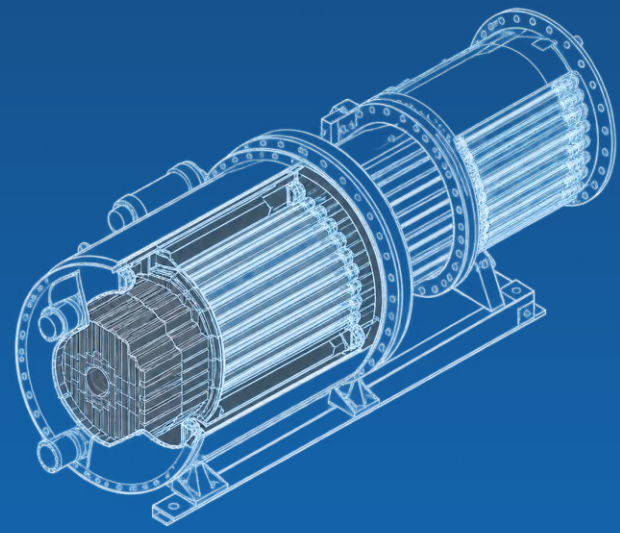
2026년 추계 KNS 워크숍 O:
극한환경 전력의 해법, 히트파이프 원자로 개발 현황

초소형원자로(MMR)와 민간 수요



김형대*, 김요한
경희대학교 원자력공학과 첨단열수력연구실(AdvanTH)
*hdkims@khu.ac.kr

경주화백컨벤션 센터 105호, 2026.10.28 14:10 – 14:35

KHU AdvanTH Advanced Thermal-Hydraulics

초소형원자로에 의해 변화하는 시장

기업은 전기를 판매하는 것이 아니라 '문제 해결(solution)'을 판매

AI 데이터센터

Meta의 RE100 탈퇴(2026.07)…
AI는 "LCOE가 가장 싼 전기"가 아닌
"24시간 공급되는 무탄소 전력"을 원함

하지만, 대형원전은 너무 긴 건설기간

MMR Solution

"AI 데이터센터의 운영 리스크 해결"
빠른 배치, 24/7 전력공급

격오지 전원

기후변화 시대에 값비싼 디젤 발전을
대체할 "무탄소 전력원" 필요

MMR Solution

"원전을 만든다"기 보다
"디젤발전기를 대체한다"

즉, LCOE(Levelized Cost of Electricity)를
낮추는 기술이 아니라,
고객(Value Proposition)을 높이는 기술

MMR의 수요는
"MMR이 해결할 수 있는 문제는 무엇인가?"
에서 출발(수요가 기술을 정의)

Aalo VALAR ATOMICS RADIANT Westinghouse

작아진 MMR을 위한 규제 변화

미국 10 CFR Part 57: ‘MMR 산업화를 위한 규제 플랫폼’ 구축 정책

- **우리나라에서는 10 CFR Part 53이 Advanced Reactor 시대를 여는 규정이라고 알려져 있지만, 실제로 MMR 산업에는 10 CFR Part 57이 훨씬 더 큰 영향을 미칠 가능성이 있음**

10 CFR 57 주요 내용

(1) **Risk-informed** – 실제 위험 수준에 비례하는 규제
(2) **Performance-based** – 무엇을 달성해야 하는가
(3) **Multiple Licensing Pathway** – CP/OL/ML/SDA 등 MMR 비즈니스 모델에 맞게 선택 가능
(4) **Manufacturing License** – 원자로를 공장에서 허가 받는 시대
(5) **High-volume Licensing** – ex) 1번 심사 → 100기 배치
(6) **Fueled Reactor Transportation** – "Fuel-loaded Reactor“ 운송 제도화
(7) **Centralized Decommissioning** – 사용 완료 → 공장 회수 → 중앙집중 해체 또는 재생산

- **즉, 원자로를 "발전소"가 아니라 "제품(Product)"으로 규정하기 시작**
- **궁극적으로, MMR 산업화를 통해 원전 산업이 자동차 산업처럼 변화함을 시사**

작아진 MMR을 위한 규제 변화

Source: U.S. Nuclear Regulatory Commission. (2026, May 1). *Licensing requirements for microreactors and other reactors with comparable risk profiles* (Proposed rule).

MMR용 규제의 배경: 매우 작은 핵연료량 (Metric Ton Heavy Metal)

높은 열출력 ➔ 안전하게 다루기 위한 다수의 공학설계
➔ 복잡한 설계/안전성평가/규제 (10 CFR 50, 52, 53)

~90 톤





x 1/2

~45 톤



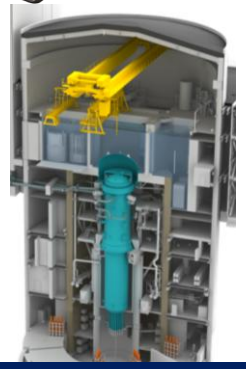


Source: Sequoyah nuclear plant Wikipedia



대형원전(~1000 MWe)

Source:
GE Hitachi
(BWRX-300)



SMR (~300 MWe)

매우 낮은 열출력+밀도 ➔ 안전계통 없이도 안전한 운영
➔ 단순한 설계/안전성평가/규제

기존의 복잡한 규제제도의 단순화 가능
➔ 빠른 규제, 빠른 실증/배치

10 톤 ↓
(NRC 안)

x 1/100

~0.5 톤





Source:
Westinghouse eVinci

MMR (~1 MWe)

작아진 MMR을 위한 규제 변화

Source: U.S. Nuclear Regulatory Commission. (2026, May 1). *Licensing requirements for microreactors and other reactors with comparable risk profiles* (Proposed rule).

심층방어에 기여하는 10 CFR 57 진입조건과 달라지는 MMR의 비상계획구역(EPZ)

1. 사고선량 기준

≤ 1 rem (10 mSv) TEDE

TEDE: 총 유효선량당량

2. 연료질량 제한 기준

≤ 10 MTHM

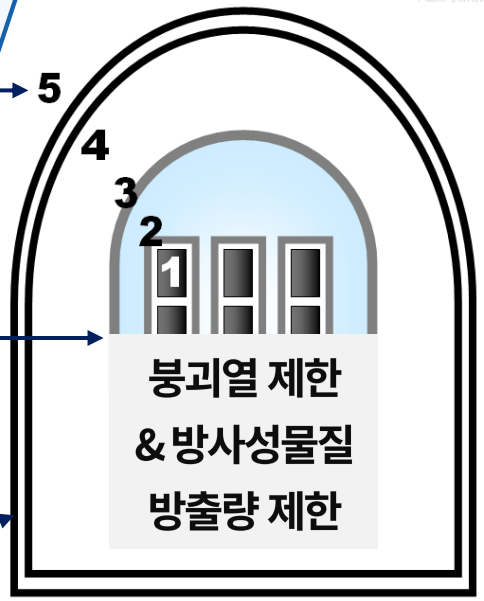
Metric Ton Heavy Metal: Th + U + Pu의 총질량

3. 여섯가지 설계특성

반응도 제어	피동 열제거
핵분열생성물 보유	차폐
방사성유출물 관리	설계단계 보안

Part 57 적용 적격성 확보

단순한 설계·운영에 맞춘 신속 인허가



심층방호에 기여하는 진입조건

challenged. The fuel mass limit entry criteria would be established to provide additional defense in depth for these

Source: U.S. Nuclear Regulatory Commission. (2026, May 1).

10 CFR 57 진입조건을 만족하는 시설은,
넓은 영역에 영향주는 대형사고 배제…
별도 EPZ 정의 X ➔ 자체 비상조치계획 수립

An emergency planning zone (EPZ) would not be defined for facilities licensed under proposed part 57. An

Source: U.S. Nuclear Regulatory Commission. (2026, May 1).

*** eVinci의 경우, 부지경계(반경 약 65 m 원)를 EPZ로 설정**

Source: IAEA eVinci ARIS



[참고] 울산광역시와 새울원전/SMR의 EPZ (반경 30 km 원)

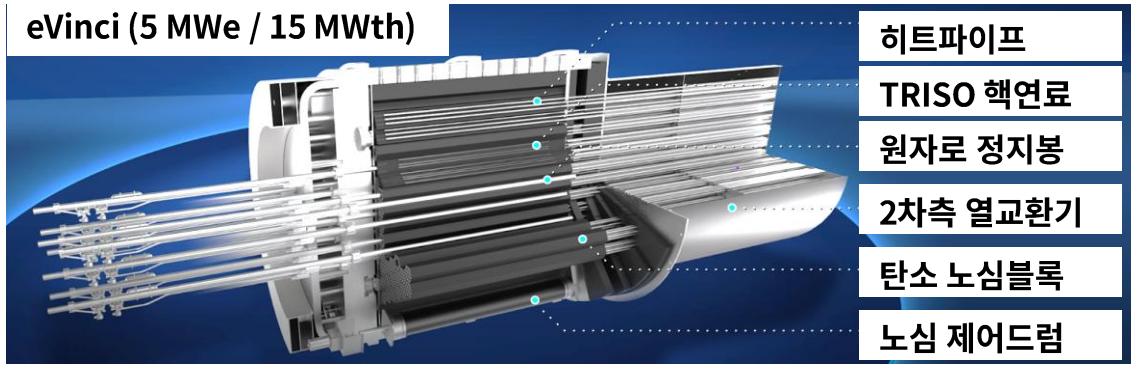
EPZ Source: 한국에너지정보문화재단

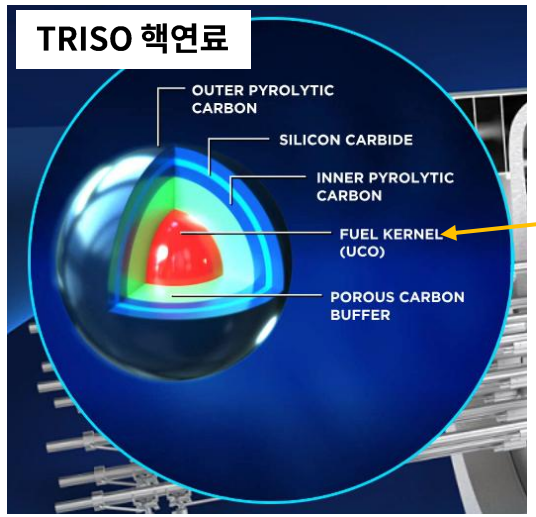
MMR의 안전성을 달성하는 설계사례(히트파이프 MMR)

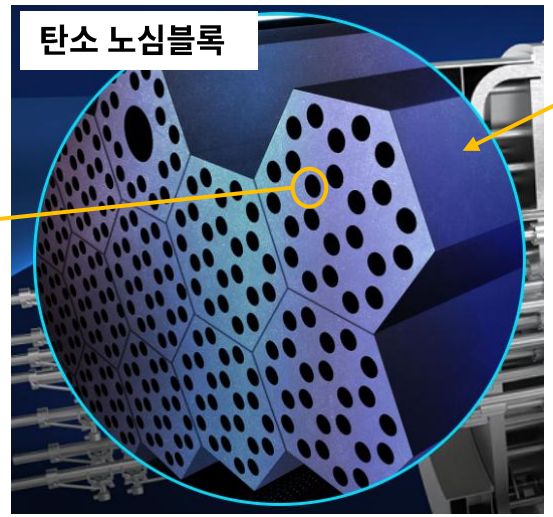
Source: Westinghouse Website & IAEA eVinci ARIS

Westinghouse

MMR의 기본안전기능 설계

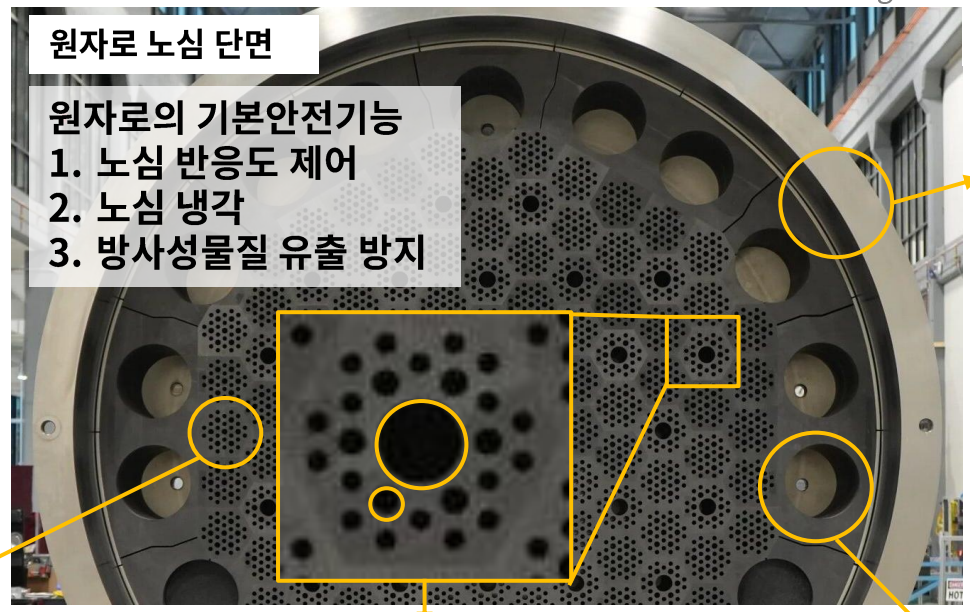


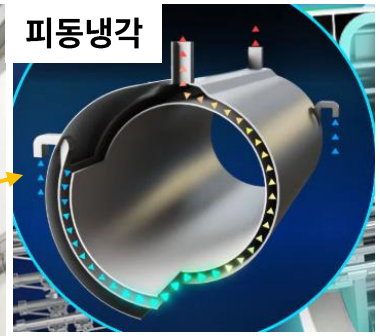




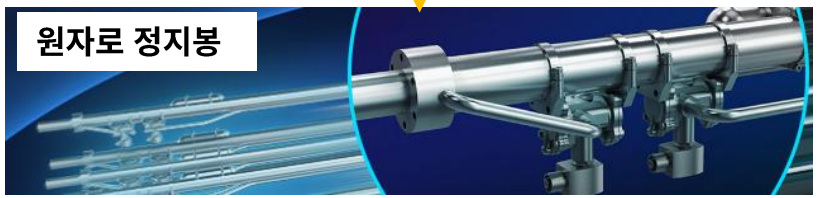
[노심 반응도 제어 & 방사성물질 유출 방지] TRISO 기반 핵연료:

- 낮은 출력밀도 + 매우 큰 음의 반응도 피드백(온도 자가 제어 가능)
- 3중 코팅으로 방사성 물질 보관(자체 격납 기능)





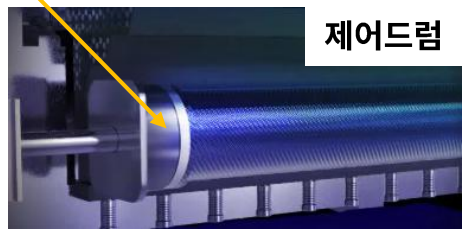
[노심 냉각] 공기대류:
겉면 자연대류로 냉각



[노심 반응도 제어] 정지봉: 비상, 운송 시 원자로 정지
(Fail-safe 삽입 설계: 전원 or 제어통신 상실 시)



[노심 냉각] 히트파이프: 피동, 비가압 조건 노심 냉각



[노심 반응도 제어] 제어드럼:
회전하며 노심의 반응도 제어

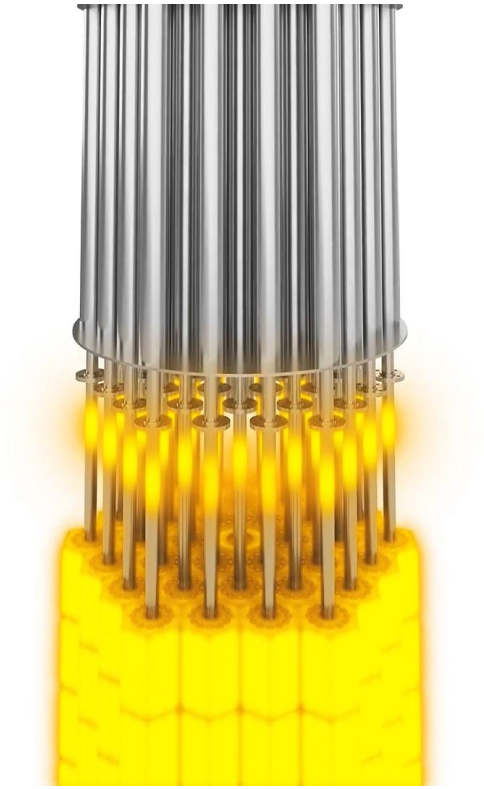
+ 자체 원격제어 소프트웨어:
자체 계측/제어 SW 보유
(ALS v2: NRC 인증)

MMR의 안전성 예시(히트파이프 MMR)

실제 사고 시에도 별도 안전계통 없이 자가 안정화 가능

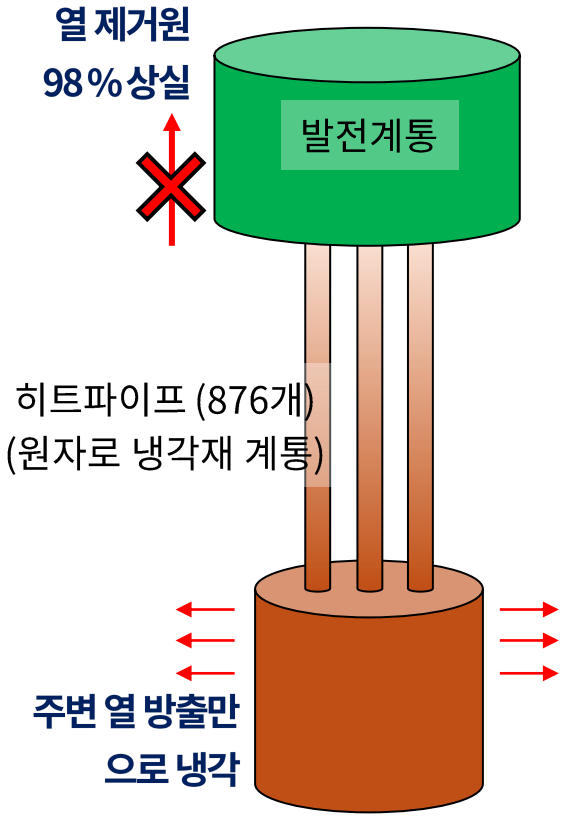
Source: *Ortensi, J., Jaradat, M. K., Hansel, J., & Terlizzi, S. (2024). Idaho National Laboratory. Prepared for the U.S. Nuclear Regulatory Commission.*

히트파이프 MMR 구조 예시

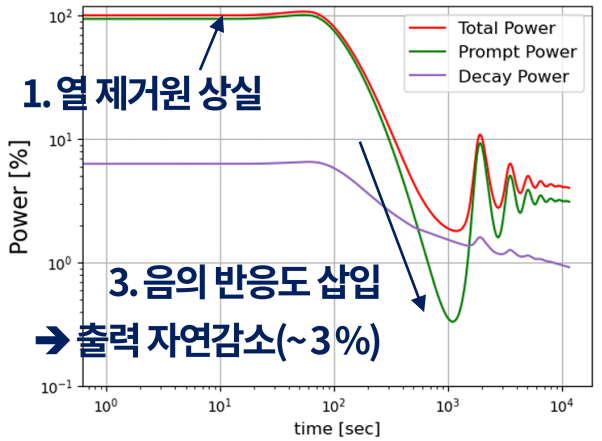


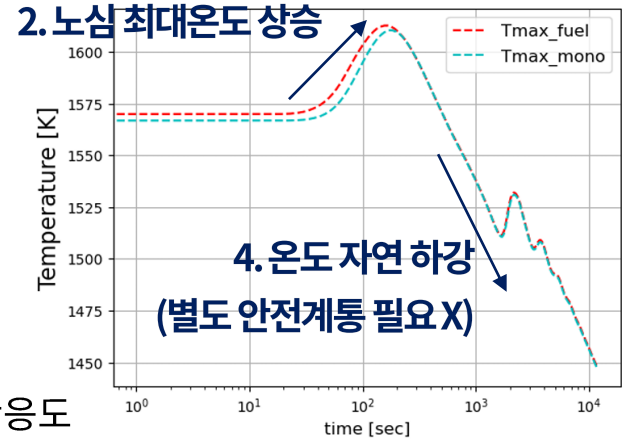
Source: Antares Website

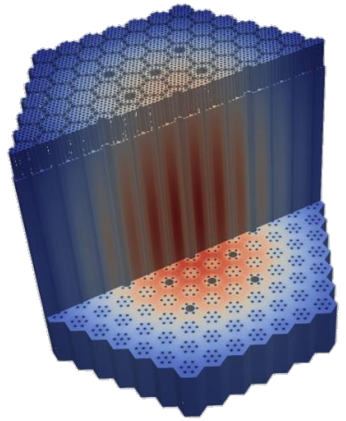
참조설계 히트파이프 MMR의 사고(열 제거원 상실) 시 노심 출력, 온도 해석 결과



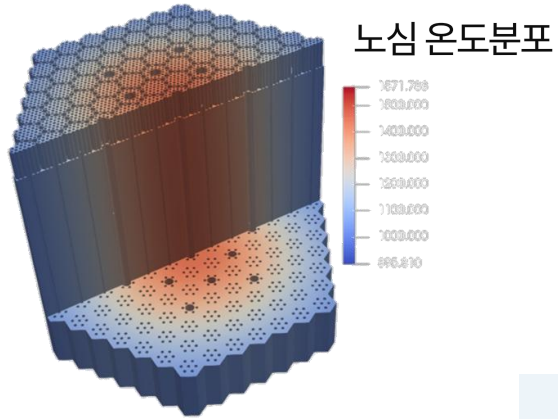
고체노심(핵연료 + 탄소블록)
→ 낮은 출력밀도, 높은 열용량/음의 반응도







사고 전
노심온도분포



사고 후
노심 온도분포

“제품”으로서의 원자력

출력이 작아지고, 안전성이 극대화되며 생기는 MMR의 3가지 기능특성

01 **공장 완전제작**

현장 건설 최소화 · 공장 품질관리



원전의 제조업화

조선·기계·플랜트 공급망 활용

02 **운송 가능**

트럭 · 선박 · 항공 · 철도 운송



발전소 건설이 아닌 “제품”을 구매

수요 기업이 필요한 곳에 직접 도입

03 **준자율 운전**

적은 인력 운전 · 피동 안전 설계



운영의 문턱이 낮아짐

원자력 사업자가 아니어도 도입 검토 가능

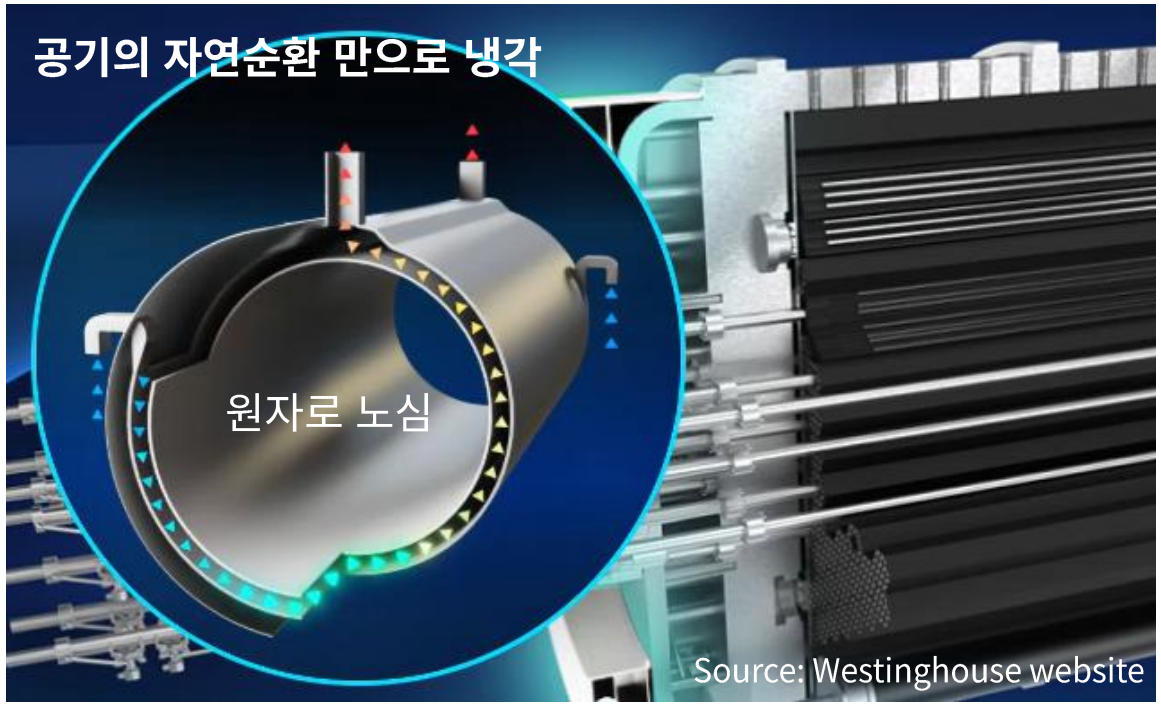
“제품”으로서의 원자력

자연현상이 책임질 수 있는 범위의 열출력

NANO Nuclear Energy Inc. **KRONOS MMR (3.5 - 15 MWe)**



Westinghouse **eVinci (5 MWe)**



복잡한 안전계통 설계가 없어 매우 단순한 설계 ➔ 원자로 “건설”이 아닌 “제품 제조” 영역으로의 전환

“제품”으로서의 원자력

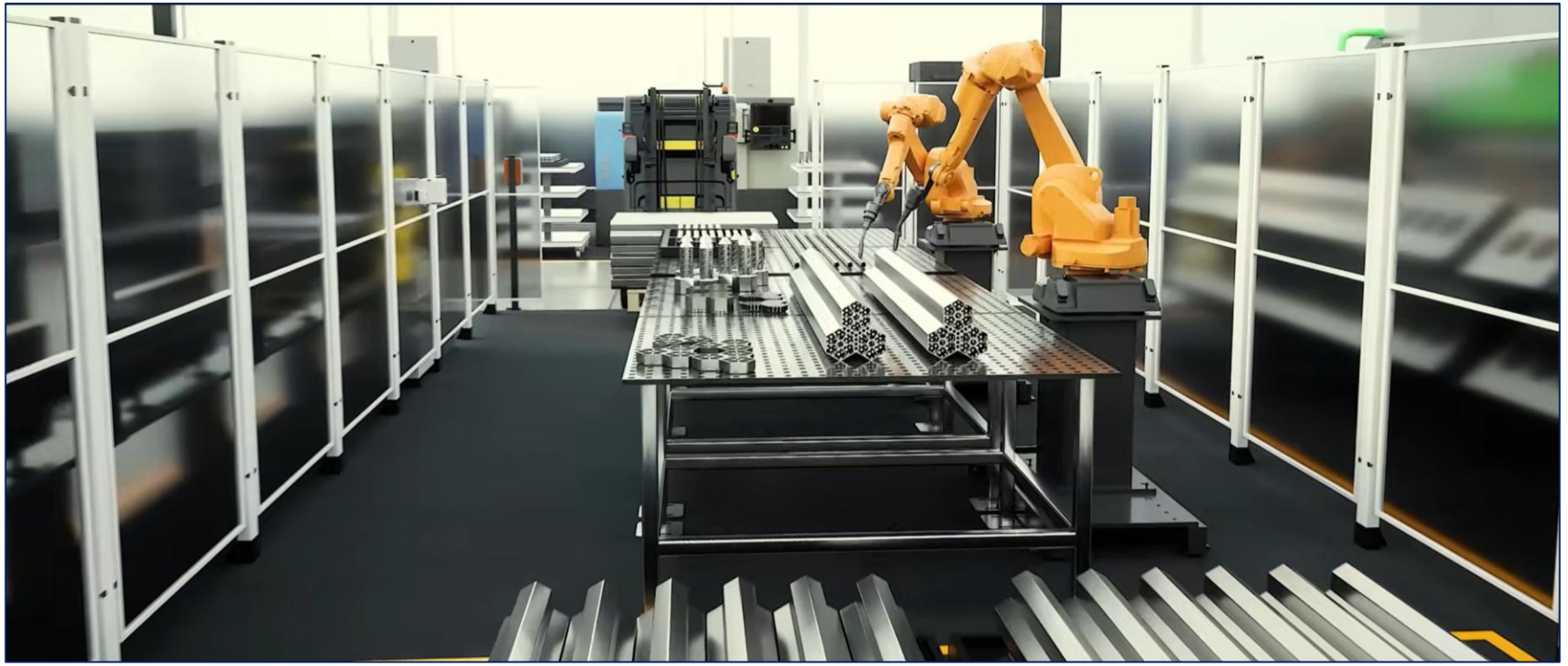
시스템이 단순해진 만큼, 제조도 단순: 원자력 제조혁명



Source: https://www.bygonely.com/model-t-assembly-line-mass-production/



2차 세계대전 시 B-32 폭격기 제조시설
(Source: Wikipedia)



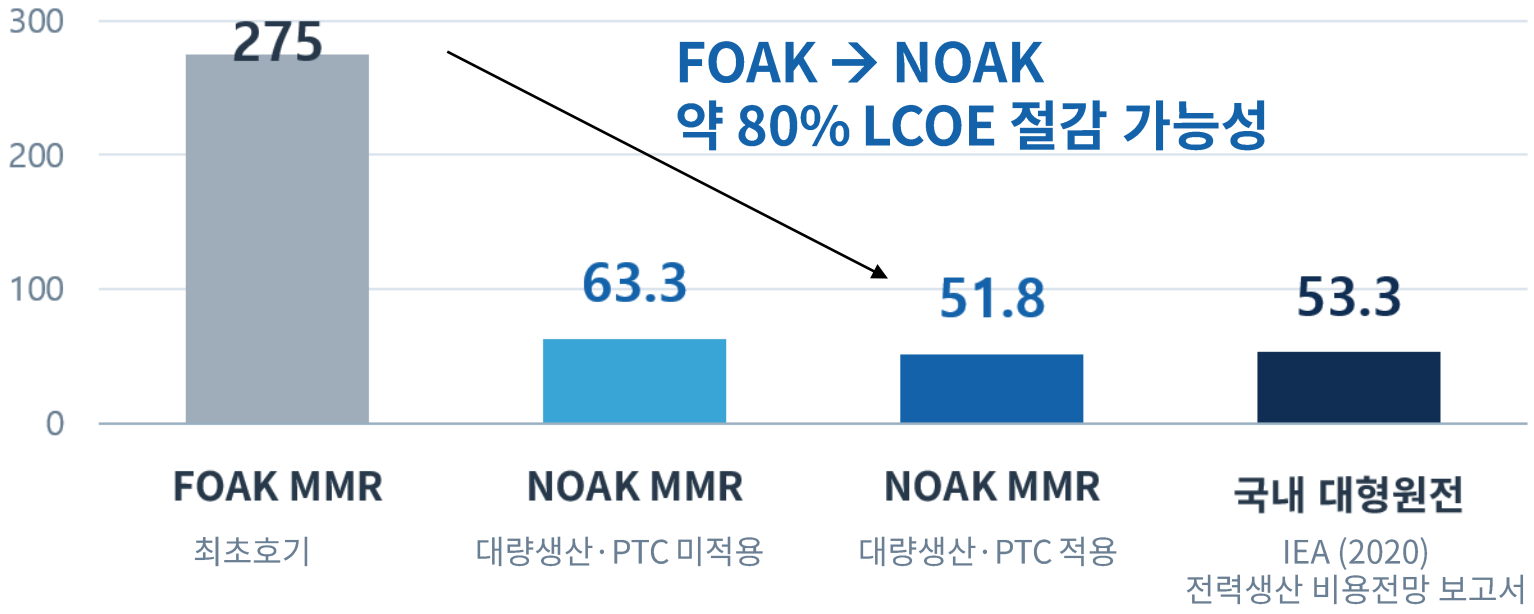
Source: Aalo atomics Youtube

“제품”으로서의 원자력

초도호기(FOAK) → 대량생산(NOAK) MMR의 경제성 전망 선행연구

Abdussami, M. R., Khaleb, I., Gao, F., & Verma, A. (2025). Evaluation of nuclear microreactor cost-competitiveness in current electricity markets considering reactor cost uncertainties. *Nuclear Engineering and Design*, *443*, 114295.

MMR, 국내 대형원전 LCOE(달러/MWh) 비교



비용 절감의 주요 요인

반복 제작·대량생산의
학습효과로 초기 건설비 절감

60.8%

NOAK LCOE 중
초기 건설비 비중

국내 대형원전과 유사한 LCOE 달성 가능성 시사

* FOAK: First of a kind, NOAK: Number of a kind
* FOAK MMR의 275는 문헌 범위 140–410의 중간값
* PTC: 미국 발전량 기반 친환경 세액공제

“제품”으로서의 원자력

제조된 MMR은 “배송”의 개념이 가능

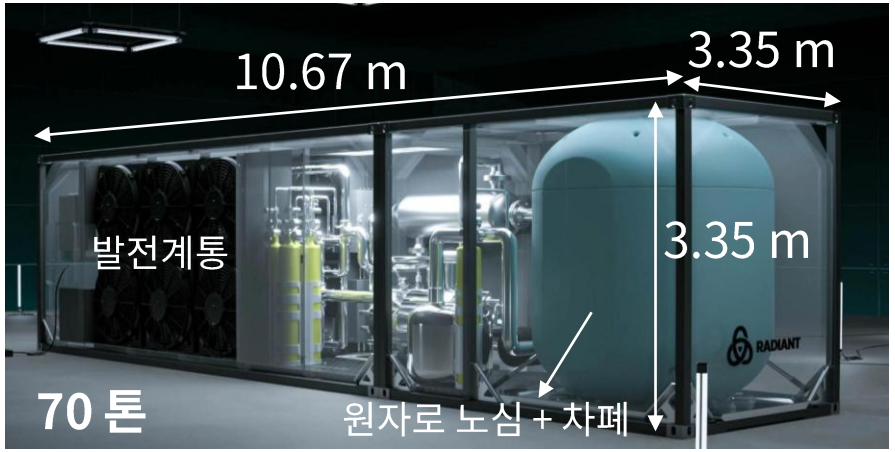
i-SMR



Source: IAEA

650 톤 (원자로압력용기만)

RADIANT Kaleidos (1 MWe)





Source: Radiant (2026.08, DOME 실증시설로 배송)

Westinghouse eVinci (5 MWe)

Source: Westinghouse



~ 100 톤

크기/무게: https://frontier.psu.edu/



Source: Westinghouse



“사업 제품”으로서의 MMR

미국을 중심으로 민간 기업 간 MMR 개발 경쟁 시작

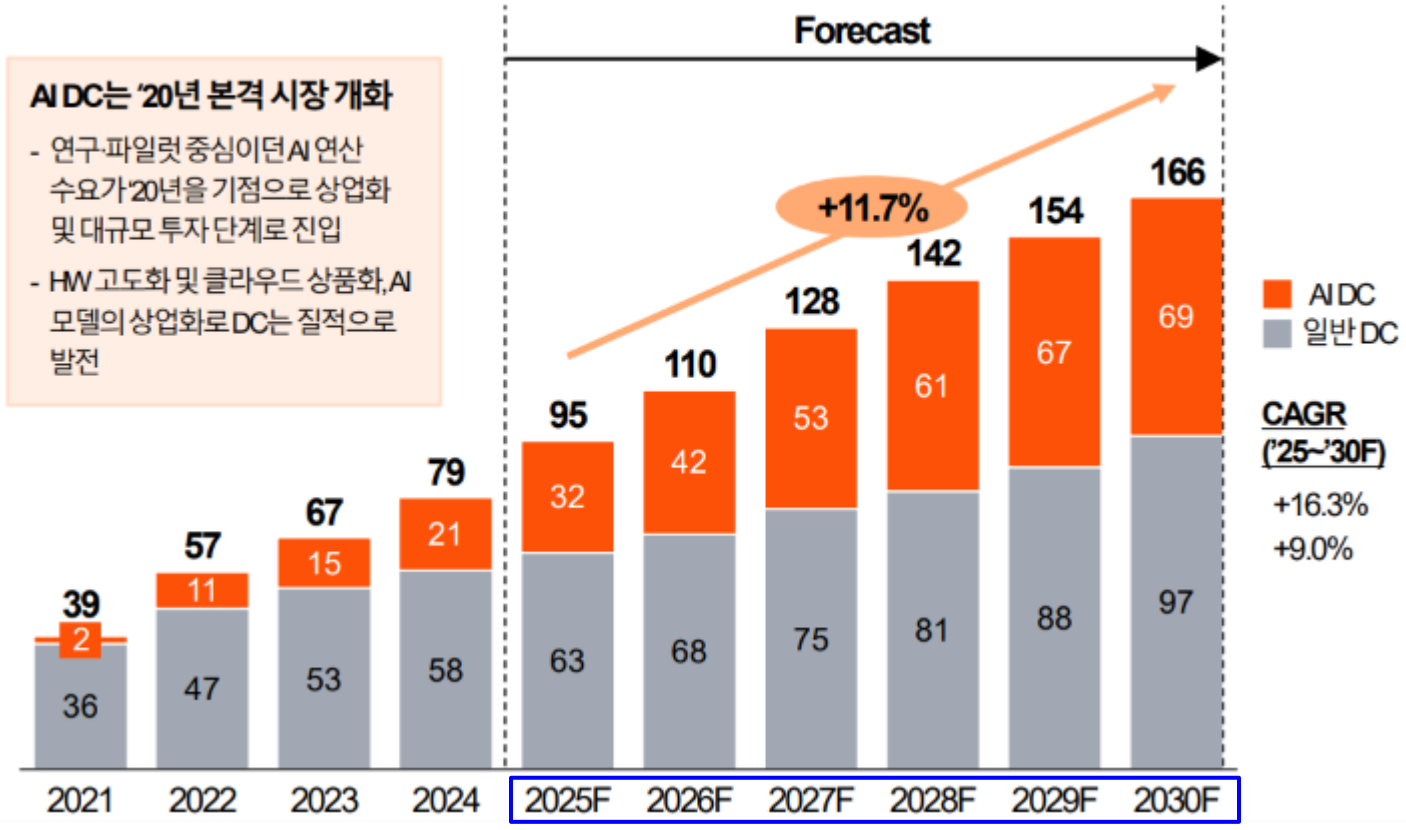
	기업·제품	노형·냉각재	온도	활용 분야
	Radiant **Kaleidos**	**고온가스로 (HTGR)** 헬륨 가스	**750~950°C**	· 수소 생산 (SOEC · S-I) · 석유화학 공정열 · 산업단지 열병합
	Westinghouse **eVinci**	**히트파이프로** 금속 히트파이프	**600~700°C**	· 우주 (달 표면동력) · 국방 · 전진기지 · 원격지 · 도서 · 광산
	Oklo **Aurora**	**액체금속 고속로** 나트륨 등 액체금속	**500~550°C**	· 데이터센터 전력 · 장수명 분산전원 · 고출력밀도 발전
	Saltfoss **seaMSR-100**	**용융염로 (MSR)** 불화염 (연료 겸 냉각재)	**600~700°C**	· 해양 추진 · 선박 · 부유식 발전 · 상압 운전 열공급
	Last Energy **PWR-20**	**소형 가압경수로** 경수	**약 300°C**	· 데이터센터 조기 배치 · 도서 지역 전력 · 저온 증기 · 지역난방

문제 해결을 판매하는 MMR 기업들: AI 데이터센터

전력은 당장 필요…“민간주도 MMR 신속 개발 및 배치”

글로벌 DC 수요 전망 (설비용량 기준)

(단위: GW)



Source: 서용태 (2026.03), 한국 AI 데이터센터 산업의 현재와 투자방향, 삼일회계법인

AI 데이터센터는 2년인데 원전은 10년…‘전력 브리지’ 없으면 반도체·AI 투자도 떠난다

에너지안전신문, 2026.10.06

주요 MMR 개발 기업 별 배치 목표 시기

기업명 (MMR)	배치 목표 시기
Westinghouse (eVinci)	2029년
Valar Atomics (Ward 250)	2028년
Aalo atomics (Aalo-1)	2027년
Radiant (Kaleidos)	2030년
Antares (R1)	2028년
NANO nuclear (KRONOS)	2030년 전후

Source: 각 기업 공식 홈페이지

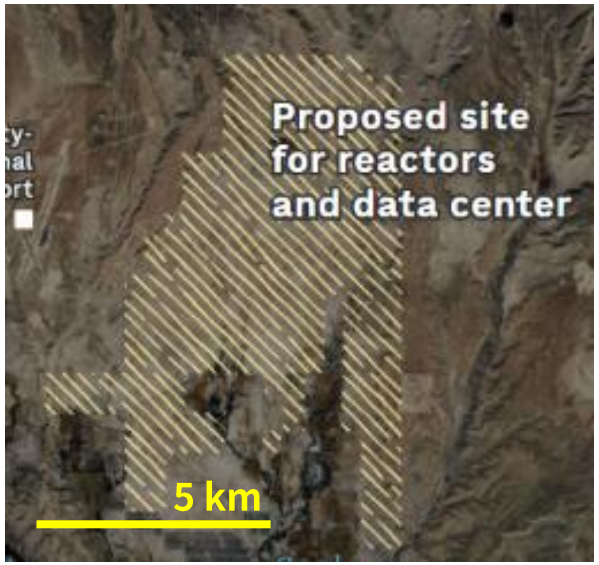
문제 해결을 판매하는 MMR 기업들: AI 데이터센터

전력은 당장 필요…“민간주도 MMR 신속 개발 및 배치”

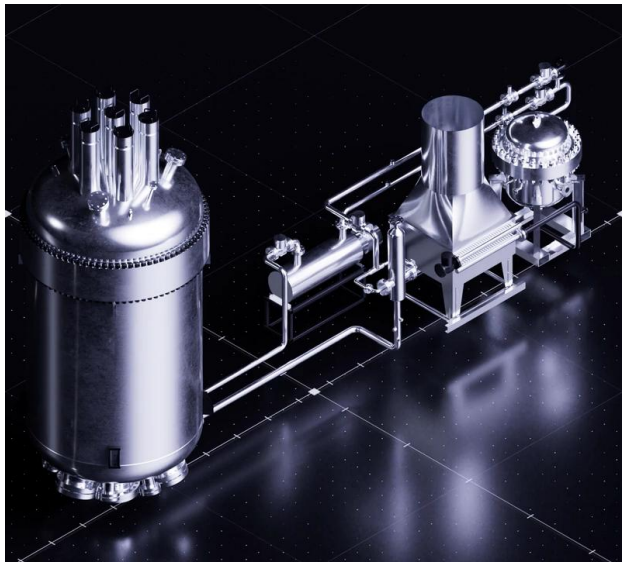
"원자력을 다시 위대하게 만들겠다" 456기의 원자로를 서버처럼 깐다…9.6GW AI 전력기지 추진 에너지안전신문, 2026.10.01

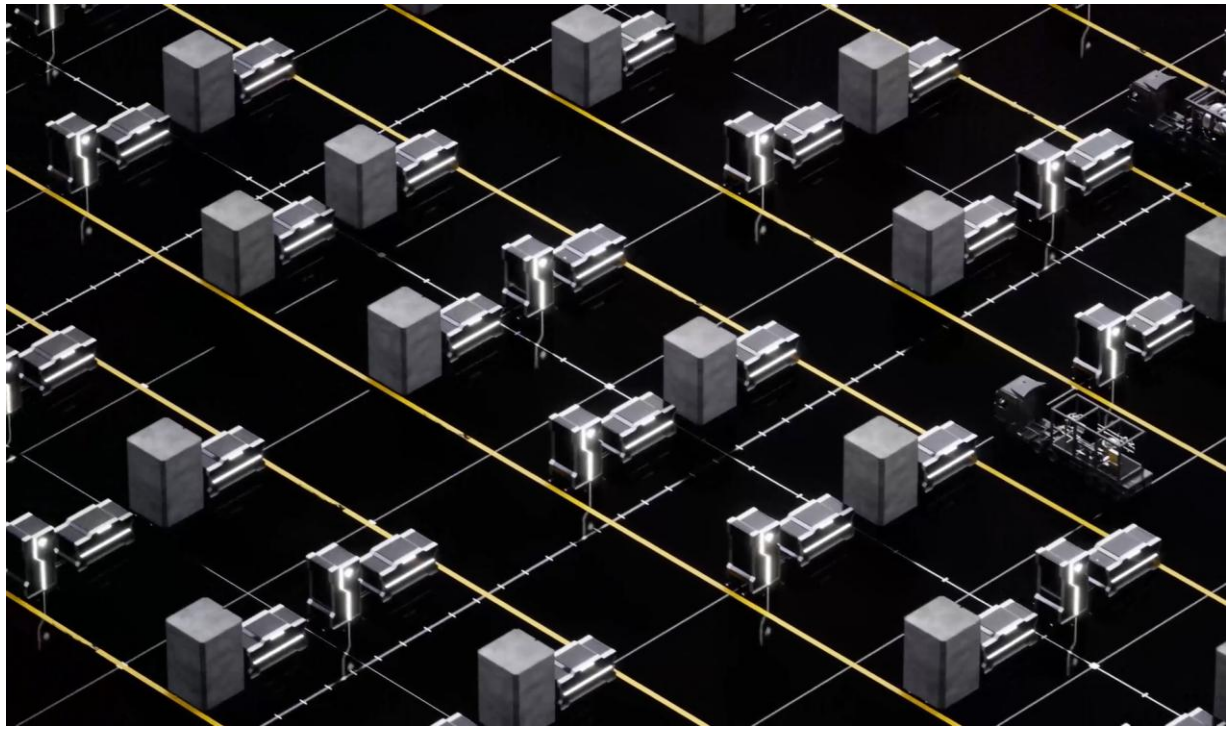
AI 데이터센터·핵연료 생산·방사성폐기물 저장까지 한 부지에 결합
2028년 첫 원자로 가동 목표…연방 환경심사·주민 의견수렴은 남아

Project Beehive (Valar Atomics, USA, Utah)



Source: NPR





Source: Valar atomics

문제 해결을 판매하는 MMR 기업들: 조선/해양

새로운 데이터센터 부지로서의 해양…“해상부유식 발전 MMR”

부유식 DC 개념설계 보고서

ABS

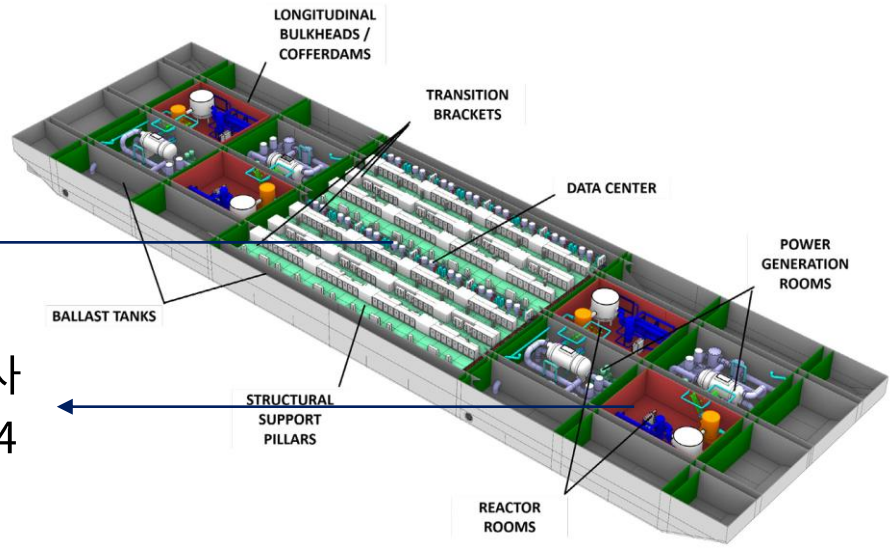
PATHWAYS TO A
LOW CARBON FUTURE
FLOATING NUCLEAR POWER DATA CENTER

IN PARTNERSHIP WITH
HEC
Herbert Engineering Corp.



Source: American Bureau of Shipping, & Herbert Engineering Corp. (2025). Pathways to a low carbon future: Floating nuclear power data center *(Technical Report). American Bureau of Shipping.*

데이터센터+냉각시스템
(60 MWe 용량)



BWXT
BWX Technologies, Inc.

원자로: BWXT사
BANR MMR x 4
(총 70 MWe)

국내 관심

AI 데이터센터 열풍에 조선사도 출격…'부유식 데이터센터' 선점 경쟁

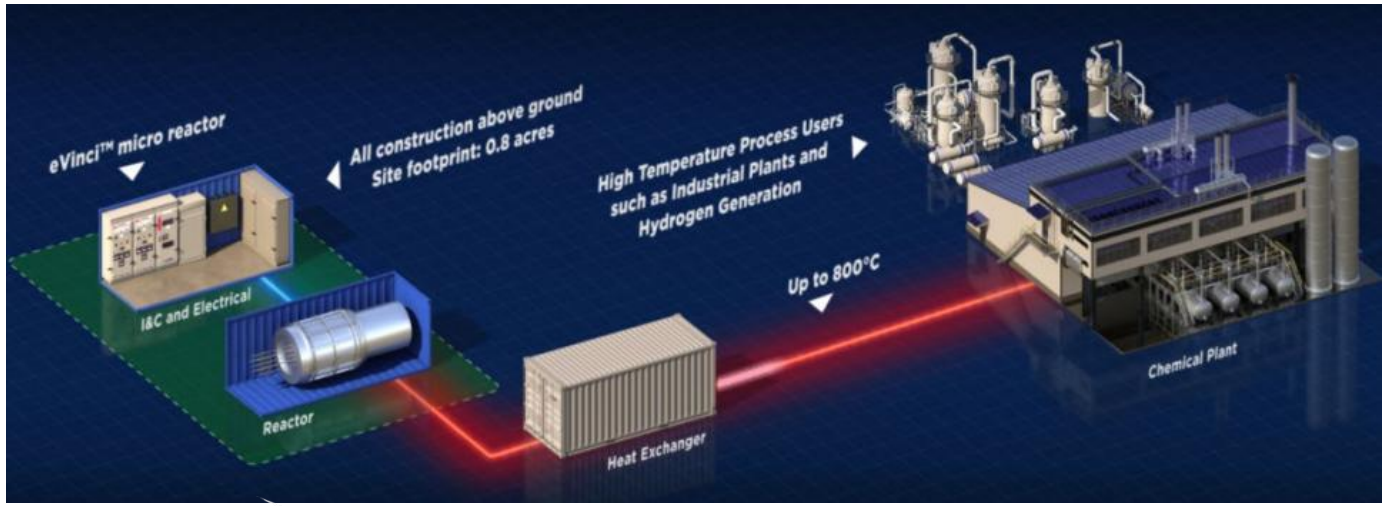
중앙일보, 2026.07.09

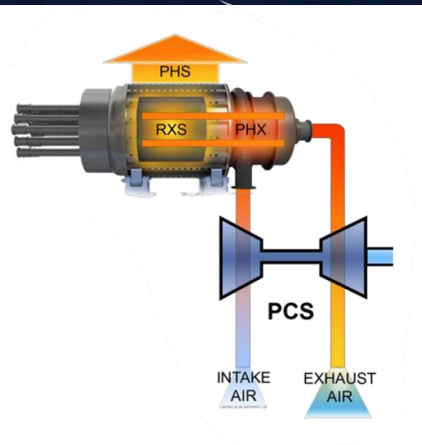


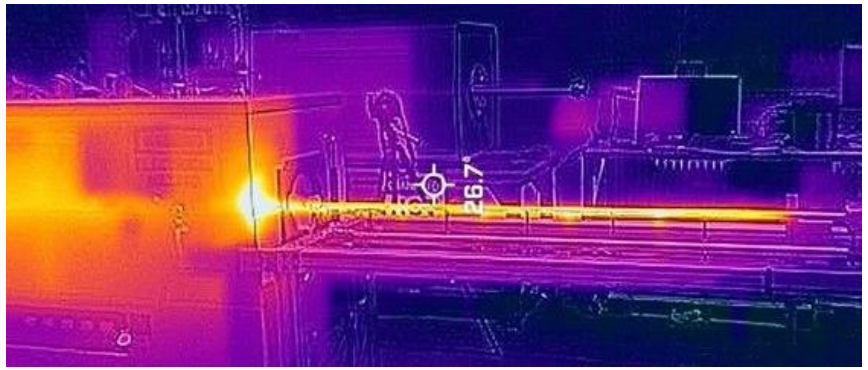
문제 해결을 판매하는 MMR 기업들: 제조/공정산업

무탄소 전력 & 열의 동시 공급 필요…“고온 작동온도(~ 800 ℃)의 MMR”

Westinghouse





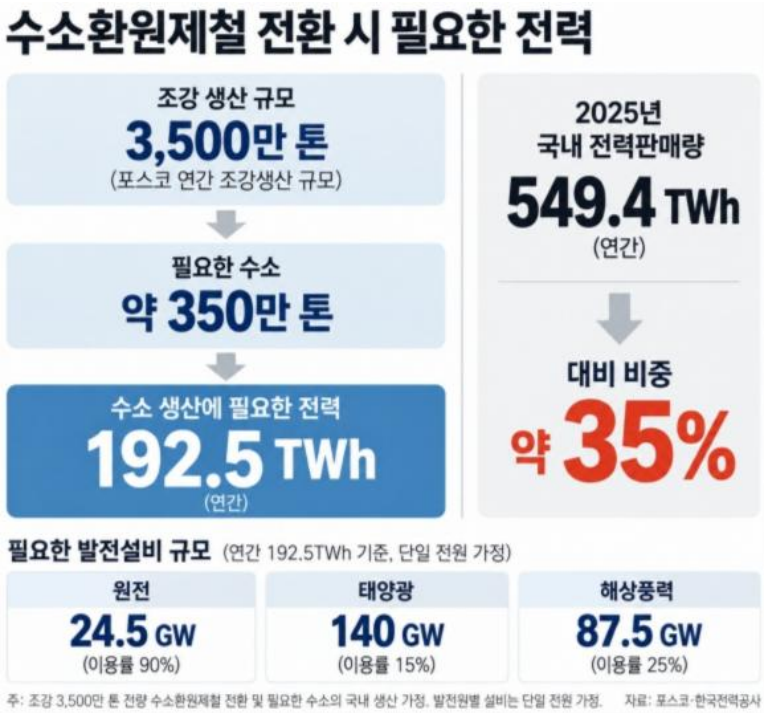


Source: Westinghouse

국내 관심

수소환원제철 목표…에너지·전력 공급 방안 마련 시급

딜사이트, 2026.06.25



Source: 철강금속신문

문제 해결을 판매하는 MMR 기업들: 격오지 전원

디젤 발전기는 비싸고, 탄소중립 필요…“디젤 발전을 대체하는 무탄소 전원”

Westinghouse



Source: Westinghouse, Youtube

ANTARES



Source: Antares



국내 관심

해수부·현대차·극지연구소, 남극기지 친환경 발전 확대 위해 '맞손'

머니투데이, 2026.06.18



장보고과학기지(Source: 극지연구소)



세종과학기지(Source: 극지연구소)

(과제소개) 한국형 MMR 개발전략 수립

“MMR을 개발할 것인가?” 보다, “MMR이 해결할 수 있는 문제는 무엇인가?”로 접근

➔ 우리나라 민간 산업의 미래 수요(문제 정의)를 조기에 발굴하여 개발 목표와 전략 수립 필요

과제명	**산업 분야별 민간수요 기반 초소형 모듈원자로 개발목표 및 추진전략 수립 연구**
수행기관	주관 경희대학교(외부연구원: 한양대학교) / 위탁 한국산업기술진흥협회
수행기간	2026.08.01 ~ 2027.01.31 (6개월)
최종목표	**민간 MMR 활용 수요를 체계적으로 도출하고, 정부 원자력 R&D 사업과 연계할 한국형 MMR 개발목표 및 상용화 추진전략(RFP 초안) 수립**

세부목표

01 국외 기술·산업 활용 동향 조사 노형별 개발·활용 사례 및 정책·투자 방향 분석	**02 국내 민간 산업계 사용자수요 조사·분석** 산업별 활용 수요 및 실제 이용조건 파악
03 산업별 적용 시나리오·핵심요건 도출 우선 적용시장 및 수요 기반 핵심 성능요건 정립	**04 신규 MMR 개발사업 기획·RFP 초안 도출** 개발목표·기술로드맵 수립 및 정부 R&D 연계

과제 수행 경과(~ 2026.10)

9.22 기업 대상 MMR 설명회

2026.09.22 13:00~15:00 / 양재 산기협회관



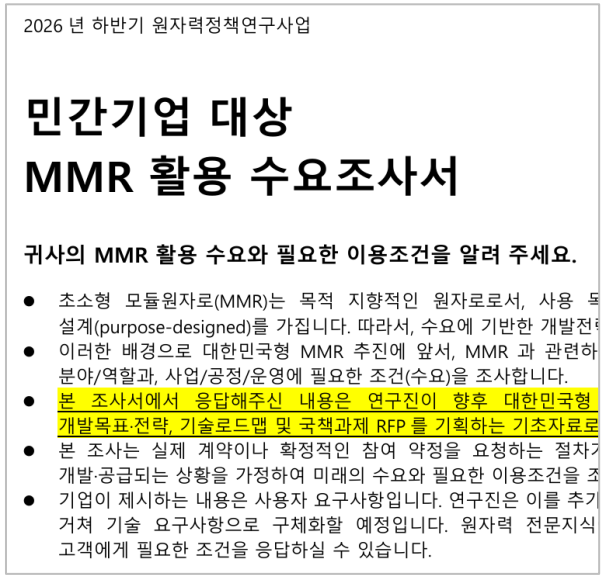
민간기업 23개사 · 총 34명 참석

과제·MMR 개요 소개, 수요조사 작성 안내
산업계 질의응답 진행

9.23~10월 기업 수요조사

설명회 참석기업 및 잠재 수요기업 대상

수요조사서 작성양식·MMR 소개자료·설명회 녹화영상 배포



2026 년 하반기 원자력정책연구사업

민간기업 대상
MMR 활용 수요조사서

귀사의 MMR 활용 수요와 필요한 이용조건을 알려 주세요.

- 초소형 모듈원자로(MMR)는 목적 지향적인 원자로로서, 사용 목
  설계(purpose-designed)를 가집니다. 따라서, 수요에 기반한 개발전
- 이러한 배경으로 대한민국형 MMR 추진에 앞서, MMR 과 관련하
  분야/역할과, 사업/공정/운영에 필요한 조건(수요)을 조사합니다.
- 본 조사서에서 응답해주신 내용은 연구진이 향후 대한민국형
  개발목표·전략, 기술로드맵 및 국책과제 RFP 를 기획하는 기초자료로
- 본 조사는 실제 계약이나 확정적인 참여 약정을 요청하는 절차가
  개발·공급되는 상황을 가정하여 미래의 수요와 필요한 이용조건을 조
- 기업이 제시하는 내용은 사용자 요구사항입니다. 연구진은 이를 추가
  거쳐 기술 요구사항으로 구체화할 예정입니다. 원자력 전문지식
  고객에게 필요한 조건을 응답하실 수 있습니다.

MMR 수요 분야 및 참여 역할

사용자 요구사항 12개 문항

적용사업·지역·서비스 규모
부하·설치·운송·운영 조건
도입시점·경제성 판단기준

후속 미팅 참여 의향

10월 서면 수요조사 및 응답자료 취합

후속 기업 협의와 전문가 검토의 기초자료 확보

과제 향후 수행 계획

2026.10 ~ 2027.01 민간 수요 구체화에 기반한 개발목표·추진전략 수립

번호	추진내용	추진일정				담당	주요 산출물
		2026.10	2026.11	2026.12	2027.01		
1	수요조사 결과 취합·분석 후속 기업 협의	취합				전체	산업별 수요· 사용자 요구사항
2	적용 시나리오·우선시장 도출		도출			경희대·한양대	산업별 적용 시나리오
3	수요 기반 MMR 핵심요건 도출		정립			경희대·한양대	핵심 성능요건
4	개발목표·기술로드맵(TRM) 수립			수립		경희대·한양대	MMR 개발목표· 기술로드맵
5	정부 R&D 연계 RFP 초안 작성			작성		경희대·한양대	정부 R&D 제안요청서 초안
6	최종보고서 작성·결과 정리				완성	전체	개발전략·RFP 최종보고서

※ 주요 의사결정 시점에 기업 협의 및 전문가 검토 병행

최종 산출물 한국형 MMR 개발목표 · 기술로드맵(TRM) · 정부 R&D 연계 RFP 초안

MMR 설명회 자료 안내

9월 22일 MMR 설명회 자료를 공유합니다

01 MMR 소개자료

MMR의 개념·기능특성과 산업별 활용

02 설명회 녹화영상

과제·MMR 개요 및 수요조사 안내

03 민간기업 MMR 수요조사서 작성 양식

활용 분야·참여 역할 및 사용자 요구사항 조사

QR코드로 자료 폴더 열기

공유자료 바로가기

감사합니다

수요조사서 관련 문의: zeus5137@khu.ac.kr