

# 보고서 요약

원자력 에너지의 평화적인 이용은 20세기 과학·기술의 가장 위대한 성취 중 하나이며 의학, 안보, 에너지 분야에 도움을 주었다. 하지만, 수십 년 동안의 빠른 성장 후, 많은 선진국에서 원자력에너지에 대한 투자를 멈추었고, 원자력 에너지는 현재 세계 주요 에너지 생산의 5% 만을 구성하고 있다.

21세기에 들어, 세계는 수십억 인구에 대한 에너지 접근성 향상 및 이경제규모의 확대와 더불어 온실가스의 방출을 대폭 줄여야 하는 새로운 과제를 맞이했다. 이 보고서에서는 심층적 탈 탄소화의 대표적인 방안으로써 전력 부문을 검토했다. 대부분의 지역에서 2050 년 예상되는 전력 부하를 해결하는 동시에 탄소 배출량을 줄이기 위해서는 기존 시스템과는 다른 발전(發電)믹스 모델이 필요하다. 다양한 종류의 저탄소 혹은 무탄소 기술을 이용한 발전믹스들 가운데, 이번 분석은 원자력에너지가 저전력으로서 저탄소 기술로서 기여할 수 있음을 보였다. 원자력에너지를 발전믹스에서 배제할 경우, 심층적인 탈 탄소화의 비용은 현저하게 증가한다 (Figure E.1, 왼쪽 열 참조). 최저 비용의 포트폴리오를 구상할 경우, 원자력에너지가 상당한 점유율을 갖고 있으며, 원자력에너지의 규모가 감소함에 따라 발전비용이 급격하게 증가한다. (Figure E.1, 오른쪽 열 참조).

이러한 가능성에도 불구하고, 세계의 많은 지역에서 원자력에너지 확대 전망은 그다지 밝지 않다. 가장 핵심적인 문제는 비용이다. 최근 수십 년 동안 다른 발전(發電) 기술은 저렴해 진데 반해, 새로운 원자력 발전소의 비용은 여러 요인들로 인해 증가해왔다. 이는 원자력에너지의 잠재적 기여도를 감소시키며 심층적인 탈 탄소화 비용을 증가시킨다. 이번 연구에서는 이러한 추세의 원인과 해결방안에 대해 조사했다.

본 연구에서는 전 세계의 최근 경수로 건설 프로젝트를 조사하고, 다양한 선진 원자로의 개념, 설계 및 건설에 적용될 수 있는 최신 기술의 발전을 조사했다. 비용 문제의 해결을 위한 제안은 다음과 같다:

(1) 검증된 프로젝트 및 건설 관리 사례를 통한 신규 원자력 발전소 건설의 성공 확률 증대

최근 미국과 유럽의 원자력 건설 프로젝트에서는 예정 공사 기간 및 예산 범위 내에서 제품을 조달하는데 있어 반복적으로 실패한 건설 관리 사례가 발생했다. 이와 관련해 몇몇 시정 조치가 시급히 요구된다: (a) 건설 전 세부 설계의 상당 부분을 완료한다. (b) 입증된 공급망 및 숙련된 노동력을 사용한다. (c) 설계 과정의 초기 단계에서 제조업체 및 건축업체를 설계 팀에 통합함으로써, 발전소 시스템, 구조 및 부품이 관련 표준에 따라 효율적으로 설계되도록 한다. (d) 복수의 독립적인 협력업체를 관리하는 데 있어 입증된 전문 지식을 가진 단독 계약 관리자를 임명한다. (e) 모든 계약자가 프로젝트의 성공을 통해 얻을 수 있는 확정된 권리를 가지고 있음을 보장하는 계약 구조를 수립한다. (f) 설계 및 건설 중 예기치 않은 변화를 적기에 수용할 수 있는 유연한 규제 환경을 조성한다.

(2) 복잡하고 부지 증속적인 기존의 건설방식에서 표준화 된 발전소 제조로의 전환

신규 원자력 발전소의 자본 비용을 대폭 줄이고 건설 일정을 단축 할 수 있는 방법은 다음과 같다. 첫째, 다수의 표준화 된 기기의 배치, 특히 단일 부지에서의 배치는 각 기기의 건설로부터 상당한 경험을 얻을 수 있다. 건설 현장에서의 생산성이 낮은 미국과 유럽에서는 높은 생산성을 갖는 공장 생산을 확대하여 복잡한 시스템, 구조 및 부품을 제조하는 것을 권장한다. 공장 및 조선소에서의 모듈형 건축, 콘크리트 보강책 (예 : 강판 복합재, 고강도 철근 보강재, 초 고성능 콘크리트), 내진 기술 및 진보된 발전소 배치(예: 매립, 해양 부지 선정) 등을 포함한 최신 기술 집합체의 활용은 신규 원자력 발전소 건설 비용 및 일정에 긍정적인 영향을 줄 수 있다. 기존보다 덜 복잡한 시스템, 구조 및 부품의 제조 또는 건설 현장에서의 생산성이 높은 지역(예 : 아시아)에서는 반대로 기존 방식을 고수 하는것이 가장 비용이 적게 드는 방법일 수 있다.

모든 원자로 개념 및 설계 전반에 대하여 앞에서 언급된 권장 사항은 광범위하게 적용 될 수 있다. 비용 절감은 특히 3세대 개량형 경수로, 소형모듈형 원자로 (SMR) 및 4세대 원자로와 밀접한 관련이 있다. 설계의 표준화 및 건설 분야의 혁신이 없는 선진 원자로 기술은 다른 발전 기술보다 가격 경쟁력을 갖지 못 할 것이다.

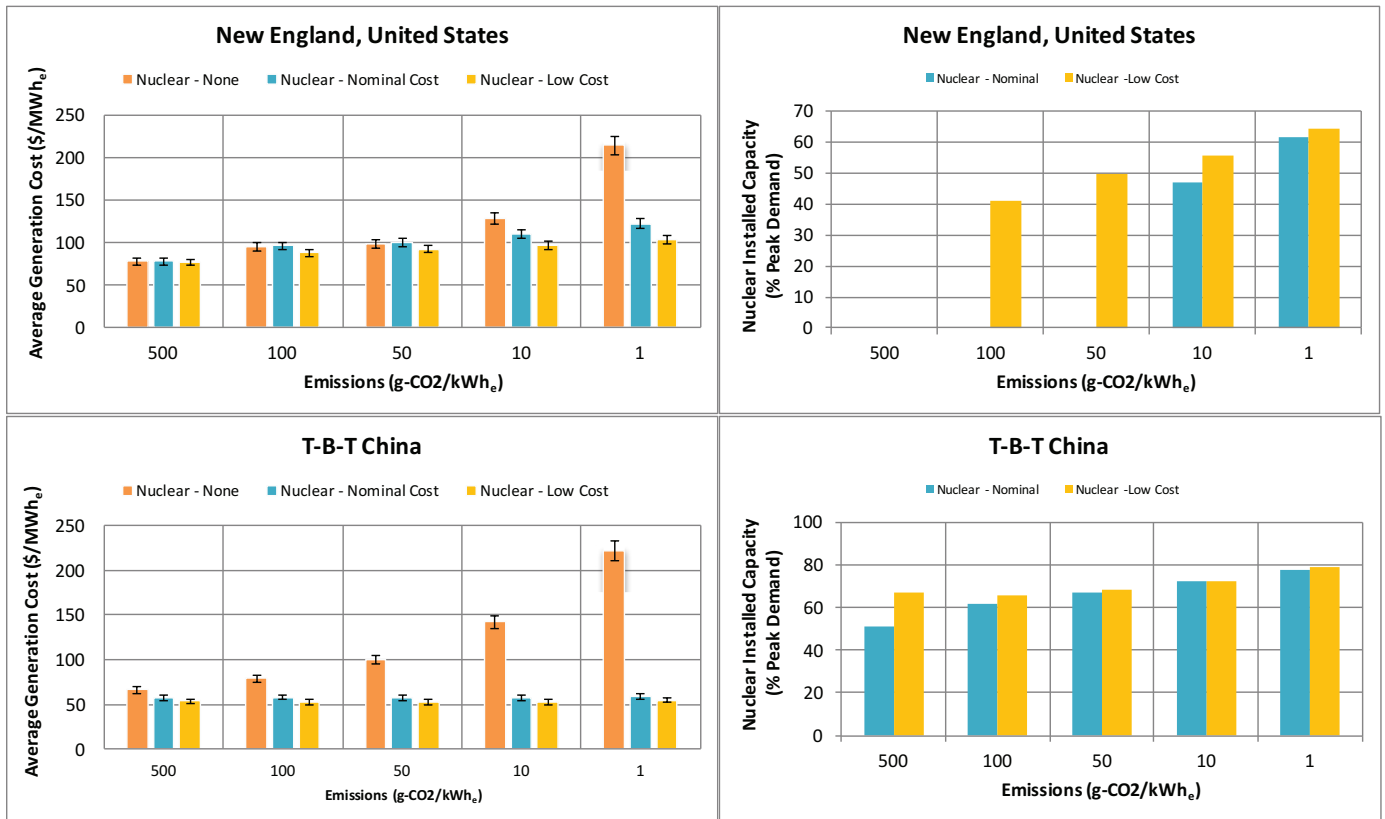
높은 비용뿐만 아니라, 기존의 2세대 원자로 중대 사고에 대한 사회적 우려는 원자력 에너지의 발전을 저해 시켰다.(e.g. 2011년 후쿠시마 사고) 이로 인해 몇몇 국가들이 탈원전 정책을 결정하게 되기도 하였다. 이러한 원자력 안전 문제를 해결하기 위해 다음 사항을 제안한다:

(3) 고유 및 피동 안전성을 갖는 원자로 설계로의 전환

우수한 노심 재료 (높은 화학, 물리적 안전성, 높은 열용량, 음의 궤환 효과, 핵분열 생성물 보유 특성)와 비상 발전기 및 외부 개입이 최소화된 안전 시스템 계통은 원자로 운전을 단순화하고 인적 오류의 위험성을 감소시킨다. 이러한 개선사항은 일부 3세대 원자로 설계시 이미 반영되었으며, 현재 중국, 러시아, 미국에서 건설중인 원자로에서도 나타난다. 피동 안전 설계는 중대 사고의 발생 확률을 낮춤과 동시에 사고 인근지역의 피해를 줄일 수 있다. 이러한 설계는 신규 원자력 발전소의 인허가를 유리하게 하며 선진국과 개발도상국에서의 배치를 가속시킨다. 소형 경수로(예: NuScale)와 같은 개량형 원자로 및 4세대 원자로 개념(예: 고온 가스로, 소듐 고속 냉각로)은 앞에서 언급된 특성을 가지고 있으며 상업적으로 이용될 준비가 되었다. 또한, 이 연구에서 수행된 미국 및 국제 규제 환경평가는 현재의 규제 시스템이 선진 원자로의 인허가에 있어 충분히 융통적임을 시사한다. 기존 규제 체계의 개선은 인허가 검토의 효율 및 효과를 더욱 향상 시킬 수 있다.

<sup>1</sup> 원자로 설계는 주로 네 세대로 분류된다. 1950년대 후반과 1960년대에 건설된 최초의 상업용 원자로를 1세대 시스템으로 분류된다. 2세대 시스템은 1970년에서 1990년 사이에 건설된 상업용 원자로를 포함한다. 3세대 원자로는 2세대 시스템에서 혁신적으로 발전된 설계를 포함한 상업용 원자로이다. 4세대는 오늘날 개발되고 있는 물 이외의 냉각제를 사용하는 선진 원자로 설계를 일컫는다.

Figure E.1 미국 뉴 잉글랜드 지역과 중국의 천진 - 베이징 - 당산 (TBT) 지역의 탄소 배출량 규제 (gCO<sub>2</sub>/kWh<sub>e</sub>)에 따른 2050년 예상 평균 발전 비용 (\$ / MWh<sub>e</sub> 단위) (좌) 및 원자력 시설 용량 (첨두 수요량 대비 %) (우). 세 가지 시나리오: (a) 원자력 비 허용 (b) 명목상 순건설 비용에서 원자력 허용 (뉴 잉글랜드에서 \$5,500 per kWe, T-B-T에서 \$2,800 per kWe) (c) 개선된 순건설 비용에서 원자력 허용 (뉴 잉글랜드에서 \$4,100 per kWe, T-B-T에서 \$2,100 per kWe). 시뮬레이션은 GenX라는 MIT 시스템 최적화 도구로 수행되었다. 주어진 전력 시장에 대해 필요한 입력 값은 모든 발전소 (원자력, 풍력, 태양, 화력)에 대한 시간당 전력 수요, 시간 별 날씨 패턴, 경제적 비용 (자본, 운영 및 연료)과 모든 입력 값의 변화이다. GenX 시뮬레이션은 각 시장에서 평균 시스템의 전력요금을 최소화하는 발전믹스를 식별하는 데 사용되었다. 강력한 탄소 제약 조건 하에 비핵화 시나리오에서 확인되는 비용의 상승은 에너지 저장장치의 증축 및 건설 비용에 기인한다. 변동성을 갖는 신재생에너지 기술에 전적으로 의존하는 경우 이러한 에너지 저장장치는 필수적이다. 오늘날 전세계 에너지원의 평균 이산화탄소 배출량은 500 gram/kWh이다. 2017년 국제에너지기구 (International Energy Agency)에서 발표된 기후변화 안정화 시나리오에 의하면, 지구 온난화를 현재기준 평균 2°C 안쪽으로 제한하기 위한 전력 부문에서의 탄소 배출 목표량은 2050년 까지 10~20 gram/kWh, 2060년 까지 2 gram/kWh 이다.



마지막으로, 원자력 에너지의 이점을 살리기 위해서 정책결정자들에게 다음과 같은 사항이 요구된다:

(4) 탈탄소화 정책을 통한 저탄소 기술의 고유 경쟁력 향상

원자력 혁신 개발의 투자자들은 해당 투자를 통한, 이산화탄소 배출절감의 효과를 비롯한 외부요인들 만큼이나, 이윤의 회수가 중요하다. 또한 원자력 에너지를 배제하는 정책은 원자력 기술에 대한 투자를 감소시킨다. 그리고 이와 같은 정책과 그로인한 투자위축은 저탄소화의 비용을 증가시키며 기후 변화 억제에 관한 목표 달성을 현실적으로 어렵게 한다. 이에 따라 탄소배출비용을 전력요금에 포함시키는 방식으로 에너지원을 평가한다면, 여타의 저탄소 에너지 기술들과 비교하여 원자력이 공정한 기준하에 평가받을 수 있다. 그리고 현재 운영중이거나 계획중인 원자력 발전은 경쟁에서 큰 이점을 가지고 있는 기술이다.

(5) 정부 주도의 발전소 부지 마련 및, 인허가에 기반한 기업의 실증로 시험

발전소 부지는 기업이 실증로 시험으로 선택한 다양한 원자로 형태를 수용 할 수 있어야 한다. 정부는 적절한 지원과 감독 (안전 규약, 설비, 환경평가 및 승인, 핵연료주기 서비스)을 제공하며 모든 시험에 함께 직접 참여해야 한다.

(6) 선진 원자로의 실증로 시험 및 상업적 이용을 위한 재정 지원 계획 수립이 필요하다: (a) 규제 인허가 비용의 분담, (b) 연구 및 개발 비용의 분담, (c) 세부적 기술 목표 달성의 지원, (d) 초기 신규 실증로 및 새로운 유형의 원자로에 대한 지원

본 연구에 대한 자세한 논의는 연구 보고서의 개관 및 본문에 수록되었으며, 각 장은 원자력 에너지의 가능성, 원자력 발전소의 비용, 선진 원자로 기술의 평가, 원자력 산업의 비즈니스 모델과 정책, 원자로 안전 규제 및 인허가의 다섯 가지 주제로 구성되었다.

