



원자력 발전과 SMR 전망



Yang-Hoon Sonn



전력수요의 폭발이 다가오고 있다



Electric power

Big Tech's dash for nuclear power

The take-off of AI will fuel a surge in demand for electricity

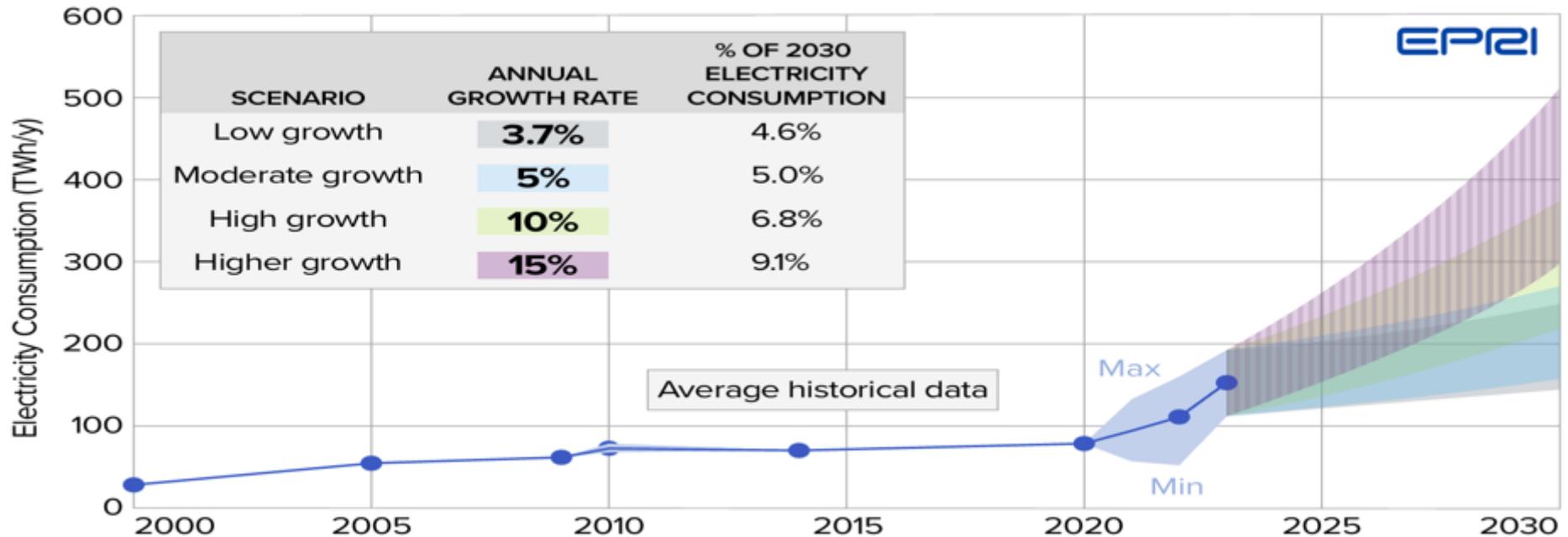




AI needs Power

- 전력 공급능력이 AI 경제에서 가장 중요한 요소이며
- 간헐성이 없는 발전소와 계통망 투자 확대가 핵심

Projections of potential electricity consumption by U.S. data centers

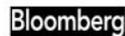




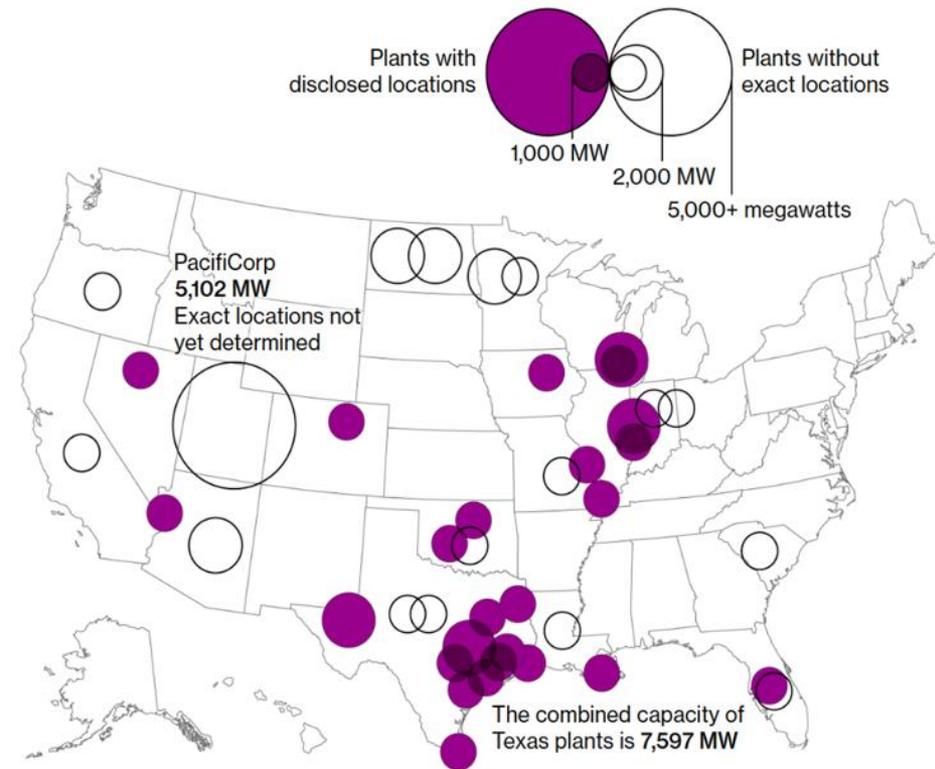
Big Tech's Gas & Nuclear Power

AI Boom Is Driving a Surprise Resurgence of US Gas-Fired Power

New US Gas Power Plants Announced in 2024



Capacity and locations of proposed gas-powered facilities



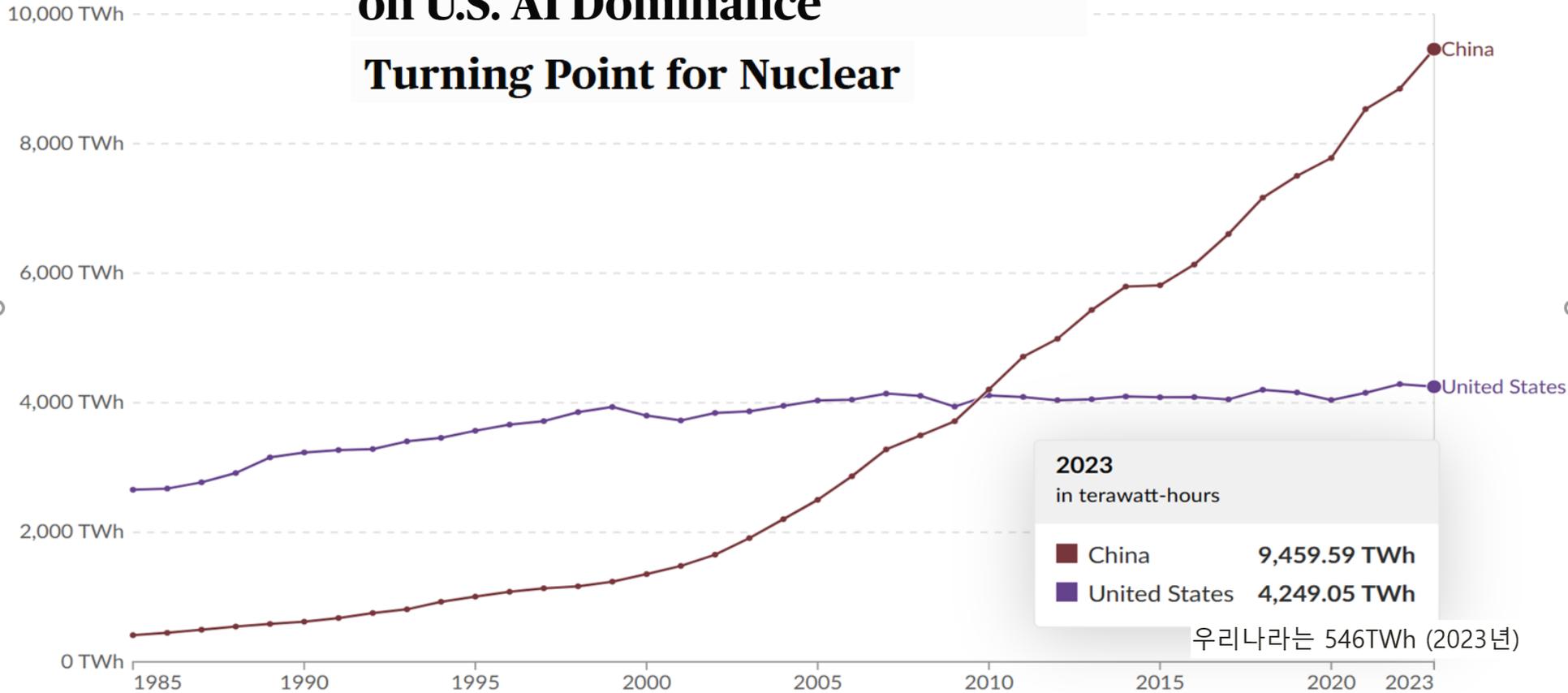
Summary of U.S. Big Tech Nuclear Power Contracts

Tech Company	Energy Partner	Project Details	Date
Microsoft	Constellation Energy	Signed a 20-year power purchase agreement to restart the Three Mile Island Unit 1 nuclear reactor, aiming to supply energy to Microsoft's data centers.	Sep 2024
Microsoft	Helion	Helion, a nuclear fusion startup, secured \$425M to advance its goal of producing electricity through nuclear fusion by 2028, with plans to supply power to Microsoft.	Jan 2025
Google	Kairos Power	Entered into an agreement to purchase power from small modular nuclear reactors (SMRs) developed by Kairos Power to support AI-related energy needs.	Oct 2024
Amazon Web Services (AWS)	Talen Energy	Explored a deal to connect directly to the Susquehanna nuclear plant in Pennsylvania to power AWS data centers. This "behind the meter" arrangement is under review by FERC.	Mar 2024
Meta	TBD (Request for Proposals)	Issued an RFP for 1-4 GW of new nuclear capacity to power AI-driven data centers by the early 2030s. Seeking developers capable of constructing multiple reactor units.	Dec 2024 (Proposals due Feb 2025)
OpenAI	Oklo & U.S. Government	OpenAI, under Sam Altman, is seeking 5GW of nuclear-powered data centers, with backing for Oklo's advanced nuclear reactors. Oklo signed a deal to supply up to 12GW of nuclear power by 2044.	Sep-Dec 2024



CSIS AI를 위한 미국 전력공급능력의 절대부족

The Electricity Supply Bottleneck on U.S. AI Dominance Turning Point for Nuclear



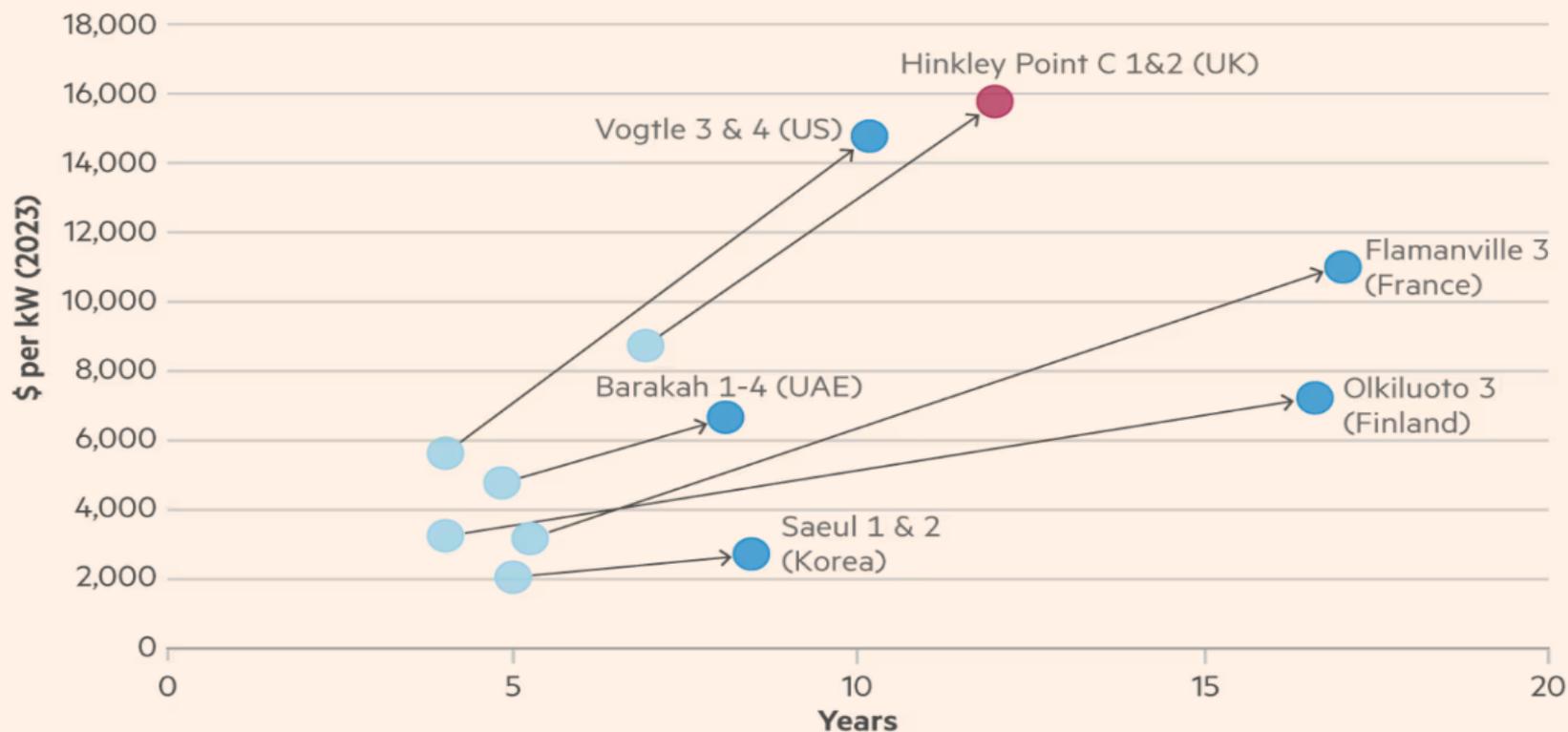


APR1400의 경쟁력!... ?..

Many recent nuclear projects have been hit by delays and cost overruns

Initial and latest capital cost estimates and construction time for selected projects

● Initial ● Final ● Latest



Source: IEA analysis based on publicly available sources. The latest cost estimates for Hinkley Point C considered in this analysis are based on 'Hinkley Point C Update' (EDF, 2024)

© FT



송전망 부족 문제: 에너지 공급의 미래를 위협

- 전 세계적으로 송전망 부족이 심각한 문제로 떠오르고 있다. 신재생에너지 확대와 전력 수요 증가로 인해 기존 송전망이 감당하기 어려운 상황이다. 새로운 송전망을 깔려면 수십 년이 걸리지만, 다가오는 AI 시대의 전력수요는 급증하고 있다.

송전망 부족이 심각한 글로벌 이슈

- 오늘날 에너지 산업에서 가장 심각한 문제 중 하나는 송전망 부족이다. 전력 수요는 지속적으로 증가하고 있지만, 송전망의 확장은 지연되고 있으며, 신재생에너지의 확대는 전력망 부담을 더욱 가중시키고 있다.
- 미국, 유럽, 한국을 포함한 주요 국가들은 송전 인프라 업그레이드에 막대한 비용과 시간이 소요될 전망
- 신재생에너지 발전소는 대개 수요지에서 멀리 떨어진 지역에 위치해 있어, 생산된 전기를 원활하게 공급하기 어렵다.
- 송전망 확충이 단 기간내에 이루어지기를 기대하기 어렵다. 다른 대안이 필요하다.



분산형 전력 공급의 필요성

- 전통적인 대규모 발전소에서 전력을 생산하여 장거리 송전하는 방식은 점점 한계를 보이고 있다. 이에 따라, 전력 수요지 근처에서 직접 전력을 공급하는 분산형 전력 시스템이 필수적인 해결책으로 떠오르고 있다.
- 신재생에너지는 변동성이 크기 때문에 안정적인 백업 전력이 필요하다.
- 산업단지, 대도시 주변, 도서 지역 등에서 안정적인 전력 공급을 위한 새로운 모델이 요구된다.

당분간 현실적인 대안은 가스발전 뿐

- 현재로서는 안정적인 전력 공급을 위한 현실적인 해결책으로 가스발전밖에 없다. 가스발전은 상대적으로 짧은 시간 내에 설치가 가능하고, 출력 조정이 유연하며, 석탄 발전보다 탄소 배출이 적다는 장점이 있다. 이에 따라, 세계 여러 나라에서는 신재생에너지와 함께 가스발전을 활용하는 방식으로 전력 공급을 유지하고 있다.
- 하지만 가스발전 역시 탄소중립 목표와 장기적인 에너지 안보 관점에서는 한계가 있다. 천연가스 가격 변동성이 크고, 장기적으로 탄소 배출을 줄여야 하는 과제가 남아 있다. 따라서 가스발전은 과도기적인 대안일 뿐이며, 장기적으로는 보다 지속가능한 해결책이 필요하다.



SMR은 개발되기만 한다면 많은 장점:

- 소규모 배치 가능: 기존 대형 원전보다 설치 면적이 적으며, 필요에 따라 여러 개를 배치 가능
- 송전 부담 완화: 수요지 근처에서 직접 전력을 생산하여 장거리 송전망 부담 감소
- 안전성 향상: 최신 기술 적용으로 기존 원전보다 안전성이 강화됨
- 빠른 구축 가능: 모듈형 설계로 건설 기간 단축 및 비용 절감
- 탄소 배출 없음: 가스발전 대비 완벽한 탄소중립 가능

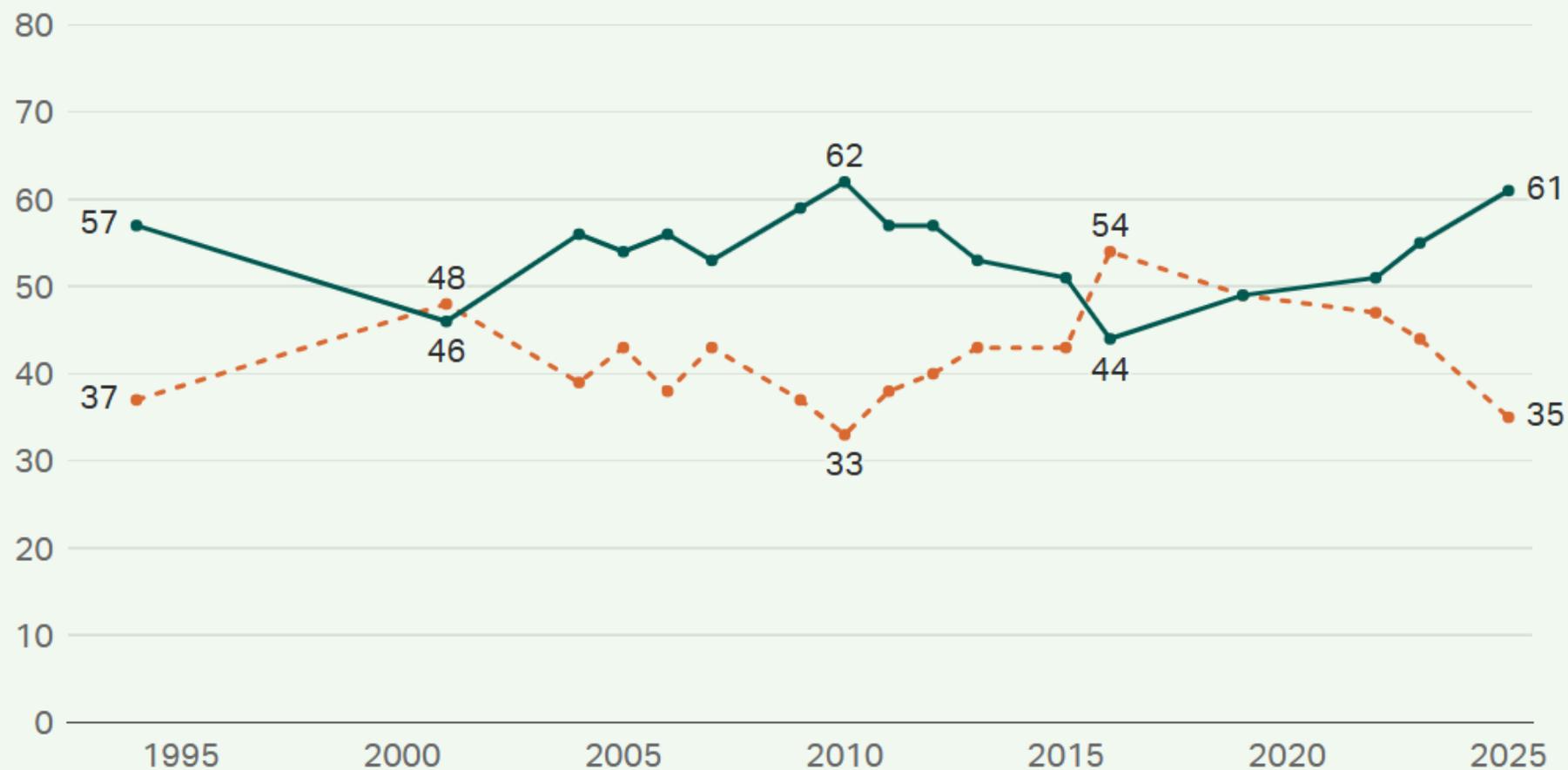
SMR 개발은 빠른 속도로 진행되고 있으며 일종의 'golden time'

- 지금은 SMR 개발은 빠른 속도로 진행되고 있으며 일종의 'golden time'을 맞고 있다. 글로벌 에너지 시장이 빠르게 변화하는 가운데, 이 기술의 선점이 매우 중요하다. 신속한 기술 개발과 정책 지원을 통해 SMR은 미래 전력망의 핵심이 될 가능성이 있다. 개발에 성공한다면..
- 더 이상 전력을 어디에서 생산할 것인가의 문제가 아니라, 어디에서 어떻게 공급할 것인가의 시대로 변하고 있는데 SMR은 이 질문에 대한 가장 현실적인 답으로 이해

Americans' Opinions of Nuclear Energy, 1994-2025

Overall, do you strongly favor, somewhat favor, somewhat oppose or strongly oppose the use of nuclear energy as one of the ways to provide electricity for the U.S.?

— % Strongly/Somewhat favor - - - % Strongly/Somewhat oppose





트럼프 대통령의 원전확대 행정명령

- 2025년 5월23일 미국 원자력 산업을 대대적으로 확대하기 위한 4개의 행정명령 서명
- 2050년까지 원자력 발전 용량을 현재의 약 100GW에서 400GW로 4배 확대하는 것을 목표
- 인공지능(AI) 데이터 센터와 국방 시설의 전력 수요 증가에 대응하기 위한 것

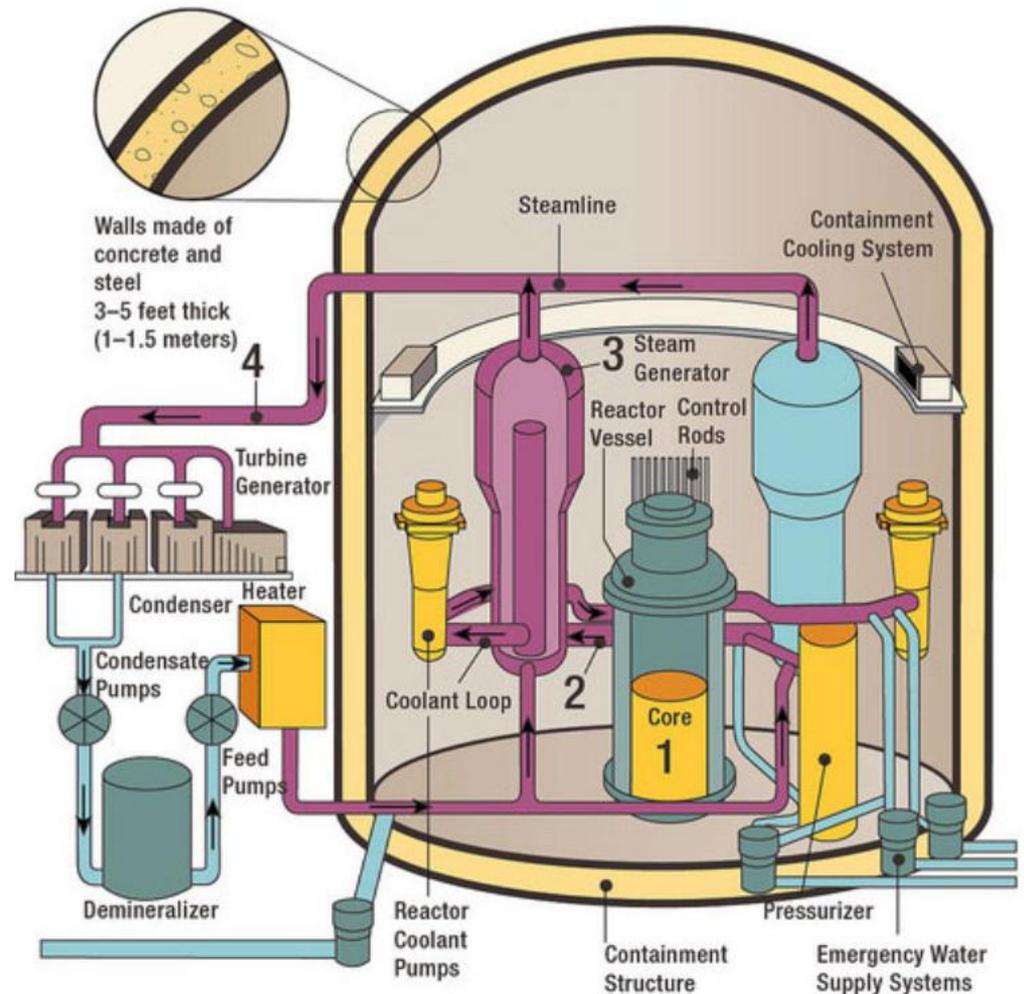
- 원자력 규제 위원회(NRC) 개혁
- 연료공급망 강화 및 재처리 추진
- 연방토지 내 원자로 건설 및 AI인프라 지원
- 원자력 산업 및 인력 육성

- 산업 반응 및 전망: 정책 발표이후 증시에 상장된 SMR을 개발하는 OKLO 와 우라늄 공급업체인 Centrus Energy의 주가가 급등하여 시장에서는 긍정적인 반응이 나타나고, AI 및 DC 운영업체들과의 협력을 통해 원자력기반 전력공급계약이 체결되고 있음



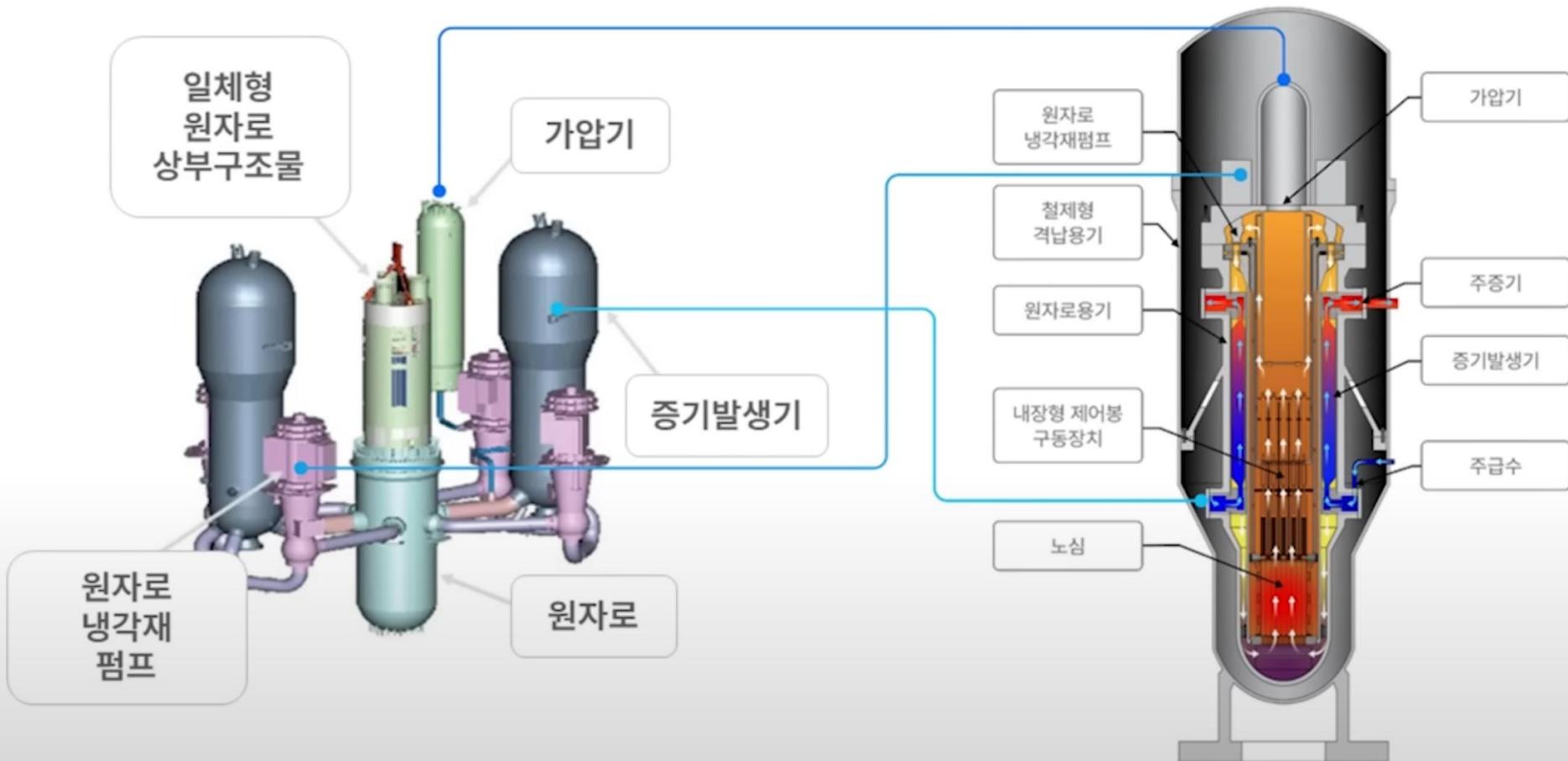
Pressurized Water Reactor

- 냉각재는 비등점이 100도인 경수로서 끓지 않게 150 bar 가압하여 순환하며 냉각(범위: 약320도-250도)
- 물은 가장 이상적인 coolant로서 경수로가 가장 경제적인 원전이 되는데 기여
- 1차계통과 2차계통의 엄격한 분리
- 그러나 nuclear island내의 원자로와 증기발생기, 그리고 펌프 사이를 가압의 상태에서 순환하는 과정을 수십년간 하기 때문에 누출을 방지하기 위한 안전설비의 추가와 대형화가 불가피





대형원전과 SMR의 구조적 차이(i-SMR)





물이 아니라면, 뭐?

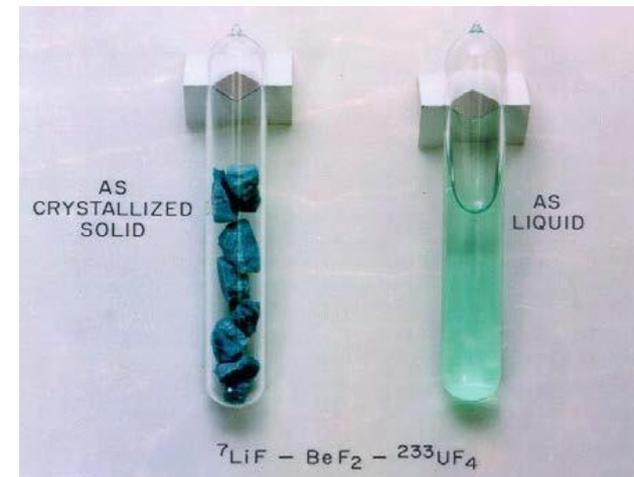
Gen IV Reactors

- Sodium Fast Reactor
 - Liquid metal
 - 저압, temp 550도(97.8도-882.8도)
 - Fast Reactor
 - 물과 공기 접촉 시 발화
- Gas Cooled Reactor
 - 헬륨 기체로 냉각
 - 고압, temp 850도
 - Fast Reactor
- Molten Salt Reactor
 - 용융염으로 냉각
 - 저압, temp 800도(459도-1,400도)
 - Fast Reactor
 - No meltdown

Sodium



Molten Salt





- 소듐 냉각 고속로(SFR)란?

SFR은 액체 소듐을 냉각재로 사용하고, 고속 중성자를 활용하는 원자로 유형. 이는 기존 경수로와 비교하여 더 효율적인 연료 활용과 핵연료 재활용이 가능하도록 설계되었다.

- SFR의 주요 특징:

- 냉각재: 액체 소듐(Liquid Sodium)
- 중성자 에너지: 고속 중성자 사용(Neutron Moderator 없음)
- 핵연료: 플루토늄-우라늄 혼합 산화물(MOX), 금속 우라늄 합금 등
- 안전성: 소듐은 높은 비등점을 가지고 있어 냉각재 손실 위험이 적으며, 자연 대류 냉각 기능이 뛰어나
- 핵연료 활용: 우라늄-238의 전환을 통해 플루토늄-239를 생성하는 '증식로' 역할 가능

- SFR이 가지는 장점:

- 고속 중성자 활용 → 우라늄-238을 플루토늄-239로 변환하여 연료로 재활용 가능
- 고효율 연료 사용 → 기존 원자로보다 연료 소모가 적으며, 사용 후 핵연료에서 더 많은 에너지를 추출 가능
- 냉각 안정성 → 소듐은 고온에서 액체 상태를 유지하며, 물처럼 증기 폭발 위험이 없음
- 방사성 폐기물 감소 → 장반감기 핵종을 연소시켜 방사성 폐기물의 양과 독성을 줄일 수 있음

- 대표적인 SFR 개발 기업:

- TerraPower (미국, 나트륨(Natrium) 프로젝트)
- ARC Clean Technology (캐나다, ARC-100)
- 러시아 BN-600, BN-800 운영 중



- 고온가스로(GCR)란?

GCR은 헬륨(He) 또는 이산화탄소(CO₂)와 같은 기체를 냉각재로 사용하는 원자로 유형으로, 높은 운전 온도를 유지할 수 있어 열효율이 뛰어난 것이 특징입니다.

- GCR의 주요 특징:

- 냉각재: 헬륨(Helium) 또는 이산화탄소(CO₂)
- 중성자 에너지: 열중성자(thermal neutron) 또는 고속중성자(fast neutron) 활용 가능
- 핵연료: TRISO 연료(TRi-structural ISOtropic Fuel) 또는 흑연 감속 우라늄 연료
- 안전성: 높은 운전 온도로 효율적이며, 냉각재가 화학적으로 비활성 상태라 폭발 위험이 없음
- 핵연료 활용: TRISO 연료 사용으로 방사성 물질의 누출 가능성이 낮고, 고온에서 안정적으로 작동 가능

- GCR이 가지는 장점:

- 고온 운전 가능 → 700~950°C의 높은 온도로 효율적 발전 가능
- 냉각재 안정성 → 헬륨은 비활성 기체로 반응성이 없어 폭발 위험 없음
- 다양한 응용 가능 → 수소 생산, 고온 산업 공정 등에 활용 가능
- 핵연료 안전성 → TRISO 연료 사용으로 우수한 방사선 차폐 효과

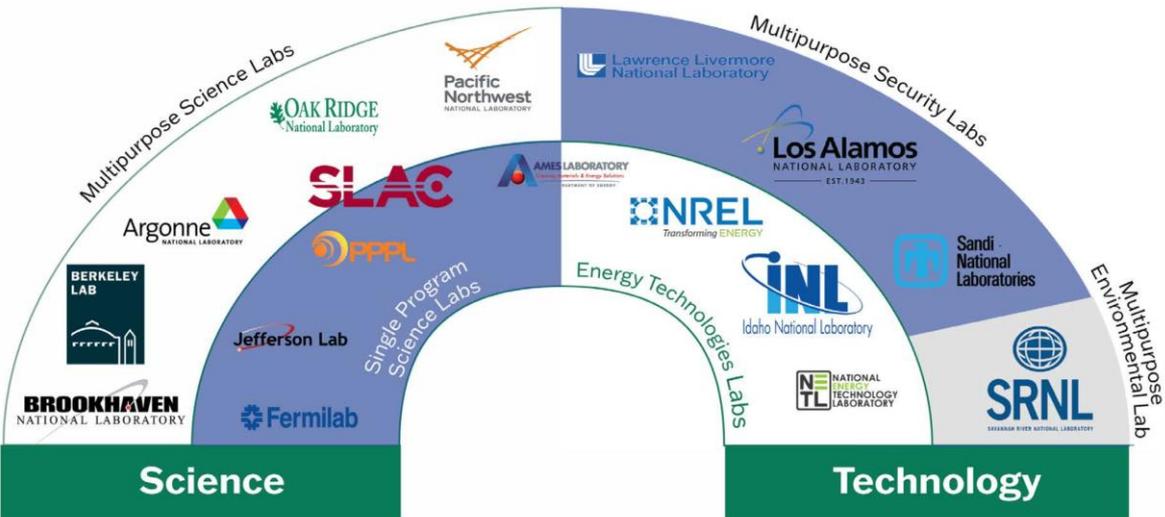
- 대표적인 GCR 개발 기업:

- X-energy (미국, Xe-100 고온가스로 개발)
- China HTR-PM (중국, 고온가스로 시범 운영 중)
- JAEA (일본, 고온가스로 실험로 개발)



- MSR이란?
- MSR(Molten Salt Reactor)은 핵연료를 액체 상태로 녹여 용융염(Molten Salt)과 함께 사용하는 원자로 유형입니다. 기존 고체 연료를 사용하는 원자로와 다르게 연료가 액체 상태이므로 운전 중 연료 교체가 가능하며, 높은 안전성과 연료 활용성이 특징입니다.
- MSR의 주요 특징:
 - 냉각재: 용융염(Molten Salt, 플루오라이드 계열)
 - 중성자 에너지: 고속 중성자 또는 열중성자 방식 가능
 - 핵연료: 우라늄 플루오라이드(Uranium Fluoride, UF₄) 또는 플루토늄 기반 연료
 - 안전성: 자연 순환 냉각이 가능하고, 핵연료의 녹는점이 높아 과열 위험이 적음
 - 핵연료 활용: 고온 운전이 가능하여 열효율이 높고, 장수명 방사성 폐기물을 연소 가능
- MSR이 가지는 장점:
 - 연료 활용 효율이 높음 → 우라늄 및 토륨 연료 활용 가능
 - 자연 안전성 강화 → 연료가 액체 상태라 멜트다운(노심 용융) 위험 없음
 - 고온 열공학 응용 가능 → 수소 생산 및 고온 산업 공정에 활용 가능
 - 핵폐기물 감소 효과 → 장반감기 핵종(Plutonium, Minor Actinides) 연소 가능
- 대표적인 MSR 개발 기업:
 - Terrestrial Energy (캐나다, IMSR 개발)
 - Kairos Power (미국, KP-FHR 개발)
 - Moltex Energy (영국, SSR-W 개발)

Map of the
National Laboratories
of the United States Department of Energy



This map was produced by the National Renewable Energy Laboratory. Cartography by Billy J. Roberts, October 18, 2023



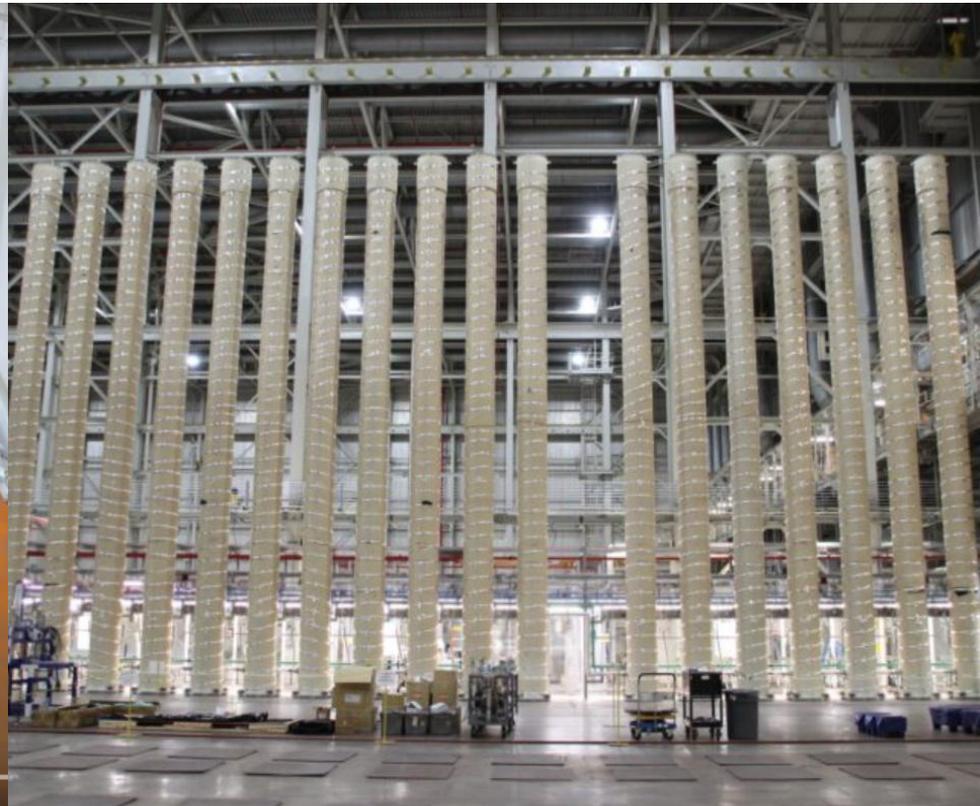


Nuclear & National Security

- GEN III의 PWR이 경제성이 압도적으로 좋고 핵 비확산에 유리하였기 때문에 지배적 노형으로 자리잡았고,
- 체르노빌 사고(1986) 이후 서구 국가들이 원자력 발전에 투자하지 않는 동안에도 우리나라는 지속적으로 건설하여 대형원전 PWR에서 strong performance를 가짐
- 그러나 그 기간에도 미국은 DOE, DOD, US NAVY 등이 다양한 노형에 대한 원자력 기술개발에 엄청난 규모로 투자해 왔음
 - Nuclear Weapon
 - 핵잠수함 및 항공모함의 에너지 원
 - 우주 project, 항공기 등 에너지 공급원 (Rocket for Agile Cislunar Operation 등)
 - 그리드가 없는 지역에서 군사기지운영 (Alaska's Air Force base, 아프가니스탄 미국기지 등)



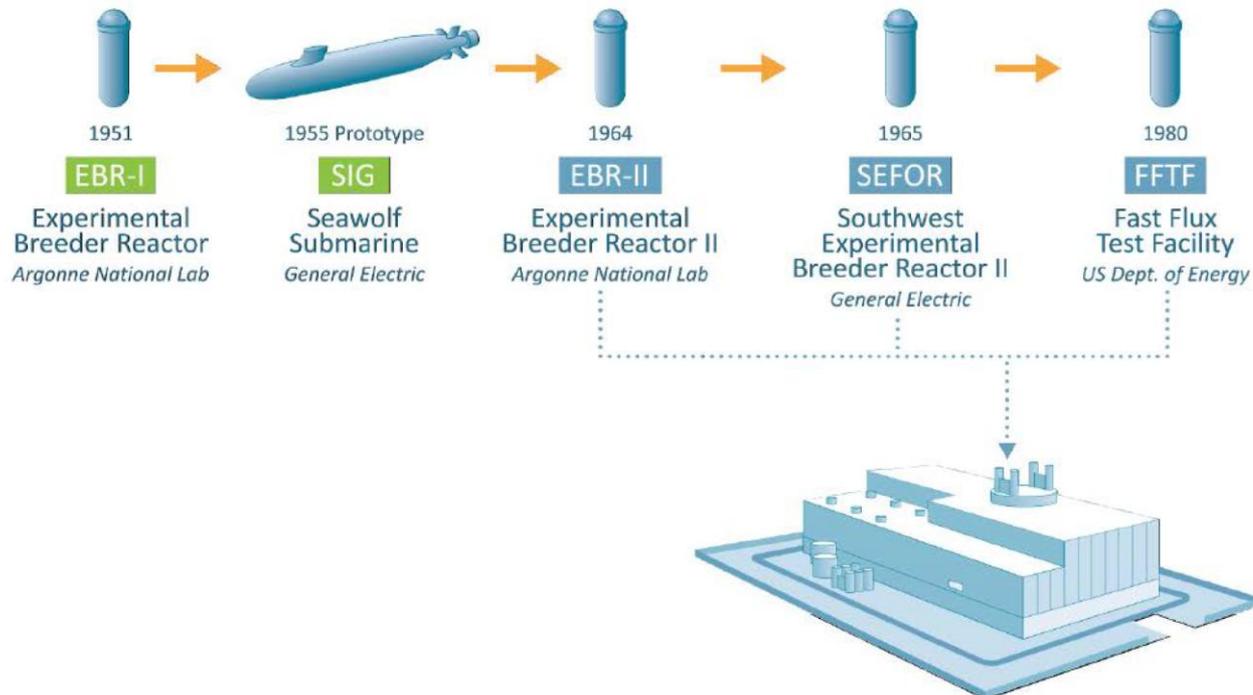
우라늄 농축시설(enrichment facility)





Everything old is new again! ★★

- **100 MWe SFR based on EBR-II design**
 - Pool type. 5x scale up of EBR-II
 - LEU fuel
 - 510°C outlet temperature





1. NuScale Power (뉴스케일 파워)

- 본사 위치: 미국 오리건주
- 주요 기술: 77MWe 소형 모듈 원자로 (SMR) 설계
- 냉각재: 경수(Light Water)
- 핵연료: 저농축 우라늄(LEU)
- 투자자: 미국 에너지부(DOE), Fluor Corporation, 두산(1.3억불), 삼성물산(0.7억불), GS(0.4억불) 등 지분투자
- IPO 상장 여부: 2022년 뉴욕 증권거래(NYSE) 상장
- 아이다호 국립연구소에서 '탄소 무배출 전력 프로젝트'의 첫 번째 원자로를 2030년까지 가동 목표로 준비 중
- VOYGR 원자로가 동유럽과 아시아 등 국제적으로 관심
- 진행 상황:
 - 미국 원자력규제위원회(NRC)로부터 50MWe 설계 인증 획득

2. TerraPower (테라파워)

- 본사 위치: 미국 워싱턴주
- 주요 기술: 소듐 냉각 고속로(SFR) 기반 SMR
- 냉각재: 액체 소듐(Liquid Sodium)
- 핵연료: 금속 우라늄 합금(Metallic Uranium Alloy)
- 투자자: 빌 게이츠, 미국 에너지부(DOE), SK(2.5억불), 현대중공업(0.3억불) 지분투자 한수원(0.4억불) 투자 이사회통과
- 와이오밍주 케머러에서 실증 원자로 건설을 시작했으며 2030년 가동을 목표로 함
- 특징: 빌 게이츠가 설립한 원자로 개발 기업 용융염 storage(500MW)



3. GE Hitachi Nuclear Energy

- 본사 위치: 미국 노스캐롤라이나주 월밍턴
- 주요 기술: BWRX-300 (300MWe 소형 모듈형 비등수형 원자로)
- 냉각재: 경수(Light Water)
- 핵연료: 저농축 우라늄(LEU)
- 투자자: GE, Hitachi, 미국 및 캐나다 정부
- IPO 상장 여부: 비상장 (GE 및 Hitachi 계열사)

4. Holtec International

- 본사 위치: 미국 뉴저지주
- 주요 기술: SMR-160 (160MWe 용량)
- 냉각재: 경수(Light Water)
- 핵연료: 저농축 우라늄(LEU)
- 투자자: 사모펀드 및 미국 정부 지원
- 현대건설이 300MW 2기 건설 착수하기로 계약
- IPO 상장 여부: 비상장
- 진행 상황: 캐나다 원자력안전위원회(CNSC) 사전 인허가 검토 진행 중



5. ARC Clean Technology

- 본사 위치: 캐나다
- 주요 기술: 고속 소듐냉각로 기반 SMR (ARC-100)
- 냉각재: 액체 소듐(Liquid Sodium)
- 핵연료: 금속 우라늄 합금(Metallic Uranium Alloy)
- 투자자: 캐나다 정부, 뉴브런즈윅주 지원
한수원과 상호협력 체결
- IPO 상장 여부: 비상장
- 진행 상황: 캐나다 뉴브런즈윅 주에서 상용화 추진

6. X-energy (X-에너지)

- 본사 위치: 미국 메릴랜드주
- 주요 기술: Xe-100 (80MWe 고온가스로)
- 냉각재: 헬륨(Helium)
- 핵연료: TRISO-X 연료(TRISO-coated Uranium Particles)
- 투자자: Amazon(5억불), 미국 에너지부
두산(0.05억불), DL(0.2억불) 등 지분투자
- 텍사스에서 다우케미칼과 협력해 2029년까지 산업용 적용을 위한 실증 플랜트를 구축 중
- 특징:
 - TRISO-X 연료 사용
 - 4개 모듈 결합 시 320MWe 출력 가능
 - Amazon 기후 서약 기금 등으로부터 7억 달러 투자 유치



7. Oklo (오클로)

- 본사 위치: 미국 캘리포니아주
- 주요 기술: 마이크로 원자로 기반 SMR (Aurora Powerhouse, 1.5MWe)
- 냉각재: 액체 금속(Liquid Metal)
- 핵연료: 고농축 우라늄(HALEU)
- 투자자: 미국 국방부(DOD), 미국 에너지부(DOE), 사모펀드
- 샘 알트만(Sam Altman)이 초기 투자자로 참여하고, 현재 회사 회장 역할 수행
- IPO 상장 여부: 나스닥(NASDAQ) 상장 추진 중
- 진행 상황: 아이다호 국립연구소에서 2027~2028년 가동 목표로 75MW급 소형 고속로인 오로라(Aurora) 원자로를 개발 중
- 데이터센터 기업인 스위치(Switch)와 최대 12GW 규모의 원자력 발전 계약을 체결했고, 연료 공급 문제 해결을 위한 파트너십도 체결

8. Kairos Power

- 본사 위치: 미국 캘리포니아주
- 주요 기술: 용융염 냉각 고온가스로 (KP-FHR, 140MWe)
- 냉각재: 플루오라이드 용융염(Fluoride Molten Salt)
- 핵연료: 저농축 우라늄(TRISO Fuel)
- 투자자: 미국 에너지부(DOE), 사모펀드, 민간 투자자, 2035년까지 구글과 전력구매 계약 체결
- IPO 상장 여부: 비상장
- 진행 상황: 실험적 원자로 설계 검토 및 건설 준비 중인데 NRC로부터 테네시주 오크리지에 헤르메스(Hermes) 실증 원자로의 건설 허가를 받고 2024년 7월부터 건설을 시작



SMR(소형 모듈 원자로)을 새롭게 건설하려면 국가별 규제 기관의 인허가 과정을 거쳐야 한다.
주요 라이선스 과정은 다음과 같다.

- 예비 검토 단계
 - 사업 타당성 검토: 경제성, 안전성, 기술적 가능성 등을 평가
 - 규제기관과의 사전 협의: 해당 국가의 원자력 규제기관과 초기 협의 진행
 - 부지 선정 및 환경 영향 평가: 부지 적합성 검토 및 환경에 미치는 영향을 평가
- 설계 승인 단계
 - 개념 설계 제출: SMR의 기본 개념 및 주요 설계 원칙을 제출
 - 설계 심사 및 승인: 원자력 안전성을 중심으로 규제 기관이 설계 적합성을 평가
 - 기본 설계 및 상세 설계 검토: 원자로 및 관련 시스템의 상세 설계 검토
- 건설 허가 단계
 - 건설 허가 신청: 규제 기관에 정식 건설 허가 신청 제출
 - 건설 계획 및 안전성 검토: 공사 과정 중 안전성 보장 여부 평가
 - 규제 기관 승인: 최종 건설 허가 발급
- 운영 허가 단계
 - 시운전 및 성능 검증: 초기 연료 장전 및 시운전 테스트 진행
 - 운영 허가 신청: 운영 절차 및 안전 프로토콜 제출
 - 최종 운영 승인: 정식으로 상업 운전 허가 발급



예상되는 어려움

- 규제 및 정책 문제
 - 규제 불확실성: SMR은 기존 원전과 다른 설계 특성을 가지므로, 기존 규제 체계와 충돌 가능
 - 국가별 규제 차이: 각국의 원자력 규제가 상이하여 국제적으로 표준화된 인허가 과정이 부족함
- 기술적 난제
 - 신기술 검증 요구: 새로운 SMR 기술은 기존 원자로와 다르므로, 추가적인 안전성 검증이 필요
 - 소규모 생산에 따른 비용 문제: 초기 개발 비용이 크고, 대형 원자로에 비해 경제성이 낮을 가능성
- 사회적 수용성 문제
 - 주민 반대 가능성: 원자력 발전에 대한 지역 주민들의 거부감
 - 환경 영향 평가 강화: 새로운 원자로 유형에 대한 환경 영향 평가 기준이 더 엄격할 가능성
- 공급망 및 인프라 문제
 - 핵연료 공급망 구축 필요: SMR에 적합한 연료의 안정적 공급망 확보 필요
 - 건설 및 유지보수 인프라 부족: 기존 대형 원전과는 다른 건설 및 유지보수 체계 필요

결론

- SMR의 라이선스 과정은 기존 원자로와 유사하지만, 신기술 도입에 따른 규제 검토가 더 엄격하게 이루어질 가능성이 크다.
- 또한, 규제 불확실성, 사회적 수용성, 경제성 등의 문제를 해결하기 위해서는 현재의 상태에서는 예상하기 어려운 어려움이 있을 수 있다.
- 성공적인 SMR 도입을 위해서는 국제 협력과 표준화된 규제 체계 마련이 필요하며 상당한 시간이 필요하다.