

토륨 핵연료 장전 육방형 무붕산노심의 전환성 평가

The Conversion Ratio Evaluation of the Thorium Fuel in Boron-Free, Hexagonal Core

조진영, 정형국, 노재만, 주형국, 송재승, 김궁구
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

본 연구에서는 핵확산 저항성이 큰 토륨핵연료를 24개월주기 무붕산 육방형 노심에 장전하여 전환률 및 노심특성을 우라늄 장전노심 경우와 비교 평가하였다. 이를 위하여 토륨장전 핵연료집합체의 격자특성을 분석하여 노심설계요건을 만족할 수 있는 토륨핵연료집합체를 설계하였다. 토륨핵연료집합체를 우라늄 핵연료가 장전되었던 육방형 노심에 대체 장전하여 초기 노심부터 평형주기 노심까지 노심특성을 계산하였다. 격자해석 및 노심해석에 HELIOS/MASTER 코드체계를 사용하였으며, 해석결과 토륨 핵연료를 사용하여 24개월 핵연료 교체주기와 무붕산운전이 가능한 노심을 구성할 수 있음을 확인하였고, 또한 토륨 장전노심에서는 기존 우라늄 장전노심에 비해 전환성이 15% 증가하고, 초우란 핵종 생성량이 57% 감소함을 확인하였다.

Abstract

In this study, the conversion ratio and nuclear characteristics of the thorium fuel loaded core were evaluated and compared with those of the uranium fuel loaded core in the hexagonal geometry core. To this end, the thorium fuel assemblies were designed to meet the core design requirement on the basis of the sensitivity analyses of the thorium fuel lattice. The thorium fuel assemblies are loaded in the hexagonal core which is originated from the uranium loaded core. Core analyses from the initial cycle to the equilibrium cycle were carried out by using HELIOS/MASTER computer codes. The results show that the thorium loaded core meets core design requirements, such as the 24-month refueling cycle length, boron free operation, etc. Thorium loaded core also enhances the conversion ratio by 15% and reduces the transuranium nucleus production by 57% compared with those of the uranium loaded core.

1. 서론

미래의 신형원자로에 적용할 여러 가지 노심 개념중의 하나로 본 논문에서는 무봉산 노심에 토륨을 장전하는 고전환 노심개념을 고안하였다. 무봉산노심은 기존 액체 폐기물의 대부분을 차지하면서 1차계통의 부식의 주원인인 붕산수를 사용하지 않음으로 인해 붕산함량 제어와 관련된 제어계통이 불필요하므로 계통의 단순화뿐만 아니라 노심내 양의 냉각재온도계수의 주 원인을 제거함으로써 노심의 고유 안전성을 향상시킬 수있어 최근에 활발히 연구되고 있다. 또한 고전환 노심 개념연구는 이미 여러 가지로 수행되어 왔으나, 방출된 핵연료를 핵확산 가능성이 높은 재처리를 수행하지 않고 노심내에서 전환률을 향상시켜 핵연료의 이용률을 제고시킬 수있는 노심개념으로 토륨을 장전하는 고전환 노심개념연구가 수행되고 있다[1].

토륨은 우라늄에 비해 반감기가 길어 자연계에 우라늄보다 풍부히 존재하는 핵연료 자원이다. 그러나 이러한 토륨은 질량수가 232인 핵원료성 물질로만 존재하기 때문에 이를 핵연료로 사용하기 위해서는 핵분열성 물질로의 전환이 필수적이다. 물론 우라늄도 핵원료성 물질인 238을 핵분열성 물질로 전환하여 사용할 수가 있으나 우라늄은 장수명핵종의 생성, 핵확산 가능성 등으로 인해 핵사찰의 대상이 되고 있다. 이러한 이유로 핵원료성 물질로서 뿐만 아니라 자연 친화적 에너지로서 토륨은 최근 활발히 연구되고 있다.

본 연구에서는 이러한 최근의 경향에 부응하여 육방형 무봉산노심에 토륨 핵연료를 장전하여 노심특성을 평가하였다. 수행방법으로는 먼저 기존의 우라늄 핵연료에 대응하는 토륨 장전 핵연료 집합체를 설계하여 집합체 특성을 우라늄핵연료와 비교하였다. 그리고 이들 토륨 장전 핵연료집합체를 기존 우라늄장전 핵연료집합체에 대체 장전하여 초기노심부터 평형주기까지 계산하여, 평형 주기에서의 노심특성을 비교하였다. 특히 토륨핵연료 장전 노심의 주 관심사라고 할 수 있는 전환성의 평가와 초우란 핵종 생성에 초점을 두었다. 토륨 핵연료장전노심의 격자해석 및 노심해석에는 HELIOS[3]/ MASTER[4] 체계를 사용하였다.

2. 토륨 장전 핵연료 집합체 특성

그림 1은 토륨 장전 핵연료집합체를 나타낸 것이다. 토륨핵연료의 중성자 흡수 단면적이 크기 때문에 토륨핵연료를 20% 우라늄 핵연료(MEU: Medium Enrichment Uranium)와 고루 섞어서 장전하였으며 우라늄 양을 조절하여 핵연료집합체의 반응도를 조절하였다. 가연성 흡수물질로는 $B_4C-Al_2O_3$ 혼합체를 사용하였으며 제어봉과의 양립성을 확보하기 위해 핵연료봉 장전위치에 대체 장전되었다. B12-19 토륨장전 핵연료집합체는 12개의 가연성 독봉을 장전하고 핵연료봉내 19%의 MEU 핵연료를 장전한 집합체로서 1주기용으로 설계된 것이다. B24-28 토륨 장전 핵연료집합체는 24개의 가연성 독봉을 장전하고 MEU 핵연료를 28%장전한 집합체로서 1주기에서 평형주기까지 장전된다.

그림 2는 토륨장전 무독봉핵연료와 우라늄 핵연료집합체의 연소에 따른 무한증배계수를 나타낸 것이다. 토륨 핵연료집합체의 연소에 따른 무한증배계수의 변화는 우라늄 핵연료집합체에 비해 상대적으로 매우 완만한 것을 알 수 있다. 따라서 토륨 장전무봉산노심에서는 가연성독물질이 제어해야할 주기초 잉여반응도가가 우라늄 장전노심에 비해 상대적으로 작기 때문에 이를 제어할 가연성 독봉수도 줄어들게 된다. 그림 1에서 보인 B12-19 토륨장전 핵연료 집합체는 가연성독봉

18개를 장전한 우라늄핵연료집합체에 대응하는 것이며 B24-28 토륨장전 핵연료 집합체는 가연성 독봉 36개를 장전한 우라늄 핵연료집합체에 대응하는 것인데 토륨 장전 핵연료집합체에서의 가연성 독봉수가 약 1/3가량 줄어든 원인도 여기에 있다.

그림 3은 토륨 장전 핵연료집합체의 연소에 따른 전환률을 우라늄 핵연료집합체와 비교한 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 B24-28 토륨장전 핵연료집합체의 전환률은 우라늄 핵연료집합체에 비해 약 12% 정도 높게 나타남을 알 수 있으며 B12-19 토륨장전 핵연료집합체의 전환률은 우라늄 핵연료집합체와 거의 유사하게 나타났다. 그리고 우라늄량이 적은 B12-19 핵연료집합체가 B24-28 핵연료집합체에 비해 전환률이 높게 나타남을 알 수 있다.

3. 토륨 핵연료 장전노심 평가

표 1은 토륨 핵연료 장전노심의 노심 특성을 보여준다. 이 노심은 600 MW(e)급 24개월 주기로 설계된 것으로 선출력밀도가 상용되고 있는 기존원자로에 비해 약 60%정도이다. 이는 무봉산 노심의 출력분포제어의 어려움 때문이며 상용원자로에 비해 노심내 침투출력치 제한치가 상당히 높아질 수있음을 의미한다. 실제로 이 연구에서 사용하는 노심은 침투출력제한치가 3.5로 상용원자로의 2.3에 비해 상당히 높다.

그림 4는 토륨 핵연료가 장전된 평형노심의 핵연료장전모형을 보여준다. 공급핵연료집합체는 54개이며 B24-28 토륨장전 핵연료집합체로 공급된다. 이 장전모형은 공급핵연료집합체를 노심 안쪽에 두 번 연소된 반응도가 가장 낮은 핵연료집합체를 노심 최외각에 장전한 저누설 노심으로 설계된 것이다.

그림 5는 토륨장전 평형노심의 노심내 침투출력치 및 조절제어1군의 임계 위치를 나타낸 것이다. 노심내 침투출력치는 대체로 2.8 이하로 침투출력제한치 3.5를 충분히 만족시키고 있고 노심의 잉여 반응도는 6개의 CEDM으로 구성된 조절제어1군만으로 주기말까지 노심운전이 가능함을 알 수 있다.

표 2는 토륨 장전노심의 fissile 및 fertile 원소량의 변화를 기존 우라늄 장전노심과 비교하여 나타낸 것이다. 주기말에서의 fissile의 양들을 비교해 보면 토륨 장전노심이 우라늄 장전노심에 비해 높음을 알 수 있는데 이는 같은 반응도를 얻기 위해서 토륨장전노심에서는 더 많은 fissile의 양이 필요하다는 것을 의미한다. 이로부터 대략적인 전환률을 구해보면 우라늄장전노심이 0.51로 나타나며 토륨장전노심은 0.59로 나타나며 토륨장전노심이 우라늄장전노심에 비해 약 15 %의 전환률이 높아짐을 알 수 있다. 이는 앞서 나타낸 핵연료집합체에서의 전환률 계산치와 거의 같은 수치이다. 또한 초우란계 핵종 생성량은 토륨핵연료 장전 노심에서 우라늄 장전 노심과 비교하여 57% 감소하는 것을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 육방형 무봉산노심에 토륨 핵연료를 장전하여 전환률 특성을 평가하였다. 토륨 핵연료를 육방형 무봉산 노심에 장전함으로써 우라늄 장전 노심에 비해 15% 전환률 이득이 있고, 초우란계 핵종 생성량을 57% 줄일 수 있다. 따라서 토륨을 사용하면 노심의 전환률을 증가시킬 수 있고 또한 초우란계 핵종 생산량을 감소시킬수 있는 노심 설계가 가능하다. 그러나 24개월 주

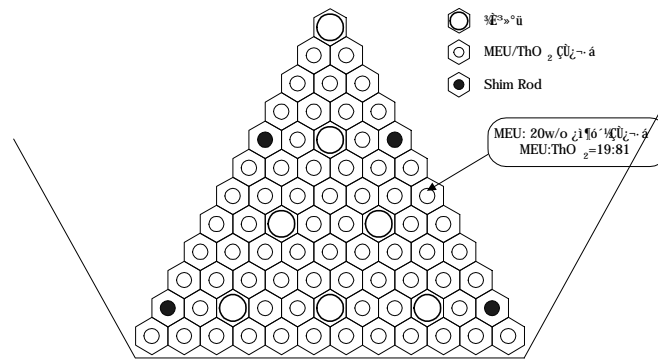
기로 운전하는 토륨장전 방법으로는 새로운 핵연료에 장전된 토륨량의 3%만이 우라늄으로 전환 되기 때문에 토륨의 전환특성을 충분히 살릴 수 없다고 판단된다. 따라서 토륨의 전환율을 제고 하기 위하여 토륨핵연료의 노심내 장전기간을 증가 시킬수 있는 장전 방법이 개발되어야 할 것이다.

감사의 글

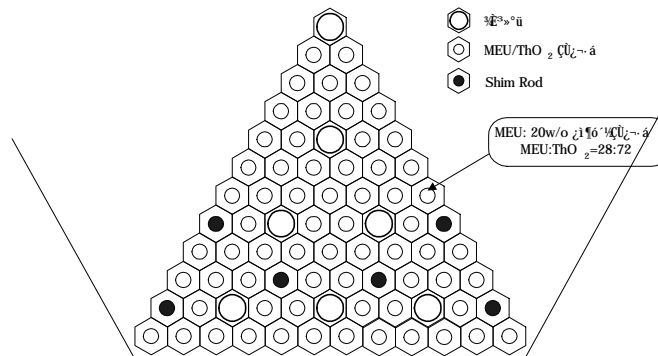
본 연구는 과학기술부의 원자력 연구개발 사업의 일환으로 수행되었음.

참 고 문 헌

1. 주형국 외, “900MWe 가압경수로에 대한 토륨 핵연료 및 혼합핵연료 노심 핵특성 분석,” ‘98 춘계학술발표회 논문집(I), 한국 원자력학회, 46-51, 1998.
2. 송재승 외, “육방형핵연료 장전 무봉산 노심 개념의 핵설계 평가,” ‘98 춘계학술발표회 논문집 (I), 한국 원자력학회, 27-33, 1998.
3. “HELIOS Programming Description,” Scanpower, 1994.
4. 이창호 외, “MASTER-2.0 사용자 지침서,” KAERI/UM-3/98, 한국원자력연구소, 1998.



(a) B12-19



(b) B24-28

그림 1. 토륨 핵연료 장전 핵연료집합체

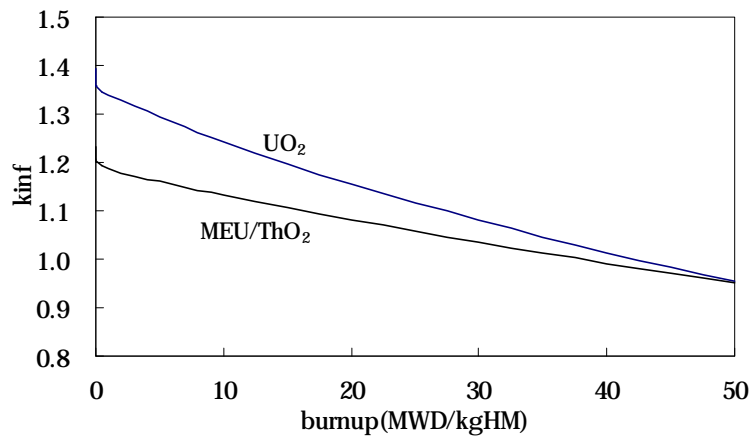


그림 2. 무독봉 우라늄 핵연료집합체와 무독봉 토륨장전 핵연료집합체의 무한증배계수 비교

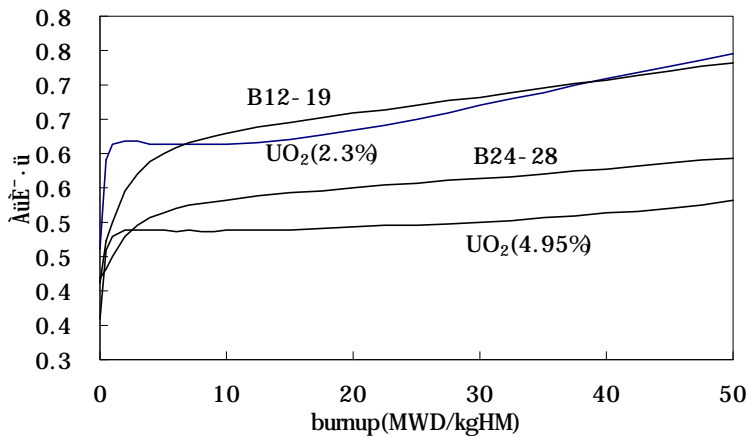


그림 3. 우라늄 핵연료집합체와 토륨장전 핵연료집합체의 전환률 비교

표 1. 토륨 장전노심 제원

노심	
열출력(MWe)	1933
주기길이(전출력일)	660
핵연료집합체수	151
핵연료집합체 pitch(cm)	25.3
노심유효높이(cm)	365.76
핵연료집합체	
핵연료봉 pitch(cm)	1.246
핵연료봉수	348(B12-19), 336(B24-28)
가연성독봉수	12(B12-19), 24(B24-28)
안내관수	37
우라늄핵연료농축도(%)	20
우라늄핵연료 content(%)	19(B12-19), 28(B24-28)
가연성독봉	B ₄ C-Al ₂ O ₃
B10 장전량	0.081(B12-19), 0.171(B24-28)

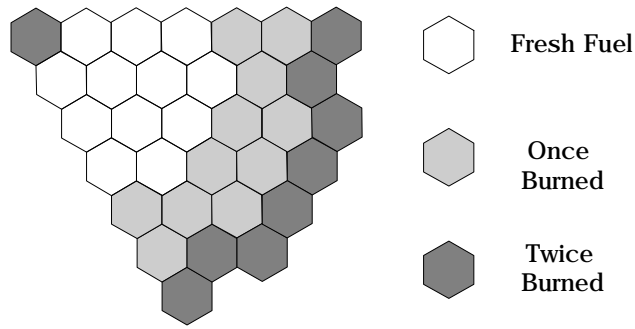


그림 4. 토륨 장전노심 평형주기 핵연료 장전모형

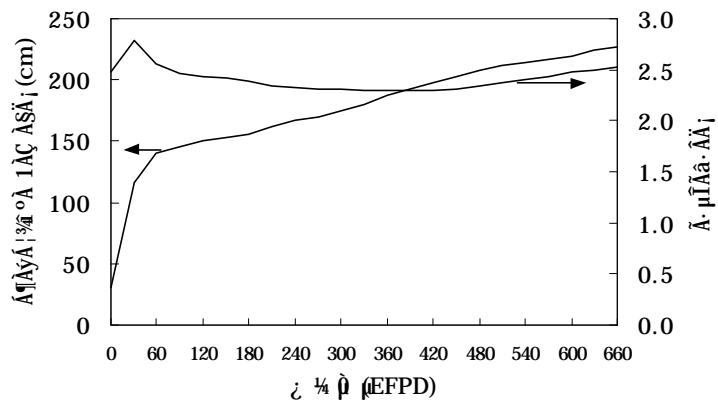


그림 5. 토륨장전 평형노심의 노심내 침투출력치 및 조절제어1군의 임계 위치

표 2. 평형노심에서의 fissile 및 fertile 동위원소 변화량(단위,kg)

		우라늄 장전 노심		MEU/ThO ₂ 장전노심	
		주기초	주기말	주기초	주기말
fissile	233U	-	-	415	730
	235U	2596	1646	3310	2252
	239Pu	327	512	127	201
	241Pu	54	98	22	42
	sum	2923	2158	3874	3225
fertile	232Th	-	-	59074	58427
	238U	76262	75378	18243	17925
	240Pu	90	166	28	52
	sum	76353	75544	77346	76403
TRU	Neptunium	13.4	29.8	14.8	30.9
	Plutonium	489.6	815.4	186.7	316.3
	Americium	2.5	6.1	1.7	4.8
	Curium	0.6	1.5	0.5	1.2
	sum	506.3	852.7	203.8	353.3