



혁신형 SMR 설계특성 및 재생에너지와 SMR 조화 기반 Smart Net-zero City

김용수¹⁾ · 박철규^{2)*}

Design Features of the Innovative Small Modular Reactor and Development of the SMR Smart Net-zero City Model Harmonizing Renewable Energy and SMRs

Yongsoo Kim¹⁾ · Chulkyu Park^{2)*}

Received 31 October 2025 Revised 12 December 2025 Accepted 12 December 2025 Published online 23 December 2025

ABSTRACT The Innovative Small Modular Reactor (i-SMR) is a next-generation integral pressurized water reactor currently under development as part of a national R&D program. Designed under the philosophy of “Safety-by-Design,” the i-SMR represents a new-concept nuclear power system combining structural simplification with fully passive safety systems. A total of four reactor modules, each rated at 170 MWe, will be constructed and operated at a single plant site, providing a total installed capacity of 680 MWe. Key components—such as the boron-free core, internally mounted control rod drive mechanisms, helical-coil steam generators, and canned motor coolant pumps—are all integrated within a single pressure vessel. This integral design physically eliminates the possibility of large-break loss-of-coolant accidents. The i-SMR incorporates three fully passive safety systems: the Passive Emergency Core Cooling System, the Passive Auxiliary Feedwater System, and the Passive Containment Cooling System, which can maintain both core and containment cooling for over 72 h without any external power supply or operator intervention. Leveraging its exceptional safety, reliability, and flexible load-following capability, the i-SMR can serve as a core energy source for the SMR Smart Net-zero City model, which integrates solar, wind, energy-storage systems, and hydrogen-production facilities. The SSNC is an AI-driven energy-management platform designed to provide integrated control of electricity, heat, and hydrogen, the essential energy forms for future smart cities. By achieving both enhanced competitiveness and accelerated carbon neutrality, the SSNC represents a sustainable and innovative business model for the next era of clean-energy urban ecosystems.

Key words Net-zero(탄소중립), CO₂ emissions(이산화탄소 배출량), SMR(Small Modular Reactor, 소형모듈원자로), Renewable energy(재생에너지), Energy mix(에너지 믹스), Electricity Demand(전력수요), Distributed Energy(분산에너지), Nuclear energy(원자력에너지), Eco-friendly smart energy mix(친환경 스마트 에너지 믹스)

1) Vice President, SMR Project Office, Korea Hydro & Nuclear Power. Co. Ltd.

2) Senior Manager, SMR Project Office, Korea Hydro & Nuclear Power. Co. Ltd.

*Corresponding author: chulkyu.park@khnp.co.kr

Tel: +82-54-704-7011

Fax: +82-502-734-0242

Subscript

SMR : Small Modular Reactor

SSNC : SMR Smart Net-zero City

1. 서론

기후위기 대응을 위한 탄소중립은 전 인류가 공동으로 노력하여 실현해야 하는 과제이다. 전 세계적으로 재생에너지 확대 정책을 추진하고 있고, 태양광과 풍력으로 대표되는 재생에너지의 기술혁신을 통한 경제성 향상으로 활용이 확대되고 있다. 한국도 2025년 2월 정부가 확정된 제11차 전력수급기본계획^[1]에 따르면 2024년 전체 발전량의 10.6% 수준이었던 재생에너지 발전비율을 2030년 21.8%, 2038년 33.0%로 확대할 계획이다.

재생에너지는 높은 공공 수용성을 보유하고 있어, 탈산소 이행을 위해 필수적인 에너지원이다. 하지만, 기상 조건에 따라 발전량이 불규칙적이어서 발전 출력을 예측하기 어려우며 출력의 변화폭이 큰 특징을 가지고 있다. 이러한 예측 불확실성 및 출력 변동성이 큰 전력원의 전력계통 투입 비중이 확대될 경우, 전력망 안정성 유지하기 위한 보조수단이 필요하다. 전력계통의 유연성을 제고할 수 있는 발전자원(Balancing resources)에는 수급 변동에 빠르게 대응할 수 있도록 높은 출력 증·감발량(Ramp rate)을 가진 유연성 높은 발전원이 필요하다.^[2]

제10차 전력수급기본계획^[3]을 기반으로 순수요 패턴 생성을 이용한 관성 제약 기동정지계획 연구 결과^[4]에 따르면 2030년 발전원별 발전량 비중은 Table 1, 발전량 프로파일은 Fig. 1과 같다.

Figure 1의 프로파일에서 나타나듯이 재생에너지, 특히 태양광 발전량이 증가할수록 태양광 발전량 변동에 따라

Table 1. Share of power generation by energy source

Source	Nuclear	Coal	LNG	Renewable	Others
Share (%)	32.4	19.7	22.9	21.6	3.4

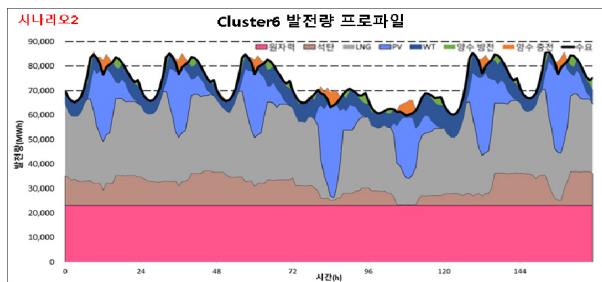


Fig. 1. Hourly generation profile

Table 2. Capacity factor for generation resource type

Source	Coal	LNG	Pumped-storage Hydropower (PSH)	Nuclear
Capacity factor (%)	23.33	63.29	15.88	79.67

출력을 증·감발하여 공급과 수요의 균형을 이루도록 하는 유연성 높은 발전원이 필요하다. 이 프로파일에서는 석탄과 LNG 발전원이 출력을 조절하며 전력계통의 안정성을 유지하는 모습을 보여주고 있다. 또한 이러한 출력 증·감발 운전으로 인해 석탄과 LNG 발전원의 이용률은 Table 2에서 보는 바와 같이 각각 23.33%, 63.29%로 기저발전원인 원자력의 79.67%에 비해 낮음을 알 수 있다.

정부는 탄소중립 실현을 위해 석탄발전소 폐지 정책을 수립하고 단계적으로 시행하고 있다. 제11차 전력수급기본계획에 따르면 2024년 기준 석탄 발전량 비중 28.1%에서 2038년 10.3%, LNG는 28.1%에서 11.1%로 축소할 계획이다. 재생에너지의 발전량은 2024년 10.2%에서 2038년 32.9%로 확대하겠다는 계획도 포함되어 있다.

Figure 1에서 보는 바와 같이 재생에너지의 비중이 21.9%인 2030년 전력계통 안정성 확보를 위해 석탄과 LNG 발전이 큰 역할을 하고 있다. 2038년 재생에너지 비중을 2024년 대비 10% 이상 확대하면서 동시에 석탄과 LNG 발전량을 각각 18% 정도를 감소시켜야 하는 어려운 과제에 직면하는 것이다. 석탄은 발전원 중 가장 많은 양의 온실가스를 배출한다. LNG는 석탄에 비해 친환경이라고는 하나, 온실가스 배출량은 석탄의 절반 정도로 평가되고 있다. 두 종류의 화석연료 발전원을 줄여나가는 것이 탄소중립 실현을 위한 가장 시급한 과제라 할 수 있다.

AI의 급속한 발전 및 산업, 운송, 주거, 농업 등 전 분야의 전기화로 인한 급속한 전력수요 증가 대응, 탄소중립 실현 및 산업경쟁력 강화를 이뤄내야 한다. 위 의 세 가지 과제를 실현시키면서 동시에 전력계통 신뢰성 및 안정성을 향상시켜야 한다. 이는 다수의 복합적 문제를 동시에 해결해야 하는 총체적이고 중대한 도전과제라 할 수 있다.

본 연구는 위의 중대한 도전과제에 대한 정확한 해답 제시보다는 정부의 계획에 따라 폐지되는 석탄과 탄소중립을 위해 중장기적으로 비중을 줄여나갈 필요가 있는 LNG 발전을 효과적으로 대체하는 한 가지 방안을 제시하는 것을

목적으로 한다. 재생에너지의 확대를 통한 탄소중립 실현과 산업경쟁력 확보에 기여할 수 있다고 판단되는 소형모듈원전(SMR, Small Modular Reactor)의 활용 가능성을 분석하였다.

이와 더불어, 재생에너지와 소형모듈원자로(SMR) 조화를 기반으로 안정적이고 경제적인 친환경 에너지 믹스를 구현하는 미래형 에너지 자립도시인 SMR 스마트넷제로시티(SMR Smart Net-zero City) 모델을 소개한다.

2. SMR 활용 필요성과 의미

2.1 글로벌 에너지 패러다임의 전환

21세기 AI 산업 경쟁의 중심축이 빠르게 이동하고 있다. 과거 반도체, 알고리즘, 데이터로 대표되던 AI 경쟁이 이제는 에너지 확보 경쟁으로 전환되고 있다. AI 산업의 폭발적 성장과 함께 데이터센터의 전력소비는 도시 전체 수준을 넘어섰다. 2010년대 중반 GPU 기반 AI 학습이 확산되면서 데이터센터 규모는 면적이 아니라 전력용량(MW, GW)으로 정의되기 시작했다. OpenAI, Google, Microsoft 등 빅테크들은 이미 5~7 GW급의 초대형 AI 데이터센터를 추진하고 있다. 이는 단일 산업시설로서 전례 없는 규모로 AI 데이터센터만 전체 전력의 8% 이상을 차지할 것으로 예측되고 있다. 이러한 변화는 단순한 에너지 수요 증가가 아니라, 산업 전체의 경쟁력이 안정적 에너지 확보에 좌우된다는 것을 의미한다.

이제 AI 경쟁의 본질은 반도체·알고리즘 성능이 아니라, 누가 안정적이고 무탄소 전력을 대규모로 공급할 수 있는가의 문제로 귀결되고 있다. 이는 곧 “AI 경쟁 = 에너지 경쟁”이라는 등식으로 정리될 수 있다. 또한, 산업, 운송, 주거, 농업 등 다방면의 전기화로 인해 전력수요는 지속적으로 증가할 것으로 예상된다. 미 에너지부 산하 National Energy Technology Laboratory가 전망하고 조사한 결과^[5]에 따르면, 2050년을 기점으로 세계 인구증가는 정체기로 접어드는 반면, 에너지 수요는 지속적으로 급격히 증가할 것으로 예상되고 있다. 인류의 풍족하고 편리한 삶과 산업 경쟁력 향상을 위해 에너지 소비는 지속적으로 증가한다는 것이다.

이렇듯 안정적 에너지 확보는 국가 산업발전의 필수조건

이 되었다. 재생에너지는 전력생산의 간헐성, 효율성 등 구조적 문제를 갖고 있어, 이의 확대로 만으로는 폭증하는 에너지 수요에 대응이 어려울 것으로 판단된다. 재생에너지의 근원적 한계를 합리적으로 보완하여 재생에너지의 안정적 확대에 기여할 수 있는 에너지원으로 원자력, 특히 SMR이 주목받고 있다.

2023년 제28회 유엔기후변화협약 당사국 총회에서 미국, 유럽, 한국 등 22개국이 탄소중립 실현을 위해 2050년까지 원자력 용량을 3배 확대하기로 선언하였다. 또한, 2024년 원자력 정상회의에서는 EU 등 38개국이 원전 확대 이행 선언을 하였다. 2024년 9월에는 뱅크오브아메리카, 골드만삭스 등 14개의 글로벌 메이저 금융기관들이 원자력 확대에 대한 지지 및 금융지원 선언하였다. 미국과 유럽을 중심으로 정부 차원의 원자력 분야 각 종 지원 정책들도 이어지고 있다.

또한, AI 경쟁의 중심에 있는 미국의 빅 테크들도 원자력에 직·간접적인 투자가 이어지고 있다. Google, Microsoft 등은 재생에너지 활용 확대를 주도한 기업들이지만 AI 경쟁이 에너지 경쟁으로 전환되면서 원자력 활용을 적극 추진하고 있다. 2014년부터 RE100 캠페인을 주도해 온 국제적인 비영리 단체인 The Climate Group는 RE100을 보완하는 24/7 CFE 캠페인을 발표하고, 세계 각국 정부 및 기업들의 동참을 위한 다양한 활동을 진행하고 있다.^[6] 24/7 CFE는 UN이 제시하고 주도하는 캠페인으로 원자력을 포함하기 때문에 RE100을 이끌어온 The Climate Group도 원자력의 필요성을 인정한 것이라 볼 수 있다. 화석연료를 배제한 재생에너지와 원자력 조화 기반의 SMART Energy Mix의 필요성이 전 세계적으로 높아지고 있다.

2.2 SMR의 활용 가능성과 기대효과

원자력, 특히 SMR은 AI 패권 전쟁 심화, 산업 전반의 전기화 확대로 급증하는 전력수요 대응과 더불어 화석연료 대체의 가장 합리적인 수단으로 인정받고 있어 글로벌 시장의 폭발적 성장이 예상된다.^[7] 글로벌 SMR 시장 선점과 점유율 확대를 위해 세계적으로 100종 이상의 SMR 모델이 개발되고 있고, 사업화 경쟁이 심화되고 있다. 해외 주요국들은 정부 및 국회 차원의 정책·예산 측면의 지원을 통해 글로벌 SMR 시장 선점을 위해 노력 중이다.

SMR은 일반적으로 핵분열 반응에서 나오는 에너지를 활용하여 열과 전기를 생산할 수 있는 전기출력 300 MWe 이하의 원자로를 일컫는다.^[8] SMR은 모듈식 제조 공정 및 공장 생산의 이점과 함께 이동성, 용량 확장성을 고려하여 설계된다. 모듈형 제작/건설 방식, 혁신제조 기술의 전면 적용 등으로 건설공기 단축 및 단일 프로젝트 당 투자 비용 감소 등의 이점으로 인해 대형 원전의 단점인 투자 리스크를 크게 완화할 수 있다.

또한, 수소생산, 담수화 및 공정열 생산 등 다목적 활용성이 높아, 탈탄소 달성이 어려운 부문으로의 친환경 에너지 공급이 가능하여 탄소배출 저감 효과도 높다. 또한, 다수의 SMR 노형은 출력 증발 및 감발, 운전시간 및 정지시간 특성에 있어 석탄 및 LNG 발전과 유사한 부분이 많다. 이러한 기능적 유사점들로 인해 SMR이 석탄 및 LNG 발전소를 효과적 대체하고, 재생에너지의 안정적 확대를 통해 탄소중립 가속화를 기여할 수 있다.

안전성에 있어서는 혁신적 안전 기술인 완전 피동 안전 설계, 일체형 설계 등을 전면 적용하여 획기적으로 향상되어 높은 공공 수용성이 기대된다. 또한, 산업단지 등의 수요지 인근에 건설로 대규모 송전망 건설이 요구되지 않으며, 전력 생산 이외에 다목적 활용으로 에너지 생산 효율성을 높일 수 있다. 이는 분산형 에너지원으로서의 활용도가 높아지는 것이다. 이러한 SMR의 특성을 고려하여 2024년도에 국회를 통과한 분산에너지 활성화 특별법에도 SMR이 포함되었다.^[9] 재생에너지와 SMR 조화를 통해 경제적인 친환경 에너지 생산 및 안정적인 공급으로 산업경쟁력 강화에 기여할 것이라 판단된다.

2.3 SMR Smart Net-zero City 모델

급격한 도시화와 디지털 전환은 도시의 구조와 기능을 근본적으로 변화시키고 있다. 교통, 에너지, 환경, 주거, 복지 등 다양한 문제가 복합적으로 얽혀있어 기존의 행정 중심적 도시관리 방식으로는 효율적 대응이 어렵다. 이에 따라 데이터와 첨단기술을 기반으로 도시의 운영 효율성과 시민의 삶의 질을 동시에 향상시키는 스마트 시티의 필요성이 높아지고 수요도 증가하고 있다.^[10]

스마트시티에 대한 수요는 단순한 기술적 혁신을 넘어, 지속가능한 도시 생태계 구축이라는 시대적 과제에서 비롯

된다. 인공지능, 사물인터넷, 빅데이터 등 4차 산업혁명 기술의 발전은 도시 인프라를 실시간으로 모니터링하고 최적화 할 수 있는 기반을 제공한다. 하지만, 이러한 기술적 진보만으로는 도시의 에너지·환경 문제를 근본적으로 해결하기 어렵다. 결국 스마트시티의 지속가능발전을 위해서는 에너지 공급의 안정성과 친환경성을 동시에 확보해야 한다.

이러한 배경에서 재생에너지와 SMR의 조화 기반 친환경 스마트 에너지 믹스가 중요하다고 할 수 있다. 두 친환경 에너지원이 상호보완적 결합을 통해 스마트시티의 에너지 자립성과 친환경성을 동시에 달성하는 것이 SMR 스마트넷제로시티(SSNC)의 비전이다. SSNC는 에너지 관제의 최적화로 도시가 필요로 하는 모든 종류의 친환경 에너지를 경제적인 비용으로 공급함으로써 지속가능한 도시 발전과 탄소중립을 동시에 실현하게 만드는 새로운 도시의 패러다임이다.

3. 혁신형 SMR 설계특성

혁신형 소형모듈원자로(i-SMR)는 대한민국이 글로벌 탄소중립을 위한 에너지 전환에 대응하기 위해 개발 중인 차세대 원자력 시스템이다. 세계적으로 안정적 전력공급과 온실가스 감축을 동시에 달성하기 위한 해법으로 SMR이 주목받는 가운데, i-SMR은 한국이 독자 기술로 개발하는 국가 전략형 원전 기술이다. “Safety by Design(설계단계부터의 안전)” 철학 아래 복잡한 구조를 단순화하고 완전피동 안전계통을 적용함으로써, 근본적인 안전성 강화와 운전 효율 향상을 달성하였다. 이러한 기술 혁신은 단순한 원자로 개발을 넘어, 국민 신뢰 회복과 에너지 기술 주권 확보라는 상징적 의미를 지닌다. i-SMR은 모듈 확장형 설계로 다양한 입지와 수요에 맞게 적용이 가능하며, 분산형 전원으로서 산업단지·스마트시티·데이터센터 등에도 안정적으로 전력을 공급할 수 있다. i-SMR은 안전·경제·환경의 조화를 이끄는 미래형 에너지 전략 기술이다. 다음 절에서는 그 핵심 설계특성과 기술적 차별점을 항목별로 살펴보고자 한다.

3.1 구조 및 통합형 시스템 구성

i-SMR은 모든 주요 1차 계통 기기를 Fig. 2 처럼 하나

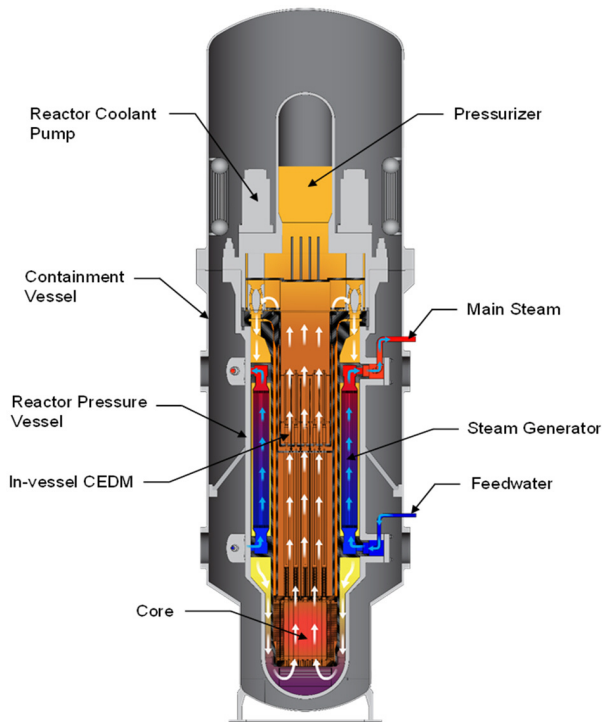


Fig. 2. Structural configuration and coolant flow path of the i-SMR

의 Reactor Pressure Vessel(RPV) 내에 통합하였다. 증기 발생기(Helical Once-Through Type), 냉각재펌프(Vertical Canned Motor RCP), 제어봉구동장치(IV-CRDM)가 용기 내부에 배치되어 대구경 배관이 완전히 사라졌다. 통합 일체형 설계는 냉각재 누설경로를 물리적으로 차단하고 계통 부피를 감소시켜 열수력 안정성을 향상시킨다. 증기발생기는 나선형 전열관으로 이루어진 구조로서 전열면적당 체적비가 기존 U-관형보다 20% 이상 크며, 증기 품질의 균일성과 응답속도를 보장한다. 냉각재펌프는 축동부가 없는 캔드모터 일체형으로, 냉각재 누설 위험이 없고 순환계통이 불필요하다.

3.2 노심 및 연료 설계

i-SMR의 노심은 69개의 17×17 연료집합체로 구성되며, 농축도 5 wt% 이하의 UO₂ 연료를 사용한다. 무봉산 운전을 적용하여 냉각재의 화학적 안정성을 확보하고, 가연성 흡수봉을 이용해 장기 출력 평형을 유지함으로써 제어봉 조작이 단순화되고 냉각재 화학관리 비용이 크게 줄어든다. 또한 보론 희석사고 및 냉각재 응력부식균열(PWSCC)

위험을 근본적으로 제거하며, 음의 온도계수에 의한 자연 안정성이 향상된다. 연료는 가돌리늄이 첨가된 UO₂로 구성되어 축·반경방향 출력 분포를 평탄화하고, 믹싱 베인 그리드를 통해 냉각수 혼합과 열적 여유도를 확보한다. 연료 연소도는 최대 62 GWd/MTU, 24개월 주기 운전을 기준으로 설계되어 효율성과 경제성을 동시에 높인다.

3.3 피동안전계통 및 열수력 거동

i-SMR은 외부 전원이나 운전원 개입 없이 장기간 냉각이 가능한 3중 완전피동 안전계통(PECCS, PAFS, PCCS)을 적용하였다. 세 계통은 서로 다른 열전달 메커니즘을 통해 단계적으로 작동하며, 어떠한 비정상 상황에서도 안정적인 열 제거 기능을 유지한다.

먼저 PECCS는 증기압력 차와 중력에 의한 자율 순환 구조로 노심 초기 냉각을 담당한다. 냉각재 손실 사고 발생 시에도 자연주입이 이루어져 노심 열을 신속히 제거한다. PAFS는 이차측 증기발생기와 응축기를 이용해 증기-응축-중력 순환을 형성하며, 전원 상실 시에도 잔열을 지속적으로 방출한다. PCCS는 격납건물 외벽 열교환기를 통해 복사·대류 방식으로 열을 방출하고, 내부 수증기를 응축시켜 장기 냉각을 유지한다.

이 세 계통은 상호 보완적으로 작동하여, 외부 및 내부 비상전원 공급이 완전히 상실되더라도 72시간 이상 핵심 설비 냉각이 가능하며, 이후에도 장기 안정 상태를 유지할

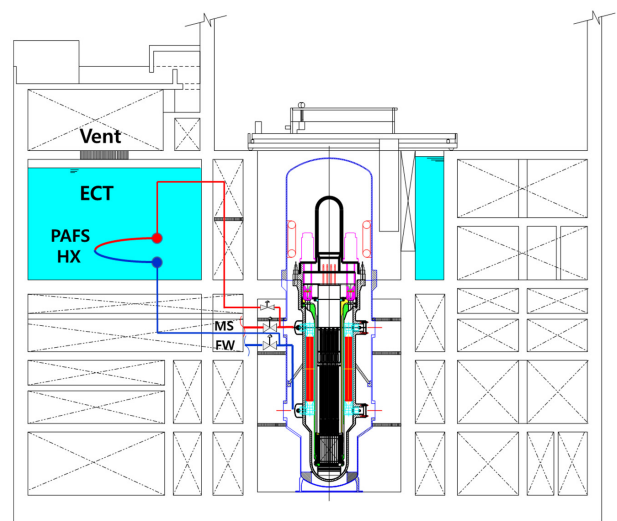


Fig. 3. Schematic diagram of the PAFS

수 있다. 이를 통해 i-SMR은 외부 전원 의존도가 0에 가까운 완전 피동형 열수력 안정성을 확보하였으며, 세계 최고 수준의 안전성($CDF \leq 1 \times 10^{-9}/yr$)을 달성하도록 설계되었다.

3.4 탄력운전 성능 및 경제성

i-SMR은 Fig. 4와 같이 20~100% 출력 범위에서 5%/min 속도로 부하추종(load-following) 운전이 가능하며, 재생에너지 변동성에 효율적 대응을 통해 재생에너지의 안정적 확대에 기여할 수 있다. 기존 대형 원전이 정격 출력 근처의 완만한 조정만 가능했던 것과 달리, i-SMR은 10% 단위 출력 단계 변동과 급격한 램프(5%/min) 운전이 가능해, 태양광·풍력 발전의 간헐적 변동을 실시간으로 보정할 수 있다.

이러한 성능은 무봉산 노심과 정밀 제어 가능한 냉각재 순환계통 덕분에 구현된다. 봉산 농도 변화 없이 가연성 흡수봉과 제어봉을 이용한 반응도 제어가 가능해, 화학적 지연 없이 즉각적인 출력 조절이 가능하다. 냉각재 유량과 증기발생기 압력, 터빈 제어밸브 개도를 통합적으로 제어함으로써, 부하변동 시에도 열수력적 안정성을 유지한다.

이를 통해 i-SMR은 단순한 발전소를 넘어 전력·수소·열의 융합적 에너지 허브로 기능하며, 재생에너지 출력 저하시 즉시 보완하고, 잉여전력은 수전해 설비로 공급해 수소를 생산하거나 열저장 시스템으로 전환하여 전체 시스템의 효율을 극대화한다.

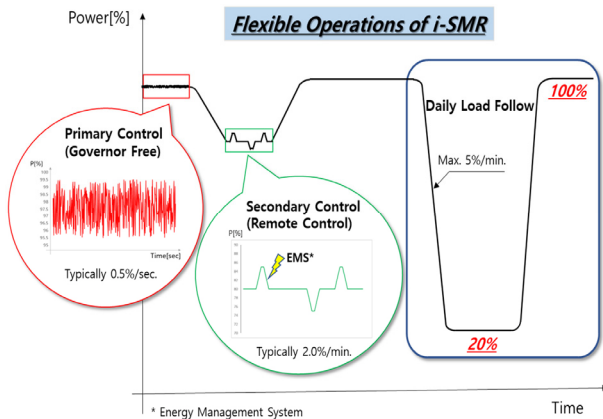


Fig. 4. Operational flexibility and load-following capability of the i-SMR

경제성 측면에서도 i-SMR은 모듈 단위 제작·조립(Modular Construction) 방식을 통해 건설 기간 단축 및 균등화 발전 단가(LCOE) 약 65 \$/MWh 수준을 목표로 한다.^[11] 이러한 경제성은 공장 제작률 향상, 현장 공정 단축, 표준화된 다중 모듈 통합제어 시스템 등을 통해 실현된다.

따라서 i-SMR은 탄소중립 시대의 유연한 전원(flexible baseload)으로서, 안정적 전력공급·경제성·재생에너지 연계 운전성을 모두 확보한 새로운 에너지 시스템 모델로 평가된다.

4. SMR Smart Net-zero City (SSNC)

4.1 운영 개념 및 시스템 구성

SSNC는 재생에너지와 SMR의 조화를 통해 도시 단위에서 에너지의 자급자족과 탄소중립을 실현하는 지능형 에너지 시스템이다. 그 핵심은 특정 전원이나 단일 관리시스템이 아니라, 전력·열·수소 등 다양한 에너지원이 최적의 조합(Smart Energy Mix)으로 운영되도록 설계된 통합 관제 체계(Integrated Optimization Control)에 있다.

이 시스템은 기상 조건, 수요 패턴, 부하 변동, 전력 가격, 저장장치 상태 등 복합 데이터를 기반으로 도시 전체의 에너지 생산·저장·소비·전환을 실시간 최적화한다. SMR이 공급하는 안정적 전력과 태양광·풍력 등 간헐적 재생에너지를 조화시켜 필요 시에는 잉여 전력을 수전해 설비로 전송해 수소를 생산하고, 남은 폐열은 지역난방 및 산업열로 재활용하는 순환형 에너지 구조를 구현한다.

이러한 최적화 관제를 통해 SSNC는 발전 효율을 극대화하고, 에너지 낭비를 최소화하며, 도시 단위에서 전력망과 열망, 수소망이 하나의 생태계로 작동하는 고도화된 스마트 에너지 인프라를 실현한다.

4.2 에너지 흐름 구조 및 최적화 메커니즘

SSNC의 에너지 시스템은 생산(Generation), 저장(Storage), 전환(Conversion), 소비(Consumption)의 4단계 순환 구조로 구성되며, 각 단계가 독립적으로 작동하는 것이 아니라 Fig. 5와 같이 통합관제체계(Integrated Optimization Control)를 통해 실시간으로 연결·조정된다. 즉, 모든 에

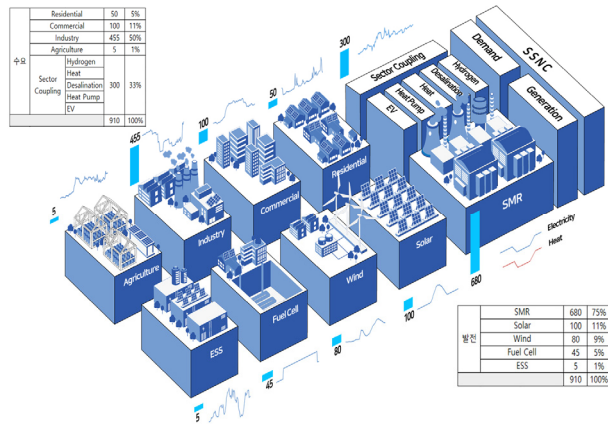


Fig. 5. SMR smart net-zero city concept



Fig. 6. SSNC energy flow and optimization structure

너지 생산원과 수요원이 하나의 유기체처럼 반응하며, 전체 시스템이 최적 효율 상태를 유지하도록 제어된다.

첫째, 생산 단계에서는 SMR이 도시의 기저부하를 안정적으로 담당하고, 태양광·풍력 등 재생에너지가 부하 변동에 따라 출력이 자동 조정된다. 기상 조건이나 부하 패턴 변화에 대응하여 각 전원의 운전 상태가 즉시 갱신되며, 실시간 전력 균형이 유지된다.

둘째, 저장 단계에서는 재생에너지의 간헐적 과잉 전력을 에너지저장장치(ESS)에 저장하거나, 수전해 설비로 전송하여 수소 형태로 전환·축적한다. SMR에서 생산되는 열에너지 또한 축열 시스템에 저장되어, 이후 지역난방 또는 산업공정 열원으로 재활용된다. 이 단계는 재생에너지의 변동성을 완충하고, 도시 내 에너지 자립률을 높이는 핵심 기능을 수행한다.

셋째, 전환 단계에서는 저장된 에너지가 수요 조건에 따라 전력, 열, 수소 등으로 자유롭게 변환된다. 수소는 연료

전지를 통해 다시 전력으로 재생산되거나, 산업·운송용 에너지원으로 활용되며, 축열된 열에너지는 냉·난방 부하나 지역 난방망을 통해 배분된다. 이 과정에서 관제 시스템은 각 에너지의 가격, 효율, 수요량을 비교 분석하여 가장 경제적이고 탄소배출이 적은 조합을 선택하도록 자동 운전한다.

마지막으로, 소비 단계에서는 생산·저장·전환을 거친 에너지가 도시의 주거·상업·산업·데이터센터 등 다양한 수요처에 공급된다. 부하 패턴, 시간대별 요금, 환경 조건 등이 지속적으로 관제 시스템에 피드백되어, 다음 운전 사이클의 최적 운전 조건이 즉시 갱신된다. 이 피드백 루프를 통해 SSNC는 예측제어 기반의 지속적 학습형 에너지 운영체제(Self-Optimizing Energy System)로 발전하게 된다.

결과적으로 SSNC의 에너지 흐름은 단순한 공급-소비의 선형 구조가 아니라, 도시 내 모든 에너지원이 상호 순환하며 최적화되는 순환형 에너지 생태계(Circular Energy Ecosystem)로 진화한다. 이 구조는 에너지 손실을 최소화하고, 재생에너지의 불안정성을 보완하며, 도시 단위의 완전한 에너지 자립과 탄소중립 실현을 가능하게 한다.

4.3 SSNC 구현을 위한 단계적 접근

SSNC의 실현은 단일 기술의 상용화가 아니라, 다양한 에너지원과 부하가 통합된 도시형 에너지 생태계가 기술적으로 구현 가능한지를 단계적으로 검증하는 과정으로 접근해야 한다. 따라서 기술 개발, 실증, 적용, 확산으로 이어지는 단계적 접근(Phased Approach)이 필수적이다. 특히, 이 과정은 현재 진행 중인 i-SMR 개발계획과 긴밀히 연계되어야 하며, i-SMR의 설계, 실증, 모듈화 개발단계에서 확보되는 데이터와 기술 성과를 SSNC 적용 모델에 반영하는 것이 중요하다.

1단계(기술 실증 단계)에서는 i-SMR과 재생에너지, 에너지저장장치(ESS), 수전해 설비 간의 연계 운전성을 실증하고, 에너지 흐름 예측과 최적 제어를 위한 핵심 알고리즘을 개발한다. 이 단계의 목표는 i-SMR 개발단계에서 검증되는 열수력 안정성, 부하추종 제어 특성, 피동안전계통 성능 데이터를 활용하여 다중 에너지원이 하나의 통합 시스템으로 안정적으로 작동할 수 있음을 실증적으로 검증하는 것이다.

2단계(적용 검증 단계)에서는 i-SMR 실증 및 표준설계

완료 시점에 맞춰 산업단지나 소규모 스마트시티 등 실제 수요지 환경에 적용 모델을 구축한다.

이를 통해 부하 변동 대응성, 폐열 재활용, 수소 병행 생산 등 i-SMR 기반 에너지 믹스의 기술적·경제적 타당성을 평가하며, 도시 단위 에너지 균형 모델을 구체화한다.

3단계(확산 및 시스템화 단계)에서는 i-SMR의 상용모델 개발 및 다중 모듈 운전 경험을 바탕으로 SSNC의 통합 운영 플랫폼을 표준화하고, 지역별 수요 특성과 산업 구조를 고려한 적용 모델을 확장한다. 이 단계는 SMR-재생에너지-수소-열의 통합 시스템을 도시 전반으로 확산시킬 수 있는 기술적 기반을 마련함과 동시에, i-SMR 개발 성과가 실제 도시 에너지 생태계 구현으로 이어지는 기술-도시 연계 프레임워크를 완성하는 과정이다.

결국 SSNC의 단계적 접근은 단기적 사업화보다는 통합 운영 신뢰성, 에너지 최적화 기술, 실증 기반 모델의 재현성 확보에 중점을 둔 체계적 검증 과정이라 할 수 있다. 특히 i-SMR의 개발 일정(표준설계 승인, 실증부지 확보, 모듈화 제작 검증 등)과 병행함으로써 향후 도시·산업 단위의 에너지 자립형 시스템으로 확장될 수 있는 실질적 토대를 마련하게 된다.

SSNC 모델은 i-SMR을 출발점으로 하되, 장기적으로 고온가스로서형(HTGR), 소듐고속냉각로(SFR), 용융염로(MSR) 등 4세대 SMR로의 확장을 통해 산업열·수소·담수화 등 다목적 활용성이 크게 확대될 것으로 기대된다. 이를 통해 SSNC는 차세대 원자로 기술 발전과 함께 진화하는 지속가능한 에너지 도시 플랫폼으로 발전할 것이다.

5. 결론

본 논문은 현재 개발되고 있는 i-SMR의 주요 설계특성 설명과 함께 재생에너지와 SMR 기반 다양한 무탄소 에너지 지원이 통합적으로 운영되는 SMR Smart Net-zero City(SSNC) 개념을 제시하였다. SSNC는 단일 발전원이 아닌, 상호 보완적인 에너지원들이 하나의 최적화된 시스템으로 작동함으로써 도시 단위에서의 에너지 자립과 탄소중립을 동시에 달성하려는 새로운 에너지 운영 패러다임이다.

i-SMR은 우수한 탄력운전 성능으로 태양광·풍력 등 간

헐적 재생에너지의 출력변동을 즉각적으로 보완할 수 있다. 이와 같은 높은 운전 유연성은 재생에너지의 발전 비중이 증가하는 상황에서 계통 안정성을 유지하고, 잉여전력을 수전해나 축열 시스템을 통해 활용할 수 있는 기반을 제공한다. 또한 i-SMR은 완전피동 안전계통을 바탕으로 외부 전원 의존 없이 장기간 냉각이 가능하므로, 도시나 산업단지 인근에도 안전하게 설치·운전할 수 있는 분산형 전원으로서의 활용성을 지닌다.

SSNC의 통합 운영 체계는 전력, 열, 수소의 생산-저장-전환-소비를 실시간으로 연계·최적화함으로써 기존의 선형적 에너지 공급 구조를 다층적 순환형 에너지 생태계로 전환시킨다. 특히 i-SMR이 제공하는 안정적 기저전력과 폐열, 그리고 재생에너지의 변동 출력을 통합적으로 관리함으로써 에너지 효율을 극대화하고, 에너지 낭비를 최소화할 수 있다. 이러한 통합 최적화 운영 모델은 재생에너지의 불안정성을 보완하면서, 지역 단위의 에너지 자립률을 높이는 핵심 플랫폼으로 기능할 수 있다.

또한 SSNC는 단순한 발전소 모델을 넘어, 산업·주거·데이터센터 등 다양한 부하를 통합 관리하는 지능형 도시 에너지 플랫폼으로 확장될 수 있다. 이는 전력망 확충 부담을 줄이고, 지역 내 분산형 전원의 자율적 운영을 가능하게 하여 분산에너지 활성화와 전력계통 유연성 확보에 기여한다. 나아가, SMR-재생에너지-수소-열의 복합적 연계는 국가 차원의 탄소중립 정책과 산업경쟁력 강화 전략에 있어 중요한 기반이 될 수 있다.

향후 SSNC의 실현을 위해서는 i-SMR 개발계획과 병행하여, 실증단계에서 확보되는 운전 데이터와 열수력 특성을 활용한 최적화 제어 알고리즘의 고도화, 통합 관제 플랫폼의 표준화, 도시 적용 모델의 지역 맞춤형 설계가 필요하다. 또한 기술적 신뢰성과 함께 사회적 수용성, 법·제도적 지원, 인프라 구축 등 다차원적 여건이 종합적으로 마련되어야 한다.

결국 SSNC는 재생에너지의 확대 과정에서 발생하는 간헐성과 계통 불안정성을 보완하고, 도시 단위에서 무탄소 에너지의 안정적 공급을 가능하게 하는 차세대 에너지 운영 플랫폼으로 발전할 것이다. i-SMR을 중심으로 한 SSNC는 단순한 기술 융합이 아니라, 지속가능한 에너지 전환의 실질적 해법을 제시함으로써 탄소중립 사회 실현과 산업경

쟁력 강화를 동시에 견인할 수 있는 새로운 패러다임으로 자리매김할 것이다.

References

- [1] Ministry of Trade, Industry and Energy (MOTIE), 2025, “The 11th Basic Plan for Long-term Electricity Supply and Demand (2024–2038)”, <https://www.motir.go.kr/kor/article/ATCLc01b2801b/70083/view>.
- [2] Shin, J.J., and Kim, C.H., 2024, “A Study on Reinforcing Technology and Industrial Competitiveness for Small Modular Reactors (2/3)”, Korea Energy Economics Institute (KEEI) Basic Research Report 24-20, Ulsan, Korea.
- [3] Park, S.J., and Shin, H.Y., 2023, “Inertia-Constrained Unit Commitment Using Net Load Pattern Generation through the DTW-based Clustering Algorithm”, *Trans. Korean Inst. Electr. Eng.*, **72**(9), 1002-1011.
- [4] Ministry of Trade, Industry and Energy (MOTIE), 2023, “The 10th Basic Plan for Long-term Electricity Supply and Demand (2022–2036)”, <https://motie.go.kr/kor/article/ATCLc01b2801b/68162/view>.
- [5] U.S. Department of Energy, National Energy Technology Laboratory (NETL), 2020, “Global Energy Outlook: Long-term Energy Demand and Population Trends”, DOE.
- [6] The Climate Group, 2024, “24/7 Carbon-Free Electricity (CFE) Campaign – Climate Group launches 24/7 CFE coalition and standards”, Accessed 27 October 2025, <https://www.granular-energy.com/insights/climate-group-247-cfe-coalition>.
- [7] Deloitte Research Center for Energy & Industrials, 2025, “Nuclear Energy’s Role in Powering Data Center Growth”, Deloitte Insights, April 9 2025, <https://www.deloitte.com/us/en/insights/industry/power-and-utilities/nuclear-energy-powering-data-centers.html>.
- [8] International Atomic Energy Agency (IAEA), 2019, “What Are Small Modular Reactors (SMRs)?”, IAEA, Accessed 27 October 2025, <https://www.iaea.org/newscenter/news/what-are-small-modular-reactors-smrs>.
- [9] Ministry of Trade, Industry and Energy (MOTIE), 2024, “Enactment of the Distributed Energy Activation Special Act Including Small Modular Reactors (SMRs)”, Press Release, June 14 2024.
- [10] World Economic Forum (WEF), 2023, “Governing Smart Cities: Use Cases for Urban Transformation”, World Economic Forum, Geneva, Switzerland, https://www3.weforum.org/docs/WEF_Governing_Smart_Cities_Use_Cases_for_Urban_Transformation_2023.pdf.
- [11] Korea Institute of S&T Evaluation and Planning (KISTEP), 2022, “Pre-Feasibility Study Report on the Innovative Small Modular Reactor (i-SMR) Technology Development Project”, KISTEP, July 28 2022, https://www.kistep.re.kr/reportDetail.es?mid=a10305070000&rpt_tp=831-003&rpt_no=RES0220220131.