

2026년 춘계 원자력학회 워크숍: AI·탄소중립시대, SMR 생태계의 역할과 의미

SMR 사업 성공을 위한 공급망 구축 방안



Strategies for Building a Supply Chain to Ensure the Success of the SMR Business

4세대 원전(SFR·MSR·LFR·HTGR·Heat Pipe) 공급망 분석 및 Xe-100·eVinci 사례 연구

발표자 **이상일** 산학협력중점교수 (서울대학교)
발표일시 2026년 5월 6일

목차 (Agenda)

Five-part narrative from paradigm shift to the case studies

01

서론: 4세대 SMR 공급망의 패러다임 전환

기계공학 중심에서 화학·소재 공학 중심으로

02

공통 진입점: HALEU 농축과 TRISO 연료

모든 4세대 노형의 공통된 시작점

03

5대 핵심 노형별 공급망 진단

SFR · MSR · LFR · HTGR · Heat Pipe

04

Case Study: Xe-100 (X-energy)

HTGR 컴팩트화와 고온 합금 공급망

05

Case Study: eVinci (Westinghouse)

Heat 파이프 기반 마이크로원자로

06

한국의 전략적 포지셔닝 및 로드맵


제조 허브에서 IP Owner 로


기계적 가공에서 '화학·소재 공학'으로의 패러다임 전환

Paradigm Shift: From Mechanical Machining to Chemistry & Materials Engineering

과거 · 기존 경수로 (LWR)

 기계공학 및 정밀 가공 중심


 고압·저온 환경 (물 냉각재)


 대형 단조·용접이 경쟁력의 핵심

물 기반 루프, 탄소강·스테인리스강 중심의 성숙한 공급망. 한국이 수십 년간 역량을 축적한 영역.

미래 · 제4세대 원자로 (Gen IV)

 신소재 및 화학 처리 중심

 저압·초고온 (500~1000°C)

 특수 냉각재 (헬륨·소듐·용융염·납)

극한 부식·중성자 조사를 견디는 특수 합금과 화학 처리 기술이 새로운 공급망의 핵심.

핵심 인사이트 제4세대 SMR의 상용화 패권은 원자로 설계 기술이 아닌, 극단적 환경을 견디는 **'특수 소재'**와 고농축 핵연료의 **'양산 능력'**에 달려 있다.

공급망의 시작점: HALEU 농축과 TRISO 연료

Common Entry Point for All Gen-IV Reactors



HALEU (고순도 저농축 우라늄)

5~20% 농축도를 가진 차세대 원자로 필수 연료

- 현재 **러시아(TENEX)**가 상업적 공급을 점유
- 미국 **Centrus Energy** 등 서방 진영의 자립화 경쟁 중
- 초기 시장 주도권을 결정짓는 **최고 난도의 전략 물자**



공급 병목 (Bottleneck)

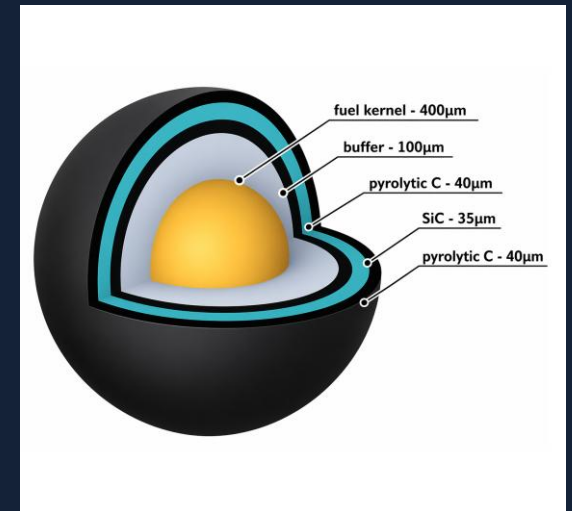
서방 진영의 HALEU 자립화 속도가 초기 시장의 실질적 상용화 일정을 결정.



TRISO (피복입자 핵연료)

1,600°C 이상 고온에서도 방사성 물질 유출을 물리적으로 차단하는 4중 코팅 구조

- Core** fuel kernel - 400 μ m
- Layer 1** buffer - 100 μ m
- Layer 2** pyrolytic C - 40 μ m
- Layer 3** SiC - 35 μ m
- Layer 4** pyrolytic C - 40 μ m



주요 파트너

BWXT · X-energy (미국) | KAERI (한국원자력연구원)

제4세대 원자로 5대 핵심 노형

Five Pillars of Generation-IV Reactor Technology

I	II	III	IV	V
SFR	MSR	LFR	HTGR	Heat Pipe
<i>Sodium Fast Reactor</i>	<i>Molten Salt Reactor</i>	<i>Lead-cooled Fast Reactor</i>	<i>High-Temp Gas Reactor</i>	<i>Heat Pipe Microreactor</i>
냉각재	냉각재	냉각재	냉각재	냉각재
액체 소듐	용융염	액체 납	헬륨	알칼리금속 열파이프
작동 온도	작동 온도	작동 온도	작동 온도	작동 온도
500~550°C	600~700°C	500°C+	700~950°C	600~700°C
핵심 소재	핵심 소재	핵심 소재	핵심 소재	핵심 소재
HT9 강재	Hastelloy-N	AFA 강재	원자력등급 흑연	Fe-Cr-Al 합금



각 노형은 고유한 극복 과제를 가지며, 이를 해결하는 특수 소재 기술 확보가 상용화 공급망의 패권을 결정한다.

핵심 노형 1 · 소듐냉각고속로 (SFR)

Extreme Heat Transfer & Special Alloys — TerraPower's Natrium

기술 제원 (Technical Specs)

냉각재 액체 소듐 (Liquid Sodium)

핵심 소재 HT9 강 (페라이트-마르텐사이트강)

특징 고속 중성자 조사에 강한 구조재, 대용량 전력 그리드 타겟

핵심 극복 과제

- 불투명성 · 반응성: 소듐은 불투명하여 내부 점검용 초음파 시각화 장치 등 특수 센서 필수
- 물·공기와의 격렬한 반응성 제어 필요
- 핵심 기자재: 원자로 용기, 대형 소듐 펌프, 중간 열교환기(IHX), 특수 연료 취급 로봇

글로벌 생태계 맵 (SFR)

TerraPower (Natrium) & GE-Hitachi

글로벌 상용화 선도 OEM · 미국 주도

HD현대중공업

원자로 용기 제작

두산에너지빌리티

주조/단조 부품 타진

현대건설

EPC (Engineering, Procurement, Construction)

핵심 노형 II · 용융염 원자로 (MSR)

Where Nuclear Meets Chemical Engineering — Seaborg's CMSR

기술 제원 (Technical Specs)

연료/냉각재 액체 용융염 (염화물/불화물) + 우라늄 혼합
핵심 소재 Hastelloy-N 계열 니켈 초합금 (고온 부식 내성)
타겟 시장 해상용 SMR 및 선박 엔진 (파워 바지선)

핵심 극복 과제

- **치명적인 소재 내부식성:**
고온 용융염이 금속을 심하게 부식시킴
- 실시간 화학 상태 모니터링 및 불순물 제거 필수
(Off-gas 시스템, 제논/크립톤 포집)
- **화학 제어 시스템:** 원자력 공정에 화학 공학이 본격 접목

글로벌 생태계 맵 (MSR)

Seaborg (CMSR) · 덴마크

Compact Molten Salt Reactor · 해상 바지선 플랫폼

삼성중공업

파워 바지선 모듈 조립

HD현대

원자로 용기 및 주요 기기 제작 검토

Materion

용융염 냉각재

핵심 노형 III · 납냉각고속로 (LFR)

Ultra-Heavy Load & Corrosion-Resistant Coatings — Rosatom, Newcleo

기술 제원 (Technical Specs)

냉각재 액체 납 (Lead) 또는 납-비스무트 합금

핵심 소재 AFA 강재 — 표면 산화알루미늄층으로 부식 차단

구조재 특수 합금강 + 고성능 세라믹 코팅

핵심 극복 과제

- **극한의 하중:** 납은 물의 약 10배 무게
- 대용량 순환 펌프 임펠러 + 고성능 면진(Seismic Isolation) 필수
- 폴로늄(Po-210) 방사성 물질 필터링 시스템
- 비스무트 희귀 금속 조달 병목 가능성

글로벌 생태계 맵 (LFR)

Rosatom (BREST-300) · Westinghouse / Newcleo · UNIST (Micro-URANUS)

KRISO

선박해양플랜트연구소 — 해상 적용 협력

UNIST

Micro-URANUS 초소형 LFR 독자 개발

두산에너지빌리티

주조/단조 부품 생산 역량

핵심 노형 IV · 고온가스로 (HTGR)

Ultra-High-Temp Management for Hydrogen Production — X-energy

기술 제원 (Technical Specs)

냉각재 헬륨(Helium) 가스

감속재/구조재 원자력등급 흑연 (Nuclear Graphite) — 금속을 대체하는 노심 구조재

타겟 시장 수소 환원 제철 · 산업 공정열 통합

핵심 극복 과제

- 700~950°C 초고온 제어
- 불활성 헬륨 가스 누설 방지 기술 (완전 밀폐형 순환기 필수)
- 초고온 니켈 합금 기반 중간열교환기(IHX) 필수
- 원자력등급 흑연: Toyo Tanso(일본) · SGL Carbon(독일) 독점

글로벌 생태계 맵 (HTGR)

X-energy (Xe-100) · 미국

Pebble-bed 고온가스로 · 다음 장에서 Case Study

두산에너지빌리티

X-energy 주기기 제작 계약 체결

DL 이엔씨

EPC사로 사업 참여 예정

GrafTech(미국) ·
Mersen(프랑스)
·포스코퓨처엠(한국)

글로벌 원자력등급 흑연 공급 대안

핵심 노형 V · Heat Pipe 마이크로원자로

Zero Pump Passive Heat Transfer — Westinghouse eVinci

기술 제원 (Technical Specs)

노형 초소형 마이크로원자로 (Nuclear Battery, ~5MWe급)

열전달 알칼리금속 열파이프 (무동력 모세관력 기반)

핵심 소재 Fe-Cr-Al 합금 열파이프 + 원자력등급 흑연 코어 블록

핵심 극복 과제

- **단일 실패점 (SPOF):** 열파이프 1개 품질이 전체 안전성 결정
- 12-foot 핵등급 열파이프의 재료·밀봉 수명 검증 난제
- **폐쇄형 공급망:** Westinghouse 내부 제작, 대체 벤더 진입 차단
- **분산형 에너지:** 공장 조립 후 완제품 운송 (일체형 모듈)



글로벌 생태계 맵 (Heat Pipe)

Westinghouse (eVinci) · 미국

100% 피동형 원자력 배터리 · 다음 장에서 Case Study

두산에너지빌리티

PCHE(인쇄회로기판형) 1차 열교환기 잠재력

대흥기업

산업용 열파이프 실적보유, NQA-1 승격 시 진입 기회

KAERI

국내 독자 Heat Pipe MMR 연구

Xe-100 · 고온가스로(HTGR)의 컴팩트화와 대형 구조물 공급망

X-energy (미/국) · 200MWt / ~80MWe per module · Helium cooled · Graphite moderated · Rankine cycle

설계 특징 (Design Characteristics)

연료	구형 TRISO (Pebble) — 피동형 고유 안전성
냉각재	1차측 헬륨 순환 (7~9 MPa)
발전 사이클	2차측 Rankine Cycle (증기 터빈)
주기기	대형 RPV, 헬리컬 코일 증기발생기, 헬륨 순환기
안전성	자연 대류 기반 피동 잔열 제거

✓ 국내 공급망 주도권 (RPV 및 압력경계)

연간 20기

조립 능력 목표

두산에너지빌리티

X-energy 주기기 제작 계약

국내 중공업체가 RPV 등 대형 주기기의 선제적 생산 계약 체결

- 상대적으로 성숙한 대형 원전 인프라 활용 가능 영역
- RPV는 기존 APR1400 제작 역량이 직접 전이되는 품목
- 대형 단조·주조·용접 역량을 보유한 국내 중공업계의 Tier-1 진입 유망 영역
- 2030년 전후 상용 가동을 목표로 하는 실증 일정에 맞춘 공급 계약 진행 중

Xe-100 핵심 병목: 3대 극한 기자재

Helical Coil SG · Hermetic Helium Circulator · Isotropic Graphite



병목 I · 헬리컬 코일 증기발생기

Helical Coil Steam Generator

- 컴팩트화를 위해 나선형 코일 구조 채택
- **565°C / 16.5 MPa의 극한 운전 조건**
- 수천 개 튜브의 3차원 정밀 벤딩 시 편평화(Ovality) 제어 필요
- 1순위 소재: Alloy 800H (Ni-Fe-Cr 기반, HTR-10 등 상용 검증)
- 대안 소재: Alloy 617 (Ni-Cr-Co-Mo, 우수한 열안정성)

진입 장벽

초고압·초고온 전용 Tube Mill 확보 및 니켈합금 원주용 접(WPS/PQR) 고도 기술력 부재 시 제작 불가



병목 II · 완전 밀폐형 헬륨 순환기

Hermetic Helium Circulator

- 헬륨의 극저밀도 특성에 대응하는 공기역학 설계 필요
- **방사성 유출 원천 차단**을 위해 동적 씰(Seal) 배제
- 완전 밀폐형(Hermetic Sealing) + 능동자기베어링(AMB) 탑재
- 글로벌 소수 업체(Curtiss-Wright, Howden)의 기술 독점 영역
- 국내 자립은 단기 불가 — 국제 전략적 파트너십 필수

진입 장벽

능동자기베어링(AMB) 및 초저압 밀폐 회전기계 설계 IP는 소수 글로벌 업체에 집중되어 단기 진입 차단



병목 III · 원자력등급 특수 흑연

Reactor-Grade Isotropic Graphite

- **750°C 이상을 견디는 핵심 노심 구조재 및 감속재**
- 원자로용 승인을 획득한 '특수 등방성 흑연(Isotropic Graphite)' 필요
- 일본 Toyo Tanso (IG-110), 독일 SGL Carbon (NBG-18) 이 시장 과점
- 진입 장벽 극상 품목 — 신규 공급 인증에 5~10년 소요
- 국내 포스코퓨처엠 등이 장기적 국산화 R&D 추진 가능 영역

진입 장벽

원자로급 흑연은 원료(피치·코크스) 선택부터 소성·정제까지 수십 년 축적된 노하우가 요구되는 진입 장벽 극상 품목

eVinci · 100% 피동형 초소형 원자력 배터리 (Nuclear Battery)

Westinghouse (미국) · ~5MWe class · Heat Pipe 피동형 냉각 · Open-Air Brayton Cycle · 일체형 모듈

설계 특징 (Design Characteristics)

분산형 에너지 솔루션

공장 조립 후 완제품 상태로 운송되는 일체형 모듈. 전통적인 거대 압력용기(RPV) 개념에서 탈피.

핵심 메커니즘

펌프·밸브 등 동적 기계장치 없이, 열파이프(Heat Pipe) 내부 소듐 응축 및 모세관력을 이용한 무동력 열전달.

시스템 구조

강철 캐니스터 + 흑연 코어 블록 + 수평형 열파이프 네트워크. 증기 터빈을 배제한 Open-Air Brayton Cycle 적용.



병목 I · 핵심 Heat 파이프 독점

- 12-foot 원자력 등급 열파이프 (Fe-Cr-Al 합금)
- Westinghouse 내부 폐쇄형 공급망으로 자체 제작 주도
- 재료·밀봉 수명에 대한 독자적 검증 수행 중
- 대체 벤더의 진입이 원천 차단된 폐쇄형 기술



병목 II · 연료 희소성과 I&C 플랫폼 종속성

- HALEU 기반 UCO TRISO 입자 흑연 펠릿 성형 (19.75wt%↓)
- 서방권 HALEU 공급 희소성 — 강력한 해외 파트너십 필수
- 하드웨어 기반 ALS(Advanced Logic System) Ver.2 I&C 플랫폼 적용
- 이미 NRC 승인을 득한 특정 OEM 기술에 고도로 종속

한국의 전략적 포지셔닝: '제조 강점'과 '소재 한계'의 공존

Korea's Positioning — Manufacturing & EPC Strength vs. Materials & Chemistry Gap

압도적 우위 역량 · Manufacturing & EPC

대형 주기기 단조·주조 역량

두산에너지빌리티, 삼성·HD현대중공업 세계 최고 수준 제조 능력

해양 플랜트 연계 모듈 조립

파워 바지선, 해상용 SMR 등 조선업 인프라 직접 활용

EPC 경험 및 공급망 통합력

현대건설·DL이엔씨·포스코이엔씨 주도로 글로벌 원전 EPC 이력 축적

공장 기반 양산 전환 적응력

'설계의 시대'에서 '상용화 제작(Manufacturing)의 시대'로의 전환기 주도 가능

치명적 극복 과제 · Materials & Chemistry

특수 합금 원천 기술 부재

Hastelloy-N, Incoloy, HT9, Alloy 800H 등 원천 내재화 미흡

HALEU 농축 역량 없음

국가 차원의 농축 능력 부재, 100% 해외 의존 불가피

원자력 등급 특수 흑연 미개발

일본 Toyo Tanso, 독일 SGL Carbon 과점 체제

I&C 플랫폼 및 폐쇄형 기술 종속

NRC 승인 OEM 기술, eVinci 열파이프 등 대체 불가 기술 다수

결론 · Two-Track 전략 로드맵

Short-term Global Partnership + Long-term Core Tech Independence

PHASE 1 (2026~2030)

Manufacturing Hub

글로벌 가치사슬 진입

- 두산·HD현대·삼성을 중심으로 Xe-100 RPV 및 대형 기자재의 Tier-1 벤더 지위 확보
- HALEU·TRISO·eVinci 열파이프 등 초기 독자 수급 불가 전략 물자는 X-energy·Westinghouse·Centrus와 선택적 협력 구축
- PCHE 열교환기·특수 밸브·범용 터빈 계통·열파이프는 NQA-1 승격을 통한 개방형 공급망 선점

PHASE 2 (2030~2035)

IP Owner

원천 기술 집중 자립화

- 원자로급 특수 흑연 국산화 — 포스코퓨처엠·KAERI 주도 R&D 집중 투자
- 완전 밀폐형 헬륨 순환기(AMB 베어링) 독자 설계 역량 확보
- 국가 차원의 HALEU 장기 농축 기술 확보 및 공급선 다변화

PHASE 3 (2035+)

Final Vision

한국형 표준 모델 수출

- 핵심 소재 내재화가 완료된 '한국형 표준 수출 모델' 완성
- 글로벌 원자력 생태계에서 설계·제조·연료·서비스 전 영역을 포괄하는 IP Owner로 자리매김
- 4세대 원전 생태계의 최종 지배자로서 수출 주도 성장 모델 확립

글로벌 벤더와의 전략적 동맹 + 핵심 기술 자립의 병행만이 대한민국을 4세대 원전 생태계의 최종 지배자로 이끄는 유일한 로드맵