream flow, geological discontinuities	Satellite imagery
Fault offset, stratigraphy, lithological contact, size and shape of subsurface volcanoes	Aeromagnetic and gravity
Lithological contacts, fractures	Seismic refraction
Site specific	
Fracture density	Seismic tomography
Lithological contacts, fractures	Magnetotelluric and seismic refraction
Borehole log	
Density, groundwater flow	Electrical resistance tomography
Moisture content, fracture location	Ground penetrating radar
Porosity	Neutron logging
Saturation	Cross-hole radar tomography

Table 11. Methods of hydrological and hydrogeological investigation used in the site-characterization phase

Factor	Method
Hydrology	
Rainfall, evapotranspiration, run-on, run-off, infiltration, groundwater recharge, temperature, humidity	Climate data analysis
Field test	
Bulk permeability, porosity, anisotropy	Air injection test
Permeability, fracture network, hydraulic conductivity	Trace injection test
Laboratory test	
Fracture (aperture, density)	Core logging
Matrix porosity, permeability	Porosity measurements
Matrix permeabiltiy, hydraulic conductivity	Permeability measurements
Moisture content, moisture retention relations	Moisture content measurements

Table 12. Methods of hydrological and hydrogeological investigation used in the site-characterization phase

Factor	Method
Groundwater conditions	
Oxidation-reduction potential, pH, temperature, pressure	Field measurements
Chemical analysis	
Al, Ca, Mg, K, Na, SiO_2, HCO_3, CO_3, Cl, NO_3, SO_4, TDS	Major elements
δD, δ18O, δ13C	Stable isotopes
$^{87}Sr/^{86}Sr$, $^{234}U/^{238}U$	Radiogenic isotopes
Mineral composition, alteration minerals, secondary minerals, absorption, $^{40}Ar/^{39}Ar$ age	Rock geochemistry
CO_2, ^{13}C, ^{14}C, CH_4, Ar, N_2	Gas geochemistry

Table 13. Methods of physical, mechanical and thermal investigation used in the site-characterization phase

Factor	Method
Field test	
In situ stresses	Hydraulic fracturing
Temperature (by depth)	Temperature measurements
Laboratory test	
Compressive/tensile/shear strength, Young's modulus, Poisson's ratio, RQD, cohesion, friction	Mechanical properties
Grain density, bulk porosity, saturation, permeability	Physical properties
Thermal conductivity, thermal capacity, coefficient of thermal expansion	Thermal properties

캐나다

캐나다의 온타리오주를 중심으로 사용후핵연료의 저장, 운송 및 영구처분 연구를 통해 1978년 캐나다 핵연료 폐기물 관리 프로그램(Canadian Nuclear Fuel Waste Management Program)을 개발하였다. 관리 프로그램은 캐나다 원자력유한공사(Atomic Energy of Canada Limited)에서 감독 수행하였으며 주로 지하 500-1,000 m에 분포하는 결정질암을 최우

선 대상으로 고려한 심지층 처분기술 개발에 집중하였으며 사용후핵연료 운반을 위한 개념 설계를 포함하고 있다. 방사성 폐기물 관리를 위한 핵연료폐기물법(Nuclear Fuel Waste Act)에 기반하여 핵폐기물관리기구(Nuclear Waste Management Organization, NWMO)가 설립되어 사용후핵연료의 장기 관리를 위한 연구 및 처분방식 개발을 목표로 하고 있다. NWMO와 전문가 협업을 통해 총 9단계의 부지 선정을 위한 의사 결정 프레임워크를 개발하고 부지선정 과정을 설계하였다(NWMO, 2023).

부지조사는 예비 적합성 평가와 상세 부지 평가 두 단계에서 이루어지고 예비평가 단계는 문헌조사와 현장조사를 수행하여 이를 통해 상세조사를 수행할 부지를 선정한다.

부지 선정 과정에 따른 조사인자와 조사기법은 아래 Table 14에 나타나있다(Everitt et al., 1994; Davison et al., 1994).

Table 14. Methods used for site screening

Factor	Method
Geology	
Major fault and fracture orientation	Lineament analysis
Major rocks types, petrology, mineralogy, mineral fabric, pluton intrusion (age, rate of cooling, erosion rate), size and shape of pluton	Geological mapping and sampling
Distribution, orientation, relative ages of faults and fracture zones, fracture density	Structure
Geophysical survey	
Lineaments/faults distribution, topography, sedimentary layers, lithological distribution	Remote-sensing techniques
Lineament, lithologic variation, thickness of overburden deposit, faults, fracture zones	Airborne geophysical survey (EM, magnetic, radiometric)
Shape, depth, pluton contacts, geological structure, lithologic variation, boundary, major fracture zones	Surface geophysical survey (gravity, electrical, GPR, seismic reflection)
Borehole surveys	
Lithology, rock types, fractures location, fracture fills, mineral alteration	Drill core analysis
Fracture depth, location, lithological boundary, low-angle fracture location	Geophysical logs
Fracture location, continuity, geometry, lithological variation	Seismic tomography
Fracture location, direction	Televiewer
In situ stress (magnitude, direction), effective stress, remnant stress	Hydraulic fracturing
Thermal conductivity, temperature	Thermal response test
Hydrology	
Recharge/discharge area, basin, drainage, surface-water patterns	Satellite image analysis
Laboratory test	
Density, porosity, hydraulic conductivity, permeability	Physical properties
Stress, strength, elasticity, deformation	Mechanical properties
Thermal expansion, thermal conductivity, thermal diffusivity	Thermal properties
Chemical analysis	
pH, Eh, EC	Field measurements and monitoring
Cation (Na, Ca, Mg, K, Sr, Si, B), Anion (HCO_3, SO_4, Cl, Br, F, NO_3, I), Trace elements (Li, Fe, Mn, V, Al)	Ion analysis
^{2}H, ^{3}H, ^{13}C, ^{14}C, ^{18}O, $^{34}SO_4$, ^{36}Cl, ^{129}I, $^{87}Sr/^{86}Sr$, $^{234}U/^{238}U$, ^{222}Ra, ^{226}Ra	Isotopes
H_2, He, O_2, N_2, CO_2, CH_4, Ar, H_2S	Dissolved gases

토 의

본 연구에서는 해외 부지조사 사례를 검토하여 해외 주요국의 조사 프로그램별 공통점과 차이점을 확인하고 부지조사 추진체계 개발을 위해 국내 여건을 고려하여 적용할 수 있는 조사 프로그램을 분석하였다. 스웨덴, 핀란드, 미국, 캐나다의 조사는 공통적으로 지질, 수리지질, 수리지화학, 암반역학 및 열적특성 분야에 대한 조사를 수행했으며 국가별 기후, 지형 및 지질 등의 환경에 따라 차이가 있는 조사인자를 분석하였다.

조사인자

지질

- 산과 계곡 등의 지형은 유역을 구분하고 유거수의 흐름을 결정하여 지하수 시스템에 영향을 미치며 기상현상과 관련됨
- 지질구조(단층, 단열)와 암종 분포, 암석 경계 등의 지질학적 인자는 처분시설을 수용할 수 있는 크기의 암반 식별을 위한 조사 및 시추공 위치를 결정할 수 있는 기초자료를 제공함
- 광물학적 분석은 광물 조성, 비율, 광물 방향성 등을 조사하며 암종 분류, 연대측정, 변성 및 변질, 동위원소 평형과 같은 암석-물 상호작용 등을 해석하기 위한 정보를 획득할 수 있음
- 스웨덴, 핀란드, 캐나다는 빙하지형을 고려하며 후빙기 단층 등의 지구조운동과 이를 해석하기 위한 토양층 두께, 기저 퇴적물, 신기지구조운동 지시자(스웨덴), 미고결 퇴적물(핀란드), 퇴적물 두께, 빙하기 역사(캐나다)를 조사함
- 미국, 캐나다는 광역탐사를 통해 매장된 화산의 규모, 화산 분포, 화산유리, 열변성 등 화산과 관련된 인자를 조사하며 제4기 지구조운동에 화산활동을 포함

수문 및 수리지질

- 수문조사는 수리모델의 경계조건 설정을 목적으로 이루어지며 공통적으로 함양/배출지역, 배수유역, 강수 등의 인자를 포함하고 미국과 캐나다는 침투량 또는 지하수 함양량 추정을 위한 증발산, 토양수분, 지하수체의 위치 등의 자료를 추가로 획득함
- 기후는 침투량, 온도 조건, 유거수, 증발산 등 지표 조건을 제어하며 지하매질의 수분 재분배, 침투, 지하수 함양에 영향을 미치는 요인으로 미국과 캐나다는 수문조사에서 수행하고 스웨덴은 생태계 프로그램, 핀란드는 부지선정 시 기타 요인으로 미래 기후를 조사함
- 수리지질학적 인자는 지하수의 수압, 수위, 유동, 매질의 수리전도도, 공극 등이며 수리지질 모델 개발에 요구되는 단열대의 기하학적 구조, 수리학적 연결성 등을 식별함

수리지화학

- 지하수의 화학조성은 처분환경의 화학적 평형과 처분시설의 장기 성능평가, 기원 및 암석-물 상호작용 해석과 핵종 이동에 영향을 미치는 요인을 확인하기 위한 정보 제공
- 지하수의 pH는 벤토나이트 충전재의 성능에 영향을 주며 Eh는 지하수의 산화/환원 조건 판별을 위한 자료로 활용됨
- 암석-물 상호작용 해석에 요구되는 지하수의 주원소, 미량원소 등의 화학조성은 포장재 부식과 2차광물 침전 및 흡착 등의 방사성핵종의 거동을 지연하는 기작을 규명함
- 동위원소는 지하수 및 암석의 기원, 진화 및 상호작용 해석에 활용되며 동위원소 조성비는 지하수 혼합을 지시하며 처

분환경에서 이를 통해 지표환경까지의 이동을 추적함
- 미국은 핵무기 실험에서 발생한 핵종을 포함한 ^{3}H, ^{14}C, ^{36}Cl을 추적자로 활용하여 지하수 침투를 해석함
- TDS, TOC, 콜로이드 및 미생물 등의 유기물은 포장재에 영향을 미치거나 방사성핵종을 운반할 가능성을 평가함

물리적 및 역학적 특성

- 암반 및 단열의 역학적 특성은 심층처분시설 설계에 요구되는 정보로 물리적, 역학적 특성을 규명하기 위한 인자를 조사 및 측정함
- 암석의 밀도, 공극, 투수율과 같은 물리적 특성은 천연방벽으로서 암석의 성능을 평가하기 위해 활용됨
- 무결암의 변형(영률, 포아송비)과 강도(압축, 인장, 전단)는 암석의 파괴 없이 견딜 수 있는 능력으로 심층처분시설 설계와 암반역학 모델의 주요 인자임
- 밀도, 투수율, 원위치 응력, 열전도도는 실내시험과 현장시험 측정값으로 구분되며 현장시험 결과는 현지암반 조건 해석과 실내시험 결과 검증을 목적으로 함

열적특성

- 처분암반의 열적특성은 포장재의 성능, 처분터널 및 처분공 설계에 요구되는 정보로 암반의 열전도도, 열팽창계수, 열용량 등의 인자를 조사하며 실내시험 결과(열전도도)는 현장시험 결과와 비교·검증함
- 스웨덴은 무결암의 열적특성을 결정하기 위해 추가로 광물을 분석하며 열 이방성은 광물의 조성, 조직의 결과이며 석영의 열전도도는 다른 조암광물보다 3~4배로 석영의 함유량이 암석의 열전도에 중요한 것을 규명함

물질 이동특성

- 스웨덴은 별도의 이동특성 조사 프로그램을 구축하며 핀란드, 미국, 캐나다의 이동특성 조사는 지질 또는 수리지질 조사와 함께 수행되나 조사인자는 이동경로, 침투, 지연 등의 공통된 인자를 포함하고 있음
- 이동특성에 영향을 주는 요인은 이동경로, 지하수 조건 및 지연으로 지질 또는 수리지질 조사와 함께 이루어짐
- 지하수의 유동 시스템을 규명하기 위해 지하수의 유동을 제어하는 이동경로(단열대)를 식별하고 유속, 유향, 수리경사 등의 지하수 조건을 측정함
- 암석/매질에 의한 지연은 매질의 공극, 매질에 의한 확산, 분산과 모암 및 단열충전광물에 의한 지연으로 구분
- 이동특성은 처분환경과 지표환경으로 구분되며 국가별 조사는 다음과 같이 수행됨
  - 스웨덴: 생태계(지표) 프로그램, 이동특성(처분환경) 프로그램
  - 미국: 불포화대 조사(지표), 포화대 조사(처분환경)
  - 캐나다: 지표 환경 조사, 지질 환경 조사(처분환경)

조사기법

해외 사례분석 결과 중 해외 주요국의 조사기법을 정리하여 국내 적용할 수 있는 사항을 도출하였다. 분석을 수행한 해외국가의 부지조사는 모두 광역규모에서 소규모로 범위를 축소하여 부지특성을 상세히 조사하며 지표에서 처분시설을 수용할 수 있는 암반을 식별하고 시추공 및 지하연구시설 기반한 조사를 수행하여 대상 암반의 지하환경을 해석하고 있다.

조사기법은 지표와 지하에 적용되는 조사기법으로 구분하며 지형, 수문 및 지질 등 지표환경 해석을 위한 원격탐사, 물리탐사, 지질조사와 지하환경 해석을 위한 물리탐사, 시추조사를 수행하며 지표 및 지하에서 획득한 시료를 대상으로 실내시험 및 분석을 통해 부지 고유 정보를 획득한다.

지표 환경 조사

- 항공· 위성영상 분석은 주요 선구조의 방향과 연장을 식별하고 활성단층의 위치 확인에 유용한 조사기법으로 Landsat TM 영상으로 추출한 원격탐사 정보를 이용하여 부지의 광역적인 개요를 확인할 수 있음
- 지형 및 수문조사는 지형도와 기존 기상 및 수문자료를 분석하여 지표수 흐름과 배수유역을 제어하는 지형 조건을 파악하고 지하수 함양/배출지역 식별 및 함양량을 산정하여 수문학적 경계조건을 결정함
- GPS 모니터링은 암반의 안정성을 확인하기 위한 목적으로 활용되며 스웨덴과 핀란드는 이를 적용하여 지형의 변위를 측정함
- 지표수 및 지하수는 호수, 샘, 기존 관정에서 시료를 채취하며 가능한 현장에서 측정, 분석하여 이동으로 인한 시료의 오염을 방지해야 함
- 지표 지질조사는 규모에 따라 항공물리탐사, 지표물리탐사, 지질매핑으로 구분되며 항공 자력, 전자, 방사선탐사는 광역 지질구조와 암종 분포, 암석 경계를 확인하여 충분한 규모의 암반을 선별함
- 지질매핑은 원격탐사, 항공물리탐사에서 확인된 지질구조, 암종 분포 등을 육안으로 관찰하며 실내시험 및 분석에 필요한 시료를 획득함
- 지표물리탐사는 중력, 자력, 전자, 방사선, 탄성파 및 GPR 탐사 등 다양한 조사기법을 적용하여 항공물리탐사 결과의 검증과 식별하지 못한 지질구조(수평 단열대)를 규명하며 암종 분포, 토양층 두께, 지질구조 및 층서를 해석하고 인간 침입을 유발하는 천연자원의 존재를 확인함

지하 환경 조사

- 지표 지질조사 결과를 바탕으로 조사에 적합한 위치에 시추공을 설치하여 지하 환경 해석을 위한 후속 조사를 수행함
- 시추공은 단층 및 단열을 확인할 수 있는 위치를 선정하고 시추하는 동안 굴착속도, 시추수의 조성변화, 코어 및 암편 변화를 주기적으로 기록하며 시추수를 추적자로 표시하여 지하수에 미치는 영향을 확인함
- 코어 로깅은 시추공에서 회수한 코어를 대상으로 육안 관찰 및 광물의 기본특성(조흔색, 경도)을 측정하고 상자에 코어의 깊이, 방향 등을 주기하여 보관하고, 시추공이 설치되면 물리검층, 원위치 응력시험, 수리시험, 열응답시험(Thermal response test) 등의 현장시험을 수행함
- 시추공 물리검층은 자연감마, 밀도, 중성자, 음파, 전기비저항, BIPS 등으로 암반의 공극률, 밀도, 균질성, 단열(위치, 방향, 충전물질) 정보를 획득함
- 원위치 응력시험(오버코어링, 수압파쇄법)은 수리시험 등으로 응력이 교란되기 전 수행되어야 하며 원위치 응력의 크기와 방향을 측정함
- 수리시험은 처분심도에서 지표까지 핵종 이동 경로 파악을 목적으로 이루어지며 양수/주입시험, 추적자시험, 간섭시험, 패커시험 등 다양한 시험을 통해 매질의 수리특성 및 이동경로를 해석함
- 처분심도의 지하수는 압력상태를 유지하며 채취하고 이동으로 인한 오염을 줄이기 위해 가능하면 현장에서 분석해야 함

실내시험 및 분석

- 지질조사, 시추조사에서 획득한 암석 시료는 물리적, 역학적, 열적특성 해석을 위한 분석을 수행하며 압축, 인장, 전단 시험과 밀도, 공극률, 함수비와 열전도도, 열팽창계수를 측정하여 심층처분시설 설계에 요구되는 정보를 제공
- 암석과 지하수의 대표적인 지구화학적 분석은 화학분석, 동위원소로 암석-물 상호작과 기원을 해석하고 발생 연대를 측정함

결 론

본 연구에서는 해외 선도국에서 실시한 부지선정 절차와 부지특성 조사 프로그램을 분석하였으며, 국가별 부지선정을 위한 조사인자 및 기법의 다양성을 확인하였다. 해외 주요국의 처분부지 특성 해석을 위한 조사는 국가별 기후, 지질 및 사회 조건에 따라 상이하나 공통적으로 광역규모에서 지역 및 부지와 같은 소규모 탐사로 범위를 좁히는 방식으로 지질, 수리지질, 수리지화학, 암반역학 및 열적특성 분야의 이해를 목적으로 정보를 수집한다. 본 연구의 결과는 국내부지 선정을 위한 조사인자 및 조사기법 선정에 활용 될 수 있으며, 국내여건에 적합한 부지조사 특성 프로그램을 개발 하는데 기여할 것으로 기대한다.

사 사

이 논문은 2023년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 사용후핵연료관리핵심기술개발사업단 및 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구사업(No. 2021040101003A)의 지원으로 수행되었습니다.

References

Äikäs, T., 1985, Site investigation for the disposal of spent fuel - Investigation programme, Report YJT-85-29, Nuclear Waste Commission of Finish Power Companies, 1-60 (in Finnish).

Äikäs, T., and Laine, T., 1982, Site investigation programme for the Olkiluoto area in Eurajoki, Saanio & Laine Oy, Report YJT-82-45, 1-150 (in Finnish).

BSC, 2003, Technical basis document No. 11: Saturated zone flow and transport Revision 2: September 2003, Bechtel SAIC Company, 1-36.

BSC, 2004a, Technical basis document No. 1: Climate and infiltration Revision I: May 2004, Bechtel SAIC Company, 1-206.

BSC, 2004b, Technical basis document No. 2: Unsaturated zone flow Revision I: May 2004, Bechtel SAIC Company, 1-430.

Davison, C.C., Brown, A., Everitt, R.A., Gascoyne, M., Kozak, E.T., Lodha, G.S., Martin, C.D., Soonawala, N.M., Stevens, D.R., Thorne, G.S., Whitaker, S.H., 1994, The disposal of Canada's nuclear fuel waste: Site screening and site evaluation technology, AECL-10713, COG-93-3, Atomic Energy of Canada Limited, 255p.

DOE, 1984, General guidelines for the preliminary screening of potential sites for a nuclear waste repository, US Code of Federal Regulations Title 10, Chapter III Department of Energy, Part 960.

Everitt, R.A., Martin, C.D., Thompson, P.M., 1994, An approach to underground characterization of a disposal vault in granite, AECL-10560, COG-94-38, Atomic Energy of Canada Limited, 1-220.

Lindell, S., Ambjörn, C., Juhlin, B., Larsson-McCann, S., Lidquist, K., 2000, Available climatological and oceanographical data for site investigation program, SKB R-99-70, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co., 1-73.

McEwen, T., Äikäs, T., 2000, The site selection process for a spent fuel repository in Finland - Summary report, Posiva Oy, POSIVA 2000-15, 1-224.

NWMO (Nuclear Waste Management Organization), 2023, Steps in the site selection process, Retrieved from https://www.nwmo.ca/Site-selection/Steps-in-the-site-selection-process.

SKB, 1992, Treatment and final disposal of nuclear waste: Programme for research, development, demonstration and other measures, RD&D-Programme 92, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co., 61-75.

SKB, 2001, Site investigations: Investigation methods and general execution programme, Technical Report TR-01-29, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co., 1-264.