

고준위방사성폐기물 심층처분을 위한 해외국가의 부지개발체계 사례 분석

나태유 · 채병곤[‡] · 박익섭

한국지질자원연구원 국토우주지질연구본부 심층처분환경연구센터

A case study of site selection processes for high level radioactive waste (HLW) deep geological disposal in foreign countries

Tae-Yoo Na · Byung-Gon Chae[‡] · Eui-Seob Park

*Deep Subsurface Storage and Disposal Research Center, Geology & Space Division,
Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon 34132, Republic of Korea*

요 약

고준위방사성폐기물 심층 처분시설을 건설하기 위한 처분 부지확보를 위해서는 이와 관련된 법적 체제 내에 명시된 요구사항 및 기준에 따라 적합한 단계별 부지개발체계 정립이 선행되어야 한다. 본 논문에서는 국제원자력기구(IAEA)가 제안한 부지개발체계 및 해외 고준위 방사성폐기물 처분 선도국인 스웨덴, 핀란드, 스위스, 프랑스, 독일, 일본의 부지선정을 위한 법적 체제와 단계별 부지개발체계 사례를 분석하였다. 또한, 분석 결과를 토대로 국가별 법적 기준과 부지선정 절차의 특징 및 차이를 살펴보았다. 해외사례를 살펴본 결과 각국은 자국의 상황에 따른 법안과 지질환경 및 조건에 적합한 방법 및 기술을 개발하여 적용하였으며, 최종 고준위방사성폐기물 처분 부지선정에 성공한 스웨덴, 핀란드, 스위스, 프랑스의 사례에서 지역사회 및 주민과의 소통, 절차의 투명성을 통해 처분 안전성에 대한 충분한 이해를 확보하여 주민 수용성의 문제를 해결하는 것이 최종 부지선정에 매우 중요한 요건임을 확인하였다. 해외 선도국들의 처분 부지선정 사례 비교분석 결과는 향후 우리나라의 실정이나 조건에 최적화된 부지개발체계를 정립하는데 유용한 자료와 정보를 제공할 것으로 기대된다.

주요어: 고준위방사성폐기물, 심층 처분, 법적 체제, 부지선정 절차, 부지개발체계

ABSTRACT: To secure a site for constructing deep geological disposal facilities for High Level Radioactive Waste (HLW), it is important to first establish a phased site development process that aligns with the requirements and criteria outlined in the relevant legal framework. This paper reviews the site development process proposed by the International Atomic Energy Agency (IAEA) and analyzes the legal structures and phased site development procedures in leading nations for HLW disposal: Sweden, Finland, Switzerland, France, Germany, and Japan. Furthermore, based on the analysis, the distinct legal standards and site selection processes for each country have been examined. Upon reviewing international case studies, it is evident that each nation has developed and implemented laws, methods, and technologies tailored to their specific circumstances, geological conditions, and requirements. The successful cases of Sweden, Finland, Switzerland, and France emphasize the critical importance of effective communication with local communities and residents. Transparency in the process ensures a comprehensive understanding of disposal safety, addressing the challenges of community acceptance in the final site selection. Insights from comparing the site selection cases in these leading countries are anticipated to provide invaluable data and information for devising an optimized site development system tailored to Korea's conditions and realities.

Key words: high level radioactive waste, deep geological disposal, legal framework, site selection processes, site development system

[‡]Corresponding author: +82-42-868-3052, E-mail: bgchae@kigam.re.kr

1. 서론

방사성폐기물 심층 처분은 장기간에 걸쳐 상당한 방사능 위험을 내포하고 있는 방사성폐기물을 안정된 지질 구조의 지하 심부에 처분시설을 구축하여 장기간 폐기물을 격납하고 생물권으로부터 안전하게 격리하는 것을 의미하며 현재 가장 안전한 처분 방법으로 평가되고 있다.

2016년 7월 우리나라 정부는 「고준위방사성폐기물 관리 기본계획」을 최초 발표하고, 에너지전환 및 사용후핵연료 정책의 재검토 추진 등 변화된 정책 마련의 필요에 따라 2021년 12월에 「고준위방사성폐기물 관리 제2차 기본계획」을 발표하며, 향후 국내 고준위방사성폐기물과 사용후핵연료의 효율적인 관리를 위한 정책 및 계획을 수립하였다.

2차 기본계획에 따르면, 우리나라는 향후 13년간 조사계획 수립 및 부적합지역 우선 배제, 부지공모 및 주민의견 확인, 부지적합성 기본조사 실시, 부지적합성 심층조사 실시, 주민의사 최종 확인 및 부지확정의 부지선정 절차를 계획하고 있다.

처분부지 선정은 고준위방사성폐기물 및 사용후핵연료의 심층 처분을 위한 근본이 되는 매우 중요한 활동이며, 이는 궁극적으로 심층처분시스템의 최우선 목표인 장기 안전성을 확보하는데 있어 핵심적인 단계라 할 수 있다. 처분부지 선정을 위해서는 이와 관련된 법적 체제 내에 명시된 요구사항 및 기준

에 따라 적합한 단계별 부지개발체계 정립이 선행되어야 한다.

이에 따라 본 논문에서는 국제원자력기구(International Atomic Energy Agency, IAEA)의 고준위방사성폐기물 심층 처분을 위한 부지개발체계 지침을 바탕으로 스웨덴, 핀란드, 스위스, 프랑스, 독일, 일본 등 해외 처분 선도국들의 처분 부지선정을 위한 세부 규정 및 기준과 단계별 기술적 평가요소에 대해 조사하고 국가별 차별성과 차이점을 비교, 분석하였다. 이를 통해, 국내 처분부지 확보를 위해 우리나라 고유 여건 및 지질환경 특성에 적합한 법적 체제를 구축하고 이를 기반으로 객관적이고 투명한 부지개발체계를 마련하는데 기여하고자 하였다.

2. 국제원자력기구(IAEA) 부지개발체계 지침

국제원자력기구(IAEA)는 방사성폐기물 지층처분시설을 위한 안전기준 지침서 SSG-14 (IAEA, 2011)에서 처분시설 설립을 위한 부지선정 시 고려해야 할 1) 개념 및 계획 단계, 2) 지역조사 단계, 3) 부지조사 단계, 4) 구체적 부지 특성화 단계의 총 4단계의 절차를 제안하고 있다(그림 1). 또한, 지층처분시설 부지선정에 있어 모든 과정에서 인구통계학적 조건 및 토지 이용 현황 등의 사회정치적 요소를 특히 고려해야 하며 광역 조사, 부적합 부지 제외, 부지의 선별 및 비교분석을 하고, 가능한 많은 잠재적 부지

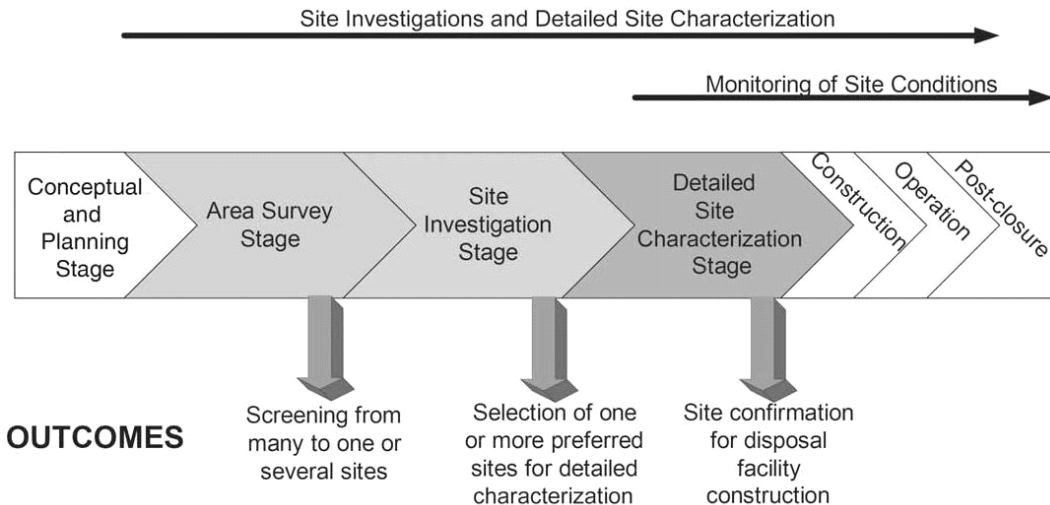


Fig. 1. Procedure for site selection in radioactive waste disposal (IAEA, 2011).

중 지질학적 환경과 다른 요인들을 고려하여 하나 이상의 후보부지가 고려되어야 한다고 명시하고 있다. 이에 따른 IAEA가 제안한 단계별 세부 지침 및 기준 그리고 고려되어야 하는 정보를 정리하면 다음과 같다.

개념설계 및 계획 단계는 부지선정 과정을 위해 전반적인 계획을 개발하고 지역조사 단계의 기초 자료로 사용될 수 있는 암석의 종류 및 지질형성 등의 사용 가능한 데이터를 확인하기 위한 과정으로, 이 단계의 초기에 부지선정 과정의 기본 원칙이 설립된다. 또한, 처분시설에 배치될 방사성폐기물의 유형과 양의 지정 및 특성화, 정량화를 통해 일반 설계 개념을 개발하고, 부지의 잠재적 적합성에 관한 판단을 뒷받침하기 위한 지구과학적 기준으로부터 적합한 지역과 모암의 선정을 위한 선별 지침이 수립된다.

지역조사 단계는 개념 및 설계 단계에서의 부지선정 요소를 고려하여 지역을 조사하고, 처분장 건설에 적합한 잠재적 지역을 조사하고 확인하는 것을 목적으로 한다. 지역조사 단계는 잠재적으로 적합한 부지가 있는 지역을 확인하기 위한 지역 지표조사 또는 조사단계와 더 구체적인 평가를 위해 하나 이상의 잠재적 부지를 선정하기 위한 심사의 단계를 포함하고 있다.

부지조사 단계에서는 안전 관점에서 수용 가능성

을 결정하기 위해, 지역조사 단계에서 확인된 잠재적 부지에 대한 자세한 연구가 요구된다고 명시하고 있다. 예정된 위치와 관련하여 부지 특성정보를 얻기 위해 더 구체적인 연구가 필요하며, 이는 부지의 실제 지질학적, 수리지질학적 및 환경적 조건을 현장답사와 조사를 통해 확인된다. 또한, 교통 접근성, 인구 통계 및 사회적 고려사항과 같은 부지 설명이나 부지에 대한 광범위한 이해와 관련된 자료가 요구된다. 예비 안전성 평가는 처분시설의 적합성 여부를 판단하기 위해 상대적으로 초기 단계에서 수행될 것을 권장하고 있으며, 이 평가에는 부지조사 결과와 의사결정 과정에 대한 설명이 포함된다.

상세 부지 특성화 단계에서는 구체적인 처분설계의 기술적 뒷받침을 위해 지구과학적 요소들의 정보를 포함하고, 처분시설 설계와 관련된 유입특성(inflow characteristics)들에 영향을 미치는 암반의 부피, 부지 특성, 부지 조건, 관리체계 등의 요소들에 대한 이해가 제공되어야 한다고 제안하고 있다.

IAEA가 처분 안전성 평가, 처분시설 설계 연구, 환경 영향 평가 및 처분 옵션에 대한 추가 신뢰를 제공하기 위해 제안한 부지조사 및 특성화 단계에서 요구되는 지질환경, 미래 자연 변화, 수리지질, 지구화학, 인간의 활동에 의한 영향, 건설 및 공학적 조건, 환경보호, 토지이용, 폐기물 운반 및 사회적 영향 요소에 대한 정보 및 자료를 정리하면 그림 2와 같다.

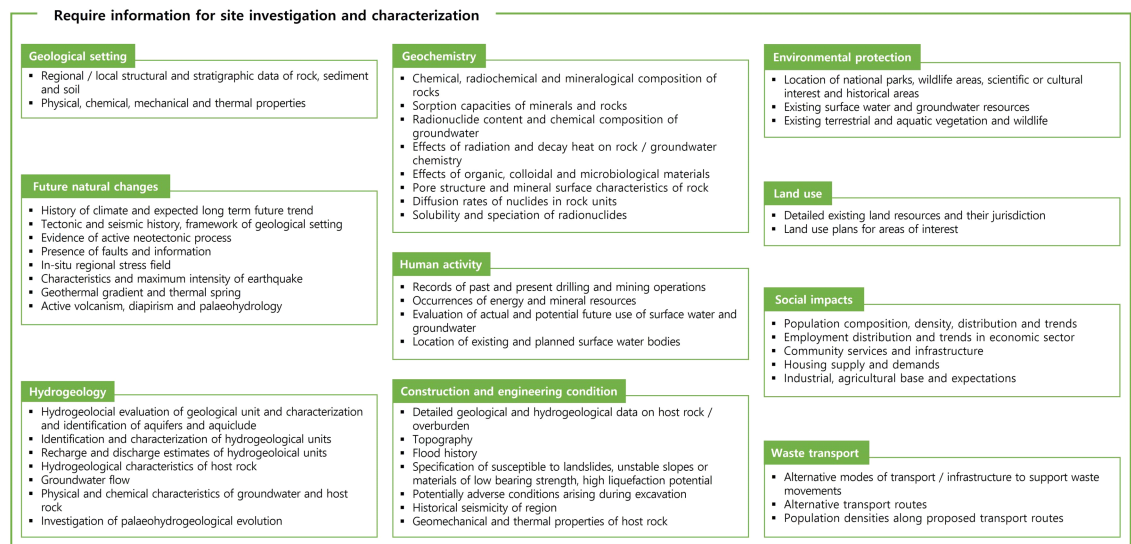


Fig. 2. Information required for site investigation and characterization (IAEA, 2011).

3. 해외 부지선정 관련 법적 체제

해외 각국은 고준위방사성폐기물 처분을 위한 관련 법률을 제정하고 부지선정에 관한 법적 기준 및 요구사항을 명시하였으며, 이를 바탕으로 각국의 상황 및 지질환경에 가장 잘 준하는 효율적이고 체계적인 부지선정 절차를 정립하였다. 본 절에서는 처분사업 선도국가인 스웨덴, 핀란드, 스위스, 프랑스, 독일, 일본의 국가별 고준위방사성폐기물 처분을 위한 법적 체제 정립 사례를 분석하였다.

3.1 스웨덴

스웨덴은 크게 원자력법, 방사선방호법 및 환경 규정 내에서 직간접적으로 처분 부지선정에 대한 사항을 명시하고 있다. 원자력법 자체에서는 처분장에 대한 특정 조항을 포함하고 있지는 않으나, 스웨덴 방사선안전청(The Swedish Radiation Safety Authority, SSM)이 법률에 의거하여 처분장 부지와 처분장 깊이는 지층이 적절하게 안정되고 온도, 수리, 역학 및 화학적으로 유리한 조건을 제공하여 처분 방법이 장기간 의도한 대로 작동하도록 선정하고, 처분장 부지는 천연자원에서부터 안전한 거리에 위치해야 한다는 권장 사항을 공표한 바 있다.

방사선방호법의 경우에도 부지선정에 관한 구체적인 규정은 없으나 법에 따른 SSM의 규정에서 부지선정을 위해 기반이 되는 중요한 일반적 요구 사항을 명시하였다. 환경 규정에는 부지선정 조항이 명시되어 있으며, 이는 현재 및 미래 세대를 위해 건강하고 건전한 환경을 보장할 지속 가능한 개발을 촉진하고 이러한 발전은 자연은 보호받을 가치가 있으며, 인간이 천연자원을 현명하게 관리할 책임이 따른다는 인식에 기초한다고 명시하고 있다.

3.2 핀란드

핀란드의 부지선정 과정은 당시 입법 체계에 따라 1983년에 시작되었고, 새로운 원자력법에 대한 준비가 1980년대 초반부터 진행되어 1988년에 발효되었으며 이는 의사결정 과정의 개념, 국무회의의 원칙적 결정(Decision in Principle, DiP)을 도입하였다. 시행자인 POSIVA가 특정부지에 대해 신청서를 제출하면 사용후핵연료 처분에 관한 이 법률에 의거하여 DiP가 이루어진다. 결정을 내리기 위해 정

부는 주최단체에 승인을 요청하고 방사선 및 원자력 안전당국(Radiation and Nuclear Safety Authority, STUK)에서 수행하는 처분개념의 예비안전평가를 검토해야 하며, 이때 지역사회의 제안된 처분부지에 대한 찬성과 STUK의 정부 결정에 대한 지지가 요구된다. 이후, DiP는 의회의 비준을 거쳐 부지선정에 대한 최종 결정을 내릴 수 있게 된다. 1994년에는 원자력법이 개정되어 방사성폐기물의 수출입이 금지되고 Olkiluoto 및 Loviisa 발전소의 전기 생산으로 발생하는 폐기물은 자국에서 처리하도록 규정하였다.

3.3 스위스

스위스는 원자력법에 심층 처분부지에 적용되는 기본 요건을 명시하고, 장기 안전성을 보장하기 위한 요구사항을 충족하기 위해 부지가 적합한 모양의 규모, 유리한 수리지질학적 조건 및 장기 지질학적 안정성의 특성을 갖출 것을 규정하였다. 심층 처분에 적용되는 요건은 원자력시설안전본부(Swiss Federal Nuclear Safety Inspectorate, HSK) 지침 R-21 「방사성 폐기물 처분에 대한 보호 목표」에 정의되어 있으며, 구체적인 보호 목적과 폐기 원칙을 명시하고 있다. 원칙은 낮은 인구의 추가 방사선량 보장, 생물종 다양성 및 환경보호 보장, 사람과 환경에 대한 위험기준 수준 유지, 다중 방벽 시스템에 의한 처분장의 장기안전 보장, 모니터링, 수리 및 회수를 위한 조치로부터의 수동적 안전방벽의 기능유지 보장, 현재대의 처분대책 마련 책임의 내용을 포함하고 있다.

1979년 6월 공간계획법 13조에 따라 연방 정부는 토지 이용 계획 이행을 위해 필요한 기반 마련을 목적으로 부지선정 전략과 계획에 대한 구체적인 지침을 설정하였으며, 1980년 10월 환경 보호법 제 10a 조에서는 환경에 중대한 영향을 미칠 수 있는 프로젝트에 대한 환경영향평가(Environmental Impact Assessment, EIA) 수행을 규정하였다. 방사성폐기물 심층 처분장은 환경영향평가 조례에 따라 2단계의 평가를 거쳐야 하며, 1단계에서는 일반 허가 절차의 일부를, 2단계에서는 건설 인허가 절차의 일부를 형성한다.

3.4 프랑스

프랑스의 방사성폐기물 관리의 일반 원칙은 1991

년 12월 폐기물법(Loi Bataille)에 의해 처음 설정되었으며, 이후 방사성 물질 및 폐기물의 지속 가능한 관리에 관한 2006년 계획법에 의해 수정되었다. 1991년 프로그램법은 심층 처분의 타당성 원칙을 명시하고 있으며, 프랑스 방사성폐기물관리청(French National Radioactive Waste Management Agency, ANDRA)은 이에 따라 폐기물 처리 시설의 설계와 운영을 담당하는 국가 소유 기관으로 설립되었다. 프로그램법에서는 폐기물의 분할, 변환 가능성, 장기 저장 및 지층처분의 세 가지 연구 분야를 설정하였으며, ANDRA는 이 중 지층처분을 담당하여 점토층에서의 고준위방사성폐기물 심층 처분의 타당성을 제공하기 위한 연구를 수행하였다.

2006년 방사성폐기물 및 자료의 지속 가능한 관리에 관한 계획법은 심층에서의 고준위방사성폐기물 처분을 선정한 장기 관리 해결책을 규정하였고, 폐기물의 부피와 유해성을 감소시키기 위한 규정도 포함되었다. 이후, 2008년에는 원자력안전국(Nuclear Safety Authority, ASN)이 기존의 기본안전규칙(Basic Safety Rules, RFS)을 대체하는 방사성폐기물 관리에 관한 안전지침을 발행하였으며, 이는 ANDRA가 1999년부터 2006년 사이에 수행한 작업과 2006년 법의 요구사항을 고려하여 설계 및 건설에 필요한 주요 안전목표를 포함하고 있다. 특히 안전지침은 단기 및 장기적으로 인간과 환경보호의 필요성과 재정 및 사회적 대중의 수용과 같은 다양한 요소와 방사선 영향을 유지하기 위한 요구사항을 강조하고 있다.

2016년 7월에 공표된 법에서는 가역적 처분장을 만들기 위한 조건의 세부사항을 제공하였으며, 이 원칙의 이행은 시설 운영기간 중 5년마다 검토되고, 주민의 참여를 위해 이해관계자 및 대중과 협력하여 5년마다 운영 마스터플랜(Operations Master Plan, PDE)을 개발하고 갱신하도록 규정되었다.

3.5 독일

2013년 독일은 고준위방사성폐기물 처분장 구축을 위해 안전한 부지 탐색을 재개하기 위한 법을 통과시켰다. 이를 위해, 2013년부터 2016년의 기간 동안 고준위방사성폐기물 처분위원회가 백지도(white map)를 기반으로 처분장 부지선정에 필요한 규칙, 기준 및 규정된 요건을 개발하였고, 2017년 “고준위방사성폐기물 처분장 부지선정 및 조사에 관한 법률(부

지선정법(Site Selection Act, StandAG))이 통과되었다. 이 법은 과학 기반, 참여, 투명성, 자기 질문 및 학습을 원칙으로 하여 부지선정 절차를 설명하고 있으며, 검색 영역을 좁히기 위해 지표조사(surface exploration)와 심층조사(subsurface exploration), 처분장 부지에 대한 제안의 총 3단계 전략을 세웠다. 절차는 100만 년 동안 사람과 환경을 보호하기 위한 안전성을 최우선으로 하며, 가역성의 원리를 도입하여 필요에 따라 절차를 수정할 수 있도록 하였다.

독일은 암염, 점토암 및 결정질암의 세종류 모암 중에서 고준위방사성폐기물의 안전한 최종처분을 위해 유리한 지질학적 조건이 예상될 수 있는 지역을 하위 지역(sub-areas)으로 지정하였으며, 이는 StandAG의 제외 기준, 최소 요건 및 지구과학적 가중 기준에 명시된 법적 요구사항 및 기준을 적용하여 3단계에 걸쳐 진행된다.

3.6 일본

일본은 방사성폐기물 지층처분이 최종처분법, 최종처분 기본방침, 경제산업성의 최종처분계획에 따라 규제되고 있으며, 최종처분법은 부지선정의 단계적 구현을 규정하고, 문헌조사, 예비 조사, 세부 조사, 처분장 건설 허가 신청 및 운영단계를 포함한 부지선정 과정을 정의하고 있다. 일본핵폐기물관리기구(The Nuclear Waste Management Organization of Japan, NUMO)는 과정의 투명성과 안전성을 강화하기 위해 예비 조사와 세부 조사에 대한 선정 기준을 설정하고 법적 요구사항을 기반으로 적격성을 판단하며, 경제산업성(Ministry of Economy, Trade and Industry, METI)은 관청과 지방자치단체의 의견을 고려하여 조사를 위해 선정된 부지의 적합성을 결정하게 된다. 일본 원자력규제위원회(Nuclear Regulation Authority, NRA)는 안전기준과 지침을 수립하기 위한 기본방침을 발표하고, 부지선정과 과학 및 기술의 발달에 따라 요구되는 세부 안전기준 및 지침을 단계별로 개발하는 것을 강조하고 있다. 또한 2007년 개정된 원자로규제법(Nuclear Reactors Regulation Act)은 프로젝트 진행상황에 따른 규제 틀을 수립하였으나, 2011년 도요전력 후쿠시마 제1원자력 발전소 사고를 계기로 2012년 원자로규제법의 대대적인 개정과 중대 재해 예방대책에 관한 규정 등 원자력 산업 전반의 안전 규제 체제 재검토를 실시하게 된

다. 이후, 2017년 원자로규제법 개정으로 처분장 주변의 지하 교란을 제한하는 제도가 도입되었고, 이에 NRA는 새로운 규제 표준을 개발하고 있다.

또한, 일본의 부지선정 절차는 Organisation for Economic Co-operation and Development/Nuclear Energy Agency (OECD/NEA)의 권고에 따라 지층 처분사업의 가역성과 회수 가능성에 대한 논의를 진행하였으며, 2015년 최종처분에 대한 개정된 기본 정책에서는 가역성과 회수 가능성을 보장해야 한다고 명시하고 있다.

4. 부지개발체계

해외 고준위방사성폐기물 처분 선도국에서는 심층 처분장의 최소 10만년 기간 동안 안전성 확보를 목적으로 처분 부지선정을 위해 충분히 긴 시간을 투자하여 각국의 지질학적 환경 및 여건에 적합한 체계적이고 효율적인 단계별 부지개발체계를 개발하고 시행하였다. 스웨덴, 핀란드, 스위스 그리고 프랑스에서는 고준위방사성폐기물 처분을 위한 부지를 확보하였으며, 그 외 독일, 일본도 각국 고유의 부지선정 절차를 확립하고, 최종 처분부지 확보를 위해 단계별 절차를 시행하고 있다. 이에 본 절에서는, 해외 고준위방사성폐기물 처분 선도국들의 부지

선정을 위한 기술적 체제 사례를 분석하였다.

4.1 스웨덴

스웨덴은 고준위방사성폐기물 지층처분을 위해, 자국에 우세한 기반암인 선캄브리아기의 결정질암을 대상으로 처분장 건설 위치를 결정한다는 전제로 시작하였으며, 최종 처분장 위치 선정을 위한 주요 단계는 그림 3과 같다. 스웨덴 처분사업의 초기 단계 주요 작업 중 하나는 기반암과 최종 처분요건을 충족하기 위해 암석이 갖추어야 할 특성에 대해 파악하는 것으로, 전국의 다양한 지질환경에서 연구가 수행되었다. 1977년 통과된 스웨덴 의회의 규정법은 부지선정 작업의 중요한 출발점이 되었으며, Nuclear Fuel Safety (KBS) 프로젝트 내에서 원자력 회사는 요구사항을 충족시키기 위한 집중적인 시추 및 연구 활동을 수행하게 되었다.

최종 처분장에 적합한 부지를 찾는 실제 작업은 Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company (SKB)가 1991년 부지선정 프로젝트를 구성하면서 시작되었다. 타당성 조사 단계에서는 최종 처분장 선정을 위한 추가 조사 대상 부지의 존재 여부와 지역 및 주민들의 참여 및 의견을 형성할 기회가 주어 졌는지를 확인한다.

1992년에서 2000년 사이에 SKB는 20여개 지역

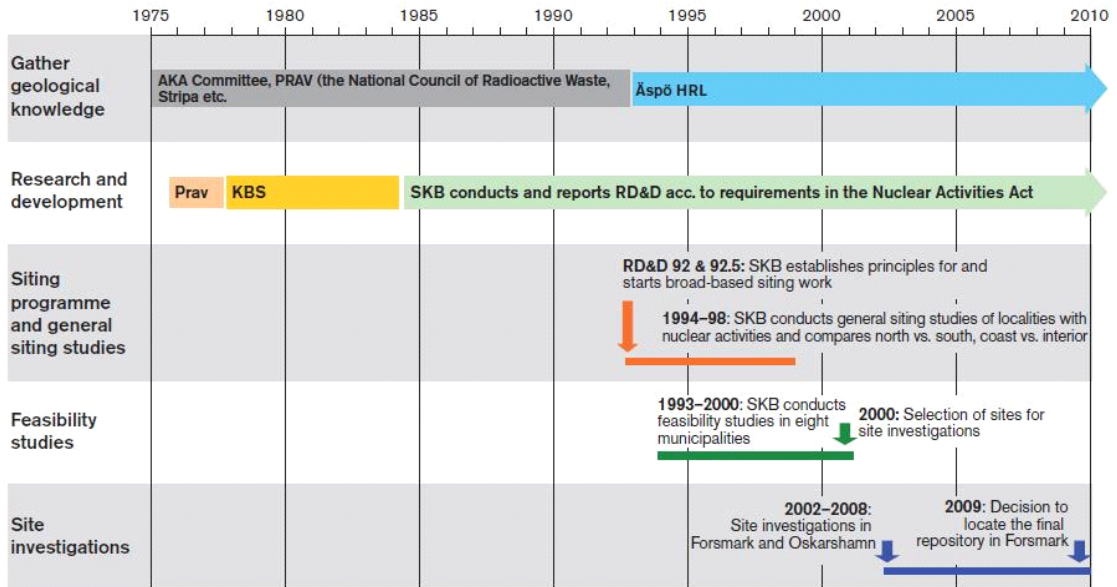


Fig. 3. Main phases of repository site selection in Sweden (SKB, 2011).

의 타당성 조사에 대한 논의를 통해 최종적으로 8개 지역을 선정하고, 최종 처분장에 적합할 수 있는 기반암이 있는 지역을 조사하고자 하였으며, 지질학적 연구가 주요 구성요소로서 수행되었다(SKB, 1992). 타당성 조사 이후, 지역주민 투표 결과 및 SKB의 결론으로 추가 조사를 위한 6개 지역이 선정되었으며, 기반암의 특성, 산업시설, 사회적 측면을 평가하고 검토 결과로부터 8개의 부지 대안(siting alternatives)이 포함된 후보 그룹(selection pool)이 선정되었다(그림 4).

기반암의 특성은 Andersson *et al.* (2000)에 의해 개발된 부지평가 방법론에 따라, 지질학적, 암반역학적, 열 특성, 수리지질, 화학 및 암반의 운반 특성 분야의 여러 요구사항 및 선호 사항이 포함되었으며, 분야별 세부 고려 요소는 표 1에 나타낸 바와 같다.

산업시설 전망과 관련하여 부지선정 대안에 대한 전반적인 평가 및 순위 지정에서 SKB는 원자력 활

동이 존재하는 지역에 부지를 선정하는 것이 유리하다고 결론지었으며, 최종 처분장을 결정하기 위해 충족되어야 하는 사회적 측면과 관련하여 국가 지원, 안정적인 기술 및 과학적 기반, 폭넓은 상담과 열린 토론, 관련 지자체의 자발적 참여 및 지역 신뢰의 요소들을 고려하여, Forsmark와 Simpevarp의 두 지역을 우선순위로 고려하였다.

부지조사 단계에서는 최종 처분장에 대한 원자력 활동법 및 KBS-3 시스템에 대한 환경법에 따른 인허가를 위해 신청서 및 보조자료를 준비하는 것이 목표이다. 프로젝트는 초기 부지조사(initial site investigation, ISI)와 일체 부지조사(complete site investigation, CSI)의 두 가지 주요 단계로 진행되었으며, 지질학적, 암반역학적, 열 특성, 수리지질, 화학(지하수 조성) 및 암반의 운반특성에 대한 조사를 수행하였다. 초기 단계 이후, 후보부지의 선정을 정당화하기 위한 평가 및 지속적인 조사와 처분장 배

Table 1. Parameters considered for bedrock evaluation in Sweden (SKB, 2011).

Fields	Parameters
Geology	Topography, soils, rock types, plastic shear zones, fracture zones
Rock mechanic	Initial rock stress, Intact rock, fracture and fracture zones, rock mass, coefficient of thermal expansion, future loads
Thermal property	Heat transport conductivity, heat capacity, ambient temperature
Hydrogeology	Permeability for fracture and fracture zone, flow porosity and storage coefficient, density and viscosity, near-surface ecosystem, hydraulic heads, recharge and discharge areas
Chemistry	Dissolved oxygen, pH, Total dissolved solids, DOC, Ca, Mg, Ra, Rn, free gas, colloids, NH ₄
Transport properties of rock	Flow parameters on deposition hole scale (Darcy velocity), transport resistance, coefficient of rock sorption, thermal diffusivity, porosity

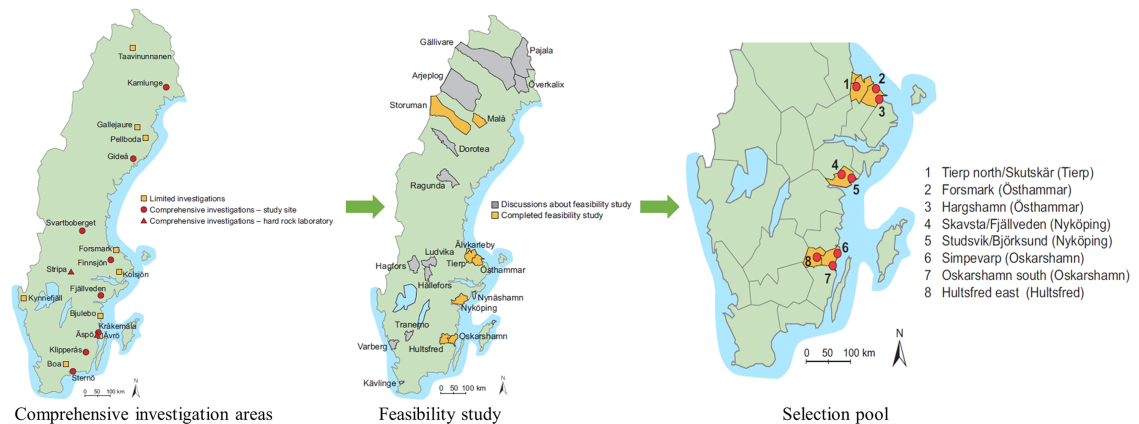


Fig. 4. Procedures to determine 8 selection pools in Sweden (SKB, 2011).

치 작업에 대한 피드백을 제공하고 지속적인 작업에서 특별한 주의가 필요할 수 있는 지구과학적 불확실성을 확인하기 위해 사전 설정된 기준과 부지 조건에서 수집된 데이터를 비교하는 것을 포함하여 해당 부지에 대한 예비 안전성 평가가 이루어졌다 (Andersson *et al.*, 2000).

부지조사 결과 Laxemar와 Forsmark가 후보부지로 결정되었으며, 부지선정 과정의 마지막 단계에서 확립된 전략에 따라 부지선정에 필요한 자료를 얻기 위해 체계적으로 비교하였다. 이를 위한 근거로 SKB는 부지요소를 정의하였으며, “안전 관련 부지특성”, “실행 기술”, “건강 및 환경” 및 “사회자원”의 네 가지 주요 그룹으로 구분하였으며 이는 그림 5와 같다 (SKB, 2011).

스웨덴은 최종 처분장을 구축하여 운영할 수 있는 산업적 전망 및 프로젝트로 인한 환경적 영향은 Forsmark와 Laxemar 두 부지 모두에서 매우 좋은 것으로 판단하였으나, 유리한 단열의 빈도와 투수성 등의 안전성 평가 관점에서 장기 안전성을 달성하기 위한 최상의 조건을 갖춘 것으로 결론된 Forsmark를 최종부지로 선정하였다.

4.2 핀란드

4.2.1 부지선정 기준

Niini *et al.* (1982)은 NEA (1977)에서 제안한 국제 권장 사항을 토대로 핀란드에서 사용후핵연료의 최종처분에 중요하다고 여겨지는 지질학적 요소를 분석 및 비교하고, 핀란드의 암반분류와 처분 목적에 대한 적합성에 영향을 미치는 요인을 제안하였다 (표 2).

또한, Salmi *et al.* (1985)은 기반암의 높은 역학적 강도, 밀도, 낮은 물 함유량, 준수한 수차용량 등의 특성이 핀란드 내 심층처분에 적합한 지역을 선정함에 가장 중요하다고 제안하였다. 부지선정을 위해 기반암 지형을 기반으로 지하수의 지역적 흐름 특성, 수리구배, 형성 및 배출 면적이 평가되었으며, 지형의 기울기가 낮은 지역과 일반적으로 존재하는 암종이 있는 지역에서 잠재적 처분장을 선정하는 것을 고려하였다.

환경적 부지선정 기준 개발을 위해, 핀란드에서는 잠재적 처분부지의 조사, 처분장 건설, 운영 및 폐쇄의 활동이 환경에 미치는 영향을 고려하였으며, 부지선정 과정에서 가장 중요하게 고려된 환경요소

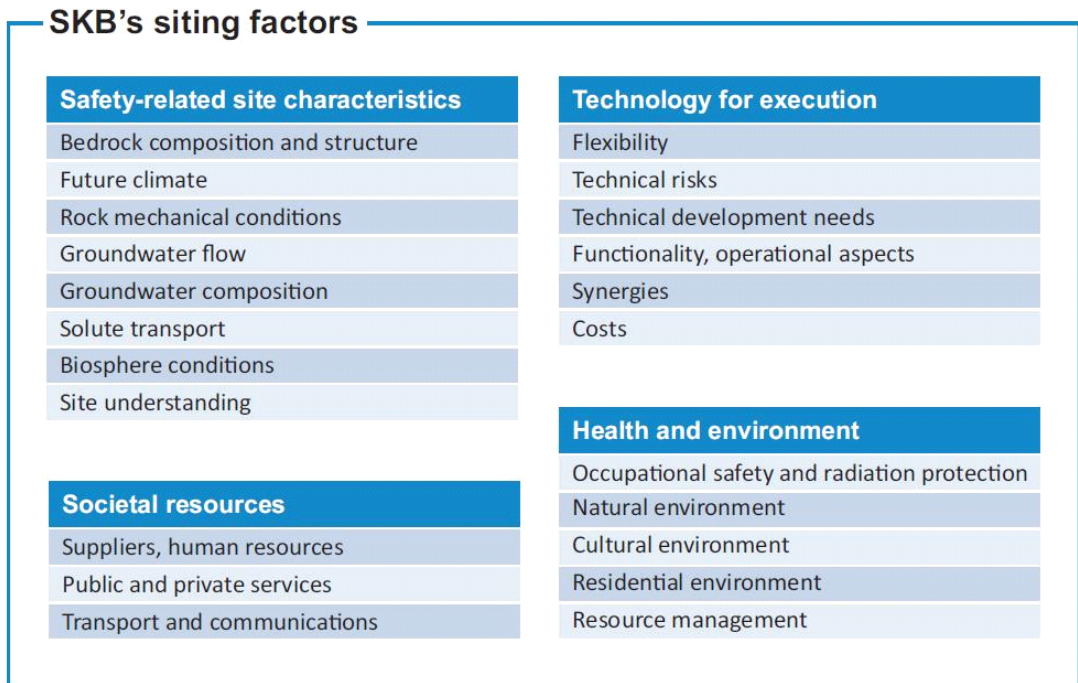


Fig. 5. Siting factors for site selection in Sweden (SKB, 2011).

Table 2. Geological factors considered for HLW disposal in Finland (Niini *et al.*, 1982).

Category	Item	Geological factors
Condition and material property	Structure and formation	<ul style="list-style-type: none"> • Surface formation • Rock structure and formation: <ul style="list-style-type: none"> - plastic rock structures: intrusive, fold and schistosity structure - fragmentary rock structures: fault, crush zone and fracture cleavage - morphological or weathering and erosional deposit
	Physical and chemical property	<ul style="list-style-type: none"> • Material property of near-surface soil and rocks: <ul style="list-style-type: none"> - mineral, mechanical and thermal properties and suitability for construction • Material property of rock masses: <ul style="list-style-type: none"> - hydrogeological, sorption property, strength, deformation, thermal properties and suitability for construction
Geological process	Slow and steady natural phenomena	<ul style="list-style-type: none"> • Groundwater flow, weathering, erosion and sedimentation, creep
	Slow periodical phenomena	<ul style="list-style-type: none"> • Orogeny, sea-level changes, epeirogenic movement of earth's crust
	Sudden catastrophic phenomena	<ul style="list-style-type: none"> • Earthquake, volcanic eruption, flood, meteorite
	Geological change due to human activity	<ul style="list-style-type: none"> • Results of earth and rock construction • Results of waste behaviour • Non-deliberate results of other human activities

에는 인구밀도, 운반 여건이 포함된다. Aikas (1985)는 이 중, 낮은 인구수, 교통 근접성, 지하수자원 유무 등의 인구밀도의 특징들을 고려하여 추가조사에 가장 적합한 지역을 정의하였다.

4.2.2 부지선정 절차

핀란드 부지선정 프로그램은 부지 내 안전한 처분시스템의 개발 가능성, 규제 한도 내의 장기간 방사성핵종 유출 방지, 기술적 건설 가능성, 사회적 수용성, 경제성 등을 충족할 수 있는 사용후핵연료 처분부지를 찾는 것에 초점을 두었다.

핀란드의 지질은 오래된 변성암과 화성암의 우세를 보이며, 경암(hard rock) 환경에서 방사성폐기물의 처리를 조사하는 것으로 제한되었다. 이를 위해, 주요 기반암 유형에 대한 조사가 수행되었으며 지질학적 기준을 통하여 핀란드 기반암에서 잠재적 처분장소를 찾는 것이 가능하다고 결론지었다(Aeikaes, 1985). 지역선정에 대한 접근 방식은 초기에 핀란드 전체를 조사하고 수집된 데이터에서 간단한 지질학적 추론(simple geological reasoning)에 기초하여 처분장 개발에 적합하지 않은 지역을 제외하고 추후 나머지 영역을 추가로 조사하는 방식으로 진행되었

으며 전체 절차는 그림 6과 같다(McEwen and Äikäs, 2000).

1986년 초, Teollisuuden Voima (TVO)사는 지방자치단체들과 논의 후, 예비조사를 위해 Ikaalinen 지방의 한 지역을 지명했으나, 조사 초기 현지의 반대가 높아져 추가 작업에 실패하게 되었다. 이 실패를 계기로 다른 지방자치단체와의 의사소통에서 더 적극적인 접근을 시도하게 되었으며, 지방자치단체의 조사 착수 동의를 얻어 1987년, Romuvaara, Veitsivarra, Kivetty, Syyry, Olkiluoto의 다섯 개 지역이 예비 부지조사를 위한 지역으로 선정되었다(그림 7).

4.2.3 부지조사

부지조사 과정 중 예비조사의 목적은 부지에 대한 정보를 획득하여 처분장의 장기적 안전성 및 시공성과 관련하여 부지성능의 모델링 및 평가가 수행될 수 있도록 하기 위함이다. 이 단계에서는 기반암의 수리학적 전도도, 파쇄된 기반암의 전도성 구역의 위치 및 기하학, 지하수의 화학적 성질이 주요 관심 주제로 고려되었다. 조사는 주제 영역으로 나뉘어 수행되었으며, 그 일반적인 목적과 내용은 그림

8과 같다.

이후, 조사의 용이성과 안전성 분석 및 처분장 설계를 위한 데이터 수집과 관련하여 5개 부지에 대한 전반적인 평가 및 비교분석을 통해, Romuvaara, Kivetty, Olkiluoto의 세 부지가 불확실성을 줄이고 필요한 추가 정보를 얻는데 더 적합하다고 판단되어 상세한 조사단계를 위한 부지로 선정되었다.

상세 부지조사 프로그램은 세 부지의 기준선 조

사 및 장기 모니터링에 필요한 부지 데이터 수집, 부지 특성화 및 기반암 추가 정보 획득, 조사 초기 단계에서 개발된 지역의 지질학, 수리지질학 및 수리화학 개념 모델 및 결과 검증에 대해 집중적으로 진행되었다.

1997년부터 2000년의 기간 중, Olkiluoto, Romuvaara, Kivetty 지역을 대상으로 지화학적 조건, 염분, 용존 산소 등급, 산화환원 조건 조사 목적의 지하수 채취,

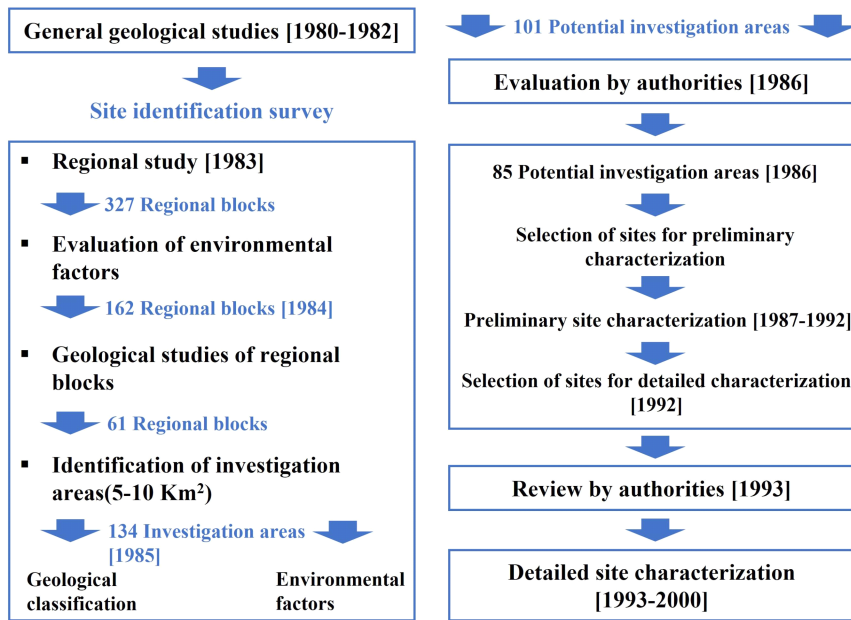


Fig. 6. Site selection procedure in Finland (McEwen and Äikäs, 2000).

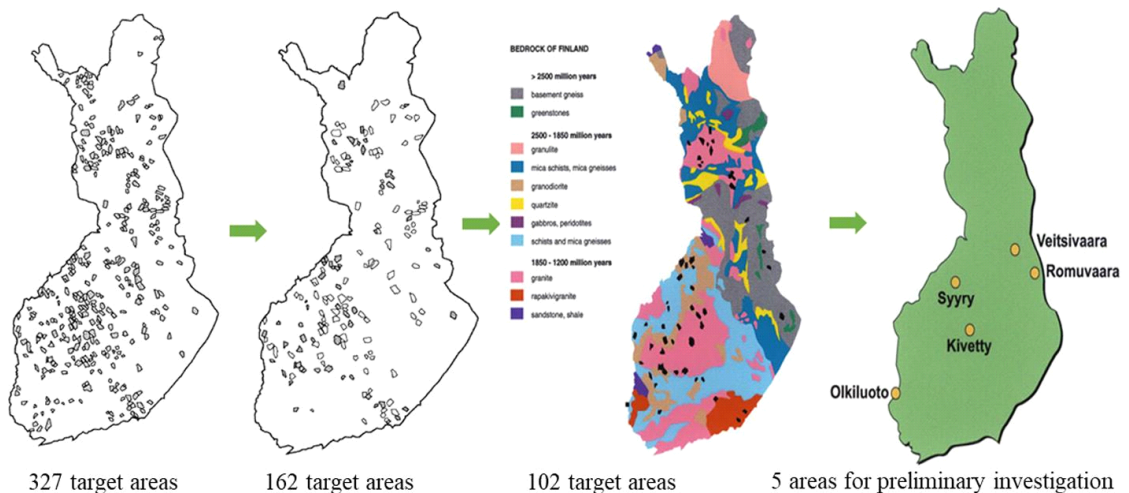


Fig. 7. Distribution of target areas at each survey stage in Finland (McEwen and Äikäs, 2000).

부지의 고수리지질학적(palaeohydrogeological) 진화 분석 목적의 파쇄 광물 연구, 구조의 연속성, 수리적 특성 결정을 평가할 목적으로 양수시험 및 수압측정이 집중적으로 이루어졌으며, 세부 조사 항목으로는 암석 및 구조 모델 개발, 수리지질, 지하수 흐름 모델링, 수리화학, 시공성, 미래 기후변화, 지진 활동도가 포함되었다.

규제기관인 STUK은 POSIVA의 DiP 신청을 검토하고 예비 안전성 평가와 함께, 조사된 4개 부지 사이에 장기 안전성의 관점에서 큰 차이가 존재하지 않는 것으로 보이며 조사 결과로부터 Olkiluoto가 적합한 처분 장소임을 최종 발표하였다.

4.3 스위스

스위스의 방사성폐기물 관리에 대한 첫 번째 개념은 1978년 2월에 제시되었으며, 이는 심층 처분을 기반으로 방사성폐기물이 지질학적으로 적절한 장소에 처분될 것이라고 가정하고, 처분장 최종 폐쇄 후 장기적인 안전에 최우선 순위가 지정되었다. 1999년, 연방 환경 교통 에너지 통신부(Department of the Environment, Transport, Energy and Communications, DETEC)는 방사성폐기물 처리 개념에 대한 전문가 그룹(Expert Group on Disposal Concepts for Radioactive Waste, EKRA)을 구성하고, 논의 중인 방사성폐기물 관리 개념을 비교할 기반을 준비하였다. EKRA

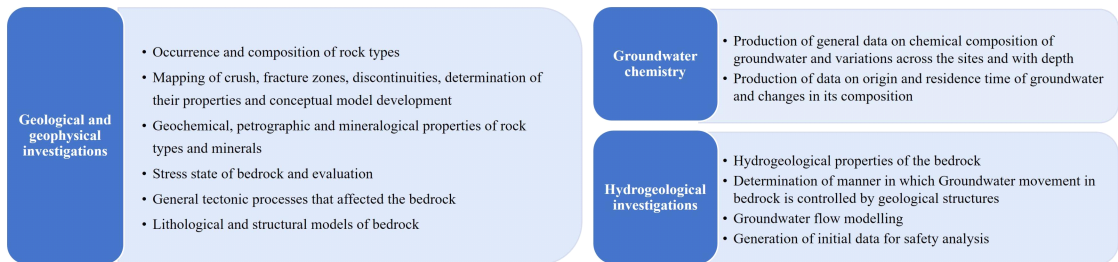


Fig. 8. Subject areas and general aims in Finland (McEwen and Äikäs, 2000).

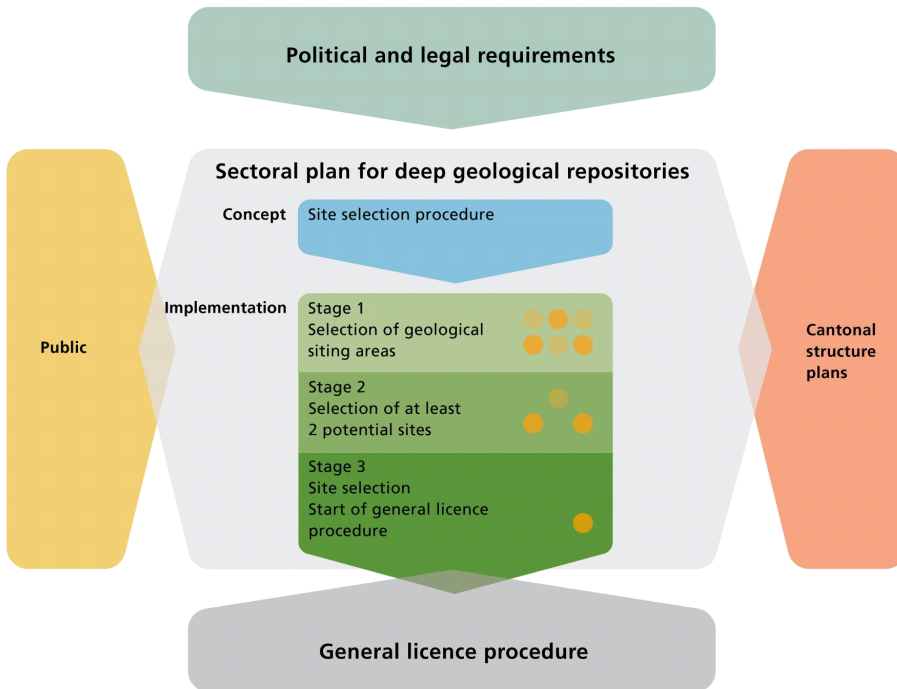


Fig. 9. Position and interrelationships of the sectoral plan in Switzerland (SFOE, 2008).

Table 3. Criteria for site evaluation in Switzerland (SFOE, 2008).

Criteria group	Criteria
1. Properties of host rock and effective containment zone	1.1 Spatial extent 1.2 Hydraulic barrier effect 1.3 Geochemical conditions 1.4 Release pathways
2. Long-term safety	2.1 Stability of the site and rock properties 2.2 Erosion 2.3 Repository-induced influences 2.4 Conflicts of use
3. Reliability of geological findings	3.1 Ease of characterisation of the rock 3.2 Explorability of spatial conditions 3.3 Predictability of long-term changes
4. Engineering suitability	4.1 Rock mechanical properties and conditions 4.2 Underground access and drainage

는 심층 처분만이 인간과 환경에 필요한 장기적 보호를 제공할 수 있다는 결론을 내렸으며, 최종처분의 특징과 폐기물 회수 가능성 및 가역성을 결합한 모니터링된 장기 지층처분의 개념을 개발하였다.

심층 처분장에 대한 부문별 계획(sectoral plan)의 개념적 부분은 연방 정부의 목표와 스위스의 모든 방사성폐기물 범주에 대한 지층처분장 부지선정에 적용되는 절차 및 기준을 설정하였다. 부지선정 절차의 초점은 안전기준에 있으며 토지이용 계획과 사회경제적 기준은 부차적인 역할을 수행하였다. 개념적 부분은 3단계로 절차 단계를 정의하고, 연방 정부와 주, 인접국가, 관련된 여러 연방 사무소, 관련 조직, 공공 및 민간인 간의 협력을 규제하고, 공간계획에 영향을 미치는 활동이 어떻게 서로 조화를 이룰 수 있는지, 그리고 심층 처분장 프로젝트에 의해 영향을 받는 한 부지 지역 개발이 어떻게 지원될 수 있는지에 대해 명시하였다(그림 9).

4.3.1 안전성 및 기술적 타당성 관련 기준

스위스는 안전성 및 기술적 타당성 관점에서 부지평가를 위해 선정된 4개의 그룹과 13개의 상세 기준 요소들을 표 3과 같이 설정하였다(SFOE, 2008). 첫 번째 기준 그룹인 모암의 특성 및 유효 격납대(effective containment zone, ECZ)에서는 공간 범위, 수리적 방벽 효과, 지구화학적 조건 및 유출 경로의 세부 기준에 대해 다루고 있다. 장기 안전성 그룹에서는 부지 안전성 및 암반 특성, 침식, 처분장에 의한 영향 및 이용 충돌의 4가지 기준이 고려되었으

며, 부지의 장기적인 지질학적 안정성과 암반 특성 및 지질학적 과정으로 인한 모암과 ECZ의 격리 성능 저하 또는 변화가 평가되었다. 지질학적 정보의 신뢰성 그룹에서는, 암반 특성화 용이성, 공간 조건의 탐색 가능성 및 장기 변화 예측 가능성 그리고 공학적 적합성 그룹에서는 암반역학 특성 및 조건과 지하 접근 및 배수 요소가 고려되었다.

4.3.2 부지선정 절차

스위스는 처분장 부지선정 절차의 주요 특징은 부지에 대한 광범위한 기반 검색, 잠재적으로 적합한 지역의 단계적 축소 및 안전 기반 기준의 적용이라는 국제적 권고에 따라, 수행된 조사와 지질학적 이해의 현 상태를 기반으로 심층 처분장의 위치를 확인하는 세 단계를 정의하였다(그림 10). 또한 스위스의 부지선정 절차는 방사성폐기물 처리의 최우선 원칙과 목표 및 관련 법적 체제에 따라 안전을 최우선으로 한 인간과 환경의 장기적인 보호 보장과 공간계획, 생태학, 경제 및 사회적 고려사항 측면을 중점적으로 고려하였다.

1단계에서 NAGRA는 저준위/중저준위방사성폐기물(low and intermediate-level waste, L/ILW) 및 고준위방사성폐기물(HLW) 처분에 대한 안전 및 기술적 타당성과 관련된 기준을 기반으로 2008년 10월, 고준위방사성폐기물 처분장에 대해 3개의 지층 처분 부지선정 지역을 제안하고 저준위/중저준위방사성폐기물 처분장에 대해 6개 부지를 제안하였다(NAGRA, 2008). 이후, 당국의 포괄적인 검토와 공

개 협의 절차를 거쳐 1단계는 2011년 11월 연방 정부의 제안 승인으로 완료되었다.

2단계에서는 지역사회 참여, 처분장 프로젝트의 구체화, 잠정적 안전성 평가, 공간계획 및 환경적 측면 그리고 사회경제적 연구가 평가되었다. 이 단계에서 수집된 추가 지질 정보와 지층처분 부지선정 지역 및 관련 처분 매개변수의 안전성을 기반으로 한 종합적인 비교평가를 토대로 Jura Ost와 Zürich Nordost가 적합한 지질학적 위치로 제안되었으며,

이외에도 Nördlich Lägern 부지에 대한 추가 조사가 제안되고 2018년 11월 정부의 승인을 받았다.

3단계에서는 부지의 심층 조사, 부지선정 및 일반 허가 신청 준비 작업이 수행되며, 이후 당국의 검토 및 청문회를 거쳐 최종 결정이 내려진다. 사업 계획의 기본 개요에는 주요 구조물의 대략적인 크기와 위치, 처분할 방사성폐기물 범주 및 최대 처분 용량 등이 포함되어야 하며, 예비 보호 구역과 기준을 정의하고, 부적합한 경우 제외된다. 2022년 9월, 조사

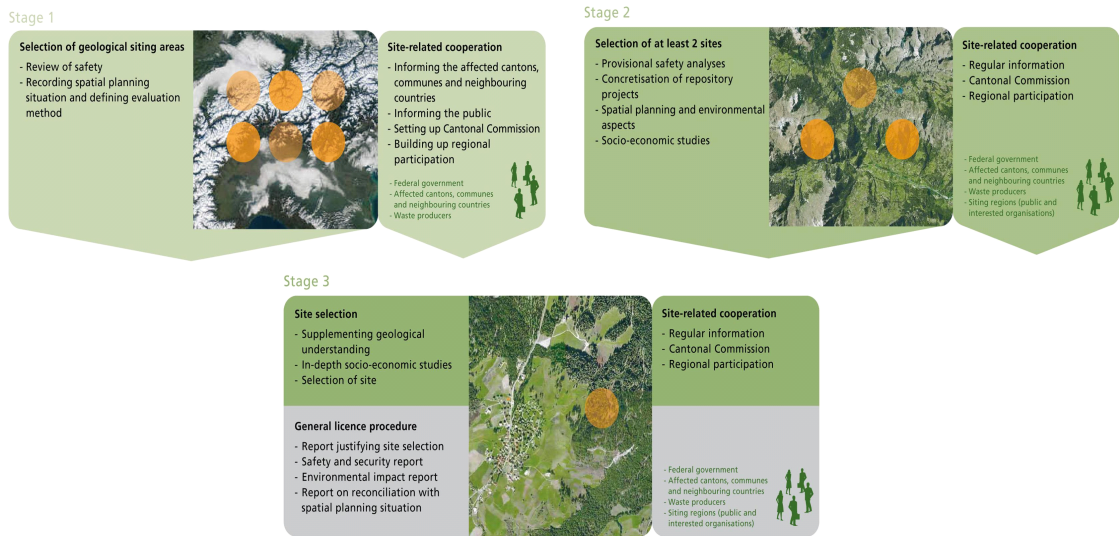


Fig. 10. Three stages of the site selection procedure in Switzerland (SFOE, 2008).



Fig. 11. Siting proposal area in Switzerland (NAGRA, 2021).

결과 Nördlich Lägern 지역이 천연방벽의 품질, 안정성 및 유연성 요건을 가장 잘 충족하는 것으로 판단되어 가장 적합한 부지로 선정되었다(그림 11).

4.4 독일

독일은 2013년 독일에서 생산된 고준위방사성폐기물 처분을 위해 가능한 가장 안전한 부지 탐색을 재개하는 법을 통과시켰다. 이후 2016년까지 독일의 고준위방사성폐기물 처분위원회는 독일 백지도를 기반으로 한 부지선정 절차의 개념에 대해 작업했으며, 고준위방사성폐기물 처분장에 대한 규칙, 기준 및 규정된 요건을 개발하였다. 이어 2017년 위원회의 조사 결과를 바탕으로 고준위방사성폐기물 처분장 부지선정 및 조사에 관한 법률 “부지선정법(StandAG)”을 통과시켰다. 연방폐기물협회(Federal Company for Radioactive Waste Disposal, BGE)는 독일 방사성폐기물 관리 조직으로서 부지선정 절차를 담당하게 되었으며, 2017년 9월에 본격적으로 작업이 시작되었다.

4.4.1 부지선정 절차

부지선정 절차는 3단계의 과정으로 구성되어 있으며(그림 12), 각 단계의 결과와 입법자의 결과 사양에 따라 다음 단계의 구체적인 작업 범위가 결정되었다.

1단계의 Step 1에서는 방사성폐기물의 안전한 최

종처분을 위해 유리한 지질학적 조건을 가진 것으로 확인된 하위 지역(sub-areas)을 제시하는 것을 목표로 하며, 이는 StandAG에 정의된 지구과학적 기준과 최소 요건을 적용하여 이루어진다. Step 2에서는 확인된 하위 지역과 회의의 심의 결과를 기반으로 지반조사 지역을 확인하는 것이 목표이며, 유리한 지역을 확인하기 위해 지구과학적 기준이 적용되지만, 각 하위 지역에 대해 대표적인 예비 안전성 평가가 수행된다.

이후, 2단계에서는 법으로 정의된 지역의 지표 조사가 포함되며, 이는 부지별로 준비된 조사 프로그램에 따라 진행된다. 조사 결과를 바탕으로 최적화된 예비 안전성 평가가 수행되며, 각 부지선정 지역에 대해 사회경제적 잠재력 분석이 수행된다. 비교 분석 및 가중 절차는 법정 제외 기준, 최소 요건, 지구과학적 가중 기준 및 계획 프로세스의 과학적 기준에 따라 재차 수행되게 된다.

3단계에서는 이전에 정의된 부지들의 심층 조사와 이점 비교가 수행되며, 결과를 바탕으로 BGE가 최적의 안전성을 갖춘 부지에 대한 제안서를 연방핵폐기물관리안전청(Federal Office for the Safety of Nuclear Waste Management, BASE)에 제출하여 검토받게 된다. 검사 결과를 기반으로 모든 개인 및 공공 이익과 참여 절차의 결과를 고려하여 부지를 평가하고 이후, 연방 입법자의 부지 결정에 따라 최종적으로 부지선정이 달성되며, 2031년경 부지선정

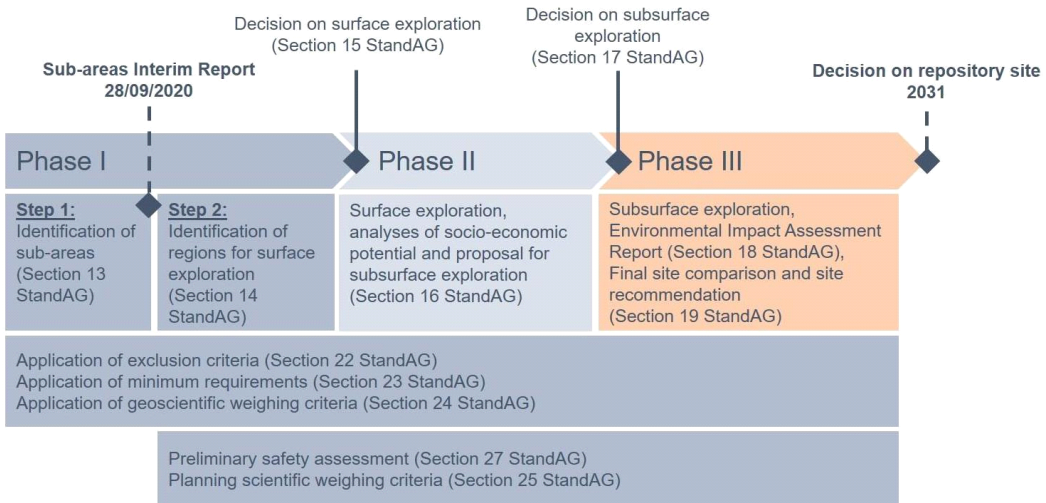


Fig. 12. Site selection procedure in Germany (BGE, 2020).

Table 4. Criteria for site exclusion in Germany (BGE, 2020).

Category	Criteria
Large-scale vertical movements	Average large-scale geogenic uplift of more than 1mm per year should be expected over period of proof of one million years
Active fault zone	Geologically active fault zones that may affect the repository system and its barriers are present
Mining activity	Expected to have negative influences on the stress state and permeability of the rock due to mining activities
Seismic activity	Local seismic hazard is greater than intensity of 6.5 is reached or exceeded with a probability of 10% in 50 service life years
Volcanic activity	Quaternary volcanism is present or future volcanic activity can be expected over the period of proof of one million years
Groundwater age	Young groundwater has been found in rock areas that may be taken into consideration as effective containment zones or storage areas

Table 5. Number of identified sub-areas and surface in Germany (BGE, 2020).

Host rock	Number of sub-areas	Surface (km ²)
Claystone	9	129,639
Rock salt		
• stratiform formations:	14	28,415
• steep formations:	60	2,034
Crystalline host rock	7	80,786
Sub-areas, total:	90	240,874

을 목표로 하고 있다.

4.4.2 부지선정 기준

하위 지역을 확인하는 과정에서 BGE는 첫 번째 단계에서 관할 연방 및 주 당국이 제공한 자료를 기반으로 독일 전역에 제외 기준(표 4)을 적용하였다. StandAG에 명시된 적용 원칙에 따르면 해당 지역은 정의된 제외 기준 중 하나가 적용되는 즉시 처분장 부지로 부적합한 것으로 분류된다. 부지선정 절차가 진행됨에 따라 새로운 제외 영역이 나타나거나 기존 제외 영역의 규모가 커질 수 있으며, 제외 기준의 적용은 부지선정 절차의 세 단계 각각에서 반복적인 주기로 이루어진다.

제외 기준을 적용 완료한 후 두 번째 단계는 제외 지역으로 확인되지 않은 지역에 최소 요건을 적용하는 것이다. 최소 요건은 관할 연방 및 주 당국이 제공한 자료를 기반으로 적용되며, 고준위방사성폐기물의 최종처분을 위해 압염, 점토암 및 결정질암의 모임을 고려할 수 있다.

지구과학적 가중 기준을 적용하는 목적은 처분장으로서의 적합성과 관련하여 확인 지역의 비교평가를 하기 위함이다. 유리한 전체 지질 상황은 모든 가중 기준을 참조하여 결과를 가중하는 과정 후에 결정되며, StandAG에 명시된 지하수 이동에 의한 방사성 물질의 이동, 암반 구성, 공간 특성, 유리한 조건의 장기 안정성, 유리한 지구역학적 특성, 유체 경로를 형성하는 경향, 가스 형성, 온도 호환성, 유효 격납구역의 잔류 용량, 수리화학적 조건, 과부하에 의한 유효격납구역 보호의 11개 기준을 기반으로 평가된다.

최종적으로 하위 지역은 제외 기준, 최소 요건 및 지구과학적 가중 기준을 적용하여 결정된다. 지구과학적 가중 기준에 기초한 확인 지역의 평가는 방사성폐기물의 최종처분을 위해 유리한 지질학적 전체 상황을 나타낼 것으로 예상할 수 있는 90개의 하위 지역을 산출했다(BGE, 2020). 독일 국토의 약 54%가 확인된 하위 지역으로 지정되었으며 이는 표 5에 나타낸 바와 같다.

4.5 일본

일본에서는 일본원자력위원회(Japan Atomic Energy Commision, JAEC)가 1998년 “고준위방사성폐기물 처분의 기본개념”을 공포하였으며, 이어 2000년에 일본원자력연구개발기구(Japan Atomic Energy Agency, JAEA)가 제작한 “H12: 일본에서 고준위방사성폐기물(HLW) 처분을 위한 과학 및 기술 기반 구축 프로젝트”를 통해 연구 결과를 정리하고 1976년부터 수행된 개발사업으로 지층처분의 근본적인 실현 가능성을 확립하였다. 이러한 보고를 바탕으로 2000년에 최종처분법이 제정되었으며, 이에 근거하여 2000년에 일본핵폐기물관리기구(NUMO)가 프로젝트 시행을 담당하는 조직으로 설립되었다.

4.5.1 지질환경 요건 및 관련 영향 인자

문헌조사를 시작으로 단계적 부지조사를 거쳐 처

분장 부지선정이 진행되고, 이후 처분장 건설, 운영, 폐쇄와 관련된 일련의 작업이 이루어지게 된다. 이러한 작업에는 지상 및 지하 시설 건설, 방사성폐기물 수용 및 검사, 캡슐화, 방사성폐기물 배치 및 공학적방벽 시스템(engineered barrier system, EBS) 건설, 마지막으로 처분장 뒤채움 및 밀봉이 포함된다. 표 6은 이러한 작업을 수행하는 관점에서 안전을 최우선으로 하는 지질환경에 대한 요구사항(NUMO, 2021)을 요약한 것이다.

일본은 환태평양 조산대에 위치하고 있어 화산 및 화성 활동, 지진 및 단층 활동, 용기 및 침식과 같은 자연 파괴 현상이 수십만 년에서 수백만 년의 지질학적 시간 척도에서 반복적 또는 지속적으로 발생한다는 점에 유의하여, 이러한 자연현상이 지질학적 환경의 안전 기능에 영향을 미칠 수 있음을 특히 고려하였다.

Table 6. Requirements and factors for the geological environment up to closure in Japan (NUMO, 2021).

Requirements for geological environment	Influence factors
Host rock – Not unconsolidated Quaternary sediments	Distribution of unconsolidated Quaternary sediments at depths of 300 m or more
Safety and operability of underground facilities – Low possibility to occur of affecting events	Geothermal activity/hot springs, swelling ground, rock burst, mud volcanoes, high water inflow, toxic gas, earthquake activity
Safety of surface facilities – Low possibility to occur of disrupting events	Pyroclastic flow, lava flow, lahar
Safety of surface facilities – Low possibility to occur of negative events	Distribution of soft ground, ground deformation and displacement, occurrence of earthquakes, tsunamis, landslides, debris flows, floods

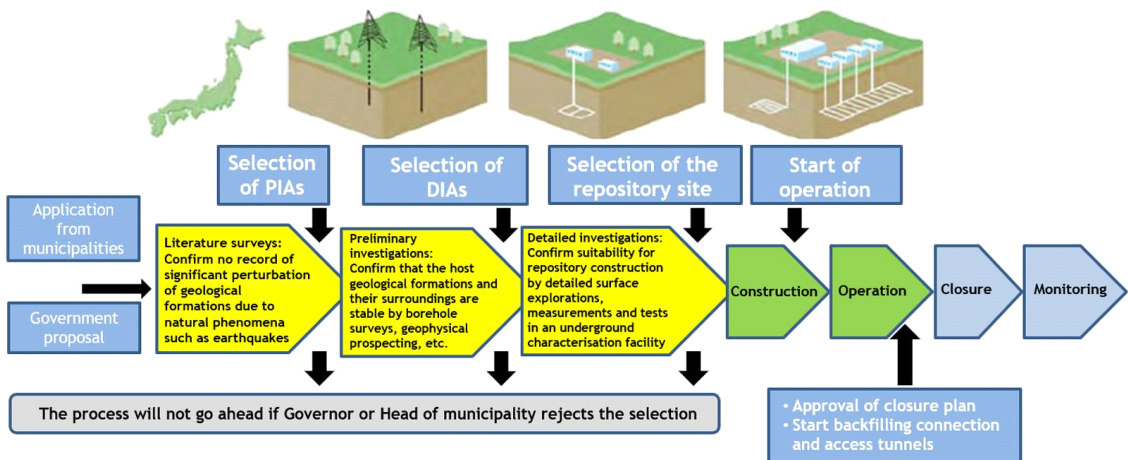


Fig. 13. Procedure for HLW disposal site selection in Japan (NUMO, 2021).

4.5.2 부지선정 절차

최종처분법에 규정된 단계별 부지선정 절차(그림 13)에 따라, NUMO는 부지조사에 자원한 지역의 문헌조사, 예비 조사(preliminary investigations), 세부 조사(detailed investigations)의 단계적 부지조사 절차를 기반으로 작업의 흐름을 개발하였다. 이후, 특정 요구사항 및 기준에 따라 지층처분을 위한 전국 과학적 특성지도(전국 지도)가 개발되었으며, 부지의 문헌조사 실행 절차를 검토하였다.

부지선정 절차의 각 단계에서 법적 요구사항 및 부지 요소 측면에서 적격성을 평가한 후, 공학적 타당성과 폐쇄 후 안전성을 확인하기 위해 부지에 맞는 처분장 개념을 검토하고, 이를 통해 지질학적 환경, 필요한 세부 수준, 정보 부족으로 인한 불확실성 또는 정보 해석 방법에 대한 불확실성을 줄일 방법에 대해 추가 정보를 확인할 수 있다(그림 14).

문헌조사 단계는 대상 부지 및 주변 환경의 과학적 특성 제시와 관련된 법적 요구사항 및 기준을 기반으로 문헌 정보를 수집하는 단계로, 부적합한 지역을 제외하기 위해, 자연적 섭동(perturbation)의 잠재적 영향과 범위를 확인하는 데 중점을 두고 수집된 정보의 검토를 기반으로 평가되며, 미고결 제4기 퇴적물의 분포와 광물자원의 존재에 대한 평가가 수행된다.

예비 조사 단계에서는 문헌조사 단계에서 수립된 조사계획에 따라 부지와 주변 지역에 대한 체계적인

조사를 수행한다. 지표 탐사, 수리학적 조사, 지각 변형 및 미세지진 관찰, 지구물리탐사, 시추공 조사 등을 포함한 예비 조사가 이루어지며, 세부 조사 지역 선정에 대한 법적 요구사항을 고려하여 자연 섭동의 영향 범위, 미래 영향, 터널 굴착 및 처분장의 안전 기능을 평가하고, 처분장 안전 기능 평가 결과에 따라 명백히 부적합한 지역이 제외된다.

세부 조사 단계에서는 지표면과 특수(special) 지하조사시설(underground investigation facility, UIF)을 통해 체계적인 조사를 수행한다. 소규모의 부지모사 모델을 구성하여, 모암의 수리학적 및 역학적 특성, 핵종 이동 및 물 전도 기능을 이해하고, 지질학적 정보를 고려하여 매개변수의 불확실성을 줄이게 된다. 이후, UIF 내 추가 연구에서는 세부 수준과 함께 특정 항목을 결정하여 조사를 진행한다. 세부 조사 2단계에서는 적합한 지역에 UIF를 건설하고, 지하의 지질학적 특성과 변화를 구체적으로 파악하기 위한 조사가 이루어진다.

4.6 프랑스

프랑스는 1991년 12월 폐기물법(Loi Bataille)을 통해 방사성폐기물 관리의 일반 원칙을 처음으로 확립했으며, ANDRA는 1991년 설립 이후 프랑스에서 고준위 및 장수명 중준위 방사성 폐기물 관리와 관련된 연구를 수행해 왔다. 1994년부터 1996년까지 ANDRA는 다양한 프랑스 지역의 지질을 연구하

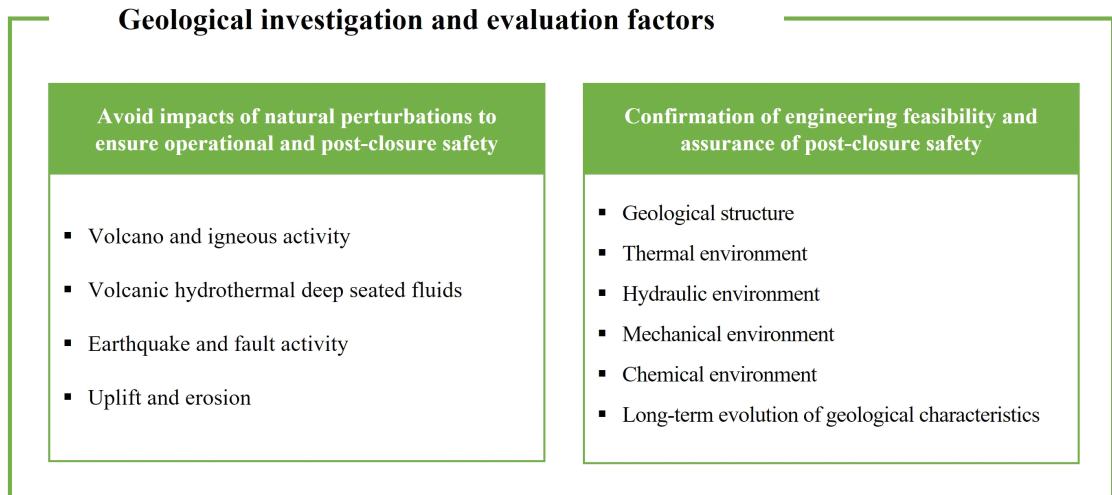


Fig. 14. Geological investigation and evaluation factors for site selection in Japan (NUMO, 2021).

여 지하연구시설(underground research laboratory, URL) 건설을 위한 부지로 적합한 지역을 조사했으며, Gard, Meuse 및 Haute-Marne의 점토층과 Vienne의 화강암 산맥, 총 4개의 부지가 선정되었다. 조사 결과, 지질학적 특성이 점토층의 연속성으로 인해 특히 적합하다는 것이 확인되어 1998년에 프랑스 정부는 Meuse 및 Haute-Marne 지역 내에 위치한 Bure를 URL 부지로 선정하였다.

URL (Bure URL)은 1999년 11월에 건설 허가를 받았으며, 장기적인 안전성을 보장하기 위해 실제 처분장과 유사한 조건에서 광역적으로 확인된 심층

처분에 유리한 점토 모암층에 접근하는 것을 목표로 운영되었다. URL은 2000년 8월 건설이 시작되었으며, 부지 점토층은 약 130 m의 두께로 422-552 m 깊이에 위치하고 있다(그림 15).

URL 구축 및 운영은 Centre Industriel de stockage GEOlogique (Cigeo) 프로젝트개발계획의 마일스톤과 밀접한 관련이 있는 세 가지 주요 단계로서 정의할 수 있다(Delay, 2019).

- 2000-2005년: Cigeo 프로젝트의 타당성 원칙, 장기 안전을 입증하기 위한 Callovo-Oxfordian 점토층의 유리한 특성 확인

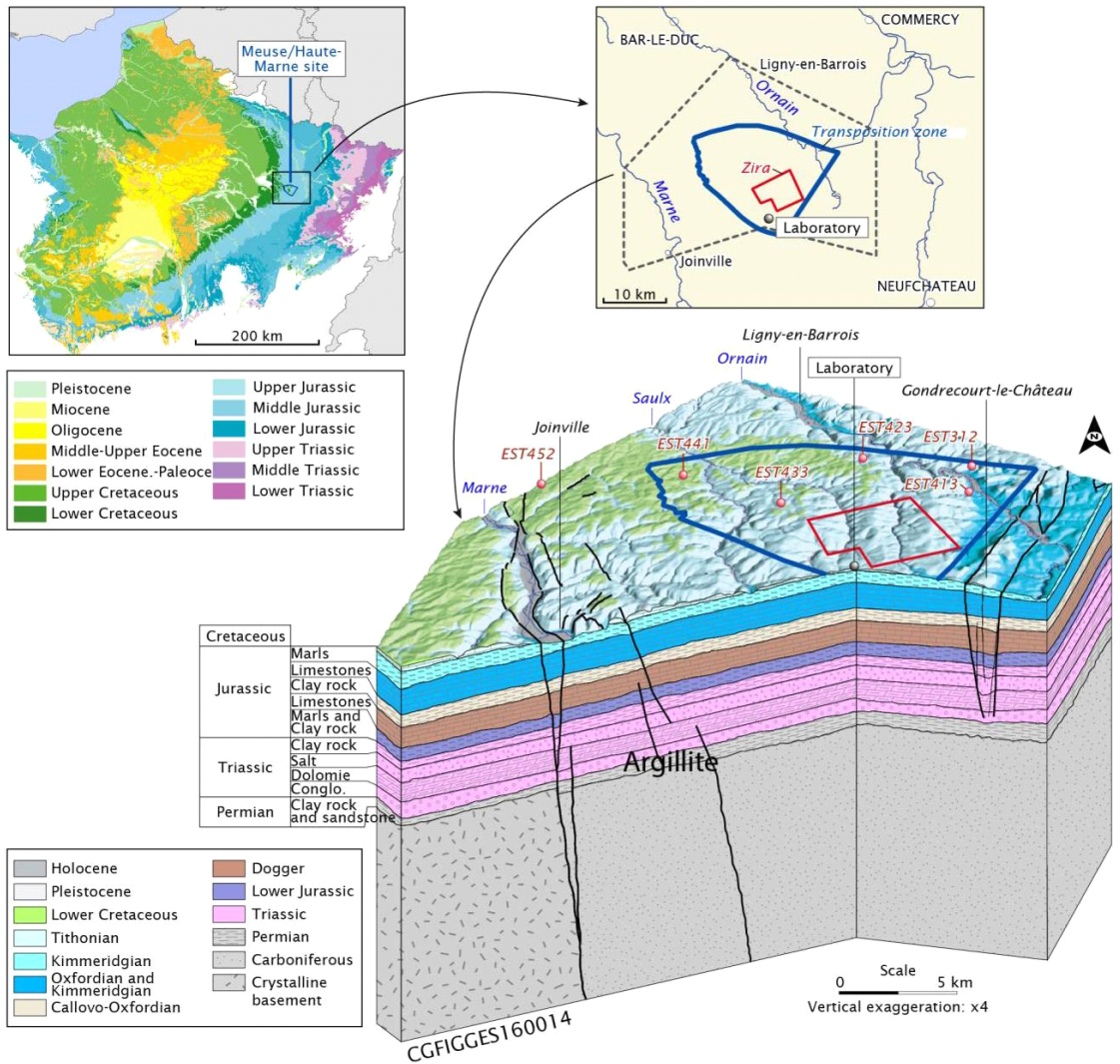


Fig. 15. Location and geological features of the Bure URL in France (Delay, 2019).

- 2006-2010년: Callovo-Oxfordian의 처분장과 공학적 구성 요소의 거동에 의해 생성될 교란의 심층 특성화

- 2010-2015년: 100년의 긴 운영 기간 끝에 안전하게 폐쇄 및 봉인될 수 있는 가역적 처분장을 설계하기 위한 건설 및 운영 옵션 사전 시험

ANDRA의 전체 Research and Development (R&D) 프로그램의 일부인 URL의 과학 및 기술 R&D 프로그램 정의를 위한 기본 전략 및 로드맵은 프랑스의 회에서 투표한 법적 체제에 의해 추진되며 전체 프로젝트 개발 절차는 그림 16과 같다. R&D 프로그램은 광범위한 과학적 및 기술적 영역과 과학적 지식체계, URL의 과학적 및 기술적 R&D 활동과 지상 연구실을 다루고 있다.

1995 도입된 프로젝트개발계획(Project Development Plan, PDP)은 Cigeo 프로젝트와 관련된 모든 활동을 조정하고 지속적인 발전을 위해 일정을 연속적인 연구 단계로 세분화하는 데 사용되었다. 각 개발 단계 완료는 프로젝트 검토를 통해 확인되었으며, 이 과정에서 얻은 정보를 취합하여 전체 시스템의 성능을 평가하였다. 이후 잔존하는 불확실성이 처분 기능에 미치는 영향을 평가하고, 결과는 평가자와 이해관계자에게 보고되며 이를 토대로 목표를 재정의하게 된다.

Cigeo 처분 개념은 인간과 환경을 장기적으로 보호하기 위해 방사성 물질 확산으로부터 방어하기 위한 목적을 가지며, 이를 위해 방사성폐기물 처분 시스템의 특정 구성 요소에 장기적인 안전 기능을 부여한다. 방사능 봉쇄 특성은 물 순환 제한, 독성 요소 방출 제한, 유출 방지 및 환경으로의 이동 지연, 모암 특성 보존을 포함한 안전 기능에 의존한다. 이러한 안전 기능들은 Callovo-Oxfordian 층의 유리한 특성에 의존하므로, 처분 설계는 점토층의 유리한 특성을 최대한 활용하고 강화하는 것에 그 목적이 있으며, 이를 달성하기 위해 URL이 구축되었다. 안전성 분석을 포함한 R&D 연구 전략은 Cigeo의 기술 설계 옵션을 제공하기 위해 URL 활동과 함께 일반적인 지질학적 특성, 폐기물 구성 요소, 램프, 수경 및 강도, 실제 규모의 처분장, 환경 모니터링, 관찰 및 감시, 인간 및 사회과학의 6가지 주요 구성 요소를 고려하였다.

URL의 전반적인 목표는 처분 개념에 대한 기여

도를 평가하기 위해 잠재적 모암 매체에 대한 직접 접근을 용이하게 하는 것(생물권으로부터 격리를 목적으로 적절한 깊이에서의 처분장 건설 가능성 확인을 위해 봉쇄 특성을 확인)과 확실한 처분장의 배치를 정의하고 프로젝트 단계 전반에 걸쳐 안전 평가를 위한 정보 및 데이터를 제공하는 것이다. 1992년부터 2020년까지 이루어진 URL 활동의 내용을 정리하면 그림 17과 같다.

5. 해외 처분 선도국의 법적 및 부지개발 체계 사례 고찰

고준위방사성폐기물 처분장 부지확보를 위한 해외 처분 선도국인 스웨덴, 핀란드, 스위스, 프랑스, 독일, 일본의 법적 체제 및 부지개발체계를 검토한 결과는 다음과 같다.

먼저, 법적 체제의 경우 공통적으로 검토된 모든 국가에서 방사성폐기물의 심층 처분을 위한 관련 법률을 제정하고 부지선정을 위한 법적 요구사항 및 기준 마련을 시작으로 각국이 지정된 규제기관이 법률 및 규정에 따라 안전 규제를 수행하고, 사업자로 선정된 기관이 이와 관련된 프로젝트 및 연구를 공식화하고 수행하고 있다. 핀란드의 경우, 1988년 발효된 새로운 원자력법에서 핀란드만의 독특한 의사결정 과정의 개념인 원칙적 결정(DiP)을 도입하여 최종 부지선정 절차를 진행하였다. 프랑스, 독일, 일본은 가역성의 원리를 도입함으로써, 후속세대가 이전 결정을 재평가하고 관리대책을 수정하는 등의 가능성을 법적 체제에 명시하여 유연성을 제공하였다. 이는 대부분의 국가에서 언급되고 있는 방사성폐기물의 처분 및 관리에 대해 현세대가 미래 세대에 대해 부당한 부담과 의무를 전가하는 것을 방지해야 한다는 측면과 관련하여 중요한 부분이다. 해외사례 분석 결과, 법적 체제 내에서 가장 중요하게 다뤄져야 할 부분은 장기 안전성을 확보하기 위한 부지선정 전략과 계획에 대한 구체적인 지침이 수립되어야 한다는 점이다. 또한, 부지선정 절차 및 처분장 운영 등에 있어 투명성을 보장할 것을 법적으로 명시하여 사회적 수용성 측면에서 발생할 수 있는 큰 저항을 최소화할 수 있도록 해야 할 것이다. 이와 관련하여, 독일은 사회적 수용성을 높이기 위해 기존의 원자력법을 개선하여 법적 체제 내에서 규정된 단계별 기

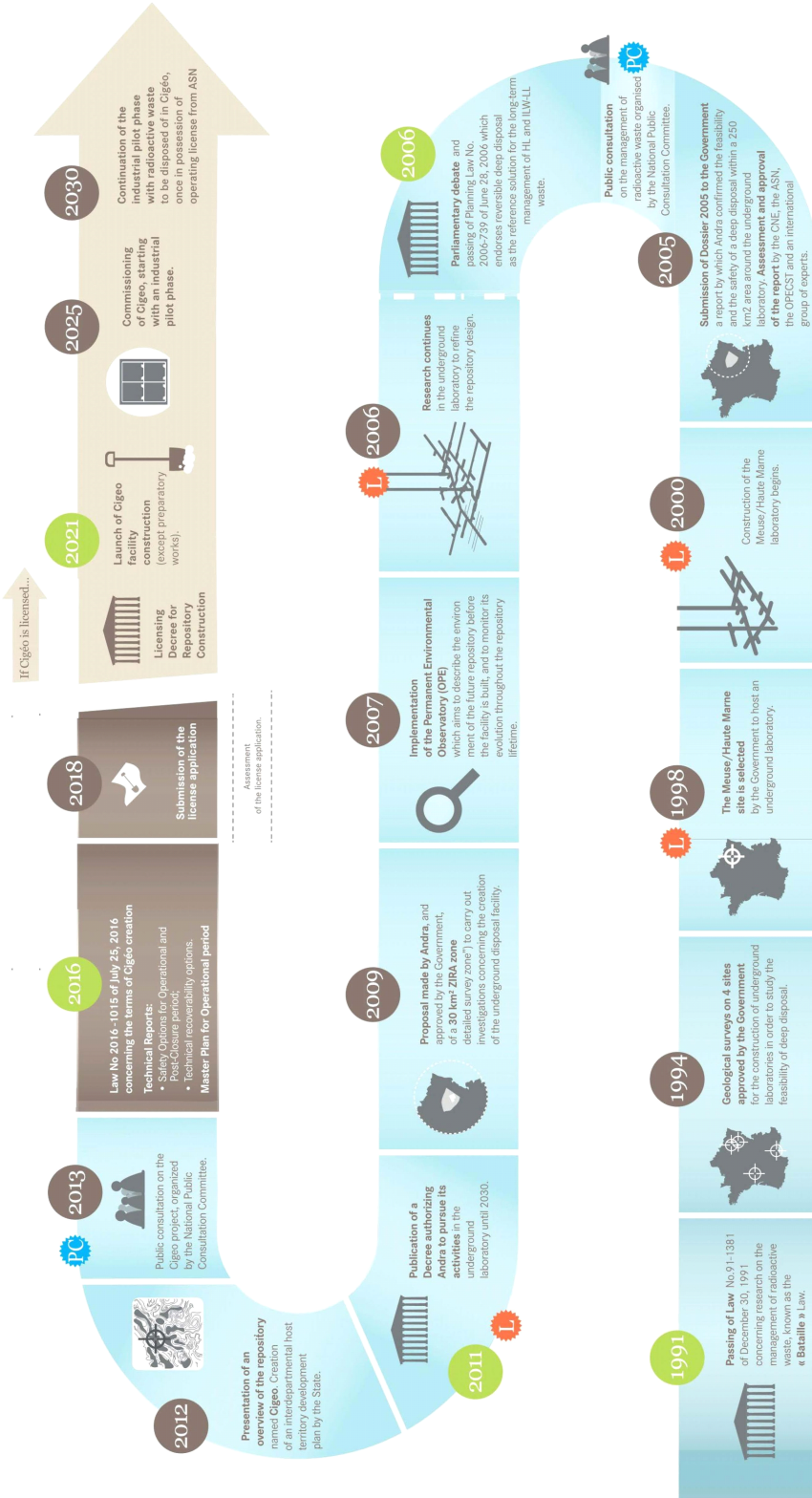


Fig. 16. Development stages of the cigeo project in France (Delay, 2019).

준 및 절차에 의해 부지를 선정하도록 명시한 바 있다. 또한, 프랑스가 처분장 주민의 참여를 목적으로 이해관계자 및 대중과 협력하여 5년마다 운영 마스터플랜(PDE)을 개발하고 갱신하도록 규정한 사례를 들 수 있다.

두 번째로, 해외 처분 선도국들의 부지개발체계의 경우 최종 처분장 부지선정을 위해 자국의 전반적인 지질학적 정보 및 지식을 획득하고 예비 조사 및 상세 조사 등의 단계적 조사 절차를 거쳐 각국의 부지제외 기준을 적용하여 부적합 지역을 제외함으로써 적합한 것으로 예상되는 후보부지의 범위를 점차 좁혀나가며 추가 조사를 진행하는 방식으로 구성되었다. 또한, 공통적으로 전체적인 부지선정 체계는 대부분의 국가에서 IAEA가 제안한 부지선정 지침을 기반으로 진행되었으며, 지역사회 및 주민들과의 상호 작용 및 대화를 통해 의견을 수렴하는 등의 지역사회 및 주민 수용성을 중요하게 고려하고 있다. 그러나 부지선정 과정에서의 세부 조사 기준, 방법 및 기술, 부지제외의 기준, 부지선정 요소 및 방법론, 부지 적합성 평가는 국가별 법률, 규정, 기술 수준, 지질학적 특성 및 사회적 요소 등을 고려하여 최적의 방법 및 기술을 적용하고 있음을 확인하였다. 또한, 부지개발체계 확립 측면의 경우 스웨덴, 핀란드, 독일 및 프랑스는 처분 사업기관인 SKB, POSIVA, BGE 및 ANDRA에 의해 개발된 것에 비해, 스위스와 일본은 이와는 다른 방식으로 진행되었다. 스위스의 경우, 규제기관인 SFOE가 부문별 계획(sectoral

plan)에서 심층 처분장에 방사성폐기물을 처분하는데 적용되는 목표와 기준을 지정하였으며, 지질학적 처분부지 지역선정에 적용되는 요인들을 평가하는 기본 절차를 정의하고, 부지선정에서 후보부지 지역으로부터 확정부지로 이어지는 전반적인 절차를 규제하였다. 일본은 2000년 제정된 최종처분법에서 문헌조사, 예비 조사 및 세부 조사 3단계의 부지선정 과정을 명시하였으며, 이에 근거하여 NUMO가 부지선정 프로젝트 시행을 위해 설립되어 프로젝트를 수행하고 있다. 해외 처분 선도국들의 사례를 검토한 결과, 부지개발체계를 구축하는 과정에서 중요하게 고려되어야 할 점은 언급한 바와 같이 부지제외 기준, 조사단계별 고려 요건 및 조사 방법, 부지 성능검증 방법 등의 측면에서는 국가별로 상이할 수 있으나, 모든 과정은 수립된 법적 체제하의 규정 및 기준들을 철저히 준수하여 수행되어야 한다는 점이다. 또한, 부지선정 과정의 전반에 걸쳐 지자체 및 주민들의 처분 안전성에 대한 이해를 돕기 위한 노력과, 지속적인 교류 및 협의를 통해 원만한 부지선정 작업이 수행될 수 있도록 해야 할 것이다.

6. 결론

본 논문에서는 고준위방사성폐기물의 심층 처분을 위한 IAEA의 안전기준 지침과 해외 처분 선도국인 스웨덴, 핀란드, 스위스, 프랑스, 독일, 일본의 처분 부지선정을 위한 법적 체제와 부지개발체계 사례

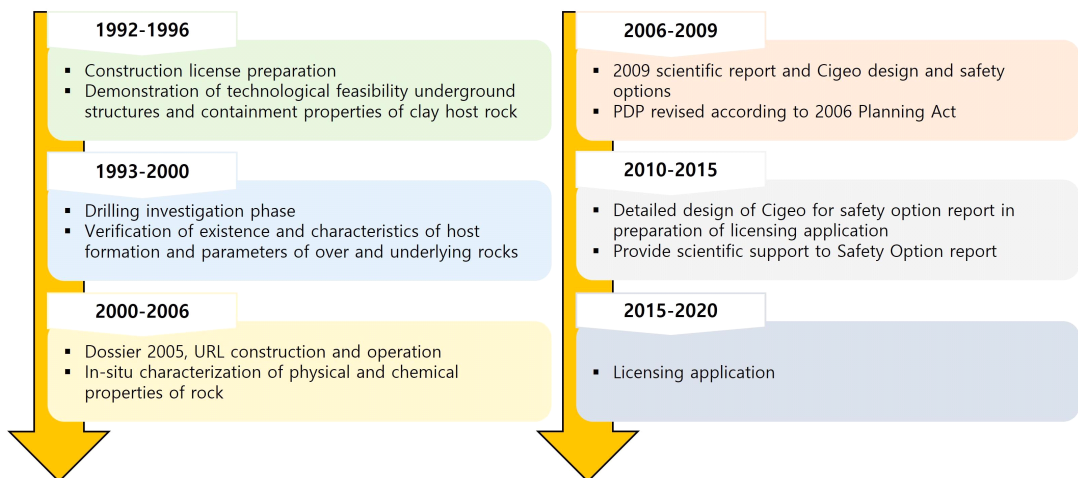


Fig. 17. Activities at the URL in France from 1992 to 2020 (Delay, 2019).

를 조사하고 분석하였다.

세계 처분 선도국들이 시행한 국가별 법적 체계와 부지개발 기술 체계를 살펴본 결과, 전반적인 흐름은 단계별로 유사하게 진행되었으나 각국의 개별 상황에 맞는 법률안과 지질 환경 및 조건에 적합한 방법 및 기술을 차별적으로 적용하여 철저한 조사와 평가가 수행되었음을 알 수 있다. 이를 고려하여 우리나라에서도 국내 고유의 여건, 지질 환경 및 특성에 맞는 법안 및 단계별 기술 체계를 구축하는 것이 중요할 것이다.

또한, 최종처분 부지선정을 위해서는 지방자치단체 및 주민과의 꾸준한 소통 및 참여 기회 제공을 강조하고, 투명성을 가진 절차를 통해 처분 안전성에 대한 충분한 이해를 도움으로써 민감한 부분인 주민 수용성의 문제를 해결하는 것이 가장 중요하고 핵심적인 공통분모라고 할 수 있으며, 이는 최종 고준위 방사성폐기물 처분장 부지선정에 성공한 스웨덴, 핀란드, 스위스, 프랑스의 사례를 통해 확인하였다.

본 논문의 해외 고준위방사성폐기물 심층 처분 선도국들의 법적 체제 및 부지선정 절차 사례 조사 및 분석 결과는, 우리나라의 향후 성공적인 고준위방사성폐기물 처분사업을 위한 효율적이고 체계적인 법적 체계 정립과 국내 지질학적 환경에 적합한 최적의 부지개발체계를 확립하는데 중요한 기초 자료로 활용될 수 있을 것이다.

감사의 글

이 논문은 2023년도 정부(원자력안전위원회)의 재원으로 사용후핵연료관리핵심기술개발사업단 및 한국원자력안전재단의 지원을 받아 수행된 연구사업입니다(No.2109092-0222-SB110).

REFERENCES

Aeikaes, T., 1985, The environmental factors to be considered in the site selection studies of the spent fuel final disposal (YJT-85-28). Nuclear Waste Commission of Finnish Power Companies, Helsinki, Finland, 81 p (in Finnish with English abstract).

Andersson, J., Ström, A., Svemar, C., Almén, K-E. and Ericsson, L.O., 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, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co., Sweden, 143 p.

BGE, 2020, Sub-areas Interim Report pursuant to Section 13 StandAG. Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH, Peine, Germany, 437 p.

Delay, J., 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, 104 p.

IAEA, 2011, Geological Disposal Facilities for Radioactive Waste. Specific Safety Guide. IAEA Safety Standards Series No. SSG-14, Vienna, Austria, 104 p.

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

NAGRA, 2008, Vorschlag geologischer Standortgebiete für das SMA- und das HAA-Lager, Geologische Grundlagen. Technischer Bericht 08-04, Nagra, Wettingen, Switzerland, 477 p (in German with English abstract).

NAGRA, 2021, Report of the site for the deep geological repository-Nagras proposal. Nagra, Wettingen, Switzerland, 35 p.

NEA, 1977, Objectives, concepts and strategies for the management of radioactive waste arising from nuclear power programmes. Nuclear Energy Agency of the OECD (NEA): OECD, Paris, 174 p.

Niini, H., Hakkarainen, V. and Patrikainen, P., 1982, Geological factors in the final disposal of high-level nuclear waste (YJT-82-36). Helsinki, Finland, 189 p (in Finnish with English abstract).

NUMO, 2021, The NUMO pre-siting SDM-based safety case. NUMO-TR-21-01, Nuclear Waste Management Organization of Japan, Japan, 709 p.

Salmi, M., Vuorela, P. and Kuivamaki, A., 1985, Geological site selection studies for the final disposal of spent nuclear fuel in Finland (YJT-85-27). Helsinki, Finland, 125 p (in Finnish with English abstract).

SFOE, 2008, Sectoral plan for deep geological repositories-conceptual part. Swiss Federal Office of Energy SFOE, Bern, 84 p.

SKB, 1992, Treatment and final disposal of nuclear waste. Programme for research, development and other measures. RD&D-Programme 92, Svensk Kärnbränslehantering AB, 143 p.

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

Received : August 9, 2023
 Revised : August 22, 2023
 Accepted : August 22, 2023