

심지층 처분시설 설계를 위한 처분터널 및 처분공 간격 분석

Analysis of the Disposal Tunnel Spacing and Disposal Pit Pitch for the HLW Repository Design

이종열, 김성기, 김진웅, 최종원, 한필수
한국원자력연구소

요 약

본 연구에서는 고준위 방사성폐기물 심지층 처분시설의 규모 및 layout 설정에 필요한 요소인 처분터널 및 처분공 간격에 대한 분석을 수행하였다. 이를 위하여, 기존 처분개념 및 공학적 방벽 개념을 바탕으로 처분터널 및 처분공 단면을 설정하고, 단층 및 복층 개념에 따른 처분동굴의 구조적, 열적 안정성을 분석하였다. 분석 결과를 바탕으로 설계에 있어서 주요한 인자 중의 하나인 굴착량을 최소화할 수 있는 처분동굴 및 처분공 간격을 제안하였다. 향후, 부지에 대한 불확실성을 줄이기 위하여 정확한 부지특성 자료를 통한 상세한 분석이 필요하다.

Abstract

In this study, analysis of the disposal tunnel spacing and disposal pit pitch was carried out, as a factor of the design to estimate the scale and layout of the repository. To do this, based on the reference repository concept and the engineered barrier concept, the cross section of the disposal tunnel and disposal pit are established and the mechanical and thermal stabilities of the tunnels are analyzed. Also, the optimized disposal tunnel spacing and the disposal pit pitch which minimize the excavation volume was proposed. The detailed analyses by the exact site characteristics data are needed to reduce the uncertainty of the site in the future.

1. 서 론

고준위 방사성폐기물 처분의 목표는 일정 기간동안 인간 생활권으로부터 고준위폐기물을 완전 격리하는 것이며, 이러한 목표를 달성하기 위하여 우리나라를 비롯한 세계 각 국에서 심지층 처분시스템 개발 연구가 활발하게 진행되고 있다. 고준위폐기물은 핵연료주기에 따라 다르게 표현될 수 있는데, 사용후핵연료 재활용주기의 경우 고준위폐기물은 사용후핵연료를 재처리하는 과정에서 발생하는 악티나이드/핵분열 생성물 등을 함유하는 폐기물을 말하며, 직접 처분주기의 경우는 사용후핵연료 자체가 처분대상 고준위폐기물이 된다.

본 연구에서는 방사선원항 및 열원항 관점에서 보다 보수적인 것으로 판단되는 사용후핵연료를 처분대상으로 고려하여, 이를 심지층에 처분할 경우 시설 규모 및 lay-out 개념을 추정하기 위한 처분터널 및 처분공의 간격을 설정하였으며, 이에 필요한 근거 자료를 얻기 위하여, 지하 터널의

구조적, 열적 안정성 분석을 수행하였다. 분석에 필요한 자료로는, 기준 처분개념 및 공학적 방벽 개념에 따라 지하시설 각 터널에 대한 단면을 설정하고 단층 또는 복층 처분개념을 도입한 처분 터널 및 처분공 간격을 설정하여 분석의 입력자료로 활용하였다. 또한, 분석된 결과를 바탕으로 하여 지하시설 설계 주요인자 중의 하나인 경제성 관점에서 굴착량을 최소화하는 처분터널 및 처분공 간격을 제안하였다.

2. 기준 처분 개념 및 터널 단면 설정

2.1 기준처분 및 공학적 방벽 개념

지하 처분시설 배치개념 설정시 폐기물 거치 간격과 터널 간격을 적절하게 조합하는 것이 필요하며, 그림 1.은 처분 터널의 사양 및 폐기물 포장물 거치 간격을 결정하는 절차를 나타내고 있다.

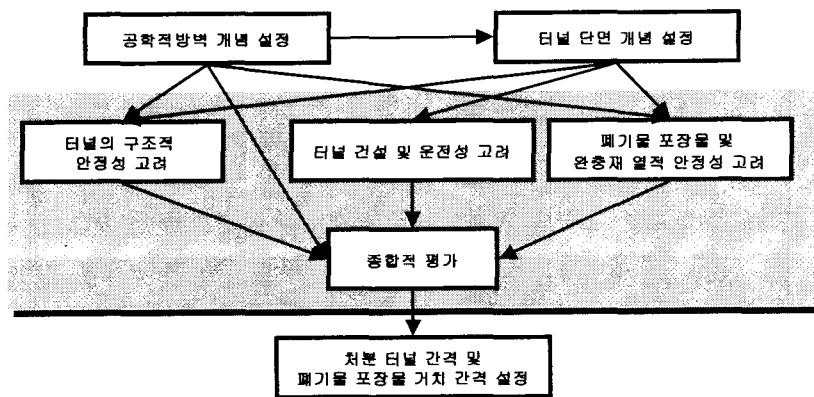


그림 1. 처분터널 사양 및 폐기물 포장물 거치 간격 결정절차

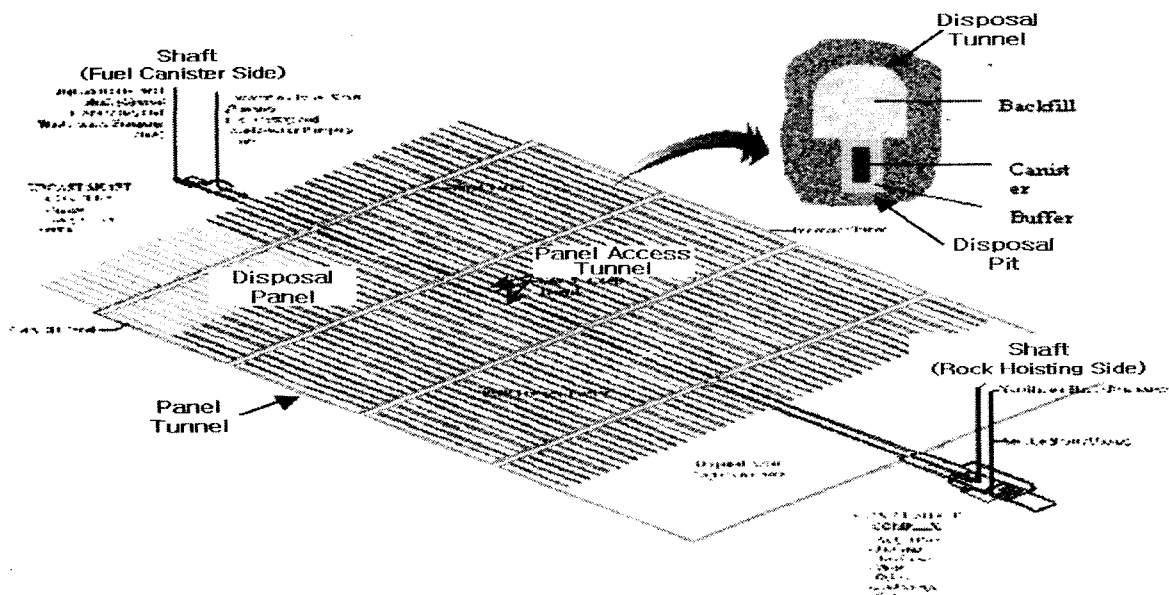


그림 2. 기준 처분시스템 및 공학적 방벽 개념

처분 터널 간격과 폐기물 포장물 거치 간격은 처분 터널 또는 처분 피트의 단면을 근거로 설정

되며, 형상과 규모는 공학적 방벽 개념을 고려하여야 한다. 그림 2.는 사용후핵연료 심지층처분을 위한 기준 처분개념을 나타내고 있으며, 진입 샤프트, 접근 터널, 파넬터널, 처분터널 및 처분공으로 구성된다. 또한, 공학적 방벽 개념은 그림에서 보여주는 바와 같이 처분용기, 버퍼물질, 되메움물질 등으로 구성된다.

2.2. 터널 단면 설정

지하 처분시설은 수행하는 기능에 따라 접근터널, 파넬터널, 처분 터널 및 처분 피트로 구성되며, 각 터널의 단면은 형상과 요구되는 기능을 수행하기 위해 필요한 크기로 구성된다. 터널 형상에 영향을 주는 인자는 구조적 안정성, 건설/운전/폐쇄 용이성 및 경제성이다. 다음 요건이 고려되어야 한다.

- 구조적 안정성 : 지하시설 굴착은 구조적으로 안정하고 굴착으로 인한 변형이 최소화 하도록 하여야 함.
- 작업용이성 : 건설, 운전 및 폐쇄가 안전하고 용이하게 수행되어야 함.
- 경제성 : 요구되는 단면은 굴착량을 가능한한 최소화하도록 하여야 함.

표 1은 지하처분시설을 구성하는 터널별 기능 및 크기를 나타내며, 그림 3.은 위의 요건을 고려하여 설정한 처분 터널의 단면 예를 나타내고 있다.

표 1. 처분시설 터널별 기능 및 크기

구 분	기능	Size	비 고
진입 샤프트	지상시설에서 지하시설로의 진입 (폐기물, 버력, 작업자, 환기 등)	3 m(Φ) ~ 6 m(Φ)	
접근 터널	처분 파넬로의 접근	7 m(W) x 7 m(H)	
파넬 터널	처분 파넬 주변 터널	6 m(W) x 7 m(H)	
처분 터널	처분공이 굴착되는	5 m(W) x 6 m(H)	
처분 피트	사용후핵연료가 정치되는 처분공	2.22 m(Φ) x 6.837 m(H)	

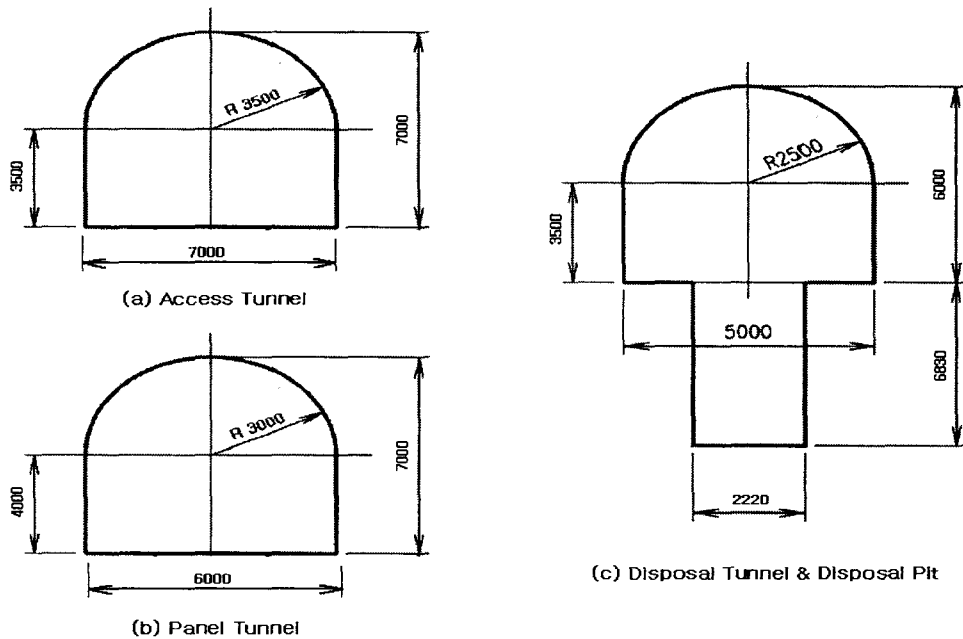


그림 3. 처분시설 주요터널 형상 및 단면

3. 폐기물 당 점유면적 및 구조적/열적 안정성 분석

3.1. 폐기물 당 점유면적

폐기물 거치 간격과 터널 간격의 적절한 조합에 필요한 분석 및 처분시설 규모 추정을 위하여, 그림 4.에서 보여주는 바와 같이 터널 간격과 폐기물 거치 간격간의 면적을 고려한 폐기물 포장물 당 점유면적 개념을 설정하였다. 고준위폐기물 처분을 위한 지하시설의 개략적인 규모는 폐기물 당 점유면적과 처분될 총 폐기물 포장물의 수를 곱하여 추정할 수 있다. 또한, 개략적인 처분 터널의 총 길이는 처분될 폐기물 포장물의 수와 폐기물 포장물 거치 간격의 곱으로 추산이 가능하다. 경제성 관점에서 볼 때, 지하 처분시설의 면적을 최소화 할 수 있도록 처분 터널 간격과 폐기물 포장물 거치 간격을 설정하는 것이 바람직하다.

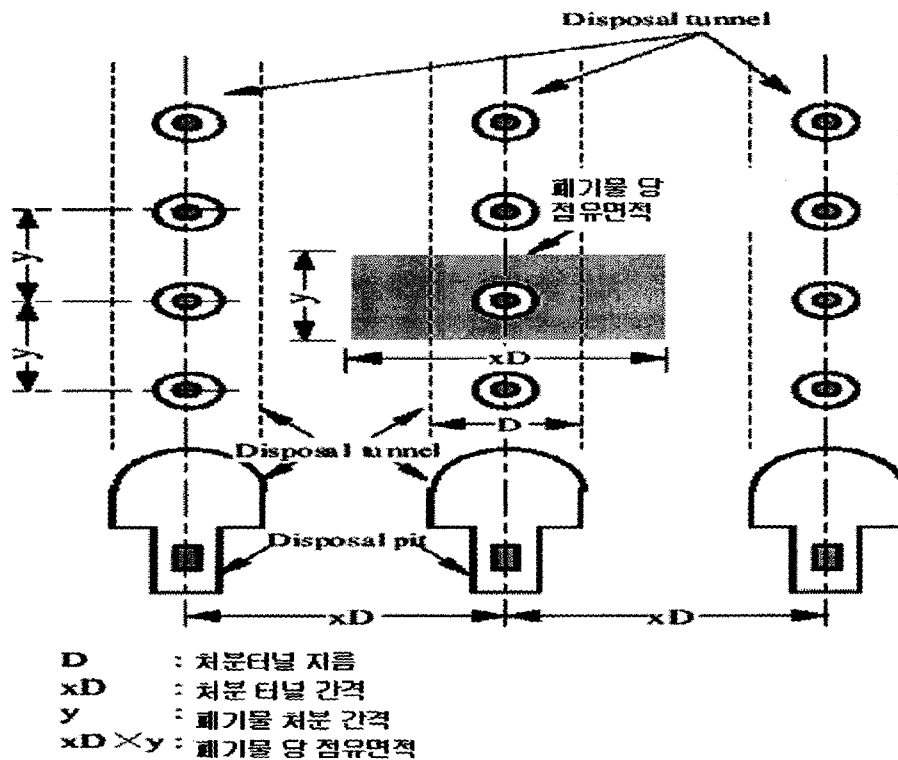


그림 4. 폐기물 당 점유면적 개념

지하 처분시설 면적을 최소화하기 위한 적절한 터널 간격과 폐기물 거치 간격의 조합은 터널의 구조적 안정성에 대한 분석뿐만 아니라 열적 안정성 등 다양한 분석 결과를 고려하여야 한다. 공학적 방벽의 사양, 터널 건설 및 처분시설 운전 기술 등은 이러한 조합 결정에 제한 사항을 주는 인자이며, 이러한 인자에 대한 철저한 분석이 필요하다. 그러나, 가장 중요하고 민감한 요소는 고준위폐기물로부터 발생되는 붕괴열에 의한 완충재의 온도를 100 °C 이하로 유지하여야 하는 것이다.

버퍼물질의 최대온도가 100 °C 이하가 되도록 하는 폐기물 포장물 거치 및 처분터널 간격 분석에 필요한 연구를 수행하였으며, 사용후핵연료의 붕괴열 방출에 의한 시간 변화에 따른 공학적 방벽 및 주변 암반의 온도변화에 대한 분석을 수행하였다. 처분 터널과 포장물 거치 간격의 다양한 조합 및 단층배열과 복층배열을 고려하여 구조적 안정성과 열적 안정성을 분석하였다.

3.2 처분 터널 및 처분공 간격에 따른 구조적, 열적 안정성 분석

처분 터널의 배치는 단층 배치와 복층 배치를 고려하여 다음 4가지 경우에 대한 구조적, 열적 안정성을 분석하여, 각 경우에서의 구조적 안정성이 유지되고 버퍼의 열적 요건과 일치하는 적절한 처분터널 간격 및 처분 피트 간격을 정하였다.

3.2.1 단층 배열

단층 배열의 경우 기준 처분시스템에서 고려하고 있는 처분 터널간격 40 m 와 처분공 간격 6 m를 기준으로 분석하였으며, 아래 표에서 나타내고 있는 바와 같이 처분심도에 관계없이 요건에 만족됨을 알 수 있었다.

표 2. 단층 배열의 경우 분석

처분터널 및 처분공 간격	처분심도 (m)	최대온도 (°C)	최대응력 (MPa)	비고
처분터널간격 : 40 m 처분 공 간격 : 6 m	200	72.6	-59.1	요건 만족
	300	75.6	-64.5	요건 만족
	400	78.6	-68.7	요건 만족
	500	81.6	-73.8	요건 만족

3.2.2 복층 배열

처분 부지의 조건에 따라, 단층으로 배열이 불가능한 경우 처분 심도를 달리한 복층배열을 고려하여 처분부지 면적을 최소화 할 필요가 있다. 복층배열은 다양하게 수행할 수가 있으며, 본 연구에서는 다음과 같은 경우에 대해 분석하였다.

- 심도 500 m에 처분 후 일정기간이 지난 뒤 심도 400 m에 처분하는 경우
- 심도 400 m에 처분 후 일정기간이 지난 뒤 심도 500 m에 처분하는 경우

심도 500 m에 사용후핵연료를 처분한 후 약 30년이 지난 후 심도 400 m에 처분하는 경우 처분 터널 간격을 40 m로 설정하면 구조적 열적 안정성 요건을 만족시키기 위해서는 처분공 간격을 최소 8 m로 하여야 한다. 그리고, 이 경우에 있어서 처분 터널간격을 30 m 로 설정하면, 요건을 만족시키기 위한 최소 처분공 간격은 10 m가 된다(표 3).

표 3. 복층 배열(지하 2층 처분 후 지하 1층 처분개념)의 경우 분석

처분터널 간격(m)	처분공 간격(m)	최대온도(°C)	최대응력(MPa)	비고
40	6	111.0	-106.6	온도/응력 초과
40	8	91.6	-92.5	요건 만족
30	9	97.3	-108.4	온도/응력 초과
30	10	91.8	-91.8	요건 만족

심도 400 m에 처분한 다음 일정기간이 지난 후 심도 500 m에 처분하게 되는 경우에는 처분 터널간격을 40 m로 설정하면, 처분공 간격이 10 m 이상이 되어야 하며, 표 4에 보이는 바와 같이 이때의 지하층간 간격이 50 m 인 경우에 요건에 만족하게 된다.

표 4. 복층 배열(지하 1층 처분 후 지하 2층 처분개념)의 경우 분석

처분터널 및 처분공 간격	처분장 층간 간격(m)	최대온도(°C)	최대응력(MPa)	비고
처분터널 : 40 m 처분 공 : 10 m	50	93.7	-92.0	요건 만족
	100	95.0	-91.3	온도 초과
	150	99.0	-126.5	온도/응력 초과

4. 굴착량 비교

구조적, 열적 안정성에 대해 수행한 해석 결과에 따라 처분 터널 및 처분공 간격은 단층 배열인 경우 각각 40 m와 6 m(A)가 적절한 것으로 판단된다. 그리고, 복층 배열의 경우 지하 2층 처분 후 지하 1층 처분인 경우 층간 간격이 100 m (지하 2층-500m, 지하 1층-400m)로 설정하면, 처분 터널과 처분공 간격은 각각 40 m 와 8 m(B), 30 m와 10 m(C)일 때 구조적 열적 안정성 요건에 만족하게 된다. 또한, 지하 1층에 먼저 처분하고 지하 2층에 처분하는 경우는 층간 간격을 50 m로 설정하고, 처분터널과 처분공 간격을 각각 40 m와 10 m(D)일 때, 요건에 만족한다.

이상에서 도출된 처분터널과 처분공 간격의 조합에 대하여, 주요한 설계인자인 경제성 관점에서 평가를 위하여 굴착량을 산출하였으며, 표 5.에 나타낸 바와 같다. 산출된 굴착량 총량은 조합된 각각의 처분 동굴 및 처분공 간격에 대한 접근터널, 파넬터널 및 처분터널에 대한 굴착량을 산출한 것이다. 처분 파넬은 정사각 형태를 가진다고 가정하였으며, 폐기물 량은 사용후핵연료 36,000 tHM을 기준으로 한 처분용기 수인 15,000 개를 기준으로 하였다.

표 5. 각 경우별 폐기물당 점유면적 및 굴착량

구 분	Disposal Tunnel Spacing (m)	Disposal Pit Pitch (m)	Occupied area (m ² /Wase package)	Excavation Volume (x 1,000 m ³)
A(단층배열)	40	6	240	2,500 (0.61)
B(지하 2층 후 1층배열)	40	8	320	3,290 (0.81)
C(지하 2층 후 1층배열)	30	10	300	4,020 (0.98)
D(지하 1층 후 2층 배열)	40	10	400	4,070 (1.00)

표 5에 나타난 바와 같이 구조적, 열적 안정성 요건을 만족하는 처분 터널과 처분공 간격의 조합에 대하여, 경제성 측면인 굴착량을 기준으로 하였을 경우 단층 배열일 때는 40 m와 6 m로, 복층 배열일 때는 지하 2층에 먼저 처분하고 지하 1층에 처분하는 것이 바람직하며, 이 경우 처분 터널과 처분공 간격은 각각 40 m와 8 m로 설정하는 것이 경제성 측면에서 바람직할 것으로 판단된다.

5. 결론 및 향후 계획

본 연구에서는 사용후핵연료를 대상으로 하는 고준위 방사성폐기물 심지층 처분시설의 규모 및

layout 설정에 필요한 요소인 처분터널 및 처분공 간격에 대한 분석을 수행하였다. 이를 위하여, 기존 처분개념 및 공학적 방벽 개념을 바탕으로 터널 형상 및 단면 설정에 영향을 주는 인자를 고려하여 처분터널 및 처분공 단면을 설정하고, 단층 배열 및 복층 배열 개념에 따른 처분동굴의 구조적, 열적 안정성을 분석하였다. 또한, 분석 결과를 바탕으로 설계에 있어서 주요한 인자 중의 하나인 경제성 측면에서, 굴착량을 최소화할 수 있는 처분동굴 및 처분공 간격을 제안하였다. 향후, 부지에 대한 불확실성을 줄이기 위하여 정확한 부지특성 자료를 통한 상세한 분석이 필요하다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력중장기 연구개발사업의 일환으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

1. JNC, H12 Project to Establish Technical Basis for HLW Disposal in Japan, Japan Nuclear Cycle Development Institute, (1999).
2. 최종원 등 "Reference Spent Fuel and Its Characteristics for a Deep Geological Repository Concept Development," J. KNS, Vol.31. No.6 (Dec. 1999).
3. 최종원 등 "고준위폐기물 심지층 처분시스템 예비 개념 선정을 위한 기술성 평가," 한국원자력연구소, KAERI/TR-1361/99, 1999.
4. 강철형 등 "심지층 처분시스템 개발," 한국원자력연구소, KAERI/RR-2336/2002, 2003.
5. T. Kukkola, T. Saanio, J. Choi, C. Kang, "KAERI's spent fuel repository Design evaluation and cost estimation," Posiva Oy, R&D Report 2003-02.