

## 수용성 보론 효과를 이용한 사용후연료 저장대 가상사고 핵임계 안전성 평가

### Criticality Safety Evaluation of Spent Fuel Storage Rack under Accident Condition using Soluble Boron Credit

윤정현, 송양수, 이경훈\*, 이흥영, 하종현, 송명재, 김정묵, 조규성#

원자력환경기술원/한국전력공사  
대전광역시 유성우체국 사서함149호  
\* (주)한국원자력엔지니어링 기술연구소  
# 한국과학기술원

#### 요약

사용후연료의 밀집저장을 위해 조밀저장대에 부착되어 중성자흡수재로 사용되는 보라플렉스는 수중환경에서 사용후연료로부터 발생하는 방사선에 장기간 조사될 경우 실리카와 B<sub>4</sub>C로 서서히 용해되는 특성이 있다. 본 논문에서는 울진2호기 사용후연료 저장조의 가상사고로 인한 임계도 변화량을 저장조내 함유된 수용성 보론으로 상쇄할 수 있는 핵임계 평가에 대하여 기술하였다. 핵임계도 평가를 위한 전산코드는 PHOENIX-P와 SCALE 4.4를 사용하였고, 사전에 이 코드들의 bias 및 불확실도를 평가하기 위한 검증계산을 수행하였다. 가상사고 핵임계 해석 결과 사용후연료집합체 낙하사고 등 저장조에서의 사고는 대부분이 반응도를 크게 증가시키지 않았다. 반응도를 가장 크게 증가시킬 수 있는 가장 심각한 가상사고는 Checkerboard 장전 형태하에서의 사용후연료의 부적절한 장전으로 평가되었고 이때 증가된 반응도 상쇄를 위해 최대 요구하는 수용성 보론 등가 반응도(SBC<sub>PA</sub>)는 698.45 ppm으로 나타났다. 연소도 계산과 연소도 측정에서 오는 불확실도를 상쇄하기 위한 수용성 보론 농도 116.65 ppm과 합쳐도 815.10 ppm으로 현재 울진2호기 사용후연료 저장조의 기술지침서상에 운영시 요구되는 최소 수용성 보론 농도인 2,300 ppm과 비교할 때 매우 작은 값으로 저장조의 운영은 미입계를 유지하는데는 충분하다고 판단된다.

#### Abstract

A boraflex attached on a consolidated storage spent fuel rack as neutron absorber has a characteristic that silica and boron carbide(B<sub>4</sub>C) present in the boraflex are dissolved into spent fuel pool water due to the long term irradiation of boraflex by spent fuels. In this report it is analyzed how in a case of complete dissolution of boron from the boraflex into the pool water, the adapted credit of the dissolved boron affects on the criticality of storage spent fuels to compensate an excessive reactivity due to postulated accidents. For criticality analyses PHOENIX-P and SCALE4.4 were used and benchmark calculations were carried out to verify the bias and uncertainties of the codes. The result of criticality analyses for postulated accident conditions shows that most of postulated accident such as spent fuel drop did not cause reactivity to increase significantly. However, the most severe accident to increase reactivity was a postulated abnormal loading of spent fuel under checkerboard loading pattern

and the maximum required soluble boron concentration to compensate the increased reactivity in this case was 698.45ppm. The soluble boron concentration to make up the uncertainty from the burnup calculation and measurement of the spent fuels was 116.65ppm so that the total required soluble boron concentration for compensation of the increased reactivity due to the most severe accident could be taken 815.10ppm by arithmetic addition of 698.45 and 116.65 ppm. It can be concluded that 2,300ppm minimum soluble requirement in technology specification of spent fuel storage pool operation of Ulchin NPP#2 is large enough to maintain sub-critical of the spent fuel storage pool under all of postulated accidents conditions.

## 1. 서론

사용후연료 저장조의 가상사고시 반응도를 증가시킬 수 있는 사고의 종류는 크게 저장조 냉각 장치 상실에 의한 온도상승, 지진으로 인한 저장대 횡방향 이동에 의한 Region간 간격 변화, 사용후연료집합체 취급중 저장대 상부 낙하 및 사용후연료 부적절한 장전 등의 네 가지 사고로 나눌 수 있다. 이와 같은 가상사고시 반응도 변화는 3차원 실제 모델 묘사가 가능한 SCALE 코드를 사용하였고, 가상사고로 인한 반응도 초과량을 상쇄할 수 있는 수용성 보론 효과 적용을 위한 수용성 보론의 양은 PHOENIX-P 코드를 사용하여 계산하였다. 현재 울진 원전 2호기 사용후연료 저장조와 보라플렉스 조밀저장대의 구조는 그림 1에 제시한 것과 같다.

사용후연료 저장조의 가상사고 핵임계 해석에서는 미국 ANSI/ANS-8.1-1983의 이중 우발성의 원리(Double Contingency Principle)에 따라 핵임계 사고 해석시 비현실적인 2개의 사건을 동시에 고려할 필요가 없기 때문에 각각의 가상사고가 독립적으로 발생한다는 전제에 따른 반응도 변화만을 고려하였다[1].

## 2. 연소도 효과를 이용한 핵임계 평가 방법

계산된 임계도 값은 실제 사용후연료 저장조의 임계도 보다 항상 커야하므로 가상사고 임계도 평가에서도 다음과 같은 보수적인 가정을 하였다.

- 반응도가 가장 큰 V-5H 연료를 대상 연료로 가정.
- 사용후연료 저장조의 냉각수에는 2,500ppm 이상의 보론이 희석되어 있으나 보수적인 계산을 위해서 보론이 존재하지 않는 순수로 가정.(단, 가상사고 상태를 제외)
- 사용후연료 저장조의 냉각수의 온도는 20°C로 가정.
- 사용후연료 저장셀이 반경방향으로 무한대로 배열되어 있다고 가정하였고, 축방향 및 반경방향으로의 중성자 손실은 무시.
- 방사선조사에 의한 손상으로 보라플렉스 저장대 내에 B-10이 존재하지 않는 것으로 가정.
- 스페이서 그리드와 같이 흡수영향이 작은 구조재의 중성자 흡수효과는 무시.

사용후연료 저장조의 인허가 기준에는 95%의 신뢰도와 95%의 확률을 만족하는 최대 임계도값이 0.95이하라는 것을 확신할 수 있도록 불확실도가 포함되어야 한다. 이러한 불확실도는 통계적인 조합으로 구성되며, 최대 임계도  $k_{eff}^{max}$  는 다음과 같이 표현된다[2].

$$k_{eff}^{max} = k_{ref} + \Delta k_{bias} + \Delta k_{temp} + \Delta k_{axial} + \Delta k_{uncert} \dots\dots\dots (1)$$

- $k_{ref}$  : 기준상태 반응도 계산값
- $\Delta k_{bias}$  : 검증계산 계산값과의 바이어스
- $\Delta k_{temp}$  : 온도 바이어스
- $\Delta k_{axial}$  : 축방향 연소도분포 영향
- $\Delta k_{unc}$  : 모든 불확실도의 종합적 영향

$$\Delta k_{\text{uncert}} = (\Delta k_a^2 + \Delta k_i^2 + \Delta k_g^2 + \Delta k_t^2 + \Delta k_E^2 + \Delta k_\rho^2 + \Delta k_p^2 + \Delta k_b^2)^{1/2} \dots\dots\dots (2)$$

$\Delta k_a$  : 흡수체 크기의 제작공차에 의한 불확실도

$\Delta k_i$  : 셀 박스 내경의 불확실도

$\Delta k_g$  : Water Gap 두께의 불확실도

$\Delta k_t$  : 셀 박스벽 두께의 불확실도

$\Delta k_E$  : 핵연료 농축도 불확실도

$\Delta k_\rho$  : 핵연료 밀도의 불확실도

$\Delta k_p$  : 핵연료집합체 위치의 불확실도

$\Delta k_b$  : 바이어스의 불확실도

설계기준 연소도에 대한 최대  $k_{\text{eff}}$ 는 식(1)을 이용하여 설계기준 연소도에 대한 최대  $k_{\text{eff}}$ 를 결정할 수 있다. 다른 농축도에서는 설계기준연료와 같은 최대  $k_{\text{eff}}$ 를 등가 반응도로 생성하는  $k_{\text{calc}}$ 가 계산되어야 한다. 각 농축도에 대해  $k_{\text{calc}}$ 는 연료의 연소도의 함수로 결정된다. 기준값인 최대  $k_{\text{eff}}$ 를 알고 있으므로, 계산된  $k_{\text{calc}}$ 과 감손계산에 대해 식(1)과 (2)를 이용하여 반복적인 계산을 수행한다. 계산된 값이 결정되면, 내삽으로 해당 연소도를 구한다. 이 값이 각 농축도의 연료에 대한 미입계 유지를 위한 제한 연소도이며, 고려되는 농축도에 대해 반복적인 계산을 수행한다. 본 연구에서 핵임계 해석은 핵연료 감손계산과 제작공차에 의한 반응도의 영향 평가를 위한 PHOENIX-P 코드와 임계도 계산을 위한 SCALE 4.4 코드의 CSAS 모듈(KENO-V.a)을 사용하였다[3,4].

### 3. 핵임계 검증계산

사용후연료 저장조의 핵임계 안전성 분석에 사용된 PHOENIX-P 코드의 검증계산은 임계도 계산(Criticality Validation)과 연소 계산(Isotopic Validation)에 대한 검증으로 나뉘어서 수행하였다. 임계도 계산에 대한 검증은 B&W(Bobcock & Wilcox) 사의 CX-10 임계 실험로(XIII, XIV, XV, XVII, XIX)를 사용하였고[5] 그 외에도 SCALE 모듈에 대한 검증계산을 수행하여 핵임계도 계산 전산시스템에 대한 불확실도를 분석하였다[6]. 그림 2와 그림 3에서 볼 수 있듯이 CX-10 검증 실험로는 총 9개의 연료 다발을 장전하거나 연료봉 형태로도 장전할 수 있으며, 기계적인 조작으로 연료 다발간의 피치를 조정하면서 핵임계에 도달하게 하거나 연료를 둘러싼 감속재인 물의 높이나 감속재내의 보론 농도를 조절함으로써 핵임계에 도달할 수 있도록 설계/제작되었다. CX-10 핵임계 실험로는 형태가 사용후연료 저장조의 축소형태나 수송용기와 비슷한 배열을 하고 있어 핵임계 검증계산을 위하여 많이 활용된다. CX-10 실험로의 또 다른 핵임계 제어방법은 사용후연료 수송용기의 중성자 흡수재로 많이 사용되는 보랄과 탄화보론(B<sub>4</sub>C)봉을 사용하였다. 표 1에 B&W 사 핵임계실험의 노심조건과 검증계산 결과를 기술하였다. 임계도 검증계산 결과 최대 0.04Δk의 오차를 보였으며, 이는 2차원 셀코드의 한계를 보여주는 것으로서 정확한 임계도계산에는 한계를 가지지만 전반적으로 계산결과가 보수성을 가진다는 것을 나타낸다. 하지만 다른 2차원 셀코드에 비해서는 오차가 작아서 SCALE 코드와 혼용할 경우 정확한 임계도 값을 계산할 수 있을 것으로 판단된다. 연소 계산에 대한 검증은 핵연료 연소에 따른 사용후연료 내의 핵종량 예측의 정확성을 평가할 수 있다. 표 2에 나타낸 것처럼 서로 다른 4가지 노심(Mihama, Turkey Point, Calvert Cliffs, H. B. Robinson)의 26가지 사용후연료 실험자료를 사용해서 PHOENIX-P 연소 계산 결과와 사용후연료 내 핵종비를 비교하였다[7]. 각 노심의 조건과 핵연료의 농축도, 연소도 및 냉각기 간은 서로 상이하며, U-235/U, U-236/U, U-238/U, Pu-239/Pu, Pu-240/Pu, Pu-241/Pu, Pu-242/Pu, Pu-239/U-238, U-235/U-238을 실험 자료와 비교하였다. 검증계산 결과 4가지 노심의 26가지 핵연료집합체에 대한 %오차는 약 ±12% 범위로 평가되었으나, 4가지 노심과 26가지 핵연료집합체 전체의 평균 %오차는 약 ±5%정도로 계산되어서 PHOENIX-P 코드의 연소계산에 의해

서 감소된 핵종량은 충분히 신뢰할 수 있다고 판단된다. 연소계산의 검증결과는 그림 4 및 그림 5에 나타나있다.

#### 4. 저장조 냉각장치 상실 사고

현재 우리 나라의 가압경수로형 원자력 발전소에서 발생한 사용후연료를 안전하게 습식 저장·관리하기 위해 만족해야하는 열수력 허용 기준은 다음과 같이 U.S.NRC의 codes, standard & regulation에 따른다[8].

- U.S.NRC Standard Review Plan, NUREG-0800, Section 9.1.3.
- U.S.NRC OT Position for Review and Acceptance of Spent Fuel Storage and Handling Applications, 4/78.
- U.S.NRC Branch Technical Position ASB 9-2, "Residual Decay Energy for Light Water Reactors for Long Term Cooling", Rev. 2, 7/81.

사용후연료 저장조의 냉각은 저장조 냉각계통에서 공급된 저장수의 자연대류에 의해서 이루어지며, 충분한 냉각을 통해서 저장수의 온도를 약 20 °C로 유지해야 한다. 저장조 냉각계통이 상실될 경우 저장수 온도가 상승하여 저장수의 밀도가 낮아지며 보라플렉스 사용후연료 저장대의 반응도 감소를 유발한다. 그러나 보라플렉스 저장대내의 보론 카바이드 효과를 적용하지 않으며, 온도 상승으로 인한 저장수내의 보론 밀도가 감소되고 이에따라 보론의 원자수 밀도 역시 감소하여 부수적인 양(Positive)의 반응도 주입이 발생된다.

사용후연료 저장조 냉각장치 상실사고는 냉각장치 상실로 인하여 저장조 냉각수가 65.6 °C에서 120 °C까지 변화하고 20 % 기포가 발생한 상태로 가정한다. 사용후연료 저장조내 냉각수의 온도 변화에 따른 반응도 변화를 평가하기 위해서 PHOENIX-P 코드를 이용해서 5.0 wt% 농축도의 신연료가 장전된 저장조에 대해 50, 60, 70, 80, 90, 100 °C 까지 물의 온도를 변화시키며 반응도를 계산하였다. 저장조 냉각계통이 상실될 경우 반응도 변화량은 100 °C 조건에서 0.01053 Δk이고, 이를 상쇄하기 위한 수용성 보론의 양은 47.75 ppm으로 계산되었다.

#### 5. 지진으로 인한 저장대 횡방향 이동

지진으로 인한 저장대 횡방향 이동사고는 지진 발생시 저장대 모듈의 횡방향 움직임에 의해 저장대 모듈 사이의 거리가 변화함으로써 반응도 증감 요인이 발생한다. 현재 울진 2호기 사용후연료 저장조에서 Region I과 Region II 사이의 간격은 2 inch이며, 지진으로 인하여 최대 저장대 움직임을 1.136 inch로 가정해서 Region I과 Region II 사이의 간격이 0.864 inch로 좁아진다고 가정한 HOLTEC의 1995년도 울진2호기 사용후연료 저장조 인허가 보고서를 참조하였다[8]. 지진으로 인한 저장대 횡방향 이동사고의 경우 반응도 변화량은 0.00096 Δk이고, 이를 상쇄하기 위한 수용성 보론의 양은 4.03 ppm으로 계산되었다.

#### 6. 사용후연료 취급중 저장대 상부 낙하

사용후연료의 취급중 낙하사고는 저장대 상부에 떨어지는 경우, 저장대 모듈 사이에 떨어지는 경우, 저장조 벽면과 저장대 모듈 사이에 떨어지는 경우, 캐스크 장전 영역에 떨어지는 경우로 나눌 수 있다. 미국 Westinghouse사에서 수행한 Prairie Island 원전의 가상사고 핵임계 해석에서는 저장대 모듈 사이에 떨어지는 경우와 저장조 벽면과 저장대 모듈 사이에 떨어지는 경우에 대해서는 제외하였고, 현재 울진 2호기 사용후연료 저장조의 설계 형태에서 알 수 있듯이 위의 경우와 같은 사고는 일어날 가능성이 없어서 고려하지 않았다. 또한, 캐스크 장전 영역에 떨어지는 경우의 사고는 현재 사용후연료 저장조내 캐스크 장전 영역이 없으므로 무시하였다. 따라서, 사용후연료의 취급중 낙하사고는 저장대 상부에 떨어지는 경우에 대해서만 고려하였다[8,9].

사용후연료의 장전 및 취급중 저장대 상부로 떨어지는 사고의 경우 사용후연료는 저장대 상부 12 inch 위에 수평으로 놓이게 된다. 따라서, 상부에 떨어진 사용후연료에 의해 저장대 구조물이

심하게 변형되지 않으며 떨어진 사용후연료는 아래의 사용후연료와 직접적으로 반응하지 않으며, 12 inch의 물은 중성자 상호작용을 막을 수 있는 충분한 거리로서 유지될 수 있다. 사용후연료의 장전 및 취급중 저장대 상부에 떨어지는 사고의 경우 반응도 변화량은  $0.00115\Delta k$ 이고, 이를 상쇄하기 위한 수용성 보론의 양은 5.15 ppm으로 계산되었다.

## 7. 사용후연료 부적절한 장전

사용후연료의 부적절한 장전사고는 핵연료의 초기농축도, 냉각기간, 연소도가 적합하지 않은 사용후연료를 특정 위치에 저장한 경우이다. 사용후연료의 부적절한 장전은 다음과 같이 7가지의 형태로 구분할 수 있다.

- 저장조 단면도 그림 1의 Region II 측면 모듈 외부에서 사용후연료의 부적절한 장전사고가 발생할 경우 반응도 변화는  $0.00111\Delta k$ 이고, 이를 상쇄하기 위하여 계산된 수용성 보론의 양은 4.95 ppm으로 나타났다.
- 또한, Region I 측면 모듈 외부에서 사용후연료의 부적절한 장전사고가 발생할 경우 반응도 변화는  $0.00932\Delta k$ 이고, 이를 상쇄하기 위한 수용성 보론의 양은 42.2 ppm으로 계산되었다.
- 그림 6과 같이 냉각기간 0년의 사용후연료가 저장된 저장대 모듈 내부에 신연료의 부적절한 장전사고가 발생할 경우 반응도 변화는  $0.02646\Delta k$ 이고, 이를 상쇄하기 위한 수용성 보론의 양은 123.5 ppm으로 계산되었다.
- 그림 7과 같이 냉각기간 20년의 사용후연료가 저장된 저장대 모듈 내부에 신연료의 부적절한 장전사고가 발생할 경우 반응도 변화는  $0.00466\Delta k$ 이고, 이를 상쇄하기 위한 수용성 보론의 양은 20.9 ppm으로 계산되었다.
- 제한 연소도를 갖는 농축도 3.8 wt% 이하의 사용후연료를 장전하기 위한 Checkerboard 저장 구조 I에서 신연료가 그림 8의 Case 1과 같이 장전되는 부적절한 장전사고의 경우 반응도 변화는  $0.11883\Delta k$ 이고, 이를 상쇄하기 위한 수용성 보론의 양은 669.7 ppm으로 계산되었다.
- 제한 연소도를 갖는 농축도 3.8 wt% 이하의 사용후연료를 장전하기 위한 Checkerboard 저장 구조 I에서 신연료가 그림 9의 Case 2과 같이 장전되는 부적절한 장전사고의 경우 반응도 변화는  $0.12289\Delta k$ 이고, 이를 상쇄하기 위한 수용성 보론의 양은 698.45 ppm으로 계산되었다.
- 제한 연소도를 갖는 농축도 3.8 wt% 이하의 사용후연료를 장전하기 위한 Checkerboard 저장 구조 I에서 신연료가 그림 10의 Case 3과 같이 장전되는 부적절한 장전사고의 경우 반응도 변화는  $0.09966\Delta k$ 이고, 이를 상쇄하기 위한 수용성 보론의 양은 540.0 ppm으로 계산되었다.
- 농축도 3.8 wt% 초과 5.0 wt% 미만의 제한 연소도를 갖는 사용후연료를 장전하기 위한 Checkerboard 저장 구조 II에서 신연료가 그림 11과 같이 장전되는 부적절한 장전사고의 경우 반응도 변화는  $0.09851\Delta k$ 이고, 이를 상쇄하기 위한 수용성 보론의 양은 532.5 ppm으로 계산되었다.

## 8. 결론

울진 2호기 사용후연료 저장조에 대한 가상사고 핵임계 해석 결과로써 가상사고시 반응도 변화와 변화된 반응도를 상쇄하여 임계도값을 0.95 이하로 만족시키기 위한 수용성 보론 농도를 표 3에 나타내었다. 사용후연료집합체 낙하사고 등 저장조에서의 사고는 대부분이 반응도를 크게 증가시키지는 않았으며, 반응도를 가장 크게 증가시킬 수 있는 가장 심각한 가상사고는 Checkerboard 장전형태하에서의 사용후연료 부적절한 장전으로 평가되었다. 가상사고시 반응도 상쇄를 위해 최대 요구하는 수용성 보론 증가 반응도(SBC<sub>PA</sub>)는 그림 9와 같은 부적절한 장전시에 698.45 ppm이 가장 큰 값으로 나타났다. 이것은 울진 2호기 사용후연료 저장조의 기술지침서상에 운영시 요

구되는 최소 수용성 보론 농도인 2,300 ppm과 비교할 때 매우 작은 값으로 연소도 계산과 연소도 측정에서 오는 불확실도를 상쇄하기 위한 수용성 보론 농도 116.65 ppm과 합쳐도 815.10 ppm으로 현재의 울진 2호기 저장조의 운영은 미임계를 유지하는 데는 충분하다고 판단된다.

#### 참고문헌

1. 우승웅, "경수로형 원전 안전심사 지침 - 부록 9.1-1 핵연료저장시설에 대한 임계도 안전성", 한국원자력안전기술원, May, 1998.
2. W. D. Newmyer, "Westinghouse Spent Fuel Rack Criticality Analysis Methodology," WCAP-14416-NP-A, Westinghouse Electric Corporation, 1996.
3. SCALE-4.4 Manual, ORNL, 1998.
4. ALPHA User's Manual, Westinghouse Electric Corporation, Revision 12, April 1995.
5. 윤정현 외, "사용후연료 조밀저장대 핵임계해석 위한 검증계산," '00 춘계원자력학술발표회 논문집, 한국원자력학회, 2000.
6. 윤정현 외, "울진2호기 사용후연료 조밀저장대 미임계 여유도 추가확보 기술개발" 한국전력공사 원자력환경기술원, 2000.
7. M. N. Baldwin, *et al.*, "Critical Experiments Supporting Close Proximity Water Storage of Power Reactor Fuel," BAW-1484-7, The Babcock & Wilcox Co., July 1979.
8. "Licensing Report for Reracking of Ulchin Unit 2 Spent Fuel Pool", HOLTEC Report HI-951301, HOLTEC International, July, 1995.
9. W. D. Newmyer, "Westinghouse Spent Fuel Rack Criticality Analysis Methodology", WCAP-14416-NP-A, Westinghouse Electric Corporation, Rev. 1, November, 1996.

표 1. 임계도 계산의 검증에 사용된 B&W CX-10 노심의 조건 및 검증 계산 결과

Core	Type of Isolation Sheets [w/o B/Al]	Moderator Boron Concentration [ppm]	Measured	Calculated	Difference [ $\Delta k$ ]
XIII	1.614	15	1.0000±0.0010	1.01005	-0.01005
XIV	1.257	92	1.0001±0.0010	1.00870	-0.00860
XV	0.401	395	0.9998±0.0016	1.01238	-0.01258
XVII	0.242	487	1.0000±0.0010	1.02319	-0.02319
XIX	0.100	634	1.0002±0.0010	1.04762	-0.04742

표 2. 연소 계산 검증에 사용된 원자로와 핵연료의 설계 변수

Parameter	Mihama	Turkey Point	Calvert Cliffs	H.B. Robinson
Designer	WH	WH	CE	WH
Lattice	15×15	15×15	14×14	15×15
Number of Fuel Rods	204	204	176	204
Number of Guide Tubes	20	20	4	8
Number of Instrument Tubes	1	1	1	1
Soluble Boron, Cycle Average, ppm	450	450	450	450
Type Fuel Pellet	UO <sub>2</sub>	UO <sub>2</sub>	UO <sub>2</sub>	UO <sub>2</sub>
Initial Enrichment (U-235)	3.208	2.556	3.038	2.561
	3.203		2.720	
	3.210		2.453	
Stack Density with Gap, g/cm <sup>3</sup>	9.996	10.235	10.045	9.944
			10.036	
Rod Pitch, cm	1.430	1.4300	1.4732	1.4300
Rod OD, cm	1.072	1.0719	1.1176	1.0719
Rod ID, cm	0.948	0.9484	0.9855	0.9484
Pellet OD, cm	0.929	0.9296	0.9563	0.9294
			0.9639	
Clad Material	Zry-4	Zry-4	Zry-4	Zry-4
Guide & Instrument Tube Data				
ID, cm	1.300	1.3004	2.628	1.3004
OD, cm	1.387	1.3868	2.832	1.3868
Tube Material	Zry-4	Zry-4	Zry-4	Zry-4
Cooling Time, day	1825	927	1870	927
			2374	3936
			2447	3631

표 3 가상사고시 반응도상쇄를 위해 요구되는 수용성보론 농도

Postulated Accidents	Δk	SBC <sub>PA</sub> [ppm]
1. 저장조 냉각장치 상실사고	0.01053	47.75
2. 지진으로 인한 저장대 횡방향 이동사고	0.00096	4.30
3. 사용후연료 취급중 저장대 상부 낙하사고	0.00115	5.15
4. 사용후연료 부적절한 장전사고		
4-1. Region II 측면 모듈 외부	-0.00111	4.95
4-2. Region I 측면 모듈 외부	0.00932	42.20
4-3. 냉각기간 0년의 저장대 모듈내부	0.02646	123.50
4-4. 냉각기간 20년의 저장대 모듈내부	0.00466	20.90
4-5. 농축도 3.8 wt% 이하		
Checkerboard 저장 구조 - Case 1의 경우	0.11883	669.70
4-6. 농축도 3.8 wt% 이하		
Checkerboard 저장 구조 - Case 2의 경우	0.12289	698.45
4-7. 농축도 3.8 wt% 이하		
Checkerboard 저장 구조 - Case 3의 경우	0.09966	540.00
4-8. 농축도 3.8 wt% 초과 4.98 wt% 미만		
Checkerboard 저장 구조	0.09851	532.50
5. 연소도 계산과 연소도 측정에서 오는 불확실도	0.00956	116.65

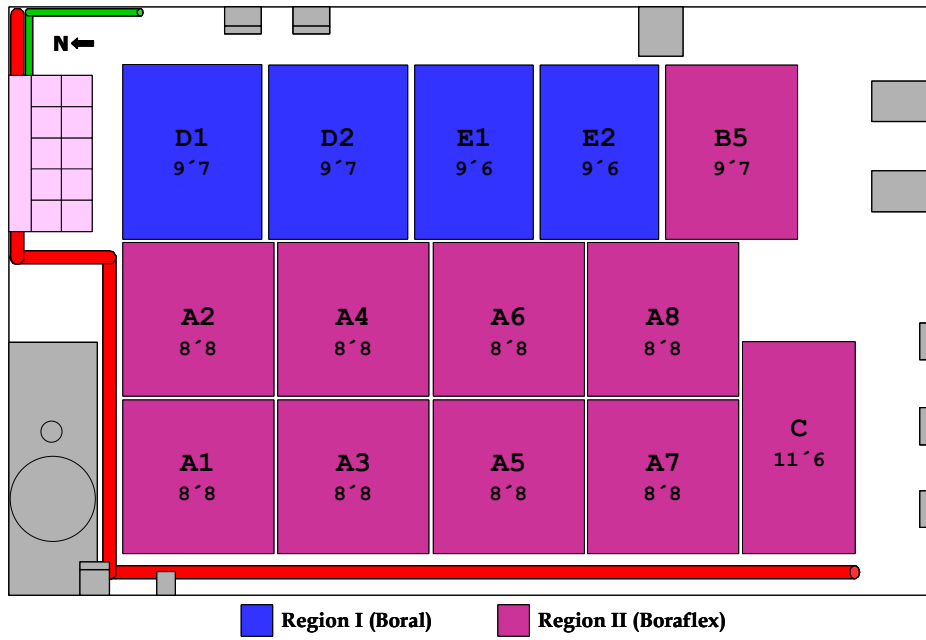


그림 1. 울진 원전 2호기 사용후연료 저장조 단면도

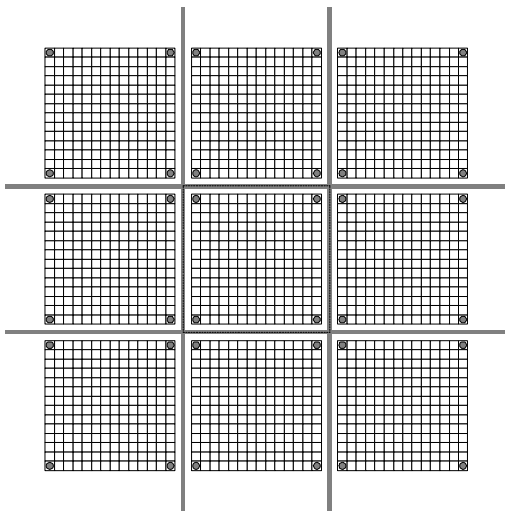


그림 2. B&W CX-10 노심의 단면도

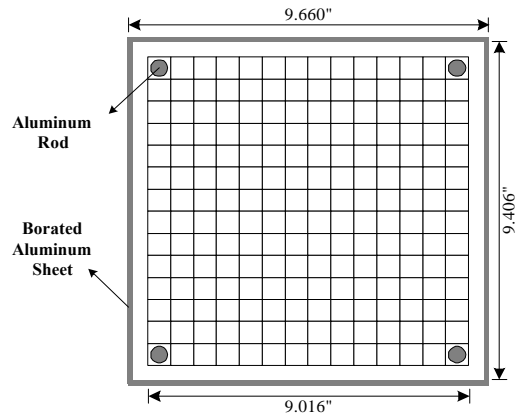


그림 3. PHOENIX-P 계산에 사용한 계산모델



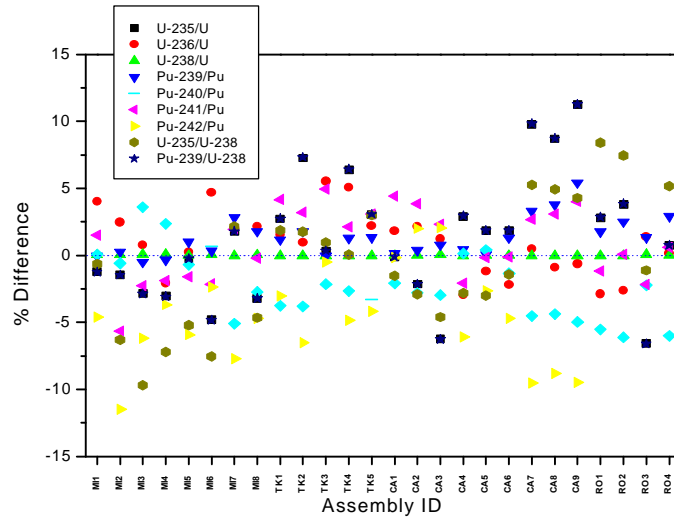


그림 4. 4가지 노심에 대한 26가지 사용후연료 실험자료와 PHOENIX-P 계산값의 % 오차

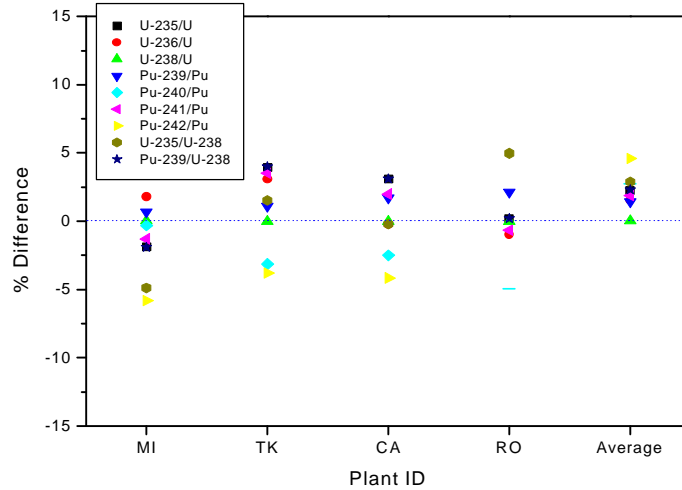


그림 5. 4가지 노심의 % 오차와 평균 % 오차

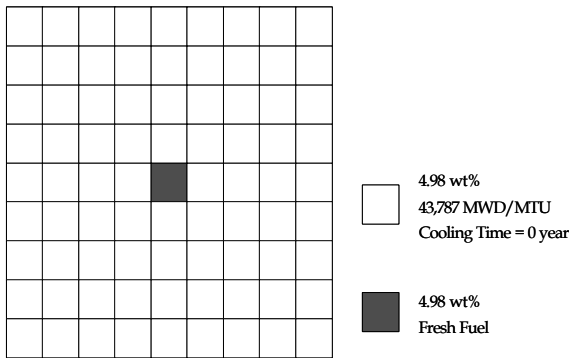


그림 6. 모듈내 부적절한 장전 (냉각기간 0년)

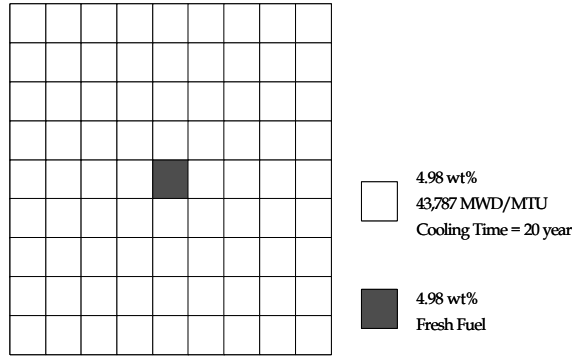


그림 7. 모듈내 부적절한 장전 (냉각기간 20년)

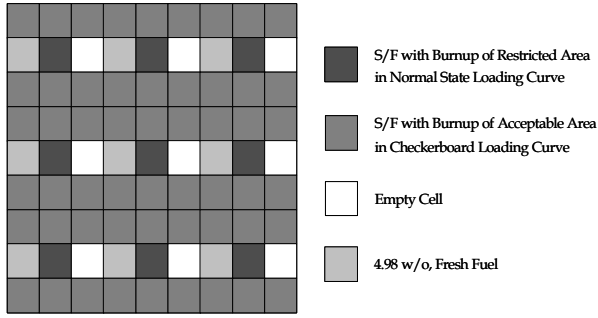


그림 8. Checkerboard 저장구조 I에서의 부적절한 장전 - Case 1

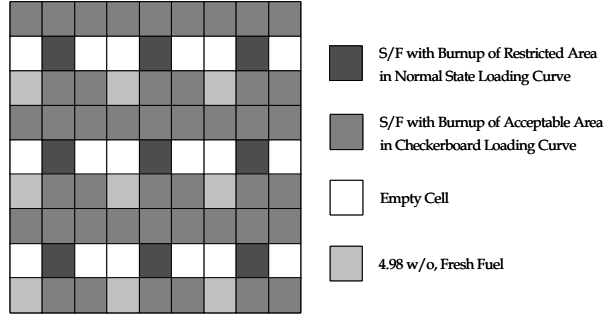


그림 9. Checkerboard 저장구조 I에서의 부적절한 장전 - Case 2

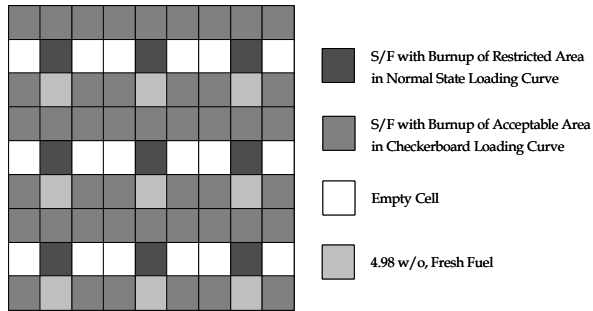


그림 10 Checkerboard 저장구조 I에서의 부적절한 장전 - Case 3

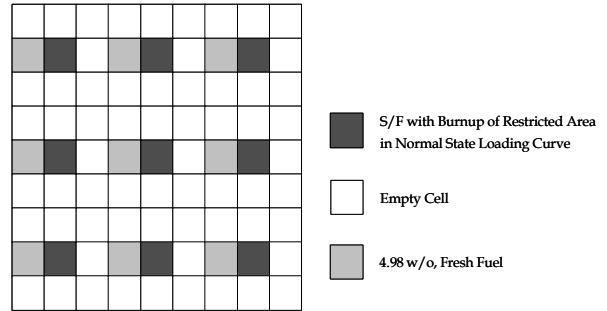


그림 11. Checkerboard 저장구조 II에서의 부적절한 장전