

《기술보고》

영광 3, 4호기 사용후 핵연료 저장시설의 용량증대

안준기 · 이성희 · 문복자

한국원자력연구소

(1994. 9. 1 접수)

요 약

현재 10년분의 사용후 핵연료를 저장할 수 있도록 설계된 영광 3, 4호기 사용후 핵연료 저장시설을 구조변경이나 reracking없이 핵연료 저장밀도를 변경함으로써 그 저장용량을 약 3년 정도 늘릴 수 있음을 보였다. 영광 3, 4호기 사용후 핵연료 저장시설의 경우 열수력해석, 구조해석, 방사선해석은 이미 100% 저장밀도를 가정하여 설계가 되어 있으므로 여기에서는 임계안전 측면에서 100% 저장밀도가 가능한가를 분석하였다. 사용후 핵연료 저장시설중 일정 기준 이상으로 연소된 사용후 핵연료만을 저장할 수 있게 설계된 영역 2의 핵연료 저장밀도는 현재 75%인데, 이 영역의 저장밀도를 중성자 흡수체를 쓰지 않고도 100%로 높일 수 있는가를 알아보기 위해 먼저 영역 2에 100%의 저장밀도로 저장할 때 임계안전을 만족하는 사용후 핵연료의 최소연소도를 핵연료의 초기농축도에 따라서 계산하였다. 이렇게 계산된 저장 가능 최소연소도를 노심에서 연소된 후 방출되는 핵연료의 예상연소도와 비교하여 노심에서 연소된 후 정상적으로 방출되는 사용후 핵연료는 영역 2에 100%의 저장밀도로 안전하게 저장될 수 있음을 확인하였다.

1. 서 론

가압경수로의 노심에서 연소된 후 방출되는 사용후 핵연료는 일단 습식저장 형태의 핵연료건물내 사용후 핵연료 저장시설에 저장되는데, 저장시설의 용량은 최소한 전체 노심내에 장전되는 핵연료집합체와 정상적인 재장전운전동안 노심에서 방출되는 핵연료 집합체를 수용할 수 있어야 한다[1]. 소내의 사용후 핵연료 저장시설에 저장된 사용후 핵연료는 처분 혹은 중간저장을 위해 소외로 반출되기 이전까지는 소내에 저장되어 있어야 하기 때문에 사용후 핵연료 저장시설은 규정에서 요구하는 최소한의 용량보다 훨씬 큰 용량으로 건설하는 것이 일반적이다. 영광 3, 4호기 사용후 핵연료 저장시설도 10년간의 운전에서 방출되는 사용후 핵연료를 수용할 수 있는 용량으로 설계되어 있다[2]. 그러나, 소내에 저장되어 있는 사용후 핵연료를 처리할 중간저장시설의 건설일정이 불투명한 현실을 고려하면 여분을 가

지도록 설계된 현재의 사용후 핵연료 저장시설의 용량도 곧 그 한계에 이를 것으로 예상된다. 따라서 사용후 핵연료 저장시설의 저장용량 확보는 대부분의 발전소에서 시급한 현안이며, 울진 1호기와 고리 3호기의 경우는 저장용량 부족문제를 해결하기 위해 이미 중성자흡수체를 사용하는 고밀도 저장랙으로 reracking을 수행한 실정이다.

영광 3, 4호기 사용후 핵연료 저장시설은 임계안전해석시 저장되는 핵연료의 연소를 고려하여 설계되었는데 [2], 이는 연소되지 않은 핵연료의 저장을 가정한 국내에서 운전중인 Westinghouse사 설계 발전소의 사용후 핵연료 저장시설과는 그 설계 개념이 매우 다르다. 연소되지 않은 최대농축도의 핵연료가 저장된다고 가정한 기존의 Westinghouse사 설계 개념에서는 저장시설의 임계안전을 만족하기 위해 저장랙의 피치를 상대적으로 넓게 유지하여(영광 1, 2호기의 경우 35.56cm (14.0") [3]) 단위 면적당 핵연료의 저장 밀도가 매우 낮다. 따

라서 이렇게 설계된 저장시설의 저장용량을 늘리려면 저장조의 크기를 늘리거나 고밀도 저장이 가능한 피치가 작은 저장랙으로 reracking을 해야만 하는데, 이는 경제적으로 큰 부담이 있을 뿐만 아니라 작업중사자의 추가적인 방사선피폭도 있게 된다. 영광 3, 4호기 사용후 핵연료 저장시설은 영역 1과 영역 2로 구분되는데 저장랙의 피치는 각 영역 모두 24.85cm (9.785") [2]로 고밀도저장이 가능한 형태로 구성되어 있다. 영역 1은 최대농축도 5.0 w/o의 연소되지 않은 핵연료를 저장하는 구역으로 임계안전을 만족하기 위해 50%의 저장 밀도로, 영역 2는 일정 기준 이상 연소된 사용후 핵연료만을 저장할 수 있는 구역으로 75%의 저장 밀도로 설계되어 있다. 저장랙의 모든 영역은 추후 그 저장밀도를 높일 수 있도록 열수력해석, 구조해석, 방사선해석의 경우 이미 100% 저장밀도를 가정하여 설계가 되어 있다[2].

영역 1은 현재의 설계가 임계안전 측면에서 여유도가 많지 않아[4] 현재 50%인 저장밀도를 그 이상으로 높이려면 중성자흡수체를 사용하는 것이 불가피하다고 판단된다. 주어진 조건의 핵연료가 저장되었을 때 임계안전이 만족되는가를 평가하는 영역 1의 설계와는 달리 영역 2의 설계는 핵연료의 초기농축도에 따른 최소연소도

를 설정하여 이 연소도 이상으로 연소된 핵연료만을 저장하도록 규정하게 된다. 75% 저장밀도를 가정했을 때 영역 2에 저장 가능한 핵연료의 초기농축도에 따른 최소연소도[4]를 노심에서 연소된 후 방출되는 핵연료의 예상 방출연소도[5]와 비교한 그림 1을 보면, 저장 가능한 핵연료의 최소연소도가 예상 방출연소도보다 매우 낮아 현재의 설계가 임계안전 측면에서 상당히 많은 여유도를 가지고 있음을 알 수 있다. 따라서, 이 설계 여유도를 고려한다면 영역 2 저장랙은 중성자흡수체를 사용하지 않고도 저장밀도를 높일 수 있는 가능성이 있다고 판단된다. 또한, 영광 3, 4호기와 비슷한 설계개념의 Palo Verde 발전소 사용후 핵연료 저장시설의 경우에는 중성자흡수체를 사용하지 않고도 그 저장밀도를 높일 수 있다는 것이 이미 확인되어 있다[6].

영역 2의 저장밀도를 중성자흡수체를 사용하지 않고 100% 저장밀도로 변경할 수 있으며, 이와 같은 저장밀도 변경을 통해 저장용량을 늘릴 수 있음을 보이기 위해 다음을 수행하였다. 먼저 현재의 설계가 가지는 임계여유를 검토하기 위해서 임계해석과 관련된 자료를 검토하였다. 다음으로 저장밀도 100%를 가정한 영역 2에 대한 임계해석을 수행하여, 저장이 가능한 핵연료의 초기농축도에 따른 최소연소도를 계산하였다. 마지막으로 이 저장가능 최소연소도를 노심에서 연소된 후 방출되는 사용후 핵연료의 예상 방출연소도와 비교하여 노심에서 정상적으로 연소된 후 방출되는 사용후 핵연료는 영역 2에 100% 저장밀도로 저장이 충분히 가능하다는 것을 확인하였다.

2. 영광 3, 4호기 사용후 핵연료 저장시설의 설계 특성

영광 3, 4호기 사용후 핵연료 저장시설의 설계중 임계안전과 밀접한 관련이 있는 내용들을 살펴보면 다음과 같이 정리할 수 있으며, 이러한 설계 특성은 FSAR 및 설계자료로부터 인용되었다[2, 4, 7].

사용후 핵연료 저장랙 모듈은 피치가 24.85cm(9.785")인 저장 cell이 10×12로 배열 구성되었으며, 이 저장랙 모듈 9개가 저장수조내에 3×3의 배열로 설치되어 영역 1과 영역 2로 구분되어 진다(그림 2 참고).

영역 1은 최대농축도 5.0 w/o의 연소되지 않은 핵연료를 저장할 수 있는 구역으로 임계안전을 위하여 저장되는 핵연료가 서로 인접한 cell에는 위치하지 않는 배

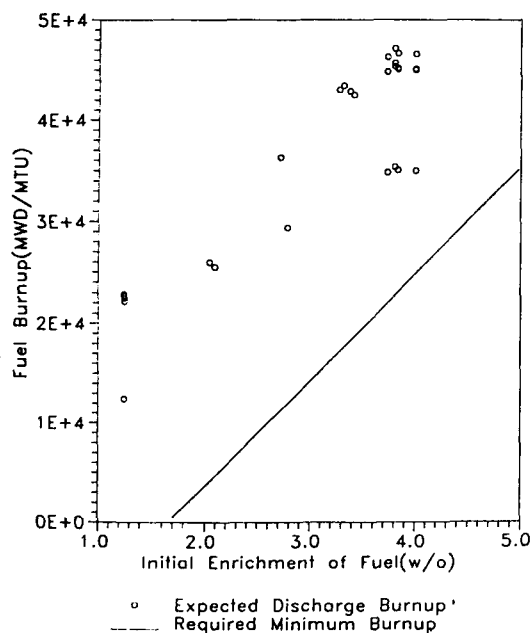


그림 1. 75% 저장밀도인 영역 2에 저장 가능한 핵연료의 최소연소도와 사용후 핵연료의 예상 방출연소도

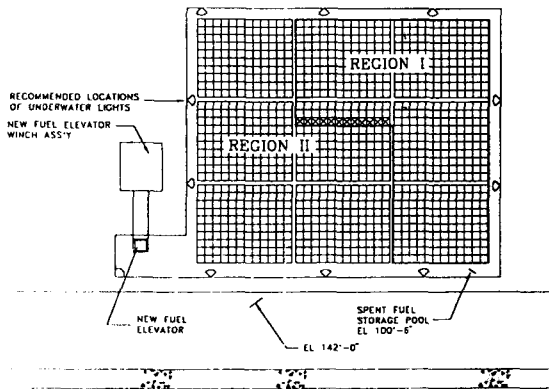


그림 2. 영광 3, 4호기 사용후 핵연료 저장시설

열의 50% 저장 밀도로 설계되어 있으며 252개의 핵연료집합체를 저장할 수 있다. 영역 2는 핵연료의 초기농축도에 따라 일정 기준 이상 연소된 핵연료만을 저장할 수 있는 구역으로 핵연료의 반응도가 상대적으로 낮으므로 영역 1보다 높은 75%의 저장밀도로 설계되었으며 426개의 핵연료집합체를 저장할 수 있다. 핵연료 취급 운전시의 부주의 및 사고 등으로 인해 핵연료를 넣지 않아야 하는 cell에 핵연료가 놓이게 되어 임계안전 사고를 유발할 가능성을 미리 방지하기 위해 핵연료가 저장되지 않아야 하는 cell은 모두 잠금장치가 설치되어 있다. 핵연료가 저장되는 cell에는 저장되는 핵연료집합체 사이의 거리를 유지하면서 flux trap water gap을 형성하도록 하는 SS-304 재질의 L형 삽입체가 설치되어 있다. 영역 1과 영역 2의 핵연료 저장밀도는 임계안전 측면에서 각각 50%와 75%로 제한되었지만, 구조해석, 열수력해석, 방사선해석 등의 다른 설계는 추후에 저장밀도를 높여 저장용량을 늘릴 수 있도록 모든 영역을 100% 저장 밀도로 가정하여 수행하였다.

임계 안전해석에는 CEPAC-DOT/KENO 전산코드 체계를 이용하는 ABB-CE의 임계해석 방법을 이용하였는데, CEPAC 코드 체계는 핵단면적 계산에, DOT와 KENO 코드는 유효증배계수 계산에 각각 이용된다. CEPAC 전산코드 체계를 이용하여 핵연료 집합체의 연소 계산을 수행하고, 이 연소된 핵연료 집합체 및 저장랙 구조물, 냉각수 등에 대한 4군 핵단면적 자료를 계산하였다. 핵연료봉 cell 및 안내관 cell의 핵단면적은 구성물질이 균일하게 분포된 cell을 가정해 핵단면

적 자료를 계산하였다. 정상상태의 유효증배계수 계산에는 2차원 각분할법 코드인 DOT4.3 전산코드가 이용되었으며, 가상사고시의 유효증배계수 계산에는 3차원 Monte Carlo 코드인 KENO-IV 코드가 이용되었다. 정상상태의 유효증배계수를 계산하는데 있어 영역 1의 기하학적 모형에서는 저장랙의 구조물중 L형 삽입체가 그대로 묘사된 반면, 영역 2의 경우에는 없는 것으로 가정되었다. 영역 2의 기하학적 구조에서 L형 삽입체가 없다고 한 가정은 임계해석 측면에서 보수적일 뿐만 아니라 저장랙의 기하학적 구조를 매우 단순화해 주는 이점이 있다.

3. 100% 저장밀도를 가정한 영역 2의 임계도해석

영역 2의 저장밀도를 100%로 높이는 것이 가능한가 분석하기 위해서는 먼저 임계안전 측면에서 저장이 가능한 사용후 핵연료의 초기농축도에 따른 최소 방출연소도를 계산하여야 한다. 이를 위해 영역 2에 핵연료가 100% 저장밀도로 저장된다고 가정하여, 저장되는 핵연료의 초기농축도와 연소도에 따른 유효증배계수를 계산하였는데, 이 계산에는 CEPAC-DOT 전산코드 체계를 이용하는 ABB-CE의 임계해석 방법[4]을 이용하였다.

100% 저장밀도를 가정한 영역 2의 임계도해석에서는 현재의 75% 저장밀도에서는 핵연료가 저장되는 cell에만 설치되어 있는 L형 삽입체가 모든 cell에 설치되어 있는 것으로 가정하였다. 이 L형 삽입체는 구조해석 관점에서의 구조재가 아니라 저장되는 핵연료집합체 사이의 거리를 유지하면서 flux trap water gap을 형성하는 역할을 하는 것이므로 L형 삽입체의 추가적 설치는 임계해석 측면에서는 영향이 있으나, 그 이외의 기존 설계 내용에는 거의 영향을 주지 않을 것으로 판단된다. L형 삽입체가 추가로 설치되었다고 가정한 100% 저장밀도의 영역 2의 기하학적 구조는 그림 3에 있는 것과 같다.

CEPAK 코드[8]를 이용한 핵단면적 계산에서, 핵연료봉 cell 및 안내관 cell의 핵단면적은 저장밀도의 변화에 의한 영향을 받지 않으므로 기존 75% 저장밀도의 임계해석에서 계산된 핵단면적자료를 참고문헌 4에서 인용하였으며, 저장랙의 벽체, 냉각수 및 L형 삽입체의 핵단면적은 계산을 새로이 수행하였다. 유효증배계수 계산을 위한 DOT 코드[9]의 입력중 영역 2의 기하학적

계산을 수행하였으며, 나머지 요소의 불확실성은 참고 문헌으로부터 인용하였다. 계산된 각각의 불확실도는 아래 수식과 같이 유효증배계수의 평가에 고려되었다.

$$k_e = k_{calc} + B_{method} + \Delta k_m + (\sum \Delta k_u)^{1/2}$$

여기에서, k_e : 모든 불확실성이 고려되어 평가된 유효 증배계수,

k_{calc} : 정상상태를 가정해 계산된 유효증배계수,

B_{method} : 임계해석 방법의 바이어스,

Δk_m : 해석결과와 실험결과와의 비교시 발생하는 통계적 불확실성,

Δk_u : 기계적 공차 및 기타 오차에 의해 발생하는 불확실성.

이렇게 평가된, 저장밀도 100%를 가정한 영역 2의 유효증배계수는 저장되는 핵연료의 초기농축도와 연소도에 따라서 표 2에 제시된 것과 같다.

표 2. 100% 저장밀도인 영역 2의 핵연료의 초기농축도와 연소도에 따른 유효증배계수

Enrichment (wt%)	Fuel Burnup (MWD/MTU)			
	11000	22000	33000	44000
5.0	1.1837	1.1027	1.0227	0.9419
4.5	1.1581	1.0721	0.9867	0.9026
4.0	1.1276	1.0360	0.9459	0.8600
3.5	1.0909	0.9937	0.9002	0.8149
3.0	1.0467	0.9444	0.8503	0.7727
2.5	0.9929	0.8882	0.7988	—
2.0	0.9268	0.8261	—	—

4. 영역 2의 저장밀도 증대 가능성 검토

영역 2에 100% 저장밀도로 사용후 핵연료를 저장한다고 가정하여 평가된 유효증배 계수가 임계안전에서 제한하는 최대치인 0.95가 되는 핵연료의 연소도는 표 2로부터 핵연료의 초기농축도에 따라 계산하면 표 3과 그림 5와 같이 된다.

임계안전 측면에서 사용후 핵연료 저장시설의 유효증배계수는 0.95를 초과할 수 없으므로, 영역 2가 100% 저장밀도로 핵연료를 저장하기 위해서는 저장되는 사용

표 3. 100% 저장밀도인 영역 2에 저장 가능한 핵연료의 초기농축도에 따른 최소연소도

Enrichment (wt%)	Minimum Burnup (MWD/MTU)
2.0	8700
2.5	15500
3.0	21500
3.5	27300
4.0	32700
4.5	37700
5.0	42700

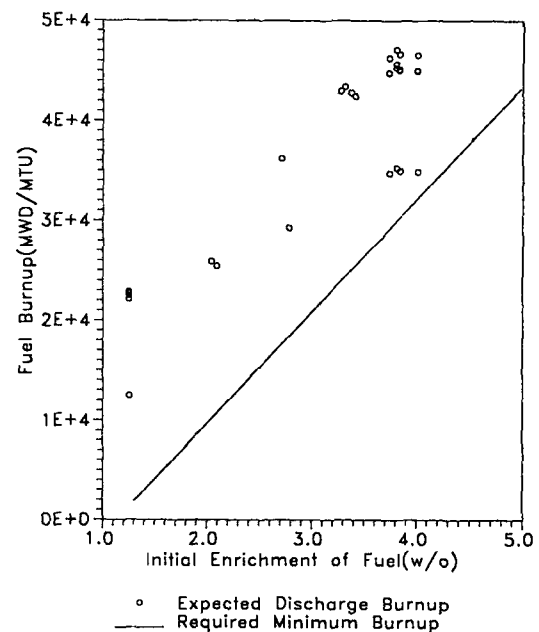


그림 5. 100% 저장밀도인 영역 2에 저장 가능한 핵연료의 최소연소도와 사용후 핵연료의 예상 방출연소도

후 핵연료의 연소도가 그 초기농축도에 따라서 표 3 혹은 그림 5에 제시된 연소도 이상으로 제한되어야 하며 이 저장 가능한 핵연료의 최소연소도가 노심에서 방출되는 사용후 핵연료의 연소도보다 낮아야만 노심에서 정상적으로 연소된후 방출되는 핵연료를 영역 2에 저장할 수 있게 된다. 100% 저장 밀도로 저장이 가능한 핵연료의 초기농축도에 따른 최소연소도와 예비적인 노심 장전 모형에 의한 핵연료의 초기농축도에 따른 예상 방

출연소도[5]가 비교된 그림 5를 보면 예상 방출연소도가 저장 가능 최소연소도보다 훨씬 높음을 알 수 있는데, 이는 노심에서 정상적으로 연소된 후 방출되는 사용후 핵연료는 영역 2에 100% 저장밀도로 저장하는 것이 가능하다는 것을 의미한다.

5. 결론 및 토의

영광 3, 4호기 사용후 핵연료 저장시설의 저장용량을 늘리는 방안의 하나로 중성자흡수체를 사용하지 않고 영역 2의 저장밀도를 높일 수 있는가를 분석한 결과, 현재 75%의 저장 밀도를 100% 저장밀도로 높여도 노심 내에서 정상적으로 연소된 후 방출되는 사용후 핵연료의 저장이 가능하다는 것을 확인하였다. 이를 위해서는, 현재 L형 삽입체가 설치 되지 않은 빈 저장 cell에 L형 삽입체를 추가로 설치하는 것과 운전 지침등에 규정되어 있는 영역 2에 저장 가능한 사용후 핵연료의 최소연소도 값을 100% 저장밀도를 가정해 계산한 값으로 대체하는 등의 변경이 필요하다. 이와 같은 방법으로 영역 2의 핵연료 저장용량을 늘리면 저장 가능한 사용후 핵연료 집합체수는 426개에서 568개로 142개 증가하는데, 이는 한주기 연소후 방출되는 사용후 핵연료 집합체 44개와 비교하면 약 3년간의 운전으로부터 방출되는 사용후 핵연료를 더 저장할 수 있는 용량이다. 이 저장용량의 증가는 기존 저장랙을 해체하고 새로운 저장랙을 설치하는 reracking 작업과는 달리 L형 삽입체를 설치하는 간단한 작업 및 관련 운전지침의 변경만으로 가능하므로 비용의 발생 및 작업자의 방사선피폭이 거의 없거나 아주 미미한 아주 경제적인 방법이라고 하겠다.

영광 3, 4호기 사용후 핵연료 저장시설은 영역 1과 영역 2의 저장밀도를 모두 100%로 바꾸면 그 저장용량을 20년으로 늘릴 수 있도록 설계되었는데, 여기에서 계산한 바와 같이 영역 2는 중성자흡수체를 사용하지 않고도 100% 저장밀도로 변경하는 것이 가능한 반면, 최대농축도 5.0 w/o의 연소되지 않은 핵연료를 저장할 수 있어야 하는 영역 1은 저장 밀도를 높이기 위해서는 중성자흡수체를 반드시 사용해야 할 것으로 판단된다. 또한 영역 1에 그 공간을 반드시 확보하여야 하는 연소되지 않은 핵연료의 최대농축도와 저장랙 피치가 아주 작은 것을 고려하면, 영역 1의 저장 밀도를 높이기 위해서는 중성자흡수체의 사용 이외에도 저장되는 핵연료의 일부

에 대해서 그 연소도를 고려하여 임계해석을 하는 방법을 도입하여야 할 것으로 판단된다. 즉, 영역 1을 100% 저장밀도로 변경하기 위해서는 중성자흡수체를 사용하는 동시에 연소되지 않은 최대농축도의 핵연료와 일정 기준 이상 연소된 사용후 핵연료를 checkerboard 형태의 배열로 저장하는 방안을 도입해야 할 것으로 판단된다. 이와 같은 방법을 통해 영역 1의 저장 밀도를 100%로 높이기 위해서는 사용할 중성자흡수체의 종류, 형태, 설치 위치 등의 결정과 함께 연소를 고려하게 되는 사용후 핵연료의 최소연소도의 평가등이 요구되는데 이는 추후의 과제로 남겨 놓았다.

참고문헌

1. "Design Requirements for Light Water Reactor Spent Fuel Storage Facilities at Nuclear Power Plants," ANSI /ANS-57. 2-1983, American Nuclear Society (1983).
2. "Yonggwang Nuclear Units 3 and 4, Final Safety Analysis Report," Ch. 9, Korea Electric Power Corporation (1993)
3. 안준기 외 "900 MWe급 경수로의 저장가능 핵연료 농축도 평가를 위한 임계도 해석," KAERI /TR-181/90, 한국원자력연구소 /한국전력공사 (1990)
4. J.G. Ahn and C.J. Hah, "Criticality Analysis of YGN 3 & 4 Spent Fuel Storage Rack," 10487-NRE-047 (Rev. 0), ABB-CE/KAERI (1989)
5. "원자력 11, 12호기 핵연료설계 계약," KNF/KRI-87-F1112, 한국핵연료주식회사-한국 에너지연구소 (1987)
6. P.F. O'Donnell, "Crediting Assembly Burnup in the Palo Verde Spent Fuel Racks," A-PV-FE-0002 (Rev. 0), ABB-CE, Inc. (1993)
7. T.M. Shin, "Spent Fuel Storage Rack System Design Requirements for YGN 3 & 4," 10487-ME-SR931-00, ABB-CE/KAERI (1988)
8. "CEPAK-Lattice Physics and Few-Group Cross Section Generation Code," CE-CES-30 (Rev. 0-P), Combustion Engineering Inc. (1983)

9. W.A. Rhoades and R.L. Childs, "An Updated Version of the DOT 4 One- and Two-Dimensional Neutron/Photon Transport Code," ORNL-5851, Oak Ridge National Laboratory (1982)
10. "Spent Fuel Storage Facility Design Basis," Proposed Revision 2 to Regulatory Guide 1.13, U.S. Nuclear Regulatory Commission (1981)