

Analysis of the Spent Fuel Cooling Time for a Deep Geological Disposal

심지층 처분을 위한 사용후핵연료 냉각기간 분석

Jong-Youl Lee, Dong-Geun Cho, Heui-Joo Choi, Jong-Won Choi and Yang Lee

Korea Atomic Energy Research Institute, Daedeokdaero 1045, Yuseong-gu, Daejeon

*SK E&C, 192-18, Gwanhun-dong, Jongno-gu, Seoul

njylee@kaeri.re.kr

이종열, 조동건, 최희주, 최종원, 이양*

한국수력원자력(주) 원자력발전기술원, 대전시 유성구 장동 25-1

*SK 건설(주) 연구소, 서울시 종로구 관훈동 192-18 SK건설

(Received December 24, 2007 / Approved January 21, 2008)

Abstract

The purpose of the HLW deep geological disposal is to isolate and to delay the radioactive material release to human beings and the environment for a long time so that the toxicity does not affect to the environment. The main requirements for the HLW repository design is to keep the buffer temperature below 100 °C in order to maintain its integrity. So the cooling time of spent fuels discharged from the nuclear power plant is the key consideration factors for efficiency and economic feasibility of the repository. The disposal tunnel/disposal hole spacing, the disposal area and thermal capacity required for the deep geological repository layout which satisfies the temperature requirement of the disposal system is analyzed to set the optimized spent fuels cooling time. To do this, based on the reference disposal concept, thermal stability analyses of the disposal system have been performed and the derived results have been compared by setting the spent fuels cooling time and the disposal tunnel/disposal hole spacing in various ways. From these results, desirable spent fuels cooling time in view of disposal area is derived. The results shows that the time reaching the maximum temperature within the design limit of the temperature in the disposal site is likely shortened as the cooling time of spent fuels becomes short. Also it seems that the temperature-rising and-dropping patterns in the disposal site are of smoothly varying form as the cooling time of spent fuels becomes long. In addition, it is revealed that a desirable cooling time of spent fuels is approximately 40-50 years when spent fuels are supposedly disposed in the deep geological disposal site with its structural

scale under consideration in this study.

Key words : Spent fuel, Deep geological disposal, Repository layout, Buffer material, Thermal stability, Disposal tunnel/disposal pit spacing, Cooling time

요 약

사용후핵연료 심지층 처분의 목적은 그 독성이 인간 및 자연환경에 영향을 미치지 않도록 장기간 동안 격리하고, 방사성물질의 누출을 지연시키는 것이다. 이러한 심지층 처분장 설계시 주요한 요건은 처분시스템의 건전성 유지를 위하여 폐기물로부터 발생된 열로 인하여 완충재의 온도가 100 ℃를 넘지 않도록 하는 것이다. 따라서, 원자력 발전소에서 방출된 후의 사용후핵연료 냉각기간은 심지층 처분장 설계시 효율 및 경제성을 위한 중요한 고려인자이다. 본 연구에서는 가장 적절한 사용후핵연료 냉각기간 설정을 위하여 처분시스템 온도요건을 만족하는 심지층 처분장 배치에 필요한 처분터널-처분공 간격 및 그에 따른 면적, 열하중에 대한 분석을 수행하였다. 이를 위하여, 기준 처분개념을 바탕으로 사용후핵연료의 냉각기간 및 처분터널/처분공 간격을 다양하게 설정하여, 처분시스템에서의 열적 안정성을 해석하고 그 결과를 비교분석하였다. 그리고 분석결과를 바탕으로 처분면적 측면에서 효율적인 사용후핵연료 냉각기간을 도출하였다. 그 결과, 사용후핵연료의 냉각기간이 짧을수록 처분장에서 설계온도 제한치 범위내 최고온도에 이르는 시간은 빨라지고, 사용후핵연료 냉각기간이 길수록 처분장에서 온도상승 및 하강속도는 완만해지는 것으로 나타났다. 또한, 본 연구에서 고려대상으로 삼은 처분장 규모와 사용후핵연료를 심지층에 처분한다고 할 때 그 냉각기간을 40-50년으로 함이 적합한 것으로 나타났다.

중심단어 : 사용후핵연료, 심지층 처분, 처분구역 배치, 처분터널-처분공 간격, 열적안정성, 완충재, 냉각기간

I. 서론

원자력발전소에서 전기를 생산하고 난 후 방출되는 사용후핵연료 또는 고준위폐기물의 처분은 인간 및 자연 환경을 보호하고 원자력에너지를 지속적인 동력원으로 사용하기위하여 필수적으로 해결해야하는 과제로서, 세계 각국에서 이에 대한 연구를 활발하게 진행하고 있다.

고준위폐기물은 재순환핵연료 주기의 경우 사용후핵연료를 재처리하는 과정에서 발생하는 악티나이드/핵분열 생성물 등을 함유하는 폐기물로서 주로 유리 고화체 형태이며, 직접 처분주기의 경우는 사용후핵연료 자체가 처분대상 고준위폐기물이 된다.

이러한 고준위폐기물의 처분으로는 일반적으로 지하 수 백 미터의 건전한 암반에 매립하는 것을 가장 안전한 처분 방안으로 고려하고 있다. 이는 방사성물질에서 나오는 방사선에 의한 인간의 피폭을 가능한 한 최소한으로 낮출 수 있도록 일정 기간 동안 인간 생활권으로부터 고준위폐기물을 완전 격리시키고, 누출된 방사성물질이 인간환경으로 도달하는 것을 최대한 지연시키는 방법이다.

고준위폐기물 심지층 처분장 설계시 주요한 고려인자는 처분 안전성 확보를 위하여 설치한 공학적 방벽을 구성하는 완충재의 건전성을 유지하도록 하는 것이다. 즉, 고준위폐기물로부터 발생되는 열로 인하여 완충재의 온도가 100 ℃를 넘게 되는 경우 물성의 변화

로 인하여 공학적 방벽으로서의 성능이 저하되므로, 심부지하에서 고준위폐기물 간의 간격을 조정하여 이를 넘지 않도록 배치하여야 한다.

이러한 고준위폐기물 심지층 처분장 설계를 위한 사용후핵연료 또는 고준위폐기물의 냉각기간 및 방사능붕괴열과 지하처분구역 배치와 관련하여 다양한 연구를 수행하고 있다. 일본에서는 사용후핵연료를 재처리한 후 발생하는 고준위폐기물을 유리화시켜 처분할 계획으로, 처분심도는 최소 300 m 이하이며, 암반을 경암과 연암으로 구분하여 구조적 건전성 및 완충재의 최고온도 제한치에 따른 다양한 처분터널/처분공 간격을 설정하여 굴착량 분석에 의한 최적 배치방안을 제안한 바 있다[1]. 또한, 스웨덴, 핀란드에서는 사용후핵연료를 직접 처분대상으로 하여 유사한 연구를 수행하였고, 그 결과로부터 온도 요건에 만족하는 처분터널과 처분공 간격을 설정하고 있으며[2, 3], 캐나다의 경우 CANDU 사용후핵연료의 냉각기간에 따라 수평처분 개념에 따른 처분터널과 처분용기 간격을 설정하고 처분장에서의 단위 면적당 열하중, 우라늄 밀도 등을 분석하여 최적의 조건을 도출하기 위한 연구를 수행한 바 있다[4].

현재까지 우리나라는 사용후핵연료의 재활용이나 직접처분에 대한 정책결정이 없는 상태이지만, 본 연구에서는 사용후핵연료를 직접처분 대상으로 가정하여 이를 심지층에 처분할 경우 최적 처분 시스템을 도출하기 위한 사용후핵연료 냉각기간과 심지층 처분구역과의 관계를 분석하였다. 사용후핵연료를 처분하기 전까지 냉각기간을 길게 하면 방사능 붕괴를 더 할 수 있게 되고, 따라서 방사성 독성과 발열량이 감소하여 처분장 소요면적도 감소하게 된다. 이러한 사용후핵연료 냉각기간과 처분구역과의 관계 분석을 위하여, 심지층 처분구역 개념을 설정하고, 사용후핵연료 냉각기간에 따른 처분장에서의 완충재 온도 제한치 요건을 만족하는 다양한 처분 터널과 처분공 간격 개념을 도출하기 위하여 열해석을 수행하였다. 또한, 그 결과를 바탕으로 사용후핵연료 냉각기간과 처분구역 개념들에 있어서의 상관관계를 분석하여 심지층 처분시스템 최적화를 위한 사용후핵연료 냉각기간을 설정하였다.

II. 심지층 처분 시스템 개념

가. 처분시스템 구성

고준위폐기물 처분시스템을 크게 지상시스템과 지하시스템으로 구분한다(Fig. 1). 지상시스템은 고준위폐기물을 처분용기에 포장하는 시스템과 지하시스템 건설, 고준위폐기물 처분 후 뒷채움 및 지하시스템 지원을 위한 시스템들로 구성된다. 지하시스템은 지상시설에서 처분용기에 포장한 고준위폐기물을 암반에 굴착한 처분공에 매설하는 처분용기 거치, 완충재 및 뒷채움재 설치 등 처분공정을 수행하며, 이를 위한 기술지원 시스템으로 이루어진다. 또한, 수직갱과 접근 경사터널은 지상시스템과 지하시스템을 연결하며, 이들을 통하여 환기, 물질 및 작업자 이송 등을 수행한다. 지상 시설과 지하시설에서는 고준위폐기물과 같은 방사성물질의 취급여부에 따라 통제구역과 비통제구역으로 구분하여 공정을 수행하도록 한다[5, 6].

나. 다중방벽

사용후핵연료를 심부 지층 암반에 처분하여 그 독성으로 인한 생태계의 영향이 미치지 않는 수준까지 낮아지도록 장기간동안 안전하게 격리시키고 누출된 독성물질이 생태계에 이르는 것을 지연시키기 위하여, 처분시스템에서는 자연방벽과 공학적 방벽으로 구성된 다중방벽 시스템을 고려하고 있다. 자연방벽은 심부지하에서 처분구역 주변의 건전한 모암으로 어떠한 경우이라도 방사성물질을 영구히 생태계로부터 격리시켜 처분된 방사성물질에서 나오는 방사선

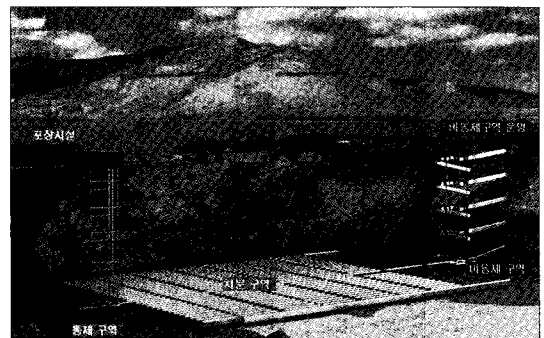


Fig. 1. The layout concept of the HLW repository.

에 의한 피폭으로부터 생태계의 안전성을 유지시킬 수 있어야 하겠지만, 자연계가 지니고 있는 비균질성과 불확실성으로 인하여 안전성을 신뢰할 수 없는 단점이 있다. 따라서 안전성에 대한 확고한 신뢰를 구축하기 위하여 공학적 방벽 개념을 도입하고 있으며, 처분대상인 사용후핵연료 또는 고준위폐기물, 처분용기, 완충재, 뒷채움재 등으로 이를 구성(Fig. 2)한다.

처분시스템은 이러한 자연방벽과 공학적 방벽 구성요소들의 조합으로서, 취급의 용이성, 처분장 운영의 효율성과 안전성, 주변 암반과 연계된 상태에서의 구조적 안정성 등을 포용할 수 있도록하며, 이 구성요소들이 장기간동안 성능을 유지할 수 있도록 이 처분시스템을 최적화하여야 한다.

① 처분용기

처분장의 지상시설에서 사용후핵연료를 포장하여 지하 처분터널 내 처분공에 매설시키는 처분용기를 일반적으로 심지층에서의 수압과 완충재 팽윤압에 견디도록하는 구조재와 심지층 처분환경에서 장기간 부식에 견디도록하는 내부식성 재료의 이중구조로 구성한다. 처분용기 형상은 Fig. 2에서 보여주는 바와 같으며, 경수로 사용후핵연료의 경우 방사능 붕괴열을 고려하여 4개의 집합체(440 kgU/집합체)를 수용하며 이때의 총무게는 약 25톤에 이른다[8,9].

② 완충재

처분시스템 공학적 방벽 구성요소인 완충재는 처

분용기를 보호하고 방사성 핵종을 격리하며 이들의 이동을 지연시키는 기능을 유지하여야한다. 이를 위해 완충재는 수리전도도와 핵종의 이동성이 암반보다 작아야 하며, 물성변화로 인한 공학적 방벽으로서의 성능저하 방지를 위하여 완충재 온도는 100 ℃ 이하로 유지되도록 열전도도가 커야 한다. 이러한 완충재의 온도요건은 지하 처분구역배치에 있어서 주요한 제한요건이 된다[10, 11].

다. 지하 처분구역 및 단위 처분면적

본 연구에서는 사용후핵연료 처분용기를 수직 처분하는 것으로 가정하고, 이때 지하처분구역을 처분 파넬과 이들을 연결하는 중앙터널로 구성한다. 그리고 처분파넬에는 처분터널과 연결터널이 있으며, 처분터널 내에는 처분용기를 수직으로 처분할 수 있는 처분공을 굴착한다[12].

지하처분구역의 배치는 처분용기에 포장되어 처분공에 매설되어 있는 사용후핵연료로부터 발생하는 방사능붕괴열로 인한 처분장내 온도를 이들 처분터널과 처분공의 간격을 적절하게 설정하여 요건에 맞도록 하는 것이다.

처분공 간격과 처분터널 간격의 적절한 조합에 필요한 분석 및 처분시설 규모 추정을 위하여, 처분터널 간격과 처분공 간격 간의 면적을 고려한 단위 처분면적 개념을 설정하였다. 단위처분면적은 Fig. 3에서 그 개념을 보여주고 있으며, 처분용기 1

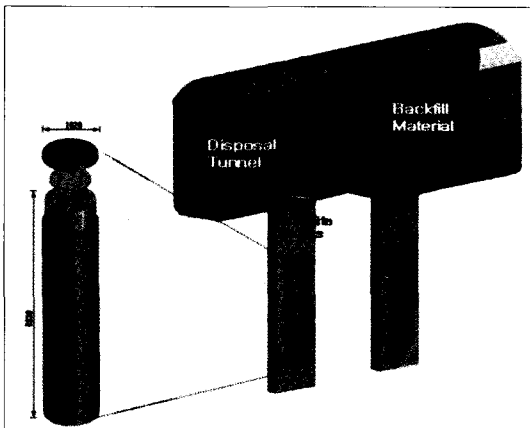


Fig. 2. The concept of the engineered barrier and the disposal tunnel.

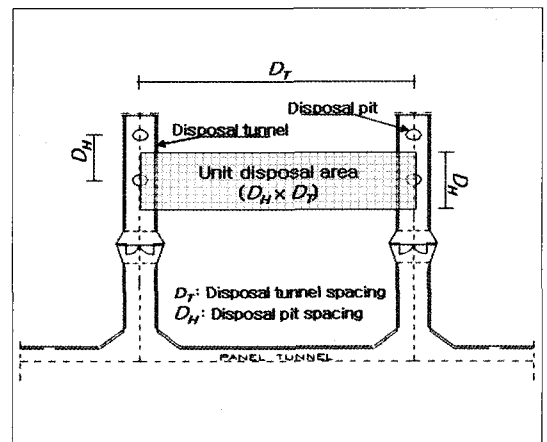


Fig. 3. The unit disposal area.

개를 처분하였을 때 소요되는 처분구역의 면적을 나타낸다.

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.

III. 처분 시스템 열 해석

가. 해석 모델

사용후핵연료 심지층 처분시스템에서 지하처분구역의 온도요건에 따른 열적 안정성 분석을 위한 모델은 다수의 처분터널과 처분공이 동일 간격으로 나란하게 배치되어 있는 처분장 배치특성을 고려한 3차원 모델을 이용하였다. 즉, 수평방향으로는 처분 터널 간격과 처분공 간격의 1/2씩을 고려한 1/4모델로 하였으며, 상하부 수평경계로는 방사능 붕괴열에 의한 영향이 미치지 않도록 충분한 거리인 처분용기 중심으로부터 상하 500 m를 고려하였다. 해석모델의 기하학적 형상은 Fig. 4에 나타난 바와 같다.

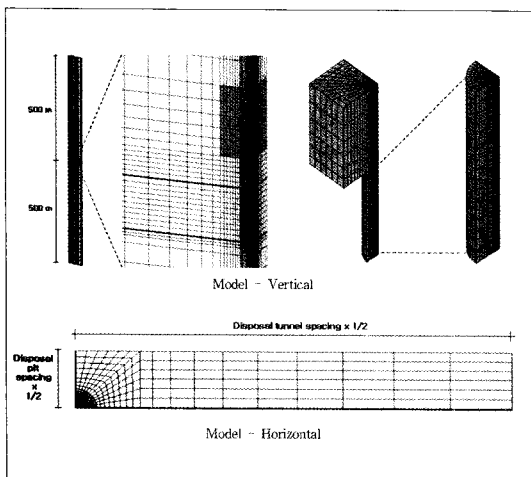


Fig. 4. The repository model for the thermal analysis.

나. 사용후핵연료 방사능 붕괴열

처분공 주변에 영향을 미치는 사용후핵연료 방사능 붕괴열(W/tHM)은 핵분열생성물과 악티나이드 원소로부터 발생되는데, 방출연소도가 45 GWd/tU인 경우에 있어서 원자로에서 방출된 후 시간경과에 따른 열량 예를 Table 1에 나타내었으며, 사용후핵연료 냉각기간을 고려한 방사능 붕괴열 이력에 따른 열량 $P(t)$ 를 다음식으로 표현한다[13,14].

$$P(t) = 14548 t^{-0.762} \quad (30 \leq t \leq 10^6)$$

다. 초기/경계조건 및 입력 물성

처분장 열해석을 위한 본 해석의 대칭적 모델에 따른 경계조건으로 해석모델의 양쪽 수직 경계면과 바닥을 단열 경계로 설정하였으며, 온도 분포는 지표 하 지하수대의 온도를 15 °C로 가정하여 이를 기준으로 지하 100 m 깊이마다 3 °C씩 상승하는 것으로 초기조건을 설정하였다[7].

또한, 본 해석에서 사용한 암반, 완충재, 뒷채움재 및 처분용기의 물리적 특성은 Table 2에 나타난 바와 같으며, 컴퓨터 해석코드로 범용 유한요소 구조해석 및 열해석 프로그램인 NISA ver. 12의 Heat module

Table 1. Decay heat of spent fuels according to the cooling time

Cooling Time (yr)	FPs (W/tHM)	ACT (W/tHM)	Total (W/tHM)
1.00	11,200.00	973.70	12,170.00
5.00	2,097.00	425.90	2,524.00
10.00	1,238.00	419.20	1,658.00
30.00	688.50	386.90	1,075.00
40.00	539.00	369.70	908.70
50.00	423.10	353.40	776.50
60.00	332.70	338.30	671.00
70.00	261.90	324.50	586.40

* PWR burn-up : 45 GWd/tU

Table 2. The material properties for the analysis

Items	Density (kg/m ³)	Thermal Conductivity (W/m °C = J/s/m °C)	Specific Heat (J/kg °C)
Spent fuel	2,000	0.14	2,640
Cast insert	7,200	52.0	504
Outer shell	8,900	386.0	383
Buffer	1,970	1.0	1,380
Backfill	2,270	2.0	1,190
Rock	2,650	3.2	815

을 이용하여 해석을 수행하였다[15].

IV. 냉각기간에 따른 해석 결과 및 분석

가. 열해석 결과 분석

사용후핵연료 냉각기간 30년에서부터 80년까지 10년 간격으로 완충재 블록의 온도요건을 충족하는 처분터널과 처분공간격을 설정하여 열해석을 수행하였다. Fig. 5는 해석 결과의 예로서 사용후핵연료에서 발생한 열이 전도되어 일정 시간이 흐른 후 나타난 처분터널 주변의 열 분포를 나타내며, 수직방향으

로는 처분터널과 처분공에서의 열 분포를 나타낸다.

사용후핵연료를 원자로로부터 꺼낸 후 냉각된 시간에 따라 처분장의 온도제한조건인 완충재 온도 100 °C 이하의 조건을 만족하는 처분터널과 처분공

Table 3. Tunnel spacing and hole pitch

Cooling Time	Tunnel spacing	Hole pitch	Max. temp.	Year
30	40	12.0	96.1	3
40	40	6.0	98.6	16
50	35	5.4	97.7	43
60	35	4.8	96.8	72
70	35	4.5	98.1	107
80	35	4.4	96.7	141

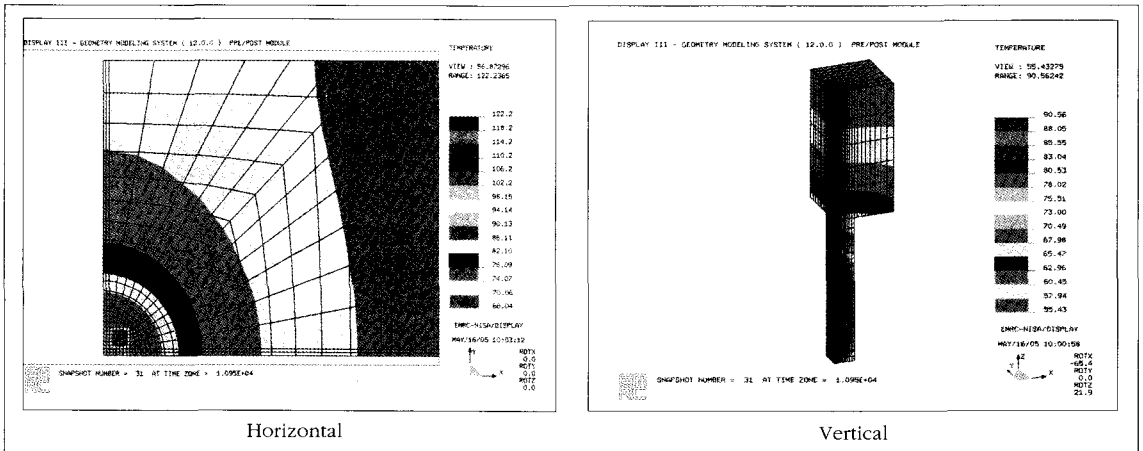


Fig. 5. An example of the thermal analysis results.

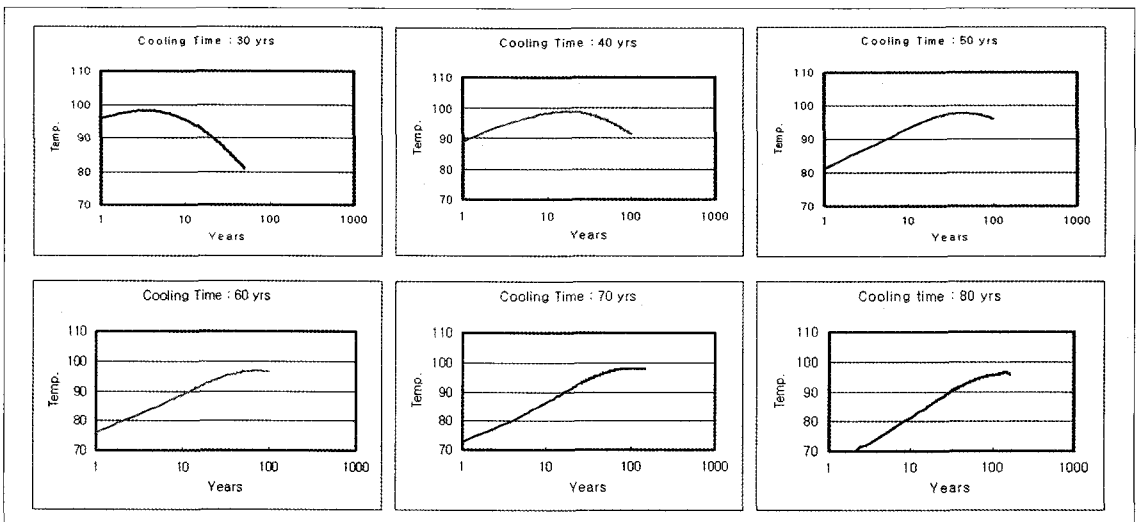


Fig. 6. Thermal behavior according to the spent fuel cooling time.

간격 및 열해석 결과를 Fig. 6, Table 3.에 나타내었다. 그림에서 나타난 바와 같이 사용후핵연료의 냉각 시간에 따라 최고 온도에 도달하는 시간 및 온도 변화에 있어서 차이를 나타내었다. 즉, 냉각기간 30년인 사용후핵연료를 처분하는 경우, 최고 온도에 도달하는 시간은 처분 후 3년 정도이고, 냉각기간 40년인 경우에 있어서는 최고 온도에 도달하는 시간이 16년이며, 냉각기간 50년, 60년, 70년, 80년인 경우에도 최고 온도에 이르는 시간은 각각 43년, 72년, 107년, 141년으로 냉각기간이 길어질수록 최고온도에 도달하는 시간이 늦어지며, 처분장에서의 온도 상승 및 하강이 완만하게 나타나고 있다.

나. 처분구역 분석

열해석 결과에 따라 사용후핵연료의 냉각시간별 처분장 온도조건을 만족하는 처분터널 및 처분공간 격을 바탕으로 각 경우에 있어서 단위처분면적을 산출하였으며, 산출된 결과를 이용한 냉각기간별 단위 처분면적당 열하중 용량 및 우라늄 용량 등 처분구역에 대한 분석내용을 Table 4.와 Fig. 7에 나타내었다. 개략적인 처분장의 규모를 산출할 수 있는 단위처분면적은 냉각시간이 길어짐에 따라 감소하지만 감소

하는 효율은 냉각시간이 길어질수록 작게 나타났다. 단위처분면적 당 열하중 용량의 경우 초기에는 증가하다가 냉각기간이 50년에 최대값인 6.99 W/m²에 이르고 이후 점차 감소하는 경향을 보인다.

이상의 분석결과로부터 사용후핵연료를 심지층 암반에 처분하는 경우 처분장의 규모를 고려할 때 사용후핵연료의 냉각기간은 40년-50년이 적합할 것으로 생각되며, 그 이상의 경우에는 큰 이점이 없을 것으로 판단된다.

V. 결론 및 향후 계획

본 연구에서는 사용후핵연료를 대상으로 하는 고준위폐기물의 심지층 처분시설 설계를 위하여 다양한 사용후핵연료의 냉각기간에 따라 처분장 설계 온도 조건에 맞는 처분터널과 처분공 설계를 위한 열해석을 수행하였다. 열해석 결과를 이용하여 각 냉각기간별 단위처분면적을 산출하고, 그에 따른 열하중 용량 및 우라늄 용량 분석 등 사용후핵연료 냉각기간과 처분구역과의 관계를 분석하여 처분장 규모 측면에서 적합한 처분시점에서의 사용후핵연료 냉각기간을 도출하였으며, 그내용은 다음에 기술하는 바와 같다.

· 사용후핵연료의 냉각기간이 짧을수록 처분장에서 설계 온도 제한치 범위 내 최고 온도에 이르는 시간이 빠르다.

· 사용후핵연료의 냉각기간이 길수록 처분장에서 온도 상승 및 하강 속도는 완만해진다.

· 본 연구에서 고려하고 있는 처분장의 규모를 대상으로 하고 사용후핵연료를 심지층 처분장에 처분하는 경우 냉각기간은 40-50년이 적합하다.

본 연구에서 얻은 결과를 고준위폐기물 심지층 처분장 설계 및 사용후핵연료 관리방안 수립시 유용하게 활용할 것이며, 향후 불확실성을 줄이기 위하여 정확한 물성자료 확보 및 부지특성 자료를 통한 보다 구체적인 해석과 분석이 필요하다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력중장기 연구개발

Table 4. Unit disposal area and thermal load

Cooling time	Unit disposal area (m ²)	Reduction rate	Efficiency	Thermal load (W/m ²)
30	480.0	100.0	-	4.04
40	240.0	50.0	50.0	6.52
50	189.0	39.4	10.6	6.99
60	168.0	35.0	4.4	6.85
70	157.5	32.8	2.2	6.50
80	154.0	32.1	0.7	6.02

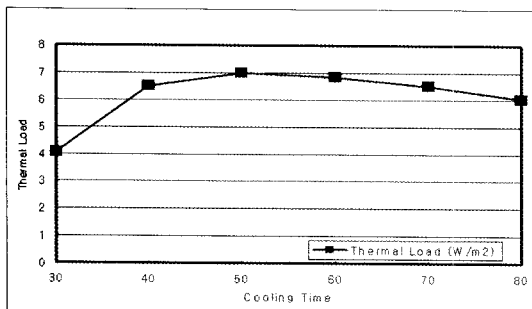


Fig. 7. Thermal load of the repository.

사업의 일환으로 수행하였습니다.

참고문헌

- [1] 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.
- [2] H. Hokmark and J. Claesson, "Use of an Analytical Solution for Calculating Temperatures in Repository Host Rock," Engineering Geology Vol. 81, Elsevier Science, 2005.
- [3] Kari Ikonen, "Thermal Analyses of Spent Nuclear Fuel Repository," Posiva Oy, POSIVA 2003-4, 2003.
- [4] 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.
- [5] Tapani Kukkola, "Final Disposal Plant in Korea Description of Above Ground Facilities," Posiva Oy, R&D Report 2005-03, 2005.
- [6] T. Saanio, Matti Kalliomaki, Paula Keto, "KRS-1, Pre-Conceptual Design of Korean Reference HLW Disposal System," Volume 1, Posiva Oy, R&D Report 2005-04, 2005
- [7] 최희주, 이종열, 조동건, 최종원 외, "고준위폐기물 한국형 처분시스템 개념설계 요건," 한국원자력연구소, KAERI/TR-3003/2005, 2005.
- [8] 최종원 외, "처분시스템 개발," 한국원자력연구소, KAERI/RR-2765/2006, 2007.
- [9] 이종열, 최희주, 조동건, 최종원 외, "고준위폐기물 심지층 수직처분(KRS-V1) 지하시설 예비개념설계," 한국원자력연구소, KAERI/TR-3012/2005, 2005.
- [10] KAERI 2002, "Progress Report on the R&D Program for the Disposal of HLW in Korea," Korea Atomic Energy Research Institute, August 20, 2002.
- [11] S. S. Kim, J. W. Choi, K.S. Chun, "Requirements Performance and Design of Container, buffer and Backfill materials for the Disposal of Spent Nuclear Fuel," Korea Atomic Energy Research Institute, KAERI/TR-2628/2003, 2003.
- [12] J. Lee, D. Cho, H. Choi, J. Choi, "Concept of a Korean Reference Disposal System for Spent Fuels," JNST, Vol. 44, No. 12, 2007.
- [13] 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.
- [14] D. Cho, J. Lee, H. Choi, J. Choi, "Characteristics of a Geological Disposal System for the Increasing Burn-up of spent Nuclear Fuel in Korea," JNST, Vol. 44, No. 10, 2007.
- [15] 이양, 최종원, 최희주, 이종열 외, "NISA 프로그램을 활용한 열전달 해석과 처분장 설계에 적용," 한국원자력연구소, KAERI/TR-3228/2006, 2006.