

해외국가별 고준위방사성폐기물 처분 후보부지 조사를 위한 기준 분석

나태유¹ · 채병곤^{2*} · 박의섭² · 김민준³

¹한국지질자원연구원 심층처분환경연구센터 박사후연구원

²한국지질자원연구원 심층처분환경연구센터 책임연구원

³한국지질자원연구원 심층처분환경연구센터 선임연구원

Comparative Analysis of Siting Criteria of High-Level Radioactive Waste Disposal in Leading Countries

Taeyoo Na¹ · Byung-Gon Chae^{2*} · Eui-Seob Park² · Min-Jun Kim³

¹Post-Doc, Deep Subsurface Storage and Disposal Research Center, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

²Principal Researcher, Deep Subsurface Storage and Disposal Research Center, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

³Senior Researcher, Deep Subsurface Storage and Disposal Research Center, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

Abstract

Deep geological disposal of high-level radioactive waste is imperative to national safety and environmental protection and it relies on establishing siting criteria suited to the geological and social conditions of each country. This paper compares the various geological and social criteria applied by different countries in the process of securing sites for the deep geological disposal of high-level radioactive waste. The present comparative analysis considers the siting criteria established by the worlds leading countries in high-level radioactive waste disposal with the aims of establishing detailed criteria appropriate to Korea's conditions and applying the criteria to explore safe and suitable sites for deep geological disposal. The findings of this research are expected to serve as a foundation for establishing criteria for the selection of disposal sites for high-level radioactive waste in Korea and are anticipated to contribute significantly to sustainable national development and environmental protection.

Keywords: deep geological disposal, high-level radioactive waste, siting criteria, geological criteria, social criteria

초 록

고준위방사성폐기물 심층처분은 국가의 안전과 환경 보호를 위해 필수적이며, 각 나라의 지질학적, 사회적 환경에 적합한 부지선정기준의 확립은 이 과정에서 중요한 단계이다. 논문의 목적은 고준위방사성폐기물의 심층처분 부지를 확보하는 과정에서 국가별로 적용되는 다양한 지질학적 및 사회적 선정기준을 비교분석하는 것이다. 이 연구에서는 고준위방사성폐기물 처분 선도국들이 설정한 부지선정기준을 중심으로 비교분석을 수행하였으며, 각 국가별 선정기준 분석결과, 국가별 지질조건 및 환경을 반영한 선정기준을 차별적으로 설정하였음을 확인하였다. 연구의 결과는 우리나라의 고준위방사성폐기물

OPEN ACCESS

*Corresponding author: Byung-Gon Chae
E-mail: bgchae@kigam.re.kr

Received: 24 January, 2024

Revised: 11 March, 2024

Accepted: 15 March, 2024

© 2024 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.

심층처분 부지선정기준 마련에 중요한 기반 자료로 활용될 수 있을 것이며, 국가의 지속 가능한 발전과 환경 보호에 이바지하게 될 것으로 기대된다.

주요어: 심층처분, 고준위방사성폐기물, 부지선정기준, 지질학적 선정기준, 사회적 선정기준

서론

고준위방사성폐기물 심층처분을 위한 처분 부지선정을 위해서 부지선정 과정 및 조사단계에서 통합적인 부지성능 평가를 통하여 부지의 적합성을 증명해야 하며, 이를 위해서 부지선정 단계별 선정기준을 설정하고 이 기준에 근거하여 부지성능을 검증한 후 최적의 부지를 제시하여야 한다. 부지선정기준은 처분 안전성에 관련한 기준, 건설 적합성에 관련한 기준, 보안 및 사용후핵연료 운반에 관련한 기준, 사회경제에 관련한 기준, 환경에 관련한 기준 등으로 크게 구분할 수 있으며, 부지선정기준을 기반으로 단계에 따라 배제기준(exclusion criteria) 또는 비교기준(comparative criteria)의 성격에 해당하는 인자(indicator)를 대상으로 부지성능을 평가하게 된다. 이러한 기준들은 지질학적 안정성, 사회적 수용성, 환경 보호 등을 강조하는 동시에 각자의 국가적 상황에 부합하게 설정되어 적용되고 있다(USNRC, 1984; POSIVA, 2000; NUMO, 2004; SFOE, 2008; SKB, 2011; BGE, 2020).

부지선정의 대표적인 해외 사례로 스웨덴에서는 1970년대부터 부지선정 작업이 시작되어, 1992년부터 2000년 사이에 타당성 조사를 통해 8개 지역을 선정하였으며, 최종적으로 2009년에 Forsmark 지역이 심층처분장 부지로 확정되었다.

핀란드는 1983년 부지선정 프로그램이 시작되었으며, 1986년부터 1992년 동안 수행된 예비조사를 기반으로 1993년부터 상세 부지조사가 시작되어, 2001년에 올킬루오토(Olkiluoto)가 심층처분 부지로 최종 확정되었다. 처분장 건설허가는 2015년에 받았으며, 2016년에 건설 시작을 기점으로 2025년부터 최종 처분을 진행하는 것으로 계획하고 있다. 이는 고준위방사성폐기물의 심층처분과 관련하여 세계 최초로 심층처분장 건설에 착수한 사례이다.

스위스는 2008년에 부지선정 절차를 시작하여 부문별 계획(Sectoral Plan)에 따라 진행되었으며, 심층처분 부지 지역 선정, 최소 2개의 부지선정, 부지선정 및 일반 허가의 3단계로 구성되었다. 1~2 단계를 통해 총 3개의 부지로 범위를 좁혔으며, 3단계에서는 2단계 종료 시 선정된 부지에 대해 보다 정밀한 추가 지질조사를 수행하여 Nördlich Lägerm 지역을 최종 부지로 선정했다.

프랑스는 1991년 폐기물법 제정을 시작으로 자국 내 다양한 지역의 지질을 연구하여 지하연구시설 건설을 위한 총 4개의 부지를 선정하였다. 조사 결과를 바탕으로 2000년에 Meuse/Haute-Marne 지역에 지하연구시설 건설 시작을 기점으로 5년간의 실증 연구를 통해 최종 심층처분장 부지로 확정되었다. 프랑스는 2018년 건설허가 신청 이후 검토 중이며 2027년경 처분장 건설을 예정하고 있다.

우리나라는 산업통상자원부가 2021년 발표한 「고준위방사성폐기물 관리 제2차 기본계획」을 통해 국내 고준위방사성 폐기물 및 사용후핵연료 심층처분을 위한 부지선정 절차를 계획하고 있으며, 부적합지역 우선 배제, 부지 적합성 기본조사 및 심층 조사를 수행하기 위해서는 국내 상황에 적용될 수 있는 부지선정기준 마련이 필요하다. 최근 국내에서도 고준위 방사성폐기물 심층처분을 위한 부지선정과 관련하여 조사인자 및 조사기법(Choi et al., 2017; Kim et al., 2023a), 처분 관련 자료 관리 방법(Kim et al., 2023b) 및 부지선정 방식(Kim et al., 2023c) 등에 대한 해외 사례 연구들이 수행되었으나, 처분 선도국들이 설정한 부지선정 기준 및 세부 기준에 대한 종합적인 사례 분석 및 다양한 국가별 설정 기준들의 공통사항 및 환경적 특성 등의 차이점에 대한 비교분석은 다루어지지 않았다. 이에 본 연구는 해외 주요 고준위방사성폐기물 처분 선도국인 스웨덴, 핀란드, 스위스, 독일, 프랑스, 미국, 일본 등의 국가들이 도입한 지질학적 및 사회적 부지선정기준을

조사하고, 이러한 해외 사례를 중심으로 비교분석을 수행하여 우리나라 실정에 적합한 자체 부지선정기준을 도출하는 데 도움이 되고자 하였다.

해외 주요 국가별 부지선정기준

스웨덴

스웨덴은 처분장을 유치하는 것이 아닌 자국 내 지질을 조사하고 전국 단위 여러 지역의 조사 및 자료 확보를 주요 목표 중 하나로 설정하는 것으로 부지선정이 시작되었다. 스웨덴이 설정한 처분장이 갖춰야 할 기준에 따르면, 처분장은 사회 변화와 지표면에서의 장기적 기후변화 등의 직접적인 영향을 피할 수 있는 충분한 깊이에 위치해야 한다. 또한, 장기 안전성 및 안정성을 보장할 수 있는 지질학적, 수리 지질학적 및 지구화학적 특성을 가진 충분히 큰 체적의 암석이 위치한 곳이어야 한다. 임반의 수리전도도는 낮아야 하며, 처분장 깊이의 자연온도가 작업 조건을 손상시키거나 사전 조건인 최고 온도 100°C에 도달할 정도로 일정 수준을 초과하지 않아야 한다고 명시하였다. 이 외에도 지표 조사가 가능하고, 처분장 깊이는 굴착 및 방사성폐기물 적치 중 터널의 안정성을 손상시키지 않아야 한다는 기준을 도입하였다.

SKB(Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company)는 자국의 지질, 환경, 사회 및 경제적 상황을 고려하여 부지선정의 요소 및 기준을 처분장의 장기적 안전을 위한 안전(safety), 처분장의 건설, 기능 및 안전한 운영을 위한 기술(technology), 토지 사용 및 일반적 환경 영향에 중요한 토지 및 환경(land and environment) 그리고 사회적 조건 및 사회적 영향과 관련한 사회적 측면(societal aspect)의 네 가지 그룹으로 분류하였으며(SKB, 2011) 이를 정리하면 Table 1과 같다.

Table 1. Siting criteria group and factors in Sweden (SKB, 2011)

Criteria group	Factors				
Safety	Bedrock composition and structure	Future climate	Rock mechanical condition	Groundwater flow and composition	Biosphere / Site understanding
Technology	Flexibility	Technical development needs and risks	Functionality and operational aspects	Synergies	Costs
Land and Environment	Occupational safety and radiation protection	Natural environment	Cultural environment	Residential environment	Resources environment
Societal aspect	Suppliers	Human resources	Public and private services	Transport	Communication

핀란드

핀란드는 부지선정기준으로 안전한 처분시스템이 개발될 수 있어야 하며, 규제 한도 내에서 장기간 방사성핵종 유출을 방지하고 기술적으로 처분장 건설이 가능해야 한다고 설정하였다. 또한, 처분장이 건설 중 및 폐쇄 이후 모든 기간에서 환경적 및 사회적으로 광범위한 수용성을 가져야 하며, 비용이 너무 과하지 않을 것을 기본 요건으로 도입하고 이들을 충족할 수 있는 처분부지를 찾는 것을 목표로 하였다.

전체 부지선정 과정에서 지질학적 부지선정기준과 환경적 부지선정기준을 고려하였으며, 지질학적 부지선정기준은 NEA(Nuclear Energy Agency)가 제안한 국제 권장 사항을 토대로 핀란드에서 최종 처분에 중요하다고 여겨지는 지질학적 요소를 비교분석하고 부지 적합성에 영향을 미치는 요인을 선정하였다. 또한, 환경적 부지선정기준 개발을 위해 잠재

적 처분부지의 부지조사, 캡슐화 공장 및 처분장 건설, 캡슐화 공정의 운영, 처분장의 폐쇄가 환경에 미치는 영향을 고려하여 부지선정 과정에서 중요하게 고려해야 할 요소를 선정하였다(POSIVA, 2000). 핀란드의 지질학적 및 환경적 부지선정 기준을 정리하면 Table 2와 같다.

Table 2. Siting criteria group and factors in Finland (POSIVA, 2000)

Criteria group	Factors			
Geological criteria	Topography	Bedrock stability	Final disposal depth	Sorption
	Size of formation	Homogeneity	Rock type	Natural resources
	Fault and fracture	Diapiric structure	Porosity of bedrock	Erosion
Environmental criteria	Population density	Transportation	Land ownership	

스위스

스위스의 경우 하향식(top-down) 안전 기반 접근 방식의 부지선정기준을 설정하였으며, 안전 및 기술적 타당성과 관련된 기준만 적용하고 전체 부지선정 과정에서 기준은 변경하지 않았다. 전체단계에 적용한 부지선정기준은 모암 및 유효 적남대의 특성, 장기 안정성, 지질학적 정보의 신뢰성 및 기술 적합성의 네 가지 그룹으로 분류되어 있으며, 각 그룹별 세부 기준은 Table 3에 정리된 바와 같다. 스위스는 총 3단계에 걸쳐 부지선정기준을 적용하여 심층처분 부지를 선정하였으며, 1단계에서 6개의 후보부지에 대해 처분장 유형에 따른 방사성폐기물, 안전성 개념에 기반한 지질학적 방벽 요구사항 도출, 적합한 대규모 지질구조 단위(geotectonic units) 식별, 잠재적으로 적합한 모암 식별 등의 원칙을 바탕으로 화이트 맵 평가를 실시하였다(SFOE, 2008). 2단계에서는 최적 부지 주변의 각 지역 평가(지역적 균열대, 지구조적 연약대 식별, 적절한 심도 선정 등)와 안전성 기반 비교를 통해 6개의 후보부지에서 3개의 부지로 축소하였다. 최종 3단계에서는 더욱 많은 관측자료를 이용하여 분석하고 이를 기반으로 명백한 차이점을 비교함으로써 최종 후보부지를 발표하였다.

Table 3. Siting criteria group and factors in Switzerland (SFOE, 2008)

Criteria group	Factors			
Properties of the host rock and effective containment zone	Spatial extent	Hydraulic barrier effect	Geochemical conditions	Release pathways
Long-term stability	Stability of the site and rock properties	Erosion	Repository-induced influences	Conflicts of use
Reliability of geological findings	Ease of characterisation of the rock	Explorability of spatial conditions	Predictability of long-term changes	
Engineering suitability	Rock mechanical properties and conditions		Underground access and drainage	

독일

독일은 최종 심층처분 부지를 선정하기 위해 총 3단계의 부지선정 절차를 구성하였으며, 첫 번째 단계에서 부지선정법(StandAG, Site Selection Act)에 정의된 제외 기준을 적용하여 처분장으로 부적합한 지역을 우선 제외하게 된다. 이후 두 번째 단계에서 최소 요건을 충족하는 지역을 식별하기 위한 평가를 수행하였으며, 처분장과 관련된 모암 유형을 포함하는 암석층이 확인되었다. 이 단계에서 제외 기준에 해당하지 않고 모든 최소 요건을 충족되는 지역을 “확인된 지역(Identified areas)”이라 칭하며 최종 단계에서 고려할 후보부지로 선정된다. 확인된 지역은 세 번째 단계에서 StandAG에 정의된 11개

의 지구과학적 가중치 기준에 따라 평가되며 최종적으로 고준위방사성폐기물의 안전한 최종 처분을 위해 유리한 지질학적 조건이 예상될 수 있는 지역을 의미하는 “하위 지역(sub-areas)”으로 선정된다(BGE, 2020). 부지선정기준은 부지선정 절차의 모든 단계에서 반복적으로 확인되었으며, 지질학적 가중치 기준은 제한된 데이터로 인해 1단계에서 부분적으로만 적용되고, 사회경제적 가중치 기준은 주로 2단계와 3단계에서 고려되었다. 독일의 제외 기준, 최소 요구사항, 지구과학적 가중치 기준을 정리하면 Table 4와 같다.

Table 4. Siting criteria in Germany (BGE, 2020)

Siting criteria	
Identified areas	Exclusion criteria
	Large-scale vertical movements
	Active fault zones (Tectonic, atectonic fault)
	Influences from current or past mining activities (boreholes, mines)
	Seismic activity
	Volcanic activity
Minimum requirements	Groundwater age
	Hydraulic conductivity of the rock
	Thickness of the effective containment zone
	Minimum depth of the effective containment zone
	Surface of the repository
	Preservation of the barrier effect
Sub-areas	Geoscientific weighing criteria
	Transport of radioactive substances by groundwater movements in the effective containment zone
	Rock formation configuration
	Spatial characterisability
	Long-term stability of the favourable conditions
	Long-term stability of the favourable geomechanical characteristics
	Tendency to form fluid pathways
	Gas formation
	Temperature compatibility
	Retention capacity in the effective containment zone
	Hydrochemical circumstances
Protection of the effective containment zone by the overburden	

프랑스

프랑스는 규제기관인 ASN(Nuclear Safety Authority)이 1991년 폐기물법 제정 이후 설계 옵션의 선택과 지원연구에 초점을 맞추기 위하여 기본안전규칙(RFS III.2.f)을 발표하였다. 기본 안전 규칙은 잠재적 부지와 관련하여 안정성, 수리 지질, 역학적 및 열적 특성, 지구화학적 특성, 최소 심도 준수 및 지하자원의 부재의 주요 목표를 제시하였으며 먼저 안정성과 관련하여 발생할 수 있는 지질 현상(빙하, 지진, 신기지각운동)으로 인한 초기 조건의 변화가 처분시설의 안전성 측면에서 허용될 수 있는 수준이어야 한다고 설명하고 있다. 부지의 수리지질은 수리전도도가 매우 낮고 수리경사가 낮아야 하며, 처분장의 최소 심도는 천연방벽의 격리 성능이 침식(특히 빙하 후), 지진의 영향 또는 사람의 침입에 의해 크게 영향을 받지 않도록 부지를 선정하도록 하였다. 또한, 중요한 자원이 있는 것으로 알려졌거나 가능성이 있는 지역은 피하도록

설정하였다(ANDRA, 2019). 프랑스의 부지선정기준은 Table 5와 같이 요약할 수 있다.

Table 5. Siting criteria in France (ANDRA, 2019)

Siting criteria					
High level objectives	Safety objectives		Safety principles		Waste retrieval
Site characteristics	Bedrock position and conditions	Future climate	Future evolution	Stability	Groundwater flow
	Depth	Thickness of overlaying formations	Resource management	Rock mechanical conditions	Groundwater composition
Technology for execution	Design definition		Design of engineered components		
Health and environment	Occupational safety and radiation protection	Natural environment	Cultural environment	Residential environment	Resource management
Human activities	Administrative framework	Land use	Infrastructures	Socio-economic development perspectives	

미국

미국의 규제기관인 NRC(Nuclear Regulatory Commission)는 10 CFR 60.122에 부지선정 시 고려해야 할 8가지 유리한 조건과 24가지의 잠재적으로 불리한 조건을 설정하였다. DOE(Department of Energy)는 이러한 대부분의 정성적인 유리한 조건과 잠재적으로 불리한 조건을 부지선정 가이드라인 10 CFR Part 960에 포함하였다(USNRC, 1984). DOE는 또한 부지를 선정하기 위해 17개의 결격 사유를 설정했으며, 이 중 10개는 잠재적으로 수용할 수 있는 부지를 식별하는 첫 번째 단계에 사용하였다. 2단계 및 3단계의 후보지 추천 및 선정에서는 17가지 결격 사유를 모두 활용하였다. 미국 동부지역 제2 처분장 조사는 Nuclear Waste Policy Act의 1단계에 따라 진행되었으며, 잠재적으로 수용할 수 있는 부지를 식별하기 위한 첫 번째 단계는 먼저 일반적인 지역 정보를 고려하여 후보 지역을 식별하고, 유리한 지역의 정보를 활용하여 12개 유망 지역을 식별한 후 지역 정보를 고려하여 잠재적으로 수용할 수 있는 부지를 식별하는 단계로 구성되었다. 10 CFR Part 960에 명시된 미국의 부지선정기준을 요약하면 Table 6과 같다.

Table 6. Siting criteria in the USA (USNRC, 1984)

Siting criteria		
Population density and distribution	Site ownership and control	Meteorology
Offsite installation and operations	Environmental quality	Surface impacts
Rock characteristics	Hydrology	Tectonics
Socioeconomic impacts	Transportation	Geohydrology
Geochemistry	Climate changes	Erosion
Dissolution	Human interference	-

일본

일본의 방사성폐기물 심층처분 프로그램은 2000년에 발효된 ‘특정 방사성폐기물 최종 처분법(최종 처분법)’을 통해 일반 연구개발 단계에서 실행 단계로 전환되었다. 최종처분법에 규정된 처분 후보지 선정단계는 총 3단계로 구성되어 있으며, 1단계는 지질환경의 장기적 안정성 관점에서 주로 전국 및 지역별 문헌 조사를 통해 예비 조사 지역을 선정하고 2단계에서 지질환경의 특성을 평가하기 위한 표면 기반 조사를 통해 예비 조사 지역 내에서 세부 조사 지역을 선정한다. 마지막 단계에서는 선정된 세부 조사 지역에 대한 정밀조사(시험터널 굴착 및 시험터널 내 조사 포함)를 통해 처분장 건설 부지를 최종 선정하게 된다. 예비 조사 지역의 선정기준으로는 지진, 단층 활동, 화성 활동, 용기, 침식 및 기타 자연 현상의 영향과 광물 자원의 존재 여부 등이 있으며, 세부 조사 지역의 선정에는 주로 대상 지층의 활성단층, 파쇄대 및 지하수 흐름이 터널 및 기타 처분시설에 끼칠 수 있는 영향 등에 대해 기준이 설정되어 있다(NUMO, 2021). 최종 처분장 건설 부지선정은 지하시설에 대한 압력, 지층의 물리적 특성, 열화/부식, 화학적 특성, 지하수 흐름 등에 대한 기준을 명시하고 있으며, 이러한 최종처분법을 기반으로 설정된 일본의 세부적인 부지선정기준은 Table 7과 같다.

Table 7. Siting criteria in Japan (NUMO, 2021)

Siting criteria		
Volcanic activity	Active faults	Rock deformation and seismicity
Properties and condition of geological formation	Unconsolidated deposits	Mineral resources
Hydrogeological properties of rock formation	Potential for natural disaster	Land use
Transportation	Hydrochemical properties	Future climate change
Economic aspects	-	-

국가별 후보부지 조사를 위한 기준 그룹

주요 국가별 후보부지 조사를 위한 기준은 공통적으로 장기 안전성과 사회적 수용성 등을 중요한 기준으로 두고 있으며, 국가별 고유의 지질학적, 사회적, 경제적 상황에 따라 인자 그룹과 세부 기준을 설정하여 적용하고 있다. 해외 주요 국가 중 스웨덴, 핀란드, 스위스는 부지선정을 위한 기준들을 그룹화하여 명시하고 있으며 이를 정리하면 Table 8과 같다.

Table 8. Siting criteria group in Sweden, Finland and Switzerland

Country	Criteria group
Sweden	Safety-related site characteristics
	Technology
	Land and environment
	Societal aspect
Finland	Geological criteria
	Environmental criteria
Switzerland	Properties of the host rock and effective containment zone
	Long-term stability
	Reliability of geological findings
	Engineering suitability

스웨덴이 설정한 기준 그룹은 크게 안전성 관련 부지특성, 실행 기술, 건강 및 환경, 사회자원의 4개 그룹으로 나뉘며, 그룹별 인자들은 다음을 포함하고 있다.

- 1) 안전성 관련 부지특성: 기반암 조성 및 구조, 미래 기후 진화, 암석역학적 조건, 지하수 흐름, 지하수 조성, 용질 운반, 생물권 조건, 부지이해
- 2) 실행 기술: 유연성, 기술적 위험, 기술 개발의 필요성, 기능, 시너지, 비용
- 3) 부지 및 환경: 산업 안전 및 방사선 방호, 자연환경, 문화환경, 주거환경 및 건강, 천연자원 관리
- 4) 사회적 측면: 지역적 수용 가능성, 처분시설의 설립에 필요한 공급업체, 서비스, 기술, 채용 기반, 커뮤니케이션 및 기타 요소의 형태로 사용할 수 있는 자원

핀란드는 부지선정 절차 전반에 걸쳐 지질학적 기준과 환경적 기준 그룹을 적용하였으며, 다음과 같은 인자들이 고려되었다.

- 1) 지질학적 기준: 지질 요소(지형, 기반암 안정성, 최종 처분 깊이, 최종 처분부지 지층의 크기, 균질성, 압중, 단층작용 및 파쇄작용, 다이어피릭(diapiric)구조, 기반암의 다공성, 수차, 천연자원, 침식), 지하수 흐름, 천연자원
- 2) 환경적 기준: 인구밀도, 운반 여건, 토지 소유권

스위스의 부지선정을 위한 기준 그룹은 모암 및 유효 격납대 특성, 장기 안정성, 지질학적 정보의 신뢰성, 기술 적합성으로 나뉘며, 그룹별 인자는 다음과 같다.

- 1) 모암 및 유효 격납대 특성: 공간 범위, 수리적 방벽 효과, 지구화학적 조건, 유출 경로
- 2) 장기 안정성: 부지 안정성 및 암반 특성, 침식, 처분장에 의한 영향, 이용 충돌
- 3) 지질학적 정보의 신뢰성: 암반 특성화 용이성, 공간 조건의 탐색 가능성, 장기 변화 예측 가능성
- 4) 기술 적합성: 암반역학 특성 및 조건, 지하 접근 및 배수

스웨덴, 핀란드, 스위스의 기준 그룹은 국가별로 상이하나, 그룹별 고려된 인자들의 경우, 기반암 안정성, 지하수 흐름, 지하수 조성, 침식, 천연자원, 장기 기후변화, 환경요소 등 국가 간 유사하게 설정 및 고려되고 있다. 독일은 별도 평가인자 그룹을 분류하고 있지는 않으나, 부지선정 단계에 따라 제외 기준, 최소 요구조건, 지구과학적 가중 기준(geoscientific weighing criteria)을 각각 설정하여 적용하고 있다. 부지 제외 기준은 독일 전역에 제외 기준을 적용하여 적어도 하나가 충족되는 지역을 확인하고 잠재적 부지에서 제외하기 위한 목적으로 제외 기준을 세 단계의 부지선정 절차 전체에서 반복적으로 적용된다. 최소 요구조건은 부지 제외 기준을 바탕으로 확인된 잠재적 부지에 대해 최소 요구조건을 적용하여 후보 부지의 범위를 좁히기 위해 적용되며, 지구과학적 가중 기준은 처분장으로서의 적합성과 관련하여, 제외 기준 및 최소 요구조건을 적용하여 확인된 지역의 비교 평가를 가능하게 하기 위한 목적을 가진다.

프랑스, 미국, 일본 또한 부지선정을 위한 기준들을 그룹화하여 분류하지는 않았으나, 각 기준 유형들은 스웨덴, 핀란드, 스위스, 독일과 대부분 유사하게 설정 및 고려되고 있음을 확인하였다. 이들을 포함한 주요 국가들의 고려 인자들의 세부 기준에 대한 비교분석은 다음 절에서 기술하였다.

국가별 세부 기준 비교분석

해외 주요 국가들의 부지성능검증을 위한 부지선정기준 검토 결과를 바탕으로 대부분의 국가들이 고려하고 있는 인자별 세부 기준에 대해 비교하여 정리하면 다음과 같다.

기반암 특성

기반암 특성에 대한 부지선정 세부 기준을 살펴볼 때, 모든 국가들이 일반적으로 안정적인 지질구조를 중요시하고 있다. 스웨덴과 독일은 기반암의 깊이와 안정성에 중점을 두며, 미국은 기반암이 두껍고 넓게 분포하는 것을 선호한다(USNRC, 1984; AkEnd, 2002; SKB, 2011). 핀란드는 균질한 지질구조를 요구하고(POSIVA, 2000), 일본은 변성작용과 풍화작용이 적은 기반암을 중시한다(NUMO, 2021). 독일은 특히 암염층, 점토층, 결정질암과 같은 다양한 암석 유형에 따른 최소 면적과 깊이를 명확히 규정하고 있다. 스웨덴의 경우 처분장 깊이를 450~500 m로 규정하고 있는데 이는 자국의 지층 내 전도성 균열의 빈도가 400 m 심도 이하에서 급격히 감소함이 확인되었기 때문이다(SKB, 2011). 핀란드는 자국 내 적합한 크기의 충분히 균질한 암반이 존재한다고 판단하고 처분장을 약 500 m 심도에 구축할 것으로 가정하였으며, 더 깊은 심도의 처분장 건설이 요구되는 경우에도 기술적으로 가능하다고 여겼다(POSIVA, 2000). 독일은 방사성폐기물의 격리를 보장하기 위해 격리 암반 구역(isolating rock zone) 내 지하수의 유동이 적어야 한다는 관점에서 암층(rock formations)의 최소 두께가 100 m 이상이어야 한다고 설정하였다. 또한, 각 암층의 공간적 범위(spatial extension)는 안전한 처분장 건설이 가능하도록 커야 하며, 폐기물의 열 발생과 처분장의 인프라 요구사항을 고려하여 암염, 점토 및 화강암의 최소 요구 면적 기준을 설정하였다(AkEnd, 2002). 필요한 격리 암반대 상단의 깊이는 지표면의 자연 영향으로부터 처분장을 충분히 보호하기 위해 최소 300 m 이상이어야 하고, 더 깊은 곳에서의 굴착 작업 등에는 암석 온도 상승으로 인해 상당한 기술적 노력이 필요하게 되므로 1, 500 m보다 더 깊은 곳에는 처분장이 위치할 수 없다고 규정하고 있다. 미국의 경우 지질학적 다양성으로 인해 핀란드, 스웨덴과 달리 부지선정 과정에 앞서 단일 처분 개념을 선택하는 것에 어려운 점이 있으나 지표에서 발생하는 침식과정으로 인해 방사성핵종 유출이 일어날 가능성이 없는 깊이에 지하시설을 배치할 수

Table 9. Siting criteria for the characteristics of bedrock in leading countries (a: SKB, 2011; b: POSIVA, 2000; c: AkEnd, 2002; d: USNRC, 1984; e: NUMO, 2021)

Country	Detailed site selection criteria
Sweden ^a	Bedrock should be able to accommodate a disposal facility at a depth of approximately 500 m without significant issues such as stability problems or large volumes of water ingress. Preferred geological features include flat bedrock topography, low frequency of fractures, uniform composition and structure, low water flow rate and content within the rock, high mechanical strength, high bedrock exposure, and wide intervals of major deformation zones.
Finland ^b	It should have a size of approximately 5~6 km ² and be homogeneous.
Switzerland	-
Germany ^c	The thickness of the bedrock should be at least 100 m. For salt formations, it should be over 3 km ² , and for clay layers and crystalline rock, it should exceed 10 km ² . The preferred depth of the bedrock is between 500~1,500 m, with a minimum range of 300~500 m (Minimum requirements).
France	-
USA ^d	The bedrock should be thick and broadly distributed horizontally. The preferred depth of the bedrock is less than 300 m.
Japan ^e	The degree of metamorphism and weathering should be low, and there should be a wide layer at a sufficient depth to accommodate underground facilities.

있도록 규정하고 있다(USNRC, 1984). 이러한 기준들은 부지의 장기적인 지질학적 안정성과 처분시설의 구조적 무결성을 보장하는 것을 공통된 목표로 하면서도, 각 국가의 지질학적 특성과 처분 기술에 따라 차별화된 접근을 취하고 있음을 보여준다(Table 9).

활성단층

활성단층의 존재는 고준위방사성폐기물 심층처분 부지의 안전성과 직결되므로, 각 국가는 자체적인 조건에 부합하는 세심한 평가 기준을 마련하고 있음을 알 수 있다. 핀란드는 잠재적인 처분장 부지 주변의 활성단층 및 미래의 중대한 지진과의 연관성을 평가하기 위해 지진활동도(seismicity)를 고려하는 등 지질학적 위험 평가에 선형구조도(lineament maps)를 활용하는 체계적인 접근을 취하고 있다(POSIVA, 2000). 독일은 지질학적으로 활동적인 단층대가 처분시스템이나 방벽에 영향을 미칠 수 있다고 판단될 경우, 해당 단층대가 포함된 암반지역(rock areas)을 처분 후보지에서 배제하고 있다(BGE, 2020). BGE(Federal Company for Radioactive Waste Disposal)는 지난 3,400만 년 동안의 단층대를 식별하여 독일 전체에 대한 표준화된 데이터 기반을 사용하여 활성 단층대 식별을 시도하였으며, 단층대 활동 평가를 통한 제안서 평가, 최대 3,400만 년 연령의 단층대 식별 및 활동적인 대규모 구조(예를 들어, 독일의 지질학적 단층 시스템)의 경계의 세 가지 방법론적 접근 방식을 기반으로 하고 있다. 일본은 지난 수십만 년 동안 상당하고 반복적인 움직임을 보인 단층을 활성단층으로 분류하고, 이러한 단층은 향후 십만 년 동안 다시 반복적으로 운동할 가능성이 크다고 평가하여 이를 바탕으로 활성단층 활동이 명백한 지역을 배제하는 기준을 설정하였다(NUMO, 2004). 이는 지각운동이 빈번한 일본의 지질학적 특성을 반영하고 있음을 알 수 있다(Table 10).

Table 10. Siting criteria for the active fault zone in leading countries (a: POSIVA, 2000; b: BGE, 2020; c: NUMO, 2004)

Country	Detailed site selection criteria
Sweden	-
Finland ^a	Seismic activities was examined using lineament maps, aiming to establish a connection between upcoming major earthquakes and the active fault areas near possible storage locations.
Switzerland	-
Germany ^b	If the rock regions identified as potential repository zones, along with a sufficient buffer area, contain geologically active fault zone that could impact the repository system and its protective barriers, the location is not suitable for repository purposes.
France	-
USA	-
Japan ^c	Excluding areas included in damaged zones outside major fault zones, regions with clearly ongoing large folds and flexures, and areas where new deformations due to fault activity are evidently possible.

용기 및 침강

용기와 침강에 대한 국가별 부지선정 세부 기준을 비교 분석했을 때, 각 국가는 지질학적 변화에 대한 예상 및 해당 변화가 처분시설의 안전성에 미치는 영향을 평가하는 데 있어서 다양한 접근 방식을 취하고 있음을 알 수 있다. 스웨덴은 지반 용기율이 매우 높아 스웨덴 해안가 곳곳에서 해안선 변위를 고려하고 있으며, 이러한 용기 현상으로부터 처분장의 안전성을 보장하기 위해 처분장 설치 심도에 대해 기준(500 m 이하)을 설정하였다(SKB, 2000). 스위스는 북부의 기후가 지난 60만 년처럼 빙하기와 간빙기 사이를 향후 10만 년마다 계속해서 변동할 것으로 예상하였으며, 간빙기와 빙하기 사이의

전환 동안 빙하기 기후가 스위스 북부에서 발달할 것으로 예상하였다(Burga and Perret, 1998). 이러한 빙하 순환이 지질 환경, 지표 환경 및 특히 인간 활동에 영향을 미칠 것이라는 점이 명백하다는 결론을 토대로 낮은 침강률이나 상당한 깊이 의 환경을 유리한 조건으로 간주하고 있다(SFOE, 2008). 프랑스는 향후 100만 년 동안 빙하 주기와 지표 용기가 지형에 따라 수십에서 수백 m의 침식을 수반하여 30~50만 년 후에 계곡이 옥스퍼드(Oxford) 층까지 깊어지고 고원의 고도가 낮아질 것으로 예측하고(ANDRA, 2005) 이에 영향을 받지 않을 수준의 적절한 깊이에 위치할 것을 기준으로 명시하고 있다. 독일의 응력 체계는 백악기 초기에 바뀌었는데, 이는 특히 북부와 중부 독일에 구조적 영향을 미쳤다. 백악기 초기까 지 이 지역은 북독일 분지의 일부로서 주로 용기와 침강을 경험하였으며, 신생대 시작(6, 600만 년 전) 이후에는 알프스의 중앙 부분을 제외하고는 대규모의 용기 및 침강이 다시 발생하지 않았다. 이러한 지질학적 역사를 바탕으로 독일은 매우 구체적인 기준을 적용하여 100만 년 동안 연간 1 mm 이상의 대규모 지질학적 용기가 예상되는 지역을 처분부지 후보지에 서 제외하고 있다(AkEnd, 2002). 미국은 잠재적으로 파괴적인 침강 과정의 가능성을 예측할 때 제4기 동안 지질환경의 침강 속도와 패턴에 대한 기후, 구조 및 지형 증거를 고려하였으며, 처분장이 지표면으로부터 최소 200 m 아래에 위치해 야 한다는 기준(USNRC, 1984)을 통해 지질학적 변화로 인한 방사성핵종 유출을 방지하고자 하였다. 일본의 대부분 지역 은 지체구조운동(tectonic activity)의 결과로 용기 및 침강을 겪고 있으며 이는 지역마다 크기가 다르다. 일본은 수십만 년 에 걸쳐 육지 표면이 깊은 처분장 깊이까지 침식될 수 있으며, 이로 인한 처분장의 환경 내 암석 수리전도도가 증가하고 화 학적 환경이 더욱 산화됨에 따라 처분장이 일부 격리 특성을 잃기 시작할 것으로 판단하였다. 이를 바탕으로 십만 년 내에 용기가 300 m를 초과할 것으로 예상되는 지역 그리고 최근 십만 년 동안 300 m를 초과하는 침식이 확인된 지역을 배제하 고, 처분장이 일본이 고려할 수 있는 최소 깊이인 300 m보다 더 깊게 위치해야 한다고 규정(NUMO, 2004)하고 있다 (Table 11).

Table 11. Siting criteria for the uplift and erosion in leading countries (a: SKB, 2000; b: SFOE, 2008; c: AkEnd, 2002; d: ANDRA, 2005; e: USNRC, 1984; f: NUMO, 2004)

Country	Detailed site selection criteria
Sweden ^a	To ensure the safety of the repository from uplift phenomena, it must be situated at an appropriate depth, preferably below 500 m.
Finland	-
Switzerland ^b	The circumstances are advantageous, involving low erosion and/or substantial depth, when the barrier function of the host rock remains intact, or at least does not get compromised until a significantly later phase.
Germany ^c	Exclude regions where a large-scale geological uplift averaging more than 1 mm per year is anticipated over a period of 1 million years.
France ^d	To ensure that climatic erosion does not significantly impact the safety of the disposal site, it must be situated at an adequate depth, isolating the waste from humans and the biosphere.
USA ^e	Exclude regions where it is not possible for every part of the underground facility to be located at least 200 m below the ground surface, to prevent the potential for more radioactive nuclide release than what is permitted.
Japan ^f	Locations that have experienced more than 300 m of erosion in the past 100,000 years are not considered. Regions including interior mountains predicted to undergo an uplift greater than 90 meters in the upcoming 100,000 years, as well as coastal zones anticipated to face over 300 meters of erosion in the same timeframe, are excluded.

지진 활동

스웨덴, 핀란드, 독일, 미국, 일본 모두 지진 활동이 많고 지진에 의한 지질구조의 변화가 우려되는 지역은 후보부지에서 제외하고 있다. 스웨덴은 지진 활동이 낮은 지역으로서, 대부분의 지진은 남서부, 북동 해안 및 노르보텐 지역에서 관측되며 동남부는 상대적으로 비활성 지역인 특성을 갖고 있다(SKB, 2011). 핀란드의 경우 남부에 두 개의 지진대가 있으며, 이들 규모-빈도 관계는 후보 부지 주변 100 km 반경 내의 지진 활동을 대표하는데 사용되었다. 핀란드의 주요 지질학적 변화를 초래하는 지구조 운동은 약 3억년 전 중단된 것으로 보고되어 있으며, 현재의 지진 활동은 낮고 그 상태를 유지할 것으로 예상하였다(POSIVA, 2000). 스웨덴과 핀란드는 공통적으로 지진 활동 자체가 정량화하기 어렵고, 불확실성이 높다는 사실에 근거하여 구체적인 기준을 설정하지 않았다. 독일 또한 스웨덴, 핀란드와 마찬가지로 지진 활동이 비교적 낮으나 일부 지역은 유럽의 다른 지역에 비해 높은 특징이 있어, 특정 기준(DIN EN 1998-1/NA:2011-01)에 따라 지진대를 분류하고 지진 위험이 있는 지역을 제외(BGE, 2020)하는 방식을 취하고 있다(Table 12). 미국은 지진이나 화산 활동과 같은 사건으로 인해 방사성 물질이 지하수로 이동하여 공학적 처분 시설 밖으로 유출될 수 있음을 고려하여 과거 대규모 지진이나 화산 활동이 있는 지역 및 향후 발생 가능성이 있는 지역 등을 배제기준으로 삼았다(USNRC, 1984). 일본은 모든 지역이 지진의 영향을 받는 지질학적 특성으로 인해 처분장과 모든 시설은 지진 진동을 고려하여 설계되어야 함을 기준 설정 근거로 두고 있다(NUMO, 2021).

Table 12. Siting criteria for the seismic activity in leading countries (a: SKB, 2011; b: POSIVA, 2000; c: BGE, 2020; d: USNRC, 1984; e: NUMO, 2021)

Country	Detailed site selection criteria
Sweden ^a	A region with low seismic activity.
Finland ^b	Estimation of future seismic activity within a 100 km radius of the candidate areas.
Switzerland	-
Germany ^c	Exclude areas at risk of earthquakes greater than seismic zone 1, according to the earthquake zone and intensity interval classification (DIN EN 1998-1/NA:2011-01).
France	-
USA ^d	Exclude regions that have a history of large-scale seismic activity or show signs of potential earthquakes, especially those areas prone to frequent occurrences.
Japan ^e	There should be no records of significant geological structural movements due to earthquakes.

화산 활동

화산 활동에 대한 기준 적용은 독일, 미국 및 일본에서만 적용하고 있으며, 제4기 화산 활동이 존재하거나 가능성이 있는 지역을 각국의 세부 거리 기준에 따라 부지선정 지역에서 제외하고 있다(Table 13)(USNRC, 1984; AkEnd, 2002; NUMO, 2004). 독일의 경우 최근 지질역사 동안 여러 곳에서 화산 활동의 증거가 있었으며 이에 전문가 설문조사를 기반으로 화산 위험 평가가 이루어졌다. 평가에서는 백만 년이라는 예측 기간 내에 화산 활동이 발생할 확률, 추가 영역 고려, 잠재적 분화 중심점 및 직접 영향의 반경, 다른 국가의 화산재해 문제 처리 방법 등이 고려되었다(AkEnd, 2002). 일본은 향후 수만 년 동안 마그마 관입이나 화산 폭발이 발생할 가능성이 있는 위치(기존 화산 중심지와 가깝고, 계속해서 활발할 수 있는 최근 화산 활동을 보이는 지역)를 피하고자 하였으며, 마그마 관입은 화산 중심부 주변에서 제한적으로 이루어졌음을 확인하였다. 오래되고 반복적으로 분화한 화산(polygenetic volcanoes)은 마그마 활동의 가장 큰 영역을 가지나, 이것은 화산 중심을 기준으로 반경 약 15 km로 제한됨을 근거로 기준을 설정하였다(NUMO, 2004).

Table 13. Siting criteria for the volcanic activity in leading countries (a: AkEnd, 2002; b: USNRC, 1984; c: NUMO, 2004)

Country	Detailed site selection criteria
Sweden	-
Finland	-
Switzerland	-
Germany ^a	Exclude areas with Quaternary volcanic activity or regions where volcanic activity is anticipated in the next million years (include the surrounding 10 km area around the center of a volcanic explosion, and the underground affected zones that are impacted by volcanic eruptions (approximately 1 km ²)).
France	-
USA ^b	It is unfavorable in cases where there is a possibility of volcanic activity that could alter the groundwater flow system of the region.
Japan ^c	Exclude regions with areas of calderas larger than 15 km with Quaternary volcanic activity, as well as areas within a 15 km radius of a Quaternary volcano center.

지온경사

지온경사에 대한 국가별 기준은 전반적으로 낮은 지열 포텐셜(geothermal potential) 및 지온경사를 기준으로 삼고 있다(Table 14)(USNRC, 1984; SKB, 2000; AkEnd, 2002; NUMO, 2021). 독일은 지온경사 기준 도출과 관련하여 온도에 따른 암석 특성의 변화(광물학적 측면), 열역학적 응력으로 인한 지하수 흐름 경로 발생(열역학적 측면)의 두 가지 측면을 고려하였다. 암석의 온도 적합성 분석을 통해 암석의 높은 등방성 열전도율, 높은 열용량, 낮은 열팽창 계수, 높은 인장 강도 및 높은 이완 능력이 유리한 특성인 것으로 조사되었으며, 유리한 전체 지질환경이 충분히 커야 한다는 요구사항은 처분장 공간의 평균 열 생산량이 0.1 W/m³이고 처분장 공동 표면의 온도가 100°C를 초과하지 않도록 보장해야 한다고 규정하였다(AkEnd, 2002). 미국의 경우 대부분 지역의 지온경사는 15°C~35°C/km 범위에 속하며, 광범위한 열전도 추세에 따라 미국 동부는 지온경사가 평균 25°C/km로서 일반적으로 미국 서부의 평균 34°C/km보다 낮고, Atlantic Coastal Plain 지방과 Allegheny Plateau 및 Great Plains 지방의 분지와 같이 두껍고 전도성이 낮은 퇴적물이 분포하는 곳에서는 지온경사도가 높아지는 특성을 보인다(Nathenson, 1988). 일본은 평균 지온경사가 3°C/100 m이고 표면 온도가 15°C인 특성을 토대로 심성암 및 Pre-Neogene 퇴적물(처분장 깊이 1, 000 m)의 경우 45°C, Neogene 퇴적물의 경우 30°C (처분장 깊이 500 m)를 기준으로 설정하였다(NUMO, 2021).

Table 14. Siting criteria for the geothermal gradient in leading countries (a: SKB, 2000; b: AkEnd, 2002; c: USNRC, 1984; d: NUMO, 2021)

Country	Detailed site selection criteria
Sweden ^a	There are no specific demands regarding the surrounding temperatures; however, it is crucial to steer clear of regions with significant potential for geothermal energy extraction, indicated by an extremely high geothermal gradient.
Finland	-
Switzerland	-
Germany ^b	The temperature at which reactions begin in the bedrock's minerals should be at least in the range of 100~120°C, with temperatures above 120°C being preferred.
France	-
USA ^c	Exclude cases where the heat generated from radioactive waste significantly reduces the barrier effect of the bedrock, and those that have the potential to affect the storage and isolation performance.
Japan ^d	A low geothermal gradient in the bedrock, typically ranging from 3 to 5°C/100 m.

수리전도도 및 수리경사

암반의 수리전도도에 대한 세부 수치적 기준은 국가별로 조금씩 상이하나 방사성핵종의 느린 이동, 공학적 방벽의 기능 및 보호 등 방사성폐기물의 안전한 격리를 보장하기 위한 목적으로 모두 암반의 낮은 수리전도도 및 수리경사를 부지선정의 유리한 조건으로 간주하고 있다(Table 15)(USNRC, 1984; POSIVA, 2000; SKB, 2000; Nagra, 2008; ANDRA, 2019; BGE, 2020; NUMO, 2021). 스웨덴은 광범위한 수리지질학적 분석을 통해 완충재/암석 변이(buffer/rock transition)의 지연에 대한 성능을 유지하기 위해서 처분공 규모에서 수리전도도가 10^{-8} m/s를 초과하는 지역은 피하는 것이 바람직하다고 결론 지었다(SKB, 2000). 핀란드의 경우 지형이 대체로 낮은 구릉 지형으로 낮은 지형경사를 갖는 것이 특징인데, 이러한 지형적 특징은 잠재적 처분장 깊이에서 수리경사의 크기에 미미한 영향을 미치는 것으로 간주되었다(POSIVA, 2000). 독일은 부지의 수리전도도가 매우 낮은 암종의 경우 처음부터 낮은 지하수 유동을 가정할 수 있다고 전제하고, 한 지역의 수리전도도가 10^{-10} m/s 이상인 암종이 주로 있는 경우 필요한 낮은 지하수 유동을 기대할 수 없다고 판단하였다. 따라서 지하수 흐름을 제한하기 위한 지질학적으로 유리한 상황은 낮은 현장 수리전도도로 인해 제한된 지하수 이동만 허용하는 암석을 주로 포함해야 한다는 점을 기준으로 격리 암반대의 현장 수리전도도는 10^{-10} m/s를 초과해서는 안 된다고 규정하고 있다(BGE, 2020).

Table 15. Siting criteria for the hydraulic conductivity and hydraulic gradient in leading countries (a: SKB, 2000; b: POSIVA, 2000; c: Nagra, 2008; d: BGE, 2020; e: ANDRA, 2019; f: USNRC, 1984; g: NUMO, 2021)

Country	Detailed site selection criteria
Sweden ^a	The bedrock should have a low hydraulic conductivity (around 10^{-8} m/s)
Finland ^b	Groundwater flow in the near-field region must be sufficiently slow, having both a low hydraulic gradient and low hydraulic conductivity.
Switzerland ^c	A value of $10^{-12} \leq K_v \leq 10^{-11}$ m/s is suitable, $K_v \leq 10^{-12}$ m/s is very suitable (Requirements).
Germany ^d	In the effective containment zone, the hydraulic conductivity of the bedrock should be less than 10^{-10} m/s (Minimum requirements).
France ^e	A low hydraulic conductivity and hydraulic gradient in the bedrock are preferred.
USA ^f	Areas with low hydraulic conductivity are preferred.
Japan ^g	Groundwater flow should be low, and the flow velocity needs to be slow.

수소이온농도(pH)

해외 주요 국가들의 수소이온농도(pH) 기준을 분석해보면, 대부분의 국가가 중성에 가까운 pH 범위를 선호한다는 공통점이 있다. 스웨덴(SKB, 2000), 스위스(Nagra, 2008), 독일(AkEnd, 2002), 일본(NUMO, 2021) 모두 pH 6 이상 10 이하의 범위를 적합하게 여기는데, 이는 중성에서 약알칼리성에 이르는 범위이며 지하수의 pH가 주로 처분용기 부식, 흡착, 방사성핵종의 용해도에 영향을 미친다는 점을 고려한 것이다. 이 중, 핀란드는 거의 중성에 가까운 pH를 요구하며(POSIVA, 2000), 일본은 약간 더 좁은 범위인 pH 6.3에서 8.4 사이를 규정하고 있다(Table 16). 이와 관련하여 스웨덴과 핀란드의 경우 안정된 화강암을 방사성폐기물 처분 암종으로 선정하였는데 이는 결정질 암석이 중성에서 약산성의 pH에서 안정성을 유지하는 경향이 있기 때문이다.

Table 16. Siting criteria for the pH in leading countries (a: SKB, 2000; b: POSIVA, 2000; c: Nagra, 2008; d: AkEnd, 2002; e: NUMO, 2021)

Country	Detailed site selection criteria
Sweden ^a	At depths less than 100 m, the pH should range between 6 and 10.
Finland ^b	A pH concentration close to neutral is required.
Switzerland ^c	A pH range of 6~7 is suitable, a pH range of 7~9 is very suitable (Requirements).
Germany ^d	A pH range of 7~8
France	-
USA	-
Japan ^e	6.3 < pH < 8.4

산화환원전위(Eh)

산화환원전위(Eh)에 대한 기준을 살펴보면, 대체로 환원 조건이나 혐기성 환경을 선호하는 경향이 있는 것으로 나타난다(Table 17). 스웨덴(SKB, 2000), 핀란드(POSIVA, 2000), 스위스(Nagra, 2008), 독일(AkEnd, 2002)은 처분장의 깊이에서 Eh 음수 값을 지니거나 특정 광물의 완충작용에 의해 유도되는 환원 조건을 적합하다고 여기고 있다. 일본은 더 구체적으로 Eh 범위를 -170 mV에서 -300 mV로 규정하여 강한 환원 조건을 요구하고 있다(NUMO, 2021).

Table 17. Siting criteria for the Eh in leading countries (a: SKB, 2000; b: POSIVA, 2000; c: Nagra, 2008; d: AkEnd, 2002; e: USNRC, 1984; f: NUMO, 2021)

Country	Detailed site selection criteria
Sweden ^a	At least one of the following criteria must be met: a negative Eh value at the disposal site depth, Fe ²⁺ : 5 µg/L to 10 mg/L, and a sulfide concentration between 0.01 and 5 mg/L.
Finland ^b	Eh < 0 mV
Switzerland ^c	Reducing conditions, resulting from the buffering action of minerals (such as pyrite and siderite) are deemed suitable (Requirements).
Germany ^d	Reducing conditions or the presence of an anaerobic environment are preferred.
France	-
USA ^e	Exclude areas where the groundwater conditions of the bedrock are chemically oxidative.
Japan ^f	Eh: -170 to -300 mV

미래 기후변화, 천연자원 및 인구밀도

미래 기후변화에 대비해 처분장의 장기적 안전성을 확보하려는 공통된 목표를 확인할 수 있으며, 스웨덴, 핀란드, 프랑스, 미국, 일본은 기후변화가 수리학적 조건, 지하수의 화학적 성질, 침식 현상 등에 미치는 영향을 최소화하는 위치를 처분장 부지로 선정할 것을 중시한다(Table 18)(USNRC, 1984; POSIVA, 2000; NUMO, 2004; ASN, 2008; SKB, 2011).

천연자원에 있어서는 부지선정 지역 내의 경제적 가치가 있는 자원의 존재가 부지선정에 부정적인 요소로 작용하며, 스웨덴, 핀란드, 스위스, 프랑스, 미국, 일본 모두 이를 회피하는 경향을 보인다(Table 19)(USNRC, 1984; POSIVA, 2000; ASN, 2008; SFOE, 2008; SKB, 2011; NUMO, 2021).

Table 18. Siting criteria for the future climate change in leading countries (a: SKB, 2011; b: POSIVA, 2000; c: ASN, 2008; d: USNRC, 1984; e: NUMO, 2004)

Country	Detailed site selection criteria
Sweden ^a	The disposal site should be situated at a sufficient depth to avoid the direct impact of long-term climate changes at the surface.
Finland ^b	The disposal site should be avoid significant changes in hydrological conditions and the chemical properties of groundwater, which can be caused by fluctuations in surface environmental conditions and climate.
Switzerland	-
Germany	-
France ^c	The disposal site must ensure the isolation of radioactive waste from humans and the biosphere, maintaining its safety against significant impacts from erosion phenomena associated with climate change.
USA ^d	The site should be located in an area where future climate conditions do not lead to a higher likelihood of radioactive nuclide release than what is deemed acceptable.
Japan ^e	Locations that are less likely to be adversely affected by major changes in climate over the next hundred thousand years or so are preferred.

Table 19. Siting criteria for the natural resources in leading countries (a: SKB, 2011; b: POSIVA, 2000; c: SFOE, 2008; d: ASN, 2008; e: USNRC, 1984; f: NUMO, 2021)

Country	Detailed site selection criteria
Sweden ^a	The disposal site should be situated at a safe distance from natural resources that are currently being utilized or could potentially be used in the future.
Finland ^b	Exclude areas containing economically valuable minerals and geological features such as faults and shear zones.
Switzerland ^c	It is advantageous if there are no significant natural resource deposits within the site selection area that could substantially reduce the barrier effect of the bedrock.
Germany	-
France ^d	There should be no natural resources of interest existing at or near the surface of the proposed site.
USA ^e	It is advantageous if there are no natural resources that could be economically usable or valuable in the future.
Japan ^f	Exclude areas containing economically useful mineral resources.

인구밀도 기준에서는 스웨덴, 핀란드, 스위스, 독일, 미국, 일본이 모두 인구밀도가 낮은 지역을 유리한 부지선정 지역으로 간주하고 있음을 알 수 있다(Table 20)(USNRC, 1984; POSIVA, 2000; SKB, 2000; AkEnd, 2002; NUMO, 2004; Nagra, 2008).

Table 20. Siting criteria for the population density in leading countries (a: SKB, 2000; b: POSIVA, 2000; c: Nagra, 2008; d: AkEnd, 2002; e: USNRC, 1984; f: NUMO, 2004)

Country	Detailed site selection criteria
Sweden ^a	Areas with a low population density surrounding the site are preferable.
Finland ^b	Regions with no residential or cultivated areas, as well as cities or densely populated districts are advantageous.
Switzerland ^c	Areas with a low population density surrounding the site are preferable.
Germany ^d	Areas with a low population density surrounding the site are preferable.
France	-
USA ^e	Areas with a low population density surrounding the site are preferable.
Japan ^f	Areas with a low population density surrounding the site are preferable.

운반 및 비용

해외 주요 국가들의 운반 및 비용에 관한 세부 기준을 분석한 결과, 운반 측면에서는 대부분의 국가들이 용이한 접근성을 중요한 기준으로 정하고 있음을 알 수 있다. 스웨덴과 미국은 철도나 도로를 통한 접근성을 강조하며, 핀란드는 철도에 인접한 위치를 유리하게 보고, 일본은 해안선의 근접성을 고려하고 있다(Table 21). 스웨덴은 모든 원자력발전소와 방사성폐기물 관련 시설이 해안을 따라 위치해 있기 때문에 사용후핵연료 및 기타 방사성폐기물의 선적은 해상을 통해 운반된다는 특징이 있으며 운반 시스템으로는 선박인 MS Sigrid, 다수의 운송 컨테이너/캐스크(cask), 적재 및 하역용 특수 차량으로 구성되어 있다(SKB, 2011). 핀란드의 경우 도로를 통한 운반에 대한 일부 제한을 설정하기 위해 철도 운송이 합리적인 대안인 경우 위험 물질의 도로 운반은 일반적으로 권장하지 않는다는 원칙을 세웠으며, 부지선정 프로그램 당시 이용 가능한 정보에 따르면 철도 운송이 가장 경제적인 선택이라고 결론지었다(POSIVA, 2000). 미국은 기존 또는 필요한 접근 경로나 개선 사항을 평가하기 위해 부지 부근의 교통 시설과 관련하여 운송 네트워크의 적절성, 전체 비용과 비상대응 요구사항 및 기능 분석, 날씨 영향 등을 고려하였다(USNRC, 1984). 미국에서는 일반적으로 사용후핵연료를 트럭이나 철도를 통해 운송하였으며, DOE는 철도 운반의 장점을 내세우고, 네바다 철도 노선을 구축하고 복합 운송 서비스를 확대하여 트럭 운송의 필요성을 줄이는 방법도 검토한 바 있다. 일본은 해상 및 육상(도로 및 철도) 모두 장거리 운반 시스템이 잘 확립되어 있으나, 선택 사항인 경우 대중에 대한 노출 위험은 해상 운반의 경우가 가장 낮으며 이는 더 많은 양의 폐기물에 대해 최대 유연성을 제공한다는 결론을 근거로 해안 지역을 선호하며 처분장 인근 항구까지의 해상 운반은 육상에서의 지역적 운반만 뒤따르는 방식을 가정하고 있다(NUMO, 2021).

Table 21. Siting criteria for the transportation in leading countries (a: SKB, 2011; b: POSIVA, 2000; c: USNRC, 1984; d: NUMO, 2021)

Country	Detailed site selection criteria
Sweden ^a	The site must be accessible for the regular transportation of 100 t radioactive waste primarily via ships or railways. It should be situated in close to railways, roads, and ports.
Finland ^b	Being within 10 km of a railway or within 10~30 km is preferred.
Switzerland	-
Germany	-
France	-
USA ^c	The site should be situated in a way that allows for the construction of access roads from existing local roads and railways.
Japan ^d	Relatively short distance from the coastline (including submarine areas and islands): approximately within 20 km of the coastline.

비용 측면에서는 스웨덴, 핀란드, 미국, 일본 모두 처분장의 설립과 운영, 폐쇄와 관련된 비용을 중요하게 고려하며, 특히 핀란드와 미국은 비용이 합리적이어야 함을 강조한다(USNRC, 1984; POSIVA, 2000; SKB, 2011; NUMO, 2021). 스위스는 비용 발생에 대한 예산 준비를 중요시하며, 폐기물 생산자의 비용 부담 원칙을 명확히 하고 있다(Table 22)(SFOE, 2008). 이러한 기준들은 효율적인 운반 운영과 비용 관리의 중요성을 공통적으로 인식하고 있음을 보여주며, 각 국가의 사회경제적 환경과 정책에 따라 구체적인 기준이 설정되고 있다.

Table 22. Siting criteria for the costs in leading countries (a: SKB, 2011; b: POSIVA, 2000; c: SFOE, 2008; d: USNRC, 1984; e: NUMO, 2021)

Country	Detailed site selection criteria
Sweden ^a	Calculate the costs associated with executing the entire final disposal facility project, including construction, operation and winding-up.
Finland ^b	The disposal facility cost should not be excessively high. The construction and operation expenses of the disposal facility vary depending on the chosen location, taking into account factors such as the distance for transporting spent nuclear fuel.
Switzerland ^c	Prepares the budget for arising costs and charges this to the waste producers
Germany	-
France	-
USA ^d	Repository siting, construction, operation, and closure shall be demonstrated to be technically feasible on the basis of reasonably available technology, and the associated costs shall be demonstrated to be reasonable relative to other available and comparable siting options.
Japan ^e	Consideration should be given to the cost-effectiveness of repository construction, operation, and closure.

결론

해외 주요 국가들의 고준위방사성폐기물 처분 부지선정기준을 비교 분석한 결과는 우리나라의 부지선정기준 마련에 많은 시사점을 제공한다. 각국은 공통적으로 장기 안전성과 사회적 수용성을 중요시하며, 세부적으로는 지질학적 안정성, 지하수 흐름, 환경요소 등을 부지 적합성 평가 인자로 적용하고 있으며, 이러한 평가 인자들은 국가별 지질학적, 사회적, 경제적 상황에 따라 차별적으로 적용되고 있다. 스웨덴, 핀란드, 스위스와 같은 국가들은 평가 인자를 그룹화하여 명시하고 있으며, 독일은 제외 기준, 최소 요건, 지구과학적 가중 기준 등을 적용하였다. 프랑스, 미국, 일본은 각각의 기준 유형들을 유사하게 설정하지만 그룹화하지는 않았으며, 전반적으로 기반암 안정성, 지하수 흐름, 지하수 조성, 침식, 천연자원, 장기 기후변화, 환경요소 등이 국가 간 유사하게 설정되고 고려되는 공통적인 부지선정기준들로 나타났다.

본 연구에서 수행한 해외 주요 국가들의 세부 부지선정기준의 비교분석을 통해, 각국이 고준위방사성폐기물 심층처분 부지를 선정함에 있어 중요시하는 다양한 기준들의 특징과 차이점을 확인하였으며, 이러한 분석은 기반암 특성, 활성단층대의 존재, 용기와 침강, 지진 및 화산 활동, 지온경사와 수리전도도, 수소이온농도(pH) 및 산화환원전위(Eh), 미래 기후 변화 및 천연자원 그리고 운반 및 비용 등 여러 측면을 포괄한다. 각 국가별로 다루는 세부 기준들은 그 나라의 지질학적, 환경적, 사회경제적 특성을 반영하는 동시에 방사성폐기물 처분장의 장기적 안전성 확보에 기여하는 중요한 요소로 작용한다. 특히, 기반암의 깊이와 안정성, 활성단층대의 평가 방법, 용기와 침강에 대한 반응, 지진 활동의 예측 및 대응 방안은 국가별로 상이하게 접근되고 있으며, 이는 해당 국가의 지리적 및 지질학적 특성과 밀접한 관련이 있다. 또한, 수소이온농도와 산화환원전위에 대한 구체적인 기준도 국가마다 다르게 설정되어 있어, 각국의 환경 조건과 기술적 능력을 반영한다. 이러한 다양한 기준들을 통해 각 국가는 방사성폐기물의 안전한 격리와 환경 보호를 위해 맞춤형 접근 방식을 취하고 있음을 알 수 있다.

우리나라의 경우, 이러한 해외 사례를 참고하고 부지선정기준을 개발함에 있어 각 기준의 적용 가능성과 타당성을 심도 있게 고려할 필요가 있으며 특히, 지질학적 조건 및 사회경제적 요소와의 균형을 고려한 국내 고유의 평가 기준 설정이 중요할 것이다. 향후 해외 선도국가별 특성을 반영한 부지선정기준 설정 근거를 중심으로 더욱 심도 있는 분석을 수행할 계획이며, 이를 기반으로 국내 환경에 적합한 기준 및 고려되어야 할 영향 인자들에 대해 제안하고자 한다.

사사

이 논문은 2024년도 정부(원자력안전위원회)의 재원으로 사용후핵연료관리핵심기술개발사업단 및 한국원자력안전재단의 지원을 받아 수행된 연구사업임(RS-2021-KN066110).

References

- AkEnd, 2002, Site selection procedure for repository sites, Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte, Germany, 260p.
- ANDRA, 2005, Dossier 2005 Argile, Evaluation of the feasibility of a geological repository in an argillaceous formation, Meuse/Haute-Marne site, France, 241p.
- ANDRA, 2019, Synthesis of 20 Years Research, Development and Demonstration in Andra's Underground Research Laboratory in Bure for Cigéo Project-France, Andra Technical Document ID: DRPAS3, France, 104p.
- ASN, 2008, Safety guide relating to the final disposal of radioactive waste in deep geological formations, France, 32p (in French).
- BGE, 2020, Sub-areas Interim Report pursuant to Section 13 StandAG, Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH, Peine, Germany, 437p.
- Burga, C.A., Perret, R., 1998, Vegetation und Klima der Schweiz seit dem jüngeren Eiszeitalter, Ott Verlag, Thun, Switzerland, 805p (in German).
- Choi, J.H., Chae, B.G., Kihm, Y.H., Park, E.S., Hyun, S.P., Kim, H.C., Nahm, W.H., Jeon, J.S., Suk, H.J., 2017, Suggestion of site investigation method for HLW disposal facility, Journal of the Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineers, 54(4), 303-318 (in Korean with English abstract).
- Kim, H.G., Yoo, S.W., Bae, D.S., Jung, S.H., Kim, K.S., Kim, J.K., Han, M.H., Choi, J.H., 2023a, Case studies of site investigation factors and methods for site selection for high-level radioactive waste disposal, The Journal of Engineering Geology, 33(4), 611-626 (in Korean with English abstract).
- Kim, H.R., Kim, M.J., Park, S.J., Yoon, W.S., Park, J.H., Lee, J.H., 2023c, Site selection methods for high-level radioactive waste disposal facilities: An international comparison, The Journal of Engineering Geology, 33(2), 335-353 (in Korean with English abstract).
- Kim, M.J., Park, S.J., Kim, H.R., Yoon, W.S., Park, J.H., Lee, J.W., 2023b, Analysis of overseas data management systems for high level radioactive waste disposal, The Journal of Engineering Geology, 33(2), 323-334 (in Korean with English abstract).
- Nagra, 2008, Proposal of geological siting areas for the L-ILW and HLW storage facility - Description of the requirements, the procedure and the results, NTB 08-03, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, 458p (in German).
- Nathenson, M., 1988, Geothermal gradients in the conterminous United States, Journal of Geophysical Research, 93(B6), 6437-6450.
- NUMO, 2004, Evaluating site suitability for a HLW repository-Scientific background and practical application of NUMO's siting factors, NUMO-TR-04-04, Nuclear Waste Management Organization of Japan, Japan, 83p.
- NUMO, 2021, The NUMO pre-siting SDM-based safety case, NUMO-TR-21-01, Nuclear Waste Management Organization of Japan, Japan, 709p.
- POSIVA, 2000, The site selection process for a spent fuel repository in Finland - Summary report, POSIVA-2000-15, Posiva Oy, 224p.
- SFOE, 2008, Sectoral plan for deep geological repositories-conceptual part, Swiss Federal Office of Energy SFOE, Bern,

84p.

SKB, 2000, What requirements does the KBS-3 repository make on the host rock? Geoscientific suitability indicators and criteria for siting and site evaluation, SKB TR-00-12, Svensk Karnbranslehantering AB, 143p.

SKB, 2011, Site selection - siting of the final repository for spent nuclear fuel, SKB R-11-07, Svensk Karnbranslehantering AB, 106p.

USNRC, 1984, 10 CFR Part 960, Retrieved from <https://www.ecfr.gov/current/title-10/part-960>.