Technical Paper https://doi.org/10.7733/jnfcwt.2019.17.4.405

An Improved Concept of Deep Geological Disposal System Considering Arising Characteristics of Spent Fuels From Domestic Nuclear Power Plants

국내 원자력발전소에서의 사용후핵연료 발생 특성을 고려한 심층 처분시스템 개선

Jongyoul Lee*, Inyoung Kim, Heuijoo Choi, and Dongkeun Cho
Korea Atomic Energy Research Institute, 111, Daedeok-daero, 989beongil, Yuseong-Gu, Daejon, Republic of Korea

이종열*, 김인영, 최희주, 조동건
한국원자력연구원, 대전광역시 유성구 대덕대로989번길 111

(Received August 13, 2019 / Revised September 18, 2019 / Approved October 4, 2019)

Based on spent fuels characteristics from domestic nuclear power plants and a disposal scenario from the current basic plan for high-level radioactive waste management, an improved disposal system has been proposed that enhances disposal efficiency and economic effectiveness compared to the existing disposal system. For this purpose, two disposal canisters concepts were derived from the length of the spent fuel generated from the nuclear power plants. In the disposal scenario, the acceptable amount of decay heat for each disposal container was determined, taking into account the discharge and disposal times of spent fuels in accordance with the current basic plan. Based on the determined decay heat of the two types of disposal canisters and the associated disposal system, thermal stability analyses were performed to confirm their suitability to the proposed disposal system design requirement and disposal efficiency assessment. The results of this study confirm 20% reduction in the disposal area and 20% increase in disposal density for the proposed disposal system compared to the existing system. These results can be used to establish a spent fuel management policy and to design a viable commercial disposal system.

Keywords: Spent fuels, Disposal Canister, Deep geological disposal system, Disposal scenario, Decay heat, Engineered barrier, Thermal requirement, 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	Inyoung Kim	http://orcid.org/0000-0001-7928-2415
Heuijoo Choi	http://orcid.org/0000-0001-9253-7697	Dongkeun Cho	http://orcid.org/0000-0003-4152-8605

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

국내 원자력발전소에서 발생하는 사용후핵연료의 제원 및 방출시점 등 특성과 현재의 고준위 방사성폐기물 기본계획에 근거한 처분시나리오를 도출하여 기존 심층 처분시스템을 바탕으로 처분효율과 경제성을 향상시킨 개선된 처분시스템을 제안하였다. 이를 위하여 국내 원자력발전소에서 발생하는 사용후핵연료의 길이에 따라 2종류의 처분용기 개념을 도출하고, 사용후핵연료 발생 년도와 현재의 기본계획에 근거한 처분 시나리오 설정에 따른 처분시점에서의 냉각기간을 고려하여 처분용기내 수용 가능한 붕괴열 량을 결정하였다. 그리고 2종류의 처분용기에 대한 처분시스템과 결정된 붕괴열을 바탕으로 열적 안정성 분석을 통하여 제안된 처분시스템의 설계요건에 대한 적합성 여부를 확인하고, 처분효율을 평가하였다. 개선된 처분시스템은 기존 처분시스템에 비하여 처분면적은 약 20% 감소되고 처분밀도는 약 20% 향상됨을 확인하였고, 처분용기와 완충재 재료도 상당량 절감됨을 확인하였다. 본 연구의 결과는 향후 사용후핵연료 관리정책 수립 및 실제 사업을 위한 처분시스템 설계를 위한 자료로 활용될 수 있다.

중심단어: 사용후핵연료, 처분용기, 심층처분시스템, 처분 시나리오, 붕괴열, 공학적방벽 열적 요건, 처분효율

1. 서론

1978년 고리 1호기 운영을 시작으로 국내 원자력발전소는 산업발전에 따른 전력 수요의 증가로 인해 필요한 전력의 상당부분을 꾸준하게 담당하여 왔으며, 획기적인 대체 에너지에 의한 대안이 없는 한, 기존 원자력발전에 의한 전력공급은 지속될 전망이다. 따라서, 안정한 전력공급을 위해서는 원자력발전소의 안전한 운영은 물론 원자력발전소에서 전기를 생산하고 난 후 필연적으로 발생된 사용후핵연료에 대한 안전한 관리가 요구된다. 이들 사용후핵연료는 유용한 물질을 함유하고 있어 재활용하는 방안을 고려하거나 고준위폐기물로 분류하여 직접처분을 고려하고 있다. 사용후핵연료를 직접 처분하든 재활용 공정으로부터 발생하는 고준위폐기물이든 높은 열과 방사능으로 인하여 인간생활권으로부터 격리시켜 수 만년 이상의 장기간 동안 안전하게 관리하는 것은 일반대중의 안전을 지키고 안심시키기 위한 필수사항이다.

이러한 사용후핵연료를 포함하는 고준위 방사성폐기물 관리는 원자력발전소를 운영한 이래로 아직까지 해결하지 못한 과제로서 정부에서는 이에 대한 대책마련을 위한 고준위 방사성폐기물관리 기본계획[1]을 수립하였으나, 에너지 정책의 전환에 따라 현재 이에 대한 재검토 단계에 있다.

국내에서 고준위 방사성폐기물에 대한 연구개발은 1997년부터 착수하였으며, 2007년에 사용후핵연료를 직접 처분대상으로 하여 현재 기술로 가장 안전한 방법으로 고려하고 있는 심도 500 m의 안정한 암반에 처분하는 심층 처분방식인 스웨덴 KBS-3형 처분개념을 바탕으로 한 심층 처분시스템을 개발하였다[2,3]. 이후, 원자력발전의 경제성 향상을 위한 핵연료 개량사업 및 노심장전 모형 개선 등 관련 기술의 진보에 따라 국내 원자로에서 방출되는 사용후핵연료의 특성도 변화하여 발생되는 사용후핵연료의 연소도가 높아짐에 따라 붕괴열도 높아지고 있다. 따라서, 국내 원자력발전소에서 발생하는 고연소도 사용후핵연료의 특성을 반영한 기준 심층 처분시스템을 도출한 바 있다[4].

원자력발전에 따라 필연적으로 발생하는 부산물인 사용후핵연료는 현재 발전소부지에 임시 저장되어 누적되고 있으며, 향후 안정적으로 전력을 공급하기 위하여 지속적인 원자력발전소의 운영이 필요하므로 사용후핵연료의 발생량은 계속 증가할 것으로 예상된다. 따라서, 이들을 안전하게 관리하기 위한 사용후핵연료 처분장 면적도 크게 증가될 것으로 예상되므로, 처분장 면적을 감소시켜 처분효율을 향상시키는 방안에 대한 연구는 필수적이다.

본 연구에서는 국내에서 발생하는 사용후핵연료의 제원 및 발생시점 등 특성과 현재의 고준위 방사성폐기물 기본계획에 따른 처분시나리오를 고려하여 기존 심층 처분시스템을 바탕으로 처분효율을 향상시킨 개선된 심층처분시스템을 제시하였다. 이를 위하여 국내 원자력발전소에서 발생하는 사용후핵연료 특성을 분석하여 제원에 따른 2종류의 처분용기 개념을 도출하였다. 이를 바탕으로, 사용후핵연료 발생 년도와 현재의 기본계획에 따른 처분 시나리오를 설정하여

Table 1. Reference Spent Fuel

Type	Dimension (cm)	Initial Enrichment	Discharged Burn-up	Cooling Time
PLUS-7	Section : 21.4 × 21.4 Length : 453	4.5wt%	55 GWd/MtU	40 yr.

처분시점에서의 냉각기간을 고려한 처분용기내 수용 가능한 붕괴열량을 제안하였다. 또한, 제안된 붕괴열과 2종류의 처분용기에 대한 처분시스템의 열적 안정성을 평가하여 설계요건에 적합한 처분시스템을 제시하고, 기존 처분시스템과의 처분효율 및 경제성을 평가하였다.

본 연구는 정책수립 등 준비단계부터 최종 처분장 운영 및 폐쇄까지 장기간 소요되는 사용후핵연료 관리 특성으로 인하여 환경과 기술의 변화에 따른 유연성과 개선된 처분시스템 개발에 필요한 기술을 확보하기 위하여 수행하였다. 따라서, 본 연구의 결과는 사용후핵연료 관리정책 수립 및 실제 상용 처분시스템 설계에 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

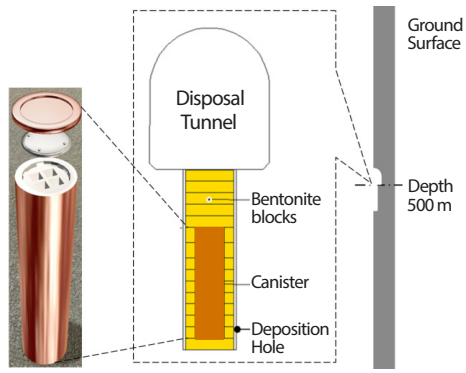

Fig. 1. A concept of the reference spent fuel disposal system [4].

2. 기존 국내 사용후핵연료 처분시스템 개념

2.1 기준 사용후핵연료

기존의 국내 사용후핵연료 처분시스템 개념은 국내 원전에서 전기를 생산하고 배출되어 누적된 사용후핵연료의 특성을 분석하고 국가에서 설정하는 원자로 설비계획에 따라 각 원전에서 매년 방출하는 사용후핵연료의 양을 예측한 결과를 바탕으로 처분을 위한 기준 사용후핵연료를 설정하여 도출하였다. 국내에서의 사용후핵연료 처분시스템 개념을 위한 기준 사용후핵연료는 아래와 같이 설정되었다.

국내에서 발생하는 경수로 사용후핵연료를 처분대상으로 한 심층 처분시스템은 2007년에 개발하였으며, 이 당시에 기준 사용후핵연료로는 초기 농축도 4.0wt%, 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 4.5wt%, 방출연소도 55 GWd/MtU를 갖는 PLUS-7형 사용후핵연료가 발생되고 있으며, 향후 이들 PLUS-7형 사용후핵연료가 전체 발생량의 약 70% 정도를 차지할 것으로 전망하였다. 따라서, 이러한 고연소도 사용후핵연료를 심층 처분시스템 설계에 근간이 되는 기준 사용후핵연료(Table 1)로 설정할 것을 제안하여[6,7], 그에 따른 기준 처분시스템 개념을 개발하였다[4].

2.2 기준 처분시스템

공학적방벽과 천연방벽으로 구성된 다중방벽의 고준위 폐기물 심층 처분시스템 설계에 있어서 가장 중요한 요건은 공학적방벽인 완충재인 벤토나이트의 온도요건이다. 일부 벤토나이트의 온도가 100℃를 초과하는 경우의 처분시스템 안전성에 대한 영향평가가 연구 중에 있으나[8], 현재의 온도요건으로는 처분용기와 벤토나이트 블록의 경계면에서 온도가 100℃를 초과하지 않도록 배치하는 것이다[9,10]. 국내에서 발생하는 사용후핵연료를 처분대상으로 하여 설정한 기준 사용후핵연료를 바탕으로 열적 안정성 평가를 통하여 상기 설계요건에 적합하도록 도출한 기준 사용후핵연료 처분시스템 개념은 Fig.1과 2에 나타낸 바와 같다.

사용후핵연료를 적재한 처분용기는 심도 500 m 정도의 안정한 암반에 굴착한 터널 바닥의 처분공에 정치되며, 처분

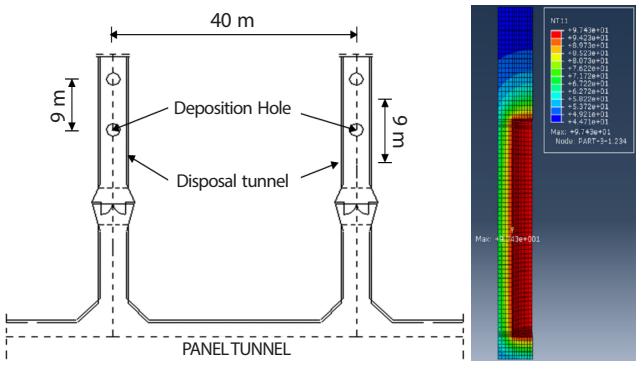

Fig. 2. Result of thermal analysis for the reference spent fuel disposal concept [4].

용기 주변과 처분공 벽면 사이 공간은 벤토나이트 블록으로 채운다(Fig. 1). 또한 Fig. 2에서 보여주고 있는 바와 같이 열적 안정성 해석결과를 바탕으로 설계요건에 적합하도록 처분터널 간격 40 m, 처분공 간격 9 m로 결정하였다[11].

3. 국내 사용후핵연료 발생 특성 및 처분 시나리오 분석

국내에서 원자력발전으로 발생되는 사용후핵연료의 양은 지속적으로 누적되고 있으며, 향후 에너지 전환정책을 기반으로 하여 발생될 사용후핵연료를 고려할 때, 이들을 처분하기 위해서는 상당한 처분면적이 소요될 것으로 예상된다. 따라서, 국토가 협소한 우리나라의 경우 사용후핵연료를 처분하기에 필요한 면적을 최소화하기 위하여 다양한 방안을 연구하고 있다. 본 연구에서는 국내 원자력발전소에서 발생하는 사용후핵연료의 종류, 제원 및 발생시점 등 특성을 분석하고, 기존에 수립된 사용후핵연료 관리 기본계획을 참조하여 처분시나리오를 수립하였다. 이를 바탕으로 처분대상 사용후핵연료의 처분시점에 있어서의 냉각기간을 설정하여 처분용기 당 수용 가능한 붕괴열량을 산출하고 개선된 처분시스템 개념을 개발하였다.

3.1 PWR 노형별 사용후핵연료 제원

현재 우리나라에서 운영 중인 가압 경수로형 원자력발전소는 공급국가에 따라 다양한 노형으로 구성되어 있어 원전별로 다양한 종류의 핵연료가 이용되고 있다. 국내에서 운영 및 건설예정인 원전의 대표 노형별 핵연료 기본 사양은 Table 2와 같다[6]. Table 2를 살펴보면, PWR 사용후핵연료 길이는 406 cm와 453 cm로 구분되며, 이 값은 사용후핵연료를 대상으로 하는 처분시스템의 처분용기 설계에 있어 아주 중요한 의미를 갖는다. 예상되는 사용후핵연료 발생량을 각 길이 특성 별로 분석한 결과 고리 1,2,3,4 호기, 영광 1,2 호기 및 울진 1,2 호기에서 발생하는 406 cm 길이의 사용후핵연료가 약 22 %, 그 외 원전에서 발생하는 453 cm 길이의 사용후핵연료가 총 발생량의 약 78%를 차지하였다.

본 연구에서는 이해를 돕고 혼돈을 피하기 위하여 상기 사용후핵연료 발생 특성에 따라 길이가 짧은 406 cm 길이 사용후핵연료를 S-SF (Short-Spent Fuel)로, 길이가 453 cm인 사용후핵연료를 R-SF (Regular-Spent Fuel)로 명명하여 구분하였다.

3.2 국내 사용후핵연료 발생량 및 발생 시점

1978년 원자력발전소 고리 1호기가 상업운전을 시작한 이후 원자력발전소 운영에 따라 1979년 경수로 사용후핵연료 다발이 처음 방출된 이후로 2018년말 기준으로 PWR 사용후핵연료는 약 18,600 다발이 방출되어 소내 저장풀에 임시 저장되어 있으며, CANDU 사용후핵연료는 약 451,000 다발이 방출되어 소내 저장풀과 건식 저장시설 (콘크리트 사일로 및 MACSTOR)에 임시 저장되어 있다[12].

처분대상 사용후핵연료의 발생량은 국가에서 설정하는 원자로 설비계획과 각 원전에서 매년 방출하는 사용후핵연료의

Table 2. Dimension of spent fuels generated from PWR in Korea [6]

Nuclear Power Plants	Dimension (cm)		Weight/Assembly (kgU)	Remark
	Length	Width		
Kori#1	406	19.7	360	S-SF (Short-Spent Fuels)
Kori#2	406	19.7	410	
Kori#3,4 Hanbit#1,2 Hanul#1,2 (WH Type)	406	21.4	460	
Estimated Arising	14,133 Assemblies : about 22.6%			
Hanbit #3,4,5,6 Hanul #3,4,5,6 SinKori#1,2 Sinwolseong#1,2 (Standard Type)	453	20.7	431	R-SF (Regular-Spent Fuels)
SinKori#3,4,5,6 SinUljin#1,2,3,4 (APR 1400)	453	20.7	431	
Estimated Arising	48,287 Assemblies : about 77.4%			

Table 3. Spent fuel arising from domestic nuclear power plants

Year	Accumulation (Assemblies)		
	S-SF	R-SF	SUM
2018	11,084	7,515	18,599
2028	14,133	16,728	30,861
2040		28,105	42,238
2050		35,120	49,253
2060		39,841	53,974
2070		43,841	57,974
2080		47,739	61,872
2082		48,287	62,420

양을 예측함으로써 평가할 수 있다. 원자로 설비계획은 국가에너지기본계획 및 전력수급계획에 따라 결정되는데, 에너지 전환정책에 따른 시나리오에 대한 사용후핵연료 발생량 추정은 다음과 같다.

원자로는 제8차 전력수급계획을 기본으로 하되, 신고리 5,6호기 건설을 반영하고 신한울 2기, 천지 2기 및 신규 2기는 건설 취소를 가정하여 경수로 26기, 중수로 4기를 운영하는 것으로 하였다. 따라서, 총30기 원전에 대한 사용후핵연료 발생량을 예측하고 있으며, 이에 따른 사용후핵연료 발생 예상 누적량은 Table 3에 나타내고 있다. 원자력발전소 30기의 운전이 모두 종료되는 2082년을 기준으로 예상되는 사용후핵연료 발생량은 PWR 사용후핵연료가 약 62,400다발(약 26,900톤), CANDU 사용후핵연료가 약 664,600 다발(약12,600 톤)으로 총 39,500 톤이 발생될 것으로 예상된다.

PWR 사용후핵연료의 경우 Table 3에서 보여주는 바와 같이 S-SF는 2028년까지 14,100여 다발이 발생될 것으로

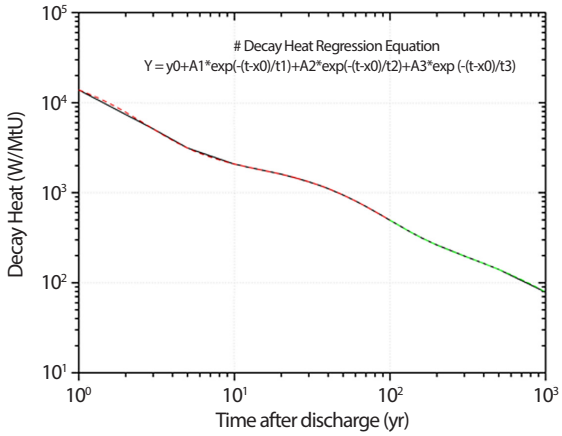

Fig. 3. Decay heat of the reference spent fuel [7].

Table 4. Coefficient of regression equation for decay heat

	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
	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

Table 5. Spent fuels cooling time at the time of disposal

Cooling times	S-SF (14,133 Ass. : 3,534 canisters)				R-SF (48,287 Ass. : 12,072 canisters)			
	Canister	Ass.	%	Accu. %	Canister	Ass.	%	Accu. %
60 years <	2,000	8,000	56.6	56.6	6,750	27,000	55.9	
55 years <	750	3,000	21.3	77.9	3,000	12,000	24.8	80.7
50 years <	694	2,776	19.6	97.5	1,000	4,000	8.3	89.0
45 years <	90	357	2.5	100.0	1,185	4,739	9.9	98.9
43years <					137	548	1.1	100.0
	3,534	14,133	100		12,072	48,287	100	

예상되며, R-SF는 2082년도까지 운영하는 원자력 발전소로부터 48,300여 다발이 발생될 것으로 예상된다. 또한, Table 3에서는 발생 시점별 사용후핵연료 발생누적 량을 보여주고 있다[13].

3.3 사용후핵연료 붕괴열

원자력발전소에서 방출된 사용후핵연료는 내부에 남아있는 방사성 핵종의 연속적인 붕괴반응으로 인하여 높은

Table 6. Dimension of improved disposal canister

Item	Disposal Canister Dimension (mm)	
Fuel type	R-SF	S-SF
• Width/Length	214 × 214 / 4,530	214 × 214 / 4,060
Fuel channel		
• Width/Length	235 × 235 / 4,550	235 × 235 / 4,080
• Distance between channels	120	120
• Channel edge radius	~15	~15
Cast Iron Insert		
• Length	4,680	4,210
• Diameter	930	930
• Bottom thickness	80	80
• Lid thickness	50	50
Copper shell		
• Length	4,780	4,310
• Diameter	1,030	1,030
• Bottom thickness	50	50
• Lid thickness	50	50

열을 발산한다. 아래 식은 고연소도 기준 사용후핵연료 [Table 1 참조]의 붕괴열식(W/tU)과 시간 범위별 상수를 나타내고 있으며, 이를 바탕으로 한 붕괴열 평가 계산 결과는 Fig. 3에서 보여주고 있는 바와 같이 시간에 따른 붕괴열 변화로 나타내고 있다[4,11].

$$Y = y0+A1*\exp(-(t-x0)/t1)+A2*\exp(-(t-x0)/t2)+A3*\exp(-(t-x0)/t3)$$

여기에서, Y는 기준 PWR 사용후핵연료 단위무게(1 tU)당 원자로로부터 방출된 시간에 따른 붕괴열(W), t는 원자로로부터 방출된 시간을 나타내며, 나머지x0, y0, A1, A2, A3, t1, t2, t3는 시간범위 별 상수로서 그 값을 아래 Table 4에서 보여주고 있다.

3.4 사용후핵연료 노형별 발생시기에 따른 처분 시나리오

2016년 7월 수립된 고준위 방사성폐기물관리 기본계획은 에너지 전환정책에 따라 현재 사용후핵연료 관리정책 재검토위원회를 출범시켜 전면 재검토에 들어갔지만, 본 연구에서는 기존의 고준위 방사성폐기물관리 기본계획을 근거로 처분시나리오를 설정하였다. 즉, 기본계획에서 제시한 일정에 따라 유추하여, 2053년에 처분장 운영을 착수하는 것으로 하였으며, 초기 10년동안은 CANDU 사용후핵연료를 처분하고, 이후 2063년부터 PWR 사용후핵연료를 처분하는 것으로 설정하였다. 또한, PWR 사용후핵연료의 처분율은 년간 작업일 수 250일을 가정하여 1일 1 처분용기를 처분하는 것으로 하여 연간 250 처분용기(1,000 다발)를 처분하는 것으로 설정하였다.

따라서, 전체 PWR 사용후핵연료 처분용량 62,420 다발 중 앞에서 분류한 바와 같이 S-SF인 14,133 다발은 CANDU 사용후핵연료 처분을 완료한 후 우선 처분하고(2063~2077년), R-SF인 48,287 다발은 이들 S-SF 처분을 완료한 후 처분(2078~2125년)하는 것으로 설정하였다.

상기 처분 시나리오에 따른 처분율을 고려하고, 사용후핵연료가 원자력발전소에서 발생하는 순서에 따라 처분하는 것으로 분석하면 해당 사용후핵연료의 처분 시점에서의 냉각기간이 산출될 수 있다. 이를 바탕으로 사용후핵연료 처분시점에서의 냉각기간을 산출(Table 5)하고, 그에 따른 붕괴열을 적용하면 처분용기당 사용후핵연료 붕괴열이 결정될 수 있다.

4. 심층 처분시스템 개선

국내 원자력발전소에서 발생하는 사용후핵연료의 제원 특성과 발생 기간에 따른 냉각기간을 고려하여 기존의 처분시스템을 개선하였다. 즉 사용후핵연료의 길이에 따라 2종류의 처분용기를 설계하여 처분시스템을 도출하고, 각 처분시스템에서의 처분시점에 따른 냉각기간을 고려하여 해당 처분용기에 수용 가능한 붕괴열량을 결정하였다.

4.1 처분용기 개선

Table 3에서 보여주고 있는 바와 같이 국내 원자력발전소에서 발생하는 사용후핵연료 길이는 2종류이다. 즉, 원전 운전 초기 원자로인 고리 1,2,3,4호기, 영광 1,2호기 및 울진 1,2호기에서 발생하는 사용후핵연료의 길이는 406 cm로 전체 발생량의 약 22% 정도이며, 그 외의 원자력발전소에서 발생하는 사용후핵연료의 길이는 453 cm로서 약 78% 이다.

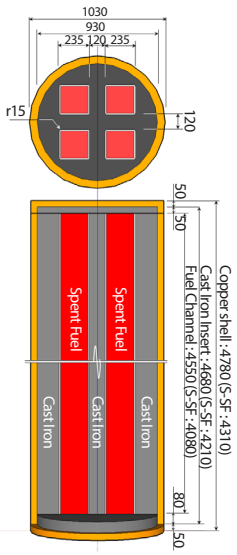

Fig. 4. Concept of improved disposal canister.

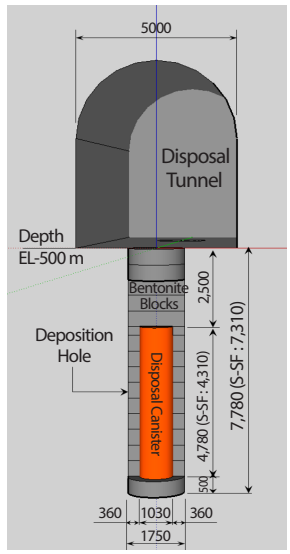

Fig. 5. Concept of improved disposal system.

따라서, 상기 2종류의 사용후핵연료를 분리하여 처분용기를 설정함으로써[14, 15, 16] 처분 효율을 향상시키고 처분용기 재료와 완충재인 벤토나이트 소요량 저감 등 경제성을 향상시키는 것이 가능하다. 개선된 처분용기에 대한 개념은 아래 Table 6 및 Fig. 4와 같다.

4.2 처분시스템 개선

사용후핵연료 발생특성에 따라 분류된 2종류의 처분용기에 대하여 각 처분용기에 수용될 수 있는 열량은 처분시나리오에 따라 설정하였다. 즉, 국내 원전에서의 사용후핵연료 발생시점과 현재의 기본계획에 따른 처분시나리오를 바탕으로 냉각기간을 정하고 이를 기준으로 하여 각 종류별 처분용기에 수용 가능한 붕괴열량을 설정하였다. 이렇게 설정된 처분용기와 붕괴열량에 따라 처분장 설계요건에 적합하도록 열적 안정성을 분석하여 처분시스템을 설계하였다. Fig. 5는 열적 안정성 평가를 위한 처분시스템 개념모델을 보여주고 있다.

본 연구에서 설정한 처분시나리오에 따르면 Table 5에서 기술한 바와 같이 S-SF의 경우 처분시점에서 97% 이상 대부분의 사용후핵연료 냉각기간이 50년을 초과하고 있으며, R-SF의 경우는 처분시점에 냉각기간 45년을 초과하는 사용후핵연료는 98%이상인 것으로 분석되었다. 따라서, 현재 설정된 고연소도 기준 사용후핵연료 붕괴열 특성(3.3사용후핵연료 붕괴열 참조, Table 7)을 반영하여 개선 처분시스템에 있어서의 사용후핵연료 냉각기간은 S-SF와 R-SF에 대하여 각각 50년과 45년, 그에 따른 처분용기당 붕괴열은 1,620 W 와 1,760 W으로 설정하고, 이를 바탕으로 설계요건 적합성을 위한 열적 안정성 평가를 수행하였다.

5. 개선된 처분시스템의 열적 안정성 분석

지하 심도 약 500 m에 위치한 모암에 처분용기와 완충재로 구성된 공학적방벽과 모암인 천연방벽으로 다중방벽을 구축하여 사용후핵연료를 포함하는 고독성 장반감기 방사성 폐기물을 인간환경으로부터 격리하는 심층처분 개념이 현재 기술로 가장 유용(BAT : Best Available Technology) 하고 실현가능(BPT : Best Practicable Technology)한 기술로 고려되고 있다. 이 개념의 설계에 있어서 가장 중요한 요건 중의 하나는 공학적방벽인 처분용기 부식과 완충재의 안전성능 저하를 방지하기 위하여 완충재인 벤토나이트의 온도가 100℃를 넘지 않도록 하는 것이다[9,10]. 따라서, 본 연구에서 설정된 개선된 사용후핵연료 처분개념에 있어서도 열해석을 수행하여 이러한 열적 설계요건 만족여부를 확인하여야 한다.

Table 7. Decay heat of spent fuels

Time		decay heat		Remark
Time after discharge [yr.]	Time after disposal [yr.]	Basis [W/1tU]	Disposal Canister [W/canister]	
40	0	1111.6	1915.5	Existing System
45	5	1021.8	1760.8	R-SF System
50	10	941.9	1623.1	S-SF System
100	60	497.9	858.1	
200	160	262.6	452.6	
300	260	198.2	341.5	

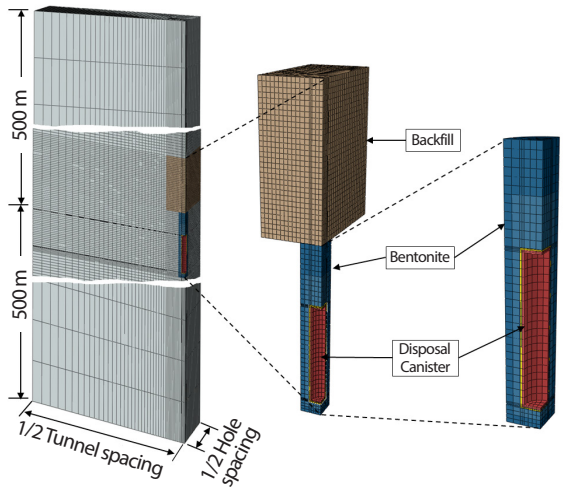

Fig. 6. Calculation domain for thermal analyses [18].

5.1 해석범위 및 방법

사용후핵연료를 적재한 처분용기가 지하 처분장에 처분되면 사용후핵연료로부터 나온 붕괴열은 처분용기, 완충재, 뒷채움재 및 암반으로 전달되어 확산하게 된다. 이때, 처분시스템은 뒷채움재로 채워져 폐쇄되어 있기 때문에 주요 전달방법은 열전도가 되며, 대류 및 복사는 무시될 수 있다. 심층 처분시스템의 열적 안정성평가를 위한 열해석 범위는 Fig. 6에 나타낸 바와 같다. 그림에서 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, 처분터널 간격은 40 m로 고정하고 붕괴열에 따라 처분공 간격을 조정하여 설계요건에 따른 처분시스템의 열적 안정성을 평가하였다. 처분공 간격은 S-SF의 경우는 6.5 m, 7 m 및 7.5 m를 설정하였으며, R-SF의 경우는 7 m, 7.5 m 및 8 m를 설정하여 해석을 수행하였다.

해석을 위한 전산프로그램은 유한요소방식을 이용한 상용코드이며, 고준위폐기물 처분시스템 설계를 위한 코드로서 검토되고 검증된 아바쿠스 ver. 6.14를 활용하였다[17].

열해석을 위한 초기조건, 지열경사 및 물성재료는 국내의

Table 8. Material properties for the thermal analyses

Items	Density ($kg \cdot m^{-3}$)	Thermal Conductivity (W/m℃=J/s/m℃)	Specific Heat (J/kg℃)	Ref.
Copper shell	8,900	386	383	[4]
Cast insert	7,200	52	504	[4]
Bentonite (Buffer)	1,970	1.0	1,380	[19]
Crushed rock (80%) + Bentonite (20%) (Backfill)	2,270	2	1,190	[4]
Granite (Rock)	2,650	3.2	815	[20]

지하처분연구시설인 KURT에서의 연구결과 자료를 활용하였다. 초기조건으로는 지표 부분의 지하수온도를 기준으로 지표는 10℃로 하였으며, 심도에 따른 지열경사는 3℃/100 m를 적용하였다. 따라서, 해석모델 범위의 상부와 하부의 온도는 각각 10℃와 40℃로 설정하였다[18]. 또한, 처분시스템을 구성하는 암반, 완충재, 뒷채움재, 처분용기의 밀도, 열전도도, 비열 등 해석에 필요한 물성은 Table 8에 나타낸 바와 같다.

5.2 개선 처분시스템에 대한 열적 안정성 평가

기존 사용후핵연료 심층 처분시스템을 바탕으로 국내 원자력발전소에서 방출되는 사용후핵연료 특성을 고려하여 처분용기를 2종류로 분류하고 처분시점의 냉각기간에 따른 붕괴열을 설정하여 처분효율을 향상시키고자 하는 개념을 도출하였다. 이렇게 개선된 처분개념에 있어서도 처분시스템의 열적 요건을 만족하여야 하며, 앞에서 설정한 해석 범위 및 방법에 따른 열해석 결과는 Fig. 7 및 8에서 보여주고 있다.

사용후핵연료의 길이가 짧은 406 cm의 S-SF 처분시스템의 경우는 처분시점에서의 사용후핵연료 냉각기간 50년을 기준으로 하였을 때, 완충재의 최고온도는 처분 후 11년 경과하였을 때 95.5℃(Fig. 7)로 계산되었다. 이때의 처분터널 간격은 40 m, 처분공 간격은 7 m로서 설계요건에 적합함을 확인하였다. 또한, 사용후핵연료의 길이가 453 cm 인 R-SF 처분시스템의 경우도 처분시점의 사용후핵연료 냉각기간 45년에 대하여 처분터널 간격 40 m, 처분공 간격 7.5 m일 때 11년 경과 후 최고온도 95.3℃(Fig. 8)로서 설계요건을 만족한 것으로 평가되었다.

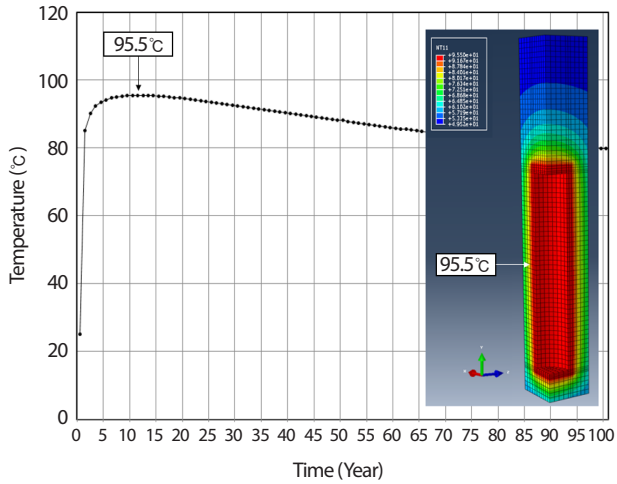

Fig. 7. Result of thermal analysis for S-SF disposal system.

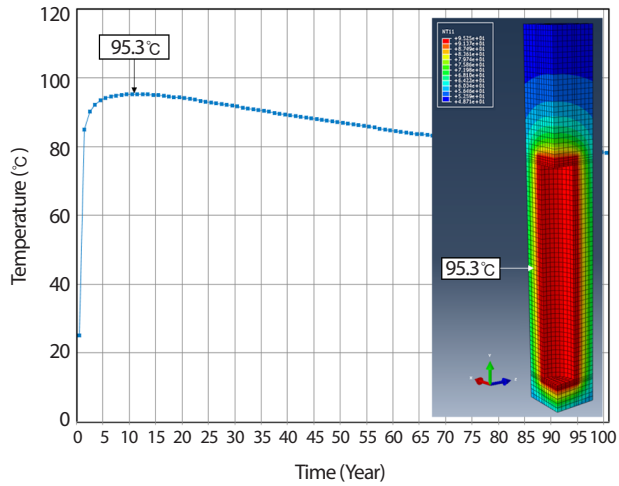

Fig. 8. Result of thermal analysis for R-SF disposal system.

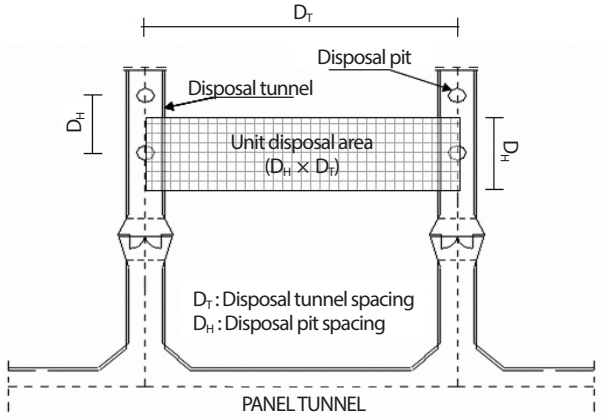

Fig. 9. The unit disposal area [21].

Table 9. Disposal efficiency analyses

	Existing Disposal system	Improved Disposal System		Remark
		R-SF Disposal system	S-SF Disposal system	
No. of assemblies	62,420	48,287	14,133	
Canister dimension (Dia. × Height, m)	1.03 × 4.78	1.03 × 4.78	1.03 × 4.31	
Assemblies/canister	4	4	4	
No. of canisters	15,605	12,072	3,534	
Disposal Tunnel spacing (m)	40	40	40	
Deposition Hole spacing	9	7.5	7	
Unit disposal area (m^2)	360	300	280	
Disposal area (km^2)	5.62	3.62	0.99	82% (Reduction : 18%)
		4.61		
Disposal density (kU/m^2)	4.79	5.83		121.7% (Increase : 21.7%)

6. 개선된 처분시스템 효율분석

6.1 단위처분 면적

본 연구에서는 국내에서 발생하는 사용후핵연료를 처분용기, 완충재, 뒷채움재인 공학적방벽과 모암인 천연방벽으로 구성된 다중방벽 개념으로 심층 처분하는 것으로 가정하였다. 그리고, 지하처분 구역의 배치는 처분공에 매립된 처분용기 내의 사용후핵연료로부터 발생되는 방사능 붕괴열로 인한 처분장 내 완충재의 최고온도가 설계를 위한 온도요건을 충족하도록 처분터널과 처분공의 간격을 적절하게 설정하는 것이다. 개선된 처분시스템의 효율분석을 위하여 Fig. 9에서 보여주고 있는 바와 같이 처분터널 간격과 처분공 간격 간의 면적을 고려한 단위 처분면적 개념을 설정하였으며, 이는 처분용기 1개를 처분하였을 때 소요되는 처분구역의 면적을 나타낸다[21].

Table 10. Economic analyses

	Existing Disposal System	Improved Disposal System			Volume Reduction
		R-SF	S-SF	Sum	
No. of SFassemblies	62,420	48,287	14,133	62,420	
Canister Dimension (Dia. × Height, m)	1.03 × 4.78	1.03 × 4.78	1.03 × 4.31	-	
Spacing (DT × DH, m)	40 × 9	40 × 7.5	40 × 7	-	
No. of Canister	15,605	12,072	3,534	15,606	
Cu Volume (m^3)	12,543	9,703	2,585	12,288	255 (2,268 ton)
Cast iron Volume (m^3)	33,925	26,244	6,922	33,166	759 (5,466 ton)
Bentonite Volume (m^3)	229,865	177,823	49,446	227,269	2,596 (4,154 ton)

Table 11. Decay heat for each disposal canister

Item	S-SF	R-SF
Cooling Time	50 year	45 year
Decay Heat (W/canister)	1,620 W	1,760 W

따라서 고준위폐기물 순수 처분 구역의 개략적인 규모는 단위 처분면적과 처분될 총 처분용기의 수를 곱하여 추정할 수 있다. 경제성 관점에서 볼 때, 지하 처분시설의 면적을 최소화할 수 있도록 처분 터널 간격과 처분공 간격을 설정하는 것이 바람직하며, 이러한 단위처분 면적을 비교하여 처분효율 및 경제성을 분석하고자 하였다.

6.2 처분효율 분석

국내에서 발생하는 사용후핵연료의 제원 및 처분시점에서의 냉각기간을 분석하여 사용후핵연료 길이와 처분용기당 붕괴열에 따라 2종류의 처분시스템을 설정하고 이를 기존 처분시스템과 비교하여 처분효율을 분석하였다. Table 9는 사용후핵연료 종류에 따른 냉각기간(S-SF: 50년, R-SF: 45년)을 고려하여 설정한 처분용기내 수용 가능한 붕괴열 저감으로 인한 처분면적 감소에 따른 처분효율 비교분석 결과를 보여주고 있다. Table 9에서 보여주고 있는 바와 같이 S-SF 발생량인 14,133 다발(처분용기 수 3,534 개) 및 R-SF 발생량인 48,287 다발(처분용기 수 12,072개)를 기준으로 순수 처분면적은 4.61 km^2로서 기존 처분시스템의 순수면적인 5.62 km^2에 비하여 약 20% 감소되었다. 또한, 단위면적당 처분 가능한 우라늄량을 나타내는 처분밀도에 있어서도 개선된 처분개념은 5.83 kU/m^2로서 기존 처분시스템의 4.79 kU/m^2 대비 약 20% 이상 향상되었음을 확인하였다.

6.3 처분 시스템 구성 재료 절감

기존 사용후핵연료(길이 453 cm) 처분시스템과 길이가 짧고 냉각기간이 비교적 긴S-SF (길이 406 cm) 처분시스템 개념을 바탕으로 처분용기 재료인 구리 소요량, 주철 소요량과 공학적방벽 시스템을 구성하는 완충재 재료인 벤토나이트의 소요량에 대한 분석을 통하여 경제성을 비교분석 하였으며, 결과는 Table 10에 나타내었다. Table에서 알 수 있는 바와 같이 해당 사용후핵연료 총량 62,420 다발에 대하여 기존 사용후핵연료 처분시스템과 비교하여 공학적방벽을 구성하고 있는 주요 재료에 있어서도 절감됨을 확인하였다. 즉, 구리의 경우 기존 소요량 12,543 m^3에서 12,288 m^3로 255 m^3 (약 2,270 톤), 주철의 경우 기존 소요량 33,925 m^3에

서 33,166 m^3으로 759 m^3 (약 5,470 톤)이 절감되었다. 또한, 벤토나이트의 경우도 기존 소요량 229,865 m^3에서 227,269 m^3로 2,596 m^3 (약 4,150 톤) 정도의 소요량이 절감되었다.

7. 결론

원자력 에너지는 국내 산업발전에 소요되는 필요한 전력을 안정적으로 공급해 왔으며, 향후에도 원자력발전소는 지속적으로 운영될 것으로 예상된다. 그에 따라 전기를 생산하고 난 후 발생된 사용후핵연료는 지속적으로 증가되어 누적되고 있다. 이들을 직접 처분할 경우 처분면적 또한 지속적으로 증가될 것이므로, 국토를 효율적으로 이용하고, 대중수용성을 높이기 위하여 처분면적을 감소시킬 수 있는 처분효율 향상 방안에 대한 다양한 연구가 필요하다. 본 연구에서는 이의 일환으로 기존의 사용후핵연료 처분시스템을 바탕으로 아래에 기술하는 바와 같이 국내 원자력발전소에서의 사용후핵연료 발생 특성을 고려하여 개선된 처분시스템 개념을 설정하고, 기존 처분시스템과 처분효율 등을 비교분석 하였다.

- 국내 원자력발전소에서 발생하는 사용후핵연료의 제원을 분석하여, 사용후핵연료 길이에 따라 S-SF (길이 406 cm), R-SF (길이 453 cm)의 2종류로 분류하여, 각각에 적합한 처분용기 개념을 도출하였다.
- 현재의 고준위폐기물 관리 기본계획을 바탕으로 처분시나리오를 설정하여 사용후핵연료 종류별 발생시점과 처분시점에 따라 아래 Table 11과 같이 냉각기간을 결정하고 처분용기별 수용 가능한 붕괴열을 설정하였다.
- 설정된 처분용기 개념들과 붕괴열을 바탕으로 기존의 처분시스템을 개선하였으며, 개선된 처분시스템에 대하여 완충재 온도 100℃를 초과하지 않도록 하는 설계요건 충족여부를 확인하기 위하여 열 해석을 수행하였다. 해석결과에 따라 처분터널 간격을 40 m로 고정하면 S-SF 사용후핵연료 처분용기 간격은 7 m, R-SF 사용후핵연료 처분용기 간격은 7.5 m로 하였을 경우 완충재 최고온도는 약 95℃ 내외로 열적 안정성을 유지함을 확인하였다.
- 개선된 처분시스템에 대하여 기존 처분시스템과 순수 처분면적, 처분밀도(면적당 우라늄 밀도) 등 처분효율과 처분시스템 구성재료 소요량을 비교하였다. 비교결과 순수 처분면적은 기존 처분시스템 5.62 km^2에 비해 개선된 처분시스템이 4.61 km^2로 약 20% 감소하였고, 처분밀도는 기존 시스템의 4.79 kU/m^2에서 개선 시스템 5.83 kU/m^2로 약 20% 정도 향상되었다. 또한, 처분시스템 구성재료에 있어서도 구리 255 m^3 (2,268 ton), 주철 759 m^3 (5,466 ton) 및 완충재인 벤토나이트 블록 2,596 m^3 (4,154 ton)이 절감될 수 있음을 확인하였다.

이상의 비교분석 결과로부터 국내 원자력발전소에서의 사용후핵연료 발생 특성을 고려하여 기존의 처분시스템을 개선하는 방안이 사용후핵연료의 지속적인 증가 및 누적에 따라 요구될 것으로 예상되는 처분면적을 상대적으로 감소시킬 수 있어 좁은 국토를 효율적으로 활용할 수 있는 처분효율 향상방안으로서 적용 가능함을 확인하였다.

추후, 처분장 부지가 확정되면 해당부지의 현장 물성자료 입력을 통한 보다 정확하고 상세한 열적 안정성 평가가 필요하다. 본 연구결과는 사용후핵연료 관리정책 수립 뿐만 아니라 실제 상용 처분시스템 설계에도 활용이 가능할 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, MOTIE, July 25, 2016.

[2] J.Y. Lee, D.Cho, H. Choi, and J. Choi, “Concept of a Korean Reference Disposal System for Spent Fuels”,

JNST, 44(12), 1565-1573 (2007).

[3] H.J. Choi, J.Y. Lee, J.W. Choi, D.K. Cho, and S.G. Kim, et al., Korean Reference HLW Disposal System, Korea Atomic Energy Research Institute Technical Report, KAERI/TR-3563/2008 (2008).

[4] I.Y. Kim, H. A. Kim, and H.J. Choi, 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).

[5] J.Y. Lee, H.J. Choi, D.K. Cho, S.G. Kim, and J.W. Choi, et al., 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] D.K. Cho, 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, H.J. Choi, J.W. Choi, W.I. Ko, and S.G. Yoon, "Reference spent nuclear fuel for pyro-processing facility design", J. Korean Radioact. Waste Soc., 6(3), 225-232 (2008).

[8] G. Gaus and K. Wieczorek, EBS Performance at Temperature above 100℃ - PEBS Case 3, Proc. of. Int. Conf. on the Performance of Engineered Barriers, February 6-7. 2004, Hannover (2004)

[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] J.Y. Lee, M.S. Lee, I.Y. Kim, and D.K. Cho, An Engineered Barrier Concept of Reference Deep Geological Disposal System for Hi-burnup Spent Fuels, Korea Atomic Energy Research Institute Technical Report, KAERI/TR-7405/2018 (2018)

[12] D.K. Cho, J.W. Kim, I.Y. Kim, and J.Y. Lee, "Investigation of PWR Spent Nuclear Fuels for the Design of Deep Geological Repository", J. Nucl. Fuel Cycle Waste Technol., 17(3), 339-346 (2019)

[13] Korea Hydro & Nuclear Power Co. LTD. Accessed July 30, 2019. Available from http://www.khnp.co.kr/board/BRD_000179/boardView.do?pageIndex=1&boardSeq=69267&mnCd=FN051304&schPageUnit=10&searchCondition=0&searchKeyword=

[14] Heikki Raiko, Disposal Canister for Spent Nuclear Fuel–Design Report, July 2005, POSIVA 2005-02 (2005)

[15] Svensk Kärnbränslehantering AB(SKB), Spent nuclear fuel for disposal in the KBS-3 repository, SKB, December 2010, TR-10-13 (2010)

[16] Svensk Kärnbränslehantering AB(SKB), Design, production and initial state of the canister, SKB, December 2010, TR-10-14 (2010)

[17] Dassault systems, Abaqus/CAE 6.14 User's manual, Dassault systems simulia corp. (2014).

[18] 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, Progress in Nuclear Energy 53, 361-367 (2011).

[19] W.J. Cho, J.O. Lee, and S.K. Kwon, "Thermal Conductivity of Compacted Bentonite and Bentonite-Sand Mixture", J. Korean Radioact. Waste Soc., 6(2), 101-109 (2008)

[20] C.S. Lee, W.J. Cho, J.S. Kim, and H.J. Choi, Characterization of thermal and mechanical properties of granite at KAERI Underground research Tunnel, Korea Atomic Energy Research Institute Technical Report, KAERI/TR-5566/2014 (2014)

[21] 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).