

## 일본의 방사성 폐기물 처분관련 현황

### State report of radioactive wastes disposal in Japan

김형목, 권상기, 조원진 (한국원자력연구소 방사성폐기물처분연구부)

#### 요약문

본고에서는 해외사례의 조사/분석을 통해 국내 환경에 적합한 처분시스템을 개발하는데 효율적으로 이용할 목적으로 일본의 방사성 폐기물 처분과 관련한 주요기관의 사업내용을 정리하고 암석역학 전공자가 관심을 가져볼 만한 처분 관련 연구시설 및 연구내용을 소개한다. 저준위 폐기물을 대상으로한 100m 심도의 롯까쇼무라 시험공동과 고준위 폐기물을 대상으로 결정암질에 건설되는 1000m 심도의 미즈나미 지하연구시설 및 퇴적암질에서의 500m 심도의 호로노베 지하연구시설을 소개하였다.

#### 1. 서 론

국내에서도 중/저준위 방사성 폐기물 처분장 부지가 선정되고, 고준위 폐기물 처분과 관련한 연구가 한국원자력연구소를 중심으로 활발히 추진되고 있다. 특히, 원자력 연구소 부지 내에 건설중인 지하연구용 터널을 이용한 각종 원위치시험은 우리나라의 지질조건에 부합하는 한국형 처분시스템을 개발하는데 필요한 많은 데이터를 제공해 줄 것으로 기대된다.

방사성 폐기물 처분의 특성상 인접 국가와의 긴밀한 공조가 필수적이고, 막대한 연구비용을 감안할 때 해외의 관련 사례를 통한 조사/분석이 필요할 것으로 생각된다. 본 보고에서는 일본의 방사성 폐기물 처분사업 및 연구개발에 관한 내용을 간략히 정리하고 암석역학 및 지질관련 전공자가 관심을 가져볼 만한 연구 시설 및 내용을 소개하고자 한다.

저준위 방사성 폐기물의 경우, 일본본토 북부에 위치한 아오모리현 롯까쇼무라에 건설된 2개의 처분장을 이용 천층처분방식으로 현재 처분/관리중에 있다. 저준위 폐기물 중, 방사성 위험도가 상대적으로 높은 폐기물을 별도로 분류하여 지하100미터 심도의 동굴처분방식으로 처분하기 위한 연구가 대규모 시험공동굴착을 통해 진행 중에 있다. 저준위 폐기물과 관련한 사업은 일본원연주식회사 (JNFL, <http://www.jnfl.co.jp>)에서 관리/운영하고, 각 전력회사에서 기술 개발과 관련한 자금지원을 하고 있다.

고준위 폐기물의 경우, 일본국내에서의 심부지층처분과 관련한 과학기술적인 근거를 집성해 발

간한 핵연료사이클기구(JNC)의 1999년의 보고서(: H12 보고서)를 기반으로, 2000년 10월에는 고준위 폐기물 처분사업의 실시주체가 되는 원자력발전환경정비기구(NUMO, <http://www.numo.or.jp>)를 발족시킨 바 있다. NUMO에서는 고준위 폐기물 처분장 설치유치를 위한 공모를 통해 지방자치단체의 신청을 있는 기다리고 있는 상태다. 고준위 폐기물과 관련한 연구개발사업은 JNC에서 담당해 왔으며, 2005년 10월 원자력연구소 (JAERI)와의 통합을 거쳐 일본원자력개발기구(JAEA, <http://www.jaea.go.jp>)로 개편된 바 있다. 또한, 2005년에는 H12보고서 발표 이후의 연구성과물의 중간정리와 지금까지의 연구 성과물을 기술기반으로 하여 장래의 연구개발사업의 우선순위를 명확히 하고 축적된 지식의 효율적인 관리/이용을 주된 목적으로 하는 H17보고서 (<http://www.jaea.go.jp/04/tisou/tisou.html>)를 발간한 바 있다. H17보고서는 심부 지층의 과학적 연구, 공학기술의 검토, 안전평가수법의 개발 등의 세부항목에 대한 연구결과를 별책으로 총4권으로 구성되어 있다(표 1). 이외에도 산업종합연구소의 심부지질환경연구센터 (AIST, <http://unit.aist.go.jp/deepgeo>)등에서 심부지층처분과 관련한 연구업무를 수행하고 있다.

표 1. H17보고서의 구성 및 주요내용

부 제	세부내용
고준위방사성폐기물의 지층처분기술에 관한 지식기반의 구축	지층처분기술의 지식화 및 관리
심부 지층의 과학적 연구 (별책1)	-지질환경 (결정질암 및 퇴적암질)특성 -지질환경의 장기안전성 -심지층에서의 공학기술의 기초개발 (미즈나미 및 호로노베 지하 연구실) -natural analogue연구
공학기술의 개발 (별책2)	-인공방벽 기본특성 데이터베이스 -인공방벽등의 장기복합거동연구 -인공방벽의 공학기술의 검증 -설계수법의 적용성확인
안전평가수법의 개발 (별책3)	-핵중이동 데이터베이스의 정리 -안전평가모델의 고도화 -안전평가수법의 적용성 확인

저/고준위 방사성폐기물 처분사업과 관련한 자금의 관리/운용은 원자력환경정비촉진/자금관리센터(RWMC, <http://www.rwmc.or.jp>)에서 실시하고 있으며, RWMC에서는 이외에도 처분관련 기술정보의 정비 및 주변기반기술의 개발과 같은 연구개발사업과 해외협력사업을 적극적으로 추진하고 있다.

상기 소개한 일본내 처분관련 주요기관들의 성격 및 주요한 사업을 요약하면 그림 1과 같다.

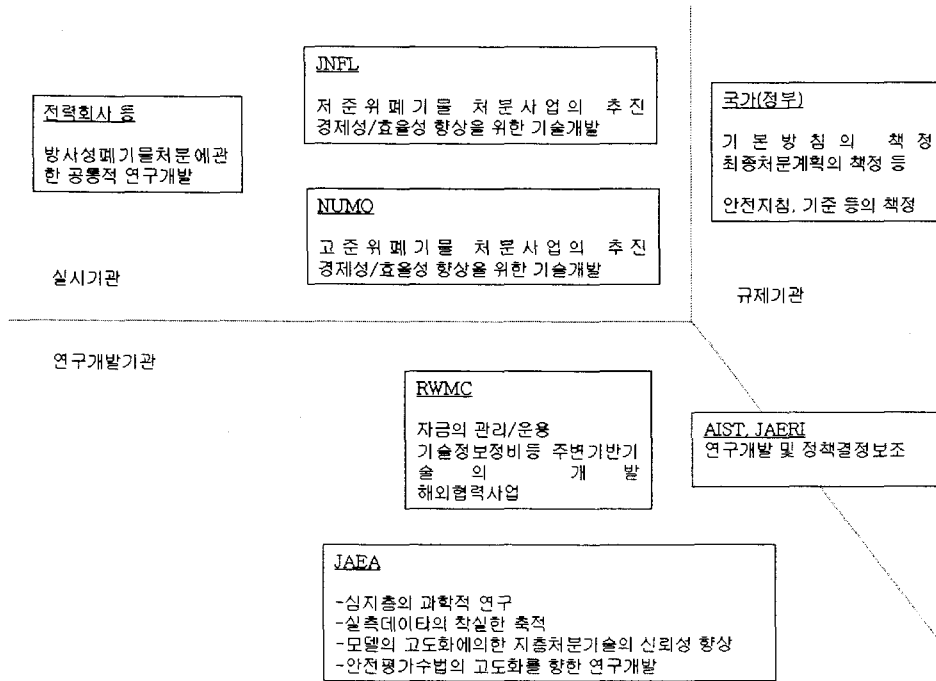


그림 1. 일본내 방사성 폐기물 처분관련 주요기관들의 성격 및 주요사업내용

## 2. 본 론

일본내 방사성 폐기물 처분과 관련한 대표적인 연구 시설로서 아오모리현 롯카쇼무라 동굴처분 연구용 시험공동, 기후현 미즈나미 지하연구시설, 홋카이도 호로노베시 지하연구시설을 들 수 있다. 그림2에 각 시설의 위치를 표시하였다.



그림 2. 방사성 폐기물 지층처분과 관련한 대표적인 연구시설의 위치

## 2.1 아오모리현 롯카쇼무라 동굴처분연구용 시험터널

저준위 폐기물 중 방사성 위험도가 상대적으로 높은 폐기물을 별도로 분류, 지하 100미터 심도에 처분하기 위한 타당성 연구가 일본 북부 아오모리현 롯카쇼무라에서 진행되고 있다. 롯카쇼무라의 지질은 퇴적사암이 주류를 이루고 있으며 실험실 실내시험 및 현장시험을 통한 탄성계수 및 투수계수의 측정치는 1.9 GPa 및  $3.0 \times 10^{-8}$  m/sec였다. 2001년에 시작된 본 사업은 2년간의 지질 및 지하수관련 예비조사결과를 통해 시설 설치의 타당성을 검증하고 2002년부터 3년간의 예정으로 시설 건설과 관련한 본격조사를 실시 중에 있다. 예비조사와 본격조사에서 실시되는 주요시험 항목을 표1에 요약하였다.

표 2. 롯카쇼무라 동굴처분 연구시설 관련 조사항목

		주요시험항목비고	비 고
예비조사		코어관측, 탄성과탐사, 시추공을 통한 투수시험, 지하수압측정, 수질시험시설 설계에의 활용	시설 설계에의 활용
본격조사	조사갱도	지질관측, 물리시험, 삼축압축시험, 투수시험, 지하수유속측정, 지하수압측정	시설예정지 근방의 지질, 지반, 지하수 조건 파악
	시험공동	지질관측, 암반변위측정, 지보공 응력측정	시설의 안정성평가
	시추공 등	시추공조사, 코어관측, 삼축압축시험, 투수시험, 지하수압측정, 수질시험, 음파탐사	지질 및 지하수 조건의 조사

그림 3에 롯카쇼무라에 건설된 3개의 조사갱도 및 시험공동과 각각의 단면크기를 예시하였다. 조사갱도는 시험공동의 상부, 좌우에 선진 굴착되어 상대적으로 단면적이 큰 시험공동의 굴착에 따른 변형 및 간극수압을 계측할 수 있도록 설계되었다.

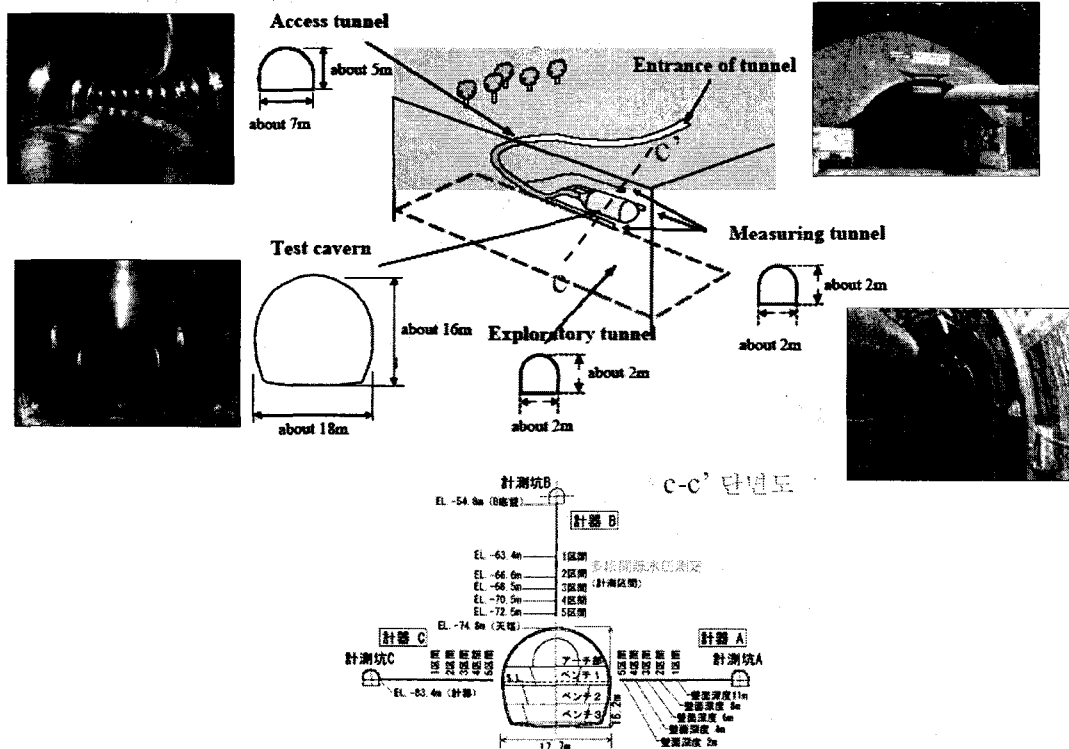


그림 3. 아오모리현 롯카쇼무라 동굴처분 연구용 조사갱도 및 시험공동

그림 4에는 저준위 폐기물의 동굴처분형식에서 고려되고 있는 개념도의 예를 제시하였다. 동굴 처분방식에 의한 처분시설은 콘크리트지보(lining concrete), 폐기물이 놓여지는 콘크리트 pit (concrete pit), 폐기물과 공동벽면 사이의 공간을 채우는 충전재 (backfill), 폐기물과 지하수와의 접촉을 차단하기 위한 저투수층 (low permeability zone), 폐기물내의 핵종 확산을 방지하기 위한 저확산층 (low diffusion zone) 등으로 구성되어 있다. 따라서 이러한 구조물들의 개별적인 거동뿐만 아니라 복합적인 거동을 이해하기 위한 연구가 필요하다.

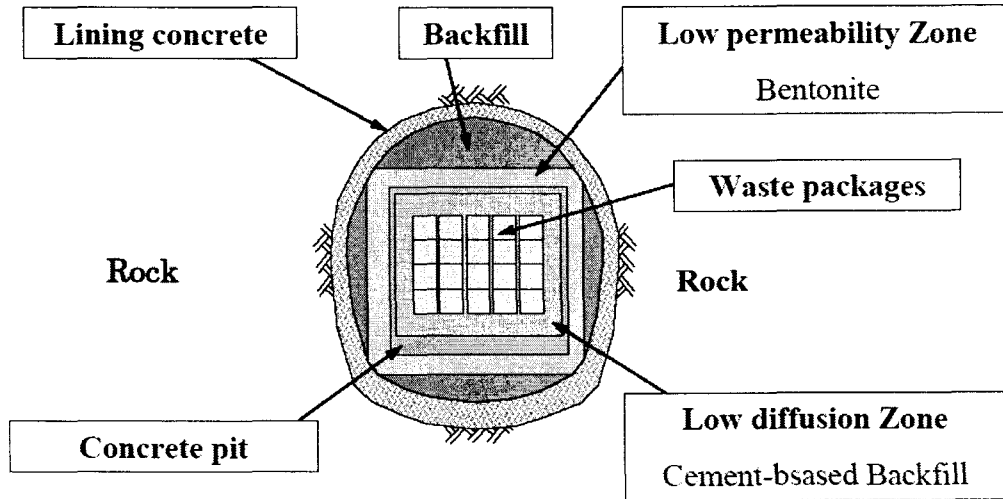


그림 4. 동굴처분방식 설계 개념도의 예

## 2.2 기후현 미즈나미 지하연구시설

심부 결정질 암반의 지질학적 특성 파악 및 데이터의 축적과 현 단계의 공학적 기술을 이용한 심부지하처분시설 건설의 기술적 타당성 검증을 목적으로 일본 본토 중부 기후현 미즈나미시에 심도 1000미터에 이르는 지하연구시설을 건설 중에 있다. 부지선정을 위해 주변지역에 총50여개에 이르는 수직에서 최대1300미터에 이르는 시추공을 굴착하여 부지특성조사를 실시하였다.

그림 5에 미즈나미 지하연구시설의 개념도를 제시하였다. 시설은 크게 직경 6.5m의 메인 수갱과 4.5m의 환기용 수갱으로 이루어져 있으며 2개의 수갱은 100미터 간격으로 연결갱도에 의해 연결되어 있다. 또한 심도 500미터와 1000미터에는 심부지질관측 및 원위차 시험을 위한 연구용 수평갱도를 건설할 예정이다. 수갱 굴착은 발파에 의해 이루어지고 있으며 2회 발파후 지보재를 설치하는 방식으로 진행되고 있다. 1일 굴진장은 약 1.3m 정도이다. 2006년 3월 현재의 굴착심도는 메인 수갱이 172미터, 환기용 수갱이 191 미터이다.

지하연구시설 건설과 관련한 연구활동은 크게 3단계로 나누어져 진행되고 있다. 1단계는 지표로부터의 조사예측 연구단계, 2단계는 수갱 및 연구갱도 굴착과 병행한 연구단계, 마지막으로 3단계는 연구갱도를 이용한 연구단계에 해당된다. 1단계에서는 지표탐사 및 시추공조사를 이용하여 심부지질조건 및 지하수 양상을 살펴보고 지하연구시설이 건설되는 심부지하환경을 예측한다. 2단계에서는 굴착에 따른 관측결과와 1단계에서의 예측결과와의 비교를 수행하고 굴착에 기인한 심부지하환경의 시간에 따른 변화를 조사한다. 3단계에서는 건설된 연구갱도를 이용한 다양한 현

장시험을 통해 심부지하조건의 직접적인 계측 및 장기거동 관측을 실시한다. 각각의 연구단계에  
서의 공정내용을 표3에 정리하였다.

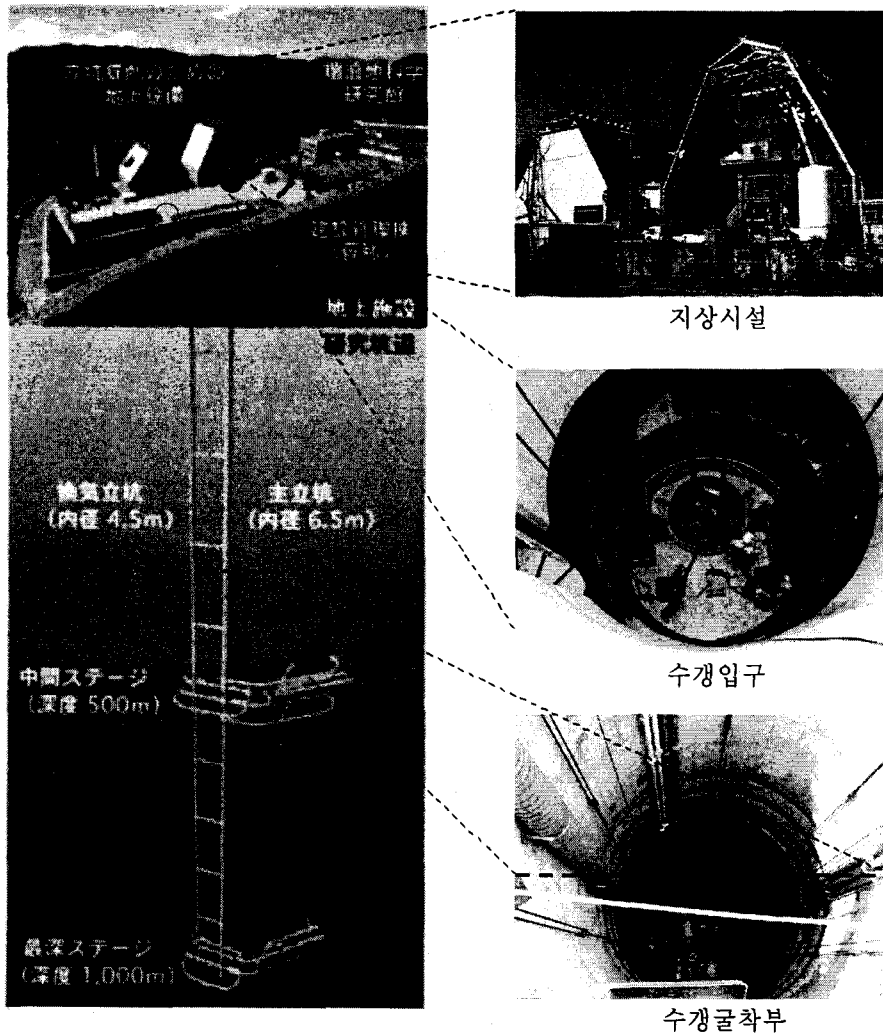


그림 5. 기후현 미즈나미 지하연구시설(<http://www.jaea.go.jp/04/tono/index.htm>)

표 3. 기후현 미즈나미 지하연구시설의 공정 및 연구내용

1단계	2단계	3단계
지표로부터의 조사	지하연구시설 건설	지하연구시설을 이용한 연구
1996년 ~ 2004년	2001년 ~ 2009년	2007년 ~ 2015년
<ul style="list-style-type: none"> <li>- 지하연구시설의 설계</li> <li>- 탄성파탐사 및 시추공 조사결과를 이용한 심부지하환경의 예측</li> <li>- 지하연구시설 건설에 따른 지하환경에의 영향 예측</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 지하연구시설 건설에 따른 주변지질환경에의 영향평가</li> <li>- 지하연구시설 건설기술의 타당성 평가</li> <li>- 블록 혹은 site스케일(수 km) 모델링</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 지하연구시설의 안정성 평가</li> <li>- 원위치 계측장비의 실용성 평가</li> <li>- 광역스케일 (수 10 ~ 100km) 모델링</li> </ul>

### 2.3 홋카이도 호로노베 지하연구시설

퇴적암질 심부지질환경의 조사와 지하연구시설 건설과 관련한 인공방벽 기술 등의 관련기술개발 및 실증을 목적으로 홋카이도 호로노베시에 지하연구시설을 건설할 계획이다. 지표에서의 탐사를 완료하고 올해부터 본격적인 굴착작업이 시작될 예정이다. 호로노베 지하연구시설은 3개의 수갱으로 이루어져 있다. 중앙의 환기수갱을 중심으로 동, 서의 2개의 메인수갱이 굴착되며 250미터와 500미터 심도에 연구용 수평공동이 건설된다. 125미터와 375미터 심도에는 환기갱도와 연결갱도가 건설될 예정이다. 그림 6에 호로노베 지하연구시설 개념도를 예시하였다.

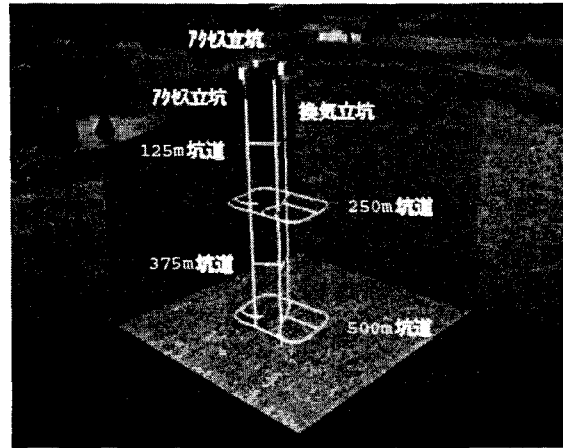


그림 6. 홋카이도 호로노베 지하연구시설 개념도(<http://www.jaea.go.jp/04/horonobe/index.html>)

호로노베지역은 퇴적암질의 지층으로 시추공 통사를 통해 메탄가스를 주로 하는 다량의 용존가스가 존재함이 확인되었다. 또한, 지하수성분 분석결과 염수계가 주성분을 이루고 있어, 물, 가스, 공기 등의 다상(多狀) 유체 및 밀도류 해석 등이 요구된다.

표 4 에 호로노베 지하연구시설과 관련한 단계별 세부연구항목 및 공정일정을 요약하였다. 또한, 표 5에는 미즈나미와 호로노베 지하연구시설의 주된 사항을 비교/ 요약하였다.

표 4. 호로노베 지하연구시설의 공정 및 연구항목

연구단계	지표에서의 조사연구단계	갱도굴착(지하시설건설)시의 조사연구단계	지하시설에서의 조사연구단계
공정	2002년 ~ 2005년	2005년 ~ 2013년	2009년 ~ 2019년
세부항목	측량 지상시설설계/건설 지하시설설계	지하시설의 건설	지하시설을 이용한 심부지질관측 및 원위치 시험
	지질환경의 예측	지질환경특성의 평가수법/예측결과 검증확인	
		갱도에서의 세부조사 굴착에 의한 수압/수질변화 등의 측정	갱도를 이용한 심부 지질환경 특성의 연구
		원위치시험(예비시험)	원위치시험 인공방벽시험 갱도밀폐시험

표 5. 미즈나미 및 호로노베 지하연구시설의 비교

		미즈나미 지하연구시설	호로노베 지하연구시설
대상암반		결정암질	퇴적암질
메인수갱	내 경	6.5m	
	심 도	1000m	500m
환기수갱	내 경	4.5m	
	심 도	1000m	500m
연구갱도		내경 : 3~8m 설치심도 : 500m, 1000m 총연장 : 800m	폭 : 4m의 마제형 설치심도 : 250m, 500m 총연장 : 1600m 정도
연결갱도		내경 : 3m 설치심도 : 심도 100m 간격 연장 : 35m	폭 : 4m의 마제형 설치심도 : 125m, 375m 총연장 : 200m
지하수조건		담수계	염수계

## 2.4 카마이시 및 토노광산의 기존갱도를 이용한 시험시설

현재 건설 중인 방사성 폐기물 처분관련 시설 이외에 기존의 광산 갱도를 이용하여 처분관련 연구를 진행한 곳으로 동경에서 북쪽으로 5백km 떨어진 카마이시 광산과 미즈나미 지하연구실 근교의 토노광산이 있다. 80년대 초반부터 시작된 이들 광산 갱도를 이용한 연구는 현재는 모두 완료된 상태로 갱도 역시 시험 전 초기상태로 복귀되어 간단한 모니터링 장치만이 남아 있다. 표 6에 두 시설에서의 주요한 연구내용을 정리하였다.

표 6. 카마이시 및 토노광산을 기존갱도를 이용한 처분관련 연구시설 및 주요연구내용

	카마이시 광산	토노 광산
지질특성	결정암질 철광산	퇴적암질 우라늄 광산
주요사양	심도 약 750m의 수평갱도에서의 시험	직경 6m, 심도 150m 정도의 수갱을 굴착
주요연구내용	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 심부지하암반에서의 굴착영향평가</li> <li>- 결정질 암반의 수리/물질이동현상연구</li> <li>- 인공방벽시험 (히터시험, 벤토나이트 팽윤시험)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 물질이동현상에 관한 natural analogue 연구</li> <li>- 광역지하수 유동 연구</li> <li>- 지구화학적 연구</li> </ul>

## 3. 결 론

현재 국내에서는 중/저준위 처분장에 대한 부지조사 및 처분방식 선정작업이 진행 중에 있으며 2008년도의 운영이 계획되고 있다. 또한, 고준위 폐기물의 처분개념선정을 위한 연구가 원자력연



구소의 주도로 추진되고 있다. 국내 처분연구의 효율적인 수행을 위해서는 외국의 사례를 통한 조사/분석이 요구된다.

본고에서는 일본에서의 방사성 폐기물 처분관련 사업 및 실시기관들의 주요 업무를 소개하였다. 또한, 암석역학 및 지질관련을 전공하는 사람들이 관심을 가져볼 만한 처분관련 주요 연구시설을 정리, 관련 연구내용을 소개하였다. 처분연구지 선정을 위한 부지특성 평가에서의 탐사기술의 개발, 장기거동의 예측 및 평가를 위한 조사기술, 데이터의 축적 및 해석 모델의 개발, 방대한 조사 데이터의 유효한 활용을 위한 정보시스템의 체계화 등이 강조되는 추세이다.

방사성 폐기물 처분사업 및 관련연구에서 각자의 관심사에 연관된 일본의 현황을 이해하고 협력대상을 설정하는데 있어 조금이나마 참고가 되었으면 한다.

### ■ 참고문헌 ■

1. わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性-地層処分研究開発第2次取りまとめ-総論レポート、核燃料サイクル開発機構、JNC TN1400-99-020、1999
2. 高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する知識基盤の構築-III7年取りまとめ-地層処分技術の知識化および管理、核燃料サイクル開発機構、JNC TN1400-2005-020、2005