"Bridging Innovation and Deployment, Bridging Classroom and Field"

# 차세대 고온 원자력 시스템 융복합 인력양성 센터

2025. 10. 29


서울대학교 원자핵공학과 | 과제 책임자 조형규
KAIST 원자력 및 양자공학과 | 과제 책임자 이정익
부산대학교 기계공학부 | 과제 책임자 이현철


**차세대원자력 전문인력 양성센터**

서울대학교 SEOUL NATIONAL UNIVERSITY KAIST 부산대학교 PUSAN NATIONAL UNIVERSITY

# 차세대 고온 원자력 시스템 융복합 인력양성 센터

## 최종 목표

**600℃ 이상의 고온**의 열제공이 가능한
**차세대원자력 시스템** 개발 **전문인력** 및 **현안 해결형 융복합** 인력양성

## 세부 목표

**교육**

1

차세대 고온 원자력
시스템 및 융·복합
원천기술 개발 역량 강화
커리큘럼 개발 및 운영

**산학연 협력**

2

산학연 협업을 통한
고온 원자력 기업의
현안 해결 프로젝트
설계·운영

**융복합 연구**

3

차세대
고온 원자력 시스템 관련
핵심 융복합 연구

**성과 공유 플랫폼**

4

차세대 고온 원자력
전문인력 양성센터
성과 공유플랫폼
구축·운영

**차세대 고온 원자력 시스템 개발 선도 글로벌 인재 육성**

# 대상 노형 및 선정 배경

**연구대상** 600℃ 이상 고온 열을 제공할 수 있는 차세대 원자력 시스템

| | |
|---|---|
| 노형 범위 | 고온 가스로, 히트파이프 마이크로 원자로 |
| 시스템 범위 | 고온 원자로 적용 전력변환, 수소생산, 공정열, 통합 열관리 (고온 원자력 시스템 기반 융복합 에너지 생태계) |
| 용량 범위 | 10 – 300 MWe |

- 시너지: 다수의 핵심 공통 기술을 공유하는 2종의 고온 원자로 선정
- 확장성: 수소생산, 공정열 공급 등 시장 확장성 고려
- 기업지원: 비 원자력시스템과의 연계, 확장 시 기업의 다양한 신기술 개발 수요 고려

## 높은 국내 기술력

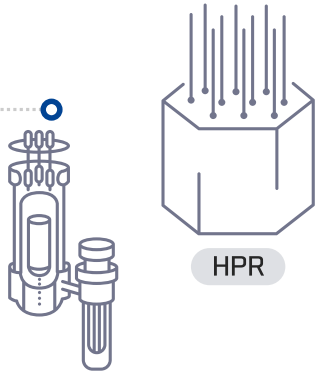
- 경쟁국 대비 높은 경험 및 기술수준 확보

## 높은 안전성 및 에너지 효율

- 경수로 대비 높은 전력변환 효율
- 우수한 경제성의 근간

## 높은 산업 활용성

- 전력생산, 수소생산, 화학 제조, 고온 합성, 소재 열처리, 재활용 산업, 반도체 제조, 금속 제련, 암모니아 생산, 쉐일 가스 등




고온 원자력 시스템 (>600℃)

## 높은 기술 달성도

- 경수로를 제외하고 가장 높은 상용화 수준 확보
- 중국: HTR-10, HTR-PM 건설, 운영
- 미국: 히트파이프 원자로 실증, ARDP 프로그램 지원, 군사용 원자로 기술개발
- 일본: HTTR 건설, 운영

## 높은 실증성

- 높은 안전성으로 실증로 인허가 단순화
- 해외 실증사례 참고 가능
- 검증 (Qualification) 가능한 핵연료

# 차세대 고온 원자력 시스템 융복합 인력양성 센터 구성

## 서울대학교(주관)

"차세대 원자력 융·복합 커리큘럼 개발 및 운영" 주도

- 고온 원자력 시스템 융복합 커리큘럼 개발주도 및 공유 (심화, 응용, 콜로키움 등)
- 시장수용성, 사회수용성 고려한 고온 원자력 시스템 종합설계과목 개발 및 공유
- 자체 개발 전산해석 코드 활용 인력양성 (노심-핵연료-열수력-안전해석-핵주기)
- 차세대 고온 원자력 시스템 실험실습 개발 및 공유
- 센터 교육/연구성과 공유플랫폼 구축, 운영

## KAIST(공동)

"시스템설계 및 융복합 연구" 주도

- 고온 원자력 시스템 융복합 연구주제 발굴 주도 및 공유
- 차세대 위험도 정보 활용 성능기반 규제 교육 개발 및 공유
- 고온 원자력 시스템 경제성, 기술성 등 종합평가 교육

## 부산대학교(공동)

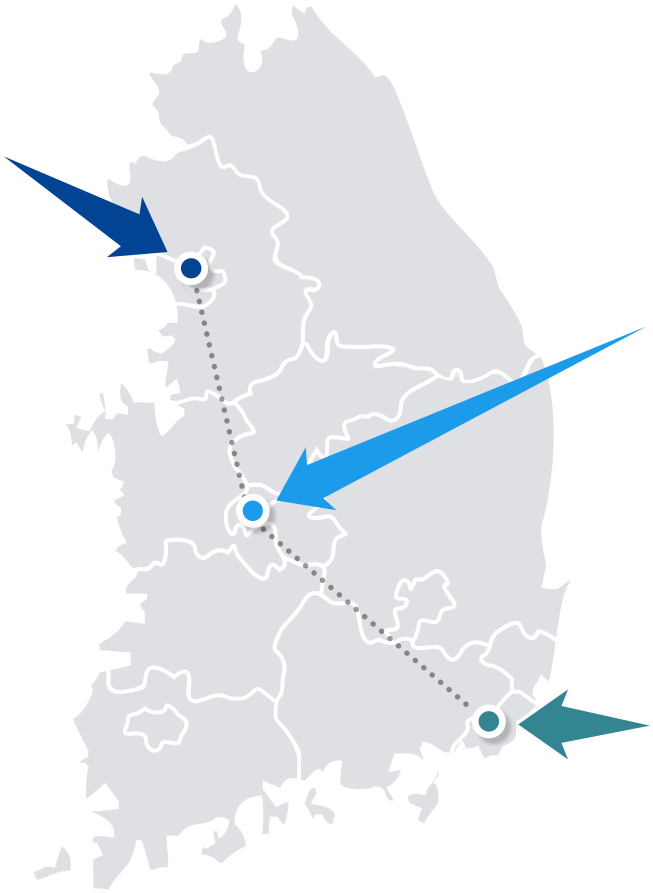
"산·학협력 원자력 현안 해커톤 프로젝트" 주도

- 고온 원자력 시스템의 기업현안 중심 해커톤 프로젝트 개발, 운영 및 공유
- 원자력-타분야 융합 교육/연구 교류 프로그램 운영 및 공유 (기계, 재료, 에너지 등)
- 원자력 수소 경제와 고온 원자력 시스템 씽크탱크 운영

# 고온 원자력 시스템 인력양성 센터의 산학연 협력기관

- 고온 원자력 시스템 융복합 커리큘럼
- 고온수전해 시스템 교육 협력
- 정밀해석-고온실험 교육/연구 협력

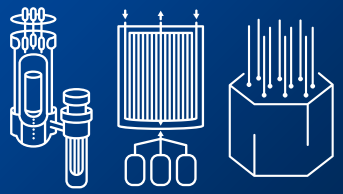
- 현안 기술 해커톤 프로젝트
- 산업계 대상 원자력 기초 교육
- 학위연구 공동 지도
- 현장 실습 및 인턴쉽



- 고온원자력시스템 기술성, 경제성 평가
- 고온원자로 핵심 요소 기술 개발 협력
- 고온원자로 안전규제

- 고온원자로 동력변환계통 연구 협력
- 고온원자로 구조재료 연구 협력
- 고온원자로 열교환기 연구 협력

**차세대 고온 원자력 시스템 융복합 인력양성 센터**

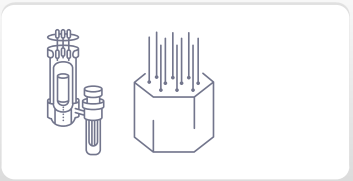


# 1 차세대 고온 원자력 시스템 융복합 교육

## 고온원자력시스템 인력양성 교육체계

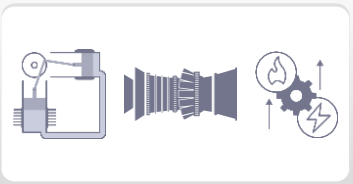
**기초 (학부)**

- 기초 이론 교육 및 소양 함양
- 우수인재 유치
- 대학원 진입 유도
- 고온원자로의 역할과 전망
- 소형/초소형원자로의 필요성
- 고온원자로 노형별 특성



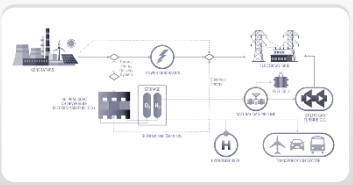
**심화 (대학원)**

- 심화 이론교육 및 연구연계 교육
- 기술 현안 교육
- TRISO 핵연료
- 모놀리스 노심 노물리 해석
- 노형 별 핵심 열유체 이론
- 고온 동력변환계통
- 고온원자로 안전 및 규제
- 고온원자로 폐기물 특성



**응용 (대학원)**

- 시스템 통합 및 응용 교육
- 융복합 설계 교육
- 고온원자로 시스템 설계
- 고온열 응용 시스템 통합 설계
- 고온원자로 폐기물 시스템 설계
- 경제성, 수용성, 규제, 법 등을 고려한 융복합 설계



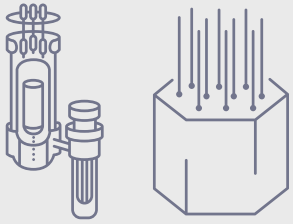
### 교과목 체계 개편 계획

- 산학연 협력 강좌 개발: 산학연 협력을 통해 최신 기술과 경험에 대한 접근성을 높이기 위한 강좌를 개발/고온 원자로 전산해석 코드 교육 강좌
- 산학연 인턴십 프로그램 강화: 산학연 파트너십을 통한 인턴십 프로그램을 운영하여 실무 경험을 증진
- 산업체 맞춤 교육 강화: 산업체 및 연구소의 인력을 대상으로 한 위탁 교육을 통해 역량을 강화/산업체 인력 학위과정 지원
- 산업 맞춤 강좌 제공: 원자력 분야 산업체 인력을 위한 맞춤형 강좌를 제공하여 지식과 역량을 강화/하계강좌 및 기초교육 강좌
- 산학연 공동 학위 연구 지도위원회 운영: 학위 연구 지도위원회에 산업계, 학계, 연구계가 모두 참여하여 연구의 실용성과 효율성을 강화

# 1 차세대 고온 원자력 시스템 융복합 교육

## 고온원자력시스템 종합설계 ❶ 다분야 기술 융합

| Step 1 | Step 2 | Step 3 | Step 4 | Step 5 |
|---|---|---|---|---|
| 3 weeks | 2 weeks | 4 weeks | 3 weeks | 3 weeks |
| 수요 정의<br>최상위 요건 수립<br>세부 요건 수립 | 노형선정<br>재료선정<br>시스템선정 | 노심 개념 설계<br>시스템 개념 설계<br>기기 개념 설계 | 설계 통합<br>시스템 분석<br>안전해석 | 설계 변경<br>설계 검증<br>설계안 제시 |



- 고온원자로-수전해-데이터센터
- 초소형원자로-특수목적 활용처
- 고온원자로 폐기물 처분 시스템
- 고온원자로-공정열-에너지저장
- 고온원자로-동력변환-전력계통

# 1 차세대 고온 원자력 시스템 융복합 교육

## 고온원자력시스템 종합설계 ❷ : 다학제 융합

**운영계획**

- 학기말 설계 발표회 개최

# 1 차세대 고온 원자력 시스템 융복합 교육

## 에너지시스템 종합설계 (부제: 선진 원자로 개념설계) 개설: 서울대, 25년 1학기

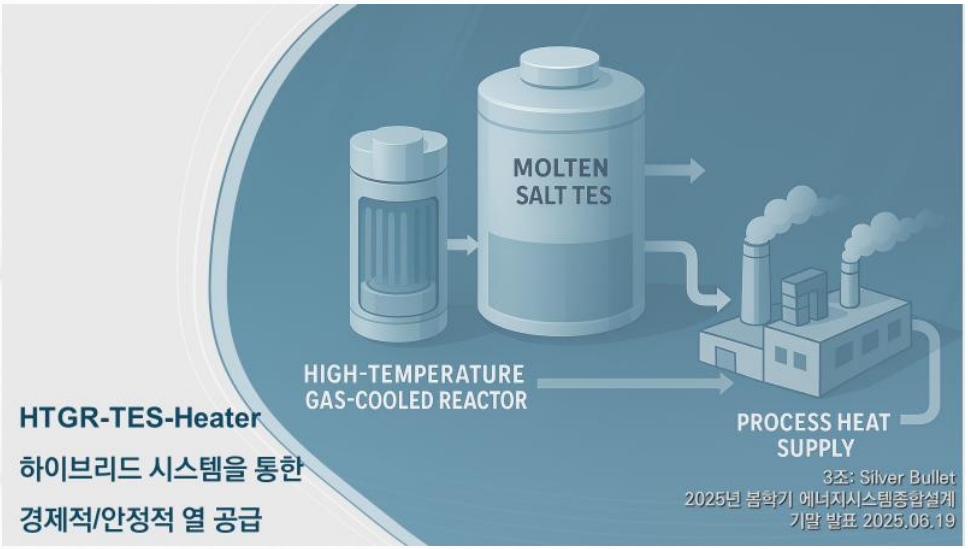
- 학생들은 4~6명으로 팀을 이뤄, 팀 단위로 원자로형을 결정하고 개념 설계를진행하여, 강의 일정에 따라 연구 결과물에 대한 발표를 수행.
- 교수는 주차 별 강의 주제에 따라 1시간(또는 2시간)의 강의를 제공하고, 수강생들은 2시간(또는 1시간) 동안 프로젝트를 수행.

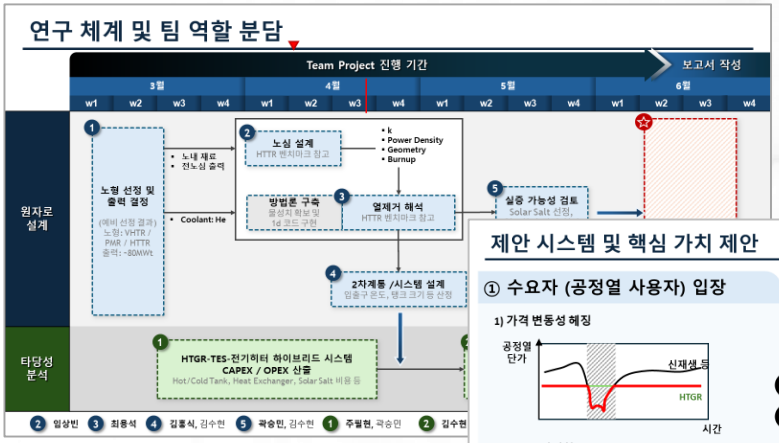
| 교과 구분 | 개설대학 | 개설학과 | 학년 | 교과목 번호 | 강좌 번호 | 교과목명 (부제명) | 학점-강의-실습 | 수업교시 | 수업 형태 | 강의실 (동-호) (#연건, *평창) | 담당교수 | 강의 계획서 | 정원 | 수강 신청 인원 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 전선 | 공과대학 | 에너지시스템공학부(원자핵공학전공) | 0학년 | M1589.001400 | 001 | 에너지시스템종합설계 (선진원자로 개념설계) | 3-3-0 | 목(14:00~16:50) | 이론 | 36-106(무선랜제공) | 심형진 (대표교수) | Y | 30 (30) | 31 |

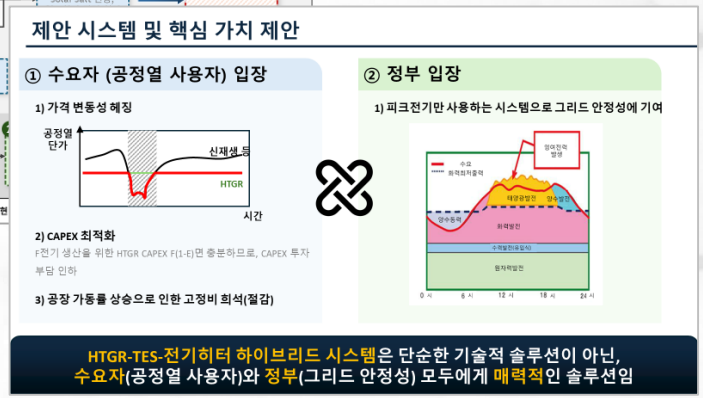
| 주차 | 강의주제 | 주차 | 강의주제 |
|---|---|---|---|
| 1주차 (3월 06일) | • 강의 목표 및 계획 | 9주차 (5월 1일) | 고온가스로 종합설계 예시 |
| 2주차 (3월 13일) | • 프로젝트 목적, 원자로형 특성 비교 | 10주차 (5월 8일) | 종합설계 자문 |
| 3주차 (3월 20일) | • 선진원자로 설계요건 예시 | 11주차 (5월 15일) | 전체 프로젝트 중간발표 |
| 4주차 (3월 27일) | • 설계 프로세스 일반 | 12주차 (5월 22일) | 팀프로젝트 수행 |
| 5주차 (4월 03일) | • 선진원자로 설계사업 예시 프로젝트 계획 수립 | 13주차 (5월 29일) | 팀 프로세스 2 |
| 6주차 (4월 10일) | • 팀 프로세스 1 | 14주차 (6월 05일) | 선진원자로 인허가 현안 및 과제 |
| 7주차 (4월 17일) | • 노심핵설계 자문 | 15주차 (6월 12일) | 전체 자문 |
| 8주차 (4월 24일) | • 열수력/계통설계 자문 | 16주차 (6월 19일) | 전체 프로젝트 최종발표 |

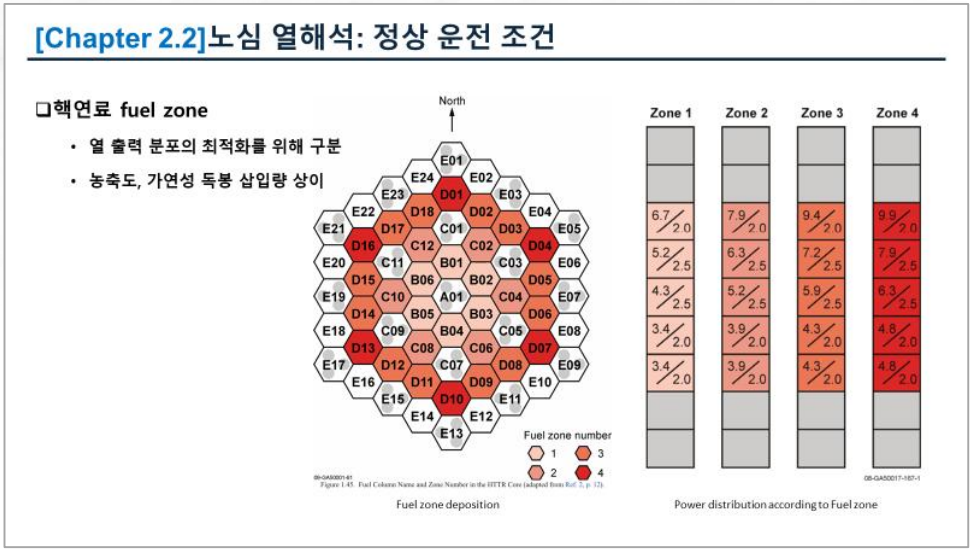
# 1 차세대 고온 원자력 시스템 융복합 교육

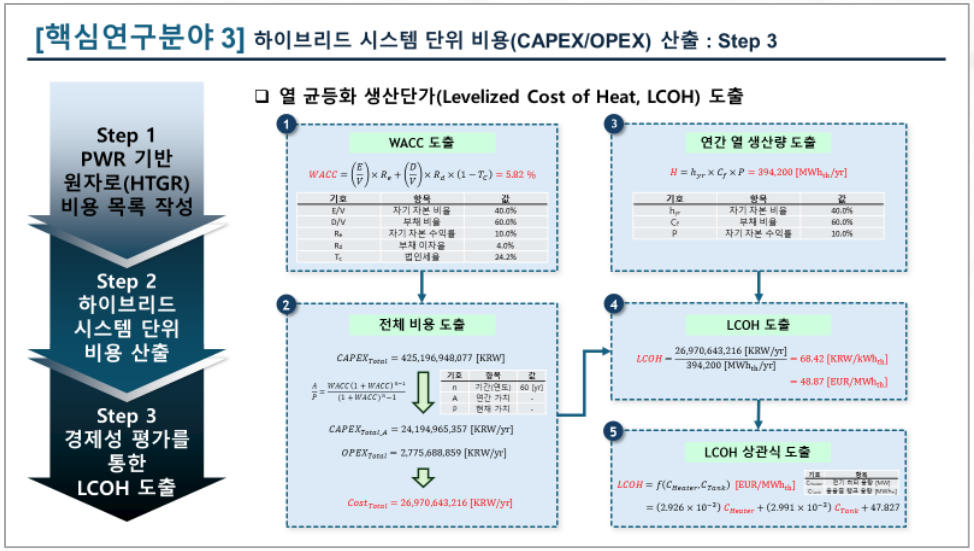
## 에너지시스템 종합설계 (부제: 선진 원자로 개념설계) 개설: 서울대, 25년 1학기



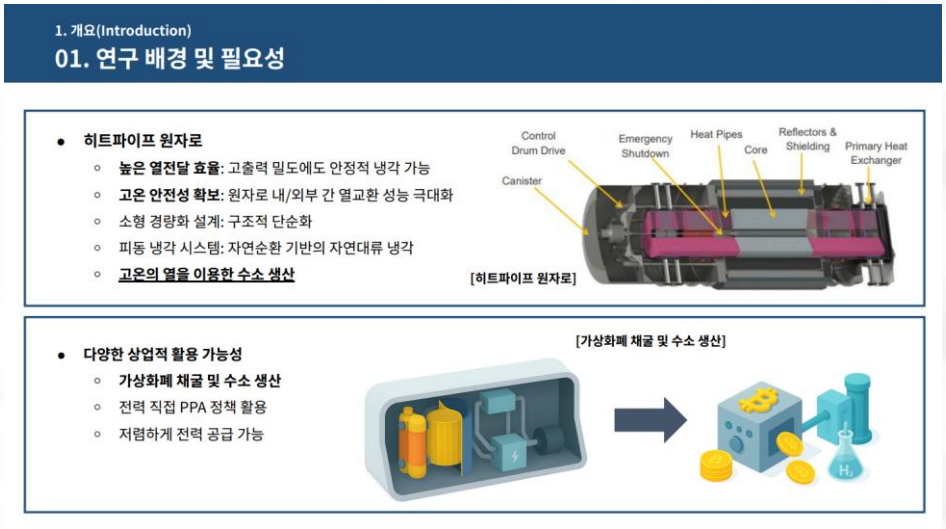



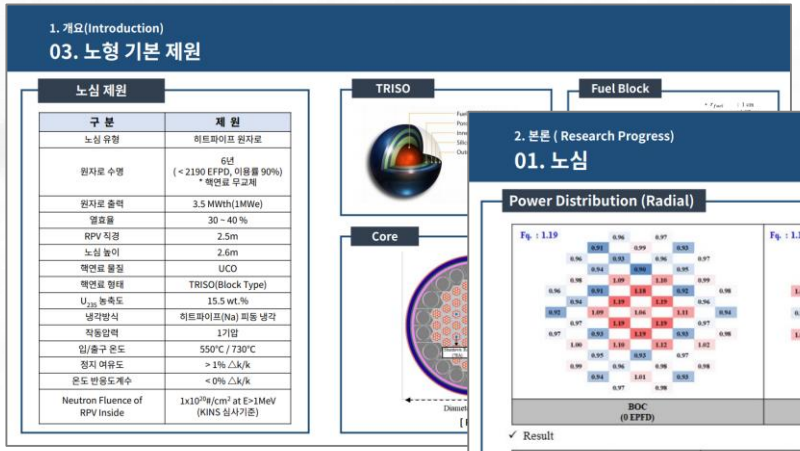



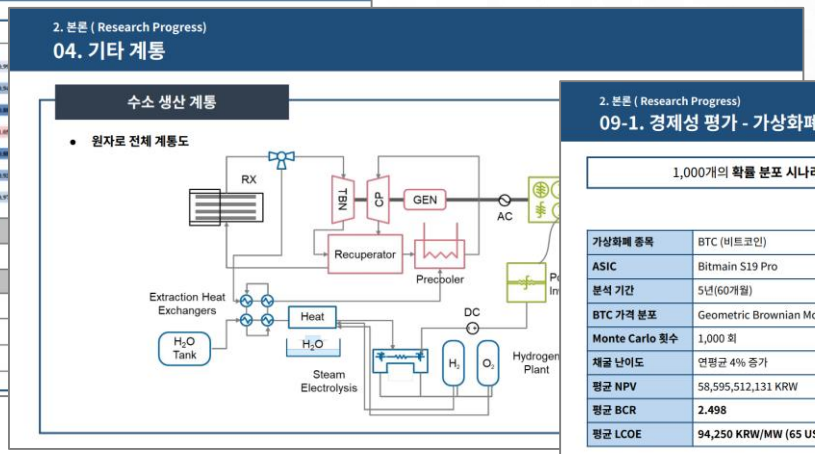



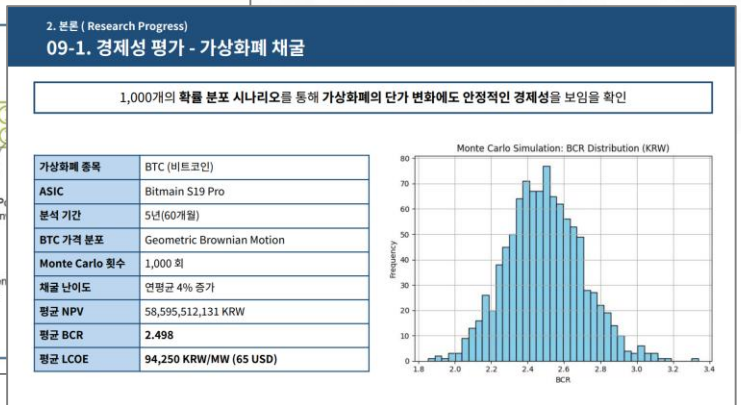
# 1 차세대 고온 원자력 시스템 융복합 교육

## 에너지시스템 종합설계 (부제: 선진 원자로 개념설계) 개설: 서울대, 25년 1학기





# 1 차세대 고온 원자력 시스템 융복합 교육

## 에너지시스템 종합설계 (부제: 선진 원자로 개념설계) 개설: 서울대, 25년 1학기

에너지시스템종합설계(001) | 2025년 2학기 | NOVA (5조)

강형탁, 김예성, 김재현, 김주빈, 이재우, 임지훈, 최정대

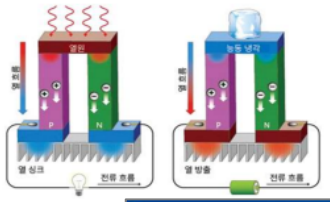
서울대학교 마이크로그리드 전력 공급을 위한

Heat Pipe Reactor 설계

최종 발표

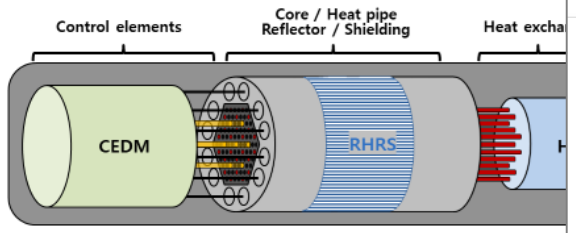
### 2. Final Design – Residual Heat Removal

- 열전소자(Thermoelement)를 이용한 잔열 제거
  - → 펠티어(Peltier)효과를 이용하여 전류를 흘려주어 원자로 잔열 냉각
    - 예상되는 COP는 0.5 수준(=100 kW 냉각시 200 kW 필요)
    - 사용 기간 10년 이상으로, 수명이 40~60년인 원전에서 사용하기 적합
    - 발전효율이 보편적으로 10% 이하로 낮음. 최근 발전 효율 20% 이상 상승
    - 열전소자 설치 위치는 노심 및 원자로 설계 이후 결정



〈 열전소

특허 출원 시도 중




* COP: Coefficient of Performance

### 2. Regulatory Approach (제작 ~ 설치)

- HPR 모듈 규제 – 모듈 설치 → 비상계획구역(EPZ) 설정, 보안 및 안보
  - 외부 재해 및 인위적 사고 방지(원자로시설 기술규칙 제4조~8조)
  - 원자로 방호시설 구축(원자로시설 기술규칙 제14조~제31조)
  - 방사선관리구역 설정(방사선안전관리 기술규칙 제13조, 원자력 시설 방호 및 방재 대책법)

# 1 차세대 고온 원자력 시스템 융복합 교육

## 에너지시스템공학특강 (부제: 고온가스원자로 및 수소생산시스템): 서울대, 25년 1학기

| 교과 구분 | 개설대학 | 개설학과 | 학년 | 교과목 번호 | 강좌 번호 | 교과목명 (부제명) | 학점-강의-실습 | 수업교시 | 수업 형태 | 강의실 (동-호) (#연건, *평창) | 담당교수 | 강의 계획서 | 정원 | 수강 신청 인원 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 전선 | 공과대학 | 에너지시스템공학부(원자핵공학전공) | 0학년 | 459.570A | 001 | 에너지시스템공학특강 (고온가스원자로 및 수소생산시스템) | 3-3-0 | 금(09:30~10:45) | 이론 | 36-105(무선랜제공) | 김용완 (대표교수) | Y | 35 (35) | 35 |
| | | | | | | | | 금(11:00~12:15) | 이론 | 36-105(무선랜제공) | | | | |

- **수업내용 및 일정**
  1. 고온가스원자로 기술적 배경 (1주, 2주)
     - 고온가스원자로 기술적 정의, 블록형과 페블형원자로 기술,
     - 고온가스원자로 기술적 진화, 제4세대 고온가스로
  2. 피복입자핵연료 (3주, 4주): 피복입자핵연료 기술특징, 제조, 성능
  3. 고온가스원자로 재료 (5주): 원자력급 흑연, 고온재료
  4. ASME 고온가스로 코드 (6주): ASME 코드 개요, 적용 및 활용방법
  5. 고온가스로 계통 및 기기 구성과 설계 (7주, 8주, 9주)
     - 원자로계통, 열전달계통, 잔열제거계통, 정지냉각계통, 제어계통, 동력변환계통,
     - 핵연료재장전계통, 헬륨정화계통
  6. 고온가스원자로 고유안전성 (10주): 고온가스원자로 안전성, 기기안전등급
  7. 고온가스원자로 폐기물 (11주)
  8. 고온가스원자로 계통 활용기술 (12주)
  9. 원자력수소생산기술 (13주, 14주)
     - 수증기개질 수소생산계통, 열화학수소생산계통, 고온전기분해

# 1 차세대 고온 원자력 시스템 융복합 교육

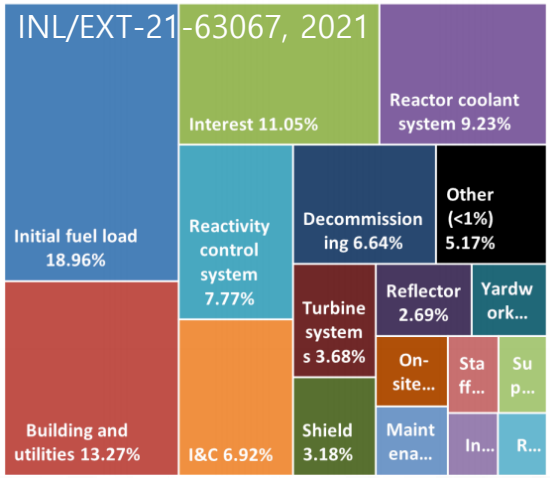
## 에너지시스템종합설계 (부제: 고온원자로 활용): 서울대, 25년 2학기 진행 중

| 주차 | 강의주제 | 주차 | 강의주제 |
|---|---|---|---|
| 1주차 | 1학기 설계 노형 소개 | 9주차 | i-SMR 에너지 통합 시스템 |
| 2주차 | 경제성기반<br>SMR 설계 방법론 | 10주차 | “에너지 신사업에서<br>기회를 잡아보자” |
| 3주차 | 원전 경제성 분석 강의 및 실습 | 11주차 | 원자력 공정열/수소/경제성 강의 |
| 4주차 | 민간 기업 고온가스로<br>개발 및 사업화 계획 | 12주차 | 스타업 사업계획서 작성 교육 |
| 5주차 | 기술 스타업 사례 소개 | 13주차 | 팀 최종 점검 |
| 6주차 | 경제성 분석으로 통한<br>원자로 설계 개선 결과 발표 | 14주차 | 프로젝트 최종 발표 |
| 7주차 | Heat Pipe 제작, 설계<br>및 기술 동향 | | |

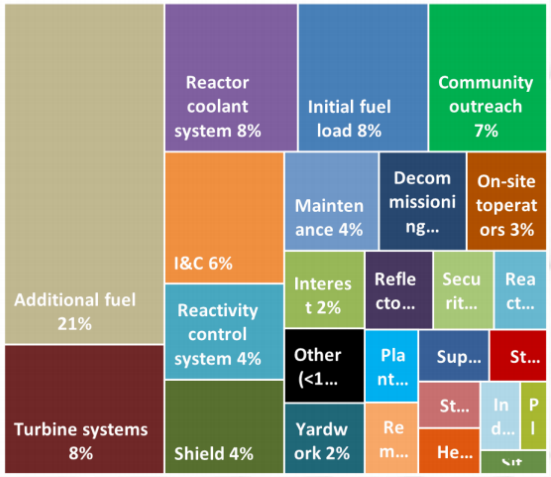
# 1 차세대 고온 원자력 시스템 융복합 교육

## 에너지시스템종합설계 (부제: 고온원자로 활용): 서울대, 25년 2학기 진행 중

DESIGN A



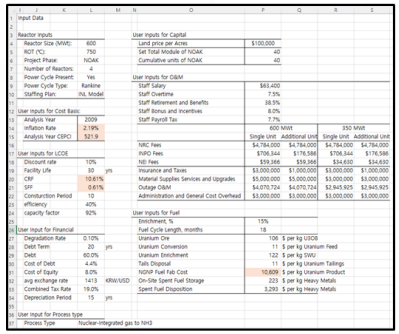

DESIGN A'



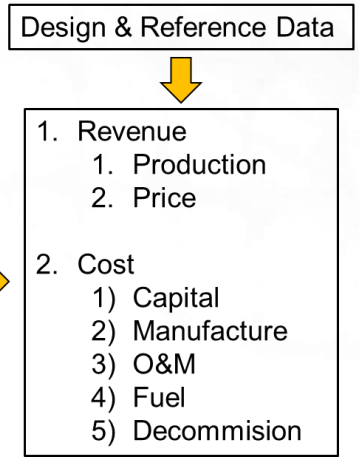

## 프로젝트 사례

TERRA

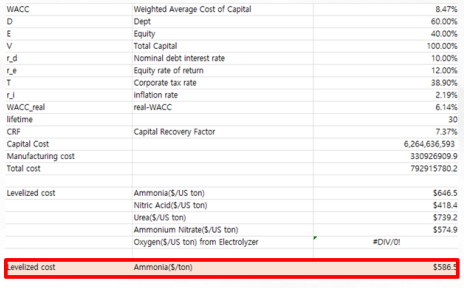
**TERRA** (**T**hermal **E**nergy from **R**eactor for **R**efined **A**mmonia)



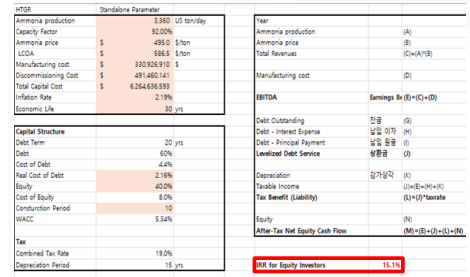
설계 요구조건 및 재무요소 입력




비용 및 편익 데이터 작성

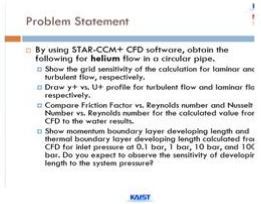


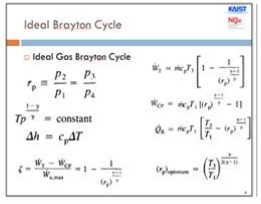

LCOA 계산

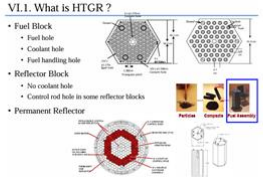


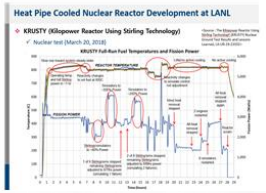
# 1 차세대 고온 원자력 시스템 융복합 교육

## 기존 교과목 내 고온 원자로 주제 보강










**2024 Curriculum Development & Implementation**

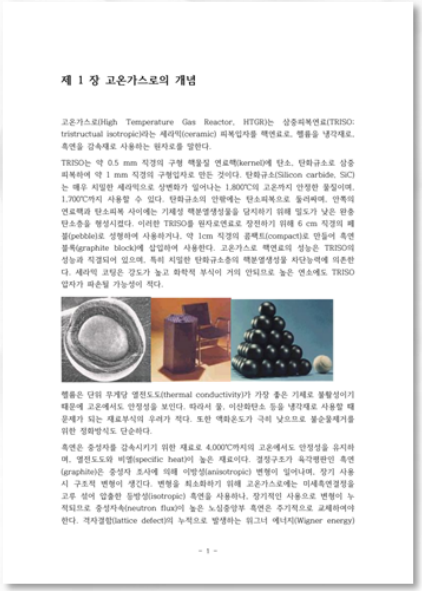
**Total**: 10 courses opened (SNU, KAIST, PNU)
**Total students enrolled**: **224**

**By Institution**
**Seoul National Univ.**: 5 courses, 143 students
**KAIST**: 4 courses, 47 students
**Pusan Nat'l Univ.**: 1 course, 34 students

# 1 차세대 고온 원자력 시스템 융복합 교육

## 고온가스로 교재 개발

- 총 8권의 시리즈로 개발 (1,2 권 작성 중)
- 수준: 국문, 대학원 교재 수준



제 1 장 고온가스로의 개념

고온가스로(High Temperature Gas Reactor, HTGR)는 삼중피복연료(TRISO: tristructual isotropic)와는 세라믹(ceramic) 피복입자를 핵연료로, 헬륨을 냉각재로, 흑연을 감속재로 사용하는 원자로를 말한다.

TRISO는 약 0.5 mm 직경의 구형 핵물질 연료핵(kernel)에 탄소, 탄화규소로 삼중 피복하여 약 1 mm 직경의 구형입자로 만든 것이다. 탄화규소(Silicon carbide, SiC)는 매우 치밀한 세라믹으로 상변화가 일어나는 1,800℃의 고온까지 안정한 물질이며, 1,700℃까지 사용할 수 있다. 탄화규소의 안팎에는 탄소피복으로 둘러싸며, 안쪽의 연료핵과 탄소피복 사이에는 기체성 핵분열생성물을 담지하기 위해 밀도가 낮은 완충 탄소층을 형성시킨다. 이러한 TRISO를 원자로연료로 장전하기 위해 6 cm 직경의 페블(pebble)로 성형하여 사용하거나, 약 1cm 직경의 콤팩트(compact)로 만들어 흑연 블록(graphite block)에 삽입하여 사용한다. 고온가스로 핵연료의 성능은 TRISO의 성능과 직결되어 있으며, 특히 치밀한 탄화규소층의 핵분열생성물 차단능력에 의존한다. 세라믹 고팡은 강도가 높고 화학적 부식이 거의 안되므로 높은 연소에도 TRISO 입자가 파손될 가능성이 적다.



헬륨은 단위 무게당 열전도도(thermal conductivity)가 가장 좋은 기체로 불활성이기 때문에 고온에서도 안정성을 보인다. 따라서 물, 이산화탄소 등을 냉각재로 사용할 때 문제가 되는 재료부식의 우려가 적다. 또한 액화온도가 극히 낮으므로 불순물제거를 위한 정화방식도 단순하다.

흑연은 중성자을 감속시키기 위한 재료로 4,000℃까지의 고온에서도 안정성을 유지하며, 열전도도와 비열(specific heat)이 높은 재료이다. 결정구조가 육각형판인 흑연(graphite)은 중성자 조사에 의해 이방성(anisotropic) 변형이 일어나며, 장기 사용시 구조적 변형이 생긴다. 변형을 최소화하기 위해 고온가스로에는 미세축연결정을 고루 섞어 압출한 등방성(isotropic) 흑연을 사용하나, 장기적인 사용으로 변형이 누적되므로 중성자속(neutron flux)이 높은 노심중앙부 흑연은 주기적으로 교체하여야 한다. 격자결함(lattice defect)의 누적으로 발생하는 위그너 에너지(Wigner energy)

- 1 -

**Volume 1. Introduction to HTGR**
1.What is an HTGR?
2.History of HTGR development
3.Advantages of HTGR
4.Future outlook of HTGR

**Volume 2. HTGR Nuclear Fuel**
1.Overview of HTGR fuel
2.Structure of TRISO fuel
3.Fabrication of TRISO fuel
4.Failure mechanisms
5.Performance of TRISO fuel

**Volume 3. HTGR Core Characteristics**
1.Overview of HTGR cores
2.Prismatic vs. pebble-bed
3.Neutronic characteristics
4.Heat transfer characteristics

**Volume 4. HTGR Systems and Components**
1.Overview of HTGR systems
Reactor system
1.Heat transport system
2.Power conversion system
3.Reactor shutdown cooling system
4.Reactor control system
5.Fuel reloading system
6.Other systems

**Volume 5. HTGR Materials and Equipment**
1.Overview of HTGR materials and structures
2.Metallic materials
3.Graphite and ceramic materials
4.High-temperature equipment

**Volume 6. HTGR Safety**
1.Safety characteristics of HTGR
2.Safety systems in HTGR
3.Design basis accidents
4.Safety analysis of HTGR

**Volume 7. HTGR Fuel Cycle and Radioactive Waste**
1.Characteristics of HTGR fuel cycle
2.Generation and management of radioactive waste in HTGR
3.HTGR and non-proliferation

**Volume 8. Applications of HTGR**
1.Electricity generation
2.Process heat utilization
3.Hydrogen production
4.Seawater desalination

2

고온 원자력 시스템을 중심으로 교육에서 연구로 이어지는 융복합 인재 양성 및 혁신 역량 강화

# 차세대 고온 원자력 시스템 융복합 연구

## 고온원자로 개발 동향 보고서 발행

03 국내/해외 동향

2050년 탄소중립 목표 달성을 위해 전력 부문을 넘어 산업 부문의 탈탄소화가 시급한 과제로 부상했다. 특히 철강, 석유화학 등 고온의 공정열을 필수적으로 사용하는 산업은 전 세계 탄소 배출의 상당 부분을 차지하며, 이를 대체할 무탄소 에너지 솔루션이 절실한 상황이다.

이러한 배경 속에서 고온가스로(HTGR)는 750°C 이상의 초고온 열을 안정적으로 공급할 수 있는 유일한 무탄소 에너지원으로, 단순 전력 생산을 넘어 산업 동력원으로서 원자력의 패러다임을 전환할 핵심 기술로 주목받고 있다.

### ○ 국내 동향

- 한국은 정부의 '탄소중립' 목표와 '원자력수소 개발' 정책에 발맞추어, 산업 부문에서 대량으로 사용되는 화석연료를 대체하기 위한 HTGR 기술 개발을 본격화하고 있다. 이는 기존의 대형 경수로 중심 전력 생산 정책에서 나아가, 산업용 열공급원으로서 원자력의 역할을 확장하는 중요한 정책적 전환을 의미한다.
- 특히 주목할 점은 '수요자 중심'의 개발 모델을 채택했다는 것이다. 2024년 7월, 과학기술정보통신부 주관 하에 한국원자력연구원(KAERI)과 5개 민간기업(포스코이앤씨, 대우건설, 롯데케미칼, SK에코플랜트, 스마트파워)이 참여하는 '고온가스로 기술개발 사업'이 공식 출범했다.[1]
  총 사업비 445억 원(정부 255억, 민간 200억) 규모의 이 프로젝트는 2027년까지 HTGR의 기본 설계를 완료하는 것을 목표로 한다. 원자력연은 원자로 설계를, 참여 기업들은 플랜트 설계 및 구축과 활용 분야 연구를 담당한다.
- 이 모델의 핵심은 기술의 최종 수요자인 포스코(수소환원제철)와 롯데케미칼(나프타 분해 공정)이 프로젝트 초기부터 깊숙이 관여한다는 점이다. 이는 과거 SMART 원자로가 기술 개발 후 수요처를 찾지 못해 상용화에 어려움을 겪었던 교훈을 반영한 것으로, 기술의 시장성을 초기부터 담보하고 상용화 성공률을 높이기 위한 실용적인 전략으로 평가된다. 설계 요구사항, 비용 목표, 배치 일정 등이 최종 사용자의 구체적인 필요에 의해 결정되므로, 기술 개발과 시장 수요 간의 불일치를 최소화할 수 있다.

1 Kang, K. J. "South Korea has embarked on a 44.5 billion won project…" KED Global, 2024-07-31.



### ○ 해외 동향

① 미국: 민간 주도 상용화 가속

- 미국은 에너지부(DOE)의 선진원자로실증프로그램(ARDP)[2]을 통한 자금 지원과 2024년 7월 제정된 '청정에너지를 위한 다목적 첨단 원자력 배치 가속화 법안(ADVANCE Act)'[3]을 통해 민간 기업의 상용화를 강력하게 지원하고 있다. 이는 신기술이 연구개발 후 상용화에 이르지 못하고 사장되는 '죽음의 계곡(Valley of Death)'을 극복하기 위한 고도화된 전략으로 평가된다.
- 정부가 ARDP와 같은 프로그램을 통해 초기 자금 지원으로 기술 개발 리스크를 분담하고(technology-push), Dow와 같은 명확한 '최초 고객(first-of-a-kind customer)' 확보를 통해 시장 불확실성을 제거하며(market-pull), 규제 기관과의 조기 협력을 통해 인허가 리스크를 관리하는 공공-민간 파트너십(PPP) 모델이 성공적으로 작동하고 있다.
- X-energy(Xe-100): 화학기업 Dow의 텍사스 Seadrift 부지에 자사의 페블베드형 HTGR인 Xe-100 4기(총 320MWe)를 건설하여 공정열과 전력을 공급하는 프로젝트를 추진하며 미국[4] 내 HTGR 개발을 선도하고 있다. 이 프로젝트는 2025년 6월, 미국 원자력규제위원회(NRC)가 건설허가 신청서에 대한 18개월의 공식 심사 일정을 발표하면서[5] 본격적인 인허가 궤도에 올랐다. NRC가 신청서의 완성도와 사전 협의의 효율성을 언급하며 비교적 신속한 심사 일정을 제시한 것은, X-energy가 수 년간 NRC와 설계, 핵연료, 안전성 관련 주제 보고서에 대해 긴밀히 협의해 온 성과로 분석된다. 또한 2025년 8월, 미 국방부 및 공군과 가스냉각 초소형원자로(XENITH) 개발 계약을 체결하며 기술 적용 범위를 확대하고 있다.[6]

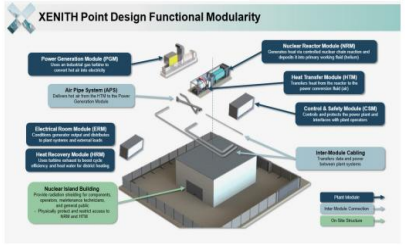



그림 8.
X-energy사가 미 국방부(DoD)용으로 개발 중인 가스냉각 초소형원자로 'XENITH'(출처: U.S. NRC

2 U.S. Department of Energy. "Advanced Reactor Demonstration Program (ARDP) Overview." DOE/NE, 2025.
3 ADVANCE Act of 2024 (Public Law 118-67). U.S. Congress, 2024.
4 X-energy. "NRC Publishes 18-Month Review Schedule for Xe-100 Construction Permit Application." 보도자료, 2025-06-16.
5 <X-energy, 국방부·공군과 가스냉각 초소형원자로(XENITH) 개발 계약> https://goo.su/weAozWz 출처: WNN, 보도일: 8. 18
6 World Nuclear News. "NANO announces MMR rebrand on completion of USNC technology acquisition." 2025-01-14.

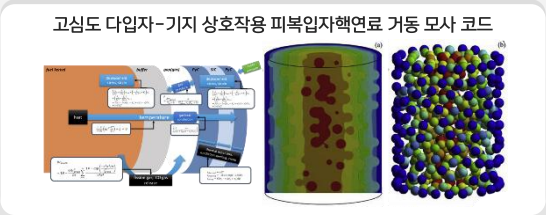
2

고온 원자력 시스템을 중심으로 교육에서 연구로 이어지는 융복합 인재 양성 및 혁신 역량 강화

# 차세대 고온 원자력 시스템 융복합 연구

## 인력양성센터-원자력연구원 융복합 연구분야 예비 수요조사

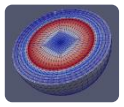
### 01 TRISO 핵연료 핵심기술




서울대학교 TRIPLE

장점

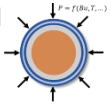
FEM 기반 코드.
복수의 입자연료 및 입자-기지 상호작용 모사 가능.



한국원자력연구원 COPA

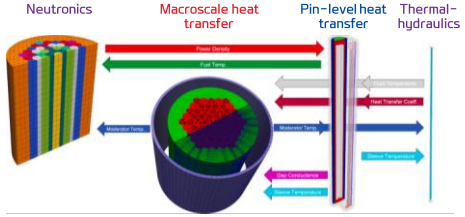
장점

검증된 종합 핵연료 재료 물성 및 거동 모델.



- 고온 원자로 핵연료 코드 고도화
- 고온 원자로 핵연료 설계방법론 개발
- 피복입자 물성측정

### 02 고온 원자로 시스템 핵심기술

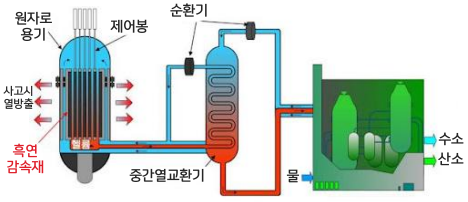



- 고온 원자로 시스템해석코드 고도화
- 고온 원자로 노심열해석코드 고도화
- 고온 열교환기 및 기타 주요 구성요소 설계
- 고효율 전력변환계통 기술 개발

### 03 고온 에너지저장 유체 및 재료 핵심 기술

- 고온 에너지저장 유체 물성치 평가 고도화
- 고온 에너지저장 유체 환경 원소 거동 이해
- 고온 에너지저장 유체 제어 기술 개발
- 환경 영향 평가 기술 개발

### 04 고온 원자로 수소 생산 및 공정열 연계 기술




- 고온 수전해 기술
- 원자력-수소생산 통합 시스템 기술
- 원자력-공정열 통합 시스템 기술
- 고온 원자로 열에너지 저장 및 관리 시스템 기술
- 공정열 활용 친환경 산업공정 개발

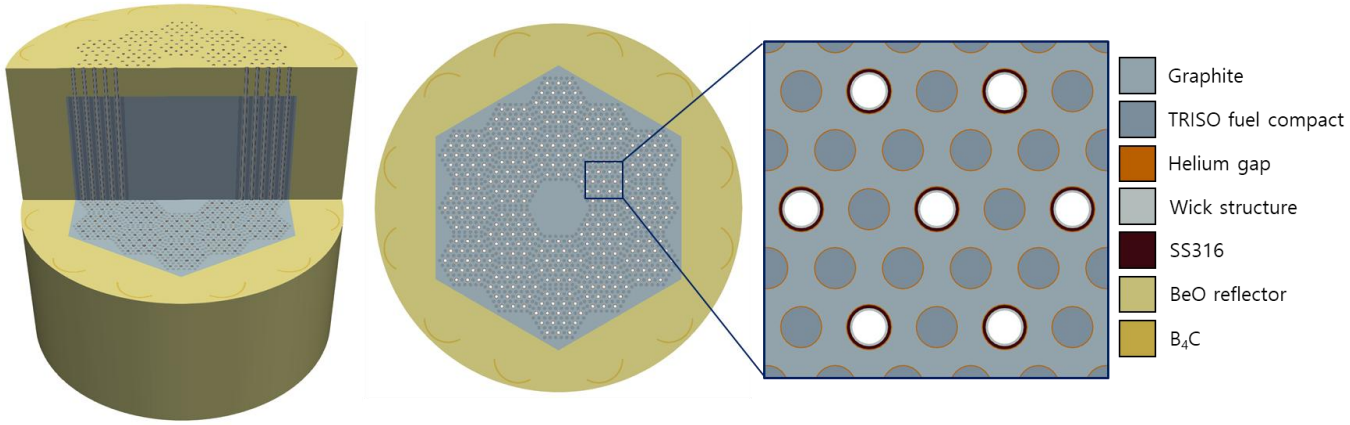
2

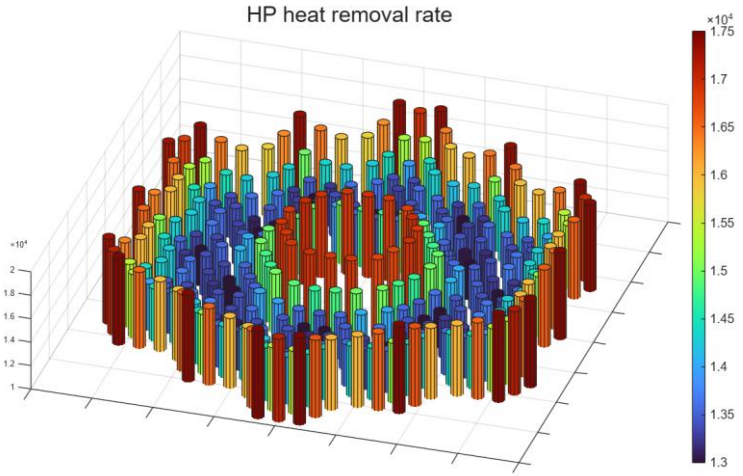
고온 원자력 시스템을 중심으로 교육에서 연구로 이어지는 융복합 인재 양성 및 혁신 역량 강화

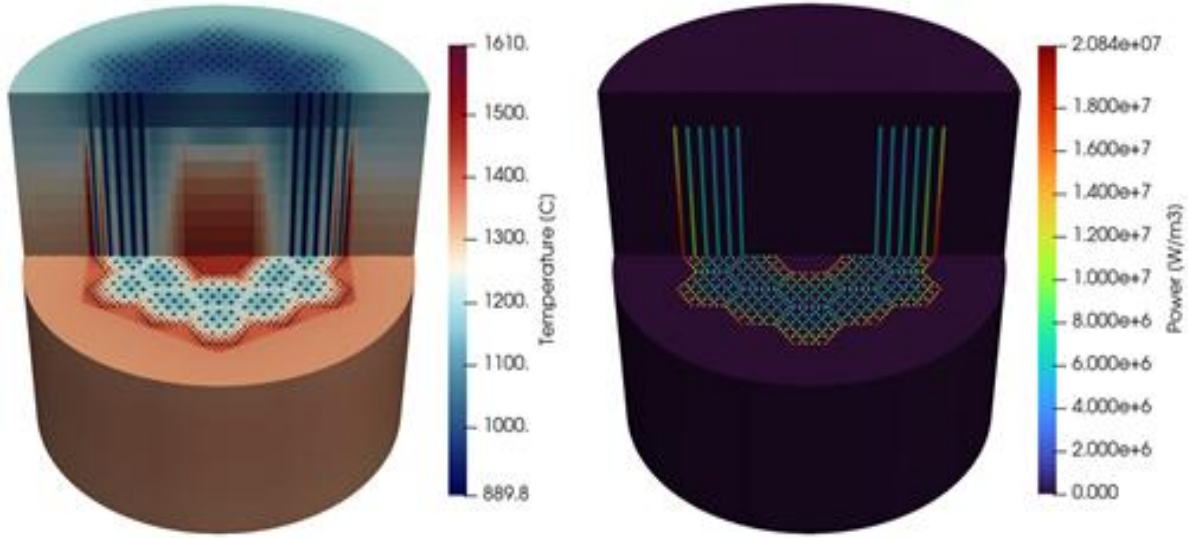
# 차세대 고온 원자력 시스템 융복합 연구

## 핵심 연구 현황 (서울대, 조형규 교수 연구실)

### 흑연감속 히트파이프 냉각원자로 (rHPMR) 다물리 해석

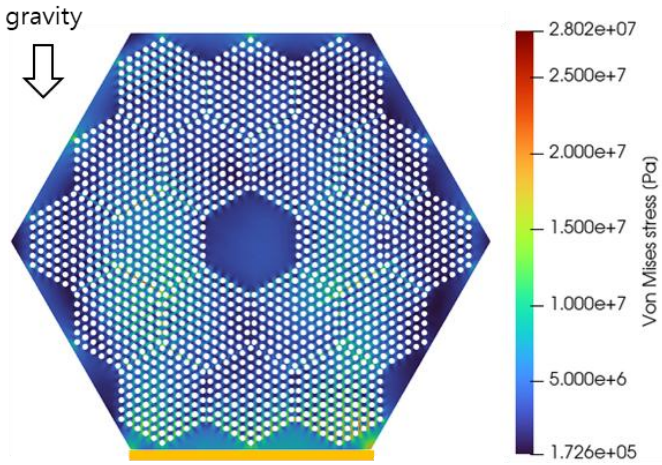



Temperature [°C]

Power [W/m³]




Side-fixed

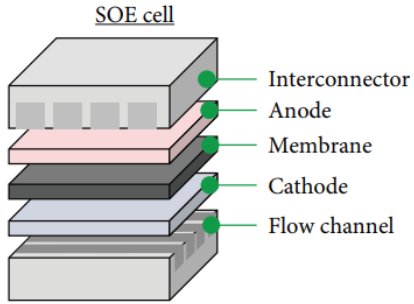
2

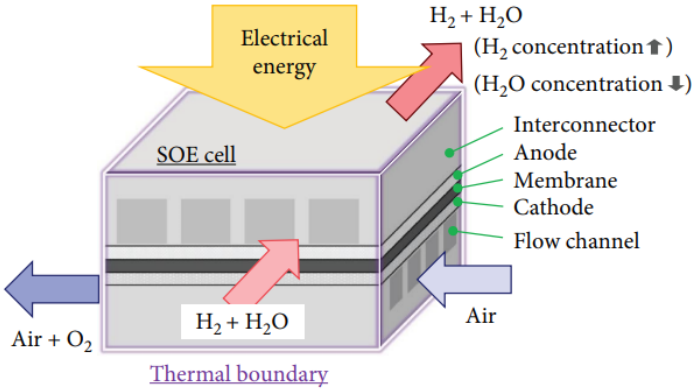
고온 원자력 시스템을 중심으로 교육에서 연구로 이어지는 융복합 인재 양성 및 혁신 역량 강화

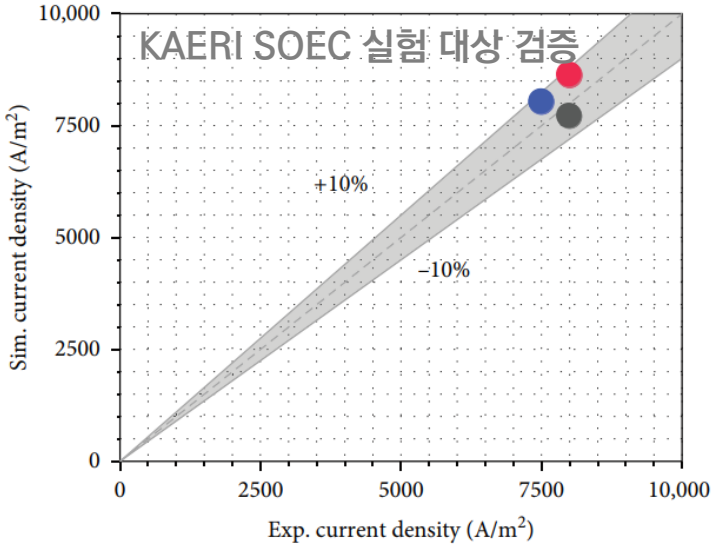
# 차세대 고온 원자력 시스템 융복합 연구

## 핵심 연구 현황 (서울대, 조형규 교수 연구실)

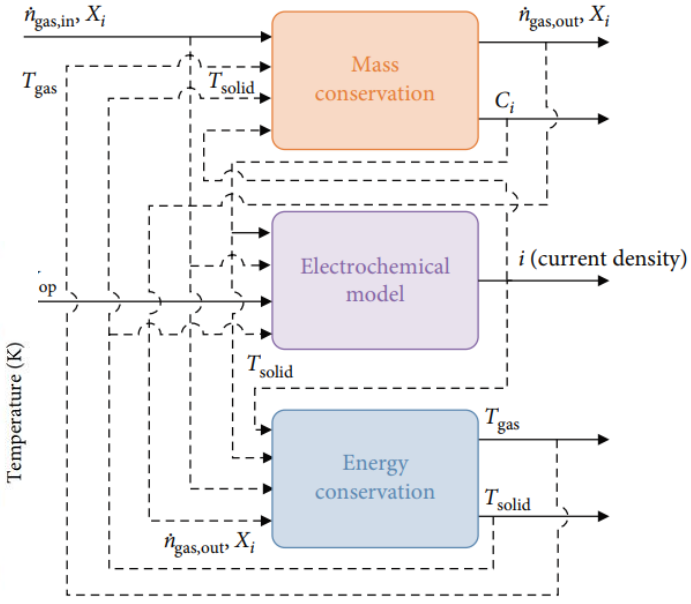
### 고온수전해 (SOEC) 시스템 거동 해석 코드 개발

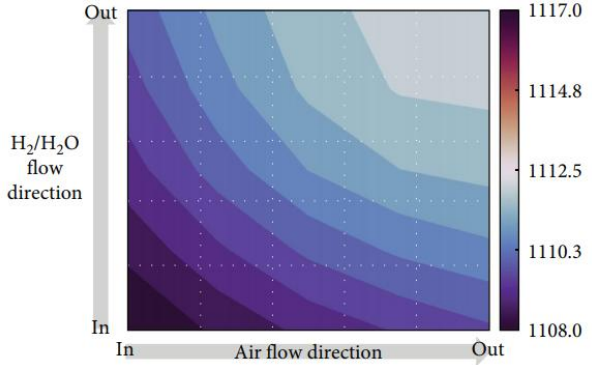


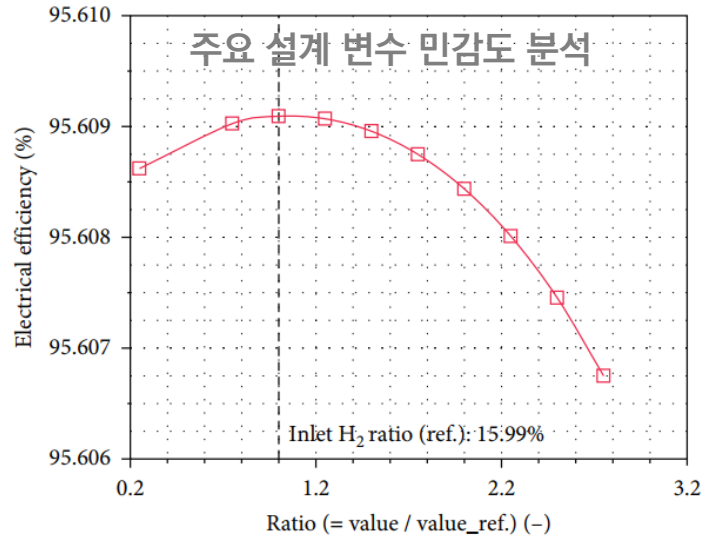




MATLAB SIMULINK



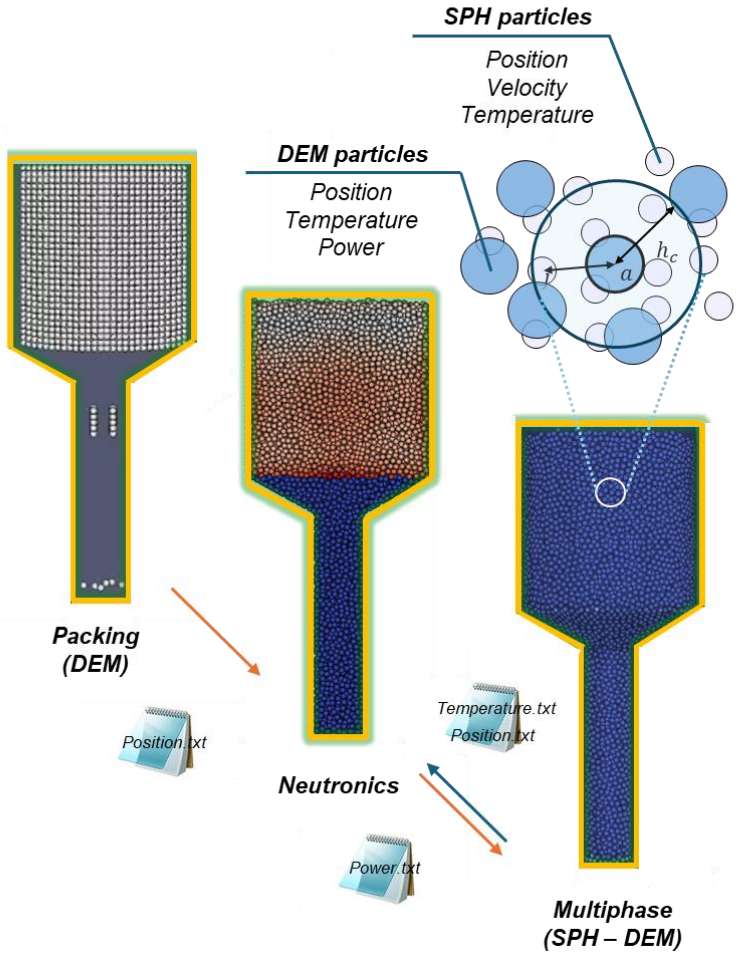
2

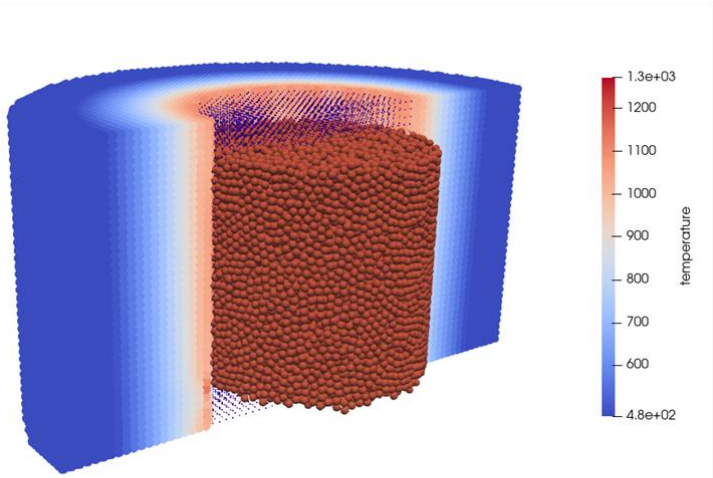
고온 원자력 시스템을 중심으로 교육에서 연구로 이어지는 융복합 인재 양성 및 혁신 역량 강화

# 차세대 고온 원자력 시스템 융복합 연구

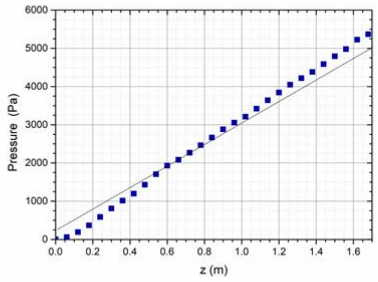
## 핵심 연구 현황 (서울대, 김응수 교수 연구실)

### Particle based multiphysics modeling of an operating pebble bed reactor

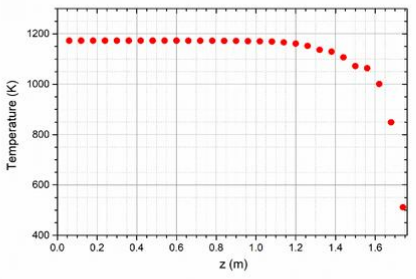



HTR-10 Benchmark – steady state




Axial fluid pressure




Axial fluid temperature

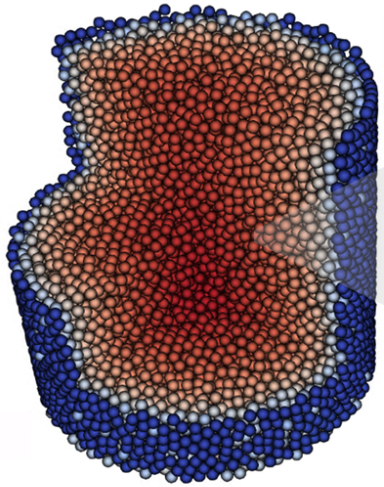
2

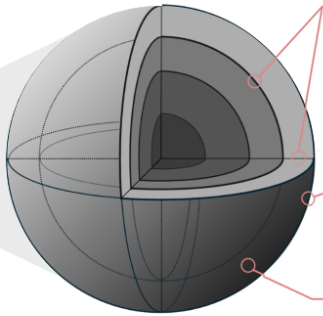
고온 원자력 시스템을 중심으로 교육에서 연구로 이어지는 융복합 인재 양성 및 혁신 역량 강화

# 차세대 고온 원자력 시스템 융복합 연구

## 핵심 연구 현황 (서울대, 김응수 교수 연구실)

### Thermal Analysis of PBR Using Monte Carlo Ray Tracing





**Internal heat conduction**

- Heat conduction between each adjacent pair of pieces calculated by discretized Fourier's law of conduction.

$$q = -kA\frac{dT}{dx} \rightarrow q = -\frac{k_i+k_j}{2}A_{ij}\frac{T_i-T_j}{D_{ij}}$$

- $A_{ij}$: Area between a pair of pieces
- $D_{ij}$: Straight or arc distance between the centroid of a pair of pieces

**External heat conduction**

- Outer pieces on contact participate on static conduction.

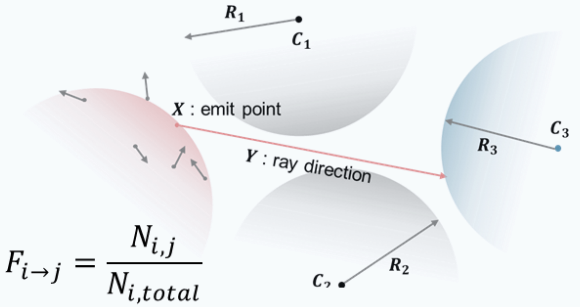
$$Q_{ij} = H_c(T_i - T_j)$$

$$H_c = \frac{4r_c}{\left(\frac{1}{k_i}+\frac{1}{k_j}\right)},\ r_c = \sqrt{2\delta_n r_p - \delta_n^2}$$

**Radiative heat transfer**

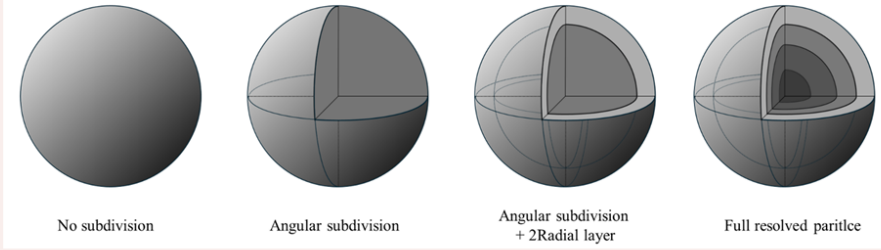
- Each of the 8 outer pieces per pebble exchanges radiative heat with those of other pebbles based on the view factor.

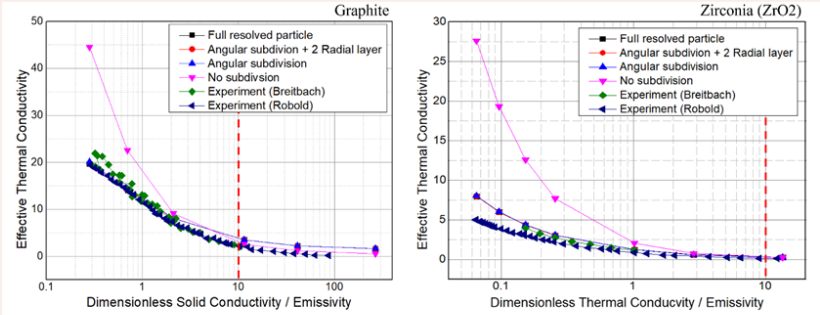
**View factor calculation using MCRT**




$$F_{i\rightarrow j} = \frac{N_{i,j}}{N_{i,total}}$$

**Effect of internal heat conduction**



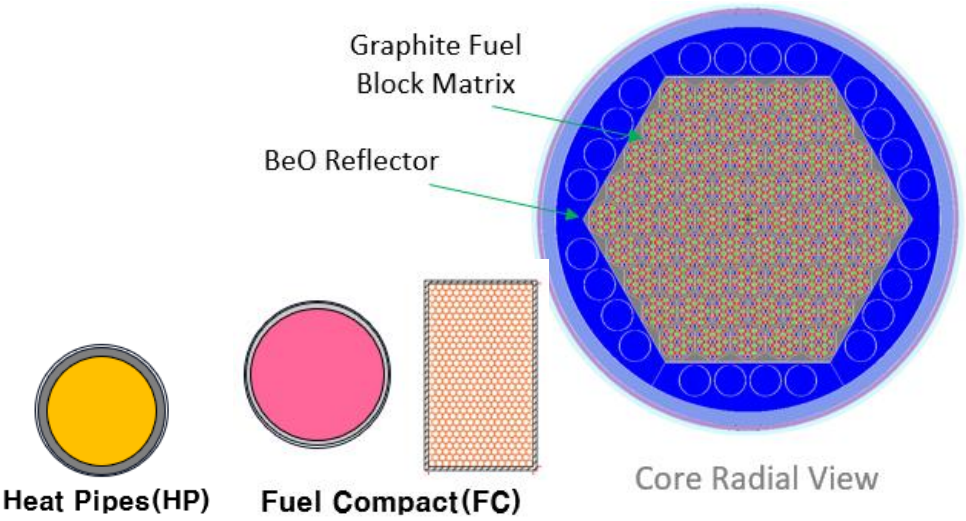
2

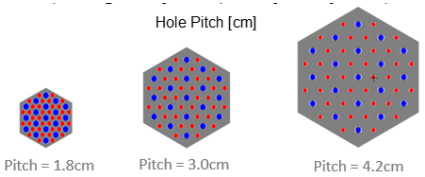
고온 원자력 시스템을 중심으로 교육에서 연구로 이어지는 융복합 인재 양성 및 혁신 역량 강화

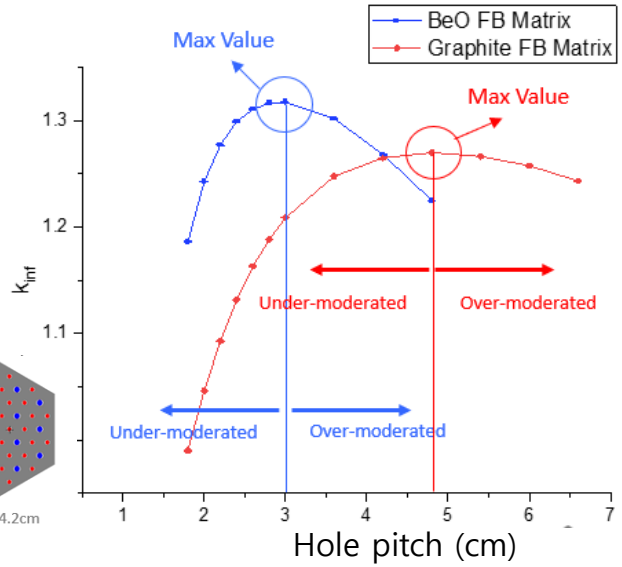
# 차세대 고온 원자력 시스템 융복합 연구

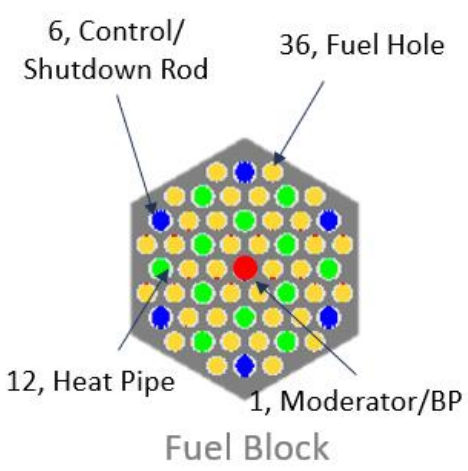
## 핵심 연구 현황 (서울대, 심형진 교수 연구실)

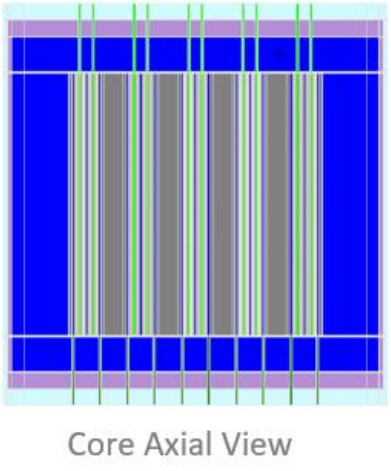
### 히트파이프 냉각 초소형원자로 설계

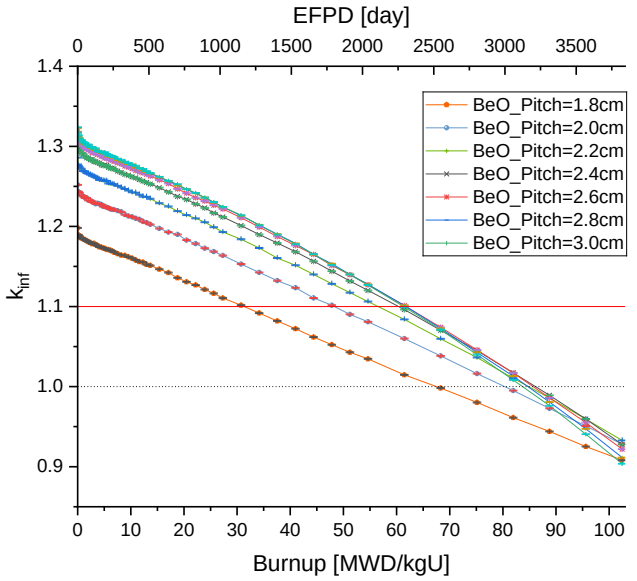


2

고온 원자력 시스템을 중심으로 교육에서 연구로 이어지는 융복합 인재 양성 및 혁신 역량 강화

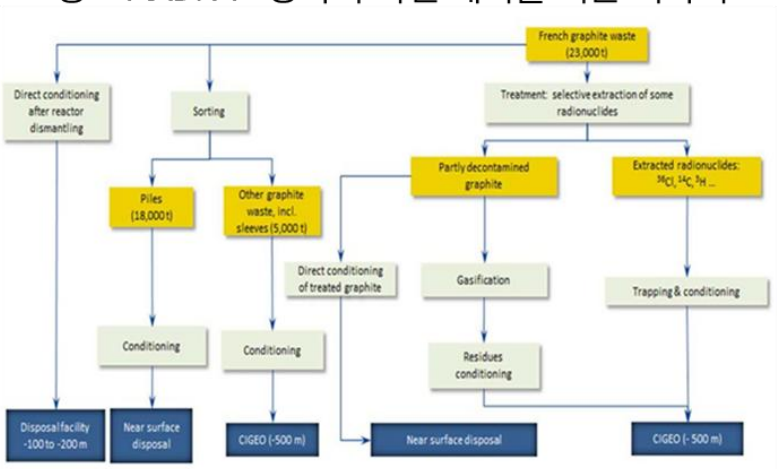
# 차세대 고온 원자력 시스템 융복합 연구

## 핵심 연구 현황 (서울대, 최성열 교수 연구실)

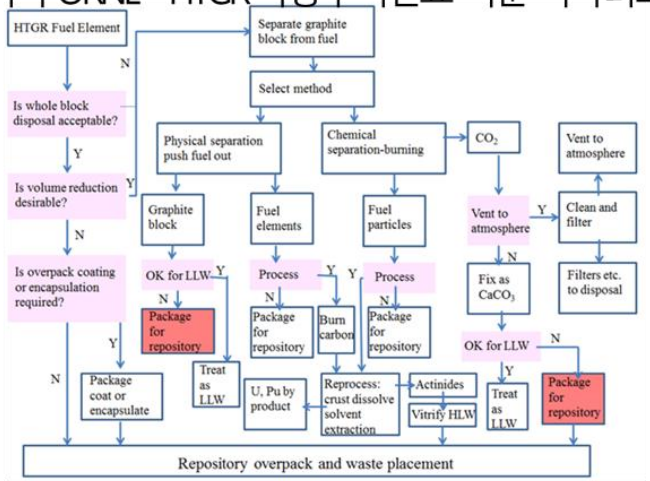
### 고온가스로 흑연 구조재료 처분 규제·기술 현황 분석

#### 해외에서 제시된 HTGR 사용후핵연료 및 방사화 흑연 폐기물 처분 시나리오

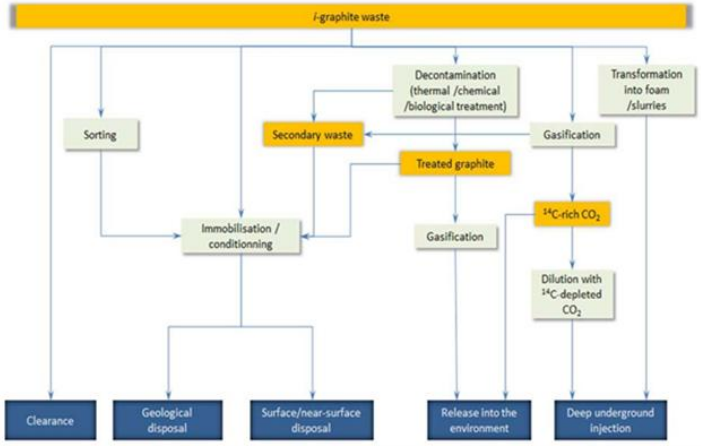
프랑스 ANDRA – 방사화 흑연 폐기물 처분 시나리오



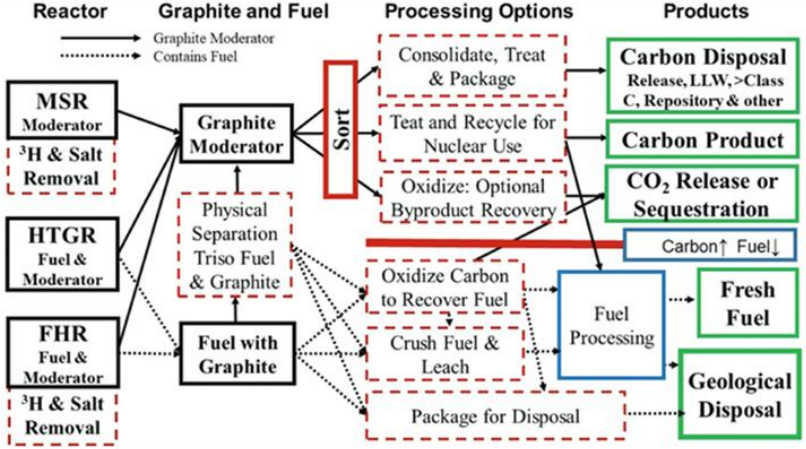

미국 ORNL – HTGR 사용후핵연료 처분 시나리오




IAEA – 방사화 흑연 폐기물 최종 처분 시나리오




미국 MIT – HTGR 사용후핵연료 및 방사화 구조재료 처분



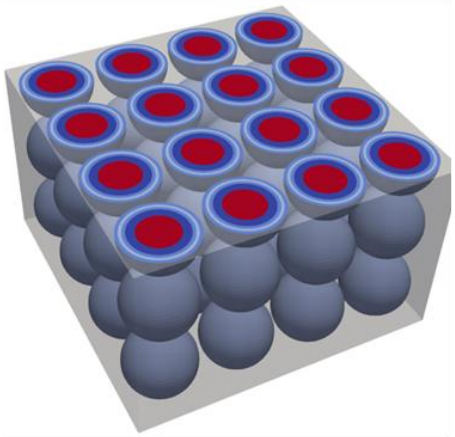
2

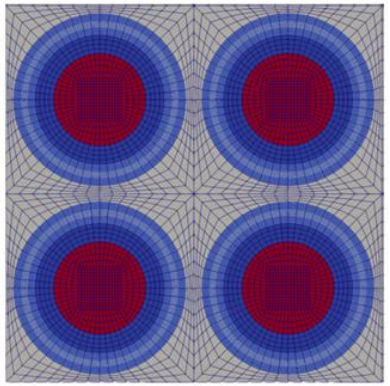
고온 원자력 시스템을 중심으로 교육에서 연구로 이어지는 융복합 인재 양성 및 혁신 역량 강화

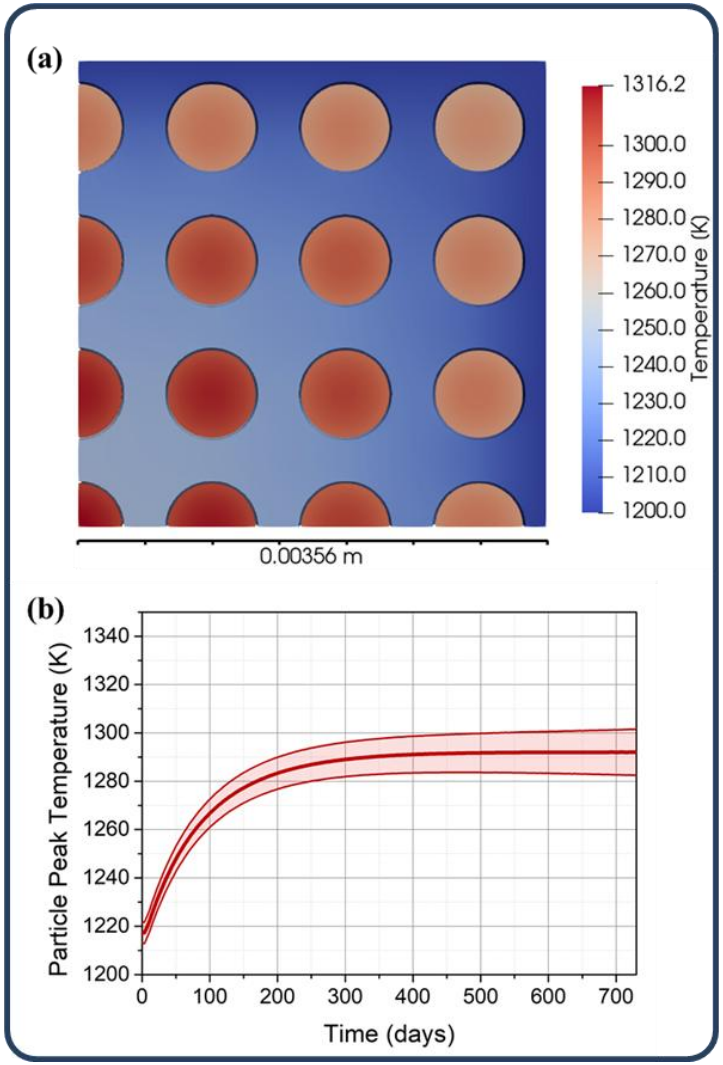
# 차세대 고온 원자력 시스템 융복합 연구

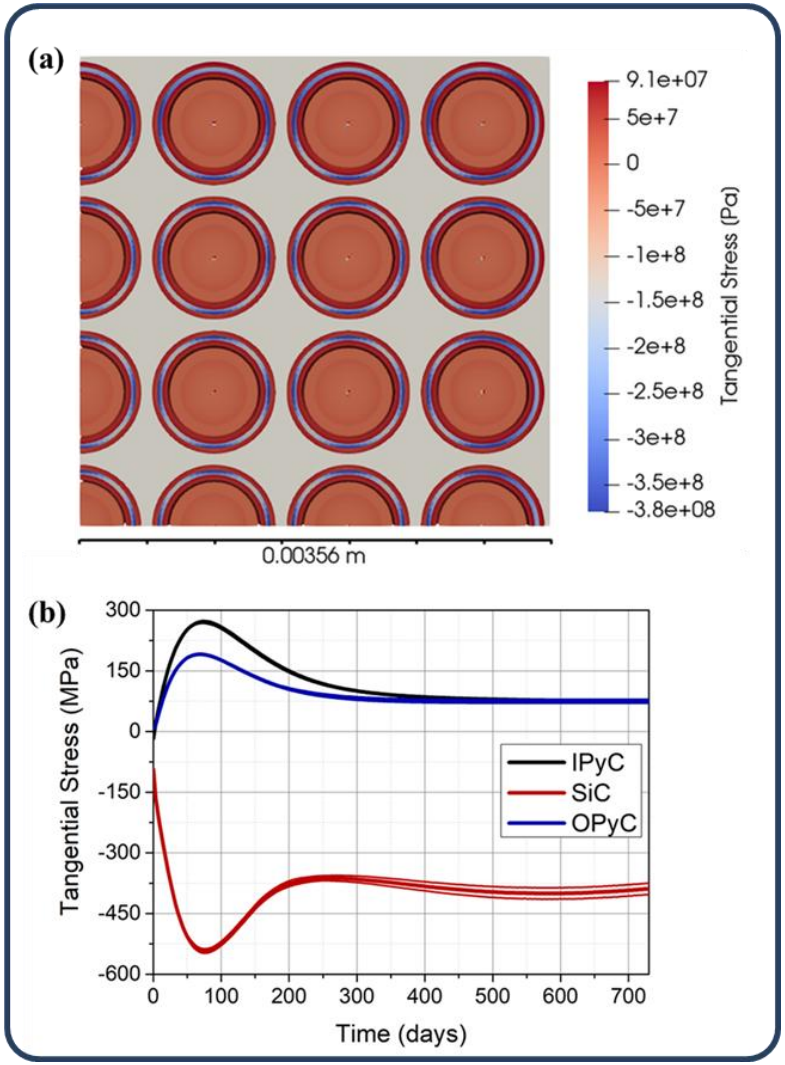
## 핵심 연구 현황 (서울대, 이유호 교수 연구실)

### 3차원 유한요소법 기반 TRISO 핵연료 다물리 성능해석 코드 개발







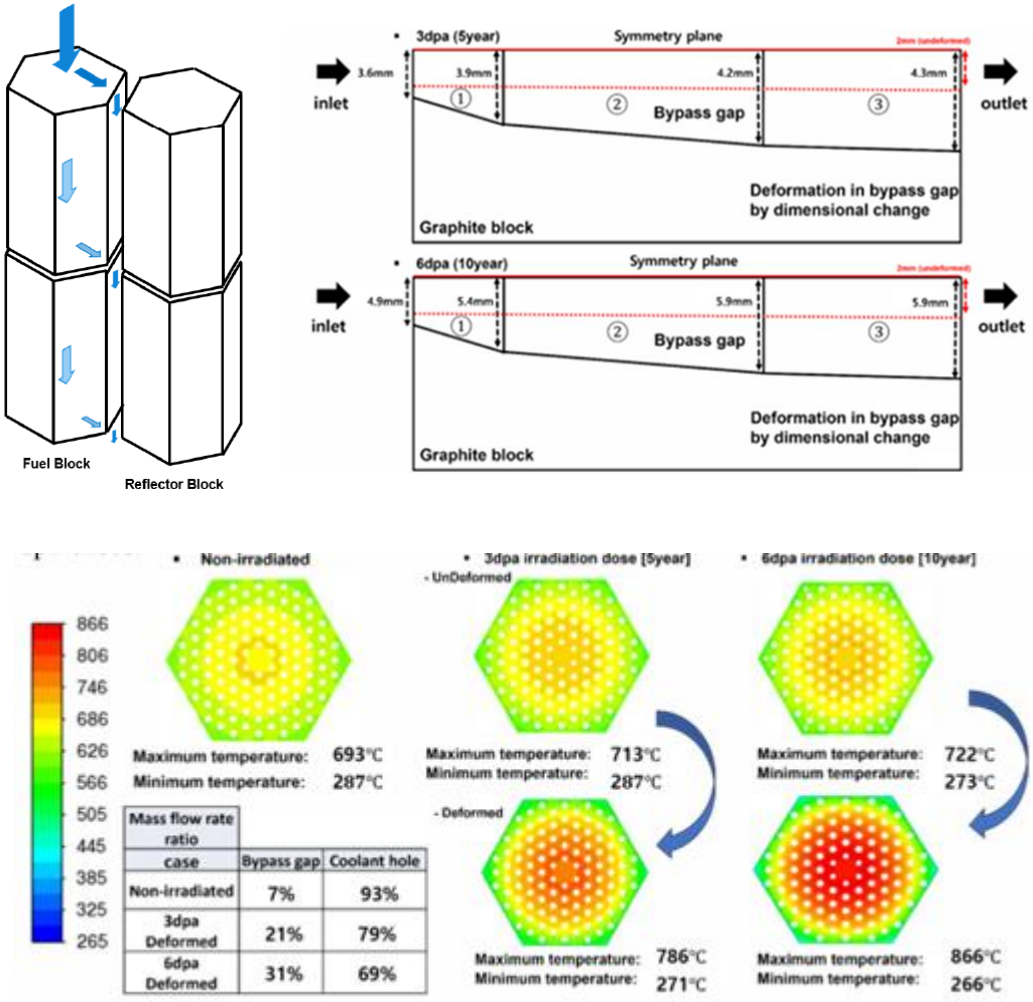
2

고온 원자력 시스템을 중심으로 교육에서 연구로 이어지는 융복합 인재 양성 및 혁신 역량 강화

# 차세대 고온 원자력 시스템 융복합 연구

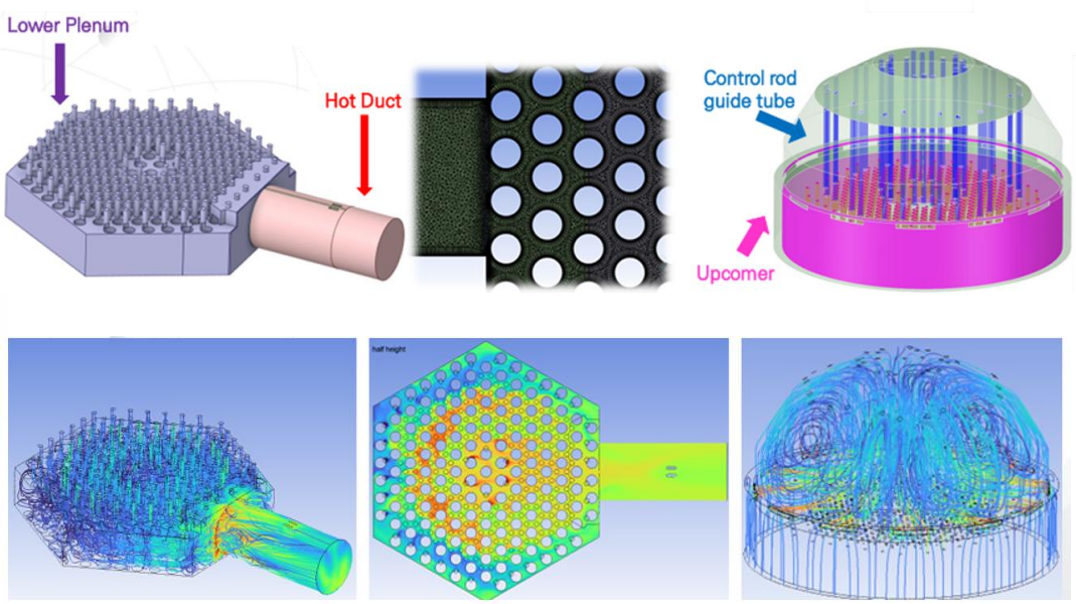
## 핵심 연구 현황 (KAIST, 성지현 교수 연구실, 이정익 교수 연구실)

### 방사선 조사 및 열 팽창에 의한 우회 유동 분석

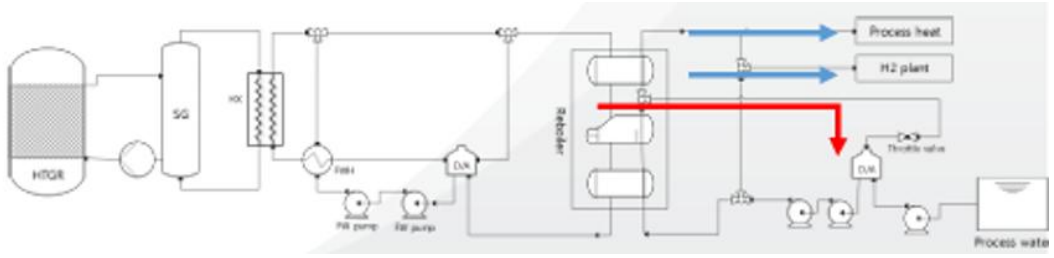



| Mass flow rate ratio | | |
|---|---|---|
| case | Bypass gap | Coolant hole |
| Non-irradiated | 7% | 93% |
| 3dpa Deformed | 21% | 79% |
| 6dpa Deformed | 31% | 69% |

### 원자로 상하부 플레넘 전산유체해석




### HECTAR 공정열생산 단가 분석 (PH-LCOH 최적화)



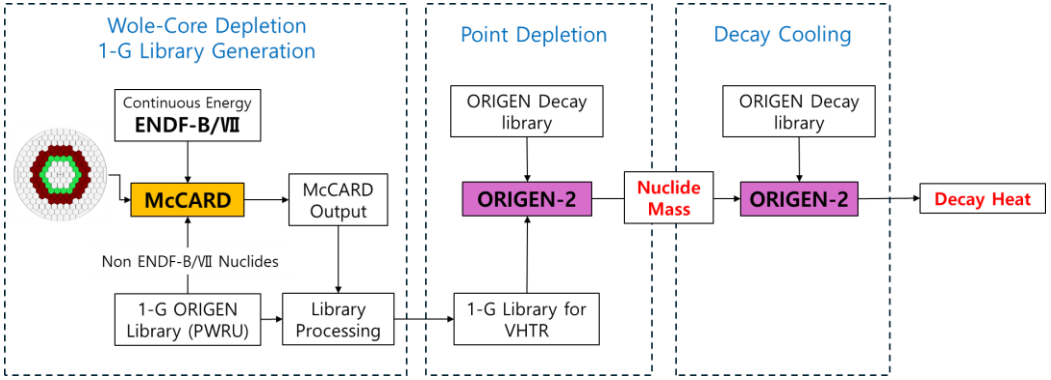
2

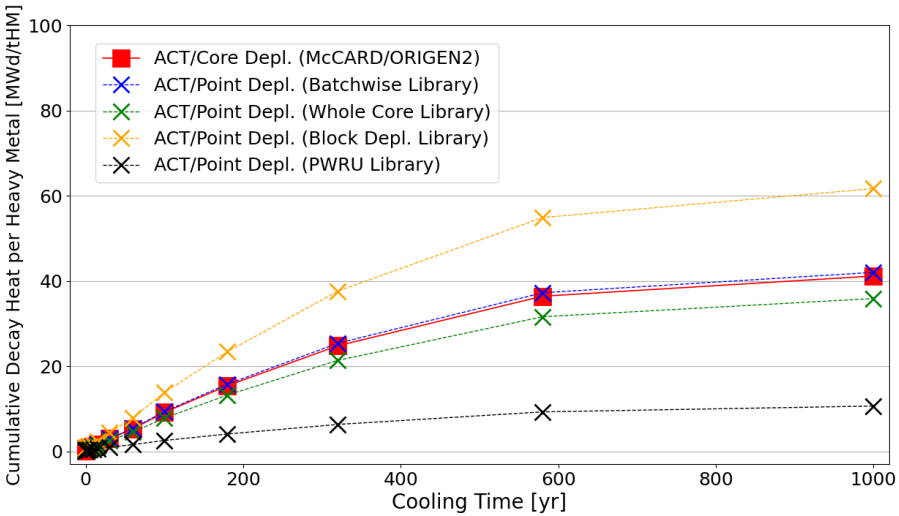
고온 원자력 시스템을 중심으로 교육에서 연구로 이어지는 융복합 인재 양성 및 혁신 역량 강화

# 차세대 고온 원자력 시스템 융복합 연구

## 핵심 연구 현황 (KAIST, 이현철 교수 연구실)

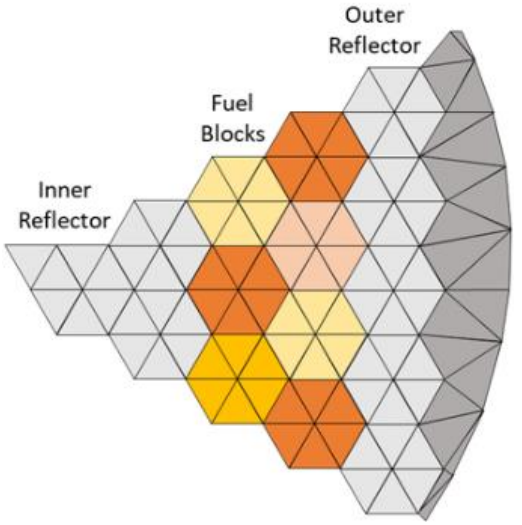
### 고온가스로 붕괴열 계산을 위한 ORIGEN-2 라이브러리 생산

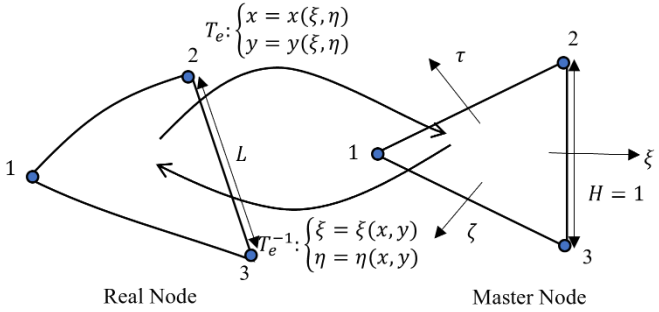



### 임의 삼각형 기반 노달법 개발

Mapping 기법 도입을 통한 임의의 삼각형에 대한 노달법 구현



3

현안에서 혁신으로: 원자력 기술 해커톤으로 미래를 설계하다.

# 고온 원자력 시스템 산학연 협력

## 핵심 목표: 학계와 산업계의 협력을 통해 차세대 원자력 분야의 현안 문제를 해결하는 기술적 솔루션 모색

- **기술 세미나 및 워크숍**: 원자력 기술의 최신 트렌드와 현안에 대한 정보 공유
- **혁신적 아이디어 해커톤**: 참가자들이 팀을 이루어 짧은 기간 내에 혁신적인 솔루션을 개발
- **기술 전시회 및 네트워킹 이벤트**: 개발된 솔루션의 전시 및 참가자들 간의 네트워킹 기회 제공
- **전문가 패널 토론 및 멘토링**: 업계 전문가들로부터의 피드백과 지도

### 산업계

한국조선해양 / 현대건설 / posco / 주미래와도전 FNC Technology Co., Ltd.

| 실제문제 제공 | 기술적 인프라 지원 | 상업화 전문지식 | 네트워킹 및 멘토링 | 투자 및 자원확보 |
|---|---|---|---|---|

### 연구기관

KAERI 한국원자력연구원 Korea Atomic Energy Research Institute / KIMM 한국기계연구원 KOREA INSTITUTE OF MACHINERY & MATERIALS / KIMS 한국재료연구원 Korea Institute of Materials Science

| 학계와 산업계의 가교 | 최신 연구 및 전문지식 제공 | 중립적 평가 및 분석 | 네트워킹 및 멘토링 |
|---|---|---|---|

현안에서 혁신으로: 원자력 기술 해커톤으로 미래를 설계하다.

# 3 고온 원자력 시스템 산학연 협력

**핵심 목표: 학계와 산업계의 협력을 통해 차세대 원자력 분야의 현안 문제를 해결하는 기술적 솔루션 모색**

| 창의적이고 혁신적인 아이디어와 기술적 솔루션의 발굴 | 산업계와 학계의 전문가들 사이의 협력 강화 | 차세대 원자로에 대한 대중의 인식 개선 및 관심 증가 |
|---|---|---|

## 해커톤 프로젝트 주제 발굴

- 각 학교, 참여 산업체가 참여하는 정례 회의를 통한 주제 발굴
- 연 1회 이상 운영위원회 회의를 통해 해커톤 프로젝트 주제 10건 이상 발굴
- 산업체 현안 해결을 위한 주제 발굴, 공학 문제 외에도 다양한 주제 발굴
  (예: 고온 SMR 주민 수용성 향상을 위한 홍보 전략 등)

## 해커톤 프로젝트 설계 및 시범운영

- 방학 기간 중 2~3일 동안 주어진 주제에 대해 탐색, 연구 및 해결책 제시
- 학교별 예선(겨울 방학) 및 결선(여름 방학) 운영, 대표 각 1팀 선발
- 박사과정-석사과정-학부생 각 1인 이상으로 구성 멘토-멘티 체계 유지
- 학교 연합 팀은 본선 직행(학교별 예선 면제)의 특전을 부여

## 해커톤 프로젝트 운영, 성과 평가 및 확산

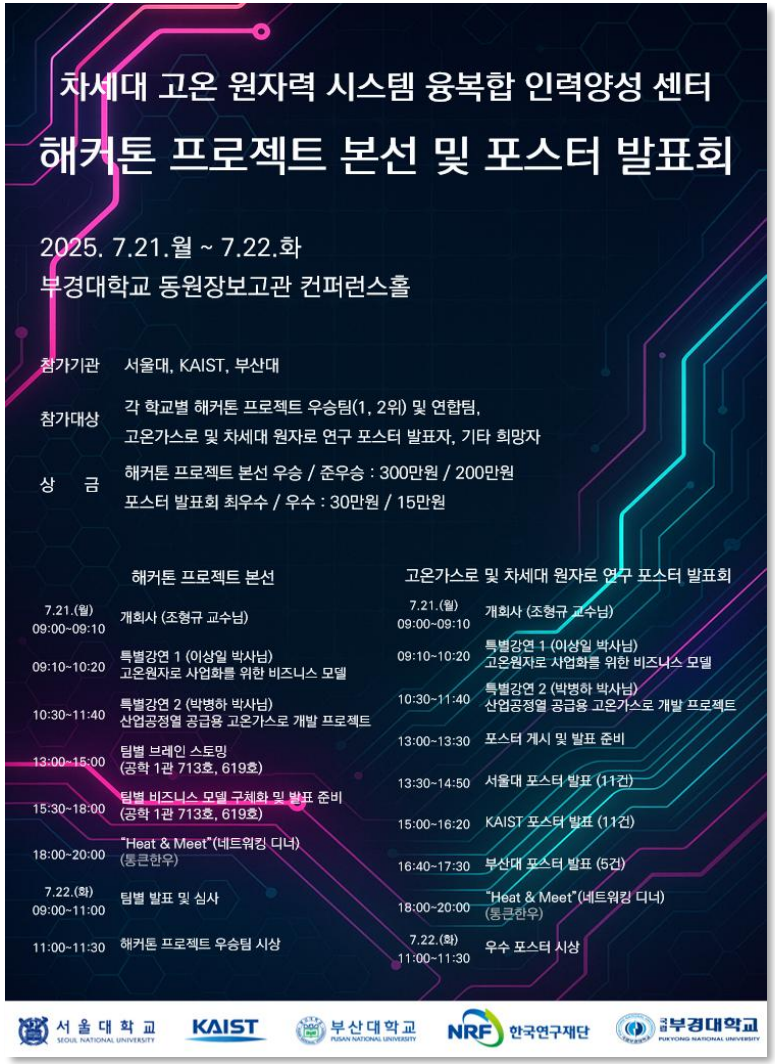
- 시범운영 결과 반영하여 프로젝트 재설계
- 학교별 예선(겨울 방학) 및 각 학교 대표 출전 결선(여름 방학) 운영
- 우수 프로젝트는 추가 연구개발 지원을 통해 실제 적용 가능성 탐색
- 워크숍 등을 통한 성과 평가 및 확산

현안에서 혁신으로: 원자력 기술 해커톤으로 미래를 설계하다.

# 3 고온 원자력 시스템 산학연 협력

## 2025년 해커톤 경진대회 및 포스터 발표회: 2025.0721–22, 부경대학교

- 학교별 예선 → 전체 학교 참여 본선 (8팀)
- 협업 능력 강화, 학생 간 네트워크 강화



4

교육과 연구의 경계를 허물다: 인력 양성을 위한 지식 통합 플랫폼

# 차세대 원자력 인력양성 센터 연구성과물 공유 플랫폼 구축

**핵심 목표: 차세대 원자력 인력의 지속적인 학습과 연구 협업을 지원하며, 다양한 디지털 채널을 통해 교육과 연구 내용을 광범위하게 공유**

01

### 디지털 허브 구축

- 센터 전용 홈페이지: 최신 교육 커리큘럼과 연구 자료의 중심지
- 다양한 학습 자원: 수업 자료와 동영상 강의 라이브러리

02

### 소셜미디어 네트워크

- 전문 연결망: LinkedIn으로 산업계와 학계 네트워킹 강화
- 창의적 인터랙션: Instagram을 통한 시각적 스토리텔링
- 지식 공유 채널: YouTube에서 콜로키움과 교육 세션 스트리밍

03

### 교육 및 연구 홍보

- 실시간 정보 공유: SNS를 통한 콜로키움, 교육행사 및 센터 활동 홍보
- 접근성 향상: 모든 자료는 온라인으로 접근 가능하여 글로벌 리치 확대

04

### 학술자료 배포

- 학술 연구의 산실: 홈페이지에서 최신 논문과 보고서 다운로드 제공
- 연구 성과의 쇼케이스: 광범위한 관객에게 연구 성과와 인사이트 공유

24. 4. 28. 오전 11:38 Gateway for Accelerated Innovation in Nuclear - MicroreactorProgram

Sign In

GAIN Gateway for Accelerated Innovation in Nuclear

HOME ABOUT FUNDING OPPORTUNITIES RESOURCES REGULATORY WORKSHOPS AND WEBINARS CALENDAR NEWS

DOE MICROREACTOR PROGRAM

*Through cross-cutting research and development and technology demonstration support, by 2025 the Microreactor Program will:*

- *Achieve technological breakthroughs for key features of microreactors*
- *Enable successful maturations of multiple domestic commercial microreactor technologies*
- *Empower initial demonstrations of the next advanced reactor in the U.S.*

**What are Microreactors?**

Microreactors are a class of very small modular reactors targeted for non-conventional nuclear markets. The US Department of Energy supports a variety of advanced reactor designs, including gas, liquid-metal, molten-salt, and heat-pipe-cooled concepts. In the U.S., microreactor developers are currently focused on designs that could be deployed as early as the mid-2020s.

Potential Microreactor applications are:

- Remote communities
- Mining sites
- Remote defense bases
- Applications such as back-up generation for power plants
- Humanitarian assistance and disaster relief missions

Such applications currently face economic and energy security challenges that can be uniquely addressed by this new class of innovative nuclear reactors.

**Key Attributes**

Microreactors have key features enabled by their small size that distinguish them from other reactor types mainly large reactors (LWRs) and small modular reactors (SMRs).

These are:

- Typically produce less than 20 MWth
- Smaller footprint
- Factory fabrication
- Transportable
- Self-regulating (enabling remote and semi-autonomous microreactor operation)
- Rapid deploy-ability and availability during emergency response
- Possible operation up to 10 years or more

**What are National Laboratories Doing?**

The U.S. Department of Energy (DOE) Microreactor Program was established to support research and development (R&D) of technologies related to the development, demonstration

**Information Sheets**

The U.S. DOE Microreactor Program
Microreactor Applications Research Validation and Evaluation Project (MARVEL)
Microreactor Agile Non-nuclear Experimental Testbed (MAGNET)
Single Primary Heat Extraction and Removal Emulator (SPHERE)

**Program Plans**

Program Plan
Operations Plan

**Organizational Structure**

Org Structure

**Technical Reports**

Technical Reports
Microreactor Program: Experimental Capabilities

**Publications**

Journal Articles
Nuclear Technology Special Issue

**Verification and Validation (Experimental Results)**

Manuscripts

- Sockeye Validation Support Using the SPHERE Facility

Experimental Database

- SPHERE
- MAGNET (will be available soon)

**In The News**

Puerto Rico work to update grid, make territory more energy independent
An affordable zero emissions grid needs new nuclear

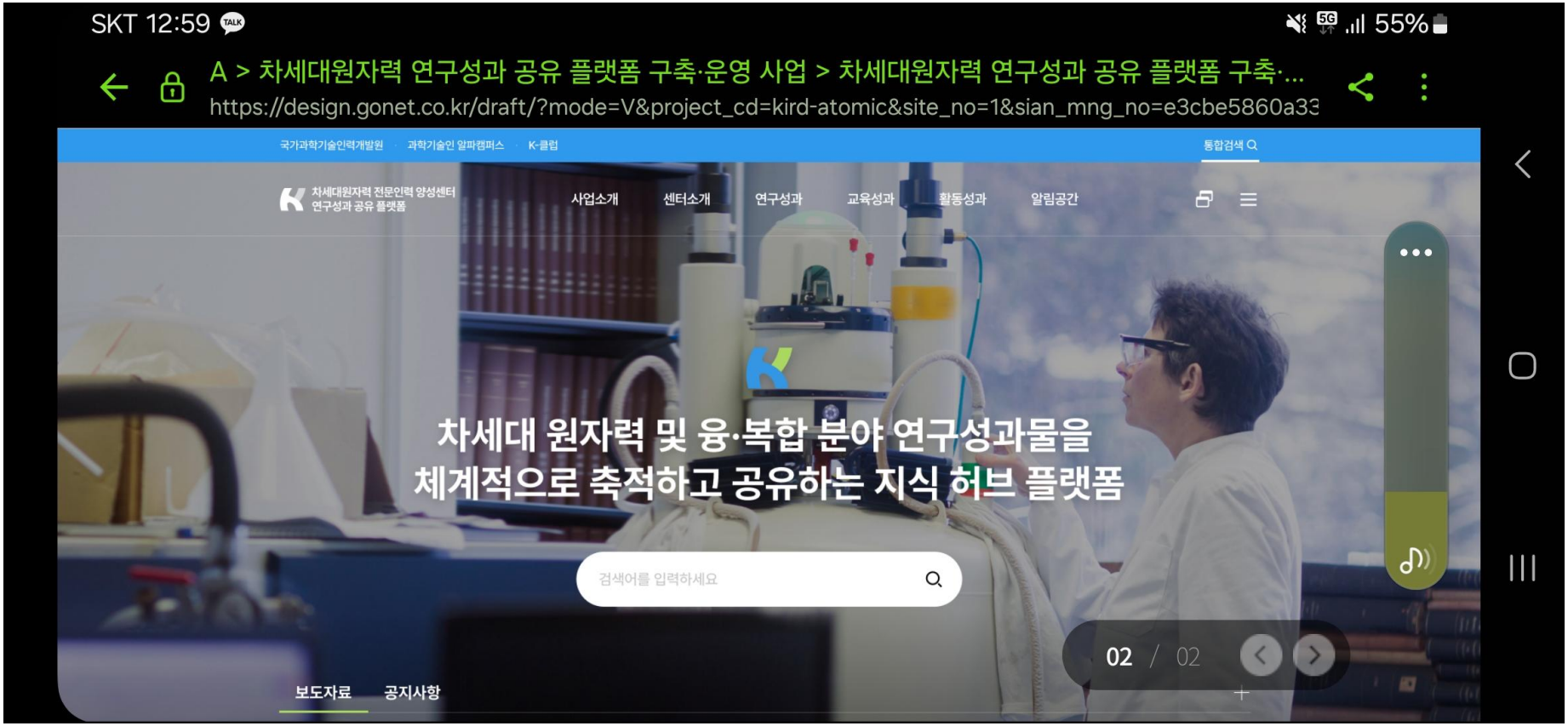
https://gain.inl.gov/SitePages/MicroreactorProgram.aspx 1/3

4

교육과 연구의 경계를 허물다: 인력 양성을 위한 지식 통합 플랫폼

# 차세대 원자력 인력양성 센터 연구성과물 공유 플랫폼 구축

**핵심 목표: 차세대 원자력 인력의 지속적인 학습과 연구 협업을 지원하며, 다양한 디지털 채널을 통해 교육과 연구 내용을 광범위하게 공유**



산학연을 연결하는 차세대 원자력 시스템 교육 및 연구의 허브

# 차세대 고온 원자력 시스템 융복합 인력양성 센터 추진체계

## 핵심 목표: 차세대 원자로 글로벌 교육센터이자 산학연 연구개발의 거점센터로 운영

**차세대 고온 원자력시스템 융복합 인력양성 센터**

1. 교육 및 연구방향 설정
2. 프로그램 전체 진행 관리 및 조정
3. 연구성과물 공유 플랫폼 구축 및 운영

### 산업계

한국조선해양 · 현대건설 · POSCO HOLDINGS · ㈜미래와도전 FNC Technology Co., Ltd.

1. 융복합 교육 개발 지원
2. 해커톤 프로젝트 주제발굴 및 멘토링 지원

### 연구계

KAERI · KIMM · KIMS

1. 융복합 교육 개발 지원
2. 공동연구 주제발굴 및 멘토링

### 산·학 협력 원자력 현안기술 해커톤 프로젝트

1. 산업현안 해커톤 프로젝트 운영 및 총괄
2. 프로젝트 기획, 자료, 운영, 멘토링, 피드백 등에 대한 전반사항 관리

### 융·복합 커리큘럼 개발·운영

1. 기술, 융복합 지식에 대한 교과목 개발 및 운영 총괄
2. 교과목 개발, 운영, 텍스트북, 보고서, 강의자료, 피드백, 콜로퀴움 등에 대한 전반사항 관리

### 시스템 설계 및 융복합 연구

1. 융복합 연구파트 운영 및 총괄
2. 연구 프로젝트 기획, 운영, 논문, 보고서, 실적, 피드백 등에 대한 전반사항 관리