

Global Trend of Molten Salt Reactors

용융염 원자로 세계 동향



한국원자력연구원
Korea Atomic Energy Research Institute

이 태 준

한국원자력연구원

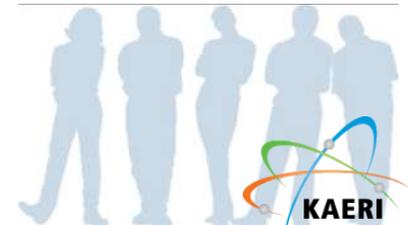


목 차

- 서론
- 용융염로 특징
- 역사적 기술개발 동향
- 국가별 동향
- 주요 사업 동향
- 결론

KAERI

한국원자력연구원
Korea Atomic Energy Research Institute



1. 서론: 연구 배경 및 목표

□ [배경] 후쿠시마 원전사고로 원자력 이용개발 패러다임 변화

○ 원자력의 경제성과 저탄소 강점보다 안전성 더욱 중시

- 방사선 (원자로 및 SF 관리) 사고 위험의 우선 해결 요구

○ 용융염 원자로

- 원자로 운전과 핵연료 관리상의 방사선 사고 위험이 (거의) 없이
- 핵비확산성과 경제성도 높을 것으로 평가
- 탄소중립 시대에 가장 촉망받는 원자력 기술로 부상 중

□ [목표] 용융염로의 세계적인 개발 동향 조사

국내 기술개발 전략 방향 제시



2. 용융염 원자로 특징

□ (정의) 용융염 원자로 (Molten Salt Reactor, MSR)

핵연료 물질을 냉각재인 용융염에 용해시킨 상태로

연소(핵분열)시켜서 에너지를 생산하는 핵분열 원자로

* 용융염: 저압(대기압)의 고온에서 용융된 (기저)염(냉각재)에 핵연료를 녹인 액체 혼합물로서 원자로의 핵연료 및 냉각재로 동시에 활용됨

□ (특징) 안전성이 매우 높고, 핵비확산성과 경제성도 확보 가능

○ 안전성: 원자로 용융사고 (거의) 없고 사용후핵연료 관리 매우 용이

☞ 핵연료와 냉각재가 혼합물로 안정화되어 냉각재 상실 사고 없음

☞ 열적여유도 높아서 (운전온도: 약 700 °C, 비등점 약 1400 °C) 핵연료 안정

☞ 핵분열생성물 상시제거되어 잔열제거 용이

☞ 장수명 고방사성 핵종 거의 연소되어 사용후핵연료 관리 용이

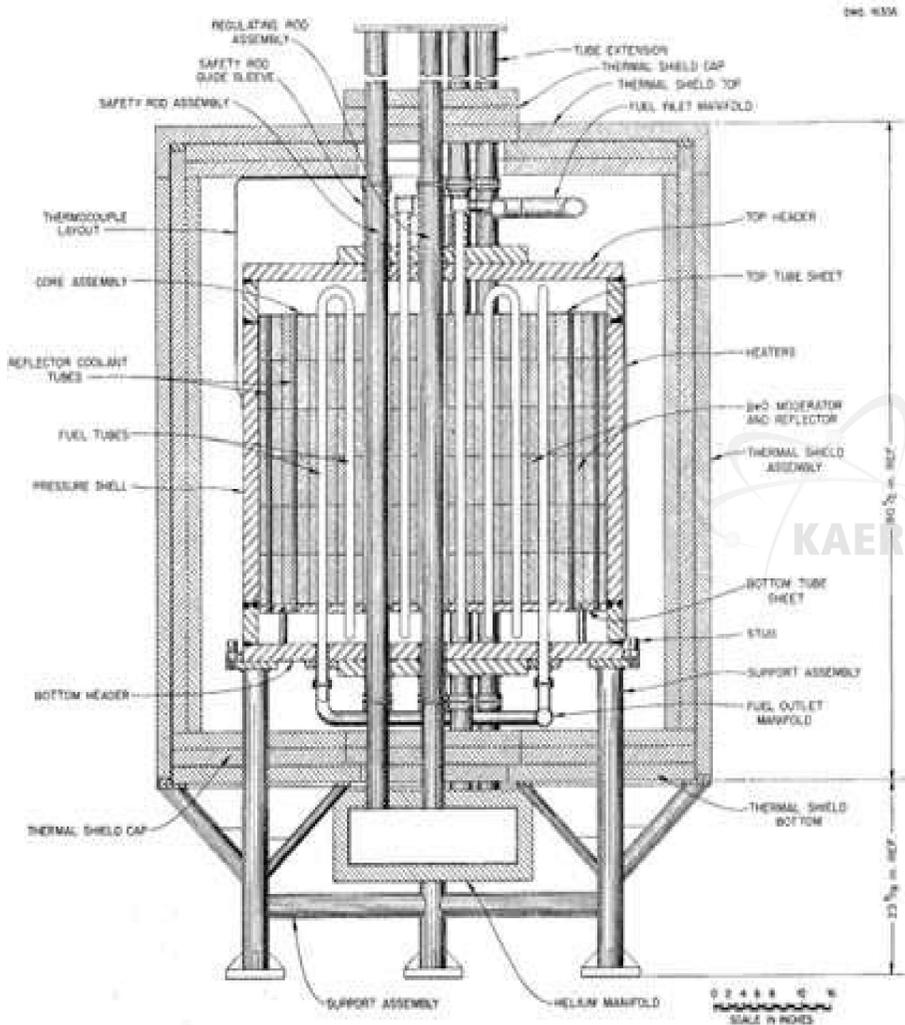
○ 핵비확산성: 핵분열로 생성되는 플루토늄 거의 연소

○ 경제성: 안전성과, 열효율성, 단순 설계로 매우 높음

- 초소형 MSR 31\$~65\$/MWh vs. IEA(2021) 원전 \$65~120/MWh)

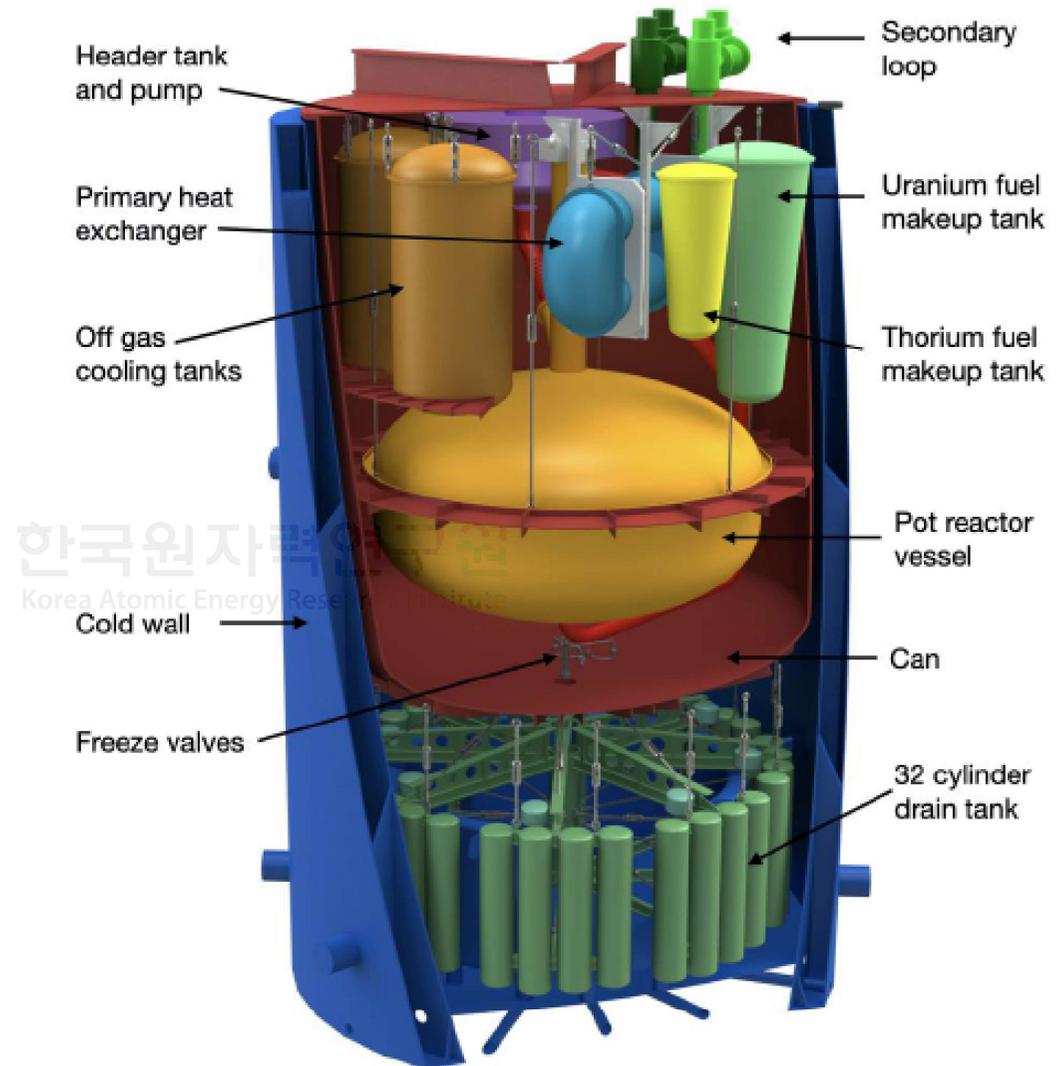


2. 용융염 원자로 특징



최초의 용융염로 ARE 모형도 (1950s)

출처) 한국원자력학회 (2021)



ThorCon MSR(TMSR) [2020s] 모듈 2기 250MWe

높이 1.6m, 지름 7.3m, 무게 360톤

1. 역사적 기술 개발 동향

□ **1950**년대에 원전 기술 태동기부터 개발했으나

2022년 현재까지 산업화 되지 못함

□ 미국의 오크리지연구소에서 **1950**년대 초부터 개발 시작

○ ARE: 최초의 용융염로(실험로). 미공군 항공기 추진용 개발

- **1954년 2.5MWth** 약 **9일** 동안 가동 (초소형화가 가능성)

○ PWAR-1: PWAC사의 순환 연료 원자로 개발용

- **1957년** 오크리지의 실험 시설에서 몇 주 동안 제로 출력에서 운전

□ **1965년** 최초의 발전용 용융염로 (MSRE, 실험로) 개발

○ **7.5MWth** 출력으로 **4년간** 약 **2만** 시간동안 가동

- 미국은 고속 증식으로 실패 대비 백업 옵션 연구

□ 오크리지는 저농축우라늄 용융염로(DMSR) 타당성 연구도 수행

○ DSMR은 핵비확산성 향상에 초점을 둔 소각로(burner)

- 저농축 우라늄 사용과 소각로 기능으로 최소수준 화학공정으로 상용화 가능성



1. 역사적 기술개발 동향

- 1970-1976년 오크리지는 용융염 고속증식로 (MSBR) 설계도 개발함
- 1970-1976년 기간 동안 ORNL는 2,250 MWth 출력 설계
- MSBR 개발사업은 정부가 고속증식로 개발에 집중하면서 중단되었음
- 결과적으로 세계적으로 용융염로 연구개발이 정체되었음.

□ 21세기에 들어서 용융염로 개발 재개

- 지구온난화 대응 위한 저탄소 에너지 필요성 증가 및 핵융합 등 타 기술 개발 지연
- 후쿠시마 원전사고 이후 중대사고 고준위 SF 현안 해소위한 용융염로 개발 증가
- 또한 용융염로의 핵비확산성도 주목받게 됨

□ 21세기 전후에서는 토륨 용융염로 개발이 활발

□ 가장 최근에는, 경수로 사용후핵연료를 사용할 수 있는

용융염 고속중성자로가 다시 개발되기 시작

- 염소염 이용 용융염 고속중성자로는 2015년 빌게이츠가 설립한 테라파워사가 개발 착수를 발표하면서 주목을 받기 시작한 최신 개념

1. 역사적 기술 개발 동향

	ARE	PWAR-1	MSRE
공식명칭	Aircraft Reactor Experiment	Pratt and Whitney Aircraft Reactor-1	Molten Salt Reactor Experiment
최종 용도	항공기 추진체 (핵추진 폭격기의 엔진)		전기 생산
원자로 용도	핵추진 항공기 개발용 원자로 실험	PWAC사의 순환연료원자로 프로그램의 일부로 연구	발전용 용융염로 기술 이해 고속증식로(액체금속냉각로)의 백업/대체용 실험
가동 년도 및 기간	1954년 9월 (100시간) 동안 100 MWh 발전	1957년에 몇 주 동안 영(zero)출력으로 가동	1965~69년까지 4년 동안 약 2만 시간 가동
핵연료염	불화물염 NaF-ZrF ₄ -UF ₄ (53-41-6 mol%) -핵연료 UF ₄ -기저염: 불소염	불화물염 NaF-ZrF ₄ -UF ₄	핵연료: 33%까지 농축된 U-235 사불화물(U-235 tetrafluoride) 기저염: 불소염(용융된 리튬, 베릴륨 및 지르코늄 불소염)
출력/출구온도	2.5MWth/최대 860 °C	영(zero)출력	7.5MWt/최대 650°C
노형/중성자	아열중성자		열중성자
최종 개발 단계/수준	실험로 (TRL 5)	실험로 (TRL 5)	실험로 (TRL 5)

2. 국가별 개발 동향

□ 미국: 용융염로 개발 세계 선도

○ 20세기 중반 부터 용융염로 개발 세계 선도

- 1950년대 중반에 용융염로 개념 개발
- 열중성자 실험로(ARE, PWAR-1, MSRE), 고속중성자로 (MSBR) 설계, 산화우라늄로 타당성 분석

○ 21세기에도 용융염로 개발 선도

- 토륨용융염로(TMSR), 염소염 고속증식 용융염로 (MSFR) 개발
- * 2021년 현재 세계적으로 많은 용융염로가 개발되고 있으나. 대부분 1970년대 중반까지 미국 ORNL에서 수행한 용융염로 연구개발에서 축적된 지식과 경험을 토대로 함

□ 영국: 미국에 이어 1960년대 중반 부터 용융염로 개발

○ 1964년부터 10년간 비축된 Pu이용 에너지 생산 목적으로

- 2.5GWe 출력의 염소염 기반 납 냉각 용융염 고속로(MSFR) 연구
- 1964년~1966년: 이론/개념 연구; 1968년~1973년 실험후 중단
- 미국의 ORNL과 정보 교환 및 전문가 방문을 통해 지식 공유
- 영국의 MSFR 사업의 중단 사유도 미국과 유사
- * Dounreay의 고속원자로 시험로 성공에 의해서 영향을 받음.



2. 국가별 개발 동향

- 21세기에도 영국은 혁신적 개념의 Stable Salt Reactor (SSR) 개발 중
 - **SSR-W (Pu연료), SSR-U (U연료), SSR-Th (Th연료)** 등 세가지 모델 개발 중
 - 캐나다의 공급자설계사전인허가 검토(**VSDR**) 받고 있음
- **러시아: 미국-영국에 이어 1970년대 후반 부터 용융염로 연구**
- **Kurchatov** 연구소에 주로 이론 및 실험 연구
 - 특히 용기 재료 기계적, 부식 및 복사 특성 연구 후, 문제 해결 가능성 도출
 - **1986년** 체르노빌 사고 이후 전반적인 산업침체와 함께 용융염로 연구 축소
- **2020년에 Rosatom은 10MWth MSR인 FLiBe burner MSR** 건설 계획 발표
 - **VVER** 사용후핵연료와 불화물 연료
 - **2031년**까지 광산과 화학 단지에서 가동 목표
- **중국: 21세기에 토륨 용융염로 상용화 주도**
- 2021년 9월 실험로 수준이지만 세계 최초로 토륨 용융염 발전 성공
 - 2020년까지 2기의 12 MW급 TMSR-LF1을 Wuwei 지하 연구 시설에 건설
 - TMSR-LF1 실험로 목표는 내부식성 재료 개발 시험
 - * 2017년, ANSTO/상해응용연구소는 MSR용 NiMo-SiC 합금 개발 성공 발표
- 2035년까지 토륨 용융염로(TMSR-LF) 실증로를 배치 목표
 - 100MWe급 원자로 높이가 3미터, 너비가 2.5미터로 예상

2. 국가별 개발 동향

□ 덴마크: 신재생 선도 국가도 용융염로 개발

○ 덴마크의 Copenhagen Atomics는 코펜하겐 원자력폐기물소각로(Copenhagen Atomics Waste Burner, CAWB)를 개발 중

- CAWB는 단일 유체, 토륨연료, 중수 감속, 불소 기반, 열 중성자 용융염로
- 연료가 토륨이지만 초기 장전용으로는 사용후핵연료에서 분리된 플루토늄 사용

○ Seaborg Technologies는

모듈식 소형 용융염원자로(Compact Molten Salt Reactor, CMSR)를 개발 중

- 저농축 우라늄을 연료로, NaOH를 감속재(특허권 보유)로 사용하는 열중성자로
- 열 출력은 250MWth 또는 전기 출력은 100MWe임
- (용도) 약 200,000 가구에 에너지 공급

□ 독일: 탈원전 선도 국가도 용융염로 개발

○ 고체핵물리연구소(German Institute for Solid State Nuclear Physics, GISSNP)는

고속증식 납냉각 MSR을 개발 중



2. 국가별 개발 동향

- 인도네시아: 화산과 지진의 나라도 최초 원전으로 용융염로 개발
- 국방부와 에너지자원부(MEMR)이 함께 부유식 토륨용융염로(TMSR) 개발
- 3500 MWe 규모의 TMSR 건설 사업을 2 단계로 추진.
 - 1단계: 500MWe (250MWe급 모듈 2기)의 TMSR(prototype: TRL 6) 건설·실증 후 후속 상용 TMSR 설계 인증 획득
 - 2단계: 후속적으로 3000MWe 규모의 TMSR을 조선소에서 건조 (대우해양조선)
- 2015년 10월 인도네시아 토륨 컨소시엄 (Indonesia Thorium Consortium, 3개의 인도네시아 회사)은 미국 ThorCon사와 ThorCon MSR(TMSR)을 공동 개발 협정 체결
 - 2017년 자국내 3개 국영기업은 ThorCon MSR에 대한 예타 연구 수행후 도입 결론
 - * 자국 보유 풍부한 토륨 매장량과 함께 TMSR이 사고위험 거의 없고, 석탄보다 저렴한 발전비용으로 타당성 확보 (LCOE, US 30\$/MWh)
 - 2019년 7월 Thorcon International은 인도네시아의 국영 전력회사(PAL)과 500 MWe 실증로 연구와 건설을 위한 12억불(약 1조5천억원) 규모의 투자 협정 체결
- 2020년 국방부는 Thorcon사와 50MWe 이하 규모의 TMSR 개발 협정 체결

2. 국가별 개발 동향

□ 기타: 캐나다, 인도, 일본, 프랑스

○ 캐나다의 **Terrestrial Energy**는 **400 MWt (190MWe)** 출력의 저농축우라늄 이용 일체형 용융염로 (**IMSR**) 원자로(**SMR**) 개발 중

- 2017년에 캐나다 원자력 안전 위원회 공급자설계사전인허가 심사 완료

○ 인도는 토륨 기반 원자로의 대안으로 **MSR** 개발 중

- 2015년 용융염로 설계 발표

KAERI 한국원자력연구원
Korea Atomic Energy Research Institute

○ 일본 **Fuji** 용융염 원자로(**Fuji Molten Salt Reactor, FMSR**) 개발중

- 일본, 미국, 러시아 회원들로 구성된 컨소시엄이 **100~200MWe** 토륨로임

○ 프랑스는 용융염 고속로(**SAMOFAR**)의 타당성 연구 진행 중

- 2014년 **CNRS**는 액체 연료 고속로 시스템의 평가 및 실행 가능성에 대한 연구 프로젝트 (**EVOL**) 완료 후 안전성 평가 연구 지속 예정



4. 결론

- 용융염 원자로는 미래 에너지 시장을 주도할 것으로 전망됨
 - 방사선 사고 위험 (거의) 없고, 핵비확산성과 경제성도 높게 평가
- 그러나 용융염로는 1950년대부터 개발되었으나
 - 2030년대후반에야 상용화에 도달할 것으로 전망됨
 - 고온의 고방사성 용융염의 재료 부식 문제 해결 및 최적의 용융염 발견 등 기술적 난제 해결이 관건
- 후발주자인 우리나라가 용융염로 개발에 성공하기 위해서는
 - (1) 위험관리 중심의 사업 관리
 - 기술 실증, 인허가, 상용화 및 시장 성공에 대한 불확실성이 매우 높음
 - (2) 핵연료염과 부식방지 등 요소 기술단위의 문제 해결 우선 추진
 - 미국 (MSRE), 러시아, 중국(TMSR-LF1), 미국 테라파워(MSFR)은 개발 초기에 부식방지 기술확보 우선 추진
 - (3) 국내외 시장을 확보하기 위해서는 원천 발명 및 특허 확보 주력
 - 원천 특허 없이는 세계 선도형 기술시장에서 진입 자체 불가 (추격형 대형로와 차이)
 - (4) 용융염로 선도국과 국제협력을 통한 기술개발 효율성 제고
 - 2030년 초반까지 기술역량, 사업(시장 확보)역량 면에서 열세 극복 필요

4. 결론 <참고>



TerraPower MCFR 개발용 용융염 실험실



TerraPower 재료 부식 시험 장치

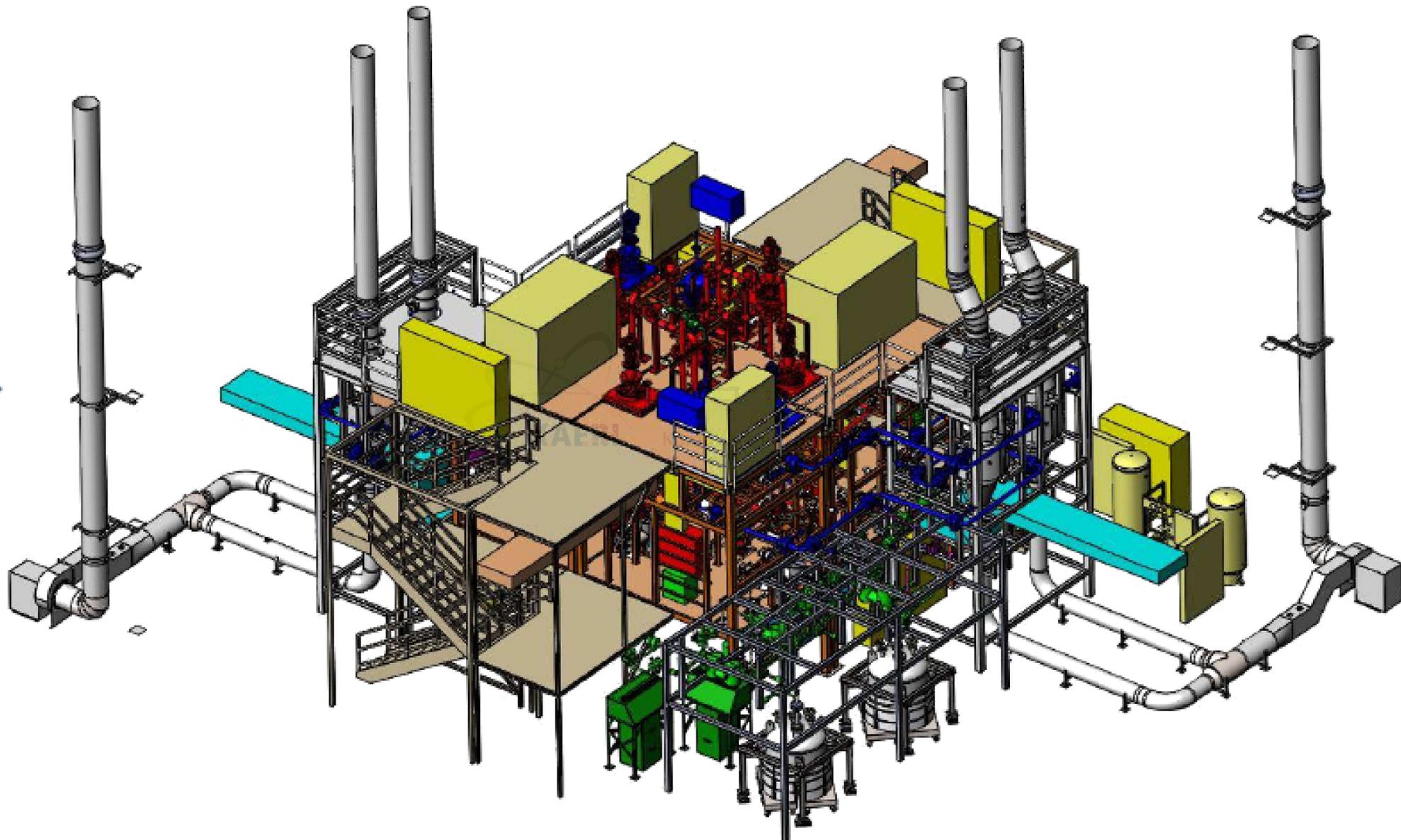


TerraPower 종합시험장치(IET) 일차열교환기



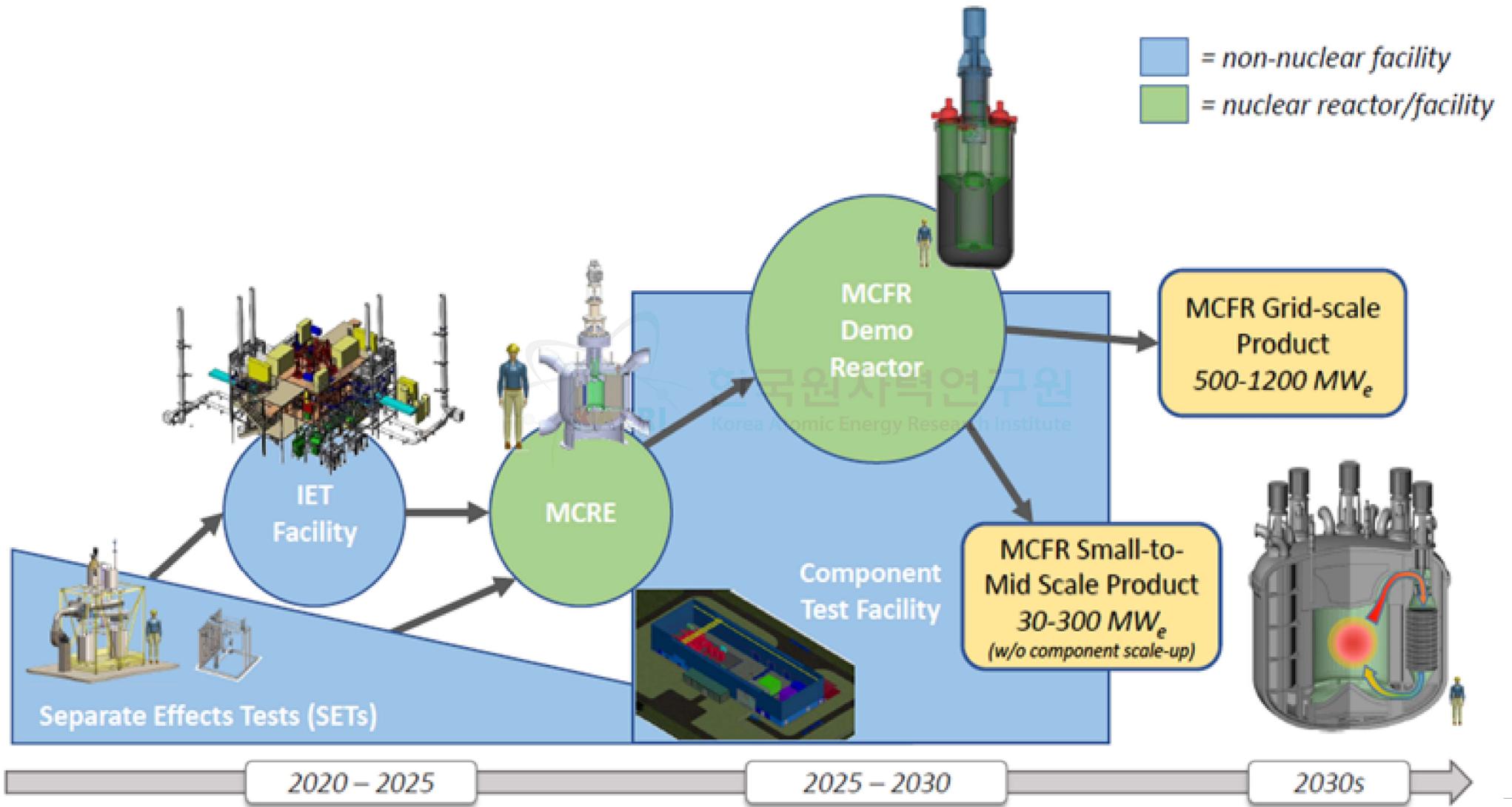
TerraPower (IET)의 모의원자로 노심

4. 결론 <참고>



TerraPower사의 염소염 종합시험장치 (모의용융염로 이용)

4. 결론 <참고>



TerraPower사의 염소염 용융염로 (MCFR) 개발 로드맵 (2021)

감사합니다 Thank you for your Attention.

KAERI

한국원자력연구원
Korea Atomic Energy Research Institute

이태준
책임연구원, 미래전략연구부, 한국원자력연구원
tjee@kaeri.re.kr, +82-42-868-2149, +82-10-9015-2112

