

감마선 방출 핵종비를 이용한 PWR 사용후핵연료의 연소도, 냉각시간 및 초기농축도 동시 결정

Joint Determination of Burnup, Cooling Time and Initial Enrichment of PWR Spent Fuel by Use of Gamma-ray Emitting Isotope Ratios

박형중, 박광준, 구대서, 이동욱, 엄성호, 민덕기, 노성기
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

냉각시간, 초기농축도와 출력이력에 대한 정보가 없는 가압경수로(PWR) 사용후핵연료의 연소도를 감마선 측정법만을 사용하여 비파괴적으로 결정할 수 있는 방법을 개발하였다. 다중채널 HPGe 감마선검출시스템(multi-channel analyzer)을 이용하여 고리 1호기와 2호기의 사용후핵연료(절편, 연료봉 및 집합체)에 대한 감마선 측정실험을 수행하고 이 결과로부터 $^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$, $^{154}\text{Eu}/^{137}\text{Cs}$ 과 $^{106}\text{Ru}/^{137}\text{Cs}/(^{134}\text{Cs})^2$ 의 핵종비를 산출하였다. 이와 별도로 사용후핵연료의 초기농축도별 연소도와 냉각시간을 변화시키면서 $^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$, $^{154}\text{Eu}/^{137}\text{Cs}$ 과 $^{106}\text{Ru}/^{137}\text{Cs}/(^{134}\text{Cs})^2$ 의 핵종비를 ORIGEN-S 코드로 계산하고, 이 값과 연소도 및 냉각시간과의 상관관계를 회귀 분석하여 핵종비를 연소도 및 냉각시간의 함수로 유도하였다. 이 관계식과 감마선 분광실험으로 측정된 핵종비를 비교 평가하여 냉각시간, 초기농축도 및 연소도를 순차적으로 결정할 수 있었다. 이 방법은 측정 대상의 기하학적 조건이나 공표 자료에 의존하지 않고도 이들 파라미터를 결정할 수 있다는 장점을 갖고 있다.

Abstract

Burnup, cooling time and initial enrichment, which are basic parameters of the spent fuel, were determined nondestructively by use of gamma-ray activity ratios from high resolution gamma-ray spectroscopy and ORIGEN-S calculations. The activity ratios used in this work are $^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$, $^{154}\text{Eu}/^{137}\text{Cs}$, and $^{106}\text{Ru}/^{137}\text{Cs}/(^{134}\text{Cs})^2$. With the regression analyses of the calculation results, the activity ratios were correlated as a function of burnup, cooling time after irradiation, and initial enrichment. The gamma-ray spectrometric experiments were carried out on spent fuel rods irradiated in Kori Unit-1 and Unit-2 pressurized water reactor(PWR) using a high purity Ge(HPGe) detector system installed in KAERI hot cells. And the cooling time, the initial enrichment and the burnup were sequentially determined with help of the correlation derived. This technique has an advantage in sequential determination of the three spent fuel basic parameters (cooling time, enrichment and burnup) with one gamma-ray measurement without information on measurement geometry (or geometric efficiency) and operator declared values.

1. 서 론

사용후핵연료의 연소도는 사용후핵연료를 효율적 관리측면이나 안전성 측면에서 매우 중요한 특성인자이다. 따라서 사용후핵연료의 연소도를 측정하는 여러 가지 방법들이 개발되어 활용되고 있으며 지금도 계속 빠르고 정확하게 측정할 수 있는 방법들에 연구가 계속되고 있다[1,2].

사용후핵연료의 연소도를 측정하는 방법에는 크게 화학적 분석방법, 감마선 측정방법과 중성자 측정방법 등이 개발되어 활용되고 있으나, 지금까지 개발된 방법들은 그들이 갖고 있는 고유한 특성 때문에 제한적일 수밖에 없었다. 즉, 파괴적 방법인 화학적 분석방법은 정확하지만 비용과 시간이 많이 소요되고, 비파괴적인 방법인 감마선 및 중성자 측정방법은 간단하고 시간이 적게 소요되지만 측정시스템의 기하학적 형태에 따른 검출효율을 결정하는 것이 어렵기 때문에 주로 상대적인 연소도 분포측정에 많이 이용되어 왔다. 감마선 방출 핵종의 핵종비를 이용하여 연소도를 결정하는 방법이 개발되어 있으나 이 방법 역시 사용후핵연료의 초기농축도, 냉각시간과 연소이력 등에 대한 정보가 있어야 가능하다. 최근에 영국에서는 감마선과 중성자를 동시에 측정하여 초기농축도와 냉각시간에 대한 정보가 없는 사용후핵연료의 연소도를 결정할 수 있는 방법을 개발하였으나 이 방법은 감마선 측정시스템과 중성자 측정시스템이 같이 설치되어 있어 고가이고 측정방법도 복잡하다[3].

본 연구에서는 감마선 측정만으로 초기농축도, 냉각시간과 출력이력에 대한 정보가 없는 사용 후핵연료의 연소도를 빠르고 정확하게 결정하는 방법을 개발하였다. 그리고 그 방법을 검증하기 위해 고리 1호기와 2호기 사용후핵연료에 대한 감마선 측정시험을 수행하였으며 먼저 냉각시간과 초기농축도를 결정하고 이 값으로부터 연소도를 결정하였다.

2. 이 론

초기농축도와 냉각시간에 대한 정보가 없는 사용후핵연료의 연소도를 결정하는 과정은 크게 ORIGEN-S (또는 SCALE4.3의 SAS2H module)코드 계산으로부터 모니터 핵종들의 핵종비와 연소도 및 냉각시간과의 상관관계를 구하는 단계와 감마선 실험으로부터 감마선 방출 핵종의 핵종비를 구하여 냉각시간, 초기 농축도와 연소도를 구하는 단계로 나눌 수 있다.

가. 모니터 핵종의 핵종비 계산

SCALE4.3 의 ORIGEN-S 전산코드를 이용하여 현재 보유하고 있는 모든 가압경수로 사용후핵연료가 포함될 수 있도록 핵연료의 형태, 초기농축도 및 연소도를 현재 다음과 같이 변화시키면서 모니터 핵종의 생성량을 계산하여 모니터 핵종의 핵종비 data base를 작성하였다.

- 핵연료의 형태 : 14x14와 17x17 배열의 핵연료
- 초기농축도 : 2.5 ~ 5.0 wt.% 까지 (0.1 wt.% 씩 증가)
- 연소도 : 10 ~ 60 GWd/tU (2 GWd/tU 씩 증가)
- 냉각시간 : 0 ~ 20 년 (0.1 년 씩 증가)

ORIGEN-S 코드로 계산한 모니터 핵종의 핵종비에 대한 보정을 위하여 미국의 가압경수로인 Calvert Cliff 1호기 사용후핵연료의 ^{134}Cs 와 ^{137}Cs 에 대한 분석결과를 이용하였다[4]. 표 1은 이 측정결과를 ORIGEN-S 코드로 계산한 ^{134}Cs 과 ^{137}Cs 량과 비교한 것이다. 이 결과에 의하면 ^{134}Cs 의 계산 값은 연소도가 클수록 과소평가 하였으나(44 GWd/tU의 연소도에서 최대 약 20 % 과소평가), ^{137}Cs 의 경우 약 2 % 이내에서 비교적 잘 일치하였다. 그러나 ^{154}Eu 와 ^{106}Ru 에 대해서는 측정값이 주어지지 않아 보정을 하지 않고 사용하였다. 그림 1은 표 1의 결과를 이용하여 ORIGEN-S 코드로 계산한 $^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$ 값에 대한 보정인자를 연소도의 함수로 나타낸 것이다.

초기농축도가 en 인 모니터 핵종의 핵종비와 연소도와 관계를 회귀분석하여 상관관계를 구하면 다음과 같은 형태의 식으로 표시할 수 있다.

$$\begin{aligned} (^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs})_{\text{en,t}} &= [P_{1,\text{en}} + P_{2,\text{en}} \cdot \text{연소도} + P_{3,\text{en}} \cdot \text{연소도}^2] e^{-(\lambda_{34}-\lambda_{37})t} \\ (^{154}\text{Eu}/^{137}\text{Cs})_{\text{en,t}} &= [Q_{1,\text{en}} + Q_{2,\text{en}} \cdot \text{연소도} + Q_{3,\text{en}} \cdot \text{연소도}^2] e^{-(\lambda_{54}-\lambda_{37})t} \quad \dots (1) \\ \ln [^{106}\text{Ru} \times ^{137}\text{Cs} / (^{134}\text{Cs})^2]_{\text{en,t}} &= A_{\text{en}} + B_{\text{en}} \ln(\text{연소도}) - (\lambda_{06} + \lambda_{37} - 2\lambda_{34})t \end{aligned}$$

여기서 $P_{1,\text{en}}$, $P_{2,\text{en}}$, $P_{3,\text{en}}$, $Q_{1,\text{en}}$, $Q_{2,\text{en}}$, $Q_{3,\text{en}}$, A_{en} 와 B_{en} 은 회귀계수이고, λ_{34} , λ_{37} , λ_{54} 와 λ_{06} 은

각각 ^{134}Cs , ^{137}Cs , ^{154}Eu , ^{106}Ru 의 붕괴상수이다.

나. 연소도 결정 방법

사용후핵연료의 초기농축도와 냉각시간을 알 경우 측정된 모니터 핵종의 핵종비를 (1) 식에 대입하여 연소도를 쉽게 구할 수 있다. 그러나 초기농축도와 냉각시간을 모를 경우, (1) 식을 사용하여 연소도를 구하기 위해서는 먼저 냉각시간과 초기농축도를 구하여야 한다.

냉각시간 결정 : 기존에는 $^{144}\text{Ce}/^{137}\text{Cs}$ 비를 측정해서 냉각시간을 구했으나 ^{144}Ce 은 측정하기 어렵고 또 연소이력을 모르고서는 냉각시간을 정확하게 측정하기 어렵다는 문제를 갖고 있었다[5]. 본 연구에서는 $^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$ 과 $^{154}\text{Eu}/^{137}\text{Cs}$ 을 이용한 것으로 냉각시간이 긴 경우에도 적용할 수 있으며 연소이력에도 별 영향을 받지 않고 또 냉각시간을 정확하게 결정할 수 있다는 장점을 갖고 있다.

냉각시간을 측정하기 위한 모니터 핵종의 핵종비($^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$ 과 $^{154}\text{Eu}/^{137}\text{Cs}$)를 (1)식을 이용하여 연소도와 냉각시간의 관계를 개략적으로 도시하면 그림 2와 같다. 이 두 그래프의 기울기는 모니터 핵종의 핵종비에 고유한 특성에 따른 것이다. 따라서 만약 핵종비 계산과 감마선 측정이 올바르게 되면 이 두 그래프는 사용후핵연료의 실제 냉각시간에서 서로 만날 것이다. 그러므로 이 두 그래프가 만나는 점의 시간이 사용후핵연료의 냉각시간이 된다. 실제 경우 감마선 측정은 사용후핵연료의 여러 측정지점에 대해 행해지므로 이 다음과 같이 F 라는 양을 정의해서 그 측정값의 평균값을 최소로 하는 냉각시간을 결정한다.

$$F \equiv \left[\sum_{i=1}^N \frac{|BU_i(\text{Cs}) - BU_i(\text{Eu})|}{BU_i} \right] / N \quad \dots \dots (2)$$

여기서 N 은 사용후핵연료에서 감마선을 측정된 지점의 수이고, $BU_i(\text{Cs})$ 와 $BU_i(\text{Eu})$ 는 측정지점 i 에서 (1)식에 따라 $^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$ 및 $^{154}\text{Eu}/^{137}\text{Cs}$ 의 핵종의 핵종비 각각으로부터 결정된 연소도이고, $\overline{BU}_i = [BU_i(\text{Cs}) + BU_i(\text{Eu})] / 2$ 이다. 따라서 F 는 냉각시간이 t 라는 가정에서 $^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$ 와 $^{154}\text{Eu}/^{137}\text{Cs}$ 를 써서 결정한 연소도 사이의 상대적인 차이를 나타낸다.

F 를 최소로 하는 냉각시간이 사용후핵연료의 초기농축도에 거의 의존하지 않기 때문에(초기농축도 2.5~5 wt.% 구간에서) 초기농축도를 모르더라도 냉각시간을 결정할 수 있다(그림 3 참고).

초기농축도 결정 : 사용후핵연료의 초기농축도를 결정하기 위해서는 우선 집합체의 냉각시간을 알고 있어야 하는데, 그 것은 앞에서 설명한 방법에 따라 구한 냉각시간을 사용한다. 이 경우 모니터 핵종의 핵종비로 $^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$ 및 $^{106}\text{Ru}/^{137}\text{Cs} / (^{134}\text{Cs})^2$ 을 사용한다.

사용후핵연료의 감마선 측정점 i 에서 측정된 핵종비 $^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$ 및 $^{106}\text{Ru}/^{137}\text{Cs} / (^{134}\text{Cs})^2$ 와 앞에서 구한 냉각시간을 (1) 식에 대입하고 초기농축도를 변화시키면서 구한 연소도를 각각 $BU_i(\text{Cs})$ 와 $BU_i(\text{Ru})$ 라 할 때 F' 을 다음과 같이 정의한다.

$$F' = \left[\sum_{i=1}^N \frac{|BU_i(\text{Cs}) - BU_i(\text{Ru})|}{BU_i} \right] / N \quad \dots \dots (3)$$

여기서 $\overline{BU}_i = [BU_i(\text{Cs}) + BU_i(\text{Ru})] / 2$ 이다. F' 은 임의의 초기농축도 값에서 핵종비 $^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$ 와 $^{106}\text{Ru}/^{137}\text{Cs} / (^{134}\text{Cs})^2$ 를 써서 계산한 연소도 사이의 상대적인 차이를 나타낸다. 따라서 이들 핵종들에 대한 ORIGEN-S 코드 계산과 감마선 측정이 올바른 경우 F' 은 사용후핵연료의 참 초기농축도 값에서 최소가 될 것이다.

연소도 결정 : 앞서 설명한 방법에 따라 냉각시간과 초기농축도를 구한 경우 그 값들을 식 (1)의 어디에나 집어넣음으로써 측정 지점의 연소도를 구할 수 있다. 본 연구에서는 $^{154}\text{Eu}/^{137}\text{Cs}$ 와 연소도 사이의 회귀식을 사용함으로써 연소도를 구했다. 이것은 이 핵종비가 연소이력에 별 영향을 받지 않는 특성을 갖고 있기 때

문이다.

3. 실험

가. 시험 대상 핵연료

연소도 측정실험은 고리1호기 사용후핵연료봉 절편, 고리2호기 사용후핵연료봉 및 고리1호기 사용후핵연료집합체에 대하여 세 번에 걸쳐 수행하였다. 시험대상 핵연료에 대한 개요는 표 2에 나타내었다.

나. 시험 장치

사용후핵연료에 대한 감마선 측정실험은 한국원자력연구소(KAERI)의 조사제시험시설(IMEF)과 조사후시험시설(PIEF)의 핫셀 및 수조에 설치되어 있는 감마선측정시스템 장비를 이용하여 수행하였다[6].

(1) KAERI-IMEF 핫셀 실험 (고리1호기 사용후핵연료봉 절편 실험)

- 감마선 검출기: HPGe검출기(효율15%, 액체질소 냉각방식) @ORTEC
- 벤치 구동 : 프로그램화된 자동구동 시스템
- 집속기 : 2 mm(폭) x 40 mm(길이) x 150 mm(두께) 수평슬릿
- 검출신호 분석프로그램 : Maestro II 및 Gammavision

(2) KAERI-PIEF 핫셀 실험 (고리2호기 사용후핵연료봉 실험)

- 감마선 검출기 : HPGe검출기(효율10%, 액체질소 냉각방식) @Canberra
- 벤치 구동 : 자동구동 시스템
- 집속기 : 0.5 mm(폭) 수평슬릿

(3) KAERI-PIEF 수조 실험 (고리1호기 사용후핵연료집합체 실험)

- 감마선 검출기 : HPGe검출기(효율10%, 액체질소 냉각방식) @Canberra
- 집합체 구동 : 크레인
- 집속기 : 1차(전방) 2.5 mm(폭) x 213.8-80 mm(넓이)
2차(후방) 5 mm(폭) x 5 mm(넓이)
- 검출신호 분석프로그램 : Aptec OSQ

KAERI-PIEF 수조 실험에서는 우선 사용후핵연료집합체 전체적인 연소도 분포를 얻기 위해 5 cm 간격으로 총 감마선(gross gamma-ray) 측정실험을 하였으며 그 후 연소도 결정을 위해 핵연료집합체 축방향으로 여섯 군데를 선정하여 2~4 시간 동안 감마선을 측정하였다.

4. 결과 및 토의

가. 냉각시간 결정

실험대상 사용후핵연료에 대한 연소도, 냉각시간과 초기농축도를 모른다 가정하고 이의 연소도 결정을 위한 실험을 수행하였다. 앞에서 설명한 바와 같이 연소도를 결정하기 위해서는 냉각시간과 초기농축도를 결정하여야 하는데, 우선 냉각시간을 결정하기 위하여 초기농축도를 2.5에서 5.0 wt.% 까지 0.1 wt.% 씩 증가시키면서 F 값이 최소가 되는 시간 t 를 계산하였다.

그림 3은 J14E11 사용후핵연료봉에 대하여 2.5~5 wt.% 사이의 초기농축도 값에 대하여 F 의 최소 값과 이 때의 시간, 즉 냉각시간을 보여주고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 F 를 최소로 하는 냉각시간은 초기농축도에 거의 의존하지 않았다. 따라서 냉각시간은 초기농축도 전체구간(2.5~5 wt.%)에 대한 평균값으로 결정하였다. 이렇게 하여 구한 J14E11 과 J44M5 사용후핵연료봉의 냉각시간은 각각 8.76 ± 0.2 년과 5.22 ± 0.2 년이었는데 이 값은 실제 냉각시간인 8.45 년과 5.3 년에 3.7 % 이내에서 잘 일치하였다. 마찬가지로 구한 F02 고리1호기 사용후핵연료집합체에 대한 냉각시간은 12.55 ± 0.2 년으로 실제 냉각시간 12.5 년과 잘 일치하였다.

나. 초기농축도 결정

사용후핵연료의 초기농축도의 결정에는 앞에서 결정한 냉각시간 값을 사용하여 F' 가 최소가 되는 점을 찾는 방법을 사용하였다. 그림 4는 J44M5 사용후핵연료봉의 초기농축도를 변화시키면서 계산한 F' 분포를 보여준다. J44M5 연료봉의 경우 F' 의 값이 최소가 되는 점, 즉, 초기농축도가 3.6 ± 0.2 wt.%로 나타났는데, 이는 발전소 공표 값 3.5 wt.% 와 잘 일치하였다. 그러나 J14E11 연료봉의 경우 2.5~5.0 wt.% 전 구간에서 F' 의 최소 값을 결정할 수 없었는데, 이것은 높은 연소도에서 ^{106}Ru 에 대한 ORIGEN-S 코드 계산의 부정확성에 따른 것으로 판단된다.

다. 연소도 결정

앞에서 구한 냉각시간과 초기농축도 값을 (1) 식에 대입하여 연소도를 계산하였다. J14E11 연료봉과 F02 핵연료집합체의 경우 초기농축도를 결정하지 못하였기 때문에 발전소 공표 값을 이용하여 연소도를 계산하였다.

그림 5는 J44M5 연료봉의 각 측정위치별 연소도를 보여주고 있다. 여기서 $^{154}\text{Eu}/^{137}\text{Cs}$ 핵종의 핵종비에 의한 연소도 값과 연료봉 전체길이에 대한 총 감마선 세기분포곡선을 이용하여 봉 평균 연소도를 구하였다. 그 결과 J14E11 과 J44M5 연료봉의 평균 연소도는 각각 41.3 ± 2.4 GWd/tU 과 34.6 ± 2.2 GWd/tU 로 각각 발전소 공표 값 39 GWd/tU 와 35 GWd/tU 에 잘 일치하였다.

그림 6은 F02 핵연료집합체의 3면에 대한 상대 감마선 세기와 여섯 개 측정 위치에서 결정된 연소도를 보여준다. F02 집합체의 평균 연소도는 3면의 여섯 개 지점에서 구한 연소도 값을 총 감마선 곡선의 세기로 가중 평균하여 구했으며 그 결과는 29.7 ± 1.9 GWd/tU 이었다. 이 값은 발전소 공표 값 28 GWd/tU 와 약 6 % 범위에서 일치하는 결과이다.

5. 결론

초기농축도와 냉각시간을 모르는 가압경수로 사용후핵연료의 연소도를 감마선 측정만으로 구하는 방법을 제시하고, 이에 따라 고리 1호기 J14E11 사용후핵연료봉 절편, 고리2호기 J44M5 사용후핵연료봉 및 고리1호기 F02 사용후핵연료집합체에 대한 실험을 수행한 결과 연소도는 발전소 공표값과 6% 범위에서 비교적 잘 일치하였다(표 3).

특히 냉각시간은 기존의 방법에 비해 더 정확하고 간편하게 구할 수 있었다. 그러나 초기농축도의 경우 연소도가 상대적으로 낮은 J44M5에 대해서는 구할 수 있었으나 연소도가 높은 J14E11에 대해서는 구할 수 없었다. 이는 주로 ORIGEN-S 코드의 의한 ^{106}Ru 계산치가 부정확하기 때문인 것으로 판단된다.

본 연구의 연소도 결정방법은 근본적으로 ORIGEN-S 계산결과에 의존하고 있기 때문에 좀 더 정확한 연소도를 결정하기 위해서는 모니터 핵종의 계산오차를 줄이는 것이 무엇보다 중요하다. 이를 위해서는 국내외의 실험자료를 입수하여 모니터 핵종의 계산결과를 검증/보정하고 기존 핵자료의 upgrade 를 통하여 계산의 정확도를 높여야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력사업의 일환으로 수행되었음.

참 고 문 헌

1. 神田啓治, “임계안전과 연소도 크레디트,” 일본 원자력공업 40(3), 5(1994).
2. “Implementation of Burnup Credit in Spent Fuel Management Systems,” Proceedings of an Advisory Group Meeting held in Vienna, 20-24 October, 1997, IAEA-TECDOC-1013(1998).
3. A.S. Chesterman, “Radiometric Instrumentation for Spent Fuel Monitoring,” in Proceedings of SPECTRUM '96, held in Seattle, USA (1996).
4. M.D. DeHart, O.W. Hermann, and C.V. Parks, “Validation of a Method for Prediction of Isotopic Concentrations in Burnup Credit Applications”, *The 5th International Conference on Nuclear Criticality Safety*, New Mexico, USA (1994).
5. 이영길, 엄성호, 노성기, “핵종비 $^{144}\text{Ce}/^{137}\text{Cs}$ 검출에 의한 사용후핵연료 냉각기간 결정,” 한국원자력학회지, Vol.25, No.2, p.237, 한국원자력연구소 (1993).
6. 박대규외, “감마스캐닝에 의한 사용후PWR핵연료의 핵종비 $^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$ 및 $^{154}\text{Eu}/^{137}\text{Cs}$ 측정”, KAERI/TR-925/97, 한국원자력연구소 (1997).

표 1. Calver Cliff 1호기(PWR, 미국) 사용후핵연료의 감마선 방출 핵종량에 대한 측정값과 계산 값의 비교[4]

핵 종	농축도 (wt%)	연소도 (GWd/tU)	냉각시간 (day)	비 교, (mg/g UO ₂)		
				측 정	계 산	% 차이
^{134}Cs	3.04	27.35	1870	0.01	0.097	-3.5
		37.12		0.02	0.017	-13.5
		44.34		0.03	0.024	-19.6
^{137}Cs	3.04	27.35	1870	0.77	0.78	1.7
		37.12		1.04	1.06	2.0
		44.34		1.25	1.27	1.2
^{154}Eu	3.04	27.35	1870	0.079	0.0798	1.0
		37.12		0.109	0.121	10.7
		44.34		0.148	0.151	2.0

표 2. 실험대상 사용후핵연료의 특성

실험 대상	실험장소	연소주기	발전소 공표값		
			초기농축도 (wt.%)	연소도 (GWd/tU)	냉각시간 (year)
고리1호기(14x14) 핵연료봉 절편 (J14E11)	KAERI-IMEF 핫셀	7/8/9	3.2	39	8.5 ('89.1.방출)
고리2호기(16x16) 핵연료봉 (J44M5)	KAERI-PIEF 핫셀	7/8	3.5	36	5.3 ('92.5.방출)
고리1호기(14x14) 핵연료집합체 (F02)	KAERI-PIEF 수조 (-10m)	4/5/6	3.2	28	12.5 ('85.10.방출)

표 3. 실험 대상 사용후핵연료의 연소도, 냉각시간 및 초기농축도 비교

구 분	연소도, (GWd/tU)		냉각시간, (년)		초기농축도, (wt%)	
	공표값	측정값	공표값	측정값	공표값	측정값
o 고리1호기 사용후핵연료봉 절편 (J14E11) -초기농축도, 냉각시간 모를 때	39	41.3 ± 2.4	8.45	8.76 ± 0.2	3.2	-
		40.0 ± 2.3		-		
		41.0 ± 2.4		8.7 ± 0.2		
o 고리2호기 사용후핵연료봉 (J44M5) -초기농축도, 냉각시간 모를 때	35	34.6 ± 2.2	5.3	5.22 ± 0.2	3.5	3.6 ± 0.2
		33.7 ± 2.1		-		
		33.3 ± 2.1		5.2 ± 0.2		
o 고리1호기 사용후핵연료 집합체 (F02) -초기농축도, 냉각시간 모를 때	28	29.7 ± 1.9	12.5	12.55 ± 0.2	3.2	-
		29.6 ± 2.0		-		
		30.0 ± 2.0		12.6 ± 0.2		

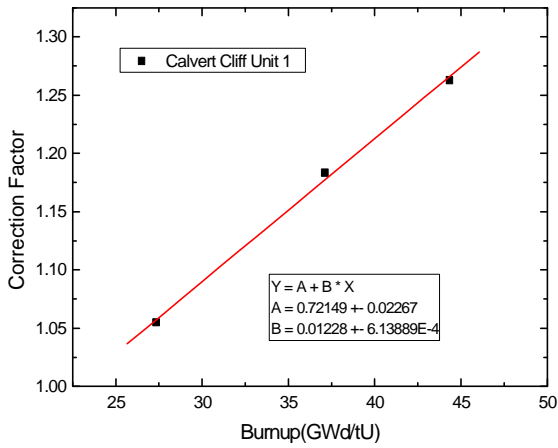


그림 1. $^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$ 의 ORIGEN-S 계산 값에 대한 보정인자.

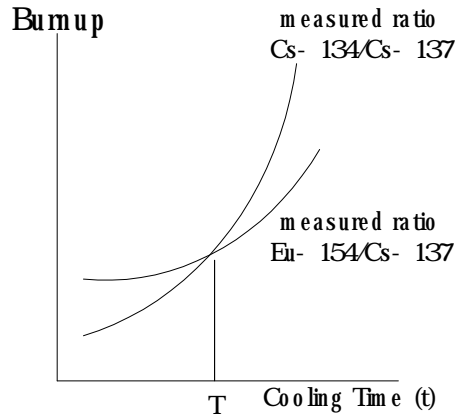


그림 2. 주어진 모니터 핵종의 핵종비를 만족하는 연소도와 냉각시간 사이의 관계.

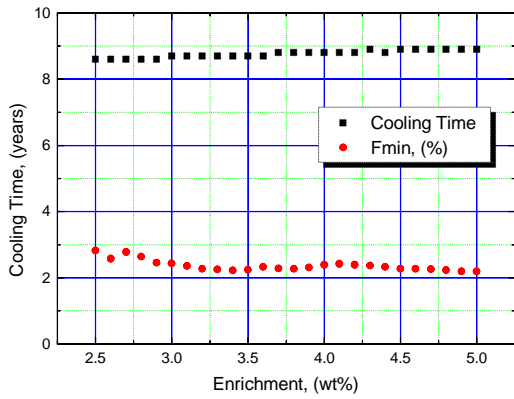


그림 3. J14E11 고리1호기 사용후핵연료봉의 냉각시간 결정.

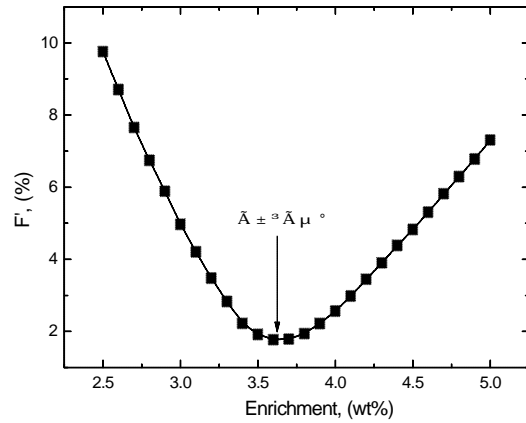


그림 4. J44M5 연료봉의 초기농축도 결정.

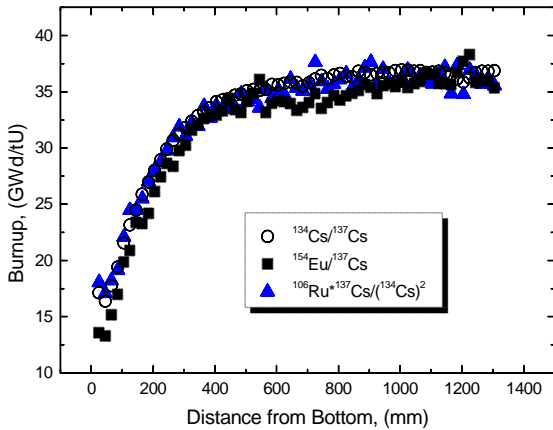


그림 5. J44M5 연료봉의 연소도 분포 결정.

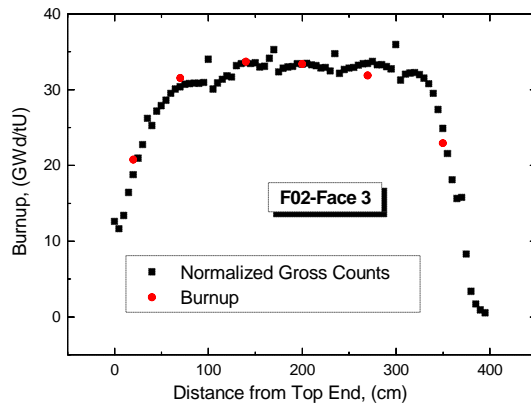


그림 6. F02 핵연료집합체 제 3면의 연소도 분포 결정.