

## 우라늄/토륨 핵연료를 이용한 APR-1400용 비균질 노심설계

### A Heterogeneous Core Design with U/Th Fuel for APR-1400

배강목, 김명현

경희대학교

경기도 용인시 기흥읍 서천리 1

주형국

한국원자력연구소

대전광역시 유성구 덕진동 150

#### 요 약

핵확산저항성과 경제성을 최적화시킨 우라늄 씨드 핵연료집합체와 토륨기반 블랭킷 핵연료집합체를 채택하는 비균질 노심을 APR-1400 원자로를 대상으로 설계하였다. 씨드는 18개월 주기의 3 batch로 장전하고 블랭킷은 씨드 9주기(14.5년)동안 1 batch로 장전하는 핵주기를 적용하였다. 씨드와 블랭킷의 노심장전 비율은 1:1로 설계하였으며 노심안전성, 핵확산저항성과 경제성을 비교하였다. 노심설계 결과 APR-1400  $UO_2$  노심보다 핵확산저항성과 경제성이 좋게 나타났으며 안전성인자도 높게 평가되었으나, 씨드와 블랭킷의 출력불균형 차이로 생긴 과도한 출력 침투현상을 제어할 수 없었다.

#### Abstract

Seed and blanket assembly module design concept, KTF which was optimized for the proliferation resistance and economics was tested for the application to advanced PWR, APR-1400. A three batch strategy was applied for seed 18 month cycle length and single batch was applied for blanket, which should be stayed in the core for up to 9 seed cycles(14.5 years). A heterogeneous thorium fuel core with the seed-to-blanket ratio of 1:1 was examined in the aspects of core safety, proliferation resistances and fuel cycle costs. It was shown that designed core was better than the

current APR-1400  $\text{UO}_2$  core in proliferation resistance and fuel cycle costs, however BP design and core loading pattern should be re-optimized to control the high pin peaking.

## 1. 서론

토륨핵연료는 핵확산저항성 측면에서 매우 큰 장점이 있으며 이를 이용하려는 연구를 여러 기관에서 수행하고 있다. 그 예로써, 이스라엘 Ben-Gurion 대학의 RTF<sup>[1]</sup>, MIT에서 제안한 WASB<sup>[2]</sup>(Whole Assembly Seed and Blanket) 개념과 경희대학교에서 연구중인 KTF<sup>[3-4]</sup> 설계안이 있으며 각각의 설계안은 서로 다른 특징을 가지고 현재까지 지속적으로 연구중이다. MIT에서는 WASB 설계안을 이용하여 18개월 주기길이의 PWR 노심설계를<sup>[5]</sup> 수행하고 있으며, 경희대학교에서는 차세대원자로인 APR-1400을 대상으로 KTF를 이용한 노심설계를 수행하고 있다<sup>[6,7]</sup>. KTF 설계 개념은 씨드와 블랭킷을 1:3 비율로 장전하여 핵확산저항성과 경제성에 대하여 최적화한 설계안이다. 1:3의 비율로 씨드와 블랭킷을 노심에 장전할 경우 핵확산저항성과 경제성은 높아지지만 높은 출력차이로 인하여 주기초에 씨드 핵연료집합체에서의 높은 핵연료봉 침투치를 낮추기가 어렵다. 씨드와 블랭킷 사이의 높은 출력차이를 줄이기 위해서는 블랭킷의  $\text{UO}_2$  농축도를 높이고 잉여반응도를 BP로 제어하여 씨드와의 반응도 차이를 줄이는 방법이 있다. 이 경우 블랭킷은 3주기까지는 반응도가 평탄하게 유지되지만 4주기부터 점차 감소하여 6주기에는 매우 낮은 반응도를 갖게된다. 즉, 블랭킷의 반응도가 감소하는 효과는 노심의 주기길이를 짧게 만들어 경제적으로 이득이 작고 블랭킷의 반응도 감소에 의한 침투봉출력치가 증가하여 노심설계의 어려움이 있다<sup>[6]</sup>. 앞서 블랭킷의 반응도를 높여 설계하는 것은 한계가 있지만 블랭킷에 장전하는  $\text{UO}_2$ 의 농축도와 장전량을 조절하면 블랭킷은 부의 반응도값으로 일정하게 유지할 수 있으며 이를 이용하여 주기길이의 변동이 작은 노심을 설계할 수 있었다.<sup>[7]</sup> 그러나 블랭킷의 반응도가 작아 노심에서의 침투봉출력치가 높게 나타났다. 열출력 차이를 줄이는 또다른 방법은 씨드와 블랭킷의 장전비율을 1:3에서 1:1등으로 변화시키는 방법이 있다. 본 연구에서는 씨드와 블랭킷의 비율을 1:1에 근접하게 설계하는 방안을 모색하였고, KTF 최적설계안을 바탕으로 출력차이를 줄일 수 있도록 설계안을 변경하였으며, 차세대 원자로인 APR-1400을 모델로 하여 노심설계를 수행하였다. 9 주기 동안의 노심설계를 수행하여 핵적안전성, 핵확산저항성과 경제성을 평가하고 APR-1400  $\text{UO}_2$  노심과 결과를 비교하였다. 1:1 비율로 설계할 경우 MIT의 WASB 개념과 비슷하지만 U/Zr 금속핵연료를 사용하므로 여전히 차별을 두고 있다.

## 2. 핵연료집합체 설계방법

토륨을 사용하는 핵연료주기에는 두 가지 개념의 핵연료집합체를 사용한다. 본 연구에서 사용한 핵연료집합체 제원은 씨드와 블랭킷의 기하학적 구조와 구성물질 변화에 따른 최적 설계안 자료<sup>[4]</sup>를 바탕으로 노심설계의 문제점을 해결할 수 있는 설계방향으로 최적설계안을 변경하였다. 최적 설계안은 핵확산저항성을 평가하는 평가지수(BCM, SNS, TG)에 의해 현재의 LWR보다 월등한 핵확산저항성을 갖음을 확인한 바 있다. 블랭킷 핵연료집합체는 9주기를 설계목표로 하였으며 연소도에 따른 반응도 변화를 최소화해야 재장전주기의 주기길이를 일정하게 설계할 수 있다. 또한 블랭킷 핵연료집합체는 전주기에 걸쳐 부(-)의 반응도값을 가지므로 씨드에서 반응도를 보상해야 하므로 농축도가 높아야 한다. 이는 씨드와 블랭킷 사이에서의 출력차이를 심화시켜 피킹이 발생하며, 출력 피크를 제어하기 위한 방안으로 블랭킷의 반응도를 최대로 높여야 하는데 이 경우 감속재 대 핵연료비를 줄이는 방법이 유리하다. 스펙트럼경화 효과는 블랭킷 핵연료집합체내 Th-232의 수십 eV~수십 KeV 에너지대에 존재하는 공명흡수 반응을 크게하여 U-233의 핵변환에 유리하게 작용하며 블랭킷의 P/D 비율이 작을수록 좋다. P/D 비율이 작으면 또한 핵연료 장전량이 증가하므로 Th-232의 장전량에 비례하여 U-233 핵종의 생성량이 증가한다. 따라서 본 연구에서는 APR-1400 원자로의 핵연료 반경인 0.485 cm를 블랭킷의 반경으로 사용하였다. 씨드 핵연료집합체는 높은 출력을 제어하기 위하여 8 w/o의 가돌리니아 흡수봉 20 개를 사용하였으며, 가이드 튜브 주변의 핵연료봉은 저농축 핵연료봉을 사용하였다. 씨드 핵연료봉은 경제성을 좋게하기 위하여 블랭킷보다 반경을 작게 설계하였다. 씨드의 반경을 증가시켜 P/D 비율을 감소시키고 핵연료 장전량을 늘여도 주기길이 증가는 크지 않고 k-inf.의 감소 기울기만 작아진다. 씨드의 반경이 0.355 cm에서 APR-1400의 핵연료 반경인 0.485 cm로 늘어날 경우 경제성은 두배로 감소하였다. 따라서 경제성을 유지하기 위하여는 씨드 핵연료의 반경을 작게하고 BP를 사용하여 반응도를 제어해야 한다. 핵연료집합체 설계제원은 표 1에 나타내었다.

## 3. 재장전주기 노심설계

### 3.1 노심장전모형

APR-1400은 18개월 주기길이를 갖는 차세대 원전으로 3983 MWth의 열출력을 갖는다. 본 연구에서는 초기에 씨드와 블랭킷의 비율을 1:3으로 설계하여 MIT에서 수행중인 WASB(Whole Assembly Seed and Blanket)개념보다 핵확산저항성과 경제성이 우수한 설계안을 확보하는 것이었다. 그러나 1:3의 비율로 설계시 높은 핵확산저항성과 경제성을

갖지만 seed에서의 높은 열출력을 제어할 수 없어 씨드와 블랭킷의 비율을 1:1로 낮추어 설계하고자 하였다. 노심의 장전모형은 중성자 누설을 최소화하고 노심내 침투봉출력값을 최소화하는 위치를 탐색하였다. 노심의 비출력은 블랭킷의 반경이 증가하여 44.7 W/g에서 40.2 W/g으로 감소하였다. 그림 1은 1/4 노심의 장전모형을 나타낸 것이다. 씨드와 블랭킷 핵연료집합체가 각각 108, 133개로 약 1:1의 비율로 장전되고 노심외곽은 모두 블랭킷으로 장전하였다. 블랭킷은 씨드 재장전 5 주기후에 노심외곽의 연소도가 낮은 핵연료 집합체는 노심내부로, 노심내부의 연소도가 높은 블랭킷 핵연료집합체는 노심외곽으로 재장전하였다. 이 경우 약간의 주기길이 증가효과를 보였다.

### 3.2 노심안전성 평가

그림 2는 재장전 9주기동안의 주기길이를 나타낸 것이다. 18개월 주기인 경우 1주기의 연소도는 19.6 MWd/kgHM로 계산되는데 노심설계 결과 1주기에서는 약간 길게 나타나고 2주기 이후는 조금씩 감소하는 경향을 보였다. 9주기의 노심 평균 주기길이는 19.8 MWd/kgHM로 18개월 주기를 만족하였고 씨드와 블랭킷 핵연료집합체의 평균 방출연소도는 각각 85 MWd/kgHM과 115 MWd/kgHM로 계산되었다. 임계보론 농도는 9주기에 걸쳐 최대 1000 ppm을 넘지 않으므로 APR-1400 UO<sub>2</sub> 노심보다 MTC 측면에서 유리하였으며, 주기초에는 -33.2 pcm/°C에서 주기말에는 -77.1 pcm/°C로 큰 부의 값을 가졌다. 감속재 온도계수는 재장전 주기에 걸쳐 모두 충분한 부의 값을 가지므로 APR-1400 UO<sub>2</sub> 노심보다 안전성이 증대되었다고 평가할 수 있다. FTC의 경우 주기초에는 -1.5 pcm/°C 값을 가졌고 주기말에는 -1.7 pcm/°C로 계산되었다. 노심의 반경방향 상대출력분포는 그림 3에 나타내었다. ARP-1400의 반경방향 상대출력분포 제한치는 1.58인데 비하여 본 연구에서는 최대 2.16으로 높게 나타났고 침투봉출력도 설계제한치를 만족하지 못하였다. 그림 5는 주기별 연소도에 따른 침투봉출력값이다. 씨드에서는 가돌리니아를 8 w/o 20개를 사용하였는데 가돌리니아의 이차침투 현상이 약 20~25 MWd/kgHM 연소도 부근에서 나타난다. 이로 인하여 재장전 2 주기에서 침투봉출력값이 가장 크게 나타나고 있으며 주기가 반복될수록 점차 작아지는 경향을 보였다. 이것은 현재의 설계 노심이 평형상태로 설계되지 않은 것을 의미하며, 블랭킷의 반응도가 연소도에 따라 감소하기 때문이다. 노심계산결과 침투봉출력값이 크게 나타났지만 BP 설계와 장전모형 탐색에 의하여 침투봉출력값을 감소시킬 예정이며 향후 DNB 계산을 수행할 예정이다.

### 3.3 핵확산 저항성 평가

핵확산 저항성을 평가하기 위해서는 사용후핵연료 집합체내의 플루토늄의 벡터와 양이 중요하다. 플루토늄의 양이 적을수록 유리하며 또한 플루토늄내 핵분열물질인 Pu-239와 Pu-241의 양이 적을수록 유리하여 BCM이 크게 된다. 이는 상대적으로 방사붕괴의 열원인 Pu-238의 양이 크을 의미하며 TG와 SNS값이 크게되어 핵확산저항성이 높아진다. 그림 5는 플루토늄의 방출율을 비교한 것으로 같은 기간내에 같은 출력을 내는 경우 생성되는 플루토늄의 생성비율을 나타낸 것이다. 블랭킷 핵연료집합체에서는 거의 플루토늄이 생성되지 않으며, 노심전체의 생성률도  $UO_2$  노심의 1/2에 해당하는 수준이다. 블랭킷 핵연료집합체는 재장전 9주기 이후 방출되며 9주기이후 사용후핵연료 처리량은  $UO_2$  노심에 비하여 36.8% 감소한다. 그림 6은 APR-1400  $UO_2$  노심에서 연소도에 따른 플루토늄 동위원소의 생성변화를 나타낸 것이고, 그림 7, 8은 각각 씨드와 블랭킷에서의 플루토늄 동위원소의 생성비율을 나타내었다. 그림에서 보듯이 씨드와 블랭킷에서의 Pu-238 생성률은  $UO_2$  노심과 거의 같으므로 SNS, TG 지수값이 비슷하게 나타나며 Pu-239, 241은 상대적으로 낮기 때문에 BCM은 크게되어 핵확산 저항성이 높음을 알 수 있다. 토륨 핵연료를 사용하는 경우 U-233의 생성을 목표로 하지만 핵임계관점에서 U-233의 양을 제한해야 한다. 우라늄 대비 핵분열 우라늄의 비율이 12w/o 보다 낮아져야 하는데 아래의 식과 같이 표현된다.

$$\frac{U^{233} + 0.6 * U^{238}}{U^{tot}} \leq 12 \text{ w/o}$$

그림 9는 우라늄 동위원소들의 연소도에 따른 변화를 보여준 것이다. 평가결과 주기가 진행함에 따라 블랭킷에서의 U-233 잔존량이 증가하여 12w/o에 근접하고 있으나 안전한 계치 이내로 핵임계에 문제가 없음을 보였다.

### 3.4 경제성 평가

9주기 재장전 노심의 경제성을  $UO_2$  노심과 비교하기 위하여 선행핵연료 주기와 후행핵주기에서 핵연료 처리비용만을 고려하여 평가하였다. 선행핵연료 주기의 주기비용은 현재가치에 근거하여 평가되므로 원자로에서 사용될 시점에서의 비용으로 환산하여야 한다. 계산식은 아래와 같이 사용되며 FC는 원자로내에서 사용될 시점에서의 미래비용이고 C는 실제비용,  $r_y$ 는 할인율,  $t_i$ 는 비용이 지출된 시점과 사용시점사이의 시간간격이다. 이 계산에서 할인율은 5%로 가정하였으며 플랜트 효율과 이용율은 각각 35.15%와 95%

로 사용하였다. 각 공정별 사용한 원가<sup>[8]</sup>는 표 2에 나타내었다.

$$FC = C*(1 + r_y)^t$$

위식을 사용하여 미래시점에서의 주기비용을 계산하였다. 계산 결과는 표 3에 나타내었으며 단위시간당의 전기출력 생산에 필요한 가격으로 환산하였다. 계산결과 선행핵연료주기만 비교하면  $UO_2$  노심이 경제성이 좋으나 사용후핵연료 처리비용을 고려하면 토륨핵연료 노심의 경제성이 유리하였다. 본 연구에서 사용하는 U/Zr 금속핵연료의 자세한 경제성 단가를 알 수 없어  $UO_2$  핵연료에 준하여 계산하였다. 따라서 계산결과는 다소 차이를 보일 수 있지만 현재의 설계안은 충분히  $UO_2$  노심과 대등한 경제성을 가질 수 있음을 보여준다.

#### 4. 결 론

토륨핵연료를 사용하는 최적 KTF 설계안을 바탕으로 APR-1400 원자로를 이용한 노심설계 결과 핵확산저항성이 APR-1400  $UO_2$  노심보다 높고 경제성이 높은 노심설계가 가능하였다. 9주기 재장전 노심에 대하여 플루토늄 생성률과 양에 의한 핵확산 저항성은 APR-1400  $UO_2$  노심보다 2배이상 높은 것으로 평가되었으며 선행핵주기와 후행핵주기를 포함한 경제성도  $UO_2$  노심과 경쟁력이 있음을 보였다. 그러나 씨드와 블랭킷의 출력분포 불균형이 크기 때문에 첨두봉출력인자가 설계제한치보다 크게 나타났으며, 향후 BP 사용과 장전모형 및 장전비율을 변경하는 방안을 이용하여 향후 첨두봉출력 인자를 설계 제한치 이내로 제어하는 연구를 수행할 예정이다.

#### 참고문헌

1. Galperin, A., et al. "A Thorium-Based Seed-Blanket Fuel Assembly Concept to Enhance PWR Proliferation Resistance", Proc. Int. Conf. on Future Nuclear Systems, Jackson Hole, WY, USA, #532, 1-8, (1999).
2. D. Wang, M. J. Driscoll, M. S. Kazimi "Design and Performance Assessment of a PWR Whole-Assembly Seed and Blanket Thorium Based Fuel Cycle," MIT-NFC-TR-026, MIT Nuclear Engineering Department, September (2000).
3. M.H. Kim and I.T. Woo "Once-Through Thorium Fuel Cycle Options for the

Advanced PWR Core”, Proc. ANS Int. Top. Mtg. on Advances in Reactor Physics, Pittsburgh, PA, USA, XV.C.3, 1-11, (2000).

4. K. H. Kim, K. M. Bae and M. H. Kim, Optimization of Thorium-Based Seed and Blanket Fuel Assembly Design for PWR, Trans. Am. Nucl. Soc. vol. 86, pp. 302-303, Florida, USA, (2002).
5. D. Wang, M J. Driscoll, M.S. Kazimi and E. E. Pilat, A Heterogeneous Th/U Core for Improved PWR Core and Spent Fuel Characteristics, Proc. Int. Cong. on Advanced Nuclear Power Plant, #1131, pp. 1-8, Florida, USA, (2002).
6. M. H. Kim, K. M. Bae and K. H. Kim, Nuclear Design Study on Once-Through Thorium Fuel Cycle for PWR, PHYSOR 2002, #9E-08, pp. 1-8, Seoul, Korea, October, (2002).
7. 배강목, 김관희, 김명현 “토륨핵연료를 이용한 비균질 노심설계 방안연구”, 2002 추계 학술발표회 논문집, 한국원자력학회, (2002).
8. The Economics of the Nuclear Fuel Cycle, OECD/NEA, (1994).

표 1 핵연료집합체 설계제원

Parameter	Seed	Blanket
Fuel Assembly Size [cm]	20.778	
Dimensions [cm]	20.778	20.778
Fuel Material Composition	U/Zr Metal alloy U enrichment 11/9 w/o	(U+Th)O <sub>2</sub> U volume content 15 v/o U enrichment 10 w/o
Number of Fuel Rods	236	236
Fuel Pellet Radius [cm]	0.325	0.413
Gas Gap Thickness [cm]	No	0.0085
Cladding Thickness [cm]	0.03	0.057
Fuel Rod Radius [cm]	0.355	0.485
Fuel Cell Pitch [cm]	1.285	1.285
Moderator/Fuel Volume Ratio	3.78	1.9
Seed/Blanket Volume Fractions	45	55

표 2 경제성 단가

	Lead Time (months)	Loss Factor (%)	Unit Prices(\$/kg)
Ore Purchase	24		50
- Uranium			85
- Thorium			30
- Zirconium			
Conversion	18	0.5	8
Enrichment	12	0.25	110
Fabrication	6	1.0	275
Discount Rates	5 %		
Spent Fuel Storage	600 \$/kg		

표 3. 경제성평가 결과 [mills/kWe-hr]

Component	Ref. PWR	U/Th Core (9 cycles)		
		Seed	Blanket	
			U	Th
Ore	1.14	1.22	0.06	0.03
Conversion	0.18	0.19	0.01	-
Enrichment	1.79	2.30	0.12	-
Fabrication	0.69	0.30	0.02	0.09
Front End	3.78	4.01	0.32	
Spent Fuel Storage	1.44	0.57	0.22	
Total	5.23	5.12		



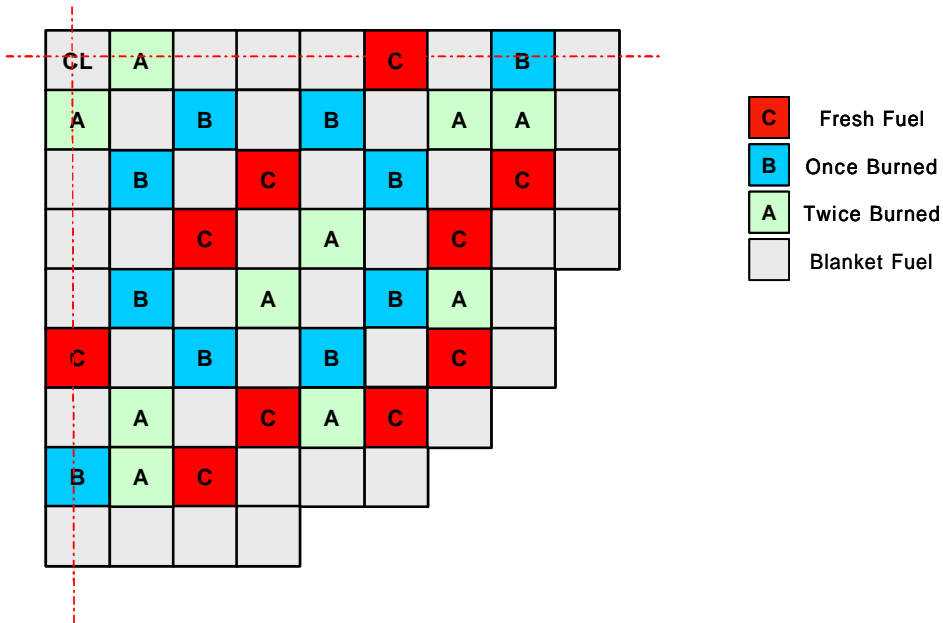


그림 1. 1/4노심 장전모형.

0.320	0.818	0.428	0.445	0.605	2.070	0.697	1.580	0.275
0.453	0.931	0.599	0.610	0.779	2.074	0.767	1.263	0.279
0.595	1.008	0.741	0.748	0.871	1.879	0.812	1.170	0.336
	0.440	1.448	0.569	1.737	0.695	1.514	1.380	0.270
	0.602	1.559	0.776	1.677	0.825	1.280	1.142	0.285
	0.732	1.508	0.880	1.522	0.877	1.148	1.080	0.354
		0.667	1.993	0.659	1.791	0.713	1.690	0.237
		0.925	2.196	0.821	1.584	0.817	1.596	0.272
		1.000	1.980	0.879	1.410	0.879	1.640	0.366
BOC			0.630	1.251	0.715	2.089	0.444	0.134
MOC			0.835	1.158	0.800	1.961	0.527	0.164
EOC			0.893	1.054	0.844	1.803	0.632	0.232
				0.634	1.930	1.449	0.314	
				0.691	1.563	1.210	0.351	
				0.742	1.385	1.111	0.433	
					0.746	1.671	0.219	
					0.794	1.508	0.241	
					0.866	1.580	0.323	
						0.313		
						0.354		
						0.459		

그림 2. 노심의 반경방향 상대출력분포

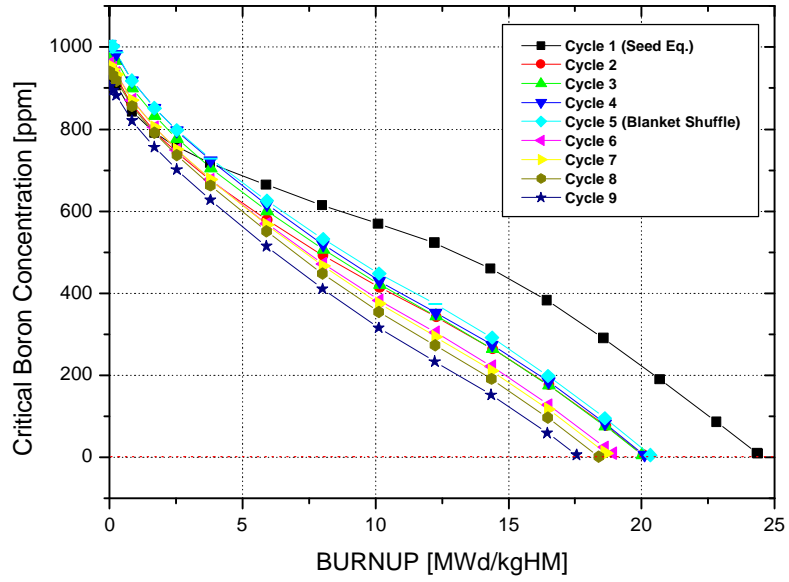


그림 3. 연소도에 따른 9주기 임계보론농도.

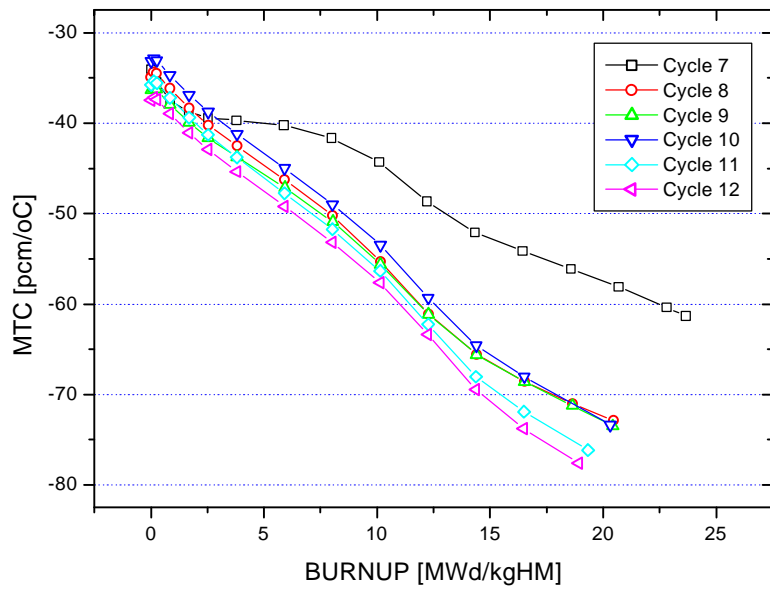


그림 4. 연소도에 따른 감속재온도계수.

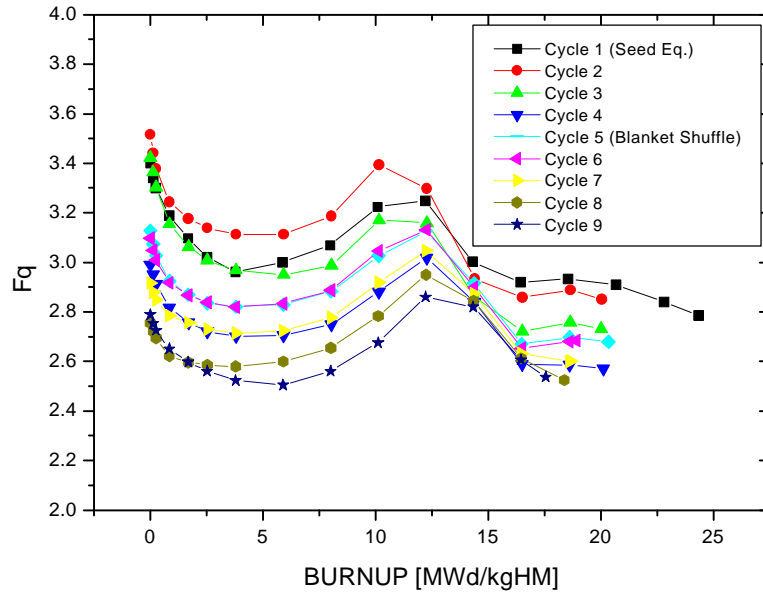


그림 5. 연소도에 따른 주기별  $Fq$ .

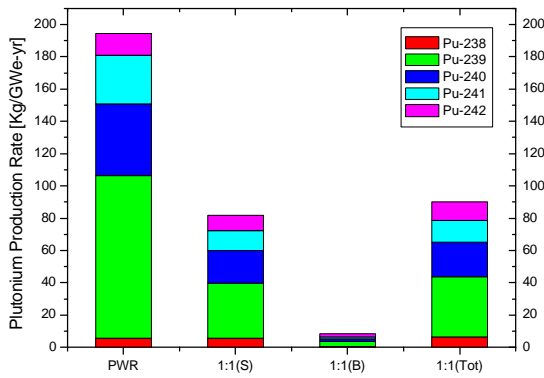


그림 6. PWR과 U/Th 설계노심에서의 플루토늄 생성률.

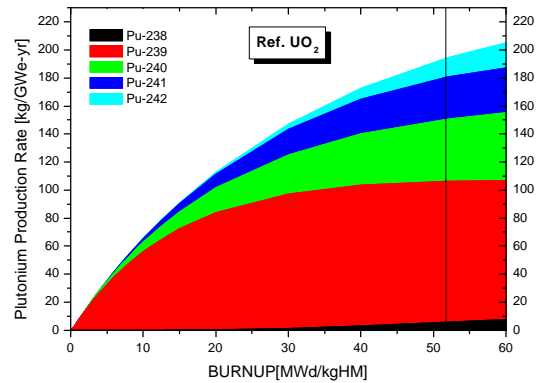


그림 7.  $UO_2$  노심에서 연소도에 따른 플루토늄 핵종별 생성률.

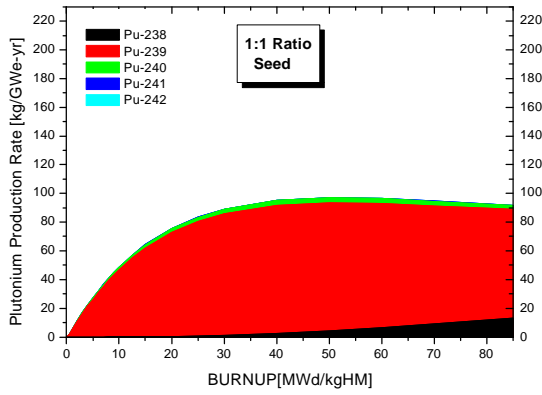


그림 8. 씨드에서의 연소도에 따른 플루토늄 핵종별 생성률.

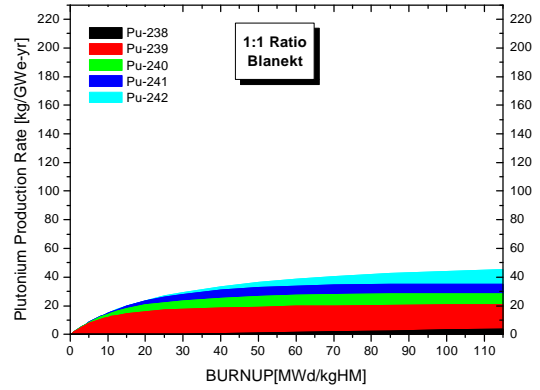


그림 9. 블랭킷에서 연소도에 따른 플루토늄 핵종별 생성률.

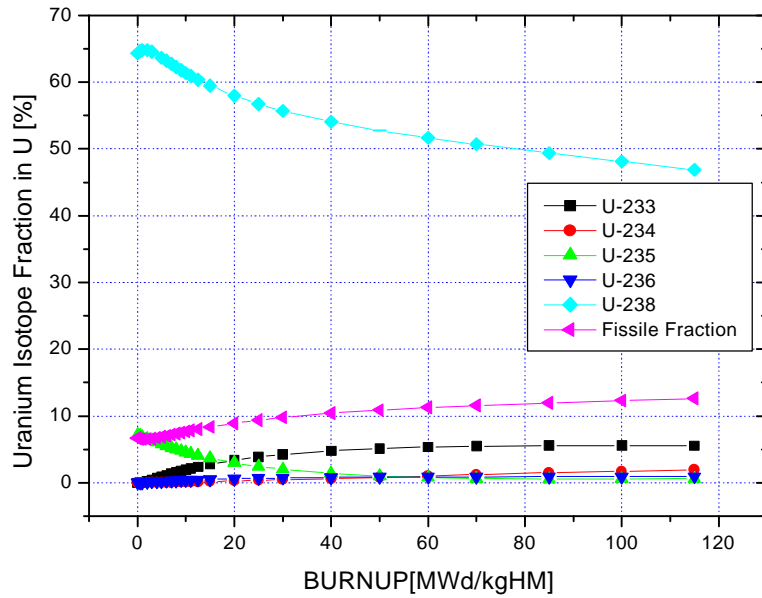


그림 10. 설계노심의 연소도에 따른 우라늄 동위원소의 변화율.