

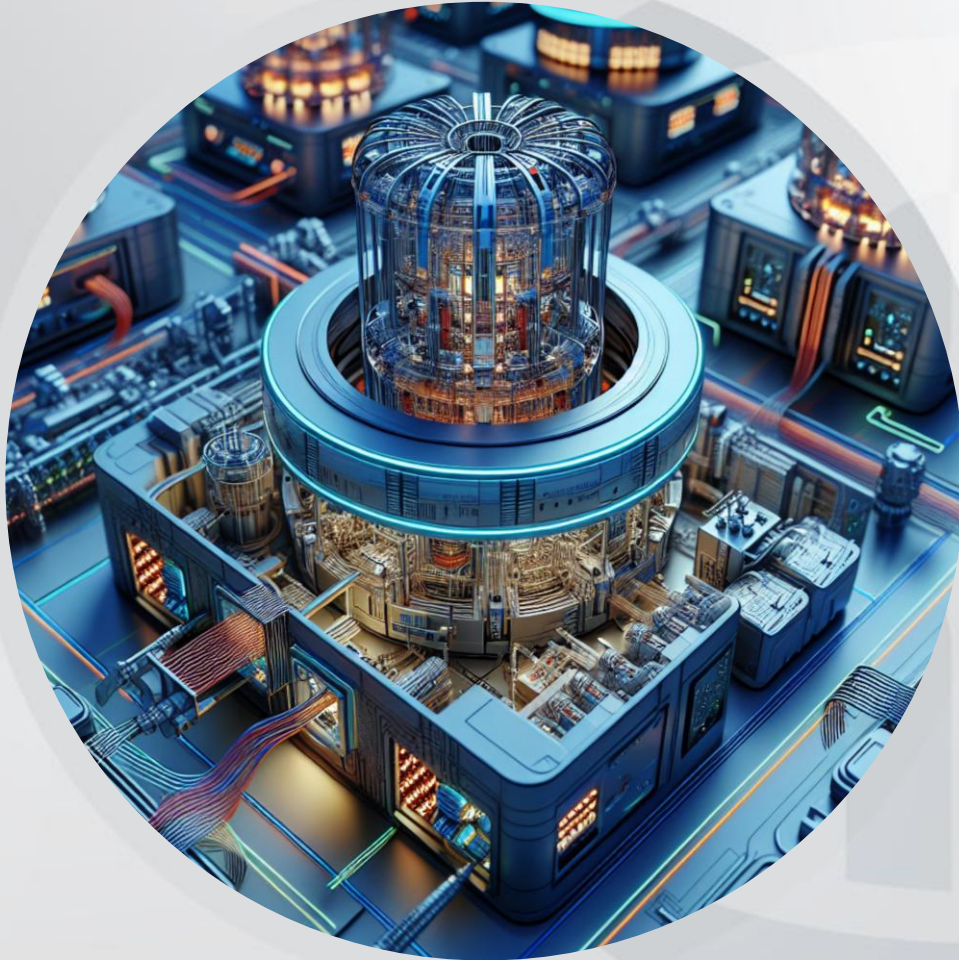
조윤제

한국원자력연구원

2026.05.06

2026 한국원자력학회 춘계학술대회
(AI탄소중립 시대, SMR 생태계의 역할과 의미)

AI 활용 가상원자로 플랫폼 구축



목차

01 • 고신뢰도 시뮬레이션 기술 필요성

02 • SMR 가상원자로 플랫폼 개발 사업 개요

03 • AI의 필수 요소

04 • AI를 위한 가상원자로 활용

05 • AI를 활용한 가상원자로 고도화

06 • 향후계획



SMR 핵심 기술 구성



NotebookLM

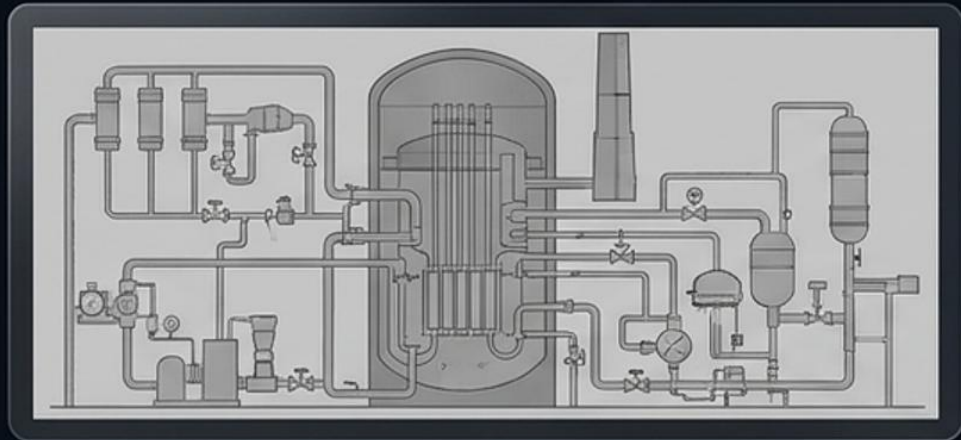
높은 신뢰성의 시뮬레이션(예측) 도구

시뮬레이션 기술 혁신

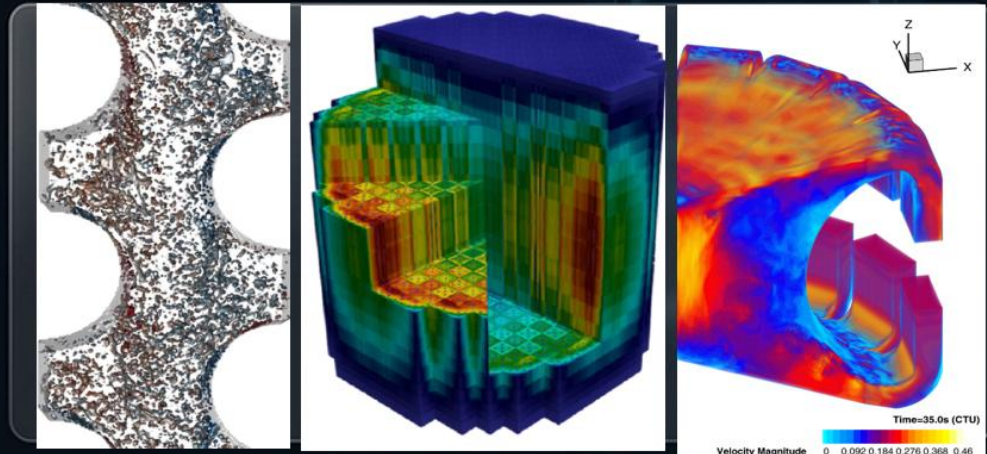
VIRTUAL-SMALL MODULAR REACTOR

[설계 도구]

기존 대형 원전 (Legacy)



V-SMR 혁신 (Next-Gen)



높은 신뢰성의 3D 노심 시뮬레이션(예측) 모델링

[운영 공간]

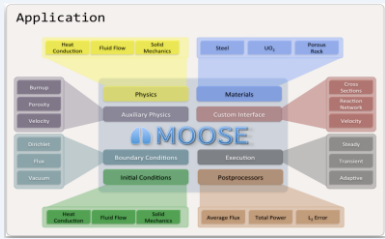


디지털 트윈 기반 AI 자율 운전 및 컨트롤 센터 대시보드

○ 해외동향

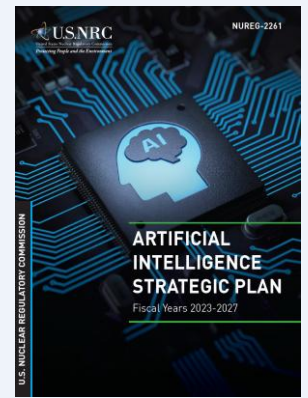
➤ MOOSE Platform

- 미국 국립연구소 공동연구 (6000억원 이상)
- NEAMS (2008~2020)
- 1000명 이상의 사용자
- 200명 이상의 핵심 기여자



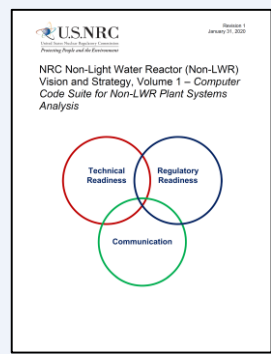
➤ U.S.NRC AI 활용

- AI 인허가 신청 대비 규제 준비태세 확립 (NUREG-2261, 2023)
- 기관 내부 AI 활용 추진 (SECY-24-0035, 2024)
- AI 규제 격차 평가: 10CFR 전체 검토 (AIRGA, 2024)



➤ 규제 검증용 통합해석 플랫폼(BlueCRAB) 개발

- U.S. NRC가 선진 비경수로(Non-LWR) 안전성 평가를 위해 개발한 분석 코드 번들
- 주요 코드: TRACE, FAST, PARCS, SCALE/SHIFT, MOOSE, BISON, Pronghorn, SAM, Griffin, Nek5000/NekRS, SERPENT 등
- NRC 코드와 NEAMS 코드는 BlueCRAB 내에서 호환되도록 설계 (핵심 차이는 품질관리 체계)



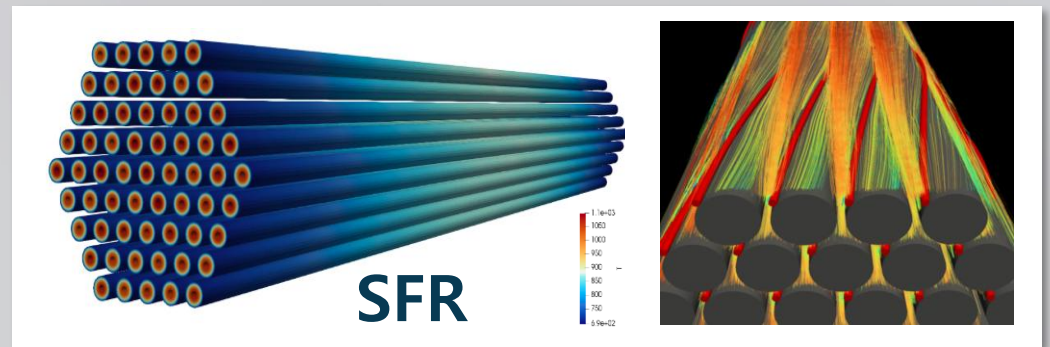
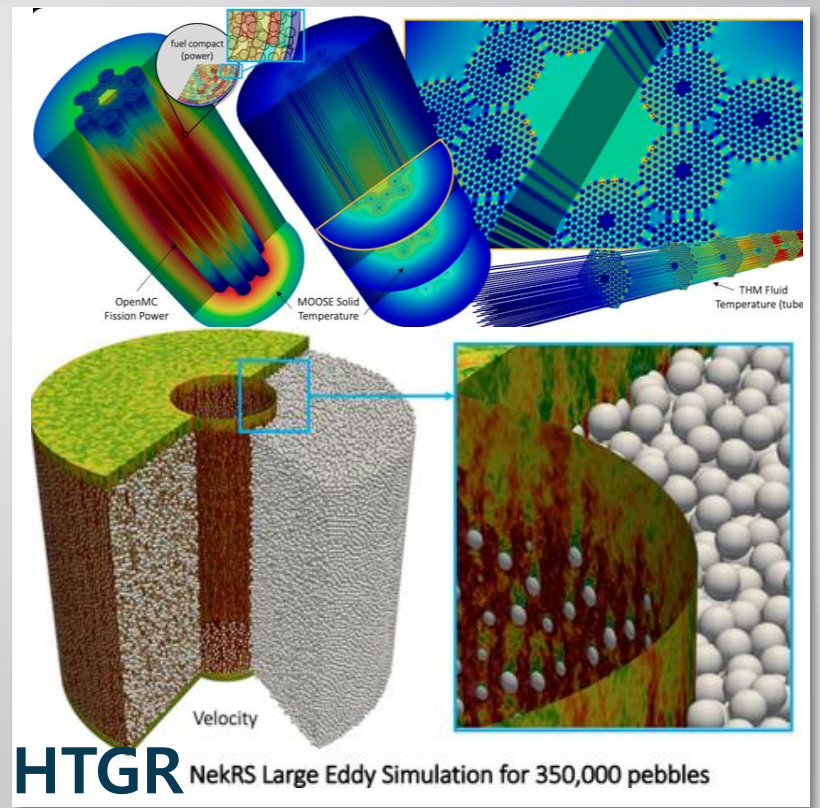
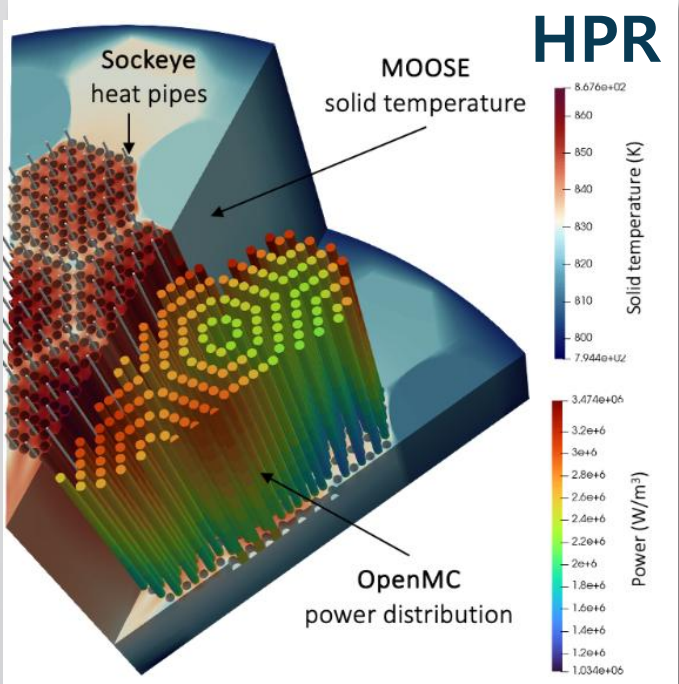
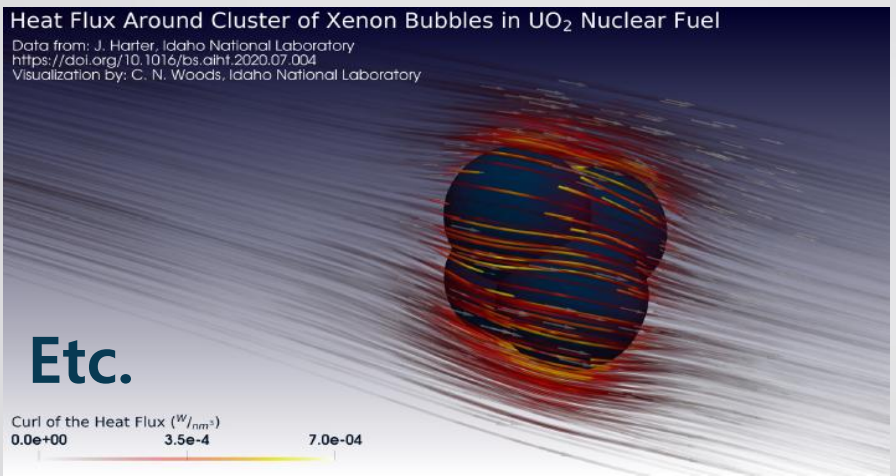
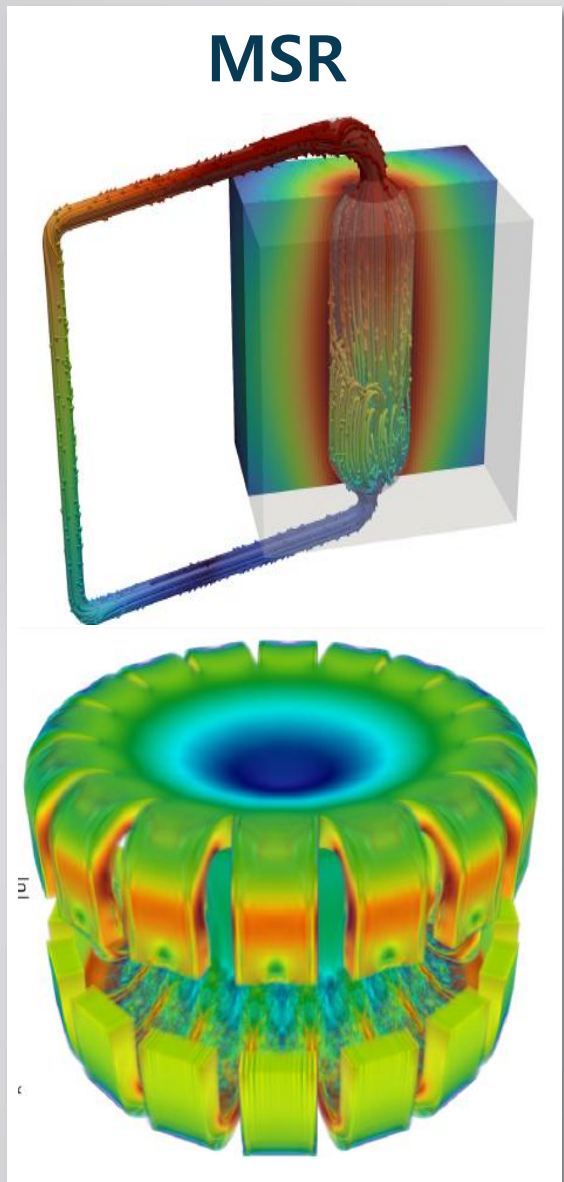
※ 관련 문헌: ML24079A245(V&V Plan), ML24069A004(Status Update), ML21053A024(ACRS Review), ML20030A176(Vision & Strategy Vol.1)

➤ Genesis Mission

- 트럼프 행정명령 (2025.11.24), 초기예산 \$600M 이상
- 26개 국가 S&T 도전과제 발표 (핵분열 10개 → 에너지 패권 확보)
- PROMETHEUS Challenge (INL x NVIDIA)
 - ※ 핵심 코드: MOOSE (다물리 프레임워크) · BISON (핵연료 성능) · Griffin (중성자공학) · Pronghorn (열수력) → NVIDIA GPU 아키텍처 이식으로 수일 → 수시간 단축
 - ※ 최종 목표: 원자로 개발·배치 기간 2배 단축, 운영비용 50% 절감

해외사례 (설계)

- DireWolf(Griffin+BISON+Sockeye)
- Cardinal (OpenMC+NekRS)
- FENIX (Griffin+Pronghorn)
- BlueCRAB (MOOSE + NRC TRACE)
- Aurora (OpenMC+MOOSE)



○ 해외사례 (운영)



ARPA-E GEMINA Program

- Generating Electricity Managed by Intelligent Nuclear Assets (GEMINA)
- **출범:** 2019년 10월 FOA(Funding Opportunity Announcement) DE-FOA-0002174 발표
- **총 예산:** 9개 프로젝트에 약 \$28M

Genesis Mission

- 26개 과제 (**PROMETHEUS Challenge**)
- **출범:** 2025년 11월 트럼프 행정명령
- **총 예산:** 초기 투입 \$600M

목차

- 01 • 고신뢰도 시뮬레이션 기술 필요성
- 02 • SMR 가상원자로 플랫폼 개발 사업 개요
- 03 • AI의 필수 요소
- 04 • AI를 위한 가상원자로 활용
- 05 • AI를 활용한 가상원자로 고도화
- 06 • 향후계획



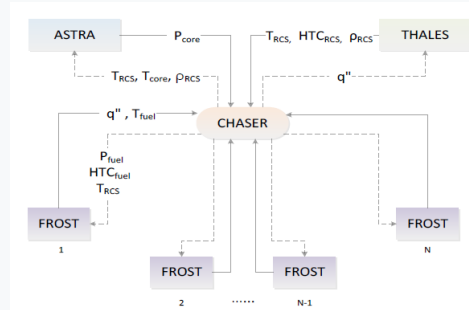
국내 사례

KEPCO NF

CHASER

Consolidated kinetics and thermal-Hydraulics Analysis Solver

- ASTRA: Advanced Static and Transient Reactor Analyzer
- THALES: Thermal Hydraulic Analyzer for Enhanced Simulation of Core
- FROST: Fuel Rod performance Optimizer for Steady and Transient states
- Approved Safety Analysis Methodology for APR1400 CEA Withdrawal

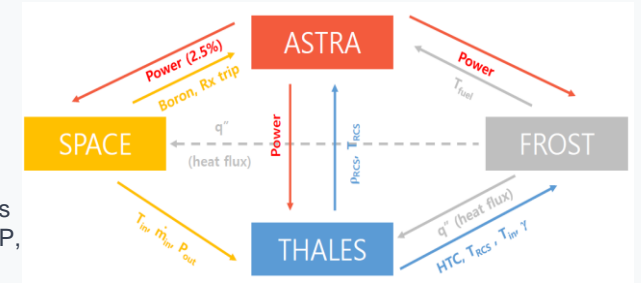


KHNP

CAPLER

Comprehensive Analysis Package for Light water reactor

- SPACE + CHASER
- SPACE: Latest thermal-hydraulics analysis code developed by KHNP, KAERI, KEPCO E&C

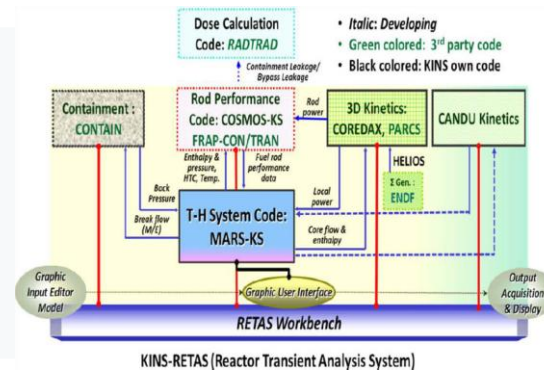


KINS

RETAS

Reactor Transient Analysis System

- MARS-KS, CONTAIN, FRAPCON/TRAN, PARCS
- PWR & CANDU Applications

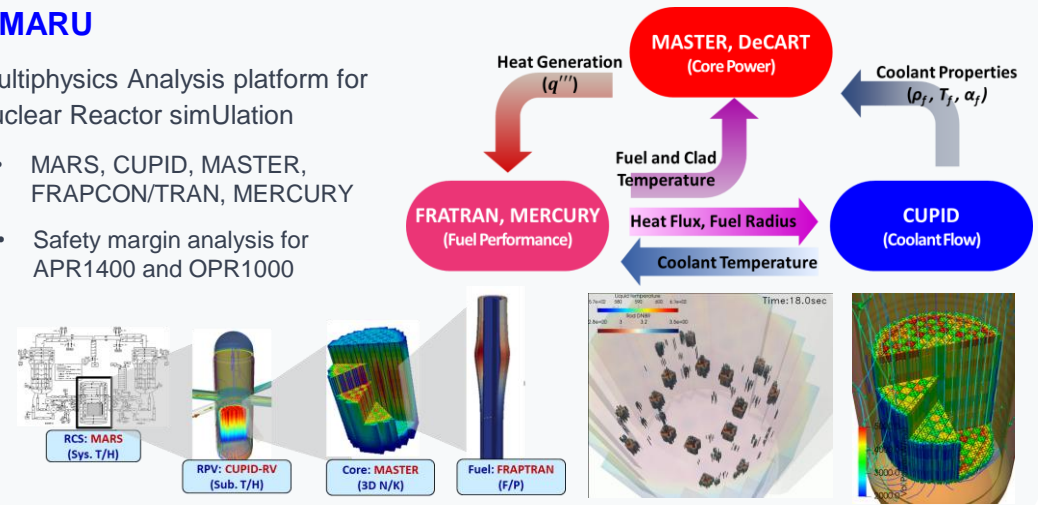


KAERI

MARU

Multiphysics Analysis platform for nuclear Reactor simulation

- MARS, CUPID, MASTER, FRAPCON/TRAN, MERCURY
- Safety margin analysis for APR1400 and OPR1000



사업 개요

▶ SMR 가상원자로 플랫폼(V-SMR) 개발 사업

- (사업목표) 소형모듈원자로(SMR) 기술 경쟁력 확보를 위한 가상원자로(V-SMR) 개발
- (사업기간) '24.6 ~ '29.5(총 5년)
- (총사업비) 1,037억 원 (국고 1,025억 원, 민자 12억 원)
- (참여기관) KAERI, KISTI, ETRI 외 19개 기업 및 대학



V-SMR 사업단 구성

▶ 정부출연 연구기관

한국원자력연구원

- 고신뢰도·고속해석 모델
- 고수준 자율운전·사고대응 기술

+

한국과학기술정보연구원

- 슈퍼컴퓨팅 응용 기술
- 웹기반 인터페이스 및 사용자 지원

+

한국전자통신연구원

- 통합 시뮬레이션 플랫폼
- 초고속 가시화 및 협업형 AR/VR





한국원자력연구원
Korea Atomic Energy Research Institute



한국과학기술정보연구원
Korea Institute of Science and Technology Information



한국전자통신연구원
Electronics and Telecommunications Research Institute



Argonne
NATIONAL LABORATORY

▶ 해외 협력기관

- (ANL) 가상원자로 플랫폼 성능 검증
- (INL) 고수준 자율운전 핵심기술 개발

▶ 산업계

- 원전 이차계통 모델링
- AI 소프트웨어 통합
- 시뮬레이션 형상관리 도구
- 가시화 프레임워크



FNC
이주미래와도전
FNC Technology Co., Ltd.



EBIGHT

NARNIA LABS



VIZINF
vizenia technology



KAIST



한국대학교



연세대학교



SKY



UNIST
ULSAN NATIONAL INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY



한국기술교육대학교



경희대학교



조선대학교
CHONNAM UNIVERSITY



경상대학교



명지대학교

▶ 학계

- 고신뢰도 해석 SW 원형 개발
- AI 응용 전산해석 고속화
- 사고대응 및 지원 기술
- GPU 기반 수치해석 가속화

SMR 가상원자로 플랫폼 구성



고신뢰도 해석

고속 해석

설계검증 수치해석

실증 실험

핵연료 사용 장기 실험 대체

고비용 실험

실규모 대형 검증실험 대체

슈퍼컴퓨터 응용 및 검증

GPU 가속기술

GPU 수치 라이브러리

슈퍼컴 인터페이스

고신뢰도 계산 워크벤치



6호기, KISTI (별도사업)

고속 가상화
초고속 렌더링
& 몰입형 가상화

HW 인프라

웹기반
사용자 서비스

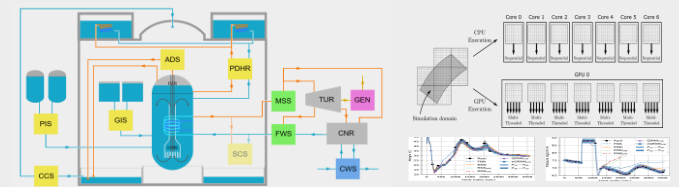
고수준 자율운전

지능형 감시진단
선제적 진단 및
운전지원

지능형 자율운전
통합제어 및
운전자동화

고속사고예측
사고 시나리오예측
및 대응

실시간 원자로 시뮬레이션



시뮬레이션 플랫폼

DB 관리
초대용량 데이터/
메타 데이터 관리

자원 관리
물리모델/
라이브러리 관리

워크플로우 관리
워크플로우 병렬 처리

형상관리
원자로 형상 관리

고신뢰도·계통 모델

열유체 해석

고차정확도
직접수치해석

핵분열 해석

몬테카를로
중성자수송해석

고비용 실험

실규모 대형
검증실험 대체

구조해석

유한요소법 기반
구조·핵연료해석

계통해석

계통·기기
단위 해석

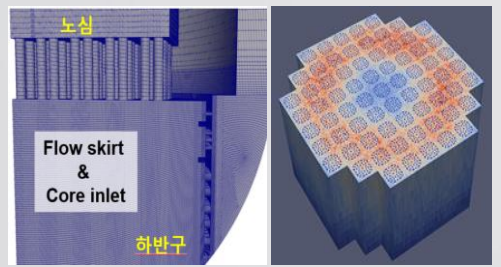
AI 응용기술

AI 기반
시뮬레이션 가속

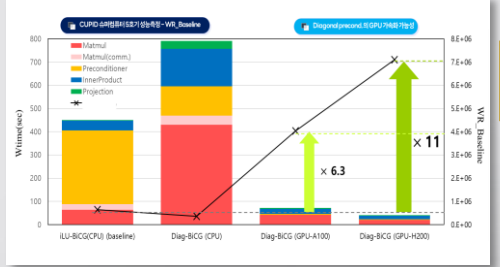
세부기술 역할

고신뢰도 설계·검증 해석

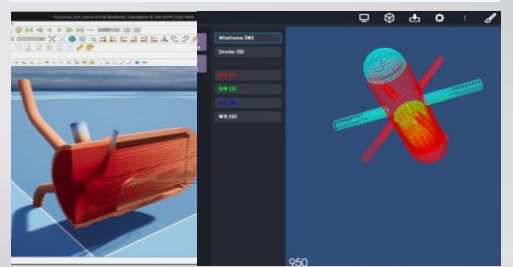
KAERI 고신뢰도 해석
다물리 연계



KISTI 슈퍼컴 활용
GPU 고속화



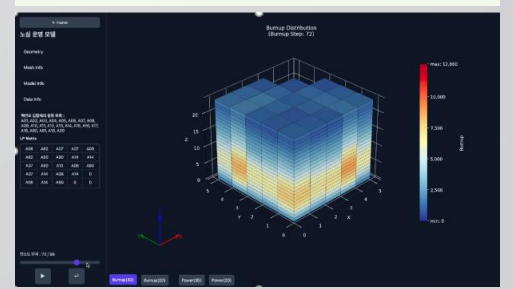
ETRI 초고속 &
고품질 가시화



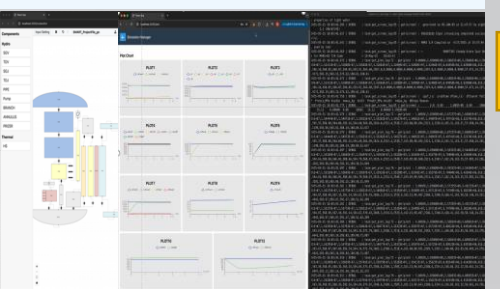
KISTI Web 접속,
입력 작성+ 실행



KAERI AI 대리모델 기반
고속해석 모델



ETRI 실시간
시뮬레이터



KAERI 자율운전
모델



KAERI 고성능
슈퍼컴퓨터 구축

자율운전 · 운영

KAERI 시나리오
예측 모델



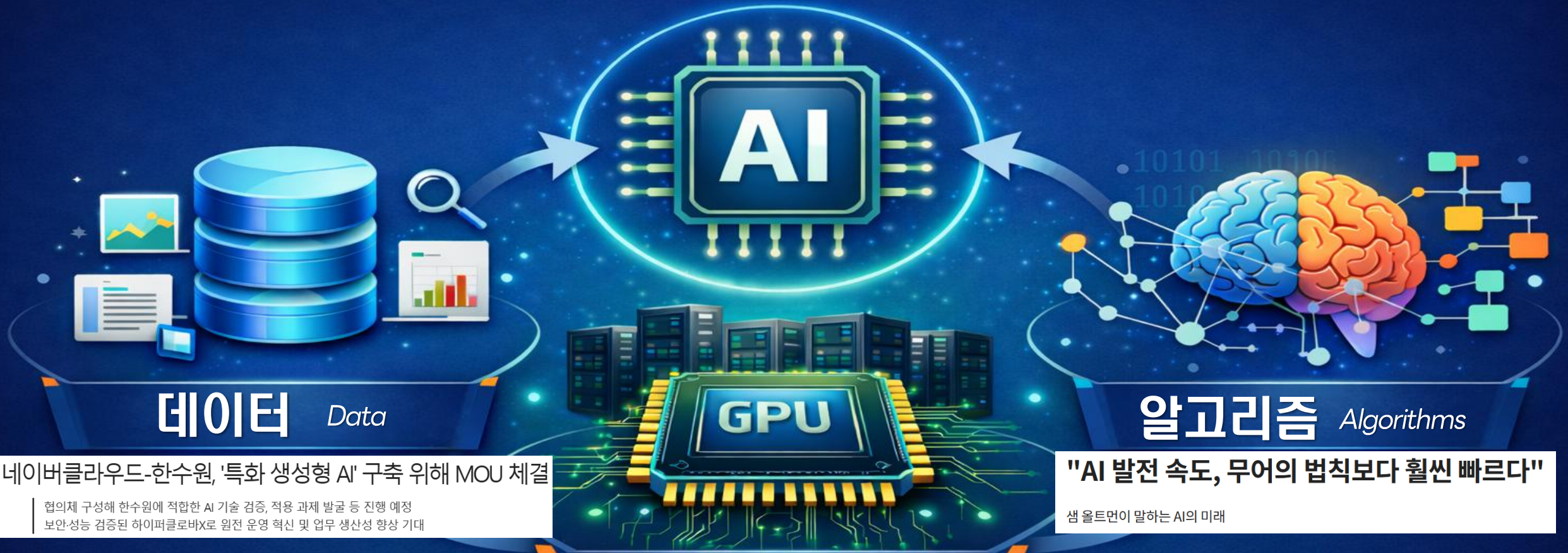
웹기반 가상원자로 시뮬레이션 플랫폼을 소개합니다.
복잡한 설치 없이 브라우저만으로
시뮬레이션 실행과 결과를 분석할 수 있습니다.

목차

- 01 • 고신뢰도 시뮬레이션 기술 필요성
- 02 • SMR 가상원자로 플랫폼 개발 사업 개요
- 03 • AI의 필수 요소**
- 04 • AI를 위한 가상원자로 활용
- 05 • AI를 활용한 가상원자로 고도화
- 06 • 향후계획



AI의 3대 핵심 요소



데이터 *Data*

네이버클라우드-한수원, '특화 생성형 AI' 구축 위해 MOU 체결
협약체 구성해 한수원에 적합한 AI 기술 검증, 적용 과제 발굴 등 진행 예정
보안·성능 검증된 하이퍼클로바X로 원전 운영 혁신 및 업무 생산성 향상 기대

알고리즘 *Algorithms*

"AI 발전 속도, 무어의 법칙보다 훨씬 빠르다"
샘 올트먼이 말하는 AI의 미래

연산력 *Computing power*

엔비디아, 한국에 GPU 26만장 푼다
삼성·SK·현대차·네이버와 'AI 동맹'... 총 14조 규모
AI 생태계 구축 핵심 부품, 현재 보유량의 5배 확보



테슬라 FSD 완성 멀었다? 지구 40만 바퀴 도는 데이터 필요

머스크 "100억 마일 주행 데이터 필요해"

권민성 기자

입력 2026.01.09 10:59

수정 2026.01.09 11:00



일론 머스크 테슬라 최고경영자(CEO)는 8일(현지 시간) 소셜 미디어 X를 통해 "안전한 무인 자율주행을 완성하려면 대략 100억 마일의 학습 데이터가 필요하다"는 새로운 기준을 제시했다. 이는 머스크가 지난 2016년 언급했던 60억 마일(약 96억 킬로미터)보다 약 1.6배 상향 조정된 수치다. 이미 테슬라의 누적 데이터가 70억 마일(약 112억 킬로미터)을 돌파했음에도 목표치가 높아진 셈이다.

이는 자율주행 기술이 발전할수록 새로운 난제가 드러나는 복잡계의 영역임을 시사한다. 머스크는 더 많은 주행데이터가 필요한 이유로 '롱테일(Long Tail)' 문제를 거론했다. 드물게 발생하는 예외적인 상황이 전체 자율주행 기능의 안전성을 좌우하는 현상을 의미한다. 도로 위에서 다양한 돌발 상황이 발생하기 때문에 이에 대처할 역량이 필수적이라는 것이다.

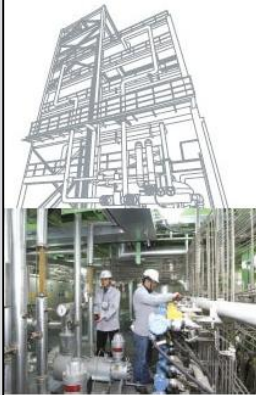
직진이나 회전 같은 일상적인 주행은 전체 데이터의 99%를 차지한다. AI 또한 이를 쉽게 학습한다. 그러나 도로 위에 갑자기 타조가 나타나거나, 특이한 코스튬을 입은 보행자가 무단횡단을 하는 등 발생 확률 0.001% 미만의 희소한 사건들은 낮은 발생 가능성에도 치명적인 교통 사고의 원인이 될 수 있다. 인간은 인과 추론 능력을 발휘해 한 번도 본 적 없는 상황에도 유연하게 대처하지만 AI는 학습한 데이터에 없는 상황을 극복하는 데 취약하다. 이를 극복하기 위해선 방대한 주행데이터 학습을 통해 역량을 끌어올려야 한다. 특히 정교한 센서 대신 카메라를 이용하는 테슬라로서 데이터 양이 중요하다.

비정상·사고 상황에 대한 데이터 생성 방법



원자력 안전을
떠받치는
원전 열수력
종합실험장치

아틀라스
(ATLAS)



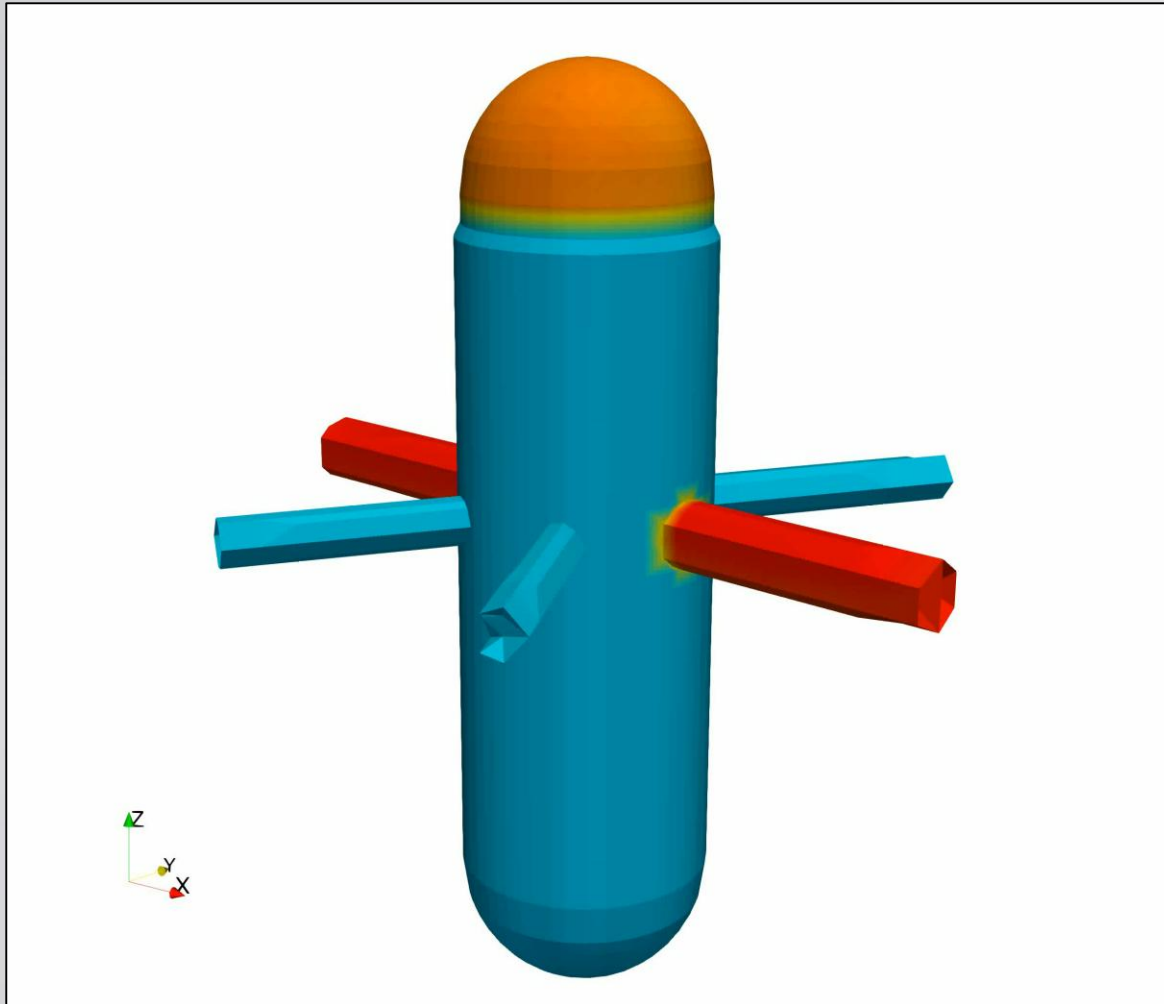
목차

- 01 • 고신뢰도 시뮬레이션 기술 필요성
- 02 • SMR 가상원자로 플랫폼 개발 사업 개요
- 03 • AI의 필수 요소
- 04 • AI를 위한 가상원자로 활용**
- 05 • AI를 활용한 가상원자로 고도화
- 06 • 향후계획

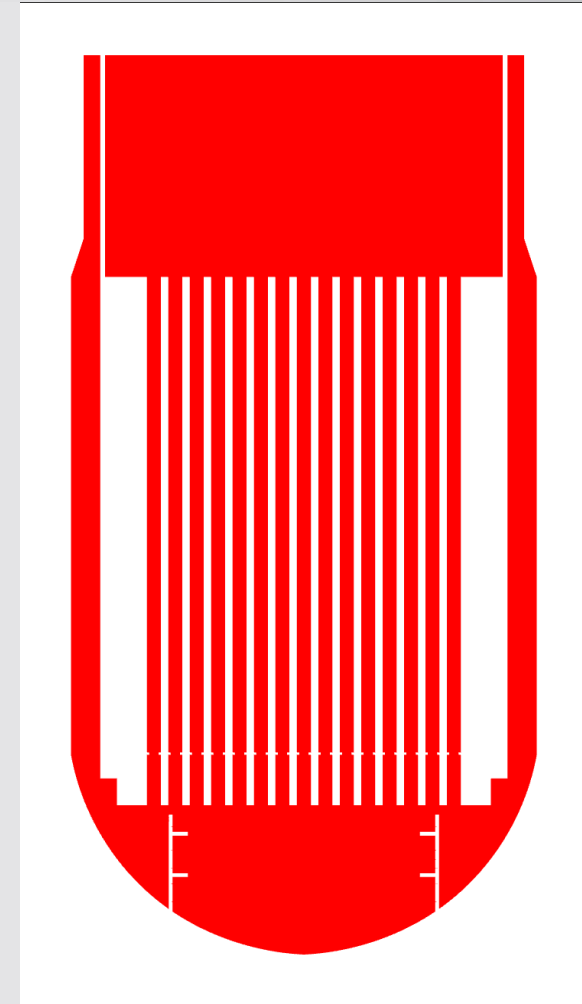
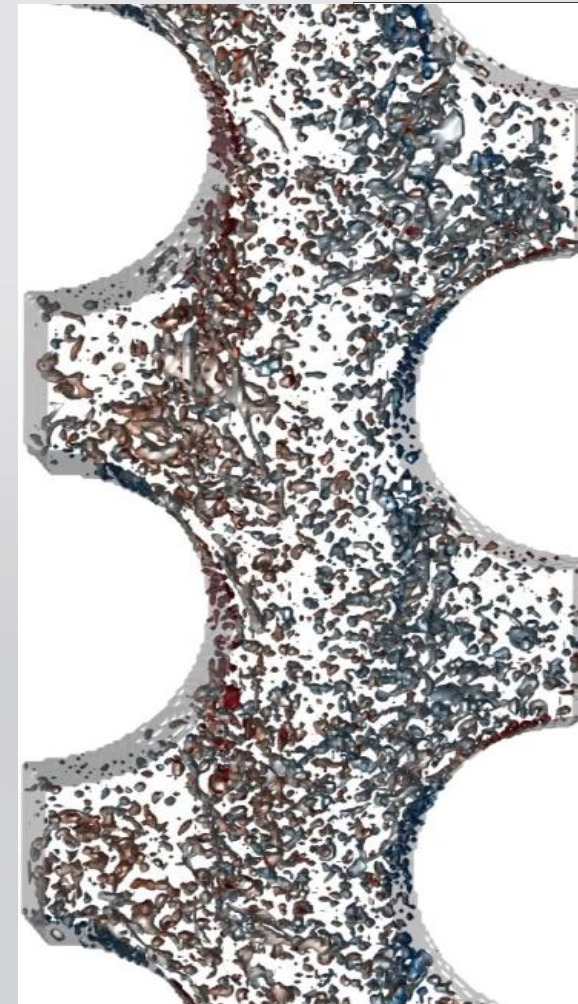


고신뢰도 시뮬레이션 데이터 생산

✓ 가상 사고 해석



✓ 기기 설계 최적화



AI Surrogate 모델 개발

탄력운전 평가용 노심해석 대리모델

확보 데이터 수	데이터 구성
<p>약 10만 세트 (약100GB)</p>	<ul style="list-style-type: none"> 장전모형 수 (100,000 case) 3d 봉단위 출력분포 (137,280 point)

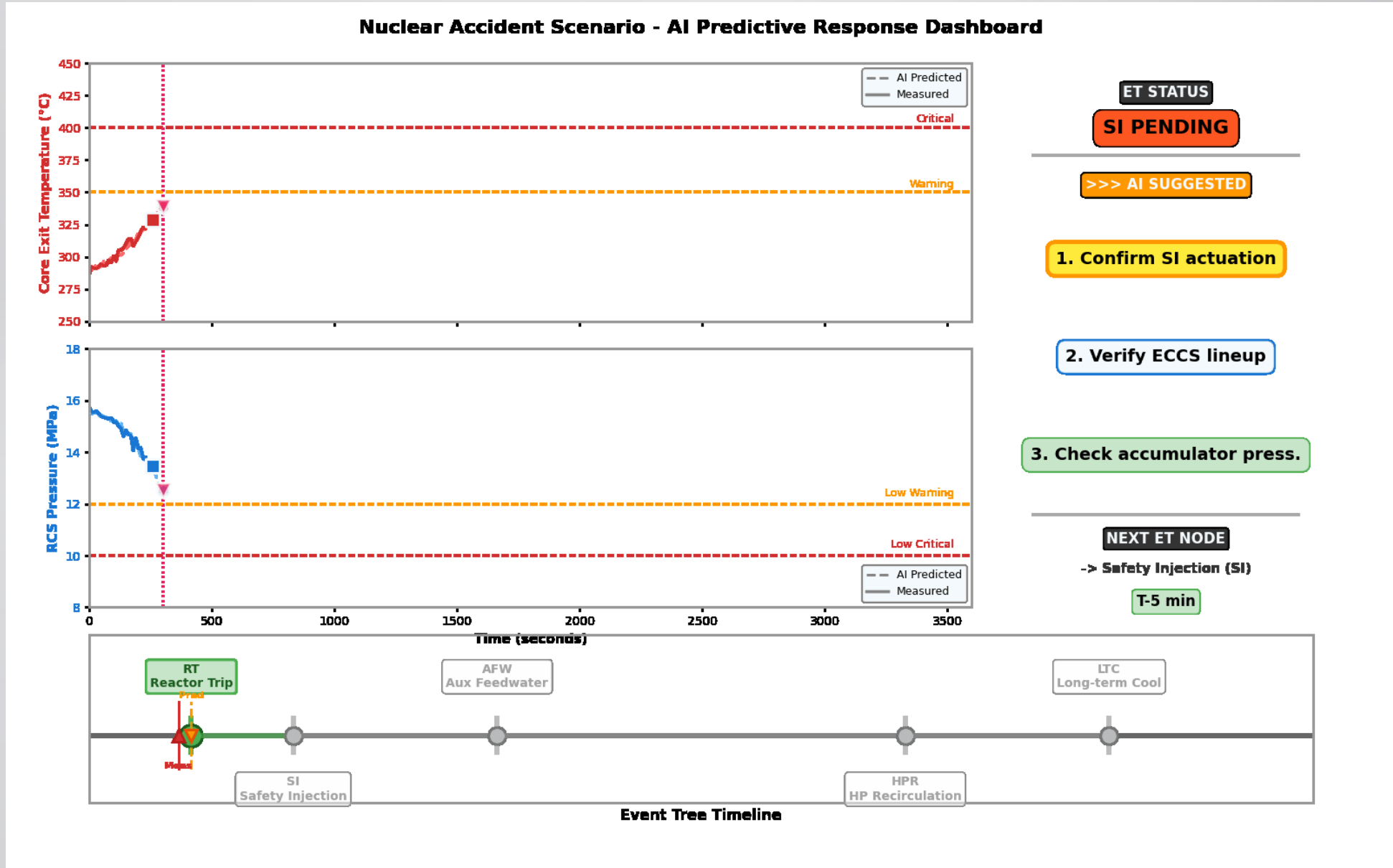
해석 소요 시간		가속화 성능
기존 방법	개발 모델	
2.9s/1case (30hr / 37532case)	0.0013s/1case (5s / 3754case)	2230배

증기발생기 유동 정밀해석 대리모델

확보 데이터 수	데이터 구성
<p>약 14만 세트 (약40GB)</p>	<ul style="list-style-type: none"> 3D URANS : 19GB / 300개 2D Laminar : 10GB / 60,000개 2D k-w SST : 11GB / 80,000개

해석 소요 시간		가속화 성능
기존 방법	개발 모델	
2.16s/1step (6hr / 10000step)	0.04s/1step (4s / 100step)	54배

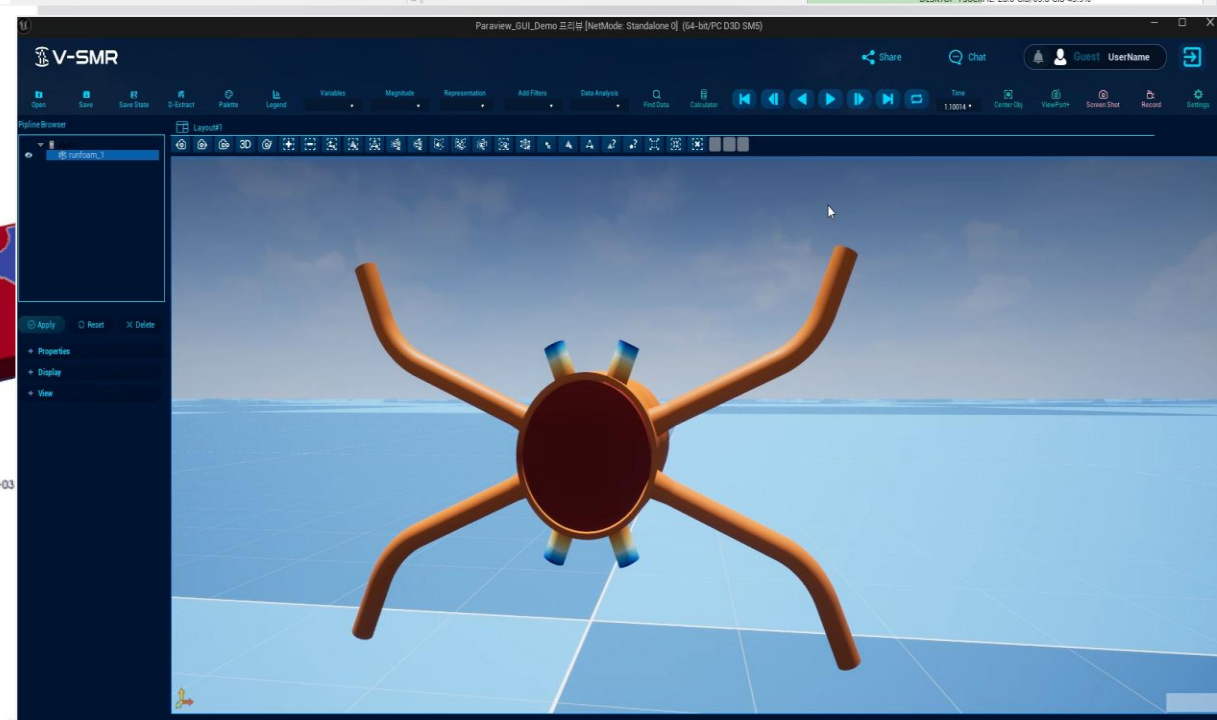
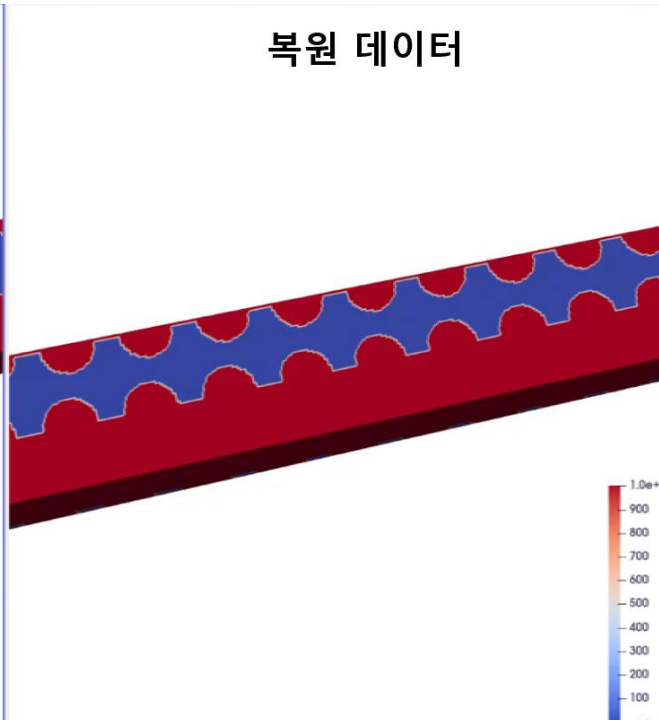
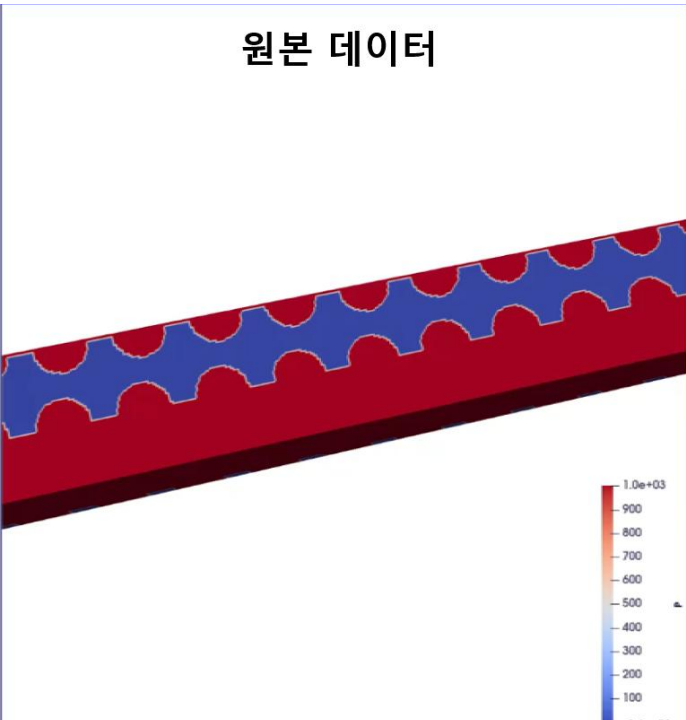
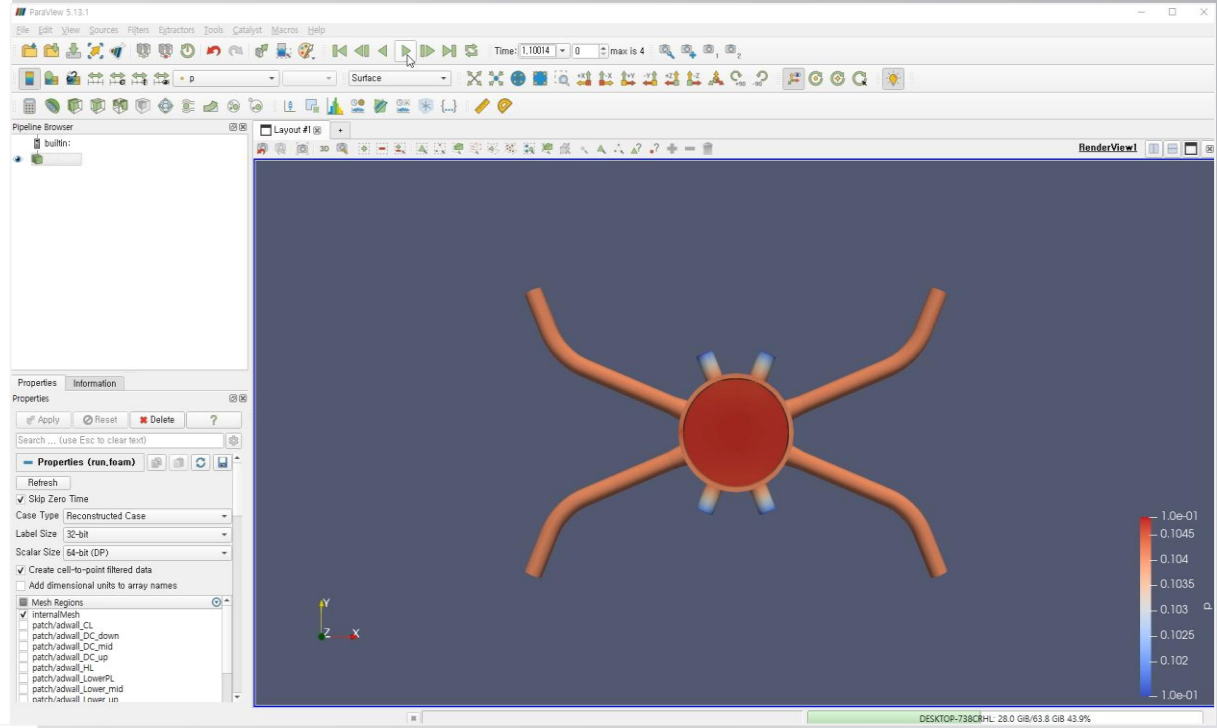
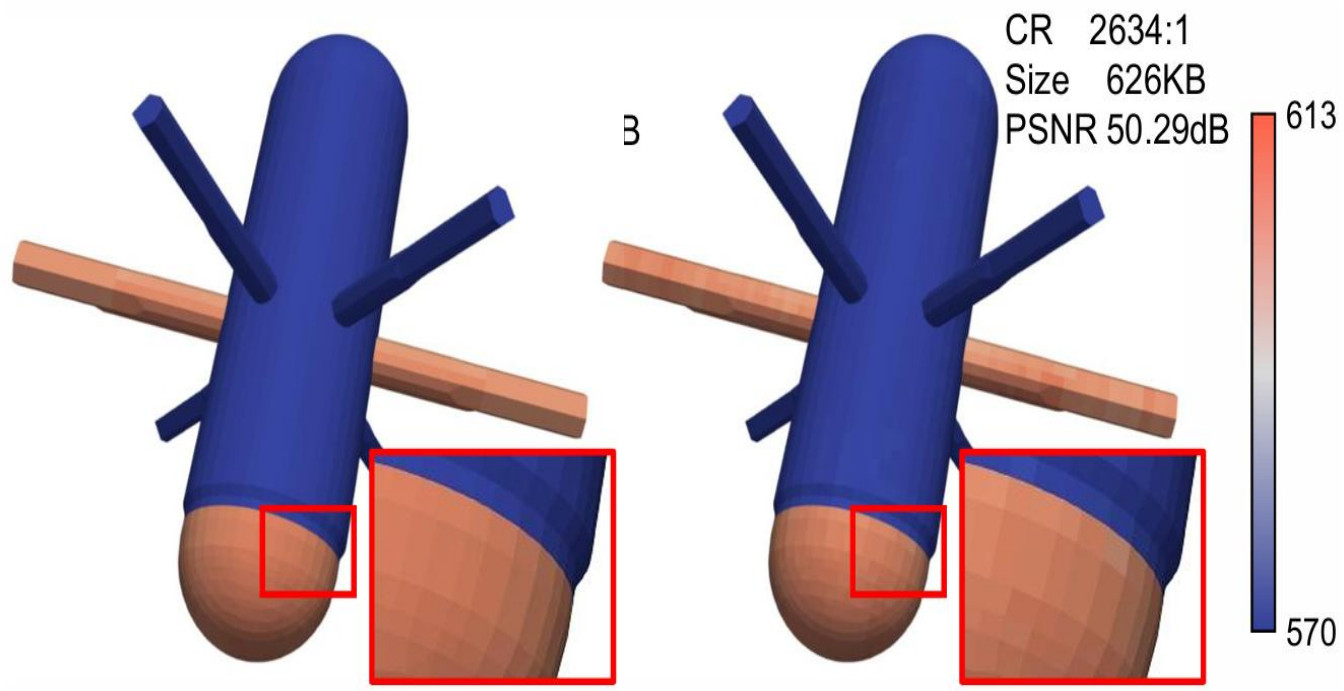
고속 사고 시나리오 예측 모델 개발



목차

- 01 • 고신뢰도 시뮬레이션 기술 필요성
- 02 • SMR 가상원자로 플랫폼 개발 사업 개요
- 03 • AI의 필수 요소
- 04 • AI를 위한 가상원자로 활용
- 05 • AI를 활용한 가상원자로 고도화**
- 06 • 향후계획





Job Status Icon

runPragmaTest_gp...
 Edit
 Activate
 Duplicate Case
 Delete Case
 Print PRAGMA Input to Console
 Write PRAGMA Input to File
 Print PRAGMA Run LOG

New Job

276 00:10:10.863 59 1.39 5.39235 5493 200500 11.0700 1.33004 0.000204
 277 00:10:10.863 Performing T/M Feedback...
 278 00:10:26.360 HONER : 0.11
 279 00:10:26.749 60 0.35 1.38922 2226 38
 280 00:10:37.264 HONER : 0.10
 281 00:10:39.450
 282 00:10:39.450 k-eff = 1.33
 283 00:10:39.450
 284 00:10:42.362 Writing Output File...
 285 00:10:43.859 Writing VTK File...
 286 *****
 287 * * * Timers * * *
 288 - Tracking Time : 03.32s
 289 - Macroscopic : 47.32s
 290 - Intersection : 30.62s
 291 - Collision : 7.15s
 292 - Sorting : 0.85s
 293 - Com : 0.00s
 294 - Cycle Time : 92.15s
 295 - CMFD Time : 0.63s
 296 - T/M Time : 409.00s
 297 - Search Time : 0.00s
 298 - Axon Time : 0.00s
 299 - Depletion Time : 0.00s
 300 - Group Collapse : 0.00s
 301 - CRG : 0.00s
 302 - Plotting Time : 0.00s
 303 - * * * Statistics * * *
 304 - Total Simulated Neutrons : 800500

A/B COMPARISON

VTK + paired H5 comparison workspace

Case A Volume Case_A/sample01.vtk Case B Volume Case_B/sample05.vtk

Comparison Summary

Loaded Case_A/sample01.vtk vs Case_B/sample05.vtk (power)

Paired H5 loaded: sample01.h5 vs sample05.h5

K-EFF TL 2.53545e-05 Delta hint: 0.00235	ASI -0.0246705 Delta hint: 198.2
Case A 1.07877	Case B 1.07875
Case A -0.0124473	Case B 0.0122322

FQ 0.173505 Delta hint: 4.673	FR 0.0438613 Delta hint: 2.117
Case A 3.56019	Case B 3.38669
Case A 2.07181	Case B 2.02794

Core A Core B

Core A (Average) Core B (Average)

Core Diff (absolute)

Detail A Detail B

Detail A (Average) Detail B (Average)

Detail Diff (absolute)

H5 Axial Power H5 k-eff History H5 Shannon Entropy

H5 Axial Power (Average)

H5 k-eff Track-Length History

H5 Shannon Entropy History

VSMR AI Assistant

PRAGMA 입출력 구조

- 입력 파일 종류 - 사용자 입력용 구조 - 핵자료 메타데이터 파일 구조 - 핵자료집 구조 및 생산 - 핵자료집 입력 방식 - 출력 파일 - 기타 모델링
- 블록 및 카드 설명
- CASEID 블록 (문제 이름 정의) - STATE 블록 (노심 열수력 조건 설정) - MATERIAL 블록 (노심 물질 정보 정의) - XSEC 블록 (핵자료집 정의) - OPTION 블록 (계산 옵션 설정) - TALLY 블록 (밸리 설정) - SOURCE 블록 (고정 선원 계산 제어) - DEPL 블록 (연속계산 제어 블록) - 노심추적계산 입력문 예시 - RELOAD 블록 (재장전 계산 제어 블록) - BRANCH 블록 (분기 계산 제어 블록) - OUTPUT 블록 (출력 파일 제어 블록)

참조 문서 2개

OPTION 블록의 MC 카드는 몬테칼로 계산 파라미터를 설정하는 카드입니다. MC 카드의 형식은 다음과 같습니다. MC N1 N2 N3

N1: 몬테칼로 계산의 총 반복 횟수
 N2: 몬테칼로 계산의 초기 반복 횟수
 N3: 몬테칼로 계산의 최종 반복 횟수

예를 들어, MC 카드의 값이 100000 10 50 인 경우는 다음과 같이 해석할 수 있습니다.
 테칼로 계산의 총 반복 횟수: 100000
 테칼로 계산의 초기 반복 횟수: 10
 테칼로 계산의 최종 반복 횟수: 50
 이 파라미터 설정은 몬테칼로 계산의 정확도와 성능을 결정하는 중요한 요소입니다.

OPTION MC 100000 10 50
 이게 무슨뜻이지?

PRAGMA 사용 설명서 Rev. 1

질문을 입력하세요

PRAGMA는 무엇인가요? 목차 보러줘 PRAGMA 설치 방법은? 입력 파일 작성 예제

Local LLM+RAG (pragma manual)

IPWR Control Center

출력증감발 운전 자동화

Reactor Power Decrease from 100% to 0%

[3] Power Decrease (100% → 0%) 00:01:23

OVERALL PROGRESS 5%

Current Power: **99.15 %** | Target Power: **0.0 %**

STEP TIMELINE

- ▶ 진행 중: STEP 1 / 20
초기 변수 안정성 확인
- ⏸ 대기 중: STEP 2 / 20
제어 계통 실감 점검

현재 step 수행 목표

- ★ 지시 사항: 초기 변수 안정성 확인
- ✅ 판단 기준: SUR ±1.0 dpm, 타변수 ±2%

System Status

[15:47:42] >> [시스템] 시나리오 로딩 중... (Index: 2)
[15:47:45] >> 시뮬레이터 준비 완료. 자동화 운전 시작하려면 가이드 정의 [Next Step ▶]를 누르세요.

START

현재 단계 할당형 질문 (문막)

- 현재 단계의 핵심 목표는 무엇인가요?
- 지금 가장 주의 깊게 봐야 할 변수는?
- 다음 단계로 넘어가기 위한 조건은?
- 현재 발생될 수 있는 잠재적 위험 요소는?

SMALL MODULAR REACTOR SIMULATOR

IAEA International Atomic Energy Agency

- Home
- Overview
- Controls
- Core
- Trips
- Systems

ALARMS

Reactor trip	Setback	ADS actuation	Rods in manual	MSS isolation	Low CNR vacuum	Turning gear	Turbine trip
Low RCS pressure	Stepback	PDHR actuation	High CBS pressure	FWS isolation	Low steam pressure	Gen breaker open	Runback

DIAGRAM

Neutron Flux (%)

0.973	1.139				
0.976	1.485	1.504	0.976		
1.141	1.504	1.485	1.471	1.483	0.973
0.973	1.482	1.485	1.484	1.503	1.139
0.966	1.502	1.483	0.976		
1.136	0.973				

Scale: 0.000 to 2.000

CONFIGURATION

Real time | Fast time

Alarms Reset

00:00:38

RUN

BORIC ACID ADDITION

Boric acid concentration: 765.07 ppm | Mode of operation: OFF

Boric acid setpoint: 765.00 ppm | Reaction: Eloron

REACTIVITY

Control rods reactivity: 0.00 pcm | 100.00 %ΔK/K

Fuel reactivity (Doppler): 79.51 pcm | 100.00 %ΔK/K

Moderator temp. reactivity: -422.74 pcm | 59.52 %ΔK/K

Boron reactivity: -2251.84 pcm | 97.80 %ΔK/K

Xenon reactivity: -2423.15 pcm | 67.82 %ΔK/K

Total reactivity: -0.03 pcm | 100.00 %ΔK/K

FUEL TEMPERATURES

Max clad surface temperature: 540.63 °C

Average clad surface temperature: 354.30 °C

Average fuel temperature: 859.89 °C

Peak fuel temperature: 1002.57 °C

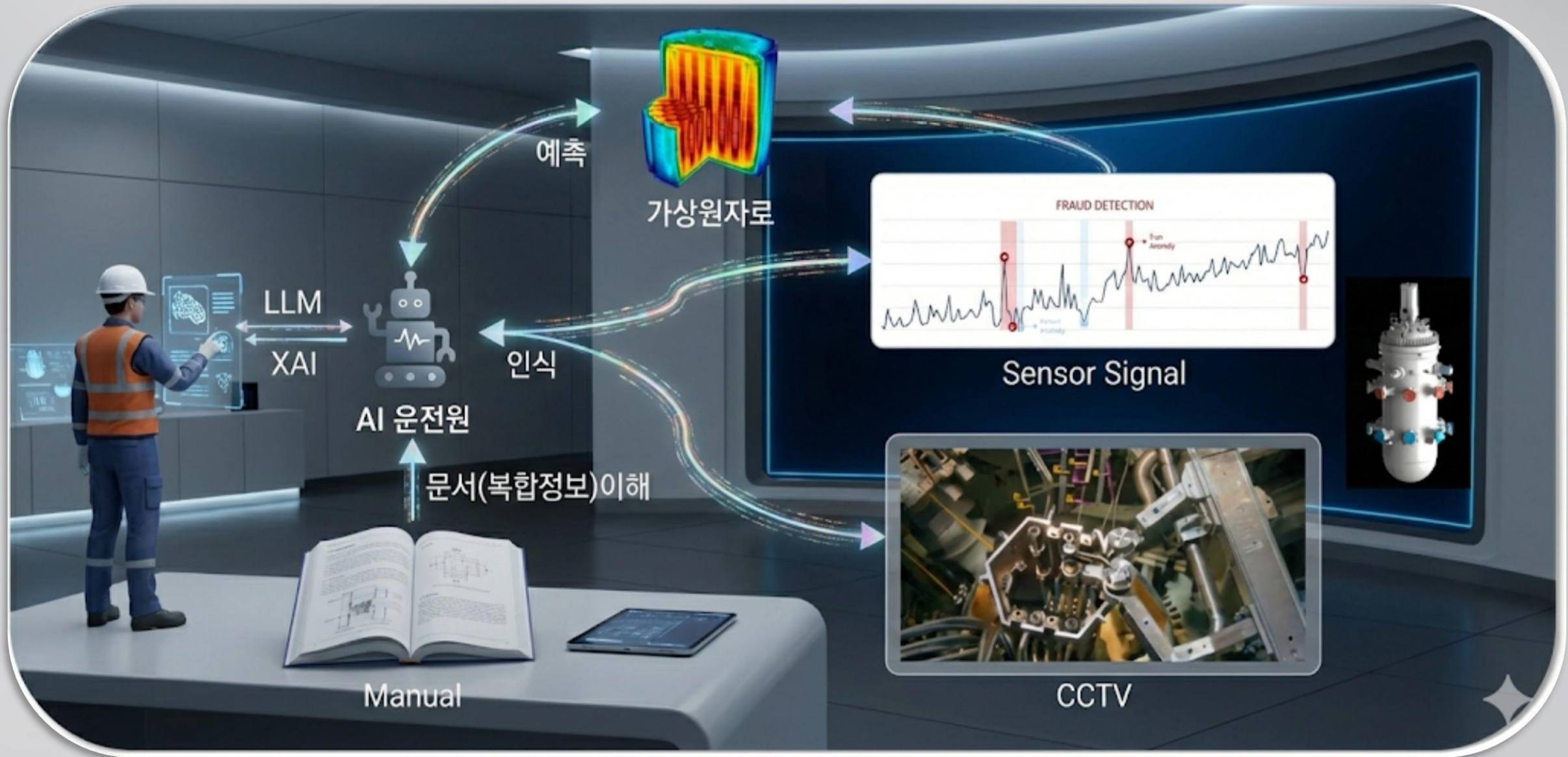
STEP 1

초기 변수 안정성 확인

✅ 기대 변수: SUR ±1.0 dpm, 타변수 ±2%

STEP 1 수행 중...

AI 운전원 개발

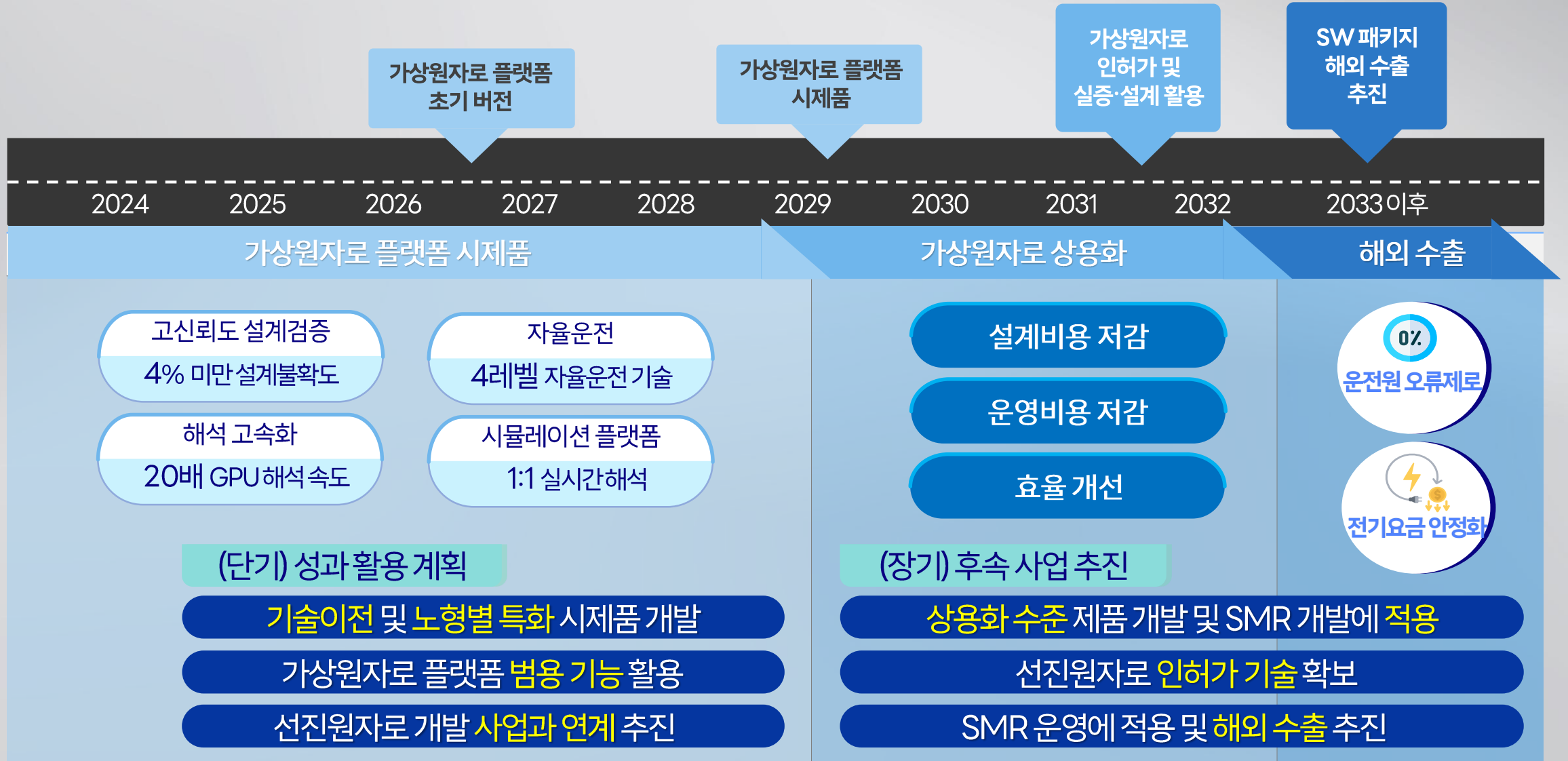


목차

- 01 • 고신뢰도 시뮬레이션 기술 필요성
- 02 • SMR 가상원자로 플랫폼 개발 사업 개요
- 03 • AI의 필수 요소
- 04 • AI를 위한 가상원자로 활용
- 05 • AI를 활용한 가상원자로 고도화
- 06 • 향후계획



○ V-SMR 사업 향후 일정



THANK YOU
(yjcho@kaeri.re.kr)



기후위기를 해결하는 국민안심 미래 에너지, 가상원자로가 실현합니다