

[한국원자력학회 2025 춘계학술발표회]

소듐냉각고속로 국내 개발 현황 및 향후 개발 방향 워크숍

SALUS-100 개발 현황

2025년 05월 21일



제주 국제컨벤션센터

박 창 규  한국원자력연구원

주관 : 한국원자력학회 / 차세대원자력정책센터

CONTENTS



01 연구개발 목표 및 내용

02 추진 전략 및 추진 체계

03 연구개발 내용 및 성과

04 연구개발 성과 활용 방안

1. 연구개발 목표 및 내용

» 연구 배경

세계 원자력 시장의 변화

- ❖ 원자력발전 패러다임의 변화
 - 규모의 경제(대형원전)에서 중소형원전으로 전환
 - 투자리스크 감소, 다양한 활용성 대응
 - 선진 소형원자로 개발 부상
- ❖ 소형원자로(SMR) 시장의 급부상
 - 2035년까지 65~85 GW 규모의 SMR 시장 예상*
- ❖ 전력생산, 다목적 열원, 독립전원, 오지/격지의 에너지 공급원 등 다양한 수요
- ❖ 근미래 시장환경을 고려한 전략적 기술개발로 신시장 요건에 대응 필요

국내 원자력 정책 추이

- ❖ 제8차 원자력진흥위원회('19.11)
 - '既 확보 소형 원자력 시스템기술 기반의 혁신기술 개발 및 핵심기술 국내외 실증검증' 전략수립
- ❖ 원자력 정책연구사업내 정책연구 과제
 - '미래 선진원자로 핵심기술 확보방안 수립' ('19.08)
 - '국가 소형원자로 개발사업 기획 및 조정 전략 수립' ('20.08)
- ❖ 제9차 원자력진흥위원회 ('20.12)
 - '미래 원자력시스템 개발을 통한 시장 다변화 대비' 전략수립
 - 非경수형 소형원자로 기술의 선제적 확보 추진



비경수형
SMR 개발

- ❖ 우수한 안전성과 경제성의 금속연료 노심 적용
- ❖ 피동안전성을 확보한 非경수형 SMR
- ❖ 既 확보 고속로 기술을 활용한 중간진입 전략

* "Small Modular Reactors – once in a lifetime opportunity for the UK," Rolls-Royce (2017)

1. 연구개발 목표 및 내용

» 사업 개요

➤ 해외시장 맞춤형 미래선진원자로 검증기술개발 사업 (한국연구재단 주관)

➤ 사업 목적

- 제4세대 소형원자로 기반 혁신원자력시스템의 신시장 진입을 위한 미래수요 대비 기술기반 구축 및 기술 역량 강화

➤ 사업 내용

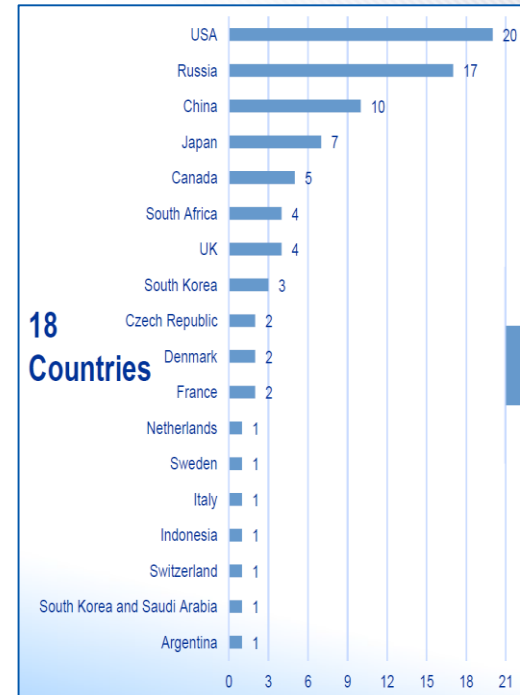
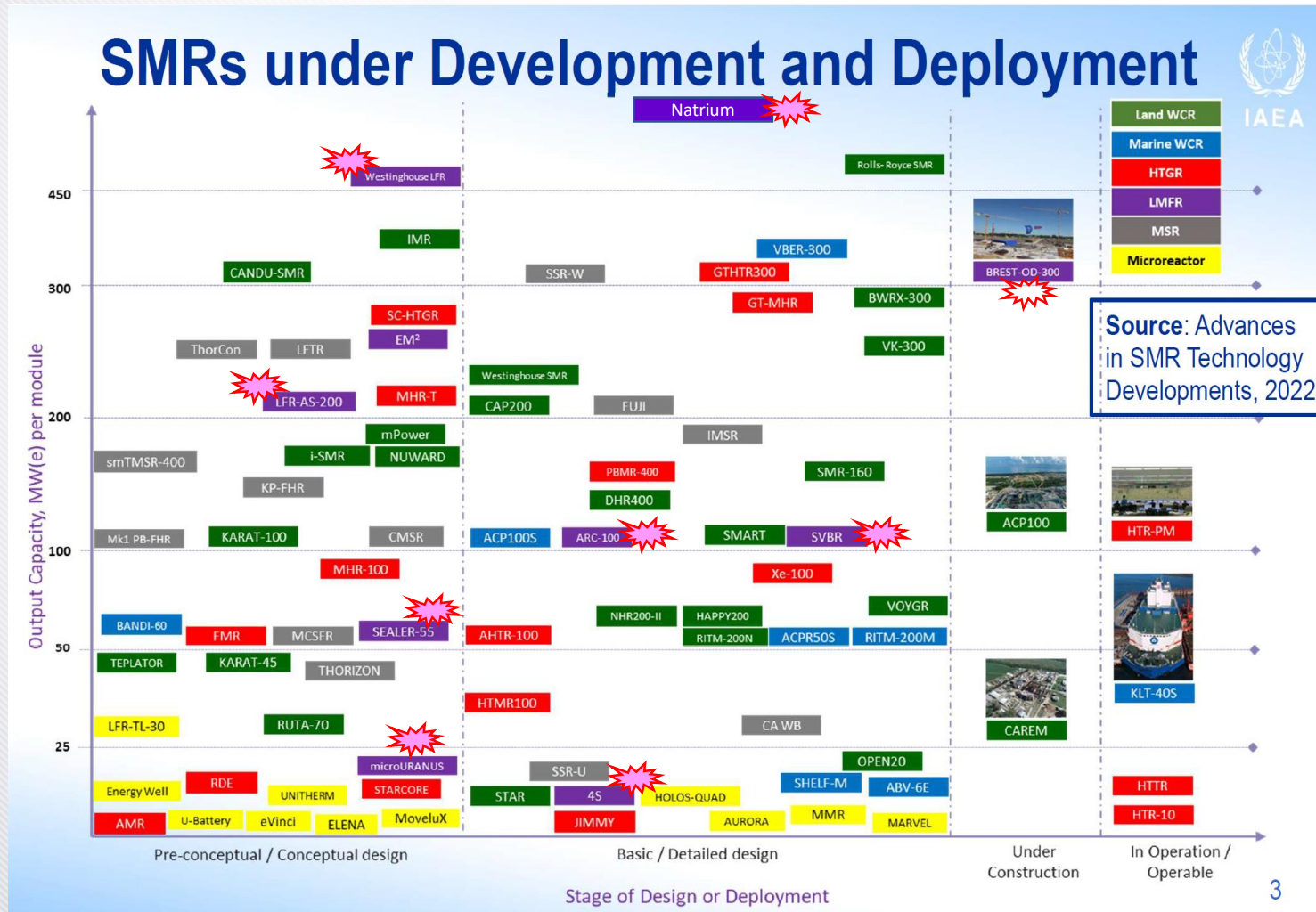
- [1총괄] 제4세대 선진 소형원자로기술 개발
 - 국내 고속로 기술을 활용하여, 소형원자로(SMR) 개발 및 설계기술의 해외 인증 추진
 - 소형원자로 장주기 핵연료 및 노심 개념설계, 소형원자로 주요 계통/기기 설계요건 및 개념설계 개발 등
- [2총괄] 선진 소형원자로 안전성 강화 핵심기술 검증
 - 기 확보된 고속로 핵심기술의 완결성 입증 및 국제 공동연구를 통한 안전성 향상 관련 국외 검증기반 확보
 - 선진 열유체 해석방법론 및 주요 전산코드 검증, 파이로-SFR 타당성 검토 및 TR 심사 대응

➤ 규모 및 사업 기간(1총괄)

- 1개총괄 + 3개 세부과제
- 2021.04.15.~2024.12.31.

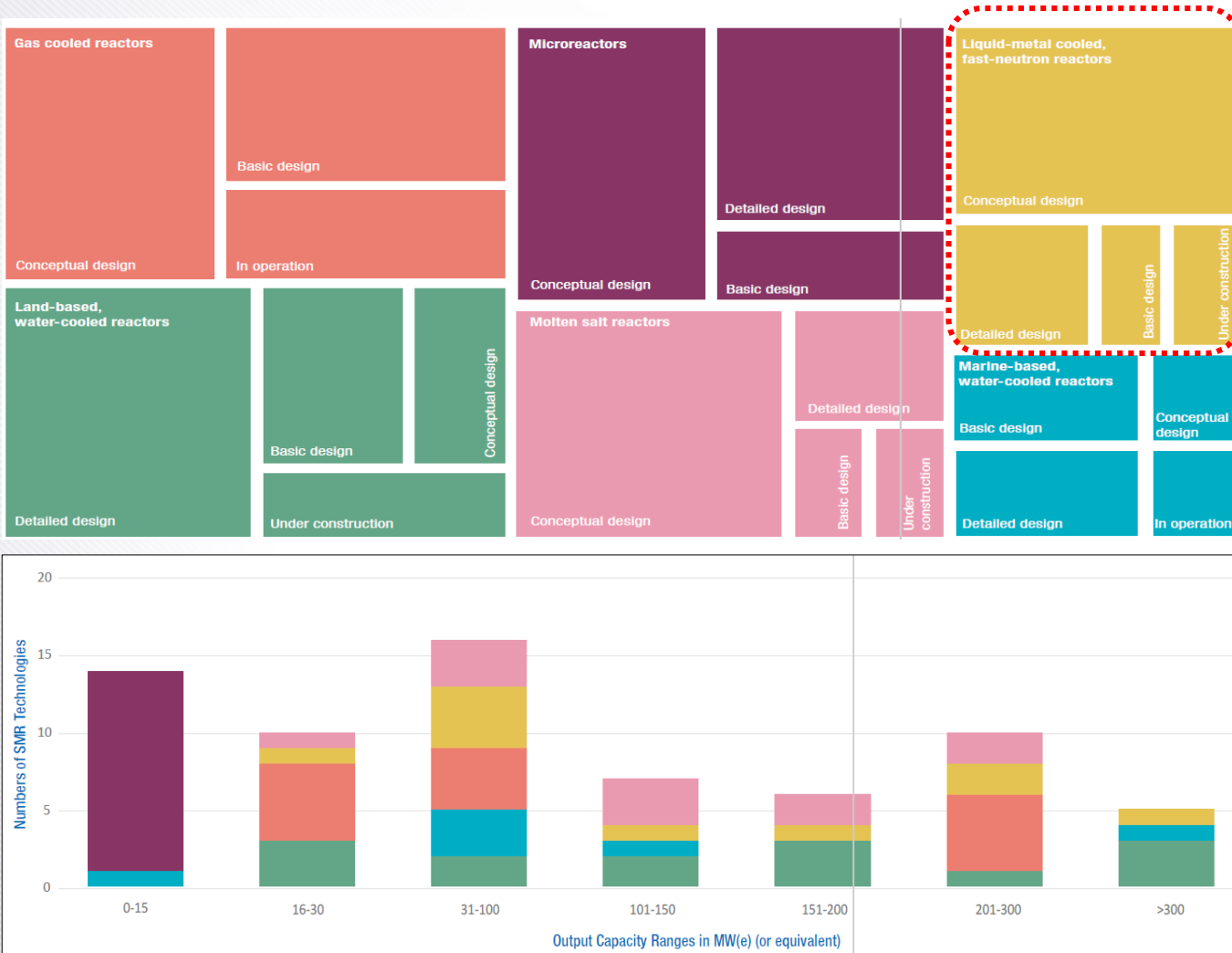
1. 연구개발 목표 및 내용

» 글로벌 SMR 개발 현황



1. 연구개발 목표 및 내용

» 글로벌 SMR 개발 현황 (2024)



Status of Development of Active SMR Designs

- Land-based, water-cooled reactors
- Marine-based, water-cooled reactors
- Gas cooled reactors
- Liquid-metal, fast-neutron reactors
- Molten salt reactors
- Microreactors

* Advances in SMR Developments, International Conference on Small Modular Reactors and Their Applications, 2024, IAEA

1. 연구개발 목표 및 내용

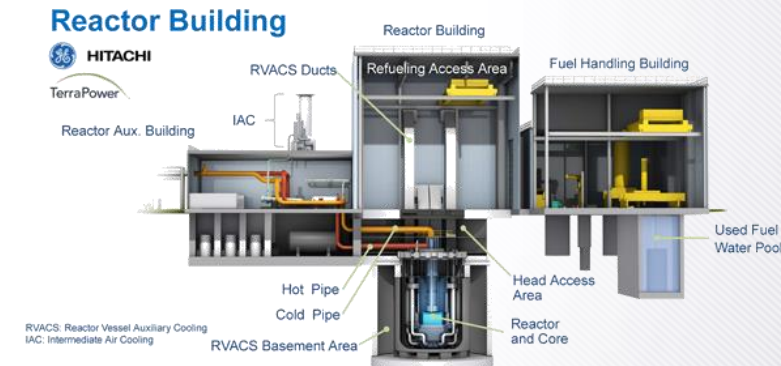
» NATRIUM™ (TerraPower)

» 설계 사양

- 원자로 유형: 풀형 소듐냉각고속로 (SFR)
- 전기 출력: 기본 345 MWe, TES로 최대 500 MWe까지 확장 가능
- 연료 종류: 최대농축도 20% 인 HALEU
- 냉각 계통: 360°C/510 °C 의 액체소듐(Na)
- 순효율 및 재장전 주기: 약 41%, 1년~2년
- 에너지 저장: 그리드 유연성을 강화하는 용융염 기반 시스템

» 최근 동향 및 특성

- 미국 ARDP 의 “Advanced Reactor Demonstrations” 의 수혜
- 미국 와이오밍 주 캐머리에서 건설 착공(2024.06, 공식 건설허가는 미발급)
- 혁신적 에너지 저장: ESS는 전력망의 안정성을 지원하면서 변동 전력 출력을 가능하게 함
- 협력 관계: 산업 파트너와의 협력(Sabey 데이터 센터와의 파트너십을 통해 데이터 센터 운영을 지원할 잠재적 배치를 탐색)
- 규제 이정표: 미국 원자력 규제위원회(NRC)와의 진행 상황 및 주 정부 기관으로부터의 승인은 정부의 강력한 지원 및 안전 및 효율성에 대한 신뢰를 나타냄



* Pre-application activities in www.nrc.gov website

1. 연구개발 목표 및 내용

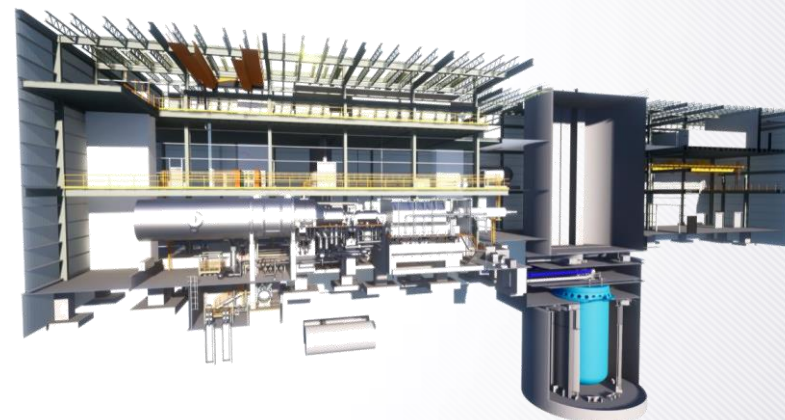
» ARC-100 (ARC Clean Technology)

▶ 설계 사양

- 원자로 유형: 풀형 소듐냉각고속로 (SFR)
- 전기 출력: 100 MWe
- 연료 종류: 금속 연료(U-Zr alloy)
- 냉각 계통: 355°C/510°C 의 액체소듐(Na)
- 재장전 주가: 20년
- 안전 기능: 대기압에서 운영되며 피동 안전 시스템을 갖추
- 자체 연료를 재활용하여 장기 핵폐기물의 부피를 크게 줄일 수 있음.

▶ 최근 동향 및 특성

- 미국 ARDP의 “Advanced reactor Concepts 2020 (ARC-20)” 수혜
- 캐나다 NBP와 협력 협약 및 CNSC 공급자설계검토(VDR) Phase2 진행
- 검증된 설계: EBR-II 기술을 기반으로 하며, 기술적 신뢰성 및 국제 시장에서의 성공 가능성을 입증
- 경제적 이점: 장주기 운전은 운영 비용을 줄이며, 제한된 에너지 인프라를 가진 시장에 매력적임
- 확장성: 다양한 에너지 요구에 맞게 유연한 설계로 다양한 지역과 시장 상황에 적용 가능
- 환경적 고려사항: 효율적인 폐기물 관리 및 연료 사용으로 환경 영향을 최소화



* ARC-100 Technical Summary(2023.08), ARC Clean Technology

1. 연구개발 목표 및 내용

내역사업 및 최종목표

- ❖ 총괄과제 : 제4세대 선진 소형원자로기술 개발 [한국연구재단, 2021.04~2024.12]
- ❖ 최종목표 : 해외시장 맞춤형 제4세대 SFR기반 선진 소형원자로기술 개발

단계별 연구목표

세부과제	1 단계 [' 21 - ' 22]	2 단계 [' 23 - ' 24]
[1세부] 선진 소형원자로 장주기 핵연료 및 노심 개념개발	○ U-235 20wt.% 장주기 금속연료 핵연료봉/집합체 및 장주기(20년) 소형원자로 노심 개념설계	○ 장주기 금속연료 10at.% 연소도 성능 검증 및 장주기 노심 내재적 안전성 확보
[2세부] 선진 소형원자로 계통개념 개발 및 안전성 평가	○ SFR원형로 설계 기반 장주기 선진 소형원자로 계통/구조 설계 적합성 검토 및 예비 안전성 평가	○ SFR원형로 설계 기반 장주기 선진 소형 원자로 계통/구조 기본설계 및 고도화 - 대표사고 안전여유도 확보 - 원자로 주요기기 설계요건 만족
[3세부] 선진 소형원자로 구조개념 개발 및 기술성 종합 검토	○ 해외 사전설계검토 제도를 활용한 既 확보 고속로 기술 기반 장주기 소형원자로 인허가성 확인용 문서 개발	○ 사전설계검토 완료를 통한 규제현안 조 기 확인/ 인허가 또는 설계/안전성 관점의 장애요소 확인

2.1 추진 전략

❖ 과제 운영 및 추진체계

- ✓ SFR 기술개발을 통해 축적된 연구개발 인프라 활용
 - SFR원형로에 기반한 시스템 개념 설정
 - 연구인력, 시험 데이터베이스, 설계도구 및 전산코드 등 기존 기반기술 활용
 - SFR원형로 설계방법 활용으로 설계요건 및 적합성 검토 조기 도출
- ✓ 원자로 개념과 핵심기술의 타당성 확보를 위한 해외 사전설계검토 추진
 - 캐나다 공급자사전설계검토(VDR) 및 IAEA 기술안전검토(TSR)

❖ 해외시장 SFR 기반 SMR 연구개발 협력

- ✓ 현대건설(주)과의 민관합작 선진원자로수출기반구축사업에 대한 상호협력협약서(MOU) 체결
- ✓ KAERI-TerraPower 기술협력 추진
 - 전기출력 345MWe급 고속로인 Natrium™은 '30년 운전을 목표로 사업을 진행 중
- ✓ 캐나다 New Brunswick 州 진출중인 (美) ARC 社와 연구개발 협력(MOU) 체결
 - 전기출력 100MWe급 고속로인 ARC-100에 대한 사전설계검토 2단계(VDR Phase2) 진행
- ✓ 현대엔지니어링(주)의 캐나다 Alberta 州 사업 협력 추진
 - KAERI, Alberta 주정부, 경상북도, HEC 등 국내외 7개 기관 연구개발 협력 MOU 체결

2.1 추진 전략

» 총괄과제 : 제4세대 선진 소형원자로기술 개발

전략목표

해외시장 맞춤형 제4세대 고속로 기반 선진 소형원자로 기술 개발

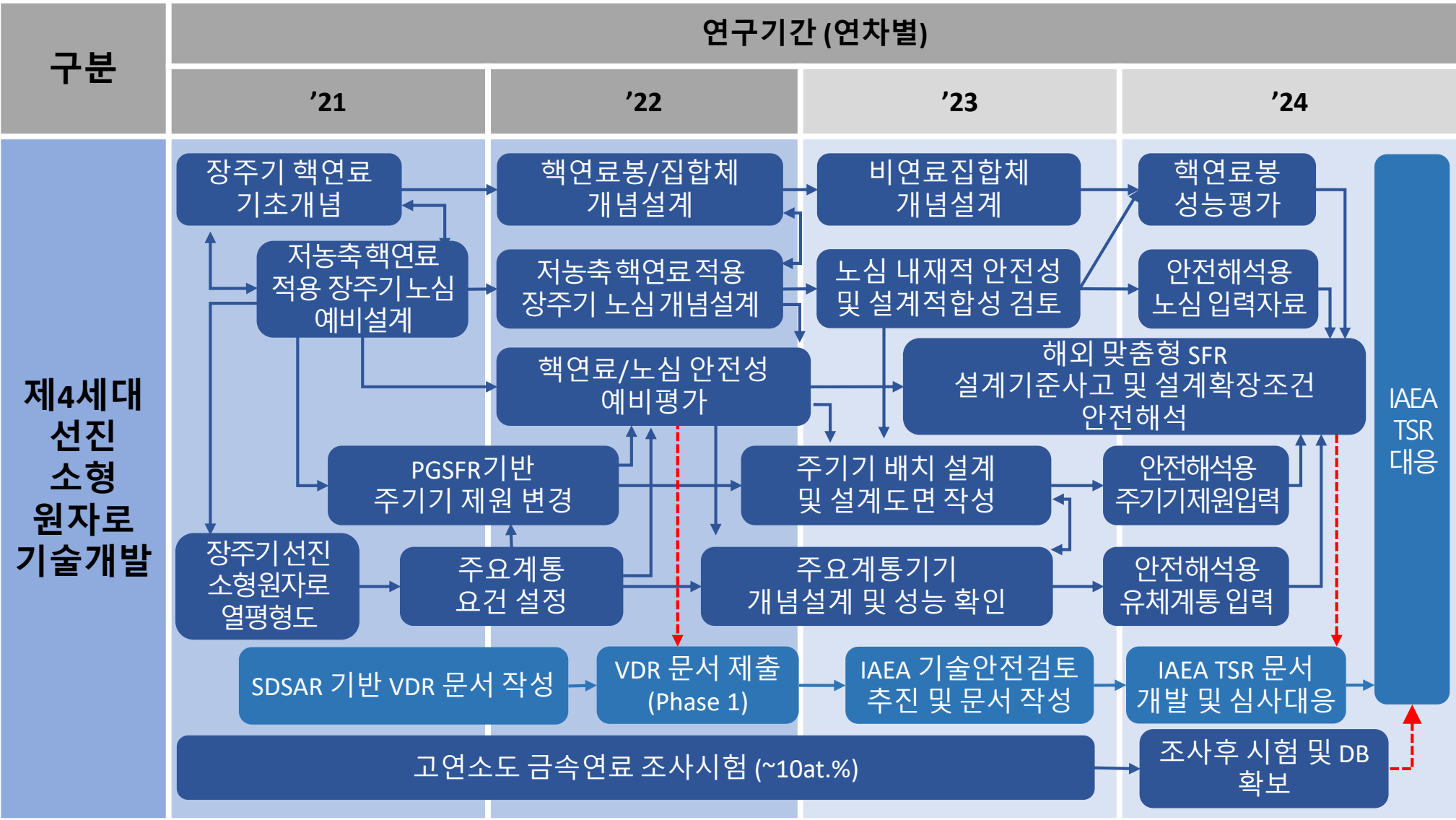
중점 추진 전략

- ❖ 고속로 기반 선진 소형원자로 장주기 핵연료 및 노심 설계
- ❖ 고속로 기반 장주기 선진 소형원자로 계통 및 고온 기기 설계
- ❖ 고속로 기반 선진 소형원자로 해외 사전설계검토 1단계 심사완료 및 2단계 문서 개발

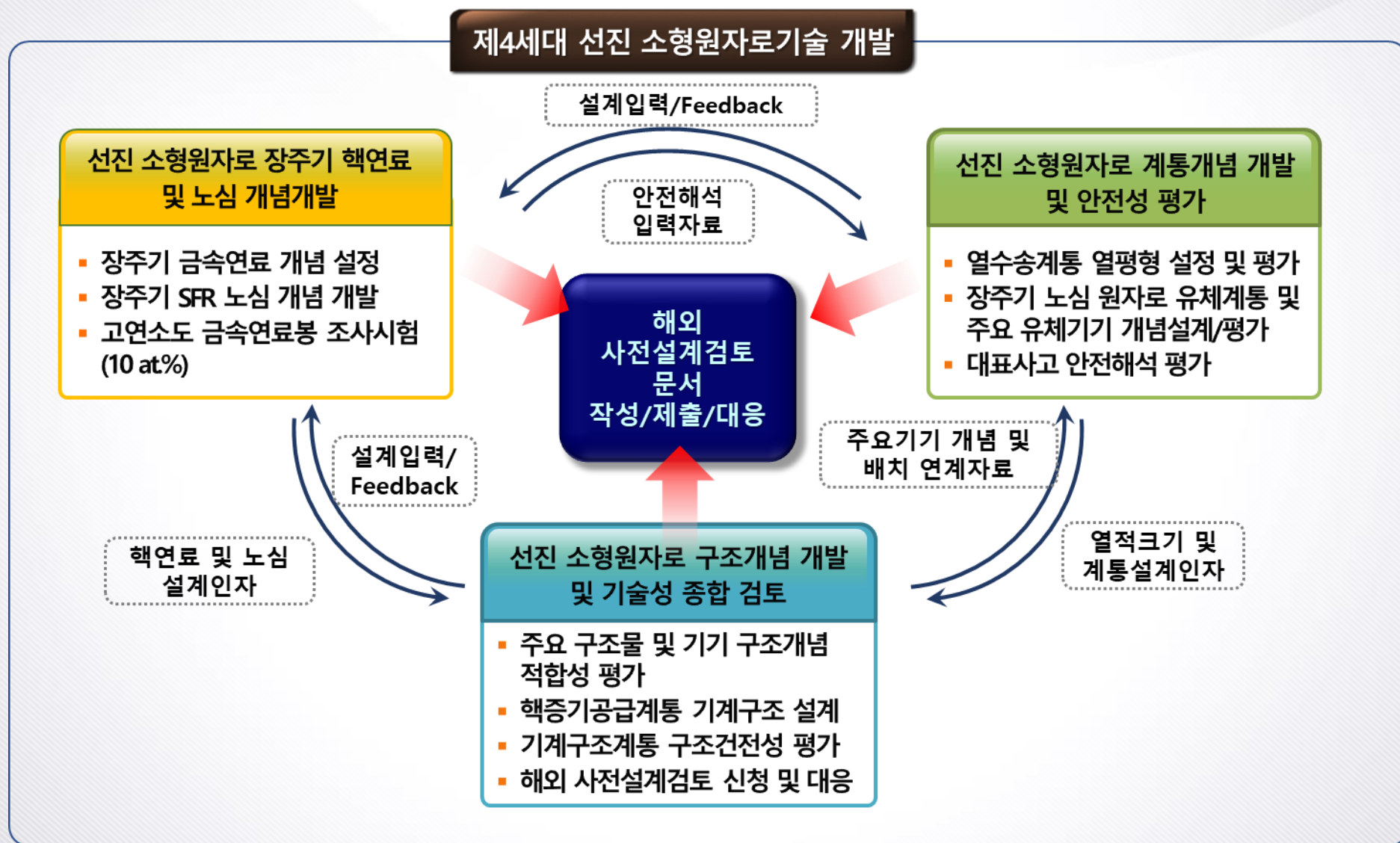
주요 성과지표

- ❖ 장주기 금속연료 10at% 연소도 성능 검증 및 장주기 노심 내재적 안전성 확보
- ❖ SFR원형로 설계 기반 장주기 선진 소형원자로 계통/구조 기본설계 및 고도화
- ❖ 규제현안 조기 확인/인허가 불확실성 제거 및 인허가/설계/안전성 관점의 장애요소 확인을 위한 해외 사전설계검토 문서 개발 및 심사 대응

2.2 추진 체계



2.3 세부과제간 연계



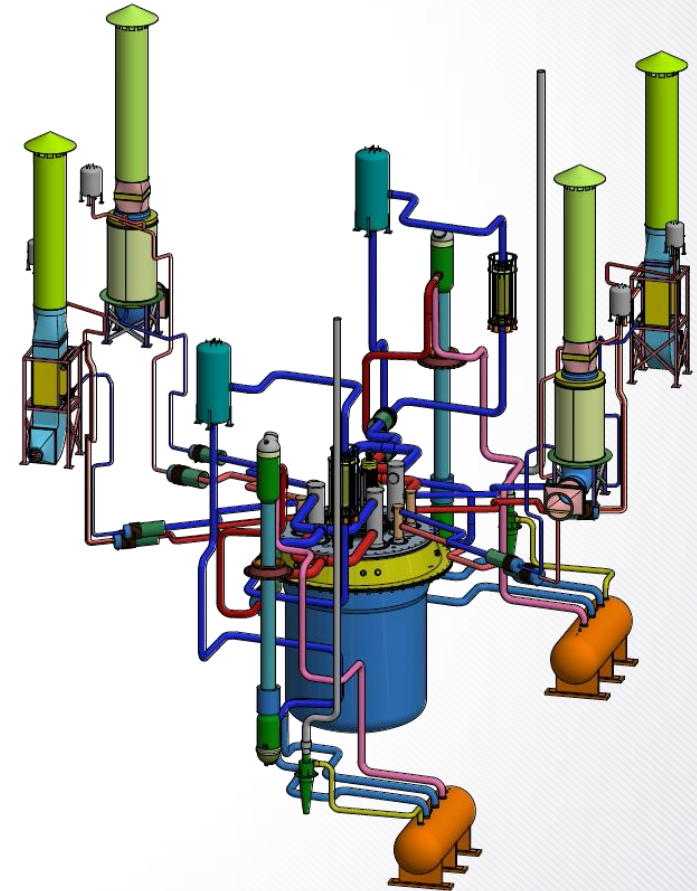
3.0 제4세대 선진 소형원자로

» SFR 기반 장주기 소형원자로

- SALUS [Small, Advanced, Long-cycled and Ultimate Safe SFR]
- SFR원형로 설계에 기반한 spin-off 기술 개발
- 발전로 방식의 장주기 SFR 소형원자로

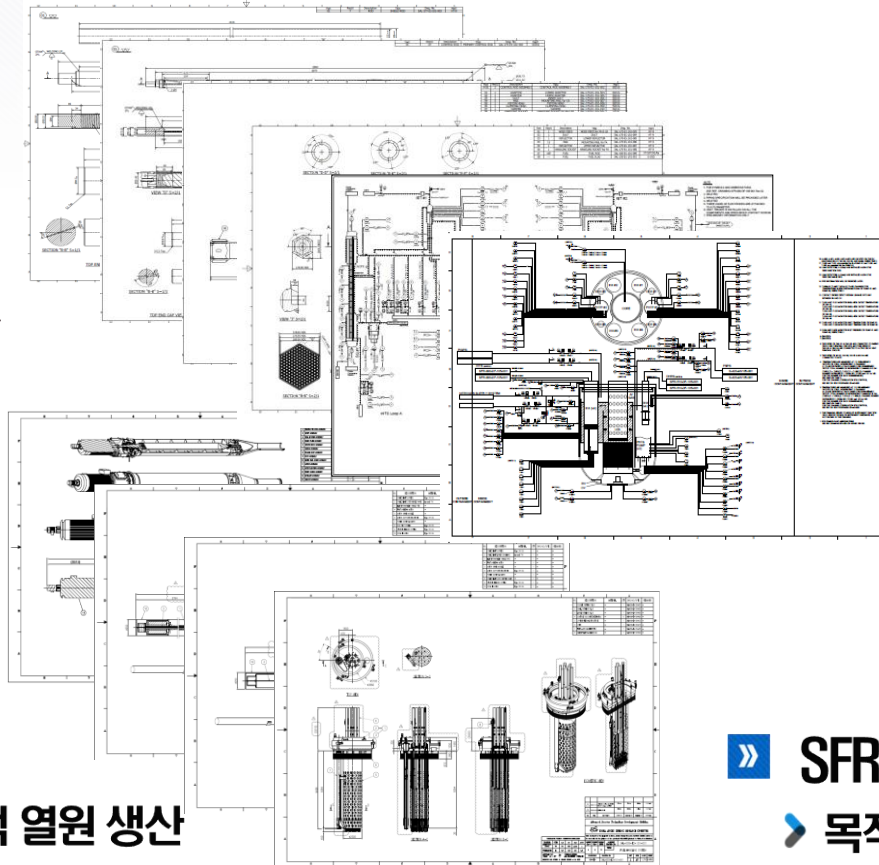
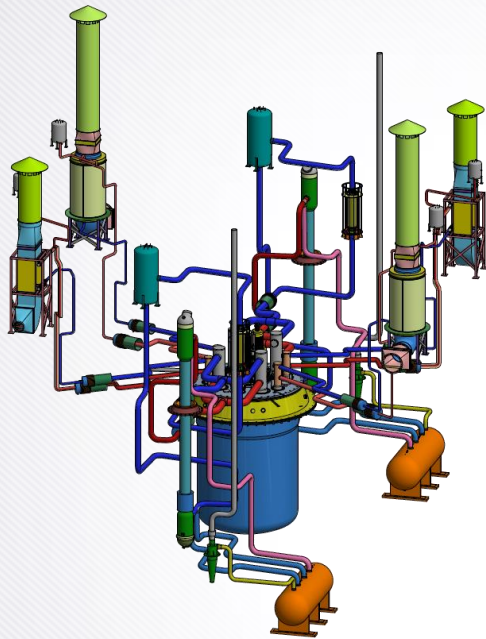
» SALUS Design specification

- 풀(pool)형 소듐냉각고속로
- 전기출력 : 100 MWe
- 재장전주기 : ~ 20-year
- Net plant 효율 : ~ 37.4%
- 노심 입/출력 온도 : 360/510 °C
- FMS 피복관의 금속연료(U-10%Zr, U-235 20wt.%)
- 동력변환 : 과열증기 Rankine 사이클
- 증기발생기 : 직전열관 관류형 열교환기
- 자연순환에 의한 Long-term cooling
- 잔열제거계통 : 능동형 2-train + 피동형 2-train



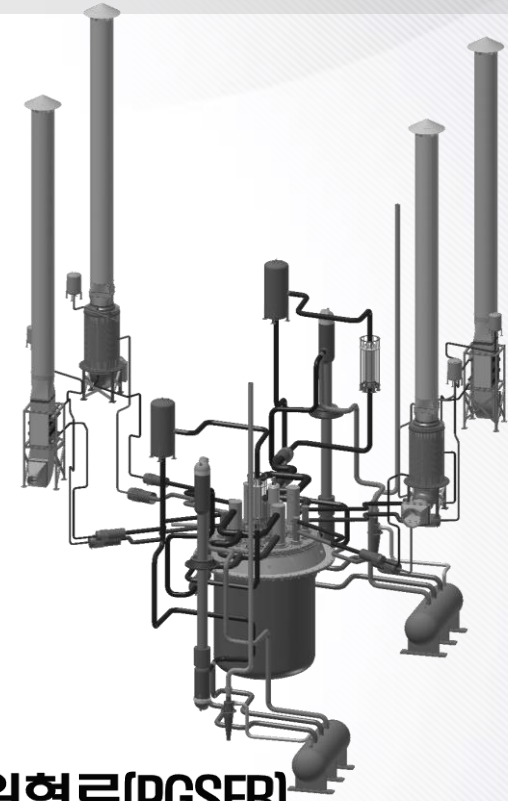
[SALUS-100 NSSS 구성도]

3.0 SALUS vs PGSFR 비교



» SALUS-100

- ▶ 목적: 발전 및 다목적 열원 생산
- ▶ 주기길이: ~20년
- ▶ 출구온도: 510°C [장주기 안전성]
- ▶ NSSS 변경 계통 집중 설계
- ▶ 핵연료/피복관 조사시험: 10 at% [장주기 조사시험]



» SFR 원형로(PGSFR)

- ▶ 목적: U 노심 및 TRU 집합체 연소자료 획득
- ▶ 주기길이: 12개월
- ▶ 출구온도: 545 °C [연소효율 증강]
- ▶ NSSS 및 BOP 설계
- ▶ 핵연료/피복관 조사시험: 7 at%

3.1 핵연료 및 노심 개발

» 연구목표

▶ 고속로 기반 선진 소형원자로 장주기 노심 및 금속연료 설계

- U-235 20wt% 장주기 금속연료 핵연료봉/집합체 및 장주기(~20년) 소형원자로 노심 개념설계
- 장주기 금속연료 10at% 연소도 성능 검증

» 주요 연구내용

▶ U-235 20wt%의 저농축 금속연료 핵연료봉/집합체 개념설계안 도출

- 피복관 변형률 1% 미만 및 누적손상분율 0.05 미만 등 금속연료봉 설계제한치 만족 장주기용 핵연료봉 설계/성능평가 및 설계도면 확보
- 집합체 4종(핵/제어/반사/차폐)별 설계 제원(덕트, 취급소켓, 노즈피스 등) 설정/건전성평가 및 설계도면 확보

▶ ~20년 핵연료 교환주기의 고속로 기반 소형원자로 노심 개념설계안 도출

- 3종의 농축도 분할 노심설계안으로 ~20년 핵연료 교환주기 달성
- 몬테칼로 방법론 기반 불확도 평가 완료 및 노심 내재적 안전성과 1\$ 이상의 충분한 정지여유도 확보

▶ 10 at% 연소도의 금속연료 성능 검증 자료 확보

- 장주기 핵연료봉 검증용 고연소도 (10 at%) 금속연료 조사 시험자료 확보
- 조사이력 분석(선출력, 연소도, 피복관 온도) 및 건전성 평가 완료 및 조사연료봉 비파괴 조사시험 자료 확보

3.1 핵연료 및 노심 개발

» 연구목표

- ▶ 금속연료 핵연료봉/집합체 개념설계
- ▶ 장주기 SFR 노심 개념 설계
- ▶ 고연소도 금속연료봉 조사시험 (10 at%)

» 장주기 금속연료봉 개념설계 및 성능평가

- ▶ 금속 핵연료봉 성능평가 설계기준 및 평가 방법론 설정
 - 설계기준: CDF < 0.05, 변형률 < 1%, 연료심 최대온도 < 1,237°C
- ▶ 노심 핵설계/열유체 설계 결과 반영 장주기 핵연료 건전성 확인
 - 장주기 연소 조건 고려 노심연계 핵연료 제원 변경 및 건전성 확보

» 장주기 핵연료/비핵연료 집합체 개념설계

- ▶ 집합체 4종(핵연료/제어/반사/차폐) 제원 설정 및 설계도면 생산
 - 집합체 당 장전봉 개수, 피복관 두께/재질, 구조부품 등 선정
- ▶ 집합체 구조 부품 건전성 및 안전계수 평가
 - 보수적 하중에 대한 응력안전계수 설계기준 만족 확인
 - 제어봉집합체 낙하시간 및 낙하 충격 평가로 건전성 확인

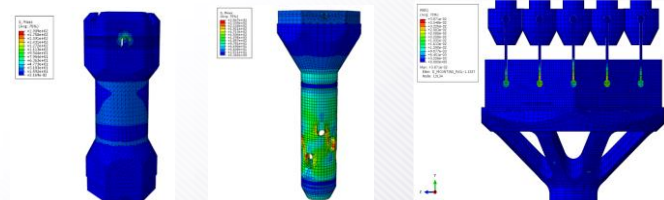
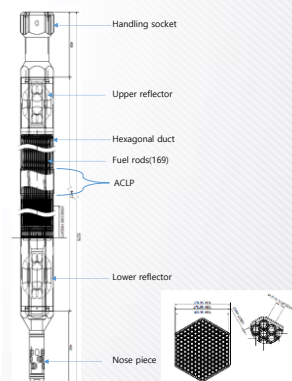
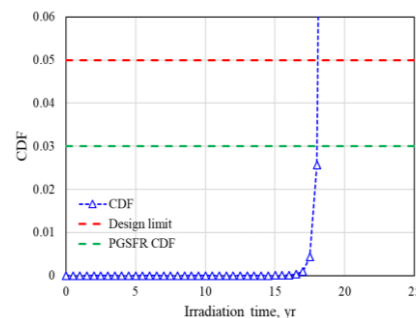
» 해외 사전설계검토 핵연료 분야 입력 작성

- ▶ 캐나다 VDR Phase 1 및 IAEA TSR 대상 핵연료 관련 문서 작성 및 대응

[연료봉 제원 및 연소조건]

Core		Inner Core (IC), Middle Core (MC), Outer Core (OC)
Fuel slug	Material	U-10Zr (wt.%)
	U-235 enrichment, wt.%	IC: 12.8 (z=0~35 cm), 8.7 (z=35~128 cm), 12.8 (z=128~163 cm) MC: 12.8, OC: 19.0
	Density, g/cm ³	15.9
Cladding	Material	FC92
Geometry	Fuel slug diameter (length), mm	8.94(1500)
	Cladding OD (thickness), mm	11.927(0.8)
	Cladding ID, mm	10.327
	Smear density, %	75.0
	Plenum length, mm (including sodium height)	2000
	Sodium height, mm	25
	Initial plenum to fuel volume ratio ¹⁾	1.76
	Fuel pin pitch, mm	12.877
Coolant	Material	Sodium
	Inlet/outlet temperature, °C	360/510
Power and flux	Max. peak linear power, W/cm	IC: 135.3, MC: 126.1, OC: 147.8
	Max. peak fast neutron flux, ×10 ¹⁵ /cm ² ·sec	IC: 0.733, MC: 0.658, OC: 0.482
EFPD		7300(20 yr)
Max. peak burnup, at. %		IC: 10.2, MC: 10.7, OC: 10.9
Max. peak fast neutron fluence, ×10 ²² /cm ²		IC: 34.8, MC: 35.5, OC: 28.1
Max. peak cladding mid-wall temp., °C		IC: 573.3, MC: 566.4, OC: 573.1
Time-avg. peak cladding mid-wall temp., °C		IC: 544.8 MC: 564.2, OC: 548.9

[핵연료집합체 및 연료봉 성능평가]



[집합체 구조 부품 건전성 성능평가]

3.1 핵연료 및 노심 개발

» 연구목표

- ▶ 금속연료 핵연료봉/집합체 개념설계
- ▶ 장주기 SFR 노심 개념 설계
- ▶ 고연소도 금속연료봉 조사시험 (10 at%)

» 20년 핵연료교환주기의 장주기 SFR 노심 개념설계

- ▶ 설계개선을 통한 모든 설계요건 만족 노심 설계안 도출
 - 내부/중간/외부 노심 농축도 분할, 전노심 CDF 기준 유량 평탄화, 등
- ▶ 전산코드 불확도 평가 및 불확도 포함 노심 핵특성 인자 생산
 - 71개 SFR 노물리실험 기반 전산코드 통계적 불확도 평가 완료

» SALUS-100 NSSS 예비 차폐설계

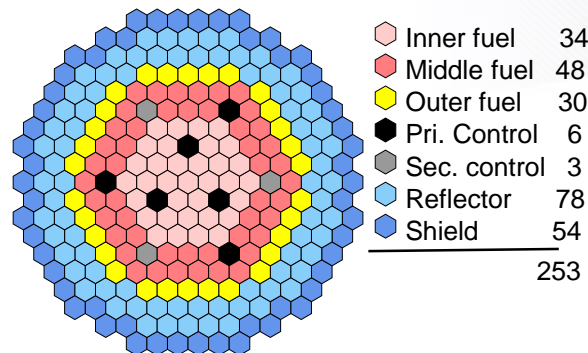
- ▶ 보수적 차폐설계 방법론 구축 및 적용
- ▶ S/G 격실 내 방사선 방호 및 노내 주요기기 중성자 손상 평가

» 결정론적 방법 전산코드 및 MC 전산코드 연계체계 구축

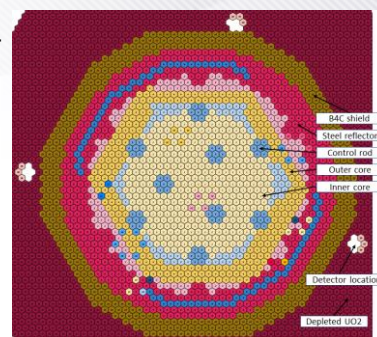
- ▶ 설계/계산 효율 고려 2종의 전산코드 동시 적용
 - 결정론적(변수해석, 예비 계산) vs MC(상세 설계, 연계자료 생산)

» 해외 사전설계검토 노심 분야 입력 작성

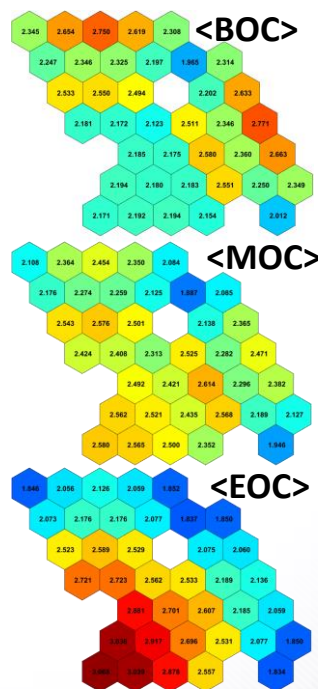
- ▶ 캐나다 VDR Phase 1 및 IAEA TSR 대상 노심 관련 문서 작성 및 대응



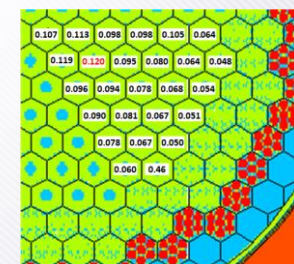
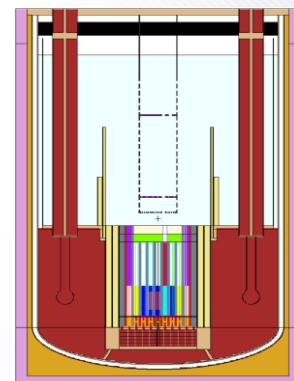
[SALUS 노심 구성안]



[BFS-84 노물리실험 구성안]



[연소시점별 출력분포]



[NSSS MCNP 차폐모델(상) 및 격자판 DPA(하)]

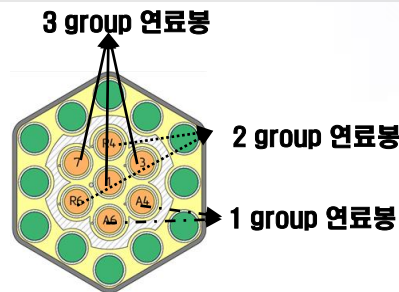
3.1 핵연료 및 노심 개발

» 연구목표

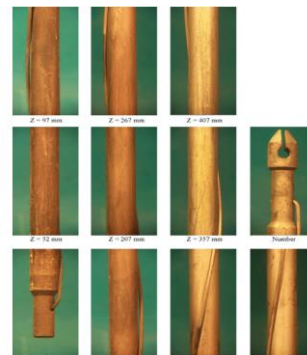
- ▶ 금속연료 핵연료봉/집합체 개념설계
- ▶ 장주기 SFR 노심 개념 설계
- ▶ 고연소도 금속연료봉 조사시험 (10 at%)

» 고연소도 금속연료봉 조사시험

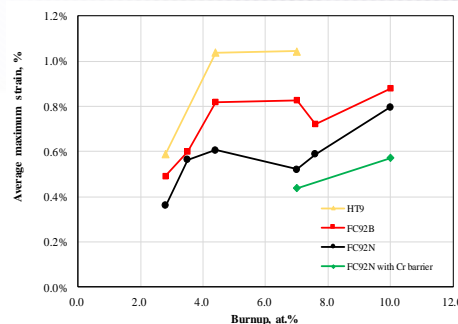
- ▶ BOR-60 고속실험로 금속연료봉 조사시험 수행 완료
 - 환경: 고온(피복관 615°C, 냉각재 390°C), 침투 선출력(310 W/cm)
 - 1그룹(2봉): (22.06~24.02 조사) 3.4 at% 연소도 달성
 - 2그룹(2봉): (18.03~24.02 조사) 7.6 at% 연소도 달성
 - 3그룹(3봉): (16.08~24.02 조사) 10.0 at% 연소도 달성
- ▶ 실험 DB 기반 고연소도 금속연료봉 성능 검증 및 전산코드 개선
 - 3그룹 조사봉 성능평가: 핵연료 설계기준 모두 만족 [CDF < 0.05, 변형률 < 1%, 최대온도 < 1,237°C]
 - 조사 연료봉 비파괴 검사(Profilometry, 감마스캐닝)분석
 - 핵연료봉 성능평가 전산코드 LIFE-METAL 모델 개선 [FCMI, 연료심 팽윤, Creep 변형식 등]



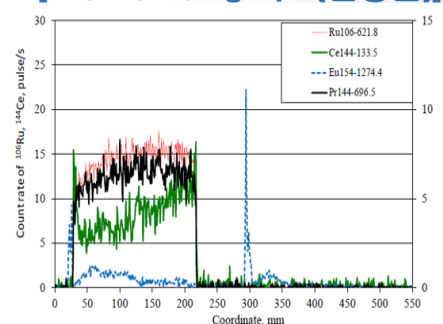
[조사시험 리그 내 연료봉 배치]



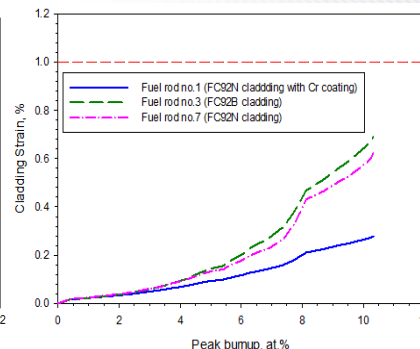
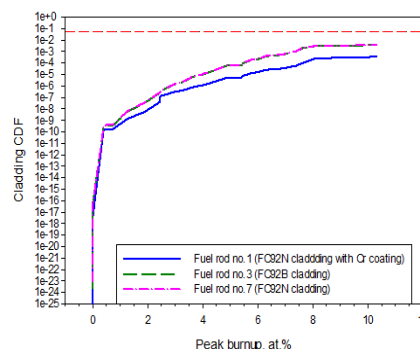
[연료봉 육안검사]



[Profilometry 비교(변형률)]



[감마스캐닝 비교(선출력)]



[10at.% 조사 연료봉 성능평가: [좌] CDF [우] 변형률]

3.2 계통설계 및 안전성 평가

» 연구목표

- ▶ 장주기 선진 소형원자로 계통개념 개발 및 안전성 평가
 - 장주기 선진 소형원자로 유체계통 기본설계 및 기기 제원 설정
 - 장주기 선진 소형원자로 안전해석 방법론 구축 및 대표사고 안전해석

» 주요 연구내용

- ▶ 장주기 선진 소형원자로 유체계통 기본설계 및 기기 제원 설정
 - 장주기 원자로 운전특성을 고려한 열수송계통 열평형 도출
 - 20년 장주기 노심 설계조건 및 열적 안전여유도 확보하는 노심 열유체 예비설계 도출
 - 열수송 및 안전계통 계통설계요건 및 기기 제원 설정
 - 원자로 열적 설계 성능분석 및 기기 배치 설계적합성 평가
 - 중대사고 대처를 위한 RVCS 설계 및 성능향상방안 성능 검토
- ▶ 장주기 선진 소형원자로 안전해석 방법론 구축 및 대표사고 안전해석
 - 대표사고 안전해석 방법론 설정 및 해석 모델 정합성 평가
 - 설계기준사고(A00, DBA-I&E), 설계확장조건, 중대사고 안전해석

3.2 계통설계 및 안전성 평가

» 연구목표

- 장주기 선진 소형원자로 유체계통 기본설계 및 기기 제원 설정
- 장주기 선진 소형원자로 안전해석 방법론 구축 및 대표사고 안전해석

» 열수송계통 열평형 평가

- 장주기 원자로 운전특성을 고려한 열수송계통 열평형 도출
 - 20년 장주기 운전기간, 피복관 및 원자로 구조물 고온 건전성, 노심출구온도변화에 따른 BOP 조건, 소듐고화 방지 온도 특성 고려

» 열평형 주요인자 설정

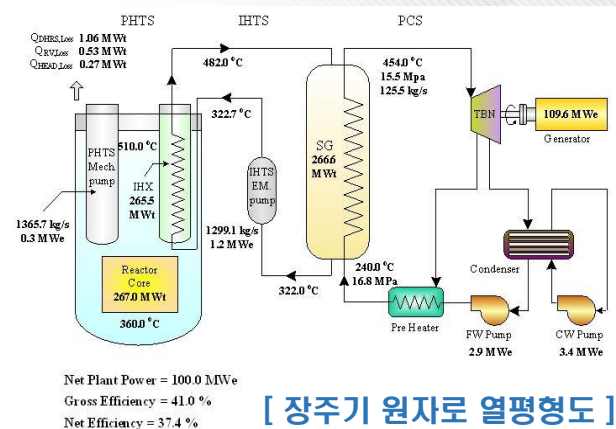
- 노심출력/순효율, 노심 입/출구 온도, SG 입/출구 온도 등

» 노심 열유체 기본설계

- 장주기 노심에 대한 핵연료/비핵연료 포함 전노심 열유체 설계
 - 전노심 유량그룹선정 및 유량할당, 온도분포 해석 및 불확실도 평가, [전노심 유량그룹 및 유량할당] 노심 압력강하를 포함하는 설계자료 생산

» 일차열전달계통 계통설계요건 및 기기 제원 설정

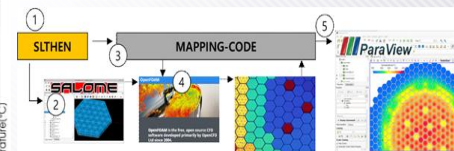
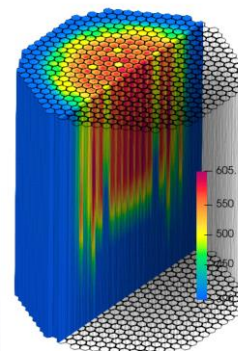
- 일차펌프: 노심 대응 유량, 양정, 회전속도, 효율, 유입구 크기, 이격거리, 잠김깊이, NPSH 여유도, 플라이휠 관성모멘트, 관성서행곡선 도출
- 중간열교환기: 검증실험 결과 활용 범위 내 열적크기 변경, 원자로 운전조건에 따른 소듐 액위 계산 및 수직배치 요건



[장주기 원자로 열평형도]



	#	Flow rate (kg/s)	Total flow (kg/s)	Fraction (%)
1	21	12.989	272.77	20
2	22	12.338	271.44	19.9
3	15	11.887	178.31	13.1
4	6	11.106	66.64	4.9
5	15	10.49	157.35	11.5
6	18	9.715	174.87	12.8
7	9	9.067	81.6	6
8	6	8.154	48.92	3.6
9	78	0.1	7.99	0.6
10	54	1.23	66.15	4.8
11	9	1.36	12.26	0.9
leak			27.31	2
Total	253		1365.6	100



[노심열유체 3차원 가시화]

3.2 계통설계 및 안전성 평가

» 열수송 및 안전계통 계통설계요건 및 기기 제원 설정

▶ 중간열전달계통

- 중간열전달계통 환상유도형펌프의 운전 및 효율 적합성 확인
- 증기발생기 열적크기 및 전열관 설계 변경

▶ 잔열제거계통 및 소듐물반응압력안화계통

- 계통 설계점 도출, 배관배치 및 계통기기에 대한 설계요건
- DHX-배럴간 이격거리 및 열교환기 잠김깊이 등 배치요건

▶ 유체계통 설계문서

- 계통 별 설계요건설정 보고서, 기기설계요건서, I&C 설계요건서
- Flow Diagram 및 P&ID 생산

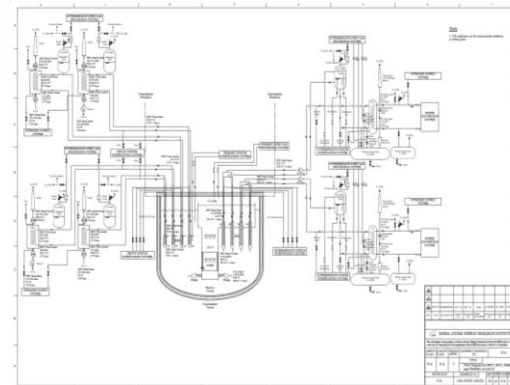
» 원자로 다차원 열유동 해석 및 설계 검토

▶ 원자로 다차원 열유동 해석

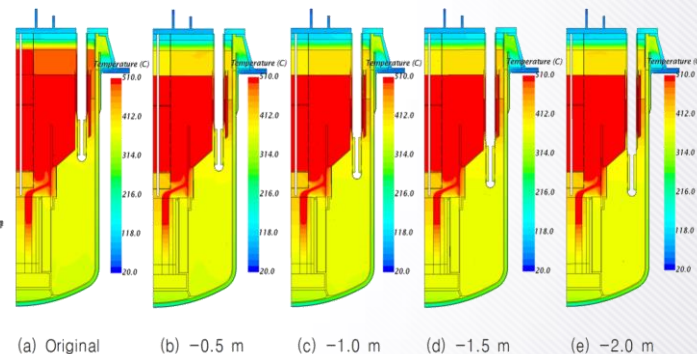
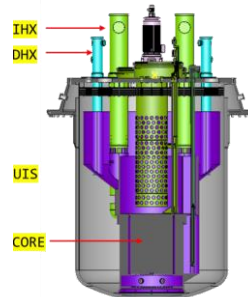
- 원자로헤드접근구역(HAA) 원자로공동냉각계통(RVCS), 일차열전달계통(PHTS) 포함 복합 열전달 해석 수행
- 원자로 일차계통 주요 열유동 정보 확보와 열적 설계 및 성능 확인
- DHX 수직 배치에 따른 열유동 해석 및 냉각 성능 확인

▶ 중대사고 대처용 RVCS 성능평가

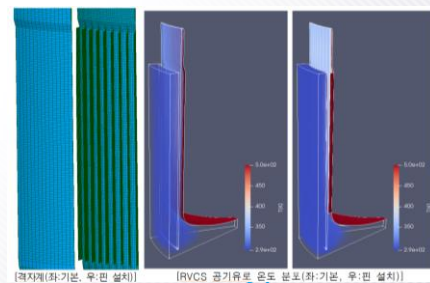
- 자연대류 조건 RVCS 제열성능 확인



[계통 설계요건서[좌] 및 Flow Diagram[우]



[원자로 다차원 열유동 해석]



[RVCS 성능 평가]

3.2 계통설계 및 안전성 평가

연구목표

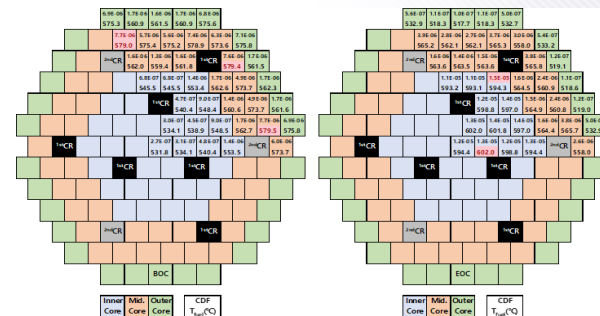
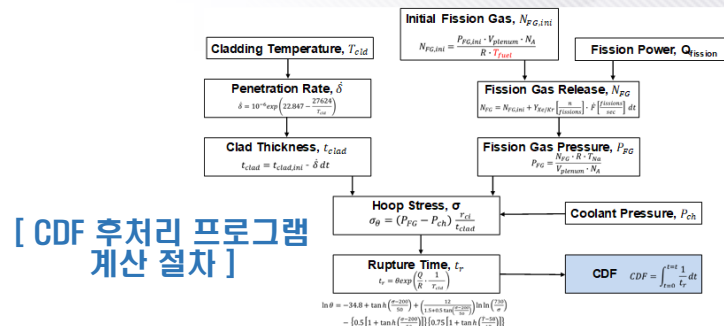
- 장주기 선진 소형원자로 유체계통 기본설계 및 기기제원 설정
- 장주기 선진 소형원자로 안전해석 방법론 구축 및 대표사고 안전해석

안전해석 방법론 구축

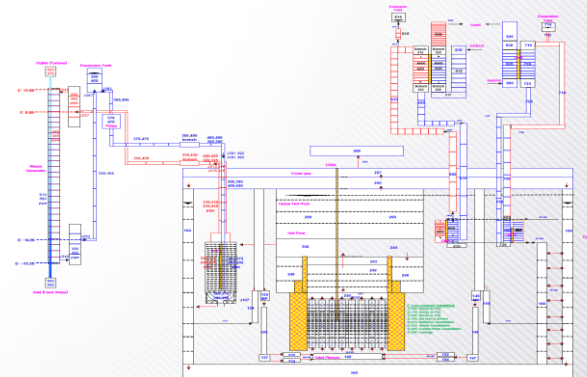
- 누적손상분율(CDF) 계산 방법론 구축
 - 고온수로계수 고려 및 후처리 프로그램 개발로 보수적이며 명확한 체계 구축
- 안전해석 초기조건 계산 자동화 방법론 구축
 - 노심 유량, 급수유량 등 초기조건 도출을 위한 작업을 자동화
- 장주기 노심 보수적인 고온수로 모델링 방법론 구축
 - 장주기 운전동안의 집합체의 출력 및 온도 변화 고려
 - 전노심, 전주기를 포괄할 수 있는 고온수로 모델을 적용한 보수적 방법론 수립

안전해석 정상상태 계산

- 안전해석 설계입력자료 생산
- 일차열전달계통/중간열전달계통 안전해석 모델 개발
 - PHS: 저온풀, 펌프, 노심 입/출구 플레넘, 고온풀, 커버그스 영역으로 모델링
 - IHS: 2개의 독립된 루프로써 각 루프를 IH, 배관, SG, 팽창탱크, 펌프로 모델링
- 잔열제거계통 안전해석 모델 개발
 - 피동잔열제거계통 및 능동잔열제거계통에 대한 노드체계 개발 완료
 - DHX, AHX, RHX의 노드 민감도 분석 수행 및 약 98.4% 이상의 정합성을 확보
- MARS-LMR 정상상태 계산
 - 정상상태 주요 계통변수의 설정값 대비 온도 기준 최대 약 0.1% 수준 오차 확인



[주기별 각 핵연료 집합체 CDF 및 온도 분포]



[SALUS 안전해석 노드 체계]

3.2 계통설계 및 안전성 평가

장주기 원자로 안전해석

예상운전과도, 설계기준사고-1 및 2 안전해석

- 반응도이상, 노심유량상실, 열제거원상실의 각 범주에 초기사건들에 대한 안전해석 수행 완료
- 민감도분석: 초기사건 별 계통변수, 반응도 변수, 단일고장 유형, 노심 출력에 따른 민감도분석으로 가장 제한적인 초기조건 도출
- 2차 정지변수에 대한 확인 계산 및 안전성 평가 완료

설계확장조건 안전해석

- 각 사건 범주의 예상운전과도 대표사고에 대해 정지불능 예상과도상태에 대한 안전해석 수행 완료

중대사고 안전성 분석

- 금속핵연료 시험결과 및 PGSFR 해석결과 기반 중대사고 예비분석 및 보고서 개발

IAEA TSR 유체 및 안전분야 문서 개발

- 유체분야 및 안전분야 문서개발 및 질의 답변서 작성

[안전해석 대표사고]

Group	Initiating Events	Event Frequency
6.2	<u>Reactivity Anomalies</u>	
6.2.1	Control Assembly Withdrawal with Normal Speed	AOO
6.2.8	Control Assembly Withdrawal with Full Speed	DBA Class-1
6.2.13	Seismic Reactivity Insertions-SSE	DBA Class-2
6.3	<u>Loss of Core Flow</u>	
6.3.1	PHTS Pump Failure	AOO
6.3.2	PHTS Pump Pipe Break	DBA Class-2
6.3.3	PHTS Pump Seizure	DBA Class-2
6.4	<u>Loss of Heat Sink</u>	
6.4.1	Failure of IHTS Pump	AOO
6.4.2	Loss of Feedwater	AOO
6.4.3	Loss of Off-site Power	AOO
6.4.4	Turbine Trip	AOO
6.4.5	Small Leakage of SG Tube	DBA Class-1
6.4.6	Feedwater Line Break	DBA Class-1
6.4.7	Inadvertent Actuation of the SWRPRS	DBA Class-1
6.4.8	Large Leakage of SG Tubes	DBA Class-2



[안전해석 방법론 및 안전해석 보고서 발행]

3.3 기계구조설계 및 기술 종합

» 연구목표

- ▶ 고속로 기반 장주기 선진 소형원자로 구조개념 개발 및 기술성 종합 검토
 - 고속로 기반 장주기 선진 소형원자로 고온 기계구조 설계
 - 고속로 기반 선진 소형원자로 해외 사전설계검토 1단계 심사완료 및 2단계 문서 개발
 - ※ 해외 사전설계검토 2단계는 IAEA 기술안전검토로 변경 추진

» 주요 연구내용

- ▶ SFR원형로 설계 기반 장주기 선진 소형원자로 고온 기기 설계
 - 장주기 원자로 핵증기공급계통 구조개념 적합성 검토
 - 장주기 원자로 핵증기공급계통 주요기기 예비설계 및 구조건전성 평가
 - 장주기 원자로 핵증기공급계통 주요기기 정상상태 구조건전성 평가
 - 장주기 핵증기공급계통 주요기기 과도상태 구조건전성 평가
- ▶ 고속로 기반 선진 소형원자로 해외 사전설계검토 심사
 - 선진 소형원자로 해외 사전설계검토 전략 수립
 - 선진 소형원자로 사전설계검토용 캐나다 VDR 1단계 문서 작성 및 사전설계검토 신청
 - 선진 소형원자로 VDR 2단계 문서 체계 구축
 - 선진 소형원자로 IAEA TSR 문서 개발 및 심사 완료

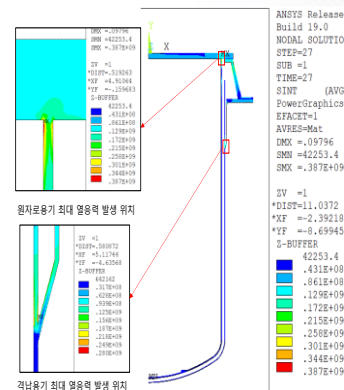
3.3 기계구조설계 및 기술 종합

» 연구목표

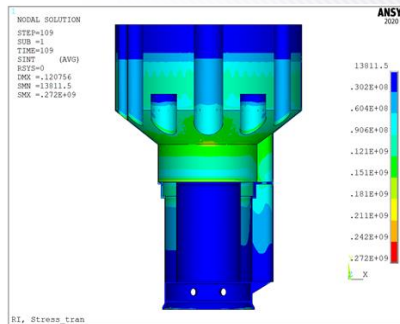
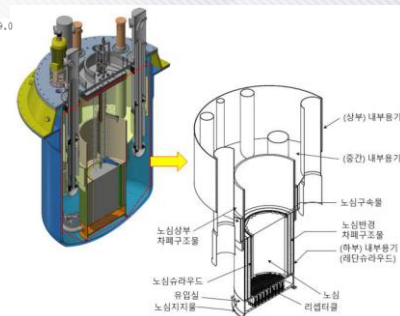
- ▶ SFR원형로 설계 기반 장주기 선진 소형원자로 고온 기기 설계
- ▶ 고속로 기반 선진 소형원자로 해외 사전설계검토

» 원자로 주요 구조물 설계 및 건전성 평가

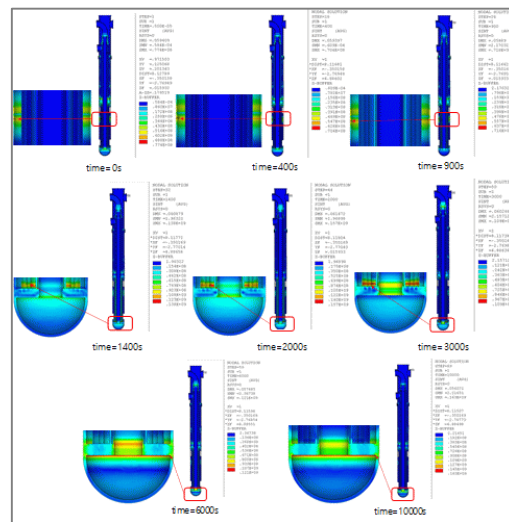
- ▶ 원자로보호구조계통(PES) 구조설계
 - 원자로용기, 격납용기, 원자로헤드, 원자로지지물로 구성
 - 주요설계변수 변화에 따른 열응력 변화 민감도 분석 및 설계 개선
- ▶ 원자로내부구조물 구조설계
 - 내부용기 단순화 및 핵연료집합체 연계를 고려한 리셉터클 설계
- ▶ 중간열전달계통 주요기기 구조설계
 - 중간열전달계통 주요기기(IHX, SG 등) 열제거량 변경에 따른 기기설계 변경
- ▶ 잔열제거계통 주요기기 구조 설계
 - 주요기기(DHX, AHX, AHX) 구조개념 적합성 평가 및 기기 설계
- ▶ 정상운전, 예상운전과도에 대한 구조건전성 평가
 - ASME Sec.III Div5 코드에 따른 Level A, B 조건 구조건전성 평가
 - 구조 취약성 확인된 구조물에 대한 설계개선



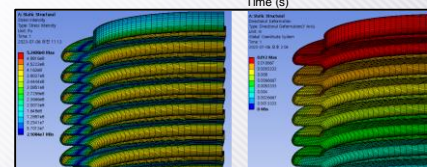
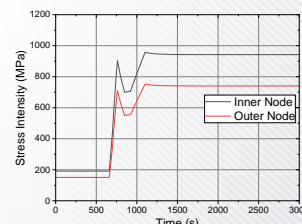
[RES 구조해석]



[RI 구조설계형상 및 구조해석]



[IHX 운전과도구조해석]



[DHX벨로우즈 설계 개선]

3.3 기계구조설계 및 기술 종합

» SALUS -100 원자로건물 개념 도출

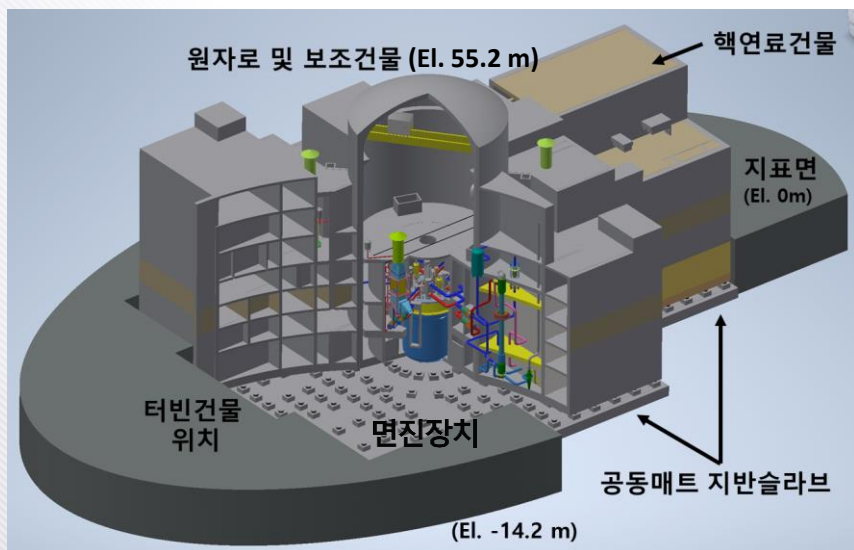
➤ 원자로건물 3D 개념 도출

- 지붕 높이 변경, RV 지지벽 높이 변경, 원자로용기 길이 증가 대응 설계

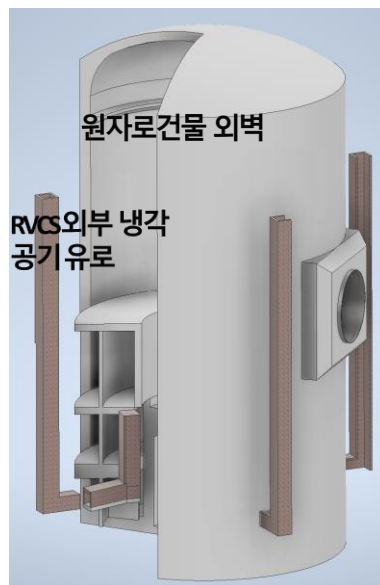
➤ NSSS 배치와 관련한 주요 현안 도출

- ADHRS, FDHRS 굴뚝 높이 변경 사항 수용
- RVCS 외부 냉각공기 유로 -U 형 path 동일하게 적용
- RV 지지구조물, AHX, FHX, SG 등 주요기기 지지층 높이 수용성 확인

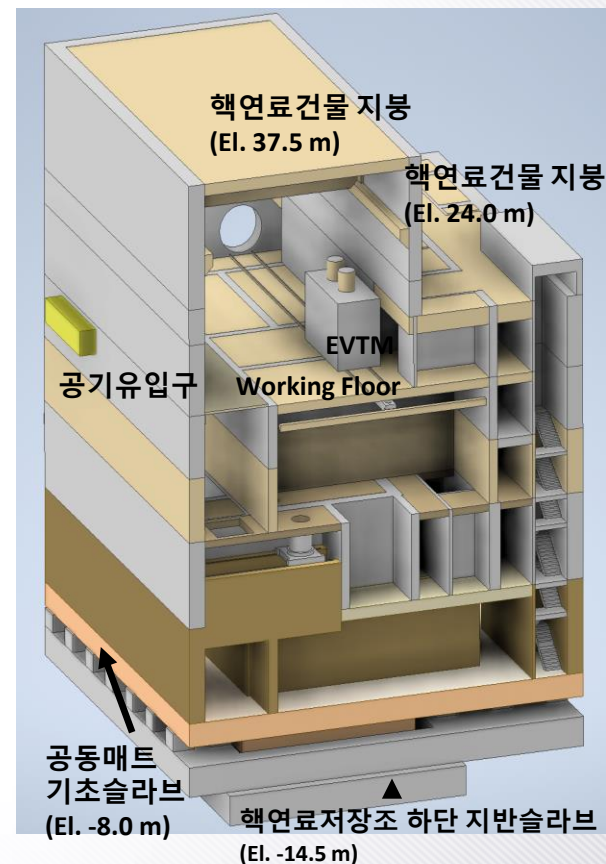
➤ SALUS 핵연료건물 3D 개념 형상화



< SALUS-100 원자로건물 3D 입체 개념 >



< RVCS 외부 냉각공기 유로 >



< 핵연료건물 3D 형상화 >

3.3 기계구조설계 및 기술 종합

» 연구목표

- ▶ SFR원형로 설계 기반 장주기 선진 소형원자로 고온 기기 설계
- ▶ 고속로 기반 선진 소형원자로 해외 사전설계검토

» 해외 사전설계검토로 캐나다 VDR 1단계 준비

- ▶ 진출 전략 수립 및 VDR 중점검토분야 분석
- ▶ CNSC와 협의 및 검토용 보고서 개발
 - CNSC와 화상회의(21. 07, 21. 11) 및 계약 논의(~22)
 - VDR 1단계 검토용 보고서 개발 완료(22. 12)
- ▶ CNSC의 VDR 우선순위 정책 결정 (22. 12) 으로 신청 무산
 - SALUS-100은 해당 범주에 속하지 못함을 통지 받음

» 해외 사전설계검토로 IAEA TSR로 변경 추진

- ▶ IAEA 안전성 평가 팀과 추진 배경 및 향후 일정 등에 대한 사전 협의 진행
- ▶ 신청절차: KAERI ⇒ 과기부 ⇒ 외교부 ⇒ IAEA 대표부 ⇒ IAEA TSR 담당
- ▶ IAEA 회신 서명본 접수, 서약서신 교신, 업무 계약

▶ VDR 우선순위 지정 (Prioritization of pre-licensing VDR)

- 공급업체와 유틸리티 또는 신청자 간의 입증된 파트너십/관계 입증
- 공급업체가 신청서를 제출한 주정부 선정 절차가 진행 중임을 제시 또는 입증
- 캐나다 정부가 주정부 이해관계자와 협의하여 VDR이 국익에 부합한다는 명확한 신호 제시

▶ IAEA 기술안전검토 (Technical Safety Review)

- 원자로 설계에 대한 제3자 독립 검토를 통해 종합적 안전성을 평가하고 안전성 강화 및 개선을 위한 권고사항 등을 제공
- 국제적으로 통용되는 IAEA 안전기준에 근거하여 기존 상용 원전 또는 개발 중인 선진원자로의 설계 안전성 강화 지원
- 개발 및 이행 단계 별로 서비스를 신청한 회원국의 요구에 따라 기술안전성 종합 검토 수행

3.3 기계구조설계 및 기술 종합 [7/7]

» IAEA TSR 검토용 문서 개발

▶ TSR 준비

- 준비회의: 검토용 보고서 준비 상태 점검 및 수출 통제 지침 확정
- 착수회의: SALUS-100 개발 현황 및 설계 특성에 대한 IAEA 전문가 숙지

▶ TSR 검토용 보고서 작성 및 제출

- 이전 단계에서 개발된 VDR 보고서를 토대로 IAEA 요건에 맞게 Chapter 및 내용 재편

» IAEA TSR 심사 대응

▶ IAEA 검토의견 및 KAERI 대응

- 6인 전문가의 검토의견에 대한 대응(Response) 작성 및 의견 송부
- 종료회의에서 최종논의

▶ TSR 검토대응 완료

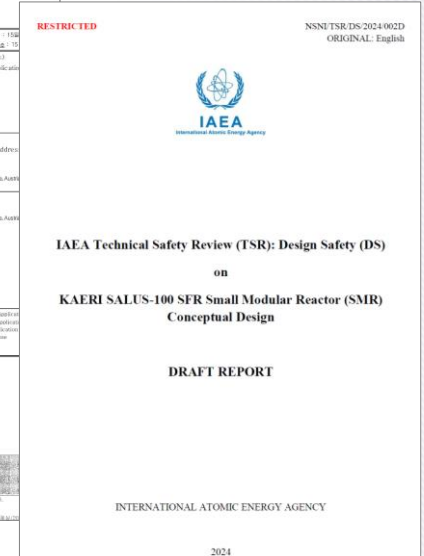
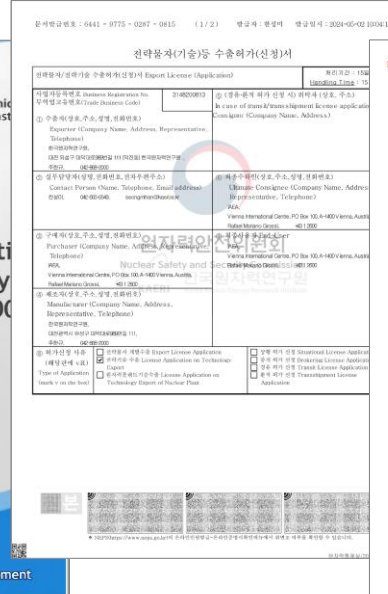
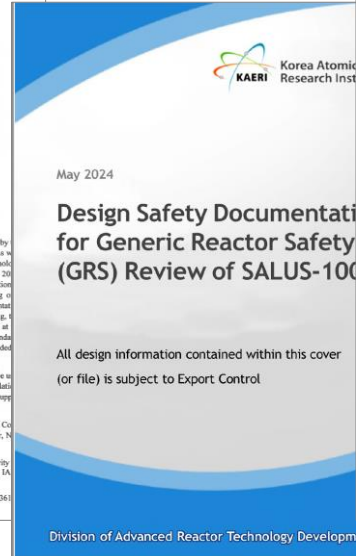
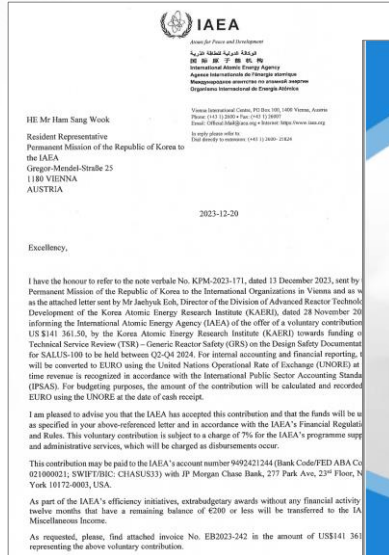
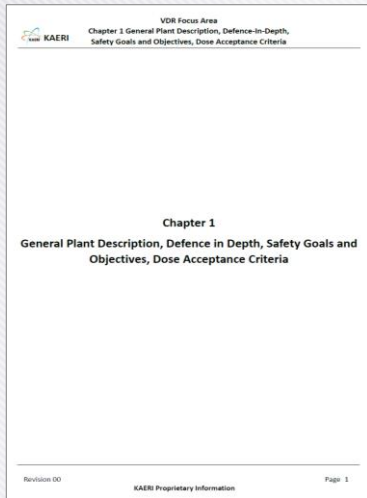
- IAEA 측이 작성한 TSR 보고서 초안에 대한 검토의견 제시
- 최종보고서 접수 및 TSR 완료 [25.02]

[TSR에서 제시된 현안 및 대응/향후 계획]

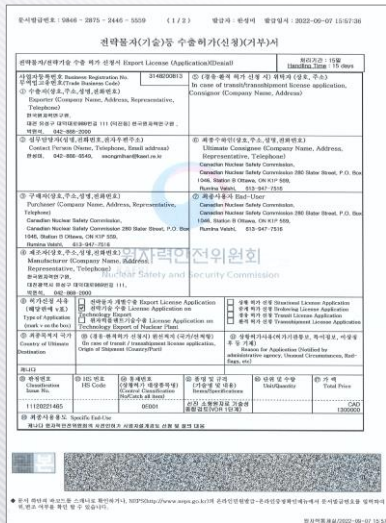
대상	현안	대응/향후 계획
계통설계	- 질소가스계통 설계 미비	- 질소가스계통 용량, 성능 요건 등 설계 내용 포함 필요
안전설계 접근법	- Practically Eliminated 접근법 제시 필요	- IAEA SSR 2/1 에서 제시하는 PE 접근법 포함 - PE 목록 및 입증방안 수립 필요
핵연료 설계	- BOR-60 연료봉 파괴 조사후 시험 필요	- BOR-60 조사연료봉에 대한 파괴조사후 시험 기획 필요
계측제어	- 운전한계 및 조건 정의 필요	- 수명기간 동안의 예상과도에 대해 감시변수 및 발생빈도 결정 필요
계통설계	- RV 손상방지 미비 - 공기혼입 방지 보완	- RV, CV 압력차에 의한 RV 손상방지장치 설치 보완 필요 - 커버그스내 공기 감지계통 추가 필요
안전해석	- 사고 목록 및 도출 방법론 - PSA 미수행	- 향후 설계 구체화 단계에서 PSA에 기반한 사고목록 상세화 필요 - Level 2 PSA 중대사고 해석체계 구축 필요
선원항 평가	- 선원항 평가 방법론	- 선원항 평가 방법론 수립 및 구체화 필요
중대사고	- 중대사고 시나리오 및 해석	- 중대사고로 귀결되는 시나리오를 DEC-II로 정의하되 PE는 제외 필요 - 해석코드 체계 필요. 재임계 방지 및 냉각 유지 평가 필요
해체	방사선방호 및 방사성 폐기물 관리관점의해체	- 해체에 대한 설계 단계별 고려 필요 - 개념설계에서는 예비 해체계획 수립 필요

3.4 주요 성과

[IAEA TSR 수락서신, 검토용 문서, 수출허가서, TSR 검토보고서 [左->右]]



[VDR 1단계 심사용 문서(上) 및 수출허가서(下)]



[IAEA TSR 준비회의(左), TSR 검토회의(中), TSR 검토보고서(右)]

4. 성과 활용 방안

❖ 성과활용

- ✓ 저농축 장주기 금속핵연료 및 노심 설계안과 핵연료봉 건전성 입증 조사시험 자료는 신규 사업화 추진 중인 가칭 SALUS+ 원자로에 활용 가능하며, 세계시장 대상 우리나라 원자로의 수출 경쟁력 강화에 활용
- ✓ 미국 외 유일한 고연소도 금속연료봉 조사시험 데이터는 장주기 핵연료 건전성 입증 인허가 핵심 자료
- ✓ 非경수형 소형원자로의 경쟁력 있는 계통 및 기기 핵심 기술 확보와 상세 설계를 위한 기반기술로 활용
- ✓ 안전성 분석 자료는 SFR 기반 장주기 원자로의 안전성을 입증하는 자료로 추후 인허가에 활용
- ✓ 해외 사전설계검토 문서 개발 및 심사 대응은 非경수형 소형원자로 인허가를 위한 기술기반 확보

❖ 기대효과

- ✓ SALUS 노심은 20 wt%이하 농축도의 우라늄 금속핵연료 적용으로 핵비확산금지 조약 부합 및 장주기 핵연료교체 주기 채택으로 **사용후핵연료 최소화** 등 해외시장 진출시 유리한 위치 확보
- ✓ 사고시 출력 자동 저감 가능한 내재적 안전성 확보 및 **고연소도 핵연료 조사시험 자료에 기초한 안전한 핵연료봉 성능 검증자료**로 후쿠시마 원전사고 이후 원자로에 대한 대중의 우려 불식 및 PA 향상 기대
- ✓ 해외 사전설계검토를 통하여 국내에서 기 확보하고 있는 **핵심기술 (계통/구조물/기기 설계기술, 전산코드 및 실험자료)**을 검토하여 **추후 전략 기술화** 가능
- ✓ SFR 기반 장주기 원자로의 설계 및 안전해석 기술에 대한 **해외 사전설계검토 통해 국제표준과의 부합성을 확인**하였으며, 기술의 확산과 해외 수출을 위한 기반 기술로 활용 될 것으로 기대됨

4. 성과 활용 방안 (계획 안)

» 사업명 : (가칭) **민관합작 선진원자로 수출기반 구축 사업-분산전원용 장주기 SFR 개발**

» 사업 개요

- » (목적) 민간기업 공동 참여를 통한 SFR기반 차세대 원자로 개발 및 상용화 기반 구축
- » (전문기관/수행주체) 한국연구재단/출연연 (50%), 산업체 (50%)
- » (기간 & 예산) 미정

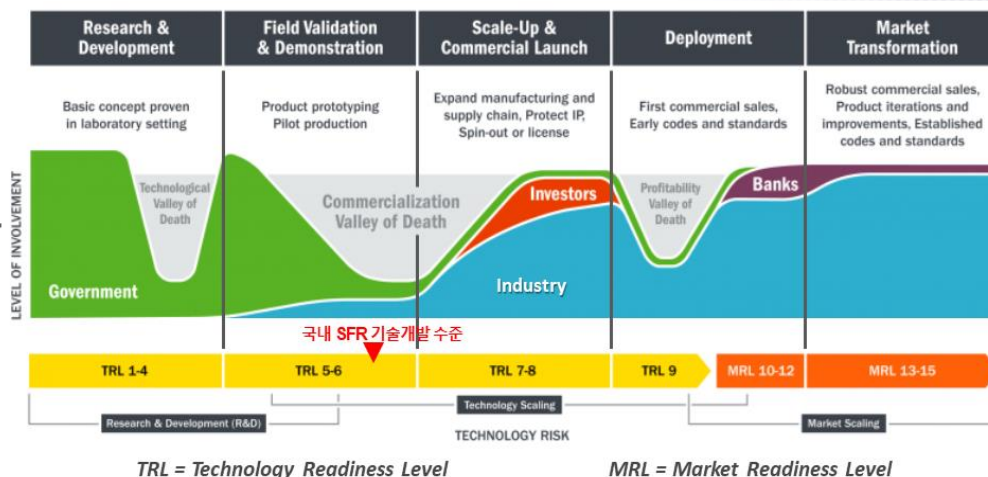
» 사업 목표

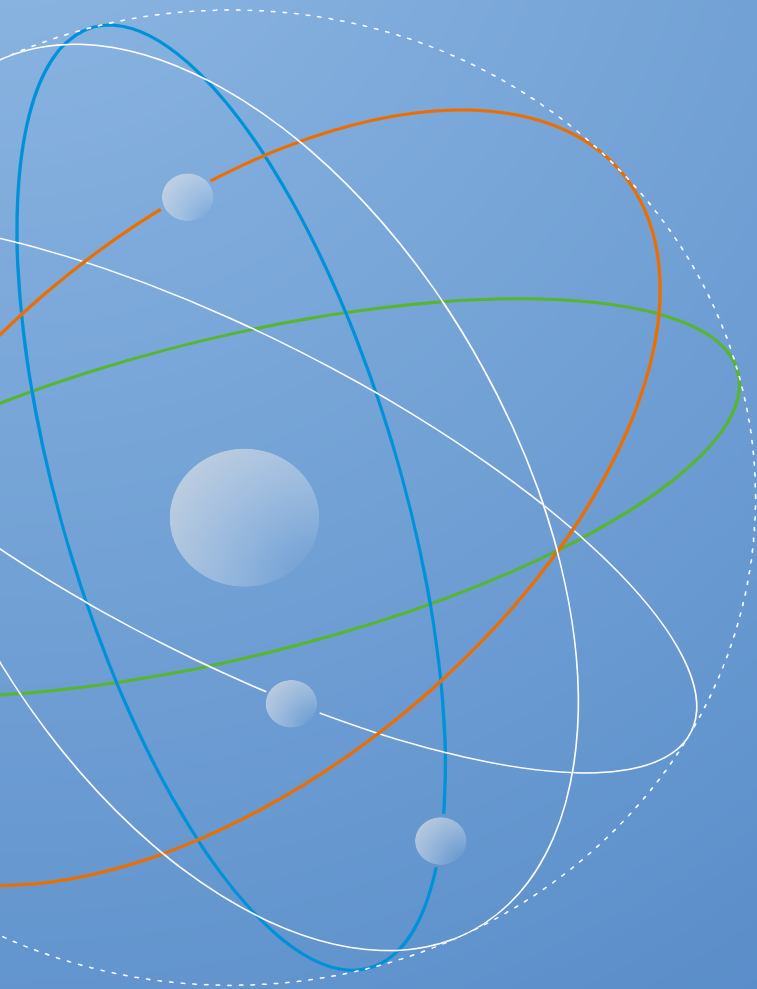
- » 既 확보 기술역량 활용 및 민관합작 SFR 기반 소형원자로 개발
- » SFR 실용화 기반 구축 및 상용화 목표 수출경쟁력 강화

» 사업 특징

- » 원자력 산업의 특성상 초기에는 정부주도로 개발되지만 최종 실증 및 상용화를 위해서는 과도기적으로 **정부와 민간의 공동개발** 과정 필요
- » 美에너지부(DOE) 선진원자로 실증프로그램(ARDP) 사업과 유사한 방식

» 참여 예상 민간기업 : 미정





더 나은 세상을 위한 원자력기술
국민과 세계가 지지하는 한국원자력연구원



감사합니다.



한국원자력연구원
Korea Atomic Energy Research Institute