



노물리 실험 및 Mock-up 실험

4세대원자로기술개발부

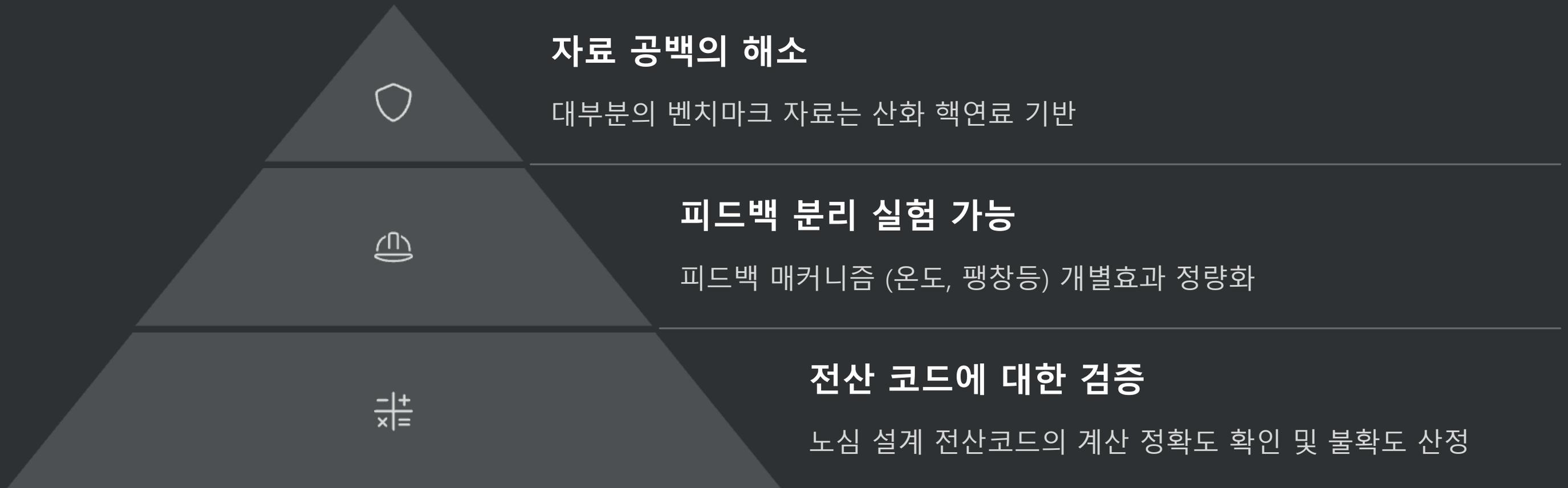
이민재

Contents

- 01 노물리 실험의 필요성
- 02 BFS 실험 시설의 개요
- 03 BFS-76-1A 실험
- 04 BFS-84-1 실험
- 05 결론



노물리 실험의 필요성



노물리 실험에서 측정하는 자료

임계 조건 확인

임계 핵연료 량, 반사체 구성



중성자 물리량 측정

중성자 스펙트럼, 반응률

제어 계수 측정

제어봉가



안전 계수 측정

도플러, 소듐기화, 팽창 반응도가

BFS 시설 개요

BFS(Bol'shoy Fizicheskiy Stand, 대형 물리 스탠드)

러시아 오브닌스크의 A.I. 레이폰스키 물리 및 동력 공학 연구소(IPPE)에 위치

고속로 노물리 실험을 위한 임계 시설 (Critical Facility)

시설 구성

- BFS-1: 중형 임계 실험 장치 (1961년 최초 임계 도달)
- BFS-2: 대형 임계 실험 장치 (1969년 운전 시작)
- 다양한 핵연료 및 구조재 보유

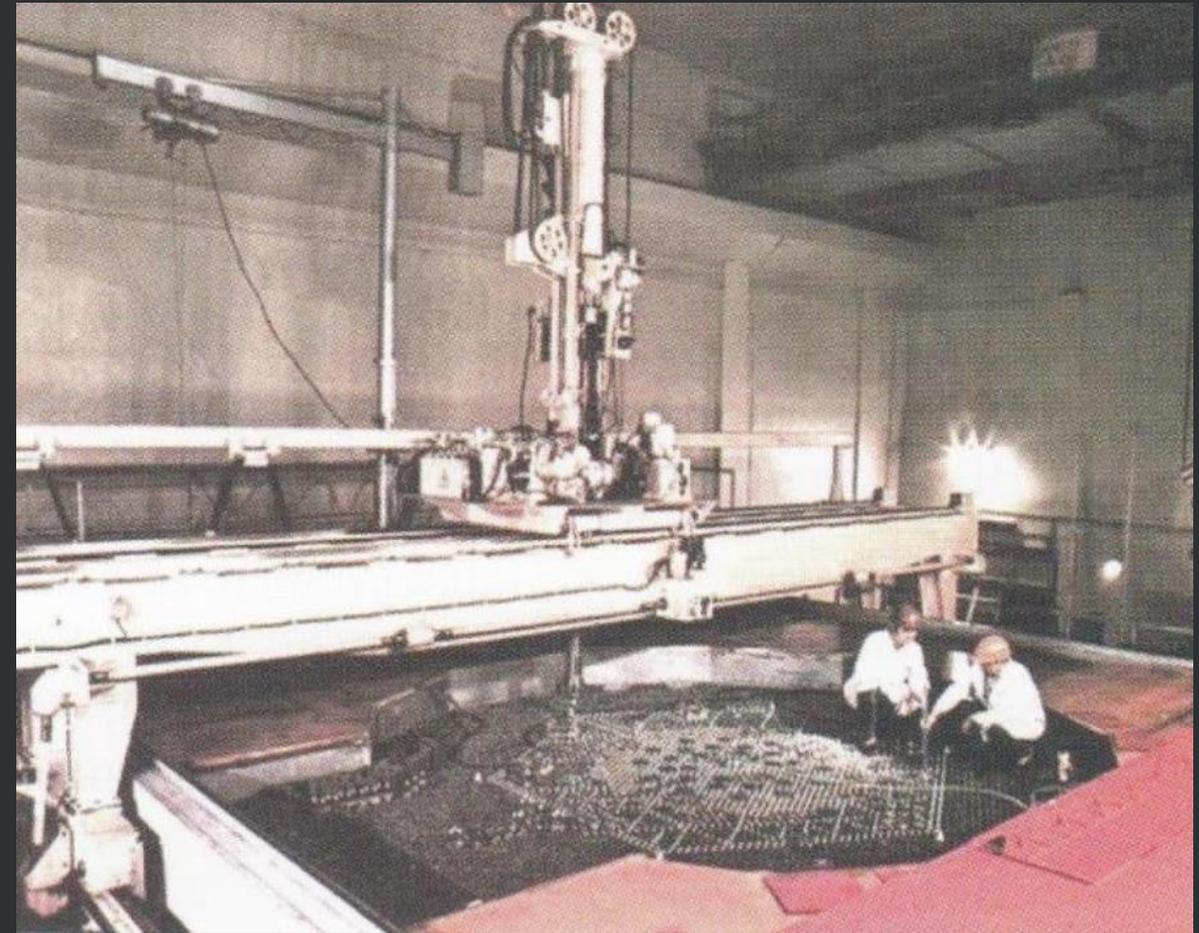
주요 특징

- 모듈식 디스크 어셈블리 구조
- 다양한 노심 구성 가능 (산화/금속 핵연료)
- 정밀한 중성자 스펙트럼 측정
- 국제 공동 연구 플랫폼

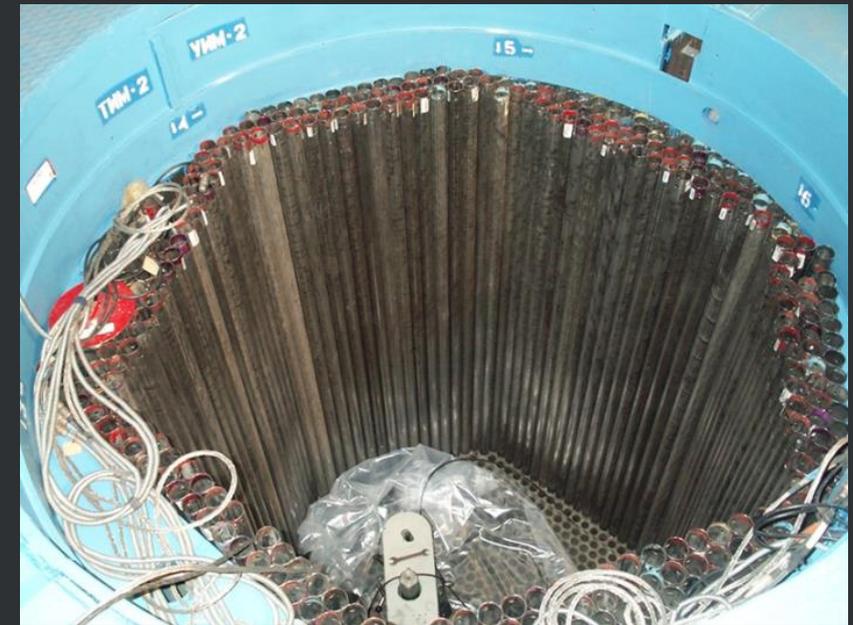
BFS 시설 비교 (BFS-1 VS BFS-2)

시설	BFS-1	BFS-2
직경	약 2m	5 m
튜브 수	~1,500	~10,000
출력	0.2 kW	1 kw
KAERI 보유 실험	BFS-73-1 BFS-75-1 BFS-55-1 BFS-109-2A	BFS-76-1A BFS-84-1 (PGSFR mock-up)

BFS 시설 비교 (BFS-1 VS BFS-2)



BFS-2 시설 사진



BFS-76-1A 실험 진행 과정

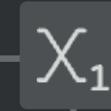
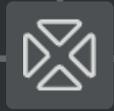
KAERI

대상 노심 선정 &
균질화 모형 제공

실험 모형 확인

독립 계산 &
결과 피드백

최종 결과 확정



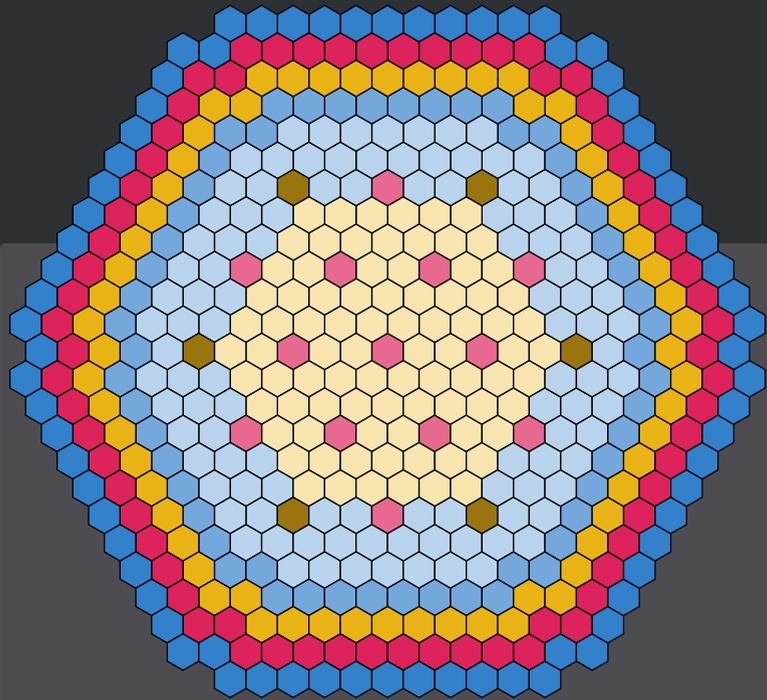
실험 노심 설계 및
예비 계산 수행

실험 수행 &
전산코드 이용 해석

피드백 반영 &
오류 수정

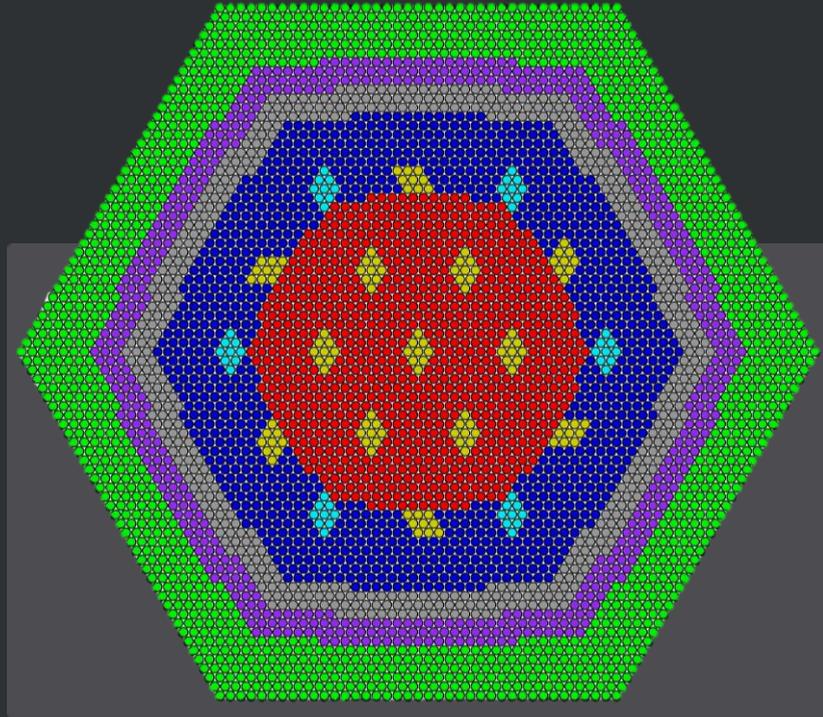
IPPE

BFS-76-1A 실험 노심 설계



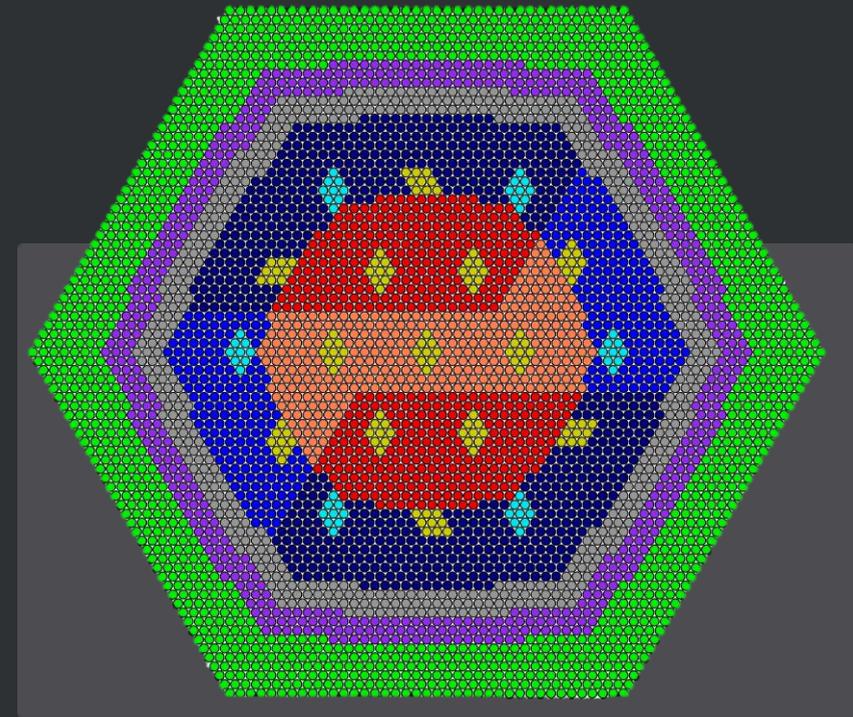
대상 노심 정의

300 MWe TRU burner



실험 노심 설계

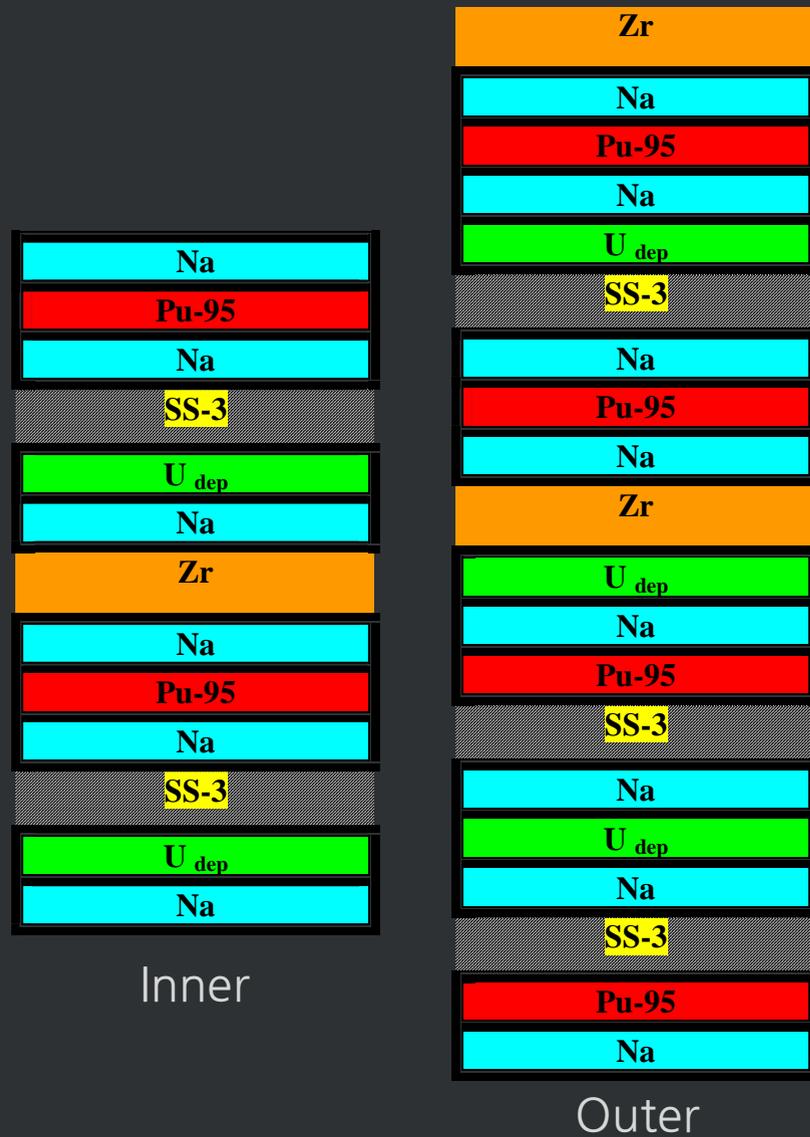
약 1.6 ton 의 Pu 핵연료 포함 노심



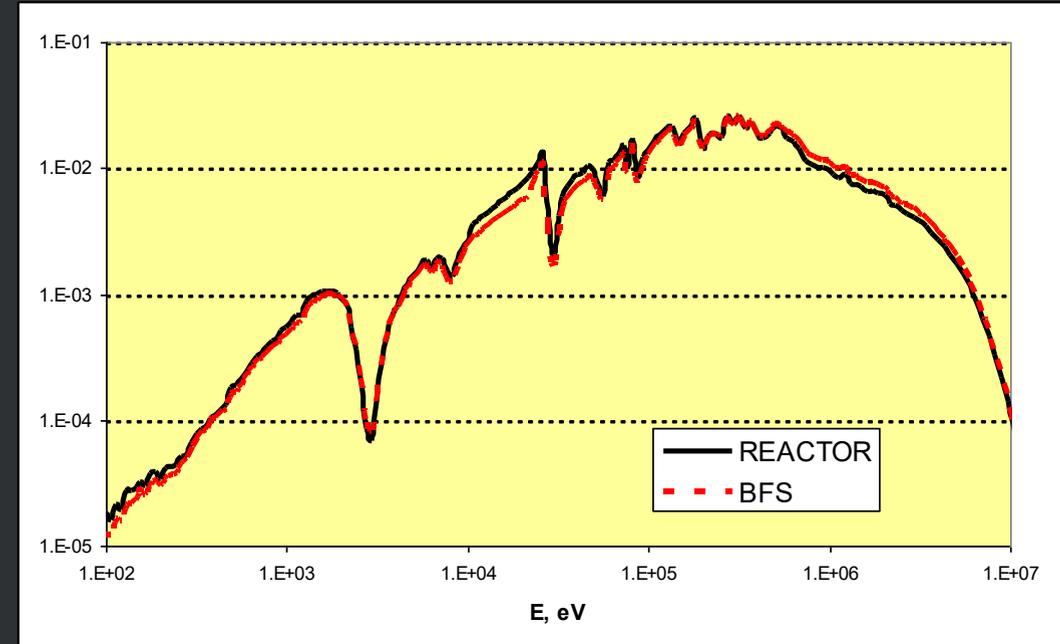
실험 노심 수정

시설이 가지고 있는 Pu 핵연료 부족
670kg 의 Pu 핵연료 모형으로 수정

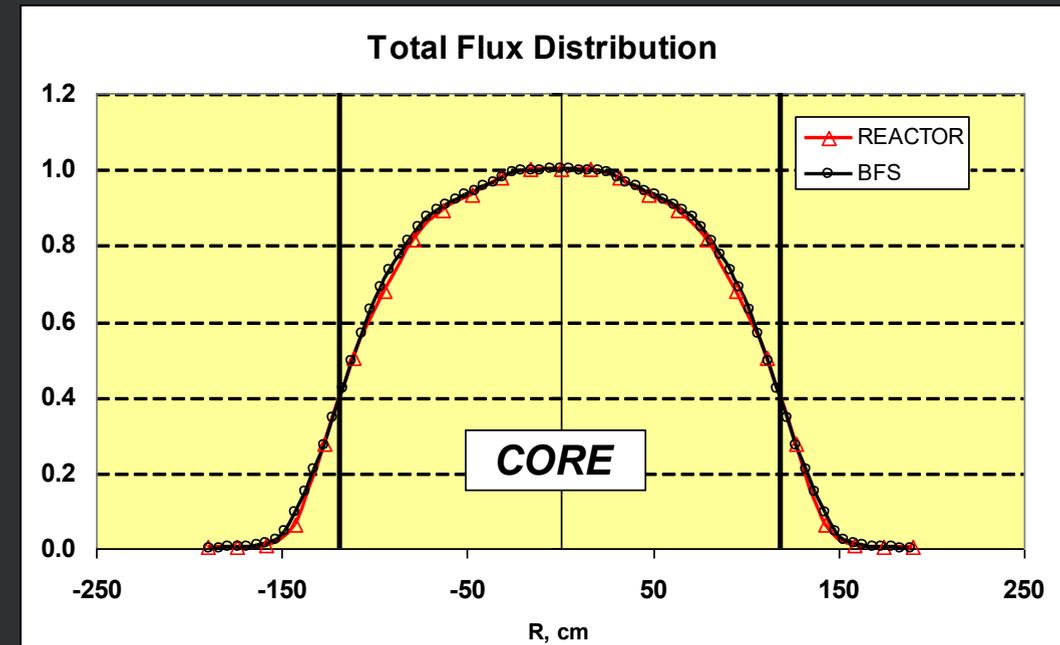
BFS-76-1A 실험 전 예비 계산



핵연료 구성



Neutron Spectrum



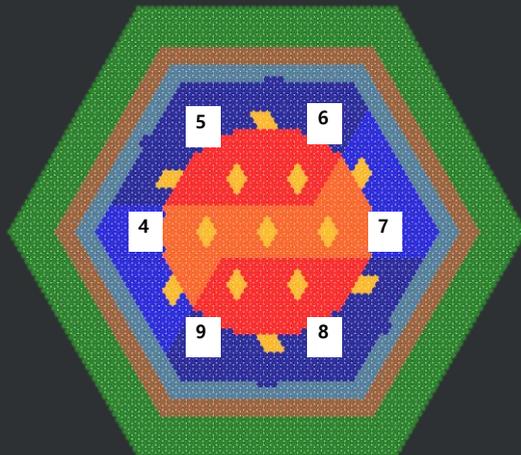
Flux Distribution

BFS-76-1A 제어봉가 계산 결과

측정 제어봉 위치

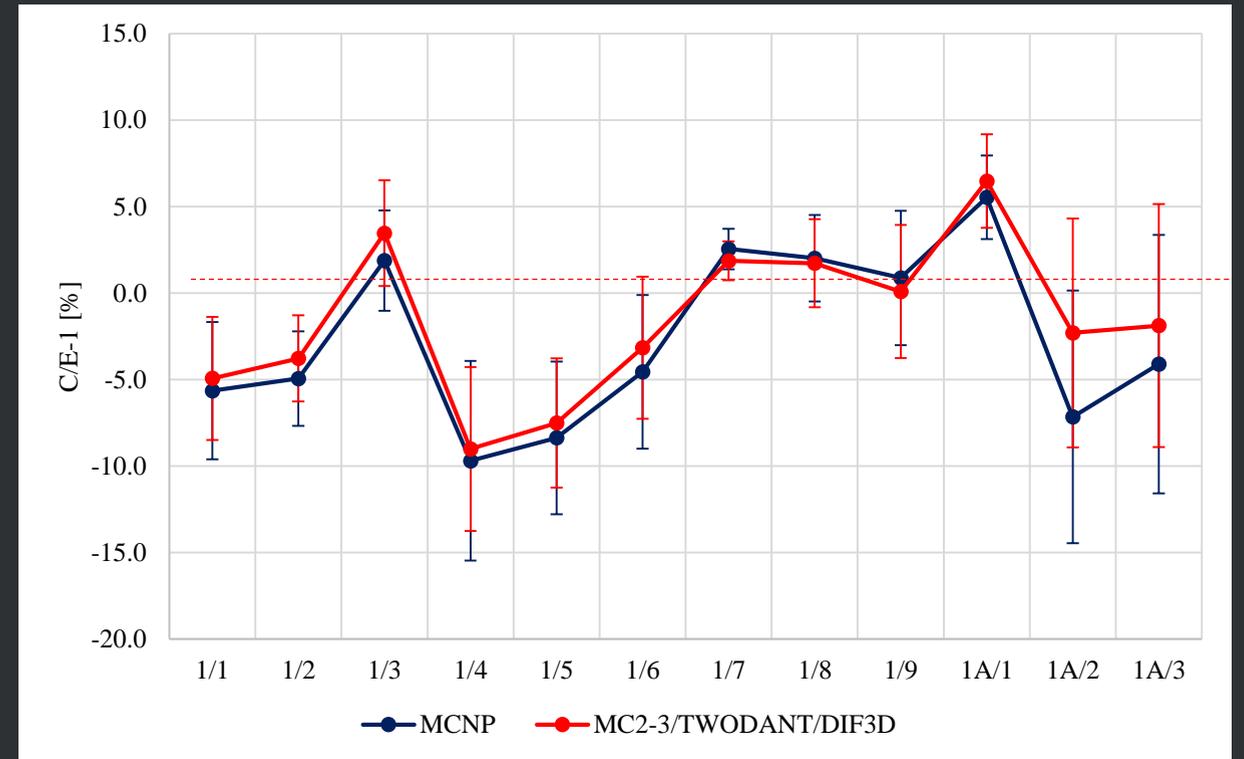


BFS-76-1



BFS-76-1A

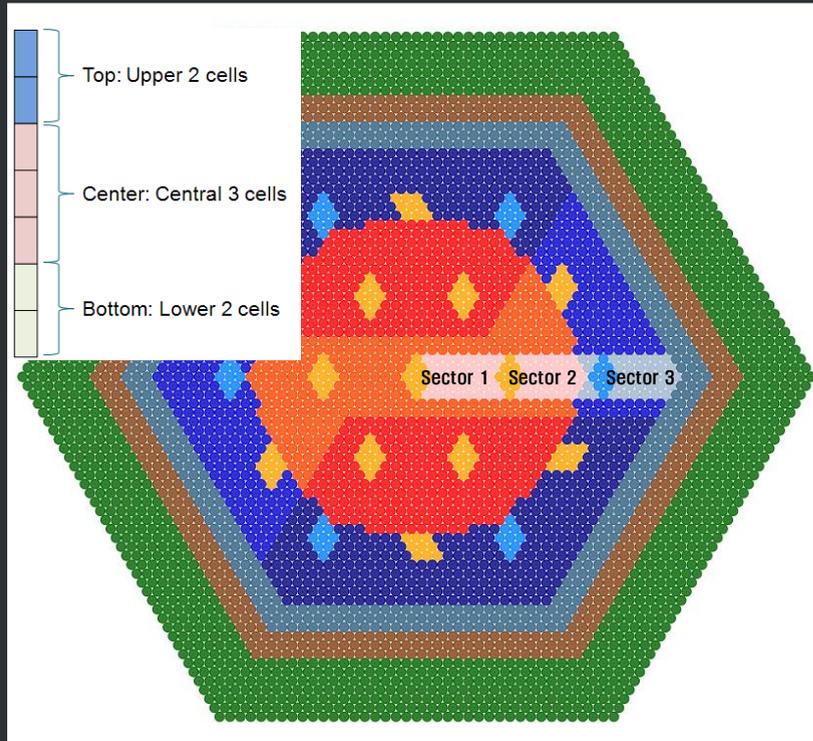
Case	Measured rod positions	Case	Measured rod positions
1/1	1	1/7	1
1/2	2	1/8	2
1/3	3	1/9	3
1/4	1, 2	1A/1	4
1/5	1, 3	1A/2	5, 6, 7, 8, 9
1/6	2, 3	1A/3	4, 5, 6, 7, 8, 9



제어봉가 계산 결과

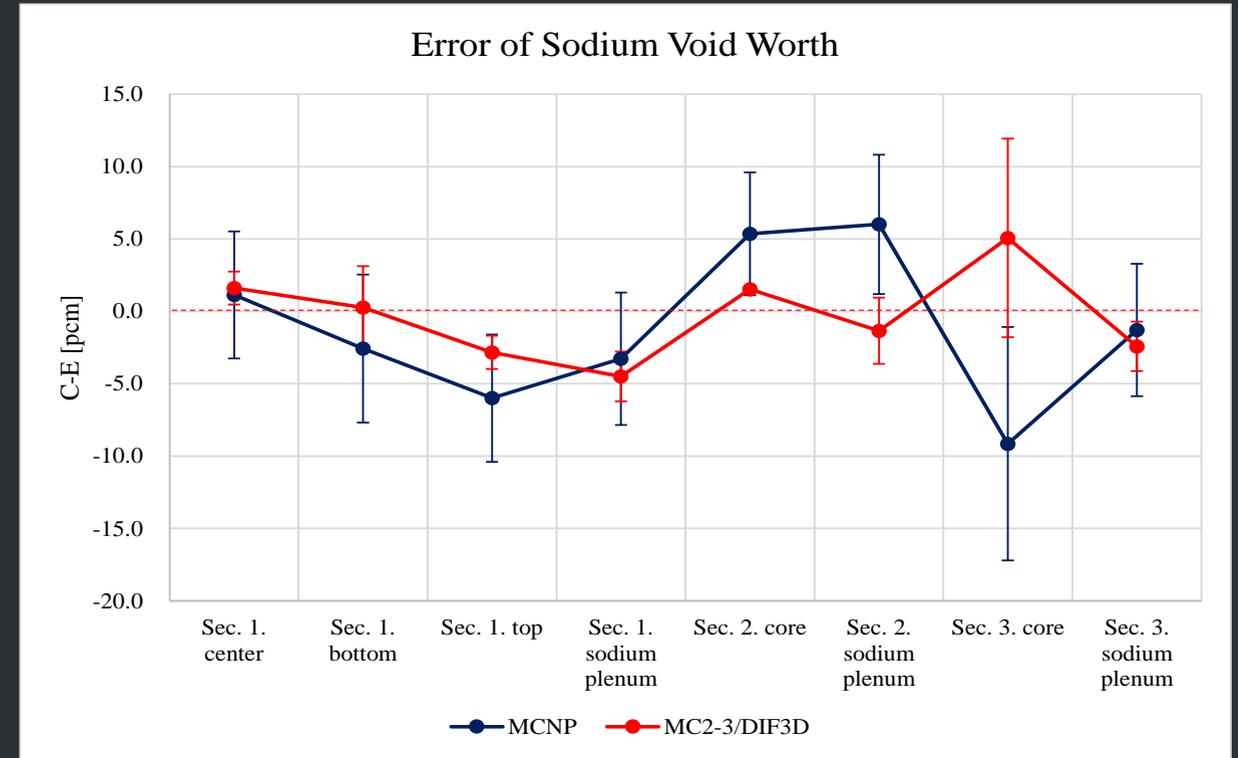
BFS-76-1A 소듐기화반응도가 계산 결과

기화 영역 및 반응도가



소듐 기화 실험 노심

Step	Description	Measured worth [pcm]
1	Center 3 core cells in Sector 1	~ 10
2	Lower 2 core cells in Sector 1	~ -5
3	Upper 2 core cells in Sector 1	~ -5
4	Sodium plenum in Sector 1	~ -5
5	Core cells in Sector 2	~ 0
6	Sodium plenum in Sector 2	~ -10
7	Core cells in Sector 3	~ -40
8	Sodium plenum in Sector 3	~ -10



소듐기화반응도가 계산 결과

BFS-76-1A 실험의 총평

긍정적인 측면

- Pu 함유 노심에 대한 실험 결과 성공적 획득
- 실험과 계산 결과가 대부분 일치
- 개선된 실험 정보 (Disc, 수밀도) 추가 확보

부정적인 측면

- 한정된 Pu 핵연료로 인해 수정된 노심에서 실험
- 초기 실험 자료의 오류
- 실험의 완결성 부족

BFS-84-1 실험 진행 과정

KAERI

NEW

실험 노형 설계 &
실험 계획 수립

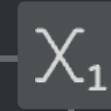
예비 계산 수행



실험 적합성 확인

독립 계산 &
결과 피드백

최종 결과 확정



실험 수행 &
전산코드 이용 해석

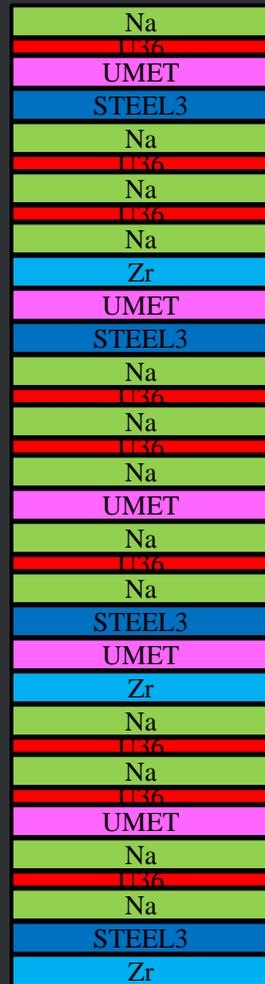
피드백 반영 &
오류 수정

IPPE

BFS-84-1 실험 노심 설계

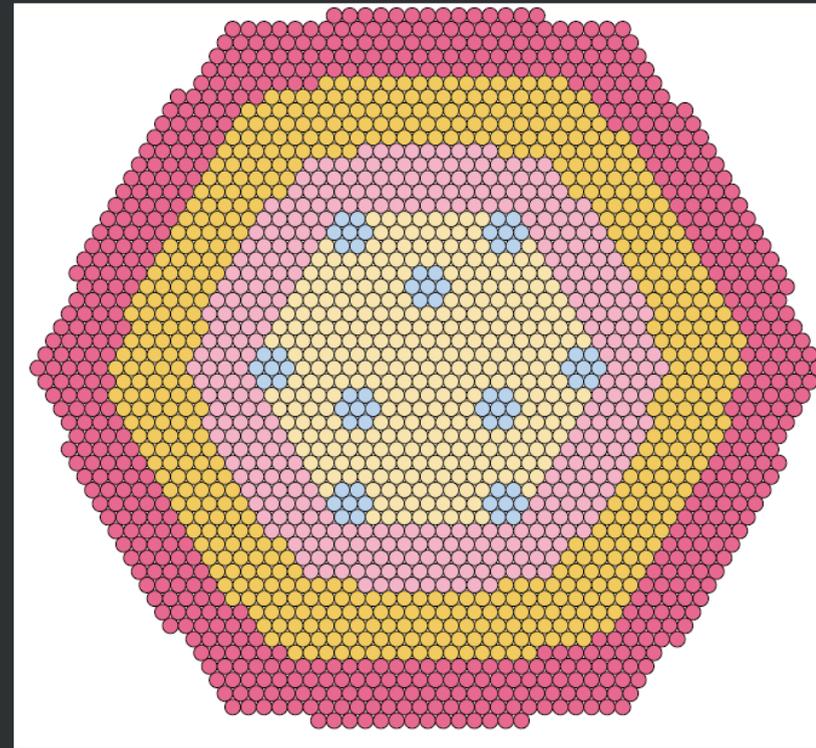


내부노심 유닛셀 (5개 배치)



외부노심 유닛셀 (3개 배치)

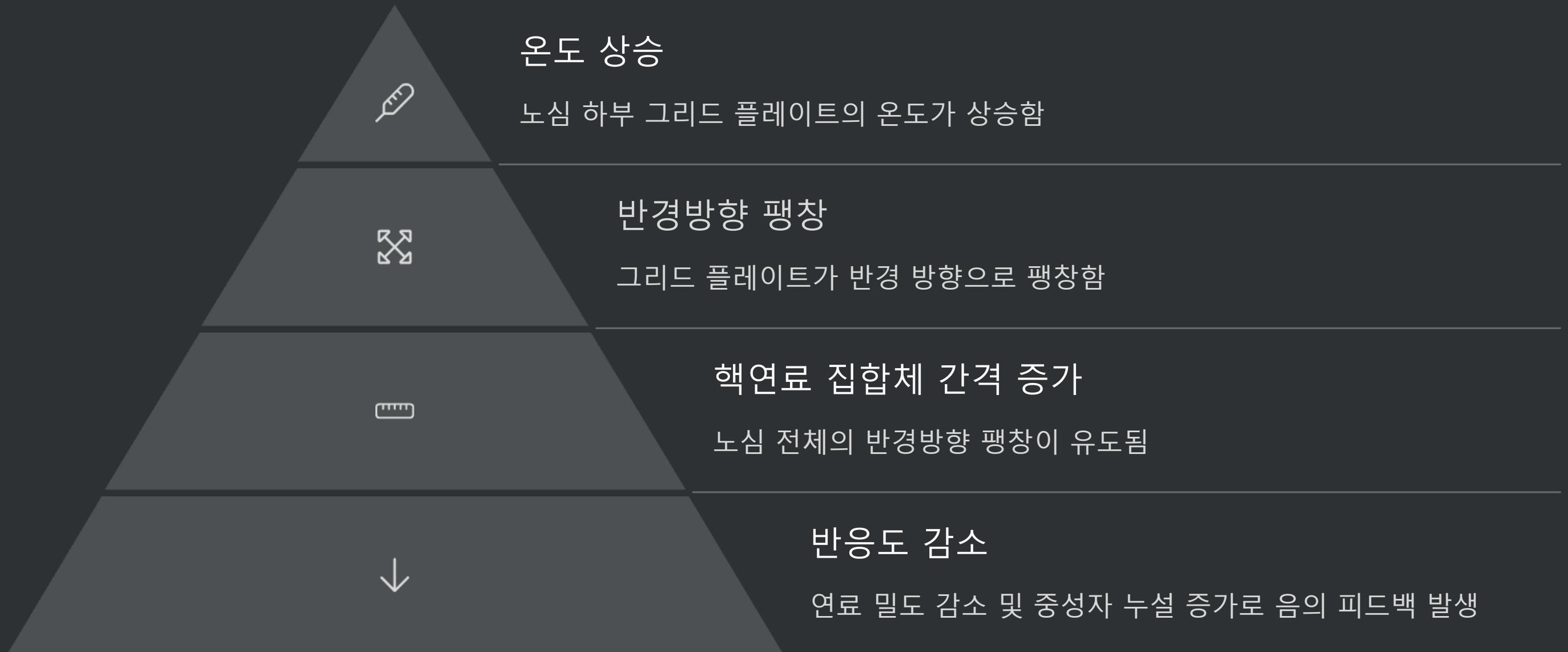
핵연료 구성



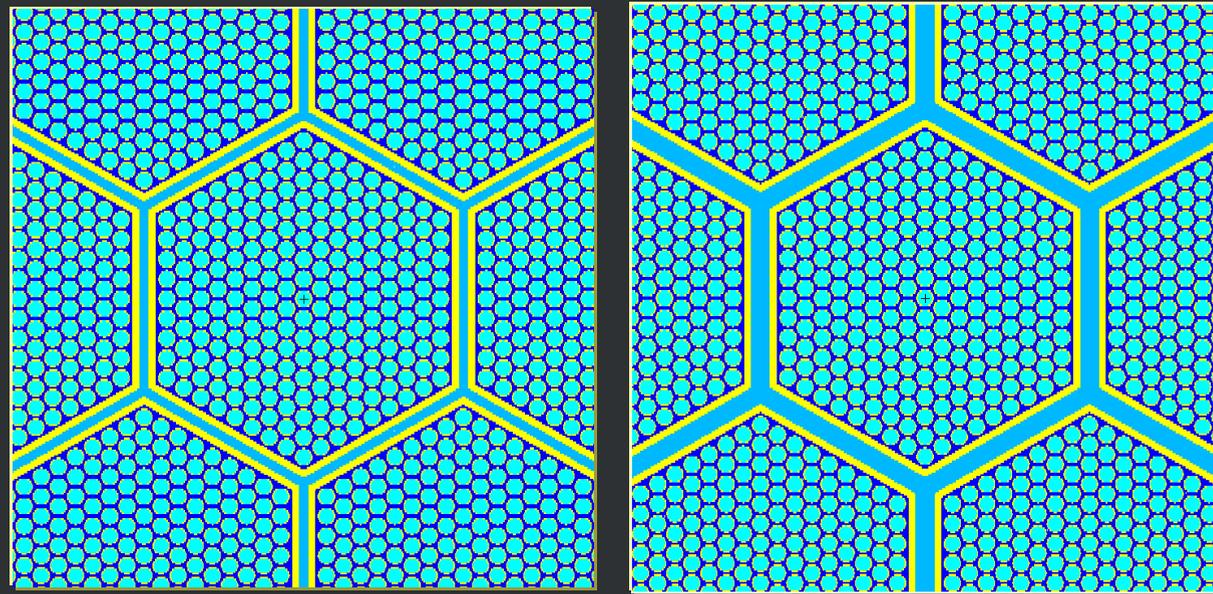
실험 노심 구성

봉 종류	개수
IC-FUEL	334
OC-FUEL	378
Mock-up Control rod	63
Steel Radial Reflector (SRR)	582
Boron Shield Rod (BSR)	678

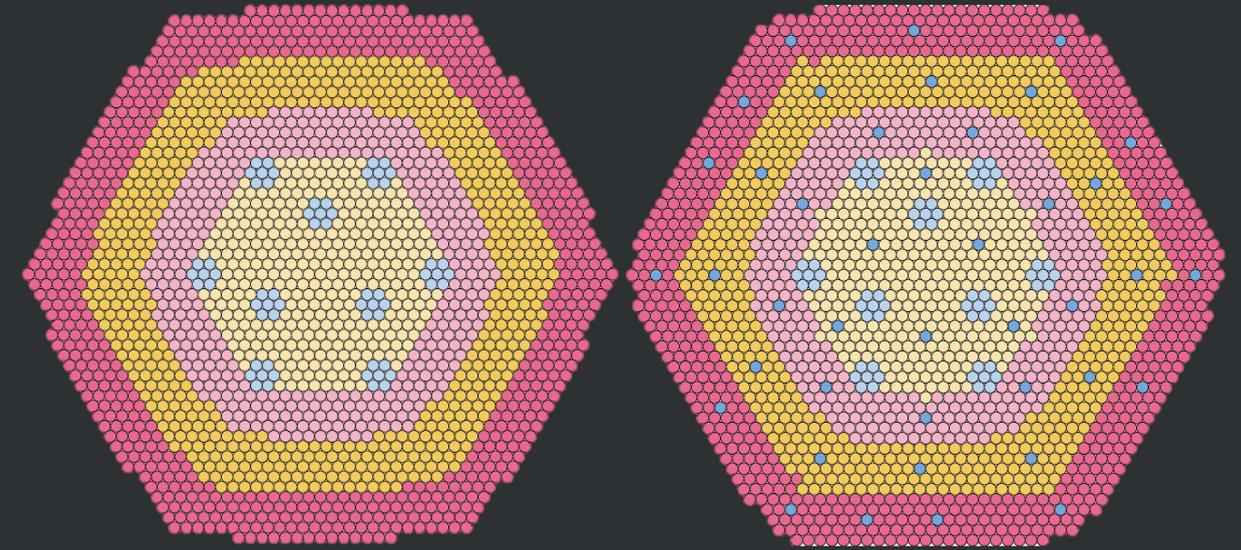
반경방향 노심 팽창 시나리오



반경 방향 팽창 반응도가 모사



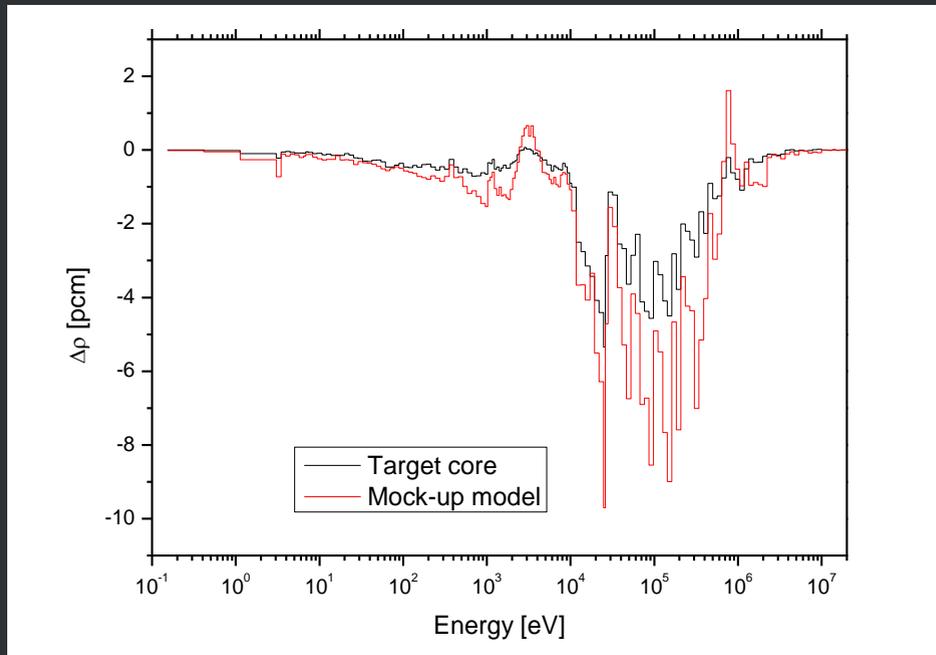
대상 노심 팽창 모사



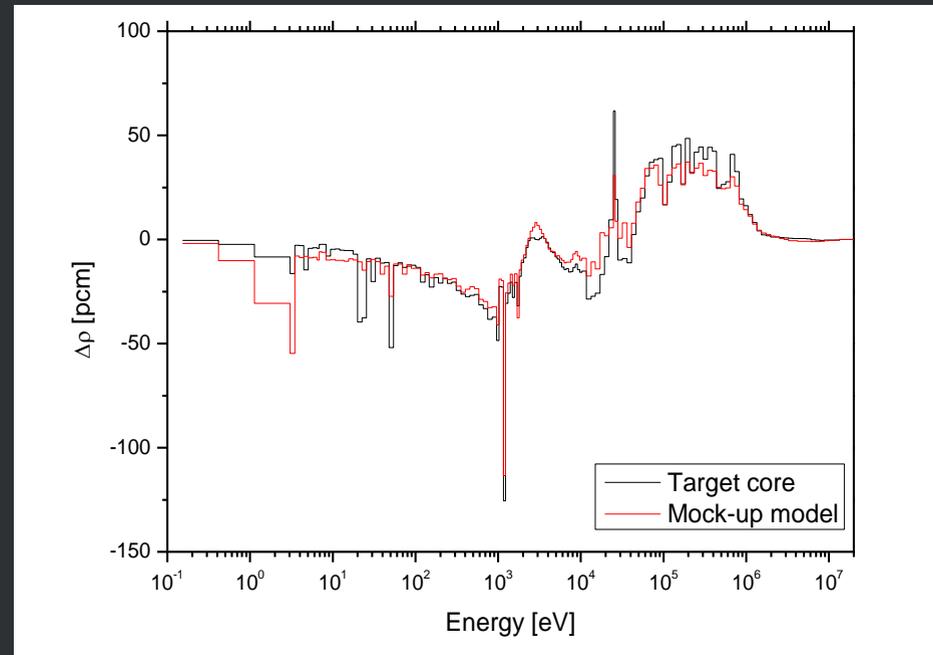
실험 노심 팽창 모사

※ 세계 최초 반경방향 팽창 반응도가 측정 방법 고안 (특허 등록 완료)

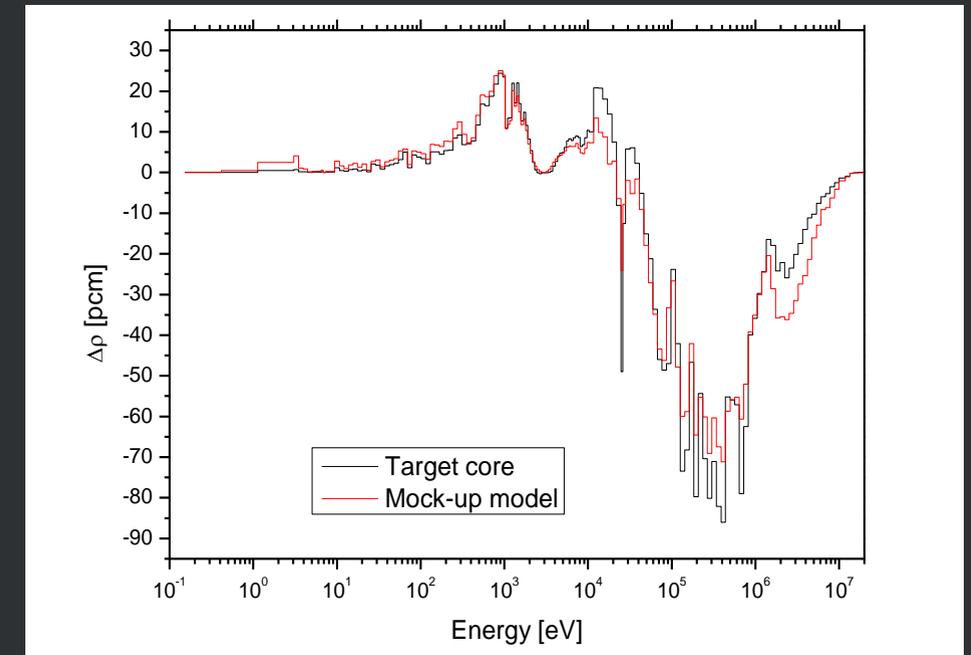
반경 방향 팽창에 따른 반응도가 변화 분석



중성자 누설



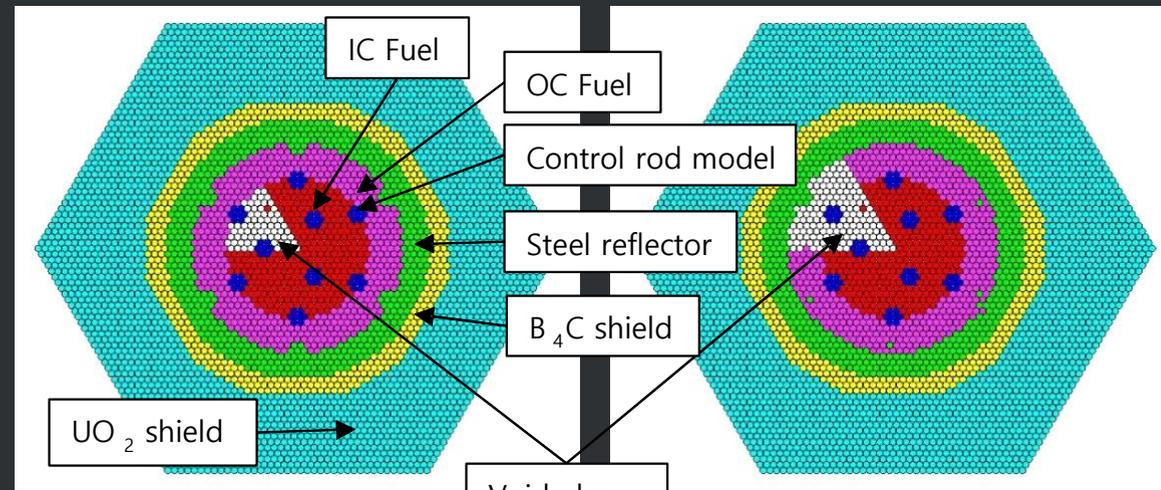
중성자 흡수



핵분열

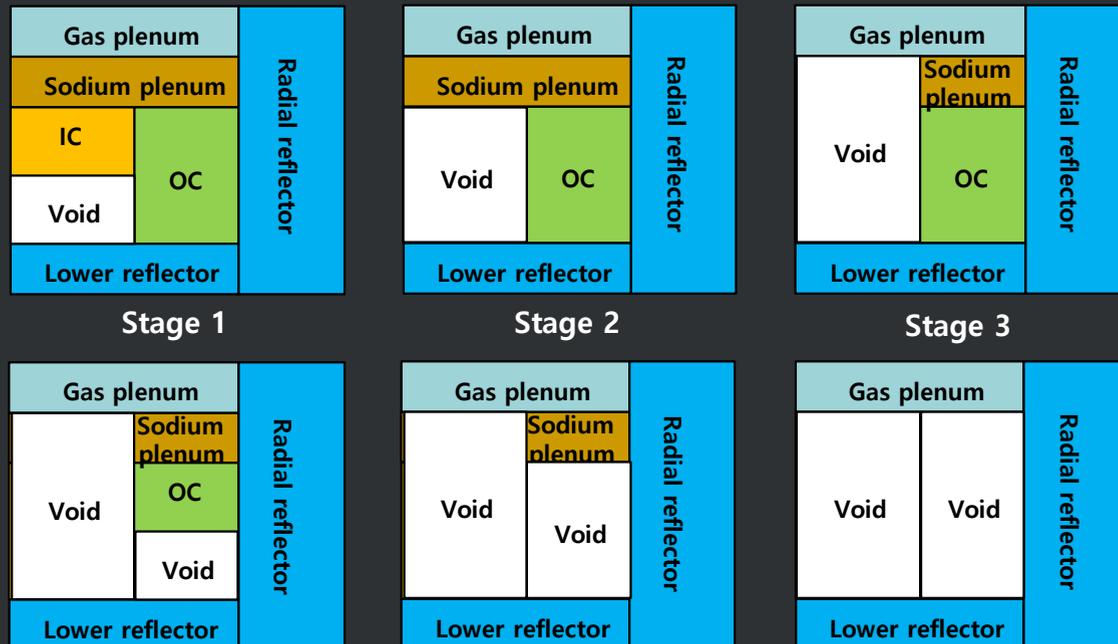
※ 8% 팽창 가정 계산 결과

BFS-84-1 소듐기화반응도가 해석 결과



(a) Stage 1~3

(b) Stage 4~6



Stage 1

Stage 2

Stage 3

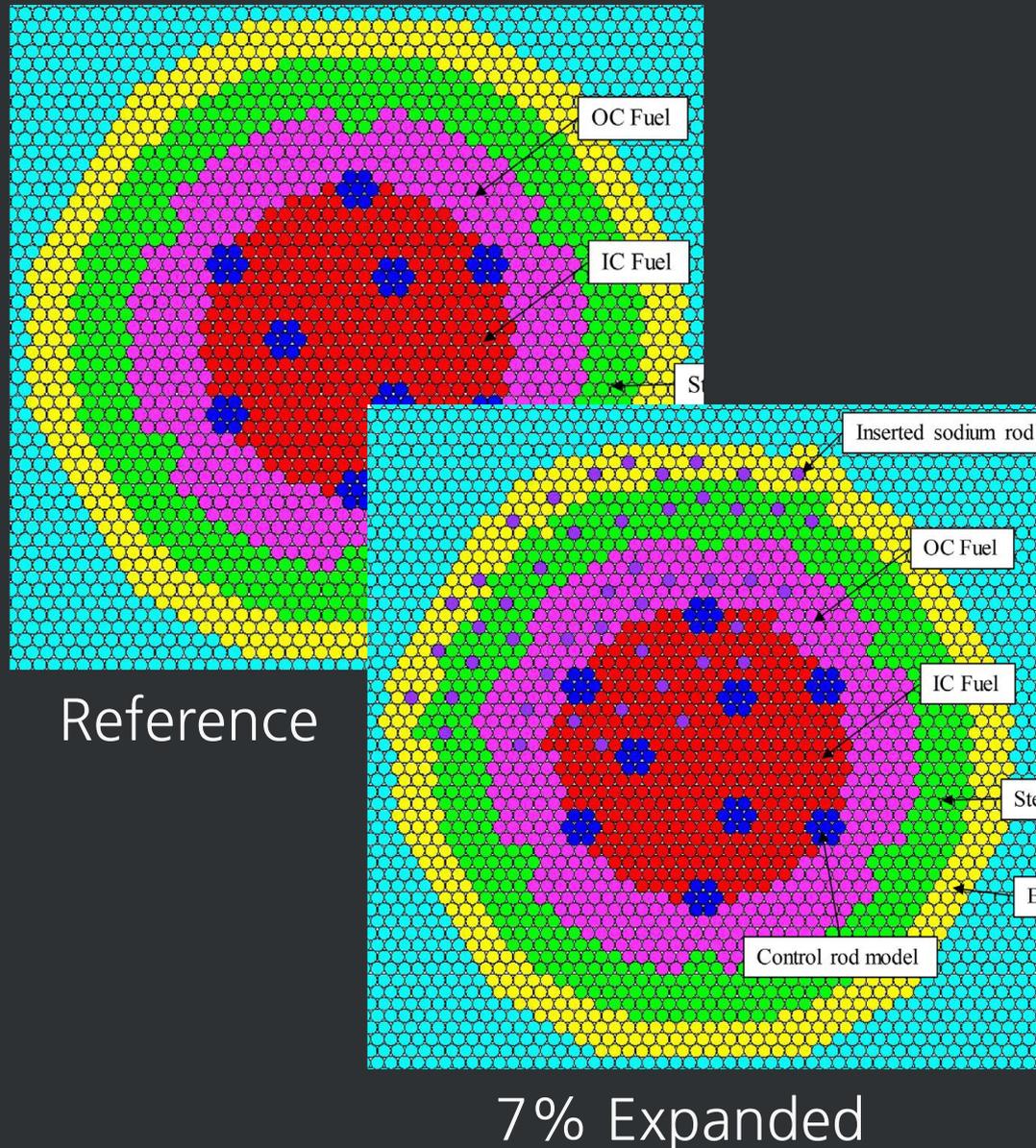
Stage 4

Stage 5

Stage 6

Stage	Measured Worth [pcm]	C/E-1 [%] MCNP	C/E-1 [%] DIF3D
1	~ -90	-16.4 ± 3.9	-25.0 ± 1.9
2	~ -70	-5.9 ± 5.0	-10.2 ± 2.8
3	~ -100	-11.9 ± 4.2	5.3 ± 3.7
4	~ -100	-4.0 ± 4.5	-39.2 ± 2.2
5	~ -80	-0.9 ± 4.4	-34.1 ± 1.8
6	~ -50	1.4 ± 7.0	-10.5 ± 3.7

BFS-84-1 반경방향 팽창반응도가 해석 결과



Stage	Expansion	Measured Worth [pcm]	C/E-1 [%] MCNP	C/E-1 [%] DIF3D
1	3 %	~ -250	-4.3±2.8	5.5±2.8
2	4 %	~ -300	0.6±3.8	9.9±4.1
3	5 %	~ -350	5.2±4.5	13.4±4.8
4	6 %	~ -400	6.6±4.8	15.5±5.2
5	7 %	~ -500	9.2±5.0	17.2±5.3

BFS-84-1 실험 성과

PGSFR 대상 노물리 실험 자료 확보

- 주요 반응도가 계산에 대한 신뢰도 향상
- 불확도 계산을 위한 기반 자료 확보
- 자체 실험 설계 및 수행 역량 확인

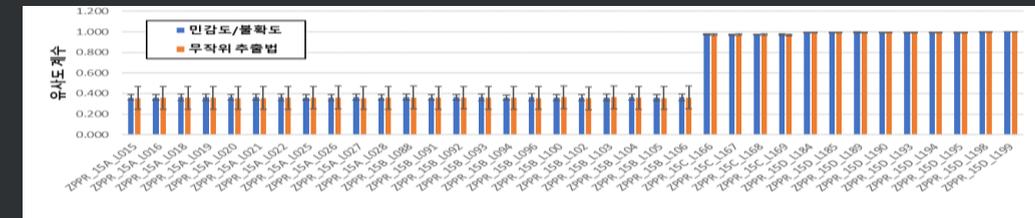
실험 자료 기술 이전 (테라파워)

- 전세계 유일 반경방향 팽창 반응도가 실험
- 잘 계획된 실험 설계 및 신뢰성 있는 실험 결과 포함
- 일목요연 정리된 실험 보고서 수록

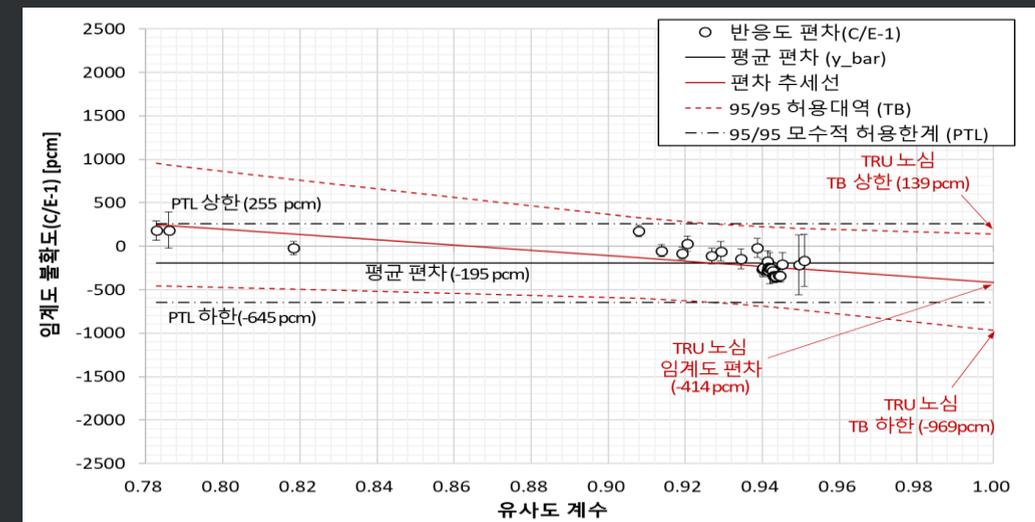
TRU 노심에 대한 검증 및 불확도 산정 전략

유사도 계수 이용 오차 외삽법 개발

- TRU 함유 노심에 대한 실험은 불가능
- 기존 실험 데이터 베이스 활용 유사도 계수 계산
- 유사도 계수 대비 오차 경향성 파악
- 외삽을 통한 대상 노심 불확도 추정



유사도 계수 분석



TRU 노심 임계 불확도 평가를 위한 추세선 분석

결론



성공적인 노물리 실험 수행 및 실험 자료집 확충

BFS 시설에서의 노물리 실험 수행으로 상당량의 노물리 자료집 구축



자체 실험 설계 역량 확인 및 독자적 실험 기획

BFS-84-1 노물리 실험 직접 설계 및 세계 최초 반경방향 팽창 반응도가 평가 방법 제시



설계 불확도 산정을 위한 지속적 노력

기존 노물리 실험 재평가 및 유사도 계수 활용 불확도 외삽 방법론 개발

Q&A

질문 있으신가요?

