

한국원자력학회 춘계학술대회 워크숍, 국내외 소형모듈원자로(SMR) 기술개발현황, 2022년 5월 18일, 제주국제컨벤션센터

i-SMR 탄력운전

재생에너지 간헐성 보완을 위한 탄소제로 에너지원

한국원자력연구원 강한옥



한국원자력연구원
Korea Atomic Energy Research Institute

Small Modular Reactor

01

| 탄소중립(Net Zero)

02

| SMR이란?

03

| i-SMR 탄력운전 성능요건

04

| i-SMR 탄력운전 핵심기술

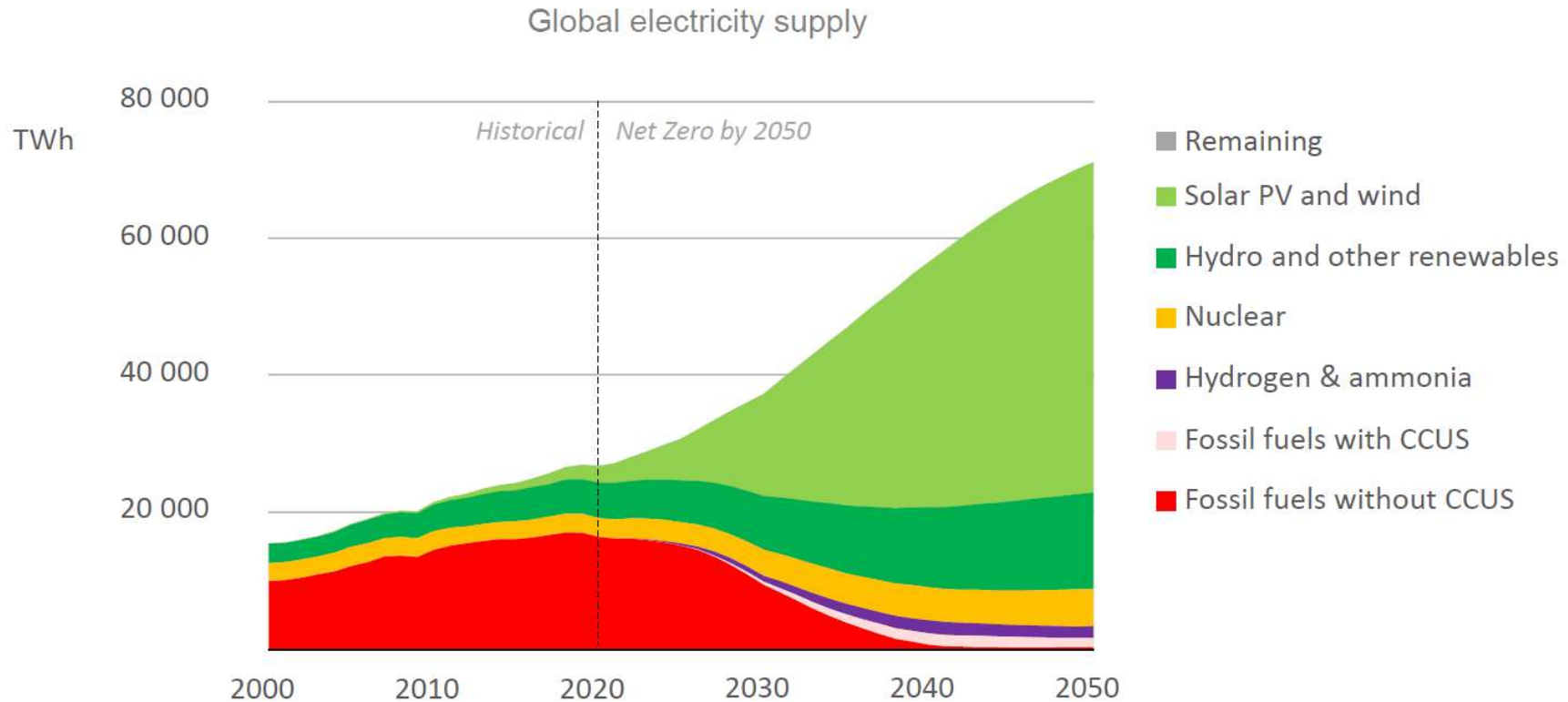
05

| 요약

온실가스 배출



글로벌 전력 공급 전망



Brent Wanner, Korea Atomic Power Annual Conference, 27 April, 2022

- ◆ 탄소중립 실현을 위하여 **재생에너지 기반의 전기에너지 중심으로 에너지 환경 변화**
- ◆ 재생에너지 도입 비중의 증대에 따라 **원자력 에너지 또한 증가**

Refinery-scale Hydrogen Gigafactory



Missing Link to a Livable Climate, February 2021, LUCID CATALYST

Small Modular Reactor

01

| 탄소중립(Net Zero)

02

| SMR이란?

03

| i-SMR 탄력운전 성능요건

04

| i-SMR 탄력운전 핵심기술

05

| 요약

SMR이란?

소형모듈원자로(SMR)는 원자로의 부품을 공장에서 모듈형으로 생산하여 현장에서 쉽게 조립할 수 있도록 설계한 300 MWe이하 출력의 원자로

중소형원자로(Small and Medium sized Reactor)

대용량 발전원자로와 대비되는 개념으로
전기출력 규모 700 MWe 이하의 원자로를 통칭

소형모듈원자로(Small Modular Reactor)

300 MWe이하의 출력을 가지며,
원자로 부품을 공장에서 모듈형으로 생산하여 현장에
서 쉽게 조립할 수 있도록 설계한 원자로

건설방식

현장건설

공장생산
현장조립

중소형원자로

소형모듈원자로

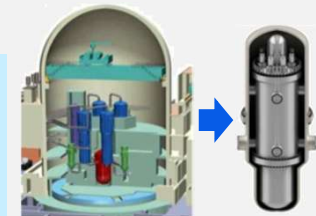
300 MWe

700 MWe

(참고) 'Modular'의 중의(重義)

1 Modular design

증기발생기, 원자로냉각재펌프, 가압기 등의
원전 주요기기들이 일체형으로 설계/제작
→ SMR을 설명하는데 사용되는 의미



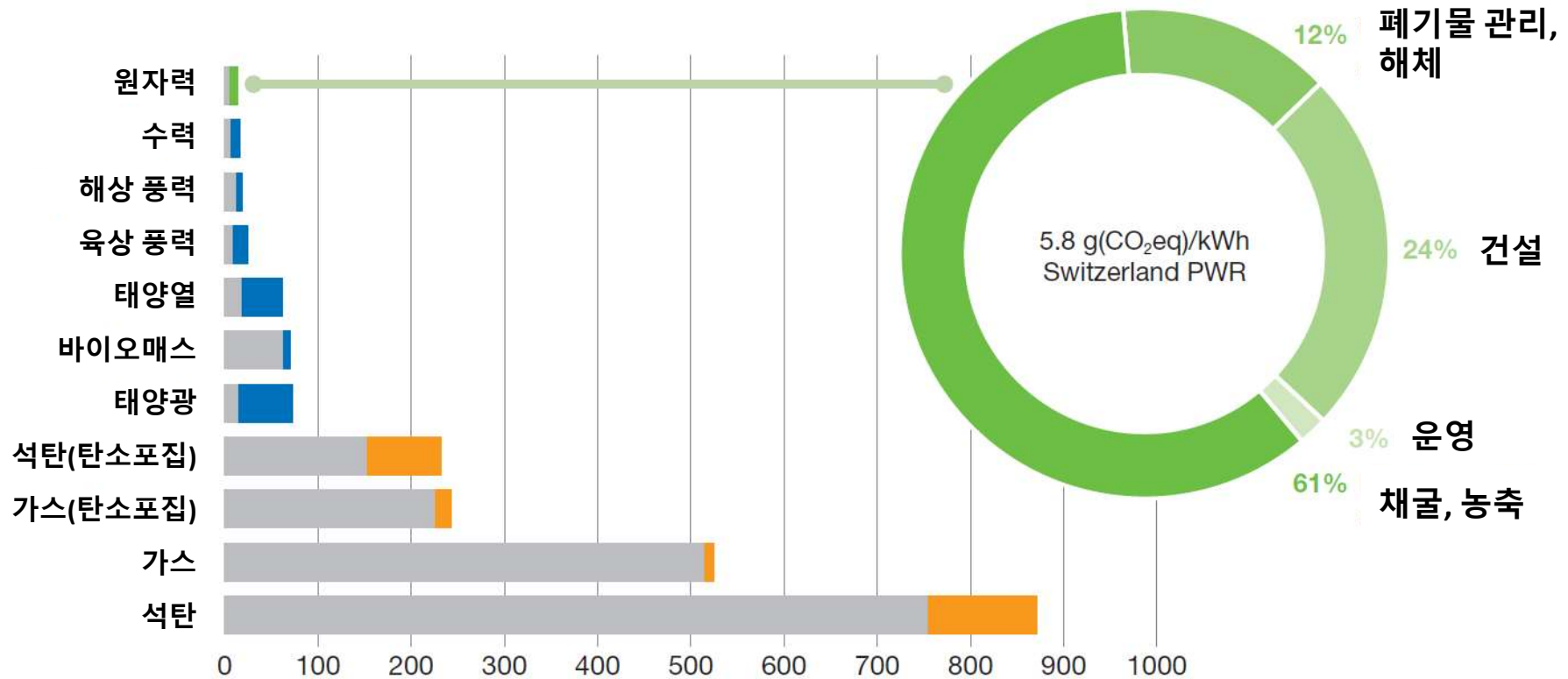
2 Modular construction

공장에서 부분적으로 제조되고 시험을 거친
Component Module을 현장에서 설치
→ 공기단축등을 위해 사용되는 건설공법



* 출처 : IAEA, Advances in Small Modular Reactor Technology Developments, 2020
IAEA, Technology Roadmap for Small Modular Reactor Deployment, 2021

SMR은 탄소중립에 기여

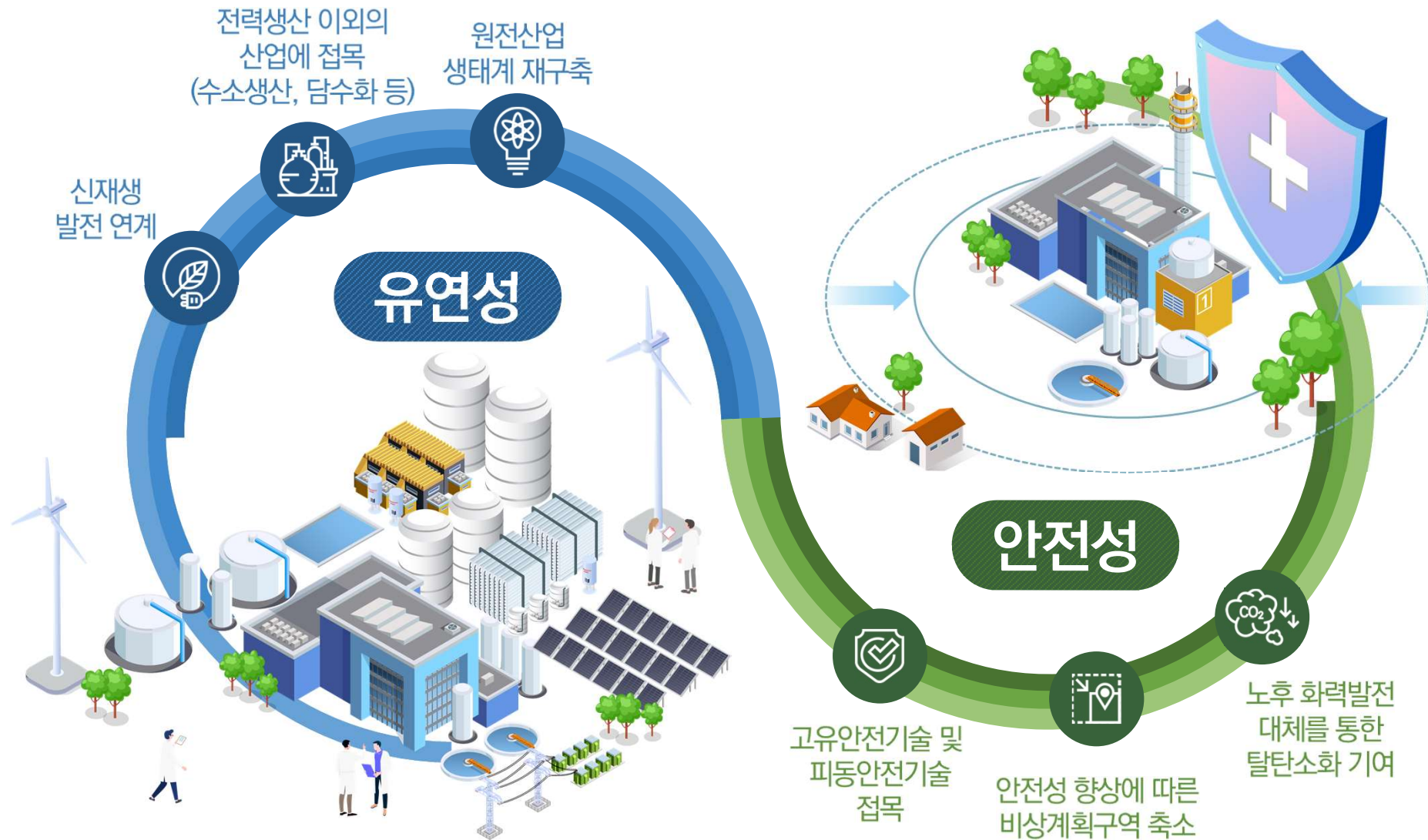


※ Source : IAEA, Climate Change and the Role of Nuclear Power (2020)

< 발전원별 온실가스 생애주기 배출계수 (g CO₂-eq/kWh) >

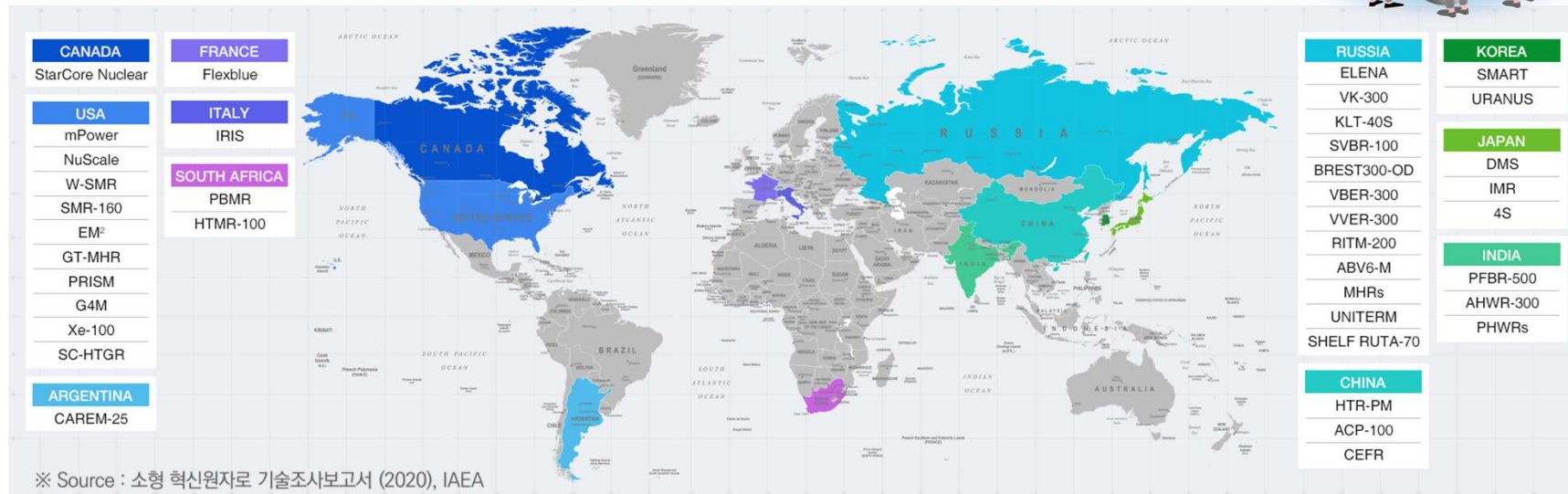
발전소 이용률을 80%로 고정할 경우,
300MW급 석탄발전소를 SMR로 대체 시 약 1.7백만 톤 온실가스 저감 효과

SMR 장점



세계 SMR 개발 현황

한국, 미국, 러시아, 중국 등에서 **70종 이상의 SMR** 개발 중



국내 SMR 개발				해외 SMR 개발			
SMART	BANDI-60S	NuScale	BWRX-300	NuWard	UK SMR	KLT-40S	ACP100
KAERI	한전기술(주)	NuScale(미)	GE-Hitachi(미)	EDF(프)	Rolls-Royce(영)	OKBM(러)	CNNC(중)
'12년 7월 표준설계 인가	해수담수화 개념설계 단계	자연순환 표준설계인가(20년 8월)	BWR 노형 NRC예비심사중	블록형, 개념설계 '30년 건설계획	440MWe, 루프형 '30년 건설계획	블록형, 해상원전 상업운전중('19)	원전부지 선정 '25년 준공 계획

* 해외의 경우 미국의 NuScale 원전이 기술성, 사업성 측면에서 가장 앞서있다고 평가됨

혁신형 SMR(i-SMR) 개발 계획



추진체계

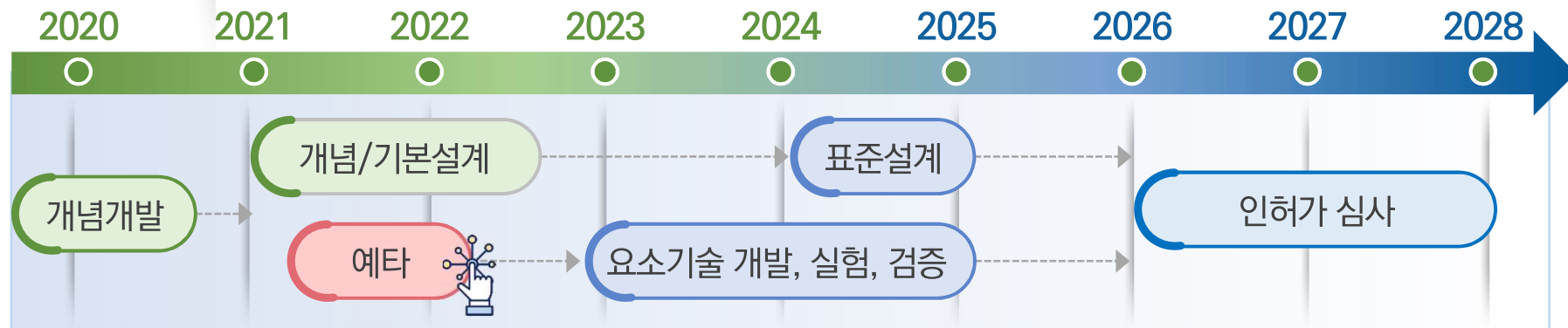


- 노심 핵연료 설계
- 계통 및 종합 설계
- 주요 기기 설계
- 인허가

- 혁신 개념 개발
- 요소 기술개발 지원

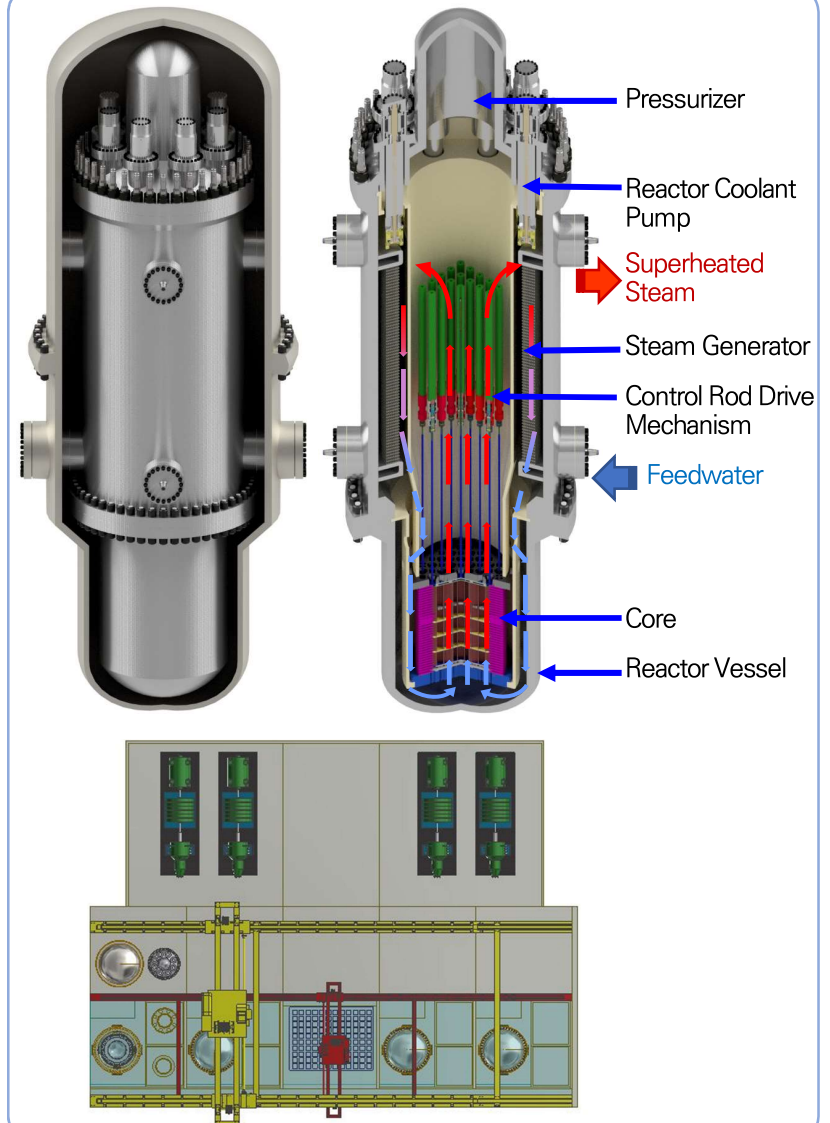
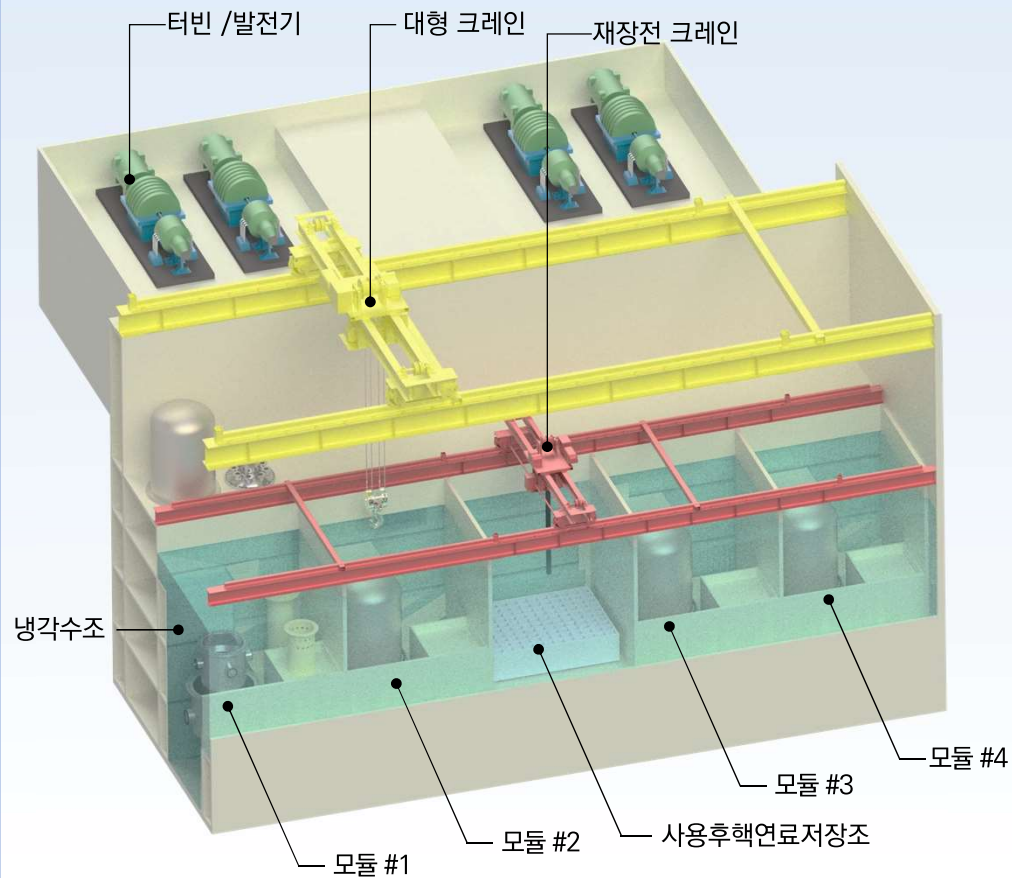
- 노심 계통 설계
- 요소 기술 개발
- 실험 및 검증

추진일정

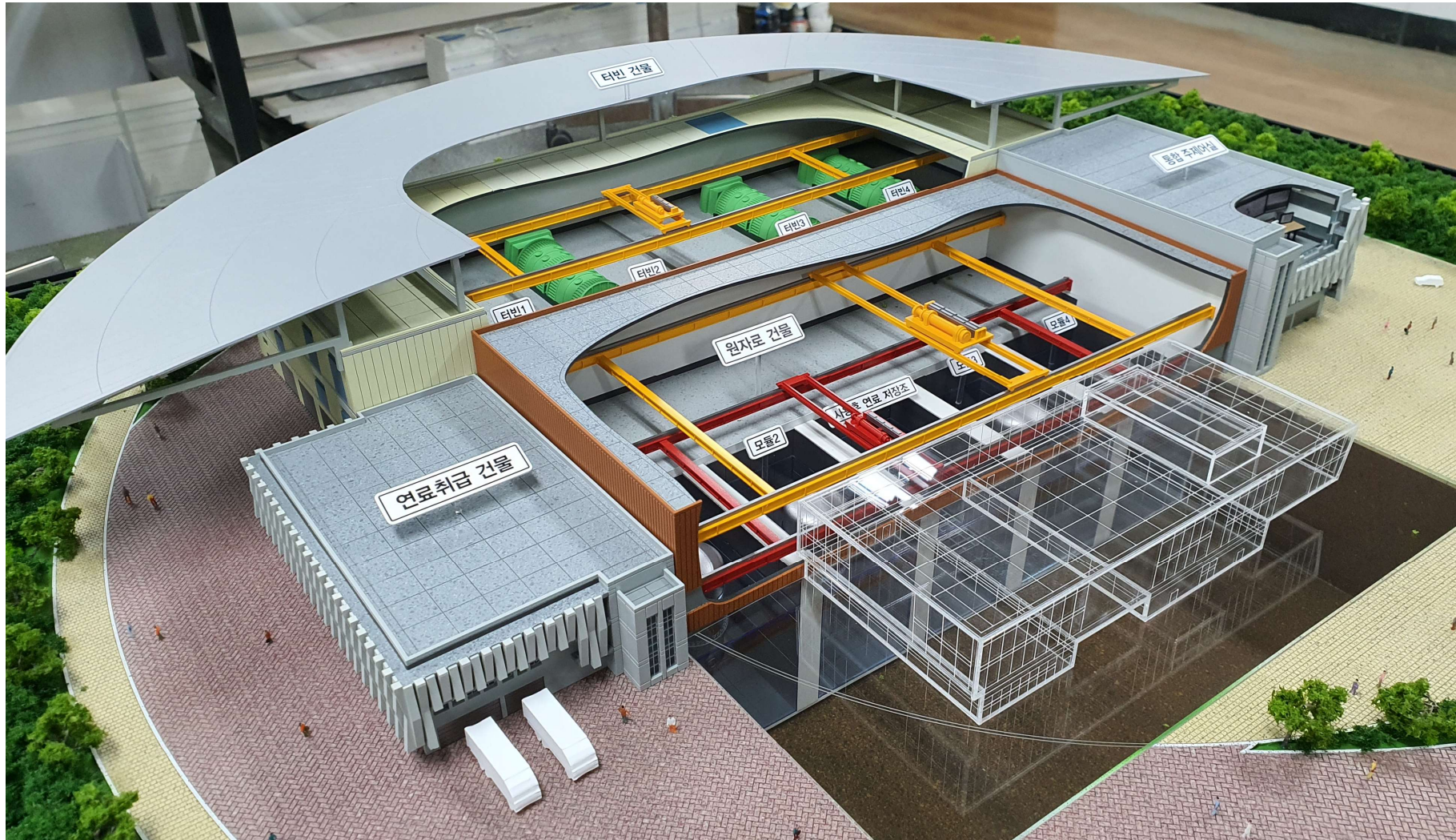


혁신형 SMR(i-SMR) 개념

Small Modular Reactor



혁신형 소형모듈원자로(i-SMR)



Small Modular Reactor

01

| 탄소중립(Net Zero)

02

| SMR이란?

03

| i-SMR 탄력운전 성능요건

04

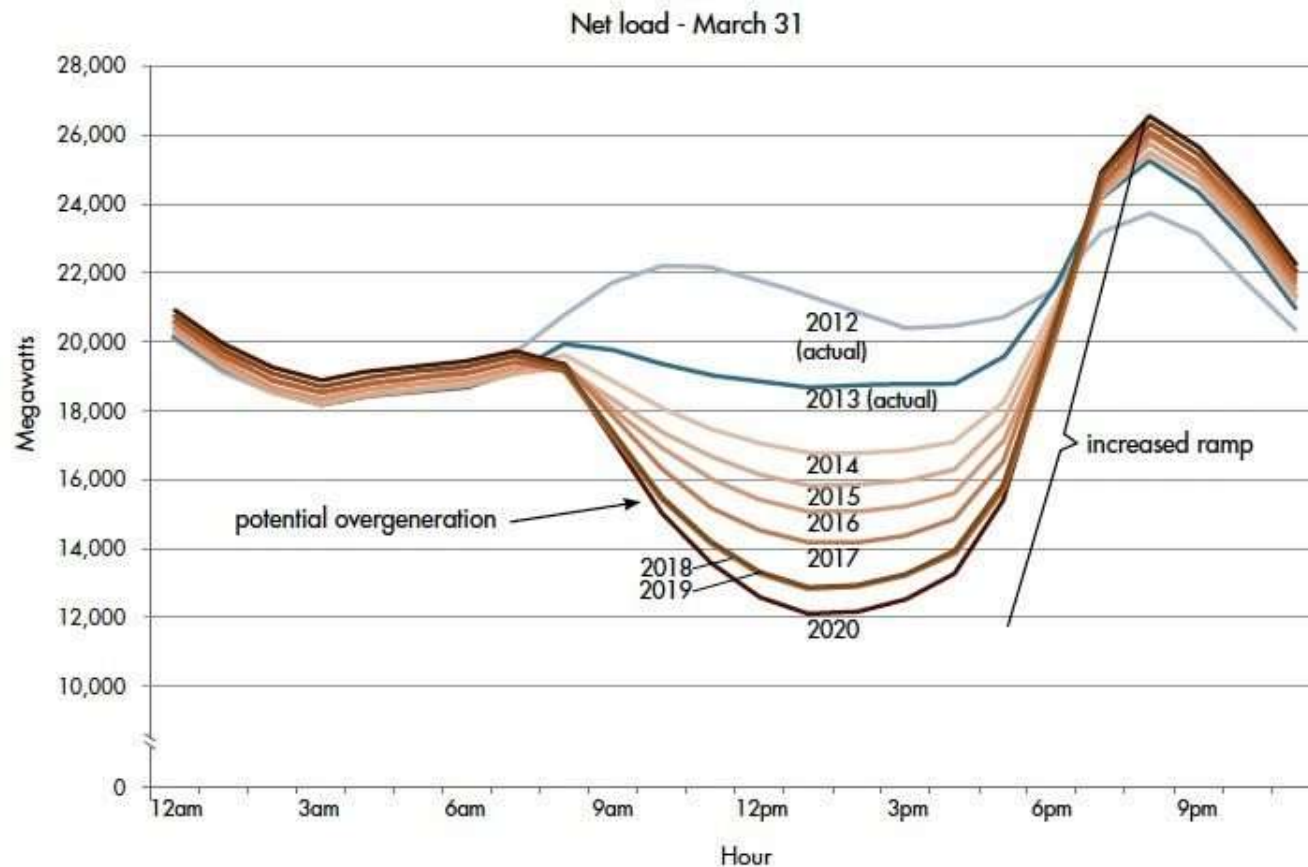
| i-SMR 탄력운전 핵심기술

05

| 요약

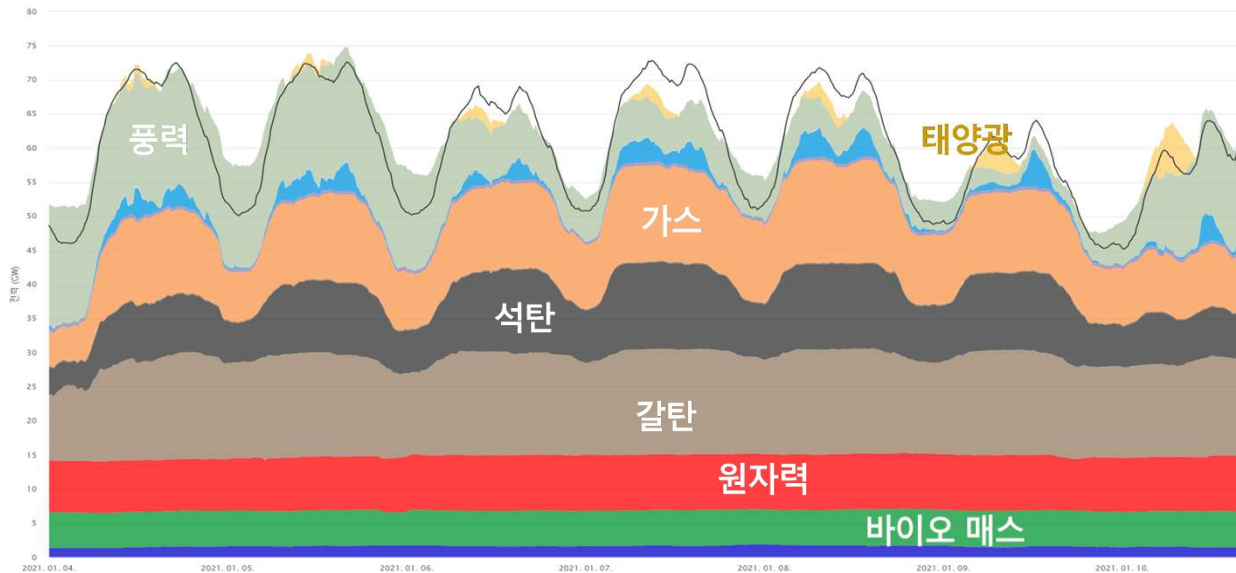
재생에너지 확대에 따른 도전

◆ 재생에너지의 공급 과잉에 따라 낮기간 동안 순부하 급격히 감소 발생



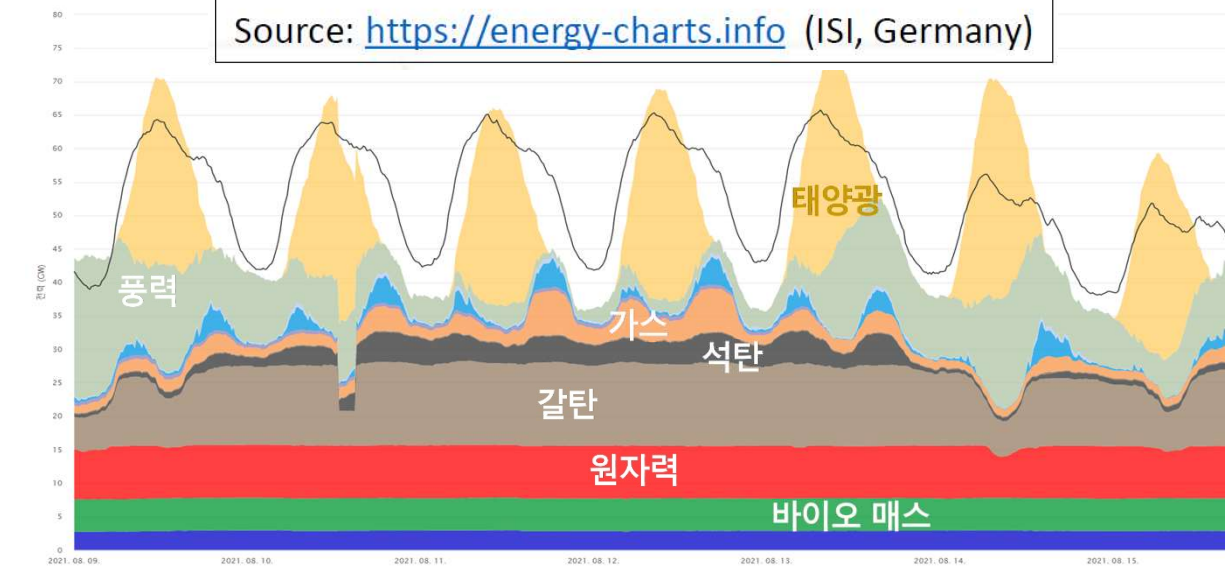
Source: Confronting the Duck Curve: How to Address Over-Generation of Solar Energy (2017)

재생에너지 간헐성 (독일)



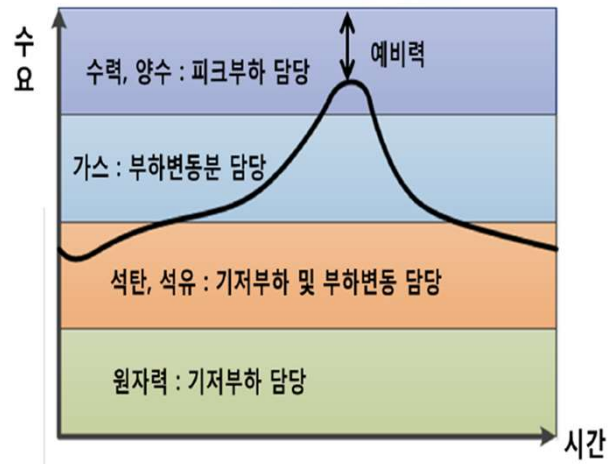
21년 1월 첫주

Source: <https://energy-charts.info> (ISI, Germany)

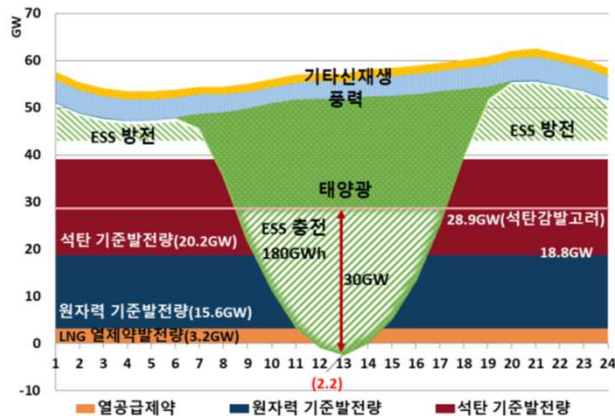


21년 8월 첫주

재생에너지 증가에 따른 전력 특성의 변화

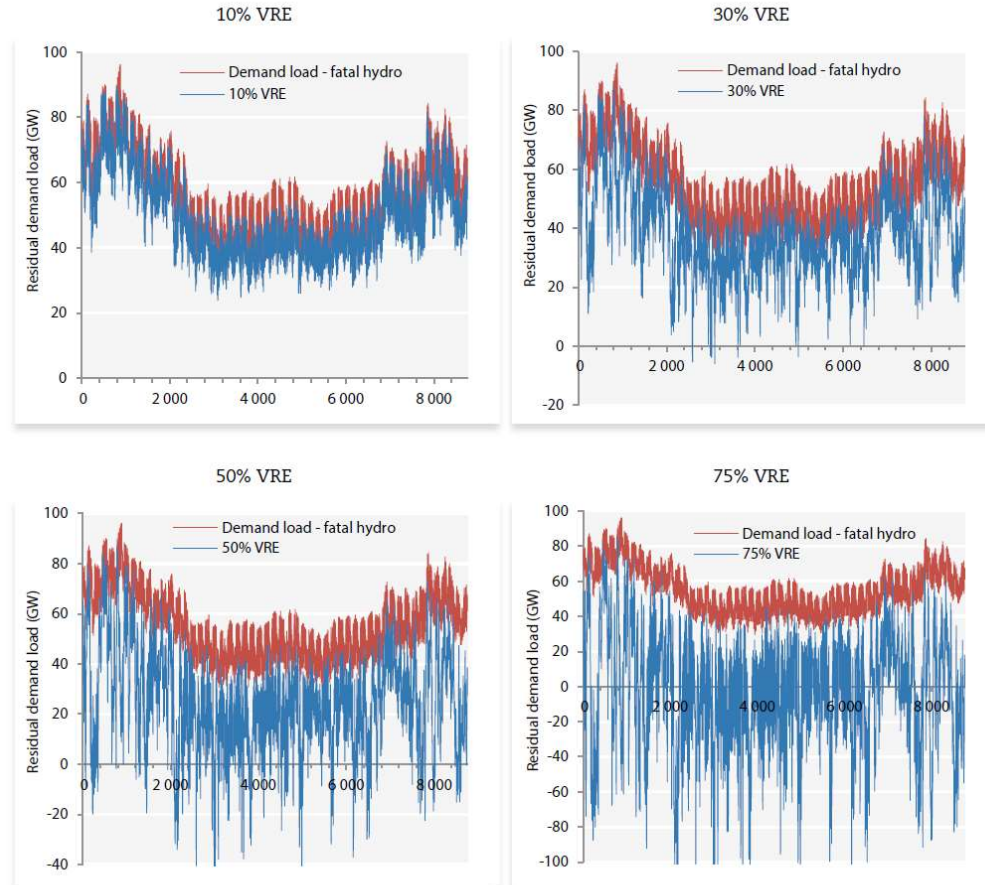


< 전통적인 전력 수요 >



< 재생에너지 비중 증가에 따른 전력 수요 (일) >

Figure 23. Comparison of the residual load at different VRE generation shares



Note that the figures have a different vertical scale.

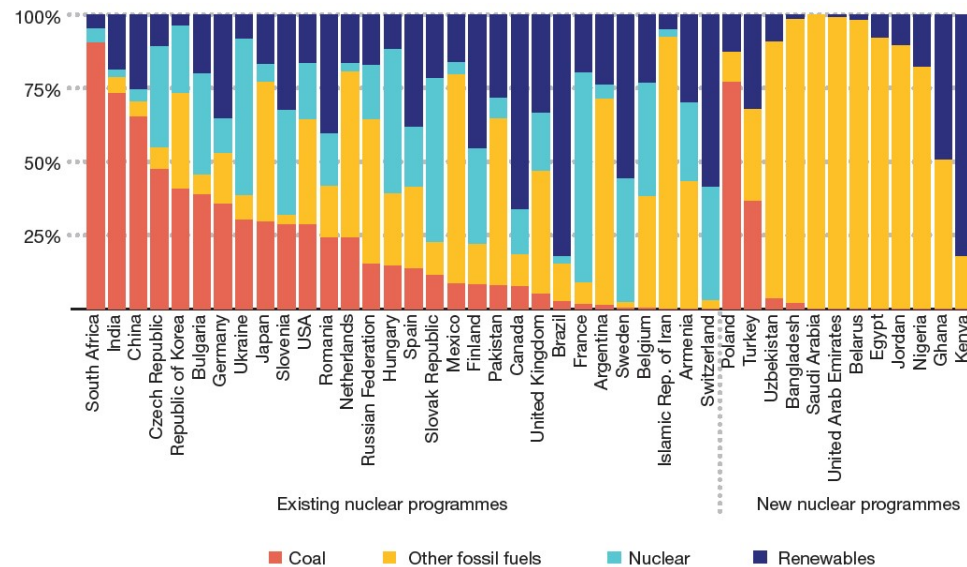
< 재생에너지 비중 증가에 따른 요구 전력 (년) >

The Costs of Decarbonisation: System Costs with High Shares of Nuclear and Renewables
OECD/NEA 2019

재생에너지 간헐성 보완 필요성



- ◆ 글로벌 Net Zero 실현을 위해 2050년까지 대부분의 전기는 탈탄소화를 통해 생산되어야 함. 따라서 노후화력 발전소는 크게 감소하고 저탄소 에너지인 풍력, 태양광 등의 재생에너지와 원자력, 이산화 탄소포집 및 저장장치를 갖춘 화력 발전소 및 수력 발전에 대한 의존도는 점차 높아질 것으로 예측
- ◆ 재생에너지는 일별, 주별 및 계절별 변동성을 지니고 있으며, 재생에너지 비중이 점차 증가하게 될수록 에너지 변동성과 수요·공급 예측 불확실성이 같이 증가
- ◆ 재생에너지의 간헐성을 보완하기 위해, 이들 발전 부하와 조화롭게 연계할 수 있는 에너지원 필요



원자력 프로그램을 보유하고 있거나 계획중인 국가의 전력에너지믹스(2018)
Source: Nuclear Energy for a Net Zero World, IAEA (2021)

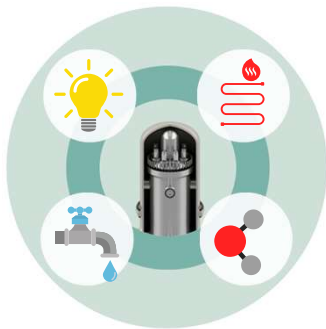
i-SMR 탄력운전 성능목표

혁신형 SMR 활용의 유연성 제고



재생연계/자율탄력운전

재생에너지 발전특성(간헐적, 단속적) 보완
전력계통 요구에 능동적으로 대응



분산형전원, 수소생산, 해수 담수화,
공정열 공급 등 다양한 분야 활용 가능

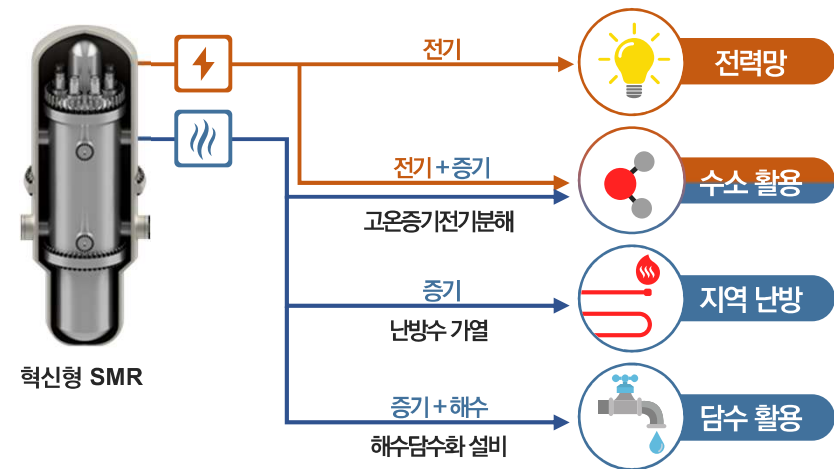


중소도시, 산업단지, 오지 등 수요지 인근 설치 가능
대규모 송전망 추가 건설에 따른 환경 파괴 최소화

✓ 정량목표 달성

출력범위: 100%-20%-100%

출력변화율: 5%/min



i-SMR 탄력운전 성능 확보 (1)

◆ 초/분 단위 유연성 성능

- (요건) 수 밀리초에서 수 십분 단위로 변동하는 재생에너지에 조화롭게 연계 및 대응 할 수 있는
불시 출력변동 대응과 주파수 제어
- (설계) 5%P 주파수 제어 능력

◆ 일일 단위 유연성 성능

- (요건) 일일 단위로 변화하는 재생에너지 변동성을 보완하기 위한 일일부하추종, 탄력운전 성능
- (설계) 100-20-100%의 출력 범위를 5%/min의 선형출력변동율로 제어할 수 있는 일일 부하
추종 능력 확보



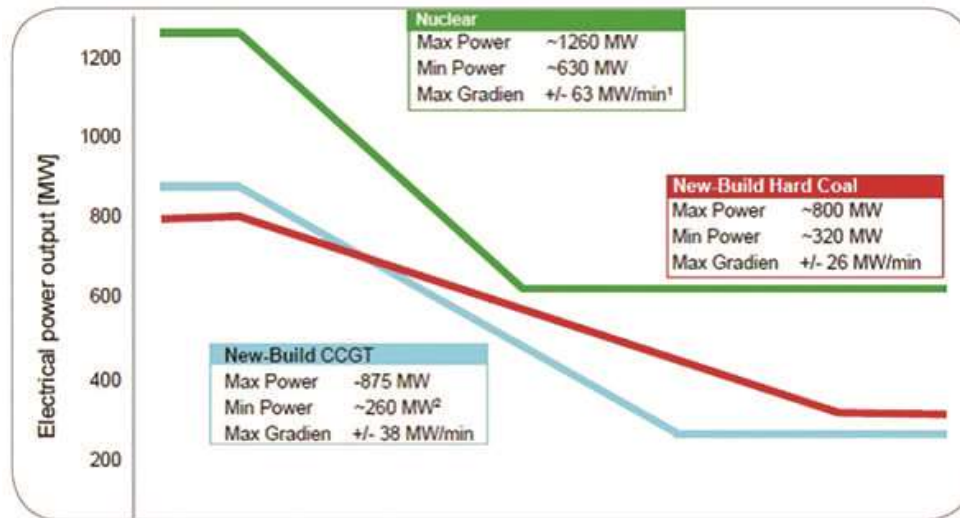
[프랑스 원자력발전소 하루 전력 생산량]

Source: Nuclear Energy for a Net Zero World, IAEA (2021)

i-SMR 탄력운전 성능 확보 (2)

◆ 일일 단위 유연성 성능

- (설계) 복합화력발전 역할을 대처할 수 있는 전력 부하 변화 대응 능력 보유



- (출력범위) 대표적인 발전사업자요건인 EPRI SMR URD, EUR(Rev.E)를 기본 요건으로 국내/외 원전 요건을 고려하여 출력변화범위를 정격출력의 100%-20%-100%로 설정
- (선형출력변화율) 석탄 및 복합화력발전 출력변화성능을 토대로 혁신형 SMR의 선형 출력변화율 목표치를 5%/min로 설정

[원자력, 석탄, 복합화력 발전소의 출력변화성능 비교]

Source: A 2010 comparison of German nuclear, newly built hard coal, and combined cycle gas turbine (CCGT) power plants' ability

◆ 계절 단위 유연성 성능

- (성능) 풍력, 태양광 등은 계절적 특성에 따라 전력 생산에 변동이 있으므로 안정적인 에너지 공급을 위한 에너지 저장 수단으로서의 수소 생산과 연계
- (설계) i-SMR의 남는 전력은 고온 수전해기술을 활용한 수소 생산에 활용

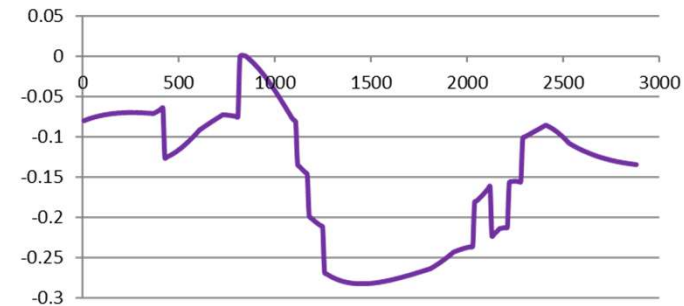
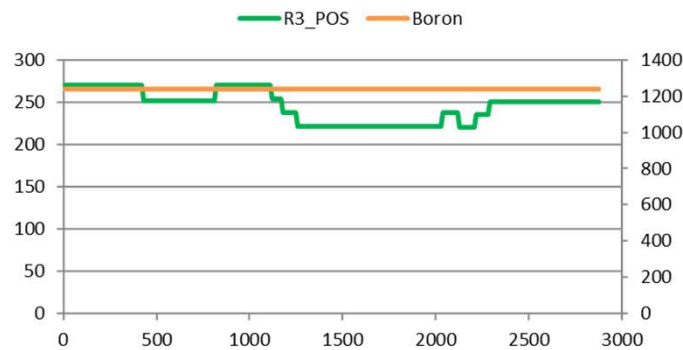
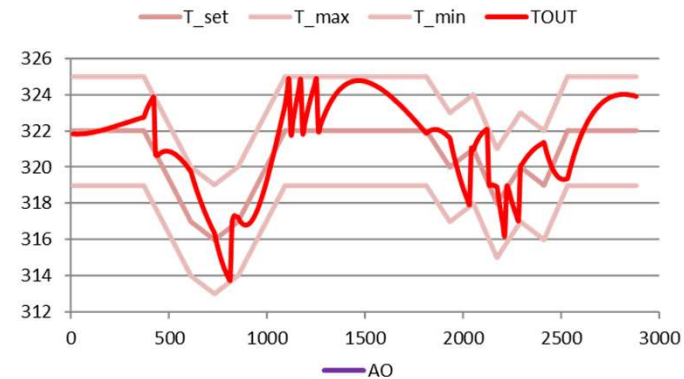
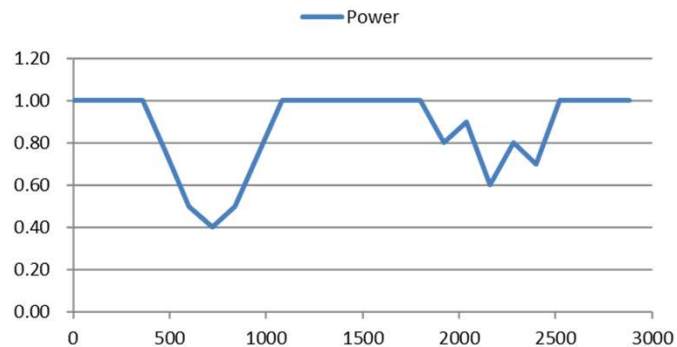
SMART 부하추종 예비평가 (사례)

◆ 부하추종운전 요건

- 7일 이상 혹은 30일 이상의 운전시 부하추종능력 화인(EUR 요건)
- 원자로 주기 90% 이상의 연소도에서 부하추종능력 확인 (EPRI)

◆ 맑은 날 하루와 흐린 날 하루 총 2일의 부하추종 평가

Time step	AO 제한조건	허용범위	설정범위	Boron 농도	제어봉 이동거리	제어봉 삽입거리	제어봉 인출거리
10 min	1.0	± 3.0 °C	0 %	1238.22 (BOC)	148	84	64



Small Modular Reactor

01

| 탄소중립(Net Zero)

02

| SMR이란?

03

| i-SMR 탄력운전 성능요건

04

| i-SMR 탄력운전 핵심기술

05

| 요약

i-SMR 유연성 확보 기술



◆ 무봉산 탄력운전 노심설계코드

- 무봉산 핵설계코드, 노심열수력 설계코드, 핵연료 성능해석체계

◆ 탄력운전 노심설계

- 노심 영향 평가 및 설계 방법론
- 출력분포 및 반응도제어 방법론
- 연료봉 열적/기계적 성능모델 개발/검증
- 핵연료 온라인 성능감시체계 개발(Pellet Cladding Interaction, 3D 출력분포 감시)

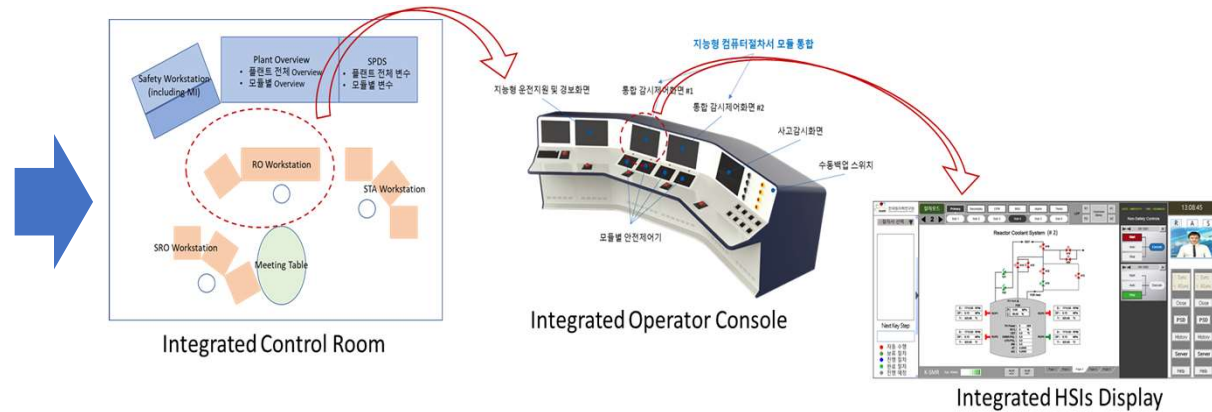
◆ 탄력운전 계통설계

- 원자로냉각재 평균온도 기반 원자로 출력제어논리
- 내장형 제어봉구동장치 성능향상 및 정밀 위치지시기개발
- 다중모듈 디지털트윈 체계구축 및 출력제어 성능평가
- 모듈형 화학및체적제어계통

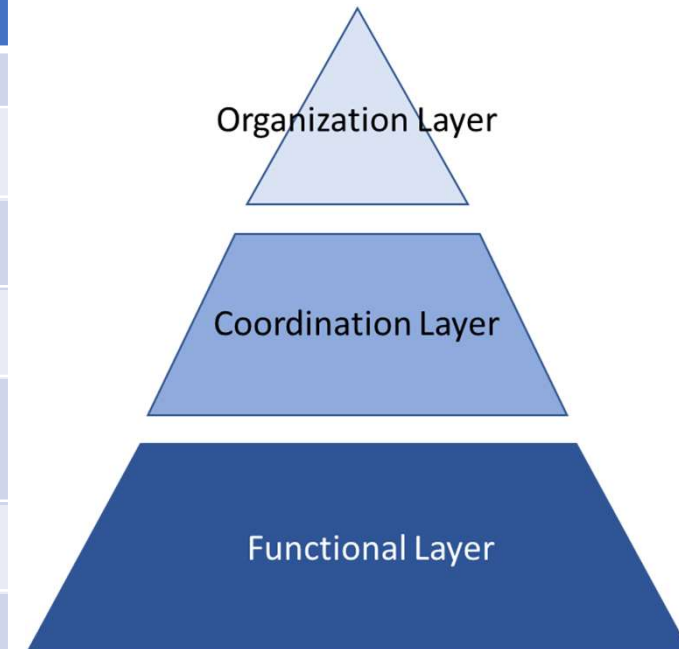
◆ 탄력운전 운전지원 시스템

- 모듈 통합 운전 및 지원 시스템
- 자율운전 및 모듈 기반 인간공학 기술 개발

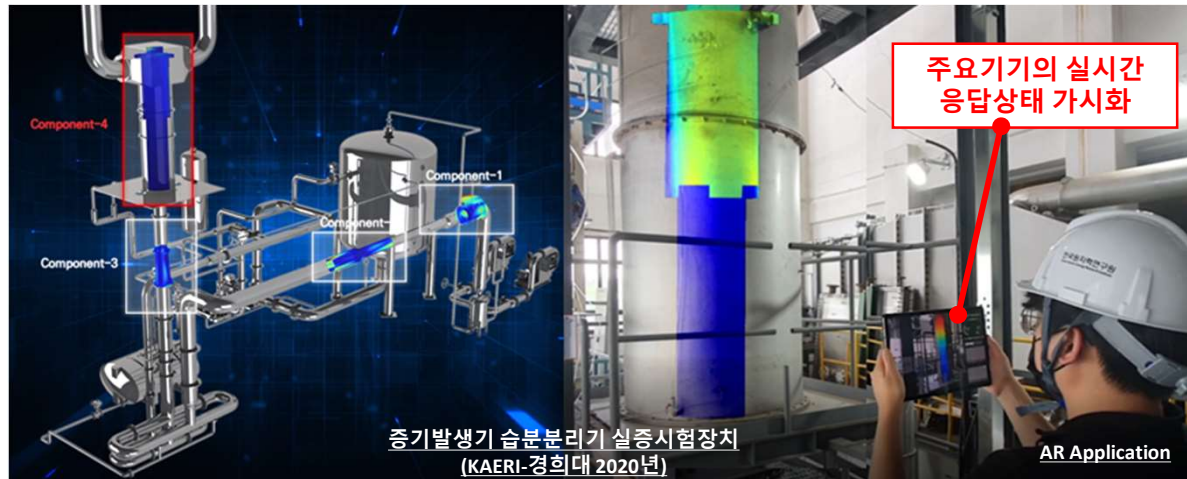
SMR 자율운전



자동화 수준	구분	설 명	원전 적용수준
Level 6	자율제어 지원	모든 자율제어	Micro Reactors
Level 5	자율제어 보조	보호/감시/제어 자율화, 자율기능 감시 및 수동백업	TCR (ORNL)
Level 4	자동제어 지원	안전계통 자동화, 자동 정상운전, 자동 비정상운전	i-SMR
Level 3	자동제어 보조	안전계통 자동화, 자동기동/출력 운전, 경보기반 수동대응	NuScale
Level 2	수동제어 보조	안전계통 자동화, 수동 공정제어, 경보기반 수동대응, 운전지원시스템, 컴퓨터절차서	APR1400, SMART
Level 1	수동제어 지원	안전계통 자동화, 수동 공정제어, 경보기반 수동대응	WH PWRs
Level 0	직접 수동제어	모든 수동제어, 경보기반 수동대응	-



디지털 트윈(Digital Twin) 활용 SMR 운전/유지/보수



Digital Twin is

- 3D Digital Asset
- Digital Replica

Digital Twin for

- SG, RCP, CRDM
- Seismic Model, RVA
- Piping, Building

Digital Twin do

- 3D Real-time Simulation
- Virtual Sensing
- AR / VR Application
- Big Data Generation

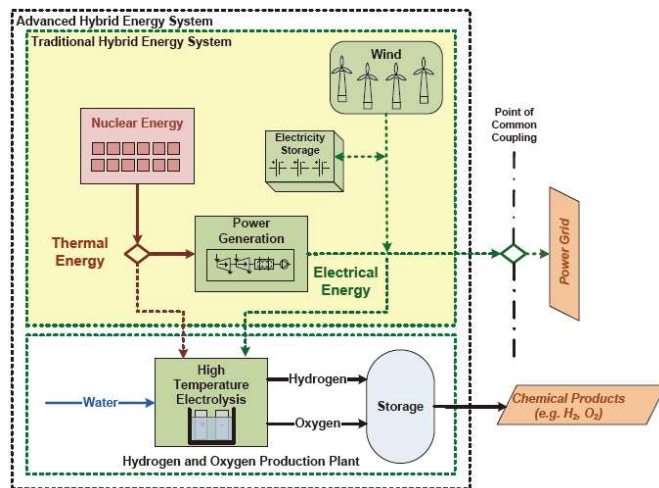
Digital Twin used

- SMR (Prototype) Design
- Advanced Monitoring System
- Intelligent SMR Maintenance

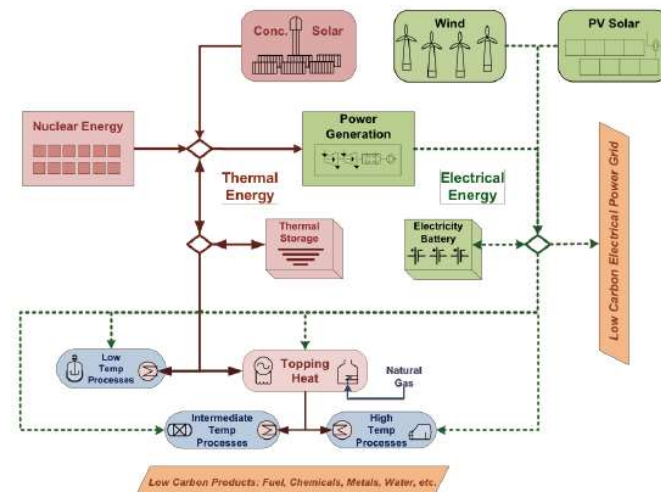


재생에너지 연계

- ◆ 원자로 출력 조절을 통한 재생에너지 연계가 가능하며, 노심 출력을 고정하고 잉여 에너지를 더 부가가치가 높은 수소나 열을 생산하는 방식도 가능
- SMR에서 일반적인 일일부하추종 운전 전략은 모듈별 독립적인 출력 제어 운전 뿐 아니라 모듈 전체의 통합 제어를 통해 구현
- 저출력 운전 상태에서 급격한 출력감발 요구시에는 증기 우회 운전을 통해 전력 계통에 대한 영향을 최소화
- 전력 비수기 기간에는 모듈별 On/Off 운전 방식을 통해 필요 없는 전력공급 축소



[원전-재생 연계 수소생산 시스템]



[원전-재생 연계 열저장 시스템]

SMR 부하추종운전과 경제성



< 이용률 변동에 따른 민감도 분석 사례 >

전력계통 안정성 유지를 위해 유연성 운전으로 인한 발전단가 증가비용을 보존하는 시장제도(전출력 기회비용 보상제도) 활용

Small Modular Reactor

01

| 탄소중립(Net Zero)

02

| SMR이란?

03

| i-SMR 탄력운전 성능요건

04

| i-SMR 탄력운전 핵심기술

05

| 요약

요약



- » 원자력 에너지는 기술에 기반하고 있으며, 기후위기 해결을 위한 대안
- » SMR은 뛰어난 안전성과 유연성을 가지고 있으며 세계 각국은 SMR 시장을 선점하기 위해 노력 중
- » 산학연 공동으로 세계 최고수준의 탄력운전 성능을 가지는 i-SMR 개발

➡ 새롭게 떠오르고 있는 글로벌 SMR 시장의 주도권 확보 가능

i-SMR의 우수한 안전성과 탄력운전 성능을 기반으로 재생에너지의 간헐성을 보완하고 Net-Zero 실현에 기여



우리 손으로 만든
소형모듈원자로(SMR)가
세계 시장을 주도하도록
최선을 다하겠습니다.