

URL을 이용한 오염물질이동실험 현황 및 과제

박정균, 조원진, 한필수 (한국원자력연구소)

1. 서 론

지금까지 인간이 발생시킨 오염물질은 대체로 지표생태계에서 발생해 강이나 토양투수층을 타고 생태계로 이동하였으며, 오염물질이동에 관한 연구는 주로 이들 매질과 상호작용에 관심이 모아져왔다. 그런데, 최근 원자력산업이 급부상함에 따라, 고준위 방사성폐기물과 같이 장기간 관리가 필요한 폐기물을 인간생태계와 격리시키기 위해 지하심부에 처분하는 방안에 대해 세계적으로 활발히 연구가 진행되고 있다.^{1,2)} 이러한 심지층 처분에서 가장 큰 관건은 인간 환경에 대해 충분히 안전하다는 사실을 입증하는 것이다. 따라서 처분폐기물에서부터 이동을 억제하는 다중 방벽을 포함하여 생태 환경에 이르기까지 처분 시스템 전반에 걸친 장기적 안전성 평가가 매우 중요한 과제로 떠오르고 있다.³⁾ 이러한 장기적 평가는 다중 방벽에 대한 열 및 수리 조건, 구조적 요인과 각 방벽 요소에 대한 물리 화학적 특성, 방벽간 물질 전달 등, 처분된 폐기물에서 유출될 수 있는 물질이 상호작용하여 방벽간 및 자연 환경으로 이동하는 현상을 주요 대상으로 이루어진다.

특히 처분 시스템의 다중 방벽을 구성하는 여러 요소 중에서도 천연 방벽으로서 처분장 모암의 기능이 중요하게 인식되고 있는데, 이는 장기적인 안전성 측면에서 폐기물 고화체 자체와 이를 보호하는 인공 방벽이 궁극적으로 그 기능을 상실하는 경우, 지층 처분의 최후 방벽으로서 역할이 중요하기 때문이다. 또한, 방사성물질의 이동경로중 대부분을 암반균열층이 담당하고있기 때문이다. 최종 천연방벽인 처분장 주변 모암은 그 매체의 재질에 따라 균열성이거나 다공성으로 분류될 수 있는데, 지하 심부 화강암과 같은 결정암질을 비균질한 균열 매질로 보고, 토양층은 다공성매질로 가정한다.⁴⁾

고준위폐기물처분이 이루어지는 심지층 처분환경은 매우 복잡한 지화학적 특성을 가지고 있으며 고준위핵종들 또한 복잡한 화학적 거동 특성을 가지고 있다. 따라서 이러한 핵종들이 처분장에서 유출되어 천연방벽 및 자연환경을 따라 이동하는 현상 및 매질과의 상호작용에 의한 지연현상 등에 대한 연구는 처분 안전성을 평가하는데 핵심적인 요소이다. 그래서, 각국에서는자국의 지하매질에대한 핵종들의 상호반응을 실험관찰하고 정량적으로 평가하는데 노력을 경주하고 있다. 실험실에서 수차, 확산, 이동등을 단위현상을 관찰하고, 관련매개변수값을 측정해왔지만, 현장조건에서 적용성이 중요하므로, 1980년대부터 캐나다 URL을 시작으로 실제규모현장실험으로 중심이 이동하고 있다.

그러나, 현장환경에서 이루어지는 실험도 실제처분환경과는 괴리가 있는데, 실제 처분환경에서 핵종이동은 수만년에 동안 장기간에 걸쳐 서서히 일어나는 과정인데 비해 실험은 극도로 짧은 기간에

걸쳐 수행관찰하고 평가를 한다는 점이다. 이런, 단점을 보강하기위해, 수만년에 걸쳐 일어난 우라늄 광물의 자연조건에서 이동을 평가하는 자연유사연구(natural analogue)도 수행하고 있는데, 이 또한, 초기조건 및 시간에따른 경계조건변화를 유추할 수 밖에 없다는 단점이 있다.

2. 본 론

2.1 처분장에서 핵종이동특성

암반층에서 오염물질이 이동하는 과정을 살펴보면, 암반 매질은 투수도가 매우 낮아 지하수가 거의 이동하지 않는다고 보며, 대신 이들 매질이 포함하고 있는 불규칙한 균열들을 통해 오염물질이 주로 이동하는 것으로 이해하고 있다.⁹⁾ 그림1과 같이 오염물질은 균열에서 이류와 분산으로 지하수를 따라가면서, 지하매질과 상호작용을 통해 균열표면에 수착하고 암반매질내로 확산해 들어가 지하수에 비해 이동이 지연된다. 또한, 지화학적 조건에 따라, 약틴족 핵종의 경우 다양한 화학종을 가지며, 때로는 콜로이드를 형성하거나, 암반균열내에 존재하는 미생물의 대사작용에 포함되기도하여, 복잡한 이동과정을 거치게된다.

방사성핵종들은 이동하는 동안에 계속 방사능 붕괴를 하기 때문에 시간이 지남에 따라 독성이 줄어드는 특성을 가지고 있다. 그러므로, 이론적으로 방사능이 완전붕괴할 때까지 방사성핵종들을 환경과 격리시킨다면 그 이후에는 더 이상 관리 필요성이 없다. 그래서, 반감기가 수년 이내로 짧은 핵종들은 그 양이 아무리 많드라도 처분관점에서는 중요하지 않으며, 일부 약틴족들 처럼 반감기가 수만년 이상에 달하는 핵종들은 주요 관심대상이 된다.

이상과 같은 내용들을 수학적으로 기술하기 위한 방법론을 개발하고 관련 매개변수값을 측정하는 것이 주된 연구방향이다.

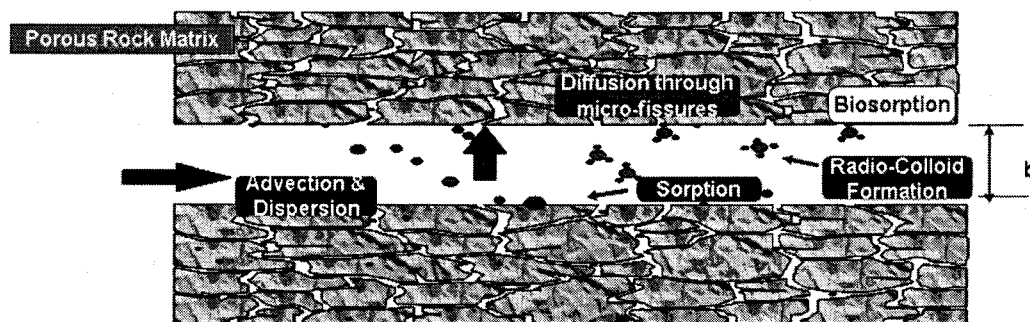


그림1. 암반균열에서 핵종이동현상 개념도

2.2 URL을 이용한 용질이동실험 특성

전세계적으로 처분관련연구는 실험실에서 소규모로 단위현상들에대한 관찰및 자료측정부터 시작한다. 그리고, 여건이 성숙하게되면, 지하시험시설을 건설하여 관련연구를 진행하는데, 이들의 특징을 비교해보면 표1과 같다. 즉, 실험실에서는 관심분야별로 다양한 실험장치를 구비해 단위실험들을 수행하고, 다양한 실험환경을 조성해 매개변수들의 민감도를 분석하는등 전범위에 걸쳐 폭넓은 연구를 수행해 처분안전성평가나 처분장설계등에 필요한 자료를 확보한다. 그러나, 실험실 자료들은 실제

처분장조건을 완벽하게 구비한 상태에서 측정할 것이 아니므로 자료의 검증과 신뢰도 확보가 중요하다.

이런 필요성과 공학적 규모에서 처분시스템의 성능평가를 위해 지하시험시설을 이용하게 된다. 지하시험시설에서는 보통 방사성폐기물처분장과 같은 지하환경을 조성해 실험하므로 측정자료가 현실적이란 점이 가장 중요한 특징이다. 그러나, URL은 많은 투자비가 든다는 점 이외에 환경문제가 중요한 사회적 갈등으로 나타날 가능성이 많다. 원자력선진국에서는 이 문제를 실험자와 환경당국, 주민들이 과학적인 평가와 합리적인 논의과정을 거쳐 대부분 방사성핵종을 사용해 실험하고 있다. 한국에서는 최근 비방사능실험시설(cold test)로 소규모 지하시험시설(KURT)을 인허가 받았다.

표1. 지하시험시설을 이용한 용질이동실험의 장단점

	장 점	단 점
실험실 측정	<ul style="list-style-type: none"> - 실험조건 조절가능 - 세부 단위현상관찰 - 방사성핵종 사용가능 	<ul style="list-style-type: none"> - 심부지하조건 조성 난점 - 측정자료 신뢰도 미약
지하시험시설	<ul style="list-style-type: none"> - 처분조건과 유사 - Large scale & long-term test - 복합이동현상 - 이동모델/기술 실증 	<ul style="list-style-type: none"> - RI 사용제한 - 실험조건 조절불가 - 고액의 연구투자비 - 복합자연현상해석 난제

지하시험시설에서 연구활동을 환경에 미치는 영향을 기준으로 분류한다면, 개방계와 폐쇄계로 양분 할 수 있다. 개방계는 실험장치와 실험용액이 그대로 자연과 연결된 상태로 실험하는 것인데, 두시추공사이 암반균열내 이동실험 (dipole test)이 대표적이다. 용액 주입구로부터 들어간 실험액은 암반균열을 타고 생태계 어느 곳으로라도 이동해갈 수 있다. 실제 실험에서는 이런 가능성을 차단하기 위해 다양한 환경영향차단방안을 마련하고 있다. 예를 들면, 주된 지하수 두 이동경로 사이를 실험구간으로 정하고, 토출유속을 입력유속보다 빠르게 함으로써 주변 지하수들이 유출구로 모이게 하고, 반감기가 짧은 핵종을 사용하여 실험기간이 경과한 후에는 환경에 미치는 위해도가 무시되도록하며, 실험추적자량을 환경허용치 이하로 사용함으로써 문제발생요인을 차단하고 있다.

한편, 폐쇄계는 실험장치를 자연과 분리/격리한 상태로 실험하여 방사능 오염이 실험장치내에서만 이뤄지도록하여 자연에는 오염가능성이 생기지 않도록 한다.

표2. 실험시스템분류및 특징

		폐쇄계 Closed system	개방계 Open system
특 징		<ul style="list-style-type: none"> - 환경과 독립 - 현장조건 인위적 유지 - 현장지하수 사용 	<ul style="list-style-type: none"> - 환경과 연결 - 거시/장기현상관찰
실험용액		<ul style="list-style-type: none"> - 완전회수 가능 	<ul style="list-style-type: none"> - 완전회수 의문
사용추적자	외국	<ul style="list-style-type: none"> - 안정화화시료 - RI/actinides 	<ul style="list-style-type: none"> - 안정화화시료 - RI/actinides
	한국	<ul style="list-style-type: none"> - 안정화화시료 - 유기염료 	<ul style="list-style-type: none"> - 안정화화시료 - 유기염료

2.3 세계 URL 을 이용한 핵종이동실험 현황

고준위 방사성폐기물의 심지층 처분을 고려하고 있는 주요 선진국에서는 고준위 방사성폐기물 처분장을 지하 심부 지층에 건설하기 위하여 기술 개발과 처분장 운영방안에 대한 실증 시험을 수행하기 위해 지하 연구 시설 (URL: Underground Research Laboratory)을 운영하거나 건설을 추진하고 있다.

지하연구시설(URL)에서는 고준위폐기물처분장의 주요 구성요소인 공학적 또는 천연방벽의 성능과 관련된 다양한 연구가 수행되며 처분장의 건설, 운영 및 폐쇄에 필요한 기술 개발과 실증 시험(demonstration)을 수행한다. 이러한 다양한 실증시험에서 얻어진 각종 실험 결과에 대한 실제 처분 환경에서의 검증은 고준위 방사성폐기물 처분의 안전성을 확보하고 지역사회와 주민들로부터 처분장 운영과 처분장 안전에 대한 신뢰 확보에 중요하다.

지하연구시설(URL)은 이러한 목적을 달성하기 위해 부지조사, 시험, 기술개발, 그리고 실증 등의 순서로 수행되며, URL 건설, 운영에는 통상 20년 정도의 기간이 요구된다.

고준위 방사성폐기물 처분을 위한 지하 연구시설로는 미국의 경우 군사용 프로그램에서 발생된 고준위 방사성폐기물을 처분하기 위해 뉴멕시코주에 지하연구시설(WIPP)을 건설하여 1990년대 말까지 운영한 바 있으며, 상용원전에서 발생하는 사용후핵연료의 처분을 위하여 네바다주 Yucca Mountain에 연구 시설 건설을 1997년 4월 완료하고 그동안 부지 특성조사와 분석, 열 특성 실험, 지하수 유동 조사, 심부 지질환경 등을 포함한 실증시험 등을 수행하였으며, 현재 실증결과들을 토대로 처분장 건설을 위한 인허가 단계에 있다.

스웨덴은 1977년 Stripa 폐철광산(화강암반)을 개조, 지하연구시설을 만들어 1992년까지 다양한 연구를 수행하였고 1992년부터는 오스카섬에 지하 450m, 터널 총 길이 약 3,600m의 지하연구시설인 ÄSPÖ을 건설 운영하고 있다. 현재는 2개의 지역을 대상으로 최종 처분시설 부지 선정 작업이 순조롭게 진행 중이다.

캐나다의 Manitoba 주 Winnipeg시 Lac du Bonnet에 지하 450m에 지하연구시설(URL)을 1990년부터 운영 하였으며 현재 처분장폐쇄에 대한 예비 연구 등을 수행하면서 시설의 폐쇄를 준비 중에 있다.

독일의 경우 1967년부터 1978년까지 Asse 암염광을 개조하여 지하연구시설 및 LLW 처분시설로 활용하였으며, 스위스의 경우 점토층(Mt.Terry)과 화강암반(Grimsel)의 두곳의 지하 연구시설을 운영하고 있다.

핀란드는 올킬루오토에 위치한 중.저준위 방사성폐기물 처분장 내에 지하 50미터의 소규모 지하 연구프로젝트를 추진하였으며 2001년 5월에는 의회의 승인을 받아 올킬루오토 지역을 사용후 핵연료 최종 처분부지로 선정한 바 있다. 현재는 이 지역에 지하연구시설을 건설하고 있다.

프랑스는 고준위 폐기물 관리에 대한 특별법에 따라 지난 15년간 (1991-2006) 고준위폐기물 처분에 관한 연구를 수행해 오고 있다. 이에 따라, 2002년부터 화강암반 층을 대상으로 지하 490m에 지하연구시설을 건설하였으며 점토층 대상의 지하연구시설은 대상 부지 선정에 실패하여 건설을 유보하였다. 프랑스는 이들 연구 결과를 종합하여 2006년에 고준위 폐기물의 자국에서의 처분 타당성을 국회에 보고하도록 되어있다.

일본은 폐광을 개조하여 심부 지하에서의 실증시험을 1980년대 부터 수행한 바 있으며 현재는 화강암층 및 퇴적층을 대상으로 두 곳 (미즈나미, 호로노베)에 지하 500-1,000미터 깊이의 신규 지하 연구 시설을 건설하고 있다.

표3. 세계 각국의 처분지하연구시설현황

국가	지하연구시설	모암	심도 (m)	진입방식
Canada	Whiteshell URL (1984~)	Granite	240 ~ 420	Shaft
USA	Busted Butte (1998~)	Bedded Tuff	70	Horizontal Tunnel
	Yacca Mt. ESF (1997~)	Bedded Tuff	300	Ramp
Japan	Kamaishi (1988 ~ 1998)	Granite	260	Ramp
	Tono (1986 ~)	Sed. Rock	200	Shaft
	Mizunami URL	Granite		Under Construction
	Honorobe URL	Sed. Rock		Under Construction
Swiss	Grimsel Test Site (1983 ~)	Granite	450	Horizontal Tunnel
	Mt. Terri (1995~)	Hard Clay	400	Horizontal Tunnel
Sweden	Stripa (1980 ~ 1992)	Granite	360 ~ 410	Shaft
	Aspo Hard Rock Lab. (1995~)	Granite	200 ~ 450	Ramp
Finland	Olkiluoto Resear. Tunnel (1992~)	Granite	50 ~ 100	Ramp
	ONKALO URL	Granite	420	Under Construction
Belgium	Hades URF (1984~)	Boom Clay	230	Shaft
France	Bure URL	Hard Clay		Under Construction

이들 연구시설에서 수행하는 핵종이동관련 연구내용은 대부분 유사하므로 지금 가장 연구가 활발한 스웨덴 ÄSPÖ 연구내용을 중심으로 좀 더 자세히 살펴보면 다음과 같다.

ÄSPÖ는 1995년에 완공한 S/F 처분을위한 연구시설로 지하500m 깊이로 동굴을 굴착하여 실제 처분과 유사한 조건에서 각종 실험 수행하고 있다. 그림2 참조. 현재 방사성핵종을 사용해서 실험할 수 있는 최상의 URL로서, Canada, Finland, France, Germany, Japan, Spain, Swiss, UK, USA등이 공동연구형태로 다양한 방면에 참여중이며 연구항목은 다음과 같다.

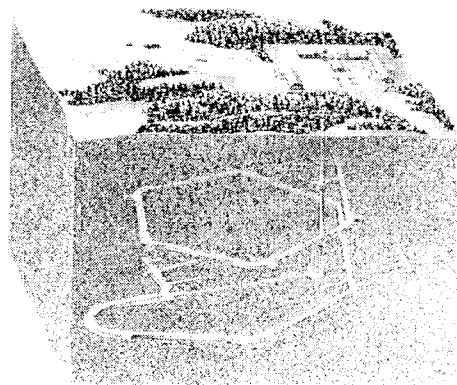


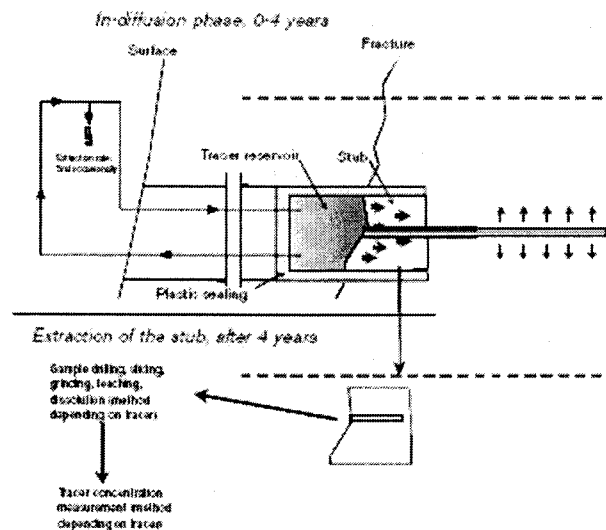
그림 2. 스웨덴 지하처분시험시설 SP 개념도

1) Tracer retention Understanding Experiments (TRUE)

- Multipole 에서 방사성핵종이동실험
- 세분야로 나누어 여러단체에서 공동연구
 - . Laboratory : 암반물성, 기초입력인자값측정
 - . Field : Multipole 에서 핵종이동 실험
 - . Predictive Modeling : 이동모델개발, Posiva, Andra, JNC, SKB
- 1단계연구(TRUE-1) 끝나고, 2단계 진행중 (BS2, True Block scale Continuation Project)

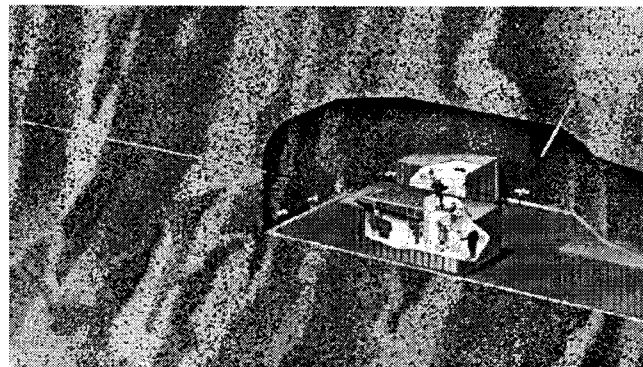
2) Longterm Diffusion experiment (LTDE)

- Rock matrix diffusion 실험



3) Radionuclide Retention experiments with Chemlab.

- small fractured core 로 실험장치를 만들어 현장에 다시 삽입하고, 현장조건에서 이동실험
- SKB, INE 공동연구
- 한국도 일부 연구 분석에 참여



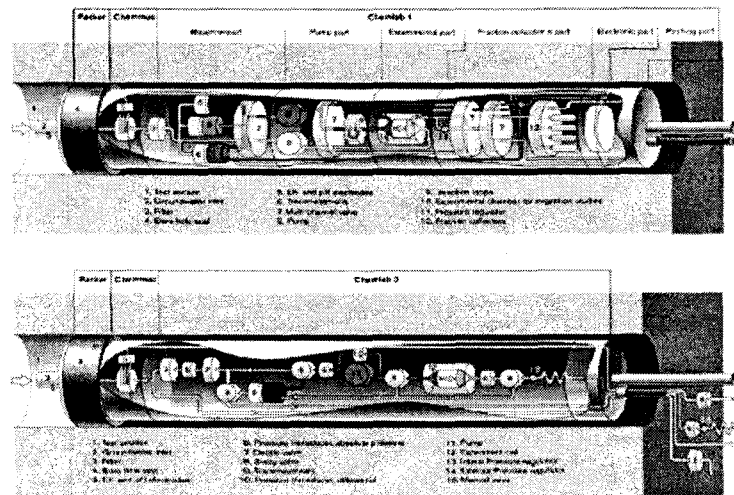
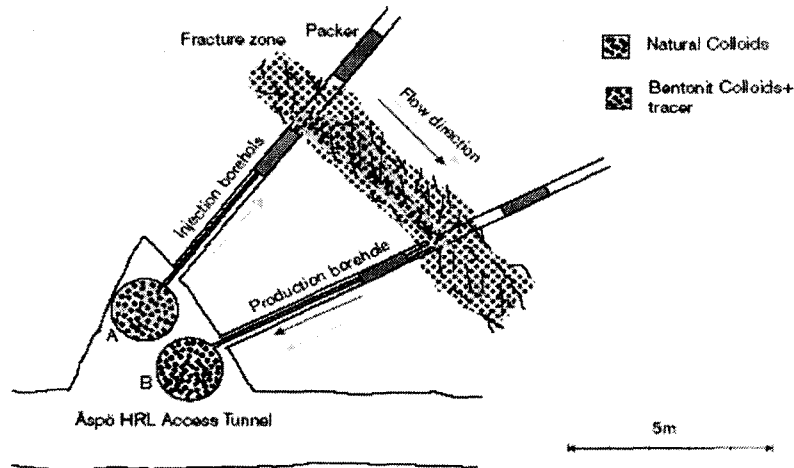


Figure 4-10. Schematic illustration of Chaslab 1 and 2 borehole laboratories.

4) Colloid Project

- 2.5m dipole test 로 콜로이드의 이동성과 stability 관찰



5) Microbe Project

- 지하에 생존하는 미생물들의 핵종에 대한 bio-mobilisation 연구
- 세계적으로 미생물에 대한 연구가 서서히 부각되고 있음

6) Matrix Fluid Chemistry

- 터널공사가 주변환경에 미치는 영향을 hydrochemical & hydraulical 측면에서 지하수 관찰

7) Task Force on Modeling of Groundwater flow and Solutes Transport

- ASPO 실험결과 해석에 필요한 모든 이동모델 취급,
- 각 기관이 자신의 모델로 연구한 후, 결과 상호비교

- 연구내용
- . longterm pumping and tracer experiment (완료)
- . scooping calculation for the various scale experiments (완료)
- . Hydraulic impact of the tunnel excavation(완료)
- . Tracer Retention Understanding Experiment, 1st stage(완료)
- . Coupling between hydrochemistry and hydrogeology(완료)
- . Performance assessment modeling using site characterization data(진행중)

8) Padamot

- Palaeohydrogeology study : water -rock reactions at the scale of mineral crystals and evolution of the groundwater

9) Fe-Oxides in Fractures

- 철산화광물 형성조건 및 균열충진광물로서 특성 분석
- 철산화광물이 핵종 수착과 지연에 미치는 영향 연구

2.4 우리나라 URL을 이용한 실험계획

우리나라는 1980년부터 1996년까지 중저준위 방사성폐기물 처분기술 및 안전성 연구를 수행하기 시작하였고, 고준위폐기물 처분에 관한 연구는 1997년에 착수하였다. 대략 2016년에 고준위폐기물 심지층저장시설 건설을 목표로 KAERI를 중심으로 단계별 연구목표를 설정하고 이에따라 연구를 진행하고 있다. 2002년까지는 국내의 자료를 종합분석해 처분개념을 수립하고 예비성능평가를 수행하였다. 또, 국내 지질에서 시추를 통해 각종 지질, 지하수자료를 확보하고, 실험실수준에서 수착, 확산, 이동 등의 각종 실험을 수행하고 자료를 생산하여 안전성평가에 활용하였다. 실제 처분 조건은 지하500m 이상으로 고압환경상태로 지상조건과 많은 차이를 가지고 있어, 실제 심부조건하에서 실험 및 자료생산이 필요하나, 국내 연구투자여건상 실험실에서 심부지하조건을 생성하기도 어렵고 정밀분석기기도 확보하기 어렵다. 더욱이 실제 처분장 수준 URL은 국내에 건설하기 어려우므로, 해외 URL을 적극 활용해 적은 투자로 국내에서 필요한 연구를 수행할 필요가 있다. 그래서, 연구결과로 제안할 한국형 처분 시스템의 현장실증을 위한 소규모 지하연구시설 (KURF) 건설을 위하여 시설의 설계와 관련 인허가 작업을 2004년에 완료하였으며 2005년 1단계 건설공사가 착수되어 2006년 후반에 운영을 개시할 예정이다.

계획하고 있는 지하연구시설에서 용질이동관련 연구내용을 소개하면 다음과 같다.

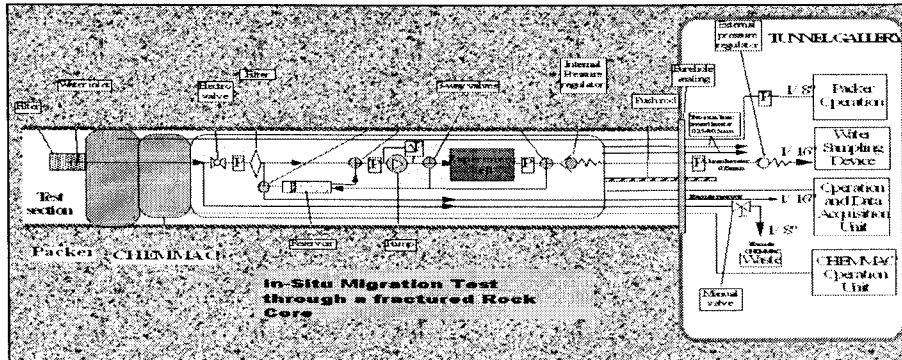
지하지화학조건에서 현장지하수를 사용해 지화학조건변화에 민감한 화학종들의 이동 및 암반표면 수착 현상을 평가하는데 목적이 있다. 실험세부목적과 장치특성규모에 따라 다음과 같이 4가지로 나눈다.

- 1) 시추코아를 이용한 화학종 이동실험,
- 2) 1m 규모의 시추한 균열암반실험장치를 이용한 이동시험,
- 3) 약 3m 규모 현장균열을 통한 이동실험(dipole test)
- 4) 현장환경에서 화학종 확산계수 및 확산깊이 측정

이중 1), 2)는 모든 실험용액을 완전 회수하는 폐쇄계실험이고, 3), 4)는 반개방계 실험이다. 그리고, 지하시험시설에서 이루어지는 모든 실험에 방사성핵종을 사용하지 않는다.

1) 시추코어를 이용한 화학종 이동실험,

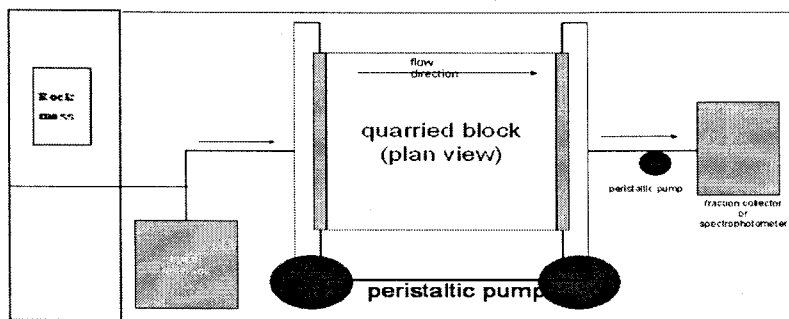
균열암석을 시추한 후, 그림과 같은 실험장치를 만들어 다시 시추공에 삽입해 현장환경을 그대로 활용하되 실험장치로 폐쇄계를 만들어, 온도, 압력, 지화학조건변화등을 실시간 측정할수 잇는 시스템이다.



2) 현장지하수를 활용한 1m 규모 추출암반균열에서 화학종이동실험

- 1m 규모로 추출한 균열암반에 현장지하수를 연결해 균열에서 핵종이동실험
- 지화학민감 화학종의 이동현상연구
- Geochemical transport model 개발
- 핵종포획미생물의 대사작용 연구
- nano particle 및 biomass의 이동과 상호작용 연구

experimental design for tracer tests

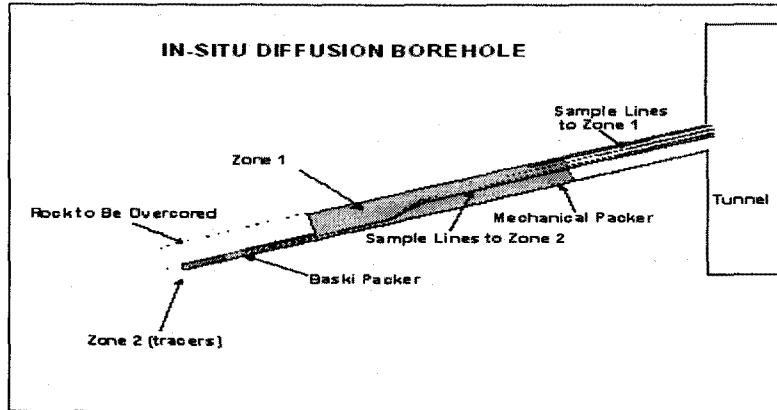


3) 약 3m 규모 현장암반균열에서 화학종이동실험

- 주변 암반 균열망분포파악
- 이동구간내 hydrology 실험및 모델 수립
- 수탁성및 비수탁성 추적자를 사용한 물질이동실험
- 3차원 물질이동 모델 개발및 검증

4) 현장환경에서 화학종 확산계수 및 확산깊이 측정

- 균열이 없는 암반매질내로 용질 확산능 및 확산 깊이 평가
- 수개 실험조를 병렬로 설치해 실험기간에 따른 평가 : 1 ~ 10년
- 수차성 용질의 장기간 수차특성 분석



3. 결 론

한국처럼 원자력을 주된 에너지로 사용하는 환경에서 방사성 폐기물 처분은 중요한 국가 사회적인 환경문제로 대두되었다. 생태계와 생활환경의 보전 측면에서 안전하고 장기적인 관리를 위해서는 심도깊은 연구가 필요하다. 고준위방사성폐기물의 처분 기술은 원자력 선진국에서 오랜 동안의 연구를 통하여 실증적으로 정립되어 있으나, 처분장의 부지선정과 건설, 처분장의 폐쇄와 감시 등 기술적 실증, 환경 안전의 실증, 경제성 등 다양한 측면에서 고려해야 할 요소가 많다. 따라서 고준위 폐기물의 장기 안전관리를 위한 처분장의 확보와 시설의 안전성 입증 을 위하여 장기적이고 체계적인 연구와 실증을 위한 계획의 수립과 추진이 요구된다. 그 중에서도, 방사성핵종이 장기간의 시간경과동안 처분장에서 누출되어 생태계로 이동할 수 있는 가능성에 대한 연구가 핵심적인 사항이며, 이에 대한 실험적 평가를 실험실 수준 뿐만 아니라 현장실험까지 포함하여 심도 깊게 지속적으로 추진하여야 할 것이다.

■ 참고문헌 ■

1. Abelin et al., "3D Migration experiment - report3, part I, performed experiments, result and evaluation," Stripa project TR 67-21, Stockholm, Sweden(1987)
2. Moreno, L. and A. Rasmuson, "Contaminant transport through a fractured porous rock : impact of the inlet boundary condition on the concentration profile in the rock matrix," Water Resour. Res. 22(12), 1728(1986)
3. D.H.Tang, E.O Friend and E.A.Sudicky, Contaminant transport in fractured porous media, Water Res. 17, 555, (1981)
4. Chung-Kyun Park, Dong-Kwon Keum, Pii-Soo Hahn, Stochastic analysis of contaminant transport through a rough-surfaced fracture, Korea J. of Chem. Eng., 12, (1995)

5. Moreno, L., Tsang C.F., Hale, F.V and Neretnieks, I. Flow and tracer transport in a single fracture, *Water Res.* 24, 2033, (1988)
6. Tsang, Y.W., C.F.Tsang, I. Neretnieks, and L.Moreno, Flow and tracer transport in fracture media – A variable–aperture channel model and its properties, *Water Resour. Res.*, 24(12), (1988)
7. AERE–R–11287, Analysis of steady–state hydraulic tests in fractured rock, 1984
8. Thomas, H R and Cleall P J, 1999, "Inclusion of expansive clay behaviour in coupled thermo–hydraulic–mechanical models". *Engineering Geology Invited contribution to a Special Issue "Microstructural modelling with special emphasis on the use of clays for waste isolation"*. 54, Nos 1–2, 93–108.
9. Cleall, P J and Thomas, H R, 1999, "Application of a coupled thermal–hydraulic–mechanical model for unsaturated soil". *Proc of the 7th Int. Symposium on Numerical Models in Geomechanics*, Graz, Austria, 237–242.
10. IAEA, Training in radioactive waste disposal technology in underground research facilities, C7–INT9.173.008, 2006–07–10
11. K.Almen, ASPO hardrock Laboratory : characterization methods and instruments, SKB/TR–05–11