

“제4차 산업혁명과 소듐냉각고속로”

자율운전 SMR 연구개발 현황

2017년 5월 17일

김 용 희

원자력 및 양자공학과

한 국 과 학 기 술 원

한국원자력학회 원자로시스템기술연구부회 워크샵, 제주 ICC

KAIST

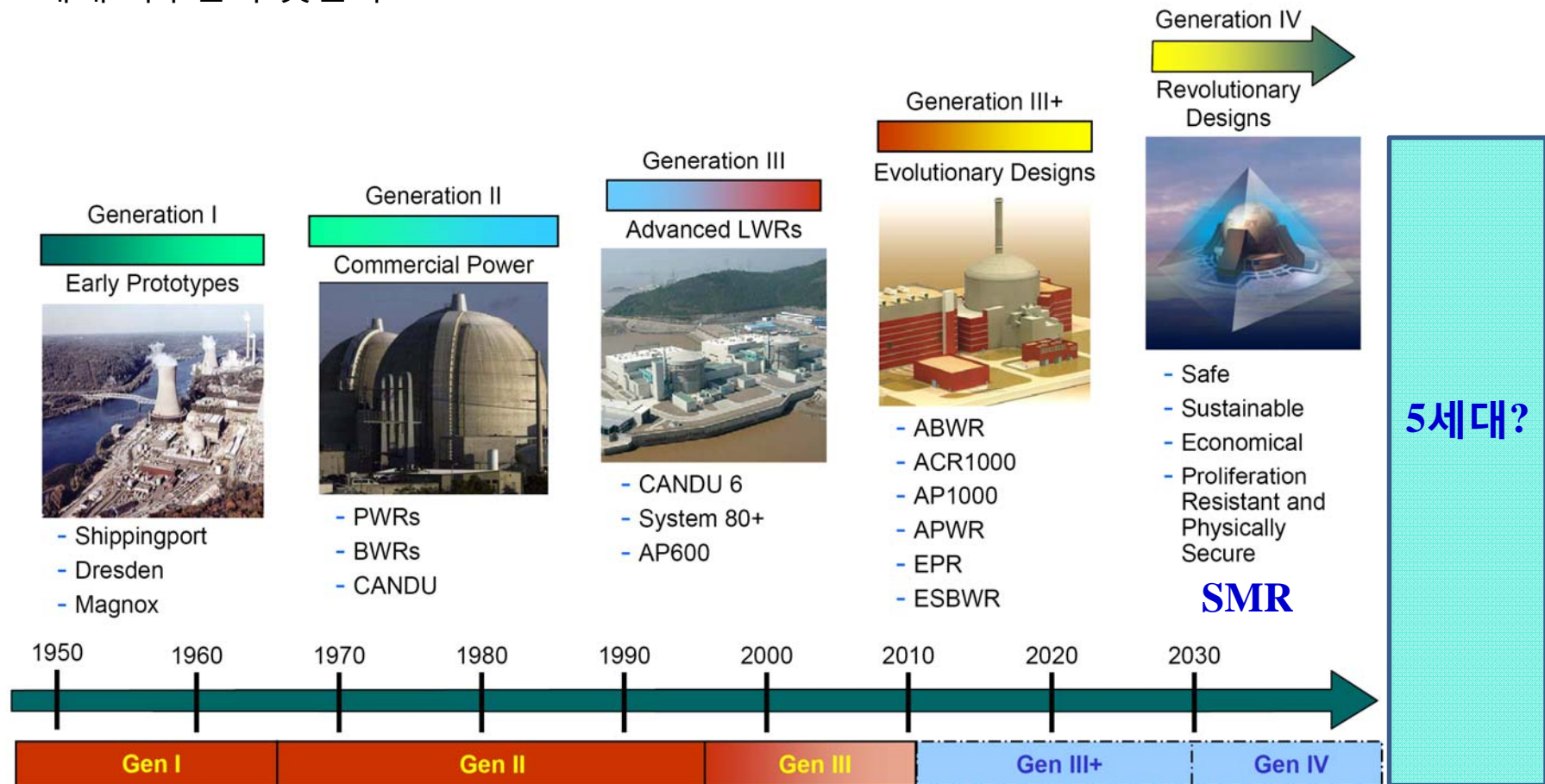
목 차

- ◆ 변화와 도전
- ◆ 자율형 원자로 개념
- ◆ 자율형 원자로 연구개발 경험
- ◆ 자율형 SMR (ATOM) 연구개발 현황
- ◆ 주요 기술 현안 및 도전

변화와 도전

원자력의 미래 방향

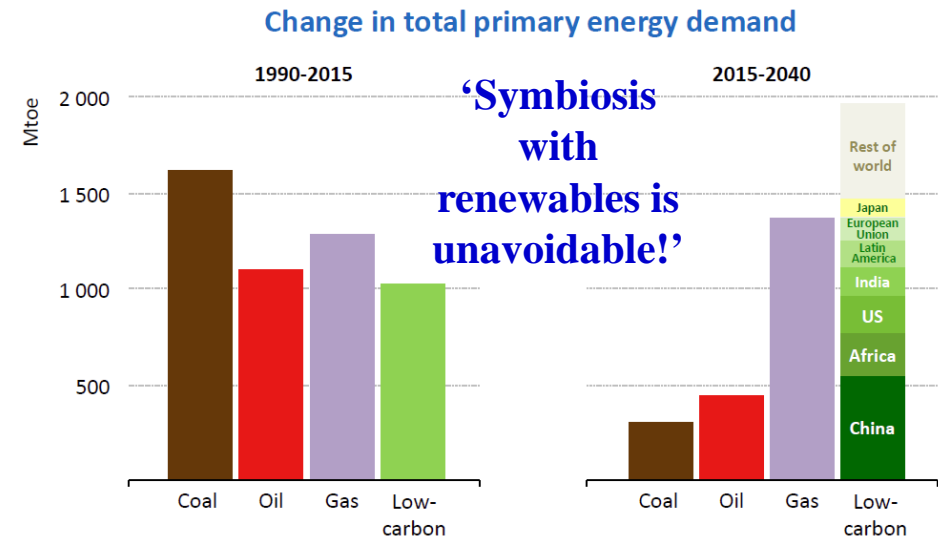
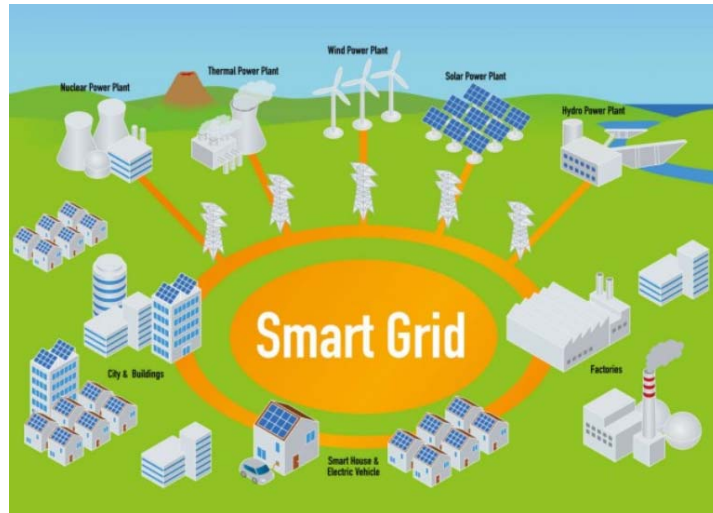
- 원자력은 **진정으로 진화**하고 있나?
- 제4세대 원전은 충분히 **지속가능한** 개념인가?
- 4세대 이후는 무엇인가?



초연결(IoT) & 4차 산업혁명

스마트 그리드 & 분산전원

WEO2016



- ‘무인’ 공장 (지능형 시스템, IoT)
- 아마존의 ‘예측배송’ 서비스 (빅데이터 활용 지능)

“모든 것이 연결되고 보다 지능적인 사회로의 진화”
- 다보스 포럼, 2016 -

Industry 4.0



제4차 산업혁명, 즉 제2차 정보혁명 시대에
지능정보기술은 국가 산업의 흥망을 결정

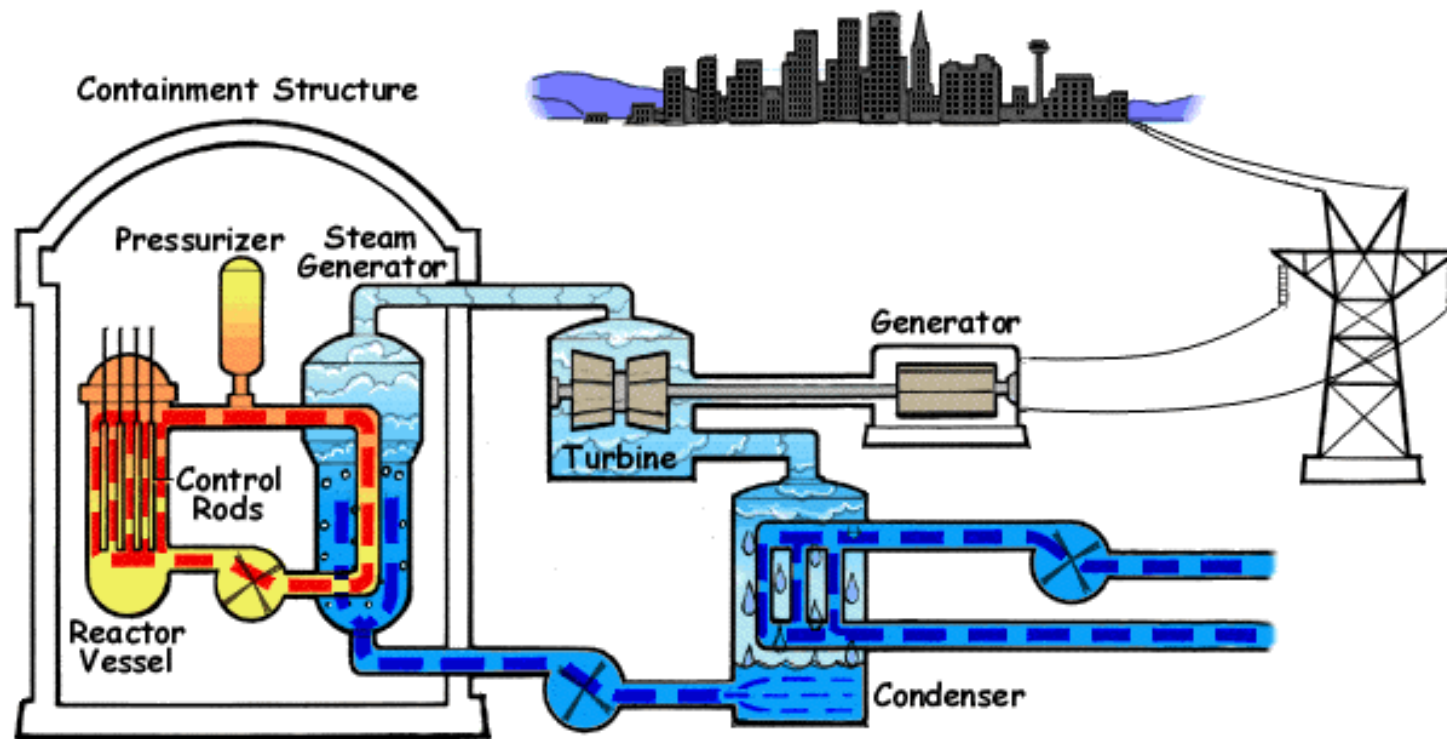


자율형 자동차

자율형 원자로 개념

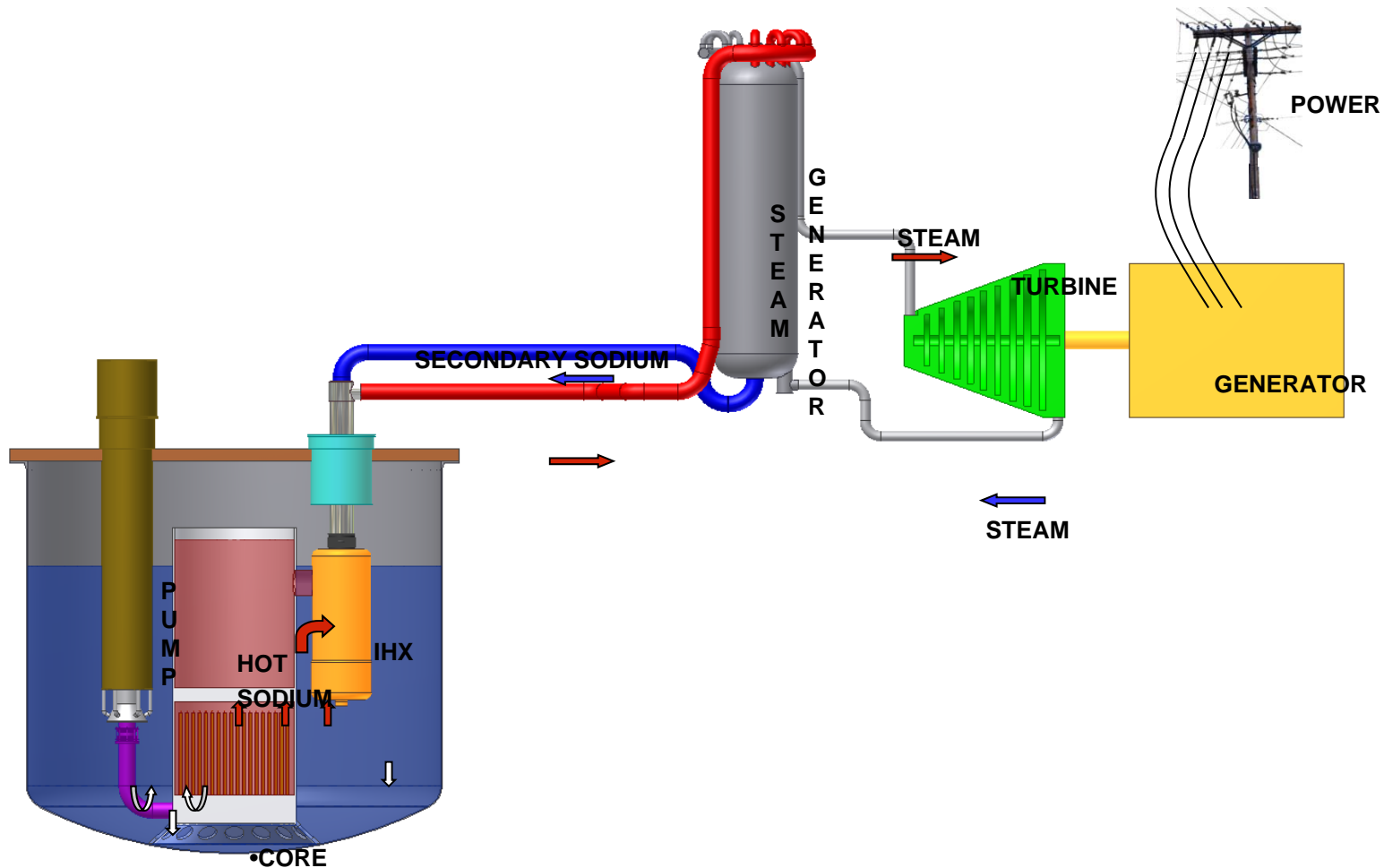
가압경수로 개념 (PWR)

- 제한적 자동 운전 (컴포넌트별 자동화)
 - 많은 경우 운전원 개입



소듐냉각로 (SFR, Sodium-cooled Fast Reactor)

- 제4세대 원전의 하나로서 PWR에 비하여 단순한 시스템 운전 방식
- 극히 높은 고유 안전성
→ 보다 쉬운 자율적 노심운전



용어 정의

- Automated System (자동 시스템)

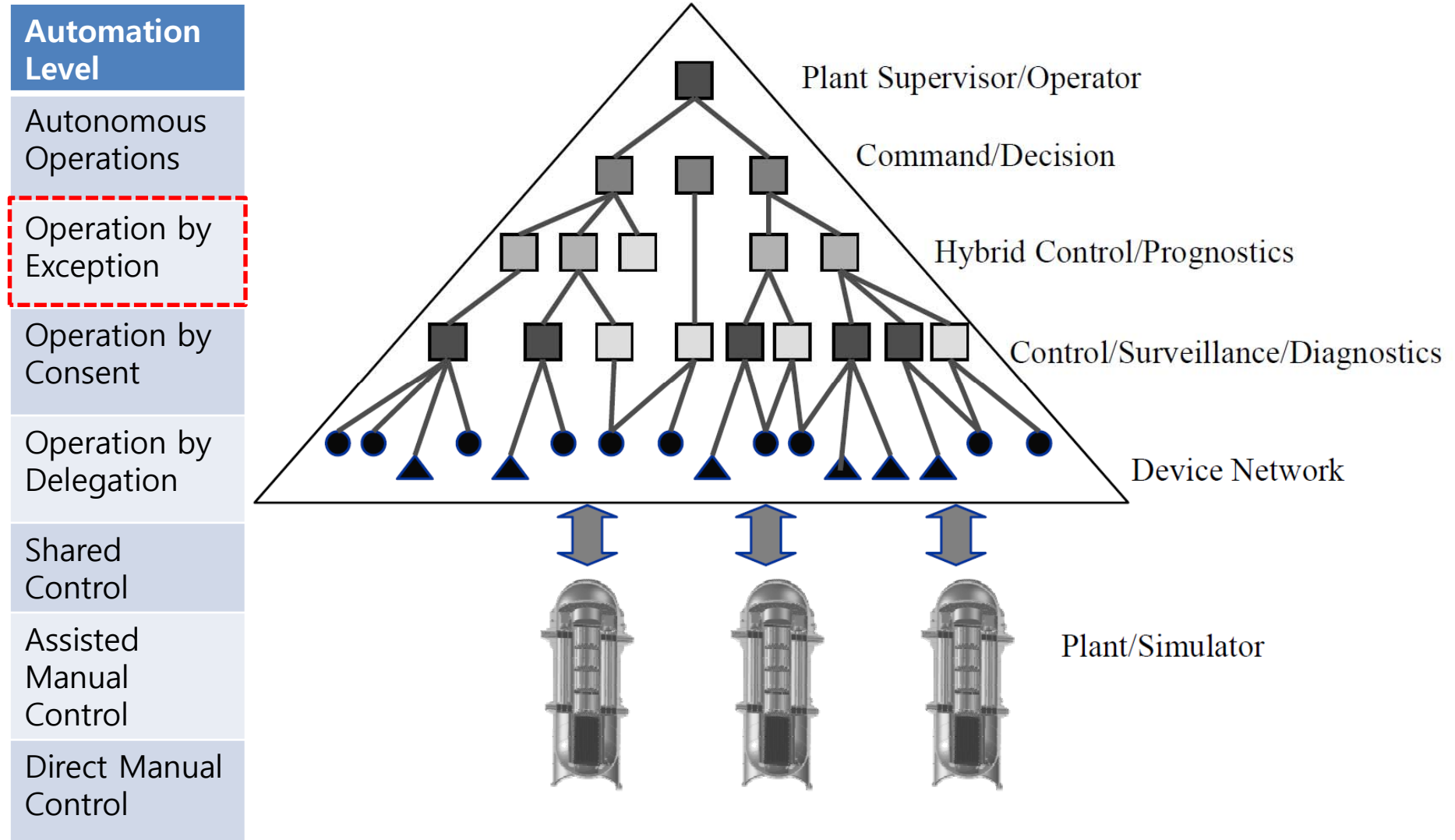
- : 인간이 개입하지 않고 시스템이 **자동적으로 작동되지만** 모든 작동은 사전에 인간이 만든(프로그램한) 규칙, 원칙, 판단 등에 따라서 결정되며, 결과적으로 **'스스로 어떤 선택을 하지 않음'**
- : 시스템의 작동을 관장하는 논리는 상당히 복잡할 수 있으나 기본적으로 사전에 인지되고 분석된 방식에 따라서 작동하며, 만약 **'사전에 고려되지 않은 상황을 만나면 시스템은 중지'**되며, 인간의 개입을 요함.
(it phones home!)

- Autonomous System (자율 시스템)

- : **자동적으로 작동한다는** 점은 기존 Automated System과 동일하지만, 모든 상황에서 **스스로 판단한 결정에 기초하여 작동될** 수 있음.
- : **자율적인 판단은 경험하지 못하고 예상하지 못한 상황에서도 수행됨.**
- : 따라서 '**자율형 시스템**' 구현을 위해서는 **스스로 판단할 수 있으며, 또한 스스로 배우면서 진화할 수 있는** 소위 '**인공지능**'이 필요함.
- : 지능에 따라서 자율형 시스템의 '**신뢰도**'가 달라짐.

자율운전 개념

- Autonomous control for Gen-IV NPP, R.T. Woods, et al, ORNL



왜 자율인가?

○ 안전성 제고

<극도의 안전성이 확보되지 않은 자율운전은 구현될 수 없음>

- 모든 시스템의 유기적 최적-자율 제어
: 시스템의 **Inherent Safety** 극대화 → **피동(안심) 자율성** 극대화
- 운전원 실수를 배제한 안심운전
- 비상시 종합적 최적 대처 가능

○ 시스템 운용 신뢰성 향상

- 전 시스템 실시간 계측제어를 통한 신뢰도 분석 및 성능 예측
: Living and holistic PSA → 시스템 최적 운영 (유지 & 보수)

○ 경제성 제고

- 높은 안전성에 따른 경제성 향상 가능
- 운전원 최소화
- 신재생에너지와 상생하는 운전 환경 가능 (최적 부하추종운전)

○ 입지성 제고

- 오지 입지 가능성

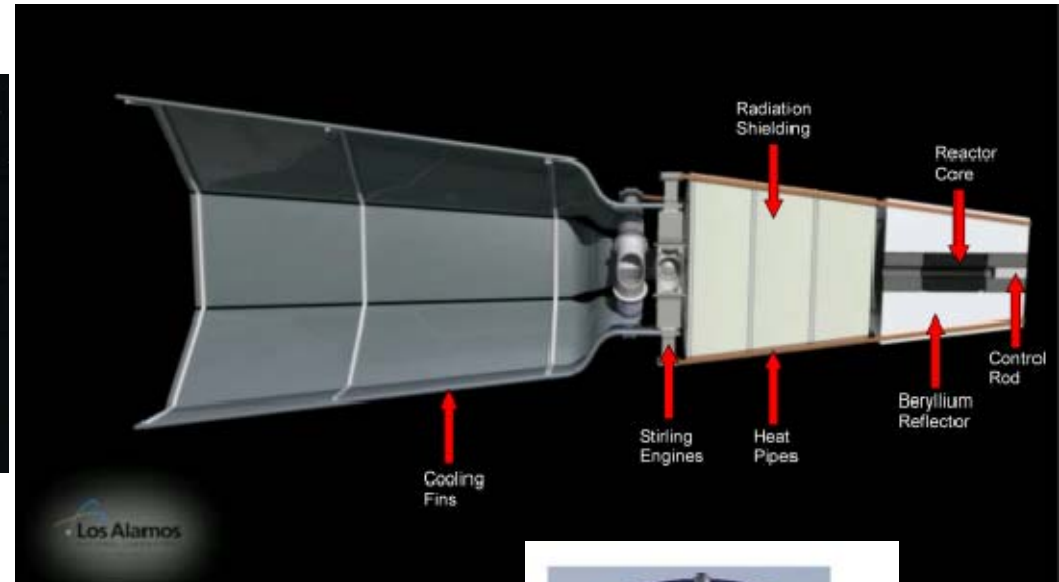
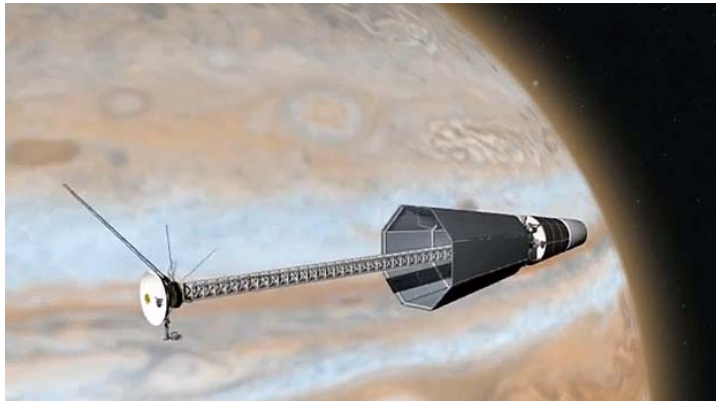
무엇이 필요한가?

- 전시스템 관점에서 최적 판단을 내리는 지능시스템 (**AI, 인공지능**)
 - 최적제어 관점 (정상 및 과도상태)& 최적 대처 방안 제시 (유지보수, 감시, 비상상황)
 - **두 종류 인공지능**
 - : 시스템 제어 (실질 제어 정보) - 알파고 형식
 - : 시스템 이해 (보조 정보 제공) - 인공지능 박사 '**ExoBrain**' (Tech. Spec. 등 정보 이해)
- 인공지능 훈련 및 진화를 위한 자료생산
 - 사고를 포함 넓은 운전영역을 포함하는 **훈련자료 생산** → 시스템 **다물리 모사** 도구 필수
 - 각 시스템 및 컴포넌트 특성 분석용 (감시 및 동적 PSA)
 - 시스템 감시를 위한 패턴인식 자료 등
- 시스템 계측 및 전송
 - 모든 주요 시스템 상태 계측 및 전송 (현 PWR 1000개 이상 정보 실시간 계측)
 - 안전전송 방식
- 사이버 보안 확보
 - 외부접촉 차단 그러나 내부는 모든 연결
- **독립성 및 다양성?**
 - 독립적인 2개 이상 인공지능?

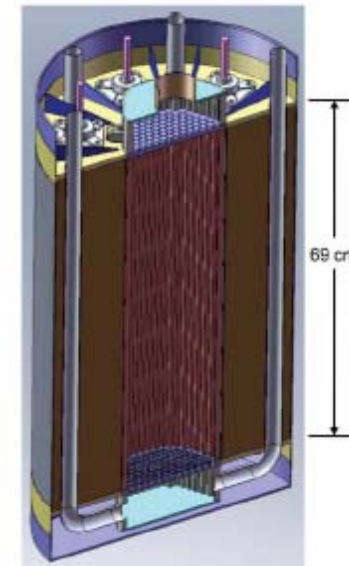
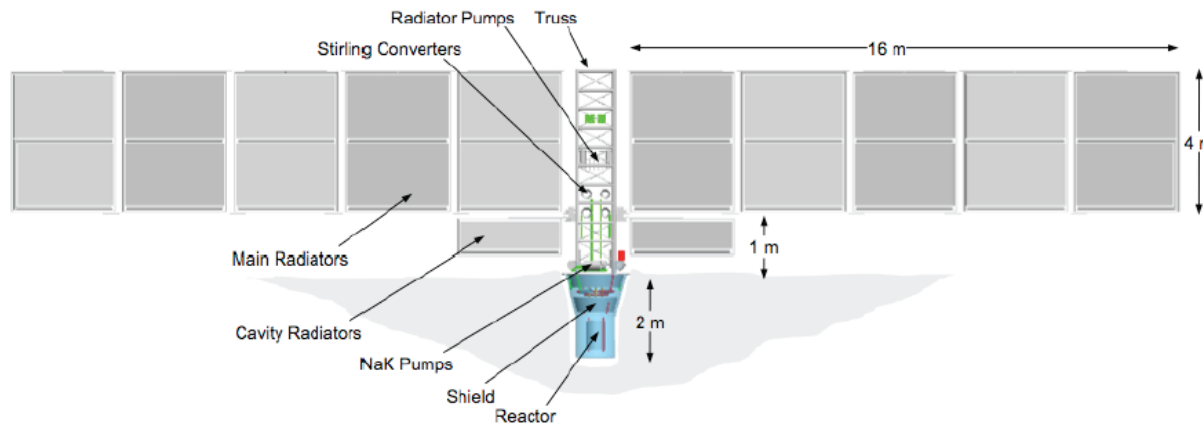
자율형 원자로 연구개발 경험

우주용 원자로 최근 연구개발

- 과거 우주용 원자로 원격제어
- LANL Heat Pipe 원자로 (탐사선 전원 제공)
- 자율형 원자로 & 원격제어

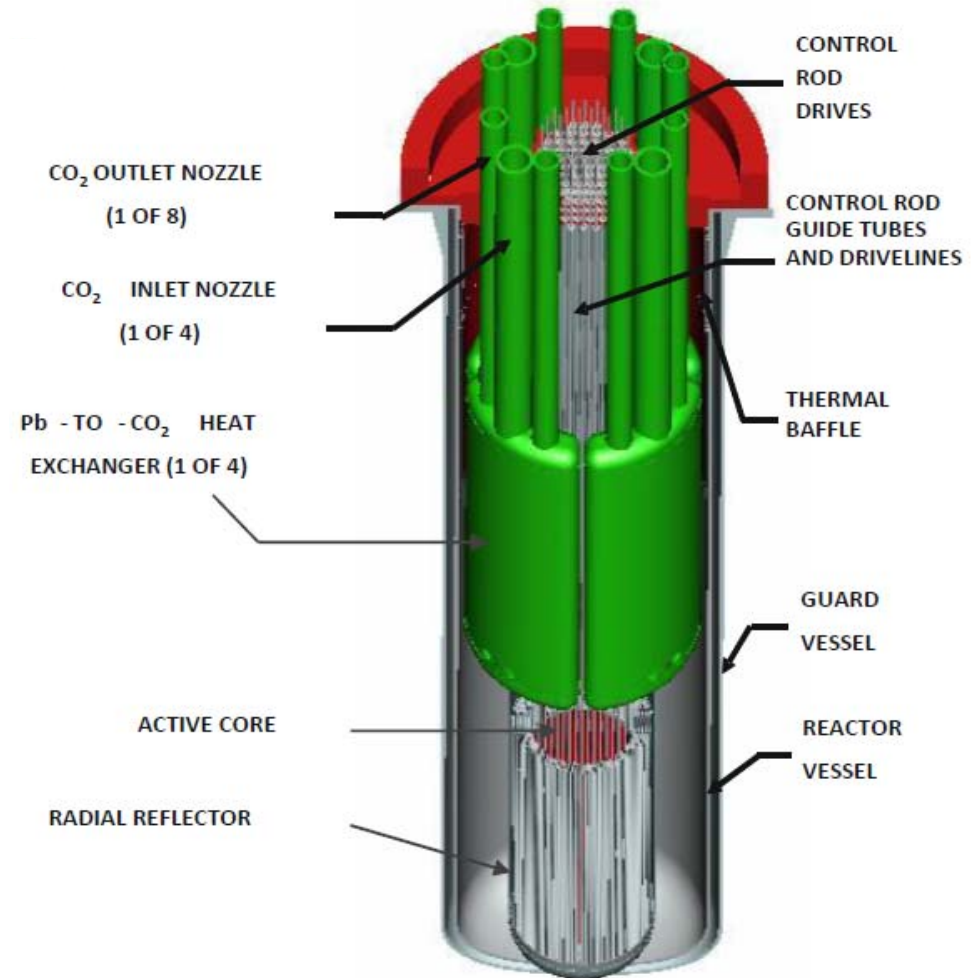


- NASA Surface Fission Power (예, 달 & 화성)



Small Secure Transportable Autonomous Reactor (SSTAR)

- Gen-IV 개념의 하나로서 ANL, LLNL, LANL 공동연구
- 납 혹은 LBE 냉각 고속로 개념
- UN 연료
- 10-30년 노심 수명
- SCO_2 발전개념
- 자율형 부하추종운전
- Tamper-resistant 개념
- 최근 연구개발 진척 없음



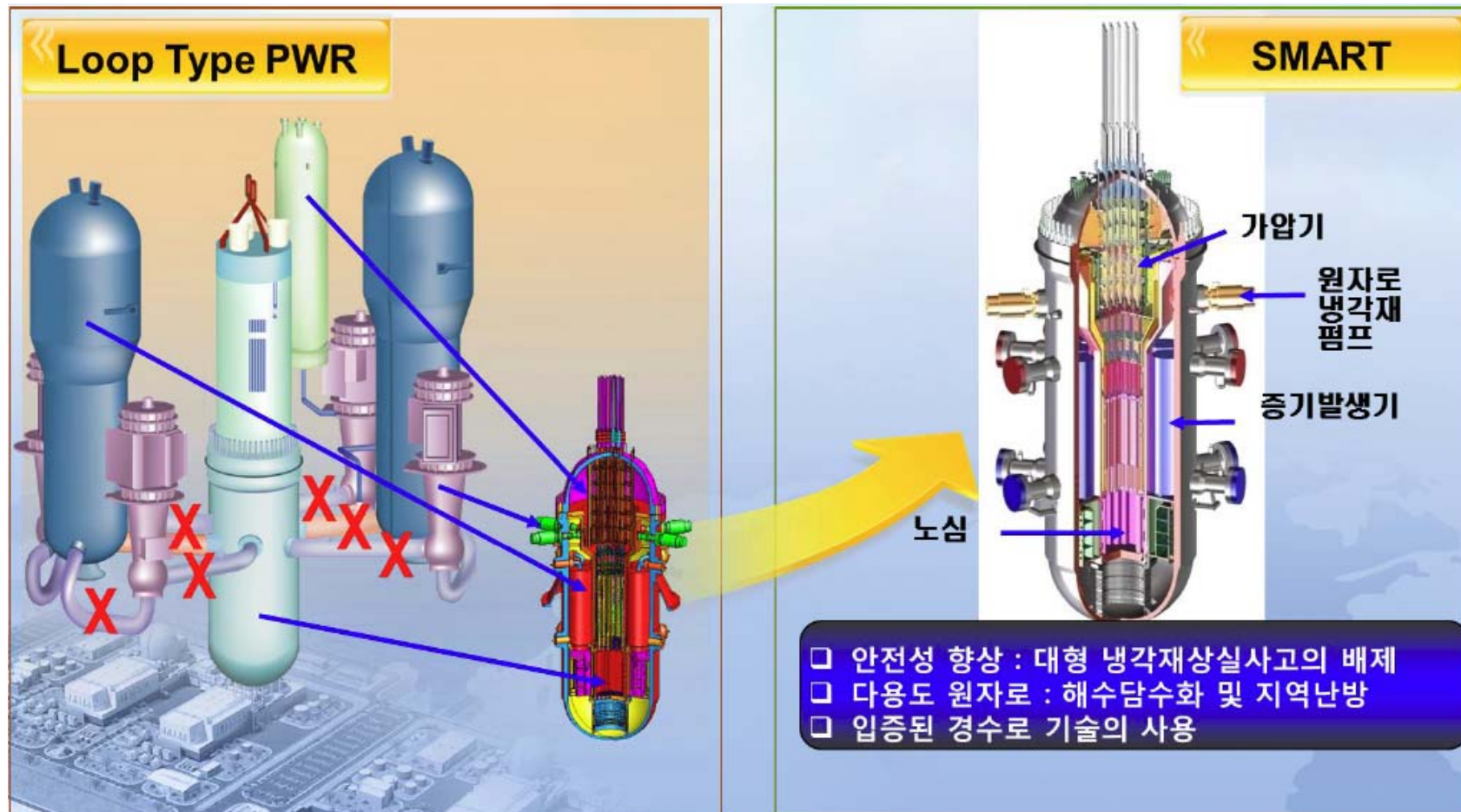
자율형 SMR
(Autonomous Small Modular Reactor, ASMR)
연구 개발

Center for Autonomous SMR Research
(CASMR)

KAIST ERC (선도공학연구센터)
(2016-2022 or 2024)

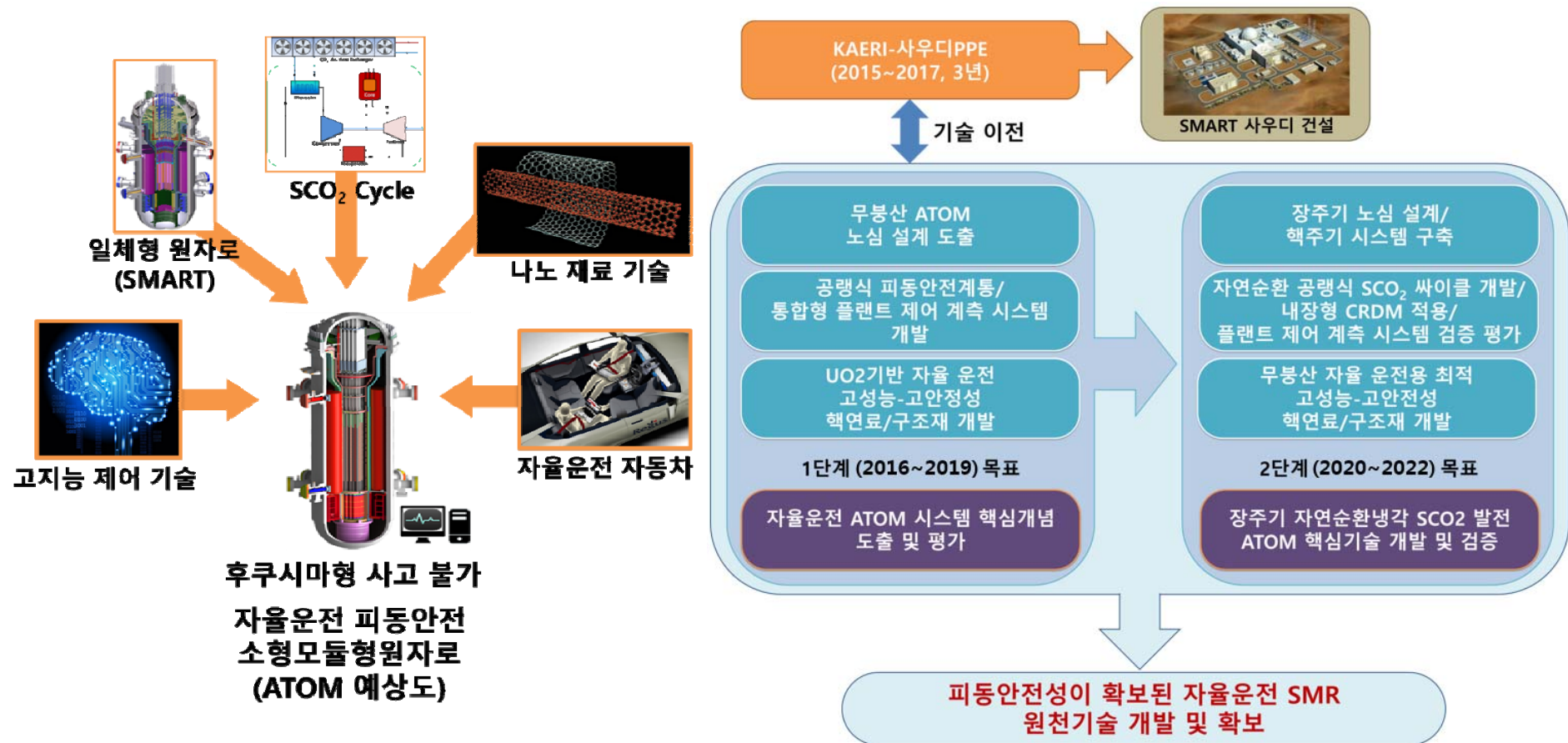
Small Modular Reactor (SMR)

- 출력 < 300 MWe



CASMRR 최종목표

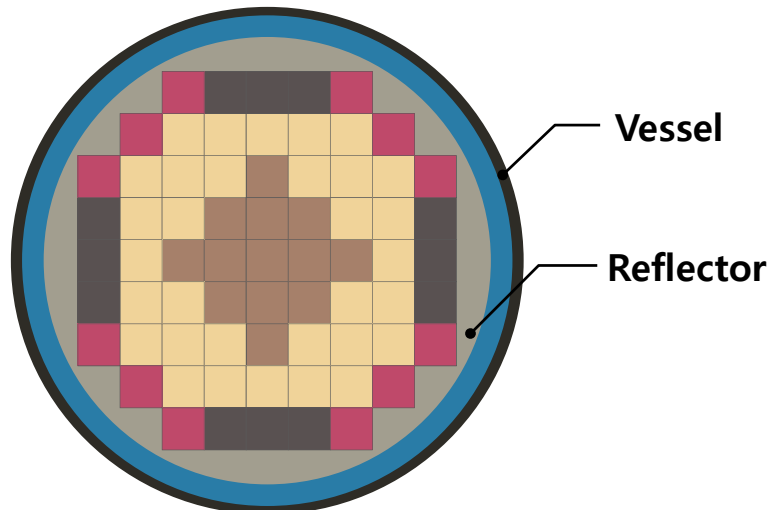
- 혁신 노심기술, 나노 기술(NT) 및 정보통신기술(ICT)이 융합되어 **극도의 안전성이 확보된 자율 운전 소형모듈형원자로 (SMR) 시스템** Autonomous Transportable On-demand reactor Module (ATOM)의 원천기술 개발 및 검증



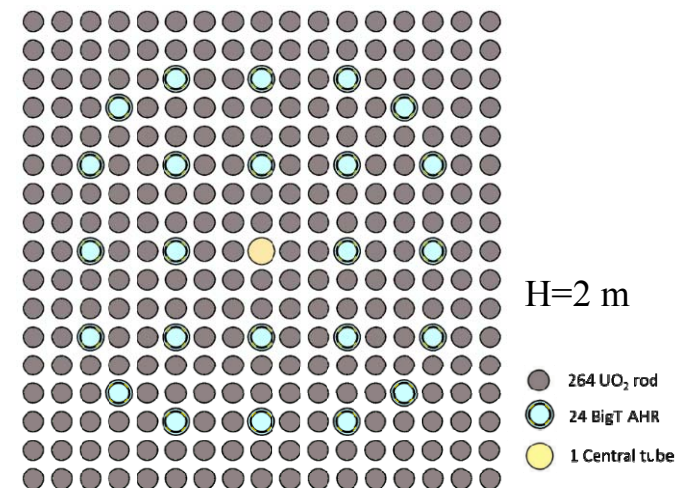
ATOM 노심 예비개념

○ ATOM 노심 주요 설계 및 성능 목표

주요 인자	내 용
원자로 출력	120~150 MWe
출력밀도	60~80 W/cm ³
핵연료	UO ₂ /U ₃ Si ₂
노심손상빈도 (CDF)	< 10 ⁻⁸
피동잔열제거 시간 (Grace Time)	제한 없음
반사체	Heavy material such as SS
핵연료집합체	표준 17X17 집합체
가연성 흡수체	1) BigT (Burnable Absorber-integrated Guide Thimble) 2) CBSA (Centrally-shielded Burnable Absorber)
주요 특징	1) 높은 원자번호의 반사체 (Heavy reflector) 2) 무붕산 노심 (Boron-free) 3) 피동 부하추종운전 (near-Passive Load-Follow Operation)



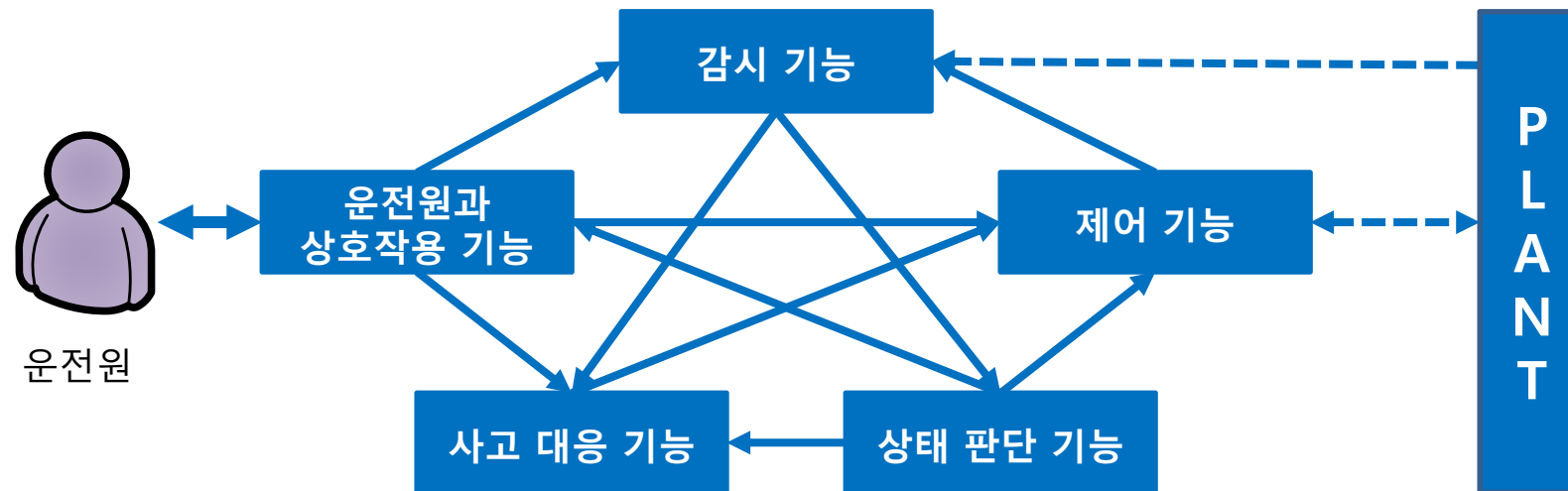
ATOM 노심 예비개념



17X17 핵연료집합체

ATOM 인공지능, GAIA

- 인적개입을 최소화하는 ATOM 전영역 자율운전 시스템
- **GAIA (Genuine Autonomous Intelligence for ATOM)**
 - Deep-learning with advanced Neural Network
 - 다물리 코드 (MARS) 및 시뮬레이터를 활용한 훈련자료 생산
- 발전소 상태에 따른 운전모드 별 자율운전 전략 개발
- 각 핵심기능 구현을 위한 인공지능 알고리즘 적용

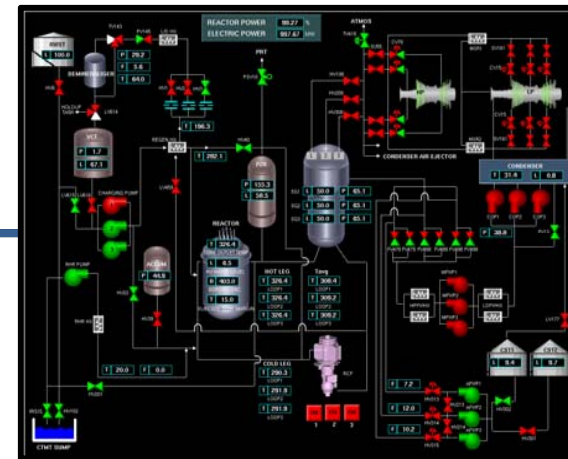


< 자율형 SMR을 위한 핵심 기능과 기능간 상호작용 >

ATOM 인공지능, GAIA

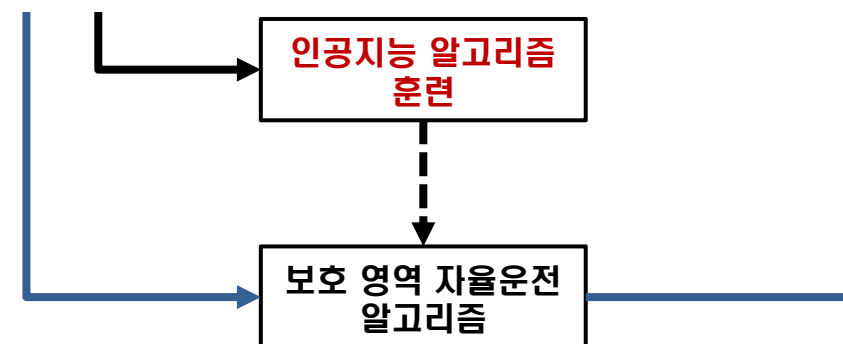
- 보호영역 자율운전 알고리즘 개발 (예비결과)
 - 소형 시뮬레이터 (CNS) 활용

Reference plant	Westinghouse PWR
Electrical output	930 MWe
RCS Pressure	160Kg/cm ²
Loop	3 loop
Hot leg / Cold leg Temp	325°C / 290°C
RCS Average Temp	308°C
S/G Pressure	64.4Kg/cm ²



Plant Parameter
기기상태

제어 명령

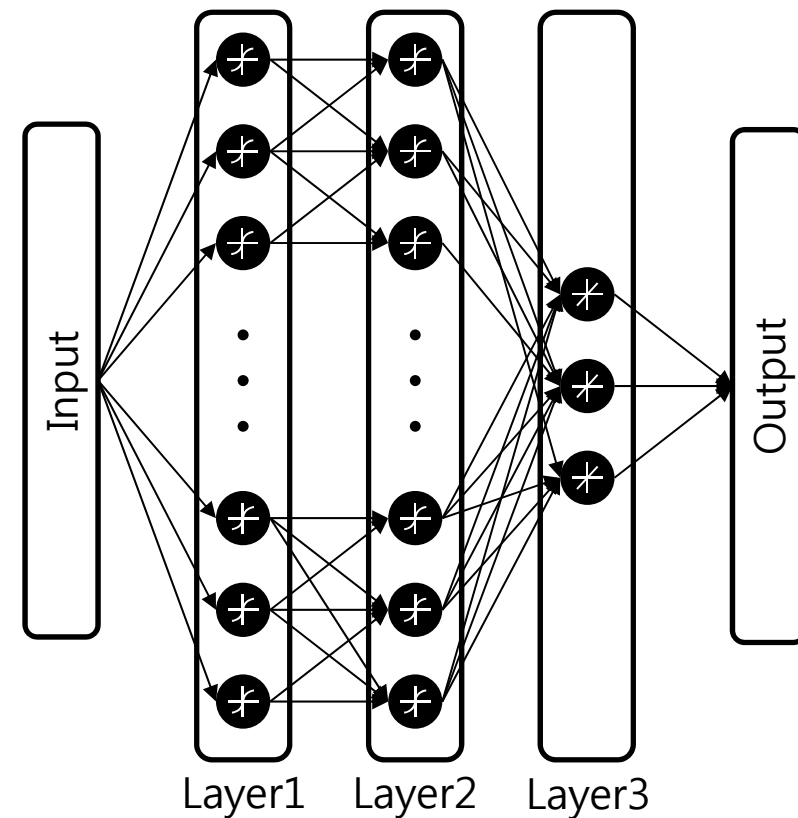


ATOM 인공지능, GAIA

- 비상운전시 발전소 자료 수집 및 훈련 (예비결과)
 - 약 2,200개 변수 고려
 - 일반적인 FNN 사용 (향후 RNN 고려)
 - 설계기준사고 및 설계기준초과사고 시나리오 고려Value

Feed-water Temp	0~400
Containment Pressure / Temp	0~100/0~20 0
S/G 1,2,3 Pressure	0~100
RCS Pressure / level	0~100
Loop 1,2,3 average Temp	0~400
AUX Feed-water Flow	0~75

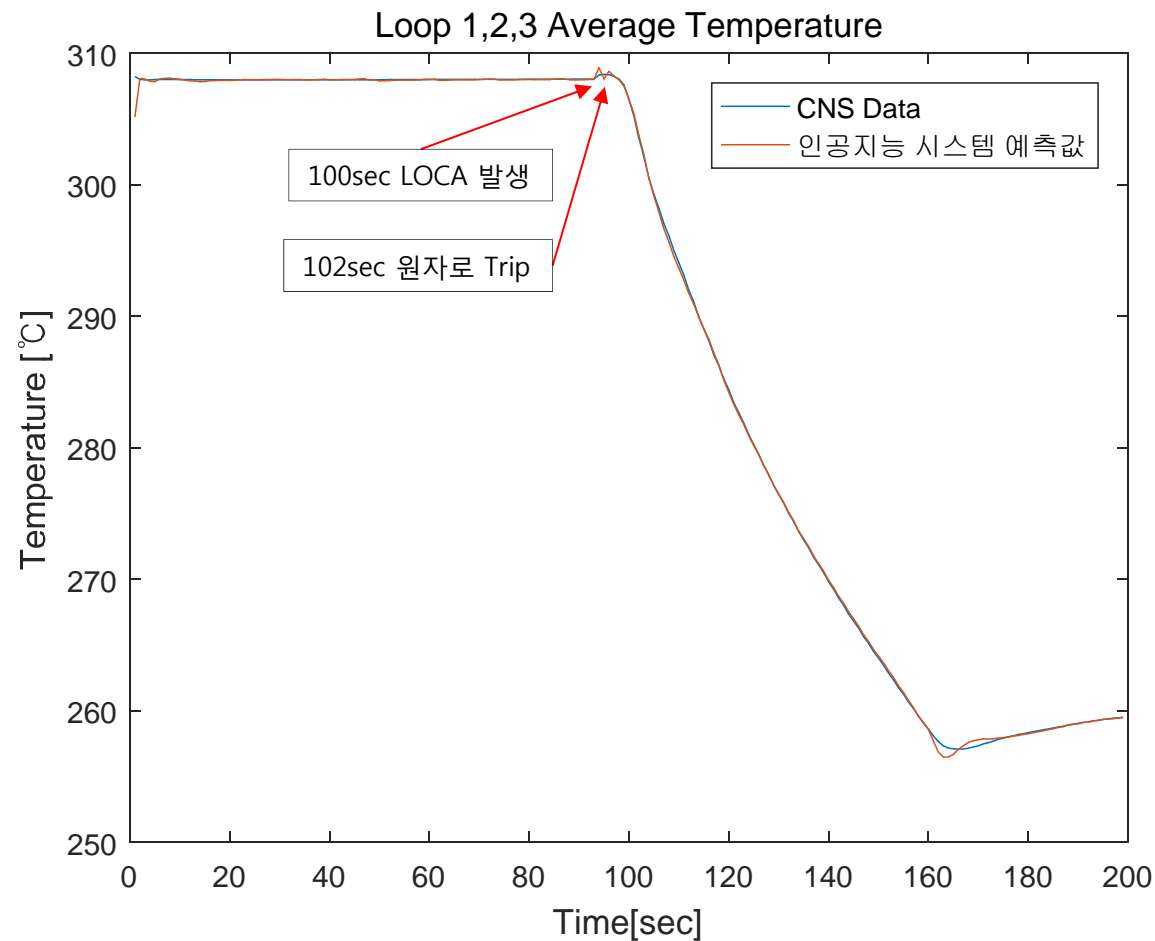
사고 시나리오
Loss of Coolant Accident (LOCA)
PORV 강제 개방(LOCA)
LOCA + SI 밸브 고장
Steam Generator Tube Rupture (SGTR)
Main Steam Line Break (MSLB)
Loss of All Feed-water (LOAF)
SGTR+MSLB



ATOM 인공지능, GAIA

- 인공지능 시스템 결과 (예비)
 - LOCA (cold-leg, 1.5 cm²) 시 발전소 변수 및 제어신호 비교
 - : 성공적인 예측

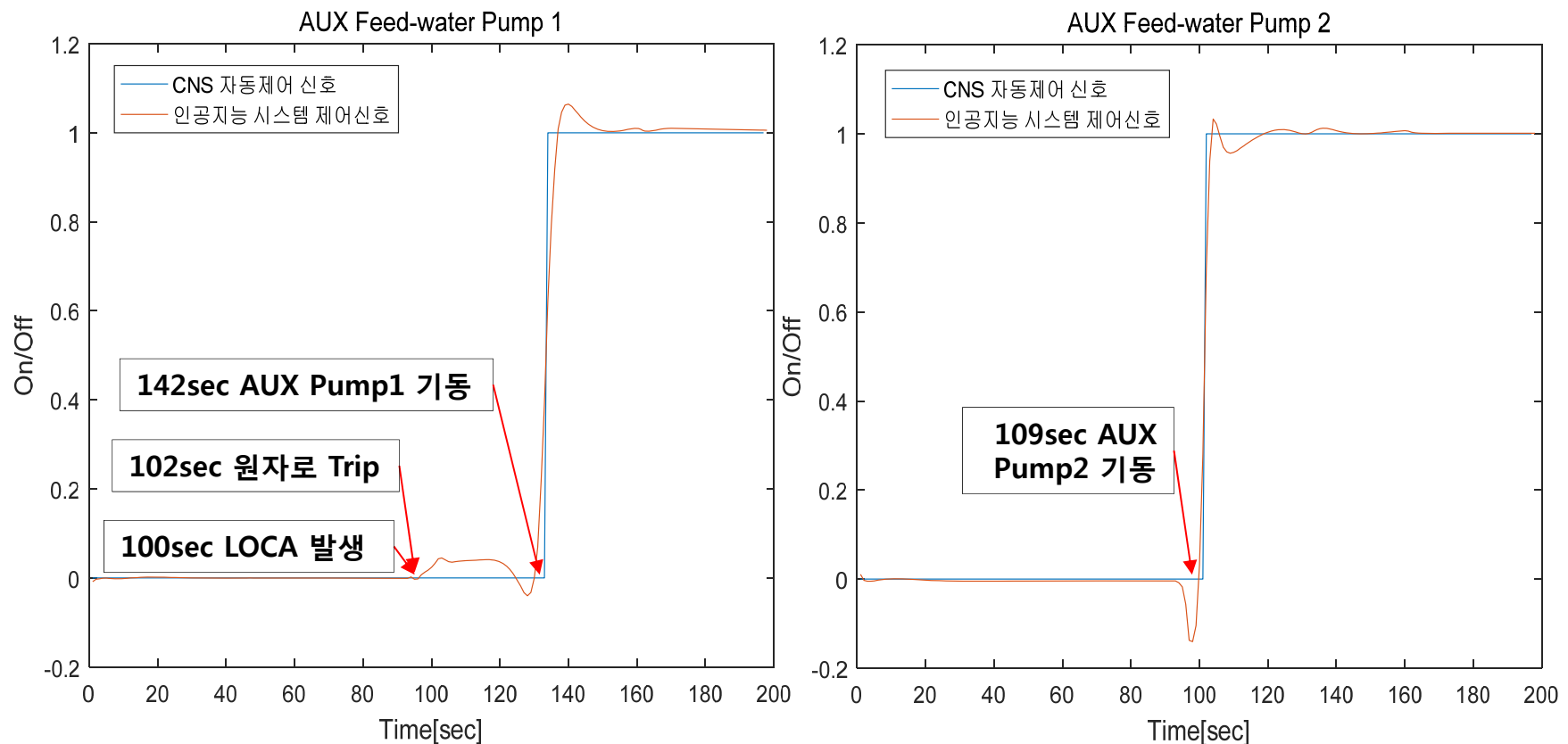
발전소 상태 변수 예측



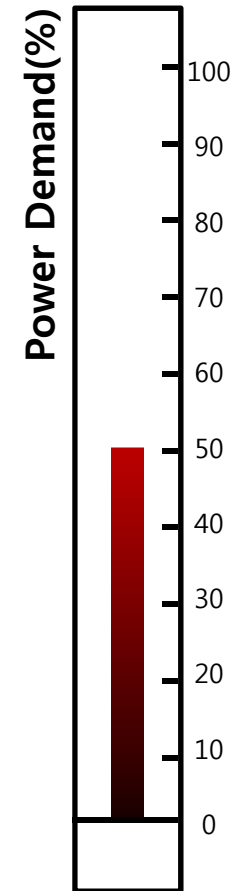
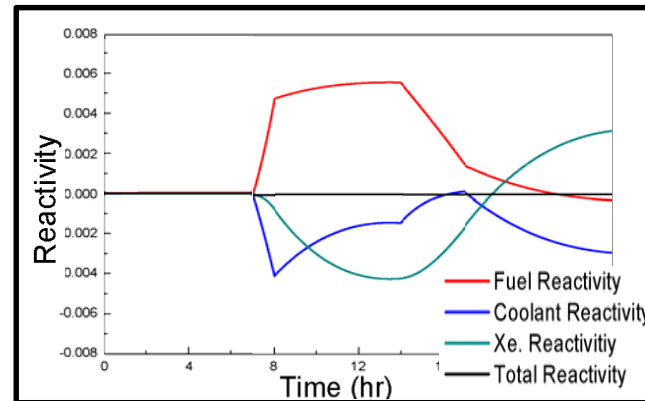
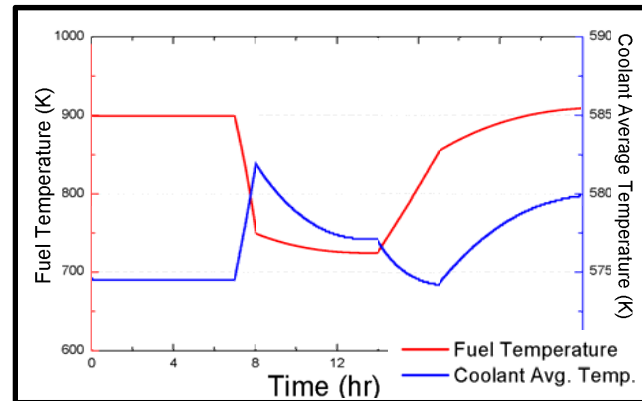
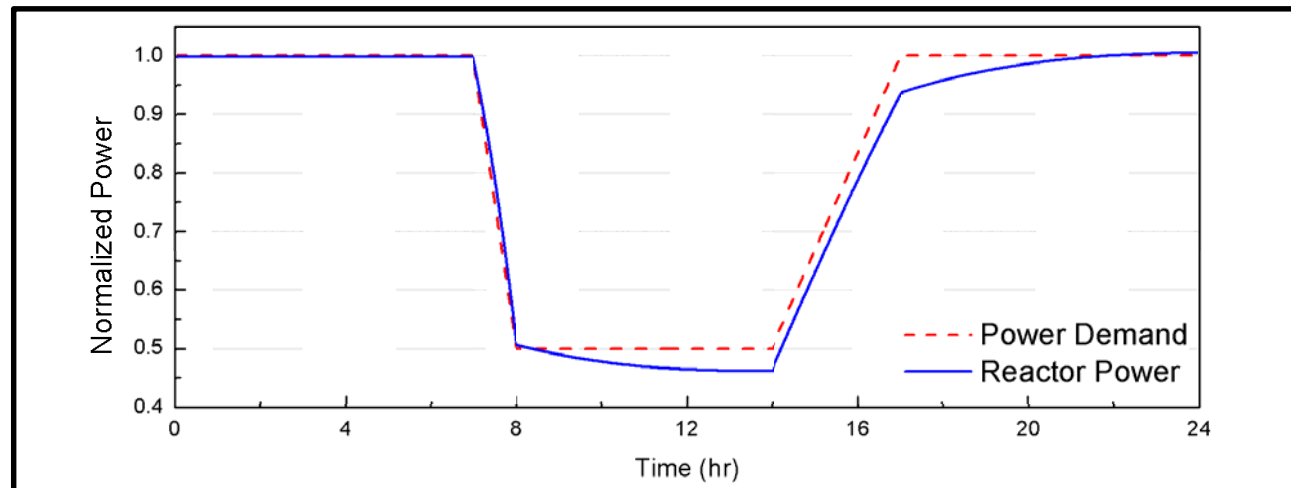
ATOM 인공지능, GAIA

- 인공지능 시스템 결과 (예비)
 - LOCA (cold-leg, 1.5 cm²) 시 발전소 변수 및 제어신호 비교
 - : 성공적인 예측

발전소 제어 신호 발생

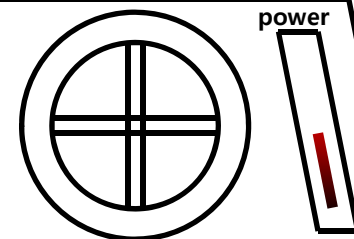


ATOM 피동적 일일부하추종운전



※ Passively Autonomous Operation Mode ※

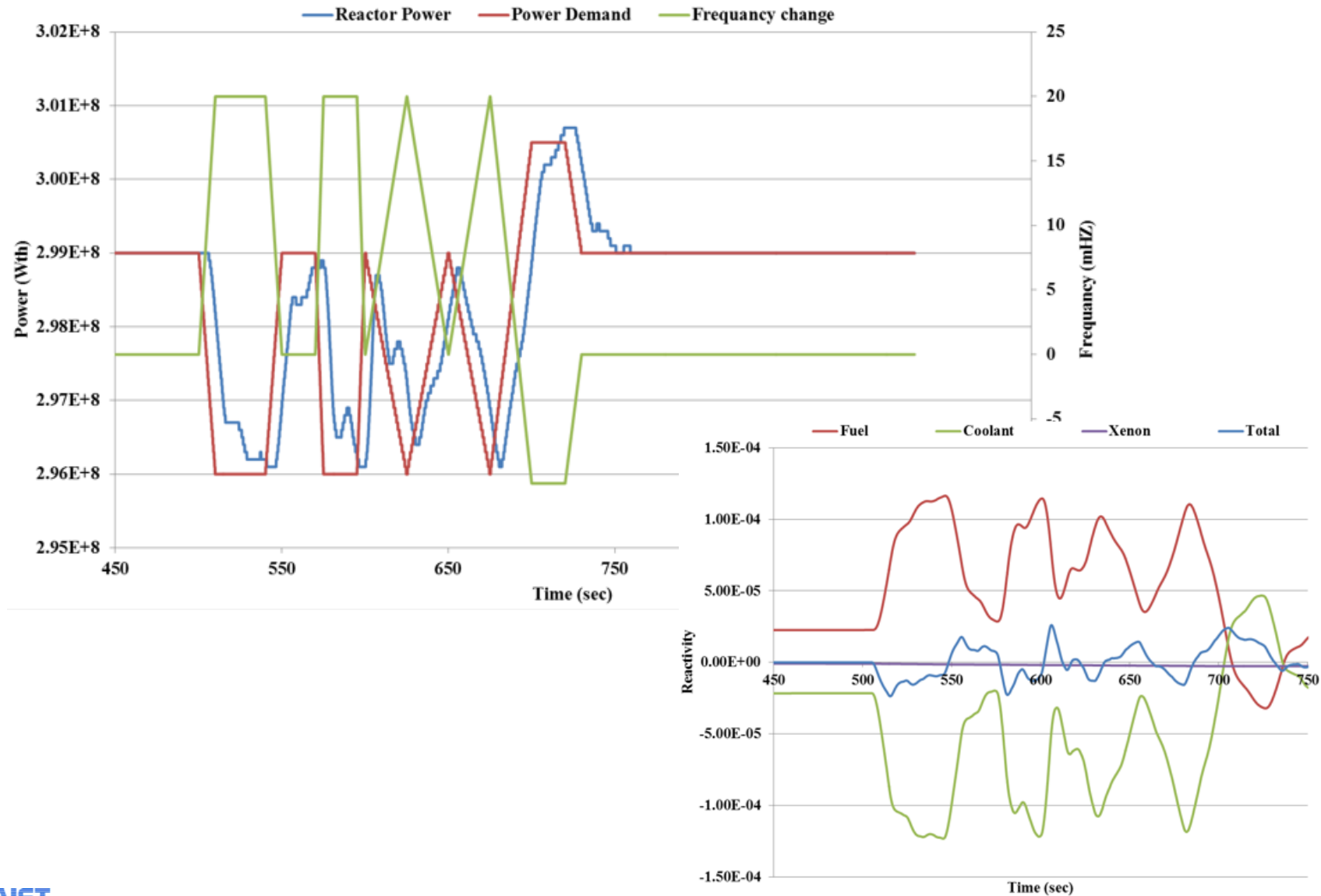
< No Control Rod Movement >



Heat transfer capacity

ATOM 피동적 주파수 제어운전

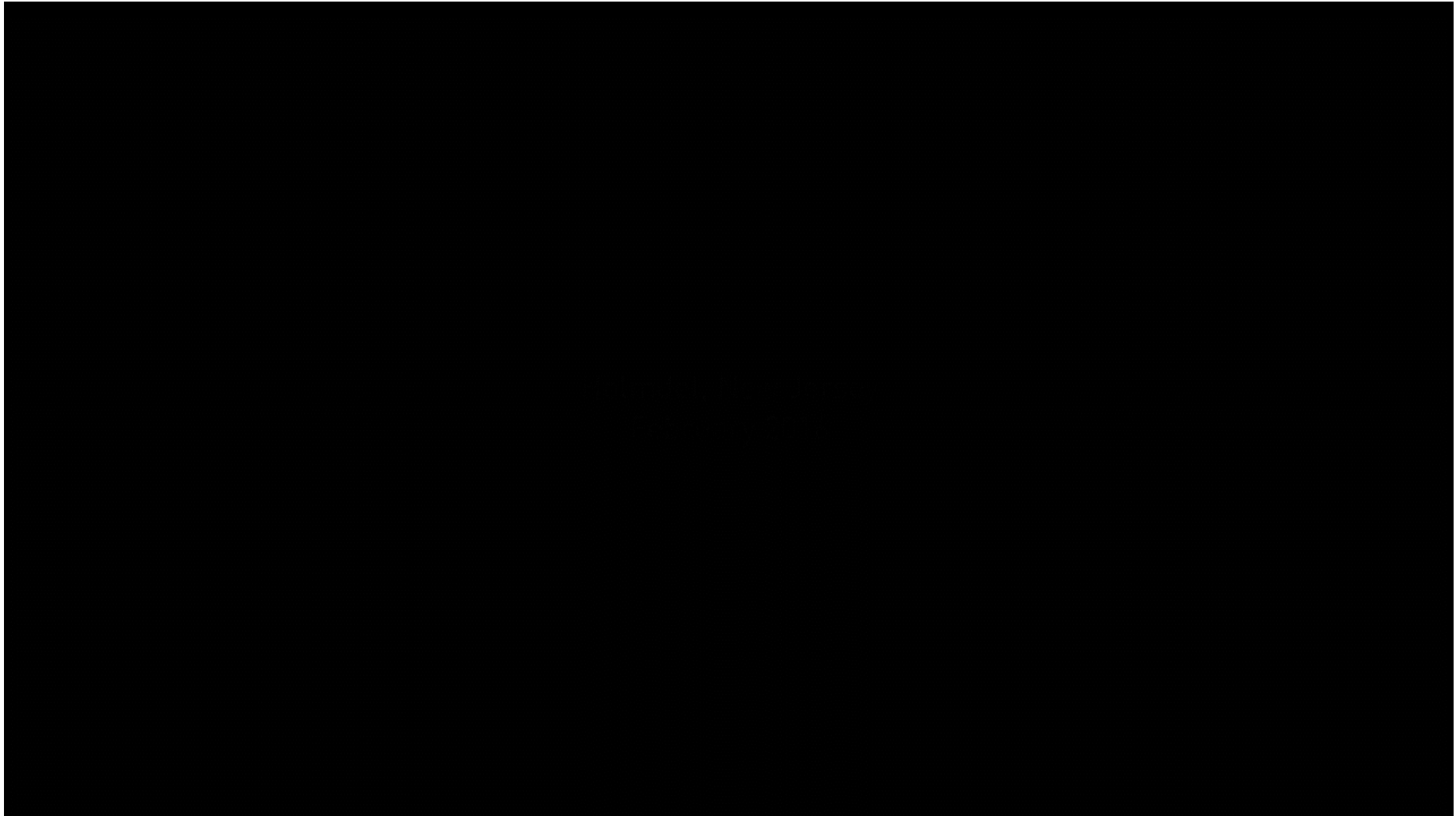
- 일차측 제어 전혀 없음!



주요 기술현안 및 도전

- **인공지능 훈련자료 생성**
 - 다물리 시뮬레이터를 통해서 충분히 정확한 훈련자료 생산 가능한가?
 - 사고를 적절히 모사 가능한가?
 - Seamless training 가능한가?
- **인허가성**
 - 훈련되지 않는 영역에 대한 신뢰성 입증 방식
 - License by Test 개념?
- **필요한 측정자료 불확실성 고려**
 - 불확실도 정량화 및 처리 방안
- **사이버 보안성 확보 방안**
 - 한 차원 높은 보안성 요구됨. (인공지능 자체가 스스로 방어 필요)
- **독립적 복수 인공지능**
 - 다른 방법? 누구를 믿어야 하나?
- **자율학습의 길은 있는가?**

스스로 학습할 수 있는 길은?





감사합니다.