

## 경수로용 비순환 토륨핵연료 이용 방안 특성 평가

### An Evaluation of Once-through Homogeneous Thorium Fuel Cycle for Light Water Reactors

주형국, 노재만, 유재운  
한국원자력연구소  
대전광역시 유성구 덕진동 150번지

#### 요약

균질화 토륨핵연료 외의 토륨핵연료를 달리 이용하는 방안에 대한 경제성을 검토하였다. 즉 seed인 U-235의 농축도를 낮추는 방안, ThO<sub>2</sub>와 UO<sub>2</sub>를 핵연료소자에서 지역적으로 분리하는 duplex 개념 이용 방안, 균질화 토륨핵연료집합체를 우라늄핵연료집합체와 노심에 혼용하여 이용하는 방안, 그리고 토륨핵연료를 blanket 개념으로 이용하는 방안들이 검토되었다. 토륨핵연료의 경제성 평가 결과, 균질화 토륨핵연료에 비해서는 경제성이 향상되는 것으로 나타났으나, 우라늄핵연료의 경제성에는 미치지 못하는 것으로 평가되었다. 핵확산 저항성 관점에서는 무엇보다도 토륨핵연료가 플루토늄 원소의 생성량이 현저히 줄어드는 장점이 있음을 확인하였다. 비록 현 시점에서 토륨핵연료의 경제성은 없지만 앞으로 우라늄 가격이 상승하는 경우나 잉여 플루토늄의 소모를 촉진시키는 면에서는 활용이 가능하다.

#### Abstract

The other ways enhancing the economic potential of thorium fuel has been assessed ; the utilization of lower enriched uranium in thorium-uranium fuel, duplex thorium fuel concept, thorium utilization in the mixed core with uranium fuel assembly and thorium blanket utilization in the uranium core. The fuel economics of the proposed ways of thorium fuel increased compared to the previous homogeneous thorium fuel cycle. Compared to uranium fuel cycle, however, they do not show any economic incentives. From the view of proliferation resistance potential, thorium fuel option has the advantage to reduce the inventory of plutonium production. Any of proposed thorium options are less economical than uranium fuel option, the thorium fuel option has the potential to be utilized in the future for the sake of the effective consumption of excessive plutonium and the preparation against the using up of uranium resource.

## 1. 개 요

핵확산 저항성의 증대, 장수명 핵종의 생성이 감소하여 환경에 미치는 영향의 감소, 잉여 플루토늄을 빠르게 소진시키는 능력, 고연소도에 적합한 점 등 핵특성에서의 장점들 외에 높은 용융점과 열전도도에 의한 안전성의 증진 등은 토륨핵연료 개발에 대한 매력들이다.<sup>1,2</sup>

이전에는 자원을 가장 효과적으로 이용하는 방법이 주요시되어 토륨핵연료의 개발 방향은 Th-232로부터 전환된 U-233을 재처리하여 다시 핵연료로 이용하는 방안을 토대로 이루어졌다. 그러나 최근에는 핵확산 저항성이 핵연료나 원자로의 개발에 있어서 고려하여야 할 중요한 조건 중에 하나로서 U-233을 재순환하는 개념을 이용한 핵연료개발은 정책적으로 용인되지 않고 있다. 따라서 토륨핵연료에 관한 연구 개발도 핵비확산 관점에서 재순환이 아닌 once-through 개념으로 수행되고 있다.<sup>3~6</sup>

본 논문은 once-through 토륨핵연료 개발과 관련하여 이전에 수행한 토륨핵연료를 균질화하여 사용하는 방안의<sup>7,8</sup> 핵연료 경제성을 제고시키려는 목적으로 몇 개의 대안을 제시하고 이들에 대해 경제성 및 핵확산 저항성을 평가하였다. 대안으로서는 seed로 이용되는 UO<sub>2</sub>의 농축도를 낮추어 사용하는 방안, 핵연료 소자내의 연료물질을 반경방향으로 달리하는 duplex 개념<sup>9</sup>, 토륨핵연료 집합체를 우라늄핵연료와 동일 노심에 함께 사용하는 방안<sup>10</sup>, 그리고 토륨 핵연료집합체를 노심의 가장자리에 blanket으로 이용하는 방안들이다.

## 2. 우라늄핵연료 노심 및 균질화 토륨핵연료 노심 분석

토륨핵연료 주기가 경제성을 갖느냐에 대한 평가는 기존의 우라늄핵연료 주기에 대한 상대적인 평가로 나타나기 때문에 먼저 참고 노심인 우라늄핵연료 노심을 구성하고 이에 대한 분석을 수행하였다. 노심의 특성 및 주기 분석을 위하여 현재 국내 가압경수로의 주종을 이루고 있는 900MW급 노심을 대상 노심으로 선정하였다. 주기길이가 경제성에 미치는 영향을 고려하기 위하여, 대략 18개월 및 24개월의 두 가지 주기길이를 갖는 노심을 구성하였으며, 이때 장전되는 우라늄핵연료의 농축도는 4.5w/o 및 7.2w/o로 하였다. 이 농축도는 정확히 18개월 및 24개월 주기길이에 해당되는 것은 아니나, 미국의 토륨 관련 NERI 프로그램을 수행하는 측에서 분석한 결과와 비교하기 위하여 그들이 사용한 값을 사용하였다. 문헌에 따라서는 24개월 주기에 해당하는 농축도를 8.0w/o로 가정한 것도 있어,<sup>11</sup> 본 연구에서도 8.0w/o로 농축된 우라늄 노심을 추가로 구성하고 이에 대한 분석도 수행하였다. 참고 노심에 장전되는 핵연료집합체의 수는 157개로서 가장 보편적인 핵연료 장전 전략인 3-batch 형태를 가정하므로써 매주기마다 52개의 핵연료집합체가 교체 장전되

는 것으로 하였다. 핵연료 교체시 방출되는 핵연료는 주기말에서 반응도가 낮은 순으로 선택하여 교체하였다. 노심의 장전모형 결정은 가능하면 중성자 저누출 개념에 맞추어 출력첨두치가 제한치 이내로 유사하도록 핵연료의 위치를 변경하여 수행하였다. 평형노심은 특성상 매주기마다 교체 장전되는 핵연료가 일정한 위치 및 거의 같은 연소이력을 갖게되는데 24개월 주기의 경우 우라늄핵연료 평형노심의 장전 모형은 그림1과 같다. 노심의 출력분포를 제어하기 위한 가연성 독봉으로는 가돌리니아봉을 사용하였다. 가돌리니아봉은  $Gd_2O_3$ 가 4.0 w/o 포함되어 있으며, 나머지는 U-235의 농축도가 1.8 w/o인  $UO_2$ 로 구성되어있다. 18개월 주기 우라늄핵연료 노심에서는 가돌리니아봉이 4개 또는 8개가 장전된 핵연료집합체가 사용되었으나, 24개월주기의 우라늄핵연료 노심의 경우는 새로운 핵연료집합체에서의 출력이 상대적으로 높기 때문에 12개 또는 20개로 보다 많은 수의 가돌리니아봉이 장전된 핵연료집합체가 사용되었다. 18개월 주기 노심에는 총 336개, 24개월 주기 노심에는 총 880개의 가돌리니아봉이 신핵연료 집합체에 장전되어 이용되었다. 참고 노심인 우라늄핵연료 노심의 주기길이는 4.5, 7.2 및 8.0w/o의 농축도에 따라 412, 626, 693 EFPD로 분석되었다. 이 경우 각 핵연료집합체의 배치별 평균 연소도는 49, 75 및 83MWD/KgU를 갖는 것으로 분석되었다.

균질화 토륨핵연료는 핵연료집합체 내의 모든 핵연료봉 및 이를 구성하는 핵연료 소자가 같은 비율의  $ThO_2$ 와  $UO_2$ 로 균질하게 혼합되어 있어 지역적으로 구분되지 않는 핵연료이다. 본 연구에서  $UO_2$  내의 U-235의 농축도는 19.5w/o로 가정하였다. 균질화 토륨핵연료는  $ThO_2$ 이 차지하는 무게분율이 75, 70, 65, 60 그리고 55w/o인 경우에 대해  $UO_2$ 의 무게분율이 각각 25, 30, 35, 40 및 45w/o인 다섯 종류의 핵연료를 고려하였으며, 각 핵연료만으로 별도의 노심을 구성하였다.

토륨핵연료 노심에서도 우라늄 노심과 마찬가지로 매주기마다 52개의 핵연료집합체를 교체장전 하였으며, 중성자 누출이 적은 장전 모형을 적용하고, 가연성 독봉으로는 가돌리니아를 사용하였다. 그림2는 토륨핵연료 장전 노심의 평형주기에서의 핵연료 장전모형을 보여주고 있는데, 토륨핵연료집합체중 일부에는 4개 또는 8개의 가돌리니아봉이 사용되었다. 우라늄핵연료 노심에서는 모든 핵연료집합체에 가연성 독봉이 장전된데 반해, 토륨핵연료 노심에서는 비교적 노심 내부에 새로 장전되는 핵연료에만 가돌리니아봉이 장전되어 있다. 이는 토륨핵연료의 연소도에 따른 반응도 변화율이 우라늄핵연료와 비교하여 작기 때문에 연소도가 작은 핵연료와 큰 핵연료집합체의 출력 차이가 심하지 않아 비교적 적은 수의 가연성독봉이 필요하게 된다. (75w/o  $ThO_2$  + 25w/o  $UO_2$ ) 토륨핵연료 노심에서는 160개의 가돌리니아봉이,

나머지 토륨핵연료 노심에는 208개의 가돌리니아봉이 사용되었다.

균질화 토륨핵연료 노심의 주기길이는  $\text{ThO}_2$ 의 무게분율이 75, 70, 65, 60, 55w/o 인 핵연료에 대해 각각 333, 443, 545, 640, 728 EFPD로 분석되었다. 이 경우 각 핵연료집합체의 배치별 평균 연소도는 42, 56, 69, 80 및 91MWD/KgU를 갖는 것으로 나타났다.

우라늄핵연료 노심 및 토륨핵연료 노심의 연소도별 임계붕산 농도의 변화는 그림 3과 같다. 그림3에서 나타난 각 노심별 주기길이를 핵연료별로 초기의 U-235양에 대해 나타내면 그림4와 같은데 균질화 토륨핵연료 노심의 주기길이는 우라늄 노심보다 짧은 것으로 나타났다. 그러나 토륨핵연료 노심에서는 초기의 U-235의 양에 따라 노심의 주기길이가 증가하는 변화율은 우라늄 노심보다 크기 때문에, U-235의 양이 증가할수록 우라늄 노심의 주기길이에 근접해 가는 경향을 보이고 있다.

그림5는 토륨핵연료 노심의 핵연료 온도계수는 우라늄 노심의 핵연료 온도계수보다 음의 값을 갖는다는 사실을 뚜렷하게 보여주고 있는데, 이는 Th-232의 유효공명적분이 우라늄핵연료의 주 원소인 U-238의 값의 1/3 정도로 작아서 온도 변화에 의한 영향을 크게 받기 때문이다. 그림6과 7은 각 노심의 감속재온도 계수와 붕산 계수를 보여주고 있는데, 핵연료에 따른 특징은 크게 구별되어 나타나지 않는다. 표 1은 제어봉가를 보여주고 있는데 마찬가지로 우라늄 노심에서의 제어봉가와 유사한 값을 나타내고 있다.

표2는 우라늄노심과 토륨핵연료 노심이 각 주기별 생성 에너지, 핵연료의 장전량 및 주기비 인자를 보여주고 있다. 균질화 토륨핵연료 노심에서 천연우라늄 이용률은 우라늄 노심보다 떨어지며, 특히 SWU 이용률은 현저히 떨어지는 것으로 나타났다. 그러나 주기길이가 증가할수록, 즉 초기의 U-235의 함량이 늘어갈수록 우라늄 노심의 천연우라늄 이용률 및 SWU 이용률은 떨어지는 반면에 토륨핵연료 노심에서는 모두 증가하고 있어 두 핵연료사이의 차이는 줄어든다.

### 3. 균질화 핵연료외의 토륨핵연료 대안 검토

앞 절에서 균질화 토륨핵연료를 이용하는 방안은 우라늄핵연료의 노심 특성과는 커다란 차이를 나타내지 않아 핵특성면에서 양립성을 확보하고 있으나, 경제성은 크게 떨어지는 단점을 나타내었다. 따라서 본 절에서는 토륨핵연료의 경제성을 제고하는 관점에서 균질화 핵연료외의 토륨핵연료의 다른 대안에 대하여 검토하였다.

#### 3.1 저농축 우라늄 seed 이용

균질화 토륨핵연료 이용안에서 토륨핵연료의 경제성을 악화시키는 큰 요인 중 하나는  $\text{UO}_2$ 의 농축도이다. 즉 토륨핵연료에 핵분열물질로 이용되는 U-235의 농축도

는 보편적인 우라늄핵연료의 농축도인  $\sim 4\text{w/o}$  보다 훨씬 높은  $19.5\text{w/o}$ 를 가정하고 있다. 이는 토륨핵연료의 대부분이 핵분열성이 없는 Th-232로 구성되므로서 필요한 핵분열 물질을 확보하기 위하여 비교적 고농축의 우라늄을 사용하기 때문이다. 그런데 우라늄의 농축도에 따라 필요한 우라늄의 원광량과 SWU는 비교적 저농축도에서는 선형적으로 변하지 않는다. 이 말은 그림8에서 보는 바와 같이 단위 농축도당 우라늄의 원광량과 SWU 소요량의 변화가 농축도가 낮을수록 적어진다. SWU소요량에서  $20\text{w/o}$  농축도에서의 값을 기준으로 할때  $10\text{w/o}$  농축도인 경우는 90%,  $7\text{w/o}$  농축도의 경우는 85% 수준으로 감소하고 있다. 이는  $20\text{w/o}$ 로 농축된 우라늄을 이용하는 것보다는  $10\text{w/o}$  농축도의 우라늄을 이용하는 것이 SWU 소요량을 10% 가량 절감할 수 있다는 말이 된다. U-235의 농축도를 낮추므로서 부족한 U-235의 필요량을 맞추기 위해서는 토륨핵연료에서의  $\text{UO}_2$ 가 차지하는 비율을 증가시켰다.

U-235의 농축도를 낮추어 사용하는 안에 대해 18개월 및 24개월 주기 노심에 대한 분석을 수행하고, 그 결과인 주기길이 및 핵연료 주기비 구성 인자를 표3에 나타내었다. 이 표에서 보듯이  $10\text{w/o}$  농축도를 사용하는 경우는  $19.5\text{w/o}$  농축 우라늄을 사용하는 경우 보다 핵연료비를 12~18% 절감하는 것으로 나타났다. 농축도를 낮출수록 핵연료비는 더욱 절감이 되나, 이는 우라늄핵연료의 구성비가 증가하게 되므로 토륨이 이용될 수 있는 입지가 줄어들게 되어 토륨핵연료로서의 명목이 무색해지는 면이 있다.

### 3.2 Duplex 핵연료 개념 이용

균질화 토륨핵연료에서는 Th-232로부터 전환되는 U-233은 핵연료의 일부를 구성하고 있는 U-238과는 지역적으로 분리되어 있지 않다. 그런데 U-233과 U-238 핵종은  $6.67\text{eV}$  부근에서 각각 fission resonance 및 capture resonance를 가지고 있다. 따라서 토륨핵연료내의 핵분열성 원소인 U-233은 U-238의 resonance shielding 효과 때문에 핵분열반응에 효과적으로 이용되지 못하고 있다. 이와 같은 resonance의 중첩을 피하기 위하여 핵연료소자를 반경방향으로 나누어 핵연료 내부 지역에는 이산화우라늄을, 핵연료 외부에는 이산화 토륨을 지역적으로 분리하는 duplex 개념의 핵연료가 미국의 NERI 과제에서 고안되었다. duplex 핵연료의 특성을 평가하기 위해 핵연료소자 내의 핵연료 물질의 구성비 및 양을 균질화 토륨핵연료와 같도록 하기 위하여  $\text{ThO}_2$ 와  $\text{UO}_2$ 의 무게비는 75:25 및 65:35로 만들고  $\text{UO}_2$ 내의 U-235의 농축도는 마찬가지로 19.5%로 하였다. duplex 핵연료의 연소도별 무한증배계수 계산 결과는 균질화 핵연료와 비교하여 약 10% 이상의 연소도 증가 효과를 나타냈다.

duplex 핵연료의 경제성은 표4에서 보는 바와 같이 우라늄의 이용률이나 SWU의 이용률의 개선은 이루어졌다. 그러나 핵연료의 소자를 반경방향으로 두 지역으로 나눔으로서 핵연료의 가공의 어려움과 공정의 복잡성을 가져온다. 따라서 이는 핵연료 가공비의 증가를 가져올 것으로 보여 전체적인 경제성의 향상을 가져오기는 어렵다. 더군다나 이 핵연료는 초기에  $UO_2$  영역에서 생성하는 출력이 매우 높기 때문에 핵연료의 안전성을 확보해야 하는 또 다른 어려움을 내포하고 있다.

### 3.3 혼합노심 이용방안

균질화 토륨핵연료에서 U-233의 생성량은 연소도가 70MWD/KgHM 부근에서 최대치에 이르러 이후에는 거의 포화된다. 또한 연소 초기에서 토륨핵연료의 반응도는 같은 양의 U-235를 함유한 우라늄핵연료 보다 작으나, 연소가 진행됨에 따라 나타나는 반응도 변화는 우라늄 핵연료 보다 완만한 것으로 나타났다. 따라서 방출연소도에서는 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 토륨핵연료 만을 장전하는 경우에는 주기길이를 늘리는 토륨핵연료의 장점을 제대로 얻을 수가 없다. 그 이유는 새로운 토륨핵연료의 주기초에 반응도가 상대적으로 작아서 신핵연료로 부터 얻는 노심의 반응도가 크지 않기 때문이다. 따라서 토륨핵연료와 연소 초기의 반응도가 큰 우라늄핵연료를 함께 사용하여 혼합노심을 구성하고, 토륨핵연료는 고연소도가 가능하도록 4주기 동안 연소시키는 주기전략을 채택하므로써 토륨핵연료의 경제성을 증진시킬 수 있을 것으로 예상된다. 그림9는 혼합노심의 개념을 나타내는 것으로 blanket에 가까운 토륨핵연료 집합체를 seed 개념에 가까운 우라늄핵연료 집합체와 한 노심에서 지역적으로 달리한다는 면에서는 seed와 blanket의 분리된 비균질 토륨핵연료의 이용방안과 유사한 개념이다. 전형적인 seed와 blanket으로 구분되는 비균질 토륨핵연료 이용방안과 다른 점은 토륨핵연료집합체의 노심내의 장전 위치가 정형화되어 있지 않다는 점과 노심내에서의 연소기간이 4주기로 다른 두 비균질 토륨핵연료 개념의 9~10주기 보다 짧다는 점이다.

토륨핵연료와 우라늄핵연료가 함께 섞여 장전된 혼합노심에 대한 분석에서 우라늄핵연료는 3-batch, 토륨핵연료는 4-batch의 형식에 따라 핵연료를 재장전하는 방식을 따랐다. 교체되는 핵연료집합체의 수는 노심내의 핵연료 장전이 사분면 대칭성을 유지하도록 매주기마다 우라늄핵연료는 32개, 토륨핵연료는 16개의 핵연료집합체가, 즉 총48개의 핵연료집합체가 교체되도록 하였다. 우라늄핵연료집합체의 농축도는 우선 18개월 주기만을 고려하여 4.5w/o를 사용하였으며, 토륨핵연료에서의

ThO<sub>2</sub>의 함량은 75, 70, 및 65w/o의 세 가지 경우를 고려하였다. 토륨핵연료에서의 UO<sub>2</sub>내의 U-235의 농축도는 19.5w/o로 하였다.

혼합노심의 주기길이는 ThO<sub>2</sub>의 함량이 75, 70 및 65w/o인 경우 각각 365, 399 및 427 EFPD로 나타났으며, 핵연료의 경제성은 표5에서 보는 바와 같이 우라늄의 이용률이나 SWU의 이용률의 개선이 이루어졌다. 본 혼합 노심 개념 분석에서 유리한 점의 하나는 표5에서와 같이 주기별로 발생하는 사용후핵연료의 양이 줄어든다는 점이다. 사용후핵연료를 처리하기 위해 소요되는 경비를 감안한다면 혼합 노심의 경제성 향상은 더욱 제고될 것이다.

### 3.4. Blanket으로의 토륨핵연료 이용안

노심의 경계인 가장자리에 위치한 핵연료집합체의 출력은 노심 평균출력의 약 40~70% 수준으로 비교적 노심 내부의 핵연료집합체 보다는 출력생성률 및 그 중요도가 떨어진다. 900MWe 노심의 경우 총 157개의 핵연료집합체중 36개가 노심주변에 위치한다. 따라서 이 36개의 자리에 토륨핵연료집합체를 10주기 이상 장기간 장전함으로써 노심에 소요되는 핵연료의 양을 줄이고 노심 밖으로의 중성자누출을 효과적으로 줄이는 반사체 내지는 blanket 개념으로 이용하는 방안이다. 노심내에 36개의 토륨 blanket 집합체를 장전하는 경우 이외에도 24개 및 16개의 토륨 blanket을 사용하는 경우도 분석하였다. 토륨 blanket이 장전되는 노심의 가장자리 이외의 내부는 우라늄핵연료가 장전되는 것으로 하였다. 이 우라늄핵연료의 재장전 전략은 16, 24개 및 36개의 토륨 blanket을 이용하는 각각의 경우에 매 주기별로 48, 44, 40개의 핵연료 집합체가 교체되도록 하였다. 토륨blanket에 대한 개념 분석에서 사용된 우라늄핵연료의 농축도는 참조 노심에서 사용하였던 4.5%를 사용하였고, 토륨 blanket의 구성은 75%가 이산화토륨으로 되었으며, 나머지 25%는 4.5%농축도의 이산화 우라늄으로 되어있다. 따라서 토륨 blanket 핵연료집합체의 U-235의 평균 함량은 약 1.2w/o 정도로 하였다. 토륨 blanket에서 이와 같이 소량이나마 fissile 원소를 포함하도록 한 것은 토륨 집합체에서도 출력을 어느 정도 발생토록 하여 노심 내부에 위치한 집합체에서의 출력이 너무 높지 않도록 하기 위함이다.

토륨 blanket 노심의 주기길이는 토륨 blanket 집합체를 36, 24, 16개 사용하는 경우 각각 339, 367 및 395 EFPD로 나타났으며, 핵연료의 경제성은 표6에서 보는 바와 같이 우라늄의 이용률이나 SWU의 이용률과 유사한 값을 보여주고 있다. 이는 노심 출력의 대부분을 우라늄핵연료가 생성하고 있으며 실제적인 핵연료 재장전도 우라늄 노심과 거의 같기 때문이다. 주기길이도 매 주기 교체되는 핵연료집합체의 수가 적음으로 짧게 나타나고 있다.

#### 4. 핵확산 저항성 관점에서의 토륨핵연료

핵확산 저항성에 대한 평가는 핵무기로 사용될 수 있는 핵연료 물질의 양 및 질을 따져서 평가한다. 핵물질들이 핵무기로 전용되는 것을 막는 방법은 IAEA의 규제와 같이 제도적인 장치도 있지만, 핵연료 주기 자체가 갖는 핵연료 물질의 성질이 핵무기용으로 사용 가능한가를 따지는 것이 핵확산저항성에 대한 평가라 할 수 있다. 임계질량 (Critical Mass), 자발적핵분열률 (Spontaneous neutron generation), 방사성붕괴열 생산률 (Heat-generation rate), 방사선 (Radiation)과 같은 인자들은 핵무기제조에 큰 영향을 미치므로 핵확산 저항성에 대한 평가 수단으로 고려하였다. 임계질량은 핵무기에 제조에 필요한 물질의 최소량을 뜻하는 것으로 임계질량이 클수록 많은 양이 필요한 것으로 핵확산 저항성이 커진다. 자발적 핵분열에 의해 중성자가 생성되는 것은 핵무기 장치를 설계하는 것을 복잡하게 만들뿐 아니라 장치의 신뢰도 및 핵폭발력을 떨어뜨린다. 따라서 자발적 핵분열률이 클수록 핵확산 저항성이 커진다고 할 수 있다. 방사성 붕괴에 의해 발생하는 열은 핵무기 장치 설계를 복잡하게 만드므로, 열발생률이 높을수록 핵확산 저항성이 커진다고 할 수 있다. Pu-238은 높은 열출력을 내는 대표적인 원소이다. 핵물질에서 나오는 방사선 자체는 장치의 설계, 제작공정 및 취급 등에 큰 장애 요인이 되기 때문에 방사선이 높을수록 핵확산 저항성은 커진다.

표7은 핵확산 측면에서 역할이 큰 플루토늄 원소만을 고려하여 매주기별로 사용 후핵연료에서 존재하는 플루토늄의 총량, 플루토늄만으로 핵무기를 제조할 때의 임계질량, 자발적핵분열율 및 방사성붕괴열의 발생을 보여주고 있다. 임계질량은 각 핵연료별 플루토늄 조성비를 이용하여 각 동위원소별 임계질량을 가중처리하여 계산한 값이다. 토륨핵연료에서의 임계질량 자체는 플루토늄의 조성비에 영향을 받는데 토륨핵연료의 연소도와 우라늄핵연료의 연소도의 차이가 크게 나타나지 않아 서로 비슷한 조성을 갖기 때문에 임계질량도 큰 차이가 없이 우라늄핵연료와 비슷한 것으로 나타났다. 그러나 총 플루토늄 생성량은 많이 줄어드는 것으로 평가되었다.

자발적핵분열율은 핵무기의 성능, 즉 핵폭발력의 감손을 정의하는 중요한 인자로, 자발적핵분열에 따라 생성된 중성자는 핵무기가 최대의 폭발력에 도달하기도 전에 폭발이 시작되는 사전폭발의 원인이 된다. 이는 결과적으로 핵무기 장치의 폭발력을 떨어뜨리는 결과를 나타낸다. 플루토늄에 있어서 자발적 핵분열률은 fertile 원소인 Pu-238, Pu-240, Pu-242의 존재량에 좌우되는데 토륨핵연료와 우라늄핵연료가 서로 비슷한 조성을 갖기 때문에 자발적핵분열율도 큰 차이가 없다.

핵무기 제조에 있어 또 하나의 장벽인 방사성붕괴열의 발생을 각 핵연료별로 표7에 함께 나타내었다. 방사성붕괴열은 핵폭발 장치의 온도를 증가시키므로써, 플루토



늄 금속의 경우 약115°C에서 나타나는 상의 변화를 유발시킬 수 있으며, 과열된 상태의 플루토늄 노심의 핵연료 물질의 분산을 유발할 수 있다. 높은 방사선을 내는 대표적인 원소들은 Pu-240, Pu-242, U-232 등으로 토륨핵연료에서 방사성붕괴열은 우라늄핵연료 보다 큰 경향을 보이고 있다.

토륨핵연료는 우라늄핵연료와는 달리 U-233 원소가 생산된다. U-233을 이용한 핵무기는 Pu-239을 이용하는 것과 필적할 만한 성능을 갖는 것으로 알려져 있는데, U-233을 재처리하는 과정은 아래와 같은 기술적인 어려움 때문에 실질적으로 핵무기로 전용되기 어렵다. U-232 핵종의 붕괴사슬에 의해 나타나는 강한  $\gamma$ -방사선 때문에 우라늄 재처리공정은 원격장치에 의해 처리되어야 하며 이들 과정은 감지가 되기 쉽다. 분리된 우라늄을 농축하는 것은 우라늄 동위원소의 조성비 때문에 실질적으로 효과적이지 못하다. 즉 U-233을 U-238, U-234 및 U-236으로부터 분리하는 것은 유용한 원소인 U-235도 함께 제거할 뿐아니라, 분리과정에서 잔존해 있는 U-234 및 U-236은 농축 분리된 우라늄의 임계도를 떨어뜨리는 효과를 낸다. U-233를 농축하는 것은 U-232원소를 분리할 수 없기 때문에 상대적으로 높은 U-232의 조성비를 갖게되는데 이는  $\gamma$ -방사선 문제를 악화시킬 뿐이다.

## 5. 결론 및 논의

균질화 토륨핵연료 외의 토륨핵연료를 달리 이용하는 방안에 대한 경제성을 검토하였다. 즉 seed인 U-235의 농축도를 낮추는 방안, ThO<sub>2</sub>와 UO<sub>2</sub>를 핵연료소자에서 지역적으로 분리하는 duplex 개념 이용 방안, 균질화 토륨핵연료집합체를 우라늄핵연료집합체와 노심에 혼용하여 이용하는 방안, 그리고 토륨핵연료를 blanket 개념으로 이용하는 방안들을 검토되었다.

각 토륨핵연료 이용방안에 대해 우라늄 원광소요량 및 농축에 필요한 SWU 소요량을 위주로 토륨핵연료의 경제성을 평가한 결과, 균질화 토륨핵연료에 비해서는 경제성이 향상되는 것으로 나타났으나, 우라늄핵연료의 경제성에는 미치지 못하는 것으로 평가되었다.

핵확산 저항성 관점에서는 임계질량, 자발적 핵분열률, 방사선붕괴열 생성률 등을 비교하였는데, 토륨핵연료는 무엇보다도 플루토늄 원소의 생성량이 현저히 줄어드는 장점이 있음을 확인하였다.

현 시점에서 토륨핵연료의 경제성은 비록 없지만 앞으로 우라늄의 자원이 고갈되어 가격이 상승하는 경우나 현재 많은 잉여 플루토늄을 효과적으로 소모시키는 면에서는 토륨핵연료의 활발한 이용이 예상된다.

## 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. 주형국 외, "경수로용 균질화 토륨핵연료 이용 방안에 대한 핵연료 경제성 검토," 2001년 한국원자력학회 춘계학술회의, 2001.
8. 주형국 외, "가압경수로용 균질화 토륨핵연료 노심 핵특성 분석 및 핵연료 경제성 평가," KAERI/TR-1687/2000, 한국원자력연구소, 2000.
9. 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.
10. 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," GLOBAL2001, 2001.

- J.S. Herring, P.E. MacDonald, "Advanced, Lower Cost, Proliferation Resistant, Uranium-Thorium Dioxide Fuels for LWRs," Transactions of ANS, Vol(30), 1999.

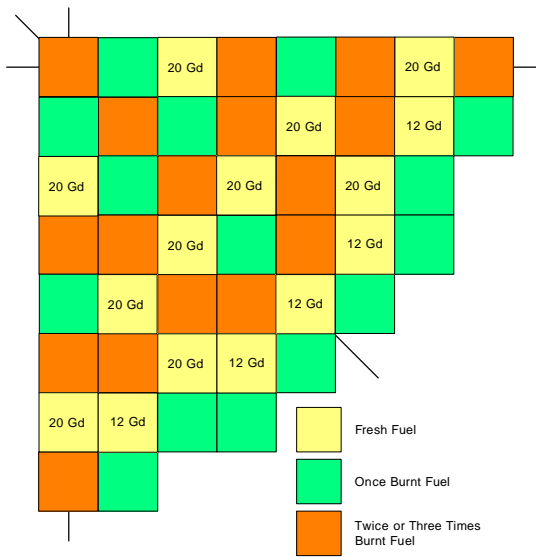


그림1. 우라늄핵연료 노심의 핵연료장전모형

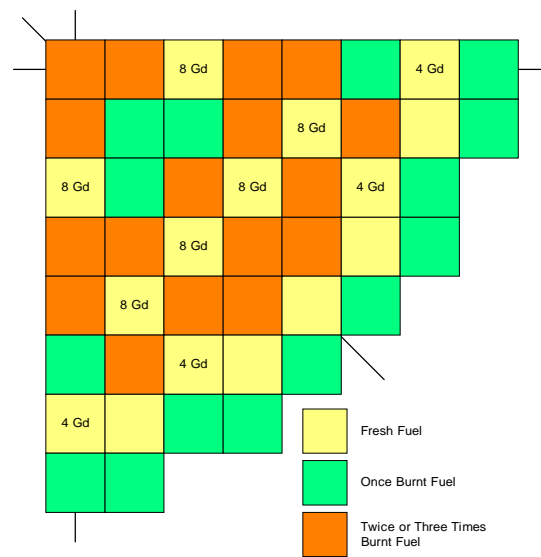


그림2. 균질화 토륨핵연료 노심의 핵연료장전모형

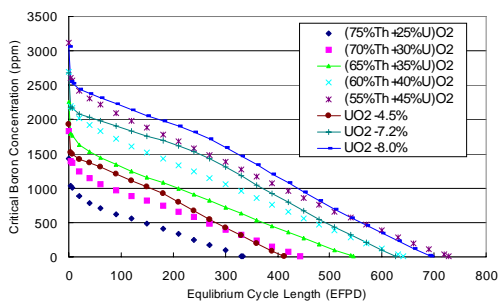


그림3. 연소도별 임계붕산농도 변화

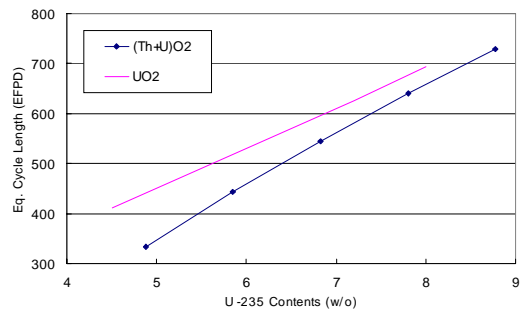


그림4. U-235 양에 따른 주기길이 변화

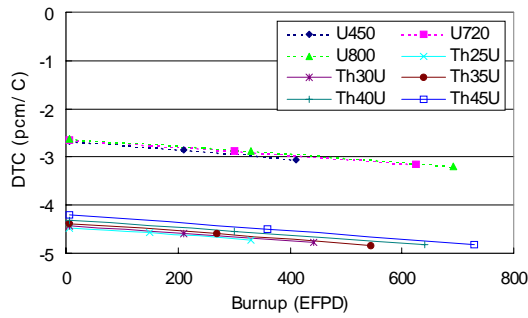


그림5. 연소도별 핵연료온도계수 변화

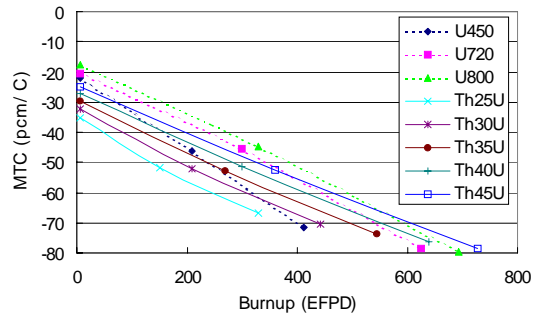


그림6. 연소도별 감속재온도계수 변화

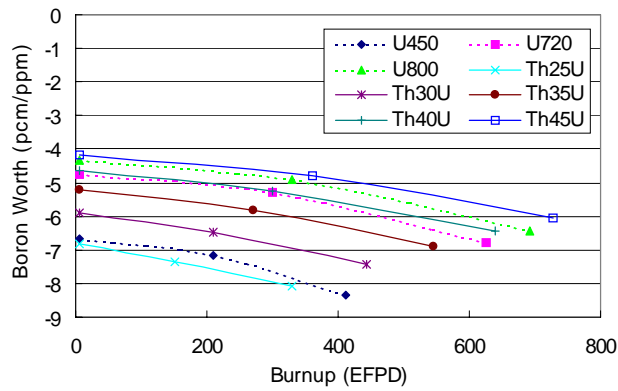


그림7. 연소도별 붕산가 변화

표1. 우라늄노심 및 토륨노심에서의 제어봉가 비교, EOC, HFP

Control Rod Configurations	UO <sub>2</sub> Core			ThO <sub>2</sub> +UO <sub>2</sub> Core				
	U-235 Enrichment (w/o)			UO <sub>2</sub> Weight fraction (%) (U-235 Enrichment = 19.5w/o)				
	4.5	7.2	8.0	25	30	35	40	45
D	1.39	1.24	1.21	1.36	1.32	1.28	1.25	1.22
D+C	2.96	2.68	2.63	2.89	2.79	2.71	2.64	2.57
D+C+B	4.59	4.15	4.05	4.55	4.36	4.20	4.07	3.94
D+C+B+A	5.56	5.11	4.99	5.40	5.24	5.09	4.96	4.84
D+C+B+A+S	9.41	8.48	8.25	9.52	9.01	8.60	8.25	7.94

\* Control rod worth was calculated at EOC, with HFP state, Eq. xenon and critical boron concentration for ARO, HFP condition.

표2. 우라늄핵연료 노심 및 토륨핵연료 노심의 주기비 인자 요약

노심	핵연료내 UO <sub>2</sub> 분율 (%)	U-235 무게분율 (%)	매주기별 에너지 발생량 (GWD)	매주기별 우라늄 장전량 (M <sub>P</sub> , kg)	M <sub>F</sub> /M <sub>P</sub>	SWU/M <sub>P</sub>	우라늄 Utilization (MWD/Kg-U <sub>nat.</sub> )	SWU Utilization (MWD/Kg-SWU)	주기별 사용후핵연료 발생량 (ton)
참고노심 (UO <sub>2</sub> 노심)	100	4.5	1142	23427	9.219	6.871	5.29	7.10	22.25
	100	7.2	1737	23427	15.076	12.664	4.92	5.86	21.62
	100	8.0	1923	23427	16.811	14.419	4.88	5.69	21.43
균질화 토륨노심 (ThO <sub>2</sub> +UO <sub>2</sub> )	25	4.875	924	5476	41.757	40.427	4.04	4.17	20.88
	30	5.850	1230	6599	41.757	40.427	4.46	4.61	20.69
	35	6.825	1512	7738	41.757	40.427	4.68	4.83	20.50
	40	7.800	1776	8884	41.757	40.427	4.79	4.95	20.33
	45	8.775	2021	10039	41.757	40.427	4.82	4.98	20.17

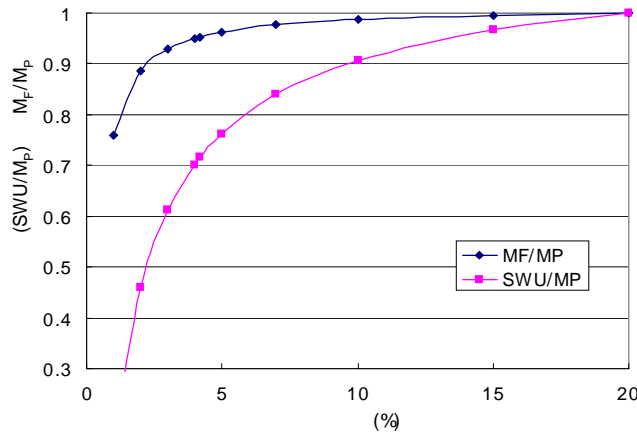


그림8. 농축도별 단위 농축도당 SWU/M<sub>P</sub> 및 M<sub>F</sub>/M<sub>P</sub> 변화

표3. 저농축 우라늄 seed 이용 토륨핵연료 노심의 주기비 인자 요약

노심	UO <sub>2</sub> 내 U-235 농축도 (w/o)	U-235 무게분율 (%)	매주기별 에너지 발생량 (GWD)	매주기별 우라늄 장전량 (M <sub>P</sub> , kg)	M <sub>F</sub> /M <sub>P</sub>	SWU/M <sub>P</sub>	우라늄 Utilization (MWD/Kg-U <sub>nat.</sub> )	SWU Utilization (MWD/Kg-SWU)
균질화 토륨노심 (ThO <sub>2</sub> +UO <sub>2</sub> )	7	4.875	989	15241	14.642	12.227	4.43	5.31
	10	4.875	938	10665	21.150	18.855	4.16	4.66
	15	4.875	917	7108	31.996	30.135	4.03	4.28
	<b>19.5</b>	<b>4.875</b>	<b>924</b>	<b>5476</b>	<b>41.757</b>	<b>40.427</b>	<b>4.04</b>	<b>4.17</b>
균질화 토륨노심 (ThO <sub>2</sub> +UO <sub>2</sub> )	10	6.825	1537	15075	21.150	18.855	4.82	5.40
	15	6.825	1507	10041	31.996	30.135	4.69	4.98
	<b>19.5</b>	<b>6.825</b>	<b>1512</b>	<b>7738</b>	<b>41.757</b>	<b>40.427</b>	<b>4.68</b>	<b>4.83</b>

표4. duplex 토륨핵연료 노심의 주기비 인자 요약

노심	핵연료내 UO <sub>2</sub> 분율 (%)	U-235 무게분율 (%)	매주기별 에너지 발생량 (GWD)	매주기별 우라늄 장전량 (M <sub>F</sub> , kg)	M <sub>F</sub> /M <sub>P</sub>	SWU/M <sub>P</sub>	우라늄 Utilization (MWD/Kg-U <sub>nat.</sub> )	SWU Utilization (MWD/Kg-SWU)
duplex 토륨노심 (ThO <sub>2</sub> +UO <sub>2</sub> )	25	4.875	1062	5466	41.757	40.427	4.65	4.81
	35	6.825	1689	7727	41.757	40.427	5.23	5.41
균질화 토륨노심 (ThO <sub>2</sub> +UO <sub>2</sub> )	25	4.875	924	5476	41.757	40.427	4.04	4.17
	35	6.825	1512	7738	41.757	40.427	4.68	4.83

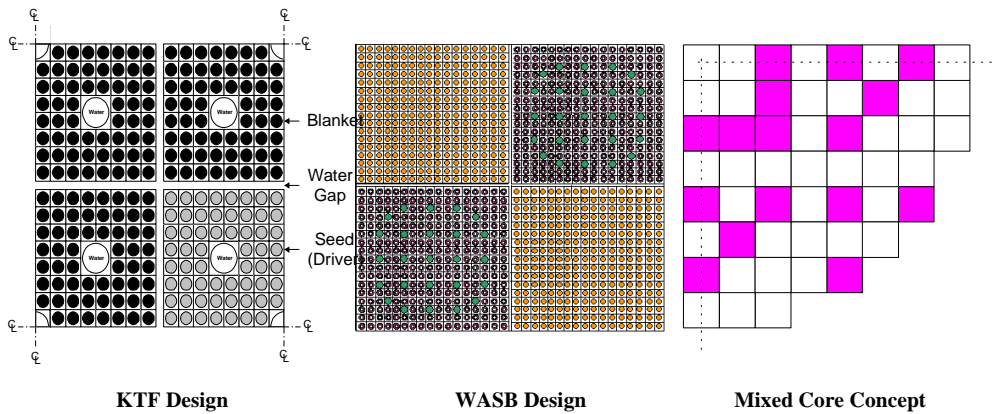


그림9. 비균질 seed 및 blanket 토륨핵연료 개념 비교

표5. 토륨핵연료 혼합노심의 주기비 인자 요약

혼합 노심	토륨 핵연료내 UO <sub>2</sub> 분율 (%)	평균 U-235 무게분율 (%)	주기별 에너지 발생량 (GWD)	주기별 우라늄원광 소요량 (M <sub>F</sub> , kg)	주기별 SWU 소요량 (SWU-kg)	우라늄 Utilization (MWD/Kg-U <sub>nat.</sub> )	SWU Utilization (MWD/Kg-SWU)	주기별 사용후핵연료 발생량 (t)
4.5w/oUO <sub>2</sub> + (75ThO <sub>2</sub> +25UO <sub>2</sub> )	25	4.625	1012	203261	167169	4.98	6.05	20.09
4.5w/oUO <sub>2</sub> + (70ThO <sub>2</sub> +30UO <sub>2</sub> )	30	4.95	1106	217699	181147	5.08	6.11	20.03
4.5w/oUO <sub>2</sub> + (65ThO <sub>2</sub> +35UO <sub>2</sub> )	35	5.275	1186	232324	195306	5.10	6.07	19.98

표6. 토륨 blanket 노심의 주기비 인자 요약

노심내 토륨 blanket 집합체수	매주기별 에너지 발생량 (GWD)	매주기별 우라늄원광 소요량 (M <sub>F</sub> , kg)	매주기별 SWU 소요량 (SWU-kg)	우라늄 Utilization (MWD/Kg-U <sub>nat.</sub> )	SWU Utilization (MWD/Kg-SWU)	주기별 사용후핵연료 발생량 (t)
36	940	203261	167169	5.54	7.44	18.58
24	1017	217699	181147	5.50	7.37	19.80
16	1096	232324	195306	5.46	7.32	20.83

표7. 우라늄핵연료 및 토륨핵연료의 핵확산 저항성 인자

노심	핵연료내 UO <sub>2</sub> 분율 (%)	U-235 무게분율 (%)	플루토늄 생성량	플루토늄 임계 질량 (kg)	자발적핵분열 중성자생성률 (n/sec)		Specific Decay Heat (watts/kg)
					임계질량당	단위Kg당	
참고노심 (UO <sub>2</sub> 노심)	100	4.5	263	21.95	1.600×10 <sup>7</sup>	7.290×10 <sup>5</sup>	19.88
	100	7.2	327	22.23	1.733×10 <sup>7</sup>	7.795×10 <sup>5</sup>	32.53
	100	8.0	344	22.32	1.779×10 <sup>7</sup>	7.971×10 <sup>5</sup>	36.96
균질화 토륨노심 (ThO <sub>2</sub> +UO <sub>2</sub> )	25	4.875	88	20.21	1.577×10 <sup>7</sup>	7.802×10 <sup>5</sup>	25.98
	30	5.850	113	21.07	1.705×10 <sup>7</sup>	8.094×10 <sup>5</sup>	34.30
	35	6.825	138	21.69	1.822×10 <sup>7</sup>	8.400×10 <sup>5</sup>	42.08
	40	7.800	164	21.96	1.899×10 <sup>7</sup>	8.646×10 <sup>5</sup>	49.76
	45	8.775	191	22.09	1.957×10 <sup>7</sup>	8.861×10 <sup>5</sup>	54.89
저농축우라늄 seed이용 토륨노심 (ThO <sub>2</sub> +UO <sub>2</sub> )	10	4.875	147	19.33	1.442×10 <sup>7</sup>	7.460×10 <sup>5</sup>	16.68
	10	6.825	243	21.04	1.644×10 <sup>7</sup>	7.815×10 <sup>5</sup>	29.54
duplex 토륨노심 (ThO <sub>2</sub> +UO <sub>2</sub> )	25	4.875	74	22.16	1.672×10 <sup>7</sup>	7.547×10 <sup>5</sup>	21.16
	35	6.825	120	24.62	2.017×10 <sup>7</sup>	8.191×10 <sup>5</sup>	35.03
4.5w/oUO <sub>2</sub> + (ThO <sub>2</sub> +UO <sub>2</sub> ) 혼합노심	25*	4.625	185	21.49	1.638×10 <sup>7</sup>	7.606×10 <sup>5</sup>	24.45
	30*	4.95	195	21.77	1.669×10 <sup>7</sup>	7.656×10 <sup>5</sup>	26.51
	35*	5.275	204	21.93	1.688×10 <sup>7</sup>	7.694×10 <sup>5</sup>	28.20
토륨 blanket 노심	25*	4.625	207	22.03	1.607×10 <sup>7</sup>	7.255×10 <sup>5</sup>	19.47

\* : 토륨 핵연료내 UO<sub>2</sub> 분율 (%)