

고전환 압력관형 경수로심의 최적 노심 설계

Optimized Core Design of High Converting Pressure-Tube type LWR

임재용, 김명현

경희대학교
449-701 경기도 용인시 기흥읍

요 약

Once-through 토륨 핵주기를 적용한 고전환 압력관형 경수로심의 개념 핵설계를 최적화하였다. 토륨 Blanket은 압력관 안에서 약 10년 정도 머무르게 하여 U-233의 생성을 극대화하였고, Driver 핵연료는 약 780 EFPD 방출 연소도를 가지며 On-power 재장전이 가능한 상태에서 교체 되도록 설계하였다. 모든 핵연료 다발은 CANDU와 비슷하지만 육각형 격자 구조를 가졌으며, Driver 핵연료의 제원은 상업용 가압경수로의 것을 그대로 적용하였으며 Blanket 핵연료는 반경을 증가시켜 사용하였다. 본 연구에서는 16가지의 로심에 대한 상대 평가를 통하여 고전환 압력관형 경수로심의 최적 설계안을 도출하였다.

최적화된 노심 설계안은 Driver Channel과 Blanket Channel이 1대3의 비율로 구성된 사각형 격자 노심 구조를 채택하였고, Driver 핵연료는 15 w/o로 농축한 U-10%Zr 합금 핵연료를 사용하였으며, Blanket 핵연료는 5 w/o로 농축한 UCO 탄소 피막 핵연료와 ThO₂ 세라믹 핵연료로 구성되었다. 이 설계안은 상업용 경수로보다 높은 전환율을 보이고, 핵주기의 경제성을 얻을 수 있었다.

Abstract

An optimization of conceptual nuclear design was done for a high-converting pressure-tube type light water cooled reactor (HCPLWR) with an once-through thorium cycle. Thorium blanket fuel bundle are designed to stay about 10 years within a light water cooled pressure tube, whereas uranium driver fuel bundles are to be refueled by on-power refueling mode with about 780 EFPD discharge burnup rate. Fuel rod bundles are configured in hexagonal lattice array in a similar size of those of CANDU. Fuel pin size is the same with conventional PWR rod, however but the radius of blanket rod is a little larger than that of conventional PWR. Sixteen core design options were tested and the optimum design option was sought for.

The optimized core design has 1 to 3 volume ratio of driver channel and blanket channel, which shows a higher conversion ratio than conventional LWR. Driver channels are loaded with U-10%Zr alloy fuels (enriched with 15 w/o U-235) and blanket channels are loaded with new fuels, which consist of pyrocarbon-coated UCO particles (enriched with 5 w/o U-235) and pyrocarbon-coated ThO₂ particles in a graphite matrix.

1. 서론

앞서 수행된 “고전환 압력관 모듈형 신형 경수로의 개념 설계”¹⁾에서는 기존 원전에 비하여 경제성이 향상되고 안전성이 증진된 혁신적 신형 원자로로서의 개념 설계안을 소개하였다. 본 연구에서는 플루토늄 핵연료 주기보다 높은 핵확산 저항성을 가진 토륨핵연료 주기 전략²⁾을 갖고, 이스라엘의 RTR (Radkowsky Thorium Reactor)³⁾에서 이용한 Driver(Seed) 핵연료와 Blanket 핵연료의 운영 전략을 참조하여 압력관형 신형 경수로⁴⁾의 설계안을 이용한 신형 노심 설계안을 제시하였다. 또한 여러 후보 설계안에 대한 핵설계 해석을 통하여 고전환 압력관형 신형 경수로의 최적 설계안을 찾아보았다. 여기서의 최적화는 전환율이 높아서 핵연료 소모량이 적은 설계안인면서 사용후 핵연료의 방사선 환경 측면에서 유리한 설계안을 뜻한다.

2. 설계안의 핵적 특성 및 기본 설계안

노심의 고유 안전성을 위해 열중성자로로 설계하며, 핵확산 저항성을 높이고 사용후 핵연료내의 반감기가 긴 장주기 액티나이드의 발생량을 줄일 수 있는 토륨 핵연료를 핵연료로 채택하여 고전환 노심이 되도록 설계하였다. On-Power Refueling이 가능해서 이용률을 높일 수 있는 CANDU 원자로처럼 압력관내에 핵연료봉 다발이 장전되는 형태의 원자로형을 선택하였다. 1차계통은 CANDU와 현재는 같게 구성하였으며, 운전 압력도 CANDU와 같게 하였다. 다른 점은 냉각수로서 중수대신 경수가 흐르며, 고전환을 위해 고집적 배열을 갖도록 핵연료봉 다발이 원주형 배열을 하지 않고 육각형 배열을 갖게 하였으며 CANDU에서 사용되어지는 소결체보다 반경크기가 작은 일반적인 PWR의 소결체 크기를 채택하였다.

압력관 Channel수는 상용화 된 CANDU-6(640 MWe)와 동일하게 380개로 정하였다. 단, 압력관은 전환율을 높이기 위해 Driver Fuel이 장전되는 Channel(Seed Bundle)과 Blanket Fuel이 장전되는 Channel(Blanket Bundle)로 나뉘서 Bundle을 Seed Bundle과 Blanket Bundle의 2 가지 종류로 구분하였다. Blanket Bundle은 Seed Bundle이 5번 재장전되는 기간동안 노내에 위치하게 했다. 이 둘은 반반씩 노심내에서 Checker-Board Type으로 배분된다. Blanket Fuel은 Seed Bundle에서 중성자를 공급받아 핵전환이 되는 핵연료로서 장시간 노내에 존재해야 하므로 기계적 성질이 좋은 탄소 피막 핵연료를 사용하였다. Driver Fuel은 Blanket Bundle에 가능한 많은 중성자를 공급해주기 위해 핵분열성 물질의 장전량이 높아야 한다. 따라서 Blanket Fuel처럼 탄소 피막을 하지 않고 UO₂ 핵연료나 U-10%Zr 금속핵연료를 사용하여 계산하였다.

고농축 핵연료를 사용하므로써 CANDU보다 방출 연소도가 더 길면서, 사용후 핵연료 발생량이 적은 주기를 택하여 핵연료 주기 경제성을 향상시켰다. 노심의 운전 및 보수, 유지를 향상시키기 위해서 무봉산 운전을 지향하며, CANDU처럼 Calandria를 사용하여 여러 가지의 다양한 반응도 제어 및 노심 정지 기구들의 설치가 가능토록 하였다. 감속재는 CANDU에서 사용되고 있는 D₂O를 사용하지 않고 Calandria가 Air로 차있는 Dry Calandria 개념을 도입하여 사고시 비상 정지 기능과 장기 노심 냉각 기능이 가능케 하였다.

본 설계안의 기하학적 구조는 모체가 되는 CANDU의 크기 즉, Bundle Pitch, 압력관과 Calandria관의 반지름, CO₂ Gap 등을 그대로 이용하였고 단지 Bundle의 형태와 감속재의 재질을 Air와 중수로 바꾸어 가며 선택하였다. 또 더 많은 양의 Th-232를 장전하기 위해 Blanket Bundle의 핵연료 반경을 증가시켜 계산해 보았고 Seed Bundle과 Blanket Bundle의 구성비도 바꾸어 가며 계산하였다. 표 2.은 민감도 분석을 위해 설계 변수를 바꾸었을 때의 각각의 설계안에 대한 이름과 설계 변수들을 나타낸 것이다.

3. 노심의 구성 변화

U-233의 생성량을 더욱 증가시키기는 방법을 찾기 위하여 Checker-Board 형태 즉, 1:1로 구성 되어 있던 로심형태를 Driver Channel 한 개에 Blanket Channel 세 개로 구성된 새로운 기하학적 모델과 그 반대의 경우인 Driver Channel 세 개에 Blanket Channel 한 개로 구성된 모델을 설계 하여 보았다. 로심형태를 3:1로 구성한 경우 그림 4와 그림 5를 살펴보면 무한증배계수는 장전되는 핵분열성 물질의 감소로 인하여 감소하였다. U-233의 생성량 변화를 살펴보면 U-233의 생성량은 오히려 감소하였으나 노심 전체에서 생성되는 절대량, 질량은 Blanket Channel 수의 증가로 증가함을 알 수 있었다. 그러므로 FIR(Fissile Inventory Ratio)값 역시 각 Channel별로 보면 그 값은 감소하였으나 로심 전체의 FIR값은 결국 증가하였다. 로심형태를 1:3으로 구성한 경우는 그림 6과 그림 7처럼 반대로 무한증배계수는 매우 크게 상승하였다. 이로 인하여 Blanket으로의 중성자 공급이 증가하였기 때문에 Blanket 내의 U-233의 수밀도는 증가하였다. 하지만 원자로내에 존재하는 Blanket Channel의 수 자체가 적기 때문에 생성되는 절대량인 질량은 오히려 감소하게 되었다. 즉, Driver Channel이나 Blanket Channel에서의 FIR값은 상승하였으나 로심 전체의 FIR값은 감소하였다. 단, 실제로 장전되는 Driver 핵연료의 양이 많기 때문에 실제 연소하는 일수인 Effective Full Power Day(EFPD)는 증가하였다. 위의 결과를 살펴볼 때, U-233의 생성량을 늘리기 위해서는 노심의 형태를 Driver Channel 한 개에 Blanket Channel 세 개로 구성된 형태를 취함이 타당함을 알 수 있었다.

4. 세라믹 핵연료와 금속 합금 핵연료의 비교

Driver 핵연료의 농축도 변화와 종류에 따른 무한증배계수와 U-233의 생성량, FIR 값을 비교하여 보았다. 즉, Blanket의 UCO 핵연료의 농축도를 5 w/o로 고정시킨후 Driver의 핵연료 종류를 UO_2 세라믹 핵연료와 U-10%Zr 금속핵연료로 바꾸어 보았고 각 핵연료의 농축도를 5 w/o, 7 w/o, 10 w/o로 바꾸어 가며 그 변화량을 살펴보았다. 계산에 이용한 기학적 모델은 Driver Channel과 Blanket Channel을 번갈아 가며 위치시킨 Checker-Board 형태를 취하였다. 그 결과 그림 8과 그림 9처럼 UO_2 핵연료의 경우 무한증배계수는 농축도의 증가에 따라 크게 증가하였으나 고전환을 위한 U-233의 생성량 변화는 미비하였다. 즉, Driver의 농축도 상승에 따라 U-233의 생성에 미치는 영향은 크지 않았으나 무한증배계수의 값을 크게 상승시켰으므로 비현실적인 재장전 방법이라 할 수 있다. U-10%Zr 금속 핵연료의 경우 밀도가 크기 때문에 실제 장전된 핵분열성 물질의 양의 증가로 무한증배계수는 UO_2 핵연료에 비해 증가하였으나 농축도 변화에 따른 변화는 적었다. U-233의 생성량과 FIR값은 UO_2 핵연료보다 더 큰 값을 가지게 되었다. 그리고 금속 핵연료를 장전한 결과 더 많은 양의 핵분열성 물질을 장전할 수 있기 때문에 실제 연소하는 일수인 EFPD도 증가하는 결과를 가져왔다. 그러므로 위의 비교를 통하여 Driver의 농축도의 증가를 통하여 U-233의 생성량 증가를 이룰 수 없음을 알게 되었고, UO_2 핵연료보다는 U-10%Zr 금속 핵연료의 경우 더 많은 양의 U-233의 생성과 더 긴 연소일을 얻을 수 있음을 알 수 있었다.

5. Blanket 핵연료의 농축도 및 구성의 변화

Blanket Channel에서의 주기초 출력을 높이기 위해 장전한 핵분열성물질인 UCO 핵연료의 우라늄 농축도를 올려 가면서 무한증배계수와 U-233의 생성량, FIR값의 변화를 살펴보았다. 그림 10을 보면, 무한증배계수는 Blanket에 장전한 UCO의 농축도가 올라가면서 주기초에서 그 값이 상승하였으나 Driver를 4~5 재장전한 후로부터는 그 값이 거의 일정해졌다. 이는 Blanket Channel은 Driver의 10주기의 재장전 기간동안 계속 원자로내에 위치하므로 농축도를 올려 장전한 UCO가 4~5주기 안에 거의 연소하고 평형상태를 이루었기 때문이다. 그러므로 그림 11과 같이 U-233의 생성량 역시 Blanket 핵연료의 농축도 변화에 대해 그 생성량의 변화는 거의 없었다. Blanket

Channel에 장전되는 토륨의 양을 증가시키기 위해 Blanket 핵연료의 반경을 증가시켜 계산하여 보았다. 그 결과 그림 12와 같이 무한증배계수의 값은 감소하였으나 실제로 장전되는 핵연료의 양이 많아졌기 때문에 실제 연소 가능한 EFPD는 증가하였다. 그리고, U-233의 생성량 역시 증가하는 효과를 그림 13에서 볼 수 있었다. 이는 Blanket에서 핵연료의 반경이 증가한 이유로 스펙트럼이 경화가 일어났고 Th-232의 흡수 반응 단면적이 오히려 열외중성자영역에서 크기 때문에 더 많은 전환이 일어난 것이라 예상된다. FIR값 역시 U-233의 양이 증가하였으므로 그 값도 증가하게 되었다. 본 분석의 결과, Blanket 핵연료의 농축도 증가는 아무런 이득을 얻을 수 없었고, Blanket 핵연료봉의 반경 증가를 통하여서는 U-233의 생성량 증가와 연소일수의 증가를 얻을 수 있었으므로 최적 설계안 설계 시에 고려되어야 할 것이다.

6. 감속재 재질 변화에 따른 비교

위의 설계안들은 Calandria Tank에 Air를 충전한 설계안이다. 이에 반해 이 설계안에서는 D₂O 감속재를 대신 충전시켜 위의 값들과 비교하여 보았다. 그림 14과 그림 15에서 보는 바와 같이 무한증배계수는 크게 증가하였으나 FIR값과 U-233의 생성량은 현저히 감소하였다. 그 이유는 D₂O 사용으로 열중성자 발생량이 크게 증가한 반면 고속중성자의 발생량은 현저히 줄었기 때문에 열외중성자 영역에서 중성자 흡수 단면적이 U-238보다 상대적으로 큰 Th-232의 중성자 흡수가 떨어져 전환되는 비율 또한 줄어들었기 때문이라 추측된다. 이 결과 D₂O의 사용은 CANDU에서는 적절하지만 본 설계안의 경우 오히려 전환율을 떨어뜨리는 영향을 미치므로 타당하지 않다.

7. 최적 설계안 선정 및 결론

앞의 민감도 분석을 통하여 다음과 같은 최적 설계안을 결정하였다. 우선, 로심의 구성은 그림 1과 같이 Calandria Tank에 Air를 장전한 Dry Calandria 개념에 Driver Channel 한 개와 Blanket Channel 세 개로 구성된 사각형 배열의 집합체 격자로 선정하였고, Driver 핵연료는 더 오랜 시간 연소시킬 수 있는 15 w/o 농축도의 U-10%Zr 합금 핵연료를 이용하였다. 이에 Blanket 핵연료는 더 많은 양의 토륨을 장전할 수 있도록 Driver 핵연료보다 반경이 큰 핵연료봉으로 구성하였다. 이 경우 CANDU의 방출연소도에서의 무한증배계수와 같은 값을 가지도록 연소시키며 Driver 5번 재장전에 Blanket을 1번 재장전했을 때 그림 2와 그림 3처럼 약 3,899 EFPD, 약 10년의 연소도를 가질 수 있었으며 일반 상업용 경수로보다 높은 전환율을 얻을 수 있었다. 이 경우 같은 에너지를 생산하기 위해 필요한 핵연료 수요량을 계산한 결과 표 1과 같이 U-235의 양과 토륨 핵연료의 수요량은 증가하게 되었으나 우리나라의 전체 수요량은 CANDU나 PWR에 비해 현저히 줄어들게 되어 방사성 사용후 핵연료 처리시 유리한 장점을 갖게 됨을 알 수 있다.

표 1. 같은 에너지 생산을 위해 필요한 핵연료 수요량 (for 8,037 GWD)

	HCPLWR	CANDU	PWR
Effective Operation Year (year)	11.2435*	11.2435*	9.7773**
Consumption of Thorium (Ton)	14.017	0	0
Consumption of Uranium (Ton)	149.216	1071.567	588.773
Consumption of U- 235 (Ton)	22.007	7.619	13.718

* : Availability Factor 0.95

** : Availability Factor 0.8

참고 문헌

1. 김명현, 이경훈, "고전환 압력관형 신형 경수로의 개념 설계," '98 춘계학술발표회 논문집(I), 한국원자력학회, p.40~45, (1998)
2. Myung-Hyun Kim, Jae-Yong Lim, Hyung-Kook Joo and Young-Jin Kim, "A Feasibility Study of Thorium Fuel Application to PWR," Proceedings of 9th International Conference on Emerging Nuclear Energy Systems, p.656~663 (1990)
3. Kyung-Taek Lee and Nam-Jin Cho, "Evaluation of U-Zr Hydride Fuel for a Thorium Fuel Cycle in an RTR Concept," '98 춘계학술발표회 논문집(I), 한국원자력학회, p.52~57, (1998)
4. Myung-Hyun Kim, "Conceptual Design of a Light Water Cooled PHWR," Proceeding of 11th Pacific Basin Nuclear Conference (1998)

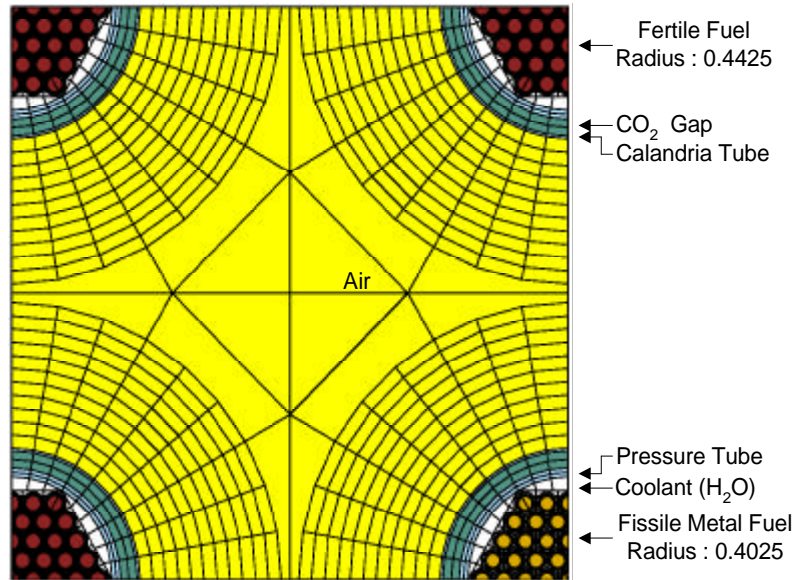


그림 1. 최적 설계안의 기하학적 모델

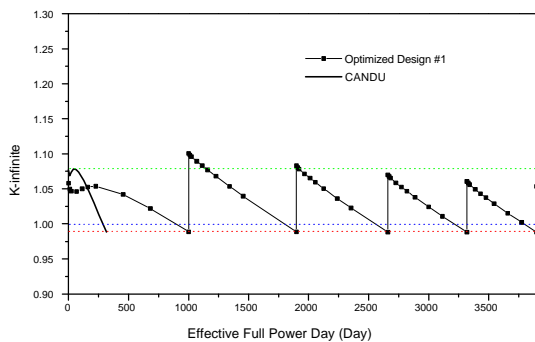


그림 2. 최적 설계안의 무한증배계수 변화

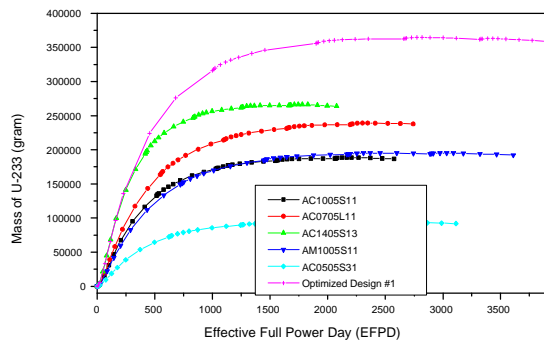


그림 3. 최적 설계안의 U-233 생성량 변화

표 2. 설계 변경에 따른 각 설계안의 설계 변수

CASE Name	Parameters						
	Moderator Type	Fuel Type	Enrich. of Driver Fuel	Enrich. of Blanket Fuel	Blanket Fuel Radius	Structure of Channels	
AC0505S11	Air	UO ₂	5 w/o	5 w/o	0.4025 cm	1 : 1	
AC0705S11			7 w/o				
AC1005S11			10 w/o				
AC0510S11			5 w/o	10 w/o	0.4025 cm	1 : 1	
AC0515S11				15 w/o			
AC0520S11				20 w/o			
AC0505L11			5 w/o	5 w/o	0.4425 cm	1 : 1	
AC0705L11			7 w/o				
AC1005S13			10 w/o				
AC1205S13			12 w/o	5 w/o	0.4025 cm	1 : 3	
AC1405S13			14 w/o				
AC0505S31			5 w/o	5 w/o	0.4025 cm	3 : 1	
AM0505S11			U-10%Zr	5 w/o	5 w/o	0.4025 cm	1 : 1
AM0705S11				7 w/o			
AM1005S11				10 w/o			
DC0505S11	D ₂ O	UO ₂	5 w/o	5 w/o	0.4025 cm	1 : 1	
Optimized	Air	U-10%Zr	15 w/o	5 w/o	0.4425 cm	1 : 3	

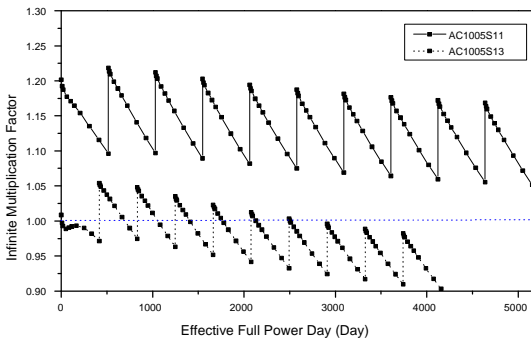


그림 4. Driver와 Blanket의 구성비를 1 : 3으로 변경하였을 때, 무한증배계수의 변화

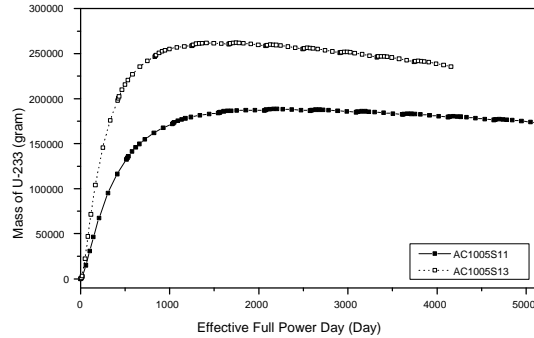


그림 5. Driver와 Blanket의 구성비를 1 : 3으로 변경하였을 때, U-233의 생성량 변화

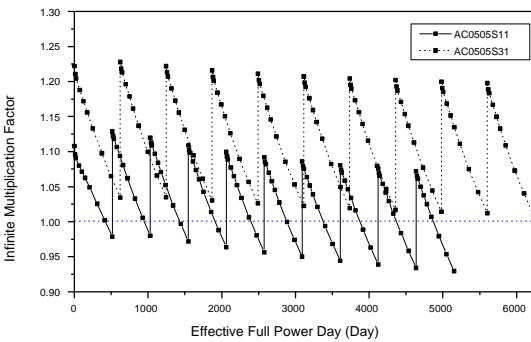


그림 6. Driver와 Blanket의 구성비를 3 : 1로 변경하였을 때, 무한증배계수의 변화

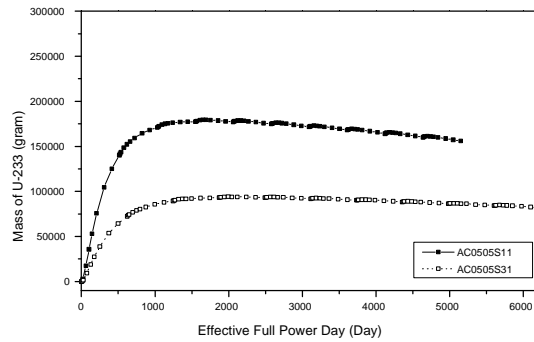


그림 7. Driver와 Blanket의 구성비를 3 : 1로 변경하였을 때, U-233의 생성량 변화

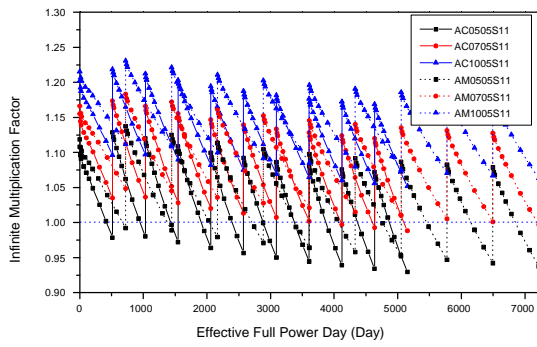


그림 8. 핵연료의 농축도 변화에 따른 무한증배계수의 변화

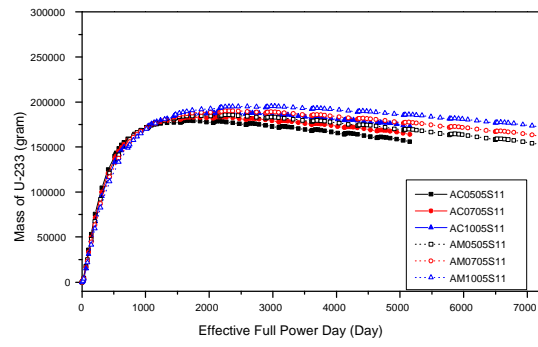


그림 9. 핵연료의 농축도 변화에 따른 U-233의 생성량 변화

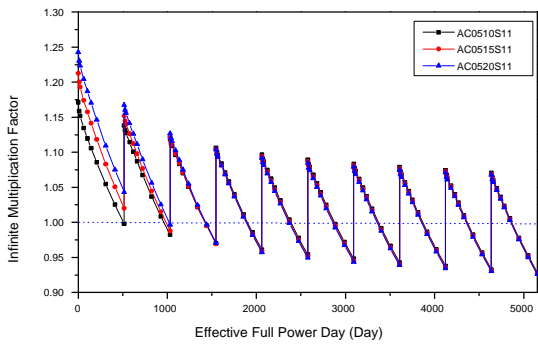


그림 10. Blanket 농축도 변화에 따른 무한증배계수의 변화

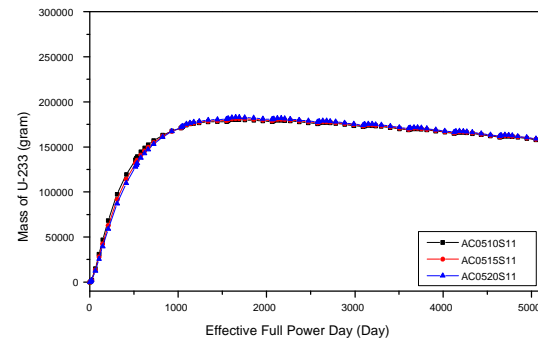


그림 11. Blanket 농축도 변화에 따른 U-233의 생성량 변화

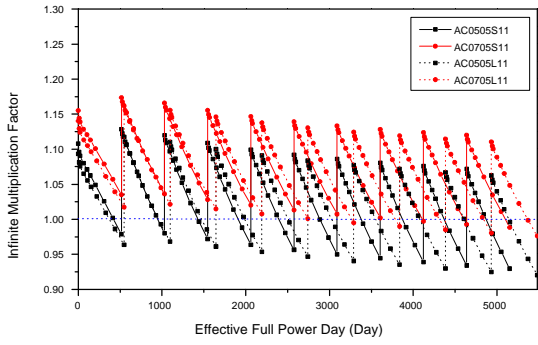


그림 12. Blanket 핵연료의 반경 변화에 따른 무한증배계수의 변화

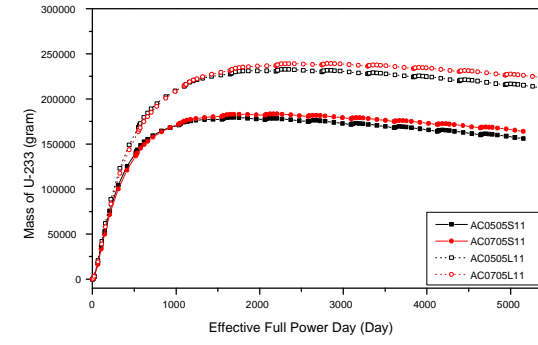


그림 13. Blanket 핵연료 반경 변화에 따른 U-233의 생성량 변화

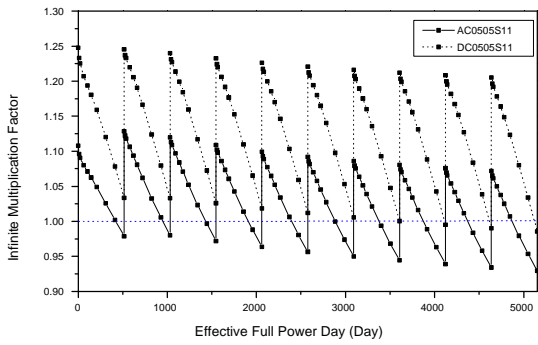


그림 14. 감속제 변화에 따른 무한증배계수의 변화

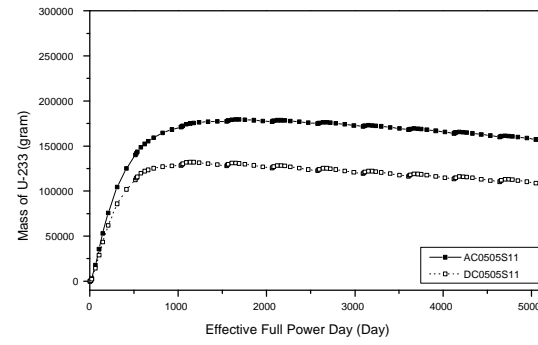


그림 15. 감속제 변화에 따른 U-233의 생성량 변화

표 3. 원자로 전 영역에서의 각 설계안과 재장전에 따른 FIR값의 변화

CASE Name	Cycles					Average
	1	3	5	7	10	
AC0505S11	0.6986	0.7063	0.7041	0.6999	0.6917	0.7001
AC0705S11	0.7357	0.7423	0.7410	0.7383	0.7328	0.7380
AC1005S11	0.7803	0.7850	0.7842	0.7825	0.7791	0.7822
AC0510S11	0.6860	0.7048	0.7039	0.6998	0.6914	0.6972
AC0515S11	0.6809	0.7027	0.7036	0.6997	0.6912	0.6956
AC0520S11	0.6810	0.7001	0.7031	0.6995	0.6909	0.6949
AC0505L11	0.7159	0.7219	0.7204	0.7167	0.7090	0.7168
AC0705L11	0.7432	0.7492	0.7484	0.7461	0.7410	0.7456
AC1005S13	0.7857	0.7894	0.7859	0.7815	0.7733	0.7832
AC1205S13	0.8012	0.8047	0.8018	0.7980	0.7913	0.7994
AC1405S13	0.8150	0.8182	0.8156	0.8124	0.8067	0.8136
AC0505S31	0.6881	0.6927	0.6920	0.6903	0.6867	0.6900
AM0505S11	0.7338	0.7359	0.7328	0.7280	0.7192	0.7299
AM0705S11	0.7645	0.7668	0.7648	0.7616	0.7558	0.7627
AM1005S11	0.8026	0.8044	0.8031	0.8012	0.7975	0.8018
DC0505S11	0.5414	0.5494	0.5444	0.5389	0.5305	0.5409
Optimized	0.7428	0.7938	0.8366	0.8646	0.8941	0.8264

표 4. Blanket Channel 영역에서의 각 설계안과 재장전에 따른 FIR값의 변화

CASE Name	Cycles					Average
	1	3	5	7	10	
AC0505S11	1.4548	1.0350	0.9982	0.9841	0.9749	1.0894
AC0705S11	1.4663	1.0409	1.0029	0.9886	0.9788	1.0955
AC1005S11	1.4775	1.0472	1.0077	0.9931	0.9828	1.1017
AC0510S11	0.8647	0.9998	0.9959	0.9840	0.9745	0.9638
AC0515S11	0.7071	0.9498	0.9911	0.9837	0.9740	0.9211
AC0520S11	0.6538	0.8910	0.9831	0.9830	0.9737	0.8969
AC0505L11	1.5216	1.0492	1.0068	0.9905	0.9791	1.1095
AC0705L11	1.5325	1.0559	1.0118	0.9952	0.9833	1.1157
AC1005S13	1.3830	1.0418	1.0042	0.9897	0.9794	1.0796
AC1205S13	1.3857	1.0438	1.0058	0.9913	0.9809	1.0815
AC1405S13	1.3877	1.0455	1.0072	0.9927	0.9822	1.0830
AC0505S31	1.5440	1.0341	0.9975	0.9839	0.9752	1.1069
AM0505S11	1.5597	1.0268	0.9887	0.9744	0.9653	1.1030
AM0705S11	1.5725	1.0333	0.9945	0.9796	0.9698	1.1099
AM1005S11	1.5846	1.0404	1.0004	0.9850	0.9746	1.1170
DC0505S11	1.0143	1.0044	0.9858	0.9798	0.9759	0.9921
Optimized	1.7162	1.0315	0.9978	0.9902	0.9883	1.1448