

이투데이 소형모듈원전산업 세미나
“세계 원전 개발 동향과 i-SMR 성공전략”

기후위기 대응과 탄소중립 2050 달성을 위한 차세대 원자력의 역할

연사: 한양대학교 원자력공학과 김성중

장소: 대한상공회의소 의원회의실(지하2층)

일시: 2023년 4월 27일 14:00 ~17:00

주최: 이투데이

후원: 산업통상자원부, 한국수력원자력, 한국원자력학회



한양대학교



원자력공학과



목 차

1. 기후위기 대응: 탄소중립과 원자력 필요성
2. 글로벌 차세대 원자력 동향
3. 탄소중립 SMR 역할
4. 차세대 원자력 역할 (수소생산 중심)
5. 요약 및 결론



목 차

1. 기후위기 대응: 탄소중립과 원자력 필요성

기후위기 대응: 탄소중립과 원자력 필요성

제 4차 산업 혁명 (Fourth Industrial Revolution; 4IR) : 정보통신 기술 융합으로 이루어지는 차세대 산업 혁명



- 전력 접근성 확대에 의한 전력 수요 증가 (연2.1%)
- 석유 및 석탄보다 전력 수요 증가량이 가파름 (암호화폐, 빅데이터, 전기자동차 등)

세계 1차 에너지원별 수요 전망(NPS)								
(단위 : Mtoe)								
세계	2016e	2025	2030	2035	2040	비중(%)		연평균 △(%)
						2016	2040	
1차에너지 수요	13,760	15,182	16,011	16,806	17,584	100.0	100.0	1.0
·석탄	3,755	3,842	3,896	3,909	3,929	27.3	22.3	0.2
·석유	4,388	4,633	4,715	4,764	4,830	31.9	27.5	0.4
·가스	3,007	3,436	3,737	4,068	4,356	21.9	24.8	1.6
·원자력	681	839	897	949	1,002	4.9	5.7	1.6
·수력	350	413	459	499	533	2.5	3.0	1.8
·바이오에너지	1,354	1,530	1,630	1,721	1,801	9.8	10.2	1.2
·기타 재생에너지	225	490	676	896	1,133	1.6	6.4	7.0

자료 : IEA(2017.11.14), World Energy Outlook 2017, Annex A, p.648

세계 최종 에너지원별 수요 전망(NPS)								
(단위 : Mtoe)								
세계	2016e	2025	2030	2035	2040	비중(%)		연평균 △(%)
						2016	2040	
최종에너지 소비	9,486	10,672	11,306	11,896	12,461	100.0	100.0	1.1
·석탄	1,020	1,066	1,080	1,088	1,092	10.8	8.8	0.3
·석유	3,878	4,191	4,307	4,389	4,481	40.9	36.0	0.6
·가스	1,426	1,746	1,927	2,106	2,268	15.0	18.2	2.0
·전력	1,777	2,159	2,405	2,652	2,895	18.7	23.2	2.1
·열	274	295	299	302	303	2.9	2.4	0.4
·바이오에너지	1,069	1,142	1,188	1,228	1,260	11.3	10.1	0.7
·기타 재생에너지	42	74	100	132	162	0.4	1.3	5.8

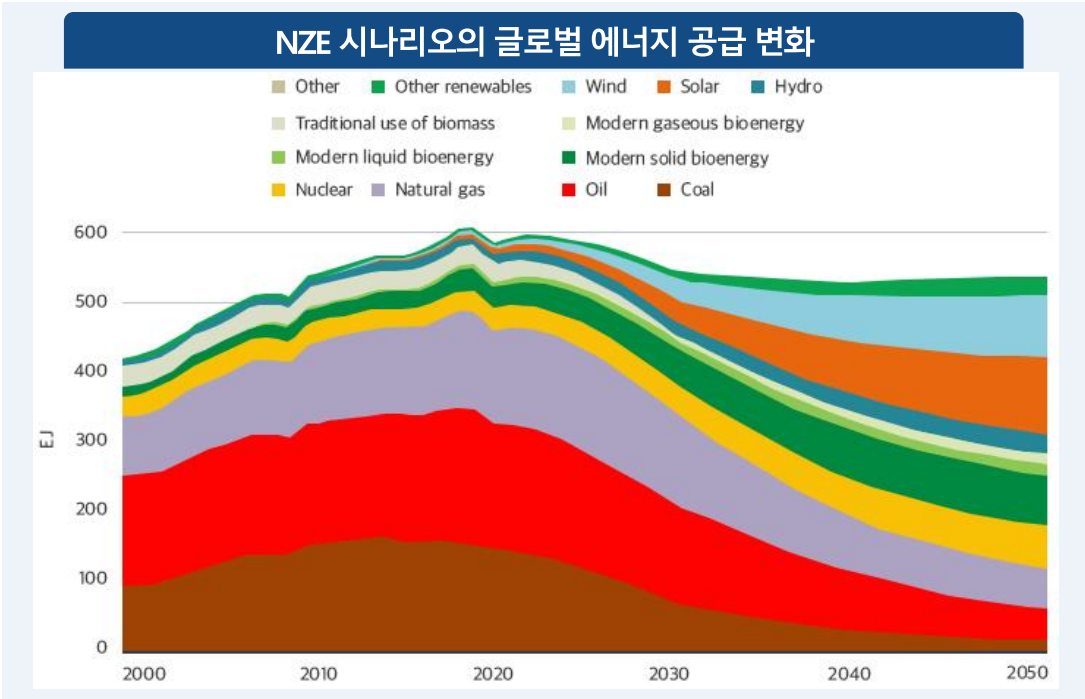
자료 : IEA(2017.11.14), World Energy Outlook 2017, Annex A, p.648

“ IEA (국제 에너지 기구): 2040년까지 전세계 에너지 수요 연 1.0%씩 지속적 증가 예측 ”

기후위기 대응: 탄소중립과 원자력 필요성

Net-zero: 온실가스 및 탄소 배출로 인한 기후위기 막기 위한 탄소중립 목표

- ✓ 현재 무분별한 화석연료 사용 등으로 인한 지구 온난화 가속 중
- ✓ 지구 온난화 해결 위해 대다수 국가들이 탄소배출 감축에 참여
- ✓ G20 국가 비롯 전세계 124개국 2050년까지 탄소중립 공식 선언 IEA에서 Net-zero 달성 위한 시나리오 지속적 제시



2050년까지 감소하는 에너지 공급원

- ✓ 천연가스(Natural Gas)
- ✓ 석유 (Oil)
- ✓ 석탄 (Coal)

2050년까지 증가하는 에너지 공급원

- ✓ 풍력 (wind)
- ✓ 태양 에너지 (Solar)
- ✓ 수소 (Hydrogen)
- ✓ 원자력 (Nuclear)
- ✓ 고체 바이오에너지

“Net-Zero 달성 위해 저탄소 에너지원의 극적인 확대가 필수적”

기후위기 대응: 탄소중립과 원자력 필요성

- ✓ 화석연료에 의존한 현시대 에너지 경제의 결과: 기후위기 & 에너지위기
- ✓ RE100: 재생에너지 100% 달성 목표 → 하지만, REC 구매 및 보유로 달성이 정의되어 실질적이지 않음
- ✓ * 이산화탄소 배출과 에너지 안보 위험이 없으며 우수한 시장경제성을 갖춘 CF100 에너지 필요

CF100 = Carbon-Free 100%



석유·석탄·가스
화석연료

이산화탄소배출 기후위기




에너지자원불균형 에너지위기




CF100 에너지 요건

- ✓ 이산화탄소 배출 Zero
- ✓ 낮은 에너지 안보 위험
- ✓ 우수한 시장 경제성



원자력에너지



태양 & 풍력
재생에너지

기후위기 대응: 탄소중립과 원자력 필요성

- ☑ 태양 & 풍력: 매우 높은 간헐성 & 변동성, 전력공급망 불안정화 이슈
- ☑ 대형 원자력 발전: 낮은 유연성과 P2X 활용도
- ☑ 소형·모듈화 및 혁신 원자력 기술개발로 높은 유연성을 갖춘 차세대 원자력 기술 필요

1950 1960 1970 1980 1990 2000 2010 2020 2030



소형모듈형원자로 (SMR)

소형화

☑ 유연성 향상

☑ 안전성 향상

모듈화

☑ 경제성 향상

☑ 제작성 우수

4세대 원자력 발전

☑ 수소·공정열 생산 등 탄소중립 P2X

☑ 폐기물 저감·안전성·지속가능성

차세대 원자력 = SMR & 4세대 원자로

기후위기 대응: 탄소중립과 원자력 필요성

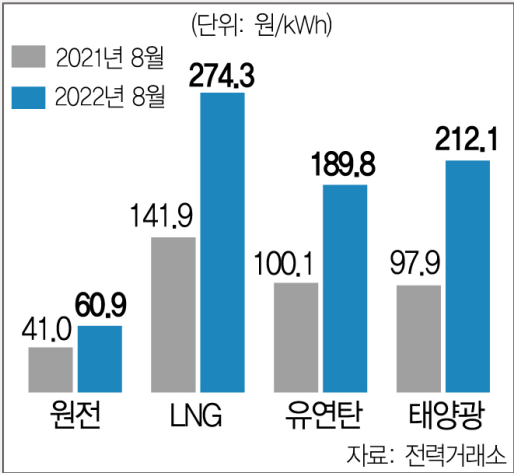
원자력 에너지 장점

높은 경제성

무탄소 에너지

안정적 전력 생산

발전원별 발전 단가 추이



원자력발전과 석탄화력발전 발전 총 비용 비교표

발전소 종류	총비용	자본비용	고정비	변동비 (연료비)	송전비용
원자력발전소	99.1	73.6	12.6	11.7	1.1
석탄화력발전소	123.2	78.0	10.8	33.1	1.2

미국 에너지정보청의 2022년 발전원별 발전비용 전망결과

- 원자력 발전소는 변동비, 즉, 연료비가 매우 저렴함
- 원자력발전소는 석탄화력발전소 대비 연료비에서 발전비용을 크게 절감할 수 있음

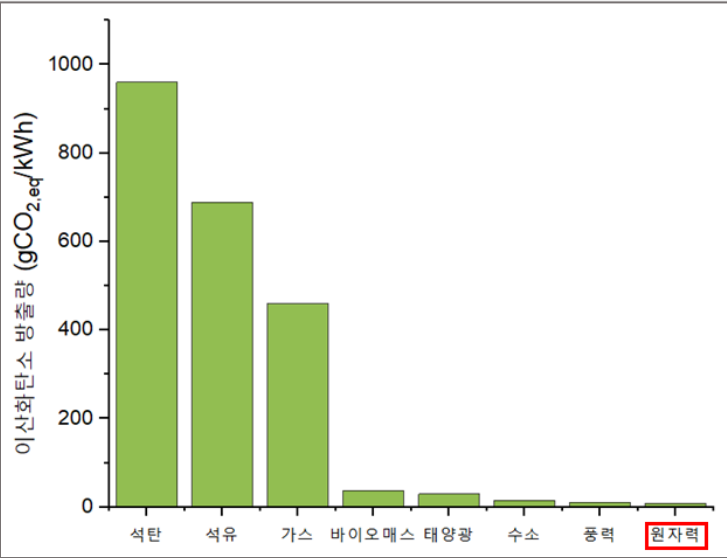
• <https://www.sedaily.com/NewsView/26B5D5OYJH>
• <http://www.e2news.com/news/articleView.html?idxno=100419>
• Kuett, Jesse. "Benefits and disadvantages of nuclear energy." (2018).

기후위기 대응: 탄소중립과 원자력 필요성

원자력 에너지 장점

- 높은 경제성
- 무탄소 에너지
- 안정적 전력 생산

에너지원에 따른 전력생산 시 이산화탄소 배출량



제조 방법에 따른 수소 분류

그레이수소 (Gray H₂)

☒ 천연가스 등 화석연료로 제조

☒ 생산비용: ~ \$ 1/kg

블루수소 (Blue H₂)

☒ 그레이수소 생산 시 탄소 포집

☒ 생산비용: ~ \$ 2/kg

그린수소 (Green H₂)

☒ 재생에너지 연계 생산

☒ 생산비용: > \$ 5/kg

원자력수소 (Pink H₂)

☒ 원자로 연계 생산

☒ 생산비용: ~ \$ 2.5/kg

- 수소: 운송, 산업, 발전 용으로 기존 화석연료 역할 대체 → 탄소중립에 기여
- 원자력수소: 경제적 생산비용과 탄소중립 모두를 달성의 현실적 대안

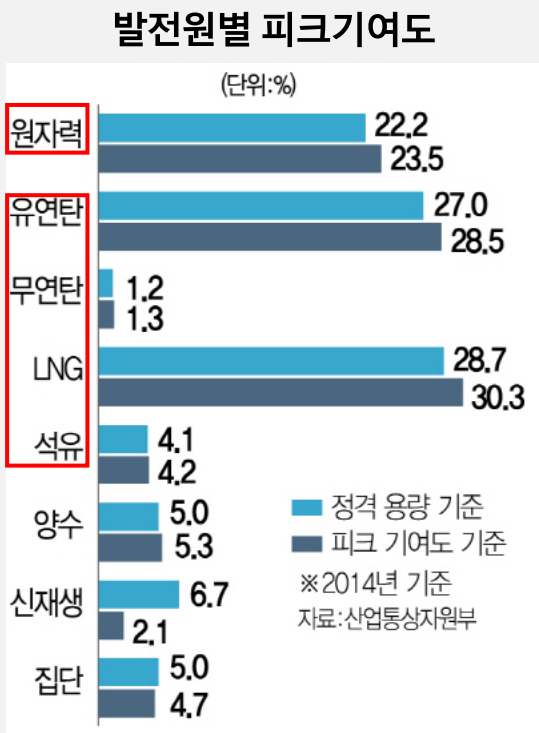
기후위기 대응: 탄소중립과 원자력 필요성

원자력 에너지 장점

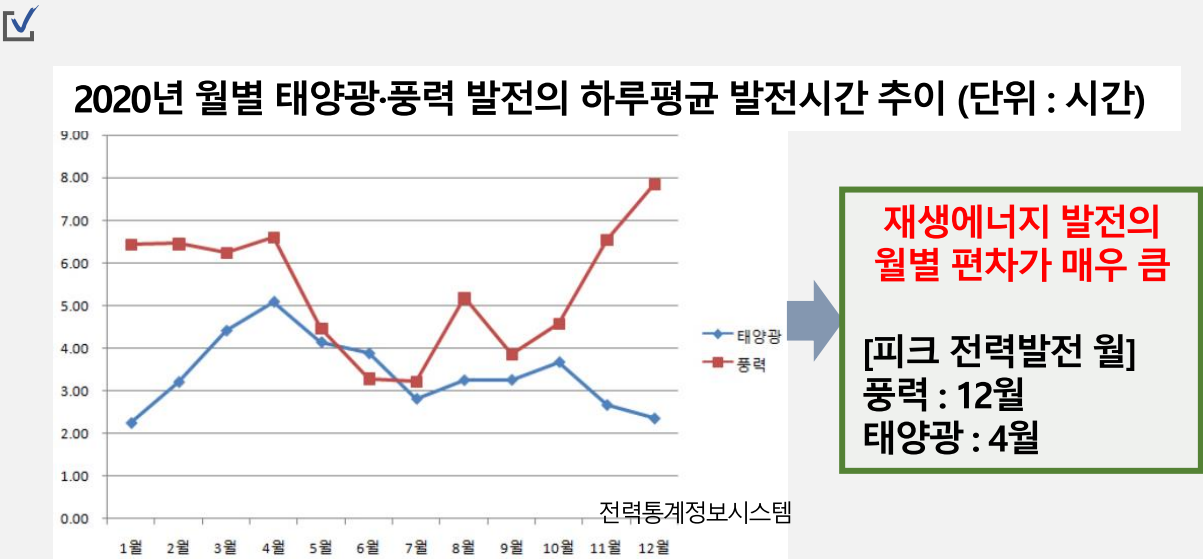
높은 경제성

무탄소 에너지

안정적 전력 생산



피크기여도에서 화력발전과 원자력발전이 비중이 높음
이는 기상 및 기후 조건의 영향을 많이 받는 재생에너지(태양광, 풍력) 특성 때문



핵연료 장기간 보관성 매우 우수, 운전기간 18개월 수준
단기간 에너지 자원 수급 이슈로부터 자유로움

기후위기 대응: 탄소중립과 원자력 필요성

원자력 발전소의 단점

높은 초기 투자 비용

- ✓ 상대적으로 높은 건설비
- ✓ 장기간 건설에 따른 이자비용 부담

비교적 낮은 사회적 수용성

- ✓ 중대사고 등 부정적 인식

방사성 폐기물 처리

- ✓ 방사성 폐기물 처리의 어려움 존재
- ✓ 별도의 방사성 폐기물 처리 시설 요구

원자력 발전소 개선 방안

높은 초기 투자 비용

- ✓ 표준형 원전 반복 건설 → 건설기간 및 비용 단축
- ✓ 원전 이용률 향상에 따른 경제성 제고

비교적 낮은 사회적 수용성

- ✓ 사고저항성핵연료 개발 및 피동안전성 강화
- ✓ 안전성이 획기적으로 증진된 SMR 개발에 따른 인식 개선

방사성 폐기물 처리

- ✓ 방사성 폐기물 재처리 및 감축 기술에 대한 다양한 연구 개발 진행

“중대형원전 단점이 개선된 다양한 형태 SMR 연구개발 진행 중”



목 차

2. 글로벌 차세대 원자력 동향

글로벌 차세대 원자력 동향

☑ 글로벌 차세대 원자력 연구개발 및 지원정책 수립 국가 현황

차세대 원자력 연구개발 및 지원정책 수립 국가 목록

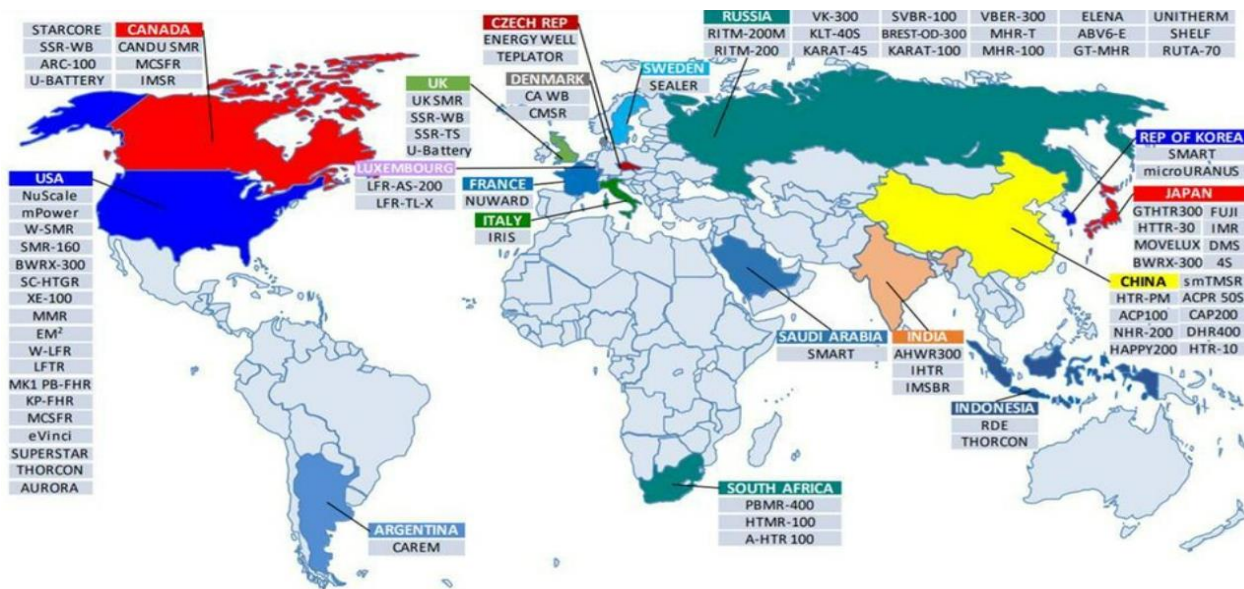
차세대 원전 개발 주요 국가	대한민국	미국	중국	아르헨티나	캐나다	체코	프랑스
	일본	영국	덴마크	룩셈부르크	남아프리카공화국	이탈리아	러시아
원자력 도입 및 지원정책 수립 주요 국가	대한민국	미국	중국	아르헨티나	캐나다	체코	프랑스
	일본	영국	폴란드	이집트	사우디아라비아	UAE	러시아
	튀르키예	남아프리카공화국	우크라이나	유럽연합	EU 그린 택소노미 (환경적으로 지속가능한 경제 활동)에 SMR 포함한 원전 포함되는 법안 가결		

“ 주요 선도국 중심으로
전례 없는 원자력 연구개발 및 지원정책 강화 ”

글로벌 차세대 원자력 동향

☑ 전세계적으로 다양한 SMR 개발 진행 중

세계 SMR 연구개발노형 지도



*IAEA 2020년 집계 자료

소형모듈형원자로 (SMR)

소형화

☑ 유연성 향상

☑ 안전성 향상

모듈화

☑ 경제성 향상

☑ 제작성 우수

- 2020년 기준 → 70여종 SMR 개발
- 경수형 SMR, 비경수형 MSR 등 다수 진행 중
- 2030년 전후 SMR 본격적 상용화 예상

“ 미래 SMR 시장 (약 1,000조 규모) ”
더욱 확대 예상

글로벌 차세대 원자력 동향

국가별 SMR 정책 및 개발 중 SMR

미국



2021.11. 원전 운전 및 **미래형 원전 개발** 포함하는 상업원전 지원책 (Civil nuclear credit program)에 60억 달러 예산 배정

인디애나주 SMR 지원책 법안 (SB 271) 승인,
→ SMR 건설, 구매, 임차 관련 규정과 지원금 정책 수립 예정

가나 및 라트비아와 ‘SMR의 책임 있는 사용을 위한
기초 인프라 정책 (FIRST)’ 협약 체결

NuScale과 동유럽 국가 (예: 폴란드) 간 다수 SMR 협력 체결

대표노형 : NuScale, BWRX-300

- ✓ 검증된 상용 경수로 기술 기반 안전성/경제성 향상
- ✓ 주기를 하나의 모듈에 집약, 격납건물 역시 모듈에 일체화
- ✓ 건물 내 원자로모듈 수를 선택하여 출력 조정 가능
- ✓ 피동형 설계로 외부 전력공급 중단 시 안전성 유지 가능
- ✓ 미국 원자력규제위원회(NRC)가 최초로 SMR 설계인증 승인



글로벌 차세대 원자력 동향

국가별 SMR 정책 및 개발 중 SMR

영국



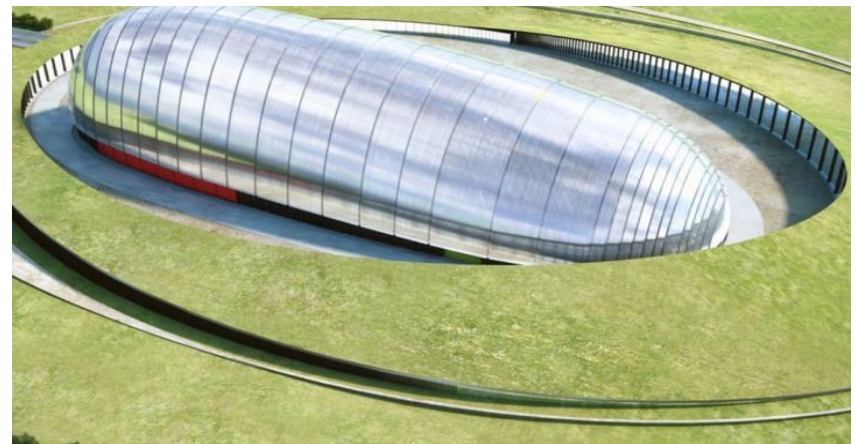
2020년, ‘녹색산업혁명을 위한 10대 계획’ 및 ‘에너지 백서 2020’ 정책의 원자력 부문에서 3억 파운드 (약 4,700억원) 규모 **SMR 민간 투자 촉진 및 SMR 설계 프로젝트 추진**

2021.10. Net-zero 전략 발표
→ 원자력 부문 SMR 및 원전에 대한 **최종투자결정(FID)** 시행

Rolls-Royce SMR Ltd의 SMR (470MWe)에 대한
일반설계평가 1단계 개시

대표노형 : UK SMR

- ✓ 설계사: Rolls-Royce
- ✓ 3-Loop형 가압경수로
- ✓ 출력 470MWe, 설계수명 60년
- ✓ 입증된 공장 제작 방식 선정



글로벌 차세대 원자력 동향

국가별 SMR 정책 및 개발 중 SMR

캐나다



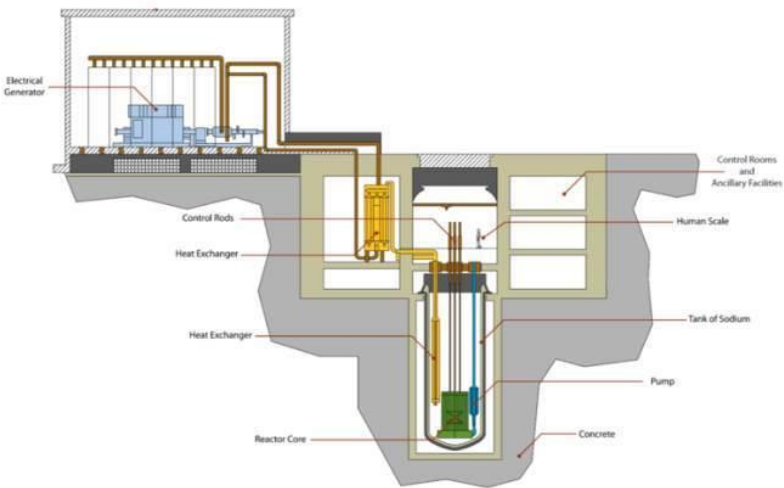
2018 SMR Roadmap 발표 이후,
SMR 개발사 자금 지원, 자국 연구기관/현지업체 육성 정책 시행 중

2022.03. 온타리오 주 포함 4개 주 ‘SMR 개발 및 보급 위한
전략적협력안’ 발표, 이를 통한 SMR 도입 움직임

2022.10.25 **그리드 규모의 SMR 개발 지원** 위해
9억 7000만 캐나다 달러 (약 1조 166억 원) 대출

대표노형: ARC-100

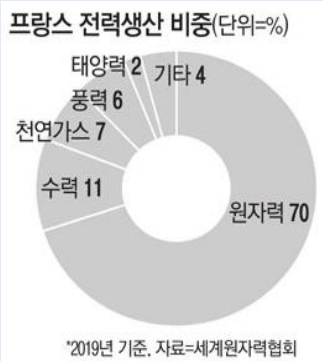
- 미국의 EBR-II (Sodium cooled fast reactor) 에 근거하여 설계
- 100MWe SFR 타입 SMR
- 피동안전계통 통해 고유 안전성 달성
- 20년 핵연료주기 및 60년 수명



글로벌 차세대 원자력 동향

국가별 SMR 정책 및 개발 중 SMR

프랑스



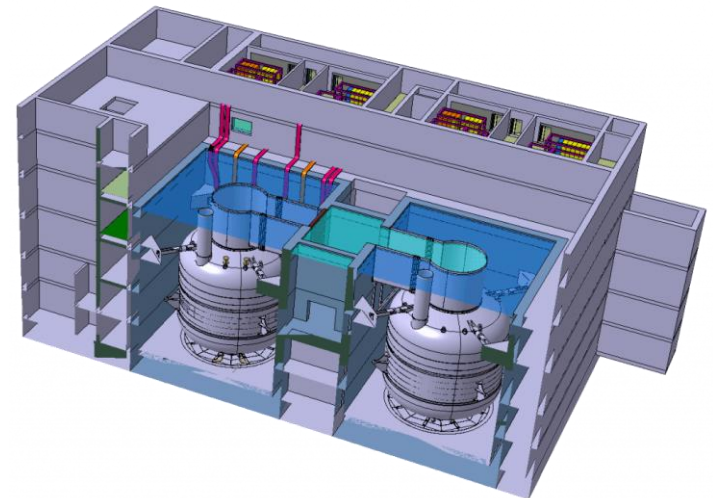
원전 비중 약 70% 달하는 원전 대국

2020.10. 현 원전의 계속운전, 신규 원전 및 SMR 도입 시나리오를 가정한 '에너지 미래 2050년' 발표

2021.10. 300억 유로 규모 '프랑스 2030 투자 계획' 통해 SMR 개발 및 원자력 수소 생산에 투자 계획 발표

대표노형 : NUWARD

- 170MWe의 출력 두 기의 원자로 (총 340MWe)
- 표준화, 모듈식 제조 등을 목표로 설계
- 핵연료주기: 24개월
- 76개 연료 집합체 포함



글로벌 차세대 원자력 동향

국가별 SMR 정책 및 개발 중 SMR

러시아



‘에너지전략 2035’ 정책 바탕 SMR 및 차세대 원자로에
약 1,200억 루블 (약 1.9조원) 투자

2020.05. 세계 최초 해상부유식 SMR 상용화 성공

2028년까지 사하 공화국 내 SMR 건설 프로젝트 추진 중,
SMR 수출 위한 해외 국가들과의 협력 추진 중

대표노형 : KLT-40S

- ✓ 150MWth 2기 운영 (총 300MWth)
- ✓ 발전소 설계 수명 40년
- ✓ 부하추종 운전 활용
- ✓ 경수형 냉각재 및 감속재 활용

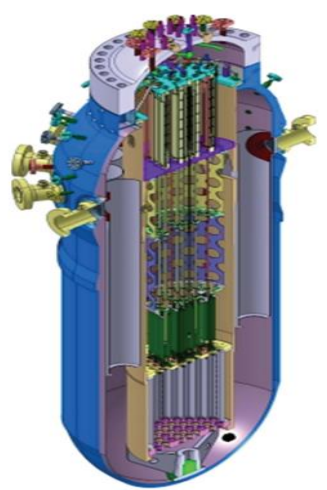


글로벌 차세대 원자력 동향

기타 SMR 주요 노형

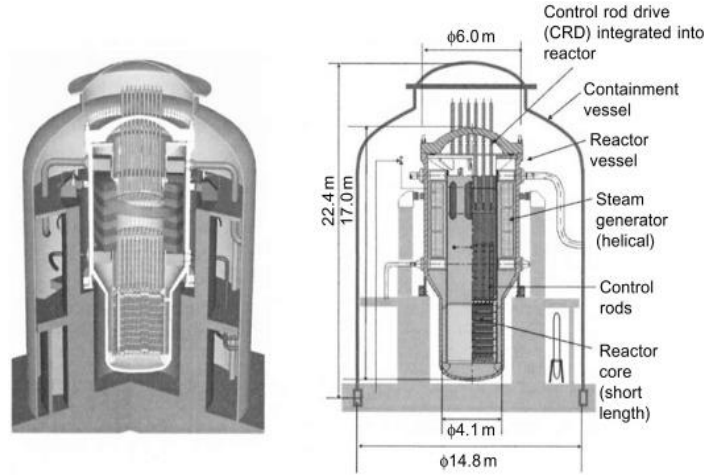
CAREM (아르헨티나)

- 아르헨티나 자체 기술 통해 설계 및 개발한 소형 모듈 형태의 가압경수로 (Central Argentina de Elementos Modulares)
- 첫번째 프로토타입 예상 발전용량은 25MWe이며, 후속 프로토타입 용량 100MWe 목표
- 자연순환 냉각방식 채택
- 현재 첫 프로토타입 건설 진행 중



DMS (일본)

- DMS는 GE Hitachi Nuclear Energy 개발 노형으로, Double MS (Modular Simplified & Medium Small Reactors)를 의미
- BWR형 전기출력 400MWe 목표
- 자연순환 적용 → 피동 안전성 확보



글로벌 차세대 원자력 동향

✓ 국내 기업/기관의 해외 SMR 시장 개척

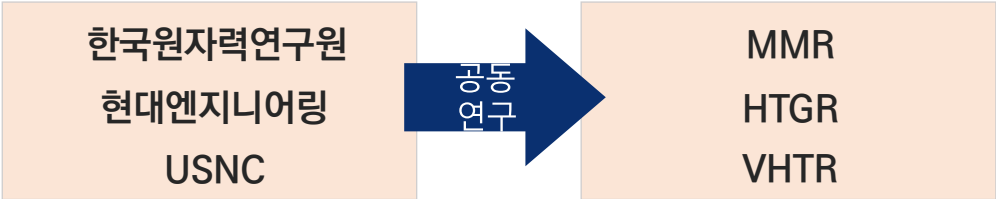
① 한국원자력연구원 - USNC - 현대엔지니어링

국내 기업(SK, 삼성중공업, 두산에너빌리티, 현대건설, GS 등)
국내외 SMR 개발에 참여 사례

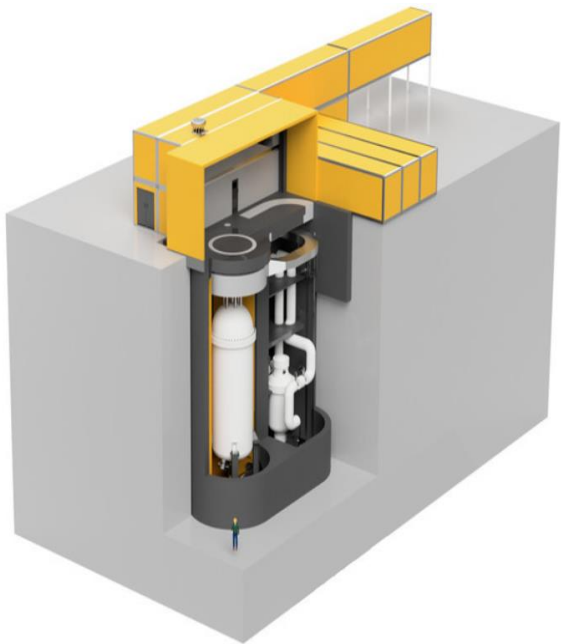
SMART 원전과 i-SMR 등 소형 원전 개발 기술
및 노하우 바탕 해외 SMR 시장 진출

한국원자력연구원, 미국 원자력기업 USNC, 현대엔지니어링
공동으로 MMR 개발 및 건설을 위해
향후 5년간 상호 협력 (2022.9)

공정열 및 전력생산용 고온가스로(HTGR) 및
수소생산용 초고온가스로(VHTR) 활용 및 개발에도 상호 협력



초소형모듈형원자로 (Micro modular reactor; MMR)*



* 고온가스로 기술을 바탕으로 미국 USNC(Ultra Safe Nuclear Corp)가 개발한 노형으로, 캐나다 북부 오지 광산 및 주거지역 전력공급용으로 활용 가능하며 출력은 15MW (5MWe)를 목표로 함

글로벌 차세대 원자력 동향

☑ 국내 기업의 해외 소형 원전 시장으로의 진출

② 두산에너빌리티 – NuScale Power

두산에너빌리티와 NuScale Power 간 소형모듈형 원자로 생산계약 체결

두산에너빌리티는 뉴스케일파워 모듈(NuScale Power Module™, ‘NPM’) 생산 위해 상부 원자로 압력 용기에 사용되는 단조 금형 생산

2021	2022	2023
<ul style="list-style-type: none">☑ NPM 제조 적합성 검토 완료☑ NPM 제조 순서 및 공정의 성공적 수립	<ul style="list-style-type: none">☑ SMR 적용 대형 단조 소재 생산 시작	<ul style="list-style-type: none">☑ 본격적 NPM 생산 예정

NuScale Power Module



글로벌 차세대 원자력 동향

국내 SMR 정책

[(과기부) 미래원자력기술 발전전략 ('17.12) ~]

✓ 종합적 기술역량 확보 위한 5대 핵심전략 및 13개 실천과제 도출

[제9차 원자력 진흥위원회 ('20.12)]

✓ 종합적 기술역량 확보 위한 5대 핵심전략 및 13개 실천과제 도출

→ [전략1: 초기시장 창출] SMART 해외 건설

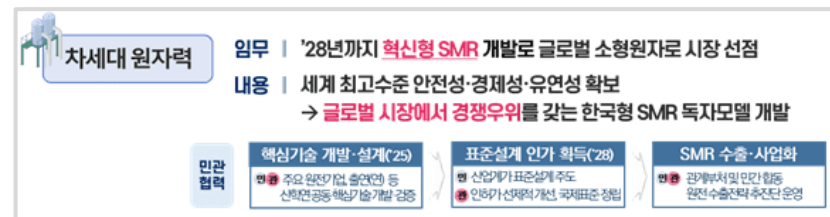
→ [전략2: 경쟁력 고도화] 혁신기술이 집약된 소형모듈원자로 (i-SMR) 개발

[국가전략기술 프로젝트 ('22.10)]

✓ 12대 국가전략기술 중 하나로 차세대 원자력 포함

→ 2023년부터 6년 간 약 이천 칠백억 원 규모의 혁신형 SMR (i-SMR) 표준설계 사업 수행 예정

핵심전략	세부 실천과제
원전 안전 및 해체연구	<ul style="list-style-type: none"> 가동 원전의 안전성 제고 및 사고방지 기술개발 원전 해체 핵심기술 및 해체 인프라 확보 안전하고 친환경적 원자력 폐기물 관리기술 개발
방사선기술 등의 활용 확대	<ul style="list-style-type: none"> 의료·바이오 부문과 융합연구 강화 첨단소재·환경기술 개발에 적용 확대 우주·국방·해양·극지 분야에 활용 촉진
해외수출 지원 강화	<ul style="list-style-type: none"> 연구로 및 중소형원자로 해외수출 지원 국내 개발 요소기술의 수출기반 조성
미래에너지원 확보노력	<ul style="list-style-type: none"> 핵융합에너지의 핵심기술 및 운영역량 강화 국제핵융합실험로 건설사업에 주도적 참여
핵심기술의 사업화 추진	<ul style="list-style-type: none"> 방사선 융복합 기술 사업화 지원 연구로·SMART의 국내 특화산업 육성 해체기술의 산업화 지원 강화



글로벌 차세대 원자력 동향

국내 SMR 주요 노형

SMART

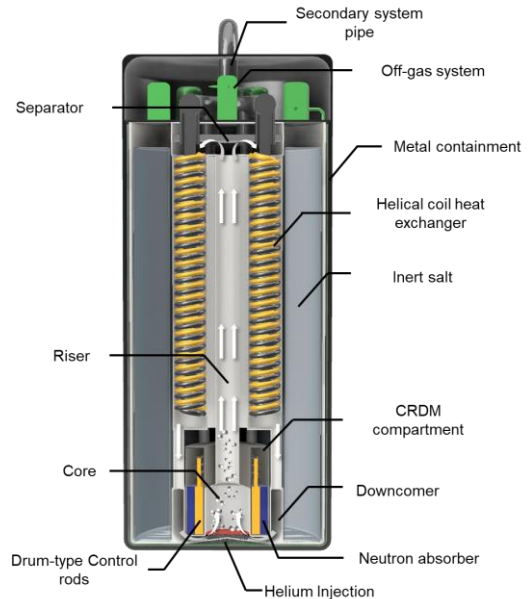
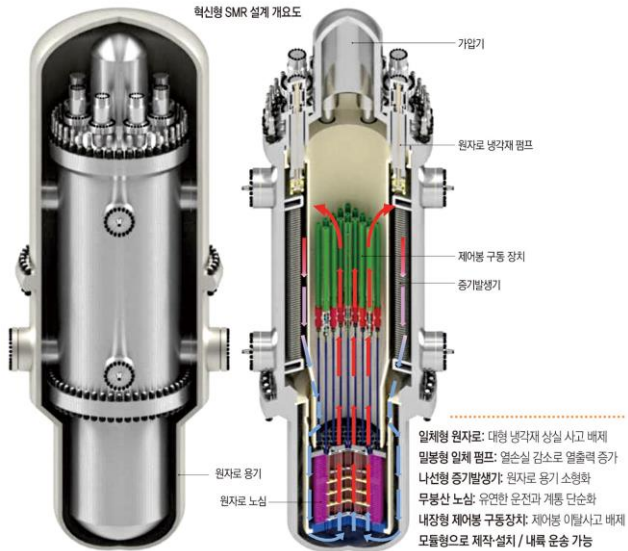
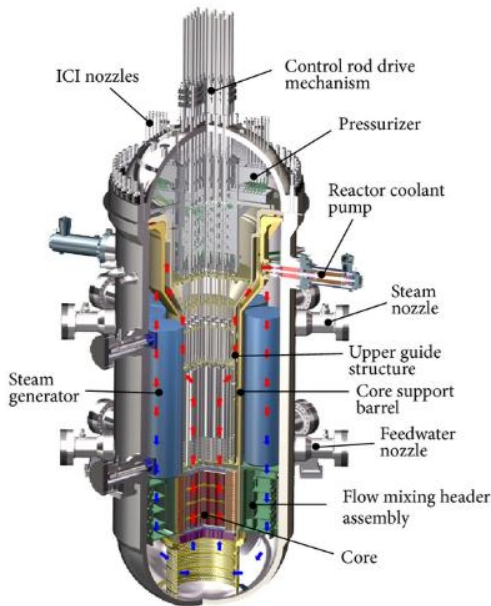
- 2012년 세계 최초 표준설계인가 획득
- 설계전기출력: 100MWe

i-SMR

- 무봉산 노심, 금속격납용기 및 피동 응축 열교환기 등 혁신 기술 반영된 SMR 노형
- 설계전기출력: 170MWe

PMFR

- 수소생산 등 다목적으로 개발 중인 Molten salt reactor (MSR) 노형
- 600~750℃ 높은 작동 온도





목 차

3. 탄소중립 SMR 역할

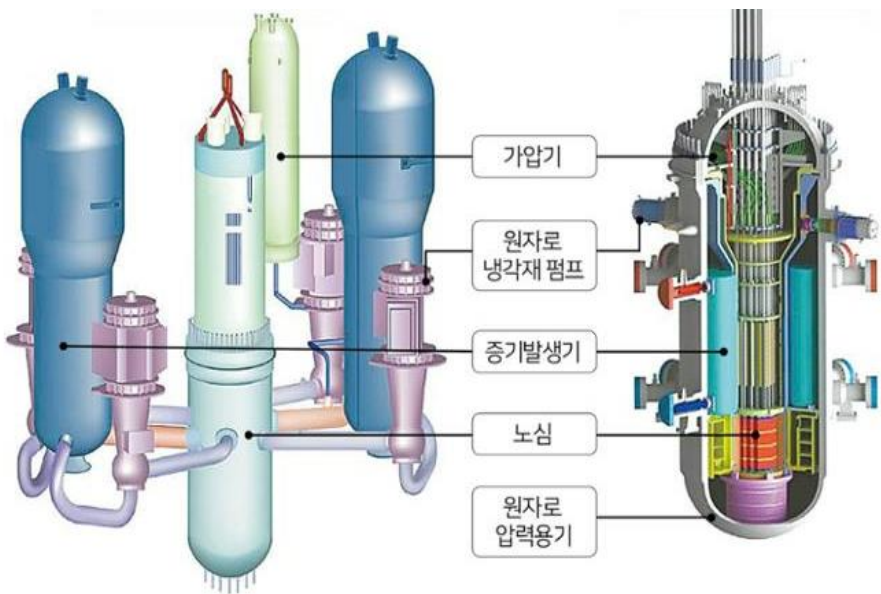
탄소중립 SMR 역할

Small Modular reactor (SMR)

- 1990년대 초반, IAEA에서 중소형 원자로 (Small and Medium-sized Reactor, SMR)로 명명
- 이후, 소형모듈형원자로 (Small Modular Reactor, SMR)로 재정의
- 기존 중대형원전과 달리 주요기기를 하나의 용기에 통합 및 배치한 **300MWe급 이하 원자로**

가압경수형 원자로 ➡ 소형모듈형 원자로(SMR)

중대형 상용원자로와 SMR의 비교



특 징	중대형 상용원자로	i-SMR
출력	1,000~1,400MWe	170MWe
부품수	100만 개	1만 개(모듈화, 단순화)
노심손상빈도	100만 년에 한 번	10억 년에 한 번
비상대피구역	반경 16km	부지경계 이내 (~1km)
건설공기	48개월	24개월
건설비용	10조 원(2기 기준)	목표: 좌동

탄소중립 SMR 역할

SMR 특징

☑ SMR 주요 특징: 소형화, 일체형, 모듈형 공장 제작 → 주요 특징들로부터 다양한 장점들 파생

1. 소형화

: 300MWe 이하 원자로

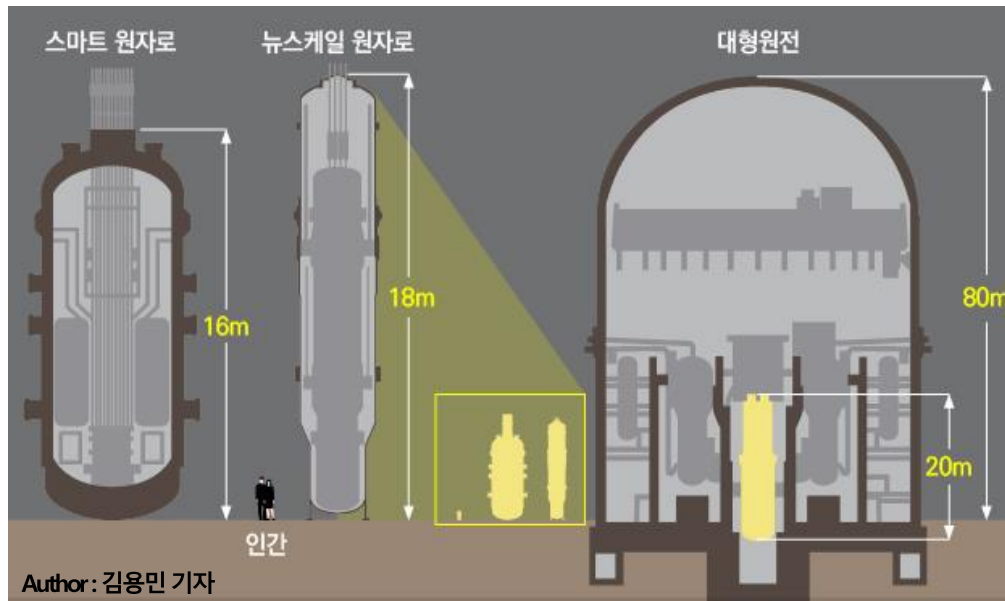
2. 일체형

: 주요기기를 하나의 용기 안에 배치

3. 모듈 공장 제작

: 원자로 모듈 공장 제작 후 현장 조립

SMR vs 상용원자로 크기 비교



높은 안전성

: 소형화 → 출력 감소 → 붕괴열 감소 → 피동냉각 용이
: 안전성 향상에 따른 비상계획구역 감소
(대형원전 20~30km → 소형원전 1km 이내)

부지선정 용이

: 소형화에 따른 냉각 수요 감소 → 내륙설치 용이
: 국지적 전원으로 활용 → 전력망 소외지역
: 좁은 비상계획구역으로 도시 인근까지 진입 가능

건설기간 단축

: 모듈화 및 계통단순화로 획기적 단축 (최소5년→2년)
: 건설비용 절감 및 재정 여유도 확보 (이자비용 절감)

탄소중립 SMR 역할

SMR 특징

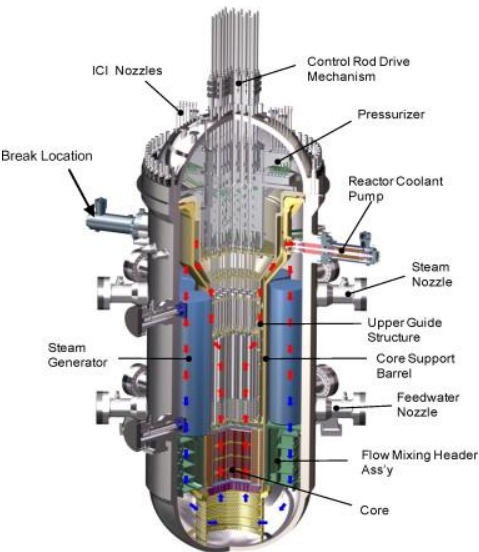
☑ SMR 주요 특징: 소형화, 일체형, 모듈형 공장 제작 → 주요 특징들로부터 다양한 장점들 파생

1. 소형화
: 300MWe 급 이하의 원자로 지칭

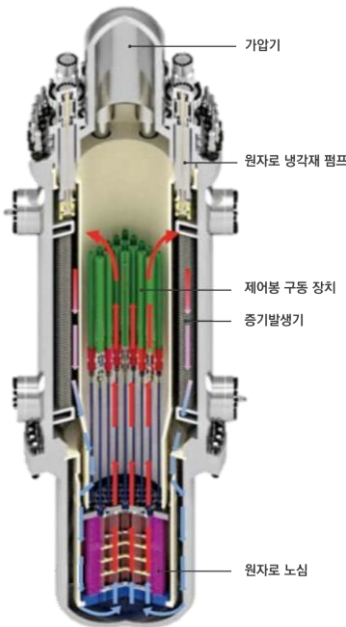
2. 일체형
: 주요기기를 단일 용기 안에 배치

3. 모듈 공장 제작
: 원자로 모듈 공장 제작 후 현장 조립

SMART



i-SMR



단순한 계통 설계

- : 모든 주기가 단일 압력용기 내에 위치
- : 설계 단순화로 기기 고장 및 사고 확률 감소

피동안전계통 접목 용이

- : 소형화, 단순화 및 일체형 → 피동안전계통 적용 용이

냉각재 유출 가능성 감소

- : 일체형에 따른 대형배관 불필요
- : 대형배관 부재로 대형 냉각재 상실사고 근본적 배제

탄소중립 SMR 역할

SMR 특징

☑ SMR 주요 특징: 소형화, 일체형, 모듈형 공장 제작 → 주요 특징들로부터 다양한 장점들 파생

1. 소형화
: 300MWe 급 이하의 원자로 지칭

2. 일체형
: 주요기기를 하나의 용기 안에 배치

3. 모듈 공장 제작
: 원자로 모듈 공장 제작 후 현장 조립

모듈 공장 제작 (NuScale)



원자로 건설기간 단축
: 공장에서 모듈 생산 후 건설부지에 일괄 설치
: 건설 공사기간 단축 및 이에 따른 건설 비용 절감

대량생산체제의 표준화
: 다수 모듈 제작 → 동일 제작설비 활용 → 제작비용 절감

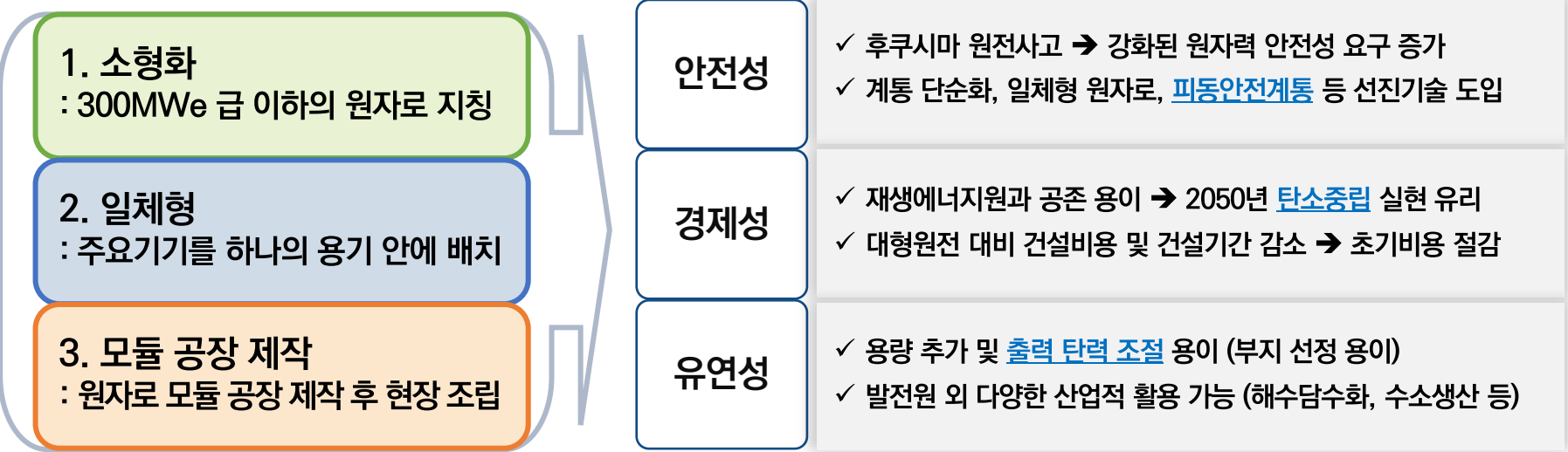
품질향상
: 기기 제작공장에서 전문적인 제작 조립 및 진행
: 품질 향상에 따른 원자로 안전성 및 신뢰성 향상

탄소중립 SMR 역할

SMR 장점 및 추후 해결 과제

☑ SMR 3가지 최상위 목표 : 안전성, 경제성, 유연성 달성

SMR 주요 특징



☑ 그러나, SMR에서 추후 해결해야 하는 사안 역시 존재

- ① 국내 SMR 독자적 인허가 규제 개발 요구
- ② 대형원전 대비 생산에너지 당 비용 증가
- ③ SMR 운전 경험 부재 : 원자로 운영에 대한 신뢰성 확보
- ④ 여전히 존재하는 방사성폐기물 처분 문제

탄소중립 SMR 역할

저탄소 전력 생산원

- 모든 에너지원은 생애주기 전 기간 중 탄소배출
- 다만 화석 연료에 비해 극히 탄소배출량이 낮은 저탄소 에너지원 존재
- 탄소중립에 가장 높은 잠재력 에너지원: 태양광, 수력, 풍력, 원자력 등 제시됨

태양광

- 태양광에 의한 광전효과 이용
- 밤 혹은 기상 악화에 따른 전력생산 간헐성 높음
→ 이용율 15%, 예비 발전원 필수

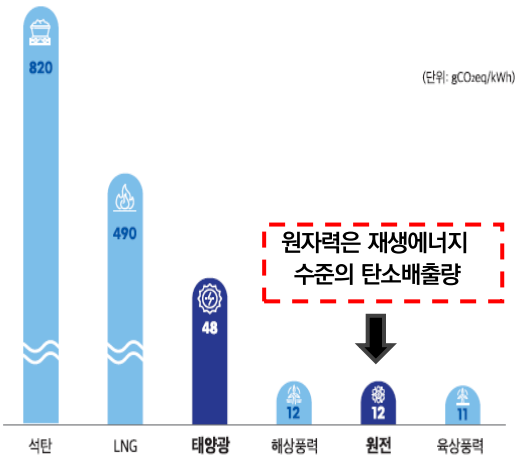
수 력

- 강이나 폭포 등에서 떨어지는 물의 위치에너지 활용
- 제한적 부지

풍 력

- 바람의 운동에너지 이용
- 기상에 따른 발전 불안정성 및 설치 지역에 따라 크게 변동하는 발전 효율

발전원별 생애주기 탄소배출량



온실 가스 배출 주기 비교

(단위: 톤/GWh)

구분	평균	최저	최고
석탄	888	756	1,310
석유	733	547	935
천연가스	499	362	891
태양광	85	13	731
바이오매스	45	10	101
원자력	29	2	130
수력	26	2	237
풍력	26	6	124

자료: World Nuclear Association (2011), Comparison of Life Cycle Greenhouse Gas Emissions of Various Electricity Generation Sources.

탄소중립 SMR 역할

원자력과 SMR

원자력

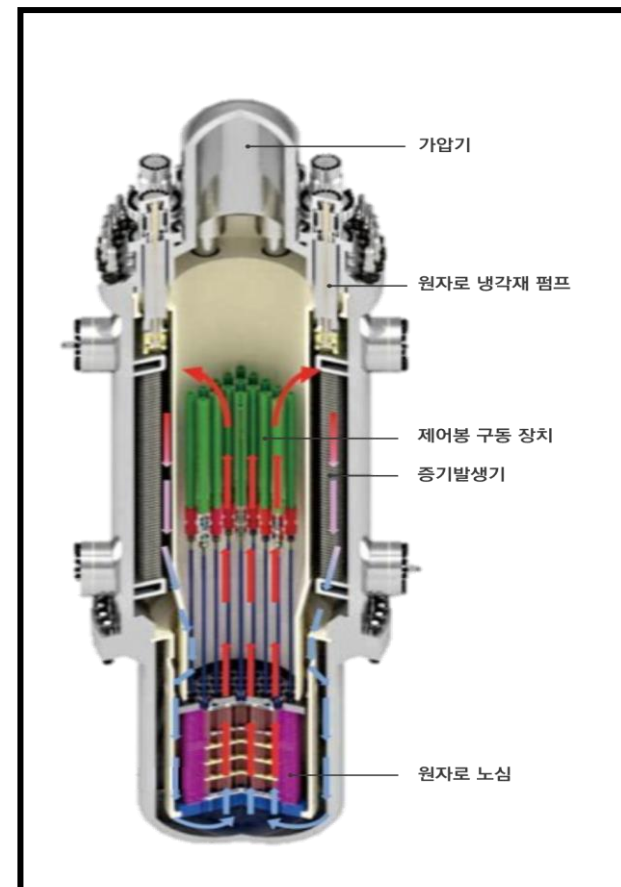
- ✓ 우라늄 물질의 핵분열 에너지 이용
- ✓ 낮은 발전단가, 안정적 이용률 → 전력망 기저부하에 최적
- ✓ 그러나 사고 시 발생하는 큰 피해 등으로 인해 **낮은 대중 인식 보유**
- ✓ 기존 대형원전: 큰 수원(바다) 근처에 설치해야 하는 **입지 제한 존재**

원자력 장점 부각
원자력 단점 보완

SMR

- ✓ 대형원전 대비 **낮은 초기 비용과 높은 안전성 보유**
- ✓ 소규모 출력과 피동 안전성 강화 → **부지 선정 제약 해소**
- ✓ 모듈에서 배출되는 고온 증기 자체 활용에 유리
→ 재생에너지와 함께 사용하는 **Hybrid energy system (HES) 활용**

i-SMR 단면도



탄소중립 SMR 역할

Hybrid energy system (HES)

: 증가하고 복잡해진 전력 부하에 유연하게 대처하기 위함

재생에너지 활용 발전원

✓ 전력부하에 유연하게 대처하기 어려움

불안정한 이용률

복잡한 전력 부하에 대처 제한

- ✓ 에너지 저장설비 운영
- ✓ 다양한 발전원 사용하는 전력망 형성
→ SMR을 기저부하 혹은 탄력적 활용



전력망 안정성 향상

풍력과 태양광의 출력 변동

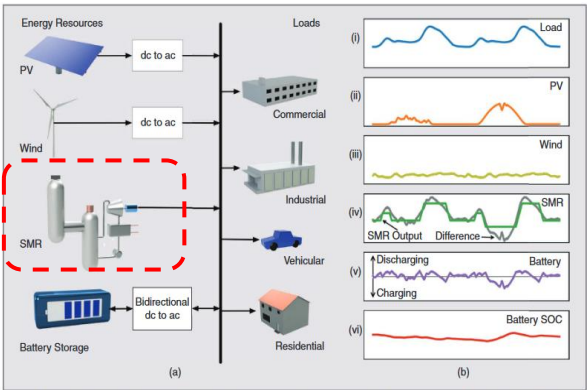
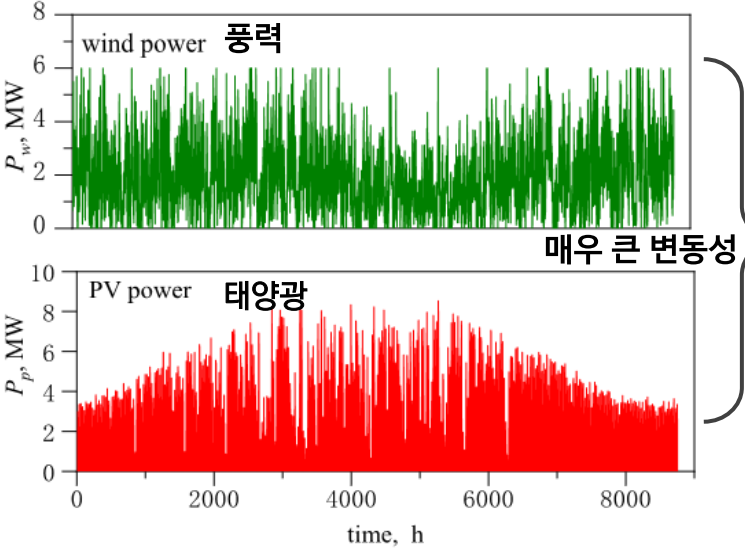


figure 2. (a) Microgrid configuration; (b) Example operation scenario showing 48-h power profiles: (i) load profile; (ii) PV profile; (iii) wind profile; (iv) SMR ramping; (v) battery charging/discharging; and (vi) battery SOC: state-of-charge.

- ✓ SMR을 기저 발전원으로 설정하여 전력망 부하에 유연하게 대처 가능
- ✓ SMR의 유연운전 및 안정적 전력생산으로 전력망의 높은 안정성 확보

탄소중립 SMR 역할

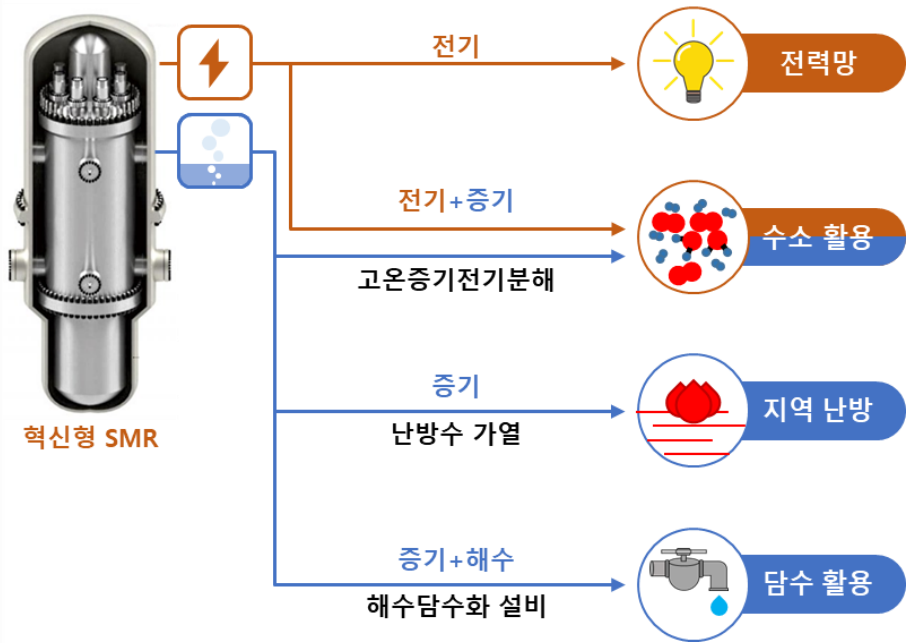
SMR 다목적 활용

- SMR의 자유로운 부지 선정 장점 활용 → 산업 부지 전력 생산, 해수 담수화, 지역 난방 등 다목적 용도 활용 가능
- SMR의 강화된 안전성, 낮은 출력 등의 장점 → 활용 범위 더욱 확장 예상

SMR 활용방안

- 분산전원 활용
- 화석연료발전소 대체발전
- 해수 담수화 및 지역 난방
- 공정열원 제공
- 대형 운송수단 추진용

SMR 다목적 활용 예시 (i-SMR)





목 차

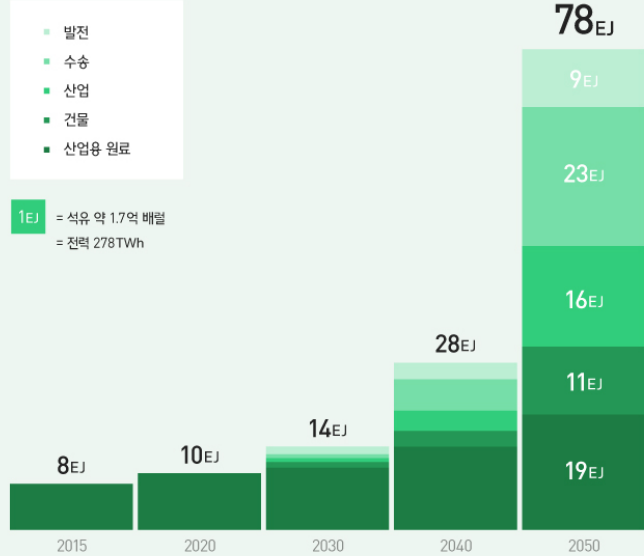
4. 차세대 원자력 역할 (수소생산 중심)

차세대 원자력 역할

수소 수요 및 공급망 전망

글로벌 수소 수요 전망

2050 글로벌 수소 소비량 전망

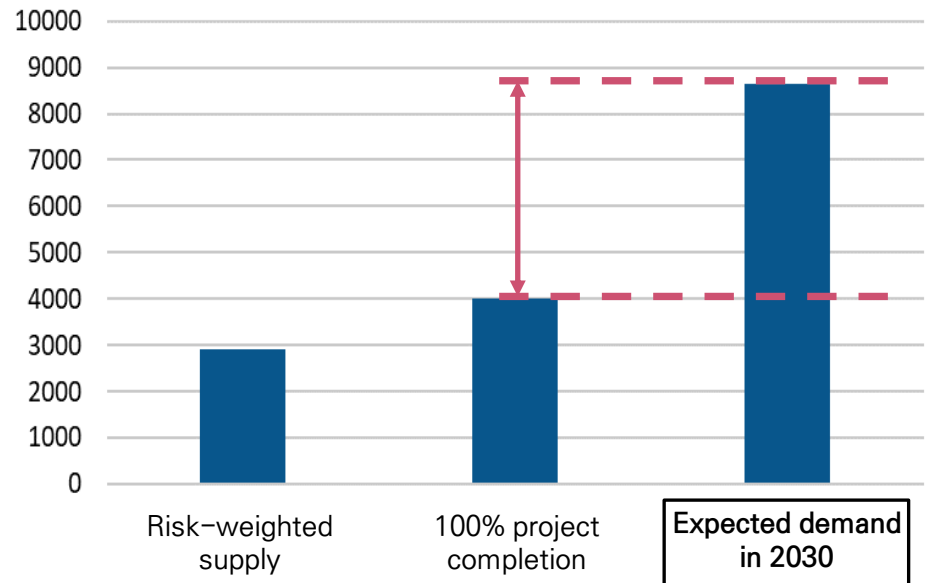


수소 수요 2050년까지 크게 증가 전망

2030년 글로벌 저탄소 수소 공급망

- 저탄소 배출 수소공급 부족 전망

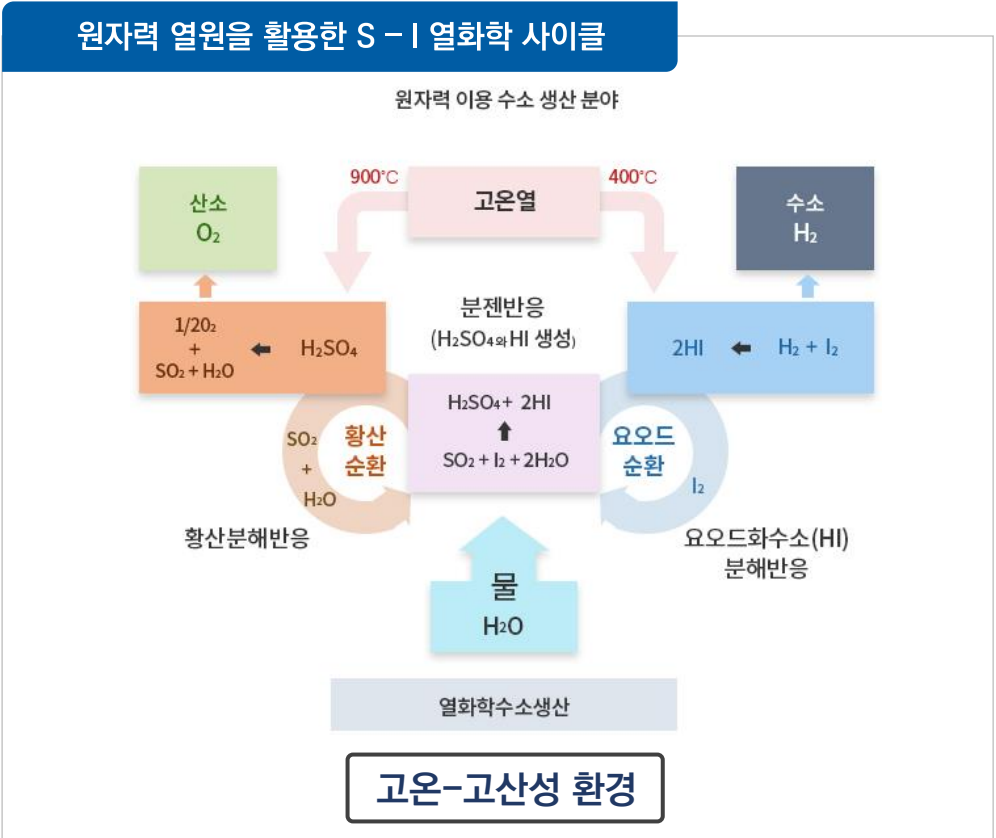
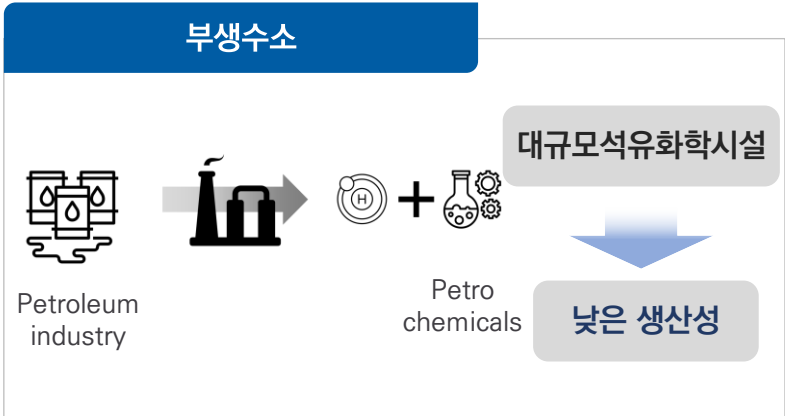
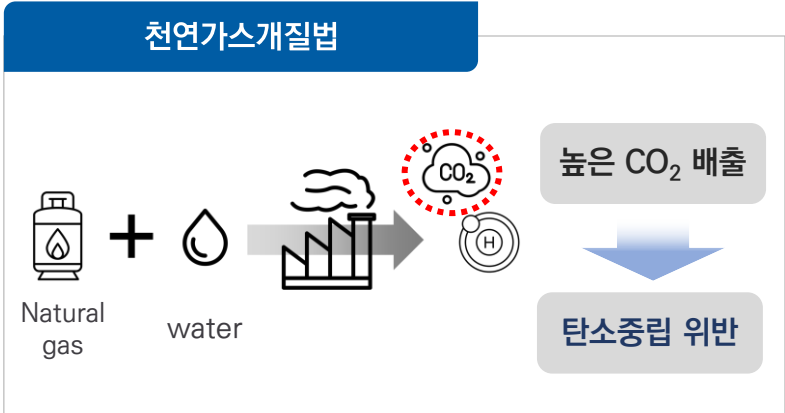
kiloton/year



수소 공급량 부족 전망 → 저탄소 고효율 대용량 생산 기술 필요

차세대 원자력 역할

수소생산 방법



탄소중립 시대 현실적 수소생산기술

차세대 원자력 역할

☑ 국내외 원자력수소 정책 동향

미국



- ☑ 수소 생산, 저장, 수송 분야에서 국립연구소 및 기업 간 협력사업 지원 및 기술 개발 프로그램 발표
- ☑ **그린수소 생산 위한 SMR 실증 연구** 추진
- ☑ 아이다호 국립연구소에서 **가동원전과 연계한 수전해 실증 및 타당성 평가** 수행
- ☑ 2030년 GW급 규모 SOEC 대용량화 달성 위해 기업과 협력연구 수행

프랑스



- ☑ **원자력수소 포함한 100억 유로 규모 수소경제 및 청정수소 국가 전략 정책 발표 (2020)**
- ☑ SMR 개발 등 차세대 원전 연구에 10억 유로 투자
- ☑ EU 집행위에 **원자력 등 저탄소 전력으로 생산한 수소를 '그린수소'로 인정할 것 촉구 (2022)**
- ☑ 원자력수소 사업 위한 Hynamics 설립, **가동원전 이용 수소생산 실증 및 사업화** 추진

일본



- ☑ VHTR과 같은 원자력수소 포함, 2050년 2천만 톤 수소생산 역량 확보 목표

- ☑ JAEA S-I 사이클 공정 연속운전 수행 → 8시간 10L 수소생산 성공

차세대 원자력 역할

☑ 국내외 원자력수소 정책 동향

러시아



- ☑ '전략2035' 중 2024년까지 실행 계획인 수소연료 개발 로드맵 발표
- ☑ 국영기업 로사토크와 사기업 가즈프롬 주도 수소연료 개발 로드맵 추진 중
- ☑ 콜라 발전소(Kola-II) 600MWe급 2기의 원자로 기반 수소생산 플랜트 개발 추진
- ☑ 200MWt급 VHTR 활용 수소생산 실증 계획

대한민국



- ☑ 2004년부터 한국원자력연구원 주관 초고온가스로 연계 원자력 수소생산 핵심기술 개발연구 추진

영국



- ☑ 자국 수소 공급 전략에 원자력 수소를 그린수소에 포함
- ☑ 수소생산 및 공정열원 공급 위한 초고온가스로 개발 추진

캐나다



- ☑ 자국 수소 공급 전략에 원자력 수소를 그린수소에 포함

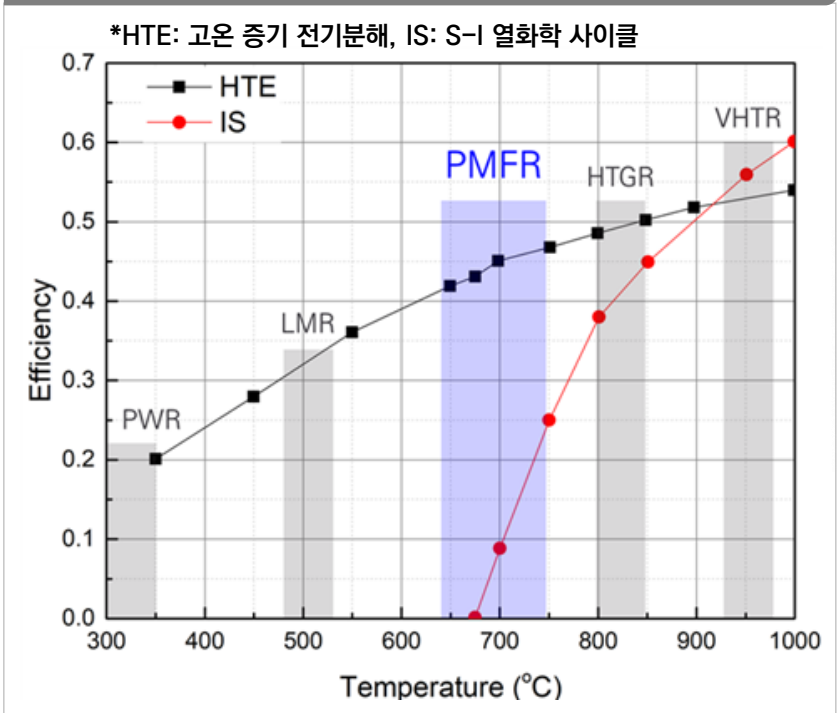
- ☑ 수소기술 개발 로드맵 발표, 초고온시험로 고온증기분해 등 수소생산 기술 분야 연구개발 수행 중

차세대 원자력 역할

원자력 수소 생산

- 원자로 이용 고온열원 지속적 공급: 고온에서 더 높은 효율로 생산 가능
- 원자력과 수소 생산 기술 접목, 원자력수소 생산 기술 개발 진행 (저온수전해 이용 원자력 수소 예타 기획중)
- 대표적 원자력 연계 수소생산기술로 ‘고온증기 전기분해’와 ‘S-I 열화학 사이클’ 제안됨

원자로 출구온도 별 수소생산기술 열효율



원자력 수소

- 저탄소 에너지원인 원자력으로 수소생산
- 고효율 대규모 수소 생산 가능
- 증가하는 수소 에너지 수요 달성 위한 그린수소 공급 수단 → Net-zero 필수 요소
- 고온열원 제공 위한 미래형 원자로기술 개발 병행 필요
- 용융염원자로(MSR)와 초고온가스로(VHTR)가 수소생산 주요 노형으로 제안됨

차세대 원자력 역할

수소생산용 원자로 연구개발현황 - ① PMFR

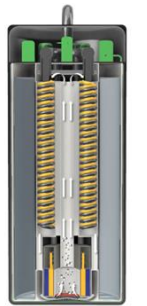
- i-SAFE-MSR 연구센터(한양대-가천대-카이스트) 신개념 용융염 고속로 노형 개발
- 600°C 이상 고온 작동온도로, 고온수전해 활용하여 40% 이상 수소 생산효율 달성 가능
- MSR 다양한 장점 반영함과 동시에, 기존 MSR 노형 단점을 보완한 노형

MSR 장점

- 고유안전성 및 큰 열적 여유도
- 낮은 운전압력 → 경제성, 소형화에 유리
- 매우 적은 핵폐기물

기존 MSR 한계점

- 짧은 흑연 감속재 수명 (3~4년)
- 토륨 기반의 증식으로 → 짧은 연료주기
- 실시간 재처리 → NPT 위배



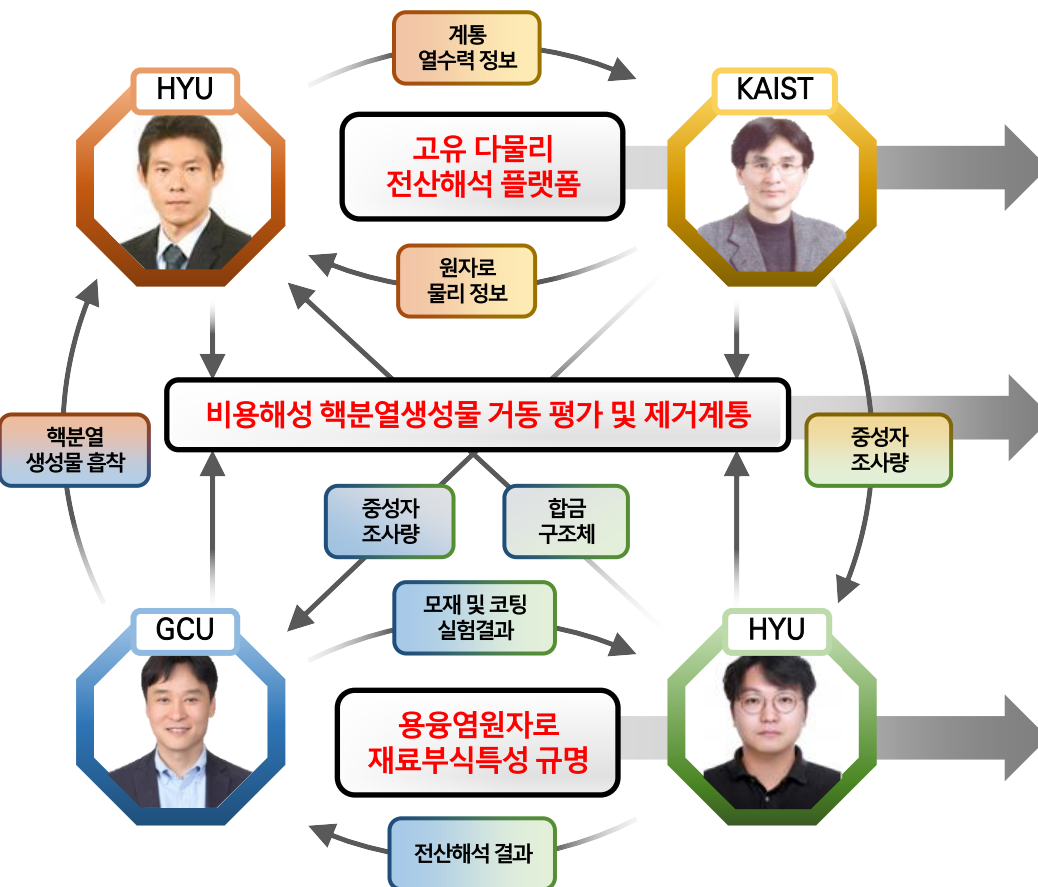
PMFR
Passive Molten salt Fast Reactor

기존 MSR 한계점 개선 및 혁신기술 개발

- 감속재 제거 (구조 단순화, 핵폐기물 경감)
- 고속 스펙트럼 → 장수명 원자로 설계
- 실시간 재처리 X → NPT 준수

차세대 원자력 역할

수소생산용 원자로 연구개발현황 - ① PMFR



i-SAFE-MSR 연구센터 주요 연구목표

PMFR 뿐만 아니라 MSR 정상-과도해석에 활용할 수 있는 **고유 전산해석 코드 및 기술, 수소생산기술 개발**

MSR 설계 최대현안인 비용해성 FP 거동, 노심영향, 재료열화 평가기술 개발

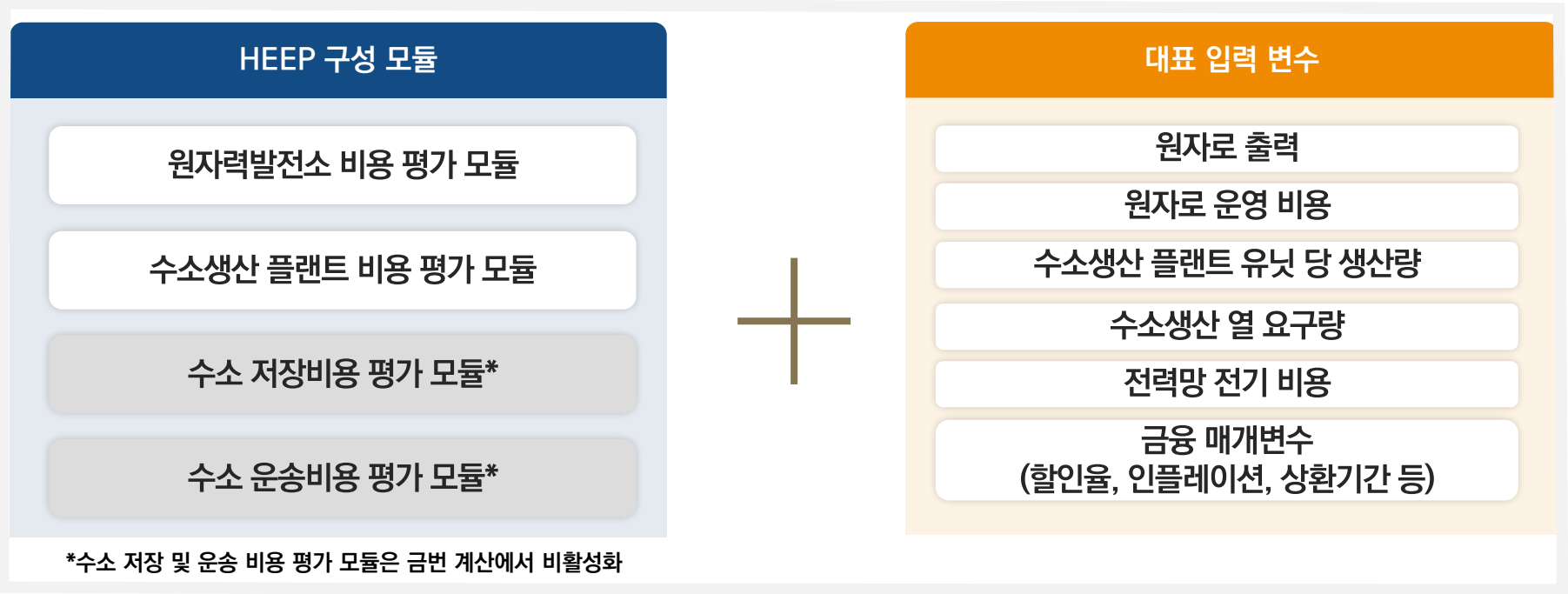
중성자 조사, 핵분열 생성물 침투로 인한 열화방지 **내부식성 코팅기술 및 재료 개발**

차세대 원자력 역할

✓ HEEP (Hydrogen Economic Evaluation Program)

: 인도 BARC 연구소가 IAEA 주관 하에 개발한 원자력 수소생산 플랜트 경제성 평가 프로그램

✓ 원자력 수소생산 시스템에 대한 수소생산 단가 산정하여 여러 원자로 조건 및 수소생산 방식에 따른 상대적 경제성 평가 수행



→ 해당 플랜트의 수소 생산 시스템 경제성 평가

차세대 원자력 역할

☑ 수소생산 시스템 평가 케이스 (1)

[총 8개 케이스 경제성 평가 수행]

경수형 원자로 + 상온수전해

CASE 1

- ✓ 소형 가압경수로 + 상온수전해 수소 생산
- ✓ 359.5MWe 2기 + 4kg/sec 수소생산 설비

CASE 2

- ✓ 중형 가압경수로 + 상온수전해 수소생산
- ✓ 718.96MWe 2기 + 8kg/sec 수소생산 설비

CASE 2

- ✓ 대형 가압경수로 + 상온수전해 수소 생산
- ✓ 1117.05MWe 2기 + 12.4kg/sec 수소생산 설비

고온가스로

*(VHTR; Very High Temperature Reactor)

CASE 4

- ✓ VHTR + 고온증기 전기분해 수소 생산
- ✓ 546.5MWt 2기 + 4kg/sec 수소생산 설비

CASE 5

- ✓ VHTR + S-I 사이클 수소생산
- ✓ 630.7MWt 2기 + 4kg/sec 수소생산 설비

차세대 원자력 역할

수소생산 시스템 평가 케이스 (2)

[총 8개 케이스 경제성 평가 수행]

실증 고온가스로 노형 반영

CASE 6

- ✓ GTHTR-300 + S-I 사이클 수소생산 + 전력 생산
→ 전기 수소 병합 생산
- ✓ 일본 JAEA에서 설계한 고온 가스노형
- ✓ 170MWt 열과 25.4MWe 전력
→ 0.77kg/s 수소생산
- ✓ 나머지 178.6MWe 전력 → 전력망 공급

CASE 7

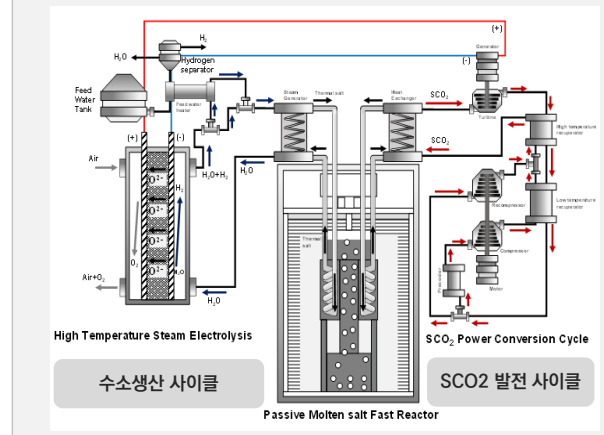
- ✓ HTR-PM + S-I 사이클 수소생산
- ✓ 중국 최초의 상업용 펄베드 모듈식 HTGR
- ✓ 250.0MWt 2기 + 1.36kg/sec 수소생산 설비

용융염 원자로

CASE 8

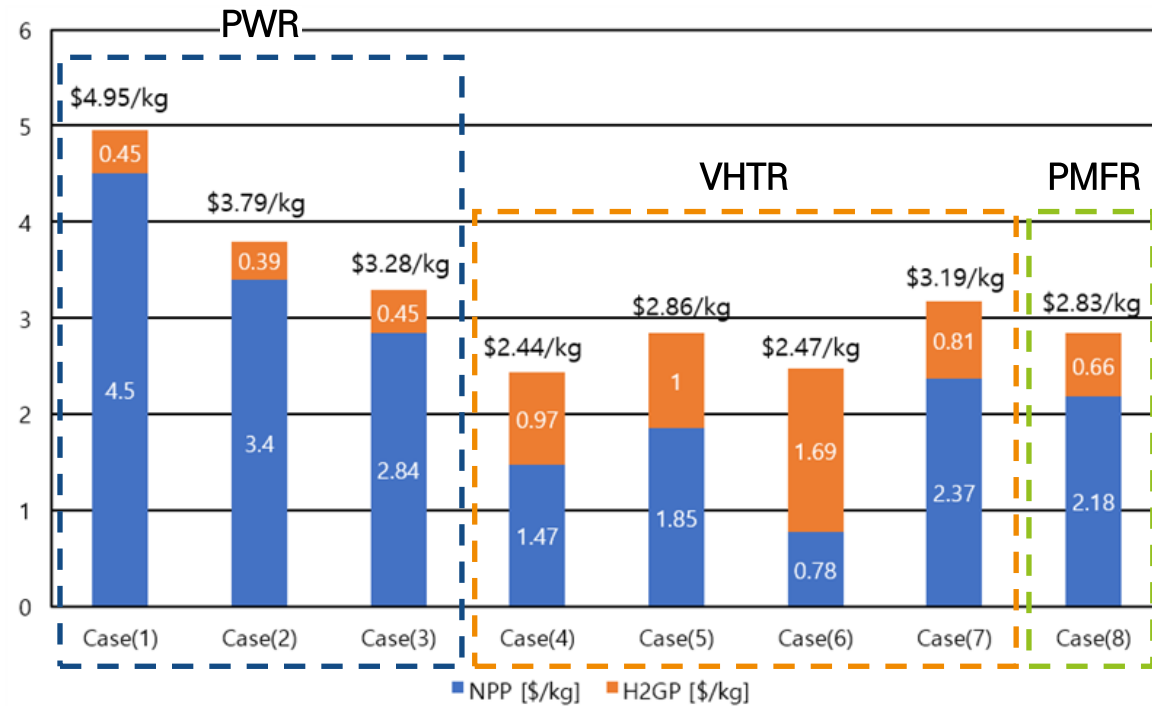
- ✓ PMFR + 고온 증기 전기분해 수소생산
+ SCO₂ 사이클 전력생산 → 전기 수소 병합생산
- ✓ 370.0MWe 2기 + 2.7kg/sec 수소생산 설비

PMFR 전기 및 수소 병합발전시스템 개념도



차세대 원자력 역할

HEEP 수소생산 시스템 평가 결과



CASE 1 - 3

- ✓ 가압경수로 + 상온 수전해
- ✓ 높은 원자력발전소 및 총 수소생산 비용
- ✓ 낮은 수소생산설비 비용

CASE 4 - 7

- ✓ VHTR (고온가스로)
- ✓ 높은 수소생산설비 비용
- ✓ Case 1-3에 비해 저렴한 총 수소생산 비용

CASE 8

- ✓ PMFR (용융염원자로)
- ✓ VHTR (Case 4-7)평가 결과와 유사한 비용



가압경수로-수전해에 비해 VHTR-SI공정 및 MSR-고온수전해가 높은 경제성을 보임



목 차

5. 요약 및 결론

요약 및 결론

기후위기 대응: 탄소중립과 원자력의 필요성

- Net-zero 달성 → 저탄소 에너지원 필수적
- RE100 (신재생 100%) 비현실적, 비실질적 → CF100 (원자력 에너지 포함)

글로벌 차세대 원자력 동향

- 원자력 선진국을 중심으로 개발, 주요 국가 연구개발 및 지원정책 크게 확대
- 국내 기업 SMR 관련 사업 진출 및 연구개발, 정책 확장

탄소중립 SMR 역할

- 대형원전을 대체하며 안전성, 경제성, 유연성에서 큰 특징점을 가짐
- 특히, 다목적 활용성(전력생산, 수소생산, 지역난방, 담수화 등)이 매우 높음

차세대 원자력 역할 (수소생산)

- 현실적인 저탄소 수소생산 → 원자력수소 → 해외 원자력수소 지원정책 확대
- 수소생산용 SMR (MSR, VHTR) 국내 연구개발 역량 확대 필요



경청해 주셔서 감사합니다.