

PWR 사용후핵연료 처분용기(KDC-1)의 핵임계 안전성 평가

조동진, 최중원, 이종열, 최희주, 김성기
한국원자력연구소, 대전광역시 유성구 덕진동 150

dkcho@kaeri.re.kr

한국원자력연구소에서는 사용후핵연료를 심지층에 안전하게 처분하고자 처분용기를 개발 중에 있다. 증장기연구개발사업 2단계까지의 연구를 통하여 개발된 PWR 처분용기는 네 개의 사용후핵연료 집합체를 수용할 수 있으며 외부용기와 내부용기의 이중구조로 되어 있다. Cast iron 재질의 내부용기는 처분용기가 심지층에 위치했을 때, 외압으로부터 구조적 건전성을 확보해 주며, 구리재질로 이루어진 외부용기는 부식을 억제하는 역할을 한다. 이 처분용기의 반경은 122 cm이며, 축방향 총 길이는 483 cm 이다. 그런데, 이 처분용기의 문제점은 무게가 약 40 톤으로 매우 무겁다는 것이다. 3단계 연구에서는 보수성을 줄이고 공학적이고 실제적인 입력자료를 적용하여 구조해석을 재수행하였으며, 이를 통하여 지름을 102cm로 감소시킨 PWR 처분용기 개념설계안(KDC-1)을 제안하였다. 따라서 본 연구에서는 이 설계안이 심지층 처분장에 위치하였을 때 핵임계 안전성이 확보되는 지를 평가하였다.

핵임계 해석 시 연소 및 냉각시간에 따른 핵종생성량은 SCALE5.0의 SAS2 모듈을 이용하여 산출하였으며, 단위 처분공 모델에서의 핵임계도는 MCNP4c2를 이용하여 평가하였다. 기준사용후핵연료로 초기농축도 4.0 wt.%, 방출연소도 45 GWD/MTU를 적용하였으며, 제어봉이나 가연성 독봉은 없는 것으로 가정하였다. 핵연료는 3주기 동안 원자로 내에서 연소된 후 방출되며 37.5 W/gU의 비열출력으로 400 일간 연소시켰으며, 실제 발전소 데이터를 근거로 재장전 기간은 60일을 가정하였다. 처분되는 핵연료의 냉각기간은 40년을 가정하였으며, 연소에 의한 반응도 감소효과(burnup credit)는 액티나이드 핵종만을 고려하였다. MCNP에서 6 m 간격의 단위 처분공만을 묘사하였으며, 처분공 안에는 한 개의 처분용기를 묘사하였다. 압축벤토나이트는 반경방향으로 60 cm, 아래쪽으로는 50 cm, 위쪽으로는 250 cm가 채워져 있다. 압축벤토나이트 외곽에는 천연방벽인 암반이 벤토나이트를 감싸고 있다. 처분용기 및 처분공의 각 구성 물질 조성은 사용후핵연료가 처분된 심지층 처분장의 핵임계 안전성을 평가한 SKI Report 00:13 보고서에서 사용한 조성을 그대로 적용하였다.

심지층 처분장의 핵임계 안전성에 대해 언급하고 있는 10CFR60.131(h)에서는 고준위폐기물 처분장에 관하여 반응도를 가장 크게 야기 시키는 조건에서 불확실도를 포함하여 유효증배계수가 0.95 이하로 유지될 것을 요구하고 있다. 표 1에는 본 연구에서 고려한 불확실성을 유발하는 인자와 이에 상응하는 불확실도가 기재되어 있다. 표 1에서 보듯이 총 불확실도는 매우 보수적으로 고려했을 때, 0.079 Δk 로 나타났다.

표 1. Summary of the uncertainties

Factor	Uncertainty
Operating history	0.002
Declared burnup	0.007
Power history	0.002
Axial burnup distribution	0.005
Control rods	0
Calculational uncertainty	0.02
MCNP statistical uncertainty	0.002
Emplacement uncertainty	0.001
Isotopic prediction	0
Long term reactivity change	0.040
Total	0.079

고려된 불확실도 중에서 방출연소도(declared burnup) 및 장기저장에 따른 반응도 변화(long term reactivity change)에 대해서만 언급하면 다음과 같다. 사용후핵연료의 연소도는 원자로의 열출력과 관련이 있으며, 보통 열출력은 약 2% 정도의 오차를 보인다. 또한 노심계산코드로부터 원자로 출력을 각 핵연료 집합체 출력으로 변환하는 데는 약 1% 정도의 오차를 야기 시킨다. 따라서 각 핵연료 집합체당 명기된 방출연소도는 약 3% 정도의 오차를 갖으며, 이에 의한 불확실도가 고려되었다. 그림 1은 원자로에서 방출된 사용후핵연료를 처분공에 처분하였을 경우 시간에 따른 유효증배계수의 변화를 나타낸다. 그림에서 보는 바와 같이, 냉각기간이 40년인 핵연료를 처분하면 시간이 지남에 따라 반응도 값은 증가하다가 다시 감소하는 경향을 나타낸다. 본연구의 기준핵연료는 냉각기간이 40년이므로 이로 인한 반응도 증가를 불확실도에 포함시켰다.

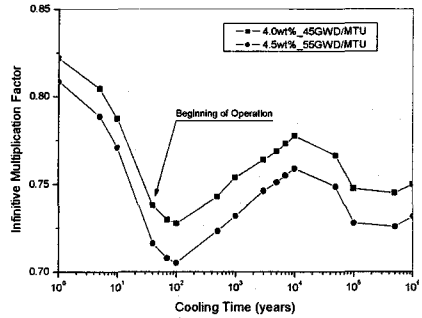


그림 1. 냉각기간에 따른 유효증배계수 변화

핵임계 해석은 정상 및 비정상 조건에 대해 각각 해석하였다. 정상조건은 KDC-1 처분용기가 처분공에 거치된 후, 공학적 방벽의 건전성 및 성능이 유지되면서 지하수에 의해 최적 감속조건을 이룰 때의 조건이며, 이때, 최대 핵임계도를 나타내는 조건은 1.0 g/cc의 밀도를 갖는 지하수가 처분용기 바스켓 내와 벤토나이트에 포화되었을 때로 나타났다. 이 조건에서의 유효증배계수 값은 표 2에서 보듯이 불확실도를 포함해도 0.816로 나타나. 새로이 제안된 KDC-1 처분용기 및 단위 처분공은 정상조건에서 미임계 기준을 만족하였다.

비정상 조건은 매우 극단적인 조건으로 인위적으로 추가한 공학적 방벽은 모두 소실되고 천연방벽만이 존재하면서 지하수에 의해 최적 감속조건을 이룰 때이다. 즉, 벤토나이트가 물에 의해 소실되고 이차적으로 처분용기를 구성하고 있는 모든 재질이 소실되어 사용후핵연료 집합체만 물속에 남은 경우를 고려하였다. 그림 2는 이 경우에 대하여 평가된 핵임계도를 나타낸다. 계산 시, 물의 밀도는 0.6~1.0 g/cc까지 변화시켰으며, 집합체 간의 거리는 0~13cm 까지 변화시켰다. 가장 반응도가 높은 조건은 물의 밀도가 1g/cc 이고, 집합체 네 개가 상호간에 붙어 있는 경우로 나타났으며, 이 경우의 핵임계도 값은 0.86717로 나타났으며, 불확실도를 고려하면, 0.946으로 미임계 한계치를 만족하였다.

표 2. 핵임계도 평가 결과

	$K_{eff} + \text{uncertainty}$
정상상태	$0.73686 + 0.079^{1)} = 0.81586$
비정상상태	$0.86717 + 0.079^{1)} = 0.94617$

of uncertainties : 고려된 불확실도의 총 값임

1) Sum

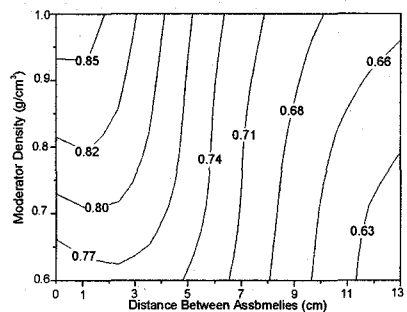


그림 2. Criticality Map for four spent fuel assemblies in pool.

앞서 언급한 바와 같이, 새로이 제안된 PWR 처분용기 KDC-1은 불확실도를 보수적으로 적용하고 극단적인 비정상조건을 적용한다 해도 핵임계 안전성이 확보되는 것으로 나타났다. 본 연구에서 수행한 핵임계 해석은 예비 안전성 평가로서 불확실도를 지나치게 보수적으로 적용하였으므로 향후 이에 대한 개선연구가 필요하다.