2001 춘계 학술발표회 논문집
한국원자력학회

한국표준형원전 개량연료의 가연성흡수봉 장전 노심특성분석
Core Characteristics of Burnable Absorbers for KSNP Advanced Fuel Assembly

임채준, 최기용, 김재학, 성기봉

한전원자력연료㈜
대전광역시 유성구 덕진동 150

요약

현재 개발중인 한국표준형원전용 개량연료에 대하여 일체형 가연성흡수봉인 Gadolinia, IFBA (ZrB_2), Erbia가 각각 장전되는 평형노심에 대한 노심특성을 분석하였다. 개량연료의 열적성능 향상과 고연소 성능을 고려하여 평형노심의 운전 주기길이는 18개월주기(480 정격출력운전일수,EFPD)로 하고 2회 연소된 핵연료를 노심 최외곽에 배치하고 교체 신연료 64다발은 모두 노심내부에 장전하는 완전한 저누출 장전모형을 구현하였다. 이들 장전모형은 첨두출력인자(F_{xy}), 연료봉 방출연소도, 감속재온도계수, 최소요구 정지여유도에 대한 설계제한치를 모두 만족하였다. 주기길이 480 EFPD를 만족하는 교체 신연료의 우라늄 평균 농축도는 IFBA가 4.20 w/o로 가장 낮고, Gadolinia 4.30 w/o, Erbia 4.43 w/o 순으로 나타났다. 감속효과가 강화된 개량연료의 특성 때문에 현행 표준연료 평형노심에 비해 더 많은 가연성흡수봉이 소요되었다.

Abstract

The development of advanced fuel assembly for KSNP (Korean Standard Nuclear Power Plant) is in progress. The equilibrium core characteristics for integral burnable absorbers of Gadolinia, IFBA(ZrB_2), Erbia with the advanced fuel assembly are analyzed. The fuel management ground rules for equilibrium core are the cycle length of 18-month (480 Effective Full Power Days, EFPD), feed assemblies of 64 and full low leakage loading pattern which twice burned fuel assemblies are loaded in core periphery. Each loading pattern for three burnable absorber types meets the design criteria for power peaking, peak rod discharge burnup, MTC limit and shutdown margin requirement. The required uranium feed enrichments to meet the cycle length of 480 EFPD are 4.20 w/o for IFBA, 4.30 for Gadolinia, 4.43 w/o for Erbia. Since the advanced fuel assembly have more enhanced moderation capability due to reduced fuel rod diameter, the total number of burnable absorber rods are increased in comparison with those of current reload core with standard fuel assembly.

1. 개요

현재 대부분의 가압경수로의 핵연료 관리는 우라늄자원의 효율적인 이용과 원전의 경제성 향상 및 사용후 핵연료의 저장문제를 해결하기 위하여 장주기 운전, 중성자 저누출 장전모형 및 고연소의 노심설계 방식을 채택하고 있다. 이같은 핵연료 관리방식은 4 w/o 이상의 높은 우라늄 농축도를 갖는 신연료를 노심 내부에 장전하게 되므로 주기초 잉여 반응도가 매우 클 뿐 아니라 신연료와 연소된 연료와의 반응도 차이가 커서 출력분포 조절에 상당한 어려움이 따른다. 이러한 노심설계 추세에 따라 주기초의 잉여 반응도 억제 및 출력분포 조절을 위해 가연성흡수봉의 필요성이 더욱 부각되었으며 효과적인 가연성흡수봉의 선택과 사용에 대한 많은 연구가 이루어졌다.[1,2,3] 현재까지 개발된 가연성흡수봉으로는 Pyrex, WABA, Integral B_4C, Gadolinia, IFBA(ZrB_2), Erbia 등이 있으며 제조 및 핵연료 집합체내의 장전 형태에 따라 Integral B4C, Gadolinia, IFBA 그리고 Erbia등과 같은 일체형과 Pyrex와 WABA의 분리형으로 구분된다. 이들 가연성흡수봉은 노심특성, 안전성, 경제성 그리고 제조 기술성등의 복합적인 측면을 고려하여 선택적으로 사용되고 있다. 과거에는 분리형 가연성흡수봉이 많이 사용되었으나 근래에는 일체형 가연성흡수봉으로 대체되고 있는 것이 세계적인 추세이다.

1999년도부터 원자력 중장기 연구개발계획의 일환으로 한국표준형 원전용 개량핵연료 개발과제가 수행중에 있으며 2006년부터 개량핵연료의 상용공급을 목표로 하고 있다. 한국표준형 원전에 사용될 개량연료는 기존의 표준연료에 비하여 연료봉 직경이 줄어들어 감속효과가 커진 것이 특징이다. 이와 같이 현재 개발중인 KSNP형 개량연료는 기존연료의 핵적특성과는 다르기 때문에 개량연료 장전노심에 대한 최적의 가연성흡수봉 선정이 요구된다. 한국표준형 원전용 핵연료는 안내관이 5개밖에 없으며 노심내 제어봉이 다량으로 존재하기 때문에 분리형 가연성흡수봉 사용이 불가능하므로 본 연구에서는 Gadolinia, IFBA 및 Erbia의 일체형 가연성흡수봉을 대상으로 노심특성을 분석하였다. 본 연구의 결과는 향후 가연성흡수봉별 핵연료경제성 평가에 유용한 자료로 사용될 것이다.

2. 개량핵연료 특징 및 가연성흡수봉 집합체 설계

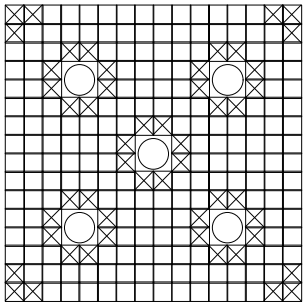
한국표준형 원전에는 177 다발의 핵연료 집합체가 장전되며, 각 집합체는 16X16 배열의 격자구조로서 236 개의 핵연료봉과 제어봉 및 계측기의 안내관 용도로 연료봉 격자크기의 4 배에 해당하는 Waterhole 이 5 개로 이루어져 있다. 이 Waterhole 에서는 감속효과가 크기 때문에 핵분열을 잘 일으킬 수 있는 열중성자의 수가 많아 Waterhole 에 인접한 핵연료봉의 출력이 높아지게 된다. 이러한 현상을 억제하고 집합체내 출력분포를 평탄화 시키기 위해 Waterhole 주변에는 다른 영역의 핵연료봉 농축도보다 약 0.5 w/o 정도 낮은 농축도를 사용하는 소위 저농축구역 (Enrichment Zoning)을 사용하고 있다. 이같은 저농축구역 개념은 핵연료 집합체간의 Water Gap 으로 인해 중성자 감속효과가 비교적 큰 핵연료집합체의 모서리에도 적용되고 있다.

현재 한전원자력연료㈜에서 개발중인 한국표준형 원전용 개량연료의 연료봉 직경은 WH사의 V5H 연료봉의 직경과 같은 0.374"로서 기존 표준연료의 0.382"에 비해 직경이 작으나 핵연료의 UO_2 소결체 밀도는 기존연료에 비해 증가하여 핵연료 전체의 우라늄 양은 비슷하다. 따라서 중성자 감속효과측면에서 개량연료가 기존의 표준연료에 비해 더 우수하므로 핵연료 경제성 향상이 기대된다. 또한 열적성능은 기존 표준연료대비 약 10%이상 향상을 목표로 개발하기 때문에 핵설계측면에서 첨두출력 제한치가 완화되어 저누출 장전모형 구현이 더욱 용이해진다. 한편 뱃치 평균 방출연소도의 목표값이 55 GWD/MTU 이상이므로 주기길이 연장을 통한 경제성 향상이 기대된다.

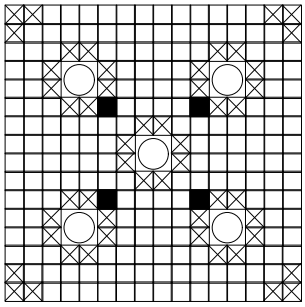
가연성흡수봉의 기본적인 기능은 주기초 잉여 반응도를 적절히 억제하고 집합체의 출력 및 집합체내의 핵연료봉 출력분포를 효과적으로 평탄화 시키는 것이다. 반응도 억제는 주로 가연성흡수봉의 농도 및 개수에 의해 결정되며 출력분포는 이들 뿐만 아니라 배치 형태에 의해 조절된다. 따라서 가연성흡수봉의 농도, 개수 및 위치가 가연성흡수봉 및 집합체 설계에 있어서 중요한 설계인자가 되며 이들은 중성자를 흡수하는 가연성흡수물질의 종류에 따라 핵적특성이 상이하므로 가연성흡수봉 집합체 설계시에는 이러한 특성이 고려된다. 또한 일체형 가연성흡수봉은 핵연료봉으로서의 역할도 함께 수행하기 때문에 가연성흡수봉내의 우라늄 농축도도 중요한 설계인자가 된다. 이러한 인자들은 가연성흡수봉 장전 집합체의 핵적특성 분석을 통해 선정하였다.

한국표준형 원전의 개량연료에 대하여 가연성흡수봉의 개수에 따른 집합체내의 배치형태는 Gadolinia의 경우 그림 2-1에, IFBA 와 Erbia는 그림 2-2 에서 나타내었다. 본 연구에서는 개량연료에 장전된 Gadolinia의 농도는 8 w/o 이며 Gadolinia 가연성흡수봉내의 우라늄 농축도는 천연우라늄이 아닌 1.6 w/o를 사용하였다. 그림 2-2 에서 가연성흡수봉의 개수가 A+B 형태로 표기되어 있는데 A 는 정상적인 우라늄 농축도를 가진 연료봉에, 그리고 B 는 저농축구역 연료봉에 장전된 가연성흡수봉의 개수를 의미한다. IFBA와 Erbia 가연성흡수봉의 농도는 각각 2.5 mg/inch와 2 w/o를 사용했으며 이들 가연성흡수봉내의 우라늄 농축도는 핵연료봉과 동일한 농축도를 사용하였다. Gadolinia, IFBA, Erbia 가연성흡수봉의 축방향 상하부 각각 7.5"의 Axial Cutback 영역에는 가연성흡수물질은 없고 1.6 w/o 우라늄만을 사용하고 있다. 한편 아직까지 한국 표준형 원전에서는 Axial Blanket 설계를 도입하고 있지 않지만 핵연료 경제성을 고려하여 향후 적용할 계획을 가지고 있기 때문에 본 연구의 노심특성 분석에서는 모든 핵연료봉의 상하부 각각 7.5"의 Axial Blanket 영역에는 1.6 w/o의 저농축 우라늄을 사용하였다. 현재 국내 WH형 노심에서 사용중인 Axial Blanket 의 농축도가 1.6 w/o 이므로 제조 편이성을 고려하여 개량연료의 Gadolinia 내의 우라늄 농축도와 Axial Blanket 의 농축도를 1.6 w/o 로 선정하였다.

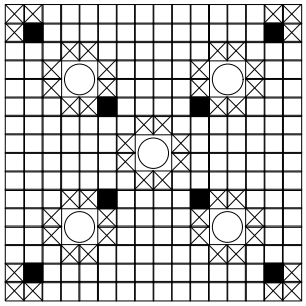
그림 2-1. KSNP **개량연료** Gadolinia **장전 집합체 형태**



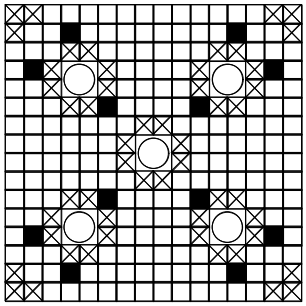
No Gd 52 Zone



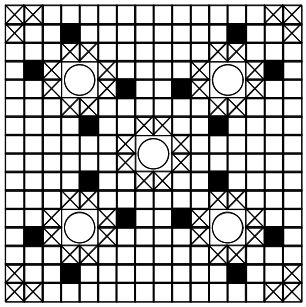
4 Gd 52 Zone



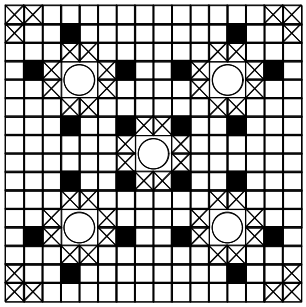
8 Gd 52 Zone



12 Gd 52 Zone

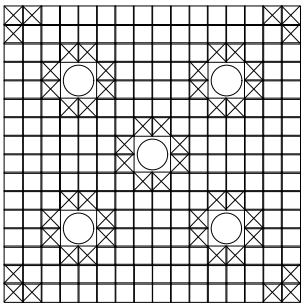


16 Gd 52 Zone

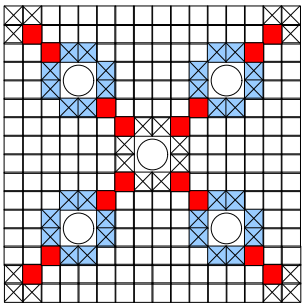


20 Gd 52 Zone

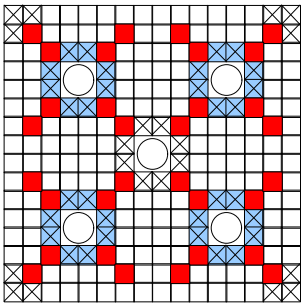
그림 2-2. KSNP 개량연료 IFBA/ Erbia 장전 집합체 형태



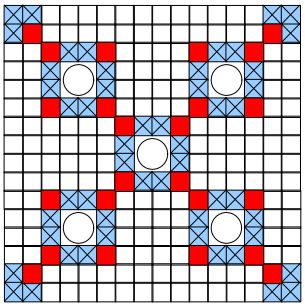
No BA 52 Zone (IFBA/Er)



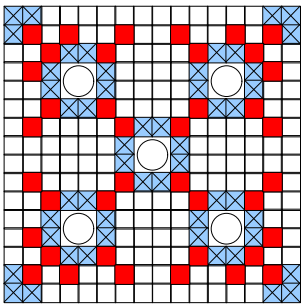
16+32 BA 52 Zone (IFBA/Er)



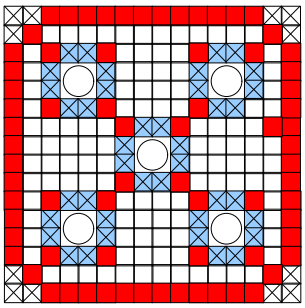
32+32 IFBA 52 Zone



24+52 Erbia 52 Zone



40+52 BA 52 Zone (IFBA/Er)



72+40 BA 52 Zone (IFBA/Er)

Normal Enriched Fuel Rod

BA Rod in Normal Fuel Enrichment

Enrichment Zoning Fuel Rod

BA Rod in Zoned Fuel Enrichment

Water Hole

Note : BA Rod means IFBA (ZrB2) or Erbia

3. 가연성흡수봉 장전 평형노심 장전모형 선정

한국표준형 원전의 개량연료를 대상으로 Gadolinia, IFBA, Erbia 가 장전된 노심의 특성분석을 위해 다음과 같은 설계기준과 제한치를 정하여 노심장전모형을 탐색하였다.

1) 주기길이는 480 EFPD 를 갖는 18 개월주기를 적용한다. 기존 표준연료가 장전된 현행 한국표준형 원전의 주기길이가 440~450 EFPD 로서 뱃치 평균 방출연소도가 약 44~46 GWD/MTU 정도임을 감안 할 때 개량연료는 뱃치 평균 방출연소도를 55 GWD/MTU 이상의 연소성능을 목표로 하므로 약 2 개월 정도의 주기길이를 연장시킬 수 있다. 하지만 현행 부하율 및 가동율을 감안하고 계통기기 보수점검 주기를 고려하여 본 연구에서는 480 EFPD 를 기준 주기길이로 정하였다.
2) 노심장전모형의 기본전략은 노심 최외곽에 2 회 연소된 연료를 배치하는 완전한 저누설 장전모형 (Full L^3P)으로 구성하는 것이다. 이것은 개량연료의 열적성능 향상으로 첨두출력제한치가 완화되는 것을 전제로 현행 표준연료의 부분적 저누출 장전모형에 비해 중성자 이용율을 향상시킨 것이다.
3) 재장전 노심에 교체 장전되는 신연료 다발 수를 64 개로 고정하고 Full L^3P 에서 480 EFPD 의 주기길이를 만족하는 우라늄 농축도를 가연성 흡수봉의 종류에 따라 구한다.
4) 장전모형 탐색시 개량연료 장전 노심에 대한 설계제한치가 아직 확정된 것은 아니지만 개량연료의 열적 및 연소성능 향상 목표를 반영하여 반경방향 첨두출력제한치가 현행 1.55 에서 1.65 로 그리고 연료봉 최대방출연소도는 현행 58 GWD/MTU 에서 70 GWD/MTU 로 상향 조정하였다. 그리고 MTC 및 정지여유도등은 현행 설계제한치를 그대로 유지하는 것을 전제로 하였다. 주기말의 정의는 전출력, 평형제논 상태에서 노심 임계붕소농도가 10 ppm 이 되는 시점으로 한다.

표3-1부터 3-3까지는 Gadolinia, IFBA, Erbia 가연성흡수봉 종류별로 평형노심에 장전되는 집합체 종류, 장전연료 다발수, 우라늄 농축도와 가연성흡수봉 개수등의 핵연료 장전과 관련한 자료를 보여준다. 그림 3-1에서 3-3까지는 노심 장전모형 기본 전략인 Full L^3P, 480 EFPD를 만족하는 Gadolinia, IFBA, Erbia 가연성흡수봉 장전노심의 반경방향 첨두출력인자가 각각 최대값을 갖는 노심 연소도에서의 1/4노심의 집합체별 상대적 출력 및 연소도를 나타내고 있다. 집합체 ID 중에서 X는 2회연소연료, Y는 1회연소연료 그리고 Z는 신연료를 나타내며, X, Y, Z 뒤의 숫자는 집합체별로 장전된 가연성흡수봉의 개수를 구분하는 표식인자를 나타낸다.

표 3-1. KSNP 형 Gd 장전 개량연료 제원

뱃치 ID	연료봉 1		연료봉 2		Gd 흡수봉			집합체	
	개수	U235 농축도 (w/o)	개수	U235 농축도 (w/o)	개수	Gd 농도 (w/o)	U235 농축도 (w/o)	개수	U235 농축도 (w/o)
Z	184	4.85	52	4.35	-	-	-	16	4.4258
Z1	176	4.85	52	4.35	8	8	1.6	8	4.3334
Z2	172	4.85	52	4.35	12	8	1.6	8	4.2870
Z3	168	4.85	52	4.35	16	8	1.6	32	4.2404
Axial Blanket	236	1.6	-	-	-	-	-	-	1.6
교체연료					672			64	4.3042

표 3-2. KSNP 형 IFBA 장전 개량연료 제원

뱃치 ID	연료봉 1		연료봉 2		IFBA 흡수봉			집합체	
	개수	U235 농축도 (w/o)	개수	U235 농축도 (w/o)	개수		IFBA 농도 (mg/in)	개수	U235 농축도 (w/o)
					Hi E	Lo E			
Z1	152	4.60	20	4.10	32	32	2.5	32	4.2008
Z2	144	4.60	0	4.10	40	52	2.5	32	4.2008
Axial Blanket	236	1.6	-	-	-		-	-	1.6
교체연료					4992			64	4.2008

표3-3. KSNP 형 Er 장전 개량연료 제원

뱃치 ID	연료봉 1		연료봉 2		Er 흡수봉			집합체	
	개수	U235 농축도 (w/o)	개수	U235 농축도 (w/o)	개수		Er 농도 (w/o)	개수	U235 농축도 (w/o)
					Hi E	Lo E			
Z	184	4.85	52	4.35	-	-	-	20	4.4258
Z1	168	4.85	20	4.35	16	32	2.0	4	4.4255
Z2	160	4.85	-	-	24	52	2.0	8	4.4254
Z3	144	4.85	-	-	40	52	2.0	32	4.4248
Axial Blanket	236	1.6	-	-	-		-	-	1.6
교체연료					3744			64	4.4253

그림 3-1. Gadolinia 장전노심 출력 분포

Y/X	H	J	K	L	M	P	P	R
8	X3 0.847 54.129	Y3 1.096 36.315	Y 1.191 33.343	Z3 1.385 14.538	Y3 1.186 37.495	Z3 1.412 14.982	Y 0.998 30.886	X 0.428 42.096
9	Y3 1.096 36.315	Z3 1.394 15.214	Y 1.185 32.628	X3 0.934 54.125	Z2 1.425 15.329	Y2 1.118 37.376	Z1 1.149 12.851	X 0.405 44.529
10	Y 1.191 33.343	Y 1.191 32.728	Y3 1.135 36.402	Z3 1.390 14.611	Y3 1.116 36.403	Y1 1.085 33.126	Z 1.046 12.018	X1 0.315 43.739
11	Z3 1.385 14.538	X3 0.935 54.168	Z3 1.390 14.622	Y3 1.130 36.940	Y3 1.137 33.939	Z3 1.202 12.783	X3 0.503 46.832	
12	Y3 1.186 37.495	Z2 1.425 15.340	Y3 1.116 36.420	Y3 1.137 33.956	Z3 1.358 14.407	Z 1.104 12.205	X3 0.316 47.133	
13	Z3 1.412 14.982	Y2 1.120 37.411	Y1 1.085 33.206	Z3 1.204 12.799	Z 1.106 12.238	X 0.445 45.712		
14	Y 0.998 30.886	Z1 1.153 12.911	Z 1.047 12.037	X3 0.504 46.861	X3 0.318 47.091			
15	X 0.428 42.096	X 0.404 44.651	X1 0.315 43.816	Power Burnup				

FA ID	BA갯수
Z	0
Z1	8
Z2	12
Z3	16

MAXIMUM FXY = 1.6056 AT (H,13)

Core Burnup = 11 GWD/MTU

그림 3-2. IFBA 장전노심 출력 분포

Y/X	H	J	K	L	M	P	P	R
8	X3 0.757 51.939	Y1 1.070 29.233	Z3 1.474 10.148	Y3 1.264 34.824	Z3 1.505 10.431	Y3 1.131 33.550	Z1 1.191 8.450	X1 0.398 43.143
9	Y1 1.070 29.233	Y1 1.104 29.902	Y3 1.182 34.268	Z3 1.520 10.303	Y3 1.214 33.515	Y1 1.185 26.577	Z1 1.162 8.211	X1 0.378 43.535
10	Z3 1.474 10.148	Y3 1.182 34.248	Z3 1.453 9.745	X3 1.067 44.788	Z3 1.462 9.967	Y1 1.119 28.992	Z1 0.985 6.833	X1 0.275 43.808
11	Y3 1.264 34.824	Z3 1.518 10.289	X3 1.067 44.749	Z3 1.471 9.864	Y1 1.204 29.252	Z1 1.160 8.048	X1 0.459 42.204	
12	Z3 1.505 10.431	Y3 1.207 33.893	Z3 1.460 9.945	Y1 1.203 29.239	Z1 1.233 8.550	Y3 0.664 29.909	X3 0.221 46.918	
13	Y3 1.131 33.550	Y1 1.183 26.548	Y1 1.118 28.964	Z1 1.160 8.041	Y3 0.664 29.874	X1 0.270 43.191		
14	Z1 1.191 8.450	Z1 1.161 8.200	Z1 0.984 6.825	X1 0.459 42.160	X3 0.219 47.530			
15	X1 0.398 43.143	X1 0.378 43.499	X1 0.275 43.793	Power Burnup				

FA ID	BA갯수
Z1	32+32
Z2	40+52

MAXIMUM FXY = 1.6402 AT (L,9)

Core Burnup = 7 GWD/MTU

그림 3-3. Erbia 장전노심 출력 분포

Y/X	H	J	K	L	M	P	P	R
8	X1 0.861 42.515	Y 1.160 21.541	Z3 1.364 0.069	Y3 1.176 25.675	Z3 1.332 0.067	Y3 1.191 25.761	Z 1.312 0.065	X 0.402 41.315
9	Y 1.160 21.541	Y1 1.174 21.981	Y3 1.184 25.557	Z3 1.354 0.068	X 1.063 34.589	Z2 1.370 0.069	Y 1.050 18.147	X 0.385 35.614
10	Z3 1.364 0.069	Y3 1.184 25.570	Z3 1.378 0.070	Y3 1.191 26.235	Z3 1.360 0.069	Y2 1.148 24.771	Z 1.076 0.054	X2 0.265 44.196
11	Y3 1.176 25.675	Z3 1.354 0.068	Y3 1.191 26.238	Z3 1.376 0.070	Y3 1.169 26.330	Z 1.295 0.065	X3 0.443 46.748	
12	Z3 1.332 0.067	X 1.063 34.608	Z3 1.361 0.069	Y3 1.174 25.957	Z1 1.243 0.062	Y 0.743 21.458	X3 0.224 46.790	
13	Y3 1.191 25.761	Z2 1.370 0.069	Y2 1.149 24.773	Z 1.298 0.065	Y 0.744 21.489	X3 0.269 46.509		
14	Z 1.312 0.065	Y 1.050 18.150	Z 1.077 0.054	X3 0.445 46.451	X3 0.225 46.782			
15	X 0.402 41.315	X 0.385 35.601	X2 0.265 44.197	Power Burnup				

FA ID	BA갯수
Z	0
Z1	16+32
Z2	24+52
Z3	40+52

MAXIMUM FXY = 1.6033 AT (H,14)

Core Burnup = 0.05 GWD/MTU

4. 가연성흡수봉 장전 평형노심 특성

개량연료가 장전된 한국표준형 원전에 대한 가연성흡수봉별로 평형노심 장전모형에 대하여 교체 신연료 평균 우라늄 농축도 및 장전양, 가연성흡수봉 소요량, 뱃치 평균 방출연소도, 연료봉 최대 방출연소도, 중성자 누출도, 가연성흡수봉의 반응도 억제가, 주기초 임계붕산농도, 감속재 온도계수, 최대 첨두출력 인자(F_{xy}) 그리고 정지여유도와 같은 노심특성 인자들에 대한 계산결과를 표 4-1에 정리하였다.

480 EFPD를 만족하는 교체 신연료의 우라늄 평균 농축도는 IFBA가 4.20 w/o로 가장 낮고 Gadolinia는 4.30 w/o 그리고 Erbia는 4.43 w/o로 가장 높게 나타났다. 이것은 가연성흡수봉의 주기말 잔존 반응도 억제가와 매우 밀접한 관계가 있는데 표 4-1의 IFBA, Gadolinia, Erbia 순으로 나타난 결과와도 일치하고 있다. 주기초 반응도 억제가는 IFBA가 가장 많으나 주기중 거의 연소되어 주기말에서의 잔존 반응도 억제효과가 거의 없는데 반하여 Erbia는 상당양이 남아 있다.

우라늄 장전양은 IFBA가 76.411톤으로 가장 많고 Erbia가 76.070톤으로 가장 작게 나타났다. 이것은 Gadolinia 와 Erbia는 UO_2 와 혼합되어 핵연료봉에 장전되므로 노심에 장전되는 우라늄 양이 가연성흡수체의 장전양에 따라 감소하나 IFBA의 경우 UO_2 소결체 표면에 ZrB_2를 도포한 형태이므로 노심에 장전되는 우라늄 양에는 영향을 주지 않기 때문이다.

가연성흡수봉 개수는 Gadolinia가 가장 적은 672개가 사용되었으며, Erbia는 3,744개 그리고 IFBA는 4,992개로 가장 많이 소요되었다. Gadolinia의 중성자흡수 단면적이 다른 흡수물질에 비해 워낙 크기 때문에 가연성흡수봉의 장전양이 가장 작다. 현재 운전중인 한국표준형 원전의 표준연료에 장전된 Gadolinia 개수가 약 500개 내외인 것을 감안하면 개량연료에는 더 많은 Gadolinia가 장전되었다. 그 이유는 개량연료의 감속효과가 기존 표준연료에 비하여 크기 때문에 감속재온도계수 제한치를 만족시키려면 붕산농도를 낮춰야 되고 이를 위해 가연성흡수봉의 장전양도 증가할 수 밖에 없다. 가연성흡수봉 집합체 특성분석에 따르면 동일한 반응도 억제를 위해 소요되는 2.5 mg/inch 농도의 IFBA 와 2 w/o 농도의 Erbia 가연성흡수봉의 양을 비교하면 IFBA의 장전양이 더 작게 나타난다. 그리고 주기초 잉여반응도 측면에서 보면 평균 우라늄농축도가 낮은 IFBA가 Erbia에 비해 가연성흡수봉의 소요량도 작을 것으로 예상된다. 그럼에도 불구하고 노심계산 결과 IFBA의 장전양이 많은 이유는 Erbia에 비해 IFBA가 감속재온도계수 조절능력이 작기 때문에 감속재온도계수 제한치를 만족시키기 위해서는 주기초 임계붕소농도를 Erbia 보다도 많이 낮춰야 하기 때문이다.

주기초 영출력 무제논 상태의 임계붕소농도는 Erbia가 2,200 ppm으로 가장 높고 Gadolinia가 2,065 ppm, 그리고 IFBA가 1,901 ppm으로 가장 낮다. 한편 주기초 붕소농도가 IFBA가 가장 낮음에도 불구하고 감속재온도계수는 오히려 IFBA가 +3.56 pcm/°F로 Gadolinia의 +3.14 pcm/°F, Erbia의 +2.66 pcm/°F 보다 더 양의 값이다. 개량연료와 같이 감속효과가 큰 연료에는 감속재온도계수 제한치를 만족시키기 위해 가연성흡수봉의 역할이 중요한데 가연성흡수물질의 핵

단면적 특성때문에 Erbia는 가연성흡수봉의 장전양으로 감속재온도계수를 조절하기가 용이한 반면에 IFBA는 불리한 단점이 있다. 하지만 본 연구에 따르면 현행 감속재온도계수에 대한 설계제한치를 세 경우 모두 만족 하고 있다.

뱃치 평균 방출연소도는 원칙적으로는 주기길이가 같고 장전 다발 수가 같기 때문에 가연성흡수봉별로 비교하는 것이 큰 의미는 없다. Gadolinia나 Erbia가 우라늄 장전양이 적어서 평균 방출연소도가 IFBA에 비해서 약간 크게 나타났다. 다만 현행 표준연료 장전노심의 약 45 GWD/MTU에 비해 주기길이 증가에 의해 약 4 GWD/MTU 정도 증가한 49 GWD/MTU 정도로 계산되었다. 한편 연료봉 최대방출 연소도는 Gadolinia 장전노심이 약 64 GWD/MTU 로 가장 크다. 연료봉 최대방출 연소도는 노심장전모형에 따라 차이가 있고 Gadolinia봉의 연소도가 낮기 때문에 상대적으로 핵연료봉에서 분담해야 할 연소도가 커진 영향도 있다. 하지만 세종류 모두 설계제한치로 정한 70 GWD/MTU 이하로 모두 만족하고 있다.

노심 최외곽에 2회 연소된 연료를 배치하고 교체 신연료를 모두 노심 내부에 배치하는 완전한 저누설 장전모형 (Full L^3P)에도 불구하고 주기중 반경방향 최대 첨두출력인자(F_{xy})는 IFBA의 경우가 다른 가연성흡수봉에 비해 약간 높으나 Gadolinia, IFBA, Erbia 모두 설계제한치 1.65 이하를 만족하고 있다. 한편 노심 최외곽 연료들의 주기중 연소된 값의 평균을 노심 평균연소도로 나눈 값을 중성자 누출도로 정의할 경우 완전한 저누출 장전모형중에서도 Erbia의 경우가 가장 작고 IFBA와 Gadolinia는 거의 비슷한 결과를 보이고 있다. 이러한 결과로 볼 때 Erbia가 첨두출력 조절이 용이하면서 중성자 누출을 줄이는데 다소 유리한 것을 알 수 있다.

주기초에서의 정지여유도는 가연성흡수봉별로 큰 차이없이 약 8.9 %Δρ 정도로 서로 비슷한 값을 가진다. 그러나 주기말에서의 정지여유도는 IFBA와 Erbia가 약 9.2 %Δρ 정도로 주기초에 비해 큰 반면에 Gadolinia 경우엔 8.0 %Δρ로서 오히려 주기초보다도 작은 정지여유도를 보이고 있다. 그 이유는 N-1 제어봉가가 다른 가연성흡수봉에 비해 Gadolinia 의 경우 상대적으로 작기 때문이다. 고착제어봉은 12 Finger CEA 로서 그림 3-1의 (L,13)에 위치하는데 주기말에서 이 위치와 인접한 핵연료 집합체의 출력이 IFBA와 Erbia에 비해 상대적으로 높기 때문에 Gadolinia 의 경우 고착 제어봉가가 크고 이로 인해 N-1 제어봉가가 작은 것이다. 하지만 현행 최소 정지여유도 요구량인 5.5%Δρ 이상을 세경우 모두 만족하고 있다.

그림 4-1은 각각의 가연성흡수봉에 대하여 평형노심 장전모형의 전출력에서의 연소도에 따른 임계붕소농도를 그린 것이다. Gadolinia의 경우 주기중반 약 12 GWD/MTU 이후에나 거의 다 연소되는 것을 알 수 있다. IFBA의 경우 Dilute 흡수체로 연소가 주기초반에 빠르게 진행되며 Erbia의 경우 주기초반에 다소 빠르게 연소되나 전체적으로 일정하게 연소되는 것을 알 수 있다. 이를 통해 IFBA의 경우 주기초반에 노심특성의 변화가 많이 있을 것으로 예상되며 Gadolinia나 Erbia는 상대적으로 변화가 단순할 것으로 예상된다.

그림 4-2는 각각의 가연성흡수봉에 대하여 평형노심 장전모형의 전출력에서의 연소도에 따른 축

방향 출력편차 (Axial Offset) 를 그린 것이다. 세종류 모두 주기초반에는 노심상부에 출력이 쏠려 있으나 노심이 연소되면서 노심하부쪽으로 출력이 쏠리고 있다. Gadolinia의 경우 주기중반 약 10 GWD/MTU 이후에도 A.O가 변하고 있다. 한편 IFBA는 주기초반에 급격히 A.O가 변하지만 연소도 8 GWD/MTU 이후에는 거의 변화가 없다. 그리고 Erbia의 경우엔 A.O 변화가 매우 안정된 것을 보이고 있다.

그림 4-3은 각각의 가연성흡수봉에 대하여 평형노심 장전모형의 전출력에서의 연소도에 따른 반경방향 첨두출력인자(F_{xy})를 나타낸 것이다. Gadolinia의 경우 주기초반에는 거의 변화가 없다가 약 6 GWD/MTU 이후부터 증가하다가 Gadolinia가 거의 연소되는 부근인 11 GWD/MTU에서 최대값을 가지고 이후엔 단조 감소하는 현상을 보이고 있다. IFBA는 주기초반에 연소가 빨리 진행되면서 약 7 GWD/MTU까지는 증가하여 최대값을 가진후 감소하고 있다. 반면에 Erbia 경우는 주기초에서 최대값을 가지고 감소하고 2 GWD/MTU부터 7 GWD/MTU까지는 서서히 증가하다 이후 다시 단조 감소하는 현상을 보인다.

그림 4-4는 축방향 첨두출력인자(F_z)를 나타내고 있는데 IFBA가 주기초반에 약간 증가하나 전체적으로 약 6 GWD/MTU까지는 감소하다가 이후에는 커다란 변화를 보이고 있지 않다. 그림 4-5는 3차원 첨두출력인자(F_q) 의 변화를 나타낸 것이다. Gadolinia의 경우 주기초에서 최대값을 가지며 연소되면서 감소하다 약 6 GWD/MTU 이후부터 서서히 증가하다 14 GWD/T 이후에 다시 감소하는 현상을 보이고 있다. 반면에 IFBA는 주기초반엔 증가하다 2 GWD/MTU에서 최대값을 가지며 이후부터 감소하고 6~10 GWD/MTU 구간에서 거의 변화가 없다가 이후 다시 서서히 감소하고 있다. Erbia는 주기초에서 최대값을 가지고 연소되면서 단조감소 현상을 보이고 있다. 3차원 첨두출력인자가 변하는 경향을 보면 그림4-3의 반경방향 첨두출력인자와 그림 4-4의 축방향 첨두출력인자를 합성한 형태와 유사한 경향을 가진다.

그림 4-6에서 4-8는 Gadolinia, IFBA, Erbia 평형노심의 전출력, 평형제논 상태에서의 주기초, 주기중반 그리고 주기말에서의 축방향 출력 분포를 그린 것이다. 이때 주기중반은 반경방향 첨두출력인자가 주기중반에서 극대값을 가지는 연소도, 즉 Gadolinia의 경우 11 GWD/MTU, IFBA와 Erbia는 7 GWD/MTU을 의미한다. 세종류 모두 노심 중앙부근의 출력은 주기초반엔 높다가 연소되면서 서서히 감소하여 주기말에서는 노심 중앙부근 출력은 낮고 노심 상하부는 높은 Saddle 형태를 보이고 있다. 이러한 Saddle 현상은 Gadolinia 장전노심이 IFBA나 Erbia에 비해 약간 더 뚜렷한 현상을 보이는데 그 이유는 주기초반에는 노심 상하부에서 출력이 낮기 때문에 Gadolinia가 연소가 적고 주기중반 이후에 연소가 많이 이루어지면서 출력이 노심 상하부로 쏠리는 현상이 주기초반과 중반에 거의 대부분 연소되는 Dilute 흡수체인 IFBA나 Erbia에 비해 더 심하기 때문이다. 그리고 Gadolinia 봉에는 저농축 우라늄이 장전되므로 IFBA,나 Erbia에 비해 노심의 중앙부분의 농축도가 상대적으로 낮은 것도 Gadolinia 노심의 Saddle 특성에 영향을 준다.

5. 결론

현재 개발중인 한국표준형 원전용 개량연료에 대하여 일체형 가연성흡수봉인 Gadolinia, IFBA (ZrB_2), Erbia가 각각 장전되는 평형노심에 대한 노심특성을 분석하였다. 평형노심의 운전주기길이는 18개월주기(480 EFPD)로 하고 2회 연소된 핵연료를 노심 최외곽에 배치하고 교체 신연료 64다발은 모두 노심내부에 장전하는 완전한 저누출 장전모형을 설계기준으로 하여 가연성흡수봉별로 장전모형을 선정하였다. 이들 장전모형은 첨두출력인자(F_{xy}), 연료봉 방출연소도, 감속재온도계수, 최소요구 정지여유도에 대한 설계 제한치를 모두 만족하였다. 특히 개량연료의 열적성능과 연소성능 향상으로 완전한 저누출 장전모형을 구현하면서도 첨두출력인자와 방출연소도에 대하여 세가지 가연성흡수봉 모두 충분한 여유를 가지고 설계제한치를 만족할 수 있었다.

주기길이 480 EFPD를 만족하는 교체 신연료의 우라늄 평균 농축도는 IFBA가 4.20 w/o로 가장 낮고, Gadolinia 4.30 w/o, Erbia가 4.43w/o 순으로 나타났다. 한편 가연성흡수봉 장전양은 IFBA가 약 5,000여개로 가장 많고 Erbia가 약 3,700여개, Gadolinia가 약 670여개로 가장 작았다. 이러한 장전양은 현행 표준연료 평형노심에 비해 많은 편인데 이것은 감속효과가 강화된 개량연료의 특성 때문에 주기초 잉여 반응도 증가와 보다 양의 감속재온도계수를 가지므로 더 많은 가연성흡수봉이 필요하기 때문이다. 가연성흡수봉의 장전양이 많을 경우 그 제조비용도 상당하므로 핵연료 경제성은 우라늄 비용과 가연성흡수봉의 제조비를 감안하여 평가해야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력 중장기계획 사업의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. 최기용외 3인,"영광 3호기 가연성흡수봉 종류에 따른 노심특성 분석," 한국원자력학회 '96 춘계 학술발표회 논문집, 1996.
2. 박상원외 2인,"W형 3-Loop 발전소에 일체형 가연성 흡수봉 경제성 평가," 한국원자력학회 '96 춘계 학술발표회 논문집, 1996.
3. 한국전력공사 기술연구원,"고연소 핵연료 주기를 위한 신가연성 독물질 연구," KRC-89N-T05, April 1991.

표4-1. 가연성 흡수봉 장전 평형노심 노심 특성 요약

노심 특성 항목	Gadolinia		IFBA		Erbia		설계제한치*
신연료 우라늄 농축도, w/o							
•Center	4.85/4.35		4.60/4.10		4.85/4.35		≤ 4.95
•Axial Blanket	1.60		1.60		1.60		
•BA	1.60		4.60/4.10		4.85/4.35		
신연료 우라늄 평균 농축도, w/o	4.3042		4.2008		4.4253		≤ 4.95
BA 개수	672		4992		3744		
BA 농도	8 w/o		2.5 mg/inch		2 w/o		≤ 8 w/o for Gd
우라늄 장전양, MTU	76.166		76.411		76.070		
주기길이, MWD/MTU	17764		17680		17880		
뱃치평균 방출연소도, MWD/MTU	49127		48895		49449		
봉 최대 방출연소도, MWD/MTU	64225		61663		61417		≤70000
중성자누출도 (노심외곽집합체 평균출력)	0.398		0.398		0.343		
주기초 BA 반응도 억제가, pcm	4393		5289		5135		
주기말 BA 반응도 억제가, pcm	579		83		1124		
임계붕산농도, ppm							
•주기초, 영출력, 무제논	2065		1901		2200		≤2500
•주기초, 전출력, 무제논	1895		1743		2021		
•주기초, 전출력, 평형제논	1536		1387		1632		
감속재온도계수, pcm/°F							
•주기초, 영출력, 무제논	+3.14		+3.56		+2.66		≤ +5
•주기초, 전출력, 무제논	-2.52		-2.29		-2.99		≤ +0
•주기초, 전출력, 평형제논	-6.09		-5.97		-6.82		≤ +0
•주기말, 전출력, 평형제논	-34.93		-35.2		-36.34		≥ -38
최대 첨두출력인자, F_{xy}	1.6056		1.6402		1.6033		≤ 1.65
Shutdown Margin, %Δρ	BOC	EOC	BOC	EOC	BOC	EOC	
•Power Defect	1.25	2.47	1.19	2.51	1.31	2.59	
•RIA	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27	
•Void Effect	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	
•Total Requirement	1.62	2.84	1.56	2.88	1.68	2.96	
•N-1 including Uncertainty	10.47	10.88	10.46	12.07	10.65	12.14	
•SDM	8.85	8.04	8.90	9.19	8.97	9.18	≥ 5.5

* 개량연료 장전노심에 대한 잠정 설계제한치

그림 4-1. CBC vs. Burnup
(KSNP Equlibrium Cycle)

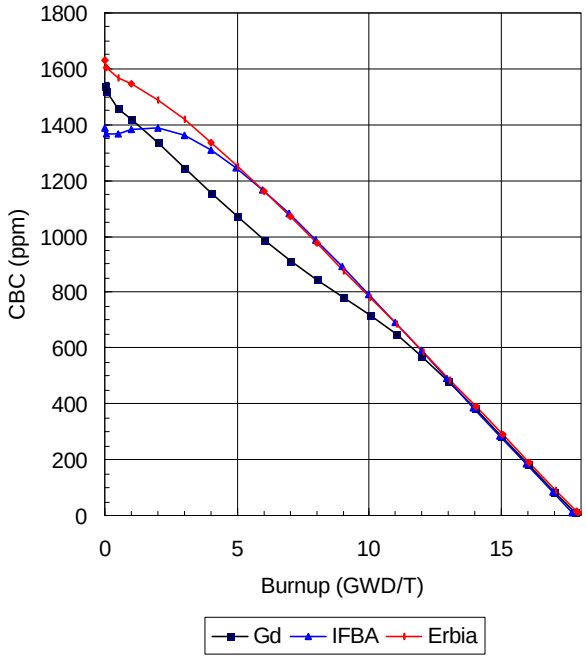


그림 4-2. Axial Offset vs. Burnup
(KSNP Equlibrium Cycle)

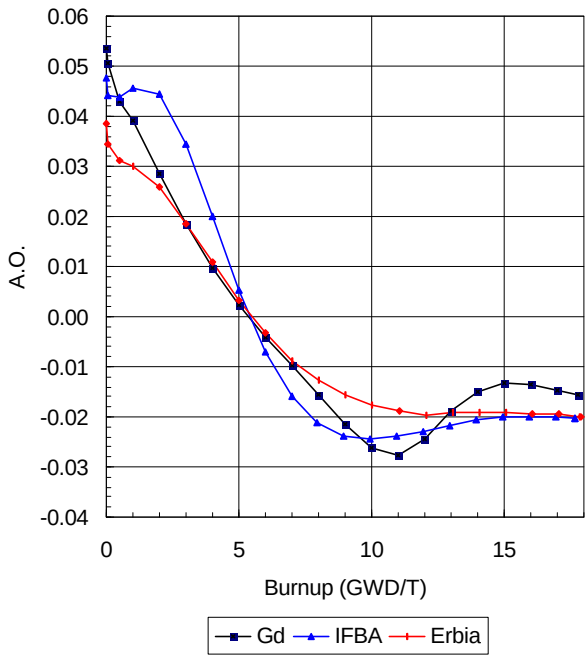


그림 4-3. Fxy vs. Burnup
(KSNP Equlibrium Cycle)

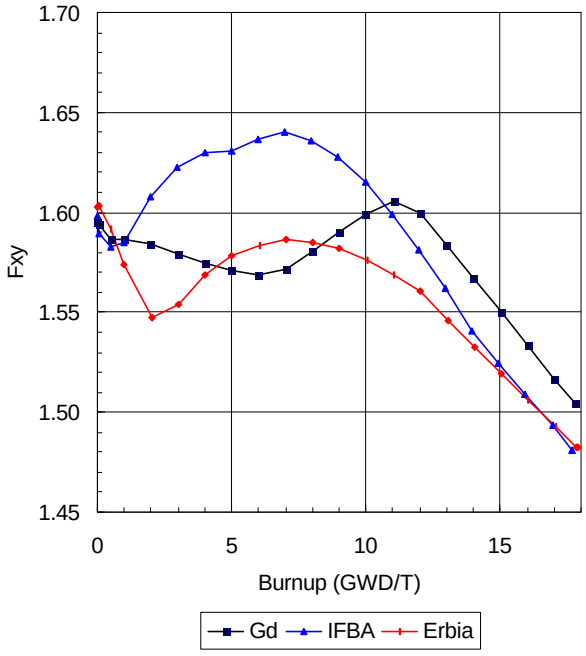


그림 4-4. Fz vs. Burnup
(KSNP Equlibrium Cycle)

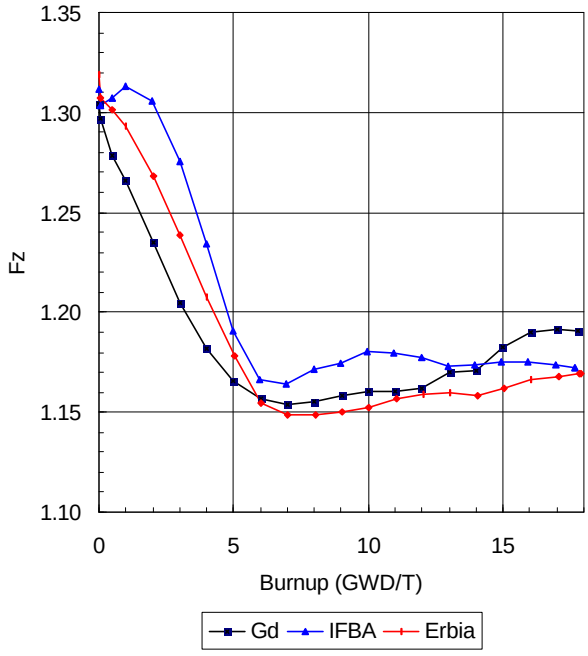


그림 4-5. Fq vs. Burnup
(KSNP Equlibrium Cycle)

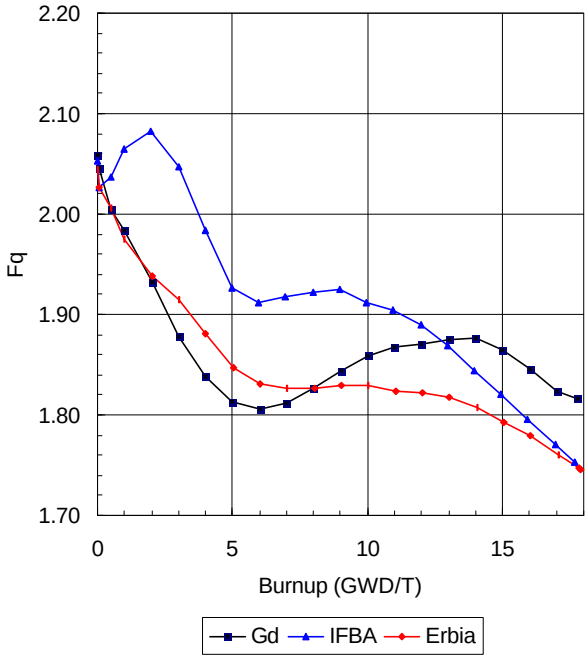


그림 4-6. Axial Power Shape vs. Burnup
(KSNP Gd Equlibrium Cycle)

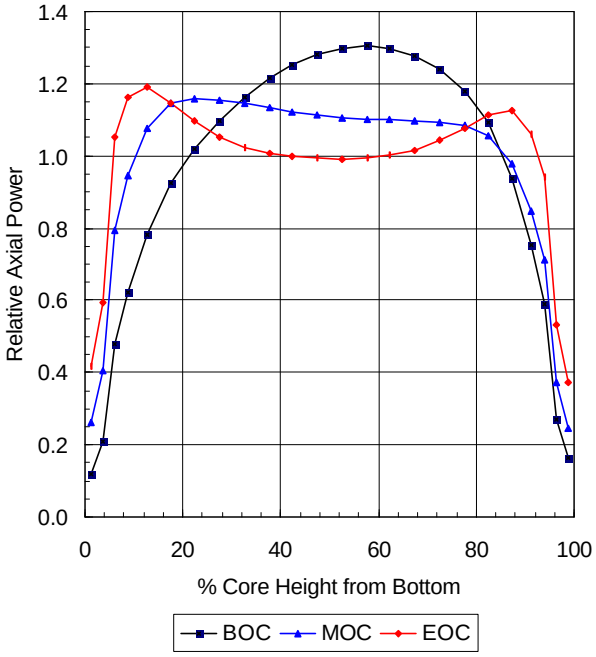


그림 4-7. Axial Power Shape vs. Burnup
(KSNP IFBA Equlibrium Cycle)

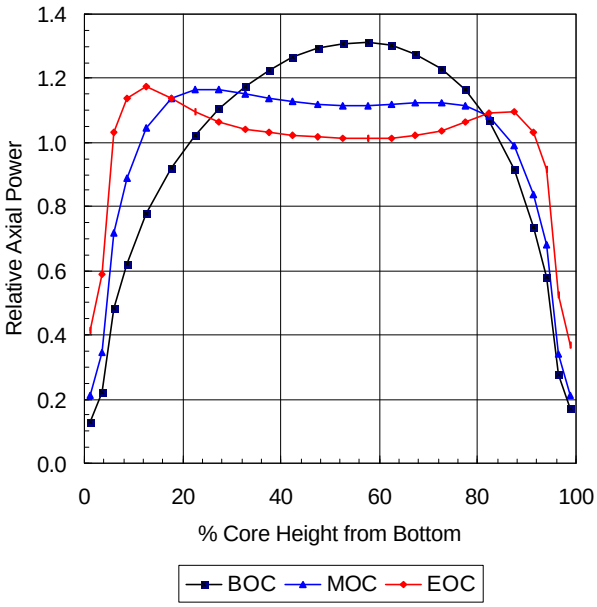


그림 4-8. Axial Power Shape vs. Burnup
(KSNP Erbia Equlibrium Cycle)