

## 사용후핵연료 처분시스템의 예비 핵임계 안전성 평가

### A Preliminary Evaluation on Criticality Safety for Spent Fuel Disposal System

조동건, 최종원, 이종열, 김성기, 한필수

한국원자력연구소

대전광역시 유성구 덕진동 150

#### 요 약

본 연구에서는 사용후핵연료가 안착된 처분공 모델을 대상으로 핵임계 해석을 수행하였다. PWR의 경우 기준 사용후핵연료로 초기농축도 4.0wt%, 방출연소도 45,000MWD/MTU인 핵연료와 초기농축도 4.5wt%, 방출연소도 55,000MWD/MTU인 핵연료를 적용하였으며, CANDU의 경우에는 0.7wt%, 7,500MWD/MTU를 사용하였다. 기준 처분공 모델은 현재까지 개발된 모델을 적용하였다. 사용후핵연료 내의 핵종수밀도 산출을 위해 HELIOS 코드를 사용하였으며, 처분공의 임계도 산출을 위해 MCNP 코드를 적용하였다. 계산결과, 핵연료 처분공이 침수된 경우에 대해 PWR의 기준 사용후핵연료에 대해서는 처분장이 운영되는 이후의 임계도 값이 ~0.78 정도로 나타났다으며, CANDU 핵연료의 경우는 신핵연료를 가정하더라도 0.5 이하로 유지되어 제한치인 0.95보다 현저히 낮은 것으로 나타났다. 따라서, 핵연료봉이 파손되지 않아 핵연료가 연료봉내에만 존재한다면 물이 침수하여 최적 감속 조건을 이룬다 할지라도 기준 사용후핵연료에 대해서는 임계도 값이 제한치 이내로 유지되어 핵임계 안전성이 확보되는 것으로 나타났다.

#### Abstract

Criticality analysis was performed under assumption that spent fuel assemblies were placed in boreholes of underground repository. The PWR fuel assemblies studied were assumed to have discharged burnup of 45,000MWD/MTU and 55,000MWD/MTU in response to initial fuel enrichment of 4.0wt% and 4.5wt%  $^{235}\text{U}$ , respectively. The discharged burnup of CANDU reactor fuel was assumed to be 7,500MWD/MTU with initial enrichment of 0.711wt%  $^{235}\text{U}$ . HELIOS and MCNP codes were used for burnup calculation and criticality analysis, respectively. In case the canister void space was filled with water for PWR reference spent fuel, infinitive multiplication factor was maintained below ~0.78 after operation of repository. For the repository with CANDU fuel assemblies, criticality was assured within 0.5 in the water-flooded condition, although fresh fuel was placed in a disposal canister. Therefore, if the fuel assemblies are intact and fissile nuclide is confined in a fuel rod, the criticality in a repository is impossible under current design.

## 1. 서 론

원자력 선진국들은 원자력발전소로부터 발생하는 사용후핵연료를 안전하게 처분하고자 자국의 환경에 맞는 심지층 처분시스템 개발에 지속적인 노력을 기울이고 있다. 이와 발맞추어 우리나라에서도 사용후핵연료를 안전하게 심지층에 처분하고자 1997년부터 원자력 중·장기 기술개발 프로그램에 따라 고준위폐기물 처분기술을 개발 중에 있다.

그런데, 사용후핵연료는 발전소에서 충분히 연소되고 방출되어 핵임계 가능성이 매우 희박하지만 핵연료 내에는 핵분열성 물질이 일정량 함유되어 있으므로 핵임계 해석은 필수적으로 수행되어야 한다. 미국의 1)10CFR60.131(h)에서는 고준위폐기물 처분장에 대한 핵임계 안전 지침을 제시하고 있는데, 이 조항에서는 두 개 이상의 예기치 않은 독립적인 사건이 동시에 또는 연속적으로 발생하지 않는 한 사용후핵연료 처분과 관련한 모든 시스템은 핵임계 안전성을 확보할 것을 요구하고 있다.

따라서, 본 연구에서는 기준 사용후핵연료가 안착된 기준 처분공 모델에 대해 예비 핵임계 안전성을 평가하였다. 우선적으로 기준 사용후핵연료 및 처분공에 대해 간략히 서술하였으며, 사용후핵연료가 손상되지 않아 핵연료 물질이 연료봉 내에 존재한다는 가정 하에 평가한 정상상태 및 침수시 핵임계 해석 결과를 수록하였다.

## 2. 기준 사용후핵연료 및 처분공 모델

### 2.1. 기준 사용후핵연료

사용후핵연료를 처분할 고준위폐기물 처분장은 2040년에 운영될 계획이다. 따라서, 처분장과 관련한 핵임계 해석을 위해서는 2040년 시점에 존재하는 사용후핵연료 현황을 정확히 알아야 한다. 이는 향후 30~50년 이상의 장기적인 예측을 필요로 하나, 현재까지 정부에서 발표한 원전수급계획은 2015년까지만 존재한다. 현재, 원자력 발전소는 가압경수로 14기와 중수로 4기가 운영중이며, 정부에서 확정고시한 2015년까지의 장기전력수급계획[1]을 반영하면 2015년까지 10기의 원전이 추가로 건설될 예정이다. 따라서, 2008년에 폐로되는 고리 1호기와, 2013년에 폐로되는 월성 1호기를 고려하면 2015년에는 총 26기의 원전이 가동될 예정이다.

이렇듯, 2015년까지 운영되는 원자로만을 고려하더라도 두 가지의 형태의 원자로와 28기의 원전으로부터 사용후핵연료가 발생하므로 처분장이 운영되는 2040년 시점에는 핵연료 농축도, 방출연소도, 핵연료집합체 크기 등을 고려하면 매우 다양한 종류의 사용후핵연료가 존재한다. 따라서, 이를 대표하기 위한 기준 사용후핵연료의 선정이 필요하다. 본 연구에서 사용된 기준 사용후핵연료는 "심지층 처분시스템 개념설정을 위한 기준 사용후핵연료 선정 및 특성분석" 보고서[2]에서 선정한 제원을 사용하였다. 본 계산에 적용된 기준 사용후핵연료의 특성 및 상세 제원은 표 1 및 2와 같다.

---

1) 10CFR60.131. (h) *Criticality control*. All systems for processing, transporting, handling, storage, retrieval, emplacement, and isolation of radioactive waste shall be designed to ensure that nuclear criticality is not possible unless at least two unlikely, independent, and concurrent or sequential changes have occurred in the conditions essential to nuclear criticality safety. Each system must be designed for criticality safety assuming occurrence of design basis events. The calculated effective multiplication factor (keff) must be sufficiently below unity to show at least a 5 percent margin, after allowance for the bias in the method of calculation and the uncertainty in the experiments used to validate the method of calculation.

표 1. 기준 사용후핵연료 주요 특성

|            | PWR  | CANDU                                 |
|------------|--|---------------------------------------|
| 핵연료 형태     | 17×17 Westinghousee 표준형 집합체  | CANDU 집합체                             |
| 집합체무게/단면적  | 665kg / 21.4×21.4cm  | 25kg / Φ10cm                          |
| 초기농축도와 연소도 | 4.0wt% <sup>235</sup> U일 때 45,000MWD/MTU<br>4.5wt% <sup>235</sup> U일 때 55,000MWD/MTU | 0.7wt% <sup>235</sup> U, 7,500MWD/MTU |
| 냉각기간       | 40년  |                                       |

표 2. 기준 사용후핵연료 상세 제원

| Parameters                                   | PWR   | CANDU |
|--|-------|-------|
| Number of fuel pins                          | 264   | 37    |
| Number of empty channels                     | 25    | 0     |
| Outside diameter of fuel pin (cm)            | 0.95  | 1.31  |
| Zry-4 clad thickness (cm)                    | 0.064 | 0.040 |
| Total fuel length (cm)                       | 405.8 | 49.53 |
| Active fuel length (cm)                      | 365.8 | 38.90 |
| UO <sub>2</sub> density (g/cm <sup>3</sup> ) | 10.16 | 10.6  |
| Pellet diameter (cm)                         | 0.805 | 1.220 |
| Fuel pin pitch (cm)                          | 1.260 | -     |

## 2.2. 처분용기 및 처분장 모델

PWR 핵연료 처분용기는 네 개의 사용후핵연료 집합체를 처분할 수 있으며, 집합체 삽입을 위한 공간을 제외한 용기 안쪽은 구조적 건전성 확보를 위해 탄소강으로 채워져 있다. 용기 외부는 부식의 방지를 위해 두께 5cm를 갖는 니켈 합금으로 이루어져 있다. 용기의 외경은 122cm이며, 축방향 총 길이는 483cm 정도이다. CANDU 핵연료 처분용기는 397개의 사용후핵연료를 처분할 수 있으며, 그 외 제원은 PWR 핵연료 처분용기와 같다. 각 처분용기의 모델 및 상세 제원은 그림 1과 같다.

처분장은 6m 간격의 처분공으로 이루어져 있으며, 각 처분공 안에는 그림 2와 같이 한 개의 처분용기가 놓여지게 된다. 외부로부터 처분용기로의 지하수 유입을 막고 처분용기로부터 방사성 핵종의 누출을 지연시키는 역할을 하는 인공방벽인 압축 벤토나이트가 50cm의 두께로 처분용기 아래쪽과 반경방향으로 채워져 있으며, 위쪽으로는 150cm로 채워져 있다. 압축 벤토나이트 외곽에는 천연방벽인 암반이 벤토나이트를 감싸고 있다. 그림 2에는 처분공 모델 및 제원이 상세히 기재되어 있다.

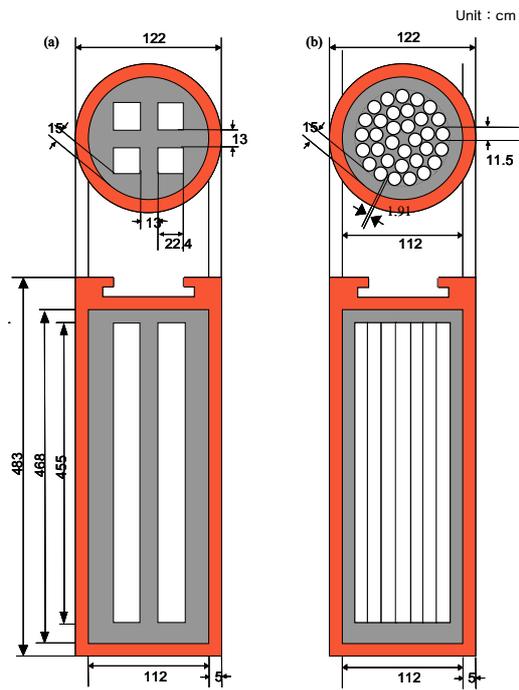


그림 1. 처분용기 모델 및 제원

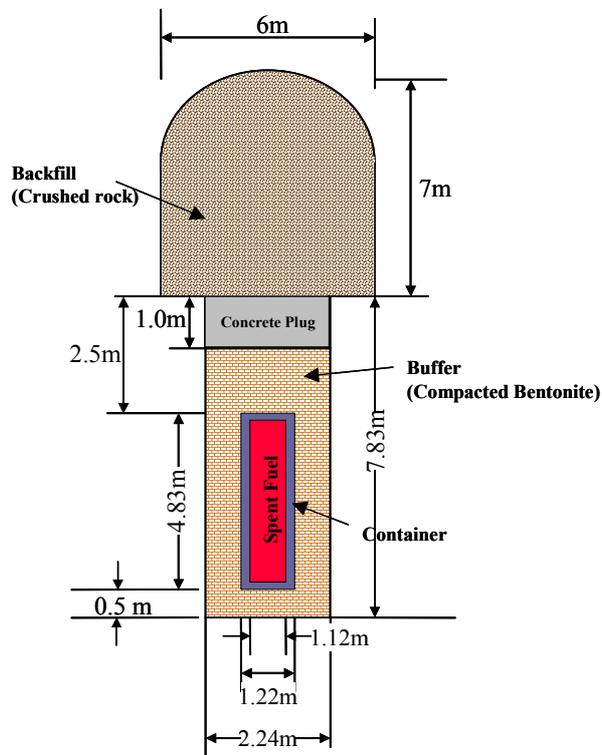


그림 2. 처분공 모델 및 제원

### 3. 핵임계 해석

사용후핵연료에는 핵분열성 물질이 함유되어 있으므로, 사용후핵연료가 안착된 처분장은 정상 상태나 사고조건 하에서도 핵임계 안전성을 반드시 확보하여야 한다. 미국의 10CFR60.131(h)에 따르면 두 개 이상의 예기치 않은 독립적인 사건이 동시에 또는 연속적으로 발생하지 않는 한 사용후핵연료 처분과 관련한 모든 시스템은 핵임계 안전성을 확보하여야 하며, 실험오차 및 계산편차를 고려한 상태에서 임계도는 0.95이하가 되어야한다고 규정[3]하고 있다.

본 계산에서는 정상상태 및 침수조건에 대해서만 핵임계 해석을 수행하였으며, 핵연료 피복관 및 처분용기의 방벽기능이 모두 소실된 가상 사고조건에 대해서는 아직 수행하지 못하였다. 또한, 적용된 코드에 대한 계산 편차는 처분장 모델에 대한 모집단 실험치가 존재하지 않으므로 고려하지 못하였다.

#### 3.1. 해석 방법론

사용후핵연료 처분조건에서의 핵임계 해석을 위해서는 첫째, 연소 및 냉각시간에 따른 사용후핵연료 내의 핵종 수밀도 산출이 필요하며 둘째, 사용후핵연료 처분용기가 놓여진 심지층 사용후핵연료 처분장에 대한 임계도 값 계산이 필요하다. 본 연구에서 연소 및 냉각시간에 따른 핵연료 내 핵종 수밀도는 이차원 균정수 생산을 위해 사용되는 HELIOS[4] 코드를 사용하였으며, 처분장에 대한 임계도 값 산출을 위해서는 MCNP[5] 코드를 적용하였다. HELIOS는 중성자 및 감마의 수송을 해석하는 코드로서 핵연료집합체에 대한 연소 및 냉각에 따른 핵종량을 계산할 수 있다.

그림 3에서와 같이 토륨(Th)에서 큐륨(Cm)까지 액티나이드 핵종의 붕괴-생성 사슬을 매우 상세히 다루고 있어 사용후핵연료에서 핵분열에 기여하는  $^{235}\text{U}$ ,  $^{239}\text{Pu}$  및  $^{241}\text{Pu}$ 과 중성자 흡수에 기여하는  $^{238}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{240}\text{Pu}$  및  $^{241}\text{Am}$  등의 핵종생성량 예측에 타당할 것으로 판단된다.

처분장 모델에 대한 정상상태 및 침수 조건에서의 핵임계도 평가에 사용된 MCNP 코드는 몬테카를로 방법론을 사용하여 수송방정식의 해를 얻으며, 연속핵반응단면적 라이브러리를 사용하므로 균축약으로부터 발생하는 오차를 최소화 할 수 있고, 기하학적 형태묘사가 자유로와 상세 모델링이 가능하므로 실제 실험을 통해 데이터 산출이 어려울 경우 실험을 대체하는 결과로서 이용될 정도로 그 정확성을 인정받고 있다.

미국의 NRC에서는 핵임계 해석에 대한 인증코드로서 SCALE 코드 시스템을 사용할 것을 권하고 있다. 본 계산에서는 HELIOS-MCNP 체계를 이용하여 핵임계 해석을 수행하였으나, 향후 SCALE 코드 시스템을 병행하여 핵임계도 해석을 수행

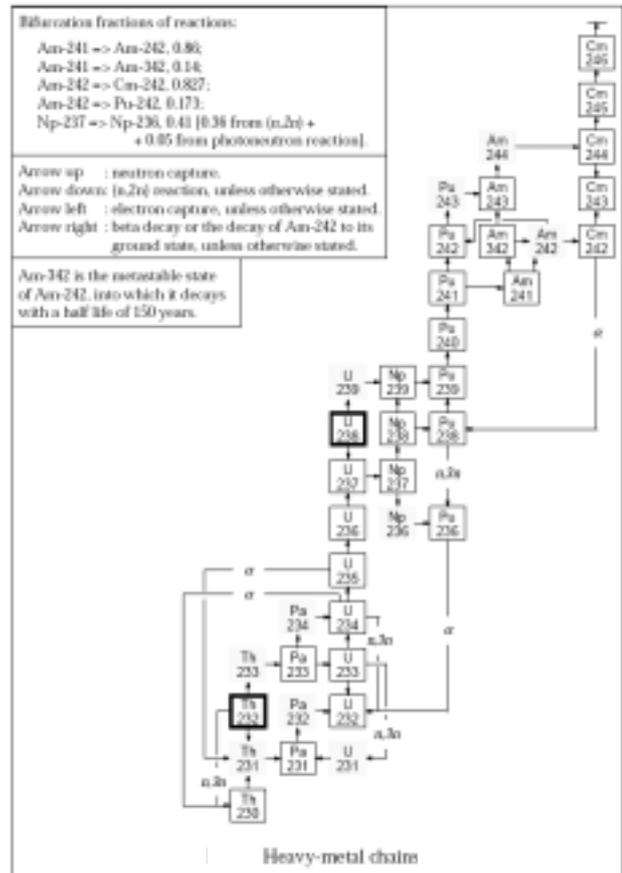


그림 3. HELIOS의 액티나이드 연소 체인

할 예정이다.

### 3.2. 핵임계 해석 결과

#### 3.2.1 기준 사용후핵연료 특성 분석

PWR 기준 핵연료의 연소에 따른 거동을 파악하기 위해 HELIOS 코드를 이용하여 PWR 기준 핵연료에 대한 연소에 따른 무한증배계수 변화를 산출하였다. 집합체 연소계산시 비출력 (specific power)은 37.5w/gU을 적용하였으며, 방출시까지 재장전 기간은 없는 것으로 가정하였다. 핵연료, 냉각재 및 피복재 온도는 각각 600℃, 310℃ 및 340℃를 적용하였으며, 보론의 농도는 연소기간 내내 600ppm으로 일정하게 유지시키면서 계산을 수행하였다. 핵반응단면적 라이브러리는 45그룹 중성자 라이브러리를 사용하였다. 핵연료집합체는 그림 4에서 보는 바와 같이 반사경계조건(reflective boundary condition)을 적용하므로써 1/8만을 묘사하였다.

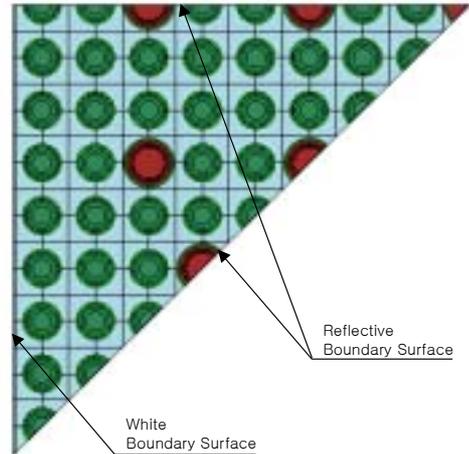


그림 4. 기준 사용후핵연료 HELIOS 모델

그림 5는 연소도에 따른 무한증배계수의 변화를 나타낸다. 그림에서 보듯이, <sup>235</sup>U의 초기 농축도가 4.0wt%인 핵연료는 37,000MWD/MTU를 초과하면 무한증배계수 값이 0.95 정도 이하로 유지되는 것으로 나타났으며, 4.5wt%인 핵연료는 42,000MWD/MTU 이상이면 0.95이하로 유지되는 것으로 나타났다. 4.0wt%인 핵연료를 45,000MWD/MTU까지 연소시켰을 때의 무한증배계수 값은 약 0.90정도로 나타났으며, 4.5wt%인 핵연료를 55,000MWD/MTU까지 연소시켰을 때의 무한증배계수는 0.87 정도로 나타나, 초기 농축도 4.5wt%, 방출연소도 55,000MWD/MTU를 갖는 PWR 기준 사용후핵연료가 핵임계 안전성 측면에서 더 유리한 것으로 나타났다.

그림 6은 PWR 기준 사용후핵연료의 냉각시간에 따른 무한증배계수의 변화를 나타낸다. 초기 농축도가 4.0wt%인 사용후핵연료는 45,000MWD/MTU까지 연소시킨 후 냉각시켰으며, 4.5wt%인 사용후핵연료는 55,000MWD/MTU까지 연소시킨 후 냉각시간에 따른 무한증배계수 값을 산출하였다. 기준 사용후핵연료의 냉각시간에 따른 핵임계 관점에서의 거동특성만을 분석하는 것이 주목적이므로 냉각재의 밀도는 원자로 연소조건과 동일하게 사용하였다. 계산결과, 초기에는 급격히 감소하다가 80년 정도 이후부터는 다시 임계도 값이 증가하는 것으로 나타났다.

그림 5와 6을 비교해 보면, 핵연료집합체 방출시점보다 1년 냉각시점에서 무한증배계수가 높게 나타나는데 이는 원자로 내에서 평형을 이루고 있던 제논이 급격히 감소했기 때문이다. 또한, 그림 6에서 약 80년까지는 증배계수가 감소하다가 그 이후 증가하는 이유는 그림 8을 보면 알 수 있는데, <sup>239</sup>Pu 및 <sup>241</sup>Pu의 붕괴에 따른 핵분열성 물질의 감소와 <sup>241</sup>Am의 생성으로 인한 중성자 흡수가 증가하기 때문에 약 80년까지는 감소하다가 그 이후는 <sup>240</sup>Pu과 <sup>241</sup>Am의 붕괴에 따른 중성자 흡수의 감소로 반응도가 다시 증가한다. HELIOS 코드가 같은 목적으로 사용되는 다른 코드에 비해 액티나이드 붕괴사슬을 비교적 상세히 다루고 있긴 하나, 근본적으로 HELIOS 코드는 원자로 내 핵연료 연소계산을 위한 균정수 생산이 주목적이므로 냉각시간이 매우 길 경우에 대한 연소체인의 해석과 관련해서는 적용타당성을 면밀히 검토하여야 한다. 향후 이 부분에 대한 논의가 이루어져야 할 것이다. 그림 7에는 노내 조사시 액티나이드 핵종의 거동 특성이 제시되어 있다.

CANDU 핵연료에 대해서는 연소계산이 수행되지 않았는데, 그 이유는 3.2.5절에서 언급될 것이다.

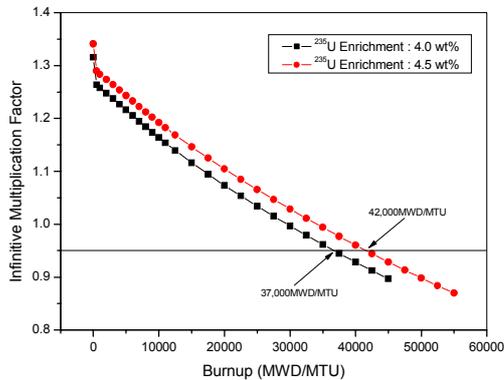


그림 5. 연소도에 따른 무한증배계수 변화

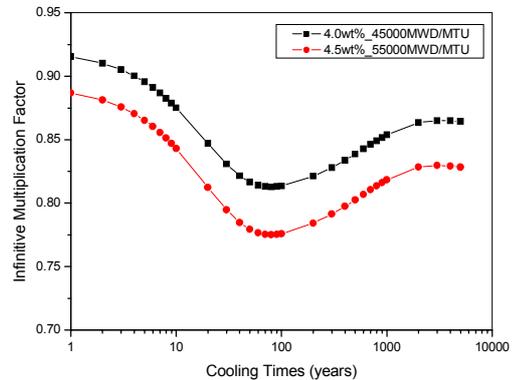


그림 6. 냉각시간에 따른 무한증배계수 변화

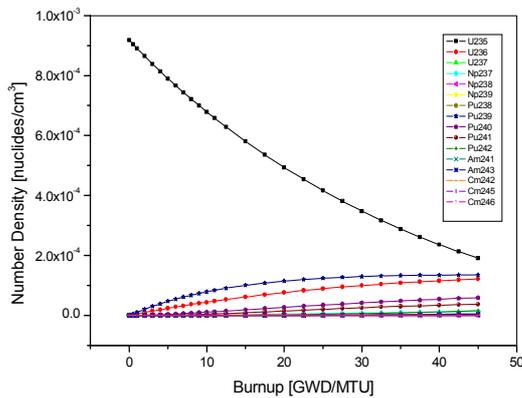


그림 7. 연소도에 따른 액티나이드 핵종 수밀도 변화

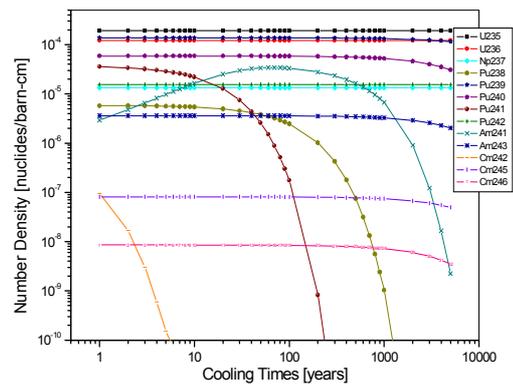


그림 8. 냉각시간에 따른 액티나이드 핵종 수밀도 변화

### 3.2.2 단위 처분공 의존성 평가

처분공 상호간에 의존성이 존재하면 임의의 한 처분공에서 핵임계 사고가 일어났을 때, 다른 처분공에 영향을 주어 연쇄적인 핵임계 사고로 전파될 수 있다. 따라서, 처분공은 의존성이 없도록 충분한 간격을 유지하여야 한다. 이러한 관점 하에 처분공 간격에 따른 무한증배계수의 변화를 살펴보았다. 처분용기 및 벤토나이트 완충재의 제원은 그대로 사용하고 천연방벽인 암반의 크기를 조절하여 암반과 암반 사이의 격자크기에 따른 무한증배계수의 변화를 살펴보았다. 계산은 물이 포화된 경우와 건조상태인 경우에 대하여 수행하였다. 사실상 건조상태인 경우는 핵임계 사고가 일어날 가능성이 희박하여 연쇄적인 핵임계 사고로 전파될 확률이 거의 없지만, 중성자 스펙트럼을 경화(hardening)시킴으로써 중성자의 평균자유행정거리(mean free path)를 가능한 크게 하여 처분공 상호간에 종속성을 최대한 부여하기 위해 설정하였다.

표 3에는 핵연료 초기 농축도가 4.5wt%인 신핵연료 모델에 대해 계산된 처분공 간격에 따른 무한증배계수 값이 기재되어 있다. 처분공 상호간의 거리가 4m 이상만 되면 상호 의존성은 거의

없는 것으로 나타났다. 정확한 경향을 파악하기 위해서는 결정론적 방법론(deterministic method)을 사용하는 코드 시스템을 이용하여 처분공 거리에 따른 종속성을 평가해야 하나, 현재 제안된 기준 처분공 간격이 6m로 충분히 멀고 몬테카를로 방법론으로 평가한 표 3의 결과 값도 통계오차가 매우 적고, 제시된 평균값(mean value)의 변화도 상당히 적으므로 확률론적 방법론을 이용하는 코드를 통한 평가만으로도 충분할 것으로 판단된다. 본 계산에서 사용된 처분용기 및 처분장에 사용된 각 물질에 대한 조성은 표 4에 상세히 기재되어 있다.

표 3. 처분공 간격에 따른 무한증배계수 변화

| 처분공 간격<br>(cm) | K_eff ± σ         |                   |
|----------------|-------------------|-------------------|
|                | 물포화 상태            | 건조 상태             |
| 300            | 1.07063 ± 0.00078 | 0.23457 ± 0.00024 |
| 400            | 1.07109 ± 0.00072 | 0.23422 ± 0.00023 |
| 500            | 1.07109 ± 0.00072 | 0.23471 ± 0.00022 |
| 600            | 1.07109 ± 0.00072 | 0.23471 ± 0.00022 |

표 4. 처분용기 및 처분공에 사용된 물질의 조성

| Property   | Value  | Property   | Value   |
|--|--|--|---|
| <b>Water</b><br>Density<br>Proportion by weight : H<br>O                     | 1.0 g/cm <sup>3</sup><br>11.2<br>88.8                        | <b>Dry Bentonite</b><br>Density<br>Proportion by weight : Si<br>Al<br>O          | 1.8 g/cm <sup>3</sup><br>35.8<br>12.4<br>51.8                 |
| <b>Air</b><br>Density<br>Proportion by weight : N<br>O                       | 0.001293 g/cm <sup>3</sup><br>76.7<br>23.3                   | <b>Wet Bentonite</b><br>Density<br>Proportion by weight : Si<br>Al<br>O<br>H     | 2.15 g/cm <sup>3</sup><br>30.0<br>10.4<br>57.8<br>1.8         |
| <b>Nikel</b><br>Density<br>Proportion by weight : Ni<br>Si<br>Cu<br>Mn<br>Al | 8.602 g/cm <sup>3</sup><br>85.0<br>10.0<br>3.0<br>1.0<br>1.0 | <b>Rock</b><br>Density<br>Proportion by weight : Si<br>Al<br>Ca<br>Fe<br>O       | 2.7g/cm <sup>3</sup><br>33.9<br>9.5<br>3.2<br>3.5<br>49.9     |
|  |  | <b>Carbon Steel</b><br>Density<br>Proportion by weight : C<br>Mn<br>P<br>S<br>Fe | 2.7g/cm <sup>3</sup><br>0.30<br>1.60<br>0.04<br>0.04<br>98.02 |

### 3.2.3 최적 감속조건

핵임계 안전성은 최대 반응도를 야기시키는 조건 하에서 보장되어야 하므로 최적 감속조건을 검토하였다. 처분용기가 안착된 처분공 모델에 대해 감속재인 물의 양을 증가시키면서 증배계수 값을 산출하였다. 그림 9는 신핵연료를 대상으로 처분용기 내 핵연료 저장공간에 물이 차는 경우를 가정하여 산출된 물의 밀도에 따른 증배계수 값의 변화를 나타낸다. 그림 10은 기존 사용후핵연료에 대하여 같은 방법으로 산출된 물의 밀도에 따른 증배계수의 변화를 나타낸다. 그림에서 보듯이 물의 밀도가 1.0g/cm<sup>3</sup>인 경우가 최대 반응도를 야기시키는 조건인 것으로 나타났다. 그림 9 및 10의 최대 반응도 조건 산출시 벤토나이트 완충재에는 물이 포화된 것으로 가정하였는데, 완충재에 물이 포화된 경우나 포화되지 않은 경우나 상호간에 차이는 없었다.

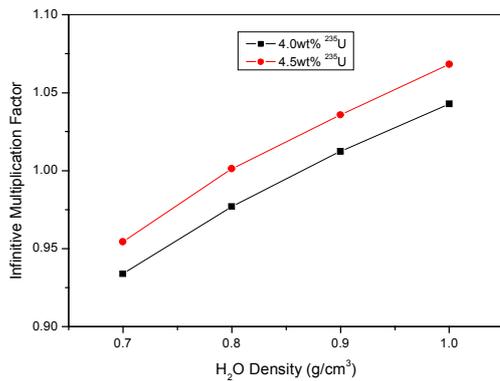


그림 9. 물의 밀도 변화에 따른 증배계수 변화(신핵연료)

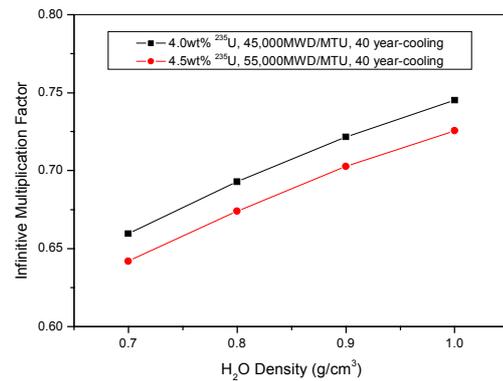


그림 10. 물의 밀도 변화에 따른 증배계수 변화(기존사용후핵연료)

### 3.2.4 정상상태 해석결과

사용후핵연료가 내장된 처분용기가 안착된 처분공 모델에 대하여 정상상태에 대한 임계도 값을 산출하였다. 정상상태는 처분용기, 벤토나이트 완충재 및 암반에 물이 침수하지 않은 최초 처분 완료상태가 그대로 유지되는 경우를 의미한다. 초기 농축도가 4.0wt%, 방출연소도 45,000MWD/MTU인 핵연료가 처분공에 위치한 경우의 증배계수 값은 0.22093±0.00023로 나타났으며, 초기 농축도가 4.5wt%, 방출연소도 55,000MWD/MTU인 핵연료가 처분공에 위치한 경우의 증배계수 값은 0.23471±0.00022로 나타났다. CANDU 핵연료가 처분된 경우에 대한 증배계수 값은 신핵연료가 처분된 경우에 0.17086±0.00016로 나타나 제한치인 0.95보다 현저히 적게 나타났다.

### 3.2.5 침수시 해석결과

사용후핵연료가 정상적으로 처분된 후, 지하수가 유입된 경우를 가정하여 처분공 모델에 대한 핵임계 해석을 수행하였다. 처분이 시작되는 2040년에는 다양한 농축도 및 연소도를 갖는 사용후핵연료가 존재하므로 연소도에 따른 증배계수 변화 정도를 제시하고자 우선 MCNP 코드를 이용하여 사용후핵연료가 처분공에 정상적으로 처분된 후 지하수가 유입된 경우를 가정하여 연소도에 따른 증배계수 변화를 그림 11에 제시하였다. 이때, 지하수 밀도는 최적 감속조건을 야기시키는 조건으로 설정하였다.

그림에서 보듯이, 초기 농축도가 4.0wt%인 경우는 19GWD/MTU 이상으로 연소된 핵연료집합체가 처분되면 임계도 값은 0.95 이하로 유지되는 것으로 나타났다. 향후, 전산체계 및 처분용기

제조 공차에 대한 불확실도를 고려한다해도 약 20GWD/MTU 이상만 연소되면 물이 침투하여 최적 감속조건이 이루어진다해도 임계도 값은 제한치를 만족할 수 있을 것으로 판단된다. 초기 농축도가 4.5wt%인 핵연료는 25GWD/MTU 이상 연소된 핵연료집합체가 장전되어야만 임계도 값이 0.95 이하로 유지되는 것으로 나타났다.

그림 12에는 기준 사용후핵연료에 대한 냉각시간에 따른 증배계수 변화가 나타나 있는데, 초기 농축도 4.0wt%, 방출연소도 45,000MWD/MTU인 핵연료의 임계도 값은  $0.74518 \pm 0.00069$ 로 나타났으며, 초기농축도 4.5wt%, 방출연소도 55,000MWD/MTU인 핵연료의 임계도 값은  $0.72558 \pm 0.00059$ 로 나타나 기준 사용후핵연료에 대해서는 핵연료봉이 파손되지 않아 핵연료가 연료봉내에 존재한다면 물이 침수하여 최적 감속 조건을 이룬다 할지라도 임계도 값은 제한치 이내로 유지되어 핵임계 안전성은 확보되는 것으로 나타났다.

그림 12에서 증배계수가 감소하다가 증가하는 이유는 앞서 언급된 이유와 같으며, Burnup credit은 액티나이드 핵종에 대해서만 적용하였다. 앞서 그림 6은 액티나이드 및 핵분열 생성물이 모두 고려되는 상태에서 도출된 곡선인데 두 곡선 형태가 비슷한 것은 핵분열 생성물에 의한 중성자 흡수율이 전체 중성자 흡수율에 비해 10% 정도로 적기 때문이다.

CANDU 핵연료가 처분된 경우에 대해서도 증배계수 값을 평가하였는데, 물이 침수된 경우의 증배계수는 신핵연료가 침수된 경우에 대해서도  $0.47614 \pm 0.00043$ 로 나타나 핵임계 안전성은 충분히 확보되는 것으로 나타났다. 앞서 HELIOS 코드를 이용한 연소도에 따른 증배계수 및 핵종 수밀도 산출이 이루어지지 않은 이유도 이 때문이다.

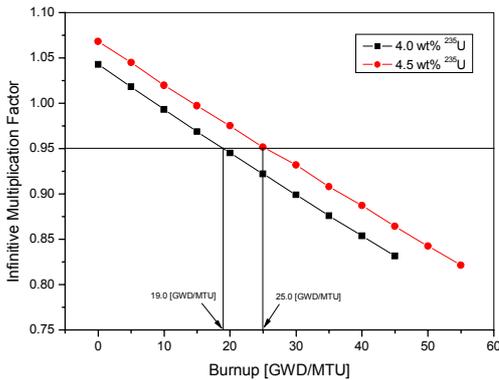


그림 11. 연소도에 따른 증배계수 변화

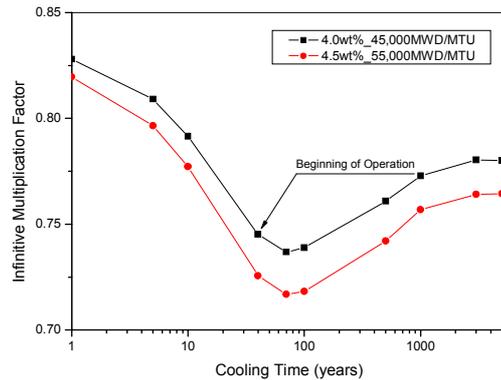


그림 12. 냉각시간에 따른 증배계수 변화

### 3.2.6 Burnup Credit에 의한 임계도 변화

앞서 침수시 핵임계도 평가시 연소에 따른 증배계수 감소효과(burnup credit)를 고려하기 위해 임계도 평가시 중성자 흡수 역할을 하는 액티나이드 핵종을 고려하였다. 그런데, 액티나이드 핵종량 예측에는 필수적으로 불확실성이 수반될 수밖에 없으며, 이로 인해 핵임계 안전성이 영향을 받아서는 않된다. 이에, 액티나이드 핵종이 임계도 값에 미치는 영향도를 분석하였다.

그림 13은 핵분열성 물질과 <sup>238</sup>U만을 고려

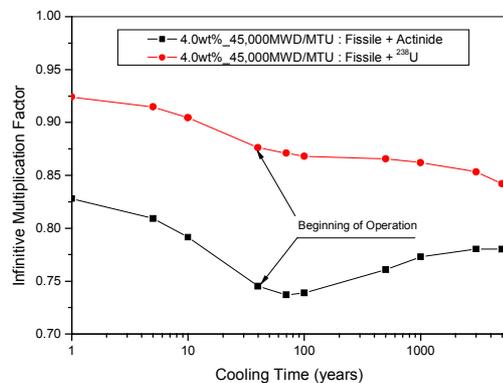


그림 13. Burnup Credit에 의한 임계도 변화

했을 때와, 액티나이드 핵종을 함께 고려했을 때의 임계도 변화를 보여준다. 그림에서 보듯이, 액티나이드 핵종이 중성자를 흡수함으로써 핵임계에 미치는 영향은 약 100mk 정도로 상당히 큼을 볼 수 있다. 이는 향후 burnup credit을 적용함에 있어 액티나이드 핵종양의 산출시 불확실도를 줄이기 위한 연구가 매우 중요함을 뜻한다. 그러나, 기준 사용후핵연료에 대해서는 그림 13에서 보듯이, 액티나이드에 대한 burnup credit을 적용하지 않더라도 운영시점 이후의 임계도 값은 0.88 정도 이하로 유지되어 안전성은 확보되는 것으로 나타났다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 사용후핵연료가 안착된 처분공 모델을 대상으로 핵임계 해석을 수행하였다. PWR 기준 사용후핵연료로 초기농축도 4.0wt%, 방출연소도 45,000MWD/MTU와 초기농축도 4.5wt%, 방출연소도 55,000MWD/MTU를 적용하였으며, CANDU의 경우에는 0.7wt%, 7,500MWD/MTU를 사용하였다. 기준 처분공 모델은 현재까지 개발된 모델을 적용하였다. 사용후핵연료 내의 핵종수밀도 산출을 위해 HELIOS 코드를 사용하였으며, 처분공의 임계도 값 산출을 위해 MCNP 코드를 적용하였다.

계산결과, 사용후핵연료가 처분된 상태가 변형되지 않은 정상상태에 대해서는 모든 경우에 대해 임계도 값이 0.95 보다 현저히 낮게 나타나 핵임계 안전성이 충분히 확보되는 것으로 나타났다. 침수조건에 대해서는 4.0wt%인 사용후핵연료에 대해서는 19GWD/MTU 이상으로 연소된 핵연료집합체가 처분되면 임계도 값은 0.95 이하로 유지되는 것으로 나타났으며, 4.5wt%인 핵연료는 25GWD/MTU 이상 연소된 핵연료집합체가 장전되어야만 임계도 값이 0.95 이하로 유지되는 것으로 나타났다. 기준 사용후핵연료에 대해서는 농축도 4.0wt%, 방출연소도 45,000MWD/MTU인 핵연료의 임계도 값은  $0.74518 \pm 0.00069$ 로 나타났으며, 농축도 4.5wt%, 방출연소도 55,000MWD/MTU인 핵연료의 임계도 값은  $0.72558 \pm 0.00059$ 로 나타났다. CANDU 핵연료의 경우도 침수된 경우를 가정하더라도 임계도 값은 0.95보다 현저히 적게 나타나 안전성이 확보되었다.

따라서, 기준 사용후핵연료에 대해서는 핵연료봉이 파손되지 않아 핵연료가 연료봉내에만 존재한다면 물이 침수하여 최적 감속 조건을 이룬다 할지라도 임계도 값은 제한치 이내로 유지되어 핵임계 안전성은 확보되는 것으로 나타났다.

#### Acknowledgements

본 연구는 과학기술부가 지원하는 원자력연구개발 중장기과제 중 “처분시스템개발” 과제의 일환으로 수행되었습니다.

#### REFERENCES

1. "제5차 장기전력수급계획(99~2015)," 산업자원부 공고 제2000-3호(2000).
2. 최종원 외, "심지층 처분시스템 개념설정을 위한 기준 사용후핵연료 선정 및 특성 분석, KAERI/TR-914/97, 한국원자력연구소(1997).
3. 10CFR60.131 : Code of Federal Regulations, Title 10, Energy-Part 60, Disposal of

High-Level Radioactive Wastes in Geologic Repositories, Section 60.131(1996).

4. HELIOS Computer Code System, Studsvik Scanpower Corporation.

5. J. F. Briesmeister, MCNP-A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 4C, LA-13709-M, Los Alamos National Laboratory(2000)