

## 原電연료 주기비와 폐기물 감소 방안

# 우리나라처럼 原電건설 연속되는 경우 初期爐心 핵연료 주기비 경제성 입증

白 主 鉉

한국원자력연구소 책임연구원 경수로 핵연료 사업부장

# 영광 3, 4호기 호기당 약 100억원 경제성 있다 영광 5, 6호기까지 적용경우 200억원 비용절감

한국원자력연구소

요 약

임채준, 이정찬, 김상지

선 임 연구원

공 동 연 구

일반적으로 핵연료 주기비가 가장 비경제적인 초기노심 핵연료를 택하여 핵연료 주기비 경제성을 높이기 위한 방안을 모색하였다.

영광 5, 6호기 초기노심에 영광 3, 4호기에서 한 주기 연소후 방출될 batch A 핵연료 45다발을 장전하여

노심을 구성한 후 노심 특성과 경제성을 고찰하였다.

노심 특성 측면에서 주기길이는 11,697MWD/MTU이고, 각종 안전성 관련 핵적상수들도 모두 설계제한치를 만족하여 오히려 신연료 만으로 구성된 영광 3, 4호기 초기노심에 비해 안전성을 향상시키는 경향을 갖는 것을 확인하였다.

경제성 측면에서는 영광 3, 4호기 초기노심 핵연료 주기비보다 호기당

그림 1 : 연소집합체를 사용한 초기노심 장전모습

N F						1 C	2 D	3 C
N : Box Number F : Fuel Type		4 C	5 C	6 D1	7 B1	8 D1		
		9 C	10 D1	11 D1	12 A	13 C1	14 A	
15 C	16 D1	17 C1	18 A	19 D1	20 A	21 B		
22 C	23 D1	24 A	25 C	26 A	27 D1	28 B1		
29 C	30 D1	31 A	32 D1	33 A	34 D1	35 A	36 C1	
37 D	38 B1	39 C1	40 A	41 D1	42 A	43 B	44 B1	
45 C	46 D1	47 A	48 B	49 B1	50 C1	51 B1	52 A	

약 100억 원의 비용절감 효과를 확인 하였으며, 영광 5, 6호기 모두 적용할 경우에는 200억 원의 비용절감이 예상된다.

이들 외에도 사용후 핵연료 절대량 감소로 인한 부수적인 효과등 긍정적인 측면으로 작용할 수 있다.

## I. 서 론

핵연료 주기비의 경제성을 고찰하는 데 있어서 초기노심을 따로 떼어서 볼 필요가 있을까? 핵연료 주기비를 구성하는 요소들은 상당히 복잡하기

때문에 어느 한 노심에만 국한하지 않고 앞 뒤 주기노심과의 상관관계들을 모두 고려해야만 한다.

그러나 초기노심을 구성하는 핵연료는 재장전 노심에 장전되는 핵연료와는 다른 특성을 갖고 있기 때문에 핵연료 주기비에도 이러한 특성이 반영된다.

그리고 만약에 초기노심핵연료 주기비의 경제성을 제고할 수 있는 방안이 있다면 우리나라와 같이 새로 건설하는 발전소가 많은 곳에서는 그 효용성이 클 것이다.

핵연료 주기비를 구성하는 요소들은 크게 세 가지로 나눌 수 있다.

첫째는 노심에 핵연료를 장전하기 전 연소전단계(front end) 주기비로서, 원광구입(原廣購入), 변환, 농축, 재변환, 성형가공(成型加工) 등에 소요되는 비용이다.

둘째는 노심에서 연소된 후의(back end) 주기비로서, 재처리를 할 경우와 재처리를 하지 않는 경우로 나눌 수 있지만 방출(放出) 핵연료 처리비용이다.

셋째는 이들 비용에 대한 이자 및 할인이 해당된다. 이들 비용은 통상 지출요소로 작용한다.

이에 반하여 전력생산을 통한 수익 요소는 노심에서의 연소를 통하여 얻어진다.

따라서 핵연료 주기비를 따질 때는 이들 제반 요소들을 모두 고려하여야 한다.

그리고 지출요소를 줄이고 수익요소를 늘일 수 있다면 핵연료 주기비의 경제성이 좋아지는 것은 당연하다.

핵연료 주기비 구성요소로 볼 때 초기노심을 구성하는 핵연료는 후속 노심에 재장전 되는 핵연료와는 몇 가지 다른 특징이 있다.

재장전되는 핵연료는 노심 전략(爐心戰略)이 바뀌지 않는다면 통상적으로 동일 농축도를 유지한다. 그러나 초기노심을 구성하는 핵연료 농축도는 다양하다.

농축도의 종류는 노심 관리 전략에 따라서 다르지만 3 batch 노심은 세 가지, 4 batch 노심은 네 가지이다. 4 batch 평형 노심(平衡爐心)에서는 평

# 原電연료 주기비와 폐기물 감소 방안

표 1 : 연소집합체를 사용한 초기노심의 집합체 구성

Assebmly type	Number of Assemblies	Fuel Rod Enrichment (w/ o)	No. Gd Rods per Assembly	No. of Gd Rods per Assembly	Gd203 w/ o in Nat'1 UO2
A	45	1.28	236	—	—
B	8	2.37	236	—	—
B1	16	2.37/ 1.87	176/ 52	8	4
C	36	2.87/ 2.37	184/ 52	—	—
C1	16	2.87/ 2.37	176/ 52	8	4
D	8	3.37/ 2.87	184/ 52	—	—
D1	48	3.37/ 2.87	176/ 52	8	4

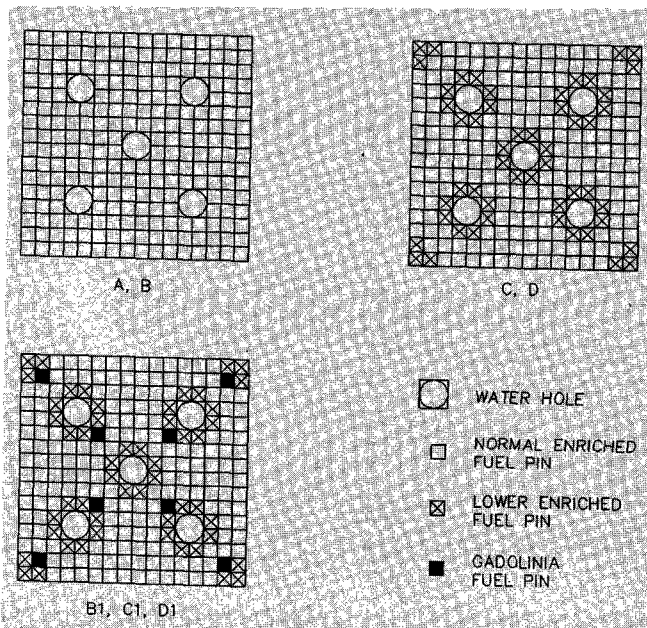
균적으로 핵연료가 4번의 연소주기를 거친다.

그러나 초기노심의 경우 장전핵연료 전체의 1/4에 해당하는 핵연료는

한 주기만 연소하면 방출되고, 그 다음 1/4은 두 주기 연소, 그 다음 1/4은 세주기 연소 후 방출된다.

영광 3, 4호기의 경우에 초기 노심

그림 2 : 초기노심에 장전되는 집합체 모형



에 장전되는 핵연료 중에서 한 주기만 연소한 후 방출되는 batch A 핵연료가 45다발이다.

batch A 핵연료는 한 주기만 연소를 시키면 되기 때문에, 즉 전력생산에 기여하는 수익요소가 작기 때문에 지출요소를 작게 할 수밖에 없다. 따라서 핵연료 주기비 측면에서 batch A의 농축도는 가능하면 낮을수록 좋고 또한 노심에서의 연소도는 가능하면 높을수록 좋다.

이렇게 하기 위하여 초기노심에서 batch A 핵연료는 모두 노심 안쪽에 장전한다.

그러나 노심에서의 연소가 한 번 뿐이라는 이유 때문에 batch A 핵연료 주기비는 타 batch 핵연료보다 상당히 높다.

물론 농축도가 낮기 때문에 front end 주기비에서 원광구입비나 변환, 농축비가 낮지만 재변환, 그리고 성형 가공비는 동일하다. 따라서 초기노심에 장전되는 batch A의 경제성을 높으려면 농축도와 무관한 지출요소를 줄여야 한다.

이러한 관점에서 영광 5, 6호기 초기노심에 장전할 batch A의 경제성을 높이기 위한 방안을 모색하였다. 핵연료 주기비 측면에서 수익요소와 지출요소 중 지출요소 감소방안에 중점을 두었다.

농축도와 무관한 주기비의 지출요소(支出要素)를 줄일 수 있는 방안은 무엇인가?

새로운 핵연료를 만든다면 이러한

비용은 당연히 지출할 수 밖에 없는 항목이다.

그렇다면 핵연료를 새로 만들지 않으면 될 것이 아닌가. 핵연료를 새로 만들지 않으면 5, 6호기 초기노심은 어떻게 구성할 수가 있겠는가?

이미 만들어진 핵연료를 장전하면 되지 않는가? 이미 만들어진 핵연료가 어디에 있겠는가?

초기노심이라고 반드시 새로 만든 핵연료를 장전해야만 한다는 법칙이 없다면 연소된 연료는 많다.

영광 3, 4호기 초기노심에서 한 주기만 연소하고 방출될 시점에서 batch A의 핵연료는 핵적인 측면의 반응도는 작지만 기계적인 측면에서 영광 5, 6호기 초기노심에서 연소하는 데는 아무런 문제가 없다.

이와 같은 목적으로 II장에서는 영광 5, 6호기 초기노심에 영광 3, 4호기에서 방출될 batch A 핵연료를 장전하여 노심을 구성하고 노심 특성을 살펴보았다.

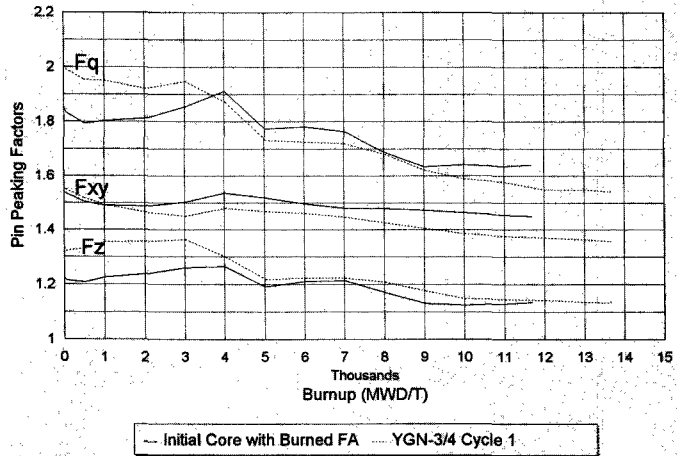
III장에서는 이와 같이 구성된 영광 5, 6호기 초기노심의 핵연료 주기비를 분석하였다.

IV장에서는 결론 및 향후연구과제를 요약하였다.

## II. 노심의 구성 및 특성

현재 한국원자력연구소에서 사용중인 핵설계코드인 ROCS/MC 체계를 이용하여 영광 3, 4호기 초기노심의

그림 3 : 연소도에 따른 첨두 출력 인자



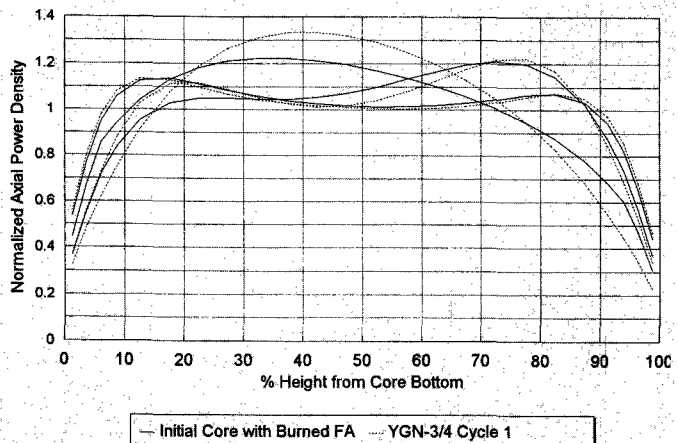
batch A 핵연료를 영광 5, 6호기 초기노심에 재 사용된 장전모형은 그림 1과 같다.

이 노심을 구성하는 핵연료집합체는 표 1에 나타내었으며 이들 집합체의 모형은 그림 2에서 나타내고 있는

바와 같다.

그림 1에서 보이는 바와 같이 핵연료 장전모형은 3, 4호기에 비하여 D 영역 집합체가 A 영역 집합체와 바둑판 형태를 유지하며 노심 내부에 위치하고 있음을 알 수 있다. 이러한 저누

그림 4 : 연소도별 축방향 출력분포



# 原電연료 주기비와 폐기물 감소 방안

설형 장전모형은 한번 연소된 batch A 핵연료의 재사용으로 가능한 것이었다.

또한 표 1에서도 알 수 있듯이 1주기에 장전되는 집합체의 종류는 영광 3, 4호기의 경우 아홉 가지가 필요하였으나 여기서는 7종의 집합체 종류만 사용하여 장전모형을 구성할 수 있었다.

노심에 들어가는 gadolinia 봉 수는 각각 640개로 동일 하였으며, 노심의 평균농축도는 영광 3, 4호기의 경우 2.33w/o인 반면 여기서는 batch A의 U-235농축도를 연소도 12,366MWD/MTU인 경우로 고려한 0.48w/o로 계산하여 노심의 평균농축도는 2.23w/o이었다.

이와 같은 노심의 주기(週期)길이는

11,697MWD/MTU로 4batch A 노심인 영광 3, 4호기가 주기길이 13, 650MD/MTU인 경우와 비교하여 953MWD/MTU가 감소된 결과를 얻어냈다. 이는 batch A의 재사용에 의한 노심 잉여반응도의 감소 때문이다.

노심 구성에 제약이 되는 여러 가지 요인중에서 특히 중요한 침투출력인자(Fq, Fxy, Fz)는 연소도에 따라 영

표 2 :  
연소집합체를  
사용한  
주기계획표

Fuel Type	No.	Enrich.	Avg. En	F	S	MTU	CY0	CY1	CY2	CY3	CY4
A	45	1.28	1.2800	236		19.3068	12366*	9445			
B	8	2.37/ 1.87	2.2598	184/ 52		3.4323		13196	12042		
B1	7	2.37/ 1.87	2.2056	176/ 52	8	2.9980		13502			
B1	9	2.37/ 1.87	2.2056	176/ 52	8	3.8546		12892	12517		
C	22	2.87/ 2.37	2.7598	184/ 52		9.4389		10289	13860		
C	9	2.87/ 2.37	2.7598	184/ 52		3.8614		7344	14883	12455	
C	5	2.87/ 2.37	2.7598	184/ 52		2.1452		8362	14589		13914
C1	16	2.87/ 2.37	2.6893	176/ 52	8	6.8526		13992	13705		
D	8	3.37/ 2.87	3.2598	184/ 52		3.4323		10542	15239	13006	
D1	48	3.37/ 2.87	3.1730	176/ 52	8	20.5579		14322	11028	12001	
E	16	4.35/ 3.75	4.2178	184/ 52		6.8646			13013	16359	16820
E1	24	4.35/ 3.75	4.1013	176/ 52	8	10.2701			16753	11973	12304
E2	12	3.75/ 3.25	3.5426	176/ 52	8	5.1350			17875	9075	12940
F	16	4.62/ 4.12	4.5098	184/ 52		6.8646				13229	20125
F1	4	4.62/ 4.12	4.3848	176/ 52	8	1.7117				17878	18247
F2	25	4.12/ 3.62	3.9008	176/ 52	8	10.6980				17318	17873
F2	3	4.12/ 3.62	3.9008	176/ 52	8	1.2838				18132	18672
F3	12	4.62/ 4.12	4.3221	172/ 52	12	5.1283				16335	9657
G	16	4.40/ 3.90	4.2898	184/ 52		6.8646					14203
G1	28	4.40/ 3.90	4.1742	176/ 52	8	11.9715					19295
G3	13	4.40/ 3.90	4.0579	168/ 52	16	5.5389					20227
G3	3	4.40/ 3.90	4.0579	168/ 52	16	1.2782					21751

\* 영광 3, 4호기 1주기말 방출 연소도

표 3 : 영광 5, 6호기 주기비 인자

원광	변환	농축	성형가공비	방출핵연료처리
\$/ lb	\$/ KgU	\$/ KgU	\$/ KgU	\$/ KgU
30	6	110	350	500

광 3, 4호기와 비교하여 그림 3에서 나타내었다.

이 그림에서 알 수 있듯이 반경반향 첨두출력인자는 전체적으로 약간 증가되어 있으나, 축방향 첨두출력인자의 감소로 인하여 Fq는 주기초에서는 오히려 영광 3, 4호기보다 약 15% 정도의 개선을 보이고 있으며 주기중반 이후부터의 증가량도 작은 양임을 알 수 있다.

또한 열적여유도에 큰 영향을 미치는 축방향 출력분포 역시 영광 3, 4호기와 비교하면 주기 초에서 첨두치 감소 및 주기 중반에서 말안장 모양이 완화되고 있음을 볼 수 있다. 주기말로 연소가 진행됨에 따라 축방향 출력 분포는 유사해 진다.

이러한 효과는 재사용하게 되는 batch A의 축방향 연소도 분포가 미치는 영향이다.

또한 노심의 평균농축도 감소와 동일하이를 사용함으로써 영광 3, 4호기에 비하여 주기초 붕소농도가 감소하였고 이에 따라 감속재 온도계수도 더욱 큰 음의 값을 갖는다.

영광 3, 4호기의 경우 주기초 열출력(熱出力 1,141ppm)에서 +2.88 pcm/°C, 전출력(778ppm)에서 -9.36 pcm/°C를 실현하였으며 반면, 영광 5,

6호기의 경우 각각 1,100ppm에서 -1.98pcm/°C 및 720ppm에서 26pcm/°C로 나타남바 있다.

### Ⅲ. 핵연료 주기비 분석

영광 3, 4호기에서 한 주기 연소를 끝내고 방출된 batch A 핵연료를 재 사용하는 영광 5, 6호기 초기노심의 핵연료 주기비는 다음과 같은 방법으로 산출하였다.

핵연료 주기비는 해당주기의 핵연료 비용을 전력 생산량으로 나눈 것이다.

영광 5, 6호기 첫째 주기 핵연료 비용은 batch B, C, D 핵연료 비용만을 포함하고 재사용 핵연료 batch A는 비용지출이 없기 때문에 포함하지 않는다.

그리고 batch B, C, D 핵연료의 1 주기 핵 연료 비용은 표 2와 같은 장전계획에 의한 주기비 계산을 통하여 구할 수 있다.

FUELCOST-IV와 표 3의 입력자료를 사용한 결과 batch B, C, D 핵연료 1주기의 핵연료 비용은 \$ 50.1528 × 10<sup>6</sup>이다.

1주기 노심연소도 1,697MWD/

MTU에 해당하는 전력생산량은 7.5256 × 10<sup>9</sup> KWhe이므로 결과적으로 1주기 주기비는 6.664mills/KWhe이다.

4 batch 영광 3, 4호기 노심의 1주기 핵연료 비용인 8.17mills/KWhe나 3 batch 노심의 핵연료 비용인 8.39mills/KWhe에 비하여도 1.51~1.73mills/KWhe의 이익을 보이고 있다.

이는 생산전력량 7.5256x10<sup>9</sup> KWhe를 곱하면 \$ 11.36 × 10<sup>6</sup>~\$ 13.02 × 10<sup>6</sup> 또는 91억~104억 원에 달하고 있음을 말해준다.

후속주기의 핵연료비는 주기전략에 의해 영향을 받을 수밖에 없으나 여기서 계산된 비용은 2주기는 7.72mills/KWhe, 3주기의 경우 7.08mills/KWhe 등으로 나타나 통상적인 노심의 주기비와 큰 차이가 없음을 알 수 있다.

단지 2주기의 비용이 약간 높기 나타나고 3주기의 비용이 감소된 원인은 2주기에 52개의 신연료를 넣는 전략을 사용하였기 때문으로 볼 수 있다.

또한 이 논문에서 고려하지 못한 손실 부분은 영광 3, 4호기의 핵연료 저장조에서 영광 5, 6호기의 핵연료 저장조로 운반하는 데 필요한 추가비용과 약 2개월에 해당하는 1주기 길이의 감소로 인한 발전소 고정설비비용의 회수에 걸리는 기간의 연기를 생각할 수 있다.

핵연료 운반에 필요한 비용에 대하여는 추후 연구가 필요할 것으로 판단되나 최대한 방출핵연료 처리비용에는 미치지 못할 것이며 주기길이 감소로 인한 고정 비용 회수기간 연기에 따른 손실 역시 장기에 걸친 손익분기점을 고려할 때

## 原電연료 주기비와 폐기물 감소 방안

미미할 것으로 생각된다.

그러나 이와 같은 추가 비용은 이 논문에서 비용계산에 고려하지 않은 개선된 사항들에 의하여 상쇄될 수 있을 것이다.

비용으로 환산하지 않은 개선사항들은 영광 3, 4호기에 비하여 주기초 열적여유(熱的餘裕度)도 증가에 의한 운전여유도 향상, 45개의 핵연료집합체 재사용에 따른 사용후 핵연료 저장조의 여유증가, 개선된 저 누설형 장전모형 채택으로 인한 압력용기의 중성자 조사량(中性子 照射量) 감소에 의한 수명연장 등을 생각할 수 있으며, 자원 재활용 측면에서도 유용한 전략이 될 수 있다.

다른 한편으로는 사용후 핵연료 절대량(絕對量) 감소에 따라 환경에 미치는 긍정적인 요인도 무시할 수 없다.

### IV. 결 론

Bactch A를 재사용하는 초기노심은 통상적인 노심의 1주기 핵연료 주기비에 비해 발전소내에서의 핵연료 수송비용을 고려하지 않는 경우 약 100억 원의 비용절감 효과를 가져오며, 핵연료 사용량을 줄임으로써 사용후 핵연료 저장시설에 부담을 줄인다.

또한 자원의 재활용 측면과 환경에 미치는 영향에도 긍정적인 효과를 가져오고 있다.

추후 연구과제로는 발전소내에서의

수송비용이 핵연료 주기비에 미치는 영향에 대한 평가 및 수송비용 절감방안이 모색되어야 하겠다.

### 참 고 문 헌

1. Edward C. Rodgers, "FUE-LCOST-IV Code Descriptions and User's Manual", December 1971.
2. "Final Safety Analysis Report of Yonggwang Units 3&4", 한국전력공사.
3. "User's Manual for ROCS", CE-CES-4 Rev. 6-P, ABB-CE, Dec. 1990.
4. "User's Manual for MC", CE-CES-62 Rev. 8-P, ABB-CE, May 1990.

핵연료 주기비를 구  
성하는 요소들은 상당  
히 복잡하기 때문에 어  
느 한 노심에만 국한하  
지 않고 앞뒤 주기노심  
과의 상관관계들을 모  
두 고려해야 한다.

초기노심핵연료 주기  
비의 경제성을 제고할  
수 있는 방안이 있다면  
우리나라와 같이 새로  
건설하는 발전소가 많  
은 곳에서는 그 효용성  
이 클 것이다.