

## Analysis of the Disposal Tunnel and Disposal Pit Spacing for the Spent Fuel Repository Layout

### 사용후핵연료 지하 처분장 배치를 위한 처분공 및 처분터널 간격 분석

Jong-Youl Lee, Yang Lee, Heui-Joo Choi and Jong-Won Choi

Korea Atomic Energy Research Institute, 150 Duckjin-dong, Yuseong-gu, Daejeon

[njylee@kaeri.re.kr](mailto:njylee@kaeri.re.kr)

이종열, 이 양, 최희주, 최종원

한국원자력연구소, 대전광역시 유성구 덕진동 150번지

(Received July 14, 2006 / Approved August 10, 2006)

#### Abstract

In design of a deep geological repository for the high level wastes, it is very important that the temperature of the bentonite block should not be over 100 °C to maintain the integrity of the bentonite buffer block from the decay heat. In this study, for the layout of the repository to meet the requirement, the analysis of the disposal tunnel and disposal pit spacing was carried out. To do this, based on the reference repository concept, several cases of cooling times and disposal tunnel and disposal pit spacing were compared. The thermal stabilities of the disposal systems were analyzed in terms of the cooling time and spacing. The results showed that it was more desirable to determine the layout of the repository in terms of disposal pit spacing than the disposal tunnel spacing. The results of these analyses can be used in the deep geological repository design. The detailed analyses with the exact site characteristics data will reduce the uncertainty of the results.

**Key words** : Spent Fuel, HLW, Deep Geological Disposal, Repository Layout, Buffer Block, Thermal Stability, Disposal Tunnel/Disposal Pit Spacing

#### 요 약

고준위폐기물 심지층 처분장 설계시 주요한 고려인자는 완충재의 건전성 유지를 위하여 폐기물로부터 발생하는 열로 인하여 완충재의 온도가 100 °C를 넘지 않도록 하는 것이다. 본 연구에서는 이러한 요건을 만족하는 고준위폐기물 심지층 처분장 배치를 위하여 처분터널 및 처분공 간격에 대한 분석을 수행하였다. 이를 위하여, 기준 처분개념을 바탕으로 사용후핵연료의 냉각

기간 및 처분터널/처분공 간격을 다양하게 설정하여, 처분시스템에서의 열적 안정성 해석 및 결과를 비교분석하였다. 분석결과, 처분장 열적 요건을 만족하는 배치는 처분터널의 간격 보다는 처분공 간격을 조절하여 배치하는 것이 유리한 것으로 판단되었다. 본 연구의 결과는 심지층 처분시설 설계시 활용될 것이다. 향후, 정확한 부지특성 자료를 통한 상세한 분석이 수행되면, 분석결과와 불확실성을 줄일 것이다.

**중심단어 :** 사용후핵연료, 고준위폐기물, 심지층 처분, 지하처분시설 배치, 처분터널/처분공 간격

## I. 서론

고준위폐기물 처분은 방사성물질에 의한 인간의 피폭을 가능한 한 최소한으로 낮출 수 있도록 일정 기간 동안 인간 생활권으로부터 고준위폐기물을 완전 격리시키고, 누출된 방사성물질이 인간환경으로 도달하는 것을 최대한 지연시키도록 하는 것이다. 이러한 목표를 달성하기 위하여 고준위폐기물은 일반적으로 지하 수 백 미터의 건전한 암반에 처분하는 것이 가장 안전한 방법으로 고려되고 있으며, 우리나라를 비롯한 세계 각 국에서 이러한 심지층 처분시스템 개발 연구가 활발하게 진행되고 있다[1].

고준위폐기물은 핵연료주기에 따라 다르게 표현될 수 있는데, 사용후핵연료 재활용주기의 경우 고준위폐기물은 사용후핵연료를 재처리하는 과정에서 발생하는 악티나이드/핵분열 생성물 등을 함유하는 폐기물로서 주로 유리 고화체 형태로 만들어 처분하며, 직접 처분주기의 경우는 사용후핵연료 자체가 처분대상 고준위폐기물이 된다.

이러한 고준위폐기물 심지층 처분을 위한 배치분석과 관련하여 다양한 연구가 수행되고 있다. 고준위폐기물을 유리화시켜 처분할 계획인 일본은 경암과 연암으로 구분하여 구조적 건전성 및 완충재 최고온도 제한치에 따른 다양한 처분터널/처분공 간격을 설정하여 굴착량 분석에 의한 최적 배치방안을 제안한 바 있다[2]. 또한, 스웨덴, 핀란드에서는 유사한 연구를 수행하여 처분터널과 처분공 간격을 설정하고 있으며[3, 4], 수평처분 개념을 설정한 캐나다의 경우 CANDU 사용후핵연료의 냉각기간에 따라 처분터널과 처분용기 간격을 설정하고 처분장에서의 단위 면

적당 열하중, 우라늄 밀도 등을 분석하여 최적의 조건을 도출하기 위한 연구가 수행되었다[5].

현재까지 우리나라는 사용후핵연료에 대한 재활용이나 직접처분과 같은 정책결정이 지연된 상태이지만, 본 연구에서는 사용후핵연료를 처분대상 고준위폐기물로 고려하여 이를 심지층에 처분할 경우 처분 시스템 및 layout 개념을 설정하고 이의 최적 방안을 도출하기 위하여 처분할 시점에 있어서의 사용후핵연료 냉각기간과 처분터널/처분공 간격과의 관계를 분석하였다. 이를 위하여 처분장에 대한 열해석을 통하여 사용후핵연료 냉각기간에 따라 처분공에 설치된 완충재의 온도 제한치를 넘지 않도록 하는 조건을 만족하는 다양한 처분공 및 처분터널 간격을 도출하였다. 또한, 이의 열해석 결과를 분석하여 사용후핵연료 냉각기간과 처분터널 간격/처분공 간격에 있어서의 상관관계를 다양하게 검토하였으며, 지하 처분장 면적 최적화를 위한 방안을 도출하였다.

## II. 처분 시스템 개념

### 가. 다중방벽 개념

사용후핵연료를 생태계로부터 안전하게 격리시키기 위하여 심지층에 처분하는 방식은 자연암반으로 구성된 자연방벽 뿐만 아니라 사용후핵연료를 담고 있는 금속용기, 완충재와 같은 공학적 방벽에 의해서도 핵종 이동이 지연되도록 하기 위한 다중방벽 시스템을 고려하고 있다.

자연방벽은 어떠한 경우에도 방사성물질을 영구히 생태계로부터 격리시켜 처분된 방사성물질에 의한 방사선피폭으로부터 생태계의 안전성을 유지시

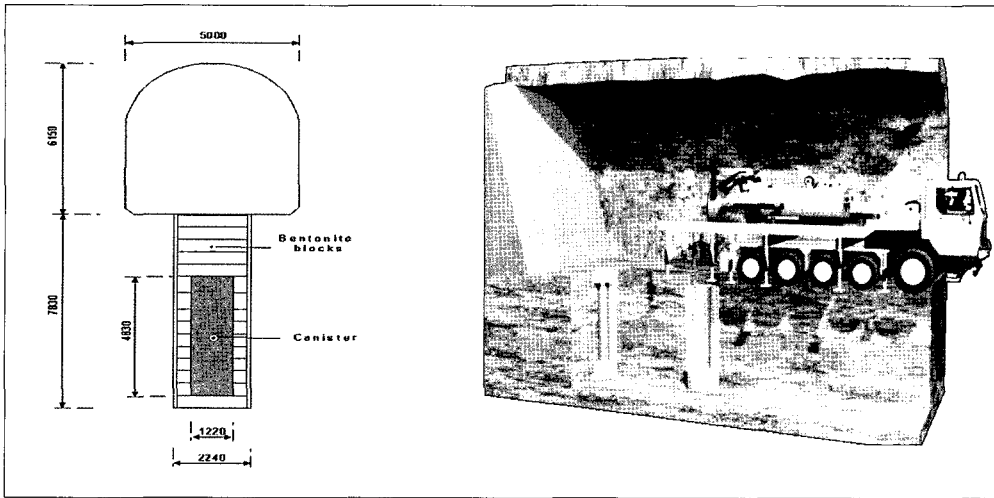


Fig. 1. The concept of the engineered barrier and the disposal tunnel.

킬 수 있어야 하겠지만, 자연계가 지니고 있는 비균질성과 불확실성이 상존하고 있기 때문에 안전성을 신뢰할 수 없는 단점이 있다. 따라서 안전성에 대한 확고한 신뢰를 구축하기 위하여 공학적 방벽 개념을 도입하고 있으며, 이는 처분대상이 되는 사용후핵연료 또는 고준위폐기물, 처분용기, 완충재, 뒷채움재 등으로 구성(Fig. 1)된다[6].

공학적 방벽의 구성요소로 처분용기를 둘러싸고 있는 완충재는 처분용기를 보호하고 핵종의 이동을 지연시켜야 하는데, 이를 위해 완충재는 수리전도도와 핵종의 이동성이 암반보다 작아야 하며, 온도는 100℃ 이하로 유지되도록 열전도도가 커야 한다. 이러한 완충재의 온도요건은 지하 처분구역배치에 있어서 주요한 제한요건이 된다.

처분시스템은 이러한 자연방벽과 공학적 방벽 구성요소들의 일련의 조합으로서, 취급의 용이성, 처분장 운영의 효율성과 안전성, 주변 암반과 연계된 상태에서의 구조적 안정성 등을 포용할 수 있도록 이 구성요소들을 최적화하여야 한다.

## 나. 처분장 구성요소 및 배치

### ① 단위 처분면적

처분공 간격과 처분터널 간격의 적절한 조합에 필요한 분석 및 처분시설 규모 추정을 위하여, Fig. 2에서 보여주는 바와 같이 처분터널 간격과 처분공 간격 간

의 면적을 고려한 단위 처분면적 개념을 설정하였다.

따라서 고준위폐기물 처분을 위한 지하시설의 개략적인 규모는 단위 처분면적과 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 최소화할 수 있도록 처분 터널 간격과 처분공 간격을 설정하는 것이 바람직하다.

### ② 처분장 구성요소

지하 처분시설은 수행하는 기능에 따라 접근터널, 파넬 터널, 처분 터널 및 처분 공으로 구성되며, 각 터널의 단면 형상 및 배치는 해당 기능을 수행하기 위해 필요한 요건을 만족시키도록 하여야 한다[7]. 터널 형상 및 배치에 영향을 주는 인자는 구조적 안정

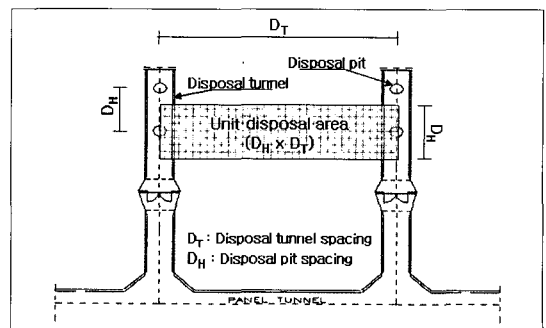


Fig. 2. The unit disposal area.

**Table 1. The function and size of the tunnels in the underground repository.**

Items	Functions	Size
Access tunnel & Shafts	To access from surface facilities to underground facilities (Canister/Construction/Personnel/Ventilation, etc)	4 m( $\phi$ ) ~ 6 m( $\phi$ )
Central Tunnel	To connect the access tunnel & shafts between controlled area and uncontrolled area and the panel tunnel	7 m(W) x 8.4 m(H)
Panel Tunnel	To connect the disposal tunnels & the central tunnel	6 m(W) x 7.6 m(H)
Disposal Tunnel	To excavate the disposal pit for emplacement of the disposal canister in the disposal tunnel	5 m(W) x 6 m(H)
Disposal Pit	To emplace the disposal canister & the buffer block into the vertical pit in the disposal tunnel	2.0 m( $\phi$ ) x 7.8 m(H)

성, 건설/운전/폐쇄 용이성 및 경제성으로서, 다음 요건이 고려되어야 한다.

- 구조적 안정성 : 터널 굴착은 구조적으로 안정하고 굴착으로 인한 변형이 최소화하도록 하여야 함.
- 작업용이성 : 건설, 운전 및 폐쇄가 안전하고 용이하게 수행되어야 함.
- 경제성 : 요구되는 단면 및 배치는 굴착량을 가능한 한 최소화하도록 하여야 함.

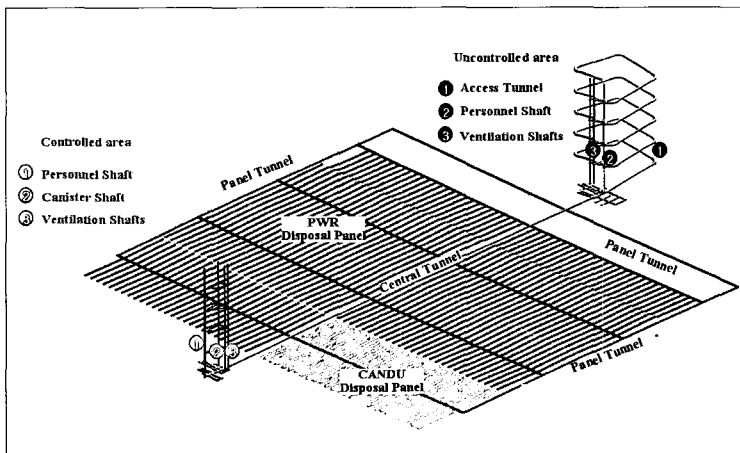
Table 1은 지하처분시설을 구성하는 터널별 기능 및 크기를 나타내며, Fig. 3은 위의 요건을 고려하여 설정한 처분시설 주요 터널에 대한 개념적인 배치를 나타내고 있다[8].

### Ⅲ. 처분 시스템 열 해석

#### 가. 해석 모델

사용후핵연료 지하 처분장에 대한 열적 안정성 분석을 위한 모델은 처분장 배치에서 다수의 처분터널과 처분공이 동일 간격으로 나란하게 배치되어 있으므로 3차원의 1/4모델을 이용하였으며, 해석모델의 기하학적 형상은 Fig. 4에 나타낸 바와 같다. 그림에서 보는 바와 같이 모델 상하부 수평경계는 방사성 붕괴열에 의한 영향이 미치지 않도록 충분한 거리인 처분용기 중심으로부터 상하 500 m를 고려하였다[9, 10].

또한, 처분공 주변에 영향을 미치는 방사성붕괴열



**Fig. 3. The layout concept of the underground repository.**

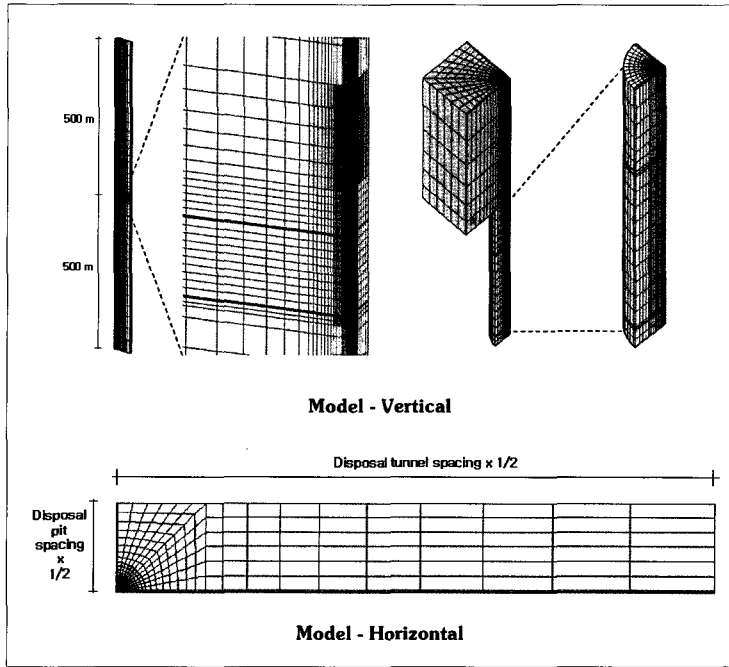


Fig. 4. The repository model for the heat analysis.

(w/tHM) P(t)는 사용후핵연료 냉각기간에 따른 붕괴 열 이력에 따라 다음 식으로 표현된다[11].

$$P(t)=14548.7t^{-0.76204} \quad (30 \leq t \leq 10^6)$$

#### 나. 초기/경계조건 및 입력 물성

처분장 열해석을 위한 본 해석의 대칭적 모델에 따른 경계조건은 해석모델의 양쪽 수직 경계면과 바닥은 단열 경계로 설정하였으며, 온도 분포는 지표 하 지하수대의 온도를 15 ℃로 가정하여 이를 기준으로 지하 100 m 깊이마다 3 ℃씩 상승하는 것으로 초기조건을 설정하였다[12].

또한, 본 해석에서 사용한 암반, 완충재, 뒷채움재 및 처분용기의 물리적 특성은 Table 2에 나타난 바와 같으며, 컴퓨터 해석코드는 NISA ver. 12의 heat module을 이용하여 해석을 수행하였다.

#### IV. 냉각기간에 따른 해석 결과 및 분석

열해석은 사용후핵연료 냉각기간 30, 40, 50년 각각에 대하여 완충재 블록의 온도요건을 충족하는 처

분터널과 처분공간격을 설정하여 해석을 수행하였다. Fig. 6은 해석 결과의 예로서 사용후핵연료에서 발생된 열이 전도되어 일정 시간이 흐른 후 나타난 처분터널 주변의 열 분포를 나타내며, 수직방향으로는 처분터널과 처분공에서의 열 분포를 나타낸다.

냉각기간 및 처분공/처분터널 간격에 따른 해석 결과는 Table 3과 Fig. 7에 나타난 바와 같으며, 냉각기간에 따라, 그리고 처분공 간격에 따라 최고 온도에 도달하는 시간 및 온도 변화에 있어서의 차이를 나타내었다[10]. 즉, 냉각기간 40년인 사용후핵연료를 처분하는 경우, 최고 온도에 도달하는 시간은 처분 후 12년 정도로 냉각기간 30년에 있어서의 처분 후 3년인 경우보다 늦어지고, 시간에 따른 처분장의

Table 2. The material properties for the analysis.

Items	Density (kg/ m <sup>3</sup> )	Thermal Conductivity (W/m <sup>2</sup> ℃=J/s/m <sup>2</sup> ℃)	Specific Heat (J/kg <sup>2</sup> ℃)
Spent fuel	2,000	0.135	2,640
Cast insert	7,200	52	504
Outer shell	8,900	386	383
Buffer	1,970	1.0	1,380
Backfill	2,270	2	1,190
Rock	2,650	3.2	815

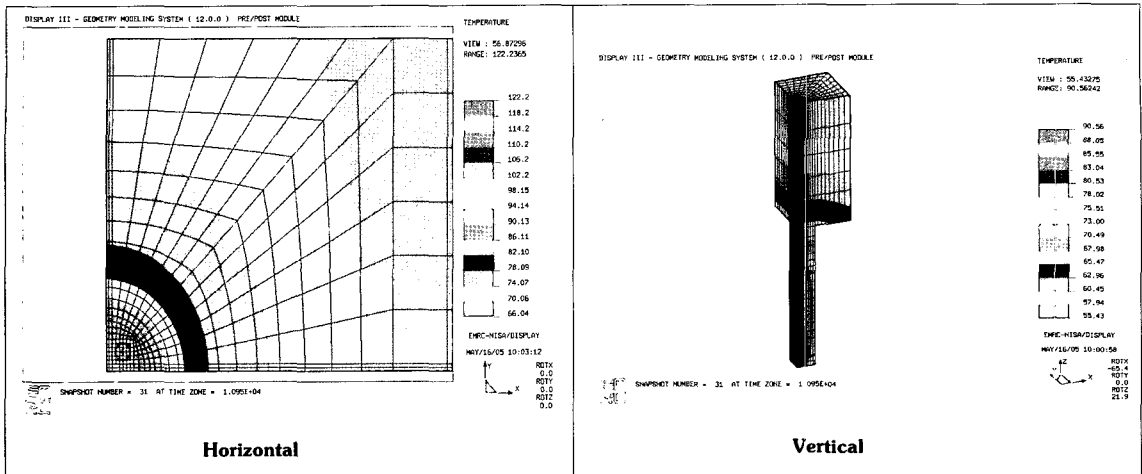


Fig. 6. An example of the heat analysis results.

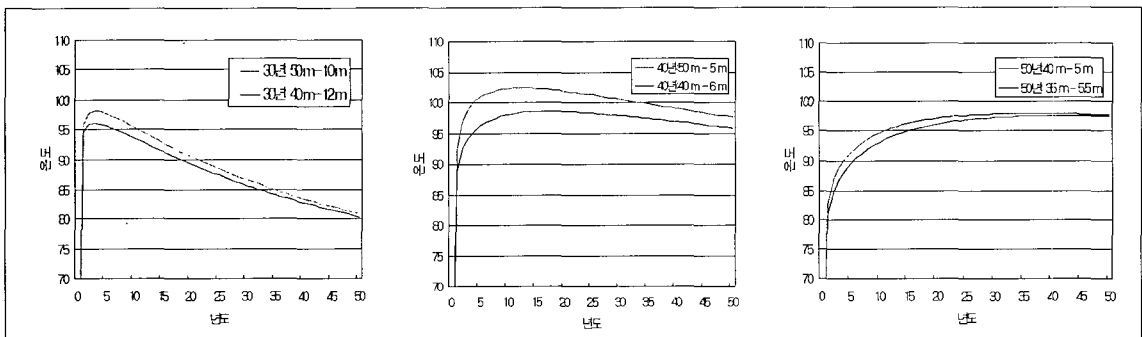


Fig. 7. History of the buffer temperature in the disposal system according to the cooling time.

온도 하강 속도도 완만하였다. 처분공 간격에 있어서는 냉각기간 40년인 사용후핵연료를 처분하는 경우 처분공 간격이 5 m이면 처분 후 12년경에, 처분공 간격이 6 m이면 처분 후 16년경에 최고온도에 도달하

게 되며, 냉각기간 50년인 사용후핵연료를 처분하는 경우 처분공 간격이 5 m 이면 처분 후 36년경에, 처분공 간격이 5.5 이면 처분 후 43년에 최고온도에 도달하는 것으로 나타났다.

Table 3. The results of the heat analyses according to the cooling time and disposal tunnel/disposal pit spacing.

Cooling Time (yrs.)	Disposal tunnel spacing (m)	Disposal pit spacing (m)	Unit disposal area (m <sup>2</sup> )	Maximum temp. (°C)	Time with maximum temp. (yrs.)
30	50	10	500	98.1	3
	40	12	480	96.1	3
40	50	5	250	102.35	12
	40	6	240	98.6	16
50	40	5	200	97.98	36
	35	5.5	192.5	97.65	43

그리고 처분터널과 처분공간격이 50 m, 5 m로 단위 처분면적 250 m<sup>2</sup>인 경우보다 각 간격이 40 m, 6 m로 단위 처분면적 240 m<sup>2</sup>인 경우가 단위 처분면적이 작음에도 최고온도는 낮게 나타났다. 이는 처분장의 온도변화가 처분터널의 간격에 의한 영향보다 처분공 간격에 의한 영향이 크기 때문인 것으로 판단된다. 전체 처분용량 36,000 tHM의 고준위폐기물을 고려할 경우, 처분구역의 면적과 굴착량은 처분터널과 처분공간격이 50 m, 5 m인 경우 350 만 m<sup>2</sup>, 278 만 m<sup>2</sup>과 40 m, 6 m인 경우 336 만 m<sup>2</sup>, 284 만 m<sup>2</sup>으로 나타났다. 즉, 처분터널 간격을 조절하는 것 보다는 처

분공을 우선적으로 조절하여 배치하는 것이 경제적 측면에서도 유리할 것으로 생각된다.

## V. 결론 및 향후 계획

본 연구에서는 사용후핵연료를 대상으로 하는 고준위폐기물 심지층 처분시설의 규모 및 layout 설정을 위하여 다양한 사용후핵연료 냉각기간 및 처분터널/처분공 간격을 설정하고, 처분시스템에 대한 열적 안전성을 분석하였다. 그리고 그 결과를 이용하여 상기 요소 간 상호 미치는 영향을 검토하고, 안정성 및 경제적 측면에서 유리한 layout 설정방안을 도출하였으며, 그 내용은 다음에 기술한 바와 같다.

- 사용후핵연료의 냉각기간이 짧을수록 처분공 간격이 좁을수록 처분장에서 허용된 범위의 최고 온도에 이르는 시간이 빠르다.

- 사용후핵연료의 냉각기간이 길수록 처분장에서 온도가 떨어지는 속도는 완만해진다.

- 처분장에서의 허용 온도 조건을 만족하도록 하는 배치는 처분터널의 간격을 조절하기 보다는 처분공의 간격을 조절하여 배치하는 것이 열적 측면이나 경제적 측면에서 유리할 것으로 판단된다.

본 연구에서의 결과는 고준위폐기물 지하처분장 배치 설계시 유용하게 활용될 것이며, 향후 부지에 대한 불확실성을 줄이기 위하여 정확한 부지특성 자료를 통한 상세한 분석이 필요하다.

## 감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력중장기 연구개발 사업의 일환으로 수행하였습니다.

## 참고문헌

[1] C. H. Kang, "Preliminary Conceptual Design and Performance Assessment of a Deep Geological Repository for High Level Waste in the Republic of Korea," KAERI and Sandia National Lab.,

2000.

- [2] JNC, "H12 Project to Establish Technical Basis for HLW Disposal in Japan, Supporting Report 2-Repository Design & Engineering Technology," Japan Nuclear Cycle Development Institute, 1999.
- [3] H. Okmark and J. Claesson, "Use of an Analytical Solution for Calculating Temperatures in Repository Host Rock," Engineering Geology Vol. 81, Elsevier Science, 2005.
- [4] Kari Ikonen, "Thermal Analyses of Spent Nuclear Fuel Repository," Posiva Oy, POSIVA 2003-4, 2003.
- [5] P. Baumgartner, "Technical Implication of Aging Used Fuel Prior to Disposal within a Deep Geologic Repository," Canadian Nuclear Society, Waste Management, Decommissioning and Environmental Restoration for Canada's Nuclear Activities : Current Practices and Future Needs, Ottawa, Ontario, Canada, May 8-11, 2005.
- [6] T. Kukkola, T. Saanio, J. Choi and C. Kang, "KAERI's Spent Fuel Repository Design Evaluation and Cost Estimation," Posiva Oy, R&D Report 2003-02, 2003.
- [7] 최희주, 이종열, 조동건, 최종원 외, "고준위폐기물 한국형 처분시스템 개념설계 요건," 한국원자력연구소, KAERI/TR-3003/2005, 2005.
- [8] 이종열, 최희주, 조동건, 최종원 외, "고준위폐기물 심지층 수직처분(KRS-V1) 지하시설 예비개념설계," 한국원자력연구소, KAERI/TR-3012/2005, 2005.
- [9] E. Johansson, M. Hakala and L. Lorig, "Rock Mechanical, Thermomechanical and Hydraulic Behaviour of the Near Field for Spent Nuclear Fuel," Report YJT-91-21, Helsinki, 1991.
- [10] J. W. Kim and D. S. Bae, "Thermo-hydro-mechanical Behavior Study on the Joints in the Vicinity of an Underground Disposal Cavern," J. of Korean Society of Engineering Geology,

Vol. 13(2). 2003.

- [11] J. W. Choi and C. H. Kang, "Reference Spent Fuel and Its Characteristics for a Deep Geological Repository Concept Development," *J. KNS*, Vol.31(6), 1999.
- [12] 강철형, 최종원 외, "심지층 처분시스템 개발," 한국원자력연구소, KAERI/RR-2336/2002, 2003.