

2001 춘계학술발표회 논문집

한국원자력학회

## 경수로용 균질화 토륨핵연료 이용 방안에 대한 핵연료 경제성 검토

### **An Assessment of Once-through Homogeneous Thorium Fuel Economics for Light Water Reactors**

주형국, 노재만, 유재운

한국원자력연구소

대전광역시 유성구 덕진동 150번지

#### **요 약**

토륨핵연료를 균질화하여 once-through 개념으로 사용하는 방안에 대해 상세한 노심계산을 수행하고, 핵연료의 경제성을 평가하였다. 또한 토륨핵연료 주기의 경제성을 향상시키기 위해 균질화 토륨핵연료집합체를 우라늄핵연료집합체와 노심에 혼용하여 이용하는 방안, 그리고 핵연료 소자내의 연료물질을 반경방향으로 달리 구성하는 방안에 대한 경제성 평가도 수행하였다. 토륨핵연료의 경제성 평가 결과, 주기길이가 18개월인 경우는 우라늄핵연료 보다 경제성이 떨어지는 것으로 나타났으나, 우라늄핵연료와의 혼합노심을 구성하여 이용하는 방안이나 Duplex 개념의 토륨핵연료를 이용하는 방안은 토륨핵연료의 경제성이 현저히 향상되어 장주기에서는 우라늄핵연료보다 경제성이 있는 것으로 평가되었다. 혼합노심 방안과 Duplex 개념을 동시에 활용하면 토륨핵연료의 경제성은 더욱 좋아질 것으로 기대된다.

#### **Abstract**

The fuel economics of an once-through homogeneous thorium fuel concept for PWR was assessed by doing a detailed core analysis. In addition to this, the fuel economics assessment was also performed for two other ways enhancing the economic potential of thorium fuel; thorium utilization in the mixed core with uranium fuel assembly and Duplex thorium fuel concepts. As a results of fuel economics assessment, the thorium fuel cycle does not show any economic incentives in preference to uranium fuel cycle under the 18-months fuel cycle for PWR. However, the utilization of thorium in the mixed core with uranium fuel assembly and Duplex thorium fuel concepts significantly improve the economic potential of thorium fuel cycle and show superior fuel economics to uranium fuel under the longer fuel cycle scheme. The economic potential of once-through thorium fuel cycle is expected to be increased further by utilizing the Duplex thorium fuel in the mixed core with uranium fuel assembly.

## 1. 개 요

토륨 핵연료주기 개발은 과거에는 U-233의 증식을 통한 핵분열물질 자원양의 확대, 핵연료 이용률 향상, U-235의 농축이 필요 없다는 점, 그리고 노심의 잉여반응도가 작다는 장점들 때문에 수행되었다. 그러나 최근에는 핵확산 관점에서 가장 큰 문제가 되고 있는 핵종인 플루토늄 원소의 생성이 적다는 점, 장수명 핵종의 생성이 현저히 줄어드는 점, 재고를 포함한 잉여 플루토늄을 빠르게 소진시키는 능력, 고연소도에 적합한 점 등 핵특성에서의 장점들 외에 높은 용융점과 열전도도에 의한 안전성의 증진 등 핵연료 물성적인 장점이 또 다른 개발의 이유가 되고 있다. 특히 토륨 핵연료주기는 기존의 경수로, 중수로 및 고속로의 노심 설계를 크게 변경하지 않고도 적용할 수 있고, 기존의 상용 우라늄/플루토늄 핵연료주기 기술을 이용할 수 있으며, 그리고 21세기초에 예상되는 우라늄가의 상승 등이 또 다른 개발요인으로 꼽히고 있다.<sup>1,2</sup> 토륨자원을 가장 효과적으로 이용하는 방법은 Th-232로부터 전환이된 U-233을 재처리 공정을 거쳐 다시 핵연료로 이용하는 것이다. 그러나 U-233을 재순환하여 이용하는 것은 핵비확산 정책에 위반되므로 핵비확산 관점에서 재순환이 아닌 once-through 개념의 토륨핵연료 주기가 연구되어 오고 있다.<sup>3-6</sup> 미국의 NERI (Nuclear Energy Research Initiative) 프로그램의 지원으로 추진되고 있는 경수로용 균질화 토륨핵연료 개발도 once-through 개념을 바탕으로 경제성을 확보하는 방향으로 추진하고 있다.<sup>3</sup> 본 논문은 once-through 토륨핵연료 개발과 관련하여 토륨핵연료를 균질화하여 사용하는 방안에 대하여 핵연료 경제성 평가를 목적으로 하였다. 연구 동기는 단순히 토륨핵연료를 균질화하여 once-through로 사용하는 경우에도 경제성이 있다고 평가된 바가 있어,<sup>7</sup> 우리 나라의 여건에서도 이에 대한 타당성을 상세한 계산을 통해 검토하고,<sup>8</sup> once-through 개념의 토륨핵연료 주기의 경제적인 잠재력을 향상시키기 위해 균질화 토륨핵연료집합체를 우라늄핵연료 집합체와 노심에 혼용하여 이용하는 안,<sup>9</sup> 그리고 미국 MIT대학에서 제시한 핵연료 소자내의 연료물질을 반경방향으로 달리 구성하는 안<sup>10</sup>에 대한 평가를 수행하였다.

## 2. 토륨핵연료 집합체 연소 특성

토륨핵연료가 장전된 노심을 분석하기 위하여 HELIOS/MASTER<sup>11</sup> 계산 체계를 이용하였다. 핵연료 집합체의 균정수를 포함한 노달인자는 35개 중성자에너지 그룹으로 HELIOS<sup>12</sup> 계산을 통해 이루어졌다. 노심분석용 노달코드인 MASTER 내의 핵종 연소사슬은 Th-232과 관련핵종인 Pa-233, U-233, 및 U-234에 대한 모형을 포함하도록 확장되어 있어 토륨핵연료에 대한 계산이 가능하다.<sup>13</sup>

본 연구에서 지칭하고 있는 균질화 토륨핵연료란 ThO<sub>2</sub>와 UO<sub>2</sub>가 정해진 비율로

균질하게 혼합된 핵연료인데,  $UO_2$  내의 U-235의 농축도는 19.5%로 일정하도록 고정하였다. 토륨핵연료내에서  $ThO_2$ 이 차지하는 무게비율은 토륨핵연료만으로 노심을 구성하는 방안에서는 75, 70, 65, 60 그리고 55w/o의 5가지를 고려하였으며, 토륨핵연료와 우라늄핵연료를 혼용하여 노심을 구성하는 경우에는 75, 70 및 65w/o의 세 가지 토륨핵연료를 고려하였다. 또한 Duplex 개념의 토륨핵연료에서는 토륨핵연료의 무게 비율이 75, 65 및 55w/o의 세 가지를 고려하였는데, 이는 다른 균질화한 토륨핵연료와는 달리  $ThO_2$ 와  $UO_2$ 가 혼합되어 있지 않고, 핵연료 소자의 반경방향으로 두 지역으로 나누어 내부는  $UO_2$ 가, 그 밖으로는  $ThO_2$ 로 구분된 핵연료이다. 토륨핵연료에 대한 비교 대상으로 100%  $UO_2$  핵연료로 구성된 노심을 참고호기로 선정하였는데, U-235의 농축도는 18개월 주기와 24개월 주기에 적합하도록 설정하였다.

토륨핵연료에 대한 연소특성으로서 연소도별 무한증배계수 및 주요 핵종인 U-233의 변화를 단위 집합체에 대한 연소계산을 통해 분석하였다. U-233의 생성량은 그림1에서와 같이 연소도 70MWD/KgHM 부근에서 최대치에 이르는 것으로 나타나고 있다. U-233은 Th-232로부터 전환되기 때문에 그 생성량은 Th-232의 초기량에 비례하는데, 초기의 heavy metal mass가 1ton일 경우 약 13kg의 전후의 U-233이 존재하는 것으로 나타났다. 그림2는 핵연료별 무한증배계수의 변화를 보여주고 있는데, 연소도 초기에서 토륨핵연료의 반응도는 같은 양의 U-235를 함유한 우라늄핵연료 보다 작으나, 연소가 진행됨에 따라 나타나는 반응도 변화는 우라늄핵연료 보다 완만한 것으로 나타났다. 따라서 핵연료가 노외로 인출되는 연소도인 방출연소도에서 우라늄핵연료 보다 반응도가 크다. 이는 토륨핵연료가 같은 방출연소도의 우라늄핵연료 보다 더 길게 연소될 수 있는 가능성을 의미하며, 토륨핵연료가 장주기 운전 전략에 적합한 핵연료임을 나타낸다. 그러나 노심에 토륨핵연료만을 장전하는 경우에는 주기길이를 늘리는 토륨핵연료의 장점을 제대로 얻을 수가 없다. 그 이유는 새로 장전되는 핵연료가 주기초에 반응도가 상대적으로 작은 토륨핵연료이기 때문에 신핵연료로 부터 얻는 노심의 반응도가 그리 크지 않기 때문이다. 따라서 토륨핵연료와 연소 초기의 반응도가 큰 우라늄핵연료를 함께 사용하여 혼합노심을 구성하고, 토륨핵연료는 고연소도가 가능하도록 4주기 동안 연소시키는 주기전략을 채택함으로써 토륨핵연료의 경제성을 증진시킬 수 있을 것이다. 그림3은 Duplex 개념 토륨핵연료의 무한증배계수의 변화를 균질화 토륨핵연료와 비교하여 나타내었다. 이 그림에서 보듯이 Duplex 개념의 토륨핵연료를 이용하면 주기길이나 연소도를 증가시킬 수 있어 경제적인 이득이 있는 것으로 예상된다.

### 3. 균질화 토륨핵연료 노심 분석

현재 국내에서 가동중인 900MW급 PWR의 노심을 대상으로 토륨핵연료의 경제성 평가를 위한 주기 분석을 수행하였다. 토륨핵연료 노심의 구성은 19.5w/o로 농축된  $UO_2$ 가 25.0 w/o를 차지하고 나머지 75.0 w/o는  $ThO_2$ 인 핵연료만으로 구성된 노심,  $UO_2$ 가 35.0 w/o를 차지하고 나머지 65.0 w/o는  $ThO_2$ 인 핵연료만의 노심, 그리고 위의 두 가지 토륨핵연료 외에도  $UO_2$ 의 분율이 30, 40, 45 w/o의 경우도 고려하였다. 참고 노심인 우라늄핵연료 노심은 18개월 및 24개월의 두 가지 주기길이에 대해 구성되었고, 핵연료 장전은 3-batch 형태를 가정하여, 매주기마다 52개의 핵연료집합체가 교체장전되는 것으로 하였다. 따라서 토륨핵연료 노심도 매주기마다 52개의 핵연료집합체가 교체장전되는 것으로 하였다. 핵연료 교체시 방출되는 핵연료는 주기말에서 반응도가 낮은 순으로 선택하여 교체하였다. 노심의 장전모형 탐색은 가능하면 중성자 저누출 개념에 맞도록 시행착오를 통하여 출력첨두치가 제한치 이내로 유사하도록 핵연료의 위치를 변경하여 수행하였다. 평형노심은 특성상 매주기마다 교체 장전되는 핵연료가 일정한 위치 및 거의 같은 연소이력을 갖게된다. 새로 장전된 핵연료집합체에서 발생하는 높은 출력을 제어하기 위하여 가연성 독봉으로 가돌리니아를 사용하였다. 모든 토륨핵연료 노심에 장전된 핵연료집합체중 일부에는 4개 또는 8개의 가돌리니아봉이 사용되었으며, 18개월주기  $UO_2$  핵연료 노심의 경우에도 가돌리니아봉이 4개 또는 8개가 사용되었다. 그러나 24개월주기의  $UO_2$  노심의 경우는 가돌리니아봉이 12개 또는 20개가 장전된 핵연료집합체가 사용되었다. 가돌리니아봉은  $Gd_2O_3$ 가 4.0 w/o 포함되어 있으며, 나머지는  $^{235}U$ 의 농축도가 1.8 w/o인  $UO_2$ 로 되어있다. 우라늄핵연료 노심에서는 모든 핵연료집합체에 가연성 독봉이 장전된데 반해, 토륨핵연료 노심에서는 비교적 노심 내부에 새로 장전되는 핵연료에만 가돌리니아봉이 장전되어 있다. 각 노심별로 신핵연료에 장전되는 가돌리니아봉의 수는 18개월 주기의 우라늄 노심에는 336개, 24개월 주기의 우라늄 노심에는 880개이다. 그리고 75 w/o 토륨핵연료 노심에는 160개, 나머지 토륨 노심에는 208개의 가돌리니아봉이 사용되었다. 우라늄핵연료 노심 및 토륨핵연료 노심의 주기길이를 사용한 핵연료별로 초기의 U-235의 양에 따라 그림4에 도시하였는데, 토륨핵연료 만으로 구성된 노심의 주기길이는 우라늄 노심보다 짧은 것으로 나타났다. 초기의 U-235의 양이 증가할수록, 즉 노심의 주기길이가 증가할수록 토륨노심의 주기길이는 우라늄 노심의 주기길이에 근접해 가는 경향을 보이고 있다.

### 4. 토륨핵연료-우라늄핵연료 혼합노심 및 Duplex 토륨핵연료 노심 분석

노심의 일부를 토륨핵연료와 우라늄핵연료가 장전된 혼합노심에서 재장전 배취

모형은 우라늄핵연료는 3-batch를 토륨핵연료는 4-batch를 따르는 방식을 하였다. 노심내의 핵연료 장전이 사분면 대칭성을 유지하도록 교체되는 핵연료집합체의 수를 결정하였는데, 매주기마다 우라늄핵연료는 32개, 토륨핵연료는 16개의 핵연료집합체가, 즉 총48개의 핵연료집합체가 교체되도록 하였다. 토륨핵연료에서의 ThO<sub>2</sub>의 함량은 앞에서 설명한바와 같이 75, 70, 및 65w/o의 세가지 경우를 고려하였으며, 나머지를 차지하는 UO<sub>2</sub>내에서의 U-235의 농축도는 19.5w/o로 하였다.

새로 제안한 토륨핵연료와 우라늄핵연료의 혼합노심의 주기길이는 그림4에서 보는바와 같이 우라늄핵연료 노심의 주기길이에 필적하는 것으로 나타났다. 75w/o 및 70w/o의 ThO<sub>2</sub>를 사용한 토륨핵연료 혼합노심은 18개월 주기의 우라늄 노심보다 주기길이가 40-EFPD 및 10-EFPD 짧은 것으로 분석되었으나, 65w/o의 ThO<sub>2</sub>를 사용한 토륨핵연료 혼합노심은 15-EFPD 정도 주기길이가 늘어나는 것으로 분석되었다.

Duplex 토륨핵연료 노심의 주기분석은 선형반응도 모델을 이용하여 수행하였다. 균질화 토륨핵연료 노심분석 결과로부터 핵연료의 연소주기별 출력분담률과 중성자 유출율을 추정된 결과, 핵연료의 출력분담률은 첫 주기는 1.16~1.26, 두 번째 주기는 0.76~0.78, 세 번째 주기는 0.96~1.08의 범위로 나타났으며, 주기말에서 중성자의 누출률은 3.5% $\Delta\rho$ 로 추정되었다. 이를 선형반응도 모델에 추가하여 주기길이를 추정된 결과가 그림4에 수록되어 있다. Duplex개념의 토륨핵연료 노심의 주기길이는 균질화 토륨핵연료 노심 보다 증가하였으며, 우라늄 노심과 비교하면 U-235의 초기 농축도가 7w/o에 해당되는 범위까지는 주기길이가 우라늄핵연료 노심보다 짧으나, 이후는 긴 것으로 나타났다.

## 5. 토륨핵연료 경제성 평가 및 논의

여러 형태의 토륨핵연료 노심에서 우라늄 원광소요량 및 농축에 필요한 SWU (Separative Work Unit) 소요액을 위주로 토륨핵연료의 경제성을 평가하였다.

균질화 토륨핵연료 노심에서 천연우라늄 이용률은 그림5에서 보듯이 핵연료내 U-235의 초기 함량이 5w/o에 해당하는 경우 약 4.3 MWD/KgU<sub>nat.</sub>로 우라늄 노심의 5.25 MWD/KgU<sub>nat.</sub> 보다 떨어지는 것으로 나타났다. 그러나 주기길이가 증가할수록, 즉 초기의 U-235의 함량이 늘어갈수록 우라늄 노심의 천연우라늄 이용률은 떨어지는 반면에 토륨핵연료의 천연우라늄 이용률은 증가하므로써 약 7w/o의 U-235 농축도의 경우 서로 같아지며, 이후에는 토륨핵연료의 천연우라늄 이용률이 우라늄핵연료 보다 높아지게 된다. 토륨핵연료를 우라늄핵연료와 혼합노심을 구성하여 이용하는 경우나 Duplex 개념으로 이용하는 경우는 우라늄이용률이 현저히 증가하는 효과를 보이고 있다.

균질화 토륨핵연료의 SWU의 이용률은 그림6과 같이 핵연료내 U-235의 초기 함량이 5w/o에 해당하는 경우 약 4.5 MWD/SWU-Kg으로 우라늄 노심의 7 MWD/SWU-Kg 보다 현저히 떨어진다. 초기의 U-235의 함량에 따른 SWU 이용률의 변화는 천연우라늄 이용률과 마찬가지로 U-235의 함량이 증가할수록 우라늄 노심의 SWU 이용률은 떨어지는 반면에 토륨핵연료의 SWU 이용률은 증가하나 본 연구의 U-235 함량의 범위내에서는 항상 우라늄핵연료의 SWU 이용률이 큰 것으로 나타났다. 토륨핵연료를 Duplex 개념으로 이용하는 경우 SWU 이용률이 증가하고 있으며, 우라늄핵연료와 혼합노심을 구성하여 이용하는 방안은 토륨핵연료만을 사용하는 경우보다는 SWU 이용률이 현저히 증가하여 우라늄핵연료의 SWU 이용률 보다 약간 낮은 값을 보이고 있다. 토륨핵연료에서 SWU의 이용률이 감소하는 것은 seed 물질인  $UO_2$ 에서 U-235의 농축도가 19.5%로 높기 때문이다.

각 토륨핵연료 이용방안에 대해 우라늄 원광소요량 및 농축에 필요한 SWU 소요액을 위주로 토륨핵연료의 경제성을 평가한 결과를 그림7에 수록하였다. 여기서 우라늄원광의 구매가 및 SWU 단가는 1994년에 발간된 OECD/NEA의 핵연료 주기 경제성 평가에서 사용한 금액인 50 US \$/KgU 및 110 US \$/SWU-Kg을 가정하였다[14]. 18개월 주기에 해당하는 균질화 토륨핵연료의 원광소요량 및 농축에 필요한 SWU 소요액은 MWD당 35.5 US \$로 같은 U-235의 함량을 갖는 우라늄핵연료의 25.5 US \$/MWD 보다는 높은 비용이 드는 것으로 평가되었다. 그러나 장주기로 갈수록 그 차이는 좁혀지는 것으로 나타났다. 18개월 주기에 해당하는 경우의 Duplex 개념의 토륨핵연료 이용방안의 원광 및 SWU 소요액은 31 US \$/MWD로, 우라늄핵연료와의 혼합노심 이용방안은 27 US \$/MWD로 경제성이 증대되었다. Duplex 개념의 토륨핵연료의 경우 U-235의 초기 함량을 7.0 w/o 이상을 사용하는 경우는 우라늄핵연료 보다 핵연료 경제성이 있는 것으로 보이며, 혼합노심을 구성하여 이용하는 방안은 5.5 w/o부터 우라늄핵연료 보다 핵연료 경제성이 있는 것으로 판단된다. 토륨핵연료에서 가연성 독봉의 소요량이 적은 것이 하나의 장점인데, 가연성독봉 구매비용을 고려하면 토륨핵연료의 경제성이 약간 증대될 것이다.

once-through 주기에서 여러 가지 토륨핵연료 이용방안에 대하여 토륨핵연료의 경제성을 평가해본 결과 주기길이가 18개월인 경우는 우라늄핵연료 보다 경제성이 떨어지는 것으로 나타났다. 그러나 우라늄핵연료와의 혼합노심을 구성하여 이용하는 방안이나, Duplex개념의 토륨핵연료를 이용하는 방안은 토륨핵연료의 경제성이 현저히 향상되어 장주기에 있어서 우라늄핵연료보다 경제성이 있는 것으로 평가되었다. 혼합노심 방안과 Duplex 개념을 동시에 활용하면 토륨핵연료의 경제성은 더욱 좋아질 것으로 기대된다.

## 감사의 글

본 연구는 과학기술부가 지원하는 원자력연구개발 프로그램의 일환으로 수행됨.

## 참고 문헌

1. M.Lung, A Present Review of The Thorium Nuclear Fuel Cycles, Nuclear Science and Technology, European Commission, 1997.
2. Thorium Based Fuel Options for the Generation of Electricity: Developments in the 1990s, IAEA-TECDOC-1155, International Atomic Energy Agency, Vienna, May 2000.
3. US DOE NERI Abstract, Advanced Proliferation Resistant, Lower Cost, Uranium-Thorium Dioxide Fuels for Light Water Reactors, Proposal No. 99-0153, 1999.
4. US DOE NERI Abstract, Optimization of Heterogeneous Schemes for the Utilization of Thorium in PWRs to Enhance Proliferation Resistance and Reduce Waste, Proposal No. 2000-014, 2000.
5. US DOE NERI Abstract, Fuel for Once-Through Cycle (Th,U)O<sub>2</sub> in a Metal Matrix, Proposal No. 99-0095, 1999.
6. US DOE NERI Abstract, A Proliferation Resistant Hexagonal Tight Lattice BWR Fuel Core Design for Increased Burnup and Reduced Fuel Storage Requirements, Proposal No. 99-0164, 1999.
7. J.S. Herring, P.E. MacDonald, "Advanced, Lower Cost, Proliferation Resistant, Uranium-Thorium Dioxide Fuels for LWRs," Transactions of ANS, Vol(30), 1999.
8. 주형국 외, "가압경수로용 균질화 토륨핵연료 노심 핵특성 분석 및 핵연료 경제성 평가," KAERI/TR-1687/2000, 한국원자력연구소, 2000.
9. H-K Joo et al., "An Enhancement of Economic Potential of Homogeneous Thorium Fuel for PWR by Utilizing the Mixed Core with Uranium Fuel Assembly," (to be published in GLOBAL2001), 2001.

10. M.S.Kazimi et al., "Advanced Fuel for High Burnup and Proliferation Resistance in Light Water Reactors," MIT-NFC-TR-024 Rev.1, Massachusetts Institute of Technology, July 2000.
11. B.O.Cho et al., "MASTER-2.0: Multi-purpose Analyzer for Static and Transient Effects of Reactors," KAERI/TR-1211/99, Korea Atomic Energy Research Institute, 1999.
12. R.Stammler et al., "User's Manual for HELIOS," Scandpower, 1994.
13. C.H.Lee et al., "Verification of Extended Nuclide Chain of MASTER with CASMO-3 and HELIOS," KAERI/TR-947/98, Korea Atomic Energy Research Institute, 1998.
14. The Economics of the Nuclear Fuel Cycle, OECD/NEA, 1994.

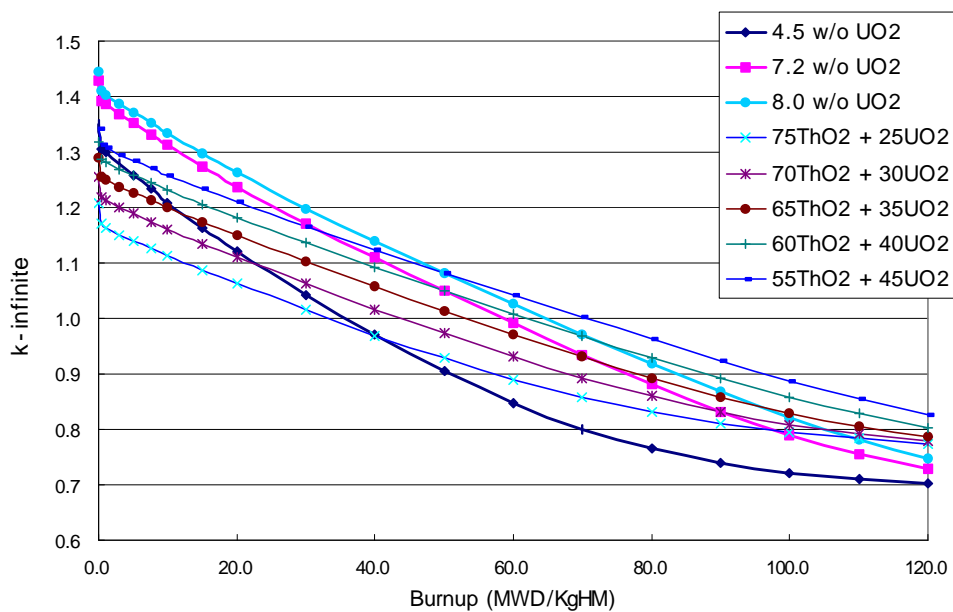


그림1 토륨핵연료 및 우라늄핵연료의 연소도별 무한증배계수 변화



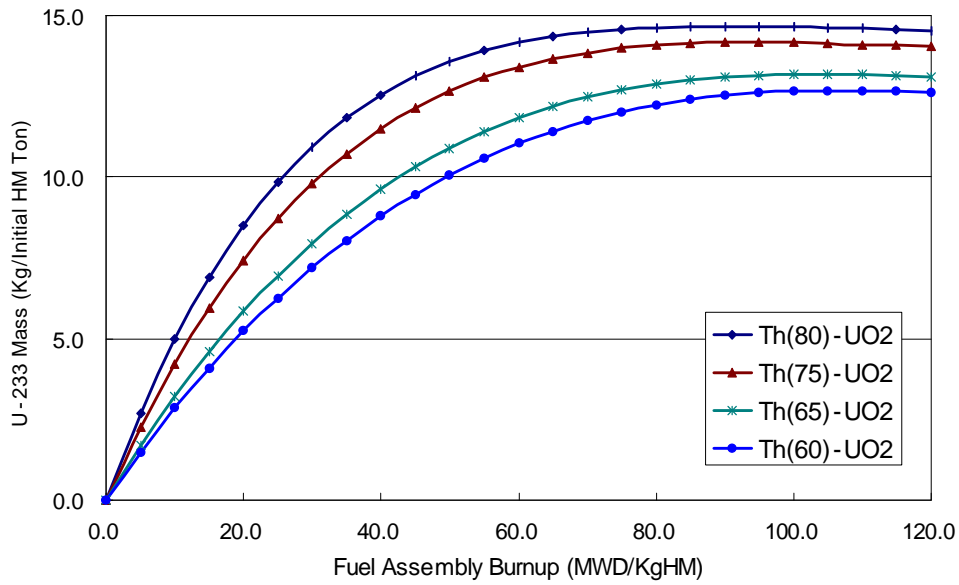


그림2 핵연료별 U-233 원소 존재량 변화

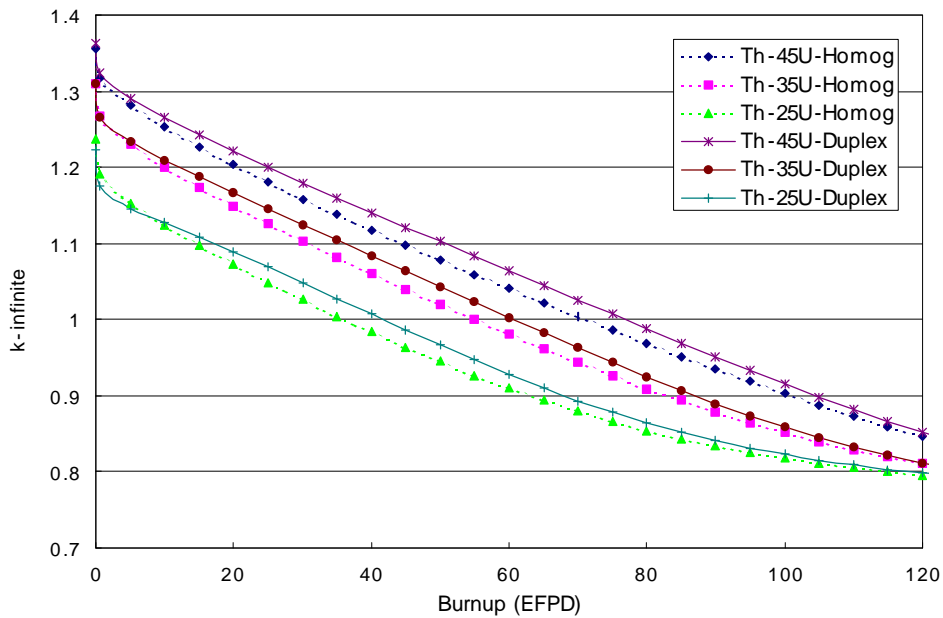


그림3 균질화 토륨핵연료 및 Duplex 개념 토륨핵연료의 무한증배계수 변화

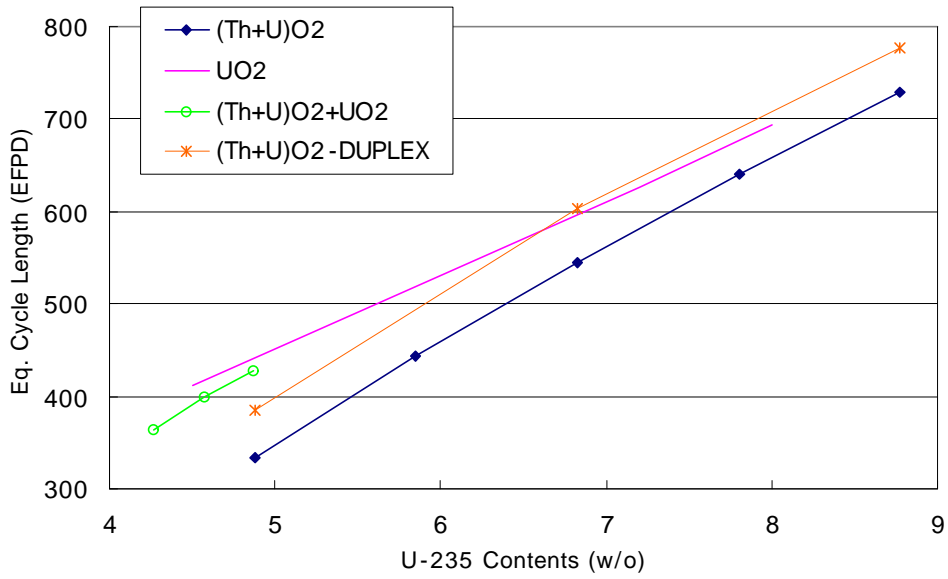


그림4 각 노심별 U-235 함량에 따른 평형 주기길이(EFPD) 변화

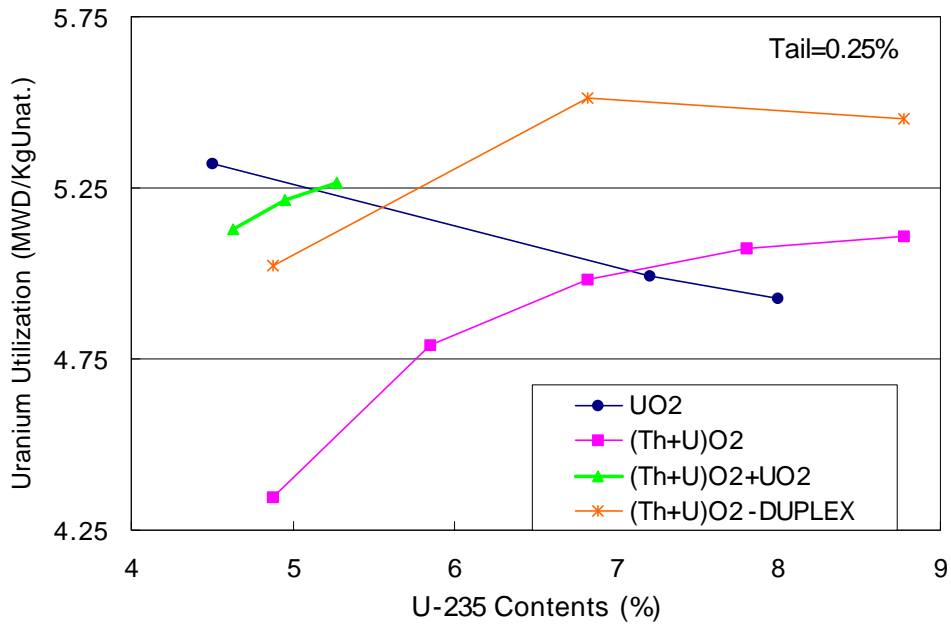


그림5 핵연료별 Uranium Utilization 변화

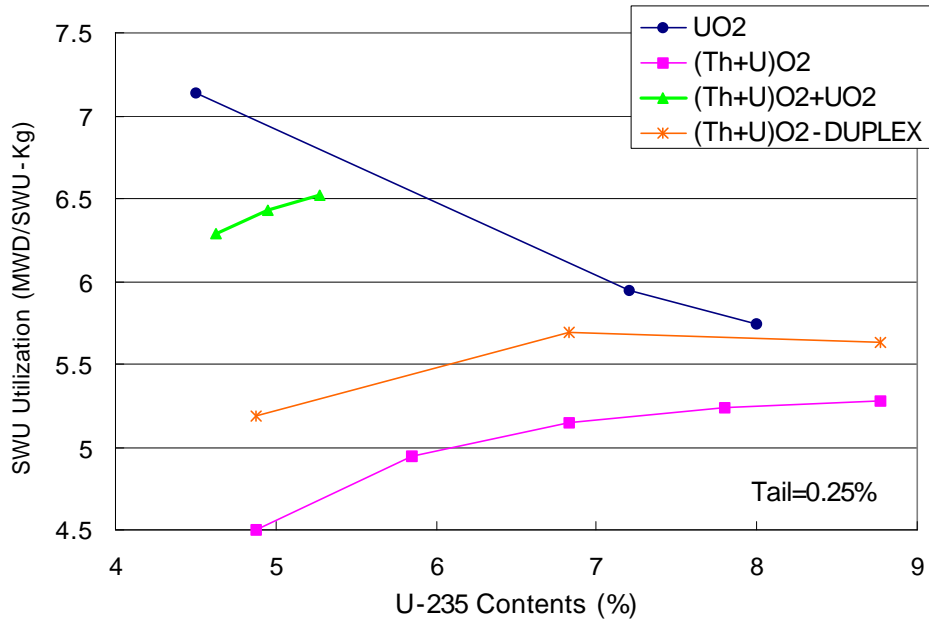


그림6 핵연료별 SWU Utilization 변화

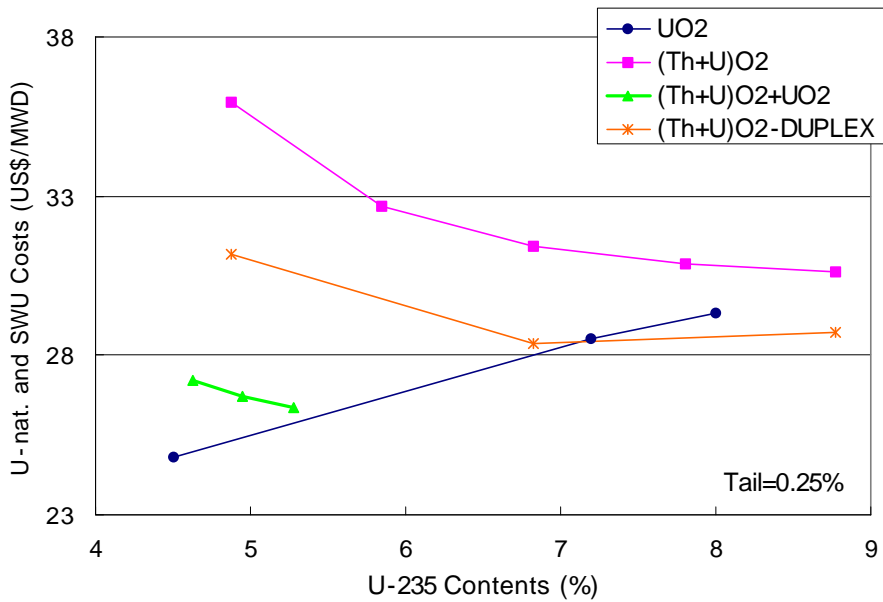


그림7 핵연료별 MWD당 우라늄 원광 및 SWU 소요액 변화