

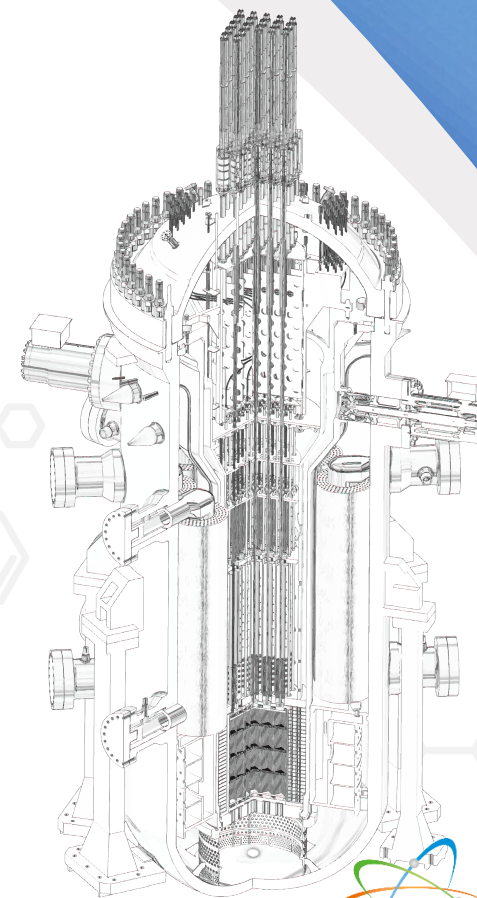
더 나은 세상을 위한 원자력기술
국민과 세계가 지지하는 한국원자력연구원



고온가스로 노심 설계 전산코드체계 현황

2025. 10. 29. 한국원자력학회 워크샵

한국원자력연구원 육승수



한국원자력연구원
Korea Atomic Energy Research Institute



原子力은 國力

더 나은 세상을 위한 원자력기술
국민과 세계가 지지하는 한국원자력연구원



- 01 고온가스로 개요
- 02 블록형 고온가스로 노심
- 03 고온가스로 노심 특성
- 04 고온가스로 노심해석 체계
- 05 맺음말

CONTENTS



고온가스로 노심 설계 전산코드체계 현황

고온가스로 개요

01



한국원자력연구원
Korea Atomic Energy Research Institute

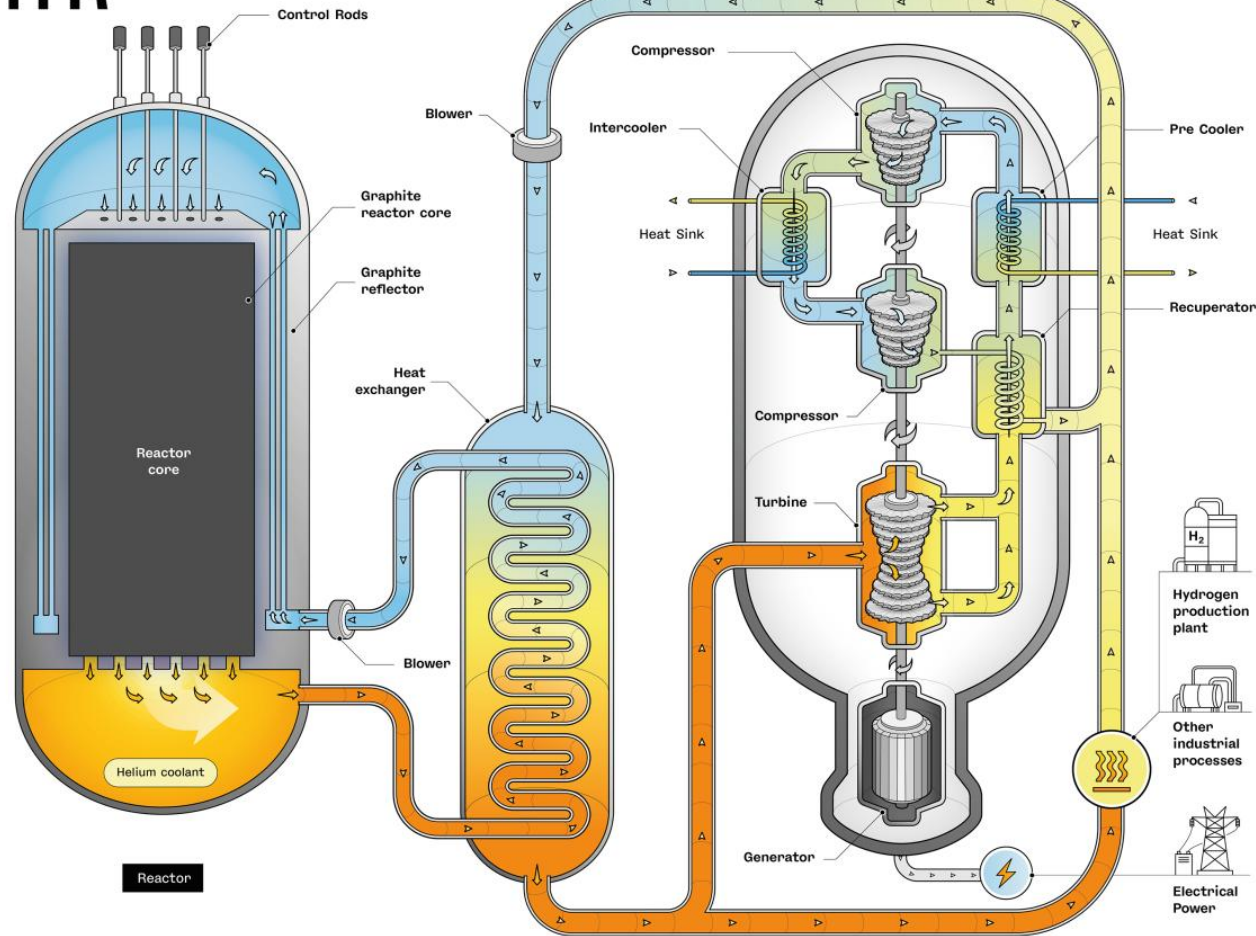
01

고온가스로 개요

고온가스로란?

- 핵연료
 - 삼중피복입자핵연료(TRISO)
- 감속재 및 반사체
 - 흑연(Graphite)
- 냉각재
 - 헬륨(Helium)
- 출구온도
 - 700~950°C
- 열중성자로

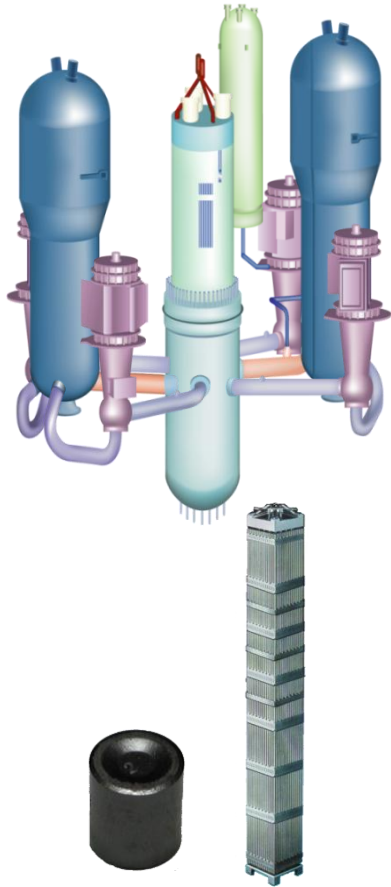
VHTR



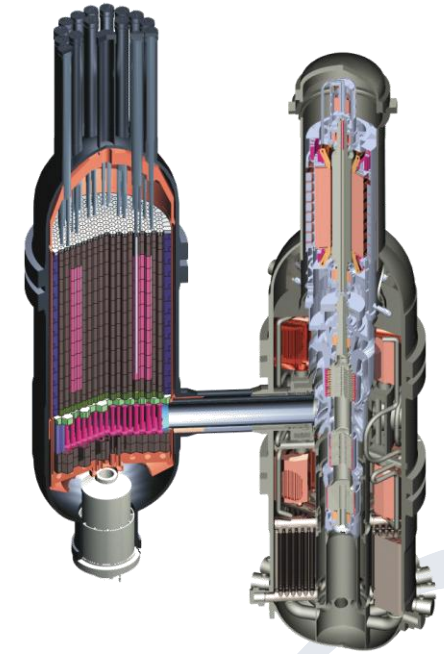
Very-High-Temperature Reactor

(<https://gen-4.org>)

고온가스로와 경수로 비교



항 목	경수로	가스로
냉각재	물	헬륨가스
출구온도	320℃	700~950℃
냉각재압력	150기압	~70기압
감속재	물	흑연
핵연료	펠릿(피복관)	삼중피복입자
안전계통	능동/피동	자연냉각
전력변환	증기사이클 (효율~30%)	가스터빈 (효율~50%)
열 이용	담수, 난방	수소생산, 산업 공정열

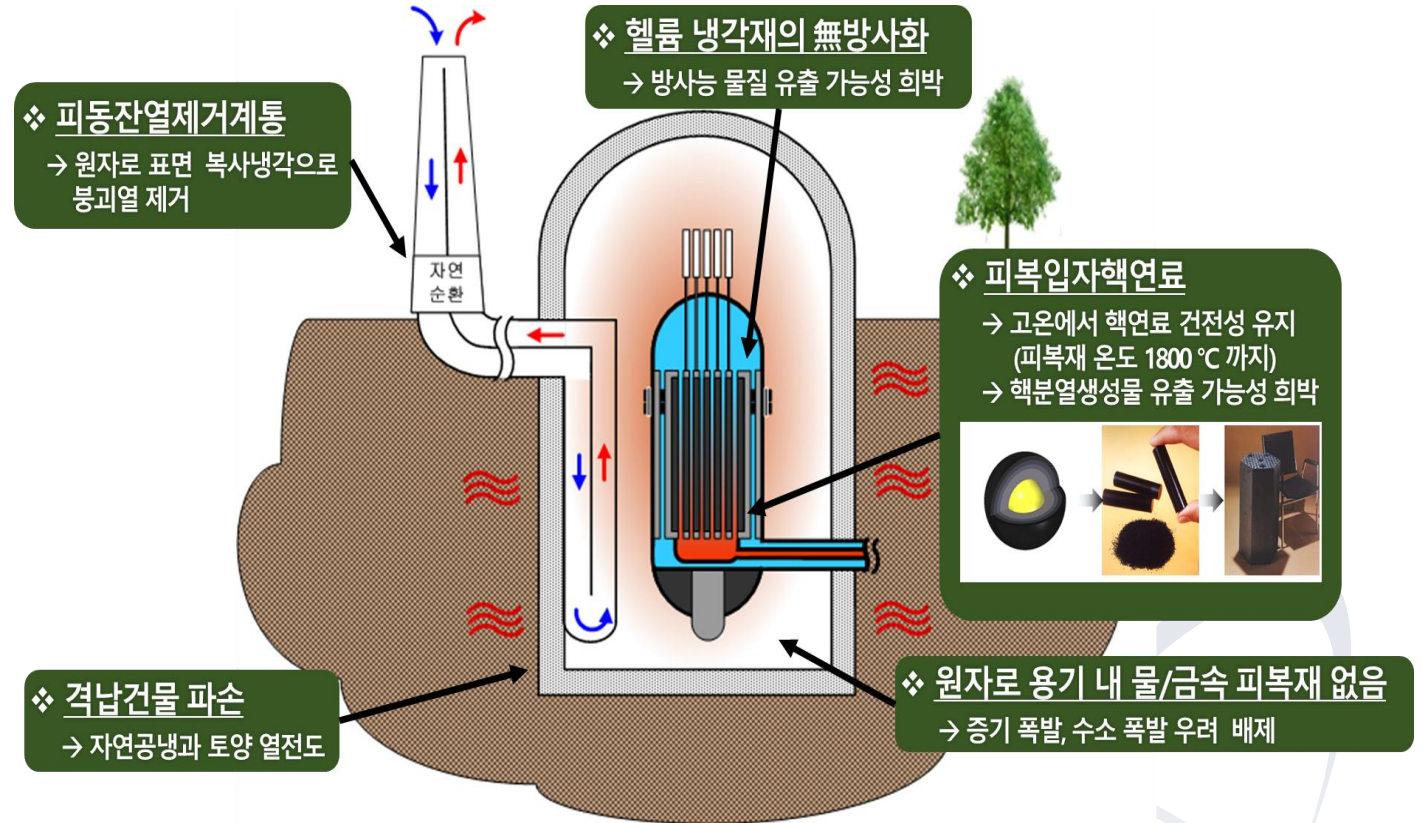


01

고온가스로 개요

고온가스로 특징

- ❑ TRISO 핵연료
 - 고온조건 핵연료 건전성 유지
- ❑ 흑연
 - 우수한 열적 특성 및 큰 열용량
- ❑ 헬륨
 - 열화학적 안전성, 핵적 투명성
- ❑ 원자로공동냉각계통
 - 전원없이 붕괴열 제거
- ❑ 고온열 생산
 - 수소생산, 산업공정열 공급에 유리



〈고온가스로 피동안전개념〉

01 세계 고온가스로 개발 동향

미국: ARDP (차세대원자로개발프로젝트)

- X-Energy, BWXT, Nano Nuclear Energy 등 민간산업체에서 고온가스로 개발, 건설 계획
 - 초소형원자로 타입: 4 / SMR 타입: 5

중국: HTR-PM (고온가스로 실증로, 상업운전 중)

- 250MWth 원자로 모듈 2개와 한 개의 터빈 연결, 200MWe 전력 생산
- 후속 원자로 HTR-PM600 계획 (6개의 모듈과 한 개의 터빈 연결)

유럽: GEMINI 4.0 (산업용 고압 증기 생산 고온가스로 개발프로젝트)

일본: HTTR 실험로 (가스로 수소생산 실증 계획)

- 국제협력개발(영국, 폴란드) 및 150~250MWth급 가스로 실증 사업 계획

러시아: 200MWth급 고온가스로(VTGR-200) 건설 계획

한국: 민관합작 차세대원자로개발 프로젝트

- 산업공정열 공급용 고온가스로 HECTAR(90MWth) 개발 중



고온가스로 노심 설계 전산코드체계 현황

블록형 고온가스로 노심

02



한국원자력연구원
Korea Atomic Energy Research Institute

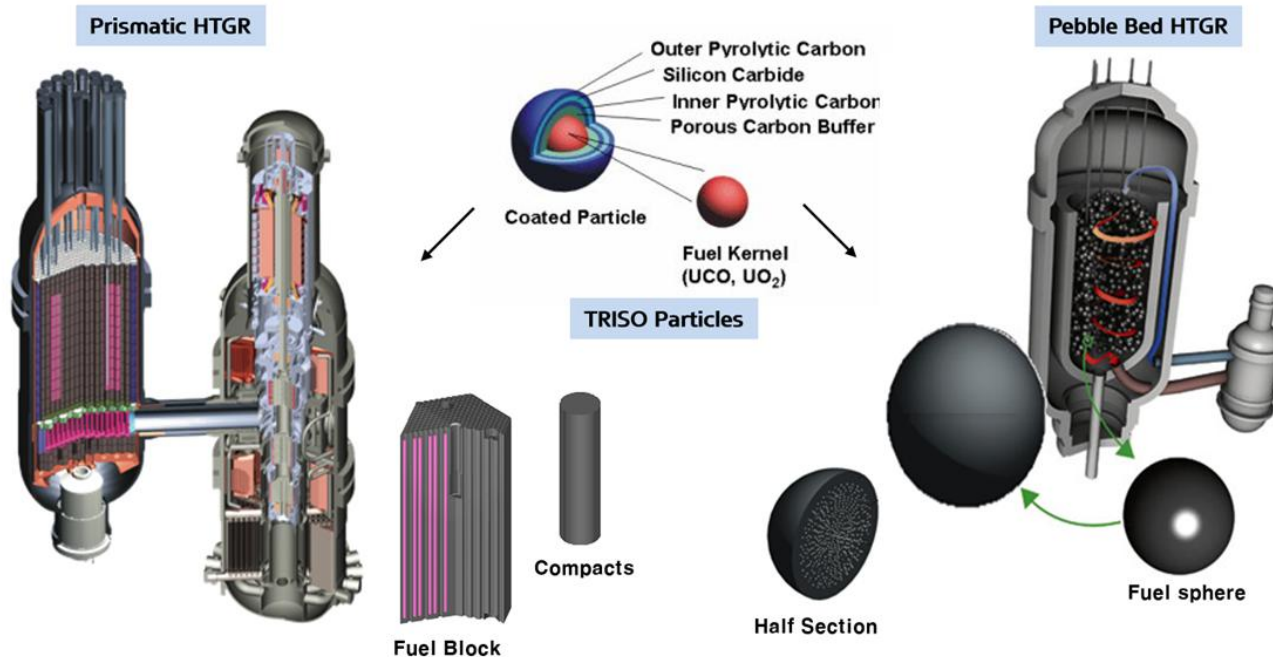
블록형 고온가스로 특징

육각기둥 블록 단위의 규칙적인 배치

- 펄베드형 대비 높은 출력밀도 가능
- 높은 잉여반응도 제어 방법 필요
- 핵물질 추적 용이함
- 핵연료 재장전 시 운전정지 필요

참고: 펄베드형 고온가스로 특징

- 연속적인 핵연료 교체
 - 노심 잉여반응도가 매우 낮음
 - 핵연료 재장전을 위한 운전정지 불필요
- 불규칙한 펄베 배치
 - 불규칙한 헬륨 유로
 - 낮은 출력밀도



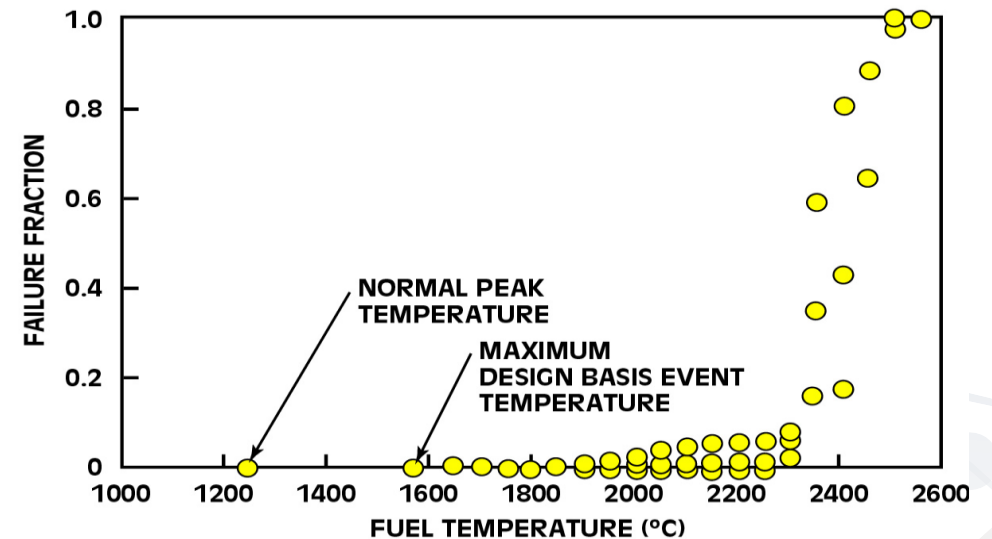
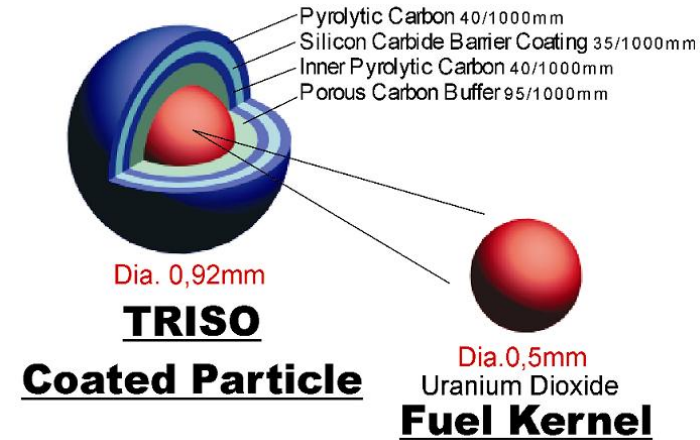
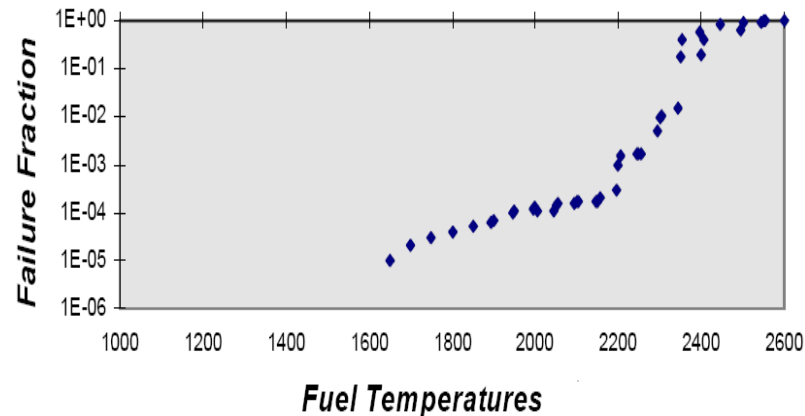
TRISO 입자 핵연료

구조

- Fuel Kernel: 350~800 μm
 - Carbides/Oxides of U, Pu, and Th
- Porous Carbon Buffer : 60~100 μm
- Inner Pyrocarbon Layer: ~40 μm
- SiC Layer: ~40 μm
- Outer Pyrocarbon Layer: ~40 μm

핵분열생성물 누출 방지

- 다중 방벽 개념, Failure Fraction $< 10^{-5}$ up to 1,600 $^{\circ}\text{C}$



02

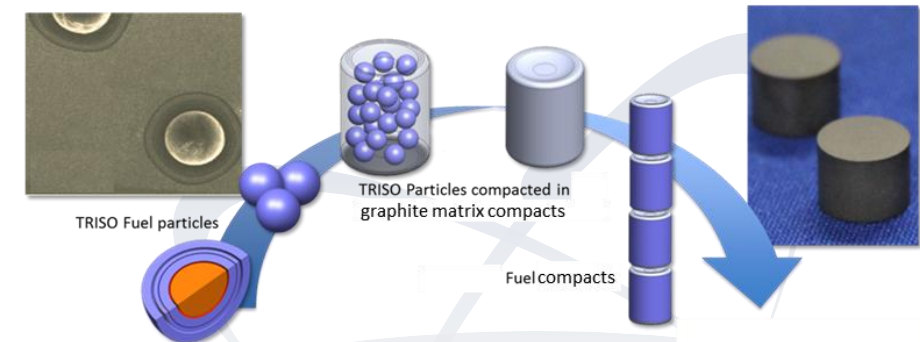
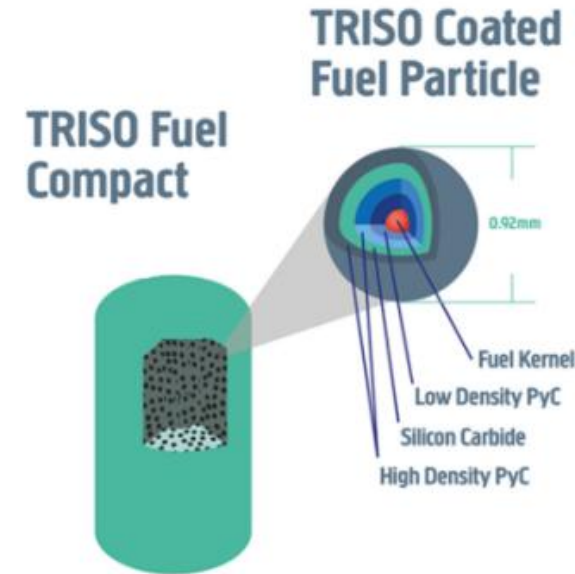
블록형 고온가스로 노심

블록형 고온가스로 노심 구성 요소 (2)

- 핵연료 컴팩트 (Fuel Compact)
 - 흑연 또는 SiC 매트릭스와 TRISO 입자를 일정 비율로 혼합 후 제조
 - 핵연료 컴팩트 안에는 TRISO 입자가 랜덤하게 분포
 - 원통형 (미국) vs. 환상형 (일본)

핵연료 컴팩트 제원 예시

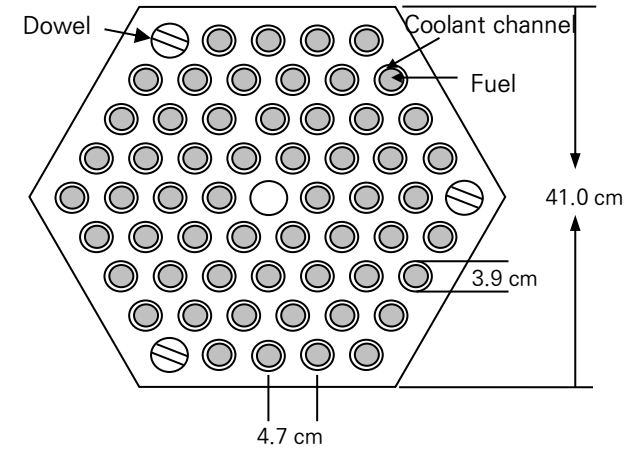
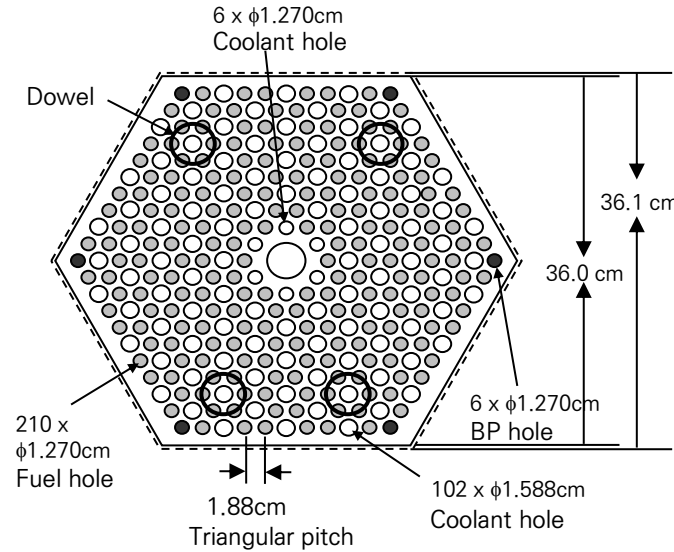
Parameters	Value
Radius/Height (cm)	0.625/5
Particle packing fraction in a compact	0.279
Uranium mass (g)	1.5
Matrix density (g/cc)	0.8 ~ 1.2



핵연료 블록

육각 기둥 핵연료 블록에 다수의 구멍을 뚫고 핵연료 컴팩트를 장전함

- 미국: 핵연료 구멍과 냉각재 구멍이 다름
- 일본: 구멍 중앙에 핵연료 컴팩트 장전, 블록과 핵연료 컴팩트 사이에 냉각재 흐름



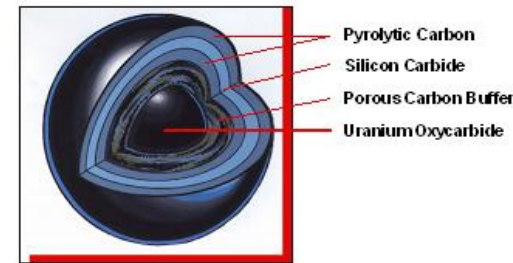
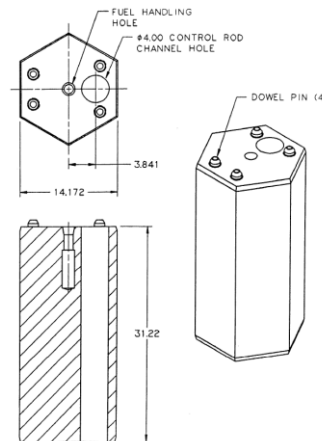
반사체 블록

핵연료/냉각재 구멍 없는 육각 기둥

- 크기는 핵연료 블록과 동일
- 일부 반사체에 제어봉 구멍 있음

영구 반사체

노심 배럴 경계에 맞는 모양의 흑연 반사체



Particles



Compacts



Fuel Assembly

원자로 노심

■ 반사체, 핵연료 블록 배치

- 반경 방향: 육각격자 구조
- 축 방향: 블록 층 구성

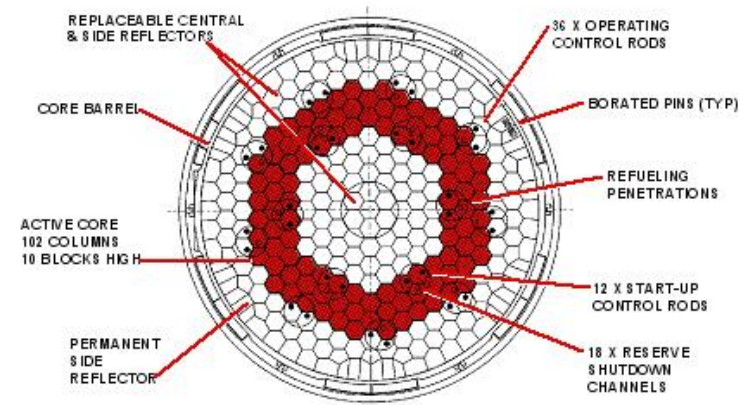
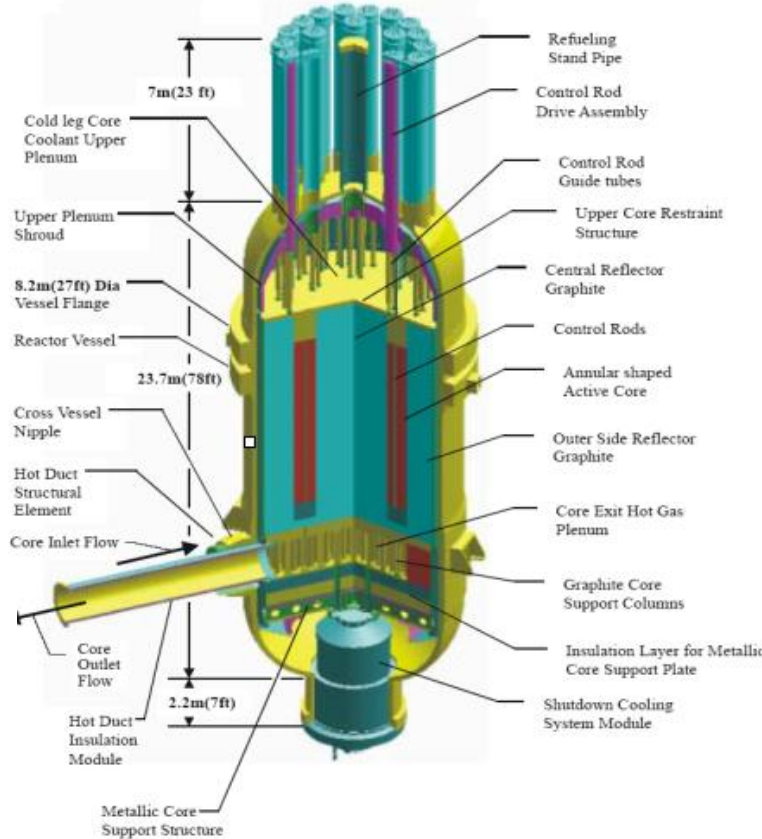
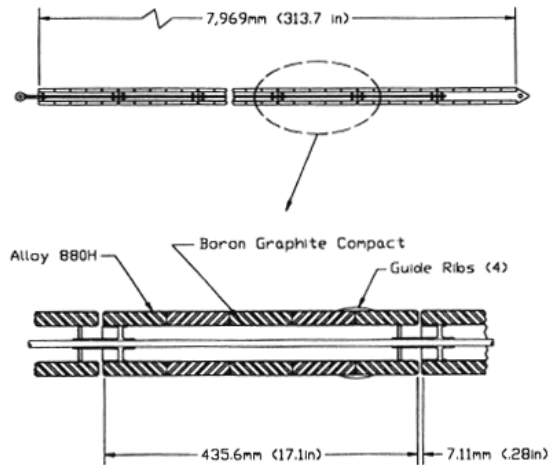
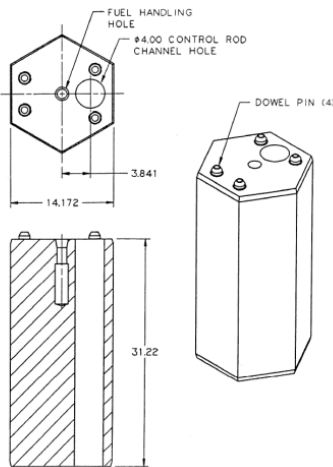
■ 축 방향으로 긴 구조

■ 핵연료 영역

- 고리형 또는 내부반사체 활용

■ 제어봉

- 핵연료 인접 반사체 블록에 위치





고온가스로 노심 설계 전산코드체계 현황

고온가스로 노심 특성

03



한국원자력연구원
Korea Atomic Energy Research Institute

03

고온가스로 노물리 특성

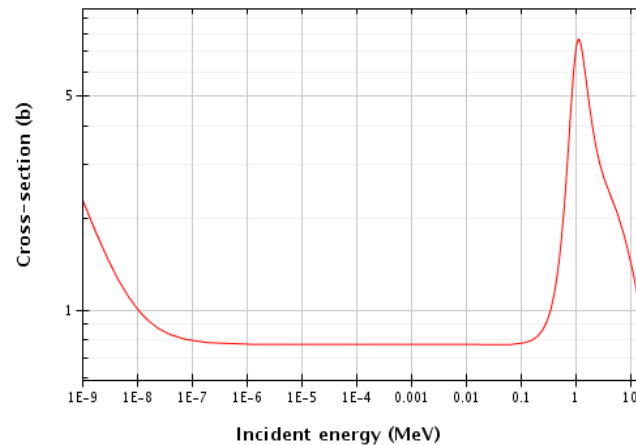
고온가스로의 핵적 특성 (1)



헬륨 냉각재

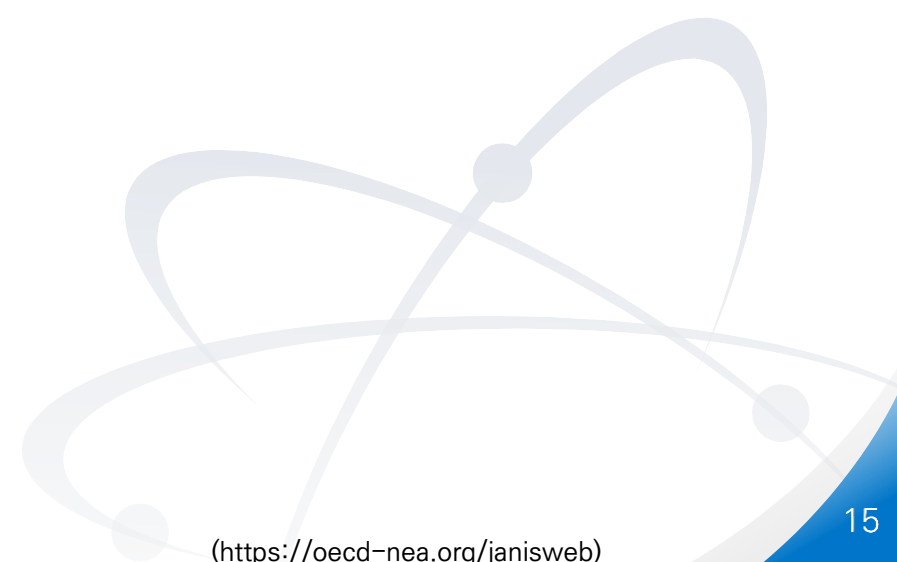
- 스스로 방사화 되지 않음
- 기체 핵종(낮은 밀도), 작은 핵단면적
 - 핵적으로 무시 가능

Incident neutron data / ENDF/B-VIII.0 /
He4 / MT=1 : (n,total) / Cross section



〈He-4 핵단면적〉

(<https://oecd-nea.org/janisweb>)



(<https://oecd-nea.org/janisweb>)

03

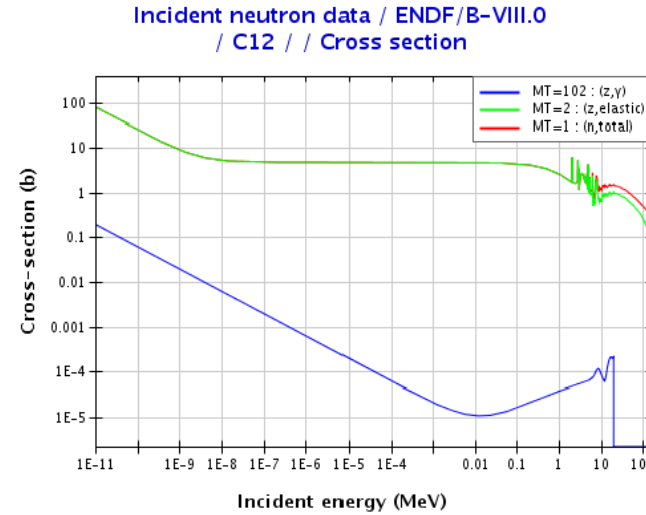
고온가스로 노물리 특성

고온가스로의 핵적 특성 (2)

핵연 감속재/반사체

물과 비교

- 중성자 감속능력($\zeta\Sigma_s$) 작음
 - 중성자 감속에 많은 양이 필요함
 - 상방향 산란
- 중성자 흡수(Σ_a)가 매우 작음
- 감속비($\zeta\Sigma_s/\Sigma_a$) 우수함
 - 적은 핵연료로도 임계 가능



<C-12 핵단면적>

(<https://oecd-nea.org/janisweb>)

<실온에서 물과 흑연의 감속 특성 비교>

(고온가스로 공학 입문)

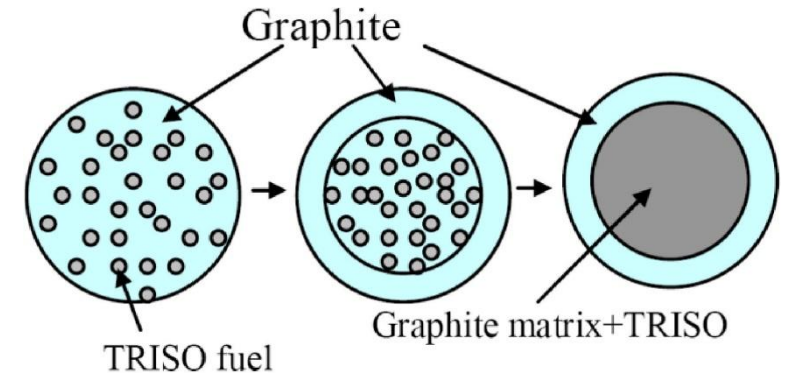
	Parameter	Water	Graphite
Thermal (0.0253 eV)	Σ_a (1/cm)	0.022	0.00029
	Σ_s (1/cm)	3.45	0.41
	D (cm)	0.16	0.86
	L (cm)	2.75	54
Epithermal	Σ_s (1/cm)	1.40	0.41
	$\zeta\Sigma_s/\Sigma_a$	62.0	216.0
	ζ	0.93	0.158
Fermi age	τ (cm ²)	27.0	370.0
Migration length mean free path (cm)		6	57

이중 비균질성

- 핵연료 영역과 비핵연료 영역이 비균질하게 배치
- 핵연료 영역의 흑연 매트릭스에 TRISO 입자가 랜덤하게 분포
 - 자기 차폐 효과 (Self-shielding effect)

어떻게 해결할까?

- TRISO입자 랜덤 분포 직접 모사 (Random sampling)
 - 몬테카를로 코드에서 사용하기 적합함
- 반응도 증가 물리 변환 (RPT: Reactivity-equivalent Physical Transformation)
 - TRISO+흑연 매트릭스 균질화, but 균질화 영역 크기는 반응도를 보존하도록 맞춤
 - 실제 흑연 매트릭스 영역보다 균질화 영역 크기가 줄어들음 (자기 차폐 효과 보존)
- Sanchez-Pomraning 방법
 - MOC 계산에서 이중 비균질성 문제를 풀기 위한 방법
 - DeCART2D_HTR 코드에 적용



〈이중 비균질성 및 RPT 개념〉

(<https://doi.org/10.1016/j.anucene.2020.107396>)

고온가스로 중성자 스펙트럼

흑연 감속재 사용

- 중성자 감속능 떨어짐/중성자 흡수율 작음
- 열중성자 영역에서 상방향 산란 발생

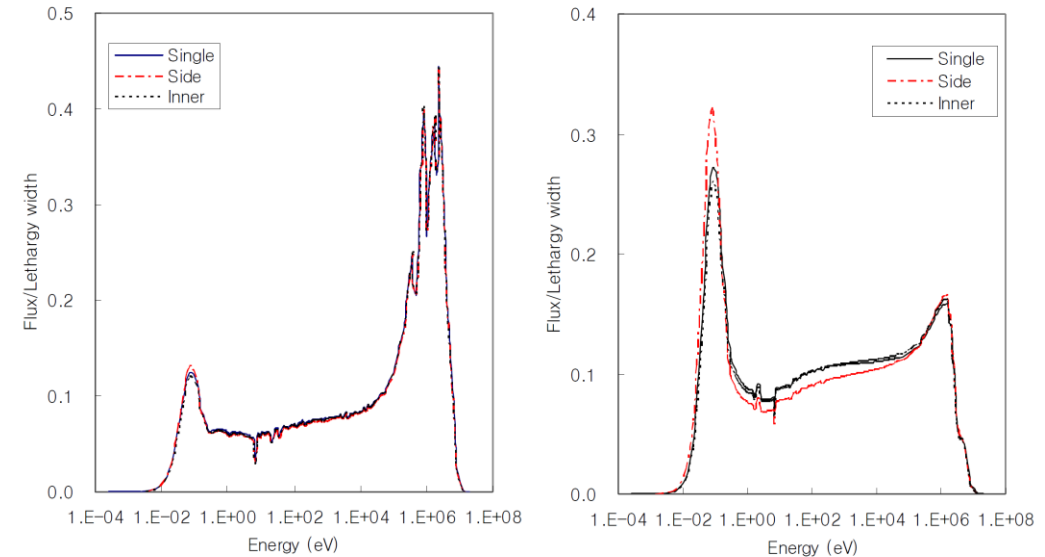
반경방향 위치 별 중성자 스펙트럼 차이

- 핵연료 영역 / 내부 반사체 영역 / 외부 반사체 영역이 다름
- 흑연 비중에 따른 차이

축 방향 위치 별 온도 차이

- 냉각재 입/출구 온도 차이: 400도 이상
- 위치별로 온도 차이가 크게 벌어짐
- 온도 차이에 따른 핵단면적 차이 발생

고 연소도에 따른 스펙트럼 변화



(a) PWR

(b) VHTR($UC_{0.5}O_{1.5}$)

〈고온가스로 중성자 스펙트럼〉

(김강석 외, KNS-Autumn 2006)

- 핵연료/반사체 상호작용
 - 핵연료 블록 / 반사체 블록 간의 상호 영향이 강함
 - 확산거리: 핵연료 영역 30 cm / 반사체 영역 70 cm
 - 일반 경수로 대비 4배(핵연료), 14배(반사체)

- 일반 2단계 해석 절차 시 주의할 점
 - 군 축약 (Group condensation)
 - 2군 군축약으로는 고온가스로 중성자 스펙트럼을 반영하기 어려움
 - 8~10군 군축약

 - 균질 핵단면적 및 등가 균질화 인자 (Homogenized Constants)
 - 전반사 경계조건 하의 단일블록 균질화는 블록 간 상호작용 반영하기 어려움
 - 핵연료 블록 주변 영향을 고려한 균질화 작업 필요



헬륨 냉각재

비활성 기체

- 열적, 화학적 안정성

기체 중 열전달 우수

- 높은 열전도율
- 높은 비열

분자량 작아 누출율 높음



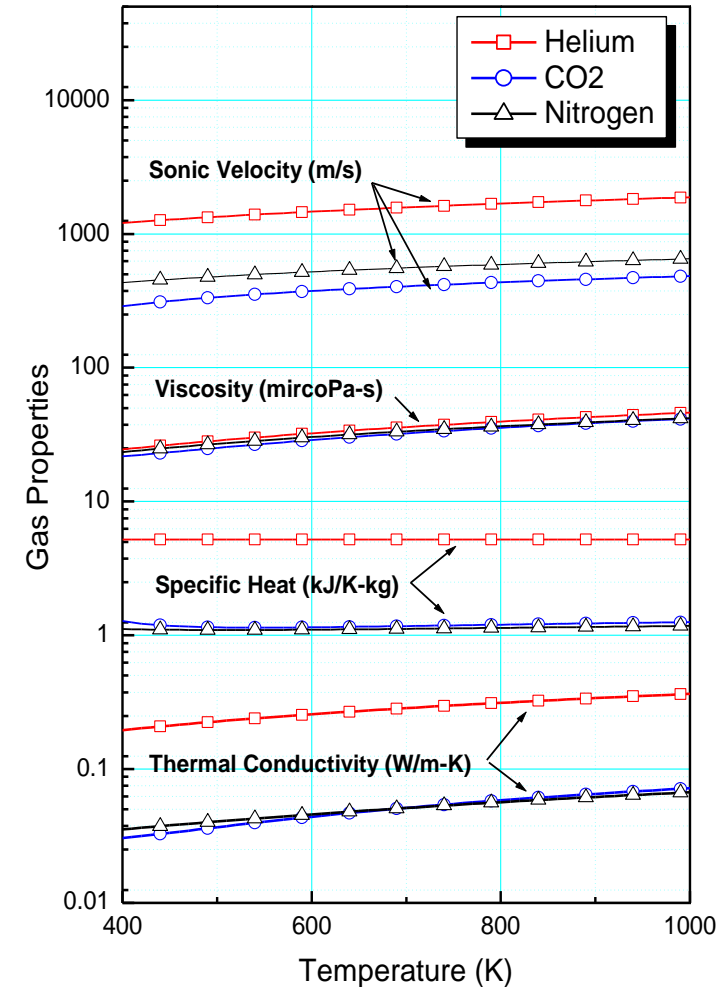
흑연 구조물

우수한 열적 특성 및 큰 열용량

- 사고 조건에서 느린 과도 거동

음의 감속재 온도계수 (크기는 작음)

고온 조건: 위그너 효과로 인한 에너지 축적 문제 없음



- 축 방향으로 긴 노심 형상
 - 반경 방향 중성자 누출이 상대적으로 큼
 - 제어봉가 또한 큼
 - 붕괴열 제거 시, 반경 방향으로 열전도가 큼
 - 출력분포, 유량분포 제어 난이도
 - 붕산 사용 불가
 - 제논 안정성 고려 필요 (경수로 대비 여유 있음)



- 고리형 노심 또는 내부 반사체
 - 반경 방향 출력분포 평탄화
 - 제어봉이 핵연료 영역 근방에 위치하여 제어봉가 높임
 - 활성 노심과 용기 간 거리 단축
 - 붕괴열 제거 용이
 - 핵연료 영역 근방 반사체도 재장전 필요
 - 높은 중성자 조사량
 - 거대한 노심, RPV



03

고온가스로 노물리 특성

기타 고온가스로 노심 특성 (4)

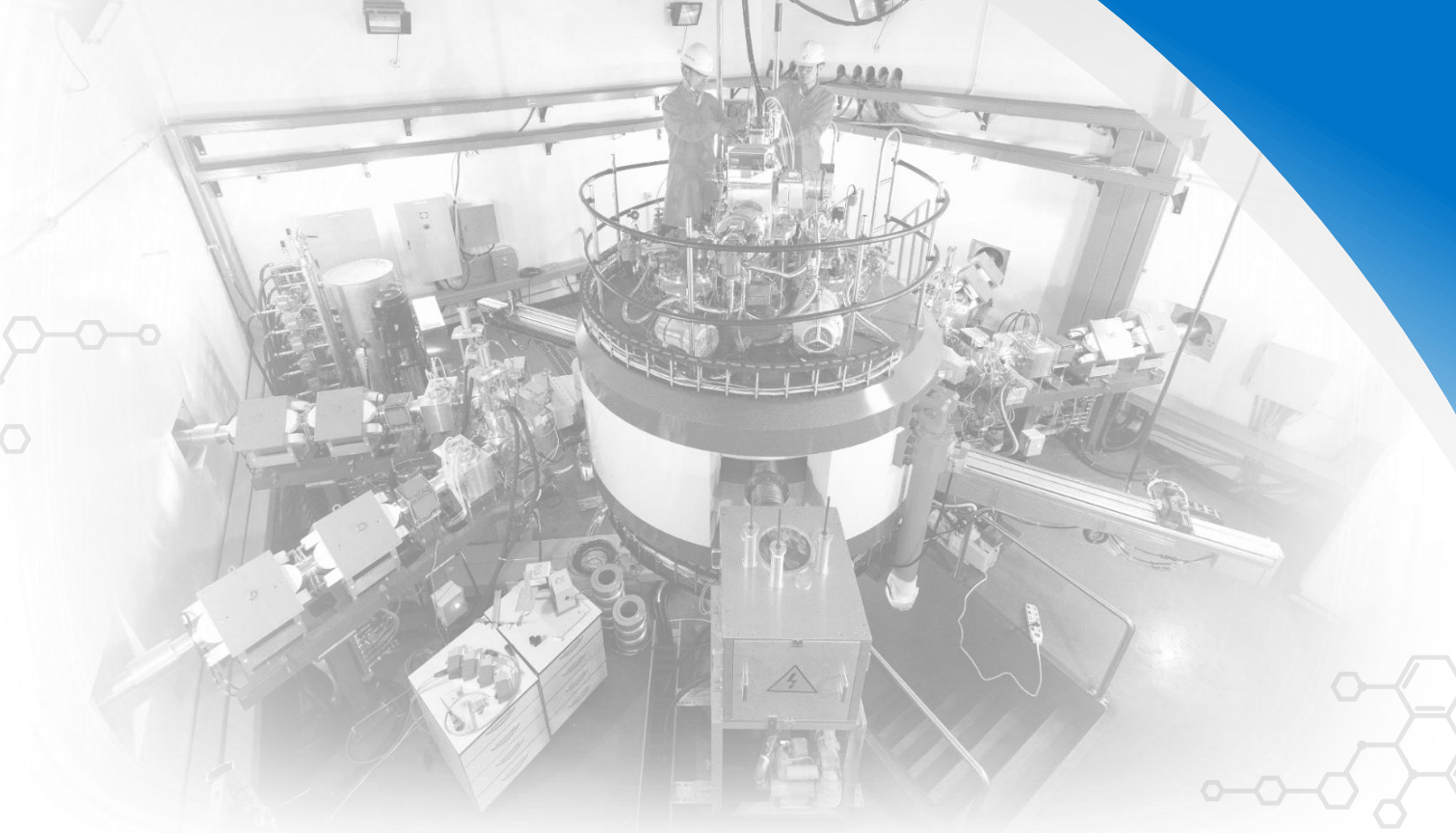
❏ 다른 노형 대비 낮은 출력밀도

- 경제성 떨어짐
- 붕괴열 제거 용이, 안전성 우수

❏ 반응도 제어 및 운전 정지 시스템

- 제어봉
- RSC (Reserved shutdown system): 중성자 흡수 물질 pellet or ball을 낙하시킴
- 헬륨 순환기로도 원자로 정지 가능





고온가스로 노심 설계 전산코드체계 현황

고온가스로 노심해석 체계

04



한국원자력연구원
Korea Atomic Energy Research Institute

04

고온가스로 노심해석 체계

고온가스로 노심 핵설계 인자

■ 노심 핵설계에서 도출할 자료

■ 노심 구성

■ 유효 증배계수

- 반응도 계수
- 제어봉가
- 정지여유도
- 제논가

■ 출력분포

- 침두출력인자
- 축방향 출력 편차

■ 온도 분포

- 최대 핵연료 온도

■ 핵연료 연소도 분포

- 핵종 재고량
- 최대 핵연료 연소도

■ 주기 길이

- 임계 제어봉 팁 위치

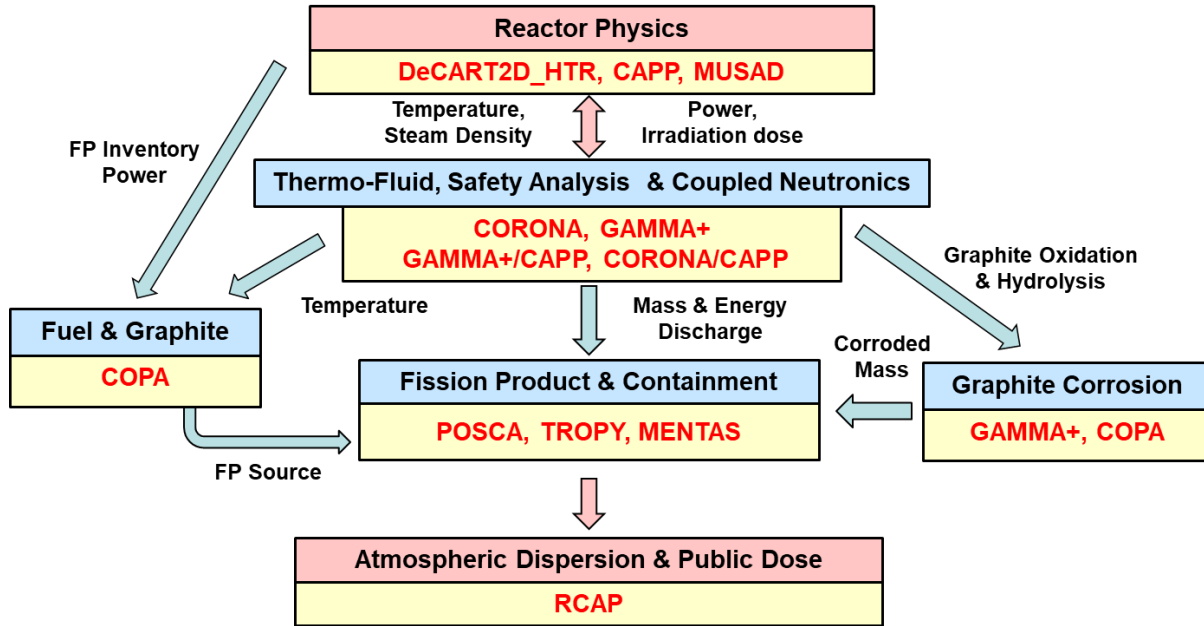
■ 중성자 조사량

04

고온가스로 노심해석 체계

고온가스로 핵심 설계/해석코드 개발 현황

(KAERI) 고온가스로 고유 핵심 설계코드 시스템



	McCARD	DeCART2D	CAPP	CORONA	GAMMA+	COPA	POSCA	TROPY
Function	Monte Carlo Depletion	2-D Lattice Physics	3-D Core Diffusion	3-D Core Thermo-Fluids	Transient System Performance, Safety Analysis	(TRISO) Fuel Performance Analysis	Fission Product Transport Analysis	Tritium Transport Analysis
Development Status	O	O	O	O	O	Δ	Δ	Δ
Theoretical Manual	O	O	O (Rev.3)	O	O	O	×	×
Input Manual	O	O	O (Rev.3)	O	O	O	×	×
V&V Report	O (Kor)	O	O (Rev.3)	Rev. 0 (Kor)	O (Rev.1)	O	O	×
CMVB WP	WP3	WP3	WP3	WP2	WP5	FFC	WP4	WP4

O: completed

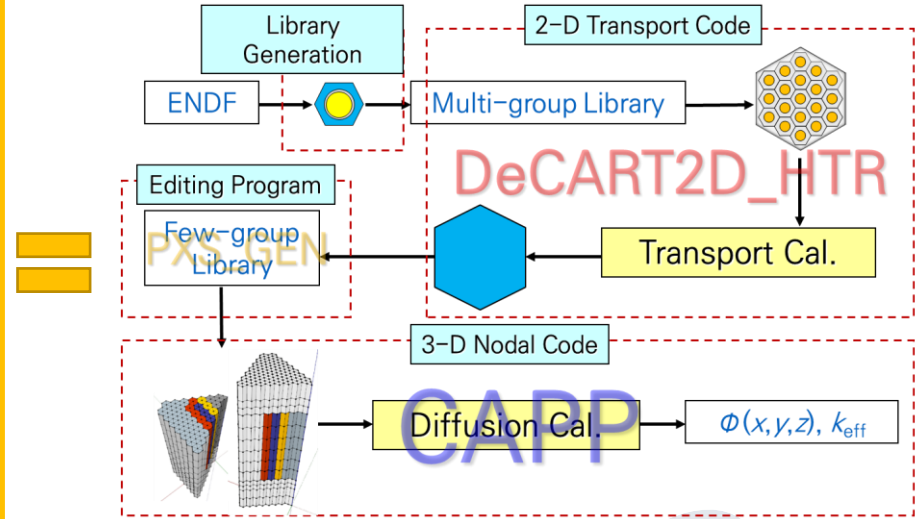
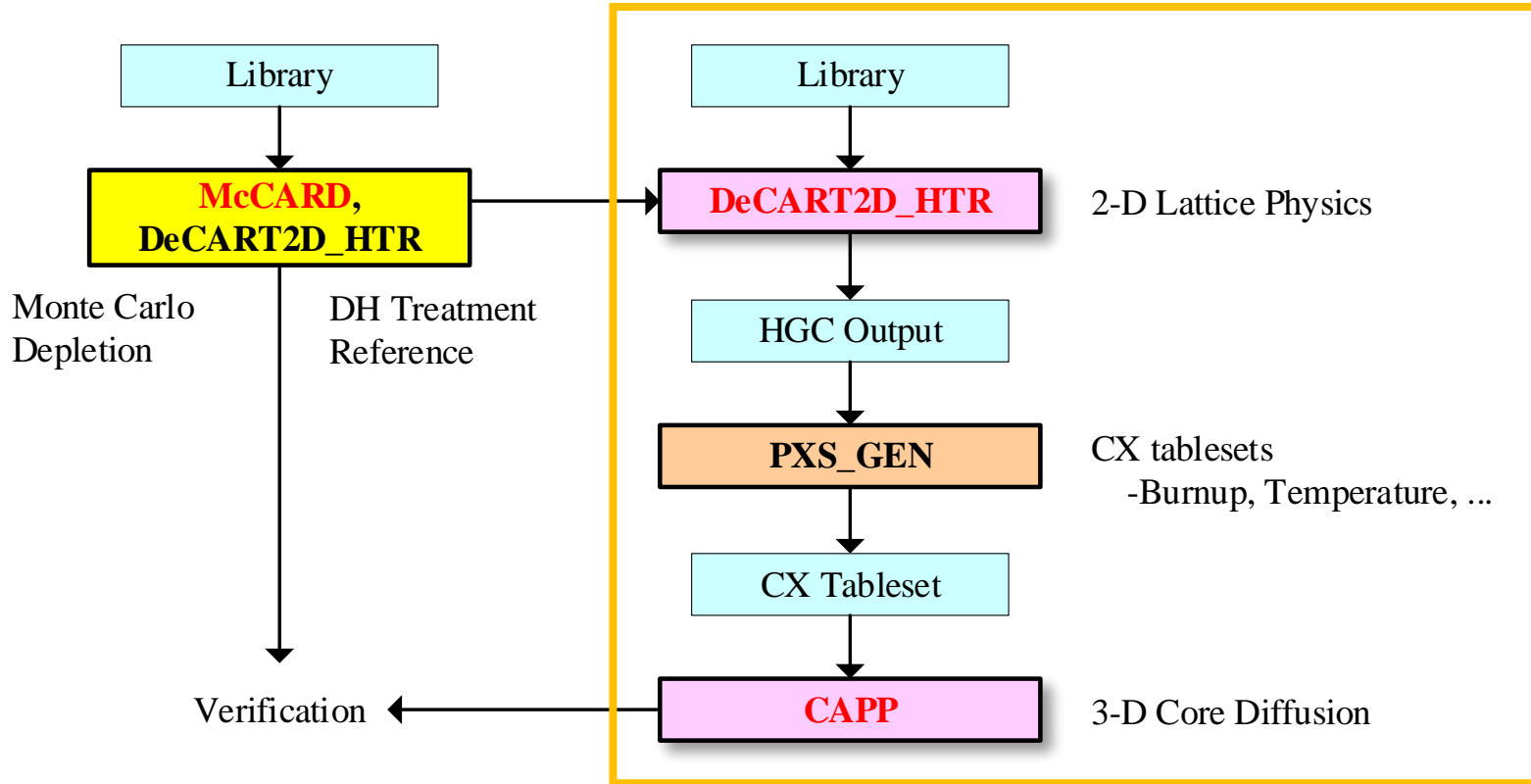
Rev. 0: First Version issued, but need Revision

Kor: Korean

- 노심, 열유체, 안전해석, 핵연료, 핵분열생성물 해석 코드 국산화/문서화
- 고온가스로 설계 과제에 활용 중 (산업 공정열 공급용 고온가스로 설계, 2024~2027)

04

(KAERI) 고온가스로 노심해석 전산코드 체계



- DeCART2D_HTR: 2차원 격자해석코드
- CAPP: 3차원 노심해석 코드
- McCARD: 몬테카를로 계산 코드

- **McCARD?**
 - Monte Carlo Code for Advanced Reactor Design and Analysis
 - 서울대 개발

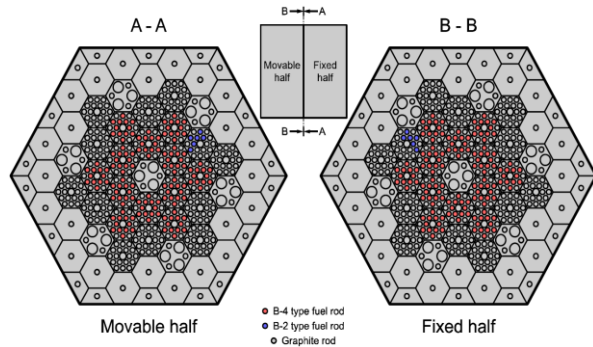
- **McCARD 특징**
 - Composition 셀의 계층적 사용을 통해 복잡한 기하구조 구현
 - 복잡한 기하구조에서의 중성자, 감마 몬테카를로 시뮬레이션
 - 연속에너지 라이브러리, 다군 라이브러리 선택 사용 가능
 - 자체 연소계산 방정식이 내장, 노심 연소해석 수행
 - 입자 무작위 분배 방법으로 이중 비균질성 묘사
 - 3차원 확산 코드를 위한 소수 군 균정수 생산
 - 섭동기법을 이용한 민감도 및 불확실도 분석
 - 점동특성 인자 계산

04

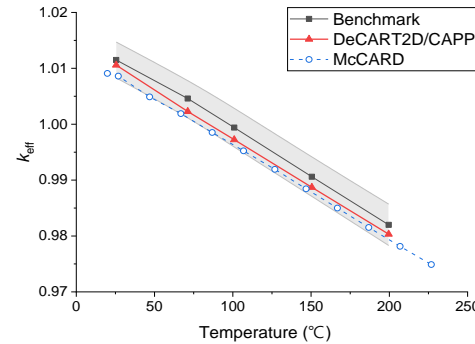
McCARD 고온가스로 해석 결과

■ McCARD는 고온가스로 정상상태 문제에 대한 참조해 제공 (코드 비교 검증에 활용)

■ Ex 1) V&V of DeCART2D/CAPP using VHTRC Benchmark



<Loading pattern of HP core in VHTRC>



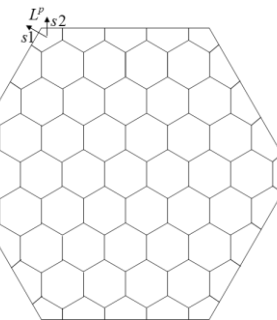
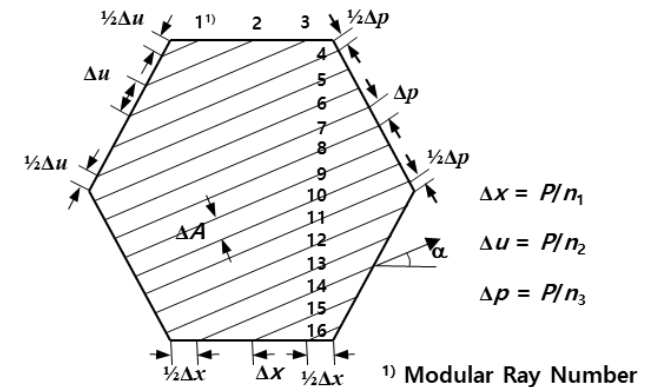
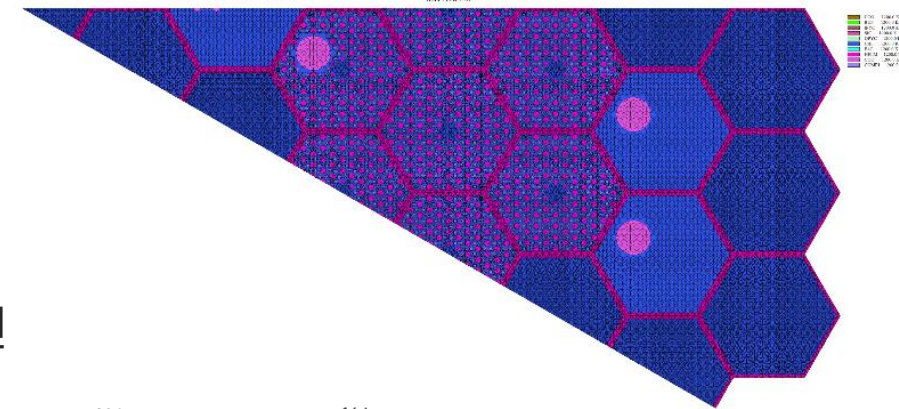
<Multiplication factors for HP core in VHTRC>

■ Ex 2) SHE (Semi-Homogeneous Experimental Assembly) Benchmark

Cases	Temp. [K]	Experiment (A)	MCNP 6.1 (B)	McCARD (C)	Difference [pcm]		
					(B)-(A)	(C)-(A)	(C)-(B)
SHE-8	298.05	1.00064	0.99641	0.99597	-423	-467	-44
SHE-12	280.55	1.00170	1.00697	1.00717	527	547	20
SHE-13	287.10	0.99952	1.00943	1.00985	991	1033	42
SHE-14	283.65	0.99721	1.00341	1.00334	620	613	-7

- DeCART2D_HTR?
 - Deterministic Core Analysis based on Ray Tracing for 2-Dimensional High Temperature Reactor
 - DeCART: 3차원 전노심 수송해석
 - DeCART2D: 균질화된 균정수 생산을 위해 만든 DeCART의 2D 버전
 - DeCART2D_HTR: 고온가스로 해석에 특화된 DeCART 버전

- DeCART2D_HTR 특징
 - Sub-Pin 수준의 MOC 수송해석
 - 공명처리 (Subgroup, RIT, PSM-DH)
 - 연소해석 (Krylov Subspace Method)
 - Sanchez 방법을 통한 이중 비균질성 처리
 - 균질화된 균정수 생산



04 DeCART2D_HTR 이중 비균질 영역 처리 방법

Sanchez-Pomraning Method)

Effective source and the effective total XS of matrix

$$\tilde{S} = \Sigma \left(\frac{S_0 + \frac{1}{p_0} \sum_i \sum_k p_{ik} E_{ik} S_{ik}}{\Sigma_0 + \frac{1}{p_0} \sum_i \sum_k p_{ik} E_{ik} \Sigma_{ik}} \right) \quad \Sigma = \Sigma_0 + \frac{1}{p_0} \sum_i \sum_k p_{ik} \hat{E}_{ik} (\Sigma_{ik} - \Sigma)$$

0 : matrix,

ik : layer k of grain i,

p : the volume fraction,

E : the escape probability,

\hat{E} : the escape probability evaluated with reduced cross section,

S : the total source.

Matrix average flux and grain layer average flux

$$\bar{\psi}_0 = \frac{\psi_{in} - \tilde{S}/\Sigma}{\Sigma L} (1 - e^{-\Sigma L}) + \frac{\tilde{S}}{\Sigma}$$

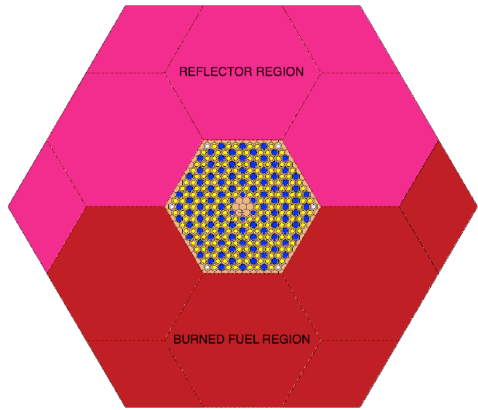
$$\bar{\psi}_{ik} = \bar{\psi}_0 \hat{E}_{ik} + \psi_{as} (E_{ik} - \hat{E}_{ik}) + \frac{1}{p_{ik} \Sigma_{ik}} \sum_l p_{il} P_{ik,il} S_{il}$$

04

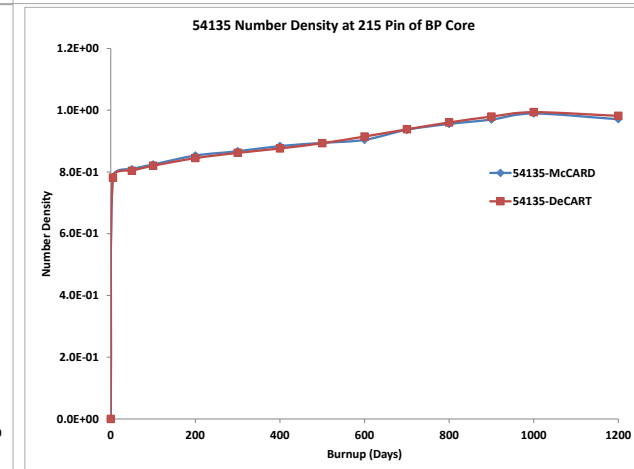
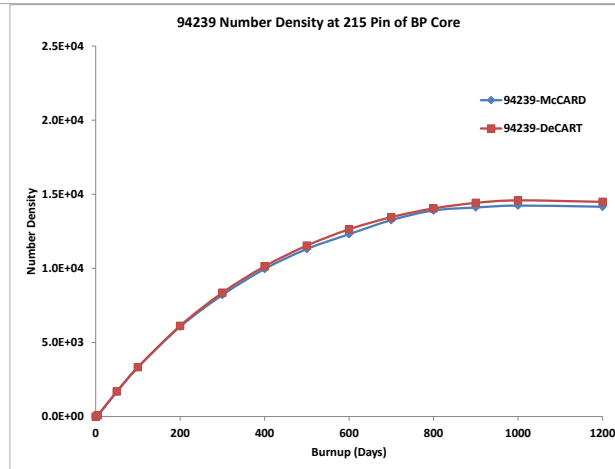
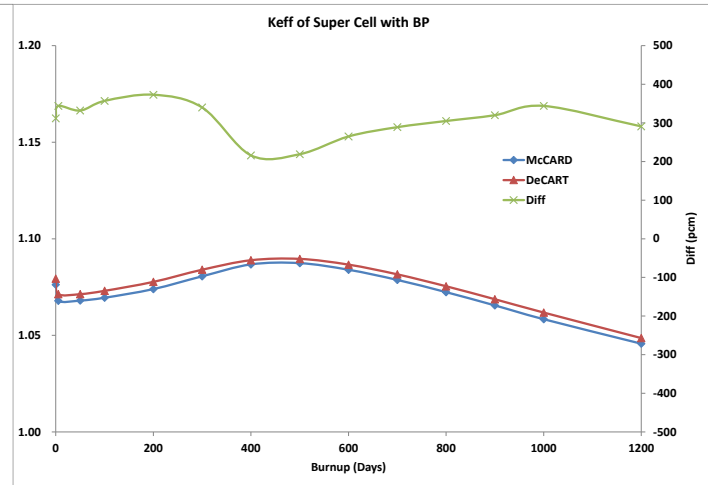
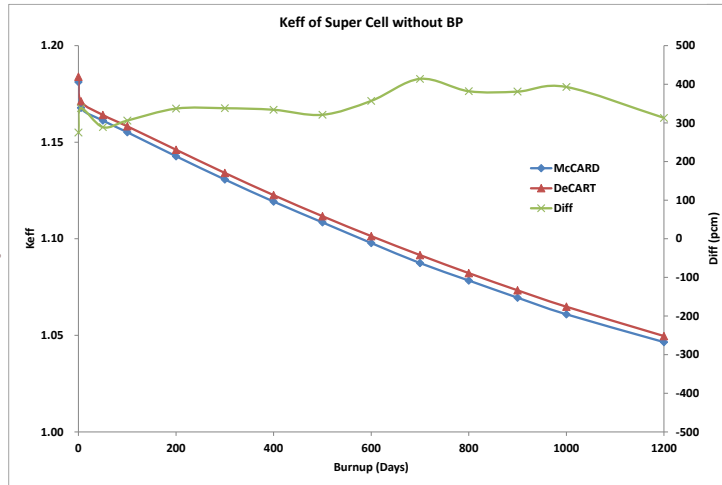
고온가스로 노심해석 체계

DeCART2D_HTR 고온가스로 해석 결과 (1)

- DeCART2D_HTR 코드 검증
 - Ex 1) OECD MHTGR-350 Phase III Super-cell Problem



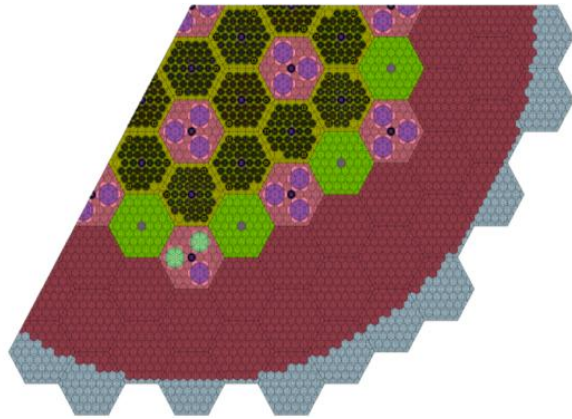
	Dimension	Units	
TRISO Fuel Particle	Kernel Radius	2.125E-02	cm
	Porous Carbon Buffer OR	3.125E-02	cm
	IPyC OR	3.475E-02	cm
	SiC OR	3.825E-02	cm
	OpyC OR	4.225E-02	cm
Burnable Poison Particle	TRISO Packing Fraction	0.35	
	Compact Radius	0.6225	cm
	Gap Radius	0.635	cm
	Kernel Radius	1.00E-02	cm
	Kernel Density	2.4696	g/cm ³
	Porous Carbon Buffer OR	1.18E-02	cm
	PyC OR	1.41E-02	cm
	BP Particle Packing Fraction	0.109	
	BP Compact Radius	0.5715	cm
	BP Gap Radius	0.635	cm
Large Coolant Channel Radius	0.794	cm	
Small Coolant Channel Radius	0.635	cm	
Pin pitch	1.88	cm	
Block Flat-to-Flat Width	36.0	cm	
Super-cell Flat-to-Flat Width	108.0	cm	



04

DeCART2D_HTR 고온가스로 해석 결과 (2)

Ex 2) HTR Numerical Benchmark



<2-D 1/3 Core DeCART Model>

Core 2D ARI	McCARD		DeCART	Difference (pcm)
	k-inf	std	k-inf	
Layer 3	0.77206	0.00012	0.76830	-376
Layer 4	0.71030	0.00013	0.70668	-362
Layer 5	0.66459	0.00012	0.66114	-345
Layer 6	0.60415	0.00011	0.60137	-278
Layer 7	0.60023	0.00011	0.59719	-304
Core 2D ARO	McCARD		DeCART	Difference (pcm)
	k-inf	std	k-inf	
Layer 3	1.24286	0.00013	1.24046	-240
Layer 4	1.16616	0.00014	1.16350	-266
Layer 5	1.11289	0.00014	1.11032	-257
Layer 6	1.04452	0.00012	1.04203	-249
Layer 7	1.04294	0.00012	1.03983	-311

PSM-DH (Pin-based point-wise Slowing-down Method for DH)

PSM 방법을 사용해 HTGR의 이종 비균질 영역에서의 자기차폐 효과 고려 (공명처리)

1단계

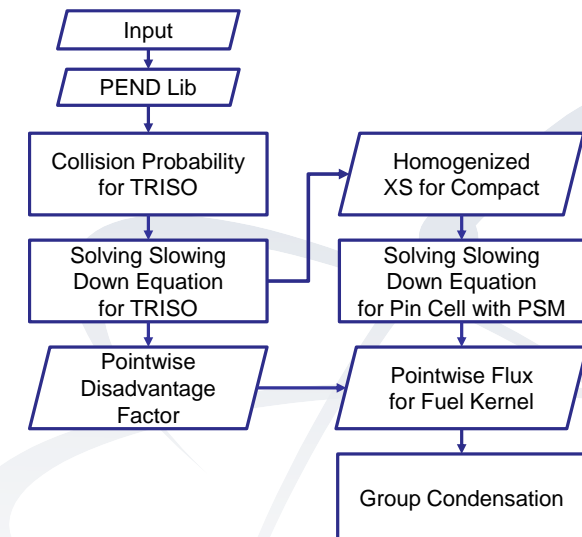
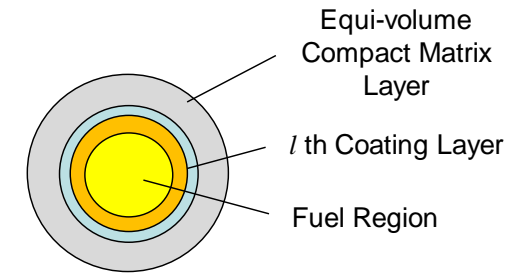
- Pointwise energy slowing down equation for a TRISO model with equi-volume compact matrix layer

$$\Sigma_l \phi_l V_l = \sum_{k=1}^L P_{k,l} V_k Q_k \Leftrightarrow \phi_l = \frac{\sum_k P_{k,l} V_k Q_k}{\Sigma_l V_l} = \sum_k Q_k \frac{P_{l,k}}{\Sigma_k}$$

- P : collision probability
- Q : scattering source
- Spatially homogenized pointwise-cross section for a compact

2단계

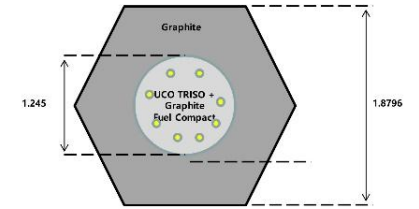
- 균질화된 컴팩트 모델에 대해 PSM 방법 적용



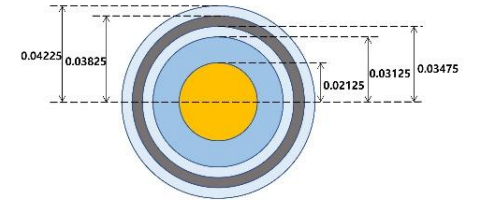
04

DeCART2D_HTR 개발 현황

- Effective Homogenized Cross Section Method
 - 이중 비균질 영역에서의 자기차폐 효과 고려(비공명 에너지 영역)
 - BISO 포함된 가연성 흡수체도 고려함

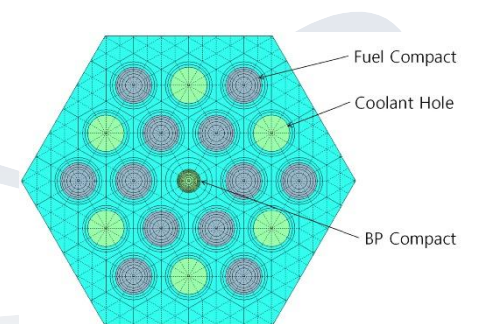


(a) Single fuel pin cell



(b) TRISO fuel particle

TRISO Packing Fraction	Homogeneous BP Radius = 0.3 cm					
	Multiplication Factor					DH effect in Thermal Energy Region
	McCARD (M) (std.~14pcm)	DeCART with Hom. (H)	DeCART with Ehom. (E)	$\Delta\rho(H-M)$ (pcm)	$\Delta\rho(E-M)$ (pcm)	
15%	1.16237	1.17002	1.16087	563	-111	-674
25%	1.25841	1.26243	1.25650	253	-121	-374
35%	1.28098	1.28404	1.27994	186	-63	-249
40%	1.28186	1.28503	1.28156	192	-18	-211

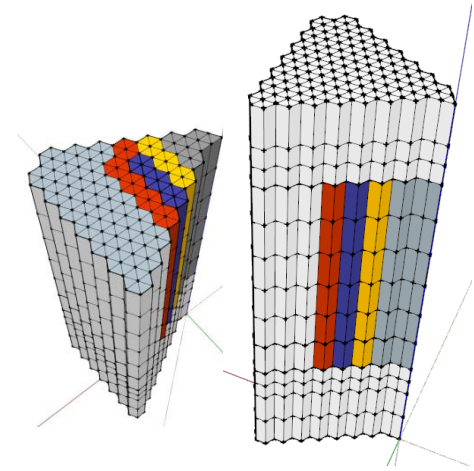


04

CAPP 개요

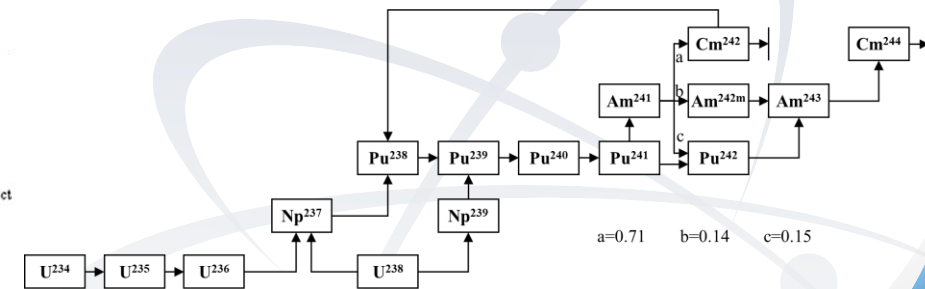
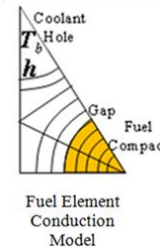
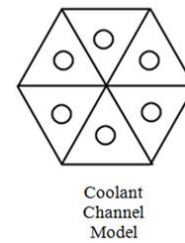
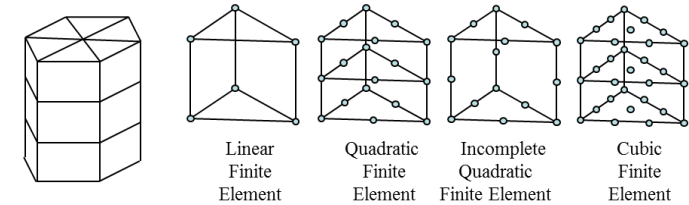
CAPP?

- Core Analyzer for Pebble and Prism type HTGRs
- CAPP v3.1은 현재 블록형 고온가스로에 집중



CAPP 특징

- DeCART2D_HTR/CAPP 2단계 해석체계
- 3차원 노심 해석 코드
- 다군 에너지 중성자 확산 해석
- 유한요소법 사용
- 단순화된 열해석 모듈 내장
- 임의의 핵종붕괴사슬에 대한 연소해석
- 임계 제어봉 위치 탐색



04 DeCART2D_HTR/CAPP 2단계 체계

DeCART2D_HTR/PXS_GEN/CAPP 체계

1단계: 2차원 노심 모델에 대해 DeCART2D_HTR 해석

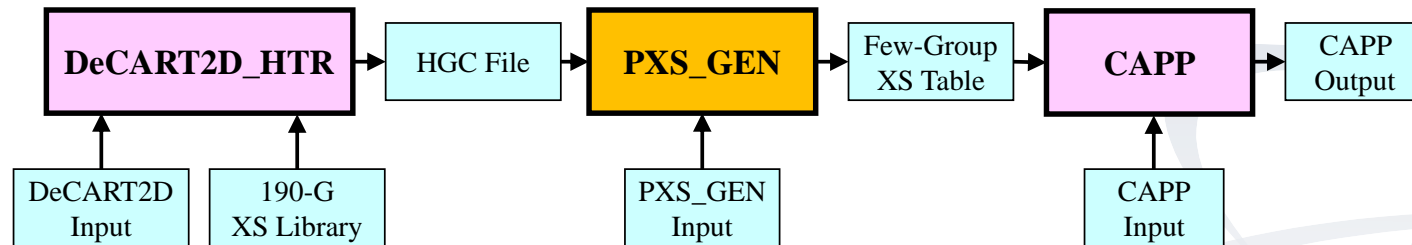
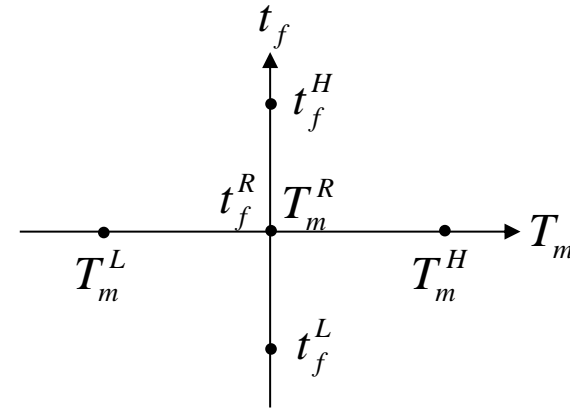
- 190군 핵단면적 라이브러리 사용
- 고정밀 중성자 수송 해석(MOC)

Step 2: 균정수 처리 by PXS_GEN

- 다섯 세트의 분기계산 자료 => 2차 함수로 근사된 핵단면적 테이블

Step 3: 3차원 노심 모델에 대한 CAPP 해석

- 3차원 중성자 확산 계산 + 연소해석 + 3차원 온도 분포 계산



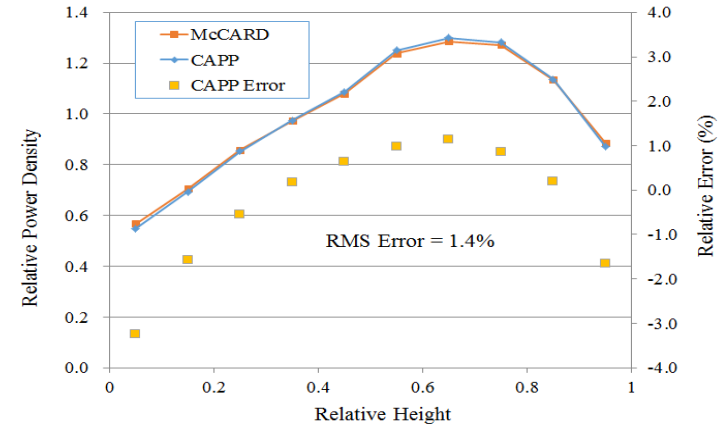
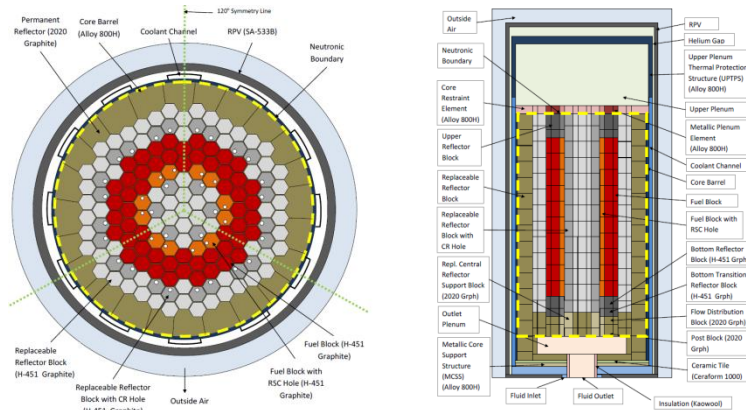
04

고온가스로 노심해석 체계

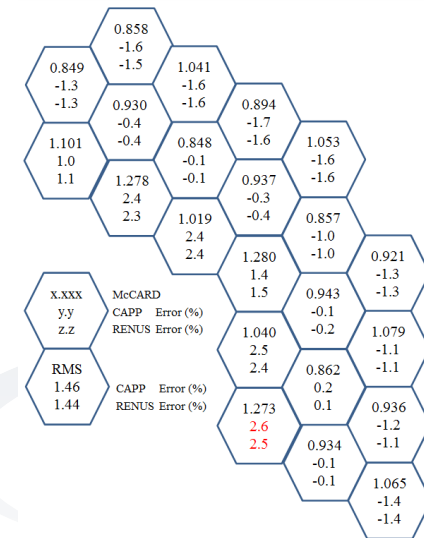
CAPP 고온가스로 해석 결과 (1)

CAPP 코드 검증

Ex 1) OECD MHTGR-350 Phase I Ex. I Benchmark Problem



Participant	Codes	Keff (error in pcm)	CR Worth [pcm]	Axial Offset
SNU	McCARD MG	1.06889	785	0.1635
	RENUS	1.06696 (-193)	771 (-1.8%)	0.1730 (+5.8%)
KAERI	CAPP C	1.06694 (-195)	769 (-2.0%)	0.1672 (+2.3%)
	CAPP Q	1.06733 (-156)	763 (-2.8%)	0.1705 (+4.3%)
	CAPP Q2	1.06722 (-167)	769 (-2.0%)	0.1686 (+3.1%)
INL	RSn	1.06692 (-197)	880 (+12.2%)	0.1655 (+1.2%)
UMICH	Instant	1.06694 (-195)	870 (+10.9%)	0.1600 (-2.1%)
	PARCS	1.06695 (-194)	934 (+19.0%)	0.1890 (+15.6%)

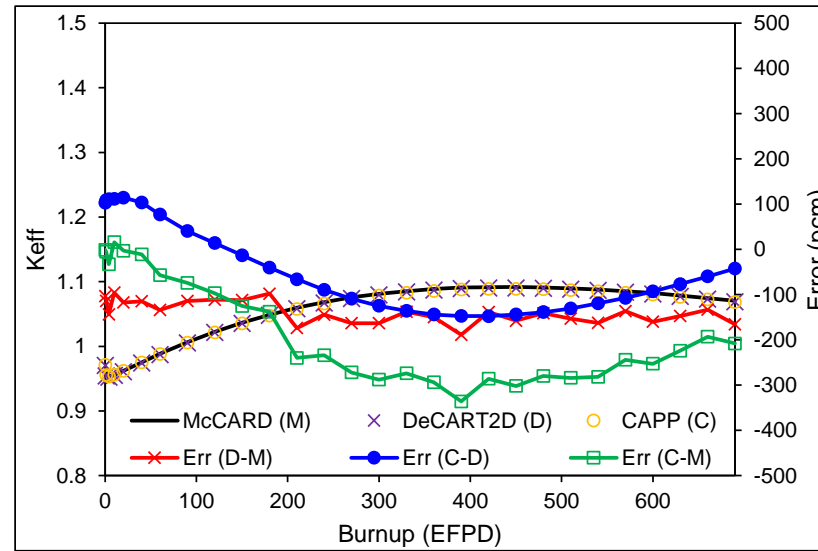
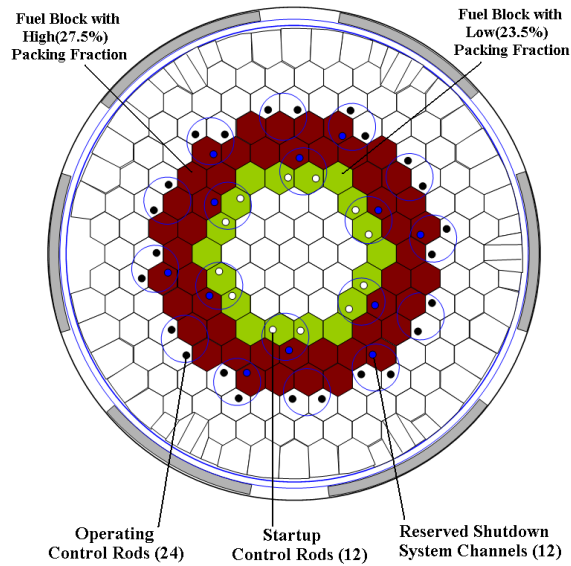


04

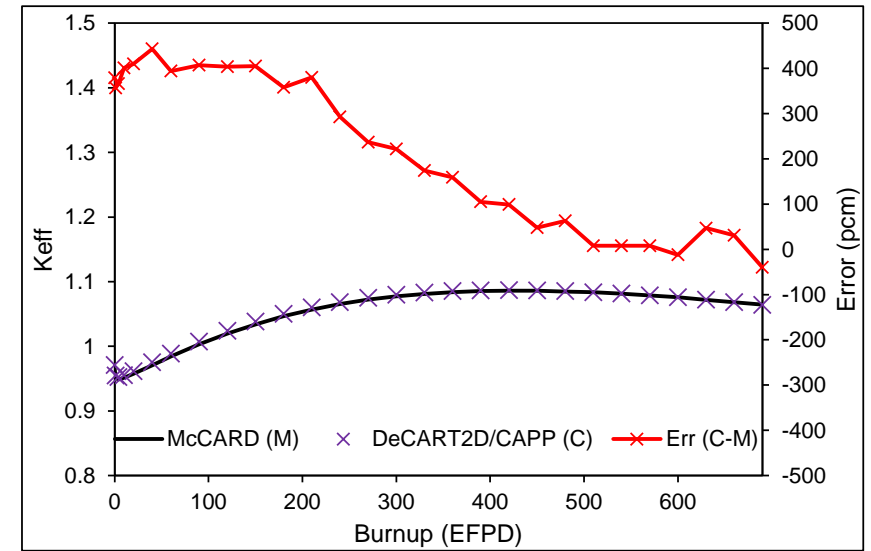
고온가스로 노심해석 체계

CAPP 고온가스로 해석 결과 (2)

Ex 2) PMR-200 Conceptual Core



$\langle k_{eff} \rangle$ of 2-D Core



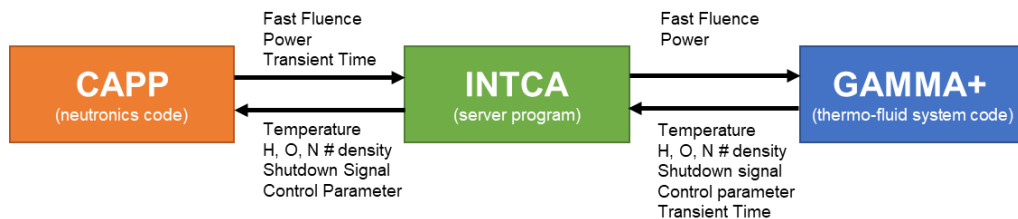
$\langle k_{eff} \rangle$ of 3-D Core

■ CAPP/GAMMA+ 연계 과도해석 개발

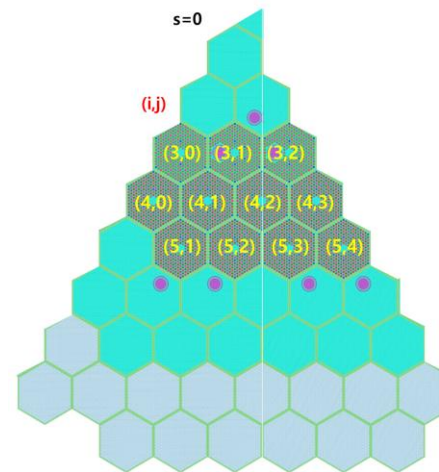
■ 목표: 사고 시 노심 내 거동을 정확하게 모사하기 위함

- 노심해석 코드: CAPP
- 열유체, 안전해석코드: GAMMA+
- 연계를 위한 중개 프로그램: INTCA

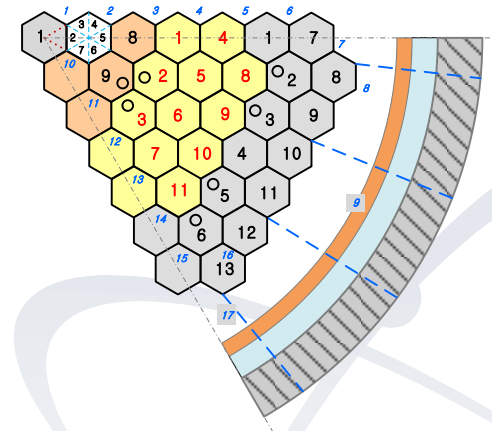
■ 예제 문제: VHTR-350 (노심 열출력: 350MWth, 냉각재 입출구 온도: 490/950도)



〈CAPP/GAMMA+ Coupled Code System〉



(a) CAPP



(b) GAMMA+

〈Computational Models for VHTR-350 Reactor Core〉

04

고온가스로 노심해석 체계

CAPP 개발 현황 (2)

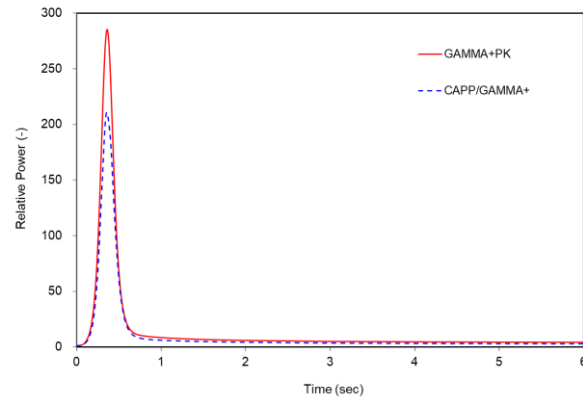
CAPP/GAMMA+ 연계 과도해석 결과

Control Rod Ejection

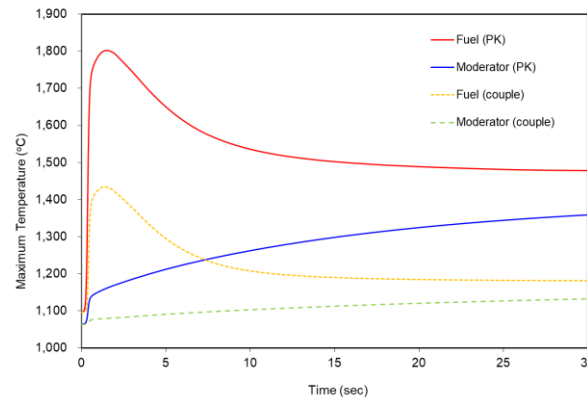
- 모든 제어봉이 0.1 초 안에 노심에서 이탈하는 시나리오
- 연계해석이 PK계산보다 과도기간 동안 낮은 핵연료 온도 거동을 보임

Water-ingress Accident, ATWS

- 중간 열교환기 튜브가 파손되어 물이 유입된다 가정.
- 연계해석과 PK계산과 출력 레벨 피크에 다소 차이가 있음을 확인

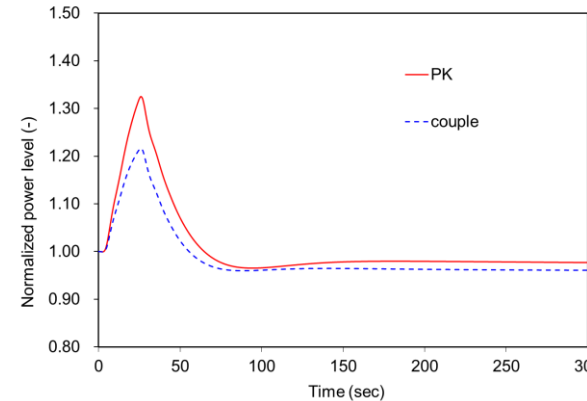


(a) Power level

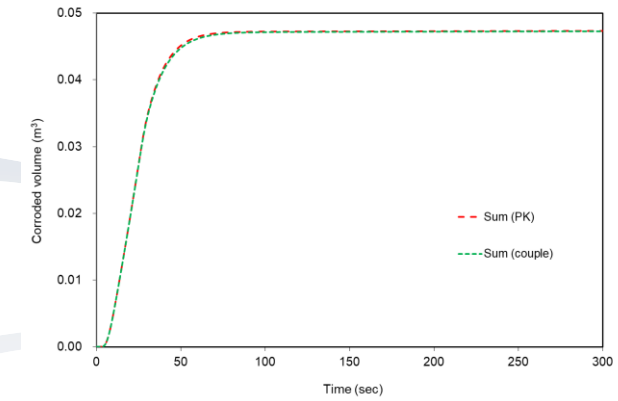


(b) Maximum temperature

〈Control Ejection Transient〉



(a) Power level

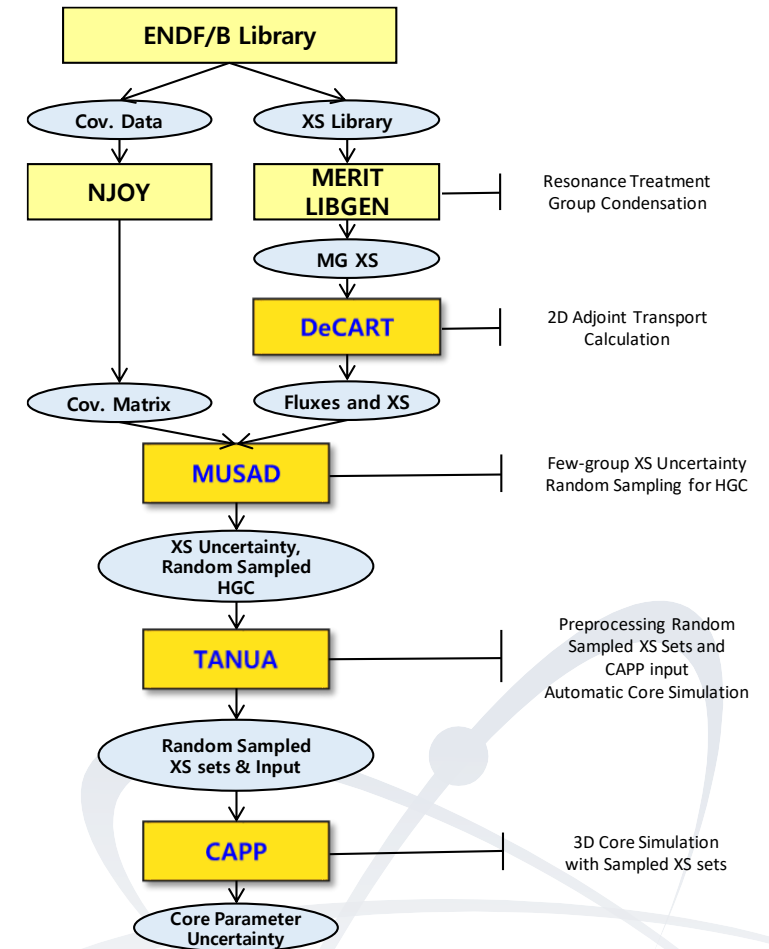


(b) Corr. Vol.

〈Water-ingress accident〉

- **MUSAD: 민감도 및 불확실도 해석**
 - 핵자료 불확실도에 의해 유발되는 민감도 및 불확실도 평가
 - 일반 섭동 이론(Generalized Perturbation Theory, GPT) 기반의 불확실도 해석
 - CAPP 계산을 위한 무작위 표본 추출 균정수 자료 생산

- **TANUA: 불확실도 해석 자동화 도구**
 - 핵종의 공분산 행렬(covariance matrix) 후처리
 - PXSGEN용 소수 군 핵단면적 세트 전처리
 - CAPP 입력의 자동 생성 및 CAPP 결과의 후처리
 - 제작 공차를 고려한 DeCART2D 입력 무작위 표본 추출



04

참고: 일반 섭동 이론

- Definition of general response for few-group XS

$$R = \frac{\langle H_1 \psi \rangle}{\langle H_2 \psi \rangle}$$

- Sensitivity of general response by a cross section

$$S_{R,X} = \frac{\frac{\delta R}{R}}{\frac{\delta X}{X}} = X \left(\frac{\frac{\langle \frac{\delta H_1}{\delta X} \psi \rangle}{\langle H_1 \psi \rangle} - \frac{\langle \frac{\delta H_2}{\delta X} \psi \rangle}{\langle H_2 \psi \rangle} - \left\langle \Gamma^* \left(\frac{\delta A}{\delta X} - \lambda \frac{\delta F}{\delta X} \right) \psi \right\rangle \right)$$

- Generalized adjoint equation for sensitivity

$$(A^* - \lambda B^*) \Gamma^* = S^* \equiv \frac{H_1}{\langle H_1 \psi \rangle} - \frac{H_2}{\langle H_2 \psi \rangle}$$

- Uncertainty from Sandwich rule

$$u_R^2 = \mathbf{S}_R \mathbf{C} \mathbf{S}_R^T$$



04

고온가스로 노심해석 체계

고온가스로 노심 열유체 해석 인자

■ 노심 열유체 해석에서 도출할 자료

■ 온도분포

- 핵연료 온도
- 감속재 온도
- 냉각재 온도
- 기타 노심 구성물 온도

■ 유량 분포

■ 압력 강하

■ 노심 열유체 요건 예시

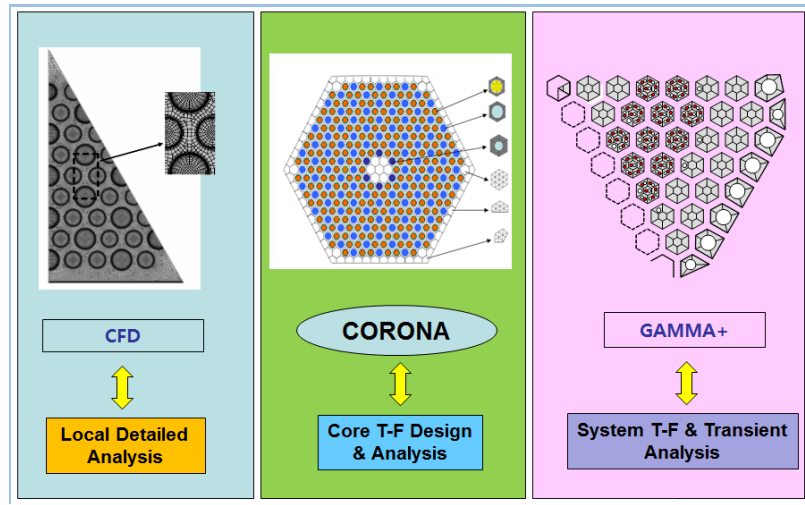
- 핵연료 최고온도
 - 정상운전 시 1250도 이하
- 제어봉 피복재 최고온도
 - 정상운전 시 870도 이하
- 흑연 블록 온도 및 온도 분포
 - 구조물 건전성 관련
- 노심 압력강하량
 - $dP < \sim 70 \text{ kPa}$

04

고온가스로 노심해석 체계

노심열유체 코드 - CORONA

- COre Reliable Optimization and thermo-fluid Network Analysis
- 노심 열유체 해석코드
 - 블록형 고온가스로 노심에 대한 노심 열유체 해석
 - 전체 노심에 대한 고정밀 해석 + CFD 대비 빠른 계산
- 2020년 CORONA 2.0 등록

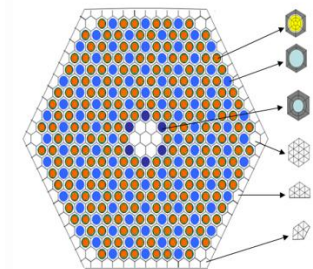


■ Efficient Numerical Method



■ Efficient Grid Generation

Basic Unit Cell Concept



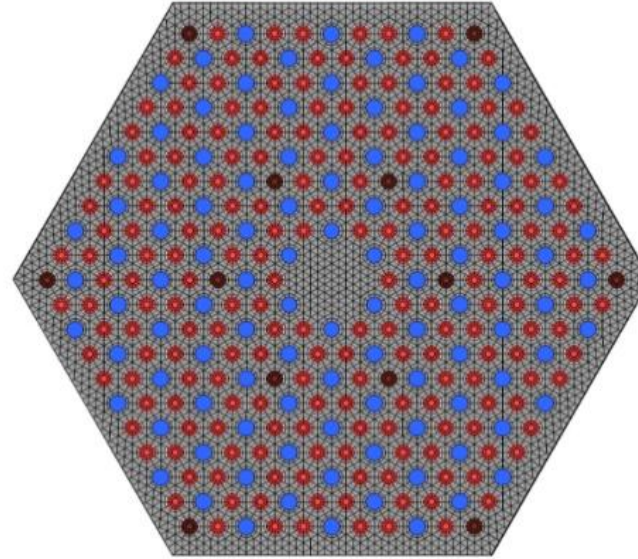
04

고온가스로 노심해석 체계

CORONA 해석 모델

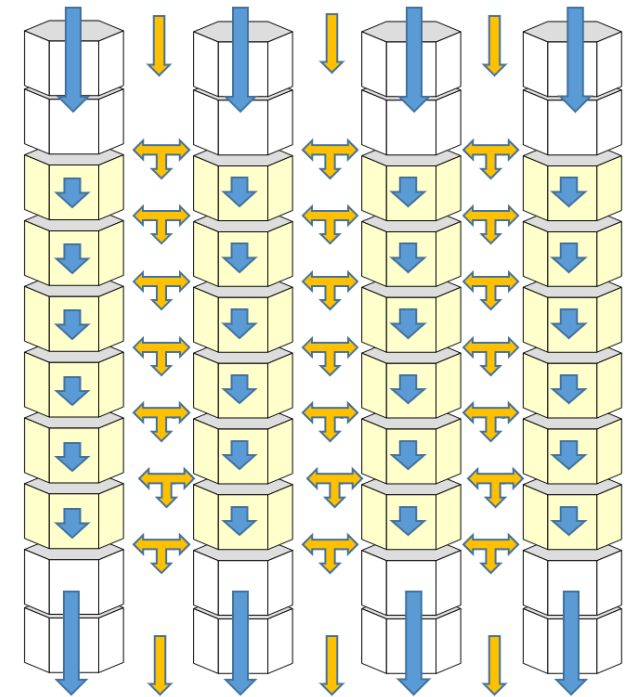
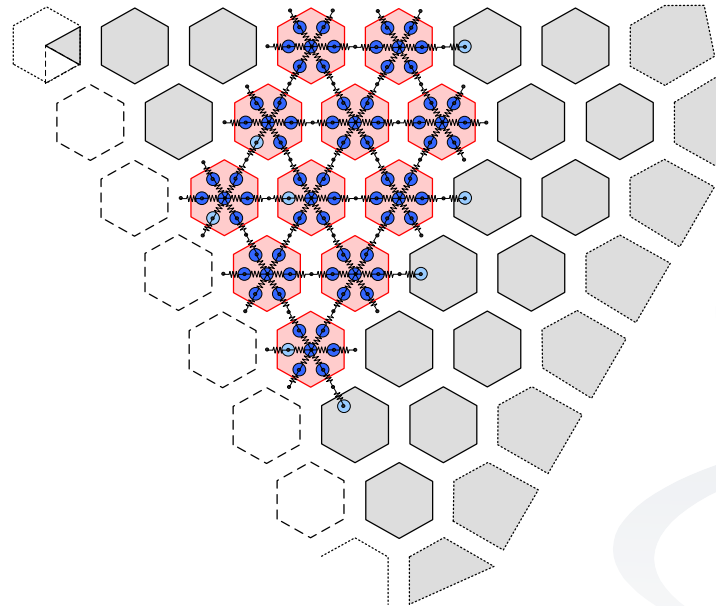
다차원 고체 열전도

- 단위셀을 이용한 3D 비정렬격자
- Pin-by-Pin 3D 출력분포 활용



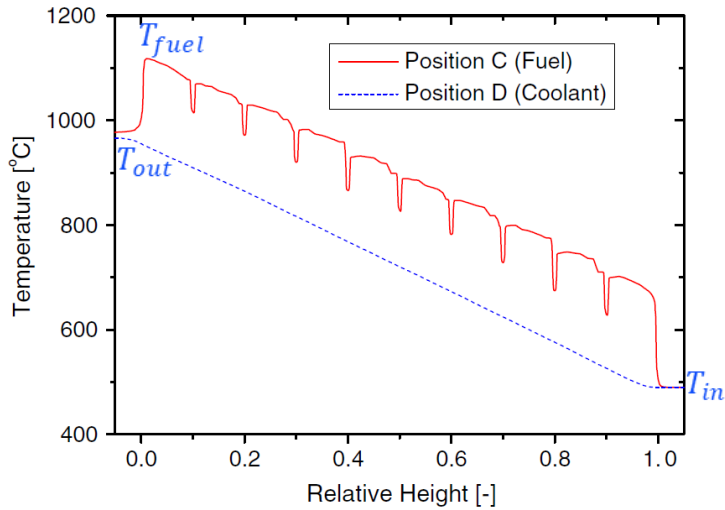
일차원 유체 네트워크

- 개별적 냉각재 채널 유동
- 개별적 우회유량 갭 유동
- 개별적 제어봉 냉각채널 유동

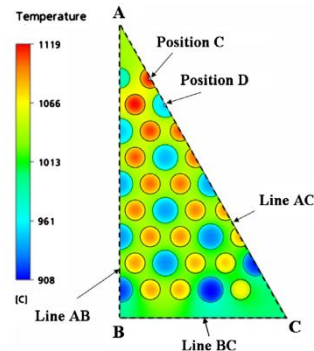


축방향 온도 분포

- 큰 냉각재 온도 증가에 주목

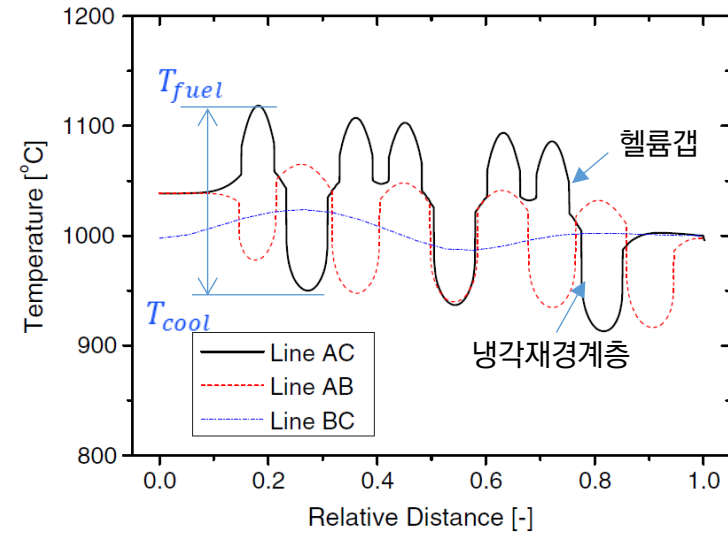


[참고문헌: Tak et al., Ann. Nucl. Energy, 2008]



반경방향 온도 분포

- 냉각재 경계층 및 헬륨갭에서의 큰 온도구배



04

고온가스로 노심해석 체계

CORONA 개발 현황(1)

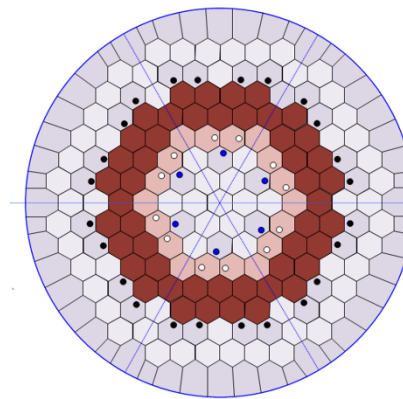
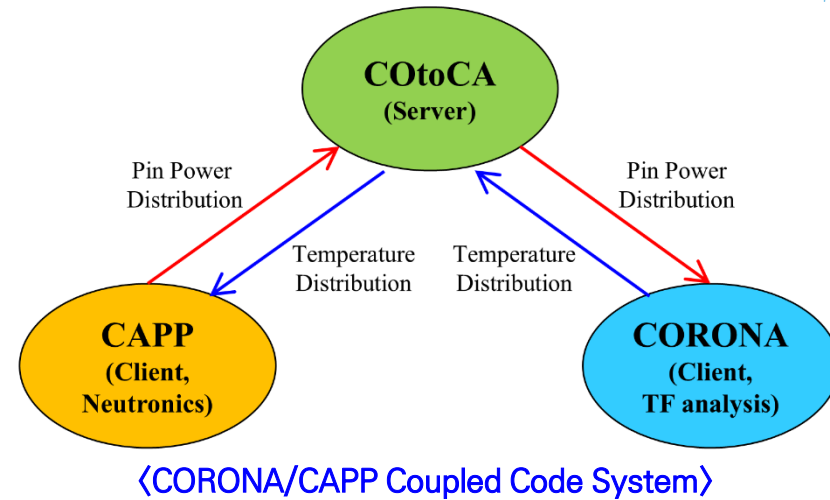
CORONA/CAPP 연계 코드 체계 개발

■ 목표: 노심 내 최대 핵연료 온도 정확하게 계산

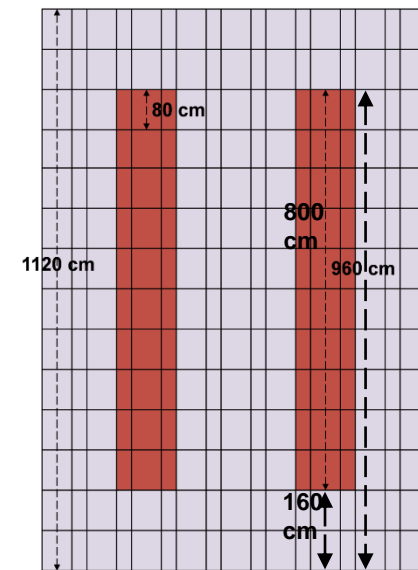
- 노심해석 코드: CAPP
- 열유체해석 코드: CORONA
- 연계를 위한 중개 프로그램: COtoCA

■ 예제 문제: MHTGR-350 노심 문제

- 노심 열출력: 350MWth
- 냉각재 입구 온도: 259도
- 노심 냉각재 유량: 157.1 kg/s



(a) Plane geometry



(b) Axial geometry

〈MHTGR0-350 Core Problem Cut View〉

04

고온가스로 노심해석 체계

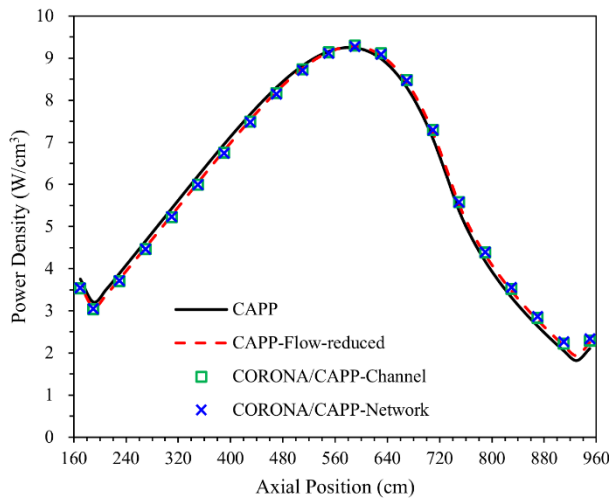
CORONA 개발 현황(2)

CORONA/CAPP 연계계산 결과

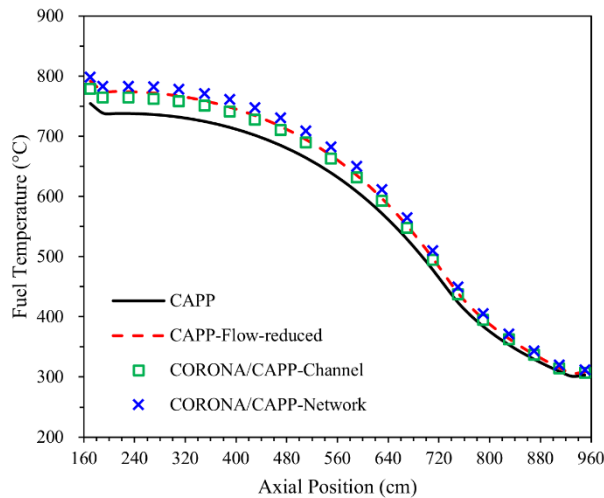
유효증배계수 및 최대핵연료온도

Code	Options	Keff	Diff. [pcm]	Maximum Fuel Temperature [°C]	Diff. [°C]	Bypass Flow Frac. [%]
CAPP	--	1.00132	--	1163.3	--	0
	Flow-reduced	0.99881	-251	1228.6	65.3	8.0
CORONA/CAPP	Channel	0.99774	-358	1050.5	-112.8	8.0
	Network	0.99561	-571	1284.9	121.6	8.0

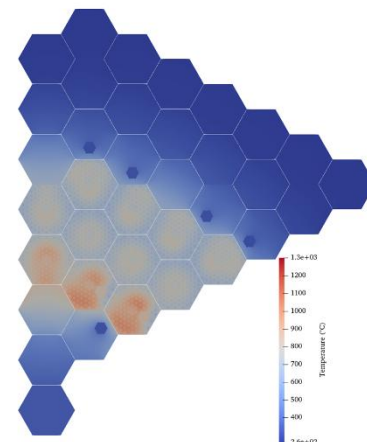
축 방향 및 반경 방향 출력, 온도 분포



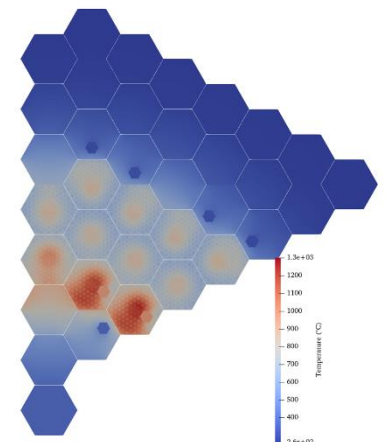
(a) Power Density



(b) Fuel Temperature



(a) CORONA/CAPP-Channel



(b) CORONA/CAPP-Network



고온가스로 노심 설계 전산코드체계 현황

맺음말



05

05 맺음말 고온가스로 노심 특성 요약

- 열중성자로 (Thermal reactor)
- 이중 비균질성 (Double heterogeneity)
- 흑연의 낮은 감속능, 높은 감속비, 긴 확산거리
- 낮은 출력밀도 / 높은 연소도
- 위치 별 온도 차이



- 노심 핵설계: 국내개발 코드로 2단계 노심해석 체계 수립
 - DeCART2D_HTR/CAPP
 - 경수로 접근법에 고온가스로 특성 반영 (그러나 두 노형이 근본적으로 다른 것을 인지해야 함)
 - 균 축약 시, 10군 이상의 에너지군 사용
 - 격자해석에서 단일 블록이 아닌 2차원 노심해석 수행
 - 이중 비균질성 고려
 - 온도분포 반영
 - 틈새 기술, 부족 기술 개발/도입 필요
 - 설계, 인허가에서 필요하지만 국내 연구/개발 경험이 없는 기술, 자료
 - 고온가스로 계측기 관련
 - 고온가스로 노심 차폐, 방사선원향, ...
 - 고온가스로 노심 임계실험 자료 필요

지금까지 고온가스로 노심 설계 전산코드체계 현황에 대한 발표였습니다.

감사합니다

