

Review of Site Characterization Methodology for Deep Geological Disposal of Radioactive Waste

방사성폐기물의 심층 처분을 위한 부지특성조사 방법론 해외 사례 연구

Kyung-Woo Park*, Kyung-Su Kim, Yong-Kwon Koh, Yeonguk Jo, and Sung-Hoon Ji

Korea Atomic Energy Research Institute, 111, Daedeok-daero 989beon-gil, Yuseong-Gu, Daejeon, Republic of Korea

박경우*, 김경수, 고용권, 조영욱, 지성훈

한국원자력연구원, 대전광역시 유성구 대덕대로 989번길 111

(Received June 5, 2017 / Revised June 27, 2017 / Approved July 24, 2017)

In the process of site selection for a radioactive waste disposal, site characterization must be carried out to obtain input parameters to assess the safety and feasibility of deep geological repository. In this paper, methodologies of site characterization for radioactive waste disposal in Korea were suggested based on foreign cases of site characterization. The IAEA recommends that site characterization for radioactive waste disposal should be performed through stepwise processes, in which the site characterization period is divided into preliminary and detailed stages, in sequence. This methodology was followed by several foreign countries for their geological disposal programs. General properties related to geological environments were obtained at the preliminary site characterization stage; more detailed site characteristics were investigated during the detailed site characterization stage. The results of investigation of geology, hydro-geology, geochemistry, rock mechanics, solute transport and thermal properties at a site have to be combined and constructed in the form of a site descriptive model. Based on this site descriptive model, the site characteristics can be evaluated to assess suitability of site for radioactive waste disposal. According to foreign site characterization cases, 7 or 8 years are expected to be needed for site characterization; however, the time required may increase if the no proper national strategy is provided.

Keywords: Radioactive waste disposal, Preliminary site characterization, Detailed site characterization, Site descriptive model

*Corresponding Author.

Kyung-Woo Park, Korea Atomic Energy Research Institute, E-mail: woosbest@kaeri.re.kr, Tel: +82-42-868-8893

ORCID

Kyung-Woo Park <http://orcid.org/0000-0001-9620-8751>

Yong-Kwon Koh <http://orcid.org/0000-0001-7728-8135>

Sung-Hoon Ji <http://orcid.org/0000-0002-2506-4049>

Kyung-Su Kim <http://orcid.org/0000-0002-0399-2653>

Yeonguk Jo <http://orcid.org/0000-0003-3655-8500>

방사성폐기물 지층 처분을 위한 부지 선정 과정에서 심층 처분장의 안전성을 평가하는데 필요한 입력 자료를 제공하기 위해 부지특성조사를 수행한다. 본 논문에서는 부지특성조사를 선도하여 수행하였던 해외 사례를 분석하고, 국내에서 방사성폐기물 처분을 위해 수행해야 할 부지특성조사 방법을 제안하고자 하였다. IAEA가 고려하는 부지특성조사 방법은 단계별 부지특성조사로 본 논문에서 소개된 해외의 경우도 이 방법을 따르고 있는데, 부지특성조사는 시기별, 조사 항목별로 다수의 지역에서 개략적인 부지의 정보를 도출하는 예비 부지특성조사와 조사 결과 선정된 지역에서 보다 자세한 부지특성자료를 생산하기 위한 상세 부지특성조사로 구분할 수 있다. 특히, 상세 부지특성조사 단계에서는 조사지역에 장심도 시추공을 굴착하여 심부 영역에 대한 지질 특성을 바탕으로, 수리지질, 수리-지화학, 암석역학, 열, 용질이동에 대한 특성을 도출해야 한다. 단계별 부지특성조사를 통해 도출된 부지 고유의 지질환경 특성은 부지특성모델로 구축되어야 하는데, 이를 종합하여 해석해야 비로소 조사지역의 부지특성을 이해하고, 지층 처분에 보다 유리한 부지를 최종 후보지역으로 선정할 수 있는 것이다. 해외 사례를 살펴본 결과, 부지특성조사 단계에 소요되는 시간은 대략 7~8년이 소요될 것으로 예상되나, 이를 계획하고 수행하는 시스템이 뒷받침 되지 않을 경우 보다 지연될 수 있을 것이다.

중심단어: 방사성폐기물 지층 처분, 예비 부지특성조사, 상세 부지특성조사, 부지특성모델

1. 서론

일반적으로 부지특성조사(Site Characterization)는 지상 시설물을 건설하거나, 지하 공동을 건설하여 부지를 직접 이용하는 과정에서 사전에 수행해야 하는 지질 환경에 대한 종합적인 조사를 의미한다. 우리나라와 같이 국토가 좁고 인구가 많은 국가의 경우 공간을 효율적으로 활용하기 위해 지하 공간을 고려할 수 밖에 없으며, 더욱이 지하철 및 도로 터널, 석유저장탱크, 지하유류/가스 비축기지 등 반드시 지하 공간을 활용해야 할 기간 시설물의 수요가 늘어남에 따라 지하 환경을 대상으로 하는 부지특성조사의 중요성은 확대되고 있다. 특히, 방사성폐기물의 심층 처분과 관련하여 정확한 지하 환경에 대한 이해는 처분장의 건설 안정성 및 처분 안전성의 제고를 위해서 그 중요성이 커지고 있다. 국외의 경우, 지상 혹은 지하 시설물 건설 전, 건설에 적용할 공학적 기술의 안정성과 건설 후의 안전성을 검토하기 위해 부지특성조사에 상당한 시간과 비용을 투자하고 있으며, 건설 중에도 추가 조사의 결과를 이용하여 좀 더 정확한 부지의 지질환경을 이해함으로써 시설물의 안전한 이용을 도모하고 있다[1]. 그러나 국내의 경우 부지특성조사가 지상 혹은 지하 시설물의 건설 과정에서 상당 부분 생략되거나 비전문가에 의해 건설 목적에만 국한된 부분적인 조사를 수행하고 있어 그 중요성이 과소평가 되고 있다[2, 3].

방사성폐기물 처분을 위한 부지특성조사는 일반적인 부지특성조사에 비해 공간적으로 그 깊이가 확장되는데, 지표에서 100 m 이내의 심도를 대상으로 하는 일반적인 부지특성조사와는 달리, 처분 심도 보다 확장되어 심도 500 m 이상까지의 깊이를 대상으로 한다[4]. 따라서 부지특성조사에 많은 시간과 비용이 소요되고, 조사 결과의 불확실성도 크다. 시간적 관점에서 보면 방사성폐기물의 심층 처분시설은 그 영향이 현 세대나 다음 세대에 국한되는 일반적인 시설과는 다르게 수십만 년 후의 환경에까지 영향을 미칠 수 있다. 이는 원자력 발전의 부산물인 고준위 폐기물에 포함된 방사성 핵종의 반감기가 수십 년에서 수만 년까지 되기 때문이다[5].

즉, 심층 처분을 고준위폐기물의 최종 관리 방안으로 고려할 때, 앞에서 기술한 바와 같이 부지특성조사는 조사 영역이 공간적으로 확장되어 그 결과가 많은 불확실성을 가질 수 있으며, 시간적으로 먼 후손에 까지 영향을 줄 수 있으므로 현재 개발된 가장 최선의 방법을 이용하여 가능한 불확실성을 최소화하는 방향으로 수행되어야 한다.

본 논문에서는 방사성폐기물 처분을 위해 다양한 부지특성조사를 선도하여 수행하였던 SKB (스웨덴)의 사례를 기준으로 NAGRA (스위스), POSIVA (핀란드), JAEA (일본) 등이 수행한 부지특성조사 방법을 종합하여 국내에서 수행해야 할 처분을 위한 부지특성조사 방법을 모색해 보고자 한다.

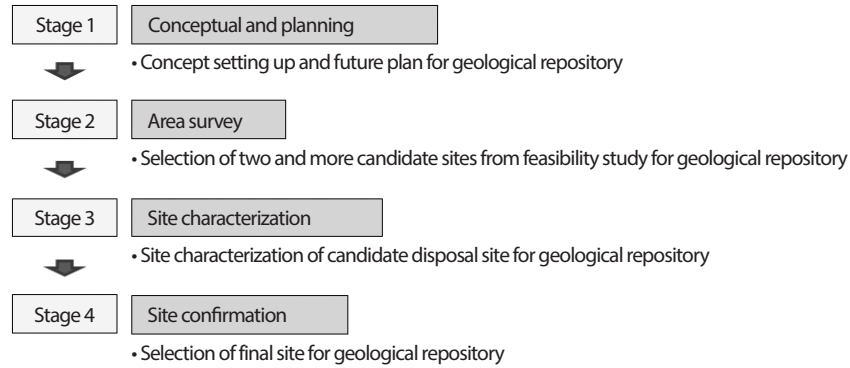


Fig. 1. Final site selection process for geological repository recommended by IAEA [6].

2. 부지특성조사의 목적 및 방법

2.1 목적

방사성폐기물처분에서 부지특성조사의 목적은 심층 처분장을 건설하고 처분에 대한 안전성을 입증하여 인허가를 획득하는 데에 있다. 그러나 보다 근본적인 목적은 조사지역이 방사성폐기물을 처분하는데 적합한 환경을 갖고 있는지를 확인하여 장기적으로 처분의 안전성을 확보하는데 있다. 부지특성조사는 생태계, 수리-수문, 지질환경 등 조사 지역에 대한 종합적인 정보를 획득하는 과정이며, 이 중 지질환경 조사의 역할은 심층 처분 시설 부지로서 조사지역의 적합성을 확인하고, 방사성폐기물처분장의 안전성 평가를 위한 자료를 생산하는 것에 있는데, 특히 다음의 항목에 초점을 맞춰 시행하여야 한다[1].

- 조사 지역이 심층 처분장의 안전성을 위해 필요한 기본적인 조건을 만족하는가?
- 조사 지역이 심층 처분장 건설에 요구되는 공학적인 조건을 만족하는가?
- 조사 지역의 부지특성평가 결과가 다른 지역에서 수행된 결과와 비교해 볼 때, 심층 처분부지로서 유리한가?
- 사회, 환경적 측면을 고려하였을 때, 조사 지역에 심층 처분 방법을 적용할 수 있는가?

부지특성조사는 광범위한 내용을 포함하고 있기 때문에 조사와 분석을 체계적으로 수행하기 위해 부지특성조사

단계를 시간, 공간, 항목별로 세분화 할 필요가 있다. 이렇게 조사 단계를 구분함으로써 시기적으로 적절한 조사 방법을 효율적으로 배분할 수 있으며 각 단계별 부지특성평가 결과를 비로소 다음 단계의 조사에 반영할 수 있게 된다.

2.2 단계별 부지특성조사

방사성폐기물처분을 위한 부지특성조사는 지표 근처의 환경을 대상으로 하는 것이 아니라 지하 심부 환경까지 조사 범위를 수직적으로 확장해야 하므로 지표에서 심부로 가는 체계화된 접근 방법이 요구된다. 그리고 장차 심층 처분장이 가져 올 환경에 대한 영향을 최소화하기 위해 현재 이용 가능한 가장 진보된 기술로 조사를 수행해야 한다. 심부 환경을 대상으로 하며, 비록 도출해야 하는 인자가 소수더라도 안전성에 중요한 영향을 미친다면 객관적인 결과를 도출하기 위해 다양한 현장시험 방법을 적용하여 과학적인 신뢰성을 확보해야 하므로 부지특성조사는 장시간이 소요될 것으로 예측된다.

일반적으로 방사성폐기물 처분을 위한 최종 부지선정 방법으로 IAEA는 다음과 같이 권고하고 있다[6]. 최종 부지선정 과정은 심층 처분 방법이 적용될 수 있을 것으로 예상하는 다수의 후보지역에서 보다 적합한 조건을 갖는 선호부지를 선정하고, 이 중 하나의 지역을 최종 처분 부지로 결정하는 단계적 접근법을 따른다(Fig. 1). 부지선정 단계에서는 우선 처분부지의 개념 설정과 계획 단계(Conceptual and Planning Stage)가 수행되어야 한다. 다음으로는 기존 조사된 문헌 및 자료를 바탕으로 각국의 지질 조건 특성을 반영하여

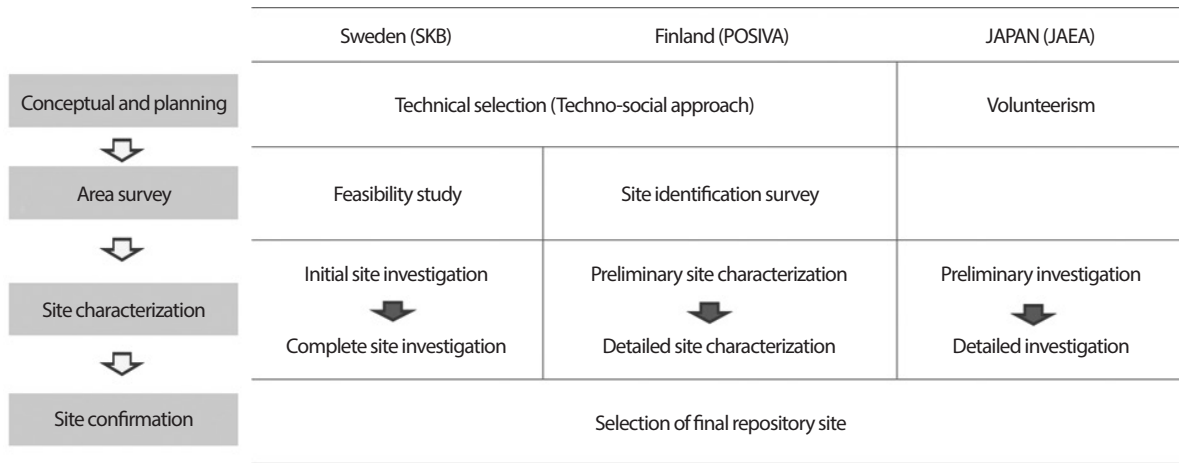


Fig. 2. Foreign cases of site selection process for radioactive waste disposal.

심층 처분부지로 적합한 지역을 선별하는 타당성 조사단계 (Feasibility Study)를 거쳐야 한다. IAEA는 이 단계를 후보부지 도출단계(Area Survey Stage)로 정의하고 있다. 후보부지 도출단계에서 두 개 이상의 후보 부지가 도출되면, 부지특성화 단계(Site Characterization Stage)를 통해 후보 부지에 대한 조사를 수행해야 한다. 부지특성화 단계 후, 최종 부지가 선정되면 부지 확정 단계(Site Confirmation Stage)에서 환경영향 평가를 포함하여 보다 상세한 조사를 수행하고, 그 결과를 바탕으로 방사성폐기물 처분부지로서 규제기관에 인허가를 신청하게 된다.

원자력을 이용하여 전력을 생산하거나, 방사성 물질을 이용하는 각국에서는 사용후핵연료 및 방사성폐기물 최종 관리를 위한 자국 고유의 처분 프로그램과 처분부지 선정방안을 연구 개발하고 있으나, 기본적인 방향은 IAEA가 제시한 바와 같다.

심층 처분시스템에 대한 개념이 설정되고 처분 계획이 수립된 후, 후보부지 도출단계에서 기존 조사된 문헌 자료를 바탕으로 다수의 후보 부지가 도출된다. 스웨덴(SKB)은 “Feasibility Study”로, 핀란드(POSIVA)는 “Site Identification Survey”로 후보부지 도출단계를 정의하였다[1, 7]. 후보부지 도출단계 후 부지특성화에 진입한다. 부지특성화 단계의 주요 목적은 후보부지 도출단계에서 선정된 후보부지 중 심층처분부지로 보다 적합한 부지를 선택하는 것이다.

IAEA에서 제안한 심층 처분을 위한 부지선정 과정에서

부지특성화 단계는 시기 및 조사 항목에 따라 2개로 구분할 수 있는데, 본 논문에서는 이를 예비 부지특성조사와 상세 부지특성조사로 구분하였다. 예비 부지특성조사 단계에서는 후보부지 도출단계에서 도출된 다수의 후보부지에서 조사 자료를 바탕으로 어떤 지역을 처분심도 이상의 깊이 까지 상세하게 조사할 것인지를 결정한다. 스웨덴은 예비 부지특성조사 단계를 “Initial Site Investigation”로, 핀란드는 “Preliminary Site Characterization” 단계로 정의하였다[1, 7]. 예비 부지특성조사를 통해 2개 이상의 지역이 상세 부지특성조사지역으로 선정되면, 상세 부지특성조사단계에서는 보다 보완된 조사를 통해 하나의 지역을 처분장으로 최종 선정하게 된다. 상세 부지특성조사 단계를 스웨덴은 “Complete Site Investigation”로, 핀란드는 용어만 달랐던 “Detailed Site Characterization”로 정의하였다[1, 7]. 이 예비 부지특성조사와 상세 부지특성조사를 합친 개념이 IAEA의 처분장 선정 단계에서 부지특성화 단계(Site Characterization Stage)라고 전술한 바 있다. 다만, 스웨덴은 예비 부지특성조사 후, 상세 부지특성조사 이전에 예비 부지특성조사 결과를 바탕으로 처분에 보다 적합한 선호부지에 대해 보완된 조사를 수행한 후, 상세 부지특성조사 단계를 밟았다[1]. 우리나라와 가장 인접한 일본은 심층 처분부지를 지자체 공모에 의해 선정하는 것으로 계획하여 앞 두 나라와는 부지선정의 접근 방법을 달리하였다. 그러나 다수의 공모된 지역에 대한 부지특성조사를 예비조사단계

(Preliminary Investigation, PI)와 상세조사단계(Detailed Investigation, DI)로 구분하여 최종 처분장을 결정하는 단계적 부지특성조사를 고려하고 있다[8]. 이와 같은 스웨덴, 핀란드, 일본의 심층 처분장 부지 선정 방법은 Fig. 2와 같이 정리할 수 있다.

2.3 부지특성조사의 분야

부지특성조사를 효과적으로 수행하고, 그 결과를 객관적으로 검토하기 위해 조사를 분야별로 구분하여 구체화해야 한다. 부지특성조사를 수행하는 조사지역을 지표에서 시작하여 심부의 처분장으로 진행되는 공간적 개념으로 구분했을 때, 지표의 생태계, 수리수문 환경과 지하의 지질환경특성으로 나눌 수 있다. 지하의 지질환경특성은 다시 지질, 수리지질, 지구화학, 암반의 역학적 특성, 열적 특성과 용질이동 특성으로 구분할 수 있다.

위에서 열거한 부지특성조사 분야 중, 지표 생태계와 수리수문 환경, 큰 규모의 지질특성에 대한 조사는 문헌자료와 지표 현장조사를 통해 수행하고, 수리지질, 지구화학과 암반 역학조사는 조사지역에서 굴착된 시추공이나 연구용 지하시설을 이용하여 수행한다. 열적 특성 또한 지질조사를 통해 도출되며, 용질이동 특성은 시추공을 이용한 용질이동 특성 현장시험을 통해 도출할 수 있다. 부지특성조사 분야 중 지구물리탐사나 검증의 경우, 지질 분야에 주요한 자료를 제공하기 위해 수행되므로 지질의 한 분야로서 기술할 수 있을 것이다.

3. 부지특성조사 프로그램

방사성폐기물의 최종 관리 방안으로 심층 처분 방법을 결정한 해외의 사례를 볼 때, 심층 처분 연구를 국내 보다 먼저 수행한 각 나라에서 현재 진행 중이거나 계획 중인 부지특성화 단계는 시기별로 예비 부지특성조사와 상세 부지특성조사로 구분할 수 있었다.

특히, 스웨덴은 부지특성조사 프로그램을 예비 부지특성조사 단계와 상세 부지특성조사단계로 구분하여 수행내용을 비교적 상세히 기술하고 있으며, 핀란드, 일본, 스위스의 경우와 크게 다르지 않다. 따라서, 본 논문에서는 스웨덴의 부지특성조사 프로그램을 기준으로 국내의 한국원자력연구원에서

수행하였던 시추조사 프로그램을 참조하여 향후 국내에서 수행해야 할 부지특성조사 프로그램을 제안하고자 한다[1, 9, 10, 11].

3.1 예비 부지특성조사

3.1.1 일반 지질 및 수리지질-지화학 조사

예비 부지특성조사 단계에서는 후보 부지의 지질환경을 전반적으로 이해하기 위한 조사를 진행하여야 한다. 일반적으로 수행하는 야외지질조사와 함께 GPS (Global Positioning System) 네트워크로 지질구조의 운동의 관측망을 구축한다. 또한 레이더를 이용한 지구물리탐사방법으로 암반을 덮고 있는 토양층 및 풍화대의 깊이를 확인한다. 특히 광역 지질구조 도출을 위해 항공 물리탐사를 포함한 지구물리탐사를 수행하며, 전자기 방법을 이용한 탐사와 기반 암종의 정보를 제공하는 자력탐사 및 방사능 탐사는 필수적으로 수행해야 한다. 광역 지질구조 도출을 위한 다른 방법으로는 디지털 지형 자료를 이용한 선형구조 분석이 있다. 이 방법은 광역 규모의 연약대(Deformation Zone)를 확인하는데 좋은 방법으로, 특히 국내의 경우 대부분의 지역에서 결정질 암반의 기반암으로 구성되어 있으므로 선형구조 분석은 더욱 좋은 광역 규모 연약대의 지시자로 활용될 수 있다. 아울러 지구물리탐사, 선형구조 분석을 통해 도출한 광역 지질구조를 확인하기 위해 일부 지역에서 충격식(Percussion) 시추도 부지특성조사 초기 단계에서 수행한다[10].

예비 부지특성조사 단계에서 지표수와 지하수의 수리지질학적 특성과 지구화학적 특성에 대한 정보는 조사 지역에서 기존에 굴착된 시추공을 이용하거나 광역 규모 지질구조 확인을 목적으로 굴착한 충격식 시추공을 활용한다. 후보 부지의 수리 수두 및 기상 자료에 대한 모니터링도 이 시기에 시작하여 장기적으로 지하수의 유동 양상, 수문학적인 특성에 대한 정보를 축적한다.

3.1.2 지표 생태계 조사

선정된 후보 부지에서 지표 생태 조사를 수행하여 생태계에 대한 기본 정보를 획득한다. 지표 생태계 조사를 위해 계절별 항공사진, 위성사진을 통한 지상 생태계 조사를 수행하고, 환경영향평가를 위해 후보 부지에서 살고 있는 동물종, 식물종에 대한 생태지도를 작성한다. 이외에도 국토 지리정보로

계획된 시추 조사 지역에 위치한 도로 정보, 계획된 도로 정보를 함께 확보한다.

3.1.3 선호 지역에 대한 조사

스웨덴은 후보 부지 도출단계에서 전국을 대상으로 심층 처분부지로서 적합할 것으로 판단되는 다수의 후보지를 선정 후, 예비 부지특성조사 단계에서는 선정된 각 후보 부지에 대해 보다 적합한 선호 지역을 도출하고, 도출된 선호 지역에서 처분 심도 이상의 영역에 대한 지질환경 특성을 조사하였다. 즉, 예비 부지특성조사 단계에서 처분에 보다 적합한 지역을 미리 결정하여 보다 자세한 조사를 수행함으로써 부지특성조사에 소요되는 시간을 절약할 수가 있는 것이다[10].

예비 부지특성조사 단계에서 수행할 선호 부지에 대한 부지특성조사 내용으로는 2~3개의 심부 시추조사(코어 시추)와 다수의 충격식 시추 조사가 일반적이다. 충격식 시추공은 처분장의 안전성에 주요하게 영향을 미칠 수 있는 심부 영역의 저경사 단열대 도출을 주요 목적으로 3차원 반사법 탄성과 탐사를 위해 굴착한다. 또한, 충격식 시추공을 이용하여 비교적 큰 규모의 암반 손상대 해석을 위한 수직탄성과 탐사를 수행하는데, 이 수직탄성과 탐사 결과를 시추공과 지표면에서 수행한 반사법 탄성과 탐사 결과와 비교하여 지질구조 분석하고, 부지특성조사 결과에 반영한다. 심부 코어 시추공에서도 위에서 기술한 지구물리탐사를 수행할 수 있지만 주요 목적은 심부 환경에 대한 수리지질특성, 수리 지화학 특성, 암반 역학적 특성을 도출하는 것이다. 심부 코어 시추공에서는 수리지질조사, 수리지화학조사, 암반역학 실험 등의 다양한 현장 실험을 수행하며, 암반과 암반 손상대에 대한 조사 지역의 부지특성 자료를 도출한다. 이를 위해 상세한 현장조사프로그램을 마련하여 코어 시추공에서 계획적인 현장 실험을 수행하여야 한다[10].

3.2 상세 부지특성조사

3.2.1 지표 생태계 조사

상세 부지특성조사 단계에서 후보 부지의 지표 생태계 조사를 통해 획득한 생태 정보는 향후 처분 부지로서의 인허가에 필요한 환경영향평가의 기본 자료가 된다. 지표 생태계 조사 항목으로는 조사 지역 내에 분포하는 생태종과 각 종의

개체수가 있으며, 다양한 지점에서 지표수 및 토양시료가 채취되어야 한다. 특히 지표 생태계를 조사할 때, 부지의 지하수 유동 특성을 고려하여 함양 영역이 아닌 배출 영역에서 상세한 생태종 및 미고결 퇴적층에 대해 보다 자세한 조사가 이루어져야 하는데, 이에 대한 모니터링은 심층 처분장 건설·운영·폐쇄 이후의 기간에도 지속적으로 수행하여, 최종적으로는 처분에 따른 생태계의 변화를 관찰하는데 그 목적이 있다. 예를 들어, 만약 심층 처분 부지로서 선호 지역이 해안에 위치한 경우 해안 지역 바닥에 서식하고 있는 생태종 조사가 수행되어야 하고, 바닥 퇴적층에 대한 시료가 채취되어야만 심층 처분장이 건설되기 전 현재와 건설 후 미래의 배출영역에 대한 객관적인 생태 모델이나 지표 수문모델에 대한 자료를 제공할 수 있는 것이다[10].

3.2.2 지질과 지구물리조사

상세 부지특성조사 단계에서는 야외 지질조사(Field Geological Investigation)를 보다 상세하게 수행하여 예비 부지특성조사 단계의 지구물리탐사 결과로부터 확인된 단층에 대한 정보를 수집하고, 지질도 등 문헌에서 기재한 조사지역의 지질 특성을 확인해야 한다. 이와 함께 토양층의 분포 범위, 두께 등에 대해서도 조사한다. 야외 지질조사에서 확인된 조사지역의 지질특성, 단층에 대한 방향성과 크기, 토양층의 두께 등에 대한 정보는 부지특성조사 결과 구축되는 지질모델의 기본적인 요소인 토양층, 기반암, 단열대 혹은 전단대에 대한 정보를 제공한다.

또한 예비 부지특성조사에서 수행하지 않았던 지질 조사를 추가적으로 수행한다. 예를 들어 예비 부지특성조사 단계에서 조사지역의 대규모 지질 구조를 예측할 수 있는 선형 구조 분석과 항공물리탐사를 수행하였다면 상세 부지특성조사단계에서는 예측된 지질구조를 확인하기 위해 굴절법 탄성과 탐사, 중력 탐사, 비저항 탐사, 전자기 탐사 등 다양한 지표 지구물리탐사를 수행하여 부지특성모델의 주요 요소인 지질구조모델의 구축을 위한 입력 자료로 이용한다. 지질구조에 대해 보다 과학적이고, 객관적인 자료 확보를 위해 조사용 시추공에서 단열(Fracture) 영상촬영과 방사능, 전기, 자력, 음파, 온도 검층과 같은 지구물리검층을 함께 수행하여 단열대에 대한 상세 정보를 획득한다. 암반이나 토양층의 특성에 대한 야외 지질조사와 실험실에서 시추코어 표본의 지질학적 특성을 분석하면 조사지역의 부지특성모델의 주요

요소인 암반대에 대한 생성 연대, 주요 지질 등에 대한 정보를 제공한다. 이와 함께 예비 부지특성조사단계에서부터 연속적으로 신기 지구조 운동에 대한 조사를 수행하여 활동성 단층에 대한 정보를 파악하도록 한다[10].

3.2.3 수리지질조사

상세 부지특성조사 단계에서 수행하는 수리지질조사는 후보지역에서 현장 시험을 통해 이미 구축된 지질모델의 각 요소에 대한 수리지질 특성을 도출하여 지하수 유동 및 지화학 특성을 예측할 수 있는 수리지질모델을 구축하는 데에 목적이 있다.

수리지질조사를 수행하기 이전에 후보 부지를 포함한 광역적 규모의 영역에서 지하수의 유동 형태를 먼저 분석할 필요가 있다. 이에 대한 분석은 지형 구배에 대한 정보를 이용하는 데, 지하수의 흐름이 고지대에서 저지대로 지형에 따라 흐른다는 기본적인 가정에 근거한다. 야외 지질조사와 마찬가지로 수리지질조사도 야외 조사를 통해 실제 조사지역에 존재하는 함양대(Recharge Area) 및 배출대(Discharge Area)에 대한 정보를 확인할 수 있다면 지형 구배의 분포에 대한 정보와 함께 광역적 지하수 유동을 파악할 수 있으며, 지표 수계를 포함한 지하수 유동의 경계 또한 알 수 있다. 후보 부지에 대한 지표 수리지질조사가 수행된 후 시추공을 이용한 수리지질조사를 실시한다. 시추공을 이용한 수리지질조사에서는 먼저 심부 시추공을 굴착할 때 일정 심도별로 현장 수리시험을 수행하여 심부 환경에 대한 전반적인 투수성을 확인하고, 시추공 굴착이 완료되면 나공 상태에서 이중 패커를 이용하여 지질모델의 요소에 해당하는 주요 구간에 대한 현장 시험을 수행한다. 이중 패커를 이용하여 수행할 수 있는 현장 시험으로는 주요 구간 전체에서 순간충격시험을 수행하고, 투수성이 양호하여 일정 압력 혹은 유량으로 양수나 주입이 가능한 구간에서는 양수시험/주입시험을 수행한다. 그리고, 시추공 내 지하수 흐름을 관측하는 유향유속 검층을 수행하여 심부 환경에서 실제 지하수의 흐름을 관측할 필요가 있다[11].

지질 모델의 요소에 대한 현장 수리시험을 통해 각 요소별 수리지질특성이 파악되고 3차원으로 수리지질모델이 구축되면, 단열대의 수리적 연결성을 파악하여 구축된 모델을 검증할 필요가 있다. 이 때, 이중 패커로 주요 구간을 격리한 후 연결된 지역에서 그 압력 변화를 관측하는 수리간섭시험을

수행한다[11]. 현장 수리시험이 종료되어 수리지질모델이 구축되고, 수리간섭시험을 통해 검증이 되면, 장기 수리수두 관측공을 선정하여 다중패커시스템을 설치하고 수리수두를 관측한다.

3.2.4 수리-지화학 조사

상세 부지특성조사 단계에서 수리-지화학 조사는 조사 지역에 부존하는 지하수의 물리·화학적 특성에 대한 3차원 지화학 모델을 구축하기 위해 수행한다. 3차원 지화학 모델은 이미 구축된 지질모델과 수리지질모델의 각 구성요소에 대해 지구화학적 관점에서 그 특성을 해석할 수 있으므로 다른 모델을 검증하는 목적으로도 이용된다. 예를 들어 지질조사를 통해 조사지역의 한 지점에서 단열이 발달된 파쇄대가 존재하고 있음을 확인하고, 수리지질학적으로 이 파쇄대는 투수성이 커서 지하수가 잘 흐르는 경로로 평가되며, 이 파쇄대에서 채수한 지하수의 지화학적 특성이 주변 암반과 다르다면 이를 통해 지질모델과 수리지질모델을 확인할 수 있고, 나아가 파쇄대의 수리지질학적 연결성을 뒷받침해 주는 근거 자료가 될 수 있다.

상세 조사단계에서 수리-지화학 조사의 주요 수행 수행 내용으로 공내 검층장비를 이용한 지하수 화학특성 관측과 지하수의 채수가 있다. 공내 검층장비로는 심도별 지하수의 전기전도도, 용존산소량, 온도, 수소이온농도, 산화환원전위 등을 비교적 빠른 시간에 확인할 수 있다. 단, 검층장비가 시추공내 지하수를 교란시키지 않도록 속도를 조절하여 하강시키면서 측정해야만 한다. 지하수의 채수를 위해서는 패커시스템을 이용한다. 투수성이 양호한 구간에서는 관심구간을 패커로 격리한 후, $0.1 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$ 이하의 유량으로 지하수를 천천히 채수하여 해당 심도의 지하수를 채수한다. 그리고 고투수성 구간에서는 양수시험에 병행하여 지하수 시료 채수가 가능하다. 지질모델에서의 암반영역이자 수리지질모델에서의 수리암반대의 저투수성 구간에서는 패커로 구간을 격리한 후 장기간에 걸친 채수 작업이 필요하다[11].

3.2.5 암석역학 조사

상세 부지특성조사 단계에서는 조사 지역의 심부환경을 구성하고 있는 기반암에 대한 역학적 특성을 파악하기 위해 암석역학 조사를 수행한다. 암석역학 조사의 주요 목적은

조사 지역의 지하 암반에서 응력 상태에 대한 정보를 획득하고, 무결암과 무결암 내부에 존재하는 변형 및 강도 특성에 대한 자료를 획득하는 데에 있으며, 이러한 암석 역학적 자료는 향후 처분장이 건설될 심부 암반에 대한 공학적 안정성을 평가하고, 처분장 건설로 인해 발생할 수 있는 인위적 균열 여부를 예측할 수 있게 해 준다.

조사 지역의 심도에 따른 지하 암반의 응력을 측정하기 위해 시추공을 활용하여 정해진 심도 구간에서(예를 들어 100~800 m 까지) 현장 조사를 수행하는데, 조사 방법으로 확장 코어링(Over Coring) 방법의 암반 응력 조사와 수압파쇄(Hydraulic Fracturing)를 이용한 암반 응력조사가 있으며, 상세 조사단계에서는 두 방법을 병행하여 조사 결과의 불확실성을 저감할 필요가 있다[10]. 또한 수직적으로는 심도에 따른 암반 응력자료를 획득하고, 수평적으로는 다수의 조사공에서 암반역학 시험을 수행함으로써 암반 응력에 대한 3차원 공간적 분포를 도출하고 암반역학 모델을 구축해야 한다.

3.2.6 열적 특성 조사

상세 부지특성조사 단계에서 조사지역 기반암의 열적 특성 조사를 통해 암반의 열전도율과 열용량 및 열팽창 계수를 측정하여 처분 시스템 설계에 필요한 입력 자료를 제공해야 한다. 이를 위해 처분 심도에 해당하는 암반에 대해 코어 시료를 채취하고, 실험실에서 시추 코어를 이용하여 열적 특성 실험을 수행한다. 심부 영역에 대한 암반의 깊이별 온도는 공내 감층장비를 이용하여 측정하고, 깊이에 따른 온도 구배를 평가한다[10].

3.2.7 용질이동 특성 조사

상세 부지특성조사 단계에서 암반의 용질이동 특성조사를 통해 처분장에서 누출된 핵종이 생태계까지 흘러가는 유동 경로에서의 흡착, 분산, 확산 등의 자연 현상을 규명하고, 천연 암반의 용질 이동에 대한 저항성을 규명한다.

암반에서의 용질이동 기작은 기반암의 지질학적 특성, 용질이 이동하는 경로를 제공하는 암반 매질의 수리지질 특성, 매질 내 부존하는 지하수의 화학적 특성, 암반 매질의 공극률, 확산계수와 같은 물리적 특성이 모두 연관된 복합적인 과정이다. 용질이동 특성 조사로부터 처분장에서 존재하는 다양한 핵종에 대한 암반 매질의 자연 특성을 확인해야

하는데, 일부 핵종의 경우 매질에의 흡착성이 강해서 이동 시간이 매우 길기 때문에 현장 조사로부터 해당 핵종의 용질이동에 대한 특성을 도출하기 어렵다. 따라서 암석 시료를 이용한 실험실 시험을 통해 암반 매질의 용질이동 특성(암반매질의 확산계수, 공극률, 흡착계수)을 도출한다[10].

용질이동 특성조사를 위한 현장 조사 방법으로 추적자 시험(Tracer Test)이 있는데, 추적자 시험은 실제로 핵종을 이용할 수 없으므로, 핵종과 유사한 거동을 갖는 용질을 추적자로 선정하여 야외 조사를 수행하고, 용질이동 특성을 도출하도록 한다. 또한, 추적자 시험은 실험실에서 측정된 용질이동과 관련된 각 특성치를 현장에서 검증하는 방법으로 활용될 수 있다.

4. 부지특성조사 프로그램을 통해 도출해야 할 인자

부지특성조사 프로그램을 통해 도출된 부지 고유의 지질환경 정보는 부지특성모델을 구축하기 위한 입력 인자가 된다. 부지특성화 단계에서 구축된 부지특성모델을 이용하여 부지 고유의 처분시스템을 설계할 수 있고, 처분 안전성을 평가할 수 있다. 앞서 기술한 각 부지특성조사 프로그램을 통해 반드시 제시되어야 할 인자를 다음과 같이 요약할 수 있다[10, 13].

4.1 생태적 특성

부지특성평가 단계에서 도출해야 할 생태적 특성은 후보 부지로 선정된 지역에서의 연속적인 생태적 변화에 대한 모니터링 기록이라고 정의할 수 있다.

부지특성조사 단계별로 조사 지역에서 서식하는 동물종, 식물종과 각 종의 개체수에 대한 생태지도를 작성해야 하고, 일정 주기에 따라 조사부지내 다양한 지점에서의 지표수, 토양 시료에 대한 시간적 변화를 관측해야 한다. 생태적 특성 외에도 축적된 정보에 근거하여 조사지역에 대한 인구 분포, 지하 공간 활용 유무, 기존에 굴착된 시추공에 대한 정보, 도로의 위치 정보 등 조사지역에 대한 제반적인 정보가 제공되어야 한다.

Table 1. Geological parameters which should be obtained during site characterization stage [1, 13]

Parameter group		Parameters	
Topography		Topography	
Soil		Thickness of soil cover Mineral distribution and description in soil Soil characteristics Bottom sediment Indication of neo-tectonics	
Bedrock (Lithology)	Occurring rock type	Rock type distribution Xenoliths and dykes Contact rock Occurring age Ore potential for industrial use	
	Rock type description	Mineralogical composition Grain size Mineral orientation Micro-fractures Density and porosity Susceptibility, gamma radiation etc Mineralogical alteration/weathering	
	Plastic structures	Folding Foliation Lineation Veining	Extent/age
		Shear zones	Extent/age, properties
Bedrock (Structures)	Regional and local major fracture zone	Location and orientation Size (Length and width) Movements (size, direction) Age Properties	
		Local minor fracture zones	Location, orientation, density Size (Length and width) Movements (size, direction) Age Properties
	Brittle structures	Fractures	Density (each set) Orientation and trace length Contact pattern Aperture width Roughness Weathering (alteration) Fracture filling (fracture mineral) Age

Table 2. Hydrogeological parameters which should be obtained during site characterization stage [1, 13]

Parameter group	Parameters
Soil layer (Hydraulic Soil Domain, HSD)	Geometry of soil volumes with similar hydraulic properties
	Hydraulic conductivity
	Specific storage
Deterministic fracture zones (Hydraulic Conductor Domain, HCD)	Geometry – regional and local fracture zones
	Deterministic or statistical distribution of transmissivity
	Storage coefficient
Rock mass which includes stochastic fracture zones, background fractures (Hydraulic Rock Domain, HRD)	Geometry of rock volumes with similar hydraulic properties
	Statistical description of the spatial distribution and geometric properties of the fracture zones
	Statistical distributions of transmissivity (fracture zones) and hydraulic conductivity (rock)
Groundwater’s hydraulic properties	Statistical distributions of specific storage (rock) and storage coefficient (fracture zones)
	Density, viscosity and compressibility
	Salinity and Temperature
Boundary conditions supporting data	Meteorological and hydrological data
	Recharge/Discharge area
	Hydraulic head in borehole sections
	Groundwater flow through borehole
	Regional boundary conditions
	Historic and future development

4.2 지질학적 특성

후보 부지의 지질학적 특성 평가를 위해 기반암의 지질학적 균질성에 대한 정보와 기반암의 분포 범위에 대한 자료가 필요하다. 또한 기반암내에 자원으로서 가치가 있는 광물의 공간적 규모 분포를 확인해야 한다. 처분장의 입지 조건으로 불리하게 적용되는 단층이나 습곡의 광역적 연성 전단대의 위치와 광역규모(Regional), 국지 주요규모(Local Major)의 단열대 위치에 대한 정보를 획득해야 한다. 이와 함께 국지 소규모(Local Minor) 단열대와 배경 단열에 대한 통계적 특성이 도출되어야 한다. 부지특성조사 과정에서 도출되어야 주요 지질학적 인자는 Table 1과 같이 정리할 수 있다.

4.3 수리지질학적 특성

후보 부지의 수리지질학적 특성 평가를 위해 지질학적 특성 조사가 우선되어야 한다. 지질학적 특성 조사 결과를 바탕으로 수리지질조사를 수행하여 처분 영역의 지하수 유동을 설명하는 수리지질학적 특성을 분석한다. 주요하게 도출해야 할 수리지질학적 특성으로 처분 영역을 포함한 지질 모델 요소에 대한 수리전도도의 통계적 분포가 있다. 수리지질특성을 반영한 수리지질모델이 구축되고, 지하수 유동 모델을 수행하여 예상되는 처분 영역의 처분공 규모에 대한 지하수 유량의 통계적 분포와 처분 심도에서 자연 상태의 수리수두 구배를 제시한다. 수리지질특성을 도출함에 있어 처분

Table 3. Hydrogeochemical parameters which should be obtained during site characterization stage [1, 13]

Parameter group	Parameters
Variables	pH, Eh
Main components	TDS (sum of main components)
Main components	Na, K, Ca, Mg, HCO ₃ , SO ₄ , Cl, Si
Trace substances	Fe, Mn, U, Th, Ra, Al, Li, Cs, Sr, Ba
Trace substances Dissolved gases	HS, I, Br, F, NO ₃ , NO ₂ , NH ₄ , HPO ₄ ,
	REE, Cu, Zr
Stable isotopes	N ₂ , H ₂ , CO ₂ , CH ₄ , Ar, He, C _x H _x , O ₂
	² H in H ₂ O, ¹⁸ O in H ₂ O and SO ₄ , ¹³ C in DIC and DOC, ³⁴ S in SO ₄ and HS, ⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr, ³ He, ⁴ He, (Xe isotopes, Kr isotopes)
Radioactive isotopes	T, ¹⁴ C in DIC and DOC, ²³⁴ U/ ²³⁸ U, ³⁶ Cl, ²²² Rn
Others	DOC (Dissolved organic matter), humic acids, fulvic acids, colloids, bacteria
Fracture-filling minerals	δ ¹⁸ O, δ ¹³ C, ⁸⁶ Sr/ ⁸⁷ Sr, ²³⁵ U/ ²³⁸ U
	Morphology in calcite and iron oxides

영역에 해당하는 수리지질특성은 보다 상세히 조사되어야 한다. 특히 처분영역에 존재하는 단열대의 투수성과 공간적인 연결성은 장기 수리간섭시험을 통해 검증되어야 한다. 부지특성조사 과정에서 도출되어야 주요 수리지질학적 인자는 Table 2와 같이 정리할 수 있다.

4.4 지구화학적 특성

후보 부지의 지구화학적 특성은 모암과 부존하고 있는 지하수와 오랜 시간에 걸친 물-암석 반응의 결과로 해석할 수 있다. 그러나 단열대가 발달한 파쇄대에서 지하수의 유동력이 제공된다면 파쇄대를 따라 지하수가 비교적 빠르게 흐를 수 있기 때문에 충분한 물-암석 반응의 시간이 없으므로 지하수의 흐름이 느린 지역과 비교하여 화학적으로 차별성을 보인다. 이를 뒷받침해 줄 지구화학적 특성은 지하수내 용존산소를 지시하는 화학적 인자, 특히 산화환원전위와 이산화철 및 황화물에 대한 자료이다.

또한, 처분 심도에서 지하수의 화학적 특성은 처분장에서

혹시 누출될 수 있는 핵종에 대한 지연 기능을 제공한다. 예를 들어 환원 상태의 지하수가 존재하는 영역에서 핵종은 물에 용해되기 보단 침전되어 더 이상 지하수를 따라 흐를 수 없게 된다. 그러나 누출된 핵종이 콜로이드에 흡착될 경우 콜로이드를 따라 빠르게 이동할 수 있어 이에 대한 조사가 필요하다.

이와 같이 지하수의 화학적 특성은 이미 조사된 결과에 대한 검증자료로 활용할 수 있으며, 다중 방법을 이용한 심지층 처분장에서 천연방벽의 주요 기능인 지연 기능에 대해 주요한 영향을 미칠 수 있으므로, 특히 처분 영역 주변에서의 지구화학적 특성은 면밀히 분석되어야 한다. 부지특성조사 과정에서 도출되어야 주요 지구화학적 인자는 Table 3과 같이 정리할 수 있다.

4.5 암반공학적 특성

부지특성조사 단계에서 주요하게 도출할 인자는 초기응력과 강도, 변형대 특성, 열팽창 계수 등의 암반과 단열의

Table 4. Rock mechanical parameters which should be obtained during site characterization stage [1, 13]

Parameter group	Parameters
Fracture zones	Geometry (see Table 1)
Mechanical properties of fractures	Deformation properties in normal direction
	Deformation properties in shear direction
	Shear strength
Mechanical properties of intact rock	Modulus of elasticity (Young's modulus)
	Poisson's ratio (ν)
	Compressive strength
	Tensile strength
	Indentation index, RDI, wear index
	Blastability
Mechanical properties of rock mass	Modulus of elasticity (Young's modulus)
	Poisson's ratio (ν)
	Rock classification
	Groundwater chemistry
	Dynamic propagation velocity, compression wave
	Dynamic propagation velocity, shear wave
Density and thermal properties	Density
	Coefficient of thermal expansion
Boundary conditions and supporting data	In-situ stresses, magnitude and directions
	Observed deformations and seismic activity

암반공학적 특성이다. 암반의 공학적 특성은 주어진 현생 응력 조건 하에 지하 구조물 및 부지 암반에 대한 장단기적 역학적 안정성 및 거동 특성을 평가하는데 필요한 요소이다. 또한, 기본적으로 RMR, Q-system 의 암반의 공학적 분류는 부지의 활용 가능성에 대한 초기 지표를 제공할 수 있다. 암반의 역학적 물성인 영률(Young's Modulus, E), 포아송비(Poisson's Ratio, ν), 압축강도 같은 인자는 건설 초기 단계에서 공벽 변형 및 파괴 거동을 예측하기 위해 필요한 변수들이다. 그리고, 후보 부지 주변에 존재하는 단열의 진단 물성(점착력, 마찰계수 등)은 주어진 응력 상태 아래서 재활성에

의한 균열 투수성 증가, 미소 진동 발생 등을 예측하는데 필요한 요소이다. 암반의 공학적 성질은 건설 등의 기초 단계부터 부지 운영 및 모니터링 단계까지 처분 시스템 전반에 대한 종합적인 연구에 필요한 요소들이며, 기존 연구들에서 언급하고 있는 주요 인자들은 Table 4와 같이 요약할 수 있다.

4.6 열적 특성

암반의 열적 특성은 처분심도를 설정하거나, 처분장의

Table 5. Thermal parameters which should be obtained during site characterization stage [1, 13]

Parameter group	Parameters
Thermal properties of the rock	Thermal conductivity
	Heat capacity
Temperatures	Temperature in rock and groundwater
	Thermal boundary conditions/gradient

Table 6. Transport parameters which should be obtained during site characterization stage [1, 13]

Parameter group	Parameters
Properties on deposition hole scale	Groundwater chemistry
	Groundwater composition
	Fracture aperture, geometry
Properties along flow paths	Flow paths*
	Transport resistance along flow paths*
	Dispersivity*
	Flow porosity*
Properties in rock	Sorption data (K_d)
	Matrix diffusivity
	Matrix porosity
	Maximum penetration depth into rock
	Groundwater chemistry
Supporting data	Result of tracer tests
	Chemical analysis of fracture-filling material
	Chemical analysis of wall rock
	Groundwater chemistry

* Calculated by evaluation of other data and/or modelling

배치를 설계할 때 필요한 입력인자이다. 후보 부지에 대한 부지특성조사 단계에서 도출해야 할 열적 특성은 암반의 열전도도와 열용량(Heat Capacity)에 대한 암반 매질에 대한 특성과 깊이에 따른 온도 분포 및 구배에 대한 부지 고유의 특성으로 구분할 수 있으며, Table 5와 같이 정리할 수 있다.

4.7 용질이동에 대한 특성

후보 부지의 부지특성조사 단계에서 용질이동에 대한 특성은 수리지질, 지화학 특성과 함께 처분영역으로부터 형성된 지하수 유동로를 따라 흐르는 용질의 이동 저항성을 설명한다. 따라서 용질이동의 특성을 해석하기 위해서는

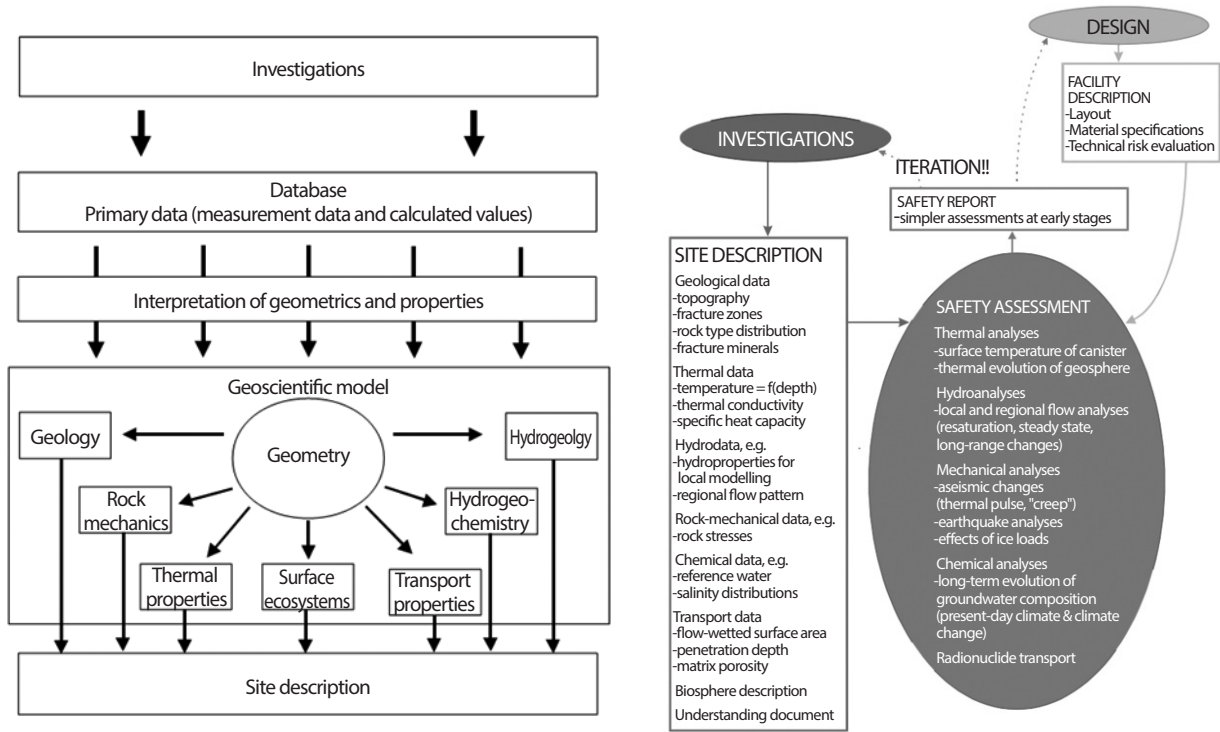


Fig. 3. Geo-synthesis program for site characterization of SKB. Geoscientific model about geology, rock mechanics, thermal properties surface ecosystem, transport properties, hydrogeo-chemistry and hydrogeology should explain detail site characteristics by construction of site description model [1, 12].

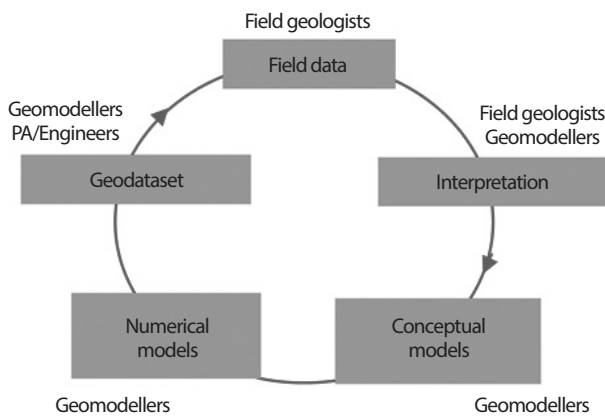


Fig. 4. Iteration process during site characterization of NAGRA.

지하수의 화학특성, 지하수가 유동하는 단열의 특성에 대한 정보뿐만 아니라 지하수의 유동로에서의 분산계수, 공극률에 대한 통계적 분포 자료와 암반 매질에서의 용질이동 특성에

대한 자료를 모두 포함하여 도출해야만 한다. 부지특성조사 과정에서 도출되어야 할 주요 용질이동에 대한 특성 인자는 Table 6와 같이 정리할 수 있다.

5. 부지특성모델

방사성폐기물 처분과 관련하여 부지특성모델은 처분 부지에 대한 지질환경 특성을 종합적으로 해석하기 위해 구축되어야 한다. 스웨덴은 부지특성통합모델 구축을 Site Descriptive Model (SDM)로서 제안하며, 현장 조사에 대한 자료체계를 구축하고, 각 자료에 대한 특성과 도출된 형태에 대한 개별적인 지구과학모델(Geo-scientific Model)을 만든다. 지구과학모델에는 지질모델, 암반 역학 모델, 열특성 모델, 생태계 모델, 용질이동에 대한 모델, 수리지화학 모델과 수리지질모델을 포함하고 있으며, 전체 모델을 Site Description Model로 구성하여 처분부지에 대한 안전성 평가와 설계에

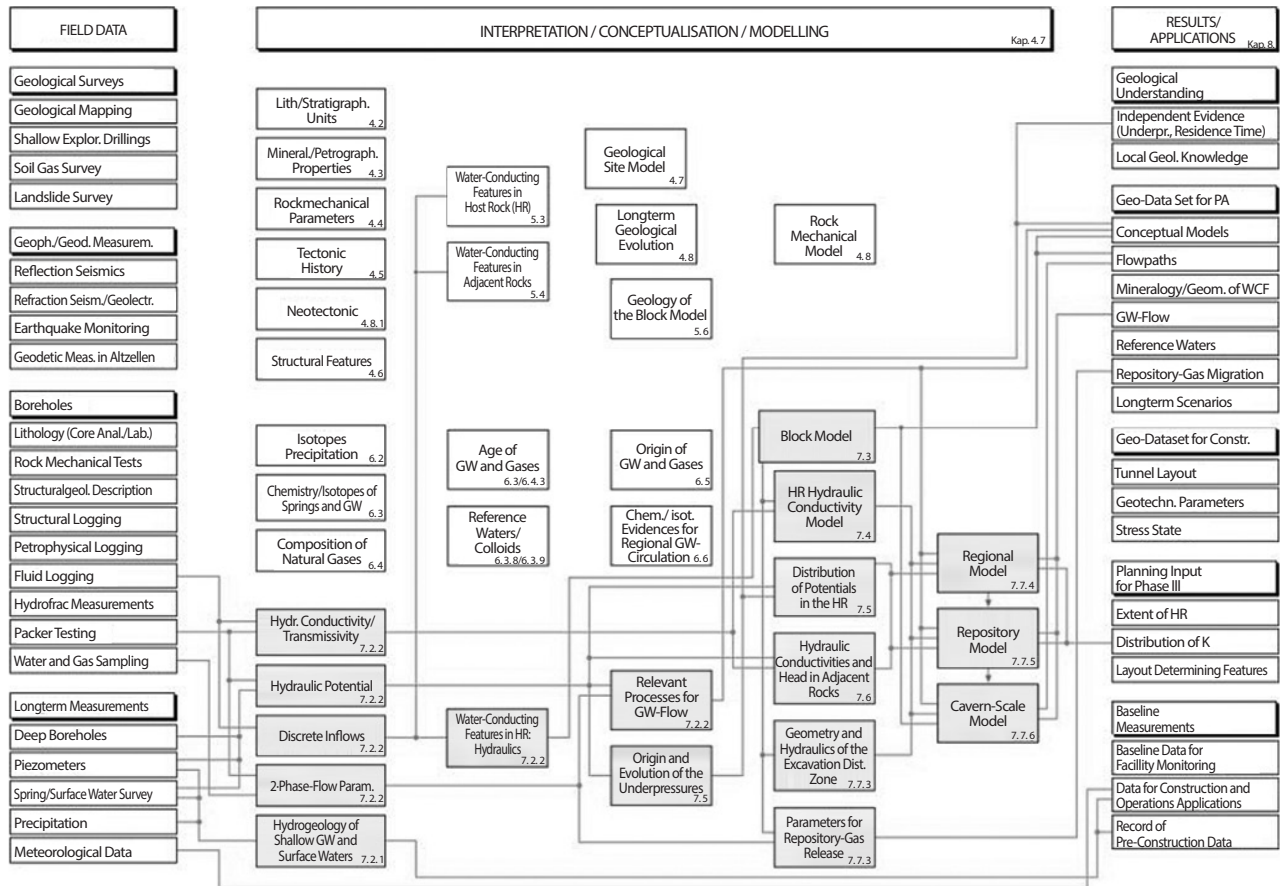


Fig. 5. Example of flow diagram focused on hydrogeological data of NAGRA. Field data, their interpretation and application to model can be systematically explained [14].

반영한다(Fig. 3)[12].

스위스의 NAGRA는 시추공에서 확인되는 점(Point)자료와 지구물리탐사와 지질조사를 통한 선(Line)로 도출한 지질환경의 결과들(Field Data)을 잘 해석하여(Interpretation) 각각의 개념모델을 통해(Conceptual Model) 수치모델로 구현하고 (Numerical Model), 최종적으로 안전성 평가나 처분장 건설을 위한 자료체계를 구축하는(Geo-dataset) 다섯 가지 단계의 부지특성통합모델 방법론을 개발하였다. 또한, 최종 구축된 자료체계에서 불확실한 자료나 새로 도출해야 할 부지특성 자료가 있을 경우 다시 현장 조사를 수행하여 해석하고, 개념화하고, 수치 모델화하는 업무를 반복한다. 이러한 일련의 과정은 순환되어 상호 보완되는 개념을 갖고 있다 (Fig. 4)[14].

특히, 현장조사 자료를 이용하여 부지특성통합모델을

구축할 때, 각 현장조사 자료를 어떻게 해석하고, 무엇을 개념화하는지, 그리고 어떤 모델링을 통해 최종적으로 어떤 결과를 도출할 것인지에 대한 과정을 도식화하여 각 항목에 대한 흐름도를 구현함으로써 보다 체계적인 연구 개발이 가능토록 하였다(Fig. 5)[14].

JAEA는 Mizunami와 Horonobe 두 개의 URL에서 1990년대부터 방사성폐기물에 대한 지층 처분 연구를 수행하고 있으며, NAGRA의 부지특성통합모델 구축 방법과 같이 현장 조사로 시작하여 최종 결과가 도출되는 과정을 Flow Diagram으로 도식화하는 방법을 적용하고 있다. 특이한 점은 JAEA의 경우 최종 사용자(End-users)가 요구하는 “해결해야 할 이슈들(Issues to be Resolved)”를 먼저 정의하고 이 문제를 해결하기 위한 Geo-synthetic Flow Diagram을 설정하는 귀납적 방법을 적용하고 있다(Fig. 6)[15, 16, 17].

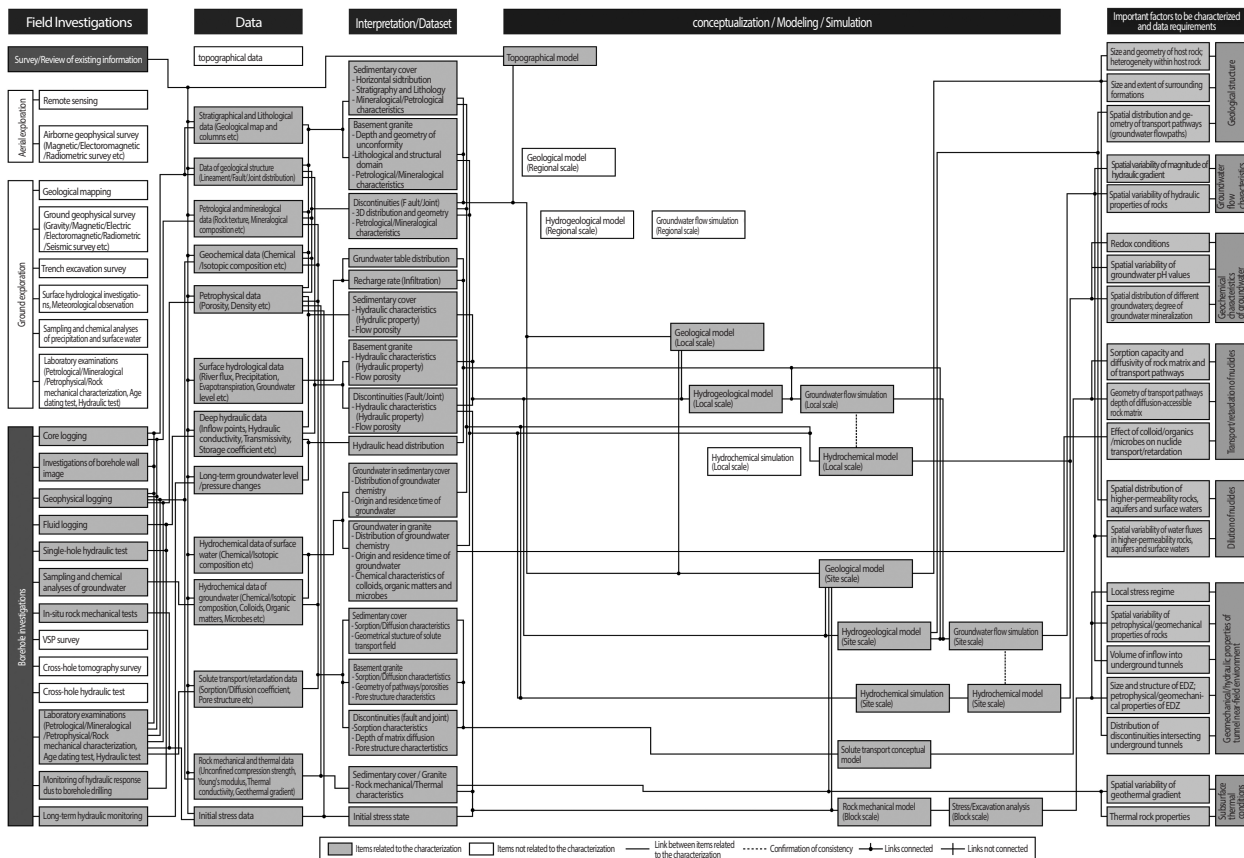


Fig. 6. Flow diagram for geo-synthesis during surface based investigation in/around the URL area of JAEA. This flow diagram can be applied to understand the detail site characteristics around proposed and candidate site during site characterization stage [16].

6. 결론

본 논문에서는 방사성폐기물 처분 연구를 선도한 해외 국가 중 스웨덴, 핀란드, 일본의 사례를 토대로 각국에서 수행하거나 계획 중인 부지 선정의 방법과 부지특성조사 프로그램을 살펴보았다. 부지선정 방법은 IAEA에서 제안한 개념 설정 단계, 후보부지 도출단계, 후보 부지에 대한 부지특성화 단계, 부지확정단계의 단계별 부지선정 방법을 따르고 있으며, 부지특성화 단계에서는 예비 부지특성조사와 상세 부지특성조사로 구분하여 수행하고 있다. 특히 다수의 후보 부지에서 수행하는 예비 부지특성조사는 전반적인 부지특성을 평가하여 어느 부지가 방사성폐기물 처분에 유리할 것 인지를 판단하기 위해 수행하며, 상세 부지특성조사에서 2 개 혹은 3개의 후보 부지에서 현재 개발된 가장 진화된 기술을 이용하여 부지특성조사를 수행하여 그 결과를 비교

평가하면서 최종 부지를 확정하는 단계로 나아간다. 스웨덴의 경우, 부지특성조사에 소요되는 시간을 예비부지조사에서 1년 6개월~2년, 상세부지조사 3년 6개월~4년, 그리고 인허가에 2년이 소요되는 것으로 부지특성화 단계에서만 총 7~8년의 시간이 소요되는 것으로 계획하였다[1].

후보부지 도출단계, 2개로 구분된 부지특성화 단계, 그리고 최종 부지 확정단계의 부지특성조사 결과는 분야별 부지특성모델로 구축되어 통합 해석되어야 한다. 최초의 부지특성모델은 후보부지 도출단계에서 획득 가능한 기존 자료를 통해 일반적으로 구축된 모델이라면, 예비 부지특성조사 단계에서 현장 실험 결과를 통해 보다 구체화된 모델이 구축되고, 상세 부지특성조사 단계에서 보다 개선된 부지특성모델이 구축될 수 있는 것이다. 즉 부지특성모델도 부지특성조사 단계의 시간적 흐름과 같이 진화되어 간다.

국내의 경우도 해외의 부지선정 사례나 부지특성조사

방법을 따르는 것이 타당하다. 현재 한국원자력환경공단에서는 심층 처분장에 대한 계획을 수립하고, 문헌조사를 실시하여 후보부지 도출단계를 밟으며, 여러 후보 부지에서 부지공모를 통해 주민의사를 확인 하고, 부지특성화 단계를 위한 부지를 선정하는 계획을 수립하였다. 이 후 해당 부지에서 기본조사와 심층조사를 수행하고 2028년에 최종 부지를 확정할 예정이다[18]. 그러나, 부지특성화 단계에서만 7~8년이 소요되는 해외 사례를 참조해 볼 때, 2020년에는 부지특성조사를 수행하여야 2028년에 최종 처분부지를 확정할 수 있는 것으로 역산되므로 현재 시점에서 부지선정 프로젝트가 보다 속도를 내어야 할 것으로 판단된다.

지층 처분이 국내 사용후핵연료의 최종 관리방안으로 결정되었다면, 이를 위해 인문사회, 공학, 자연과학의 처분과 관련된 다양한 분야의 연구를 수행하여 최선의 안전을 도모해야 한다. 우리나라 보다 처분 연구를 먼저 수행한 해외 사례를 참조로 국내의 여건을 고려하여 면밀히 부지선정 계획을 수립해야 할 것이며, 투명하고 객관적인 부지선정 단계를 통해 공공의 수용성을 확보해야 한다. 특히 후보 부지특성화 단계에서는 관련 학계, 연구계, 산업계가 협력하여 단계별 조사 결과를 평가하고 그 결과는 공공에 공개되는 과정이 필요하다. 단순히 기관 차원의 공개가 아닌 정부에서 평가 결과를 언론 매체를 활용하여 공개하는 것도 한 방법이다. 처분을 위한 기술적, 과학적, 공학적 뒷받침이 충분하더라도 결국 공공에 어떻게 다가가느냐가 처분의 성패를 좌우할 주요한 열쇠이기 때문이다.

감사의 글

본 연구는 미래창조과학부 지원에 의한 원자력기술개발사업 처분환경 진화특성기술개발(NRF-2017 M2A8A5014858)의 일환으로 수행되었습니다.

REFERENCES

- [1] A. Ström, K.E. Almén, J. Andersson, R. Christiansson, S. Follin, A. Hedin, S. Pettersson, and J.O. Selroos, Geoscientific Programme for Investigation and Evaluation of Sites for the Deep Repository, SKB TR-00-20, SKB (2000).
- [2] C.S. Jang, K.W. Lee, and S.H. Baik, Site Investigation in Korea-state of the Art Report, Seminar on Geotechnical Investigation Committee, Korean Geotechnical Society, 1999.12, 107-148 (1999).
- [3] K.Y. Kim, C.Y. Kim, S.B. Yim, H.S. Yun, and Y.S. Seo, "A Study on Problems and Improvements of Face Mapping during Tunnel Construction", The Journal of Engineering Geology, 16(3), 265-273 (2006).
- [4] I.S. Park, "Decision Criteria for Interval and Depth of Drilling Investigation", Conference on Drilling Investigation and In-situ Geological Test, Korean Society of Engineering Geology, 2002.11, 21-46 (2002).
- [5] J.W. Choi, D.S. Bae, S.H. Ji, G.Y. Kim, K.S. Kim, Y.K. Koh, J.S. Kwon, K.W. Park, J.H. Ryu, D.K. Cho, W.J. Cho, H.J. Choi, J.S. Kim, D.H. Kook, J.Y. Lee, M.S. Lee, J.H. Park, M.H. Baik, J.T. Jung, C.H. Kang, J.W. Kim, S.S. Kim, N.Y. Ko, J.K. Lee, J. O. Lee, S.Y. Lee, Y.M. Lee, J.K. Park, and T.J. Park. Geological Disposal of Pyro-processed Waste Form PWR Spent Nuclear Fuel in Korea, KAERI/TR-4525/2011, KAERI (2011).
- [6] IAEA, Siting of Geological Disposal Facilities: A Safety Guide, Safety Series No 111-G-4.1, STI/PUB/952 (1994).
- [7] T. McEwen, T. Äikäs, The Site Selection Process for a Spent Fuel Repository in Finland -Summary Report, POSIVA 2000-15, POSIVA (2005).
- [8] NUMO, Evaluating Site Suitability for a HLW Repository, NUMO-TR-04-04, NUMO (2004).
- [9] U. Thoregren, Final Disposal of Spent Nuclear Fuel-Standard Programme for Site Investigations, SKB TR-83-31, SKB (1983).
- [10] K.E. Almén, R. Stanfors, L. Stenberg, I. Rhén, M. Morosini, R. Christiansson, A. Fredriksson, P. Wikberg, A. Säfvestad, A.C. Nilsson, A. Ström, P. Andersson, U. Kautsky, T. Lindborg, L. Ekman, E. Thurner, and J. Andersson. Site Investigation methods and General Execution Programme, SKB TR-01-29, SKB (2001).
- [11] K.W. Park, Y.K. Koh, G.Y. Kim, and J.S. Kwon. Detail Drilling Program for In-situ Investigation in Granitic

Area, KAERI-TR-4789/2012, KAERI (2004).

- [12] J. Andersson, A. Störm, and C. Svemar, What Requirements Does the KBS-3 Repository Make on the Host Rock?, SKB TR-00-12, SKB (2000).
- [13] J. Andersson, K.E. Almén, L.O. Ericsson, A. Fredriksson, F. Karlsson, R. Stanfors, and A. Ström. Parameters of Importance to Determine During Geoscientific Site Investigation. SKB TR-98-02, SKB (1998).
- [14] NAGRA, Geosynthese Wellenberg 1996, Ergebnisse der Untersuchungsphasen I und II, National Cooperative for the Disposal of Radioactive Waste, Technical Report NTB 96-01, NAGRA (1997).
- [15] K. Hatanaka, H. Osawa, and H. Umeki, “Geosynthesis: Testing a Safety Case Methodology”, Proc. of Third AMIGO Workshop on Approaches and challenges for the use of geological information in the safety case, April 15-18, France (2008).
- [16] K. Ota, H. Abe, T. Yamaguchi, T. Kunimaru, E. Ishii, H. Kurikami, G. Tomura, K. Shibano, K. Hama, H. Matsui, T. Niizato, K. Takahashi, S. Niunoya, H. Ohara, K. Asamori, H. Morioka, H. Funaki, N. Shigeta, and T. Fukushima, Horonobe Underground Research Laboratory Project ; Synthesis of Phase I Investigations 2001-2005, Volume “Geoscientific Research”, JAEA-Research 2007-044, JAEA (2007).
- [17] H. Saegusa, Y. Seno, S. Nakama, T. Tsuruta, T. Iwatsuki, K. Amano, R. Takeuchi, T. Matsuoka, H. Onoe, T. Mizuno, T. Ohyama, K. Hama, T. Sato, M. Kuji, H. Kuroda, T. Semba, M. Uchida, K. Sugihara, and M. Sakamaki. Final Report on the Surface-based Investigation (Phase-I) at the Mizunami Underground Laboratory Project, JAEA-Research 2007-043, JAEA (2007).
- [18] J.H. Yun, “Current Status and Future Plan for Research URL Project of Korea”, Workshop on ‘The 10th Anniversary of KURT Project’, Korean Radioactive Waste Society, May 24-26, 2017, Busan.