

2003 추계학술발표회 논문집  
한국원자력학회

## 이중구조 가연성독봉의 재장전 노심설계 타당성 평가

### A Feasibility Study on Reload Core Design with Duplex Burnable Poison Rods

이대진, 김명현  
경희대학교  
경기도 용인시 기흥읍 서천리

송근우  
한국원자력연구소  
대전광역시 유성구 덕진동 150번지

#### 요 약

Duplex BP의 노심에 대한 적용 타당성을 평가하기 위해 설계변수에 대한 민감도분석을 통해 도출한 최적 핵연료집합체를 이용하여 노심설계를 수행하였다. 비교 노심은 18개월과 24개월 주기 한국표준형원자로를 선정하였고 노심 계산은 주기길이, 첨두봉출력 그리고 감속재온도계수에 대해서만 고려하였다. 전체적인 노심계산 결과, 첨두봉출력과 감속재온도 계수 측면에서는 18개월과 24개월 주기 모두 Gadolinia BP 노심과 유사한 경향을 보였다. 그러나 주기길이 측면에서는 18개월은 Gadolinia BP 노심과는 큰 차이가 없었지만 24개월 주기 노심에 대해서는 비교 노심에 비해 주기길이를 7일 연장시켜 원자로 운전에 대한 경제성 측면에서 유리하게 나타났다. 위와 같은 계산과정을 통해 본 연구에서는 장주기 노심에 대한 Duplex BP의 적용 가능성을 확인하였다.

#### Abstract

In order to evaluate the feasibility of duplex BP, nuclear core design was performed using optimized fuel assembly contained duplex burnable poison rods. Korean Standard Nuclear Power Plants(KSNP) based on 18 and 24 month fuel cycle were selected as reference core. As the results of core calculation, pin peaking and MTC of the core with duplex BP were similar to those of the core with gadolinia BP in two kinds of fuel cycle.

In aspect of fuel cycle length, the core with duplex BP based on 18 month fuel cycle showed few days difference with reference core. The calculated fuel cycle length based on 24 month fuel cycle was longer 7 days than that of core with gadolinia BP. It was confirmed that the duplex BP is applicable to the extended fuel cycle core.

## 1. 서론

장주기 노심의 효과적인 반응도 제어를 위해서 그리고 한국 고유의 기술로 세계적인 가연성 흡수 소결체 시장에서의 우위를 점하기 위해서 이중구조 개념의 가연성 독봉을 한국원자력연구소에서 제시한 바 있다. 이중구조 가연성 독봉(Duplex BP)의 구조는 핵연료 펠릿(fuel pellet) 크기의 소결체를 내부에는 natural  $UO_2-Gd_2O_3$ 를, 외부에는 enriched  $UO_2-Er_2O_3$ 의 서로 다른 독물질을 위치시킨 형태를 이루고 있으며 그림 1에 Duplex BP의 구조를 나타내었다.<sup>(1)</sup> 지난 연구에서는 이러한 Duplex BP의 핵설계 측면에서의 특성을 평가하기 위해 3개의 일체형 가연성 독봉(integral burnable poison rods)인 gadolinia, erbia, IFBA를 이용하여 등가 독봉집합체를 설계한 후 핵특성을 비교하였다.<sup>(2)</sup> 또한 설계변수에 대한 민감도분석을 통해 18개월과 24개월 주기에 대한 최적 핵연료 집합체를 설계하였다.<sup>(3)</sup> 핵연료 집합체에 대한 핵특성은 무한증배계수 측면에서 Duplex BP가 가장 평탄한 감쇠곡선을 보였으며, 첨두봉출력 측면에서는 핵연료 집합체내 다량의 독봉을 장전한 Erbia가 가장 낮은 첨두봉출력을 보였다. 반응도억제가 측면에서는 IFBA가 가장 우수하게 나타나 잔존독작용이 가장 적은 것으로 나타났다, 감속재온도계수 측면에서는 0.5 eV 근방에서 높은 공명흡수단면적을 갖는 Erbia가 가장 낮은 음(-)의 MTC를 보였다. 종합적으로 Duplex BP의 핵특성은 무한증배계수와 첨두봉출력 측면에서 Gadolinia보다 좋은 핵특성을 보였으나 감속재온도계수 측면과 반응도 억제가 측면에서는 거의 유사한 경향을 보였다.<sup>(4)</sup>

본 연구의 목적은 이렇게 도출한 최적 독봉집합체를 실제 노심에 적용하여 Duplex BP의 노심 적용 타당성을 타진해보는 것이다. 비교 노심은 18개월 및 24개월 주기의 영광 3/4호기의 노심으로 선정하였으며 노심 계산은 크게 3가지 측면에서만 고려하였다. 주기길이, 첨두봉출력인자 그리고 감속재온도계수 측면에서만 고려하였고 열수력 측면 안전성과 경제성은 고려하지 않았다.

## 2. Duplex BP를 적용한 노심 설계

### 2.1 최적 핵연료 집합체

지난 연구에서 Duplex BP의 설계변수에 대한 민감도 분석을 통해 최적 핵연료 집합체를 설계하였다. 12개와 16개의 Gadolinia BP가 장전된 핵연료 집합체와 등가를 이루는 Duplex BP의 개수를 결정하고 이를 이용해서 개략적인 핵연료 집합체를 설계하였다. 12개와 16개의 Gadolinia BP에 대해서 각각 16개와 24개의 Duplex BP를 이용하여 등가 반응도를 갖도록 하였으며, 내부 반경크기, 독물질의 농축도 그리고 독봉의 위치에 따른 설계변수에 대해 민감도

분석을 수행하였다. 최적 핵연료 집합체 선정방법은 2가지 조건을 최대한 만족하도록 설계하였다. 하나는 연소 중 낙타 혹(hump)모양과 같이 나타나는 무한증배계수의 2차 첨두현상을 감소시키고 최대한 주기초 평탄한 감쇠곡선을 갖으며, 또 하나는 핵연료 집합체내 첨두봉출력을 최소화 시킬 수 있도록 설계하였다. 독봉위치에 대해서 감속재온도계수는 큰 변화가 없기 때문에 이는 고려하지 않았다. 그림 2는 이러한 조건을 만족하도록 설계한 최적 핵연료 집합체의 구조를 나타낸 것이고 표 1은 18개월과 24개월 주기에 대한 최적 Duplex BP 설계제원을 나타낸 것이다.

## 2.2 Reference Core

본 연구에서는 18개월과 24개월 주기 노심에 대해 Duplex BP의 적용성을 타진하기 위해 영광 3/4호기를 비교 노심으로 선정하였다. 현재 한국표준형 원자로심 관리계획에는 12개월 주기와 18개월 주기의 두 가지가 있으며 24개월 주기의 계획은 아직 수립되지 않고 있다. 18개월 주기 3배치 노심은 1주기와 2주기는 현 영광 3/4호기 핵연료 집합체를 장전하여 설계하였으며, 3주기부터 18개월 3배치 노형으로 설계하였다. 그리고 5주기에서 어느 정도 평형주기가 성립된다고 가정하였다. 또한 24개월 주기 3배치 노심은 18개월 주기로 평형상태에 도달한 노심을 24개월 주기로 확장하는 방법을 채택하여 노심이 24개월 평형주기 상태에 가능한 빨리 도달하도록 하였다. 이에 따라 6주기부터 24개월 3배치 노형으로 설계하였고, 9주기까지 모의하여 평형노심을 도출하였다. 표 2는 한국표준형원자로 노심의 24개월 주기, 3배치 노심의 핵연료 집합체 자료를 나타낸 것이다. 1주기 및 2주기는 12개월 주기 영광 3/4호기 노심과 마찬가지로 초기노심에는 저농축도봉을 사용하지 않은 핵연료 집합체, 52개 저 농축도봉 핵연료 집합체, 100개 저농축도봉을 사용한 핵연료 집합체가 혼합 사용되고 있으며 재장전 노심에 장전하는 핵연료 집합체는 모두 52개 저농축도봉 핵연료 집합체를 사용하고 있다. 저 농축도봉이 사용된 경우 저 농축도봉은 고 농축도봉에 비해 초기 노심에는 농축도를 1.0 wt% 낮게 하였으며 재장전 노심에는 0.5 wt% 낮게 하였다. 독물질로는 Gadolinia를 사용하고 있으며 1주기 및 2주기에서는 6 wt%  $Gd_2O_3$ 를, 18개월과 24개월 주기 평형노심까지 모두 8 wt%  $Gd_2O_3$ 를 천연우라늄 핵연료에 혼합하여 사용한다. 3주기 이후로 5주기까지 18개월 주기 평형노심과 6주기부터 9주기까지 24개월 평형노심에 장전되는 Gadolinia BP 핵연료 집합체는 각각 12개와 16개의 가연성 독봉을 사용하여 노심내 출력을 제어한다. 재장전 노심에 공급되는 핵연료집합체는 18개월은 4.5/4.0 wt%, 24개월은 4.95/4.45 wt% 핵연료 집합체가 장전된다. 비교노심의 핵연료 집합체 제원과 장전모형에 관한 자료는 한국원자력연구소로부터 입수하였다.

## 2.3 Duplex BP 노심 설계

Duplex BP 노심은 전 연구에서 수행하였던 최적 핵연료 집합체를 이용하여 설계하였다. 노심 장전 모형은 비교 노심의 장전모형을 이용하여 등가 반응도를 갖는 Duplex BP 핵연료 집합체를 동일 위치에 장전하는 등가 노심설계 개념으로 수행하였다. 1주기 및 2주기에서는 6 wt%  $Gd_2O_3$ 를 사용하고, 3주기 이후로 5주기까지 18개월 주기 평형노심과 6주기부터 9주기까지의 24개월 평형노심에 장전되는 Duplex BP 핵연료 집합체는 각각 16개와 24개의 가연성

독봉을 사용한다. 재장전 노심에 공급되는 핵연료집합체는 한국 표준형원자로와 동일하게 18개월은 4.5/4.0 wt%, 24개월은 4.95/4.45 wt% 핵연료 집합체를 장전된다. 그림 3은 18개월과 24개월 주기 평형노심의 장전모형을 나타낸 것이다. 노심설계는 HELIOS-MASTER 전산체계를 이용하여 수행하였다.<sup>(5)(6)</sup>

### 3 노심계산 결과

#### 3.1 주기 길이

주기길이 측면에서 Gadolinia BP 노심과 Duplex BP 노심은 18개월 주기에는 큰 차이가 없었지만 24개월 주기에는 7일 정도 주기길이가 연장되었다. 표 4는 24개월 3배치 노심의 평형 주기에 대한 Gadolinia BP 와 Duplex BP 핵연료 집합체를 장전한 노심의 주기길이를 비교한 것이다. 1주기와 2주기에는 Gadolinia BP와 Duplex BP사용 노심 모두 동일하게 12개월 주기를 만족하는 Gadolinia 독봉집합체를 사용하여 주기 길이가 동일하다. 그러나 3주기부터 서로 다른 가연성 독봉을 사용하게 되므로 이후 주기 길이의 약간에 변화가 있다. 두 노심 모두 18개월 주기 노심에 대해서 5주기에서 평형노심을 이루었는데 Gadolinia BP를 이용한 노심의 경우 430일, Duplex BP를 이용한 노심의 경우에는 428일로 2일의 차이를 보였으며 5주기에서 평형을 이루게 됨을 알 수 있다. 6주기에서 24개월 노형으로 설계하여 9주기에 두 노심은 모두 평형상태를 유지했다. 24개월 주기 평형노심은 비교 노심에 비해 9주기에 607일로 600일의 주기길이를 보인 Gadolinia BP 노심에 비해 7일 연장되었다. 결론적으로 주기길이 측면에서는 18개월 주기에 대해서는 큰 차이가 없지만 장주기인 24개월 노심에 대해서는 보다 노심 운영의 경제적 측면에서 유리하다 할 수 있다.

#### 3.2 첨두봉출력

노심내 첨두봉출력인자는 핵설계에서 중요한 설계 제한치 중 하나이다. 24개월 주기 한국표준형원전의 반경방향 첨두출력 허용치는 1.55로 이다. 그림 4는 18개월과 24개월 주기 Duplex BP 노심의 반경방향 출력분포를 나타낸 것이다. 18개월 노심에서는 1.172, 24개월 노심에서는 1.279로 모두 설계허용치를 만족하였다. 노심내 첨두봉출력인자 측면에서는 핵연료 집합체의 핵특성 계산결과와 동일하게 반경방향 첨두봉출력(Fr)은 전체적 연소구간에 걸쳐 Gadolinia BP 노심보다 낮은 첨두봉 출력인자 변화를 보였다. 그림 5는 주기별 평형노심의 Fr를 나타낸 것이다. 24개월 주기 노심에 대해서는 18개월 주기 노심에 비해 큰 차이를 보이지 않고 유사한 감소 경향을 보였고, 15 MWD/kg-U 에서 비교적 큰 폭으로 첨두봉출력인자가 감소하는 Gadolinia BP Core에 비해 Duplex BP Core는 선형적으로 감소하였다. 그림 6은 주기별 평형노심의 F<sub>Q</sub>를 나타낸 것이다. 18개월 주기 노심은 반경방향에 대한 첨두봉출력 결과 유사하게 전체적 연소구간에 대해서 비교 노심에 비해 낮은 첨두봉출력을 보인 반면 24개월 주기 노심은 15 MWD/kg-U까지 유사한 감소경향을 보이다가 그 이후로 Gadolinia BP 보다 약간 높은 첨두봉출력인자를 보였다.

표 4는 18개월과 24개월 평형노심에 대해 주요 연소 시점에서의 반경방향 첨두봉 출력인자

를 비교한 것이다. 표 4에서 보는바와 같이 18개월 주기 노심의 경우 주기초 Gadolinia BP 사용 노심에 비해 - 0.004%의 반경방향 침투봉 출력인자가 감소된 것을 확인할 수 있고, 연소중 최대 침투봉 출력인자 또한 -0.007% 정도 낮게 나타났음을 확인할 수 있다. 24개월 주기 노심의 경우 주기초 Gadolinia BP 사용 노심에 비해 - 0.002%의 반경방향 침투봉 출력인자가 감소된 것을 확인할 수 있고, 연소중 최대 침투봉 출력인자 또한 -0.003% 정도 낮게 나타났음을 확인할 수 있다. 결론적으로 그림으로는 18개월이 24개월에 비해 비교 노심에 비해 낮은 침투봉출력을 갖지만 실제 수치상으로는 큰 차이 없이 거의 유사한 침투봉출력을 가지게 됨을 알 수 있어 안전성 측면에서는 유사한 경향을 보인다고 판단된다.

### 3.3 감속재온도계수

18개월과 24개월에 대해 두 노심모두 음의 감속재온도계수를 보였으며, 18개월 주기 Duplex BP노심은 Gadolinia BP 장전 노심에 비해 연소도 전 구간에 걸쳐 그림 7에서와 같이 임계붕산농도가 낮게 나타났으며 주기초 임계붕산농도가 Gadolinia BP 장전 노심에 비해 80 ppm 정도 낮게 나타났다. 이는 Gadolinia BP 장전노심에 비해 Duplex BP 장전노심이 보다 음(-)의 감속재 온도계수를 갖게 하는 요인이 된다. 표 5는 주요 연소시점에서의 감속재 온도계수이다. 표 5에서 보는 바와 같이 주기초에는 Duplex BP 장전노심이 Gadolinia BP 장전 노심에 비해 주기 초에는 0.29 pcm/°C 정도 낮게 나타남을 확인할 수 있었다. 그러나 24개월 주기 노심에 대해서는 임계붕산농도가 연소 전 구간에 걸쳐 유사하게 나타났다. 이에 따라 감속재온도계수 또한 큰 차이를 보이지 않았다. Boron 사용 감소로 인한 감속재온도 측면에서 18개월보다 24개월 주기 노심에 대해 Gadolinia BP 노심보다 Duplex BP 노심이 유리하다 할 수 있다.

## 4. 결 론

민감도분석을 통해 도출한 18개월과 24개월 주기에 대한 최적 Duplex BP 핵연료 집합체를 실제 3차원 노심 계산으로 적용 가능성에 대해 타진해보았다. 노심계산은 주기길이, 침투봉출력인자, 임계붕산농도 그리고 감속재온도계수에 대해서 수행하였다. 주기길이 측면에서는 18개월 주기 노심에 대해서는 큰 차이 없이 유사하게 나타났지만, 장주기노심인 24개월 주기에 대해서는 비교노심에 비해 7일 연장시켰다. 핵연료 집합체에 대한 계산결과와는 달리 반경방향 침투봉출력인  $Fr$ 은 18개월과 24개월 모두 큰 차이 없이 유사한 경향을 보였으며, 축방향 침투봉출력을 고려한  $F_Q$  역시 연소도 전구간에 걸쳐 큰 차이를 보이지 못했다. 감속재온도계수 측면에서는 핵연료집합체 계산결과와 동일하게 큰 차이의 MTC 차이를 보이지 않고 유사하게 나타났다. 위 계산결과 대부분 Gadolinia BP를 사용했을 때의 노심과 유사한 노심특성을 보였고, 주기길이 측면에서만 7일 정도의 주기길이를 연장시켜 노심 운용에 대한 이득을 보였다. 그러나 충분한 장전모형 탐색을 수행하지 않고 단지 등가 반응도개념의 노심설계로서 비교해 본 것으로서 추후 연구 계획으로 자동 노심장전모형 탐색 코드를 이용하여 보다 객관적으로 노심설계를 수행할 계획이다.

## 참고문헌

1. 경수로용 신형핵연료 개발 ; 소결체재료신기술개발 보고서, KAERI/RR-2023/99, pp.37-38. 한국원자력연구소, (2000).
2. 차세대원자로기술개발 최종보고서 ; 노심특성 개량연구 및 노심 핵설계 평가(Vol. 2.2), TR.95ZJ16.J1999.115, (1999).
3. 이대진, 김명현 외, “장주기 노심에 대한 이중구조 가연성독봉의 핵설계 특성 평가”, 한국원자력학회 춘계학술발표회논문집, 경주, (2003).
4. 이대진, “이중구조 가연성 독봉의 핵설계 특성 평가,” 경희대학교 석사학위 논문, (2003).
5. R. Stammer et. al., "User's Manual for HELIOS," Scanpower, (1994).
6. 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).

표 1. 주기별 최적 Duplex BP 설계안

	Parameter	
	18개월 주기	24개월 주기
Inner Fuel Rod Material	Natural UO <sub>2</sub> +12wt% Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Natural UO <sub>2</sub> +12wt% Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Outer Fuel Rod Material	4.50wt% UO <sub>2</sub> +2wt% Er <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.95wt% UO <sub>2</sub> +2wt% Er <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Inner Fuel Rod Diameter (cm)	0.54480	0.56480
Outer Fuel Rod Diameter (cm)	0.82550	0.82550
Cladding Outer Diameter (cm)	0.97210	0.97210
Outer Annulus thickness	0.14035	0.13035

표 2. 다주기 계획을 위한 핵연료 집합체 제원

Assembly Type	UO <sub>2</sub> wt%	# of Rods	Burnable Absorbers			Cycle
	Normal/Low	Normal/Low	Material	wt%	# of BA's	Used
A	1.40	236				1
B	2.87/2.37	184/52				1
B1	2.87/2.37	176/52	Gd	6.0	8	1
C	3.37/2.87	184/52				1
C1	3.37/2.87	128/100	Gd	6.0	8	1
D	4.00/3.50	184/52				2
D1	4.00/3.50	176/52	Gd	8.0	8	2
D2	4.00/3.50	172/52	Gd	8.0	12	2
D3	4.00/3.50	124/100	Gd	8.0	12	2
E, F, G	4.50/4.00	184/52				3,4,5
E1,F1,G1	4.50/4.00	172/52	Gd	8.0	12	3,4,5
E3,F2,G2	4.50/4.00	168/52	Gd	8.0	16	3,4,5
H, I, J, K	4.95/4.45	184/52				6,7,8,9
H1,I1,J1,K1	4.95/4.45	172/52	Gd	8.0	12	6,7,8,9
H2,I2,J2,K2	4.95/4.45	168/52	Gd	8.0	16	6,7,8,9

표 3. 24개월 주기 3배치 Gadolinia BP와 Duplex BP 노심의 주기길이 비교

		1 주기	2 주기	3 주기	4 주기	5 주기	6 주기	7 주기	8 주기	9주기
Gadolinia BP Core	EFPD	353	338	401	430	430	595	602	600	600
	MWD/kgU	13.014	12.488	14.800	15.884	15.901	21.996	22.255	22.186	22.207
Duplex BP Core	EFPD	353	338	400	435	428	604	606	608	607
	MWD/kgU	13.014	12.488	14.759	16.104	15.795	22.359	22.431	22.513	22.484

표 4. 주요 연소시점에서의 반경방향 침투봉출력인자

	18 month fuel cycle			24 month fuel cycle		
	Gadolinia BP Core	Duplex BP Core	difference	Gadolinia BP Core	Duplex BP Core	difference
연소초	1.303	1.308	-0.004%	1.3562	1.3533	-0.002%
연소중 최대값	1.339	1.330	-0.007%	1.3295	1.3258	-0.003%

표 4. 주요연소시점에서의 감속재온도계수

	18 month fuel cycle		24 month fuel cycle	
	Gadolinia BP Core	Duplex BP Core	Gadolinia BP Core	Duplex BP Core
No.Xe. BOC	-3.26 pcm/°C	-4.97 pcm/°C	3.44 pcm/°C	2.52 pcm/°C
Eq.Xe BOC	-28.27 pcm/°C	-30.52 pcm/°C	-17.11 pcm/°C	-18.17 pcm/°C
Eq.Xe EOC	-70.93 pcm/°C	-71.45 pcm/°C	-72.80 pcm/°C	-73.36 pcm/°C



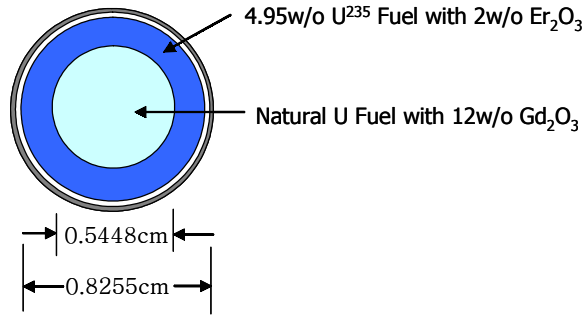
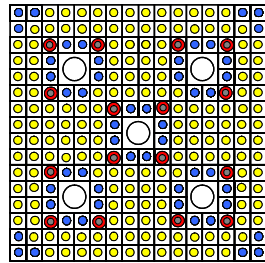
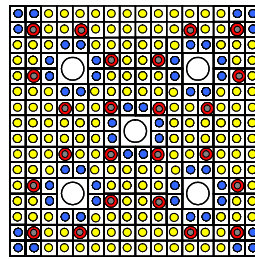


그림 1. Duplex BP Structure



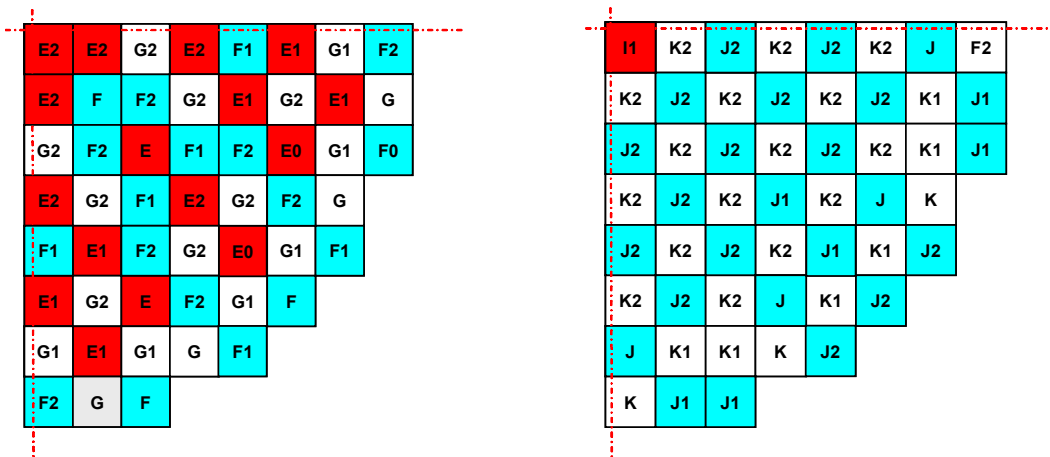
(a) 16 Duplex BP



(b) 24 Duplex BP



그림 2. Optimized Assembly Configurations



(a) Equilibrium core based on 18 month cycle (b) Equilibrium core based on 24 month cycle

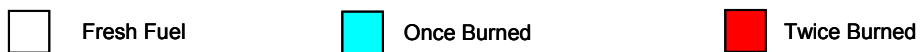
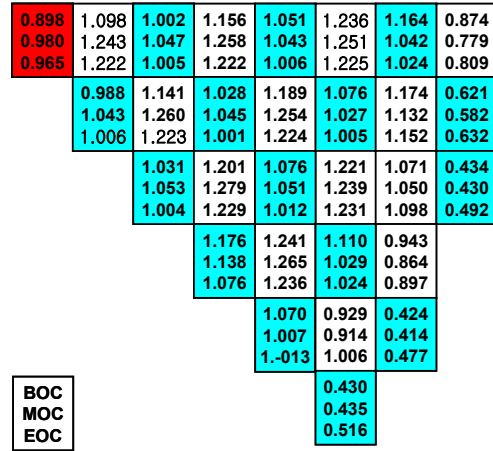
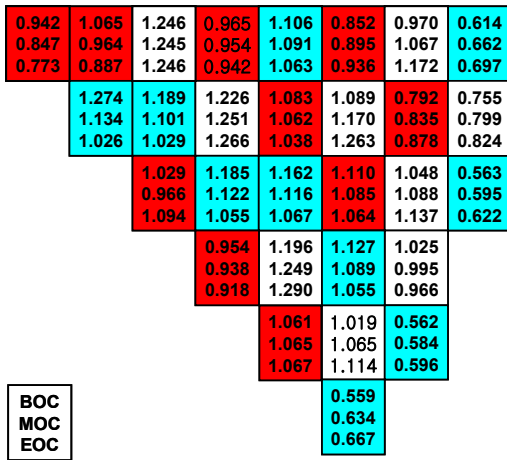


그림 3. Loading Pattern of Duplex BP Core



(a) 18 month fuel cycle (b) 24 month fuel cycle  
그림 4. Assembly-wise Relative Power Distribution of Duplex BP Core

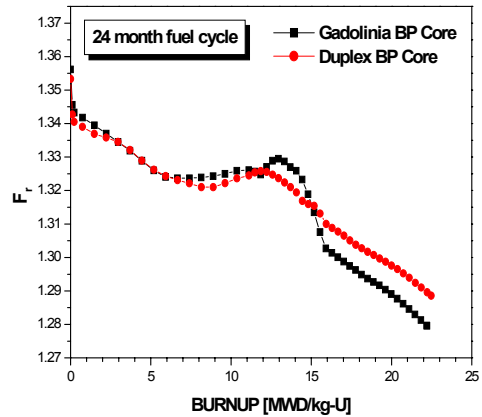
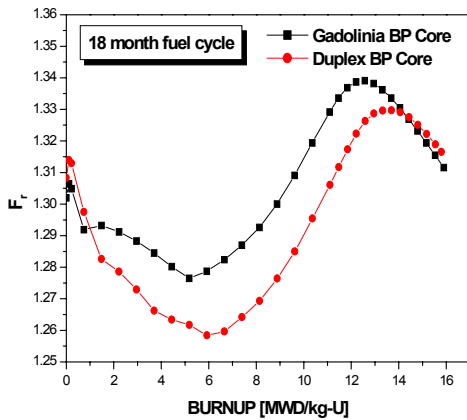


그림 5. 연소에 따른  $F_r$  비교

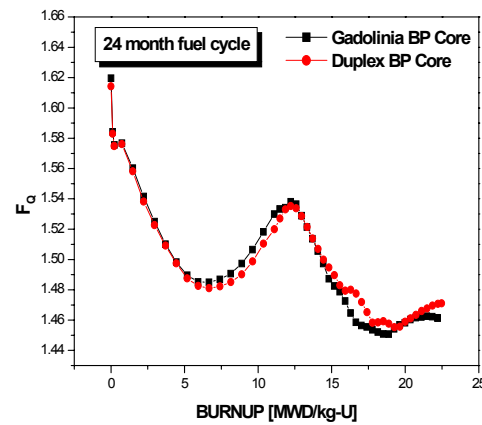
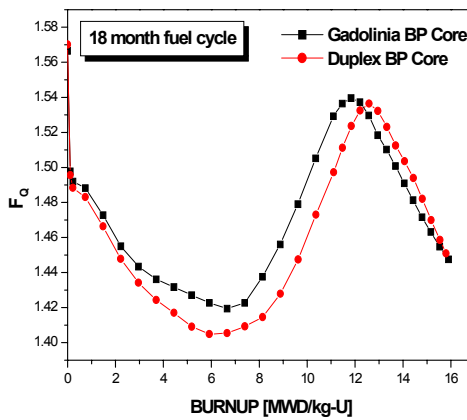


그림 6. 연소에 따른  $F_Q$  비교

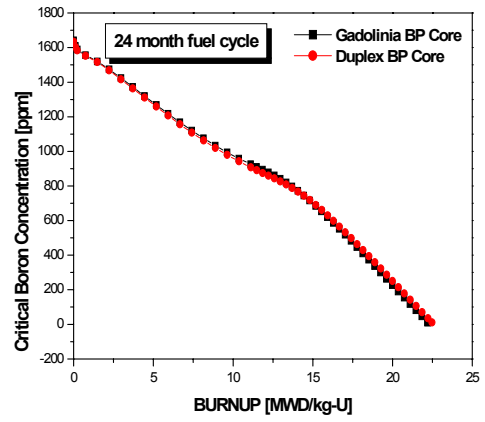
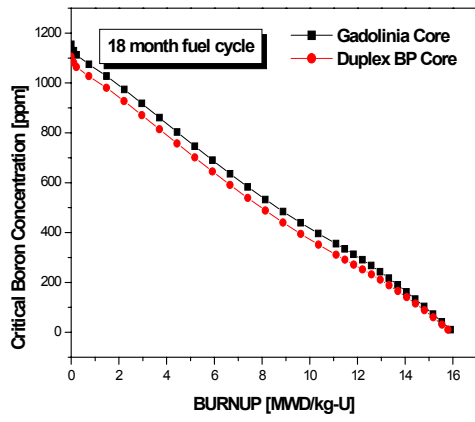


그림 7. 연소에 따른 임계보론농도 비교