

소듐냉각고속로 설계 전산코드의 현주소와 미래

2025. 10. 29



이민재 (한국원자력연구원)

목 차



01 고속로의 노심 특성과 전산코드 요구사항

02 PGSFR 사업에서의 노심 해석 체계

03 KAERI 자체 개발 노심 해석 전산 코드

04 요약 및 마무리

소듐냉각고속로 노심의 특성

» 액체 소듐 냉각재

- 열전달 성능이 우수하고 비등점이 높아 대기압에 가까운 저압 운전 가능
- 노심 출구온도가 500°C 이상이며 열효율이 높음

» 고속 중성자 스펙트럼

- 고속중성자를 이용한 핵분열
 - 비등방성 산란이 중요
 - 수 barn 수준의 핵분열 단면적 (Thermal 영역의 ~ 1/100)
- 비교적 긴 평균 자유 행정 거리
 - 국부적 비균질 효과가 크지 않음
 - 중성자 누설이 경수로 대비 매우 크게 나타남
- 낮은 핵반응 단면적 & 중성자 누설로 인해 장전된 핵연료의 농축도가 높음 (~20 at.%)

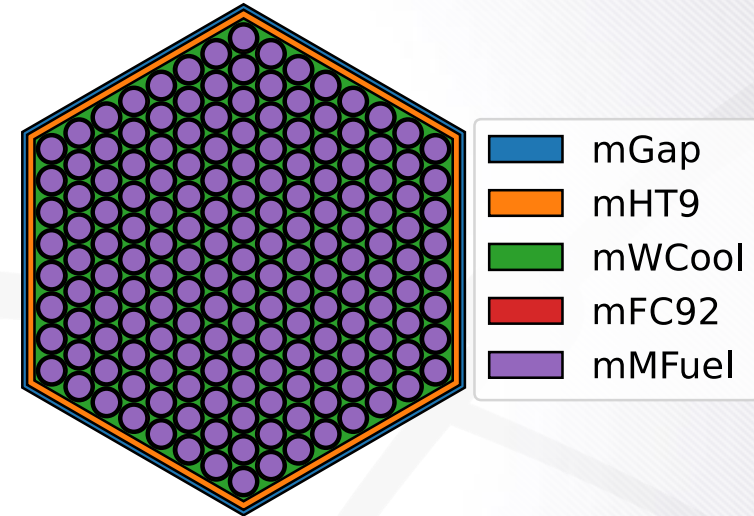
» 주요 노심 반응도 제한 효과

- 도플러 효과 : 주요하나, 경수로 대비 크지 않음
- **금속 핵연료의 축방향 팽창** : 온도 증가와 함께 금속핵연료가 축방향으로 팽창하여 노심의 높이가 증가하는 효과를 가져옴
- **Grid plate의 팽창** : Grid plate의 반경방향 팽창으로 노심이 크기 증가→ 임계도 감소의 효과를 가져옴
- 냉각재 (Sodium)의 밀도 변화 : 노심 설계 및 밀도 변화 영역에 따라 음의 제한 효과 또는 양의 제한 효과를 가질 수 있음

소듐냉각고속로 전산코드에 요구되는 사항

» 소듐냉각고속로 노심 해석을 위해 필요한 기능

- 고속에너지 영역을 포함한 넓은 에너지 구간에서 효과적인 핵반응 단면적
 - 공명영역을 포함한 에너지 구간에서 중성자속 변화를 모사할 수 있어야 함
- 비등방성 산란 처리능 (일반적으로 P3 이상)
- 중성자 누설을 정밀하게 모사할 수 있는 전노심 해석능
- 열팽창으로 인한 노심 임계도 감소 모사 기능
- 소듐기화로 인한 반응도가 삽입에 대한 정밀 계산능
 - 축방향 중성자 누설 효과 VS 중성자 Spectrum 경화 효과
- 자체 재순환을 고려한 핵주기 해석능



[소듐냉각고속로 핵연료 집합체 예시]

» 열중성자 이용 원자로 전산 코드 대비 중요성이 떨어지는 기능

- 좁은 영역에서의 공간적 자기차폐 효과 구현
- Xe등의 핵분열 생성물에 의한 출력 진동 또는 과도 모사
- 노내 계측기 반응 함수 분석 기능

PGSFR 사업 – 아르곤 연구소의 ARC 코드 도입

» Argonne National Lab.(ANL) 과 협업

- PGSFR 주요 설계에 대하여 협업 및 일부 업무 위탁
- KAERI가 노심 설계 주도 → ANL 설계에 대한 독립 검토 (독자 계산 수행)
- 설계 전산코드로 Argonne이 개발한 전산 코드 도입

» ARC (Argonne Reactor Computation) code suites

- MC²-3 : 다군 핵반응 단면적 생산 전산코드
- DIF3D-VARIANT : Even-parity 기반 전노심 수송해석 코드
- REBUS-3 : SFR 주기해석 코드
- RCT : 봉출력 재구성 코드

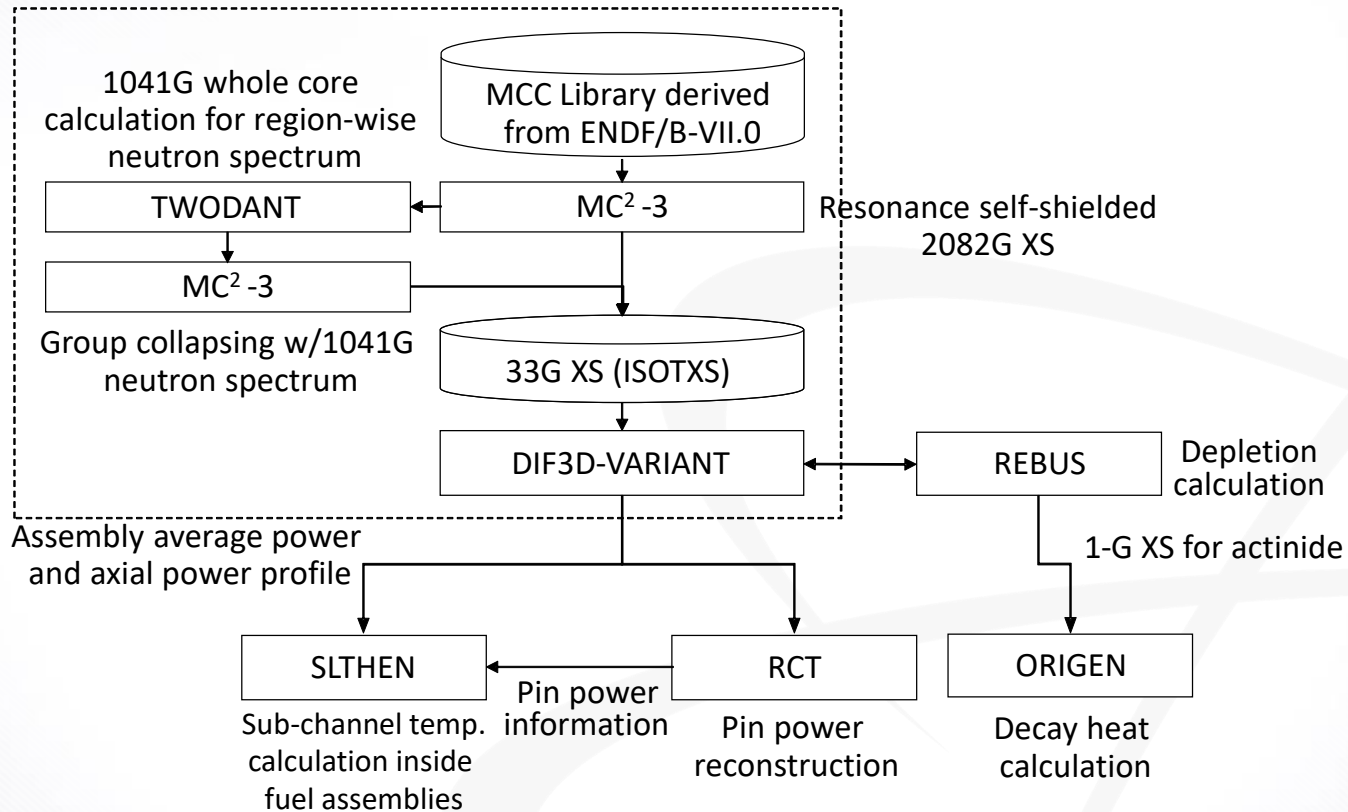
» 추가적으로 이용된 전산 코드

- TWODANT : 전노심 중성자 스펙트럼 계산
- ORIGEN : 붕괴열 및 선원항 계산

» 노심 전산코드 검증 DB 확보

- 자체 노물리실험 설계 및 주요 궤환효과에 대한 검증 데이터 확충 (BFS-84)
- I-NERI 프로그램을 통해 전산코드 검증 DB 교환 및 확보 (EBR-II, ZPPR-15 ↔ BFS-76)

PGSFR 노심 해석 체계



MC²-3 : 다군 핵반응 단면적 생산

공명영역 처리

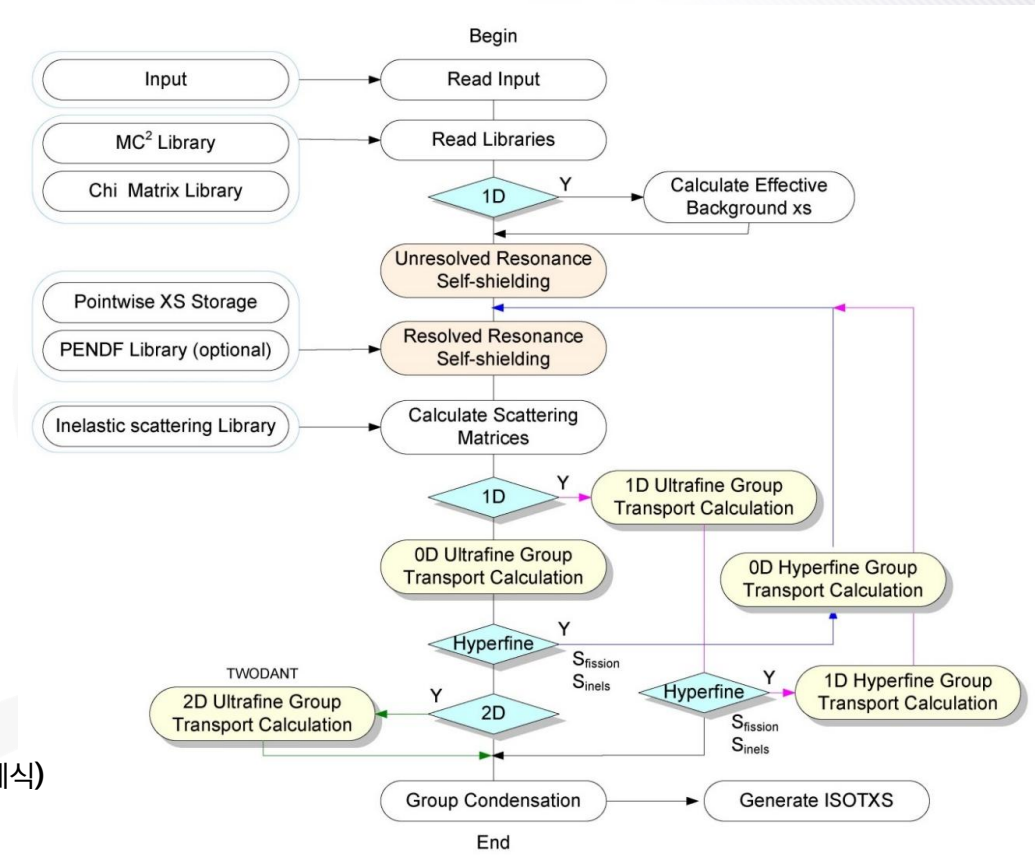
- On-the-fly resonance reconstruction
 - Multi-Pole 형태로 저장된 MCC 라이브러리 활용
- Resolved : Narrow Resonance Approximation
- Un-resolved : Analytic Integral

비균질 효과 구현

- Tone's Method를 이용
- Collision Probability를 통해 Escape XS 계산
 - CPM 수송 계산 모듈 활용

군축약을 위한 중성자 스펙트럼 계산

- 0D P1 수송 계산 수행
 - B_N 방법으로 고차 중성자 모먼트 계산 (재귀적 관계식)
- 1D의 경우 CPM 수송계산 모듈을 활용
- 외부 스펙트럼 (TWOANT-RZ) 반영 군축약 가능



[MC²-3 프로그램 흐름 개요]

DIF3D-VARIANT : 전노심 수송 해석

» DIF3D-VARIANT 핵심 기능

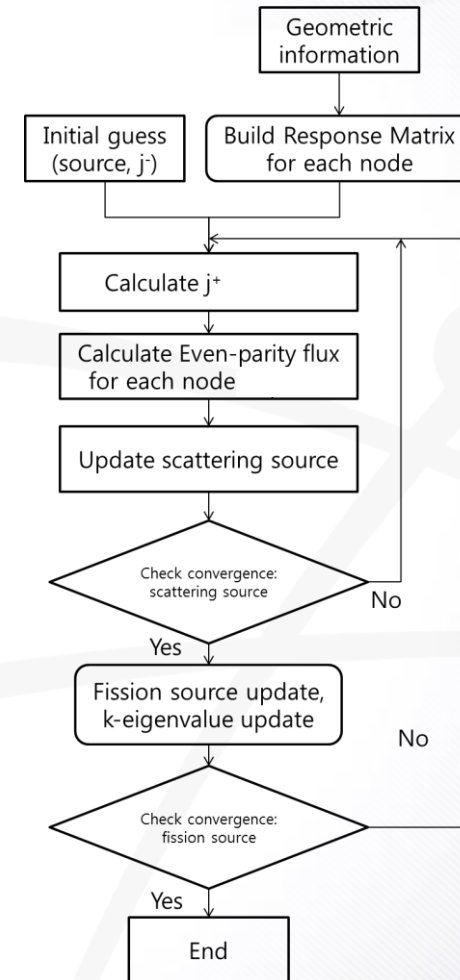
- Even-parity Transport Equation w/ Variational Formulation
 - Finite Element Method와 유사한 접근법
- 삼각, 육각, 사각 격자 구조 기하구조 해석
- 다항식 기반 공간 기저 함수 & P_N 기반 방향 기저 함수 사용
- Chebyshev 가속 구현

» 장점

- 비등방성 산란 명시적으로 구현
- 기저함수 차수 변경으로 해석 정밀도 조정 가능
- 비교적 빠른 시간에 전노심 수송 계산 수행

» 한계

- 소돔 기화로 인한 중성자 누설 정밀 모사 불가
- 진공 영역에 대한 계산 불가
- 축방향으로 짧은 mesh에서 수렴 안정성 저하
- 병렬화 부재 (현재 ANL 버전에는 구현됨)

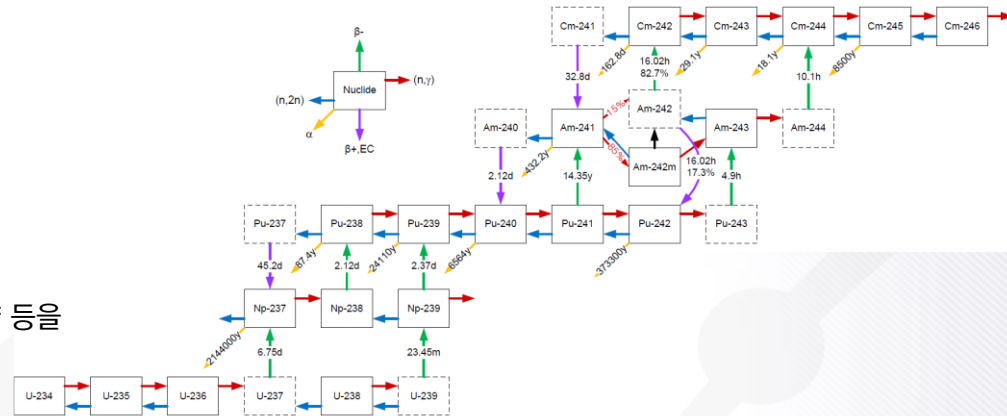


[DIF3D-VARIANT 프로그램 흐름 개요]

REBUS-3 : 고속로 주기해석

» 주요 기능

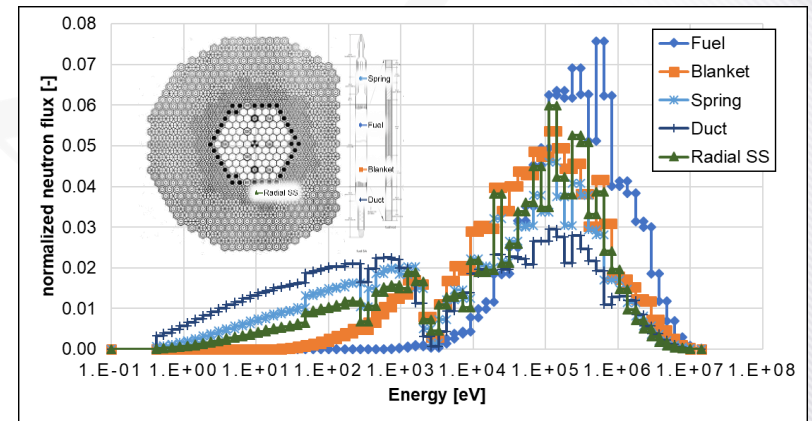
- 핵연료 주기 해석
 - 노심 내 연소 및 노외 재처리/재가공 등의 흐름을 연계
 - 핵연료의 증식/소멸/재순환을 시뮬레이션
- 비평형주기 탐색
 - 특정 시점의 목표 증배계수, 방출 연소도, 재처리연료량 등을 바탕으로 노심의 주기길이, 농축도 등을 계산
- 평형주기 탐색
 - 산개 재장전법 이용 최종 상태의 노심 탐색
 - 평균 핵연료 조성 확인



[악티나이드연소사슬]

» REBUS-3의 연소 계산

- DIF3D-VARIANT를 수송해석 모듈로 활용
- Matrix Exponential Method 이용 연소 계산
- 사용자 고유의 연소사슬 입력 가능
- SFR 해석 시 간소화된 연소사슬 이용
 - Xe, Sm, Gd, B 등 강한 열중성자 흡수 핵종의 중요도 감소
 - 21 actinides, 16 FPs, 16 REs, 1 dummy (54x54)

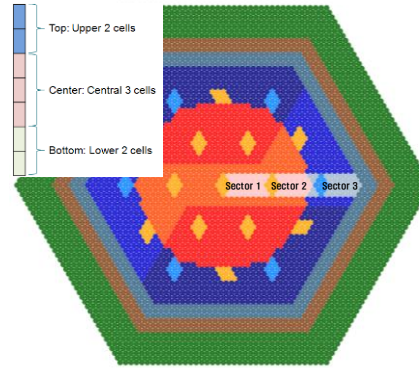


[노심 영역별 중성자 Spectrum-CEFR]

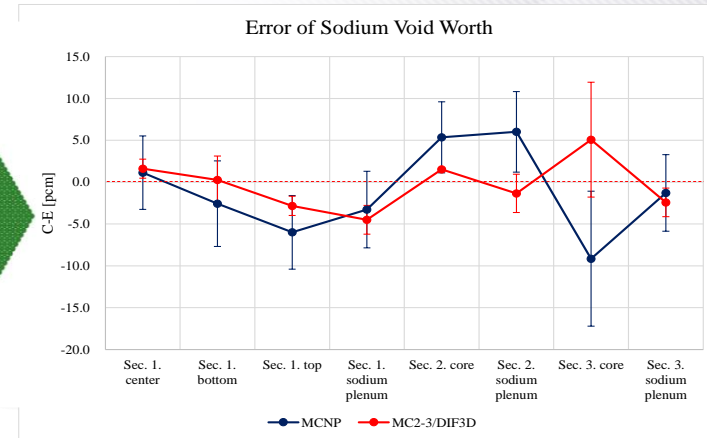
전산코드의 검증 - BFS 실험

» BFS-76 실험

- Pu 함유 노심에 대한 검증 실험 수행
- 제어봉가, 소듐기화반응도가, 스펙트럼 등 측정
- 한정된 Pu 핵연료 디스크
 - 소듐기화 반응도가 대부분 낮게 나타남
 - 계산 결과의 상대 오차가 커짐



[BFS-76 소듐기화 실험 노심]



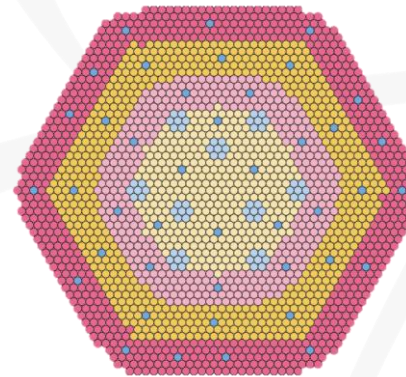
[BFS-76 소듐기화 반응도가 계산 결과]

» BFS-84 실험

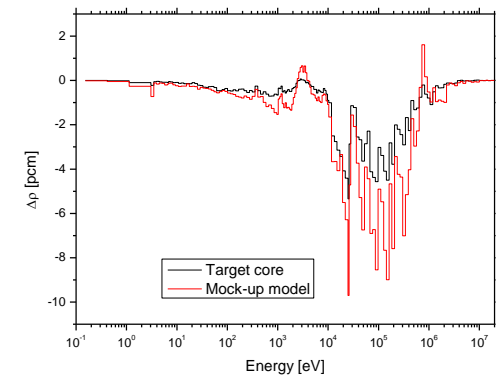
- PGSFR의 Mock-up 실험
- 주요 반응도가 계산에 대신 신뢰도 향상
- 세계 최초 반경방향 팽창 반응도가 측정
- 자체 실험 설계 및 수행

[BFS-84 반경방향 팽창 반응도가 계산 결과]

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



[BFS-84 노심 팽창 모사]



[중성자누설 비교]

KAERI 자체 개발 SFR 전산코드

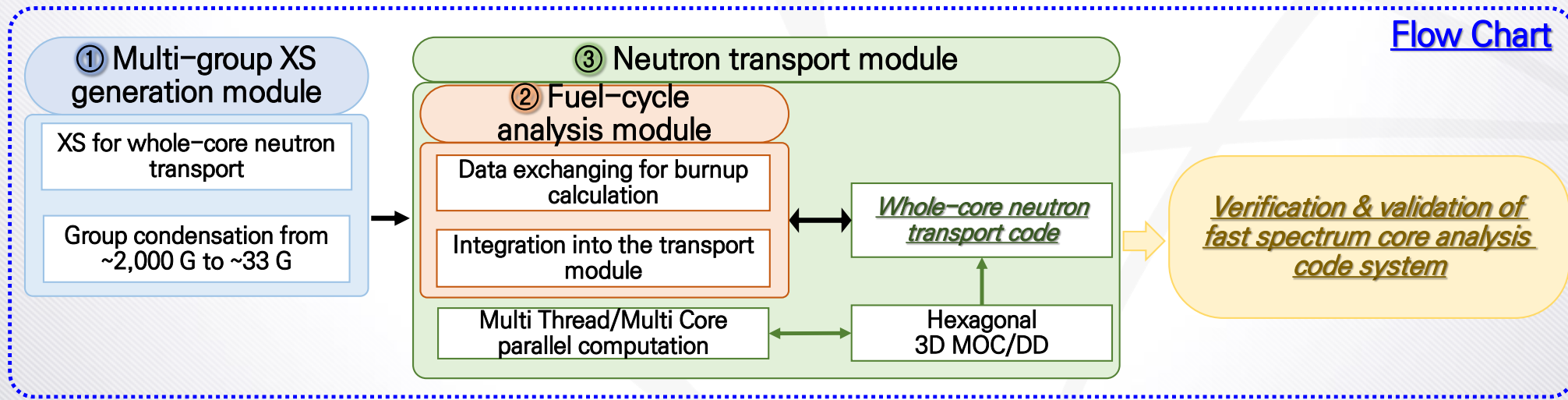
» SFR 노심 해석 코드 패키지 개발

① 핵자료 생산 FXGen: Fast reactor XS Generator

② 핵주기 해석 PENECA-F: Program for Equilibrium and Non-Equilibrium Cycle Analysis
- Fast Reactor

③ 중성자 수송해석 NeuMOCA: Neutron transport solver using the Method of Characteristics Analysis

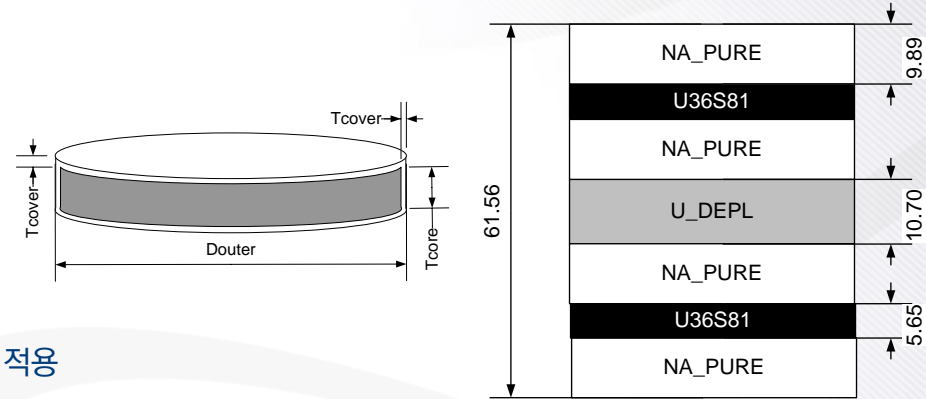
④ 동특성 해석 FREK: Fast REactor Kinetics



FXGen : 고속로용 다군 핵반응 단면적 생산

» 방법론

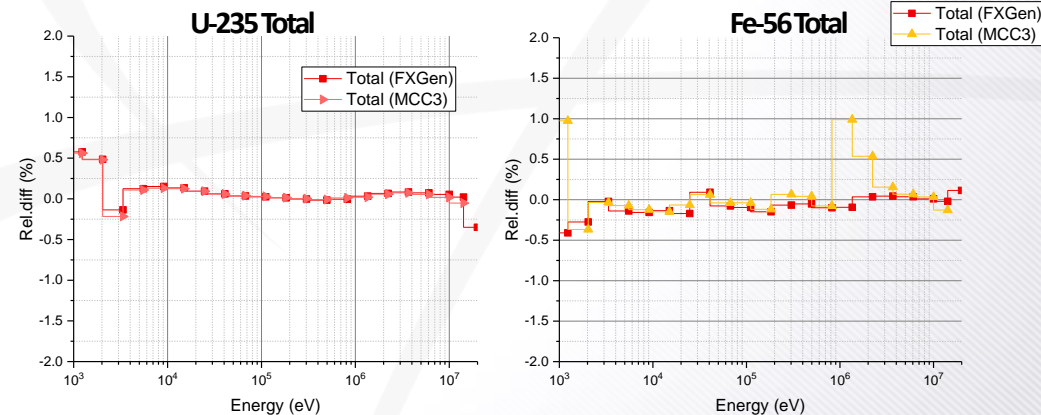
- NJOY로 생산된 PENDF 입력
- MC²-3와 유사한 공명 처리
 - Resolved resonance에 대한 NR 가정
 - CPM기반 Tone's method로 비균질 효과 반영
- Unresolved Resonance 영역 적분에 Probability-table 방법 적용
- (n,2n), (n,3n) 등의 반응에 대한 비등방성 산란 고려



[BFS-73-1 핵연료 유닛셀]

» 차후 개선 사항

- 다차원 수송 계산 모듈 구현
 - 복잡한 기하구조에서의 비균질 효과 반영
- 외부 스펙트럼 반영 군 축약능 구현
- 계산 효율성 개선 및 병렬화
- 사용자 친화적 입출력 모듈 구현
- 감마 라이브러리 생성

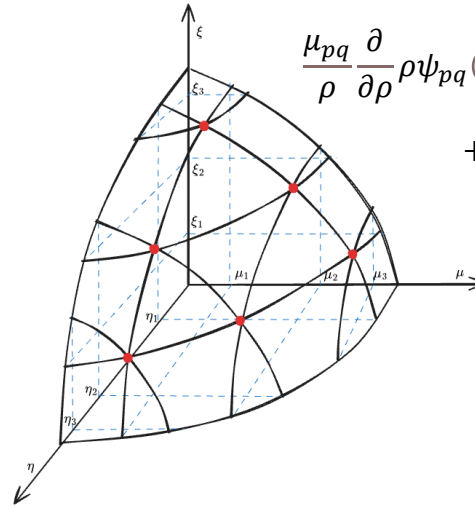


[핵반응 단면적 오차 비교 FXGen VS MC²-3(Ref. McCARD)]

TWODANT 대체 SN 전산코드

» TWODANT 프로그램의 한계

- 메모리 문제로 인한 에너지 군수 제한
 - 현재 1041군 핵반응단면적 사용 계산
- 병렬화 부재로 느린 계산 속도
- MC²-3와 호환성 문제
 - 버전에 따라 MC²-3와 연동 계산이 불가



$$\frac{\mu_{pq}}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} \rho \psi_{pq}(\vec{r}) + \frac{\alpha_{q+1/2}^p \psi_{p,q+1/2}(\vec{r}) - \alpha_{q-1/2}^p \psi_{p,q-1/2}(\vec{r})}{\rho w_{pq}} + \xi_p \frac{\partial}{\partial z} \psi_{pq}(\vec{r}) + \sigma \psi_{pq}(\vec{r}) = q_{pq}(\vec{r})$$

» 자체 SN-RZ 전산코드 개발

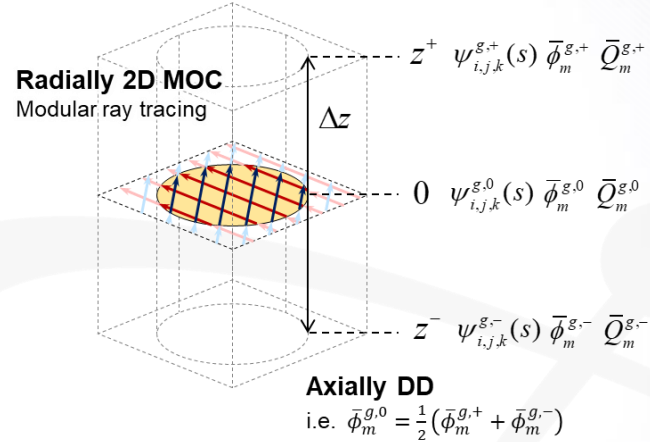
- C++17 기반 표준화된 프로그래밍 활용
- OpenMP 이용 병렬화
- 고차 중성자 모멘트 직접 계산
- 간단한 문제에 대해서 검증 계산 수행
 - 추가적인 검증 필요
- 입/출력 Interface 고도화 필요

	Sn Order	Scattering Order	Mesh Size [cm]	k-eff	Difference [pcm]	Computing Time [sec]
자체 개발 코드 (8cpus)	S6	P3	2	1.13721	36	1.779
	S8	P3	2	1.13705	20	2.335
	S12	P3	2	1.13695	10	4.415
	S16	P3	2	1.13693	8	7.498
	S16	P1	2	1.13386	-299	4.731
	S16	P2	2	1.13721	36	6.165
	S16	P3	2	1.13693	8	-
	S16	P3	5	1.13669	-16	1.186
	S16	P3	3.333	1.13688	3	2.662
	S16	P3	2	1.13693	8	7.973
S16	P3	1	1.13695	10	32.848	
Griffin (4cpus)	PL10 AZ18	P3	2.5	1.13685	-	50.000

NeuMOCA : 전노심 수송 해석

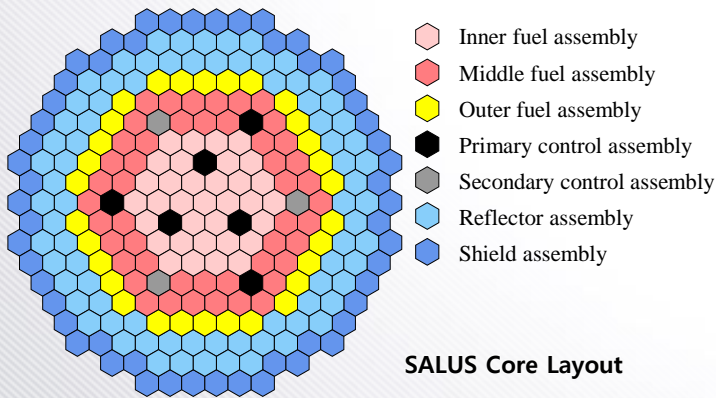
» 육각형 격자구조 기반 MOC/DD 수송계산 전산 코드

- 축방향 중성자 누설 정밀 모사
 - 반경방향 선원영역→ 축방향 확장
- ISOTXS 형식 핵반응 단면적 처리
 - MC²-3와 연동 전노심 계산 가능
- 3D MOC 대비 약 80배 빠른 계산 속도
- 비등방성 산란선원항 구현



» MPI/OpenMP 병렬화계산

- 집합체 기준 영역 분할법 구현
 - 병렬 계산에 요구되는 메모리 저감 및 계산 효율성 향상



NeuMOCA	1.160				
FSR 6/side		1.299			
MOC	1.074		1.353		
0.05cm/8azi/4pol		1.121		1.299	
P1 scattering	1.195		1.121		1.160
k-eff		1.204		1.074	
1.05019	0.897		1.195		0.970
		0.897		-	1.161
	-		0.887		1.075
		0.880		1.196	1.302
	0.864		0.883		1.124
	0.844			1.205	1.356
		0.864		0.883	1.124
U-235 wt.%					
Inner: 5.90%		0.880		1.196	1.302
Middle: 8.33%			0.887		1.075
Outer: 12.46%				-	1.161
					0.970

NeuMOCA Fission Power Distribution

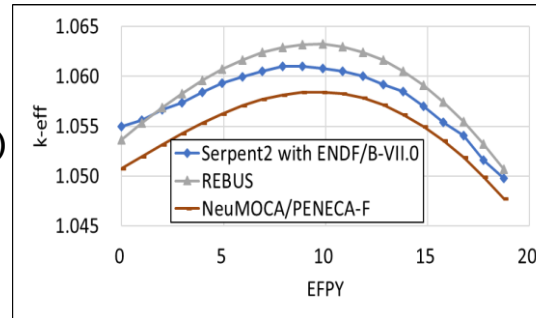
Rel.Dif. [%]	1.48				
(N-O)/O		1.03			
	0.14		0.50		
		0.33		-0.01	
	0.13		-0.19		0.44
		0.03		-0.78	
k-eff diff. [pcm]	0.18		-0.58		-0.40
-438		-0.08		-	0.67
	-		-0.05		-0.42
		-0.31		-0.50	0.34
	-0.39		0.22		-0.44
	0.40		0.05		-0.18
		-0.27		0.10	-0.44
			-0.19		-0.46
				-0.29	-0.69
Max Power Err. 1.48%					-0.15
Min Power Err. -0.78%					
RMS Power Err. 0.47%					0.51
Peak Power Err. 0.16%					-0.45

출력분포 차이 비교

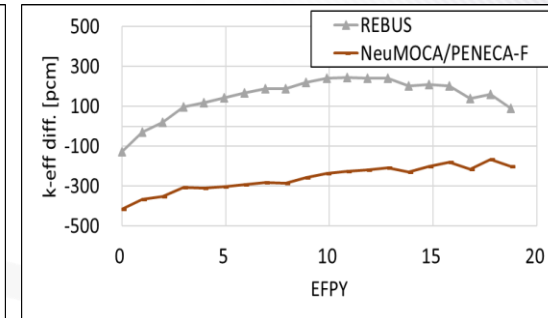
PENECA-F : 고속로 핵주기 해석

» PENECA-F 주요 기능

- 노내/노외 핵주기 모사
- 산개 재장전법 적용 평형주기 해석
- 노심 내 영역 수밀도 반복계산 수치 알고리즘 개선
 - 지수함수 행렬 계산 옵션 추가 (CRAM, Pade)
- 신연료 농축도 예측을 위한 가속기법 구현
 - 계산 시간의 감소 및 안정된 수렴 성능



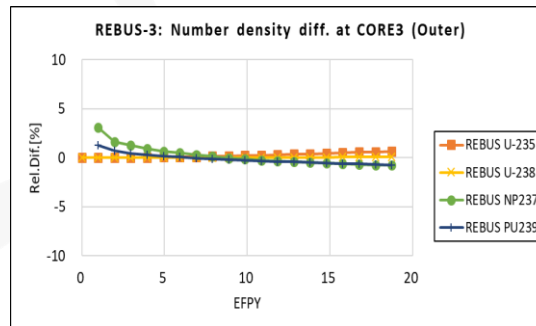
[유효증배계수 변화]



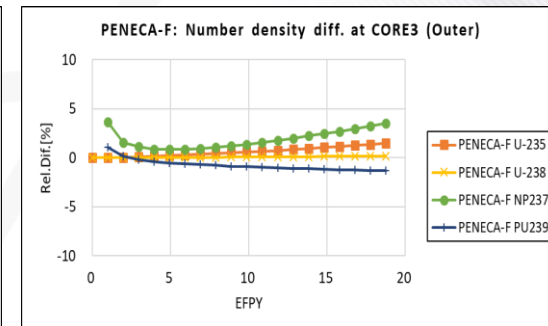
[유효증배계수 변화 비교]

» NeuMOCA/PENECA-F 연계 계산

- MC²-3에서 생산된 핵반응 단면적 활용
- 2차원 SALUS노심 대상, 영역별 연소도 비교
- 몬테칼로 (Serpent 2) 참조 계산
 - REBUS-3와 계산 결과 비교



[REBUS3 최외곽 활성 노심 수밀도 비교]



[PENECA-F 최외곽 활성 노심 수밀도 비교]

» 차후 개선 사항

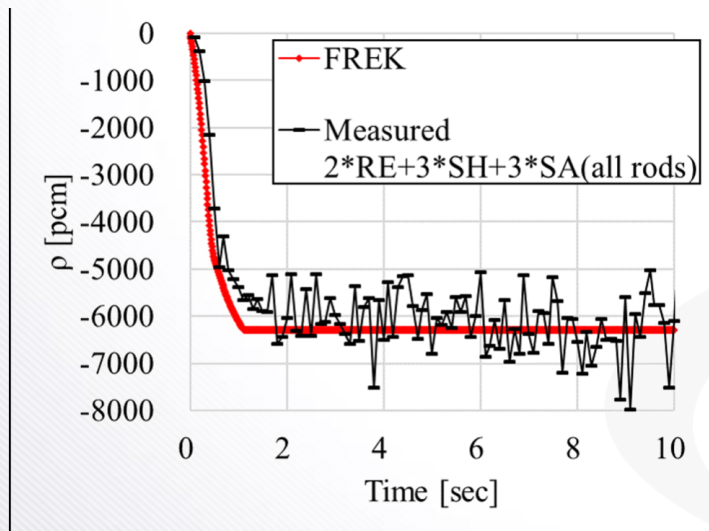
- 평형주기 탐색 모듈 연계 계산 및 검증
- 연계 계산능 개선

FREK : 과도 계산

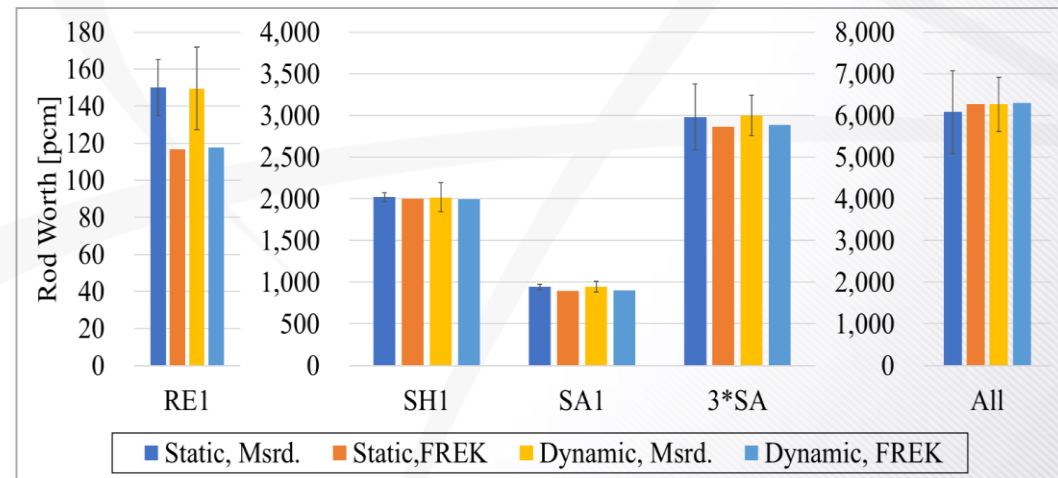
» FREK 전산코드의 기능

- 육각형 격자구조 기반 소듐냉각 고속로 정상 상태 및 과도 상태 노심 해석
- Triangular Polynomial Expansion Nodal (TPEN) 방법론 구현
 - Diffusion 및 Simplified P3 (SP3) 기반
 - Coarse Mesh Finite Difference (CMFD) 가속능 구현
- 차후 Variant 방법론 구현 예정

» FREK 계산의 예제 : IAEA CRP WP3e: Neutron Dynamics



[Dynamic Reactivity 계산]

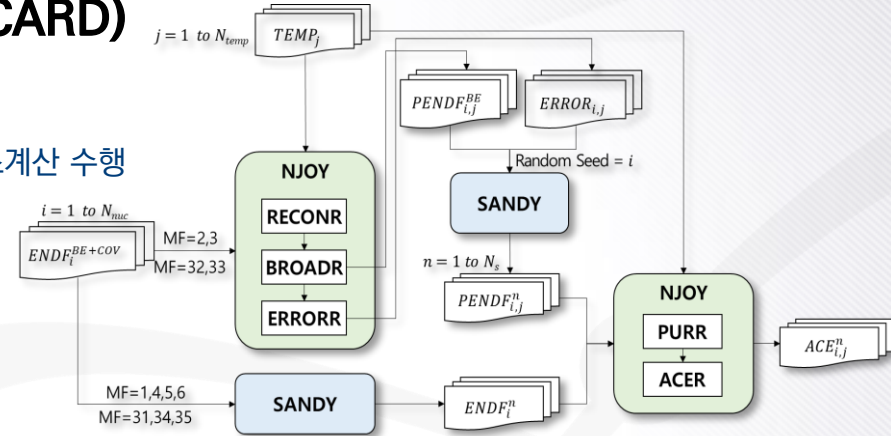


[제어봉가 계산 결과]

TRU 함유노심 불확도 평가 체계

▶ 핵자료 기인 불확도 평가법 (SANDY/NJOY/McCARD)

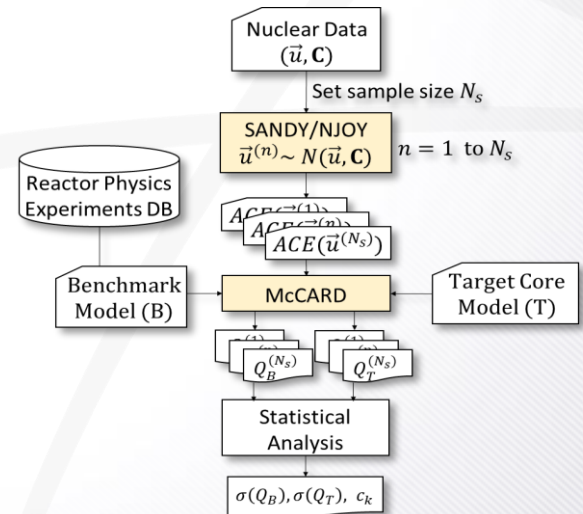
- ENDF 공분산 자료를 활용한 섭동 핵자료 무작위 추출 수행
- 섭동 핵자료(중성자 및 핵분열 생성물 수율)를 이용한 몬테칼로 연소계산 수행
- 연소에 따른 핵종 수밀도에 의한 불확도 기여도 반영
- TRU 함유 노심 임계도 불확도 확인 (2σ)
 - 주기초 : 2587 pcm VS 주기말: 2410 pcm
 - 연소가 진행됨에 따라 임계 불확도가 감소
 - 주요 불확도 기여 핵종인 U-238 수밀도의 감소에 기인



[무작위 추출 기반 섭동 핵자료 생산체계 - SANDY/NJOY]

▶ 편차 추이 분석법 (Bias Trending Approach)

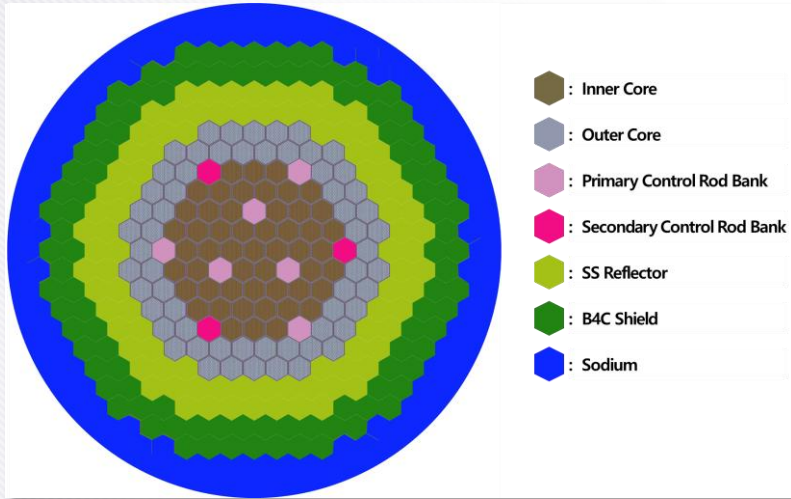
- 대상노심과 노물리 검증자료(임계시설)의 유사도 계수 계산
- 검증자료의 유사도에 따른 임계도 편차(C/E-1)의 추세선 분석
- 편차 추세선의 95/95 허용대역(Tolerance Band)으로부터 불확도 확인
 - BOC : 1083 pcm VS EOC : 1186 pcm
 - 대상노심의 EOC와 벤치마크 노심의 유사도 감소



[불확도 평가코드 체계 - SANDY/NJOY/McCARD]

TRU 함유노심 불확도 평가 결과

» 대상 노심 – PGSFR TRU장전 노심

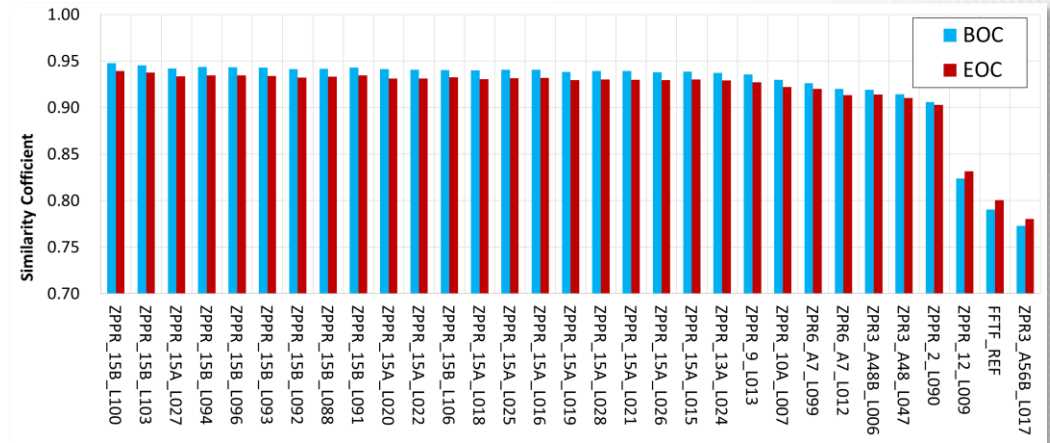


[대상 노심 반경방향 단면]

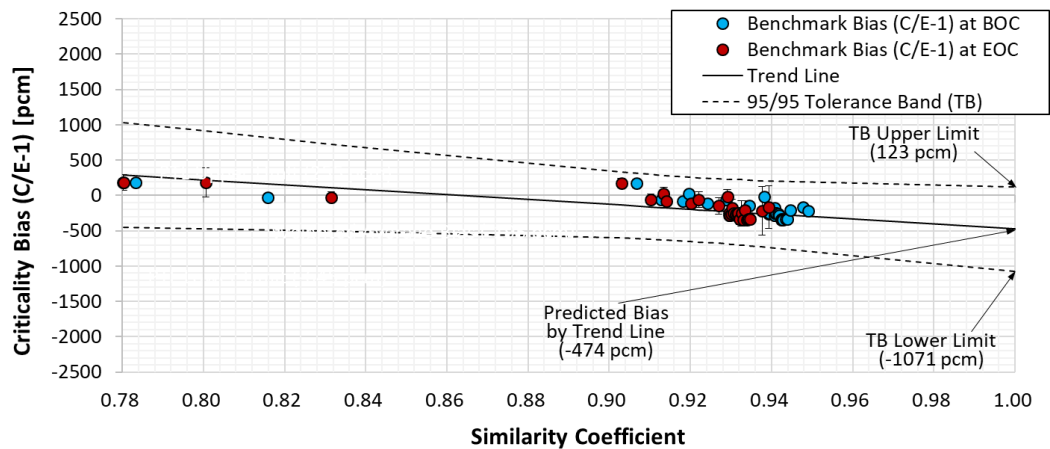
[U-TRU-Zr 금속 핵연료 조성]

Composition	Inner Core	Outer Core
U-TRU, wt%	86.06	86.93
- U, wt _{HM} %	74.94	74.76
- TRU, wt _{HM} %	25.06	25.24
- Fissile, wt _{HM} %	13.92	14.19
- Minor Actinides, wt _{HM} %	2.98	3.05
Zr, wt%	10.00	10.00
Fission Products, wt%	3.94	3.07

» 대상 노심과의 유사도



» 유사도 계수와 편차의 관계



요약 및 마무리

» 소듐냉각고속로 해석을 위한 독자적 노심해석 코드의 필요성

- 노형에 따른 중성자 스펙트럼의 차이
 - 주요 핵종의 공명 에너지 영역에 중성자가 넓게 분포
- 높은 자유행정거리와 비교적 누설이 많은 노심 설계

» PGSFR 사업으로 ANL의 노심해석 전산코드 도입

- MC²-3 / DIF3D-VARIANT / REBUS-3
- 전산코드에 대한 검증 DB 확보
 - ZPPR-15, BFS, EBR-II

» PGSFR 사업 이후 자체 전산코드 개발

- FXGen / NeuMOCA / PENECA-F
 - ANL 전산코드의 방법론 참조
- 주요 계산 모듈 개발 및 검증 수행
 - 일부 모듈 개선 및 추가기능 개발 필요

» 민관 합작 사업에서의 전략

- 자체 전산코드 고도화 및 검증 & 최종 설계에 자체 전산 코드 활용

감사합니다