



일본의 고준위폐기물 처분 연구

활 용 수

정회원, 한국원자력연구소

1. 서 론

일본은 1963년 원자력발전을 시작한 이래 1999년 말 현재 총 53 기의 원자력 발전소로부터 전력 생산량의 36%인 43.7 GWe의 발전¹⁾을 하고 있다. 일본에서는 1998년 9월 현재 17,460 MTU의 사용후핵연료가 발생하였는데 이는 500 kg 무게의 유리 고화체 12,600개 분량의 재처리 폐기물 양에 해당된다. 이중 7,100 MTU가 프랑스와 영국에서 재처리되어 이미 1999년 5월 현재 128 용기 분량의 재처리 고준위 폐기물이 일본으로 반입되어 로카쇼무라에 저장 중이고, 또한 940 MTU가 토카이 재처리 공장에서 처리되어 62 개 처분 용기 분의 고준위 폐기물이 발생하였다²⁾. 현재의 계획으로는 JNFL은 로카쇼무라 재처리 공장을 2005년부터 가동할 예정인데 JNFL의 추산으로는 로카쇼무라에서 처리될 1 MTU의 사용후핵연료는 500 kg의 유리 고화체 약 1.25 개를 발생시킬 것으로 예상되어 향후 이들의 안전한 영구 처분의 필요성이 부각되고 있다.

2. 일본의 고준위폐기물 처분 연구 개요

이와 같은 고준위 방사성폐기물 영구 처분을 위한 연구를 일본은 단계적으로 수행하고 있는 바 첫 번째 종합 연구보고서인 H3³⁾가 이미 1992년 제출되었고 2000년에는 두 번째 종합 보고서인 H12⁴⁾가 발간되어 정부의 심의를 받을 예정이다. 일본 AEC는 지난 1997년 4월 향후 고준위 방사성 폐기물 영구 처분 관련 심지층 처분에 관한 기술적 신뢰의 개요를 담은 "Guidelines on Research and Development Relating to Geological Disposal of HLW in Japan⁵⁾"을 제시하였으며 이에 근거하여 2000년 이후 부지 선정 및 규제 방안 관련 계획을 작성할 예정이다.

H12 연구 계획에 따르면 JNC(Japan Nuclear Cycle Development Institute)는 중간 보고서를 1998년 9월에 정부에 제출하여 AEC(Atomic Energy Commission)

Guideline에 의거하여 연구가 진행되고 있는지를 심사 받도록 되어 있다. H12 Guideline에서 AEC는 다음과 같은 3 가지 사항을 중점적으로 연구하도록 권고하고 있다.

- (1) 지질 환경에 대한 평가
- (2) 처분장 설계 및 공학적 기술 연구
- (3) 처분장 종합 성능 평가

2.1 지질 환경에 대한 평가

일본의 경우 환태평양 지진대에 위치한 지질학적 특성으로 인하여 지진 발생 빈도가 높고, 단층 및 화산 운동이 활발하다. 이러한 지질학적 특성이 처분장 전체 안전성에 영향을 미치지 않게하는 처분 개념이 무엇보다도 중요하므로 H12 프로젝트에서는 지진, 단층 및 화산 활동과 같이 단 기간에 국부적으로 일어나는 자연 재해 사건들 뿐 아니라 지반의 상승, 함몰, 기후 및 해수면 변화와 같은 장기간에 걸쳐 일어나는 자연 재해 사건들의 영향을 적극 고려하는 처분 시스템을 개발하도록 권고하고 있다.

2.2 처분장 설계 및 공학적 기술 연구

이러한 자연재해의 영향을 최소화하기 위한 일본 처분 개념은 높은 안전성을 가지고 있는 공학적 방벽을 개발 처분장에 적용하는 것을 근간으로 하고 있다. 이와 같이 공학적 방벽에 의존하는 처분 개념은 처분장 입지 조건을 완화시킬 수 있는 장점이 있어 일본의 지질 인문 사회학적 특성에 맞는 처분 부지를 도출할 수 있다.

일본의 이와 같은 다중 방벽 개념은 현재 일본과 스위스와 같이 지질 조건이 복잡한 국가에서는 처분 안전성을 확보하기 위한 주요 개념으로 자리잡고 있으며 이러한 관점에서 일본의 처분장 안전성 관련 연구도 near field에서의 종합 안전성 확보 및 평가에 초점이 맞추어져 있다.

2.3 처분장 종합 성능 평가

일본에서는 1985년 ICRP(International Committee

for Radiation Protection)가 발표한 개념을 수용하여 미래의 주민들이 받을 개인 선량을 안전성을 가늠할 판단 기준으로 삼고 있다. 이와 같이 선량을 안전성 기준으로 채택할 경우 그 경계치는 0.1-0.3 mSv/yr의 범위일 것으로 일본에서는 판단하고 있다. 또한 일본에서는 부수적으로 다른 나라들과 같이 risk를 안전성 기준으로 채택할 가능성도 있는데 이 경우 기준치는 치명적인 암 발생과 같은 중대한 사고 발생 확률이 10^{-6} 에서 10^{-5} /yr 가 될 것으로 판단된다. 처분장 안전성 평가에서 언제까지 기간을 안전성 평가 대상 기간으로 설정할 것인가는 규제 측면에서 매우 중요한데 일본은 향후 규제 설정을 위하여 미국, 캐나다, 스위스의 경우를 면밀히 검토하고 있다. 이들 세 나라는 다음과 같이 처분장 평가 시간에 관한 다른 접근 방법들을 가지고 있는 바, 향후 우리 나라와 일본은 이들 관점 중 어느 방법을 채택할 것인가에 대한 연구가 필요하다 하겠다.

- (1) 미국 EPA의 접근 방안 : 안전성 평가를 위한 평가 시간을 설정한다
- (2) 캐나다 AECB와 프랑스 DSIN의 접근 방안 : 일정 시간대까지만 선량을 계산하고 그 이후의 시간대에 대해서는 다른 평가 방안을 적용한다
- (3) 스위스 HSK/KSA 의 접근 방안 : 방사성 선량이 최고치에 도달할 때까지 특정 평가 시간대를 설정하지 않고 계속 평가한다

3. 일본 H12 프로젝트에서 지질 환경 연구

H12 Guideline에서는 지질 연구의 주요 목표로 일본에서 심지층 처분의 기술적 신뢰성을 실증하는 것을 제시하고 있다. 이러한 목표 달성을 위해서 AEC는

▶ 심부 지하수 및

▶ 심부 암반 구조에 관한 정보를 심도 1,000m 까지 지하 환경을 대상으로 원위치(In-Situ) 시험으로 축적하는 것이 중요하다는 것을 강조하였다

앞서 기술한 바와 같이 현재 일본에서는 언제까지 기간에 대한 안전성 평가가 이루어져야 하는가에 대한 기준은 설정되어 있지 않으나 현재 H12 연구에서는 대략 100,000 년을 안전성 평가 대상 기간으로 삼고 있다. 현재 일본에서는 1984년과 1994년 AEC에 의해서 제안된 일반(generic) 부지에 대한 연구 진행 권고에 따라 다음과 같은 사항을 대상으로 한 지질 연구가 진행되고

있다.

- ▶ 과거의 지질 기록을 평가하여 심지층 처분 환경에 영향을 미칠 자연 현상을 평가하는 연구
 - ▶ 일본 내 고준위 방사성폐기물 처분이 가능한 지질 환경이 존재한다는 것을 실증하는 연구
 - ▶ 지구 과학, 토목 공학 및 토노와 카마이시 광산에서 얻어진 자료들을 이용한 일본의 처분 환경에 맞는 암반 구조 및 지하수에 관한 일반적인 특성을 요약하는 연구
- 이와 같은 연구 목표 달성을 위해 JNC는 다음과 같은 지질 분야 세부 연구 목표를 설정하였다.

3.1 자연 현상 연구

▶ 단층 활동 연구

- 일본의 활성 단층 연구 과학 및 새로운 지구 구조체 지도 발간 등에 관한 문헌 조사 연구
- 단층 운동이 지질 환경에 미치는 영향 연구

▶ 화산 활동 연구

- 마그마 침투에 따른 공학적 방벽 내구성 평가 및 화산 폭발로 인한 폐기물의 지층 이동 관련 연구
- 마그마의 발열로 인한 지열 증가 연구
- 일본의 화산 활동 분포 규명 연구
- 화산 활동이 주변 지하수 시스템에 미치는 수리 영향 및 화산 개스와 수열(hydro-thermal) 용액과의 혼합으로 인한 pH 감소 등 지화학 환경 변화 연구

이와 같은 주제에 관한 현재까지의 일본의 연구 결과를 요약하면 다음과 같다

- (1) 화산 활동으로 인한 열 및 화학적 영향은 화산의 중심부로부터 약 20 km 거리 이내에서는 뚜렷이 나타난다.
- (2) 화산으로부터 보다 멀리 떨어진 곳에서는 화산 활동으로 인한 지화학 변화는 지하수와 암반의 상호 반응으로 인하여 상쇄된다
- (3) 지화학 완충작용으로 인하여 화산 활동으로 야기될 수 있는 처분장 성능에 악영향을 주는 지화학적 변화는 줄어든다

그러나 특수한 경우에는 20 km 이상 떨어진 곳에서도 현재 처분장에서 주요 기준으로 사용되고 있는 3°C/100m 온도 구배 기준을 초과하는 현상이 존재한다. 현재까지 축적된 일본의 경험으로는 화산 중심으로부터 50 km 이상이고 온도 구배가 3°C/100m 이하일 경우 처분

장 부지 조건으로 적절한 것으로 판단된다.

▶ 침강/융기 연구

현재까지 일본의 연구 결과, 대부분의 지역에서는 지표면 침강과 융기는 0-100m 이내의 범위에서 발생할 것으로 판단된다.

▶ 기후 및 해수면 변화 연구

기후 및 해수면 변화 연구는 일본의 환경이 우리나라와 매우 유사하기 때문에 국내 향후 관련 연구 방향 설정에도 많은 도움을 줄 것으로 예상된다. 신생대 말기 이후 특히 지난 70년 동안 빙하기 및 해수면 변화에 대한 뚜렷한 주기 현상이 관측되었다. 이러한 주기에 영향을 미치는 가장 큰 요인은 태양 복사열의 변화인 것으로 판단된다. 그러나 이러한 복사열 변화는 빙하 맨틀의 팽창이나 수축을 설명하기엔 부적절한 것으로 밝혀졌으며 특히 제 4기 후반 동안에 있었던 100,000년 주기의 기후 변화 주기를 설명할 수 있는 이론 정립이 요구되었다. 기후 변화 등에 따른 해수면 변화는 해안가에 대한 관측과 해저 침전물을 대상으로 한 산소 동위 원소 측정 등을 통한 연구 결과, 지난 350,000년 동안 해수면에서 수 미터 상승 혹은 130 미터 아래까지 하강하는 범위에서 비교적 정적인 상태를 유지해 왔다. 최근의 기후 변화 주기에서는 해수면은 약 20,000년 전 일본 열도 주위에서 현재 해수면보다 약 120m 하강한 최하치를 기록하였다. 그후 해수면은 약 6,000년 전 지금의 수위보다 약 5m 까지 상승하였다. 이와 같은 기후 변화는 온도에도 상당한 영향을 미쳐 해수면이 최근 최저점에 다다른 약 20,000년 전에는 현재의 평균 기온보다 섭씨 8도 하강하였고 해수면이 상승한 약 6,000년 전에는 현재의 평균 온도보다 2-3도 상승하였다. 따라서 빙하기와 간빙기 사이의 온도차는 일본의 경우 약 10도 정도 차이를 나타내었다. 빙하기에는 수증기의 발생이 여의치 않고 태풍의 수도 감소하여 강수량도 지금의 50-70%에 머물러 현재와는 다른 생태계 및 지하수 체계 조건을 가졌을 것으로 추측된다.

기후 변화는 이와 같은 빙하기와 간빙기로 인해 생기는 것만은 아니고 보다 단기간의 영향으로 소위 말하는 Dansgaard-Oeschger 주기가 발생하게 된다. 이 주기는 보통 수 백년에서 수 천년인데, 심할 경우 불과 수 십년 만에 7°C 정도의 온도 변화가 발생했으며, 이 증거로 산소 동위 원소의 분포의 급격한 변화가 관측된다. 이러한 Dansgaard-Oeschger 주기는 주로 대륙 빙하의 일부 붕괴 등의 영향으로 발생되는데 일반적으로 보다 추운 지

방에서 이러한 기후 변화가 자주 발생하는 것으로 알려져 있다. 이와 같은 연구 결과는 특히 매 100,000년 마다 간빙기와 빙하기가 교차한다는 사실을 알려주는데 이와 같은 결과는 향후 100,000년 후에 빙하기가 도래하며 이와 같은 빙하기 도래로 인한 변화 현상을 안전성 평가 시에 반영되어야 한다는 것을 의미한다. 또한 Dansgaard-Oeschger 주기와 온실 효과로 인한 산업 혁명기부터 매 백년마다 지구 온도의 0.5 도씩 상승 현상 등은 부수적인 기후 변화 현상으로 평가에 반영되어야 할 것이다.

이와 같은 기후 변화는 지질 환경에도 영향을 미치는데 빙하기 도래에 따라 동토와 얼어붙은 균열 등이 발생하게 된다. 동토의 경우 지하수 유동을 멈추는 역할을 할 것이며 얼어붙은 균열의 경우에는 여전히 지하수 유동이 가능할 것이다. 이러한 지질 환경의 변화는 지하수 유동 경로를 변화시킬 것이다. 일본의 경우 가장 최근의 빙하기 동안 홋카이도와 일본 본섬의 고산 지대에서 동토 지역이 발생하였다. 만일 평균 기온이 현재의 7도에서 14도 하강한 영하 7도로 떨어질 경우 해발 150 미터 이상 지역은 동토화 할 것으로 예상된다. 그리고 지표면 20 미터까지의 범위에서는 지하수의 응결과 용해로 인한 크래킹 현상이 발달하지만 그 아래 심도에서는 온도 하강으로 인한 영향은 심각하지 않을 것으로 판단된다.

3.2 종합 성능 평가 및 처분장 설계와 관련된 자연 현상 연구

종합 성능 평가 및 처분장 설계와 관련된 지질 환경 인자는 다음 4 가지로 분류할 수 있다

- ▶ 지하수 및 핵종 이동 경로
- ▶ 지하수두 구배
- ▶ 지하수 종류
- ▶ 암반 종류

H12 연구에서는 지하수 및 핵종의 이동 경로를 다음과 같이 구분하였다

- ▶ 암반체내 공극
- ▶ 비활성 단층
- ▶ 단열
- ▶ 층리
- ▶ unconformities

(1) 암반 내 공극, 층리, unconformities

암반 내 공극은 주로 생성 당시의 특징을 유지하고 있으나 그 후의 여러 반응으로 인하여 바뀌기도 한다. 결

정질 암반의 경우 연결된 유효 공극률은 1에서 수%의 범위의 낮은 값을 가지게 되며 퇴적층의 경우 30-40%의 높은 공극률을 가질 수 있다. 일본 토노 우라늄 광산에서의 실험 결과 운모와 진흙 광물과 산화철 광물들은 우라늄이나 이와 유사한 성질의 물질들의 이동을 공극 표면에서 흡착시켜 잘 억제하는 경향을 나타낸다. 또한 암반 내에 층리가 발달할 경우 이 층리를 따라 방사성 핵종들이 유동할 확률이 높아지게 된다. Unconformity는 퇴적층 사이에 발달하는 것이다. 일반적으로 이것은 기반암과 퇴적암 사이에 발달하는데 이러한 지층 구조는 지하수 및 방사성 물질의 이동 경로로 작용하게 된다.

(2) 비활성 단층 및 단열

비활성 단층 및 단열은 암반과 동시에 생성되며 평면적인 특징을 띠고 있다. 때때로 비활성 단층은 지하수의 유동을 방해하는 방벽 역할을 하기도 하는데 이러한 특징은 토노 광산의 Tsukiyoshi 단층에서 잘 나타나 있다. 또한 핵종이나 지하수는 이러한 비활성 단층대에 있는 점토질 물질 때문에 단층대를 가로질러 이동하는데 많은 시간을 요하게 되기도 한다. 카마이시 광산에서의 단열망에 대한 현장 연구 결과 일본의 결정질 암반에서의 투수 계수는 평균 10^{-9} m²/sec, 분포 값으로 10^{-7} 에서 10^{-11} 을 갖는 것으로 판명되었는데 이들의 빈도, dip, dip direction 등에는 매우 많은 변화가 있었다. 또한 단열로부터 주변 암반으로의 matrix 확산을 이해하는 것이 처분 안전성 평가에서 매우 중요한데 카마이시 현장 실험 결과 단열로부터 약 0.01-0.1 m 거리까지 matrix 확산이 일어나는 것으로 밝혀졌다.

3.3 심부 지하수의 특성 규명 연구

H12의 연구 결과 결정질 암반에서는 비균일적으로 지하수 유동이 일어난다는 것이 밝혀졌다. 일반적으로 스웨덴과 유사하게 지하 심부로 들어갈수록 지하수두 구배는 현저하게 감소되었다. 또한 심도가 증가함에 따라 암반의 confining 압력이 증가하고, 이에 따라 투수 계수 값이 감소하였다. 그리고 심도가 깊은 곳에서 출발한 유동 경로의 길이가 그렇지 못한 경우에 비해 일반적으로 길어 안전성이 더욱 확보되었다.

H12 연구 프로젝트에서는 기존의 H3 프로젝트의 연구 결과를 토노와 카마이시 광산에서 현장 검증하는 연구가 활발히 진행되었다. 그러나 H12 연구에도 불구하고 해안 지방에서 발생하는 해수 침투 영향 평가는 앞으로 도 계속 수행해야 되는 연구 과제로 남게되었다.

3.4 심부 지하수의 지하화 특성

H12 프로젝트에서 약 15,000 회의 지하수 화학 관련 문헌 조사가 이루어졌다. H3 프로젝트에서 수행된 지하화 연구 결과물들은 토노에서의 현장 실험들을 통하여 검증되었다. 현장 시험의 결과 토노의 지하 150m 깊이의 퇴적층 내 지하수의 연대는 약 15,000년으로 밝혀졌다. 심도가 깊어질수록 토노퇴적층 내 Si와 Ca²⁺의 값은 감소하고 반면 Na⁺와 HCO³⁻ 값은 증가하여 지하수의 pH가 약 알칼리성으로 변화하게 된다.

이와 같은 반응 결과 일반적으로 지하수는 Eh가 약 -200에서 -300 mV의 환원 분위기를 유지하고 있었다. 또한 지하수의 생성원을 분석하기 위한 현장 연구도 활발히 수행되었으며 해수로부터 기인한 지하수에 관한 연구도 수행되었다. 일본 H12의 연구 결과 일본의 대부분의 지하수는 용존 고체물의 농도가 1000 mg/l 이하인 담수이나 때로는 용존 고체물의 농도가 35,000 까지 올라가는 염수도 일부 관측되었다. 이러한 염수의 경우에는 Na-Cl이 주성분이며 pH는 약 8-10 정도의 분포를 가지고 있으며 Eh의 범위도 담수와 유사하다.

3.5 암반 물성 연구

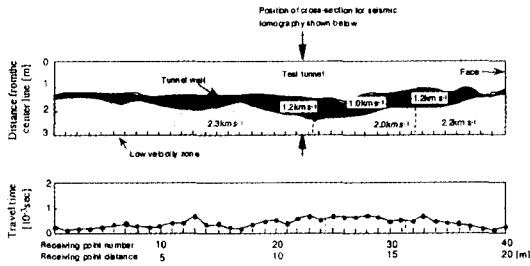
암반의 열적 역학적 특성은 공학적 방벽과 처분 시설 설계 건설에 중요한 영향을 끼친다. 일본에서는 H12 프로젝트에서 퇴적암과 같은 연암과 결정질 암반과 같은 경암을 대상으로한 암반의 물성 특성 규명 연구가 수행되었다. 또한 일본에는 활발한 화산 활동으로 인한 지열 분포의 영향이 중요한 바 이에 관한 연구도 수행되었다.

토노와 카마이시에서 EDZ의 범위가 얼마인가를 규명하는 현장 연구가 수행되었는데 연구 결과 스웨덴 Aspö의 ZEDEX 연구 결과와 유사하게 발파 공법을 사용할 경우 EDZ 범위는 약 1m, TBM 공법으로 굴착할 경우 아주 작은 범위에서만 EDZ가 발생한다고 실측되었다. 그림 1은 토노 광산에서 수행된 EDZ 연구 개요도이다. 또한 앞에서도 지적한 바와 같이 열적 구배는 약 100 m 당 3°C 정도이며 우리 나라와는 달리 수직 수평 응력 비가 심도가 증가할 경우 1의 값을 가지게 된다.

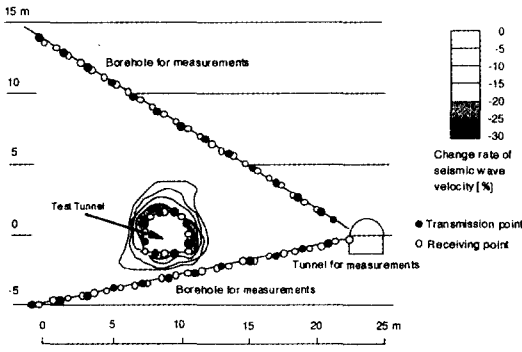
4. 처분장 설계 및 공학 관련 연구

H12 연구에서는

(1) 공학적 방벽 및 처분 시설을 위한 설계 요건을 제시하고



(1) Result of seismic refraction survey



(2) Result of seismic tomography

그림 1. 토노 광산에서의 EDZ 현장 시험 연구

(2) 이러한 시설들이 현재의 공학적 기술 수준에서 요건을 만족한다는 것을 실증하는 것을 처분장 설계 및 공학 관련 연구 분야의 주요 목표로 제시하고 있다. 이러한 관점에서 H12 프로젝트는 공학적 방벽과 처분 시설에 관한 기본 개념 및 각종 처분 요소들에 관한 상세 연구를 진행하고 있다.

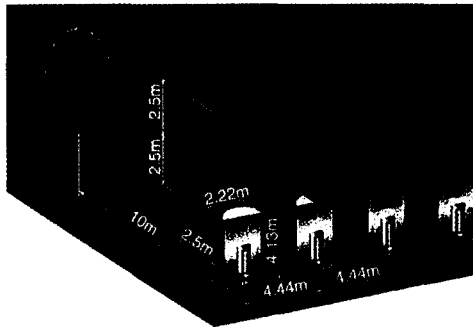
4.1 기본 개념

H12에서 고려하는 공학적 방벽의 개념은 크게 수직 처분 및 수평 처분으로 구분되는 바 그 개요는 그림 2에 잘 도시되어 있다.

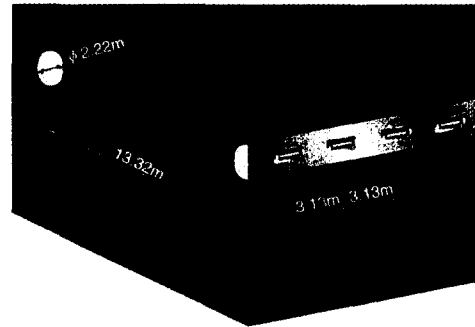
H12 연구에서 고려되는 설계 요건은 크게 아래의 4가지로 대별된다.

▶ 재처리 고준위 폐기물의 열 발생량 및 방사선량과 중간 저장 기간 및 처분 시설 규모 :

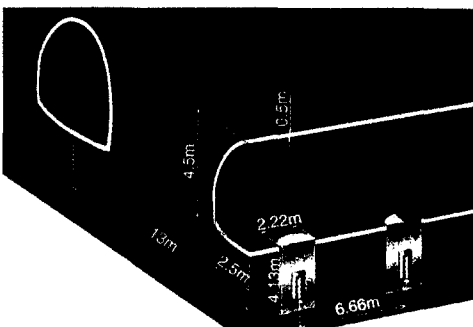
현재 계획에 의하면 일본에서는 약 30-50 년의 중간 저장 기간을 거쳐 2030년에서 2040년대 중반까지 처분장을 건설 운영할 예정이다. 처분 개념 설정에서는 무엇보다도 방사성 붕괴열 이력이 중요한 바 일본에서는 고준위 폐기물의 열 이력을 평가하고 이에 의거하여 단위



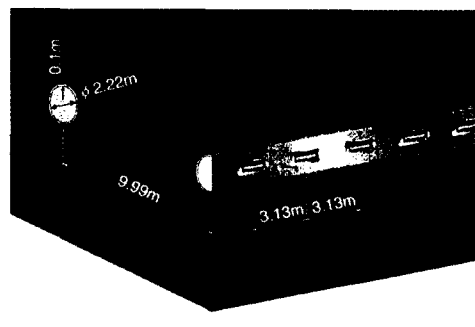
(a) Disposal pit vertical emplacement method (Hard rock)



(b) Disposal tunnel horizontal emplacement method (Hard rock)



(c) Disposal pit vertical emplacement method (Soft rock)



(d) Disposal tunnel horizontal emplacement method (Soft rock)

그림 2. H12 연구에서 고려하는 공학적 방벽 개념

처분 용기 당 열용량을 설정하였다. H12 계산에서는 중간 저장 기간을 50년으로 선정하였는 바 단위 처분 용기 당 열 이력은 350 Watt로 평가되었다.

▶ 지질 변수값들과 지표 지형 조건:

처분 대상 암반의 크기 등은 처분장 위치 선정 뿐 아니라 다층/단층 처분장 개념 선택들에 있어서 매우 중요한 역할을 하고 처분 동굴의 역학적 안정성을 위해서도 단열 암반을 처분 모암으로 선정할 경우 단열망의 방향, 빈도 등이 매우 중요한 역할을 한다. 대부분의 경우 처분 터널의 방향은 구조적 안정성을 확보하기 위해 단열과 직각으로 배치되어야 한다. 또한 지표 지형은 초기 응력 분포와 지하수 유동 속도 및 건설과 수송의 편의성에도 영향을 미치므로 이러한 변수들이 고려된 설계가 수행되어야 한다.

▶ 암반의 물성치:

암반의 물성치는 지하수 유동 측면보다는 설계 건설 등에 영향을 미친다. 일본의 경우 아직 처분 후보부지가 도출되지 않았으므로 특정 암반에 대한 정밀 물성치를 구하는 연구보다는 주요 암반들을 적절하게 몇 가지 그룹으로 분류한 다음 각 그룹별 물성치들의 분포를 파악하는 연구를 수행하고 있다. 전술한 바와 같이 일본에서는 처분 대상 암반으로 경암과 연암을 모두 고려하고 있는데 현재의 H12 연구에서 대상으로 삼고 있는 암반의 종류는 다음과 같다.

◆ 경암

- 산성 결정질 암반
- 염기성 결정질 암반
- 신생대 이전의 퇴적암반

◆ 연암

- 신생대의 퇴적암반

이러한 암반들을 대상으로 다음과 같은 암반 물성치들이 실측되고 있다

◆ 기본적 암반 물성치

- 탄성 계수
- cohesion
- 내부 마찰각
- 전단 강도
- 유효 공극률
- 포화 상태에서의 밀도
- 포와존 계수
- 초기 지압비

- 지진 관련 암반의 동특성 계수

◆ 열 관련 물성치

- 암반의 열 전도도
- 암반의 비열
- 이들과 유효 공극률 등 다른 암반 물성치와의 상관관계

- 주요 지역의 열 구배치

◆ 수리적 물성

- 투수 계수 및 수두 구배

▶ 처분 심도

일본의 처분 심도 결정을 위한 접근 방안은 스웨덴의 KBS-3 개념과 매우 유사하다. 즉 처분 안전성, 경제성, 구조적 안정성 및 지표 지질 조사의 유용성, 자연 재해 영향 범위 등을 종합 고려하여 설정한다. H12에서 연구한 심도와 관련된 특기 사항을 요약하면 다음과 같다.

- 처분 심도를 결정하는 인자의 하나로 지하 공간을 얼마까지 심도로 활용하는가가 고려되어야 한다. H12 프로젝트의 조사 결과 현재 수준에서는 인간은 지하 30-50m 심도까지를 가장 활발하게 이용하고 있고 최대 사용 심도는 100m로 조사되었다. 처분 심도를 결정할 때는 이와 같은 지하 공간 사용으로 처분장 안전성이 훼손되지 않는 범위에서 심도가 결정되어야 하겠다.

- KBS-3 보고서가 지적한대로 처분 심도를 결정하는 주요 요인의 하나로 지하화 조건을 들수 있다. 일본 H12 프로젝트의 수행 결과 토노 광산에서는 퇴적암의 경우 심도 160m 이하에서는 환원 분위기가 유지되었으며 결정질 화강암반의 경우 심도 500-1,000m 범위에서 환원 분위기가 유지된 것으로 실측되었다.

▶ 기타 요구 사항 :

KBS-3 보고서에서 지적한대로 처분 심도 고려 시에는 처분 작업 인력들의 작업 환경도 고려되어야 한다. 현재까지의 지하 공동 작업 경험에 의하면 환기 냉방 시설을 갖춘 경우 지하 온도가 75도 까지 올라가도 작업 수행에 문제가 없는 것으로 알려지고 있다. 따라서 이와 같은 경우 지표 온도를 15도로 가정하고 지열 구배를 백 미터 당 3도씩으로 가정할 경우 심도가 2,000m 까지 내려가도 작업에 지장을 받지 않는다고 H12 연구 결과는 판단하고 있다. 또한 현재까지의 지하 굴착 경험에 의하면 심도 2,200m까지 굴착할 수 있는 기술적 능력이 있다. 이 밖에 구조적 안정성 등을 고려한 H12 프로젝트의 연구

결과 일본의 경우 경암에서의 처분 심도는 1,000m, 연암의 경우 500m로 선정되었다.

4.2 처분 용기, 완충재, 처분 시설의 요건

처분 용기, 완충재, 처분 시설의 개요는 아래와 같다.

(1) 처분 용기

설계 시 고려되는 용기 내 최대 온도는 150 도로 선정되었으며, 용기 재질은 카본 스틸로 선정되었다. 처분 용기는 원통형이며 직경 440 mm 높이 1350 mm 로 설계되었다. 또한 부식 내구성을 가지기 위하여 카본 스틸의 처분 환경에서의 부식 기구가 연구되었는 바 Honda 의 연구 결과에 의하면 카본 스틸의 경우 일본 처분장 조건에서는 국부 부식이 발생하지 않고 균일 부식이 발생할 것으로 예측되었다. 현재 일본에서는 연암 조건에서의 자세한 부식률 예측 연구가 수행되고 있다. 이러한 연구에서 고려되고 있는 주요 부식 현상은 다음과 같다.

- ▶ 용존 산소로 인한 부식
- ▶ 지하수의 환원으로 인한 부식
- ▶ 박테리아로 인한 부식

이러한 기구들을 고려한 단기 시험 결과 부식률은 1,000년 동안 약 23.8 mm 진행될 것으로 예측되었는데 보다 보수적인 입장에서 H12 프로젝트에서는 0.02 mm/yr의 부식률을 설계 요건으로 사용하고 있다. 따라서 1,000년 동안 처분 용기의 기밀성이 유지되기 위해서는 20 mm가 되어야 하고 여기에 공학적 마진을 고려하여 처분 용기의 두께는 40 mm로 결정되었다. 여러 가지 철의 부식에 대한 자연 유사 현상 연구 결과들을 종합한 결과 H12 프로젝트에서는 이와 같은 부식 예측이 충분히 보수적이라고 결론짓고 있으나 보다 확실한 검증을 위해 장기 실험 연구를 추진하고 있다.

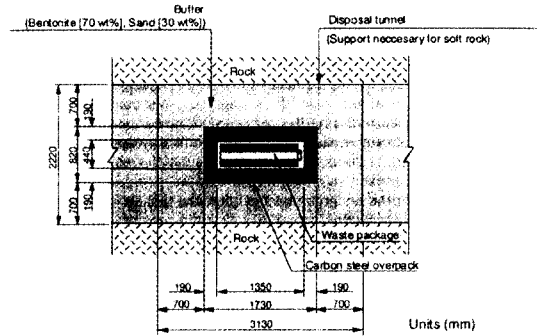
처분 용기를 설계하면서 고려해야 할 주요 사항의 하나가 압력에 대한 용기의 안정성이다. H12 프로젝트에는 경암과 연암에 대해 각기 작용하는 압력들의 원인과 크기를 분석하였다.

이와 같이 부식 내구성 및 압력 내구성과 차폐 효과를 고려하여 H12에서는 처분 용기 두께를 190 mm 로 결정하였다. 그림 3은 이러한 계산 결과 도출된 처분 용기의 개요를 도시한 것이다.

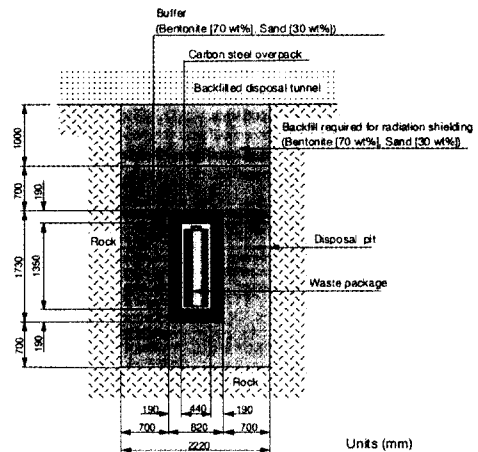
(2) 완충재

일본 H12 프로젝트에서 고려하는 완충재는 아래와 같은 특성을 가져야 한다.

- ▶ 완충재는 높은 팽윤성을 가져야 한다



Tunnel disposal (Hard rock / Soft rock)



Pit disposal (Hard rock / Soft rock)

그림 3. H12 연구에서 도출한 처분 용기 개념

- ▶ 완충재는 아주 낮은 투수성을 가져야 한다
- ▶ 완충재는 높은 핵종 이동 저지능을 가져야 한다.

H12 프로젝트 이전에 수행된 H3 프로젝트에서는 첫 단계 연구로 1.8 g/cm³의 밀도를 갖는 100% 벤토나이트를 대상으로 물성이 규명되었으며, H12 프로젝트에서는 경제성 등을 고려하여 벤토나이트-퀵츠모래 혼합체에 관한 물성 연구가 진행되었다. H12 프로젝트의 완충재에 대한 연구 결과를 요약하면 아래와 같다.

1) 열적 특성

완충재는 방사성 붕괴열을 외부로 전달하기 위하여 좋은 열전도성을 가져야 한다. 밀도 1.6 g/cm³인 30 wt% 퀵츠모래, 7% 지하수 함양 벤토나이트를 대상으로 한 실험에서 열전도도는 0.8W/mK, 비열은 0.5 kJ/kg-K로 나타났다.

2) 수리적 특성

완충재의 수리적 특성은 완충재가 포화 상태인지 불포

화 상태인지에 따라 달라지게 된다.

▶ 포화 상태에서의 수리적 특성

- 연구 결과 포화 상태에서 완충재 내에서의 지하수 유동은 다시(Darcy) 법칙으로 기술될 수 있음이 판명되었다

- 연구 결과 건조 밀도가 낮고 퀴츠모래의 비율이 높을수록 수리 전도도는 높은 값을 가졌다

- 연구 결과 투수 계수의 온도에 대한 변화는 지하수의 밀도와 점성 계수의 변화로 야기되었다.

30 wt%의 퀴츠모래가 혼합될 경우 25도에서 완충재의 수리전도도는 약 4.5×10^{-13} m/sec 로 관측되었다.

▶ 불포화 상태에서 수리적 특성

- 연구 결과 불포화 상태에서는 지하수는 액체와 수증기 상태로 이동한다

3) 역학적 특성

30 wt% 퀴츠모래 혼합 완충재의 주요 역학적 물성치는 다음과 같다.

- unconfined compressive strength: 이 물성치는 물의 함량비의 함수로 아래와 같이 표시된다

$$q_u = 0.99 - 7.28 \times 10^{-2} \omega + 1.84 \times 10^{-3} \omega^2 \text{ [MPa]},$$

- 탄성 계수 $E = 84.34 - 3.74 \omega$ [MPa],

- 전단 응력 $q_t = 1.63 \times 10^{-5} \exp(5.84 \rho_b)$ [MPa], 여기서 ρ_b 는 유효 밀도이다

- 초기 공극률 $\epsilon_0 = 0.68$

- Compression index $C_c = 0.27$

- 팽윤 계수 $C_s = 0.16$

- Critical state 인자 $M = 0.63$

이외에 creep 및 동적 물성 특성 등이 관측되었다.

4) 화학적 특성

완충재는 예견한 바와 같이 중성에서 약 알칼리성을 보여주었고 chemical buffering 능력을 보여주었다.

5) 유동 관련 특성

심부 지하수 온도가 60도 일 경우 공학적 방벽에서의 투수 계수와 우라늄의 걸보기 확산 계수는 Matsumoto 와 Sato에 의해 관측되었다. 또한 완충재에서 콜로이드의 이동 특성이 관측되었는데 일반적으로 고려되는 완충재의 밀도값 범위에서는 콜로이드는 완충재를 관통하지 못하는 것으로 판명되었다. H12에서 사용한 투수계수 기준값은 4.5×10^{-13} m/sec 이다.

6) 팽윤 특성

완충재의 팽윤 특성을 요약하면 아래와 같다

▶ 100% 벤토나이트, 밀도 1.8 g/cm^3 인 경우 : 35

% 팽윤

▶ 30 wt% 퀴츠모래 혼합, 밀도 1.6 g/cm^3 인 경우 : 19% 팽윤

7) 기체 투과성

완충재에서의 가스 투과성에 관한 PNC의 장기 연구 실험 결과 투수계수는 $10^{-18} - 10^{-21} \text{ m}^2$ 인 것으로 판명되었다. 이러한 완충재의 기본 물성과 압력 관련 분석을 통하여 H12에서는 완충재의 두께를 70 cm로 산정하였다. 이와 같은 완충재를 실제 처분장에 설치하기 위한 연구도 활발히 수행되었다. Chijimatsu의 연구에 의하면 약 10 MPa의 압력을 가하면 실험실 조건에서 완충재 블록이 제조될 수 있으며 이 경우 최종적으로 블록의 건조 밀도는 1.92 g/cm^3 이 되고 함유율은 13.6%된다고 판명되었다. 또한 buffer 단일체를 만드는 연구가 FEPCO와 CRIEPI를 중심으로 수행되고 있다.

(3) 처분 시설

지하 처분 시설 배치를 위해서는 먼저 동굴 굴착에 따른 역학적 안정성이 평가되어야 한다. H12에서는 진입 터널, 지하 처분장 내 주 터널 및 연결 터널, 처분 터널, 그리고 처분공의 규격을 수평, 수직 개념에 대하여 각각 경암과 연암에 대하여 설정하였다. 이와 같은 규모의 지하 시설의 구조적 안전성을 평가하기 위하여 H12 프로젝트에서는 Oka가 개발한 해석해에 의한 안정성 평가와 2, 3차원 유한요소법을 이용한 평가를 자세한 수행하였다. 이러한 해석에는 암반 물성치 이외에 심도에 따른 초기 지압비에 관한 자료도 필요한 바 아래 식은 일본 H12 프로젝트에서 사용한 심도에 따른 초기지압비에 관한 공식이다

$$K_0 = 164/h + 0.74 : \text{심도가 } 630\text{m 이하일 경우}$$

$$K_0 = 1.0 : \text{심도가 } 630 \text{ m 이상일 경우}$$

H12 연구에서는 단순한 굴착으로 인한 구조적 안정성 평가 뿐 아니라 지진 발생으로 인한 영향 평가도 수행하였다. 이상과 같은 연구 결과 일본 H12 프로젝트에서는 처분 용기 당 사용후핵연료 집합체 수와 열 이력, 핵종별 재고량, 용기의 재질, 두께, 규격, 벤토나이트의 재질 및 규격, 터널 크기 및 간격 등을 결정하였다. 이와 같은 자료들을 고려하여 그림 4에 도시된 처분장 개념을 개발하였으며 이와 같은 처분 개념을 실제화하기 위한 건설 방안, 처분 용기 거치 방안, 공학적 방벽 거치 방안, 운영 폐쇄 방안 등을 자세하게 마련하였다.

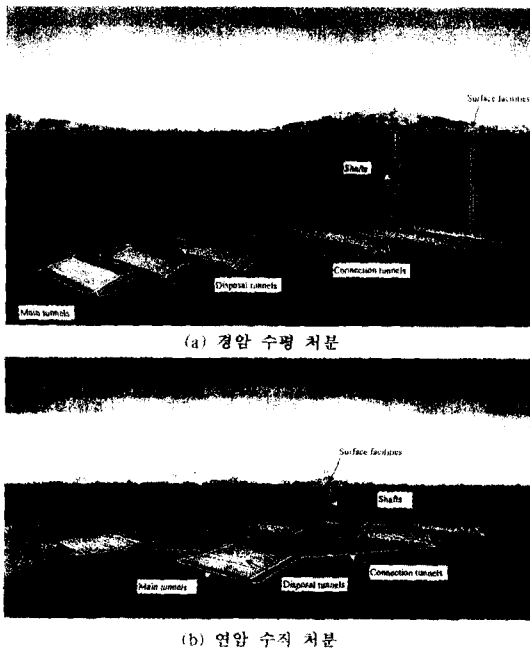


그림 4. H12 연구에서 개발한 일본 고준위 폐기물 처분장 개념

5. 처분장 성능 평가

일본 H12 프로젝트에서의 성능 평가 연구의 목표는 아래와 같다.

▶ 현재까지 개발된 처분 개념에 대한 처분 안전성 관련 시나리오가 안전성 평가에 충분한 신뢰감을 줄 수 있게 상세하게 개발되어야 하며 특히 일본에서 강조하고 있는 near-field 안전성 확보 여부를 판단하기 위하여 이 지역에서의 지하수 유동, 지화학, 암반 역학에 관한 평가가 고도의 신뢰성있는 입력자료를 이용하여 수행되어야 한다.

▶ 이와 함께 천연 방벽에서의 지하수 유동을 보다 정확히 이해할 수 있는 연구가 진행되어야 한다

▶ 또한 생태계에 관한 연구가 진행되어 처분 성능 평가의 결과가 주민에 대한 선량으로 표시되어야 한다.

일본 H12에서의 처분장 안전성 평가 방안은 처분장 개념 연구, 수리 연구, 지화학 연구의 결과물들이 종합 안전성 평가에 입력되어 처분 개념의 안전성을 규명하도록 되어 있다. 지금부터는 처분장 안전성 평가 관련 세부 연구 사항에 관하여 살펴보겠다.

5.1 처분 안전성 시나리오 개발 연구

일본의 시나리오 관련 연구는 OECD/NEA의 시나리오

오 관련 연구의 방향을 모방한 것으로 현재 우리 나라의 연구와 비슷한 접근 방법을 취하고 있는 것으로 판단된다. H12 프로젝트에서 제시한 시나리오 개발 방안의 개요를 살펴보면 다음과 같다.

▶ 일본의 심지층 처분 개념의 목적과 업무 범위에 맞게 개발된 처분 시스템의 성능을 종합 평가하기 위한 총괄적인 FEP 목록을 준비한다 : 현재 일본에서는 PNC와 CRIEPI/FEPC가 독자적으로 FEP 목록을 개발하고 있다.

▶ 가능한 모든 경우를 포함하도록 하면서 FEP 목록의 내용을 반복하여 선별한다 : 위에서 작성된 FEP들은 아래의 4 가지 조건에 의해 선별적으로 걸러진다.

- 만일 적절한 부지가 선정될 경우 별다른 영향을 주지 못하는 FEP들은 선별 삭제한다

- 만일 적절한 설계가 이루어질 경우 별다른 영향을 주지 못하는 FEP들은 선별 삭제된다

- 발생 확률이 낮은 FEP들은 선별 삭제된다

- 발생시 영향이 적은 FEP들은 선별 삭제된다

이러한 선별 과정에서 남은 FEP들은 다음 단계에서 시나리오로 조합된다.

▶ FEP들간의 상호 반응을 고려하여 시나리오를 작성한다.

일본 H12 연구에서는 선별된 시나리오를 조합하여 기준 시나리오로 지하수를 통한 유동 시나리오를 작성하였고

- (1) 마그마의 처분장으로의 직접 침입
- (2) 인간 침입
- (3) 폭성 충돌

과 같은 기타 대안 시나리오들도 작성하였다. H12에서는 이와 같은 시나리오 개발 결과를 스웨덴, 핀란드의 연구에서 흔히 사용하는 influence diagram으로 표시하였다.

▶ 또한 안전성 평가를 위해 일본 지질 환경의 다양성, 처분 요소들에 관한 여러 설계 대안, 미래에 발생 가능한 처분장을 둘러싼 여러 가지 사건들과 관계된 불확실성, 처분장 진화에 따라 발생하는 평가 모델의 한계, 평가 모델 입력치에 존재하는 불확실성 등 다양한 요인들을 고려하여 다음과 같은 절차를 거쳐 평가 대상 경우들을 선정하였다.

- (1) 기준 처분 안전성 평가 방안 선정

H12 연구에서는 기준 처분 개념 설계 방안에 대해 지하수 유동을 통한 정상적인 핵종 이동 시나리오를 기준 처분 안전성 평가 방안으로 선정하였는데 이러한 개념은 앞 장에서 기술한 KBS-3의 Central Case 시나리오와

매우 유사하다.

(2) 입력 단계에서 평가 방안 선정

H12 연구에서는 입력치의 불확실성을 충분히 인정하고 이를 고려하기 위하여 입력 인자들의 민감도 평가 방안을 준비하였다

(3) 모델 선정 단계에서 평가 방안 선정

처분장의 장기 안전성을 평가하는데는 어떤 특정한 종합 안전성 평가 모델로는 평가할 수 없는 부분이 생기게 되는 바 H12 연구에서는 평가 모델 선정 단계에서 이러한 점을 인지하고 특이 사건들을 개별 평가할 수 있도록 하였다.

(4) 처분 시스템 선정 단계에서 평가 방안 선정

여러 가지 처분 개념 설계에 따라 지질 환경 등 처분 대상물이 달라지게 되므로 이에 관한 준비를 H12 연구에서는 고려하였다.

(5) 처분 안전성 관련 시나리오 선정 단계에서 평가 방안 선정

정상 시나리오를 선정하는가 혹은 지반의 용기/침강, 기 후/해수면의 변화와 같은 자연 재해 시나리오를 선정하는가, 혹은 용기의 초기 파손 시나리오를 선정하는가, 인간 침입 시나리오를 선정하는가에 따라 평가 방안이 달라진다.

5.2 기준 처분 안전성 평가 시나리오 선정

전술한 바와 같이 지하수 침입과 이로 인한 핵종 유출 시나리오는 H12 프로젝트에서 선정한 기준 시나리오다. 이에 관하여 보다 자세히 기술하면 다음과 같다.

▶ 처분장으로 침투한 지하수는 뒷채움재를 포화시킨 후 차츰 완충재도 포화시킨다.

▶ 카본 스틸로 만들어진 처분 용기는 1,000 년간 건전성이 유지되어 Cs-137, Sr-90 과 같이 비교적 단반감기 핵종을 현저히 붕괴시킨다.

▶ 먼저 산소가 포함된 부식 반응과 이후 산소와 연계되지 않는 부식 반응으로 인하여 처분 용기는 건전성을 상실하게 되며 이에 따라 지하수가 처분 용기 내부로 침투하여 유리 고화체와 접촉하여 지하수가 점진적으로 유리 고화체와 그 속에 함유된 핵종들을 용해시켜 외부로 유출시킨다. 이때 유리 고화체는 제조 과정에서의 냉각 현상으로 말미암아 균열들이 많이 존재하게 되어 유리 고화체의 용해가 용이하다고 가정한다.

▶ 완충재는 처분 용기가 건전성을 상실하기 이전 완전 포화 상태에 도달하여 균일한 다공 물질로서의 특징을 띄게되며 완충재의 팽윤으로 완충재와 주변 암반은

밀착되게 된다.

▶ 완충재 내부는 수리전도도가 매우 낮아 확산이 물질 이동의 유일한 기구로서 활약한다. 완충재 내부에서 콜로이드, 고분자량을 가진 미생물 등은 모두 여과되어 외부로 이동하지 않는다.

▶ 침투 지하수는 원래 환원 상태였는데 처분 용기, 완충재와 반응한 이후에도 계속 환원 상태를 유지한다. 침투 지하수는 방사능으로 인하여 분해되어 산소를 발생시키나 이러한 산소는 곧 소진되거나 그 영향은 처분 용기 극히 가까운 곳으로 제한된다.

▶ 완충재를 통과하는 핵종들은 완충재의 큰 흡착능력에 의해 이동 속도가 현저히 감소하게 된다.

▶ 완충재 외부에는 발파로 인한 굴착 영향 지역이 조성되어 낮은 유동 속도를 가진 지하수가 존재하게 되어 이로 인하여 이 부근에서 초기에는 방사성 핵종 농도가 낮아지게 된다.

▶ 천연 방벽으로 유출된 핵종들은 단열망을 따라 이류와 분산으로 이동하면서 주변 암반으로 확산 침투하며 흡착을 경험하게 된다.

▶ 위와 같은 과정을 거쳐 이동하는 핵종의 농도는 지중 이동 시간이 길어 방사성 붕괴의 영향으로 상당히 저감된다.

▶ 이러한 평가에서 완충재 내 최고 온도는 100°C 를 넘지 않아 완충재의 상 변화에 따른 영향은 고려되지 않는다.

▶ 암반 내 지하수 유동이 늦어 침식이 일어나지 않으며 이로 인한 완충재의 밀도가 낮아지는 일은 발생하지 않는다.

▶ 처분 용기의 부식으로 발생하는 수소 개스는 부식 속도가 낮아 주변 완충재 내 압력을 상승시킬 정도로 작용하지 않으며 부식으로 인한 부피 팽창은 처분장 주변 방벽들의 안전성 관련 성능들을 저감시키지 않는다.

5.3 평가 대상 경우 선정

앞서 기술한 대로 상기의 기준 시나리오와 대안 시나리오들에 대한 평가 대상 경우들이 H12 연구에서 선정되었다. 또한 공학적 방벽, 천연 방벽, 생태계에 존재하는 불확실성을 고려하기 위한 평가 대상들이 고려되었다.

5.4 처분 안전성 평가를 위한 평가 모델 및 입력 자료

(1) 공학적 방벽에서의 평가

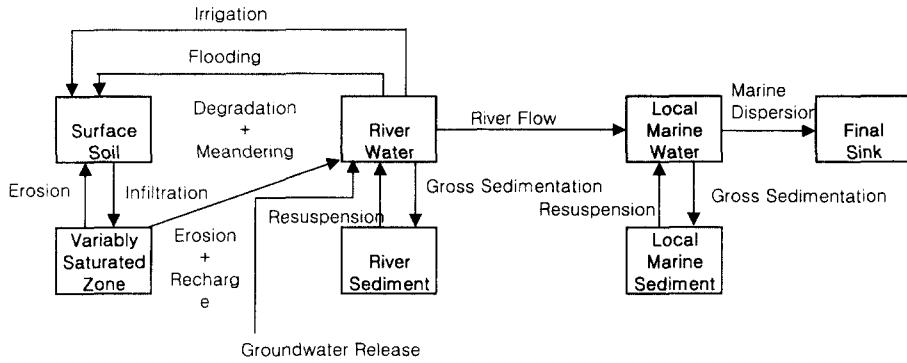


그림 5. H12 연구에서 고려된 생태계 경로

H12 프로젝트에서는 공학적 방벽 내 핵종 이동을 모사하기 위하여 유한 요소 수치 해석 코드인 MESHNOTE를 사용하고 있는 바 이 코드는 다른 코드들과의 비교 연구를 통하여 검증되었다.

(2) 천연 방벽에서의 평가

H12 프로젝트에서 천연 방벽에서의 안전성 평가를 위해 사용한 주요 가정은 다음과 같다.

- ▶ 처분장은 활성 단층 및 주요 단층으로부터 최소한 100m 이상 떨어져 있다.
- ▶ 평가의 편의성을 위하여 처분장을 벗어난 방사성 핵종들은 100m 떨어진 큰 단열으로 이동하고 단층을 따라 800m 상승하여 퇴적층을 만나고 다시 이를 최단 거리로 이동하여 생태계에 도달하게 된다.
- ▶ 처분장은 지하 1,000 미터에 위치하며 이러한 심도에서의 온도는 섭씨 45도라고 가정한다.
- ▶ 천이적인 처분장의 역학적, 수리지질학적, 화학적 변화는 고려되지 않는다.
- ▶ 암반은 화강암이며 지하수는 환원 분위기에서 염기성을 띤 담수이다.

H12에서는 단열에서의 이동을 MATRICS라는 1차원 평판 단열 평판 모델로 해석하였다.

(3) 생태계 평가

H12 프로젝트에서는 IAEA BIOMASS 공동 연구 프로젝트에서 개발한 기준 생태계 개념을 적용하여 대수층으로 도달한 모든 핵종들은 흡착되지 않고 강으로 유입된다고 가정하였다. 이렇게 생태계로 유입된 핵종들은 그림 5에 도시된 경로를 따라 이동하게 되는 바 최종적으로 주민에게는 3 가지 경로를 따라 도달하게 된다.

이렇게 최종적으로 주민이 받는 피폭 선량을 계산하기 위하여 H12에서는 QuantiSci가 개발한 AMBER 코드를

사용하였고 섭생 관련 데이터들은 일본 국내 연구로 다른 데이터들은 문헌 조사 및 외국 자료들을 활용하였다.

6. 결 론

일본에서 현재 AEC Guideline에 의거하여 수행되고 있는 H12 프로젝트의 개요를 살펴보았다. 일본의 처분 개념 연구 및 안전성 연구의 방향은 국내의 연구 방향과 매우 유사하다. 다만 일본의 연구는 기존에 H3 프로젝트가 수행되었고 또한 장기간에 걸친 Stripa 및 Aspo 프로젝트의 참여, 또한 일본 내 활발한 지하 암반에 대한 다방면의 연구 등을 통하여 세부 연구 내용이 훨씬 구체적이고 지수문 관련 데이터의 축적이 상당히 앞섰으며 화산, 지질 활동이 활발하며 인구 밀도가 높은 일본 고유의 인문사회 지질학적 측면을 살린 경암과 연암에 대하여 각기 다른 처분 개념을 제시한 것은 높이 살만하다. 일본은 우리나라와 같이 아직 구체적인 기술기준과 처분 후보 부지를 가지지 못하고 있으므로 일본의 연구 현황을 잘 파악하여 우리의 연구 계획을 수정 보완하는 것이 바람직하겠다.

사 사

본 논문은 과학기술부 국가 원자력중장기 개발사업 기금으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

1. IAEA, "IAEA Bulletin", 41. 4, 1999.
2. Atomic Energy Commission of Japan, "Long-term

- Program for Development and Utilization of Nuclear Energy", in Japanese, 1994.
3. Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation, "Research and Development on Geological Disposal of High-Level Radioactive Waste: First Progress Report", PNC TN 1410 93-059, 1992.
 4. Japan Nuclear Cycle Development Institute, "H12 Project to Establish Technical Basis for HLW Disposal in Japan, Project Overview Report", JNC TM 1400 99-010, 1999.
 5. Advisory Committee on Nuclear Fuel Backend Policy, The Atomic Energy Commission of Japan, "Guidelines on Research and Development Relating to Geological Disposal of High-Level Radioactive Waste in Japan", 1997.



황 용 수

1983년 서울대학교 공과대학, 공학
사
1985년 캘리포니아대학교 공과대학,
공학석사
1992년 캘리포니아대학교 공과대학,
공학박사

Tel : 042-868-2034

E-mail : ucbne28@kaeri.re.kr

현 재 한국원자력연구소 선임연구원
