

고준위폐기물 심지층 처분장 부지선정, 설계 및 건설

권상기 · 최종원 · 강철형

정회원, 한국원자력연구소

1. 서 론

지금까지 비교적 짧은 반감기를 갖는 중·저준위 방사성폐기물은 여러 나라에서 지표면 또는 지하 약 30미터 하부 지하공간에 안전하게 처분되어 왔으나, 고준위 방사성폐기물(이하 고준위폐기물)은 독성이 강한 장반감기 핵종을 포함하고 있고, 이들 핵종들의 방사선붕괴로 인해서 많은 열을 방출하는 특성 때문에 고준위폐기물의 처분은 아직까지 상용화되지 못하고 있다.

1970년대 중반부터 고준위폐기물 처분과 관련하여 IAEA(국제원자력기구), OECD/NEA(경제개발협력/원자력기구)와 같은 국제기구와 원자력을 이용하고 있는 세계 여러 국가들에서는 고준위폐기물 처분에 대한 인허가 규제요건은 물론 필요한 기술 및 안전기준을 만들어 제시하고 있다. 그러나 안전성 평가기준의 범위와 적용 방법론에 있어서는 나라마다 조금씩 다르며 아직까지도 전문가들 사이의 합의가 이루어지지 않고 있다. 우리나라의 경우 중·저준위폐기물 처분시설에 대해서는 방사선 안전기준을 포함하는 인허가 요건 및 관련 기술기준이 과기처고시 제 94-2호로 나와 있으나, 고준위폐기물에 대해서는 어떠한 안전 기준(또는 안전성 평가기준)도 정해진 바 없는 상태이다. 1997년도부터 한국원자력연구소를 중심으로 고준위폐기물 처분시설의 장기 안전성확보를 위한 기초연구가 본격적으로 시작되고 있어 지금부터라도 처분장 부지선정 및 시설 위치, 설계/건설 및 운영기준에 대한 논의가 필요한 시점이다.

1989년 IAEA는 고준위폐기물의 지층처분에 관한 두 가지 주요 안전 원칙을 발표하였다. (1) 미래 세대에의 책임 : 미래 세대에 대하여 처분시스템의 안전성을 계속적으로 보장하기 위한 책임을 지우거나 처분장으로 인해 큰 위해가 없도록 인간과 그 생활환경에서 고준위폐기물을 장기간 격리되도록 해야 한다. (2) 방사선 안전성 : 인간과 그 환경의 방사선에 대한 안전은 국제적으로 받아들여지고 있는 방사선 방호의 규칙에 따라 보증되어야 한다.

그 동안 심해저 처분, 빙하처분, 우주 처분, 시추공 처

분, 심지층 처분, 천층 처분과 같은 다양한 처분 방법들이 제안되어왔다(권상기 등 1999). 이들 중 심지층 처분 방안, 즉 지하 300~1000 m 깊이에 처분터널과 처분공을 뚫고 처분용기와 함께 사용후핵연료를 처분하여 인간 생활권과 격리시키는 방안이 가장 유력하게 제안되어, 현재는 모두 심지층 처분 연구에 집중되어 있는 상태이다. 따라서 본 보고에서는 다양한 처분 방법들 중 심지층 처분장의 부지선정과 설계 그리고 건설에 관한 내용을 다루고자 한다. 부지선정과 관련하여 IAEA를 비롯 미국, 스웨덴, 핀란드, 독일, 캐나다 등 여러 나라에서 보고서가 만들어졌으며 이들의 경험은 향후 한국의 부지선정 과정에 참고가 될 것이다. 따라서 이들 국가들에서 수행되었던 부지선정과정에서 고려되었던 사항들에 대해서도 검토하고자 한다.

2. 부지 선정

처분장 부지는 장기적 안전성, 처분장 운영 시스템의 안전성, 처분 시스템의 기술적 실현가능성, 환경적인 고려, 사회적인 수용, 비용과 같은 사항들을 고려하며 이들 요소들에 대한 최적화 과정을 거쳐 적합한 부지를 선택하게 된다. 장기적 안전성의 확보를 위해서는 적합한 지질, 수리지질 조건이 중요하다. 처분장의 건설, 운영과 관련된 비용의 경우 수십년에 걸쳐서 지출되며 처분방안의 선정에 따라 큰 차이를 보이기도 한다. 일반적으로 처분시스템의 안전성이 비용에 우선한다고 여겨지고 있다. 또한 환경영향을 최소화할 수 있는 부지를 선택하는 것이 유리하다. 처분장 건설, 운영과 장기적 관리에 따른 환경에 미치는 영향으로는 교통량 증가, 굴착된 암석의 처리 등이 포함되며 부지에 따라 사회적인 수용 정도에 차이가 있다. 일반적으로 심지층 처분에 적합한 환경과 적합하지 않은 환경은 Table 1에 나타나 있다. 부지선정에 관련되는 요소들은 크게 기술적 요소와 비기술적 요소로 나눌 수 있다. 비기술적 요소로는 사회·경제적인 고려사항, NIMBY효과, 의사결정과정과 같은 요소들이 있다(Savage, 1995). 원활한 부지선정을 위해

캐나다에서는 처분장의 평가에 민간참여를 장려하고 있으며 연구프로그램에 관한 정보 제공을 꾸준히 하고 있다. 영국에서의 부지선정과 관련하여 사회경제적, 정치적 측면에서 얻어진 경험을 Savage (1995)는 다음과 같이 정리하였다.

(a) 부지 선정과정을 유연하게 할 수 있도록 부지선정과 관련 경직된 기준을 설정하지 않도록 한다.

(b) 방사성폐기물 처분장 부지 선정이나 조사부지 선정에서 지역주민의 반대에 직면하기 쉽다. 폐기물 처분기관의 개방성이 가장 중요한 이슈가 된다.

(c) 지역주민의 정서는 원자력산업에 대한 기존의 경험에 많이 좌우된다. 여러 정권을 통해서 실시되어야 하는 처분프로그램의 경우 정치적인 제약이 따르며 일반의 지지를 얻을 수 있는 최선의 부지를 선정하는 것이 중요하다.

(d) 국민, 인허가 담당자, 정치인들이 중요하게 여기는 것은 자국의 처분 방안이 다른 나라에 비해 큰 차이가 있거나 열악하지 않아야 한다는 것이다. 따라서 많은 처분관련 기구는 각종 국제 공동 연구에 참여하여 자신들의 처분프로그램의 신뢰도를 높이고자 한다.

(e) 방사성폐기물의 운반에 있어서도 반감을 살 수 있으며 가장 안전한 운반수단에 대해서 의견일치를 보기가 힘들다. 영국의 경우 해안에 발전소들이 있기 때문에 해상운반이 여러 면에서 유리하지만 여기에 대해서 일반 국민은 특히 우려를 한다. 이것은 전문가에 의한 해석이 자신을 전문가와 동일시하는 일반인의 의견과 일치하지 못하는 한 예라고 할 수 있다.

(f) NIMBY현상의 정도는 나라마다 다르며 지역에 따라서도 차이를 보이기 때문에 예측한다는 것이 어렵다.

고준위폐기물의 장반기적 특성 때문에 적어도 수만 년 동안 주어진 지하환경 내에서 격리시키기 위해서는 처분장 부지의 지질학적 안정성은 물론 지하 처분시스템의 건전성이 원하는 기간 동안 보장될 수 있어야 한다. 따라서 시간의 경과에 따라 조금씩 움직이는 지각운동과 같은 지질현상 등을 고려할 때, 방사성폐기물 처분장은 해당 국가의 기준 뿐만 아니라 국제적으로 수용될 수 있는 기준을 만족하여야 하는 것이 국제적인 중론이다. 이 때문에 국제원자력기구에서는 처분장 부지 선정절차와 기준을 다음과 같이 권고하고 있다(IAEA, 1994).

2.1 기획 및 준비단계

부지선정을 위한 준비단계로서 현재 가능한 폐기물 특성 및 처분량, 처분장 필요시기, 처분장 개념과 같은

Table 1. Favorable and unfavorable conditions for the siting of a geologic repository (Berlin and Stanton, 1989).

적합한 환경	부적합한 환경
<ul style="list-style-type: none"> · 지각운동의 빈도와 크기, 수리 지질, 지구화학, 지형적 과정 · 이 처분장이 폐기물을 격리시키는 데 영향을 미치지 않는 지질환경 · 포화된 암반인 경우 투수계수가 낮고 수압기울기가 아래쪽이거나 수평으로 놓이는 수리지질학적 환경 · 핵종의 흡착이나 침전, 핵종의 이동을 촉진하는 유기/무기물, 콜로이드, 입자의 형성과 이동에 의한 핵종의 이동이 방지될 수 있는 지구화학적 환경 · 열을 받았을 때 광물의 변화가 없거나 변화시 핵종의 이동을 막을 수 있도록 변화하는 환경 · 지표면에서 최소 300 m 심도에 폐기물을 거치할 수 있는 환경 · 인구밀도가 낮고 인구밀집지역에서 멀리 떨어진 곳 · 지하수가 처분장에서 지표까지 흘러가는 시간이 긴 곳 	<ul style="list-style-type: none"> · 지하시설에 홍수가 날 가능성이 있는 지역 · 지하수 유동 시스템에 부정적인 영향을 주는 인간의 활동 가능성이 있는 곳 · 처분성능에 영향을 줄 수 있을 정도의 지표수 변화를 일으키는 규모의 산사태, 지반 침하, 또는 화산활동의 가능성이 있는 지역 · 용기, 침하, 습곡, 단층작용과 같은 구조적 변형 · 핵종 이동에 영향을 미칠 수 있는 수리지질환경의 변화 가능성 · 공학적 방법의 성능에 부정적인 영향을 줄 수 있는 지화학 환경 · 지진과 화산활동 · 경제적으로 유용한 광물의 존재 · 설계시 공학적으로 복잡한 암반 또는 지하수 환경 · 지하공동의 안전성을 확보할 수 있는 설계가 어려운 역학적 환경 · perched water · 핵종이 가스상태로 이동할 수 있는 환경

관련 자료, 대상 암종 및 지질, 부지특성 평가 기준, 예상비용 등을 정하며 부지선정을 위한 개략적인 절차 등이 포함된다. 특히 부지선정에 크게 영향을 주는 인자들의 장기적 안정성, 기술적 타당성, 사회경제적·정치적·환경적 조건 등을 기준으로 도출되어야 한다. 초기 단계에서는 이용 가능한 자원을 근거로 가능한 빨리 대상 부지 하나하나의 적합성을 평가한다. 후보부지를 대상으로 처음 개략적으로 수행하는 안전성 평가는 규제기관의 자문을 기준으로 향후 가장 중요한 연구항목을 도출하는데 주안점을 두고 수행하며, 이후 반복되는 안전성 평가를 통하여 추가적인 자료의 필요성을 판단하고 또한 처분개념을 재평가·수정하는데 도움이 될 수 있도록 진행한다.

2.2 지역조사 단계(Area Survey)

준비단계에서 선정한 부지 적합성 평가 결과를 기준

으로 심부지하조건을 고려하여 부지범위를 축소하는 단계이다.

- 대상 부지에 대한 조사 (Regional mapping phase)
 - 대상 부지 전체 영역과 지역간의 경계, 부지주변 조건 등 조사
 - Regional mapping을 위한 부지선정 요소 결정
 - 해당 부지내의 지질학적, 수리지질학적, 지형학적 특성 자료 등을 기반으로 regional mapping 작업 수행
- 후보부지 선정 단계 (Potential site screening phase)
 - 처분장 후보부지 선정 단계로서 regional mapping 단계에서 고려되지 않았던 국가적 차원의 관련 법 및 규정 수용성 검토- 지하수원, 국립공원, 역사적 유물 등을 고려하게 된다.

2.3 부지특성 분석 단계 (Site Characterization phase)

부지특성조사·분석 단계에서는 해당 후보지 한 개 또는 몇 개를 안전성 관점에서 분석하는 것을 목적으로 부지특성이 고려된 처분장 설계자료를 본 단계에서 확보한다. 특히 부지특성 자료는 설계하고자 하는 처분장 위치에서의 각종 지질학적, 수리지질학적 입력인자의 특성과 범위 등을 도출하는 것으로 현장에서의 지표조사 및 시추공을 통한 조사를 포함한 일련의 현장 부지조사 작업이 필요하다. 지표조사에서는 암석의 종류, 균열 및 균열대에 대한 조사가 실시된다.

이와 동시에 토층 아래의 균열대와 이들의 경사 등을 파악하기 위한 지구물리탐사가 실시된다. 시추공 조사에서는 시추공을 통해 심부암반의 상태를 파악하게 된다. 시추공의 설치 장소와 방향은 심부암반의 지질학적, 수리지질학적 특성을 가장 잘 나타낼 수 있도록 설정한다. 시추공을 통해 암반의 균열대를 파악하고 균열 내 광물 연구를 통해 핵종 이동을 지연시키는 정도를 추정하게 된다. 시추공에서 주입시험을 통해 암반의 수리전도도를 파악할 수 있으며 심도에 따라 지하수 샘플을 채취해서 지하수의 화학적 성질의 변화에 대한 정보를 얻는다. 부지특성 조사·분석 마지막 단계에서 최종 후보부지가 결정되는데, 이때 사회 경제적, 정치적, 환경적 요소가 고려되어야 하며, 규제기관의 후보부지 선정 결과는 물론 선정된 부지가 처분장 부지로서 타당한지를 검토하여야 한다.

2.4 부지확정 단계 (Site confirmation stage)

본 단계는 선정된 부지를 대상으로 최종 처분장 건설 착수 이전에 정밀분석, 조사, 연구를 수행하는 단계이다. 정밀 연구에는 해당 부지의 특성자료를 근거로 방

사성 핵종 이동 모델이 확보되어야 하며, 정밀조사 분석 자료는 처분장 건설을 위한 공학적 자료와 비용평가 등에 활용된다. 본 단계에서는 처분장으로 기인되는 환경영향평가는 물론 안전성 평가와 함께 부지 적합성 평가자료들이 규제기관에 제출되어야 한다. 부지에서의 정밀조사·분석연구는 처분 안전성의 향상을 위하여 시설의 설계, 건설, 운영, 폐쇄 및 사후 감시기간까지 지속적으로 수행되는 것이 바람직하다.

3. 부지선정 기준 및 선정에 필요한 정보

3.1 지질조건

처분장의 지질조건은 방사성폐기물에서 누출된 방사성 핵종의 이동을 억제하기에 적합한 기하학적, 물리적, 화학적 특성을 가져야 한다. 처분장 위치가 방사성 핵종의 주 이동 경로가 되는 단층과 파쇄대와 같은 불연속면으로부터 충분히 격리하기 위해서는 처분장 모양의 크기가 이를 수용할 수 있도록 충분하여야 한다. 그리고 처분장 건설, 운영 및 폐쇄 작업이 안전하게 이루어질 수 있도록 보장하고, 처분장 주변의 지질학적, 구조적 안정성을 보장할 수 있어야 한다. 이러한 평가에 필요한 정보는:

- 암반과 토양의 전체적/지역적 구조 및 층서에 관한 자료
- 물리적, 화학적 물성
- 열적, 열역학적 물성

3.2 미래의 자연현상

처분장 모양은 미래에 있을지도 모를 기후변화, 지각운동, 지진, 화산, diapirism 등에 의해 처분장 성능에 영향이 없어야 한다. 이에 대한 정보로서

- 기후자료
- 전체적, 지역적인 규모에서의 지질조건과 지각운동 및 지진기록
- 융기, 습곡, 단층작용과 같은 현재 지각운동의 증거
- 지질구조에서 단층의 존재와 위치, 심도와 최근의 이동기록
- 현지응력
- 가능한 최대 지진의 특성
- 온천의 존재와 지열계수값
- 화산활동의 증거
- Diapirism 의 증거

일반적으로 지진이 발생하는 부지는 처분장 후보부

지에서 제외하는 경향이 있지만 단지 지진 발생이 있다고 후보부지에서 제외하는 것은 바람직하지 않다. 이는 지하구조물의 경우 특히 되메움이 되어 있는 구조물에서의 지진의 영향은 지표면에 비해 미약하기 때문이다 (Fairhurst, 1998).

3.3 수리지질(Hydrogeology)

처분장이 위치하는 주변의 수리 지질학적 특성과 조건은 처분장 내 지하수 흐름을 제한할 수 있는 환경을 제공하여야 한다. 지하 환경에서의 대수층과 단열대 등은 방사성물질의 이동 경로가 될 수 있기 때문에 지하수 이동 메커니즘과 지하수 유속 및 유량 등은 처분 안전성평가에 중요한 입력 인자가 된다. 따라서 처분안전성 측면에서 가장 합리적인 수리지질학적 조건은 지하수 이동 경로가 가능한 길고 지하수 유속은 느린 환경이다. 대상 부지의 수리지질학적 특성을 분석하기 위하여 필요한 정보는:

- 대수층의 수리지질학적 특성 : 위치 및 범위, 상호 연관관계, recharge/discharge 특성
- 처분장 모암의 수리지질학적 특성: 공극율, 수리전도도, 수두 구배
- 지하수 이동특성
- 지하수 및 처분장 모암의 물리·화학적 특성

3.4 지화학 (Geochemistry)

처분장 주변의 물리·화학적/지화학적 특성은 방사성물질의 이동이 제한될 수 있는 환경을 제공하여야 한다. 바람직한 지화학적 특성을 평가하기 위한 정보는:

- 처분환경 내 모든 매질의 광물학적, 분류학적 조성 및 지화학적 특성, 흡착특성
- 방사성물질 농도, 조성, pH, Eh 와 같은 지하수의 화학적 특성
- 붕괴열과 방사선이 처분장 모암과 지하수의 특성에 미치는 영향
- 유기물, 팔로이드, 미생물 등이 미치는 영향
- 암석의 공극 구조 및 광물의 표면 특성
- 방사성물질의 암석 내 유효화산이동 특성
- 용해성과 종분화 (solubility/speciation)

3.5 인간활동에 따른 결과

처분장 부지 선정 시에는 과거 또는 미래 인간의 지하자원 탐사/개발 활동 등으로부터 파급되는 영향 등이 최소화될 수 있도록 고려되어야 한다.

- 처분장 부지 주변의 과거/현재의 굴착공 및 광산 현황

- 부지 주변의 에너지 및 광물자원 현황, 지하수 및 지표수의 현재 사용현황 및 미래 활용 잠재력
- 현존하거나 향후 계획되어있는 지표수 현황

3.6 방사성물질 수송

처분장 부지는 방사성물질의 수송으로 인하여 인간 및 환경에 영향을 주지 않는 곳에 위치하여야 한다.

3.7 환경보호

처분장은 주변 환경에 어떤 영향을 최소화할 수 있는 곳에 위치하여야 한다. 처분장 굴착과 건설 및 운영에 따른 영향으로는 환경파괴, 공공 식수원 파괴, 동식물 생태계에 미치는 영향 등을 들 수 있다. 이러한 환경영향 평가를 위해 필요한 정보는 국립공원, 야생동물 구역 및 사적지 위치, 지표수 및 지하수자원, 육상/수상 생물 및 야생 생태현황 등을 들 수 있다.

3.8 토지이용 (Land use)

처분장 부지 선정 시에는 주변 토지이용 현황 및 미래계획 등을 반영하여 처분장 개발로 인한 상호영향이 최소화될 수 있도록 하여야 한다.

3.9 사회적 영향

처분장은 사회적 영향이 극소화될 수 있는 곳에 위치하여야 한다. 이러한 영향을 분석하기 위하여 필요한 정보는:

- 인구밀도, 분포 및 향후 전망
- 경제구역 내의 고용분포 및 전망
- 사회단체 서비스 및 기반설비
- 주택 수요와 공급 현황
- 지역사회의 경제적 예측 등

4. 부지선정과 관련된 세계 각국의 현황

4.1 미국

미국의 경우 10CFR60에 부지 선정 과정에 대해 적고 있다. 미국에서는 고준위 폐기물 처분장 부지로 캔사스주의 오래된 광산인 Lyons 암염광산에 대해 타당성 조사를 실시하였었다. 이 프로젝트는 정치적인 반대와 함께 인근 시추공들에 의한 영향이 문제로 제기됨으로써 중단되고 서부 텍사스주의 델라웨어 암염층과 뉴멕시코주의 Waste Isolation Pilot Plant (WIPP) 부지에 대한 조사를 시작하였다. 델라웨어 암염층의 경우 황화수소와 가압 brine이 시추에서 탐지되어 WIPP 부지가

최종적으로 선택되었다. 현재 WIPP은 Transuranics (TRU) 폐기물 처분장으로 운영이 되고 있다.

고준위폐기물 처분장의 부지선정을 위해 DOE는 1983년에 6개주의 9개 후보부지를 선정하였다. 후보부지중 7곳이 암염층이었으며 나머지 2곳은 화성암층이었다 (고원일 등, 1998). 1984년에 제시된 에너지성 (Department Of Energy, DOE)의 최종 부지 선정기준에 의해 1986년 9개의 후보부지를 5개로 압축하고 이어 네바다(응회암), 텍사스(암염), 위싱턴주(현무암)의 3개 부지로 압축하였다. 1987년에는 부지특성조사의 지연과 비용과다로 인해 미국 정부는 부지확보 연구를 포함한 폐기물 관리정책의 재검토를 지시하였고, 1987년 말 미국 의회는 새로운 폐기물 관리 정책인 Nuclear Waste Policy Amendments Act (NWPAA)를 통과시켰다. 이에 따라 본격적인 Yucca Mountain (YM) 프로그램이 착수되었다. 1993년부터 YM 부지에서는 고준위폐기물 처분장으로 적합한지를 결정하기 위한 정밀 부지탐사작업 (Exploratory Studies Facility)이 수행되어 현재 거의 완료단계에 있으며 2001년에 YM 부지의 최종 적합성 평가가 정부에 의해 받아들여지면 2002년 처분장 건설을 위한 인허가절차에 들어갈 예정이다. 현재 계획하고 있는 처분장 운영 목표는 2010년이다.

4.2 스웨덴

스웨덴에서의 부지조사는 먼저 feasibility study에서 시작하였다. Feasibility study는 처분장으로 적합한 부지를 선정하기 위해 모암의 상태, 토지이용, 환경영향 및 운송 등의 측면에서 타당성을 검토하는 작업을 말한다. 스웨덴에서는 총 5-10곳에 대한 feasibility study를 할 계획으로 있으며 1993년 북부 스웨덴에 있는 Storuman과 Malå 지방에서 feasibility study를 시작하였다. 1996년 6월 Storuman 지역에서 SKB (Swedish Nuclear Fuel and Waste Mangement Company)가 이 지역에서 연구를 계속하는 것에 대한 찬반 투표가 있었는데 71%가 반대를 그리고 28%가 찬성을 하였다. Malå 지방에서의 feasibility study는 1996년에 끝났으며 투표결과 반대가 많아 이 곳에서 더 이상의 조사는 하지 않고 있다. Nyköping과 Östhammar, Oskarshamn, Tierp 지방에서 feasibility study가 진행중에 있다. 이들에 대한 최종 보고서는 1999-2000년에 나올 예정으로 있다. 1998년에는 Östhammar와 Nyköping 지방에서의 feasibility study에 대한 논의가 시작되었다. 이러한 feasibility study들은 두개의 예비 부지를 선택하는 기초가 될 것이며 또한 이를 통해 안정성해석과 환경영향평가를 위한 부지 특성

자료를 얻을 수 있다. 모든 feasibility study는 2001년에 끝날 예정으로 있으며 이를 통해 2곳이 부지 조사 대상으로 선정된다. 부지조사는 1 km까지의 시추를 통해 암반을 조사하고 운송방법, 운송 및 취급중의 방사선 방호에 대한 조사를 포함한다. 그외에 현재의 토지이용, 노동력의 공급 가능성도 검토된다. 2002년 시작될 이러한 부지조사는 적어도 4년이 소요되며 부지조사 결과 처분장으로 부적절한 점이 발견되면 feasibility study에서 적당하다고 파악된 다른 지역에 대하여 부지 조사를 실시하게 된다. 이러한 과정을 거쳐 가장 적합한 부지를 선정하게 되고 여기에서 자세한 부지특성 파악을 위한 연구를 하게 된다. 부지특성조사에 들어가기 전에 원자력법과 환경규정 및 기타 법률에 따라 인허가 신청을 하게 되고 지방정부와 기타 담당기관들이 이를 심사하게 되며 최종적인 인허가 여부는 정부가 결정한다. 부지특성파악을 위해서 터널이나 수직터널을 500 m 지점까지 굴착하고 처분장으로 적합하다고 판단될 경우 본격적인 건설을 시작하게 된다. 이러한 부지특성조사와 1단계 건설은 적어도 6년이 소요될 것으로 보고 있다.

4.3 독일

독일에서는 방사성폐기물 처분장의 건설을 위한 부지조사가 1976년-1982년 사이에 실시되었다. 1983년 정부는 환경, 자연보호, 원자력 안전에 관한 자문을 담당하는 원자력안전위원회(Reactor Safety Commission, RSK)의 권고에 따라 암반에 방사성폐기물 처분장을 건설하기 위한 안전기준을 만들었으며, 이 기준에 맞추어 Goleben에서 지표 및 지하 조사를 포함하는 프로그램이 만들어 졌다. 지표조사는 1985년에 종료되었는데 수리지질 조사, 물리탐사, 지진파 측정, 암염층 시추, 암염동의 심부시추, 수직터널의 predrilling과 같은 조사를 실시하였다. 지표조사에서 얻은 일반적인 지식과 장기안정성 계산을 토대로 북부 독일에 200개 이상 존재하는 암염동이 방사성폐기물 처분에 적합한 암반으로 결론짓고 지하에 대한 조사를 시작하였다.

4.4 캐나다

캐나다에서는 80년대 후반 천연자원성이 2개의 부지조사팀(Siting Task Force, STF)을 조직하고 온타리오주와 브리티시 컬럼비아주의 Surrey에서 그 주에서 발생한 폐기물 처분을 위한 부지를 자발적인 지역동의 과정을 통해 선정하도록 하였다. 온타리오주의 조사에서는 1995년 11월 Deep River 지역이 Port Hope 지역에 저장중인 폐기물을 받아들일 용의가 있는 것으로 보고

되었다. Deep River는 STF와 맺은 협약 (Community Agreement in Principle, CAP)에 기초하여 폐기물을 받아들이기로 하였으며 이를 지역투표에 부쳐 72%의 찬성을 얻었다. Surrey에서 활동한 부지조사팀은 소규모의 처분을 위한 몇 개 지역을 확인하여 이 지역에 대한 평가작업을 진행하고 있다.

4.5 일본

일본의 처분 프로그램은 아직 어떤 특정 암석 또는 부지를 대상으로 하지 않고 있다. 일본에서의 고준위폐기물 지층처분을 위한 단계별 추진계획은 다음과 같다.

- 1 단계: 유효한 지층선정
- 2 단계: 처분 예정지 선정
- 3 단계: 처분예정지에 대한 처분기술 실증
- 4 단계: 처분시설의 운전, 운용, 폐쇄

현재 일본은 1985년에 시작된 2단계 연구를 완료하여 1999년 5월 H-12 보고서를 발표하였다. 이 연구결과는 국민의 이해와 신뢰를 얻는 것이 제일 중요하다는 원칙 하에 먼저 수행된 연구결과를 바탕으로 심지층 처분개념의 기술적 타당성과 신뢰도를 보여주는 것을 포함하여, 향후 필요하게 될 처분부지 선정 및 관련 법적 기준 제정에 필요한 중요한 입력자료 생산 등을 포함하고 있다. 현재 결정질암과 연암 두가지를 연구 대상으로 고려하고 있으며 각 대상암반에서의 보다 실제적인 자료를 확보하기 위하여 체계적인 지하 처분연구 시험 시설을 계획하고 있다 (JNC, 1999).

4.6 핀란드

핀란드에서는 사용후핵연료의 최종처분과 관련된 연구는 무역산업부 (Ministry of Trade and Industry, KTM) 에 의해 승인된 일정에 따른다. 네 곳의 처분장 후보부지 (Olkiluoto, Romuvaara, Kivetty, Hastholmen) 에서 부지선정을 위한 조사가 있었다. 세밀한 부지 조사와 안전성 조사에서 4곳 모두 최종 처분장 요건을 만족하는 것으로 나타났다. 1999년 Olkiluoto 를 최종후보부지로 선정하고 2000년에 적합한 최종처분 부지를 선정하고 이에 관한 승인을 얻고자 하고 있다. Olkiluoto 가 최종후보부지로 선정된 것은 지질적 적합성 외에도 주민들의 동의와 현재 대부분의 사용후핵연료가 이미 Olkiluoto 에 저장되어 있기 때문에 얻을 수 있는 각종 장점들 때문이었다.

4.7 스위스

스위스에서는 Fig. 1에 보여지는 과정에 따라 처분장

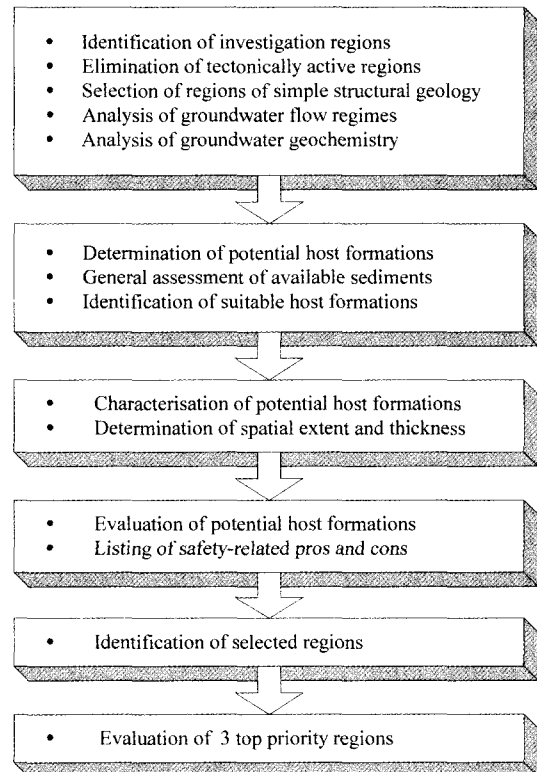


Fig. 1. The procedure for the selection of areas for investigation by Nagra (after Savage, 1995).

부지를 선정하고 있다(Savage, 1995). 먼저 지각운동이 활발하지 않고 지질구조가 간단한 지역을 파악하고 지하수 유동과 지하수의 화학적특성을 분석한다. 다음 단계로 처분장이 설치될 수 있는 모암을 선정하고 이 모암에 대한 특성을 조사하게 된다. 이러한 조사를 통해 모암을 평가하고 안전성 측면에서의 장·단점을 기술하게 된다. 이렇게 선정된 지역중에서 유력한 3곳을 최종적으로 평가하여 부지를 선정할 계획으로 있다.

5. 처분장 개념선정 및 설계

5.1 처분 개념의 선정

심지층 처분시스템의 개발을 위해서는 고려되는 처분시스템의 구성요소 또는 하부시스템을 기술적, 경제적, 안전성 측면에서 조화를 이룰 수 있도록 처분시스템을 통합하고 최적화하여야 한다.

가. 처분 방법

스웨덴의 SKB (1992a)는 처분장이 위치하는 암반의

주요 기능을 "장기적으로 안정한 역학적, 화학적 환경을 제공함으로써 공학적 방법들의 장기적인 성능에 손상이 가지 않도록 해야 한다" 라고 기술하였다. 이에 따라 SKB의 KBS-3 개념은 고려되는 기간동안 처분용기와 near-field 에서의 공학적 방법이 핵종을 확실하게 차단할 수 있도록 개념설계를 하였다. 이러한 처분 개념은 500 m 심도의 처분장의 경우 성능 평가시 처분장에서 누출된 핵종이 지상으로 이동하는데 걸리는 시간이 경우에 따라서는 매우 짧게 나타났기 때문이었다 (Savage, 1995). 이는 성능평가가 개념선정과 처분장 설계와 함께 진행이 되어야 함을 의미한다. 일반적으로 단단한 결정질 암반에서의 처분은 광산개발에서 널리 사용되었으며 비용, 안전성, 유연성, 기술성, 국제공동연구 측면에서 유리한 주방식으로 굴착된 지하공간에 처분하는 것이 일반적이며 이에 대한 연구는 미국, 캐나다, 일본, 스웨덴, 스위스, 핀란드 등에서 수행되었다.

나. 모암 종류

결정질암, 점토질암, 응회암, 암염이 고준위폐기물 처분장 모암으로 고려되고 있다. 단단한 결정질 암반의 경우 심부에 처분장을 건설하기가 용이하며 처분단가가 다른 암반에 비해 적게 든다 (Savage, 1995). 결정질 암반의 문제점으로 암반내의 핵종이동 통로가 짧으며 예측이 어렵고 지하수의 흐름과 핵종이동이 복잡하며 처분장 주위 손상대 (Excavation Disturbed Zone, EDZ) 의 발달이 두드러진다는 점을 들 수 있다. 따라서 결정질 암반에 처분장을 건설하기 위해서는 균열망 (fracture network)과 처분장 건설시 발생하는 EDZ를 파악하는 것이 중요하다.

점토질암반의 경우 수리전도도가 낮고 흡착성능이 뛰어나기 때문에 심지층처분에 적합한 암반으로 여겨지고 있다. 점토질 암반의 단점으로는 지하수의 이동에 대한 이해가 부족하며 현장에서의 불성숙정이 어렵고 또한 심부에 처분장을 건설하는데 어려움이 따르고 비용이 많이 든다는 점이다. 그외에도 점토의 낮은 열확산도 때문에 열문제가 발생할 수 있다.

암염층의 경우 핵종의 이동속도가 느리기 때문에 심지층처분장으로 선호되고 있다. 암염은 열확산도가 결정질암반이나 점토질암반에 비해 높기 때문에 폐기물 발생열에 의한 온도 증가가 낮다. 암염은 균열을 천천히 메우는 능력이 있기 때문에 처분장 안전성을 확보하는데 유리하다. 암염의 문제점으로 들 수 있는 것은 암염층의 경우 석유나 가스전과 밀접한 관련이 있으며 암염층 사이로 놓이는 취성이 강한 무수석고(anhydrite) 층에서의 파괴로 인한 문제 발생 등이다. Table 2는 방

사성폐기물 처분장 모암으로 고려되고 있는 암반의 장 단점을 보여주고 있다.

다. 처분심도

YM에서는 상재하중(overburden)의 두께, 모암의 성질, 단층의 위치, 지하수위 등을 고려하여 처분 블럭을 결정하였다. 즉 처분장은 폐기물이 외부환경에 노출되지 않을 정도로 충분히 깊은 곳에 처분되어야 하기 때문에 지상에서 일어나는 현상으로부터 보호하기 위해 적어도 200 m 두께의 상재하중을 갖도록 하였다 (Boyle and Rowe, 1998). WIPP의 처분지층(지하 650 m) 선정 시에는 다음과 같은 기준이 사용되었다 (Rempe et al., 1998).

- (a) 예상되는 처분지층과 부지 인근에서부터의 잠재적인 이동통로를 최소화
- (b) 기존의 광산작업과 처분장 사이에 안전한 간격을 유지
- (c) 적어도 300 m 아래의 수평 암염층을 선택하되 diapirism을 겪을 정도로 깊지는 않은 곳
- (d) 대규모의 변형이 일어나지 않는 지역
- (e) 처분장의 건전성을 유지

영국 프로그램에서는 지하수이동과 빙하 침식에 의한 영향을 고려하여 처분심도를 200-1000 m 로 고려하고 있다. 방사성폐기물 처분장 후보지 중 가장 깊은 곳은 독일의 중저준위 처분장인 Konrad 폐철광산으로서 처분심도가 800-1300 m 이며 가장 얇은 곳은 벨기에의 Mol 후보부지로 지하 215 m 이다.

일반적으로 처분심도가 부지특성에 영향을 받기 때문에 최종 처분심도는 최종 부지 선정이 어느 정도 수행된 단계에서 결정된다. 처분방법에 따라서도 처분심도에 변화가 있을 수 있는데, 예를 들어 터널내에 처분하는 in-room 처분일 경우 처분공 처분의 경우보다 좀 더 깊은 곳에 처분장 건설이 가능하다 (Simmons and Baumgartner, 1994).

라. 기준 사용후핵연료

처분장 개념을 선정하기 위해서는 처분용기의 선정이 우선되어야 한다. 처분용기의 재질, 무게, 크기, 형상, 두께 등을 결정하기 위해서는 기준 사용후핵연료와 처분용량의 선정이 필요하다. 사용후핵연료의 특성을 결정하는 요소로는 (a) 형상 (b) 크기 (c) 무게 (d) 냉각기간 (e) 연소도 (f) 방사선원 (g) 붕괴열량 (h) 방사선물질농도 등을 들 수 있다. 이러한 핵연료 특성은 처분시설을 구성하는 모든 관련 시스템의 설계, 건설, 운영 및 사후관리는 물론 처분시스템의 성능 및 안전성 평가에 필요한 기본 입력 인자이다.

Table 2. Advantages and disadvantages of major rock types.

Rock Type	Advantages	Disadvantages	Countries
Rock salt (암염)	(a) Self-sealing (b) Easy mining (c) High thermal conductivity (d) Low water content (e) Very low permeability (f) Abundant availability	(a) High thermal expansion coefficient (b) High solubility (c) Corrosiveness of brines (d) Low sorptive capacity (e) Creep closure	USA Germany Denmark Spain Netherlands
Granite	(a) Very strong rock (b) Low permeability (c) Low solubility (d) Low corrosion potential	(a) Difficult to excavate (b) Complex geology (c) Complex hydrology (d) Higher thermal stress	Canada Sweden Finland U.K. France Swaziland Australia Spain India
Shale	(a) Self-sealing (b) Low permeability (c) High sorptive power	(a) Low physical strength (b) Difficult to maintain stability of mined openings	Swaziland Belgium Italy
Tuff	(a) High strength (b) Zeolite tuff is highly sorptive (c) Very low water flows in arid regions	(a) Strata difficult to model (b) Aquifers in arid regions may be attractive to future generations (c) Unsaturated zone hydrology not well understood (d) Seismic activity may be high	USA

마. 공학적 방벽 (처분용기, 완충재와 되메움재)

고준위폐기물 처분의 안전성을 확보하기 위해 처분용기 외벽, 처분용기 외벽과 핵연료사이의 공간을 채우는 주철, 처분용기와 처분공 압반사이의 공간을 채우는 완충재 그리고 압반이 방벽으로 작용하는 다중방벽개념 (multi-barrier concept)이 채택된다. 처분용기의 경우 짝개는 300-1000년에서 길게는 1백만년 까지 핵종을 가둬둘 수 있도록 설계된다. 스웨덴 처분용기의 경우 구리를 사용하며 캐나다는 타이타늄을 미국의 경우 탄소강을 처분용기 재질로 고려하고 있다. Table 3은 각국에서 고려하고 있는 처분용기의 재질, 규격과 설계기준을 보여주고 있다.

결정질 암반에 설치되는 처분장에서는 주로 팽윤현상이 두드러지는 벤토나이트가 완충재로 고려되고 있다. 현무암 처분장 개념에서는 과쇄 현무암이 완충재로 고려되었었으며 YM과 같이 매우 건조한 지역에 설치되는 처분장에서는 완충재를 사용하지 않고 공간을 남겨두는 것이 선호되기도 한다 (Chapman and McKinley, 1987). 완충재의 기능은 (1) 지하수가 폐기물에 접근하는 것을 최소화하며 (2) 지하수를 변환시키며 (3) 핵종의 이동을 지연시키고 (4) 폐기물에서 발생하는 열을 발산하도록 하며 (5) 주위 암반에서 작용하는 응력을 분산시키는 것이다 (Chapman and McKinley, 1987). 이

러한 기능을 만족시키기 위해 수리전도도가 낮고 팽윤현상이 뚜렷하고 이온교환능력이 뛰어난 smectite가 풍부한 벤토나이트가 선호된다. 처분장에 사용될 수 있는 벤토나이트의 물성기준으로는 (1) 2 μm 보다 작은 점토성분의 무게가 80% 이상 (2) smectite 광물이 전체 점토광물의 70% 이상 (3) 벤토나이트 1 kg 안에 유기물과 황화물 함량이 200 mg 이하이어야 한다 (SKB, 1992b). 완충재와 되메움재의 선택시 이러한 주요 기능을 최적화할 수 있도록 하는 것이 필요하다. 캐나다에서는 되메움재와 밀봉을 통해 20 km 이상에서 발생하는 강도 6.5의 지진이 발생하더라도 처분장에서의 손상이 크지 않도록 설계하고 있다 (Simmons and Baumgartner, 1994).

5.2 처분장 설계

부지선정이 어느 정도 진행된 상태에서의 처분장의 설계는 해당 부지의 지질조건을 고려하여 최종 결정된다. 지하공동의 설계는 공동의 안전성에 결정적인 영향을 미치는데 공동의 안정성은 암반의 물성, 초기응력, 터널형상, 굴착법, 지보, 완충재, 열 하중에 의해 결정된다. 또한 처분장이 위치할 지질 구조에 적합한 설계가 되어야 한다. 지질구조에 따라 단층 또는 복층처분에 대한 결정, 처분터널의 방향, 처분터널의 크기와 처분공

Table 3. Different canister designs for the countries, Canada, USA, and Sweden.

	재질	크기		설계기준
		직경	길이	
캐나다	타이타늄	0.62	2.24	<ul style="list-style-type: none"> · 시간당 50 mm 폭우에 1시간 이상 견딤 · 최소 0.3 m 낙하에 견딤 · 평면 위 9 m 낙하시험, 지름 15 cm 인 스틸바의 1 m 낙하 · 800도 화염에서 30분간 건전성 유지 · 수심 15 m 에서 8시간 잠수시 방수 · 수송용기 표면선량 < 1 rem/hr 이내 (1 m 거리)
미국	탄소강	1.8	5.7	<ul style="list-style-type: none"> · 성능 : 300-1000년 (10CFR60) · 1000년 후 처분용기의 파손율 < 1% · 21 PWR, 40 BWR 폐기물 저장 · 평평한 표면 위 2 m 높이 낙하에서 건전성 유지 · 25 kN 하중에 건전성 유지
스웨덴	구리	0.92	4.85	<ul style="list-style-type: none"> · 성능 : 적어도 100,000년간 알려진 모든 부식에 견딜 수 있어야 · 10 cm 이하의 암반이동에 대해 기계적 건전성 유지 · 용기표면 방사선량 < 1 Gy/h · 지하수압, 팽윤압, 빙하압 등에 의한 기계적 응력에 견디야 · 불균등 팽창에 의한 안정성 · 안전한 회수가 가능하도록 · 안전계수 : 2.5 · 항복강도 > 250 MPa · 불특정 결합에 의한 초기 용기파손율 0.1% 이하.

간격, 지보의 선택이 결정되어진다. 부지가 결정되지 않은 상태에서의 처분개념은 처분장의 안정성에 영향을 미치는 요소들에 대하여 보수적인 관점에서 접근하는 것이 필요하며 문헌조사를 통해서 얻은 분포값을 기준으로 설계를 하는 것이 필요하다. 이러한 개념선정은 부지선정에 영향을 미치며 상호연관성이 높기 때문에 함께 진행해 나가는 것이 중요하다.

지하 처분장의 설계를 위해서는 열적, 기계적, 수리적, 방사성적 관점에서의 설계 기준들이 만족될 수 있도록 해야 한다. Table 4는 미국, 스웨덴, 캐나다의 처분장 설계 기준들을 보여주고 있다. 캐나다의 경우 발열량이 적은 CANDU 사용후핵연료를 처분 대상으로 하기 때문에 처분밀도가 47.5 kgU/m³로 미국이나 스웨덴보다 높다. 스웨덴의 SKB에서는 설계시 대규모 균열대에 직각으로 터널이 놓일 수 있도록 고려하며 현장 상태에 따라 유연하게 처분장을 건설할 수 있도록 하는 설계를 하도록 하고 있다. 대량의 방사성 핵종이 지표로 흘러나가는 것을 방지하기 위하여 지하수의 유입과 처분용기의 부식을 최소화 하는 것이 처분장 설계 시 가장 중요하게 고려되어야 한다. 그 외에 일본과 같이 지질학적 특성이 복잡하고 지각운동이 활발하게 일어나기 때문에 공학적 방벽의 성능을 주축으로 하는 처분시스템을 개발하고자 하고 있다.

처분장의 개념선정 및 설계단계에서 다양한 코드를 이용한 모델링 작업이 실시된다. Table 5는 현재 방사

성폐기물 처분 연구에 많이 사용되고 있는 각종 코드들의 특징을 보여주고 있다. 방사성폐기물 처분장 건설과 관련된 컴퓨터 코드는 암석역학 코드, 지하수 유동 코드, 열해석 코드, 통기해석 코드, 비용분석 코드로 크게 나눌 수 있다. 암석역학 코드들은 처분장 암반에서 동적, 정적 하중에 대한 영향을 기계적인 관점에서 해석하는 코드이며 지하수 유동(groundwater flow) 코드는 처분장 건설 전·후 지하수의 유동에 대한 해석 코드이다. 열해석(heat transport) 코드들은 방사성폐기물에서 발생하는 열이 시간에 따라 처분장 주변에서 변화하는 경향을 해석하는데 사용되며, 통기(ventilation) 코드들은 지하 구조물의 통기 문제를 해석하는데 사용된다. 그 외에 비용분석을 위한 코드들이 있다.

처분장의 설계시 사용되는 안전계수는 계산에 사용되는 각종 가정들과 이들에 의한 오차와 함께 실험실에서 측정된 물성과 현지 암반 물성의 차이 때문에 고려된다. 암반구조물 문제의 경우, pillar나 공동 벽면과 같이 압축력이 작용하는 곳에서는 안전계수 2-4를 적용하는 것이 일반적이며 인장력이 작용되는 곳에서는 4-8의 좀 더 높은 안전계수를 적용한다 (Eloranta, 1996).

공동의 굴착 후 발생하는 지반의 수직변위는 지하수의 유동을 변화시킬 뿐만 아니라 지표구조물에 손상을 입히기 때문에 설계 단계에서 이를 고려하여야 한다. 고준위 폐기물 처분장의 경우 고준위폐기물에서 발생하는 열에 의해 암반은 팽창하게 되고 이에 따라 지표면이

Table 4. Design criteria for the countries, Canada, USA, and Sweden.

	캐나다	미국 YM	스웨덴
일반기준	<ul style="list-style-type: none"> · 지표면으로 연결된 공동의 최소화 · 운전유연성 최대화 · 방사성, 비방사성물질의 취급을 분리 · 모든 보조시설은 처분구역외부에 위치 · 적절한 환기시스템 · 배수는 upcast shaft 쪽으로 · 수직터널은 처분장에서 200 m 이상 격리 · 처분밀도: 47.5 kgU/m² 	<ul style="list-style-type: none"> · 처분 후 100년간 회수 가능 · 처분밀도: 20.5 KgU/m² · Type I fault 에서 적어도 15 m 이상 격리 	<ul style="list-style-type: none"> · 폐쇄 전, 폐쇄 후 1000년 방사선 방호에 유의 · 다음 빙하기 (10000년 이내) 고려 · 처분밀도: 7.8 KgU/m²
기계적 기준	<ul style="list-style-type: none"> · 굴착비율 < 27% · 평균강도 대 응력 비 > 2 	<ul style="list-style-type: none"> · 굴착비율은 < 30% · 처분장 위 암반상승 < 1 m · 처분장 위 지표면 상승률 < 0.5 cm/yr · 변위 < 15 cm/100년 · 변위속도 < 3 mm/년 	
열기준	<ul style="list-style-type: none"> · 용기표면온도 < 100° 	<ul style="list-style-type: none"> · 주위암반 온도 < 115° · 처분동굴표면 < 200° · 지표면 온도상승 < 2° · 동굴표면온도 < 50° · 핵연료피복관 < 350° (HLW glass < 400°) · Zeolite layer < 90° · 건설 중 접근통로 < 27° · 거치, 되메움작업 시 < 50° · 폐쇄 전 최대허용 암반표면온도: 수직갱도 35°, 램프 50°, 주접근통로 50°, 처분동굴 200° · 회수기간 중 < 50° 	<ul style="list-style-type: none"> · 용기표면온도 < 100°
방사능 기준	<ul style="list-style-type: none"> · 작업자 2 rem/yr · 일반주민 100 rem/yr · 수학적 모델을 사용한 개인 risk 평가는 1만년을 초과할 필요가 없다 	<ul style="list-style-type: none"> · 인공방벽 통한 핵종 누출율이 폐쇄 후 1000년 뒤 처분량의 1/10⁶ 이하 · 핵임계에 대한 통제기간 : 1백만년 · 작업자 500 mrem/yr · 일반주민 15 mrem/yr 	<ul style="list-style-type: none"> · 용기표면선량 < 1 Gy/h
수리기준		<ul style="list-style-type: none"> · 지하수면에서 100 m 이상 · 지하수의 가장 빠른 경로를 통한 이동시간 1000년 이상 	

상승하는 효과가 발생하게 된다 (Johansson et al., 1993). 따라서 최대 지반 침하하는 공동 굴착 후 암반에서의 온도가 최대치에 도달하기 전에 일어날 것으로 예상된다. 고준위폐기물에서 발생하는 열에 의해 처분용기 외벽의 온도가 상승하게 되는데 처분장 설계에 따라 최대 온도가 발생하는 시점은 50-400년 사이가 된다 (SKB, 1992b).

다음은 처분장의 설계 단계에서 결정되어야 하는 주요 설계 변수들과 이들의 결정시 고려되어야 하는 것들을 보여주고 있다.

(a) 수직·수평 터널의 수 : 처분터널의 수와 처분공의 수는 처분장에 처분될 폐기물의 양에 의해 결정된다. 처분터널의 길이는 각 처분터널에 설치되는 처분공의 수와 처분공 사이의 간격에 의해 결정이 되는데 이를 결정하기 위해서는 역학적, 열적 해석이 수행되어야 한다.

다.

(b) 굴착방법 및 공정 : 터널의 굴착은 발파 또는 TBM 을 이용하여 수행될 수 있다. 암반의 상태와 처분 방법, 심도 등을 고려하여 기술성, 경제성, 안정성 측면에서 적합한 방법을 선택한다.

(c) 터널의 크기와 길이 및 간격 (수직터널, 경사터널, 수평터널, 처분공 등) : 처분터널과 이동용 터널의 크기는 터널에서의 작업에 사용되는 장비와 방사선 방호를 위한 시설, 통기 시설, 예상 지보 등을 고려해서 결정된다. 처분공의 크기는 처분용기의 크기와 완충재의 두께를 고려해서 결정된다. 수직터널의 경우 사용 목적을 고려하여 크기를 결정한다.

(d) 처분장의 소요 면적 : 처분장의 소요면적은 필요한 터널의 수와 열적, 역학적 안정성을 만족하는 터널간의 간격, 처분장 층수를 고려하여 결정한다. 일반

Table 5. Computer codes for underground nuclear waste repository.

종류	코드명	개요
Heat Transport	ABAQUS	A 3D model of FEM code to simulate the canister and its surrounding rock mass.
	ANSYS	Finite element program to do static, dynamic, thermal analysis (linear and nonlinear) and also steady-state and transient heat transfer analysis with heat generation.
	COBRA-SFS	A code uses an interactive procedure to solve finite-difference equations of mass, momentum, and energy conservation for an interconnected array of channels and structural members. A great deal of flexibility in modeling complex geometries.
	HEATING	A generalized heat conduction program, capable of steady-state or transient problems in one, two, or three dimensions for either Cartesian or cylindrical coordinates. Transient problems are solved by several finite-difference methods such as the classical explicit procedure and Crank-Nicholson finite-difference equations.
Rock Mechanics	ABAQUS	Same as above.
	ANSYS	Same as above.
	VISCOT	A general nonlinear 2D FEM code that analyzes visco-plastic material behavior in a system subjected to mechanical and/or thermal loading.
	FLAC/ FLAC3D	Uncoupled thermo-mechanical finite difference model mainly for mining and civil engineering projects.
	UDEC/ 3DEC	Two-dimensional and three-dimensional distinct element model that analyzes the mechanical, thermal, hydraulic behavior of discontinuum rock mass.
Ground water flow	Connectflow	Combined code of Napsac and Nammu 1) Napsac : Finite element code for groundwater flow and solute transport through fracture network. 2) Nammu : Finite element code for groundwater flow and solute transport in a porous media.
	FRACMAN	Finite element code for groundwater flow and solute transport through fracture network
	TRUST	3D saturated and unsaturated flow with deformation of porous matrix, fractured media, time-dependent boundary conditions and sources, and complex geometry.
Ventilation	VNETPC	Simulation code for ventilation networks such that fan operating points, airflow quantities, and frictional pressure drops approximate those of the actual system. This program can also be used in the designing stage of mine ventilation.
	CLIMSIM	Code for predicting the variation in psychrometric and thermodynamic properties of the air and heat stress indices at chosen intervals along any underground shaft, slope or airway.
Cost analysis	COSTUN	Code for estimating the overall cost for tunnel projects based on tunnel size, rock condition, labor and material cost and other utility costs.

적으로 단층 처분장이 복층 처분장에 비해 비용이 적게 들며 기술적 적용성 측면에서도 유리하다 (Simmons and Baumgartner, 1994).

(e) 배수, 통기 방법 : 자연배수를 위해 터널의 건설시 일정정도의 구배를 주도록 한다. 통기 시스템의 구성에서는 방사능 오염 위험도가 높은 지역에는 낮은 공기압이 그리고 위험도가 낮은 지역에는 높은 압력이 걸리도록 하여 공기가 위험도가 낮은 지역에서 높은 지역으로 흐를 수 있도록 설계한다. 또한 처분장에서 나온 공기는 HEPA를 거쳐서 대기중으로 배출될 수 있도록 한다.

(f) 계측기기의 설치 : 처분장의 건설중과 건설후 각종 계측 기기들을 설치하여 처분장의 변위, 응력변화, 온도분포 등을 측정함으로써 처분장의 안전성과 안정성이 보장될 수 있도록 한다.

(g) 처분용기, 폐석 및 자재의 운반 경로

(h) 터널 지보 : 지보의 종류에 대하여 결정이 되어야

한다. 또한 rock bolt 의 경우 길이, 직경, 종류가 선정되어야 한다. 지하구조물의 안정성을 높이고 불연속면을 통한 지하수의 유동 방지를 위해 실시되는 그라우팅은 비용과 시간이 많이 들며 한번 실시하고 나면 되돌릴 수 없는 작업이기 때문에 설계 단계에서부터 주의가 필요한 작업이다.

6. 처분장 건설

처분부지에 대한 세부적인 부지특성 조사·분석 결과로부터 처분장 건설에 적합한 모양의 크기가 추정되고 이에 따라 지하 처분장 시설의 배치도가 설계된다. 이러한 시설 배치는 지하로 굴착되면서 얻어지는 정보에 따라 수정이 불가피한 경우가 발생된다. 스웨덴의 처분장 개념연구 결과에 따르면 결정질 암층의 주요 파쇄대는 지하 처분장 설계와 위치설정에 많은 영향을 주는

것으로 평가되고 있다. 특히, 처분장의 터널길이의 배열은 처분장 주변의 수평·수직 균열대에 의해서 결정되는 것으로 보고되고 있다(KBS, 1983). 지하 처분장 건설의 첫 단계는 지표면에서부터 원하는 처분지점까지 수직으로 굴착해가는 것이 일반적인데 수직터널을 굴착함으로써 얻을 수 있는 몇 가지 장점은 다음과 같다.

- i) 시추공을 통해서 얻는 것보다 수직터널 건설 도중에 시도되는 여러가지 현장시험을 통하여 더욱 정확한 지질학적, 수리지질학적 정보를 얻을 수 있다.
- ii) 실제적인 현장시험을 통하여 문제가 제기될 수 있는 성능평가 관련 모델들을 검증할 수 있다.
- iii) 처분장 건설 및 운영/폐쇄와 관련된 과학적·공학적인 기술문제를 현장에서 실증할 수 있다. 다른 여러 나라에서는 처분장 부지가 아닌 유사한 처분장 모암층을 대상으로 지하 시험 연구시설을 운영하고 있으나 미국에서는 보다 경제적이고 처분장 성능 평가의 불확실성을 줄이기 위하여 실제 처분장에서 시험하는 방법을 택하고 있다.
- iv) 지표면에서의 시추공 자료를 통하여 추정된 처분장 모암 규모 이상으로 개발할 수 있으며, 처분장 모암을 관통하는 시추공 수를 줄일 수 있기 때문에 지표면까지의 인위적인 방사성물질 이동 경로를 만들지 않는다.
- v) 수직터널에서 수평으로 시추 작업을 수행할 수 있기 때문에 지표면에서 수행되는 시추작업 시 알지 못했던 많은 정보를 얻을 수 있다.

이상과 같이 수직터널 굴착작업으로 얻어진 현장 정보는 더욱 정확한 설계와 안전성평가 및 환경영향평가 등에 입력되며, 이는 인허가 서류작성에 활용된다. 인허가 절차가 완료되면 실제적인 처분장 건설 작업이 진행되는데 처분장 건설에 활용되는 기술은 기존의 광산개발 및 터널공사 등에 활용되고 있는 기술과 거의 유사하다. 일단 계획된 지하처분장 건설이 완료되면 지상에 폐기물 접수 및 포장을 위한 밀봉/포장시설과 처분용기 수송/취급/거치를 위한 보조시설들을 건설하고 필요한 도로나 철도 및 유지보수설비들을 보완하게 된다. 이와 같은 시설들의 운영기간은 폐기물 처분량, 처분장 모암의 크기 등에 따라 다르고 또한 고준위폐기물인 경우에 처분안전성의 이유와 재사용 가능한 핵연료물질 회수를 목적으로 지상으로 다시 회수하는 "retrieval operation" 전략에 따라 다르다. 이는 각국의 전략적 목적에 따라 다른데, 미국의 경우 회수가능 운전기간을 처분용기 거치 후 50년으로 하고 있으며, 캐나다, 스웨덴 등에서는

처분 즉시 밀봉하는 시스템이나 필요시엔 언제든지 다시 회수한다는 원칙을 세워 놓고 있다.

7. 결 론

방사성폐기물 처분장의 부지선정과 개념 및 처분장 설계에 관한 고찰을 통해 얻은 중요한 결론들은 다음과 같다.

- (a) 처분장 부지선정을 위해서는 단계적인 접근방법이 필요하다. 즉 준비단계, 지역조사단계, 부지특성분석단계, 부지확정단계로 나누어 안전성, 기술성, 경제성 등의 요소들을 고려한 최적 부지를 선정할 수 있도록 해야 한다.
- (b) 스웨덴의 처분장 프로젝트의 진행과정에서 볼 수 있듯이 부지선정과 개념선정, 그리고 성능평가 작업은 상호보완적으로 연계되어 진행되어야 한다.
- (c) 지질구조가 복잡한 국가에서는 처분장의 개념 설계시 지질조건의 변화에 유연하게 대처할 수 있도록 하는 것이 필요하다. 처분장에 있어서 지질구조가 미치는 영향이 크기 때문에 국내의 지질 구조특성을 고려한 처분장 부지선정, 개념설계, 건설이 필요하다.
- (d) 국제 공동연구의 필요성. 인허가과정에서의 합의를 이끌어 위해서는 자국의 처분방안이 국제적인 기준을 만족한다는 것을 보여야 한다. 이를 위해 추진되어야 할 많은 연구들을 국제공동연구로 추진함으로써 경제적인 이익뿐 아니라 신뢰도의 향상에 기여할 수 있을 것이다.
- (e) 부지선정을 비롯한 처분장 프로젝트의 경우 처분장의 평가에 민간의 참여를 장려하는 것이 필요하다.
- (f) 향후 한국에서의 고준위폐기물 처분 연구를 위해서는 처분장의 부지선정 및 시설위치, 설계 및 건설과 관련된 기준 선정이 필요하다.

사 사

이 연구는 과학기술부의 원자력연구 개발사업의 일환으로 수행되었음.

참고문헌

1. 고원일 등, 1998, 세계 주요국의 고준위폐기물 처분 개념 및 기술기준, 한국원자력연구소, KAERI/AR-499/98.
2. 권상기 등, 1999, 방사성폐기물 심지층 처분시설 건설을 위한 암석역학의 응용, 암반공학회지, 9(4), 243-259.

3. Berlin, R.E. and Stanton, C.C., 1989, Radioactive waste management, John Wiley & Sons, New York.
4. Boyle and Rowe, 1998, Rock mechanics of the proposed United States nuclear waste repository, Proceedings of the international workshop on the rock mechanics of nuclear waste repositories, Vail, CO, USA.
5. Chapman, N.A. and McKinley, I.G., 1987, The geological disposal of nuclear waste, John Wiley & Sons, NY.
6. Dixon, R.S. Anderson, R.B., Greber, M.A., and Hiller, J.R., 1987, Public consultation in the Canadian nuclear fuel waste management program, Waste management'87, Proc. Of the symp on waste management, Tucson, AZ., 657-660.
7. Eloranta, E., 1996, The international DECOVALEX project for the modelling of coupled Thermo-Hydro-Mechanical processes in a nuclear waste repository, STUK-YTO-TR 113.
8. Fairhurst, C., 1998, Rock mechanics and nuclear waste repositories, Proceedings of the international workshop on the rock mechanics of nuclear waste repositories, Vail, CO, USA.
9. IAEA, 1994, Siting of Geological Disposal Facilities, Safety Series No.111-G-4.1.
10. JNC, 1999, H12 Project to establish technical basis for HLW disposal in Japan, JNC TN400 99-010.
11. Johansson, E. et al., 1993, Rock mass behavior around a nuclear waste repository in hard crystalline rock - Overview based on numerical modelling, Work Report, TEKA-93-02.
12. KBS, 1983, Final storage of spent nuclear fuel-KBS3, Vol.4, Swedish Nuclear Fuel Supply Co.
13. Rempe et al., 1998, Geotechnical perspectives on the Waste Isolation Pilot Plant (WIPP), Proceedings of the international workshop on the rock mechanics of nuclear waste repositories, Vail, CO, USA.
14. Savage, D., 1995, The scientific and regulatory basis for the geological disposal of radioactive waste, John Wiley & Sons, New York.
15. Simmons, G.R. and Baumgartner, P., 1994, The disposal of Canada's nuclear fuel waste: Engineering for a disposal facility, AECL Research, AECL-10715.
16. SKB, 1992a, PASS - Project on Alternative Systems Study. Performance assessment of bentonite clay barrier in three repository concepts: VDH, KBS-3 and VLH, SKB 92-40.
17. SKB, 1992b, Treatment and final disposal of nuclear waste, SKB RD&D Programme 92.