

가압경수로에서 비순환 토륨 핵연료 주기의 적용 타당성

우일탁, 김명현
경희대학교 원자력공학과

A Feasibility of Once-Through Thorium Fuel Cycle for PWR

Il-Tak Woo, Myung-Hyun Kim
Department of Nuclear Engineering, Kyung Hee University

1. 서론

토륨은 자연계에서 유일한 동위원소인 Th-232로 존재하며 반감기는 1.4×10^{10} 년으로 U-238의 4.5×10^9 년에 비하여 약 3배 길고 매장량도 약 3배 많은 것으로 알려져 있다.[1] 토륨은 원자력 초기 개발단계인 1950년대부터 우리나라에 관한 연구와 함께 시작되었지만, 70년대 중반 이후로는 토륨 핵연료 재처리의 어려움과 여러 정치적 이유로 이에 관한 연구가 거의 중단되었다. 그러나 1990년대에 들어와 토륨 핵연료 주기에 관한 연구가 몇몇 선진국을 중심으로 다시 시작되고 있는데, 이는 과거의 토륨 연구가 자원 활용의 극대화에 목적은 둔 반면, 최근의 연구방향은 토륨 핵연료를 사용하는 경우 핵확산 저항성이 증대되고, 핵사찰이 용이하며, 장주기 핵폐기물량이 감소하는 점이 강조되기 때문이다.[2] 토륨 핵연료 주기는 우라늄-플루토늄 핵연료 주기에 비해 핵확산 저항성이 매우 높아 우리나라와 같이 핵문제가 사회, 정치적으로 민감한 나라에서는 장주기 노심 구성 방식으로 생각할 수 있는 좋은 대안이다.

본 연구에서는 가압경수로에 토륨핵연료를 비순환 주기로 사용할 때, 토륨 핵연료의 장,단점을 살펴보았다.

2. 토륨 핵연료 주기 특성

Th-232는 중성자를 포획하여 U-233을 생성하며 생성된 U-233의 핵분열 단면적은 비록 열중성자 영역에서 다른 핵분열성 물질(U-235, Pu-239)에 비해 작지만 흡수 단면적이 U-235에 2배, Pu-239에 5배나 작기 때문에 capture to fission ratio는 적으며, 고속중성자 영역을 제외하고는 U-233이 가장 큰 η 값을 갖는다. 따라서 토륨 핵연료주기는 열중성자 영역에서의 증식이 가능하다.

Th-232의 중성자와의 반응 형태는 (n, γ) 와 $(n, 2n)$ 이 있는데 (n, γ) 반응은 2번의 β 붕괴를 거쳐 U-233을 얻을 수 있다. $(n, 2n)$ 반응의 경우 여러 단계의 변환과정을 거쳐 U-232를 생산하게 된다. U-232가 생성되면 Bi-212나 Tl-208과 같은 원소가 생성되는데 Bi-212는 1.8 MeV, Tl-208는 2.6 MeV의 매우 강한 γ -선을 방출하는 핵종이다. 따라서, 사용후 토륨 핵연료의 재처리나 핵연료 가공 과정에서는 강한 독성이 수반된다. 이러한 단점이 토륨 핵

연료 주기가 실제로 상용화되는데 가장 큰 문제점이었다. 하지만 이러한 단점은 재처리를 금지하고 핵사찰은 중시하는 현 상황에서 핵확산 저항성을 증대시키고 강한 독성에 의한 감지의 용이성(Easy Detectibility)등으로 오히려 장점이 된다. 또한 핵무기 제조 가능한 수준의 U-233양을 추출, 농축하기 위해서는 화학적 분리뿐만 아니라 고도의 동위원소 분리 노력이 요구되어 핵확산 저항성을 더욱 증대시킨다.

토륨은 우라늄에 비하여 원자번호가 2가 적으므로 자연적으로 토륨 핵연료 주기는 우라늄 주기에 비하여 Minor Actinide 생성이 자연적으로 감소한다. 그 이유는 동일한 액티나이드 핵종으로 변환하기 위해서는 2회의 중성자 흡수가 더 필요하기 때문이다. 표 1은 1,300MWe PWR에 대하여 우라늄과 토륨의 여러 형태의 핵연료에 대한 Minor Actinide 생성을 계산한 결과이다.[1]

3. 토륨 핵연료의 가압경수로 적용 노심 설계

토륨 핵연료에 대한 연구는 여러나라 연구팀에서 연구하고 있고, 그 중 최근의 연구로는 이스라엘 Ben-Gurion 대학의 Radkowsky교수와 Galperin교수 연구팀이 개발한 RTR 설계안이 있다.[3] 본 연구의 토륨 핵연료를 적용한 설계안은 RTR 설계개념을 도입하여 씨드와 블랭킷으로 구분하여 비균질 로심으로 구성하였다. RTR의 Seed Blanket Unit (SBU)는 그림 1과 같이 씨드와 블랭킷이 하나의 핵연료 집합체내에 서로 공간적으로 분할된 형태를 갖는데, 이 경우 Seed 재장전시 많은 기술적 어려움이 있다. 그러나, 본 연구에서는 씨드와 블랭킷을 SBU와 달리 그림 2와 같이 단일 집합체로 구성하여 씨드와 블랭킷의 비율을 그림 3과 같이 1:3으로 노심에 장전하였다. 이렇게 함으로써 기존의 재장전 기술을 그대로 적용할 수 있다.

본 연구에서 설계된 로심은 씨드에서 블랭킷으로 원활한 중성자 공급을 위해 무봉산 노심을 채택하였다. 무봉산 운전은 발전 시설을 간단하게 할뿐만 아니라 제어 및 감시 계통이 간소화되는 장점이 있다. 또한 음의 감속계 온도계수를 크게 하여 원자로 운전 안전성을 증진시킨다.[4]

본 연구에서는 우리 나라의 실정에 맞게 비순환 주기를 고려하였기 때문에 토륨으로 이루어진 블랭킷을 원자로내에 오래 잔류시켜 U-233의 생성이 충분해지도록 하고자 씨드와 블랭킷을 서로 다른 교체 주기로 재장전하였다. 즉, 씨드 핵연료는 원자로의 임계 조건을 만족시키고 블랭킷으로의 중성자의 공급을 극대화하기 위하여 자주 교체시키나, 블랭킷 핵연료는 씨드 핵연료가 교체되는 동안 로내에 계속 잔류하면서 장전 위치만 옮겨가도록 하였다.[5] 씨드는 3 batch로 매년 교체되고, 블랭킷은 토륨의 전환 특성을 고려하여 약 100 GWD/MT 까지 노내에 계속 잔류토록 하는 핵주기 전략을 채택하였다.

블랭킷 핵연료는 토륨을 기저물질로 사용하는 (Th+U)O₂ 혼합물이며 씨드로부터 중성자를 공급받아 핵변환되는 핵연료이고, 씨드 핵연료는 블랭킷으로 가능한 많은 중성자를 공급해 주고 임계유지를 위해 고농축 U/Zr Alloy 사용하였다. 표 2는 본 연구의 씨드와 블랭킷 핵연료 집합체 설계변수이다. 각각의 설계변수들은 토륨 핵연료의 전환특성 연구를 통하여 전환과 핵확산 저항성에 가장 유리하도록 설정하였다.[6]

4. 비순환 토륨 핵연료주기의 가압경수로 적용 장·단점

토륨 핵연료를 적용한 설계안의 장점은 다음과 같다.

첫째, 높은 전환율이다. 토륨 핵연료의 전환 특성은 FIR값[6]으로 살펴보았다. 토륨 핵연료를 적용한 설계안의 FIR값은 표 3에서와 같이 기존의 가압경수로보다 높다.

둘째, 핵연료 이용률의 증가이다. 이는 전환율 증가로 인한 결과로 볼 수 있다. 표 4는 기존 가압경수로와 토륨 핵연료를 적용한 설계안이 같은 열출력(8,325 GWD)을 낸다고 가정하였을 때 요구되어지는 핵연료 수요량을 나타내었다. 토륨 핵연료를 적용한 설계안은 기존 가압경수로에 비해 장전되어지는 우라늄의 양은 68% 감소하였고 그 대신에 토륨이 장전되었다. 전체적으로 사용후 핵연료 발생량은 약 51% 감소하였고, 사용된 U-235 량은 34% 감소하였다. 감소된 U-235량에 해당하는 에너지는 토륨에서 전환된 U-233에서 생성되어졌음을 의미한다.

셋째, 핵확산 저항성 증대이다. 표 5는 토륨 핵연료를 적용한 설계안의 사용후 핵연료내 플루토늄 조성이다. 기존의 가압경수로에서 나오는 플루토늄 조성에 비해 Pu-238, 240, 242의 함유량은 높고, Pu-239, 241의 함유량은 낮다.

넷째, 장수명 액티나이드 핵종 발생량의 감소이다. 표 6은 토륨 핵연료를 적용한 설계안과 가압경수로에서의 장수명 액티나이드 핵종 발생량이다. 표에서 보는 것과 같이 가압경수로에서보다 약 18 % 감소하여 토륨 핵연료를 적용한 설계안이 보다 환경 친화적임을 알 수 있다.

또한, 그림 4와 같이 토륨 핵연료를 적용한 설계안의 감속재 온도계수와 핵연료 온도계수는 모든 주기에 걸쳐 음의 값을 유지하고 있고 기존의 가압경수로와 차이가 없어 로심 설계가 요구되어지는 내재적인 안전성을 확보하고 있음을 알 수 있다.

반면, 토륨 핵연료를 적용한 설계안의 단점은 다음과 같다.

첫째, 씨드와 블랭킷간의 심한 열출력의 불균형이다. 이것은 본 연구에서 비순환 토륨 핵연료 주기를 적용하였기 때문에 토륨의 전환특성을 높이기 위해 씨드와 블랭킷으로 구분하였기 때문이다.

둘째, 고농축의 핵연료가 필요하다. 로심의 임계는 전적으로 씨드에 의해서만 유지되기 때문에 본 연구에서의 토륨 핵연료를 적용한 설계안은 높은 농축도의 핵연료가 필요하게 된다.

5. 결론

미래형 핵연료로써 토륨 핵연료 주기 특성과 가압경수로에 적용하는 방안에 대한 장, 단점을 살펴보았다. 장점으로는 토륨 핵연료의 특징인 열중성자 영역에서의 증식으로 인한 핵연료 이용률의 증가와 핵확산 저항성 증대, 장수명 액티나이드 핵종 발생량의 감소를 들 수 있다. 반면, 단점으로는 씨드와 블랭킷간의 심한 열출력의 불균형과 높은 농축도의 핵연료의 필요하다. 그러나, 토륨 핵연료를 적용하는 설계안의 안전성 측면에서는 음의 냉각재 온도계수와 핵연료 온도계수를 가짐으로써 내재적인 안전성을 확보할 수 있었다.

토륨 핵연료를 적용한 설계안에 대한 경제성 평가가 이루어지지 않아 기존의 가압경수로와

의 절대적인 비교는 어렵다. 그러나, 핵연료 주기비용에서의 높은 농축비용을 고려한다면 기존의 가압경수로와 비슷한 경제성을 가질 것으로 보인다.

6. 참고 문헌

1. M. Lung, "A Present Review of The Thorium Nuclear Fuel Cycle," Nuclear Science and Technology, European Commission, 1997
2. V. Arkhipov, H. J. Rutten, and A. Galperin, "Progress Summary of the IAEA Coordinated Research Program on the Potential of Thorium-based Fuel Cycles to Constrain Pu and to Reduce Long-lived Waste Toxicity," ICENES'98, The 9th International Conference of Emerging Nuclear Energy System, Tel-Aviv, Israel, June 28 - July 2, 1998.
3. A. Galperin, P. Reichert, and A. Radkowsky, "Thorium Fuel Cycle for Light Water Reactor-Reducing Proliferation Potential of Nuclear Power Fuel Cycle," Science & Global Security, Vol.6, 265-290, 1997
4. Myung-Hyun Kim, Jong-Chae Kim, and Un-Chul Lee, "Soluble Boron Free Operation in Advanced PWRs," Proceedings of the 2nd Japan-Korea Seminar on Advanced Reactor, Tokyo Institute of Technology, Tokyo, Japan, Oct.15-17,1996
5. 김명현, 임재용, "고전환 압력관형 경수로심의 최적 노심 설계," '98 추계학술발표회 논문집, 한국원자력학회, 1998
6. Myung-Hyun Kim, Il-Tak Woo, and Hyung-Kook Joo, "Advanced PWR Core Concept with Once-Through Thorium Fuel Cycle," Proceeding of the International Conference on Future Nuclear Systems, GLOBAL'99, Jackson Hole, WY, USA, Aug. 29 - Sep. 3, 1999

표 1. Relative Production of Minor Actinides in Diverse Cycles

Actinide	Burnup (GWD/t)	Fuel Types			
		U235+U238 (g/t of HM)	U235+Th232 (% of *)	U233+U238 (% of *)	U233+Th232 (% of *)
⁹³ Np ²³⁷	30	0.036	92	20	1
	60	0.090	107	13	3
⁹⁵ Am (241 to 243)	30	0.016	0.04	106	6.3×10 ⁵
	60	0.047	0.28	117	1.8×10 ³
⁹⁶ Cm (243 to 246)	30	0.36	0.01	111	1.7×10 ⁵
	60	0.022	0.14	132	6.4×10 ⁴

* (U-235 + U-238)로 구성된 핵연료에서 발생한 Heavy Metal의 질량

표 2. 토륨 핵연료를 적용한 설계안 설계 변수

Parameter	Seed	Blanket
Fuel Assembly Size, cm	21.61	
Fuel Material Composition	U/Zr Alloy Enrichment 5.0 w/o	(U+Th)O ₂ U Enrichment 10 w/o U Content 20 %
Initial Fuel Weight (kg H.M)	U - 460 Th - 0.0	U - 92 Th - 337
Pellet Radius (cm)	0.33	0.4025
No. of guide tubes	24 + 1 central	
Reactivity Control	Control rods + Burnable poisons	none

표 3. 토륨 핵연료를 적용한 설계안의 FIR 값

	Seed Refueling #				Average FIR
	1	2	3	4	
Blanket	0.81	0.99	1.00	0.99	0.94
Core	0.55	0.60	0.60	0.60	0.58
PWR	0.42				

표 4. 같은 에너지 생산을 위해 필요한 핵연료 수요량 (for 8,325 GWD)

	Designed Rx.	PWR
운전 년수 (Year)	8.21	8.10
토륨 장전량 (Ton)	40.44	0
우라늄 장전량 (Ton)	75.91	238.62
U-235 장전량 (Ton)	4.32	7.87
사용후 핵연료내 U-235 량 (Ton)	0.29	1.72
U-235 소모량 (Ton)	4.03	6.15

표 5. 사용후 핵연료내 Pu 동위원소 조성비

	Seed	Blanket	Seed+Blanket	PWR
Pu-238	0.03	0.09	0.07	0.01
Pu-239	0.46	0.39	0.41	0.59
Pu-240	0.28	0.17	0.21	0.21
Pu-241	0.14	0.15	0.15	0.14
Pu-242	0.09	0.20	0.16	0.05

표 6. 최적 설계안의 MA 생성량 [kg/yr]

	Seed	Blanket	PWR
Np-239	3.9	2.9	8.3
Am-241	0.2	0.1	1.0
Am-243	1.1	2.2	3.5
Cm-242	0.1	0.1	0.4
Cm-244	0.4	2.4	1.2
Total	5.7	9	18

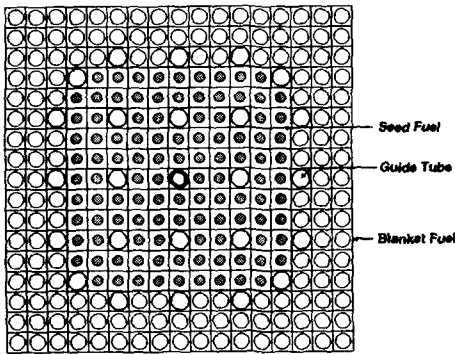


그림 1. Seed-Blanket Unit(SBU)

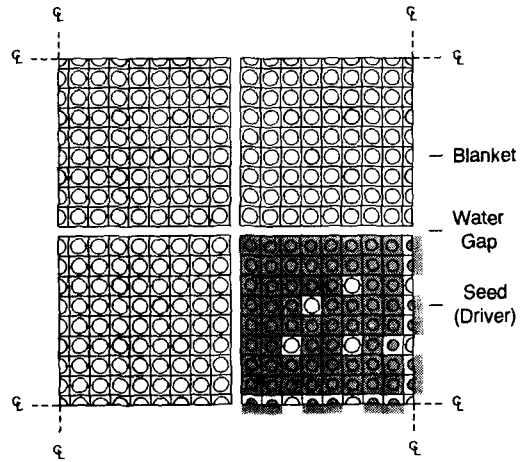


그림 2. 토륨 핵연료를 적용한 설계안 (1/4)

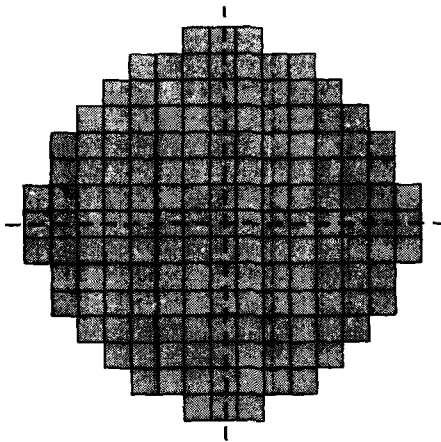


그림 3. 로심 구성 (씨드:블래킷=1:3)

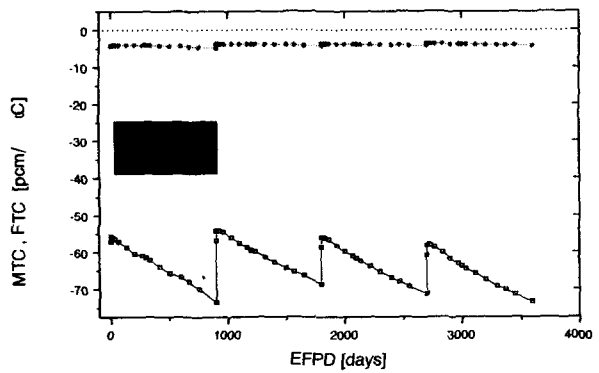


그림 4. 토륨 핵연료를 적용한 설계안의 MTC, FTC