'2000 춘계원자력학술발표회 논문집
한국원자력학회

연소도효과를 이용한 사용후연료 조밀저장대 정상상태 핵임계평가

Criticality Evaluation of High Density Spent Fuel Storage Rack under Normal Condition Using Burnup Credit

전제근, 윤정현, 고덕준, 김병태, 하종현, 송명재, 조규성*
원자력환경기술원/한국전력공사
대전광역시 유성우체국사서함 149호
*한국과학기술원

요 약

사용후연료저장조내 보라플렉스 조밀저장대는 수중환경에서 장기간 방사선에 조사될 경우 물성변화를 일으켜 보라플렉스의 표면이 서서히 용해되는 것으로 알려지고 있다. 본 연구에서는 울진 원전2호기 조밀저장대의 임계안전도 평가를 위하여 보라플렉스 저장대의 손상을 고려하기 위하여 저장대내의 보론이 완전히 손실되었다고 가정하고 정상상태시에 연소도효과를 고려하여 저장조 핵임계 안전성을 평가하였다. 핵임계 계산을 위한 전산코드들의 bias 및 불확실도를 평가하기 위하여 검증계산을 수행하였으며, 저장대와 핵연료 가공시의 제작공차를 고려하기 위한 불확실도 평가도 수행하였다. 그리고 전산코드 bias와 불확실도를 보수적인 측면에서 고려하여 정상상태시의 사용후연료 저장조의 핵임계도를 평가하였다. 연소도를 고려한 핵임계평가 결과는 각 해당 초기 농축도에서 사용후연료 저장조에 저장이 가능한 연소도의 허용구역을 나타내는 장전곡선으로 나타낼 수 있으며, 각 해당 초기 농축도에서의 연소도가 장전커브의 허용구역에 해당되는 경우 사용후연료는 보라플렉스 저장대의 보론 크레딧을 고려하지 않고도 안전한 저장이 가능하다. 초기 농축도가 5.0w/o인 사용후연료는 연소도가 43.0MWD/kgU 이상일 경우 핵임계 안전도를 만족하는 것으로 평가되었으며, 연료 초기농축도가 1.6w/o 이하일 경우에는 연소도에 관계없이 사용후연료의 안전한 저장이 가능한 것으로 나타났다. 사용후연료저장조 Region 2의 최대 유효증배계수 k_{eff}는 불확실도를 고려하여 0.94818로 계산되었다($k_{eff} \leq 0.95$).

Abstract

The high density spent fuel storage rack Boraflex was known to experience changes of its physical property and to dissolve under exposure to radiation in an aqueous environment for long period of time. In this study, the criticality evaluation for spent fuel storage rack of Ulchin Unit 2 under normal condition was performed assuming complete loss of ^{10}B from the Boraflex and applying burnup credit. Criticality evaluation code KENO-V.a. from SCALE4.4 system was benchmarked against critical experiments to obtain the calculation bias and bias uncertainties. The manufacturing tolerances of nuclear fuel and storage rack and their reactivity uncertainties were derived, as well. Considering those bias and uncertainties of calculation, the criticality of spent fuel storage under normal condition was conservatively evaluated. The criticality evaluation result using burnup credit can be presented as a spent fuel loading curve that indicates the acceptable burnup domain in spent fuel storage pool. The spent fuels with various initial enrichments and discharge fuel burnup can be safely accommodated in the storage without taking any boron credit from Boraflex, provided the combination falls within the acceptable domain in the loading curve. The spent fuel with initial enrichment of 5.0w/o was evaluated to meet the subcritical safety if its burnup is over 43.0GWD/MTU. The criticality evaluation result also showed that spent fuels with the initial enrichment less than 1.6w/o were able to be stored in the storage pool regardless of their burnup. Conclusively, in the Region 2 of the spent fuel storage pool, the maximum k_{eff}, considering all uncertainties, was calculated as 0.94818.

1. 서 론

울진 원전2호기는 프랑스 Framatom사 설계의 950MWe 용량으로 1989년 9월 상업운전을 시작하였다. 울진 원전2호기 사용후연료 저장조의 초기 저장용량은 315 다발이었으나, 1990년 보라플렉스(Boraflex) 조밀저장대를 이용하여 Region 2의 저장용량을 781다발로 증대시켰고, 1996년에는 보랄(Boral) 조밀 저장대를 설치하여 Region 1의 저장능력을 추가로 확장하였으며, 저장연료의 최대허용 농축도도 3.8w/o에서 5.0w/o로 높여서 인허가를 획득하였다. 보라플렉스는 중성자 흡수재인 B_4C를 함유한 폴리머계통의 재료로서 사용후연료 조밀 저장대에 얇은 판 형태로 부착하여 사용되고 있다.

1980년대부터 보라플렉스 저장대를 사용하는 외국 원전의 사용후연료 저장조에서 높은 농도의 실리카가 검출되었는데, 계속적인 측정 데이터와 실험을 통하여 보라플렉스 저장대내의 실리카가 저장조 실리카 농도 상승의 주 원인이라는 것이 밝혀졌다[1]. 보라플렉스는 실리카와 B_4C가 같은 무게비로 구성되어 있으며, 실리카는 B_4C를 매질에 고정하는 역할을 한다. 보라플렉스 저장대는 수중환경에서 장기간 방사선에 조사될 경우(1.0×10^{10}rads) 물성변화를 일으키게 되는데, 폴리머 재질은 실리카와 규산염 성분으로 변환되고 실리카는 수용성이므로 방사선에 조사된 보라플렉스의 표면은 서서히 용해되는 것으로 추정하고 있다. 최근 몇 년간 우리공사의 울진 원전2호기 사용후연료 저장조에서도 실리카 농도의 증가현상이 나타나고 있는데, 이러한 현상은 보라플렉스 저장대의 손상이 진행되고 있음을 나타낸다.

한편 최근 우리공사 울진 원전2호기 사용후연료 저장조와 같이 보라플렉스 조밀저장대를 사용하고 있는 미국 Prairie Island 원전 등에서는 보라플렉스 저장대의 중성자 흡수효과를 무시하고 핵임계안전성 평가를 재수행하여 USNRC의 인허가를 취득하였다[2]. 울진 원전2호기 사용후연료 저장조에서도 이와 같은 실리카 용출로 인한 보라플렉스 저장대의 성능저하가 문제가 되고 있으므로, B_4C 손실로 인한 임계도 손실을 보상하기 위한 핵임계 안전성평가의 재수행이 요구된다. 본 연구에서는 울진 원전2호기 조밀저장대의 핵임계안전성 평가를 위하여 보라플렉스 저장대의 반응도감소를 고려하지 않았으며, 이에 따른 추가적인 미임계여유도를 확보하기 위하여 연소도효과(Burnup Credit)와 보론효과를 적용하여 핵임계안전성의 재평가를 수행하고 있다.

2. 울진 원전2호기 사용후연료 저장조 운영현황

2.1 사용후연료 발생현황

울진 원전2호기(1989. 9 상업운전)는 프랑스의 Framatom사가 설계-제작한 17×17 연료봉 배열의 표준연료(F-STD)를 사용하다가 제2주기(1990. 7)부터 독일 KWU사로부터 도입된 기술로 국내에서 제조한 국산연료인 KWU-KOFA 연료로 교체되었다. 그러나 KWU-KOFA연료의 성능에 문제가 지적되면서 1996년 이후

로 모두 미국 Westinghouse사의 설계기술로 제작된 V5H(VANTAGE-5H) 연료가 장전되고 있으며, 사용후 연료 발생량은 표 1에 기술하였다.

1990년 울진 원전2호기 신연료 저장조의 최대 저장가능 농축도는 3.5w/o에서 4.2w/o로 변경되었으며, 사용후연료 저장조의 최대 저장가능 초기 농축도도 사용후연료 저장조에 조밀저장대 설치시 3.5w/o에서 3.8w/o로 개정 승인되었다. 그후 1996년 핵임계안전성평가의 재수행을 통해 저장가능 사용후연료의 초기농축도를 5w/o로 상향조정하여 인허가를 취득하였다.

2.2 설계기준 사용후연료 사양

울진 원전2호기 사용후연료 저장조에는 Westinghouse V5H, Framatom STD, KWU-JDFA 연료 등이 저장되어 있다. 반응도 평가결과에 따르면 Westinghouse사의 V5H 연료의 반응도가 가장 큰 것으로 나타났다. 따라서 V5H 연료를 사용후연료 저장조 핵임계설계 기준연료로 선정하였다. 연료들을 무한배열로 가정하였을 경우의 연소도에 따른 반응도평가 결과를 표 2에 기술하였다.

V5H 연료 집합체는 17 X 17 연료배열로 이루어져 있으며, 24개 제어봉 가이드 튜브와 1개의 씸블이 배치되어 있다. 표 3에 WH-V5H, Framatom-STD 및 KWU-JDFA 연료의 설계사양이 기술되어 있다[3].

2.3 저장조 설계사양

사용후연료 저장조 Region 2 저장셀의 저장대에는 그림 1에서 보는 바와 같이 보라플렉스 중성자 흡수재가 내경 8.8″, 두께 0.075″의 스테인레스강 박스와 두께 0.0235″의 외부 스테인레스 강 판 사이에 위치하고 있다. 사용후연료집합체는 동서방향으로 10.4″, 남북방향으로 10.2″인 저장셀의 중앙에 장전된다. 스테인레스 갭 채널은 각각의 저장셀 박스를 연결하며 각 박스사이의 외부 water gap을 형성한다. 보라플렉스 중성자흡수재의 두께는 0.075±0.007″이며 ^{10}B의 밀도는 0.0238g/cm^3 이다[3].

3. 연소도효과를 이용한 핵임계평가

3.1 가정사항

계산된 증배계수 값은 실제 사용후연료 저장조 증배계수 보다 항상 커야하므로 다음과 같은 보수적인 사항들을 가정하였다.

- 반응도가 가장 큰 연료를 대상 연료로 가정함(Westinghouse V5H).
- 사용후연료저장조의 냉각수에는 2,500ppm 이상의 보론이 희석되어 있으나 계산상의 보수성을 위하여 순수로 가정(단, 가상사고 상태를 제외함)
- 사용후연료저장조의 냉각수는 20°C로 가정함.
- 사용후연료 저장셀이 반경방향으로 무한대로 배열되어 있다고 가정하였으며, 축방향 및 반경방향으로의 중성자 손실은 고려하지 않음.
- 방사선조사에 의한 손상으로 보라플렉스 저장대내에 ^{10}B이 존재하지 않는 것으로 가정하여 핵임계 평가
- 스페이서 그리드와 같이 흡수영향이 작은 구조재의 중성자 흡수효과는 고려하지 않음.
- 핵임계도 평가 전산코드 : CASMO-3[4], SCALE4.4의 CSAS모듈(KENO-V.a)[5].

3.2 핵임계 검증계산

전산코드 검증계산의 목적은 사용후연료 저장조 핵임계해석에 사용되는 CASMO-3 및 27그룹 SCALE 핵단면적을 이용하는 NITAWL-KENO.V.a. 코드의 핵자료와 계산 모델링방법에 대해 검증하는 것이다. 전산코

드 검증계산은 사용후연료 저장조 구조와 유사한 핵임계 실험결과를 이용하여 수행하였다[6].

계산결과에 따르면, 표본의 평균값과 표준편차는 각각 0.00656과 0.00373으로 평가되었다[6]. 검증계산에서 계산값들이 t 분포를 한다고 가정하면 95%확률 95%신뢰도 구간에서 자유도가 40인 경우 k_{25}=1.960이며[7], 이 값들을 식(1)에 대입하면 계산값의 바이어스 및 바이어스 불확실도는 각각 0.00656, 0.00731이 된다.

$$\triangle k_u = \overline{\triangle k} \pm k_n \overline{\sigma_{\triangle k}} \quad \text{...(1)}$$

k_n은 95/95의 신뢰도를 갖는 허용한계다.

3.3 연소도효과를 고려한 핵임계평가법

사용후연료 저장조의 인허가 기준에서는 95%의 신뢰도에서 95%의 확률로 최대 k_{eff}값이 0.95이하라는 것을 확신할 수 있도록 불확실도가 포함되어야 한다. 이러한 불확실도는 통계적인 조합으로 구성되며, 최대 k_{eff}는 다음과 같이 표현된다[3].

$$k_{eff}^{max} = k_{Calc} + \triangle k_{Bias} + \triangle k_{Ax} + \triangle k_{Unc} \quad \text{...(2)}$$

k_{Calc} : 반응도 계산값

$\triangle k_{Bias}$: 검증계산 계산값과의 바이어스

$\triangle k_{Ax}$: 축방향 연소도분포 영향

$\triangle k_{Unc}$: 모든 불확실도의 종합적 영향

그리고 $\triangle k_{Unc}$는 다음과 같은 식에 의해 계산된다.

$$\triangle k_{Unc} = (\triangle k_b^2 + \triangle k_i^2 + \triangle k_g^2 + \triangle k_t^2 + \triangle k_E^2 + \triangle k_\rho^2 + \triangle k_d^2)^{1/2} \quad \text{.................................(3)}$$

$\triangle k_b$: 바이어스 불확실도

$\triangle k_i$: 셀 박스 내경의 불확실도

$\triangle k_g$: water gap 두께의 불확실도

$\triangle k_t$: 셀 박스벽 두께의 불확실도

$\triangle k_E$: 농축도 불확실도

$\triangle k_\rho$: UO_2 밀도의 불확실도

$\triangle k_d$: 감손계산의 불확실도

사용후연료내 핵종재고량은 CASMO-3를 이용하여 평가하였다. 핵종 감손계산에 대한 불확실도 $\triangle k_d$는 감손전 반응도 k_{zero}와 일정기간 연소후의 반응도 계산값 k_{Calc} 차의 5%로 나타낼 수 있다. 이러한 핵종감손에 대한 불확실도는 USNRC에 의해 승인되어 사용되고 있으며[8], 사용후연료 냉각기간에 의한 핵종의 붕괴를 고려하게 되면 보수적인 계산을 수행하게 된다

설계기준 연소도에 대한 최대 k_∞는 식(2)를 이용하여 계산된 최대 k_∞로부터 결정될 수 있다. 다른 농축도에서는 설계기준연료와 같은 최대 k_∞를 등가 반응도로 생성하는 k_{Calc}가 계산되어야 한다. 각 농축도에 대해 k_{Calc}는 연료의 연소도의 함수로 결정된다. 기준값인 최대 k_∞를 알고 있으므로, 계산된 k_{Calc}과 감손계산에 대해 식(2)와 (3)을 이용하여 반복적인 계산을 수행한다. 계산된 값이 결정되면, 내삽으로 해당 연소도를

구한다. 이값이 각 농축도의 연료에 대한 미임계도유지를 위한 제한 연소도이며, 고려되는 농축도에 대해 반복적인 계산을 수행한다. 그림 2는 연소도 효과 및 붕산 효과를 적용한 사용후연료 저장조 핵임계 안전성 분석의 흐름도를 나타내고 있다.

사용후연료 저장조 핵임계해석에는 CASMO-3 코드와 SCALE4.4 전산코드에서 제공하는 27그룹 핵단면적을 이용하는 NITAWL-KENO.V.a. 코드가 사용되었다. 핵연료 감손계산과 제작공차에 의한 반응도의 영향은 CASMO-3 코드를 이용하여 계산하였다.

3.4 불확실도 평가

식(3)의 불확실도는 저장대 및 핵연료 성형가공시의 제작공차와 핵연료 감손계산에 따른 불확실도의 통계적 합으로 나타내 진다. 핵연료 감손계산과 그에 따른 불확실도는 CASMO-3 전산코드를 이용하여 하였다. 연소도에 따른 반응도의 계산시 불확실도를 결정할 수 있는 실험값은 없으므로, USNRC에서 인증된 해당 핵연료 농축도에서 핵연료 감손계산에 따른 반응도 값 차의 5%를 감손계산에 따른 불확실도로 사용한다[8]. 표 4에 제작공차 및 그에 따른 불확실도, 그 외 불확실도의 계산값이 나타나 있다.

3.5 축방향 연소도분포 영향 평가

핵연료는 노심에서 균일하게 연소되지 못하고 핵연료 중앙부위가 더 많이 연소되어 상부와 하부의 끝부분의 반응도가 높아지는 end effect가 발생하여 임계도에 영향을 미치게 된다. 이러한 축방향 연소도분포의 영향은 기존의 실험값과 계산값을 비교한 자료로부터 결정할 수 있다. 표 5에 핵연료 초기농축도와 연소도에 따른 축방향 연소도분포 보정계수를 나타내었다[9].

표 5에 따르면 울진 원전2호기 사용후연료 저장조에 대한 핵임계평가에서 4.0w/o 농축도에서 해당 반응도에 도달하는 연소도값이 32.1MWD/kgU이므로 축방향 연소도분포를 고려해서 0.0008을 적용하였다.

3.6 핵임계안전성평가 결과

초기농축도가 최대 5.0w/o인 사용후연료에 대해 울진 원전2호기 사용후연료저장조 Region2에 대한 핵임계안전성평가를 수행하여 그 결과를 표 6에 나타내었으며, 그림 3은 초기농축도 1.6w/o와 5.0w/o 사이의 농축도의 사용후연료에 대해 등가 반응도를 갖는 장전곡선(Loading Curve)을 나타낸다. 그림 3에서 알 수 있듯이, 각 해당 초기 농축도에서 허용구역(Acceptable Region)이상의 연소도를 갖는 사용후연료만이 저장조에 장전이 가능하다. 즉, 연소도가 장전곡선의 허용구역에 해당할 경우 사용후연료는 보라플렉스 저장대의 보론크레딧을 고려하지 않고도 안전하게 저장이 가능하다. 또한 사용후연료의 냉각기간이 길어질수록 사용후연료내의 ^{241}Pu이 점차 붕괴되어 반응도가 계속 감소하게 되어 임계 여유도는 시간에 따라 증가하게 된다.

초기 농축도가 5.0w/o인 사용후연료는 방출 연소도가 43.0MWD/kgU 이상일 경우 핵임계 안전도를 만족하는 것으로 평가되었다. 그리고 핵연료 초기농축도가 1.6w/o 이하일 경우에는 연소도에 관계없이 사용후연료의 저장이 가능한 것으로 나타났다. 사용후연료저장조 Region 2의 최대 유효증배계수 k_{eff}는 불확실도를 고려하여 0.94818로 계산되었다($k_{eff} \leq 0.95$).

4. 결 론

최대 초기농축도가 5.0w/o인 사용후연료 집합체에 대해 정상상태 핵임계 안전성 평가를 수행하였다. 그 결과로서 초기농축도 1.6w/o와 5.0w/o 사이의 농축도를 가지는 사용후연료 집합체에 대하여 등가 반응도

(Equivalent Reactivity)를 가지는 장전곡선(Loading Curve)을 작성하였다. 이 장전곡선에 의하면, 초기농축도가 1.6w/o 이하일 경우에는 사용후연료 집합체는 방출 연소도에 무관하게 보라플렉스 조밀 저장대인 Region 2에 안전하게 저장할 수 있는 것으로 분석되었으며, 보라플렉스 사용후연료 저장조 Region 2의 최대 유효증배계수 k_{eff}를 가지는 저장대는 불확실도를 고려하여 0.9468로 분석되어 핵임계 안전여유도를 만족하고 있는 것으로 나타났다.

이러한 결과는 정상상태시 보라플렉스에 함유된 보론 효과를 고려하지 않아도 일정한 방출 연소도 이상을 가지는 사용후연료 집합체는 안전하게 보라플렉스 조밀 저장구역에 저장될 수 있음을 나타내는 것이다. 또한, 사용후연료 집합체의 냉각 기간이 길어질수록 사용후연료내의 핵분열성 물질인 ^{241}Pu 등이 점차 붕괴되어 질량이 감소하므로 반응도는 시간에 따라 계속 감소하게 되어 핵임계 안전 여유도는 시간에 따라 증가하는 것으로 분석되어 정상상태에서는 보라플렉스 조밀저장대의 안전성에 문제가 없는 것으로 나타났다.

보라플렉스 조밀 저장조의 핵임계 안전성 분석을 위한 과도상태 및 사고해석은 계속 수행중에 있다.

참 고 문 헌

1. Northeast Technology Corp., Guidelines for Boraflex Use in Spent Fuel Storage Racks, EPRI TR-103300, Dec. 1993.
2. NRC, Revision to License Amendment Request : Boron Credit in the Spent Fuel Pool, Feb. 1997.
3. Stanley E. Turner, Criticality Safety Evaluations of the Fuel Storage Rack for Ulchin Unit 2, Holtec Report HI-951287, Holtec International,, July 1995.
4. M.Edenius and A. Ahlin, CASMO-3: New Feature, Benchmarking, and Advanced Applications, Nuclear Science and Engineering, 100, pp342-351, 1988
5. SCALE-4.4 Manual, ORNL, 1998.
6. 윤정현 외, 사용후연료 조밀저장대 핵임계평가를 위한 검증계산수행, '00 춘계원자력학술발표회 논문집.
7. W. Mendenhall, Introduction to Probability and Statistics, Duxbury Press, 1987.
8. Laurence Kopp, Guidance on the Regulatory Requirements for Criticality Analysis of Fuel Storage at Light Water Reactor Power Plants, Proceeding of Consultancies : Implementation of Burnup Credit in Spent Fuel Management System, IAEA-NEFW, Vienna, 1998.
9. W. Fecteau, Effect of Axial Burnup on Fuel Storage Rack Burnup Credit Reactivity, ANS Transaction, 62, 1990.

표 1. 울진 원전2호기 장전 핵연료의 종류 및 사용후연료 발생량
(1999년 12월 현재)

핵연료종류		발생량(집합체)
17x17	F-STD	153
	KOFA	235
	VANTAGE-5H	-
계		388

표 2. 연소도에 따른 연료별 반응도

Burnup (GWD/MTU)	Reactivity, k_{eff}		
	WH-V5H	KWU-JDFA	F-STD
0	0.97798	0.97458	0.97790
5	0.94242	0.93932	0.94235
7	0.92920	0.92626	0.92912
10	0.91031	0.90746	0.91024
13	0.89207	0.88909	0.89200
15	0.88010	0.87707	0.88003
20	0.85180	0.84856	0.85174

표 3. 울진 원전2호기 장전 연료 설계사양

Fuel Rod Data			
Specification	Fuel Type		
	WH-V5H	F-STD	KWU-JDFA
Cladding O.D., cm	0.950	0.950	0.950
Cladding I.D., cm	0.836	0.836	0.822
Cladding Material	Zr	Zr	Zr
Stack Density, g-UO_2/cc	10.412±0.200	10.412±0.200	10.412±0.200
Pellet Diameter, cm	0.819	0.819	0.805
Enrichment, w/o U-235	5.00±0.05	5.00±0.05	5.00±0.05
Active Fuel Length, cm	365.8	365.8	365.8
Fuel Assembly Data			
Fuel Rod Array	17 X 17	17 X 17	17 X 17
Number of Fuel Rods	264	264	264
Fuel Rod Pitch, in.	1.2598	1.2598	1.2598
Number of Thimbles	25	25	25
Thimble O.D., cm	1.204	1.224	1.224
Thimble I.D., cm	1.123	1.143	1.140

표 4. 불확실도 계산결과

Case	Tolerance	Uncertainty
Absorber Width	±0.007 in.	±0.00375
Box I.D.	±0.03 in.	±0.00383
Water Gap Spacing	±0.04 in.	±0.00536
SS Thickness	±0.005 in.	±0.00045
Fuel Enrichment	±0.02 %	±0.00120
Fuel Density	±0.20 g/cm^3	±0.00162
Statistical Sum (root-mean square)		±0.00786
with Other Uncertainties		
in Bias		±0.00548
in Depletion Calculation		±0.01540
Total Uncertainty		±0.01813

표 5. 핵연료 초기농축도와 연소도에 따른 축방향 연소도분포 보정계수

Burnup (MWD/MTU)	핵연료 초기농축도	
	3.0w/o ^{235}U	4.0w/o ^{235}U
0	-0.0036	-0.0037
20,000	-0.0033	-0.0036
30,000	-0.0003	-0.0026
40,000	+0.0027	+0.0008
50,000	+0.0041	+0.0037

표 6. 울진 원전2호기 사용후연료 저장조 Region2에 대한 핵임계평가 결과

항 목	계 산 결 과
○ 저장조 저장가능 최소 농축도	5.0w/o ^{235}U, 43.0MWD/KgU
○ 적용 전산코드	CASMO-3, SCALE4.4(KENO-V.a.)
○ 임계도 계산값, k_{calc}	0.92050
○ 계산 Bias, $\triangle k_{Bias}$	0.00656
○ 축방향 연소도분포 영향, $\triangle k_{Ax}$	0.00080
○ 불확실도, $\triangle k_{Unc}$	
· Bias	0.00731
· Absorber Width	0.00375
· Inner Box Dimension	0.00383
· Water Gap Thickness	0.00536
· S/S Thickness	0.00045
· Fuel Enrichment	0.00120
· Fuel Density	0.00162
· Depletion Calculation	0.01540
----------------------	---------------
· 불확실도의 통계적 합	0.01877
○ 임계도 계	0.92941±0.01877
○ 최대 임계도(k_{eff})	0.94818
○ 임계도 규제값	0.95000

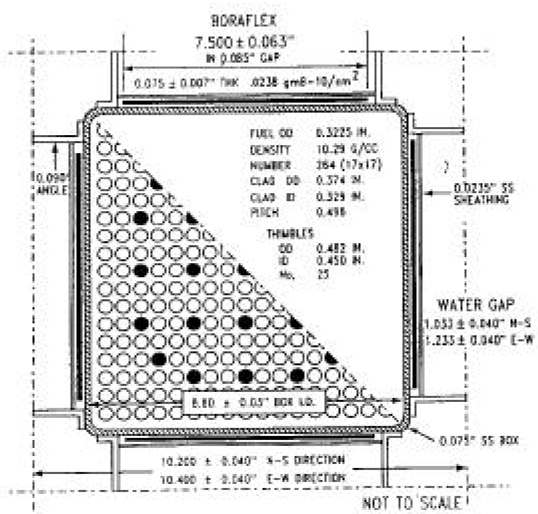

그림 1. Region 2 사용후연료 저장셀 단면도

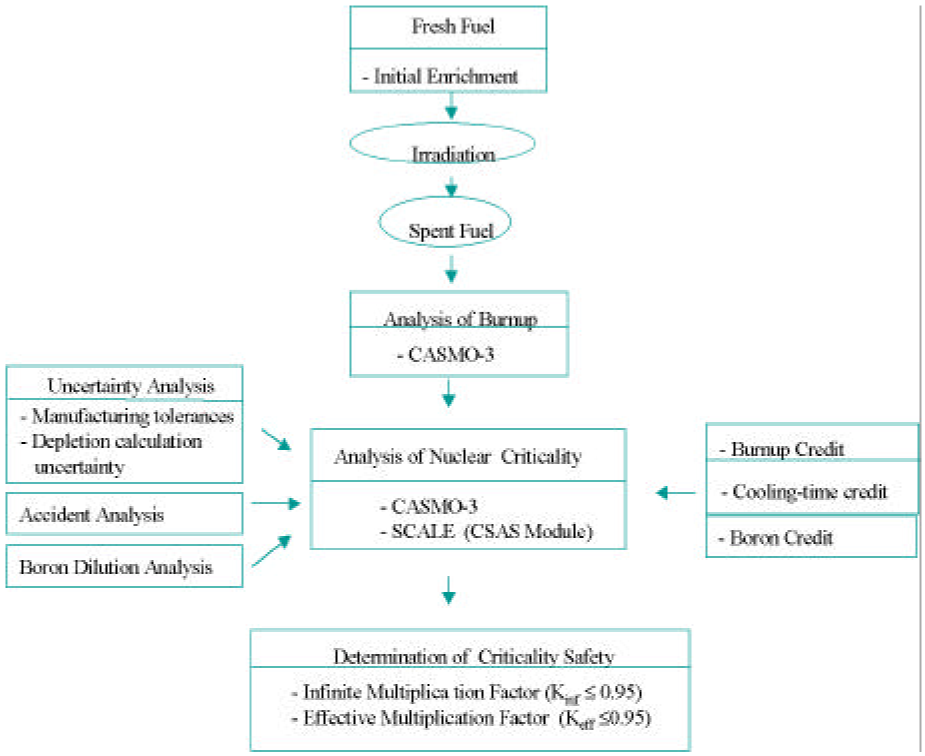

그림 2. **연소도효과를 이용한 사용후연료 저장조 핵임계 안전성해석 흐름도**

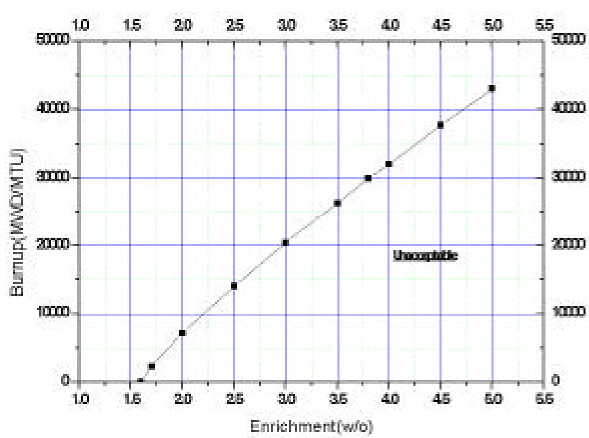

그림 3. **울진 원전**2**호기 사용후연료 저장조** Region2**에 대한 장전곡선**