

## 고준위 방사성폐기물 처분 기술개발 현황

이 영 업\*

### On the Research and Development for High Level Radioactive Waste Disposal in Korea

Young-Up Lee\*

**ABSTRACT** : The amount of the high level radioactive wastes in Korea will be increased up to 14,297 MTU about 2010 year. Most of countries adopt the concept of deep burial repository in high level radioactive waste disposal. Because the high level radioactive wastes are very toxic in biosphere and to human, the data verifying its never return to the biosphere are requisite for the disposal. Presently, the evaluating techniques for the high level radioactive waste disposal are not fully developed. Therefore, in order to dispose the high level radioactive wastes in proper time the R & D of it is urged in our country. The R & D and/or the international joint research programme for the disposal of high level wastes have already been proceeded. In our country no plan for its disposal has been prepared. It is the time that the direction of the R & D is to be discussed seriously. The R & D for the disposal of high level radioactive wastes in Korea is believed to be focused on developing the peculiar techniques such as in situ characteristics of groundwater flowage, and change of properties of in situ rock mass at thermal effects.

#### 개 요

고준위 방사성폐기물 처분에 대한 관심은 1970년대 말부터 시작되었다. 현재 원자력 발전을 하거나 계획 중인 국가는 국제원자력기구(International Atomic Energy Agency, IAEA) 114 회원국 가운데 28개국에 이르며, 연구로 만을 보유하는 국가는 44개국이다(Saire, 1993). 이 중 원자력 발전을 하고 있는 국가들은 방사성폐기물의 발생량이 많기 때문에, 방사성폐기물 관리에 특별한 관심을 집중하고 있다. 현재 중·저준위 방사성폐기물의 영구처분에는 크게 문제가 없을 정도로 처분 기술이 개발되어 있는 상태이다. 따라서, 각 국은 앞으로 심각한 문제로 대두될 고준위 방사성폐기물의 영구처분에 지대한 관심을 갖고 연구개발을 시작했거나 계획하고 있다. 고준위 방사성폐기물 영구 처분의 특징은 벨기에의 점토층, 독일의 암염층, 캐나다, 영국, 미국, 프랑스 등의 화강암 심층 처분 등과 같은 각각 자국의 특성에 알맞는 처분방식을 연구개발해야 한다는 점과 연구개발이 원위치(in situ)에서의 실증과 일치한다는 점이다. 고준위 방사성폐기물을 고화, 냉각시킨 후, 본격적인 처분이 시작되어야 할 시기는 국가별로는 조금씩 차이가 있지만 처분장의 후보지 선정에 대해

2000~2020 년경으로 보고 처분장의 실증, 건설 인허가에 20년 정도를 예상하면, 2020~2040 년경이 될 것으로 추정할 수 있다. 고준위 방사성폐기물 처분은 현재의 기술수준으로는 입증될 수 없는 많은 실증 자료들을 요하기 때문에 2000년대 초까지는 기술 및 시험방법을 개발하고, 처분이 시작될 2020년 경에는 이러한 기술에 의한 실증자료들이 준비될 수 있어야 한다. 각국은 이러한 시나리오를 통해 고준위 방사성폐기물의 처분장 건설 및 처분을 하고자 연구개발에 온 힘을 기울이고 있다. 실제로 미국은 1970년대에 이미 고준위 방사성폐기물의 처분계획을 수립하였고 1980년대 초에는 스웨덴, 스위스, 독일, 미국 등 여러 국가들이 관계 법령과 연구개발 전담기구들을 설립하기 시작하였다. 현재는 각국이 단독 혹은 여러 국가가 공동 참여하는 형식으로 연구개발을 진행시키고 있다.

#### 국내의 고준위 방사성폐기물

현재 우리가 고준위 방사성폐기물이라고 부르는 폐기물은 원자력발전소에서 사용을 마친 사용후핵연료에서 플루토늄과 우라늄을 회수하기 위해 재처리 공장에서 화학적으로 재처리할 때 발생하는 높은 방사능( $>10^4$  Ci/m<sup>3</sup>)을 갖는 액체 상태의 폐기물이다. 일반적으로 재처리된 연료 부피의 약 3%

\*전북대학교 자연과학대학 지질학과

Table 1. Amounts of spent fuel arising in Korea up to 2020(NE-MAC, 1992).

Year	Annual production			Cumulative total(MTU)
	PWR type	CANDU type	Total	
1991	150	92	242	1,578
1995	166	95	261	2,622
2000	242	380	622	5,010
2005	339	570	909	9,106
2010	377	665	1,042	14,297
2020	228	570	798	23,817

가 고준위 방사성폐기물에 해당된다. 재처리하지 않은 사용 후 핵연료도 고준위 방사성폐기물에 포함된다. 이러한 고준위 방사성폐기물은 생태계에 치명적인 피해를 줄 수 있는 높은 방사선을 방출하기 때문에 이를 다루거나 저장 혹은 처분을 하는 데 있어서 각별한 주의가 요망되며, 모든 처리, 처분 단계에서 적절한 차폐물이 필요하다.

현재 국내에서 발생하는 고준위 방사성폐기물의 양은 사용 후 핵연료가 가장 큰 비중을 차지하고 있으며, 그 외 양은 적지만 발전소에서 발생하는 고체 고준위 방사성폐기물이 있다. 사용 후 핵연료는 엄밀하게 따진다면 재처리를 결정하기 전까지는 연료에 속하지만 공식적으로는 1991년 한반도비핵화 선언에서 재처리를 하지 않기로 천명했기 때문에 고준위 방사성폐기물이 될 가능성이 아주 높다. 우리나라는 총 9기(가압경수로 발전기(PWR) 8기, 캐나다형 중수로 발전기(CANDU) 1기)의 원자력 발전소를 상업 운전 중이며, 가압경수로 발전기 4기와 캐나다형 중수로 발전기 1기를 추가로 건설 중이다. 또한 정부의 중장기 전원 수급에 따라 13기의 원자력 발전소가 추가 건설될 예정이며, 2006년까지는 총 27기의 원자력 발전소가 가동될 것으로 예측된다(원자력 환경 관리센터, 1992). 이러한 원전의 건설은 사용 후 핵연료의 발생량을 급속히 증가시키게 될 것이다. 1979년 원전이 가동된 후부터 1991년 말 현재까지의 사용 후 핵연료 누적량은 1,578 MTU에 불과하나, 2010년에 이르러서는 14,297 MTU에 이를 것으로 전망되며, 연간 발생량만도 1,000 MTU를 넘을 것으로 예상된다(Table 1).

현재 국내의 원자력 발전소에서 발생하는 사용 후 핵연료는 각 발전소별로 자체 저장조 내에 저장, 관리되고 있으나, 1990년 중반 이후에는 모두 포화될 것으로 예상되어 한국 전력공사에서는 부지별로 저장 능력 확장을 실시 또는 계획 중에 있다(원자력 환경관리센터, 1992). 이 계획에 따르면 1단계 확장 후에도 영광 원전부지의 경우에는 1997년, 고리 원전 부지와 울진 원전 부지는 1999년에 다시 저장 능력이 포화될 것으로 예상되고 있다. 이와는 별도로 발전소를 해체할 경우에도 많은 양의 고준위 방사성폐기물이 발생한다. 1979년 가동된 고리 발전소의 가동 기간을 30년으로 잡으면,

2009년에는 해체가 본격적으로 시작되어야 할 것이며, 해체 시에는 많은 고준위 방사성폐기물이 발생될 것이다. 이러한 고준위 방사성폐기물은 저장만 하고 있을 수는 없으며, 고화, 냉각시킨 후에는 반드시 처분을 하여야 한다.

### 고준위 방사성폐기물의 처분상의 문제점

현재 거론되고 있는 고준위 방사성폐기물의 처분방법 들은 남극의 만년설에 묻는 방법, 사막과 같은 건조한 지역에 처분하는 방법, 우주공간에 처분하는 방법 등 여러가지 방법이 거론되어 왔으나, 비용, 위험성, 현재의 기술 수준 등을 고려하여(Krauskopf, 1988), 다음과 같은 두 가지 방법이 가장 타당성이 높은 것으로 간주되고 있다. 즉, 1) 경암층, 점토층, 암염층 등에서의 심층처분(Krauskopf, 1988)과 2) 심해저 지층처분(Roxburgh, 1987)이다. 이 두가지 처분방식의 공통점은 두 방법이 모두 지질학적 암층을 처분장의 대상으로 한다는 사실이다. 이 둘 중에서도 심해저 지층 처분은 1972년의 런던조약에 따른 제약을 받고 있으므로 현재는 심층처분 외에는 달리 대안이 없는 실정이다.

고준위 방사성폐기물과 중,저준위 방사성폐기물과의 처분 개념의 차이는 그것이 환경과 인간에 미치는 해의 정도와 지속기간의 차 및 높은 열의 발생 여부에서 발생한다. 고준위 방사성폐기물의 지하 심층처분 개념은 지층 방벽을 이용하여 방사성 핵종이 생태계에 도달하기 전, 긴 유로 통한 핵종의 도달 시간의 지연에 따른 독성의 감소와 지층에 포함된 핵종 흡착광물과의 반응에 의한 희석 효과가 가장 주된 처분개념이다. 따라서 고준위 방사성폐기물의 처분부지 선정에서 가장 중요한 요소는 유로와 흡착을 결정할 수 있는 암반의 종류와 물성이다. 핵종의 이동 지연에 결정적인 역할을 하는 암반의 이러한 특성은 핵종의 이동이 시발되는 장소 즉, 지하심부에서의 원위치 물성으로 결정되어야 한다. 고준위 방사성폐기물의 처분부지 선정은 이러한 원위치의 물성이 고준위 방사성폐기물을 처분하기에 적합할 것인가를 시험하는 것을 포함한다.

고준위 방사성폐기물을 처분하는 데 있어서는 액체 상태의 폐기물일 경우에는 유동성을 제거하는 데 가장 큰 중점을 두고 있으며, 현재 유리화 시키는 방법이 개발되어 있다. 액체를 유리화 시킨다하더라도 폐기물을 최종적으로 처분하기 위하여 사용 후 핵연료와 유리화된 재처리폐기물을 감시가 가능한 상태에서 50년간을 임시 저장하여야 한다. 이러한 과정을 거친 후 비로소 고준위 방사성폐기물을 처분하게 된다.

방사성폐기물이 처분장으로부터 생물권으로 노출되는 경로는

- 1) 지구조운동(tectonism), 다이아피리즘(diaperism) 혹은

침식(erosion) 등과 같은 지질학적 과정과 2) 지하수에 의한 생태계로의 핵종운반이다(Bredehoeft, 1978).

따라서 처분장은 지구구조적 안정성(tectonic stability)이 높고, 지하수의 이동이 느리면서, 생태계까지 도달하는데 긴 유동로(flow path)를 가져야 한다. 이러한 조건을 수용하는 암층은 다음과 같은 요건을 갖추어야한다(Angino, 1977).

1) 암층은 지진 발생의 위험이 없는 지질 구조적으로 아주 안정한 곳에 위치하 여야 한다.

2) 암층은 비교적 넓게 분포되어야 하며 수직적으로나 수평적으로 범위가 넓고, 미래에 광물자원으로 사용되지 않아야 한다.

3) 암반은 압축강도에 있어서 구조적인 강인성을 갖추어야 하며, 열전도성 (thermal conductivity)이 좋고, 높은 열적 수용력을 갖추어야 한다.

4) 지하수의 수문학적 특성(암층에서의 유량의 수직적 이동 및 양)이 규명되어야 한다.

5) 암층은 불투수성이라야 하고, 측정된 공극율과 함께 평가되어야만 한다.

6) 암석은 구조적인 변형을 적게 받았어야만 한다.

7) 암층은 폐기물을 묻기에 충분한(300 m 이상) 두께이어야 한다.

8) 단일 암층으로 구성되거나 균질한 암층이 좋다.

9) 암층은 처분장에 틈(breached)이 생겼을 때는 자체 봉합이 가능할 정도의 가 소성(plasticity)이 있어야만 한다.

10) 지하수가 없거나 있더라도 무시할 정도라야 한다.

이 중 무엇보다도 중요한 요소는 지하수의 존재여부이다. 그러나, 이러한 항목들이 충족되었다고 해서 모든 문제가 해결되는 것은 아니다. 신선한 결정질 암석의 투수율은 매우 낮으며(대개  $10^{-8}$  m/sec 이하), 확산 속도도 매우 느리기 때문에 암반에서 폐기물의 생물권으로의 노출은 주로 열극(fracture)을 통한 지하수의 이동에 의한다. 고준위 방사성폐기물의 핵분열은 높은 열을 방출하게 되며, 이러한 열역학적(thermo-mechanical) 응력은 폐기물 캐니스터 근처에서 변화를 일으킨다. 따라서 방사성폐기물을 처분하기에 충분한 암층을 찾았다고 하더라도 다시 다음과 같은 문제점을 해결하여야 폐기물 처분이 가능하다(Witherspoon *et al.*, 1977).

1) 아주 낮은 투수성을 갖는 열극 발달 암반의 지하수의 이동 특성,

2) 공극수 시료의 채집과 화학적, 동위원소적 자료를 이용한 물의 고수문학적 특성,

3) 3차원적인 열극 분포 특성,

4) 파쇄암에 대한 국부적 열적 하중(thermal load)의 영향 및 처분장 전체에 걸친 광역적 열하중에 대한 암석의 반응,

5) 압력, 온도 및 지하수 유동 등을 포함하는 수학적 모델링,

6) 처분이 마무리된 후의 방사성 물질의 누출 감시 체계의 수립

등이다. 이러한 문제들을 해결하기 위해서, 각국은 각각의 처분후보 지층의 특징 및 특성을 파악하고 종합적인 안전 평가를 행하여야 하며, 특히, 원위치에서의 안전성을 실증해야 한다. 따라서 여러나라에서는 처분대상 후보부지 내 혹은 그와같은 종류의 암층에 지하동굴을 굴착하여 연구 시설을 갖추고, 현장 암반에서의 연구를 수행하고 있다.

## 각국의 고준위 방사성폐기물 처분 기술개발

미국에서의 고준위 방사성폐기물 처분을 위한 기술개발은 에너지부가 주관하며 여러 부지를 대상으로 처분부지의 특성 평가를 위한 원자력폐기물 정책법(1982)과 10CFR60에 맞추어 주로 원위치 시험(in-situ testing)을 중심으로 이루어지고 있다. 실제 처분에 있어서는 그 인허가 신청에 앞서서 NRC (Nuclear Regulatory Commission)의 1984년 처분부지의 선정과 특성평가를 위한 지하처분 원위치 시험의 기술적 내용에 대한 구체적 실시지침에 따라 보고서를 제출해야 하기 때문에 각 실험 부지에서는 원위치 시험을 위한 기초조사와 원위치 시험 방법 개발, 원위치 시험 등을 실시하고 있다. 미국은 상업용 고준위 폐기물 처분장 후보 부지로 네바다 주의 사막 내 Yucca mountain 부지(화강암-응회암-세일)를 선정하였으나(Krauskopf, 1988), 현재까지는 1989년 11월에 수립된 애초의 계획대로 추진되지는 않고 있다(이찬구, 1993).

프랑스에서는 1983년 고준위 방사성폐기물을 처분하기 위한 후보부지로서 화강암, 암염, 점토질암 및 편암을 대상으로 (1) 심부에서의 안정성, (2) 불투수성, (3) 핵종의 흡착력 및 (4) 열역학적 성질 등을 3단계에 걸쳐 비교하여, 4개 부지를 최종 후보지로 선정하였다. 핵주기를 담당하는 회사인 CO-GEMA(Compagnie Generale des Matiers Nucleaires)에서 고준위 방사성폐기물을 유리화 시킨 후, ANDRA(Agence Nationale pour la Gestion des Dechets Radioactifs)에서 관리를 한다. 현재는 최종 1개 처분장 부지 선정을 위한 원위치에서의 지질연구가 진행 중이며, 지질조사를 위한 시추, 결정질암으로 된 지하시험실 등도 유럽 연합(EU, 구 EC)의 공동연구의 일환으로 추진되었으나, 주민의 반대로 건설은 연기되었다(Bosser, 1993).

독일에서는 모든 형태의 고화 방사성폐기물을 지층 특히 암염층 중에 처분하기로 하고 처분 사업을 진행 중이며, 다른 처분 개념은 연구 중이다(Langer, 1989). 그 이유로는

1) 독일에는 약 200개 이상의 암염 돔이 존재하며, 그 성인상 지하수 침입의 우려가 없고, 생물이 생존할 수 없는 극한 환경을 형성하기 때문에 생물 사이클 에는 개입되지 않는다.

2) 10,000 입방미터나 되는 큰 공동을 저렴한 비용으로 굴착할 수 있고, 또한 장기에 걸쳐서 안정성이 보장되기 때문에, 고화체를 안전하게 유지시킬 수 있다.

3) 붕괴열을 발생시키는 고준위 방사성폐기물 처분의 경우 특히 문제가 될 수 있는 열에 대한 전도성이 아주 좋다는 점 등이다.

독일은 고준위 방사성폐기물의 실험과 처분을 각각 Asse II 암염광과 Gorleben 암염광에서 실시하고 있다. Asse II 암염광은 1965년 연방정부가 각종 방사성폐기물을 처분하기 위하여 매입한 후, 1978년까지 중·저준위 방사성폐기물 약 12만 트럼을 시험처분하였는데, 고준위 방사성폐기물 고화체의 경우 여기에서는 처분 시험만을 할 계획이다. 이 Asse II 암염광 내에서는 현재 네덜란드가 공동으로 연구개발을 수행하고 있다. 고준위 방사성폐기물 처분은 Gorleben 부지를 후보지로 선정하여 그 적합성을 평가하기 위한 원위치 실증 시험을 계속하고 있다. 제 1 단계는 1979년부터 1983년까지 지표에서 조사를 하였으며, 제 2 단계는 1983년부터 지하에서 계속 조사 중이다(Closs *et al.*, 1993).

영국은 고준위 방사성폐기물의 처분에 대한 정책이 마련되지 않아 부지 조사나 부지 선정을 위한 기준을 마련하지 못하고 있어 환경론자들에게 비난을 받고 있는 실정이며(Richardson, 1991), 현재는 고준위 방사성폐기물을 지상에 50년간 저장하는 계획만을 정해 놓고 있다. 고준위 방사성폐기물의 처분은 해양저 처분과 심층처분을 모두 고려하고 있으며, 심층 처분 시의 처분장의 후보지질은 화강암질 심성암과 결정질편마암이 고려되고 있으나, 조사지가 아직 명확히 정해지지 않았기 때문에 본격적인 연구개발 사업에는 착수하지 못하고, Sellafield 채처리 공장과 Dounreay 고속 증식로 실험 시설에서 기본적인 조사와 연구 수행하고 있다(Chapman, 1989).

스웨덴의 고준위 방사성폐기물 개발 사업은 SKB(The Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company) 산하의 KBS(Karn Bransle Sakerhet)가 주관하고 있으며, Stripa 폐철광에서 처분장의 안전성 입증에 위한 연구개발에 중점을 두고 있다. 국제적으로는 Stripa 사업으로 알려져 있는 이 사업은 1977년 Stripa 폐철광을 KBS가 사들여 화강암반 내에서 실험을 실시한 것이 시작이다. Stripa 사업은 스웨덴 자체의 고준위 방사성폐기물 처분기술개발 사업으로 시작되었으나, 점차 미국, 캐나다, 핀란드, 프랑스, 일본, 스위스 등의 7개국이 제 1차 단계 연구에서부터 참여하였으며, 제 2차 단계에는 스페인과 영국이 새로 참가함으로써 국제 공동 연구가 되었으며(SK, 1985), 벨기에, 스위스 및 캐나다의 연구 개발 사업과도 긴밀한 관계를 맺고 각자의 자료를 제공함으로써 상호 협조하고 있다. 연구 개발은 지하 350m에서

철광상 주변의 파쇄대가 많이 발달한 화강암반을 대상으로 다음과 같은 실험을 하였다. 제 1차 단계(phase)에서는

1) 지하 1230m의 시추를 통한 수리지 및 수리지화학적(hydrogeochemical)인 조사,

2) 암반의 열극대를 따른 핵종의 운반 메커니즘을 연구하기 위한 추적자(tracer)의 이동 실험,

3) 시추공과 터널에서 뒤채움(backfill) 물질의 큰 규모 시험 등이다.

제 2차 단계에서는

1) 열극대를 탐지하기 위한 크로스 홀(cross hole)을 이용하는 지구 물리학적 방법과 유압식(hydraulic) 방법의 개발,

2) 열극이 발달된 화강암 내의 추적자 시험의 연장,

3) 잘 다져진 벤토나이트를 이용한 시추공과 수갱의 봉합(sealing) 실험,

4) 스웨덴과 미국의 합작(Swedish-American Cooperative; SAC) 사업의 자료에 기초한 Stripa 부지의 수리지질학적 특성,

5) Stripa 지하수의 동위원소를 이용한 기원 특성 및 지하학적 상호 작용 등을 연구하였다.

이런 일련의 연구를 통하여 확인된 사실로는 벤토나이트가 폐기물 처분시 사용되는 봉합재로서 적절하다는 점이나, 그 외의 자료들은 참가국을 제외하고는 공포되지 않고 있다. Stripa에서 행하고 있는 모든 실험에는 방사성 추적자를 제외하고는 방사성 물질을 사용하지 않는다. 최종 처분장은 여러 곳의 후보부지를 도출한 후 세부 조사를 위해 2~3개 부지를 선정하고, 최종 부지는 2000년까지 선정할 예정이며, 운영은 2020년으로 예상하고 있다(Thegerstrom, 1993).

벨기에의 Boom Clay 층은 지하 약 190m~300m에 분포하며, 곳에 따라 분포가 다른 한편, 네덜란드, 독일 등지에 넓게 분포하는 층이다. 벨기에 북동부 마을에서는 지하 약 160m~270m 사이에 북동 방향으로 약 1%의 경사를 갖는 점토층이 중신세의 합철 해륙성 사암에 의해 덮여 있다. 점토에 대해서는 처분매체로서의 부지고유(site specific) 특성을 알기 위하여 시험을 하고 있고, 점토 자체가 지하 처분에 있어 봉합물질로서 사용되기 때문에 Stripa 사업과도 밀접한 관련이 있으며, 항상 정보 교환이 이루어지고 있다. 실험은 지상시설 및 지하 실험 시설에서 계통 해석의 일환으로 현장 부근에서의 고화체와 주변 점토층과의 상호작용, 특히 점토의 특성 및 고화체 처분에 의한 성상 변화의 평가에 주력하며,  $K_d$  (distribution coefficient) 측정, 지질공학적 시험, 지층의 핵종포장성과 그 파손에 관한 연구가 추진되고 있다(Bonne, 1989). 제 1단계의 연구 사업은 1992년에는 방사선원을 포함시킨 가폐기물 포장물을 저장하는 것으로 계획되어 있다. 제 2단계에서는 수평갱을 두번째의 수갱에 연장시켜 소규모의

Table 2. Present status of R and D for high-level waste disposal in each countries.

Nation	Status	Rock type
U.S.A.	Evaluation survey in the Yucca Mountain site for HLW disposal repositoty, in-situ survey of hydrologic and thermal strain measurement in deep underground bore hole	Granite, Tuff, Shale
France	Investigation for siting, R and D for in-situ testing techniques	Granite, Clay, Rock Salt, Slate
Germany	Operating R & D lab. in the Asse II Salt Mine	Rock Salt
England	Stored 50 years prior to disposal, Site investigation	Crystalline Gn. Granitic Pluton
Sweden	Stripa Project in abandoned Stripa Mine, international project for hydrology, hydrogeochemistry and back-fill studies	Granite
Belgium	Underground experiments in Boom Clay, in-situ corrosion experiments	Clay bed
Swiss	Operating rock lab. in about 1 km of horizontal 3.5m dia. tunnel, international project for geophysics and hydrogeology studies	Granite
Canada	Deep underground experiments in shield granite	Granite
Japan	Investigation for siting	Crystalline rocks

시험(pilot) 처분실을 만들고 보다 많은 가처분 포장물과 최 후에는 실제로 고준위 방사성폐기물을 처분할 예정이다. 제 2단계 Hades 사업은 1994년에 시험 처분이 시작되어 금세기 말까지 계속될 전망이다.

스위스는 방사성폐기물의 발생자가 안전한 처분을 책임진다고 법으로 정해졌기 때문에 전력회사는 연방보건국(Federal Office of Public Health)과 함께 NAGRA(National Cooperative for the Storage of Nuclear Waste)를 1972년 설립하여 연구개발을 수행하고 있다. NAGRA는 모든 종류의 방사성폐기물 처분을 업무의 대상으로 하고 있는데, 고준위 방사성폐기물 처분을 위한 지구물리학적, 수리지질학적 원위치 시험에 가장 깊은 관심을 쏟고 있다. 1992년 경에는 부지를 선정하여 상세한 연구 및 조사를 2000년까지 행할 계획이며, 2000년 경부터 처분장의 설계, 건설을 시작하여, 2020년 이후 처분장을 운영할 계획으로 있다. 연구개발을 위한 지하 동굴 실험장은 Luzerne 남쪽 약 50km의 알프스 산맥 Grimsel부근에 있는 화강암체 중에 만들어진 수력발전용 지하강도에 심층 실험시설을 만들어 1983년부터 운영 중이며, 교차 수리시험, 현지 응력 측정, 대규모 환기 시험, 피압대 연구, 지진, 레이타 토포그래피, 지전기 탐사, 핵종 이동, 시추공 밀봉 등에 대한 국제적인 공동 연구가 수행되고 있다(McCombie et al., 1993). 또 스웨덴의 Stripa 사업과 같은 종류의 암체이므로 깊은 협력관계를 유지하고 있다.

캐나다에서는 조사후의 핵연료(irradiated fuel) 다발을 지상이나 지상 가까운 저장소에 저장하고 있다. 주로 화강암

으로 구성된 캐나다 순상지의 결정질암들이 재처리를 하지 않은 방사성 물질을 최종 처분하기 위한 처분장으로 조사되고 있다(Dormuth, 1989). 연방 동력자원부의 현재의 연구개발은 온타리오에 위치한 캐나다 순상지의 화강암의 고준위 방사성폐기물 처분장으로서의 적합성 입증에 초점이 맞추어져 있다.

일본에서는 고준위 방사성폐기물의 최종적인 처분 방법으로 지하 수백미터의 깊은 지층 중에 유리고화체로 처분하는 소위 지층처분을 기본 방침으로 하고 있다. 이를 실현 시키기 위하여 우선 일본의 지질환경에 대응한 지층처분체제(인공 방벽과 천연방벽으로 구성되는 다중 방벽체제)의 개발 등에 관한 지층처분 기술의 확립이 필요하며, 구체적인 지점을 정해 시추 등의 현지 조사를 하여 해당 지점이 처분장으로 적당할 것인가를 결정해야 한다고 판단하고 있다(Hirose, 1989). 또 기술 확립을 위한 연구개발과 처분장의 입지선정을 위한 현지조사와는 상호연관이 있기는 하나, 내용 및 실시 방법이 아주 이질적인 것이라고 판단하여 1992년 8월의 원자력 위원회 방사성폐기물 대책 전문가 보고서에서 구체적인 추진 방법은 두가지를 분리, 각각의 특성에 맞는 추진 방법을 실시하고, 일본의 지질학적 특성을 고려하여 복수의 시설 건설이 바람직한 것으로 제안하고 있다. 이상의 내용들을 요약해 보면 표 2와 같다.

### 우리나라의 기술현황과 개발 방향

이상에서는 간략하게나마 각 국가에서의 고준위 방사성폐기물 처분장 부지 선정 및 건설, 운영을 위한 기술 개발 동향과 현황에 대하여 살펴 보았다. 고준위 방사성폐기물의 처분에 관련된 문제는 우리나라에서도 멀지 않아 심각한 현안으로 대두될 것이다. 따라서 현재 우리로서는 고준위 방사성폐기물에 대한 문제와 실정에 대한 인식, 우리 기술 및 잠재 인력의 현황과 습득해야할 선진 기술의 파악, 기술 개발의 방향 및 항목, 부지 선정을 위한 대책 등이 시급히 고려되어야 할 시기라고 판단된다. 현재 우리는 마땅한 고준위 방사성폐기물 처분에 기술 개발 방향이 전혀 설정되어 있지 않은 형편이며, 이를 담당할 조직 또한 구성되어 있지 않으며, 국제 공동 연구에도 참여하지 못하고 있는 실정이다. 다만 한국 원자력 연구소 부설 원자력환경 관리센터에서 이러한 문제에 대한 접근을 시도하고 있다(이찬구, 1993).

우리나라에서의 고준위 방사성폐기물 처분을 위한 기술 개발은 전혀 이루어진 바가 없으며, 전문 인력의 확보도 국내 여건상 쉽지 않은 것으로 보인다. 고준위 처분장의 선정, 처분방식의 결정 및 건설허가를 위해서는 광범위한 범위의 지질학적 연구개발이 선행되어야 하며, 여기에는 URL(un-

derground rock laboratory)에서의 연구도 포함된다. 또한 원자력 발전이 국가 에너지의 근간을 이루는 점을 감안할 때 기술의 무조건적인 해외의존은 에너지 수급의 국가 전략 차원에서 문제가 되며, 그에 따른 비용 문제와 아울러 심층 처분의 특성상, 처분기술의 현장성 문제도 제기될 수 있다. 따라서 현 시점에서의 우리의 기술 개발은 처분에 필요한 모든 기술을 자체 개발하는 것보다 해외 기술을 어느 정도는 들여오되, 현장성을 가지면서, 고유한 기술의 개발이 가능하고, 개발 후에는 다른 기술과의 상호 교환이 가능한 기술에 대한 개발이 올바른 방향일 것으로 판단된다. 이러한 기술의 개발은 어떤 한 두 개의 조직만으로 감당하기가 힘들며, 범국가적인 차원에서 대처해야 함을 빨리 인식해야 한다. 각 국가에서의 고준위 방사성폐기물 처분을 위한 기술 개발은 첫째, 처분장의 도출 방법 및 과정과 일치한다는 점과 둘째, 그 연구개발의 대상이 지구과학 분야에 집중되어 있다는 점이 그 특징이다. 이는 거의 모든 국가에서 고준위 방사성폐기물 처분 방법으로서 심층처분이 채택되고 있음을 보여 주며, 도출 방법 및 과정에서의 기술 개발의 현장성에 따라 국가마다 각기 다른 지질학적 매체에서의 기술개발이 이루어지고 있음도 주목된다. 이러한 처분부지의 선정에 관한 지하에서의 시험은 아직은 시험 방법의 대부분이 미개발 상태이므로 지구과학 분야의 대부분의 연구 및 기술개발은 원위치에서의 암반 물성시험 및 측정 방법, 열역학적 운동, 파쇄대의 발달, 지하수 흐름의 측정 방법, 지하수의 이동 및 모델링, 지하학적 특성, 뒤채움(backfill) 물질의 연구 등에 초점이 모아지고 있다. 즉, 이러한 모든 연구 개발은 고준위 방사성폐기물 처분장의 선정에서부터 건설 및 운영허가를 받기 위한 안정성 분석에 영향을 미칠 수 있는 암반의 안정성과 수리지질학적 및 지구화학적 타당성을 제시할 수 있는 원위치에서의 실증 기술의 개발이라고 할 수 있다. 우리나라의 심층 처분장은 지질학적인 여건상 미국의 화산암, 독일의 암염광, 벨기에의 점토암 등은 고려할 수 없으며, 지하 심부까지의 연장성이 좋은 결정질암이 되어야 할 것이다(이찬구, 1993). 그러나, 우리나라의 결정질암은 대륙 안정지괴에 속한 국가들에서의 결정질암과는 달리 구조 운동에 따른 파쇄대의 발달이 두드러진다. 따라서 우리의 기술 개발에서는 이런 파쇄대의 발달을 고려하여 고유한 지하수의 유동 조건을 해결하여야 한다. 또한 고준위 방사성폐기물의 특성상 높은 고열에 따른 결정질암에서의 모든 변화도 필수적으로 연구되어야 할 항목이다. 따라서 우리나라에서의 고준위 방사성폐기물 처분을 위한 이상적인 암반 조건을 시험할 수 있는 기술개발은 다음과 같은 두 분야에 초점이 맞추어져야 할 것으로 보인다. 즉,

- 1) 심부 결정질 암반내의 지하수 유동특성
- 2) 심부암반의 열하중에 따른 응력장, 물성 특성 및 지하

학적 특성 변화

등이다. 지하수의 유동 특성은 대류, 확산, 화학반응 및 폐기물의 용해 속도 등이 유동 특성에 영향을 줄 수 있으며, 열하중은 대류 셀(convection cell)의 형성과 가속(driving), 압력 기울기의 증가, 점성도의 감소, 암반 응력장의 감소에 의한 유체의 이동 특성 변화 및 용액의 화학적 특성의 변화를 포함한다(Bredhoeft, 1978). 이 두 분야는 핵 선진국에서도 연구가 일천하여 우리도 노력 여하에 따라서는 충분히 경쟁할 수 있는 분야로 판단되며, 아울러 현장성을 고려한다면 우리 고유의 기술이 될 수 있을 것이다. 구체적으로 지하수의 유동 특성의 경우 지하 암반에서의 지하수 시료 채집 기술 개발, 수직 수리전도도의 결정 기술 개발,  $10^{-12}$  m/sec 이하의 수리전도도 측정 기술 개발 등과 같은 주제를 예로 들 수 있으며, 열하중에 따른 암반 물성 변화에서는 열하중에 따른 미세 열극의 발달 특성, 열하중에 따른 열극 발달과 지하수 유동과의 관계, 열하중에 따른 대류 셀이 지하수 유동에 미치는 영향 등을 예로 들 수 있다. 물론 우리의 이러한 기술개발에는 기초 자료가 되는 부지 고유성에 따른 장기 안전성에 관한 연구 및 지진-지체구조구(seismo-tectonic province)의 설정도 포함되어야 할 것이다.

아직 우리는 고준위 방사성폐기물의 처분에 관해서는 전혀 준비를 하지 못하고 있는 상태이다. 그러나, 부지 선정의 여건이 좋고, 기술 수준이 월등 앞서는 선진국과 어깨를 나란히 하려면, 이제부터라도 고준위 방사성폐기물 처분을 위한 현재의 기술 현황을 분석하고, 부지 선정에 필요한 기술의 모든 분야를 포괄하기보다 기술의 핵심에 해당되면서도 우리의 시간과 인력 및 개발비로도 가능할 것으로 판단되며, 현장성을 기대할 수 없는 외국 기술의 무분별한 도입을 어느 정도 제어할 수 있는 잇점도 있는 위의 분야에 집중적인 투자가 이루어진다면 우리 기술로도 세계와 충분히 경쟁할 수 있을 것으로 믿는다.

## 결 론

국내에서 발생되는 고준위 방사성폐기물은 대부분 사용후 핵연료이며, 원자력 발전소가 본격적으로 해체되기 시작할 2010년에 이르러서는 그 양이 크게 늘어날 것으로 전망된다. 고준위 방사성폐기물의 처분은 대부분의 국가에서 심층처분을 채택하고 있다. 고준위 방사성폐기물은 고화, 냉각시킨 후 처분을 해야 하며, 환경과 인간에 미치는 해와 독성의 지속기간이 길고, 높은 열을 발생시키기 때문에 이러한 폐기물이 생태계로 결코 돌아오지 않을 것이라는 엄격한 실증자료가 필요하다. 이는 현재의 기술로는 입증할 수 없으며, 기술 개발에 많은 시간을 요하기 때문에 고준위 방사성폐

기물을 적절한 때에 처분할 수 있기 위해서는 기술 개발을 서둘러야 한다. 고준위 방사성폐기물을 발생시키는 대부분의 국가에서는 이미 처분연구가 심도있게 진행되고 있으며, 국제 공동연구에도 활발하게 참여하고 있다. 우리나라는 아직 고준위 방사성폐기물 처분을 위한 어떤 준비도 되어 있지 않은 실정이며, 기술, 인력, 경제적 여건도 결코 좋다고는 할 수 없다. 그러나, 지하수 유동, 열하중에 따른 암반의 특성 변화 등의 분야에서 현장성을 갖는 특정 기술 개발, 예를 들어 투수율이나 공극율이 아주 낮은 지역에서의 지하수 시료 채집 방법, 수직 수리 전도도의 결정 방법, 극도로 낮은 수리전도도의 측정 기술 개발 등이나 열하중에 따른 미세 열극의 발달 특성, 열하중에 따른 열극 발달과 지하수 유동과의 관계, 열하중에 따른 대류 셀이 지하수 유동에 미치는 영향 등의 기술 개발에 기술력을 집중할 경우 기술 경쟁력을 충분히 갖출 수 있을 것으로 판단된다.

## 사 사

이 보문의 내용에 대해 검토와 조언을 해 주신 한국원자력연구소 김천수 박사님과 이찬구 실장님께 감사드리며, 참고문헌을 찾는 데 큰 도움을 준 동 연구소 최원학 선임연구원에게도 감사한다.

## 참고문헌

- 원자력 환경관리센터 (1992) 방사성폐기물 관리 사업 종합보고서 (1986-1991), KAERI-NEMAC/GP-1/92, 한국원자력 연구소 부설 원자력 환경관리센터, 315p.
- 이찬구, 김지영, 최원학 (1993) 방사성폐기물의 심부지층 처분장 선정을 위한 지질학적 도출지침 설정 및 그 적용, KAERI-NEMAC/TR-12/93, 한국원자력 연구소 부설 원자력 환경관리센터, 123p.
- Angino, E. E. (1977) High-Level and Long-Lived Radioactive Waste Disposal, Science 198, No. 4320, p. 885 - 890.
- Backblom, G., and P. E. Ahlström (1989) Swedish Programme for Disposal of Radioactive Waste Site Characterization for a High Level Waste Repository, p. 117-126, in Witherspoon, P. A. ed., 1989, Geological problems in radioactive waste isolation : A world wide review, Proceedings of Workshop W3B, 28th International Geological Congress Washington, D. C., July 15-16, 1989, LBL-29703, CONF-8907218, 232p.
- Bonne A. (1989) Geoscientific Investigation in the Belgian R & D Programme Concerning the Disposal of Radioactive Wastes in Clay, p. 11-26, in Witherspoon, P. A. ed., 1989, Geological problems in radioactive waste isolation : A world wide review, Proceedings of Workshop W3B, 28th International Geological Congress Washington, D. C., July 15-16, 1989, LBL-29703, CONF-8907218, 232p.
- Bosser, R. H. (1993) Basic Safety Regulation for the Disposal of Radioactive Wastes in Deep Geological Formation, IAEA-SM-326/58, p. 381-403, in Geological Disposal of Spent Fuel and High Level and Alpha Bearing Wastes, Proceedings of Symposium, Antwerp, 19-23, Oct., 1993, IAEA, 486p. Bredehoeft, J. D., A. W. England, D. D. Stewart, N. J. Trask and I. J. Winograd (1978) Geological Disposal of High Level Radioactive Waste, Earth Science Perspectives, Geological Circular 779, 15p.
- Brocoum, J. S., S. G. Van Camp, and D. F. Fenster (1989) Site Characterization Activities to Investigate Major Geologic Uncertainties at Potential High-Level Radioactive Waste Repository, Yucca Mountain, Nevada, p. 165-172, in Witherspoon, P. A. ed., 1989, Geological problems in radioactive waste isolation : A world wide review, Proceedings of Workshop W3B, 28th International Geological Congress Washington, D. C., July 15-16, 1989, LBL-29703, CONF-8907218, 232p.
- Chapman, N. A. and T. J. McEwen (1989) Geological Aspects of the British Programme for Deep Disposal of Nuclear Wastes, p. 143-163, in Witherspoon, P. A. ed., 1989, Geological problems in radioactive waste isolation : A world wide review, Proceedings of Workshop W3B, 28th International Geological Congress Washington, D. C., July 15-16, 1989, LBL-29703, CONF-8907218, 232p.
- Chenevier, F. (1989) The French Radioactive Waste Management Programme, p. 51-55, in Witherspoon, P. A. ed., 1989, Geological problems in radioactive waste isolation : A world wide review, Proceedings of Workshop W3B, 28th International Geological Congress Washington, D. C., July 15-16, 1989, LBL-29703, CONF-8907218, 232p.
- Dormuth, K. W., W. T. Hancox and S. H. Whitaker (1989) Geological Consideration for Disposal of Nuclear Fuel Wastes in Canada, p. 27-36, in Witherspoon, P. A. ed., 1989, Geological problems in radioactive waste isolation : A world wide review, Proceedings of Workshop W3B, 28th International Geological Congress Washington, D. C., July 15-16, 1989, LBL-29703, CONF-8907218, 232p.
- Hirose, K., M. Uchida and S. Takeda (1989) Reviews of the Geological Problems on Radioactive Waste Isolation in Japan, p. 93-101, in Witherspoon, P. A. ed., 1989, Geological problems in radioactive waste isolation : A world wide review, Proceedings of Workshop W3B, 28th International Geological Congress Washington, D. C., July 15-16, 1989, LBL-29703, CONF-8907218, 232p.
- Krauskopf, K. B. (1988) Radioactive Waste Disposal and Geology, Chapman and Hall, 145p.
- Langer, M., H. Schneider and K. Kuhn (1989) The salt Dome of Gorleben- Target Site for the German Radioactive Waste Repository, p. 57-66, in Witherspoon, P. A. ed. (1989) Geological problems in radioactive waste isolation : A world wide review, Proceedings of Workshop W3B, 28th International Geological Congress Washington, D. C., July 15-16, 1989, LBL-29703, CONF-8907218, 232p.
- McCombie, C., A. Lambert and I. G. McKinley (1993) Swiss Strategy for Developing a High Level Waste Disposal System, IAEA-SM-326/30, p. 365-373, in Geological Disposal of Spent Fuel and High Level and Alpha Bearing Wastes, Proceedings of Symposium, Antwerp, 19-23, Oct., 1993, IAEA, 486p. Richardson P. J. (1991) Management and Disposal of High Level Waste, p. 32-50, in Kemp, S., 1991, Management of Radioactive Waste, The Issues for Local Authorities, Thomas Telford, London, 177p.
- Roxburgh, I. S. (1987) Geology of the High Level Nuclear Waste Disposal, Chapman and Hall, 229p.

Saire D. E. (1993) The IAEA Programme on Management and Disposal of High Level Wastes, in Geological Disposal of Spent Fuel and High Level and Alpha Bearing Wastes, Proceedings of Symposium, Antwerp, 19-23, Oct., 1993, IAEA, IAEA-Sm-326/67, p. 21-29.

SKB (1986) Stripa Project 86-05, Technical Report, 30p.

Thegerstrom, C. (1993) The Swedish Programme for Siting of a Deep Geological Repository for Spent Nuclear Fuel, IAEA-SM-

326/23, p. 353-363, in Geological Disposal of Spent Fuel and High Level and Alpha Bearing Wastes, Proceedings of Symposium, Antwerp, 19-23, Oct., 1993, IAEA, 486p.

Witherspoon, P. A., J. E. Gale, and M. G. W. Cock (1977) Radioactive Waste Storage in Argillaceous and Crystalline Masses, Rockstore v.2, 77p.

---

1995년 2월 15일 원고접수