

세계 주요국의 고준위폐기물 처분개념과 현황

최종원¹⁾ · 권상기²⁾ · 강철형¹⁾

1) 한국원자력연구소

2) 정회원, 한국원자력연구소

1. 서 론

고준위 방사성폐기물(이하 고준위폐기물)이란 높은 방사능을 지닌 방사성폐기물로서 사용후핵연료를 재처리했을 때의 폐용액 또는 사용후핵연료 그 자체를 말한다. 고준위폐기물은 장기간에 걸쳐서 방사능을 지니는 소위 장수명의 방사성 핵종을 많이 함유하고 있고, 이러한 핵종에서 나오는 붕괴열 때문에 특별한 관리가 요구되고 있다.

고준위 방사성폐기물이 지니는 장기적 방사성독성(radiotoxicity)과 붕괴열의 방출은 심지층처분장의 장기 안전성 확보에 매우 중요한 요소이며, 이러한 요소들과 심지층처분 환경과의 장기적 양립성을 분석, 예측할 수 있는 정보의 한계가 심지층처분장이 아직까지 상용화되지 못하고 있는 주요 원인중의 하나라 할 수 있다. 원자력 선진국들에서는 이를 극복하기 위한 여러 형태의 연구개발 사업이 수 십년 전부터 진행되고 있다.

국내의 고준위폐기물 처분 연구는 다소 늦은 감은 있지만 1997년 부터 한국원자력연구소를 중심으로 추진되고 있다. 이 연구는 과학기술처의 중장기 과제로 수행중이며, 1단계가 종료되는 2003년 3월까지 국내 환경에 맞는 기준처분개념(reference disposal concept) 설정을 목표로 진행중이다. 기준 처분개념을 설정하기 위해서는 폐기물의 밀봉포장 개념, 처분용기 사양, 지하처분시설의 형태, 처분터널/처분공의 형상, 인공방벽의 구성요소 등과 같은 부시스템들에 대한 개념들이 가장 중요한 선정기준인 안전성과 연계되어 세워져야 한다. 이를 위하여 구성 부시스템의 성능 요건, 그리고 방사성 방호기준 등과 같은 운영중/폐쇄후 안전 요건 등이 반영된 지상 및 지하 시설에 대한 개략적인 예비개념설계도 수행되어야 한다.

본 연구에서는 1970년대부터 체계적인 기술개발을 통해 현재까지 약 20여 년 이상 자국의 실정에 맞는 처분 기술을 축적해온 미국, 캐나다 및 스웨덴의 처분 개념을 비교, 분석하였다. 기타 국가, 즉 스위스, 벨기에, 일본,

독일 등 자국의 실정에 맞는 기준 개념을 갖고 있는 나라들도 있으나 미국, 캐나다 및 스웨덴만큼 구체적으로 공개된 자료들이 부족하거나 또는 국내에 예상되는 처분장 모암(결정질암)과 성질이 다른 암염 또는 점토층 등을 처분매질로 고려하고 있어 위 3개국의 현황만을 우선적으로 조사, 분석하였다.

2. 미국의 고준위폐기물 처분 개념

2.1 미국의 고준위폐기물 정책

1945년 세계 최초로 핵무기 생산에 성공한 미국에서는 1954년에 원자력 에너지의 평화적인 사용과 이의 부산물인 고준위폐기물의 관리책임이 연방정부에 있음을 알리는 원자력에너지법이 의회를 통과함으로써 방사성폐기물 관리정책이 처음 나오게 되었다.

1956년 국립과학아카데미(NAS)는 고준위폐기물의 처분은 심지층처분이 적당하며, 심지층처분을 위하여 암염층을 포함하여 여러 지질암층에 대해서 조사할 것을 권고하였다. 이에 따라 1960년대 초 원자력위원회(AEC)는 미시간 주와 오하이오 주의 근처에 있는 암염층에 대한 지질조사를 시작하였으나, 지방 정부의 반대로 조사가 중단되는 사태가 발생하였다. 그후 1970년대초 원자력위원회는 캔사스주 Lyons 암염층에 고준위폐기물 처분장 건설을 제시하였으나, 캔사스주의 지질학자들에 의해 그 지방에 과거 석유 및 가스탐사를 위한 많은 시추공들이 있음이 밝혀지면서 계획이 취소되었다.

1980년에 DOE는 여러 처분 대안에 대한 광범위한 환경영향평가(EIS)를 통하여 심지층처분의 우수성을 발표하였으며, 1982년 미 의회는 방사성폐기물 관리에 관한 법, 즉 NWPA¹⁾를 통과시킴으로써 본격적인 방사성폐기물 처분연구가 광범위하게 수행될 수 있는 전기를 마련하였다.

이 NWPA를 근거로 하여 DOE는 1983년에 6개 주에 9개의 후보부지를 선정하였는데, 이중 7개가 암염층

이며 2개가 화성암층이었다. 1984년에 제시된 DOE의 최종 부지 선정 기준에 의해서 1986년에 9개의 후보부지를 5개로 압축하고, 이어 네바다, 텍사스, 및 워싱턴 주의 3개 부지로 압축하였다. 한편 1985년에는 핵무기 제조시 발생한 고준위폐기물도 상업용 원전에서 발생한 고준위폐기물과 함께 처분하는 것을 대통령령으로 발표하였다. 그러나 1986년에 DOE는 주 정부 및 주민의 반대에 부딪쳐 후보부지 선별작업을 중단하였으며, 1987년에는 부지특성조사의 지연과 비용 과다로 인하여(당시 부지당 10억불로 추정) 미 정부는 부지확보조사의 연기를 포함한 폐기물관리정책의 재검토를 지시하였고, 1987년 말 미의회는 새로운 폐기물관리 정책인 NWPAA^[2]를 통과시켰다. 1987년의 NWPAA의 발표로 유카마운틴 프로그램이 착수되어 현재에 이르고 있다.

유카마운틴 프로젝트에서는 고준위폐기물 처분장 부지대상을 일단 네바다 주의 유카마운틴으로 가정하고 이곳이 처분장 부지로서의 적합성 및 종합 안전성 평가 등을 수행하게 된다. 현재 주관 기관은 고준위폐기물 처분을 담당하는 DOE이며 산하에 방사성폐기물관리국(OCRWM)을 두어 총괄하고 있다. 실제적인 프로젝트 관리는 운영관리 계약을 맺은 TRW사(TRW Environmental Safety Systems Inc.)가 하고 있으며, 부지특성 조사를 위하여 25개 기관이 TRW사와 계약을 맺어 참여하고 있다. 또한 기술적인 정책결정 및 인허가 관련 기준 설정 등의 업무를 위하여 연방정부의 회계국(General Accounting Office), 기술검토 기구(Nuclear Waste Technical Review Board), 원자력 규제위원회(NRC), 환경보호국(EPA), 국립과학아카데미, 네바다주 폐기물 사업국(State of Nevada's Nuclear Waste Project Office), 지역폐기물처분 사무국(Nye Country Nuclear Waste Repository Office) 등이 직·간접적으로 참여하고 있다.

현재 2010년 처분장 운영을 목표로 추진되고 있는 주요 일정은 다음과 같다.

- 1997 : 터널 및 시험장 공사 완료, 광범위한 열시험 시작
- 1998 : 예비 타당성평가 완료 : DOE로부터 "고준위폐기물 처분장 부지로서 기술적으로 타당하다"는 의견 도출
- 2000 : 최종 환경영향 평가
- 2001 : 부지 타당성 여부 최종 발표
- 2002 : NRC에 인허가 서류 제출 및 건설
- 2010 : 처분장 운영 시작

2.2 고준위폐기물 처분장 개념^[3]

2.2.1 폐기물 처분시스템 설계를 위한 주요 가정 및 기준

- 처분대상 고준위폐기물 량 : 70,000MTU (상업용 사용후 핵연료:63,000MTU; DOE 사용후핵연료: 2,333MTU; 군사용 시설에서 발생된 고준위폐기물: 4,027MTU; 상업용 시설에서 발생된 고준위폐기물: 640MTU)
- 거치 방법 : 고준위폐기물 운반은 기차수송이며, 최종 처분구역에서의 거치방법은 수평갱도 처분방식(indrift 방식). 거치 작업시 로봇 혹은 원격조절 구동장치를 이용하여 수행.
- 폐기물 회수성 : 폐기물 거치 시작 후 최소 100년 까지 폐기물 회수가 가능하도록 설계.
- 열부하 범위 : 지상/지하시설 및 포장용기의 설계시 기준 열부하 범위는 80-100 MTU/acre (기준 열부하는 83 MTU/acre).
- 처분동굴에서 완충재 및 되메움재는 사용하지 않음.
- 작업자 피폭은 ALARA 원칙이 적용으로 피폭선량 제한치는 연간 500 mrem.
- 처분동굴 굴착 : TBM을 이용한 굴착을 원칙으로 하고, TBM 적용이 불가능한 부분에 대해서는 발파공법 적용.
- 최대 굴착비율 : 30%
- 최대 램프(Ramp) 경사 : 레일 수송을 위해서 램프의 최대 경사도는 3%이내이며, 처분 동굴에서의 경사도는 배수를 위해서 0.25~0.75% 범위.
- 지하 처분장의 순환 공기 표준밀도 1.2 kg/m³, 열전달계수 0.02564 W/mK, 열용량 1.2082 kJ/m³K.
- 지하 처분장내의 최대 순환 공기 속도 : 램프에서 7.6 m/s, 환기수직터널에서 20.3 m/s, 사람출입용 수직터널에서 11.7 m/s, 건설중인 처분동굴에서 3.0 m/s. 최소 허용 공기의 속도는 굴착 작업 및 유지 보수시 램프에서 각각 0.51 m/s, 0.31 m/s, 수직터널에서 각각 0.51 m/s, 0.31 m/s, 처분동굴에서 각각 0.51 m/s, 0.31 m/s.
- 지하 처분장에서의 최대 공기 온도(처분갱도) : 건설공사중 27°C, 처분용기 거치 작업 및 되메움(back-filling) 작업시 50°C, 처분 후 감시기간 중에는 제한이 없으며(이때는 암반 온도에 의해서 좌우됨), 그리고 회수기간 중에는 50°C. 접근통로에서의 공기 온도는 건설, 운영, 회수, 감시 등 모든 단계에서 27°C로 제한.

- 폐쇄전 최대허용 암반 표면 온도 : 환기시스템이 작동되지 않는다는 가정하에 수직터널에서 35°C, 램프에서 50°C, 접근터널에서 50°C, 처분동굴에서 200°C.
- 열에 의한 지표면 상승은 연간 0.5 cm 이내.

2.2.2 폐기물 포장/공학적 방벽 설계를 위한 주요 가정 및 기준 (PWR 사용후핵연료 21개 수용 기준)

- 크기 : 지름 1.6~1.8m×길이 5.3~5.7m
- 무게 : 21개의 PWR을 저장하는 다목적용기 (MPC)의 경우 65,900 kg
- 건전성 : 2m 높이 낙하 또는 정상적인 취급 및 수송중 25 kN 하중에서 건전성 유지.
- 처분용기 수명 : 1,000년이며, 처음 1,000년이 지난 후 파손율은 1% 미만.
- 처분용기 재질 : 탄소강
- 사용후핵연료 무게 : PWR 887 kg, BWR 332 kg
- 공학적 방벽의 신뢰도 : 처분장 폐쇄전 폐기물 패키지 각각의 파손율 연간 10⁻⁶ 미만.
- 온도제한: 핵연료 피복관 온도 ≤ 350°C, HLW Glass의 온도 ≤ 500°C.
- Near-field 환경 : 지하수 흐름은 기본적으로 없으나, 극단적인 상황에서 0.1 mm/year 까지 허용.

2.2.3 처분시스템 운영 시나리오

처분시스템 운영 시나리오는 건설단계, 개발단계, 지하

처분장내 폐기물 거치단계, 감시, 회수 및 폐쇄 후 감시의 5단계로 구분하고 있으나 이들의 보다 세분된 주요 운영 순서는 다음과 같다.

방사성폐기물 수납 및 검사 → 폐기물 패키지 취급 및 저장 → 지하 처분시설 이송을 위한 폐기물 패키지 준비 (처분용기 밀봉/포장) → 지하 처분시설로 이송 → 이송 장비 지상으로 이동 → 처분용기 거치 → (불량 폐기물 패키지 회수) → 시스템 성능평가 → 지하 처분터널 폐쇄 → 모든 지하시설 폐쇄 → 지상시설 철거 → 폐쇄 후 폐기물 고립

2.2.4 지하 처분장 개념

지하 처분시설은 지름 7.62m를 갖는 접근 램프 (access ramp), 지상과 지하 처분장을 연결하는 길이 320-380m의 수직터널, 지하시설에서 패키지 이동 통로인 주수송터널, 폐기물이 처분되는 처분터널로 구성된다. 지하시설은 두 개의 평평한 블록으로 구성되는데, 총면적 3.24 km²인 상부블록은 면적 0.7 km²의 하부블록보다 약 65~70m가 더 높으며, 상부블록 끝에서 램프(ramp)를 통하여 하부블록과 연결된다(Fig. 1 참조). 처분 밀도가 83 MTU/acre(≈ 20 kg/m²)일 때 처분동굴의 총 길이는 160 km가 된다.

가) 지하시설 건설

지하시설 굴착은 대부분 TBM공법을 이용한다. 수송

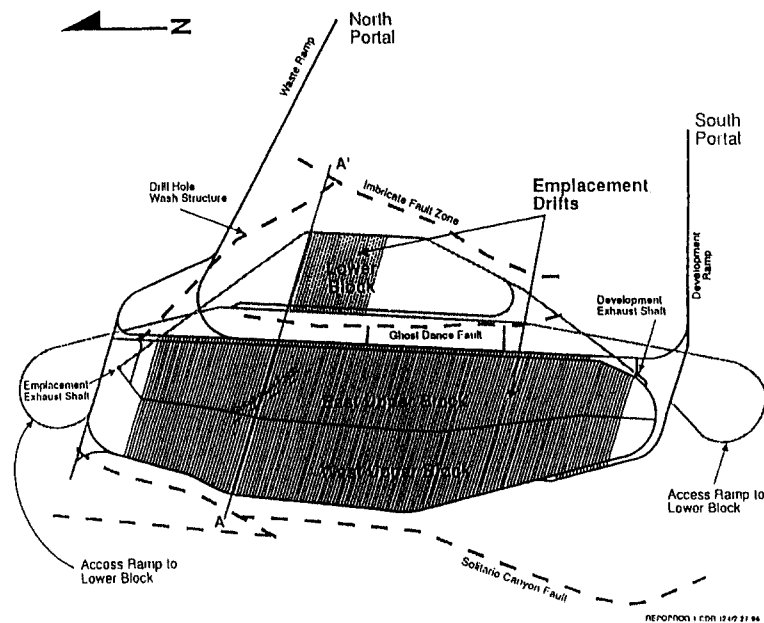


Fig. 1. Underground Repository concept in Yucca Mountain in the United States

경도는 지름이 7.62~9.0m이며, 처분경도의 지름은 5.0~5.5m이므로, 굴착되는 암반의 체적은 5,900,000m³가 될 것이다. 초기 건설기간은 약 6년으로써, 이 기간에 두 개의 수직터널, 수송경도, 13개의 처분경도가 굴착될 것이다. 또한 이 기간에 환기 시스템도 장착하게 될 것이다. 초기 건설기간이 끝난 후 폐기물 거치 작업과 동시에 굴착이 이루어지게 된다. 먼저 상부 블록의 북쪽에서부터 굴착을 시작하여 남쪽으로 내려온 후 하부블록을 위한 통로를 개척하고 하부블록으로 이동하게 된다. 그리고 상부블록의 굴착작업은 두 대의 TBM이 필요하며, 하부 블록 작업시는 TBM 한 대만 필요하다.

나) 처분용기 거치 작업

처분용기는 지상의 폐기물 취급 건물에서 차폐가 된 이송장비에 싣고, 레일을 이용하여 지하로 이송하게 된다. 북쪽 램프를 이용하여 지하로 내려온 수송팩키지는 주동굴을 거쳐 처분 동굴입구에서 처분용기와 레일카를 처분 동굴안으로 밀어 넣는다. 다시 원격으로 움직이는 일종의 거치 기관차(emplacement locomotive)를 처분동굴 안으로 밀어 넣고 처분용기를 실은 레일카와 연결시켜 거치 위치로 이동시킨 후 다시 거치 기관차는 빠져 나온다.

처분 동굴 내에서 처분용기를 실은 레일카를 위치시키는 방법은 현재 두 가지 방안이 고려되고 있다. 기준방법으로 제시하고 있는 중심위치 거치(center in-drift emplacement)는 처분동굴의 지름이 5m 필요하며(Fig. 2 참조), 비 중심위치 거치(off-center in-drift emplacement)는 지름이 5.5m 필요하다. 비 중심위치 거치는 처분용기 옆에 새로운 레일을 설치할 수 있기 때문에 거치 후 처분용기의 원격 감시가 용이하고, 비정상 상태를 초래하는

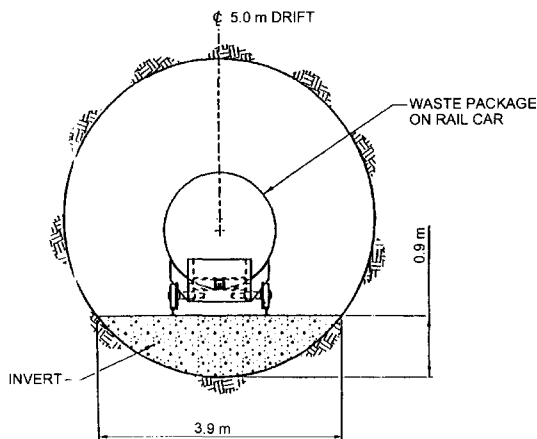


Fig. 2. On-center in drift emplacement method

처분용기상태를 적절히 처리할 수 있는 기회를 제공한다. 그러나 처분동굴의 크기가 커야하고 이에 따른 되메움재의 양이 많이 들어가는 단점이 있을 것으로 예상되고 있다.

다) 지하시설 환기계통

지하시설의 환기계통은 독립된 두 개의 시스템, 즉 지하시설 개발지역과 폐기물 거치지역으로 나누어져 있다. 개발지역의 환기시스템은 지상의 공기를 지하로 빨아들이는 inlet fan을 이용하고, 폐기물 거치지역은 지하의 공기를 외부로 뽑어내는 outlet fan을 이용한다. Outlet fan 시스템에는 비상용 HEPA 필터가 부착되어 있어 운영 중 비상상태 발생시(방사선량의 증가시) 작동하도록 되어 있다. 폐기물 거치가 끝난 처분경도에서는 경도입구에 있는 도어를 닫고, 환기 시스템을 운영하지 않는다. 만일 보수 혹은 회수 작업과 같이 처분동굴 내에서 작업이 필요한 경우에는 동굴표면 온도를 50℃로 낮춘 후 작업한다.

라) 처분터널의 되메움

처분경도 내에 되메움재는 사용하지 않는 것을 기준 개념으로 정하고 있다. 현재 이 되메움재의 사용 여부를 그 효과성 측면에서 계속 분석 중에 있으며, 만일 되메움재가 사용된다면, 낙반에 의한 처분용기 보호, 처분동굴의 붕괴 가능성 감소 등과 같이 안전성 측면에서 성능 향상을 기대할 수 있다. 그러나 현재의 설계기준상 처분동굴 내에서는 원격 작업을 하는 개념이기 때문에 되메움작업은 매우 어려울 것으로 평가되고 있다.

2.2.5 처분용기 개념

처분용기 개념 설정에 있어서 처분용기가 차폐기능을 포함하고 있는가의 여부는 폐기물 거치 작업을 하는데 있어서 매우 중요하다. 일반적으로 수직 처분공을 이용한 거치 형태에서는 팩키지에 차폐보강이 필요 없으나 수평동굴에 거치 할 때는 차폐보강이 필요한 것으로 알려지고 있다. 그러나 여기서는 수평동굴에 처분하면서 도 차폐보강 필요성을 없애기 위해서 원격으로 운전하는 개념을 도입한 것이 특색이라 할 수 있다. 처분 용기는 Fig. 3에 보여지는 MPC(다목적 용기)에 담겨진 채로 이송된 핵연료(canistered fuel), MPC를 사용하지 않고 일반적인 수송용기를 이용하여 이송된 핵연료(uncanistered fuel), 혹은 고준위폐기물을 담은 캐니스터를 수용할 수 있도록 설계되었다. 또한 처분 대상 핵연료가 매우 다양하기 때문에 모든 핵연료 종류가 수용될 수 있도록 설계되어야 한다. 이러한 점을 고려하여 다양한 종류의 기준

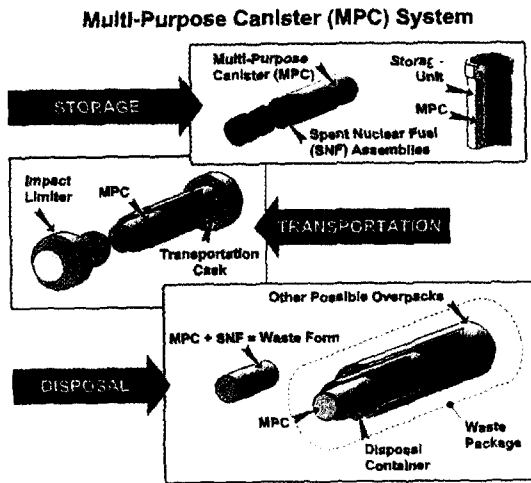


Fig. 3. Multi-Purpose Canister (MPC) concept

처분용기들이 제안되었다.

3. 캐나다 고준위폐기물 처분장 개념⁴⁾

3.1 캐나다의 고준위폐기물 처분 관련 정책 및 프로그램

캐나다의 처분 프로그램은 1978년 캐나다 연방정부와 온타리오 주정부가 체결한 "핵연료폐기물 관리프로그램 (Nuclear Fuel Waste Management Program)"에 근거를 두고 있다. 이 협약안에 의해서 AECL(Atomic Energy Canada Ltd.)이 사용후핵연료 심층처분 연구개발의 책임기관으로 선정되었으며, 캐나다 원자력발전소의 대부분을 소유하고 있는 온타리오 전력(Ontario Hydro)사는 사용후핵연료 중간저장과 수송에 대한 책임을 지게 되었다. 또한 온타리오 주정부는 온타리오 전력회사로 하여금 AECL의 처분 연구개발을 적극 지원하도록 지시하였다. 따라서 현재까지 처분개념의 모든 주요 사항에 대한 연구개발은 AECL이 중심이 되고, Ontario Hydro사가 보조역할을 하면서 수행되고 있다.

1981년에 캐나다 정부와 온타리오 주정부는 공동발표문을 통하여 처분 부지선정은 처분개념이 정립된 후 실시해야하며, 처분시설 건설 및 운영기관 선정도 처분개념이 정립된 후에 하기로 하였다. 그러므로 캐나다에서의 처분연구는 처분시설 건설 및 운영책임기관이 결정되지 않은 상태로 진행중이며, 연구기관인 AECL에 의해서 부지확보 및 부지특성 조사와는 별도로 처분개념연구가 진

행중이다. 이러한 접근방법이 미국이나 스웨덴의 처분개념연구와는 크게 다르다고 할 수 있다.

고준위폐기물 처분관련 연구는 대부분 AECL의 Whiteshell Laboratory와 URL(Underground Research Laboratory)에서 수행되고 있으며, 현장연구는 캐나다 전국토의 대부분을 차지하고 있는 순상지의 여러 지점에서 실시되었다. 이러한 연구개발 결과를 토대로 AECL은 환경영향보고서를 통해 현재까지 개발된 기준 처분개념으로 고준위폐기물을 기술적으로 안전하게 처분할 수 있다고 결론내리고 있다. 현재 캐나다에서 발생하는 사용후핵연료는 약 6년 동안 원자력발전소 건물 내의 습식 저장수조에서 저장되고 이후는 부지 내에 건설된 건식 저장시설로 옮겨 관리되고 있다. 일정기간 저장 후 사용후핵연료를 직접 처분할 것인지 혹은 재처리할 것인지의 여부는 아직 결정하지 않았으나 직접 영구처분을 기본 가정으로 취하고 있다. 현재 개발되고 있는 기준처분 개념 역시 미국의 경우처럼 필요시 폐기물 회수를 고려하고 있다.

캐나다는 현재 운영되고 있는 건식 중간저장시설(발전소 부지내 저장)이 안전하게 잘 운영되고 있기 때문에 폐기물 처분이 급박한 것은 아니다. AECL은 처분 프로그램을 원활히 수행하기 위해서 5단계로 구분하였다. 첫째 단계는 부지선정단계로서 잠재적인 부지에서 충분한 지질학적 정보를 얻기 위한 단계로서 최소한 20년이 걸릴 것으로 보고 있다. 다음 단계는 건설, 운영, 해체 단계로서 각각 최소 5년, 40년, 10년이 걸리는 것으로 보고 있다. 마지막 단계는 폐쇄 단계로서 제도적 관리 없이 안전성이 확보된다고 인정받은 후 실시하며, 최소 2년이 소요될 것으로 추정하고 있다. 따라서 현재 부지단계에 조차 진입하지 못하였기 때문에 처분장 운영시점은 2025년 이후가 될 전망이다.

한편 처분연구를 책임지고 있는 AECL의 연구 결과를 평가할 수 있도록 독립적인 기구가 만들어 졌는데, 이것이 연방 환경영향평가 심사단(Federal Environmental Assessment Review Panel)이다. AECL은 연방 환경영향평가 심사단으로 하여금 고준위폐기물에 대한 처분방안이 타당한지 검토할 수 있도록 환경영향평가 보고서를^{5,7)} 1994년에 제출한 바 있다. 이 보고서는 주어진 조건하에서 처분방안이 기술적, 안전성, 경제성 측면에서 타당하다는 것을 뒷받침하기 위하여 처분시스템의 개념설계, 순상지의 지질학적, 수리적 특성, 처분용기-원충재 등으로 구성되는 공학적 방벽, 종합 안전성/성능평가 등에 관한

세부적 기술사항을 부록으로 포함하고 있다. 이에 앞서 1992년에는 AECL에서 개념설계보고서"를 제출한 바 있는데, 본 내용은 상기 보고서들을 참고하여 캐나다의 처분개념을 정리·요약하고자 한다.

3.2 캐나다의 고준위폐기물 기준 처분장 개념

3.2.1 개념설계를 위한 주요 가정 사항

- 시설용량 : 191,000 MTU (10,100,000 다발)
- 사용후핵연료 발생량은 현재 약 900,000다발이나 수십년 후에 건설될 처분장을 위해서 앞으로의 발생량까지를 포함하고 있다. 이는 향후 캐나다에서의 원자력발전 전략에 따라 다소 다르게 나타나는데, 향후 원자력발전이 3%씩 증가된다는 가정하에 2033년에 이르면 약 1000만 다발(약 19만톤)의 사용후핵연료가 발생될 것이라는 추정치에 근거하고 있다.
- 처분장 : 순상지의 심성암
- 기준 CANDU 사용후핵연료
 - 연소도 : 685 GJ/kgU (7,928 MWD/MTU)
 - 핵연료당 우라늄 무게 : 18.9 Kg/다발
 - 최소 냉각기간 : 10년
- 처분용기 : CANDU 사용후핵연료는 Fig. 4와 같이 18다발씩 4개 층으로 쌓아 총 72다발이 한 처분용기에 들어갈 수 있도록 한다.
- 재질 : Titanium, 최소 수명: 500년

- 연간 취급 핵연료 및 처분용기 : 사용후핵연료 250,000다발/년, 처분용기 3471개/년
- 시설 운영기간 : 40년
- 지하 처분시설의 깊이 : 1000m
- 처분용기 외부표면 및 완충재의 최대 허용 온도 : 100°C

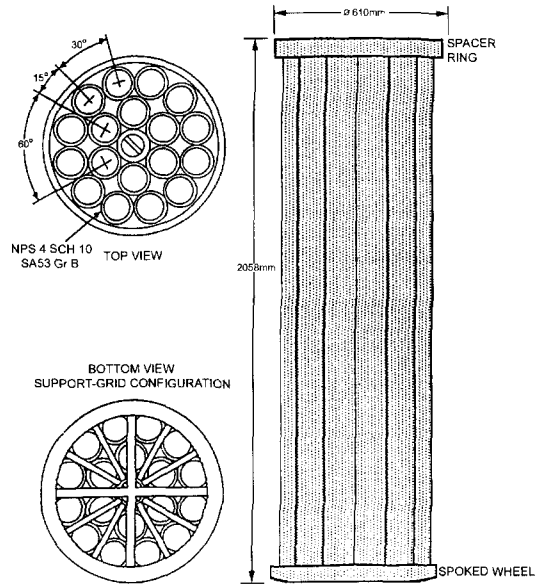


Fig. 4. Concept of canister basket for CANDU spent fuel

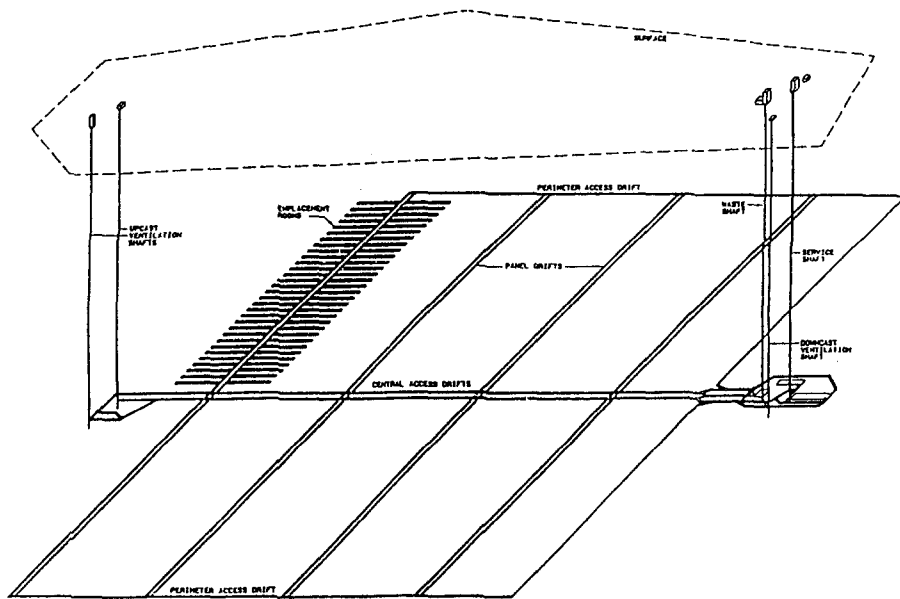


Fig. 5. Underground repository concept in Canada

- 평균 강도 대 응력 비 : 최소 2
- 최대 굴착비율 : 25%
- 지하 처분장 내 처분용기 거치 방안 : 수직처분공에 1개의 처분용기 거치.

3.2.2 지하시설 개념

Fig. 5는 지하처분장의 개략도를 보여주고 있는데, 이 그림에서 보여주는 바와 같이 지하처분시설은 수직터널/호이스트 설비, 처분용기 하적지역 및 기타 지하설비들로 구성되어 있다. 처분용기 하적지역은 지하처분장과 같은 심도인 지하 1000m에 위치하며, 지상과는 여러 종류의 수직터널로 연결되어 있다. 지하 처분장은 암반에 굴착되는 수평터널과 처분터널로 이루어져 있다.

가) 수직터널

모든 수직터널은 지표면에서부터 지하 처분장 시설까지 수직으로 되어 있으며, 처분용기를 이송하기 위한 폐기물 수직터널, 서비스 수직터널, 환기용 수직터널로 구분되어, 운반용 1개(service shaft), 폐기물용 1개 (waste shaft), 통기용 3개(downcast ventilation shaft, emplacement-panel upcast ventilation shaft, excavation-panel upcast ventilation shaft)로 구성되어 있다.

폐기물 수직터널은 지름 4.0m인 실린더형으로써, 지상출구의 헤드프레임은 30m 높이의 직사각형의 콘크리트 구조물로 되어 있다. 지름 3.8m인 드럼을 갖는 700 kW 호이스트가 있으며, 호이스트의 최대 이송속도는 3.3 m/s로 설계되었다.

서비스 수직터널은 작업자, 재료 및 장비 등을 수송하기 위한 것으로 지름이 7.3m로 수직터널 중에서 크기가 가장 크다. 완충재, 되메움재 및 굴착된 암석 이송을 위한 두 개의 9톤 용량의 skip과 작업자 및 장비 이송을 위한 10톤 용량의 cage, 그리고 1톤 용량의 보조 cage로 구성되어 있다. 그 주위로 압축공기, 벤토나이트 공급 라인, 공급수 파이프 라인들이 연결되어 있다. 헤드프레임은 60m 높이의 콘크리트 구조물로 되어 있으며, 3.66m 지름의 드럼을 갖는 최대 이송속도 13 m/s의 1000 kW 호이스트가 설치된다.

환기용 수직터널은 하향환기 수직터널(downcast ventilation shaft)과 상향환기 수직터널(upcast ventilation shaft)로 구성되어 있는데, 하향환기 수직터널의 경우 내부 지름이 4.6m인 실린더형으로 1,800 kW의 팬을 이용하여 공기 462 m³/s를 공급할 수 있다.

나) 지하 처분장

지하 처분장은 접근터널(access tunnel)과 처분구역

그리고 각종 보조시설로 이루어지며 각 처분구역에 처분터널이 위치하게 된다. 이러한 시설 배치에 대한 공학적 가정은 다음과 같다:

- ① 지하공간 굴착비율은 25% 보다 작게;
- ② 처분되는 사용후핵연료의 최대 표면온도는 100°C;
- ③ 지하공동의 수를 최소화;
- ④ 운전의 유연성 최대화;
- ⑤ 굴착 작업과 폐기물 거치 작업을 동일 처분구역에서 동시에 수행되지 않도록 함;
- ⑥ 모든 보조시설은 처분구역 외부에 위치;
- ⑦ 수직터널의 위치는 처분구역에서 최소 200m이상 이격; 배수시설 확보; 적절한 환기시스템을 설치/운영.

· 처분구역 : 190,000톤의 사용후핵연료를 처분하기 위하여 지하처분장은 그림 5에서 보여주는 바와 같이 중앙터널을 중심으로 4개씩 총 8개의 처분구역으로 구성되어 있다. 각 처분구역에는 64개의 처분터널로 구성되어 있으며, 각 처분구역을 채우기 위해서는 5년이 소요되는 것으로 나타났다.

· 접근 통로 : 지하 처분장 접근터널 및 물질 수송을 위한 터널로 이루어져 있다. 이 중에서 중앙접근터널은 두 개의 평행한 터널로서 구성되어 두 개의 수직터널 그룹사이를 연결한다. 터널의 넓이는 6m이며, 높이는 5m이다. 처분구역 접근터널은 중앙접근터널을 따라 각각의 처분터널과 연결되는 두 개의 평행한 터널로서 터널의 폭은 6m이며, 높이는 6.5m이다. 높이는 수송용기 취급이 가능해야 하기 때문에 중앙접근터널보다 높게 되어 있다. 주위접근터널(perimeter access tunnel)은 단일 터널로 되어 있으며 터널의 폭과 높이는 중앙접근터널과 같다.

· 처분터널 및 처분공 : 총 512개의 처분터널로 되어 있으며, 각 처분터널은 230m 길이를 갖고 있다. 터널의 넓이는 8m 이며, 높이는 5.5m이다. 처분터널은 배수를 위해서 길이 방향으로 1% 경사, 폭 방향으로 2%의 경사를 갖고 패널터널 쪽으로 지하수가 흐르도록 되어 있다. 처분공은 지름 1.24m, 길이는 5m이다. 처분공의 간격은 좌우 2.1m로서 각 처분터널 당 3개의 줄로 나란히 배열하여 총 282개의 처분공이 위치하게 된다(Fig. 6 참조).

다) 지하 처분bolt 건설

최초 지하처분장 공사시 작업순서는 먼저 모든 수직터널 공사를 마치고 접근통로를 개척한 다음에, 수직터널

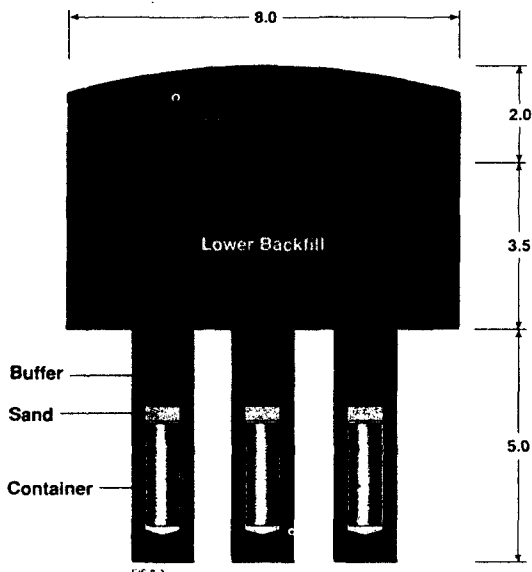


Fig. 6. Deposition holes in a deposition tunnel in Canada repository concept

근처에 위치하게 될 보조시설들을 건설하고 마지막으로 첫째 패널의 처분터널을 굴착하는 것으로 건설단계는 끝나고 그 이후는 폐기물 거치작업과 처분터널 개발이 동시에 이루어진다.

TBM의 경우 원형의 공동만을 굴착하기 때문에 편평한 처분실의 바닥에 적합하기 때문에 발파공법을 이용하여 처분장이 건설된다. 연속경암굴착기를 사용하여 굴착하는 방법이 현재 개발 중에 있다. 이 굴착기는 발파에 비해서 굴착된 공동 주변의 암반에 영향을 적게 미칠 것으로 예상되나 이 역시 아직 실용성이 입증되지 않은 상태이다. AECL의 URL에서의 경험에 의하면 발파에 의한 주변 암반의 손상은 적절한 제어발파 패턴의 적용으로 최소화할 수 있는 것으로 나타났다.

처분 동굴에 대한 보강은 주로 록볼트로 이루어지는데 파쇄대가 많이 발달한 지역은 록볼트를 설치한 후 철망을 씌우고 슛크리트를 타설한다.

기존 처분장 개념설계시에 가정한 버력 발생량은 처분장 건설단계 동안 약 1,200 Mg/shift이다. 이 발생량은 운영단계 동안 770 Mg/shift로 떨어지는데, 그 중에서 650 Mg/shift은 추가로 건설되는 처분터널에서, 그리고 120 Mg/shift은 처분공 설치를 위한 천공작업에서 비롯된 것으로 추정하였다. 모든 장비 및 버력의 발생량을 결정하기 위해서는 처분장 건설/운영 단계 및 일정, 처분장

크기, 배열 및 설치 개념, 그리고 모든 처분장의 경제성을 고려해야 한다. 실제 처분 시설의 최적의 고안을 위하여 여러 번의 설계 변경도 불가피하게 된다. 버력 운반에 필요한 트럭의 수는 굴착 장소와 운반 수직터널 사이의 거리에 의해 결정된다. 또한 지하 처분장으로부터 지표까지 버력을 운반하는데 필요한 수직터널 장비는 최대 굴착속도에 달려있다.

라) 지하처분장 운영

지하처분장의 운영은 모든 수직터널의 장비가 완료되고, 지하터널, 지하 보조시설 공사 및 한 개의 패널굴착이 완료된 후 거치작업과 동시에 다른 패널 굴착작업이 이루어지면서 운영이 시작되는 것이다.

Fig. 7에는 폐기물 거치작업 순서를 나타내고 있는데, 상향수직터널 쪽에 위치한 처분구역에서 처분공 굴착, 폐기물 거치작업 및 처분터널 밀봉작업이 이루어지고 동시에 반대편 처분구역에서는 굴착작업이 수행된다.

처분구역의 배치와 운영순서는 운영중 충돌을 최소화할 수 있도록 해야 한다. 이를 위하여 폐기물 거치작업이 이루어지는 처분구역에서 폐기물 거치는 처분공 굴착과 처분터널 밀봉작업이 동시에 이루어지므로 교통의 혼잡함을 피하기 위하여 두 개의 평행한 터널이 사용되고 있다.

굴착터널에서 진행되는 작업은, 레일 및 환기 덕트 설치, 처분공 굴착, 처분공 밑바닥에 완충재 거치, 처분터널에 되메움재를 터널 밑부분에 설치, 처분터널 입구 칸막이 설치 등이며, 거치터널에서 행해지는 작업은 처분용기 거치, 완충재 채움, 처분터널에 되메움재 설치이다. 한편 환기 덕트는 천정 모서리에 설치된다.

처분공에서의 작업은 처분공 굴착에서 처분용기 밀봉으로 이어지는데, 그 작업 공정을 구체적으로 보면 다음과 같다.

- 처분공 굴착 및 초기 완충재 설치(Fig. 7 참조) : 처분공을 지름 1.24m, 깊이 5.0m로 수직으로 굴착한다. 밀도 1.67 Mg/m^3 , 두께 15 cm 혹은 20 cm를 갖는 완충재를 처분공 아래부분부터 3.5m까지 삽입한다. 처분용기가 들어갈 공간을 만들기 위해 오오거로 바닥에서 50 cm까지 직경 74 cm로 천공한다.
- 처분공 조정 및 건조모래 삽입 : 처분용기를 삽입하기 전에 구멍 깊이가 2.8m가 되도록 10 cm 두께로 건조모래를 밑바닥에 고르게 채운다.
- 차폐링 장치 및 처분용기 거치 : 처분공 입구에 차폐링을 장치하고 처분용기를 수송용기 호이스트를 이

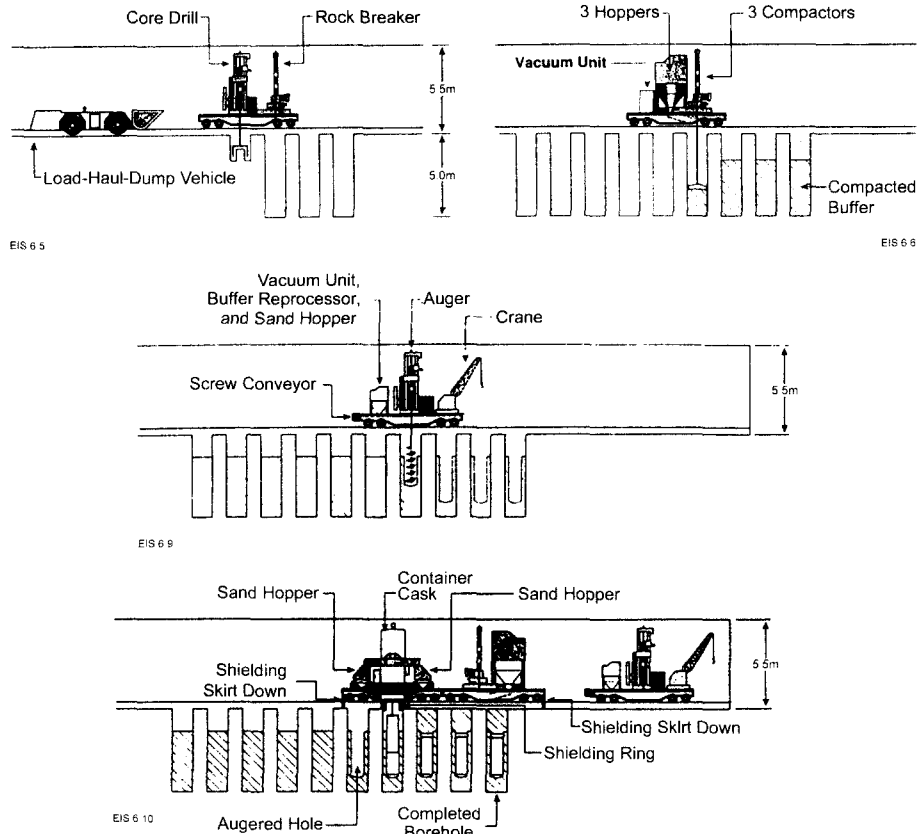


Fig. 7. Concept of deposition hole drilling, buffering and emplacement of a canister

용하여 내린다. 처분용기와 구멍벽 사이의 작은 공간을 건조모래를 이용하여 채운다.

- 수송용기를 제거 및 건조모래 채움
- 차폐링 제거 및 임시 차폐막 설치
- 완충재 설치 : 이상과 같은 처분용기 거치작업이 끝나면 처분터널을 밀봉하게 되는데, 터널을 밀봉하기 전에 먼저 레일과 콘크리트 curb를 제거한다. 되메움재는 3.5m 높이의 하부되메움과 1.5m 높이의 상부되메움으로 구분되는데, 하부되메움의 재료는 화강암가루와 점토가 3:1로 혼합된 것을 사용하며, 상부되메움은 수리전도도가 훨씬 낮은 벤토나이트와 silica가 1:1로 혼합된 것을 사용한다. 되메움재를 채울 때는 공기압을 이용한 방법이 사용된다.

마) 환기계통

환기계통은 지하시설 설계, 건설 및 운영에 있어서 핵심으로서 다음과 같은 요건을 갖추고 있다.

- 디젤동력을 이용 충분한 공기 공급이 가능하여, 지하

시설내에 유해한 가스가 허용치 이내에 머물도록 하여야 한다.

- 정상운전시 발생한 먼지를 제거하여 지하시설 내에 허용농도 이내가 되도록 하여야 한다.
- 지하시설 내에서 안전한 작업환경을 유지시켜야 한다.
- 공기가 폐기물 거치패널 쪽에서 굴착작업중인 굴착패널방향으로 흐르지 않도록 하여야 한다.
- 처분용기로부터 방사성물질이 방출되는 비정상적인 상황에서도 방사성물질을 필터등을 통해 통제할 수 있어야 한다.

환기계통의 공기흐름의 원리를 이용하여 환기계통은 거치패널 환기계통과 굴착패널 환기계통을 물리적으로 분리하여 독립적인 회로가 되도록 구성한다. 공기 흐름은 지상의 팬을 이용하여 하향환기 수직터널을 통해 들어온 다음 중앙/주위 접근터널을 거친 다음 폐기물 거치패널 및 굴착패널을 거친 다음 두 개의 상향환기 수직터널을 통해 지상으로 빠져 나오게 된다. 또한 공기의 일부는

폐기물수직터널 및 서비스 수직터널 주위의 여러 보조시설들을 돌아서 역시 상향환기 수직터널을 통해 흐르게 되도록 되어 있다. 폐기물 수직터널의 맨 위에는 음의 압력이 걸릴 수 있도록 하기 위한 팬이 연결되어 있다. 폐기물 수직터널과 상향환기 수직터널 출구에는 비상시를 대비하여 HEPA 필터가 연결되어 있다. 또한 각 폐기물 거치터널에는 폐기물 거치작업시 사용하기 위한 보조 팬과 덕트들이 설치되어 있다.

바) 처분용기 회수

지하시설 운영기간동안 처분된 사용후핵연료의 회수를 위해 밀봉된 처분터널 내 혹은 폐기물이 거치된 처분공에 다시 들어가야 되는 상황이 발생할 지도 모른다. 캐나다는 사용후핵연료 회수 조건을 기준개념으로 포함시키고 있다.

손상되지 않는 건전한 처분용기를 회수하는 경우, 회수를 위한 절차는 다음과 같다.

- 처분터널 입구에 설치된 콘크리트 마개를 제거한다. 이는 hydraulic rock breaker와 발파방법을 이용하여 수행한다.
- 처분터널의 되메움재를 제거한다. 환기 덕트와 같은 시스템을 재설치한다.
- 배수로, 레일 등을 재설치한다.
- 처분용기를 회수하기 위하여 core drill을 이용하여 압축벤트나이트를 원형으로 파낸다.
- 새로운 platform을 설치하여 처분용기가 포함된 core를 들어올린다. 이때 처분용기에 묻혀있는 완충재로 인해서 무게가 10톤 이상 증가할 것으로 예상된다.

사) 지하시설 밀봉

지하처분장의 운영이 끝나고 처분된 사용후핵연료를 재사용하기 위한 회수 가능성이 없으면 지하시설을 밀봉하게 된다. 지하시설 밀봉 대상은 처분터널, 주변접근터널, 중앙접근터널, 보조시설 및 각종 수직터널이다. 먼저 처분터널과 주변접근터널에 대한 밀봉작업을 먼저 수행하고 상향환기 수직터널 및 중앙접근터널에 대해 수행한다. 다음 보조시설 및 수직터널 순서로 진행된다. 본격적으로 밀봉작업을 수행하기 전에 먼저 지하처분장을 지나는 단층지역이나 보조시설 운영 및 터널작업시 사용했던 처분공 혹은 앵커 구멍 등에 대해서 밀봉작업을 수행한다. 맨 마지막에 수행하는 수직터널 밀봉에서는 먼저 수직터널 측면에 붙은 각종 장비를 제거하고 콘크리트 라이닝을 제거한 후 시추공들과 굴착시 발생한 EDZ를 밀봉한다.

4. 스웨덴

4.1 스웨덴의 고준위폐기물 처분정책 및 프로그램

스웨덴은 현재 12기의 원자력발전소(9.8 MWe)를 운영하고 있으며, 연간 약 250톤의 사용후핵연료가 발생되고 있다. 2010년경에는 약 8,000톤의 사용후핵연료가 발생될 전망이다. 사용후핵연료의 약 75%는 BWR에서 발생된 것이며 나머지는 PWR에서 발생된 것으로, 이들의 관리는 현재 SKB사(Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.)가 담당하고 있다. 1977년 4월 스웨덴 정부는 향후 원자로에 장전되는 모든 핵연료는 그의 안전한 처분방안 또는 그로부터 파생되는 고준위폐기물의 안전한 처분 방안이 규명되어야한다는 법안을 통과시키면서, 원자력발전소 운영자(utilities)의 후원하에 사용후핵연료 및 고준위폐기물의 처분방안을 연구하기 위한 KBS-프로그램을 착수하였다. 이 연구결과는 KBS-3 보고서로서 1983년 발표되었는데, 스웨덴 정부는 1984년 이 보고서에서 제안한 사용후핵연료 처분개념 "지하 500m 깊이의 화강암층에 구리처분용기를 수직 처분공에 처분"을 한시적인 기준개념으로 승인하였다.

스웨덴 정부는 자국내에서 발생된 모든 방사성폐기물은 외국기술에 의존하지 않는 독립적인 기술을 바탕으로 자국내에서 처리한다는 원칙을 세웠다. SKB사는 이 원칙에 따라 사용후핵연료 및 방사성폐기물을 안전하게 처분하기 위한 처리기술, 임시저장 기술 및 처분기술과 관련된 기초 및 응용연구를 착수하면서 현재 사용후핵연료 중간저장을 위한 CLAB 시설과 중저준위 방사성폐기물 동굴처분시설인 SFR 등 독자적인 관리시설을 운영하고 있다.

KBS-3개념이 정부로부터 승인 받은 후 다음 단계로 KBS-3개념을 기준으로 처분시설의 기술성, 경제성 및 안전성 확보를 위한 연구, 즉 KBS-3개념을 보완할 수 있는 처분개념을 도출하고, 각각의 처분개념에 대해서 비교·평가하여 최종적으로 가장 적합한 처분개념을 도출하는 프로그램이 수행되었다(Project Alternative System Study, PASS). 각 처분개념들을 비교, 검토함에 있어 KBS-3개념을 표준개념으로 하여 각 방안별로 처분용기, 장기 건전성/안전성 및 기술성 관점에서 비교, 평가한 결과 기존의 KBS-3개념에 약간의 수정을 가한 개념이 가장 적합한 것으로 결론 내리고 있다. 또한 KBS-3개념에 대하여 다음과 같은 내용의 처분 정책이 결정되었다.

Table 1. Important design parameters for the reference disposal concept in Sweden

Parameters		Concept	KBS-3
General	Operation period (year)		20
	Depth (m)		500
	Area (km×km)		1×1
	Access method		Ramp
	Deposition tunnel spacing (m)		25
	Deposition tunnel length (m)		250
	Deposition hole spacing (m)		6
	Emplacement method		Vertical
	Deposition hole size (m)		Diameter 1.6× Length 7.6
Canister	Size (m)		Diameter 0.88× Length 4.9
	Material		Cu/Fe
	Wall thickness (m)		0.05/0.05
	Number of BWR bundles per each canister		12
	Required number of canisters		3,745
	Total number of deposition holes		4,120
Buffer	Type		Compressed bentonite
	Density (Mg/m ³)		2.0-2.1
	지하수포화밀도 (Mg/m ³)		2.0
	Hydraulic conductivity (m/s)		2×10 ⁻¹¹
	Thermal conductivity (W/m.K)		1.5
	Thermal criteria (°C)		100
	Thickness (m)		0.36
Backfill	Type		Mixture of bentonite and sand (80/20-90/10)
	Hydraulic conductivity (m/s)		10 ⁻⁹

- 방사성폐기물 수송체계 확립 : 모든 발전소가 해변에 위치하고 있기 때문에 주 수송은 M/S sigyn을 이용한 해상수송으로 한다. 이 M/S sigyn은 1,400톤의 용량을 갖고 있다.
- 사용후핵연료 중간저장시설(CLAB)과 밀봉포장시설 및 처분장과의 연계체제 확립. 1985년부터 운영중인 CLAB시설의 저장용량을 5,000톤으로 확장하고(초기 용량은 3,000톤), 밀봉포장시설을 CLAB시설과 동일 부지에 연계하여 확장한다. 그러나 처분장부지가 아직 확정되지 않은 상태이기 때문에 다른 부지에 위

치하는 방안도 대안으로 고려한다.

- 사용후핵연료 처분용기 개념 설계 : 기존의 구리 처분용기에서 Composite Canister 즉, Copper-Steel 처분용기를 기준처분용기로 한다.
- 밀봉포장시설(EP) 개념설계 : 2007년 운영 목표로 추진하며, 먼저 개념설계 수행완료 후 현재 실제 규모의 Cold Test 시설에서 처분용기 개념 개발 작업과 병행하면서 관련 공정 최적화 조건을 확립하고 있다.

현재 스웨덴에서는 처분장 부지선정 및 평가 업무를 수행 중에 있으며, 성공적으로 부지를 결정하고, 전문가의 검증 및 인허가 신청과 취득까지 즉, 처분장 운영 시작까지는 앞으로 많은 기간이 소요될 것으로 예상된다. 그러나 각종 결정과정에는 원자력에 대한 국가정책의 변경논의, 부지 주변 주민들의 이해 및 협조 등과 같은 많은 불확실한 변수들이 내재되어 있다. 현재까지의 기술개발과 자국의 지질 특성을 고려할 때 기술적인 문제는 쉽게 해결할 수 있으리라 예상되나, 주민 및 지방정부의 협조 등과 같은 기술 외적인 문제에 중점적으로 대처하는 방안을 고려하고 있다.

처분장 건설은 두 단계로 나누어 진행될 예정이다. 제 1단계로 총 처분용량의 10%인 약 400 처분용기 분량(약 800톤)의 사용후핵연료에 대해 2008년부터 처분을 시작하여 2013년까지 완료한 다음 처분개념에 대한 시스템 평가를 재수행할 것이다. 평가 후 처분시스템의 안전성에 중요 문제가 발생될 경우 핵연료가 회수될 것이며, 그렇지 않을 경우 2020년부터 총 8,000톤 규모의 제 2 단계 처분이 2040년 초반까지 진행될 예정으로 있다.

4.2 스웨덴의 고준위폐기물 처분개념^{8,9)}

KBS-3 개념(수직 처분공 거치 방식)은 스웨덴에서 80년대 초부터 사용후핵연료 지하 처분대안 제시하였던 개념으로서, Fig. 8에서 보여주는 바와 같이 지하 500m에 여러 가지 목적의 터널과 갱도로 구성되어 있는 지하 시스템과 지하 처분 준비(사용후핵연료 수납, 처분용기 포장 등)를 위한 지상 시설로 나누어져 있다. 지상/지하 시설들은 간단한 물질 수송, 환기 및 기타 필요한 것들을 공급·배출하기 위한 2개의 수직터널과 한 개의 램프로 연결된다. 여기서 램프는 지상/지하의 주 수송시스템이다. 지하시설은 결정질 암반에 위치하게 되는데 여기서 처분장 주변의 암반은 지하 구조물의 모암으로서의 역할뿐만 아니라 방사성 물질의 이동 측면에서 지질방벽으로서의

역할도 겸하고 있다.

사용후핵연료는 1 백만 년 정도의 기간 동안 건전성을 가질 수 있는 copper/steel composite 용기에 포장되어 지하 처분 시설로 운반된 후 처분터널 중앙부에 6m 간격으로 천공되어있는 수직 처분공(직경 1.6m×깊이 7.58m)에 하나씩 넣는다. 처분용기를 처분공에 넣기 전, 처분공 내에는 미리 직경 1.6m의 원통형 벤토나이트 블록을 밑에서부터 약 50 cm 두께로 넣고 그리고 처분공 벽 주위로도 두께 36 cm의 벤토나이트 블록을 쌓아 88 cm 직경의 처분 용기가 들어갈 수 있는 공간만을 남긴다. 그리고 처분 용기를 벤토나이트 블록으로 둘러쌓인 공간에 집어 넣은 후 다시 처분용기 위 1.5m 높이까지 원통형 벤토나이트 블록을 넣는다. 지하수의 지화학적 조건에 따라 다르지만 벤토나이트 블록의 평균 수리전도도는 약 2×10^{-13} m/s이다 (Table 1). 벤토나이트는 외부로부터의 지하수 침투를 방지/지연시킬 뿐만 아니라 방사성 물질의 흡착성능도 좋아 처분용기가 부식되었을 경우 사용후핵연료로부터 누출된 방사성 물질이 주변으로 누출되지 않도록 하는 기능이 우수한 것으로 알려져 있다. 또한 처분공에 놓여진 처분 용기가 장기간 동안에도 외부 충격 또는 어떤 기계적 불균형에서도 잘 보호해 줄 수 있는 mechanical support 역할도 한다. 일단 처분공이 압축 벤토나이트 블록으로 밀봉되면 처분장 폐쇄 작업의 일환으로 처분터널과 수송/저장 터널, 수직터널 등

은 모래/벤토나이트 혼합물로 구성된 되메움재로 밀봉하게 된다. 되메움재의 수리전도도는 약 10^{-9} m/s 이다.

KBS-3 개념 설정에 필요한 처분장 면적은 약 1 km×1 km 일 것으로 평가되고 있으나 세부적인 지하 시설 배치도도 국부적인 지질학적 조건에 따라 결정될 것이다. 현재까지 평가, 도출된 몇 가지 기술사항은 다음과 같다. :

- ① 지하시설내 처분경도(수직 처분공이 있는) 간격은 최소 25m 유지.
- ② 수직 처분공내 완충재 온도로 100°C 이하로 유지.
- ③ 지하 처분장은 크게 두 구역으로 나누어져 한 구역은 폐기물 처분 거치 작업을 그리고 나머지 하나는 처분장 건설 작업을 병행하기 위함이다.

4.3 지하시설 기준개념

스웨덴의 처분개념에 따르면 처분장은 지하 약 500m 깊이에 위치하며 크게 두 부분으로 나누어진다. 사용후핵연료를 처분하기 위한 넓은 지역과, 이 지역과 약 1 km 떨어진 지역에 원자로 및 시설 제염해체된 부품들을 위한 공간을 별도로 확보하는 것으로 계획하고 있다. 처분장 소요 면적은 약 1 km×1 km인데, 처분 터널간 이격 거리는 약 40m이고, 수직처분공간 거리는 6m이다. 처분공은 지름 1.6m, 깊이 7.6m로서 1개의 처분용기를 처분하도록 되어 있다(Fig. 8). 터널이 250m로서 총 길이는 30 km에 달한다.

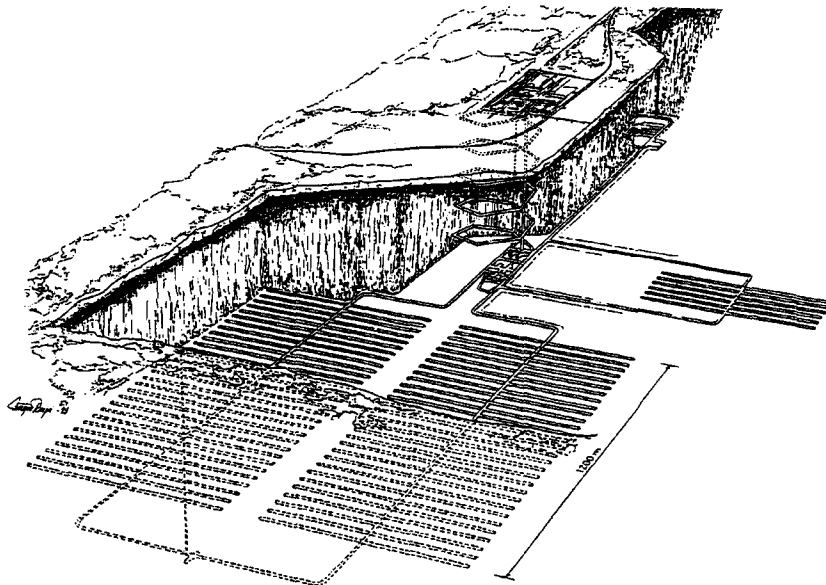


Fig. 8. Underground repository concept in Sweden

지하 처분시설까지의 접근통로로는 1개의 램프와 2개의 수직터널이 필요한데, 사용후핵연료 처분용기 등은 램프(경사도 1:7)를 이용하여 운반되고, 수직터널은 환기 및 기타 자재의 공급통로로 활용된다.

폐기물 처분시 처분용기는 차폐 기능을 갖춘 운반용기에 넣어 이송한 뒤, 지하에서는 처분용기를 특수 제작된 차량으로 옮기고, 처분터널로 이송 처분한다. 처분용기의 거치 순서는 Fig. 9에 나타나 있다.

스웨덴은 안전성이 입증된 처분시설 설계를 위하여 엔지니어링 관점에서의 문제점을 분석하고 앞으로의 연구 개발을 위해서 필요한 분야가 무엇인지를 평가하여 왔는데, 그 내용을 요약하면 다음과 같다.

4.3.1 처분 동굴

1970년대 SKB의 전신인 KBS가 폐철광에서 부지조사 목적으로 Stripa 프로젝트를 국제 공동 연구로 수행하여 1992년에 종료하였고 SKB는 그 후속 연구 사업으로 오스카샤의 Äspö 섬에서 Hard Rock Lab(HRL) 프로젝트를 수행하고 있다. Stripa와 Äspö의 암반은 모두 북구 유럽에서 흔히 볼 수 있는 화강암이다.

4.3.2 굴착

주로 발파(drill & blast)를 이용하여 굴착을 하였으며, 굴착방법 변화에 따른 EDZ 연구를 위하여 TBM 굴착을 수행하기도 하였다. 발파 굴착시 장약공 천공을 위하여 자동식과 수동식의 두 가지의 drilling rig를 사용하고 그 효과를 상호 비교하였다. 발파에 의한 주변 암반의 손상범위는 벽면과 천정부는 0.5m 이내로, 바닥부는 1.5m 이내로 제한하였다.

발파후 발생한 버력은 전기식 Load Haul Dump (LHD)를 이용하여 지상으로 반출한다. 광산에서 주로 쓰이는 전기식 LHD는 디젤식에 비하여 이동성이 떨어지기 때문에 터널 공사에서 많이 쓰이지 않으나 환경적인 면에서 장점이 있다. Bucket에는 보통 7m³(약 18,000 kg 버력)를 적재할 수 있다.

4.3.3 보강

일반적으로 록볼트, 강섬유를 포함한 슛크리트, 시멘트 그라우팅 등을 사용하여 암반 보강을 한다. 슛크리트 보강보다 철망 설치가 사용되기도 하는데 그 이유는 암반 상태에 대한 지속적인 관찰이 가능하기 때문이다.

그러나 낙석이 철망에 모인 후 아래로 떨어질 수 있는 위험성도 존재한다. 충전재는 지하수의 화학적 성분에 영향을 미치지 말아야 하며 암반내로 확산되었을 때 암반의 원래 상태를 훼손하지 말아야 한다. 파쇄대 지역

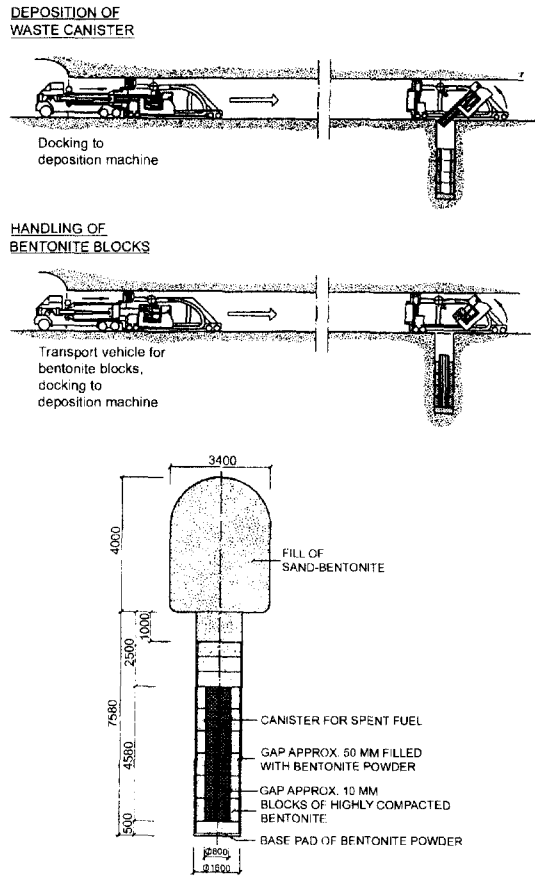


Fig. 9. Emplacement process of canister into a deposition hole in Sweden repository concept

에서는 터널의 안정을 위해서 그라우팅 충전이 필요하다. 충전 시기 및 주입량은 터널 벽면에 뚫었던 시추공으로부터의 지하수 유출량의 증가 여부를 고려하여 결정한다.

일반적으로 시추공 당 최대 주입량은 양호한 암반에서는 600리터, 불량한 암반에서는 1,500리터 정도이다. 충전재는 silicates, calcium chloride, bentonite와 같은 첨가제가 포함된 시멘트이다. 충진을 위한 시추공의 위치 및 깊이는 현장 상황을 판단하여 결정하여야 하며 충전의 전 과정 동안 지질, 수리 및 진행 상황을 자세하게 기록하는 것도 필요하다. 높은 지하수의 압력으로 인하여 충전재가 확산되지 않는 상황에서, 넓은 균열대나 점토층에 사용할 수 있는 효과적인 충전재는 벤토나이트(2%)와 소금(8-15%)을 혼합한 시멘트이다. 주입 압력은 최대 20bars 정도이다.

5. 주요국의 처분시스템 개념 종합 비교분석 결론

처분시설의 배치에 있어서 캐나다는 지하 시설에 각종 보조시설들이 포함되어 있으나 미국의 개념은 보조시설들을 가능한 지상에 배치시키고 있다. 지하 시설에 각종 보조시설들이 들어가 있는 경우는 비상 사고시 지하시설 내에서 대응이 가능하여 신속하게 대처할 수 있으나 건설비용은 많이 소요될 것으로 보인다. 캐나다의 경우 지하 시설에 보조시설을 두는 이유는 지하시설의 깊이가 1,000m로서 미국의 경우 약 300m보다 매우 깊기 때문인 것으로 판단된다. 핵연료 거치 방법에 있어서 미국의 개념은 수평식 동굴처분인 반면 캐나다 및 스웨덴의 기준개념은 수직 처분공 거치 방법을 채택하고 있다. 특히 미국의 개념에서는 수평으로 동굴에 처분하면서도 차폐보강 필요성을 없애기 위해서 원격으로 운전하는 개념을 도입한 것이 특색이라 할 수 있다. 또한 미국의 개념은 캐나다와 스웨덴의 개념과는 달리 처분터널 내에는 완충재 및 되메움재는 사용하지 않는 것으로 가정하고 있다.

지하시설의 열적 제한조건 측면에서 미국의 경우는 핵연료 피복관의 온도를 350°C 이내로, 그리고 처분동굴표면의 온도를 200°C로 제한하고 있다. 반면에 캐나다의 경우는 처분용기 외부표면 및 완충재의 최대 허용 온도를 100°C로 제한하고 있으며, 스웨덴에서는 완충재의 최대 허용 온도를 80°C로 가장 낮게 제한하고 있다. 이러한 열적 제한조건 때문에 각국의 핵연료 처분밀도가 크게 다르게 나타나고 있다. 처분밀도는 미국의 경우 20.5 kgHM/m², 스웨덴의 경우 7.8 kgHM/m², 그리고 캐나다의 경우 47.5 kgHM/m²로 나타났다. 캐나다의 경우는 중수로 핵연료의 단위무게당 붕괴열이 작기 때문에 크게 나타나고 있지만, 스웨덴과 미국의 처분밀도 차이는 열적 제한에 기인된 것으로 보인다.

각국의 고준위 방사성폐기물 처분 개념을 조사한 결과, 미국, 캐나다 및 스웨덴 모두 사용후핵연료 회수성을 개념설계에 반영하고 있는 것으로 나타났다. 미국은 처분용기 거치 후 처분장을 폐쇄하지 않고 수 십년간의 감시기간을 두어, 향후 안전성에 어떤 문제가 발생하거나 또는 핵연료의 재이용 가능성에 대비하고 있다. 캐나다 개념은 미국의 개념과 같은 감시기간을 따로 두지는 않고 있으나, 처분용기의 회수가 가능하도록 설계에 반영하고 있다. 스웨덴 개념은 시스템 운영을 두 단계로 구분하고 있다. 즉 초기 단계에서 총 시설 용량의 약 10%(약

800톤)를 먼저 처분하여 일정 기간(약 5년)을 운영 측면과 안전성 측면에서 종합 점검하는 기간을 두고 있다.

그러나 상기한 기준 개념들은 아직 확정된 것은 아니며, 향후 부지특성 조사 및 추가 안전성 분석 등을 통하여 얻은 자료를 반영하여 처분개념이 재평가될 것이므로, 지금까지의 기준 개념들은 단지 참고용이라 할 수 있으며, 향후 충분히 변경의 여지가 있다 하겠다. 따라서 고준위 방사성폐기물 처분시스템의 개발이 전무한 우리 실정에서는 외국의 처분시스템 개발과 인허가 및 기술적 조건들을 주시하면서 우리 환경에 맞는 독자적 기술기준과 처분개념을 개발해 나가는 자세가 필요하다.

사 사

본 논문은 과학기술처 원자력중장기 개발사업 기금으로 수행되었습니다.

약 어

AECL	: Atomic Energy Canada Limited
ALARA	: As Low as Reasonably Achievable
BWR	: Boiling Water Reactor (비등수경수로)
CANDU	: Canadian Deuterium Uranium Reactor (중수로)
CLAB	: Central interim storage facility for spent fuel
DOE	: Department of Energy (미국 에너지성)
EDZ	: Excavation Disturbed Zone (손상대)
EIS	: Environmental Impact Statement (환경영향 평가)
EP	: Encapsulation Plant (밀봉포장 공장)
EPA	: Environmental Protection Agency
ESF	: Exploratory Studies Facility
HEPA	: High Efficiency Particulate Air Filter
HLW	: High-Level Waste (고준위폐기물)
KBS	: Nuclear Fuel Safety
MPC	: Mulpi-Purpose Canister (다목적 처분용기)
MTU	: Metric Tons of Uranium
MWD	: Mega Watt per Day
NAS	: National Academy of Science
NRC	: Nuclear Regulatory Commission
NWPA	: Nuclear Waste Policy Act (방사성폐기물

정책법안)

NWPAA : Nuclear Waste Policy Amendments Act
 OCRWM : Office of Civilian Radiation Waste Management
 PWR : Pressurized Water Reactor (가압경수로)
 SKB : Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.
 URL : Underground Research Laboratory

참 고 문 헌

1. Nuclear Waste Policy Act, 1983, "Nuclear Waste Policy Act of 1982", Public Law 97-425, 42 U.S.C. 10101-1026, Washington D.C.
2. Nuclear Waste Policy Amendment Act, 1987, "Amendments to the Nuclear Waste Policy Act of 1982", Public Law 100-203, Dec. 27, 1987, 100th Congress, Title V, 216-236, Washington D.C.
3. "Mined Geologic Disposal System Advanced Conceptual Design Report, Volume I-IV", TRW Environmental Safety Systems Inc., 1996.
4. "Used Fuel Disposal Centre: A Reference Concept: Volume I-III", AECL, 1992.
5. AECL-10721, "Summary of Environmental Impact Statement on the Concept for Disposal of Canada's Nuclear Fuel Waste", AECL, 1994.
6. AECL-10711, "Summary of Environmental Impact Statement on the Concept for Disposal of Canada's Nuclear Fuel Waste", AECL, 1994.
7. AECL-10715, "The Disposal of Canada's Nuclear Fuel Waste: Engineering for a Disposal Facility", AECL, 1994.
8. "Final Storage of Spent Nuclear Fuel-KBS-3", Swedish Nuclear Fuel Supply Co., 1984.
9. SKB-TR-93-04, "Project Alternative System(PASS) Final Report", Swedish Nuclear Fuel Supply Co., 1992.
10. RD&D-Programme 95, "Treatment and Final Disposal of Nuclear Waste", Swedish Nuclear Fuel Supply Co., 1995.

최 종 원



1984년 한양대학교, 공과대학 원자
력공학과, 공학사
1992년 한양대학교 대학원 공과대학
원자력공학과, 공학박사

Tel : 042-868-2041

E-mail : njwchoi@kaeri.re.kr

현 재 한국원자력연구소 방사성폐기물 처분 연구팀,
책임연구원

권 상 기



1987년 서울대학교 공과대학 자원공
학과, 공학사
1989년 서울대학교 공과대학 자원공
학과, 공학석사
1996년 미국 Missouri-Rolla 대학
교 Mining Engineering, 공
학박사

Tel : 042-868-2632

E-mail : swonsk@nanum.kaeri.re.kr

현 재 한국원자력연구소 고준위 폐기물 처분기술개발팀,
Post-Dr.

강 철 형



1977년 서울대학교 공과대학 원자핵
공학과, 공학사
1984년 미국 Washington 대학교 대학
원 원자핵공학과, 공학석사
1989년 미국 Berkeley 대학교 대학
원 원자핵공학과, 공학박사

Tel : 042-868-8914

E-mail : chkang@kaeri.re.kr

현 재 한국원자력연구소 고준위 폐기물 처분기술개발팀,
실장
