

토륨을 이용한 SMART 초장주기 노심 설계

Ultra-Long Cycle SMART Core Design using Thorium Fuel

조진영, 송재승, 이정찬, 박상윤, 지성균
한국원자력연구소

대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

이 연구에서는 토륨 핵연료를 사용하여 주기길이 5년의 초장주기 SMART 노심을 설계하였다. 이를 위하여 현재 설계되어 있는 SMART 노심의 핵연료 장전모형, 제어봉 운전전략, 독물질 종류 등 대부분의 설계사양들을 그대로 사용하였으며 다만 우라늄 핵연료를 농축도 20%인 우라늄과 토륨을 균질하게 섞은 (Th,U)O₂ 핵연료로 대체하였다. 그리고 이에 필요한 독봉은 우라늄 장전 노심에 사용된 독봉 중에서 주기길이에 맞게 선별하여 사용하였다. SMART 노심이 5년 주기 길이를 갖기 위한 우라늄과 토륨의 혼합비는 40:60으로 나타났으며 초장주기에 필요한 독물질을 적절히 사용함으로써 SMART 노심에 적용된 설계제한조건들을 잘 만족하는 노심을 구성할 수 있음을 보였다.

ABSTRACT

A ultra-long cycle(5 years) SMART core design is examined using the thorium fuel. Most of design configurations of SMART core such as fuel loading pattern, control rod management strategy, and burnable absorber material remain unchanged but uranium fuel which is replaced with a homogeneous mixture of 20 % enriched uranium and thorium. The number of burnable absorber pins of the thorium loaded SMART core was adjusted to control the excess reactivity during the cycle burnup. It was shown that mixing ratio of 40:60 of uranium fuel and thorium fuel is necessary to achieve a 5 year cycle length of SMART core. The results also show that the ultra-longer cycle SMART core satisfying all design constraints such as F_q less than 2.5, axial offset less than 0.3, keff less than 0.95 when refueling, shutdown margin of 1% with most reactive control rod stuck, and ejected rod worth less than 250 pcm, are possible by using thorium fuel and absorber materials effectively.

1. 서론

토륨은 자연계에 우라늄보다 풍부히 존재하는 핵연료 자원¹이며 또한 초우라늄핵종의 감소, 핵확산방지등의 자연친화적 에너지원일 뿐만 아니라 높은 용융점, 높은 열전도도 등, 핵연료로서의 여

러 가지 우수한 핵적특성으로 인해 핵연료 확보 차원에서 활발히 연구되고 있는 핵물질이다. 토륨은 열중성자 흡수 단면적이 ^{238}U 에 비해 약 2.5배 높아 연소초기에는 중성자 흡수물질로서의 작용을 하여 노심의 반응도를 낮추어 주는 역할을 하나 중성자를 흡수하여 핵분열성 물질인 ^{233}U 으로 변환되므로 연소에 따른 반응도 감소율을 낮추는 역할도 한다. 이러한 토륨의 핵적특성은 주기초 노심의 잉여반응도를 낮추어 독봉의 사용량을 줄여줄 뿐만 아니라 핵분열성 물질의 생성으로 연소도에 따른 반응도 변화를 감소시키므로 장주기 노심설계에 적합하다.

SMART원자로는 해수 담수화뿐만 아니라 발전용으로의 사용을 위해 중소형으로 개발되고 있는 원자로로서 노심은 57개의 핵연료집합체로 구성되어 있으며 열출력 330 MWth로 운전하도록 되어있다. 이 원자로는 압력용기 내부에 1차계통 설비의 상당부분이 들어있는 일체형 원자로로서 압력용기 개폐횟수의 제한으로 인해 주기길이를 극대화하도록 설계되었으며 이를 위해 우라늄 농축도는 핵연료저장조 허용치한계치인 4.95%를 사용하며 단일벙치로 핵연료를 장전한다.

이 연구에서는 토륨 핵연료의 높은 중성자 흡수단면적 특성과 높은 전환률 특성을 이용하여 주기길이 5년의 SMART 노심을 설계한다. 이에 사용된 코드는 HELIOS²/MASTER³ 코드체계이며 SMART 노심 계산을 통해 주요 핵설계인자들의 제한조건 만족여부를 검사하였다. 이 연구에서 사용한 설계제한 조건은 우라늄 핵연료를 장전한 SMART 노심의 설계제한조건과 동일한 것으로 다음과 같다.

- 주기길이: 1680 일 (노심 이용율 0.92로 가정)
- $F_q\text{-Pin} < 2.5$
- 축방향 출력편차 < 0.3
- 상온 영출력, 전제어봉 삽입 상태에서의 노심 미임계도 < 0.95
- 상온 영출력, 고착제어봉 상태에서의 노심 미임계도 < 0.99
- 이탈 제어봉가 < 250 pcm

2. 초장주기 SMART 노심설계 전략

토륨핵연료를 사용한 주기길이 5년의 새로운 노심을 설계하기 위해서는 핵연료집합체 및 노심 장전모형등 모든 핵연료 설계인자들을 토륨핵연료에 적합하게 최적화해야 한다. 이러한 일련의 설계과정은 방대한 작업이 되며 또한 이 연구의 목적이 토륨 핵연료를 사용하여 SMART 노심의 설계제한조건을 만족하는 초장주기 노심 설계가 가능한지를 파악하는데 있으므로 단순히 우라늄 핵연료를 (Th,U)O₂ 핵연료로 대체 장전하여 그 성능을 평가하였다. 즉, 토륨핵연료를 장전할 노심 장전모형은 우라늄핵연료를 장전한 장전모형을 그대로 사용하기로 하였으며 노심 잉여반응도 제어 위한 제어봉 운전전략도 SMART 노심과 동일하게 사용하기로 하였다. 또한 핵연료집합체의 제원 및 독봉의 종류, 독봉 위치도 그대로 사용하였다. 다만 독물질은 주기길이 확보차원에서 매우 중요한 설계인자이므로 주기길이 특성에 맞는 독물질을 SMART 노심에 사용된 독물질 중에서 선별하여 사용하였다.

토륨 장전 핵연료집합체에는 농축도 20%의 우라늄(MEU:Medium Enriched Uranium) 핵연료를 사용하기로 하였다. 그리고 토륨장전 핵연료집합체에는 토륨핵연료와 MEU가 균질하게 혼합된 핵연료를 사용하기로 하였으며, 주기길이 확보에 필요한 노심 잉여 반응도는 토륨과 MEU의 혼합비에 의해 결정하기로 하였다.

SMART 노심은 무봉산으로 운전할 예정으로 있으므로 노심의 잉여반응도는 제어봉만으로 제어한다. 이 경우 노심의 축방향 출력편차가 제어봉 위치에 매우 민감하게 작용하므로 노심의 잉여

반응도를 최소화하여 제어봉 삽입을 최소화하도록 설계하는 것이 중요하다. 이러한 목적으로 SMART 노심에는 다량의 독물질이 투입되어 주기초부터 주기말까지의 노심 잉여반응도를 최소화하고 있다.

초장주기 노심의 주기길이는 노심 이용률 0.92로 가정하여 1680일로 하였다. 이 경우 노심 열출력이 330 MWth이므로 노심 평균 연소도는 상용로와 유사한 약 45 MWD/kgHM가 된다.

3. 토륨장전 핵연료집합체 연소특성 및 초장주기용 핵연료집합체

그림 1은 연소도 45 MWD/kgHM에서의 토륨장전 핵연료집합체의 무한증배계수를 MEU 혼합비에 따라 나타낸 것이다. 토륨장전노심의 주기말에서의 무한증배계수는 중성자 누출에 의한 반응도 손실양과 핵연료에 남아있는 잔여독물질에 의한 반응도 손실량, 그리고 제어봉에 의한 반응도 손실량을 포함하여 노심이 임계가 되어야 한다. 이 경우 연소도 45 MWD/kgHM에서의 무한증배계수는 1.1보다 커야 하며 이 경우 그림 1로부터 MEU 혼합비는 최소한 40%가 되어야 함을 알 수 있다. 이로부터 이 연구에서는 토륨장전 핵연료집합체에 장전될 MEU를 40%로 결정하였다.

우라늄 장전 SMART 노심에는 Gadolinia를 4% 사용한 Gd봉 외에 ^{10}B 을 0.0111 g/cm, 0.01588 g/cm, 0.029 g/cm 사용한 3종류의 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-B}_4\text{C}$ 독봉 등, 모두 4종류의 독봉이 사용된다. 그림 2는 그림 1로부터 결정된 MEU 혼합비 40%인 핵연료집합체에 이들 4종류의 독봉을 각각 8개 장전한 독봉집합체의 연소도에 따른 무한증배계수 변화를 무독봉 핵연료집합체와 비교하여 나타낸 것이다. Gadolinia는 중성자 흡수단면적이 매우 커서 연소도 약 15 MWD/kgHM에서 대부분 소멸됨을 알 수 있고 ^{10}B 을 0.0111 g/cm, 0.01588 g/cm, 0.029 g/cm 사용한 독봉은 각각 연소도 약 30, 40, 50 MWD/kgHM에서 대부분 소멸됨을 알 수 있다. 토륨장전노심은 노심 평균연소도가 45 MWD/kgHM 이며 이 연소도까지 독물질에 의해 노심 반응도를 제어해야 하므로 ^{10}B 함량이 0.29 g/cm인 독봉이 가장 적합할 것으로 판단된다. 그러나 노심의 잉여반응도와 독봉집합체의 노심내 장전위치등을 고려하여 다른 독물질을 적절히 조합하여 사용하여야 할 것으로 판단된다.

그림 3은 토륨장전노심에 사용하기 위하여 그림 1과 2로부터 설계한 독봉집합체의 사양을 나타낸 것이다. TYPE-B 핵연료집합체는 노심외각에 장전될 예정이며 TYPE-C는 노심내부에, 그리고 TYPE-D는 노심 최외각에 장전될 예정으로 설계된 것이다. 따라서 TYPE-D는 Gd 독봉을 12개, 0.0111 g/cm의 ^{10}B 함량을 가진 독봉을 28개 사용하여 연소초기에는 독물질에 의한 잉여반응도 억제가가 매우 높으나 연소도가 증가하면서 독물질도 빠르게 연소하도록 하여 노심 출력을 외각으로 유도하도록 하였다. TYPE-B에는 0.01588 g/cm의 ^{10}B 함량을 가진 독봉을 12개, 0.029 g/cm의 ^{10}B 함량을 가진 독봉을 12개 등, 다른 독봉집합체보다 독봉수에서 상대적으로 적은 총 24개의 독봉을 장전하여 연소초반부터 연소중반에 걸쳐 노심출력을 외각으로 유도하도록 하였다. 그리고 TYPE-C는 모든 독봉을 0.029 g/cm의 ^{10}B 함량을 가지는 $\text{B}_4\text{C-Al}_2\text{O}_3$ 로 하여 주기말까지 출력을 억제하도록 하였다. 또한 TYPE-B와 TYPE-C에는 핵연료집합체 상부에 독물질 Zoning 구역을 두어 노심 잉여반응도 제어를 위해 제어봉이 노심 상부에 삽입되더라도 노심내 축방향 출력이 노심 하부로 과도하게 치우치는 것을 방지하도록 하였다.

그림 4는 그림 3에 제시한 독봉집합체들의 연소도에 따른 무한증배계수를 나타낸 것이다. TYPE-B 독봉집합체는 0.29 g/cm의 ^{10}B 함량을 가지는 독봉에 의해 연소도 50 MWD/kgHM 까지 무한증배계수가 제어됨을 알 수 있다. TYPE-C 독봉집합체는 0.1588 g/cm의 ^{10}B 함량을 가진 독봉과 0.029 g/cm의 ^{10}B 함량을 가지는 독봉이 잘 조화되어 연소도 50 MWD/kgHM까지 일정한 무한증배계수를 유지하고 있음을 알 수 있으며 무한증배계수가 항상 TYPE-B보다 높아 노심 출력을 노심 외각으로 유도할 수 있음을 알 수 있다. 그리고 TYPE-D 독봉집합체는 연소초기에는

무한증배계수가 낮으나 연소도 15 MWD/kgHM까지 무한증배계수가 지속적으로 증가하여 주기초반의 출력을 외각으로 유도할 수 있음을 알 수 있다.

4. 토륨장전 초장주기 노심

그림 5는 노심내 핵연료장전모형과 핵연료집합체들의 축방향 핵연료장전모양을 나타낸 것이며 그림 6은 노심내 잉여반응도 제어를 위한 제어봉의 위치 및 제어봉 운전전략을 나타낸 것이다. 이들은 앞에서 전술한 바와 같이 우라늄 장전노심의 것들과 동일한 것이다.

그림 7은 노심 연소도에 따른 임계제어봉 위치를 나타낸 것이다. R4, R3, R2는 제어봉 운전전략에 따라 60 cm 간격으로 움직이고 있으며 R1은 노심운전중에는 전혀 사용되지 않음을 알 수 있으며 R2는 주기초와 연소도 1300 EFPD 부근에서 조금 삽입되고 있음을 알 수 있다. 그리고 제어봉이 가장 많이 삽입될 때는 주기초이며, 주기초를 제외하면 연소도 1300 EFPD 부근에서 가장 많이 삽입됨을 알 수 있다. 그림 8은 임계제어봉 위치에서의 연소도에 따른 축방향 출력편차와 F_q 값을 나타낸 것이다. 축방향 출력편차는 임계제어봉 위치와 매우 유사한 모양을 보이고 있다. 즉 제어봉이 삽입되면 출력은 노심하부쪽으로 치우치며 제어봉이 인출되면서 노심 상부쪽으로 출력이 움직임을 알 수 있다. 그리고 축방향 출력편차는 -0.3에서 0.05 사이의 값을 보여 이 연구에서 설정한 설계제한치를 만족함을 알 수 있다. F_q 값은 주기초에는 1.75정도로 낮게 유지되다가 노심이 연소하면서 점차 증가하여 주기말에는 2.2 정도로 유지됨을 알 수 있다. 이 값도 역시 이 연구에서 설정한 설계제한치 2.5를 만족시키고 있음을 알 수 있다.

그림 9는 상온영출력 상태에서의 노심 미임계도를 연소도에 따라 나타낸 것이다. 전체어봉 삽입, 상온 영출력 상태에서의 미 임계도는 최대값이 주기초에 0.93851로 나타나 이 연구에서 설정한 설계제한치 0.95를 전주기에 걸쳐 만족하고 있음을 알 수 있다. 그리고 제어봉가가 가장 큰 제어봉이 노심내로 삽입되지 않은 경우를 가정한 고착제어봉 상태의 경우도 최대값이 주기초에 0.97755로 나타나 이 연구에서 설정한 설계제한치 0.99를 만족하고 있음을 알 수 있다.

그림 10은 영출력상태에서의 토륨장전노심의 감속재 온도계수를 온도에 따라 우라늄장전노심과 비교하여 나타낸 것이다. 주기초 토륨장전노심의 감속재 온도계수는 상온에서는 우라늄장전노심에 비하여 높으나 고온에서는 낮게 나타났다. 그리고 주기말에는 상온에서는 거의 유사하게 나타나며 고온에서는 약간 낮게 나타났다. 그러나 전체적으로 볼 때 이러한 차이는 매우 미소하며 온도에 따른 경향이나 핵연료 연소에 따른 경향이 우라늄 장전노심과 매우 흡사함을 알 수 있다.

그림 11은 영출력상태에서의 토륨장전노심의 Doppler 온도계수(DTC)를 온도에 따라 우라늄장전노심과 비교하여 나타낸 것이다. 토륨 장전노심이나 우라늄 장전노심의 DTC는 상온 상태에서 가장 작음을 알 수 있으며 온도가 증가하면서 증가함을 알 수 있고 노심 연소에 따라서는 주기초보다 주기말에서 더 낮게 나타남을 알 수 있다. 그리고 토륨장전노심의 DTC는 우라늄장전노심의 DTC보다 모든 계산상태에서 약 2 pcm/C 정도 낮게 나타나 DTC 측면에서 토륨장전노심이 우라늄장전노심에 비해 보다 안정적임을 알 수 있다.

표 1은 토륨장전노심의 핵적 특성들을 주기초, 420 EFPD, 840 EFPD, 1260 EFPD 및 주기말에서 살펴본 것이다. 이탈제어봉가는 주기말에서 228 pcm으로 가장 높게 나타났으며 설계제한치인 250 pcm을 만족하고 있다. 총 제어봉가는 주기초에 약 21 % $\Delta\rho$ 로 가장 높게 나타났다.

5. 결론

이 연구에서는 토륨 핵연료를 사용하여 주기길이 5년의 초장주기 SMART 노심을 설계하였으

며 SMART 노심에 적용된 설계제한조건을 그대로 적용하여 초장주기 노심을 평가하였다. SMART 노심이 5년 주기길이를 갖기 위한 MEU와 토륨의 혼합비는 40:60으로 나타났으며 초장주기에 필요한 독봉을 적절히 사용함으로써 SMART 노심에 적용된 설계제한조건들을 잘 만족하는 노심을 구성할 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력 연구개발 사업의 일환으로 수행되었다.

참고문헌

1. M. Lung, A Present Review of the Thorium Nuclear Fuel Cycles, Nuclear Science and Technology, Eupropean Commission, 1997.
2. R. Stammer et. al., "User's Manual for HELIOS," Scanpower, 1994.
3. B. O. Cho, et. al., "The Features and Solution Methodologies of the KAERI Nuclear Design Code," International Conference on the Physics of Reactors, Mito, Japan, Sep. 16-20 (1996).

표 1. 토륨장전노심의 핵적 특성

	BOC	420 day	840 day	1260 day	EOC
Critical State					
Axial Offset	-0.156	0.037	-0.102	-0.257	-0.020
Fq-pin	1.975	1.677	1.916	2.100	2.184
keff					
CZP, ARO	1.17474	1.13597	1.12393	1.12522	1.11469
CZP, ARI	0.93851	0.92152	0.92305	0.91863	0.90141
CZP, 고착제어봉상태	0.97755	0.96479	0.97066	0.96883	0.95446
총 제어봉가(% $\Delta\rho$)	21.4	20.5	19.4	20.0	21.2
이탈제어봉가(pcm)	218	184	195	216	228
MTC(pcm/K)					
HFP, Eq.Xe	-68.9	-61.0	-56.0	-56.1	-54.8
HFP, no.Xe	-73.3	-65.9	-63.6	-64.4	-60.3
HZP	-60.7	-53.6	-51.8	-51.7	-48.9
CZP	-10.5	-10.2	-9.2	-7.6	-6.0
DTC(pcm/K)					
HFP, Eq.Xe	-4.5	-4.4	-4.9	-5.7	-5.6
HFP, no.Xe	-5.6	-4.6	-5.5	-7.2	-5.8
HZP	-4.2	-4.3	-4.5	-4.8	-5.0
CZP	-4.9	-4.9	-5.1	-5.3	-5.5

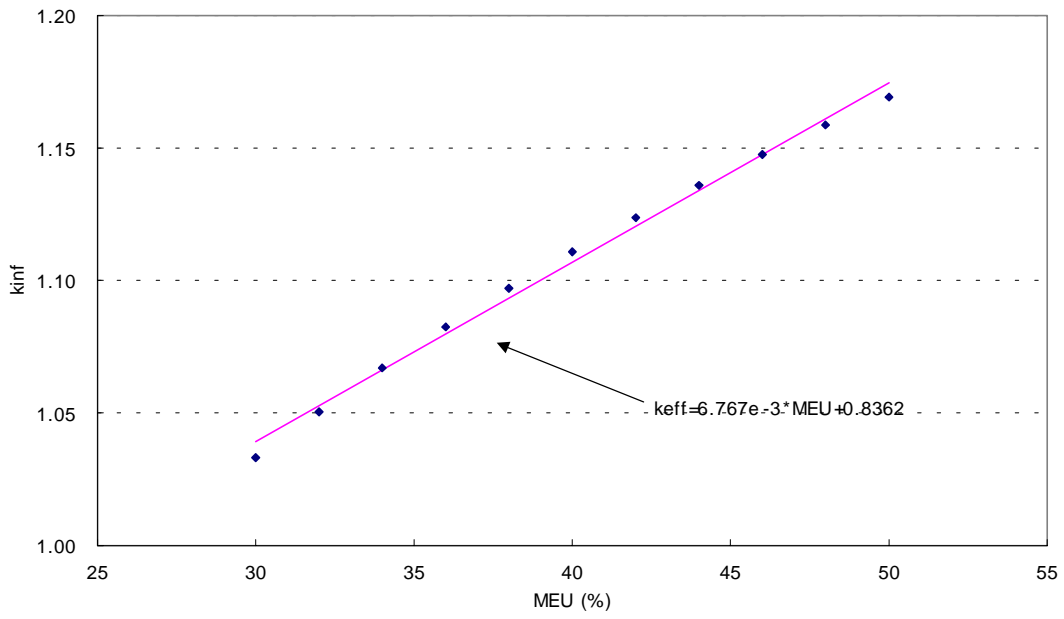


그림 1. 연소도 45 MWD/kgHM 에서의 MEU 혼합비에 따른 무한증배계수

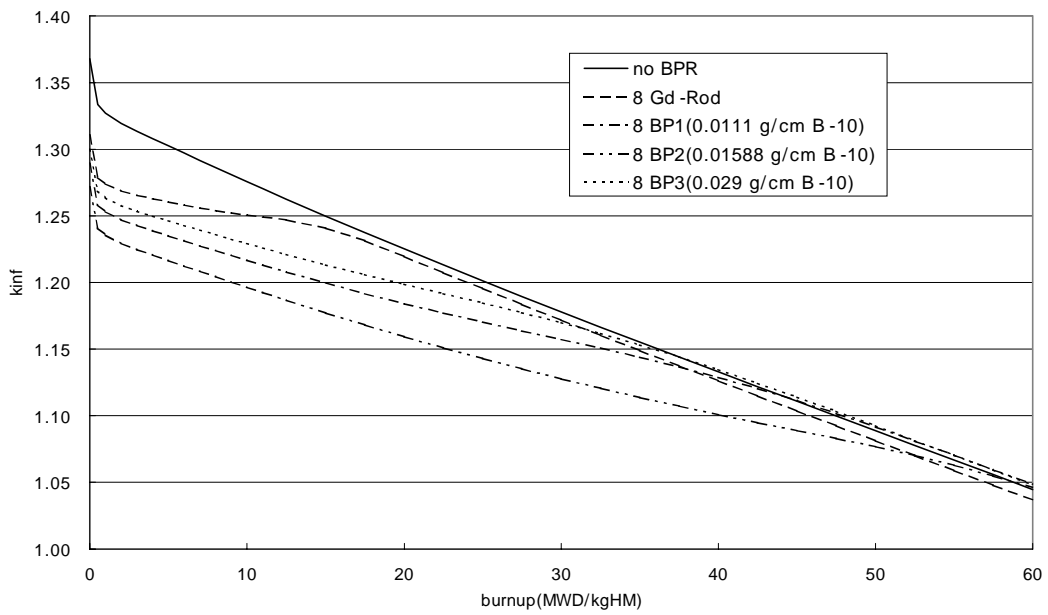


그림 2. 독봉종류별 연소도에 따른 무한증배계수

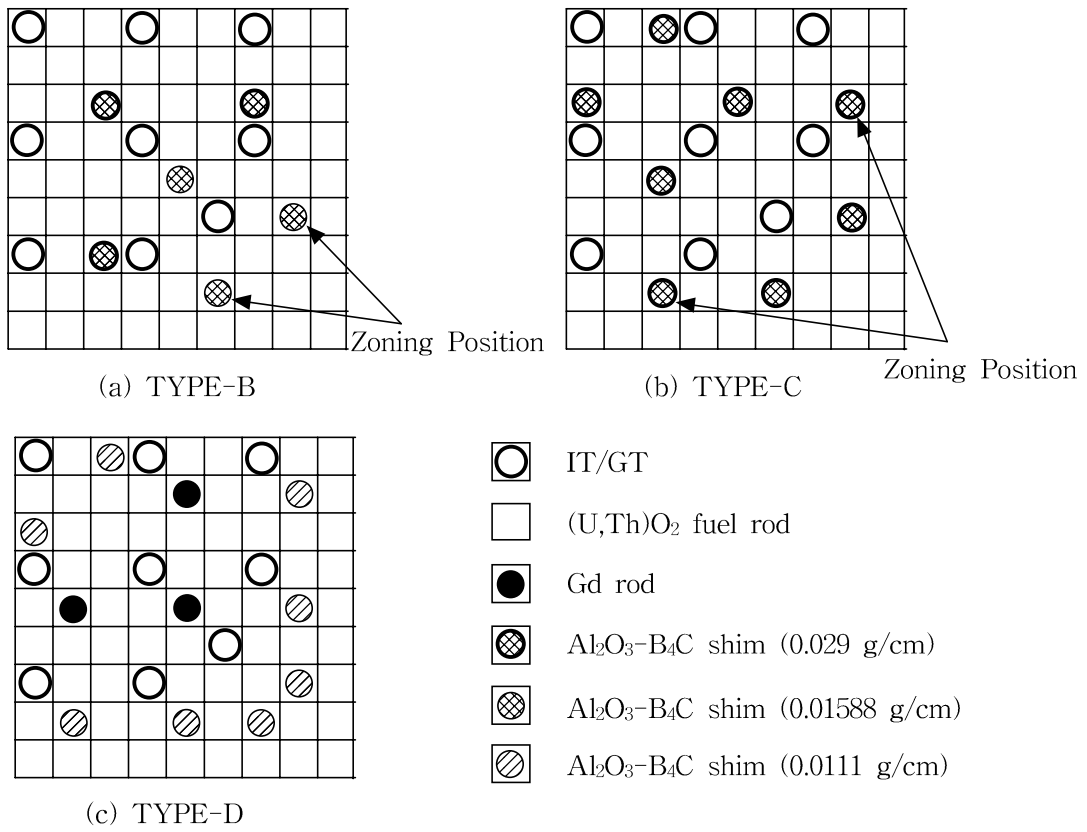


그림 3. 토륨장전 핵연료집합체

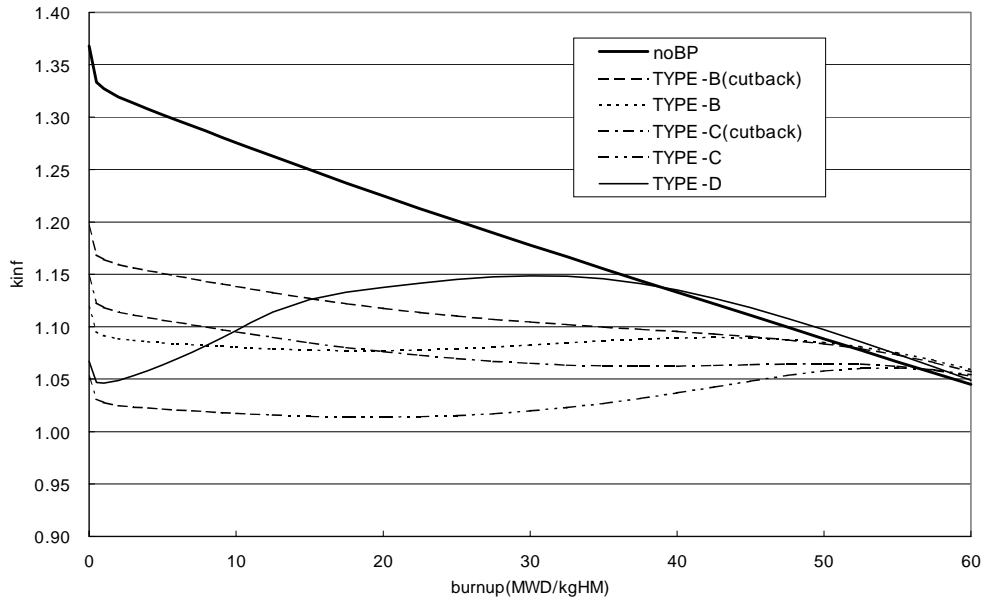
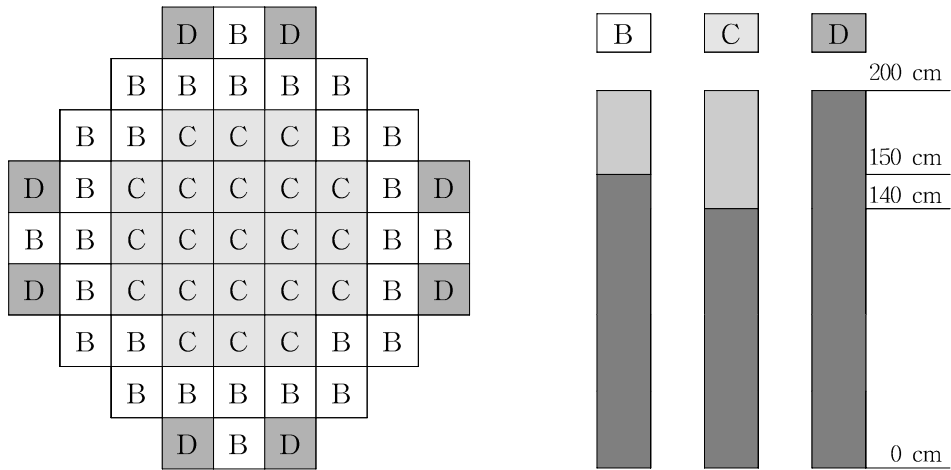
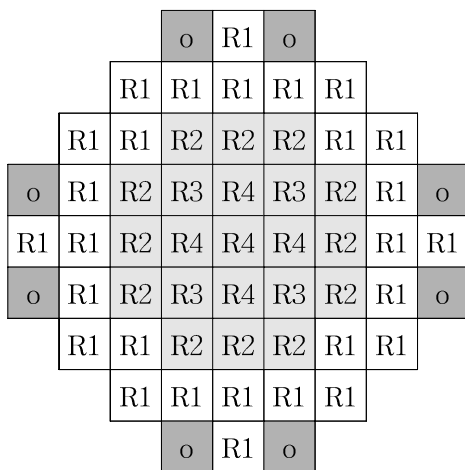


그림 4. 토륨장전 핵연료집합체의 연소도에 따른 무한증배계수

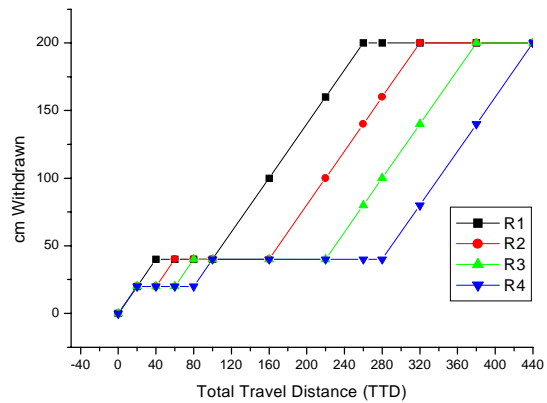


Type	Gd rod (4%)	Al ₂ O ₃ -B ₄ C shim		
		0.0111 g/cm ¹⁰ B	0.01588 g/cm ¹⁰ B	0.029 g/cm ¹⁰ B
B-normal	0	0	12	12
B-cutback	0	0	4	12
C-normal	0	0	0	28
C-cutback	0	0	0	20
D-normal	12	28	0	0

그림 5. 핵연료 장전모형 및 축방향 cutback



(a) 제어봉 위치



(b) 제어봉 운전전략

그림 6. 노심내 제어봉위치 및 제어봉 운전전략

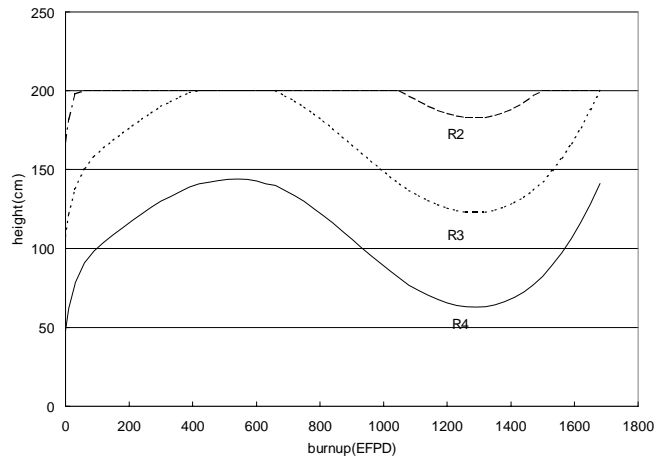


그림 7. 연소도에 따른 임계 제어봉 위치

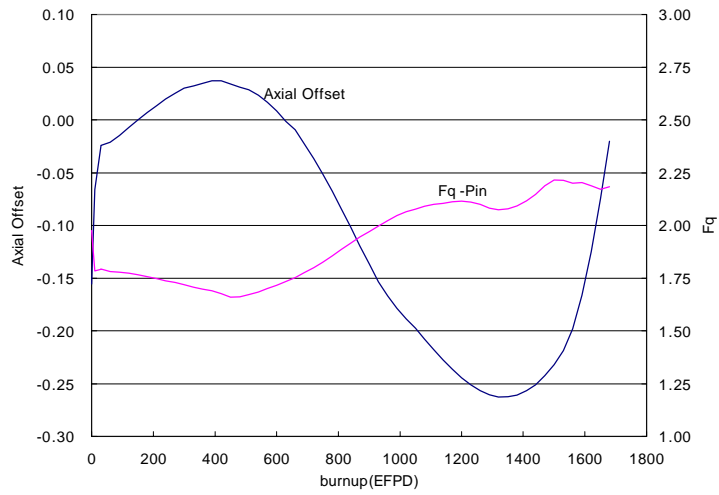


그림 8. 연소도에 따른 임계 축방향 출력편차 및 Fq

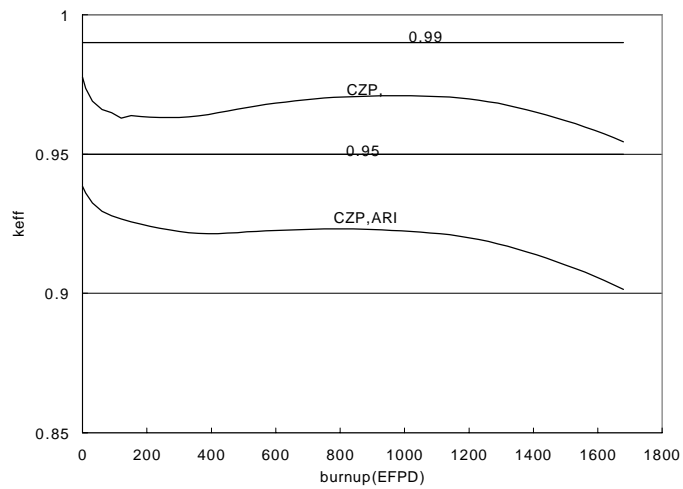


그림 9. 상온 영출력상태에서의 노심 미임계도

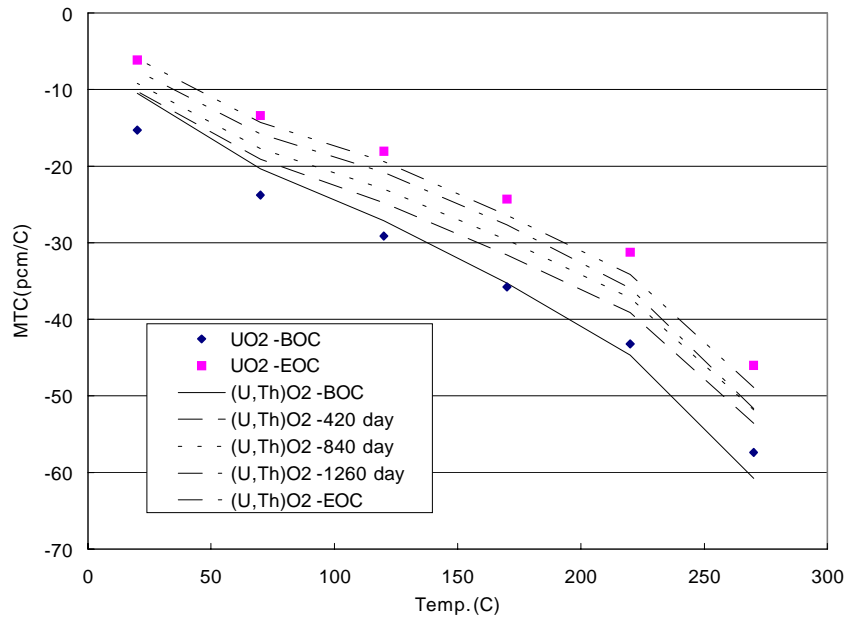


그림 10. 영출력상태에서 토륨장전노심의 온도에 따른 감속재 온도계수

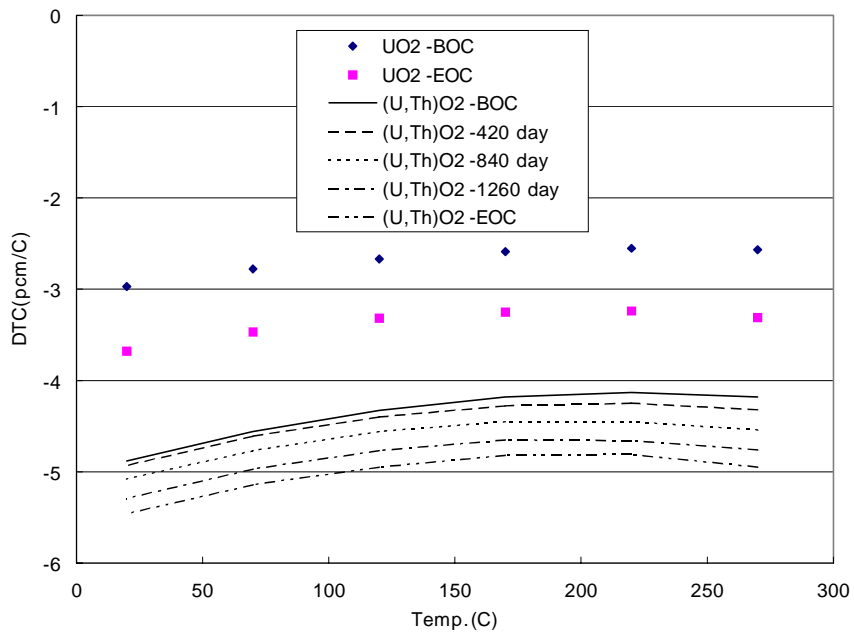


그림 11. 영출력상태에서 토륨장전노심의 핵연료 온도에 따른 핵연료 온도계수