

An Analysis of the Deep Geological Disposal Concepts Considering Spent Fuel Rods Consolidation

사용후핵연료봉 밀집을 고려한 심지층처분 개념 분석

Jongyoul Lee*, Hyeona Kim, Minsoo Lee, Geonyoung Kim, and Heuijoo Choi
Korea Atomic Energy Research Institute, 111 Daedeok-daero 989, Yuseong-Gu, Daejeon, Korea

이종열*, 김현아, 이민수, 김진영, 최희주
한국원자력연구원, 대전광역시 유성구 대덕대로 989번길 111

(Received August 26, 2014 / Revised September 24, 2014 / Approved November 7, 2014)

For several decades, many countries operating nuclear power plants have been studying the various disposal alternatives to dispose of the spent nuclear fuel or high-level radioactive waste safely. In this paper, as a direct disposal of spent nuclear fuels for deep geological disposal concept, the rod consolidation from spent fuel assembly for the disposal efficiency was considered and analyzed. To do this, a concept of spent fuel rod consolidation was described and the related concepts of disposal canister and disposal system were reviewed. With these concepts, several thermal analyses were carried out to determine whether the most important requirement of the temperature limit for a buffer material was satisfied in designing an engineered barrier of a deep geological disposal system. Based on the results of thermal analyses, the deposition hole distance, disposal tunnel spacing and heat release area of a disposal canister were reviewed. And the unit disposal areas for each case were calculated and the disposal efficiencies were evaluated. This evaluation showed that the rod consolidation of spent nuclear fuel had no advantages in terms of disposal efficiency. In addition, the cooling time of spent nuclear fuels from nuclear power plant were reviewed. It showed that the disposal efficiency for the consolidated spent fuel rods could be improved in the case that cooling time was 70 years or more. But, the integrity of fuels and other conditions due to the longer term storage before disposal should be analyzed.

Keywords: Spent nuclear fuels, Deep geological disposal(DGD), Disposal efficiency, Rod consolidation, Disposal tunnel, Deposition Hole, Cooling time

*Corresponding Author.

Jongyoul Lee, Korea Atomic Energy Research Institute, E-mail: njylee@kaeri.re.kr, Tel: +82-42-868-2071

ORCID

Jongyoul Lee <http://orcid.org/0000-0001-8482-9008>
Minsoo Lee <http://orcid.org/0000-0001-7928-2415>
Heuijoo Choi <http://orcid.org/0000-0001-9253-7697>

Hyeona Kim <http://orcid.org/0000-0001-9253-7697>
Geonyoung Kim <http://orcid.org/0000-0001-5502-178X>

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited

사용후핵연료 또는 고준위폐기물의 안전한 처분을 위하여 지난 수십 년 동안 많은 나라들이 다양한 처분대안을 연구하여 왔다. 본 논문에서는 심지층처분기술에 있어서 사용후핵연료를 직접 처분하는 방안으로서 처분효율 향상을 위한 다양한 방안 중의 하나로 고려할 수 있는 PWR 사용후핵연료 집합체를 해체하여 연료봉을 밀집한 경우에 대한 처분 효율을 분석하였다. 이를 위하여, 우선 사용후핵연료 연료봉 밀집개념과 관련 처분용기 및 심지층처분 개념을 설정하였다. 이 개념에 근거하여 심지층 처분시스템의 공학적방벽 설계에 있어서 가장 중요한 요건인 완충재의 온도 제한요건을 만족시키는 지 여부를 확인하기 위하여 각 처분개념 별로 열해석을 수행하였다. 그리고, 처분공 간격, 처분터널 간격 및 처분용기 열발산 면적에 따른 열해석 결과를 바탕으로, 단위처분면적 관점에서의 처분효율을 비교/분석하고 평가하였다. 또한, 사용후핵연료봉을 밀집시킨 경우에 있어서 냉각기간에 따른 처분개념을 분석하였다. 분석결과에 따르면 사용후핵연료봉을 밀집하여 심지층처분하는 경우 처분효율 측면에서 불리한 것으로 판단되었다. 다만, 사용후핵연료의 냉각기간을 70년 이상으로 장기화 할 경우 처분효율은 향상될 것으로 예상되지만, 사용후핵연료의 내구성 및 장기저장에 따른 조건 등 추가적인 분석이 필요하다.

중심단어: 사용후핵연료, 심지층처분, 처분효율, 연료봉 밀집, 처분터널, 처분공, 냉각기간

1. 서론

지속적인 산업성장으로 인하여 요구되는 에너지의 원활한 공급과 지구온난화에 따른 우려로 원자력에너지에 대한 관심이 증대되고 있다. 반면 후쿠시마 원자력발전소 사고로 인하여 원자력 안전에 대한 불신도 함께 증대되고 있다. 특히, 원자력발전소에서 전기를 생산하고 난 후 발생하는 사용후핵연료 또는 이들 사용후핵연료의 재활용 공정으로부터 발생하는 고준위폐기물의 안전한 처분은 원자력에너지를 지속적인 동력원으로 사용하기 위하여 필수적으로 해결되어야 할 과제이다. 후핵연료주기의 완성을 위하여 세계 각국에서는 신뢰도 높은 안전한 고준위폐기물 처분 연구를 활발하게 진행하고 있으며, 지난 수십 년 동안 많은 나라들이 다양한 처분대안을 분석하여 왔다. 그 결과 현재 기술로 실현할 수 있는 가장 안전한 방법으로서 심지층처분(DGD: Deep Geological Disposal) 기술을 개발하고 각 국가 환경에 적합한 개념개발 및 실증연구를 거쳐 상용화 단계에 진입하였다.

심지층처분 기술은 고준위폐기물을 장기간 생태계로부터 격리하기 위하여 500 m 정도의 심도에 있는 안정한 암반에 건설하는 터널형 처분시스템이다. 대표적인 개념은 스웨덴에서 개발한 KBS-3 개념으로, 핀란드와 스웨덴에서는 이 개념에 의한 심지층처분 방식의 처분시설 건설에 대한 인허가 단계에 있다[1, 2].

본 논문에서는 심지층처분기술에 있어서 사용후핵연료

를 직접 처분하는 방안으로서 처분효율 향상을 위한 다양한 방안연구의 일환으로 고려할 수 있는 PWR 사용후핵연료 집합체를 해체하여 연료봉을 밀집한 경우에 대한 분석을 수행하였다. 이를 위하여, 우선 사용후핵연료 심지층 처분 공학적방벽 개념과 사용후핵연료봉 밀집개념을 검토하였다. 이 개념들을 바탕으로 심지층 처분시스템의 공학적방벽 설계에 있어서 가장 중요한 요건인 완충재의 온도 제한요건을 만족하는 처분시스템을 도출하기 위하여 다양한 처분터널-처분공 간격 조합과 연료봉 밀집용 처분용기 개념들이 적용된 처분시스템의 열해석을 수행하였다. 그리고, 해석 결과에 근거하여 처분공 간격, 처분터널 간격 및 처분용기의 열발산 면적에 따른 효율성을 분석하고, 단위 처분면적을 산출하여 처분효율을 비교/분석하고 평가하였다. 아울러 사용후핵연료봉 밀집을 고려한 경우에 있어서 심지층 처분시스템의 적용을 위한 사용후핵연료 냉각기간을 분석하였으며, 그에 따른 사용후핵연료봉 밀집 심지층처분 방안별 소요 냉각기간을 제안하였다.

본 분석결과는 이 기술의 국내에서의 적용 가능성 분석 및 관련 정책결정을 위한 입력자료로서 유용하게 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

2. 심지층 처분 공학적방벽 및 연료봉 밀집 개념

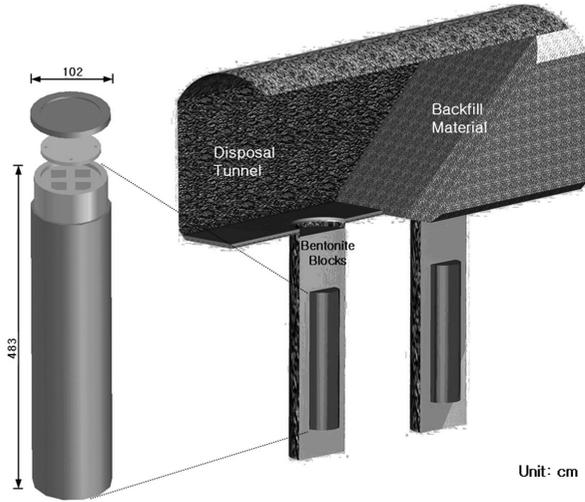


Fig. 1. A concept of a disposal canister and an engineered barrier.

2.1 심지층 처분 공학적방벽 개념

심지층 처분시스템의 목적은 사용후핵연료 또는 고준위 폐기물의 방사선적 위험이 소멸될 때까지 생태계로부터 안전하게 격리시키는 것이다. 사용후핵연료 또는 고준위폐기물 처분시스템은 지하수 백미터의 압반에 굴착한 동굴에 사용후 핵연료 또는 고준위 폐기물을 적재하여 봉입한 처분용기를 다중방벽시스템을 도입하여 매립하는 심지층처분을 기본으로 하고있으며, 현재의 기술수준으로는 심지층 처분시스템이 가장 안전한 방법으로 제안되고 있다[3].

심지층 처분시스템에 있어서 다중방벽은 천연방벽과 공학적방벽으로 구성되며, 각 구성요소들이 일련의 조합으로서, 취급의 용이성, 처분장 운영의 효율성과 안전성, 주변 압반과 연계된 상태에서의 구조적 안정성 등을 포용할 수 있도록 하여 장기간동안 성능을 유지할 수 있도록 최적화하여야 한다. 천연방벽은 심부지하에서 처분구역 주변의 건전한 모암으로 어떠한 경우에도 방사성물질을 영구히 생태계로부터 격리시켜 처분된 방사성물질에 의한 방사선피폭으로부터 생태계의 안전성을 유지시킬 수 있어야 하겠지만, 자연계가 지니고 있는 비균질성과 불확실성이 상존하고 있어 안전성을 신뢰할 수 없는 단점이 있다.

따라서 안전성에 대한 확고한 신뢰를 구축하기 위하여 공학적 방벽 개념을 도입하고 있으며, 이는 처분대상이 되는

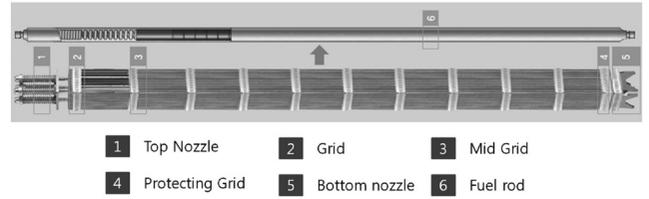


Fig. 2. A PWR spent fuel assembly and fuel rod[9].

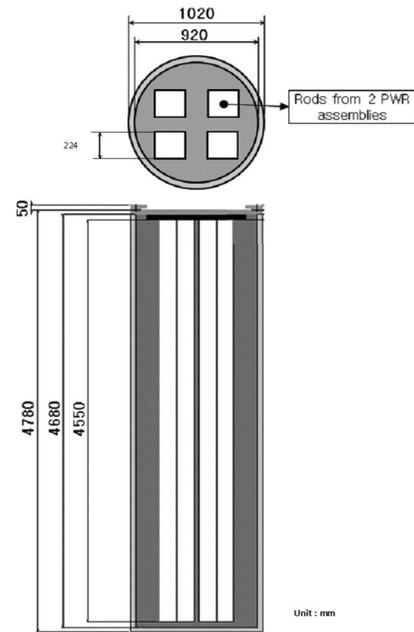


Fig. 3. A disposal canister for rod consolidated spent fuel.

사용후핵연료 또는 고준위폐기물, 처분용기, 완충재, 뒷채움재 등으로 구성된다. Fig. 1에는 처분심도에서의 정수압 및 완충재 팽윤압 등 압력에 견디도록 설계된 내부 주철용기와 처분환경의 부식에 견딜 수 있는 외부 구리용기로 구성되어 사용후핵연료 4개 집합체를 적재할 수 있는 처분용기의 제원 및 처분용기를 포함한 공학적방벽 개념을 나타내고 있다[4].

2.2 사용후핵연료봉 밀집

일반적으로 사용후핵연료 집합체는 Fig.2에서 보이는 바와 같이 상하단 고정체(1, 5), 지지격자(2, 3, 4) 및 연료봉(6)으로 구성되어있다. 사용후핵연료를 중간저장 또는 직접 처분하는 경우, 효율성을 높이기 위하여 사용후핵연료 집합체를

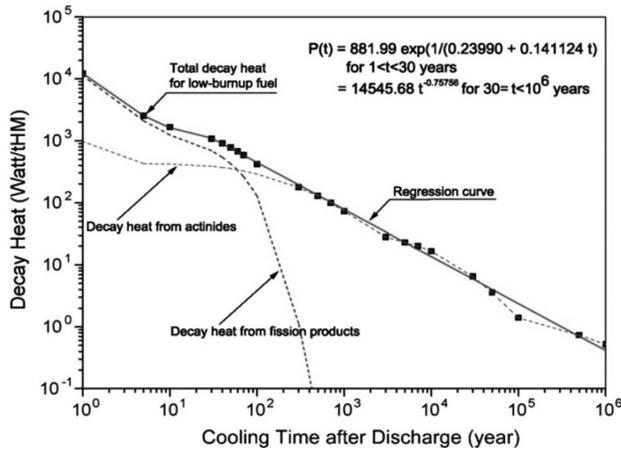


Fig. 4. Decay heat source from PWR spent fuel.

해체한 후 연료봉(6)을 인출하여 밀집시켜 중간저장하거나 최종 처분하는 방안에 대한 연구를 수행하는 국가들이 있다 [5, 6]. 즉, 사용후핵연료 집합체로부터 연료봉만을 인출하여 저장용기 또는 처분용기에 적재하는 경우, Fig. 3에서 보여 주고 있는 바와 같이 사용후핵연료 집합체를 그대로 적재하는 경우에 비하여 동일한 용기면적에 두배 이상의 연료봉을 적재하는 것이 가능하다.

이렇게 밀집된 사용후핵연료봉을 적재한 처분용기로 구성된 공학적방벽과 천연방벽의 다중방벽 개념을 적용한 심지층 처분시스템에 처분하는 경우, 시스템의 안전성능 확보를 위하여 시스템의 열적요건[7, 8]인 완충재 온도가 100℃ 이하를 만족하는지에 대한 평가가 필요하다.

2.3 처분대상 사용후핵연료 특성

심지층 처분대상인 사용후핵연료는 지속적으로 높은 열과 방사능을 방출하게 된다. 심지층 처분시스템 개념을 위한 처분대상 기준 PWR 사용후핵연료는 U-235 초기농축도 4.0~4.5%로 연소도는 45~55 GWD/MTU로 설정하고 있다. 그리고 PWR 사용후핵연료 집합체가 원자로에서 방출된 후로부터 40년 냉각시킨 후 처분하는 것으로 하고 있다. 본 논문에서는 저연소도 사용후핵연료(45 GWD/MTU)를 밀집하여 처분하는 것을 고려하였으며, 이의 냉각기간에 따른 붕괴열 산출식은 아래에 나타낸 바와 같고, 결과는 Fig. 4와 같다[10].

$$P(t) = 14545.68 t^{-0.75756} \quad (30 \leq t \leq 10^6) \quad (1)$$

여기서, P(t)는 처분용기에 있는 사용후핵연료에서 발생하는 붕괴열로서 단위는 W/tU 이고, t는 원자로에서 방출된 후의 시간으로 단위는 년(year)이다.

3. 밀집을 고려한 심지층처분개념 열해석

3.1 열해석 모델

본 연구에서는 사용후핵연료를 대상으로 한 심지층 처분시스템의 처분용기내 사용후핵연료 적재효율을 향상시키기 위하여 사용후핵연료 집합체를 해체한 후 연료봉만을 밀집하여 적재한 처분용기를 고려하였다. 이렇게 설정한 처분시스템 개념에 대한 열적 요건을 만족하는 처분터널 간격 및 처분공 간격을 도출하기 위하여 열해석을 수행하였다.

사용후핵연료를 심지층에 안전하게 처분하는데 있어서 사용후핵연료를 적재한 처분용기의 적절한 배치는 중요한 인자이다. 처분용기를 배치하는데 중요한 제한 요건은 사용후핵연료로부터 발생하는 열로 인하여 다중방벽의 하나인 공학적방벽을 이루고 있는 완충재의 온도가 100℃를 넘지 않도록 설계하여야 한다는 것이다[11, 12]. 이는 처분용기의 지하수 침수 및 처분한 방사성물질이 처분용기 외부로 누출되는 것을 억제하는 완충재인 벤토나이트의 성분을 변화시키지 않고 그 성능을 충분히 발휘할 수 있도록 하기 위해서이다.

3.2 해석 범위 및 방법

심지층 처분시스템의 열적 안정성평가를 위한 해석 범위는 Fig. 5에 나타낸 바와 같다. 그림에서 보여주는 바와 같이 해석영역은 처분심도 500 m에 위치한 처분용기로부터 발생되는 붕괴열의 영향이 미치지 않도록 하는 범위인 처분심도 상부 500 m와 하부 500 m로 하고, 처분터널과 처분공이 일정한 간격으로 연속적으로 배치되는 특성을 고려하여 처분터널과 처분공 간격의 중앙을 기준으로 하는 1/4 모델로 설정하였다.

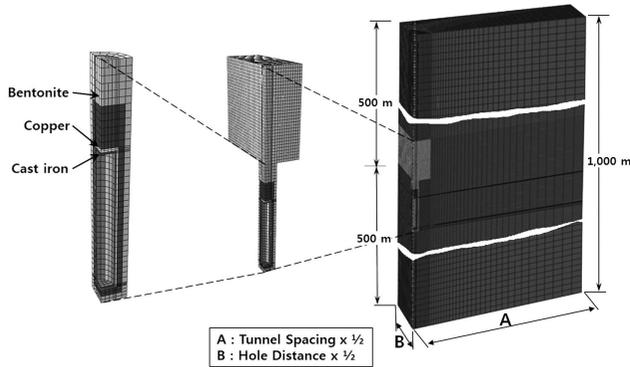


Fig. 5. Calculation domain for thermal analyses.

사용후핵연료봉 밀집을 고려한 처분시스템의 해석을 위하여 기존의 사용후핵연료 집합체 4개를 수용하는 처분용기에 8개의 사용후핵연료 집합체를 해체하여 밀집한 사용후핵연료 봉을 적재하는 것으로 가정하였다. 연료봉을 밀집한 경우에 있어서의 처분시스템 온도요건을 만족시키는 처분공 및 처분터널 간격을 설정하기 위하여 다음에 기술하는 바와 같은 경우를 설정하여 해석하였다.

기존 시스템이 처분공간격 6 m, 처분터널 간격이 40 m 이므로 처분공 간격을 기존 시스템의 배수인 12, 18, 24, 30 m로 설정하고 이에 대하여 각각 처분터널 간격을 기존 시스템보다 10 m씩 증가시킨 40, 50, 60 m 인 경우(Case 1)에 대하여 해석하였다. 또한, Fig. 6과 같이 동일한 용량의 밀집 연료봉을 적재한 처분용기의 규모(지름 및 높이)를 변경하여 기존 처분용기에 비해 열발산 면적을 점차 확대함으로써 열전달 특성을 개선한 경우(Case 2)에 대하여도 해석을 수행하였다.

3.3 초기 및 경계조건

본 열해석을 위한 초기조건으로는 기존 처분시스템에 대한 열해석과 동일하게 지표 부분의 지하수온도를 기준으로 지표는 15°C로 하였으며, 심도에 따른 지온경사는 3°C/100 m를 적용하였다. 따라서, 해석모델 범위의 상부와 하부의 온도는 각각 15°C와 45°C로 설정하였다[13]. 또한, 연속적이고 주기적인 처분터널 및 처분공 배치특성을 지닌 심지층 처분시스템의 특성을 반영한 열해석 모델에 대하여 대칭성을 지닌 점을 고려하여 해석모델의 측면은 단열조건을 설정하

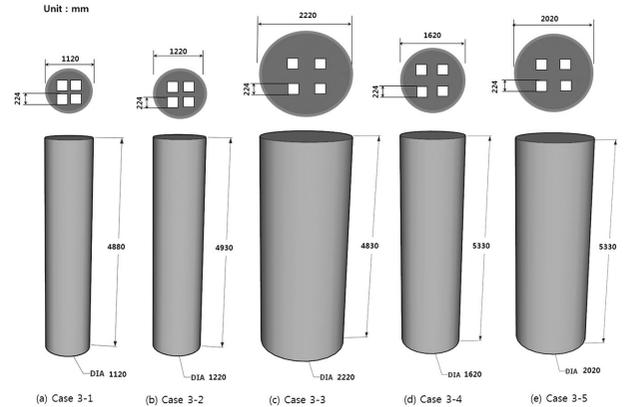


Fig. 6. Various canister concepts for case 2.

Table 1. Material properties for the thermal analyses

Items	Density (kg/m ³)	Thermal Conductivity (W/m°C=J/s/m°C)	Specific Heat (J/kg°C)
Copper shell	8,900	386	383
Cast insert	7,200	52	504
Buffer	1,970	1.0	1,380
Backfill	2,270	2	1,190
Rock	2,650	3.2	815

였다.

사용후핵연료를 적재한 처분용기가 지하 처분장에 처분 되면 사용후핵연료로부터 나온 붕괴열은 처분용기, 완충재, 뒷채움재 및 암반으로 전달되어 확산하게 된다. 이때, 처분시스템은 뒷채움재로 폐쇄되어 채워져 있기 때문에 주요 전달방법은 열전도가 되며, 대류 및 복사는 무시될 수 있다. 처분시스템을 구성하는 암반, 완충재, 뒷채움재, 처분용기의 밀도, 열전도도, 비열 등 해석에 필요한 물성은 기존처분시스템 해석[12, 13]에서의 동일하며 Table 1에 나타낸 바와 같다.

본 해석을 위한 전산프로그램은 유한요소방식을 이용한 상용코드이며, 고준위폐기물 처분시스템 설계를 위한 코드로서 검토되고 검증된 아바쿠스 ver. 6.10을 활용하였다[14, 15].

4. 열해석 결과 및 분석

앞에서 기술한 바와 같이 해석은 처분공 간격을 고정하고 처분터널의 간격을 조정한 경우 그리고 처분용기의 크기 조정으로 열발산면적을 점증적으로 확대하여 열전달특성을 개선한 경우(Fig. 6)의 열해석 결과는 아래에 기술한 바와 같다.

4.1 처분공 및 처분터널간격을 조정한 경우에 대한 결과 및 분석

처분공 간격을 고정한 경우(Case 1)에 대해서는 처분공 간격을 12 m(Case 1-1), 18 m(Case 1-2), 24 m(Case 1-3) 및 30 m(Case 1-4)로 고정하고 각각에 대하여 처분터널 간격을 40, 50, 60 m로 설정한 경우에 대하여 해석한 결과는

Fig. 7 및 Table 2에 나타내었다. 처분공 간격이 12 m 인 경우(Case 1-1) 각각의 처분터널 간격에 있어서 최고온도는 134.2, 133.7, 133.6°C, 처분공 간격이 18 m 인 경우(Case 1-2)에는 각각의 최고온도는 129.4, 129.3, 129.2°C, 처분공 간격이 24 m 인 경우(Case 1-3) 각각의 최고온도는 128.1, 128.0, 127.9°C 및 처분공 간격 30 m 인 경우(Case 1-4) 각각의 최고온도는 127.7, 127.6, 127.5°C로 산출되었다. 표 및 그림에서 보이는 바와 같이 처분공 간격을 고정하고 처분터널 간격을 조정하는 경우 처분시스템에 있어서 최고온도는 거의 동일하며 처분터널 간격이 커짐에 따라 시간경과에 따른 온도감소가 커지는 것으로 나타났다.

하지만, Fig. 8에서 보는 바와 같이 기존의 처분용기와 동일한 크기에 사용후핵연료 봉을 밀집하여 처분하는 경우

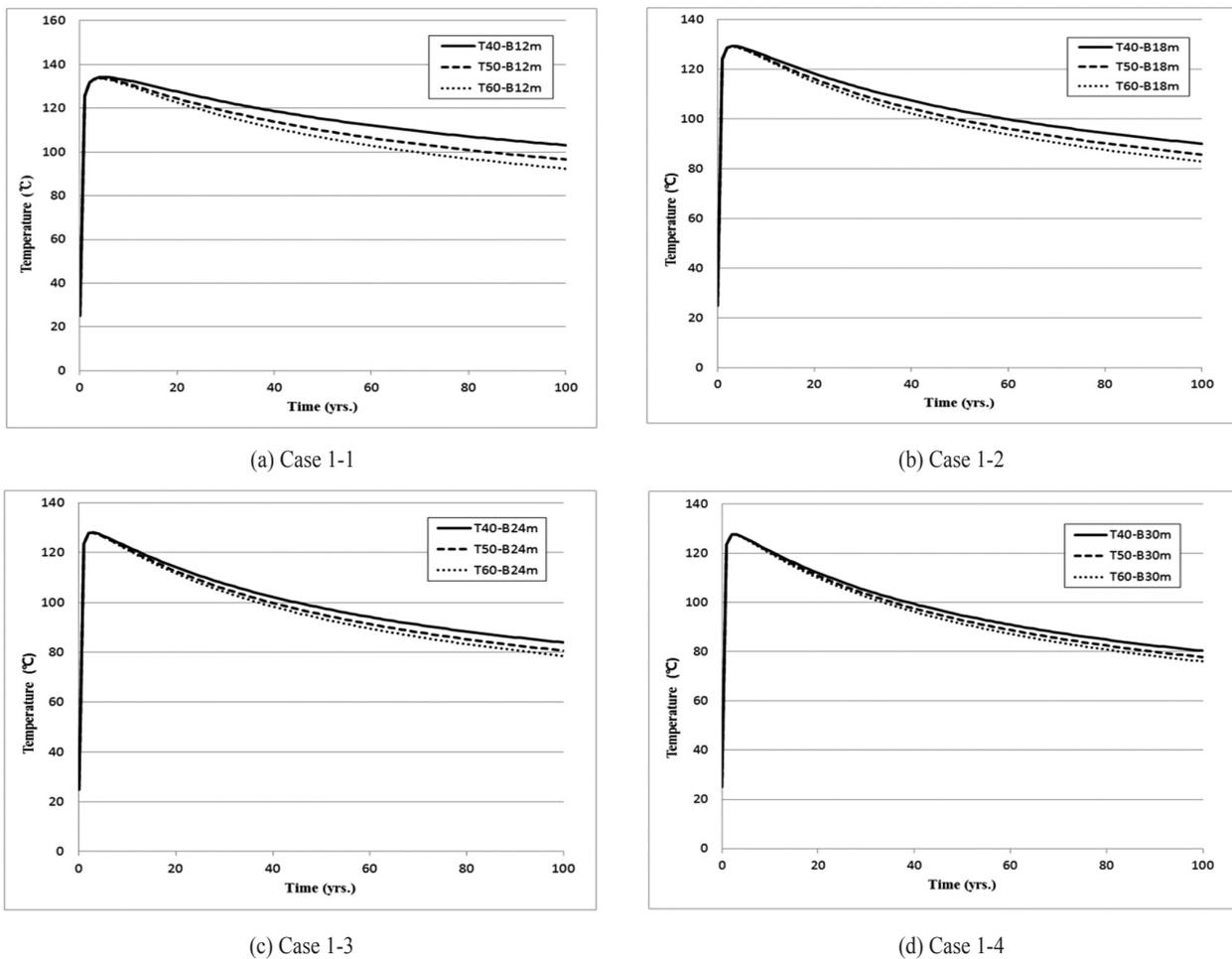


Fig. 7. Thermal analyses results for case 1(fix: hole spacing).

Table 2. Maximum temperature for the case 1 (fix: hole spacing)

D. T. Spacing (m)	D. H. Distance (m)	Max. Temp. (°C)	D. T. Spacing (m)	D. H. Distance (m)	Max. Temp. (°C)
40		134.2	40		128.1
50	12 (Case 1-1)	133.7	50	24 (Case 1-2)	128.0
60		133.6	60		127.9
40		129.4	40		127.7
50	18 (Case 1-3)	129.3	50	30 (Case 1-4)	127.6
60		129.2	60		127.5

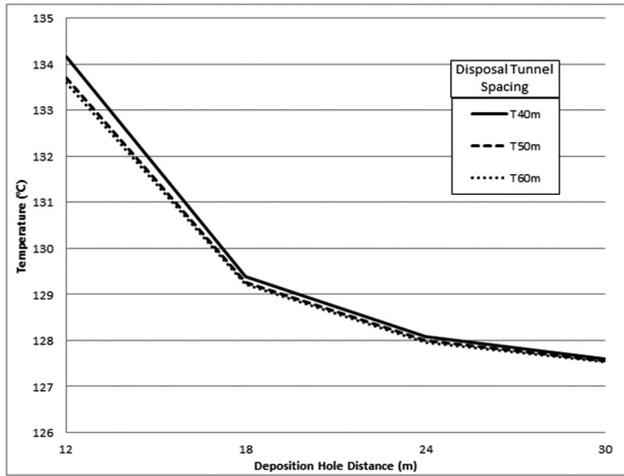
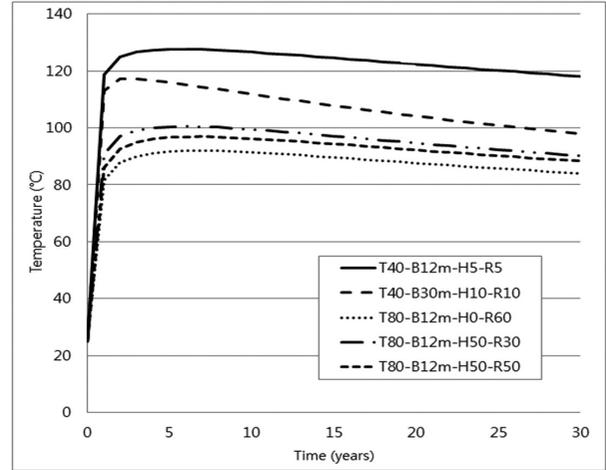


Fig. 8. Maximum temperature for the case 1.

처분공과 처분터널의 간격 조정만으로는 완충재의 온도를 100°C 이하로 유지하여야 하는 처분시스템의 온도요건을 만족시키기 어려울 것으로 판단된다.

4.2 처분용기 개선한 경우 결과 분석

본 연구에서는 처분시스템의 열적 요건에 만족하는 조건을 찾기 위하여 Fig. 6 및 Table 4에서 보이는 바와 같이, 처분용기의 지름과 길이를 확대하여 열발산 면적을 기존 12.25 m²에서 점차 확대하여 34.17 m²(2.7 배)까지 증가시킨 다섯 가지 경우(Case 2-1 ~ Case 2-5)에 대하여 열해석을 수행하였으며, 각 경우에 대한 최고온도는 Fig. 9 및 Table 3에 나타난 바와 같다.



T : Tunnel spacing, B : Borehole distance, H : Increase in canister height R : Increase in canister radius

Fig. 9. Thermal analyses results for the case 2.

Table 3. Maximum temperature for the case 2

Disposal Canister	D. T. Spacing(m)	D. H. Distance (m)	Heat Emission Area (m ²)	Max. Temp (°C)
Existing Disposal System	40	6	12.25	< 100
T40-B12-H5-R5 (Case 2-1)	40	12	14.00	127.718
T40-B30-H10-R10 (Case 2-2)	40	30	16.04	117.30
T80-B12-H0-R60 (Case 2-3)	80	12	34.17	91.97
T80-B12-H50-R30 (Case 2-4)	80	12	26.17	100.54
T80-B12-H50-R50 (Case 2-5)	80	12	31.48	96.92

T : Tunnel spacing, B : Borehole distance, H : Increase in canister height R : Increase in canister radius

표 및 그림에서 알 수 있는 바와 같이, 사용후핵연료 집합체를 해체하여 밀집한 연료봉을 처분용기에 적재한 심지층 처분시스템에 있어서 열적요건을 만족시키기 위해서는 처분공 간격, 처분터널 간격 및 처분용기의 열발산 면적 각각에 대하여 처분용기에 추가된 열량의 배수만큼 고려하여야 함을 확인하였다.

즉, 사용후핵연료 집합체 8다발의 연료봉을 밀집하여

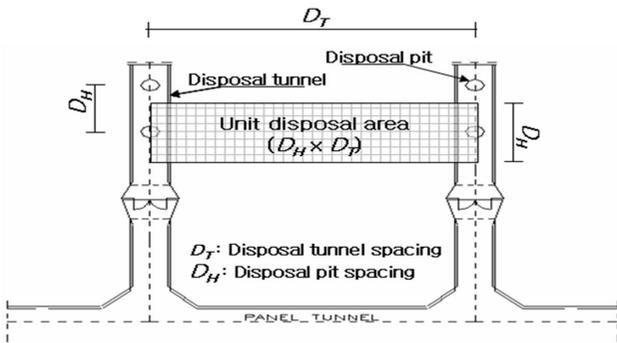


Fig. 10. Unit disposal area.

처분용기에 적재하여 처분하는 경우 사용후핵연료 집합체 4 다발을 적재한 처분용기를 처분하는 경우에 비하여, 처분공간격 및 처분터널 간격을 2배 이상으로하고 처분용기의 크기 도 확장하여 열발산 면적을 2배 이상으로하여야 처분시스템 온도요건을 만족시킬 수 있을 것으로 판단된다.

5. 사용후핵연료봉 밀집을 고려한 처분시스템 열해석 결과 분석

5.1 단위 처분면적 비교

본 연구에서는 사용후핵연료처분용기를 수직 처분하는 것으로 가정하였으며, 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. 10에서 그 개념을 보여주고 있으며, 처분용기 1개를 처분하였을 때 소요되는 처분구역의 면적을 나타낸다[16]. 따라서 고준위폐기물 처분을 위한 지하시설의 개략적인 규모는 단위 처분면적과 처분될 총 폐기물 포장물의 수를 곱하여 추정할 수 있다. 경제성 관점에서 볼 때, 지하 처분시설의 면적을 최소화할 수 있도록 처분 터널 간격과 처분공 간격을 설정하는 것이 바람직하다.

Table 4. Comparison between existing disposal system and rod consolidated disposal system

	Existing Disposal System	Disposal system with rod consolidation
Disposal Canister	Capacity	4 Assemblies
	Size	Φ102 x 485
	Heat	1,540 W
Unit disposal area	Copper volume	0.76 m ³
	Hole distance	6 m
	Tunnel spacing	40 m
Unit disposal area	Unit area	240
	Bentonite volume	21 m ³
	Disposal area per assembly	60 m ² /assembly
Disposal system with rod consolidation	Rods from 8 assemblies	3,080 W
	Size	Φ152 x 535
	Heat	3,080 W
Unit disposal area	Copper volume	1.30 m ³
	Hole distance	12 m
	Tunnel spacing	80 m
Unit disposal area	Unit area	960
	Bentonite volume	31 m ³
	Disposal area per assembly	120 m ² /assembly

Table 4는 기존의 밀집을 고려하지 않은 처분시스템 [4, 10]과 본 연구에서의 연료봉 밀집을 고려한 처분시스템에 대한 단위 처분면적 관점에서 비교 분석한 내용을 나타내고 있다.

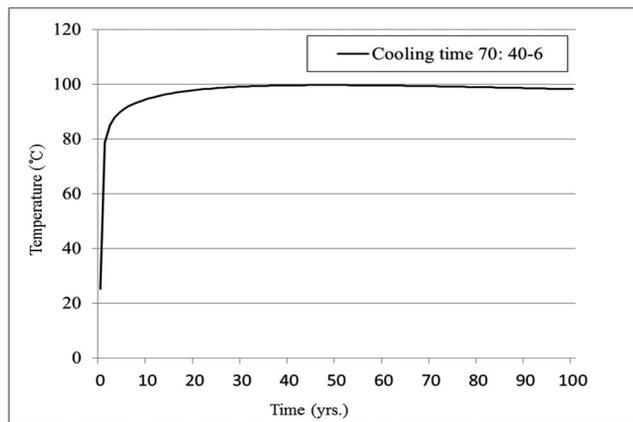
표에서 나타내고 있는 바와 같이, 동일한 냉각기간의 사용후핵연료를 처분하는 경우 집합체당 처분면적이 기존의 밀집하지 않은 경우는 60 m² 이고, 밀집을 고려한 경우는 120 m² 로 나타나 밀집하는 경우가 오히려 불리한 것으로 나타났다. 또한, 처분용기 크기의 증가로 이에 따라 처분용기 재료인 구리 및 주철, 완충재 및 뒷채움재의 양이 증가(Table 4. 구리 및 벤토나이트 양 참조)하고 굴착량도 증가하여 더욱 불리한 것으로 판단된다.

5.2 냉각기간을 고려한 사용후핵연료 밀집 처분시스템

기존 사용후핵연료 처분시스템은 냉각기간 40년인 사용후핵연료집합체를 4다발 적재한 처분용기를 처분하는 것으로 이때 열량은 1540 W 이다. Table 5는 사용후핵연료 냉각기간과 사용후핵연료 톤당 및 집합체 수에 따른 붕괴열 관계를 나타내고 있다. Table에서 보여주고 있는 바와 같이 기존의 시스템의 열량과 동일한 열량을 갖도록 기존의 처분용기 체원에 사용후핵연료 집합체 6 다발을 밀집하여 처분하기

Table 5. Decay heat from spent fuels according to the cooling time

Cooling Time (yrs.)	P(t) (W/tHM)	P(t) (W/ass.)	P(t) (W/4 ass.)	P(t) (W/6 ass.)	P(t) (W/8 ass.)
40	889.36	385.09	1540.37	2310.56	3080.74
50	751.04	325.20	1300.80	1951.20	2601.60
60	654.15	283.25	1132.99	1699.48	2265.98
70	582.05	252.03	1008.11	1512.17	2016.23
80	526.05	227.78	911.12	1366.68	1822.25
90	481.15	208.34	833.35	1250.02	1666.69
100	444.24	192.35	769.42	1154.13	1538.83
110	413.29	178.96	715.82	1073.73	1431.64
120	386.93	167.54	670.16	1005.24	1340.32



(Cooling time : 70 yrs, 6 assemblies/canister, rod-consolidation)

Fig. 11. Result of thermal analysis.

위해서는 냉각기간이 약 70 년이 필요하고, 집합체 8 다발을 밀집하여 처분하기 위해서는 냉각기간이 약 100 년이 필요할 것으로 판단된다. Fig. 11은 냉각기간 70 년된 사용후핵연료 6다발을 밀집하여 기존의 처분용기에 적재하여 기존의 처분 개념에 있어서의 처분터널과 처분공 간격인 40 m와 6 m로 처분한 경우의 시간에 따른 온도이력을 나타내고 있다. 그림에서 보여주고 있는 바와 같이 처분시스템 열적 요건인 완충재의 온도 100℃ 이하를 유지함을 확인하였다.

이에 따른 단위처분면적은 Table 6에 나타내었으며,

Table 6. Comparison between existing disposal system and rod consolidated disposal system with 70-year cooling time spent fuels

	Existing Disposal System (cooling time : 40 years)	Disposal system for rod consolidated spent fuels (cooling time : 70 years)
Capacity	4 Assemblies	Rods from 6 assemblies
Disposal Canister Size	Φ102 x 485	Φ102 x 485
Heat	1,540 W	1,512 W
Unit disposal area Hole distance	6 m	6 m
Tunnel spacing	40 m	40 m
Unit area	240	240
Disposal area/assembly	60 m ² /assembly	40 m ² /assembly

표에서 보여주고 있는 바와 같이 집합체당 처분 소요면적이 40 m²로 기존시스템[10]의 집합체당 처분면적 60 m²에 비하여 1.5배정도 처분효율이 향상됨을 알 수 있다. 다만, 70 년 냉각한 사용후핵연료를 밀집하지 않고 처분하는 경우와 냉각기간의 장기화에 따른 저장조건 및 사용후핵연료의 건전성 등에 대하여 추가적인 평가가 필요하다.

6. 결론

본 연구에서는 현재 기술수준으로 가장 안전한 고준위 폐기물 처분방식으로 고려되고 있는 심지층처분기술에 있어서, 처분효율 향상을 위한 다양한 방안연구의 일환으로 고려할 수 있는 PWR 사용후핵연료 집합체를 해체하여 연료봉을 밀집하여 처분하는 경우에 대한 열해석을 수행하였다. 열해석 결과 평가인자인 처분공간격, 처분터널 간격 및 처분용기의 열발산 면적에 대한 분석결과는 아래와 같다.

- 처분공 간격을 고정하고 처분터널 간격을 조정하는 경우 처분시스템에 있어서 최고온도는 거의 동일하며, 처분터널 간격이 커짐에 따라 시간경과에 따른 온도감소가 커지는 것으로 나타났다.
- 처분터널 간격을 고정하고 처분공 간격을 조정하는 경우 처분시스템의 최고온도는 일정부분 감소하였다. 다만, 12 m에서 18 m로 늘린 경우가 가장 크게 감소하였으며, 이후는 크게 장점이 없는 것으로 나타났다.

- 기존의 처분용기와 동일한 크기에 사용후핵연료 봉을 밀집하여 처분하는 경우 처분공과 처분터널의 간격 조정만으로는 처분시스템의 온도요건을 만족시키기 어려울 것으로 판단되었다.
- 따라서, 사용후핵연료봉 밀집을 고려한 처분시스템에 있어서 열적요건을 만족시키기 위해서는 처분공 간격, 처분터널 간격 및 처분용기의 열발산 면적을 처분용기에 추가된 열량의 배수만큼 고려하여야 함을 확인하였다. 이 경우에도 동일한 냉각기간의 사용후핵연료를 처분하는 경우 처분효율 측면에서 불리한 것으로 나타났다.

아울러 사용후핵연료봉 밀집을 고려한 경우에 있어서 심지층 처분시스템의 적용을 위한 사용후핵연료 냉각기간을 분석하였으며, 처분효율 향상을 위한 방안별 밀집된 사용후핵연료의 소요 냉각기간을 아래와 같이 산출하였다.

- 기존 처분용기 제원에 사용후핵연료 집합체 6 다발을 밀집하여 처분하기 위해서는 냉각기간이 약 70 년이 필요하고 집합체 8 다발을 밀집하여 처분하기 위해서는 냉각기간이 약 100 년이 필요할 것으로 판단된다.
- 냉각기간 70 년의 사용후핵연료를 심지층 처분하는 경우 처분효율은 기존 개념에 비하여 1.5배정도 향상되는 것으로 판단되지만, 냉각기간이 장기간 소요되는 경우 사용후핵연료의 건전성 등 다양한 측면에서의 분석이 추가적으로 필요하다.

이들 연구결과는 사용후핵연료를 대상으로하는 다양한 처분기술에 대한 국내 적용성 및 처분효율 향상방안 등 타당성 분석을 위한 입력자료로서 유용하게 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

REFERENCES

- [1] Svensk Kärnbränslehantering AB(SKB), Long-term safety for the final repository for spent nuclear fuel at Forsmark, Main report of the SR-Site project, SKB Technical Report TR-11-01 (2011).
- [2] Jaana Palom, Linnea Ristim, Facility Description 2012 Summary Report of the Encapsulation Plant and Disposal Facility Designs, Posiva Oy, Working Report 2012-66 (2013).
- [3] International Atomic Energy Agency(IAEA), IAEA Nuclear Energy Series Geological Disposal of Radioactive Waste: Technological Implications for Retrievability, No. NW-T-1.19, IAEA, VIENNA (2009).
- [4] J.Y. Lee, D. Cho, H. Choi, and J. Choi, "Concept of a Korean Reference Disposal System for Spent Fuels", JNST, Vol. 44, No. 12, 1565-1573 (2007).
- [5] J.P. Lempert and E. Biurrun, "STATUS OF HLW AND SPENT FUEL MANAGEMENT IN THE FEDERAL REPUBLIC OF GERMANY", WM'00 Conference, Tucson, AZ (2000).
- [6] Bill W. Arnold, Patrick V. Brady, and Stephen Pye, Reference Design and Operations for Deep Borehole Disposal of High-Level Radioactive Waste, Sandia National Laboratories Report, SAND2011-6749, 28-29 (2011).
- [7] H.J. Choi and J.Y. Lee, Design Requirements for the Korean Reference Repository System of HLW, Korea Atomic Energy Research, KAERI/TR-3003/2005 (2005).
- [8] Svensk Kärnbränslehantering AB(SKB), Buffer and backfill process report for the safety assessment SR-Can, SKB Technical Report TR-06-18 (2006).
- [9] Korea Electric Power Corporation Nuclear Fuel(KEPCO NF), COMMUNICATION INNOVATION & ONE VOICE WE ARE GLOBAL KNF, Brochure, 15, KEPCO NF (2013).
- [10] H.J. Choi, J.Y. Lee, and J.W. Choi, Korean Reference HLW Disposal System, Korea Atomic Energy Research Institute, KAERI/TR-3563/2008, 23-35 (2008).
- [11] Svensk Kärnbränslehantering AB(SKB), Buffer and backfill process report for the safety assessment SR-Can, SKB Technical Report TR-06-18 (2006).
- [12] J.Y. Lee, D.K. Cho, H.J. Choi, and L.M. Wang, "Analyses of Disposal Efficiency Based on Nuclear Spent Fuels Cooling Time and Disposal Tunnel/Pit Spacing for the Design of a Geological Repository", Progress

in Nuclear Energy 53, 361-367 (2011).

- [13] J. Y. Lee, D. K. Cho, M.S. Lee, H. J. Choi, and L. M. Wang, “Efficiency analyses of the CANDU spent fuel repository using modified disposal canister for a deep geological system design”, Nuclear Engineering and Design 242, 433-333 (2012).
- [14] Svensk Kärnbränslehantering AB(SKB), Programme for research, development and demonstration of methods for the management and disposal of nuclear waste, SKB Technical Report TR-07-12 (2007).
- [15] Dassault systems, Abaqus/CAE 6.10 User’s manual, Dassault systems simulia corp. (2010).
- [16] Japan Nuclear Cycle Development Institute(JNC), H12 Project to Establish Technical Basis for HLW Disposal in Japan, Supporting Report 2-Repository Design & Engineering Technology, JNC (1999).