

A Review on Development of Nationwide Map of Scientific Features for Geological Disposal in Japan

일본의 과학적 특성 지도 개발에 대한 고찰

Jeong-Hwan Lee, Sang-Jin Lee, and Hyeongjin Kim

Korea Radioactive Waste Agency, 174, Gajeong-ro, Yuseong-gu, Daejeon, Republic of Korea

이정환, 이상진, 김형진

한국원자력환경공단, 대전광역시 유성구 가정로 174

(Received October 18, 2019 / Revised December 11, 2019 / Approved December 26, 2019)

Japan enacted the “Designated Radioactive Waste Final Disposal Act” for the geological disposal of high-level radioactive waste in 2000 and began the site selection process. However, no local government wanted to participate in the siting process.

Therefore, in 2015, the Japanese government developed a new site selection process during the literature survey step, and on June 28, 2017 they published a “Nationwide Map of Scientific Features for Geological Disposal” created with the aim of promoting public participation from local governments. This map illustrated the requirements and criteria to be considered in the early or conceptual stages of securing a geological repository and was useful for improving public understanding and exchanging opinions with local governments by analyzing the suitability of different geological disposal sites.

Keywords: Geological disposal, High-level waste, Siting, Requirement and criteria, Nationwide map of scientific features

* Corresponding Author.

Lee, Jeong-Hwan, Korea Radioactive Waste Agency, E-mail: oathway@korad.or.kr, Tel: +82-42-601-5344

ORCID

Jeong-Hwan Lee <http://orcid.org/0000-0003-4671-5282>

Sang-Jin Lee <http://orcid.org/0000-0003-8485-8869>

Hyeongjin Kim <http://orcid.org/0000-0002-2449-2188>

일본에서는 2000년 고준위방사성폐기물의 심층처분을 위한 「특정방사성폐기물의 최종 처분에 관한 법률」을 제정하고 부지선정을 착수하였으나, 부지선정 절차에 참여를 원하는 지자체가 존재하지 않았다. 따라서, 일본 정부는 2015년 문헌조사 단계에 새로운 부지선정을 절차를 개발하고, 지자체의 공모를 촉진하고자 2017년 6월 28일 심층처분을 위한 전국규모 과학적 특성 지도를 발간하였다. 이 지도는 심층처분장 초기 혹은 개념단계에 고려되는 요건 및 기준 등을 제공하고 심층처분을 위한 적합성을 분석함으로써, 공공의 이해도 증진과 지자체와의 의견교환 등을 위해서 유용하게 활용되고 있다.

중심단어: 심층처분, 고준위방사성폐기물 부지선정, 요건 및 기준, 전국규모 과학적 특성 지도

1. 서론

국내 원자력발전소에서 전기를 생산하고 난 후에는 방사성폐기물이 발생되고 있으며, 특히 사용후핵연료는 높은 방사능과 열발생으로 인해 원자력 이용 초기부터 관리 방안의 개발을 위해서 꾸준히 연구가 수행되어 오고 있다[1]. 1957년 미국 NAS (National Academy of Science)가 지층처분(Land disposal) 개념을 제시한 이후, 지질 매체를 활용한 관리 방안이 대두되었다[2]. 다만 심층처분(Geological disposal) 개념으로 확립된 이후에도 심층처분과 관련된 안전성 해석 체계는 1970년대에 들어와서 구체화가 되었다[3]. 핀란드, 스웨덴, 프랑스, 스위스 등 처분선도국들은 자국내 심층처분 안전성에 대해 실증을 수행하여 안전성을 입증하고 있으며, 2020년대에 심층처분 건설 인허가 확보를 목표로 사업을 추진 중에 있다[4]. 따라서, 원자력 국제기구와 각국 규제기관들은 안전성과 경제성이 유일하게 입증된 심층처분을 권고하고 있는 실정이다[5, 6]. 처분후발 국가들(영국, 독일, 중국, 일본)은 고준위방사성폐기물(사용후핵연료 포함)을 관리하는 방안으로 심층처분을 우선적으로 고려하여, 심층처분장 확보를 추진하고 있거나 계획하고 있다.

처분선도국들은 심층처분장 확보 초기 단계에서 자국 전국규모 기반으로 심층처분장의 입지에 대해서 타당성을 분석하고 부지선정을 위한 조사를 착수하였다[7-10]. 최근에는 일본에서도 전국규모 기반으로 심층처분에 대한 과학적 타당성을 검토한 후 심층처분장 확보를 추진 중에 있다[11]. 본 연구는 일본의 심층처분장 확보 초기단계 추진사례 분석을 통해 시사점을 도출하여, 심층처분장 초기 혹은 개념단계에 고려되는 요건 및 기준 설정을 제언하고자 하였다. 이를 위해서 일본 경제산업성(Ministry of Economy, Trade and Industry,

METI)에서 2017년 6월에 발간한 심층처분을 위한 전국규모 과학적 특성 지도(Nationwide map of Scientific Features for Geological Disposal) 구축 현황[12]을 검토하였다.

2. 일본 심층처분 관련 추진 경과

일본은 심층처분과 관련하여 포괄적인 연구성과 결과를 기반으로 고준위방사성폐기물의 심층처분에 대해 기술적인 가능성과 안전성의 타당성을 증명하는 H12 보고서를 1999년 발간하였다[13]. H12 결과를 반영하여 「특정방사성폐기물의 최종 처분에 관한 법률」(Final Disposal of Designated Radioactive Waste Act)이 제정되었고, 심층처분 실시주체로 NUMO (Nuclear Waste Management Organization of Japan)가 2000년 설립되었다. 심층처분 관리에 포함되는 방사성폐기물의 범위는 고준위방사성폐기물뿐만 아니라 원자력발전에서 발생하는 사용후핵연료를 재처리한 후에 발생하는 중준위방폐물도 포함되며, 300m 이상 심도의 안정한 지층에 처분되는 것으로 2007년 규정되었다[14].

한편, NUMO는 2002년 12월 부지선정을 착수하기 위해서 지자체(지방자치단체) 유치공모를 추진하였으나 부지선정 절차에 참여를 희망하는 지자체의 공모가 없었다. 이에 따라, NUMO는 부지선정 단계 진입을 위해서 대국민 수용성 확보가 최우선되어야함을 인지하고 추가적인 후속 조치들을 수행하였다. 이러한 상황에서 일본 원자력위원회 정책 평가위원회는 2008년 NUMO에 심층처분 실시 안전성에 대한 기술적 타당성을 보여주는 보고서 발표를 권고하였다[15].

후쿠시마 원전 사고(2011년 3월 11일)에 따라 안전환

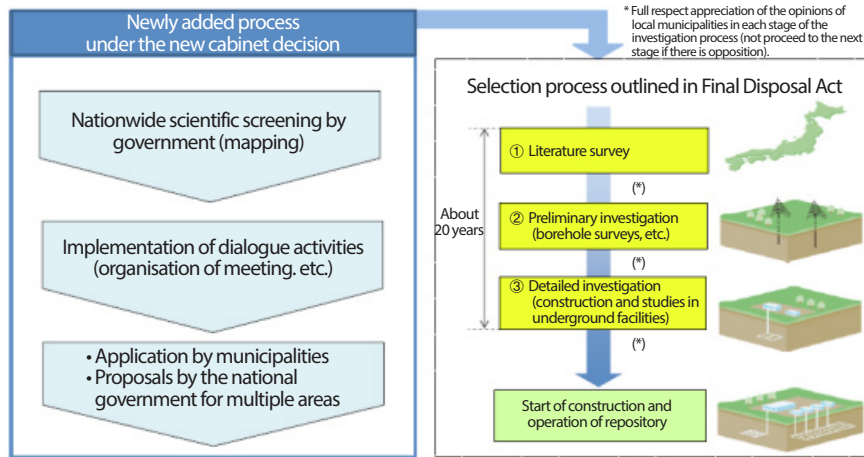


Fig. 1. Newly added process of site selection process for proposals of scientifically promising sites in Japan [18].

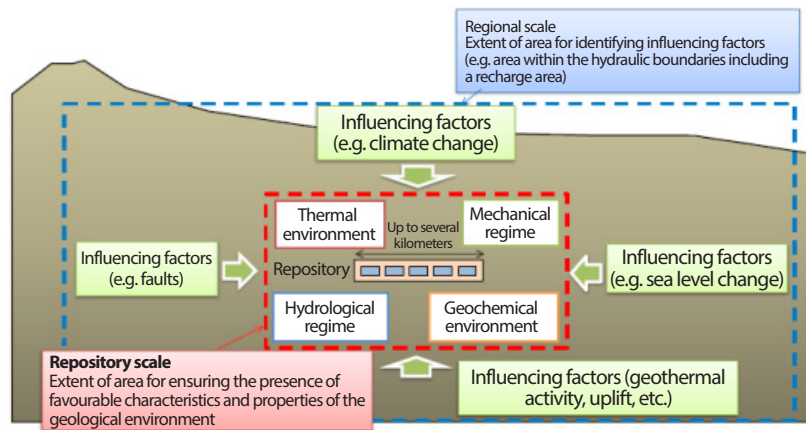


Fig. 2. Schematic concept of geological disposal in Japan [18].

심층처분의 타당성과 신뢰성에 관해 국가적으로 관심이 증폭되었으며, NUMO는 2011년 9월 심층처분의 안전성을 입증하기 위한 관련 기술개발을 추진하는 심층처분 안전성 프로젝트 계획 및 수행에 대한 내용을 발표하였다[16]. 심층처분 안전성 프로젝트 수행에서 가장 중요한 내용은 심층처분장의 운영 중과 폐쇄 후 둘 다의 관점에서 장기 안전성을 Safety case 체계 기반으로 입증하는 것이다.

일본 METI가 주관하고 전문기술자문 그룹(Technology Working Group)에서 심층처분 안전성 프로젝트 사업 이행 사항을 재검토 결과를 바탕으로, 2015년 “특정 방사성폐기물의 최종 처분에 관한 기본 정책”이 개정되어 정부는 지자체의 자발적 공모를 위한 지역조사를 주도하게 되었다.

이 절차는 지자체들과 협의와 협력을 착수하기 위해 지구과학적 관점으로 보다 적합한 지역들을 지명하는 역무가 포함된다. 최종적으로 지자체에서 부지조사의 수용성을 확보하게 되며 이 역무는 NUMO가 주도적으로 추진한다. METI와 NUMO는 개정된 기본 정책에 따라 고준위방사성폐기물 관리를 위한 심층처분의 이해를 증진시키기 위해서 대중과의 적극적인 소통을 통한 전국민의 이해 증진, 심층처분 사업과 관련되는 지역사회의 지원활동 등의 홍보를 강화하고 있다[17].

이와 병행하여 전문기술자문 그룹에서는 지구과학적 관점으로 심층처분의 적합지역 도출을 위한 전국규모 기반의 지역선별 요건 및 기준 등을 개발하였다. 이 그룹은 심층처분과

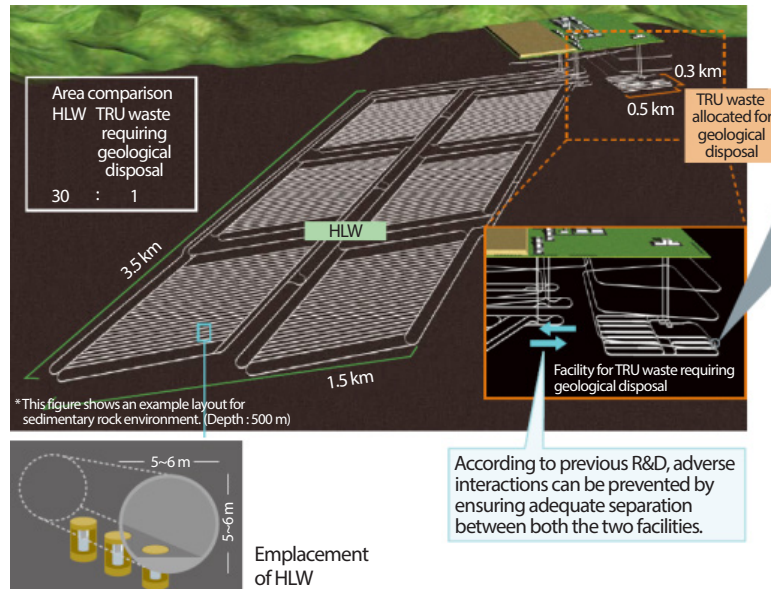


Fig. 3. Schematic layout of HLW disposal facility in Japan [21].

관련된 과학적 특성들을 지역적으로 정의하기 위해서 지질 환경, 지질의 장기적인 안전성, 폐쇄 후 안전성 및 방폐물 운반 안전성 등의 관점으로 전국규모를 기초하여 개발된 요건 및 기준들을 적용하여 지역별로 조사/검토를 수행하였다. 2년 동안의 조사, 검토, 협의 등의 과정을 통해 METI는 2017년 6월 28일 심층처분을 위한 전국규모 과학적 특성 지도를 발간하였다[12]. NUMO는 이 결과를 바탕으로 심층처분 사업착수를 위한 대국민 홍보를 추진하고 있다.

3. 일본 전국규모 과학적 특성 지도 개발 결과 검토

3.1 전국규모 과학적 특성 지도 개발 배경

NUMO는 최종 심층처분장 확보를 위한 부지선정 절차를 고안하였고 2002년 12월부터 최종 심층처분장 확보를 위한 부지선정을 착수하고 지자체 공모를 수행하였으나, 공모하는 지자체가 없는 관계로 부지선정이 중단되었다. 부지선정이 중단된 배경에는 심층처분의 안전성에 대한 신뢰성 확보 미흡, 지자체 의회의 공모발의에 따른 정치적인 위험도 때문이었다[18].

2015년 5월 개정된 최종 처분에 관한 기본 정책에는 심층처분을 위해 국가가 과학적으로 보다 적절성이 높은 지역(과학적 유망부지)을 제시하고 과학적 유망부지를 포함한 지자체에 대해 문헌조사 단계 참여여부의 확인을 제안하는 신규 절차가 첨가되었다(Fig. 1). 이 절차의 개념은 과학적 유망부지를 포함하는 지자체와 부지선정 참여여부를 논의하기 위해서는 우선 해당 지자체가 심층처분에 대한 타당함을 과학적으로 제시해야되고, 아울러 최종 심층처분에 관한 이슈들이 국민 전체가 인식 및 이해하는 계기가 될 수 있도록 정보를 제공하는 것이다. 이에 따라, METI는 심층처분에 대한 지역별 과학적 특성 제시 및 전국민 이해증진을 위해 「전국규모 과학적 특성 지도」를 개발하고 발간하였다.

3.2 고준위방사성폐기물 관리를 위한 심층처분 기본 개념

고준위방사성폐기물 심층처분 개발은 인문사회환경, 자연환경 및 선원항 발생특성 등에 기반하여 자국의 환경에 최적화되도록 심층처분 개념을 도출하고, 방사성폐기물에 대한 안전성을 담보토록 다중의 안전기능을 갖추도록 해야한다. 이러한 처분시스템의 안전성 및 안전 구성에 기초하여 공학적으로 실현가능한 심층처분 시설 설계를 수행하게 된다[19].

일본의 기초적인 심층처분 개념은 기본적으로 다중방벽을 활용하며, 공학적방벽으로 방사성 핵종의 격납 안전기능 상실에 대한 안전성을 보장하고, 천연방벽인 모암은 10만년 이상의 처분안전성 및 성능을 유지시키도록 지열, 화학적, 역학적 및 수리지질학적 등이 우수한 지질환경을 제공해야함을 제시하고 있다(Fig. 2.). 또한 심층처분장은 활용가치를 가지는 광상과는 원거리에 위치해야 하고 미래 인간 침입이 불가능하도록 충분한 심도를 가져야 한다.

일본은 사용후핵연료 재처리공정에서 발생하는 방사성 폐기물을 유리고화시킨 고준위방사성폐기물을 처분대상으로 설정하고 있으며, 주철로 제작될 처분용기는 수직 처분과 수평 처분 등의 모든 방식이 고려되어 최종 처분을 계획하고 있다[20]. 심층처분 고려 심도는 지표하 300m 이상이고, 심층처분장의 면적은 약 5.4 km²이다(Fig. 3)[21].

3.3 전국규모 과학적 특성 지도 개발 결과

3.3.1 전국규모 과학적 특성 구분 및 선별 인자 도출

2015년 기본 정책에 따라 일본 METI는 고준위방사성폐기물의 심층처분장 확보를 위한 부지선별 체계를 설정하고자 1)잠재적으로, 다소 적합한 지역, 2)잠재적으로, 적합한 지역, 3)잠재적으로, 더 적합한 지역 등 3가지 기반으로 전국규모 지역적 영역화를 수행하고자 하였다. 이를 위해 일본 METI 산하의 천연자원 및 에너지 분야의 자문위원회 내 전문기술자문 그룹에서는 먼저 4가지의 개념적이고 포괄적인 지역선별 요건들과 그에 해당되는 인자들을 설정하였고 상세 논의를 추진하였다.

- ① (제외될 지역) 만약 심층처분에서 요구되는 공학적 특성 실현이 매우 어렵고, 심층처분 시설 안전기능 손실과 관련된 외부 요인들에 의해 직접적으로 영향을 받을 가능성이 높은 지역은 제외될 필요가 있다. 고려되는 인자들로는 화산 및 화성활동, 단층활동 등이 포함된다.
- ② (제외해야만하는 지역) 만약 요구되는 공학적 특성 실현이 매우 어렵고, 심층처분 시설 안전기능의 손실과 관련된 외부요인들에 의해서 직접적으로 영향을 심각하게 받는 지역은 더 우선적으로 제외해야만 할 지역이다. 고려되는 인자들로는 큰 용기울과 침식율,

높은 지열활동, 높은 화산 열수 및 심부 유체의 영향, 잠재적인 광상 등이 포함된다. 또한 시설 운영과 관련된 인자들은 큰 화산쇄설류의 영향, 미고결 퇴적물의 큰 두께 등이다.

- ③ (선호지역) 부지의 특성들이 심층처분의 안전성에 우수하게 영향을 미치는 것이 확인되는 지역이며, 고려되는 인자는 항구로부터의 거리이다.
- ④ (사업 타당성 관점에서부터 선호지역) 심층처분사업 수행을 위해 부지특성들의 공학적 타당성이 확인되는 지역이다.

4가지 포괄적 요건들과 그에 포함되는 세부 인자들에 대해서 하나라도 해당되는 지역은 잠재적으로 다소 부적합한 지역으로 선정되며, 모두 인자들이 포함되지 않는 지역은 잠재적으로 적합한 지역으로 구분된다. 잠재적으로 적합한 지역 중에서도 선호지역 인자들이 포함되면 잠재적으로 더 선호되는 지역으로 고려된다(Fig. 4.).

3.3.2 전국규모 과학적 특성 선별 인자별 기준 설정

① 화산 및 화성활동

화산의 근접성 인자와 관련되는 분야로서 마그마 활동과 연관되는 분출 및 관입은 심층처분시스템의 안전기능 중에서 물리적 격리 기능을 광범위하게 상실시킬 우려가 있다. 따라서 마그마 활동에 따른 심층처분장 내로 관입과 지표 분출에 의해서 심층처분시스템의 물리적 격리 기능이 상실되지 않아야하며 이러한 직접적인 영향을 받는 부지는 제외해야 한다[22].

일본 내에 분포하는 제4기 화산의 중심 및 개별 화산체(측면 화산 등)의 분포에 근거하면 97.7%의 화산에서 화산 중심의 반경 15 km 범위 내에 개별 화산체가 들어가고 있다[23]. 이 과학적 연구결과를 토대로 제4기 화산의 중심에서 15 km 이내의 범위와 제4기 화산 활동 범위가 15 km를 초과하는 칼데라의 범위를 화산 근접성 제외 기준으로 설정하였다. 일본의 화산 중에서 제4기 화산 대상으로 화산 중심의 위치가 표시된 456개 화산 정보를 활용하여 전국규모 과학적 특성 지도 제작을 수행하였다.

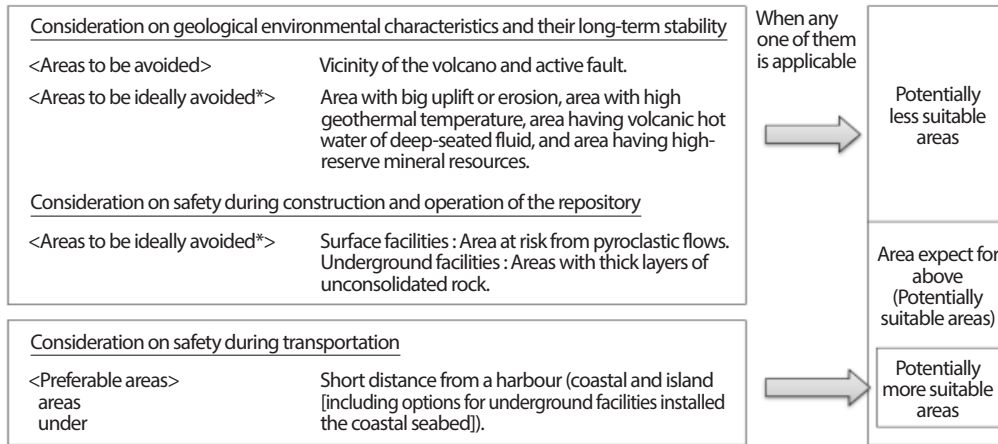


Fig. 4. Extracted indicators for 4 categories area based on generic requirement [18].

다만, 현재 화산이 없는 장소에 향후 새로운 화산이 발생할 가능성도 고려할 필요가 있다. 따라서 제4기 화산이 존재하지 않는 지역에서도 실제 부지 조사결과를 바탕으로 평가를 실시하여 향후 신규 화산·화성 활동이 발생할 가능성이 높은 지역은 제외해야 한다.

② 단층활동

단층단층(활성단층 포함)의 영향에 의해서는 심층처분장의 파괴, 단층 파쇄대를 따라 지하수 투수성 증가 등으로 심층처분시스템의 격리 기능을 상실시킬 우려가 있다. 따라서 단층 활동에 따른 심층처분장 파괴 및 단층 파쇄대 등에 의해서 심층처분시스템의 격리 기능이 상실시키지 않아야하며 이러한 직접적인 영향을 받는 부지는 제외해야 한다[22].

단층의 파쇄대는 단층의 길이 밀접한 관련이 있으므로, 선행 연구에서 단층 파쇄대폭은 단층 길이의 1/350~1/150 정도로 보고함[24]에 따라, 전문기술자문 그룹에서는 단층활동의 영향을 줄 가능성의 범위 영역(단층대폭)은 단층 활동 분절 및 단층의 길이의 1/100 정도(단층의 양쪽 합계) 면적을 제외 기준으로 설정하였다. 일본의 단층 데이터베이스를 활용하여 단층선을 표시하고 단층 분절 길이 및 단층의 길이의 1/100의 범위로 파쇄대 범위로 계산하여 전국규모 과학적 특성 지도 제작을 수행하였다.

다만, 지표 및 심부에서 단층활동의 위치가 다를 수 있으며 지상에 나타나 있지 않은 단층이 지하에 존재할 가능성이

있기 때문에, 지하에 있는 단층은 심층처분장 부지 선정 조사에서 주의 깊게 평가를 해야만 한다. 따라서 심층처분장 선정 조사에서는 단층의 연장·분절의 발생 가능성이나 단층면 파쇄부 균열 등의 투수성 등을 평가하고 안전성 평가를 실시하여 안전성에 심각한 문제를 야기하는 지역에 대해서는 제외할 필요가 있다.

③ 용기율 및 침식율

용기·침식에 의해 심층처분장이 지표에 상당히 접근하면 처분시스템의 물리적 격리 기능이 광범위하게 상실될 우려가 있다. 따라서, 우세한 용기·침식에 의해서 심층처분장이 지표 환경으로의 접근에 따른 물리적 격리 기능의 유지되어야 하며 이러한 직접적인 영향을 받는 부지는 제외해야 한다[22].

배제되는 지역은 향후 10만년에서 용기 및 해수면 저하에 의한 침식량이 300 m를 초과 할 가능성이 높은 지역을 의미하며, 해안에서 90 m/10만 년 이상의 용기량을 나타내는 장소에서는 해수면 상승(10만 년에서 최대 150 m의 침식 양)을 고려하면 상대적인 용기량이 240 m/10만년 이상이 될 것으로 예상된다[25]. 이 지역에 상대적인 용기율이 300 m/10만년을 넘을 가능성이 있는 지역으로 평가되면 이를 제외 기준으로 설정하였다. 일본의 지질학적 장기 안정성 자료를 기반으로 해안선을 포함하는 지역을 추출하여 전국규모 과학적 특성 지도 제작을 수행하였다.

용기율 및 침식율은 수만년 이상의 장기간 고려해야 되는 지질환경 안전성 사항이나, 활용된 자료는 대략적인

추정에 근거하고 있기 때문에 개별 지점의 용기·침식에 대한 정보는 심층처분장 부지선정 조사에서 신중하게 검토되어야 할 필요가 있다.

④ 지열활동

심층처분장이 위치할 지역에 지중온도가 높을 경우, 심층처분시스템 완충재는 열 변질을 야기시켜 격납 기능의 상실에 영향을 미칠 우려가 있다. 따라서, 지열활동에 의해서 심층처분시스템의 격납 기능이 상실되지 않도록 하여야 하며, 이러한 직접적인 영향을 받는 부지는 제외해야 한다[22].

현재 심층처분 지하시설의 예상 면적은 6~10 km²이고 전체 부지면적 등을 고려할 경우, 완충재의 온도 100℃가 허용되는 지중온도는 약 60℃로 계산되어, 지상 온도를 15℃로 가정하고 최소한의 심도인 300 m에 적용하여 지온 구배를 결정하면 약 15℃/100 m 산정되고 이를 제외기준으로 설정하였다[13]. 일본의 전국 지열 잠재력 지도를 활용하여 전국 규모 과학적 특성 지도 제작을 수행하였다.

지열활동은 수만년 이상의 장기간을 고려해야 되고, 방사성폐기물의 붕괴열, 공학적방벽 및 천연방벽의 열적 거동 특성을 반영한 통합적인 심층처분시스템의 열적 영향 평가는 심층처분장 부지선정 조사 결과를 바탕으로 평가되어야 할 것이다. 또한 구체적인 처분 심도가 정해져 있지 않기 때문에 부지기반의 처분심도 결정시 처분심도가 증가될수록 지온구배의 영향이 가중될 것으로 고려되므로 유의할 필요가 있다.

⑤ 화산 열수 및 심부 유체

화산 열수 및 심부 유체의 화학적 영향, 유입 등에 의해 심층처분시스템의 격리 기능을 상실시킬 우려가 있다. 따라서, 화산 열수, 심부 유체의 현저한 화학적 영향과 다량의 유입으로 인해 심층처분시스템의 격리 기능을 상실시키지 않아야 하며 이러한 직접적인 영향을 받는 부지는 제외해야 한다[22].

지하수가 낮은 pH 및 높은 pH의 경우 방사성폐기물의 용해 속도의 촉진, 완충재의 변질에 의한 투수성의 증가와 수축능의 저하, 방사성 물질의 용해도 증가 및 천연방벽의 흡착 기능의 저하를 초래한다. 또한 높은 탄소 화학종 농도는 처분용기의 국부 부식을 초래할 수 있다. 다만

초염기성암과 지하수가 반응하여 생성되는 지하수의 pH는 대체로 11로 발생될 수 있으나, 이 정도의 pH이면 완충재의 화학적 격납 기능 및 처분용기의 내식성 등에는 심각한 영향을 미칠 수 없으므로 평가되었다. 따라서, 낮은 pH는 pH 4.8 미만의 범위로 설정하였다. 또한 탄산 화학종의 농도는 0.5 mol/dm³ 이상이 되는 수질 조건은 탄소강 처분용기의 국부 부식을 초래할 수 있는 농도로 평가되어, 이를 화산열수 및 심부 유체의 제외 기준으로 설정하였다[26]. 일본의 전국 지열 잠재력 지도를 활용하여 전국규모 과학적 특성 지도 제작을 수행하였다.

화산 열수 및 심부 유체는 수만년 이상의 장기간의 특성을 고려해야 하며, 실제적으로 화산 열수와 심부 유체의 분포는 단열 등의 지하 구조에 기인하여 형성되므로 심층처분장 부지선정 조사 시 상세히 검토할 필요성이 있다.

⑥ 미고결 퇴적물

심층처분을 위한 지하 시설은 깊이 300 m 보다 깊은 심부에 건설되기 때문에 미고결 퇴적물이 심층처분장 건설 심도까지 존재하는 경우, 터널 굴착 시에 시설의 안전성 유지 및 붕괴 가능성이 증가되고, 작업 종사자의 안전도 크게 우려될 수 있다. 따라서, 심층처분장의 공학적 건설성을 증진시키기 위해서 미고결 퇴적물이 심부 깊게 분포하는 지역은 심층처분장 부지로는 제외해야 한다[22].

플라이스토세 중기 이후(약 78만년 전 이후)로 일본의 지질연대가 변화함으로써, 지층의 물리적 특성이 명확한 차이가 나타나, 플라이스토세 중기 이후 지층은 지표면 침하 등의 지층 변위 제어가 어려운 지반 조건이 된다. 따라서, 플라이스토세 중기 이후의 미고결 퇴적물 및 지층이 심도 300m 이상이 분포하는 지역을 제외 기준으로 설정하였다. 일본의 지하수 부존량 추정에서 이용한 퇴적물의 모델 결과를 활용하여, 플라이스토세 중기 이후의 층 두께 300 m 이상에 해당되는 지역의 범위를 추출하여 전국규모 과학적 특성 지도 제작을 수행하였다.

미고결 퇴적물의 공학적 건설성 특성은 수십년 기간을 고려한 심층처분시설의 건설·운영시의 안전과 관련된 사항이다. 그러나 미고결 퇴적물에서도 공학적 대책을 채택하여 시공이 성공한 사례가 다수 존재하기 때문에 미고결 퇴적물에서도 적절한 공학적인 대안으로 시공이 가능함을 유의할 필요가 있다.

⑦ 화산쇄설류

운영 시 화산쇄설물, 밀도류 등에 의한 영향으로 심층처분 시설의 안전성이 손상될 우려가 있다. 따라서, 심층처분장의 공학적 건설성 및 운영을 증진시키기 위해서는 화산쇄설물, 밀도류 등에 의한 영향이 직접적으로 받는 지역들을 제외시켜야 한다[22]. 플라이스토세(약 1 만년전 이후)에 활동이 있는 등 향후 활동의 가능성을 내포한 화산을 추출하여 화산쇄설물, 밀도류 흐름의 용암류, 눈사태, 산사태 및 사면붕괴, 분화구 지각 변동 등을 평가하고 이를 제외 기준으로 설정하였다. 일본의 화산쇄설류의 영향은 1:20만의 지질도를 기반으로 플라이스토세 화산 퇴적물, 비알칼리 규장질 화산암류, 화산암 등의 분포를 보인 지역을 GIS로 추출하여 전국규모 과학적 특성 지도 제작을 수행하였다.

⑧ 광물 자원(유전, 가스전, 탄전, 광상 지역)

심층처분장의 폐쇄 후에 인간 침입으로 탐사 및 채굴 등의 행위에 의해서 심층처분시스템의 격리 기능이 손상될 우려가 있다. 따라서, 현재 경제적으로 가치가 있다고 평가되는 광물 자원이 분포함에 따라 잠재적인 인간 침입으로 처분시스템의 물리적 격리 기능을 상실시키지 않아야 하며 이러한 영향을 직접적으로 받는 부지는 제외해야 한다[22].

일본 광산 관련 법적으로 자원 중 기술적으로 채굴이 가능하고 광산으로 허가된 광산들은 제외 기준으로 설정하였다. 일본의 유전, 가스전, 탄전, 광상 등의 분포도를 활용하여, 해당 자료의 중심을 기준으로 면적을 추출하여 전국규모 과학적 특성 지도 제작을 수행하였다.

인간침입 방지에 대해서는 수만년 이상의 장기간을 고려되어야 하고 기존 자료를 활용하여 전국규모 자료를 전제로 작성하였기 때문에, 심층처분장 부지선정 조사에 광물자원에 대한 존재를 확인하는 것이 필수적으로 요구된다.

⑨ 운반

일본 고준위방사성폐기물은 운반 용기(무게 115톤)를 기준으로 연간 약 4,600개를 운반할 계획이다. 따라서 십년 이상의 기간 동안 매년 상당량의 방사성폐기물의 운반이 필요하기 때문에 그 기간 동안 방사성폐기물의 운반 안전에 관한 규제 기준을 준수하고 안전성을 지속적으로 확보할 필요가 있다[22].

일본에서 고준위방사성폐기물 운반은 해상 운반이 공중

피폭 위험 및 핵 보안 위험이 작고, 운반 수행 경험 확보 등으로 인해 상대적으로 선호된다. 항만(해안)에서 최종처분 시설까지의 육상 운반 위험에 대한 기준은 항만(해안)에서의 거리가 20 km 이내의 지역이 선호되나 이들 지역 중에서도 약 7.5%의 도로 경사 지역과 고도 1,500 m 이상의 지역은 제외시키는 것을 기준으로 설정하였다. 운반 선호는 기존자료를 활용하여 해안으로부터 20 km 내의 지역으로 선정하였다.

일본의 운반 안전성에 대해서도 수십년 이상의 기간을 고려해야 한다. 또한 국도 및 고속도로의 차량 무게는 최대 25톤이기 때문에 현재 가정하고 있는 100톤을 넘는 용기를 적재한 운반 차량이 통행이 예상되어 추가적인 도로와 다리의 보강이 필요하다.

3.3.3 시사점 및 토의

2015년부터 2017년까지 실무그룹 운영결과 보고서를 바탕으로 일본 정부 METI는 2017년 6월 28일 전국규모 과학적 특성 지도를 편찬하였다(Fig.5).

최종적으로, 심층처분장 부지선정 착수를 위한 도출된 인자들의 요건 및 기준을 바탕으로, 심부지질 환경의 장기 안전성 관점(화산 및 화성활동, 단층활동, 용기울 및 침식율, 지열활동, 화산 열수 및 심부유체, 미고결 퇴적물, 화산쇄설류 등) 및 미래 인간 침입의 위험도 관점(광물자원)으로부터 비선호 지역으로 추정되는 지역과 위의 인자들이 하나라도 포함되지 않는 선호지역으로 추정되며 향후 심층처분 선호 특성을 확인할 수 있는 가능성이 절대적(운반도 고려됨)으로 높은 지역으로 구분되어 제시된다. 지도상에 오렌지색으로 표현되는 것은 지하심부의 장기 안정성에 해당되는 지역이며, 지도상에 실버색으로 표현되는 영역은 미래 굴착 인간 침입의 위험도에 해당되는 지역으로, 배제특성이 있는 지역으로 추정될 수 있다. 지도상에 녹색으로 표현되는 영역은 선호 특성을 확인하고 향후 조사할 가능성이 상대적으로 높은 지역이며, 초록색은 운반측면에서 선호되는 지역을 지시한다. 향후, 일본 정부는 이 지도 개발 결과를 활용하여 선호지역으로 추정되는 지자체들과 심층처분에 개발과 관련해서 연속적인 대화를 추진할 예정이다[27].

일본의 심층처분장 확보를 위한 부지선정 참여 공모를 실패한 후, 정부의 적극적인 개입을 천명하고 고준위방사성 폐기물 심층처분 확보를 위한 부지선별 일환으로 일본 전국

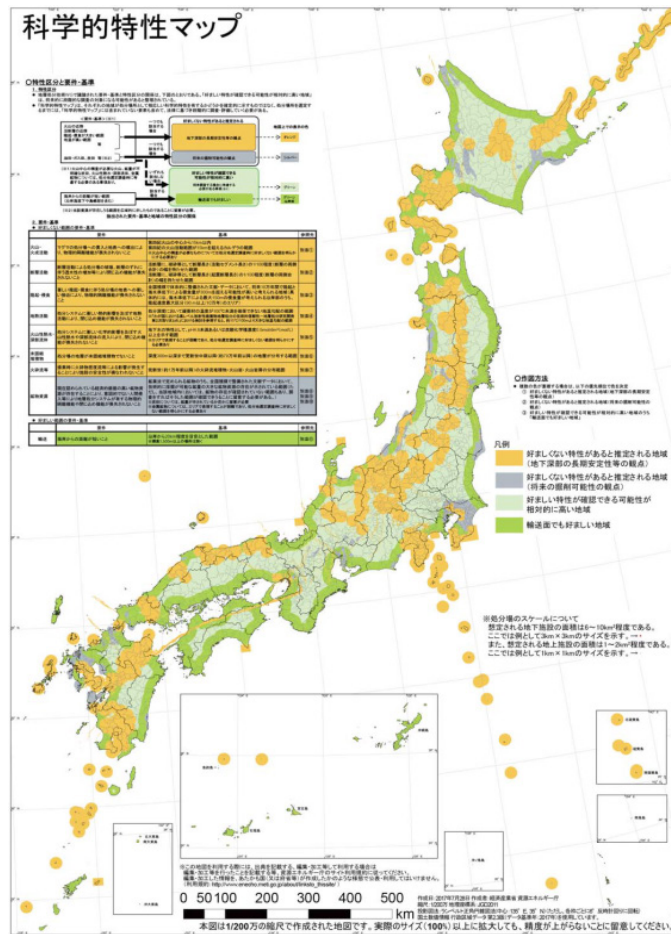


Fig. 5. Result of nationwide map of scientific feature relevant for geological disposal in Japan [22].

규모 기반의 과학적 특성 결과를 제시하였다. 본 지도 제작에 활용된 인자들 및 각각의 기준은 심층처분장의 지질 안정성, 시설 운영·건설, 운반 등을 다각적인 요인들이 고려된 것으로, 기본적으로 일본 자국 기반의 심층처분 개념의 예비 안전성 해석의 결과를 반영하여 결정된 것이다.

또한 전국규모 기반으로 자자체별로 과학적으로 비선호 지역으로 추정되는 과학적 유망부지를 제시하여, 스웨덴, 핀란드 등처럼 원전이 위치하는 지자체가 최종 후보지역으로 제안되는 약점도 피할 수 있었다. 따라서, 비록 최대한 기준 문헌 자료를 활용하여 과학적 특성 지도를 제작하였으나, 일본의 방사성폐기물 관리 정책, 지질환경, 법적체계 등이 종합적으로 고려하여 선별 인자들의 요건 및 기준이 설정된 것으로 판단되며, 심층처분 프로그램을 개발하는 처분후발 국

가들에게는 시사하는 바가 크다고 하겠다.

따라서, 심층처분 사업 프로그램 개발을 위해서는 단계적인 접근법을 바탕으로 즉시 부지선정을 위한 부지조사를 착수하는 것보다 심층처분 안전성에 대한 과학적인 정보를 충분히 지자체와 대국민들에 제공하여 추진하는 것이 바람직한 것으로 판단된다. 이러한 부지확보 절차는 부지선정을 실패하고 부지선정 절차를 재검토를 중인 영국에서 차용되고 있는 전략이다[28].

4. 결론

본 연구는 일본의 심층처분 사업추진 현황에 분석을

통해 심층처분장 확보 초기 단계에 고려되는 선별 인자들의 요건 및 기준 설정을 수립 체계를 고찰하고자 하였다. 이를 위해서 일본 METI에서 2017년 6월에 발간한 전국규모 과학적 특성 지도 개발 결과를 심층 분석하였다. 일본은 1999년 고준위방사성폐기물 심층처분에 대한 기술적 가능성과 안전성을 입증하는 보고서를 발간하고, 이 기술현황을 바탕으로 2000년 최종 처분에 관한 법률 제정 및 추진 전담기관을 설립하여 2002년 심층처분을 위한 지자체 유체공모형 부지선정을 착수하였다. 다만 심층처분 부지선정 단계에 참여할 의사가 있는 지자체의 공모가 없었다. 따라서 정부는 심층처분의 안전성 입증과 대국민 수용성 확보가 중요함을 인식하여, 심층처분을 위한 종합 안전성 규명 보고서 발간, 부지선정 착수 지자체 및 국민 수용성 확보를 위한 정부의 적극적인 개입을 추진하도록 계획하였다. 2015년 5월 개정된 최종 처분에 관한 기본방침에 의거 국가가 과학적으로 보다 적절성이 높은 지역(과학적 유망부지)을 제시하는 절차를 공식화하고 2015년부터 2017년까지 과학적 유망부지를 포함하는 지역을 선별하기 위해서 전국규모 과학적 특성 지도를 개발하였다.

전국규모 과학적 특성 지도는 처분시설 개념단계에 해당되는 심부지질 환경의 장기 안전성 관점(화산 및 화성활동, 단층활동, 용기울 및 침식율, 지열활동, 화산 열수 및 심부 유체, 미고결 퇴적물, 화산쇄설류 등) 및 미래 인간 침입의 위험도 관점(광물자원)으로부터 비선호 지역으로 추정되는 지역과 위의 인자들이 하나라도 포함되지 않는 선호지역, 심층처분 선호특성(운반 특성)을 확인할 수 있는 가능성이 절대적으로 높은 지역 등을 일본 전국규모 기반으로 특성화 및 구역화를 제시하고 있다. 이 결과는 현재 일본에서 수행된 기존 연구성과들을 바탕으로 작성된 것이기 때문에 심층처분장을 위치되는 과학적 특성을 가지는 지역으로 확정 및 지지하는 것은 아니며, 과학적인 부지조사 대상지역이 될 가능성을 포괄적 및 개념적으로 제시하는 것이다. 다만, 지도 개발에 활용된 대부분의 선별 인자들은 실제 심층처분장 부지선정 조사 단계에서 정량적인 조사 및 안전성 평가를 실시하고 신중한 검토를 요구한다.

본 연구결과는 사용후핵연료 관리 개념수립을 위한 기초 자료로 활용이 가능하며, 고준위방사성폐기물 관리에 관심을 가지는 분들에게 이해를 높여줄 기초문헌 정보들로 활용될 수 있을 것이다.

감사의 글

투고된 논문에 대해 성심껏 심사해주시고 의견을 제시해 주신 심사위원분들께 감사의 말씀을 드립니다. 또한 본 논문의 교정작업을 지원해준 박보배님, 이원준님, 이휘준님께도 심심한 감사를 전합니다.

REFERENCES

- [1] H. Jung, H.J. Kim, J.Y. Cheong, E.Y. Lee, and J.H. Yoon, "Analysis of Siting Criteria of Overseas Geological Repository (II): Hydrogeology", *J. Nucl. Fuel Cycle Waste Technol.*, 11(3), 253-257 (2013).
- [2] National Academy of Sciences, *The Disposal of Radioactive Waste on Land (1957)*, Accessed Jun. 29 2017. Available from: <https://www.nap.edu/catalog/10294/the-disposal-of-radioactive-waste-on-land>
- [3] OECD Nuclear Energy Agency, *Objectives, Concepts and strategies for the Management of Radioactive Waste Arising from Nuclear Power Programmes*, OECD-NEA (1977).
- [4] J. Lee, M. Lee, H. Choi, K. Kim, and D. Cho, "Preliminary Evaluation of Domestic Applicability of Deep Borehole Disposal System", *J. Nucl. Fuel Cycle Waste Technol.*, 16(4), 491-505 (2018).
- [5] International Atomic Energy Agency, *Disposal of Radioactive Waste*, SSR-85 (2011).
- [6] *Radioactive Waste Management , Geological Disposal – Overview of international siting process 2017*, NDA Report no. NDA/RWM/157 (2017).
- [7] Svensk Kärnbränslehantering AB, *Siting of a Deep Repository for Spent Nuclear Fuel*, SKB Technical Report, TR 95-34 (1995).
- [8] Nagra, *The Nagra Research, Development and Demonstration (RD&D) Plan for the Disposal of Radioactive Waste in Switzerland*, Nagra Technical Report 16-02 (2016).
- [9] J.H. Lee, J.H. Yoon, S.G. Kim, S. Kim, K.Y. Seong. and

- S.J. Lee, “The Role of Underground Research Laboratory Contributing to Siting Process in France”, *J. Korean Soc. Miner. Energy Resour. Eng.*, 54(4), 358-366 (2017).
- [10] Posiva, The Site Selection process for a Spent Fuel Repository in Finland – Summary Report, Report code Posiva 2000-15 (2000).
- [11] RWMC, State-of-the-Art Report on geological disposal of High-Level Radioactive Waste in Foreign Countries, http://www.enecho.meti.go.jp/category/electricity_and_gas/nuclear/rw/ (2018) (In Japanese).
- [12] METI: Summary of Requirement and Criteria for Nationwide Map of Scientific Features for Geological Disposal: Advisory Committee for National Resources and Energy, Electricity and Gas Industry Committee, Tokyo (2017) (In Japanese).
- [13] Joint Negotiating Committee, H12: Project to establish the scientific and technical basis for HLW disposal in Japan, JNC-TN1410-2000-001~004 (2000).
- [14] Japan Atomic Energy Agency and The Federation of Electric Power Companies of Japan, Second progress report on research and development for TRU waste disposal in Japan – repository design, safety assessment and means of implementation in the generic phase-, JAEA-Review 2007-010 (2007).
- [15] Atomic Energy Commission (AEC), Review of the H12: Project to establish the scientific and technical basis for HLW disposal of radioactive waste, Specified in the framework for nuclear policy, Policy Evaluation Committee of the Japan Atomic Energy Commission (In Japanese) (2008).
- [16] NUMO, Safety of the geological disposal project 2010 – Safe geological disposal based on reliable technologies, NUMO-TR-13-05, 148p (2013).
- [17] T. Fujiyama, S. Suzuki, A. Degruich, and H. Umeki, “Overview of the NUMO safety case at pre-siting stage”, Proceedings of 6th East Asia Forum on Radwaste Management, November 27-29, 2017, Osaka.
- [18] OECD Nuclear Energy Agency, Japan’s Siting Process for the Geological Disposal of High-level Radioactive waste: An International Review, NEA No. 7331 (2016).
- [19] Svensk Kärnbränslehantering AB, Design Premises for a KBS-3V Repository Based on Results from the Safety Assessment SR-Can and Some Subsequent Analysis, SKB Technical Report, TR 09-22 (2009).
- [20] H. Choi, J. Lee, J. Jeong, M. Lee, H. Choi, and D. Kook, 2009 State-of-the-Art Report on the Development of the Geological Disposal System for High Level Waste, Korea Atomic Energy Research Institute report, KAERI/AR-845/2009, 3-103 (2017).
- [21] Nuclear Waste Management Organization of Japan, Geological Disposal of TRU Waste, Japan (2008).
- [22] METI. 28 July 2017. “Nationwide Map of Scientific Features relevant for Geological Disposal”, Accessed Oct 1 2019. Available from: http://www.enecho.meti.go.jp/category/electricity_and_gas/nuclear/rw/kagakutekitokuseimap/maps/kagakutekitokuseimap.pdf (In Japanese).
- [23] Geological Survey of Japan, Volcanoes of Japan (3rd Edition), Geological Survey of Japan (2013) (In Japanese).
- [24] Ogata, S and Hohsho, S. “Fault Activity Evaluation in the Case of electric Power Plants”, *J. the Japan Soc. Eng. Geology*, 22(1), 67-87 (1981) (In Japanese).
- [25] P. Huybrechts, “Sea-level Change at the LGM from Ice-dynamic Reconstructions of the Greenland and Antarctic Ice Sheets during the Glacial Cycles”, *Quat. Sci. Rv.*, 21, 203-231 (2002).
- [26] N. Taniguch, M. Morimoto, and A. Honda, “A study of the Condition for the Passivation of Carbon Steel in Bentonite”, JNC, Tokyo (1999).
- [27] M. Takehiro, H. Hideaki, S. Hiromitsu, D. Akira, and U. Hiroyuki, 2017, “Scientific Basis for Nationwide Screening of Geological Disposal sites in Japan“, Proceedings of 6th East Asia Forum on Radwaste Management, November 27-29, 2017, Osaka.
- [28] NDA, National geological screening for a GDF, <https://www.gov.uk/guidance/about-national-geological-screening-ngs/> (2019).