

<Technical Report> 고준위방사성폐기물 심층처분장의 장기 안전성 평가를 위한 지질환경 진화 연구 사례 검토

정수림* · 지성훈
한국원자력연구원

요 약

고준위방사성폐기물의 심층처분 개념에서 처분장은 처분 후 수만 년에서 수십만 년 동안 방사성 핵종을 고립시키거나 그 이동을 지연시켜야 하기 때문에 장기 안전성 평가가 필수적이다. 이 연구에서는, 고준위방사성 폐기물 지하 처분장의 장기 안전성과 관련한 지구조 및 지질환경 진화에 관한 연구들을 검토하였다. 핀란드, 스웨덴, 그리고 일본 등 원자력 선도국들의 연구를 살펴보면, 각 국은 자국의 지리 및 지질환경 특성에 따라 다양한 방식으로 지질환경 진화 연구를 수행하였다. 향후 심층처분을 위하여 진행될 국내 장기 지질환경 진화 연구 역시, 안전성 확보가 중점적으로 필요한 분야를 선정하고 관련 기술을 개발하는 데에 있어 한반도의 지리 및 지질환경 특성을 고려함으로써 한반도 지질환경에 적합한 효율적인 기술개발이 가능할 것으로 생각된다. 이에 따라 처분 관련 지질환경 진화를 연구하기 위해 고려하여야 할 한반도의 지리 및 지질환경 특성을 토의하였다.

주요어: 심층처분, 처분부지, 장기 안전성, 지질환경 진화

Soolim Jung and Sung-Hoon Ji, 2020, Review of researches on geological evolution relating to long-term safety of a deep geological disposal repository for high-level radioactive wastes. Journal of the Geological Society of Korea. v. 56, no. 5, p. 641-652

ABSTRACT: In geological disposal concept for high-level radioactive waste (HLW), it is necessary to assess long-term safety of a subsurface repository, which aim to provide isolation and retardation of radioactive nuclides for several tens to hundreds of years after closure. In this study, researches on tectonic and future geological evolution relating to long-term safety of a subsurface repository for HLW were reviewed. The researches by the advanced nations in terms of nuclear energy, such as Finland, Sweden and Japan, were investigated. The results showed that various approaches and techniques were developed considering their own geographical and geological characteristics. It is suggested that the techniques to estimate the long-term geological evolution at a given site should be developed based on the geographical and geological characteristics of Korean Peninsula, and several features to be considered were discussed.

Key words: deep geological disposal, disposal site, long-term safety, geological evolution

(Soolim Jung and Sung-Hoon Ji, Korea Atomic Energy Research Institute, Daejeon 34057, Republic of Korea)

1. 서 론

심층처분은 기반암 깊은 곳에 처분장을 건설하여 방사성폐기물을 처분함으로써 유해한 방사성 물질이 생물권에 미치지 않도록 하는 처분개념이다. 심층처분 개념에서는 공학적방벽과 천연방벽으로 이루어진 다중방벽 시스템을 통해 방사성 물질을 격리

시키며, 천연방벽을 구성하는 처분장 부지의 지질환경은 공학적방벽으로부터 핵종이 유출되어도 생물권으로 쉽게 도달하지 못하도록 이동을 지연시킨다. 현재 원자력 발전을 사용하는 세계 대부분의 국가에서는 자국의 고준위방사성폐기물 처분을 위한 가장 안전하고 효율적인 방식으로 심층처분을 고려하고 있다(JAEA, 2011; SKB, 2011a; POSIVA Oy, 2012;

* Corresponding author: +82-42-868-8376, E-mail: sljung@kaeri.re.kr

UFDC, 2012; NAGRA, 2016). 사용후핵연료를 포함한 고준위방사성폐기물은 자연 상태에서 붕괴되어 생물권에 미치는 유해한 영향이 사라지는 데에 수만 년에서 길게는 수십만 년의 시간이 걸리므로 심층처분장의 장기적인 안전성이 중요하다.

이러한 심층처분 개념에서 장기적인 안전성을 확보하려면 공학적방벽의 장기 성능 평가뿐만 아니라 천연방벽의 장기 성능 평가도 필수적이다. 천연방벽의 장기 성능 평가를 위해서는 다양한 연구가 수행되며, 장기적인 지구조 운동 혹은 기후변화로 인한 지질환경 변화 과정에 대한 연구도 그 중 하나이다. 또한, 지진이나 화산활동과 같은 지각 운동으로 공학적방벽이 파손되지 않도록 미래에 발생 가능한 변화를 예측하는 연구도 필요하다. 즉, 만년 이상의 장기 안전성을 확보해야 하는 고준위방사성폐기물의 처분을 위해서는, 지진 발생 가능성을 포함하여 부지의 지구조 진화과정 및 지구조 발달 특성을 파악함으로써 장기적인 지질학적 안정성을 분석할 필요가 있다. 뿐만 아니라, 장기적으로 지진활동 및 지구조 운동을 겪을 경우의 수리 및 지화학 환경 변화를 분석하여 핵종 이동 가능성을 평가할 수 있어야 한다.

우리나라에서는 최근 경주와 포항에서 발생한 지진 이후 원자력 관련 시설의 안전성에 대한 국민들의 우려 및 관심이 높아졌다. 한반도는 중국 동부 순상지의 연변부에 위치하며 지각판의 경계와 상대적으로 인접하여 좁은 국토 면적에 비해 지구조사 및 지질 환경이 매우 복잡하며, 여러 번의 변형 기록이 중첩되어 지체발달사 해석이 명확하지 않고 의견이 분분한 상황이다(Cruzal *et al.*, 1991; Yin and Nie, 1993; Ernst and Liou, 1995; Ree *et al.*, 1996, 2001; Chough *et al.*, 2000; Oh and Kusky, 2007). 처분 부지를 대상으로 한 구체적인 지구조사 및 향후 지질 환경 진화 과정에 대한 연구는 심층처분에 대한 장기 안전성 평가의 기초적인 사항으로 인정되고 있는 만큼 활발한 연구가 필요하다 우리나라에서는 지금까지 많은 연구가 없었던 것이 사실이다(Oh *et al.*, 2017).

이 논문에서는 해외 원자력 선도국의 고유 지질 환경을 간략히 기술하고, 각 나라에서 처분 장기 안전성과 관련하여 지구조 및 지구조사 복원 연구를 어떻게 수행하였는지, 또한 처분장 부지 지질환경의 장기 안전성 평가를 위하여 어떤 연구가 수행되고 있는지에 대하여 조사하였다. 스웨덴과 핀란드는 결정

질 암반을 고준위방사성폐기물을 위한 처분장 모암으로 선택하였고 최종 처분 부지가 확정된 국가이다. 또한 일본은 우리나라와 지리적으로 가장 인접하며 지하연구시설을 보유하여 다양한 처분연구를 수행하여 왔기 때문에, 핀란드와 스웨덴, 일본을 사례 조사 대상으로 선택하였다. 아울러 향후 지질환경 진화 연구 시 고려하여야 할 한반도의 특성을 논의하였다.

2. 핀란드

2.1 핀란드의 지질 환경

핀란드의 결정질 기반암은 선캄브리아기 페노스칸디아 순상지(Fennoscandian Shield)에 속한다. 핀란드의 지질을 구성하는 가장 오래 된 기저암은 핀란드 북부와 북동부에 분포하는 시생대 화강암(Granitoids)과 편마암(tonalitic and granodioritic gneisses)으로, 페노스칸디아 순상지 중 카렐리아 대륙괴(Karelian craton)의 일부이며 약 35억 ~ 25억년 전의 연대를 갖는다. 핀란드는 30년 이상 처분 연구를 수행해 왔으며, 약 20년에 걸친 부지 선정 과정을 통해 2001년 핀란드 남서쪽 해안에 위치한 올킬루오토(Olkiluoto) 지역을 처분 부지로 선정하였다. 핀란드 남부의 기반암은 약 19억 ~ 18억 년 전 고원생대 변성암과 화성암으로 구성되어 있으며, 올킬루오토 부지가 속한 광역 지역 역시 대부분 고원생대 결정질 기반암으로 이루어져 있다. 이 고원생대 지각은 중기 원생대의 지각운동으로 약 16억 ~ 15억 년 전의 라파키비 화강암(Rapakivi granites)에 관입되었으며 일부 14억 ~ 10억 년 전의 사암과 화성암맥을 포함한다. 핀란드의 기반암은 지속적인 침식으로 퇴적암이 대부분 손실되었으며 원생대와 고생대 퇴적암 일부만이 국지적으로 보존되어 있다(Aaltonen *et al.*, 2016).

올킬루오토 부지의 기반암은 대부분 미그마타이트 구조를 보이는 변성암으로, 18억 년 전 고원생대의 스베코페니안(Svecofennian) 조산운동에 의해 고온 고압 환경에서 연성변형을 겪으며 편마암과 미그마타이트 구조 등이 형성되었고, 이후 역행(retrogressive) 변성작용으로 취성변형이 발생하였다(Posiva Oy, 2011). 약 15억 년 전 중기 원생대에는 확장성 지구조운동으로 화산활동이 발생하고 다양한 화강암질 심성암이 관입하였으며 열수의 영향을 받았다. 12억 년 전

중기 원생대의 후기에 마지막으로 약한 인장성 운동으로 인해 고철질 감람석 휘록암이 암맥과 수평한 관입암상(sill) 형태로 관입하였다(그림 1).

2.2 핀란드의 지질환경 진화 특성 연구

핀란드는 지구조 변동 특성 평가를 위해 정밀한 시추조사 결과를 통해 얻은 자료를 활용하여 올킬루오토 부지의 주요 지구조인 암석학적 경계와 지질구조를 여러 종류의 3차원 지질모델로 도식화하는 연구를 수행하였다(Aaltonen *et al.*, 2016). 3차원 지질모델은 암상 모델(lithological model)과 연성변형 모델(ductile deformation model), 변질 모델(alteration model), 취성변형 모델(brittle deformation model), 통계적 단열 모델(statistical discrete fracture network model)까지 총 5개 주제의 세부 모델로 구성되며 기반암의 암석학적 특성과 변형대, 단열망의 구조를 간소화하여 나타내었다.

암상 모델은 부지 암반에 대한 암석학 및 기하학적 특성을 가시화한 모델이다. 암석학적 분류는 대

개 화학적, 구조적 특성이 매우 다른 암질을 구분하게 되며, 변형과정 보다는 고정된 파라미터를 기준으로 하므로, 이러한 모델을 통하여 구조적으로 안정된 공간이나 형성 과정이 연관된 암반 등의 공간적 분포를 파악할 수 있다.

연성변형 모델도 암상 모델과 비슷한 과정 및 목적으로 구성되는데, 과거 연성변형으로 형성된 암반을 화학적, 구조적 특성에 따라 분류함으로써 구조적으로 연관된 암반의 공간적 분포를 확인할 수 있으며 암반 구조의 방향성과 이방성 구조에 의한 영향을 평가할 수 있다(그림 2).

변질 모델은 열수 변질에 의한 2차 생성물과, 역행성(retrograde) 변성작용, 그와 동반되는 저온 변성(풍화)작용에 의한 영향을 가시화하는 것으로, 변질에 의한 영향이 암반의 물리적, 화학적 특성에 영향을 줄 정도의 장기 변질 과정을 주로 고려한다. 변질 모델은 변질된 암반의 형태와 부피뿐만 아니라 어떤 종류의 변질이 발생하는지 또한 평가할 수 있도록 구성되었다.

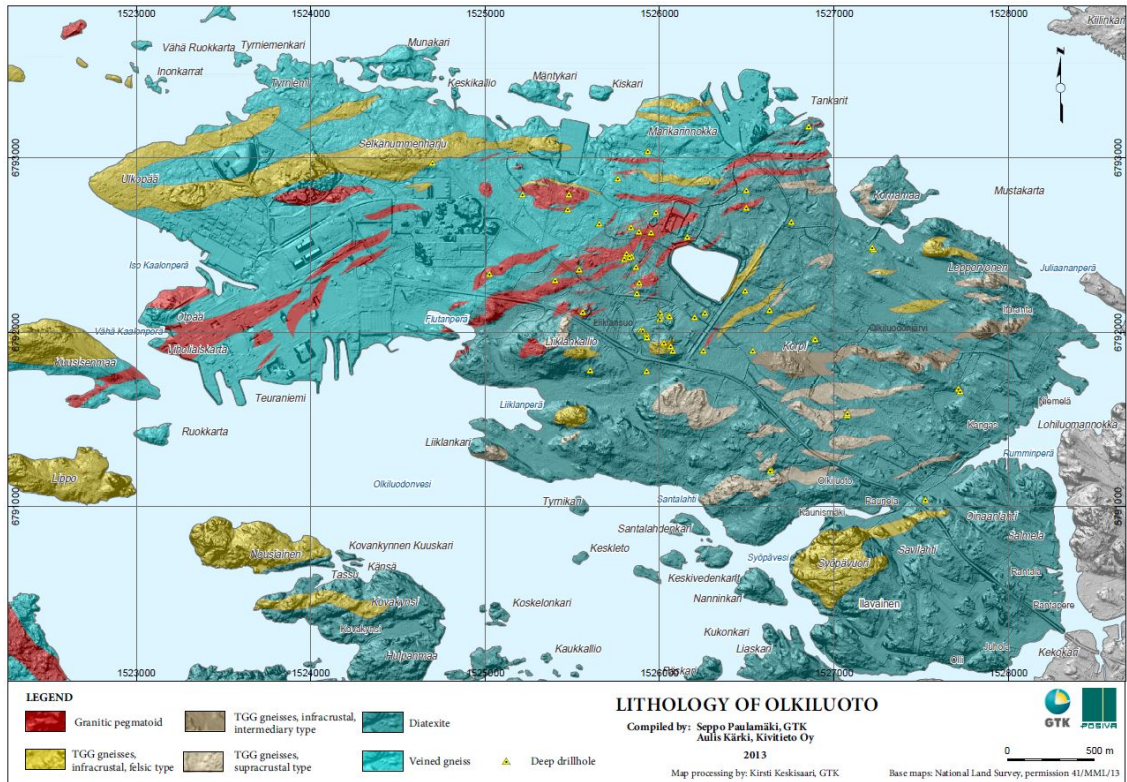


Fig. 1. Lithological map of OIKiluoto site (Aaltonen *et al.*, 2016).

취성변형 모델은 취성변형 환경에서 발생한 절리나 단층의 기하학적 구조 및 특성을 나타낸 것으로, 특히 단층을 주요하게 다루며 처분장 건설뿐만 아니

라 처분 장기 안전성 평가에도 필수적으로 활용되는 모델이다. 통계적 단열 모델로 불리는 분리 단열망 (discrete fracture network) 모델 역시 같은 개념으

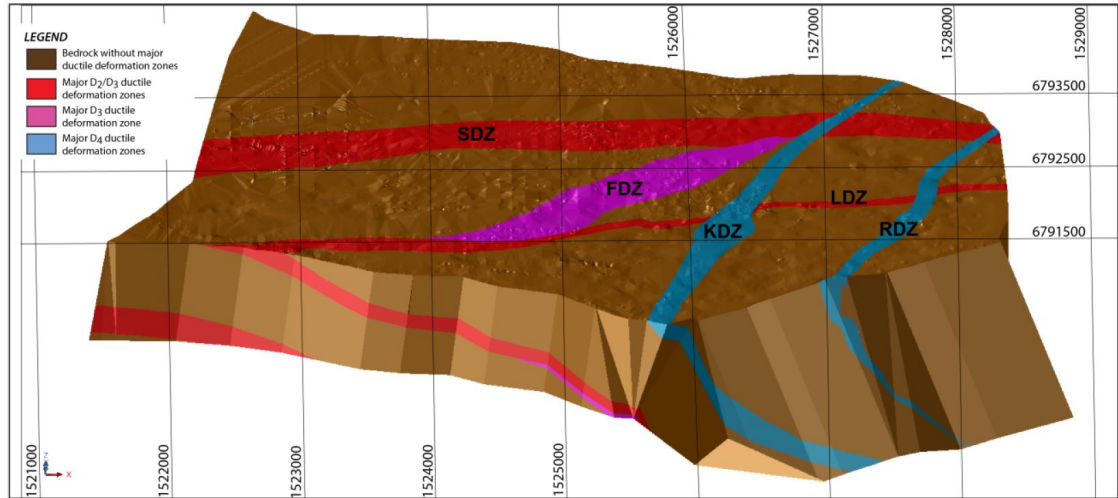


Fig. 2. 3D model of the major ductile deformation zone around Olkiluoto site (Aaltonen *et al.*, 2016).

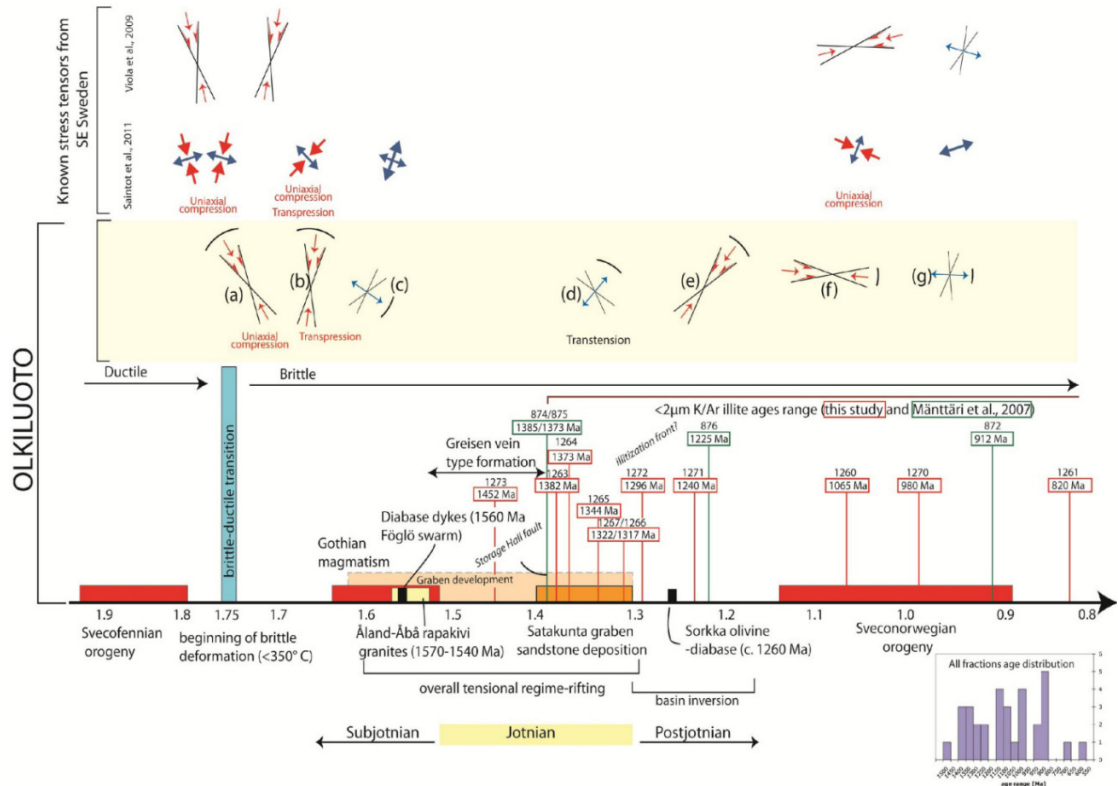


Fig. 3. Conceptual model of the brittle evolution of the Olkiluoto region (Aaltonen *et al.*, 2016).

로, 취성구조의 특성을 통계적으로 묘사한 것이 차이점이다. 올킬루오토 부지를 중심으로 한 취성구조 모델은 다양한 심부 지질구조 분석 자료를 통합하여, 추정 가능한 각각의 주요 지질구조를 정의하고 2D 및 3D 형태로 구현하였다.

처분연구시설 ONKALO가 위치한 올킬루오토 지역의 지구조사는 부지 구성 암반의 지질조사를 통해 핀란드 남부 지역 기반암인 고원생대 퇴적변성암의 퇴적 기원부터 조사되어 왔다. 순상지에 위치한 부지 특성 상 원생대의 지질 진화사가 대부분이며 현생대의 진화사는 기반암을 덮고 있는 퇴적암 및 퇴적분지의 형성과정으로 구성되어 있다. 진화과정에 대한 조사 결과는 가시적 모델 없이 서술형으로 정리되었으며 지질시대 별로 조사 내용을 분류하였다 (Aaltonen *et al.*, 2016).

올킬루오토 부지의 지구조 변형 과정은 부지 지질 모델을 만드는 과정에서 연성변형과 취성변형으로 분류하여 더 상세히 조사되었으며, 각각의 변형 과정이 개념모델로 도식화되었다 (Aaltonen *et al.*, 2010, 2016; Mattila and Voila, 2014). 연성변형의 경우 암반에서 관찰되는 연성변형 구조를 분석하여 변형 과정을 추정하고 변형 순서와 특성에 따라 D1~D5까지의 변형기작을 정리하였다. 암반의 심도가 변화함에 따라 기작이 변화하는 연성변형의 특성을 바탕으로 개략적인 연성변형 과정의 수직 단면 모델이 제시되었으며, 올킬루오토 부지의 연성변형 개념 모델이 만들어졌으나 진화 과정을 정량적으로 복원한 바는 없다. 취성변형의 경우 변형사의 근거가 될 수 있는 주요 암석 구조의 고응력을 계산하고 시료의 K-Ar 연대를 측정함으로써 정량적 수치가 도입된 취성변형사 개념모델을 구성하였다 (그림 3).

지구조사 변동 특성 평가와 더불어 장기적 기후 변화에 따른 지질학적 특성 변화 예측 연구도 진행되고 있다. 기후 변화에 따른 빙하의 생성과 소멸은 지각평형에 의해 지각의 융기율과 해수면의 상승 및 하강에 영향을 주므로 지하수유통과 같은 수리지질학적 특성에 영향을 준다. 순상지에 위치하여 지각 운동에 의한 역학적 변화가 거의 없고, 고위도 지방에 위치하여 빙하의 영향이 상대적으로 큰 핀란드에서는, 빙하기-간빙기로 기후가 전환되며 발생할 수 있는 지질환경 변화에 집중하고 있다 (POSIVA Oy, 2012). 또한, 지난 제4기의 백만 년 간 빙하기-간빙기

순환의 변화를 연구하며, 인간에 의한 과거와 현재의 CO₂ 와 같은 온실 가스의 배출이 전세계 기온 및 기후에 주는 영향을 분석하고 있다. 4기의 빙하기-간빙기 순환 기간을 분석하고 이를 바탕으로 미래 기후 변화를 예측하여 개념모델을 구성하였으며 이로 인한 영향을 추정하고 있는데, 아직까지는 기후 변화가 처분장 안전성에 큰 영향을 미치지 않는 것이라 예측하고 있다.

3. 스웨덴

3.1 스웨덴의 지질 환경

스웨덴의 결정질 기반암은 핀란드와 마찬가지로 페노스칸디아 순상지에 속한다 (그림 4a). 스웨덴은 2009년 최종 처분장 부지로 스웨덴 남동부 해안가의 포스마크(Forsmark) 지역을 선택하였다. 부지 선정 과정에서 포스마크 지역에 대한 상세한 부지 특성 조사가 수행되었다 (Söderbäck, 2008). 스웨덴 남부의 이 기반암은 19억 년에서 17억 년 전의 고원생대 시기에 발생한 대규모 지구조 운동인 스베코카렐리아(Svecokarelian) 조산운동에 의해 형성되었다. 이러한 기반암의 대부분은 고온 고압의 환경 하에서 복잡한 연성변형과 변성작용을 겪은 원생대 화강암으로 이루어져 있다.

포스마크 부지의 기반암은 이러한 원생대 기원의 변성암과 화성암으로 이루어져 있는데, 조산운동으로 북서-남동 방향의 연성변형을 강하게 받으며 포스마크 지역에 렌즈상의 지체구조구를 형성하였다 (그림 4b). 직경 약 20 km의 렌즈 모양을 한 이 지체구조는 연성 변형기작에 의해 엮리와 습곡, 변형 띠 (band)가 형성된 가운데, 상대적으로 변형이 거의 일어나지 않은 상태로 암체가 보존된 지역이다. 스베코카렐리아 조산운동의 후기에 기반암이 융기하기 시작하며 온도가 감소하여 취성 변형작용이 발생하기 시작하였다. 형성된 취성구조 역시 북서-남동의 방향성을 갖고 있다. 마지막으로 취성구조들이 재활성화 된 것은 5천만 년 전 로라시아 대륙과 발틱 대륙이 충돌하며 칼레도니아 산맥이 형성되는 칼레도니아 조산운동 시기로 추정된다. 현재 유럽지역은 아프리카판과의 충돌과 알프스 산맥의 형성, 대서양의 확장으로 인한 지각운동이 계속되고 있으나, 포스마크 지역의 어떠한 암체에서도 이러한 지각운동

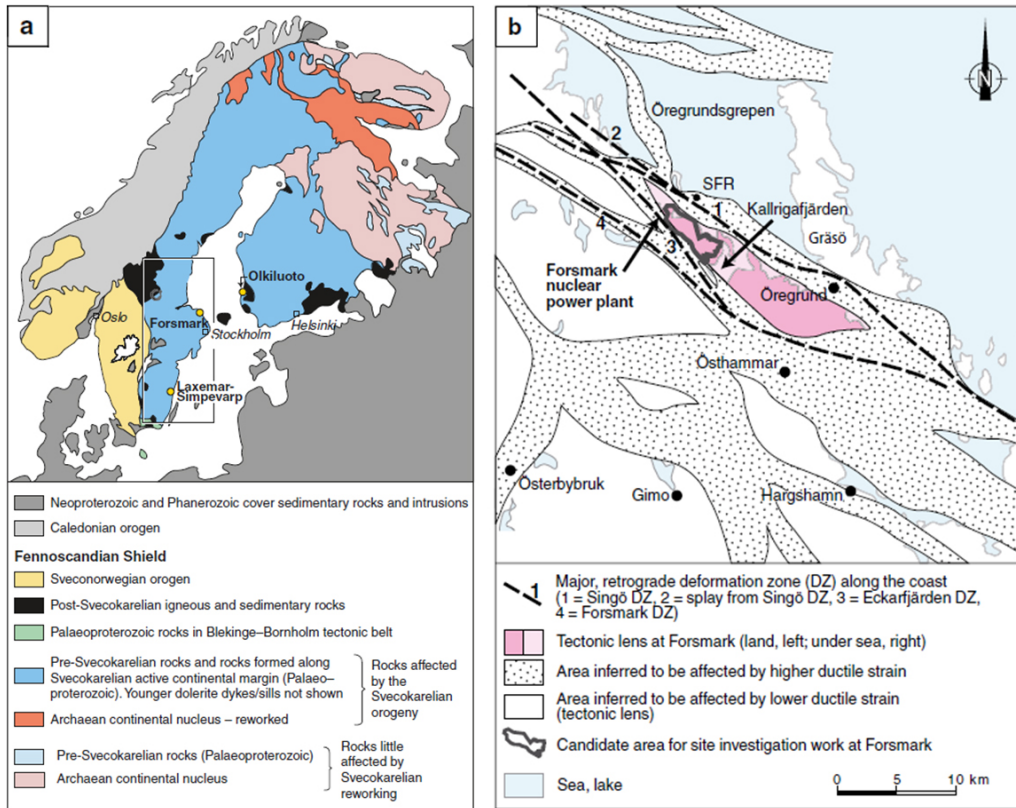


Fig. 4. (a) Map showing the major tectonic units in the northern part of Europe at the current level of erosion. (b) Tectonic lens at Forsmark and areas affected by strong ductile deformation in the area close to Forsmark (Söderbäck, 2008).

에 의한 변화가 발견되지 않으며, 취성구조 역시 활성화된 바 없는 것으로 관찰되고 있다(SKБ, 2013).

3.2 스웨덴의 지질환경 진화 특성 연구

최종 처분 후보부지인 포스마크 지역이 대부분이 화성암 및 변성암인 스웨덴도 핀란드와 마찬가지로 부지 조사 결과 자료를 활용하여 암상 분류 외에 연성 및 취성 변형 특성을 보이는 구역을 분류하였으며, 이를 각각 3차원 모델로 개념화하는 연구를 수행하였다(Curtis *et al.*, 2011; SKБ, 2013).

암석학적 모델은 부지를 구성하는 서로 다른 암상의 특성과 분포를 파악하기 쉽도록 모델화 한 것으로, “Rock domain model”로 불린다. 야외조사와 터널조사, 시추조사로 관찰 및 분석된 다양한 암상의 화학 성분과 각각의 이질성을 고려하여 대표 암상을 분류한다. 크게 네 종류로 구분되는 포스마크 지역의 암상은 심부 시추코어 및 동굴 채취 시료

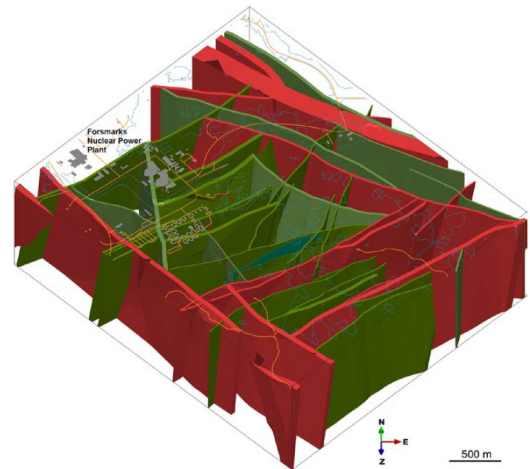


Fig. 5. Three-dimensional model showing the vertical and steeply dipping deformation zones around Forsmark area. Zones marked in red have a trace length at the surface longer than 3,000 m and zones marked in green are shorter than 3,000 m in length (SKБ, 2011b).

에서 관찰할 수 있는 광물학적 특성과 지표 물리탐사로 파악되는 암석 자기 특성을 기준으로 분류되었다. 또한 시추공 및 지하 동굴에서 관찰되는 각 암상의 분포 양상과, 부지를 대상으로 깊이 별로 측정된 자력 탐사 결과를 통합하여 각 암상의 경계를 정의함으로써 3차원의 암석학적 모델을 구성하였다.

암석학적 모델과 구분되는 구조적 모델은 “Deformation zone model”이라 불리며, 상대적으로 2차 변형이 발생하거나 지하수의 유동로가 되기 쉬운 구조적 변형대의 특성 및 분포를 파악할 수 있도록 모델화한 것이다. 여기서 변형대(deformation zone)라는 용어는 과거 변형(strain)이 집중되었던, 혹은 활성단층의 경우 여전히 집중되고 있는 2차원적 구조를 가리키는 말로 쓰인다. 충분한 지질 정보가 확인되는 경우, 변형대는 취성(brittle), 연성(ductile), 복합(composite) 변형대로 세분할 수 있다. 복합변형대는 연성변형과 취성변형 특성을 복합적으로 보이는 변형대를 의미하며, 보통 연성변형된 암석이 취성변형으로 재활성화된 경우 이에 속한다. 포스마크 부지의 변형대 모델은 구조대의 방향성을 파악한 후, 선구조와 각 변형대의 암석, 광물학적 특성을 정리하고 최종적으로 변형대의 두께를 정의함으로써 3차원으로 구성되었다(그림 5).

포스마크의 지구조적(암석학적) 진화과정 연구는 스웨덴 남동부 지역을 아우르는 페노스칸디아 순상지 지대를 대상으로, 야외지질조사로 해석되는 가장 오래된 지구조 변동인 19억 년 전의 지각 형성 과정부터 조사되었다. 문헌조사와 선행연구 자료를 기반으로 지구조 운동과 지체 발달사를 분석하였으며 통합된 자료를 바탕으로 지구조 운동에 따른 고응력 변화를 해석하였고 지구조사에 대한 간략한 개념 모델을 구성하였다. 포스마크 부지의 지구조사는 절대연대 분석을 바탕으로 부지를 구성하는 암상의 성인과 상대연대가 정리되며 더 정밀하게 분석되었다.

스웨덴은 포스마크 부지를 대상으로 수행한 장기 지질환경 진화 분석 보고서에서 조사 및 분석 진행 과정을 총 10단계로 정의하였다(SKB, 2015). 스웨덴의 방식은 핀란드와 일본의 방식을 통합한 형태이며, 세 국가 중 가장 구체적이고 체계적으로 평가 방식이 정리되어 있다.

핀란드와 마찬가지로 극지방에 인접하여 빙하기 후의 영향이 큰 스웨덴은, 기후 변화에 따라 세 종류

의 진화 예측 모델을 만들었다. 처분장 폐쇄 후 현재와 같은 기후가 지속될 것으로 예상되는 1,000년까지의 진화모델과, 이후 약 100,000년까지의 기후변화를 예측하여 구성한 모델이 분류되어 연구되었으며, 후자의 경우 주빙하기후의 동토 및 빙하가 형성되었을 때의 진화와, 지구온난화를 가정하여 빙하가 생기지 않는 경우(그림 6)로 세부 분류하여 연구되었다. 각 분류에서는 방사성폐기물 및 공학적방벽의 장기적 진화와 함께 부지 지하매질의 구조적 진화, 열적 진화, 역학적 진화, 수리지질학적 진화 및 지구화학적 진화에 대하여 다루었으며, 기후변화에 따른 식생 및 인간활동에 의한 지형변화 과정도 분석하였다(SKB, 2011b).

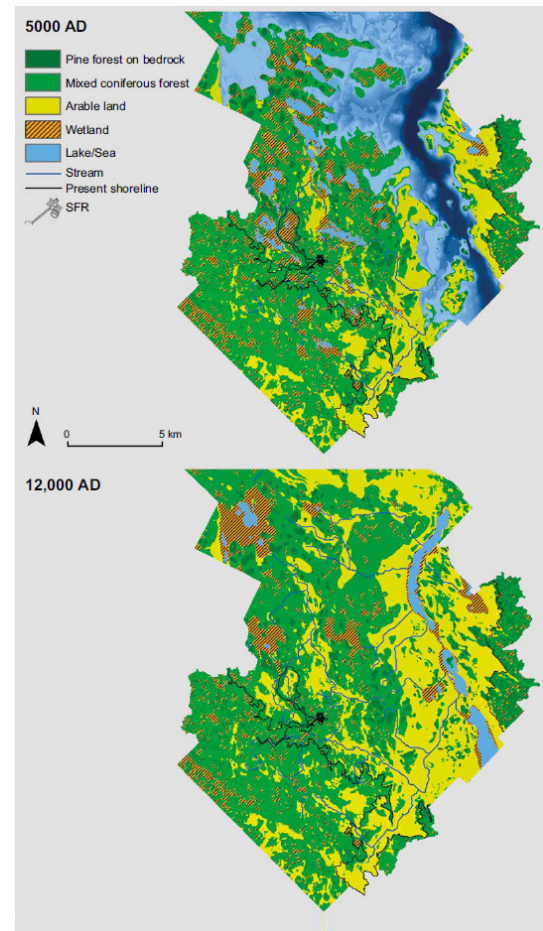


Fig. 6. Modelled distributions of vegetation and land-use in Forsmark at 5000 AD and at 12,000 AD for the global warming climate case (SKB, 2015).

4. 일 본

4.1 일본의 지질 환경

일본은 태평양의 북동쪽 가장자리에 존재하는 호상열도의 일부로, 유라시아 판의 동쪽 끝과 태평양 판, 필리핀해판이 만나는 삼중 접합점(triple junction)에 위치하고 있다. 일본 열도는 지각판의 섭입 운동에 의해 형성되었기 때문에, 현재 일본을 구성하고 있는 암상은 부가체 성인의 복합체, 변성암, 심성암, 화산암 그리고 지표 근처의 퇴적암으로 다양하다. 섭입대의 영향으로, 각각의 지체들은 전체 열도의 형태와 같은 방향으로 길쭉한 형태이며 젊은 단층이 많아 지질활동이 잦고 활화산이 존재한다. 일본의 북동부는 4기의 퇴적암과 화산쇄설물 층이 더 두꺼워 기저암이 잘 관찰되지 않으며 남서부는 기저암의 연대가 남동쪽으로 갈수록 더 젊어진다. 일본의 지사는 많은 연구가 진행되었음에도 아직 완전히 밝혀지지 않은 상태이다(Yasue *et al.*, 2014).

아직 처분 부지와 처분 대상 암종이 정해지지 않은 일본은 다양한 암상을 대상으로 연구를 수행하고 있으며 결정질 암반과 퇴적암 지역에 각각 지하연구 시설을 건설하여 연구개발을 수행하였다. 그 중에서 결정질 암반을 대상으로 건설된 지하연구시설은 일

본 중심부 토노(Tono) 지역의 미즈나미(Mizunami) 부지에 위치한다(그림 7; JAEA, 2011). 토노 지역의 지질은 주라기에서 백악기 연대의 미노대(Mino Belt) 퇴적암과 백악기 화강암 및 유문암, 그리고 고생대 마이오세 및 플라이오세의 퇴적암으로 이루어져 있다. 미노대의 퇴적암은 대부분이 사암과 이암, 처트로 이루어져 있으며, NE-WSW의 주향으로 반복적인 순차층서 구조를 보인다. 미즈나미 부지의 북동방향으로 펼쳐진 노히(Nohi) 유문암은 용결응회암의 단일암체로 이루어져 있으며 토키(Toki) 화강암에 의해 관입되어 있다. 미즈나미 부지의 주 구성암인 토키 화강암은 직경 10 km 정도의 규모이며 NNW 방향의 석영 반암질 암맥이 관입하고 있다. 고생대의 퇴적암은 기반암과 부정합경계를 갖고 있으며 약 300 m의 두께로 토노 지역 남부에 분지를 이루고 있다. 토노 지역에는 또한 여러 광역규모의 활성단층이 분포하며 일부 비활성단층도 존재하고 있다(JNC, 2001).

4.2 일본의 지질환경 진화 특성 연구

지반 운동이 활발한 일본의 지질 특성 상 미즈나미 부지에도 많은 지질구조가 존재하며 여러 개의 활성단층에 의해 지질환경이 지속적으로 변화한다.

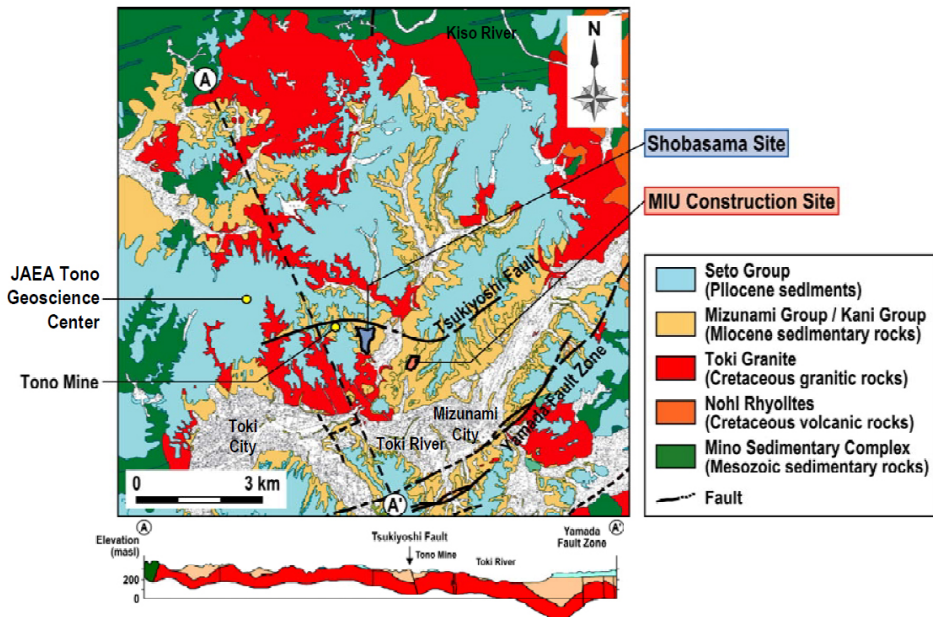


Fig. 7. Geological map of the Tono area (JAEA, 2011).

활성단층으로 인한 지반의 지속적 이동은 장기 미래 지질환경을 상당히 변화시킬 것이며, 지진과 같은 큰 사건이 발생할 경우 수리지질 및 지구화학 특성도 크게 변화할 수 있다. 미즈나미 지하연구시설에서 수행된 부지 조사는 다양한 지질구조의 분포 특성을 기반으로 수리지질 모델과 지구화학 모델을 구성하는 데에 중점을 두고 있다(JAEA, 2011). 지하수 유동 및 지구화학 모델을 구성하기 위한 기본 자료로 지구조 특성을 분석하였으며, 세부단계로 이루어진 부지 조사를 통해 지구조 모델을 만들었다. 조사 초기단계부터 지질환경 조사 자료는 수리지질 및 지구화학 환경의 시뮬레이션이 가능한 3D 모델로 구현되었으며, 여러 번의 세부단계를 거치며 추가 조사된 자료들을 더하여 모델의 정밀도와 정확도를 높

였다(그림 8).

미즈나미 부지의 지구조 진화사는 기본적인 야외 조사를 통해 복원되었다. 미즈나미 부지를 구성하는 암상의 기원 외에 화성활동 및 단층작용에 관련된 진화사도 상세히 분석되었다. 또한 부지의 연성 및 취성 변형 구조 측정 자료를 이용하여 기본적인 고응력 및 고지자기 정보를 복원하였다(Itoh, 2003; JNC, 2005).

지진 및 화산활동이 활발한 일본은 국가 전 지역에 지진 발생 시를 대비한 관측소 및 연구시설이 고르게 분포해 있으며 지반의 움직임을 측정할 수 있는 측정소가 규칙적으로 설치되어 있다. 일본의 지진조사연구추진본부(HERP, The Headquarters for Earthquake Research Promotion)에서는 일본 전역에 설치된 약 1300개의 고감도 지진계와 3000개

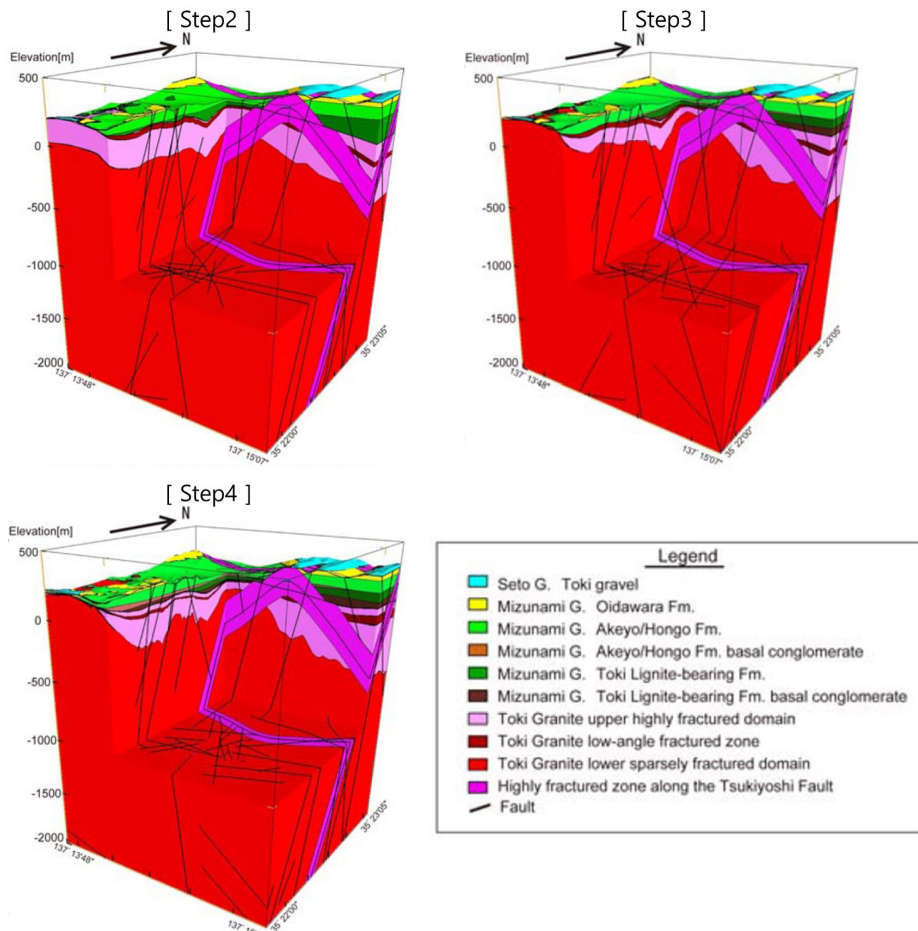


Fig. 8. Evaluation of the geological model with progress in the stepwise investigations (Step2-Step4)(Modified from JAEA, 2011).

의 강진계로부터 측정되는 자료를 관리 및 분석하고 있다. 뿐만 아니라 측지(geodetic survey)를 위한 측량 시설도 1500개 이상 존재하며, 위성자료를 이용하여 지반의 움직임을 관찰 및 분석하고 있다(HERP, 2018). 따라서 미즈나미 부지에서도 부지 내 존재하는 활성단층을 기준으로 한 지각의 이동속도나 융기율 등의 정량적 수치를 비교적 정확히 측정 가능하다. 이러한 자료들이 부지 장기 지질환경 진화 연구에 활용되었다. 예를 들어, 단층 모델의 경사에 따라 지진이 발생하였을 때 변위가 어떻게 달라지는지 분석하고 이에 대한 결과를 장기 진화 모델에 적용하였다(Kusano *et al.*, 2010).

일본은 장기 지질환경 예측 모델을 만들기 위한 두 가지 방법론을 제시하며 그 효율성 및 정확도를 비교 검증하고 있다(Kosaka *et al.*, 2011). 첫째는 연역적 모델로, 현재 지반운동 자료를 바탕으로 미래 지질환경을 예측하는 방식이다. HERP로부터 지형 변화를 야기하는 현재의 모든 지반운동 자료를 수집하여 이를 기반으로 미래 지질변화 모델(Case)을 분류하였다. 다양한 지각변동 모델의 특성에 따라 변수를 적용하여 다양한 경우의 지질진화 예측 수치모델(그림 9)을 개발할 수 있으나, 현재의 자료만 가지

고 미래를 예측하는 데 한계가 있다.

두 번째 방식은 귀납적 모델로, 과거 환경을 복원한 후 과거에서 현재까지의 변화 양상을 바탕으로 현재에서 미래로의 변화를 예측하는 방식이다. 고지질환경 자료를 수집하여 과거로부터 현재까지의 변화과정을 고지형 복원 모델, 지구조 진화 모델 등으로 모델화 하였다. 지질조사 결과를 바탕으로 과거로부터 현재까지 발생한 다양한 지질학적 사건을 고려하여 연관 FEPs (Features, Events and Processes)를 시간의 흐름에 따라 나열하여 지질 진화과정에 대한 FEPs 시나리오 모델(FEPs scenario model)을 구성하여 과정을 시스템화 한다. 이를 바탕으로 현재에서 장기 미래까지의 지질학적 변화과정을 예측하여 FEPs로 나열하였다. 일본은 FEPs의 내용을 기반으로, 과거 약 100만 년 전의 지형을 복원하고 지형 변화에 따른 수리지질 특성 변화를 정량적으로 모델링 하였다(Iwatsuki *et al.*, 2009). 귀납적 방식은 과거의 수치자료를 모델에 도입해 현재의 수치가 나오도록 검증이 가능하므로 주요 인자에 대한 평가가 가능하나, 과거와 다른 방향으로 환경이 변화할 경우의 결과 모델 도출이 불가하며 과거의 기록을 수집하는 데에 어려움이 있을 수 있다.

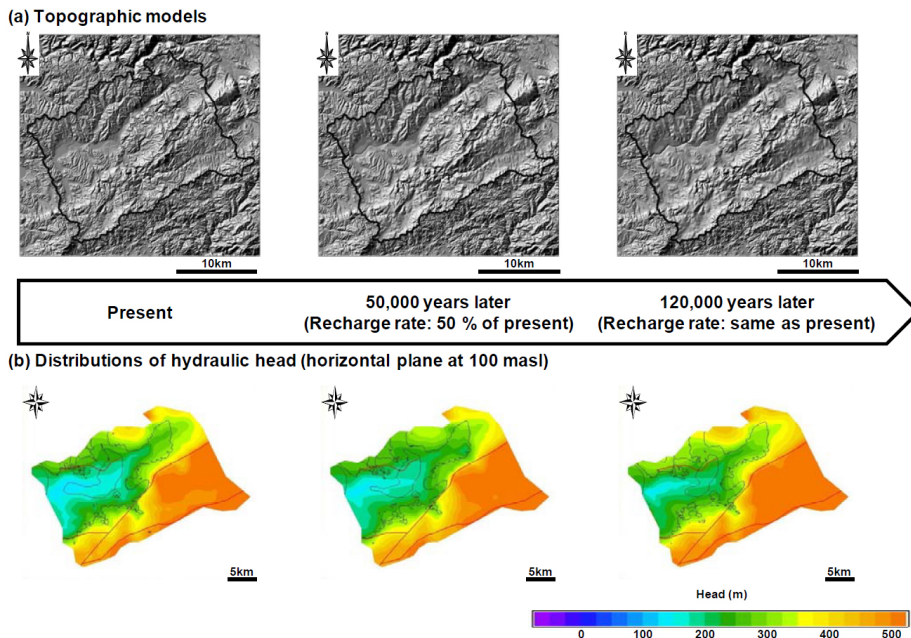


Fig. 9. Result of landform development simulation and groundwater flow simulation using deductive method approach (Kosaka *et al.*, 2011).

5. 토의 및 결론

해외 원자력 선진국의 처분 부지 장기 안전성 평가를 위한 장기 지질환경 변화 연구 사례를 살펴본 결과, 각 국의 지질환경이 다양한 만큼 장기 안전성을 위한 연구 방향 또한 다양함을 알 수 있었다. 순상지에 위치하여 수억 년 간 지구조 변동이 없으며 소규모 지각운동도 거의 발생하지 않는 핀란드에서는 지구조 변동과 관련된 연구 역시 소규모로 진행되었다. 반면에 극지방에 가까이 위치하여 빙하의 영향이 상대적으로 큰 지리적 특성으로 인하여 기후 변화와 그에 따른 지질환경 변화에 대한 연구가 진행되고 있다. 반대로 환태평양 조산대에 위치하여 지진 및 화성활동이 활발하고, 지반운동이 지속적으로 발생하고 있는 일본에서는 많은 관측소 측정 자료를 통하여 정밀한 지구조 변동 모델을 구성하고 이를 이용한 지질환경 변화 예측 모델을 개발하고 있다. 핀란드와 지리적 요인이 비슷한 스웨덴에서도 기후 변화에 따른 지질환경 변화에 집중하고 있으나, 지진 안전성에 대한 연구도 진행되고 있다.

한반도는 거대한 순상지인 중국대륙과 접입에 의한 호상열도인 일본의 사이에 위치하여, 핀란드나 스웨덴보다는 지각변동이 잦고 일본보다는 지구조적으로 안정한 특성을 갖고 있다. 한반도의 지구조사는 복잡한 구조변형을 받아 여러 차례에 걸친 변형 구조가 중첩되어 각각의 변형 과정 및 특성이 명확히 정의되지 않은 상태이다. 상대적으로 좁은 면적에 여러 개의 변형대가 띠의 형태로 조밀하게 분포해 있어 결정질 변성암이 주된 기반암으로 존재하며, 중생대 화성활동의 영향으로 화강암질 화성암체가 다수 관입되어 있다. 또한 신기 지구조 운동의 영향으로 한반도 전역에 활성단층이 분포하고 있다.

고원생대 이후로 지반운동이 거의 일어나지 않았던 핀란드/스웨덴에 비해, 국내 지질환경은 고생대 기원의 퇴적변성암과 중생대에 관입한 화성암이 주 결정질 암반이므로 일본과 같은 추가적인 지구조적 안전성 평가 기술이 필요할 것으로 생각된다. 또한 중위도에 위치하여 극지방에 비해 빙하의 영향이 크지 않으므로, 핀란드/스웨덴의 사례와 같이 빙하 영향에 중점적인 연구보다는 기후변화와 지구조 운동에 의한 다양한 영향도 함께 고려하는 평가 기술이 필요할 것으로 생각된다.

반면, 활발한 지반운동으로 인해 다수의 관측소 및 측정 자료를 확보하고 있는 일본과 달리 우리나라는 정량적 자료와 관련 선행연구가 부족하여 정밀한 예측모델의 개발이 상대적으로 어려운 실정이다. 국내의 지질환경이 일본에 비해 지구조적으로 안정하므로 일본의 예측모델만큼의 정밀도는 필요하지 않다 하더라도, 지질환경 진화 연구를 위한 충분한 자료 확보가 무엇보다 필요하다고 생각된다. 또한 일본보다 고위도에 해당하며 대륙의 경계부에 위치하여 상대적으로 빙하의 영향이 클 수 있으므로 기후변화에 따른 지질환경 진화 특성 연구도 필요할 것이다.

해외의 사례와 비교하였을 때, 국내의 부지 연구는 구체적이고 신뢰도 높은 과거 지질환경 진화사 규명 및 장기 지질환경 진화과정에 대한 연구가 충분하지 않은 것으로 보인다. 향후 국내 심층처분 부지의 장기적 안전성을 확보하기 위해서는 해외의 사례를 참고하여 한반도의 지질환경 특성에 적합하면서 효율적이고 신뢰도 높은 연구가 수행되어야 할 것으로 생각된다.

감사의 글

본 연구는 과학기술정보통신부 원자력기술개발사업(NRF-2017 M2A8A5014858)의 지원을 받아 수행하였습니다.

REFERENCES

- Aaltonen, I., Engström, J., Front, K., Gehör, S., Kosunen, P., Kärki, A., Paananen, M., Paulamäki, S. and Mattila, J., 2016, Geology of Olkiluoto. Posiva, Posiva Report 2016-16.
- Aaltonen, I., Lahti, M., Engström, J., Mattila, J., Paananen, M., Paulamäki, S., Gehör, S., Kärki, A., Ahokas, T., Torvela, T. and Front, K., 2010, Geological Model of the Olkiluoto Site - version 2.0. Posiva Oy, Working Report 2010-70.
- Chough, S.K., Kwon, S.-T., Ree, J.-H. and Choi, D.K., 2000, Tectonic and sedimentary evolution of the Korea peninsula: a review and new view. *Earth Sci. Rev.*, 52, 175-232.
- Cruzal, D., Lee, B.-J. and Cadet, J. P., 1991, Indosinian dextral ductile fault system and synkinematic plutonism in the southwest of the Okcheon belt (South Korea).

- Tectonophysics, 194, 131-151.
- Curtis, P., Markström, I., Petersson, J., Triumf, C., Isaksson, H. and Mattsson, H., 2011, Site Investigation SFR - Bedrock Geology. SKB R-10-49.
- Ernst, W.G. and Liou, J.G., 1995, Contrasting plate-tectonic styles of the Qinling-Dabie-Sulu and Franciscan metamorphic belt. *Geology*, 23, 353-356.
- HERP (The Headquarters for Earthquake Research Promotion), 2018, "Table of observation stations". <http://www.jishin.go.jp/main/index-e.html> (March 29, 2018).
- Itoh, Y., 2003, Basic Research on Tectonic Reconstruction on the basis of Paleomagnetic Methods. JNC TJ7400 2002-12 (in Japanese with English abstract).
- Iwatsuki, T., Ishii, E. and Niizato, T., 2009, Scenario development of long-term evolution for deep hydrochemical conditions in Horonobe area, Hokkaido, Japan. *Journal of Geography (Chigaku Zasshi)*, 118, 700-716 (in Japanese with English abstract).
- JAEA, 2011, Final Report on the Surface-based Investigation Phase (Phase 1) at the Mizunami Underground Research Laboratory Project. JAEA-Research 2010-067.
- JNC (Japan Nuclear Cycle Development Institute), 2001, Mizunami Underground Research Laboratory Project Results from 1996-1999 (Revised edition). JNC TN7400 2003-004.
- JNC (Japan Nuclear Cycle Development Institute), 2005, Paleostress Reconstruction using the Multiple Inverse Method. JNC TJ7420 2005-017 (in Japanese).
- Kosaka, H., Saegusa, H., Yasue, K., Kusano, T. and Onoe, H., 2011, Development of a methodology for the characterisation of the long-term geosphere evolution (2) Estimation of the long-term evolution of groundwater flow conditions in a Tono area case study. *International Conference on Nuclear Engineering*, 19-43567.
- Kusano, T., Asamori, K., Kurosawa, H., Tanikawa, S., Ninomiya, A., Negi, T., Hanamuro, T., Yasue, K., Yamada, K., Ishimaru, T. and Umeda, K., 2010, Annual Report for Research on Long-Term Stability of Geological Environments in FY2008. JAEA-Research 2009-072 (in Japanese with English abstract).
- Mattila, J. and Voila, G., 2014, New Constraints on 1.7 Gyr of Brittle Tectonic Evolution in Southwestern Finland Derived from a Structural Study at the Site of a Potential Nuclear Waste Repository (Olkiluoto Island). *Journal of Structural Geology*, 67, 50-74.
- NAGRA, 2016, Technical Report 16-02 - The Nagra Research, Development and Demonstration (RD&D) Plan for the Disposal of Radioactive Waste in Switzerland. NAGRA NTB 16-02.
- Oh, C.W. and Kusky, T.M., 2007, The Late Permian to Triassic Hongseong-Odesan collision belt in South Korea, and its tectonic correlation with China and Japan. *International Geology Review*, 49, 639-657.
- Oh, C.W., Yengkhom, K.S., Lee, S.B., Lee, S.H. and Lee, B.Y., 2017, The study on the tectonic evolution of the Yuseong area. KAERI, KAERI/CM-2379/2016.
- POSIVA Oy, 2011, Olkiluoto Site Description 2011. Posiva Report 2011-02.
- POSIVA Oy, 2012, Safety Case for the Disposal of Spent Nuclear Fuel at Olkiluoto - Synthesis 2012. Posiva Report 2012-12.
- Ree, J.-H., Cho, M., Kwon, S.-T. and Nakamura, E., 1996, Possible eastward extension of Chinese collision belt in South-Korea: The Imjingang belt. *Geology*, 24, 1071-1074.
- Ree, J.-H., Kwon, S.-H., Park, Y., Kwon, S.-T. and Park, S.H., 2001, Pre-tectonic and post-tectonic emplacements of the granitoids in the south central Ogcheon belt, South Korea: Implications for the timing of strike-slip shearing and thrusting. *Tectonics*, 20, 850-867.
- SKB, 2011a, Environmental Impact Statement - Interim storage, encapsulation and final disposal of spent nuclear fuel. SKB.
- SKB, 2011b, Long-term Safety for the Final Repository for Spent Nuclear Fuel at Forsmark - Main Report of the SR-Site Project. SKB TR-11-01.
- SKB, 2013, Site Description of the SFR area at Forsmark at Completion of the Site Investigation Phase - SDM-PSU Forsmark. SKB TR-11-04.
- SKB, 2015, Safety Analysis for SFR - Long Term Safety. Main Report for the Safety Assessment SR-PSU (Revised edition). SKB TR-14-01.
- Söderbäck, B. (ed.), 2008, Geological Evolution, Paleoclimate and Historical Development of the Forsmark and Laxemar-Simpevarp areas - Site Descriptive Modelling (SDM-Site). SKB, SKB R-08-19.
- UFDC (Used Fuel Disposition Campaign), 2012, Used Fuel Disposition Campaign Disposal Research and Development Roadmap - Fuel cycle research & development. FCR&D-USED-2011-000065 REV1.
- Yasue, K., Ishimaru, T., Kabori, K., Umeda, K. and Nakatsuka, N., 2014, Subsurface Geological Mapping of the Japanese Islands. *Journal of Geological Society of Japan*, 120, 13-14.
- Yin, A. and Nie, S., 1993, An indentation model for the north and south China collision and the development of the TanLu and Honam fault systems, eastern Asia. *Tectonics*, 12, 801-813.

Received : June 29, 2020

Revised : July 29, 2020

Accepted : July 31, 2020