'2000춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

BFS-75-1 임계실험 분석

Analysis of BFS-75-1 Experiment

송훈, 김영인, 김영일, 김영진
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

칼리머 노심설계 개발을 위한 노물리실험계획의 제 2단계로서, 러시아 IPPE의 BFS-1 임계시설을 이용하여 우라늄금속연료노심인 BFS- 75-1 노심을 구성, 벤치마크실험을 수행하여 실험자료를 분석하였다. 비교.분석한 결과, 유효증배계수는 실험치와 0.2% 정도의 오차 범위 내로 예측가능함을 보여주었다. U-235 핵분열율 분포의 경우, 내부노심 영역에서 1%, 외부노심 영역에서는 4% 오차 이내로 실험치와 일치하였으나 U-238 핵분열율 분포의 경우에는 많은 차이를 보였다. 중요 반응률비 계산은 측정기 종류에 따라 1-6 % 오차 이내로, minor actinide와 Pu-239의 반응률비는 1-17% 오차를 보였다. 소듐기화 반응도가인 경우 노심외각 영역에서는 24%의 오차를 보였다. 제어봉 반응도가인 경우 1-7% 정도의 오차를 보였으나 펠렛으로 모의한 trap type 제어봉 반응도가인 경우 실험치와 많은 차이를 보였다. 1차 섭동이론 계산방법을 사용한 샘플반응도가 계산에서는, 핵연료 물질인 U-235, U-238, Pu-239와 제어봉의 주요 구성 물질인 B-10에 대하여 대체로 실험치와 8% 오차 내로 일치하였으나 기타 물질에 대하여서는 많은 차이를 나타내었다. 도플러 효과인 경우 UO_2와 NpO_2 샘플에 대하여 조사하였으나 실험치와 많은 차이를 보였다.

Abstract

As the second stage of critical experiment plan for developing the KALIMER core design, an experimental program named BFS-75-1 was carried out, for which a uranium metal-fueled critical mock-up core was constructed at the BFS-1 facility in IPPE. In this work, the K-CORE system, being used in the KALIMER conceptual core design, has been validated against the BFS-75-1 experiment by comparing the calculated results to the measurements. The validation results show that the effective multiplication factor can be predicted within 0.2% discrepancy. The fission reaction rate distributions were calculated within 4% discrepancy in the core region, except U-238. The calculated values agreed with the measured ones within 6% for principal one and 17% for minor actinide spectral index according to various measurement methods respectively. The calculation for sodium void reactivity worth shows 24% deviation at the core boundary region. Deviations were found ranged from 1% to 7% in most of control rod experiments except the trap type control rod simulated by pellets. In the calculations of small sample reactivity worth, the first order perturbation method resulted in deviations less than 8% for U-235, U-238, Pu-239 and B-10, but much higher deviations for other materials. The calculated value for Doppler effect shows a large deviation from experiment value.

1. 서론

칼리머 노심설계를 개발하기 위한 노물리실험계획의 일환으로 1단계의 우라늄금속연료노심인 BFS-73-1 노심 실험과 분석[1]에 이어 KALIMER(Korea Advanced LIquid MEtal Reactor) 우라늄 금속연료 노심설계의 특성을 파악하기 위하여 러시아의 IPPE와 공동으로 BFS-75-1 임계노심을 구성하여 벤치마크 실험을 수행하였다[2]. 이번 공동연구에 사용된 BFS-75-1 노심은 지난 1단계의 BFS-73-1 노심이 20% 농축 금속연료로 구성된 단순한 노심구조를 갖는 것과 달리 내부노심과 외부노심으로 구성된 2농축영역의 우라늄금속연료 노심구조를 갖는 좀더 복잡한 구조를 갖는다. 실험종목으로는 임계도, 핵분열율 분포, 반응률비, 소듐기화 반응도가, 제어봉 반응도가, 샘플반응도가, 도플러 효과이다.

본 논문에서는 먼저 BFS-75-1 임계노심의 구성 및 실험내용을 간략하게 설명한 다음, 측정파라메터들에 대한 계산적 분석을 위하여 적용한 계산체제 및 계산방법론 등을 기술하였다. 측정파라메터별로 얻어진 계산 결과를 실험치와 비교.분석하였다.

2. BFS-75-1 임계실험

BFS-75-1 임계노심은 2농축 영역의 우라늄금속연료노심의 벤치마크 실험을 위하여 1998년 러시아의 IPPE의 고속임계시설인 BFS-1 시설을 이용하여 구성되었다. 노심은 내부노심(IC:inner core)인 평균 농축도 15.11%의 LEZ(Low Enrichment Zone) 영역과 외부노심(OC:outer core)인 평균 농축도 19.96 %의 HEZ(High Enrichment Zone) 영역으로 구성된 농축도 2영역 우라늄금속연료 노심이다. LEZ 영역은 그림 1에서 보는 바와 같이 91개의 연료봉으로 구성되며 연료봉들 사이에는 연료봉 당 평균 1.604개의 원형 스테인레스강 봉이 삽입되어 있다. HEZ 영역은 162개의 연료봉으로 구성되며 연료봉 당 평균 1.855개의 원형 스테인레스강 봉이 삽입되어 있다. 노심을 둘러싸고 있는 반경방향 블랭킷은 RB-1과 RB-2로 구성되는데 RB-1(Radial Blanket-1)은 U-238 펠렛(pellet)으로 구성된 144개의 블랭킷 연료봉으로 구성되며 RB-2(Radial Blanket-2)는 감손 UO_2 펠렛으로 구성된 522개의 블랭킷 연료봉으로 구성된다. RB-1과 RB-2 영역에 있는 모든 블랭킷 연료봉의 사이는 블랭킷 연료봉 당 평균 2개의 원형 스테인레스강 봉으로 채워져 있다. 스테인레스강 봉을 포함한 격자피치는 51 mm이다. 노심 상하부에는 높이 약 50 cm의 감손 UO_2 펠렛으로 구성된 축방향 블랭킷이 위치해 있다. LEZ 영역의 연료봉은 노심을 구성하는 8개의 노심 단위셀과 2개의 축방향 블랭킷으로 구성된다. LEZ 영역의 노심 단위셀은 1개의 90% 농축도의 우라늄 금속 펠렛, 2개의 농축도 36% 우라늄 금속 펠렛, 4 개의 감손 우라늄 금속 펠렛, 5개의 소듐 펠렛과 4개의 zirconium(Zr) 펠렛으로 구성되어 있다.

이 실험에서 분석대상 항목들에 대하여 적용한 측정방법을 간략히 살펴보면, 우선 핵분열율 분포는 원통형의 소형 fission chamber를 사용하여 측정하였다. 노심 중앙에서의 반응률비의 경우에는 중요반응률비 측정으로 노심의 증식 특성을 판단하는데 중요한 U-238 포획 반응율과 Pu-239 핵분열율의 비(C28/F49)와 노심의 출력과 중성자 스펙트럼을 규정하는데 중요한 Pu-239 핵분열율과 U-235 핵분열율의 비(F49/F25), U-238 핵분열율과 U-235 핵분열율의 비(F28/F25)에 대하여 측정하였고 아울러 여러 가지 minor actinide (Np-237, Am-241, Am-243, Cm-244) 핵분열율과 Pu-239 핵분열율의 비도 측정에 포함시켰다. 사용 측정장치로는 segment fission chamber, absolute fission chamber, small fission chamber 등이 사용되었다. 안전성 측면에서 중요한 소듐기화 반응도가 측정은 내부노심에서 3가지 경우, 외부노심에서 1가지 경우에 대하여 소듐 펠렛에서 소듐만을 제거한 속이 빈 펠렛을 소듐 펠렛으로 대체하여 실시하였다. 제어봉 반응도가 측정은 원자로 노심 중심부분에서의

제어봉 구성물질에 대한 반응도가 변화, 제어봉 위치에 따른 효과, 제어봉 간섭 효과에 대하여 측정하였고 또한 그림 2에서 보는 바와 같이 제어봉에 감속물질을 삽입하여 제어봉 효율을 향상시키는 trap type 제어봉에 대하여서도 조사하였다. 여러 가지 샘플반응도가는 작은 샘플을 노심중앙에 삽입하여 그때 나타나는 반응도 차이를 측정하는 방법을 사용하였다. 도플러 효과 측정에는 샘플이 든 소형 가열용기를 노심중앙에 삽입하여 나타나는 반응도 차이를 측정하는 sample oscillation 방법을 사용하였다.

3. 실험자료 분석을 위한 계산체제 및 방법론

K-CORE시스템 내 핵계산시스템과 액체금속로 핵계산용 단면적 라이브러리 KFS(Korean Fast Set)[3]는 KALIMER 노심 핵설계와 특성 분석에 사용하기 위하여 구축 중에 있는 종합전산체계로서, 본 연구 계산에서는 현재까지 구축된 시스템을 사용하였다.

계산에 사용한 KFS는 기본 평가핵자료파일인 JEF-2.2를 기본으로 NJOY처리시스템을 사용하여 생산한 다군(중성자 80군, 감마 24군) 단면적 라이브러리로서 여러 온도에서의 무한희석 단면적과 Bondarenko 자기차폐인자들을 포함하고 있다. 셀 계산에서는 유효단면적 생성모듈을 이용하여 공명자기차폐와 공간자기차폐를 보정하고, 군축약을 수행하여 BFS-75-1 임계노심을 구성하는 각 물질영역들의 80군과 9군 및 그 외의 다른 군구조의 군정수들을 생산하였다. 군축약을 위한 가중 중성자속은 그림 3에서 보는 바와 같이 80군 군정수를 사용한 거친망사형(coarse meshed) RZ모델에 대한 TWODANT[4]계산을 통하여 구하였다. 중성자속 계산은 9군 단면적세트를 주 단면적으로 사용한 확산이론계산을 기준 계산방법으로 사용하여, 육각주(hex-z) 모델에 대하여 거친 망사형 노달확산근사법을 적용한 DIF-3D 코드[5]를 사용하여 수행하였다.

핵분열율 분포와 노심중앙에서의 반응률비는 DIF-3D 기본 중성자속 계산에서 구하여진 중성자속과 유효단면적 계산 모듈에서 생산된 미시적 핵분열단면적을 사용하여 구하였다. 소듐기화 반응도가 계산에는 소듐이 기화되어 섭동이 발생한 상태와 섭동이 발생하지 않은 상태에 대한 유효단면적 세트를 각각 만든 후, DIF-3D 계산을 통하여 각 경우에 대한 유효증배계수를 직접 구하여 그 차로써 직접 반응도가를 구하는 직접계산방법을 사용하였다. 제어봉 반응도가는 제어봉이 삽입되어 변경된 유효단면적 세트를 이용한 직접계산방법을 사용하였다. 샘플반응도가 계산에는 최근에 개발된 1차 섭동이론계산코드 PERT-K[6]를 사용하였다. 반응도가 실험치와 계산치의 변환인자로 사용되는 β_{eff}는 최근에 개발된 동특성 파라메터 계산코드인 BETA-K[7]를 사용하여 계산하였다. 이 계산에 필요한 지발중성자 방출수(yield number) 및 선행핵종 6 족(family)에 대한 자료 등은 평가핵자료 ENDF-VI의 자료를 사용하였다. 도플러 효과 계산은 직접계산방법을 사용하였으며 샘플 영역이 온도 300 K와 가열온도인 900 K에 해당하는 유효단면적 세트를 각각 만든 후 이를 사용하였다.

4. 실험자료의 계산적 분석

각각의 측정항목에 대하여 K-CORE 시스템과 KFS를 이용하여 계산한 결과를 실험치와 비교하여 그 비교결과를 표와 그림 4 - 8에서 각각 보이고 있다. 이러한 계산 결과는 9 군의 군정수를 사용한, 육각주 모델에 대한 노달확산근사계산을 기준 계산으로 하여 구하였다.

임계노심의 임계도를 나타내는 유효증배계수(k_{eff})는 0.9989로 계산되었다. 실험치인 1.0013과 비교하면 계산치와 실험치의 비인 C/E가 0.9976로 구하여져 오차 0.2%의 좋은 계산결과를 보여주었다. 에너지군 구조

효과인 경우, 군정수의 군 구조가 미세할수록 유효증배계수는 감소하며, 또한 어느 정도 군 구조가 미세하여지면 유효증배계수 크기 변화는 거의 없음을 알 수가 있으며, 그림 4는 이러한 경향을 보여주고 있다.

핵분열율 분포의 경우, U-235와 U-238의 핵분열율 분포 계산 결과를 축방향과 반경방향에 대한 실험치들과 비교한 결과를 표와 그림 5 - 8에서 각각 보이고 있다. 반경방향 분포를 비교하면, U-238 핵분열율 분포는 LEZ 영역에서 실험치 보다 평균적으로 2% 정도 낮게 예측되었으나 HEZ 영역에서는 실험치 보다 평균적으로 12% 정도 낮게 예측되었다. 노심중심으로부터 멀어짐에 따라 반경방향 블랭킷 영역(RB-1, RB-2 영역)에서 평균 12% 정도의 차이를 보이고 있다. U-235 핵분열율 분포의 경우에는 LEZ 영역에서 1%, HEZ 영역에서 4%, 반경방향 블랭킷 영역(RB-1, RB-2 영역)에서 평균 7% 실험치 보다 낮게 예측되었다. 한편, 축방향 분포의 경우, U-238 핵분열율 분포는 LEZ 영역에서 실험치 보다 평균 9% 낮게 예측되었으며 축방향 블랭킷 영역(AB-1)에서 평균 12% 실험치 보다 낮게 예측되었다. U-235 핵분열율 분포는 LEZ 영역에서 1%, 축방향 블랭킷 영역에서 평균 11% 실험치 보다 낮게 예측되었다. 노심중앙에서의 반응률비에 대한 계산 결과는 중요 반응률비인 C28/F49, F49/F25, F28/F25인 경우에는 측정방법에 관계없이 계산치는 대체로 실험치와 잘 일치함을 알 수 있었다. 즉, C28/F25는 1-3% 정도, F49/F25는 1-2%, F28/F25는 4-6%로 나타났다. 그러나 minor actinide 반응률비에 대하여서는 측정방법에 따라 많은 차이를 보였다. 즉, F40/F49는 3-10%, F48/F49는 6-13%, F37/F49는 1-4%, F53/F49는 5-8%, F51/F49는 3%, F64/F49는 4-17%의 범위에서 실험치와 오차를 보였다.

소듐기화 반응도가 계산결과는 실험치가 비교적 작은 중심부분의 소듐기화 반응도가 계산치는 실험치와 비교하여 상당한 차이를 보였다. 그러나 실험치가 비교적 큰 노심외각 영역의 소듐기화 반응도가 실험치는 약 24% 정도의 차이를 보였다. 제어봉 반응도가 계산결과는 제어봉 반응도가 간섭효과의 경우 실험종류에 따라서 실험치와의 오차는 1-6% 정도로 조사되었다. 위치별 제어봉 반응도가 실험의 경우 노심중앙에서 2-3%, 노심외각에서 7%의 오차를 보였다. 펠렛으로 모의한 trap type 제어봉 반응도가 실험인 경우 실험치와 많은 차이를 보였으나 BN-600에서 사용된 실제의 trap type 제어봉 반응도 실험의 경우는 계산치와 10% 정도 차이를 보였다. 샘플반응도가 계산 결과는 노심 핵연료 및 블랭킷을 구성하는 U-235, U-238의 경우는 C/E 값이 ~8% (5% : U-235, 8% : U-238) 내의 오차로 나타났다. 이에 반하여, 이외 기타의 샘플의 경우에는 C/E의 값에서 많은 차이를 보였다. 도플러 효과에 대한 계산 결과는 UO_2 샘플의 경우 C/E가 1.89, NpO_2의 경우 0.43으로 실험치와 많은 차이를 보였다.

5. 요약 및 결론

한·러 공동으로 수행한 BFS-75-1 임계실험의 측정자료를 대상으로 하여 K-CORE 시스템의 계산능력을 검증하기 위하여 계산 결과와의 비교·분석을 수행하였다. 각각의 측정항목에 대한 계산적 분석에서는 육각주 모델을 사용한 노달확산근사계산을 기준 계산방법으로 사용하였다. 계산치(C)와 실험치(E)를 비교.분석한 결과를 비교대상 파라메터별로 종합하면 다음과 같다.

비교.분석 결과, 유효증배계수는 기본 계산 결과 실험치와 비교하여 0.2%의 오차를 보였으며 군정수 에너지군 구조의 영향을 조사한 결과 계산치가 조금 낮게 평가된 것으로 보인다. 추가로 임계도의 비균질 효과 평가가 요구된다. 핵분열율 분포의 경우에는 축방향 U-238의 핵분열율은 실험치에서 상당히 심한 요동을 보이는 반면에 균질 모델에 기초하여 계산된 계산치는 이러한 현상이 나타나지 않았다. 따라서 BFS-75-1 노심의 U-238 핵분열율 분포를 정확히 계산하려면 축방향 비균질성을 모사 할 수 있는 계산기법이 요구된다. 현

재 실험치와의 오차는 노심영역에서 약 10% 정도로 평가되었다. 중요한 반응률비의 경우에는 측정기 종류별로 1-6% 정도, minor actinide와 Pu-239의 반응률비인 경우는 1-17% 오차를 보였다. 실험치가 비교적 큰 노심외각 영역의 소듐기화 반응도가의 경우에는 약 24% 정도의 차이를 보였다. 제어봉 반응도가 간섭효과의 경우 1-6% 정도, 위치별 제어봉 반응도가 실험의 경우 노심중앙에서 2-3%, 노심외각에서 7%의 오차를 보였다. 펠렛으로 모의한 trap type 제어봉 반응도가 실험인 경우 실험치와 많은 차이를 보였으나 실제의 trap type 제어봉을 사용한 실험의 경우는 10% 정도 차이를 보였다. 샘플반응도가 경우에는 핵연료 물질인 U-235, U-238, Pu-239와 제어봉 구성물질인 B-10에 대하여 대체로 C/E가 8% 오차 내로 일치하였으나 기타 물질에 대하여서는 많은 차이를 보였다. UO_2와 NpO_2에 대한 도플러 효과에 대한 계산치는 많은 차이를 보였다.

BFS-75-1 벤치마크 실험은 칼리머 노심설계 개발을 위하여 실시된 제 2단계 실험으로서, 국내 고유의 실험자료를 확보하였다는 데 그 의의가 있다 하겠다. 본 계산치/실험치(C/E) 비교. 분석 자료는 K-CORE 시스템을 검증하고 또한 보완.개발해 나가는데 중요한 자료로 사용될 예정이다. 이번 비교.분석에서 나타난 임계도와 핵분열율 분포 실험에 대한 비균질 효과에 대한 정확한 취급 계산과 소듐기화 반응도가, 제어봉 반응도가 계산 및 샘플반응도가 계산에서 나타난 문제점에 대한 원인 분석을 앞으로 계속 수행할 예정이다.

감사의 글

이 논문은 대한민국 과학기술부에서 시행하는 원자력 중장기 사업의 지원으로 수행되었읍니다.

참고문헌

[1] H. Song, et al, "Evaluation of Core Nuclear Analysis for LMR using Measured Physics Parameters of BFS-73-1 Critical Assembly", Annals of Nuclear Energy, Vol. 27(2000).

[2] I. Matveenko, et al, "Report: Investigations of BFS-75-1 Critical Assembly", IPPE (1999).

[3] 김정도, 길충섭, "KAFAX-F22: JEF-2.2를 이용한 고속로용 다군 단면적 라이브러리 생산 및 검증”, KAERI/TR-842/97, 한국원자력연구소 (1995).

[4] R. E. Alcouffe, et al, "User's Guide for TWODANT: A Code Package for Two-Dimensional, Diffusion-Accelerated, Neutron Transport", LA-10049-M, Los Alamos National Laboratory (Feb. 1990).

[5] R. D. Lawrence, "The DIF-3D Nodal Neutronics Option for Two- and Three-Dimensional Diffusion Theory Calculations in Hexagonal Geometry", ANL-83-1, Argonne National Laboratory (Mar. 1983).

[6] 김택겸 외 2인, “육각형 노심용 섭동이론 코드 개발”, ’98 추계학술발표회 논문집, 한국원자력학회(1988).

[7] 김택겸 외 2인, “육각형 노심용 유효지발중성자 분율 계산 코드 개발”, ’98 추계학술발표회 논문집, 한국원자력학회(1988).

표 1. 측정 파라메터에 대한 계산치/실험치(C/E) 결과

파라메터	계산치(C)	실험치(E)	C/E	비고
유효증배계수(k_{eff})				
- DIF-3D (균질 모델)	0.9989	1.0013	0.9976	기준계산
핵분열율 분포				
- U-235 반경방향				평균값 표기
노심(LEZ)			0.9910±0.0056	
노심(HEZ)			0.9622±0.0050	
블랭킷(RB-1)			1.0182±0.0175	
블랭킷(RB-2)			0.9314±0.1015	
- U-235 축방향				
노심(LEZ)			0.9874±0.008	
블랭킷(AB-1)			0.8935±0.063	
- U-238 반경방향				
노심(LEZ)			0.9809±0.0138	
노심(HEZ)			0.8805±0.0061	
블랭킷(RB-1)			1.0018±0.0378	
블랭킷(RB-2)			0.8247±0.0831	
- U-238 축방향				
노심(LEZ)			0.9055±0.059	
블랭킷(AB-1)			0.8883±0.114	
노심중앙 반응률비				
- C28/F49	0.1193		0.9780	평균값 표기
- F49/F25	1.1080		0.9898	
- F28/F25	0.0339		1.0490	
- F40/F49	0.2728		1.0689	
- F48/F49	0.7080		1.0914	
- F37/F49	0.2423		0.9845	
- F53/F49	0.1529		1.0076	
- F51/F49	0.1944		0.9676	
- F64/F49	0.3139		1.0642	
샘플반응도가 (cent)				
- U-235	0.4130	0.3937±0.0010	1.0491±0.0027	*평균값 표기
- U-238	-0.1046	-0.1136±0.0011	0.9207±0.0089	
- Pu-239	1.2109	1.2041±0.0016	1.0056±0.0013	
- B-10			0.9852*	
- Na-23	-0.0107	0.0192±0.0003	-0.5587±0.0087	
- C-12	0.0040	-0.0245±0.0009	-0.1642±0.0060	
- Am-241(O_2)			1.7059*	
- Np-237(O_2)			1.0812*	
- CH_2	0.2990	0.5286±0.0035	0.5657±0.0037	
- Al-27	-0.0148	-0.0328±0.0015	0.4497±0.0206	

표 1.(계속)

파라메터	계산치(C)	실험치(E)	C/E	비고
제어봉 간섭효과($)				
.2개	0.9551	1.01±0.005	0.9456±0.0047	
.3개	1.4551	1.506±0.007	0.9662±0.0045	
.6개	2.9828	3.057±0.012	0.9757±0.0038	
제어봉 위치효과				
.중심	-1.5943	-1.55±0.03	1.0286±0.0199	
.->	-1.4935	-1.47±0.03	1.0160±0.0207	
.외곽	-0.5552	-0.6±0.02	0.9253±0.0308	
제어봉 물질효과				
.B_4C(natural)	-1.5943	-1.55±0.03	1.0286±0.0199	
.Na+SS	-0.2959	-0.3±0.015	0.9865±0.0493	
.B_4C(80%)	-4.8186	-3.72±0.03	1.2953±0.0104	
.B_4C(natural)+Na	-0.9702	-0.97±0.02	1.0002±0.0206	
.B_4C(natural)+Na+SS	-0.7703	-0.76±0.02	1.0136±0.0267	
제어봉 trap효과(pellet)				
.B_4C	-7.2310	-5.44±0.3	1.3292±0.0733	
.B_4C+폴리에틸렌	-7.8511	-6.44±0.41	1.2191±0.0776	
.B_4C+void	-7.0449	-4.90±0.24	1.4377±0.0704	
제어봉 trap효과(industrial)				
.B_4C+ZrH_2	-5.9467	-5.8±0.3	1.0253±0.053	
.B_4C	-2.9726	-3.1±0.2	0.9589±0.062	
.trap 효과	-2.9741	-2.7	1.1015	
도플러 효과(cent)				
.UO_2	0.0031	-0.0080±0,0031	1.8935±0.7337	
.NpO_2	0.0019	-0.0009±0.0019	0.4316±0.9112	
소듐기화 효과(cent)				
.중심	0.71	-2.15±0.5	-0.3282±0.0763	
.->	2.68	0.87±0.5	3.0755±1.7675	
.->	-0.36	-6.0±0.5	0.0595±0.0050	
.외곽	-35.43	-46.46±1	0.7626±0.0164	

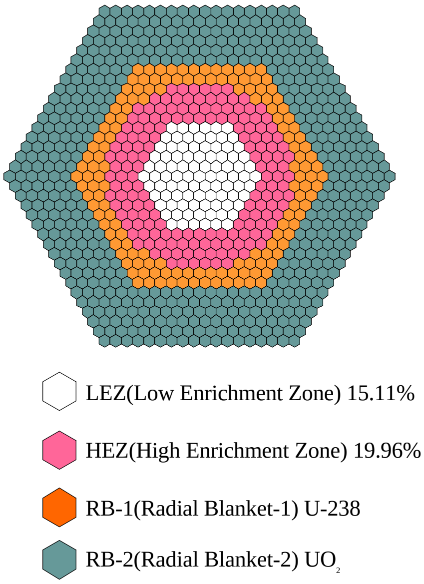


그림 1. BFS-75-1 임계노심 구성도

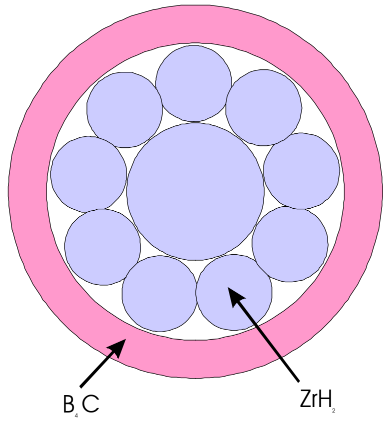
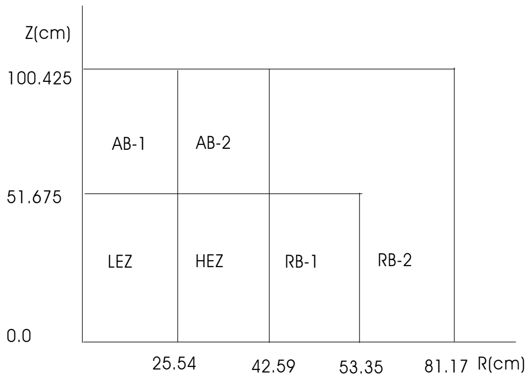
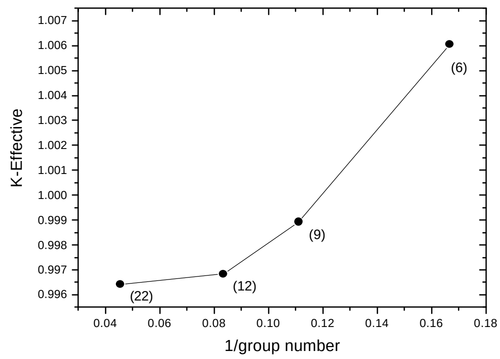


그림 2. Trap type 제어봉 구성



노심 영역(LEZ,HEZ)
블랭킷 영역(RB-1, RB-2, AB-1, AB-2)
그림 3. R-Z 모델(기준모델)



() 군 수
그림 4. 유효증배계수 비교(에너지군 구조 효과)

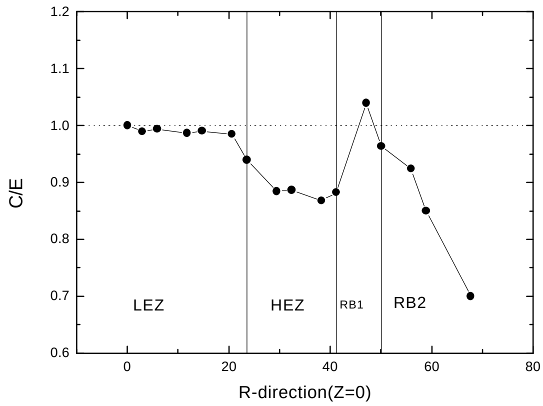


그림 5. U-238 핵분열율 분포(반경방향)

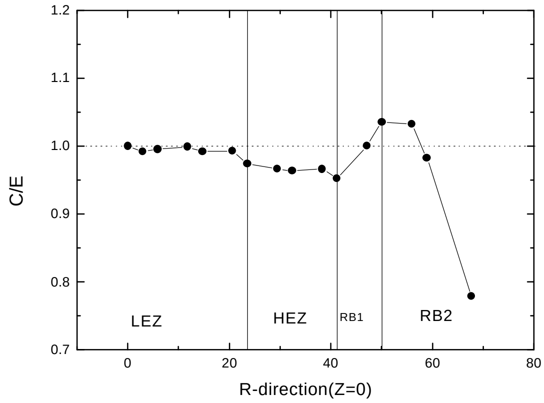


그림 6. U-235 핵분열율 분포(반경방향)

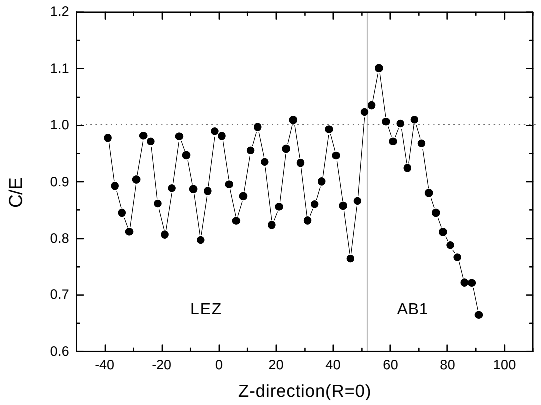


그림 7. U-238 핵분열율 분포(축방향)

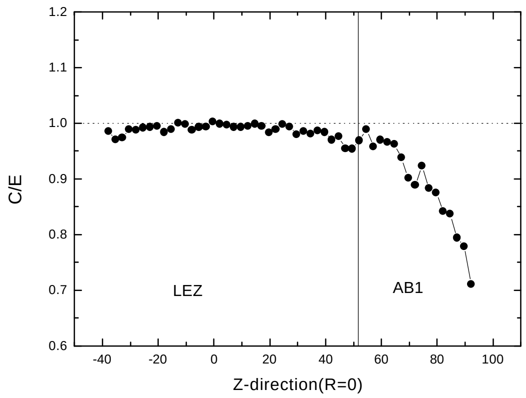


그림 8. U-235 핵분열율 분포(축방향)