

2023 KNS 추계학술발표대회 워크숍 “소형모듈원자로 기술조사 보고회”

# 소형모듈원자로 시장 및 사업 현황

2023.10.25.

주 형 국



한국원자력연구원  
Korea Atomic Energy Research Institute

# Small Modular Reactor



01

SMR 개요 및 시장 전망

02

국가별 SMR 개발 전략

03

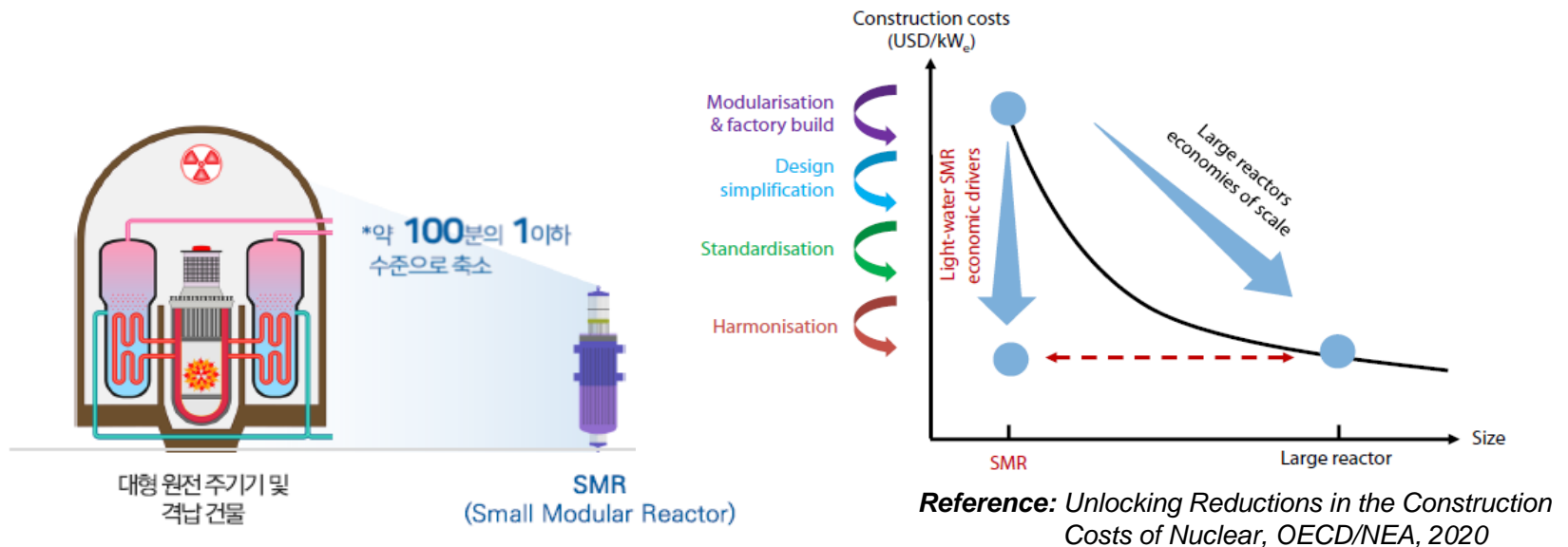
주요 SMR 사업 현황

04

주요 SMR 도입국 배치 동향

# 소형원자로 정의

- ❖ 소형모듈원자로(SMR: Small Modular Reactor) : 300 MWe 이하의 모듈형 원자로 (IAEA, WNA, OECD-NEA)
- ❖ SMR 특성
  - 증기발생기, 냉각재 펌프, 가압기 등 주요 기기를 하나의 용기에 일체화 가능
  - 모듈 형태로 공장 제작, 현장 이송 및 조립 건설: 건설공기 단축 및 건설비용 절감 가능, 증설 용이
  - 소형이라는 특성을 이용하여 다양한 지역, 다양한 목적에 따라 활용 가능
    - 안정적 기저전력원 역할 외 산업 공정열 공급, 수소생산, 해수 담수화 등 다양한 분야에 활용 가능
    - 격지, 오지 에너지원, 기후변화 대비 노후 석탄·화력발전 대체 및 수요지 인근 분산형 전력망 제공 가능

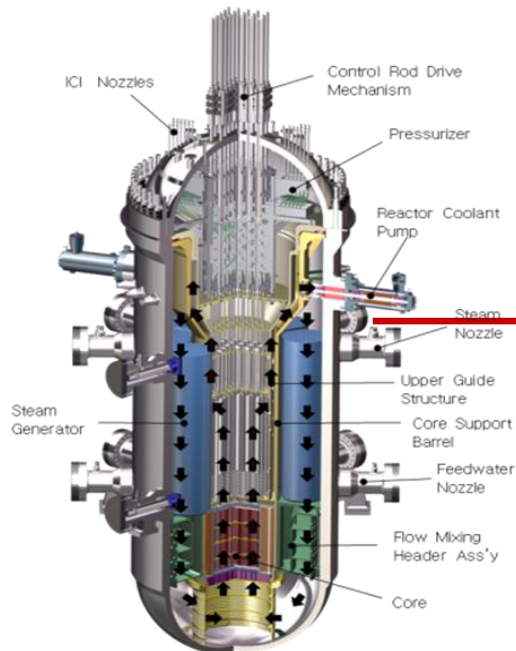


# 소형원자로-경수형 (예: SMART)



일체형 배차:

주요 기기를 하나로 합쳐 대형사고 가능성 원천 제거



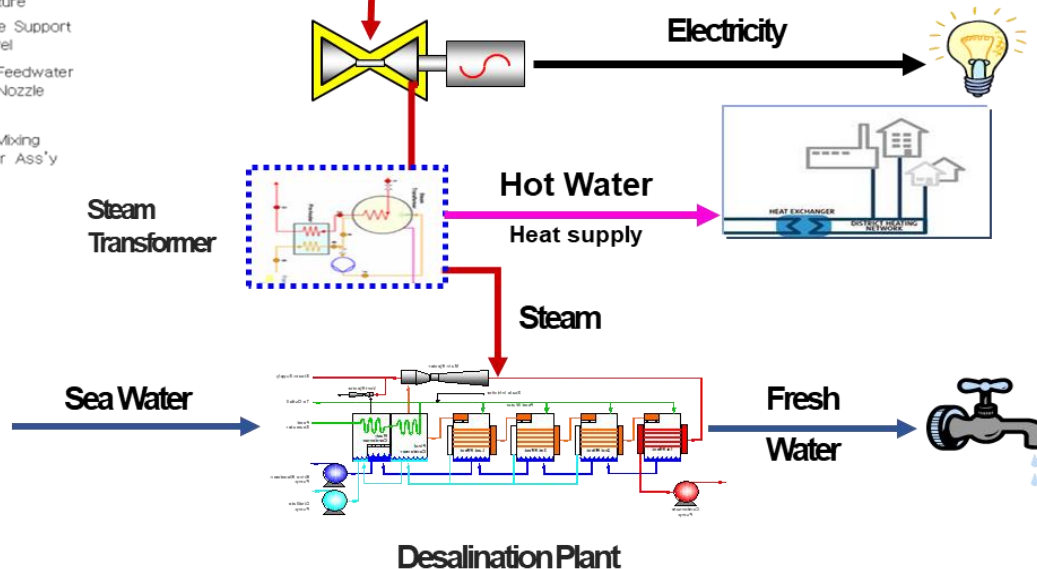
*System-integrated Modular Advanced Reactor*

**Advanced Integral PWR**  
for Electricity Generation and District Heating or Desalination

Thermal : 365 MWt

Electricity : 100 MWe

Fresh Water : 40,000 t/day

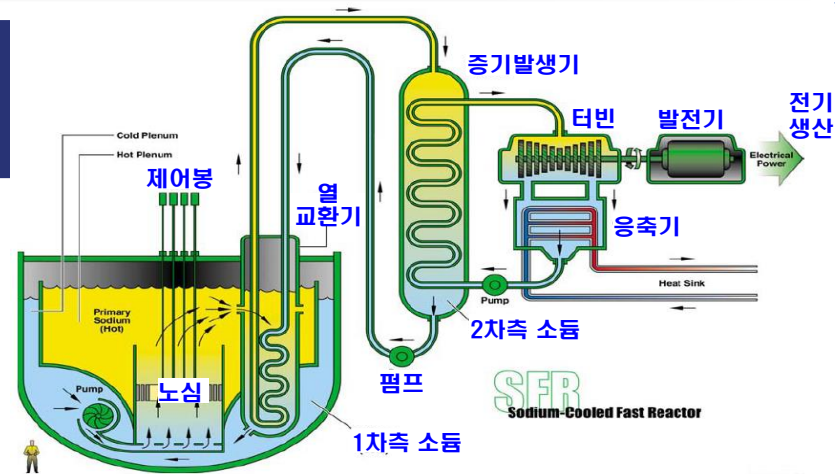




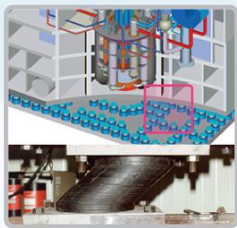
# 소형원자로 – 비경수형 (예: SFR)

## 주요 특성

- 중간열전달계통(+이중 배관)설계로 소듐위험에 대응
- 대기압 운전 및 피동안전계통으로 안전성 제고
- 금속연료노심 경우 고유 안전성과 경제성 향상
- 면진설계 등으로 지진과 같은 자연 재해로부터 대비



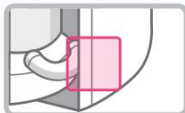
### 지진 대비



#### 면진 설계

- 지진규모 약 6.9까지 모든 계통 정상 작동
- 지진규모 약 9.0까지 피동잔열 제거 계통 정상 작동

### 소듐화재 및 소듐-물반응 대비



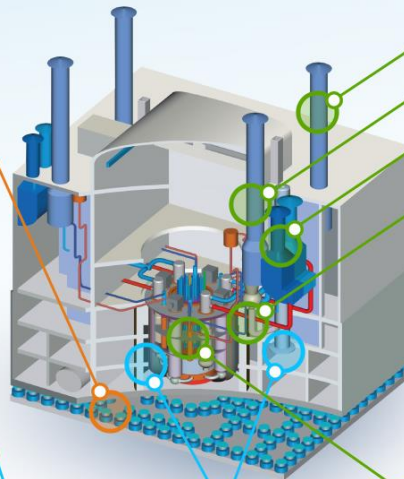
#### 이중 원자로 용기

- 원자로용기를 이중으로 만들어 소듐누출을 원천적으로 배제



#### 이중배관

- 중간열전달계통 배관을 이중으로 만들어 소듐누출 원천적으로 배제



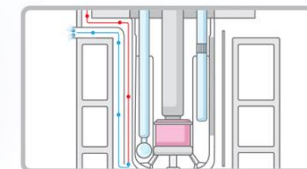
### 지진, 해일에 따른 정전대비

#### 피동잔열제거계통 PDRG

- 사고시 운전원이 아무런 조치를 취하지 않아도 소듐 자연순환으로 원자로 냉각

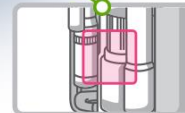
#### 원자로 격납용기 피동냉각계통

- 사고시 운전원이 아무런 조치를 취하지 않아도 공기 자연순환으로 원자로 격납용기 냉각



#### 피동원자로정지계통

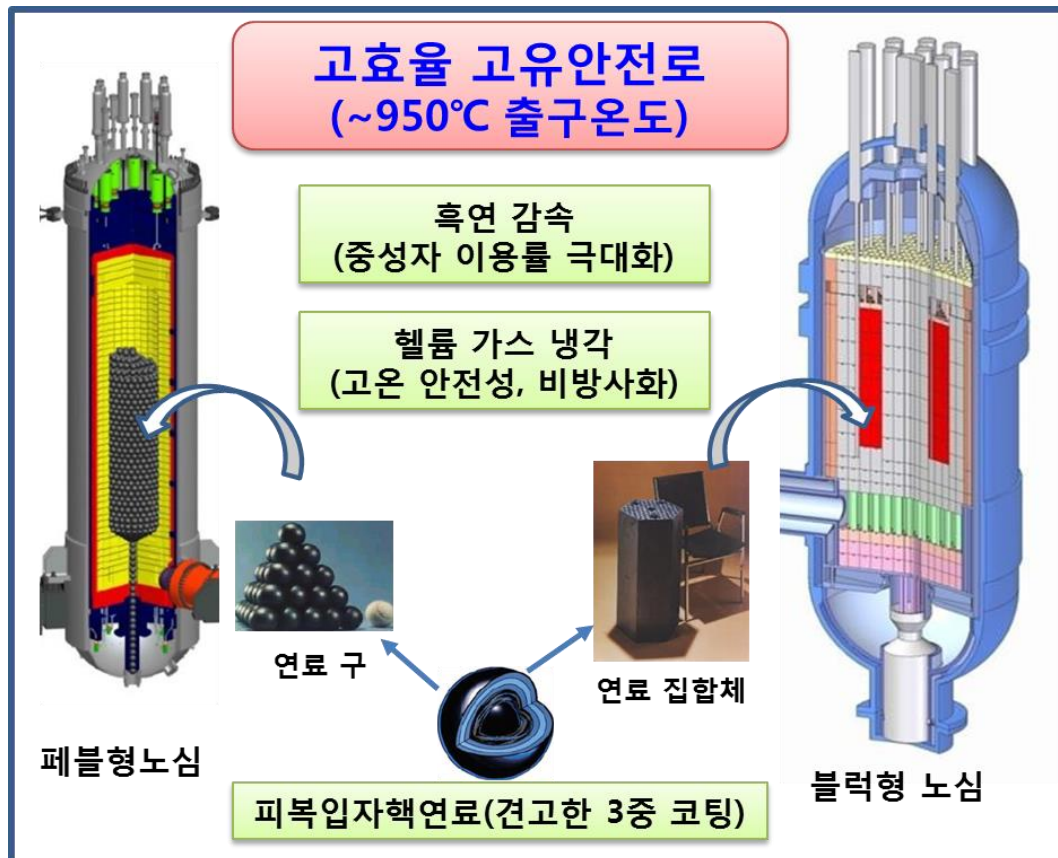
- 사고시 운전원이 아무런 조치를 취하지 않아도 자연현상으로 원자로 운전 정지



# 소형원자로 – 비경수형 (예: VHTR)



고온을 이용한 다목적 이용(전력생산, 수소생산, 공정열 및 증기 공급)  
기술 개발에 집중



안전성

완전 고유  
(자연냉각 잔열 제거)

경제성

고효율(50%)  
고온열(공정열, 수소)

핵확산  
저항성

피복입자연료(TRISO)

지속성

심층연소(Deep-burn)  
Symbiotic Fuel Cycle  
Closed Th-U Cycle

# 소형원자로 – 비경수형 (예: MSR)



## 새로운 개념의 원자로: 용융염원자로(Molten Salt Reactor, MSR)

- 구성: 염소 또는 불소 기반의 운반체 염 + 악티나이드( $\text{ThF}_4$ ,  $\text{UF}_4$ ,  $\text{PuF}_3$  /  $\text{ThCl}_4$ ,  $\text{UCl}_3$ ,  $\text{PuCl}_3$ )

$\text{NaBF}_4$ - $\text{NaF}$  384 °C

$\text{LiF-NaF-KF}$  [FLiNaK] 454

$\text{LiF-BeF}_2$  [FLiBe] 459

$\text{NaCl}$  801

$\text{NaCl-MgCl}_2$  445

$\text{NaCl-CaCl}_2$  507

$\text{ThF}_4$ ,  $\text{UF}_4$ ,  $\text{PuF}_3$  /  $\text{ThCl}_4$ ,  $\text{UCl}_3$ ,  $\text{PuCl}_3$

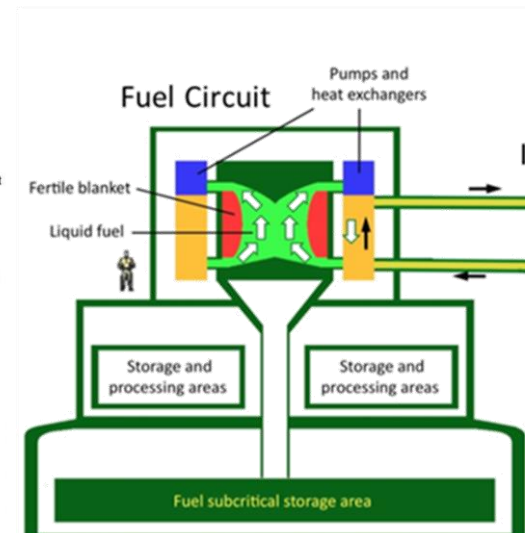
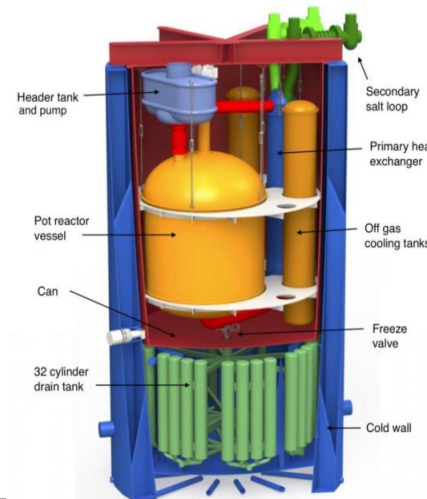


주기	1*	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	H	He																
2	Li	Be	B	C	N	O	F	Ne										
3	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	Ar										
4	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
5	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
6	Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
7	Fr	Ra	Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr	



## 안전하고 경제적인 원자로

- 핵연료가 냉각재와 공용 혼합으로 일체형
  - 냉각재 상실 사고 발생 가능성 없음
  - 필요시, 액체연료 이송하여 완전 피동 잔열제거
  - 연료 계통 외부 누설 시 2차 용기 내에서 고화되어 방사능 유출 불가(격납용기도 존재)
- 매우 단순화된 구조
  - 경제성 향상, 석탄 대비 경제적 경쟁성 확보
- 초우라늄원소(TRU), LEU, Pu를 연료로 사용 시
  - 자원 이용률 향상, 사용후핵연료 문제 해결 가능





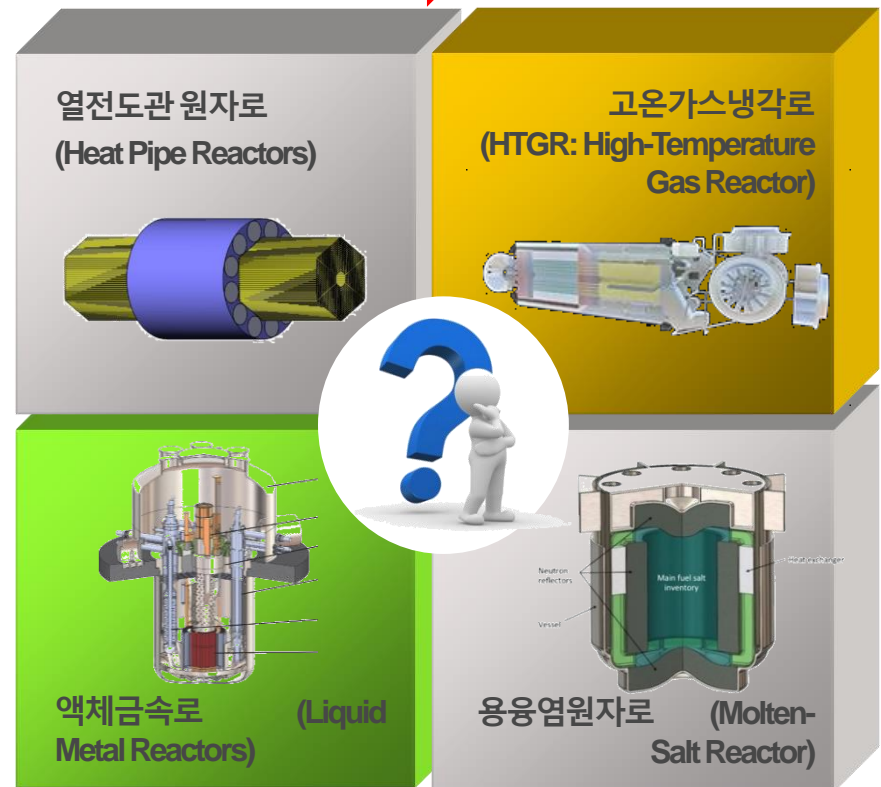
# 초소형원자로

## » 초소형원자로 정의

- ◆ 기존의 대용량(GW급) 상용원자로와 대비되는 전기출력 300MWe 이하의 소형원자로(SMR) 중, 특별히 **열출력 기준으로 1~20 MW 범위의 원자로**를 초소형원자로로 지칭
  - 국제원자력기구(IAEA) 홈페이지 참조 (<https://www.iaea.org/topics/small-modular-reactors>)
  - 미국 에너지부 자료 참조 (<https://www.energy.gov/ne/articles/what-nuclear-microreactor>)

➡ **非경수형 원자로 (Non-LWR)**

항목	개발 요건
전기출력	• 1~2 MWe급
핵연료	• 입자형 $UO_2$ (Ref.), UN/UC (Alt.)
설계수명	• 40년 이상
핵연료재장전주기	• 설계수명 (Ref.), 10년 이상 (Alt.)
사고저항성	• 중대사고 원천 배제 및 노심 손상 없음 • 완전 피동 안전계통 도입 • 사고시 운전원 대처시간 불필요 • 방사능누출 원천 차단 (EPZ 배제)
운전 성능	• 무인운전 또는 운전원 개입 최소화 • 자율진단 기술 도입 • 부하추종능력 확보 • 외부 전원 없이 기동 및 정지
동력변환계통	• 초임계 $CO_2$ 브레이튼 사이클 (Ref.) • Direct He 사이클, Air 브레이튼 사이클 (Alt.)
모듈화 및 크기	• 공장제작 및 현장조립 설치 • 배치 후 2개월 내 원자로 기동 • 트레일러 운송 가능 ( $3 \times 5 \times 25m$ )
주위 환경 및 외부테러 저항성	• 지하설치 가능 / 물리적 방호 기능 강화
Cogeneration	• 다목적 열원 응용 (공정열 및 수소 생산 등)



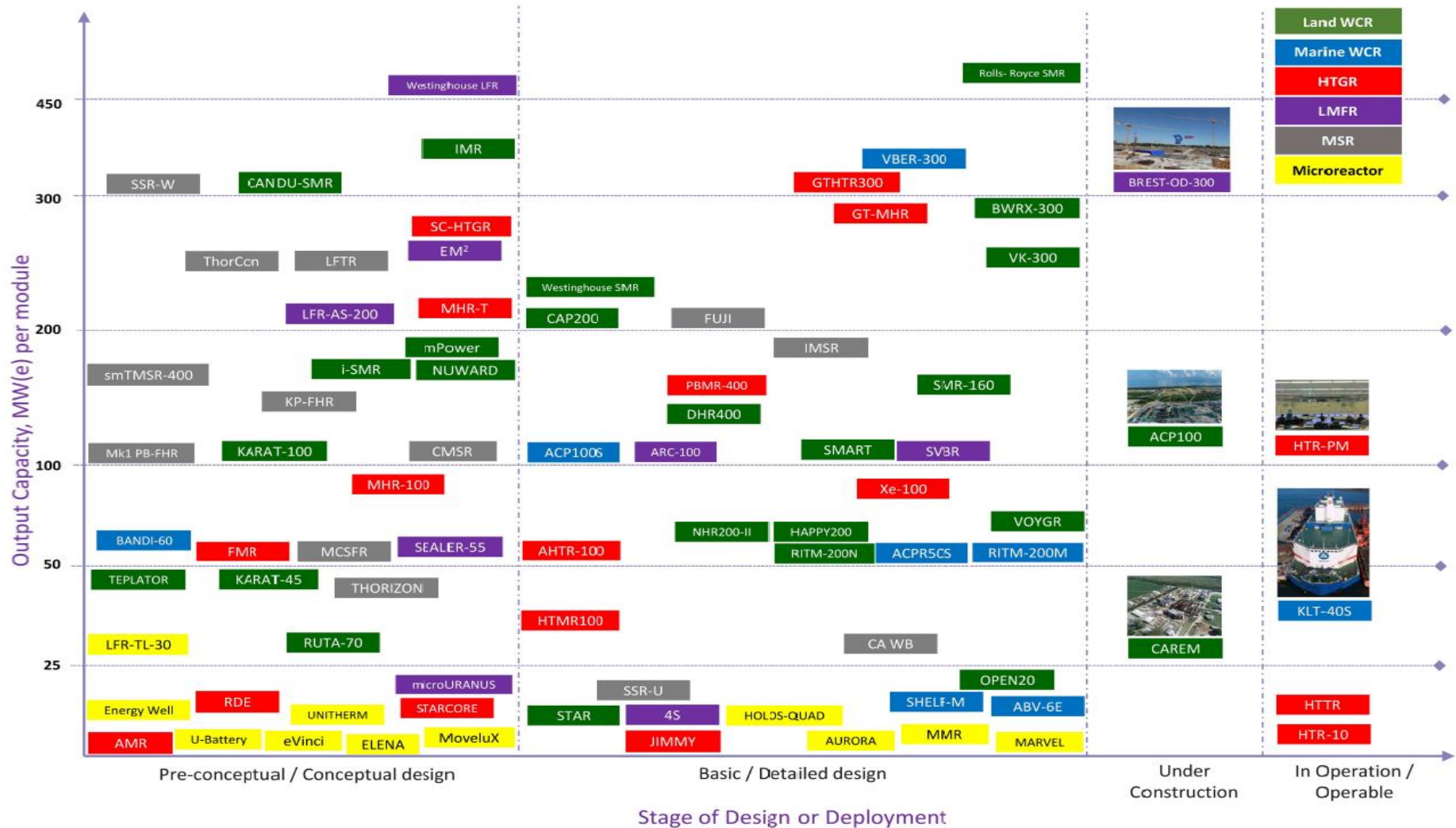


# 제4세대 원자로 기술 특성



원자로	개념	특징	개념도	중성자 종류	연료 주기	출구 온도 (°C)	장점	단점	활용
소듐냉각 고속로 (SFR)	고속중성자로 핵분열을 일으키고 소듐을 냉각제로 사용하는 원자로로서 재순환 핵연료주기를 채택	<ul style="list-style-type: none"> <li>1차계통의 낮은 압력(~대기압 수준)</li> <li>중간 소듐 순환루프 사용으로 방사성물질의 1차 계통 내 잠금 능력이 탁월하여 안전성 우수</li> <li>고준위폐기물 처리가 중요한 설계 특성으로 출구온도는 500~550°C</li> </ul>		고속 중성자	재순환	500~550	<ul style="list-style-type: none"> <li>사용후핵연료 재활용</li> <li>냉각재 전열 특성 우수</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>소듐-물반응</li> </ul>	전기생산, 악티나이드 관리
초고온 가스ro (VHTR)	열중성자로 핵분열시키고, 흑연을 감속제로, 헬륨을 냉각제로 사용하는 원자로로서, 비순환 핵연료주기를 채택	<ul style="list-style-type: none"> <li>복합발전(수소생산+전력생산) 등 광범위한 활용을 위한 설계가능</li> <li>고온소도 핵연료(150-200 GWd/tHM)와 완전한 피동안전</li> <li>낮은 운전 유지 비용과 모듈양식의 건설이 가능</li> </ul>		열 중성자	비순환	900~1000	<ul style="list-style-type: none"> <li>초고온열 생산, 수소생산용 공정열 공급</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>초고온재료 인증화</li> </ul>	전기/수소 생산, 열공급
납냉각 고속로 (LFR)	고속중성자로 핵분열시키고, 납 또는 납비스무스 혼합물 액체금속을 냉각제로 사용하는 원자로로서 재순환 핵연료주기를 채택	<ul style="list-style-type: none"> <li>연료의 형태는 우라늄과 초우라늄 계열을 함유한 금속 혹은 질화물</li> <li>소용량 전력계통용으로 전력을 생산</li> <li>수소생산 및 이동형의 에너지원으로 설계</li> </ul>		고속 중성자	재순환	480~570	<ul style="list-style-type: none"> <li>냉각재의 화학적 불활성</li> <li>높은 냉각재 기화 온도</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>재료부식성</li> <li>냉각재의 높은 하중</li> <li>높은 독성의 Po<sup>210</sup> 생성</li> </ul>	전기/수소 생산
초임계압수 냉각로 (SCWR)	열중성자로 핵분열시키고, 물을 냉각제로 사용하는 원자로로서, 비순환 핵연료 주기를 채택	<ul style="list-style-type: none"> <li>효율적인 전력생산이 기본적인 설계 방향</li> </ul>		열 중성자	비순환/ 재순환	510~625	<ul style="list-style-type: none"> <li>고효율 대용량 전력생산</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>초고압에 따른 안전성 확보</li> </ul>	전기생산
가스냉각 고속로 (GFR)	고속중성자로 핵분열시키고, 헬륨(helium)을 냉각제로 사용하는 원자로로서 재순환 핵연료주기를 채택	<ul style="list-style-type: none"> <li>연료는 혼합세라믹, 입자형 및 세라믹 피복재 등을 사용</li> <li>폐기물이 적고 산업적 활용도가 높은 특성 보유</li> </ul>		고속 중성자	재순환	850	<ul style="list-style-type: none"> <li>고효율, 높은 활용성</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>낮은 개발 수준</li> </ul>	전기/수소 생산, 악티나이드 관리
용융염 원자로 (MSR)	열영역이상(epithemal) 중성자로 핵분열시키고, 용융염을 냉각제로 사용하는 원자로로서, 재순환 핵연료주기를 채택	<ul style="list-style-type: none"> <li>연료로 리튬/지르코늄/불화우라늄 액체혼합물을 사용</li> <li>노심채널을 순환시키며 핵분열 에너지를 생산</li> </ul>		열/고속 중성자	재순환	700~800	<ul style="list-style-type: none"> <li>높은 핵확산 저항성</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>낮은 개발 수준</li> </ul>	전기/수소 생산, 악티나이드 관리

# SMR 설계·건설· 설계·운영 현황



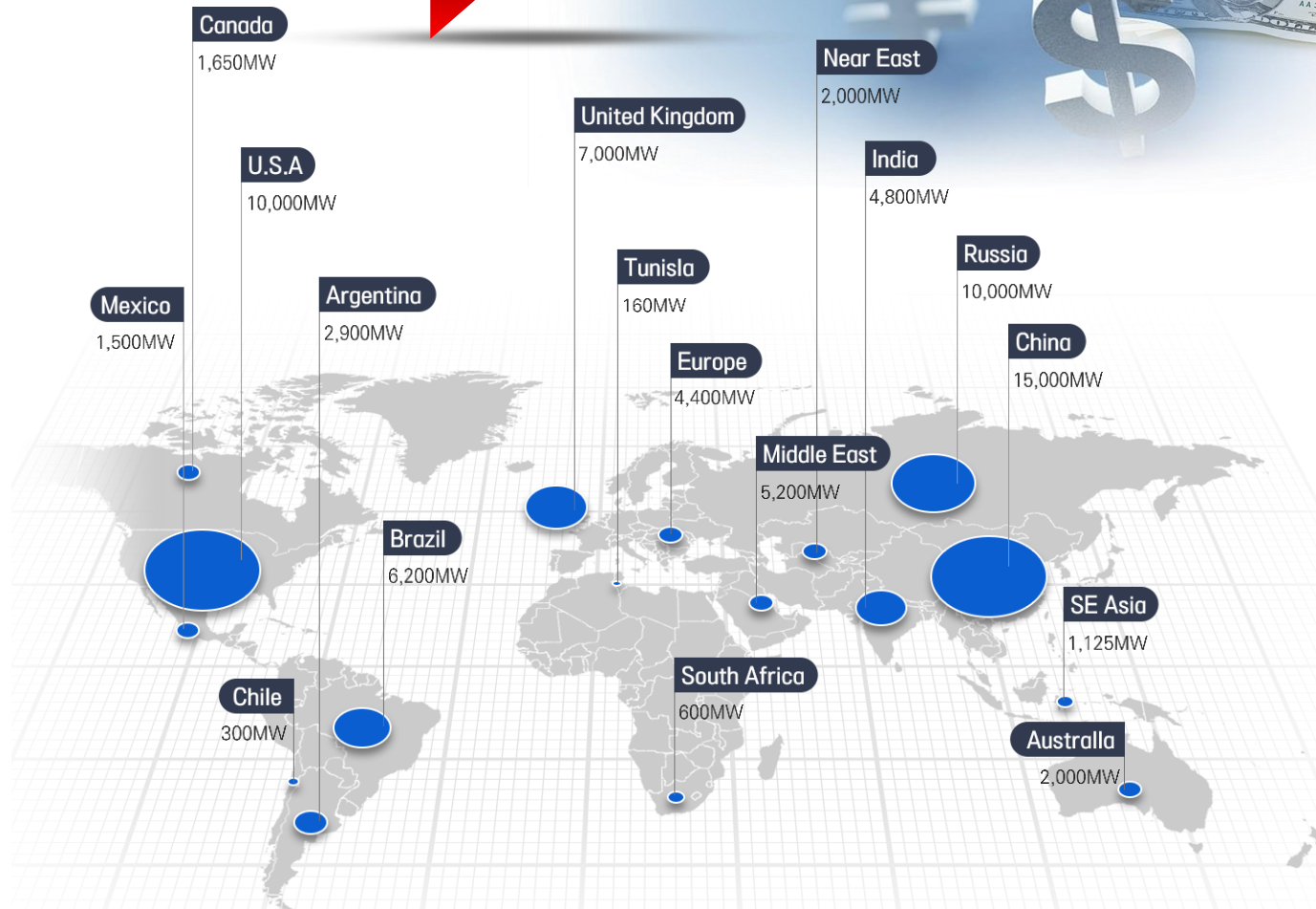
# SMR 시장 전망 (1/3)



- ❖ Research Nester (인도, 2023년): 66.6억 \$ (2022)~129.5억 \$(2035)
- ❖ Polaris Market Research (미국, 2023년): 96.9억 \$ (2022)~145.8억 \$ (2032)
- ❖ Market & Market (미국/영국, 2023년): 58억 \$ (2023)~68억 \$(2030)
- ❖ Precedence Research (캐나다/인도, 2023년): 60.4억 \$(2022)~80.6억 \$ (2032)
- ❖ Idaho National Lab. (미국, 2021년): SMR 분산전원 비중, 30% (2030)~50% (2050)
- ❖ SMR Start (2021년): 2035년 미국내 SMR 시장, 6 GWe~13 GWe
- ❖ OECD/NEA (2021년, 2016년): 2035년 SMR 시장, 1 GWe~21 GWe
- ❖ Canadian SMR Roadmap (캐나다, 2018년): 1,500억 CAD/년 (2030~2040 수출)
- ❖ National Nuclear Lab. (영국, 2014년): 2035년 65~85 GWe (동등), 5.2 GWe (틈새)

# SMR 시장 전망 (2/3)

2035년까지 전세계 65~85GW 규모 시장 전망



※ Source : Small Modular Reactors – once in a lifetime opportunity for the UK (2017)



# SMR 시장 전망 (3/3)



## 화력 발전 대체 (on-grid)



### 국제 시장

- 2°C 시나리오- '40년 기준:  
석탄(1,150 Gwe)과 천연가스(2,297 Gwe)
- 석탄의 15%, 천연가스의 5%를 SMR로  
대체할 경우 → **CA\$100B/yr. 이상**

### 캐나다 시장

- 17개 지역에 29기의 화력발전소 운영 중
- 평균용량: ~343 MWe
- '30년부터 10년간 SMR로 10% 대체할 경우  
→ **CA\$469M/yr.**

## 오지 열/전력 공급 (off-grid)



- 7만개 이상의 지역이 디젤로 전력 생산
- 평균용량: 3.5 MWe 이상, 33 MWe 정도
- SMR로 24% 대체할 경우  
→ **CA\$30B/yr.**

- 1 MWe 이상의 에너지가 필요한 오지: 79
- 평균용량: 10 MWe 이하

## 중공업/ 오일샌드 증기/전력 공급



- '40년 기준 화석연료로 348 GW 생산 전망
- '30년부터 10년간 SMR로 5% 대체할 경우  
→ **CA\$12B/yr.**

- |  |  |
|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>■ 중공업 단지: 85</li> <li>■ 평균용량: 25-50 MWe</li> <li>■ 국제 시장 조건 → <b>CA\$46M/yr.</b></li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>■ 오일샌드 시설: 96</li> <li>■ 평균용량: ~210MWe</li> <li>■ 국제 시장 조건 → <b>CA\$350-450M/yr.</b></li> </ul> |
|--|--|

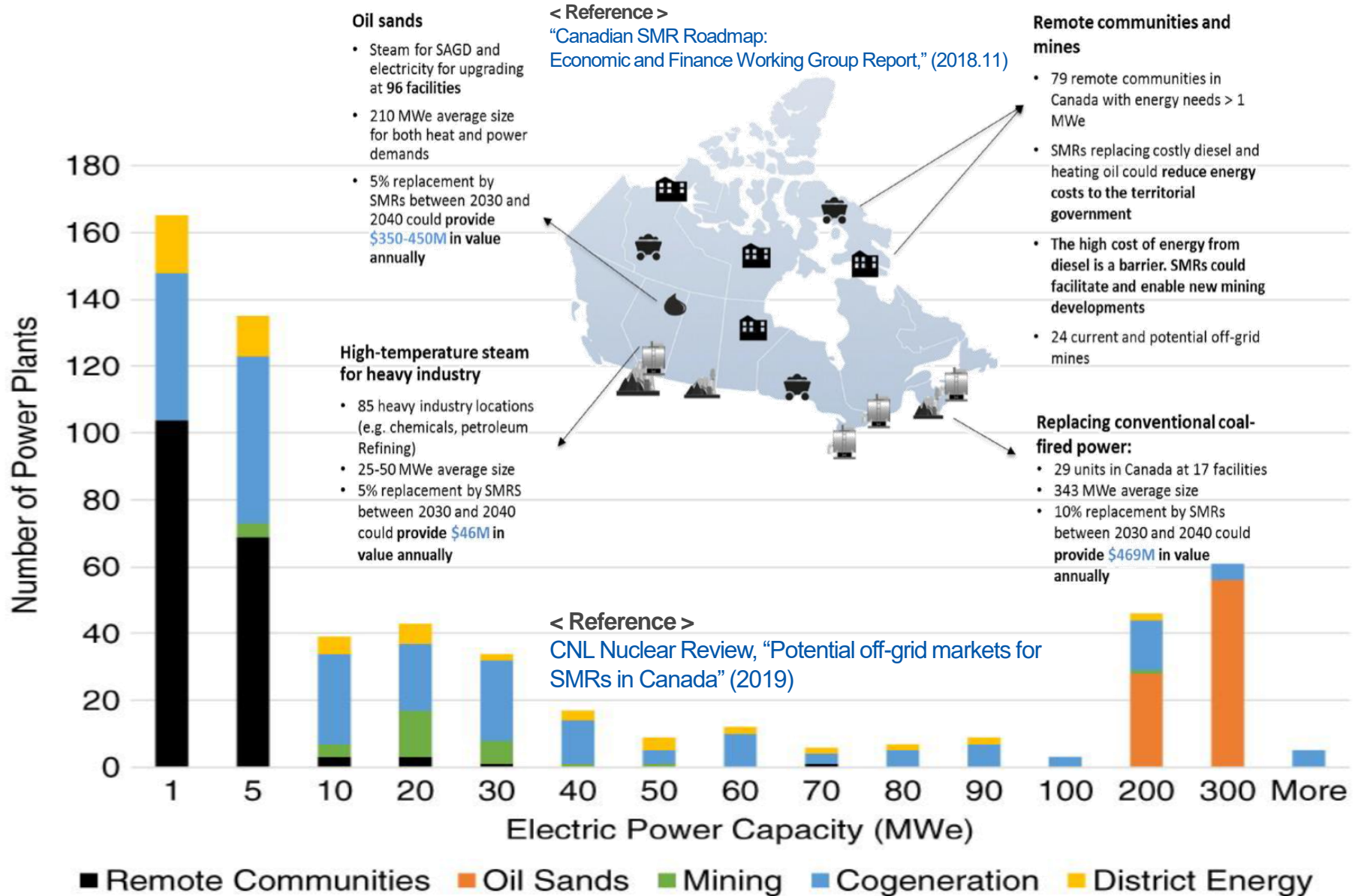
## 광산 지역 열/전력 공급 (off-grid)



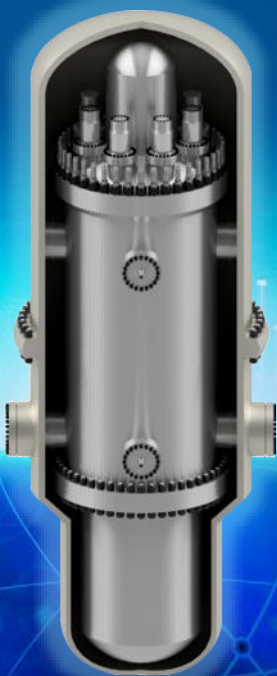
- 매년 15개의 새로운 광산 발생
- 현재 디젤로 광산 지역 열/전력 공급 중
- '30년부터 디젤의 61%를 SMR로 대체할  
경우 → **CA\$3.5B/yr.**

- 현재/잠재 off-grid 광산: 24
- 평균용량: 20 MWe

# SMR 시장 전망 – Potential Market for Off-grid SMRs in Canada



# Small Modular Reactor



01

— SMR 개요 및 시장 전망

02

— 국가별 SMR 개발 전략

03

— 주요 SMR 사업 현황

04

— 주요 SMR 도입국 배치 동향

# 국가별 SMR 개발 전략 : 미국



## ❖ 미국 SMR 개발 프로그램

- ✓ SMR LTS(Licensing Technical Support) 프로그램 (2012)
- ✓ GAIN initiative (2015)
- ✓ Industry Opportunities for Advanced Nuclear Technology Development Funding (2018)
- ✓ Advanced SMR R&D 프로그램 (2019)
- ✓ RDP(Advanced Reactor Demonstration Program) (2020)

## ❖ 국방부 초소형원자로 개발 프로그램

- ✓ Dilithium' 프로젝트 (2019)
- ✓ 'Pelle' 프로젝트 (2020)
- ✓ 공군 고정형 초소형원자로(알래스카 Eielson 공군기지, 2021)

## ❖ 우주용 초소형원자로 개발 프로그램

- ✓ 국가우주정책(NSP) 발표(2020.12.): SNPP개발과 이용 필요성 강조
- ✓ 국방부 DARPA의 DRACO (Demonstration Rocket for Agile Cislunar Operations)
- ✓ 우주항공국( NASA) 우주용 원자력열추진(NTP) 원자로 개발



# 국가별 SMR 개발 전략 : 미국



## ❖ SMR LTS (Licensing Technical Support) 프로그램

- ✓ SMR의 설계인증, 인허가, 미국 내 부지허가, 그리고 일반적인 연구 및 분석 지원
- ✓ SMR 구현에 경제적, 기술적, 규제적 장벽을 줄이려는 목적
- ✓ 지원규모: 4.52억 달러(2012~2017년, 6년간), 경수형 SMR 우선 지원
- ✓ B&W mPower (2012), NuScale SMR (2013)

## ❖ GAIN (Gateway for Accelerated Innovation in Nuclear) 프로그램

- ✓ 새로운 원자로의 상용화를 위한 기술적, 규제적, 그리고 재정적인 지원)
- ✓ 에너지부 및 국립연구소의 인력, 시설, 기반시설, 재료와 자료 등 다양한 자원
- ✓ 실험시설, 모델링 및 시뮬레이션 도구, 정보 및 자료 이용, 선진원자로 실증에 필요한 토지와 부지 정보, 선진원자로 개발에 필요한 인허가체제 수립 과정에 대한 지침을 제공
- ✓ NSUF(Nuclear Science User Facilities), voucher system

# 국가별 SMR 개발 전략 : 미국



## ❖ Advanced SMR R&D 프로그램

- ✓ 2020년대 말 또는 2030년대 초까지 SMR의 미국내 배치를 달성 지원
- ✓ NuScale Power 및 UAMPS(Utah Associated Municipal Power Systems)의 INL 부지에서의 NuScale SMR 기술 실증 지원

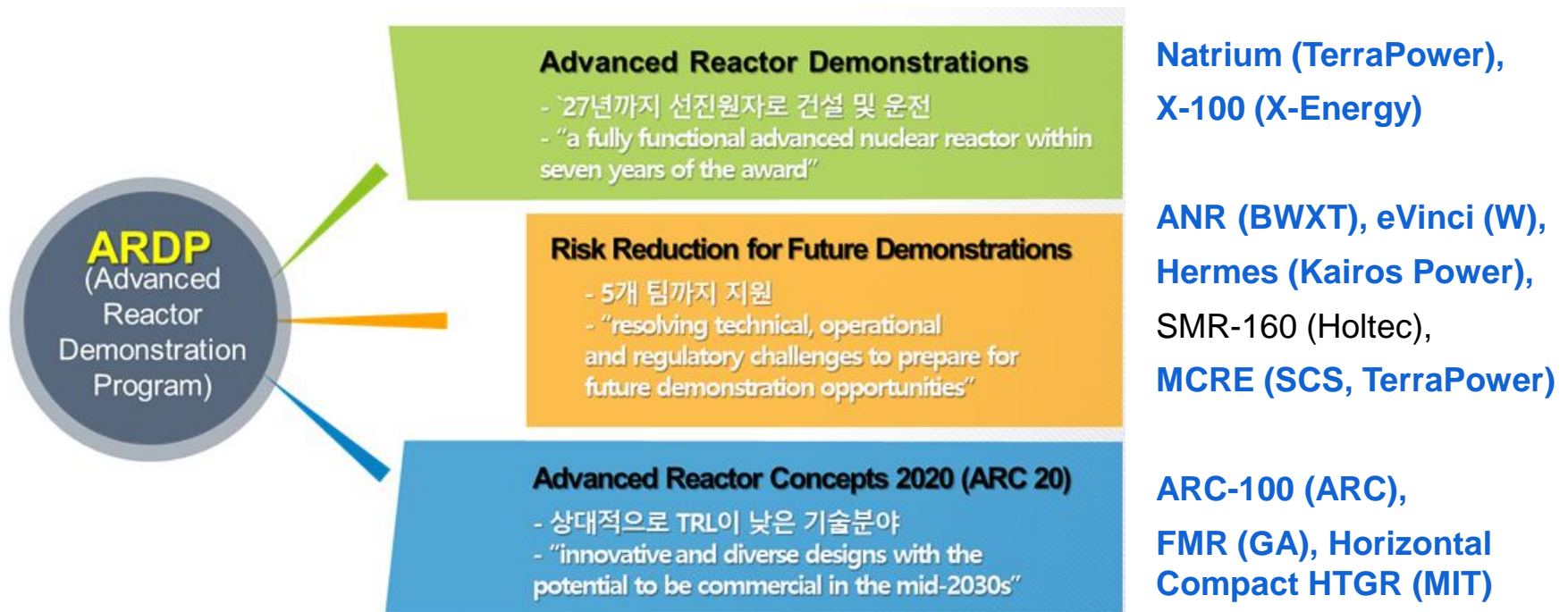
## ❖ Industry Opportunities 프로그램 (2018)

- 1) 첫 호기 원전 실증 준비 프로젝트(First of a Kind Nuclear Demonstration Readiness Projects)
  - 2) 선진 원자로 개발 프로젝트(Advanced Reactor Development Projects)
  - 3) 규제지원금(Regulatory Assistance Grant)
- ✓ 지원규모: 2.3억 달러(2018~2022년, 5년간 ): NuScale SMR, X-energy의 Xe-100, W eVinci, 푸에르토리코 SMR 부지, Terrestrial Energy 등 48개 프로젝트

# 국가별 SMR 개발 전략 : 미국

## ❖ 선진원자로 실증프로그램 (Advanced Reactor Demonstration Program)

- ✓ 선진원자로 실증 (Advanced Reactor Demonstration) (7년 이내 실증)
- ✓ 미래 병목기술 개발 (Risk Reduction for Future Demonstrations) (10~14년 내 인허가/배치)
- ✓ Advanced Reactor Concepts 2020 (ARC 20) (개념개발, 30년대 중반 기술실현)



[Reference] WNN, US DOE launches advanced reactor demonstration program, 14 May. 2020

# 국가별 SMR 개발 전략 : 미국 우주·국방용 초소형원자로 개발

## ❖ 미국 국방부 초소형원자로 실증프로그램 (Project PELE)

- ✓ 군사 전략기지용 초소형원자로 개발 계획
- ✓ 출력 1 ~ 5 MWe, 고유안전성, HALEU Triso 핵연료, 연료주기 3년 이상, 40톤 미만, 트럭/배/C-17 항공기 운반가능, 운송후 3일내 설치 및 운영, 7일 이내 제거 가능
- ✓ 2020년 3월: 2년간의 설계 경합 착수, BWXT Advanced Technology와 X-energy 경합
- ✓ 미 국방부, 초소형원자로 개발 프로젝트인 '펠레(Pele)'의 원형로(시제품) 설계 업체로 BWXT 선정 (2022.6.) (2024년 실규모 시제품 제작 완료 후 납품 계약 체결)
- ✓ 2023년 말: Pele 초소형원자로 전 출력 시험 계획
- ✓ 2024년 : 야외 이동성 시험 계획

※ 공군주도 별도의 고정식 초소형원자로 개발: 알래스카 Eielson 공군기지 전원용(2027년 설치)

## ❖ DARPA의 DRACO (Demonstration Rocket for Agile Cislunar Operations)

- ✓ 2021년 4월 : 원자로설계 계약 (GA), 우주선 개발계약 (블루오리진·록히드 마틴)
- ✓ DRACO 2, 3단계 수행 업체 선정을 위한 참여요청서 발행 (2022.5.)

## ❖ 우주항공국(NASA) 우주용 원자력열추진(NTP) 원자로 개발

- ✓ 화성탐사선 추진체, HALEU 연료
- ✓ 원자로 개념 연구 3개팀 선정: BWX 테크놀로지팀(록히드 마틴), GA Electromagnetic System팀(X-Energy, Aerojet Rocketdyne), USNT팀(USNC, Blue Origin, GEH, GE Research, Framatome, Materion)



# 국가별 SMR 개발 전략 : 캐나다



## ❖ SMR Road Map

- ✓ CNA(Canadian Nuclear Association):"A Call to Action: A Canadian Small Modular Reactor (SMR) Roadmap" 작성 (2018.11)
- ✓ 로드맵 후속조치로 정부, 산업체, 등이 SMR 배치를 위해 수행해야할 Action Plan 작성 (2020.12)

## ❖ 캐나다원자력연구소 (CNL) 장기전략 수립 (2017.6)

- ✓ CNL 캠퍼스내에 2027 까지 SMR 건설계획 수립 및 참여 희망업체 초청
- ✓ CNL SMR 개발 참여업체: Global First Power(5 MWe MMR), StarCore (2X14 MWe HTGR), Terrestrial Energy (190 MWe IMSR), U-battery Canada ( 4 MWe U-battery)
- ✓ GFP가 3단계 진입으로 진도가 가장 빠름
  - 부지준비허가 신청(2019.4.), CNSC 부지준비허가 신청 검토 결정(2021.5)
  - Chalk River 연구소내 MMR 부지 확정 (2023.5.)

## ❖ 4개 주(뉴브런즈윅, 온타리오, 사스캐처원, 알버타) 주도 SMR 배치 단계적 추진

- 1) 2028 까지 온타리오 달링턴 부지에 300MWe 규모 SMR 건설 (후보 SMR: BWRX-300, IMSR, Xe-100)
- 2) 2030년대 초 뉴브런즈윅 Point Lepreau 부지에 선진 SMR 건설 ( 후보: ARC-100, Moltex SSR)
- 3) 원격지 및 광산지역에서 초소형원자로로 디젤발전기 대체

# 국가별 SMR 개발 전략 : 영국



❖ **SMR 개발**: 경수형 SMR(Rolls-Royce 주도)과 Gen-IV 기술의 AMR의 두 가지 기술 개발

## ❖ SMR 개발 지원 정책

- ✓ NLL (National Nuclear Laboratory) 주도 SMR 타당성 및 잠재력 보고서 발간 (2014)
- ✓ 에너지환경부(DECC), 차세대원전 투자계획 (2.5억GBP/5년) 발표 (2015.11), SMR 경쟁 참여의향서(EOI) 제출 요청 (2016.3.)
- ✓ 에너지산업부(BEIS), 다양한 노형 포함 새로운 SMR 경쟁(AMR F&D) 착수 (2017.12)
  - ARC-100, HTR-PM, SEALER-UK, SSR, U-battery, UK MMR, W LFR, Tokamak 선정 (2018.9)
  - AMR F&D 2단계 지원 노형 선정 (2020): LFR, U-Battery, Tokamak
- ✓ AMR로 고온가스냉각로 선정 (2021.12) : 2030년대 초까지 1.7억 파운드 지원
- ✓ 선진 원자력기술(HTGR) 개발 지원 위해 330만 파운드 지원(2022.9.)
  - HTGR 개발, HTGR용 피복입자연료 개발
- ✓ SMR 및 신규원전 프로젝트 지원: 1.2억 파운드 FNEF(Future Nuclear Enabling Fund) (2022.5.)
- ✓ 핵연료기금(Nuclear Fuel Fund) 조성: 7.5천만 파운드 (2022.7.)
- ✓ HTGR Phase-B (6천만 파운드), W springfields 핵연료시설(1.3천만 파운드) 지원(2022.12.)
- ✓ GBN(Great British Nuclear) 공식적 출범, 새로운 SMR 개발 경쟁 착수(2023.7.)

# 국가별 SMR 개발 전략 : 러시아



- ❖ 쇄빙선용 원자로 진화: KLT-40 → KLT-40S → RITM-200 → RITM-400
- ❖ 적용 분야 진화: 쇄빙선 → 해상부유식 원전 → 육지용 원전
  - ✓ RITM-200: 55MWe iPWR (OKBM Afrikantov 개발), 20% 농축 우라늄 연료 사용, 설계수명 60년, 재장전주기 10년
- ❖ 북극권 개발 및 국가 안보 보장을 위한 전략에 관한 행정명령 서명(2020.10.)
  - ✓ 2035년까지 원자력 쇄빙선 Project 22220 계열(RITM-200) 5척, Project 10510 계열 (RITM-400) 3척 건조
- ❖ Rosatom, Yakutia 자치공화국과 SMR 건설 참여 협약 체결 (2020.12.): RITM-200 2기 (Ust-Kuyga에 건설된 SMR로 Kyuchus 금광도 개발)
- ❖ Breakthrough' 프로젝트: 순환 핵연료주기 기술 개발
  - ✓ Pilot Demonstration Energy Complex, PDEC: 핵연료 제조공장, 원자로, 핵연료 재처리 설비
  - ✓ BREST-OD-300 건설중

# 국가별 SMR 개발 전략 : 중국, 프랑스, 일본



## ❖ 중국 SMR 개발

- ✓ 125 MWe ACP100 경수형 SMR 창장에 건설중 (2021.7. 건설 시작)
  - 개발 착수(2010), 예비설계완료(2014), 건설프로젝트 착수(2017), 건설승인 (2021.6)
- ✓ 100MWe 고온가스로 HTR-PM 실증 운전 시작 및 전력망 연결(2021.12.)
  - 건설 착수(2012.12.), 운영허가 발급 및 핵연료 장전 (2021.8.)
- ✓ 액체불화토륨원자로(Th-MSR 또는 TMSR) 개발 착수 (2022.1.)
  - 2 MWt TMSR-LF1: 건설 착수(2018.9.), 완공(2021.8.), 운영허가(2023.6.)

## ❖ 프랑스 SMR 개발

- ✓ CEA 300~400 MWe 가압경수형 Nuward 개발 시작 (2019)
- ✓ 마크롱 대통령 SMR, 전기차, 수소 개발에 2030년까지 300억 유로 투자 계획 밝힘 (2021.10.)

## ❖ 일본 SMR 개발: 민간 지원 및 해외 연계를 통해 LWR, HTGR, 고속로 중심으로 개발

- ✓ NEXIP:기초연구(대학·연구기관)와 실용화(민간기업) 기술 연계
- ✓ JAEA: 고온가스로 · 고속로의 연구개발 및 기술 기반 정비, 민간에 시설 제공
- ✓ SMR 연구·개발·실증을 위한 국제협력 노력 추진입장 확인 (2021.10.)



# Small Modular Reactor



01

— SMR 개요 및 시장 전망

02

— 국가별 SMR 개발 전략

03

— 주요 SMR 사업 현황

04

— 주요 SMR 도입국 배치 동향

# 주요 SMR 사업 현황



## ❖ 경수형 SMR

- ✓ NuScale SMR (VOYGR)
- ✓ GEH BWRX-300
- ✓ Rolls-Royce SMR
- ✓ Holtec SMR-160
- ✓ RITM-200
- ✓ ACP-100

## ❖ 초소형원자로 (MMR)

- ✓ USNC MMR
- ✓ Oklo Aurora
- ✓ Westinghouse eVinci
- ✓ Project Pele

## ❖ non-LWR SMR (Gen-IV SMR )

- ✓ TerraPower Sodium
- ✓ ARC-100
- ✓ X-energy Xe-100
- ✓ HTR-PM
- ✓ Kairos Power KP-FHR (Hermes)
- ✓ Terrestrial Energy IMSR-400
- ✓ Moltex SSR
- ✓ TerraPower MCRE & MCFR
- ✓ 중국 LFTR (TMSR-LF1)
- ✓ Seaborg CMSR

# 경수형 SMR 사업현황



## ❖ NuScale 원자로 개발

- ✓ 일체형 가압경수형 SMR, 자연순환냉각
- ✓ 50 MWe NPM 발전소 NRC DC 신청 (2017년): NRC SDA 획득 (2020년), DC 획득(2023년 1월)
- ✓ 출력 변경: 45MWe (2014) → 50MWe → 60MWe (2018) → 77MWe (2020)
- ✓ 77 MWe NPM 6기 발전소 (VOYGR-6) SDA 신청 (2023년 1월 1일)

## ❖ UAMPS (Utah Associated Municipal Power System)의 CFPP (Carbon-Free Power Project)

- ✓ 2013년 중반 UAMPS는 NuScale SMR 건설 목적으로 Energy Northwest와 WIN(Western Initiative for Nuclear) 결성
- ✓ 2015년 NuScale SMR 아이다호 건설 CFPP 착수, DOE NuScale COLA 준비자금 16.6M\$ 지원
- ✓ DOE, UAMPS에 CFPP용 INL 부지사용허가 발행(2016.), NuScale 건설부지 최종 선정(2019.7.)
- ✓ 2020년 10월 DOE, UAMPS에 CFPP 개발과 건설을 위해 13.55억불 지원 승인
- ✓ 2021년 6월 UAMPS, 77MWe NuScale Power Module (NPM) 6기 건설 확정, 통합인허가(COLA) 신청서 제출 (2024년 예정), FOAK 가동(2029년)
- ✓ 제한작업인가(Limited Work Authorization, LWA) 신청 (2023.7.)

## ❖ 루마니아에 6기 건설 협약(2021년 10월)

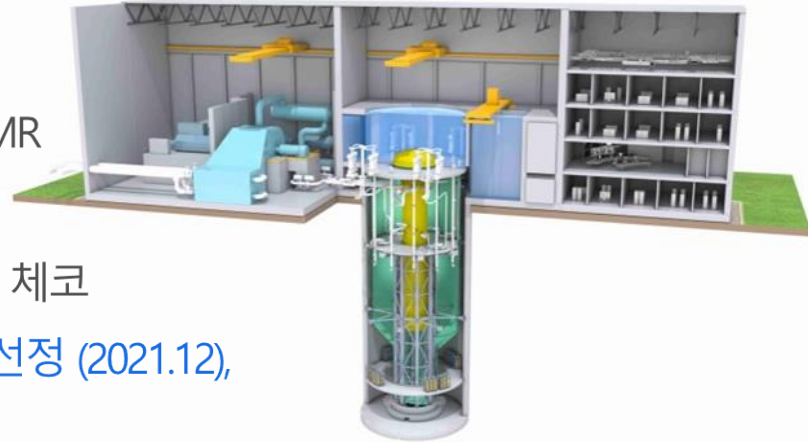
- 미정부, 도이체티 부지 Front-End Engineering and Design(FEED) 지원 (2022년 6월)

## ❖ 폴란드에 건설업무 착수 계약 (2022년 2월) : VOYGR-4에서 VOYGR-12로 확대 계획

# 주요국 SMR 개발 동향 (미국)

## ❖ GEH BWRX-300 개발

- ✓ 300 MWe 자연순환 피동냉각 계통의 비등경수형 SMR (NRC 인가 1520 MWe ESBWR 설계 기반)
- ✓ 건설 추진 : 캐나다(온타리오주), 에스토니아, 폴란드, 체코
  - 온타리오 달링턴 부지에 건설될 SMR 후보로 선정 (2021.12), 건설허가 신청(2022.10.31)
  - 캐나다 사스크파워 그리드 규모 SMR로 선정 (2022.6.)
  - TVA와 GEH, BWRX-300 클린치리버 부지에 배치 추진
- ✓ 2단계(건설 및 운영) 인허가를 통해 2027년 운전 목표
- ✓ NRC 사전인허가 검토 수행중: 2019년 TR 5종 제출
- ✓ 캐나다 CNSC VDR (Vendor Design Review) 1·2단계 검토 완료 (2019.5.~2023.3.)
- ✓ 미 NRC와 캐나다 CNSC, BWRX-300 등 기술검토 협력 협약 체결(2022.10.)
- ✓ BWRX-300에 대한 GDA(Generic Design Assessment) 신청서 영국 비즈니스·에너지·산업 전략부(BEIS)에 제출 (2022년 12월)
- ✓ 폴란드 OSGE, 부지 6곳을 기반으로 BWRX-300 건설에 대한 원칙적 결정(decision-in-principle) 신청서 제출(2023.4.)





# 경수형 SMR 사업현황



## ❖ Rolls-Royce SMR

- ✓ 영국 ONR GDA(일반설계평가) 신청(2021.11.), GDA 심사 착수 (2022.4.)
- ✓ SMR 기기 제작 제1공장(원자로용기 생산) 최종 후보지 3곳 선정 (2022.10.)
  - Sunderland의 International Advanced Manufacturing Park(IAMP), Teesside의 Teesworks, Deeside의 Gateway
- ✓ SMR-160 건설 후보 부지 4곳 발표 (2022.11.9.)
  - Kent주의 Dungeness, 북부 웨일스주 Anglesey의 Wylfa, 웨스트 컴브리아주의 Moorside, 북서부 웨일즈 Gwynedd의 Trawsfynydd
- ✓ 체코, 에스토니아, 네덜란드, 터키, 요르단에 건설 추진

## ❖ Holtec SMR-160

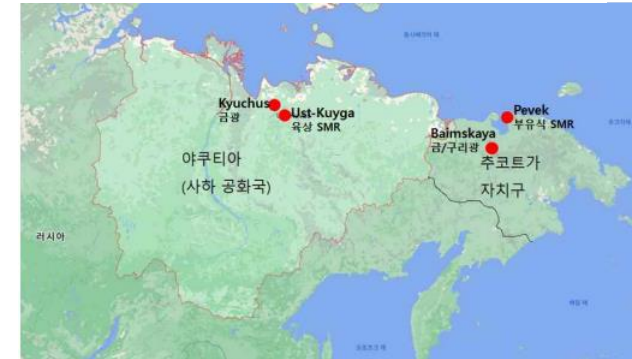
- ✓ 뉴저지주 오이스터크릭(Oyster Creek)에 첫 번째 SMR-160 배치 계획
- ✓ 영국, 우크라이나, 체코에 건설 추진
- ✓ 영국 GDA(일반설계평가) 신청 (2023.1.)
  - 영국 사용자에게 전기와 열을 제공용으로 2050년까지 32기의 SMR-160 배치 계획
- ✓ 영국의 SMR-160 건설을 위해 Balfour Beatty 및 현대건설과 MoU 체결 (2022.12.)
  - 영국 내 Holtec SMR-160 배치 후보지: 웨일즈의 Trawsfynydd, 영국 Heysham과 Oldbury 세 곳을 잠재적인 부지로 선정

# 경수형 SMR 사업현황



## ❖ 러시아 RITM-200

- ✓ 쇄빙선용 원자로 진화: KLT-40 → KLT-40S → RITM-200 → RITM-400
- ✓ KLT-40C 탑재 Akademik Lomonosov: 페벡 Chaun-Bilibino 전력망에 전력 공급 (2019.9.)
- ✓ Akademik Lomonosov, 페벡 지역에 열공급 시작 (2020.7.)
- ✓ KLT-40C를 개량하여 RITM-200 개발 (출력증강 35MWe → 55MWe)
  - 쇄빙선 Arktika(2020), Sibir(2021), Ural(2022)에 각각 2기씩 설치하여 운항중
  - 후속 쇄빙선 야쿠티아(Yakutia)와 추코트카(Chukotka) 건조 중
- ✓ 해양부유식 원전 4기(RITM-200M 8기) 건설 계획: Chaunskaya만 나글린(Nagloynyn)곶 (페벡 지역) Bilibino망을 통해 Baimskaya 구리/금광에 공급 (2027년 KLT-40C 발전소 대체)
  - ✓ 나글린 곶 부유식원전 건설 착수 (2022.8.)
- ✓ 육상 발전소 건설 계획: Yakutia 지역 Ust-Kuyga에 RITM-300N 2기 건설(2028.)하여 인근지역 및 Kyuchus 금광에 전력 공급



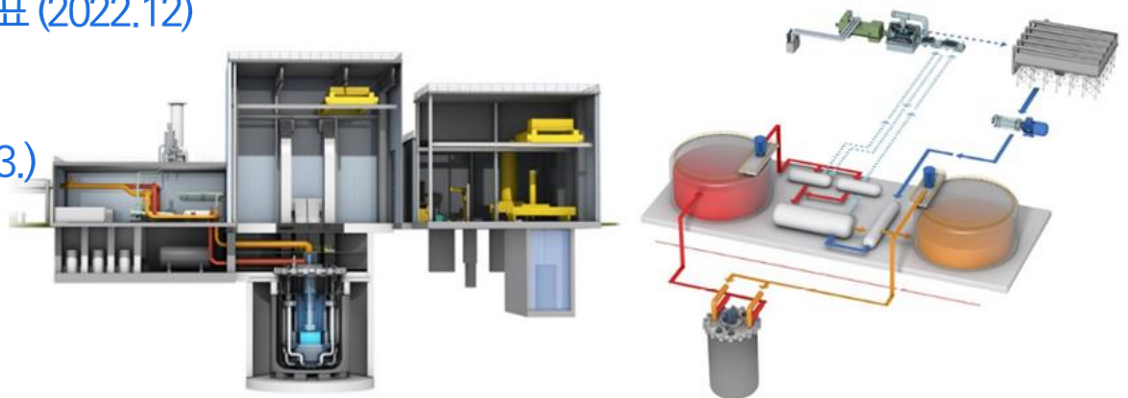
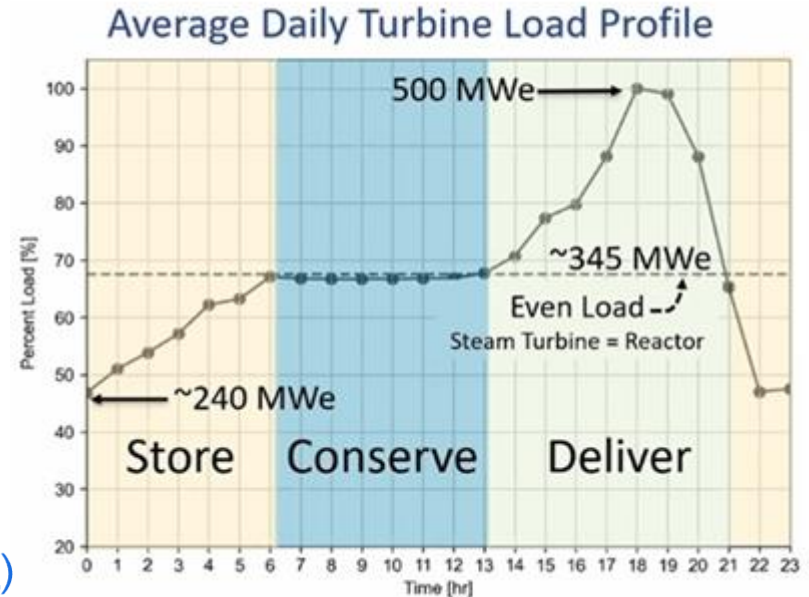
## ❖ 중국 ACP-100

- ✓ 125 MWe 경수형 SMR 창장에 건설중 (2021.7. 건설 시작), 원자로 모듈 설치(2023.8.)
  - 개발 착수(2010), 예비설계완료(2014), 건설프로젝트 착수(2017), 건설승인(2021.6)

# 비경수형 SMR 사업현황

## ❖ TerraPower Natrium™ 실증 프로젝트

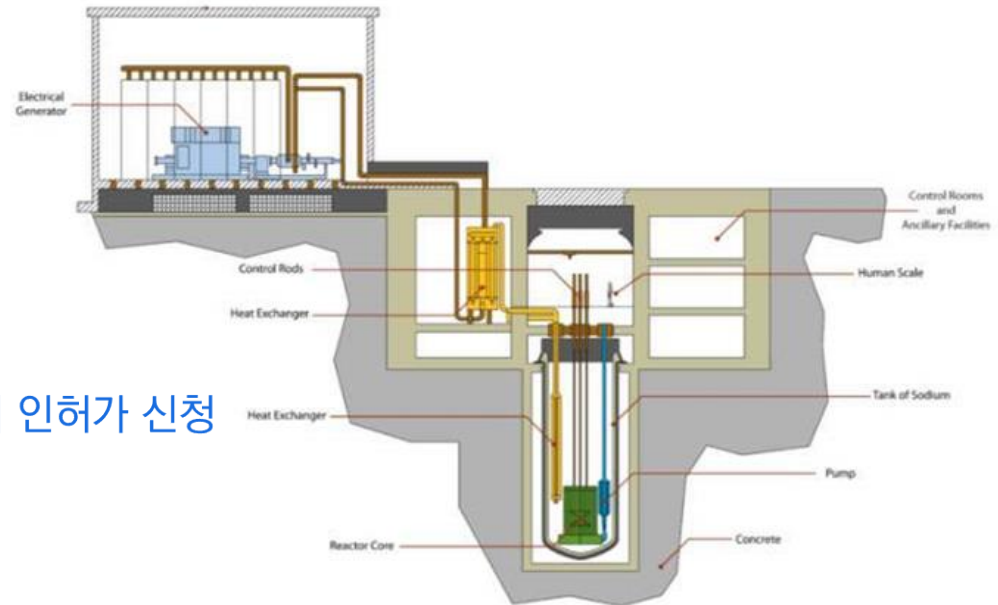
- ✓ TerraPower와 GEH 공동 개발 중
- ✓ 345MWe SFR과 용융염 열저장장치 결합
- ✓ DOE ARDP 수혜대상으로 선정(2020)
- ✓ Natrium 실증로 건설계획
  - 와이오밍주 Kemmerer 부지 선정 (2021.11.)
- ✓ NRC에 규제참여계획 송부 (2021.6)
  - 건설허가신청 (2023.8.), 운영허가신청 (2026.3.)
- ✓ Natrium Fuel Facility 착공 (2022.10.)
- ✓ 실증로 운전개시일 2년 이상 지연 발표 (2022.12)
  - HALEU 수급 문제 발생 예상
- ✓ 유타주에 추가 2기 건설 계획 (2023.3.)



# 비경수형 SMR 사업현황

## ❖ ARC-100

- ✓ 100 MWe SFR (EBR-II 기반), 금속연료, 20년 재장전
- ✓ DOE ARDP ARC-20 수혜대상으로 선정(2020) : 27.5백만불/3.5년 지원
- ✓ 실증로 건설 : 뉴브런즈윅(NB) Point Lepreau 부지에 건설계획 (2029년) , NB 2천만 CAD 지원
- ✓ 캐나다 CNSC VDR 1단계 검토 완료 (2019.10.), 2단계 착수 (2022. 2.)
- ✓ 캐나다 Hatch사와 협력 10년 내에 캐나다 뉴브런즈윅에 배치 계획 발표 (2022.7.)
- ✓ CNL과 핵연료제조 공정 기술  
실증 파트너십(2022.7)
- ✓ 캐나다 벨레둔항만청(BPA)  
ARC-100 활용 의사(2022.11.)
- ✓ 알버타주 IAC와 ARC-100 상용화  
지원 MOU 체결 (2023.3.)
- ✓ NB Power, Point Lepreau 부지준비 인허가 신청  
(2023.6.)





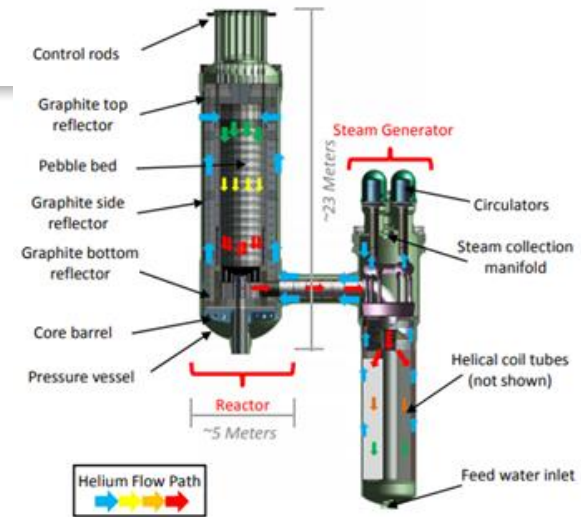
# 비경수형 SMR 사업현황

## ❖ X-energy Xe-100 개발

- ✓ 76 MWe pebble bed형 고온가스냉각로, He 냉각
- ✓ DOE ARDP 수혜대상으로 선정(2020): 12.3억불/7년
- ✓ NRC 사전인가가 검토 수행: 2018년 TR/WP 3종 제출
- ✓ 캐나다 CNSC VDR 검토 진행중 (2020년 8월 부터)
- ✓ NRC에 TRISO-X 연료제조시설(TF3) 인허가 신청 (2022.4.), NRC 검토 착수(2022.12.)
  - 오크리지 호라이즌센터 산업단지 입지
- ✓ TF3 연료제조시설 착공 (2022.10.)
- ✓ Xe-100 원자로보호계통 시제품 완성 (2022.12.)
- ✓ SPAC(기업인수목적회사)와 합병 (2022.12.): X-Energy Inc. 설립 및 상장 (2023년 2분기)
- ✓ Dow사와 Xe-100 4기 건설 공동개발협약(2023.3.), 걸프만에 부지 선정 (2023.5.)
- ✓ Energy Northwest와 최대 12기 건설 공동개발협약 체결(2023.7.)

## ❖ 중국 HTR-PM 개발

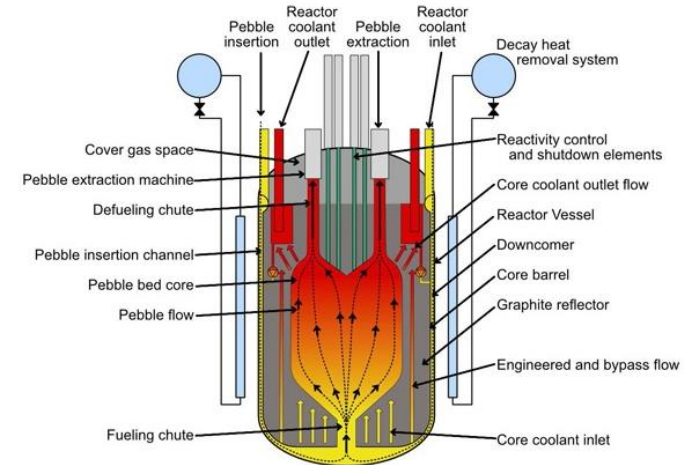
- ✓ 210 Mwe 터빈 하나에 원자로 2기 연결
- ✓ 실증 발전소 시운전 (2020.7.), 운영허가(2021.8.)
- ✓ 송전망 연결(2021.12.), 100% 출력운전 (2022.12.)



# 비경수형 SMR 사업현황

## ❖ Kairo Power사 KP-HFR

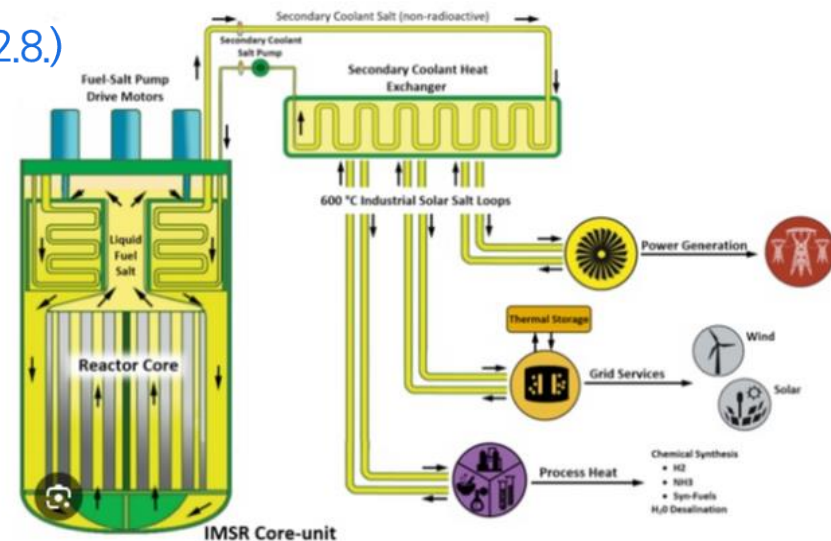
- ✓ 140 MWe 용융염로, 불화염 냉각재, TRISO 펠블형 연료
- ✓ NRC 사전인가가 검토 신청, TR 11종(2018. 11.)
- ✓ DOE ARDP (Risk Reduction) 수혜대상으로 선정
- ✓ 35 MWt 시험로(Hermes) 오크리지 ETTP에 건설계획 (2026가동)
- ✓ TVA와 상호협력 체결 (2021. 5.)
- ✓ Hermes PSAR NRC에 제출 (2021.10.)
  - NRC 검토 완료 (FSER 발행) (2021.6.)
- ✓ NRC, Hermes 원자로 건설허가 신청에 대한 환경영향보고서(EIS) 초안 발표 (2022.10.)
- ✓ 브루스파워, Constellation, 서던컴퍼니, TVA와 카이로스파워 운영 · 제조 · 개발 동맹(KP-OMADA)을 결성 (2022.4.)
- ✓ KP-FHR용 고순도 불화염 냉각재를 생산할 용융염정화공장(MSPP)을 오하이오Elmore에 있는 Materion 캠퍼스에 건설 결정 (2022.7.)
- ✓ Hermes 2호기 실증 발전소의 건설허가 신청서를 NRC에 제출 (2023.7.)
  - Hermes 2기, 착공(2025.7.), 완공(2027.7.)



# 비경수형 SMR 사업현황

## ❖ Terrestrial Energy IMSR (Integral Molten Salt Reactor)

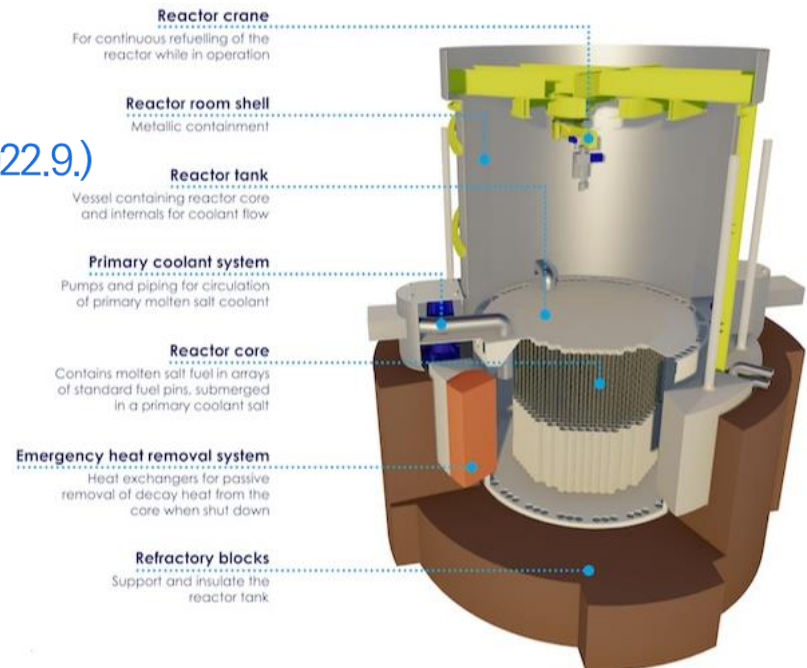
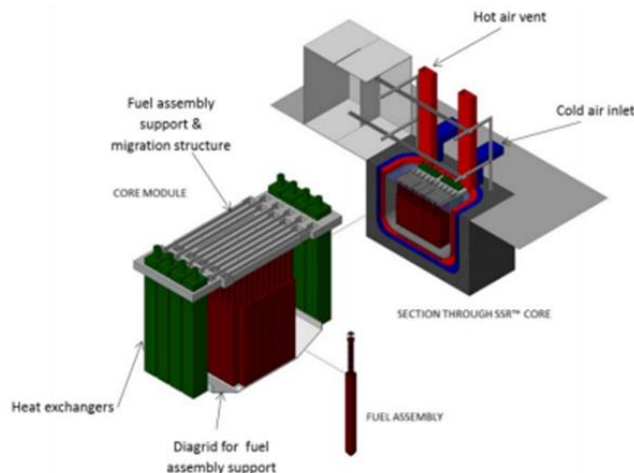
- ✓ 400 MWt (190 Mwe) 용융염로, 5% 농축도의 불화염 연료, 흑연 감속재, 운전온도 600 °C
- ✓ 온타리오 달링턴 부지에 건설될 SMR 3개 후보 중 하나였음
- ✓ NRC 사전인가가 검토 수행: 2019년 제 6종 제출
- ✓ CNSC VDR 1단계 검토 완료 (2017.11.), 2단계 검토 완료(2023.4.)
- ✓ NRC와 CNSC, IMSR의 가상 초기사건 분석 및 방법론에 대한 1차 공동 기술검토 완료 (2022.6.)
- ✓ IMSR 핵물질 안전조치 평가 완료 (2022.8.)
- ✓ 알버타주 Invest Alberta와 상용화 지원 MOU체결(2022.8.)
- ✓ DOE로부터 NRC 인허가를 위한 보조금 수혜 (2023.4.)



# 비경수형 SMR 사업현황

## ❖ Moltex SSR (Stable Salt Reactor)

- ✓ 영국 Moltex Energy가 개발한 150 MWe 용융염로
- ✓ 핵연료봉 안에 용융염연료( $2/3 \text{ NaCl} + 1/3 \text{ PuCl}_3$ ) 장입
- ✓ 실증로 건설: NB Point Lepreau부지에 건설계획 (2030년대 초), 캐나다 중앙정부 SSR-W 및 사용후연료용융 전환시설 (WATSS) 건설 5천만 CAD 지원
  - WATSS: WASTE To Stable Salts
- ✓ OPG CANDU 연료 재활용위해 WATSS 개발 지원 (2021.3.)
- ✓ CNSC VDR 1단계 검토 완료 (2021. 5.)
- ✓ SNL-Lavalin과 SSR-W 지원 파트너십 (2022.4.)
- ✓ 자회사 MoltexFLEX, 40 MWt 용융염로 FLEX 출시(2022.9.)





# 비경수형 SMR 사업현황



## ❖ MCFR & MCRE(Molten Chloride Reactor Experiment)

- ✓ TerraPower & Southern Company는 2015년부터 MCFR (Molten Chloride Fast Reactor) 개발
- ✓ DOE ARDP ARC-15에서 MCFR의 종합효과시험장치(IET) 구축에 68백만 불 지원(2016)
  - 워싱턴주 Everett 테라파워 연구소에 IET 시설의 건설과 설치 완료 (2022.10.)
- ✓ MCRE: 출력 500 kW인 MCFR 실험장치로 5년 이내 구축 운영 예정
- ✓ DOE ARDP Risk Reduction Awards에서 지원 (2021.11.): 1.7억 불/5년
- ✓ DOE, MCRE 최종환경평가 초안 발행 (2023.8.)

## ❖ 중국 TMSR (Thorium Molten Salt Reactor)

- ✓ 2011년부터 토륨증식용 액체불화토륨원자로 개발 (4.44억불 규모 프로그램)
- ✓ 상하이 응용물리연구소, 실험용토륨연료용융염원자로(TMSR-LF1) 건설을 착공 (2018.9.)
- ✓ 중국 생태환경부, 2 MWt TMSR-LF1 운영 승인 (2022.8.)
- ✓ TMSR-LF1 실증 완료 후 373 MWt 원자로를 2030년까지 건설할 계획

# 비경수형 SMR 사업현황



## ❖ Seaborg CMSR (Compact Molten Salt Reactor)

- ✓ 출력 100 MWe 불화염 용융염로
- ✓ 덴마크 시보그사가 2014년 부터 개발, 수명 12년 마다 원자로 교체
- ✓ 감속재로 흑연 대신 수산화나트륨 사용 (중성자 조사 내구성 강화)
- ✓ 전력 바지선에 2~8기 CMSR 탑재 가능
- ✓ 삼성중공업과 협력 양해각서 체결 (2022.4.7.)

## ❖ ACU MSRR (Molten Salt Research Reactor)

- ✓ 1MWt 흑연감속 불화염 연구용 원자로로 2025년 완공 계획
- ✓ MSRR의 설계, 제작 및 인허가를 위해 NEXTRA(NEXT Research Alliance) 파트너십 결성
- ✓ Natura Resources가 연구비(3,050만 불) 지원
- ✓ NRC에 MSRR 건설허가 신청 (2022.8.), NRC 검토 결정 (2022.11.)

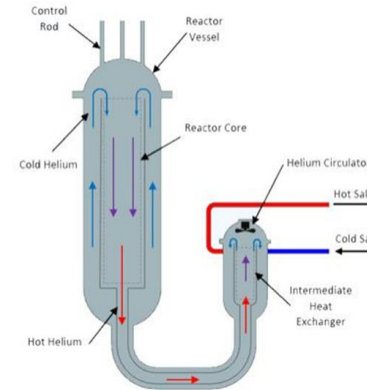
## ❖ 기타 MSR

- ✓ 네덜란드 NRG 주도 컨소시엄 토륨 MSR 개발
- ✓ 미국 ThorCon은 500MW 토륨용융염원자로 개발중, 부유식 원전 인도네시아 설치 계획(2027)

# 초소형원자로 사업현황

## ❖ USNC사 MMR (Micro Modular Reactor)

- ✓ 5 MWe HTGR, FCM 핵연료, He 냉각, 중간계통(용융염)
- ✓ GFP 주도로 CNL(Chalk River 연구소) SMR 사업에 참여  
: 3단계 시작(2019.7)
  - GFP는 USNC와 온타리오파워(OPG)의 합작회사
- ✓ : Chalk River 연구소내 부지 확정 (2023.5.)
- ✓ SMR 부지사용허가 신청(2019.3), CNSC 검토 (2021.5)
- ✓ CNSC VDR 1단계 검토 완료 (2019년 2월)
- ✓ 미 일리노이대, 캠퍼스내 MMR 건설계획 NRC에 통보 (2021.7.)
- ✓ ORNL이 개발한 원자로용 부품 3D 프린팅 적층 제조 방식 채택 (2022.1.)
- ✓ 테네시 ETTP에 파일럿연료제조시설 PFM 가동 (2022.8)
  - PFM은 시험 및 핵연료자격을 위한 첫 번째 핵연료 제조
  - ACM (Advanced Ceramics Manufacturing) : 핵연료의 세라믹 부품 제조를 위한 비방사성 시설로 유타주 Salt Lake City 2021년 가동
- ✓ 핀란드 Lappeenranta 공대, MMR 배치 고려 (2022.12.)
- ✓ Urenco USA와 농축우라늄 공급계약 (2023.3.)
- ✓ 폴란드 산업체/대학과 MMR기반 연구시설 건설 협약 (2023.3.)



# 초소형원자로 사업현황



## ❖ Oklo사 Aurora

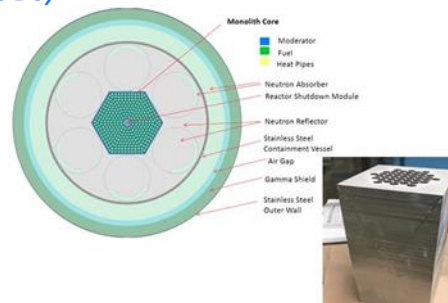
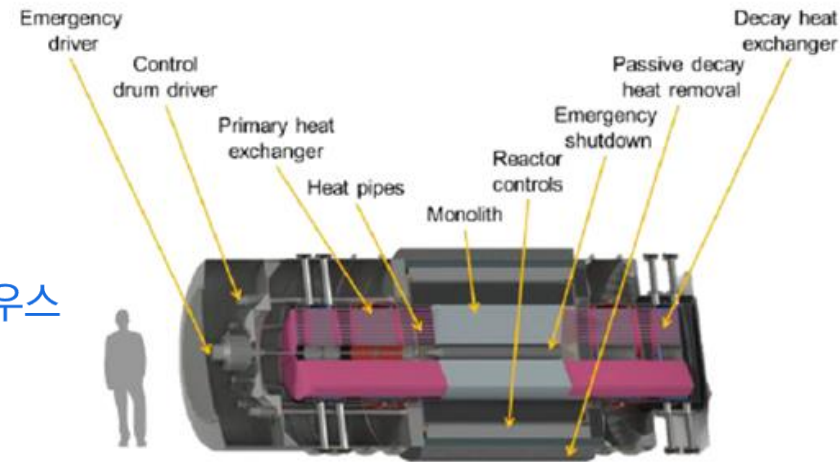
- ✓ 1.5MWe 초소형원자로(fission battery), compact fast reactor (LMFR), 금속연료, 20년 주기, 열전도관, 재생에너지와 결합가능성 실증용 태양광 패널 부착
- ✓ DOE GAIN 프로그램에서 지원 (2016년)
- ✓ 실증로 건설 : DOE의 INL 부지사용허가 (2019.12.) , 건설완료 (2026)
- ✓ INL, 실험로회수 HALEU Oklo 제공기로 합의(2020.2.)
- ✓ NRC에 통합인허가 (COL) 신청 (2020.3.)
- ✓ Maximum Credible Accident Methodology 및 Performance Based Licensing Methodology 주제에 대한 보고서와 보충 정보 제출 (2021년 7월 및 10월)
- ✓ NRC, COL 승인거부 (2022.1.)
- ✓ 향후 인허가 활동 재개를 위한 인허가프로젝트 계획 제출 (2022.9.)
- ✓ 오하이오주 남부에 15 MWe로 증강된 Aurora Powerhouse 건설 계획 발표 (2023.5.)
- ✓ 미 공군, 알래스카 공군기지용 초소형원자로 공급업체로 선정(2023.8.)



# 초소형원자로 사업현황

## ❖ 웨스팅하우스 eVinci™

- ✓ ~1 ~ 5 MWe 블록형원자로, 핵연료 및 열전도관 채널, 19.5 % 연료소자, 40년 이상 재장전 (Los Alamos 개발 KiloPower, MegaPower 기반) , 자율운전
- ✓ DOE ARDP (Risk Reduction) 수혜대상으로 선정
- ✓ NRC 사전인허가 검토 신청 (2019. 6.)
- ✓ CNSC VDR 검토 신청/착수 (2018. 2./2022.10.)
  - 검토 문서 제출 (2023.7.)
- ✓ Bruce Power와 캐나다 활용 방안 탐색중
- ✓ 캐나다 정부, eVinci 개발 지원을 위해 웨스팅하우스 캐나다(Westinghouse Electric Canada Inc)에 2,720만 캐나다달러 투자 발표 (2022.3.)
- ✓ 알래스카에 건설 추진 중 (2022.4.)





# 초소형원자로 사업현황



## ❖ 미국 국방부 초소형원자로 실증프로그램 (Project PELE)

- ✓ 전략능력실(SCO) 주도 프로젝트 Pele 착수 (2020.3.)
- ✓ 개발 요건: 출력 1 ~ 5 MWe, 고유안전성, HALEU Triso 핵연료, 연료주기 3년 이상, 40톤 미만, 트럭/배/C-17 항공기 운반가능, 운송후 3일내 설치 및 운영, 7일 이내 제거 가능
- ✓ 2020년 3월: 2년간의 설계 경합 착수, BWXT Advanced Technology와 X-energy 경합
- ✓ INL 부지에서의 이동형 초소형원자로의 건설 및 실증에 대한 최종 환경영향평가서 확정 (2022.2.)
- ✓ 미 국방부, 초소형원자로 개발 프로젝트인 '펠레(Pele)'의 원형로(시제품) 설계 업체로 BWXT 선정 (2022.6.) (2024년 실규모 시제품 제작 완료 후 납품 계약 체결)
  - 버지니아주 린치버그(Lynchburg) 시설에서 TRISO 핵연료 생산 착수 (2022.12.)
- ✓ '펠레(Pele)' 초소형원자로의 두 번째 설계 업체로 X-energy를 선정(2023.9.)
- ✓ 2023년 말: Pele 초소형원자로 전 출력 시험 계획
- ✓ 2024년 : 야외 이동성 시험 계획

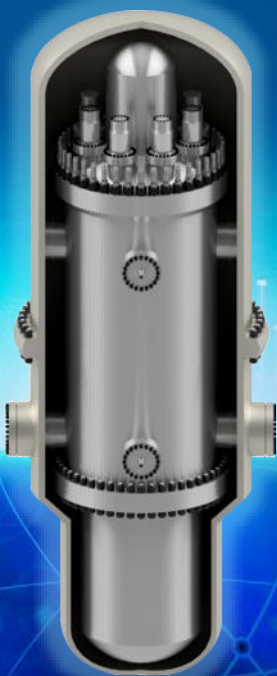
# 주요국 SMR 개발 동향 (미국 NRC)



## ❖ NRC의 선진 원자로 인허가 체계 구축

- ✓ 미 의회의 원자력혁신 및 현대화법(NEIMA) 제정 (2019.1.)
- ✓ NRC 차세대 선진 원자로 규제 준비
  - SMR 인허가 검토와 관련하여 **사전인허가신청 검토 수행중**
  - 비경수형원전 (SFR, HTGR) PDC 개발 지침 (RG 1.232) 개발 (2018.4.)
  - **비경수형 선진 원전 규제지침 (RG 1.233) 개발** (2020.7.): 위험 정보(risk-informed)에 입각한 성능 기반(performance-based) 접근방식의 인허가 검토 절차
  - 초소형원자로 인허가 전략 백서 초안 (2021.9.)
  - **선진원자로 부지 평가 방식에 대한 지침 개정** (선량에 기반한 성능 기준, 2022.8.)  
: SECY-20-0045 (technology-inclusive, risk-informed, and performance-based criteria to assess population related issues in siting advanced reactors)
  - **NuScale EPZ 결정방법론 승인** (2022.10.)
  - **10 CFR 53 제정 중** (기술 중립적, 성능기반 규제체제, 원자로 유형과 상관없이 PSA에 의한 빈도와 방사선결말 결과에 따라 인허가성 검토) (2024.10. 최종규칙 발행)
- ✓ NRC 규제 국제화: 캐나다 CNSC와 규제 공동 검토
  - Xe-100 압력용기 제작 코드 검토 완료(보고서 발표, 2021.8.)
  - Terrestrial Energy IMSR 1차 검토 완료 (가상 초기사건 분석 및 방법론, 2022.6.)
  - BWRX-300 등 기술검토 협력 협약 체결(2022.10.)

# Small Modular Reactor



01

SMR 개요 및 시장 전망

02

국가별 SMR 개발 전략

03

주요 SMR 사업 현황

04

주요 SMR 도입국 배치 동향

# 주요 SMR 도입국 배치 동향



- ❖ (폴란드) 화학그룹 Synthos 및 광산업체 KGHM 주도로 자국내 이용 가능 업체(석유회사, 에너지그룹, 광산회사 등)와 협력하여 GEH, NuScale 등의 SMR 도입 협력 체결
  - ✓ Synthos Green Energy(SGE), GEH와 협력 계약을 체결(2019.), BWRX-300 배치 타당성 조사 수행 (2020.12.)
  - ✓ SGE, 에너지그룹 ZE PAK와 파트노프(Pątnów) 석탄발전소 부지에 BWRX-300 4~6기의 건설을 위한 투자 협약을 체결 (2021.8.)
  - ✓ SGE, 석유화학회사 PKN Orlen과 폴란드에서 BWRX-300의 상용화를 목표로 합작벤처사인 Orlen Synthos Green Energy 설립을 위한 투자협약 체결 (2021.12.), OSGE 설립(2022.3.)
  - ✓ SGE, GEH 및 BWXT 캐나다와 폴란드내 BWRX-300 배치에 협력하기로 하는 의향서(Letter of Intent)에 서명 (2021.12.)
  - ✓ KGHM Polska Miedz SA(KGHM), NuScale Power사와 VOYGR 원전 배치 업무를 시작하는 조기작업협약(EWA)을 체결 (2022.2.), EWA에 따른 SMR 배치 업무지시서 서명 (2022.9.)
  - ✓ 폴란드 국영 에너지회사인 ENEA SA, 미국 Last Energy와 폴란드에 SMR을 배치할 가능성 조사를 위한 의향서(Letter of Intent)를 체결 (2022.6.)
  - ✓ OSEG, 폴란드 NAEA에 BWRX-300 기술평가 신청(2022.7.), ‘일반적 의견’ 발행(2023.5.)
  - ✓ OSEG, 기후환경부에 BWRX-300 건설 ‘원칙적 결정’ 신청서 제출(2023.4.)
  - ✓ KGHM, VOYGR 건설 ‘원칙적 결정’ 신청서 제출(2023.4.), 기후환경부 ‘원칙적 결정’ 승인 (2023.7.)
  - ✓ KGHM, 레그니차경제특구(LSEZ)와 LOI 체결 (2023.6.)

# 주요 SMR 도입국 배치 동향



## ❖ (루마니아) 미국 정부 및 NuScale사와 긴밀한 협력으로 NuScale VOYGR 도입 추진중

- ✓ 국영 원자력기업 Nuclearelectrica, NuScale SMR 사업·기술 정보 교환 MOU 체결 (2019.3.)
- ✓ 루마니아, 미국 DOE와 루마니아 원전 프로그램의 확대 및 현대화를 위한 정부 간 협력 합의문 초안에 서명 (2020.10.)
- ✓ Nuclearelectrica, NuScale Power사는 2028년까지 루마니아에 NuScale SMR 발전소 건설하기 위한 협약을 체결 (2021.10.)
- ✓ Nuclearelectrica, NuScale 및 도이체티 부지 소유주인 E-INFRA와 NuScale SMR 건설 부지 분석 업무에 대한 양해각서 체결 (2022.5.)
  - 6기의 77 MWe의 VOYGR-6 발전소를 건설위한 준비 작업 수행
- ✓ Nuclearelectrica, 민영에너지 업체인 Nova Power & Gas와 도이체티 SMR 건설 프로젝트 개발을 목적으로 RoPower Nuclear 합작회사 설립(2022.9.27)
- ✓ 미 정부는 NuScale Power사와 함께 루마니아에 SMR 첫 호기 배치와 관련하여 기초를 제공하는 Front-End Engineering and Design(FEED) 연구에 1,400만 달러 지원 발표 (2022.10.)
- ✓ RoPower, 루마니아 SMR 프로젝트 개발 관련 협력과 투자 기회를 모색위한 이탈리아 철강업체 AFV 벨트레임(Beltrame) 그룹 소속인 도날람(Donalam)과 양해각서(MoU) 체결 (2022.11.)
- ✓ RoPower와 NuScale, 도이체티 VOYGR-6 FEED 작업계약 체결(2022.12.)
- ✓ 루마니아 CNCAN, VOYGR-6 인허가근거문서 (LBD) 승인 (2023.8.)



# 주요 SMR 도입국 배치 동향



- ❖ (에스토니아) 에스토니아 기업 Fermi Energia는 GEH, Rolls-Royce, NuScale의 SMR을 도입할 것을 염두에 두고 SMR 배치 타당성을 연구해왔으며, 이들 3개 사에 SMR 공급 입찰을 요청 후 BWRX-300 선정
  - ✓ Fermi Energia, GEH와 에스토니아에 BWRX-300 건설방안 경제적 타당성과 부지 요건을 검토, 원자력 규제 요건을 평가하는 MOU를 체결 (2019.10.)
  - ✓ Fermi Energia, 스웨덴 Vattenfall, 핀란드 전력회사 Fortum, 벨기에 엔지니어링회사 Tractebel과 발틱 국가에 SMR 건설에 상호협력 MOU 체결 (2020.1.)
  - ✓ Fermi Energia, Rolls-Royce사와 에스토니아에 SMR 배치 가능성에 대한 연구를 수행하기로 양해각서를 체결 (2021.3.)
  - ✓ 에스토니아, 미국의 FIRST(Foundational Infrastructure for Responsible Use of Small Modular Reactor Technology) 프로그램에서 협력하기로 합의 (2022.1.)
  - ✓ Fermi Energia, 캐나다 OPG의 자회사인 Laurentis Energy Partners와 에스토니아의 SMR 건설 프로그램을 개발하기 위한 협력 협약을 체결 (2022.4.)
  - ✓ Fermi Energia, NuScale과 새로운 양해각서를 체결하고, NuScale SMR 발전소 배치 타당성을 평가할 계획 (2022.8.)
  - ✓ Fermi Energia, GEH, NuScale, 롤스로이스 등 3개 SMR 개발업체에 SMR 공급에 대한 입찰을 요청 (2022.9.)
  - ✓ Fermi Energia, GEH BWRX-300을 2030년까지 발틱국가에 건설할 SMR로 선정(2023.2.)
    - 민간 원자력 프로그램을 위한 법률과 입법 준비 착수 (2023.2.)

# 주요 SMR 도입국 배치 동향



- ❖ (체코) 체코 전력회사 CEZ는 GEH, Rolls-Royce, NuScale의 SMR을 도입을 염두에 두고 SMR 배치 타당성 연구 등에 협력, 남보헤미아지역에 SMR 부지 선정
  - ✓ CEZ, NuScale Power와 체코내 NuScale SMR 활용 가능 분야를 탐색하고, 건설, 운전 및 유지 보수 및 원자력 부품 공급분야의 정보를 교환하기로 MOU를 체결 (2019.9.)
  - ✓ CEZ, GEH와 체코에서 잠재적으로 BWRX-300을 건설할 수 있는 경제적, 기술적 타당성을 검토하는 양해각서에 서명 (2020.2.)
  - ✓ CEZ, Rolls-Royce와 체코내에 SMR 건설 타당성을 탐색하는 MOU를 체결 (2020.11.)
  - ✓ CEZ, 체코 최초의 SMR의 잠재적 전설 부지로 테메린(Temelín) 원전의 한 지역을 확보하였다고 남보헤미안지역(South Bohemian Region)에 통보 (2022.3.31.)
    - CEZ, 남보헤미아 주정부, 연구기관 UJV Rez는 SMR이 들어설 남보헤미아 원자력공원(South Bohemia Nuclear Park)을 조성하기로 합의 (2022.5.)
    - CEZ는 남보헤미아 원자력공원(South Bohemia Nuclear Park) 설립 계약 체결 (2022.9.)
    - 체코의 엔지니어링 서비스 업체인 UJV Rez는 SMR 실증로 인허가를 위한 엔지니어링 준비와 부지 선정 작업을 수행할 예정
  - ✓ CEZ, 제2,3 SMR 건설 부지로 다마로비체(Dětmárovice)와 투시미체(Tušimice) 석탄발전부지 지질 조사중(2023.2.2)

# 주요 SMR 도입국 배치 동향



## ❖ (우크라이나) 미국 정부 및 NuScale과 긴밀한 협력으로 NuScale SMR 도입 적극 추진

- ✓ 우크라이나의 원전 운영사인 Energoatom은 NuScale사와 화석연료 발전소를 대체하기 위해 우크라이나 내에 NuScale SMR 배치 가능성을 조사하는 MOU 체결(2021.8.)
- ✓ 미 DOE, 우크라이나 SSTC NRS의 기술 자문기구가 NuScale Power Module(NPM)의 안전성 분석보고서를 독립적으로 검토하도록 재원을 지원 (2021.11.)
- ✓ 미 무역개발청(USTDA), 우크라이나 과학기술센터(STCU)에 우크라이나의 NuScale SMR 기술 평가를 위한 보조금을 지급 (2021.12.)
- ✓ 우크라이나와 미국은 우크라이나에서 SMR과 혁신적인 전기분해 기술을 활용하여 수소와 암모니아를 생산하는 실증 프로젝트 협력을 발표 (2022.11.)
  - 고체산화물 전기분해를 이용 SMR로부터 산업적 규모의 수소와 암모니아의 생산 및 사용 가능성, 기술성 및 경제적 경쟁력을 평가하고 입증
  - 이를 위해 SMR 실증발전소를 건설하고 운영하면서 기술성 및 경제성 분석을 수행할 계획
- ✓ Energoatom, 롤스로이스와 RR SMR 모색 MOU 체결(2023.3.)
- ✓ Energoatom, Holtec과 SMR-160 20기 건설 협력 협정 체결(2023.4.)

# 주요 SMR 도입국 배치 동향



- ❖ (핀란드) VTT 기술연구센터, 지역난방용으로 SMR 개발 착수 (2020.2.)
  - ✓ 전력사 Fortum, 핀란드와 스웨덴에 신규 원전 건설 위한 전제 조건 검토 타당성 조사 (2022.10.)
  - ✓ Fortum, 핀란드 에너지 기업인 헬렌(Helen)과 새로운 원전, 특히 SMR에서 가능한 협력을 모색하기 위한 공동 연구 수행 착수 (2022.10.)
  - ✓ Fortum, 스웨덴의 SMR 프로젝트 개발사인 Kärnfull Next AB와 스웨덴에서 SMR 개발을 위한 기회를 공동으로 모색하기 위한 양해각서를 체결 (2022.12.)
  - ✓ Fortum, 롤스로이스와 SMR 배치 모색 MOU 체결(2023.3.)
  - ✓ Fortum, 핀란드 제철회사 아우토쿰푸(Outokumpu)와 철강 부문 SMR 활용 모색 MOU 체결 (2023.3.)
  - ✓ Fortum, 웨스팅하우스와 대형원전·SMR 신규 건설 전제조건 조사 MOU 체결(2023.6.)
- ✓ 핀란드 Steady Energy, LDR-50 활용 지역난방 시설 개발 중 (2023.6.)
  - Helen과 Steady Energy, LDR-50 개발 협력의향서 (LOI) 체결 (2023.10.)



***Thank you for your attention***

***HYUNG-KOOK JOO (KAERI)***

***[hkjoo@kaeri.re.kr](mailto:hkjoo@kaeri.re.kr)***



**한국원자력연구원**  
Korea Atomic Energy Research Institute