



노물리 실험 및 Mock-up 실험

4세대원자로기술개발부
이 민 재

Contents

01 노물리 실험의 필요성

02 BFS 실험 시설의 개요

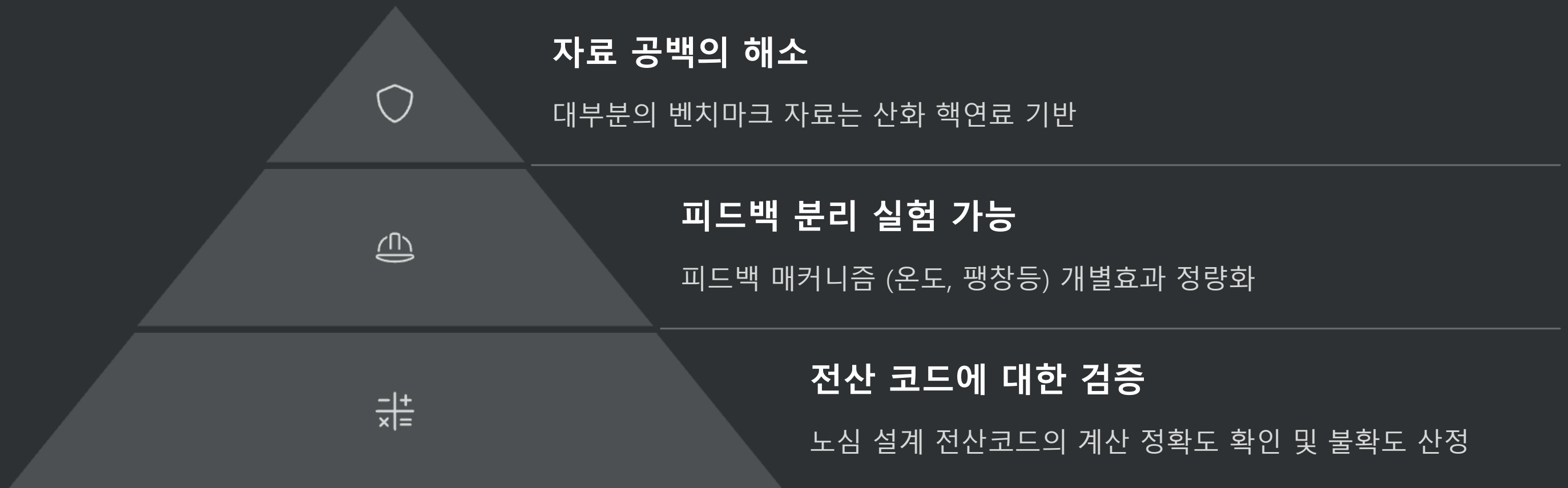
03 BFS-76-1A 실험

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

R^G



안전 계수 측정

도플러, 소듐기화, 팽창 반응도가

BFS 시설 개요

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

러시아 오브닌스크의 A.I. 레이푸스키 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

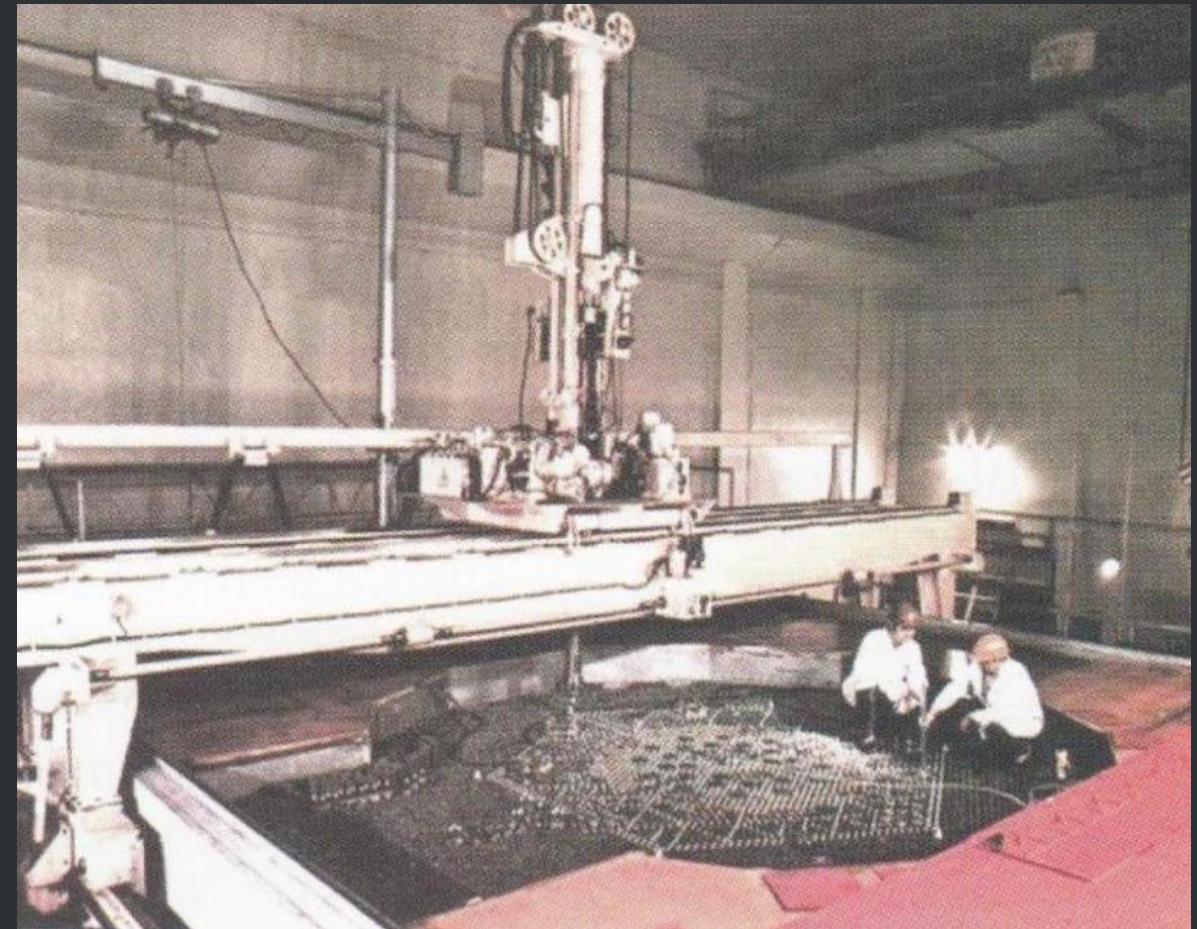
주요 특징

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

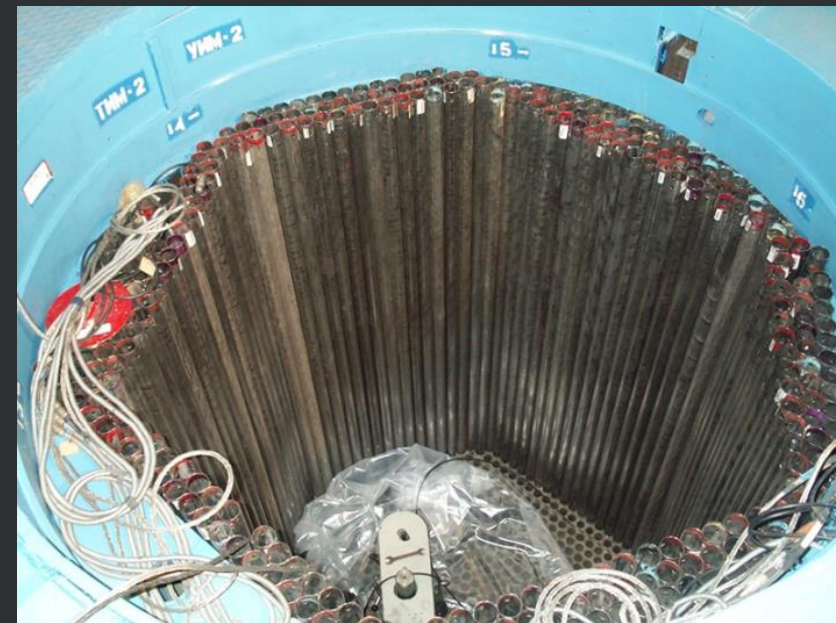
BFS 시설 비교 (BFS-1 VS BFS-2)

| 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)

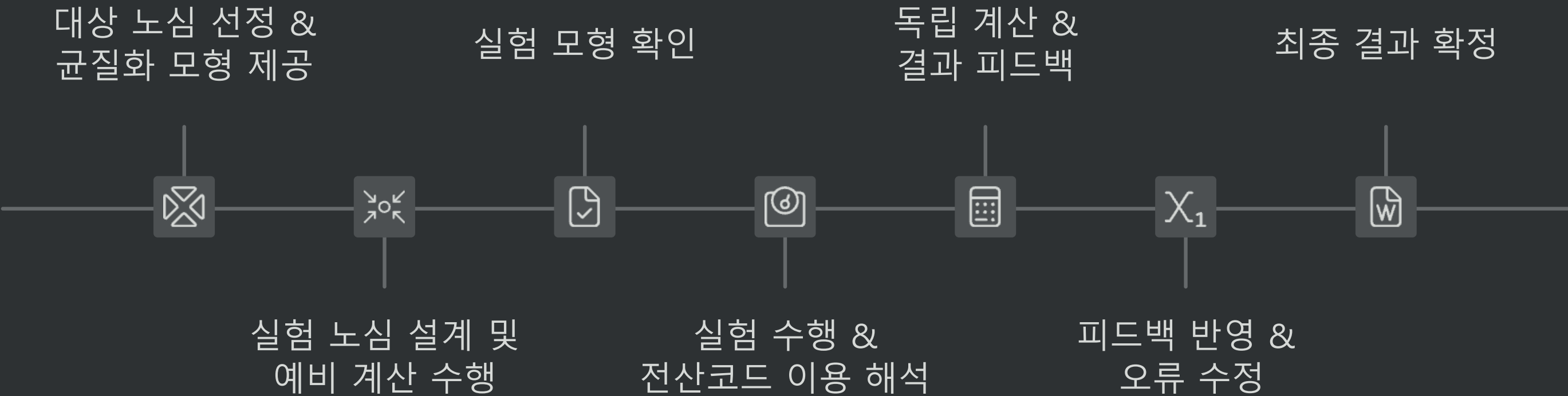


BFS-2 시설 사진



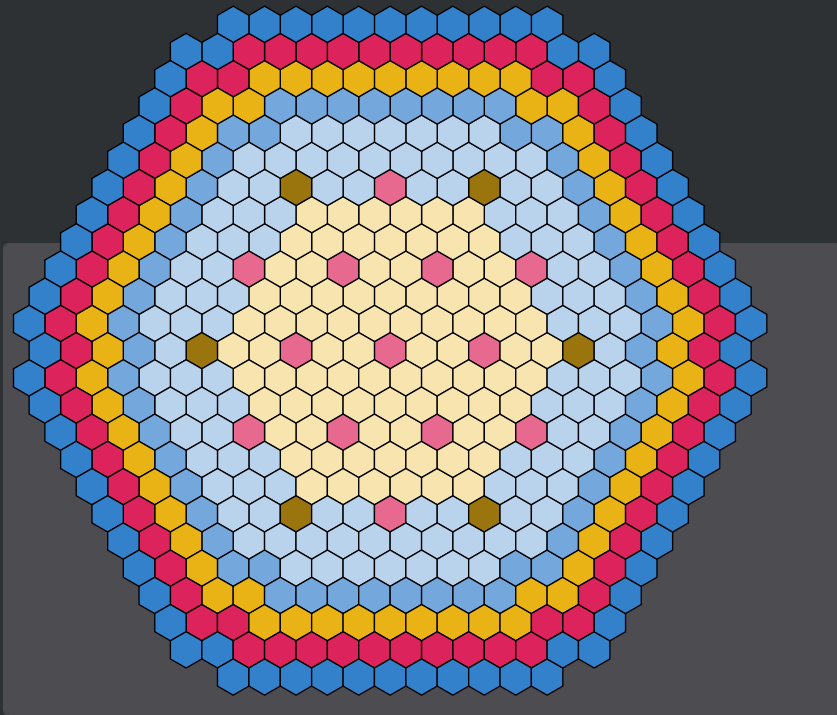
BFS-76-1A 실험 진행 과정

KAERI



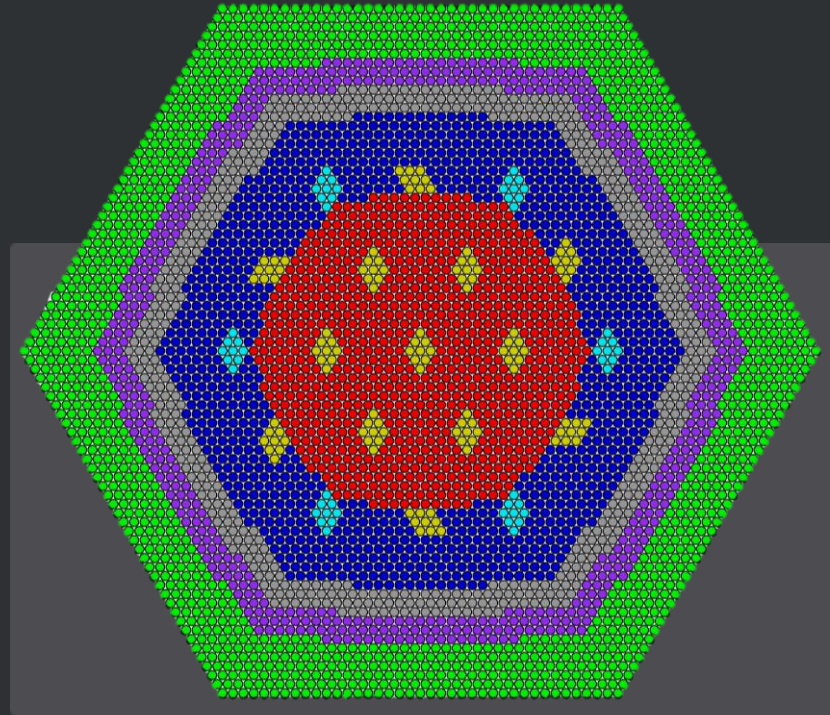
IPPE

BFS-76-1A 실험 노심 설계



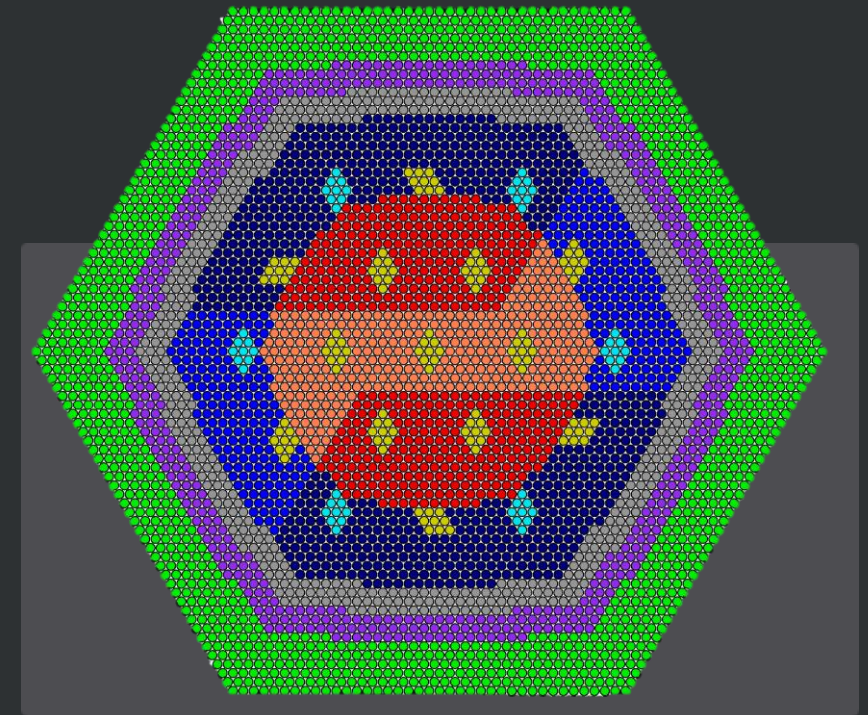
대상 노심 정의

300 MWe TRU burner



실험 노심 설계

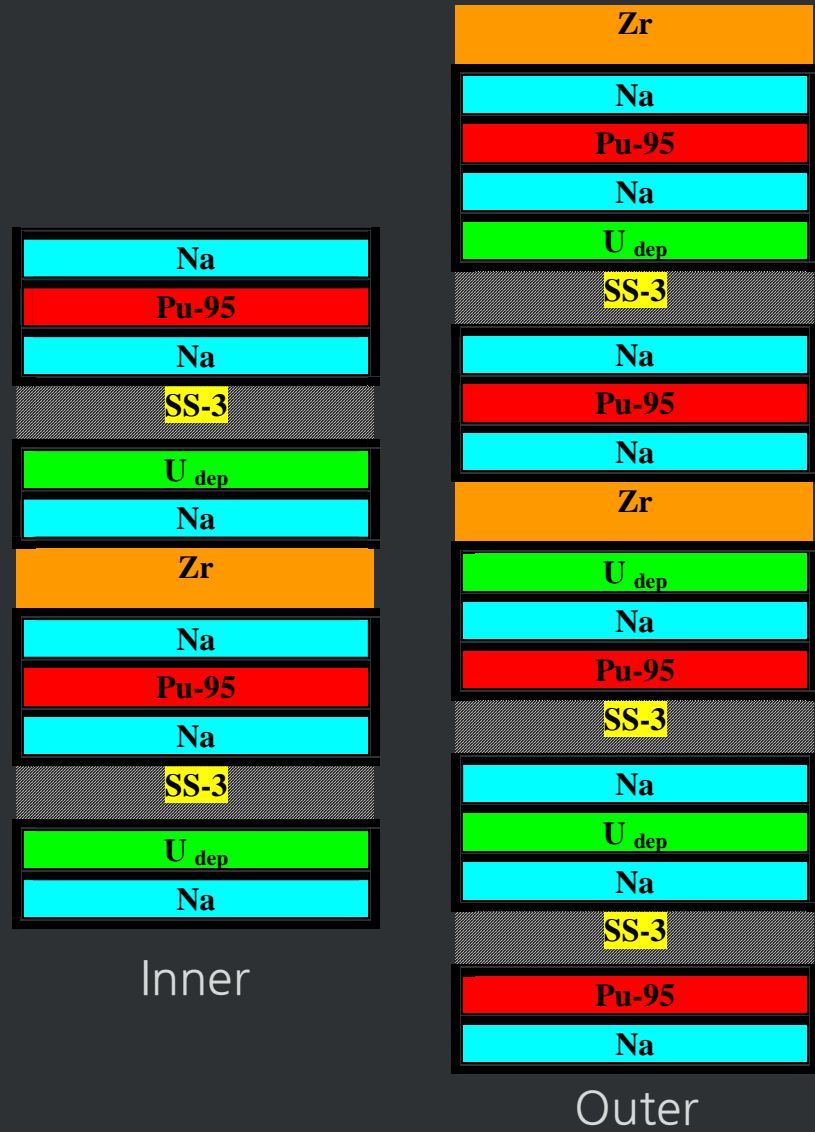
약 1.6 ton 의 Pu 핵연료 포함 노심



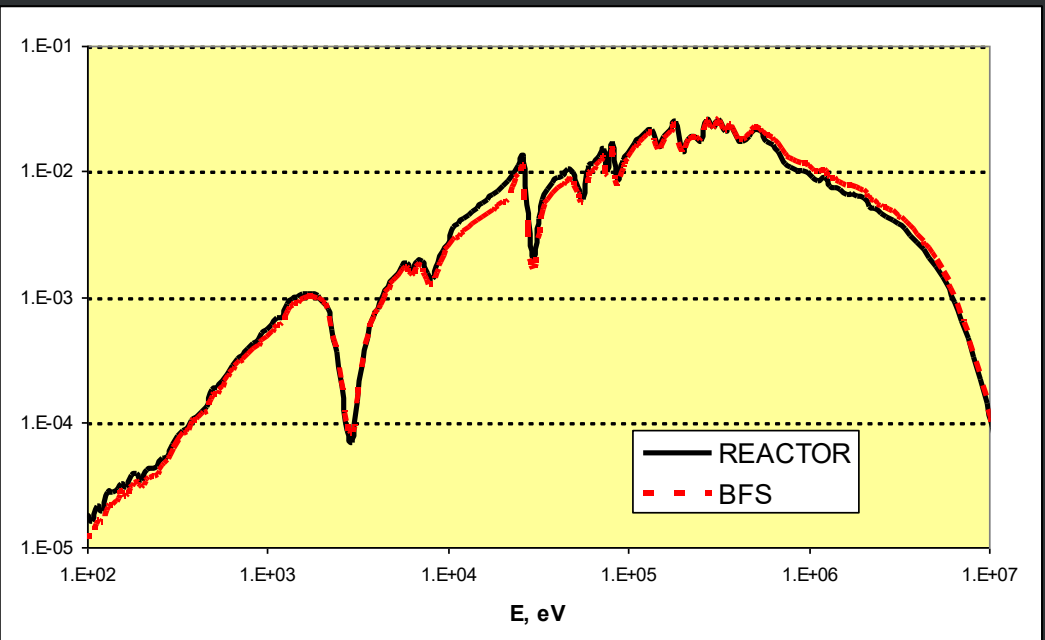
실험 노심 수정

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

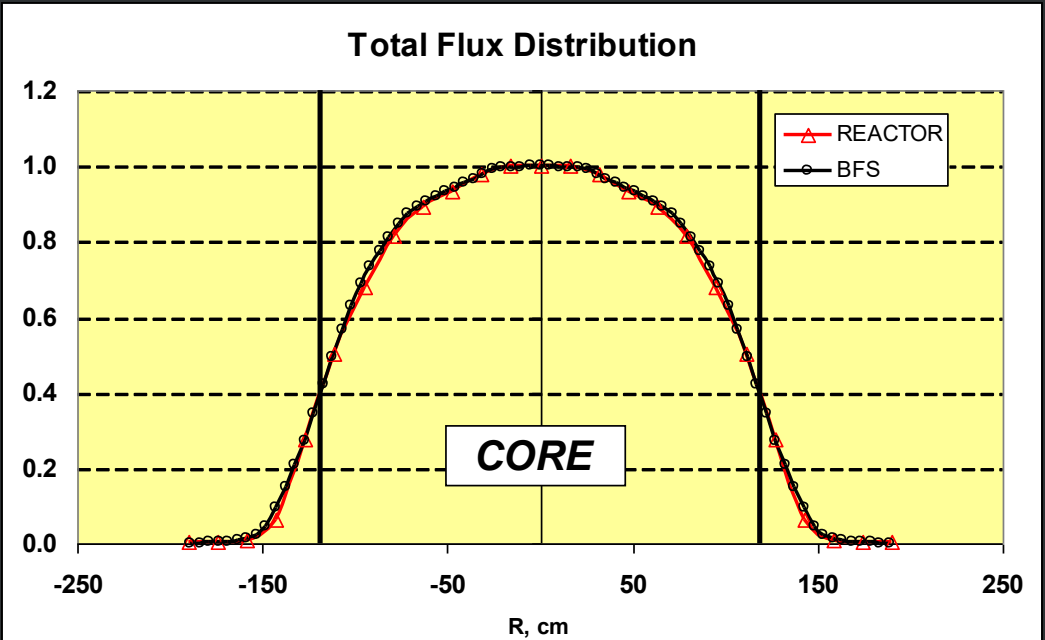
BFS-76-1A 실험 전 예비 계산



핵연료 구성



Neutron Spectrum



Flux Distribution

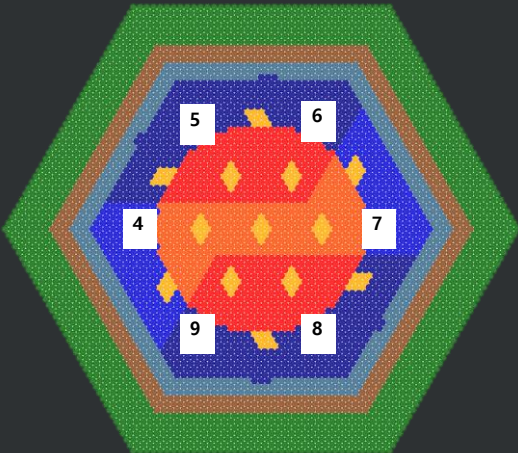
BFS-76-1A 제어봉가 계산 결과

측정 제어봉 위치

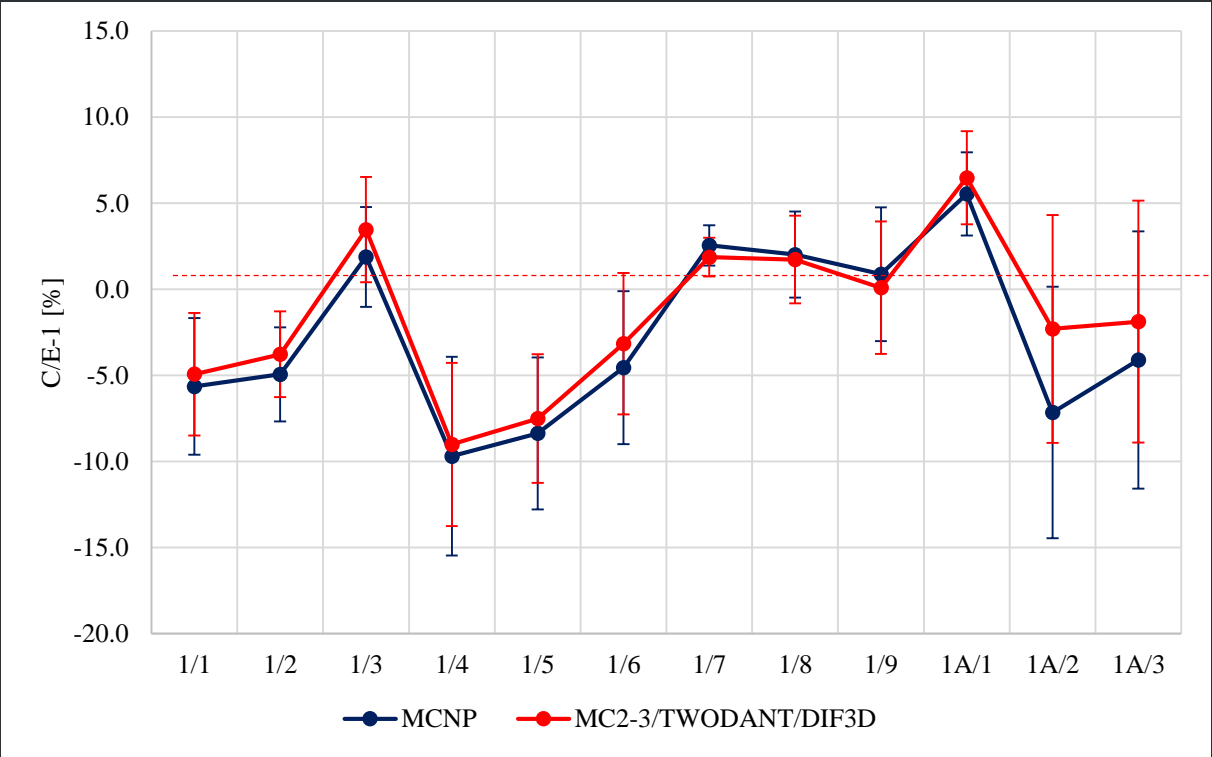
| Case | Measured rod positions | Case | Measured rod positions |
|------|------------------------|------|------------------------|
| 1/1 | 1 | 1/7 | 1 |
| 1/2 | 2 | 1/8 | 2 |
| 1/3 | 3 | 1/9 | 3 |
| 1/4 | 1, 2 | 1A/1 | 4 |
| 1/5 | 1, 3 | 1A/2 | 5, 6, 7, 8, 9 |
| 1/6 | 2, 3 | 1A/3 | 4, 5, 6, 7, 8, 9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



BFS-76-1



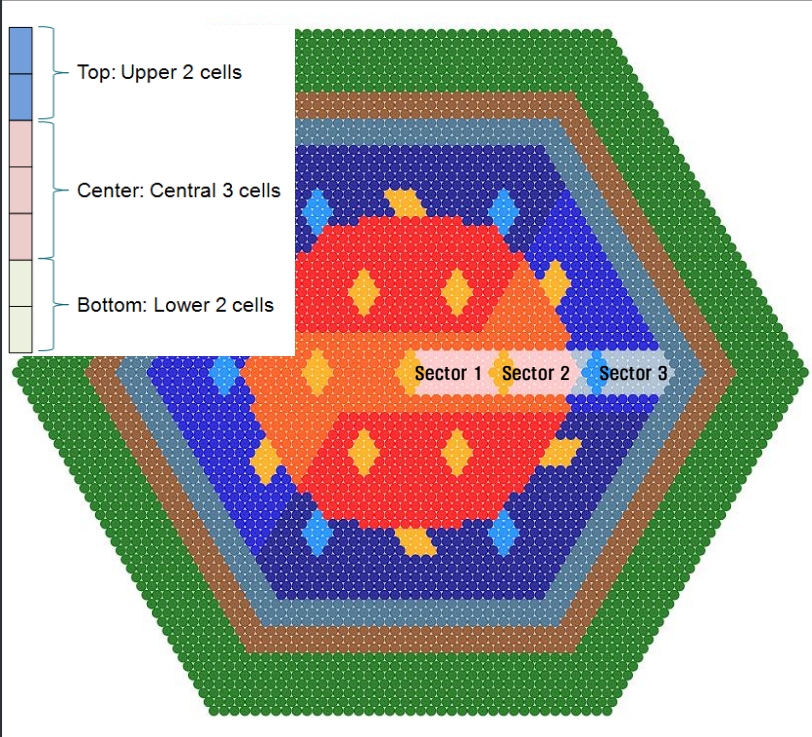
BFS-76-1A



제어봉가 계산 결과

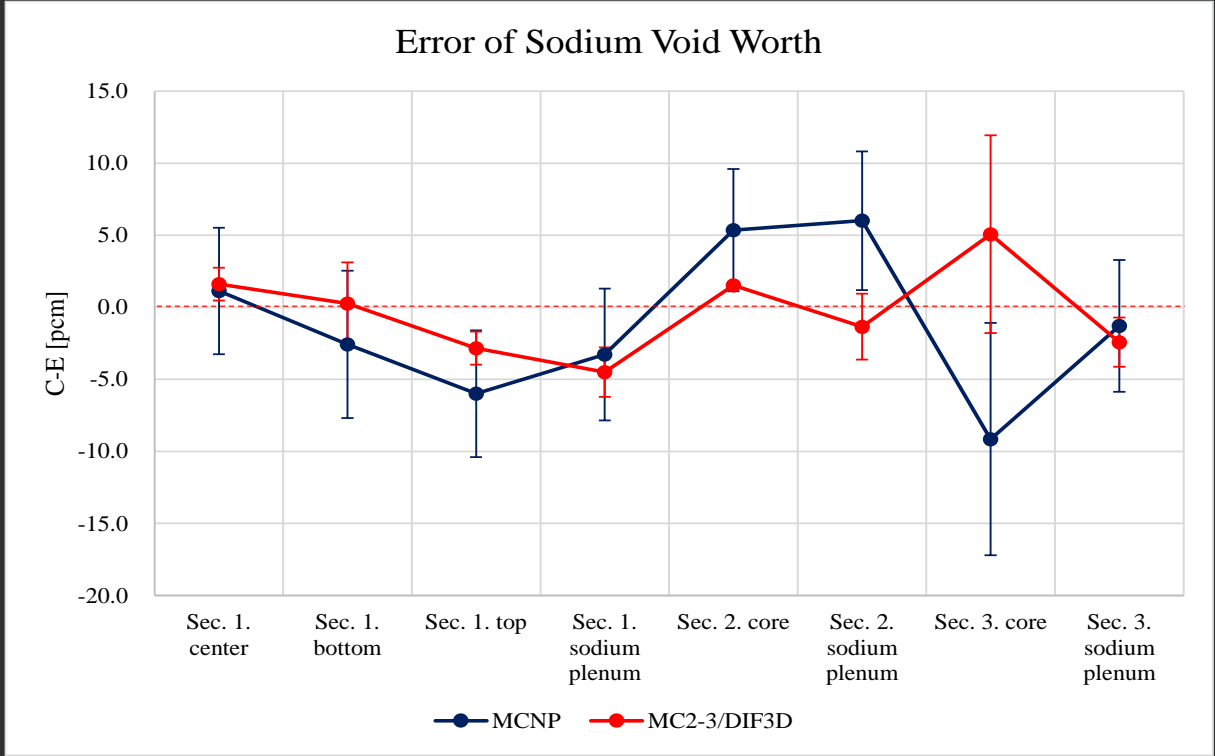
BFS-76-1A 소듐기화반응도가 계산 결과

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

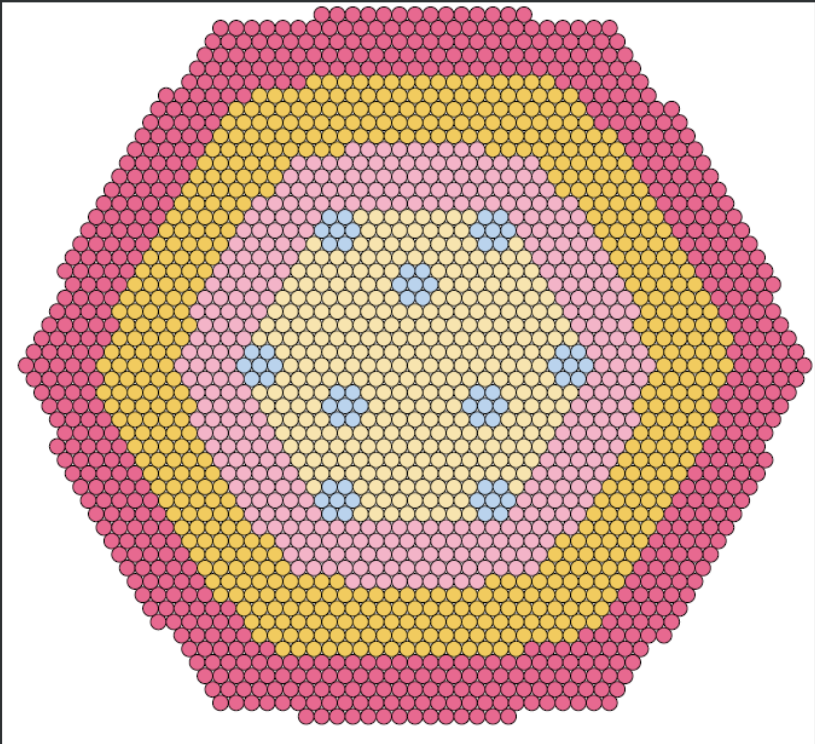
피드백 반영 &
오류 수정

IPPE

BFS-84-1 실험 노심 설계



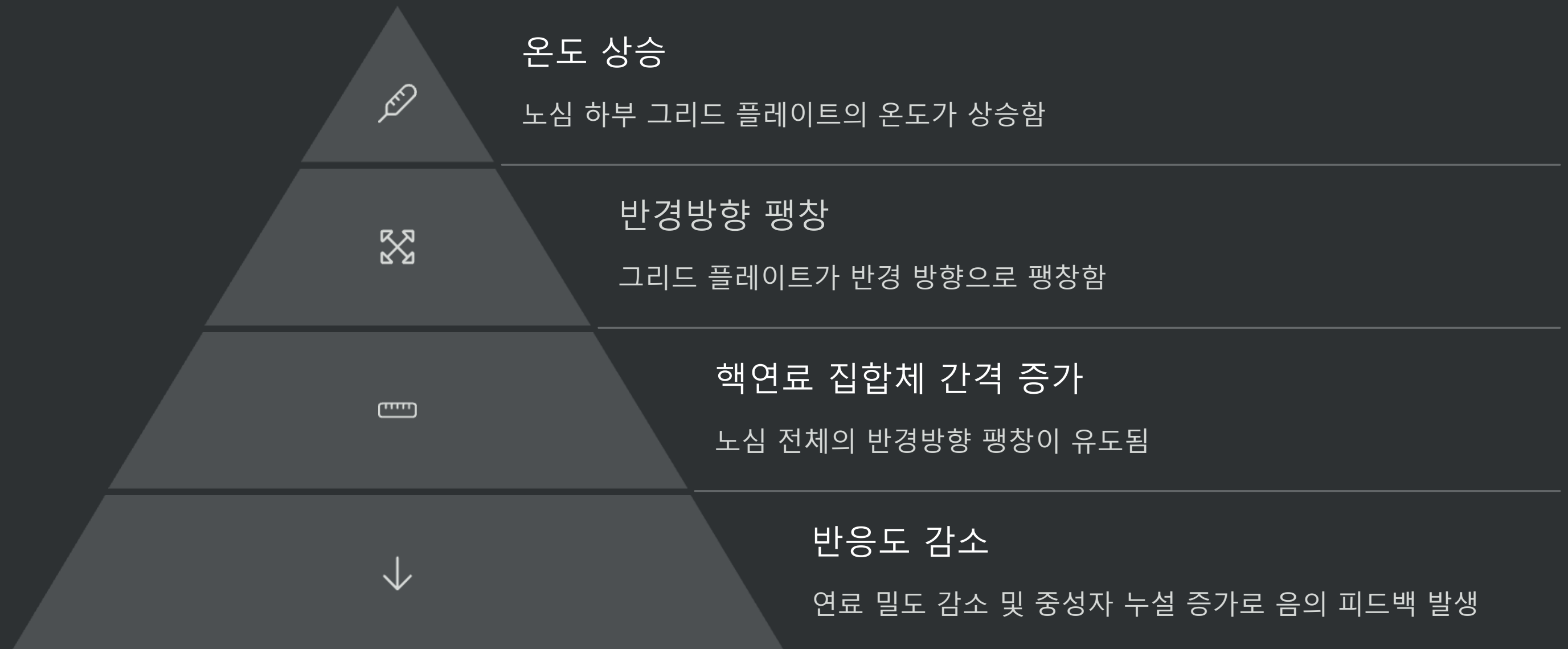
핵연료 구성



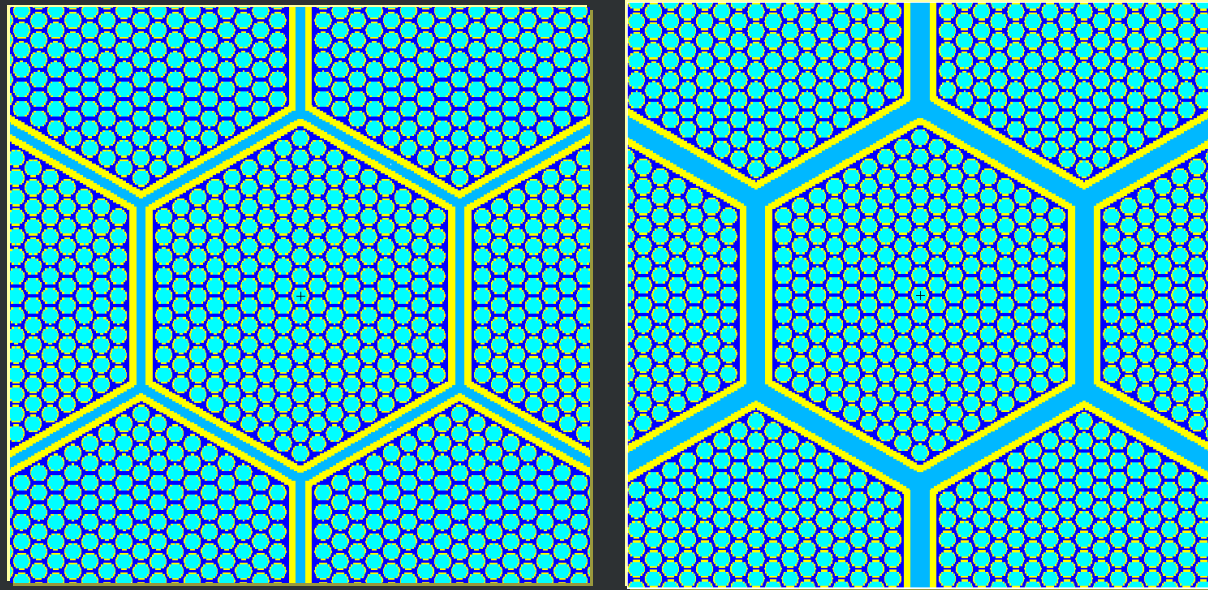
실험 노심 구성

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

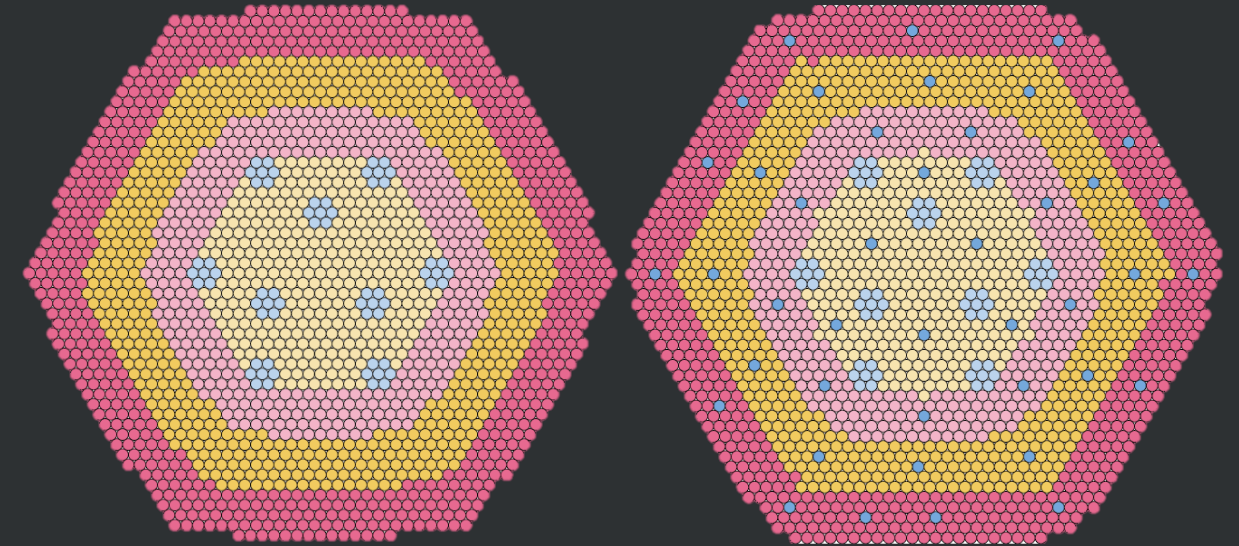
반경방향 노심 팽창 시나리오



반경 방향 팽창 반응도가 모사



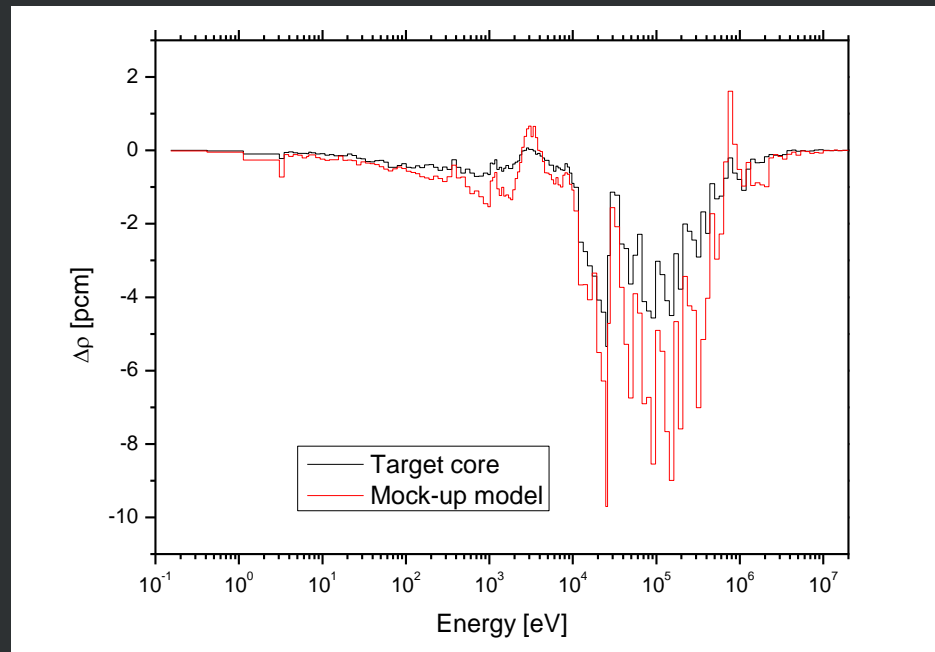
대상 노심 팽창 모사



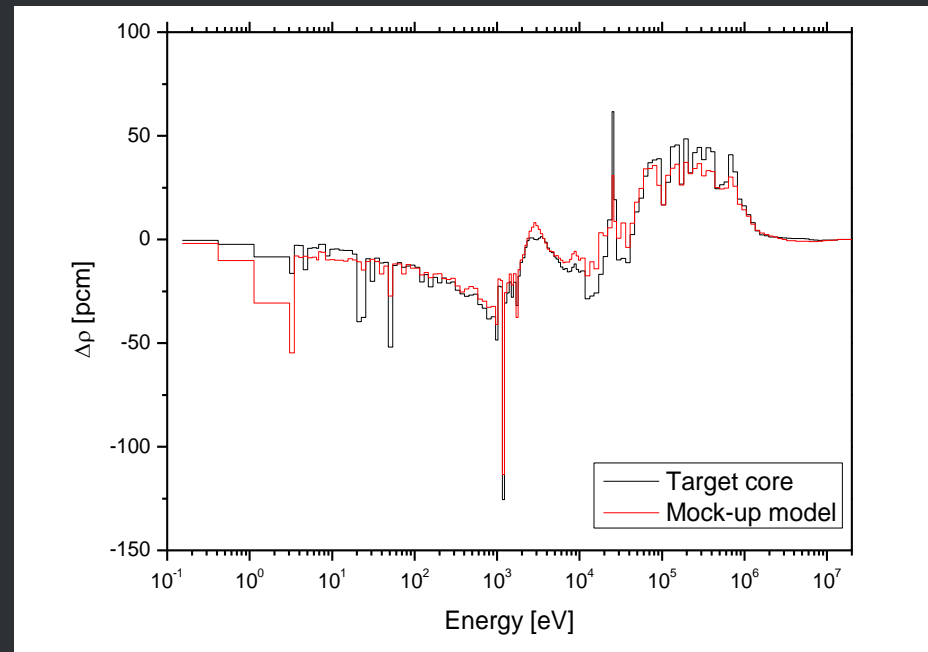
실험 노심 팽창 모사

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

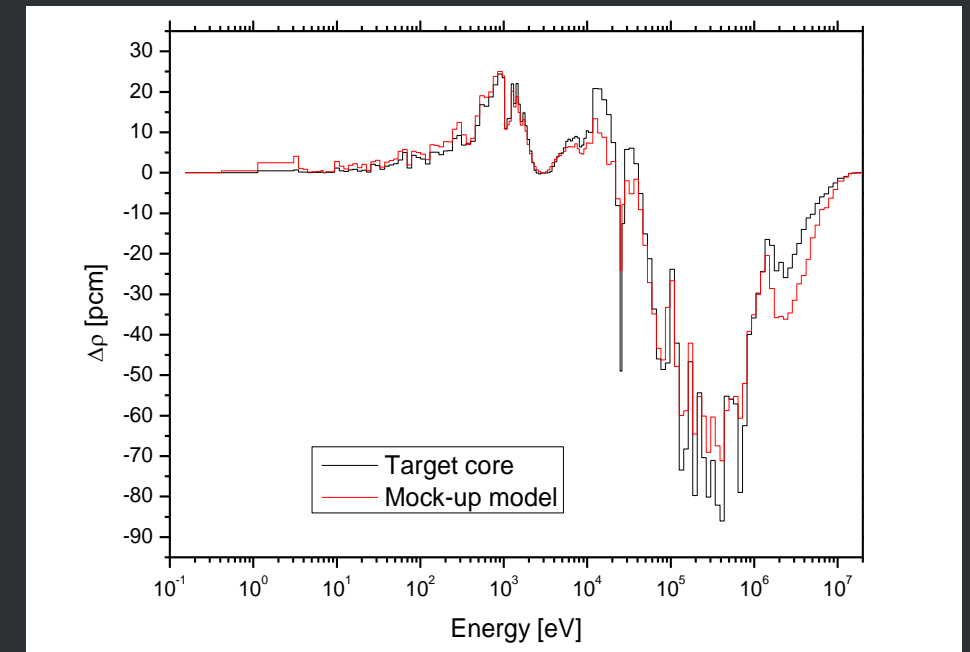
반경 방향 팽창에 따른 반응도가 변화 분석



중성자 누설



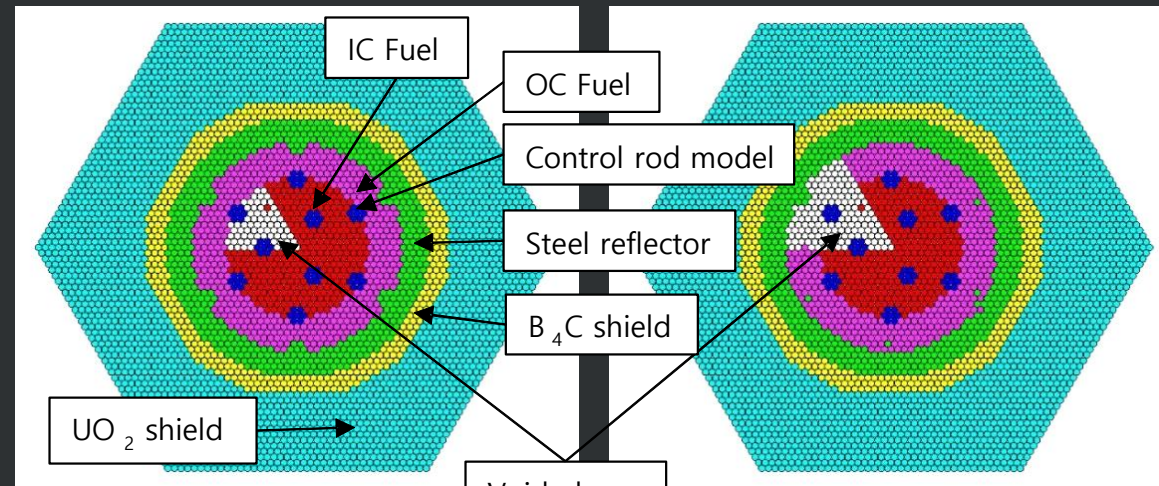
중성자 흡수



핵분열

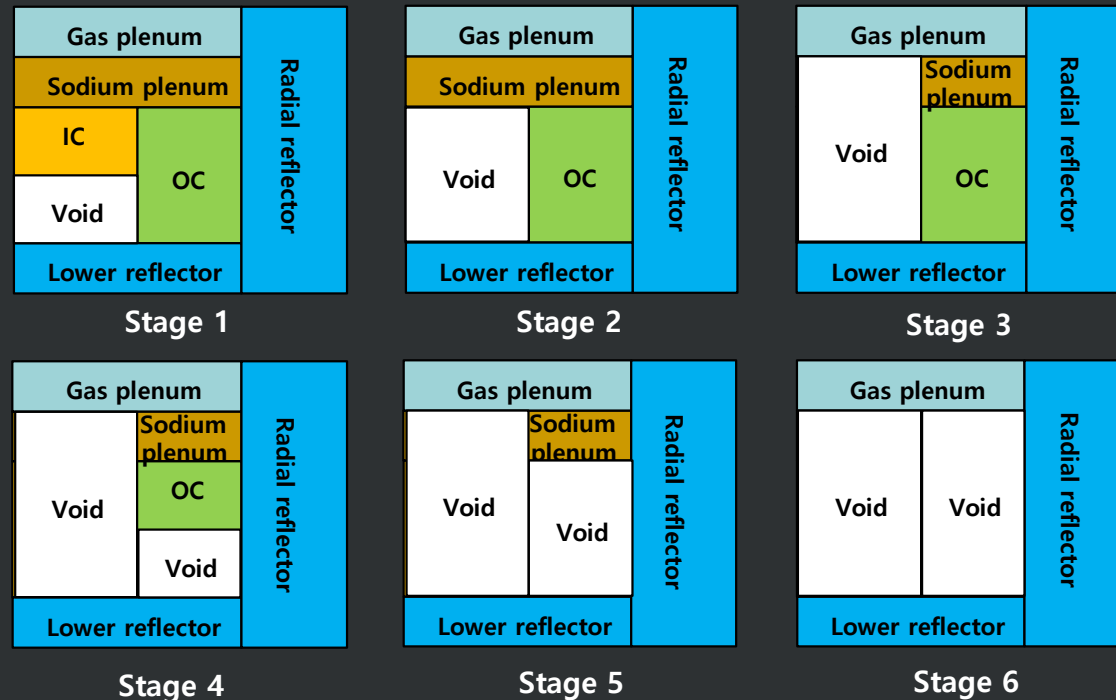
※ 8% 팽창 가정 계산 결과

BFS-84-1 소듐기화반응도가 해석 결과



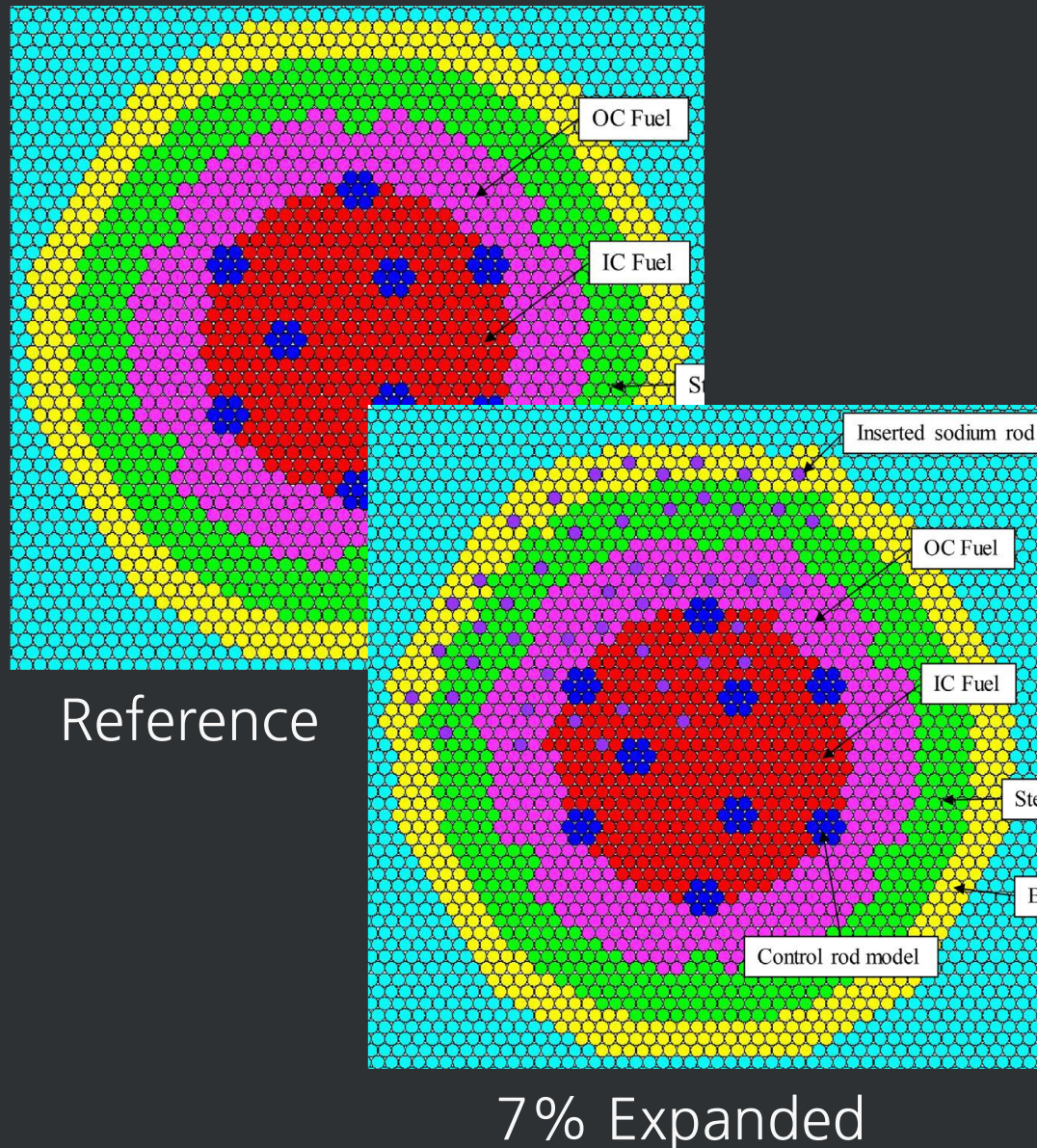
(a) Stage 1~3

(b) Stage 4~6



| Stage | 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

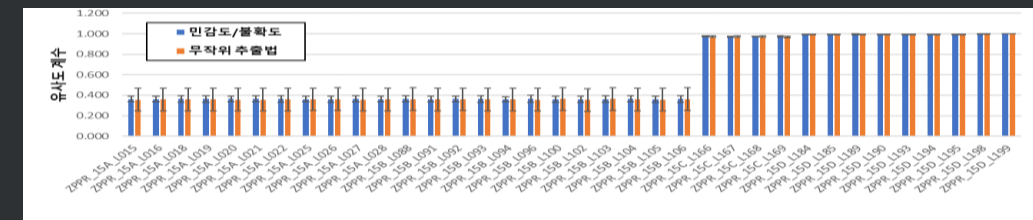
실험 자료 기술 이전 (테라파워)

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

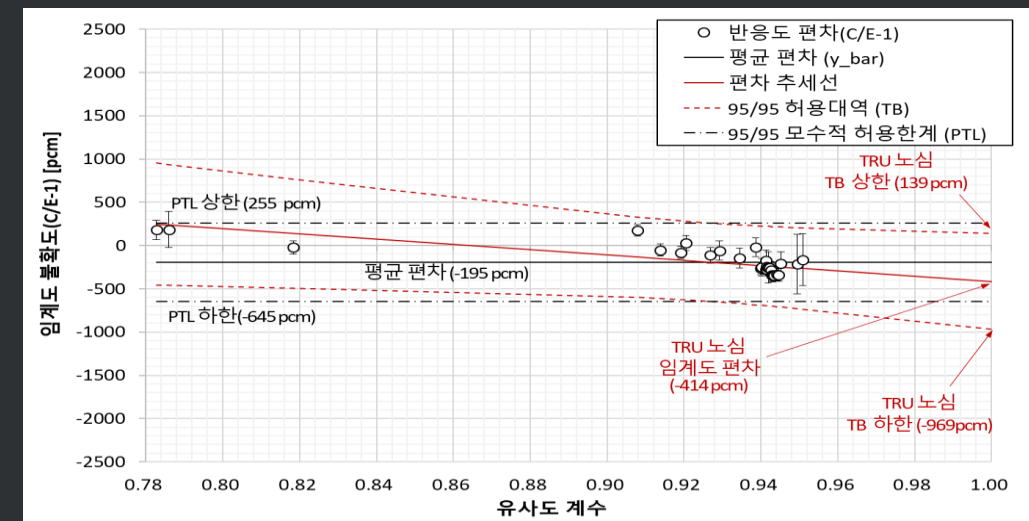
TRU 노심에 대한 검증 및 불확도 산정 전략

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?

