

에너지 패러다임의 전환, SMR

SMR 기술 설명 · 안전성과 경제성 · 국가 에너지 믹스 최적화

한국원자력학회

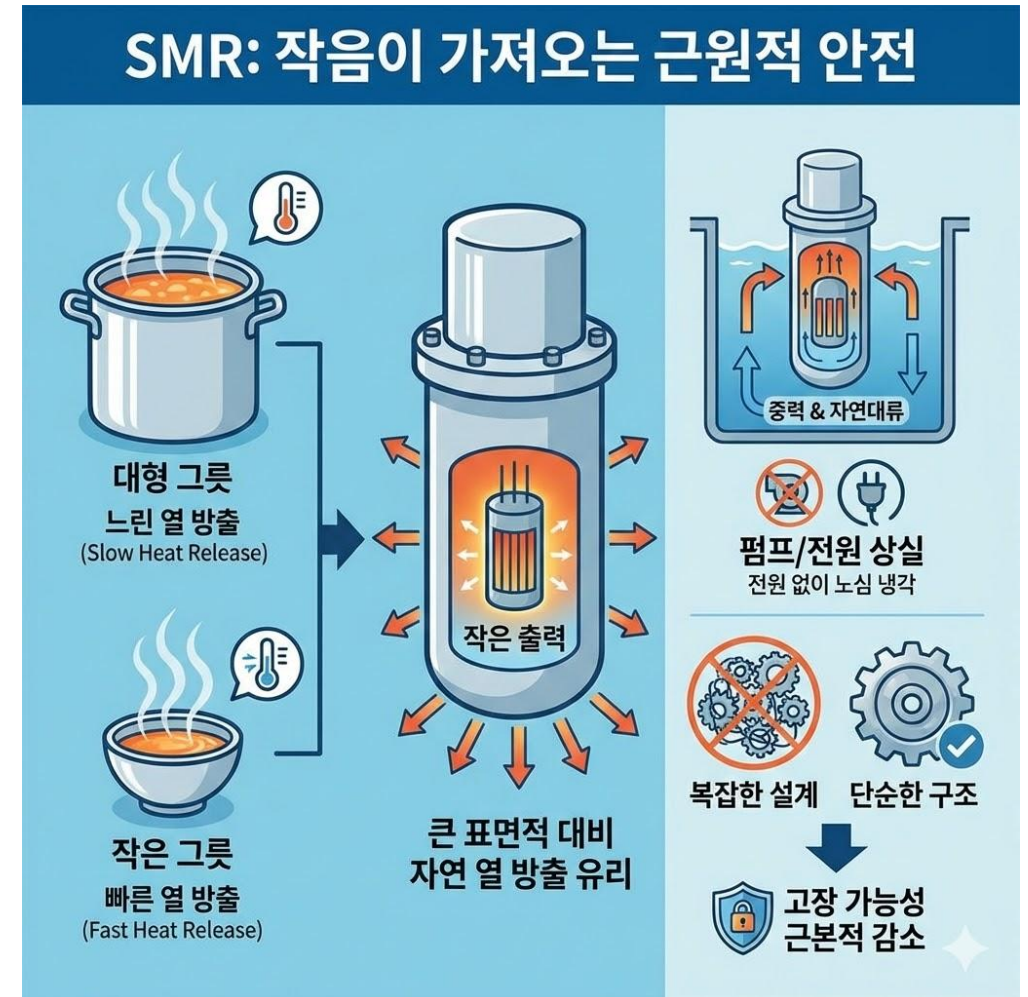
1. SMR의 등장 배경: 거대 시스템의 한계와 모듈화의 필요성

- SMR이 주목받는 이유는 단순히 출력이 작은 원전이기 때문이 아니라, 에너지 산업의 중심이 '대규모 건설 프로젝트'에서 '표준화된 제조 산업'으로 이동하고 있기 때문임.
- 미국과 프랑스를 중심으로 한 대형 원전 프로젝트들은 공급망 붕괴와 건설 경험 단절로 인해 당초 계획 대비 2~3배 이상의 비용과 기간 초과를 겪고 있음.
- 이러한 상황에서 경험이 축적 가능한 소형 원전 또는 반복 가능한 모듈형 설계로의 전환이 불가피해짐.
- 동시에 AI 데이터센터, 반도체 클러스터 등 전력 다소비 산업이 특정 지역에 집중되며 수요지 인근에서 직접 전력을 공급할 수 있는 분산형 전원의 필요성이 커지고 있음.



2. SMR 안전성 (1): '작음'이 만드는 물리적 안전

- 원자로 사고는 본질적으로 열 제거 실패 문제이며, SMR은 출력 대비 표면적이 커 자연적인 열 방출에 유리한 구조를 가짐.
- 이는 대형 그릇보다 작은 그릇의 국이 더 빨리 식는 것과 같은 물리적 원리임.
- SMR은 펌프나 외부 전원이 상실되더라도 중력과 자연대류만으로 노심 냉각이 가능한 피동형 안전계통을 보다 단순한 구조로 구현할 수 있음.
- 결과적으로 설계 복잡도가 낮아지고, 고장 가능성 자체를 근본적으로 줄이는 효과가 있음.



3. SMR 안전성 (2): 다수기 PSA와 독립성

- SMR은 여러 기를 하나의 부지에 배치하더라도 각 모듈이 안전 설비를 공유하지 않는 '완전한 독립성'을 원칙으로 설계됨.
- 확률론적 안전성 평가(PSA)에 따르면, 1기 사고 확률이 십억 년에 1회($10^{-9}/\text{년}$) 수준일 경우 독립된 두 기가 동시에 사고를 일으킬 확률($10^{-18}/\text{년}$)은 사실상 무시 가능한 수준임.
- 또한 노심 출력이 작아 사고 시 방출 가능한 방사성 물질의 총량 자체가 제한됨.
- 이로 인해 SMR은 산업단지 및 도시 인근에 배치 가능한 혁신적 무탄소 기저전원으로 평가됨.

SMR: 안전성의 핵심, 독립성과 확률

1. 완전한 독립성 설계

공유된 안전 설비 없음

2. 확률론적 안전성 평가(PSA) 결과

$10^{-9}/\text{년}$
(1기 사고)

×

$10^{-9}/\text{년}$
(1기 사고)

=

$10^{-18}/\text{년}$
(2기 동시 사고)

사실상 불가능

3. 방사성 물질 총량 제한

방사성 물질
총량 자체 감소

→

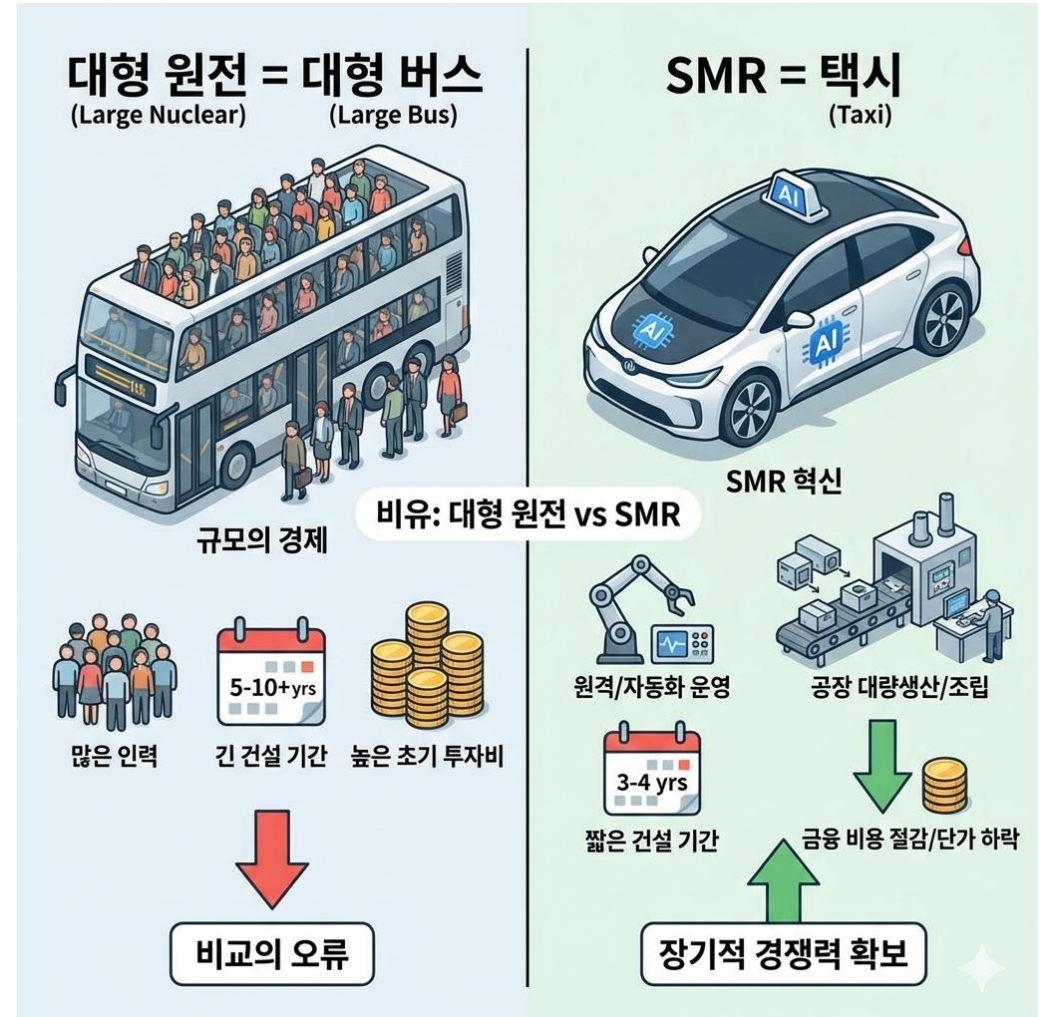
SMR 노심

대형 노심 SMR 노심

4. 도시/산업단지 인근 배치

4. SMR 경제성: 택시비를 버스비로 만드는 구조적 혁신

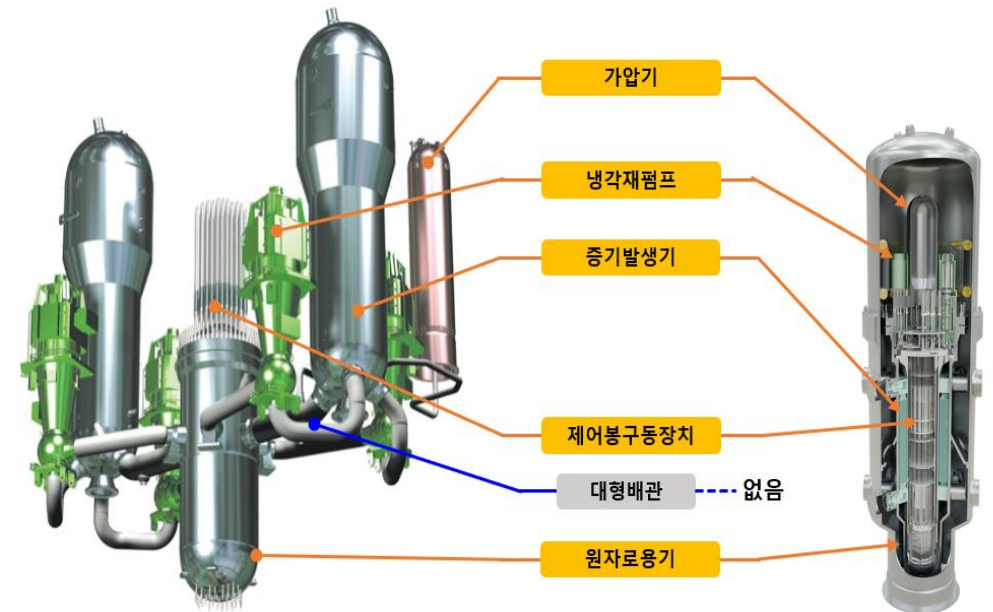
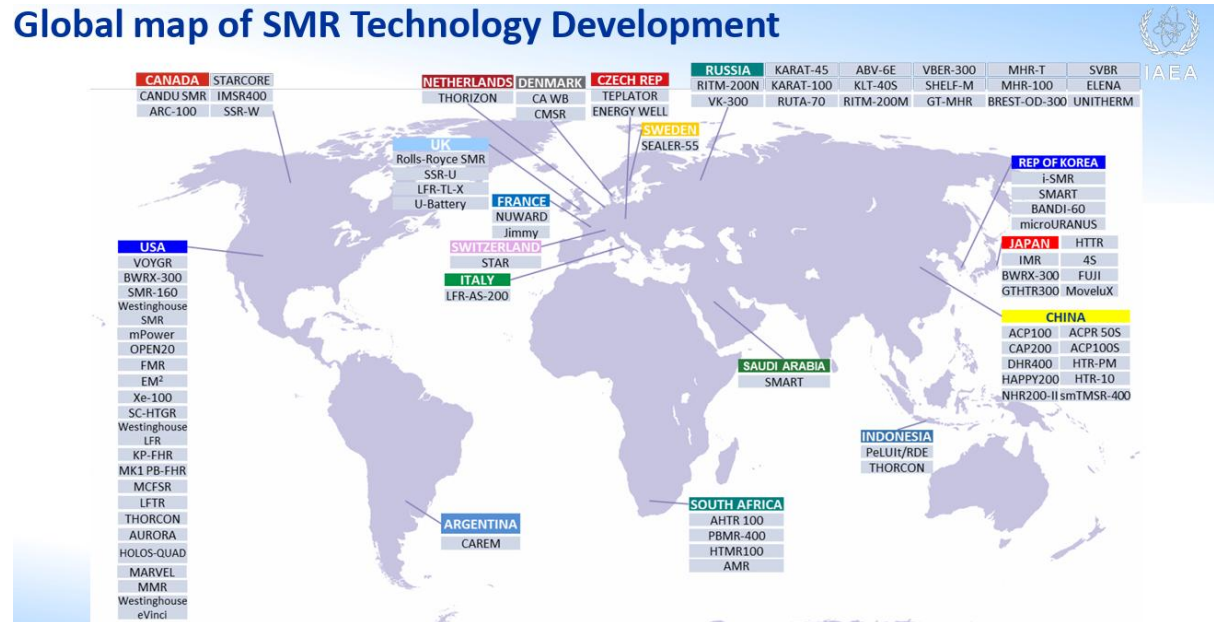
- SMR의 경제성 논란은 '규모의 경제'만을 기준으로 한 비교에서 비롯됨.
- SMR은 원격·자동화 운영을 통해 발전량 대비 운영 인력을 획기적으로 줄이는 것을 목표로 함.
- 또한 공장에서 표준화된 모듈을 대량 생산하고 현장에서는 조립만 수행함으로써 건설 기간을 3~4년 수준으로 단축할 수 있음.
- 이러한 구조는 금융 비용 절감과 학습 효과를 통해 장기적으로 발전 단가를 크게 낮출 수 있음.



5. 글로벌 SMR 프로젝트 동향

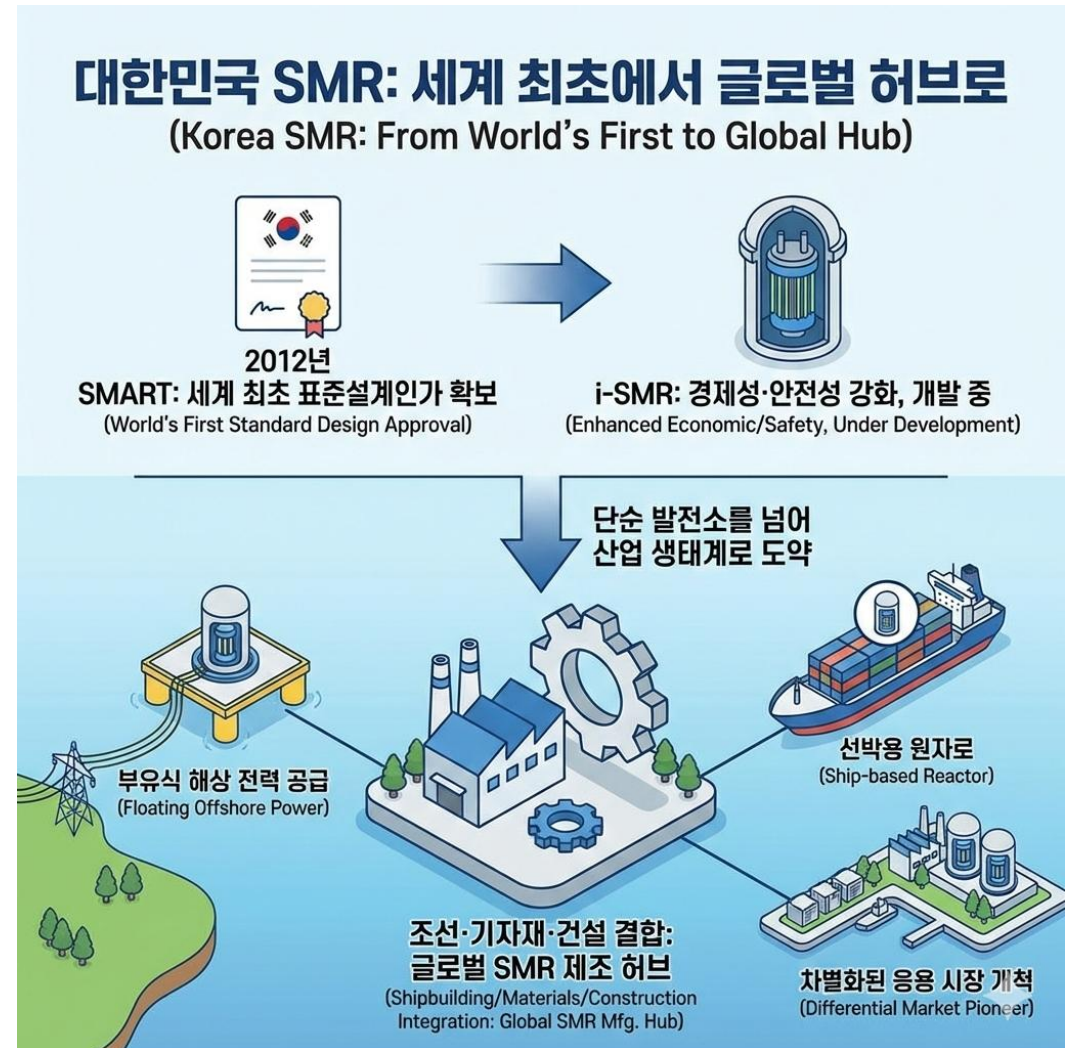
- 현재 전 세계적으로 80개 이상의 SMR 노형이 개발 중이며, 경수형과 비경수형이 병행 발전하고 있음.
- 미국 NuScale과 GE-Hitachi는 경수형 SMR 상용화의 선두주자로 평가됨.
- 우리 i-SMR은 작은 모듈원전 중에 가장 크고, 좀 더 큰 승합차 모델인 GE-H의 비등경수로는 진정한 모듈은 아님.
- TerraPower, X-energy 등은 차세대 비경수형을 통해 산업용 열공급 및 에너지 저장과의 결합을 시도 중임.
- 이러한 흐름은 SMR이 단순한 발전 설비를 넘어 종합 에너지 플랫폼으로 진화하고 있음을 의미함.

Global map of SMR Technology Development



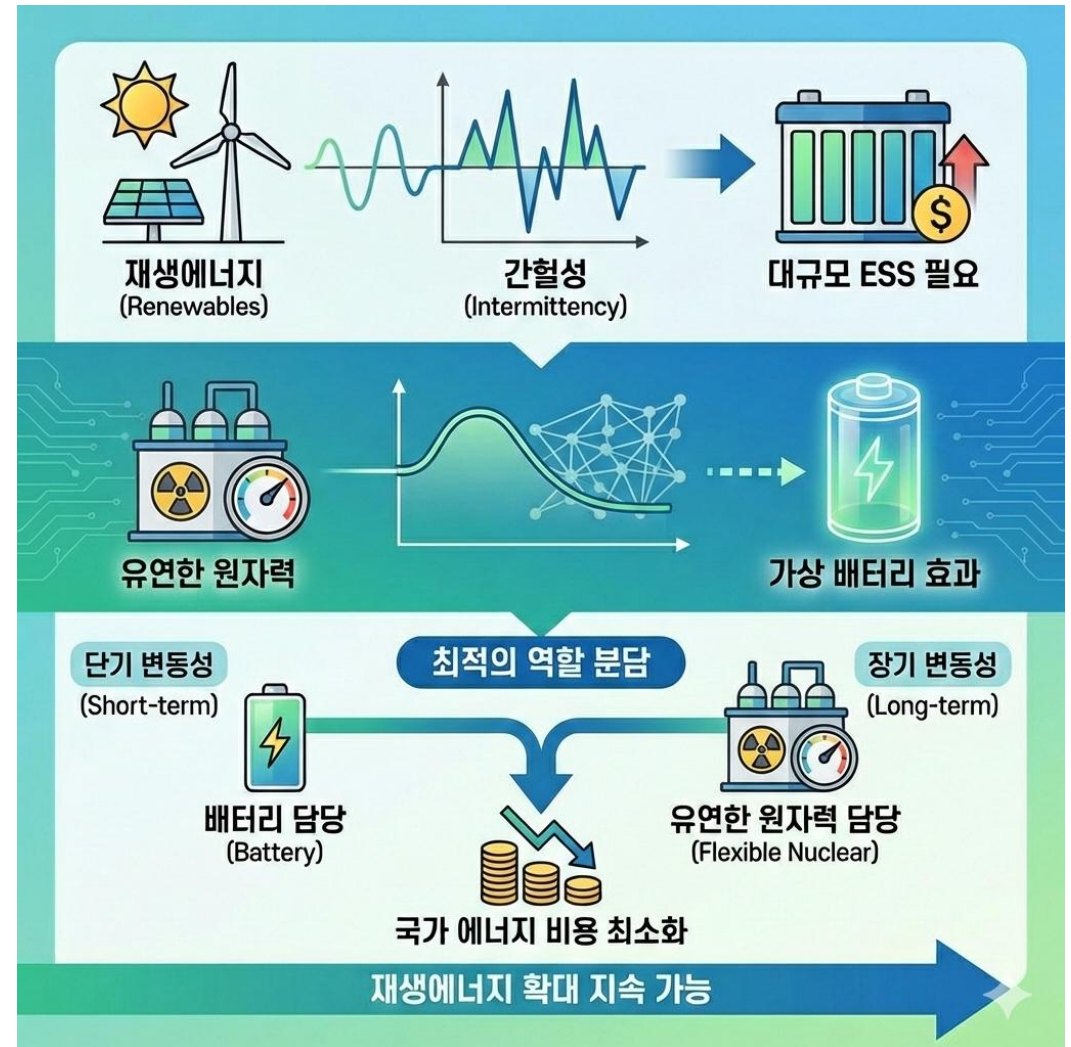
6. 국내 SMR 개발 현황과 산업 전략

- 우리나라는 2012년 세계 최초로 SMR 표준설계인가(SMART)를 확보한 바 있음.
- 현재 i-SMR 프로젝트를 통해 경제성과 안전성을 강화한 한국형 SMR을 개발 중임.
- 조선·기자재·건설 산업과의 결합을 통해 부유식, 선박용, 해상 전력 공급 등 차별화된 응용 시장을 개척할 수 있는 잠재력이 큼.
- 이는 단순한 발전소 수출을 넘어 글로벌 SMR 제조 허브로 도약할 수 있는 기반이 됨.



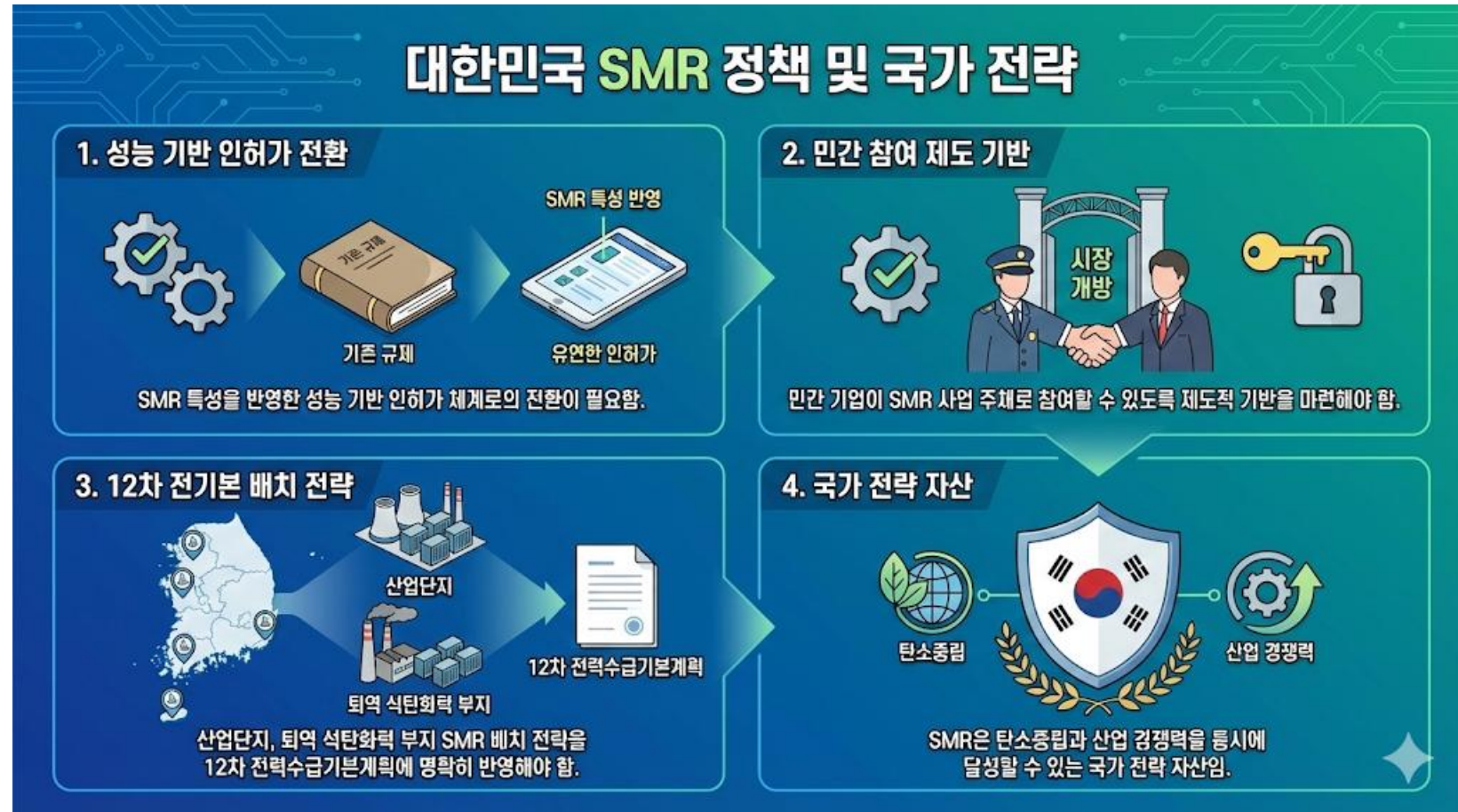
7. 원자력 유연운전과 최적 에너지 믹스

- 재생에너지는 간헐성으로 인해 대규모 에너지 저장 설비(ESS)를 요구함.
- 원자력이 유연하게 출력을 조절할 경우, 이는 '가상 배터리'와 같은 효과를 제공함.
- 단기 변동성은 배터리가, 장기 변동성은 유연한 원자력이 담당하는 역할 분담이 국가 전체 에너지 비용을 최소화하는 최적의 해법임.
- 원자력의 유연성이 확보되어야 재생에너지 확대도 지속 가능해짐.



8. 정책 제언 및 12차 전력수급기본계획 반영 과제

- SMR 특성을 반영한 성능 기반 인허가 체계로의 전환이 필요함.
- 민간 기업이 SMR 사업 주체로 참여할 수 있도록 제도적 기반을 마련해야 함.
- 노후 석탄화력 부지를 활용한 SMR 배치 전략을 12차 전력수급기본계획에 명확히 반영해야 함.
- SMR은 탄소중립과 산업 경쟁력을 동시에 달성할 수 있는 국가 전략 자산임.



Q. SMR은 정말 대형 원전보다 안전한가?

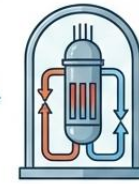
- SMR은 '더 많은 장치'가 아니라 '더 단순한 구조'를 통해 안전성을 확보함.
- 출력이 작아 붕괴열 제거가 물리적으로 유리하며, 피동형 냉각을 단순한 구조로 구현할 수 있음.
- 사고 발생 시 방출 가능한 방사성 물질의 총량 자체가 제한되어 사회적 영향이 크게 감소함.

? Q&A: SMR은 정말 안전한가?

A1. 더 단순한 구조

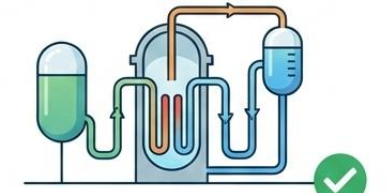


복잡한 장치



단순한 구조

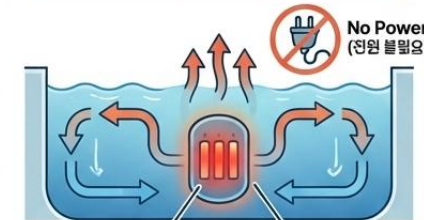
A2. 피동형 자연 냉각



단순한 구조

더 많은 장치 대신 단순한 구조로 고장 확률을 줄여 안전성을 확보합니다.

A2. 피동형 자연 냉각



작은 출력 & 붕괴열 자연 대류 & 중력
출력이 작아 물리적으로 유리하며,
펌프/전원 없이 자연 법칙으로 냉각됩니다.

A3. 제한된 방사성 물질



대형 원전 총량 사회적 영향 감소

사고 시 방출 가능한
방사성 물질의 총량이 적어
외부 영향이 크게 감소합니다.

Q. SMR은 안전하고 대형 원전은 위험한가?

- 우리나라 격납건물 설계와 같은 TMI 사고 시 방사성 물질은 격납건물 내부에 대부분 격리.
- 당시 대통령이었던 지미 카터 대통령은 사고 3일 후 현장을 방문하면서 보호장구도 필요 없었음.
- 대형원전은 충분히 안전함. 다만 SMR은 좀 더 간단한 방법으로 이를 달성하는 것임.

Q&A: 우리나라 원전에 후쿠시마와 같은 사고가 발생하면 그 결말은?

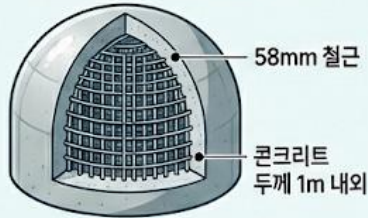
우리나라 대형 격납건물의 위력

후쿠시마 격납건물



후쿠시마 격납건물
작은 부피, 취약한 구조

우리나라 대형 격납건물



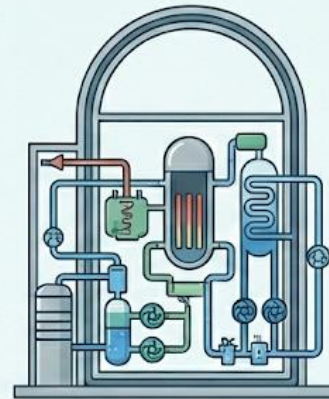
우리나라 대형 격납건물
후쿠시마보다 5배 큰 부피, 압도적 내구성



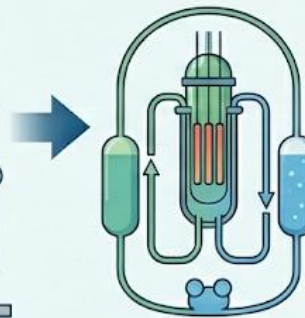
TMI 사고 실례: 외부 누출 거의 없음
대통령 마스크 없이 현장 방문 가능

결론: 외부 누출 사실상 기대 불가, 영향 미미

대형원전 vs SMR: 안전성 확보 방법의 차이



대형원전
안전하지만 복잡한 시스템

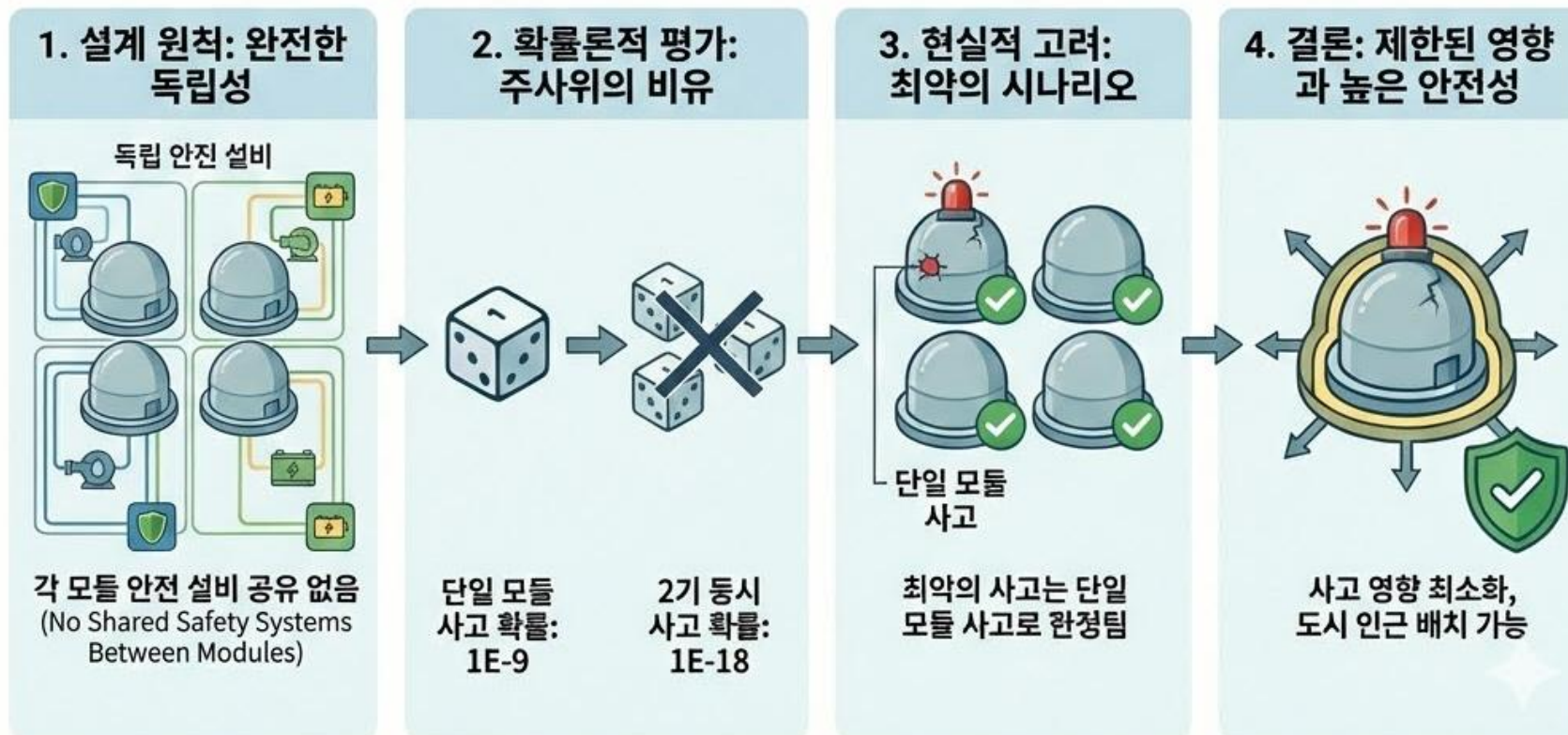


SMR
더 단순한 구조로 안전성 확보

핵심: 둘 다 안전, SMR은 방법이 더 심플하고 영향이 더 작음

Q. 여러 기를 한 곳에 두면 사고 위험이 커지는 것 아닌가?

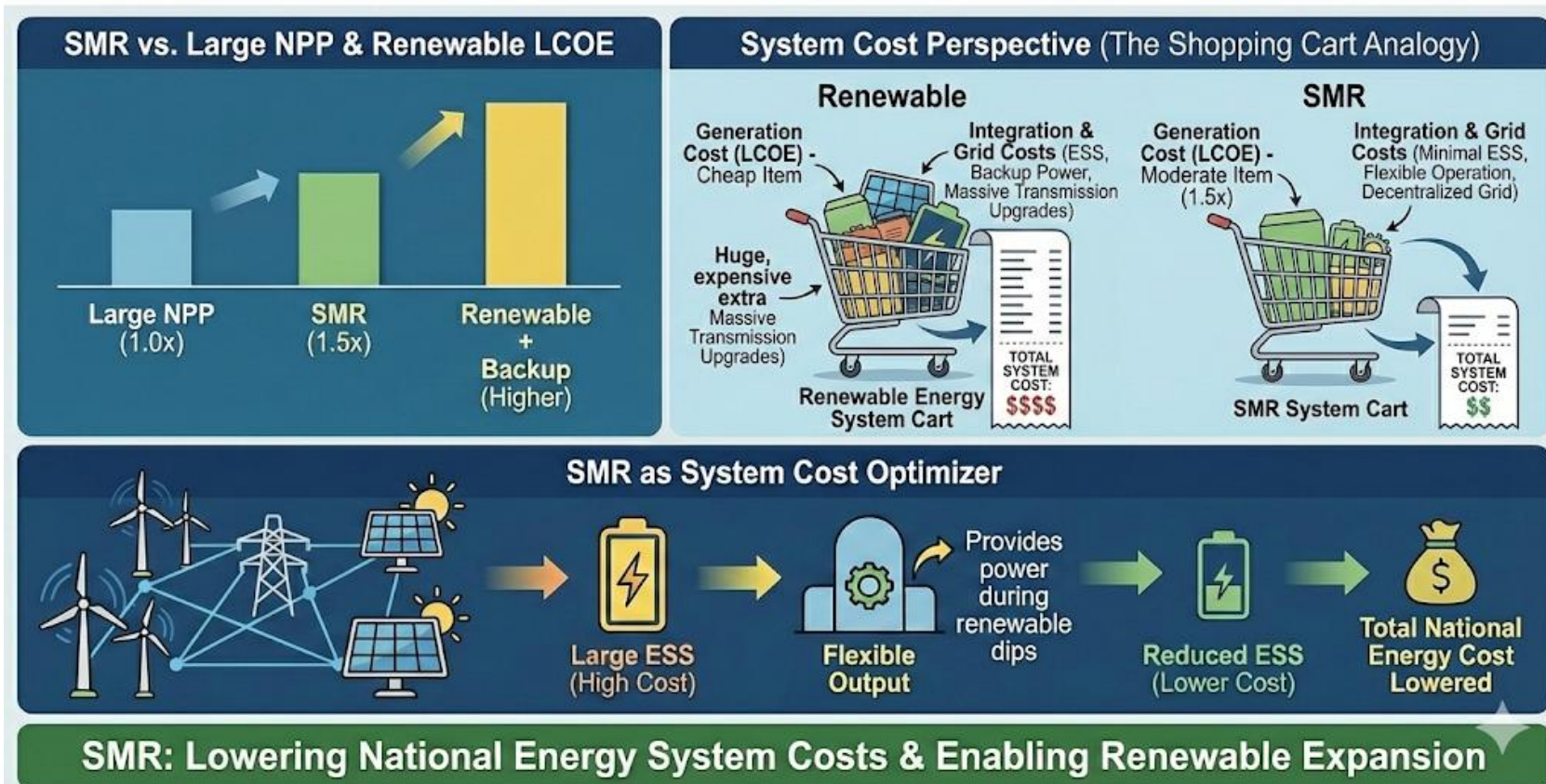
- SMR 모듈은 안전 설비를 공유하지 않는 '독립성'을 원칙으로 설계됨.
- 확률론적 안전성 평가 결과, 다수 모듈의 동시 사고 확률은 공학적으로 무시 가능한 수준임.
- 현실적으로 고려해야 할 최악의 사고는 단일 모듈 사고로 한정됨.



Q. SMR은 재생에너지보다 비싸지 않은가?

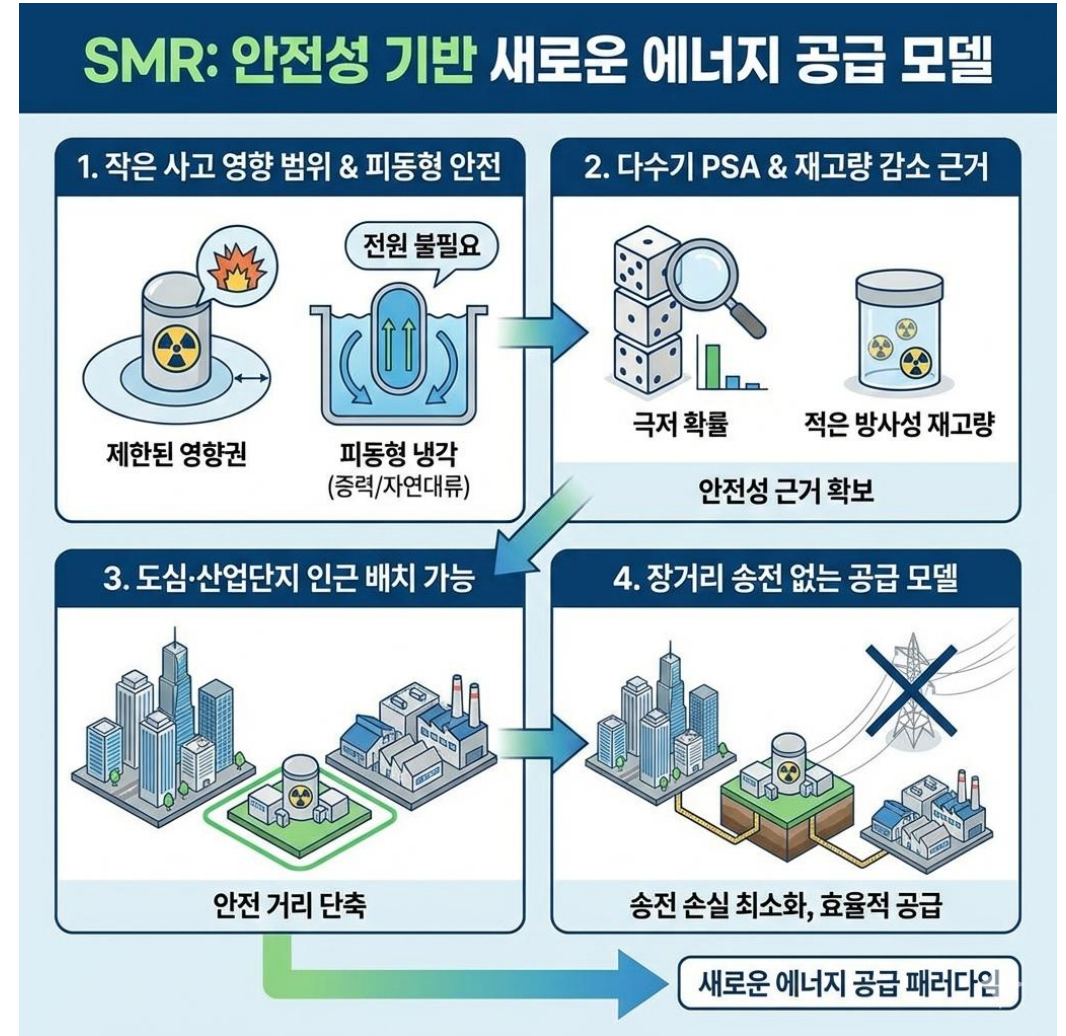
- 대형원전 대비 1.5배의 단가가 되어도 재생에너지보다 경제적임.
- 또한, 단순 발전 단가가 아니라 전체 전력 시스템 비용(System Cost) 관점에서 봐야 함.
- SMR은 재생에너지의 간헐성을 보완하여 대규모 ESS 설치 비용을 줄이는 효과가 있음.
- 국가 전체 에너지 비용을 낮추는 역할을 수행함.

SMR Economics & System Cost Advantage



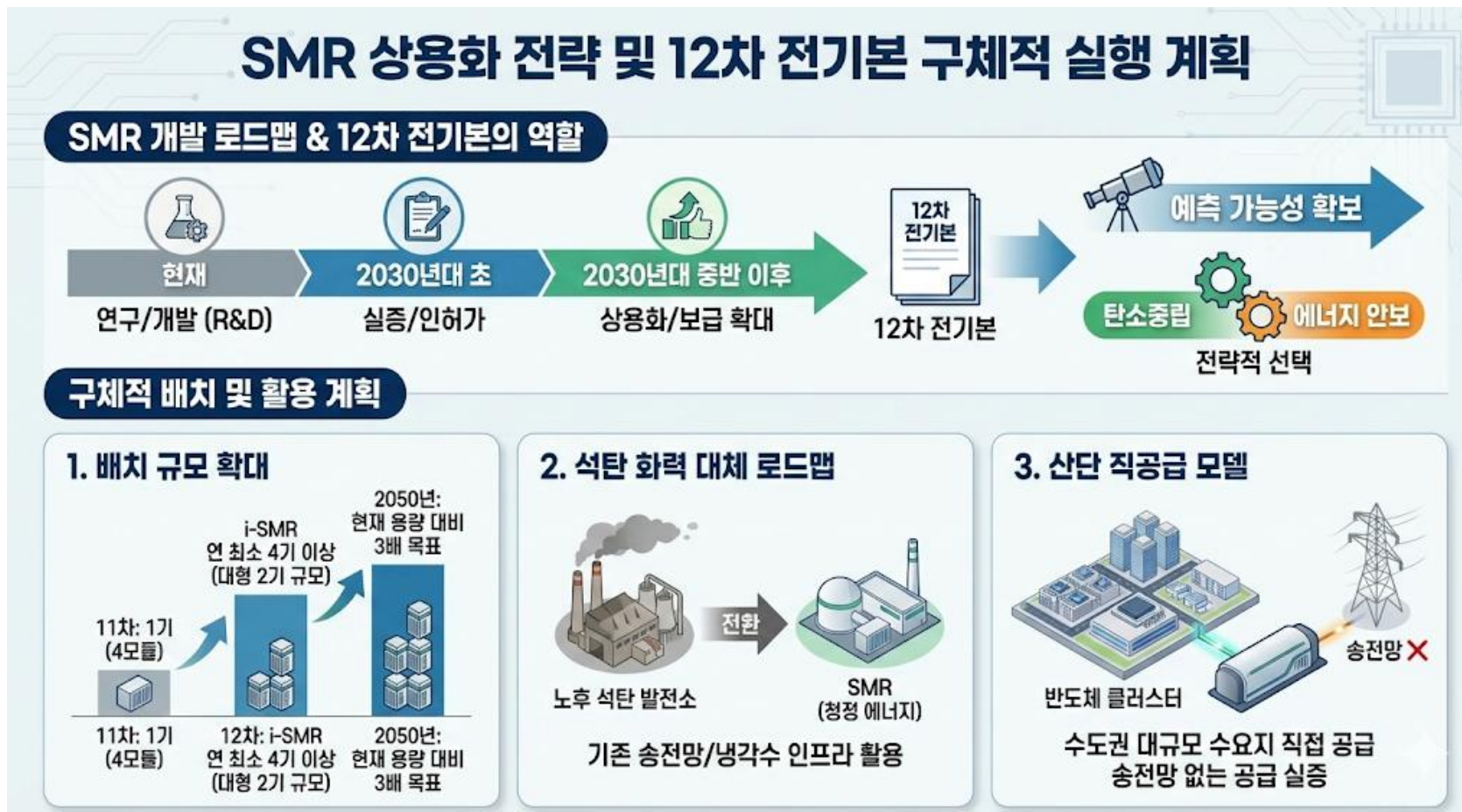
Q. SMR을 도심이나 산업단지 인근에 두는 것이 가능한가?

- SMR은 사고 영향 범위가 작고, 피동형 안전계통을 기반으로 설계됨.
- 다수기 PSA 결과와 방사성 재고량 감소를 근거로 도심·산업단지 인근 배치 가능성이 검토되고 있음.
- 발전소 부지 내부로 비상계획구역이 한정되는 추세임. 즉 발전소 외부에는 비상계획이 불필요한 수준임.
- 이는 장거리 송전 없이 전력을 공급할 수 있는 새로운 에너지 공급 모델을 가능하게 함.



Q. 왜 지금 SMR을 전력수급계획에 반영해야 하는가?

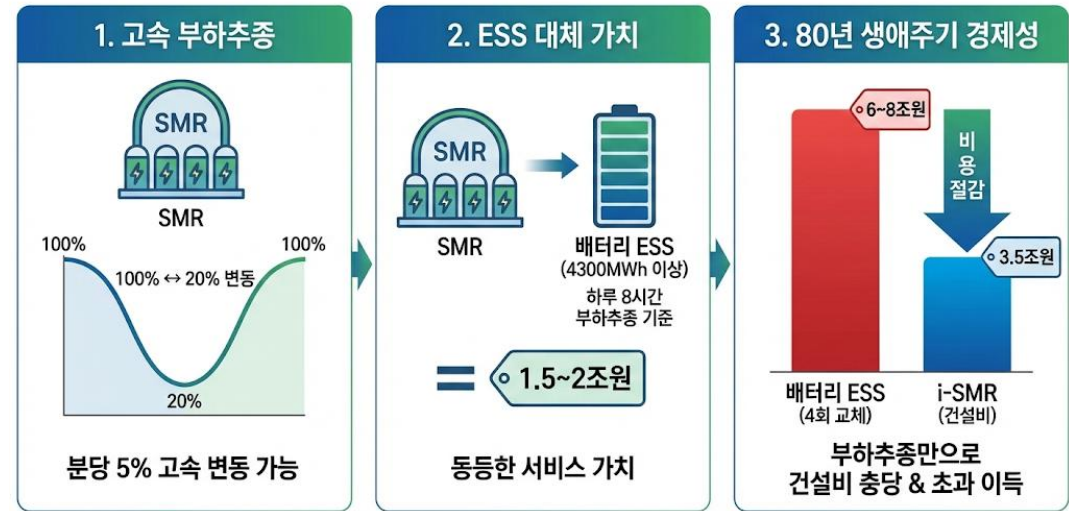
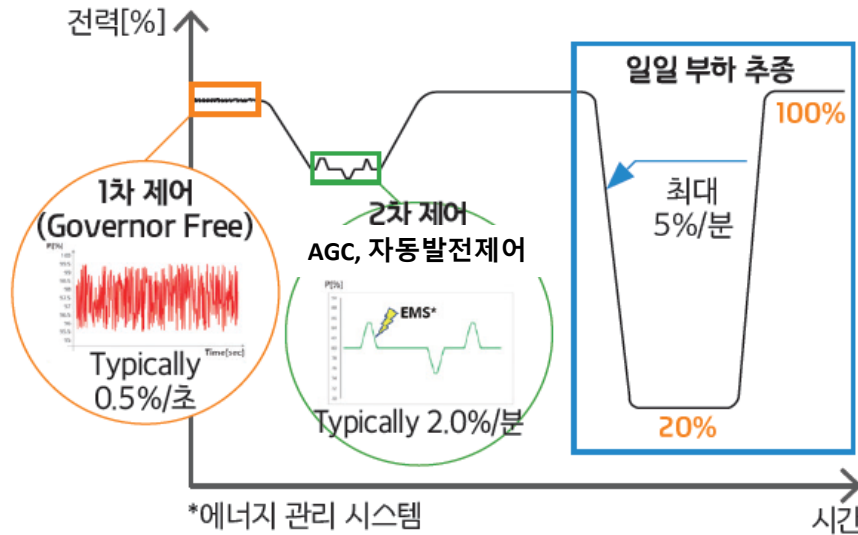
- SMR은 개발부터 상용화까지 일정 시간이 필요한 기술임.
- 12차 전력수급기본계획에 반영함으로써 중장기 에너지 전환의 예측 가능성을 확보할 수 있음.
- 이는 탄소중립과 에너지 안보를 동시에 달성하기 위한 전략적 선택임.



Q. SMR의 부하추종 능력의 가치는?

- 출력을 100%-20%-100%로 변동하면서 분당 5%의 고속변동 가능함
- 4모듈 680MW가 하루 8시간 100-20-100 부하추종을 한다면 배터리로는 4300MWh 이상의 용량이며, 1.5~2조원의 배터리 ESS 서비스와 동등함.
- 80년 설계 수명을 감안할 때 배터리 ESS 4회 교체분으로서 6~8조원임. i-SMR 건설비 3.5조원과 비교할 때 부하추종 서비스만으로 원전 건설비를 충당하고도 남음.
- SMR의 부하추종은 24시간 가능하고, 최대부하추종량보다 적게 감발할 때 더 경제적이라서 배터리와 반대임.

i-SMR의 혁신적 부하추종 능력과 압도적 경제 가치



- 국내에서 추진하는 AGC는 외부 신호가 직접 제어봉을 움직이는 방식이 아니라, 운전원이 승인한 범위 내에서 발전소의 '제어 시스템'이 안전하게 출력을 조절하고, 이상 징후 발생 시 즉시 자동 제어를 차단하거나 운전원이 개입하는 구조임.
- "Remote Dispatch"는 허용하되 "Unattended Control(무인 제어)"은 금지하는 개념임.