

사용후핵연료의 연소도 증가가 처분시스템 설계변수에 미치는 영향 분석

조동건, 이양, 이종열, 최종원, 최희주
 한국원자력연구원, 대전광역시 유성구 대덕대로 1045
dkcho@kaeri.re.kr

전 세계적으로 심지층 처분은 사용후핵연료를 인간생활로부터 가장 안전하게 격리시킬 수 있는 방안으로 인식되고 있다. 심지층 처분시스템의 설계에는 사용후핵연료의 연소도가 매우 중요한데, 원자력의 경제성을 위해 장주기 운전을 추구하면서 우리나라에서도 45 GWD/MTU 이상의 고연소도 사용후핵연료가 다량으로 방출되고 있다. 연소도가 증가하면 같은 양의 에너지를 생산하기 위해 발생하는 사용후핵연료의 양은 줄어들어 유리하지만, 방사능, 붕괴열, 핵종량 등이 증가하여 처분용기의 설계, 처분공간 간격, 처분터널간 간격 등과 같은 처분장의 설계변수에는 부정적인 영향을 초래한다. 본 연구에서는 1 TWa의 전기량을 생산하기 위해 발생하는 사용후핵연료 양을 기준으로 이와 같은 상반적인 설계변수 영향을 분석하여 연소도 증가가 처분시스템 설계에 미치는 영향을 분석하였다.

방출연소도가 B GWD/MTU 일 때, 1 TWa의 전기를 생산하기 위해 발생하는 사용후핵연료의 양은 $3.65 \times 10^5 / (B * \epsilon)$ 를 적용하였다. 여기서 ϵ 은 발전소 열효율이며 0.33을 사용하였다. 사용후핵연료는 웨스팅하우스형 PWR 사용후핵연료를 가정하였으며, 기준 처분시스템으로는 그림 1의 수직형 처분시스템을 적용하였다. 각 방출연소도에 대해 사용후핵연료로부터 발생하는 열원은 ORIGN-ARP을 사용하여 산출하였으며, 원자로에서 방출 후 40년 냉각 시점에서 산출하여 열해석에 사용하였다.

우선적으로 구조적 안전성, 핵임계, 방사선 차폐 관점에서 설계제한요건을 만족하는 처분용기 설계안을 구성하였다. 제안된 처분용기 설계안은 네 개의 사용후핵연료 집합체를 수용할 수 있는 설계안인 KDC-1, 세 개의 집합체를 수용할 수 있는 DGN #3, 다섯 개의 집합체를 수용할 수 있는 DGN #5 설계안이며, 이들의 설계 제원 및 성능은 표 1에 상세히 기재되어 있다. DGN #3 및 DGN #5의 설계안은 기본적으로 KDC-1 설계안과 축방향 길이 및 구성물질의 제원은 같으며, 수용할 수 있는 사용후핵연료의 집합체 개수가 다르므로 반경방향 배열 및 구조적 안전성을 만족하기 위한 반경방향 제원만 서로 다르게 설계되었다. KDC-1 설계안의 제원 및 구성 물질은 그림 2에 기재되어 있다.

구성된 설계안을 바탕으로 1 TWa를 생산하기 위해 발생하는 사용후핵연료의 양을 연소도가 증가함에 따라 산출하고 이를 기준 처분량으로 하여 DGN #3를 사용할 경우, KDC-1을 사용할 경우, DGN #5를 사용할 경우에 대해 각각 필요한 처분용기 개수를 산출하였다. 필요한 처분용기의 개수는 곧 필요한 처분공의 개수를 의미한다.

연소도가 증가함에 따라 증가하는 열원을 선원항으로 하여 처분용기 설계안이 그림 1과 같은 수직 처분시스템에 거치되었음을 가정하여 완충재에서의 최대 온도 100℃를 만족하는 처분공 간격을 산출하였다. 이 과정을 처분터널의 간격을 변화시켜 가면서 반복적으로 수행함으로써 열원 및 처분터널의 함수로서 처분공의 간격을 구할 수 있는 회귀식 (1)을 도출하였다. 식 (1)에서 p 는 처분공 간격 (m), q 는 표면용기에서의 열속(W/m²), y 는 처분공 간격을 나타낸다.

$$P=0.00463 \text{ EXP}(q/17.79)+11.3 \text{ EXP}(-y/16.27)+3.26 \dots \dots \dots (1)$$

위 식에서 얻어지는 처분공 간격을 바탕으로, 연소도가 45~60 GWD/MtU까지 변화에 따라 앞서의 각 설계안을 적용해 가면서, 터널의 길이, 굴착 부피, 완충재의 양, 뒤채움재의 양, 용기구성물질인 구리 및 구상흑연주철의 양등을 상호 비교하였다. 그림 4는 각 설계안을 적용할 때, 연소도가 증가함에 따른 굴착부피의 양 변화를 예시한 것이다.

연소도가 증가함에 따라 각 설계변수의 영향을 종합적으로 분석한 결과, 연도소가 ~50 GWD/MTU 이하인 경우에는 KDC-1 처분용기를 사용하는 것이 유리하며, 그 이상인 경우에는 DGN #3 처분용기 사용하는 것이 유리한 것으로 나타났다.

Table 1. Specifications and performance parameters of each model

		DGN#3	KDC-1	DGN#5
No. of fuel assemblies in canister		3	4	5
Outer radius (cm)		47.5	51.0	51
Normal Case	Max. von-Mises stress (safety factor)	84.7 MPa (2.77)	74.9 MPa (3.13)	99.5 (2.36)
	Max. deformation (mm)	2.56	2.54	2.52
Extreme Case	Max. von-Mises stress (safety factor)	120.3 MPa (1.95)	111.9 MPa (2.10)	119.2 (1.97)
	Max. deformation (mm)	2.66	2.64	2.63
Absorbed dose (Gy/hr)		< 0.5	< 0.5	< 0.5
Criticality		< 0.95	< 0.95	-

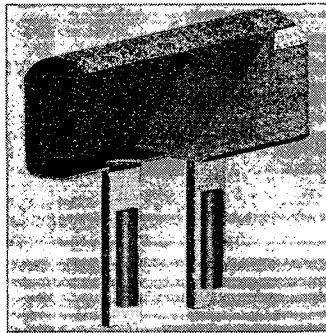
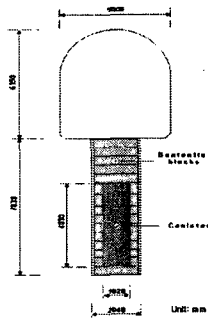


Fig. 1. View of the closed disposal holes and the backfilled disposal tunnel

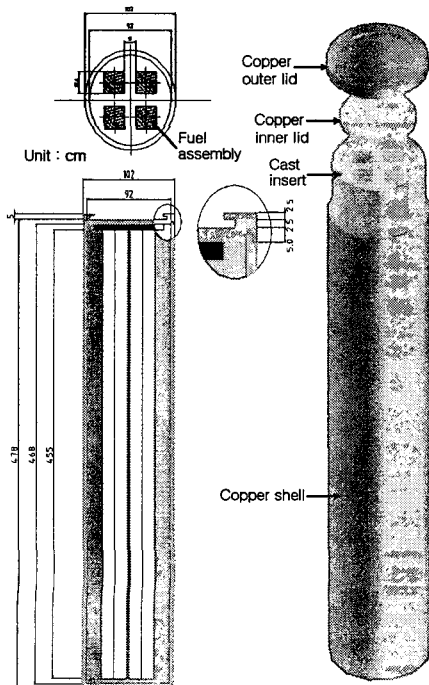


Fig. 2. KDC-1 disposal canister

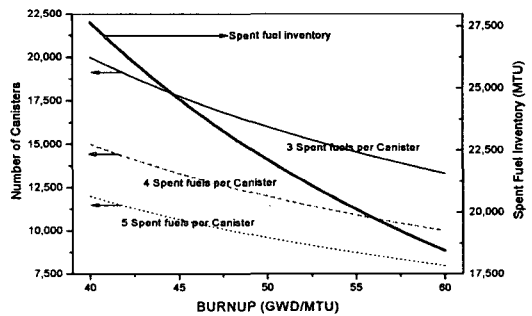


Fig. 3. Spent fuel inventory and the corresponding number of canisters

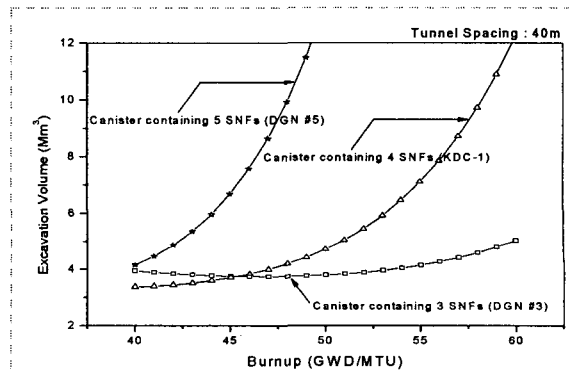


Fig. 4. Excavation volume for each canister design