

## 고준위방사성폐기물 처분후보부지 조사에 고려할 구조지질학적 요소: 해외사례에 대한 고찰

채병곤<sup>1,\*</sup> · 최정해<sup>1</sup> · 김유홍<sup>1</sup> · 박승익<sup>2</sup>

<sup>1</sup>한국지질자원연구원 전략기술연구본부

<sup>2</sup>한국지질자원연구원 국토지질연구본부

### 요 약

최근 우리나라 정부는 향후 고준위방사성폐기물 처분부지 선정에 대한 계획을 발표하였다. 본 논문에서는 이를 감안하여 전 세계에서 최초로 사용후핵연료 처분부지를 확정한 핀란드를 중심으로 국외의 처분부지 선정 과정과 후보부지 선정단계별 지질조사 항목을 개괄적으로 살펴보았다. 핀란드는 총 4단계의 부지선정 과정을 통해 올킬루오토(Olkiluoto)를 최종처분부지로 확정하였으며, 이 과정에서 구조지질학적, 수리지질학적, 지구 화학적, 지질공학적 요소들을 중심으로 후보부지 적합성을 평가하였다. 특히 구조지질학적 요소들은 부지선정의 초기단계에서 중요한 판단요소로 작용하였고, 후보부지의 크기와 기본적 형태를 결정할 뿐만 아니라, 수리지질, 암반역학 등 다른 지질항목의 특성에 영향을 미친다. 본 논문에서는 해외 각국의 처분후보부지 선정기준 중 구조지질학적 요소들에 대해 기술기준의 내용을 살펴보았다. 국외 기술기준에서 주로 고려하는 구조지질학적 요소는 연성지질구조, 취성지질구조, 활동성단층, 화산, 지진활동 등이다. 이를 바탕으로 처분부지 조사와 평가를 위한 구조지질학적 요소의 필요개념을 본 논문에서 제안하였다. 각국별 지질조사 항목과 기술기준은 그 나라의 지질학적 조건과 환경에 적합하게 설정되어 있음을 감안할 때 우리나라도 향후 우리나라 고유의 지질환경을 신중히 검토하여 각 단계별 후보부지선정을 위한 지질항목 및 요소별 기술기준을 적절하게 설정하는 것이 중요하다.

**주요어:** 고준위방사성폐기물, 처분부지, 구조지질학, 부지선정기준, 지질조사항목

**Byung-Gon Chae, Junghae Choi, You Hong Kihm and Seung-Ik Park, 2017, Geological structural parameters to be considered for siting of HLW repository: A review for case studies of foreign countries. Journal of the Geological Society of Korea. v. 53, no. 1, p. 207-219**

**ABSTRACT:** In recent, Korean government announced a plan to select a disposal site for high level waste (HLW) of nuclear fuel. This study mainly introduces the Finnish site selection process for the spent nuclear fuel (SNF) and the geological factors considered in each site selection stage. Olkiluoto site was selected as the final SNF repository through four stages of siting process in Finland. In the siting process, parameters of structural geology, hydrology, hydrogeochemistry and engineering geology are important to assess the suitability of the candidate sites. The structural geological parameters were considered as the most important evaluation parameters for the site selection. They affect the sizes and basic shapes of the candidate sites and influence properties of other geological factors such as hydrogeology and rock mechanics. This study also discusses siting criteria, related with structural geology, considered in the foreign countries. The major structural geological parameters, considered in the siting criteria in many countries, are ductile structures, brittle structures, capable fault, volcano and seismic activity. Based on the site selecting criteria of structural geological parameters, this study discussed the concept of the parameters to be considered for site investigation and evaluation. Since the foreign site investigation factors and criteria have been decided based on the geological environment in each country, it is important to setup Korea-specific siting factors and criteria based on the comprehensive studies and investigations of the Korean geological characteristics.

**Key words:** high level waste, disposal site, structural geology, siting criteria, site investigation factor

*(Byung-Gon Chae, Junghae Choi and You Hong Kihm, Climate Change Mitigation and Sustainability Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon 34132, Republic of Korea; Seung-Ik Park, Geology Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon 34132, Republic of Korea)*

\* Corresponding author: +82-42-868-3052, E-mail: [bgchae@kigam.re.kr](mailto:bgchae@kigam.re.kr)

## 1. 서 론

우리나라에서 원자력발전을 통해 향후 발생될 것으로 예상되는 사용후핵연료를 고려할 때, 우리나라도 사용후핵연료를 포함한 고준위방사성폐기물의 관리를 본격적으로 준비해야 할 상황이다. 따라서, 정부에서는 고준위방사성폐기물의 안전한 처분과 관리를 위해 2016년 7월 25일 「고준위방사성폐기물 관리 기본계획」을 확정하여 향후 사용후핵연료를 포함한 고준위방사성폐기물의 관리 정책과 일정에 대해 발표하였다.

우리나라는 1983년부터 고준위방사성폐기물의 관리시설 부지확보를 시도하였지만 총 9차례의 시도가 실패하였고, 경주 중저준위방사성폐기물 처분장 부지를 2005년에 주민투표로 결정하여 현재 운영 중이다. 이 과정에서 많은 사회적 갈등과 문제가 발생하였고, 이에 따라 정부와 주민, 지역과 지역, 주민과 주민간의 대립이 심각한 상황에 이르기까지 했다. 중저준위방사성폐기물 처분과는 달리 고준위방사성폐기물 처분은 폐기물이 갖는 높은 방사능 준위로 인해 많은 사람들이 처분장의 설치를 우려하고 있는 것이 사실이며, 이에 따라 철저한 과학적 조사와 평가에 기반하여 객관적이고 투명한 과정을 통해 처분장이 선정되어야 한다.

고준위방사성폐기물이 갖고 있는 방사능 독성이 자연계에 존재하는 우라늄 광상의 방사능 독성과 동일한 수준으로 감소하기까지 최소 1만 년 이상의 기간이 소요되는 것으로 알려져 있다(IAEA, 2011). 따라서, 천연방벽과 공학적방벽으로 구성되는 고준위방사성폐기물 처분시스템의 방사능 자연기능은 최소 10만 년 이상의 기간 동안 방사능이 자연계로 누출되지 않도록 이를 차단하여야 하며, 이를 위해서는 자세한 지질조사를 통해 처분부지의 장기안전성(long term safety)을 평가하여야 한다.

처분부지의 장기안전성을 평가하기 위해서는 다양한 항목의 지질인자를 조사·분석하여야 하며, 각 지질인자의 특성을 종합적으로 평가한 결과를 토대로 처분부지의 장기안전성과 처분적합성을 판단하여야 한다. 이러한 평가는 지표의 지질환경 뿐만 아니라 고준위방사성폐기물의 처분심도인 최소 지하 300 m 이하의 지질환경을 면밀히 분석하여 이루어져야 한다. 장기안전성은 처분부지가 갖고 있는 전

반적인 지질학적 특성 즉, 암석 종류, 지질구조, 지진, 지각 용기/침강, 수리지질, 지구화학, 지질공학, 지열 등을 포함한다. 이 중 지질구조는 지진, 지각 용기/침강, 수리지질, 지질공학 등의 지질특성에 직간접적 영향을 미치는 것으로 그 중요성이 크다고 할 수 있다. 따라서, 본 논문에서는 처분부지의 지질 특성 평가와 관련하여 지질구조의 중요성과 해외 처분분야 연구사례를 통해 어떤 항목의 구조지질학적 요소가 평가되는지를 알아보고, 국내에서 고준위방사성폐기물 처분후부지 지질조사와 평가를 위한 구조지질학적 요소의 필요개념을 제안하고자 한다.

## 2. 핀란드의 처분부지 선정절차 사례: 핀란드를 중심으로

핀란드에서 1970년대 중반 올킬루오토(Olkiluoto) 원자력발전소 내 사용후핵연료 관리에 대한 연구를 기점으로 심지층처분이 대안으로 고려되면서 1978년에 심지층처분 타당성에 관한 체계적인 연구가 시작되었다. 1982년에는 다중방벽과 장기 안전성을 고려한 처분시스템 타당성 연구결과가 발표되었고, 1983년에는 정부가 사용후핵연료 심지층처분에 대한 처분목표와 프로그램을 결정함에 따라 부지선정 작업을 착수하였다. 1999년 방폐물처분사업 주체인 Posiva 사가 KBS-3 처분시스템을 바탕으로 올킬루오토를 최종처분시설 부지로 제안하는 정부의 원칙결정(Decision in Principle, DiP) 신청서를 제출하였고, 2000년 12월 정부의 원칙결정 승인 후 2001년 5월 의회의 투표 결과로 원칙결정을 통과시켰다. 한편, 2004년 올킬루오토에 지하연구시설(ONKALO)을 건설하여 처분심도에서의 처분시스템에 대한 실증을 하였고, 처분시설 건설인허가는 2015년 11월 12일에 발급되어 2016년부터 처분시설 건설을 착수한 상태이다. 최종 처분은 2020년부터 착수하여 2112년 처분을 종료하고 처분시설은 2120년까지 폐쇄할 예정이다.

핀란드는 처분부지 선정을 위해 1983년부터 1985년까지 핀란드 전 국토를 대상으로 선별작업을 수행하였다. 1986년부터 1992년까지 부지특성조사를 수행하고 1993년부터 2000년까지 상세조사와 환경영향평가를 수행하였다. 핀란드가 수행한 후보부지조사와 선정단계를 정리하면 다음과 같다(표 1).

**Table 1.** Site selection stages for the spent nuclear fuel repository in Finland.

Siting stage	Purpose	Investigation items	Remarks
<Stage 1> Regional site identification survey	Site selection for preliminary site characterization	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Regional site survey</li> <li>· Selection of target areas (100~200km<sup>2</sup>)</li> <li>· Evaluation of environmental factors</li> <li>· Selection of investigation areas (5~10km<sup>2</sup>) mainly based on geological structures</li> </ul>	1983~1985 (102 areas)
<Stage 2> Preliminary site characterization	Preliminary site characterization for potentially suitable bedrock blocks	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Site selection for preliminary site characterization</li> <li>· Geological evaluation and classification</li> <li>· Survey of environmental factors</li> <li>· Evaluation of hydrology and hydrogeochemistry</li> </ul>	1986~1992 (5 sites)
<Stage 3> Detailed site characterization	Detailed site characterization for the selected sites in Stage 2	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Site selection for detailed site characterization</li> <li>· Detailed field investigation</li> <li>· Assessment of groundwater flow and hydrogeochemistry</li> <li>· Evaluation of rock mechanical properties</li> <li>· Evaluation of constructability</li> </ul>	1993~2000 (4 sites)
<Stage 4> Site confirmation	Site selection by detailed site investigation	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Evaluation by STUK</li> <li>· Acceptance and cooperation of Eurajoki local government</li> <li>· Application of DiP from central government</li> <li>· Ratification of national assembly</li> </ul>	1999~2001 (1 site)

## 2.1 단계 1 (광역부지조사 단계)

핀란드에는 오랜 지질연대의 변성암 및 화성암이 지배적으로 분포한다. 핀란드 원자력발전사업주체인 TVO (Teollisuuden Voima Oyj)는 방사성폐기물 처분시설 부지로 결정질암을 제안하였다. TVO는 핀란드 전역을 조사한 후 수집된 자료로부터 처분시설로 부적절한 지역을 배제하고 선별된 지역들을 대상으로 추가적인 조사를 수행하였다.

광역부지조사 단계(단계 1)에서는 대규모 선형구조나 단층대로 나뉘는 큰 규모의 암반블록을 확인하는데 목적이 있으므로, 처분시설 장기안정성에 가장 중요한 지질학적 요소인 단층대의 위치와 방향을 조사하였다. 단층대는 원암보다 풍화나 침식 특히 빙하에 약하며 지표면에서 계곡이나 함몰지형을 형성하므로 쉽게 구별할 수 있다. TVO와 핀란드지질조사소(GTK)는 지형도, 위성사진, 항공사진, 호수/하천도, 광역지자기도, 중력지도를 이용하여 핀란드 지형을 분석하고 단층대의 위치와 크기를 나타낸 지도를 작성하여 그 연장과 폭에 따라 여러 종류로 분류하였다.

### 2.1.1 목표지역(target area)

전 국토를 대상으로 핀란드지질조사소는 위성사진과 항공사진을 이용하여 지질인자를 분석하고 잠재적으로 적합한 지질특성을 보이는 수 백 개의 지

역을 선별하였으며, 이 지역을 목표지역(target area)으로 정의하였다. 주요 선형구조와 단층대를 경계로 면적이 100 ~ 200 km<sup>2</sup>인 327개 블록(목표지역)을 구분하였다(그림 1). 이들 지역을 모두 조사하는 것은 불가능하므로 지질학적으로 선호되는 블록을 제한할 필요가 있다. 327개 지역의 범위를 축소하는 과정에서 환경인자와 운반인자를 고려하고, 환경인자를 다시 배제조건과 적합조건으로 나누었다. 배제조건으로는 지하수관리구역, 인구밀도 및 국립환경보호구역을 고려하였다. 운반조건의 경우 핀란드는 도로와 철도 분포가 복잡하지 않아 교각 무게제한과 같은 인자를 고려하였고, 토지소유권의 경우 토지조사허가서를 받아야하므로 소유자가 정부나 대기업일 경우 협상이 비교적 쉬워 이러한 조건이 선호되었다.

목표지역은 3등급으로 분류하였다. 등급I 목표지역은 최소 인구밀도, 우수한 운반경로 및 비경작지가 해당한다. 등급 I과 II 목표지역만이 부지선정 다음 단계로 진행할 수 있으며, 이를 통해 등급I 지역 76개, 등급II 지역 76개 및 등급III 지역 186개로 분류하였다. 등급별 분류체계와 환경인자 분석을 통해 327개 목표지역으로부터 162개 목표지역을 선별하고 등급III인 165개 지역은 제외하였다. 선별된 162개 목표지역은 기존자료와 야외지질조사를 통해 다시 목표지역을 5 등급으로 분류하였다. 이 분석의 기본원칙은 다음과 같다(TVO, 1992).

- 목표지역 크기
- 목표지역내 더 작은 기반암(암반블록) 존재 가능성
- 단열 밀도
- 지형
- 지질조사 용이성

**2.1.2 조사지역(investigation area)**

추가적인 등급분류를 통해 162개 목표지역을 61개 목표지역으로 축소하였다. 61개 지역이 등급 I, II 및 III에 속하는 것으로 분석되었고, 등급 V에 속하는 지역은 8개로 평가되었다(그림 1). 162개 목표지역 중 61개 지역이 조사대상 지역으로 선정되었고, 61개 목표지역으로부터 항공사진, 지도 및 야외조사를 통해 목표지역내 소규모의 많은 지역이 부지선정에 필요한 지질학적·환경적 기준에 적합한 것으로 판명되었다(TVO, 1992). 따라서 61개 목표지역으로부터 134개 조사지역(investigation area)을 도출하였다.

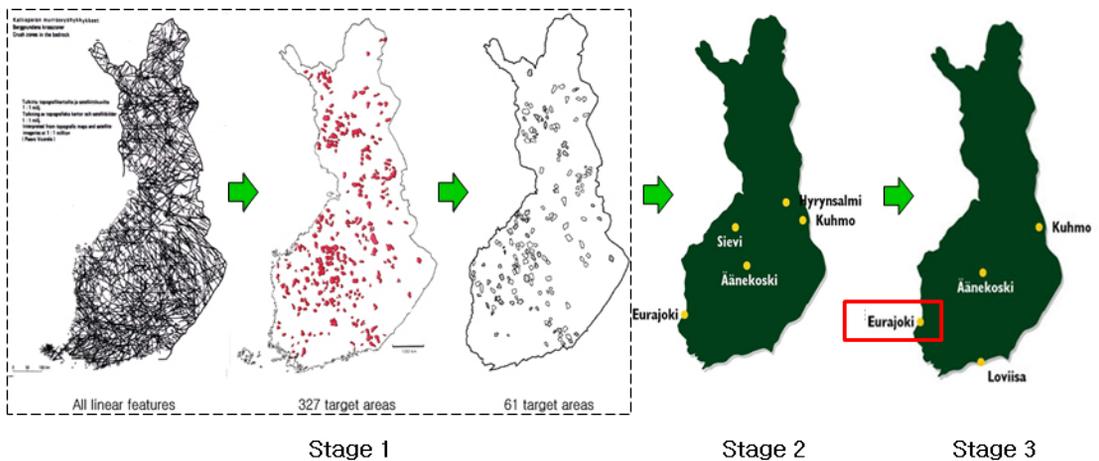
조사지역의 평가 및 분류는 조사지역에 대한 기존 지질정보와 지질도에 포함된 정보를 바탕으로 하였으며, 1:60,000 축척 항공사진 해석을 통해 대규모 단층 또는 단열대에 대한 해석을 집중적으로 수행하였다. 핀란드에서는 결정질암의 단열대 존재여부,

단열밀도 및 지하수 자원을 부지선정 시 중요한 인자로 고려하였다. 단열은 노출된 암반의 선형 종단면상에서 측정하였으며, 약 15 km의 선형 종단면을 대상으로 대략 13,000개의 단열을 측정하였고, 단열빈도를 근거로 등급을 분류하였다. 분류에 따르면 조사지역의 60% 정도는 단열발달정도가 미미하며, 약 30%는 보통 단열빈도를 보이고, 2% 정도는 높은 단열빈도를 보이는 것으로 조사되었다. 단열빈도가 낮은 지역에서는 0.6~0.8 단열/m로 조사되었다. 핀란드의 단열암반은 주로 화강반암인 것으로 나타났는데, 화강반암은 보통 수평적인 단열이 발달되어 있고, 수평단열은 노두에서는 탐지하기 어려우며 야외에서는 경사가 크거나 수직방향 단열만이 탐지된다. 단열밀도와 더불어 광역적 및 지역적 파쇄대를 조사지역 선택 시 중요한 인자로 고려하였다(Posiva, 2000).

조사지역을 평가하기 위한 자료수집 예를 표 2에 나타내었다. 각 인자들은 점수 1점(최고)에서부터 5점(최저)까지 부여되며, 조사지역은 전체점수를 바탕으로 4등급으로 분류한다. 등급 I은 가장 선호되는 지역, 등급 II는 2차 선호지역, 등급 III은 추천되거나 보류되는 지역, 등급 IV는 추천되지 않는 지역을 나타낸다.

**Table 2.** An example of geological factors considered in assessing the investigation areas (Posiva, 2000).

Investigation area	Size	Topography	Fracture zones	Fracture density (No. of fract./m)	Level of exposure	Total score	Class	Rock type
Osara	1	1	2	5	2	11.0	II	(code used)



**Fig. 1.** Distribution of the candidate sites in Finland (Posiva, 2000).

조사지역의 크기는 처분시설을 충분히 포함할 수 있도록 5 ~ 10 km<sup>2</sup>로 규정하고, 전반적인 지질평가는 핀란드지질조사소가 지질학적 적합성을 4등급으로 분류하여 수행하였고, 비지질학적 인자는 TVO가 평가를 수행하였다. 61개 목표지역으로부터 134개 조사지역을 선별하고 지질조사, 분류, 환경인자 조사를 통해 이 지역들을 4개 범주로 나누고 가장 낮은 범주에 속하는 33개 조사지역을 고려대상에서 제외하였다. 이러한 과정을 통해 결국 101개 조사지역이 적합할 것으로 판명되었다.

토지이용제한구역, 환경보호구역 및 지하수 보존구역이 목표지역을 분류하는데 이용되었다. 그러므로 조사지역에서도 더욱 상세한 환경인자 조사가 수행되어야 하며 인구밀도, 운송조건 및 토지소유권 등을 조사하였다. 토지이용제한계획, 환경보호구역 및 지하수보존지역과 같은 정보는 지도나 문헌을 통

해 다시 검토하였으며, 1:20,000 지도를 통해 134개 조사지역의 중첩 정도, 인구, 도로상황 등의 정보를 획득하였다. 토지소유권은 관할지역 지적과로부터 최신 지도(1:10,000)를 통해 조사하였고, 지역평가국에서 출판한 문헌을 통해 국유지 지도를 조사하였다. 이런 조사를 바탕으로 조사지역은 인구밀도, 운송조건 및 토지소유에 따라 세 개의 등급으로 나누었는데, 조사지역으로 “가장 적합한 등급 1 조사지역”, “양호한 등급 2 조사지역” 및 “부적합한 등급 3 조사지역”으로 분류하였다(TVO, 1992).

**2.2 단계 2 (부지특성조사 단계)**

부지특성조사단계(단계 2)는 1986년부터 1992년까지 그림 2와 같이 수행되었다. 1986년 환경부는 17개 조사지역은 배제하고 12개 다른 지역을 재분류할 것을 권고하였다. 재평가를 하는 이유는 보존지역 지

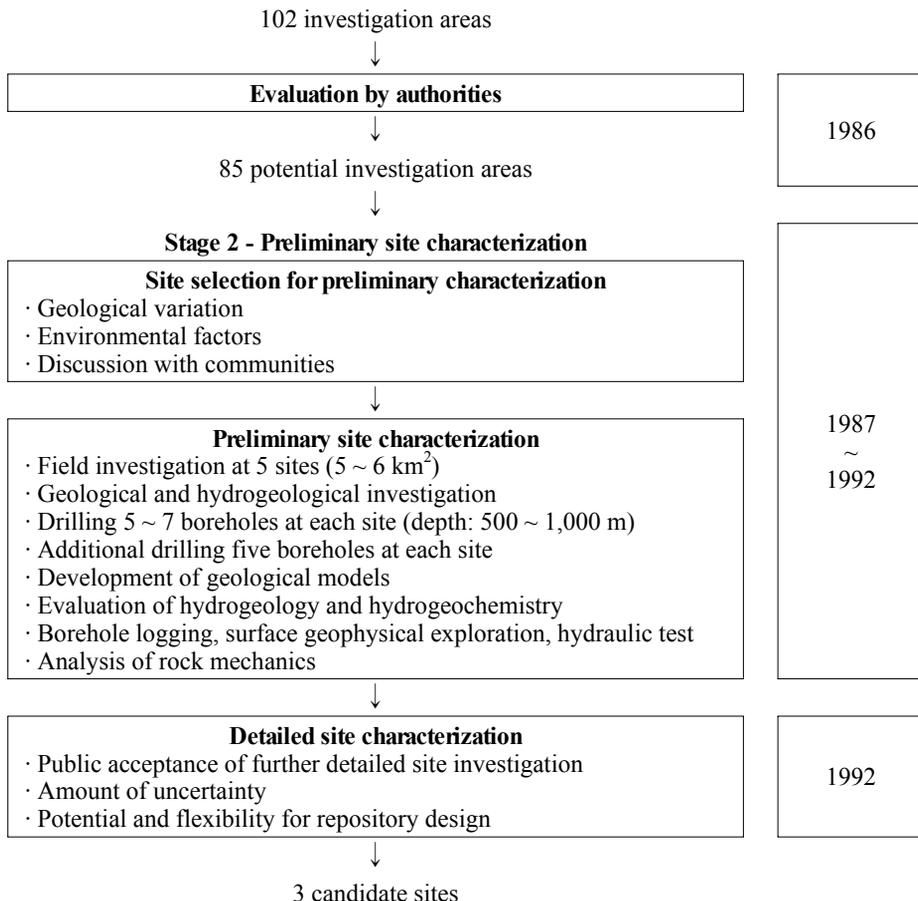


Fig. 2. Process of the candidate sites selection and investigation items in the stage 2 (Posiva, 2000).

정에 대한 미 공표된 계획이 있었고, TVO가 환경인자를 평가하는 동안 이를 인지하지 못하였기 때문이다. 이에 따라 환경부가 102개 조사지역을 검토하여 지역개발계획이 확정되지 않은 지역을 제외한 85개 지역을 선별하였다.

이 단계에서는 대중의 지지가 무엇보다도 중요하게 작용하였다. 지질학적 인자와 더불어 환경인자와 토지소유가 고려되었는데, 그 중 가장 중요한 운반 측면은 철도로 간주하였다. 환경인자의 경우 모든 지역이 비슷한 인구밀도(주로 매우 낮음), 보호구역 등 여러 인자들이 비슷한 양상을 보였으며, 조사지역의 절반은 개인소유 토지로 조사지역으로 고려할 수 없었다. 부지들 간의 암석학적 차이는 부지선정 시 중요한 인자이며, 조사지역의 대부분이 국토의 중북부 화강암 지대에 분포하고 있고, 극소수만이 가장 연대가 오래된 시생누대 지역에 분포하고 있다. 상대적으로 많은 수의 후보부지가 지형적 기복이 적고 지질연대가 좀 더 젊은 조건을 갖는 핀란드 남서부에 분포하고 있다.

1987년 TVO는 5개의 부지특성 조사지역(5 ~ 6 km<sup>2</sup>)을 다음과 같이 발표하였으며, 그림 1에 나타내었다.

- Romuvaara (Kuhmo): 편마암
- Veitsivaara (Hyrynsalmi): 화강암 및 암맥 편마암
- Kivetty (Konginkagnas): 반상화강섬록암
- Syyry (Sieve): 균질한 토날라이트
- Olkiluoto (Eurajoki): 운모편마암이 관입된 미그마타이트가 화강암-토날라이트와 교대

TVO는 <단계 2> 부지특성조사를 위한 부지선정 시 다음 두 가지 요소를 강조하였다.

- 가능한 한 단순한 지질을 가진 부지: 안전성평가와 관련된 불확실성이 제한조건 내에서 유지될 수 있어야 한다. 단순한 지질을 가진 부지는 간략한 부지조사와 안전성평가를 단순화하는 장점이 있다.
- 선정된 5개 부지들이 지질학적으로 유사한 특징을 보이기 때문에 이들 부지들을 비교하는데 지역사회의 영향 및 노동력 공급의 영향을 가장 중요한 인자로 고려하였다. 방사성폐기물 운반과 같은 인자들은 이미 이전 단계인 5개 지역을 선정하는 과정에서 고려되었다.

1987 ~ 1992년 동안 수행한 부지특성조사 결과, 예

비 심지층처분시설 설계도 및 지질모델을 근거로 안전성평가보고서(TVO, 1992)를 작성하였다. 부지조사와 예비안전성평가결과는 5개 지역 모두 적합한 것으로 판명되었으나, 이 중 두 개 지역(Syyry, Veitsivaara)은 조사의 용이성이 다른 후보지역들보다 복잡하여 고려대상에서 제외하였다. 따라서 나머지 3개 부지의 조사가 상대적으로 용이하고, 지하수 유동 시스템, 암반구조 및 지화학적 불확실성을 감소시키기 용이한 것으로 판명되었다. 부지감소는 대중의 반대 없이 진행되었으며, 원자력법이 개정된 후 1996년까지 3개 부지에서 조사를 계속하였다.

### 2.3 단계 3 (상세조사 단계)

TVO는 1993년에 상세부지조사를 위해 5개 부지 중 나머지 3개 부지인 Olkiluoto, Romuvaara 및 Kivetty를 선택하였다. 이 단계의 목적은 부지특성조사 단계에서 획득한 결과의 정확성을 향상하는데 있다. 즉, 개념모델 개발과 관련된 가정의 타당성 평가, 암반구조의 개념적 불확실성 조사, 해석 및 모델링 조사기술의 적합성을 평가하는데 있다. <단계 3>에서 수행한 부지선정절차를 그림 3에 나타내었다.

1994년 개정된 원자력법은 로비사(Lovisa) 원자력 발전소에서 발생한 사용후핵연료를 러시아에 반한하는 것을 1996년까지로 제한하고 사용후핵연료를 핀란드에 처분하도록 규정하였다. 로비사 원자력발전소는 중저준위방사성폐기물 처분시설 건설을 위해 조사한 지질환경 정보가 많았기 때문에 1995년 발전소 부지지역이 잠재적인 처분지역으로 고려되었다. 타당성 조사결과 3개 부지에 로비사 원자력발전소가 위치한 Hastholmen 섬이 추가되어 4개 부지에서 1997년부터 1999년까지 상세조사가 수행되었다.

### 2.4 단계 4 (부지확정 단계)

1999년 부지선정 프로그램이 계획대로 달성되었고, Posiva사는 올킬루오토에서 상세조사를 수행하기 위한 원칙결정(DiP) 신청서에 4개 후보부지의 특성 및 평가보고서와 안전성평가보고서를 제출하였다(Posiva, 1999). 이 보고서에 따르면 4개 부지 모두 사용후핵연료 처분시설을 건설하기 위한 지질환경이 적합하며 어느 한 부지가 특별히 우세한 것으로 나타나지 않았다. 이를 토대로 방사선·원자력안전청(STUK)은 안전성평가와 보고서를 검토한 후

올킬루오토를 잠재적인 처분시설 부지로 승인하고 정부에게 처분시설 개발프로그램 다음 단계를 진행할 것을 권고하였다. 방사선·원자력안전청은 천연방벽으로서의 암반은 다음과 같은 역할을 수행해야 한다고 발표하였다(STUK, 2001).

- 처분터널 주변의 무결암은 폐기물 처분용기 주변의 지하수 유동을 제한하여야 한다.
- 낮은 지하수 유동률, 화학조건의 저감, 용해된 화학성분의 지연과 같은 선호되는 조건을 가진 원암은 방사성 핵종의 이동을 제한하여야 한다.
- 암반은 자연현상과 인간활동으로부터 오염물질 을 격리하여야 한다.

또한, 천연방벽 및 부지의 지질학적·수리지질학적 환경인자들은 다음과 같은 조건을 만족할 것을 제시하였다.

- 처분부지 원암은 천연방벽의 역할을 충분히 수행해야 한다. 또한, 공학적방벽의 장기성능에 적절한 영향을 주어야 한다.
- 장기 안전성에 중요한 영향을 미치는 원암의 조건으로 수 천 년 동안 안전하다는 것이 예측가능해야 하므로 지질변화에 대해 적절한 평가가 이루어져야 한다.
- 지질조건으로는 단순한 지질구조이어야 한다.
- 부지인자 중 천연자원의 접근성, 대규모 현장응력, 지진, 구조지질학적 이상 및 비정상적인 지하수 특성 등이 없어야 한다.
- 지하수 특성 중 완충력 부족, 산화된 심부 지하

수 및 높은 방사성핵종 농도 등이 없어야 한다.

- 처분시설은 지하수 유동으로부터 선호되는 곳에 위치해야 한다.
- 빙하 및 인간활동이 적어야 하며, 처분시설은 수백 미터 깊이에 위치해야 한다. 처분깊이는 장기 안전성을 고려해 선택해야 하며, 지질구조, 암석 특성, 현장응력, 온도 및 지하수 유동률과 같은 특성을 고려해야 한다.
- 지하수 유동, 지하수 화학성분 및 현장응력 등의 변화를 일으키는 기후변화를 고려해야 한다.

### 3. 국내외 처분후보부지 조사기준에서 고려하는 구조지질학적 요소

본 절에서는 후보부지 선정을 위한 국내의 기술 기준을 살펴보았다. 국내의 경우는 개괄적이기는 하지만 원자력안전위원회가 고시한 「사용후핵연료 중간저장시설의 위치에 관한 기술기준」(제2014-52호) 과 「고준위방사성폐기물 심층처분시설에 관한 일반 기준」(제2015-21호) 중에서 부지의 지질학적 안정성, 천연방벽 등에 대한 기술기준이 제시되어 있다. 「사용후핵연료 중간저장시설의 위치에 관한 기술 기준」(제2014-52호)의 부지지질안정성에 대한 사항 중 구조지질학적 측면의 사항은 아래와 같다.

#### 3.1 사용후핵연료 중간저장시설의 위치에 관한 기술기준

- 중간저장시설을 중심으로 한 반경 8 km이내에

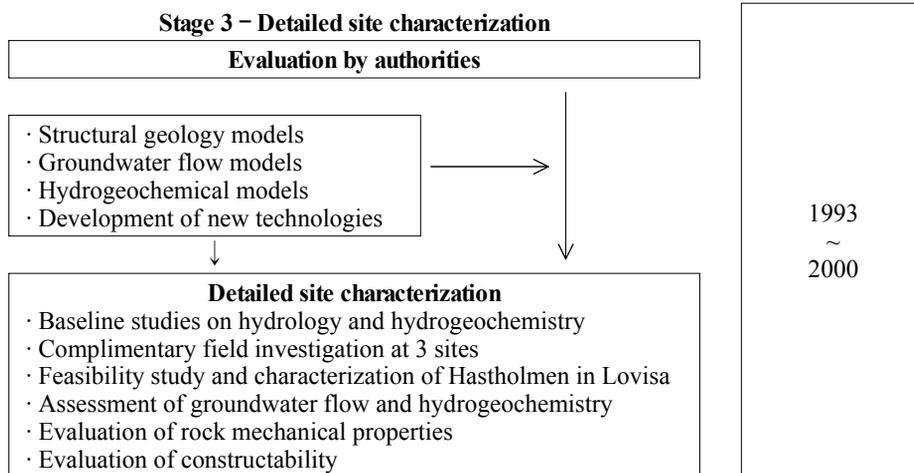


Fig. 3. Process of detailed site characterization in the stage 3 (Posiva, 2000).

활동성단층이 위치하여서는 아니 된다.

- 중간저장시설은 역사적으로 지진발생빈도, 규모 및 진도가 상대적으로 낮거나 또는 그와 같이 예상되는 지역에 위치하여야 한다.
- 중간저장시설은 풍화, 침식, 침강, 융기, 풍화작용, 산사태, 액화작용 등과 같은 지각변동으로 인하여 해당시설에 미치는 영향이 없다고 판단되는 곳에 위치하여야 한다.
- 중간저장시설의 제반 구성물질은 가능한 한 균질기반암이어야 하며, 균질기반암이 아닌 경우에는 공학적 방법으로 해당시설에 미치는 영향이 없다는 것을 입증하여야 한다.

### 3.2 고준위방사성폐기물 심층처분시설에 관한 일반기준

- 심층처분시설의 부지는 지질학적으로 안정된 곳으로서 해당 처분시스템의 성능기간에 걸쳐 구조적인 변형이 일어날 가능성이 낮은 곳이어야 한다.
- 심층처분시설의 부지는 활동성단층지역에 속하지 않아야 하고, 역사적으로 지진발생빈도, 규모 및 진도가 낮아야 하며, 성능기간에 걸쳐 그러한 것으로 예상되는 곳이어야 한다.
- 심층처분시설의 부지는 성능기간에 걸쳐 지각의 융기나 침강 등 지각변동과 지열에너지의 방출이 격리성능에 영향을 미칠 가능성이 낮은 곳이어야 한다.

국외 기술기준의 경우는 부지선정 단계에서 다른 요소에 비해 상대적으로 높은 중요도를 가지는 구조지질학 관련요소에 대해 살펴보았다. 해외국가들은 각국의 지질환경에 따라 다양한 지질항목 및 요소에 대해 각국의 여건에 맞는 기술기준을 확정하여 적용하고 있으며, 해외에서 제시되어 있는 항목의 기술기준 중 구조지질학관련 요소에 대한 항목을 정리하면 다음과 같다.

### 3.3 연성지질구조

- 핀란드: 암석관입 지역은 예비조사단계에서 배제한다(Posiva, 2000).
- 스웨덴: <단계1>에서 30 km 이상 선구조에 대한 선구조 밀도도를 작성하여 분류한다. <단계2>에서 알려진 광역연성전단대는 피하고 만약 충분한 처분장 공간이 없는 경우에는 배제한다. <단계3>에서는 상세하게 조사된 광역연성전단

대를 따라 처분장의 배치를 수정하고 합리적으로 배치할 수 없는 경우 배제한다(SKB, 1995).

- 독일: <단계2> 조사에서 암석관입의 가능성이 없어야 하고, 방벽역할을 하는 상부지층 두께는 150 m 이상이 선호되고, 적어도 100 m ~ 150 m 는 되어야 한다(AkEnd, 2002).
- 미국: 소성구조가 폐쇄 후 향후 1만 년 동안 인접 환경에 핵종을 유출시킬 확률이 1/10000 이하이면 선호하고, 만약 지하수 유동시스템에 영향을 주는 경우는 배제한다(USDOE, 2011).
- 일본: 지난 수십 년 간 큰 활동을 보인 활성습곡 및 요곡지역은 배제한다(NUMO, 2004).

### 3.4 취성지질구조

- 스웨덴: <단계1>에서 단층대 분포조사를 실시하지만 현장조사 없이는 배제지역으로 구분하지 않는다. <단계2>에서 파악된 단열대와 충분한 거리에 있어야 한다. 단열대가 많아서 처분장이 부적절하게 분리될 경우는 배제지역으로 구분한다. <단계3>에서 광역 주단열대와 국지 주단열대로부터 수십 m 이상, 광역주단열대로부터 100 m 이상 떨어져야 한다. 만약 처분장이 광역 주단열대, 국지 주단열대 때문에 합리적으로 위치할 수 없다면 배제지역으로 구분한다(SKB, 2000).
- 핀란드: 단열의 선구조에 따라 암반등급을 4단계로 나누어 평가한다(Posiva, 2000).
- 독일: <단계2>에서 단층과 단층의 간격은 3 km 이상이 선호되고 적어도 100 m ~ 3 km 범위여야 한다(AkEnd, 2002).
- 미국: 취성구조가 폐쇄 후 향후 1만 년 동안 인접 환경에 핵종을 유출시킬 확률이 1/10,000 이하인 지역을 선호하고, 만약 지하수 유동시스템에 영향을 주는 경우는 배제한다. 또한, 방사성폐기물 격리에 손실을 발생시킬 것으로 예상되는 경우도 부적합하다(USDOE, 2011).

### 3.5 활성/활동성단층

- 미국: 부지 내 활동성단층의 증거가 있을 경우 잠재적으로 불리한 조건이다(USDOE, 2011).
- 독일: <단계 1>에서 처분장 부지 내에 활동성단층이 없어야 한다(AkEnd, 2002).
- 영국: 초기 배제조건에서는 고려하지 않고 후속

부지특성 조사에서 고려한다(DETEC, 2008).

- 일본: 전국 규모에서 확인되는 활성단층지역은 배제한다. 전국규모가 아닌 다른 문헌에 조사된 활성단층지역, 활성단층의 변형대주변과 파쇄대(단층비지(fault gouge), 각력암 및 압쇄암 등), 활성단층의 분기가 발생할 가능성이 높은 지역은 배제한다(NUMO, 2004).

### 3.6 화산

- 독일: <단계 1>에서 처분장 인근 10 km 범위 이내는 제4기 또는 향후 화산활동이 예측되지 않아야 한다(AkEnd, 2002).
- 미국: 지하수 유동시스템에 영향을 주는 경우는 배제한다(USDOE, 2011).
- 일본: 화도(volcanic vent) 주변 반경 15 km 이내는 배제하고, 수 만년 내 마그마 관입 또는 분출이 예상되는 지역과 열적영향, 높은 산성온천, 지하수의 열수순환이 예상되는 지역은 15 km 밖의 지역이라도 제외한다(NUMO, 2004).

### 3.7 지진활동

- 스웨덴: <단계 1>에서 1375 ~ 1993년 사이의 역사지진 분포도를 작성하지만 배제조건으로 고려하지 않는다(SKB, 2000).
- 독일: <단계 1>에서 독일표준연구소(DIN) 보고서 4149의 기준 지진영역 1을 넘지 않아야 한다(AkEnd, 2002).
- 영국: 초기 배제조건에서는 고려하지 않고 후속 부지특성조사에서 고려한다(DETEC, 2008).
- 미국: 대규모 지진기록이 있는 경우(다시 발생했을 경우), 빈번한 지진발생 또는 대규모 지진발생의 징후가 있는 경우는 배제한다(USDOE, 2011).
- 일본: 초기 부지를 선택할 때는 고려하지 않고 다른 지역과 안전성을 비교하는 사전조사지역과 정밀조사지역의 조사에서 고려한다(NUMO, 2004).

## 4. 국내 처분 후보부지 조사를 위한 구조지질학적 요소의 고려사항 제안

### 4.1 연성지질구조

암석은 오랜 기간 동안 압력과 온도의 영향을 받아 변형된다. 온도와 압력이 높은 지하 10 ~ 15 km

이상의 지각 심부에서는 연성변형작용이 일어나며 습곡구조, 엽리구조, 선구조 및 연성전단대와 같은 연성지질구조를 형성한다. 연성지질구조 항목에는 연성전단대, 습곡구조 및 엽리구조와 같은 세 종류를 조사할 필요가 있다.

**연성전단대:** 연성전단대는 연성변형작용에 의해서 형성되는 대규모 전단대이다. 전단작용이 심해질수록 전단대는 모암과 다른 성질을 띠게 되므로, 연성전단대를 이루는 암석은 모암과는 다른 또 하나의 암종으로 취급할 수도 있다. 이 경우에 연성전단대에는 암종의 성질, 다양성 및 균질성이 다양하게 나타난다. 또한 전단대 내에는 모암과는 다른 엽리와 선구조가 잘 발달하며, 절리나 단열과 같은 취성지질구조도 잘 발달하므로 대규모 지하수 유동경로로 작용할 가능성이 높다. 따라서 연성전단대는 부지안전성에 불리한 요소로 작용한다.

**습곡구조와 엽리구조:** 습곡구조는 변형작용에 의해서 지층이 휘어진 것을 의미하며, 엽리구조는 암석을 구성하는 광물이 납작해지고 나란히 배열되어 형성된 면을 의미한다. 휘어진 지층에서 곡률이 최대인 점을 연결한 선을 힌지(hinge)라고 하며, 여러 지층에서의 힌지를 연결하여 만들어지는 면을 습곡 측면이라고 한다. 힌지, 습곡측면 및 엽리면을 따라서 물질이 이동할 수 있으므로 방폐물의 처분환경에 불리한 조건에 해당하고, 습곡측면을 따라서 절리면이 발달하는 경우가 많으며, 이 경우도 불리한 조건을 형성한다. 습곡구조와 엽리구조는 변형작용의 대표적인 산물이고, 오래된 암석일수록 여러 변형작용을 겪어 습곡구조와 엽리구조를 포함할 가능성이 높다.

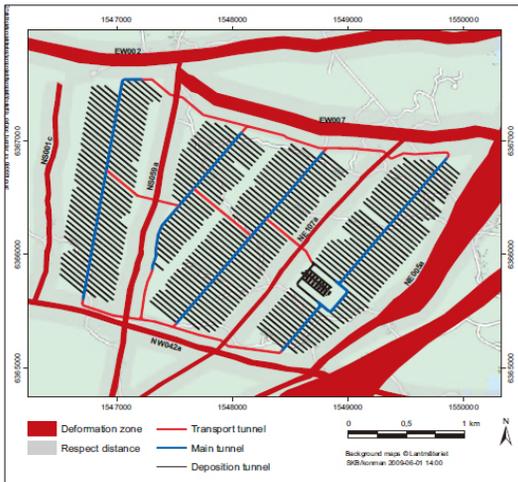
### 4.2 취성지질구조

온도와 압력이 상대적으로 낮은 지하 5 km 이하의 지각 상부에서는 암석이 압력을 받으면 취성변형작용이 일어나며 단열, 단층, 절리, 단층대와 같은 취성지질구조를 형성한다.

**단층대:** 단층대는 조밀하게 형성된 불연속면, 입자규모의 파쇄작용에 의해 형성된 단층각력, 단층비지 및 파쇄암 등을 포함하기 때문에 단층대주변 암석에 비해 역학적 강도가 현저히 떨어지며, 유체흐름의 통로로 작용한다. 즉, 단층대는 고준위방사성폐기물 처분부지의 장기지질안정성에 불리한 영향을 미치는 대표적인 요소 중 하나로 고려되기 때문

**Table 3.** Classification of fracture zone in the site investigation (SKB, 1998).

Class	Length	Width	Description method
Regional fracture zone	> 10 km	> 100 m	Deterministic
Local major fracture zone	1-10 km	5-100 m	Deterministic
Local minor fracture zone	10 m - 1 km	0.1-5 m	Stochastic (partly deterministic)
Individual fracture zone	< 10m	< 0.1m	Stochastic



**Fig. 4.** Layout of a disposal system considering a respect distance from a fault (SKB, 2011).

에 중요도가 가장 높은 부지조사인자로서 제시되어야 한다.

단층대는 심부처분장의 전체적 배치와 기반암의 격리, 지연특성에 큰 영향을 미치기 때문에 스웨덴, 핀란드, 미국 및 일본 등 대부분의 국가에서는 이를 중요한 인자로서 고려하고 있다. 이 경우에 단층대의 연장과 거리가 가장 중요한 인자가 된다.

**단층의 연장과 분절:** 단층대와 관련된 합리적인 평가기준을 마련하기 위해서는 단층대의 연장에 대한 정이가 선행되어야 한다. 단층대의 연장은 지표에서 인지되는 연장으로 제한된다. 만약 유사한 방향의 단층대 사이에 step over zone이 발달하여 Kim and Sanderson (2005)이 제시한 바와 같은 hard-linkage (연결단층(대)가 존재) 혹은 soft-linkage (직접적으로 연결되지는 않으나 변형작용을 공유함) 형태를 보이는 경우 하나의 단층대로 간주해야 한다.

**고려거리(respect distance):** 단층대 또는 단열대로부터의 거리로 고려거리를 사용하기도 한다(그림

4). 고려거리는 부지의 구조물에서 광역적 또는 지역적인 대규모 단열대와와의 최단거리를 의미한다. 이 거리는 알려진 단열대와와의 최소 확보거리와 알려지지 않은 단열대를 가정한 안전거리(safety margin)를 더한 값이다. 고려거리를 결정하기 위해서는 암반 내에 발달한 단열에 대한 정확한 기하학적 정보가 필요하기 때문에 조사와 설계단계를 거치면서 고려거리는 수정될 수 있다. SKB에서는 후보부지 선정의 초기단계에서 부지가 광역적 단열대와와는 최소 100 m, 지역적 대규모 단열대와와는 최소 수십 m 이상 떨어질 것을 요구하고 있다(표 3). 이 값은 최종적으로 암반의 암석역학적, 수리지질학적 특성분석을 통해서 정해져야 할 것이다.

**영향범위(influence range):** 단층대 또는 단열대로부터의 거리 개념으로 영향범위를 쓰기도 한다. 영향범위라는 용어는 Akiyama (2011)가 사용한 정의로서, 그는 기존에 발간된 활동성 단층지도를 이용하여 분기한 단층들의 측방거리를 측정하였고(그림 5), 그 결과 내린 결론은 표 4와 같다.

단층의 영향범위는 두 가지 의미가 있다. 첫째는 현재 관찰되지는 않지만 이차적인 단층이 존재할 가능성이 있는 지역을 의미한다. 둘째는 미래에 재활성될 경우 추가적인 단층이 발생할 가능성이 있는 지역을 의미한다. 영향범위는 주향이동단층의 경우는 단층연장의 10%에 이르며, 역단층의 경우는 최대 28%에 이르는 것으로 제안된 바 있다(Akiyama, 2011). 따라서 앞서 언급한 고려거리에 비해서 그 범위가 상당히 넓다고 할 수 있다.

**단열(대):** 단열대 및 단열의 분포는 후보부지에 발달하는 다양한 규모 단열(대)의 정량적 분포, 기하양상 및 역학적 특성 등을 토대로 부지규모(site scale) 지질구조, 지하수 유동, 핵종이동 및 암반의 건전성 등을 종합적으로 조사 및 평가하는 항목으로서 부지 지질특성 조사에서 중요한 항목이다. 단열(대)의 방

향, 규모, 밀도, 거칠기 및 간극은 단열의 특성을 조사하는 필수요인들로서 구조지질학, 지질공학 및 암반공학적 관점에서 현장정밀조사를 실시하여야 한다. 후보부지와 그 인근의 일정 영역을 대상으로 단열(대)의 분포 여부, 방향, 길이, 폭, 거칠기 및 간극을 일일이 조사하여야 하며, 단열(대)의 밀도는 부지 전체를 대상으로 평가한다.

이 요소들은 지표지질조사는 물론 심부지질조사를 통해 획득한 시추코어로깅 결과, 시추공 물리탐사 및 물리검층 결과를 종합적으로 검토하여 부지 규모에서 3차원의 단열(대) 발달특성을 규명해야 한다. 단열(대)의 조사는 일반적으로 국제암반역학회(International Society for Rock Mechanics; ISRM)에서 제안한 조사방법 등을 이용하여 수행할 수 있다. 이 자료는 각 조사단계의 최종적 성과물로 제시

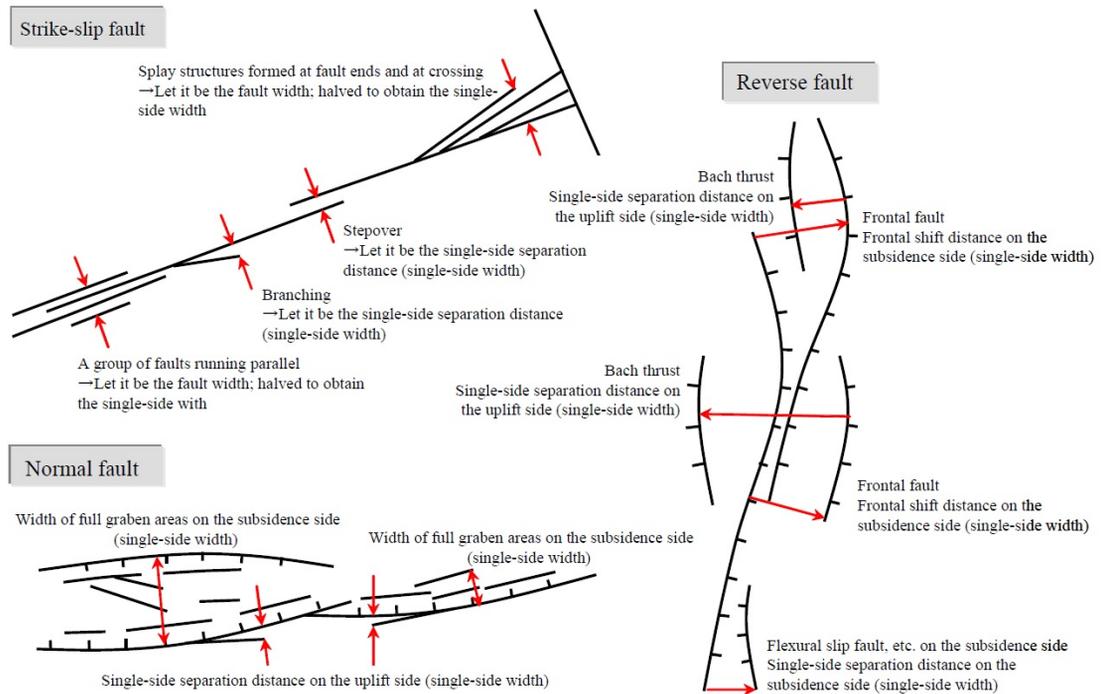
되는 지질구조·지질공학·암반공학 모델링의 입력자료로 사용되므로 가급적 정밀한 조사가 필요하다. 모델링을 통한 단열(대)의 분포평가결과는 부지의 구조지질학적 안정성, 지하수 유동모델링을 위한 필수자료이며, 이 결과를 토대로 암반의 역학적 안정성평가뿐만 아니라 불연속균열망(discrete fracture network) 개념의 지하수 유동모델링이 수행된다.

### 4.3 신기구조

**활성/활동성단층:** 활성단층(active fault)이란 최근에 움직임이 있었고 향후 움직임 가능성이 있는 단층을 의미하고, 활동성단층(capable fault)은 3만5천년 내 적어도 1회 혹은 50만년 내 2회 이상 움직인 단층을 의미한다(USNRC, 2013). 이 단층들은 가까운 미래에 지진이나 지각변형을 야기할 수 있는 단

**Table 4.** The ratio of maximum single-side separation distance to fault length sorted by fault types (Akiyama, 2011).

	Strie-slip fault	Normal fault	Reverse fault
Hanging wall $W_{max}/L$	0.092	0.212	0.281
Foot wall $W_{max}/L$	0.092	0.054	0.156



**Fig. 5.** Concept of the measurement method for the maximum separation distance (Akiyama, 2011).

층이기 때문에 앞서 제시한 단층대와는 다른 별도의 주요 조사요소로 분리하여야 한다. 활동성단층 인자는 부지평가에 있어서 가장 중요한 요소이기 때문에 전체 조사 및 평가 단계에서 철저히 조사하여야 한다.

기본적으로 처분후부지에는 제4기 단층(Quaternary fault)이 존재해서는 안 된다. 또한 활동성단층으로 예측되는 단층의 단층손상대(damage zone)에 포함될 수 있는 지역이나 활동성단층이 분기할 것으로 예측되는 지역은 불리하다. 단층손상대란 단층에 따른 변위를 흡수하기 위하여 발생한 단층주변의 이차적인 구조들과 이를 포함하는 지역을 말한다(Kim et al., 2004).

단층손상대를 파악하기 위해서는 제4기 단층 주변의 정밀지질조사와 트렌치조사가 필수적이다. 정밀지질조사와 트렌치조사를 통해서 분기되는 이차적인 단층의 기하학적 특성을 파악할 수 있으며, 이를 통해서 단층손상대의 범위를 예측할 수 있을 것이다.

**화산.** 화산활동은 마그마가 지표 또는 지표 가까이 도달해 일으키는 현상을 의미한다. 화산활동이 일어날 경우 마그마의 관입과 분출로 인해 처분장과 그 주변 암반이 파괴되어 방사성 핵종을 지표로 방출할 가능성이 있다. 또한 화산활동에 의한 열, 열수의 방출은 주변암반 변질이나 수리특성의 변화를 일으키며, 열수대류는 핵종이동을 촉진시킬 가능성이 있고, 열수나 화산가스의 혼입에 따른 지하수의 수질 변화나 열적영향은 처분시스템 내 공학적방벽의 성능저하를 일으킬 가능성이 있다. 따라서 화산활동은 처분장의 장기 안전성에 큰 위해요소로 작용할 수 있다.

## 5. 결론

본 논문에서는 향후 국내에서 진행될 것으로 예상되는 고준위방사성폐기물의 처분사업을 감안하여 핀란드를 중심으로 한 국외 처분부지의 선정과정과 후보부지 선정단계별 지질조사항목을 개괄적으로 살펴보았다. 또한, 해외 각국에서 처분후부지 선정을 위한 기술기준 중 구조지질학적 요소들에 대해 현재 적용하고 있는 기술기준의 내용을 살펴보았다. 각 국가별 지질조사항목과 기술기준은 그 나라

의 지질학적 조건과 환경에 적합하게 설정되어 있음을 알 수 있으며, 이를 감안할 때 우리나라도 고유의 지질환경을 신중히 검토하여 향후 고준위방사성폐기물 처분사업 진행 시 각 단계별 후보부지 선정을 위한 지질항목 및 요소별 기술기준을 적절하게 설정하는 것이 중요하다.

해외의 부지선정 절차와 기술기준을 볼 때, 부지조사의 전 단계에 걸쳐 구조지질학적 요소는 후보부지 및 최종부지 선정에 중요한 역할을 하는 것을 알 수 있다. 특히 부지조사의 초기단계에서는 주로 구조지질학적 특성을 기반으로 후보부지를 선정하게 되며, 구조지질학적 특성은 후보부지의 크기와 기본적인 틀을 결정하는 중요한 요소이다. 또한, 구조지질학적 요소의 특성값은 수리지질, 수리지화학, 암반역학 등 다른 지질항목의 특성을 좌우하는 기반이 된다. 이에 따라 국내 처분 후보부지의 신뢰도 높은 조사결과를 확보하기 위해 우리나라의 지질환경에 적합한 구조지질학적 요소의 조사·평가 방법과 절차를 도출할 필요가 있다.

고준위방사성폐기물의 처분사업은 궁극적으로 안전한 처분장 확보 및 건설을 위해 사전에 치밀하게 준비한 제도적·행정적·기술적 절차와 방법, 기준 등을 통해 객관적으로 진행되어야 한다. 이와 함께 무엇보다 중요한 점은 모든 과정에서 지역사회와 주민에게 처분사업의 진행상황과 자료를 투명하게 공개하여 주민의 이해를 돕고 진정으로 소통하는 것이 처분사업의 성공여부를 결정한다는 것이다. 차질 없는 처분사업의 준비와 진행은 단시간에 이루어질 수 없기 때문에 가급적 초기에 다양한 연구와 기술개발이 진행되어야 하고, 이 과정에서 규제기관과 시민사회가 초기부터 참여하여 각 단계별 결과에 대한 객관성과 사회적 수용성을 극대화함이 바람직할 것이다.

## 사 사

본 논문은 한국지질자원연구원 2015년 수탁사업의 하나의 “사용후핵연료 처분연구관련 지질조사 방법론 개발(15-5816)”사업과 한국지질자원연구원 2017년 주요사업의 하나인 “HLW 지층처분 후보부지 선정을 위한 전국규모 지질환경정보도 작성(17-3424)”사업의 지원을 받아 수행하였습니다.

## REFERENCES

- AkEND, 2002, Site selection procedure for repository sites, Recommendations of the AkEnd-Committee on a Site Selection Procedure for Repository Sites. AkEnd, 248 p.
- Akiyama, T., 2011, Study on prediction technique of influence range from super long-term natural phenomenon. Journal of Society for Social Management Systems, 1-14.
- DETEC, 2008, Sectoral plan for deep geological repositories, Conceptual part. Department of the Environment, Transport, Energy and Communications (DETEC) Report.
- IAEA, 2011, Geological disposal facilities for radioactive waste, IAEA Specific Safety Guide No. SSG-14, 104 p.
- Kim, Y.-S., Peacock, D.C.P. and Sanderson, D.J., 2004, Fault damage zones. Journal of Structural Geology, 26, 503-517.
- Kim, Y.-S. and Sanderson, D.J., 2005, The relationship between displacement and length of faults: A review. Earth-Science Reviews, 68, 317-334.
- NUMO, 2004, Evaluating site suitability for a HLW repository. NUMO TR-04-04, 74 p.
- Posiva, 1999, Safety assessment of spent fuel disposal in Hastholmen, Kivetty, Olkiluoto and Romuvaara. Posiva TILA-99, 253 p.
- Posiva, 2000, The site selection process for a spent fuel repository in Finland - Summary report. Posiva 2000-15, 224 p.
- SKB, 1995, General siting study 95, Siting of a deep repository for spent nuclear fuel. SKB TR-95-34, 149 p.
- SKB, 1998, Parameters of importance to determine during geoscientific site investigation. SKB TR-98-02, 130 p.
- SKB, 2000, What requirements does the KBS-3 repository make on the host rock? SKB TR-00-12, 143 p.
- SKB, 2011, Site selection - siting of the final repository for spent nuclear fuel. SKB TR-11-07, 106 p.
- STUK, 2001, Long-term safety of disposal of spent nuclear fuel (Draft 2/20.9.2000). Radiation and Nuclear Safety Authority (STUK) Guide YVL 8.4, 9 p.
- TVO, 1992, Final disposal of spent nuclear fuel in the Finnish bedrock - Preliminary site investigations, Helsinki. Nuclear Waste Commission of Finnish, Power Companies, Report YJT-92-32, 324 p.
- USDOE, 2011, 10 CFR 960-General guidelines for the preliminary screening of potential sites for a nuclear waste repository. USDOE, 679-710.
- USNRC, 2013, NRC Regulations 10 CFR Appendix A to Part 100 - Seismic and geologic siting criteria for nuclear power plants. USNRC, 1511-1518.

---

Received : February 7, 2017

Revised : February 28, 2017

Accepted : February 28, 2017