

더 나은 세상을 위한 원자력기술
국민과 세계가 지지하는 한국원자력연구원

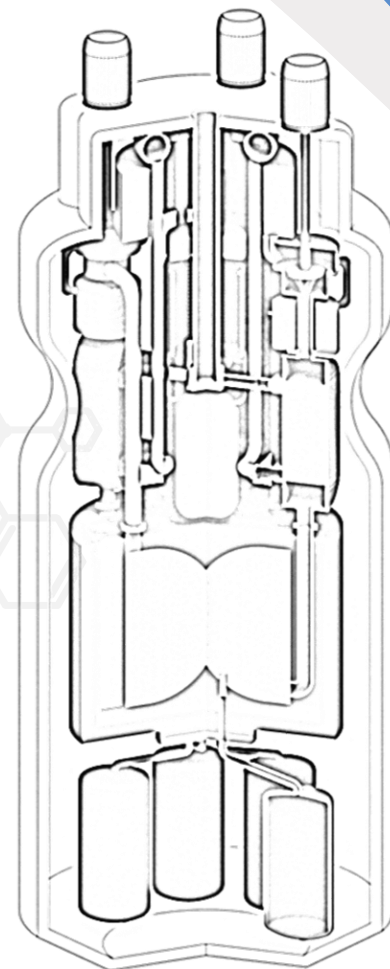


[2023 KNS 추계학술발표회] 워크숍 A – 소형모듈원자로 기술조사 보고회

용융염원자로(Molten Salt Reactor) 기술개발 및 사업현황

한국원자력연구원
용융염원자로 원천기술개발사업단 김치형

2023년 10월 25일



한국원자력연구원
Korea Atomic Energy Research Institute

Strictly Private & Confidential



용융염원자로(Molten Salt Reactor, MSR) 개요

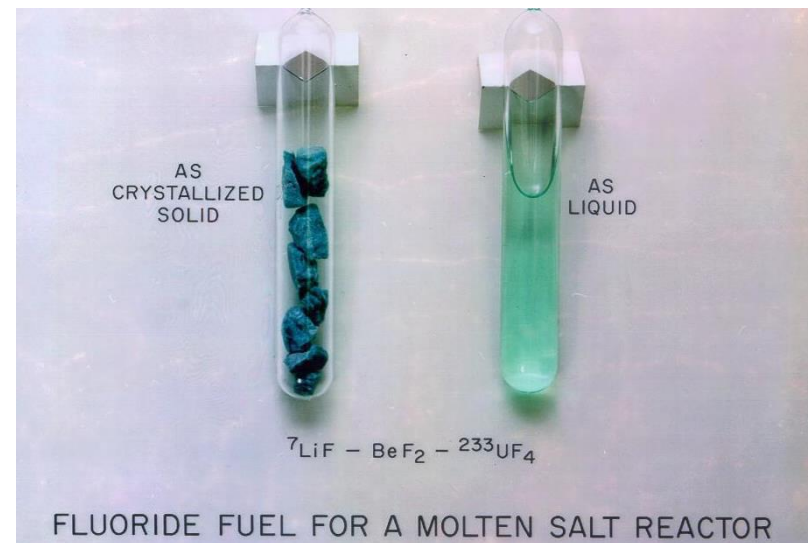
용융염? 용융 상태(액체)의 염(불소 혹은 염소 화합물)

염(또는 공용염)	녹는점(°C)
$\text{NaBF}_4\text{-NaF}$	384
LiF-NaF-KF [FLiNaK]	454
LiF-BeF_2 [FLiBe]	459
NaCl	801
NaCl-MgCl_2	445
NaCl-CaCl_2	507

공용 혼합

핵연료? 악티나이드의 염화물 혹은 불화물

ThF_4 , UF_4 , PuF_3 / ThCl_4 , UCl_3 , PuCl_3



용융염원자로 = 액체연료 원자로

MSR 주요 특징

액체

- 노심 용융 개념 원천 배제
- 핵연료봉/집합체 제조 공정 불요

균질성

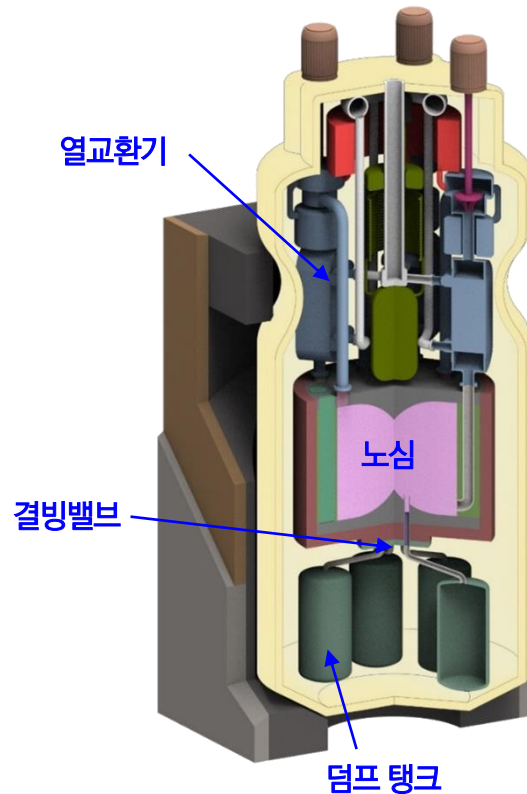
- 유체 내 균일한 열분포
- 균일한 용융염 조성 분포

대기압 운전

- 녹는점 400~550°C
- 끓는점 ~1400°C 이상

방사성 물질 유출 방지

- Cs, I 등과 화학결합, 용해
- 계통 외부로 용융염 누출 시, 그 자리에서 고화



피동 안전성

- 결빙 밸브와 같은 피동 안전 계통
- 잔열 냉각/비상 냉각 기하구조 최적화 가능

고유 안전성

- 온도 상승 시, 큰 열팽창으로 음의 온도-반응도 궤환효과 보장

조성 관리

- 용융염 조성 실시간 모니터링
- 운전 중 기체성 핵분열생성물 지속 제거

자유로운 출력밀도

- 제한 요인인 피복재, 구조물 등이 없음
- 펌프, 열교환기 등 열전달 메커니즘에 의한 출력 증가 설계 용이

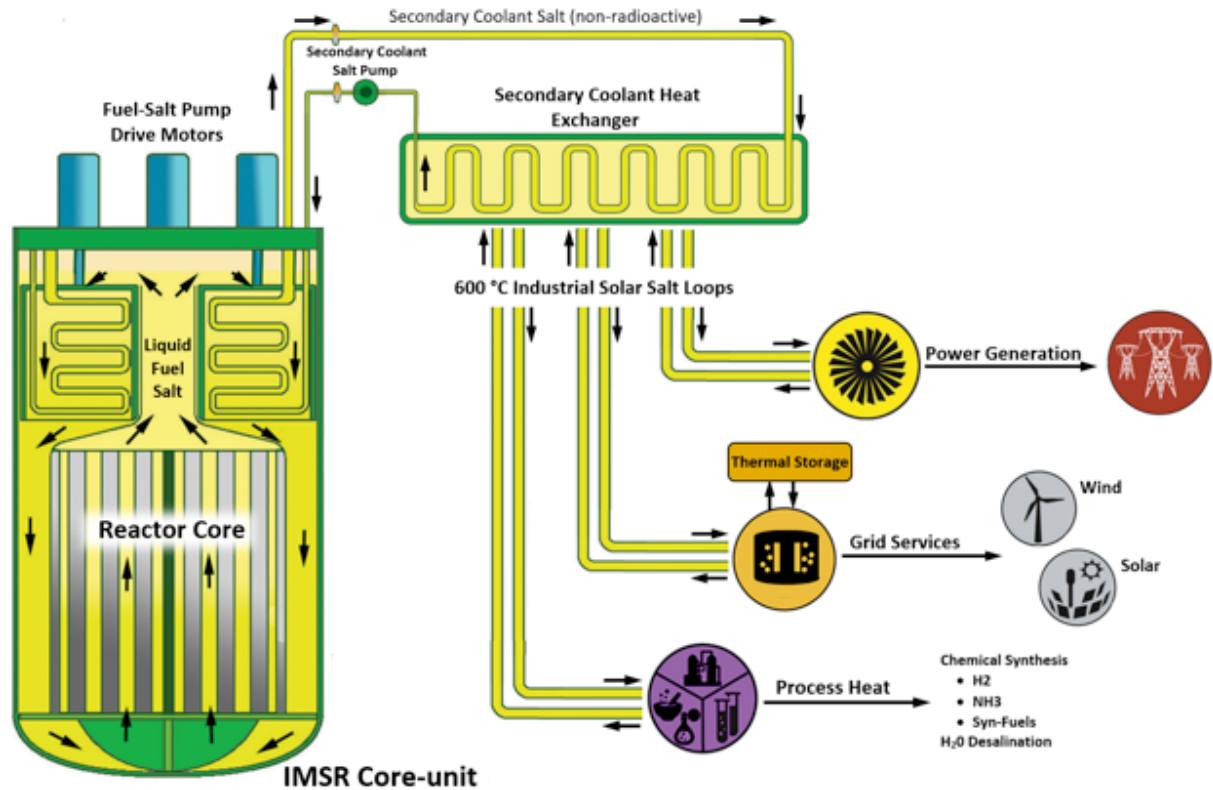
MSR의 중성자 스펙트럼(불소염 vs 염소염)

중성자 스펙트럼	열 중성자	고속 중성자
적정 용융염	NaF-ZrF ₄ / LiF-BeF ₂ / LiF-NaF-KF / LiF	NaCl-MgCl ₂ / NaCl-KCl / KCl / NaCl
감속재	흑연(수명~4년), ZrH ₂ , NaOH, BeO	없음
악티나이드, 희토류 용해도	< 4 mol%	< 45 mol%
농축 필요성	Li-7 99.95% (삼중수소 발생 저감)	Cl-37 75% 이상 농축
용융염 정화	핵분열 생성물 및 Pa-233 분리 필요	수명 중 정화 X
구조재	Hastelloy-N(ASME Section III division 5 미등재)	최적 재료 선정 필요
구조재 부식 완화 기술	REDOX 조절법 기술 완성 단계	개발 필요
운영 경험	ARE('54), MSRE('65-'69), TMSR-LF('23, 운영 중)	없음

MSR 해외 개발 현황

모델명	IMSR
국가	캐나다
개발사	Terrestrial Energy
냉각재/감속재	불소염/흑연
핵연료	우라늄(5% 미만)
출력(열/전기)	440MWth/195MWe
원자로 수명(년)	56

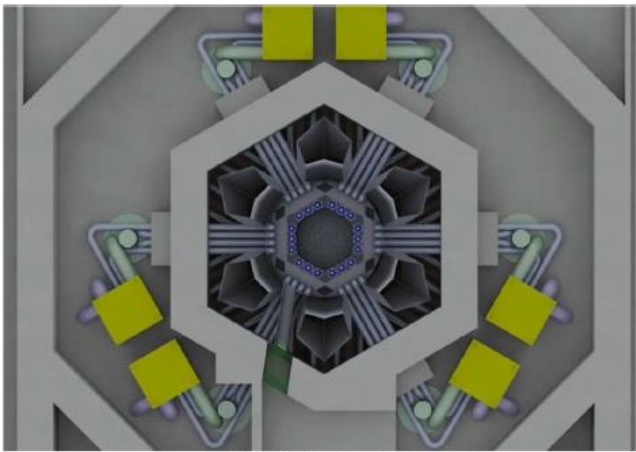
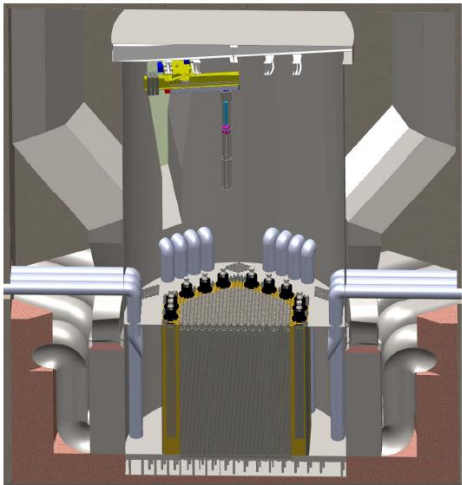
주요 특징	- 과거 ORNL의 DMSR 계열 설계 - 매 84개월 마다 원자로 유닛(Core unit) 전체 교체
개발 상태	- 캐나다 VDR 1단계 완료('17.11.), 2단계 완료('23.4)



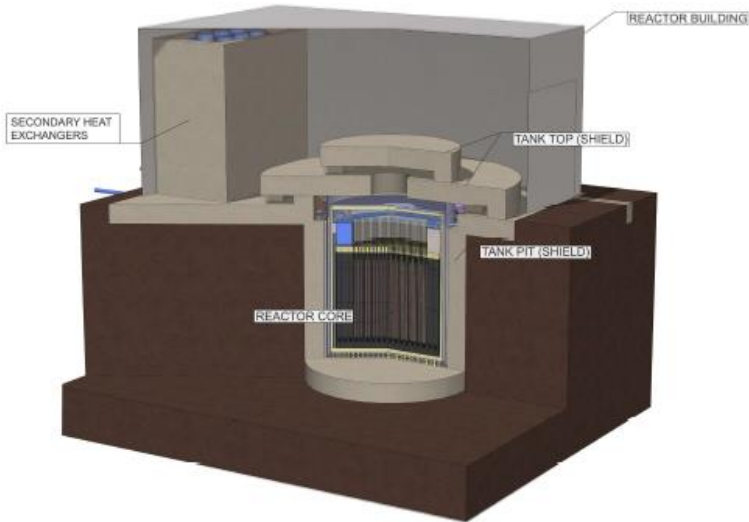
MSR 해외 개발 현황

모델명	SSR-W	SSR-U(MoltexFLEX)
국가	캐나다, 영국	캐나다, 영국
개발사	Moltex Energy	Moltex Energy
냉각재/감속재	불소염/없음(고속로)	불소염/흑연
핵연료	재처리 사용후핵연료	6% 농축 우라늄
출력(열/전기)	750MWth/300MWe	40MWth/16MWe
원자로 수명(년)	60	60
핵연료 교체	가동 중(On-load) 10일마다	20년 주기
개발 상태	캐나다 VDR 1단계 완료('21.5.)	개념설계('22)

주요 특징	용융염이 순환하지 않고, 핵연료봉 속에 용융염이 담겨있는 설계
-------	------------------------------------



SSR-W Coolant Loop

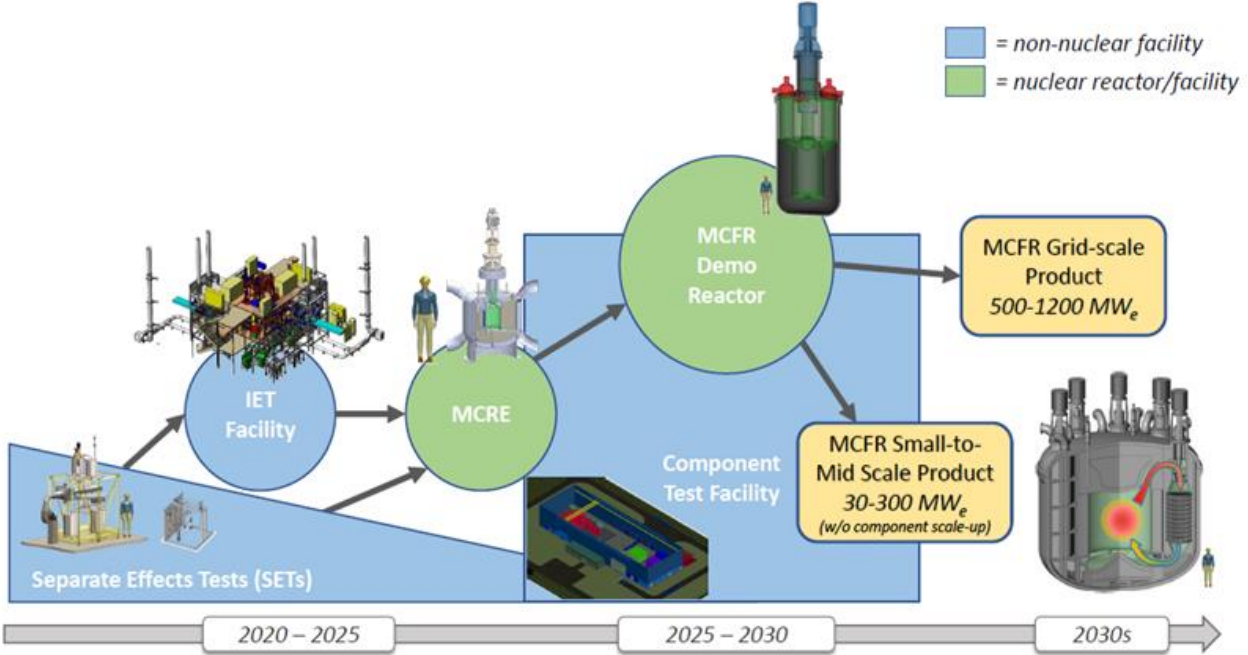


Schematic of an SSR-U Reactor single unit

MSR 해외 개발 현황

모델명	MCFR
국가	미국
개발사	TerraPower
냉각재/감속재	염소염/없음(고속로)
핵연료	고순도 저농축우라늄
출력(열/전기)	300kWth('25), 30MWe('30), 500MWe('35)
원자로 수명(년)	20~50년(미공개)

주요 특징	염소염 기반 고속로
개발 상태	종합성능 시험장치(Integrated Effects Test) 구축 완료('22) '25년 임계 목표로 실험로(MCRE) 건설 중



KAERI 출연금 사업을 통한 선행 연구 → 혁신도전사업을 통해 용융염원자로 핵심기술 개발 본격 착수

※ 혁신도전사업 : 국가적 차원의 문제를 혁신적·도전적으로 해결하기 위해 고위험 연구테마를 발굴하여 범부처 연구개발 사업으로 기획·추진하는 사업



목적 : 무탄소 해양시스템(선박 추진, 부유식 원전, 해양 플랜트 등)
등에 적합한 MSR의 핵심 원천기술 확보

기간 : ’23~’26년(4년)

예산 : 정부출연금 290억 원(과기부 270억 원, 해수부 20억 원)

기술특징 : 염소염 기반 열출력 100 MWth급 고속로



산학연 역량 결집: 생태계 조성 선례가 되도록

- 원자로 공급, 주요 기기 공급, 수요 산업계 인터페이스, 인력 양성

사업화 고려: 산업계에서 이용되고, 시장에서 팔리도록

- 노심과 계통 전체 부피, 무게 고려 현실적 설계
- 용융염 및 핵연료 가격
- 지식재산권 분산 최소화

규제 및 인허가 체계: 적기 시장 활용이 가능하도록

- 기술개발 단계부터 인허가 기관과의 협력 필요

요소기술별 실증: 남는 것이 있도록, 실물화 중심 마일스톤 설정

- 공용 용융염 제조, 펌프, 열교환기 등

국제 협력: 기술 개발/사업화 장애요인 극복

- 핵연료 확보, 인허가 체계, 핵물질 이용 실험 등



건설이 되도록

감사합니다.