

Research Status on the Radionuclide and Colloid Migration in Underground Research Facilities

지하연구시설에서 핵종 및 콜로이드 이동 연구 현황 분석

Min-Hoon Baik¹⁾, Jae-Kwang Lee and Jong-Won Choi

Korea Atomic Energy Research Institute, Daedeokdaero 1045, Yuseong-gu, Daejeon 305-600

백민훈¹⁾, 이재광, 최중원

한국원자력연구원, 대전광역시 유성구 대덕대로 1045

(Received November 27, 2009 / Revised December 15, 2009 / Approved December 28, 2009)

Abstract

In this study, research status on radionuclide and colloid migration in underground research facilities including KURT (KAERI Underground Research Tunnel) was investigated. Some foreign underground research facilities constructed in crystalline rock formations such as granite were briefly introduced and compared. International joint researches concerned with the radionuclide and colloid migration were investigated particularly for the Grimsel Test Site (GTS) and Äspö Hard Rock Laboratory by analyzing major research items, on-going research projects, and future plans.

Key words : Underground research facility, International joint research, Radionuclide, Colloid, Migration, High-level radioactive waste, Deep geological disposal

요 약

본 연구에서는 KURT (KAERI 지하처분연구시설)를 포함한 지하연구시설에서 핵종 및 콜로이드 이동에 대한 연구현황을 조사하였다. 화강암과 같은 결정질 암반층에 건설된 해외 지하연구시설들을 간략하게 소개하고 비교하였다. 특히 Grimsel Test Site (GTS)와 Äspö Hard Rock Laboratory에서의 핵종 및 콜로이드 이동연구에 대한 주요 국제공동연구의 연구항목 및 내용, 진행중인 연구 프로젝트, 연구계획 등에 대해 조사하였다.

중심단어 : 지하연구시설, 국제공동연구, 방사성핵종, 콜로이드, 이동, 고준위방사성폐기물, 심지층처분

I. 서론

우리나라는 1997년부터 원자력연구개발사업으로 고준위폐기물 처분에 관한 연구를 한국원자력연구원을 중

1) Corresponding Author. E-mail : mhbaik@kaeri.re.kr

심으로 단계별 연구목표를 설정하여 수행하여 오고 있다. 2006년까지는 국내외 자료를 종합, 분석해 한국형 처분개념을 수립하고 예비성능평가를 위한 연구들을 중점으로 수행하였다. 특히 시추를 통해 국내 지질에서 다양한 지질 및 지하수자료를 확보하였고 실험실수준에서 수착, 확산, 핵종이동 등의 다양한 실험을 수행하여 처분안전성평가에 필요한 자료를 생산하고 활용하였다[1].

고준위 방사성폐기물의 심지층 처분을 고려하고 있는 주요 선진국에서는 고준위 방사성폐기물 처분장을 지하 심지층에 건설하기 위해 다양한 기술 개발과 처분장 운영방안에 대한 실증 시험을 수행하고 있는데, 이 모든 것들이 종합된 시설로서 지하연구시설(URL, Underground Research Laboratory 또는 URF, Underground Research Facility)을 운영하거나 건설을 추진하고 있다. 지하연구시설에서는 고준위폐기물 처분장의 주요 구성요소인 공학적 방벽 및 천연방벽의 성능과 관련된 다양한 연구를 수행하며 처분장의 건설, 운영 및 폐쇄에 필요한 기술 개발과 실증시험을 수행한다[2]. 실제 처분 환경과 유사한 환경에서 수행된 다양한 실증시험에서 얻어진 각종 실험 결과들은 고준위 방사성폐기물 처분의 안전성을 확보하고, 지역사회와 주민들로부터 처분장 건설 및 운영에 대한 신뢰성을 확보하는데 매우 중요하다. 지하연구시설은 이러한 목적을 달성하기 위해 부지조사, 시험, 기술개발, 그리고 실증 등의 순서로 수행되며, 실제 규모의 URL 건설, 운영에는 통상 20년 정도의 기간이 요구된다[2].

우리나라에서도 지난 2006년 11월 한국원자력연구원 부지 내에 한국형 고준위폐기물 처분시스템(KRS, Korean Reference System for HLW Disposal)의 현장실증 및 다양한 처분기술의 확보를 위한 소규모 지하연구시설인 KURT (KAERI Underground Research Tunnel)가 건설되었다[3, 4]. 2003년부터 건설계획 및 설계를 시작하여 시설의 설계와 관련 인허가 작업을 2004년에 완료하였으며, 2005년 1단계 건설공사가 착수되어 2006년 후반부터 실험장비를 설치하였고, 2007년도부터 본격적인 연구를 시작하였다. 그러나 KURT는 지하 약 100 m 수준으로 비교적 심도가 낮고, 방사성 물질을 이용할 수 없는 단점을 가지고 있다. 또 실제 처분장 수준의 URL을 국내에 당장 건설하기는 부지와 예산확보 등 상당한 어려움이 예상된다. 따라서 이러한 문제점들을 극복하고 효과적으로 연구개발을 수행하기 위해서는 해외의 지하연구시설에서 수행하는 국제공동연구에 참여하여 필요한 연구를 수행할 필요가 있다[5].

고준위 방사성폐기물은 중·저준위 방사성폐기물과는

여러 가지 면에서 매우 다르다. 먼저 고준위 방사성폐기물의 경우 환경 및 인간에 대한 위험성이 매우 큰 고독성의 장·반감기 핵종들을 다수 포함하고 있다. 특히, 악틴족 핵종들은 반감기가 수 만년에서 수 백 만년에 달하는 핵종들이 대부분이다. 그러나 보다 중요한 문제는 이러한 고준위 방사성폐기물에 함유된 핵종들이 심지층 처분환경에서 매우 복잡하게 거동한다는 것이다. 따라서 이러한 고준위 핵종들의 지하매질을 통한 이동 특성이나 지하매질들과의 상호작용 등의 거동 특성을 이해하고 그 특성 자료를 획득하지 못하고서는 처분장의 안전성을 확보하지 못할 것이다. 따라서 원자력 선진국들은 처분안전성 연구에 있어 이러한 고준위 핵종들의 환경 거동 특성에 대한 연구를 최우선으로 수행해 왔다[6, 7].

처분장 폐쇄 후, 오랜 시간(적어도 수천에서 수만 년)이 경과하여 처분시스템의 공학적방벽을 거쳐 처분장 주변 암반(즉, 천연방벽)으로 유출된 방사성핵종들은 대부분 지하수를 따라 생태계까지 이동하게 된다. 그리고 방사성 핵종들은 다양한 이동경로를 따라 이동하면서 암반체, 암반균열의 충전광물, 지하수에 존재하는 다양한 물질들(콜로이드, 유기물, 미생물 등)과 매우 다양하고 복잡한 상호작용을 한다[8]. 그리고 이러한 상호작용은 수만 년 또는 수십만 년에 걸쳐 장기적으로 일어나기 때문에 이와 관련한 연구 또한 매우 장기적 관점에서 바라보아야 한다. 따라서 현재 수행되는 연구들은 이들 상호작용을 어떻게 이해하고, 수학적 모델을 이용하여 정량적으로 예측·평가하고, 그 불확실성을 줄일 것인가에 중점을 두고 진행하고 있다. 고준위 핵종들이 처분장에서 유출되어 천연방벽 또는 자연환경을 통해 이동하는 과정들과 다양한 지하매질과의 상호작용에 의한 지연과정들에 대한 연구는 처분 안전성을 평가하고 확보하는데 핵심적인 기술 요소라 하겠다.

고준위 방사성폐기물의 처분 문제는 단순히 과학기술적인 문제에 국한되지 않는 정치사회적 문제이기도 하며, 사업의 원활한 추진을 위해서는 국민적 공감대 및 사회적 수용성에 대한 공론화를 필요로 하는 범국가적 차원의 문제이다. 아울러 한 국가에만 국한되지 않고 주변 국가들을 포함하는 국제적인 문제이기도 하기에 해외 원자력 선진국들과의 국제협력 및 공동연구 등을 함께 추진해 나가야 할 필요가 있다. 따라서 본 논문의 목적은 국내의 지하연구시설 및 이들을 활용한 핵종 및 콜로이드 이동 관련 연구들에 대한 정보들을 수집 및 분석하여 국내 연구 수행에 필요한 기술정보를 제공하고, 해외 지하연구시설을 활용한 국제공동연구에 기여하는 것이다.

II. 지하연구시설 현황

가. 주요 지하처분연구시설의 현황

방사성폐기물의 심지층 처분을 위해 지난 수 십 년 동안 전 세계적으로 다양한 규모의 지하연구시설들이 건설되어 운영 중이거나 건설 중에 있다. Table 1은 세계의 지하처분연구시설에 대해 간략하게 정리한 것으로 표에서 인허가용(site-dependent)이란 처분장 후보부지 또는 그 부근에 건설하는 시설로 부지특성 자료를 수집하는데 주목적이 있는 경우로 실험 시 주위 환경 및 기반암이 손상되지 않도록 실험을 설계할 필요가 있다[2]. 이에 반해 연구용 지하연구시설의 경우 실제 처분장 후보 부지가 아닌 곳에 설치되는 경우로서, 수집된 자료를 실제 부지에 직접 적용하는 데는 어려움이 있으나 기반암의 손상을 크게 고려하지 않고 실험을 설계할 수 있다. 본 연구에서는 해외의 지하연구시설 중에서 우리나라와 유사한 화강암과 같은 결정질 암반에 건설되어 운영중이거나 건설중인 시설들을 중심으로 주요 시설 및 연구현황을 살펴보았다.

나. Grimsel Test Site (스위스)

Grimsel Test Site (GTS)는 알프스 산맥 산악지역의 결정질 화강암반에 위치하며 수력발전을 위한 기존터널을 활용하여 건설된 지하연구시설로 직경 3.5 m의 TBM (Tunnel Boring Machine)으로 굴착되었다. 이 시설에서는 1983년부터 처분장의 설계와 현장실험 결과의 해석과 관련된 연구 및 조사가 수행되었다. 아울러 처분장의 건설 및 운영 시에 필요한 경험 습득 및 처분장의 안전성에 관련된 물리 화학적인 과정을 조사하기 위한 연구들이 수행되었다. GTS 지하연구시설에서

수행된 연구들에는 독일, 프랑스, 일본, 스웨덴, 스페인 및 미국 등이 공동으로 참여하였고, 그동안 매우 중요하고 다양한 연구들이 수행되어 왔다[9]. Fig. 1에 GTS의 위치 및 연구시설을 개괄적으로 나타내었다[9].

2004년부터 시작된 6단계(2004 ~ 2013) 연구에서는 다음과 같은 연구들이 수행되고 있다[10].

- LCS (Long-Term Cement Studies): 심지층 처분환경에서 고 pH 및 저 pH 그라우팅 물질의 장단기적 거동특성을 이해하기 위한 연구로 현재 2단계 연구를 수행 중이다.
- FEBEXe (Full-scale Engineering Barrier Experiment-extension): 스페인 Enresa가 주도하여 수행하였던 FEBEX 장치를 Nagra가 인수하여 추가 수행하고 있는 연구로 고준위 폐기물 처분장 원충제의 열-수리-역학-화학적 과정들에 대한 연구를 수행 중이다.

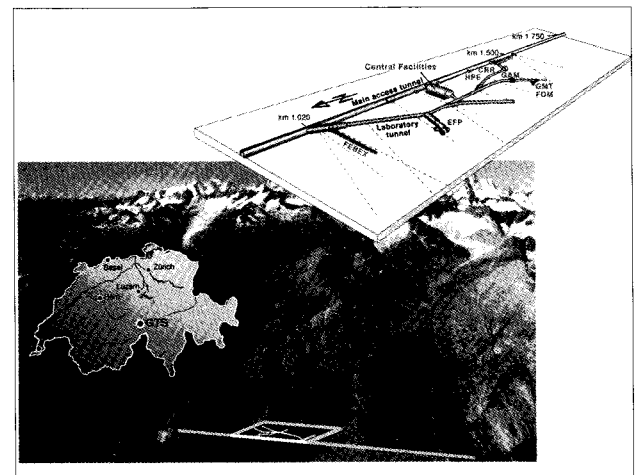


Fig. 1. Grimsel Test Site in Switzerland [9].

Table 1. Foreign underground research facilities

Nations	Location	Type/Name	Rock	Operation	Site-dependency
Belgium	MOI	HADES+PRACLAY	Plastic clay	since 1980	Yes
Canada	Pinawa	URL	Granite	since 1984	
Finland	Olkiluoto	Research Tunnel	Granite	since 1993	
France	FANAY	Test galleries in U mines	Granite	1980-1990	
	Amelie	Test galleries in K mine	Bedded Salt	1986-1994	
Germany	Asse	Test galleries in K/salt mine	Salt dome	1977-1995	
	Gorleben	Exploration galleries	Salt dome	since 1997	Yes
	Konrad	Test galleries in iron mine	Shale	since 1980	Yes
Japan	Tono	Test galleries in U mine	Sandstone	since 1986	
	Kamaishi	Test galleries in Fe-Cu mine	Granite	1988-1998	
Sweden	Stripa	Test galleries in iron mine	Granite	1980-1990	
	Äspö	HRL(experimental)	Granite	since 1990	
		HRL(prototype)	Granite	1998-2005	
Switzerland	Grimsel	GFS test galleries	Granite	since 1984	
	MontTerri	Test galleries	Shale	since 1995	
USA	Climax	SFT	Granite	1978-1983	
	Nevada	G-Tunnel	Volcanic tuff	1979-1990	
	Carlsbad	WIPP	Bedded salt	since 1982	Yes
	Yucca Mt.	ESF	Volcanic tuff	since 1993	Yes
	Yucca Mt.	Busted Butte	Volcanic tuff	since 1997	

- ESDRED Module #4 (Low pH Shotcrete Technology): 저 pH 콘크리트 물질을 활용하여 처분터널을 밀봉하는 기술을 개발하는 연구로 EU Framework 과제의 하나로 GTS에서 수행 중이다.

- TEM (Test and Evaluation of Monitoring technologies at GTS): 현장실험에서 측정되는 신호를 원격 및 무선으로 기록하는 기술을 개발하는 연구이다.

- C-FRS (CRIEPI Fractured Rock Studies): 일본 중앙전력 연구소(CRIEPI)에서 수행하는 균열암반에서 용질이동 및 균열특성 조사 실험이다.

- FUNMIG (Fundamental Processes of Radionuclide Migration) Project: EU Framework의 일환으로 수행된 프로젝트로 연구내용 중 일부를 FEBEX 장치를 활용하여 핵종이동에 대한 연구를 수행하였다.

- LTD (Long-Term Diffusion): 핵종의 암반확산 장기 실증 실험으로 현장 2단계 연구를 수행중이다. 자연유사연구와 연계한 연구도 수행 중이다.

- CFM (Colloid Formation and Migration): 암반과 완충재 경계에서 벤토나이트 콜로이드의 발생 및 이동, 핵종이동에 미치는 영향을 장기 실증하는 연구로 현재 2단계 연구가 진행 중이며, KAERI도 2008년도부터 참여하고 있다.

다. Äspö HRL (스웨덴)

스웨덴은 1977년 Stripa 폐철광산을 개조한 지하연구시설을 만들어 1992년까지 다양한 연구를 수행하였고, 1992년부터는 Oskarshamn섬에 지하 450 m, 터널 총 길이 약 3,600 m의 지하연구시설인 Äspö HRL (Hard Rock Laboratory)을 건설 운영하고 있다. Äspö HRL의 마지막 400m는 TBM을 사용하여 직경 5 m의 터널을 굴착하여 실제처분과 유사한 조건에서 각종 실험을 수행하고 있다[11]. Fig. 2에 Äspö HRL의 개괄도 및 실험시설들의 위치를 나타내었다[11].

Äspö에서는 주로 캐나다, 핀란드, 프랑스, 독일, 일본, 스위스, 영국 등 7개 국가와 공동연구를 수행하고 있다. Äspö에서 수행되는 주요 연구로는 지하수 유동 모델링, 모암에서 발생하는 손상과 공동의 뒷채움 및 밀봉기법의 실증, 처분공의 굴착 및 용기 거치와 회수, 처분용기의 수명과 관련되는 지하수의 화학적 조성에 관한 연구 등 인공방벽 및 천연방벽에 대한 매우 다양한 연구들을 수행하고 있다[12]. 스웨덴에서는 2002년 봄에 Forsmark (Östhammar 지역)와 Simpevarp/Laxemar (Oskarshamn 지역)에 대한 사용후핵연료 최종 처분장을 위한 부지조사를 착수하여 2007년 부지조사를 마무리하였으며, 2009년에 포스마크를 최종 영구 처분

장 부지로 확정하였다. 2010년에 최종처분장 건설 인허가를 신청할 계획이며, 2011년 말에 건설에 착수하여 2020년부터 상용 처분장 운영을 목표로 사업을 추진하고 있다.

라. 유카산 Exploratory Studies Facility (미국)

미국에서는 유카산(Yucca Mountain) 처분 후보부지에 ESF (Exploratory Studies Facility)를 건설하기 위해 1993년 발파공법으로 입구에서 60m의 터널을 굴착하였으며, 1994년부터 TBM 굴착을 시작하여 1997년 4월 ESF 건설을 완료하였다. 이 시설은 상용 처분시설 건설 인허가용 지하연구시설로, 처분터널들은 지하 약 300m 불포화 응회암(tuff)에 위치하게 되며 대수층은 이보다 약 100 m 정도 아래에 분포하게 된다. ESF에서는 부지특성 조사를 위해 암반자료 분석, 매질시료분석, 그리고 지하수 유동에 관한 지표조사와 심부 지질환경 등을 포함한 지하 시험, 그리고 암반과 유체 및 기체 시료 등 지하에서 얻어진 여러 시료에 대한 지하 실험실에서의 분석 등이 실시되었으며 현재는 경도(drift) 규모의 열시험이 진행 중에 있다[12].

2002년에 유카산 처분장이 최종부지로 선정되고, 이에 따

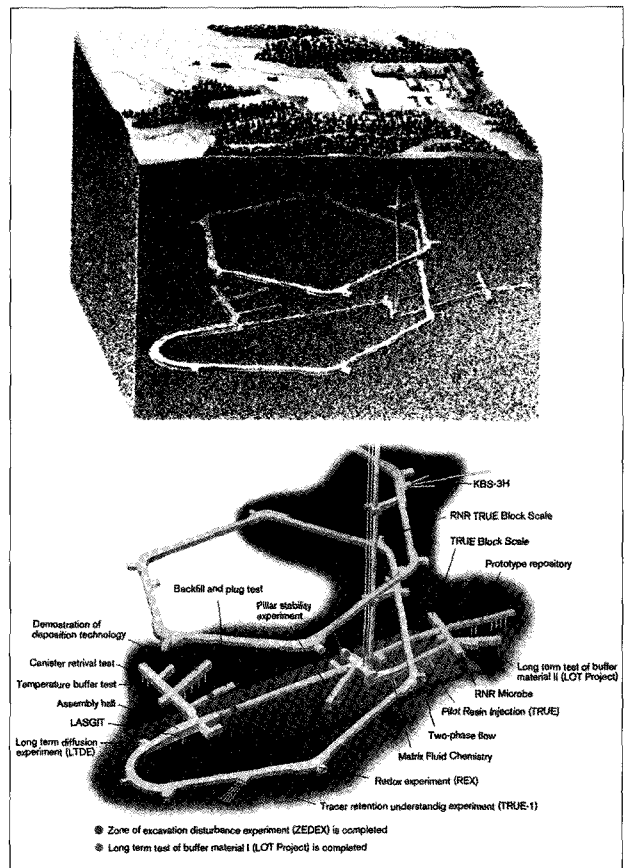


Fig. 2. Äspö Hard Rock Laboratory in Sweden [11].

라 인허가 서류가 제출되어 2017년 사용 처분장 운영을 목표로 진행되었으나, 최근 오바마 행정부가 최종 처분장 선정을 위한 절차를 잠정적으로 중단시킨 상태이다.

마. 미주나미(Mizunami) URL (일본)

일본은 고준위폐기물을 심지층 처분하는 것을 원칙으로 1980년대 중반부터 1990년대까지 페우라늄광인 Tono 광산과 폐철광인 Kamaish 광산을 이용하여 현장시험을 수행한 바가 있다. 최근에 JAEA (Japan Atomic Energy Agency)는 H-12 및 H-17 프로젝트의 연구결과 실증을 위해 결정질 화강암반의 미주나미(Mizunami)와 퇴적암반의 호로노베(Horonobe) 두 곳에 지하연구시설 건설을 추진하고 있다. 화강암반에 건설 중인 미주나미 URL (MIU)은 Gifu현 Mizunami시에 위치하며 Tono Geoscience Center가 주관하고 있다. 미주나미 URL에는 6m 직경의 수직갱(shaft)을 지하 1000 m 까지 2개 굴착하고 여러 개의 갱도가 건설될 예정이다[13].

이렇게 만들어진 지하처분연구시설에서 20 년에 걸쳐 조사 단계, 건설단계, 운영단계별로 지구과학분야의 다양한 연구가 계획되어 있다. 조사단계에서는 심부 시추공에서 지질구조, 수리지질, 지구화학에 관한 연구가 주로 수행될 계획이다. 현재 1000 m 시추공 4개소에서 시추조사를 하였으며 이들 시추공에서 수리시험, 지하수 채취, 현시응력측정 등을 수행하였다[14]. 굴착작업은 2009년 말까지 500 m 까지 굴착할 계획이었으나 몇 가지 문제들로 현재 약간 지연되고 있다.

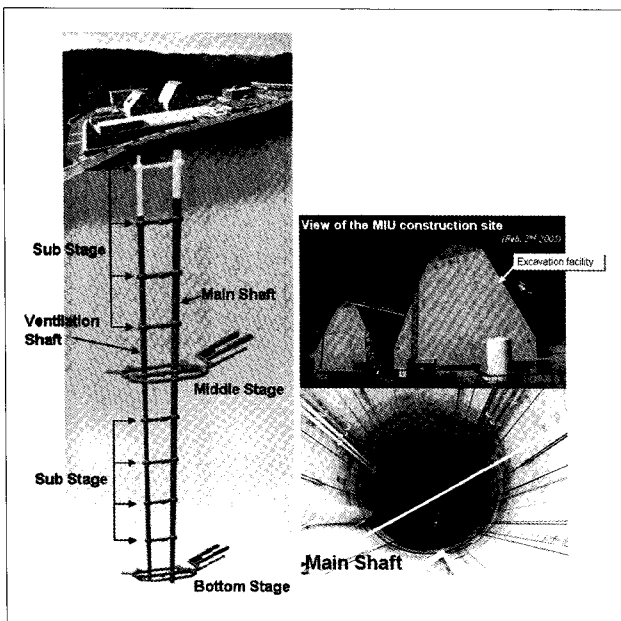


Fig. 3. Mizunami Underground Laboratory (MIU) in Japan [13].

Fig. 3은 현재 건설 중인 미주나미 URL의 개괄도 및 현장 사진들을 보여주고 있다[13].

바. Onkalo URL (핀란드)

핀란드에서는 결정질 암반의 특성을 규명하고 처분장 건설에 따른 기술을 실증하기 위한 지하처분연구시설 연구가 추진되고 있다. 핀란드는 이미 스웨덴의 Stripa 및 Äspö 같은 해외 지하처분시설 프로젝트에 초기부터 적극적으로 참여하여 지하수 유동 모델링 연구, 실험장비 개발 및 적용 연구를 공동으로 수행하였다. 이와 병행하여 1990년대 초부터는 울킬루오토(Okiluoto)에 위치한 중·저준위 방사성폐기물 처분장 내에 사용후핵연료 처분공을 모사하기 위해 지하 50 m에 폭 7 m 길이 50 m 규모의 소규모 연구 터널 프로젝트를 추진하여 사용후핵연료 처분공 굴착에 필요한 제반 기술을 실증하는 연구를 마쳤다[6].

핀란드에서는 2001년 5월 사용후핵연료 처분장을 울킬루오토에 건설하는 것에 대해 의회의 승인을 받았으며, 이에 따라 상용 처분시설건설 인허가 목적의 지하처분연구시설을 건설할 목적으로 2003-2004년 상세 지질조사를 수행하였고 2006년 처분심도에서의 조사를 실시하였다. 최근 2009년 3월 12일 핀란드 고준위방사성폐기물 처분사업자인 Posiva는 Lovisa 원자력발전소 3호기에서 발생하는 사용후핵연료 최종 처분에 대한 원칙결정(Decision-in-Principle)을 정부에 신청하였다. 따라서 울킬루오토 처분장에 처분될 사용후핵연료의 양은 기존의 9,000 톤에서 12,000 톤으로 늘어나게 되었다. 핀란드의 사용후핵연료 최종 처분의 주요 일정은 2012년에 처분장 건설 인허가를 신청하여 2020년에 사용후핵연료 처분에 착수할 예정이다.

현재 울킬루오토 암반에 굴착중인 온칼로(Onkalo) URL은 2004년 6월에 착수하여 2009년 12월 18일 현재 383 m 심도에 4018 m 까지 굴착되었다. 최종 처분 깊이인 420 m에는 2010년 초반에 도달할 예정이다. 420 m 처분심도에서는 최종 처분시설의 굴착기술과 방법의 적용성 등이 조사될 예정이다. 아울러 처분 터널의 요구사항이나 중요 항목들을 시험하고 검증하기 위한 터널들이 추가로 굴착될 예정이다. 계획된 굴착들은 2011년 말에 완료될 예정이고, 최종 깊이는 437 m에 도달할 것으로 예상된다.

III. 지하연구시설에서 핵종 및 콜로이드 이동 관련 국제공동연구 현황

해외의 지하연구시설들 중에서도 스웨덴의 Äspö와 스위

스의 GTS는 방사성핵종을 사용할 수 있는 지하연구시설로 화강암을 모암으로 하고 있고 현재 가장 활발하게 연구가 진행되고 있는 시설이다. 따라서 한국 실정에 가장 부합되는 지질조건 및 연구내용들을 가지고 있는 지하연구시설이기에 이들 시설에서 수행중인 핵종 및 콜로이드 이동 관련 연구 프로젝트들에 대해 보다 자세하게 살펴보았다.

가. 삼차원 추적자 이동실험(Äspö HRL)

스웨덴 Äspö HRL에서 수행중인 실험으로 지하 심도 500m 실험시설 내에서 다양한 방향으로 시추를 하여, 암반 균열분포를 종합적으로 분석한 다음, 서로 연결된 이동통로를 설정해 한 시추공에서 추적자를 주입하여 이동하는 양태를 다공(Multipole)에서 계속 관찰하여 3차원 흐름장(flow field)에서 수리전도도(K)와 방사성핵종 이동을 파악하는 실험이다. 이 프로젝트는 세 분야로 나누어 여러 기관에서 공동연구 형태로 추진하고 있는데, 실험실에서 암반물성, 기초 입력인자 값 측정 등을 수행하는 팀, 현장에서 핵종이동 실험을 수행하는 팀, 실험을 해석하고 예측하기위한 이동모델을 개발하는 팀으로 분반해서 연구하고 있으며, 스웨덴 SKB (Svensk Kärnbränslehantering AB), 핀란드 Posiva, 프랑스 Andra (Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs), 일본 JAEA (Japan Atomic Energy Agency) 같은 기관들이 주도하고 있다. 1단계 연구(TRUE-1, 1996-2002)를 거쳐, 2단계 연구(BS2, True Block Scale Continuation Project)가 진행되어 2007년에 최종보고서가 발간되었다[15].

나. 장기 암반매질내 확산실험(Äspö HRL)

오염물질들이 암반균열 내를 이동할 때, 일부는 암반매질 내로 확산해 들어가게 된다. 확산량은 암반의 공극률 (porosity)에 크게 좌우되는데 심부결정질암반의 경우 대개 0.003 (cm³/cm³) 수준이다. 1 m³ 부피 암반에서 오염물질이 공극을 통해 확산해 들어간다면 약 3 리터의 물질이 저장될 수 있다. 그러므로 오염물질이 암반표면에 수축하지 않더라도 확산만으로도 상당한 수준으로 이동을 지연시킬 수 있으므로, 확산에 대해 정확히 평가하는 것이 중요하다. 본 암반 확산 현장 실험은 스웨덴 Äspö HRL에서 수행한 실험으로 실험은 암반균열이 없는 면에 시추를 하고 그 시추공 안에 추적자를 집어넣고 장기간 확산과정이 일어나게 한다. 그 후, 정해진 시간에 시추공 주변을 크게 추출하여 추적자들이 확산한 양을 평가하여, 확산 깊이와 확산계수를 구하는 실험이다[8, 16].

다. 핵종이동 미시적 측정실험(Äspö HRL)

스웨덴 Äspö HRL에서 수행한 실험으로 균열을 포함한 약 20 cm 크기 암석을 채취/가공하여 이동 실험 장치를 만들어서 현장시추공에 다시 삽입한 다음 현장 조건에서 주로 약 틴족 핵종들을 대상으로 CHEMLAB 이동 실험을 수행하였다 [17]. Fig. 4에 보이는 특별한 실험시스템을 이용하여 핵종과 암반 균열 표면과의 상호작용에 대한 미시적 관찰, 회분식으로 구한 수축 및 이동자료의 검증 등에 대해 가치 있는 연구 결과들을 보고하고 있다. 이 실험은 스웨덴 SKB와 독일 INE (Institut für Nukleare Entsorgung)가 공동으로 수행하였는데, 한국(KAERI)도 일부 연구 분석에 참여하여 실험결과 해석에 일조하였다.

라. 콜로이드 이동실험(Äspö HRL)

스웨덴 Äspö HRL에서 수행한 실험으로 Fig. 5에 개략적으로 나타낸 바와 같이, 2.5 m 구간 간격으로 시추공을 뚫고 지하수가 이동하는 암반 균열대를 찾아서 이공실험(dipole test)으로 콜로이드의 이동성과 안정성을 관찰하는 실험인데, 콜로이드 물질로는 심부 지하 조건에서 생성되는 유기물, 미생물들과 핵종 착화물들 뿐만 아니라 지하 처분 시 인

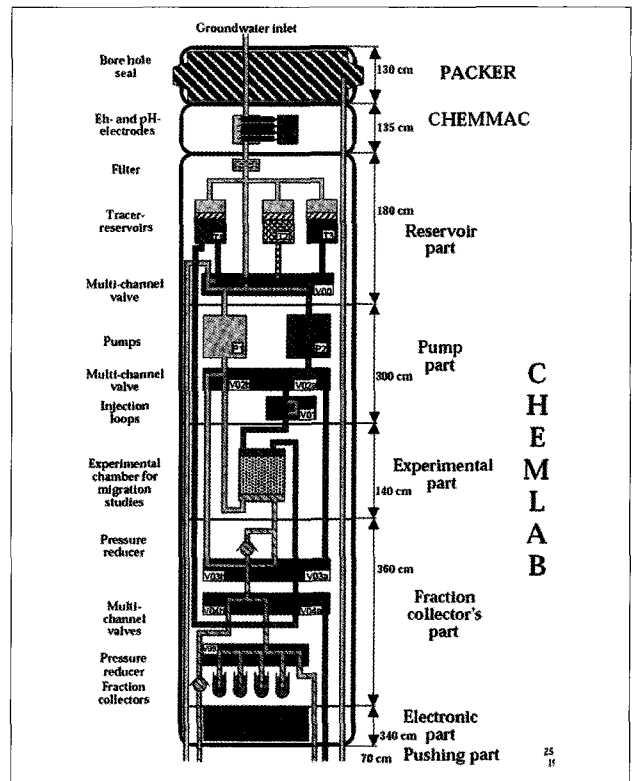


Fig. 4. The experimental system for CHEMLAB experiment in Äspö Hard Rock Laboratory, Sweden [17].

공방벽으로 사용할 예정인 벤토나이트도 포함한다[8]. 벤토나이트는 장기간 지하수에 접하는 동안 극미세 입자로 유출될 수 있을 뿐만 아니라, 방사성핵종들이 이 입자들에 수착하여 장거리 이동할 가능성이 높으므로 이에 대한 검증이 필요하다.

마. 콜로이드 형성 및 이동 실험(GTS)

스위스 GTS에서 수행하고 있는 CFM (Colloid Formation and Migration) 프로젝트는 벤토나이트에 기초한 공학적 방벽인 압축된 벤토나이트 완충재로부터 콜로이드 발생을 연구하고, 발생된 콜로이드가 이류흐름 조건에서 균열 암반에서 방사성핵종 이동에 미치는 영향을 조사하는 것이다. 이를 위해 타당한 처분장 조건 및 GTS의 자연적 지하수 유속 조건에서 장기적 현장실험이 수행될 것이다. 프로젝트의 현장실험 부분에 대한 특별한 타당성은 실험 위치 선정 과정과 장기 현장 추적자 시험을 위한 경계조건들을 명확하게 정의할 수 있다는 것이다. 또한 이 프로젝트는 지중에서 콜로이드에 의해 가속화된 핵종이동에 대한 성능평가에 사용될 컴퓨터 코드들과 데이터베이스들을 검증 및 개선하려는 의도로 수행되고 있다. 아울러 CFM 프로젝트는 다양한 현장 및 실험실적 연구들을 통해 방사성핵종의 화학종 규명과 관련하여 핵종과 콜로이드의 상호작용 같은 지화학적 문제를 조사하는 목적도 가지고 있다[9].

현재 진행 중인 CFM 프로젝트는 1단계(2004 ~ 2007) 연구를 거쳐 현재 2단계(2008 ~ 2013) 연구를 수행 중이며, KAERI에서도 2단계부터 CFM 프로젝트에 참여하고 있다[18]. 1단계 연구에서는 주로 기초자료 생산과 최종 시험 위치 선정, 시험위치 사전 준비 활동, 수력학적 모델링, 실험실적 연구 프로그램들의 계획 및 착수, 이동모델링의 착수, CFM 프

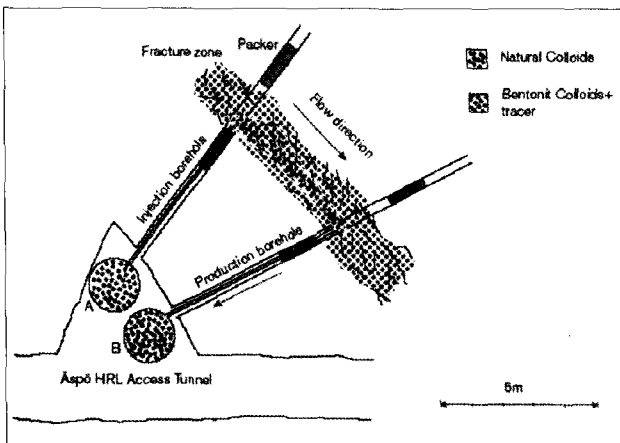


Fig. 5. Conceptual figure for the colloid migration experiment in Äspö Hard Rock Laboratory, Sweden [11].

로젝트의 계획 및 진행 등에 대한 일들이 주로 진행되었다. 2 단계 연구에서는 1단계 연구를 바탕으로 한 동족체 (homologue) 시험, 실험실적 실험 및 mock-up 시험, 그리고 실제 현장실험에 착수하는 것을 목표로 하고 있다. 현재 터널 패커(tunnel packer)가 터널 전체에 설치되어 시험 중이며, 조만간 동족체 추적자 시험을 수행할 예정이다[10]. Fig. 6에는 CFM 프로젝트의 현장실험에 대한 개념을 도식적으로 나타내었다.

바. 장기 암반 확산 실험(GTS)

스위스 GTS에서 수행하고 있는 장기 암반 확산 현장실험인 LTD (Long-Term Diffusion) 프로젝트는 암반 기공의 가시화(visualization)와 현장 암반체 확산(matrix diffusion)에 대한 조사를 목적으로 하는 대규모 장기 현장 실험이다[8]. 암반 확산은 균열을 따라 흐르는 용질이 서로 연결된 미세균열 또는 기공들을 통해 주변 암반으로 관통하고, 암반체(rock matrix)로 확산 이동하는 과정이다[19]. 방사성폐기물 처분장의 관점에서 암반체 확산의 중요성은 암반체 확산이 이동하는 핵종들과 접촉하는 암반 표면의 면적을 매우 크게 증가시키는 메커니즘을 제공한다는 것이다. 또 암반 확산이 흐름 경로의 표면으로부터 암반체의 큰 부분까지 핵종들을 지연시킬 수 있는 전체 기공부피를 증가시킨다는 것이다[8].

LTD 프로젝트의 1 단계(2004 ~ 2008) 연구에서는 문헌조사 및 실험실적 연구, 예측모델링 등이 주로 수행되었고, 현장 암반체 확산 정도와 기공형태를 결정하기 위한 많은 기술들이 시험되고 검증되었다. 실제로 LTD의 작업은 크게 다음과 같은 4개의 작업으로 나누어서 진행되고 있다: 1) 현장 확산 단일공(monopole) 실험과 모델링 작업, 2) 기공 특성 규명을 위한 현장 시험, 3) 장기 확산 과정들에 대한 증

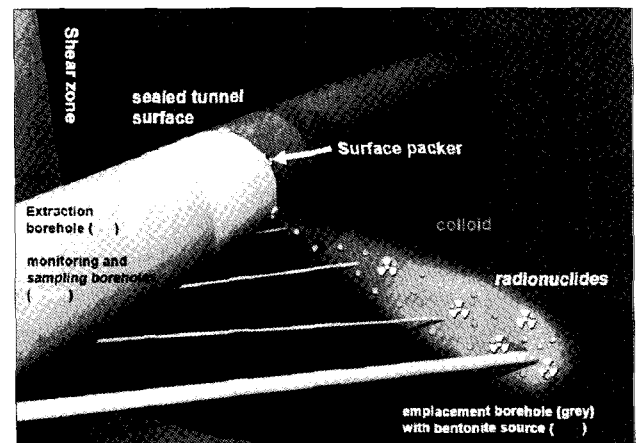


Fig. 6. In-situ experimental concept of the Colloid Formation and Migration (CFM) project in Grimsel Test Site, Switzerland [18].

거들을 설명하기 위한 자연 추적자 연구(Natural Tracer Study, NTS), 4) 균열의 흐름 경로 및 암반체 확산 경로 특성 등을 조사하기 위한 연구(Diffusion Processes Study, DPS). 현재 2단계(2009 ~ 2013) 연구가 착수되어 현장 시험공을 굴착하여 확산 특성을 조사하고 안전성평가 확산 모델을 개선하기 위한 연구들을 진행되고 있다[10]. Fig. 7은 LTD 프로젝트의 현장시험에 대한 개념 및 현장시험 사진들을 보여주고 있다.

VI. 국내의 연구현황

가. KAERI 지하처분연구시설

교육과학기술부의 원자력연구개발 사업에 의해 2006년 11월에 준공된 KURT (KAERI Underground Research Tunnel) 지하처분연구시설은 한국원자력연구원 부지 후면의 산지에 위치하고 있다. 산 중턱에 폭 6 m, 높이 6 m의 말굽형 단면으로 굴착된 총연장 255 m의 지하터널로 진입터널 180 m와 연구모듈 75 m로 이루어져 있다[3]. 연구모듈은 지표로부터 90 m 깊이의 화강암반 내에 위치하고 있다. Fig. 8에 KURT의 개념도를 나타내었다.

현재 KURT에서는 개발된 처분기술들이 실제 처분장에 적용되었을 때의 성능을 확인하고 요소기술들을 실증하기 위한 다양한 현장시험들이 수행되고 있다. 현재 수행중인 주요 현장시험은 다음과 같다[4].

- 암반의 열적거동 현장 실험
- 암반 손상대 특성 현장 실험
- 지하암반 균열에서의 용질 및 콜로이드 이동 지연 특성 현장 실험
- 심부 지질 조사기술 개발
- 수리지질 및 지하화학 기초자료 조사

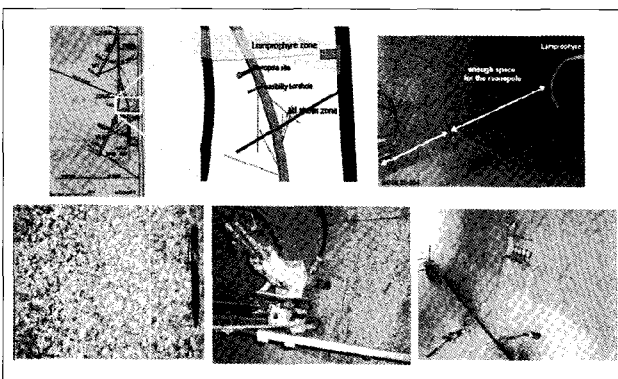


Fig. 7. Concept of Long-Term Diffusion (LTD) experiment including instruments in Grimsel Test Site, Switzerland [10].

나. KURT에서 현장 용질 이동 시험

KURT에서의 현장 용질 이동 실험을 위하여 이동 실험에 적절한 지하수 유동이 예측된 지역에 총 3개의 시험공을 시추하였다. 3개의 시추공에서 실험에 적당한 지하수 유동(약 600 mL/min)이 있는 잘 발달된 절리면을 확인할 수 있었다. 또한 방향성, 발달상태 및 충전상태 등의 기반암의 불연속면 특성을 파악하기 위하여 BIPS (Borehole Image Processing System)를 이용한 시추공 영상촬영 및 수압시험 등을 시행하였고, 단열들의 상호 연결성을 조사하였다[20]. 이러한 시추공 특성 조사 및 단열 연결성 조사 결과를 바탕으로 용질 이동 실험을 위한 대상 단열을 선정하였다.

아울러 KURT의 암반 단열을 통한 현장 용질이동 시험을 위하여 현장 용질이동 실험장치(IMS: In-situ Migration System)를 개발하여 현장에 설치하고(Fig. 9 참조), 다양한 시험을 실시하였다[21]. 장치는 주입부, 유출부 그리고 분석부로 나뉜다. 주입부는 추적자를 일정 유량으로 주입하며 추적자 저장용기, 시료 주입펌프, 압력계이지 등으로 구성되었다(Fig. 9 참조). 유출부는 토출 펌프, 지하수 함유 가스 제거 유닛, 실시간 지하수 특성 측정셀, 분류수집기(fraction collector) 등이 포함되어 있다. 분석부에서는 실시간으로 측정 데이터를 자동 입력하고, 원거리 송신이 가능하도록 구성하였다. 실시간 지하수 특성 측정셀에서는 pH, 온도, 산화환원전위, 용존산소, 그리고 전기전도도 등이 실시간으로 측정 및 기록되도록 하였다. 이 장치를 이용하여 두 개의 시추공 사이에 연결된 균열면의 지하수 흐름을 따라 이동하는 용질이동 시험이 진행되고 있다. 현재 비방사성의 비수착성 용질(염료 및 음이온)과 수착성 용질(Rb, Ni, Sm, Zr 등)을 이용한 용질 이동 및 지연 특성 연구를 수행중이며, 이동하는 용질과 단열 면에 존재하는 이차 광물과의 상호작용을 분석함으로써 용질이동의 지연현상을 규명하는 연구를 수행하고 있다. 향후로는 단열 암반을

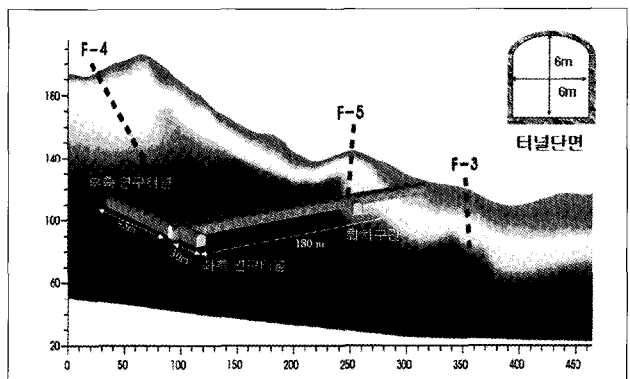


Fig. 8. Schematic picture of KAERI Underground Research Tunnel (KURT) in Korea [4].

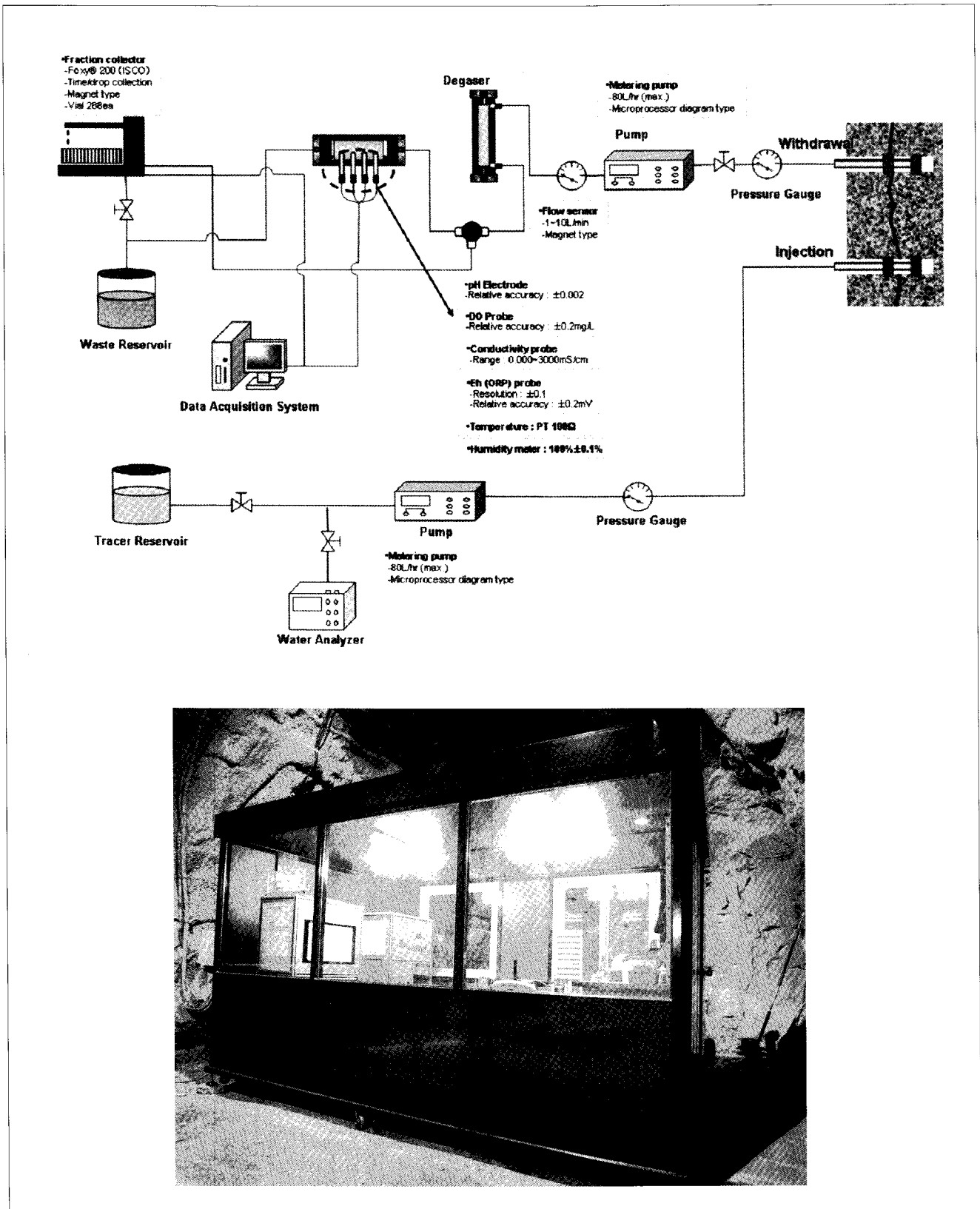


Fig. 9. Experimental concept and experimental system for in-situ solute migration experiments in KAERI Underground Research Tunnel (KURT) [20].

통한 콜로이드 이동 실험 및 모델 검증 연구를 수행할 계획이다.

V. 결론 및 제언

고준위 방사성폐기물 처분의 경우, 수 십 만년 이상의 기간 동안 안전성이 확보되어야 하므로 인공적인 공학적방벽만으로 처분장의 안전성을 확보하는 것은 현실적으로 불가능하다. 따라서 처분장의 안전성 확보를 위해서는 처분장으로부터 유출된 방사성 핵종들의 이동 특성과 지하매질과의 장기적인 상호작용을 이해하는 것이 매우 중요하다. 따라서 현재 처분 연구를 수행하고 있는 국가들에서는 실험실적 연구 및 현장 실증 연구 등을 통해 많은 자료들을 확보하고, 수학적 모델을 이용하여 정량적으로 예측 평가하는 연구들을 수행하고 있다. 최근에는 Safety Case 개념 도입을 통해 평가 모델과 자료들의 불확실성을 줄이고, 지중 처분의 신뢰성 확보를 위한 다양한 연구들을 수행하고 있다. 특히 핵종 및 콜로이드 이동 특성에 대한 연구는 실험실 및 공학적 규모의 연구 결과들을 바탕으로 지하연구시설에서 현장 실증 규모의 연구들을 국제공동연구로 활발하게 추진하고 있다.

따라서 고준위폐기물 처분 연구 분야의 후발국인 우리나라는 적극적인 국제협력 및 국제공동연구 참여를 통해 필요한 정보 및 기술들을 효율적인 습득하고, 이를 바탕으로 국내 실정에 적합한 고준위폐기물 처분시스템과 요소 기술들을 확보해 나가야 할 것이다. 아울러 국제공동연구를 통해 도출된 연구 결과들도 국내 자체 연구를 통해 얻은 연구 결과들과 동일한 의미와 중요성을 가지므로, 이들 연구 결과들을 바탕으로 국내 환경에 적합한 자료와 기술들을 개발하고 검증해 나가는 접근방법이 필요하다.

사 사

본 연구는 교육과학기술부에서 시행하는 원자력연구개발 사업의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

[1] 한필수, 최종원, 이종열, 김경수, 조동건, 김성기, 이양, 고준위폐기물 한국형처분시스템 개념설계 요건, 한국원자력연구소, KAERI/TR-3003/2005 (2005).
 [2] NEA, The Role of Underground Laboratories in Nuclear Waste Disposal Programmes, OECD/NEA,

Paris (2001).
 [3] 조원진, 권상기, 박정화, 한필수, "고준위폐기물 처분 연구용 지하터널의 기본설계," 방사성폐기물학회지, 2, pp. 279-92 (2004).
 [4] 조원진, 권상기, 박정화, 최종원, "한국원자력연구원 지하처분연구시설," 방사성폐기물학회지, 5, pp. 239-255 (2007).
 [5] 백민훈, 박정균, 이재광, 최종원, 해외 지하시험시설을 이용한 핵종 및 콜로이드 이동에 대한 국제공동연구 현황 및 참여 타당성 분석, 한국원자력연구소, KAERI/TR-3499/2007 (2007)
 [6] 백민훈, 박정균, 김승수, 이승엽, 이재광, 천연방벽에서 핵종이동 및 지연특성에 대한 연구현황 및 연구항목 분석, 한국원자력연구원, KAERI/AR-824/2008 (2008).
 [7] J.I. Kim, "Significance of Actinide Chemistry for the Long-Term Safety of Waste Disposal," Nucl. Eng. Technol., 38, pp. 459-482 (2006).
 [8] 박정균, 백민훈, 최종원, "지하연구시설을 이용한 오염물질 이동실험 현황 및 과제," 터널과 지하공간, 17(1), pp. 1-9 (2007).
 [9] W. Kickmaier, "Grimsel Test Site Phase V: Overview of the ongoing programme," Nagra Bulletin, 34, 11-23 (2002).
 [10] Nagra, Grimsel Test Site Phase VI, International Steering Committee Meeting, June 10-11, Zurzach, Switzerland (2008).
 [11] SKB, ÄSPÖ Hard rock laboratory annual report, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co, SKB TR 06-10 (2006).
 [12] 조원진, 이재완, 권상기, 김진섭, 외국의 지하처분연구 시설 현황 및 현장 연구항목 분석, 한국원자력연구소, KAERI/TR-3657/2008 (2008).
 [13] M. Shiotsyki, "An overview of JNC's R&D program for HLW disposal," The 2nd KAERI-JNC Workshop on High-Level Radwaste Disposal, Oct. 29 - Nov. 2, 2001, Tokai-Mura, Tono Geoscience Center, Toki-shi, Japan (2001)
 [14] M. Uchida, "Geoscience Research in MIU, 1st International Workshop on the Utilization of KURT for HLW Disposal Research," April 24, 2009, KAERI, Daejeon, Korea (2009).

- [15] P. Andersson, J. Byegard, D. Billaux, V. Cvetkovic, W. Dershowitz, Th. Doe, J. Hermanson, A. Poteri, E.-L. Tullborg, and A. Winberg, TRUE Block Scale Continuation Project, Final Report, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co, SKB TR-06-42 (2007)
- [16] K. Almen and L. Stenberg, ÄSPÖ Hardrock Laboratory: characterization methods and instruments, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co, SKB/TR-05-11 (2005).
- [17] B. Kinzler, P. Vejmelka and A. Gortzen, Actinide migration experiment in the ÄSPÖ HRL in Sweden, INE-FZK, FZKA-6925 (2003).
- [18] M. Baik, I. Blechschmidt, K. Iijima, B. Kanyon, K. Nakata, I. Puifdomenech, T. Schafer and M. Vahanen, Working Programme for the Colloid Formation and Migration Project, Phase 2, Grimsel Test Site, Phase VI, Swiss National Cooperative for the Disposal of Radioactive Waste, Wettingen (2008).
- [19] M. Valkiainen, Diffusion in the rock matrix - A review of laboratory tests and field studies, Nuclear Waste Commission of Finnish Power Companies, YJT Report 92-04 (1992).
- [20] 이재광, 백민훈, 지하연구시설(KURT)에서 현장 용질이동 시스템의 제작, 설치 및 운용, 한국원자력연구원, KAERI/TR-3791/2009 (2009).
- [21] 이재광, 백민훈, 손우정, "현장규모의 화강암반 단열면에서 용질이동시험: 시험공 시추 및 단열 특성 조사," 지하수토양환경학회 2008년 추계발표회 초록집, 포항공대, pp. 171-172 (2008).