

Analyses of the Double-Layered Repository Concepts for Spent Nuclear Fuels

사용후핵연료 심지층 처분장 복층개념 분석

Jongyoul Lee*, Hyeona Kim, Minsoo Lee, Heui-Joo Choi, and Kyungsu Kim

Korea Atomic Energy Research Institute, 111, Daedeok-daero 989beon-gil, Yuseong-gu, Daejeon, Republic of Korea

이종열*, 김현아, 이민수, 최희주, 김경수

한국원자력연구원, 대전광역시 유성구 대덕대로 989번길 111

(Received March 24, 2017 / Revised May 8, 2017 / Approved June 12, 2017)

A deep geological disposal at a depth of 500 m in stable host rock is considered to be the safest method with current technologies for disposal of spent fuels classified as high-level radioactive waste. The most important requirement is that the temperature of the bentonite buffer, which is a component of the engineered barrier, should not exceed 100°C. In Korea, the amount of spent fuel generated by nuclear power generation, which accounts for about 30% of the total electricity, is continuously increasing and accumulating. Accordingly, the area required to dispose of it is also increasing. In this study, various duplex disposal concepts were derived for the purpose of improving the disposal efficiency by reducing the disposal area. Based on these concepts, thermal analyses were carried out to confirm whether the critical disposal system requirements were met, and the thermal stability of the disposal system was evaluated by analyzing the results. The results showed that upward 75 m or downward 75 m apart from the reference disposal system location of 500 m depth would qualify for the double layered disposal concept. The results of this study can be applied to the establishment of spent fuel management policy and the design of practical commercial disposal system. Detailed analyses with data of a real disposal site are necessary.

Keywords: Deep geological disposal, Reference disposal system, Double layered repository, Decay heat, Engineered barrier, Thermal analyses, Disposal area, Disposal efficiency

*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>
 Kyungsu Kim <http://orcid.org/0000-0002-0399-2653>

Hyeona Kim <http://orcid.org/0000-0001-9804-7461>
 Heui-Joo Choi <http://orcid.org/0000-0001-9253-7697>

고준위 방사성폐기물로 분류되는 사용후핵연료를 현재 기술로 가장 안전한 격리 방법으로는 500 m 심도의 안정한 암반에 심지층 처분하는 방법으로, 가장 중요한 요건은 공학적방벽인 완충재의 온도가 100℃를 초과하지 않도록 시스템을 설계하는 것이다. 국내의 경우 전체 전력 소요량의 약 30% 정도를 차지하고 있는 원자력발전으로 발생하는 사용후핵연료의 양은 지속적으로 증가하여 누적되고 있어, 이들을 처분하기 위한 소요면적도 증가하고 있다. 따라서, 본 연구에서는 처분면적을 감소시킴으로써 처분효율을 향상시키기 위한 목적으로 다양한 복층처분 개념을 도출하였다. 이를 바탕으로 중요한 처분시스템 요건 만족여부를 확인하기 위하여 열해석을 수행하고 그 결과를 분석하여 처분시스템 열적 안정성을 평가하였다. 평가결과, 기준시스템 위치인 500 m 심도로부터 상부 또는 하부로 75 m를 이격한 심도에 복층으로 처분시스템 구축이 가능하였으며, 실제 부지특성자료에 따른 상세 분석이 요구된다. 본 연구결과는 사용후핵연료 관리정책 수립 및 실제 처분시스템 설계에 활용될 것으로 사료된다.

중심단어: 심지층처분, 기준처분시스템, 복층 처분장, 붕괴열, 공학적방벽, 열해석, 처분장 면적, 처분효율

1. 서론

국내 원자력발전소에서 생산되는 전력량은 총 전력량의 약 30%에 이르고 있으며, 원자력발전소에서 전기를 생산하고 난 후 발생된 사용후핵연료는 지속적으로 누적되고 있다. 이들 사용후핵연료는 유용한 물질을 함유하고 있어 재활용하는 방안을 고려하거나 고준위폐기물로 분류하여 직접처분을 고려하고 있다. 사용후핵연료 또는 이들에 대한 재활용 공정으로부터 발생하는 고준위폐기물은 높은 열과 방사성 독성을 포함하고 있으므로 인간생활권으로부터 안전하게 격리시켜 수 만년 이상의 장기간 동안 관리하는 것은 원자력에너지의 지속적인 이용을 위한 필수사항이다. 이러한 고준위 방사성폐기물관리는 원자력발전소가동 이래로 아직 해결되지 못한 과제로서 정부에서는 이에 대한 대책마련을 위한 고준위 방사성폐기물관리 기본계획[1]을 수립하고 이를 바탕으로 한 시행계획을 준비하고 있다.

국내에서 고준위 방사성폐기물에 대한 연구개발은 1997년부터 착수하였으며, 2007년에 사용후핵연료를 직접 처분대상으로 하여 현재기술로 가장 안전한 방법으로 고려하고 있는 심도 500 m의 안정한 암반에 처분하는 심지층 처분방식인 스웨덴 KBS-3형 처분개념을 바탕으로 한 기준 심지층처분 시스템을 개발하였다[2,3]. 고준위 방사성폐기물 심지층 처분시스템에 있어서 주요한 고려인자는 폐기물로부터 발생하는 열로 인하여 공학적방벽 요소인 완충재의 온도가 100℃ 이하가 되도록 처분공 및 처분터널 간격을 설정하는 것이다.

자원이 빈약한 우리나라의 경우 원자력발전에 따른 부산물인 사용후핵연료는 현재 발전소부지에 임시저장되어 누적되고 있으며, 향후 안정적인 에너지공급을 위하여 지속적인 원자력발전소의 운영계획에 따라 다량의 사용후핵연료가 발생될 것으로 예측된다. 또한, 원자력발전의 경제성 향상을 위하여 핵연료를 개량하고, 노심장전 모형을 개선하는 등 기술의 진보에 따라 국내 원자로에서 방출되는 사용후핵연료의 특성도 변화하고 있다. 즉, 원자력발전소에서 전기를 생산하고 난 후 연소도가 높은 사용후핵연료가 발생되고 이에 따라 붕괴열도 높아지고 있어 보다 넓은 처분면적이 요구되고 있다.

따라서, 이들을 장기간 안전하게 관리하기 위해서는 대규모의 사용후핵연료 처분장 면적이 요구므로, 국토를 효율적으로 이용하고 주민 수용성을 높이기 위하여 캐나다 NWMO에서 수행한 다층처분장에 대한 연구[4]와 같이 처분장 면적을 감소시켜 처분효율을 향상시키는 방안에 대한 연구가 필요하다.

본 논문에서는 사용후핵연료 특성변화에 따라 신규로 제안된 기준 사용후핵연료를 적용한 심지층 처분시스템을 검토하고, 처분장 면적 감소효과에 따른 처분효율 향상 방안의 일환으로서 복층 사용후핵연료 처분장 개념을 설정하고 이에 대한 열적 안정성 분석을 수행하였다. 복층 처분개념에 있어서는 처분공에 2개의 처분용기를 쌓아서 처분하는 개념을 포함하여 다양한 층간 간격의 처분장 개념을 설정하고 이에 대한 열적 안정성 해석을 수행하여, 처분시스템

열적요건을 만족하는 복층개념을 도출하였다.

본 연구결과는 사용후핵연료 관리정책 수립 및 실제 상용 처분시스템 설계에 활용될 것으로 사료된다.

2. 국내 사용후핵연료 기준 처분시스템 개념

2.1 국내 사용후핵연료 예상발생량

국내에서 2015년말 기준 현재까지 원자력발전소에서 전기를 생산하고 배출된 사용후핵연료는 경수로 사용후핵연료 약 16,297 다발, 중수로 사용후핵연료는 408,797 다발이 누적되어 있으며, 이들은 원자력발전소 부지에 임시저장되어 있다. 국내 원전에서 전기를 생산하고 배출되는 사용후핵연료의 발생량은 국가에서 설정하는 원자로 설비계획과 각 원전에서 매년 방출하는 사용후핵연료의 양을 예측함으로써 평가할 수 있다. 원자로 설비계획은 국가 에너지기본계획 및 전력수급계획에 따라 결정되는데, 2015년 7월 발표된 제 7차 전력수급계획에 따르면 원자로 총 36기로부터 향후 경수로형 73,110 다발, 중수로형 255,840 다발이 발생될 것으로 전망하고 있다[1]. 따라서, 현재 처분대상 사용후핵연료는 PWR 사용후핵연료가 89,407 다발, CANDU 사용후핵연료가 664,637 다발에 이를 것으로 예상된다.

2.2 기준 처분시스템 개념

국내에서도 2007년에 경수로 사용후핵연료를 처분대상으로 한 기준 심지층처분 시스템을 개발하였으며, 이 시스템 개발을 위한 기준 사용후핵연료로는 초기 농축도 4.0 wt%, 방출연소도 45 GWd/MtU, 원자로 방출 후 40년 냉각된 사용후핵연료를 설정하였다[5]. 이후, 경제성 향상을 위한 핵연료 개량사업 및 노심장전 모형 개선 등 원자력발전 기술의 진보에 따라 국내 원자로에서 방출되는 사용후핵연료의 특성도 변화되었다. 2010년대 이후부터는 대부분 초기농축도 4.5 wt%, 방출연소도 55 GWd/MtU를 갖는 PLUS-7형 사용후핵연료가 발생되고 있으며, 향후 이들 PLUS-7형 사용후핵연료가 전체 발생량의 약 70%를 차지할 것으로 전망하고 있다. 따라서, 이러한 고연소도 사용후핵연료를 심지층처분 시스템 설계에 근간이 되는 기준 사용후핵연료로 설정할 것을

제안하고 있다[6, 7].

아래 식은 기준 사용후핵연료의 붕괴열식(W/tU)과 시간 범위별 상수를 나타내고 있으며, 이를 바탕으로 한 붕괴열 평가 계산결과는 Fig. 1에서 보여주고 있는 바와 같이 시간에 따른 붕괴열 변화로 나타내고 있다[8].

$$Y = y_0 + A_1 \cdot \exp(-(x-x_0)/t_1) + A_2 \cdot \exp(-(x-x_0)/t_2) + A_3 \cdot \exp(-(x-x_0)/t_3)$$

	y0	x0	A1	t1
10 < t ≤ 100	297.9526	0.7805	3218.3828	2.9441
100 < t ≤ 1000	32.1858	101.6499	146.7649	40.5612
1000 < t ≤ 100000	1.0085	863.1459	12.052	32479.335
	A2	t2	A3	t3
10 < t ≤ 100	10394.9385	1.0966	2036.4309	42.7499
100 < t ≤ 1000	110.4017	121.2880	197.2185	622.1932
1000 < t ≤ 100000	20.7831	9417.8126	56.4434	622.6981

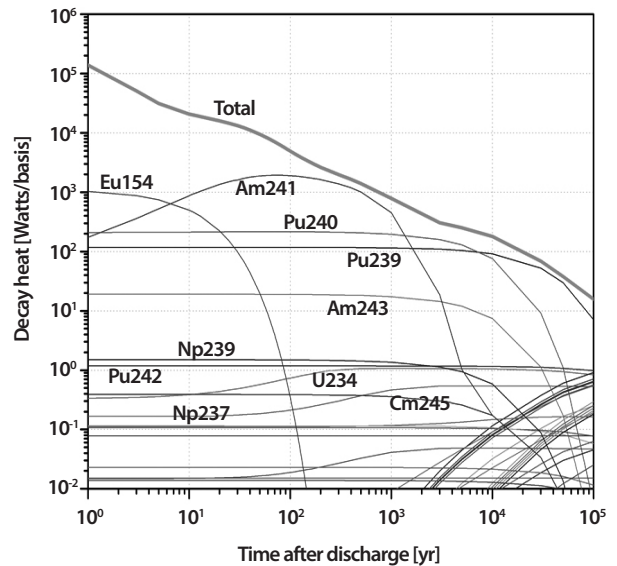


Fig. 1. Decay heat of the reference spent fuel.

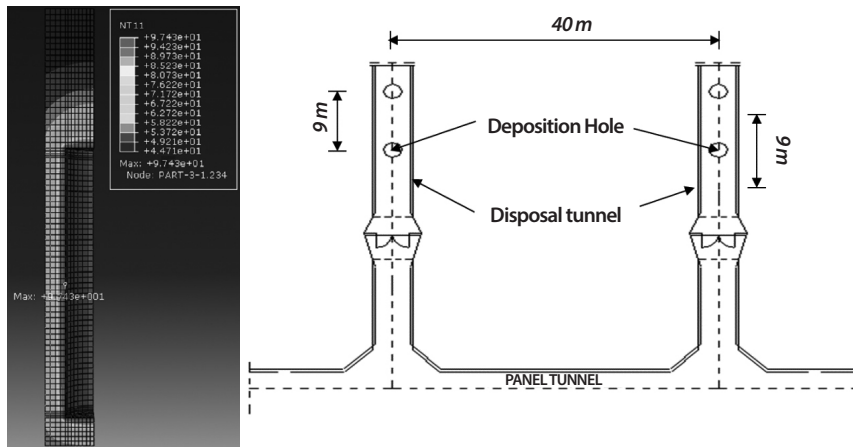


Fig. 2. Result of thermal analysis for the reference spent fuel disposal concept.

이 결과를 근거로 처분시스템 설계를 위한 열해석을 수행하여 Fig. 2에서 보여주는 바와 같이 처분시스템에 대한 열적요건을 만족하도록 하여 처분터널간격 40m, 처분공간격 9m를 설정하였으며, 그에 따른 기준 처분시스템 개념은 Fig. 3에서 보여주는 바와 같다[8].

3. 사용후핵연료 복층 처분시스템 개념

지속적인 원자력발전으로 인하여 발생하는 사용후핵연료의 양은 누적되고 있으며, 향후 발생될 사용후핵연료를 고려할 때, 이들을 처분하기 위해서는 상당한 면적이 소요될 것으로 예상된다. 따라서, 국토가 좁은 우리나라의 경우 처분에 필요한 면적을 효율적으로 활용하기 위하여 다양한 방안을 연구하고 있으며, 본 논문에서는 캐나다 사용후핵연료 관리기관인 NWMO (Nuclear Waste Management Organization)이 분석한 복층 처분시스템 개념[4]을 참고하여 다양한 적층 및 복층 처분시스템 개념을 도출하고, 이를 바탕으로 처분시스템에서 가장 중요한 인자인 열적 안정성 측면에서의 분석을 수행하였다.

3.1 적층 처분시스템 개념

적층처분 개념은 지하 500 m 심도에 뚫은 처분터널 바다의 처분공에 사용후핵연료를 적재한 처분용기 1개를 처분하는

기준 처분시스템에 비하여 1개의 처분공에 동일한 처분용기 2개를 적층하여 처분하는 개념으로 Fig. 4에서 보여주는 바와 같다.

3.2 복층 처분시스템 개념

사용후핵연료 심지층 복층 처분개념은 기준 처분시스템이 위치한 심도인 500 m를 기준으로 상부방향 또는 하부방향으로 일정한 간격을 이격시켜 추가로 처분하는 개념이다. 즉 Fig. 5와 6에서 보여주는 바와 같이 하부방향(Downward)으로 각각 25, 50, 75 및 100 m (Case D-25, 50, 75, 100)를 이격시킨 복층 처분개념과 상부방향(Upward)으로 각각 25, 50, 75 및 100 m (Case U-25, 50, 75, 100)를 이격시킨 복층 처분개념을 설정하였다.

4. 복층 처분시스템 열해석

현재 기술로 사용후핵연료를 포함하는 고준위폐기물을 인간환경으로부터 가장 안전하게 격리할 수 있는 방법으로 지하 500 m 심도의 모암에 공학적방벽을 포함하는 다중방벽으로 구성된 KBS-3 개념의 처분시스템을 고려하고 있다. 이 처분시스템에 있어서 중요한 요건 중의 하나는 공학적방벽의 성능저하를 방지하기 위하여 완충재인 벤토나이트의 온도가 100°C를 넘지 않도록 하는 것이다[9]. 따라서,

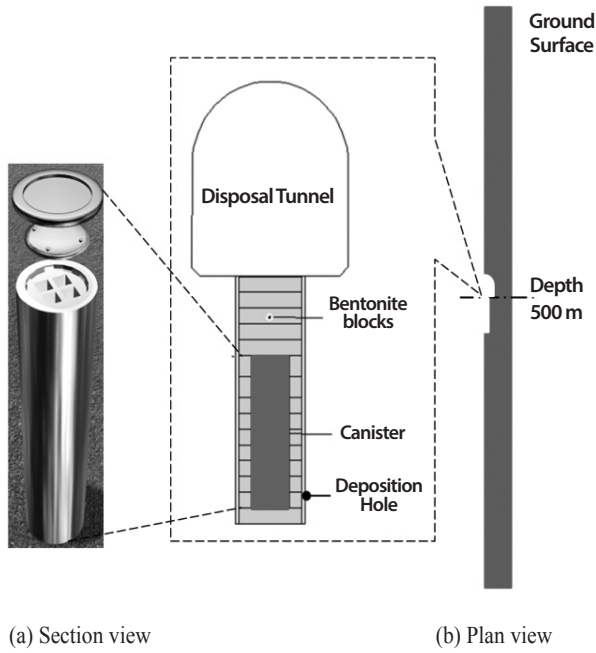


Fig. 3. A concept of the reference spent fuel disposal system.

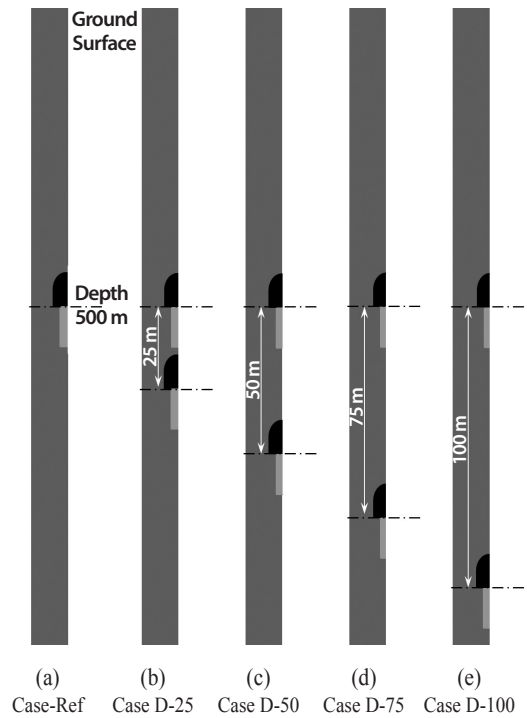


Fig. 5. Downward double layered repository concepts.

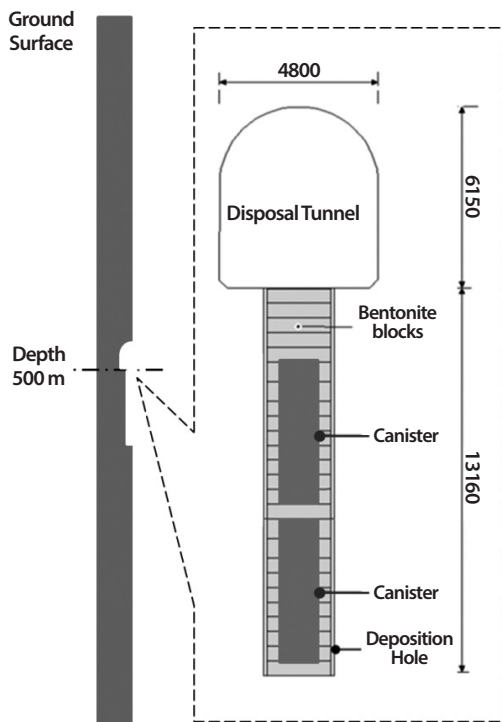


Fig. 4. A disposal concept for two canisters in a borehole.

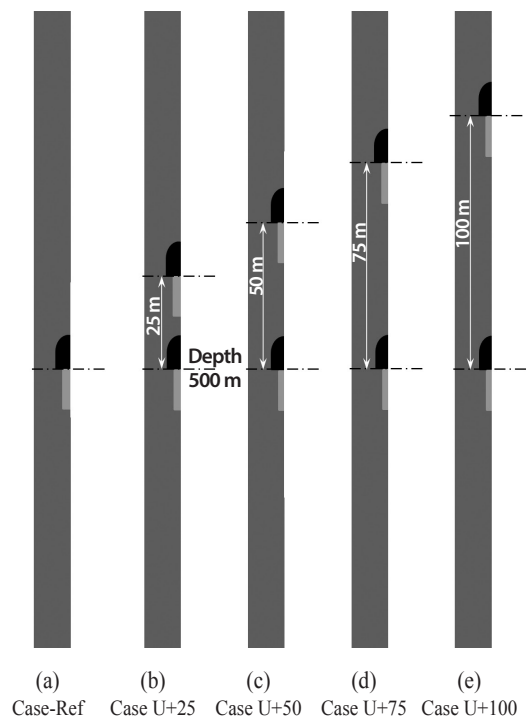


Fig. 6. Upward double layered repository concepts.

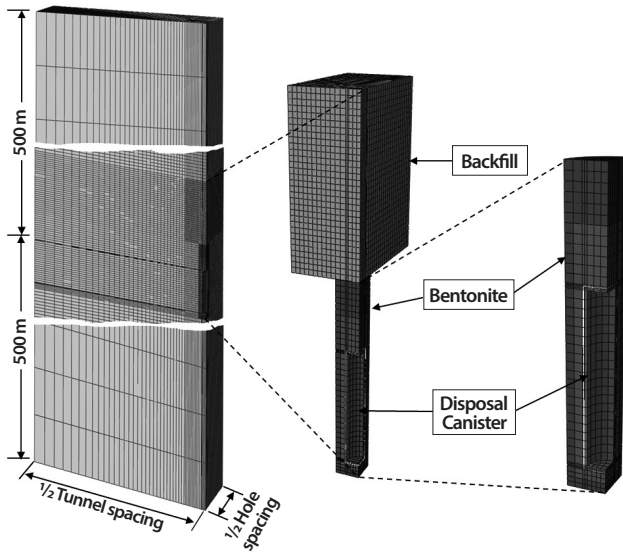


Fig. 7. Calculation domain for thermal analyses.

Table 1. Material Properties for thermal analyses

	Density (kg·m ⁻³)	Thermal Conductivity (w·m ⁻¹ ·°C ⁻¹)	Specific Heat (J·kg ⁻¹ ·°C ⁻¹)
Copper shell	8,900	386	383
Cast insert	7,200	52	504
Buffer	1,970	0.8	1,380
Backfill	2,270	2	1,190
Rock	2,650	3.2	815

본 논문에서 설정된 다양한 고준위폐기물 복층 처분개념에 있어서도 처분시스템이 열적 안정성을 유지하도록 하기 위하여 열해석을 수행하여 열적요건 만족여부를 확인하여야 한다[10].

4.1 해석범위 및 방법

사용후핵연료를 적재한 처분용기가 지하 처분장에 처분되면 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.

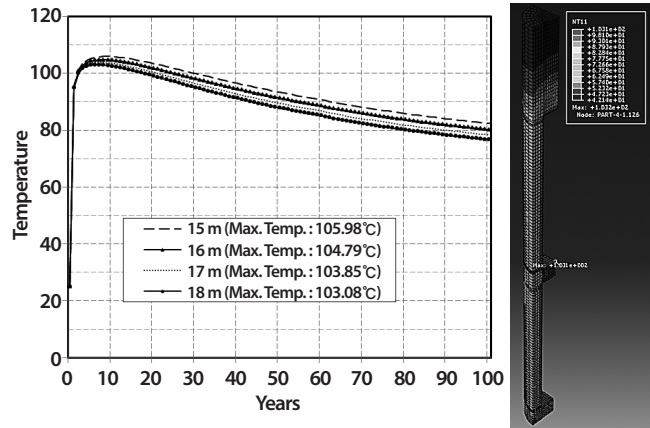


Fig. 8. Results of thermal analyses for disposal concepts of two canisters in a borehole.

심지층 처분시스템의 열적 안정성평가를 위한 열해석 범위는 Fig. 7에 나타낸 바와 같다. Fig. 7에서 보여주는 바와 같이 해석영역은 처분용기로부터 발생하는 붕괴열의 영향이 미치지 않도록 하는 범위인 지표에서부터 1000 m 심도까지를 설정하였다. 처분터널과 처분공이 일정한 간격으로 연속적으로 배치되는 특성을 고려하여 처분터널과 처분공 간격의 중앙을 기준으로 하는 1/4 모델로 설정하고 대칭성을 지닌 점을 고려하여 해석모델의 측면은 단열조건을 설정하였다.

또한, 복층 처분의 경우 기존 처분시스템과 동일한 조건인 처분터널 간격 40 m, 처분공 간격 9 m로 고정으로 하고, 기준층인 500 m 심도 상부 방향과 하부방향 간격에 따른 열해석을 수행한 결과가 열적요건에 만족하는지 여부를 확인하여 열적안정성을 평가하였다. 본 해석을 위한 전산프로그램은 유한요소방식을 이용한 상용코드이며, 고준위폐기물 처분시스템 설계를 위한 코드로서 검토되고 검증된 아바쿠스 ver. 6.14를 활용하였다[11].

본 열해석을 위한 초기조건으로는 지표 부분의 지하수 온도를 기준으로 지표는 10°C로 하였으며, 심도에 따른 지열 경사는 국내에서 보유하고 있는 소규모 지하처분연구시설인 KURT (KAERI Underground Research Tunnel) 지질을 기반으로 조사한 결과인 3°C/100 m를 적용하였다. 따라서, 해석 모델 범위의 상부와 하부의 온도는 각각 10°C와 40°C로 설정하였다[12, 13]. 처분시스템을 구성하는 암반, 완충재, 뒷채움재, 처분용기의 밀도, 열전도도, 비열 등 해석에 필요한 물성은 Table 1에 나타낸 바와 같다.

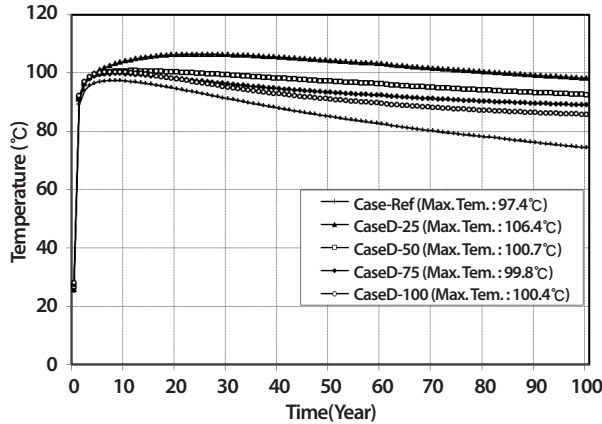


Fig. 9. Results of thermal analyses for downward double layered repository concepts.

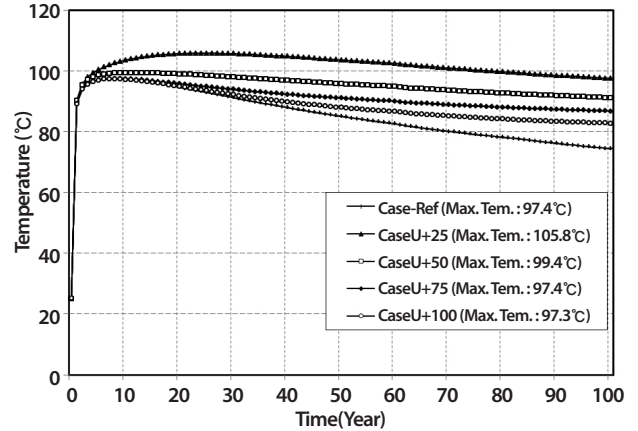


Fig. 10. Results of thermal analyses for upward double layered disposal concepts.

4.2 복층 처분시스템 개념 열적 안정성 평가

4.2.1 적층 처분시스템

처분터널 바닥에 굴착한 하나의 처분공에 사용후핵연료를 적재한 처분용기 2개를 적치하여 처분하는 적층 처분시스템은 기준처분시스템과 동일하게 처분터널 간격을 40 m로 고정하고 처분공간격을 15, 16, 17, 18 m로 설정하였다. 이 개념들에 대한 열적 안정성 만족여부를 확인하기 위한 열해석 결과는 Fig. 8에서 보여주는 바와 같다.

결과에서 보여주는 바와 같이 적층 처분시스템의 경우 기준 처분시스템의 처분용기당 소요면적인 360 m² (터널간격 40 m×처분공 간격 9 m)의 2배인 720 m² (처분터널 간격 40 m×처분공 간격 18 m)인 경우에도 완충재의 최고온도 100°C 이하를 유지하여야 하는 열적요건에 만족할 수 없음을 확인하였다. 따라서, 적층 처분시스템의 경우 현재의 완충재 열적요건이 완화되지 않는 경우[14] 처분효율 향상방안으로서는 적합하지 않을 것으로 판단된다.

4.2.2 복층 처분시스템

사용후핵연료 심지층 복층 처분개념은 Fig. 5와 6에서 보여주는 바와 같이 기준 처분시스템이 위치한 심도인 500 m를 기준으로 상부방향 또는 하부방향으로 일정한 간격을 이격시켜 처분구역을 2개 층으로 구성하여 처분효율을 향상시키고자 하는 개념이다. 이들 처분개념에 있어서도 처분시스템의 열적 요건을 만족하여야 하며, 기준시스템의 하부에

Table 2. Results of thermal analyses for double layered repository

	Case	Max. Temp. (°C)	Requirement (M.T. < 100°C)	Remark
Downward	Case-Ref	97.4	Satisfied	Thermal Gradient : 3°C/100 m
	Case D-25	106.4	Dissatisfied	
	Case D-50	100.7	Dissatisfied	
	Case D-75	99.8	Satisfied	
upward	Case D-100	100.4	Dissatisfied	
	Case U-25	105.8	Dissatisfied	
	Case U-50	99.4	Satisfied	
	Case U-75	97.4	Satisfied	
	Case U-100	97.4	Satisfied	

처분구역을 설정한 경우에 대한 열해석 결과는 Fig. 9에, 기준 시스템의 상부에 처분구역을 설정한 경우의 열해석 결과는 Fig. 10에서 보여주는 바와 같다.

기준 처분시스템 심도에 대한 하부방향으로 25, 50, 75 및 100 m를 이격시킨 복층 처분시스템의 경우 완충재의 최고온도는 각각 106.6, 100.7, 99.8 및 100.4°C로 산출되었다. 이들 시스템에서 열적요건을 만족하는 경우는 Table 2에 나타난 바와 같이 75 m를 이격시킨 경우의 복층 처분시스템이며, 100 m 이격시킨 경우는 지온경사에 따른 영향으로

열적요건을 만족하지 못하는 것으로 판단된다.

또한, 기준 처분시스템 심도에 대한 상부방향으로 25, 50, 75 및 100 m를 이격시킨 복층 처분시스템의 경우 완충재의 최고온도는 각각 105.8, 99.4, 97.4 및 97.3℃를 나타내었으며, 이 시스템의 경우 Table 2에서 보여주는 바와 같이 50 m 이상을 이격시키면 처분시스템 열적요건을 만족하는 것으로 확인되었다.

5. 결론

국내 전력량의 약 30%를 생산하는 원자력발전소에서 전기를 생산하고 난 후 발생된 사용후핵연료는 지속적으로 증가되어 누적되고 있으며, 이들을 직접 처분할 경우 처분면적 또한 지속적으로 증가 될 것으로 예상된다. 이 경우 국토의 효율적인 이용뿐만 아니라 국민수용성 측면에서도 불리하므로 처분면적을 감소효과를 기대할 수 있는 처분효율 향상방안에 대한 연구가 필요하다. 본 연구에서는 이의 일환으로 아래에 기술하는 바와 같이 다양한 복층의 심지층 처분시스템 개념을 설정하였다.

- 심도 500 m의 처분공에 1개의 처분용기를 처분하는 기준개념을 바탕으로 1개의 처분공에 2개 처분용기를 처분하는 적층 처분개념의 경우 처분터널 간격을 40 m로 고정하고 처분공 간격을 15, 16, 17 및 18 m로 하여 개념을 설정하였다.
- 심도 500 m의 기준개념에 하부방향으로 25, 50, 75 및 100 m를 이격시킨 복층개념과 상부방향으로 25, 50, 75 및 100 m를 이격시킨 복층개념을 설정하였다.

또한, 이들에 처분개념들에 대한 열해석 수행 결과를 바탕으로 열적 안정성을 분석하여 열적 요건을 만족하는 시스템 개념을 설정하였으며 구체적인 내용은 다음에 기술한 바와 같다.

- 적층 처분개념의 경우 기준개념 처분면적의 2배인 40×18 m 인 경우에도 완충재의 온도가 103℃로 열적 요건은 만족하지 않는 것으로 평가되었다. 따라서, 완충재 온도 100℃를 넘지 않도록 하는 열적 요건을 완화하지 않는 경우 처분면적 감소효과에 따른 처분효율향상을 기대하기 어려울 것으로 판단된다.

- 심도 500 m의 처분공에 1개의 처분용기를 처분하는 기준개념의 하부 방향에 간격을 이격시켜 처분구역을 설정한 복층 처분 개념의 경우 기준 개념으로부터 75 m를 이격시키는 경우 열적요건을 만족하는 것으로 평가되었다. 그러나, 지온경사에 따른 온도 상승으로 100 m 이격시킨 복층 처분시스템의 경우에는 100℃를 초과하여 열적요건을 만족하지 않는 것으로 평가되었다.
- 심도 500 m의 처분공에 1개의 처분용기를 처분하는 기준개념의 상부 방향에 간격을 이격시켜 처분구역을 설정한 복층 처분 개념의 경우 기준 개념으로부터 50 m 이상 이격시키는 경우 열적요건을 만족하는 것으로 평가되었다.

이상의 평가결과로부터 복층 처분개념이 원자력발전소에서 발생하는 대량의 사용후핵연료에 대한 처분면적 감소효과를 기대하여 좁은 국토를 효율적으로 활용할 수 있는 처분효율 향상방안으로서 적용 가능성을 확인하였다. 추후, 처분장 부지가 확정되면 정확한 해석을 위하여 해당부지 입력 자료를 통한 열적 안정성 평가가 필요하며, 본 연구결과는 사용후핵연료 관리정책 수립 및 실제 상용 처분시스템 설계에 활용될 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 미래창조과학부 지원에 의한 원자력기술개발사업 처분시스템 성능평가체계 개발(NRF-2017M2A8A5014856)의 일환으로 수행되었습니다.

REFERENCES

- [1] The Atomic Energy Promotion Commission (AEPC), The National Basic Plan for HLW Management, MO-TIE, July 25, 2016 (2016).
- [2] J.Y. Lee, D. Cho, H. Choi, and J. Choi, Concept of a Korean Reference Disposal System for Spent Fuels, J. Nucl. Sci. Technol, 44(12), 1565-1573 (2007).

- [3] Korea Atomic Energy Research Institute (KAERI), Korean Reference HLW Disposal System, Korea Atomic Energy Research Institute, KAERI/TR-3563/2008, 23-35 (2008).
- [4] José L. Carvalho and Charles M. Steed, Thermo-Mechanical Analysis of a Multi-Level Repository for Used Nuclear Fuel, NWMO TR-2012-19 September 2012 (2012).
- [5] Korea Atomic Energy Research Institute (KAERI), Preliminary Conceptual Design of the Korean Reference Repository System for HLW in Vertical Emplacement, Korea Atomic Energy Research Institute Technical Report, KAERI/TR-3012/2005 (2005).
- [6] Korea Atomic Energy Research Institute (KAERI), Reference Spent Fuel and Its Source Terms for a Design of Deep Geological Disposal System, Korea Atomic Energy Research Institute Technical Report, KAERI/TR-3084/2005 (2005).
- [7] D.K. Cho, S.K. Yoon, H.J. Choi, J.W. Choi, and W.I. Ko, Reference spent nuclear fuel for pyro-processing facility design, J. Korean Radioact. Waste Soc., 6(3), 225-232 (2008).
- [8] Korea Atomic Energy Research Institute (KAERI), Evaluation on thermal performance and thermal dimensioning of direct deep geological disposal system for high burn-up spent nuclear fuel, Korea Atomic Energy Research Institute Technical Report, KAERI/TR-5230/2013 (2013).
- [9] Markku Juvankoski and Kari Ikonen, Buffer Production Line 2012 - Design, Production and Initial State of the Buffer, POSIVA 2012-17, POSIVA OY, December 2012 (2012).
- [10] Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB), Buffer and backfill process report for the safety assessment SR-Can, SKB Technical Report, TR-06-18 (2006).
- [11] Dassault systems, Abaqus/CAE 6.14 User's manual, Dassault systems simulia corp. (2014).
- [12] Korea Atomic Energy Research Institute (KAERI), Geological Disposal of Pyroprocessed Waste from PWR Spent Nuclear Fuel in Korea, KAERI Technical Report, KAERI/TR-4525/2011 (2011).
- [13] J.Y. Lee, D.K. Cho, H.J. Choi, J.W. 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, Prog. Nucl. Energy, 53(04), 361-367 (2011).
- [14] F. Kober, I. Gaus, S. Birkholzer, and S. Vomvoris, 18 Years of heating a full scale EBS at 100°C and possible applications at higher temperatures (“hotFEBEX” at > 150°C), CLAY CONFERENCE, BRUSSELS, 52-53, March 23-26, 2015 (2015).