

가연성흡수봉과 신연료장전수에 따른 핵주기비 평가

Fuel Cycle Cost Evaluation to Burnable Absorber and Feed Assemblies

배성만, 김윤희, 신호철

한국전력공사 전력연구원
대전광역시 유성구 문지동 103-16

요약

WH형 950MWe급 원전의 18개월 주기 운전을 대상으로 가연성흡수봉 종류 및 신연료 수를 포함한 종합적인 경제성평가를 통하여 경제성 측면에서 최적의 원전연료 사용방법을 도출하였다. 가연성흡수봉 4종류(IFBA, WABA, Gadolinia, Erbia)와 신연료 수 4종류(56, 60, 64, 68)를 조합한 16개 경우에 대하여 18개월주기 평형노심의 장전모형탐색을 수행하고 노심설계 특성 및 경제성을 분석하였다. 경제성 평가시 고정비 영향을 배제하기 위하여 주기길이를 480 EFPD로 고정하고 핵연료 주기비만을 계산하여 비교하였다. 핵연료 주기비 계산에는 원광비, 변환비, 농축비, 성형가공비, 가연성흡수봉 비용, 후행핵주기비를 고려하였다. 이자율 8%를 가정하고 선행핵주기 비용만 고려할 경우 WABA 가연성흡수봉을 사용하고 신연료 수 60개를 장전하는 것이 경제성 측면에서 최적인 것으로 나타났다. 그러나 WABA, IFBA, Gadolinia 가연성흡수봉 간의 경제성 차이는 매우 적으며 그들 간의 우열은 가연성흡수봉 가격에 따라 좌우되는 것으로 나타났다. 노심설계 유통성 측면에서는 Erbia, IFBA가 WABA, Gadolinia보다 우수한 것으로 나타났다.

Abstract

The comparative analysis of fuel cycle cost for 16 equilibrium cores was performed to evaluate the fuel cycle cost depending on the combination of four different types of burnable absorbers (BAs) and feed assemblies for 18 month cycle operation of Westinghouse type 3-loop plant using 17X17 Vantage 5H fuel. The BAs considered are IFBA, Gadolinia, Erbia, and WABA and four cases of number of feed assemblies are 56, 60, 64, and 68. The optimal and practical combination of BA and number of feed assemblies is proposed.

The optimum equilibrium core loading patterns for 16 cases were generated by using self-generating method and core design characteristics and the fuel cycle cost were evaluated for each loading pattern. The cycle lengths for all the cases were fixed as 480 EPFD to exclude effect of capital cost. Uranium ore cost, conversion cost, enrichment cost, fabrication cost, and back-end cycle cost were considered to evaluate fuel cycle cost. When considering the front-end cycle cost only, with the assumption of 8% discount rate, the 60 feed assemblies with using WABA case shows best result from the economic viewpoint. But the cost differences among the cases of using WABA, IFBA, and Gadolinia were negligible. And it was founded that the major factor for fuel cycle cost is BA price. In view of the core design characteristics, IFBA and Erbia were found to be more flexible than WABA and Gadolinia.

1. 서론

WH형 950MWe급 원전의 18개월주기 운전을 대상으로 신연료 장전수, 가연성흡수봉 종류를 고려한 종합적인 평가를 통하여 최적 원전연료 사용방법을 도출하였다. 대상 원전 및 연료는 국내에서 가동중인 WH형 3loop 발전소와 V-5H연료로 선정하였고, 고정비의 영향을 배제하고 순수하게 핵연료 주기비만으로 경제성 비교를 수행하고자 주기길이를 480 EFPD로 고정하였다. 평가대상 가연성흡수봉 종류는 IFBA, WABA, Gadolinia, Erbia로서 현 시점에서 상용공급중인 모든 종류를 포함하였다. 신연료 장전수는 56개, 60개, 64개, 68개를 대상으로 하였으며 가연성흡수봉 종류와 신연료 수를 조합한 16개 경우에 대하여 각각 최적의 평형노심 장전모형을 설계하였다. 여기서 최적장전모형이라 함은 주기길이가 최대가 되도록 설계된 장전모형을 의미한다. 주기길이가 최대가 되도록 하기 위하여 모든 장전모형이 L⁴P(Low Low Leakage Loading Pattern)가 되도록 하였고 기본적인 설계제한치들을 만족하도록 하였다. 평형노심 설계 및 장전모형탐색에는 WH사의 APA(ALPHA^[1], PHOENIX-P^[2], ANC^[3])코드 체계를 사용하였으며 경제성평가에는 WH사의 FUCO 코드를 사용하였다. 노심설계 제한치는 현행 재장전 노심설계에 적용되고 있는 제한치들을 사용하였다. 설계 제한치들은 [표 1], 가연성흡수봉 특성은 [표 2]와 같으며 가연성흡수봉 구조는 [그림 1]과 같다. 가연성흡수봉의 축방향 길이는 144 inch이며 상·하부 6 inch는 천연우라늄으로 구성되어 있고 독물질은 중심부 120 inch에만 존재한다. Gadolinia 가연성흡수봉은 우라늄 농축도가 1.8w/o이고 IFBA 및 Erbia 가연성흡수봉은 연료봉과 동일한 농축도의 우라늄을 사용하였다. 장전모형은 "self-generating method"를 사용하여 탐색하였다. 이 방법은 평형주기 노심을 대상으로 한 경제성 평가시 일반적으로 사용되는 방법으로 3배치인 경우 신연료, 한 번 연소된 연료, 두 번 연소된 연료를 적절히 배치하여 장전모형을 만들고 이를 3~4주기 반복 연소시켜서 평형에 도달시키는 방법이다.

2. 최적 평형노심 설계 및 분석

공정한 경제성 평가를 위해서는 각 경우의 평형 노심을 최적의 노심이 되도록 설계하여야 한다. 최적 장전모형이 되기 위해서는 우선 두 번 연소된 연료들 중에서 반응도가 높은 집합체가 3번째 주기에 사용되고 반응도가 낮은 집합체가 방출되어야 한다. 그리고 노심 외곽에는 두 번 연소한 연료들이 배치되어야 하고 신연료가 배치되어서는 안된다. 즉 L⁴P를 만족하는 장전모형이어야 한다. 동시에 노심설계 제한치들을 만족시켜야 한다. 신연료 수가 60, 64, 68다발인 경우는 모두 설계 제한치들을 만족하는 최적장전모형을 찾을 수 있었으나 신연료 수가 56다발인 경우는 설계 제한치들 중 일부를 만족시킬 수 없었다. [그림 2] ~ [그림 5]는 신연료 수 60다발인 경우의 최적장전모형을 보여준다. 두 번 연소된 연료들이 모두 외곽으로 배치되고 신연료 들은 모두 노심 내부에 배치된 L⁴P 노심임을 알 수 있다.

[표 3]에 각 노심의 설계 특성을 나타내었다. WABA와 신연료 56다발을 장전한 노심의 경우는 18개월주기 노심설계가 불가능하여 결과에서 제외시켰다. 각 경우의 우라늄 농축도는 주기길이가 480 EFPD가 되도록 조정된 농축도이다. 최고농축도와 평균농축도를 각각 [그림 6]과 [그림 7]에 나타내었다. Erbia 56개의 경우와 Gadolinia 56개의 경우는 우라늄 농축도가 설계 제한치 5w/o를 초과하였다. [표 3]에 나타난 가연성흡수봉 수는 신연료 다발에 장전되는 봉수이며 IFBA와 Erbia의 경우 4,000개 ~ 5,000개 정도로 비슷하고 WABA의 경우는 약 1,000개, Gadolinia의 경우는 700개 ~ 800개 정도이다. 이는 독물질의 독작용 효과의 차이에 기인한 것이다.

[표 4]는 15개 평형 노심의 노심 설계 분석 결과이다. 신연료 56다발을 장전하는 경우는 모두 현재의 노심설계 제한치들을 만족하지 못한다. IFBA/신연료 56다발 경우는 최대봉연소도가 제한치 60,000 MWD/MTU를 초과하고 Gadolinia/신연료 56다발 경우와 Erbia/신연료 56다발 경우는

F_{LH} 가 제한치인 1.528을 초과하며 우라늄농축도 또한 상업적 제한치 5.0w/o를 초과한다.

3. 경제성 평가

경제성 평가에 포함되는 항목은 원광비, 변환비, 농축비, 성형가공비, 가연성흡수봉 가공비, 후행 핵주기 비용 등이다. 본 연구에서 사용한 각 항목의 기준단가를 [표 5]에 나타내었다.

경제성 평가결과는 [표 6]에 나타내었다. 선행핵주기비용(가연성흡수봉 비용 제외)을 비교하면 ([그림 8]) Erbia의 경우가 가장 불리하고 IFBA가 가장 유리하다. 가연성흡수봉 가격을 포함한 총 선행핵주기 비용을 보면([그림 9]) WABA/신연료 60다발 경우가 최적이다. 그러나 IFBA, WABA, Gadolinia 간의 우열은 전체 비용의 4%도 안되는 가연성흡수봉 가격의 변화에 따라 달라질 수 있는 정도로 차이가 적다. [그림 9]를 보면 Erbia의 경우가 경제적으로 가장 불리함을 알 수 있다. 이는 Erbia 노심의 주기말 잔존 독작용 효과가 다른 가연성흡수봉을 사용한 노심과 비교하여 상대적으로 커서 우라늄 농축도가 증가되기 때문이다. 후행핵주기 비용까지 포함하면([그림 10]) 최적 신연료 수는 56다발이다. 그 이유는 총 핵연료주기비의 10%이상을 차지하는 후행 핵주기비용이 신연료수의 감소에 따라 줄어들기 때문이다.

4. 결론

이자율 8%를 가정하고 선행핵주기비 만을 고려하면 신연료 장전수 60다발과 WABA 가연성흡수봉을 사용하는 것이 경제성 측면에서 최적이다. 그러나 WABA, IFBA, 및 Gadolinia 가연성흡수봉간의 경제성 차이는 매우 작아 쉽게 우열을 가릴수 없다. 후행핵주기 비용을 포함하면 신연료수 56다발이 최적이지만 이 경우는 현재 노심설계에 적용되는 설계 제한치들을 만족시킬 수 없다. 노심설계 측면에서는 Erbia, IFBA 가연성흡수봉을 사용하는 경우가 설계제한치들을 만족하는 장전모형을 찾기가 가장 용이하며 WABA 및 Gadolinia 가연성흡수봉을 사용하는 경우는 상대적으로 어렵다. 그러나 WABA 가연성흡수봉의 경우 일체형 가연성흡수봉과 혼합 사용함으로써, Gadolinia 가연성흡수봉의 경우는 2w/o, 4w/o, 6w/o, 8w/o등 다양한 농도의 흡수봉을 사용함으로써 노심설계 유연성을 보다 좋게 할 수 있을 것이다.

참고문헌(Reference)

1. ALPHA (User's Manual) Version 8.2.0, Westinghouse Proprietary
2. PHOENIX-P (User's Manual) Version 8.2.0, Westinghouse Proprietary
3. ANC (User's Manual) Version 8.2.3, Westinghouse Proprietary
4. 서중석 외, “가압경수로 재장전 노심설계 기술확보”, 한국전력공사 기술연구원, KRC-90N-S01, (1992).
5. 이상희 외, “가연성흡수봉 사용방법 최적화 연구”, 한국전력공사 기술연구원, KRC-92N-J04, (1993. 9)
6. 박상원 외, “WH형 3-Loop 발전소에 대한 일체형 가연성흡수봉 평가”, 한국원자력학회 '96 춘계 학술발표회 논문집, 제 1권, (1996. 5)
7. 배성만 외, “WH형 3-Loop 원전에 대한 분리형 및 일체형 가연성흡수봉 평가”, 한국원자력학회 '96 추계 학술발표회 논문집 제 1권, (1996. 11)
8. 이상희 외, “가연성흡수봉 사용방법 최적화 연구(II)”, 한국전력공사 전력연구원, TR.96NS09.96.96, (1996. 12)
9. Alf Jonsson, "COMPARISON OF THE ECONOMIC PERFORMANCE OF BURNABLE

10. David L. Stucker, "Application of Levelized Fuel Cycle Cost Methods to the Evaluation of Modern Fuel Cycle Economics", 7th Incore Management Seminar, (1998. 11. 5)

[표 1] 노심설계 제한치

항 목	제 한 치	비 고
$F_{\Delta H}$	< 1.528	D bank 삽입 경우 포함
Peak Rod Burnup	< 60,000 MWD/MTU	
BOC Boron Concentration	< 2,100 PPM	HFP, NO Xe
BOC MTC	< 9 pcm/°C	HZP

[표 2] 가연성흡수봉 특성

가연성흡수봉	WABA	IFBA	Gadolinia	Erbia
Material	B ₄ C	ZrB ₂	Gd ₂ O ₃	Er ₂ O ₃
Poison Content	-	2.53 mg/inch	9w/o	2w/o
Number of Poison Rods	4, 8, 12, 16, 20, 24	16, 32, 48, 64, 80, 104, 128, 156	4, 8, 12, 16, 20	16, 32, 48, 64, 80, 104, 128, 156

6 inch	6 inch	120 inch	6 inch	6 inch
Top				Bottom
Natural U	Enriched U	Enriched U + Poison	Enriched U	Natural U

IFBA, ERBIA

6 inch	6 inch	120 inch	6 inch	6 inch
Top				Bottom
Natural U	Enriched U	1.8 w/o U + Poison	Enriched U	Natural U

Gadolinia

12 inch	120 inch	12 inch
Top		Bottom
Zr	Al ₂ O ₃ + B ₄ C	Zr

[그림 1] 가연성흡수봉 구성

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	(1,7)	(5,6)	(6,3)	(4,5)	(3,6)	24 F	(4,6)	(5,5)
2	(5,6)	(1,6)	24 F	(2,5)	24 F	(2,7)	F	(3,5)
3	(6,3)	24 F	(3,4)	24 F	(3,2)	24 F	(2,6)	
4	(4,5)	(2,5)	24 F	(4,3)	24 F	F	(1,5)	
5	(3,6)	24 F	(2,3)	24 F	(6,4)	(1,2)		
6	24 F	(7,2)	24 F	F	(1,3)			
7	(4,6)	F	(6,2)	(1,4)			BP# Shuffle	Once
8	(5,5)	(2,2)					BP# Shuffle	Twice

[그림 2] LP for 60 Feed with WABA

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	(1,5)	(3,2)	(2,6)	128 F	(1,7)	(2,3)	48 F	(1,2)
2	(3,2)	(6,2)	104 F	(3,6)	(4,5)	104 F	32 F	(2,4)
3	(2,6)	104 F	(1,4)	(4,6)	(2,7)	64 F	(3,4)	
4	128 F	(6,3)	(6,4)	(5,5)	104 F	48 F	(4,4)	
5	(1,7)	(5,4)	(7,2)	104 F	48 F	(3,5)		
6	(2,3)	104 F	64 F	48 F	(5,3)			
7	48 F	32 F	(4,3)	(2,2)			BP# Shuffle	Once
8	(1,2)	(4,2)					BP# Shuffle	Twice

[그림 3] LP for 60 Feed with IFBA

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	(1,2)	(1,7)	(1,4)	20 F	(3,2)	(5,5)	12 F	(2,5)
2	(1,7)	(2,3)	20 F	(2,6)	(2,7)	20 F	4 F	(1,6)
3	(1,4)	20 F	(4,5)	(4,6)	(6,3)	16 F	(3,4)	
4	20 F	(6,2)	(6,4)	(5,4)	20 F	4 F	(1,5)	
5	(3,2)	(7,2)	(3,6)	20 F	8 F	(3,5)		
6	(5,5)	20 F	16 F	4 F	(5,3)			
7	12 F	4 F	(4,3)	(5,2)			BP# Shuffle	Once
8	(2,5)	(2,2)					BP# Shuffle	Twice

[그림 4] LP for 60 Feed with Gadolinia

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	(1,2)	(4,5)	(1,4)	128 F	(5,5)	(1,7)	48 F	(1,5)
2	(4,5)	(5,4)	104 F	(3,2)	(7,2)	128 F	32 F	(5,3)
3	(1,4)	104 F	(2,6)	(4,6)	(6,3)	80 F	(3,4)	
4	128 F	(2,3)	(6,4)	(6,2)	104 F	16 F	(2,2)	
5	(5,5)	(2,7)	(3,6)	104 F	48 F	(5,2)		
6	(1,7)	128 F	80 F	16 F	(2,5)			
7	48 F	32 F	(4,3)	(6,1)			BP# Shuffle	Once
8	(1,5)	(3,5)					BP# Shuffle	Twice

[그림 5] LP for 60 Feed with Erbia

[표 3] 노심 설계 특성 비교

종 류	IFBA				WABA			Gadolinia				Erbia			
신연료수	56	60	64	68	60	64	68	56	60	64	68	56	60	64	68
최 고 농축도 (w/o)	4.845	4.584	4.398	4.222	4.604	4.404	4.255	5.115	4.810	4.575	4.410	5.059	4.813	4.620	4.470
평균 농축도 (w/o)	4.503	4.264	4.093	3.932	4.282	4.099	3.962	4.565	4.349	4.156	4.016	4.699	4.474	4.297	4.159
BLANKET 농축도(w/o)	0.740	0.740	0.740	0.740	0.740	0.740	0.740	0.740	0.740	0.740	0.740	0.740	0.740	0.740	0.740
정지기간 (day)	68	68	68	68	68	68	68	68	68	68	68	68	68	68	68
주기길이 (MWD/MTU)	18385	18385	18385	18385	18385	18385	18385	18460	18450	18445	18444	18480	18468	18468	18479
EFPD	480	480	480	480	480	480	480	480	480	480	480	480	480	480	480
방출연소도 (MWD/MTU)	51544	48107	45101	42448	48107	45101	42448	51754	48278	45248	42584	51810	48325	45304	42665
우라늄 양 (Kg)	72451	72451	72451	72451	72451	72451	72451	72145	72181	72207	72209	72088	72126	72123	72081
BP 수 (FEED)	4608	4544	4160	3968	1056	1040	1024	848	832	784	784	4528	4608	4992	5408
BP 특성	2.53 mg/in	2.53 mg/in	2.53 mg/in	2.53 mg/in	-	-	-	9w/o	9w/o	9w/o	9w/o	2w/o	2w/o	2w/o	2w/o

[표 4] 노심 안전 인자 비교

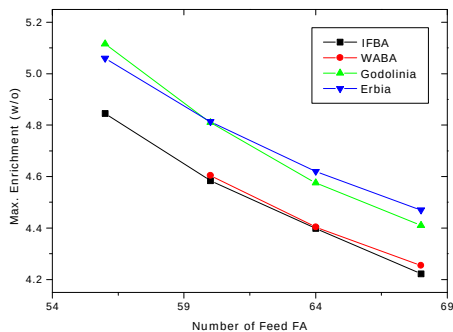
종 류	IFBA				WABA			Gadolinia				Erbia			
신연료수	56	60	64	68	60	64	68	56	60	64	68	56	60	64	68
주기초 SDM (%Δρ)	3.999	4.522	4.110	4.185	3.662	3.885	4.227	-	4.392	4.573	4.783	3.95	3.77	4.09	3.97
주기말 SDM (%Δρ)	2.810	3.188	2.495	2.797	2.859	2.942	2.923	-	3.273	3.474	3.364	2.55	2.74	2.90	2.81
Max. FdH	1.523	1.469	1.497	1.486	1.496	1.476	1.476	1.640	1.513	1.473	1.482	1.542	1.492	1.485	1.468
주기초 MTC (pcm/F)	0.52	0.97	1.47	1.92	0.58	0.68	1.17	-	0.30	1.34	1.64	1.83	1.04	0.92	1.27
주기말 MTC(pcm/F)	-	-38.87	-38.22	-37.62	-39.49	-38.80	-38.20	-	-39.53	-38.81	-38.12	-	-39.19	-38.80	-38.35
EOL PERL POWER	0.467	0.451	0.475	0.491	0.425	0.448	0.469	-	0.460	0.487	0.497	0.386	0.437	0.449	0.481
잔존 독작용 (pcm)	138	122	91	82	181	151	134	-	-	-	-	-	-	-	-
BOC HZP PPM	2270	2264	2268	2264	2302	2263	2243	-	2255	2263	2233	2423	2327	2237	2170
BOC HFP NOXE PPM	2023	2032	2054	2062	2051	2031	2024	2013	2023	2048	2030	2179	2100	2021	1962
Peak Rod Burnup<	61308	59716	59532	58014	56594	58872	59508	-	59847	59707	58783	59755	58888	56460	56772

[표 5] 경제성 평가 기준 단가

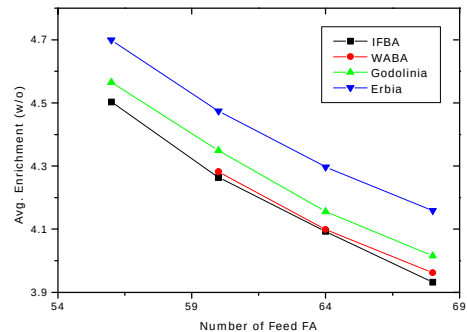
항 목		가 격	비 고
선행핵주기비	원광 (U_3O_8)	33.7 \$/kgU	
	변환	6.4 \$/kgU	
	농축	107 \$/SWU	
	성형가공	287.2 \$/kgU	
후행핵주기비	사용후연료저장	200 \$/kgU	참고문헌 10
	사용후연료처분	400 \$/kgU	참고문헌 10
가연성흡수봉 가공비	IFBA	360 \$/pin	참고문헌 9
	WABA	1,250 \$/pin	
	Gadolinia	1100 \$/pin	
	Erbia	110 \$/pin	참고문헌 9
이자율		8.0 %/yr	

[표 6] 핵연료 주기비

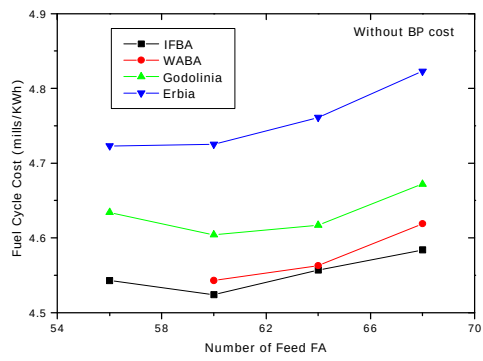
종류		IFBA				WABA			Gadolinia				Erbia			
신연료수		56	60	64	68	60	64	68	56	60	64	68	56	60	64	68
주기비 (mills/KWH)	BP 가격	0.194	0.189	0.171	0.162	0.153	0.149	0.145	0.110	0.105	0.098	0.098	0.058	0.058	0.063	0.068
	선행핵주기비 (BP제외)	4.543	4.524	4.557	4.584	4.543	4.563	4.619	4.634	4.604	4.617	4.672	4.723	4.725	4.761	4.823
	선행핵주기비 (BP포함)	4.737	4.713	4.728	4.746	4.696	4.712	4.764	4.744	4.709	4.715	4.770	4.781	4.783	4.824	4.891
	후행핵주기비	0.472	0.511	0.551	0.591	0.511	0.551	0.591	0.470	0.510	0.550	0.589	0.469	0.510	0.548	0.587
	총핵주기비용	5.209	5.224	5.279	5.337	5.207	5.263	5.355	5.213	5.219	5.265	5.359	5.244	5.292	5.371	5.477



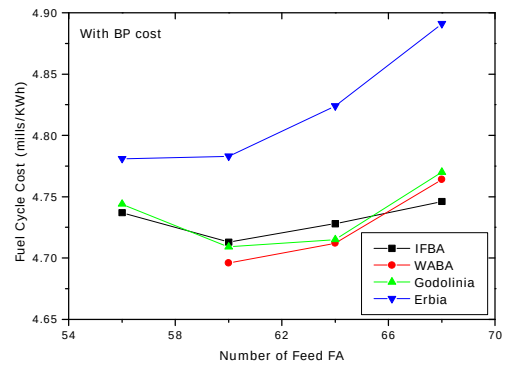
[그림 6] 신연료 수에 따른 최고 농축도



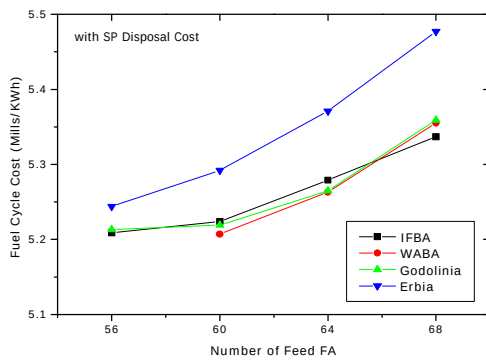
[그림 7] 신연료 수에 따른 평균 농축도



[그림 8] 선행핵주기비(BP제외)



[그림 9] 선행핵주기비(BP포함)



[그림 10] 핵연료 주기비(후행핵주기비 포함)