'99 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

가압경수로용 재순환 핵연료 주기의 특성
Characteristics of Recycled Fuel Cycle in PWR

안용수, 김명현
경희대학교
경기도 용인시 기흥읍 서천리

요 약

현재 가압경수로에서 채택하고 있는 UO_2 핵연료 주기를 기준으로 비순환 주기 및 재순환 주기에 대하여 4w/o UO_2 핵연료, MOX 핵연료, 토륨 혼합핵연료등을 선정하여 그 핵적특성을 비교하여 보았다. 비순환 및 재순환시 재처리에는 제약이 없음을 전제로 하였으며, 재순환에 있어서 기술적 문제 또한 없다고 가정하였다. 각 핵연료 주기별로 재순환 방안을 설정하고, 반응도 유지를 위해 추가되는 핵분열성 물질의 양에 따른 재순환 효과, 플루토늄 조성비, 전환특성, 감속재 온도계수, 핵연료 온도계수등을 상호 비교하였다. 계산결과, $(Th+Pu)O_2$ 핵연료 주기가 비순환시에 플루토늄의 조성이 8.3 w/o에서 재순환시 3.5 w/o로 감소하여 다른 핵연료 주기와 비교하여 유리하였다. 비핵확산 측면인 플루토늄 조성비에 있어서는, $(Th+Pu)O_2$ 핵연료 주기에서 Pu-239의 소모율이 가장높게 나타났고 동시에 Pu-240(242)생성량은 다른 핵연료 주기에 비해 많았다. 전환특성면에서는 비순환 주기일때는 $(Th+U)O_2$ 와 $(U+Pu)O_2$ 핵연료 주기가 전환특성이 좋았고 재순환 핵연료 주기에서는 $(Th+Pu)O_2$ 핵연료가 가장 좋은 전환특성을 가졌다. UO_2 핵연료주기는 오히려 재순환시 불리한 전환특성을 나타냈다. 감속재 온도계수와 핵연료 온도계수는 본 연구에서 비교하는 핵연료 주기 모두가 음의 값을 나타내 고유 안전성을 확보하였다.

Abstract

Characteristic study for the recycled fuel cycle, MOX fuel and Th-MOX fuel in PWR was performed with the comparison of 4 w/o UO_2 fuel. It was assumed that there are no limit in reprocessing and no technical difficulty in recycling of spent fuel. The effect of recycling, plutonium composition, conversion ratio, MTC, FTC was investigated to each cycle. $(Th+Pu)O_2$ recycle option was advantageous because the loading amount of plutonium could be reduced from 8.3 w/o at once-through cycle to 3.5 w/o. $(Th+Pu)O_2$ recycled fuel was known to be higher Pu-239 consumption rate and more Pu-240(242) production rate. The $(Th+U)O_2$ and $(U+Pu)O_2$ once-through fuel cycle revealed high conversion ratio. The $(U+Pu)O_2$ recycled fuel cycle, however, showed low conversion ratio. Safety of each cycle was ensured by negative MTC and FTC.

1. 서 론

우라늄 자원의 이용률을 극대화시키고 장수명 핵 폐기물의 양을 감소시키며, 핵확산 저항성증대 및 재처리시 수반되는 고방사성 공정을 피하는 측면에서 새로운 핵연료 주기에 대한 연구가 세계적으로 진행되고 있다. 사용후 핵연료의 재활용 측면에서 일부 선진국에서 개발해 왔고 현재 상용화하고 있는 MOX핵연료가 그 대표적인 예이다. 하지만 MOX핵연료 역시 우라늄 증식주기를 이용하는 핵연료 주기이므로 U-238을 통해 얻어지는 물질이 플루토늄에만 국한되지 않고 중성자와의 지속적 흡수반응을 통해 긴 반감기를 가진 Minor Actinide로 변환되어 폐기물 관리에 어려움이 많고 재처리시 방사성 독성이 매우 크다. 또한 비핵확산 조약에 따른 플루토늄재처리 공정을 엄격하게 규정하므로 현실화에 어려움이 많다. 이러한 이유로 과거 상용화에 실패했지만 재처리 금지 및 핵사찰을 중시하는 오늘날, 감지의 용이성으로 인한 핵확산 저항성 증대 및 우라늄 자원의 이용률을 극대화하는 측면에서 토륨 핵연료주기에 관한 연구가 다시 부각되고 있는 실정이다.

본 연구에서는 현재 가압경수로에서 사용하는 UO_2 핵연료 주기를 비교 기준으로 정하고 비순환 주기 및 재순환 주기에서의 MOX 및 토륨 혼합핵연료 주기를 비교 대상으로 핵적 특성을 비교, 검토하여 비핵확산성, 환경친화성, 안전성의 관점에서 보다 유리한 핵연료 주기를 모색하고자 한다.

2. 전제조건 및 비교대상 핵연료 선정

핵연료 주기 비교 분석에 있어서, 우선적으로 재처리가 가능함을 전제조건으로 하였다. 또한 현재 상업로의 우라늄 농축도 제한조건인 5% 한계를 배제하였으며, 재순환에 있어서도 기술적 제약은 없다고 가정하였다. 핵주기 특성 비교시, 전체 로심이 아닌 핵연료 집합체 계산만을 수행하여 각각의 핵연료 주기별로 상대적인 비교를 하였으며, 가연성독봉을 사용하지 않았다. 핵연료집합체는 단일 농축도를 사용하여 균질화 계산을 수행하였다. 주기길이는 모두 18개월(1620EFPD)을 만족시키도록 농축도를 계산하여 설정하였다.

기존 가압경수로에서 이용하고 있는 UO_2 핵연료 주기를 바탕으로 현재 국내 장주기 노심에 사용되는 4w/o 농축도를 비교기준 핵연료 주기로 설정하였다. 또한, 비교대상 핵연료 주기는 감손우라늄(0.225 w/o)과 사용후 핵연료에서 추출한 플루토늄을 혼합해서 만든 $(U+Pu)O_2$ 핵연료주기, 토륨을 이용한 $(Th+U)O_2$ 및 $(Th+Pu)O_2$ 핵연료 주기로 설정하였다. 앞에서 언급한 4가지 경우의 핵연료 주기들을 다시 비순환 주기 및 재순환 핵연료 주기로 나누어 핵적특성을 분석하였다. 특히 재순환 주기는 [그림2]와 같이 핵분열성 핵종(핵원료성 핵종포함)만을 재순환 시키는 경우, [그림3]과 같이 핵분열성 핵종과 Minor Actinide를 추가적으로 재순환 시키는 경우 및 [그림4]와 같이 핵분열성 핵종과 Minor Actinide 및 핵분열 생성물을 동시에 재순환 시키는 경우로 총 3가지 선택사항을 두어 계산을 수행하였다. 따라서 재순환 주기에 있어서의 계산경우의 수는 12가지이며 비순환 주기를 포함해서 총 16가지이다.

전산체계로는 핵연료 집합체 균질화 코드인 HELIOS를 사용하였다. [그림1]은 비순환 주기의 개략도를 나타낸 그림이다. 계산에 고려된 핵종은 총 30개이며, 설정기준은 사용후 핵연료 중에서 플루토늄, Minor Actinide, 긴 반감기를 가진 핵분열생성물, 그리고 짧은 반감기를 가졌으나 독성이 강한 핵종들이다. 따라서, 계산에 포함된 주요 핵종들로는 핵분열성(핵원료성)핵종인 우라늄(U-233, U-234, U-235, U-236, U-238), 플루토늄(Pu-238, Pu-239, Pu-240, Pu-241, Pu-242), 토륨(Th-232)과 Minor Actinide인 Pa-233, Np-237, Np-239, Am-241, Am-242m, Am-243, Cm-242, Cm-243, Cm-244와 핵분열 생성물인 Sr-90, Zr-93, Tc-99, Pd-107, I-129, Xe-135,

Cs-135, Cs-137, Sm-150, Sm-151이다.

3. 핵연료 주기별 초기 조성결정

토륨원소만으로 핵분열 연쇄반응을 유지할 수 없으므로, 우라늄이나 플루토늄과 같이 핵분열을 일으키는 원소가 반드시 필요하게 된다. 즉 토륨을 기저물질로 하고 농축된 우라늄이나 플루토늄을 토륨원소와 혼합하여야 핵연료로서 이용이 가능하다. UO_2 핵연료의 경우 노심의 반응도는 핵연료내의 핵분열성 원소가 되는 U-235의 양을 나타내는 농축도에 좌우된다. 따라서 UO_2 핵연료 대신 $(U+Pu)O_2$ 핵연료나 $(Th+U)O_2$ 핵연료 또는 $(Th+Pu)O_2$ 핵연료를 사용한다고 할 때, 우선 각각의 핵연료내의 핵분열성 원소인 플루토늄의 함량이나 우라늄의 함량 및 농축도를 결정하는 일이 먼저 수행되어야 한다. 우라늄 원소와 플루토늄 원소의 연소특성이 다르기 때문에 각 핵연료에 대한 등가개념을 정립하고 이에 따라 플루토늄의 함량 및 우라늄의 함량을 결정하는 것이 필요하다. 등가개념은 선형반응도 모델에 의해 평균(평형)주기길이를 같도록 하는 조건에 따라 핵분열성 원소의 함량을 결정하였다. 우라늄 및 플루토늄의 함량이 다른 각각의 핵연료주기의 연소도(혹은 EFPD)에 따른 반응도를 계산하여 이중 UO_2 핵연료의 반응도가 0인 지점의 연소도를 구하여 이 연소도에서 다른 핵연료 주기의 반응도가 각각 0이 되도록 플루토늄 함량이나 우라늄함량을 등가함량으로 결정하였다. [그림5]는 반복계산을 통한 비순환 핵연료 주기에서의 우라늄 및 플루토늄 등가함량을 결정한 그림이다.

4. 재순환 방안

재순환 핵연료 집합체는 다음과 같은 방안로 구성하였다. 비순환 주기에서 얻어지는 사용후 핵연료 중에서 핵분열성핵종만을 재순환하는 방안, 핵분열성핵종과 Minor Actinide를 함께 재순환하는 방안, 핵분열성핵종, Minor Actinide, 핵분열생성물을 도두 재순환하는 방안으로 구성하였다. 사용후 핵연로에서 얻어지는 물질만으로는 반응도 유지가 불가능하므로 이를 보상하기 위하여 핵분열성 물질을 산화물형태(UO_2 , PuO_2)로 재순환 핵연료 집합체에 추가하였다. 이 때 핵분열성 물질을 비순환 주기의 연소전 총질량에 대한 질량비로 추가하여 재순환 주기에서의 연소전 장전량으로 설정하였다. 또한, 비순환 주기에서의 연소전 장전량과 같도록 전체 장전량을 조절하였다. 추가하는 핵분열성물질의 질량비를 조절해 가면서 반응도를 가장 적절하게 유지하면서 주기길이를 만족시키는 경우의 질량비를 재순환 주기에서의 조성으로 결정하였다.

[그림7], [그림8], [그림9], [그림10]은 각 핵연료 주기별로 핵분열성(핵원료성) 동위원소만을 재순환 시킬 경우 추가해야하는 플루토늄 및 우라늄 함량을 결정하는 과정을 알 수 있는 그림이다. UO_2 핵연료 주기인 경우 비순환 주기에서의 무한증배계수와 비순환 주기에서의 사용후 핵연료에 농축도 20 w/o 우라늄을 초기장전량에 대한 질량비로 추가(20, 23, 25 w/o)하여 무한증배계수를 구하여 비교해본 결과 23 w/o 이상 핵분열성 물질이 추가되면 평균주기길이를 만족하며 반응도도 유지하는 것으로 나타났다. 다른 핵연료 주기일 경우에도 같은 방법으로 반복계산을 하였다.

[표1]은 반복계산의 결과를 나타낸 표로서 재순환 주기에서 각 핵연료별로 채택하여 추가되는 우라늄 및 플루토늄 산화물의 질량비이다. [표1]에서 보는바와 같이 반응도 유지와 주기길이를 같게 하는 조건으로 사용후 핵연료에 플루토늄이나 우라늄의 함량을 달리해서 집합체 계산을 수행한 결과, 재순환을 시키면 추가되는 핵분열성 물질의 초기장전량에 대한 비율은 줄어든다는 사실을 알 수 있었다. 가장 적은 비율로 추가되는 핵연료 주기는 $(Th+Pu)O_2$ 핵연료 주기로서 비순환 핵연료 주기에서 추가하는 핵분열성 물질의 40%(8.3 w/o 에서 3.5 w/o)정도만 추가하면 재순환이 가능함을 확인 할 수 있고 재순환에 있어서 보다 효과적인 핵연료 주기임을 알 수 있었다.

5. 핵연료주기별 핵특성

5.1 플루토늄 동위원소 변화량

비순환 주기에서의 플루토늄 동위원소 변화량을 [표2]에 나타내었다. 토륨을 이용하는 핵연료에서의 주된 관심 사항은 U-233의 전환 특성과 플루토늄 원소의 조성비 및 함량 변화이다. 플루토늄의 함량이 적으면 U-233의 포화 연소도는 줄어든다. 하지만 차이는 그렇게 크지 않은 것으로 나타났다. 비핵확산 측면에서 본다면 Pu-239의 소모량은 많고 상대적으로 Pu-240의 생성량이 많으면 유리하다고 볼 수 있다. 비순환 핵연료 주기일 경우 주기초에 플루토늄 장전량이 있고 플루토늄을 핵분열성물질로 이용하는 $(Th+Pu)O_2$ 핵연료와 $(U+Pu)O_2$ 핵연료를 비교해본다면 U-238이 존재하지 않는 $(Th+Pu)O_2$ 핵연료가 $(U+Pu)O_2$ 보다 Pu-239의 소모량이 월등히 높음을 알 수가 있다. 또한 $(Th+Pu)O_2$ 재순환시켜 보면 Pu-239, Pu-241의 량이 비순환 핵연료 주기 때보다 적음을 알 수 있다. [표3]은 $(Th+Pu)O_2$ 핵연료의 재순환시 플루토늄 동위원소 변화량을 나타낸 표이다. 재순환주기일 경우 핵분열 생성물을 제외하고 재순환 시키는 두가지 경우에 대해서는 플루토늄 동위원소중 핵분열성 핵종들의 소모율이 훨씬 높음을 알 수 있었다. 하지만 핵분열 생성물을 같이 재순환 시킨다면 Pu-239의 소모율은 오히려 줄어든다. 핵분열 생성물이 분열을 억제시키는 특성 때문인 것으로 보이며 핵분열 생성물을 재순환 시키지 않은 두 가지 경우에는 주기초와 주기말의 핵분열성 플루토늄 동위원소들의 질량변화율은 거의 같음을 알 수 있다.

5.2 전환특성

[표4]는 비순환 주기에서의 [표5]는 핵분열성 핵종 및 핵원료성 핵종의 재순환 주기에서의 핵분열성 물질 및 핵원료성 물질의 변화를 계산한 표이다. [표4]에서 U-233으로의 전환량을 보면 $(Th+Pu)O_2$ 핵연료 주기보다 $(Th+U)O_2$ 핵연료 주기가 적다는 사실을 알 수 있다. 이는 초기 장전량의 차이에서 오는 결과이다. 비순환 핵연료 주기에 대해 각 핵연료 주기별 주기말에서의 핵분열성 원소의 양을 보면 $(Th+Pu)O_2$, $(Th+U)O_2$, $(U+Pu)O_2$, UO_2 핵연료주기 순으로 적어진다. 이는 같은 반응도를 얻기 위해서는 위 순서대로 핵분열성 원소가 많이 필요하다는 것을 의미하는데 주기초와 주기말의 핵원료성 원소량 차이만큼 핵분열성 원서로 전환되었다고 가정하면 대략적인 전환비를 알 수 있다. 대략적 전환비가 비순환 주기에서는 $(Th+Pu)O_2$,핵연료는 0.60, $(Th+U)O_2$,핵연료는 0.65, $(U+Pu)O_2$ 핵연료는 0.64, UO_2 핵연료는 0.59 이다. 반면에 핵분열성 핵종(핵원료성 핵종)만을 선택적으로 재순환 시킨 경우 각각의 핵연료주기들의 전환비를 구해보면 $(Th+Pu)O_2$ 핵연료는 0.65, $(Th+U)O_2$ 핵연료는 0.65, $(U+Pu)O_2$ 핵연료는 0.65, UO_2핵연료는 0.58이 된다. 재순환 시킬 경우 $(Th+Pu)O_2$ 핵연료는 전환특성이 좋은 것으로 나타났고 UO_2 핵연료는 전환특성이 나빠지고 $(Th+U)O_2$ 핵연료와 $(U+Pu)O_2$ 핵연료는 변화가 거의 없었다.

5.3 감속재 온도계수 및 핵연료 온도계수

감속재온도계수는 감속재 온도변화에 대한 반응도 변화를 나타내는 것으로서 온도변화에 따른 밀도변화의 효과 및 온도변화 자체의 효과를 내포한다. 특히 감속재 온도계수는 중성자 스펙트럼에 영향을 받는다. [그림11]은 핵연료주기를 핵분열성 핵종+Minor Actinide+핵분열생성물을 재순환 시킨 경우의 감속재 온도계수를 보여준다. 네가지 핵연료주기 모두 EFPD가 진행됨에 따라 즉 연소가 진행됨에 따라 더욱 음의 값을 가짐을 알 수 있고 특히 토륨을 이용한 혼합핵연료들이 다른 핵연료보다 주기 길이에 상관없이 양의 값을 가짐을 알 수 있다. 이유는 토륨핵연료에서 Pu-240함량이 다른 핵연료보다 높지만 $(U+Pu)O_2$ 핵연료에서 기저물질로 사용되는 U-238은 전혀 존재하지 않고 Th-232가 기저물질로 구성되어 있기 때문이다. Th-232는 열외 중성자 영역에서의

중성자 스펙트럼의 천이효과가 U-238 및 Pu-240에서 보다 중요성이 떨어지는 사실에 기인한다. [그림12]은 핵연료 주기들을 핵분열성 핵종+Minor Actinide+핵분열생성물을 재순환 시킨 경우 핵연료 온도계수를 보여준다. 핵연료 온도계수는 핵연료 온도변화에 대한 반응도 변화를 나타내는 것으로서 이 값은 항상 음의 값을 갖는데, 원자로 제어에 있어서 중요하다. 즉 원자로 출력이 증가하면 핵연료의 온도가 따라서 증가하는데 이 온도계수에 의해 음의 반응도가 삽입되어 노심의 출력이 급작스럽게 증가하는 것을 방지하게 된다. 음의 값을 갖는 주요 원인은 U-238과 Pu-240 핵종의 공명흡수 단면적이 핵연료 온도가 증가함에 따라 broadening 되므로서 공명흡수율을 크게 만들기 때문이다. 토륨을 이용한 혼합핵연료들의 핵연료 온도계수가 다른 핵연료 보다 주기 길이에 상관없이 보다 음의 값을 갖는 경향을 보이고 있다. 감속재 온도계수 및 핵연료 온도계수에 있어서 핵연료 주기별로 차이는 있으나 모든 핵연료 주기가 고유 안전성을 유지한다고 본다.

6. 결론 및 향후과제

비순환 및 재순환 주기에 대하여 UO_2 , $(U+Pu)O_2$, $(Th+U)O_2$, $(Th+Pu)O_2$ 핵연료 주기에 대한 몇 가지 핵적특성을 검토해보았다.

우선, 핵연료 자원이용률을 제고하는 방안으로서, 사용후 핵연료에 핵분열성 원소를 추가하여 반응도를 유지하면서 비순환 주기일 때와 똑같은 주기 길이를 만족할 수 있도록 핵연료를 재가공할 수 있다면 $(Th+Pu)O_2$ 핵연료 주기가 핵연료 재활용 측면에서 가장 유리한 가능성을 보였다. 또한 비핵확산 측면에서 비순환 핵연료 주기일 경우 Pu-239의 소모율은 높으면서 동시에 Pu-240의 생성량은 다른 핵연료 주기에 비해 많은 $(Th+Pu)O_2$ 핵연료 주기가 가장 유리한 핵연료 주기로 나타났다. 전환특성면에서는 비순환 주기일 경우 $(Th+U)O_2$ 핵연료 주기와 $(U+Pu)O_2$ 핵연료 주기가 좋은 전환특성을 보였고, 재순환 핵연료 주기에서는 $(Th+Pu)O_2$ 핵연료 주기가 좋은 전환특성을 보였다. 반면에 UO_2 핵연료주기는 오히려 재순환시 불리한 결과를 보였다. 감속재 온도계수와 핵연료 온도계수는 전체 핵연료 주기에 대해서 음의 값을 보여 고유 안전성을 확보하였다.

본 연구에서는 계산의 단순함을 위하여 재순환시 모든 핵종들을 취급하지 않았다. 따라서 핵종처리에 대하여 많은 연구가 필요하고 비교 방법에서도 많은 연구가 필요하다. 핵연료 주기의 상용화에 있어서 가장 중요한 인자는 경제성일 것이다. 전체핵종에 대한 위해도 및 핵연료주기별 경제성 평가도 수행되어야할 것이다.

참고 문헌

1. M. Lung, "A Present Review of The Thorium Nuclear Fuel Cycles," Nuclear Science and Technology, European Commission, 1997
2. V.Arkhipov, H.J.Rutten, and A. Galperin, "Progress Summary of the IAEA Coordinated Research Program on the Potential of Thorium-based Fuel Cycles to Constrain Pu and to Reduce Long-lived Waste Toxicity," ICENES'98, The 9th International Conference of Emerging Nuclear Energy System, Tel-Aviv, Israel, June 28 - July 2,1998.
3. R.J.J. Stamm'ler, J.J. Casal, E.A. Villarino, HELIOS Method, HELIOS Documentation Rev. No. 2, Scandpower A/S, 1993
4. Hyung-Guk Joo, Hyung-Guk Jung, "A Review on the Nuclear Characteristics of the Recycled Thorium Fuel," '98추계학술발표회논문집, 한국원자력학회, 1998

5. Hyung-Guk Joo, Hyung-Guk Jung, "900MWe 가압경수로에 대한 토륨핵연료 및 혼합핵연료 노심 핵특성 분석," '98춘계학술발표회논문집, 한국원자력학회, 1998

표 1. 각 핵연료 주기별로 추가되는 핵분열성물질의 조성비

주기 \ 핵연료		UO_2	$(U+Pu)O_2$	$(Th+U)O_2$	$(Th+Pu)O_2$
비순환		4 w/o 농축U	6.2 w/o PuO_2	26 w/o UO_2	8.3 w/o PuO2
재순환	Fissile	23 w/o UO_2	4.5 w/o PuO2	18 w/o UO_2	3.5 w/o PuO2
	F+MA	23 w/o UO_2	5.0 w/o PuO2	18 w/o UO_2	3.5 w/o PuO2
	F+MA+FP	25 w/o UO_2	6.0 w/o PuO2	20 w/o UO_2	5.0 w/o PuO2

표 2. 비순환 주기에서의 핵연료별 플루토늄 동위원소 변화량(g)

		핵연료 형태							
		$(Th+Pu)O_2$		$(Th+U)O_2$		$(U+Pu)O_2$		UO_2	
		BOC	EOC	BOC	EOC	BOC	EOC	BOC	EOC
질량 (g)	^{238}Pu	585	528	0	163	474	470	0	142
	^{239}Pu	19,246	1,266	0	922	15,611	5,800	0	2312
	^{240}Pu	7,534	3,693	0	386	6,111	4,730	0	1355
	^{241}Pu	4,013	2,738	0	330	3,255	3,142	0	765
	^{242}Pu	1,321	2,431	0	187	1,071	2,112	0	521
	SUM	32,699	10,656	-	1,988	26,522	16,254	-	5,095
원소 비율 (%)	^{238}Pu	1.79	4.95	-	8.20	1.79	2.89	0	2.79
	^{239}Pu	58.86	11.88	-	46.38	58.86	35.68	0	45.38
	^{240}Pu	23.04	34.66	-	19.42	23.04	29.10	0	26.59
	^{241}Pu	12.27	25.69	-	16.60	12.27	19.33	0	15.01
	^{242}Pu	4.04	22.81	-	9.41	4.04	12.99	0	10.23
질량 변화율 (E/B)	^{238}Pu	0.91		-		1.00		-	
	^{239}Pu	0.07		-		0.40		-	
	^{240}Pu	0.50		-		0.78		-	
	^{241}Pu	0.70		-		0.99		-	
	^{242}Pu	1.79		-		1.91		-	

표 3. 재순환 option별 $(Th+Pu)O_2$ 핵연료의 플루토늄 변화량 (g)

		비순환주기		재순환주기					
				Fissile		Fissile+MA		Fissi+M+FP	
		BOC	EOC	BOC	EOC	BOC	EOC	BOC	EOC
질량 (g)	^{238}Pu	585	528	778	550	774	697	852	834
	^{239}Pu	19,246	1,266	8780	315	8733	384	11647	913
	^{240}Pu	7,534	3,693	6760	1663	6724	1798	7785	3124
	^{241}Pu	4,013	2,738	4399	1535	4375	1646	4920	2564
	^{242}Pu	1,321	2,431	3042	3604	3025	3575	3167	3790
	SUM	32,699	10,656	23759	7667	23631	8100	28371	11225
원소 비률 (%)	^{238}Pu	1,79	4,95	3,27	7,17	3,28	8,60	3,00	7,43
	^{239}Pu	58,86	11,88	36,95	4,11	36,96	4,74	41,05	8,13
	^{240}Pu	23,04	34,66	28,45	21,69	28,45	22,20	27,44	27,83
	^{241}Pu	12,27	25,69	18,52	20,02	18,51	20,32	17,34	22,84
	^{242}Pu	4,04	22,81	12,80	47,01	12,80	44,14	11,16	33,76
질량 변화율 (E/B)*	^{238}Pu	0,90		0,71		0,90		0,98	
	^{239}Pu	0,07		0,04		0,04		0,08	
	^{240}Pu	0,49		0,25		0,27		0,40	
	^{241}Pu	0,68		0,35		0,38		0,52	
	^{242}Pu	1,84		1,18		1,18		1,20	

표 4. 비순환 주기에서의 핵연료별 fissile 및 fertile 동위원소 변화량(g)

		핵연료 형태							
		$(Th+Pu)O_2$		$(Th+U)O_2$		$(U+Pu)O_2$		UO_2	
		BOC	EOC	BOC	EOC	BOC	EOC	BOC	EOC
Fissile	^{233}U	0	6873	0	5309	0	0	0	0
	^{235}U	0	203	20723	3003	902	294	17,050	1,566
	^{239}Pu	19246	1266	0	922	15611	5800	0	2312
	^{241}Pu	4013	2738	0	330	3255	3142	0	765
	sum	23259	11080	20723	9564	19768	9236	17050	4643
Fertile	^{232}Th	359885	345733	294086	279646	0	0	0	0
	^{238}U	0	0	82891	76458	400068	383028	409209	390035
	^{240}Pu	7534	3693	0	386	6111	4730	0	1,355
	sum	367419	349426	376977	356490	406179	387758	409209	391390

표 5. fissile재순환 주기에서의 fissile 및 fertile 동위원소 변화량(g)

		핵연료 형태							
		$(Th+Pu)O_2$		$(Th+U)O_2$		$(U+Pu)O_2$		UO_2	
		BOC	EOC	BOC	EOC	BOC	EOC	BOC	EOC
Fissile	^{233}U	7169	7614	4873	5240	0	0	0	0
	^{235}U	212	643	14337	2844	302	116	16541	2663
	^{239}Pu	8780	315	846	1217	16224	7300	2029	2763
	^{241}Pu	4399	1535	303	454	5348	4193	671	975
	sum	20570	10107	20359	9755	21874	11609	19241	6401
Fertile	^{232}Th	360619	346061	256661	244361	0	0	0	0
	^{238}U	0	0	116496	108912	392972	376647	403000	385228
	^{240}Pu	6760	1663	354	544	8858	6161	1189	1567
	sum	367379	347724	373511	353817	401830	382808	404189	386795

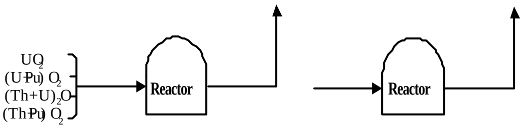

그림 1. 비순환 핵연료 주기

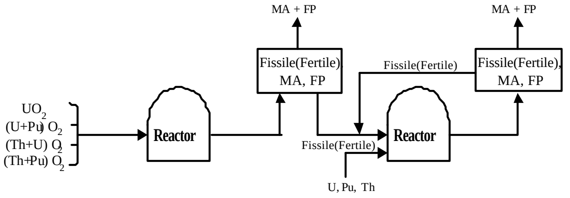

그림 2. Fissile(Fertile) 재순환 핵연료 주기

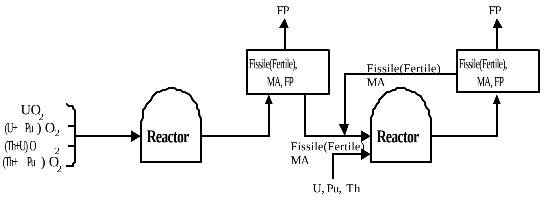

그림 3. Fissile(Fertile)+MA
재순환 핵연료 주기

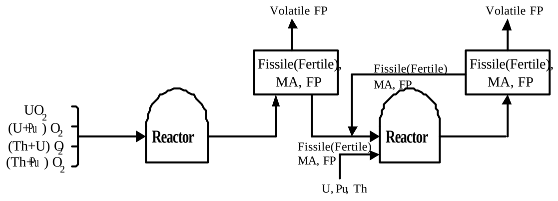

그림 4. Fissile(Fertile)+MA+FP
재순환 핵연료 주기

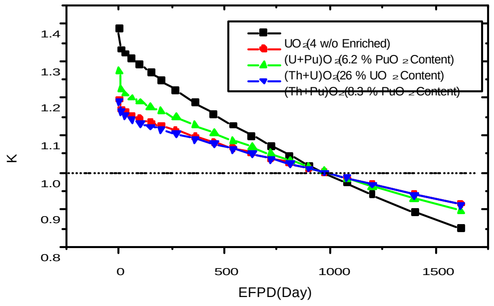

그림 5. 비순환 주기에서의 무한증배계수 변화

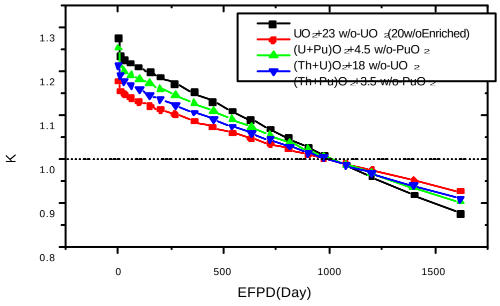

그림 6. 재순환 주기에서의 무한증배계수 변화

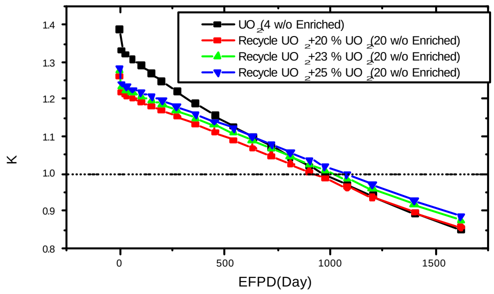

그림 7. UO_2 핵연료의 재순환시 추가비에따른 무한증배계수값 변화

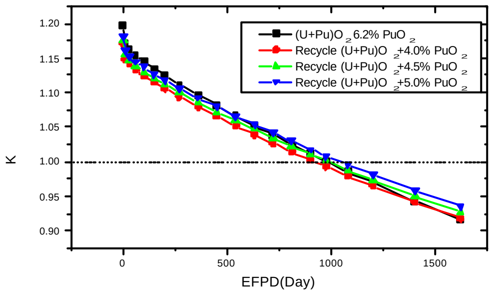

그림 8. (U+Pu)O_2 핵연료의 재순환시 추가비에따른 무한증배계수값 변화

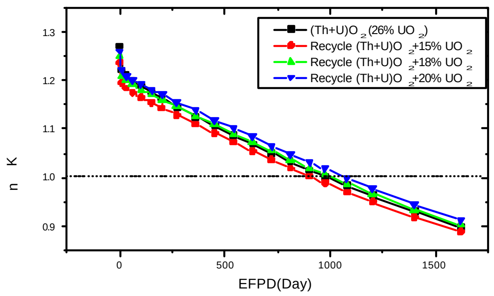

그림 9. (Th+U)O_2 핵연료의 재순환시 추가비에따른 무한증배계수값 변화

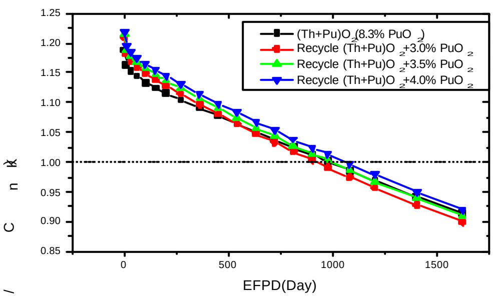

그림 10. (Th+Pu)O_2 핵연료의 재순환시 추가비에따른 무한증배계수값 변화

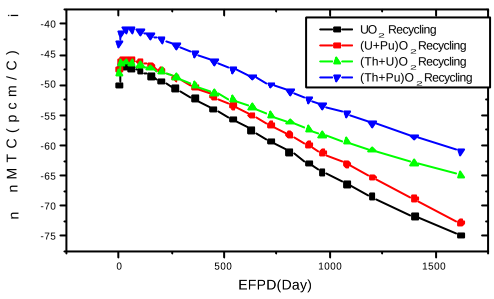

그림 11. 재순환 주기에서의 MTC값 비교

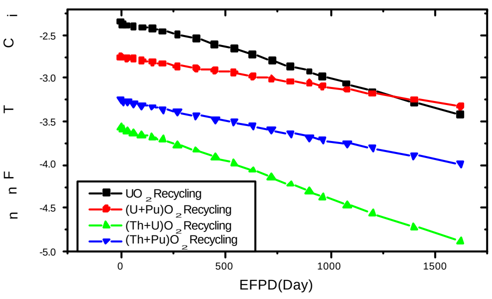

그림 12. 재순환 주기에서의 FTC값 비교