

'99추계 학술발표회 논문집
한국원자력학회

1000MWe급 고연소도 초장주기 고속로심 설계를 위한 노심설계인자 탐색
Core Design Parameter Survey for a 1000MWe High Burnup
Ultra Long Life Fast Reactor Core Design

유재운, 김상지, 김영진
한국원자력연구소
대전시 유성구 덕진동 150

요약

금속연료를 사용하는 1000MWe급 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 4개의 농축도 영역으로 이루어진 균질 노심을 구성하였으며 일반적인 1000MWe급 고속로심의 노심 부피를 갖도록 하였다. 각 영역별 농축도와 핵연료 체적비 변화에 따른 노심 핵특성 변화를 탐색하여 초장주기 노심을 구성하였다. 설계된 노심의 연소도에 따른 반응도 변화는 33년의 주기길이동안 $2.6\% \Delta k/k$ 로 나타났으며 반응도 제어 요건을 만족하고 있다. 평균 출력밀도를 높힘으로써 노심 평균 연소도를 200MWD/kg까지 증가 시킬 수 있었으며 이 값은 다른 초장주기 노심에 대한 결과에 비해 상당히 큰 값이다. 피복관 최대 중성자 플루언스를 제외한 다른 노심 핵특성 인자들도 설계목표를 만족하였다.

Abstract

An extensive parametric study was performed on the design parameters of a ultra long life core(ULLC) using metallic fuel for 1000MWe liquid metal fast reactor. Once this core is initially loaded, it does not need fuel reloading over the reactor life time. The core has a radially homogeneous configuration with four different enrichment zones and have the core volume comparable to that of a typical 1000MWe core. From the examination of the core performance parameters by varying the core fissile enrichment and fuel volume fraction for each region, a reference ULLC core has been established. The burnup reactivity swing of the ULLC core has been found to be $2.6\% \Delta k/k$ during 33 year core life, which is small enough to satisfy the control requirement. The core average discharge burnup has been increased up to 200MWD/kg with an enhanced core average power density. This value is much larger than that of other ULLC core designs. Other nuclear performance parameters except for cladding fast neutron fluence satisfy the design goals.

1. 서론

상업용 고속로의 경제성을 향상 시키기 위해 소형로 노심설계 및 모듈화 설계 노력들이 이루어져 왔다. 이와 함께 핵연료 잔존기간을 늘이고 높은 연소도를 실현하여 핵연료 이용률을 향상시키고자 하는 노력들이 이루어져왔다. 또한, 고속로의 경우 플루토늄 함유량이 높은 핵연료집합체가 장전되고 배출되기 때문에 핵비확산성(Proliferation Resistant)에 대한 국제적 관심이 높다. 특히, 현재 국내에서 핵연료 재처리가 상당히 많이 제약되고 있다는 점을 고려할 때 고속로 노심설계에서 핵비확산성은 중요한 설계요건중 하나라고 할 수 있다.

대략 30년 이상의 주기길이를 갖는 초장주기 노심(ULLC : Ultra Long Life Core)은 이러한 면에서 많은 경제적 이점과 핵비확산성을 갖고 있다. 초장주기 노심은 한번의 장전후 운전수명기간동안 운전되기 때문에 사용후핵연료 저장과 재장전을 위한 설비가 필요없으며 재장전을 위한 재처리 과정이 필요없기 때문에 초기 건설 비용과 재처리 비용을 절감할 수 있다. 또한 30년 이상의 핵연료 잔존기간과 높은 연소도를 실현함으로써 핵연료 이용율을 크게 향상시킬 수 있다.

핵연료 재처리 시설을 운용할 수 없는 국내 현실을 고려할 때 보통 1년내지는 3년주기로 이루어지는 기존 고속로의 재처리 과정에 비하여 Once-Through 방식의 초장주기 노심은 초기 장전되는 플루토늄의 재처리만이 필요할 뿐 운전중 더 이상의 재처리가 필요없다. 따라서 운전기간중 플루토늄을 함유하고 있는 핵연료집합체를 원자로 밖으로 빼내지 않기 때문에 핵비확산성이 높다.

이러한 초장주기 노심은 1979년 Doncals[1]에 의해 제안되었고 산화물 연료와 탄화물 연료[2]에 대해 그 실현가능성이 입증되었다. 또한 Fertile 연료만을 재장전하는 Partial Refuelling 초장주기 노심 설계와 APC(Asymmetric Parfait Core) 개념을 도입한 초장주기 노심[3]이 개발되었다. 금속 연료에 대해서도 300MWe급 노심[4]에 대해 구형 및 실린더형 근사 모델을 통한 예비설계가 이루어졌다.

이들 노심들은 초장주기 노심의 높은 증식비로 인한 높은 연소 결손 반응도(Burnup Reactivity Swing)를 억제하고 운전기간중 최대 출력밀도를 낮추기 위해 기존 출력밀도의 1/2 정도의 저출력밀도 노심으로 구성되어있다. 따라서 일반적인 1000MWe급 노심보다 노심 부피가 3~4배 크고 30년의 핵연료 잔존기간에 비해 노심 평균 및 최대 연소도가 작으므로 경제적인 노심과는 거리가 멀다.

Once-Through 방식의 초장주기 노심 설계에서의 관건은 높은 연소도와 30년 이상의 핵연료 잔존기간을 만족하면서 연소 결손 반응도와 최대 출력밀도를 최소화하는 것이다. 본 연구는 일반적인 1000MWe급 고속로의 평균 출력 밀도를 유지하면서 주기길이와 연소도, 최대 출력 밀도, 그리고 연소 결손 반응도를 설계목표 이내로 유지하는데 중점을 두었다.

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 군정수를 생산하였고, 이를 바탕으로 R-2모델로 근사된 노심 모델에 대하여 TWODANT코드[7]를 통해 영역별 군중성자속을 계산하였다. 이렇게 계산된 80군 군중성자속을 가중함수로 하여 다시 TRANSX코드로 군축약 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.

3. 설계 목표

본 연구에서는 U-Pu-Zr의 3원 합금으로 구성된 금속연료를 사용하였으며 경수로 사용후핵연료로부터 재처리된 플루토늄 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 다음과 같다.

- 원자로 운전수명은 30년 이상이어야 한다.
- 운전기간중 플루토늄을 함유하고 있는 핵연료집합체를 원자로 밖으로 배출하지 않는다.
- 노심 평균 연소도는 200MWD/kg이상이어야 한다.
- 연소도에 따른 연소결손 반응도는 4% Δk/k이하이어야 한다.
- 최대 출력밀도는 400W/cm³이하이어야 한다.
- 노심 평균 출력밀도는 90W/cm³이상이어야 한다.
- 핵연료 체적비는 0.55이하이어야 한다.

위에서 200MWD/kg이상의 연소도는 기존의 고속로에 적용되어 왔던 연소도 기준을 넘어서는 양으로서 현재까지는 금속연료의 경우 최대 국부 연소도가 200MWD/kg인 연소도까지 핵연료 건전성이 유지된다고 알려져 있다. 핵연료 피복관의 최대 중성자 플루언스 한도는 본 연구의 설계목표에서 제외하였다.

이전에 연구되었던 초장주기 노심들이 대체적으로 저출력 노심으로서 50W/cm³의 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.

4. 참조노심 설정 및 노심설계인자 탐색

노심 설계 인자 탐색에 앞서 참조노심을 설정하였다. 위에서 언급한 바와 같이 국내 개발 증식특성노심 정도의 노심 평균 출력밀도를 유지하였으며 노심 길이는 120cm 축방향 블랑켓 길이는 각각 35cm로 설정하였으며 반경방향으로는 전체 노심을 4개의 영역으로 분할하였다. 노심의 증식비를 높힘으로써 연소결손 반응도를 감소시키고 주기길이를 연장하기 위해 영역 1을 내부 블랑켓으로 사용하였다. 그림 1에 참조 노심의 반경방향 및 축방향 노심구성을 나타내었다.

노심 평균 농축도, 핵연료 체적비, 영역별 농축도에 대해서 설계 인자를 탐색하였다. 초기 장전되는 농축도는 노심의 증식특성을 좌우하는 변수로서 농축도가 크면 클수록 전체적인 전환비(Conversion Ratio)는 작고 주기기간 동안 변화가 크지 않기 때문에 연소에 따른 반응도 변화는 단조 감소하여 주기초와 주기말 반응도 차이가 커지게 된다. 반대로 농축도가 작으면 작을수록 주기초의 전환비는 크고 주기말로 갈수록 단조 감소하는 경향을 보이게 되며 연소도에 따른 반응도 변화는 초기 높은 증식비에 의해 상승하다가 다시 감소하는 모습을 보이게 된다. 그러나 농축도가 좀더 작아질 경우

주기초 높은 증식비에 의해 초기 반응도 상승폭이 크기 때문에 연소 결손 반응도는 커진다. 그러므로 최소의 연소 결손 반응도를 보이는 최적점이 존재한다.

그림 2부터 그림 5까지 노심의 평균 농축도를 변화시켰을 때의 각각의 노심 변수의 변화를 나타내었다. 그림 2에서 보듯이 농축도 변화에 따라서 주기길이와 주기말 임계도 변화는 적은 것으로 나타났다. 그림 5에 보인 바와 같이 주기초 최대 출력밀도는 농축도 변화에 민감하지 않지만 주기말 최대 출력밀도는 농축도가 클수록 작은 것으로 나타났다. 그림 4와 같이 노심 평균 농축도의 변화에 따라 최소 연소 결손 반응도를 보이는 최적점을 탐색한 결과 8.3w/o의 농축도에서 최소 반응도 변화를 보이는 것으로 나타났다.

핵연료 체적비는 주기길이에 밀접히 관여하는 인자로서 30년 이상의 주기길이를 갖는 초장주기 노심의 경우 일반적인 고속로에서 보다 높은 핵연료 체적비가 필요하다. 3년 이내의 주기길이를 갖는 노심이 대체적으로 0.4 이내의 핵연료 체적비를 갖는 것에 비해 초장주기 노심의 경우는 0.4 ~ 0.55 정도의 핵연료 체적비를 갖게 된다.

그림 6~그림 9는 핵연료 체적비의 변화에 따른 노심 특성의 변화를 보여주고 있다. 핵연료 체적비의 증가에 따라서 주기중반까지 반응도는 일정한 비율로 증가하고 있다. 주기중반이후 반응도의 상승을 보이는 것은 높은 핵연료 체적비로 인해 내부 블랑켓을 포함하는 노심 내부 영역의 증식비가 커져서 노심 안쪽에 위치한 핵연료집합체가 노심 출력에 좀더 일찍 기여하기 때문에 나타나는 현상이다. 최소 반응도 변화를 보이는 핵연료 체적비는 0.45정도이나 주기길이 만족 여부와 주기초 가장 낮은 반응도를 보이는 0.5를 기준 핵연료 체적비로 결정하였다.

그림 10에 노심 평균 농축도 8.3w/o와 핵연료 체적비 0.5를 사용했을때의 노심의 각 영역이 보이는 출력양상을 나타내었다. 노심의 영역별 농축도가 일정할 때 주기초에서 영역 3이 각 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 유리하다. 최소 연소 결손 반응도를 보이는 각 영역별 농축도를 결정하기 위하여 그림 11과 같이 각 영역에서의 농축도를 달리 했을 때 반응도 변화를 나타낸다.

일반적으로 반경방향으로 균질한 노심의 경우 농축도가 다른 2개의 영역으로 구성되어 있으며 이때 영역의 농축비에 따라 최소 반응도 변화를 보이는 최적점을 갖는 반면 농축도가 다른 영역이 본 노심의 경우와 같이 3개 이상일 경우 뚜렷한 최적점을 보이지 않는다. 따라서 본 연구에서는 각 영역이 보이는 출력 분율을 기초로 반복 계산에 의해 최소 반응도 변화와 주기길이, 그리고 최대 출력밀도에 대하여 설계목표를 만족하는 노심을 구성하였으며 각 설계 변수를 표 1에 나타내었다.

4. 초장주기 노심의 핵특성

최종으로 구성된 초장주기 노심의 핵특성 인자들을 표 2와 그림 12~13에 나타내었다. 33년의 주기길이를 만족하며 연소 결손 반응도는 2.6% Δk/k로 나타났다. 노심의 증식비는 주기초, 주기중, 주기말에서 각각 1.36, 1.18, 1.03으로 나타났으며 주기말에서 5431.8kg의 Fissile Gain을 얻었다. 전체 노심 평균 연소도는 207.7MWD/kg이며 최대 방출 연소도는 425.4MWD/kg으로 나타났다. 이 값은 앞서 설계된 30년 주기의 초장주기 노심의 평균 연소도 100MWD/kg와 비교되는 양이다. 초기 Fissile 장전량은 대략 6톤으로 나타났으며 이것은 앞서 설계된 초장주기 노심의 장전량 10톤에 비해 상당히 작은 양이다. 수명 기간중 최대 출력밀도는 380W/cm³으로 설계 목표를 만족하고 있으며 최대 중성자 플루언스는 1.8×10²⁴n/cm²의 값을 보였다.

5. 결론

핵연료 농축도와 체적비에 따른 노심 특성 변화를 탐색하여 33년의 주기길이를 갖는 초장주기 노심을 구성하였다. 노심의 평균 출력밀도를 높힘으로써 노심의 부피를 줄이고 평균 연소도를 200MWD/kg 이상으로 증가 시키면서도 연소 결손 반응도 및 최대 출력밀도를 설계 목표 이내로 만족시킬 수 있었다. 주기기간 동안의 Shuffling Scheme에 대한 최적화 노력을 통해 연소 결손 반응도, 최대 출력밀도는 좀더 감소시킬 수 있을것으로 생각되며 중성자 중요도에 따른 최적 배치를 통해 피복관 최대 중성자 플루언스도 감소될 수 있을 것이다. 또한 $1.8 \times 10^{24} \text{n/cm}^2$ 중성자 플루언스 값은 현재의 설계 기준을 훨씬 초과하는 값으로 향후 초장주기 노심을 위한 피복관 재질의 개발이 선행되어야 할 것이다. 본 논문에서 개발된 노심이 기존의 설계 제한치를 만족하기 위해서 수명기간중 한번의 피복관 교체와 같은 재가공 공정을 두는 것도 하나의 해결방법이라고 할 수 있다.

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. M. Kawashima, et al., “Neutronic Feasibility of An LMFBR Super Long-Life Core(SLLC),” Nuclear Engineering and Design, 106, 357-373 (1988).
4. Zaki Su’ud and Hiroshi Sekimoto, “Conceptual Design Study of Ultra Long Life Fast Reactor,” ANP’92 International Conference on Design and Safety of Advanced Nuclear Power Plants, Tokyo Japan, Vol 2, p. P9.7/1-P9.7/6, (1992).
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	1000MWe/2750MWt
Power Density (W/cm ³)	95
Core Configuration	Radially Homogeneous
Axial Fuel Length (cm)	120
Axial Blanket Length (cm)	35
Assembly Duct Pitch (cm)	21.2
Fuel Type	Metal
Zone 2, 3, 4	U-Pu-Zr Alloy
Zone 1	U-Zr Alloy
Smeared Fuel Density (%TD)	75
Coolant Material	Sodium
Core Structural Material	HT9
Core Average Fissile Enrichment (w/o)	7.87
Core Fissile Enrichment (w/o)	
Zone1	0.20
Zone2	6.10
Zone3	8.03
Zone4	9.44
Volume Fraction	
Fuel	0.50
Structure	0.22
Coolant	0.28

표 2. 주요 노심 핵특성 인자

Cycle Length (yr)	33
Fissile Inventory at BOL/EOL (kg)	5919.6/11351.4
Burnup Reactivity Swing (% $\Delta k/k$)	2.58
Breeding Ratio(BOL/MOL/EOL)	1.36/1.18/1.03
Max. Power Density (W/cm ³)	380
Average Burnup (MWD/kg)	
Core Average	207.7
Zone1	122.6
Zone2	259.4
Zone3	260.3
Zone4	189.5
Peak Burnup (MWD/kg)	
Assembly Peak Burnup	275.8
Peak Discharge Burnup	425.4
Max. Fast Fluence (n/cm ²)	1.800E+24

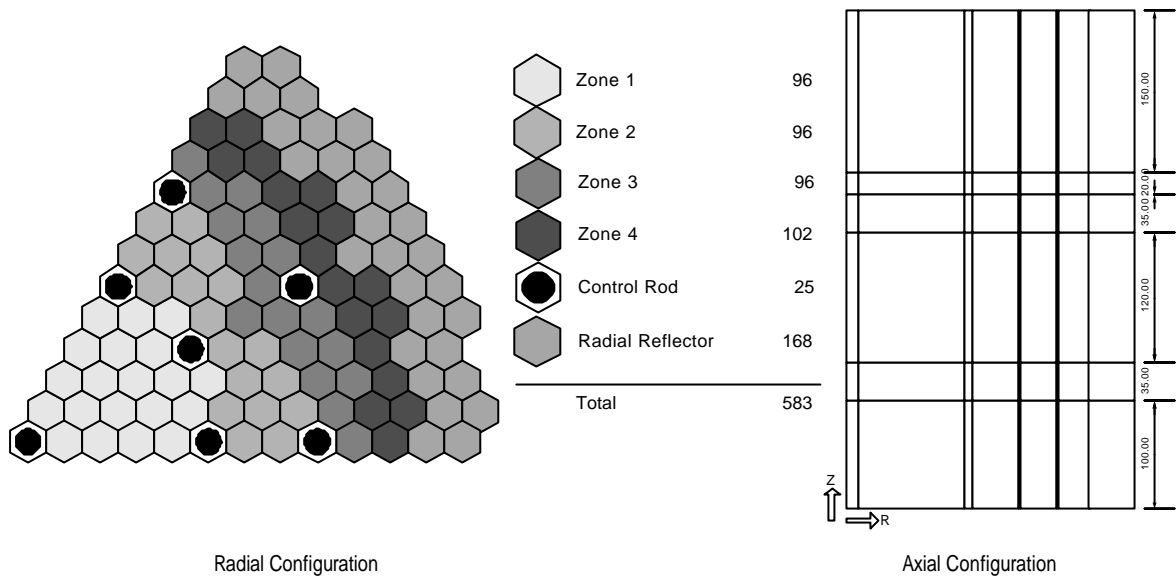


그림 1. 참조 노심의 반경방향 및 축방향 Layout

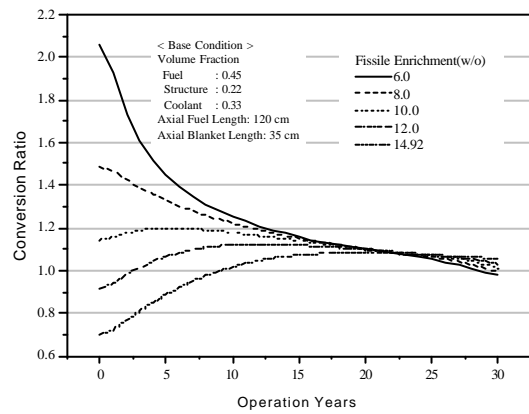
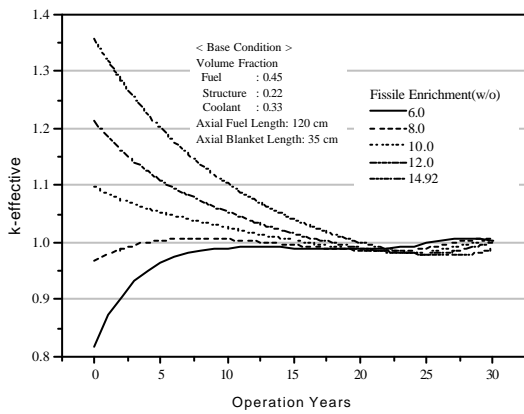


그림 2. 평균 농축도 변화에 따른 반응도 변화

그림 3. 평균 농축도 변화에 따른 전환비 변화

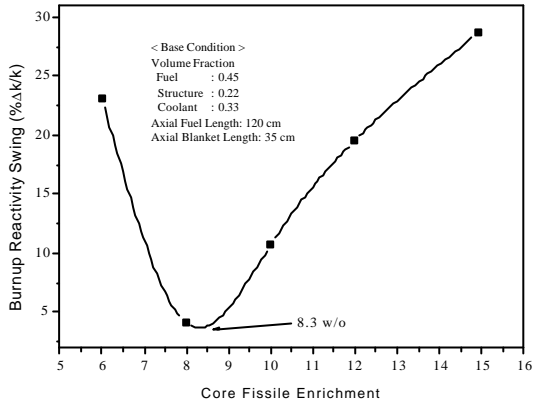


그림 4. 농축도 변화에 따른 Reactivity Swing 변화

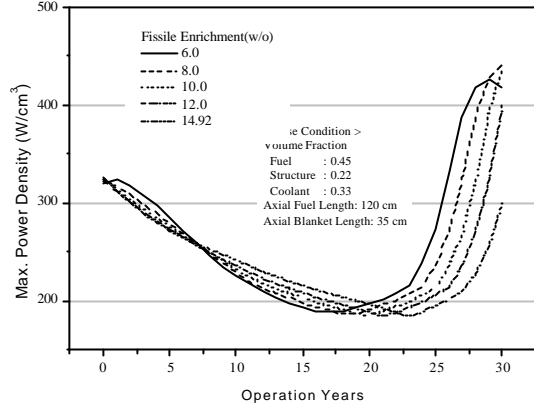


그림 5. 농축도 변화에 따른 최대 출력밀도 변화

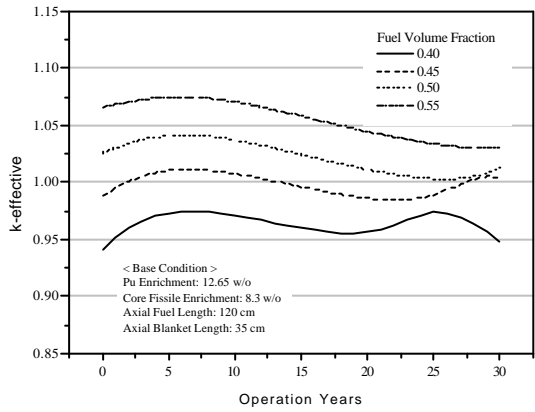


그림 6. 핵연료 체적비 변화에 따른 반응도 변화

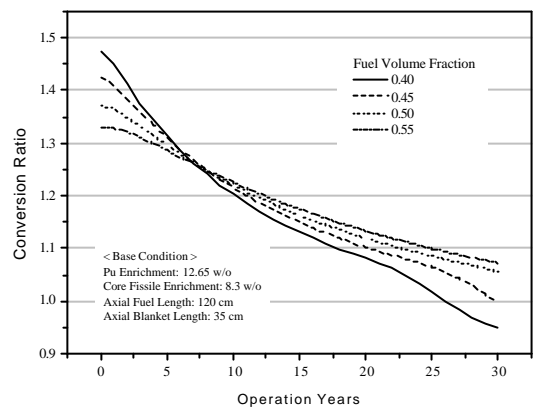


그림 7. 핵연료 체적비 변화에 따른 전환비 변화

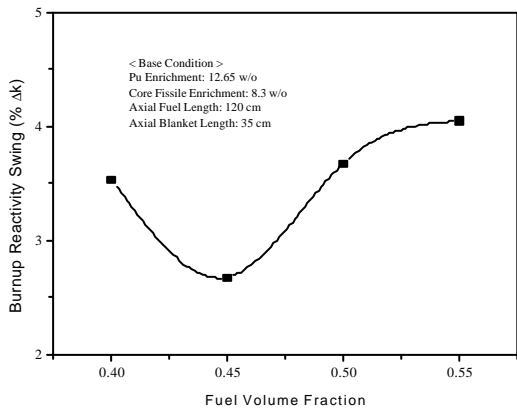


그림 8. 핵연료 체적비 변화에 따른 Reactivity Swing 변화

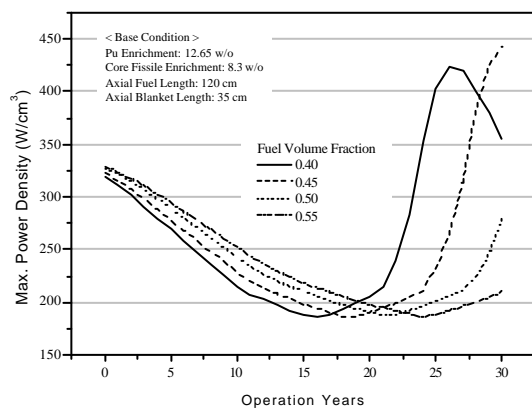


그림 9. 핵연료 체적비 변화에 따른 최대 출력밀도 변화

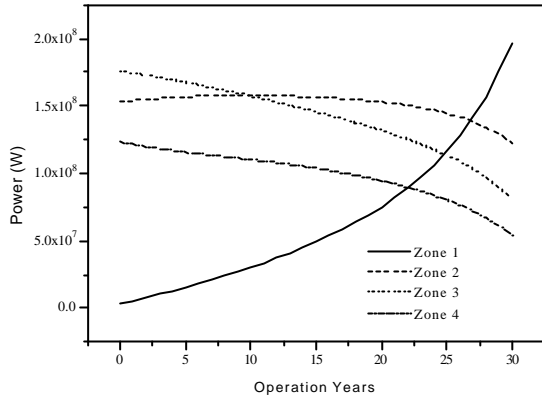


그림 10. 8.3w/o의 농축도와 핵연료 체적비 0.5에서의 각 영역별 출력 분율

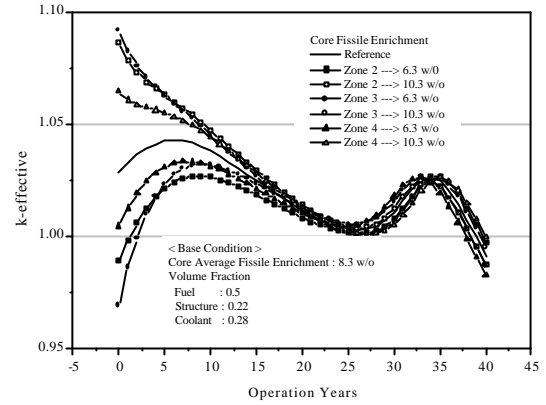


그림 11. 각 노심 영역별 농축도 변화에 따른 반응도 변화

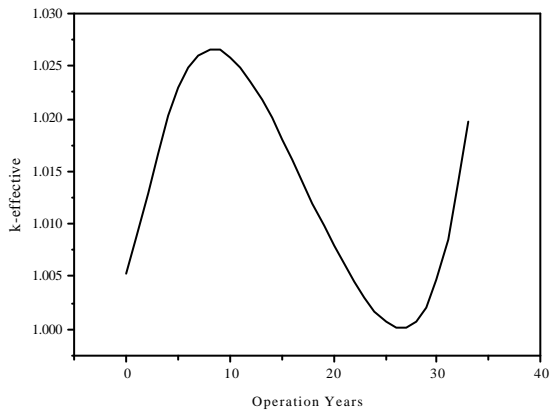


그림 12. 초장주기 노심의 반응도 변화

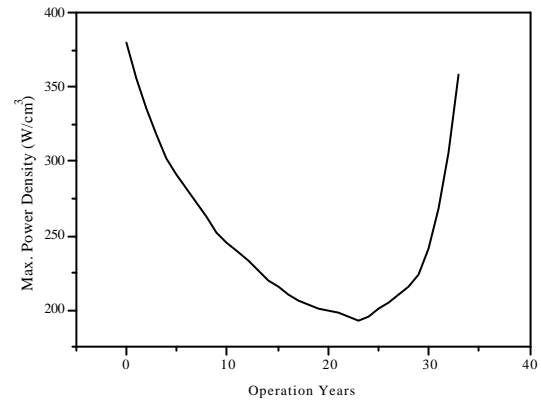


그림 13. 초장주기 노심의 최대 출력밀도 변화