

Deep URL 개발 현황 분석 보고서

- Äspö HRL, GTS -

State-of-the-Art Report for the Deep URL Facility
Development

- Äspö Hard Rock Laboratory, Grimsel Test Site -

KAERI

2012. 1

한국원자력연구원

제 출 문

한국원자력연구원장 귀하

본 보고서를 처분시스템 개발 과제의 “Deep URL 개발 현황 분석 보고서
- Äspö HRL, GTS”에 관한 보고서로 제출합니다.

2012. 1.

과 제 명 : 심지층 처분환경특성 평가

주 저 자 : 김 경 수

공 저 자 : 배 대 석

김 건 영

요 약 문

고준위폐기물 처분기술 개발의 핵심적인 인프라인 URL 시설의 개발 현황을 분석하기 위하여 스웨덴의 SKB의 Äspö Hard Rock Laboratory 시설과 스위스 Nagra의 Grimsel Test Site 시설의 개요 및 운영 체계, 시설 부지 요건, 시설 확보 추진 절차 및 현황, 그리고 처분기술 개발 및 실증시험 연구 현황 등을 조사하였다.

스웨덴과 스위스의 고준위폐기물 처분사업은 1970년대부터 개념 개발이 시작되었다. 본격적인 처분부지 선정은 1990년대에 시작되었으며 최종 처분부지 결정까지는 짧게는 15년, 길게는 30년 가까이 긴 기간이 소요되었다. 최종 처분부지에서의 조사, 설계, 건설 인허가를 거쳐 운영에 이르기까지는 10~20년이 소요될 것으로 계획하고 있다.

스위스는 기존의 양수발전소 회사의 적극적인 협조를 바탕으로 매우 짧은 기간 내에 URL 시설을 구축하였으나 스웨덴은 세계에서 대표적인 PBG-URL 시설을 건설한 경우에 해당된다. 최종 처분장 운영에 앞서 URL 시설에서 본격적인 기술개발을 수행한 기간은 스웨덴 30년, 스위스 50년 이상이다.

URL에서의 실증시험은 부지 조사기술, 천연방벽의 격리 및 지연특성, 공학적방벽의 복합거동, 핵종이동, 처분장 설계, 건설 및 운영, 재회수 기술 및 시스템 공학기술 등으로 분류할 수 있다. 근래의 URL에서의 실증시험 추세는 기초적인 연구가 점차 감소되어 가고, 처분방법의 최적화, 복합현상 진행과정의 이해에 필요한 특정 자료의 수집과 복합적인 모델의 검증, 핵심적인 안전성 평가모델의 시험 및 개발, 지하 심부의 화학적 환경 등과 같은 장기적 안정성과 관련된 현안과제들, 그리고 장기적 성능 검증을 요하는 단위 시스템에 대한 장기적인 실증시험 등이 관심의 대상이 되고 있다.

Summary

This report analysed the development status on the SKB's Hard Rock Laboratory and Nagra's Grimsel Test Site facilities to investigate their facility overview, operation system, site condition, project history and procedure, and current experiment programmes of underground research laboratory.

SKB and Nagra had launched high level radioactive waste disposal project around 1970's. Actual site investigation activities were initiated since 1990's and the time schedule for siting programmes to determine the final disposal site were taken fifteen to thirty years. Furthermore, ten to twenty years will be needed to site characterization, facility design, construction, and operation commissioning.

Nagra had constructed Grimsel Test Site facility in southern Switzerland Alps with the collaboration of KWO electrical company in early 1980's. This facility is characterized of a centre of excellence for underground Research and Development (R & D) to support projects for the disposal of radioactive and chemo-toxic waste and not a potential repository site. The SKB's Äspö HRL constructed in outside Oskarshamn is a unique PBG-URL facility. SKB is conducting full-scale research and development here in preparation for the construction of a final repository for spent nuclear fuel. The research programmes for the development of disposal technologies is performed over thirty to fifty years prior to repository operation.

The in-situ experiment activities consist of development of site investigation techniques, characterization of retardation properties of natural barrier and long-term behavior of engineered barrier, nuclide migration properties, repository design and construction techniques, and demonstration of system engineering techniques. In 2000's, the basic issues are getting decreased and long-term phenomena, i.e., optimization of disposal concept, understanding of coupling process, validation of mathematical model, test and development of safety assessment models, characterization of deep geochemical environment, and long-term demonstration experiments have been leading the issues of research and development.

목 차

제 1 장 서론	1
제 2 장 지하연구시설 개관	3
1. 개요	3
2. URL 시설의 유형	4
3. URL 행위의 유형	4
4. 처분장개발 프로그램(RDP)과 URL의 관계	5
5. URL의 역사 및 교훈	12
6. 요약	19
제 3 장 스웨덴 Äspö Hard Rock Laboratory 현황	21
1. 추진 배경	21
2. 시설 개요	24
3. 시설 운영	32
4. 부지 특성	38
5. 시설 확보 추진 절차	46
6. 처분기술 개발 및 실증시험 연구 현황	60
제 4 장 스위스 Grimsel Test Site 현황	67
1. 추진 배경	67
2. 시설 개요	69
3. 시설 운영	72
4. 부지 특성	78
5. 시설 확보 추진 절차	82
6. 처분기술 개발 및 실증시험 연구 현황	85
제 5 장 결 론	93
참고문헌	97

표 목 차

표 1. Stripa와 HADES 프로젝트의 비교	13
표 2. URL의 과거, 현재, 그리고 미래	13
표 3. 2010년 HRL 국제공동연구 및 참여 기관	35
표 4. GTS 시설에서 수행된 지진, 수리지질, 암석역학 및 지구물리조사 항목	79



그 립 목 차

그림 1. 세계 URL의 역사	3
그림 2. Äspö Hard Rock Laboratory 위치	30
그림 3. Äspö Hard Rock Laboratory의 조감도	31
그림 4. HRL 프로젝트 조직	32
그림 5. SKB가 Oskarshamn 지자체에서 운영하는 시설에 대한 교육 홍보	36
그림 6. 예비부지조사 단계에서의 시추조사 공 위치도	40
그림 7. 진입동굴과 나란한 방향으로 시행한 방향제어 시추조사	40
그림 8. HRL 시설부지의 단열대 분포도	44
그림 9. HRL 시설부지의 구조모델 단면도	45
그림 10. Äspö Research Village 전경	49
그림 11. R&D Programme 92에서 당초의 계획을 수정한 사업 일정	50
그림 12. 전체적인 HRL의 동굴 레이아웃 (TASA는 주 동굴 A의 식별코드)	51
그림 13. 동굴 막장면에서 발파공과 선진공 굴착에 이용되는 천공기	52
그림 14. 굴착 작업을 준비 중인 TBM	53
그림 15. HRL 시설의 동굴, 감실과 시추공 도면	54
그림 16. 상향식 수직구 굴진장치 (좌: 지표에 설치된 굴진장치, 우: 심도 220 m에 장착된 상향식 굴진장치 헤드)	55
그림 17. 동굴 계측 구간을 따라서 설치한 지하수 유입수 채취용 댐 (좌)과 V-notch weir (우).	56
그림 18. HRL 동굴의 배수 시스템 레이아웃 (유량 계측지점, 배수펌프 등)	56
그림 19. 동굴 측벽 선반에 설치된 배관 및 케이블 들	57
그림 20. Äspö Hard Rock Laboratory 시설 현황도	58
그림 21. 220 m 와 450 m 심도의 동굴에서의 실증시험 위치	60
그림 22. GTS 위치와 터널 단면도	70
그림 23. GTS 시설 레이아웃 및 시험 공간	71
그림 24. Nagra 조직도 (2011, 3월 현재)	73
그림 25. GTS 시설 운영조직	74

그림 26. 1984년부터 1990년 중반까지의 GTS 국제협력 현황	75
그림 27. 2000년대 이후 GTS의 국제협력 현황	76
그림 28. 스위스의 지질단면도 (북-남 방향 단면)	80
그림 29. Grimsel 주변 지역의 지질 분포도	80
그림 30. 처분사업 일정과 URL 시설 구축 시기	95



제 1 장 서 론

URL (Underground Research Laboratory)이란 방사성폐기물처분시설 개발 프로그램 (RDP: Repository Development Program)을 지원하기 위한 제반 행위, 즉, 처분시스템의 현장실증시험, 예비안전성평가, 처분장 건설 및 운영 엔지니어링기술 실증, 지하심부 지질특성 조사기술 개발, 전문가 양성, 대국민 교육홍보 등이 종합적으로 이루어지는 지하연구시설을 말한다 (OECD/NEA, 2001). 여기에서 RDP란 방사성폐기물 처분사업의 추진의 전 과정을 말하는 것으로, 구체적으로는 초기 단계의 처분개념 개발, 처분시스템 최적화 및 부지선정 절차 추진, 부지특성조사 및 상세설계, 처분시설 건설, 폐기물 반입 및 처분장 운영에 이르기까지의 전 과정을 말한다.

본 기술현황 분석 보고서는 고준위방사성폐기물의 처분기술 개발을 위한 중요 인프라인 Deep URL (Underground Research Laboratory) 시설 개발 현황을 분석하여 향후 우리나라에서의 Deep URL 개발에 필요한 선행 국가의 사례를 분석하는 것이 목적이다.

본 보고서에서는 스웨덴 SKB에서 개발, 운영 중인 Äspö Hard Rock Laboratory와 스위스 Nagra에서 운영 중인 Grimsel Test Site 시설에 관한 기술현황을 분석하였다.

제 2 장 지하연구시설 개관

1. 개요

장수명폐기물의 지하처분에 따른 현안과제들을 실제 검증해 보기 위한 URL의 역사는 거의 40여년 이전으로 거슬러 올라간다. 최초의 시도는 1960년대 중반 독일의 Asse salt mine (암염광산)에서 중저준위폐기물에 대한 실증연구부터 출발한다. 1970년대에 들어 여러나라에서 중요한 R&D 프로그램으로 URL을 추진하였다 (독일-Asse mine, 스웨덴-Stripa mine, 미국-Climax). 그 이후로 현재에 이르기까지 많은 수의 URL이 추진되었거나 추진 중에 있다 (그림 1).

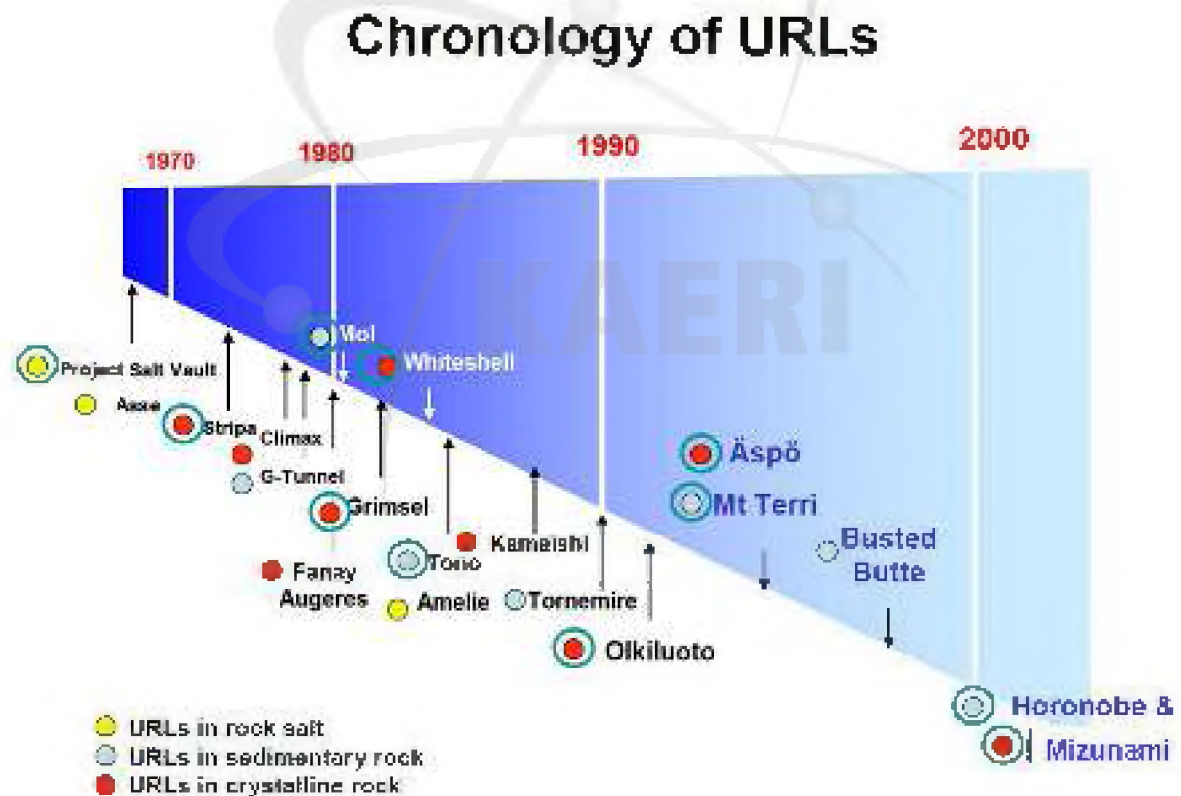


그림 1. 세계 URL의 역사

2. URL 시설의 유형

OECD/NEA의 정의에 따르면, URL의 유형은 크게 두 가지로 구분할 수 있다.

- Generic URL
 - 처분장으로 사용하지 않을 지역에 건설
 - 기존의 광산이나 터널을 확장하여 개발(Stripa, Grimsel, Kamaishi)
 - 신규 부지에서 Purposed-built Generic(PBG) URL(Whiteshell, Aspo)
 - ※ PBG-URL을 따로 분류하는 것은 기술적인 이유가 있는 것이 아니고, 단지 편의상 유용성과 기술적 접근성에 따른 것이다.
- Site-specific URL
 - 처분장개발을 목적으로 건설허가 신청 예정부지에 위치(RCF-UK, Onkalo-Finland)
 - 실제로 모든 URL 프로그램의 최종 목표는 SS-URL이다.

3. URL 행위의 유형

자국 고유의 처분시스템은 새로운 상용원자로의 운영에 앞서 개발 원자로의 실증 과정을 거쳐 안전성을 입증한 이후에 상용원자로의 건설이 가능해지는 과정에 상응하는 행위가 URL을 통해서 이루어져야 하는 것이다. 즉 자국 고유의 처분시스템은 자국내의 자연환경에 크게 좌우되기 때문에 공학적방벽 및 천연방벽에 대한 성능 입증 행위가 URL을 통해서 확보되는 것으로 이해하여야 한다.

- Experimentations
 - 처분장 진화과정에 영향을 미치는 과정/현상에 관한 연구(즉, 지하수, 열, 개스의 이동)
 - 이러한 진화 현상을 입증하는 과정 및 절차에 대한 모델 개발 및 시험
 - 특정 암종과 지질환경에 목표를 둔다.
 - Generic URL에서 수행되고 있고 일반적으로 실험적 R&D이다.
- Rock Characterization
 - 지하암반과 지하수 특성평가 기술과 전략을 개발, 시험 및 적용

- Generic URL에서 기술개발
- SS-URL에서 특정 지질환경과 암종에 대한 특성조사
- 지표조사로부터 처분장 설계와 안전성평가에 필요한 자료를 얻기 위해서 지하조사를 추진
 - 처분장 개념설계(Generic URLs)
 - 실제 처분장(SS-URLs, RCFs)
- Test 및 Demonstration(T&D)
 - 처분장 운영 단계에서 공학적 기술들을 개발, 시험 및 다양한 이해관계자에게 시연
 - 굴착기술
 - EBS 및 폐기물 정치 기술(회수기술 포함)
 - 폐쇄 및 밀봉기술
 - 사후 감시기술
 - Generic 또는 SS-URL에서 수행
 - 몇몇 프로그램들은 pilot, 기술검증 및 실증용으로 SS-URL에서 T&D를 추구한다.

4. 처분장개발 프로그램(RDP)과 URL의 관계

RDP은 다음과 같이 사업 측면에서 크게 4개 단계로 구분할 수 있다.

- 초기단계 (Early Stage)

초기단계에서는 처분장개념 개발 및 대안 설계 및 암종을 검토한다. 처분장부지개발종합프로그램을 위한 기본철학이 확립되며, 후보부지선정프로그램을 위한 기본원칙 등이 수립된다. 필요시 이와 관련한 제도적장치가 준비 또는 확립되게 될 것이다.

- 중기단계 (Middle Stage)

중기단계에서는 상당히 세부적인 기준개념을 수립하고 최적화를 위해 대안을 검토한다. 이 시기에 처분장부지 요건에 대한 정성·정량적인 정의 등 기술적인 부문에 대한 확립업무가 착수되며 이와 병행하여 부지선정 절차도 추진된다. 이 단계에

서 처분장부지요건에 대한 정량적인 기술지침 등 제반 가이드라인들이 부문별로 연구결과를 통해서 제안되기 시작한다.

- 후기단계 (Late Stage)

후기단계에는 하나 또는 그 이상의 처분장 후보부지가 선정되고 이들 후보부지를 대상으로 부지특성평가(처분적합성평가)가 진행된다. 동시에 처분장 후보부지 내에 SS-URL과 관련한 일련의 업무가 병행 수행된다. 부지특성에 맞추어 최적의 상설설계가 이루어진다. 이 시기에 처분장부지 안전성평가가 수행되어 건설허가 신청이 이루어진다. 또한 건설허가신청 대상부지에 대하여 세부적인 환경감시관리 행위가 이루어져야 한다.

- 운영단계 (Operational Stage)

운영단계에서는 실제 최종처분장이 운영되고, 폐기물이 반입, 처분된다. 처분장부지 주변지역에 대한 환경감시관리가 계속된다.

이와 같은 RDP의 진행 단계에 따라 URL이 기여하는 역할에 대하여 아래와 같이 정리하였다.

4.1 처분장개발 프로그램 단계에서 URL의 역할

4.1.1 사업자 측면

○ Experimentation

Generic URL	Site-Specific URL
Early Stage · 설계와 안전성 부분의 핵심이슈 개발(열전달 특성, EDZ, 용질 및 콜로이드 이동) · 대부분이 전형적인 방법 이용 · 현재도 중요한 generic 이슈들이 개발중(개스 이동 등)	Early Stage
Middle to Late Stage · 두드러지는 장기적 이슈들의 해결 · generic 연구가 마무리되어 가는 중에 제기되는 이슈들의 해결 · 처분장 인허가 과정에서 실증용으로 사용될 10년 이상의 자료를 얻기 위한 장기 시험 수행 · 처분장 부지요건 도출	Middle Stage
	Late Stage · 실제 처분부지 조건 하에서 generic 모델 검증 · 실제 자료를 이용한 모델의 보완 및 불확실성의 범위를 축소
Operational Stage	Operational Stage

○ Rock Characterization

Generic URL	Site-Specific URL
Early to Middle Stage · 지하지질 조사기술 개발(즉, 지하수시료 채취 기술, pilot drilling, 주요 구조대의 원격 탐사, 지하수유동 해석 등) · 암반의 물리적, 화학적 특성 시험 및 모델 개발	Early Stage
	Middle Stage
Late Stage · 처분장 부지요건 도출	Late Stage · 처분장 모암 주변의 실제 암반의 분포특성과 다양성 조사 · 지표조사결과(대부분 제한된 조사결과)와 지하조사결과(대부분 심도있고 단순한 결과)의 종합 · 궁극적으로는 전반적인 처분시스템의 감시 체계로 이용
Operational Stage	Operational Stage

○ Test & Demonstration

Generic URL	Site-Specific URL
Early	Early Stage
Middle to Late Stage · 처분장 개발을 위한 공학적 기술의 개발 및 시험(굴착, 정치, 밀봉, 감시, 회수, QA 등 소요기술과 장치 모두를 포함)	Middle Stage
Late Stage · 요소기술들이 대부분 결정된 경우 장기적 실증프로젝트 수행(수십년 이상) · 가능하다면 실제 방사성폐기물을 이용한 실증시험을 하고 종료 후 회수(일부 프로젝트에서 처분장이 아닌 시험시설에서 이를 수행해 보기 위해 정치적 및 법적으로 타진 중에 있음)	Late Stage(actual site) · Pilot Facility: 처분장 건설 전에 어떠한 행위들이 어떻게 이루어질지 제시(건설 및 운영 인허가 지원용) · Generic T&D 시설이 없는 경우, 우선적으로 일부 공학적 시험과 기술개발이 요구된다. · Pilot Facility: 실제 처분착수 전에 완벽한 정치기술(backfilling 및 회수기술)을 제시
Operational Stage	Operational Stage · 밀봉 및 폐쇄후 모니터링 기술 실증

4.1.2 규제기관 측면

규제기관의 측면에서 URL 프로젝트에 대한 시각은 다음과 같다.

- 규제기관의 입장은 사업자와 수평적인 기술 수준을 요구한다. 즉, 모든 자료 및 정보의 공유와 취득과정, 분석 및 평가 방법 및 결과 등에 대한 공감대 형성이 전제되어야 한다. 그래야만 사업자를 충분히 이해할 수 있다고 보기 때문이다.
- 사업자의 URL 프로젝트와 별도로 규제기관에서 자체적인 URL 시설을 구축하여 실제 실증시험을 수행하는 사례도 있다 (Tournemier's URF-IRSN, 프랑스).
- 일부 국가의 규제기관에서는 사업자로 하여금 URL 프로그램을 후기단계에서 SS-URL로 개발하기를 요구한 사례도 있다 (예: RCF-UK).
- 인허가 행위의 일부로 T&D (Test and Demonstration)를 요구할 가능성이 있다.
 - 후기단계: 운영 인허가 전에 폐기물 정치 및 회수기술의 T&D
 - 운영단계: 폐쇄 인허가 전에 밀봉 및 장기 모니터링 기술에 관한 T&D
 - 장기적 모니터링이 가능한 pilot facility에 대한 T&D

4.1.3 대중의 이익 측면

일반 대중은 지하지질에 대하여 친숙하지 못하다. 그런 의미에서 URL은 대중의 이해 증진을 위한 좋은 도구가 될 수 있다. URL을 통하여 지하처분에 대한 방법과 기술을 제시하는 것이 무엇보다도 중요하다. 초기단계에서는 지하 심부의 지질환경이 어떠한고, 처분장 설계와 안전성평가 과정에서 과학이 어떻게 적용되고 있는지를 보여 줘야 한다. 중기 단계 이후부터는 개발된 처분개념이 장기간에 걸쳐 과학적으로 안전하다는 것을 입증해야 한다.

4.2. Generic URL에서의 연구 필요성

SS-URL 이전에 굳이 PBG-URL을 거쳐야 하느냐에 대한 답은 “그렇다”는 것이다.

다만, 기술적으로 상당히 집중적인 추진이 필요하다는 것을 강조한다. 실제 현안과제가 될 만한 것들에 초점을 맞추어 추진해야 하는 이유들을 들자면 다음과 같다.

- Generic 설계와 안전성평가에 필요한 것들의 대부분은 이미 세계 여러나라의 URL을 통하여 확보되었다고 본다. URL은 지하수유동이라던가, 용질이동, 굴착이 암반에 미치는 영향 등에 관한 현안과제들에 대하여 성공적으로 시험 및 실증되고 있다. 다시 말하면 URL을 통하여 공부하는 기간은 대부분 끝났다는 것이 일반적인 시각이다. 이러한 관점에서 본다면 아직까지도 해결되어야 할 현안과제들을 대략 정리해 본다면 다음과 같다.
 - 점토질암과 같은 저투수성암과 단열망이 회박한 암반을 통한 개스이동
 - 점토질 완충재와 뒷채움재 물질의 시간 종속적이고 공간적인 변수 문제
 - 터널을 통한 지하수유동에 있어서 EDZ와 처분공 완충재 및 뒷채움재의 중장기적 거동
 - 단열암반의 경우 channelling flow를 해석하는 기술은 안전성평가의 핵심 매개변수이다.
 - 단열암반의 경우 콜로이드는 암반 자체의 특성에 의해 효과적으로 여과된다는 것에 대한 실험적 증거의 제시
 - 시멘트물질로 이루어지는 처분장에서의 high pH plume이 암반특성과 핵종이동에 미치는 영향
- RDP에서 URL의 역할은 곧 처분시스템의 성능확보와 이와 관련한 일련의 과정 및 결과에 대한 신뢰 구축과 전문기술을 증진시키는 것이다. 그러나, 기술적인 현안과제들을 해결하는 것이 능사는 아니다. 역사적으로 URL은 1980년부터 1990년대에 걸쳐 Stripa, Whiteshell, Grimsel, Mol 등에서 연구팀과 전문기술 구축에 초점이 맞추어져 있었다. 이를 통하여 암반과 지하수 시스템을 조사 및 평가할 수 있다는 신뢰를 증진시켰다. URL의 lifetime은 처분장의 운영기간과 비슷하다. 이것은 곧 과학자의 양성과 기술발전을 위한 영구적인 훈련장으로 활용할 수 있다는 의미이다. 또한, 처분업무 이외의 다양하고 여러 관련 분야가 참여하는 공동 프로젝트를 추진할 수도 있다. 사업자는 항상 처분장개발 프로그램의 핵심 현안과제들에 노출되어 있기 때문에 처분장 개념에 대한 생각과 시험 등은 최첨단 수준으로 추진되어야 한다. 결국 자국 고유의

다중방벽개념의 처분시스템의 성능과 안전성에 대한 입증의 전제되어야 상용화가 후속 이행될 수 있다는 기본적인 접근방식에 대한 이해이다.



5. URL의 역사 및 교훈

5.1 URL의 역사

URL의 역사는 40여년 전으로 거슬러 올라간다. 1958년부터 1972년까지 미국 Kansas의 Lyons에 있는 "Project Salt Vault"가 수행되었다. ORNL Review에 의하면, 1960년대 초반에 ORNL 과학자들은 실제 처분모의시험을 시도하였으나 1972년 캔사스주 당국의 반대로 중지되었다. 현재 미국정부는 네바다의 유카산 최종처분장 인허가 과정에서 또 한번 시련을 겪을 것으로 보인다.

1980년대에 들어 Generic URL이 태동하였다. 이러한 시도는 어찌 보면 처분프로그램에 비하여 상대적으로 조기에 착수된 것처럼 보인다. 기본적으로 Generic URL은 방사성폐기물 처분연구와 기술개발, 지하지질 조사 및 해석기술 증진을 위한 훈련장의 목적으로 한다. 앞에서 언급한 대로 미래 처분장으로 사용될 목적을 가지고 있지 않다.

초기의 URL은 주로 폐광산에서 이루어졌다. 폐광산을 활용하는 것의 장점은 접근성이 용이하고, 비용이 절감될 수 있으며, 기존의 조사자료를 충분히 활용할 수 있다는 것이다. 단점은 지질구조가 대부분 처분연구에는 적합하지 않으며 초기상태의 지질조건이 오랜 기간 동안 상당히 뒤틀려 교란되어 있고, 외래 방문객 (혹은 일반 대중)들로 하여금 친밀감을 들게 하기에는 역부족이라는 점이다.

OECD/NEA 국제공동연구로 추진된 Stripa Project는 1980년부터 1992년까지 수행되었다. 여기에는 캐나다(AECL), 핀란드(TVO, IVO), 프랑스(ANDRA), 일본(PNC), 스페인(JEN), 스웨덴(SKB), 스위스(Nagra), 영국(UK DoE), 미국(US DOE)이 참여하였다. 연구대상 암종은 핀란드, 스웨덴 및 노르웨이와 러시아에 걸친 스칸디나비아반도 대부분을 차지하는 스칸디나비아 순장지(shield)를 구성하는 결정질심성암인 화강암을 대상으로 하였다.

1980년대의 SS-URL은 최근 IAEA에서 On-site URL과 동일한 용어로 제 2세대 URL로 정의하고 있다. 벨기에는 연성 점토암에 대한 SS-URL 프로젝트를 1985년부터 수행해오고 있다. 실제로는 1974년 벨기에 지질연구소가 Boom clay를 후보암종으로 선정할 시점부터 착수된 것이다. 1996년부터 EIG PRACLAY(joint venture

SCK/CEN-NIRAS/ ONDRAF)가 설립되었다. 2003년 현재 PRACLAY 갱구를 굴착하고 THM 시험을 진행 하고 있다. 2008년까지는 가열·냉각 단계의 시험을 진행하고 2010년 최종 해체 및 해석이 계획되었다. Stripa mine과 HADES URL를 비교해 보면 다음의 표 1과 같다.

표 1. Stripa와 HADES 프로젝트의 비교

	Stripa mine	HADES URL
Location	Lindesberg, Sweden	Mol, Belgium
Geology	Granite, fractured media	Plastic clay, porous media
Facility type	Generic, abandoned mine galleries	Site-specific, purpose-built
Depth	350-400m shaft access	230m shaft access
Baseline condition	Disturbed 500 yrs of mining operation	Ambient
Operation since	1977(1980 as Stripa Project)	1980
Main operator	SKB(OECD/NEA Intl. Project)	SCK/CEN(later EURIDICE)
Participating countries	Canada, Finland, France, Japan, Spain, Sweden, Switzerland, UK, US	France, Germany, Japan, Spain
Present status	Project completed in 1992	Operational PRACLAY, RESEAL....

1990년대에 들어 기존의 R&D 차원에서 실제 실행 프로그램을 적용하려는 변화가 일기 시작했으며, URL의 과거, 현재, 그리고 미래는 표 2과 같이 정리할 수 있다.

표 2. URL의 과거, 현재, 그리고 미래

Period	Location Geology	Usual Name	URF Type Depth(m) Main access	Main operator	Type of work
1965-1968	Lyons, Kansas USA Bedded salt	Project Salt Vault	G (230) Salt mine galleries	ORNL	TM
1965-1997	Asse mine, Germany Domed salt	Asse Salt Mine	G (490-950) K/Salt mine galleries	GSF	TCHMRD
1976-1992	Stripa mine, Sweden Granite	Stripa	G (360-410) Fe-mine galleries	SKB OECD/NEA International	TCHM
1978-1983	Nevada, USA Granite	Climax	G (420) Mine galleries	USDOE	D
1978-1983	Nevada, USA Tuff	G-Tunnel	G (>300) Tunnel	USDOE	THM

Period	Location Geology	Usual Name	URF Type Depth(m) Main access	Main operator	Type of work
1979-1990	Fanay, France Granite	Fanay	G U-mine galleries	IRSN	TCHM
1980-	Mol, Belgium Plastic clay	HADES URL	S (230) Shaft	EIG EURIDICE International	TCHMRD
1980-	Konrad, Germany Shale	Konrad	S (800-1,300)	BfS DBE	CHM
1981-	Morseleben, Germany Salt dome	ERAM	S (525) K/Salt main L/ILW rep.	BfS DBE	D
1982-	New Mexico, USA Bedded salt	WIPP	S (655) TRU rep. Shaft	UEDOE/CBO	TCHMRD
1983-	Grimsel Switzerland Granite	GTS	PBG (450) KWO Dam tunnel	Nagra International	TCHMD
1984-	Pinawa, Canada Granite	URL	PGB (240-420) Shaft	AECL International	TCHMD
1986-	Tono Mine, Japan Granite+Sedimentary	Tono	G (130)U-mine galleries	JNC International	CHM
1988-1998	Kamaishi Mine, Japan, Granite	Kamaishi	G Fe-mine galleries	JNC International	CHM
1990-	Tournemire, France Shale	Tournemire Research Tunnel	G (250) Railway tunnel test galleries	IRSN	CHM
1990-	Aspo, Sweden Granite	HRL	PBG (460) Ramp/spiral	SKB International	TCHMD
1992-	Olkiluoto, Finland Granite	Research Tunnel	G in (60-100) LILW rep.	POSIVA	HMD
1993-	Nevada, USA Tuff	ESF Yucca Mt.	S (300) Ramp	USDOE	TCHMD
1995-1999	Pecs, Hungary Shale	Pecs	G (1,000) U-mine galleries	PURAM	Characteriza tion
1995-	Mont Terri, Swiss Shale	Mont Terri	G (400) Road tunnel test galleries	SNHGS International	TCHMD
1996-	Mizunami, Japan Granite	MIU	PBG (1,000) Shaft	JNC International	U n d e r construction
1997-	Nevada, USA Tuff	Busted Butt Yucca Mt.	PBG (100)	USDOE	CHM
1997-	Gorleben, Germany Domed salt	Gorleben	S (900) Shaft	BfS DBE	Characteriza tion
2000-	Bure, France Shale	Bure URL	S (450-500) Shaft	ANDRA	U n d e r construction
2000-	Horonobe, Japan Sedimentary	Horonobe	PBG (500) Shaft	JNC	U n d e r construction

Period	Location Geology	Usual Name	URF Type Depth(m) Main access	Main operator	Type of work
2004-	Olkiluoto, Finland Granite	ONKALO	S (400-600) Ramp	Posiva	U n d e r construction

* Facility type

G : generic URL of pre-existing tunnel

PBG : purpose-built generic URL

S : URL specific to the site

* Type of work

T : Thermal

C : Chemical

H : Hydrogeological

M : Mechanical

R : Radiation

D : Demonstration

현재에 이르러 URL 실증시험의 일반적인 경향은 기본적인 타당성과 기초적인 지질자료 축적의 중요성은 점차 감소되어 가고, 다음과 같은 내용의 비중이 증가하는 추세에 있다.

- 방법론의 최적화
- 복합현상의 진행과정의 이해에 필요한 특정 자료의 수집과 복합적인 모델의 검증
- 핵심적인 안전성평가모델(SS-URL보다는 Generic URL의 경우)의 시험
- 장기적 안정성과 관련된 현안과제의 연구, 특히 지하 심부의 화학적 조건 등과 관련된 현안과제

5.2 해외 URL의 주요 연구 성과

- 심부지질특성조사 기술의 개발 및 비교
 - 환기시험, 간섭공 수리시험 및 탄성파탐사, 시추공 레이다, Stripa에서 validation drift 시험
 - 캐나다 URL에서 Extensometer 개발
 - WIPP에서 brine permeability 시험을 위한 기기 및 시험절차 개발
 - Asse mine에서 brine migration 시험
- 부지특성조사에 있어서 지표조사기술의 신뢰도 결정
 - WIPP의 심부 시추공에서 시험된 투수성 결과와 in-situ 결과의 비교
 - Aspö에서 굴착전과 굴착 후 터널에서 확인된 암반특성의 비교
- 심부 지질환경의 보다 많은 정보를 얻기 위한 부지특성조사 전략의 적용

- Olkiluoto 연구터널에서 full-scale 처분공의 결정을 위한 단열조사 및 수리시험
- Grimsel, Tournemire 및 Stripa에서 지구물리조사법의 적용
- 암반에서의 핵종이동 과정에 대한 개념 및 수치모델의 시험 및 개발
 - Grimsel에서 핵종이동 자연현상 연구
 - YM에서 불포화대에서의 이동시험
 - 캐나다 URL에서 용질이동 및 확산시험
 - WIPP에서 Gas-threshold-pressure 시험
 - Aspo에서 trace retention programme
- 굴착에 따른 영향의 정량화
 - Aspo, Grimsel 및 WIPP에서 EDZ 시험
 - Olkiluoto 연구터널에서의 처분의 굴착방법(발파 및 드릴방식)에 따른 EDZ 연구
- 굴착기술의 시험 및 개발
 - HADES에서 연성 점토암에 대한 드릴방식 굴착기술의 타당성 검증
 - Aspo 및 Grimsel에서 TBM, 드릴방식, 발파방식의 비교
 - Asse에서 심부 시추기술 검증
 - Olkiluoto에서 처분기술의 성능 연구
- 방사성폐기물의 정치에 의한 영향(열, 핵종누출, 역학적 영향 등) 모사
 - HADES에서 점토암을 대상으로 열 및 방사능 영향 연구
 - Asse에서 처분공의 열적 특성 모사
 - Stripa, YM, WIPP 및 Grimsel에서 heater test
 - WIPP에서 열적-구조적 상호작용 시험
 - 캐나다 URL에서 열적-역학적-수리적 시험
- 장기적 현상, 폐쇄후 현상, 부식, 암반역학적 안정성 등
 - HADES에서 처분개념의 실증
 - WIPP에서 물질 경계에서의 상호작용 시험
 - Asse에서 뒷채움재 및 물질거동 연구
 - Grimsel에서 콜로이드 및 핵종 자연현상 시험

- EBS 실증연구
 - Stripa에서 처분공 밀봉 및 완충재 시험
 - Asse에서 HLW 처분용기 처분공 밀봉기술 개발
 - 캐나다 URL에서 완충재 및 처분용기 시험
 - WIPP에서 소규모 밀봉거동시험
 - HADES에서 처분장 밀봉 시험
- 대규모 처분 공학 실증
 - Grimsel에서 full-scale EBS 시험 (FEBEX)
 - 스웨덴 HRL에서 처분용기 회수 시험 및 실증
 - 스웨덴 HRL에서 prototype 처분장 실증



5.3 URL의 교훈 및 FAQs

- 국가별 URL 개발 전략 수립 단계에서 고려해야 할 사항
 - 자국의 처분개념을 개발하고 실증하기 위해 URL이 필요한가?
 - 필요로 하는 자료가 다른 국가의 URL에서 수행된 연구결과의 협력을 통하여 얻을 수 있는가?
 - 필요로 하는 연구와 시험을 만족시키기 위하여 지하시험시설을 이용하는 것이 가장 효율적인가?
 - 비용편익 측면에서 기존의 시설을 Generic URL로 개발하는 것이 가능한가?
 - 계획 중인 URL 시설이 성공적으로 완료된다면, 국가의 전체적인 방사성 폐기물 처분 프로그램 사업의 연속성을 보장할 만큼 충분히 기여하게 되는가?
- SS-URL 개발의 적기에 대한 고려 사항
 - 필요로 하는 자료가 SS-URL을 통해서만 얻어질 수 있는 것인가?
 - 처분시스템이 교란되기 전에 필요로 하는 모든 자료가 수집되고 있는가?
 - 기술적, 논리적, 규제 측면의 모든 필수 조건들이 충족되는가?
 - 처분장을 건설하기 전에 안전성을 full-scale로 검증할 프로그램이 준비되어 있는가? (OECD/NEA, 2001)
- 인문사회적 측면의 고려 사항
 - URL에서 얻어진 자료와 정보 중에 어느 정도가 실제 처분부지에 적용되는가?
 - URL 부지의 조건이 양호한 경우라도 미래에 최종처분장으로 절대 지정하지 않을 것이라고 어떻게 보장할 것인가?
 - 방사성폐기물의 지층처분 프로그램에 있어서 과연 URL 시설이 반드시 필요한 것인가?

6. 요약

URL 프로젝트를 추진하기 위해서는 자국의 기술수준과 세계 수준과의 비교를 거쳐 철저히 기술적 신뢰성 확보, 국민이해 증진 및 비용편익 측면에서 타당성을 갖추어야 한다.

URL 프로젝트 수행 이전에 가능하면 기존 해외시설을 이용하여 국제수준의 전문 기술을 확보하는 것이 바람직하다. 자국 내 최종처분장 계획이 결정되면 SS-URL을 RDP에 반영하는 것이 필수적이다.

현재 URL 실증시험의 일반적인 경향은 기본적인 타당성과 기초적인 지질자료 축적의 중요성은 점차 감소되어 가고, 처분방법의 최적화, 복합현상 진행과정의 이해에 필요한 특정 자료의 수집과 복합적인 모델의 검증, 핵심적인 안전성평가모델의 시험 및 개발, 지하 심부의 화학적 환경 등과 같은 장기적 안정성과 관련된 현안과 제들, 그리고 장기적 성능 검증을 요하는 단위 시스템에 대한 long-term 실증시험 등이 관심의 대상이 되고 있다.

제 3 장 스웨덴 Äspö Hard Rock Laboratory 현황

1. 추진 배경

SKB는 R&D Programme 86을 기획하는 과정에서 효율적인 방사성폐기물 관리사업 수행을 위하여 당시의 기술적 수준에 입각하여 Hard Rock Laboratory라는 지하연구시설을 제안하게 되었다. 이러한 제안은 전술한 R&D Programme 86에 포함되었으며 검토기관으로부터 매우 긍정적인 반응을 얻게 되었다 (SBK, 1989).

Hard Rock Laboratory (이하 HRL)의 건설을 제안하게 된 가장 중요한 이유는 다음과 같다.

- 지표지질조사와 지표에서 이루어지는 시추조사 결과를 지하에서 확인
- 수직구 (shaft sinking)와 동굴에서 수행되는 구체적인 상세 부지조사 방법의 시험
- 실제적인 지하환경에서, 그리고 큰 규모에서 안전성평가에 중요한 조건들, 예컨대 지하수유동 특성이라든지 용질의 복합이송특성과 같은 특성들을 실제 조사할 수 있는 기회
- 실제적인 지하환경에서, 그리고 큰 규모에서 공학적방벽과 천연방벽(암반) 간의 상호 복합반응을 장기간 시험하고 그 현상을 실증
- 암반공학 관련 굴착 기술, 폐기물 취급 기술 및 뒷채움 기술 등의 방법 개발

이러한 시설구축 동기는 상당히 심도 있는 검토를 거쳤다. 당시까지만 해도 SKB는 상용 처분장 후보부지에 대한 조사를 지표조사와 시추조사에 의존하고 있었다. 더불어서 Stripa 광산 동굴 안팎에서 에서 수행한 여러 가지 조사 경험을 가지고 있었다. 따라서 지하연구시설에서 미래 처분장 심도까지 내려가면서 수직구와 동굴에서 체계적인 조사를 거쳐 지표지질조사와 시추조사 결과를 확인할 필요가 있었다. HRL의 건설은 이러한 확인과 검증을 위해 더할 나위없는 좋은 기회를 제공해 주게 되는 것이며, 지하에서의 기술적 검증 결과는 어떤 처분장 후보부지에 대한 상세 조사가 이루어지기 이전이더라도 그 후보부지가 최종처분장으로 적합할 것인지에 대한 판단을 가능케 해준다는 것이다. 이렇게 함으로써 처분장 후보부지에 대한 기술적이고 과학적인 수용을 이끌어내게 될 의사결정 과정을 촉진시키게 되는 것이

다.

1990년대 후반에 수행할 것으로 계획한 처분장 후보부지에 대한 상세 조사는 처분장 예상 심도에서의 수직구와 동굴에서 암반에 대한 연구를 포함하기로 하였다. 이 조사에는 후보부지로 선정된 하나의 부지가 최종처분장으로 적합한 지에 대한 최종적인 결정을 제공하게 될 것으로 예상되는 각종 연구와 분석 행위를 포함하게 될 것이다. 이러한 연구들은 최종처분장 후보부지에 대한 장기적인 안전성평가에 필요한 충분한 자료를 제공하기도 하는 것이다. 안전성평가는 부지선정 과정에 포함되어야 할 것이며 후보부지가 Act on Nuclear Activities에서 정하는 요건을 만족시킨다는 것을 보여야 하는 것이다. 이러한 여러 가지 조사를 수행하는데 필요한 기술과 방법들의 일부분은 Stripa 광산 프로젝트에서 개발되고, 시험되어 왔다. 그러나 Stripa 광산은 폐광이므로 그 곳에서 모든 방법들을 개발하고 시험한다는 것은 불가능했다. 이전에 교란되지 않은 지역에서의 시험들은 실제 처분장 환경에 적용되기 전에 새롭게 개발되거나 개선될 수 있는 기회를 추가적으로 제공하기도 한다. 실제 처분장 후보부지에서는 파괴시험을 수반하는 상업적으로 개발하는 행위와 같은 방법을 적용하는 것은 타당하지 않다. 따라서 이러한 조사기술과 방법의 개발 행위는 HRL과 같은 연구용 시설에서 수행하는 것이 무엇보다도 중요한 것이다.

동시에 최종처분장에 대한 장기적인 안전성평가에서 가장 핵심적이면서 복잡한 문제는 단열 암반에서의 지하수유동 문제와 지하수에 용해된 물질의 이송에 관한 현상을 규명하는 것이다. 이에 관한 막대한 노력이 지속되어 왔고 앞으로도 계속될 전망이다. 이와 관련하여 당시에 수행되고 있던 몇 가지 중요한 연구를 들면 다음과 같다.

- 단열암반의 투수성에 관한 많은 시험이 모든 연구 부지에서 장심도 시추공을 이용하여 수행되고 있다.
- 비흡착성 추적자를 이용한 추적자시험이 Studsvik, Finnsjön, Stripa 및 Hylte 부지에서 수행되고 있으며, 실내에서는 흡착성 추적자를 이용한 시험을 수행하고 있다.
- 지하수를 포함하는 단열대에 관한 연구는 레이더 계측, 기타 지구물리탐사 방법을 통하여 Stripa와 다수 연구 부지에서 수행되고 있다.
- Poço de Caldas, Cigar Lake 등의 부지에서는 지질학적 시간 척도에서 자연

방사성 물질과 화학적으로 이와 유사한 물질의 거동에 관한 자연유사연구가 진행되고 있다.

- 상기의 조사, 시험 행위와 더불어 실내시험과 부지조사에 얻어진 자료에 대한 체계적인 해석을 위한 부지특성모델과 수학적 모델의 개발에 많은 노력이 이루어지고 있다.

상기의 모든 연구 결과들은 향후에 여러 부지에서 얻어진 자료들을 종합적으로 해석하고 그 결과를 제시하는데 기여하는 것으로 접근하였다. 이러한 종합적인 해석의 시도는 Stripa project의 3단계에서 이루어진 바 있었다. 즉, 예비조사가 이루어지지 않았던 Stripa 화강암의 125 x 125 x 50m 규모의 암반 블록에 대하여 부지특성평가와 검증시험(SCV)이 수행된 바 있다. 최종처분장의 부지선정에 앞서 이와 유사한 종합적인 해석의 시도가 장기 안전성평가에 필요한 광역 규모에서의 시험 자료를 취득하기 위해 시도될 것이다. 이러한 광역 규모에서의 시험은 HRL 시설에서 수행될 수 있는 것이다.

SKB가 1990년대 중반에 상업용 최종처분장의 기본설계를 수행하는 것으로 계획을 잡을 때, 처분시스템에 포함되어야 하는 각각의 부분들은 실규모에서 시험과 실증을 거쳐야 할 것이다. 그 중에서도 특별히 중요한 것은 가능하다면 실제의 처분장 환경 조건과 유사한 곳에서 공학적방벽과 천연방벽 간의 상호 작용을 시험하고 검증하는 것이다. 이것은 근본적으로 실규모 또는 대표되는 척도(규모)에서 장기간의 시험과 실증을 시도하는 것을 말하는 것이다. 이 과정에서는 파괴시험이 수반되기도 하며, 이것은 HRL 시설의 구축이 요구되는 또 다른 동기이기도 하다.

최종처분장의 건설에 앞서 시설의 진입동굴과 저장 갱도의 건설에 필요한 굴착방법과 기술을 개발하고 검증하는 것은 폐기물을 어느 장소에 처분할 것인가를 정확히 결정하고, 지하에서 폐기물을 어떻게 취급할 것인가, 원하는 위치에 폐기물을 적치하고, 뒷채움과 밀봉은 어떻게 할 것인지를 결정하는데 필요하다. 이러한 모든 행위는 안전성 요건을 만족시키기 위하여 문서화된 품질 형태로 수행되어야만 한다. 이러한 많은 기술들이 HRL에서 개발되고 시험될 수 있다. HRL 시설을 구축하고 그곳에서 관련 기술들을 개발하고 검증함으로써 품질 요건을 만족시키기 위한 좋은 기회를 갖게 되는 것이다.

2. 시설 개요

2.1 시설의 목적

HRL의 목적은 미래 SKB에서 계획하는 사용후핵연료 최종처분장의 예상 심도의 환경과 유사하고 실제로 비교란 환경에서 처분 관련 기술들을 연구하고 개발하는 기회를 제공하는 것이다. SKB의 연구개발 품질에 대한 요구 수준은 매우 높기 때문에 HRL에 대한 기대치는 장차 이 시설이 고준위폐기물 처분 시설의 건설과 관련하여 국제적으로 선도적인 연구개발 센터가 되어야 한다는 것이다.

가. 주요 목표

HRL에서 이루어지는 R&D 행위는 다음과 같은 주요 목표를 갖는다.

- 심지층 처분장 안전성 확보 및 건설을 위한 처분장 모암의 특성을 평가 (처분 적합성 평가) 하는데 적용되는 다양한 방법의 품질과 적절성에 관한 시험과 검증
- 심지층 처분장의 계획, 설계 및 건설 등과 관련하여 국지적으로 고유한 암반 물성을 갖는 부지에 처분장을 적용하기 위한 방법의 수정, 보완 및 시연
- 심지층 처분장의 안전성 확보와 안전성평가의 품질 및 신뢰성 확보에 필수적인 자료와 정보의 수집 (이 목표는 SKB의 모든 연구 프로그램의 일반적인 목표이기도 함)

나. 단계 목표

SKB는 사용후핵연료 최종처분장 후보부지 선정 프로그램을 고려한 연구개발 프로그램을 충족시키기 위하여 다음과 같은 HRL에서의 단계별 연구개발 목표를 수립하였다.

□ 1990년대 중반 사용후핵연료 최종처분장 부지선정에 앞서 HRL에서 다음의 연구

개발 내용을 수행

- **1 단계:** 예비부지조사방법의 검증 (verify pre-investigation methods)
 - 지표에서의 조사와 시추조사를 통하여 처분장 심도의 안전성과 관련된 중요한 암석의 특성들을 충분히 제공할 수 있다는 것을 확인하고 검증
- **2 단계:** 상세부지특성평가 방법의 결정 (finalize detailed characterization methodology)
 - 상세부지특성평가에 수반되는 암석과 암반의 특성평가에 적용하는 방법과 기술들의 보완과 검증

□ 2000년 초반에 제출하기로 계획한 최종처분장 시스템과 부지선정 프로그램의 기반인 안전성평가의 최적화에 필요한 연구개발 수행

- **3 단계:** 지하수유동 및 핵종이동에 관한 모델의 시험 (test models for groundwater flow and radionuclide migration)
 - 처분장 예상 심도에서 지하수유동 및 핵종이동을 해석하는 모델을 대규모로 시험하고 보완

□ 2010년에 착수기로 계획한 최종처분장 건설을 준비하기 위하여 처분장 예상 심도에서 그리고 처분장 대표 환경 조건 하에서 필요 기술을 개발

- **4 단계:** 건설 및 운영 방법의 시연 (demonstrate construction and handling methods)
 - 처분장 설계, 건설 및 운영과 관련된 고품질의 방법론과 기술의 개발을 보장하기 위한 시험, 실증 공간의 제공
- **5 단계:** 처분장 시스템의 주요 구성 요소의 시험 (test important parts of the repository system)
 - 심지층 처분시스템의 장기 안전성에 핵심적인 다양한 항목에 대하여 실험 규모에 상응하는 시험, 조사 및 검증

상기의 HRL에서 이루어지는 시험들은 정부로부터 처분장 건설 승인을 얻는 필요한 자료를 제공할 수 있도록 시간과 공간 측면에서 충분한 연구개발 범위를 수행할

수 있어야만 한다. 따라서, 일부 시험들은 1990년대 중반에 착수되어야만 한다.

다. 목표에 대한 설명

HRL의 주요 목표는 사용후핵연료 최종처분장 건설에 앞서 다음과 같은 3 가지 유형의 기술 능력을 시험하고 보완하는 것이다.

- 처분장 부지특성평가 기술
- 고유의 지질학적 특성을 갖는 부지에 처분시스템을 적용하는 방법론
- 처분장 부지의 안전성 성능을 평가하기 위한 방법론

후보부지 선정단계별로 중요하게 다루어지는 암반의 특성은 각기 다르다. HRL에서 수행되어질 부지특성평가 방법들의 품질에 관한 시험들은 예비부지조사 자료를 기초로 한 처분장 예상 심도에서의 지하수유동과 지화학 특성을 결정할 수 있도록 초기 단계에서 기여하게 될 것이다. 의사결정 과정이 진행됨에 따라, 그리고 예측 모델과 안전성평가가 좀 더 상세하게 보완됨에 따라 정밀한 정보에 대한 특정 요건들이 만들어질 것이다.

□ 1 단계: 예비부지조사방법의 검증

후보부지에 대한 상세부지특성평가 착수 이전에, 이들 후보부지들은 다양한 관계 기관으로부터 승인을 얻어야만 한다. 이러한 승인 과정에 필요한 자료들은 1992~1994에 계획된 예비부지조사의 결과들로 구성될 것이다.

예비부지조사 프로그램은 다른 무엇보다도 연구부지인 Stripa project와 HRL의 부지조사의 경험에 기반을 두게 될 것이다. 상세부지특성평가의 결정에 앞서 예비부지조사의 정밀성을 명확히 따져 보는 것이 중요하다. 이러한 기술적 검토는 HRL 건설과 연계하여 수행될 수 있다.

부지조사 업무는 여러 단계에 걸쳐 수행되는 반복적인 과정이다. 기존의 지질도 자료에 의한 검토 의견이 우선적으로 반영되어야 한다. 이를 이용하여 예비적인 지질모델을 구축하고 후속되는 조사 단계에서 수정 보완될 수 있다. HRL 부지의 지질특성모델은 이러한 단계별 접근방법에 의해 규모별로 확립될 것이다. 광역규모 부지특성모델은 지체구조적 특성을 반영하고 지하수유동 특성을 이해할 수 있는 중

요한 단열대와 암반의 변위 가능성을 이해하는데 중요한 모델로 사용될 것이다. HRL을 건설하는 규모, 즉, 1km² 내외의 모델은 단열대와 관련하여 처분장을 입지할 지역을 찾는다면, 수직구 등의 위치를 정하는데 필요한 적합한 암반 체적을 확인하는데 적합하다. 100 m² 규모에 대한 모델은 폐기물 처분에 적합한 암반 체적이 가능한지를 확인하는데 적합하며, 10 m² 규모의 모델은 폐기물 주변의 근계영역을 평가하는데 이용될 수 있다. 그리고 수 미터 또는 그 이하 규모의 암반블럭에 대한 특성모델은 암석과 핵종 사이의 화학적 상호반응에 관한 연구, 소위 동굴 주변의 손상대 (excavation disturbed zone)에 특성과 지하수 흐름에 관한 연구에 중요하다.

지표조사와 시추조사로 이루어지는 예비조사는 이러한 현안문제 해결을 위한 전반적인 자료와 정보를 제공할 수 있다. 터널과 수직갱도에서 특별한 조사가 수행되는 상세 부지특성조사에서는 이러한 초기의 이해수준을 상당한 수준으로 제고시킬 수 있다. 예비조사 자료에 기반을 두고 이루어진 평가 결과가 이후의 상세부지특성평가에 도출되는 중요한 결과와 크게 다를 바 없다는 것을 보여주는 것이 중요하다.

예비조사 방법의 검증 필요성은 이후의 상세 조사계획을 수립하고 이행방법을 결정할 때 참고가 될 내용들에 대한 신뢰성에 우선적으로 관련된다. 상세 부지평가와 마찬가지로 이러한 예비조사방법의 검증 과정 역시 최종처분장의 건설에 매우 중요한 것이다.

□ 2 단계: 상세부지특성평가 방법의 결정

상세부지특성평가 과정에서는 필연적으로 자연 지하수 조건의 변화를 초래한다. 따라서 중요한 자료는 동굴과 수직구 굴착 이전에 취득하는 것이 무엇보다도 중요하다. 상세조사는 완벽하게 이행되어야 하며 체계적인 형태로 문서화되어야만 한다. HRL 시설의 예비조사와 건설 단계에서는 실제 처분장 심도의 환경 조건에서 상세 부지특성평가 절차와 방법론을 개발하고, 시험할 수 있는 특별한 기회를 가질 수 있다. HRL 시설은 예비조사 단계에서 이루어진 안전성평가와 관련된 이해도의 제고 수준을 검증하게 될 것이다.

□ 3 단계: 지하수유동 및 핵종이동에 관한 모델의 시험

정부와 관계기관으로부터 승인을 얻어야 할 부지선정 프로그램 수립을 위해서는 최종처분장의 장기적인 안전성을 입증해야 하는 것이 중요하다. 장기적인 안전성 평가 행위에는 후보부지의 지하수유동에 관한 이해 수준을 실증할 것을 반복적으로 요구한다. 후보부지 내에서 폐기물의 처분 위치, 공학적방벽의 두께, 다양한 핵종 누출 시나리오와 최적의 방법에 의한 처분장의 밀봉과 폐쇄 등의 결정에 이러한 이해 수준이 필요하게 된다. HRL 시설은 지하수와 지하수에 용해된 물질들이 어떻게 격리된 폐기물 쪽으로 이송하고 폐기물로부터 어떻게 핵종이 누출되어 생태계 쪽으로 이송되는 지를 설명하는 다양한 이론적 모델들을 실제적으로 적용해 볼 수 있는 기회를 제공하게 된다.

□ 4 단계: 건설 및 운영 방법의 실증

최종처분장은 많은 여러 가지 부분들로 구성된다. 예를 들면, KBS-3 처분개념은 수 천 개의 처분용기와 이들을 각각 둘러싸는 고밀도 벤토나이트, 그리고 처분공으로 구성된다. 각기 다른 구성 요소(사용후핵연료, 처분용기, 벤토나이트, 암반)는 처분시스템이 안전성을 보장하도록 상호 작용한다. 기타 다른 중요한 구성 요소로는 수직구, 시추공 또는 동굴의 밀봉 플러그, 동굴 주변의 지하수 흐름을 막기 위한 그라우팅재, 그리고 동굴의 뒷채움재가 있다. 이들 모든 구성 요소들은 처분장의 안전성 확보에 요구되는 최소한의 품질조건을 갖추어 설치되어야 한다. 최종처분장 건설 인허가 신청에 앞서 처분시스템의 구성 요소들이 최소한의 품질을 유지할 수 있다는 것을 입증해야 하는 것이 시급한 사안이다.

예비조사와 상세조사 과정을 거치게 되면서 부지특성모델의 정밀도 수준이 점진적으로 향상된다. 이러한 부지특성모델과 이해 수준은 처분장이 건설됨에 따라 더욱 제고될 것이다. 처분장의 건설 단계에서 조사와 시험 자료가 어떻게 취득되고 분석되는 것인지를 시연하는 것이 중요하다. 처분장 건설 전에는 동굴과 처분공을 굴착하는 다양한 방법과 기술, 즉, 천공/말파 또는 전단면 보링(full-face boring) 기술도 실증될 수 있다. 폐기물이 정치될 암반 체적을 선정하기 전에 이루어지게 되는 계측과 분석 방법 역시 실증될 것이다. 최종 처분시스템의 다양한 구성 요소들의 시공에 있어서의 QA/QC 방법들도 개발되고 실규모 수준에서 시험될 것이다.

시연과

□ 5 단계: 처분장 시스템의 주요 구성 요소의 시험

부지특성평가가 양호하게 이루어진 암반에서는 선택적으로 처분개념의 구성 요소들의 성능을 실험규모로 시험할 수 있다. 이러한 시험들은 1990년대 중반에 착수되어 장기간 수행되어야만 한다. 암반과 완충재 간의 상호작용, 예를 들면, 온도 변화의 영향이 평가될 수 있다. 처분장 폐쇄 이전에 시설 밀봉 및 폐쇄기술을 실증하여 인허가 도서에 포함시켜야 한다.

결국 상기의 모든 행위들은 SKB가 선택한 처분개념의 기술적 신뢰성과 수용성 제고에 지대한 기여를 하게 될 것으로 기대한다.

2.2 부지 위치

HRL 시설은 스웨덴 남부의 발틱해 연안의 Oskarshamn 지방자치단체 지역 내 Äspö에 위치한다 (그림 2). Oskarshamn은 수도 스톡홀름에서 남쪽으로 약 350 km 떨어져 있다. 이 지역 내 SKB의 시설로는 HRL 외에 사용후핵연료 중간저장시설인 CLAB과 처분용기 시험시설인 Canister Laboratory가 있다.

SKB는 1986년 가을에 Oskarshamn 지자체의 Simpevarp 지역 내에서 지하연구시설 부지선정을 위한 활동에 착수하였으며, 1988년 말, SKB는 Oskarshamn 원자력발전소 북쪽 2 km 거리의 Äspö 섬 남쪽에 HRL 시설의 입지를 결정하였다.

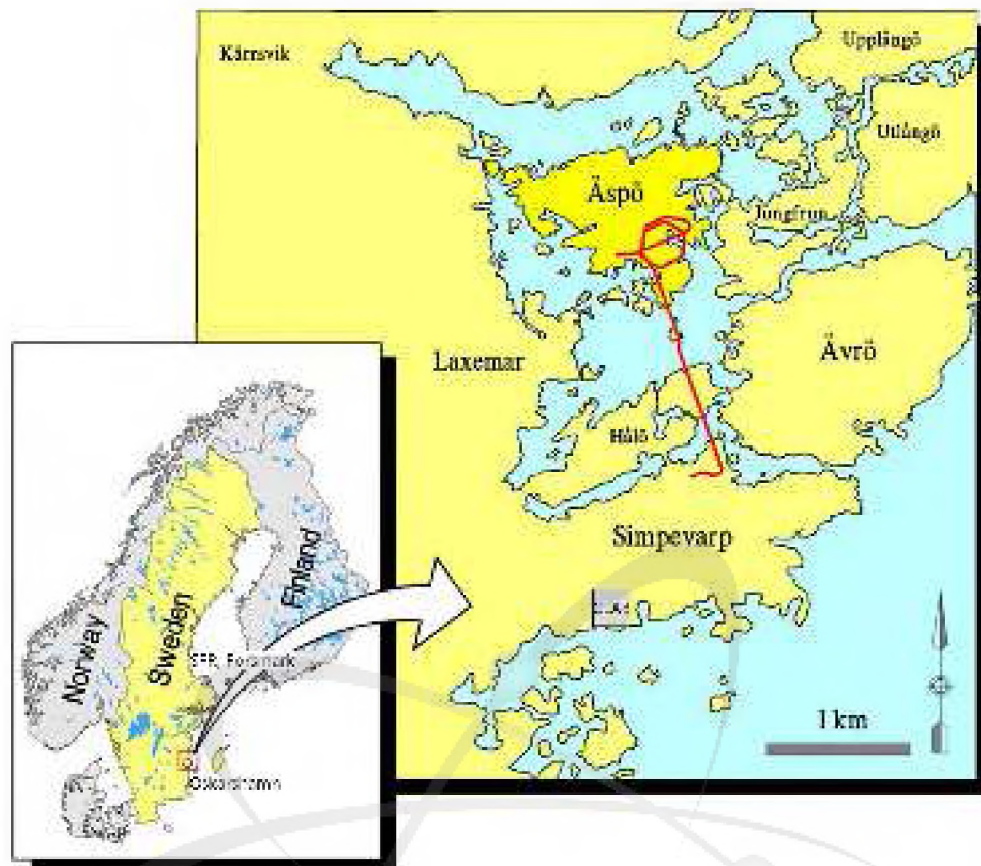


그림 2. Äspö Hard Rock Laboratory 위치

2.3 시설 현황

직경 5 m 동굴이 나선형으로 두 바퀴 돌면서 해수면 하 450 m 심도까지 굴착되었다. 전체 동굴 길이는 약 3,600 m이다. Äspö 섬 남쪽에 지하시설을 건설해야 하는 제약 때문에 동굴 초입부는 Simpevarp 반도에서 시작하여 하향 경사로 굴착하여 첫 번째 나선형 구간인 EL. -330 m 까지는 전형적인 천공/발파 방식으로 굴착되었다. 두 번째 EL.-450 m 심도까지의 나선형 구강은 직경 5 m의 TBM (Tunnel Boring Machine)으로 전단면 굴착되었다. 수직구는 모두 3 개로 구성되며, 직경 3.8 m 규모의 수직구는 연구 및 운전 요원의 시설 출입용이고, 나머지 2 개의 소형 수직구 (직경 1.5 m 규모)는 환기용으로 설치되었다 (그림 3).

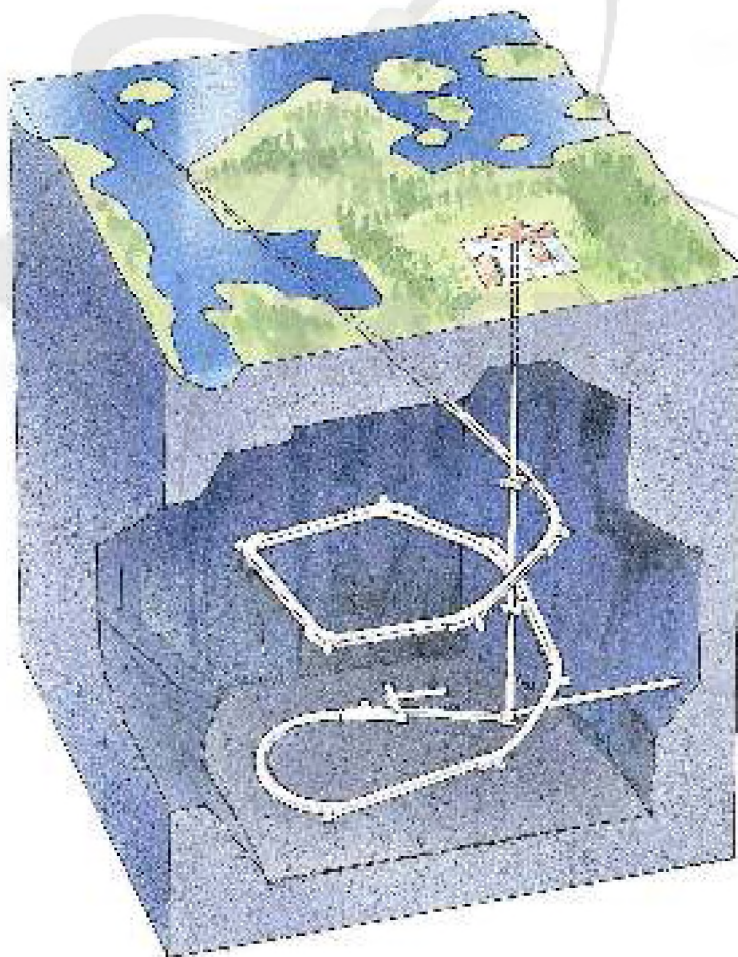


그림 3. Äspö Hard Rock Laboratory의 조감도

3. 시설 운영

3.1 운영조직

SKB의 다른 R&D 업무와 마찬가지로 HRL 시설에서의 행위 역시 주로 외부 대학, 기술연구소, 컨설팅회사, 산업체, 그리고 외부의 자국 또는 해외 연구원들과의 계약에 의해 진행되었다. 이러한 정책은 SKB가 추진하고자 하는 여러 기술적 업무의 품질 측면에서 상당한 경쟁력을 유도할 수 있는 장점이 있다.

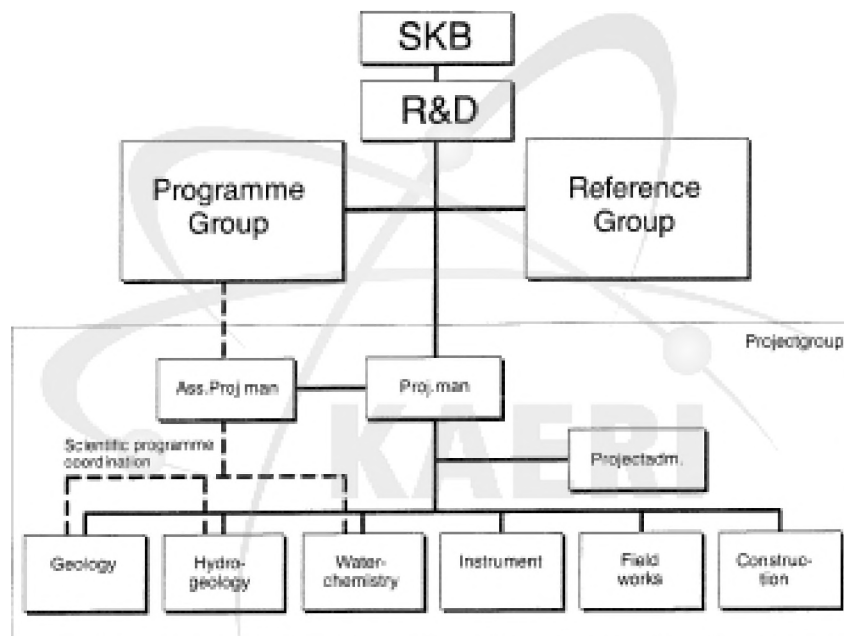


그림 4. HRL 프로젝트 조직

HRL 프로젝트의 수행 조직은 사업이 진행됨에 따라 필요한 경우 개편이 이루어 지겠지만 1989년 사업 초기의 4차 개편안은 그림 4와 같다. 1992년에는 초기의 조직이 강화된 형태로 변경되었다. HRL 프로젝트의 추진 계획은 SKB의 연구개발단 내의 프로그램 위원회에서 결정한다. RD&R 프로그램을 기본으로 하여 차기년도의 수행계획을 다루는 연차별 계획보고서가 발간된다. HRL 프로젝트에는 두 개의 자문그룹이 있다. 과학자자문위원회 (Scientific Advisory Committee)는 연구개발 행위에 대한 자문을 수행하고, 건설자문위원회 (Construction Advisory Committee)는 HRL

시설의 건설과 관련된 자문을 수행한다. 국제협력에 관한 업무는 기술조정부 (Technical Coordinating Board)에서 맡는다.

HRL 프로젝트의 수행은 연구개발단 내 PM이 관리하며, 프로젝트 그룹은 사업 시행의 책임을 갖는다. 지질, 수리지질, 지구화학, 기계설비 및 건설 분야의 책임연구원 (Principal Investigator)은 사업 전반의 프로그램 수립과 제안, 목표 설정, 그리고 결과물 평가 등을 수행한다. HRL 시설 현장 사무실 (Site Office Group)에서는 각종 현장조사 업무를 수행하고 결과물을 일반 대중과 전문가에게 제공하는 역할을 한다. 좀 더 나은 성과를 얻기 위한 하부 프로젝트가 추진될 수도 있다. 본 조직 내에는 프로젝트 관리팀이 있는데 여기에서는 시설 건설과 토목공사의 계획 수립과 공정을 관리한다. 운영 단계에서 수행할 각종 시험 및 실증 프로그램의 수립도 포함한다.

2009년 기술개발본부 내의 Äspö HRL 실과 Repository Technology 실을 병합하여 Repository Technology 단일 조직으로 변경하였다. 이 조직의 역할은 다음과 같다.

- SKB의 사용후핵연료와 중저준위폐기물 관리 프로그램에 의한 기술개발 수행
- KBS-3H 개념의 개발
- Äspö HRL 시설에서의 실증시험 수행
- Äspö HRL 시설의 안전하고 비용 효율적인 운영
- 시설 내방객에 대하여 상세한 홍보활동 수행

Repository Technology 실은 다음과 같이 5 개의 운영 그룹과 행정부서로 구성되어 있다.

- *Geotechnical barriers and rock engineering (TDG)*
- *Mechanical- and system engineering (TDM)*
- *Project and experimental service (TDP)*
- *Public relations and visitor services (TDI)*
- *Facility operation (TDD)*
- *Administration, quality and planning (TDA)*

3.2 시설 관리비

일본 JAEA의 출장 보고자료 (www.jaea.go.jp)에서는 매년 시설 관리비로 약 20백만 SEK/년인 것으로 보고하고 있다. 현재 환율 (170원/SEK)로 환산하면 약 34억원/년이다.

한편, 2006년 5월 당시 Äspö Research Village에는 SKB 직원 55명, 협력회사 직원 45명, 계약업체의 프로젝트 책임자 25명이 상주하고 있었다.

3.3 국제협력

HRL 시설에서의 다양한 실증시험 연구 프로그램에는 많은 국가가 참여하고 있다. 프로젝트 별로 다양한 형태와 그룹을 구성하여 추진하고 있는데, 캐나다, 체코, 핀란드, 프랑스, 독일, 일본, 스위스, 스페인, 한국 등의 자매 기관, 연구소, 대학교와 공동 연구를 하고 있다. 2010년 현재 HRL 프로젝트에 참여하고 있는 기관은 표 3과 같다.

표 3. 2010년 HRL 국제공동연구 및 참여 기관

Projects in the Äspö HRL during 2010	Andra	BMWi	CRIEPI	JAEA	NWMO	Posiva	Kaeri	Nagra	Rawra
Natural barriers									
Long Term Sorption Diffusion Experiment					X				
Colloid Transport Project		X			X				
Microbe Project		X							
Task Force on Modelling of Groundwater Flow and Transport of Solutes	X		X	X	X	X	X		
Engineered barriers									
Prototype Repository		X							
Alternative Buffer Materials	X	X				X		X	X
Long Term Test of Buffer Materials	X	X				X		X	
Temperature Buffer Test	X	X							
KBS-3 Method with Horizontal Emplacement						X			
Large Scale Gas Injection Test	X	X			X	X			
Task Force on Engineered Barrier Systems	X	X	X		X	X		X	X
Participating organisations :									
Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs, Andra, France									
Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie, BMWi, Germany									
Central Research Institute of the Electric Power Industry, CRIEPI, Japan									
Japan Atomic Energy Agency, JAEA, Japan									
Nuclear Waste Management Organisation, NWMO, Canada									
Posiva Oy, Finland									
Korea Atomic Energy Research Institute, Kaeri, Korea									
Nationale Genossenschaft für die Lagerung Radioaktiver Abfälle, Nagra, Switzerland									
Radioactive Waste Repository Authority, Rawra, Czech Republic									

SKB와 Andra, BMWi, CRIEPI, JAEA, NWMO 및 Posiva는 Äspö 국제공동위원회 (International Joint Committee, IJC)를 구성하였으며, 여기에서는 해외 참여기관에서 제안하는 시험연구의 조정 역할을 한다. 이외에도 다음과 같은 Task Force 형태의 연구 조직도 가동되고 있다.

- Modelling of Groundwater Flow and Transport of Solutes
- THMC Modeling of Engineered Barrier Systems

3.4 교육 홍보

SKB 조직 내 대민홍보 및 방문객 지원 그룹의 주요 목적은 SKB 사업에 대한 국민 수용성의 증진에 있다. 이를 위하여 SKB에서는 Äspö 시설 뿐만 아니라 동일 지역 내에 있는 CLAB과 Canister Lab. 시설의 견학도 병행하고 있다 (그림 5). 2009년 한 해 동안 13,129명이 방문했으며, 방문객은 주로 대표성 있는 일반 국민, Oskarshamn 지자체 공무원, 교사, 학생, 전문가, 정치인, 기자 및 외국인으로 구성된다.



그림 5. SKB가 Oskarshamn 지자체에서 운영하는 시설에 대한 교육 홍보
(상: HRL, 좌하: CLAB, 우하: Canister Lab.)

2010년부터는 일반 국민에게는 여름 시즌 (6월 말~8월 말) 중 정해진 토요일에 개방하며, 하루 중 수 차례 HRL 시설의 지하까지 버스를 운행한다.

2007년부터 Äspö 시설에서 수행된 연구개발과 관련된 특별한 강좌가 다음과 같이 해마다 개최되고 있다.

- September 11 - "The Geology Day", activities for the schools and for the

general public.

- September 24 (preliminary date) - "'Researchers Night'", a European Union initiative.
- Autumn - "'The Environmental Day'", in co-operation with the Äspö Environmental Research Foundation.
- December - "'Äspö Running Competition", a yearly event.
- Participate in the planning of the 25 year celebration of Äspö HRL and an international conference in connection with the jubilee.



4. 부지 특성

4.1 부지조사 과정

URL 시설의 입지 과정에는 예비부지조사와 건설 중의 상세지하지질조사 업무로 구성된다. HRL 시설 역시 1986~1990년까지의 예비조사와 1992~1995까지의 상세지하조사가 수행되었다.

가. 예비조사 (1986~1990)

지표에서 이루어진 예비부지조사 목표는 다음과 같다.

- Simpevarp 지역 주변에서 HRL 시설의 입지에 적합한 지역을 선정할 수 있는 지를 결정하기 위한 자료의 수집
- HRL 시설의 예비적인 배치계획 수립에 필요한 자료의 수집
- 동굴과 수직구의 건설과 굴착과정에서의 계측 프로그램의 수립
- HRL 시설 건설로 인한 수리지질학적 및 지구화학적 변화의 예측

예비부지조사는 다음과 같이 3 단계 (부지선정 단계→부지특성평가 단계→예측 단계)로 구분되어 수행되었으며 각 단계별로 수행된 조사내용을 상술한다.

□ 부지선정 단계

- 항공물리탐사 (자력탐사, 방사능탐사, 전자기탐사, VLF 탐사)
- 선구조 분석
- 지표 단열조사 및 지체구조 연구
- 수리지질조사 (인근 CLAB 시설 부지조사 자료 활용)
- 지하수화학조사 (SGU, 스웨덴지질연구소 협조)
- 시추조사 (충격식 시추조사, Äspö 섬 12 공, Ävrö 지역 4 공, Laxemar 지역 7 공)

□ 부지특성평가 단계

- 시추조사 (회전수세식 시추조사, Äspö 섬 지역, Ävrö 지역, Laxemar 지역)
- Äspö 섬 지역에 대한 예비 지질, 수리지질, 지구화학 모델 수립
- Äspö 섬 지역의 상세 트렌치조사, 단일조사를 포함한 상세 지표지질조사 (1:2,000 척도)
- 지질구조 분석 (1:4,000 척도) 및 배경단열 분포특성 (방향성, 밀도, 길이, 간격) 분석
- 자력탐사와 전기탐사 자료를 이용한 Äspö 섬 지역의 국지 지체구조도 작성
- Äspö 섬 남쪽 지역에 대한 지표레이더탐사
- 수리지질조사 (장기 양수시험, 수리간섭시험, 유속시험, 정압주입시험)
- 심도별 지하수화학특성 분석

□ 예측 단계

- 동굴 굴착이 암반에 미치는 영향을 예측하기 위하여 모든 조사 자료의 종합 해석 및 평가
- 심도 500 m까지 충격식 (20 공), 회전수세식 (14 공) 시추조사 및 양수시험 (그림 6)
- 공내 물리검층, 지반응력 계측, 탄성파(굴절법) 탐사
- 진입동굴과 나란한 700 m 길이의 방향제어 시추조사 (그림 7)
- 투수성 단열대 간의 수리적 연결성과 암반의 유동 공극률을 얻기 위해서 비흡착성 단수명 핵종을 이용한 추적자 시험 수행

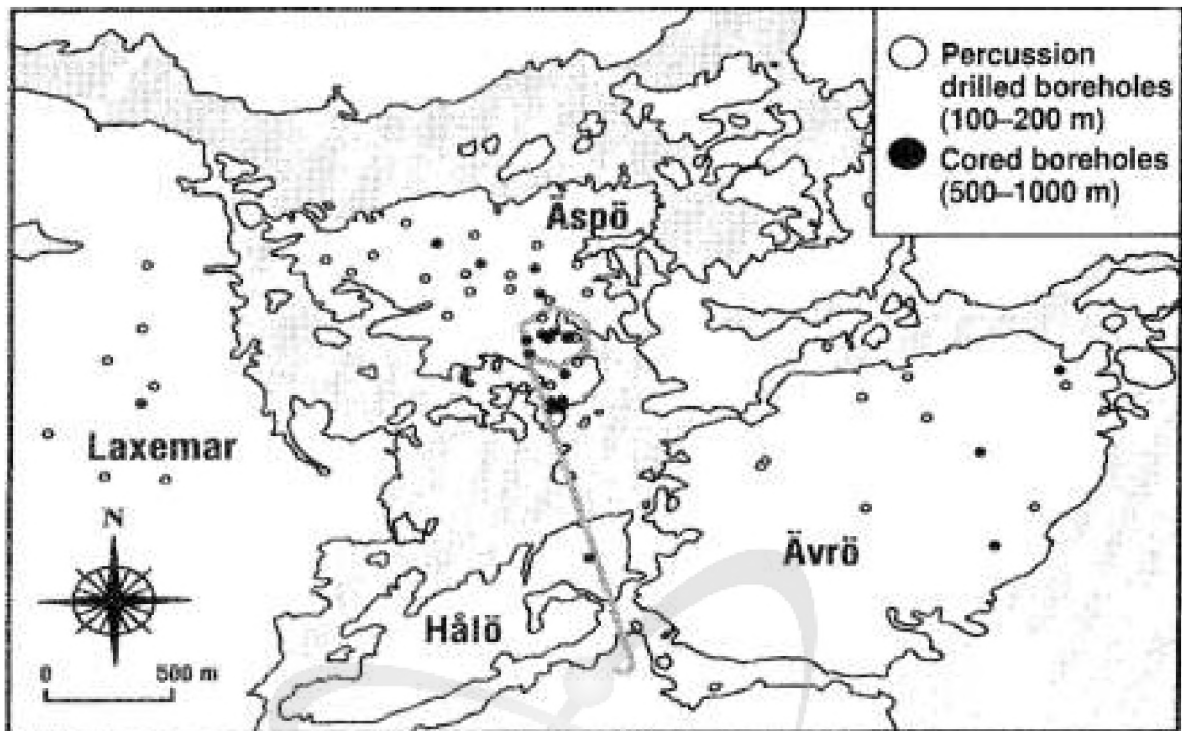


그림 6. 예비부지조사 단계에서의 시추조사 공 위치도

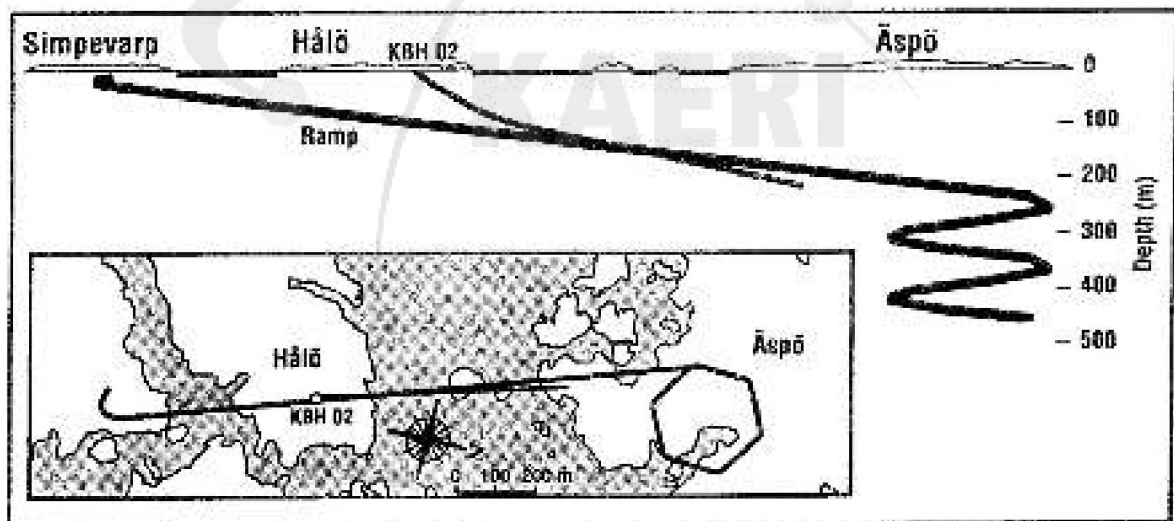


그림 7. 진입동굴과 나란한 방향으로 시행한 방향제어 시추조사 (KBH 02, 700 m)

나. 상세지하조사 (1990~1995)

동굴의 굴착 과정에서 이루어지는 상세지하조사의 주된 목적은 지표에서의 조사 결과를 확인하는 것이다. 상세지하조사는 크게 두 단계로 구성된다.

□ 1 단계 (지하 330 m 심도, 굴착길이 2,500 m 까지의 조사)

- 부지특성모델을 구축하고 모델에 근거한 예측을 검증하는 조사 수행
- 향후 사용후핵연료 최종처분장 부지선정 프로그램으로 적용될 기존 부지조사 방법의 확인

□ 2 단계 (지하 330~460 m 심도, 굴착길이 3,400 m 까지의 조사)

- 300 m부터 460 m 심도까지의 굴착과정에서 이루어지는 조사는 1 단계의 목적과는 달리 심부에서의 HRL 시설의 건설에서 얻어지는 특성 자료는 주로 소위 “진행형 특성평가 및 설계 (progressive characterization and design)”를 위한 방법론을 검증하는데 활용
- 전통적인 선행설계 (design-as-you-go) 개념은 암반조사→설계→굴착 및 문서화→평가 행위로 구성

건설 중의 조사 내용은 분야별로 지질 및 지질구조조사, 수리지질조사, 지화학조사로 분류할 수 있다. 분야별 조사 목적은 다음과 같다.

□ 지질 및 지질구조조사

- 건설 전 적용된 예비조사 방법들이 심도별로 암종의 공간적 분포, 단열대의 분포 특성 등의 예측에 얼마나 정확했는지를 평가
- 심도별 지질환경을 고려하여 암종, 지질구조, 역학적 안정성, 수리지질도 등에 관한 다양한 조사방법들의 타당성 평가
- 2 단계 건설 과정에서 마주칠 수 있는 지질환경 예측기술 개발
- 사용후핵연료 최종처분장 후보부지에 대한 정밀조사방법론의 시험과 개발

□ 수리지질조사

- 지표 예비조사에서 평가한 지하의 수리지질 특성이 얼마나 정확했는지를 평가
- 동굴 주변의 암반에서 다양한 척도로 수리지질특성에 관하여 문서화하고 발파에 의한 수리지질 영향 예측
- 정상류 상태에서 HRL 의 영향을 다양한 규모로 문서화→모델 해석을 반복적으로 수행
- 굴착이 진행되면서 축적되는 자료를 이용하여 하부 심도의 수리지질 조건을 예측하는 기술 향상
- 500 m 심도까지의 수리지질특성을 고려하여 지속적으로 보완되는 지하수유동 모델 결과의 평가
- 사용후핵연료 최종처분장 후보부지에 대한 정밀한 수리지질특성조사 방법론의 시험과 개발

□ 지화학조사

- 염수와 담수 경계면의 변화 추적
- 대규모 암반블록에서의 용질이송특성 연구
- 실규모에서의 지하수유동 및 용질이송모델의 평가를 위한 검증자료 수집
- 지하수의 산화-환원준위 변화 추적
- 단열 광물질의 화학조성 변화 추적 및 지하수-단열-광물계의 산화환원 열역학 자료 결정
- 사용후핵연료 최종처분장 후보부지에 대한 정밀한 지화학특성조사 방법론의 시험과 개발
- 지하수 시료 채취 및 분석
 - 진입동굴에서 뚫는 충격식 시추공 지하수
 - 동굴 측벽과 천장에서 떨어지는 지하수
 - 지하수 유입수 배수구
 - 동굴과 교차하는 단열대 구간

4.2 부지지질특성

HRL시설이 위치하는 지역의 지질은 Trans-Scandinavian Igneous Belt(TIB)에 속하며 대부분이 화강암질암으로 구성되어 있다. Äspö 섬의 남쪽은 화강암질암이 분포하고 북쪽 지역에는 섬록암질 내지 화강암질 암이 분포한다. 이 화강암질암은 약 17억 년전의 마그마활동에 의해 형성되었으며, 그 이후 융기와 침식이 반복되어온 지역이다. 지구구조적으로는 지진이 활성화된 서부와 지진이 일어나지 않은 남동부의 경계부에 위치한다.

대부분의 단열대는 (fracture zone)는 재활성화 되었으며, 대부분 서로 직교하는 N-S 와 E-W, 그리고 NW-NE 방향군이 우세하며 연장이 10 km 이상, 폭은 수십 m ~ 100 m 규모이다 (그림 8). Äspö 섬에서 가장 중요한 단열대는 그림 9의 단면도에 나타나있다.

수리지질학적 관점에서는 Äspö 섬은 융기에 의해 약 4,000 년 전에 발틱해의 해수면까지 융기되었으며, 향후 6,000 년 내에 본토의 일부가 될 것으로 예측되고 있다. 이 결과로 Äspö 섬의 지하수유동과 염분 분포에 영향을 줄 것으로 예상된다. 평균 강수량은 약 675 mm/year인데 이 중 18 %가 강설에 의한 것이다. 발틱해의 염도는 약 6 g/l이고 지하수내 염도 분포는 500 m 심도에서 약 10 g/l이다.

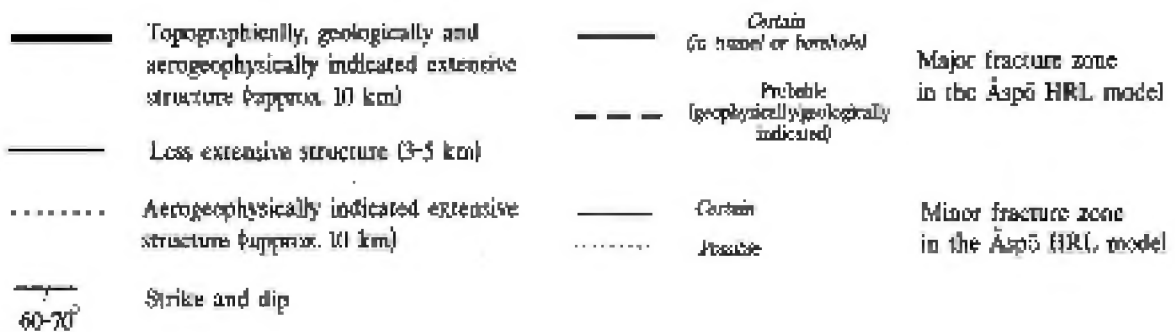
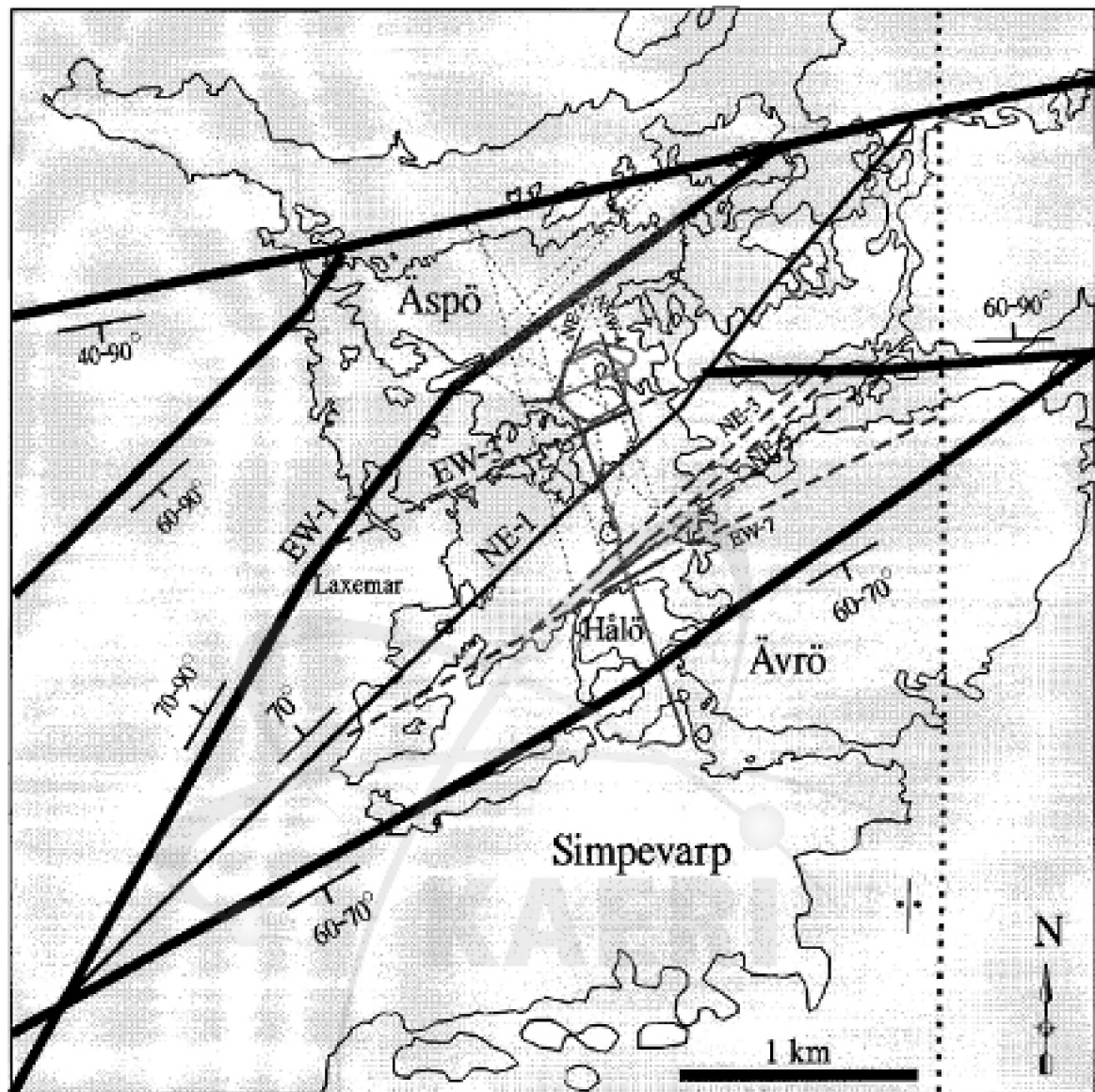


그림 8. HRL 시설부지의 단열대 분포도

5. 시설 확보 추진 절차

5.1 입지 요건

SKB R&D Programme 86에서 제안한 HRL 시설 부지의 위치는 연구 활동에 필요한 지원시설과 인프라가 잘 구축된 지역을 최우선 선호 조건으로 내세웠다. Äspö 섬이 시설 목적에 선호되는 입지 요건은 다음과 같다.

- 기반암과 자연 지하수가 교란되지 않은 상태이고, 섬에 위치하기 때문에 이곳에서 장기간에 걸쳐 수행되는 여러 가지 연구 활동을 방해하는 여타의 행위가 없을 것으로 예상된다.
- 지리적으로 제한된 영역 내에서 Äspö 섬은 수행하고자 하는 여러 가지 시험과 그 결과의 평가에 필요한 다양한 지질학적, 수리지질학적 조건을 제공한다. 조사 결과에 의하면 기반암은 신선한 암반 규모와 다양한 특성을 갖는 단열대간의 적합한 다양성을 나타내고 있다. 지하수 조성은 스웨덴 해안가에 분포하는 암석의 대표적인 특성을 보이므로 우세한 특성을 갖는 지하수 화학성분에 관한 연구와 더불어 이러한 특성들이 동굴 건설로 인하여 어떻게 변화하는지를 연구할 수 있다.
- Simpevarp 지역에서는 Oskarshamn 원전의 지원시설과 접근성이 좋기 때문에 별도의 지상 건물 신축을 최소화할 수 있으며 기존 시설을 활용하기 용이하다. 입지하고자하는 부지의 소유주가 Oskarshamn 원자력발전회사인 OKG이기 때문에 부지 임대도 용이하다.

5.2 추진 경위 및 절차

SKB R&D Programme 86에서 제안한 HRL 시설 부지의 조사 및 결정 과정은 다음과 같다. SKB는 먼저 여러 원전 부지 중의 한 곳인 Oskarshamn 지자체 내의 Simpevarp 반도를 검토하였다. 부지조사는 1986년 가을에 착수하였으며 1987년부터 1989년 봄까지는 상대적으로 넓은 범위에 걸쳐 조사가 이루어졌다. 조사에서 얻은 결과에 바탕을 두고 SKB는 HRL 시설을 Äspö 섬 남쪽에 입지한다는 원칙을 결정

하였다.

SKB는 1990년에 관계기관의 승인을 얻는 것으로 추진하였다. 정부는 1989년 가을에 HRL 시설은 천연자원보존법 (Act on the Management of Natural Resources)의 심의를 거쳐야만 한다고 결정하였다. 이에 따라 SKB는 환경영향을 저감할 수 있도록 시설 배치계획을 변경하였다.

Äspö 섬 내의 HRL 시설의 위치는 사용후핵연료의 최종처분장 부지로 고려되지 않을 것이다. 그렇지만 HRL 시설 부지의 인근서 최종처분장으로 적합한 지질학적 조건을 갖는 지역이 확인된다면 이 지역은 처분장 후보부지로 검토될 수 있으며 상세 부지조사를 수행할 수도 있다.

부지 선정 과정의 주요 절차와 경위는 다음과 같다.

- 1986
 - R&D Programme 86에서 지하연구시설 구축 계획 제안, 1986년 가을에 부지조사 착수
- 1987~1990
 - 1990년 봄까지 광역 범위까지를 포함한 부지조사 수행
- 1988 말
 - 1988년 말 Äspö 섬을 HRL 시설 부지로 결정
- 1989
 - 1989년 정부 승인 신청, 정부는 천연자원보존법의 심의를 거쳐야만 한다고 결정
- 1990. 4. 19
 - 정부 조건부 승인
 - 정부는 환경 측면의 이유로 1.5 km 길이의 진입동굴 입구는 당초의 Äspö 섬에서 Simpevarp 반도로 변경하고, Oskarshamn 지자체 행정부의 대표, Oskarshamn 원전회사 (OKG) 및 SKB 간의 공동협의체를 구성하여 환경적인 문제들을 협의
- 1990~1991
 - 공동협의체에서 굴착으로 발생하는 버력을 어떻게 처리할 것인지 등의 문제를 해결

- 1990. 6
 - Oskarshamn 지자체에서 시설 건설 승인
 - Äspö 섬에서의 행위 (Äspö Research Village와 지하동굴시설)를 위하여 계획 및 건축물법 (Planning and Building Act)에 따라 새로운 상세한 개발계획의 심의를 거쳐 승인받을 것이 요구됨.
- 1990. 10
 - Oskarshamn 지자체, 주 행정부 및 정부로부터 상세한 개발계획의 심의를 거쳐 1990년 10월 건설 승인 취득
 - Äspö 섬에서의 행위는 수자원법 (Water Law)을 준수하도록 되어 있음. 중요한 조항은 법에서 정하는 대로 지하수면 모니터링 계획과 수질 분석을 시행해야 함. 개인 관정은 1995년 이후까지, 사업자 소유의 시추공은 2004년 이후까지 모니터링해야 함.
- 1990. 10
 - 시설 건설 착공
- 1994
 - 1994년 여름, Äspö Research Village (그림 10) 준공
- 1995
 - 1995년 여름, 지하 토목공사 완료, 450 m 심도까지 굴착 완료
- 1995~2005
 - 주요 과학적 시험 수행 (지하수유동과 화학조성)
 - Zone of Excavation Disturbance Experiment (ZEDEX)
 - Tracer Retention Understanding Experiments (TRUE)
 - Redox Experiment in detailed scale (REX)
 - Degassing and two-phase flow
 - Backfill and plug test
 - Prototype repository
 - Long-term tests of buffer material (LOT)
 - Grouting technology
- 1999~2008

- 주요 실증시험 수행 (처분기술, 처분장 원형시스템, 회수기술 등)



그림 10. Äspö Research Village 전경

5.3 건설일정

1986년부터 HRL 시설이 입지할 부지 조사를 시작하여 1990년 건설 승인을 취득한 후, 1990년 10월 1일 진입동굴 굴착공사를 착수하였다. 동굴 굴착공사는 2 단계로 나누어 진행되었는데, 1 단계는 지표부터 330 m 심도까지의 진입동굴과 수직구 굴착, 2 단계는 330 m부터 450 m 심도까지의 굴착으로 진행되었다.

당초의 건설 일정은 1993년 말 굴착 공사를 마무리하는 것으로 계획하였으나, Äspö Research Village는 1994년 여름에 준공되었으며, 지하 토목 공사는 1995년 여름에 마무리되었다 (그림 11).

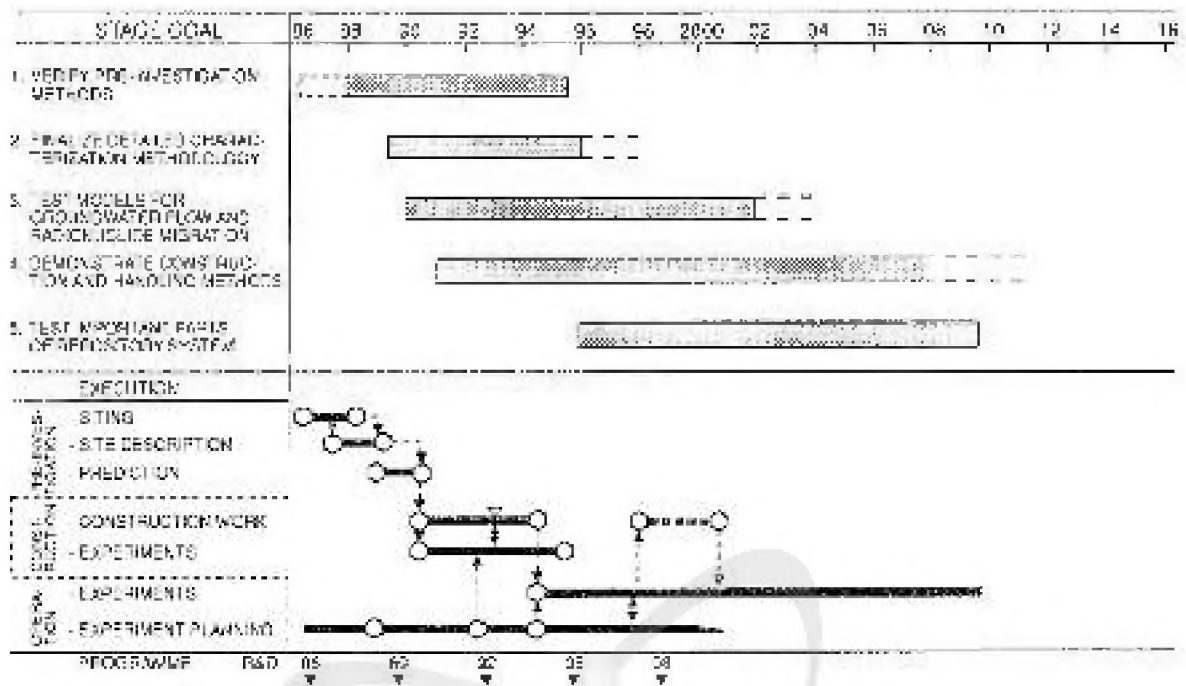


그림 11. R&D Programme 92에서 당초의 계획을 수정한 사업 일정

5.4 건설

HRL 시설의 건설은 크게 2 단계로 진행되었다. 1 단계는 EL. -330 m 심도까지 천공/발파 방식으로 동굴과 수직구를 굴착하는 과정이며, 2 단계는 그 하부부터 EL. -450 m 심도까지 TMB 방식으로 굴진하였다. 1, 2 단계의 시공사는 각각 SIAB사와 SKANSKA사였다.

전체적인 동굴의 배치는 그림 12와 같다. HRL 시설의 지하시설 건설은 주로 A 동굴 (그림 중 TASA로 표기)과 수직구로 구성되었다. TASG와 TASK는 소규모 동굴로서 운영 단계에서 굴착된 것이다.

동굴 굴착 작업은 Simpevarp 반도에서 시작하여 직선으로 Äspö 섬을 향하여 방향으로 굴착되었다. 동굴의 경사는 약 14% (8°)이다. 동굴 입구로부터 처음 500 m 연장까지에서는 굴착 공사와 지하조사 절차를 시험하는 과정을 거쳤다. 이 과정에서는 앞서의 행위 만큼 중요한 건설팀과 부지조사팀 간의 합의된 기준좌표를 구축하기도 하였다.

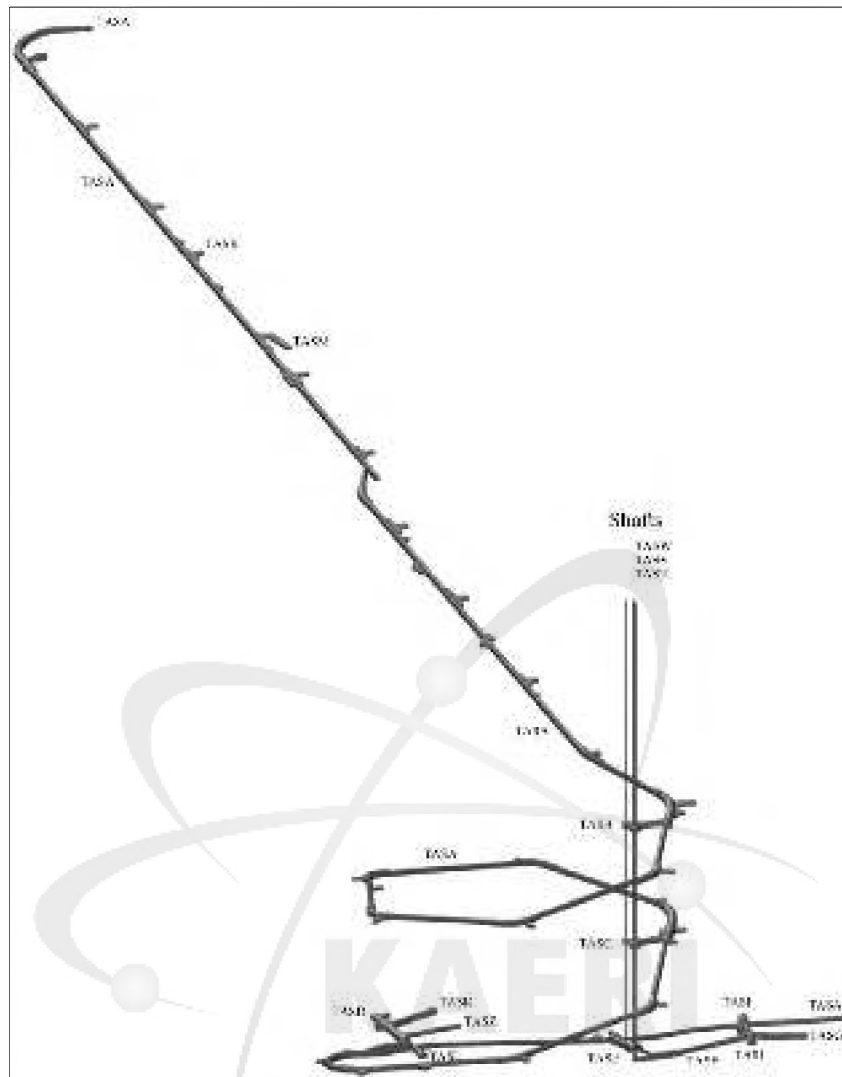


그림 12. 전체적인 HRL의 동굴 레이아웃 (TASA는 주 동굴 A의 식별코드)

굴착 길이 1,300 m 지점에서는 단열대 NE1 (Äspö 암체를 구분하는 경계로 간주되는 구조)를 지하 약 180 m 심도에서 교차하였다. 직선 진입터널은 거의 1,500 m 길이까지 굴착되었고 그 다음부터는 그림에서 보는 바와 같이 육각형 격자 모양처럼 나선형 형태로 굴착되었다. 육각형 격자의 한 변의 길이는 대략 150 m이다. 맨 밑바닥의 약 600 m 길이는 위 쪽의 나선형 동굴 영역 아래에 굴착되었고 서쪽 영역으로 200 m 더 연장 굴착하였다. 동굴의 마지막 400 m는 TBM을 이용하여 전단면 굴착하였다.

천공/발파에 의한 굴착면은 사각형 형태로 단면적은 25 m²이다. 다만, 동굴이 꺾

m 권이의 선진공을 동공 영역을 벗어나지 않는 범위 내에서 굴착하였다. 공의 굴착이 타당한 것인지를 시험하기 위함이다. TBM 굴착에 앞서 초기에는 200 m 이유는 TBM 전면에서의 조사계획을 수립하는데 있고, 또한 안전한 하향식 선진 구간이 약 1/2 구간에 대하여 매 20 m 굴진 후 선진공 조사를 수행하였다. 가장 적경 5 m 규모의 원형 터널은 TBM 공법으로 굴착되었다 (그림 14). TBM 굴착에도 운전한 상태로 자표를 보관해야만 한다.에도 유용하지만 부지평가팀의 조사계획 수립에도 매우 유용하기 때문에 굴착 이후에만 상태를 가늠하였다. 이 20 m 선진공에서 얻는 자표는 지수계획이나 보강계획 매 4 번째 발파 회차에 앞서 동공 막장면에서 20 m 권이의 선진공을 굴착하여

그림 13. 동공 막장면에서 발파공과 선진공 굴착에 이용되는 천공기



하여 동공 벽면에 대한 정밀한 조사를 수행한다. 파 회차마다 4.2 m 씩 굴진하였으며, 다음 발파까지의 중간에 부지조사팀이 참여 (13)를 이용하여 막장면에서 4.5 m 권이의 발파공을 굴착하여 발파하게 된다. 매 발 이는 영역에서의 단면적은 45 m²이다. 매 천공/발파 회차마다 3-물 천공기 (그림



그림 14. 굴착 작업을 준비 중인 TBM

주 동굴의 굴착과 더불어 수 개의 소규모 연구모듈 (龕室, niche)과 측면 동굴을 굴착하였다. 감실과 측면 동굴의 용도는 다음과 같다 (그림 12와 그림 15 참조).

- 100 m 지점의 측면 동굴: 방문객 홍보용 공간
- 500 m 지점의 소규모 연구모듈: 단열대를 교차하는 시추공에서의 지하수의 산화-환원 시험용 공간
- 700 m 지점의 측면 동굴: 함수 단열대에 대한 조사와 선진 그라우팅 방법의 시험용 공간
- 1,650 m, 2,600 m, 3,400 m 지점의 짧은 진입동굴: 수직구 연결용 동굴
- 3,150 m 지점의 넓은 공간: TBM 조립을 위한 공간

- 3,200 m 지점의 TBM 동굴과 평행한 50 m 길이의 천공/발파 동굴: 암반 손상 대 조사, 시험용 공간 (ZEDEX)
- 3,500 m 지점의 주 동굴 바닥 건너편의 측면 동굴: 460 m 심도에 위치하는 수직구의 바닥과 배수 펌프시설 접근용 공간이며, 배수 펌프의 고장날 경우에 유입수를 임시 저장하는 역할도 한다.

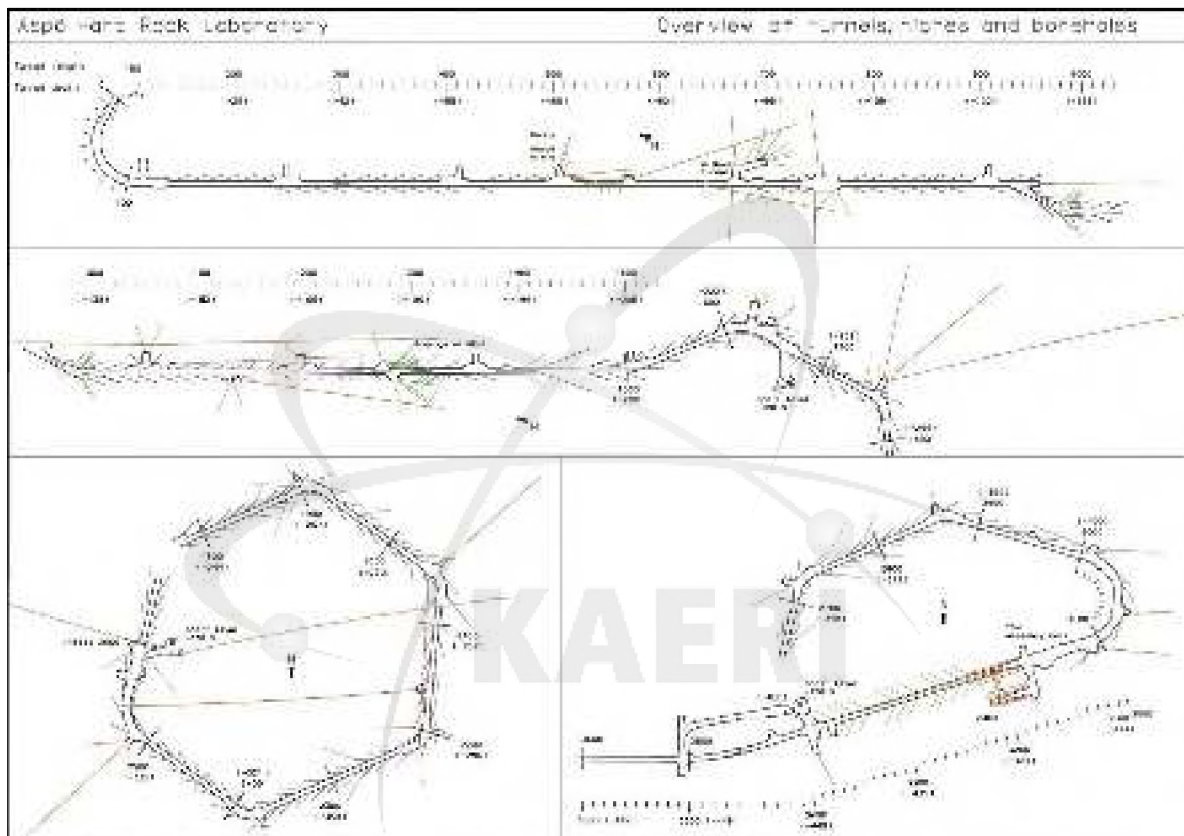


그림 15. HRL 시설의 동굴, 감실과 시추공 도면

주 동굴을 제외하고 가장 중요한 지하시설 건설은 수직구로서, 이 수직구는 지상의 Äspö Research Village와 지하의 동굴 시스템을 연결해 주는 중요한 역할을 한다. 수직구는 3 군데, 즉, 심도 220 m, 330 m, 450 m에서 짧은 연결동굴을 통하여 주 동굴과 연결된다. 수직구는 3 개로 구성되는데 하나는 엘리베이터용 (직경 3.8 m), 나머지 두 개는 환배기용 (직경 1.5 m)이다. 이들 수직구는 3 단계에 걸쳐 상향식 굴진장치 (raise boring machine)로 굴착되었다 (그림 16). 즉, 단계별 각각의 바닥 심도가 주 동굴과 연결되는 심도 220 m부터 지표까지, 심도 330 m부터 220 m



그림 16. 상향식 수직구 굴진장치 (좌: 지표에 설치된 굴진장치, 우: 심도 220 m에 장착된 상향식 굴진장치 헤드)

까지, 그리고 심도 450 m부터 330 m까지 단계별로 굴착하였다.

동굴 굴착 과정 중에는 동굴 내로 유입되는 지하수를 채취하고 계측할 수 있는 특별한 공정이 수행되었다. 이 공정은 진입동굴과 육각형 격자 한 변의 끝 부분에 지하수 유입수 채취용 댐을 설치하여 이전 댐으로부터 계측 지점까지의 구간으로 유입되는 모든 지하수를 계측하는 것이다 (그림 17). 지하수는 동굴 바닥 뿐만이 아니라 바닥부 아래의 발판 손상대를 통해서도 흐르기 때문에 댐을 설치할 때 바닥부 그라우팅을 효율 높이기 위하여 사전에 바닥에 있는 암편들을 완벽하게 제거해야 한다. 배수 파이프를 설치하여 모든 지하수를 Thomson weir에 보내어 유입량을 계측할 수 있도록 한다. 동굴 내에는 지하수 유입수를 배수하기 위한 특별한 배수펌프가 설치되었다 (그림 18).

동굴 내 운영 지원을 위한 부대시설로서 전기 및 조명시설, 동굴과 지상의 Äspö Research Village 시설에 용수를 공급하는 시설, 배수설비 및 유틸리티 공급 (전력선, 정보통신망, 수리배관 등)을 위한 측벽 선반을 설치하였다 (그림 19).

SKB에서 무역잡지 (www.bergteamet.se)에 제공한 시설 현황도는 그림 20과 같다. 건설 책임자는 정밀한 제어발파를 통해서 설계서의 30% 여굴 (overbreak)을 15%까지 감소시키는 좋은 결과를 얻었다고 보고하고 있다.

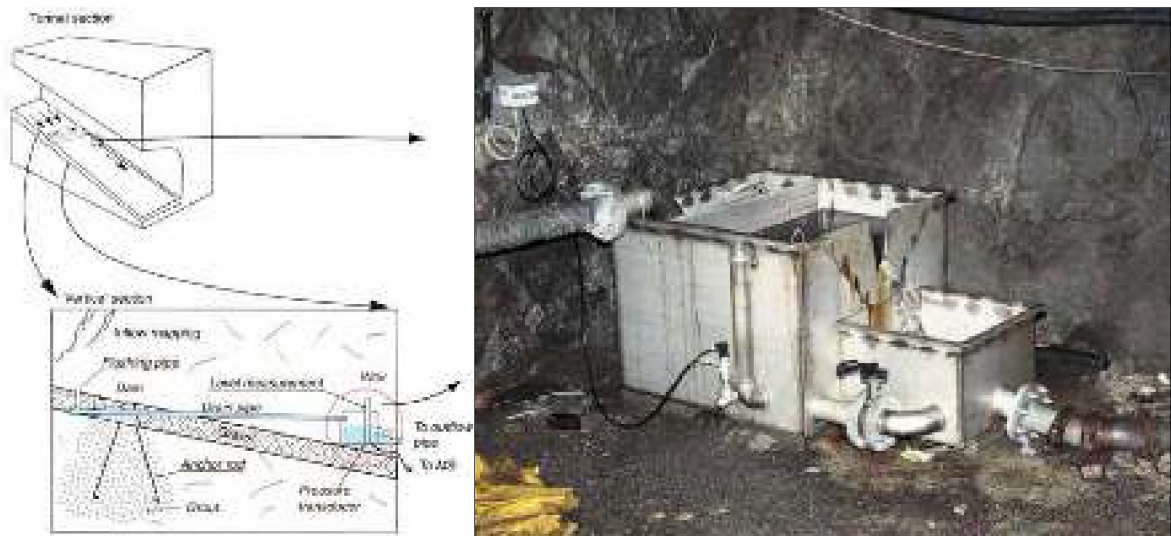


그림 17. 동굴 계측 구간을 따라서 설치한 지하수 유입수 채취용 댐 (좌)과 V-notch weir (우).

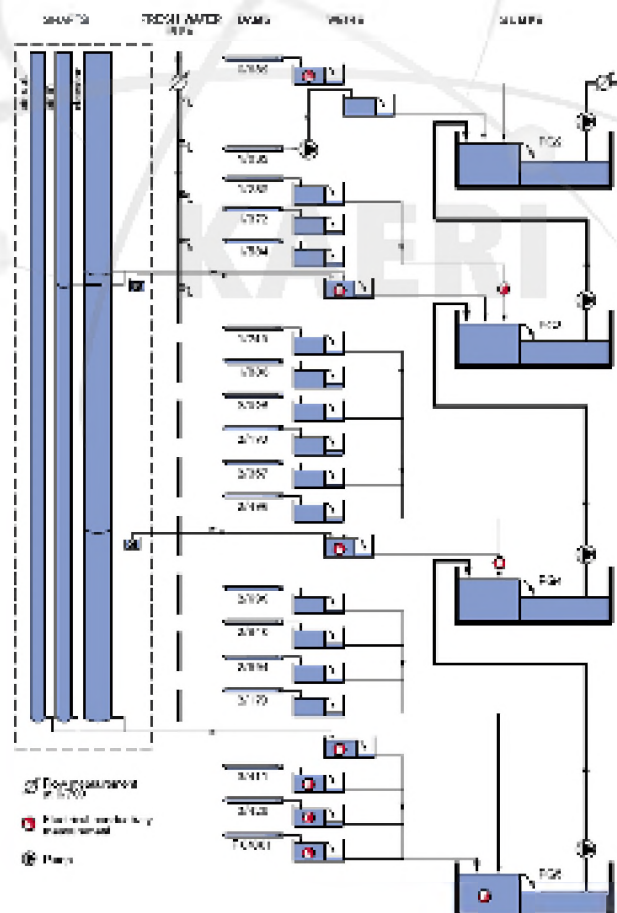


그림 18. HRL 동굴의 배수 시스템 레이아웃 (유량 계측지점, 배수펌프 등)



그림 19. 동굴 측벽 선반에 설치된 배관 및 케이블 들

Äspö Hard Rock Laboratory

Here tests of the methodologies and technologies that will be used in the final repository for spent nuclear fuel are conducted, and the processes involved in a deep repository are studied.

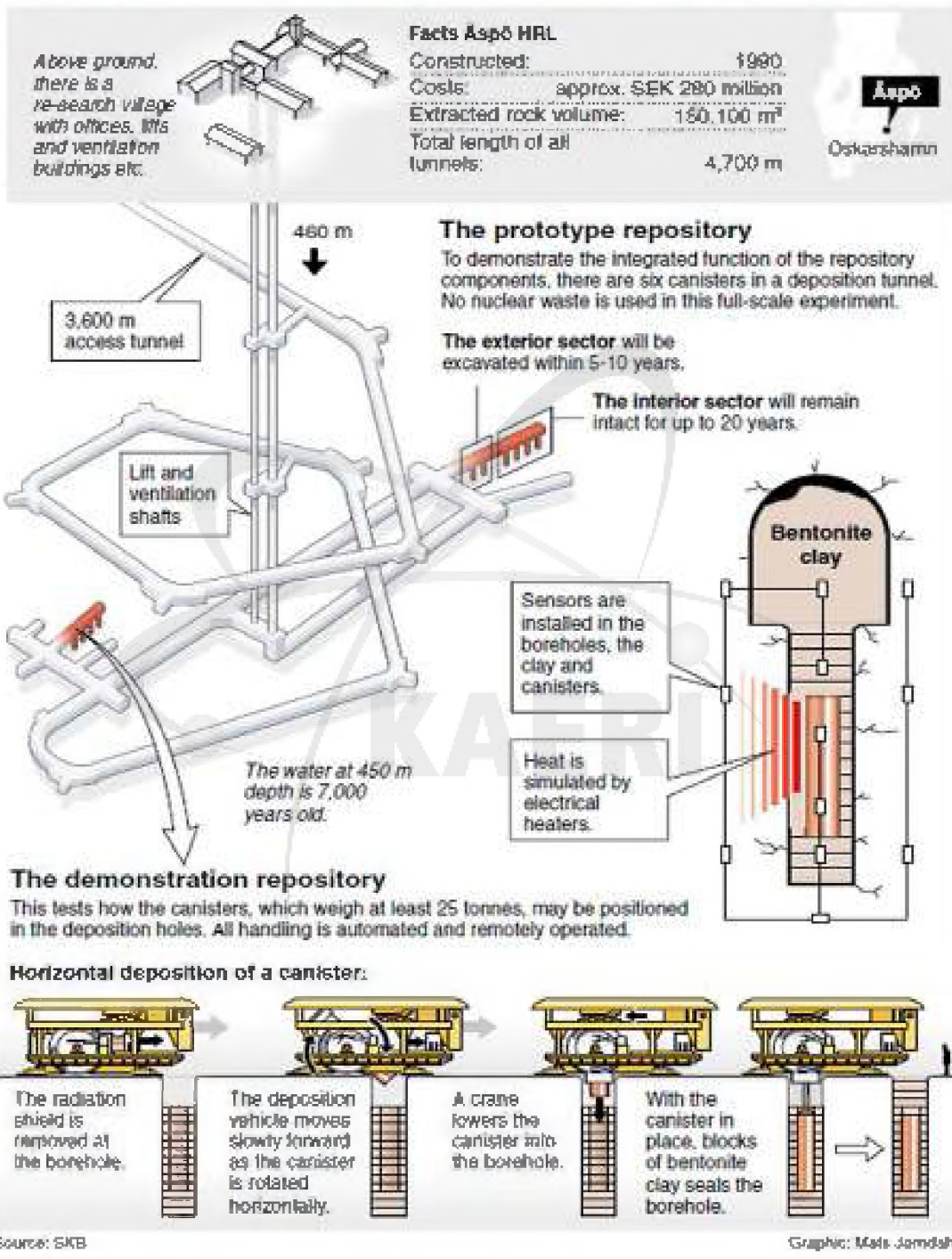


그림 20. Äspö Hard Rock Laboratory 시설 현황도

5.5 건설비

HRL 건설비용에 관한 상세한 자료는 나와 있지 않으며, 일부 자료에서 전체 건설비용이 적시되어 있다. 인용될 수 있는 자료 중에서 시설 관리비의 포함 여부가 분명하지 않은 상태로 총 사업비용이 약 200~250 억 SEK라고 인용하고 있다 (www.thelocal.se). 이를 현재 환율 (170원/SEK)로 계산하면 약 3,400~4,250 억원이다.

한편, 그림 11에 명기된 건설비용은 1990년 당시 2.8억 SEK인 것으로 보고되었다. 이를 현재 환율 (170원/SEK)로 계산하면 약 476 억원이다. Science 매거진 (www.sciencemag.org) 에서는 시설 건설에 35 백만 US\$ (한화 385 억원)으로 보고하고 있다.



6. 처분기술 개발 및 실증시험 연구 현황

HRL 시설에서의 실증시험 연구는 크게 지질과학, 천연방벽, 공학적방벽, 역학 및 시스템 공학 분야로 구분된다.

6.1 지하 실증시험 연구 위치

HRL 동굴의 건설을 위한 지표에서의 예비조사와 건설 중의 지하 상세조사와 관련된 연구를 제외하고 건설 중 및 운영 중 동굴에서 이루어졌거나 진행되고 있는 실증시험 연구의 위치는 그림 21에 표기하였다. 이들 시험 위치의 결정 과정에서 중요하게 다루어진 것은 주변의 다른 시험과의 간섭이 일어나지 않도록 배치되었다는 것이다.

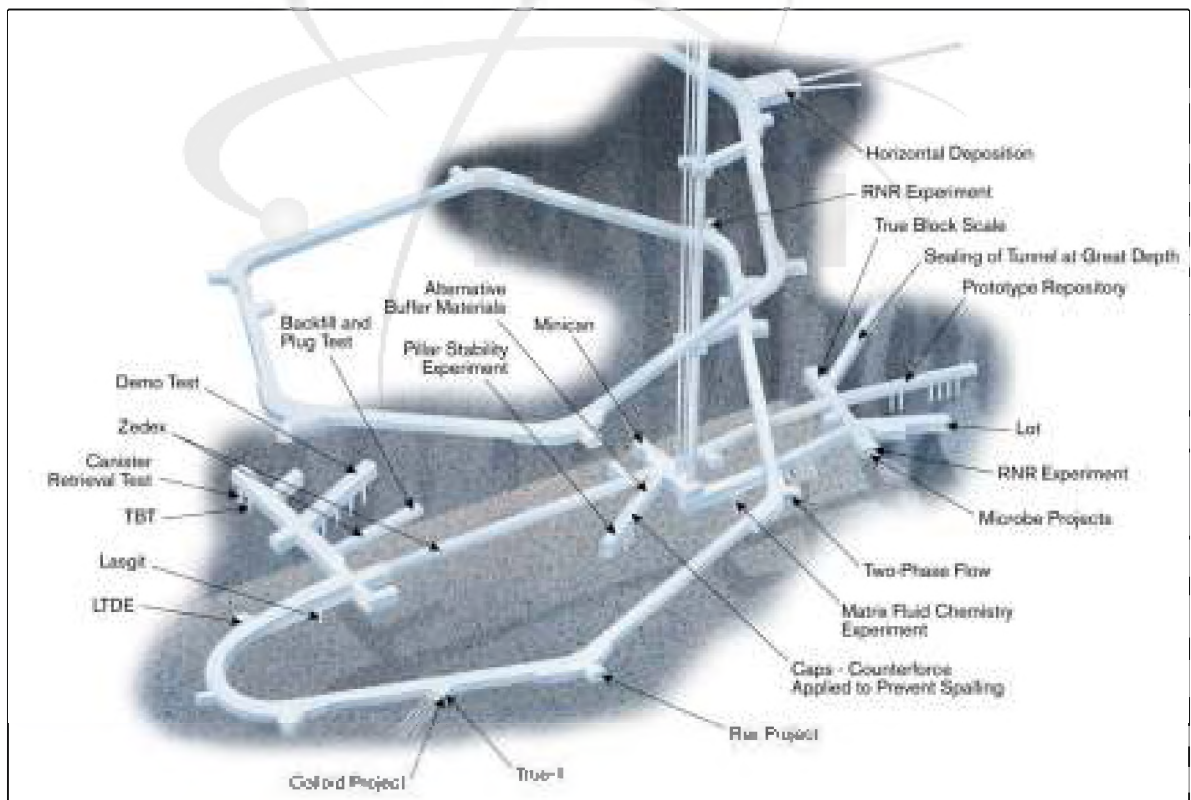


그림 21. 220 m 와 450 m 심도의 동굴에서의 실증시험 위치

6.2 지질과학 분야

HRL 시설에서의 지질과학 분야의 연구 목적은 첫째, HRL 시설부지 암반과 그의 특성에 대한 지질구조적, 수리지질학적, 지구화학적, 암반역학적 모델 구축, 둘째는 현장에서 적용 가능한 계측 및 시험 방법의 개발이다.

주요 연구내용은 다음과 같다.

- **HRL 시설 부지특성모델 (Äspö Site Descriptive Model):** HRL에서 수행되는 모든 실증시험의 계획 수립과 예측에 필요한 가장 기본적인 지구과학적 자료를 제공
- **동굴 지질조사 및 모델링 (Geological Mapping and Modelling):** 암종과 지질 구조의 기하학적 분포 특성에 관한 이해도를 증진과 3D 지질모델링에 이용
- **지하 지질조사를 위한 신기술 개발 (Rocs-Method Development of a New Technique for Underground Surveying):** 레이저 스캐닝 기술, 디지털 촬영 기술과 사진측량기술을 접목하여 조사결과를 3D 천연색으로 구현하는 기술
- **지하수 장기 모니터링 프로그램 (Hydro Monitoring Programme):** Hydro Monitoring System (HMS) 탑재하여 지하수위, 심도별 지하수압, 유동량 및 전기전도도 등 계측하고 모든 자료는 SKB의 부지특성 DB인 Sicada에 전송
- **지하수 화학특성 모니터링 (Monitoring of Groundwater Chemistry):** HRL 굴착공사 기간 중과 운영 중의 지하수 화학특성 진화 과정을 모니터링

6.3 천연방벽 분야

천연방벽의 기능에 관련된 실증시험은 처분장의 장기 거동에 중요하게 영향을 미치는 암반의 물리, 화학적 과정을 이해하는데 요구되는 지식과 자료를 축적하기 위한 연구들을 수행하고 있다.

- **추적자 이송 저지능 규명 시험 (TRUE, Tracer Retention Understanding Experiments):** 흡착성 및 비흡착성 추적자를 이용하여 다양한 그림과 같이 규모에서 단열암반 내의 용질이송과 이송 저지능을 규명

- **장기 흡착 확산 시험 (Long Term Sorption Diffusion Experiments):** 처분장과 유사한 조건에서 자연상태의 단열을 따라서 흐르는 용질이 주변의 암반 매질에 어떻게 흡착되고 확산되는지를 검증
- **콜로이드 이송 프로젝트 (Colloid Transport Project):** 처분장 안전성평가에 콜로이드 이송 특성을 반영하기 위한 연구
- **미생물 프로젝트 (Microbe Project):** 핵종이동과 연관된 미생물 복합체의 영향, 미생물 군락이 핵종의 흡착과 확산에 미치는 영향 규명, 지하수 중의 바이러스가 콜로이드 효과로 핵종의 이동성에 영향을 미칠 가능성에 관한 분석
- **암반 기질의 지하수 화학 (Matrix Fluid Chemistry):** 암반 기질의 공극, 미세 균열 내에 있는 지하수의 연대와 기원을 규명하고 그들이 투수성이 큰 암반의 지하수에 화학적으로 어떤 영향을 미칠 것인가를 규명
- **핵종 이송 저지능 시험 (Radionuclide Retention Experiments):** 사용후핵연료 침출 특성 규명과 완충재와 암반 간의 경계면에서의 이송 저지 특성 규명 시험으로 구성되며, 심부 지하수의 산화-환원 조건, 콜로이드 함량, 유기물질과 박테리아가 있는 조건에서 실증하는 목적으로 진행
- **고기 수리지질자료 분석 및 모델 시험 (Padamot: Palaeohydrogeological Data Analysis and Model Testing):** 심부 처분장의 장기 안전성은 처분장 환경의 안정성에 지배되므로 심부로 갈수록 기후 변화의 영향이 저감된다는 것을 실증
- **단열 철산화물 (Fe-oxides in Fractures):** 처분장 안전성평가에 기초적인 심부 환경에서의 환원환경을 규명
- **지하수 중 황화물 생성과정 규명 (Investigation of Sulphide Production Processes in Groundwater):** 시추 코어 시료로부터 지하수 중의 황화 생성물 (미생물에 의한 황산염 환원)의 생성 과정을 이해하고, 시추공이나 시추공 내의 장치에 의해서 황화물 농도가 높아지는 것인지에 대한 가능성도 평가
- **인공지하수를 이용한 단공 주입-강하시험 (The Single Well Injection Withdrawal (Swiw) tests with synthetic groundwater):** 인공 지하수, 즉, 염화물, 나트륨, 칼슘을 질소, 리튬, 마그네슘으로 치환한 물을 이용하여 수리시험을 행하여 암반 기질 내에서 확산이 우세한지 아니면 정체 구간이 우세한지

를 확인

- **Äspö 부지의 핵종 흡착 모델 (Äspö Model for Radionuclide Sorption):** 다양한 광물들의 흡착특성 간의 선형 조합을 이용하여 HRL 시설 부지의 흡착 특성을 산출하기 위하여 실험실 분석과 모델링 접근방법을 이용하여 화강암 매질에서의 핵종의 지화학적 이송 저지능을 정량적 모델화
- **지하수유동과 용질이송 모델링 국제공동 프로젝트 (Task Force on Modelling of Groundwater Flow and Transport of Solutes):** 본 국제공동 프로젝트는 단열 암반에서 지하수의 흐름과 용질이송에 관한 개념적이고 수치적인 모델링 분야에서 HRL 시설을 지원하기 위한 공개적인 조직으로 수행되고 있으며, 한국에서는 KAERI가 참여 중

6.4 공학적방벽 분야

처분장의 공학적방벽의 주요 구성요소의 기능과 관련 공학기술을 실증하기 위한 연구를 진행하고 있다. 현재의 기술과 이해 수준을 실제 처분장에 적용할 수 있는지를 확인하는 것이 무엇보다도 중요하다. 이를 위하여 HRL 시설에서는 실규모의 대규모 실증시험이 이루어지고 있다.

- **원형 처분장 개발 (Prototype Repository):** 450 m 심도의 TBM 동굴에 모두 6 개의 실규모 처분공을 설치하여 처분장 구성 요소의 전체적인 기능을 실증하고 여러 가지 모델과 가정 조건을 비교한 실규모 기준시설을 제공
- **완충재 장기 거동 시험 (Long Term Test of Buffer Material):** 벤토나이트 완충재의 광물조성과 물리적 특성에 관련된 모델과 가정 조건들을 입증하기 위하여 직경 300 mm, 깊이 약 4 m의 시추공에서 시험 중
- **완충재 대안 재료 연구 (Alternative Buffer Materials):** 팽창성 점토광물 등의 함량을 달리 하면서 11 개의 완충재 재료에 대한 특성 시험으로서 130 °C 조건으로 직경 300 mm, 깊이 약 3 m의 시추공에서 시험 중
- **뒤채움재 및 플러그 성능 시험 (Backfill and Plug Test):** 뒤채움재 재료 (벤토나이트:암버력=30:70) 시험, 뒤채움재 정치 시험 및 실규모 플러그 시험
- **처분용기 회수시험 (Canister Retrieval Test):** 420 m 심도에서 벤토나이트 완

충재가 완전하게 지하수로 재포화된 상태에서 이미 정치된 처분용기의 회수성 실증시험

- **완충재 온도효과 시험 (Temperature Buffer Test):** 프랑스 ANDRA에서 SKB와 협력으로 수행하는 시험으로 100 °C 이상의 온도 조건에서 공학적방벽이 지하수에 의해 재포화가 진행됨에 따라 THM 거동이 어떻게 변화하는지를 규명하기 위한 시험
- **KBS-3의 수평 정치기술 실증 (KBS-3 Method with Horizontal Emplacement):** KBS-3V (단일 수직 처분공) 개념 대신에 수평 처분공에 2개 이상의 처분용기를 정치할 수 있는 방법론을 개발하는 것으로서, 수평 개념이 실증되면 처분공 굴착량과 뒤통재를 크게 감소할 수 있고 결과적으로 환경 부담을 최소화할 수 있고 건설비도 절감할 수 있음.
- **대규모 가스 주입 시험 (Large Scale Gas Injection Test):** 벤토나이트 완충재에서의 가스이동 현상과 이러한 가스이동이 벤토나이트 점토의 수리-역학적 성능에 장기적으로 미칠 수 있는 영향과 관련된 이슈들을 시험
- **심부 환경에서의 동굴 밀봉기술 (Sealing of Tunnel at Great Depth):** 심부 환경 조건에서는 pH 11 이하에서 침출액을 생성하는 밀봉재가 선호되므로, low pH 그라우팅재와 실리카졸로 구성되는 용액 그라우팅재에 관한 시험을 수행 중
- **처분용기 축소 모형의 원위치 부식 시험 (In Situ Corrosion Testing of Miniature Canisters):** 주물 철 삽입물을 포함하는 구리재질의 처분용기가 파괴되었을 때 내부 환경이 어떻게 변화하는지를 규명하는 시험
- **조사 시추공의 세정과 밀봉시험 (Cleaning and Sealing of Investigation Boreholes):** 지표와 동굴 내 심부에서 조사용으로 굴진된 시추공의 세정, 안정화 및 밀봉기술을 개발하여 향후 이들이 처분장에서 생태계로 나가는 유출경로로 되지 않는다는 것을 입증
- **콘크리트 및 점토광물 (Concrete and Clay):** 처분장 모암에서 시멘트물질의 장기 진화에 관한 연구로서 암석뿐만 아니라 벤토나이트-폐기물-시멘트 간의 상호작용을 연구
- **저-pH 프로그램 (Low-pH Programme):** 사용후핵연료 최종처분장에 사용될

저-pH 시멘트 물질을 개발하기 위한 연구개발 프로그램. 개발된 재료는 단열의 밀봉, 록볼트의 그라우팅, 암반 지보 및 처분공의 콘크리트 플러그에 사용될 예정

- **처분공 굴착기 (Drilling Machine for Deposition Holes):** 원형 처분장과 처분용기 회수시험 프로젝트에서 처분용기 정착을 위한 처분공 설치 굴착기를 개발하기 위하여 기존의 TBM의 변형을 시도하였으며, 향후 최종처분장에서 적용할 장비는 최신 기술 도입 필요함을 인지함.
- **처분터널의 밀봉 플러그 개발 (Development of End Plugs for Deposition Tunnels):** 볼트 플러그와 마찰 플러그 형태를 고려한 결과 수밀성을 보장할 수 있는 유형으로 볼트 플러그에 대한 추가적인 연구 수행 중
- **EBS Task Force (Task Force on Engineered Barrier Systems):** 원형 처분장 프로젝트 중의 모델링 연구로서 실내시험과 현장 실증시험에 대한 모델링 (THM 거동, 포화 완충재에서의 가스 이동 관련)을 수행 중임. 이 과제는 2004년부터 국제공동연구로 진행하고 있으며, Andra (France), BMWi Germany), CRIEPI (Japan), Nagra (Switzerland), Posiva (Finland), NWMO (Canada) and Rawra (Czech Republic) 등이 참여하고 있음.

6.5 기계 및 시스템 공학 분야

Äspö HRL 시설과 Oskarsjamn에 있는 Canister Lab.에서는 최종처분장에서 적용되어야 할 기계장치와 시스템 공학과 관련된 기술 (뒤채움재 장치, 완충재 정착장치, 운반차량, 처분 기계장치, 다목적 차량, 운반 시스템, 굴착 장치 및 시스템 등)을 실규모로 개발하고 있다.

제 4 장 스위스 Grimsel Test Site 현황

1. 추진 배경

스위스의 방사성폐기물관리사업은 1972년 설립된 방사성폐기물관리공동조합(Nagra)이 중심이 되어 시행하고 있다. Nagra는 부지조사, URL에서의 연구활동 등을 통해 처분장 부지선정, 안전성평가, 처분사업에 필요한 자료수집 및 평가, 처분장 및 공학적방벽 설계, 운영과정의 계획입안, 성능평가용 자료 및 모델의 검증 등을 수행하는 외에 처분사업 계획 수립의 기반이 되는 방사성폐기물의 특성평가 등을 수행하고 있다.

Nagra는 사용후핵연료의 처분을 위한 후보 모암으로 균질 등방성의 화강암반과 유럽에 폭 넓게 분포하는 Opalinus 점토암 지층을 고려하였다. 이 과정에서 처분사업에 요구되는 기술개발을 위해 지하연구시설의 필요성이 대두되었으며, 스위스의 접근방법의 특성 상 화강암반을 대상으로 하는 Grimsel Test Site (GTS)와 Opalinus 점토암 지층을 대상으로 한 Mont Terri 암반연구소를 구축하게 되었다.

본 보고서에서는 결정질암인 화강암반에 구축한 GTS 시설에 한하여 다루기로 한다. GTS는 Generic URL로서 R&D 측면으로는 처분장의 안전성, 공학적 타당성 및 경제성을 입증하기 위한 과학적 기초를 정립하고 유지시키는 것이고, 사업측면으로는 부지특성, 설계, 건설, 운영, 폐쇄 및 장기 모니터링 관련 기술을 확보하는 것이다. 이러한 시설을 통하여 일반 대중과 이해당사자 (stakeholder), 규제기관, 과학자 및 정책 결정권자들에게 신뢰 수준을 향상시키고자 하는 것이다. 이들과의 대화 및 시설 견학을 통하여 GTS가 전달하고자 하는 기본적인 철학은 “1+1=2”라는 단순한 접근방식이다.

GTS의 추진 과정에서는 다음과 같은 기술적인 사항을 고려하였다.

- 외국의 기존 연구결과를 스위스의 지질조건에 적용할 수 있는지 검토
- 국가 프로그램 내에서 요구되는 특정 실험을 수행
- 다양한 전문분야가 모여 지하시험시설의 계획, 적용 및 해석에 관한 노하우 확보
- 실험장치 및 계측방법의 개발, 시험 및 이용에 있어서 실제적인 경험을 확보

- 지하수유동 및 물질이동 과정, 지연효과 등의 핵심적인 물질이동 과정의 실험과 이해 증진에 목적을 둔 지하연구시설 제공

상기의 사항을 충족시키기 위한 GTS의 시설 개념은 다음의 사항이 고려되었다.

- 시설 성격은 Purpose-built Generic Rock Laboratory
- 여러 가지 현장시험을 위한 공간을 제공하기 위한 branching tunnel system
- R&D, 처분장 계획 및 실증 분야의 주요 관심사를 다룰 수 있는 경계조건 제공
- 현장에서 액티나이드 핵종이송 시험 가능한 제한구역 구축 (IAEA level B/C 유형)
- 신규 프로젝트를 위해 실험실 확장 가능하도록 허용
- 중장비의 손쉬운 이동이나 방문객의 편의를 위해 수평 터널로 계획
- 시설 중앙부에는 접견실, 사무실, 회의실 등을 마련
- 지하 실험실을 일반 실험실과 같은 분위기로 조성

이와 함께 GTS의 핵심적인 고유 기능인 R&D 센터, 기술개발 센터, 실증시험 시설의 역할 외에도 대중을 위한 교육홍보시설과 전문 과학기술자의 양성 센터로서의 역할도 함께 할 수 있도록 계획되었다.

2. 시설 개요

2.1 시설의 목적

지하연구시설은 공학적 관점에서 방사성폐기물의 심지층 처분기술의 안전성 분석과 기술적 타당성 확인 과정에서 제기되는 많은 의문들에 대해서 중요한 해답을 제시할 수 있다는 장점이 있다. GTS에서 이루어지는 다양한 연구개발 행위의 목적은 다음과 같다.

- 방사성폐기물의 심지층 처분에 적합한 후보 암종의 지질학적 및 수리지질학적 특성 평가
- 안전성 관점에서 공학적방벽의 주요 구성요소들의 장기 거동 특성 규명
- 공학적방벽 시스템 내와 주변 천연방벽에서의 핵종의 이송과 이송 저지능 규명
- 안전성평가에 이용되는 자료와 모델들의 검증
- 동굴 굴착과 폐기물 정치를 위한 공학기술의 개발
- 일반 대중, 정치인 및 관련기관에 대한 연구개발 정보 제공
- GTS 시설을 이용한 국제공동연구 등의 협력체계 구축 및 노하우 교환

2.2 부지 위치

GTS는 스위스 중남부 Bern 주, Bernese Alps의 Juchlistock 봉 아래에 위치하며 해발 고도는 1,730m이고, 터널 상부의 최대 암층 두께는 450m에 이른다. GTS는 인근의 KWO사 소유의 Oberhasli AG 양수발전소의 진입터널을 통하여 접근할 수 있다. 겨울철에는 도로 결빙으로 인하여 KWO 사의 케이블카 (적재중량 10톤)를 이용하여 진입터널 입구까지 접근한다 (그림 22).

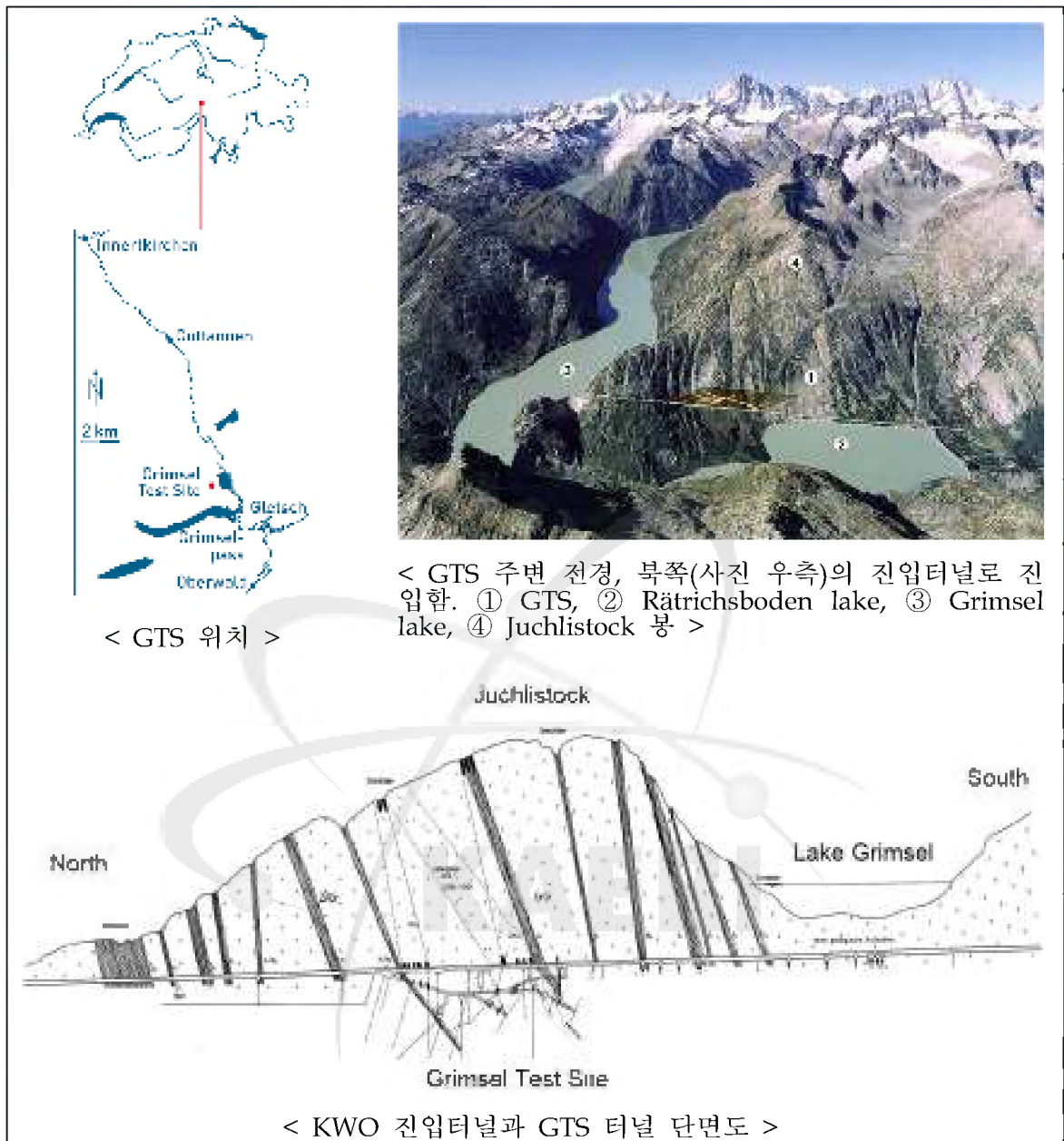


그림 22. GTS 위치와 터널 단면도

2.3 시설 현황

GTS 시설이 위치하는 KWO 진입터널의 해발 고도는 1,730m이고, 터널에서 지상의 Juchlistock 봉까지의 암층 두께는 400 ~ 450m 정도이다. 시설 접근은 차량 통행이 가능하도록 수평터널로 계획되었으며 동절기에는 KWO 사의 케이블카를 이용하

여 터널 입구부에 접근할 수 있다 (그림 23).

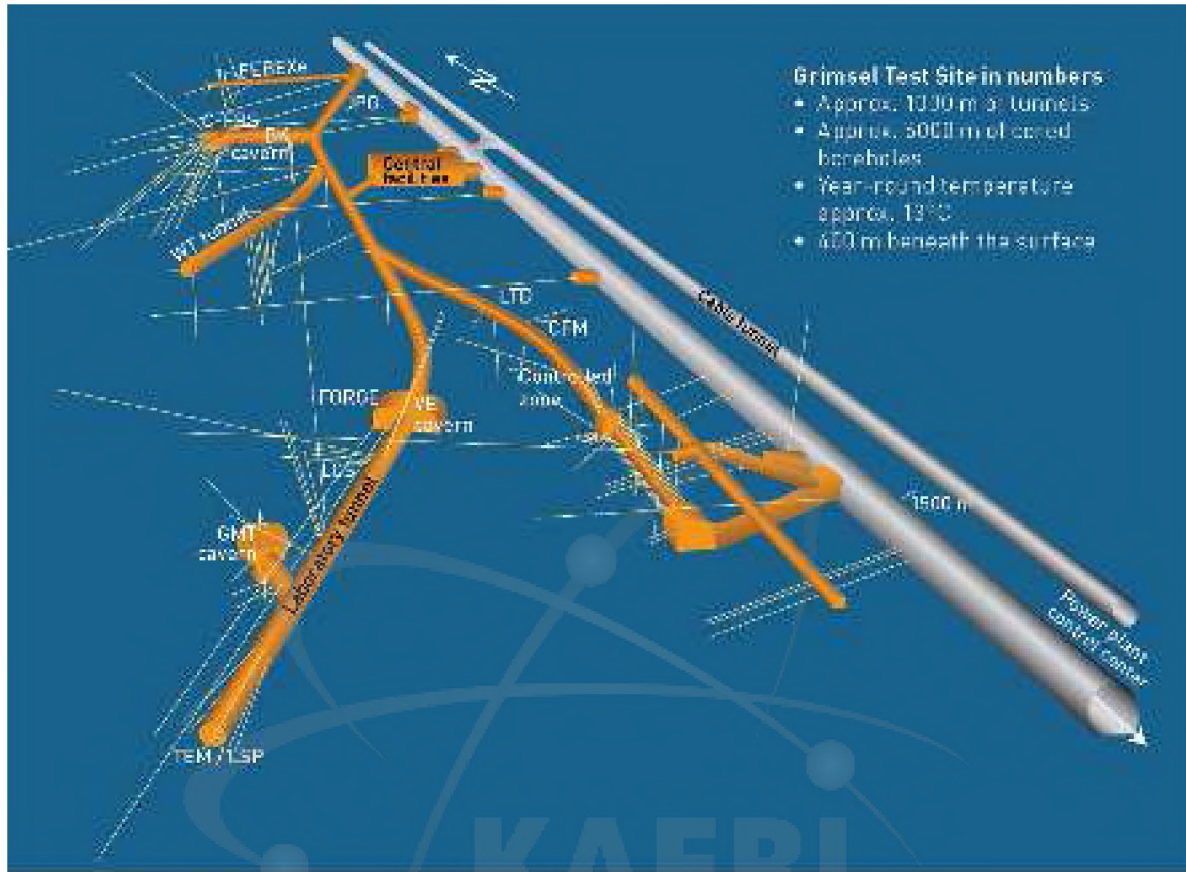


그림 23. GTS 시설 레이아웃 및 시험 공간

GTS 시설은 KWO 사의 진입터널 (그림 23에서 Power plant control center) 옆으로 TBM과 발파 방식으로 터널을 굴착하였다. 주요 터널 시스템은 다음과 같다.

- 터널 총 길이: 약 1.1 km
- 1983년 TBM 굴착 착수 (직경 3.5 m), 일부 구간은 천공 발파
- 1996년 확장: TBM 직경 2.28 m (FEBEX-drift)
- 1998년 확장: Smooth blasting cavern 및 silo (GMT)
- 배수: 자연배수 시스템
- 환기: 흡인식

3. 시설 운영

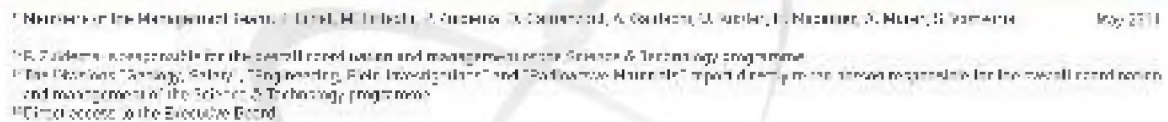
3.1 운영조직

GTS는 1983년부터 1984년까지 굴착 공사를 마무리하고 1984년부터 운영을 개시하였다. 시설의 제반 안전 관리를 위해 KWO 사와 협력하고 있으며, 자체적으로 GTS에서의 표준업무지침서를 마련하였다. 운영 측면에서는 다음과 같은 사항이 중점 관리되고 있다.

- KWO 사의 양수발전소 운영에 방해가 되지 않도록 독립적인 인프라시설로 운영
- GTS 터널 내 3 개 영역에서 배기시스템 운영 (약 5,000 m³/h, 굴착량 약 18,000 m³)
- GTS 시설 운영과 모든 시험장치에 무정전 전력 공급
- 액티나이드 통제구역은 폐쇄형 인프라시설로 운영

GTS 시설의 운영은 Nagra에서 주관하며, Nagra는 본사의 International Services and Projects (Dr. Stratis Vomvoris) 본부 내 GTS Project Manager (Dr. Ingo Blechschmidt)가 총괄 (그림 24)하며, 현지에서는 Site Management 부서가 관리 책임을 가지고 있다. GTS에서 이루어지는 모든 실증시험은 Planning Team에서 기술 지원을 담당하고 있다. 이와 함께 시설의 원활한 운영을 위하여 수력발전회사인 KWO 사, 주 정부, 지역 공동체, 그리고 연방정부와 협력관계를 유지하고 있다 (그림 25).

GTS 현장에서의 프로젝트는 Nagra 단독 프로젝트를 비롯하여 국제공동연구 등이 동시에 진행되고 있다. 전체 프로젝트는 본사의 PM이 총괄하며, 국제공동연구 프로젝트의 경우에도 각각의 프로젝트마다 참여국의 대표들로 구성되는 추진위원회의 의견을 반영하여 PM이 총괄하고 있다. 프로젝트마다 규모와 성격에 따라 추진조직이 달라질 수 있는데 그림 25에서 보는 바와 같이 연구책임자와 협력업체만으로 추진되는 소규모 조직에서부터 추진위원회-실험전담팀-연구책임자-협력업체로 구성되는 대규모의 조직이 운영되기도 한다. 프로젝트의 수는 단계별 계획에 따라 증감될 수 있다.



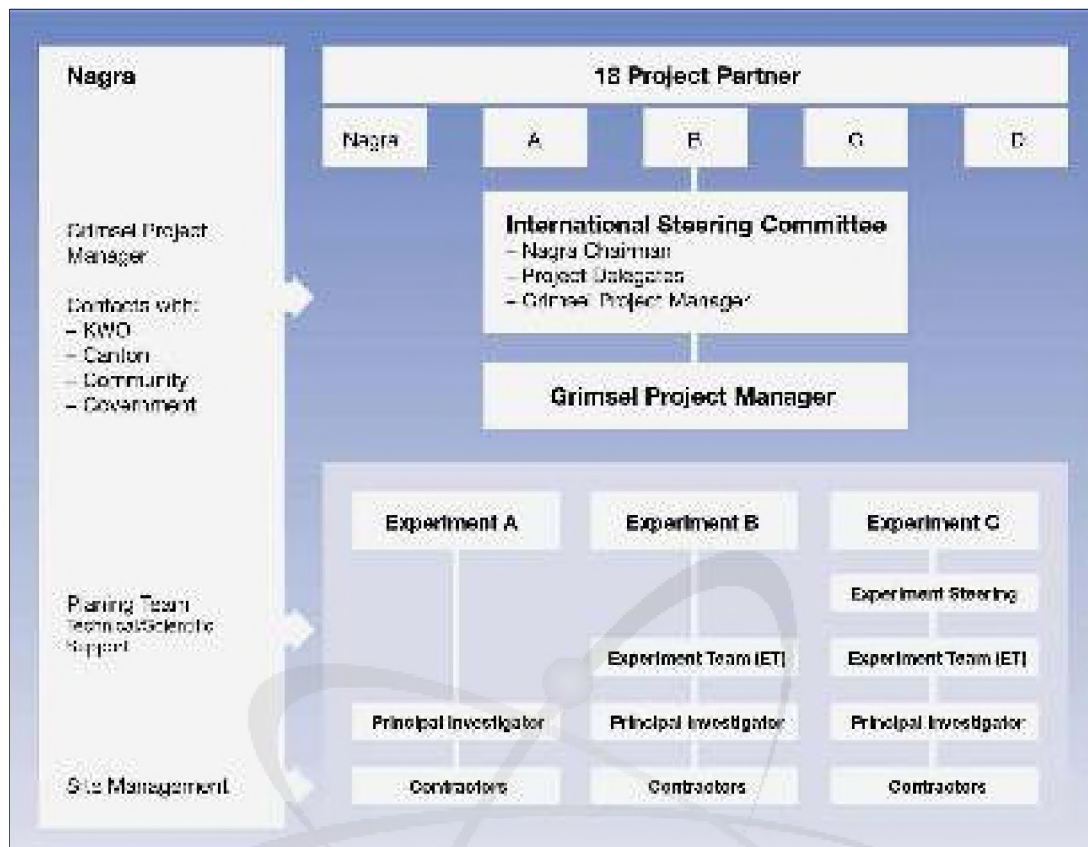


그림 25. GTS 시설 운영조직

3.2 시설 관리비

GTS 시설의 시설 관리비는 자료에 공개되어 있지 않다. 관리 책임자인 Dr. Ingo Blechschmidt의 답변에 의하면 GTS 시설 규모가 대형시설이 아니기 때문에 실제 연간 시설 운영에 소요되는 비용은 약 750,000 CHF이며, 이를 현재 기준의 환율(1,280원/CHF)로 환산하면 약 9.6억원/년이다.

3.3 국제협력

GTS 시설 내에서 이루어지는 실증시험 연구는 Nagra 자체 사업을 포함하여 대부분 국제공동연구 프로젝트로 추진되고 있다. 이 과정에서 많은 해외 유관기관들이 참여하고 있으며, 1980년대에는 독일, 스웨덴, 미국, 일본 등과 양자간 협력사업이 주류를 이루었고, 1990년대에는 다자간 협력사업이 본격화되었다 (그림 26).

2007년 3월 당시에는 다자간 협력사업이 활발하게 진행되어 9 개국에서 모두 25 개 기관과 유럽연합 참여하게 되었으며, 2010년 말 현재에는 한국을 비롯한 12개국의 25 개 기관에서 참여하고 있으며 (그림 27), 여기에는 대학교와 연구기관, 컨설팅업체 등이 포함되었다. 프로젝트 비용은 각국이 분담하는 형태로 마련되지만 유럽연합과 스위스 교육연구부에서 기금을 지원하고 있다. 이러한 연구개발 결과는 장기적으로 관련 지식을 유지관리하고 나아가 미래 세대에 노하우를 전달하는데 중요한 기여를 할 것으로 기대된다.



그림 26. 1984년부터 1990년 중반까지의 GTS 국제협력 현황



< 2007년 3월 당시의 국제협력 현황 (9 개 국 25 개 기관과 유럽연합) >



< 2010년 말 국제협력 현황 (한국을 비롯한 12 개 국 25개 기관과 유럽연합) >

그림 27. 2000년대 이후 GTS의 국제협력 현황

3.4 교육홍보

GTS 시설을 포함하여 Mont Terri 시설의 한 해 방문객 수는 3,200 명 정도이다. GTS 시설에만 현재까지 약 50,000 명이 방문했다. 정기적인 시설 방문 프로그램 외에도 방사성폐기물 처분부지 해당 지역주민을 대상으로 이틀 동안 시설 방문을 추진하기도 한다. 특별 행사로서 지질 관련한 행사를 개최하기도 한다. 시설 방문객을 위하여 최근에는 고준위폐기물의 정치 모형을 1:1 규모로 전시하고 있다.

GTS 시설은 IAEA의 사업인 “Centres of Excellence - Training in and Demonstration of Waste Disposal Technologies in Underground Research

Facilities”의 파트너 시설의 자격을 가지고 있으며, 정기적으로 전문가 훈련과정 프로그램과 펠로우쉽 과정의 이행을 위하여 시설을 제공하고 있다. 자국 내의 대학생들도 GTS 시설에서 진행되고 있는 여러 프로젝트에 박사 및 석사 학위과정의 일환으로 참여하고 있다.

2003년 스위스에 설립된 국제훈련센터(ITC, International Training Centre)는 원자력에너지 지식의 전달과 과학자, 엔지니어, 의사결정권자들의 지속적인 훈련에 초점을 맞추고 향후 전 세계 원자력산업기구와 정부기관의 필요에 부응하는 것을 목표로 하고 있다. 전 세계적으로 땅속 깊은 곳에 자리한 지하시설물에 맹독성 화학물질과 방사성폐기물을 저장하거나 처분하는 많은 사업이 진행되고 있다. 대부분의 방사성폐기물은 지층처분이 안전하고 실용적이고 지속가능한 유일한 해결방안으로 간주되고 있다. 이러한 프로젝트가 실현되기까지는 수십 년의 세월이 걸린다. 일부 국가에서는 벌써부터 전문적인 기술 기반을 유지하고 적절한 교육을 받은 과학자와 엔지니어들을 확보하는데 문제를 겪고 있다. ITC는 이러한 배경에서 프로젝트 관리 기관, 규제기관, 연구기관 또는 기타 이익단체에 치우쳐서 활동하지 않고, 대신 환경적으로 방사성폐기물을 안전하게 관리를 위해 모든 사람과 기관에 균형된 서비스를 제공하는 것을 목적으로 하고 있다. 교육과정을 들여다보면 폐기물관리 및 관련 환경문제와 관련된 과학, 공학, 의사결정 및 통신에 이르는 모든 분야에서 이론적이고 실용적인 교육과 연구를 실시하고 있다. ITC는 독립된 기구로 운영되고 있지만, 지하연구시설, 특히 GTS와 연계하여 교육을 진행하고 있다. 이러한 관계로 모든 단계의 전문교육 및 전 세계 대학교들과 연계한 대학과정에 GTS의 인프라와 데이터 베이스를 제공하고 있다

4. 부지 특성

4.1 부지조사 과정

1979년, Nagra는 자국 내 결정질암반 분포지역에 URL 시설을 구축하기로 결정하였다. 그 당시 Nagra는 스웨덴의 Stripa 광산의 연구개발 프로그램에 참여하고 있었고, Stripa에서의 연구개발을 자국 내에서 완전하게 마무리해야 한다는 요구가 있었다.

Nagra 입장에서는 솔직히 당시 고준위폐기물 처분 후보지로 고려되고 있던 스위스 북쪽에 분포하는 결정질암반에 URL을 건설하는게 더 적절했었다. 그러나, 북쪽 지역은 지형적으로 지표에 노출된 노두가 거의 없는 조건이었기에 그곳에서 URL 후보지를 찾기 위해서는 엄청난 조사가 요구되었고 시설의 심도 역시 깊어질 수 밖에 없는 상황이었다.

남쪽 지역 알프스 산맥의 Juchlistock 지역은 지표조사가 용이한 조건을 갖추고 있었다. Oberhasli 양수발전소의 진입터널에서 이루어진 지질조사 결과 URL 시설 구축에 적합한 조건을 갖추고 있으며 더불어 접근성도 양호한 것으로 판단되었다.

1980년에는 첫 번째로 Juchlistock 지역 내에서 후보지로 적합한 지역을 선택하여 집중적이고 정밀한 지질조사가 이루어졌다. 이후 1986년까지 다음과 같이 4 가지의 기본 목적을 가지고 지질, 수리지질, 지구물리 및 지화학 조사가 수행되었다.

- 기존 해외의 연구결과들을 자국의 처분장 후보지가 가지고 있는 특정 지질조건에 정성적 및 정량적 적용 가능성을 평가
- Nagra의 고준위폐기물 처분개념의 특수 조건과 관련된 특정 시험을 수행
- 지하에서 수행되는 다양한 현장시험의 모든 단계 (계획수립, 실험시행 및 결과 해석)에서의 도출되는 노하우 강화
- GTS 시설 내에서 이루어지는 다양한 기술개발, 시험, 적정 계측기술과 장치들의 적용성 결과에서 취득되는 실제적인 경험의 축적

Nagra가 1980~1986년까지 GTS 시설을 대상으로 부지특성조사 목적으로 수행한 모든 조사내용은 다음의 표 4와 같다. 1986년 이후 1994~1996년 사이에 특별히 지구물리탐사가 추가로 시행된 바 있다.

표 4. GTS 시설에서 수행된 지질, 수리지질, 암석역학 및 지구물리조사 항목

Field	Investigation method	Aim of investigation		Recording actual condition of rock				Checking effects of tunnel construction	
		Aspects		Petrography/ Mineralogy	Tectonics/ Jointing	Hydrogeology	Technical Properties	Rock formation	Flow paths
Geology	Surface mapping			X	X	X			
	Tunnel mapping			X	X	X			
	R&D facilities, GTS			X	X	X			
	Core logging			X	X	X			
Geophysics	Electrical and electromagnetic investigations in tunnels and boreholes				X	X			
	Electrometry			X					
	Sensations/acoustics, surface, tunnels, boreholes				X		X	X	
	Borehole TV and BQMS				X		X	X	
Rock mechanics	Rock temperature measurements						X	X	
	Tunnel mapping with UV light			X		X			
	Microscopy			X					
	Chemical analysis			X		X			
Rock hydraulics	Measurements and experiments in boreholes and tunnel						X	X	
	Laboratory experiments						X		
	Criability of rock						X		
Hydro-chemistry	Water-flow and temperature measurements					X			X
	Pressure measurements in boreholes					X			X
	Injection tests in boreholes and tunnel					X			X
	Flow-through experiments					X			
Hydro-chemistry	General chemical and physical parameters in surface- and groundwaters					X			X
	Trace elements in groundwater					X			
	Isotopes in surface and groundwaters					X			X

4.2 부지지질특성

GTS 시설의 모암 (Aar Massif)인 화강암질암은 약 3억 년 전에 지구 내부의 화강암질 마그마가 약 13 km 깊이에서 서서히 냉각되면서 형성되었다. 냉각 과정에서 모암의 체적이 감소되었으며 이 과정에서 일차적인 단열체계가 형성되었다. 형성 과정 후기의 휘발성이 큰 잔류 마그마는 위쪽으로 상승하면서 암맥 (lamprophyre 및 aplite)을 형성하였다 (그림 28).

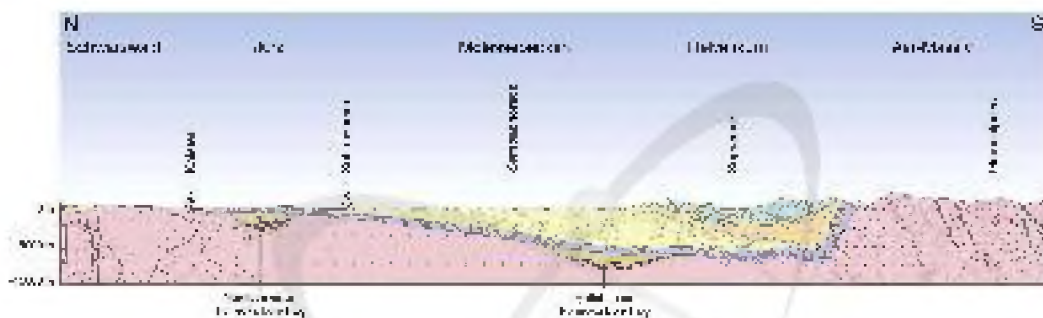


그림 28. 스위스의 지질단면도 (북-남 방향 단면)

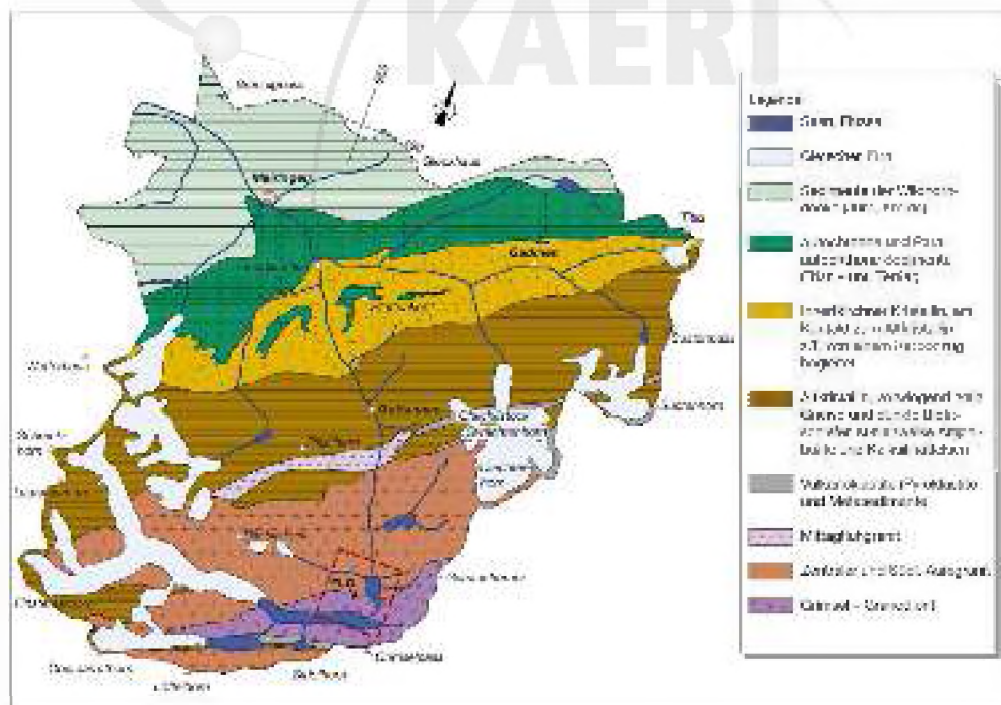


그림 29. Grimsel 주변 지역의 지질 분포도

4천만년 전에는 알프스 조산운동이 있었으며 이 때의 지각변동은 GTS 시설 주변에도 영향을 미쳐 Aar Massif는 침강하면서 북쪽으로 이동하는 알프스 횡와습곡대 위에 놓이게 되었다. 이러한 지각변동을 거친 결과로 Aar Massif는 고온, 고압 조건을 겪게 되었고 전단대와 단열체계가 형성되었다.

Grimsel 지역의 결정질암은 오랜 동안 하나의 지괴 (massif), 즉, 피복된 퇴적암의 기반암을 이루는 대규모 결정질 암반 블록으로 여겨졌다. 그러나, 최근의 Lotschberg 철도 터널에서 관찰된 결과에 의하면 Aar Massif는 사실 지역에 따라서 퇴적에 피복된 거대한 층상암층 (thrust sheet)인 것으로 밝혀 졌다 (그림 29).

현재 이 지역은 여전히 융기와 침식 작용이 진행되고 있으며 그 융기율은 0.5 ~ 0.8 mm/y 이다.



5. 시설 확보 추진 절차

5.1 입지 요건

GTS 시설의 위치는 Nagra 본사와 직선거리로 약 100 km 정도이나, 승용차로 약 2.5 시간 소요된다. 본사와의 접근성은 그리 양호한 편은 아니나 산악지의 GTS 시설의 상시 출입에는 큰 어려움이 없다.

지질학적으로는 Nagra가 고려했던 결정질암이 지괴형태로 넓게 분포하고 있다는 점에서 가장 큰 매력을 가진 지역이다. 적합한 부지를 선정해야 한다는 난제 속에서 다행히도 지하 터널을 다수 소유하고 있는 KWO 사의 적극적인 협조가 시설 구축의 실마리를 풀어 주는데 큰 역할을 했다. 현지어 실험을 수행하는 과학자들 입장에서 보면 지하의 항온 조건이 항상 쾌적한 근무환경을 유지시켜 주고 있기 때문에 큰 어려움이 없고, 현장 내 중앙 사무실에 마련된 연구실, 실험실, 화장실, 회의실 등은 일반 지상 연구동 건물과 큰 차이가 없기 때문에 연구활동에 큰 지장을 주지는 않는다.

5.2 추진 경위 및 절차

Bernese Oberland 지역의 Aar Massif 결정질암반에 자체적으로 독립적인 URL을 건설한다는 Nagra의 결정은 1970대로 거슬러 올라간다. 그 당시에 스위스의 고준위 폐기물 심지층 처분에 대한 타당성 연구 (Project Gewähr)는 결정질암반에 초점을 두고 있었다. 결과적으로 Nagra는 결정질암의 조건과 유사한 지질조건을 갖춘 암층에 타당성 연구를 뒷받침해 줄 수 있는 URL을 건설하는 것에 매우 큰 관심이 있었다.

그런 상황에 있을 때 양수발전소를 운영하는 회사인 KWO (Kraftwerke Oberhasli AG) 사에서 양수발전소를 운영하기 위해 구축한 대규모의 지하 인프라시설 중 하나의 터널 (Gerstennegg/GRIMSEL II)을 활용해서 Nagra 측이 고려하고 있는 타당성 연구에 적합한 결정질암반을 접근할 수 있는 URL 시설을 구축할 것을 제안하였다. 그 이후로 KWO 사는 Nagra의 가장 중요한 파트너 관계를 유지해 오고 있으며

현재에 이르기까지 GTS 시설의 안전한 운영을 보장해 주고 있다.

Nagra에서는 사업 초기부터 GTS 시설이 순수 연구용 시설임을 명확히 제시하였으며, 이러한 접근방법은 주변 지역사회로부터 매우 높은 지지를 유도할 수 있었다.

GTS 시설 구축의 주요 절차와 경위는 다음과 같다.

- 1979
 - URL 부지 선정 프로그램 및 지질조사 착수
- 1980
 - 수평 조사시추공 굴진
- 1982. 2
 - GTS 시설 구축사업 기본계획 결정
- 1982. 6
 - Kraftwerke Oberhasli AG (KWO) 양수발전소회사와 협력협정 체결
- 1982. 11
 - 연방정부로부터 건설 및 운영허가 취득
- 1983. 5 ~ 1983. 11
 - 1단계 시설 건설 (TBM을 이용한 전단면 굴착, 직경 3.5 m, 길이 1.1 km, 굴착량 14,800 톤)
- 1984. 6. 20
 - 1단계 시설 건설 완료 및 운영 착수
- 1990
 - 방사성핵종 이용 통제구역 인허가 취득 (IAEA level B/C 유형)
- 1996
 - FEBEX-drift 용 터널 확장 (TBM 직경 2.28 m)
- 1998
 - GMT 용 Smooth blasting cavern 및 Silo 굴착
- 2000
 - Smooth blasting cavern 굴착

5.3 건설일정

☞ 2.5.2 절 참조

5.4 건설

☞ 2.5.2 절 참조

5.5 건설비

GTS 시설의 건설비는 공식적으로 공개되어 있지 않다. 관리 책임자인 Dr. Ingo Blechschmidt의 답변에 의하면 먼저, 이 시설은 거의 30년 전에 건설된 것이므로 현재의 화폐 가치와 직접 비교할 수는 없다는 점이다.

1979년부터 1984년 사이에 이루어진 TBM 1.1 km의 굴착과 발파에 의한 굴착 등에 소요된 비용은 11,000,000 CHF이며, 이를 현재 기준의 환율 (1,280원/CHF)로 환산하면 약 140억원이다. 당시에 굴착 비용을 절감할 수 있었던 것은 부지 제공자인 KWO사의 기존시설 (진입터널, 안전 및 인프라시설)을 최대한 활용할 수 있었기 때문이다.

6. 처분기술 개발 및 실증시험 연구 현황

6.1 연구 프로그램 선정 전략

Nagra의 GTS 시설에서의 연구 프로그램 선정 전략은 과제 선정 절차와 선정된 과제의 우선 순위 결정 기준의 적용으로 구성된다. 먼저, 과제의 선정 절차는 Top-down 방식으로 선정하되 이때 고려된 사항은 다음과 같다.

- 사용자의 참여 및 제안
- 미해결 문제 정의
- 핵심적인 불확실성, 데이터베이스 누락, 부지특성조사의 최적화를 위한 가능성 등을 확인
- 처분 프로그램과 연계된 특정 결과물이 포함된 실행계획 수립
- 체계적인 순위결정 절차에 적용

선정된 과제의 순위 결정 기준은 다음과 같다.

- 처분 안전성평가에 타당성 여부
- GTS 환경에서의 연구 적합성
- 비용편익 분석
- 연구개발의 성공 가능성
- LLW/HLW 프로그램을 위한 특정한 타당성 여부
- PR을 위한 타당성
- 국제적인 관심사항

6.2 연구 프로그램 단계

GTS 시설에서의 연구개발 프로그램은 다음과 같이 단계별로 추진되고 있다.

- 1~2 단계 (1983 ~ 1990)
 - Exploratory boreholes and geological mapping
 - AU Excavation effects
 - BK Fracture flow test (BGR)

- EM Electromagnetic high frequency measurements (BGR)
- FRI Fracture zone investigation (Nagra/USDoE)
- GS Rock stress measurements (BGR)
- HPA Hydraulic potential (Nagra)
- MI Migration experiment (Nagra/JNC)
- MOD Hydrodynamic modelling (Nagra)
- NFH Near-field hydraulics (Nagra)
- NM Tiltmeters (GSF)
- SVP Prediction ahead of the tunnel face (Nagra)
- US Underground seismic test (Nagra)
- UR Underground radar (Nagra)
- VE Ventilation test (GSF)
- WT Heater test (GSF)
- 3 단계 (1990 ~ 1993)
 - BK Fracture flow test (BGR/Nagra)
 - MI Migration test (JNC/Nagra)
 - MOD Hydrodynamic modelling (Nagra)
 - ZU Unsaturated zone (Nagra)
 - VE Ventilation test (GSF/Nagra)
 - Large diameter borehole (Andra)
- 4 단계 (1994 ~ 1996)
 - BOS Borehole sealing (Nagra)
 - EDZ Excavation disturbed zone (Nagra)
 - EP Excavation of the MI shear zone (JNC/Nagra)
 - TOM Further development of seismic tomography (Nagra)
 - TPF Two phase flow (Nagra)
 - CP Connected porosities (Nagra/JNC)
 - ZPK Two phase flow in fracture network of the tunnel near-field (BGR)

- ZPM Two phase flow in the matrix of crystalline rocks (GSF)
- 5 단계 (1996 ~ 2004)
 - CRR Colloid and Radionuclide Retardation Experiment (Andra, Enresa, FZK, JNC, Sandia, Nagra)
 - EFP Effective Field Parameters (BGR)
 - FEBEX Full-scale High Level Waste Engineered Barriers Experiment (Project lead by Enresa)
 - FOM Fiber Optic Monitoring (DBE EEIG Nagra)
 - GAM Gas migration in shear zones (Andra Enresa CSIC UPC Sandia ETH)
 - GMT Gas Migration in EBS and Geosphere (RWMC Nagra/Obayashi)
 - HPF Hyperalkaline Plume in Fractured Rocks (Andra Enresa SKB JNC Sandia)
- 6 단계 (2003 ~ 2013)
 - FEBEXe (Full-scale HLW Engineered Barriers Experiment - extension) 1:1 demonstration of the emplacement concept for high-level waste
 - FORGE (Fate of Repository Gases) Gas migration in the engineered barriers (bentonite/sand)
 - GAST (Gas-Permeable Seal Test) Gas-permeable tunnel sealing (planning phase)
 - CFM (Colloid Formation and Migration) Formation and transport of colloids and their influence on radionuclide mobility
 - LCS (Long-term Cement Studies) Long-term interactions between cement solutions, porewaters and the rock
 - LTD (Long-term Diffusion) Long-term diffusion of radionuclides
 - C-FRS (CRIEPI Fractured Rock Studies) Hydrogeological and geological characterisation of tectonic fracture structures
 - LSP (Low-pH Shotcrete Plug) Use of low-pH cements
 - TEM (Test and Evaluation of Monitoring Techniques) Testing

monitoring techniques

- JGP (JAEA Grouting Project) Cement injection under high formation pressures



6.3 초기 20년 연구 결과

초기에는 GTS의 기술적인 업무 프로그램이 3년 단위로 진행되었다. 그러나 10년이 지난 시점에서 자체 평가한 결과 목표한 연구 성과를 거두기에는 이 기간이 터무니없이 짧은 것으로 드러났다. 이러 이유로 5단계(1996~2004)라는 프로젝트가 6년 기간으로 마련되었다. 1984년에 GTS 프로그램이 출범한 이후 검토된 주제는 대략 다음과 같이 분류할 수 있다

- **지구물리학적·수문지리학적 방법을 비롯한 처분 부지 분석기술 개발과 시험:** 광산개발 등을 위한 기존의 방법이 있지만 이러한 기존의 방법을 심지층 처분시설의 안전성을 설계하고 실증하는 전문가들의 특별한 요건에 그대로 적용하기에는 무리가 있다. 시간과 비용이라는 압박요인, 그리고 점차 정치적으로 민감한 사항이 있기 때문에 현장에서 “있는 그대로를 파악하는 것”이 큰 도움이 되지 못한다. 따라서 이러한 연구에 GTS가 이상적인 테스트 베드 역할을 하게 된다. GTS가 이와 관련된 모든 학문에 시너지효과를 일으키면서 점차 중요한 시설로 부각되고 있다.
- **방사성폐기물 처분시설 건설 방법 및 건설이 지질학적 특성에 미치는 영향, 특히, EDZ와 방사성 발열의 결과에 대한 평가:** 처분시설 설계 및 건설을 위한 공학기술 요건은 재래식 광산업과 터널링 산업에서의 요건을 훨씬 능가한다. 따라서 집중적인 개발과 시험이 요구된다. 이것은 특히 공학적·천연방벽의 장기적인 성능에 영향을 끼치는 시설물의 특성에 집중되어 있다.
- **공학적방벽 설치 과정과 성능 평가모델 개발 및 시험:** 이 연구는 포화, 가열, 가스가압 등의 복합적인 과정을 시험하는 것이다. 또한 상기 항에 언급된 연구를 보완하는 역할을 한다.
- **단열이 분포하는 모암에서의 핵종이송 특성을 평가하기 위한 모델과 데이터베이스에 관한 정밀 시험:** 시멘트 구조물에서 나온 고알칼리성 용액의 침출과 뒤채움재나 완충재에서 나오는 콜로이드 같은 자연적인 상태와 섭동 모두 고려대상이다. 이 프로젝트는 GTS의 방사성물질 통제구역에서 실시된다. 현장 시료분석의 경우 GTS의 중앙시설에 있는 소형 실험실을 이용할 수 있다. 방사성 핵종 방출과 후속 이송 특성을 정량화하는 능력은 사업자와 규제기관

모두에게 매우 중요한 사항이다. 이러한 현장에서의 연구 결과는 이론적인 모델과 현실성이 부족한 실내시험 결과들을 보완할 수 있게 된다.

상기의 모든 프로젝트에는 여러 기관이 다양한 분야에서 참여하였으며 비용도 함께 분담하였다. 2003년까지 실시된 5단계 실험연구 결과는 많은 전문보고서와 논문으로 발표되었다.

참고로, 5단계 프로그램 진행 중인 2003년에 GTS 설립 당시(1983)의 목표 대비 자체평가한 결과의 의견은 다음과 같다.

- 연구개발에 필요한 수단과 기술들이 스위스에 전수되었다. 당초 요구보다 더 많은 기술개발이 이루어졌다.
- 전문기술이 확립되었고 국제협력관계가 강화되었다.
- 연구결과는 곧바로 국가 처분프로그램에 적용 가능하도록 되었다.
 - 지구물리탐사, 다중패커를 이용한 시추공시험, fluid logging, 처분공 밀봉기술
 - 처분 안전성평가를 위한 지질자료 데이터베이스 개발
 - 단열암반에서 핵종이동 모델 개발
- 일반 대중과의 대화가 증진되었다.

위와 같은 자체평가 의견에 따라 5 단계 이후부터는 GTS의 연구개발 프로그램이 다음과 방향으로 진행되어야 한다는 공감대가 형성되었다.

- R&D로부터 처분장 계획, 개발 프로그램(RDP, Repository Development Program)으로 전환
- 건설 인허가 사전에 full scale 실증시험을 통한 핵심 개념의 신뢰도 증진
- 장기적 핵종 지연 프로젝트를 통하여 핵심 모델을 확정시키기 위한 최신 과학 기술 적용 및 모델링 접근방식에 있어서 보수적인 방법의 제거
- 폐기물 취급, 정치, 모니터링, HLW 및 SF의 회수 등과 같은 핵심 이슈들에 대한 노하우 개발에 전력
- 전문기술인의 교육훈련 및 지식 전수

6.4 6단계 연구 프로그램 기획

GTS와 여러나라의 URL에서 실시된 연구결과, 한 가지 눈에 띄는 경향이 있었다. 즉, 소규모로 단기간에 처리할 수 있는 이슈들이 반복적으로 다루어진 반면, 나머지 중요한 프로젝트들은 처분시설 구조물을 전면적으로 모사하는 방향으로 진행시켜야 했고 훨씬 더 오랜 기간(5단계의 6년 기간 이상)의 실험이 필요했다는 것이다. 특히 연구기간이 중요한 문제로 부각되었다. 다년간의 연구가 커다란 성과를 올리려면 프로젝트 기간을 수십 년으로 늘리는 작업이 필요하다는 점이 지적되었다. 기간에 대한 문제 제기는 현장 실험팀의 새로운 입장이었으므로 GTS 6단계는 10년 기간으로 기획하였다. 다만 국가의 사업 요건에 맞도록 프로젝트 기간을 탄력적으로 연장할 수 있도록 하였다. 현재의 6 단계 프로젝트는 스위스의 처분시설 부지선정, 시설 설계, 건설, 운영, 폐쇄, 인허가 절차와 관련된 구체적인 계획과도 연결되어 있다. 즉, 고준위폐기물 처분사업을 효율적으로 지원하기 위한 연구, 설계, 관련 기술개발을 위한 통합된 접근방법이 사용되었다.

고준위폐기물 처분시설에 대한 개념은 타당성조사를 시작으로 수십 년 전에 착수된 바 있다. 그 이후로 처분시스템의 개발, 안전성에 위해되는 조건들의 정의, 특히 국민적 합의의 중요성에 대한 인식의 확산에 커다란 진전이 있었다. 6 단계의 프로젝트들은 과거에 GTS에서 실시된 여러 가지 관련 실험을 이용하여 최근의 전체적인 시스템 성능평가에 따른 결과와 함께 구체적인 방식의 방사성폐기물 처분개념을 심도 있게 개발할 수 있다.

6.5 6단계 연구 프로그램 현황

□ EBS의 장기 거동 특성

- EBEXe (Full-scale HLW Engineered Barriers Experiment-extension): 실규모 폐기물 정치개념에 관한 실증 시험 연구로서, 스페인 국립방사성폐기물관리기구(Enresa)의 지휘 하에 진행되는 전면적인 공학적방벽 실험이다. 이 프로젝트에서는 처분용기의 정치 타당성을 증명하는 것과는 별개로 THMC 모델들과 이와 연관된 데이터베이스를 한데 묶어 시험하고 장기적인 모니터링 시스템의

성능에 관한 중요한 정보를 제공한다.

- FORGE (Fate of Repository Gases): 공학적방벽 (벤토나이트 완충재와 모래질 뒷채움움재) 내에서의 처분용기 부식과 유기물질 분해 작용으로 생성되는 가스의 이동 특성 규명을 위한 실험
- GAST (Gas-Permeable Seal Test): 처분터널의 밀봉재 재료특성 중 가스 투과성 시험 연구 (계획 단계)

□ 핵종 이송 특성 (폐기물-EBS-천연방벽 간의 상호 복합작용)

- CFM (Colloid Formation and Migration): 핵종의 이송 경로 상의 단열과 전단대 근처에 있는 콜로이드가 이송 특성에 미치는 영향 규명
- LCS (Long-term Cement Studies): 암반과 처분장 주변의 고알칼리용액 간의 상호반응작용 규명 실험

□ 천연방벽 특성평가

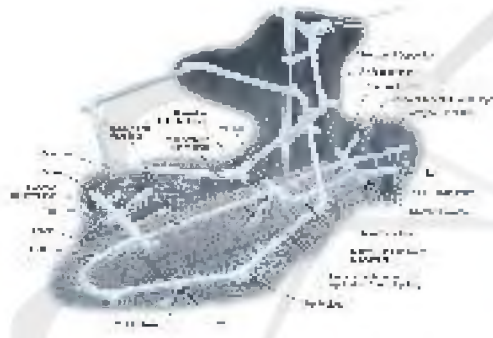
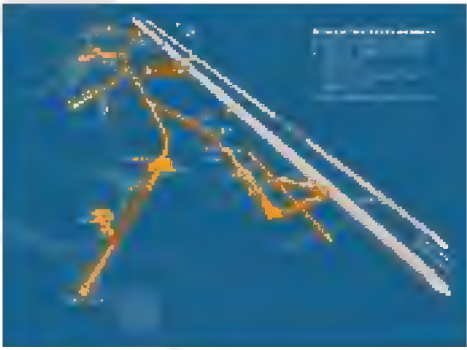
- LTD (Long-term Diffusion): 단열을 따라 이송하는 핵종이 부분적으로 잔류되면서 암반 기질 쪽으로 확산되는 특성을 장기적으로 규명
- C-FRS (CRIEPI Fractured Rock Studies): 지체구적으로 생성된 단열 구조의 지질학적 및 수리지질학적 특성 규명 연구 (일본 CRIEPI에서 주도)

□ 처분장 건설 및 운영 관련 기술

- LSP (Low-pH Shotcrete Plug): 처분장 근계 영역의 수소이온농도를 낮추기 위한 숏크리트 재료 개발 연구
- TEM (Test and Evaluation of Monitoring Techniques): 처분장 주변의 장기 모니터링을 위한 장치 및 기술개발
- JGP (JAEA Grouting Project): 일본 JAEA에서 주관하는 암반 내 지하수 고압 조건에서의 시멘트 그라우팅재 주입기술 개발

제 5 장 결 론

해외 방사성폐기물 관리 전담기관들에서는 자국의 RDP를 지원하기 위한 핵심적인 대형 인프라로서 URL 프로젝트를 추진하고 있다. 스웨덴의 SKB의 Äspö Hard Rock Laboratory 시설과 스위스 Nagra의 Grimsel Test Site 시설의 시설 개요 및 운영 체계, 시설 부지 요건, 시설 확보 추진 절차 및 현황, 그리고 처분기술 개발 및 실증시험 연구 현황을 요약하면 다음과 같다.

구 분	스웨덴 SKB	스위스 Nagra
	Äspö Hard Rock Laboratory	Grimsel Test Site
시설 배치		
URL 유형	PBG-URL	Generic URL
모암	화강암	화강암
시설 규모	○ 심도: 450m ○ 동굴 총길이: 3.5km ○ 동굴 구성 - 수직구 3개(출입용 1, 유틸리티 2) - 진입동굴	○ 심도: 450m ○ 동굴 총길이: 1.1km ○ 동굴 구성 - 기존 양수발전소 진입터널에서 분기하여 수평 동굴 건설
굴착방식	제어발파/TBM	TBM/일부 제어발파
건설비 ¹⁾ 및 시설 관리비	○ 건설비: 476억원 ○ 시설 관리비: 34억원/년	○ 건설비: 140억원 ○ 시설 관리비: 9.6억원/년
건설 기간	1990~1995	1983~1984
입지 조건	○ Oskarshamn 원전 부근 Äspö 섬 ○ 기존 인프라 양호 ○ OKG 발전사 소유 부지 임대	○ KWO 양수발전소 회사의 협조 ○ 기존 인프라 및 안전시설 양호 ○ 동절기 케이블카 이용

구 분	스웨덴 SKB	스위스 Nagra
	Äspö Hard Rock Laboratory	Grimsel Test Site
시설확보 절차	○ SKB R&D Programme 86에서 사업 제안 ○ 1986~1989 부지조사 ○ 1990 정부/지자체 승인 ○ 1990~1995 시설 건설 ○ 1995~ 운영	○ 1979~1981 부지조사 ○ 1982 -기본계획 결정 -KWO 양수발전소회사와 협력협정 체결 -정부 승인 ○ 1983~1984 시설 건설 ○ 1984~ 운영
현장 실증시험	○ 연구분야 -Geoscience -Natural Barrier -EBS -System Engineering -국제공동연구	○ 현재 6단계 연구 수행중 -EBS -핵종이동 -천연방벽 -처분장 건설 및 운영기술 -국제공동연구
처분사업 주요 일정	○ 2009 Forsmark 원전 인근 Söderviken 부지를 사용후핵연료 최종처분장으로 선정 ○ 2011. 3월 건설 인허가 신청 ○ 2015 건설 착수, 2020 초 준공 예상	○ 2010 부지선정프로그램 승인 ○ 고준위폐기물 처분장 3개 점토암 지층 후보지역 선정 ○ 2020 최종 처분부지 선정, 2040 처분장 운영 계획

¹⁾ 건설 당시의 투자비를 현재의 환율로 환산한 비용임.

스웨덴과 스위스의 처분사업 주요 일정에서 처분기술 개발을 위하여 URL 시설을 어느 시점에 구축하였는지 정리하면 그림 30과 같다. 고준위폐기물 처분사업은 1970년대부터 개념 개발이 시작되었다. 본격적인 처분부지 선정은 1990년대에 시작되었으며 최종 처분부지 결정까지는 짧게는 15년, 길게는 30년 가까이 긴 기간이 소요되었다. 최종 처분부지에서의 조사, 설계, 건설 인허가를 거쳐 운영에 이르기까지는 10~20년이 소요될 것으로 계획하고 있다.

스위스는 기존의 양수발전소 회사의 적극적인 협조를 바탕으로 매우 짧은 기간 내에 URL 시설을 구축하였으나 스웨덴은 세계에서 대표적인 PBG-URL 시설을 건설한 경우에 해당된다. 최종 처분장 운영에 앞서 URL 시설에서 본격적인 기술개발을 수행한 기간은 스웨덴 30년, 스위스 50년 이상이다.

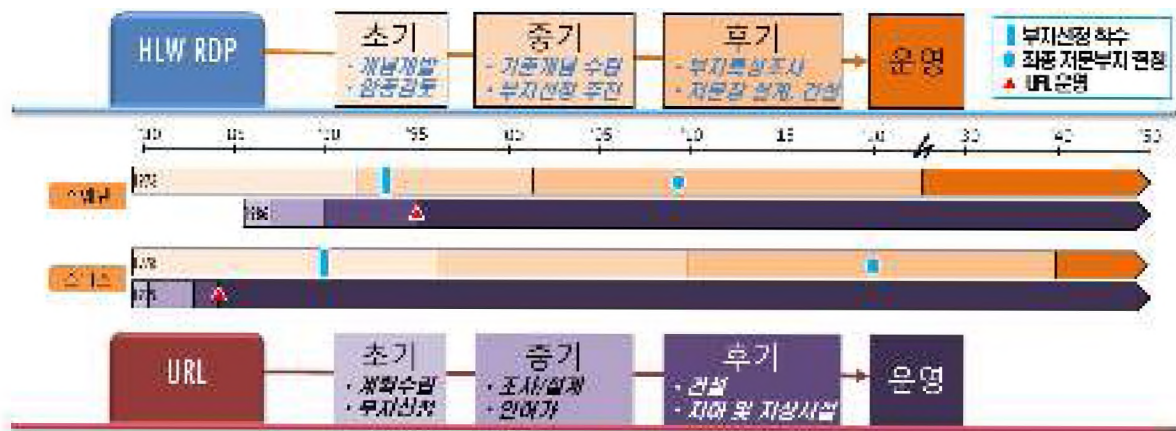


그림 30. 처분사업 일정과 URL 시설 구축 시기

URL에서의 실증시험은 부지 조사기술, 천연방벽의 격리 및 지연특성, 공학적방벽의 복합거동, 핵종이동, 처분장 설계, 건설 및 운영, 재회수 기술 및 시스템 공학기술 등으로 분류할 수 있다. 근래의 URL에서의 실증시험 추세는 기초적인 연구가 점차 감소되어 가고, 처분방법의 최적화, 복합현상 진행과정의 이해에 필요한 특정 자료의 수집과 복합적인 모델의 검증, 핵심적인 안전성 평가모델의 시험 및 개발, 지하 심부의 화학적 환경 등과 같은 장기적 안정성과 관련된 현안과제들, 그리고 장기적 성능 검증을 요하는 단위 시스템에 대한 장기적인 실증시험 등이 관심의 대상이 되고 있다.

참고문헌

- 김경수, 2003, 방사성폐기물 처분과 지하연구시설의 이론에 관한 교육훈련, 해외출장보고서, KAERI/OT-1218/2003, 50p.
- 김경수, 2003, 방사성폐기물 처분과 지하연구시설의 이론에 관한 교육훈련, 해외출장보고서, KAERI/OT-1218/2003, 50p.
- 한국방사성폐기물관리공단, 2011, 국외 처분시설 부지선정 프로그램 분석 보고서, 14215-K-TR-001, 393p.
- 한국원자력연구원, 2008, 고준위 방폐장 부지선정기준 및 절차 수립에 관한 연구, 지식경제부, 1-2007-0-033.
- H.R.Keusen, J. Ganguin, P. Schuler and M. Buletti, 1989, Geology of Grimsel Test Site, Nagra NTB 87-14E, 166p.
- IAEA, 2001, The use of scientific and technical results from underground research laboratory investigations for the geological disposal of radioactive waste, IAEA-TECDOC-1243, 67p.
- Lars O. Ericsson, 1999, Geoscientific R&D for high level radioactive waste disposal in Sweden - current status and future plans, Engineering Geology 52, p. 305-317.
- Nagra, 2002, Bulletin 34, 15p.
- Nagra, 2010, 2010 Annual report, 57p.
- Nagra, 2010, Brochure of Grimsel Test Site, 2010, 4p.
- NEA/RWM, 2001, GOING UNDERGROUND FOR TESTING, CHARACTERISATION AND DEMONSTRATION (A Technical Position Paper), NEA/RWM(2001)6/REV, 630.
- OECD/NEA, 2001, The Role of Underground Laboratories in Nuclear Waste Disposal Programmes, 47p.

- SKB, 1989, Handling and final disposal of nuclear waste, Hard Rock Laboratory, Background report to R&D-Programmes 89, 59p.
- SKB, 1992, Treatment and final disposal of nuclear waste - Äspö Hard Rock Laboratory, Background report to R&D-Programmes 92, 54p.
- SKB, 2005, Characterisation methods and instruments - Experiences from the construction phase in HRL, SKB TR-05-11, 251p.
- SKB, 2010, Äspö Hard Rock Laboratory - Planning Report for 2010, International Progress Report, SKB IPR-10-06, 99p.
- W. Kickmaier, 2003, Working in hard rock environments Grimsel Test Site Introduction, ITC, 45p.
- W. Kickmaier, S. Vomvoris and I. McKinley, 2005, Brothers Grimsel, Nuclear Engineering International, 2005. 2.
- www.bergteamet.se, 2009, Rock solid, a trade magazine, Blast Tunnels with Centimetre Precision.
- www.grimsel.com/gts-information/about-the-gts/25-years-of-history-at-the-gts-.htm
- www.jaea.go.jp/english/news/b060612, Report of President Tono-zuka's business trip to Europe (Sweden, Finland and France).
- www.sciencemag.org, 2004, Deep Repositories: Out of Sight, Out of Terrorists' Reach, Vol. 303.
- www.thelocal.se/19824/20090602/, The Local Sweden's News in English, Sweden poised to bury nuclear waste for 100,000 years.

서 지 정 보 양 식					
수행기관보고서번호	위탁기관보고서번호	표준보고서번호	INIS 주제코드		
KAERI/AR-915/2012					
제목 / 부제	Deep URL 개발 현황 분석 보고서 - Äspö HRL, GTS				
연구책임자 및 부서명 (AR,TR 등의 경우 주저자)	방사성폐기물처분연구부 김경수				
연구자 및 부서명	방사성폐기물처분연구부/ 배대석, 김건영				
출판지	한국	발행기관	한국원자력연구원	발행년	2012.1
페이지	98 p.	도표	있음(○), 없음()	크기	21cm x 30cm
참고사항					
공개여부	공개(○), 비공개()		보고서종류	기술현황분석보고서	
비밀여부	대외비 (), — 급비밀				
연구위탁기관			계약번호		
초록 (15-20줄내외)	고준위폐기물 처분기술 개발의 핵심적인 인프라인 URL 시설의 개발 현황을 분석하기 위하여 스웨덴의 SKB의 Äspö Hard Rock Laboratory 시설과 스위스 Nagra의 Grimsel Test Site 시설의 개요 및 운영 체계, 시설 부지 요건, 시설 확보 추진 절차 및 현황, 그리고 처분기술 개발 및 실증시험 연구 현황 등을 조사하였다. 스웨덴과 스위스의 고준위폐기물 처분사업은 1970년대부터 개념 개발이 시작되었다. 본격적인 처분부지 선정은 1990년대에 시작되었으며 최종 처분부지 결정까지는 짧게는 15년, 길게는 30년 가까이 긴 기간이 소요되었다. 최종 처분부지에서의 조사, 설계, 건설 인허가를 거쳐 운영에 이르기까지는 10~20년이 소요될 것으로 계획하고 있다. 스위스는 기존의 양수발전소 회사의 적극적인 협조를 바탕으로 매우 짧은 기간 내에 URL 시설을 구축하였으나 스웨덴은 세계에서 대표적인 PBG-URL 시설을 건설한 경우에 해당된다. 최종 처분장 운영에 앞서 URL 시설에서 본격적인 기술개발을 수행한 기간은 스웨덴 30년, 스위스 50년 이상이다. URL에서의 실증시험 추세는 처분방법의 최적화, 복합현상 진행과정의 이해에 필요한 특정 자료의 수집과 복합적인 모델의 검증, 핵심적인 안전성 평가모델의 시험 및 개발, 지하 심부의 화학적 환경 등과 같은 장기적 안정성과 관련된 현안과제들, 그리고 장기적 성능 검증을 요하는 단위 시스템에 대한 장기적인 실증시험 등이 관심의 대상이 되고 있다.				
주제명키워드 (10단어내외)	지하연구시설, Äspö HRL, Grimsel Test Site, 시설 개요, 운영 체계, 시설 확보 추진 절차, 실증시험				

BIBLIOGRAPHIC INFORMATION SHEET					
Performing Org. Report No.		Sponsoring Org. Report No.		Standard Report No.	INIS Subject Code
KAERI/AR-915/2012					
Title / Subtitle		State-of-the-Art Report for the Deep URL Facility Development- Äspö Hard Rock Laboratory, Grimsel Test Site			
Project Manager and Department (or Main Author)		Kim Kyung Su / The assessment of geological environment for high level radioactive waste disposal			
Researcher and Department		Bae Dae Seok, Kim Geon Young / The assessment of geological environment for high level radioactive waste disposal			
Publication Place	Korea	Publisher	KAERI	Publication Date	2012.1
Page	98p.	Ill. & Tab.	Yes(☐), No (☐)	Size	21cm x 30cm
Note					
Open	Open(☐), Closed(☐)		Report Type	State-of-Art Report	
Classified	Restricted(☐), ☐ Class				
Sponsoring Org.				Contract No.	
Abstract (15-20 Lines)					
This report analysed the development status on the SKB's Hard Rock Laboratory and Nagra's Grimsel Test Site facilities to investigate their facility overview, operation system, site condition, project history and procedure, and current experiment programmes of underground research laboratory. SKB and Nagra had launched high level radioactive waste disposal project around 1970's. Actual site investigation activities were initiated since 1990's and the time schedule for siting programmes to determine the final disposal site were taken fifteen to thirty years. Furthermore, ten to twenty years will be needed to site characterization, facility design, construction, and operation commissioning. Nagra had constructed Grimsel Test Site facility in southern Switzerland Apls with the collaboration of KWO electrical company in early 1980's. This facility is characterized of a centre of excellence for underground Research and Development (R & D) to support projects for the disposal of radioactive and chemo-toxic waste and not a potential repository site. The SKB's Äspö HRL constructed in outside Oskarshamn is a unique PBG-URL facility. SKB is conducting full-scale research and development here in preparation for the construction of a final repository for spent nuclear fuel. The research programmes for the development of disposal technologies is performed over thirty to fifty years prior to repository operation. In 2000's, research on long-term phenomena, i.e., optimization of disposal concept, understanding of coupling process, validation of mathematical model, test and development of safety assessment models, characterization of deep geochemical environment, and long-term demonstration experiments have been leading the issues of research and development.					
Subject Keywords (About 10 words)		Underground Research Laboratory, Äspö Hard Rock Laboratory, Grimsel Test Site, facility overview, operation system, project history and procedure, experiment programmes			