

KALIMER 반사체 설계변경에 따른 노심 핵특성 변화 분석

An Analysis on Nuclear Characteristics Impact from Reflector Design Change in KALIMER

김학성, 김상지, 김영일

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

김명현

경희대학교
경기도 용인시 기흥읍 서천리 1

요 약

KALIMER 반사체 설계변경을 통하여 노심의 반사체 경계 영역에서의 중성자 거동특성을 자세하게 파악하고, 이에 따른 노심 내부 영역의 핵특성 변화를 분석하여 고속로에서의 최적 반사체 모델을 탐색해 보았다. 반사체의 설계변경은 현재 반사체 물질로 쓰이는 인코넬-600 합금 대신에 납 또는 비스무스로 교체하여 설계를 변경하였고, 이 변경된 반사체 설계를 KALIMER 'Breakeven 노심'과 '초우라늄원소 연소노심'에 대하여 각각 적용하여보았다. 노심 핵특성의 변화 분석을 위하여 한국원자력연구소에서 개발한 K-CORE 계산체제를 사용하였다.

계산결과 'Breakeven 노심'의 경우 25 KeV 이하, '초우라늄원소 연소로'의 경우 10 KeV 이하의 중성자 에너지 영역에서 반사체 교체 노심의 중성자속은 인코넬을 사용했던 때보다 높아짐을 확인할 수 있었다. 또한 연소계산 결과에서는 'Breakeven 노심'의 경우 주기 초에서 잉여 반응도가 약 40 pcm, 주기 말에서 약 10 pcm 가량 증가하였고, 증식비는 전 주기를 통해 약 2% 가량 증가하였다. '초우라늄원소 연소로'의 경우 주기 초에서 잉여 반응도 값이 약 20 pcm 가량 증가하였으나, 주기 말에서는 증가하지 않았다. 이러한 결과를 종합해 본 결과 반사체 물질 교체를 통한 반사체 설계 변경은 노심의 핵특성 변화에 긍정적인 영향을 미치기는 하나, 영향은 크지 않음을 확인하였다.

후보 물질 중에서 KALIMER 노심의 최적 반사체 설계안은 액체 납을 HT-9관에 충전한 안임이 확인되었으나, 이는 노심의 핵특성만을 고려한 결론이다. 향후 열수력적 특성이나 기계적 특성, 경제성 등을 함께 고려하여 반사체 설계 변경이 시도되어야 할 것이다.

Abstract

By way of studying the nuclear characteristics upon the changed reflector design of KALIMER, it was possible to understand the neutron behavior at the core outside and, in consequence, the optimum reflector design was found out after the analysis on the impact of nuclear characteristics in the active core. The reflector material was replaced with Pb and Bi rather than the Inconel-600 alloy, and this new reflector design was applied to the KALIMER Breakeven core and the TRU Burner, respectively. The research used the K-CORE system developed by Korea Atomic Energy Research Institute (KAERI) to analyze the change of nuclear characteristics.

As a result, it was found that the neutron flux of the core increases with the use of the Pb and Bi reflector under 25 KeV in the Breakeven core and under 10 KeV of the TRU Burner, respectively. In addition, from the burn-up calculation, for the Breakeven core, the K-effective increases about 40 pcm at the beginning of equilibrium cycle(EOEC) and 10 pcm at the end of equilibrium cycle(EOEC), and the Breeding ratio increases 2% over the whole cycle. On the other hand, for the TRU Burner, the K-effective increases at BOEC, it does not increase at EOEC. Taking all these results together, it is concluded that the new reflector design achieved by switching materials has a positive effect on the nuclear characteristics of the core; however, it is not great enough to promote to adopt a new design.

Though Pb is evaluated as an optimum reflector material, only the nuclear characteristics were highlighted. The change of reflector design would have to be decided also with due regard to the thermal hydraulic and mechanical characteristics, and economics.

1. 서론

대부분의 원자로로는 노심 밖으로의 중성자 누설을 줄이기 위하여 노심 외부에 반사체를 설치하고 그 외부에는 중성자 차폐구조물을 설치한다. 반사체는 노심 밖으로 새어나오는 중성자를 산란에 의해 노심으로 되돌려 줌으로서 중성자의 경제성을 효율적으로 향상시킨다. 또한 반사체는 원자로 노심의 핵특성뿐만 아니라 원자로 압력용기의 기계적 건전성에도 영향을 미칠 수 있다. 더구나 노심 핵연료 집합체에서 약 2~3%의 중성자가 누출되는 경수로에 비해 약 30%의 중성자가 누출되는 소형 액체금속로의 특징 때문에 중성자의 누출을 줄이는 효과는 경수로에 비해 원자로 성능에 보다 큰 영향을 미칠 수 있을 것으로 예상된다.

현재 한국원자력연구소 KALIMER[1] 기술개발팀에서는 액체금속로로서 역할과 특징이 다른 여러 노심의 개념설계를 수행하여왔다. 하지만 노심 외부의 반사체 영역에 대해서는 상세한 연구가 진행되지 못한 것이 사실이다. 따라서 본 연구에서는 반사체의 설계변경을 통하여 노심 외곽의 반사체 경계 영역에서의 중성자 거동 특성을 자세히 살펴보고, 이에 따른 노심 내부 영역의 핵특성 변화를 분석하여 최적의 반사체 모델을 제시하는 것을 연구 목적으로 하였다.

2. 연구내용 및 방법

2.1 연구내용

반사체 설계변경 방법은 크게 두 가지로 나누어 생각해 볼 수 있다. 반사체의 기하학적 모형을 변경하는 방안과 반사체 물질을 교체하는 방안인데 후보 모형을 몇 가지로 구분하여 연구범위를 한정하였다.

반사체의 기하학적 모형을 변경하는 방안은 그림 1과 같이 크게 세 가지로 나누어 생각해 보았다. 첫 번째 방법은 현재 연료봉 타입의 인코넬-600 봉을 묶고 그 사이에 냉각재가 흐르도록 만든 현재의 반사체 집합체 설계를 반사체 블록 형태로 변경하는 안이다. 두 번째 방법은 반사체 봉의 사이즈를 증가시키는 것이고, 세 번째 방법은 반사체 봉의 사이즈를 감소시키는 것이다. 이러한 세 가지 방법을 검토하여 최적의 반사체 기하학적 모형을 제시하였다.

반사체 물질을 교체하는 방법은 현재 반사체 물질로 쓰이는 인코넬-600 합금대신 납, 비스무스, 수은, 백금 이렇게 4가지 물질로 교체해 보는 것이다. 좋은 반사체 물질이란 중성자 흡수 단면적이 낮고, 산란 단면적이 높으며, 고속중성자의 에너지를 이용하는 액체금속로의 특징상 중성자가 산란되면서 에너지가 감소되는 비율이 적은 물질이어야 한다. 따라서 원자번호가 28번인 니켈이 대부분을 차지하는 인코넬-600 합금 대신 더 우수한 중성자 반사 효과를 보일 것으로 기대되는 원자질량이 무거운 원자번호 80번 근처의 여러 물질 중에서 납과 비스무스가 가장 적절한 물질이라는 판단으로 반사체 교체물질 후보를 선정하였다.

2.2 연구수행 방법

액체금속로는 핵특성 면에서 볼 때 경수로에 비하여 중성자의 평균자유행정이 길어서 공간적 상호 결합성이 강하므로 노심해석이 열중성자로 보다 용이하지만, 보다 넓은 공간범위와 에너지영역에 걸쳐 상세한 중성자 확산특성을 취급해야 한다. 이러한 액체금속로의 노심 핵설계와 분석은 노심설계 종합전산체제인 K-CORE[2] 계산체제를 사용하여 수행하였다. 노심 핵설계 및 분석을 위한 계산절차는 크게 단면적 생산, 중성자속 계산, 연소계산 및 반응도가 계산으로 구분되어진다. 단면적 라이브러리는 JEF-2.2로부터 NJOY 코드의 처리과정을 거쳐 생산한 중성자 80군으로 구성된 KAFAX-F22[3] 라이브러리를 사용하였고, 노심의 각 영역별 9군 미시단면적 계산을 위해서 TRANSX[4] 코드와 TWODANT[5] 코드를 사용하였다. 그리고 노심의 중성자속 분포 및 연소계산, 반응도가 계산은 DIF3D[6] 코드와 REBUS[7] 코드를 통해 이루어졌다. 중성자속 및 연소에 대한 반복계산을 통한 평형주기 분석에서 중성자속 계산은 9군 단면적 세트를 기본으로 3차원 모델에 대한 노달 확산이론 계산을 수행하였으며, 연소계산에서는 핵연료재장전을 비롯한 일체의 핵연료관리전략을 일정한 양식으로 수행하는 평형노심을 대상으로 연소특성을 분석하였다.

2.3 대상 원자로

본 연구를 수행하기 위해 선정한 노심은 여러 개념의 KALIMER 노심중에서 'Breakeven 노심'[8][9][10]과 '초우라늄원소 연소노심'[11][12]이다. 그 이유는 'Breakeven 노심'의 경우 현재 KALIMER 노심설계의 주축으로 KALIMER의 본격적인 연구가 'Breakeven 노심'을 중심으로 진행되고 있기 때문이며, '초우라늄원소 연소노심'의 경우 현재 마이너 악티나이드 연소에 대한 관심이 국내외 적으로 많은 주목을 받고 있으며, 또한 반사체와 구동(driver)핵

연료 사이에 블랭킷이 존재하는 Breakeven 노심을 비롯한 다른 여타의 노심에 비해 구동 (driver) 핵연료와 반사체 사이에 블랭킷이 존재하지 않으므로 반사체 설계변경에 따른 노심 핵특성 변화분석에 있어 확실한 변화가 있을 것으로 예상되었기 때문이다.

3. 연구결과

고속 중성자의 에너지를 이용하는 액체금속로의 노심 외부영역인 반사체 영역에서의 중성자 거동 특성을 파악하여 이에 따른 최적의 반사체 설계를 제시하기 위하여, KALIMER 반사체 설계변경을 통하여 노심 내부 영역의 핵특성 변화를 분석하여 최적의 반사체 모델을 탐색해 보았다. 본 연구의 결과는 다음과 같이 요약될 수 있다.

3.1 반사체의 기하학적 설계변경안

반사체의 기하학적 설계는 현재의 설계안을 최적상태로 결정하였다. 반사체의 기하학적 모형 변경의 첫 번째 방법인 블록형태의 반사체로 설계를 변경 방법은 집합체 전체를 균질화시켜 핵계산을 수행하는 K-CORE 계산체제의 특성 때문에 반사체와 냉각재 사이의 부피비가 조정되지 않는 한 기하학적 변경의 효과를 파악할 수 없다. 따라서 반사체를 블록형태로 변경하는 방법은 타당하지 않음으로 판단하였고, 반사체 봉 크기를 조절하여 반사체의 부피비를 조절하는 방법으로 반사체의 기하학적 설계변경을 고려하였다. 그 결과를 'Breakeven 노심'과 '초우라늄원소 연소노심'으로 나누어 표 1과 표 2에 정리하였다. 표 1, 2의 내용을 종합한 결과 'Breakeven 노심'과 '초우라늄원소 연소노심' 모두 반사체 봉 크기를 줄였을 경우, 예상대로 노심 핵특성이 현재의 반사체 설계에 비해 더 나빠짐을 알 수 있었고, 반사체 Pin Size를 증가시켰을 경우 노심 핵특성에 긍정적인 영향을 미치기는 하나 거의 미미한 것으로 확인되었다. 따라서 두 노심의 반사체 봉 크기를 증가시키기 위해 냉각재의 양을 50% 감소시켜 이에 따른 기계적 특성, 열수력적 설계의 변경 등을 새로 고려해야 하는 반사체 기하학적 설계변경방법은 거의 의미가 없을 것으로 판단되었다. 따라서 반사체의 기하학적 설계는 현재의 설계안을 최적상태로 결정하였다.

3.2 반사체 물질 변경안

반사체의 설계변경 방법으로 현재 반사체 물질로 쓰이는 인코넬-600 합금 대신 납과 비스무스로 반사체 물질을 교체하는 방법이 채택되었고, 표 3과 그림 2에서와 같이 설계 변경된 반사체를 KALIMER 'Breakeven 노심'과 '초우라늄원소 연소노심'에 대하여 적용하였다. 모든 계산 결과를 비교하였을 때 납과 비스무스의 결과는 거의 일치하였다.

반사체를 납과 비스무스로 교체하였을 때 반사체 내부 노심의 평균 중성자속은 표 4와 5에서 보이는 바와 같이 모든 중성자 에너지 영역에 걸쳐 증가하였다. 특히 'Breakeven 노심'의 경우 25 KeV 이하, '초우라늄원소 연소노심'의 경우 10 KeV 이하의 중성자 에너지 영역에서 비교적 크게 증가하였다.

'Breakeven 노심'의 경우 표 7에서 나타난 바와 같이 주기 초에서 잉여 반응도가 약 40 pcm, 주기 말에서 약 10 pcm 가량 증가하였고, 증식비는 전 주기를 통해 약 2% 가량 증가하였다. 표 8에 정리해 놓은 바와 같이 연소반응도 변화, 침투출력밀도, 신연료 농축도등과 같은 주요 노심 설계 인자들의 변화는 거의 미미하였고, 냉각재 기화계수의 변화는 반사체

를 납과 비스무스로 교체하였을 경우 표 9에서와 같이 조금씩 증가함을 볼 수 있었다.

‘소듐냉각 초우라늄원소 연소노심’의 경우 표 10에서 나타난 바와 같이 주기 초에서 잉여 반응도 값이 약 20 pcm 가량 증가하였으나, 주기 말에서는 증가하지 않았다. ‘소듐냉각 초우라늄원소 연소노심’의 주요 노심 설계인자와 냉각재 기화계수의 변화는 표 11과 12에 정리하였다. ‘소듐냉각 초우라늄원소 연소노심’ 역시 ‘Breakeven 노심’의 결과 비슷하게 주요 노심 설계 인자들의 변화는 거의 미미하였고, 냉각재 기화계수의 변화는 반사체를 납과 비스무스로 교체하였을 경우 조금씩 증가함을 볼 수 있었다.

‘납-비스무스 냉각 초우라늄원소 연소노심’의 계산 결과는 표 13, 14, 15에 정리하였다. ‘납-비스무스 냉각 초우라늄원소 연소노심’의 결과 역시 ‘소듐냉각 초우라늄원소 연소노심’의 계산 결과와 거의 비슷한 경향을 보였다.

4. 결론

KALIMER 반사체 설계변경을 통하여 노심의 반사체 경계 영역에서의 중성자 거동특성을 자세하게 파악하고, 이에 따른 노심 내부 영역의 핵특성 변화를 분석하여 KALIMER 에서의 최적 반사체 모델을 현재 반사체 물질로 쓰이는 인코넬-600 합금 대신에 납 또는 비스무스로 교체하는 설계로 제안하였다. 변경된 반사체 설계를 KALIMER ‘Breakeven 노심’과 ‘초우라늄원소 연소노심’에 대하여 각각 적용해본 결과 액체금속로의 반사체 설계변경으로 반사체 내부 노심의 중성자속을 증가시켜 핵특성 변화에 긍정적인 영향을 미칠 수는 있으나, 기대만큼 큰 영향을 미치지 못함을 확인하였다. 여러 후보물질 중에서 납이 KALIMER 노심의 반사체로서 가장 우수한 특성을 보였으나, 이는 노심의 핵특성만을 고려하였을 경우이고, 기타 열수력적 특성이나 기계적 특성, 경제성 등이 함께 고려되어 반사체 설계변경안이 결정되어야 할 것이다.

감사의 글

본 논문은 과학기술부에서 시행하는 원자력중장기사업의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. 한도희 외, "KALIMER 예비개념설계 보고서," KAERI/TR-1636/2000, 한국원자력연구소, 2000.
2. 김영진 외, "액체금속로 설계기술개발," KAERI/RR-2027/99, 한국원자력연구소, 1999.
3. J. D. Kim, et al., "KAFAX-F22 : Development and Benchmark of Multi-group Library for Fast Reactor Using JEF-22," KAERI/TR-842/97, 한국원자력연구소, 1997.
4. R. E. MacFarlane, "TRANSX 2 : A Code for Interfacing MATXS Cross-section Libraries to Nuclear Transport Codes," LA-12312-MS, Los Alamos National Laboratory, Dec., 1993.
5. R. E. Alcouffe, et al., "User's Guide for TWODANT: A Code Package for Two-Dimensional Diffusion-Accelerated Neutral Particle Transport," LA-10049-M, Los Alamos National Laboratory, 1990.
6. K. L. Derstine, "DIF3D : A Code to Solve One-, Two-, and Three-Dimensional Finite-Difference Diffusion Theory Problems," ANL-82-64, Argonne National Laboratory, April, 1984.
7. B. J. Toppel, "A User's Guide for the REBUS-3 Fuel Cycle Analysis Capability," ANL-83-2, Argonne National Laboratory, March, 1983.
8. 김영인 외, "Nuclear and Thermal-Hydraulic Design and Analysis of KALIMER Breakeven Equilibrium Core," KALIMER/CD112-ER-01/2000, 한국원자력연구소, 2000.
9. Y. I. Kim, "Breakeven 노심의 구성 및 배치," IOC-CD-005-2000, 한국원자력연구소, 2000.
10. 김영인, "Breakeven노심의 크기, 배치 및 재료," IOC-CD-002-2000 (KALIMER 설계연계자료), 한국원자력연구소, 2000.
11. 유재운, "노심별 TRU 및 Actinide 연소능력 평가," LMR/CD113-WR-17 Rev.0/00, 한국원자력연구소, 2000.
12. 김영인외, "KALIMER 우라늄금속연료노심 개념설계연구," KAERI/TR-1279/99, 한국원자력연구소, 1999.

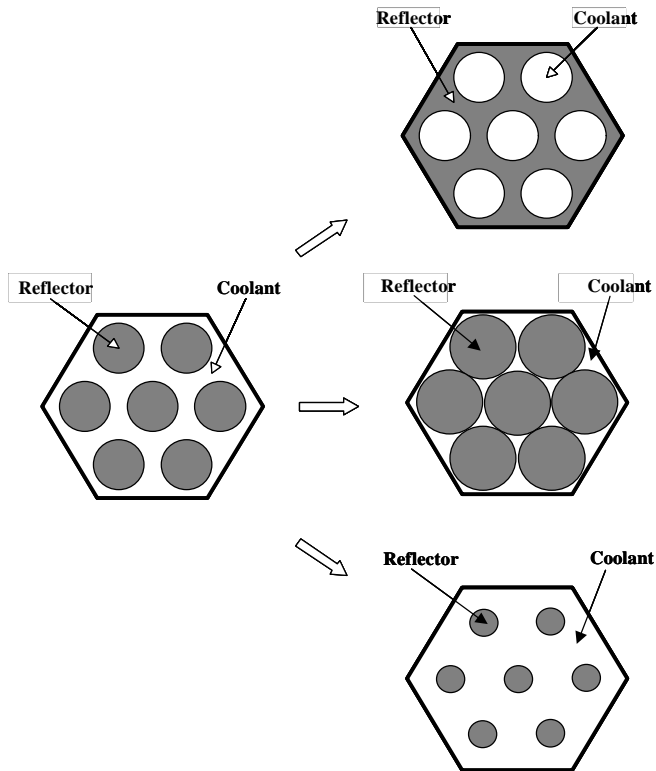


그림 1. 반사체의 기하학적 모형 변경 방법

표 1. Breakeven 노심의 반사체 Pin Size 변경에 따른 핵특성 변화

Days	Original		증가		감소	
	k-eff	Breeding Ratio	k-eff	Breeding Ratio	k-eff	Breeding Ratio
0.00	1.01102	1.05665	1.01088	1.05938	1.01184	1.04023
116.25	1.00862	1.05514	1.00852	1.05781	1.00921	1.03907
232.50	1.00632	1.05210	1.00625	1.05466	1.00672	1.03671
348.75	1.00410	1.04905	1.00407	1.05150	1.00430	1.03431
465.00	1.00194	1.04590	1.00194	1.04834	1.00195	1.03186

표 2. Na-cooled TRU 연소노심의 반사체 Pin Size 변경에 따른 핵특성 변화

Days	Original		증가		감소	
	k-eff	Breeding Ratio	k-eff	Breeding Ratio	k-eff	Breeding Ratio
0.00	1.02753	0.73490	1.02744	0.73618	1.02856	0.72690
77.50	1.02098	0.73722	1.02094	0.73849	1.02176	0.72931
155.00	1.01453	0.74180	1.01453	0.74303	1.01507	0.73407
232.50	1.00819	0.74626	1.00823	0.74747	1.00850	0.73872
310.00	1.00195	0.75061	1.00203	0.75179	1.00204	0.74325

표 3. 최종 결정된 반사체의 설계제원

· ASSEMBLY DATA	
Pins per Assembly	61
Duct Material	HT9
Duct Wall Thickness(mm)	3.70
Duct Outer Flat to Flat(mm)	157.00
Duct Inner Flat to Flat(mm)	149.60
Active Length(cm)	100.00
Reflector Element Length(cm)	346.80
Gap Distance between Ducts(mm)	4.00
Assembly Lattice pitch(mm)	161.00
Assembly Area(cm ²)	224.482
Upper Gas Plenum Length(cm)	132.50
Upper End Plug(cm)	2.54
Lower End Plug and Shielding(cm)	111.76
Overall Assembly Length(cm)	442.17
· PIN DATA	
Pin Material	Lead or Bismuth
Pin Overall Length(cm)	346.80
Pin Diameter(mm)	18.80
Pin Pitch(mm)	18.85
Pin P/D Ratio	1.002
· VOLUME FRACTION(%) (AT 458.1℃)	
Pin Material	67.62
Coolant	15.82
Structure	16.56

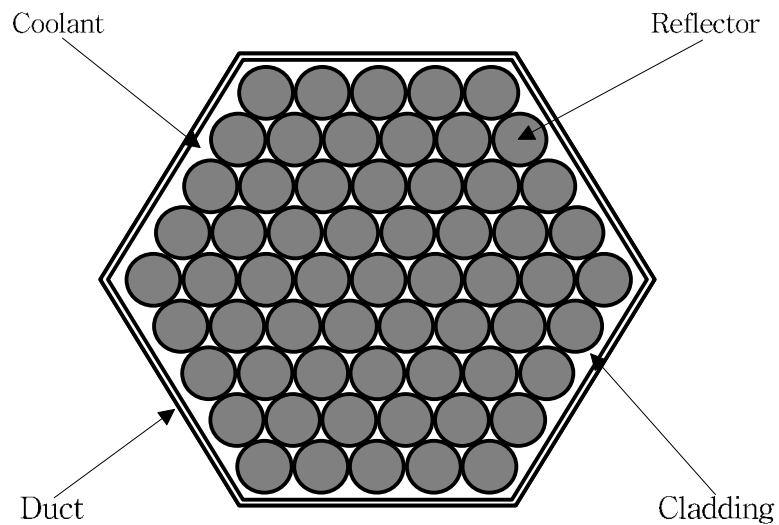


그림 2. 최종 설계 변경된 반사체의 기하학적 구조

표 4. Breakeven 노심 반사체 내부영역의 에너지 그룹별 평균 flux

	Group	Inconel-600	Pb	Bi	Pb 증가율(%)	Bi 증가율(%)
Average Flux	1	1.7373E+17	1.7367E+17	1.7368E+17	-0.03%	-0.03%
	2	4.5360E+18	4.5393E+18	4.4502E+18	0.08%	0.10%
	3	9.6672E+18	9.6773E+18	9.6741E+18	0.14%	0.13%
	4	1.8041E+19	1.8070E+19	1.8075E+19	0.26%	0.27%
	5	1.6688E+19	1.6750E+19	1.6748E+19	0.47%	0.46%
	6	8.9166E+18	8.9245E+18	8.9122E+18	0.10%	-0.05%
	7	5.8903E+18	5.9620E+18	5.5915E+18	1.22%	1.04%
	8	1.2814E+18	1.3225E+18	1.3199E+18	3.20%	3.00%
	9	9.6064E+17	1.1025E+18	1.0971E+18	14.77%	14.20%

표 5. Sodium cooled TRU 연소노심 반사체 내부영역의 에너지 그룹별 평균 flux

	Group	Inconel-600	Pb	Bi	Pb 증가율(%)	Bi 증가율(%)
Average Flux	1	3.4806E+17	3.4971E+17	3.4990E+17	0.47%	0.53%
	2	9.0860E+18	9.1375E+18	9.1489E+18	0.57%	0.69%
	3	1.6722E+19	1.6796E+19	1.6819E+19	0.11%	0.58%
	4	2.5400E+19	2.5578E+19	2.5598E+19	0.70%	0.78%
	5	1.9828E+19	2.0001E+19	2.0002E+19	0.87%	0.88%
	6	8.9498E+18	8.9789E+18	8.9665E+18	0.32%	0.19%
	7	5.2091E+18	5.2888E+18	5.2807E+18	1.53%	1.37%
	8	1.0217E+18	1.0721E+18	1.0745E+18	4.93%	5.16%
	9	5.6310E+17	6.8006E+17	6.8725E+17	17.20%	22.05%

표 6. Pb-Bi cooled TRU 연소노심 반사체 내부영역의 에너지 그룹별 평균 flux

	Group	Inconel-600	Pb	Bi	Pb 증가율(%)	Bi 증가율(%)
Average Flux	1	2.7589E+17	2.7666E+17	2.7676E+17	0.28%	0.32%
	2	8.5004E+18	8.5311E+18	8.5388E+18	0.36%	0.45%
	3	2.0965E+19	2.1034E+19	2.1059E+19	0.33%	0.44%
	4	3.1317E+19	3.1489E+19	3.1504E+19	0.55%	0.59%
	5	2.1727E+19	2.1863E+19	2.1862E+19	6.24%	6.20%
	6	9.3916E+18	9.3913E+18	9.3776E+18	-0.003%	-1.04%
	7	5.0632E+18	5.1259E+18	5.1174E+18	1.24%	1.07%
	8	9.0319E+17	9.8235E+17	9.8548E+17	5.61%	5.94%
	9	2.7368E+17	3.7720E+17	3.8468E+17	37.83%	39.56%

표 7. Breakeven 노심의 유효증배계수 및 증식비 변화

Days	Inconel		Pb		Bi	
	k-eff	Breeding Ratio	k-eff	Breeding Ratio	k-eff	Breeding Ratio
0.00	1.011027	1.056650	1.011437	1.074170	1.011508	1.072650
116.25	1.008627	1.055140	1.008873	1.073210	1.008935	1.071710
232.50	1.006325	1.052100	1.006461	1.071170	1.006515	1.069710
348.75	1.004104	1.049050	1.004179	1.068970	1.004225	1.067550
465.00	1.001947	1.045900	1.002009	1.066630	1.002047	1.065250

표 8. Breakeven 노심의 주요 노심 설계인자

	Inconel	Pb	Bi
Burnup Reactivity Swing Over Cycle	896.40 pcm 0.90 % $\Delta\phi$	930.22 pcm 0.93 % $\Delta\phi$	933.42 pcm 0.93 % $\Delta\phi$
Average Breeding Ration Over Cycle	1.05057	1.07000	1.06855
Maximum Power Density Over Cycle	342.91 W/cm ³	309.84 W/cm ³	309.83 W/cm ³
Enrichment Modification Factor	1.20	1.11	1.12

표 9. Breakeven 노심의 냉각재 기화계수 변화

Inconel			Pb			Bi		
BOEC	not void	1.011027	BOEC	not void	1.011437	BOEC	not void	1.011508
	void	1.029428		void	1.031863		void	1.034261
EOEC	not void	1.001947	EOEC	not void	1.002009	EOEC	not void	1.002047
	void	1.018273		void	1.021934		void	1.023518

표 10. Sodium cooled TRU 연소노심의 유효증배계수 및 증식비 변화

Days	Inconel		Pb		Bi	
	k-eff	Breeding Ratio	k-eff	Breeding Ratio	k-eff	Breeding Ratio
0.00	1.027536	0.734902	1.027725	0.732420	1.027802	0.731719
77.50	1.020987	0.737223	1.021119	0.734763	1.021187	0.734065
155.00	1.014537	0.741800	1.014611	0.739384	1.014670	0.738695
232.50	1.008199	0.746265	1.008217	0.743892	1.008268	0.743211
310.00	1.001959	0.750614	1.001923	0.748281	1.001965	0.747609

표 11. Sodium cooled TRU 연소노심 주요 노심 설계인자

	Inconel	Pb	Bi
Burnup Reactivity Swing Over Cycle	2484.29 pcm 2.48 % $\Delta\phi$	2505.85 pcm 2.51 % $\Delta\phi$	2508.88 pcm 2.51 % $\Delta\phi$
Average Breeding Ration Over Cycle	0.74398	0.74158	0.74090
Maximum Power Density Over Cycle	449.62 W/cm ³	453.21 W/cm ³	453.52 W/cm ³
Enrichment Modification Factor	1.66	1.66	1.66

표 12. Sodium cooled TRU 연소노심의 냉각재 기화계수 변화

Inconel			Pb			Bi		
BOEC	not void	1.021345	BOEC	not void	1.027725	BOEC	not void	1.027802
	void	1.038879		void	1.042618		void	1.044214
EOEC	not void	1.001308	EOEC	not void	1.001923	EOEC	not void	1.001965
	void	1.019136		void	1.020641		void	1.021392

표 13. Pb-Bi cooled TRU 연소노심의 유효증배계수 및 증식비 변화

Days	Inconel		Pb		Bi	
	k-eff	Breeding Ratio	k-eff	Breeding Ratio	k-eff	Breeding Ratio
0.00	1.020467	0.762367	1.020527	0.760192	1.020575	0.759487
77.50	1.015796	0.764275	1.015830	0.762114	1.015871	0.761415
155.00	1.011153	0.768024	1.011163	0.765888	1.011196	0.765203
232.50	1.006557	0.771660	1.006541	0.769551	1.006568	0.768878
310.00	1.001992	0.775186	1.001951	0.773101	1.001971	0.772442

표 14. Pb-Bi cooled TRU 연소노심 주요 노심 설계인자

	Inconel	Pb	Bi
Burnup Reactivity Swing Over Cycle	1806.85 pcm	1816.67 pcm	1819.25 pcm
	1.81 % $\Delta\rho$	1.82 % $\Delta\rho$	1.82 % $\Delta\rho$
Average Breeding Ration Over Cycle	0.76979	0.76766	0.76698
Maximum Power Density Over Cycle	364.58 W/cm ³	365.50 W/cm ³	366.71 W/cm ³
Enrichment Modification Factor	1.28	1.27	1.27

표 15. Pb-Bi cooled TRU 연소노심 냉각재 기화계수 변화

Inconel			Pb			Bi		
BOEC	not void	1.019802	BOEC	not void	1.020527	BOEC	not void	1.020575
	void	1.019753		void	1.021381		void	1.021423
EOEC	not void	1.001399	EOEC	not void	1.001951	EOEC	not void	1.001971
	void	1.001853		void	1.002248		void	1.002952