

‘2004춘계학술발표회 논문집  
한국원자력학회

300MWe급 고연소도 초장주기 고속로심 개념연구  
A Conceptual Design for a 300MWe High Burnup  
Ultra Long Life Fast Reactor Core

송훈, 김상지, 김영일  
한국원자력연구소  
대전시 유성구 덕진동 150

**요약**

금속연료를 사용하는 300MWe급 초장주기 고속로심에 대한 노심설계인자를 탐색하였다. 초장주기 노심은 원자로 수명기간 동안 재장전이 필요없이 주기초 한번의 장전으로 운전되므로 핵연료 물질의 재처리 및 이동이 없으므로 핵비확산성을 가지는 고속로로서 그 의미를 가진다. 반경방향으로 3개의 농축도 영역으로 이루어진 균질 노심을 구성하였다. 각 영역별 농축도와 핵연료 체적비 변화에 따른 노심 핵특성 변화를 탐색하여 초장주기 노심을 구성하였다. 설계된 노심은 36년의 주기길이를 만족하며 연소도에 따른 반응도 변화는 3.2%Δk/k로 나타났다. 평균 출력밀도를 높힘으로써 노심 평균 연소도를 200MWD/kg까지 증가시킬 수 있었으며 최대 피복관 중성자 조사량을 제외한 다른 노심 핵특성 인자들은 모두 설계목표를 만족하였으며 피복관은 5-7년 주기로 재가공하였다.

**Abstract**

A preliminary study was performed on the design parameters of a ultra long life core(ULLC) using a metallic fuel for a 300MWe liquid metal fast reactor. Once this core is initially loaded, it does not need the external feed of fuel materials over the reactor life time. The core has a radially homogeneous configuration with three different enrichment zones. From the examination of the core performance parameters by varying the core fissile enrichment and fuel volume fraction for each zone, a reference ULLC core has been established. The burnup reactivity swing of the ULLC core has been found to be 3.2%Δk/k during 36 year core life. The core average discharge burnup has been increased up to 200MWD/kg with an enhanced core average power density. Other nuclear performance parameters except the cladding fast neutron fluence satisfy the design goals and the cladding needs to be replaced every 5-7 years.

## 1. 서론

TRU 함유량이 높은 핵연료집합체가 장전되고 배출되는 고속로의 경우 이에 대한 처리문제가 많은 관심을 불러오고 있다. 특히 최근의 국내에서의 핵연료 재처리가 상당한 제약을 받게 됨으로써 이에 대한 대안마련이 시급한 문제이다. 이러한 점에서 대략 30년 이상의 주기길이를 갖는 초장주기 노심(ULLC : Ultra Long Life Core)은 한번의 장전 후 운전수명기간동안 운전되기 때문에 사용후 핵연료 저장과 재장전을 위한 설비가 필요없으며 재장전을 위한 재처리 과정이 필요없기 때문에 최근에 많은 연구가 이루어 지고 있다[1-2].

그러나 현재 연구되고 있는 대부분의 초장주기 노심은 초장주기 노심의 높은 증식비로 인한 높은 연소결손반응도(Burnup Reactivity Swing)를 억제하고 운전기간 중 최대 출력밀도를 낮추기 위해 기존 출력밀도의 1/2 정도의 저출력 밀도 노심으로 구성되어있다. 따라서 일반적인 1000MWe급 노심보다 노심 부피가 3~4배 크고 30년의 핵연료 잔존기간에 비해 노심 평균 및 최대 연소도가 적으므로 경제적인 노심과는 거리가 멀다. 따라서 국내에서는 이러한 핵비확산성 및 경제성을 고려하여 높은 연소도와 30년 이상의 핵연료 잔존기간을 만족하면서 연소결손반응도와 최대 출력밀도를 최소화하는 1000MWe급 초장주기 노심을 설계하여 주기길이 33년을 가진 노심의 가능성을 보인바 있고 [3] 출력에 따른 장주기 노심 가능성을 살펴보기 위하여 500MWe급 고출력 장주기 노심을 설계하여 32년 장주기가 가능하며 필요한 최소연료체적비는 0.5에서 만족함을 보였다[4].

따라서 본 연구는 300MWe급 노심의 장주기 노심가능성을 살펴보기 위해 기존에 설계되어진 1000MWe, 500MWe 노심과 동일한 설계조건 하에서 내부 블랭킷 및 연료 집합체와의 비를 일정하게 유지시킨 상태에서 평균 출력밀도를 1000MWe 노심의 평균 출력밀도  $94.70\text{W}/\text{cm}^3$ 의 10% 오차범위에서 유지시켰다. 일반적인 고속로의 평균 출력밀도를 유지하면서 주기길이와 연소도, 최대 출력밀도, 그리고 연소결손반응도를 설계목표 이내로 유지하는데 중점을 두었다. 핵연료 피복관은 최대 중성자 조사량 한도를 벗어나는 시점에서 교체가 가능한 것으로 가정하고 실제적인 재가공(Direct Refabrication) 계산을 수행하였다.

## 2. 계산 방법

노심 핵계산은 한국원자력연구소에서 고속로심 해석을 위해 사용하고 있는 종합 전산체제인 K-CORE 시스템을 사용하였으며 OECD NEA의 평가핵자료 JEF2.2로부터 NJOY코드의 처리과정을 거쳐 생산된 KAFAX-F22[5] 단면적 라이브러리를 사용하였다.

TRANSX코드[6]를 이용하여 자기차폐보정을 수행하고 KAFAX-F22 단면적 라이브러리로부터 영역별 온도에 해당하는 80군 균정수를 생산하였고, 이를 바탕으로 R-Z모델로 근사된 노심 모델에 대하여 TWODANT코드[7]를 통해 영역별 균중성자속을 계산하였다. 이렇게 계산된 80군 균중성자속을 가중함수로 하여 다시 TRANSX코드로 균축약 과정을 통해 최종적으로 DIF3D/REBUS코드 [8,9]에 사용될 영역별 9군 유효 미시 단면적을 생산하였다.

노심 연소계산은 DIF3D/REBUS 코드를 통해 이루어졌다. 육각주 3차원 모델을 바탕으로 X-Y방향으로는 핵연료집합체를 하나의 노드로 축방향으로는 대략 24개 노드로 계산을 수행하였다. 핵연료 피복관은 최대 중성자 조사량 한도를 벗어나는 시점에서 재가공 과정을 통해 피복관 교체가 가능한 것으로 가정하였기 때문에 이를 통하여 재가공 시 휘발성 핵분열생성물은 제거되고 연료조성이 축방향으로 균질하게 재분배된다고 가정하였다. 따라서 이를 고려하여 krypton, xenon, iodine 원소는 100%,  $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{108}\text{Ru}$  원소는 90%, tellurium, cadmium, ironium 원소는 75% 재가공 과정에서 소멸된다고 가정하고 이를 고려한 미시적핵단면

적을 생산하여 연소계산에 사용하였다.

### 3. 설계 목표

본 연구에서는 U-TRU-Zr의 3원 합금으로 구성된 금속연료를 사용하였으며 경수로 사용후핵연료로부터 재처리된 TRU 연료[10]를 사용하였다. 금속연료는 상대적으로 밀도가 높고 구성물질로 감속물질을 함유하고 있지 않기 때문에 산화물 연료나 탄화물 연료보다 경화된 중성자 스펙트럼을 얻을 수 있다. 따라서 다른 종류의 연료보다 증식특성이 뛰어나고 75% 정도의 희석밀도(Smeard Density)를 채용하였을 때 높은 연소도에서도 연료의 건정성을 유지하는 것으로 알려져 있다. 따라서 오랫동안의 핵연료 잔존기간을 위해 높은 증식비를 필요로 하는 고연소도 초장주기 노심의 연료로 금속연료가 적합하다고 할 수 있다.

본 연구에서 설정한 고연소도 초장주기 노심의 설계목표는 원자로 운전수명은 30년 이상, 핵확산 저항성 향상을 위해 운전기간중 TRU를 함유하고 있는 핵연료집합체를 원자로 밖으로 배출하지 않는다는 것으로 가정하였다. 또한 장주기노심이 가지는 단점인 저출력 노심에서 벗어나 노심 평균 연소도 200MWD/kg 이상을 만족하는 고연소 노심을 구성하였다. 연소도에 따른 연소결손반응도는 4%  $\Delta k/k$ , 최대 출력밀도는 400W/cm<sup>3</sup> 이하를 만족한다. 노심 평균 출력밀도는 90W/cm<sup>3</sup> 이상으로 설정하였고 핵연료 체적비는 0.55 이하를 유지하는 것으로 하였다.

위에서 200MWD/kg 이상의 연소도는 기존의 고속로에 적용되어 왔던 연소도 기준을 넘어서는 양으로서 현재까지는 금속연료의 경우 최대 국부 연소도가 200MWD/kg인 연소도까지 핵연료 건정성이 유지된다고 알려져 있다. 핵연료 피복관은 최대 중성자 조사량 한도를 벗어나는 시점에서 피복관 교체가 가능한 것으로 하였다. 이전에 연구되었던 초장주기 노심들이 대체적으로 저출력 노심으로서 50W/cm<sup>3</sup> 정도의 노심 평균 출력밀도를 갖는 것에 비해 본 연구에서는 국내 개발 증식특성노심[11] 정도의 노심 평균 출력밀도를 유지하도록 하였다.

핵연료집합체에서의 유로 확보와 피복관 및 집합체 덕트가 차지하는 체적비를 고려하여 핵연료 체적비에 대한 제한을 두었다. 노심설계의 참조노심은 노심 길이는 120cm 축방향 블랭킷 길이는 각각 35cm로 설정하였다. 출력밀도는 1000MWe 노심의 출력밀도를 기준으로 하였고 내부 블랭킷과 핵연료집합체의 체적비를 출력에 비례하여 일정하게 유지시켰다.

### 4. 참조노심 설정 및 노심설계인자 탐색

기 설계된 1000MWe 노심을 기준으로 참조노심을 선정하였다. 1000MWe 노심에 대한 계산결과에 따르면 1000MWe 노심의 평균출력밀도가 94.70 W/cm<sup>3</sup>이므로 10%오차범위에서 모델을 선정하여 예비계산을 수행하여 이 오차범위에 속하는 모델을 참조노심으로 선정하였다.

먼저 그림 1에서 보인 모델 f1에 대한 계산을 수행한 결과 평균출력밀도는 87.42 W/cm<sup>3</sup>으로 94.70 W/cm<sup>3</sup>과는 약 7.3 W/cm<sup>3</sup> 차이를 보이며 10% 오차범위를 만족하였다. 모델 f1에 대하여 장주기 노심 가능성을 보기 위하여 노심 평균 농축도를 16%으로 고정시킨 후 계산을 수행한 결과 그림 2에서 보는 바와 같이 평균농축도 16%인 경우 연료체적비 0.53 이상에서는 30년 주기길이 확보하였다. 그러나 초기의 높은 유효증배계수로 인한 연소결손도 증가(~6% 이상)로 탐색조건인 연소결손도(4% 이하)를 만족시키지 못하였다. 따라서 연소결손도를 감소시키기 위해 노심평균농축도를 15%로 감소시킨 후 다음 핵연료 체적비를 0.5에서 0.55까지 변화시켜 유효증배계수 변화를 조사하였다. 계산결과 그림 22에서 보는 바와 같이 연료체적비 0.55 이상에서 30년의 장주기가 가능한 것으로 나타났으

며 낮추어진 평균농축도로 인하여 초기치가 감소하여 연소결손도가 감소 (~5%) 하였다.

모델 f2(그림 4)인 경우에는 그림 5에서 보는 바와 같이 최적 농축도 및 최적 핵연료 체적비 탐색 결과 평균농축 16%인 경우 연료체적비 0.55 이상에서 30년 주기길이를 확보하지 못하였고 평균농축 17%인 경우 연료체적비 0.55 이상에서 30년 주기길이를 확보되었으나 초기의 유효증배계수가 너무 높아 연소결손반응도가 증가 (~7%)하였다. 모델 f3, f4(그림 6, 그림 7)인 경우 그림 8에서 보는 바와 같이 최적 농축도 및 최적 핵연료 체적비 탐색결과 평균농축 17%인 경우 앞서와 마찬가지로 초기치가 너무 높게 나타났다.

그림 9에 노심 평균 TRU 농축도 15%와 핵연료 체적비 0.55를 사용했을때의 노심의 각 영역에서 보이는 출력양상을 나타내었다. 노심의 영역별 농축도가 일정할 때 주기초에서 노심 안쪽에 위치한 노심영역 1에서 가장 큰 출력 분율을 갖는 것으로 나타났다. 노심 외곽에서 보다 노심 내부에서 증식비가 높은 점을 고려할 때 과도한 국부 출력을 방지하고 주기길이를 연장하기 위해서는 노심 최대 출력은 연소에 따라 노심 외곽에서 노심 내부로 이동해 나가는 것이 유리하기 때문에 각 영역에서의 농축도를 달리하여 최소 연소결손반응도를 조사하였다. 앞서의 예비 계산결과 노심설계 가능성을 보인 모델 f1에 대하여 연소결손반응도를 설계기준인 4%이하로 맞추기 위해 영역별 평균농축도를 조절하였다. 노심 안쪽에 위치한 노심영역 1의 농축도를 13.5%에서 15%까지 변화시켜 계산하였다. 노심 바깥쪽의 노심영역 2의 농축도는 노심영역 1에 감소된 농축도를 보상하기 위하여 같은 비율로 증가시켰다. 계산한 결과 그림 10에서 보는 바와 같이 영역 1의 농축도가 낮아짐에 따라 유효증배계수의 하한치도 점점 낮아짐을 알 수 있다. 그림 11은 최소 연소결손반응도를 보이는 농축도를 표시하고 있다. 노심영역 1 농축도가 0.145(14.5%)에서 최소값을 보였으며 연소결손반응도가 3.25%으로 나타나 설계치를 만족하는 결과를 나타내었다. 표 1은 설계목표를 만족하는 주요 설계 변수를 보여준다.

## 5. 초장주기 노심의 핵특성

최종으로 구성된 초장주기 노심의 핵특성 인자들을 표 2와 그림 12에 나타내었다. 36년의 주기길이를 만족하며 연소결손반응도는 3.25%Δk/k로 나타났다. 노심의 증식비는 주기초, 주기중, 주기말에서 각각 1.19, 1.17, 0.99으로 나타났으며 주기말에서 1550.9kg의 Fissile Gain을 얻었다. 전체 노심 평균 연소도는 193.4MWD/kg이며 최대 방출 연소도는 404.3MWD/kg으로 나타났다. 이 값은 일반적인 30년 주기의 초장주기 노심의 평균 연소도 100MWD/kg와 비교되는 양이다. 초기 Fissile 장전량은 대략 2.5톤으로 나타났다. 수명 기간 중 최대 출력밀도는 292W/cm<sup>3</sup>으로 설계 목표를 만족하고 있으며 최대 중성자 조사량은 1.6×10<sup>24</sup>n/cm<sup>2</sup>의 값을 보였다.

실제적인 재가공을 위해 최대 중성자 플루언스가 설계한계 4×10<sup>23</sup> n/cm<sup>2</sup>에 도달시 피복관을 교체하여 휘발성 핵분열생성물을 제거시킨 후 축방향 균질 재분배를 실시하여 재 장전을 하는 것으로 가정한 후 실제 계산을 수행하였다. 계산결과 그림 13에서 보는 바와 같이 초기노심 장전 후 7년 후에 피복관을 교체한 후 대략 5-7년의 주기로 재가공이 필요함을 보이고 있으며 5번째 재가공 한 후 반응도가 급격하게 감소하였다. 그러나 축방향 균질화와 휘발성 핵분열생성물의 제거로 인하여 매번 재가공 후 약 0.005 Δk 정도의 반응도가 상승하였다.

## 6. 결론

이전의 1000MWe급, 500MWe급 고연소도 초장주기노심에 이어 출력에 따른 장주기 노심 가능성을 살펴보기 위하여 핵연료 농축도와 체적비에 따른 노심 특성 변화를 탐색하여 36년의 주기길이를 갖는

300MWe급 고연소도 초장주기노심을 구성하였다. 노심의 평균 출력밀도를 높힘으로써 노심의 부피를 줄이고 평균 연소도를 200MWD/kg이상으로 증가시키면서도 연소결손반응도 및 최대 출력밀도를 설계 목표 이내로 만족시킬 수 있었다. 연소결손반응도를 감소시키기 위해 노심영역별 농축도를 변화시켰다. 현재의 설계기준인  $4 \times 10^{23} \text{ n/cm}^2$  을 초과하는  $1.6 \times 10^{24} \text{ n/cm}^2$  조사량 값은 수명기간중 피복관 교체를 통한 재가공 공정으로 극복할 것으로 보이며 실제 계산을 통하여 대략 5-7년의 주기로 재가공이 필요함을 보였고 재가공 시 축방향 균질화와 휘발성 핵분열 생성물 제거로 인한 반응도 상승은 주기길이 증가의 가능성을 보였다.

## 감사의 글

본 연구는 과학기술부가 지원하는 원자력연구개발 중장기과제인 “액체금속로 설계기술 개발” 과제의 일환으로 수행하였다.

## 참고문헌

1. R. A. Doncals, et al., "Nonrefueling Liquid-Metal Fast Breeder Reactor," Trans. Am. Nucl. Soc. 33, 445 (1979).
2. S. Hattori, et al., "Feasibility Study of Ultra Long Life Core with Oxide and Carbide Fuel," Proc. Int. Conf. Fast Breeder Systems: Experience Gained and Path to Economical Generation, Pasco, Washington, 13-17, 8.8-1 (1987).
3. 유재운 외 2인, "1000MWe급 고연소도 초장주기 고속로심 설계를 위한 노심설계인자 탐색," '99 한국원자력학회추계발표회논문집 (1999).
4. 송훈 외 3인, "500MWe급 고연소도 초장주기 고속로심 개념설계," '2003 한국원자력학회추계발표회논문집 (2003).
5. 김정도, 길충섭, "KAFAX-F22: JEF-2.2를 이용한 고속로용 다군 단면적 라이브러리 생산 및 검증," KAERI/TR-842/97, KAERI (1997).
6. R. E. MacFarlane, "TRANSX 2: A Code for Interfacing MATXS Cross-Section Libraries to Nuclear Transport Codes," LA-12312-MS, LANL (1993).
7. R. E. Alcouffe, et al., "User's Guide for TWODANT: A Code Package for Two-Dimensional Diffusion-Accelerated Neutron Transport," LA-10049-M, LANL (1990).
8. K. L. Derstine, "DIF3D: A Code to Solve One-, Two-, and Three-Dimensional Finite-Difference Diffusion theory Problems," ANL-82-64, ANL (1984).
9. B. J. Toppel, "A User's Guide for the REBUS-3 Fuel Cycle Analysis Capability," ANL-83-2, ANL (1983).
10. "Fast Plutonium-Burner Reactors: Beginning of Life," Physics of Plutonium Recycling, Vol. IV, pp. 35, OECD/NEA (1995).
11. S. J. Kim, et al., "Development of a 150MWe LMR Conceptual Nuclear Design with Breeding Characteristics," Proc. of the KNS Spring Meeting, Pohang, Korea (May 1999).

표 1. 초장주기 노심(ULLC)의 주요 설계 변수

Power	300MWe/825MWt
Power Density (W/cm <sup>3</sup> )	87
Core Configuration	Radially Homogeneous
Axial Fuel Length (cm)	120
Axial Blanket Length (cm)	35
Assembly Duct Pitch (cm)	21.2
Fuel Type	Metal
Driver Fuel 1, 2	U-TRU-Zr Alloy
Internal Blanket	U-Zr Alloy
Smeared Fuel Density (%TD)	75
Coolant Material	Sodium
Core Structural Material	HT9
Core Average TRU Enrichment (%)	15
Core TRU Enrichment (%)	
Internal Blanket	0.2
Driver Fuel 1	14.5
Driver Fuel 2	15.5
Volume Fraction	
Fuel	0.55
Structure	0.22
Coolant	0.23

표 2. 주요 노심 핵특성 인자

Cycle Length (yr)	36
Burnup Reactivity Swing (% $\Delta k/k$ )	3.25
Breeding Ratio(BOL/MOL/EOL)	1.19/1.17/0.99
Max. Power Density (BOL/EOL, W/cm <sup>3</sup> )	292/228
Average Burnup (MWD/kg)	
Core Average	193.4
Internal Blanket	195.0
Driver Fuel 1	224.7
Driver Fuel 2	156.4
Peak Burnup (MWD/kg)	
Assembly Peak Burnup	241.5
Peak Discharge Burnup	404.3
Max. Fast Fluence (n/cm <sup>2</sup> )	1.5767E+24

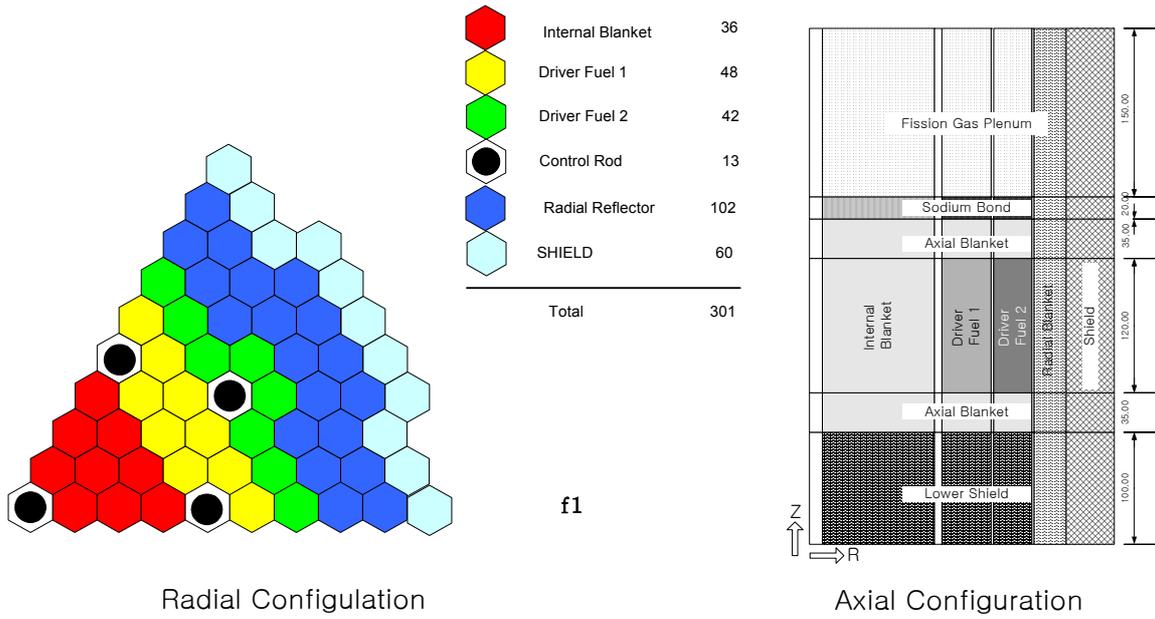


그림 1. 참조 노심의 반경방향 및 축방향 Layout

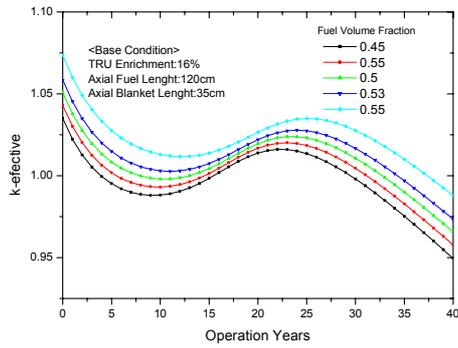


그림 2. 핵연료 체적비 변화에 따른 반응도 변화(f1 모델, 평균농축도 16%)

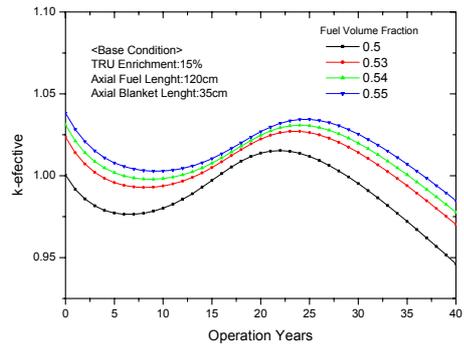


그림 3. 핵연료 체적비 변화에 따른 반응도 변화(f1 모델, 평균농축도 15%)

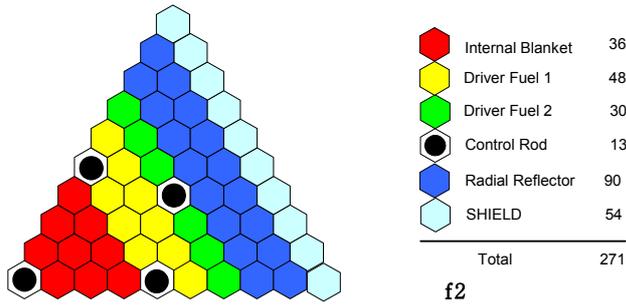


그림 4. 300MWe 노심(f2 모델)

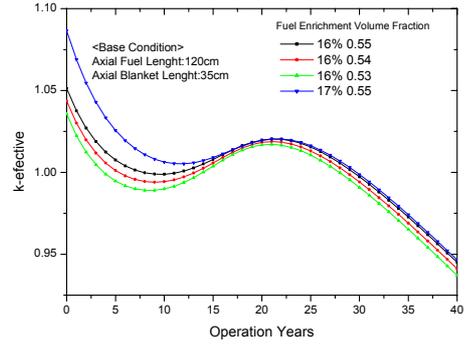


그림 5. 핵연료 체적비 변화에 따른 반응도 변화(f2 모델, 평균농축도 15%, 17%)

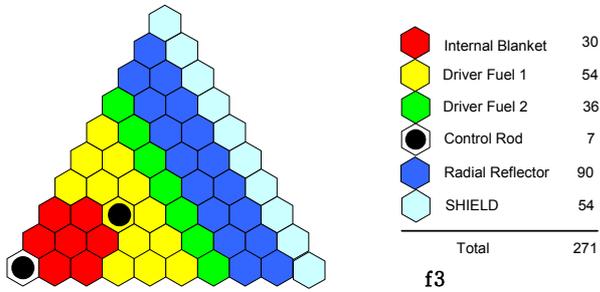


그림 6. 300MWe 노심(f3 모델)

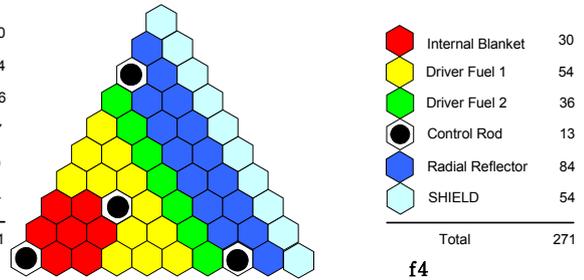


그림 7. 300MWe 노심(f4 모델)

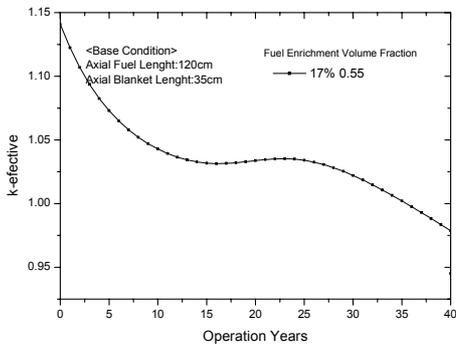


그림 8. 반응도 변화(f4 모델)

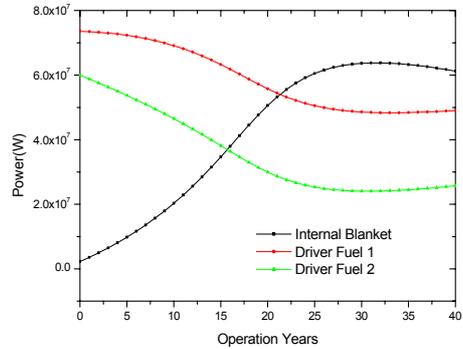


그림 9. 15% 농축도와 핵연료 체적비 0.55에서의 각 영역별 출력분율

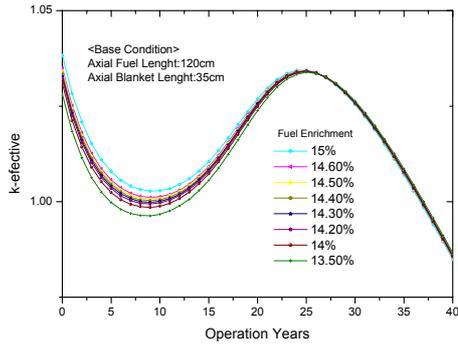


그림 10. 영역별 평균농축도 조절

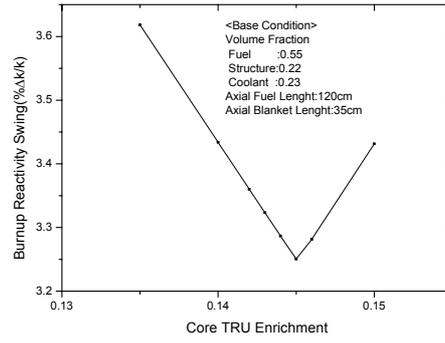


그림 11. 연소결손반응도 결과

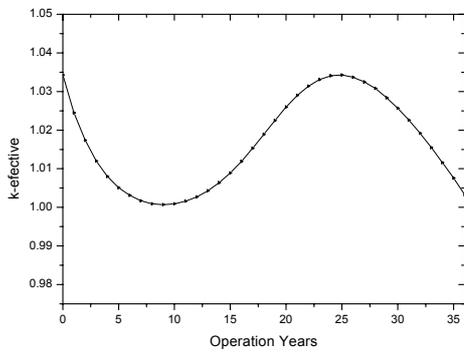


그림 12. 초장주기 노심의 반응도 변화

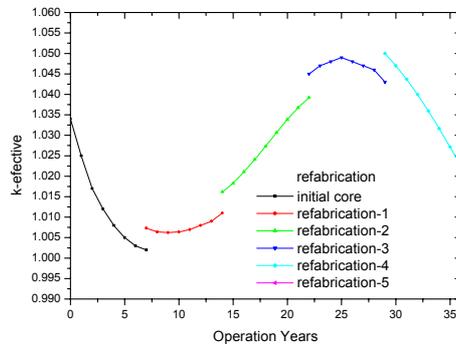


그림 13. Direct Refabrication 계산결과