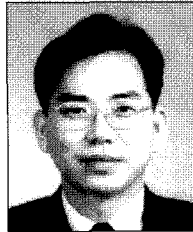
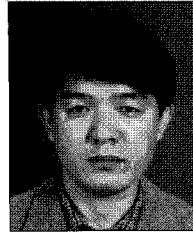


고준위폐기물 지하처분연구시설

KURT(KAERI's Underground Research Tunnel)



고 용 권*



김 경 수**



최 종 원***

* 한국원자력연구원 방사성폐기물기술개발부 책임연구원

** 한국원자력연구원 방사성폐기물기술개발부 책임연구원

*** 한국원자력연구원 방사성폐기물기술개발부 부장

1. 서 론

원자력발전을 통해 혜택을 받은 세대는 그 이익의 일부를 할애하여 원자력발전으로부터 발생한 고준위폐기물을 인간과 자연환경의 보호를 위해 영구격리 시킬 의무를 지닌다. 고준위폐기물에 포함되어 있는 방사성 핵종들은 그 고유의 특성상 스스로 붕괴되며, 대략 10만년 정도의 시간이 흐르면 고준위폐기물의 방사능은 핵연료로 이용되기 전 수준의 우라늄광 내의 준위로 낮아진다. 따라서 각국에서 고려하고 있는 처분개념은 고준위폐기물을 장기간의 수명을 갖는 처분용기에 담아 지하 동굴에 처분하며 지하수 유입의 억제, 지각운동으로부터의 충격 완화 등을 위하여 벤토나이트로 이루어진 완충재로 그 용기를 보호하고 핵종 누출의 억제를 위하여 환원 상태의 심부 지하에 처분시스템을 건설하는 것이다.

국내에서의 고준위폐기물 처분을 위한 연구개발은 교육과학기술부가 주도하는 원자력중장기연구개발사업의 일환으로 1997년부터 추진되고 있으며, 이의 결과로 국내 지질 환경에 적합한 한국형 처분시스템이 제안된 바 있다. 한국형 처분시스템을 고준위폐기물 처분사업에 적용하기 위해서는 이 시스템에 대한 실증이 이루어져야 한다. 처분시스

템의 종합적인 실증은 한국 고유의 지하 환경 특성에 대한 이해, 폐기물 처분용기의 수명과 지하수 이동 저지특성에 영향을 미치는 완충재의 특성규명, 처분시스템 운영에 대한 제반 기술의 확보, 안전성 평가 결과의 확인 등을 목표로 한다. 따라서 실제 처분시스템이 위치하게 될 지하환경을 모사할 수 있는 지하연구시설이 필요하다. 처분연구를 수행하고 있는 선진 외국에서는 이미 지하연구시설을 건설하여 자국의 처분개념에 대한 실증 연구를 이미 수십년 간 수행해 오고 있다.

지하연구시설은 Underground Research Laboratory 또는 Underground Rock Laboratory(URL)를 통칭하는 것으로 방사성폐기물처분시설 개발 프로그램을 지원하기 위한 제반 행위, 즉, 처분시스템의 현장실증시험, 예비안전성평가, 처분장 건설 및 운영 엔지니어링기술 실증, 지하심부 지질특성 조사기술 개발, 대국민 교육홍보·이해증진 등이 종합적으로 이루어지는 지하연구시설을 일컫는다(OECD/ NEA, 2001).

고준위 방사성폐기물 처분연구를 위한 선진국 수준의 실증연구 환경을 만족하는 지하연구시설 구축하기 위하여 우리나라는 2003년부터 소규모 지하연구시설 구축에 착수, 현재 지하 100m 심도에 1단계 시설 KURT(KAERI's

Underground Research Tunnel)를 건설하였다. 본 기사에서는 이러한 지하처분연구시설의 해외현황과 KURT 시설 및 활용현황을 소개하고자 한다.

2. 해외현황

2.1 미국 Exploratory Studies Facility

미국은 사용후핵연료가 각 상용원전 부지내에 저장되어 있으며, 사용후핵연료의 영구처분을 위해 네바다 주의 유카산(Yucca Mountain) 지역에 지하처분장(그림 1)의 건설을 추진하고 있다. 유카산 고준위폐기물 처분장 부지의 지질구조를 보다 잘 이해하고, 처분장 건설에 필요한 지질, 수문, 지질공학, 지화학 등에 관한 광범위한 데이터를 확보하기 위하여 Exploratory Studies Facility(ESF)를 건설하였다.

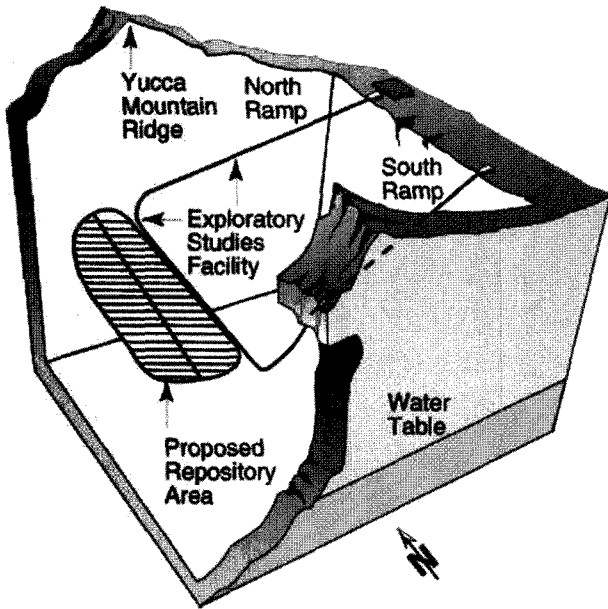


그림 1 유카산 처분장 및 ESF layout

ESF 갱구에서 60m까지의 갱도는 1993년 발파공법을 사용하여 굴착하였으며, 그 이하는 구경 7.6m TBM 공법을 이용하여 1997년 4월 ESF의 건설을 완료하였다. 처분연구용 터널은 지하 약 300m 깊이에 존재하는 불포화 응회암(tuff)내에 위치하며, 대수층은 연구터널 하부 약 100m 지점에 분포한다. ESF를 활용한 연구는 지질, 수리지질 등 부지 특성조사가 주를 이루며, 각종 scale의 heater test 및 추적자 시험 등이 수행되었다(한국원자력연구원, 2008).

2.2 스위스 Grimsel Test Site

스위스에서는 2020년 고준위폐기물 처분을 목표로 현재 광역조사, 시추공 시추, 시추코아분석, 수리시험, 지구물리 검증 및 지진파 탐사에 의한 부지선정 계획이 진행되고 있다.

스위스의 방사성폐기물관리기관인 NAGRA는 알프스산에 위치한 수력발전소용 도수터널을 고준위폐기물 처분연구시설로 개조하여 Grimsel Test Site(GTS)를 건설하였다. NAGRA는 1979년에서 1980년 GTS 부지에 대한 지질 및 시추조사를 실시한 후, 1983년부터 GTS의 건설을 시작하였으며, 터널 굴착은 직경 3.5m TBM이 사용되었고, 기타 터널들은 재래식 천공/발파공법을 사용되었다. 1990년에는 세계에서 유일하게 방사성동위원소를 직접 현장실험에 사용할 수 있는 특별통제구역이 설치되었다(그림 2). 2008년부터 우리나라도 GTS에서 수행중에 있는 콜로이드 이동에 관한 국제공동연구에 참여하고 있다.

GTS에서는 초기단계에는 주변지역에 대한 수리지질학 조건에 대한 조사 및 모델링과 이동현상을 중점적으로 다루었으며, 이후 처분장 시설 안전성 증진연구, 모델링 성능 평가에 초점을 맞춰 현장시험이 이루어지고 있다(한국원자력연구원, 2008).

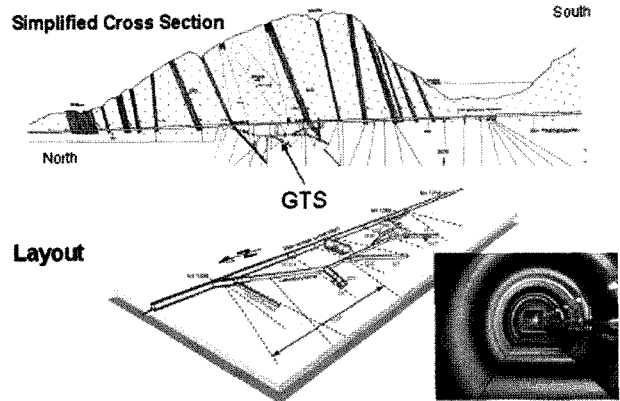


그림 2 스위스 GTS layout

2.3 스웨덴 Äspö Hard Rock Laboratory

스웨덴은 기존 Stripa 광산의 지하연구시설 운영이 종료된 후, 사용후핵연료 중간저장시설(CLAB)이 위치한 Äspö 섬에 지하연구시설을 건설하였다. 1986년 부지조사가 착수되었으며, 1992년 수직터널과 경사터널 굴착공사가 시작되었다. 터널굴착은 지하 400m까지 재래식 발파공법을 사용하고 지하 400~450m는 직경 5m TBM 공법으로 굴착되었다. 터널 총 길이는 3,600m이고 1995년에 완공되었다(그림 3). 지질은 17.5억년전 선캠브리아기 기반암으로 구

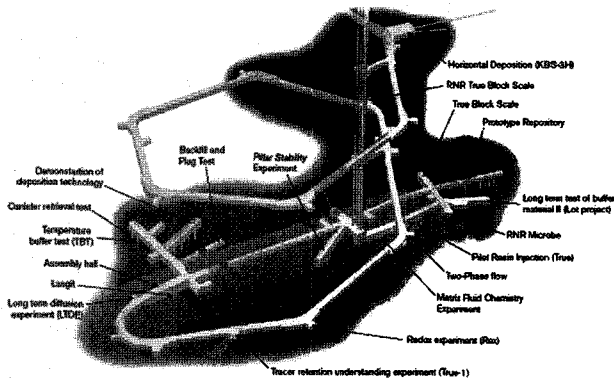


그림 3 스웨덴 Äspö HRL layout

성되어 있다.

Äspö HRL에서는 실제 고준위폐기물 처분장과 동일한 환경 하에 존재하는 심부암반을 대상을 현재까지 연구된 처분 기술을 종합적으로 실증하기 위한 자연방벽 관련 연구(Tracer, diffusion, colloid, redox test, etc)와 공학적 방벽 관련 연구(prototype, buffer material, backfill and plug test, canister retrieval test etc)가 수행되고 있다(한국원자력연구원, 2008).

2.4 핀란드 Onkalo URL

핀란드는 자국의 기반암인 결정질 암반의 특성을 규명하고, 고준위폐기물처분장 건설을 위한 기술을 실증하기 위하여, 해외 URL 프로젝트 참여 및 중·저준위폐기물 처분장내 Research Tunnel 프로젝트를 추진하여 사용후핵연료 굴착에 필요한 제반기술을 실증하였다. 또한, 2000년 세계 최초로 고준위폐기물 처분부지를 선정하고 현장부지의 상

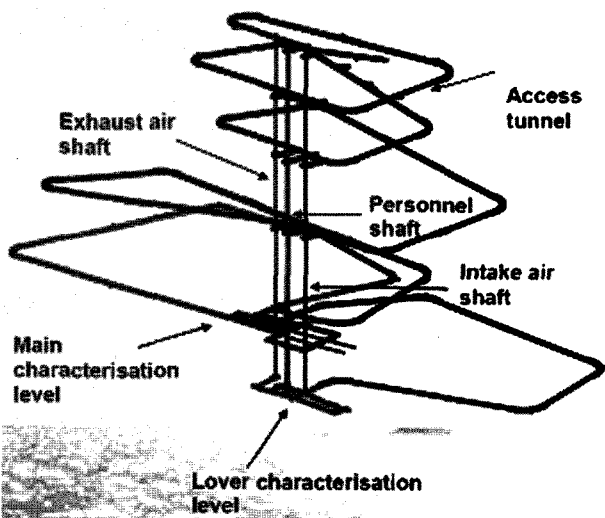


그림 4 핀란드 Onkalo URL

세지질조사를 위한 Onkalo URL을 건설중에 있다. 2014년 완공될 것이며, 2020까지 관련 연구가 진행될 예정이다. 10% 경사터널 방식으로 심도 520m까지 총연 5.5km 길의 터널이 굴착될 계획이다(그림 4).

2.5 일본 Mizunami 및 Horonobe URL

일본은 고준위폐기물을 심지층 처분하는 것을 원칙으로 하고 있다. 심지층 처분연구와 관련하여 1980년대 중반부터 폐우라늄광인 Tono광산과 폐철광인 Kamaish광산을 이용한 처분현장 시험을 실시한 바 있고, 2002년부터 본격적으로 처분관련 기술을 실증하기 위하여 Mizunami와 Horonobe에 2개의 지하연구시설을 건설하고 있다.

Mizunami URL은 Gifu현 Mizunami시에 위치하며, 기반암은 화강암이며 상부 200m 심도까지 퇴적암이 덮여있다. 이 URL에는 2개의 1,000m 샤프트와 여러개의 갱도가 건설될 예정이다. 샤프트의 굴착은 2005년에 착수하였으며, drilling & blasting과 mucking의 2회 반복후 라이닝 순서로 진행되고 있다.

Hokkaido 북부 Horonobe-최단에 위치한 Horonobe URL의 기반암은 퇴적암이며, 건설중에 있는 지하 500m 심도의 지하연구시설의 개념도는 그림 5와 같다(한국원자력연구원, 2008).

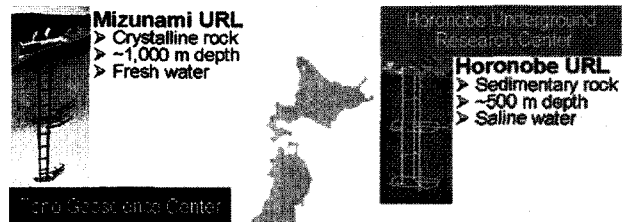
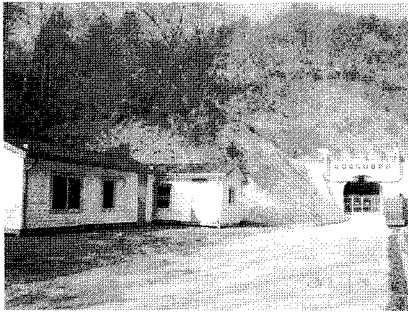


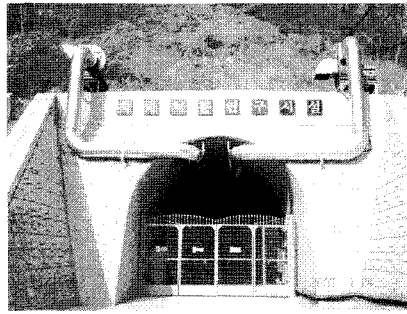
그림 5 일본 Mizunami 및 Horonobe URL

3. KURT 개요

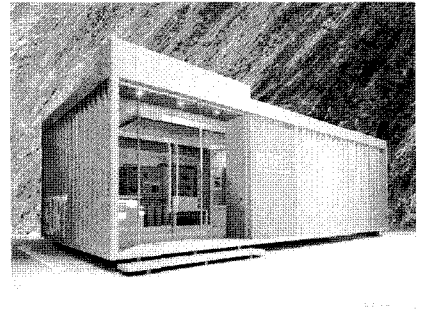
KURT는 고준위방사성폐기물 한국형 처분시스템 개발 및 실증을 목적으로 2006년말 건설된 지하처분연구시설(KAERI Underground Research Tunnel)로서, 원자력발전소에서 발생하는 사용후핵연료 등 높은 방사능을 띠는 고준위방사성폐기물을 지하 깊은 곳에 처분하는데 필요한 심부지질환경 조건에서의 안전성과 공학적 기술의 타당성과 적



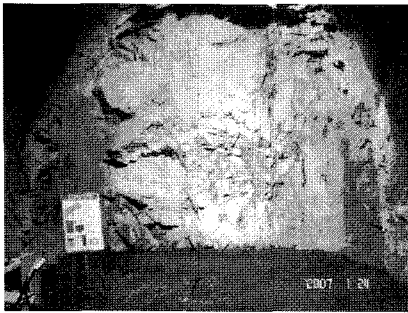
임시 사무실 및 입구



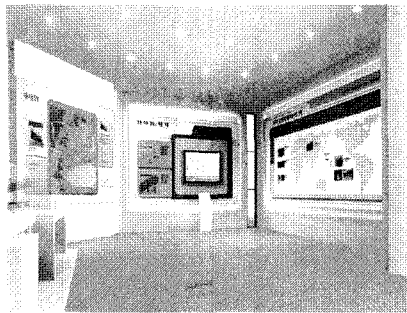
시설 입구 및 환배기 덕트



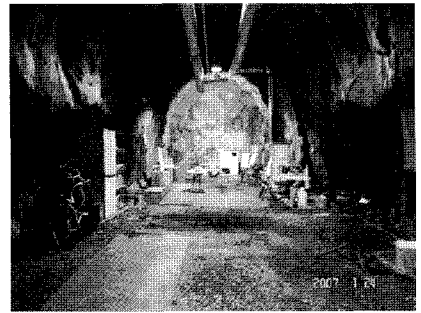
전기, 배수, 개스, 통신, 안전관리



집수조 및 펌프



연구터널 I



연구터널 II

그림 6 KURT 시설

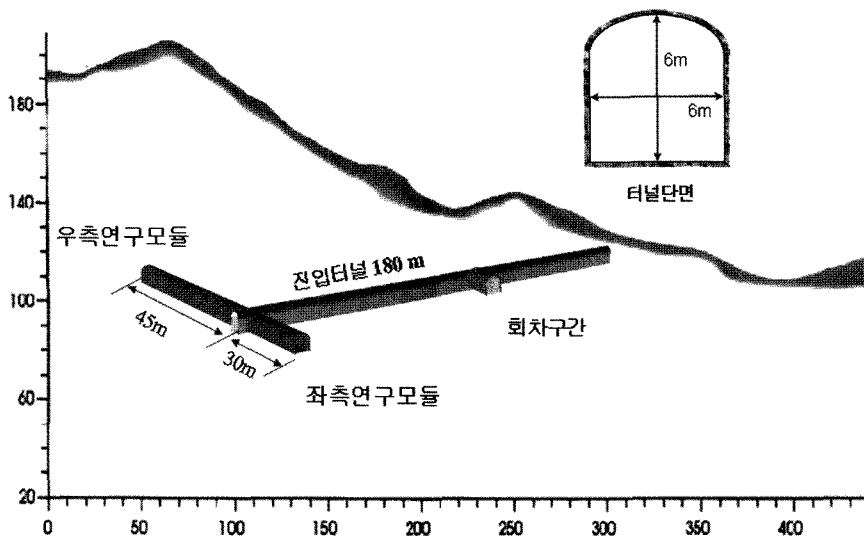


그림 7 KURT 1단계 시설 레이아웃

합성 등을 실험적으로 검증하기 위한 기초 연구시설이다. KURT의 목적은 고준위폐기물 한국형처분시스템 요소기술의 타당성, 안전성, 적합성에 대한 현장 실증시험 연구 및 지하 하부의 지질학적 처분환경 조사기술을 개발 및 방사성폐기물 처분에 대한 수용성 증진을 위한 대국민 교육홍보에 있다.

고준위방사성폐기물 처분연구는 한국원자력연구원에서 1997년부터 수행 중에 있으며, KURT는 원자력중장기연

구개발기금으로 2003~2004년에 부지조사 및 시설설계, 2005년 건설에 착수하여 2006년 1단계 시설 준공되었다(그림 6).

KURT는 한국원자력연구원 부지내 위치하며, 터널 규모는 6m × 6m × 255m(진입터널 180m, T자형 연구터널 75m)이며, 진입터널은 10%의 경사를 가지며, 연구터널을 지표로부터 약 90m 심도에 위치한다(그림 7). 지질은 우리나라의 대표적인 중생대 화강암으로 구성되어 있다.

4. 연구현황

4.1 수리지질 및 지구화학 기초자료 조사

지하처분 연구시설에서는 각종 현장실험에서 요구되는 수리지질학적 및 지구화학적 경계조건 제공을 위한 기초자료 조사를 수행하며, 산화-환원준위 전이대 조사, 심도별 지하수 압력 및 수질 변화특성 장기모니터링, 지하수 유입량 계측, 실험 현장 주변 지질구조 및 경계조건 조사등이 수행중이 있다(그림 8).

4.2 암반 손상대 특성 및 역학적 안정성 현장시험

지하 암반에 터널을 굴착할 때 발생하는 균열이나 파괴면에 의해 암반의 물리적, 화학적 물성이 변화된 손상대(EDZ)가 형성되는데, 이 손상대는 암반 거동과 지하수 유동에 영향을 미치게 된다(그림 9). 발파작업에 의해 손상대의 발생 특성을 파악하기 위해 암반의 물성 변화 및 현지 응력을 추정하는 시험을 실시하고, 각종 센서를 설치하여 구간별 암반 물성의 변화를 파악하며, 현장에서 채취한 암석 코어를 이용하여 암석의 열적, 역학적 물성변화를 측정한 뒤 현장 시험 결과와 비교 검증하였고 지구물리적 기법을 적용하여 암반에서 발생한 손상대의 규모를 추정한다.

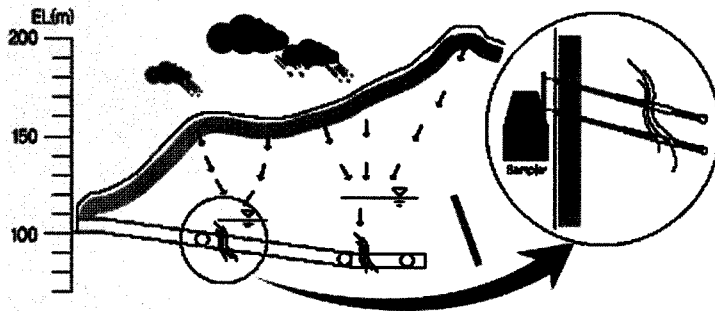


그림 8 수리지질-지구화학 모니터링 시스템

4.3 지하암반 균열에서의 용질이동 지연특성 현장실험

암석의 균열대에 존재하는 충전광물의 용질 이동지연특성을 규명하기 위한 실험으로 터널 변면에 드러난 작은 규모의 단층 또는 균열면을 선택하여 균열면을 따라 수착성 용질을 일정량 주입한 뒤 일정시간이 지난 뒤 개봉하여 용질의 이동경로와 특성을 관찰하고 충전광물이 용질 이동에 미친 영향을 규명한다. 또한 균열 구성광물과 용질과의 상호작용을 규명하고, 암반 균열을 통한 콜로이드 여과현상에 대한 현장 실험이 수행 중에 있다(그림 10).

4.4 암반의 열적거동 현장실험

고준위폐기물은 함유된 방사성 물질이 붕괴하면서 열이 발생하는데, 이 열로 인해 주위 암반의 온도가 상승하게 된다. 암반의 온도가 상승하면 암반의 응력, 변형특성, 강도와 같은 역학적 특성에 영향을 미치고 또한 지하수의 유동과 화학특성에도 변화를 초래한다. 이 같은 변화는 처분된 폐기물과 공학적 방벽의 장기 건전성에 영향을 주게된다. 암반의 열적거동 현장실험을 위해서는 터널 벽면에 지름 11cm의 열원설치공을 굴착하여 열원(5kW)을 장착하고, 이 열원을 이용하여 암반을 가열하면서 온도 상승에 따른 암반을 열적 특성변화, 암반에서의 열-수리, 열-역학적 복합

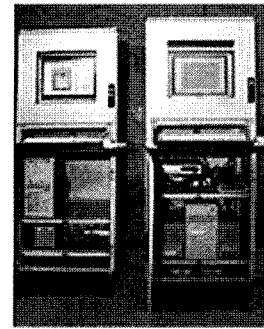


그림 9 EDS Characteristics & mechanical test of rock

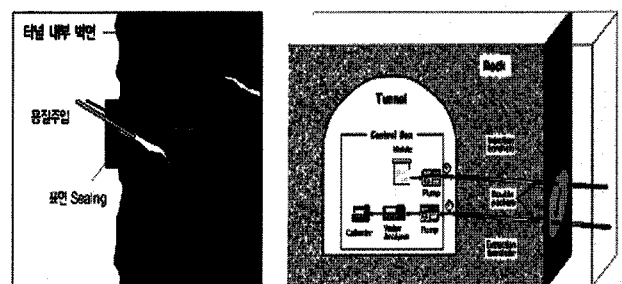


그림 10 Retardation of solute migration

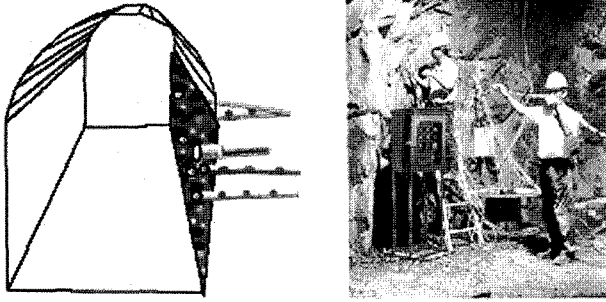


그림 11 Single hole heater test in rock

현상의 해석, 암반의 열-역학적 거동에 대해 암석 질리의 존재가 미치는 영향, 암반 손상대의 열-역학적 거동 특성 등을 조사·평가한다(그림 11).

4.5 심부지질 조사기술 개발

지하처분연구시설을 이용하여 심부 조사공에서 각종 시험을 수행할 때 요구되는 품질관리 절차를 개발한다. 터널 내 심부 시추공을 이용하여 심부지질 특성 조사기술 및 각종 시험에 요구되는 품질관리 절차를 개발한다. 이를 통해 장심도 시추기술, 코아조사방법, 암석 광물 및 지하수 시료 채취 방법, 수리시험방법 및 해석기술, 시추공 검증방법 및 해석기술, 장기 모니터링 기술 등을 확보한다(그림 12).

5. 활용성 및 기대효과

KURT는 고준위폐기물의 처분 예상 지질환경 하에서 한국형처분시스템을 실증하고 이를 최적화하는데 활용된다. 또한 저산화환경과 환원환경에서 제안된 하드웨어의 성능과 인공 및 천연방벽의 격리 지연 성능에 관한 시스템 거동 실증연구를 통하여 수치해석 모델의 타당성 입증에도 활용하게 된다.

현재 건설중인 월성 중·저준위 방사성폐기물 처분사업과 2040년대 사업 착수가 예상되는 고준위폐기물 처분사업의 성공적 수행을 위해서는 국내 전문기술집단의 확대가 요구

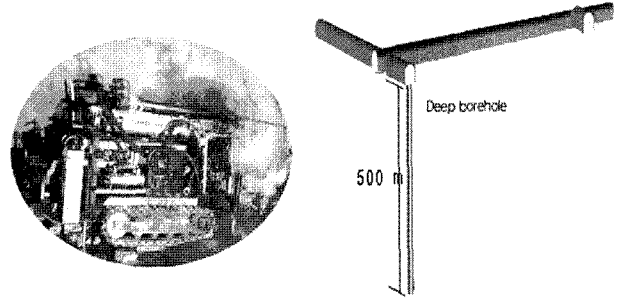


그림 12 Deep borehole investigation


된다. KURT 운영을 통하여 전문기술인력의 저변이 확대되고, 선진국 수준의 기술력이 확보될 것으로 기대된다.

KURT를 활용한 국제공동연구를 통해 고준위폐기물의 시스템의 장기적 안정성과 방사선적 안전성에 대한 불확실성을 제거시키고, 신뢰도를 향상시킴으로서 처분사업에 대한 대중 이해도를 증진시킨다. 또한, KURT를 활용한 연구를 통해 한국형처분시스템의 실증시험 연구과정과 결과를 일반 대중에게 투명하게 공개함으로써 기술적 신뢰도향상에 기여할 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 교육과학기술부의 원자력중장기연구개발사업과 원자력연구기반확충사업-연구시설/장비구축운영분야 지원(과제번호: 2009-0083259)으로 수행되었다.

참 고 문 헌

1. OECD/NEA, Going Underground for Testing, Characterisation and Demonstration, NEA/RWMC/6, 2001
2. 한국원자력연구원, 외국의 지하처분연구시설 현황 및 현장연구항목 분석, 2008 

[담당 : 김선훈, 편집위원장]