

## 고준위방사성폐기물 지하처분연구시설(KURF) 확보 및 활용 계획

김경수  
박정균  
김건영  
권상기  
한필수

한국원자력연구소 방사성폐기물처분연구부  
한국원자력연구소 방사성폐기물처분연구부  
한국원자력연구소 방사성폐기물처분연구부  
한국원자력연구소 방사성폐기물처분연구부  
한국원자력연구소 방사성폐기물처분연구부

### 1. 서 론

고준위폐기물 처분을 위한 연구개발은 과학기술부가 주도하는 원자력중장기연구개발사업의 일환으로 1997년부터 추진되어 2007년 2월에 10년간의 연구 성과를 제시하도록 되어 있다. 연구 결과로 제시하는 최종 성과물은 국내 지질환경에 적합한 한국형처분시스템의 제안과 제안될 처분 개념에 대한 종합 안전성 평가 결과이다. 이 목표를 달성하기 위하여 고준위폐기물 처분연구에서는 처분시스템개발, 방사선적 안전성 평가, 심부지질환경 특성규명, 핵종이동기구 연구 등의 분야가 상호 밀접하게 연계되어 협동 연구가 진행 중에 있다.

본 연구의 결과로 제시될 한국형처분시스템을 고준위폐기물 처분사업에 적용하기 위해서는 이 시스템에 대한 실증이 이루어져야 한다. 처분시스템의 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 처분환경에 접근한 현장 실험이 필요하며, 이를 위하여 처분연구를 수행하고 있는 각국에서는 지하시험시설(URL: Underground Research Laboratory)을 건설하여 자국의 처분개념에 대한 실증 연구를 이미 수십 년간 수행해 오고 있다. 또한, 한국형처분시스템의 실증을 통하여 고준위폐기물의 상용처분에 앞서 규제기준 개발 및 제안한 처분시스템의 규제기준 충족 여부를 판단할 수 있게 되며, 실제 최종 처분장 건설에 요구되는 관련 실증대상 분야의 경험과 소요기술을 확보할 수 있다.

고준위폐기물 처분기술 연구개발사업의 장기계획 일정과 예상되는 사업화 일정을 고려할 때, 2007년 이후 새로운 연구개발단계에서는 한국형처분시스템의 현장 실증시험에 집중적인 투자가 필요하다. 이러한 제반 연구개발 여건에 비추어 지하처분연구시설 (KURF: Korean Underground Research Facility)을 활용하여 한국형 처분시스템의 실증 관련 연구를 수행할 계획이다.

### 2. KURF 개요

#### 2.1. 시설의 목적

KURF는 2007년 초에 제안 예정인 고준위폐기물 한국형처분시스템에 대한 실증시험용 지하연구시설로서, 2006년 하반기부터 연구개발 프로그램에 따라 실증시험을 부분적으로 착수하고, 2007년 이후 한국형처분시스템의 검증·보완을 위한 시스템 단위 요소별 실증 시험에 집중 투자하여

2020년까지 최적화된 처분시스템을 확정하기 위한 기반시설이다.

따라서, KURF에서 이루어지는 연구개발의 목적은 부지특성평가를 통하여 안전성평가에 관련된 입력변수를 확보하고, 처분장 건설 및 운영과 관련된 제반 기술을 적용하여 제시된 개념이 공학적으로 타당한가를 판단하며, 단위 처분시스템에 대한 안전성 및 성능 평가 결과를 실증하는 데에 있다.

## 2.2. 위치 및 지질

KURF 시설이 입지하는 위치는 한국원자력연구소 부지 내이며, 지질은 연구목적에 적합한 중생대 북운모 화강암으로서, 편상구조가 특징적으로 발달하며 부지 북측에서 선캄브리아기의 편암을 관입하고 있다.

## 2.3. 지하시설

KURF 시설은 순수한 연구목적으로 건설되는 것으로서, 지하시설은 진입터널과 연구터널로 구성된다. 진입터널은 경사터널과 환기 및 진입용 수직 구를 함께 계획하여 시설의 건설과 운영 시 출입, 환기 및 비상 통로등의 기능을 함께 하도록 한다 (그림 1). 이들 터널은 다음의 세 가지 중요한 목적을 갖는다.

- 공간적으로 충분한 규모의 처분장 모암에 대한 지질학적 정보를 제공
- 터널 굴착으로 인한 암반과 지하수체계의 변화를 감시
- 실증시험을 수행할 수 있는 충분한 공간과 조건을 제공

KURF에서의 실증시험은 120 m 심도의 상부 연구터널 (ULRT: Upper level research tunnel) 및 250 m 심도의 하부 연구터널 (LMLRT: Lower main level research tunnel)로의 확장을 계획하며, 필요시 500 m 심도의 심부 연구터널 (DLRT: Deep level research tunnel)을 고려한다. 상부 연구터널에서는 저산화환경 조건(low oxic condition)에서 용질이동 관련 영향인자에 대한 기초자료를 확보하고, 실제 처분장 유사 환경에서 일어날 수 있는 처분장 진화현상에 대한 실증은 하부 연구터널에서 집중적으로 수행한다. 하부 연구터널에서의 장기간 실증시험의 결과를 면밀히 검토한 후 한국형처분시스템의 실증대상 구성 요소 중 실제 처분장 예상 심도에서 실증이 요구되는 경우, 수직구의 연장을 통하여 500 m 심도의 심부 연구터널을 추가 확장하는 것으로 계획한다.

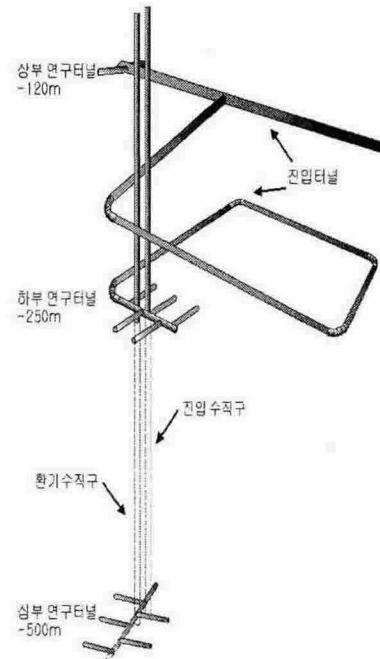


그림 1. KURF 시설 개념도.

### 2.3.1. 진입터널

경사터널은 120 m 심도의 상부 연구터널과 250 m 심도의 하부 연구터널의 진입과 그 굴착이 진행되는 동안 KURF 시설 모암에 대한 정밀한 지질특성을 파악하기 위한 목적을 가진다. 수직구는 하부연구터널 및 심부연구터널의 건설 및 운영시 출입, 환기, 비상용 통로등의 목적을 갖는다 (표 1).

표 1. 진입터널 사양 및 기능.

구 분	경사터널	수직 구
터널 단면	6.0 m × 6.0 m	Φ 6.0 m × 2
굴착 심도	250 m	250 m (500 m)
굴착 길이	2,500 m, 경사 -10 %	250 m × 2 (500 m × 2)
주요 기능	<ul style="list-style-type: none"> <li>• KURF 시설 모암의 지질환경 특성조사</li> <li>• 상부 및 하부 연구터널 출입</li> <li>• 환기, 배수, 비상용</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 하부 및 심부 연구터널 출입</li> <li>• 환기, 배수, 비상용</li> <li>• 심부 지질환경의 수직적 특성 조사</li> </ul>

( ) : 심부 연구터널 개발 시 최종 굴착 심도 및 길이

### 2.3.2. 연구터널

현재 KURF 시설의 연구터널 심도는 3개 영역으로 계획하고 있다. 상부 연구터널은 저산화환경에서의 용질이동 실증시험을 주목적으로 하고, 하부 및 심부 연구터널에서는 한국형처분시스템의 실 규모 실증시험을 주된 목적으로 한다(표 2). 각각의 연구터널은 자연배수가 가능하도록 최소한의 경사를 유지하고, 구조적 안전성이 확보되는 한 최소한의 보강만 허용하여 암반 면이 자연상태로 노출되도록 한다.

표 2. 연구터널의 사양 및 목적.

구 분	상부 연구터널(ULRT)	하부 연구터널(LMLRT)	심부 연구터널(DLRT)
연구터널 단면	6.0 m × 6.0 m		
연구터널 심도	120 m	250 m	(500 m)
연구터널 길이	25 m	100 m	(100 m)
연구터널 branch	2	5	(5)
주요 목적	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 저산화환경 조건의 실증 시험 및 기초자료 확보</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 환원환경 조건의 실증시험</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 처분심도에서의 실 규모 시스템 안정성 및 방사선 적 안전성 실증시험</li> </ul>

( ) : 심부 연구터널 개발 시 최종 굴착 심도, 길이 및 branch 터널 수

### 2.4. 추진일정

KURF 시설 건설사업의 일정은 크게 3단계로 구분한다. 1단계는 굴착 전 준비과정부터 상부 연구터널 건설까지이며, 2단계는 하부 연구터널과 수직 구 건설 단계, 그리고 3단계는 심부 연구터널 건설 단계이다. 대부분의 실증시험이 이루어지는 하부 연구터널의 준공 시점은 2013년으로 계획한다. 심부 연구터널이 필요한 경우, 시설 확장에 약 4년이 소요될 것으로 예상된다. KURF 시설의 모암에 대한 지질환경특성조사와 실증시험 연구는 투수성 지질구조와 밀접하게 관련되며, 향후 2030년까지 체계적으로 수행할 계획이다.

## 2.5. 예상 결과물

- KURF 시설을 통하여 얻어 질 수 있는 결과물은 다음과 같이 예상된다.
- 한국형처분시스템의 장기적 성능의 평가와 최적화된 설계개념의 완성에 요구되는 모암의 특성 정의
  - 실 규모 처분환경 실증시험을 통한 최적화된 고유의 처분시스템 완성
  - 공학적 방벽의 성능평가 및 핵종이동 단위 모델의 실증을 통한 한국형 처분시스템의 종합 안전성 평가 결과
  - 유사 처분장 모암의 격리 및 자연 기능에 대한 정량적 정보와 이해 증진

## 3. KURF 활용 계획

KURF는 기술적 측면에서 한국형처분시스템의 실증과 최적화라는 목표를 가지고 있을 뿐만 아니라 이를 이용한 다방면의 시너지 효과를 기대할 수 있다. 즉, 실증시험과 관련된 연구개발과 전문기술인 양성, 그리고 국제적 수준의 기술력 확보를 위한 국제공동연구를 동시에 추진할 수 있고, KURF의 시설과 연구개발 결과를 대국민 홍보물로 활용할 수 있다 (그림 2).

### 3.1. 실증시험 연구개발

KURF의 가장 궁극적인 목적은 고준위폐기물의 처분 예상도 지질환경 조건 하에서 한국형처분시스템을 실증하고 이를 최적화하는 것이다. 또한 저산화환경과 환원환경에서 제안된 하드웨어의 성능과 인공 및 천연방벽의 격리 자연 성능에 관한 시스템 거동 실증연구를 통하여 수치해석 모델의 타당성 입증에도 활용하게 된다.

### 3.2. 전문기술인력 양성

현재 추진 중인 저준위폐기물 처분사업과 2040년대 사업 착수가 예상되는 고준위폐기물 처분 사업의 성공적 수행을 위해서는 국내 전문기술집단의 확대가 요구된다. 부지특성, 안전성평가, 시스템 개발, 핵종이동현상 등의 분야에 전문적으로 종사하는 연구진은 KAERI, KHN(PNETEC), KEPCO(KEPRI), KIGAM 및 일부 대학교에 극히 제한되어 있다. 안정적인 사업화 추진을 위해서는 인적 인프라가 가장 우선시되어야 한다. 이를 위해서 국내 학계, 연구계, 산업계의 관심 있는 과학자들의 적극적인 시설 이용 및 공동연구 참여를 유도해야 한다. 이를 위한 방안으로 원자력중장기연구개발계획에 조직적으로 참여할 수 있도록 기획 단계에서 상호 참여하는 협동연구의 형태를 체계적으로 수립하며, 이와 함께 관련 학계의 석박사 과정의 연수생을 적극 참여시켜 집중적이고 세부적인 연구가 이루어질 수 있도록 유도한다. 이러한 노력을 통하여 전문기술인력의 저변이 확대되고, 선진국 수준의 기술력이 확보될 것으로 기대한다.

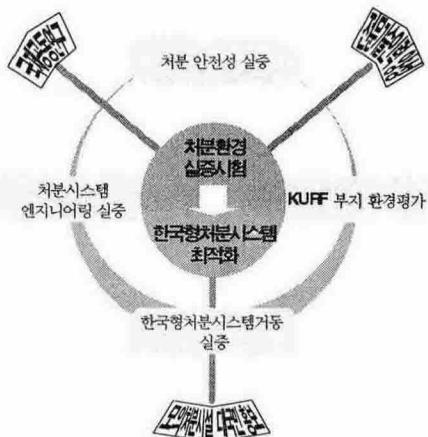


그림 2. KURF 활용 계획 연계도.

### 3.3. 국제공동연구

세계적으로 고준위폐기물의 실증연구는 향후 장기적 시스템 거동 및 핵종이동 현상 분야에 집중되어야 한다는 것이 일관된 관점이다. 시스템의 장기적 안정성과 방사선적 안전성에 대한 불확실성을 제거시키고, 신뢰도를 향상시키기 위해서 국제적인 공감대를 반드시 얻어야 하는 것은 필수적인 것이며, 이러한 결과로서 대중 이해도의 증진을 기대할 수 있다. 현재 KURF와 관련한 국내의 연구는 선진 외국의 선행 연구 결과를 조기 확보하고, 기존의 국제적인 연구성과를 토대로 미해결 현상에 대한 연구를 추진해야 하는 입장에 있다. KURF가 갖는 기술적, 상징적 의미는 원자력 G-5 진입을 목표로 하는 국내의 현 여건에서 북미, 유럽권, 일본과의 상호 밀접한 정보교환 및 공동연구를 통하여 방사성폐기물의 안전관리 분야의 위상을 선진국 수준으로 끌어 올릴 수 있는 계기가 될 수 있다는 것이다. 이를 위해서, GTS(스위스), HRL(스웨덴) 등의 실증연구 프로그램에서 수행하지 못하고 있는 프로그램을 수행하려는 시도가 필요하고, KAERI-JNC 협약에 의거 MIU/Horonobe 시설의 개발과정에 적극 참여할 필요가 있다.

### 3.4. 모의처분시설 홍보

현재 국내에는 저준위 및 고준위폐기물의 동굴처분 방식에 대한 모의시설이 마련되어 있지 않다. 원자력 산업이 지속되는 한 안정적인 사업 전개를 위해서는 국가적 차원에서 영구적인 홍보시설을 마련하는 것이 바람직할 것이다. KURF의 연구터널은 연구 목적에 따라 각기 심도를 달리한다. 상부 연구터널은 저준위폐기물의 동굴처분 환경과 매우 유사한 조건을 갖는다. 따라서 상부 연구터널 영역에 별도의 저준위폐기물 동굴처분 모의시설을 설치하여 홍보시설로 활용할 수 있다. 한편, 하부 연구터널과 심부 연구터널의 조건은 향후 추진될 고준위폐기물 처분 조건과 유사하므로 한국형처분시스템의 실증시험 연구과정을 일반 대중에게 공개함으로써 기술적 신뢰도 향상에 기여할 수 있을 것이다.

## 4. 부지특성조사 계획

KURF 모암에 대한 부지특성조사 계획은 크게 KURF 건설에 요구되는 지질학적 정보와 모암에서 이루어지는 실증시험에 필요한 상세한 지질 및 수리지질학적 특성을 제공하는데 목적이 있다. KURF 모암에 대한 부지특성조사는 다양한 분야의 조사결과를 종합적으로 해석하여 건설과 터널 굴착에 필요한 정보를 제공하고, 특히 지하조사는 실증시험 연구에 필요한 수리-지구조학적 정보를 제공하도록 초점을 맞춘다.

지표조사는 암종과 지질구조, 수리지질학적 특성을 파악하기 위하여 지질조사, 시추조사, 지구물리탐사 등을 수행한다. 이 조사결과는 KURF 시설의 설계에 직접 이용된다. 시설 건설 위치에 인접하는 지역에서 2000년부터 2003년까지 심부지질환경특성평가의 목적으로 수행된 500 m 심도 까지의 조사결과 역시 KURF 시설의 설계와 향후 지하에서의 실증시험 설계에 직접 이용한다.

지표 및 지하에서 이루어지는 부지특성조사 행위는 KURF 모암의 지질, 수리지질학적 교란을 최소화하도록 한다. 부지특성조사는 KURF 굴착 전 단계와 굴착 중 단계로 크게 나누어 계획하며 굴착 전 조사는 지표조사에 국한하고, 진입터널과 연구터널이 굴착되는 단계에서는 지하조사에 집중한다 (그림 3).

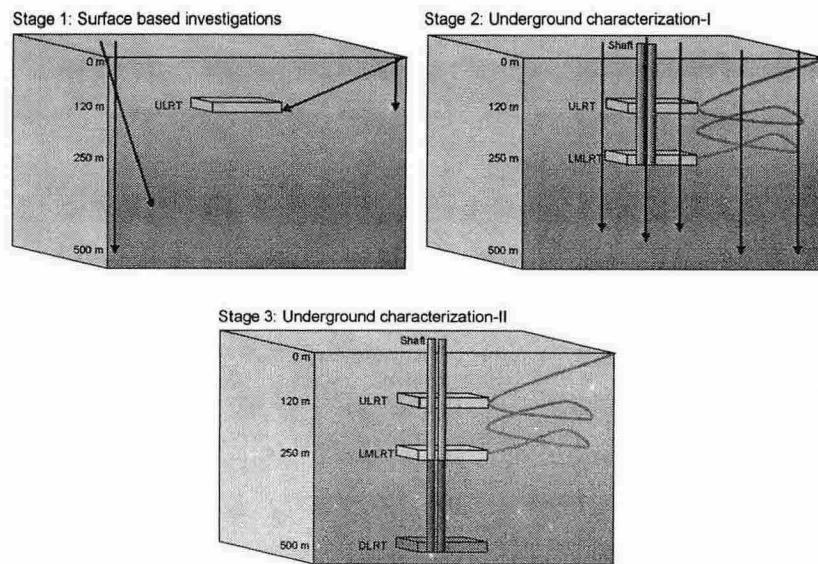


그림 3. KURF 건설 단계별 부지특성조사 계획 개념도.

## 5. 실증시험 연구개발 계획

1997년부터 현재까지 3단계에 걸쳐서 수행되고 있는 고준위방사성폐기물 처분기술개발의 연구 결과로부터 예상될 수 있는 지하실증시험 관련 연구내용과 선진 각국에서 수행하였거나 수행 중인 관련 연구들을 검토하여 KURF에서 수행할 연구 내용(안)은 다음과 같이 도출되었다.

- 공동 내 지질 및 단열체계 특성 조사 · 분석 및 부지규모 단열암반블럭 모델링
- 지하공동 및 부지 주변 지하수문체계 장기 모니터링과 지화학적 진화 모델링 및 지하공동 내 물수지 특성 분석 및 함양량 평가
- 처분공 규모 수리암반체 (HRD)에 대한 수리간섭시험과 수리지질 특성 정의 및 처분공 건설 전후의 단열 네트워크 특성분석
- 암반의 열적특성 연구(heater test)와 열원에 의한 수리화학 및 이차광물 변화특성 시험
- 지하공동 주변 지하수 시료채취와 모니터링 시스템 운영 및 방사성 핵종 거동에 영향을 끼치는 지하 심부 미생물의 특성 연구
- 지하공동 횡단 단열대(HCD)의 용질이동특성 평가를 위한 추적자시험과 핵종이동 및 확산실험
- 지하공동 단열암반에서 산화-환원전위 buffering 시험과 지하매질에서 콜로이드 및 가스의 이동/지연
- EDZ의 수리특성 변화와 그라우팅에 의한 지수효과 분석 및 그라우팅 물질에 의한 알칼리용액 생성 및 벤토나이트 반응실험
- 발파기술 및 인접터널, 지보 평가 및 설계에 미치는 발파의 영향
- 암반의 응력과 변위측정 및 EDZ 암반 거동의 계측과 현지암반의 특성 분석
- 공학적 방벽 시스템 열적-수리-역학적 특성 및 처분용기와 완충재 블록 정치 기술 실증
- 완충재에서의 오염물질 확산 및 화학적 완충효과
- 완충재 및 처분용기의 장기적 지화학적 거동특성 및 벤토나이트 버퍼의 역학적 기능 평가

KURF에서 수행되는 실증시험들은 기능적 분류와 관계없이 궁극적으로는 고준위방사성폐기물 처분의 안정성평가를 위한 파라메터 도출과 안전성 실증을 목표로 서로 유기적으로 연관되어 있으며, 시설 건설 및 확장 계획에 따라 시기적으로 그 추진 일정을 달리 한다. 추진계획의 시기적 구분에 있어서 굴착단계에서 수행되는 내용은 주로 지질 및 수리수문 분야로 집중되지만, 단계별 확장 시의 연구내용과 그 수행 시기는 향후의 상황에 따라서 다소 유동적이다.

### 참고문헌

- 한국원자력연구소, 2004, 지하처분연구시설 부지조사 및 설계, 벽산엔지니어링주식회사.  
Posiva Oy, 2003, ONKALO underground characterization and research programme, 142.  
OECD/NEA, The role of underground laboratories in nuclear waste disposal programmes, 42.  
IAEA, 2001, The use of scientific and technical results from underground research laboratory investigations for the geological disposal of radioactive waste, IAEA-TECDOC-1243, 76.