

더 나은 세상을 위한 원자력기술
국민과 세계가 지지하는 한국원자력연구원



민관합작 원자로 설계 사업

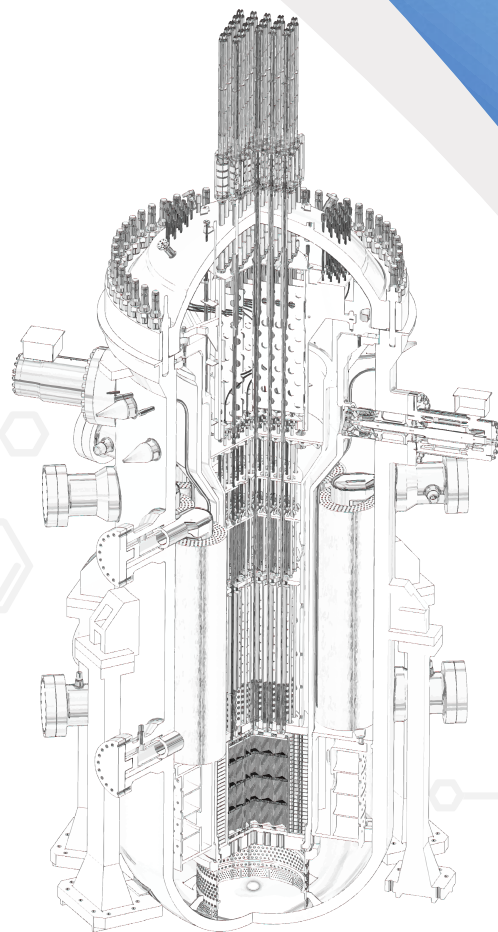
- SFR의 미래 -

KNS Workshop
2025.05.21. 제주 컨벤션센터

이 제 환



한국원자력연구원
Korea Atomic Energy Research Institute



더 나은 세상을 위한 원자력기술
국민과 세계가 지지하는 한국원자력연구원



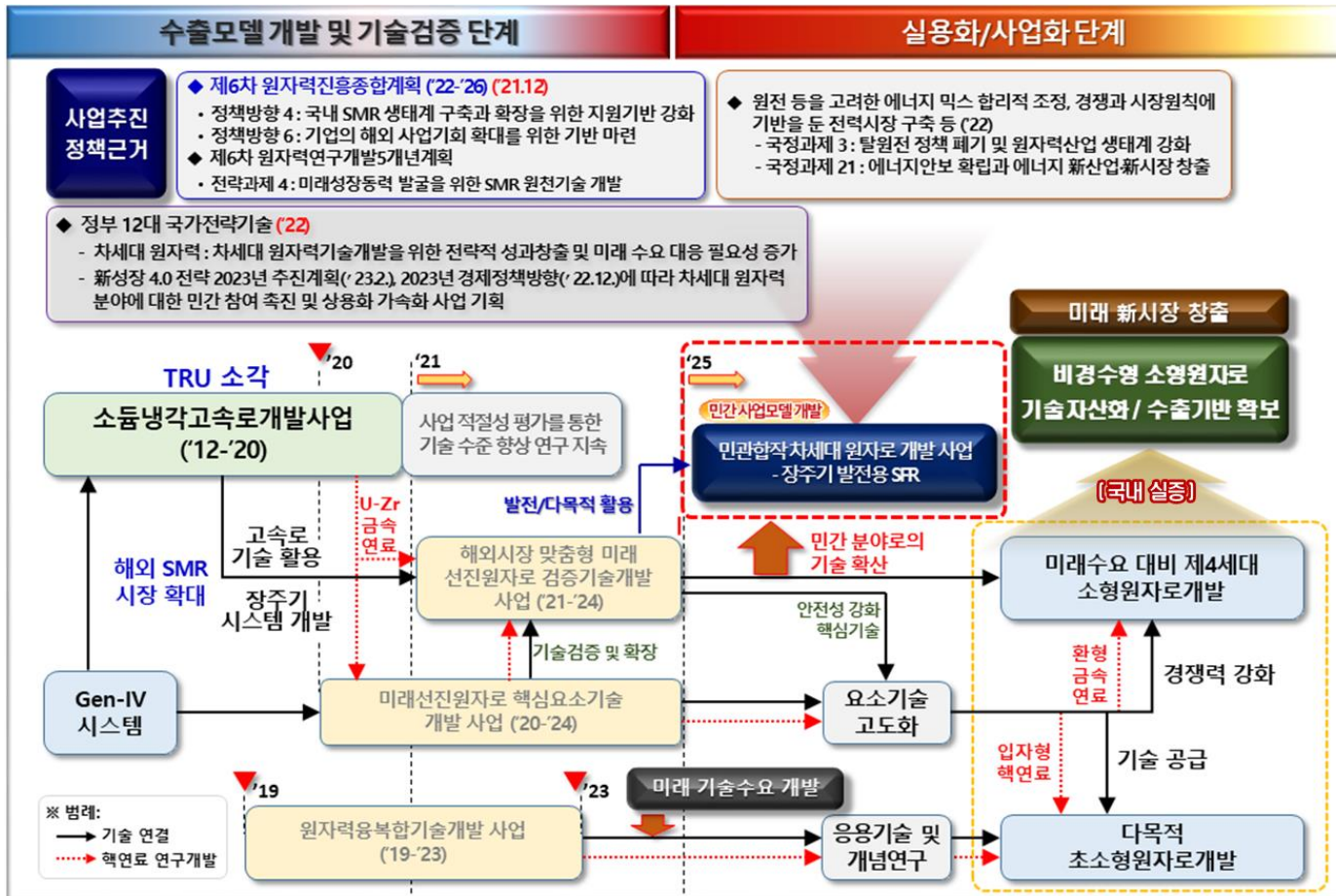
- 01 민관합작 사업 배경
- 02 민관합작 사업 내용
- 03 성공 가능성 및 인허가 전략
- 04 결론 및 제언

CONTENTS

국내 SFR 개발 방향

■ 민관합작 사업 플랫폼 활용, 장주기 발전용 SFR 추진

- (정부) 리스크 포함 초기 연구개발 단계 지원에 집중, (민간) 혁신을 통한 상용화 촉진 역할
- 정부는 공공이익 극대화 방향으로 민간으로의 기술이전을 추진하는 공공-민간 파트너십 강화 강조



SALUS*-100

- ▶ Integrated pool-type SFR
- ▶ Electric output: 100 MWe (267 MWt)
- ▶ Metallic alloy fuel & FC92 cladding
- ▶ U-10%Zr with less than 20 wt.% U-235 enrichment
- ▶ Refueling cycle: ~ 20-year
- ▶ Rx. Core Inlet/Outlet Temp.: 360/510 °C
- ▶ Net plant efficiency: 37.4% (tentative)
- ▶ Power conversion: Superheated steam Rankine Cycle
- ▶ Steam generator: Straight-tube, shell-and-tube type
- ▶ Long-term cooling with natural circulation
- ▶ DHRS: Active DHRS(2-train) + Passive DHRS(2-train)

* Small, Advanced, Long-cycled and Ultimate Safe SFR

국내 시장 수요

재생에너지의 간헐성을 효과적으로 보완하는 현실적인 분산 전원

추진배경 AI 데이터센터 및 반도체 등 증가하는 전력 수요에 대응하여 재생에너지와 함께 할 수 있는 현실적인 에너지원 확보

① 폭발적으로 증가하는 전력 수요

- AI를 위한 데이터센터 구축 계획 증가
→ 현 147개, 전력수요 1,762MW
→ '29년까지 신규 732개, 49,397MW 전망
- 지역 편중된 수요
→ 전력수요 70% 수도권 집중, '29년 80% 예상

② 재생에너지 확대에 의한 간헐성

- 늘어나는 재생에너지의 간헐성 폭 증가
→ 재생에너지와의 효율적이고 효과적인 결합을 통한 분산 전원 필요

③ 현실적인 분산 전원 필요성

- 전력망 구조상 대형원전으로부터의 송전 한계
→ 송전망 이슈로 인해 수요 인접 부지에 위치할 수 있는 SMR이 필요함

추진내용 수요 변동에 즉각적으로 반응하고 급격한 부하 추종이 가능한 SMR 개발

- ① 데이터센터 전력사용 패턴을 고려할 때 원자로 출력의 급격한 감/증발 요구 → SFR은 경사변동폭 70% 이상, 출력변동률 5%/min 이상 성능 확보
- ② 사용후핵연료 발생량 및 방사능 최소화 필요성 → SFR은 고속중성자 장점을 활용하여 장주기 설계를 통해 경수형 SMR 대비 약 38% 수준으로 최소화
- ③ 재생에너지의 간헐성을 보완할 수 있는 유연성 → SFR은 우수한 자체제어성과 함께 고온대기운전이 필요없어서 발전소의 On/Off 운전 가능
- ④ 부하 변동 시 구조물 온도 변화로 인한 피로손상 가능성 여부 → SFR은 부하추종 시 구조물 온도 변화가 없어 반복응력에 의한 피로손상 없음

장주기 SFR의 가능성

- 부하추종 및 기동/정지 운전
- 우수한 자체제어성 기반 빠른 부하변동 가능

특성	경수로	SFR
반응도제어	<ul style="list-style-type: none"> 제어봉 + 봉산 	<ul style="list-style-type: none"> 제어봉 + 유량제어
자체제어성	<ul style="list-style-type: none"> 온도변화 시 반응도궤환이 SFR 대비 상대적으로 작음 출력대유량비 (P/Q) > 1 자체제어성 낮음 	<ul style="list-style-type: none"> 온도변화에 기민한 반응도궤환 특성 출력대유량비 (P/Q) ≒ 1 자체제어성 높음
구조물 온도변화	<ul style="list-style-type: none"> 부하추종 시 구조물 온도변화 有 부하추종 시 반복응력에 의한 피로손상 가능성 	<ul style="list-style-type: none"> 부하추종 시 구조물 온도변화 無 부하추종 시 반복응력에 의한 피로손상 없음
기동/정지운전	<ul style="list-style-type: none"> 봉산 농도 조절 및 제논 제거 위한 고온대기 운전 필요 재생에너지 백업 용도로써 발전소의 on/off 불가능 	<ul style="list-style-type: none"> 봉산 및 제논효과가 없어 고온대기 운전 불필요 고온정지에서 출력운전으로 발전소의 on/off 가능

국내 SFR 기술준비도 (TRL)

기술 항목	기술 수준 TRL	기초연구		실험		시작품		제품화		사업화	
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
		기초 이론실험	실용목적 개념창립	기술개념 검증	기술모델 개발	기술모델 유사환경 검증	시제품 유사환경 검증	시제품 실제환경 검증	상용제품 시험평가	상용제품 생산	사업화
원자로 기술	국외										
	국내										
핵연료 기술	국외										
	국내										
유체계통 기술	국외										
	국내										
기계구조 기술	국외										
	국내										
계측제어 기술	국외										
	국내										
안전해석	국외										
	국내										
소듐취급 기술	국외										
	국내										
금속연료 제조기술	국외										
	국내										

※ 기술수준(TRL): 미국 NASA의 우주개발 프로그램의 기술수준 평가에 사용된 방법을 미국 DOE에서 차세대원자로 개발(NGNP)을 위한 기술수준 검토용으로 재정의

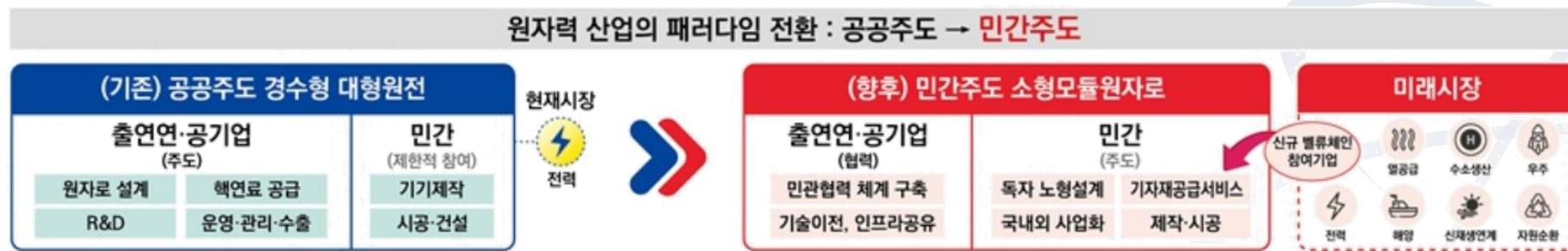
민관합작 차세대원자로 개발 프로젝트

2034년까지 차세대원자로 개발에 2.5조원 투자

- 과기부 ‘한국형 차세대원자로 기술개발 및 실증 프로젝트’ 발표 (‘24.06.04)
 - New-CLEAR 프로젝트 기획 및 후보 노형별 예타 추진 중
- 제4세대 원자로 기반 非경수형 SMR 설계 역량을 가진 민간기업 육성
- 차세대원자로의 신속 상용화를 위해 민-관 합동 기술개발 및 실증까지 유도 & 지원
- 30년대 중반 심화될 글로벌 시장 선점을 통해 기술 부가가치 생산 기대

제4세대 SMR 개발 및 실증 목표 ‘차세대원자로 개발 로드맵’ 수립 (~‘24.12)

- 대상 원자로: SFR, HTGR, MSR



민관합작 SFR 개발 사업

- ❑ 既개발 설계 방법론 및 검증 인프라 활용하여 최적화/고도화 후 인허가 준비
- ❑ 안전성/경제성 향상 新기술 적용으로 先착수한 해외 노형 대비 경쟁력 있는 설계안 제시
- ❑ 민관합작 기술개발로 상호 부족기술 보완 및 미보유 핵심기술의 전략적 확보

민관합작 선진원자로 수출기반 확보 사업 장기 로드맵

연도	'97 - '20	'21 - '24	'25 - '28	'29 - '34	'35 - '45
구분	국가 연구개발 사업		민관합작 선진원자로 개발 사업	민간 주도 SFR 개발 사업	
주관	정부·출연(연)	정부·출연(연)	정부 50% 민간 50%	민간 기업 [출연(연) 기술지원/협력]	
추진 내용	사용후핵연료 소각로 SFR 기술	발전용 장주기 SFR 개념	장주기 선진 SFR 첫 호기 기본설계 완료	<ul style="list-style-type: none"> • 민간 브랜드 SFR 설계 (발전로 / 소각로 / 연구로) • 상세설계 기술 확보 • 건설허가 / 운영허가 신청 가능 	수출 / 사업화 / 상용화

▲ '21
사용후핵연료 처리기술
적정성검토 위원회의결('21)

▲ '25

본사업범위

▲ '29
사업모델 개발 및
수출기반 확보('29)

현대건설

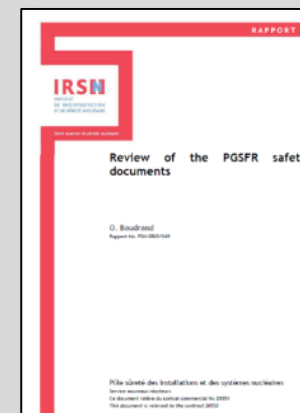
성공 가능성 및 인허가 전략

■ SFR 사전 설계안전성 검토 경험을 바탕으로 충분한 인허가 대응 역량 확보

- 프랑스 IRSN, 캐나다 VDR, IAEA TSR 문서 작성 및 대응 경험 활용
- 국내외 SFR의 설계기준과 지침 등을 종합적으로 준용하여 SFR의 안전해석을 수행하고, 이를 통해 안전성 확인 → SFR 규제경험을 보유한 규제연구기관 독립검토
- SFR 검토 경험이 풍부한 프랑스 규제연구기관(IRSN)의 종합적 설계 검토결과를 통해 기술성 검증
 - PGSFR 일반안전 목표, 구조물, 계통 및 기기 안전등급 분류, 노심 및 핵연료 설계, 보호계통 및 정지계통, 초기사건 목록, 사고해석, 중대사고 등에 대한 독립검토 수행
 - GE PRISM PSID, 미국 NRC의 PRISM 예비안전심사 평가, GIF 소듐냉각고속로 안전설계기준, 미국 NRC의 원전안전심사지침(NUREG-0800) 등 참조

〈 프랑스 IRSN 검토 결과 (예시) 〉

- SFR원형로는 미국 NRC의 일반설계기준(GDC)의 원칙을 준수하며, 일반 안전 목표와 안전성 접근법은 국제적인 컨센서스에 부합
- 구조물, 계통 및 기기의 분류는 IAEA에서 제시한 원칙을 따르고, 분류 방법은 IRSN에서 승인된 프랑스 EPR의 분석 체계와 부합함
- 소듐냉각고속로에 대한 일반설계기준(General Design Criteria) 원칙을 잘 준수
- 내재적인 노심 안전성 향상이라는 설계 목표와 일치하는 뛰어난 핵적 특성 확보
- 반응도제어 계통은 독립성, 다중성 및 다양성의 원칙을 따르며, 예비 신뢰성 결과는 통상적인 요건과 일치함
- 잔열제거계통의 설계 기준은 다음의 근거로 높은 신뢰성을 보장할 수 있는 것으로 확인됨



선진원자로 인허가 체계 구축

[US.NRC] 非경수형원자로 인허가 규제지침 개정 참고

- 선진원자로에 대한 인허가 절차를 합리적으로 개선하기 위해 非경수형원자로 인허가 규제 지침 (Regulatory Guide, RG) 개정 ('20.07)
 - 선진원자로 개발 산업계의 주요 현안인 규제 불확실성 크게 감소 / 인허가 절차 가속화 기대
 - 인허가현대화사업(Licensing Modernization Program; LMP) 운영 ('16-'19, 4년 프로젝트)
 - USDOE 주도로 비경수형 선진원자로의 인허가 장벽 해결을 목적으로 기존 원자로 규제 프레임워크의 핵심요소들에 대한 개정 추진 ('16년부터 4년 계획)
 - LMP의 결과를 활용하여 해당 지침 개정 추진
- 非경수형원자로 대상 규제 지침 개정 주요 내용
 - 현실적인 사고 시나리오 반영
 - '위험 정보(risk-informed)'에 입각한 '성능 기반 (performance-based)' 인허가 검토 절차 확립에 초점
 - 인허가기준사고(LBE)의 식별
 - SSC 안전성 분류 및 성능기준 설정
 - 선진 원자로 설계의 심층방어(안전여유도) 평가



〈 개정 지침에 따른 非경수형 원자로 안전성 평가 개념 〉

선진원자로 인허가 체계 구축

美NRC 차세대 선진 원자로 규제 준비

- 비경수형 원자로 (SFR, HTGR) PDC 개발 지침 (RG 1.232) 개발 ('18.04.)
- 비경수형 선진 원자로 규제지침 (RG 1.233) 개발 ('20.07.)
 - 위험 정보(risk-informed)에 입각한 성능 기반(performance-based) 접근방식의 인허가 검토 절차
- 선진원자로 부지 평가 방식에 대한 지침 개정 (선량에 기반한 성능 기준, '22.08.)
 - SECY-20-0045 (technology-inclusive, risk-informed, and performance-based criteria to assess population related issues in siting advanced reactors)
- NuScale EPZ 결정방법론 승인 ('22.10.)
- 10 CFR 53 제정 중 (기술 중립적, 성능기반 규제체제)
 - 원자로 유형에 무관하게 PSA에 의한 빈도 및 방사선결말 결과로 인허가성 검토 ('25.07. 최종규칙 발행 예정)

美NRC 규제 국제화: 캐나다 CNSC와 규제 공동 검토

- Xe-100 압력용기 제작 코드 검토 완료 (보고서 발표, '21.08.)
- Terrestrial Energy IMSR 1차 검토 완료 (가상 초기사건 분석 및 방법론, '22.06.)
- BWRX-300 등 기술검토 협력 협약 체결 ('22.10.)



인허가 과정에서의 예상 현안

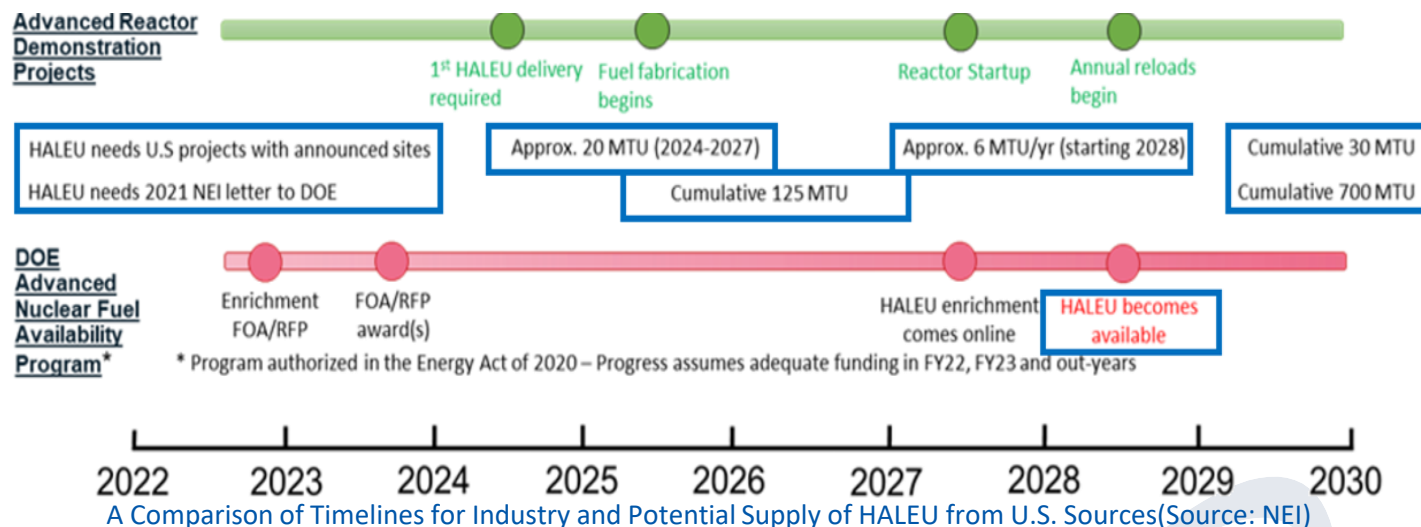
- (제도) 非경수형 원자로에 대한 규제 법규/지침 미비 (원안위 주도 기술개발 착수)
- 금속연료 장전 SFR의 내재적 안전성
- 반응도 제어 계통의 독립성, 다중성 및 다양성
- 잔열제거계통의 다중성 및 신뢰도
- 지진 및 항공기충돌사고 대처 격납기능 (공학적안전설비)
- 중대사고 대처 능력 입증
- 장주기 운전에 따른 핵연료 인허가 현안
 - 피복관 및 배리어, 집합체 제조공급 기술, 성능분석 코드, 검증 기술 등

국내 핵연료 공급 현안

High Assay Low Enriched Uranium (HALEU)

HALEU Supply Issue

- Hard to meet HALEU needs
- Deployment of infrastructure
 - Lack of time to get license
 - Lack of funding



ROK-US Cooperation for HALEU Supply

- Indirect supports such as financing R&D investment
 - Joint fuel technology development using HALEU for advanced reactors
- Strategic cooperation to establish global HALEU supply chain

결론 및 제언

■ 급증하는 에너지 수요

- 무탄소 분산전원의 필요성
 - IDC 및 반도체 클러스터 조성 계획
 - 필요조건: 100~300MW급, 수도권 인근 배치, 급격한 전력수요 변화

■ 현실적인 해결책

- 장주기 SFR 기반의 SMR
 - 부하추종 운전 가능한 원자로
 - 부지경계 축소를 통해 수도권 인근 건설

■ 정부 주도에서 민간 주도로의 패러다임 시프트

- 철저하게 시장경쟁력으로 판단하는 기업의 적극적 참여의지
- 해외시장 진출까지 고려하는 원자로 개발
- 인허가 현안 선제적 대응하는 전략 수립

Thank you for Attention

