

함께 만드는 에너지 이야기

ENERGY



한국에너지정보문화재단
Korea Energy Information Culture Agency



함께 만드는 에너지 이야기



한국에너지정보문화재단
Korea Energy Information Culture Agency

CONTENTS

■ ■ ■ ■

1	원자력의 느낌	10
	추연석 한국원자력연구원 다목적소형연구로계통개발부	
2	나는 진실로 원자력이 두려웠다	30
	유서율 중앙대학교 ICT안전학과 석사과정	
3	AI 기반 4차 산업혁명을 이끌	46
	대한민국 리더십 에너지, 원자력	
	장문희 서울대학교 원자력미래기술정책연구소 원자력정책센터 연구위원 포항공과대학교 첨단원자력공학부 겸임교수	
4	소형모듈원자로 (SMR) 개발 동향과	76
	SMR 방사선비상계획 관련 안전규제 연구개발 동향	
	조건우 KAIST 원자력및양자공학과 초빙교수	
5	바람의 나라 덴마크가 원자력을? 대한민국과 함께!	94
	정용훈 KAIST 원자력및양자공학과 교수	

6 세계 원자력에너지 시장 분석 및 전망 112

조일현 에너지경제연구원 미래전략실 실장

정귀희 에너지경제연구원 해외에너지동향분석실 연구원

7 탄소 없는 에너지가 온다! 청정수소의 비밀 134

김동국 SK Innovation E&S 수소사업기획팀 매니저

8 가정주부가 전하는 전기요금 절약 꿀팁 154

김미향 가정주부

9 2025 Mandate for Leadership 170

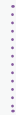
헤리티지 재단 트럼프 행정부 집권시 활용될 수 있는 로드맵('24.12)

부록 2025년 상반기 에너지 국민인식조사 결과보고서 186

발간사



한국에너지정보문화재단
대표이사
이주수



국민의 이해와 참여를 바탕으로 한
"에너지 참여 문화"의 형성과 정착은 지속 가능한 에너지 전환의
핵심입니다. 정확한 정보 제공과 열린 소통은 에너지에 대한
사회적 수용성을 높이는 첫걸음이 될 것입니다.

올해로 세 번째를 맞이한 국민 참여를 기반으로 한 에너지 정보 책자는 다양한 계층의 국민과 에너지 현안을 함께 공유하고, 보다 깊이 있는 소통의 기반을 마련하고자 2024년부터 발간해 오고 있습니다.

전 세계가 탄소중립이라는 공동의 목표를 향해 나아가고, 에너지 안보의 중요성 또한 날로 커지고 있는 지금, 에너지 정책의 실효성을 높이기 위해서는 에너지에 대한 정확한 이해와 열린 대화가 어느 때보다 절실한 시점입니다. 이에 본 책자는 국민의 자발적인 참여를 바탕으로 국민 눈높이에 맞춘 원자력 및 에너지 관련 정보를 쉽고 명확하게 전달하고자 기획되었습니다. 다양한 에너지 현안을 공유하고 사회적 공감대를 넓혀가는 소통의 마중물이 되기를 기대합니다.

올해에는 제11차 전력수급기본계획 발표, 재생에너지 확대, 전력망 인프라 확충, 고준위방사성폐기물 관리 등 굵직한 에너지 현안들이 이어지고 있습니다. 이러한 변화의 흐름 속에서 우리 재단은 ‘에너지와 국민을 잇는 매개체’로서의 역할을 충실히 수행하고자 노력하고 있습니다.

국민의 이해와 참여를 바탕으로 한 “에너지 참여 문화”의 형성과 정착은 지속 가능한 에너지 전환의 핵심입니다. 정확한 정보 제공과 열린 소통은 에너지에 대한 사회적 수용성을 높이는 첫걸음이 될 것입니다. 이번 책자의 제작에 귀한 원고를 보내주신 모든 필진 여러분께 깊은 감사의 말씀을 드리며, 정성껏 심사와 검수를 맡아주신 편집위원회도 진심으로 감사드립니다.

국민과 함께 만드는 에너지 이야기 책자가 앞으로도 더 많은 국민과 함께 소통하는 열린 공간으로 발전해 나갈 수 있도록 지속적인 관심과 참여를 부탁드립니다.

2025. 6

한국에너지정보문화재단 대표이사 **이주수**

1

원자력의 느낌



한국원자력연구원
다목적소형연구로계통개발부
추연석

돔 구조물의 외벽에 친근하게 갈매기나 돌고래 그림을 그려놓아도 사람들은 가까이 하려 들지 않는다. 사람들은 원자력에 대해 긍정적인 시선보다는 두렵고 무서운 느낌을 가지고 경계심을 품는다. 당연한 현상이다. 과거의 충격적인 사건들과 원자력이 가지고 있는 엄청난 에너지의 위력을 떠올려 본다면 이해할 수 있는 반응이다. 나처럼 원자력을 연구하는 사람들조차도 때로는 원자력에 대해 두려움을 느끼는 게 사실이니까.

내가 원자력을 연구하는 과학자임에도 내 자녀들에게 원자력을 제대로 이해시키지 못했다는 자책을 하며, 잠시 생각에 잠겼다. “어떻게 하면 원자력을 이해하게 만들 수 있을까?”라는 질문이 머리를 떠나지 않았다. 이 질문은 4박 5일의 7번 국도 여행을 끝낼 때까지 내 머리를 떠나지 않았고 나만의 방식을 찾게 되었다. 나는 아이들에게 아주 엉뚱한 질문을 세 개 던져보기로 했다.



'원자력'이라는 단어를 들으면 어떤 느낌일까?

2023년 여름, 부산에서 고성까지, 동해안의 처음과 끝을 남북으로 잇는 7번 국도를 따라 가족여행을 할 때였다. 7번 국도에는 남해안의 영광을 제외하고 우리나라의 모든 원자력발전소가 위치한다. 국도를 따라 올라가면서 간간히 보이는 원자력발전소를 보며 나는 가족들에게 가까이 가보지 않겠냐고 제안했다. 원자력발전소의 돔 구조물이 주는 압도적인 크기를 직접 느껴보고 싶었기 때문이다. 원자력발전소를 내가 연구하고 개발하는 대상이 아니라 일반 대중의 시선으로 한 번쯤 바라보고 싶기도 했다. 하지만 가족들은 모두 다 고개를 절레절레 흔들었다. 저 원자력발전소 안에도 직원들이 있고 주변에도 주민들이 살고 있다며 원자력발전소가 위험한 곳이 아니라고 이야기해 보았지만, 돌아온 대답은 “싫어요”였다. 첫째는 영화 판도라(2016.12. 개봉) 생각나서 폭발이 일어날까 봐 무섭다고 했고, 아내와 막내는 잘 모르지만, 방사선이 무섭다고 했다.

돔 구조물의 외벽에 친근하게 갈매기나 돌고래 그림을 그려놓아도 사람들은 가까이하려 들지 않는다. 사람들은 원자력에 대해 긍정적인 시선보다는 두렵고 무서운 느낌으로 경계심을 품는다. 당연한 현상이다. 과거의 충격적인 사건들과 원자력이 가지고 있는 엄청난 에너지의 위력을 본다면, 나처럼 원자력을 연구하는 사람들조차도 때로는 원자력에 대해 두려움을 느끼는 게 사실이니까.

내가 원자력을 연구하는 과학자임에도 내 자녀들에게 원자력을 제대로 이해시키지 못했다는 자책을 하며, 잠시 생각에 잠겼다. 어떻게 하면 내 아이들에게, 또 일반 대중들에게 원자력을 온전히 소개할 수 있을까라는 질문이 머리를 떠나지 않았다. 이 질문은 4박 5일의 7번 국도 여행을 끝낼 때까지 내 머리를 떠나지 않았고 나만의 방식을 찾게 되었다. 나는 아이들에게 아주 엉뚱한 질문을 세 개 던져보기로 했다.

첫 번째 질문은 막내가 무섭다고 말한 ‘방사선’에 대한 것이었다. ‘우리가 원자력 발전소 근처에만 가지 않으면 방사선을 피할 수 있겠지?’라고 나는 물어봤고, 막내는 당연하다는 듯이 “물론이지!”라고 큰 소리로 대답했다. 아내도 뭘 그런 걸 묻냐는 듯이 나를 쳐다봤다. 이렇게 사람들은 방사선이 원자력발전소와 같은 특수한 곳에서만 나오는 것이고, 원치 않는 나쁜 물질이나 현상이라서 피해야 한다고 느낀다. 내가 “그건 절대 불가능해. 우리는 단 한 번도 방사선을 피해 본 적이 없어.”라고 말하자 다들 의아한 표정을 지었다. 나는 방사선은 어디에나, 어느 순간에나 존재하고 우리는 방사선과 함께 살아가고 있다고 설명을 이어갔다. 그리고 이 방사선은 나쁘지만 한 것이 아니라 우리에게 아주 유익하다고도 덧붙였다. 아내와 아이들이 더 설명을 요구했지만, 그 설명은 잠시 뒤로 미뤄두겠다고 하고 다음 질문을 던졌다.

두 번째 질문은 ‘ChatGPT와 같은 인공지능이 발달한 시대에 꼭 필요한 건 무엇일까?’였다. 개발자가 꿈인 둘째는 GPU라고 자신에 차서 말했다. 이 답은 어떤 인공지능이냐에 따라서 맞는 말일 수도, 틀린 말일 수도 있어서 나는 50점짜리라고 했다. 그리고 곧바로 내가 생각하는 답은 전기라고 알려주었다. 인공지능이 많아질수록 전기는 점점 더 많이 필요하게 될 거라고, 우리는 지금보다 엄청나게 많은 전기를 만들어내야 하는 시대를 살게 될 거라고 설명했다. 원자력발전소는 그런 전기를 싸고 안정적으로 만들어주는 소중한 시설이라고 소개했다. 개발자를 꿈꾸는 둘째에게는 개발자도 좋지만, 전기나 에너지 전문가가 되는 것도 인공지능 시대에 꼭 필요한 사람이니 한 번 생각해 보라고 덧붙였다.

두 개의 질문을 던지고 나니, 막연하게 방사선과 원자력발전소에 두려움을 가졌던 가족들이 조금은 원자력에 가까워진 것을 느낄 수 있었다. 이제 회심의 마지막 질문을 꺼냈다. “바다, 문화유산, 암 치료, 우주. 이 네 가지 분야에 공통적으로 필요한 기술은 무엇이라고 생각해?” 아이들은 저마다의 답을 찾기 위해 애를 썼지만, 도저히 모르겠다는 표정이었다. 공통점이라고는 찾아보기 힘든 분야들이고, 각 분야를 대표하는 학문도 연결점을 찾기 어려워 보이니까. 나도 학생 때 이 질문을 받았다면, 어떤 답도 내놓기 쉽지 않았을 것이라고 생각한다. 나는 이 질문의 답은 일부러 알려주지 않았다. 답이 하나가 아닐 수도 있으니 내 답을 미리 공개하지는 않았다. 대신 내 답을 알 수 있는 이야기를 다음 여행지로 가는 동안 들려주기로 했다.

원자력이란?

원자력을 설명하기 위해서는 먼저 원자에 대해 살펴볼 필요가 있다. 원자의 정의는 “화학 반응을 통해 더 이상 쪼갤 수 없는 물질의 단위”이다. 우리 인간을 포함한 우주의 모든 것들은 다양한 원자들의 조합으로 만들어져 있다. 하지만, 잘 상상은 되지 않는다. 나와 핸드폰이 같은 원자로 만들어져 있다는 것도 말도 안 되는 것 같다. 우리 주변의 물건들은 재료가 다 다르고, 그 물건들이 잘게 잘게 쪼개져서 아주 작은 하나의 알갱이가 된다는 것도 불가능해 보인다.

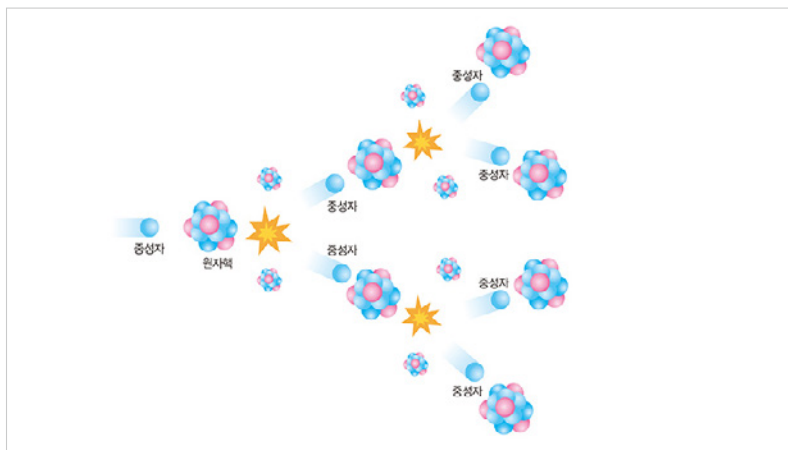
그래서 나는 학생들에게 원자를 이렇게 설명한다. 여러분이 다니는 학교를 한번 나눠 봅시다. 먼저, 1학년에서 6학년까지로 나눌 수 있습니다. 각 학년은 다시 여러 개의 반으로 나눌 수 있습니다. 각 반은 다시 모둠으로 나눌 수 있습니다. 이 모둠이 바로 원자라고 설명한다. 하나의 초등학교를 구성하는 가장 작은 단위인 모둠처럼, 나를 포함한 모든 것들은 원자라는 가장 작은 단위로 구성되어 있다.

그런데, 이 모둠을 보면 몇 가지 특징이 있다. 모둠에는 친구가 한 명 더 들어오기도 하고, 나가기도 한다. 모둠의 상태가 변한다. 담임선생님이 모둠을 두 개로 나누기도 한다. 모둠이 쪼개졌다. 담임선생님이 두 개의 모둠을 하나로 만들기도 한다. 모둠이 합쳐졌다. 그리고 모둠에 친구가 들어오거나 나가면 아이들은 환호성을 지르거나 아쉬워한다. 모둠이 쪼개지면 아쉬워서 투덜거린다. 모둠이 합쳐지면 신나서 재잘거린다. 어찌 됐든 모둠의 아이들은 시끄럽게 떠든다. 이 특징들은 원자에서도 똑같이 일어난다. 원자의 상태가 변하거나, 쪼개지거나, 합쳐지는 현상으로 과학 용어로는 방사성 붕괴, 핵분열, 핵융합이라고 한다. 나는 이 세 현상을 원자가 성질을 부리는 것이라고 표현한다. 그리고 이렇게 원자가 성질을 부릴 때는 아이들이 시끄럽게 떠드는 것과 마찬가지로 방사선과 열이 나오는데, 이 두 가지를 원자력에너지라고 정의할 수 있다. 우리는 의도적으로 원자의 이 세 가지 성질을 이용해서 열과 방사선을 얻고, 이를 이용하고 있다.

방사선은 그렇다 하더라도, 열은 원자력이 아니더라도 얻을 수 있는 방법이 많은데, 굳이 원자력을 통해 열에너지를 얻으려고 할까? 그 이유는 원자력이 가진 독특한 특징 두 가지 때문이다. 첫 번째로 원자력은 작은 양으로도 큰 에너지를 만들어 낼 수 있다. 보통 우라늄(원자력에너지를 얻을 수 있는 물질) 1그램이 석유 9드

럼, 석탄 3톤에 해당한다. 같은 양이라고 하면, 우라늄이 석유에 비해 백오십만 배, 석탄에 비해 삼백만 배 정도의 많은 에너지를 가지고 있다. 드림이나 톤에 익숙하지 않은 분들을 위해 나는 이렇게 설명한다. 만약에 우라늄과 석유, 석탄으로 만들어진 쌀밥이 있다고 상상해 보자. 그렇다면, 우라늄 쌀알 하나가 석유 햇반 1,500 그릇, 석탄 햇반 3,000그릇에 해당한다. 원자력은 아주 작은 양으로도 큰 에너지를 얻을 수 있다는 뜻이다. 두 번째로, 원자력의 핵분열은 두 배씩 증가하는 연쇄반응을 보여준다. 다시 우라늄으로 돌아와서 핵분열을 살펴보자.

[그림 1] 핵분열의 연쇄반응



출처: 한국원자력연구원

우라늄을 쪼개기 위해서는 중성자라는 원자보다 작은 입자가 필요하다. 그래서 내가 중성자 하나를 준비해서 우라늄에 강하게 충돌시켜 우라늄을 쪼갬다. 그러면 우라늄은 일반적으로 크립톤과 바륨이라는 두 개의 서로 다른 원자로 바뀌게 된다. 모듬이 두 개의 모듬으로 나뉘진 것과 같다. 그리고, 우라늄이 크립톤과 바륨이라는 원자로 나뉘지는 과정에서는 중성자도 2개에서 3개 정도가 튀어나온다. 이렇게 튀어나온 중성자는 다시 주변의 우라늄에 충돌하는 연쇄반응을 일으킨다. 새로 튀어나오는 중성자를 2개라고 가정하면, 1번의 핵분열은 2번의 핵분열을 만들어낸다는 것이다. 다시, 2번의 핵분열은 4번의 핵분열을, 4번의 핵분열은 8번의 핵분열을, 8번의 핵분열은 16번의 핵분열을 일으키는 식으로 계속해서 2배씩 증가하게 된다.

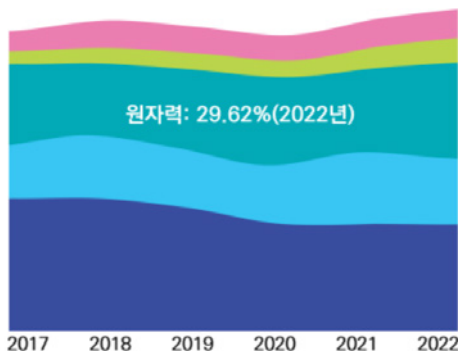
단 10번 만에 원자 1,000개가 동시에 핵분열을 일으키게 되니까, 연쇄반응의 위력을 실감할 수 있다. 이렇듯, 작은 양으로 큰 에너지를 빠르게 얻을 수 있기 때문에 원자력을 통해 열에너지를 얻는다.

기후 위기가 일상이 된 지금, 원자력을 통해 열에너지를 만들어야 하는 또 다른 이유가 있다. 지금의 기후 위기는 에너지를 얻기 위해 사용했던 화석연료 때문이다. 화석연료를 태우는 과정에서 발생한 탄소화합물이 지구의 대기 상태를 흔들어 놓았기 때문에, 우리는 극심한 기후변화를 경험하고 있다. 우리가 탄소화합물 배출을 줄이는 것이 기후 위기를 막을 수 있는 유일한 방법이다. 그렇다면 당장 화석연료의 사용을 줄이고 에너지 소비를 줄여야 하지만, 우리의 삶을 위해 에너지를 포기할 수는 없다. 그래서 대안은 탄소화합물을 배출하지 않는 에너지원을 사용하는 것이다. 원자력도 탄소화합물을 배출이 매우 적은 에너지원 중 하나이다. 화석연료는 말할 것도 없고, 신재생에너지에 비해서도 훨씬 적은 탄소화합물을 배출하는 것으로 알려져 있다.

나는 열과 방사선이 원자력에너지라고 했다. 이 원자력에너지를 우리는 구체적으로 어떻게 사용하고 있을까? 어쩌면 두려움은 모르기 때문에 생겨나는 것일 수도 있다. 두려움을 없애기 위해 원자력에너지가 어떻게 사용되는지 알아보기로 하자.

원자력 - 열

[그림 2] 한국전력통계 제92호 (2023년, 한국전력공사 발간), 그래프 자체 제작



출처: 산업통상자원부 에너지수급동향

열에너지를 가장 활발하게 사용하고 있는 분야는 '발전'이다. 우리나라의 핵분열 과정에서 발생하는 열을 이용해 간접 가열 방식으로 증기를 생산하고, 증기터빈을 회전시켜 전기를 얻는다. 사람들은 원자력 발전이 뭔가 신비스러운 것이라고 상상하지만, 열을 얻는 과정을 빼고는 화력 발전과 다른 점이 없다. 우리나라는 원자력 발전소를 도입한 1970년 이후부터 매해 전체 발전량의 약 30% 정도를 원자력이 책임지고 있다. 지금 우리가 있는 공간의 전등 3개 중 1개는 원자력 발전에서 공급하는 전기로 켜져 있는 셈이다. 거리에 돌아다니는 전기자동차 3대 중 1대도 원자력 발전으로 충전된다. 화석연료를 전량 다른 나라에서 수입해 오는 우리나라에게 원자력 발전은 더 각별한 의미를 가지고 있다. 산업화를 위해 필요했던 전기를 우리나라는 원자력 발전을 통해 저렴하게 공급할 수 있었기 때문에 빠르게 성장할 수 있었다. 우리나라의 각종 물가를 1970년대와 비교해 보면, 전기료만 거의 오르지 않은 것을 확인할 수 있다. 또한, 4계절이 뚜렷하여 기후 여건이 풍력이나 태양광 발전에 적합하지 않은 우리나라에서는 불안정한 신재생에너지를 보완하는 역할도 하고 있다.

전 세계적으로는 전체 전기의 약 10% 정도를 원자력 발전을 통해 얻고 있다. 그럼에도 원자력 발전이 배출하는 이산화탄소량은 전체 이산화탄소 배출량의 1%에도 훨씬 미치지 않는다. 기후 위기 시대에 필수적으로 검토해야 하는 발전원이라고 했던 이유이기도 하다.

원자력의 열에너지는 배를 움직이기 위한 엔진으로도 사용된다.

발전과 동일한 방식으로 생산된 전기로 스크류가 연결된 모터를 작동시켜 배의 추진력을 얻는다. 이 경우, 원자력발전소를 축소해서 배에 실었다고 생각하면 된다. 또는 증기터빈의 회전을 바로 배의 스크류에 연결해서 추진력을 얻을 수도 있다. 이 둘을 모두 적용하여 필요에 따라 변환하기도 한다. 원자력은 작은 양으로도 큰 에너지를 얻을 수 있기 때문에, 연료를 많이 싣고 다닐 필요도 없고, 연료를 주기적으로 채워주지 않아도 되기 때문에 효율이 아주 높은 엔진이다. 현재는 쇄빙선의 엔진으로만 개발되어 활용되고 있는데, 미래에는 민간 상선의 엔진으로도 주목받고 있다. 화석연료를 사용하는 상선의 이산화탄소 배출량이 전체 이산화탄소 배출량의 약 1.7% 정도를 차지하고 있어, 현재의 상선 엔진을 대체해야만 하기 때문이다. 특히, 안전성이 획기적으로 향상되고 크기가 작아진 일체형소형원자로(SMR)

가 강력한 대안으로 검토되고 있다. 전 세계 각국이 최초의 상선용 일체형소형원자로 개발을 성공시키기 위해 경쟁하고 있다. 우리나라도 정부, 연구기관 및 민간기업이 손을 잡고 한국형 일체형소형원자로를 개발하기 위해 노력하고 있다. 세계적인 선박 제조 회사 중 하나인 우리나라의 HD현대는 2025년 2월, 미국 휴스턴 아시아 소사이어티 텍사스 센터에서 열린 ‘휴스턴 해양 원자력 서밋’에서 SMR을 엔진으로 사용하는 원자력 추진 컨테이너선 개념을 선보였다.

[그림 3] HD한국조선해양이 공개한 1만5000TEU급 SMR 추진 컨테이너선의 조감도



출처: 뉴시스 기사 https://www.newsis.com/view/NISX20250213_0003063607

원자력 - 방사선

다음으로는 우리가 방사선을 어떻게 활용하고 있는지 설명할 차례이다. 이해를 돕기 위해, 두 편의 마블 히어로 영화 주인공들을 통해 방사선의 특징을 살펴보자. 헐크의 주인공인 과학자 브루스 배너 박사는 방사선(감마선)에 노출되어 헐크라는 강력한 괴물로 변하게 된다. 스파이더맨의 주인공인 평범한 학생 피터 파커는 방사선에 노출된 거미에 물려 신비한 능력을 얻게 된다.

이 두 영화 속 주인공들로부터 알 수 있는 것은, 방사선은 생물의 상태를 변화시키는 능력이 있다는 것이다. 영화의 주인공들만 보면 살짝 변화시킨 정도가 아니라, 굉장한 능력을 갖게 해서 히어로로 만들어준다. 그렇다면 우리도 히어로가 되고 싶다면 방사선에 노출되면 될까? 당연히 말도 안 되는 소리다. 현실에서 방사선에 노출되면 우리 몸에 이상이 생기고, 심한 경우 죽음에 이를 수도 있다. 히어로들에게 작용했던 방사선의 능력이 정반대로 작용하여 우리의 상태를 나쁜 쪽으로 변화시키는 것이다. 그렇다면 우리는 방사선에 노출되는 것을 완벽하게 피해야 할까? 나는 그럴 수 없다고 분명하게 말할 수 있다. 그 이유는 바로 자연방사선 때문이다. 공기, 물, 땅, 음식 등 우리가 일상적으로 접하는 모든 물질 속에는 미량이지만 방사성 원소가 포함되어 있고, 이 원소들로부터 자연적으로 방사선이 방출된다. 이처럼 우리가 평소 접하는 물질들로부터 나오는 방사선을 ‘자연방사선’이라고 한다. 일상적으로 공기, 물, 땅과 접하고, 살기 위해 음식을 먹어야 하는 우리가 자연방사선을 피해 갈 수 있는 방법은 없다. 하지만 다행히도 이 자연방사선의 양은 우리의 상태를 변화시킬 정도로 강하지 않다. 우리를 히어로로 만들어 주지도 않지만, 우리의 건강을 해치지도 않는다.

자연방사선과 달리, 특수한 목적을 위해 인위적으로 조작한 물질에서 나오는 방사선을 ‘인공 방사선’이라고 부른다. 인공 방사선은 세기가 자연방사선보다 훨씬 강해서 생물뿐 아니라 물질의 상태를 변화시키거나 투과시키는 능력을 가지고 있다. 앞에서 말한 것처럼 사람이 인공 방사선에 일정 수준 이상 노출될 경우, 질병에 걸리거나 심각한 경우 죽음에 이를 수 있다. 그래서, 인공 방사선은 엄격하게 관리되고, 노출되는 허용 양도 법적으로 제한하고 있다. 우리가 흔히 “방사선을 이용한다”고 할 때는 바로 인공 방사선을 의미한다. 그리고 이러한 인공 방사선을 이용할 때 가장 중요한 점은 방사선의 세기를 일정 수준에서 지켜야 한다는 것이다. 물질을 얼마나 변화시킬지, 어디까지 투과시킬 것인지는 방사선의 세기에 달려 있다. 우리나라를 비롯한 전 세계 모든 국가는 방사선을 이용하는 기준들을 가지고 있으며, 그 기준에 따라서 적용된 방사선은 많은 분야에서 우리에게 유익할 결과를 가져다주었다.

생물의 상태를 변화시키는 능력은 식물 개량에 많이 활용되고 있다. 식물 개량은 전문적인 용어로 ‘육종’이라고 하는데, 이를 이해하기 위해 다음 사진을 보자.

[그림 4] 옥수수 육종



출처: CropLife International

사진 속 오른쪽 몇 개는 옥수수로 보이고, 왼쪽 몇 개는 풀 종류처럼 보이지만 이 사진 속에 있는 것들은 모두 옥수수이다. 왼쪽이 초기 상태의 옥수수이고, 오른쪽으로 갈수록 현대에 개량된 옥수수이다. 이처럼 식물의 크기나 모양을 개선해 나가는 것을 식물 개량 또는 육종이라고 부른다. 일반적으로 곡식이나 과일의 크기를 키워서 생산량을 늘리거나, 미적으로 보기 좋게 만들기 위해 식물을 개량한다. 이런 식물 개량은 과거에는 유전자 교배나 화학물질을 통한 유전자 조작을 이용하였는데, 방사선에 대한 이해가 늘어나면서부터는 방사선도 식물 개량에 이용하게 되었다. 사진의 옥수수는 방사선을 이용한 사례는 아니다. 실제 사례로는 한국원자력 연구원이 방사선으로 개량에 성공한 쌀인 토코호미와 꼬마무궁화가 있다. 토코호미의 경우 기존 쌀에 비해 식감이 개선되었고, 꼬마무궁화는 실내 관상용으로 키울 수 있을 정도로 작아졌다.

방사선은 생물뿐만 아니라 무생물인 물질도 변화시킬 수 있다. 그 대표적인 사례가 바로 반도체이다. 독자들은 반도체를 삼성전자와 하이닉스에서만 만든다고

생각할 것이다. 그런데 방사선(중성자)을 이용해서도 고순도의 반도체를 만들 수 있다. 방사선을 이용하여 반도체를 만드는 과정을 바로 중성자 변환 도핑(NTD, Neutron Transmutation Doping)이라고 한다. 이렇게 방사선을 이용하여 만든 반도체들은 주로 고부가치 제품인 전력 변환용 장치들에 사용된다. 원자로에서만 만들 수 있기 때문에, 전 세계에서 이 반도체를 만들 수 있는 나라는 많지 않으며, 대한민국도 ‘하나로’라는 원자로를 이용하여 만들 수 있다.

방사선의 물질을 투과하는 능력은 우리 생활에서 더 직접적인 쓸모를 갖는다. 아마 독자들은 모두 엑스레이를 한 번 이상은 찍어봤을 것이다. 이 엑스레이가 방사선의 일종이고, 우리 몸의 일부만 투과하는 능력을 가지고 있다. 살은 통과하고 뼈는 통과하지 않는다. 그래서 뼈가 부러져 틈이 생기면 엑스레이가 그곳을 통과하고, 사진에는 그 흔적이 남는다. 엑스레이에서 확인이 되지 않는 경우에는 CT를 찍어본 독자도 있을 것이다. CT는 엑스레이를 여러 방향에서 빠른 속도로 대량으로 찍는 기술이다. 우리 몸속의 보이지 않는 부분을 입체적으로 찍는 기술이기 때문에, 몸속 상태를 더 세밀하게 관찰할 수 있다. 엑스레이는 옷이나 가죽, 플라스틱 정도는 투과할 수 있다. 그래서 공항검색대에서 짐을 검사하는 데 사용한다. 짐을 일일이 열어보지 않고 숨겨진 부분도 볼 수 있으므로, 엑스레이 검사는 더 빠르고 정확하게 짐을 검사할 수 있는 방법이다. 더 강한 방사선은 금속도 투과할 수 있다. 그래서 금속 내부의 결함을 찾는 데 사용된다. 만약 여러분이 탄 비행기의 내부 구조에, 여러분의 뼈에 있는 것과 같은 실금이 있다고 상상해보자. 비행기가 난기류를 만나 심하게 흔들리거나 착륙 때 충격을 심하게 받는다면 어떻게 될까? 아마 실금이 있는 부분이 먼저 부러지고, 비행기 전체가 부서지는 결과를 가져올 것이다. 이런 실금을 미리미리 찾는 데 바로 방사선이 사용된다. 비행기를 뜯지 않고도 밖에서 방사선으로 촬영하면 실금들을 찾아낼 수 있다. 이런 검사를 바로 비파괴 검사라고 한다. 최근에는 컨테이너 박스 내부를 멀리서도 들여다볼 수 있는 방사선 기술이 개발되었다. 상대적으로 감시가 소홀한 항구를 통해 무기나 마약을 밀수하지 못하도록 감시하는 중요한 기술이 개발된 것이다.

방사선은 화학물질로 처리하기 어려운 살균에도 활용된다. 대표적인 분야가 바로 문화재이다. 그림이나 목재 문화재 내부에 세균이 번식하는 경우, 이를 처리할

방법이 마땅치 않은데 방사선을 이용하면 효과를 볼 수 있다.

지금까지 이유 없이 무섭다고만 생각했던 원자력이, 사실은 우리와 아주 가까워서 함께하고 있었다는 사실을 확인해 보았다. 그리고 ‘방사선을 완벽하게 피할 수 있을까?’라는 나의 첫 번째 질문에 대한 답과 방사선이 우리에게 아주 유용한 도구라는 것을 충분히 설명했다고 생각한다.

그렇다면, 원자력은 앞으로도 우리에게 도움이 되는 존재일까?

원자력의 미래 – SMR

나의 두 번째 질문은 ‘ChatGPT와 같은 인공지능이 발달한 시대에 꼭 필요한 건 무엇일까?’였다. 그리고 그 대답은 ‘전기’였다. 미래는 전기를 점점 더 많이 요구하게 될 것이다. 그것도 그냥 전기가 아닌, 탄소 배출이 없는 전기를 원할 것이다. 나는 앞에서 원자력 발전이 지금까지 개발된 발전원 중에서 탄소 배출이 가장 적은 발전 방식이라고 이야기했다. 그러니 미래에도 원자력 발전은 꼭 필요한 발전 방식 중 하나일 것이다. 하지만 사람들은 여전히 원자력 발전의 안전성을 의심하고 있다. 우리가 기억하는 세 번의 대형 원자력발전소 사고는 인류의 머릿속에 여전히 트라우마로 남아 있다. 나와 같은 원자력 과학자들은 이런 인류의 트라우마를 해결해야 한다. 사람들이 두려움에 떨며 원자력을 마지못해 받아들이는 것이 아니라, 마음속 깊이 믿고 신뢰할 수 있도록 노력해야 한다. 그런 노력의 결과물이 바로 일체형소형원자로와 핵융합 발전이다.

일체형소형원자로로는 지금의 원자력발전소의 장치들을 하나의 장치로 통합하여 소형화한 모듈 형태의 원자로이다. 이를 쉽게 설명하기 위해 나는 종종 디스코 팡팡을 예로 든다. 아빠와 어린 자녀 둘이 디스코 팡팡을 타러 갔다고 생각해 보자. 첫 번째로 탈 때는 아빠와 자녀들이 손을 잡고 나란히 앉아서 디스코 팡팡에서 버텨야 한다. 이 때, 손을 놓치면 실패다. 하지만 디스코 팡팡은 제 멋대로 흔들릴 것이고, 아빠와 아이들이 손을 놓지 않기란 정말 어렵다. 두 번째로 탈 때는 아빠가 두 자녀를 안을 수 있고, 필요하다면 끈으로 아빠의 몸에 묶을 수 있다. 아이들은 단단히 아빠 몸에 묶고 두었고, 아빠가 강하게 안고 있으니 혼자 타는 것처럼 안정적이

다. 첫 번째는 지금의 원자력발전소이고, 두 번째는 일체형소형원자로의 조건이라고 생각하자. 디스코 팡팡의 흔들림은 지진이라고 생각하면 된다. 이렇게 일체형소형원자로는 지진과 같은 위험한 상황에서도 안전성이 획기적으로 향상되었다. 지진뿐만 아니라 다양한 사고들에서도 안전성을 높였다.

원자로를 개발하는 과학자들은 상상할 수 있는 모든 사고를 고려해 설계하는데, 일체형소형원자로는 어떤 사고에서도 지금의 원자로보다 더 안전해졌다. 이렇게 말하면, 지금의 원자력발전소가 상대적으로 덜 안전해보일 수 있으니, 이 말은 꼭 덧붙여야겠다. 지금의 원자력발전소도 과학자들이 상상하는 모든 사고에 대비되어 있고, 우리 인류가 경험했던 세 번의 대형 원자력발전소 사고 같은 일은 절대 일어나지 않도록 만들어져 있다. 다만, 일체형소형원자로는 더더 안전해지고 있다. 방사능에 오염된 냉각수 유출 가능성을 원천 차단했고, 원자로를 외부에서 통제할 수 없을 때 스스로 열을 식힐 수 있는 기능까지 갖추고 있다. 이제 일체형소형원자로를 두렵지만 함께해야 하는 존재가 아니라, 안전하다고 확신할 수 있는, 꼭 필요한 존재가 될 수 있다.

일체형소형원자로는 안전성뿐만 아니라 활용도도 높아졌다. 모듈로 만들어져 있기 때문에 단독으로 사용될 수도 있지만, 서로 조립해서 필요에 따라 유연하게 전기 생산량을 조절할 수 있다. 이동이 가능하고, 서로 조립이 가능하다는 점은 일체형소형원자로를 다양한 목적으로 사용할 수 있게 해 준다. 오지의 작은 도시를 위한 발전소가 되기도 하고, 모듈을 여러 개 합치면 대도시나 산업단지에서 필요로 하는 많은 전기를 공급할 수 있다. 일체형소형원자로에서 나오는 열을 산업용으로 사용하거나 우리가 사는 지역의 난방용으로도 사용할 수 있다. 사막 도시에서는 바닷물을 식수로 바꾸는 에너지원으로도 쓸 수 있다.

앞에서 말한 것처럼 일체형소형원자로는 선박용 엔진으로도 사용될 수 있다. 아니 어쩌면 선박용 엔진으로 개발되었다고 해도 무리가 없을 정도로 선박이 요구하는 특징을 모두 갖추고 있다. 일체형소형원자로는 작지만 다재다능하고, 필요할 때만 협력해 문제를 해결할 수 있는 지능을 가지고 있다. 한국원자력연구원이 개발을 모두 완료한 일체형소형원자로의 이름이 스마트(SMART)인 것은 이런 특징을 잘 반영한다. 안전하고 다재다능한 일체형소형원자로를 심지어 기존 원자력발

전소에 비해 저렴하다. 크기가 작아진 덕분에 대형 장비들이 필요 없어졌을 뿐만 아니라 모듈형으로 대량 생산이 가능해져서 만드는 비용이 낮아졌기 때문이다. 안전성, 유연성 그리고 경제성까지 갖춘 일체형소형원자로는 인류의 미래에 꼭 필요한 아이템, 잇템이라고 할 수 있다.

원자력의 미래 – 핵융합 발전

안전성을 확보한 일체형소형원자로를 개발하고 있는 우리 인류는, 엄청난 전기가 필요한 미래를 잘 대비하고 있는 것처럼 보인다. 하지만 핵분열 반응을 사용하는 원자력 발전은 어쩔 수 없는 단점을 하나 가지고 있다. 바로 원자력 발전을 하기 위해 사용한 연료 물질(우라늄)의 부산물인 사용후연료이다.

나는 사용후연료를 종종 이렇게 알려준다. 요즘 많은 사람들이 캠핑을 즐긴다. 캠핑의 즐거움은 여러 가지가 있겠지만, 단연코 먹는 즐거움이 그중 하나일 것이다. 그중에서도 고기 먹는 즐거움이 빠질 수 없다. 고기를 먹기 위해서 아빠는 숯불을 피우고, 고기를 잘 익혀 가족들과 나눠 먹는다. 고기를 다 먹고 나면, 아빠는 숯이 다 타고 남은 재를 치워야 한다. 바로 이 숯재가 사용후연료이다. 여전히 뜨겁고, 연기도 난다. 함부로 만질 수 없고, 아무 데나 버릴 수도 없다. 사용후연료는 숯재와 비교할 수 없을 정도로 뜨겁고, 방사선을 방출한다. 그것도 아주 오랫동안 방사선을 낸다. 그래서 아무렇게나 버릴 수 없고, 반드시 안전하게 잘 보관해야 한다. 과학자들은 고민했다. ‘이런 사용후연료가 나오지 않도록 하는 방법이 있을까?’ 그 답은 바로 태양이 에너지를 만들어내는 방식인 핵융합 발전에 있다.

핵융합 발전은 앞에서 말한 원자의 세 가지 성질 중 하나인 ‘합쳐지는 성질’을 이용한 발전 방식이다. 특히 수소 원자를 이용하는데, 중수소(수소 원자 2개가 붙어 있는 수소 분자)와 삼중수소(수소 원자 3개가 붙어 있는 분자)를 1억 도 이상으로 가열하면, 그 둘이 합쳐져서 헬륨으로 변하게 된다. 이 과정에서 열과 중성자가 나오고, 이 중에서 열에너지를 발전에 사용하는 것이다. 마치 선생님이 모둠 두 개를 하나로 합치면, 서로 만난 친구들이 신나서 웃고 떠드는 과정과 비슷하다고 생각한다. 이런 핵융합 발전을 하려면 1억 도 이상으로 가열해서 온도를 오랜 시간 유

지하는 것이 매우 중요하다. 그래서 핵융합 발전을 연구하는 세계 여러 나라들은 누가 더 오랜시간 1억 도를 유지하느냐로 기록 경쟁을 하고 있다.

우리나라도 케이스타(KSTAR)라는 훌륭한 핵융합 장치를 개발했는데, 세계 신 기록들을 아주 많이 보유하고 있다. 지금까지의 원자력 발전뿐만 아니라 핵융합 발전 분야에서도 우리나라는 선두를 달리고 있다.

핵융합 발전은 미래에 탄소 배출도 없고, 사용후연료도 없는 완벽하게 깨끗한 에너지를 얻기 위해 필수적인 기술이다. 그래서 각 나라가 최선을 다하기도 하지만, 전 세계가 힘을 합쳐 연구를 진행하고 있기도 하다. 바로 ITER라는 프로젝트로 전 세계 35개국이 프랑스에 모여 아주 멋진 핵융합 발전 시설을 건설하고 있다. 어쩌면 이 프로젝트는 인류의 미래를 위한 희망을 만들어내는 일이 될지도 모른다.

원자력의 미래 - 방사성의약품

발전보다도 다양한 분야에서 우리 생활에 도움을 주고 있는 방사선의 미래는 어떨까? 앞에서 방사선의 다양한 활용 사례를 이야기 했지만, 아직 말하지 않은 분야가 있다. 바로 항암치료이다.

방사선은 물질의 상태를 변화시키는 능력이 있다고 했다. 그래서 우리 몸이 방사선에 노출되면 질병에 걸리거나 죽을 수 있다고 이야기 했다. 마찬가지로 물질이기도 하면서 생물이기도 한 ‘암’이라는 존재도 방사선에 노출되면 상태가 변하고, 죽을 수도 있다. 이렇게 방사선을 이용해 암을 치료하는 것이 방사선 치료법이다. 암이 있는 부위에 방사선을 쏘아서 암을 죽이는 방식이다.

그런데 암은 보통 몸속 깊은 곳에 있고, 방사선은 그곳에 도달하기 위해 피부부터 시작해서 암 앞에 있는 여러 장기들을 지나가야 한다. 그렇게 도달한 방사선은 암을 죽이지만, 중간에 있는 피부와 장기에도 피해를 입힌다. 암과 같이 내 몸이 상처를 입는다. 암을 치료하기 위해서 어쩔 수 없이 받아들여야 하는 부작용이다. 방사선 치료법의 부작용은 암까지 방사선이 너무 먼 거리를 가야 하기 때문에 생겨난다.

그래서 과학자들은 ‘방사선을 암 가까이에서 쏘면 어떨까?’라고 생각하게 되었다. 그럼 어떻게 해야 할까. 과학자들은 우리 몸속 특정 장기에 유달리 잘 모이는 물질이 있다는 것을 생각해 냈다. 그 물질을 유도물질 또는 표적물질이라고 한다. 이러한 유도물질에 방사선을 내는 방사성 원소를 결합해 방사성의약품을 만들었다. 유도물질은 암이 있는 장기로 방사성 원소를 데리고 갈 것이고, 방사성 원소는 유도물질이 자리잡은 장기에서 방사선을 내뿜기 시작할 것이다. 암의 바로 옆에서 방사선이 나오기 때문에, 암을 직접적으로 공격하면서도 주변 장기들에 입히는 피해를 줄일 수 있다.

기존 외부 방사선치료제에 비해 부작용이 줄어들기 때문에 앞으로 방사성의약품의 활용이 크게 늘어날 것으로 기대되고 있다. 대표적인 방사성의약품으로는 희귀 소아암 치료제로 사용되는 요오드화나트륨-131(I-131)과 전립선암 치료제로 사용되는 루테튬-177(Lu-177)이 있다. 나는 원자로를 개발하는 사람이고, 내가 개발했던 원자로 중 하나로 요르단연구로가 있다. 이 요르단연구로에서는 중동에서 유일하게, 그리고 최초로 방사성의약품을 개발해서 중동 지역의 아이들을 치료하는 병원에 공급하고 있다. 이런 뉴스를 들을 때면, 과학자로서 내가 인류에 작게나마 기여하고 있다는 사실에 뿌듯함을 느낀다.

원자력의 미래 – 우주 원자력

나는 잠시 원자력과 관련없어 보이는 이야기를 하나 해보려고 한다. 인류가 만든 물체 중, 인류로부터 가장 멀리 날아간 것이 무엇인지 아는가? 바로 우주 탐사선 보이저 1호다. 1977년 9월 5일에 우주로 보내진 보이저 1호는 1990년에 그 유명한 ‘창백한 푸른 점’이라는 지구의 사진을 남기고, 2025년 현재, 명왕성을 지나 태양계 밖으로 향하고 있다. 지구로부터 약 250억km 정도 멀어졌다. 250km도 아니고 250억km이다. 지구와 태양 사이를 80번 이상 왕복해야 갈 수 있는 거리이다. 그 먼 거리를 나와 나이가 같은 보이저 1호는 48년 동안 쉬지 않고 태양계를 여행하고 있는데, 놀랍게도 아직도 지구와 교신을 하고 있다. 이렇게 오랫동안 지구와 교신할 수 있는 이유는 보이저 1호에 탑재된 원자력전지 때문이다.

원자력과 관련없어 보이는 이야기라고 했지만, 보이저 1호도 원자력의 도움을 받고 있는 것이다. 원자력전지는 원자의 상태가 변하는 성질인 방사성 붕괴 과정에서 나오는 열을 전기로 전환하는 장치인데, 산소도 없고 무척 추운 우주 환경에서도 작동하며 수명이 30년 이상이다. 태양빛이 도달하지 않는 영역을 여행해야 하는 보이저 1호에게 전기를 공급할 수 있는 유일한 장치이다. 하지만 보이저 1호의 심장이라고 할 수 있는 이 원자력전지도 이제 수명이 다해가고 있다. 보이저 1호는 원자력전지의 전력이 줄어들 때마다 장치를 하나씩 꺼 가면서 지구와의 교신만은 유지하고 있다. 원자력전지는 보이저 1호와 같은 우주탐사선뿐만 아니라 화성 탐사 로버에도 탑재된다.

태양광으로 충전하는 방식의 로버들과 달리, 화성의 모래폭풍 속에서도 작동하고, 수명이 길어 현재는 로버의 필수적인 전원 장치로 여겨진다. 실제로, 화성으로 간 로버들 중에서 태양광만으로 전기를 충전했던 로버들은 모래폭풍 속에 작동이 멈춰버렸지만 원자력전지가 탑재된 로버들은 여전히 활동 중이다. 앞으로 빛이 없는 심우주를 탐사할 때도 원자력전지는 탐사선들의 심장 역할을 하게 될 것이다. 우리나라는 이 원자력전지를 자체 개발한 세 번째 국가이다. 심우주 시대에 필수적인 기술을 이미 보유하고 있으니 우리는 준비가 된 우주 강국이라고 할 수 있다.

원자력은 우주로 가기 위한 로켓 엔진에도 활용될 수 있다. 현재 사용되고 있는 화학 로켓은 추진 연료(수소)와 산화제를 연소시켜 추진력을 얻는다. 반면에 원자력 로켓은 연소 과정 없이 원자력의 열에너지를 이용하여 추진 연료를 가열해서 추진력을 얻는다. 서로 다른 방식의 두 로켓은 각각의 장·단점을 가지고 있다. 화학 로켓은 순간적으로 큰 힘을 낼 수 있지만, 연료가 빨리 소모된다. 원자력 로켓은 순간적으로 큰 힘을 얻기는 힘들지만 한 번 가동하면 여러 가지 장점을 가진다. 화학 로켓에 비해 속도가 더 빠르고, 에너지 효율도 높고, 더 오랜 시간 사용할 수 있다. 또한, 산소가 없는 우주 공간에서도 사용될 수 있다. 그렇기 때문에 심우주 탐사 시대의 필수 기술로 기대되고 있다. 하지만, 원자력 로켓은 발사 과정에서 방사선 사고 등의 위험이 있기 때문에, 지구를 벗어날 때까지는 사용하기 어렵다. 그래서 지구를 벗어나는 과정에서는 화학 로켓을 사용하고, 우주 공간에서부터는 원자력 로켓을 사용하는 이중 추진 시스템이 개발되고 있다.

우리가 우주로 가는 최종 목표 중 하나는 우주에 정착하기 위해서이다. 이를 위해서는 지구에서와 마찬가지로 에너지를 얻어야 한다. 어떻게 해야 할까? 사실 우주에서 에너지를 얻는 방법은 지구에서 에너지를 얻는 방법과 다를 바 없다. 화성을 예로 들어 보면, 현재 과학자들이 고민하고 있는 에너지 생산 방법은 크게 세 가지이다.

태양광 발전, 원자력 발전, 그리고 지열 발전이다. 이 중에서 지열 발전은 현재까지는 효율이 높지 않아서 고려되지 않고 있다. 남은 태양광과 원자력 발전을 놓고, 과학자들은 여전히 고민 중이다. 아마도 더 저렴하게 에너지를 얻을 수 있는 방법으로 결정될 것이다. 우주에서 돈이 얼마나 들어가는지의 판단은 우주로 보내야 하는 물건들의 무게와 연결된다. 즉, 화성에서의 발전을 위해 얼마나 많은 장비를 보내야 하느냐가 발전 비용을 결정한다. 즉, 똑같은 에너지를 얻기 위해 보내야 하는 장비가 더 가벼운 쪽이 유리하다는 뜻이다. 이 말만 보면 이미 답은 정해져 있을 것처럼 보인다.

하지만, 그렇지도 않다. 화성은 지구와 비슷하게 낮과 밤이 있고, 또 적도와 극지방이 있다. 화성의 적도 근처에서는 태양빛이 많고, 극지방은 적다. 그래서, 같은 태양광 장비라고 하더라도 적도 지방에서는 많은 에너지를 만들어낼 수 있지만, 극지방에서는 그렇지 않다. 낮에는 에너지를 만들어낼 수 있고, 밤에는 에너지를 만들 들어낼 수 없다. 반면에 원자력은 지역에 관계 없이, 낮밤에 관계없이 항상 에너지를 만들어낼 수 있다. 현재 NASA에서 개발한 킬로파워(Kilopower)라고 하는 우주 발전 원자로를 2대 가져가면 우주인 6명이 약 6개월간 활동할 수 있는 에너지를 얻을 수 있다고 하는데, 무게가 10톤 정도 된다.

태양광의 경우, 적도 지방에서는 10톤보다 가벼운 장비로 같은 에너지를 얻을 수 있지만, 극지방에서는 10톤보다 많은 무게의 장비가 필요하다고 한다. 결과적으로 적도지방이나 극지방이나에 따라 태양광이 유리할 수도 원자력이 유리할 수도 있다는 뜻이다. 하지만, 우리가 빼놓은 부분이 하나 있다. 화성의 날씨 변화이다. 화성은 모래 폭풍이 자주 발생하고, 그 기간은 예측하기 어렵다. 그렇다고 하면 태양광은 에너지를 꾸준히 생산할 수 없을 때도 있을 것이다. 원자력은 그렇지 않다.

원자력은 태양이 없는 밤에도, 모래폭풍이 태양빛을 막아버리는 날에도 꾸준히 에너지를 만들어낼 수 있다. 그래서 우주에 나가 정착하는 시대에도 에너지를 얻기 위해서는 원자력을 생각할 수 밖에 없다.

맺음말 – 원자력과 함께

혼자서 하고 싶은 이야기를 다 하다 보니, 어느새 우리 가족은 다음 장소에 도착할 시간이 되었다. 다음 장소에 도착할 때쯤 7번 국도 옆 동해 바다에는 선명한 무지개가 떴다. 우리가 보는 무지개는 반원이다. 그래서 우리는 무지개가 원래 반원일 거라고 생각한다. 하지만 하늘에서 바라본 무지개는 완전한 원이다. 지구가 둥글기 때문에 땅 위에 사는 우리는 무지개의 모든 부분을 볼 수가 없어서 무지개는 반원이라고 생각한다. 우리가 만약에 하늘에 올라가서 무지개를 본다면, 무지개는 완전한 원으로 보일 것이다. 나는 원자력이 땅 위에서 보는 무지개와 같다고 생각한다. 만약에 우리가 원자력을 하늘 위에서 볼 수 있다면, 완전한 원의 무지개일 것이라고 확신한다. 나의 세 번째 질문에 대해 답할 때가 되었다. 내가 물었던 그 분야들에 공통적으로 필요한 것은 바로 원자력이다. 나는 왜 그런지 이 글을 통해 이미 설명했다. 아이들에게 다시 물었을 때 아이들은 여전히 원자력만이 유일한 답은 아니라는 표정이었지만, 원자력도 답 중 하나라는 데는 동의했다. 우리는 원자력과 함께 미래를 마주해야만 한다.



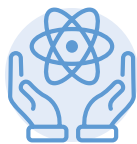
2

나는 진실로
원자력이 두려웠다



중앙대학교
ICT안전학과 석사과정
유서울

세월이 지나면서 원자력에 대한 이야기를 뉴스나 방송에서 들을 날이 줄어들었다. 그러나 이후 ‘탈원전 정책’이라는 이름으로 다시 원자력이라는 단어가 시사 이슈로 떠오르기 시작했다. 나는 그때 경제활동 인구로 분류되었다. 정말 오랜만에 원자력에 대해서 듣게 되었다. 그러나 역시 내 기억에서 원자력은 화재 사고나 교통사고보다 훨씬 위험한 것이라는 인식으로 상기되었다. 그런데, 경제와 사회 이슈에 대해서 관심을 갖게 되고, 사회에 나가 사람들을 만나서 다양한 경험을 한 이유에서인지, ‘무조건적으로 원자력에 대해 부정적인 이야기를 하는 사회현상’에 대해서 의구심이 들었다. 내 마음 속에서 ‘후쿠시마 사고는 분명히 위험한 사고였던 것은 맞는데, 그렇다면 이런 위험한 시설을 어떤 사유로 건설하고 오랜 기간 운영하는 것일까?’와 같은 근본적인 질문이 떠올랐다. 그리고 대중들이 항간에서 말하고 믿는 것처럼 ‘탈원전 정책이 필요할 정도로 원자력 시설은 무용하고 위험하기만 한 것인가? 그러면 이름난 대기업은 왜 원전 사업을 하지?’라는 질문을 스스로에게 던지게 되었다.



내게는 공포스러웠던 원자력

누구나 마찬가지겠지만, 삶을 살아갈수록 지니던 생각, 사실, 경험 등이 유동적으로 변한다. 예를 들자면 어릴 적 꿈은 이루기 어려웠다는 것을 알게 되고, 산타 클로스가 없거나 부모님이었다는 것을 알게 되고, 우리의 주식(主食)인 쌀의 과도한 섭취로 얻은 탄수화물이 비만의 주범이 된다는 것을 알게 되는 것 등을 알게 된다. 나의 삶을 돌아보면, 지식, 생각, 가치관이 잘못되었음을 깨닫고, 정, 반, 합의 과정을 통해 옳은 방향으로 나아갈 때, 항상 두 갈래의 길에서 선택해야만 했다. 하나는 나의 지식의 과오를 인정하고 개선하는 길이고, 나머지는 모른 채 편안하게 살아가는 길이었다. 하지만 살아온 날과 살아갈 날이 쏠살갈을 것이라 생각하는 나의 인문학적 가치에 비추어 내 짧은 생 34년을 돌이키자면, 과오를 인정하고 어떤 현상에 대해 의심하고 진실을 추구하는 행위는 반드시 발전을 가져다준다고 믿는다.

내가 처음 원자력을 접하게 된 것은 체르노빌 원전 사고에 대해서 교과서를 통해 배운 초등학교 시절이었다. 또한 중학생 때부터 고등학생 때까지는 무슨 이유에 서인지는 모르겠지만, 학교에서 또는 뉴스와 같은 매체에서 ‘원자력은 위험하다’라는 말을 자주 들었던 기억이 있다. 더해서 원자력에 대한 가장 형상화된 기억은 미국 애니메이션인 “심슨가족”에서 아빠 역할인 호머 심슨의 직장이 원자력발전소였다는 것이다. 호머심슨은 다소 지능이 부족한 모습으로 웃음을 자아냈는데, 만화 속에서 호머의 실수로 원자력 관련 물질이 불안정한 상태에 놓이고, 그로 인해 사고가 발생했던 위험한 모습이 기억에 남는다. 이 기억은 두 가지를 시사한다. 첫째는 ‘원자력에 대한 가장 형상화된 기억’이 애니메이션이 전부라는 것과 이는 곧 그만큼 일반인이 원자력에 대한 정보를 얻을 기회가 적다는 것이다. 그리고 둘째는 원자력에 대해서는 대부분 부정적이고 위험하다는 정보가 주로 전달된다는 것이다. 이렇듯 나의 유소년 시절의 원자력은 항상 두렵고 위험한 존재로 기억되었다.

내가 대학에 입학한 2011년 3월이 얼마 지나지 않은 당월 12일에 일본 후쿠시마에서 원자력 사고가 발생했다. 이로 인하여 당시 국내 정치인들의 원자력 관련 조치부터 시작해서 온갖 뉴스 채널에서 원자력 사고에 대해서만 보도하는 등 국내를 비롯한 전 세계는 ‘원자력 위협’에 떨고 있었다. 그 당시 TV만 틀면 하루 종일 원자력 사고에 대해 방송에서 내비추었다. 매일같이 TV를 통해 회색빛깔 콘크리트 원자로와 출렁이는 바닷물을 보고 출연한 전문가 패널이 원자력의 위험성을 강조하는 것을 들었다. 그로 인해 나는 원자력에 대해서 지식이 없었음에도, 명확한 근거가 없이 원자력에 대한 두려움에 대해 학습하게 되었다. 원자력에 대해서 공부한 지금의 내 모습과 비교할 때, 과거 나의 마음 상태는 ‘원자력은 위험하다’는 일관된 감정을 가졌었다고 형용할 수 있을 것 같다. 더해서 그 당시 일본 또는 일본해와 가까운 곳에서 어획한 수산물을 소비하지 않는 운동이 있었던 것으로 기억한다. 나도 이때부터 좋아하던 참돔회를 먹지 않았다.

원자력에 대한 인식 개선의 계기

그 이후 몇 해가 지나면서 나와 시민들의 머릿속에서 원자력 사고에 대한 기억은 점차 희미해졌다. 그렇게 세월이 지나면서 원자력에 대한 이야기를 뉴스나 방송에서 들을 날이 줄어들만 갔다. 그러나 이후 ‘탈원전 정책’이라는 이름으로 다시 원자력이라는 단어가 시사 이슈로 떠오르기 시작했다. 나는 그때 경제활동 인구로 분류되었다. 정말 오랜만에 원자력에 대해서 듣게 되었다. 그러나 역시 내 기억 속에서 원자력은 화재 사고나 교통사고보다 훨씬 위험한 것이라는 인식으로 상기되었다. 그런데, 경제와 사회 이슈에 대해 관심을 갖게 되고, 사회에 나가 사람들을 만나며 다양한 경험을 해서인지, ‘무조건적으로 원자력에 대해 부정적인 이야기를 하는 사회현상’에 대해서 의구심이 들었다. 내 마음속에서 ‘후쿠시마 사고는 분명히 위험한 사고였던 것은 맞는데, 그렇다면 이런 위험한 시설을 어떤 사유로 건설하고 오랜 기간 운영하는 것일까?’와 같은 근본적인 질문이 떠올랐다. 그리고 대중들이 방간에서 말하고 믿는 것처럼 ‘탈원전 정책이 필요할 정도로 원자력 시설은 무용하고 위험하기만 한 것인가? 그러면 이름난 대기업은 왜 원전 사업을 하지?’라는 질문을 스스로에게 던지게 되었다. 궁금한 것이 있으면 알게 될 때까지 찾아보는 성격이었

던 나는, 이에 대해서 세부적으로 알고 싶어졌다.

그 당시 나는 건설업계에서 자재 및 시공 납품을 하는 영업사원이었다. 건설업계에 계셨던 분들은 공감하시겠지만, 해당 업계는 매일같이 고되고 토요일도 쉴 새 없이 바쁘게 돌아간다. 실제로 그 당시 내 업무량을 유추할 수 있는 사실이 있다. 이는 휴대폰에 녹음되던 통화량을 분석하면 평균 월 4,000건의 녹음이 저장되었다는 것이다. 사담이지만 식사하면서 통화하고, 이동하다가 주차하고 전산 발주하고, 견적 내고, 조율하고, 각종 문제를 해결하는 맨파워 영업사원 역할을 했었다. 그렇게 생활에 치여 원자력에 대한 기억은 잊혀갔다.

그러던 중 건설 경기가 악화되어서, 건설시장에서 최우수 기업 외에는 생존이 어려울 것이라는 직감이 들었다. 그래서 나는 직무 전환이 필요하다고 생각했고, 그동안의 경험과 연관된 안전 직무로 방향을 설정했다. 그리고 안전 분야 국가기술자격을 취득했다. 또한 향후 안전 분야 국가전문자격증을 취득하여 개업 계획까지 세우게 되었다. 이런 과정에서 필수적으로 안전 분야에서 실무 경력이 필요하다고 판단했다. 하지만 해당 분야에 한참 채용이 활발하던 안전관리자 선임 법정 의무가 강화된 시점 이후였다. 또한 경력직을 우선 채용하는 특징이 강해서 이직이 어려운 상황이었다. 그러던 차에 한국원자력연구원에서 안전 부서의 육아휴직 대체자 계약직 공고를 보게 되었고, 이는 안전 경력을 쌓을 좋은 기회가 될 것이라 생각되어 지원하게 되었다.

면접을 보기 전 안전 관련한 심도 있는 학습이 필요했다. 나는 당시 건설안전 분야에 치중해 공부를 한 상황이었어서, 원자력에 대한 기초 상식과 원자력 안전에 대한 학습이 추가적으로 필요하다고 판단했다. 그렇게 다시 원자력과 연결된 시점이었다. 원자력 분야의 기초 학습을 위해 한국원자력연구원의 소셜미디어에 접속하여 원자력 관련 강의를 수강했다. 수강 초기에는 아직까지 ‘원자력’이라는 단어에 대해서 탈원전이 필요한 만큼 위험하다는 어감과 인식이 내 머릿속에 남아 있었다. 하지만 반대로 그동안 원자력에 대해서 자세히 알아보고 싶은 마음이 있었기에, 이렇게 위험한 원자력에 대해서 원자력 종사자들은 과연 어떤 이야기를 하는지 궁금해졌다.

경제활동 인구가 본 원자력

먼저 원자력 융합과 원자력이 에너지를 발생시키는 원리와 같은 기본적인 공부를 시작했다. 그리고 원자력의 안전성과 친환경성에 대해서도 알아가기 시작했다. 우선 가장 인상 깊었던 것은 효율성이 다른 에너지에 비해 월등히 높다는 점이었다. 전기 1kWh의 원자력 생산단가는 58원으로 신재생에너지(100원)나 LNG(119원)보다 훨씬 저렴하다는 사실을 알게 되었다. 나는 당시 33살이었고 그 해로부터 5년 전 경제활동을 시작한 이래로 부모님의 지원 없는 독립과 자립 생활을 해왔다.

그렇기에 모든 경제와 생활에서 극강의 효율성을 추구하고 있었다. 이렇게 효율성을 중시하는 나로서는 원자력이 나와 닮은 부분이 있다는 점이 더 매력적으로 느껴지게 되었다. 또한 원자력은 전기를 생산하는 데 있어서 연료의 투입량도 큰 차이를 보인다. 같은 양의 전기를 생산한다고 가정할 때, 우라늄-235(원자력 물질)는 1그램, 석유는 9드럼, 석탄은 3톤이 필요하다는 사실을 알게 되었고, 경영학에서도 동일한 산출량 대비 투입량이 적어질수록 효율은 극대화된다는 이론을 배운다. 나는 경영학의 입장에서 원자력을 보면서 천문학적인 효율성을 지니고 있음을 보았다. 어찌 됐든 동일전력 생산을 위한 생산 단가와 투입 연료량의 각 에너지별 차이를 알고 나서, 아직까지 벗겨지지 않던 원자력 위험성의 문제를 차치하고서라도 원자력을 가동할 만한 충분한 이유가 있음을 알게 되었다.

다른 분야로 돌아가서 환경과 관련한 이야기를 하고 싶다. 나는 개인적으로 향후 5년 뒤부터 그 이후로 20년 동안 대부분의 시민이 전기차, 수소차 등의 연료를 사용하는 친환경 자동차를 이용하는 세상이 올 것이라고 생각한다. 그만큼 친환경이 중요한 시대가 열린다는 생각이다. 친환경의 맥락에서 원자력에 대해서 공부해 보니, 원자력으로 에너지 발전을 하면서 발생하는 이산화탄소 배출량은 10g/KWh로 풍력 14g/KWh, 태양광 54g/KWh, 석유 782g/KWh, 석탄 991g/KWh와 비교하여 매우 낮다는 것을 알 수 있었다(2015년 IAEA 자료).

사실 우리나라는 그동안 친환경 에너지 사업의 일환으로 태양광 사업을 넓게 확장해 왔다. 이를 알 수 있는 근거로, 최근 몇 년 사이 태양광 설치 사업자가 늘어난 것, 공동주택이나 단독주택에 태양광 설치 관련 국비 지원사업 광고지가 많이 붙어

있다는 것과 고속도로를 지나다 보면 산 경사지에 태양광 시설이 군대처럼 오와 열을 맞추고 있다는 것을 들 수 있다. 그러나 개인적으로 태양광 에너지 시설에 대해서 아쉬웠던 경험도 있다. 바로, 내가 자주 지나다니는 오송 고속도로 방향의 산 경사지에 있던 태양광 시설이 장마로 인한 산사태로 무너져버린 모습을 여러 번 본 기억이다. 이를 보면서 태양광 시설에 대한 초기 투자 비용, 보수비용 등을 생각할 때, 경제적인 효과가 감소할 것을 생각하며 안타까워했던 기억이 있다.

비슷한 맥락으로 볼 때, 원자력 에너지는 아직까지 국내에서 후쿠시마 사고와 같은 큰 사고가 없었고, 수십 년간 계속 운영되고 있다. 이와 더불어 원자력 에너지는 다른 에너지보다 생산 비용이 저렴하고 친환경적이라는 것을 생각하면, 그동안 갖고 있던 ‘원자력은 위험하다’라는 이미지는 180도 바뀔 수밖에 없었다. 한때 영업 현장에서 전반적인 수지타산을 계산하고 컨트롤타워 역할을 하던 영업인이자 작은 경영자(영업은 경영과 상관적 의미를 갖고 있다)의 입장에서 볼 때 원자력은 ‘이건 안 사면 손해인데?’라는 매력을 가진 아이টে미란 생각이 되었다.

극도의 공포 후쿠시마의 진실

하지만 아직까지 내가 원자력 에너지를 안전하다고 받아들이기까지는 해결해야 할 마지막 난관이 남아 있었다. 그것은 바로 ‘후쿠시마 사고로 인해 형성된 원전에 대한 높은 위험 인식에 대해서 반증할 수 있냐?’는 질문이었다. 그래서 나아가 후쿠시마 사고에 대한 다큐멘터리를 찾아보게 되었다. 하지만 다큐멘터리를 통해 해당 사고에 대한 전말을 알게 되니, 알려진 내용에 겹겹이 오해가 쌓여 있다는 생각이 들었다. 대부분의 시민이 후쿠시마 사고를 통해 ‘원자력 시설은 위험하다’고 학습하게 되었다. 하지만 후쿠시마 사고가 회자되는 것의 근본적인 문제는 원자력 시설에 대한 근본적인 안전성 유무에 대한 것이 아니었다. 당시 사고를 살펴보면 지진 및 쓰나미 사고로 인한 전력 단절이 시작됐다. 이를 해결하고자 비상 전력을 투입하려고 했으나, 비상 발전시설이 지하에 위치했고 해당 시설이 침수되면서 비상 전기를 투입할 수 없는 상황이었다. 이 상황에서 마지막 해결책으로, 원자로를 식히기 위해 바닷물을 투입할 수 있었으나, 당시 책임자는 그렇게 선택하지 않았다.

무슨 이유에서였을까?

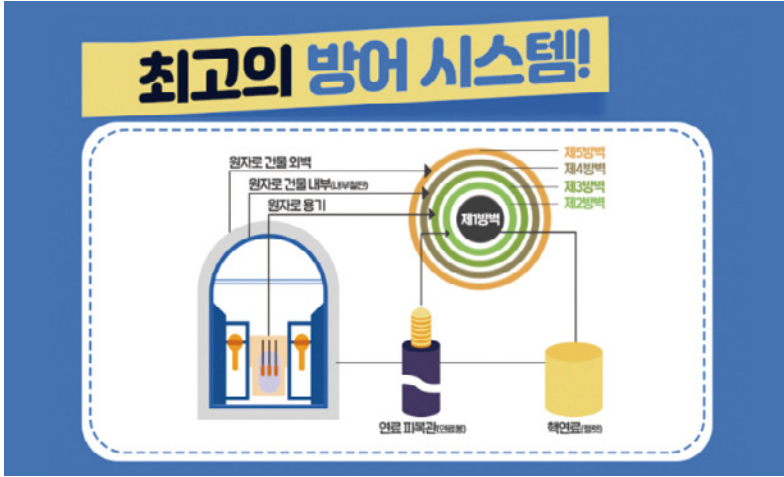
이는 바닷물 냉각을 진행하면 해당 원전은 추후 폐기 처분 과정을 거치기 때문이다. 그렇기에 마지막 선택지 앞에서 현장 결정권자는 원전 폐기로 인한 경제성 상실과 안전성 확보의 딜레마에 빠진 것이다. 그리고 그러한 상황에서 필요한 판단을 내리지 못 했던 것이다. 다시 말하자면 후쿠시마 사고는 원자력 시설 자체의 위험성을 나타내는 사건이 아닌, 선택의 딜레마에서 잘못된 판단을 내린 인재(人災) 사고였던 것으로 보인다. 그러나 후쿠시마 사고는 이러한 앞뒤 사정을 고려하지 않고 그저 참혹한 결과만을 근거로 하여, ‘원자력 시설은 위험하다’는 주장을 하기 위한 도구로 쓰이게 되었다. 하지만 나는 이를 통해 다시 한번 성찰하게 된다. 사실관계는 같은 조건에서 비교해야 한다는 것과 어떤 사건에서 문제가 되는 원인이 무엇인지 집요하게 파고들어야 한다는 것이다. 그래야 사실에 근접할 수 있다.

원자력발전소가 우리 집보다 안전했다고?

위와 같은 원자력 시설 사고로 인해서 원자력 안전 문화의 중요성이 강조되어 왔다. 그렇다면 우리나라의 원자력 시설은 어떻게 안전성을 확보하고 있는지 궁금해졌다. 이에 대해서 한국원자력연구원 소셜미디어의 원자력 안전 관련 강의 영상을 찾아보았다.

먼저 우리나라 원자력 시설은 지진에 대한 자동 정지 설비가 갖추어져 있다. 만약 지진 및 홍수 등의 재난 상황으로 인해 원전 시설의 위험이 예상되면 가동을 즉시 중단하고 사고 위험을 원천 차단하는 안전장치이다. 그리고 전력 차단에 대비한 이동형 발전 차량이 있다. 이는 후쿠시마 사고에서와 같이 위급 시 비상 전력을 공급할 시간적 여력이 부족하거나 비상 전력 시설이 마비되었을 때 이동하여 전력을 공급해 사고에 대응할 수 있는 장비이다. 이를테면 치명적인 사고로 인한 전력 마비가 발생했을 때, 전력을 공급하여 냉각 시설을 운용할 수 있도록 하는 것이다. 또한 수소 폭발 사고 방지를 위한 피동형 수소 제거 설비, 고리원전 앞 해안 방벽 증축, 침수 방지를 위한 방수문과 배수펌프 설치, 비상 냉각수의 외부 주입 유로 설치 등의 다양한 안전 설비 시스템을 구축하고 있다.

[그림 1] 원자력 시설의 5중 안전 구조



또한 대표적인 물리적 방호로는 1 방호벽(연료 펠렛), 2 방호벽(연료봉), 3 방호벽(원자로용기: 25cm 강철 원자로 용기), 4 방호벽(6~7mm 강철판의 건물 내벽), 5 방호벽(120cm 철근콘크리트의 건물 외벽)의 5중 안전 구조가 있다. 이러한 여러 가지 안전 시스템을 확인하고 스친 생각으로 ‘고의로 사고를 발생시키려고 해도 방비와 대처가 충분히 가능하겠다’는 생각이 들었다. 이처럼 원자력 시설에 대해서 자세하게 정보를 수집하면서 ‘원자력 시설이, 우리 집보다 훨씬 안전하겠다’는 생각이 들기도 했다.

내 삶의 원자력 인문학

이렇게 자의 반, 타의 반으로 원자력의 역사와 안전성에 대해 공부하고 새삼 느끼는 바가 많았다. 우리가 습관적으로 사실이라고 받아들이는 매체 정보는 객관적 근거를 통한 보정으로 진실에 가깝게 변화할 수 있다는 것이다. 즉, 이를 반대로 해석하면 우리가 보고 듣는 정보는 왜곡될 수 있다는 것이다. 나는 성인이 되어, 직장을 갖고, 이립(而立)의 나이를 지나면 ‘판단력이 뛰어난 어른이 되지 않을까?’는 막연한 생각을 갖고 있었다. 하지만 내 삶에서 원자력이라는 주제가 이러한 생각을

다시 한번 뒤집어 놓았다. 강산이 변하고 강물이 흐르는 것은 변하지 않는 자연의 이치이다. 그런데 지구라는 자연 안에서 사는 나는 내 생각, 지식, 관념이 왜 변하지 않을 거라 생각했을까? 그렇지만, 가진 신념을 추구하는 것도, 변하는 세상을 따라가는 것도, 진실을 추구하는 것도 모두 개인의 양심에 따라 자유다. 멈춰도 되고, 나아가기도 되며, 이러한 인생의 선택에 앞서 어떠한 정답은 없다고 생각한다.

하지만 나는 우리 문명이 발달하면서 편리함을 누리고 삶의 가치가 제고되었다고 생각한다. 극단적인 예시이고 지금은 청년이 살기 힘든 시대라고 하지만, 나는 조선시대 온 누리 백성을 통치한 임금님보다, 자가용과 비행기를 타고, 스마트폰을 사용하며, OTT로 전 세계 영화를 보고 언제든지 맛있는 음식을 배달해 먹을 수 있는 ‘나’라는 현대인이 더 풍족한 삶을 누리고 있다고 생각한다. 그러므로 우리에게 주어졌던 미래에도 지금보다 뛰어난 삶을 누리기 위하여 문명의 발전을 앞당겨야 한다고 생각한다. 또한 원자력은 이를 위한 이기(利器)가 되어줄 것이다. 그렇기에 원자력에 대한 올바른 이해와 안전 문화 홍보는 더욱 활발해져야 한다고 본다.

다시 생각해 보면, 매체를 통해 어디서 양산되었는지 모르는 끔찍한 원자력 피해 사진을 보고, 막연히 원자력은 피하고 싶고 두려운 대상이 되었던 적도 있다. 이러한 부정적인 경험과 지금의 상황을 마주하여 보면, ‘원자력이 왜 이렇게까지 악마화되었을까?’하는 의구심이 든다. 사실 우리는 그 사진 속 상황을 경험하지도 않았고, 그 상황이 어디서 어떻게 표현된 것인지 알지도 못한다. 이와 같은 맥락으로 ‘우리나라에 세속에 중독된 수산물이 흘러온다’, ‘우리나라 바닷물이 방사성 물질 범벅이 된다’는 등의 후쿠시마 오염 처리수 방류 위험설을 대함에 있어서도 사실과 진실을 추구하는 자세를 견지해야 하지 않을까 싶다.

부끄럽지만 사실 나는 후쿠시마 오염수 방류 이슈가 있던 때로부터 원자력에 대해서 공부하고, 우리 정부의 방사능 검사 현황 일일 업로드 자료를 보기 전까지 수개월간 광어회를 먹지 않았다. 지금 생각하면 이러한 수산물 금식 행동을 한 것에 대해 수산업 종사자와 나의 식도락을 관장하는 미뢰에 미안한 마음이 든다. 그러니 시간이 허락하신다면, 포털사이트에 ‘후쿠시마 오염 처리수’라고 검색해 보시라. 그러면 해당 문제에 대해 ‘대한민국 정책 브리핑’이라는 누리집에 수산물과 수입식품에 대한 방사능 검사 현황에 대해 일일 브리핑 자료를 확인할 수 있다. 현재

2025년 2월 수산물 일일 방사능 검사 현황을 확인하면 전체 865건 중 부적합 건수는 0건이다. 또한 2024년 수입식품 일일 방사능 검사 현황을 보면 전체 169건 중 부적합 건수는 0건이다. 이는 매일같이 업로드된다. 더해서 국무조정실 국무1 차장님은 매일 오염수 방류 대응 전반에 대해 브리핑 자료를 업로드하신다. 이 자료는 정말 매일 올라온다. 이는 그만큼 국민들이 해당 문제에 대해 예민하다는 것과 정부에서 이를 신경 쓰고 있다는 방증이다. 하지만 위에 설명한 객관적인 자료를 보면, 국민들께 심어진 민감함과 두려움은 객관적인 근거와 사실을 목격했기 때문이 아닌 것으로 보인다. 나는 이러한 현상이 그저 알 수 없는 누군가에 의하여 만들어진 두려움일 수 있다고 생각한다. 이따금 길을 지나다 횡집 안 손님을 바라보라, 오염 처리수 음모론이 생긴 지 오래되지 않았지만, 수많은 시민이 다시 수산물을 즐기고 있지 않은가?

너무 과도한 예시일 수 있지만 ‘트루먼 쇼’라는 영화를 보게 되면, 주인공은 자신이 살아가는 세계가 자신을 주인공으로 하여 유명한 영화감독에 의해 조작된 TV쇼라는 사실을 모른 채 수십 년을 살아간다. 그러나 주인공은 성인이 되고 어떠한 사건으로 인해 자신이 살아온 세계에 대해 의구심을 품게 된다. 그 이후 목숨을 걸고 이 세계에 대한 진실을 밝히기 위해 나아간 결과 진실을 찾게 된다. 내 인생에서 이 영화와 원자력 공부를 비교할 때 깨닫게 되는 것이 있다. 바로 어떤 사실관계를 판단할 때, 진실을 추구하도록 노력해야 한다는 것이다. 그저 주어진 대로, 느끼는 대로, 누군가 먹여주는 대로만 판단하는 것을 말하는 것이 아니다. 내 삶에서 일어나는 일에 대해서 주체적으로 파악하고, 분석하고, 끊임없이 사고(思考)하고 사실과 진실을 찾기 위해 노력해야 한다. 결국 원자력이 또 이렇게 내 인생을 가르치나 보다.

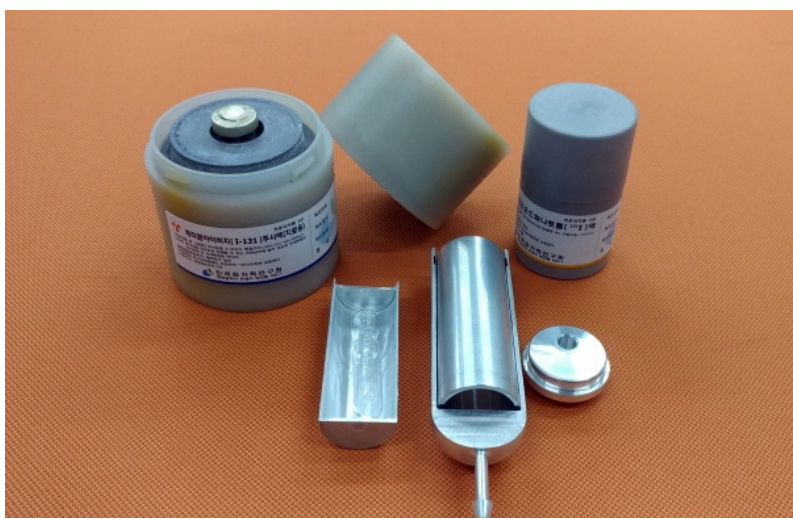
우리 삶을 변화시키는 원자력 고도화 기술력 – 난치병부터 우주탐사까지

지금까지 나 같은 범인(凡人)이 ‘트루먼쇼’의 세계관을 용기있게 부순 주인공 짐캐리처럼, 원자력에 대해서 오해에서 이해로 나아가는 모습을 보여줬다. 그렇다

면 이제부터는 우리나라의 원자력연구의 대표 기관인 한국원자력연구원에서 원자력 기술을 통해 우리 삶에 어떤 변화를 일으키고 있는지 간단히 소개하고자 한다.

먼저 나의 일상 이야기를 잠깐 하자면, 나의 이웃사촌 중 간암 환우가 있다. 어찌다 보니 둘이 호형호제하게 되었다. 그런데 몇 번은 형님께서 합병증으로 인해 위급상황에 처했을 때 병원으로 직접 이송하거나 구급차로 이송해 준 경험이 있다. 이를 보면서 암이 삶의 가까이서 우리의 생명을 위협하고 있다는 생각을 했다. 암 중에서도 신경모세포종 등 난치성 질환과 관련하여, 유일하게 한국원자력연구원에서 식약처 허가를 받아 실제 환자에게 사용하고 있는 캐리엠아이비지 주사액을 생산하고 있다.

[그림 2] 난치성 소아암 치료에 사용하는 방사성 표지의약품 (캐리엠아이비지(131I)주사액)

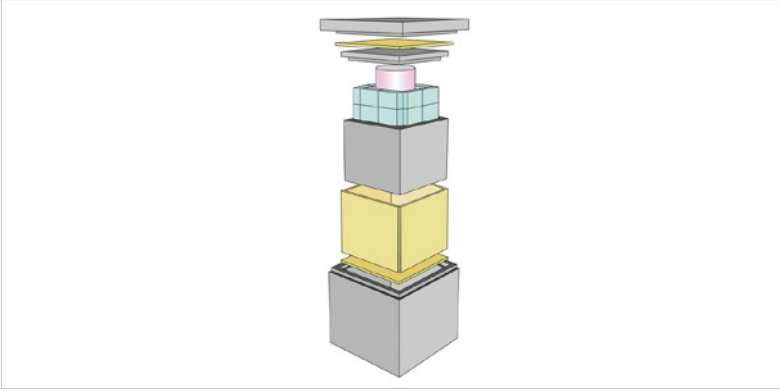


출처: 한국원자력연구원 홈페이지

또한 이 주사액은 분자 결합 구조상 초저온 상태를 유지해야 하는 조건이 있었지만 최근 한국원자력연구원에서 초저온 운송용기를 개발해서 극복했다. 이 용기는 가로, 세로, 높이 50cm의 정육면체 규격으로 방사선을 차폐하고 미세한 움직임이나 충격에도 대비하며, 영하 60도 이하의 초저온 상태를 유지하는 조건을 만족시킨다.

[그림 3] 운송용기 전체 개념도

❖ 초저온 운송 용기 내부, 중심의 원통형 용기 안에 의약품을 넣어 운송한다.



출처: 한국원자력연구원 홈페이지

또한 보관온도를 낮추는 것이 중요한데, 이 제품은 영하 60도에서 95% 이상의 안정성을 보이고, 약품 이송 유효기간을 기존 대비 2배 이상 늘렸다고 한다. 이를 통해 난치성 소아암 치료제를 해외 장거리 지역까지 이송하여 치료제를 안정적으로 공급할 수 있는 치료길이 열리게 되었다.

[그림 4] 암스트롱 양팔 로봇



출처: 한국원자력연구원 홈페이지

상기 사진에서 보는 로봇은 무한궤도 타이어가 장착되어 험지 이동이 쉬우며 양 팔로 200kg의 물체를 자유롭게 움직일 수 있는 로봇이다. 이는 한국원자력연구원 로봇응용연구실 박종원 박사 연구팀이 자체 개발하였고, 정액 기술료를 받는 조건으로 ㈜빅텍스에 기술 이전하였다. 상기 로봇은 약 400조원대의 경제성 규모를 추산하는 원전 해체 시장에 도입될 것이라고 한다. 원전을 해체할 때 인력을 활용하는 것보다 로봇을 활용하면 인체에 유해한 위험성을 최소화할 것으로 예상된다. 또한 해당 로봇은 건축물 해체 현장에서 인력을 대체하여 인력 피해의 위험성을 낮출 수 있을 것으로 예상된다.

최근 스마트 기술의 발전을 통해 건설 안전 분야 또한 다양한 스마트 기술이 현장에 접목되고 있다. 이와 같이 해당 로봇 기술이 원전해체 뿐만 아니라 건설현장에서 위험도가 높은 업무를 수행한다면, 안전사고를 예방할 수 있을 것이라는 생각이 든다. 또한 해당 로봇 기술은 한국도로공사와 업무협약을 맺었다. 향후 고속도로와 같은 고위험 환경에서 무인화를 통한 도로 보수 등의 작업에 사용될 것으로 보인다.

[그림 5] 원자력전지를 누리호에 탑재한 모습

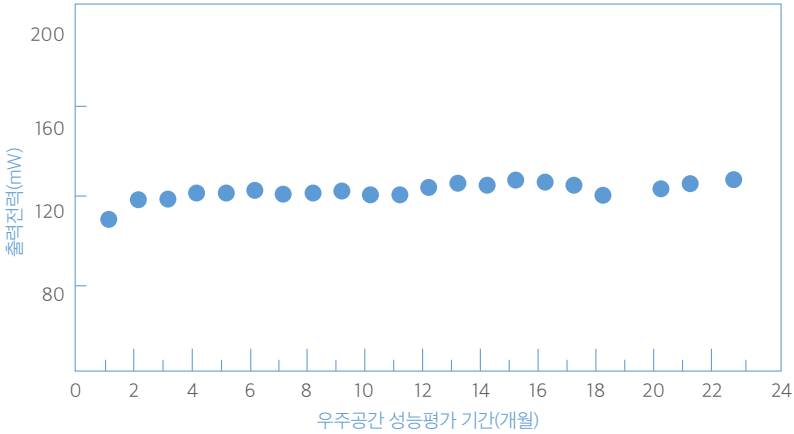


출처: 한국원자력연구원 홈페이지

상기 사진은 2022년부터 누리호 성능검증위성에 탑재해 지구 저궤도에서 신뢰성을 평가한 원자력전지이다. 해당 전지는 다음 사진에서 볼 수 있듯, 우주공간에

서 장기간동안 전력을 출력할 수 있는 성능을 검증했다.

[그림 6] 원자력전지 우주공간 성능평가 결과



출처: 한국원자력연구원 홈페이지

보통 우주 탐사선과 로버가 임무를 완성하지 못 하는 이유는 전력 공급이 차단 되는 등의 이유라고 한다. 하지만 지금과 같은 추세로 고성능 원자력전지를 개발하여 안정적인 전력생산 능력을 통해 장기간 전력을 공급할 수 있다면 우주탐사 분야에서도 원자력 기술로 인한 역량 향상을 확인할 수 있을 것이라 생각한다.

원자력이 우리의 친구로 남길 바라면서

앞에서 소개한 세 가지 기술 외에도, 중입자 암치료 기술, 다목적 일체형중소형 원자로 ‘SMART’를 통한 해수 담수화(바닷물을 식수화 하는 기술) 등 다양한 분야에 서 원자력을 이용한 기술 개발이 이루어지고 있다는 점을 확인할 수 있다.

더불어 시작된 AI혁명시대에는 대량의 반도체를 가동하기 위해 상당량의 전력 수요가 필요할 것으로 예상된다. 다시 말해, 소프트웨어의 개발로 인한 기술 개발의 특이점을 맞이하고 또 다른 산업혁명의 시대를 열기 위해서는, 반도체라는 몸체에 피처럼 흐르는 막대한 양의 전력 공급이 필요하다는 것이다. 이를 안정적으로 감당

하기 위해서 최소한의 투입으로 최대한의 산출이 전력 생산이 가능한 원자력 기술을 보존하고 개발해 나가는 것이 시대의 요구사항이 될 것이라 생각한다. 또한 상용화된 에너지 중 비교적 가장 저렴하면서 안전하고 친환경적으로 전력을 생산하는 것이 바로 원자력 기술이기에, 이를 마다할 명분이 없어 보인다.

이러한 시대적 요구 속에 원자력 기술은, 고속도로가 혈관이 되어 우리나라 경제의 심장을 뛰게 하고 한강의 기적을 이뤘던 것처럼, 제2의 한강의 기적 어쩌면 그보다 위대한 기적을 이뤄내며, 다시 한 번 대한민국을 도약하게 해 줄 핵심 기술로 자리잡아 갈 것이다.

마지막으로 필자의 고향 이야기를 하려고 한다. 나는 고향이 충주이다. 성인이 되어 외지인을 만나 인사를 나누면 고향 이야기를 하는 경우가 다반사다. 그 때마다 '나는 충주에서 왔다'고 하면 '충주?'라는 답변을 듣기 일쑤였다. 이게 무슨 뜻이냐면, 상대방이 인지도가 없는 충주라는 도시는 모르고 그에 비해 인지도가 있는 청주라는 도시는 알고 있다는 것이다. 그만큼 충주는 알려지지 않은 도시였다.

그런데 최근 몇 년 사이 충주시청 홍보과 김선태 주무관이 운영하는 충주시 유튜브 채널이 급속도로 성장하게 되었다. 충주시 유튜브의 성공 비결은 센스있고 재있으면서도 파격적인 영상 홍보 덕분이었다. 현재 25년 2월 기준, 해당 채널의 구독자는 78만 명이다. 이는 충주시 전체 인구인 20만 명의 약 4배 정도 되는 수치(數値)이다. 충주시청과 김선태 주무관의 활발한 충주시 홍보 덕분에, 이제 어디서든 '내 고향이 충주'라고 자신있게 말해도 사람들이 알아주게 되었다.

이처럼 원자력도 그동안 쌓인 오해를 풀고 국민과 함께 발전하기 위해서 원자력 권위자와 관계자 분들께서 더욱 홍보에 힘써 주는 방향이 필요하지 않을까 생각해 본다. 또한 내가 불혹(不惑)의 나이에 가까워질 즈음에는, 원자력이 우리 국민의 친구가 되어 있길 간절히 바란다. 왜냐하면 그것이 국민의 삶을 더욱 풍족하게 하고, 다시 한 번 세계에 빛나는 대한민국을 만들어 줄 것이라 확신하기 때문이다. 이제 이 글을 읽은 당신과 원자력이 좋은 친구가 되어 있는 밝은 미래를 상상하며 기분 좋게 글을 맺으려 한다.

3

AI 기반 4차 산업혁명을 이끌
대한민국 리더십 에너지, 원자력



서울대학교 원자력미래기술정책연구소
원자력정책센터 연구위원,
포항공과대학교
첨단원자력공학부 겸임교수

장문희

우리는 6·25전쟁 때 외국의 도움을 받았고, 원조 식량으로 허기를 겨우 달래기도 했다. 그러나 에너지(전기)는 그렇게 할 수 없었다. 원조국들이 비싼 석유를 공짜로 계속 줄 리 만무했다. 전기가 없는데 국민의 의식주를 챙길 생각은 할 수도 없었다. 그래서 국가가 위태롭고 국민은 헐벗고 배고팠지만, 전기 확보를 국가의 최우선 과제로 삼았다. 잘 살기 운동은 그다음이었다. 그리고 긴 인고의 시간을 보낸 후 우리는 세계의 미래를 논하는 당당한 G20 위상의 국가가 되었다. 세계 최고 품질의 원전과 원자력 발전 기술을 가진 덕분이다.

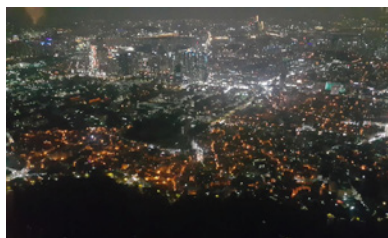
우리도 AI 기반 지구촌 미래의 리더 국가(G7) 중 하나가 되려면, 잠시 멈칫거리거나 여유 부릴 틈이 없다. 서두르자. “원자력 전기 확보”에 관해서는, 우리는 그러한 국가들 보다 여건이 훨씬 유리하다. 원자력 전기도 풍부하고, 세계가 탐내는 우리 고유의 원전과 우수한 기술도 가지고 있다. 이제 우리나라는 리더십을 갖춘 원자력이 뒷받침하는 AI 기술 혁명을 선도하여 미래 산업 패권국이 될 수 있는 단단한 기반을 먼저 구축해야 한다. 그것이 우리 미래세대를 위한 현세대의 책임이고 의무이다.



1. 폐허와 어둠에서 G20 위상의 국가로

처참했던 6.25 전쟁의 폐허에서 외국 원조로 겨우 생계를 잇던 대한민국은 70여 년의 짧은 시간 만에 세계 10위권 경제 대국으로 우뚝 서고, 원조 공여국으로 변모하였다.

[그림 1] 6.25 직후 폐허의 광화문(1953년)과 화려한 서울의 야경(2025년)



출처: 서울역사박물관/한국저작권위원회

[그림 1] 사진 2장은 70여 년 전과 현재의 서울을 보여준다. 2025년 서울은 관솔불, 호롱불도 제대로 켜지 못했던 70여 년 전 암울한 시절이 언제였냐는 듯이 야성이다.

대한민국은 대륙에 붙은 반도지만, 섬이나 다름없다. 유럽 국가들처럼 이웃 국가와 전기를 거래할 수도 없는 ‘에너지 섬’이다. 1945년 8월 해방 당시, 남한은 필요 전력의 66% 정도를 북한에서 공급받다가 1948년 5월 14일 정오에 북한이 단전했을 때, 남한은 암흑이 되었다.¹ 이승만, 박정희 대통령은 전기를 확보하는 데 모든 역량을 쏟아부었다. 석탄 발전을 앞세우고, 머리로 캔 에너지인 원자력을 도입하여 핵심 전력원으로 키워 마침내 원전 기술 자립을 이루고 수출까지 해냈다.

전기가 제대로 공급되자 산업이 일어났다. 뒤는 커녕 옆도 보지 않고 힘을 다

1 “북이 남측 전기 끊자…급파된 미 발전선이 암흑천지를 밝혔다”, 조선일보, 2014.12.16.

해 앞으로만 달려간 국민의 열정과 헌신의 대가는 풍족했고, 화려했다. 삶의 품질이 달라졌고, 국력이 달라졌다. 대한민국은 글로벌 20(G20) 국가에 올라섰고, 이제 G7도 가시권에 들어와 있다. 이 성공의 뒤를 전기가 받쳐 주었다. 미국 에너지 정보청에 따르면, 한국은 2022년 기준 전력 소비량 세계 6위에 해당한다.² 물론 이는 반도체, 석유화학, 금속기계산업과 같은 전력 의존도가 높은 제조업 기반의 산업 구조로 인해 산업용 전력 소비가 많기 때문이다. 이는 대한민국 경제를 견인해 온 산업들이다.

그렇다면 에너지(전기)의 뒷받침이 없는 국가가 과연 지속 가능할 수 있을까?

2. 에너지 안보와 국가 안보

안보의 사전적 의미는 외부의 위협으로부터 국가와 국민의 안전을 지키는 행위이다. 그래서 '안보'라고 하면 모두가 당연히 국방 안보를 가장 먼저 떠올린다. 제2차 세계대전 후 오랫동안 지속된 냉전 시대에는 그랬다. 자유주의와 공산주의의 첨예한 대립 속에서 양 진영은 상대 진영으로부터 국가를 지켜내야 했고, 국방이 최우선 목표였다. 그런 대치 상황에서도, 기술의 후진성과 낮은 농업 생산성으로 인한 식량 부족은 모든 국가가 심각하게 직면한 본질적인 문제였다. 그래서 식량 안보라는 개념이 등장하면서 국방 안보와 함께 공히 2대 국가안보 개념으로 자리 잡게 되었다.

1973년과 1979년에 두 차례 발생한 석유파동, 그리고 석유 보고인 중동의 지속적인 국제 정치적 불안정은 지구촌 에너지원 확보에 대한 큰 불안감을 안겼다. 그러나 미국 주도의 자유 자본주의 체제가 지구촌을 국가 간 협업과 분업, 자원과 기술의 교류, 상호 의존적 평화와 공존, 시장과 무역 기회를 확대·보장하는 세계화로 이끌면서, 지구촌은 안보에 대한 의식이 희미해졌다. 석유파동은 잊혀졌고, 에너지 문제도 관심이 약해졌다. 세계화가 모든 것을 해결해 줄 것만 같았다.

2 “자원빈국 韓, 세계 6위 전기 다소비국....”, 뉴시스, 2024.8.18.

하지만 세계화가 양면의 얼굴을 가졌다는 것을 깨달은 국가와 그렇지 못한 국가의 상황은 시간이 흐를수록 크게 달라졌다. 세계화는 상생과 공존이라는 높은 가치를 공유했지만, 약소국은 강대국의 경제 식민지이자 상품 시장에 불과했고, 강대국의 혜택에 기대는 무기력한 의존성만 키웠을 뿐이다. 에너지 문제에서는 상황이 더욱 나빠졌다. 약소국은 사탕처럼 달콤하지만 실질적 가치가 크지 않은 분야에서 강대국과의 협업과 분업을 큰 혜택으로 여겼고, 강대국에 귀중한 에너지 자원에 대한 접근을 쉽게 허용하였다. 국가 발전에 필요한 자본과 기술의 축적이 중요하다는 것도 인식하지 못했지만 국가의 귀중한 자원(자본)이 강대국으로 빠져나가고 있다는 사실조차 자각하지 못했다.

우리나라는 냉정한 인식과 이성적인 대응으로 세계화의 기회를 이용해 암울했던 경제를 선진 경제로 발전시켰지만 에너지 문제에서만은 세계화의 틀에 갇히지 않고, 어려운 자립의 길을 택했다. 북한의 송전 중단으로 에너지(전기) 문제의 심각성을 일찍 깨달은 이승만 대통령과 박정희 대통령은 기술 도입을 시작으로 원자력 발전 기술의 자립을 추진하면서 국가 생존의 핵심 자원인 전력 확보에 국가적 노력을 경주해 왔다.

[표 1] 원자력발전소 부지별 원전 현황

원전 부지	원전 부지별 가동 및 건설 중인 원전 수						비고
	고리	새울	한빛	한울	월성(경)	월성(중)	
가동 (건설)	5	2(2)	6	8(2)	2	3	- 영구정지 원전은 불 포함 - 운영허가 만료 후 계속운전 신청 중인 고리2, 3호기는 가동원전으로 분류함

출처: 한국수력원자력, 열린원전운영정보

그 결과 [표 1]에서 보는 바와 같이 2025년 2월 현재 우리는 26기의 원전을 운영하여(4기 건설 중) 국가 전력 생산의 30% 이상을 담당하고 있다. 나아가 글로벌 원자력 강국들과 경쟁하여 우리 APR1400 원전 4기를 UAE에 수출(2009년)하였고, 유럽 기술 요건을 만족하는 APR1000 원전 2기를 체코에 건설할 우선협상대상자로 선정되어(2024년) 명실상부 원전 기술 수출 글로벌 5대 강국의 위상을 확실히 하였다.

21세기 들어서서 미·중의 정치적·기술적 대립으로 세계화는 퇴색되고 보호주의가 부상했다. 국가와 민족을 최우선시하는 보호주의는 국제 정치에 그치지 않고, 에너지 자원을 민족 자본화하는 추세로 이어졌다. 에너지 자원에 외국의 접근을 금지하겠다는 것이다. 에너지원은 국가의 지속 가능성에 있어서 절대적인 ‘선(善)’이 되었으며, 돈으로도 쉽게 살 수 없는 귀중한 자원이 되었다. 나아가 러시아-우크라이나 전쟁(2022.2.~현재)으로 촉발된 러시아산 가스의 유럽 공급이 중단되자, 외국의 자원에 의존하는 것이 얼마나 위험한 것인지 전 세계가 깨달았다. 자국 기술로 만든 원자력을 스스로 포기한 독일이 천연가스를 러시아에 의존하다가 에너지 위기에 빠진 생생한 실례를 세계가 지켜보았다.

보호주의와 민족주의는 ‘에너지 안보’라는 새로운 국가안보 개념을 등장시키고 고착화시켰다. 탈원전에 앞장섰던 유럽 국가들이 동켈플라우테³나 에너지원 수입을 걱정하지 않아도 될 원전 건설에 앞장서고 있다. 에너지 안보를 세계화 협력 틀에 의존하는 것은 강대국처럼 힘(정치력, 군사력, 외교력 등의 국력)과 확실한 에너지원이 있을 때만 가능하다.

이젠 지구촌 전체가 에너지 안보, 국방 안보, 식량 안보가 국가 존재와 지속 가능성에 필수적인 안보 요소라는데 주저없이 동의한다. 필자는 한 걸음 더 나아가, 에너지 안보 없이는 국방 안보도, 식량 안보도 불가능하다고 생각하며, 에너지 안보가 최고 가치의 안보라고 생각한다. 에너지 없이는 국방과 식량 확보에 필요한 도구들을 작동시키거나 제품들을 생산할 수 없다.

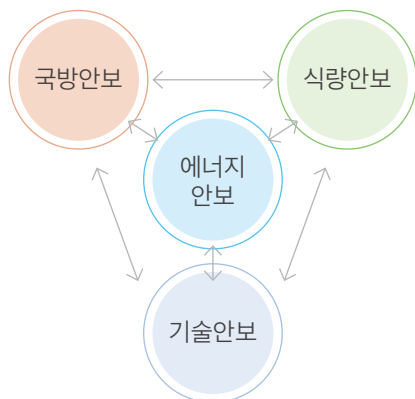
박정희 대통령이 생전에 에너지 안보에 대해 남긴 짧은, 강력한 메시지가 대전에 있는 한국원자력연구원에 있다. “원자력은 국력”, 에너지 안보의 중요성을 이보다 더 절실하게 강조한 메시지가 있을까? 에너지원 불모지나 다름없는 우리나라는 이 메시지를 금과옥조로 삼고, 혼신의 노력을 기울여 원자력을 우리나라 에너지 안보를 이끄는 초석이자 리더십을 가진 에너지원으로 만들었다.

빠트릴 수 없는 안보가 하나 더 있다. 바로 기술 안보이다. 세계 패권을 차지하려

3 독일어'Dunkelflaute'는 '어두운 침체'를 뜻하며 햇빛과 바람이 거의 없는 날씨 현상으로 태양광과 풍력 발전에 큰 영향을 끼친다.

는 미국과 중국의 첨예한 갈등과 대립의 근본은 첨단기술 보호, 즉 기술 안보에 뿌리를 두고 있다는 사실을 지구촌 전체가 알고 있다. 기술을 국가안보 차원에서 보호하려는 기술 패권 갈등인 것이다.

[그림 2] 국가의 4대 핵심 안보



[그림 2]는 에너지 안보, 국방 안보, 식량 안보, 기술 안보의 4대 안보 초석들이 서로 연결되어 플랫폼을 형성하고, 그 위에 국가와 국민이 존재한다는 현재의 국가 안보 개념을 보여준다. 국가로 존재하면서 지속 가능해야 하고, 국민의 삶의 질을 보장하기 위해서는 이 4개의 안보 초석이 튼튼한 플랫폼을 만드는 버팀목이 되어야 한다는 것을 의미한다. 이제는 안보에 대한 개념이 국방에만 한정되지 않는 시대적 환경 변화를 이해하고, 이에 대한 적응력과 대응력을 키워야 한다.

3. AI 기반 4차 산업혁명과 에너지(전기)

수요가 있으면 공급도 있게 마련이다. 상품의 핵심 가치는 가성비(가격 대비 성능)와 품질이며, 이는 경쟁력의 핵심 요소이다. 현재 문명과 산업사회를 이끌어가는 동력인 에너지(전기 또는 열) 수급 문제는, 먹고사는 문제 해결, 즉 경제발전이 최우선 목표였던 때와는 달리 쉽게 해결할 수 있는 간단한 문제가 아니다. 오늘날 산업과 우리의 사회생활은 거의 절대적으로 에너지(특히 전기) 의존적으로 되었으며, 효율성과 편리성에 의해 전기 수요는 그 끝을 예측할 수 없을 정도로 증가하고 있다.

인류를 지속 가능하게 할 4번째 산업혁명이 진행 중인 지구촌에서는 정도의 차이는 있지만 선진국이나 개발도상국을 가리지 않고 모든 국가가 ‘청정 전력 확보’에 국가의 역량을 총동원하여 전쟁을 치르고 있다. 글로벌 탄소중립 운동에도 동참해야 하고, 인공지능(AI, Artificial Intelligence) 기반 산업, 반도체, 데이터센터, 전기자동차, 수소 혁명 등으로 대표되는 거센 제4차 산업혁명의 흐름을 따라가기 위해서는 엄청난 전력, 그것도 탄소 배출이 없는 무탄소 청정 전력이 필요하기 때문이다. 최고 품질의 친환경 전기를 철나의 중단도 없이 안정적으로 공급하지 못하면, AI 기반 4차 산업은 꿈도 꿀 수 없고, 글로벌 생존 경쟁에서 탈락할 수밖에 없는 상황이다. 첨단 공정으로 이루어진 반도체 산업과 빅데이터를 다루는 데이터센터는 컴퓨터의 연산과 뜨거워진 컴퓨터의 냉각에 천문학적인 양의 전력을 필요로 한다. 반도체 생산과 데이터센터에서는 정전도 허용하지 않는다. 철나의 정전, 그 순간 모든 것을 망칠 수 있다. 간헐성과 변동성이 특징인 태양광, 풍력 전기로는 전력저장장치(ESS)가 뒤를 받쳐준다 해도 여전히 불안하다. 세계가 원자력 전기를 구하는 이유이다.

AI 기반 4차 산업혁명의 물길은 집 옆 개울가를 낭만적으로 흐르는 온순한 물길도, 넓은 강을 유유자적 흐르는 한가한 물길도 아니다. 모든 것을 일순간에 휩쓸어 갈 쓰나미 같은 기세의 물길이다. 대한민국은 이 거센 4차 산업의 물결에 휩쓸려 역사하거나 사라지지 않고, 당당히 맞설 준비가 되어 있을까? 지난 정부 5년(2017.5~2022.5)간 에너지전환 정책(탈원전, 재생에너지 진흥)을 정당화하기 위해 산업 전력 수요를 과소 예측했고, 특히 4차 산업의 전력 수요를 무시한 그 에너지 정책의 후유증은 없을까?

1) 전기만 먹는 만능 지능, AI 기반 첨단 산업혁명

지금은 컴퓨터 없는 일상생활을 생각할 수도 없다. 인간의 두뇌 대신 지능적 연산을 하도록 만든 컴퓨터는 반도체 등 수많은 전자부품으로 회로를 구성한 첨단 전자 장치이다. 이 컴퓨터에 지능형 알고리즘을 설치하고, 방대한 양의 정보와 지식을 입력한 뒤 알고리즘을 가동하면, 인간의 두뇌처럼 답을 생성하도록 만든 것이 인공지능 AI이다. 여기에 입력된 정보와 자료(데이터)에서 의미를 도출하는 자기 학습 기능이 더해지면, AI는 스스로 이미지와 텍스트(사진, 영상, 문서 등)를 만들고, 실시간으로 대화하며, 학습한 정보를 기반으로 스스로 판단을 내릴 수도 있다.

처음 나온 AI는 초보적인 지능을 지닌 어설픈 기계에 불과했지만, 조만간(기술 개발의 속도에 비추어 보아 아주 가까운 미래로 예상하고 있다) 인간의 생물학적 지능과 대등한, 아니 그 이상의 지능을 갖게 될 것이다. 그렇게 되면 어떤 일이 발생할지 아무도 알 수 없다. 이의 예로 적절할 것 같은 선지적인 영화가 과거 큰 인기를 끈 적이 있다. 2004년에 개봉된 “I, Robot”이라는 영화다(그림3).

[그림 3] 영화 ‘I, Robot’ 속 한 장면



출처: 이십세기폭스코리아(주)

영화는 해피엔딩(과연 해피엔딩일까?)으로 끝나지만 인간이 만든 AI 로봇이 인간을 지능적으로 지배할 수 있다는 과학적 상상을 담고 있다. 그보다 앞서 1968년에 나온 “스페이스 오디세이 2001”에서는 HAL-9000이라는 AI가 인간의 명령을 거부하는 장면이 등장한다. 이 예들은 과학적 상상이 아니라 현실에 매우 가까워지고 있다.

로드니 브룩스 MIT 명예교수는 “AI 로봇 한 대가 학습한 내용을 클라우드를 통해 다른 모든 AI 로봇에 전파할 수 있고, 클라우드 소프트웨어는 AI 로봇들의 모든 지능을 합친 ‘슈퍼 마인드’가 될 것”이라고 했다.⁴ 각 AI 로봇의 자율학습 결과가 클라우드에서 공유되고, 로봇 전체의 창의적 집단학습으로 업데이트하면서 승수(乘

4 『더 정밀해진‘로봇 일꾼’……』 한국경제신문, 2024.5.27.

數)처럼 작용하여 그 위력이 인간의 지능을 초월할지도 모른다는 것이다.

AI는 이미 우리와 생활을 함께하고 있다. 식당의 서빙 로봇은 초보 중의 초보 AI 로봇에 불과하다. 스마트폰의 AI 응용은 더 빠르게 진화 중이다. 육체노동뿐만 아니라 지능 활동까지 AI가 담당하면서 생물학적 인간의 일자리가 점점 없어지고 있으며, 이젠 AI의 윤리 문제까지 심각하게 제기되고 있을 정도이다. 그럼에도 불구하고 AI 기술은 발전을 거듭하여 인간 지능에 더욱 가까이 접근하고 있다. AI의 최종 목표는 생각하면서 인간과 실시간으로 대화할 수 있는 범용인공지능(GAI, General AI)이다. 즉, 생물학적 인간 지능을 가진 인간을 닮게 하는 것이다. 생성형 AI의 반응 시간은 인간 간의 대화 반응 시간과 거의 유사한 수준까지 도달했다. 오픈 AI사가 개발 중인 생성형 AI인 GPT-4o의 평균 응답시간은 320밀리초(msec)로 사람의 반응 시간과 비슷하다고 한다. 생성형 AI는 엄청난 양의 정보를 찰나의 순간에 검색·평가하여, 조건에 맞는 답을 우리가 기대하는 시간 안에 내놓는다.

AI를 학습시킬 천문학적 양의 데이터를 저장·처리하는 데이터센터와 AI의 추론 과정에서 방대한 양의 정보를 검색·조합하여 평가하기 위해 천문학적인 수의 복잡한 연산을 하는 AI의 알고리즘 구동에 필요한 전력과 연산 처리로 인해 뜨거워진 컴퓨터를 냉각하는 데 막대한 전력이 필요하다. 문제는 AI를 위한 ‘청정 전력 확보’이다. 어디서 어떻게 그 엄청난 양의 청정 전력을 확보할 수 있을까?

2016년 3월, 이세돌 9단은 AI 컴퓨터인 ‘알파고’와 세기의 바둑 대국을 펼쳤다. 알파고는 1,202개의 중앙처리장치(CPU)와 176개의 그래픽처리장치(GPU) 및 103만 개의 메모리 반도체로 만들어진 AI 컴퓨터이다. 승부를 떠나 알파고는 시간당 170kW를 사용했고, 이세돌 사범의 두뇌는 시간당 겨우 20W의 에너지를 소모했다.⁵ 구글 검색에 평균 0.3Wh 전력이 사용되지만, 생성형 AI인 챗GPT는 한 번에 약 2.9Wh를 사용하여, 전력 소모가 10배에 이른다.⁶ 2024년 들어 AI 발(發) 전력 확보 문제가 지구촌의 가장 뜨거운 이슈가 되었다. AI용 첨단 초고속 반도체 설계·제조와 데이터센터 가동이 전력수요 폭증을 앞에서 이끌고, 전기자동차와 자율주행

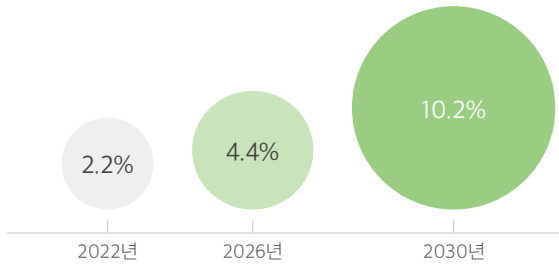
5 “알파고가 쓴 에너지, 이세돌의 8500배....”, 조선일보, 2012.11.15.

6 “AI=반도체+구리? AI발 전력위기가 다가온다”, 동아일보, 2024.4.13.

자동차, 이차전지, 산업의 전기화 등이 뒤에서 밀며 전력 수요를 가속화하고 있다.

국제에너지기구(IEA)는 2022년 전 세계적으로 데이터센터와 AI 등에서 약 460 TWh(테라 와트시, T(테라): 10^{12})의 전력이 소비되었는데, 2026년에는 최대 2.3 배 증가한 1,050TWh를 소비할 것으로 전망했다. 이는 일본 전력 소비량(2022년, 939TWh)을 넘어서는 규모다.⁷

[그림 4] 전세계 전력 중 AI 데이터센터 소요 비중



출처: 국제에너지기구(IEA)

[그림 4]는 IEA가 예측한 전 세계 전력 소비 중 AI 데이터센터가 차지하는 비중을 보여준다. AI 기반의 4차 산업혁명 영역은 미래의 먹거리 산업으로 선진국과 빅테크 기업들이 사활을 걸고 경쟁을 하는 분야이다. 이 산업은 전기를 대량으로 소비하는, 이른바 “전기 먹는 하마”라는 특징을 갖고 있다. 전력이 받쳐주지 못하면 감히 생각도 해볼 수 없는 산업들이다.

데이터센터와 AI 반도체산업에 뛰어든 선진국들마저, 부족한 전력을 구하기 위해 천문학적인 자금을 투입하며 해답을 찾고 있다. 글로벌 기업들은 전기값이 저렴한 국가에 데이터센터를 건설하는 방식으로 대응하고 있다. 데이터센터의 엄청난 전력 수요가 전기 부족 또는 전기값 상승으로 이어져 사회의 불편이 초래되면서 싱가포르와 네덜란드는 한시적으로 신규 데이터센터 건설을 억제하고 있는 상황이다.

미국은 전 세계 데이터센터의 38%를 보유하고 있으며, 2024년 말 기준 이들 데이터센터의 전력 소비는 국가 전체 전력 사용량의 4%를 차지한다. 버지니아주

7 “주요국 ‘AI발 전력난’ 직면, 빅테크 기업들도 대책 마련에 나서”, The Pabii Research, 2024.5.16.

에서는 데이터센터 신설을 제한하는 법이 발의되고 있는 등 미국은 벌써 “전력 확보” 문제에 실질적으로 부딪히고 있다.⁸ 이에 송전망 노후화가 심각한 미국은, 송전망 없이 데이터센터 옆에 전력을 직접 공급할 소형모듈원자로(SMR) 개발과 이의 신속한 배치를 위한 정책 지원에 어느 나라보다 적극적이다.

문제는 전기의 품질이다. 싸고, 깨끗하고, 안정적이어야 한다. 이에 AI 시대의 전력 부족난을 해결해 줄 수 있는 최적의 방안으로 원전이 크게 주목받고 있다. CO₂를 배출하지 않으면서 높은 품질의 전기를 안정적으로 공급할 수 있기 때문이다. 탄소중립을 위해 탈탄소 발전을 추진하고 있지만, 자원 부존의 지정학적 제약과 기상 의존적인 간헐성·변동성을 가진 공급이 불안정한 재생에너지 전기로는 폭증하는 AI산업 발(發) 전력 수요를 감당하기 어려워 원전으로 눈을 돌리고 있는 것이다.

2) AI 기반 세계는 ‘원자력 전기’ 구하기에 총력을 쏟는다.

원전 부흥(탈탈원전)은 역설적으로 일본 ‘후쿠시마 원전 사고’ 이후 탈원전 기치를 높이 들고 전력 생산을 100% 신재생에너지원으로 전환하자는 글로벌 운동을 앞서서 이끌었던 유럽에서 시작되고 있다. 유럽의 생명선이던 러시아 가스의 공급이 끊어졌다(2025.1.1.자로 전면 중단). 동켈플라우테 때문에 태양광과 풍력 발전이 결코 지속 가능하지 않다는 것을 확인했다. 에너지 안보가 목전의 심각한 문제로 떠오르자, EU는 오랜 논란을 정리하고, 원자력을 ‘그린 텍스노미’에 포함해 청정 전기로 법적 지위를 부여하였다. 탈원전에 앞장섰던 스웨덴을 위시하여 핀란드, 폴란드, 벨기에, 체코, 루마니아, 슬로베니아, 네덜란드, 헝가리 등이 원전 건설을 추진 중이거나 계획을 세우고 있다.

원자력 발전 효시 국가인 영국은 믿었던 북해 풍력발전이 멈춰 일부 지역에 정전이 발생하자 2050년까지 원전 용량을 현재의 4배로 늘리기 위해 추가로 24GW 규모의 원전을 건설하겠다는 ‘원전 로드맵 2050’을 발표했다. 원자력 발전이 전체 전력 생산의 약 60%를 넘는 프랑스는 2025년 현재, 원전 6기 건설 중에 8기를 추가로 건설할 계획이다. 탈원전을 진행하던 스웨덴은 방향을 180도 바꾸어 2045년

8 “AI·전기차 폭증, 세계가 ‘전기 쇼크’”, 조선일보, 2024.5.13.

까지 10기의 원전을 건설하는 계획 추진을 진행 중이다.

원자력 발전 부흥은 신규 원전 건설뿐만 아니라 운전 중인 원전의 운전 기간을 20년 또는 40년 연장하는 계속 운전으로까지 확장되고 있다. 한수원 보고서에 따르면⁹, 전 세계적으로 2024년 말 기준 가동 중인 416기의 원전 중에 239기가 계속 운전 승인을 받았고, 최초 운영 허가가 완료된 원전 267기 중 244기가 계속 운전을 하고 있다. 유럽은 가동 원전 97기 중 69기가 계속 운전 승인을 획득했다. 재생에너지원 환경이 우수한 미국은 오히려 원전 이용에 더 적극적이다. 가동 원전 93기 중 84기가 계속 운전 승인을 받았으며(그중 54기를 운전 중), 최초 운영 허가 만료 원전 63기 모두 계속 운전 중이다.

더 나아가 미국 미시간주는 2022년에 폐쇄된 Palisades 원전(1971년~2022년)을 이례적으로 2025년에 재가동하기로 했고,¹⁰ 일본은 탈원전 철회를 공식화한 ‘원전 회귀’ 정책을 결정하고(2025.2.18.) 2040년까지 원자력 발전 비중을 20% 수준까지 확대하기로 했다.¹¹ AI 분야 세계 4대 석학 중 한 명인 제프리 힌트 교수(토론토 대학)를 보유한 캐나다도 Pickling 원전의 운전 기간을 30년 연장하기 위한 개·보수 작업을 시작했다.

MS, 구글, 아마존 등 글로벌 IT 기업도 AI산업의 선수가 되기 위해 직접 원자력 발전소와 전력 공급망을 연계하고 있다. 글로벌 클라우드 서비스 1위인 아마존웹 서비스는 2024년 3월부터 원자력 전기로 가동되는 대형 데이터센터를 운영하기 시작하였고, 아마존은 고온가스로를 개발하는 X-Energy사에 투자했다. RE100에 참여한 대표적 글로벌 기업인 MS사는 버지니아에 있는 데이터센터 운영을 위해 2024년 9월, 미국 최대 원전 기업인 Constellation에너지와 2028년부터 20년간 전기를 독점 공급받는 계약을 체결했다.

이에 Constellation사는 경제성 악화 이유로 2019년 폐쇄한 원전 TMI-1호기를 2028년부터 재가동할 준비를 서두르고 있다.¹² 구글도 Kairos Power와 선진 SMR

9 『세계 원전 계속운전 현황보고서』 한국수력원자력, 2024.3.28.

10 『미, 사상 첫 폐쇄 원전 재가동...15억\$ 지원』 한국경제신문, 2024.1.31.

11 『일본 탈원전 철회 공식화'2040년 원전 20% 목표』, 포인트경제, 2025.2.20.

12 “정전 땀 대혼란 원전과 전력 직거래하는 빅테크들”, 국민일보, 2024.10.10.

을 건설하여 전력을 직접 공급받는 계약을 체결했다. 이는 RE100에 참여한 글로벌 빅테크 기업들까지 4차 산업의 핵심인 AI를 위한 데이터센터의 24시간 중단 없는 운영을 위해서는 간헐성과 변동성의 재생에너지 전기로는 불가능하고 무탄소의 안정적인 전원인 원전이 필요하다는 것을 확인시켜 주는 증거들이다.

3) 우리나라는 AI 기반 4차 산업혁명을 추진할 준비가 되어 있나?

AI 산업의 폭발적 성장, 반도체 수요 폭증, 데이터센터 증가, 전기자동차로의 전환 등에 천문학적 양의 전력이 필요하다. 독자들은 AI 기반 4차 산업혁명을 위해서는 안정적인 경제적인 전기가 절대적으로 필요한 상황에서 선진국들이 답을 찾기 위해 어떻게 노력하고 있는지를 보았다. 그럼 이제 우리의 상황을 살펴보자. 우선 다음 질문을 해보자(누구에게?). 우리는. 정말 AI기반, AI주도의

- 4차 산업혁명에 대한 이해는 제대로 그리고 충분히 하고 있는가?
- 4차 산업혁명 물길의 중심부에 있는가, 아니면 주변부를 맴돌고 있는가?
- 4차 산업혁명 분야에서 우리가 강한 분야는 어떤 분야인가?
- 4차 산업혁명을 이끌어 갈 에너지(전력)는 충분한가?

AI기반 4차 산업혁명은 국가의 생존과 지속 가능성을 결정할 것으로 보고, 혁명의 생명줄인 '전기 구하기'에 혼신의 노력을 기울이고 있는 지구촌 분위기를 보면서 우리의 미래에 조금이라도 관심이 있다면 누구든지 당연히 해볼 수 있는 질문들일 것이다. 필자는 AI전문가가 아니기에 이들 질문에 대한 답을 내놓을 수는 없지만 독자들하고 함께 답을 찾기 위한 고민을 해보고자 한다.

AI기반 4차 산업혁명의 핵심 인프라는 AI 모델과 이를 움직이는 AI 반도체, 그리고 이를 운영하기 위한 데이터센터라고 했다. 정부도 글로벌 4차 산업혁명 흐름과 경쟁에서 낙오되지 않기 위해 고심을 거듭하여 AI산업을 발전시키기 위한 정책을 수립했다. AI 모델과 반도체 개발을 위한 유능한 인재 확보, 최고 품질의 반도체 생산을 위한 하드웨어 구축 등에 필요한 정책들이다. 그러나 정책 이행을 위한 법을 만들어야 하는 국회는 법 만들기에 거북이 행보만 하고 있다. AI 산업 육성을 위한 'AI 기본법'과 반도체 산업 발전에 필요한 'K-칩스법'이 아직 법적 위상을 확보하지 못하고 있다.

다행히 세계 최대 규모로 조성하려는 용인 반도체 클러스터에 전력을 공급할 ‘국가 기간 전력망(송전망) 확충 특별법’과 원전의 지속 운영에 필요한 ‘고준위방사성 폐기물관리 특별법’이 법(안)으로 발의된 지 각각 28개월과 9년의 논의 끝에 가까스로 국회 상임위를 통과했다(2025.02.17.). 하루라도 빨리 AI 시대 마중물이 될 ‘원자력 전기 만들기’ 여건 강화에 힘이 보태지기를 기대해 본다.

(1) AI산업의 씨앗인 반도체와 원자력 전기

한국의 AI산업 경쟁력은 세계 6위권으로 평가받고 있다. IT 강국들은 우리나라가 AI 산업혁명 분야인 로봇공학, 자율주행자동차, 언어처리 및 음성기술 분야에서 상당한 능력과 잠재력을 갖추고 있다고 평가한다. 이들 모두 최첨단 반도체와 AI 기술이 필요한 분야이다.

반도체는 AI 기반 4차 산업혁명을 태동시킬 씨앗이다. 선진국은 반도체 산업 육성에 국가의 명운을 걸고 있으며, 미국과 중국은 반도체 패권을 두고 전쟁을 치르는 중이다. 미국은 모든 등급의 반도체를 중국으로 수출을 금지하고, 주요 동맹국과 기업들이 이에 호응하도록 강요하고 있다. 뿐만 아니라 미국은 최첨단 반도체인 AI용 반도체를 위시해서 성능 수준이 떨어지는 범용 반도체까지도 “미국 내 생산” 외치면서 보조금을 지급하여 세계 주요 반도체 기업을 자국으로 빨아들이는 블랙홀이 되었다.¹³ 한국의 상징인 삼성전자와 SK하이닉스도 예외가 될 수 없다. 시장 확보를 위해 대규모로 투자하여 미국에 생산 공장을 건설하고 있다.

정부는 “지금 벌어지고 있는 반도체 경쟁은 산업 전쟁이자 국가 총력전”이라며 총력 대응체계를 갖추겠다고 했다. 국가AI위원회를 신설하고, 민관이 협력하여 AI와 AI 반도체 분야에 2027년까지 9조 4천억 원을 투자하고 기업을 지원할 펀드까지 조성할 계획이다. 622조 원 규모의 투자가 이루어질 용인 반도체 메가클러스터에 필수적인 전기와 공업용수는 정부가 책임지고 공급하겠다고 밝혔다. 그만큼 시급하고 중요하다.

용인 반도체 메가클러스터 단지는 2029년 말까지 0.4GW 전력이 필요하며, 2042년(단지 완성)에는 수요가 7GW에 이르고, 클러스터가 완공되어 100% 가동

13 “주정부까지 나서... 미, 세계 반도체 기업 70곳 빨아들여”, 조선일보, 2024.4.10.

될 2053년 무렵에는 전력 수요가 14.7GW¹⁴에 이를 것으로 전망한다. 이에 필요한 전력은 1단계로 2036년까지 LNG 발전소 6기(3GW)를 현장에 건설하여 공급하고, 2단계로 2037년부터 동해안에서 생산되는 원자력 전기 등 7GW를 단지에 공급한다는 계획이다. 3단계로는 호남권 태양광 및 풍력 전기를 공급할 예정이다.¹⁵ 이는 전력을 송전선으로 동·서해안에서 공급하겠다는 것이다. 이는 수도권 전체 수요량의 약 25%에 해당하며, APR1400 원전 7기가 생산하는 전력량과 맞먹는다. 반도체 산업과 AI 산업은 ‘전기 먹는 산업’이 아닐 수 없다.

세계 일류 반도체 기술의 초격차 확보와 AI 기반 4차 산업혁명으로 국익을 증대시키기 위해 필요한 원자력 전기가 동해안에 있으나, 전기를 보낼 송전망이 부족하다. 피를 만드는 튼튼한 심장(발전소)이 깨끗한 피(전기)를 넘쳐나게 만들고 있지만, 이 피를 산업전선에 보낼 핏줄(송전망)이 부족한 것이다. 국회 상임위를 막 통과한 전력망확충특별법이 하루 빨리 송전망 확충에 그 역할을 다하기를 기대해 본다.

미·중의 기술패권 갈등, 중국의 ‘반도체 굴기’, EU의 엄청난 재정 규모의 반도체 개발 지원, 대만의 반도체 설계 및 AI 전문가 유치·육성은 AI와 첨단 반도체 산업의 패권을 차지하기 위한 전쟁에 다름 아니다. 그 충성 없는 전쟁의 한 사례가 등장했다. 2025년 2월, 중국 AI 스타트업 딥시크(DeepSeek)는 미국 빅테크 메타의 AI 개발비의 10분의 1 수준으로, 미국 오픈AI사의 ChatGPT급에 버금가는 성능의 AI 대규모 언어모델(LLM) R1을 출시했다. 미국 실리콘밸리에서는 그 충격을 “R1은 AI 분야의 스푸트니크 순간”이라고 표현했으며,¹⁶ 글로벌 AI 산업계는 이 사건을 ‘딥임팩트’라고 표현했다.

(2) 데이터센터 가동을 위한 원자력 전기

AI를 학습시킬 데이터센터 경우는 어떤가? 다시 강조하지만 데이터센터에서 컴퓨터를 연산 구동 시키는 전력과 뜨거워진 컴퓨터 냉각에 필요한 전력 양은 천문학적 수준이다. 특히, AI 데이터센터는 일반 데이터센터에 비해 전력 소요량이 3배 이상 많을 것으로 예측한다. 그 이유는 AI에게 학습시킬 데이터 규모와 학습 방법으

14 1GW는 우리 원전 OPR1000원전 1기가 생산하는 전력에 해당한다.

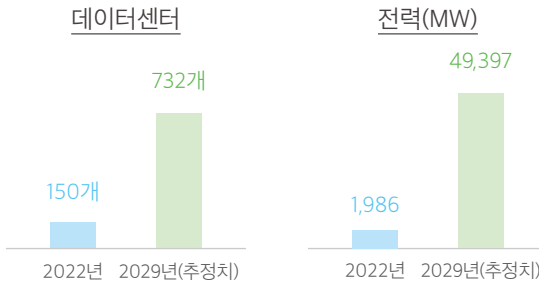
15 “전력망법, 국회에 발목잡혀...반도체 ‘송전 고속도로’ 차질”, 매일경제, 2024.5.27.

16 “중 딥시크의 습격...미 AI 급소 찔렸다”, 한국경제신문, 2025.1.31.

로 활용되는 머신러닝, 딥러닝, 그래픽처리장치(GPU) 기술 등 AI 구동(연산)에 막대한 전력이 소요되기 때문이다.

만일 데이터센터 시스템에 전력 공급이 끊어지면 어떻게 될까? 디지털 블랙아웃(작동 중지)이 작게는 일부 사회 기능의 마비, 크게는 국가 전체의 시스템 마비로 이어질 수 있다. 2018년 2월 2일 오전, KT 강남 인터넷·문자메시지 데이터센터의 정전 사고로 KT 서버를 이용하는 기업들의 웹사이트들이 다운되고, 일부는 장기간 마비되었다. 고객들은 종일 업무용 문자를 발송할 수 없었고, 1,500만 명에 이르는 KT 이동전화 가입자들도 불편을 겪었다. 만일 비슷한 사고가 국가시스템에 발생했다면? 상상만 해도 아찔하다. 위 사고는 데이터센터 운영에서 찰나 순간에도 끊어짐 없이 안정적인 전기 공급이 얼마나 중요한지를 경각시킨 매우 값진 교훈이라고 생각한다.

[그림 5] 국내 AI 데이터센터와 소요 전력



출처: 국회입법조사처

[표 2] 우리나라 데이터센터 현황(2023년 말 기준)

지역	고객 호수	총계약 전력(MW)	평균계약 전력(MW)	지역	고객 호수	총계약 전력(MW)	평균계약 전력(MW)
서울	48	653	13.6	전북	1	2	2.0
인천	8	69	8.6	광주· 전남	9	62	6.9
경기	34	681	20.0	대구· 경북	7	63	9.0
강원	7	85	12.1	부울· 경남	15	179	11.9
충북	4	30	7.5	제주	-	-	-
대전· 충남	17	162	9.5	총합계	150	1,680	13.2

출처: 한국전력공사 데이터센터 전기 공급 현황

[그림 5]와 [표 2]에 따르면, 우리나라는 전국 150개소(2023년 12월 말 기준)의 데이터센터가 운영 중이며, 이들이 2022년 한 해 동안 소비한 전력은 1,986MW (1GW급 원전 2기에 해당)로 월평균 1,762GWh 전력을 소비하였다. 이는 서울시 7,500여 가구가 소비하는 전력량에 버금간다. 산업통상자원부에 따르면¹⁷ 2029년까지 732개소 신규 데이터센터 수요가 있으며, 이에 필요한 전력량은 49.4GW로 추정된다. 이 양은 우리나라 역대 최대 전력 수요 97.1GW(2024.8.20.)의 51% 수준으로, APR1400 원전(발전 용량 1.4GW) 35기가 생산해야 겨우 감당할 수 있는 규모다. 2025년 2월 말 현재, 우리나라에서 가동 중인 원전 26기의 총 발전 설비 용량이 26.05GW에 불과한 상황에서 데이터센터에서 추가로 필요한 전력량 규모는 실로 놀라운 수치다.

문제는 데이터센터의 엄청난 소요 전력은 품질(전압 안정성 등)이 매우 중요하다는 것이다. 백업(저장·공급)이 완벽하게 지원되지 않으면 간헐성과 변동성이 태생적 특징인 재생에너지 전기만으로는 어렵도 없다.¹⁸ 탄소중립을 위해 퇴출 예정인 석탄 발전은 전력 공급원으로 고려할 수도 없다.

[표 3] 발전원별 발전량(TWh), ()안은 비중(%)

구분	2021	2022	2023	2024	2030*	2038*
원자력	158.0(27.4)	176.1(29.6)	180.5(30.7)	178.6(32.5)	204.2(31.8)	248.3(35.2)
석탄	198.0(34.3)	193.2(32.5)	184.9(31.4)	161.5(29.4)	110.5(17.2)	70.9(10.1)
LNG	168.4(29.2)	163.6(27.5)	157.7(26.8)	163.7(29.8)	161.0(25.1)	74.39(10.6)
신재생	43.1(7.5)	53.2(8.9)	56.6(9.6)	37.9(6.9)	139.6(21.7)	232.1(33.0)
청정수소 암모니아	-	-	-	-	15.5(2.4)	43.9(6.2)
기타	8.4(1.6)	8.4(1.5)	8.3(1.4)	7.7(1.4)	11.8(1.8)	34.9(5.0)

* 2030년, 2038년은 11차 전력수급기본계획(전기본)의 계획 발전량임
출처: 연도별 한국전력통계, 전기본-산업자원통상부

17 산업통상자원부, 『데이터센터 수도권 집중 완화 방안』, 2023.3.9.

18 장문희, “원자력 발전의 사회성과 지속가능성을 위한 과제”, 『알기 쉬운 에너지·원자력 2024-2』, 한국에너지정보문화재단, 2024.12.31.

[표 3]은 2021년~2024년간, 그리고 11차 전력수급기본계획¹⁹에 따른 발전원별 발전량과 비중을 보여준다. 2029년까지 단순히 발전량만으로 보더라도 신재생(태양광, 풍력 등) 전력으로는 데이터센터를 운영할 수가 없다. 이대로라면 2038년경에는 AI 산업혁명이 멈춰버릴 수도 있다. 국회 입법조사처는 2024년 5월 발표한 보고서²⁰에서 “데이터센터는 24시간 중단 없이 가동되어야 하므로, 무탄소 기저 발전원인 원자력이 효율적이며, 재생에너지 전기는 보조적으로 사용되어야 한다.”라고 분석했다.

(3) 전기자동차를 위한 전기는 어디서 구하나?

4차 산업혁명 분야의 하나인 전기자동차가 소비할 전력은 얼마나 될까? 전기자동차 보급 대수는 2023년에 54만 대를 넘었다. 대도시와 일부 가정을 제외하면 전기자동차 충전 환경이 만족스럽지 못한 상황에서도 정부가 보조금을 지급하면 수요를 독려한 덕분일 것이다. 전기자동차가 소비하는 전력량을 계산해 보자. 정부는 2030년까지 전기자동차 보급이 450만 대를 넘어서는 것으로 예측하고 있다. 계산 편의상 2023년형 아이오닉5(IONIQ 5)를 대상으로 하였다(참고로 계산에 사용된 배터리 자료 및 주행거리는 언론에 공개된 자료를 사용하였다).

- 아이오닉 5에 장착된 배터리 용량: 77.4kWh
(안전여유도 10%를 고려하여 실제 계산에서는 70kWh를 가정함)
- 배터리 완전충전 시 주행가능거리: 429~458km/충전
(계산에서는 440km로 가정), 자동차는 1,800km/월 주행을 가정함
- 따라서 1800km/440km = 약 4회 충전/월 → 70kWh x 4회 = 280kWh/월
전력 사용 → 12월/년 x 280kWh/월 = 3,360kWh/년 전력 사용
- 동일 차량 100만 대 경우 → 100만 대 x 3,360kWh = 3,360GWh 전력 사용
- APR1400 원전 1기 생산 전력량/년 → 1.4GW x 365일/년 x 24시/일 x 85% (가동률) = 10,424GWh
- 아이오닉5 100만 대가 연간 소비하는 전력량은 APR1400 원전 0.3기 (3,360GWh ÷ 10,424GWh/기)가 생산하는 전력량에 해당.
APR1400 원전 1기 기준 약 310만대 아이오닉5의 총 수요전력을 감당할 수 있음.

19 『11차 전력수급기본계획(안) 주요내용』, 산업통상자원부, 2025.2.19.

20 이슈와 논점 2238호, 『AI혁명에 부응할 선제적 전력공급·전력망 확충 긴급요』, 국회입법조사처, 2024.5.21.

승용차뿐만 아니라 연비가 낮은 화물자동차나 버스 등의 대형 차량까지 고려하면 전기자동차에 필요한 전력량은 계산된 수치보다 더 클 것이다.

AI 장착 자율주행 전기자동차의 경우, 전력 수요는 다를 수가 있다. 자동차 운행과 관련된 부품과 시스템이 반도체 기반의 AI로 제어될 것이므로 AI 시스템의 전력 소요량이 단순 전기자동차에 비할 바가 아닐 것이다. 완전 자율자동차가 아직 실용화되지 않았기에 실제로 소비될 전력을 정확하게 알 수는 없지만 비유적인 예는 우리 생활에서 찾아볼 수 있다. 스마트폰을 통상적인 통화와 문자 교신 서비스에만 사용하면 전력 소모가 많지 않아 충전 상태가 오래 간다. 그러나 전화기에 설치되어 있는 다양한 앱(Application)을 사용하면 충전 전력량은 매우 빠르게 감소한다. 사용하는 앱 시스템 구동에 별도의 전력이 많이 소모되기 때문이다.

그렇다면 우리에게 첨단 4차 산업혁명을 뒷받침할 고품질 전력이 없는 것일까? 아니다. 우리에게 에너지 자원 환경과 무관하고, 외국에 의존하지 않아도 되는 기술을 자립한 전력원이 있다. 바로 전력 생산 비중이 30%를 넘는 원자력 전기이다. 무탄소 청정 녹색전기로서, 변동성이 높은 재생에너지 전기와는 달리 날씨와 밤낮에 관계없이 전기가 안정적으로 공급될 수 있어, 고품질 전력이 필요한 4차 산업혁명을 이끌어갈 에너지로서 최적격이다.

신규 원전 건설 계획(11차 전력수급기본계획)도 있다. 11차 전력수급기본계획에는 APR1400 원전 2기와 글로벌 원자로 기술 패러다임 변화의 주체인 SMR 건설이 포함되어 있다. 기후변화에 대응하고 탄소중립 달성에 기여할 청정 원자력 전기를 AI산업 경쟁국에 비하여 쉽고 유리하게 공급할 수 있는 여건만 만들면(정책, 법/제도, 산업지원 등) AI 기반 4차 산업혁명을 선도적으로 성공시킬 수 있을 뿐만 아니라, 지구촌을 이끄는 G7급 위상을 지닌 국가로 도약할 수 있다.

4. 미래 산업의 동력 - 원자력수소 구하기

제러미 리프킨은 『수소혁명』²¹에서 화석연료 시대의 종말과 수소경제의 도래에

21 『수소혁명, The Hydrogen Economy』, Jeremy Rifkin, 민음사, 2003.1.

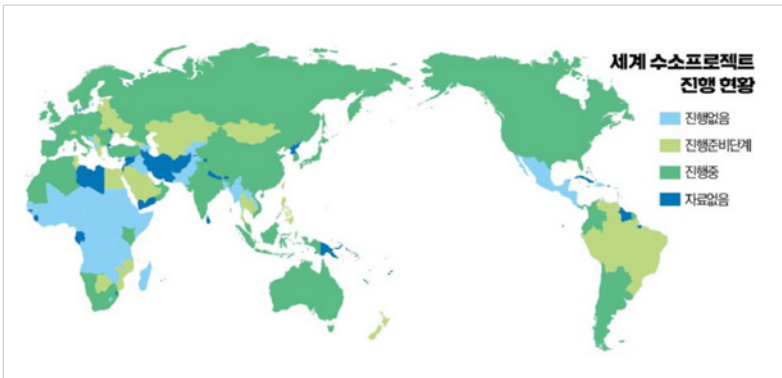
대한 뛰어난 식견을 보여주며, 1874년 프랑스의 공상과학 소설가 쥘 베른이 소설 『신비의 섬』에서 석탄이 고갈되면 물(수소와 산소)이 우리의 에너지원이 될 것이고, 물은 미래의 석탄이라면서 문명에 필요한 모든 에너지를 수소에서 얻는 날이 올 것이라고 예언했다고 했다. 150년 전의 그 예언이 지금, 현실이 되고 있다.

인간은 에너지를 얻기 위해 나무를 태우는 것에서 시작해 석탄, 석유, 그리고 천연가스 순으로 단위 질량당 탄소의 수가 적어지는 저(低)탄소 에너지원(연료)이 용으로 탄소경제를 진화시켜 왔다. 그리고 인간은 탄소경제 여정의 끝에 수소경제가 있음을 깨달았다. 수소 자원은 석유나 천연가스처럼 특정 지역에 몰려 있지 않아 기술만 있으면 누구나 가질 수 있는 기술형 에너지이다. 문제는 수소는 독립 원소로 존재하지 않아 수소화합물(물, 천연가스 등)에 에너지를 투입하여 분리해 내는 과정이 필요하다.

수소경제란 어떤 경제일까? 탄소경제가 탄소를 포함한 연료를 이용한 경제시스템을 말하듯이, 수소경제는 수소를 연료로 사용하거나, 수소를 에너지의 저장·운반을 위한 매개체로 활용하는 수소 기반 경제시스템을 일컫는다. 수소는 탄소와 달리 산소와 결합(연소)하여 에너지를 만들 때 CO₂가 발생하지 않아 지속 가능성이 높은 친환경 에너지원으로 여러 산업 분야에 활용할 수 있다. 수소경제는 탄소경제의 패러다임을 바꿀 것이므로 사회 시스템에 근본적인 변화가 일어날 것으로 예상된다.

수소경제가 희망적 전망이 아니라 실용적인 경제가 될 것이라는 것은 [그림 6]에서 보듯이 거의 전 세계가 수소 프로젝트를 진행하고 있는 것을 보면 확실해진다.

[그림 6] 세계 수소프로젝트 진행 현황



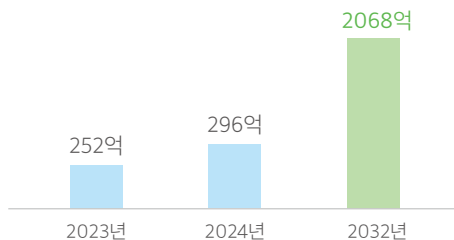
출처: 한국경제, 2024.5.30

선진국과 개발도상국은 물론, 석유 자원의 보고인 중동에서조차 거대한 수소 혁명의 바람이 불고 있다.²² 사우디아라비아가 중동 산유국의 수소경제 선두 주자로 2025년부터 수소를 하루에 650만 톤 생산할 예정이고, UAE도 국부펀드를 앞세워 ‘아부다비 수소동맹’을 결성했다. 수십 년 뒤 석유 시대가 끝난 후에도 세계 에너지 시장의 패권자가 되려는 포석으로 평가되고 있다.

수소 시장에 대해 글로벌 컨설팅업체인 맥킨지는 2050년 세계 에너지 수요의 18%를 담당하면서 수소경제 규모가 2조 5,000억 달러에 이르고, 일자리는 누적 기준 3,000만 개 이상을 창출할 것으로 예상하고 있다.²³

수소는 무색, 무취, 무미의 기체지만, 생산 방법에 따라 색깔로 구분한다. 그린수소는 재생에너지 전기로 물을 전기 분해해 얻는 수소, 석유화학·제철 공정에서 발생하는 부생수소와 메탄(CH₄)을 고온 수증기와 반응시켜(개질) 만들면 그레이수소, 그레이수소를 만들 때 발생하는 CO₂를 포집한 후 생산한 수소를 블루수소, 원자력 전기로 물을 전기분해 해서 얻는 수소를 핑크수소라 한다. 일반적으로 그린수소, 블루수소, 핑크수소를 청정수소(청정에너지원)로 분류한다. [그림 7]은 생산 효율성이 높고, 가격이 싼 원자력 핑크수소의 글로벌 시장 전망을 보여준다.

[그림 7] 글로벌 핑크수소 시장 전망



출처: 포춘 비즈니스 인사이드 (단위: 달러)

현재 이용되고 있는 기술과 개발 중인 잠재적 수소 생산 기술을 [표 4]에 요약해 보았다. 현재 생산하는 수소의 절반 정도가 천연가스의 수증기 개질 공정으로 생산

22 “에너지 패권 지켜라... 산유국, 오일머니 수소에 투자”. 한국경제신문, 2021.2.5.

23 “에너지 시장의 게임체인저 ‘수소 핵심’ 기술 주목”, 전기저널, 2024.11.18.

된다. 수증기 개질 공정에서 수소 원자가 떨어져 나올 때 CO₂가 발생한다.

[표 4] 수소 생산 방법 비교

분류	생산방법	에너지원	수소자원	장점	단점
상용기술	수증기 개질법	화석연료	천연가스 석유	성숙기술 고효율(70%)	CO ₂ 배출 원유가격 연동
	석탄 기화법	화석연료	유연탄	성숙기술 고효율(60%)	CO ₂ 배출 자원 지 역편중
	물 전기분해	전기	물	성숙기술 (알카라인, PEM)	저효율, 고비용 (PEM), 미성숙기술 (SOEC, AEM)
원자력 수소	황-요오드 공정	원자력	물	고효율(≈40%) 대량생산	미성숙기술 고온부식 이슈
	수증기 전기분해	원자력	물	고효율(≥40%) 단순공정	미성숙 기술 규모확장 취약
	황-하이브리드 공정	원자력	물	고효율 (≤ 40%)	미성숙 기술 고온부식 이슈
신재생 수소	생화학적 방법	신진대사 (미생물) 태양에너지	물	저에너지비용 환경친화기술	기초연구단계
	생화학적 방법	태양에너지	물	저에너지비용 환경친화기술	기초연구단계

수증기 개질법이 가장 경제적이지만 탄소중립을 추구하는 환경에서 부산물로 발생하는 CO₂가 문제다. 하지만 화석연료를 사용하지 않고도 수소를 생산할 수 있다. 표에서 보듯이 물을 전기로 분해하거나, 화학반응을 조합하여 열화학적으로 물을 분해하는 방법, 그리고 이 두 가지를 조합하여 물을 분해하는 방법이다.

[표 4]에서 보듯이, 상용 기술로 탄소배출 없이 수소를 생산하는 방법은 물을 전기 분해하는 방법이다. 물은 공짜로 얻을 수 있기 때문에 수소의 가격은 결국 전기 값과 수소 생산설비 운영비(가동률과 이용률)에 의해 결정된다. [표 5]는 발전원별 생산 전력을 한전이 구매할 때 지불하는 정산 가격이다. 참고로 태양광과 풍력 전기 정산단가에는 신재생 보조금(2023년, 76.8원/kWh)이 포함되어 있지 않다.(포함될 경우 태양광, 풍력의 정산단가는 더 높아진다.)

[표 5] 발전원별 전력 정산단가(단위: 원/kWh)

발전원/년도	2020년	2021년	2022년	2023년	2024년
원자력	59.6	56.2	52.5	55.0	66.3
석탄	81.5	99.1	157.0	141.3	143.6
천연가스(LNG)	98.6	121.7	239.2	214.0	175.5
태양광	70.3	93.4	191.2	159.4	135.6
풍력	72.9	99.3	191.5	150.7	123.5

출처: 전력통계정보시스템, <https://epsis.kpx.or.kr>

수소를 생산할 때 핵심은 CO₂ 배출의 유무와 수소 생산 단가다. 즉, 수소를 싸게 생산하면서 CO₂ 배출을 억제하는 것이 과제다. 탄소경제에서 수소경제로 전환하면서 CO₂를 배출하는 것은 말이 되지 않으며, 비싼 수소를 이용할 산업체는 없다. [표 5]에서 보면 알 수 있듯, 원자력 전기가 다른 발전원의 전기에 비해 월등히 싸다. 만일 이용률이 낮은 태양광(지역별 12~15%) 또는 풍력(지역별 6~23%) 발전으로 생산한 전기로 수소를 생산한다면 전기 공급의 간헐성과 변동성으로 인해 수소 생산량도 들쭉날쭉해지고 비싼 전기 값 때문에 수소 가격이 비싸질 수밖에 없다.

원자력에너지(전기, 열)를 이용한 수소 생산 방법으로 저온수전해법과 현재 개발 중인 열화학적 기술 등 다양한 방법이 있으며, 고온수전해법과 열화학적 수전해법이 특히 유망할 것으로 평가된다.

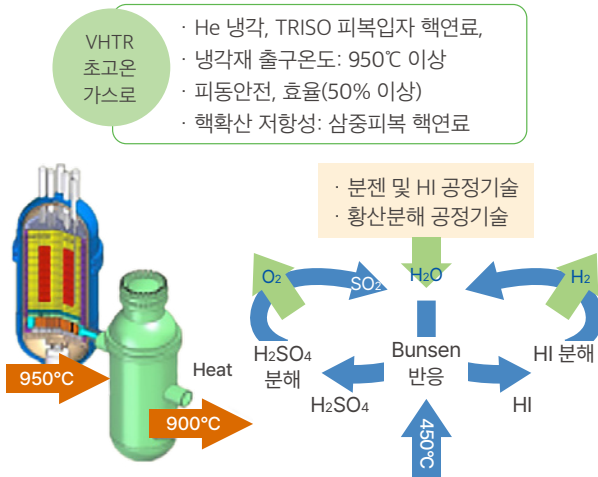
저온수전해법 - 100℃ 이하에서 물을 전기분해 하는 방식으로 필요한 전기를 원전에서 생산하여 공급한다. 재생에너지 전기를 사용하는 경우보다 원자력 전기를 사용하는 것이 훨씬 싸게 수소를 생산할 수 있다. 저온수전해법은 고온수전해법에 비해 생산 효율성이 낮다.

고온수전해법 - 고체산화물 전해요소를 이용해 고온수증기를 전기분해 하는 방법이다. 경수로 원전에서는 약 250℃ 고온의 증기를 추출하여 열을 활용할 수 있다. 고온수전해법은 전기만 사용하는 저온수전해법보다 생산 효율성이 높아 수소 생산 단가를 낮출 수 있다. 전기도 당연히 원전에서 생산하여 공급한다. 온도가 높을

수록 효율이 높아지므로 경수로보다 600℃ 이상 더 높은 열을 생산할 수 있는 가스로 (gas-cooled reactor)를 이용한 고온수전해법이 유리하지만 실증 연구가 필요하다.

열화학적 방법 - 물을 황(S)과 요오드(I)를 촉매로 이용해 850℃ 이상의 고온에서 물 분자를 열화학적으로 분해하는 방법이다. 분해 공정의 (초)고온 환경은 고온 또는 초고온가스로(Very High Temperature Gas-cooled Reactor)에서 고온의 열을 공급한다. 고온가스로는 냉각재인 가스의 온도를 경수로 냉각재인 물보다 훨씬 높일 수 있어서 수소 생산의 효율성과 경제성을 높일 수 있다. [그림 8]의 고온 가스 원자로를 이용한 수소 생산 방법이 소규모 실증 수준에서 개발 중에 있다.

[그림 8] 고온가스로 이용 열화학적 물 전기분해 방법



출처: 한국원자력연구원

수소 이용 분야는 연료전지, 화학산업, 철강산업, 수소자동차 등이 대표적이다. 그러나 수소 이용은 수소의 수송·저장·공급·가격과 긴밀히 연계되어 있다. 산업계는 수소 가격이 kg당 1,000~2,000원 정도가 되어야 산업 경쟁력이 있다고 한다. 재생에너지(태양광, 풍력)로 생산한 수소는 kg당 만원이 넘는다. 무탄소 청정에너지원인 원자력의 저온수전해법은 현재 수소 1kg에 3천 원 정도로 생산이 가능하다고 한다. 그러나 아직 산업계에서는 경제성 측면에서 어려워한다. 물론 수소의 산업적 활용 기술이 아직 확보되지 않았다는 점도 제약 요인이다.

수소 이용이 너무나 절실한 철강 산업을 보자. 철강 산업은 ‘기후 악당’이라는 불명에 꼬리표가 붙어 있다. 산업계가 배출하는 CO₂의 39%를 철강업에서 발생한다. 철광석과 코크스(석탄)를 용광로(고로)에서 녹여 고철(선철)을 만들 때 엄청난 CO₂가 발생한다. 철강 1톤 생산에 CO₂ 1.85톤 발생한다.²⁴ 대한민국 철강 산업을 이끌고 있는 포스코는 8,100만톤/년 CO₂배출로 2011년부터 국내 탄소 배출 1위 기업이다. 철강 산업에서 CO₂ 배출을 줄이지 못하면 ‘탄소 중립’은 불가능하다. CO₂가 발생하지 않는 수소환원제철²⁵로 가야 한다. 수소환원제철이 상용화되면 3천만 톤 철강 생산기준으로 약 160만 톤/년 수소가 필요하며, 이를 생산하려면 초고온가스로 16GWt(열출력으로 APR1400 약 4기) 열이 필요하다.

2021년 발표된 ‘제1차 수소경제 이행 기본계획’²⁶은 2050년까지 제철 공정의 탄소계 설비를 수소환원 설비로 완전히 전환하겠다고 한다. MW급 실증을 통해 그린수소 생산 단가를 2025년까지 kg당 6,000원, 2030년까지 3,500원, 탄소중립 달성 목표연도인 2050년까지 2,500원 수준으로 낮추는 것을 목표로 하고 있다. 그러나 대상은 원자력 수소인 핑크수소가 아니라 그린수소이다. 그린수소 가격이 그 정도로 내려오면 핑크수소는 산업계가 원하는 가격 훨씬 이하로 생산할 수 있다. 또한 정부는 제6차 수소경제위원회(2023.12.18.)에서 “원전 또는 재생에너지를 활용한 청정수소²⁷의 국내 생산을 확대하도록 기술개발 및 실증 지원을 강화하여 수소가 시장에 안정적으로 공급되도록 하겠다”고 했다. 수소경제가 4차 산업혁명의 지향 목표임을 분명히 했다. 이에 원자력계와 산업계가 뭉쳤다.²⁸

24 철광석인 산화철(Fe₂O₃)과 코크스(C)와 석회석(CaCO₃)을 용광로(고로)에서 연소시키면 코크스의 불완전연소로 일산화탄소(CO)가 발생하여 철광석과 반응, Fe₂O₃ + 3CO → 2Fe + 3CO₂ 반응에서 선철(주철, 무쇠)과 대량의 탄소(CO₂)가 발생한다. CO가 산화철을 철(Fe)로 환원시키는 것이다. 석회석은 철광석에 소량 있는 SiO₂를 제거해준다.

25 수소환원제철공정은 Fe₂O₃ + 3H₂ → 2Fe + 3H₂O로 철과 함께 탄소가 아닌 물이 생성된다. 수소환원제철공정은 ‘환원로’와 ‘전기로’라는 두 설비를 이용하는데 먼저 환원로에서 철광석(Fe₂O₃)을 고온으로 가열된 수소와 접촉시켜 고체 철(Fe)을 제조하고 제조된 고체 철을 전기로에서 녹여 쇳물을 생산한다.

26 『제1차 수소경제 기본 이행계획』, 산업통상자원부, 2021.11.26.

27 수소 생산 과정에서 온실가스 배출량이 일정 수준 이하인 즉, 수소 1kg 생산 시 온실가스 배출량이 4kg 이하인 경우에 청정수소로 인정한다.

28 “한수원, 원자력 청정수소 생산·활용 사업화 착수”, 에너지플랫폼뉴스, 2024.6.20.

우리 미래 경제 내실과 위상이 G7 반열에 오르도록 수소경제 추진을 위해 공공 기관과 민간 기업이 손을 잡은 것이다. 재생에너지 전기보다 원자력 전기로 대규모 수소 생산이 훨씬 경제적이라는 것은 명백하다. 원자력계와 산업계 간 협업도 문서에서 머물지 말고 원자력 수소 실증에 신속히 움직여야 한다. 탄소중립 청정국가로 이끌 수소경제를 조속히 구현하고 활성화하려면 결눈질하지 말고 빨리 원자력을 수소경제 정책의 견마로 삼고 관련 인프라와 수소 기반 생태계를 구축해야 수소경제 선도 국가가 될 수 있다.



5. 대한민국의 리더십 에너지, 원자력

우리는 6·25전쟁 때 외국의 도움을 받았고 원조 식량으로 허기를 겨우 달래기도 했다. 그러나 에너지(전기)는 그렇게 할 수 없었다. 원조국들이 비싼 석유를 공짜로 계속 줄 리 만무했다. 전기가 없는데 국민의 의식주를 챙길 생각은 할 수도 없었다. 그래서 국가가 위태하고 국민은 헐벗고 배고팠지만, 전기 구하기를 국가의 최우선 과제로 삼았다. 잘 살기 운동은 그다음이었다. 그리고 긴 인고의 시간을 보낸 지금 우리는 세계의 미래를 논하는 당당한 G20 위상에 오른 국가가 되었다. 세계 최고 품질의 원전과 원자력 발전 기술을 가진 덕분이다.

에너지 안보를 가볍게 생각하면 안 된다. 무기도, 기술도, 식량도 사 올 수 있지만 전기를 사 오거나 빌려올 수는 없다. 우리나라를 둘러싼 북한, 일본, 그리고 중국은 우리에게 전기를 공급해 줄 생각은 추호도 없다. 남한은 고립무원 갈라파고스섬(찰스 다윈의 진화론 연구에 큰 영향을 준 섬)과 다름없는 에너지 섬이다. 탈원전 정부(2017.5.~2022.5.) 때 그 중요한 에너지 안보를 헌신짝처럼 내팽개쳤다.

에너지 안보에 감도 없는 사람들이, 춥고 배고픔을 참아가며 인고의 노력과 열정을 쏟은 끝에 우리 것으로 만들고 수출까지 해낸 원전을 징그러운 벌레 죽이듯 단숨에 짓밟아 버렸다. 그리고 그 자리에 국부를 쏟아 넣어 태양광 패널과 풍력발전기를 외국에서 사 왔다. 그러면서 ‘에너지전환 정책’이라 불렀다. 효율성이 낮아 산업을 이끌 동력원이 못 되는 태양광, 풍력 발전의 난개발이 이루어졌고, 산업의 핏줄인 송전망 건설은 무시했다. 우리는 지금 그 폐해를 현실로 겪고 있다. 리더십을 가진 발전원이 되려면 여타 발전원과는 다르고 특별해야 한다. 그리고 그 다름이 합리적이고 정당해야 한다. 그러나 그 다름이 비교·상대적으로 얼마만큼 달라야 한다고 정해진 기준은 없다. 필자는 다음 조건을 리더십을 갖춘 발전원의 자격 요건으로 삼아야 된다고 생각한다.

- ① 탄소를 배출하지 않는 깨끗한 전기를 만들어야 한다.
- ② 생산한 전기 값이 다른 발전원 전기에 비해 싸야 한다.
- ③ 대규모 전기 공급이 가능해야 한다.
- ④ 환경과 여건에 관계없이 항상 안정적으로 전기를 공급할 수 있어야 한다.
- ⑤ 타 발전원과 조화를 이루도록 운전 유연성이 있어야 한다.
- ⑥ 에너지 안보 측면에서 기술성이 높고 해외 의존성이 낮아야 한다.

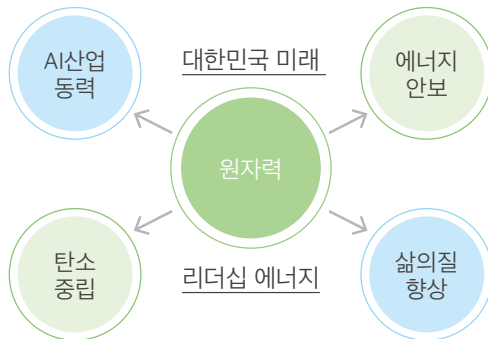
우리의 주력 발전원인 원자력, 재생에너지원(태양광, 풍력), LNG에 대해 위 기준 관점에서 비교해 보자. 태양광과 풍력 발전이 ①번 무탄소 청정전기를 만들어 내지만 나머지 기준을 맞추기에는 미흡하다. 낮은 에너지 밀도와 효율, 비싼 전기 값(표 5 참조), 대규모 발전 제한성, 날씨 의존적 간헐성 및 변동성, 유연성이 없는 발전 경직성 등은 큰 약점이다. LNG 발전은 ③,④,⑤번 기준에서는 좋은 점수를 받을 수 있으나 탄소 배출량, 전기요금, 연료의 해외 의존성 기준에서는 낮은 평가를 받을 수

밖에 없다. 그럼 원자력 발전을 보자. 원자력 발전은 그동안 기저 발전량을 담당해 원전의 운전 유연성 측면을 중시하지 않았기에 ⑤번 기준에서 LNG 발전에 비해 낮은 평가를 받겠지만 나머지 모든 기준에서는 재생에너지원이나 LNG 발전에 비해 제시된 각종 관련 자료에서 확실하게 비교 우위에 있음을 부정할 수 없을 것이다.

전기가 어둠을 밝히는 기능은 전기의 가장 기본적인 역할에 불과하다. 국가를 이끄는 전기집약적인 첨단 산업, 전기에너지 중심의 우리의 삶, 미래를 위한 깨끗한 대기와 환경 보전에 전기의 역할과 책임이 더 강조되고 있다. 이젠 전기는 국가의 지속 가능성을 위한 에너지 안보, AI 기반 산업혁명 추진 동력, 탄소중립 달성 그리고 우리 삶의 질 향상 역할과 기능에 더 높은 가치가 부여되고 있는 것이다.

어느 에너지원의 전기가 우리 미래를 더 책임감 있게, 더 윤리적으로, 더 공정하고 안정적으로, 외국의 도움 없이 우리 힘으로 지속 가능하게, 우리 삶과 환경을 더 깨끗하게 지키는 데 적합한, 그리고 리더십을 가진 전기일까? 우리는 앞서 우리의 다양한 에너지 자원 환경을 논리적으로 분석하고 평가하여 그 답을 찾았다. 필자는 AI 기반의 우리 미래를 지속 가능하게 이끌어 갈 그 답을 [그림 9]에 표현해 보았다.

[그림 9] 대한민국 리더십 에너지



4차 산업혁명은 AI 기반 첨단기술 활용으로 산업 혁신을 통해 지구를 지속 가능하게 하고 우리 삶을 더 풍족하고 건강하게, 그리고 편리하게 만들려는 혁명이다. AI 기반 4차 산업혁명은 전기 먹는 첨단 산업이 이끄는 기술혁신 혁명이다. 따라서 이 혁명에는 산업기반(인프라)의 전기화가 동반되어야 한다. 만능 지능 AI, 반도체, 데이터센터, 이차전지, 전기자동차, 수소경제 등 4차 산업혁명의 기반 인프라 요소

어느 하나 전기 없이는 작동할 수 없다. 그러나 그 전기는 기후변화를 억제할 탄소 중립을 뒷받침할 무탄소 청정 전기이자 값이 싸고 외부 환경에 영향을 받지 않는 공급이 매우 안정적인 전기여야 한다. 지구촌 미래의 패권을 차지하려는 국가들은 AI 기반 산업혁명을 경쟁국보다 더 빨리, 더 효율적(경제적)으로 추진하기 위해 “그런 전기 구하기”에 총력을 기울이고 있다. 그들은 원자력 전기가 “그런 전기”이고, 원자력 전기 없이는 AI 기반 산업 선도국으로 도약이 불가능하다는 것을 깨달았다. 그래서 그들은 대형 원전뿐만 아니라 전력 수요지에 직접 배치할 목적의 분산형 차세대 SMR 원전까지 개발을 서두르고 있다.



우리도 AI 기반 지구촌 미래의 리더 국가(G7) 중의 하나가 되려면 잠시 멈춰서 리거나 여유 부릴 틈이 없다.

서두르자. “원자력 전기 구하기”에 관해 우리는 그런 국가들보다 여건이 훨씬 유리하다. 원자력 전기도 풍부하고, 세계가 탐내는 우리 고유의 원전과 우수한 기술도 가지고 있다. 우리나라가 리더십을 갖춘 원자력이 뒷받침하는 AI 기술 혁명을 선도하여 미래 산업 패권국이 될 수 있는 단단한 기반을 먼저 구축해야 한다. 그것이 우리 미래세대를 위한 현세대의 책임이고 의무이다. 폐허와 어둠의 유산을 G20의 위상으로 바꾼 우리의 힘과 자산이 지혜와 열정이었다면, 지금은 ‘원자력 전기’라는 경쟁국이 부러워하는 막강한 자산이 추가로 보태졌다. AI 기반 미래를 우리 것으로 만들 준비는 되어 있다. 원자력 전기가 뒷받침하는 AI 혁명의 글로벌 표준이 되려면 리더십을 가지고 앞서가야 하고, 그러자면 서둘러야 한다.

4

소형모듈원자로(SMR) 개발 동향과
SMR 방사선비상계획 관련
안전규제 연구개발 동향



KAIST
원자력및양자공학과 초빙교수
조건우

소형모듈원자로(Small Modular Reactor, SMR)는 기존의 대형 원자로보다 크기가 작고, 설계도 간단하며, 외부에서 전기 공급이 끊겨도 스스로 안전을 유지할 수 있는 시스템을 갖추고 있다. 그래서 만일 사고가 나더라도 방사성물질이 원자로 밖으로 새어나갈 위험이 훨씬 적은 것으로 알려져 있다.

그런데 현재 원자력발전소에서 발생할 수 있는 중대한 사고에 대비해 우리나라에서 적용하고 있는 방사선비상계획구역 설정 안전기준은 대형 원자로를 기준으로 만들어져 있다. 이를 SMR에 똑같이 적용할 경우, SMR의 높은 안전성과 낮은 위험도를 제대로 반영하지 못하는 문제가 생기게 된다.

그동안의 연구 결과를 보면, SMR은 원자로 안에 들어 있는 방사성물질의 양이 적고, 중대한 사고가 발생할 가능성이 낮다. 또한 이러한 사고가 발생하더라도 방사성물질이 외부 환경으로 퍼져 나갈 가능성도 작다고 밝혀졌다. 이런 이유로 SMR에는 대형 원자로와 다른, 더 유연한 방사선비상계획구역 기준 설정이 필요하다는 의견이 제시되고 있다.



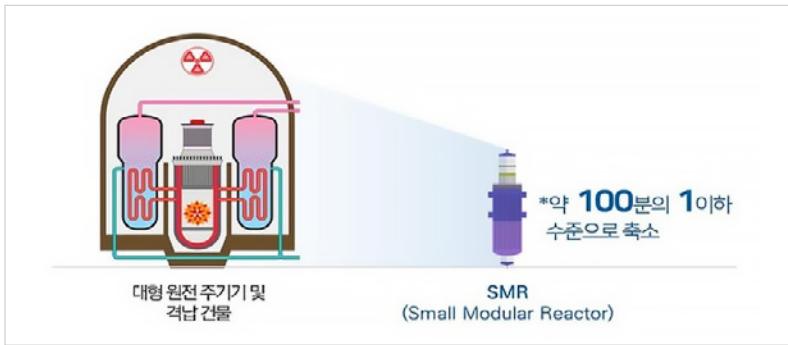
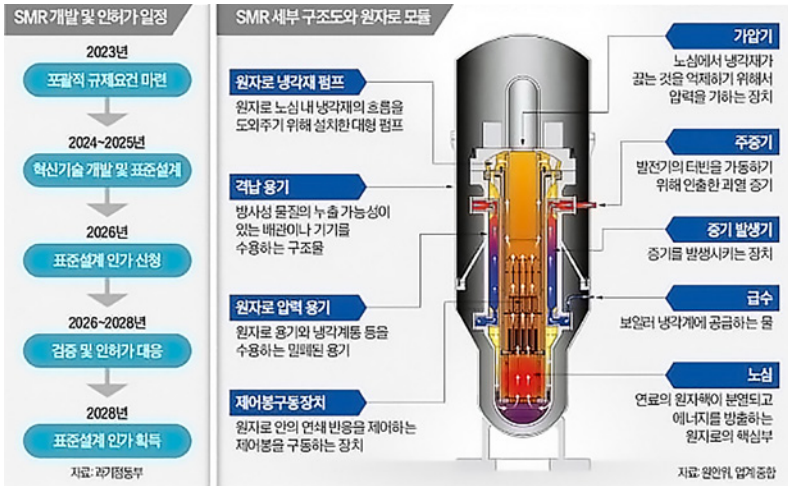
소형모듈원자로(Small Modular Reactor, SMR)는 기존의 대형 원자로보다 크기가 작고, 설계도 간단하며, 외부에서 전기 공급이 끊겨도 스스로 안전을 유지할 수 있는 시스템을 갖추고 있다. 그래서 만일 사고가 나더라도 방사성물질이 원자로 밖으로 새어 나갈 위험이 훨씬 적은 것으로 알려져 있다. 그런데 현재 원자력발전소에서 발생할 수 있는 중대한 사고에 대비해 우리나라에서 적용하고 있는 방사선비상계획구역 설정 안전기준은 대형 원자로를 기준으로 만들어져 있다. 이를 SMR에 똑같이 적용할 경우, SMR의 높은 안전성과 낮은 위험도를 제대로 반영하지 못하는 문제가 생기게 된다.

그동안의 연구 결과를 보면, SMR은 원자로 안에 들어 있는 방사성물질의 양이 적고, 중대한 사고가 발생할 가능성도 낮다. 또한 이러한 사고가 발생하더라도 방사성물질이 외부 환경으로 퍼져 나갈 가능성도 작다고 밝혀졌다. 이런 이유로 SMR에는 대형 원자로와 다른, 더 유연한 방사선비상계획구역 기준 설정이 필요하다는 의견이 제시되고 있다. 실제로 미국과 캐나다 같은 나라는 경수형 SMR의 열출력, 방출 특성, 부지 기상 조건 등을 고려하여 기존 대형 원전과는 구별되게 SMR의 방사선비상계획구역을 탄력적으로 적용하고 있으며, 이러한 국제적 사례는 국내 기준 정립에 있어 참고할 만한 시사점을 제공하고 있다.

또한 앞으로 우리나라에서는 SMR이 사람이 많이 사는 지역 근처에 지어질 가능성이 높다는 점을 고려할 때, 기존 대형 원전과 동일한 방사선비상계획구역을 적용하면, 그 안에 포함되는 인구가 너무 많아져서 비상 상황에 대비한 실용적인 계획을 세우기 어렵고, 계획의 이행에도 많은 예산과 인력이 필요하게 될 것이다. 그래서 SMR의 안전 설계 특성을 고려해, 실제 예상되는 위험도를 평가해 보고 그 결과를 근거로 방사선비상계획구역을 정하면, 사회적으로나 경제적으로 부담이 줄어들고, 훨씬 더 과학적이고 합리적으로 안전기준을 정할 수 있게 될 것이다. 이

러한 점에서, 우리나라 경수형 SMR의 특성을 반영한 방사선비상계획구역 설정 기준 및 비상 대응 체계 수립에 관한 연구가 시급히 요구된다.

[그림 1] 소형모듈원자로(SMR) 조형도



출처: 산업부, 한국경제(<https://www.hankyung.com/article/2023011791011>)

1. 소형모듈원자로 (SMR) 국내외 개발 동향

가. 우리나라

- 우리나라 SMART 소형모듈원자로의 경우, 표준설계인가를 받았으나 실제 건

설은 하지 못하고 있다.

- 한국원자력연구원에서는 방사선비상계획구역 설정 방법론 연구를 수행하고 있으며, 미국의 NUREG-0396 기준을 고려하여 방사선비상계획구역의 설정 방식을 한국의 SMART에도 적용하고자 노력 중이다.
- 한국원자력연구원의 2020년 연구에서는 중대사고 빈도와 IAEA의 선량 기준을 고려하여 예방적 보호조치 구역과 긴급 보호조치 계획구역을 줄이는 방법론을 연구하였고, 예방적 보호조치 구역을 기존 3.9km에서 1.77km로 축소할 수 있다고 잠정 결론지었다.
- 사우디아라비아 수출용 SMART에 대한 2022년 연구에서는, 확률론적 접근법을 사용하여 핵심적인 방사선원항을 계산하고 NUREG-0396 기준에 따라 사고 시나리오를 분류하여, 최대 4km의 방사선비상계획구역을 제시하였다.
- ARA는 한국원자력연구원이 추진 중인 다목적 소형연구로로, 경주 문무대왕과 학연구소에 건설 예정이며, 2021년도에 ARA 연구로 건설 허가를 신청하였다.

나. 미국

- 미국의 기업인 NuScale은 소형모듈원자로의 설계 특성을 고려하여 비상계획 구역을 230m로 축소하는 방법론을 개발한다.
- NuScale이 사용한 방법론은 미국의 원자력에너지연구소(NEI)에서 제시한 것으로, 확률론적 위험 평가를 활용하여 사고 시나리오를 분석하고, 방사선 방출과 그에 따른 선량을 평가하여 방사선비상계획구역 크기를 결정하는 방식이다.
- NEI의 백서에 담긴 내용의 일부분은 다음과 같다:
 - » 기준 1. 설계기준사고(DBA)에 의해 생긴 방사능으로 인해, 96시간 동안 방사선비상계획구역 밖에서의 유효선량이 1 rem(10mSv) 미만.
 - » 기준 2. 가능성은 높으나 경미한 사고일 경우, 방사선비상계획구역 밖에서의 96시간 동안 유효선량이 1 rem(10mSv) 미만.
 - » 기준 3. 가능성은 낮지만 중대한 사고 (24시간 동안의 유효선량이 200 rem(2 Sv) 이상)일 경우, 치명적 급성 피폭이 방사선비상계획구역 밖에서 일어날 확률이 $1E-3$ 이하.

- 이는 모두 확률론적 위험 평가에 의해 도출된 사고 발생 빈도를 고려하였다.
- 또한 NuScale의 소형모듈원자로는 자연 순환 냉각 시스템과 피동형 안전 시스템, 다중 방어 설계, 지진 대비 구조 등을 통해 안전성을 확보하였다.
- 설계적 특징 및 확률론적 위험 평가 결과를 근거로 NEI는 소형모듈원자로의 방사선비상계획구역을 230m로 축소 가능하다고 제시하였고, 미국 NRC는 검토 후 이를 승인하였다.
- NuScale은 이 접근 방식을 기반으로 자사만의 방사선비상계획구역 설정 방법을 개발하였다:
 - » 확률론적 위험 평가 기반 분석: 사고 발생 확률과 방사능 방출량을 정량적으로 평가하여 EPZ를 결정한다.
 - » 사고 시나리오 분석: 설계기준사고(DBA)와 노심용융 중대사고(e.g. Core Melt Accident)에 대해 소외 선량 평가를 수행하여 방사선비상계획구역 크기를 산정한다. 이때 선량 기준은 NEI의 기준을 적용한다.
 - » 방사능 방출 영향 축소 기술 적용: 수동 냉각 시스템을 활용하여 사고 시 방사성 물질 방출을 최소화한다. 소형모듈원자로의 모듈화 설계를 통해 사고 진행 속도를 늦추고 추가 비상 대응 시간을 확보하였다.
- NuScale의 방사선비상계획 및 방사선비상계획구역 결정 과정은 다음과 같다:
 - » Part I. 설계기준사고(DBA) 발생을 가정하여 확률론적 위험 평가(PRA)를 활용, 발생 가능성이 높지만 경미한 사고를 분석한다.
 - » Part II. 발생 가능성은 낮지만 심각한 사고가 발생할 경우를 확률론적 위험 평가(PRA)를 통해 분석하고 특히 NEI에서 제안했던 방사선비상계획구역 외부 방사선 피폭량 수준(200 rem(2Sv))을 넘는지 확인한다.
 - » Part III. 확률론적 위험 평가만으로 해결되지 않는 불확실성을 보완하는 단계로, 지진이나 테러 등 극단적인 사고를 고려하여 방사선비상계획 및 방사선비상계획구역이 충분한지 평가한다.
 - » Part IV. Part I, II 및 Part III 분석 결과를 바탕으로 방사선비상계획구역을 포함한 전체 방사선비상계획을 수립한다.
 - » Part V. 예상보다 매우 큰 사고가 발생한 경우에 충분히 대응을 할 수 있는 기반을 마련한다.

다. 캐나다

- 캐나다에서는 2029년에 BWRX-300을 가동할 계획이다. BWRX-300은 GE Hitachi 사에서 개발한 약 300MWe 출력을 내는 소형모듈원자로이다.
 - BWRX-300은 자연 순환 기반 냉각 시스템에 기반한 수동 안전 시스템을 갖추고 있으며, 이에 따라 방사선비상계획 및 방사선비상계획구역을 설정하는 과정 중에 있다.
 - 확률론적 안전성 평가(Probabilistic Safety Assessment, PSA)와 결정론적 안전성 평가(Deterministic Safety Assessment, DSA)를 병행하여 사고 확률과 방사선 영향 정도를 정량적으로 평가한다.
 - BWRX-300 안전전략백서는(Safety Strategy White paper) GE Hitachi사에서 BWRX-300의 인허가를 받기 위해 작성한 문서로, IAEA 및 캐나다의 원자력 규제 기준을 반영한 안전 설계 전략을 포함하고 있다.
 - 문서에서 말하는 비상계획 수립 과정은 다음과 같다:
 - » 사고 확률 분석: PSA를 통해 설계기준사고(DBA) 및 중대사고 발생 확률을 평가한다.
 - » 방사선 영향 평가: 사고 시 방사능 방출량 및 확산 범위를 시뮬레이션하여 방사선 영향을 분석한다.
 - » 방사선 비상 대응 시뮬레이션: 사고 시나리오별 대응 절차를 검토하여 효과적인 비상 대응 전략을 수립한다.
 - 또한 방사능 소외 방출을 막기 위해 다중 방어 개념(Defense-in-Depth)을 설정하고, 각 단계에서 독립적으로 사고를 예방하고 완화할 수 있도록 설계되었다.

[표 1] BWRX-300의 방어선(Defense Lines) 식별

Defense Lines	목표	설계 수단	운영 수단
DL1	비정상적인 운전 및 고장 방지	보수적 설계 및 고품질 운전 모니터링 구축	운영 규정 및 정상 운전 절차
DL2	비정상적 운전 및 고장 감지, 제어	제한 및 보호 시스템, 기타 감시 기능	비정상 운전 절차/비상 운영 절차

Defense Lines	목표	설계 수단	운영 수단
DL3	설계 기준 사고(DBA) 제어	엔지니어링 안전 기능을 위한 시스템	비상 운영 절차
DL4a	설계 확장 조건(DEC)에서 노심 손상 방지	노심 손상 없는 DEC에서의 안전 기능 시스템	비상 운영 절차
DL4b	DEC에서 노심 손상 방지 및 중대 사고 완화	노심 손상 가능성이 있는 DEC에서의 안전 기능 시스템	비상 운영 절차/중대 사고 관리 지침
DL5	방사성 물질의 대량 방출로 인한 영향 완화	현장 및 외부 비상 대응 시설	현장 및 외부 비상 계획

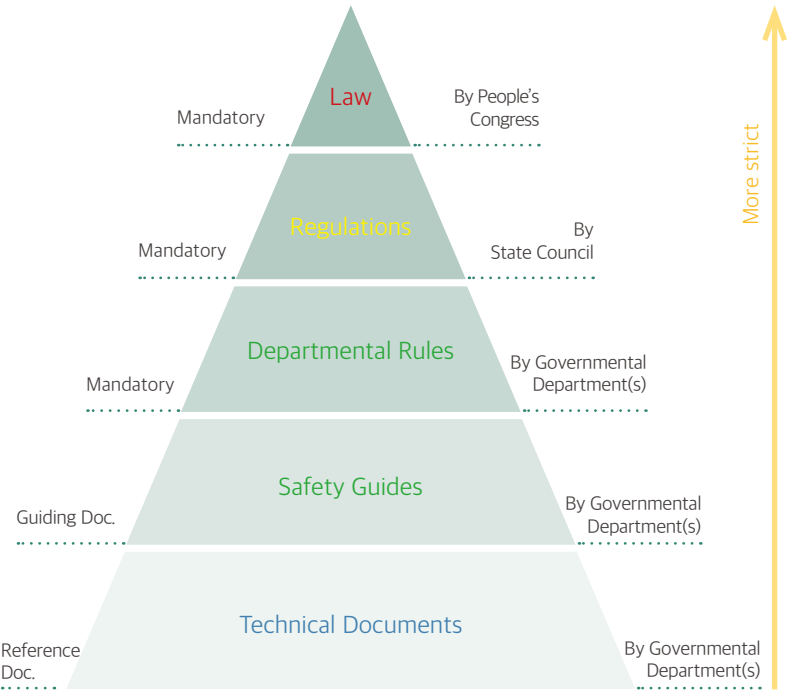
라. 중국

- 중국의 중국핵공업그룹(China National Nuclear Corporation, CNNC)에서 개발한 소형모듈형원자로인 ACP-100은 2016년 IAEA의 안전 검토(Generic Reactor Safety Review, GRSR)를 통과하여, 2026년 상업 운전을 목표로 하고 있다.
 - ACP-100은 피동형 노심 냉각, 피동형 잔열 제거 및 격납건물 냉각, 5단계 방어 심층방호 시스템 등 완전 피동형 시스템을 적용한 안전성을 높인 가압경수로형 소형모듈원자로이다.
 - ACP-100에 적용되는 안전 규제 체계를 기반으로 인허가가 진행되고 있으며, 다층적인 법령 및 규정을 5단계로 적용받고 있다. 1단계~3단계는 필수적인 사항이며, 4~5단계는 권장 사항이다:
 - » 1단계 법률: 중국 국회에서 제정된 법률을 적용받는다.
 - » 2단계 코드 및 규정: 행정 범위, 원칙, 조직 및 기능을 설정하며, 국무원에 서 발행된다.
 - » 3단계 부처별 규정: 중국원자력안전국(National Nuclear Safety Administration, NNSA) 등 정부 규제 기관이 발행하는 것으로, 구체적인 실행 방법 및 원자력 안전 목표를 설정한다.
 - » 4단계 안전 가이드: 정부 기관이 발행하는 권고 사항으로, 안전 요구사항을 충족하기 위한 방법과 절차를 제공한다.
 - » 5단계 기술 문서: 원자력 안전 관련 기술적 지침을 제공하는 참고용 문서이다.

[그림 2] ACP-100에 적용되는 규제 체계

Safety and licensing strategy

Codes and Standards applied by ACP100



[표 2] ACP-100와 중국의 대형 원자로의 구역 기준 비교

구역	ACP-100	대형 원자로(가압경수로)
비거주 구역(Exclusive Area Boundary, EAB)	300 m 이하	500 m
계획적 제한구역(Low Population Zone, LPZ)	500 m 이하	5 km
비상계획구역 내부	500 m 이하	3-5 km
비상계획구역 외부	600 m 이하	7-10 km

◦ [표 2]는 ACP-100과 대형 가압경수로에 대한 중국의 비상계획구역 관련 기준을 비교한 것으로, 설계기준사고 (Design Basic Accident, DBA)를 최소화할 수 있는 높은 안전 설계를 바탕으로 비상계획구역을 부지 경계 내로 축소하였다.

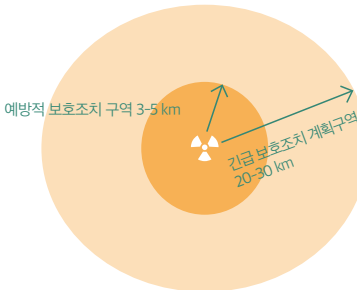
- 비상계획구역 내부는 예방적 보호조치구역(PAZ), 비상계획구역 외부는 긴급 보호조치계획구역(UPZ)으로 이해할 수 있으며, 이에 대해서는 중국의 국가표준 GB/T 17680.1에서 명시하고 있다.
- ACP-100은 중국 안전 규제기관인 NNSA의 심사를 거쳐, IAEA의 GRSR 검토를 완료받았다.
- 위험도 영향을 평가하기 위해 진행된 확률론적 안전성 평가 결과(PSA)에서 노심 손상 빈도(CDF)가 약 $1E-7$, 대량 방사성물질 방출 빈도(LERF)는 약 $1E-8$ level이라는 값을 도출하였다.
- 이는 미국의 NRC에서 목표로 하는 현행 대형 원자로의 CDF 값이 $1E-5$, LERF 값인 $1E-6$ 보다 10배 낮은 수준으로, 원자로의 안전성을 보장하는 요소가 된다.

2. SMR 방사선비상계획 관련 국내외 안전규제 연구개발현황

가. 우리나라

- ‘원자력시설 등의 방호 및 방사능방재대책법’(이하 방사능방재법)에서는, 방사선비상계획구역을 원자력시설에서 방사선 비상사태 또는 방사능 재난이 발생한 경우, 주민 보호 등을 위한 비상대책의 실효성을 마련하기 위하여 사전에 설정하는 구역으로 명시하고 있다.

[표 3] 방사선비상계획구역의 세부 범위

구역도	구역 명칭	범위
	예방적 보호조치 구역	3-5 km
	긴급 보호조치 계획구역	20-30 km

- 방사선비상계획구역은 예방적 보호조치구역(Precautionary Action Zone, PAZ)과 긴급보호조치계획구역(Urgent Protective Action Planning Zone, UPZ)으로 나뉘며, 인구 분포, 도로망, 지형 등 해당 지역의 고유한 특성을 고려하여 설정한다.
- 예방적 보호조치구역이란, 방사능 사고 발생 이전에 대피, 인체 제염, 갑상선 방호약품(방사능 요오드) 분배 등의 예방적 조치를 사전에 실시하기 위한 구역이다. 긴급보호조치계획구역이란, 소외 방출 방사능 영향 평가 또는 원자력시설의 상태를 기반으로 추가적인 주민 보호조치를 실시하는 구역이다.
- 방사선비상계획이란 원자력 및 방사선 시설에서 사고 발생 시 주민과 환경을 보호하기 위해 체계적으로 대응할 수 있는 계획을 의미하며, ‘방사능방재법 시행규칙’ 별표 3에서 방사선비상계획구역 내에서 어떤 조치를 실행할 것인지 규정하고 있다.
 - 주요 항목은 다음과 같다:
 - » 방사능 재난 대응 시설 및 장비 확보: 방사선 감시시설, 방호 장비 및 방사능 오염 제거 시설, 비상 통신 및 경보 시설, 비상 전원 설비 등을 확보해야 한다.
 - » 방사선 비상 종류별 대응 기준: 초기 경미한 이상 상황 대응 기준은 백색 비상, 중간 수준의 방사선 비상은 청색 비상, 심각한 비상 상황은 적색 비상으로 분류한다.
 - » 방사능 재난 대응 활동 및 재난 복구 계획 명시: 비상 상황별 대응 조치, 방사능 피폭 및 오염자에 대한 응급조치, 사고 후 원자력 시설 및 주변 지역의 복구 계획을 포함한다.
- 원자력안전위원회는 최근 2025년 2월에 열린 회의에서 대형 상용 원자로가 아닌 소형모듈원자로의 설계 특성을 고려한 방사선비상계획구역 설정 방법론 개발을 위한 규제 연구를 추진하고 있다고 밝혔다.
 - 열출력과 부지 인근 기상정보를 토대로 방사선비상계획구역 산정 틀이 개발되어 검토 중에 있으며, 향후 방사선비상계획 관련 규제 연구 이후에 소형모듈원자로의 방사선비상계획구역에 대한 법령이 필요시 개정될 것으로 전망된다.

나. IAEA

- 원자력 및 방사선 비상사태 대비 및 대응에 대한 국제 기준은 국제원자력기구(International Atomic Energy Agency, IAEA)의 GSR Part 7: Preparedness and Response for a Nuclear and Radiological Emergency에서 제시되고 있다.
 - GSR Part 7은 모든 원자력 시설이 국가 및 국제 기준에 맞는 비상 대비 체계를 갖추도록 요구하고 있으며, 방사선비상계획구역 설정 시 위험 평가와 보호조치를 마련해야 한다고 규정한다.
 - GSR Part 7에서는 방사선비상계획 관련 설정에 대해 다음과 같은 사항을 규정한다.
 - » 비상사태 대비 및 대응 체계 구축(Requirements 1, 4 및 20): 원자력 시설은 국가 비상계획과 연계된 비상 대응 조직 및 절차를 마련해야 하며, 사고 발생 시에는 신속한 대응이 가능하도록 해야 한다.
 - » 위험 평가 및 방사능 방출 평가(Requirement 4): 중대사고 및 핵안보 위협 등에 대한 다양한 사고 시나리오를 고려하여 위험 평가를 진행해야 하며, 이에 대한 보호 전략을 개발, 최적화를 보장해야 한다.
 - » 비상 보호 조치 및 대중 보호(Requirements 9 내지 12): 대피, 대피소 제공, 요오드화칼륨 투여 등 보호 조치를 수립하고 의료 대응 계획을 마련해야 한다.
 - 현재 우리나라는 GSR Part 7을 반영한 방사선비상계획이 대형 상업용 원전에는 적용 중이지만, 경수형 SMR에 적용하기 위한 합리적인 안전규제 기준은 미비한 상태이며, 향후 국내 소형모듈원자로 도입 시 GSR Part 7을 기반으로 우리나라 실정에 맞는 방사선비상계획 관련 규제 제도와 기준 마련이 절실하다.
- 한편, IAEA는 IAEA-TECDOC-953에서 방사선비상계획구역 설정에 대한 권고기준을 명시하였다.
 - IAEA는 방사선비상계획구역을 설정할 때 원전의 규모, 사고의 가능성 및 규모, 사고 시 방사성물질 누출의 정도, 사고 시 주민이 피해를 보는 범위를 고려하는 차등 접근법(Graded Approach)을 적용하고 있다.
- 또한, IAEA의 ERP-PPA-2013에서는 방사선비상계획구역을 방사성 물질 방출 특성, 기상 조건, 예상 방사선량과 노출 경로에 대한 주민 보호조치 전략을 함께 고려하여 결정하였으며, 이때의 선량 기준은 아래 [표 4]와 같다.

[표 4] IAEA의 방사선비상계획구역 설정에 대한 권고기준

구분	예방적 보호조치 구역	긴급 보호조치계획구역
>= 1000 Wth	3-5 km	5-30 km
100 Wth - 1000 MWth	0.5-3 km	5-30 km
10 MWth - 100 MWth	없음	0.5-5 km
2 MWth - 10 MWth	없음	0.5 km
부지 경계 500m 이내 임계질량 존재 시	없음	0.5-1 km
< 200 MWth	없음	없음

[표 5] IAEA의 방사선비상계획구역 크기 결정에 사용된 선량 기준

구역	발전소 상태에 따른 보호조치	선량량	선량 기준	주요 피폭 경로		
				흡입	공기 중 방사선	지면 방사선
예방적 보호 조치 구역	심각한 결정적 영향	AD _{red marrow} *	1 Gy	×	×	하루
		AD _{fetus, inh} **	1 Gy	×	-	-
긴급 보호 조치계획구역	확률적 영향	E _{inh} ***	100 mSv	×	-	-
		H _{fetus, inh} ****	100 mSv	×	-	-

* 몸 전체가 방사선에 노출될 때 적혈수골수, 폐, 소장, 생식샘, 갑상선, 눈의 수정체가 받는 선량

** 임신부가 흡입한 방사성 물질이 태아 갑상선에 미치는 선량

*** 흡입한 방사성 물질이 몸 안에서 장기간 동안 방사선을 방출하여 생기는 총 피폭량

**** 임신부가 흡입한 방사성 물질로 태아가 받는 선량

- 그리고 IAEA는 SMR Regulators' Forum 정기 회의를 열어 소형모듈원자로의 방사선비상계획구역 설정 방법에 대해 논의해 왔다.
 - IAEA는 소형모듈원자로의 심층방어 설계 결과를 기반으로, 전기 출력 및 작은 선원량, 향상된 안전 시스템을 반영할 수 있는 적절한 비상 대비 및 대응을 위하여 방사선비상계획구역 평가를 논의하였다.
 - IAEA에서 여러 주민 보호조치 전략을 고려하여 결정한 선량 기준을 나타낸 표 4는 대형 경우로에 관한 내용으로, 소형모듈원자로에도 적용할 가능성을 검토하였다. 그러나 소형모듈원자로의 다양한 설계 특성으로 인해 방사능 소외 방출 특성이 달라지기 때문에 차등 접근법을 적용하는 것을 검토하였다.

- 2019년도의 포럼에서는 기존 대형 원자로에서는 확률론적 안전성 평가(PSA)에서 노심 손상 빈도(CDF)와 대규모 방출 빈도(LRF)를 평가했고, 다중 소형 모듈원자로의 경우에는 원자로 전체의 위험을 통합적으로 평가할 수 있는 정량적 검증 방법론 개발의 필요성을 언급하였다.

다. 미국

- 미국의 원자력규제위원회(NRC)의 10CFR50.47와 10CFR50 Appendix E에서는 방사선 비상사고 시 적절한 보호조치가 이루어질 것이라는 합리적인 보장이 있어야만 원자력발전소의 운영 허가를 발급한다.
 - 원자력시설 운영자가 제출해야 하는 최종안전성분석보고서 내 방사선비상계획의 필수 요소는 다음과 같다.
 - » 비상 대응 책임과 조직의 명확한 할당: 원자력 시설과 정부, 해당 기관 간의 역할과 책임을 명확히 설정해야 한다.
 - » 비상 대응 역량 확보 및 신속한 대응 계획: 사고 시 초기 대응이 가능한 인력을 항상 배치하여야 하며, 현장 대응팀과 외부 지원 기관 간의 협력 체계를 구축해야 한다.
 - » 비상 통신 및 대중 경보 체계 구축: 사고 시 대중에게 조기 경보 및 행동요령을 전달할 수 있는 시스템을 구축해야 하며, 대중이 절차를 이해할 수 있도록 주기적인 정보 제공 및 교육 프로그램을 운영해야 한다.
 - » 비상 보호 조치 및 의료 대응 계획: 사고 시 주민 보호를 위한 대피, 대피소 제공, 요오드화칼륨 투여 등의 보호조치를 준비해야 하며, 의료 대응 시스템 구축 및 필요 자원을 사전에 확보해야 한다.
 - » 비상 대응을 위한 인프라 및 주기적 검토: 방사선 감시 시스템과 피폭 평가 방법을 마련해야 한다. 또한, 미국 인구조사국 데이터를 고려한 방사선 비상계획구역 내 대피 시간을 분석하여 이 결과를 보호 조치 수립 시에 사용하고 정부에 제공해야 한다.
- 한편, 미국 NRC의 경우 10 CFR 50.160과 RG 1.242를 발간하였는데, 이는 소형모듈원자로의 특성이 반영된 새로운 비상계획 내용을 다루고 있다.
 - 미국 환경보호청(EPA)의 선량 기준에 맞춘 선량 중심의 접근법을 제시하였고, 방사성물질 누출 경로를 모델링하여 방사선비상계획구역을 설정하는 확

론리적 방법론이 명시되어 있다.

» 또한 방사선비상계획구역 설정에 필요한 방사선원향을 결정하여 사고의 규모를 판단하는 기준을 포함하고 있다.

» 기존의 대형 원자로에 대한 방사선비상계획 지침과 결정론적 방사선비상 계획 요구 사항을 소형모듈원자로가 만족하기에는 매우 어렵다.

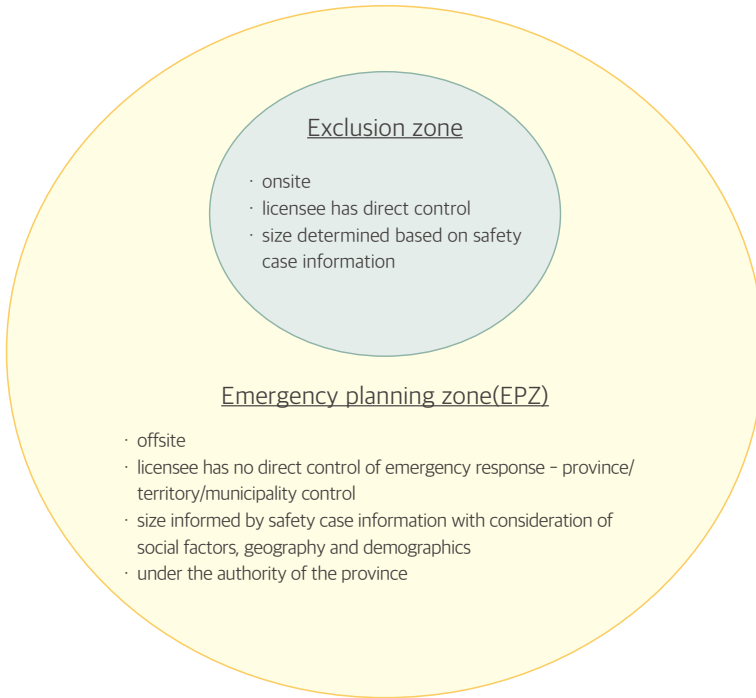
» 따라서 원자로의 성능에 따른 방사선비상계획을 개발할 수 있는 옵션을 새롭게 포함하였으며, 주요 조항은 아래 내용과 같다.

- 방사성물질 누출 경로를 접근 방식으로 분석하여 정확한 방사선비상계획구역 크기를 결정해야 하며, 주변 지역의 인구 밀도와 지형 등을 고려하여 방사선비상계획구역을 설정해야 한다.
- 위험 분석을 통해 방사선비상계획에 부정적인 영향을 미칠 수 있는 모든 위험 요인을 고려해야 한다.
- 다양한 사고 시나리오를 고려하고 이에 대한 대응 전략을 개발해야 하며, 이때 사고 시나리오란 방사성물질 누출이나 분실, 원자력 사고 등을 포함한다.
- 사고 발생 시 주민들에게 대피 방법을 충분히 고지하는 등 효과적인 의사소통 체계를 확립해야 하며 의료 인력 및 시설을 준비해야 한다.
- 또한, 미국 NRC의 10CFR50에는 소형모듈원자로의 비상계획구역과 비상 대응 관련 일부 조항을 포함하고 있다. 특히 소형모듈원자로의 관련된 조항은 2023년 12월 개정되었고, 방사선비상계획구역 관련 주요 내용은 다음과 같다.
 - 일반 대형 원자로의 경우 방사능 피폭 경로 방사선비상계획구역은 약 10마일(16km), 섭취 피폭 경로는 반경 약 50마일(80km)이다.
 - 소형모듈원자로의 경우 피폭 경로 방사선비상계획구역을 일반인의 피폭 선량이 96시간 동안 총 유효 등가선량 10mSv (1rem)를 초과할 것으로 예상되는 구역으로 지정한다.
- 소형모듈원자로의 방사선비상대응계획에 요구되는 사항은 다음과 같다.
 - 성능 기반 프레임워크는 성능 유지 및 목표, 비상 대응 계획 활동 포함
 - 위험 분석은 개발자는 시설의 위험 요인을 분석
 - 비상계획구역 설정 시 구역의 경계와 물리적 특성을 고려해야 하며, 방사능에 오염된 식품 및 물 섭취에 대한 대응 계획을 포함
 - 요구 사항을 시행할 수 있는 방식에 대한 지침을 제공

라. 캐나다

- 캐나다 원자력안전위원회(Canadian Nuclear Safety Commission, CNSC)는 2029년에 소형모듈원자로인 BWRX-300의 가동을 계획하고 있으며, 계획 관련, 방사선비상계획구역은 선원항에 영향을 미치는 요소를 고려하여 설정한다.

[그림 3] CNSC에 따른 배제구역(Exclusive Zone)과 비상계획구역(Emergency Planning Zone)



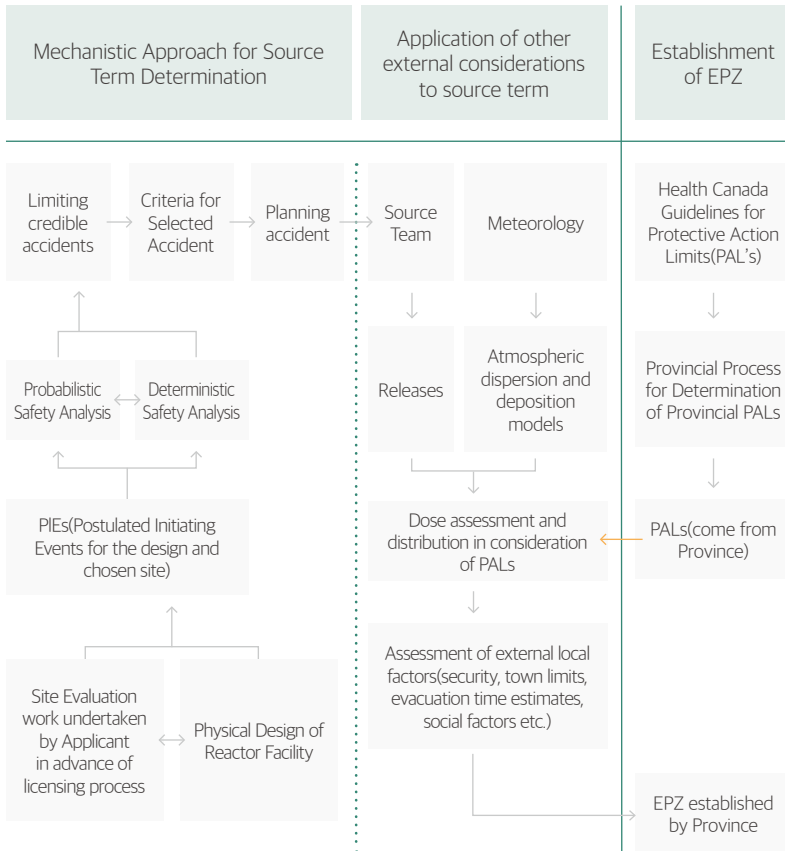
출처: Canadian Nuclear Safety Commission(*19.3월 발표자료)

- 캐나다에서는 방사선비상계획구역을 영구적 거주가 금지된 원자력시설 내부 또는 주변의 제한구역(Exclusive Zone)과 외부 비상계획 기관에 의해 통제 되는 비상계획구역(Emergency Planning Zone)으로 나누어 정의하고 있다.
- 캐나다는 방사선비상계획구역의 크기에 대한 법적 규제가 없어 최소 방사선 비상계획구역 크기에 대한 제한은 없는 상태이다.
- 따라서 IAEA에서 제시한 방법론인 확률론적 안전 분석 결과 및 해당 기관의 비상시 대응 전략을 고려하여 방사선비상계획구역 크기를 결정한다.

- 캐나다의 관련 기관들은 다음과 같이 여러 책임 소재가 나뉘어져 있다.
 - » 주 및 지역 정부: 공공의 건강, 재산 및 환경을 보호하기 위하여 방사선비상계획 및 대응에 대한 주요 책임을 갖고 있다. 각 지역 정부는 연방 원자력 비상계획(Federal Nuclear Emergency Plan, FNEP)에 따라 연방 정부와 협력하여 주 원자력 비상대응계획(Provincial Nuclear Emergency Response Plan, PNERP)을 마련한다.
 - » 캐나다 보건부: 캐나다 보건부는 FNEP의 주관 부서로, 캐나다 내 또는 캐나다 국민에게 영향을 미치는 방사선비상사태에 개입하기 위한 지침을 제공하며, 주 정부가 PNERP를 수립할 때 참고 자료로 활용된다.
 - » 캐나다 원자력안전위원회(CNSC): CNSC는 설계기준사고의 선량 한계를 검토하여 제한구역의 거리가 안전 요건을 모두 충족하는지 판단한다. 또한, 지역 정부와 협력하여 원자력시설의 안전성 및 인허가 절차에 대한 정보를 제공하여, 주 정부가 방사선비상계획구역을 결정하도록 한다.
 - » 소형모듈원자로 개발자: 부지 평가 및 기술 기반의 안전성 분석 결과를 제출하여, 적절한 제한구역과 방사선 비상 대응 계획을 제안하고 정부의 요구사항을 충족시켜야 한다.
- 방사선비상계획구역을 결정 권한은 주 정부에 있으나, 주 정부는 여러 유관 기관들과 협력하여 기술적 계획 기반으로 비상계획구역을 결정한다. 이 범위는 원자로 기술, 선량 평가 결과, 사회적 요인, 인구 통계 및 지리적 요인 등 다양한 외부 요소를 고려하여 결정된다.



[그림 4] 캐나다의 방사선비상계획구역 결정 과정



출처: Canadian nuclear safety commission presentation(2019. March)

3. 맺는말

위와 같이 알아본 우리나라와 국제기구, 그리고 주요 SMR 개발 선도국에서의 소형모듈원자로 (SMR) 개발 동향과 SMR 방사선비상계획 관련 안전 규제 연구개발 동향을 종합해 볼 때, 우리나라에서 SMR을 조기에 건설해서 운영할 수 있기 위해 기존의 대형 상업용 원자력발전소를 기반으로 현재 설정되어 있는 우리나라 현행 방사능 방재 관계 법령과 방사선비상계획구역(EPZ) 설정 등에 관한 안전 기준들을 SMR 고유 설계 특성을 충분히 반영한 과학적이고 합리적인 기준으로 수정·보완해야 할 필요성이 시급하고 절실하다.

5

바람의 나라 덴마크가 원자력을?
대한민국과 함께!



KAIST
원자력및양자공학과 교수
정용훈

한국과 덴마크의 협력은 에너지 분야에 국한되지 않고, 과거부터 인도주의적 지원을 통해 쌓아온 두터운 우정에 뿌리를 두고 있다. 특히 한국전쟁 시기의 덴마크 의료 지원은 양국 관계의 토대를 마련한 대표적 사례이다. 6·25 전쟁 발발 직후 유엔군이 파병을 결의하자 덴마크 정부는 유엔 회원국 가운데 가장 먼저 의료 지원 의사를 표명하였고, 곧바로 자국의 여객선이었던 유틀란디아호(MS Jutlandia)를 병원선으로 개조해 한국으로 파견하였다. 유틀란디아호는 정전협정이 맺어질 때까지 약 2년 반 동안 3차례에 걸쳐 한국에 파견되어, 그 기간 동안 유엔군 부상병 4,981명과 한국인 민간인 6,000명 이상에게 의료 서비스를 제공하는 큰 공헌을 했다. 특히 노르웨이, 스웨덴과 함께 1958년 서울에 국립의료원(National Medical Center)을 설립하고 10년간 의료진을 파견하여 한국 현대 의료체계 수립에 기여함으로써 양국 간 신뢰와 우호 관계를 더욱 공고히 했다. 이러한 역사적 협력의 경험은 현재 에너지·기술 분야에서의 협력을 모색하는 데에도 상호 신뢰의 기반이 되고 있다.



원자력 확대를 통한 기후 위기 돌파

기후변화 대응을 위한 전 세계적인 탄소중립 노력 속에서 원자력에너지는 안정적인 무탄소 전력 공급원으로 주목받고 있다. 실제로 기후변화에 관한 정부 간 협의체(IPCC)는 1.5°C 목표 시나리오에서 2050년까지 전 세계 원자력 발전 용량을 2020년의 394GW에서 약 1,160GW로 확대해야 한다고 제시하였는데, 이는 현재의 약 3배 수준으로 원자력 설비를 늘려야 한다는 의미이다.^{1,2} 이처럼 탄소중립을 달성하려면 간헐성이 한계점인 재생에너지 확대와 더불어 안정적인 기저 전원이면서 출력 조절까지 가능한 원자력의 역할이 필수적이라는 인식이 확산되고 있다. 특히 2023년 COP28 계기에 여러 국가들이 2050년까지 전 세계 원자력 발전 용량을 현재의 3배 수준으로 확대하자는 국제 공동선언을 추진하는 등, 원자력의 활용을 적극 모색하는 움직임도 나타나고 있다.

대한민국과 덴마크, 다르지만 모두 원자력이 필요하다

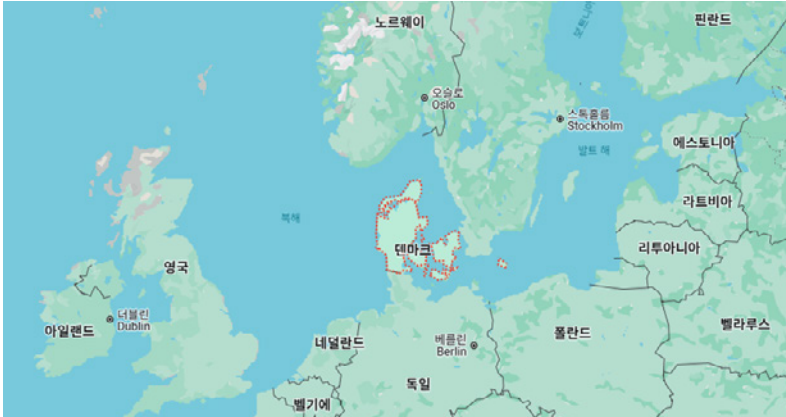
기후변화 대처와 에너지 안보 확보라는 도전에 직면해서 대한민국(이하 한국)과 덴마크 두 나라는 서로 다른 에너지 믹스를 가지고 있지만, 모두 안정적인 전력 공급을 위해 원자력에너지가 필요하다는 공통된 인식을 하고 있다. 극소량의 장기 비축이 가능하며, 발전 시 온실가스 배출이 없는 우라늄 연료로 전력을 생산할 수 있는 원자력에너지는 대한민국에게 매우 중요한 선택지이다. 이에 한국은 2030년 원

1 IPCC, "Global Warming of 1.5°C", IPCC Special Report, 2018.

2 OECD Nuclear Energy Agency, "Climate Change and Nuclear Power 2022", Oct. 2021. (IPCC 1.5°C 시나리오 분석 인용)

자력 발전 비중을 최소 30% 이상으로 유지하는 목표를 설정하는 등 원자력의 활용을 강화하고 있다.³ 이에 반해 덴마크는 1985년 의회 결의로 자국 내 원자력발전소 건설을 금지한 이후 현재까지도 비원자력 정책을 유지하고 있다.⁴ 대신 풍력을 중심으로 재생에너지에 집중하는 전략을 취하여 전력 부문의 탈탄소화를 추진해 왔다.

[그림 1] 덴마크 지도



출처: 구글 지도(<https://maps.app.goo.gl/3mNpGBSC5mLnHsuPA>)

한국과 덴마크는 1인당 에너지 소비량부터 전력 생산 구성까지 상당한 차이를 나타낸다. 한국은 2022년 한해 총 전력 생산량이 638TWh에 달하며, 석탄 33%, 천연가스 29%, 원자력 28% 등으로 전력원을 구성하였다.³ 1인당 전력 소비량은 10,700kWh로, 이는 반도체, 철강, 자동차, 중화학 공업 등 고도 제조업 중심의 산업 체계에 기인한다.³ 산업용 소비가 국내에서 사용되지만, 사실상 그 제품을 사용하는 세계 시장의 구성원이 사용하는 것이므로 1인당 전력 소비가 많아 이를 낮추어야 한다는 주장은 착시에 근거한 것이다.

반면 덴마크의 2022년 전력 생산량은 약 35TWh 수준(소비량은 이보다 많아 총소비의 10% 정도는 수입)으로 한국의 5% 정도에 불과하며, 이 중 83%가 풍력

3 World Nuclear Association, "Nuclear Power in South Korea", updated 3 May 2024.

4 World Nuclear Association, "Nuclear Energy in Denmark", updated 25 Apr. 2024.

(약 54%)과 바이오매스·폐기물 등 재생에너지로 공급되었으며, 석탄 발전이 약 10%, 천연가스와 석유 발전이 소량을 차지한다.⁵ 덴마크는 부족한 전력을 이웃국으로부터 수입하여 수요를 맞추고 있다. 1인당 전력 소비량은 약 5,200kWh(2020년 기준)로 한국의 절반 수준이며,⁴ 이는 산업 구조의 차이 때문이다.

한국은 1차 에너지 소비의 약 85%를 석탄·석유·가스 등 화석연료에 의존하며, 그 대부분을 수입하는 에너지 수입국인 반면, 덴마크는 북해 유전을 통해 석유와 천연가스를 일부 생산하는 자원 부국이기도 하다. 덴마크 풍력에너지는 기상 조건에 따라 출력이 급변하는 간헐성(intermittency) 문제가 있다. 바람이 잘 불 때는 전력 생산이 많지만, 바람이 불지 않으면 전력 생산이 급격히 줄어들어 수요를 맞추기 어렵다. 이 때문에 덴마크는 풍력이 부족한 시기에 인접한 독일, 노르웨이, 스웨덴 등 주변국으로부터 전력을 수입하거나 이웃 국가의 전력망과 연계하여 균형을 맞추고 있다. 다시 말해, 현재 덴마크의 재생에너지 시스템은 주변국의 협조에 크게 의존하고 있다.

한편, 덴마크는 풍력 외에도 바이오매스(주로 수입 목재 펄릿 등)를 활용한 발전을 재생에너지의 한 축으로 삼고 있다. 바이오매스 에너지는 재생 가능 자원으로 분류되지만, 지속적인 대량 공급에 한계가 있고 연소 과정에서 이산화탄소를 배출한다는 한계가 있다. 결국 2050년까지 완전한 탄소중립을 이루기 위해서는 현재의 풍력과 바이오매스만으로는 부족하며, 안정적으로 전력을 생산할 수 있는 새로운 에너지원이 필요하다. 이에 대한 해법으로 덴마크에서도 원자력, 특히 소형모듈원자로(SMR)와 같은 차세대 원전 기술에 관심이 높아지고 있다. 최근 2~3년간 덴마크에서 원자력 도입 논의가 활발해지고 있으며, 여론도 변화하고 있다. 2022년 여론조사에서 원자력 찬성 의견이 46%로 반대(39%)를 앞질렀으며, 2023년 조사에서는 찬성 55%, 반대 26%로 격차가 더 벌어졌다. 라르스 아가르드 기후 장관은 원자력 반대의 이념적 이유가 없다고 밝히며 도입 가능성을 열어두었다.

일부 정치인과 정당(자유동맹, 덴마크 국민당 등)은 소형모듈 원자로(SMR) 도입을 적극 검토해야 한다고 주장하고 있다. 덴마크 의회도 2023년 원자력 청문회

5 Wikipedia, "Electricity sector in Denmark", (Data accessed 2024).

를 개최하며 공식 논의를 시작했다. 정부는 아직 공식적인 도입 계획은 없지만, 원자력 연구와 기술 검토는 진행 중이며, 여론과 정책 변화에 따라 향후 논의가 확대될 가능성이 크다. 이러한 배경에서 덴마크 역시 원자력에너지를 안정적이고 청정한 전력원으로 고려하게 된 것이다. UAE 바라카에 운영 중인 우리나라 APR1400 4기 용량이면 덴마크 전체 전력 공급이 가능한 수준이므로, 원자력 도입을 통한 빠른 무탄소화도 충분히 가능하다.

[그림 2] UAE 바라카 원전 전경



결국 한국과 덴마크 모두 에너지 안보와 지속가능한 발전을 위해 원자력이 필요한 상황이다. 대한민국은 에너지 자원의 부재와 재생에너지 한계를 보완하기 위해, 덴마크는 풍력 중심 에너지 구조의 간헐성과 주변국 의존도를 탈피하기 위해 원자력을 대안으로 주목하고 있다. 두 나라 모두 안정적이면서도 탄소 배출 없는 발전원이 필요하다는 점에서 원자력의 중요성에 공감대를 이루고 있다.

한국의 축적된 원자력 기술과 덴마크에 싹트는 SMR기술

한국은 지난 수십 년간 축적된 원자력 발전 기술과 원자로 설계 능력을 바탕으로 대형 원전과 더불어 소형원자로 기술을 모두 보유한 나라이다. 대표적인 한국형 대형 원전으로는 APR1400이 있으며, 이는 신한울 1·2호기 등에 적용되었고 아

발 벤처들이 등장하여 주목을 받고 있다. 대표적으로 덴마크의 시보그 테크놀로지스(Seaborg Technologies)는 용융염 원자로인 CMSR(Compact Molten Salt Reactor) 기술을 개발 중이다. 시보그의 CMSR은 저농축 우라늄을 연료로 사용하는 불화염을 연료염으로 사용하는 4세대 원자로로, 출력 100MWe급 모듈을 바지선(barge)에 여러 기 탑재하여 부유식 발전소 형태로 운용하는 개념을 제시하고 있다. 고체 연료봉 대신 액체 연료를 사용함으로써 냉각재가 상실될 경우 자연 정지되는 수동 안전 특성을 갖는다.⁶ 시보그를 비롯한 덴마크의 혁신 기업들은 자국 내 전력 생산용보다는 해외 수출과 글로벌 시장 공략을 목표로 SMR 기술개발에 나서고 있으며, 향후 기술 상용화 시 재생에너지 위주의 덴마크 에너지 정책에 새로운 원자력 선택지를 더할 잠재성이 있다.

이러한 한국과 덴마크의 원전 기술 역량을 결합하는 협력 가능성에 대해 최근 관심이 높아지고 있다. 한국은 우수한 대형 및 SMR 원전 설계 및 건설 능력, 공급망, 그리고 조선 산업의 강점을 보유하고 있고, 덴마크는 혁신적인 SMR 설계 아이디어와 창업 생태계를 갖추고 있어 상호 보완적인 파트너가 될 수 있다.⁷ 실제로 2022년 4월, 덴마크 시보그 테크놀로지스(Seaborg Technologies)는 한국수력원자력(KHNP) 및 삼성중공업과 함께 부유식 원자력발전소(Floating Nuclear Power Plant, FNPP) 개발을 위한 MOU를 체결했다. 이 협력은 시보그의 용융염 원자로(CMSR) 기술과 삼성중공업의 함께 조선·해양 플랜트 설계·건설 역량, 한수원의 원전 운영 및 안전성 관리 경험을 결합하여 해상 부유식 원전을 개발·상용화하는 것을 목표로 하고 있다. 이 부유식 원자로를 그린수소 및 암모니아 생산에도 활용될 계획이며, 2028년까지 실증을 완료하고 2030년 이후 본격적인 상업화를 추진할 예정이다. 또한 2024년 5월, 한국원자력연구원(KAERI)과 덴마크의 시보그社は 원자로 기술 협력을 위한 양해각서(MOU)를 체결하여, 용융염 원자로 연구개발 분야에서 양국의 전문성을 결합하기로 하였다.⁶ 이 협력을 통해 한국이 보유한 원자로 설계·실증 인프라와 덴마크의 혁신 기술을 접목하여 차세대 SMR 개발을 가속화하

3 World Nuclear Association, "Nuclear Power in South Korea", updated 3 May 2024.

6 World Nuclear News, "KAERI and Seaborg sign MoU on cooperation", 30 May 2024.

7 Jeong, Y. H., "Denmark Korea cooperation on future nuclear technology", Seminar on Korea-Denmark cooperation in SMR Technologies, DTU, Denmark, 2025 Jan.

고, 향후 세계 시장에 공동 진출할 수 있는 발판을 마련할 수 있을 것으로 기대된다.

[그림 4] 뉴스케일파워 SMR 단지 예상도



출처: Nuscale Power

한국과 덴마크 역사적 협력 배경

한국과 덴마크의 협력은 에너지 분야에 국한되지 않으며, 과거부터 인도주의적 지원을 통해 쌓아온 두터운 우정에 뿌리를 두고 있다. 특히 한국전쟁 당시 덴마크의 의료지원은 양국 관계의 토대를 마련한 대표적인 사례이다. 6·25 전쟁 발발 직후 유엔군이 파병을 결의하자, 덴마크 정부는 유엔 회원국 가운데 가장 먼저 의료 지원 의사를 표명하였고,⁸ 자국의 여객선이었던 유틀란디아호(MS Jutlandia)를 병원선으로 개조하여 한국으로 파견하였다. 1951년 3월 부산항에 도착한 덴마크 병원선 유틀란디아호에는 수술실 4개와 356개 병상이 갖춰져 있었고, 의사와 간호사 등 약 100명의 의료진이 탑승하여 전쟁 중 후방병원 역할을 수행했다.

유틀란디아호는 정전협정이 맺어질 때까지 약 2년 반 동안 3차례에 걸쳐 한국에 파견되어, 그 기간 동안 유엔군 부상병 4,981명과 한국인 민간인 6,000명 이상

8 국가보훈부 나라사랑배우터, “덴마크 병원선 유틀란디아 (2024년 1월의 6·25 전쟁영웅)”, 2024.

에게 의료 서비스를 제공하는 큰 공헌을 했다.⁸ 1953년 7월 정전 후 유틀란디아호는 덴마크로 귀환하면서 남은 의약품과 의료 장비를 한국에 기증하였고, 전후에도 덴마크는 한국의 의료 재건을 도왔다. 특히 노르웨이, 스웨덴과 함께 1958년 서울에 국립의료원(National Medical Center)을 설립하고 10년간 의료진을 파견하여 한국 현대 의료체계 수립에 기여함으로써 양국 간 신뢰와 우호 관계를 더욱 공고히 했다.⁸ 이러한 역사적 협력의 경험은 오늘날 에너지·기술 분야에서의 협력을 모색하는 데에도 상호 신뢰의 기반이 되고 있다.

[그림 5] 유틀란디아호에서 치료받은 한국 어린이들



제공: 유엔평화기념관

에너지 분야에서 한국과 덴마크는 2011년 ‘녹색성장 동맹’을 체결하여 지속 가능한 경제 전환과 녹색 기술 증진을 위한 협력을 강화해 오고 있다. 국가 간 협력은 흔히 이루어지지만, 동맹 차원의 결속은 드문 사례이다. 한국과 덴마크는 친환경 기술을 중심으로 한 성장에 있어 동맹 수준의 관계를 형성하고 있다.

한국-덴마크 원자력 협력은 유럽 내 비원전국과 원전 강국 간의 협력이라는 점에서 독특한 조합이다. 그러나 이러한 협력을 성공적으로 추진하기 위해서는 정책적 정합성 확보, 규제 조화와 표준화, 공동 시장 개척 등 여러 요소가 충족되어야 한다. 양국이 원자력 분야에서 실질적인 협력을 이루기 위해서는 정부 간의 정책

적 의지와 장기적 일관성 확보, 기술 표준 및 안전 기준에 대한 협력과 상호 인정 (framework agreement) 등이 선행되어야 할 것이다.

양국의 부유식 원자로 기술 협력

부유식 원자로(Floating Nuclear Reactor)는 육지가 아닌 해상에 부유하는 구조물(주로 바지선 또는 부유식 플랫폼)에 원자로와 발전설비를 탑재하여 전력을 생산하는 개념이다. 이러한 부유식 원전은 기존 육상 원전과 비교하여 몇 가지 장점을 지닌다.⁷ 첫째, 조선소에서 모듈식 제작이 가능하여 공사 환경이 표준화되고, 제작 기간을 단축할 수 있다. 둘째, 전력이 필요한 지역 인근 해상으로 이동 배치가 가능하므로 전력 수요지 근처에서 신속히 전력을 공급할 수 있고, 필요시 다른 지역으로의 재배치도 가능해 유연성을 가진다. 셋째, 운전 종료 후 해체 시에도 부유 플랫폼째로 반출하여 처리할 수 있어 부지 복원이 용이하고, 사고 시에도 육지로부터 격리되어 영향을 최소화할 수 있다는 잠재적 이점이 거론된다. 부유식 원자로의 실현 가능성은 이미 러시아의 실증 사례를 통해 입증되고 있다.⁸ 실제로 지금까지 사용된 약 1,500개의 원자로 중 절반 이상이 해상에서 사용된 사례이며, 해상원자로는 우리에게 생소할 수 있으나 과반을 차지하는 주종으로 이미 널리 활용되어 왔다.

이러한 부유식 원자로 개발에 있어 한국과 덴마크 간 협력의 여지는 크다. 한국은 세계 최고 수준의 조선·해양 산업을 보유하고 있어 부유식 플랜트 건조 능력이 탁월하며, 덴마크의 시보그社は 앞서 언급한 바와 같이 바지선형 소형 원전을 구상 중이다.¹⁰ 현재 진행중인 민간 부문의 원자력 협력 사례들은 한국과 덴마크가 부유식 원전이라는 새로운 원전 패러다임을 함께 열어갈 수 있다는 가능성을 보여주는

7 Jeong, Y. H., "Denmark Korea cooperation on future nuclear technology", Seminar on Korea-Denmark cooperation in SMR Technologies, DTU, Denmark, 2025 Jan.

8 국가보훈부 나라사랑배우터, "덴마크 병원선 유틀란드리아 (2024년 1월의 6·25 전쟁영웅)", 2024.

9 World Nuclear News, "Russia's floating nuclear power plant passes one billion kWh", 16 Jan. 2025.

10 World Nuclear News, "Samsung, Seaborg partnership on floating nuclear reactors", 8 Apr. 2022.

것이다. 향후 한국-덴마크 협력을 통해 구상해 볼 수 있는 시나리오로는, 한국의 한국수력원자력(KHNP)과 조선사, 덴마크의 원자로 기술 기업이 컨소시엄을 구성하여 부유식 원자로 시범 플랜트를 개발·건조하는 사업을 들 수 있다.

예를 들어 한국 조선소에서 부유식 원자력 발전선을 제작하고, 이를 아시아 또는 유럽의 에너지 수요가 높은 연안 국가에 배치하여 운영함으로써 상업적 실증을 수행하는 것이다. 이 경우 한국은 원자로 설계·제작 및 운전·정비를 제공하고, 덴마크 측은 원자로 공동 설계 및 사업화를 맡는 식의 역할 분담도 가능할 것이다. 이렇게 구축된 부유식 원전 사업 모델은 두 나라가 공동으로 제3국 시장에 진출하는 데 활용되어, 탄소중립을 목표로 하는 모든 국가에 에너지 솔루션으로 공급될 수 있다.

조선소에서 제작하는 원자력 발전선의 장점

해상 원자력 발전선을 조선소에서 제작하는 방식은 기존의 육상 원자력발전소 건설과 비교하여 여러 가지 장점을 지닌다. 첫째, 건설 속도가 크게 향상된다. 전통적인 원자력발전소는 부지를 선정하고, 현장에서 일일이 건설하다 보니 착공부터 완공까지 10년에 가까운 시간이 걸리는 경우도 많다. 그러나 조선소에서 선박 형태로 원자로를 제작하면, 대형 선박을 2~3년 만에 건조하는 현대 조선 기술을 활용하여 훨씬 짧은 기간 내에 완성할 수 있다. 조선소는 크레인, 도크, 숙련공 등 대규모 구조물을 신속하게 조립하기 위한 인프라와 노하우가 이미 구축되어 있기 때문에, 원자로와 부속 발전 설비를 모듈화하여 효율적으로 조립할 수 있다. 게다가 여러 척의 선박을 병행 건조하듯 원자력 발전선도 동시다발적으로 여러 기를 한꺼번에 만들어낼 수 있어, 수요에 따라 생산량을 유연하게 늘릴 수 있다.

둘째, 경제적인 측면에서 이득이 크다. 조선소 제작 방식은 같은 설비를 반복적으로 생산하는 체계를 갖추므로, 규모의 경제를 실현할 수 있다. 동일한 설계를 반복해 만들면 부품을 대량 생산하여 단가를 낮출 수 있고, 작업자들도 반복 숙달을 통해 생산성을 극대화할 수 있다. 이와 달리 육상에서 각각의 원전을 개별적으로 건설하면 매번 새로운 공정을 거쳐야 하므로 비용이 많이 들고 비효율적이다. 조선

소에서 제조함으로써 발전소 건설에 드는 인력과 기간을 크게 줄일 수 있으며, 이는 곧 전체 사업 비용의 절감으로 이어진다.

셋째, 표준화된 제품을 통한 사업 안정성과 인허가 간소화가 가능하다. 조선소에서 만들어내는 원자력 발전선은 처음부터 표준 모델로 설계된다. 즉, 동일한 사양과 안전 기준을 가진 원자로 선박을 여러 척 생산하게 된다. 이렇게 되면 한 기를 제작하여 운용하면서 성능과 안전성이 입증되면, 이후 같은 모델에 대해서는 인허가 과정이 훨씬 수월해진다. 규제 당국 입장에서도 검증된 동일한 설계에 대해 반복 심사하는 것이기 때문에 시간과 비용이 줄어든다. 또한 표준화로 인해 운용 중 위험 요소를 사전에 충분히 파악하고 개선할 수 있어, 리스크가 감소하는 효과도 있다.

예를 들어 첫 번째 발전선에서 얻은 데이터와 경험을 바탕으로 다음 선박에서는 더 안전한 개선을 반영할 수도 있다. 이러한 반복 학습 효과는 원전 안전성 향상에도 도움이 된다. 마지막으로, 선박 형태이기 때문에 향후 업그레이드나 해체가 필요할 때에도 이동이 가능하다는 부수적 장점도 생각해 볼 수 있다. 원자로의 연료 교체나 유지보수를 위해 선박을 전문 시설이 있는 곳으로 옮길 수 있고, 수명이 다한 후에는 선박 채로 해체 장소로 이동시켜 처리하면 되므로, 각국의 원전 해체 부담을 덜어줄 수도 있다. 이와 같이 조선소에서 원자력 발전선을 제작하는 혁신적인 방식은 신속한 전력 공급, 비용 절감, 인력 및 인프라 활용 효율 증대, 그리고 표준화를 통한 안전성 향상과 규제 간소화 등 다각적인 장점을 제공한다. 이러한 이점들은 대한민국과 덴마크의 원자력 협력사업이 성공할 수 있는 탄탄한 기술적·경제적 기반이 된다.

필리핀 바탄 원자력발전소는 1976년 마르코스 정부가 에너지 위기를 해결하기 위해 착공한 동남아 최초의 원전이다. 웨스팅하우스가 가압경수로(PWR) 방식으로 건설하였으며 1986년 거의 완공되었다. 그러나 1986년 체르노빌 사고 이후 안전 우려가 커졌고, 같은 해 마르코스 정권이 무너진 후 부패 의혹과 비용 문제로 가동이 취소되었다. 이후 유지보수는 계속되었으나 한 번도 가동되지 않았으며, 현재까지 원전 재가동 여부가 논의되고 있다. 만약 이 발전소가 해상 부유식이었다면? 다른 나라로 옮겨져서 아마 지금 한국이나 일본에서 전력을 생산하고 있을지도 모른다.

대한민국과 덴마크의 브랜드 파워 결합

양국의 협력은 기술적인 측면뿐만 아니라 ‘브랜드파워’ 측면에서도 큰 강점을 지닌다. 대한민국과 덴마크는 각기 세계 무대에서 신뢰받는 이미지를 구축해 온 나라들이다. 먼저 대한민국은 전자, IT, 자동차, 조선 등 첨단 제조업 분야에서 두각을 나타내며 기술 중심의 현대적 이미지를 갖고 있다. 한국산 제품과 기술은 높은 성능과 효율성으로 글로벌 시장에서 경쟁력을 입증해 왔고, 한류(K-culture)의 인기도 더해져 한국은 혁신적이고 진취적인 국가라는 인상이 강하다. 원자력 분야에서도 대한민국은 안전하고 우수한 원전을 건설해 온 경험 덕분에 국제적으로 일정 수준의 신뢰도를 확보하고 있다. 한편, 덴마크는 ‘휘게(Hygge) 문화’로 대표되는 안전성과 신뢰성 면에서 탁월한 국가 이미지를 지니고 있다. 덴마크 사회는 투명성과 지속가능성 측면에서 세계적인 모범으로 여겨지며, 덴마크 기업들은 품질과 안전을 중시하는 것으로 유명하다. 다이나믹하면서 혁신적인 한국의 ‘K-culture’와 고요하며 안정적인 덴마크의 ‘Hygge-culture’가 결합되어 시너지를 내는 것이다.

[그림 6] 휘게와 한류의 결합



이렇듯 한국의 혁신성과 덴마크의 신뢰성이 결합될 때, 원자력 분야에서 강력한 브랜드파워가 형성될 수 있다. 두 나라가 공동 개발한 원자력 기술이나 제품이라면, “최신 기술로 뛰어나면서도 안전성과 지속가능성을 최우선으로 고려한 제품”이라는 인식을 심어줄 수 있다. 예를 들어 한국의 원자로 기술에 덴마크의 철저한 안전

기준과 투명한 운영 노하우가 더해진다면, 그것은 구매국이나 투자자들에게 큰 안심을 줄 것이다. 특히 원자력은 안전에 대한 사회적 신뢰가 무엇보다 중요한 분야이므로, 덴마크가 참여함으로써 얻게 되는 높은 신뢰도는 협력 사업의 성패를 좌우할 핵심 요소가 될 수 있다. 마찬가지로 한국의 참여는 기술적 완성도와 경제성 측면에서의 신뢰를 높여줄 것이다. 또한 공동 브랜드로 세계 시장에 진출할 때, 한국과 덴마크라는 이름값이 주는 마케팅 효과도 무시할 수 없다.

한국 제품에 익숙한 아시아·중동 지역과, 덴마크에 익숙한 유럽 지역 모두에서 호의적인 반응을 이끌어낼 수 있다. 국제사회에서 신뢰받는 두 국가의 협력이라는 점은 잠재 고객국들로 하여금 “이 정도로 서로 신뢰하는 두 나라가 만들었다면 믿을 만하다”라는 인식을 갖게 할 것이다. 이처럼 대한민국과 덴마크의 브랜드파워를 결합하면, 원자력 협력사업의 글로벌 경쟁력이 한층 강화된다.

한국은 아시아 및 중동, 아프리카 등지에서 구축해 온 외교 관계와 경제적 영향력이 있다. 예컨대 한국은 UAE에 원전을 수출한 경험을 바탕으로 동남아시아나 중동의 원전 도입 희망국들과 활발히 교류하고 있으며, 아시아·태평양 지역에서 높은 인지도를 갖고 있다. 덴마크는 유럽연합 내에서 신망이 두텁고, 환경·에너지 분야에서 서의 리더십을 통해 유럽 시장 및 국제기구에서 발언권이 강하다. 덴마크가 참여하는 사업이라면 유럽 각국의 관심을 얻기가 용이하며, 엄격한 유럽연합(EU) 규제에도 부합하는 기술로 인정받는 데 유리한 측면이 있다. 이러한 상호 보완적 시장 접근을 통해 양국은 글로벌 원자력 시장에서 폭넓은 기회를 잡을 수 있다.

한국과 덴마크의 협력 안정성

양국의 협력 파트너십은 그 어느 조합보다 안정적이라고 말할 수 있다. 우선 역사적으로나 지리적으로 한국과 덴마크 사이에는 갈등 요소가 거의 없다. 두 나라는 물리적으로 지구의 반대편에 떨어져 있어 영토 분쟁이나 이해관계 충돌이 없다. 오히려 멀리 떨어져 있기 때문에 서로 간에 직접적인 마찰 없이 우호 관계를 유지해 왔다. 한국과 덴마크는 모두 민주주의와 인권, 국제 평화에 대한 가치를 공유하는 국가들로서, 협력에 있어서 가치관의 충돌이 없다. 국제 외교 무대에서도 상

호 협력적인 관계를 이어오고 있으며, 모두 다자간 협력을 중시하는 열린 대외정책을 추구한다.

따라서 양국이 추진하는 협력사업은 정치적 변화나 외교적 갈등으로 흔들릴 가능성이 적다. 이는 원자력처럼 장기간에 걸쳐 추진해야 하는 대형 프로젝트에서 매우 중요한 조건이다. 수십 년간 지속적으로 신뢰를 유지하며 기술 협력과 투자를 이어가야 성과를 낼 수 있는 분야이기에, 파트너십의 안정성은 성공의 필수 요소라 할 수 있다. 흥미롭게도 과거 한국전쟁 때 병원선으로 맺은 인연을 바탕으로, 다시 한번 '선박'이 양국 협력의 상징이 될 수 있다는 점은 뜻깊다. 이번에는 병원선이 아닌 원자력 발전선으로, 평화로운 시대에 인류의 번영을 위해 함께하는 협력이 이루어지는 것이다.

정책적 지원 필요

한국과 덴마크의 원자력 협력을 활성화하기 위해서는 기술적인 개발과 더불어 정책·제도적 뒷받침이 필수적이다. 첫째, 법·제도 개선 측면에서 양국은 원자력 안전 규제 체계와 산업 표준에 대한 상호 이해를 높이고 조화를 이루도록 노력해야 한다. 덴마크는 현재 원자력 금지 정책 기조 하에 관련 법과 규제 경험의 부족하므로, 한국 및 유럽의 원자력 안전 규제 체계를 친숙화할 필요가 있다. 한국 역시 새로운 형태의 원자로(예: 용융염로, 부유식 원전)에 대한 인허가 기준을 선제적으로 정비하고, 해외로의 원자로 공동 수출을 촉진하기 위한 수출 통제 절차 간소화 등 제도 개선을 추진해야 한다.

둘째, 인력 교류 및 교육 측면에서 양국은 원자력 전문가와 연구 인력의 교류 프로그램을 확대할 필요가 있다. 덴마크 출신의 원자력 공학 인재들이 한국의 원자력 연구소, 대학, 산업계에서 연수 및 공동 연구를 수행하도록 장려하고, 한국의 원전 운전 경험자나 기술 전문가들이 덴마크의 스타트업 및 연구 기관에서 파견 근무하며 신기술 개발에 참여하도록 지원하는 것이다. 이를 통해 서로의 강점을 학습하고 문화적 차이를 극복하며 협력 네트워크를 구축할 수 있다. 나아가 차세대 인력 양성을 위해 공동 대학원 프로그램이나 장학 제도를 운영하고, 국제 학술 행사나 워크숍

을 정례화하여 지식 공유의 장을 마련하는 것도 고려할 수 있다.

셋째, 공동 연구개발(R&D) 협력의 중요성이 크다. 용융염 원자로, 부유식 플랫폼 설계, SMR 안전 시스템, 고효율 발전 사이클 등 다양한 분야에서 양국 연구 기관과 기업 간 컨소시엄 형태의 공동 R&D 프로젝트를 추진하면 시너지를 낼 수 있다. 이를 위해 양국 정부는 공동 R&D 펀드를 조성하거나 기존의 한-덴마크 녹색성장 동맹 등의 협력 채널을 활용하여 에너지 기술 분야 협력을 우선 지원하는 정책적 의제를 설정해야 한다. 예컨대 IAEA나 OECD/NEA 주관의 국제 연구 프로젝트에 한국과 덴마크가 공동으로 참여하여 성과를 공유하거나, 양자 간 MOU를 통해 국가 연구소 간 시험 시설을 상호 개방하여 공동 실험을 진행하는 방안도 가능하다.

넷째, 국제 공동 프로젝트 추진 측면에서는 보다 큰 규모의 실증 사업이나 상용 프로젝트를 국제 컨소시엄으로 전개하는 전략을 생각해 볼 수 있다. 예를 들어 제3국에 부유식 원전 발전소를 건설하는 사업에 한국과 덴마크 기업뿐 아니라 국제 금융기관이나 다른 기술 선도국의 참여를 이끌어내는 것이다. 이러한 다자간 프로젝트는 위험과 비용을 분담하면서도 각 참여국의 강점을 활용할 수 있어 성공 확률을 높일 수 있다. 또한 사업 추진 과정에서 얻게 되는 국제 협상, 표준 조율, 글로벌 공급망 관리 경험은 향후 양국의 원자력 산업 경쟁력을 강화하는 자산이 될 것이다. 특히 2011년 양국은 ‘녹색성장 동맹’(Green Growth Alliance)을 맺어 신재생에너지, 에너지 효율, 기후변화 대응 등 광범위한 녹색 분야에서 협력을 추진해 왔다. 이러한 기존 협력 플랫폼에 원자력 분야까지 포함한다면 보다 포괄적인 탄소중립 파트너십이 형성될 수 있을 것이다.

마지막으로, 사회적 수용성과 외교적 지원 측면도 간과해서는 안 된다. 원자력 협력 프로젝트가 순조롭게 진행되려면 양국 국민의 지지와 이해가 뒷받침되어야 하므로, 투명한 정보 공개와 소통을 통해 사업의 안전성과 필요성을 설득해야 한다. 덴마크 국민들에게는 최신 원전 기술의 안전성이 과거와 크게 달라졌음을 알리고, 한국 국민들에게는 탄소중립 목표 달성을 위한 국제 협력의 중요성을 강조하는 등의 소통이 요구된다. 아울러 정부 차원의 외교적 지원과 조율을 통해 협력 사업이 양국 우호 관계를 더욱 심화하는 긍정적 사례로 성공하도록 노력해야 할 것이다.

결론

전 지구적 기후 위기 대응을 위해 한국과 덴마크가 각자의 강점을 결합하여 원자력에너지 분야에서 협력하는 것은 상호 보완적인 윈윈(win-win) 전략이 될 수 있다. 한국의 축적된 원전 건설·운영 경험과 덴마크의 혁신적인 소형원자로 기술 아이디어가 만나면, 양국은 탄소중립 달성을 앞당길 새로운 해법을 공동으로 창출할 수 있을 것이다. 이러한 한-덴마크 원자력 협력은 양자 간 이익에 그치지 않고 국제 사회에도 중요한 의미를 지닌다. 부유식 원전과 SMR 기술의 발전은 전 세계적으로 안전하고 유연한 원자력 활용을 촉진하여 기후변화 대응에 크게 기여할 수 있으며, 양국의 협력 모델은 다른 국가들에게도 모범이 될 수 있다.

또한 원자력 분야의 협력 강화를 통해 재생에너지 중심의 에너지 전환 정책에 원자력을 결합하면 에너지 안보와 전력 계통 안정성까지 확보하는 효과를 낼 수 있다. 궁극적으로 한-덴마크 원자력 협력 모델은 기술과 신뢰를 기반으로 한 국제적 파트너십의 모범이 되어, 향후 전 세계의 지속 가능한 에너지 공급과 탄소중립 실현에 이바지할 것으로 전망된다. 바로 이어진 양국의 역사가 다시 한번 배로 연결될 것을 기대한다.

참고문헌

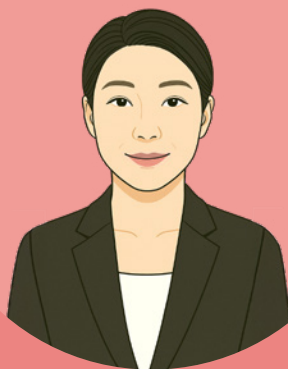
1. IPCC, "Global Warming of 1.5°C", IPCC Special Report, 2018.
2. OECD Nuclear Energy Agency, "Climate Change and Nuclear Power 2022", Oct. 2021. (IPCC 1.5°C 시나리오 분석 인용)
3. World Nuclear Association, "Nuclear Power in South Korea", updated 3 May 2024.
4. World Nuclear Association, "Nuclear Energy in Denmark", updated 25 Apr. 2024.
5. Wikipedia, "Electricity sector in Denmark", (Data accessed 2024).
6. World Nuclear News, "KAERI and Seaborg sign MoU on cooperation", 30 May 2024.
7. Jeong, Y. H., "Denmark Korea cooperation on future nuclear technology", Seminar on Korea-Denmark cooperation in SMR Technologies, DTU, Denmark, 2025 Jan.
8. 국가보훈부 나라사랑배움터, "덴마크 병원선 유틀란디아 (2024년 1월의 6·25 전쟁영웅)", 2024.
9. World Nuclear News, "Russia's floating nuclear power plant passes one billion kWh", 16 Jan. 2025.
10. World Nuclear News, "Samsung, Seaborg partnership on floating nuclear reactors", 8 Apr. 2022.
11. World Nuclear Association, "Nuclear Power in France", updated Nov. 2022.
12. World Nuclear News, "US, Canadian regulators further SMR collaboration", 18 Aug. 2022.
13. ANS Nuclear Newswire, "The blossoming of cooperation between the U.S. and Canada", 31 Mar. 2023.



세계 원자력에너지 시장 분석 및 전망



에너지경제연구원
미래전략실 실장
조일현



에너지경제연구원
해외에너지동향분석실 연구원
정귀희

2023년 12월 2일, 아랍에미리트 두바이에서 열린 제28차 기후변화협약 당사국총회(COP28)에서 미국, 프랑스, 영국, 스웨덴을 비롯한 25개 국가가 2050년까지 세계 원자력 설비 용량을 2020년 대비 3배 확대하는 '넷제로 원자력(Net-Zero Nuclear, 이하 NZN)' 이니셔티브에 동참했다. 이들은 2050년까지 지구 온도 상승을 1.5°C 이하로 억제하기 위해 원자력의 역할이 중요하다는 것을 인식하고, 선진 원자로와 SMR 등 신기술 개발에서 협력하기로 약속했다. 2024년 11월, 아제르바이잔 바쿠에서 열린 COP29에서는 6개 국가가 추가로 NZN에 동참함에 따라 참가국은 총 31개국으로 확대되었다.

2021년 COP26까지도 환영받지 못했던 원전이 탈탄소를 위한 해법으로 또다시 주목받게 된 것은 러시아-우크라이나 전쟁과 이스라엘-하마스 전쟁의 여파로 전 세계적으로 에너지 안보의 중요성이 환기되었기 때문이다. 게다가 산업용 전력 수요 증가와 더불어 전기화(전기자동차, 히트펌프 등), 에어컨 가동, 데이터센터 등의 확대로 인해 2024년부터 2027년까지 세계 전력 수요가 연평균 약 4% 수준으로 급등할 것으로 전망되는 상황에서 원전의 역할이 더욱 중요해질 것으로 예상된다.



1. 서론

2011년 3월 11일, 동일본 대지진과 후쿠시마 원전 사고는 원자력 발전에 대한 인식을 크게 변화시켰다. 세계 주요국은 원전 정책 재검토에 나섰고, 그 결과는 다양하게 나타났다. 독일은 탈원전을 선언했고, 프랑스는 원전 비중을 축소하기로 결정했으며, 미국, 중국, 러시아는 원전을 유지했다. 그러나 기후변화의 영향이 더욱 심각해지고, 탄소 배출 저감 노력이 확대됨에 따라 원전 확대 필요성이 다시금 대두되었다.

2023년 12월 2일, 아랍에미리트 두바이에서 열린 제28차 기후변화협약 당사국총회(COP28)에서 미국, 프랑스, 영국, 스웨덴을 비롯한 25개 국가¹가 2050년까지 세계 원자력 설비 용량을 2020년 대비 3배 확대하는 '넷제로 원자력(Net-Zero Nuclear, 이하 NZN)' 이니셔티브에 동참했다. 이들은 2050년까지 지구 온도 상승을 1.5°C 이하로 억제하기 위해 원자력의 역할이 중요하다는 것을 인식하고, 선진 원자로와 SMR 등 신기술 개발에서 협력하기로 약속했다. 2024년 11월, 아제르바이잔 바쿠에서 열린 COP29에서는 6개 국가²가 추가로 NZN에 동참함에 따라 참가국은 총 31개국으로 확대되었다.

2021년 COP26까지도 환영받지 못했던 원전이 탈탄소를 위한 해법으로 또다시 주목받게 된 것은 러시아-우크라이나 전쟁과 이스라엘-하마스 전쟁의 여파로 전 세계적으로 에너지 안보의 중요성이 환기되었기 때문이다. 게다가 산업용 전력 수

1 참여국은 아르메니아, 불가리아, 캐나다, 크로아티아, 체코, 핀란드, 프랑스, 가나, 헝가리, 자메이카, 일본, 한국, 몰도바, 몽고, 모로코, 네덜란드, 폴란드, 루마니아, 슬로바키아, 슬로베니아, 스웨덴, 우크라이나, 아랍에미리트, 영국, 미국임.

2 추가 참여국은 나이지리아, 엘살바도르, 카자흐스탄, 케냐, 코소보, 튀르키예 등임.

요 증가와 더불어 전기화(전기자동차, 히트펌프 등), 에어컨 가동, 데이터센터 등의 확대에 의해 2024년부터 2027년까지 세계 전력 수요가 연평균 약 4% 수준으로 급등할 것으로 전망되는 상황에서 원전의 역할이 더욱 중요해질 것으로 예상된다.

이에 본고는 최근 발간된 국제에너지기구(International Energy Agency, 이하 IEA)의 『새로운 원자력에너지 시대로 가는 경로(The Path to a New Era for Nuclear Energy)』를 통해 먼저 세계 원자력에너지 현황을 파악하고(1장), 이어서 세계 원자력에너지 전망에 대해 살펴본다(2장). 마지막으로 원자력에너지 보급 확대를 위한 방안을 정리하여(3장) 세계 원자력에너지 시장에 대한 이해를 높이고자 한다.

2. 세계 원자력에너지 현황

원전은 반세기 이상 여러 국가의 에너지 시스템에서 중요한 역할을 해 왔지만, 기술 발전, 에너지 수요, 에너지 정책의 변화로 인해 에너지 수요 충족에 대한 기여도는 크게 변화해 왔다. 지난 10년 동안 전기자동차, 데이터센터 등 새로운 전력 소비처의 출현과 함께 가전제품, 에어컨 등 기존 수요의 급격한 증가에 힘입어 세계 전력 수요가 전체 에너지 수요보다 2배 빠르게 확대되었다. 동시에 태양광과 풍력 발전의 보급도 급증하고 있다. 이 같은 상황으로 세계 전력 시스템, 원전 시장, 원전 정책이 재편되고 있다.

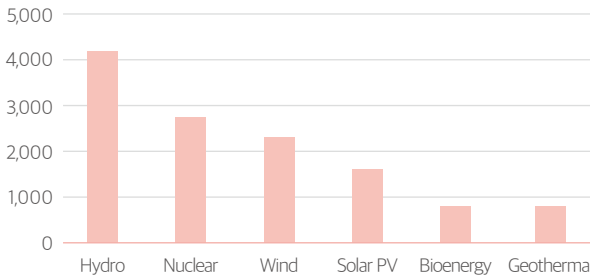
원자력에너지에 대한 투자는 21세기에 접어들 무렵부터, 특히 선진국을 중심으로 감소세를 보였으며, 그 원인으로는 높은 비용, 오랜 건설 기간, 원자력에 불리한 전력 시장 및 정책 환경, 원전의 안전한 운영과 고준위 방사성폐기물의 안전한 처리에 대한 지속적인 우려 등이 지목되었다. 따라서 전력 수요 충족에서 원전의 기여도 역시 감소했으나, 최근 몇 년 동안 에너지 안보에 대한 우려 고조, 급전 가능한 저탄소 발전 설비 용량의 필요성 증가, 원자력 기술의 발전 등으로 인해 원자력에 대한 관심이 다시 높아지고 있다.

1) 원자력의 역할

(1) 전력 공급원

원자력 발전은 2023년 세계 발전량의 9% 이상을 차지했으며, 세계 30여 개 국가에서 총 410개 이상의 원자로가 가동되고 있다. 원자력 발전량이 세계 전원 믹스에서 차지하는 비중은 1990년대 후반에 정점(약 18%)에 달한 이후 점차 감소해 왔다. 이는 지난 10년 동안 원자력 발전이 증가하기는 했지만, 전력 수요가 더욱 빠르게 상승했기 때문이다. 2023년, 원자력은 수력에 이어 2대 저공해 전력 공급원이었으며, 풍력보다 약 20%, 태양광보다 70%, 바이오에너지보다 4배 더 많은 전력을 생산했다. 원자력이 석탄, 가스, 석유 화력 발전을 대체함으로써 1971년 이후 이산화탄소 배출 약 72억 톤이 저감되었으며, 화석연료 수입 필요성이 축소됨에 따라 여러 국가의 에너지 안보가 강화되었다. 현재 가동 중인 원자로 덕분에 전 세계적으로 연간 약 15억 톤의 이산화탄소 배출이 방지되고 있다.

[그림 1] 세계 무탄소 발전원별 발전량 (2023년)



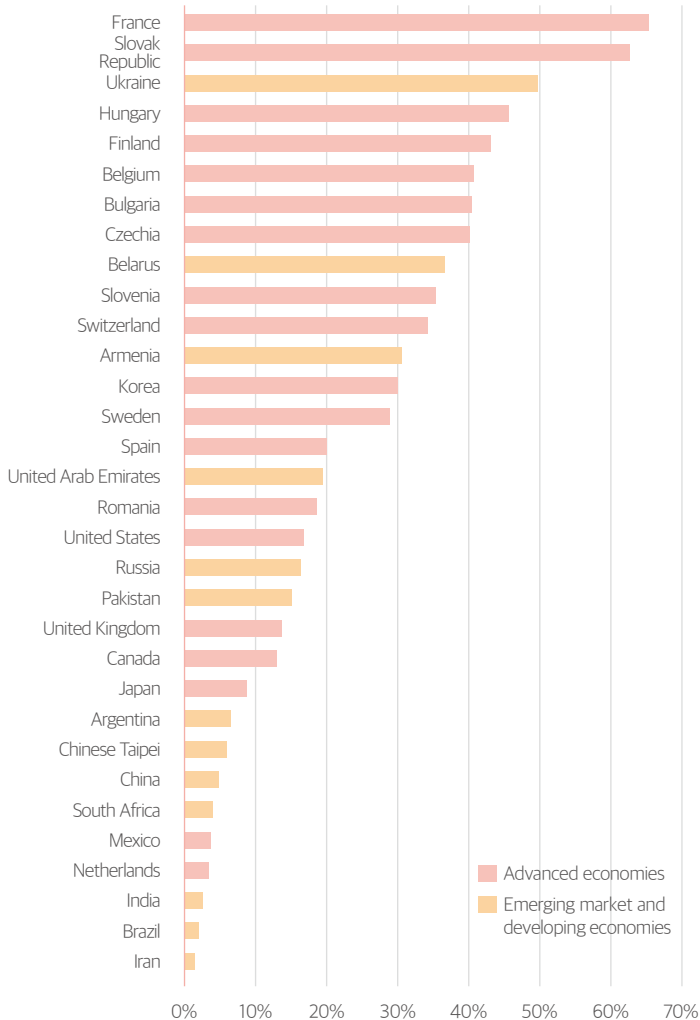
출처: IEA(2025.1), The Path to a New Era for Nuclear Energy

원자력 발전은 특히 선진국의 전원믹스에서 더 큰 비중을 차지하며, 2023년에는 17%에 달했다. 현재 19개 선진국에서 원전이 가동되고 있으며, 이들 국가에서 원자력은 수력, 풍력, 태양광 발전을 훨씬 앞서는 최대 저탄소 발전원이다. 전원 믹스에서 원자력의 비중이 가장 큰 10대 국가 중에서 8개는 선진국이며, 1위와 2위에 오른 프랑스와 슬로바키아의 원자력 비중은 각각 65%와 60%를 초과한다. 미국에서도 94개 원자로가 가동되고 있어 원자로의 수로 볼 때는 세계 최대 규모이나, 전체 전력 공급에서 원자력의 비중은 20%에도 못 미친다.

2023년, 신흥국과 개발도상국의 전체 발전량에서 원자력이 차지하는 비중은 5%에 불과했으며, 원전이 가동되는 국가는 13개국에 그친다. 이 중에서 우크라이나

나(약 50%)는 원전 비중이 가장 높은 국가이고, 다음은 벨라루스(35% 초과) 순이다. 그 외 원자력의 비중이 10%를 초과하는 국가로는 아르메니아, 아랍에미리트, 러시아, 파키스탄이 있다.

[그림 2] 각국의 발전량에서 원자력의 비중(2023년)



출처: IEA(2025.1), The Path to a New Era for Nuclear Energy

(2) 기타 역할

원자력 열병합발전(nuclear combined heat and power)은 전력 발전과 열에너지

지 활용이 모두 가능하다는 장점이 있다. 원자력 열병합발전은 폐열을 이용하여 1차 에너지 효율을 향상시키는 동시에, 핵분열 반응이 일어날 때 발생하는 열을 직접 사용함으로써 변환 손실을 줄인다. 현재 세계적으로 약 70개의 원자로가 열병합발전에 이용되고 있다. 원자력 열병합발전의 사용처는 생산된 열의 온도와 원자로의 유형에 따라 제한된다. 현재 가동 중인 원전은 대부분 경수로(light water reactor)나 중수로(heavy water reactor)를 이용하며, 이들은 150°C 이하의 공정 열을 공급할 수 있다. 따라서 원자력 열병합발전은 주로 지역난방, 해수 담수화, 펄프 및 제지 생산과 같은 특정 산업 공정에만 이용된다.

1960년대, 스웨덴의 Ågesta 원전과 영국의 Calder Hall 원전이 지역난방 네트워크를 위한 전력 발전 및 열 생산을 시작한 이후 원자력 지역난방 기술이 입증되었다. 원자력 지역난방은 현재 불가리아, 체코, 헝가리, 루마니아, 러시아, 스위스, 우크라이나를 비롯한 여러 국가에서 널리 활용된다. 원자력 열병합발전은 해수 담수화 시 전력을 공급할 수 있는 잠재력이 있다. 세계적으로 담수에 대한 수요가 계속 증가하고, 천연 담수가 더욱 부족해짐에 따라 향후 몇 년 동안 그 필요성이 급격히 증가할 것으로 예상된다. 2023년, 전 세계적으로 해수 담수화에 약 2,000페타줄(PJ)의 에너지가 소비되었으며, 2030년에는 그 수요가 약 두 배 증가할 것으로 전망된다. 중국, 인도, 이집트, 일본, 요르단, 카자흐스탄, 파키스탄, 러시아 등 여러 국가가 이미 원자력을 이용한 해수 담수화 시스템을 도입했다.

지역난방과 해수 담수화 외에도 일부 원자력발전소는 저온 산업 공정에 열을 공급하고 있다. 예를 들어 스위스의 Gösgen 설비는 220°C의 증기를 인근 판지 제조 시설에 공급하고 있다. 원자력 열병합발전의 경쟁력은 화력발전보다 높을 수 있다. 또한 여러 선진 원자로 설계가 현재 개발되고 있으며, 이들을 이용하면 800°C 이상의 고온 열을 공급하는 등 응용 분야가 더욱 광범위해질 수 있다.

2) 최근 원자력 시장 동향

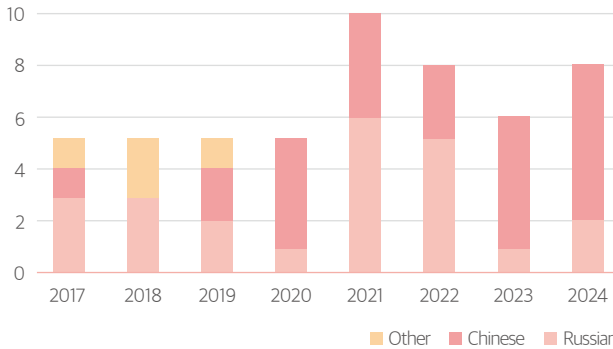
최근 몇 년간 원자력 산업의 환경은 눈에 띄게 변화했다. 선진국에서 신규 대형 원자로 건설이 감소함에 따라 대형 원자로 설계의 다양성이 감소하고 있다. 이는 선진국이 새로운 프로젝트를 적시에 가동하는 데 어려움을 겪고 있는 반면, 중

국 및 러시아 기업들이 원자력 산업을 주도하고 있는 상황을 통해서도 알 수 있다.

(1) 중국·러시아: 원자력 기술 선도

원자력 시장의 주도권은 선진국에서 중국과 러시아로 계속 이동하고 있다. 선진국이 전 세계 원전 용량의 2/3를 보유하고 있지만, 신규 원전은 대부분이 중국 또는 러시아 설계를 이용해 신흥국에서 건설되고 있다. 2017년 초부터 2024년 말까지 52개의 원자로가 건설에 들어갔으며, 중국(25기)이나 러시아(23기)가 이 중 4기를 제외한 모든 원자로를 설계했다. 선진국 중에서는 영국(유럽 설계)과 한국(국내 기술)에서 각각 2기가 건설되는 데 그쳤다. 이처럼 원전 기술 공급업체에 대한 집중도가 높아지면 향후 원자력 기술 발전이 저해될 수 있다.

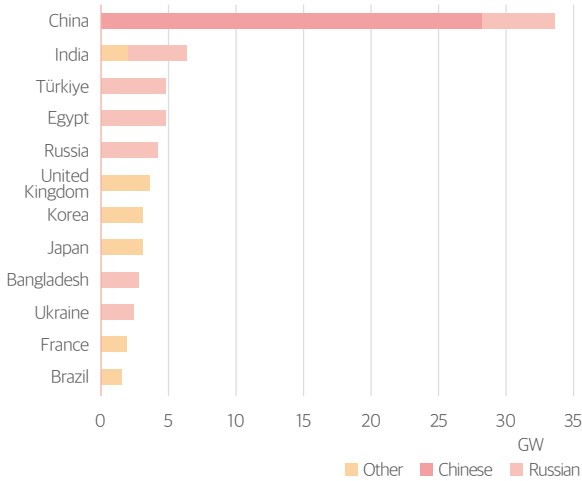
[그림 3] 원전의 기술 원천별 분류(2017~2024년)



출처: IEA(2025.1.), The Path to a New Era for Nuclear Energy

2024년 말을 기준으로 전 세계적으로 63기의 원자로가 건설되고 있으며, 전체 설비 용량은 71GW에 달한다. 중국이 가장 많은 원자로(29기, 총 33GW)를 건설 중이며, 이 중 대부분은 자국 기술이 적용되었다. 인도, 러시아, 튀르키예, 이집트는 현재 총 5GW 용량의 원자로를 건설 중이며, 이들 중 대부분이 러시아 설계를 이용한다. 방글라데시와 우크라이나에서 건설 중인 원자로 역시 러시아 기술이 이용되고 있으며, 러시아 내에서도 원자로 4기(총 4GW)가 건설되고 있다. 일본, 프랑스, 브라질, 한국, 영국에서 건설 중인 원자로는 자국 기술이나 다른 선진국의 기술이 적용되었다.

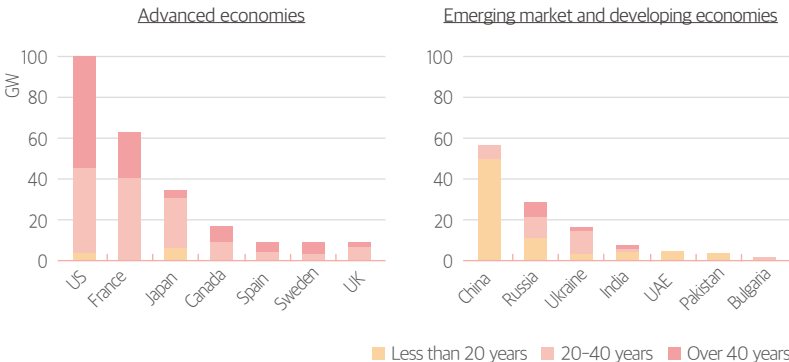
[그림 4] 현재 건설 중인 원전의 기술별 분류(2024년 12월)



출처: IEA(2025.1.), The Path to a New Era for Nuclear Energy

2023년, 선진국의 전원 믹스에서 원자력이 차지하는 비중이 2001년의 24%에서 17%로 감소했으며, 이는 기존 원전의 노후화 및 원자로 폐쇄 결정과 함께 신규 원전 건설 부족으로 인한 것이다. EU 발전량에서 원자력의 비중은 1997년에 34%를 기록하며 정점에 달했으나 이후 감소를 유지했다. 미국에서는 원자력의 비중이 수년 동안 약 20%로 유지되고 있지만, 원자력 발전량은 20년 전과 비교할 때 3% 증가하는 데 그쳤다. 일본에서는 후쿠시마 원전 사고 이후 원자력의 비중이 2010년의 25%에서 0%까지 떨어졌으나, 다수의 원자로가 점차 재가동에 들어가면서 2023년에 10%로 회복되었다.

[그림 5] 주요국의 원전 설비 용량과 운영 연수(2023년 말)



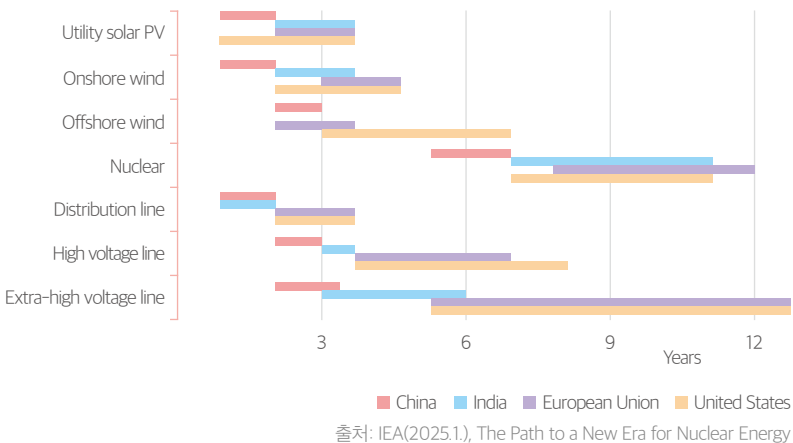
출처: IEA(2025.1.), The Path to a New Era for Nuclear Energy

(2) 원전 건설 기간 장기화

원자력발전소의 건설 기간은 전체 투자 규모에 직접적인 영향을 미친다. 신규 발전소의 가동 지연은 보통 비용 상승으로 이어지는데, 원전은 그 규모, 기술의 복잡성, 엄격한 규제 등으로 인해 화력이나 재생에너지 발전 설비보다 건설에 훨씬 더 오랜 시간이 소요된다. 2000년 이후 전 세계적으로 원자로 건설에 평균 7년이 걸렸으나, 일부 선진국에서는 10년을 초과하는 경우도 있었다. 대부분 다른 저탄소 전력 기술은 훨씬 더 빠르게 건설되며, 대규모(utility-scale) 풍력 및 태양광 발전단지지는 보통 4년 이내에 건설이 가능하다.

원자력발전소 건설 기간은 국가와 지역에 따라 매우 다양하다. 최근 유럽과 미국에서는 원전 건설에 상당히 오랜 시간이 소요되어 왔다. 심지어 한국에서도 최근 완공된 3기의 원자로 건설에 각각 10년이 걸렸다. 반면 중국은 대형 원자로를 더욱 빠르게 가동할 수 있었는데, 2017년부터 2023년까지 원전 건설에 평균 7년이 소요됐고, 일부는 5년 이내에 완공되기도 했다.

[그림 6] 기술별 전력 설비의 건설 기간

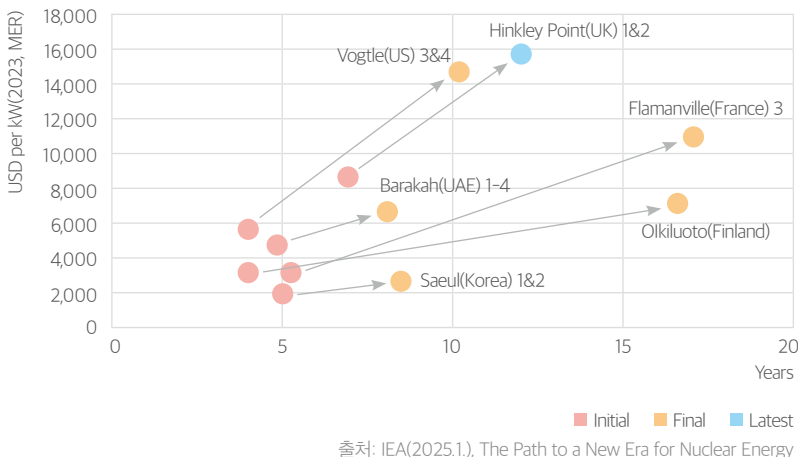


선진국에서 원자로를 건설하는 데 소요되는 기간은 지난 10년 동안 크게 늘었다. 최근에는 대부분의 원전 프로젝트가 건설 지연과 비용 초과로 어려움을 겪고 있다. 예컨대, 30년 만에 미국에서 처음으로 추진된 신규 원전 프로젝트인 Vogtle 3, 4호기 프로젝트의 경우, 자본비용은 당초 추정치(\$5,600/kW)에서 크게 불어난

\$1만 4700/kW로 확대됐으며, 공사 기간도 거의 10년에 달했다. 이는 인력 관리와 더불어 착공 이후 기술 변경, 조달 및 건설 하도급자 변경 등에서 기인했다.

핀란드의 Olkiluoto 3 프로젝트는 당초 2009년에 가동될 예정이었으나 2022년에야 전력망에 연결되었고, 예산도 당초 \$3,300/kW에서 \$7,200/kW로 두 배 이상 증가했다. 그 원인은 설계 변경, 규제, 공급망 차질 등에 있다. 영국의 Hinkley Point C 프로젝트도 비용 상승 및 건설 지연으로 어려움을 겪고 있는데, 당초 약 \$8,700/kW로 예상되었던 공사비는 \$1만 6,000/kW로 증가했으며, 완공일도 당초 예정이던 2025년에서 여러 차례 연기되었다.

[그림 7] 주요 원전 프로젝트의 투자 규모 및 건설 기간



(3) 원전 투자 증가세

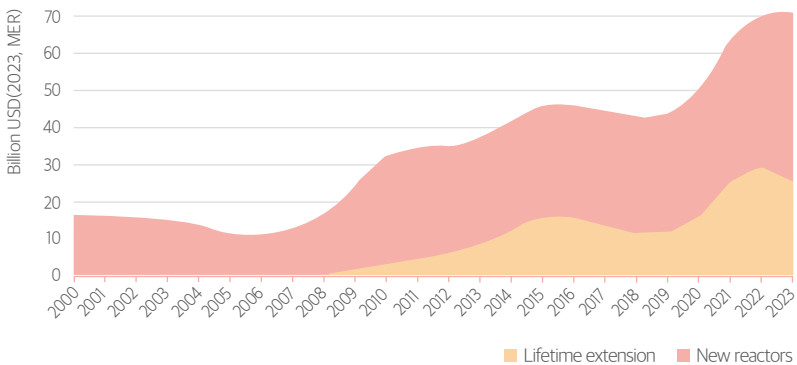
1970년대에는 오일 쇼크로 인해 여러 선진국이 화석연료 수입 의존도를 줄이고자 노력했으며, 그 덕분에 1980년대에 원자력 산업에 대한 투자가 급증했다. 1986년 발생한 체르노빌 원전 사고 이후 여러 국가가 원자력 프로그램을 포기함에 따라, 신규 투자가 거의 중단되었다. 더 엄격해진 안전 규제와 이에 따른 비용 증가로 인해 다른 국가에서도 신규 발전소 개발에 대한 참여가 감소했다.

이후 10년간 자본 지출은 점차 다시 증가하여 2000년에는 약 150억 달러에 달했지만, 이후 원자력 프로그램이 성숙기에 도달하고 신규 원전 건설이 거의 중단되

자 2006년에는 100억 달러 미만으로 떨어졌다. 그러다가 2000년대 말부터 다시 신규 원전 건설이 재개되고, 수명이 다한 노후 원전에 대한 개보수 필요성이 제기 되자, 투자가 반등하기 시작했다. 하지만 2011년 후쿠시마 원전 사고 이후, 신규 용량에 대한 투자는 다시 감소했다. 2010년대 전체 투자 증가율은 연평균 3%를 밑돌았고, 이는 대부분 선진국에서의 기존 원전 수명 연장과 특히 중국을 비롯한 신흥국의 신규 원전 증설에 기인한 것이다.

최근에는 에너지 시스템 탈탄소화 필요성과 에너지 안보 우려가 가중되면서 원자력에 대한 관심이 다시금 높아지고 있다. 2023년, 신규 원전 설비에 대한 투자는 2021년의 350억 달러에서 420억 달러로 급증했다. 2023년 전체 원자력에너지에 대한 투자는 약 650억 달러에 달했는데, 이는 2013년 대비 두 배 높은 수치다. 또한 노후 원전 보수 및 설비 개선에 연간 약 250억 달러가 투입된 것도 전반적인 투자 증가에 기여했다.

[그림 8] 유형별 원자력에너지에 대한 투자(2000~2023년)



3) 원전에 대한 관심 증가

지난 몇 년 동안 신규 원전 건설과 기존 원전의 수명 연장에 대한 관심이 높아지면서 원전 산업의 재부흥 가능성이 커지고 있다. 이는 정책적 지원 강화, 기술 발전, 그리고 데이터센터 등에서의 24시간 지속적인 전력 공급 필요성으로 인해 더욱 가속화되고 있다.

(1) 정책적 지원 강화

정책 환경 변화로 원자력이 세계 전력 시스템에서 계속해서 중요한 역할을 할 수 있는 여건이 조성되고 있다. 각국 정부는 전력 시스템의 안정성과 신뢰성을 강화함으로써, 청정에너지 전환과 에너지 안보에 기여할 수 있는 저탄소 전력 및 열 공급원으로서 원자력의 이점을 인식하고 있다. 최근 여러 국가에서 기존 원자로의 가동 수명을 연장하도록 허용하는 정책적 지원이 증가하고 있는 것은 이를 반영한 것이다. 지난 5년 동안 13개 국가가 원자로 64기(총 65GW)의 수명을 연장하기로 결정했는데, 이는 현재 전 세계 원전 설비 용량의 약 15%에 해당한다.

[표 1] 주요국의 기존 원자로 수명 연장 결정(2019~2024년)

국가	결정 내용	가동 용량	확장 용량	장기 계획
아르메니아	Armenian 2호기 수명을 2036년까지 연장 계획	0.4	0.4	확장
벨기에	Doel 4호기와 Tihange 3호기 수명을 2035년까지 10년 연장	4.1	2.2	단계적 폐지
체코	Dukovany 원자로 4기의 수명이 2045~2047년까지 20년 연장될 전망	4.2	2.0	확장
핀란드	Loviisa 원자로 2기의 수명을 2050년 말까지 연장	4.6	1.1	확장
프랑스	Grand Carenage 프로그램을 통해 모든 원전의 수명을 40년 이상으로 연장	64.0	27.4	확장
헝가리	의회가 Paks 원자로 4기의 수명 추가 연장을 승인	2.0	2.0	확장
일본	개정된 '전력산업법(Electricity Business Act)'에 의거해 안전상의 이유로 가동이 중단된 기간을 제외함으로써 일부 원자로의 경우 60년 이상 가동이 허용됨	13.3	3.5	재시작
멕시코	Laguna Verde 2호기(775MW)의 수명을 2055년까지 30년 연장 계획	1.6	0.8	확장
네덜란드	Borssele 원전 수명 연장이 가능	0.5	0.5	확장
루마니아	Cernavoda 1호기의 수명을 60년으로 연장하기 위해 개보수 계획	1.4	0.7	확장
남아공	Koeberg 1호기를 2044년까지 20년 추가 연장을 승인(Koeberg 2호기는 아직 평가 중)	1.9	1.0	확장
스페인	Trillo 원전의 가동 기간을 2034년까지 10년 연장	7.4	1.1	단계적 폐지
미국	'인플레이션 감축법(Inflation Reduction Act)'에 의거해 기존 원전에 생산세액공제(PTC) 제공	1024	22.7	확장

출처: IEA(2025.1.), The Path to a New Era for Nuclear Energy

정책적 지원은 원자력에너지 보급을 확대하는 데 중요한 역할을 한다. 현재 40여 개 국가가 신규 원자로를 건설할 계획이거나 검토 중이며, 여기에는 아직 원전을 보유하지 않은 10여 개 국가도 포함된다. 2024년까지 총 31개 국가가 2050년까지 전 세계 원전 용량을 세 배로 늘리겠다고 약속했다. 특히 최근 몇 년 동안 중소형 원전에 대한 지원이 증가하고 있으며, 관심의 정도는 다르지만 30개 이상의 국가가 SMR을 개발 중이거나 도입을 고려하고 있다.

주목할 만한 SMR 지원 정책으로는 SMR 연구·개발(R&D) 프로젝트에 최대 500만 캐나다 달러를 지원하는 캐나다의 ‘SMR 활성화 프로그램(Enabling Small Modular Reactors Program),’ SMR을 비롯한 혁신적인 원자로에 10억 유로를 투자하는 ‘프랑스의 2030 투자 계획(France 2030 Investment Plan),’ SMR을 포함한 선진 원자로 구축 지원에 30억 달러 이상을 지원하는 미국의 ‘선진 원자로 실증 프로그램(Advanced Reactor Demonstration Program)’ 등이 있다.

(2) 원자력 기술 개발 가속화

핵분열 기술, 특히 SMR의 혁신으로 원자력 산업이 재편할 수 있는 잠재력을 갖고 있다. 최근 몇 년 동안 SMR R&D가 확대되며, 전 세계적으로 80개 이상의 설계가 개발되고 있다. SMR 기술은 규모를 축소함으로써 초기 비용 절감, 개발 기간 단축, 건설 위험 축소 등의 이점을 제공하며, 이로 인해 원자력에너지의 새로운 응용 분야가 개척될 수 있다. SMR 개발의 선도 기업 다수는 선진국에 기반을 두고 있어 향후 원자력 산업의 글로벌 리더십이 재편될 가능성도 있다. 또한, 안전성, 경제성, 지속가능성의 개선을 목표로 하는 첨단 대형 원자로(3세대+, 4세대 포함)를 개발하려는 노력도 확대되고 있다.

SMR은 원자력 산업 혁신의 중심에 있으며, 최근 몇 년 동안 몇몇 선도 기업이 중요한 기술적 진전을 이루었다. 최초로 가동될 SMR 프로젝트의 최대 용량은 다양하며, 대부분의 설계는 10MW에서 최대 350MW 수준이 될 것으로 예상된다. 더 작은 마이크로 원자로 개념도 개발 중이며, 담수화, 시추, 채굴 등을 위한 외진 지역이나 산업용 전력 공급을 위한 틈새시장을 공략할 수도 있다.

[표 2] 주요 SMR 기업들의 계획과 기술

기업	SMR 개발 계획	기술
NuScale	루마니아: 2029년까지 6개 모듈형 발전소 (462MW) 가동 계획 불가리아, 캐나다, 체코, 가나, 인도네시아, 한국, 폴란드, 우크라이나, 미국과 MoU 체결	VOYGR SMR: 모듈당 77MW, 발전소당 4개 또는 6개, 12개의 모듈. 피동 안전 기능을 갖춘 일체형 가압수형 원자로(PWR) 설계
Westinghouse	영국: AP300(2030년대 초 첫 번째 원자로 가동)에 대한 사전 승인 단계 캐나다, 체코, 루마니아, 우크라이나와 MoU 체결	AP300 SMR: 330MW 단일 루프 PWR, AP1000 기술 기반, 모듈형 건설
TerraPower	미국: 와이오밍 주에 나트륨 원자로 건설 계획 2030년 가동 목표	나트륨: 용융염 에너지 저장 장치를 갖춘 345MW 나트륨 냉각 고속 원자로
GE Hitachi Nuclear	캐나다: 2029년까지 OPG와 첫 번째 SMR 건설 계약 체결 체코, 에스토니아, 폴란드, 스웨덴, 영국과 MoU 체결	BWRX-300: 비등수형 원자로(BWR) 설계에 기반한 300MW 수냉식 자연 순환 SMR
Rolls-Royce	영국: SMR 개발을 위해 정부 자금 지원, 2030년대 초 보급 체코, 네덜란드, 폴란드, 스웨덴과 MoU 체결	UK SMR: 470MW PWR 설계, 60년간의 가동 기간
NUWARD	프랑스: 200~400MW SMR, 2030년경 건설 개시 계획 핀란드, 인도, 이탈리아, 폴란드, 슬로바키아, 슬로베니아와 MoU 체결	NUWARD: 검증된 PWR 기술을 기반으로 한 200~400MW 다목적 SMR
X-energy	미국: 2030년까지 320MW SMR 가동을 위한 선진 원자로 실증 프로그램으로 선정 캐나다와 MoU 체결	Xe-100: 80MW 고온 가스 냉각 원자로, 320MW 플랜트를 위한 모듈형 설계
Oklo	미국: 2027년까지 최초의 Aurora SMR 시험 설비 완공 예정	Aurora: 15MW 고속 중성자 원자로, 용량 확대 가능성
Moltex Energy	캐나다: New Brunswick Power와 2030년대 초까지 첫 원자로 건설을 위한 계약 체결	SSR-W: 300MW 용융염 원자로 설계. 사용 후 핵연료 재사용
CNNC	중국: 하이난에 건설 중인 ACP100 SMR, 2026년 가동 예정	ACP100(Linglong One): 125MW 일체형 PWR 설계
Kairos Power	미국: 2027년까지 첫 번째 4세대 SMR 가동	Hermes 저전력 실증 원자로: 35MW 용융염 원자로
Newcleo	영국: LFR 설계 개발, 2033년까지 영국에서 최초의 200MW 상용 원자로 출시 예정	LFR-AS-200: 200MW LFR 설계
KHNP	한국: 2027년 하반기까지 시범 원자로 완공, 2028년까지 SDA 완료	i-SMR: 170MW 통합 PWR SMR

출처: IEA(2025.1.), The Path to a New Era for Nuclear Energy

기존의 석탄 및 가스화력발전소를 개조하거나 SMR로 대체하면, 기존 인프라를 활용하여 저탄소 에너지 시스템으로 전환하는 효과적인 해결책이 될 수 있다. 특히, 300MW급 SMR은 기존 화력발전소와 유사한 발전량을 제공하므로 전력망 연결이 용이하고, 기존의 수자원과 같은 인프라를 이용할 수 있어 노후 석탄 화력발전소를 대체하는 데 적합하다. 이러한 브라운필드(brownfield) 프로젝트는 신규 부지를 확보할 필요가 없기 때문에 토지 취득 비용이 낮고, 허가 절차도 비교적 수월하다는 장점이 있다.

최근 몇 년 동안 혁신적인 원자로, 첨단 핵연료 주기 및 원자력에너지 활용을 위한 다양한 해법이 개발되면서, 원자력의 지속적인 발전이 이루어지고 있다. 현재 3세대 원자로를 대체할 것으로 예상되는 4세대 원자로가 이러한 추세를 견인하고 있다. 이러한 첨단 시스템의 주요 목표는 지속가능성, 경제성, 안전성 등을 개선하고 핵확산 위험을 줄이는 것이다. 이를 위해 전 세계적으로 수랭식, 가스 냉각식, 액체 금속 냉각식, 용융염 냉각식 원자로와 다양한 연료 주기를 포함한 수십 가지의 설계가 개발되고 있다. 그러나 이러한 모든 첨단 설계는 여전히 기술 및 경제적 문제를 해결해야 하며, 비용 인하 정도에 따라 장기적으로 저탄소 전력, 열, 수소 등의 생산에 어떤 기술이 활용될지가 결정될 것이다.

(3) 데이터 센터: 새로운 원자력 수요처

기술 기업들은 데이터센터에 필요한 전력 공급원으로 원자력, 특히 SMR을 점점 더 많이 찾고 있다. 데이터센터의 전력 수요는 디지털화와 AI의 활성화에 힘입어 빠르게 증가할 것으로 예상된다. 지금까지 전 세계 데이터센터에 전력을 공급하기 위해 최대 25GW 용량의 SMR 건설 계획이 발표되었으며, 이들 대부분은 미국에 위치한다. 원자력에너지를 활용한 데이터센터의 관심 증가는 상승하는 전력 수요 충족과 탄소중립 목표 달성을 위해 청정하고 안정적인 전력의 필요성이 높아진 데 기인한다.

데이터 센터는 일반적으로 가동률이 매우 높다. 보통 99.999%의 가동률을 목표로 하며, 다운타임은 연간 5분 미만으로 제한되어야 한다. 안정적인 청정 전력의 필요성을 고려할 때 데이터센터 운영자들은 원전에 더 높은 가격을 지불할 의향이

있을 수 있다. 일부 데이터센터의 경우, 전력구매계약(PPA)을 통해 원자력에너지를 확보하고 있다. 2023~2024년에 발표된 최대 약 27GW의 프로젝트(SMR과 대형 원자로 모두 포함) 중 약 15GW를 대상으로 PPA가 체결되었다.

3. 세계 원자력에너지 전망

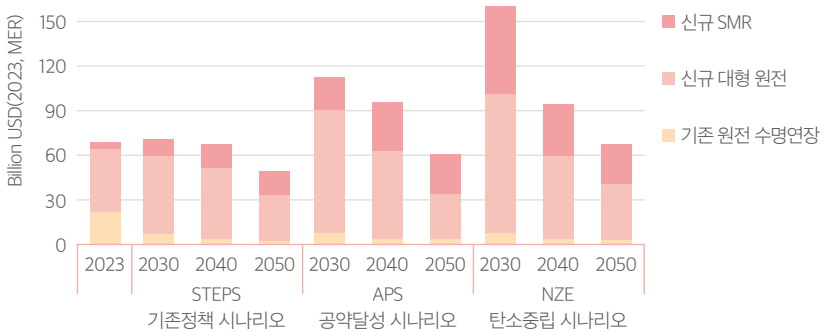
2024년 12월 말 기준, 전 세계적으로 416기의 원자로가 가동되고 있으며, 2025년 원자력 발전량은 역대 최고치를 기록할 것으로 예상된다. 일부 국가에서 원자력 발전을 단계적으로 폐지하거나 조기 폐기하는 상황이지만, 일본에서 가동이 재개되고, 프랑스에서 유지보수 작업이 완료되고, 중국, 인도, 한국, 유럽 등 다양한 시장에서 신규 원자로가 상업 가동을 시작함에 따라 전 세계 원자력 발전량이 증가하고 있다. 원자력은 전 세계 발전량의 10%에도 미치지 못하지만, 수력 발전에 이은 2대 저탄소 전력 공급원이다.

1) 원자력에 대한 투자

IEA의 '2024년 세계 에너지 전망(World Energy Outlook 2024)'에 따르면, 원자력에 대한 전 세계 투자 및 원전 설비 용량은 모든 시나리오에서 증가할 것으로 예상된다. 먼저 '기존 정책 시나리오(Stated Policies Scenario, 이하 **STEPS**)'³에서는, 원자력 투자가 2023년의 약 650억 달러에서 2030년 약 700억 달러로 소폭 증가한다. 2030년 투자의 약 80%는 신규 대형 원자로 건설에, 10%는 SMR 건설에, 나머지 10%는 기존 원자로의 수명 연장 및 증설에 투입될 예정이다. 2030년 이후에는 연간 원자력 투자가 다소 감소하고, 특히 2040년 이후 점차 축소되어 2050년에는 약 450억 달러에 그칠 것으로 예상된다. 이는 중국에서 신규 원자로 건설이 감소하고, 대규모 원자로와 소형 원자로의 건설비용이 모두 감소하기 때문이다.

3 **STEPS**는 지금의 정책 환경을 바탕으로 하며, 청정에너지 공급망을 지원하는 산업 정책 및 에너지 기후와 관련된 조치의 영향을 고려

[그림 9] IEA 시나리오별 세계 원자력에너지 투자(2023~2050년)



출처: IEA(2025.1.), The Path to a New Era for Nuclear Energy

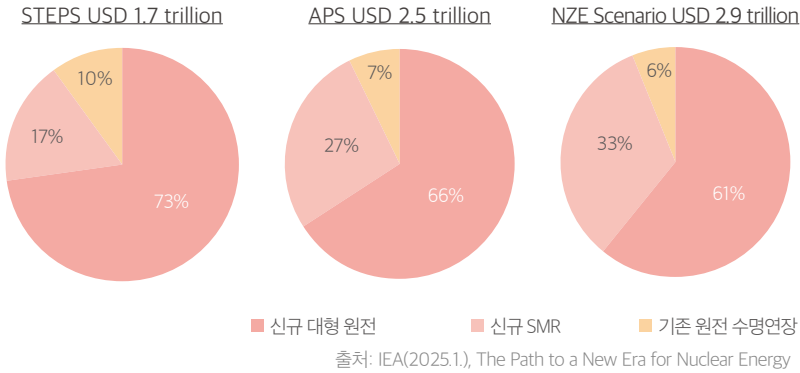
‘공약 달성 시나리오(Announced Pledges Scenario, 이하 **APS**)⁴에서는 원자력이 안전하고 경제적인 청정에너지 전환을 실현하는 데 있어 더욱 중요한 역할을 담당한다. 전 세계 원자력 투자는 2030년 약 1,200억 달러로 두 배 가까이 증가하며, 이 중 약 250억 달러는 SMR에 투입될 것이다. 그 후 대규모 원자로와 SMR의 비용 절감으로 인해 투자는 감소세로 접어들고, 2050년에는 약 600억 달러로 감소할 것이다. 다수의 전력 시스템이 2050년 전까지 탈탄소화에 근접하거나 완전한 탈탄소화를 달성하므로 신규 저탄소 전력 공급원에 대한 투자가 더는 필요하지 않을 것이다.

2040년 이후에는 전체 원자력 투자의 3분의 1 이상이 SMR에 투입될 것이다. 2040년까지 전력 시스템의 탈탄소화 일정이 빨라지면서 원자력 및 기타 저탄소 발전원에 대한 투자가 앞당겨지기 때문에 ‘2050 탄소중립 시나리오(Net Zero Emissions by 2050 Scenario, 이하 **NZE**)⁵에서는 단기 투자가 훨씬 더 높을 수 있다. 2030년에 1,550억 달러에 달한 후, 2050년에는 약 700억 달러로 다시 감소할 것이다. 모든 시나리오에서 전력 수요가 예상보다 크게 증가할 경우, 장기적으로도 원자력 투자의 지속 가능성이 높아질 수 있다.

4 **APS**는 각국 정부가 선언한 에너지-기후 목표가 제때 완전히 달성될 것으로 가정

5 **NZE** 시나리오는 2100년 지구 온도 상승을 산업화 이전 대비 1.5°C 이하로 제한하는 데 기여하는 에너지 부분의 경로를 보여줌

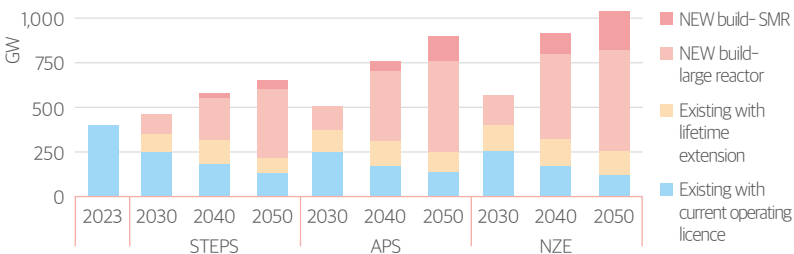
[그림 10] IEA 시나리오별 세계 원자력에너지 투자(2024~2050년)



2024년부터 2050년까지 원자력에너지에 대한 누적 투자 규모는 STEPS 시나리오에서 1조 7,000억 달러, APS 시나리오에서 2조 5,000억 달러, 그리고 NZE 시나리오에서 약 2조 9,000억 달러에 달한다. 대형 원자로가 3개 시나리오 모두에서 투자의 대부분을 차지하지만, 2030년대 이후부터 SMR 도입이 확대되기 시작하면 그 비중이 점차 증가한다.

세계 원자력 설비 용량도 모든 시나리오에서 확대되며, STEPS에서는 2023년 말의 416GW에서 2050년 650GW로 확대되고, APS에서는 870GW로 두 배 이상 증가하며, NZE 시나리오에서는 1,000GW를 초과한다. 원전 수명 연장은 각 시나리오에서 중요한 역할을 하며, APS에서는 수명 연장이 2040년 전 세계 용량의 20%(약 150GW)를 차지한다. 모든 시나리오에서 대형 원자로가 신규 원전 용량의 대부분을 차지하며, APS에서는 2024년부터 2050년까지 500GW 이상의 원자로가 증설된다.

[그림 11] IEA 시나리오별 세계 원자력 설비용량(2023~2050년)

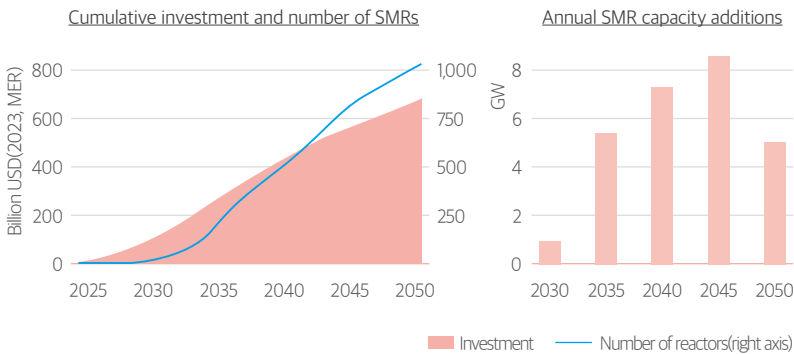


2) SMR 전망

SMR이 성공적으로 개발될 것으로 가정할 경우, APS에서 세계 SMR 시장의 규모는 2024년부터 2050년까지 총 6,700억 달러에 달하며, 30여 개 국가에서 다양한 용량의 원자로 1,000기 이상(총 120GW)이 건설될 것이다. SMR 증설 규모는 2035년에 5GW, 그리고 2045년에는 9GW에 달할 것으로 전망된다. 그러나 아직은 이 같은 결과를 장담할 수 없다. SMR 기술이 성공적으로 개발되려면 정부의 지속적인 노력과 정책 지원, 규제 기관의 빠른 설계 검토, 기술 기업의 혁신, 공공 및 민간의 자금 조달이 필요하다.

투자가 빠르게 확대될 수 있는 여건도 조성되어야 한다. APS에서 SMR에 대한 글로벌 투자는 현재 50억 달러 미만에서 2030년까지 250억 달러로 급증할 것으로 예상된다. 연간 투자는 2040년경 350억 달러에서 정점에 이른다. 그 이후에는 대부분의 주요 국가에서 전력 시스템이 완전히 또는 대부분 탈탄소화됨에 따라, 다른 저탄소 기술과 마찬가지로 SMR에 대한 투자도 둔화한다.

[그림 12] APS에서 세계 SMR 누적 투자 및 설비용량 증설(2025~2050년)



출처: IEA(2025.1.), The Path to a New Era for Nuclear Energy

모든 기술이 그렇듯이 첫 번째 상업적 규모의 프로젝트를 달성하면 중대한 전환점이 될 수 있다. 현재 계획에 따르면, 여러 국가에서 2030년까지 다수의 SMR이 설치 및 가동될 예정이다. 러시아와 중국에서는 이미 최초의 소형 부유식 원자로가 가동되고 있다. 러시아는 여러 개의 소형 부유식 원자로를 운영하고 있으며, 이는 주로 외딴 지역에서 진행되는 채굴 작업에 전력을 공급한다. 중국에서는 최

초의 SMR(HTR-PM 원자로)이 2023년에 기술 시연에 들어갔으며, 2026년에는 ACP100도 가동될 예정이다. 선진국에서는 2030년경에 첫 SMR이 완공될 예정이며, 특히 미국과 캐나다에서 프로젝트가 진행되고 있다.

4. 원자력에너지 보급 확대를 위한 과제

원전의 지속적인 가동은 탄소 배출 저감에 있어서 매우 중요하며 에너지, 경제, 환경 보호를 위해서도 반드시 필요하다. 탄소 배출 급증을 방지하기 위해서는 원자력이 더욱 널리 보급될 수 있도록 투자가 더욱 확대되어야 한다. 원자력 보급이 급속히 증가하려면 2030년까지 원자력에 대한 연간 투자가 1,200억 달러로 약 2배 증가해야 한다. 그러나 원자력 프로젝트는 규모, 자본 집약도, 긴 건설 리드 타임, 기술적 복잡성으로 인해 자금 조달이 어렵다. 최근 일부 프로젝트에서 발생한 비용 초과와 프로젝트 지연은 투자자들에게 위험 요소로 작용하고 있다. 따라서 예측 가능한 현금 흐름을 보장하고 건설 위험을 감수함으로써 상업 은행이 원자력 발전 프로젝트에 자금을 조달할 수 있도록 하려면 정부의 참여가 필요하다.

새로운 원자력 시대를 열기 위해서는 공공 자금만으로 충분하지 않다. 투자 확대를 위해서는 민간 자금 조달이 필수적이다. 그러나 원전 프로젝트는 허가 및 건설에는 오랜 시간이 소요되기 때문에 상업 대출 기관으로부터 자금 조달이 어려울 수 있고, 다른 대형 인프라 프로젝트 지원에 자주 활용되는 프로젝트 파이낸싱 이용도 제한된다. 공공 및 민간 금융을 모두 확대하려면 비용 초과와 프로젝트 지연 리스크를 반드시 축소해야 한다. 널리 이용되는 원자로 설계를 이용하고, 같은 설계를 연속적으로 구축하면 용량 확대, 공급망 구축, 숙련된 인력 확보에 상당한 도움이 될 수 있다. 또한, 표준화를 통해 건설 과정을 간소화하면 각 원자로 건설에 드는 시간과 비용을 절감할 수 있고, 시간이 지남에 따라 학습을 통해 추가 비용을 절감할 수 있다.

원자력 프로젝트의 자본비용을 절감하고 민간 자본을 유치하려면 미래 현금 흐름에 대한 예측 가능성이 요구된다. 금융 기관은 신뢰할 수 있는 미래 현금 흐름 기대치를 바탕으로 대출을 제공하기 때문에, 부채 제한과 같이 미래 현금 흐름에 대

한 가시성을 높일 수 있는 규제 체계가 필요하다. 가격 변동성이 큰 시장에서는 장기 전력 구매 계약, 차액 계약(contracts for difference), 규제 자산 기본(regulated asset base) 투자 모델과 같이 리스크를 낮출 수 있는 방법이 필수적이다. 대규모 수용가는 평균 비용으로 미래의 전력 공급을 확보하기 위해 장기 전력 구매 계약(PPA)을 체결할 수 있다. 이러한 계약을 통해 녹색 채권과 같은 입증된 상업 금융 상품을 활용할 수 있는 길도 열릴 수 있다.

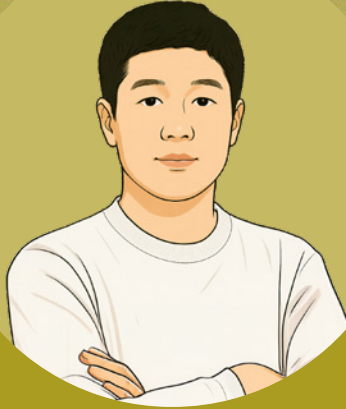
마지막으로, 각국 정부는 원자력 산업을 발전시킬 수 있는 전략적 비전, 정책, 인센티브, 공공 재정 등을 제공할 수 있는 고유한 역량을 가지고 있다. 그러나 모든 국가가 원자력 기술을 중요하게 생각하는 것은 아니다. 원자력은 보다 안전하고 지속 가능한 에너지 미래를 위해 세계적으로 필요한 여러 연료와 기술 중 하나에 불과하지만, 다른 저탄소 기술로는 복제하기 어려운 서비스와 규모를 제공할 수 있는 장점이 있다. 이러한 기회를 활용하려면 견고하고 다양한 공급망, 숙련된 인력, 혁신적인 지원, 투자 리스크 제거 방안, 직접적인 재정 지원, 효과적이고 투명한 원자력 안전 규정, 원전 해체 및 사용 후 핵연료 관리 조항을 포함한 정부의 폭넓은 접근 방식이 필요하다. 현재 원자력이 새로운 시대를 맞이할 수 있다는 여러 징후가 나타나고 있다. 이제 남은 과제는 모든 수단을 동원해 이를 실현하는 것이다.

참고문헌

1. 에너지경제연구원, 2019.6.28., 세계원전시장인사이드
2. DOE, 최종접속일: 2025.3.1., <https://www.energy.gov/articles/cop28-countries-launch-declaration-triple-nuclear-energy-capacity-2050-recognizing-key>
3. IEA, 2025.2월, Electricity 2025
4. IEA, 2025.1월, The Path to a New Era for Nuclear Energy
5. The New York Times, 최종접속일: 2025.3.1., <https://www.nytimes.com/2023/12/02/climate/cop28-nuclear-power.html>
6. World Nuclear Association, 최종접속일: 2025.3.1., <https://world-nuclear.org/news-and-media/press-statements/six-more-countries-endorse-the-declaration-to-triple-nuclear-energy-by-2050-at-cop29>

7

탄소 없는 에너지가 온다!
청정수소의 비밀



SK Innovation E&S
수소사업기획팀 매니저

김동국

1874년, 소설가 찰스 베른은 “물에서 연료를 얻는 시대가 올 것”이라고 예언했다. 150년이 지난 오늘, 그의 상상은 현실에 가까워지고 있다. 기후변화와 탄소중립 압박 속에서 수소는 미래 에너지의 게임체인저로 떠올랐다. 수소는 연소 시 이산화탄소를 배출하지 않고 물만 내뿜는 청정 에너지원이다. 전 세계 여러 나라가 수소경제에 주목하며 투자하는 이유도 여기에 있다. 특히 전기만으로 대처하기 어려운 중공업과 장거리 운송 분야에서는 수소가 탄소 배출을 줄일 필수 열쇠로 여겨진다. 국제재생에너지기구(IRENA)에 따르면, 2050년 시나리오에서 수소는 최종 에너지 수요의 약 12%를 공급할 것으로 전망된다. 현재도 전 세계에서 연간 1억 톤 이상의 수소가 생산되고 있지만, 그중 95%가 화석연료 기반으로 약 8억 3천만 톤에 달하는 CO₂를 배출하고 있다. 이러한 “더러운 수소”를 “깨끗한 수소”로 바꾸는 것, 즉 청정수소로 전환하는 것이 우리 앞에 놓인 과제이다.



1. 수소는 왜 중요한가?

1874년, 소설가 찰 베른은 “물에서 연료를 얻는 시대가 올 것”이라고 예언했다. 150년이 지난 오늘, 그의 상상은 현실에 가까워지고 있다. 기후변화와 탄소중립 압박 속에서 수소는 미래 에너지의 게임체인저로 떠올랐다. 수소는 연소 시 이산화탄소를 배출하지 않고 물만 내뿜는 청정 에너지원이다. 전 세계 여러 나라가 수소 경제에 주목하며 투자하는 이유도 여기에 있다. 특히 전기만으로 대처하기 어려운 중공업과 장거리 운송 분야에서는 수소가 탄소 배출을 줄일 필수 열쇠로 여겨진다.

국제재생에너지기구(IRENA)에 따르면, 2050년 시나리오에서 수소는 최종 에너지 수요의 약 12%를 공급할 것으로 전망된다. 현재도 전 세계에서 연간 1억 톤 이상의 수소가 생산되지만, 그중 95%가 화석연료 기반이라 약 8억 3천만 톤에 달하는 CO₂를 배출하고 있다. 이러한 “더러운 수소”를 “깨끗한 수소”로 바꾸는 것, 즉 청정수소¹로 전환하는 것이 우리 앞에 놓인 과제이다. 정부와 산업계는 수소차, 연료전지, 산업용 수소 활용 등 수소경제 육성 청사진을 그리고 있다. 이 글에서는 수소의 다양한 색깔 - 그린수소, 블루수소, 핑크수소 - 각자의 탄생 스토리와 장단점을 살펴보고, 청정수소 시대를 여는 열쇠들을 이야기해 보겠다. 탄탄한 기술 설명과 함께 흥미로운 사례와 삽화들을 통해 수소 이야기 속으로 들어가 보자.



1 청정수소: 생산 과정에서 온실가스 배출을 최소화한 수소. 보통 재생에너지 전력 기반의 그린수소, CCS 적용한 블루수소, 원전기반 핑크수소 등이 해당된다. 한국의 청정수소 인증 기준에서는 lifecycle 상 탄소배출량이 일정 기준 이하인 수소를 말한다.

2. 수소의 종류와 제조방식: 세 가지 색의 이야기

수소도 만드는 방법에 따라 색깔별 별명이 있다. 지금부터 햇살 아래 태어난 초록 수소, 땅속 탄소를 묻어 탄생한 파란 수소, 원자력의 힘을 입은 분홍 수소 이야기를 따라가 볼까?

그린수소 - 어느 햇볕 찜찜한 날, 거대한 태양광 패널과 바람개비(풍력 터빈)가 펼쳐진 들판을 떠올려보자. 이 재생에너지 발전소 옆 시설에서는 물이 전기분해되어 수소와 산소로 갈라진다. 이렇게 재생에너지 전력으로 물을 분해하여 얻는 수소가 바로 그린수소이다. 전기를 넣으면 물(H_2O)이 수소 기체(H_2)와 산소 기체(O_2)로 나뉘는데, 이 장치를 수전해 장치라고 부른다. 수전해 방식도 여러 가지가 있는데, 알칼라인, PEM, SOEC 같은 기술들이 개발되어 있다.² 그린수소의 최대 장점은 생산과정에서 탄소배출이 전혀 없다는 것이다. 또한, 재생에너지 잉여 전력을 저장하는 수단으로도 활용되어 전력망의 변동성을 완화하는데 기여한다. 다만 현재 그린수소 비중은 전체 수소 생산의 1% 미만으로 매우 낮다. 이유는 간단하다. 비용이 비싸기 때문이다. 재생에너지 전력 자체의 가격과 수전해 장치 비용이 높아, 회색수소(화석연료기반 수소)보다 몇 배나 비싸다. 하지만 바람과 태양광 발전단가가 과거 대비 급격히 떨어졌듯, 그린수소도 규모가 커지면 가격이 내려갈 것으로 예상된다. 실제로 글로벌 수전해 설비 용량이 급증하고 있으며, 각국이 그린수소에 보조금을 투입하며 가격 경쟁력을 높이기 위해 노력 중이다.

블루수소 - 이번에는 거대한 정유공장 같은 플랜트를 떠올려보자. 천연가스를 원료로 넣고 뜨거운 수증기를 반응시키면 수소가 나오기 시작한다. 동시에 이산화탄소도 다량 발생하지만, 공장 한편에서 CO_2 를 포집해 지하로 보내는 파이프라인이 가동되어 대기를 오염시키지 않는다. 이렇게 만들어지는 수소가 블루수소다. 블루수소는 천연가스 등의 화석연료로 수소를 생산하되 발생하는 CO_2 를 포집·저장(CCS)하여 탄소배출을 줄인 수소를 말한다. 구체적으로는, 천연가스의 주성분인 메탄(CH_4)을 고온의 수증기와 반응시켜 수소를 추출하는 증기 메탄 개질(SMR) 공

2 수전해(물 전기분해): 전기에너지를 이용해 물(H_2O)을 구성 원소인 수소(H_2)와 산소(O_2)로 분해하는 기술. 전해조(電解槽)라는 장치에서 이루어지며, 그린수소와 핑크수소 생산의 기본 원리이다.

정³이 쓰인다. 또는 산소를 추가 주입해 반응시키는 자열개질(ATR)⁴ 방식도 블루수소에 활용된다.

두 방식 모두 수소 생산 시 CO₂가 부산물로 나오는데, 이를 대기로 내보내지 않고 포집·저장(CCS - Carbon Capture Storage) 또는 활용(CCU - Carbon Capture Utilization) 하는 것이 블루수소의 핵심이다. CCS 기술을 적용하면 탄소 배출량의 90%까지 줄일 수 있다고 한다. 블루수소는 현재 기술로 대량 생산이 가능하고 그 린수소보다 저렴하여 '수소경제로 가는 가교'로 불리지만, 완전한 무탄소는 아니라는 한계가 있다. 포집 과정에서 일부 CO₂가 새거나, 애초에 천연가스를 캐고 운송하는 동안 메탄이 누출되는 문제가 있기 때문이다. 또한 CCS 설비 비용이 높고, 포집된 CO₂를 영구 저장하는 데 사회적 수용성이 뒷받침되어야 하는 과제도 있다. 그럼에도 많은 국가가 '가능한 한 빨리 탄소 배출부터 줄이자'라는 취지로 블루수소를 과도기적 대안으로 채택하고 있다.

핑크수소 - 어두운 밤, 거대한 원자력발전소가 꾸준히 전력을 만들어낸다. 그 일부는 수전해 장치로 흘러 들어가 쉬지 않고 수소를 생산한다. 이렇게 원자력 발전 전력으로 물을 전기분해해 얻은 수소를 흔히 핑크수소라고 부른다. 원전의 안정적인 전력 공급을 수소 생산에 활용한다고 하여 퍼플수소 또는 레드수소라고 부르기도 한다. 기본 원리는 그린수소와 동일하게 물 전기분해지만, 재생에너지 대신 원자력 전기를 쓰는 것이 차이이다. 원자력은 발전 과정에서 이산화탄소를 거의 배출하지 않으므로, 핑크수소도 탄소 배출이 매우 적은 청정수소로 간주된다. 또한 원전은 날씨에 영향받지 않고 상시 전력을 공급하므로, 전력 출력을 유연하게 조절하여 수전해 효율을 높이거나 남는 전력을 수소 생산에 투입해 부하조절에 활용할 수도 있다. 일부 차세대 원자로로는 발생하는 고온 증기를 수전해에 활용하거나, 개질

3 증기 메탄 개질(Steam Methane Reforming) : 고온·고압의 수증기와 천연가스(메탄)를 반응시켜 수소를 추출하는 공정으로, 현재 전 세계 수소 생산의 약 50% 이상을 차지하는 대표적인 수소 제조법이다. 단점은 CO₂가 부산물로 발생한다는 점이다.

4 자가 열 개질(Auto Thermal Reforming) : 부분 산화 반응을 통해 메탄을 부분적으로 연소시키며 생성된 열로 개질 반응을 촉진하는 방식. 별도의 외부 열공급 없이 공정 내 열로 반응을 유지하므로 '오토(자동)열' 개질이라 부른다. SMR 대비 공정이 단순하고 대규모화에 유리하다.

반응의 효율을 높여 수소 생산에 직접 활용하는 방안도 연구 중이다. 다만 원전을 기반으로 해야 하므로 초기 투자비가 크고, 원전 안전성 논란 등 사회적 수용성 문제가 변수이다. 현재 상용 핑크수소 사례는 많지 않지만, 프랑스, 일본 등 원전 인프라가 갖춰진 국가들을 중심으로 실증이 진행되고 있다.

이상 세 가지 청정수소의 특징을 한눈에 비교하면 다음과 같다:

구분	그린수소	블루수소	핑크수소
에너지원	재생에너지 (태양광·풍력 등)	화석연료(천연가스 등) + CCS(이산화탄소 포집 저장)	원자력 발전 전력
제조방식	수전해(Electrolysis)	개질(SMR/ATR) + 이산화탄소 포집	수전해(Electrolysis)
탄소배출	발생 없음 (단, 발전설비 생산 및 건설과정에서 간 접 배출)	일부 발생 (90% 이상 포집 시 저감)	발생 없음 (원전 연료주기 간 간접배출)
장점	궁극의 청정수소, 탄소중립 완벽 구현	대량생산 용이, 생산단가 비교적 낮음	안정적 대량생산, 날씨 영향 없음
단점	높은 전력단가 - 현재 비용 가장 높음, 간헐 성 에너지 의존	CCS 비용 및 안전성; 메탄 누출 등 완전 무탄소 아님	원전 의존 - 비용 크고 안전성 이슈, 초기 투자 부담

3. 청정전력과 수소 생산: 태양, 바람, 원자력이 그리는 수소 지도

청정수소 이야기는 결국 청정전력 이야기와 맞닿아 있다. ‘수소를 어떻게 만드느냐’는 곧 ‘어떤 에너지원으로 만드느냐’이기 때문이다. 앞서 본 세 가지 수소는 재생에너지, 화석연료+CCS, 원자력이라는 서로 다른 에너지원에 뿌리를 두고 있다. 각 에너지원의 특성에 따라 청정수소의 역할과 전망도 달라진다.

우선 그린수소와 재생에너지의 관계를 생각해 보자. 태양이 쨍쨍할 때, 바람이 세차게 불 때는 전기가 남아돌지만, 밤이나 무풍 시에는 전력이 부족해지는 문제가 있다. 이 간헐성은 재생에너지의 숙명인데, 그린수소가 이를 보완하는 훌륭한 파트너

너이다. 남은 전기로 수소를 만들어 두었다가, 전기가 필요할 때 연료전지 등을 통해 다시 전기로 바꿀 수 있기 때문이다. 일종의 에너지 저장 수단으로서 수소가 활용되는 것이다. 다만 그린수소를 대량 생산하려면 엄청난 양의 재생 전력이 필요하다. 현재 전 세계 수소 생산 중 재생 전력을 통한 수전해 비중은 고작 1% 남짓에 불과하다. 재생에너지 발전량 자체를 획기적으로 늘리고, 효율 좋은 전해조 기술이 상용화되어야 그린수소 시대가 열릴 것이다.

다음으로 핑크수소와 원자력을 보자. 원자력은 일단 발전을 시작하면 꾸준히 대량 전력을 공급하는 기저부하 전원이다. 수요가 줄어드는 심야에 남은 전력을 수소 생산에 활용하면 경제성을 높일 수 있다. 예를 들어 프랑스 등 원전 비중이 높은 국가에서는 야간 전력으로 수소를 생산해 두는 방안을 연구하고 있다. 원자로에서 발생하는 고온 열을 이용해 수전해 효율을 높이는 고온 수전해 기술도 개발 중이다. 장점이 많은 반면, 원자력 기반 수소의 단점은 높은 초기 비용과 규모의 제약이다. 원전을 지어야 하니 투자비가 막대하고, 안전 규제 등으로 소형 모듈형 원전이 아직 상용화되지 못해 소규모 분산 생산에는 부적합하다. 그러나 기후변화 대응을 위해 원자력을 유지하는 나라들은 핑크수소를 통해 원전의 활용도를 높이고자 한다. 무엇보다 원전을 활용하면 연중 안정적으로 대량의 청정수소를 얻을 수 있다는 점에서, 에너지 안보 측면의 기대가 크다.

마지막으로 블루수소와 CCUS⁵를 떼어놓고 생각할 수 없다. 블루수소는 기본적으로 천연가스 개질이라는 화석연료 기반 공정을 사용하므로, 거기서 나오는 CO₂를 얼마나 완벽히 포집하고 안전하게 격리하느냐가 승패를 좌우한다. CCUS 기술이 뒷받침되지 않으면, 블루수소는 그냥 ‘회색수소(탄소저감 없는 화석수소)’에 불과하기 때문이다. 다행히 세계 곳곳에서 CCUS의 실증 프로젝트들이 늘어나며 기술이 발전하고 있다. 이론적으로 탄소 포집률이 90% 이상이면 블루수소의 탄소발자국은 그린수소에 버금갈 만큼 낮아진다. 또한 블루수소는 기존 천연가스 인프라

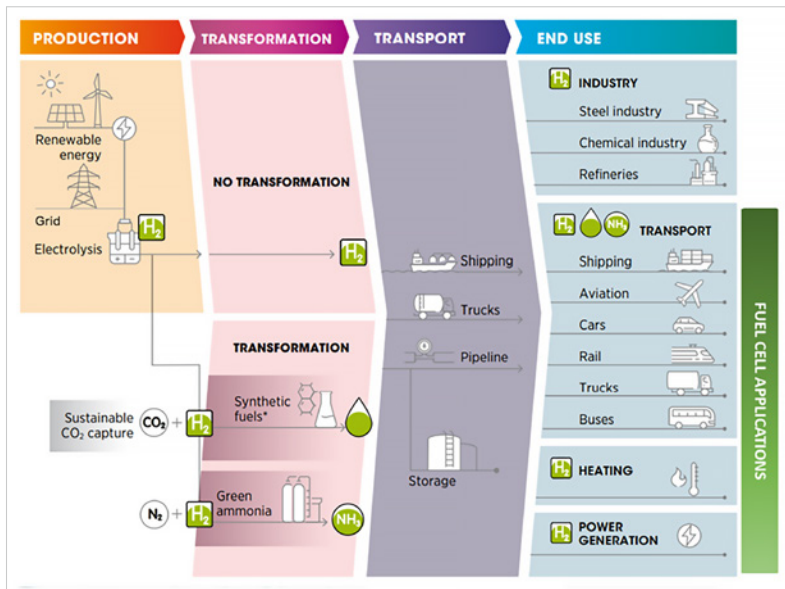
5 CCUS: Carbon Capture, Utilization and Storage의 약자. 발전소나 공장에서 발생하는 이산화탄소를 포집하여 다른 용도로 활용하거나 지질 구조 내에 저장하는 일련의 기술. 탄소 포집-저장만 가리킬 때는 CCS라고 한다.

(파이프라인 등)를 활용할 수 있다는 장점이 있어서, 산유국이나 천연가스 부국들은 CCS만 확보되면 비교적 쉽게 청정수소 공급자가 될 수 있다.

예를 들어 노르웨이, 미국 남부 등은 풍부한 지중 저장소를 활용해 블루수소 생산에 적극적이다. CCUS의 필요성은 수소 분야뿐만 아니라 화력발전 등 여러 산업의 탄소중립을 위해 공통적으로 대두되고 있으며, 향후 기술 발전과 비용 저감이 기대된다. 물론 CCUS 없이도 수소경제를 이끌 수 있다면 이상적이겠지만, 현실적으로 '감축할 수 있는 탄소는 일단 감축하자'는 전략 아래, 블루수소가 당분간 상당한 역할을 할 전망이다.

[그림 1] 청정 전력원과 수소 생산의 관계를 보여주는 인포그래픽

- ❖ 재생에너지로 물을 전기분해해 그린수소(H_2)를 만들고, 필요에 따라 암모니아(NH_3) 같은 합성연료로 전환해 저장하거나, 수소 자체를 운송하여 산업·수송·발전 등 다양한 분야에 활용한다.



그림에서 보듯이, 청정수소는 전력 → 수소 → 연료 형태로 에너지를 저장·운송할 수 있게 해준다. 이는 전기를 직접 보내기 어려운 선박·항공 분야나 계절별 에너지 저장 등에 큰 장점이다. 태양광·풍력 같은 재생에너지가 남으면 수소로 저장

했다가, 부족할 때 연료전지를 통해 다시 전기를 생산하는 스마트그리드도 구현할 수 있다. 원자력 전기는 안정적 공급원의 장점을 살려 24시간 수소를 만들 수 있고, 천연가스는 즉각적으로 대량 수소 생산이 가능하되 CCS 기술이 뒷받침되어야 한다. 이처럼 수소 생산은 곧 전력원 믹스와 직결되어 있다. 결국 청정수소 경제의 성공은 재생에너지 확대, 안정적 전력 공급, 탄소 포집 기술 진보가 함께 이루어져야 가능할 것이다. 어느 하나만으로는 부족하며 세 박자가 맞아야 수소경제가 튼튼히 자리 잡을 수 있다.

4. CCUS와 탄소 활용: 포집된 CO₂의 새로운 삶

앞서 블루수소를 이야기하며 CCUS를 언급했는데, 이번에는 이를 좀 더 들여다 보겠다. CCUS(Carbon Capture, Utilization and Storage)란 말 그대로 이산화탄소를 포집하고(Capture), 활용하며(Utilization), 저장(Storage)하는 일련의 기술을 가리킨다. 일반적으로는 발전소나 공장 굴뚝 등에서 배출되는 CO₂를 잡아내어 모으고, 압축하여 운반한 뒤 땅속 깊은 지층에 영구 저장하거나, 다른 산업에 유용하게 쓰는 것을 말한다. 과거에는 CO₂를 모아 땅속에 넣는 CCS만 강조되었지만, 최근에는 포집한 탄소를 다양한 제품의 원료로 활용하는 CCU가 부각되면서 CCUS라는 용어로 통칭되고 있다. CCUS는 왜 중요할까? 지구 온난화의 주범인 CO₂를 대기 배출 전에 제거함으로써, 화석연료 사용의 죄를 부분적으로라도 속죄시켜 주는 기술이기 때문이다.

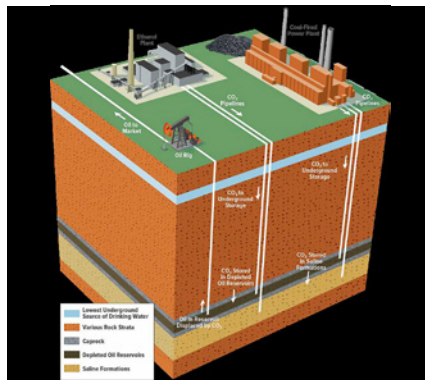
이상적인 세상이라면 화석연료를 안 쓰면 되겠지만, 현실적으로는 당장 산업 전반을 완전히 탈탄소화하기 어렵기 때문에 ‘나오는 탄소라도 잡자’는 것이다. IEA(국제에너지기구)는 넷제로 달성을 위해 CCUS가 필수 기술 중 하나라고 강조한다. 특히 시멘트, 철강, 화학 같은 산업 공정은 공정상 CO₂ 배출이 불가피한데, 이러한 탈탄소가 어려운 산업에서는 CCUS 외엔 방법이 없다. 또한 공기 중에서 직접 CO₂를 포집하는 DAC(Direct Air Capture) 기술까지 확장하면, 나중에는 배출보다 더 많은 CO₂를 제거하는 ‘음의 배출’도 가능해진다. 이처럼 CCUS는 탄소중립 퍼즐의 마지막 조각으로서 매우 중요한 위치를 차지한다.

하지만 CCUS라고 해서 무조건 땅에 파묻을 필요는 없다. 포집된 CO₂를 보물처

럼 활용할 수 있는 방안도 다양하다. 여러분이 오늘 마신 탄산음료 속 CO₂부터, 미래의 합성연료, 콘크리트, 심지어 플라스틱 원료까지 - 이산화탄소의 새로운 삶이 펼쳐지고 있다. 이를 탄소 활용(Carbon Utilization) 또는 탄소 재활용이라고 부르는데, 쓰고 버릴 CO₂를 모아 유용한 제품을 만들면 일석이조이다. 예를 들어, CO₂와 그린수소를 합성해 메탄올이나 항공기 연료를 만들 수 있다. 이렇게 만든 합성연료는 화석연료를 대체하면서도, 연소 시 배출된 CO₂가 다시 포집되어 순환하면 탄소중립 효과를 낼 수 있다.

또 다른 예로, 시멘트 제조 시 발생하는 CO₂를 포집해 콘크리트 양생 과정에 주입하면 탄산화 반응을 통해 콘크리트 강도를 높이는 동시에 CO₂를 광물 형태로 영구히 저장할 수 있다. 이러한 탄소광물화 기술은 건설재료에 CO₂를 묻어버리는 효과가 있어 주목받는다. 농업 분야에서도 CO₂ 활용이 있다. 비닐하우스나 수직농장에 포집된 CO₂를 넣어주면 식물의 광합성이 촉진되어 생산량이 늘어날 수 있다. 미생물이나 조류(algae)를 배양할 때 CO₂를 공급해 단백질 사료나 바이오연료 원료로 활용하는 연구도 진행되고 있다. 이 밖에도 화학제품 분야에서는 CO₂로 폴리에틸렌(플라스틱 원료)이나 합성고무 등을 만드는 공정이 개발 중이다.

[그림 2] 포집된 이산화탄소의 이동 및 활용/저장 경로를 보여주는 개념도



출처: Wikipedia

그림에서 보듯이 CO₂의 저장, 격리과정은 발전소나 공장에서 포집된 CO₂는 파이프라인을 통해 이동되어 고갈된 유전이나 염수 지층 깊은 곳에 주입 저장된다. 또

는 일부 CO₂는 지하로 주입돼 유전을 밀어내는 2차 회수(Enhanced Oil Recovery)에 쓰이기도 한다. 이렇게 사용 후 남은 CO₂는 결과적으로 지하에 영구 격리된다.

물론 탄소를 활용해 제품을 만들었을 때, 그 제품이 영구적으로 CO₂를 잡아두느냐도 중요하다. 예를 들어 연료나 화학제품으로 만든 CO₂는 결국 쓰이고 나면 다시 대기로 방출되므로 온실가스 저감효과가 일시적이다. 반면 콘크리트처럼 한 번 굳으면 CO₂가 반영구적으로 갇히는 용도는 온실가스 감축에 직접 기여한다. 활용이든 저장이든 탄소를 순환시켜 대기 배출량을 줄인다는 점이 핵심이기에, 전방위 기술 개발이 이루어지고 있다.

IEA는 CO₂ 활용을 다섯 가지 주요 분야(연료, 화학, 광물질, 폐기물 소재, 생물학적 활용)로 분류하면서, 각 분야가 향후 최소 연 10Mt(1,000만 톤) 이상의 CO₂를 소비하는 시장으로 성장할 수 있다고 분석했다. 다만 아직 상용화 초기 단계이므로 정책적 지원과 기준 마련이 필요하다. 정부 차원에서 저탄소 제품에 대한 공공 조달을 확대하면 시장 형성이 촉진될 것이다. 궁극적으로는 바이오매스 연료나 DAC으로 포집한 CO₂를 활용하면 탄소중립을 넘어 탄소 네거티브도 가능하기에, 탄소 활용은 미래 산업의 새로운 축이 될 수 있다.

[표 1] 탄소 활용의 분야별 사례

활용 분야	설명 및 예시	특징
합성연료	포집 CO ₂ + 그린수소로 e-메탄올, e-디젤, 항공유 등 합성연료 생산 예: CO ₂ -to-Methanol 공정, Power-to-Liquid 연료	화석연료 대체탄소 순환 이용(연소 시 재포집 전제)
화학제품	CO ₂ 를 원료로 플라스틱 성분(폴리올 등)이나 합성고무, 탄산음료 제조요구 조건: 저렴한 수소 공급, 촉매 기술 개발	제품 원료로 재활용 일부는 사용 후 CO ₂ 방출(순환 필요)
건설소재	CO ₂ 를 광물화하여 콘크리트, 시멘트, 벽돌 등의 재료로 활용 예: CarbonCure 콘크리트(양생 시 CO ₂ 주입), 탄산칼슘 생산	영구 저장 효과(탄소 광물 형태 고정) 대량 활용 잠재력(건설산업 규모)
농업·생물	온실가스 CO ₂ 를 온실농가에 공급해 작물 성장 촉진미세조류 등에 CO ₂ 공급하여 바이오연료·사료생산	식물 생장에 직접 활용바이오연료로 쓰이면 탄소 재배출(순환 필요)
기타	드라이아이스, 소화기 등 전통적 CO ₂ 이용부터, 드라이아이스 세척 등 특수용도	기존에도 일부 활용 존재했으나 규모 작음

보시다시피 CO₂는 폐기물이 아니라 자원으로 탈바꿈하고 있다. 이 과정에서 또 하나 주목할 점은, 탄소 이용에도 에너지가 필요하다는 사실이다. CO₂는 화학적으로 안정된 분자라 다른 물질로 전환하려면 많은 에너지와 촉매가 필요하다. 따라서 CO₂ 활용이 진정한 온실가스 감축으로 이어지려면, 그 에너지 역시 청정해야 한다. 결국 재생에너지와 수소의 충분한 공급이 뒷받침되어야 CCUS와 탄소 활용도 빛을 볼 수 있다.

5. 국내 수소경제 활성화 방향

세계 각국이 앞다투어 수소 기술과 프로젝트에 뛰어드는 가운데, 대한민국도 수소경제 선도 국가를 목표로 적극적인 행보를 보이고 있다. 2019년 정부는 ‘수소경제 로드맵’을 발표하여 2040년까지 수소차 620만 대 보급, 연간 수소 공급량 526만 톤 확보 등의 목표를 내걸었다. 이를 뒷받침하기 위해 2020년 세계 최초로 「수소경제 육성 및 수소 안전관리에 관한 법률」(약칭: 수소법)도 제정했다. 우리나라 수소산업 추진 방향을 살펴보면, 모빌리티 분야에서 출발하여 점차 발전 및 산업 분야로 확대해 가는 모양새이다.

국내에서 현재 수소가 가장 활발히 쓰이는 곳은 단연 교통(mobility) 분야이다. 승용 수소전기차인 현대 넥쏘(Nexo)가 2018년 출시된 이래, 2023년까지 약 3만 대에 달하는 수소차가 누적 보급되었다. 세계 수소차 1위 보급국이지만, 2040년 목표에 비하면 아직 갈 길이 멀다. 버스와 트럭 등 상용차 부문에서도 변화가 일어나고 있다. 서울, 인천, 울산, 부산 등의 대도시뿐만 아니라 소규모 지자체까지 전국 구석구석에서 정부·지자체·운수사의 노력으로 기존의 화석연료를 사용하는 버스를 수소버스로 전환하기 시작하였으며, 계속해서 그 수를 확대하는 중이다. 현대차는 대형 수소트럭 엑시언트(Xcient)를 유럽에 수출하며 기술력을 입증했고, 국내 물류시장에도 투입을 준비하고 있다.

철도 차량으로는 코레일이 수소전기열차 시제기를 공개했고, 향후 시험 운행을 거쳐 일부 노선에 투입될 예정이다. 이처럼 수소 모빌리티는 미세먼지와 온실가스를 줄이고자 하는 도시들의 수요와 맞물려 지속 성장할 전망이다. 다만 차량이 늘어날수록 연료인 수소를 충전해 줄 인프라 확충이 필수이다. 정부는 2025년까지 수소충전소 310곳, 2040년까지 1,200곳을 구축한다는 계획이다. 현재까지 약 200

곳 남짓이 운영 중인데, 부지 확보와 경제성 문제로 속도가 더딘 실정이다. 이를 극복하기 위해 규제 완화, 승용·상용차 충전소 복합설치, 민간 투자 유도 등 대책이 추진되고 있다. 또한 장기적으로는 액화수소 충전 기술도 도입하여 충전 속도와 저장 효율을 높일 계획이다.

수소경제 로드맵의 다음 단계는 발전용 수소와 산업용 수소 활용이다. 우선 발전 분야에서는 2023년 세계 최초로 수소발전 의무화제도(HPS)⁶가 도입되었다. HPS는 발전회사가 일정 비율 이상의 전력을 청정수소로 생산하도록 의무화하는 제도이다. 우리나라의 HPS는 ‘청정수소발전포트폴리오 기준(CHPS)’이라는 형태로 시행되는데, 발전사들이 수소나 암모니아 등을 혼소하여 전력을 생산하면 청정수소 인증서를 부여받고, 이를 의무 이행에 활용하는 방식이다. 2024년 첫 입찰을 통해 남부발전이 최초 사업자로 선정되어, 향후 세계 최초의 청정수소를 사용한 발전을 시작할 예정이다. 이러한 청정수소 발전은 초반에는 석탄·LNG 발전기에 소량의 암모니아나 수소를 섞어 태우는 혼소 실증 위주로 시작하지만, 2030년 이후를 바라보고 전용 수소터빈 개발도 진행 중이다.

두산, 한화파워시스템 등이 수소전소 터빈 기술을 연구하고 있어, 2035년경엔 대형 발전소에서 수소만 태워 전기를 생산하는 것도 가능해질 전망이다. 정부는 2036년까지 발전량의 2%를 청정수소로 공급하고, 2050년에는 30% 이상을 목표로 설정하였다. 이는 전력을 통한 대규모 수소 수요 창출을 의미하며, 향후 국내 수소 생산·유통 산업에 큰 시장을 제공할 것이다.

산업 분야에서는 수소 환원 제철⁷이 핵심 과제로 떠오른다. 철강산업은 국내 탄소 배출의 15% 이상을 차지하는 최대 배출원이라, 탄소중립 달성을 위해 반드시

6 HPS/CHPS: Hydrogen Portfolio Standard의 약자로, 발전사에 일정 비율 이상 수소 등 청정연료로 전력을 생산하도록 의무화한 제도. 우리나라에서는 CHPS(청정수소발전 의무화 제도)라고 불리며 2023년부터 시행되었다. 발전사들은 의무량만큼 청정수소 공급인증서를 구매하거나 직접 생산해야 한다.

7 수소환원제철: 철광석에서 산소를 떼어내 철을 얻는 환원제로 석탄 대신 수소를 사용하는 제철 공정. 수소가 산소와 반응해 H₂O(물)를 생성하므로 이산화탄소 배출이 획기적으로 줄어든다. 기술 난이도가 높아 현재 연구·개발 단계에 있다.

공정 혁신이 필요하다. 기존의 용광로-고로 제철은 석탄을 연료 겸 환원제로 쓰는데, 이를 수소로 대체하면 철광석의 산소를 제거할 때 CO₂ 대신 물(H₂O)이 배출된다. 세계적으로 스웨덴 SSAB 등이 수소 환원 제철로 만든 ‘무탄소 철강’을 선보였고, 우리 포스코도 2026년까지 수소 환원 제철 시험로를 구축할 계획이다. 다만 완전 수소 환원 공정은 아직 기술 개발 단계라, 당분간은 천연가스를 환원제로 쓰는 DRI(Direct Reduced Iron) 공정과 블루수소의 결합 등 과도기 전략이 검토되고 있다. 정부는 수소경제법을 통해 수소 환원 제철을 수소경제 핵심 분야로 지정하고, R&D 및 인프라 투자를 지원 중이다.

이 밖에도 석유화학 산업에서 정유 공정의 수소를 청정수소로 전환하거나, 암모니아를 수소 캐리어로 활용하는 방안 등이 추진되고 있다. 석유 정제와 암모니아 생산은 전통적으로 많은 수소를 필요로 하는데, 이때 부생수소나 그레이수소 대신 청정수소를 쓰도록 유도하여 간접적으로 수소 수요를 창출하는 것이다. 또 하나 주목할 점은 분산형 연료전지 발전이다. 이미 전국 여러 지역에 도시가스 기반 연료전지 발전소가 운영 중인데, 장기적으로 이 연료전지들에 청록색 수소를 공급해 발전 자체를 탈탄소화할 수 있다. 가정용 연료전지나 건물용 연료전지도 연계된다면 수소 활용의 저변이 크게 넓어질 것이다.

[표 2] 국내 수소경제의 현재 활용과 미래 계획

분야	현재 활용 현황	향후 추진 계획
모빌리티 (교통)	승용 수소차 약 3만 대 보급(세계 1위)수소버스 일부 노선 운행 시작수소충전소 200여 곳 운영	2040년 수소차 620만 대 목표수소버스·트럭 대폭 확대(광역버스, 물류트럭 등)충전소 1,200곳 구축(액화수소 기술 도입)
발전 (전력)	연료전지 발전 600MW 이상(도시가스 연료)석탄/가스 발전소 수소·암모니아 혼소 실증 단계	2023년 HPS 제도 시행(청정수소 의무발전)2030년대 대형 수소전소 터빈 상용화 목표2050년 발전량 30% 수소전원 공급
산업 (제철 등)	부생수소 일부 활용(정유공정 등)포스코 수소환원제철 Pilot 착수	2030년대 수소환원제철 상용화(탄소중립제철)정유·화학 공정 청정수소 전환 지원암모니아 수소 캐리어 인프라 구축
기타 (수소 도시 등)	안산 등 수소시범도시 조성가정·건물 연료전지 보급(~3000 세대)	수소도시 확대(울산 등 추가 지정)분산형 연료전지에 청정수소 공급 전환수소 드론, 선박 등 신산업 적용
기타	드라이아이스, 소화기 등 전통적 CO ₂ 이용부터, 드라이아이스 세척 등 특수용도	기존에도 일부 활용 존재했으나 규모 작음

정부의 정책 지원도 이러한 로드맵에 맞춰진다. 생산 측면에서는 수전해 기술 개발, CCS 실증 등을 통해 청정수소 공급을 늘리고, 유통 측면에서는 배관망 구축, 액화수소 운송 등의 인프라 투자가 추진된다. 수요 측면에서는 앞서 언급한 교통·발전·산업 분야 프로젝트에 보조금과 인센티브를 제공하여 초기 시장을 창출하고 있다. 특히 2022년 발표된 수소 선도사업으로 인천항만공사의 수소항만 구축, 현대제철의 수소환원로 개발 등이 선정되어 국가 전략 프로젝트로 지원받고 있다. 또한 청정수소 인증제를 통해 어떤 경로로 생산된 수소인지 투명하게 관리하여 그린 수소와 블루수소 등에 프리미엄 가치를 부여할 계획이다.

요약하면, 우리나라는 “수소차 → 수소발전 → 수소산업”의 단계별 확대 전략으로 수소경제를 구현해 나가고 있다. 초기에는 모빌리티 중심이었지만, 앞으로는 발전 연료와 산업 원료로서 수소 사용을 늘려 수소 생태계의 파이를 키우는 방향이다. 이를 통해 2050 탄소중립 달성과 새로운 에너지산업 창출이라는 두 마리 토끼를 잡는 것이 대한민국 수소경제의 지향점이다.

6. 해외 사례 연구: 수소경제 선점을 향한 경쟁

세계 각국도 저마다의 강점을 살려 수소경제 패권 경쟁에 뛰어들고 있다. 미국, 유럽, 중동은 서로 다른 접근법으로 수소 산업을 육성 중이다. 각국의 정책과 대표 사업을 살펴보겠다.

미국 - ‘세금 혜택으로 수소판 뒤집기’. 2022년 인플레이션 감축법(IRA)⁸을 통해 미국은 청정수소 생산에 파격적인 세액공제 혜택을 도입했다. 생산된 수소의 탄소배출량에 따라 kg당 최대 3달러의 세금 크레딧을 지급하는 내용으로, 사실상 정부가 초기 손해를 감수하며 민간 기업의 수소 생산 투자를 유도하는 것이다. 이로

8 IRA: Inflation Reduction Act, 2022년 미국에서 제정된 법률로 기후변화 대응 및 경제투자를 위한 대규모 재정지출을 담고 있다. 특히 청정에너지 생산에 대한 세액공제, 전기차 보조금 등의 조항이 포함되어 글로벌 산업에 큰 영향을 미쳤다. 수소 분야에서는 청정수소 생산세액공제(45V 조항)가 핵심이다.

써 미국은 단순히 세계에서 수소 생산 경제성이 가장 좋은 시장이 되었고, 수십 건의 대형 프로젝트가 발표되었다. 동시에 미국 에너지부(DOE)는 지역별 수소 허브 구축에 70억 달러를 투자하기로 했다. 2023년 10월 총 7개의 수소 허브(H₂Hubs)를 선정했는데, 캘리포니아, 텍사스 등 지역별로 재생 전원·화석+CCS·원자력 등 다양한 생산 방식을 분담하여 연간 300만 톤의 수소를 생산할 계획이다. 이는 미국이 2030년 목표로 한 청정수소 생산량의 약 3분의 1에 해당하는 규모로, 그 의욕이 대단하다.

또한 DOE는 ‘수소 에너지 어스샷’이라는 프로그램을 통해 ‘1불 수소’를 목표로 기술 개발을 가속하고 있다. 수소 1kg 생산비용을 1달러로 낮추는 것이 꿈의 목표로, 이를 위해 거액의 R&D 자금을 지원 중이다. 이처럼 미국은 과감한 재정 인센티브와 범국가적 프로젝트로 수소경제 퍼즐을 맞추고 있다. 민간 주도의 에너지 시장에 정부가 보조금을 지렛대 삼아 새 질서를 만들고 있는 셈이다. 다만 한편으로는 천연가스 기반 블루수소에도 많은 지원이 가고 있어 환경단체의 비판도 존재한다. 그럼에도 불구하고 미국의 전략은 효과를 발휘하여, 전 세계 수소 투자 흐름을 미국으로 끌어들이고 있다.

유럽연합(EU) - ‘규제로 밀고 보조금으로 당기다’. 유럽은 기후 위기 대응에 가장 적극적인 지역답게 수소에도 강력한 드라이브를 걸고 있다. 2022년 RePowerEU⁹ 계획을 통해 ‘2030년까지 재생수소 1,000만 톤 생산 + 1,000만 톤 수입’이라는 야심 찬 목표를 발표했다. 이는 러시아산 천연가스 의존을 줄이고자 수소를 대안으로 삼은 측면도 크다. EU 집행위원회는 이 목표 달성을 위해 회원국들과 협력하여 대규모 수전해 설비(2030년까지 40GW) 구축을 지원하고, 북아프리카 등 인접국에서 그린수소를 수입하기 위한 인프라를 준비하고 있다. 유럽은 정책 패키지를 통해 수소 산업을 육성하는데, 한편으로는 재생에너지 지침을 개정해 각국에 재생수소 사용량 할당을 권고하고, 다른 한편으로는 유럽 수소은행(EU Hydrogen Bank) 신설을 추진하여 수소 생산자에게 가격 보조금을 주려 한다. 또한 공동체 차원의

9 RePowerEU: 2022년 러시아-우크라이나 사태 이후 EU가 수립한 에너지 안보 및 전환 가속화 전략. 러시아산 화석연료 의존을 줄이고 재생에너지 및 수소 투자를 크게 확대하는 내용을 담고 있다. 재생에너지 목표 상향, 수소 목표 제시, 에너지 효율 강화 등이 포함되었다.

자금 지원에도 적극적이다.

대표적으로 EU는 IPCEI(Important Project of Common European Interest)로 선정된 수소 프로젝트들에 대규모 보조금을 승인했다. 독일, 프랑스, 이탈리아 등 여러 국가의 연합으로 전해조 생산, 수소 트럭 보급, 충전 인프라 구축 등의 사업이 진행 중이다. 민간 투자도 활발하여, 유럽 가스 배관 운영사들은 협력하여 유럽 수소백본(European Hydrogen Backbone)이라는 수소 전용 파이프라인망 구상을 발표했다. 이는 2030년대까지 약 28,000km에 이르는 파이프라인으로 유럽 각지를 연결하는 계획이다. 이처럼 유럽은 규제(의무 목표)와 지원(보조금)을 병행하며 수소경제 토대를 구축하고 있다. 다만 최근 EU 회계검사원은 'EU의 수소 목표가 과도하게 낙관적'이라는 보고서를 내기도 했다. 수소 1,000만 톤 생산은 현재 계획 대비 상당히 부족하다는 지적이다. 그만큼 목표 달성이 쉽지 않다는 반증이지만, 그럼에도 EU는 수소를 산업 혁신과 에너지 안보의 기회로 삼고 전력을 다하고 있다.

중동 - '최적의 입지로 수소 수출 대국 노리기'. 중동 산유국들도 '블루오션은 블루·그린수소'라며 대규모 프로젝트를 추진한다. 특히 사우디아라비아, 아랍에미리트(UAE), 오만, 카타르 등이 적극적이다. 이들 국가는 풍부한 일사량으로 초저가 태양광 발전이 가능하고, 한편으로는 천연가스 매장량과 지질학적 저장 공간도 넉넉하여 그린수소와 블루수소 모두 경쟁력이 높다. 사우디는 2030년 수소 세계 1위를 목표로 내걸었고, 네옴(NEOM) 도시를 세계 최대 그린수소 허브로 조성 중이다. 네옴 프로젝트에서는 4GW 규모 재생에너지로 하루 600톤의 그린수소를 생산해 암모니아로 변환, 연 120만 톤의 그린암모니아를 수출할 계획이다. 2026년 가동을 목표로 하고 있으며, 이미 글로벌 기업들과 50억 달러 투자 계약이 체결됐다. UAE는 2050 넷제로 선언 후 수소를 주요 수단으로 삼았다. 2031년까지 수소 산업에 150억 달러 투자계획을 발표했고, 일본 등에 블루암모니아를 첫 수출했다.

아부다비 ADNOC는 세계 최대 CCS 프로젝트를 가동하여 블루수소 생산을 늘리고 있으며, 동시에 마스다르를 통해 그린수소도 개발 중이다. 오만은 수르 지역에 대규모 그린수소 단지를 추진하여 2030년대 수출을 노린다. 카타르는 LNG 부국답게 블루수소에 무게를 싣고 있다. 이들 중동 국가는 지리적으로 아시아와 유럽의

중간에 위치해 수출에 유리하고, 기존에 석유·가스산업 인프라와 자본이 풍부하다는 강점이 있다. ‘제2의 석유’로 수소를 지목한 만큼, 앞으로 초대형 수소 프로젝트가 속속 현실화할 것이다. 다만 수소 운송을 위한 인프라(선박, 파이프라인 등)와 수요처 확보가 과제이다. 이를 위해 일본, 한국, 유럽과 MOU를 맺고 공급망을 구축하는 움직임도 활발하다.

이밖에 일본은 세계 최초로 수소 기본 전략을 수립하고, 수소 발전, 수소 선박 개발 등에 투자를 이어가고 있다. 호주는 값싼 석탄과 CCS로 갈탄 수소를 만들거나, 풍부한 태양·풍력을 활용한 그린수소를 생산해 수출하려는 계획을 추진 중이다. 중국도 수소연료전지차 보급과 그린수소 생산량에서 세계 선두를 달리고 있다. 이처럼 각국이 자국 상황에 맞춰 수소 전략을 펼치는 가운데, 국제협력도 중요해지고 있다. 수소는 무게 대비 에너지 밀도가 낮아 수송비용이 크므로, 수소 수출입 시장이 형성되려면 표준화와 협력이 필수이다. 예를 들어 수소의 등급(그린/블루 등)에 대한 인증, 암모니아 등 캐리어 형태로 거래하는 규격, 운송 선박 안전기준 등을 정해야 한다. 이를 위한 노력으로 국제 수소협약체, 글로벌 수소 표준화 회의 등이 열리고 있다.

[표 3] 수소정책 비교

구분	미국	유럽	중동
전략	- IRA 법안으로 세액공제 등 막대한 금융 인센티브 제공 (청정수소 1kg당 최대 \$3 지원) - 수소 허브 구축 등 정부 주도 인프라 투자	- REPowerEU로 명확한 수소 목표 제시 (30년 1,000만 톤 생산·수입) - 의무목표·보조금 병행한 시장 창출 (EU 수소은행 등)	- 풍부한 일사량·가스로 저가 생산 기반 확보 - 국가 주도로 대규모 수소·암모니아 플랜트 투자 (석유 이후 수출 산업 다각화)
주요 사업	7대 지역 수소허브 선정 - 연 300만 톤 생산 목표 “Hydrogen Shot” - 수소 생산단가 \$1/kg 도전	- 다국적 연합 IPCEI 프로젝트 지원 - 전해조 공장, H₂트럭 등 - 유럽 수소백본 파이프라인 구상 - 2030년대 대륙 간 망 구축	- 네옴 그린수소 프로젝트 (사우디) - '26년 암모니아 수출 - ADNOC 블루수소 (UAE) - CCUS로 저탄소 암모니아 생산·수출
지원 방향	- 수요보단 공급 측면 지원 집중 - 생산자 세금 크레딧, 투자 세액공제 등 - 규제보다는 시장 인센티브로 민간 참여 유도	- 규제+보조금 투트랙 - 재생연 규제에 수소 포함, 저탄소 제품 공공조달 - 인증체계 수립 - 수입 그린수소 인정 기준 등	- 국부펀드 등 자본 투입 - 국가 프로젝트로 추진 - 해외 파트너십 - 일본·유럽과 MOU, 장기 공급 계약 논의

7. 결론 및 미래 전망: 청정수소 시대를 향하여

지금까지 청정수소의 여러 얼굴과 그 가능성을 살펴보았다. 수소경제는 더 이상 공상과학이 아닌, 각국이 치열하게 준비 중인 임박한 현실이다. 그렇다면 이 거대한 전환의 물결 속에서 우리가 나아갈 길은 무엇일까?

무엇보다 지속적인 기술 혁신과 투자가 핵심이다. 수소의 생산, 저장, 운송, 활용 전 분야에서 기술 성숙도와 경제성을 높여야 한다. 예를 들어 전해조 효율 향상과 대형화로 그린수소 단가를 낮추고, CCUS 비용 절감과 안전성 증대로 블루수소 신뢰성을 높여야 한다. 연료전지 수명 향상과 비용 저감도 중요하다. 이 모든 것이 연구개발과 규모의 경제를 통해 가능해질 것이다. 정부는 R&D 지원과 함께, 초기 시장 형성을 위한 수요 창출 정책을 꾸준히 펼쳐야 한다. 의무할당제(HPS)나 보조금 정책이 적절히 조합되어 공급자와 수요자가 함께 성장하도록 이끌 필요가 있다.

둘째, 인프라 구축에 속도를 내야 한다. 수소경제는 에너지 시스템의 재편을 뜻한다. 기존 석유·가스 인프라를 수소용으로 전환하거나 신규 구축해야 한다. 구체적으로는 수소 배관망, 저장 탱크, 기체/액체 수송선, 충전소 등이 있다. 인프라는 막대한 투자와 시간이 소요되므로, 민관 협력과 지역 연계를 통해 전략적으로 계획해야 한다. 특히 배관망은 수소경제의 혈관과 같아서, 초기 수요 밀집 지역부터 우선 연결하고 장기적으로 전국망으로 확대하는 청사진이 필요하다.

셋째, 국제협력과 표준화에도 적극 나서야 한다. 수소는 글로벌 시장에서 거래될 에너지 캐리어이다. 우리나라처럼 수소 수요는 큰데 생산 여건이 제한적인 국가는 해외에서 수소를 들여올 수밖에 없다. 그러려면 국제적으로 수소 등급 인증, 운송 규격, 안전기준 등이 조율되어야 한다. 한국은 일본, 유럽 등과 함께 이러한 글로벌 표준 논의에 참여하고 주도적인 역할을 노려야 한다. 또한 호주, 중동 등 청정수소 잠재 생산국과 양자 협력을 통해 장기 공급계약(MOU)을 확보하는 노력도 병행되어야 한다. 에너지 안보 차원에서 여러 공급원과 파트너십을 맺어 두는 것이 중요하다.

넷째, 지속가능성 원칙을 견지해야 한다. 수소경제를 추진하는 목적 자체가 탄소중립이고, 지속 가능한 사회 구현이다. 따라서 수소 밸류체인 전반의 환경 영향

을 꼼꼼히 따져보고, 진정한 청정수소만이 인정받도록 해야 한다. 그린수소 생산에 필요한 재생에너지 확대, 블루수소의 메탄 누출 관리, 수소 운송 중 에너지 손실 최소화 등 세심한 정책 관리가 필요하다. 또한 수소 안전도 간과할 수 없다. 수소는 인화성 가스이므로 취급 과정에서 안전기준을 철저히 마련하고, 국민 인식 제고와 교육도 뒤따라야 할 것이다.

끝으로, 종합적 에너지 전략의 맥락에서 수소를 바라봐야 한다. 수소경제는 기존 전기·화석연료 체계를 대체하는 새로운 축이지만, 모든 것을 수소로 대체하는 것은 아니다. 전기차가 유리한 분야는 전기차로 가고, 배터리가 유효한 저장은 배터리를 쓰고, 수소는 수소에 적합한 분야에 활용하는 에너지 믹스 최적화가 중요하다. 예컨대 승용차는 전기차와 수소차가 공존하고, 대형 상용차나 장거리 운송은 수소가 주도하는 식의 역할 분담이 이뤄질 것이다. 수소경제는 결국 전력망, 연료망, 산업망이 유기적으로 연결되는 종합시스템이므로 부처 간, 산업 간 협업이 필수이다.

청정수소 산업이 성공하기 위한 핵심 요소는 한마디로 ‘협력과 실행’이라 하겠다. 정부와 기업의 협력, 에너지 부문과 산업 부문의 협력, 나라와 나라의 협력이 어우러져야 한다. 이제 시작 단계인 수소경제는 많은 불확실성이 있지만, 분명한 것은 움직이지 않는다면 아무것도 이루지 못한다는 점이다. 우리에게 20세기 석유 산업 부흥을 이끈 용기와 21세기 정보혁명을 견인한 창의를 있다면, 다가올 수소 시대도 충분히 개척해 낼 수 있을 것이다. ‘물에서 연료를 얻는’ 질 베른의 꿈을 인류가 진정으로 이루는 순간, 우리는 지속 가능한 번영의 길로 한 걸음 더 나아가고 있을 것이다.



8

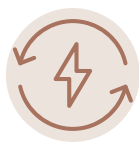
가정주부가 전하는
전기요금 절약 꿀팁



가정주부
김미향

에너지는 국가 경제와 국민 생활에 필수적인 요소로, 최근 국내외적으로 다양한 변화와 도전에 직면하고 있다. 특히 기후변화 대응, 신재생에너지 확대, 에너지 가격 변동, 전력 수급 문제 등이 주요 이슈로 떠오르고 있다.

만약 한여름 폭염이 지속되어 전국적으로 에어컨 사용이 급증한다고 가정해 보자. 전력 수요가 너무 높아지면 발전소에서 공급할 수 있는 전력량이 한계에 도달할 수 있다. 이런 상황이 되면 국가는 전력 공급을 조절하기 위해 계획 정전을 시행하거나, 전기 요금을 올려 전력 소비를 억제할 수밖에 없다. 이는 단순히 가정뿐만 아니라 기업과 공공기관에도 영향을 미치는 중요한 문제이다.



1. 전기요금 단가 이해하기 "전기요금이 꾸준히 오르고 있다."

전기는 현대 사회에서 없어서는 안 될 필수 에너지이다. 가정에서 사용하는 전기는 우리 생활을 편리하게 만들어 주지만, 매달 부과되는 전기요금이 부담스러운 경우가 많다. 특히 최근 몇 년간 한국의 전기요금은 꾸준히 상승하고 있어, 가정주부인 필자를 포함한 많은 국민들이 부담을 느끼고 있다.

요즘 뉴스를 통해 접한 전기요금 인상의 주요 원인은 연료비와 전력원 변화에 따른 비용 증가로 확인된다.

1. 국제 연료비 상승: 전기 생산의 주된 원료인 천연가스, 원유 등의 가격이 국제적으로 상승하면서 전력 생산 비용도 함께 증가하고 있다.
2. 신재생에너지 확대: 탄소중립 목표를 달성하기 위해 태양광, 풍력 등의 신재생에너지 비중이 증가하면서 발전 비용이 늘어나고 있다.
3. 전력망 유지 및 보수 비용 증가: 안정적인 전력 공급을 위해 송배전 설비를 유지·보수하는 데 필요한 비용도 점점 커지고 있다.

가정에서 전기요금을 절약하려면 전력 배전 방식과 전기요금 체계를 이해하는 것이 중요하다. 한국의 전력 시스템은 안정적인 공급을 위한 다양한 구조를 갖추고 있으며, 전기요금은 단순히 '많이 쓰면 많이 나온다'는 개념이 아니라 여러 가지 요금 항목으로 구성된다. 각 항목이 전기요금에 미치는 영향을 이해하면 보다 효율적인 절약이 가능하다.

1) 한국의 전력 배전 방식

우리나라는 한전(한국전력공사)이 전력을 공급하며, 전기는 송전 → 변전 → 배

전 단계를 거쳐 각 가정과 산업 현장에 전달된다.

1. 송전(Transmission): 발전소에서 생산된 전력을 초고압(154kV~765kV)으로 변압하여 장거리로 송출한다.
2. 변전(Substation): 초고압 전력을 중·저압(22.9kV 등)으로 변압하여 배전망으로 보낸다.
3. 배전(Distribution): 가정과 산업 시설에서 사용할 수 있도록 220V 또는 380V로 변압한 뒤 공급된다. 우리나라의 가정용 전력은 대부분 220V 단상 교류(AC) 방식으로 공급되며, 산업용 시설에서는 380V, 440V의 삼상 전력을 사용하기도 한다.

2) 전기요금의 구성 요소

전기요금은 단순히 사용량(kWh)에 따라 결정되는 것이 아니라, 다양한 요금 항목이 포함된다. 21년 1월부터 전기요금 청구서에 기후환경요금과 연료비조정요금 항목이 신설되었다. 연료비조정요금은 석탄, 천연가스, 석유 등의 전기를 생산하는 연료의 가격변동을 전기요금에 반영하는 항목이다. 연료비 시장에서 통제가 어렵고 변동성이 크기 때문에 이에 따라 요금이 조정된다. 기후환경요금은 깨끗하고 안전한 에너지 사용을 위한 비용으로, 신재생에너지 발전, 온실가스 감축, 석탄 발전 감축 등을 위한 자원이 포함된다. 이 항목이 도입됨에 따라 해당 비용들이 분리되어 한 눈에 확인이 가능해졌다.

[표 1]

요금 항목	설명
기본요금	전력 공급을 위한 기본 비용으로 계량기 용량에 따라 부과
전력량요금	실제 사용한 전력량(kWh)에 따라 부과, 가정용은 누진제 적용
기후환경요금	신재생에너지 확대 및 탄소 감축을 위한 요금
연료비 조정요금	국제 연료비 변동에 따라 가변적으로 조정
전력산업기반기금	전력산업 발전 기금으로 3.7%
부가가치세	최종 전기요금의 10%



3) 전기요금 책정 방법

전기요금은 크게 누진제(가정용)와 단일요금제(산업용·일반용)로 구분된다.

가정용(주택용) 전기요금: 누진제 적용

한국의 가정용 전기요금은 누진제를 적용하여, 사용량이 많을수록 kWh당 단가가 증가하는 구조이다.

1. 1단계(저 사용자 구간): 0~200kWh 사용 시 93.3원/kWh
2. 2단계(중간 사용 구간): 201~400kWh 사용 시 187.9원/kWh
3. 3단계(고 사용자 구간): 400kWh 초과 시 280.6원/kWh

이러한 누진제는 에너지 절약을 유도하고, 전력 과소비를 방지하는 역할을 한다. 1단계는 기본적인 가정용 전력 사용량으로, 가장 저렴한 요금이 적용된다. 전기 사용량을 이 구간에 유지하면 전기요금을 크게 줄일 수 있다. 2단계는 중간 사용 구간으로, 냉난방 기기를 많이 사용하거나 가족 수가 많으면 이 구간에 해당될 가능성이 크다. 3단계는 전력 소비량이 많은 가구에서 해당되며, 단가가 급격히 증가하므로 사용량 조절이 중요하다.

산업용 및 일반용 전기요금: 단일요금제

기업, 공장, 상업시설에서는 누진제가 아닌 시간대별 요금제(TOU, Time of Use) 또는 단일요금제가 적용된다. 시간대별 요금제(TOU)는 낮(피크 시간)에는 요금이 비싸고, 밤(비피크 시간)에는 저렴한 요금이 적용된다. 단일요금제는 사용량과 관계없이 일정 단가가 적용된다.

4) 평균적인 전기요금 수준

가정에서 월평균 사용하는 전력량과 예상 전기요금은 다음과 같다.

[표 2]

월 사용량(kWh)	예상 전기요금(원)	적용 구간
200kWh	약 3~4만 원	1단계
350kWh	약 7~9만 원	2단계
500kWh	약 15~17만 원	3단계
700kWh	약 25~28만 원	3단계

* 요금은 연료비 조정요금 변동에 따라 다를 수 있음.

2. 국내·외 에너지 이슈 "전기는 항상 풍부할까?"

에너지는 국가 경제와 국민 생활에 필수적인 요소로, 최근 국내외적으로 다양한 변화와 도전에 직면하고 있다. 특히, 기후변화 대응, 신재생에너지 확대, 에너지 가격 변동, 전력 수급 문제 등이 주요 이슈로 떠오르고 있다.

만약 한여름 폭염이 지속되어 전국적으로 에어컨 사용이 급증한다고 가정해 보자. 전력 수요가 너무 높아지면 발전소에서 공급할 수 있는 전력량이 한계에 도달할 수 있다. 이런 상황이 되면 국가는 전력 공급을 조절하기 위해 계획 정전을 시행하거나, 전기요금을 올려 전력 소비를 억제할 수밖에 없다. 이는 단순히 가정뿐만 아니라 기업과 공공기관에도 영향을 미치는 중요한 문제이다.

1) 전력3법

최근 전기요금과 관련해 가장 큰 이슈는 에너지 3법 개정 논의이다. 에너지 3법은 「국가기간 전력망 확충 특별법」(이하 “전력망특별법”), 「고준위 방사성폐기물 관리에 관한 특별법」(이하 “고준위특별법”) 및 「해상풍력 보급 촉진 및 산업 육성에 관한 특별법」(이하 “해상풍력특별법”)으로 구성된다.

[표 3]

법률명	주요 내용
국가기간전력망 확충 특별 법안	안정적인 전력 공급을 위한 전력망 확충
고준위 방사성폐기물 관리에 관한 특별법안	원전에서 발생하는 고준위 방사성폐기물 관리
해상풍력 보급 촉진 및 산업 육성에 관한 특별법안	해상풍력 발전 보급 및 산업 육성

(1) 전력망 확충 필요성

전력 사용량이 계속 증가함에 따라, 안정적인 전력 공급을 위해 송·배전망 확충은 필수적이다. 이 법이 개정되면 전국적으로 전력 인프라 개선이 이루어질 것으로 기대된다.

(2) 고준위 방사성폐기물 관리 문제

원자력발전소에서 나오는 사용후 핵연료인 고준위 방사성폐기물은 안정적으로 처리할 필요가 있다. 2030년 임시 저장시설의 포화가 예상됨에 따라, 정부는 최종 처분시설 계획을 수립해야 한다.

(3) 해상풍력 발전 확대

탄소중립 목표를 달성하기 위해 해상풍력 발전 확대가 추진되고 있다. 해상풍력 발전은 육상풍력보다 발전 효율이 높고, 주민 민원이 적으며, 환경에 미치는 영향도 적다. 다만, 초기 건설 비용과 유지보수 비용이 높다는 점이 과제로 남아 있다.

2) 신재생에너지 확대 정책

한국 정부는 2050 탄소중립 목표 달성을 위해 신재생에너지 보급을 적극적으로 확대하고 있다.

- 태양광·풍력 발전 확대: 주택용 태양광 보급 지원 및 해상풍력 프로젝트 추진
- 재생에너지 전력거래 시장 도입: 기업들이 친환경 전력을 직접 구매할 수 있도록 'RE100' 제도 활성화
- 그린수소·암모니아 도입: 탄소 배출이 없는 수소·암모니아 발전 기술 개발
- 문제점
 - ① 신재생에너지 발전의 변동성이 커서 안정적인 전력 공급이 어려움
 - ② 기존 석탄·원자력 중심의 발전 구조에서 전환 비용 부담이 큼
 - ③ 전력망 확충이 필요하지만 투자 비용이 크고, 인프라 구축이 지연됨

3) 전력 수급 안정성 문제

최근 여름철 폭염, 겨울철 한파 등 극단적인 기후변화로 인해 전력 수요가 급증하면서 전력 공급의 안정성이 중요한 이슈로 떠오르고 있다.

- 여름철·겨울철 전력 피크 발생: 냉방 및 난방 수요 급증으로 전력 공급 부담 증가
- 전력 예비율 하락: 신재생에너지 발전의 간헐성으로 안정적 전력 공급에 어려움 발생
- 노후 발전소 폐쇄: 석탄발전소 감축 정책으로 일부 발전소가 폐쇄되며 공급 부족 우려
- 해결책
 - 스마트그리드 도입 및 에너지 저장장치(ESS) 확대
 - 전력 수요 관리 정책 강화(전력 사용 피크 시간 요금제 도입)
 - 원자력 발전 활용 논의 재개(기존 원전 수명 연장 등)

4) 해외 에너지 동향

(1) 유럽 - 에너지 위기와 재생에너지 확대

유럽은 러시아-우크라이나 전쟁 이후 천연가스 공급의 불안정으로 에너지 위기를 겪고 있다.

- 천연가스 가격 급등: 러시아의 가스 공급 중단 이후 LNG 수입 의존도가 높아짐
- 재생에너지 전환 가속화: 태양광, 풍력 발전소 확대 및 에너지 저장 기술 발전
- 원전 재가동 논의: 독일, 프랑스 등 일부 국가가 원전 정책을 재검토
- 주요 변화
 - 유럽연합(EU)은 탄소중립 목표를 위해 재생에너지 의무 비율을 확대
 - 에너지 효율화를 위한 스마트미터 도입 증가

- 전력 거래 시장 개편을 통해 소비자들이 전력을 직접 구매할 수 있도록 전력 거래 추진

(2) 미국 - 에너지 안보 강화 및 청정에너지 투자 확대

미국은 에너지 안보를 강화하면서 신재생에너지 산업에 대한 투자를 확대하고 있다.

- 셰일가스 생산 증가: 에너지 자립도를 높이기 위해 셰일가스 개발 확대
- 청정에너지 지원법 (IRA): 태양광·풍력·전기차 배터리 등에 대한 대규모 투자
- 전력망 현대화 : 스마트그리드 도입 및 마이크로그리드 기술 발전
- 주요 변화
 - 에너지 자립을 위한 오일·가스 생산 확대와 신재생에너지 병행 추진
 - 전력망 인프라 현대화 및 스마트그리드 도입 증가
 - 전기차 충전 인프라 확대 및 친환경 에너지 기술 개발

(3) 중국·아시아 - 전력 부족 해결과 신재생에너지 투자

아시아 지역에서는 전력 부족 문제 해결과 탄소 감축을 위한 신재생에너지 투자가 활발하다.

- 중국: 세계 최대 태양광·풍력 발전소 건설 및 전기차 산업 확대
- 일본: 원자력 발전 재가동 추진 및 수소경제 활성화
- 인도: 신재생에너지 발전소 및 전력망 투자 확대
- 주요 변화
 - 중국은 에너지 안보를 위해 석탄 발전과 신재생에너지를 병행
 - 일본은 원전 재가동과 수소경제 활성화
 - 인도는 태양광·풍력 발전을 대규모로 확대하여 전력 부족 해결

5) 한국이 나아가야 할 방향

한국은 에너지 전환과 탄소중립 실현이라는 장기적 목표를 달성하기 위해 세 가지 주요 방향에서 정책적 노력을 강화할 필요가 있다.

첫째, 에너지 소비 전반에 걸친 효율화를 추진해야 한다. 이는 건물, 산업, 수송 등 각 부문별로 고효율 기기와 설비의 도입을 확대하고, 스마트 계량기와 에너지관리시스템(EMS) 등 디지털 기반의 효율 관리 기술을 활성화하는 방향으로 나아가

야 한다. 더불어 에너지 소비 구조의 근본적 개선을 통해 전력수요 증가를 억제하고, 에너지 비용 절감 효과도 도모할 수 있다.

둘째, 전력공급의 안정성을 확보해야 한다. 여름철과 겨울철의 전력 피크 시기에 안정적으로 전력을 공급할 수 있도록 계통망을 보강하고, 에너지저장장치(ESS)와 수요반응(DR) 시장을 확대해 공급의 유연성을 확보하는 것이 중요하다. 재생에너지 확대에 따라 간헐성 문제가 심화되는 만큼, 기저 전력인 원자력 발전과의 연계 기술도 개발이 필요하다.

셋째, 국제 연료 가격 변동성에 효과적으로 대응할 수 있는 정책 기반을 마련해야 한다. 이를 위해 액화천연가스(LNG), 석탄, 우라늄 등 주요 연료의 수입선을 다변화하고, 연료비 연동제를 보다 정교하게 운영하여 국내 소비자의 가격 부담을 완화해야 한다. 아울러 에너지 가격에 대한 투명한 정보 제공과 가격 신호의 합리적 전달이 가능한 구조로 개선할 필요가 있다.

[표 4]

추진 전략	세부 내용
에너지 효율화 정책 강화	- 에너지 고효율 설비, 스마트미터, 에너지 관리시스템 등 에너지 소비 효율화 - 효율적 전력수요 관리
전력 공급 안정성 확보	- 신재생에너지 발전 확대 및 안정적 전력 공급을 위한 ESS 투자 - 원자력 발전 활용 방안 검토 및 탄소중립과의 조화
에너지 가격 변동 대응	- 에너지 연료의 수입 다변화 - 국제 연료 가격 변동에 따른 전기요금 조정 정책 수립 - 가정용 태양광, 기업의 RE100 참여 확대 등 전력 수요 분산



3. 가정에서 실천할 수 있는 전기요금 절약 Tip

전기요금 절약은 단순히 비용을 줄이는 것뿐만 아니라, 환경을 보호하고 에너지를 효율적으로 사용하는 중요한 습관이다. 가정에서 손쉽게 실천할 수 있는 전기 절약 방법을 자세히 알아보자.

1) 대기전력 차단하기

대기전력(Standby Power)이란, 전자제품이 꺼져 있어도 콘센트에 연결된 상태에서 소비되는 전력을 의미한다. 가정에서 사용하는 가전제품 중 약 10~15%는 대기전력으로 낭비된다고 알려져 있다.

- 멀티탭 사용
 - 개별 스위치가 있는 멀티탭을 사용하여, 사용하지 않는 전자기기의 전원을 차단
 - TV, 인터넷 모뎀, 컴퓨터 등 장시간 사용하지 않는 기기는 전원을 완전히 끄기
- 스마트 플러그 활용
 - 일정 시간이 지나면 자동으로 전원을 차단하는 스마트 플러그 사용
 - 스마트폰 앱을 통해 원격으로 전원 조절 가능
- 에너지 절약 모드 활용
 - 컴퓨터, TV 등 가전제품에서 '에너지 절약 모드' 또는 '절전 모드'를 설정

→ 기대 효과: 대기전력을 차단하면, 연간 4인 가구 기준 약 5~7만 원의 전기요금 절감 효과가 있다.

2) 에너지 효율이 높은 가전제품 사용하기

에너지를 절약하기 위해서는 에너지소비효율 1등급 제품을 선택하는 것이 중요하다. 가전제품의 에너지소비효율 등급을 확인하면, 연간 전력 소비량과 전기요금을 미리 예측할 수 있다.

- 에너지효율 1등급 제품 구입
 - 전기요금을 절감하기 위해서는 냉장고, 에어컨, 세탁기 등의 주요 가전제품을 에너지효율 1등급 제품으로 교체
- 사용 연한이 지난 가전제품 교체
 - 10년 이상 사용한 냉장고, 세탁기 등은 전력 소모가 크므로, 최신 고효율 제품으로 교체



출처: 에너지관리공단

- 절전 기능 활용
 - 세탁기는 '절전 모드'로 사용하고, 에어컨은 '에코 모드'로 설정
- 기대 효과: 기존 10년 이상 된 냉장고를 1등급 제품으로 교체하면 연간 약 10만 원, 에어컨을 교체하면 최대 15만 원 이상의 전기요금 절약 효과를 볼 수 있다.

3) 자연 채광 및 환기 활용하기

자연광을 최대한 활용하면 조명 사용량을 줄일 수 있다.

- 커튼 활용
 - 낮에는 창문을 개방하고 커튼을 걷어 자연광 활용
 - 여름철에는 햇빛 차단 커튼(차열 커튼)을 활용하여 냉방비 절감
 - 자연 환기 활용
 - 여름철에는 아침과 저녁에 창문을 열어 자연 환기
 - 겨울철에는 낮 동안 햇빛을 받아 실내 온도 유지
- 기대 효과: 자연광 활용 시 전기 조명 사용량을 최대 50%까지 절감 가능할 수 있다.

4) LED 조명으로 교체하기

형광등보다 LED 조명을 사용하면 전력 소비를 대폭 줄일 수 있다.

- 기존 형광등과 LED 비교
 - 일반 형광등보다 LED 조명은 50~80% 더 적은 전력을 소비
 - 수명이 길어 교체 주기가 길고, 유지비도 절감
- 전등을 LED로 교체
 - 거실, 주방, 침실 등 자주 사용하는 조명을 LED로 교체
 - 조도 조절 기능을 활용해 상황에 맞게 밝기 조절 가능

- 밝기 조절이 가능한 스마트 조명을 활용하여 불필요한 전력낭비 ZERO
- 기대 효과: LED 조명 교체 시 연간 약 5~7만 원의 전기요금 절감 효과가 있다.

5) 냉장고 및 주방 가전 효율적으로 사용하기

- 냉장고 문 여닫는 횟수 줄이기
 - 냉장고 문을 자주 열면 내부 온도가 상승하여 전력 소비 증가
- 냉장고 적정 온도 유지
 - 냉장실: 3~5℃, 냉동실: -18℃ 유지 (너무 낮게 설정하면 전력 소모 증가)
- 뒷면 먼지 청소
 - 냉장고 후면의 열 방출구 먼지를 주기적으로 청소하면 전력 소비 절감
- 전기밥솥 및 전자레인지 절약 방법
 - 밥은 한 번에 많이 짓고, 별도 냉장·냉동 보관을 통하여 보온 기능 사용 줄이기
 - 전자레인지 사용 후 플러그 뽑기
- 기대 효과: 냉장고 및 주방 가전을 효율적으로 사용하면 연간 약 8~10만 원의 전기요금 절감이 가능하다.

6) 난방 및 냉방 에너지 절약하기

- 적정 실내 온도 유지 (여름철 26도, 겨울철 20도)
 - 실내 온도를 너무 높이거나 낮추면 전력 소모 증가
- 문풍지·단열재 활용
 - 문풍지, 뽁뽁이 등을 창문에 부착하여 외부 열 손실 방지
- 전기히터 대신 온열매트 사용
 - 난방기구 중 전력 소비가 적은 제품 사용
- 선풍기와 에어컨 동시 사용
 - 에어컨만 단독으로 사용하지 않고 선풍기와 함께 사용하면 냉방 효율 향상
- 에어컨 필터 청소
 - 필터에 먼지가 쌓이면 냉방 효율이 떨어지므로 주기적인 청소 필요
- 여름철 냉방기 온도 1℃ 높이기
 - 설정 온도를 1℃ 높이면 전력 소비를 약 7% 절감할 수 있음
- 기대 효과: 난방 및 냉방 에너지 절약을 실천하면 연간 약 10~20만 원의 전기요금을 절감할 수 있다.

4. 전기요금 할인제도 활용하기

전기요금 할인제도를 잘 활용하면 가정의 전기요금을 줄일 수 있다. 우리나라에는 특정 조건을 충족하는 가구를 대상으로 다양한 전기요금 할인제도가 운영되고 있으며, 이를 적절히 활용하면 연간 전기요금을 크게 절약할 수 있다.

1) 복지 할인제도 (사회적 배려 계층 대상)

사회적 취약계층을 대상으로 전기요금을 할인해 주는 제도이다.

- 대상
 - 기초생활수급자 (생계·의료·주거·교육 급여 수급자)
 - 차상위계층
 - 장애인 (1~3급)
 - 독립유공자 (국가보훈처 등록 유공자)
 - 다자녀 가구 (자녀 3명 이상)
 - 대가족 및 출산 가구 (세대원 5인 이상 또는 출산 가구)
 - 사회복지시설
- 할인 혜택

구분	할인 금액(월)
기초생활수급자(생계, 의료)	최대 16,000원
기초생활수급자(주거, 교육)	최대 12,000원
장애인, 독립유공자	최대 20,000원
차상위계층	최대 8,000원 (여름철 최대 10,000원)
대가족, 출산가구	전력 사용량에 따라 일부 할인, 월 최대 30%
다자녀 가구	전력 사용량에 따라 일부 할인, 월 최대 30%
사회복지시설	전력량 요금 30% 할인

- 신청 방법
 - 한전 고객센터(국번 없이 123) 또는 인터넷(한전 홈페이지)에서 신청 가능
 - 가까운 주민센터를 방문하여 신청 가능

2) 심야 전력 할인제도(전력 소비가 많은 가구 대상)

야간 시간대에 전기를 많이 사용하는 가구를 대상으로 전기요금을 할인하는 제도이다.

- 대상
 - 심야 전력용 전기설비나 전용 계량기를 설치한 가구 또는 시설
 - 전기보일러, 온수기 사용 가구
 - 전기차 충전기 운영 가구
 - 야간 근무가 많은 가구
- 할인 혜택
 - 심야 시간(23시~09시)에는 일반 주택용 전기요금 대비 50% 이상 저렴한 요금
- 신청 방법
 - 한전 홈페이지 또는 고객센터(국번 없이 123)에서 '심야전력 계약' 신청
- 활용 팁
 - 전기보일러는 심야 시간에 물을 데운 후, 낮시간에는 저장된 온수를 활용
 - 전기차 충전은 야간 시간대(23시~09시)에 충전

3) 태양광·신재생에너지 발전 가구 할인제도

신재생에너지를 활용하는 가구를 대상으로 전기요금을 할인해 주는 제도이다.

- 대상
 - 태양광 발전 설비를 설치한 주택
 - 연료전지·풍력·수소발전 등의 신재생에너지 설비를 설치한 가구
- 할인 혜택
 - 생산한 전력을 한전에 판매하여, 그 판매 금액만큼 전기요금에서 차감(전기요금 고지서에서 직접 차감)
- 신청 방법
 - 신재생에너지 설치 후, 한전에 '전력거래 계약'을 체결
- 활용 팁
 - 정부 보조금을 활용하면 태양광 패널 설치 비용 절감 가능
 - 잉여 전력을 한전에 판매하여 추가적인 경제적 이득 가능

4) 전기차 충전 요금 할인제도

전기차는 에너지효율 등급제가 있다. 1등급은 5.8km/kWh이며, 2등급은 5.7~5.0 km/kWh, 3등급은 4.9~4.2km/kWh, 4등급은 4.1~3.4km/kWh, 5등급은 3.3km/kWh

이하이다. 등급이 높을수록 연비가 좋고, 전기 충전 비용이 절감된다. 1등급(약 78만 원)과 5등급(약 162만 원)의 연간 충전비의 차는 약 84만 원이다. 또한, 전기차 보급 확대를 위해 전기차 충전 요금 할인을 제공하는 제도도 운영되고 있다.

- 대상
 - 전기를 보유한 개인 또는 법인
- 할인 혜택
 - 완속 충전기: 기본요금 면제 + 전력량 요금 할인
 - 급속 충전기: 전력량 요금 할인 적용
- 신청 방법
 - 한국전력 전기차 충전소에 차량 등록 후 할인 신청
- 활용 팁
 - 급속 충전보다는 완속 충전을 주로 사용하면 충전비 절감 가능
 - 심야 시간대(23시~09시)에 충전하면 추가적인 비용 절감 가능

5. 결론



전기요금 절약을 위해 대기전력 차단, 에너지 효율 제품 사용, 전기 사용 패턴 조절, LED 조명 교체, 냉장고 및 주방 가전의 효율적 사용, 난방·냉방 절약을 실천하면 연간 전력 요금의 상당 부분을 절감할 수 있다. 작은 습관이 모이면 가정 생활비의 절감은 물론 탄소 배출 저감과 환경 보호에도 기여할 수 있다. 전기 절약 실천을 꾸준히 이어 간다면, 경제적 이득뿐 아니라 지속 가능한 에너지 사용을 위한 중요한 발걸음이 될 것이다. 이번 공모를 통해 가정 주부의 전기요금 학습과 함께 전기요금 꿀팁이 전파되어 긍정적인 사회적 영향으로 이어지길 기대한다.



2025 Mandate for Leadership

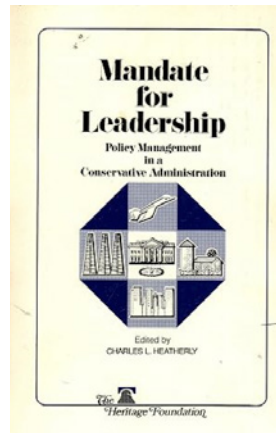
서문 케빈 로버츠
편집 폴 댄스, 스티븐 그로브스



1. 서론

전 세계는 기후위기, 에너지 안보 위협의 복합적인 위기에 직면해 있다. 유럽은 전쟁의 그림자 아래 에너지 주권을 되찾기 위해 분투하고 있으며, 아시아는 급속한 산업화와 디지털화를 위한 안정적 전력 확보에 고심하고 있다. 더불어 기후변화 대응을 위한 탈탄소 정책은 각국에서 빠르게 확산하고 있으나, 그 과정에서의 비용과 기술 격차는 오히려 새로운 불균형과 사회적 갈등을 증폭시키고 있다.

Mandate for Leadership은 1981년 1월 로널드 레이건이 미국의 대통령직에 취임한 같은 달에 처음 출간되었으며, 그해 말까지 권고안의 60% 이상이 정책으로 실현되었다. 정책 실현을 통하여 레이건은 스태그플레이션을 종식하고, 냉전 승리하는 미국의 역사적 전환점의 토대가 되었다. 2025 Mandate for Leadership은 이러한 유산을 계승하여 차기 보수 행정부가 국정 전반에 걸쳐 무엇을 어떻게 바꿔야 할지를 제시하는 실천 매뉴얼이라 할 수 있다. 2025 Mandate for Leadership에서는 4가지 핵심 목표를 기반으로 정책 권고 사항을 제시한다.



1. 가족을 미국 사회의 중심으로 회복하고, 다음 세대인 우리 아이들을 보호한다.
2. 비대하고 비효율적인 관료 체제를 없애고, 국민에게 통치 권한을 되돌려 준다.
3. 국가의 주권과 국경, 자원을 대외 위협으로부터 보호한다.
4. 미국 헌법이 '자유'의 축복'이라고 표현한, 신으로부터 부여받은 개인의 자유로운 삶의 권리를 확고히 수호한다.

2025년 5월 25일 트럼프 대통령은 에너지·원자력 관련 행정명령을 수행하였다. 행정명령에는 ▲ 원자력규제위원회(NRC) 개혁 ▲ 에너지부 원자력 연구 개혁 ▲ 연방정부 토지 내 원전 건립 추진 ▲ 미국 내 우라늄 채굴 및 농축 확대 등에 대한 것이다. 향후 25년 내 전력 생산량 4배 확대를 목표로 규제 절차를 산업의 필요와 공공의 안전에 맞춰 개혁하는 내용을 담았다.

이에, 본고는 2024년 12월 미국의 대표적인 보수 싱크 탱크인 헤리티지 재단이 주도하여 발간한 정책 제안서인 “Mandate for Leadership”의 에너지·환경 부문 주요 내용을 해설하고, 우리에게 주는 시사점을 탐색하고자 한다.

2. 본론(제12장 에너지부 및 관련 위원회)



가. 에너지부 및 관련 위원회 – 자율성과 안보를 위한 개혁

다음 보수 행정부는 에너지와 과학 분야에서의 국제적인 우위를 우선적으로 추진해야 한다. 이를 통해 풍부하고 저렴하며 신뢰할 수 있는 에너지를 확보하고, 고소득 일자리를 창출하고, 국내의 제조업과 기술 리더십을 지원하고, 국가 안보를 강화할 수 있어야 한다. 이러한 목표를 달성하려면 미국 에너지부(DOE), 연방 에너지 규

제 위원회(FERC), 원자력 규제 위원회(NRC)에 대한 과감한 정책과 개혁이 필요하다.

저렴하고 신뢰할 수 있으며 풍부한 에너지에 대한 접근성은 미국의 경제, 국가 안보 및 삶의 질에 필수적이다. 2000년대 초 에너지 르네상스 시절 미국은 에너지 산업을 주도하였으나, 이념에 치우친 정부 정책으로 불과 몇 년 만에 새로운 에너지 위기에 맞이했다. 에너지 수급과 전력망이 불안정해졌고, 엄청난 매장량에도 불구하고 천연가스와 석유는 정부의 규제로 충분히 공급되지 못하고 있다. 그 결과, 에너지 가격은 상승했고, 이는 가계와 경제 전반에 심각한 부담으로 작용하고 있다.

현재의 새로운 위기는 자원 부족이 아니라 극단적인 “녹색” 정책으로 인해 발생하였다. “기후 변화 대처”와 “ESG”(환경, 사회, 거버넌스)라는 명목으로 바이든 행정부, 의회와 각 주에서는 투자자, 국제적 기업, 진보적 특수 이익 단체와 함께 미국의 에너지 전망을 변화시키고 있다. 녹색 정책으로 인해 막대한 양의 돈을 특혜적 이해관계자에게 투자되고 있으며, 에너지에 있어서 대외 의존도를 높이게 되었다. 기후 변화에 맞선다는 미명 하에 수조 달러의 투자와 각종 정부 보조금이 발생하였으며, 결과적으로 에너지 비용의 상승으로 다음과 같은 결과를 가져왔다.

- 개인과 가족, 특히 저소득층과 고정된 소득에 의존하는 국민들의 피해
- 경제와 삶의 질의 원동력인 일자리를 창출하는 기업의 경쟁력 저하
- 에너지 안보 수준 저하

차기 대통령은 미국의 모든 에너지 자원을 활용하고 에너지 경제가 특별한 이해단체 아닌 미국 국민을 위해 활용되도록 유념하여야 한다. 차기 행정부는 다음을 수행하여야 한다.

- 풍부하고 신뢰할 수 있으며 저렴한 에너지에 대한 접근성을 보장함으로써 에너지 안보를 증진한다.
- 모든 자원 중 가장 좋은 것을 미국 국민의 편익을 위해 활용할 수 있도록 “all of the above”의 에너지 정책을 확약한다.
- 인프라 투자 및 일자리 법 및 인플레이션 감소 법과 같이 재생에너지 개발업자

와 투자자 및 특수 이해관계자들을 위한 보조금 지출 법안 폐지를 추진하고 아직 지출되지 않은 재생에너지 기금을 철회하도록 추진한다.

- 에너지 분야의 의사결정에 대한 정부 개입을 중간하여 민간 부문의 에너지 혁신을 촉진한다.
- 석유 및 천연가스에 대한 전쟁을 중단한다.
- 개인, 가족, 기업이 원하는 에너지 자원을 각각의 필요에 가장 잘 맞도록 사용하게 허용한다.
- 사이버 및 물리적 공격으로부터 에너지 인프라를 안전하게 지키고 보안한다.
- 에너지부를 에너지 안보, 에너지 산업 복구 및 첨단 과학에 역량을 다시 집중하도록 한다.
- 미국의 동맹국의 에너지 자립을 지원하고 적대세력을 약화시키는 수단으로 적극 활용한다.
- 연방 에너지 규제 위원회(FERC)가 에너지 소비자들이 저렴하고 신뢰할 만한 전기, 천연가스 및 석유를 사용할 수 있도록 하는 데 그 역량을 다시 집중하고, 특정 이해단체와 진보적 동기에 편향되지 않도록 한다.
- 원자력규제위원회(NRC)가 민간 부문의 원자력 개발과 신규 원전 도입을 방해하는 대신 이를 적극 지원하는 방향으로 개편한다.

1) 에너지부 개혁

국가가 과학 분야에서 경쟁 우위를 확보하는 것은 국가 안보와 경쟁력 유지에 필수적이다. 미국 에너지부(DOE)는 조직의 명칭과 사명을 재정립하고 ‘에너지 안보 및 첨단 과학부(DESAS, Department of Energy Security and Advanced Science)’로 개편되어 아래 역할에 집중해야 한다.

- 에너지 안보 및 관련 국가 안보 문제에 대한 리더십과 조정 기능 수행
- 해외 시장에서 미국 에너지의 경제적 이익 증진
- 기초 및 첨단 과학 분야에서 미국과 세계를 선도하는 연구 수행
- 과거 맨해튼 프로젝트 및 냉전 시기의 핵 물질 처리시설 복원
- 새로운 핵무기 및 해군 원자로 개발

이를 통해 첨단 과학 기술을 기반으로 국가 안보를 강화하는 동시에, 연방 정부

가 특정 에너지 자원의 '승자와 패자'를 선택하는 시장 개입에서 벗어나도록 한다. 미국 에너지부의 개혁이 시급한 이유는, 본연의 에너지 및 안보 중심 임무를 소홀히 하며 재생에너지 개발자와 투자자에게 보조금으로 지급하면서 미국인의 에너지 안보를 약화시키고 시장 기능을 심각하게 왜곡했기 때문이다.

미국 국민이 풍부하고 저렴하며 신뢰할 수 있는 에너지를 안정적으로 사용할 수 있도록 하기 위해, 에너지 안보 및 첨단 과학부(DESAS)는 에너지 분야에서 다음의 역할에 집중해야 한다.

- 에너지 인프라 보안을 보장하기 위해, 과학계 및 민간 부문과 조율하고 에너지 산업 및 네트워크와 긴밀히 협력
- 미국의 국가 안보를 위협하는 국제 에너지 문제를 식별하고 평가
- 동맹국을 지원하고 전략적 적대 세력을 약화시키며, 국제 시장의 안정성을 확보함으로써 국내 에너지 자원 생산을 장려
- 에너지 및 국가 안보와 직결되는 재료 과학을 포함하여, 기초 및 첨단 과학 분야의 연구를 추진
- 상업용 및 정부용 사용후핵연료 처리·관리 분야에서 연방 정부의 리더십을 강화

2) 에너지 안보

미국의 인프라를 사이버 위협, 자연재해, 인위적 공격으로부터 보호하는 일은 국가 안보는 물론, 경제 안정과 국민의 복지를 지키는 데 필수적이다. 이러한 국가 안보 이익을 수호하고 강화하는 것은 연방 정부가 당연히 수행해야 할 고유한 책무다.

- 전력망, 천연가스, 석유 인프라에 대한 위협을 체계적으로 조사하고, 관련 정보를 에너지 산업 전반과 공유하며, 에너지 자원과 인프라의 신뢰성과 보안을 강화해야 한다. 또한, 국가 연구소와 협력하여 이러한 위협에 대응할 수 있는 전략과 기술을 개발해야 한다.
- 특정 이해관계자 지원 프로그램을 폐지해야 한다. 미국 에너지부의 다수 자금 지원 프로그램은 기초 과학이나 핵심 기술 개발이 아니라, 정부가 선호하는 특정 자원의 상업화에 초점을 맞추고 있다. 이 과정에서 민간 부문은 막대한 보조금을 지원받으며, 시장의 자율성과 효율성은 저해되고 있다.

- 에너지부(DOE)의 LNG 수출 승인에 대한 정치적 및 기후 변화 기반의 개입을 중단해야 한다. 또한, 의회는 「천연가스법」을 개정하여, 자유무역협정을 맺은 국가뿐만 아니라 NATO 회원국 등 모든 동맹국에 대해 수출 승인을 확대해야 한다.
- 연방에너지규제위원회(Federal Energy Regulatory Commission: FERC)는 공정하고 합리적이며(just and reasonable) 차별 없는(not unduly discriminatory) 요금으로 안정적인 에너지 접근을 보장해야 하는 법적 의무에 집중해야 한다.
- 원자력에너지 규제 요건과 인허가 절차를 간소화해야 한다. 이러한 개혁은 민간 부문의 원자로(SMR 포함) 개발과 보급을 촉진하고, 비용 절감의 효과를 가져올 것이다. 원자력규제위원회(NRC)는 민간 원자로 및 발전소의 인허가뿐 아니라, 핵의학 등 다양한 방사성 물질의 활용을 규제하는 역할을 담당한다. NRC는 DOE 소속 기관은 아니지만, 원자로, 핵연료, 원전의 안전 및 국제 무역 문제와 관련해 DOE와 관할권이 겹치거나 충돌하는 경우가 많다. 이에 대한 조율과 규제 체계의 정비가 필요하다.
- 에너지부(DOE)는 정치화된 사회 프로그램이 아니라, 에너지 및 과학 문제에 집중해야 한다. DOE는 모든 미국인이 풍부하고 저렴하며 신뢰할 수 있고 안전한 에너지에 접근할 수 있도록 보장하는 데 정책의 초점을 맞춰야 하며, 모든 직원이 재능, 역량, 노력에 따라 공정하게 평가받고 대우받도록 인사 시스템을 운영해야 한다.

3) 국제 에너지 안보

다음 행정부는 국내 및 국제적 목표가 일치하도록 보장하면서 미국의 에너지 우위를 외교 정책의 핵심 요소로 삼아야 한다. 미국의 에너지 우위는 미국이 시민을 위한 에너지, 에너지 수출 시장, 새로운 에너지 천연자원에 대한 접근을 확보할 수 있게 해줄 것이며, 미국의 정책 입안자들이 동맹국을 지원하고 적을 억제할 수 있는 도구를 제공할 것이다. 에너지 안보 및 첨단 과학부(DESAS)는 미국의 국제 에너지 안보 이익을 분석하고 국가 에너지 안보 전략(NESS)을 개발하여야 한다.

4) 첨단 과학

미국이 기초 과학 분야에서 세계를 계속 선도할 수 있도록 National Labs에 재집중하고 국가 과학 정책을 검토하고 조정하여야 한다. 국립 연구소의 기초 과학

과 첨단 과학에 연구개발 집중하며, 과학 분야에 대한 정부 부처의 통합 관리를 추진해야 한다.

5) 방사성 폐기물 및 민간 사용후핵연료 처리 사업

미국 원자력 산업에서 맨해튼 프로젝트와 냉전을 지원하기 위해 생성된 방사성 폐기물을 정화하는 것은 에너지부(DOE) 환경 관리국이 주도하는 방대하고 복잡한 과정이다. DOE의 2023 회계연도 예산 요청에 따르면 미국 납세자가 부담하여야 할 예상 부채와 비용은 총 887조 2,050억 달러이다. 여기에 연방 정부는 원자력 발전소의 사용후핵연료를 포함하여 민간 부문에서 생성된 고준위방사성폐기물을 처리하여야 한다. 이에 폐기물 처리에 대한 정화와 더불어 민간 부분의 책임 수준을 높이는 접근이 필요하다.

6) 국가 핵안보청(NNSA)

NNSA는 미국의 핵무기 체계를 유지하고, 국제적인 핵 억지력과 비확산을 양립하는 정책을 담당하는 핵심 기관이다. 새로운 핵탄두를 연구하고 설계하고 기존 핵무기가 여전히 강력하도록 보장하는 주요 책임뿐만 아니라 신행 원자로 개발, 설계, 핵 비확산 방지를 위한 노력도 필요하다. 이러한 노력에는 상당한 자금과 과학적 노하우가 필요하다.

7) 전력국(OE)

OE는 2003년 정전 이후 그리드 신뢰성과 확실한 전력 공급 환경을 개선하기 위해 신설되었다. 전력망의 신뢰성과 현대화를 위한 기술개발, 정책, 투자 등을 통하여 스마트 그리드, 분산형 전원 확대 등 인프라 확장에 집중하고 있다. 정작 주요 임무인 전력망의 안전성과 회복력을 위한 노력에는 부족하다. 주요 업무에 대한 사업과 정책의 재조정과 필수적이지 않는 자금 지원은 종료하고, 사회적 프로그램은 타 부서로의 이관이 필요하다.

8) 원자력 에너지국(NE)

NE의 주요 임무는 첫째, 에너지, 환경 및 경제적 요구를 충족하기 위해 원자력 에너지의 과학 기술을 발전시키고, 둘째, 기존 원자로의 지속적인 운영을 가능하게

하고, 셋째, 첨단 원자로의 기술개발을 추진하며, 넷째, 핵연료 주기를 개발하고, 다섯째, 원자력 에너지기술 분야에서 미국의 리더십을 유지하며, 성과를 이루는 것이다. 더불어 방사성 폐기물 관리국의 해체 이후, 핵연료의 수거와 폐기도 담당하고 있다. 다만, NE가 원자력 기술 혁신의 기관으로 충분한 리더십을 발휘하지 못하고 있기에, 차기 혁신형 원자력 개발과 실증에 있어 투자, 협업과 기술개발이 이루어져야 한다. 더불어 핵연료 주기의 재정립과 러시아산 우라늄의 의존도를 축소하여 공급망 자립을 추진해야 한다.

9) 연방에너지규제위원회(Federal Energy Regulatory Commission: FERC)

연방전력법(Federal Power Act)에 의거 FERC는 전력신뢰도 공사(NERC)와 함께 대량 전력 시스템(전력망에 전력을 공급하는 데 필요한 송전 및 발전)의 신뢰도를 향상시키는 임무를 부여하고 있다. 주로 NERC는 기술 표준을 개발하며, FERC는 그 기술 표준을 송전 사업자, 발전사업자 및 전력회사가 준수해야 하는 사이버 보안 표준의 기준을 수립하고 있다. 공정하고 합리적이며 차별 없는 요금 설정을 통하여 소비자 권익을 보호해야 하며, 민간의 투자 유인을 저해하는 불확실성을 제거하며, 자원의 다양성과 신뢰도를 확장해야 한다.

10) 원자력규제위원회(NRC)

과거 원자력 산업은 원자력위원회(AEC)에 의해 규제되었으며, 1974년 에너지법에 따라 NRC가 설립되어 원자력 규제를 담당하고 있다. 과거의 아이러니한 점은 AEC가 상업용 원자력 발전의 장려와 규제 역할을 동시에 담당하였다는 것이다. 오늘날 NRC는 원자로 안전, 핵 물질 감독, 방사선 보호, 신규 원자로 허가, 신규 원자로 설계 인증, 핵폐기물 관리 활동 규제 등 광범위한 규제 활동을 담당하고 있다. 다만, 현대의 첨단 원자로 기술에 대하여 상당한 비용과 규제의 장벽이 남아 있다. 이에, NRC는 새로운 원자로 기술에 대한 규제 기준 수립과 산업 전반에 걸친 사이버 보안 위험을 완화하여야 한다. 더불어 경수형 원자로(LWR) 기술에 의존하는 통합 운영 라이선스(COL) 및 설계 인증 신청은 보통 2년 이내에 완료되어야 한다. 초기 부지사용 허가는 일반적으로 기존 원자로 부지 또는 그 인근에 건설하는 경우 1년 이내에 발급하는 규제 절차를 간소화해야 한다. 더불어 아래 사항을 수행하여야 한다.

- NRC가 NEPA 검토 프로세스를 간소화하고 집중하도록 요구하는 기존 원자로의 허가 연장의 검토 및 승인을 신속하게 처리한다.
- 규제 원칙인 “합리적으로 달성 가능한 최저”(as low as reasonable achievable: ALARA)를 삭제하고, 자의적인 목표가 아닌 방사선 위험도와 선량에 따라 명확한 기준을 설정하여 명확한 방사선 피폭 및 방호 기준을 설정한다.
- 의회와 협력하여 규제 기관에 특정한 활동에 일반적으로 면허 수수료가 요구되고 기타 기관 비용은 일반적인 예산 책정을 통해 제공되도록 자금 조달 방식을 개혁한다.

[표 1] 에너지 주요 조직별 개편 방향

조직명	주요 기능	개편 방향
에너지효율·재생에너지국 (EERE)	재생에너지 기술개발, 에너지 효율 향상, 관련 산업 육성을 위한 보조금 및 시범사업 수행	정치적 편향을 배제하고, 기술 중립성과 성과 기반 평가체계 도입. 보조금 중심 운영 축소
연방에너지규제위원회 (FERC)	전력·천연가스의 요금 및 인프라 승인 규제를 담당하는 독립 위원회	법률에 기반한 공정·비차별 요금 원칙 복원. 정치·사회적 요소 도입을 최소화하고 소비자 보호 중심의 규제 방향 회복
국가 핵안보청(NNSA)	핵무기 안전관리, 군사 원자로 개발, 핵비확산 정책을 담당하는 반독립기관	국가 전략기능 강화를 위해 DESAS 내 핵심 안보기관으로 편입. 핵역지력과 기술 인력 확보 병행
환경관리국(EM)	과거 DOE 프로젝트에서 발생한 방사성 폐기물 처리 및 부지 복원사업을 담당	민간 책임 확대, 프로젝트 예산 효율화, 과거 유산 정화사업의 전략적 우선순위 재조정
대출 프로그램국(LPO)	재생에너지, 배터리, 수소 등 청정 기술에 대한 연방 대출 및 보증을 통해 민간 투자 유도	특정 산업에 대한 보조금성 대출 제한, 민간 시장 원리에 따른 금융 지원 체계 재편

조직명	주요 기능	개편 방향
화석에너지·탄소관리국 (FECM)	화석연료 기술개발, 탄소포집(CCUS), 메탄 저감 관련 정책과 연구 수행	감축 위주의 기조에서 벗어나, 에너지 자립과 전략 자산화 관점에서의 재정확화
정책국(Policy Office)	DOE 내 정책 방향 설정, 부처간 조정 및 전략 문서 수립	정치적 개입 최소화, 실증· 성과 중심의 정책 수립, 전략 연계 강화
청정에너지 시범사무국 (OCED)	수소허브, CCUS 등 대형 실증 프로젝트 자금 집행과 조정 기능 수행	대규모 보조금 기반 구조 개편, 실증 우선 순위 정비, 민간 실현 가능성 기준으로 사업 구조화
송전망 배치국(GDO)	국가 전력망 투자 조정, 송전망 확장 프로젝트 지원 및 민간 유치 조정	민간 중심 투자 촉진 구조로 전환. 연방정부 단독 주도 축소 및 시장 원리 기반 인프라 개발
청정에너지단 (Clean Energy Corps)	DOE 내 신기후 인력 확대 및 채용 프로그램	정치화된 고용 구조 비판. 필요 인력에 따라 구조 축소 또는 폐지 검토
연방에너지관리프로그램 (FEMP)	연방 공공건물의 에너지 효율 및 지속가능성 향상 지원 프로그램	성과 기반 개보수, 탄소중립보다 실질 효율 중심 개편
국제협력국(IA)	에너지 외교, 다자간 에너지협력, 국제 기술·정책 협정 담당	중국, 러시아 등 전략경쟁 대응을 위한 자원 외교 재정비 및 에너지 동맹 중심으로 전환
민간방사성폐기물관리국 (OCRWM)	고준위 방사성폐기물의 민간 저장·처분 정책(현재 활동 정지)	사용후핵연료 정책 재정비 필요에 따라 기능 재가동 및 연방 처리 재개 검토

3. 본론(제13장 환경보호청)

미국 환경 보호청(EPA)은 깨끗한 공기, 물, 토양을 보장하고, 국민 건강과 환경을 동시에 보호하는 것을 임무로 한다. 이는 오직 명확한 법률, 입증 가능한 과학, 예측 가능한 규제 틀 안에서 실현될 수 있다. 현재까지 EPA가 수행해 온 광범위한 규제 활동과 정책 확대에 대한 점검을 통하여 상당한 구조 조정과 간소화가 필요하다.

- 주정부 리더십: EPA는 주 및 지방 공무원과 진지한 관계를 구축하고 자원과 전문 지식을 공유함으로써 보다 지원적인 역할을 맡아야 한다.
- 책임 있는 진전: 규제 노력은 공기, 물, 토양을 정화하기 위한 실용적이고 비용 효율적이며 저렴한 솔루션을 통해 실질적인 환경 문제를 해결하는 데 초점을 맞춰야 하며, 그 결과는 대중이 이용할 수 있는 간단한 측정 기준으로 측정하고 추적하여야 한다.
- 간소화된 프로세스: 기관의 임무를 실질적으로 지원하지 않는 중복, 낭비 또는 불필요한 프로그램은 제거되어야 하며, 공중 보건과 환경을 보호하는 데 있어 주 및 지방 정부를 지원할 수 있는 구조화된 관리 프로그램이 설계되어야 한다.
- 건강하고 번영하는 지역사회: EPA는 지역 사회의 번영을 위해 지역 사회 활동의 경제적 비용을 가능한 한 많이 고려하고 줄여야 한다.
- 법 시행 전 준수: EPA는 규제를 받는 커뮤니티, 특히 소규모 기업과의 협력 관계를 조성하여 집행보다는 준수를 장려하여야 한다.
- 투명한 과학 및 규제 분석: EPA는 규제 의사결정을 뒷받침하는 모든 과학적 연구 및 분석을 공개하고 의견을 제시하여야 한다.

1) EPA 행정관 사무실

환경보호청(EPA)의 행정관 사무실(Office of the Administrator)은 기관의 정책 방향성과 전략 우선순위를 설정하는 핵심 리더십 조직이다. 본래는 규제 기준 간 조율, 과학적 근거 기반 정책 조정, 산업계 의견 수렴 등을 총괄하는 기능 중심의 부서였으나, 최근에는 기후정의(climate justice), 다양성·형평성(DEI) 등 비환경적 가치와 정치적 메시지를 중심으로 운영되고 있다는 비판이 제기된다. 『Mandate』는 이러한 경향이 과학 기반 행정의 일관성과 규제 설계의 기술적 실현성을 저해한다고 본다. 따라서 행정관 사무실은 다시금 환경 기준의 과학적 정합성, 기술 가능성, 경제적 영향 분석을 중심으로 한 실무형 전략 조정 기능에 집중해야 하며, 대통령령 또는 사회적 운동에서 비롯된 개념이 아닌, 입법 기반과 기술 사실에 따른 행정 판단이 우선되어야 한다고 강조한다. 또한 정무직 중심 운영에서 경력직 전문가의 비중을 확대함으로써 정책의 연속성과 전문성을 강화해야 한다는 점도 함께 제안된다. 환경보호청 관련 조직에 대한 개편 방향은 아래와 같다.

환경보호청 관련 주요 조직 제도 개편 내용을 요약하였다.

조직 항목	주요 기능	개편 방향
수질담당국(OW)	• 인간의 건강을 보호하고 경제 활동을 지원하며 어류, 식물 및 야생 동물에게 건강한 서식지를 위한 안전한 식수를 보장하고 바다, 유역 및 수생 생태계를 복원 및 유지 관리	• 현재 “심의”의 지침에 대한 의존을 규정화하여 지침에 대한 투명성과 올바른 거버넌스를 보장 • 법정 기한 준수
토지 및 비상 관리국(OLEM)	• 다른 연방 기관, 주, 부족, 지방 정부 및 지역 사회와 협력하여 기존 오염을 제거하고 재사용을 위해 토지를 활성화	• 자연 정화의 실행에 대한 정책 수립보다 프로젝트 관리에 중점 • 모든 권한을 지역 관리자에게 직접 위임하는 대신 보조 관리자에게 관리 위임
항공 및 방사선국(OAR)	• 대기 오염과 방사선 노출을 통제하기 위한 국가 프로그램, 정책 및 규정을 개발	• 일관되고 투명한 비용 고려를 보장하는 규칙을 제정 • 합리적으로 사용 가능한 제어 기술 (RACT) 비용 지침을 개발하여 정확한 항공 규칙 구현 및 준수 비용을 포함한 실제 규제 부담을 반영
아메리카 인디언 사무국(AIO)	• 인디언 국가 간의 주권 대 주권 관계로 인해 이 법안의 목적은 부족들이 개발과 자체 부족 환경 보호 프로그램 관리	• 독립적인 사무국으로 크게 격상 필요

2) 국가 대기질 표준 개편(National Ambient Air Quality Standards, NAAQS)

국가 대기질 표준(NAAQS)은 미세먼지(PM2.5), 오존, 이산화질소 등 여섯 가지 주요 대기오염물질에 대해 국민 건강 보호를 목적으로 설정되는 연방 기준이다. 해당 기준은 산업계, 지방정부, 환경단체에 있어 규제의 핵심 지표로 작용하며, 대기질 개선과 정책 집행의 직접적인 근거가 된다. 이 기준이 과학적 근거보다는 정치적·이념적 목표에 따라 자주 변경되고 있으며, 기준 강화 시 기술 실현 가능성 및 경제적 영향을 충분히 고려하지 않는다는 점을 문제로 지적한다. 보고서는 기준 설정 시 정량적 건강 영향 분석과 비용-편익 평가를 의무화하고, 기준 개정 주기를 안정적으로 유지함으로써 예측 가능성과 신뢰성을 확보할 것을 제안한다. 또한 지역별로 배경 오염 수준과 산업 구조가 상이한 점을 고려하여, 일률적 적용이 아닌 유연하고 단계적인 집행체계를 마련해야 한다는 점도 강조하고 있다. 이는 규제의 실효성과 현장 수용성을 동시에 제고하려는 전략적 접근이다.

환경보호청 관련 주요 제도의 개혁 추진 내용을 요약하였다.

제도 항목	개혁 추진 내용
기후변화	• 현재 규제되지 않는 배출원 카테고리에 대해 온실가스 보고 프로그램(Green House Gas Reporting Program: GHGRP) 제거 • 온실가스(GHG)에 대한 상당한 배출률(SER)을 설정
수소불화탄소(HFC) 규제	• 불필요하게 엄격하고 비용이 많이 드는 AIM법(미국 혁신 및 제조법) 규정 폐지 • 실제 소비자 경험을 반영하는 현실적인 비용 평가 수행
모빌리티 소스 규제	• 교통부(DOT) 관리하에 비용, 선택, 안전 및 국가 안보를 적절히 고려하는 온실가스 자동차 표준 수립 • 전기 자동차의 수명 주기 배출을 포함하고 모든 환경 영향 고려 • 업계에 상당한 비용이나 복잡한 부담을 주지 않으면서 배기가스 배출 감소 목표의 균형을 맞추기 위해 청정 트럭 이니셔티브(Clean Trucks Initiative) 추진
살충제(OPP)	• 통합 위험 정보 시스템(IRIS)과 같은 사전예방적, 위험 기반 접근 방식을 따르지 않고 위험 기반의 의사결정 추진 • 미국 제조업체의 경쟁력을 보장하기 위해 법적 요건에 따라 적시에 새로운 화학 물질 평가 수행 보장
연구 개발 사무국 (ORD) 및 관련 과학 활동	• 환경보호청(EPA)는 명확하고 현재 의회 승인하지 않은 진행 중이거나 계획된 과학 활동을 수행하지 않을 것임을 의회에게 공지 • 탄소의 사회적 비용 등 비현실적인 기후 시나리오 기반의 규제 사용 제외 • 신속한 개혁적 사고의 연구개발 담당 간사 지명
보조금 개혁	• 특정 기준을 초과하는 모든 보조금에 대해 일시 중지 및 검토 실시 • 가장 도움이 필요한 사람들과 환경을 실질적으로 개선할 프로젝트에 우선적으로 보조금을 분배하기 위해 보조금을 담당하는 정책 담당자를 지명 배치

부록

2025년 상반기
에너지 국민인식조사 결과보고서

01

조사 개요

1. 조사 결과 요약

1) 조사 개요

조사 기간: 2025년 3월 29일~4월 1일

조사 대상: 전국 16개 시·도 18세 이상 성인 남녀 2,000명(95% $\pm$ 2.2%p)

조사 방법: 유·무선 RDD를 통한 전화 조사(CATI)

조사 수행: ㈜코리아서치인터내셔널

2) 조사 설계

일반 국민 전화 조사 설계

구분	내용
조사 대상	만 18세 이상 일반 국민
조사 지역	전국 16개 시·도 *세종특별자치시의 경우 인구수가 적어 충청남도에 포함
표본 규모	2,000명
표본 배분	2025년 2월 말 기준 행정안전부의 「주민등록 인구통계」 기준 비례배분
표본 추출	1단계: 16개 시도별 층화 후, 인구 비례에 근거한 표본 할당 2단계: 성/연령별 인구 구성비에 근거한 비례 할당 3단계: 전화번호 무작위 추출 및 임의전화걸기(RDD)
조사 방법	유·무선 임의전화번호걸기(RDD: Random Digit Dialing)를 이용한 전화면접조사(CATI: Computer Aided Telephone Interview) 유선(10%) 무선(90%)
조사 기간	2025년 3월 29일~4월 1일

2025년 1분기 한국에너지정보문화재단 에너지 국민인식조사

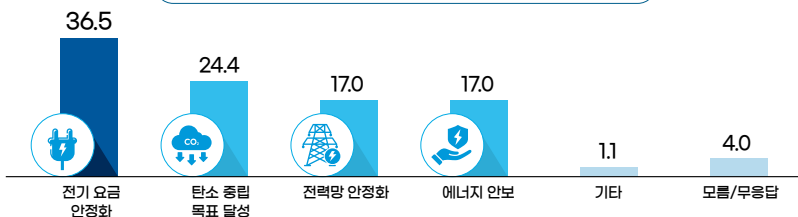


조사 대상	전국 만 18세 이상 일반국민
조사 기간	2025년 3월 29일~4월 1일
조사 방법	전화면접조사
조사 규모	2,000명
표본 오차	95% 신뢰수준이내 $\pm 2.2\%$ p
조사 수행	(주)코리아리서치인터내셔널



에너지 현안 (단위: %, n=2,000)

우리나라의 가장 큰 에너지 현안



탄소 중립 의제 인지도

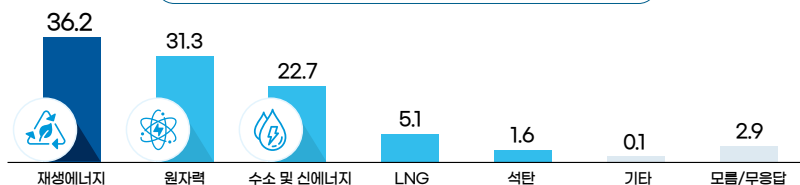


전력수급기본계획 (단위: %, n=2,000)

2038년 에너지원 발전량 비중 실현 가능성

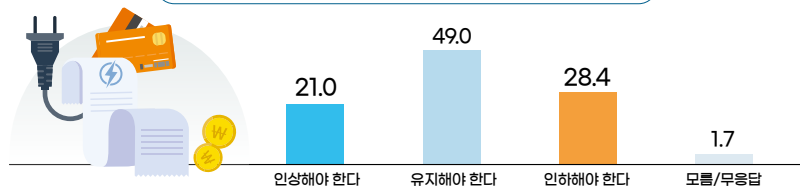


발전량 확대 필요 에너지원(1순위)



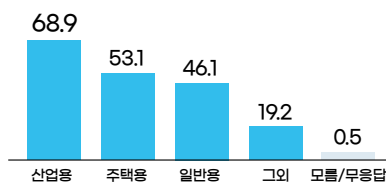
전기요금 (단위: %, n=2,000)

우리나라 전기요금 변화



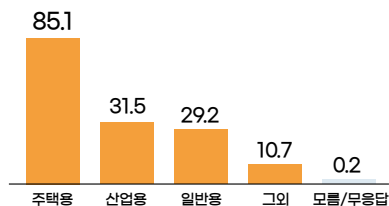
요금 인상되어야 하는 분야(복수응답)

(전기요금 인상 필요 응답자 n=420)



요금 인하되어야 하는 분야(복수응답)

(전기요금 인하 필요 응답자 n=567)



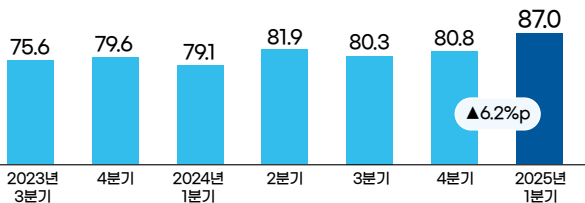
한국에너지정보문화재단
Korea Energy Information Culture Agency

원자력발전 및 현안 인식 (단위:%, n=2,000)

※매 분기별 사례수는 23년, 24년:1,000명, 25년:2,000명임

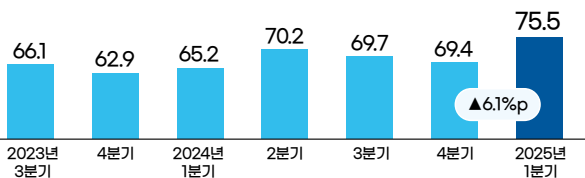
원자력발전 필요성

필요함



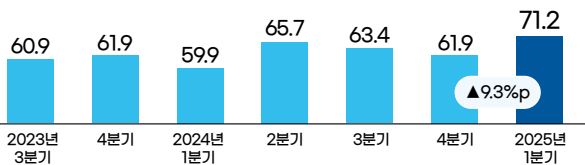
우리나라 원자력발전소 안전성

동의함



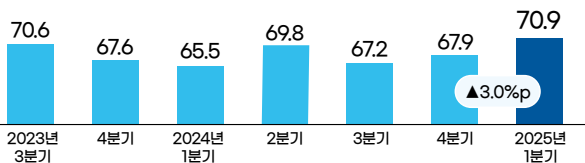
국내 원전 방사성폐기물 안전성

동의함



원자력발전소 계속운전

찬성함

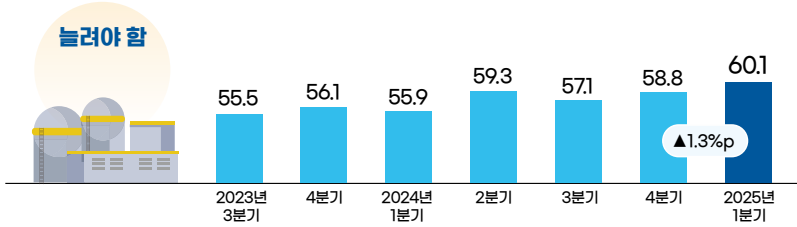


한국에너지정보문화재단
Korea Energy Information Culture Agency

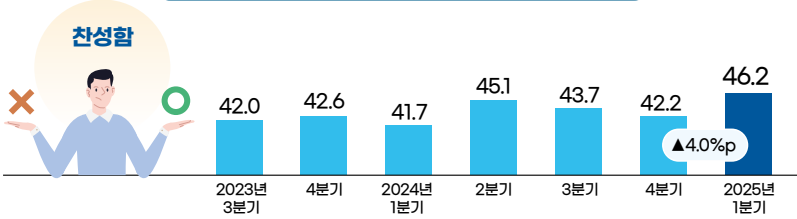
원자력발전 및 현안 인식 (타워·%, n=2,000)

※매 분기별 사례수는 23년, 24년:1,000명, 25년:2,000명임

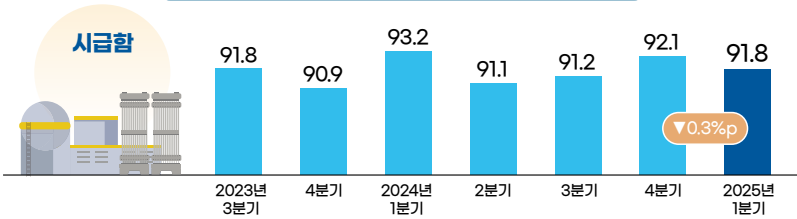
원자력발전량 증감



원자력발전소 거주지 수용성



고준위 방사성 폐기물 처분시설 시급성



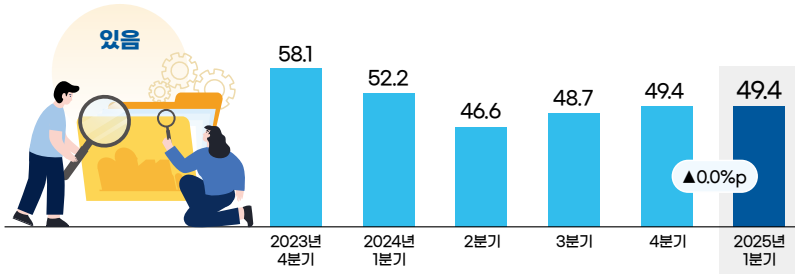
해외 원전사업이 국내 원전 산업 및 경제에 미치는 영향



원자력 정보 인지, 습득 (단위:%, n=2,000)

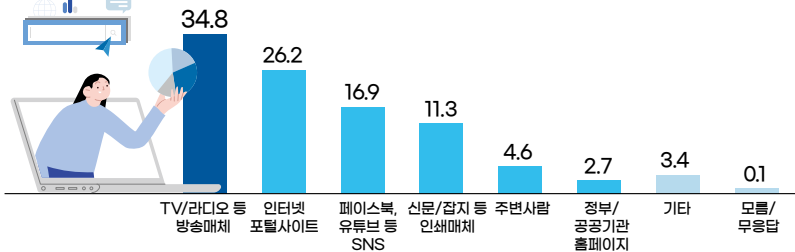
※매 분기별 사례수는 23년, 24년:1,000명, 25년:2,000명임

원자력발전 정보 습득 경험

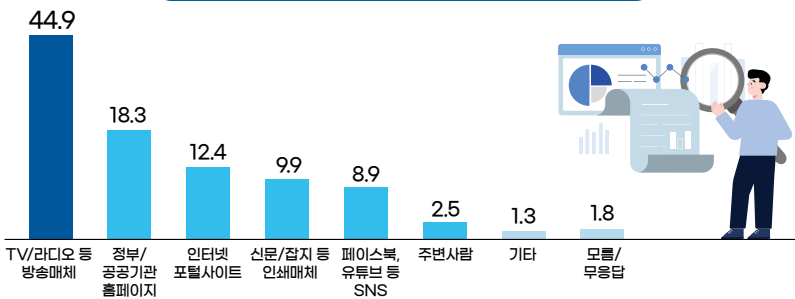


원자력발전 정보 습득 매체

(원자력발전 정보 습득 경험자 n=989)



에너지 정보 습득 신뢰 매체(1순위)



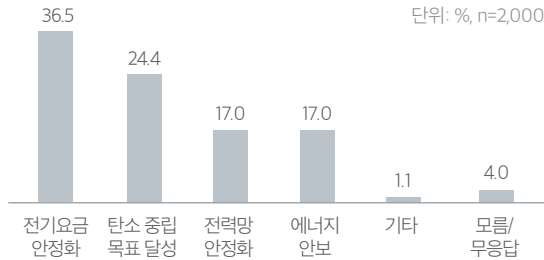
한국에너지정보문화재단
Korea Energy Information Culture Agency

1. 에너지 현안

우리나라에서는 '전기 요금 안정화'가 36.5%로 가장 큰 에너지 현안임

- 우리나라의 가장 큰 에너지 현안에 대해 '전기 요금 안정화'(36.5%), '탄소 중립 목표 달성'(24.4%), '전력망 안정화', '에너지 안보'(각 17.0%) 등의 순으로 나타남.

[그림 1]
에너지 현안

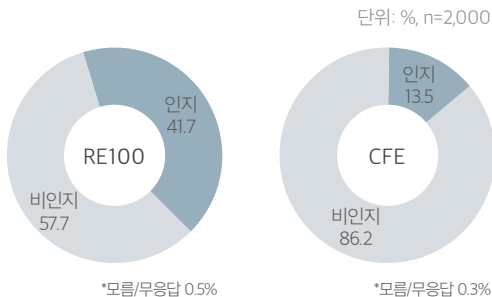


2. 탄소 중립 의제 인지도

탄소 중립 의제 중 'RE100'은 41.7%, 'CFE'는 13.5% 인지

- 탄소 중립 의제 중 RE100에 대해 '인지(잘+어느 정도 알고 있다)' 응답은 41.7%로 '비인지(전혀+잘 모르는 편이다)' 57.7%보다 낮게 나타남.
- CFE에 대해 '인지(잘+어느 정도 알고 있다)' 응답은 13.5%로 '비인지(전혀+잘 모르는 편이다)' 86.2%보다 낮게 나타남.

[그림 2]
탄소 중립 의제 인지도



3. 전력수급기본계획

산업통상자원부 공고 제2025-238호
(2025. 3. 13.)

제11차 전력수급기본계획 (2024~2038)

2025. 3. 13.

산업통상자원부

1. 전력수급기본계획 개요

① 수립관계 : 중장기 전력수요 전망 및 이에 따른 전력설비 확충을 위해 전기사업법 제25조 및 시행령 제15조에 따라 2년 주기로 수립

- 102년 7개년 전력수급기본계획을 시작으로, 5년마다 총 11차례 계획 수립

② 계획기간 : 15년 장기계획 (11차 계획기간 : '24~'38년)

③ 주요내용 : 전력수급의 기본방향, 장기 전력수급 전망, 발전 및 송·변전 설비계획, 수요관리, 지역 전기분 배계, 분산형전원 확대 등

④ 수립절차 : 실무단 마련(추진위원회) → 전략관측 기후변화영향평가, 관계부처 협의 → 공청회, 국회 심의와 보고 → 전력정책심의회 심의

< 추진 경과 >

- '23.7월 : 제11차 전력수급기본계획 전문가위원회 구성
- 중립위원회, 4개 소위 및 7개 워킹그룹 구성
- '23.7월~'24.5월 : 전문가위원회 운영 (총 8회 회차)
- '24.5월 : 제11차 전력수급기본계획 실무단 공개
- '24.6~9월 : 전략관측영향평가 및 기후변화영향평가 협의
- '24.9~10월 : 탄소중립녹색성장위원회 등 관계부처 협의
- '24.9월 : 공청회
- '25.2월 : 국회 산업통상자원중소벤처기업위원회 보고
- '25.2월 : 전력정책심의회 심의 확정

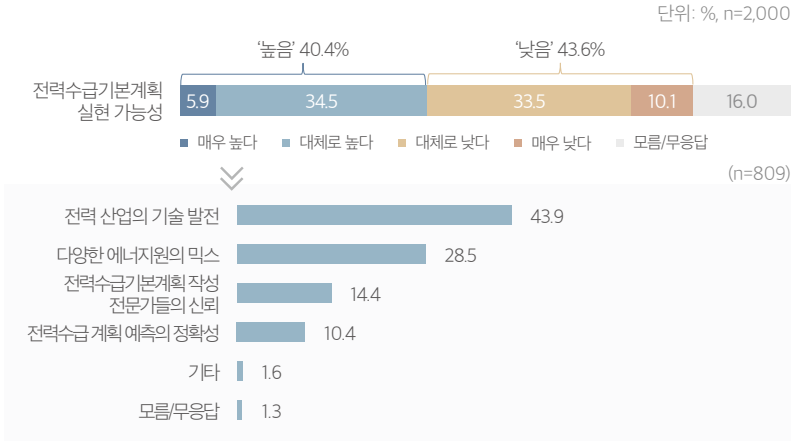
- 1 -

1) 실현 가능성이 높은 이유

전력수급기본계획은 '전력 산업의 기술 발전'(43.9%)의 이유로
실현 가능성이 높다고 나타남

- 2038년 에너지원 발전량 비중의 실현 가능성에 대해 '높음(매우+대체로 높다)' 응답은 40.4%로 나타남.
- 실현 가능성이 높은 이유로 '전력 산업의 기술 발전'(43.9%), '다양한 에너지원의 믹스'(28.5%), '전력수급기본계획 작성 전문가들의 신뢰'(14.4%) 등의 순으로 나타남.

[그림 3] 전력수급기본계획 실현 가능성이 높은 이유

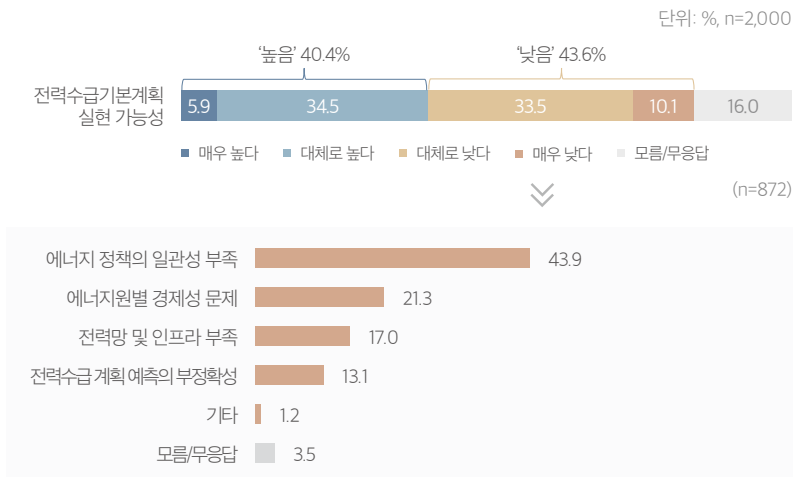


2) 실현 가능성이 낮은 이유

전력수급기본계획은 '에너지 정책의 일관성 부족'(43.9%)의 이유로 실현 가능성이 낮다고 나타남

- 2038년 에너지원 발전량 비중의 실현 가능성에 대해 '낮음(매우+대체로 낮다)' 응답은 43.6%로 나타남.
- 실현 가능성이 낮은 이유로 '에너지 정책의 일관성 부족'(43.9%), '에너지원별 경제성 문제' (21.3%), '전력망 및 인프라 부족'(17.0%) 등의 순으로 나타남.

[그림 4] 전력수급기본계획 실현 가능성이 낮은 이유

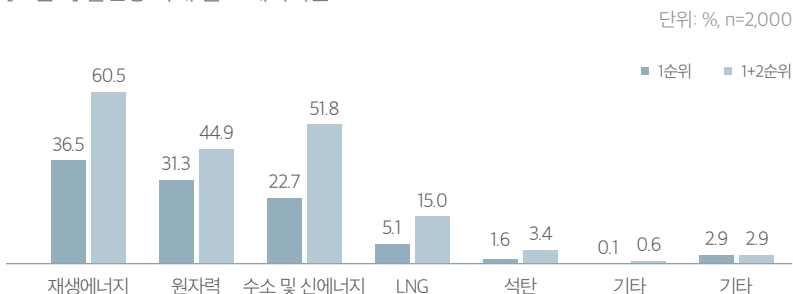


4. 발전량 확대 필요 에너지원

‘재생에너지’가 36.2%로 2038년 에너지별 발전량 비중과 관련하여 확대가 필요한 에너지원으로 나타남

- 2038년 에너지별 발전량 비중과 관련하여 확대가 필요한 에너지원에 대해 1순위 기준으로 ‘재생에너지’(36.2%), ‘원자력’(31.3%), ‘수소 및 신에너지’(22.7%) 등의 순으로 나타남.
- 종합순위(1+2순위) 기준으로는 ‘재생에너지’(60.5%), ‘수소 및 신에너지’(51.8%), ‘원자력’(44.9%) 등의 순으로 나타남.

[그림 5] 발전량 확대 필요 에너지원



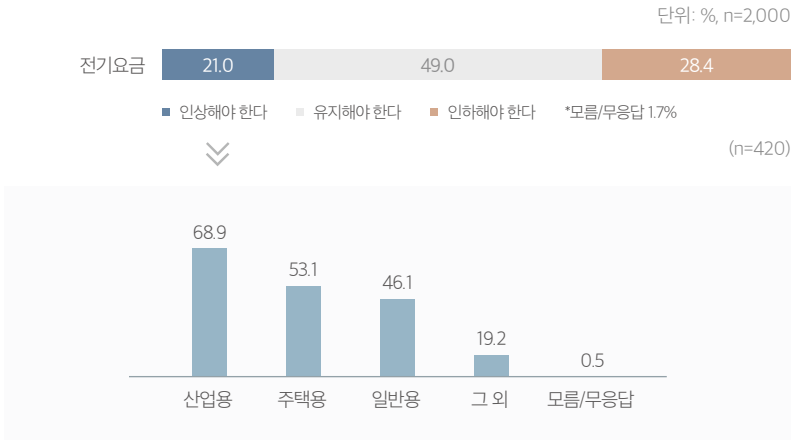
5. 전기요금

1) 요금이 인상되어야 하는 분야

우리나라의 전기요금 인상이 필요한 분야는 '산업용'(68.9%)으로 나타남

- 우리나라 전기요금에 대해 '인상해야 한다' 응답은 21.0%로 나타남.
- 전기요금이 인상되어야 하는 분야로 '산업용'(68.9%), '주택용'(53.1%), '일반용'(46.1%) 순으로 나타남.

[그림 6] 전기요금이 인상되어야 하는 분야

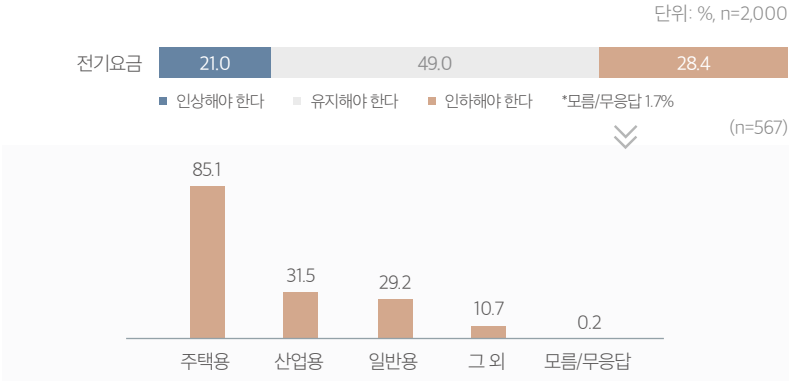


2) 요금이 인하되어야 하는 분야

우리나라의 전기요금 인하가 필요한 분야는 '주택용'(85.1%)으로 나타남

- 우리나라 전기요금에 대해 '인하해야 한다' 응답은 28.4%로 나타남.
- 전기요금이 인하되어야 하는 분야로 '주택용'(85.1%), '산업용'(31.5%), '일반용'(29.2%) 순으로 나타남.

[그림 7] 전기요금이 인하되어야 하는 분야

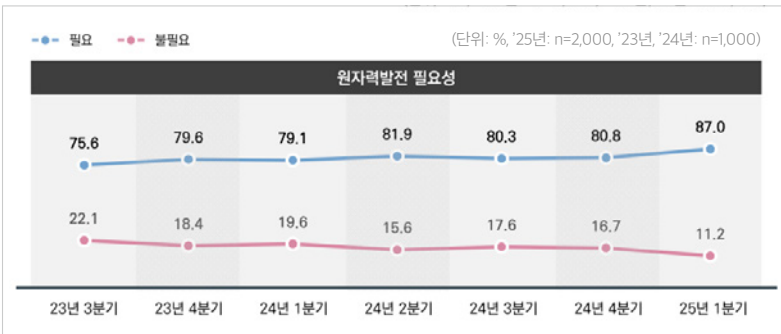


6. 원자력 발전 필요성

일반국민 10명 중 8명이 원자력 발전이 필요하다고 응답함

- 원자력 발전 필요성에 대해 ‘필요함(매우+어느 정도 필요한 편이다)’ 응답은 87.0%로 ‘필요하지 않음(전혀+별로 필요하지 않은 편이다)’ 11.2%보다 높게 나타남.
- ‘필요함’ 응답은 24년 4분기(80.8%) 대비 6.2%p 증가하고 2023년부터 전반적으로 상승하는 경향을 보이며, ‘필요하지 않음’ 응답은 24년 4분기(16.7%) 대비 5.5%p 감소함.

[그림 8] 원자력 발전 필요성 분기별 추이



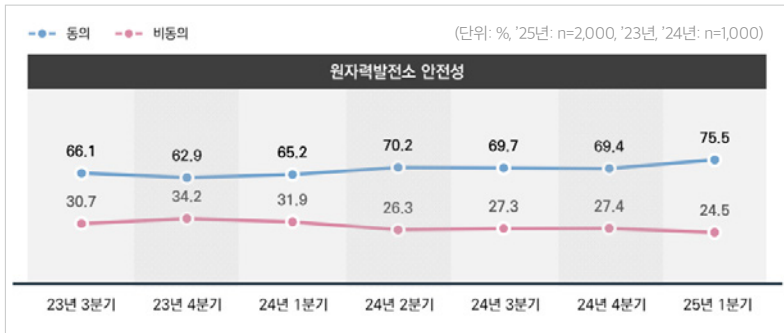
7. 우리나라 원자력 발전 안전성

1) 원자력발전소가 안전하다고 생각하는 이유

‘기술 전반에 대해 신뢰할 수 있어서’라는 이유로 일반국민의 75.5%가 우리나라 원자력발전소는 안전하다는 주장에 동의함

- 원자력발전소가 안전한지에 대해 ‘동의함(매우+동의한다)’ 응답은 75.5%로 ‘동의하지 않음’ (24.5%)보다 높게 나타났으며, 24년 4분기(69.4%) 대비 6.1%p 증가함.

[그림 9] 우리나라 원자력발전소 안전성 분기별 추이



- 원자력발전소가 안전하다고 생각하는 이유(1순위)로 ‘설계·건설·운영 등 기술 전반에 대해 신뢰할 수 있어서’(37.6%)가 가장 높게 나타남.

[표 1] 원자력발전소가 안전하다고 생각하는 이유(1순위) 분기별 비교

단위: 명, %

구분	23년 3분기	23년 4분기	24년 1분기	24년 2분기	24년 3분기	24년 4분기	25년 1분기
사례수	(661)	(629)	(652)	(702)	(697)	(694)	(1,510)
설계·건설·운영 등 기술 전반에 대해 신뢰할 수 있어서	38.9	36.7	37.9	38.5	36.6	37.4	37.6
전 세계적으로 이미 운전 중이어서	19.8	21.9	19.3	21.2	20.8	21.0	22.6
정부 및 규제기관이 철저하게 안전관리를 하고 있어서	19.1	19.7	22.1	20.4	21.3	21.6	20.7
전문가나 관련 종사자들이 안전하다고 해서	18.8	17.4	18.2	17.9	19.2	18.7	17.0
기타	1.3	2.4	1.3	0.8	0.9	0.8	0.7
모름/무응답	-	-	-	-	-	-	1.5

2) 원자력발전소가 안전하지 않다고 생각하는 이유

‘예상 외의 사고가 우려되어서’라는 이유로 일반국민의 24.5%가 우리나라 원자력발전소는 안전하다는 주장에 동의하지 않음

- 원자력발전소가 안전한지에 대해 ‘동의하지 않음(매우+동의하지 않는다)’ 응답은 24.5%로 24년 4분기(27.4%) 대비 2.9%p 감소함.
- 원자력발전소가 안전하지 않다고 생각하는 이유(1순위)로 ‘설계·건설·운영 등 기술 전반에 대해 신뢰할 수 있어서’(37.6%), ‘전 세계적으로 이미 운전중이어서’(22.6%), ‘정부 및 규제기관이 철저하게 안전관리를 하고 있어서’(20.7%) 등의 순으로 나타남.

[표 2] 원자력발전소가 안전하지 않다고 생각하는 이유(1순위) 분기별 비교

단위: 명, %

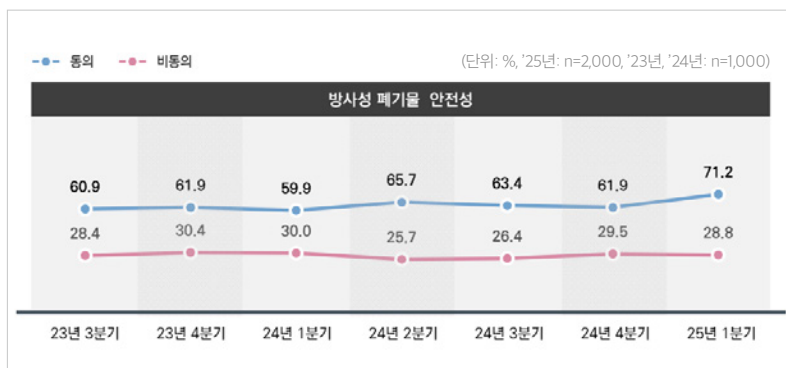
구분	23년 3분기	23년 4분기	24년 1분기	24년 2분기	24년 3분기	24년 4분기	25년 1분기
사례수	(307)	(342)	(319)	(263)	(273)	(274)	(490)
예상 외의 사고가 우려되어서	57.6	59.1	62.3	57.9	57.8	56.1	54.1
안전하게 관리할 수 있는 기술이 부족하다고 생각해서	21.0	16.1	19.0	20.2	18.1	18.1	17.6
연구자 및 기술자의 운영 오류가 우려되어서	10.5	12.0	11.0	13.6	11.7	13.4	16.1
언론, 온라인매체, 영화 등에서 위험하다고 해서	5.9	8.4	5.3	5.8	7.5	8.3	7.1
기타	3.8	3.1	2.2	1.4	4.7	3.0	3.2
모름/무응답	-	-	-	-	-	-	2.0

8. 국내 원전 방사성폐기물 안전성

일반국민의 71.2%가 국내 원전 방사성폐기물은
안전하게 관리되고 있다는 주장에 동의함

- 국내 원전 방사성폐기물은 안전하게 관리되고 있는지에 대해 ‘동의함(매우+동의한다)’ 응답은 71.2%로 ‘동의하지 않음(매우+동의하지 않는다)’ 28.8%보다 높게 나타남.
- ‘동의함’ 응답은 24년 4분기(61.9%) 대비 9.3%p 증가하였으며, ‘동의하지 않음’ 응답은 24년 4분기(29.5%) 대비 0.7%p 감소함.

[그림 10] 국내 원전 방사성폐기물 안전성 분기별 추이

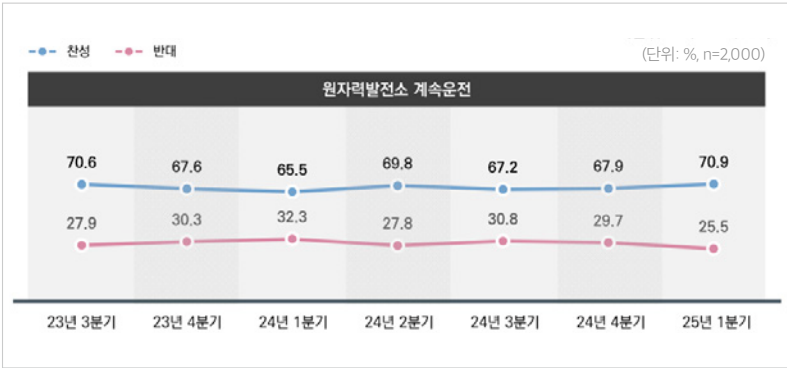


9. 원자력발전소 계속운전

일반국민의 10명 중 7명은 우리나라 원전 계속운전에 찬성함

- 원전 계속운전에 대해 ‘찬성(적극+대체로 찬성한다)’ 응답은 70.9%로 ‘반대(적극+대체로 반대한다)’ 25.5%보다 45.4%p 높게 나타남.
- ‘찬성’ 응답은 24년 4분기(67.9%) 대비 3.0%p 증가하였으며, ‘반대’ 응답은 24년 4분기(29.7%) 대비 4.2%p 감소함.

[그림 11] 원자력발전소 계속운전 분기별 추이

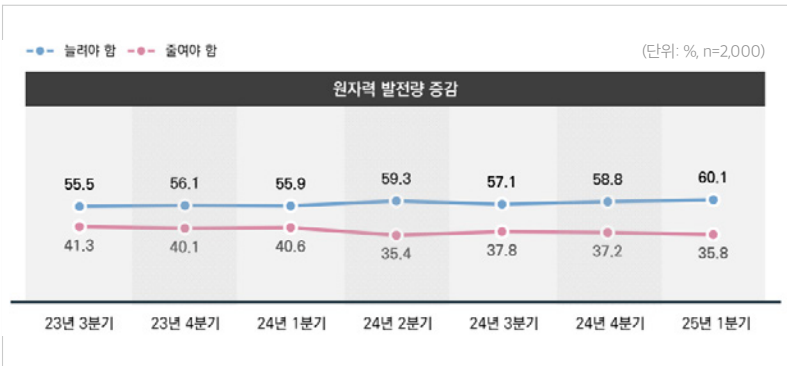


10. 원자력 발전량 증감

국내 원자력 발전량에 대해서 60.1%가 현재보다 늘려야 한다고 응답함

- 원자력 발전량에 대해 ‘늘려야 함(훨씬+약간 늘려야한다)’ 응답은 60.1%로 ‘줄여야 함(훨씬+ 약간 줄여야한다)’ 35.8%보다 높게 나타남.
- ‘늘려야 함’ 응답은 24년 4분기(58.8%) 대비 1.3%p 증가하였으며, ‘반대’ 응답은 24년 4분기 (37.2%) 대비 1.4%p 감소함.

[그림 12] 원자력 발전량 증감 분기별 추이



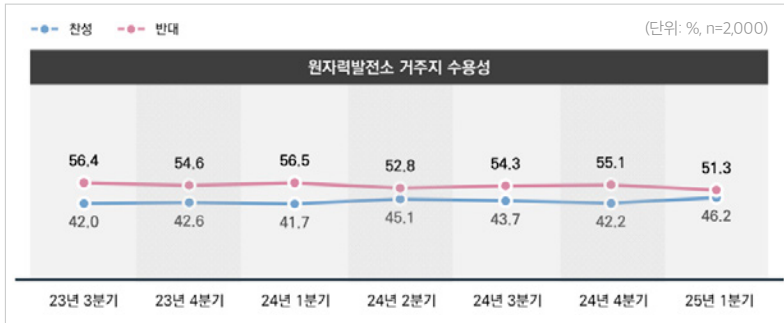
11. 원자력발전소 거주지 수용성

1) 원자력발전소 건설 찬성 이유

거주하는 지역에 원자력발전소 건설은 '에너지 자립을 위해 필요하다고
생각해서'(48.0%)라는 이유로 찬성함

- 원전 거주지 수용성에 대해 '찬성(적극+대체로 찬성할 것이다)' 응답은 46.2%로 24년 4분기 (42.2%)보다 4.0%p 증가함.

[그림 13] 원자력발전소 거주지 수용성 분기별 추이



- 원자력발전소 건설에 찬성하는 이유(1순위)로 '에너지 자립을 위해 필요하다고
생각해서'(48.0%)가 가장 높게 나타남.

[표 3] 원자력발전소 건설 찬성 이유(1순위) 분기별 비교

단위: 명, %

항목	23년 3분기	23년 4분기	24년 1분기	24년 2분기	24년 3분기	24년 4분기	25년 1분기
사례수	(420)	(426)	(417)	(451)	(437)	(422)	(925)
에너지 자립을 위해 필요하다고 생각해서	51.1	54.7	54.7	54.2	54.8	55.5	48.0
지역 경제 및 산업 활성화	23.1	21.0	19.4	21.9	23.6	22.2	25.8
인구 유입 및 일자리 창출	16.3	15.4	17.7	13.7	14.8	15.9	17.7
지역주민에 대한 보상	6.0	5.9	4.6	5.8	5.1	4.7	6.0
기타	2.1	1.9	2.5	2.6	1.0	1.3	2.0
모름/무응답	-	-	-	-	-	-	0.5

2) 원자력발전소 건설 반대 이유

거주하는 지역에 원자력발전소 건설은 ‘방사능 노출 위험이 우려되어서’(60.0%)라는 이유로 반대함

- 원전 거주지 수용성에 대해 ‘반대(적극+대체로 반대할 것이다)’ 응답은 51.3%로 ‘찬성’(46.2%)보다 높게 나타났으며, 24년 4분기(55.1%)보다 3.8%p 감소함.
- 원자력발전소 건설에 반대하는 이유(1순위)로 ‘방사능 노출 위험이 우려되어서’(60.0%), ‘원전 건설에 따른 환경훼손 등이 우려되어서’(23.6%), ‘지역발전 저해 및 재산가치 하락이 우려되어서’(9.2%) 등의 순으로 나타남.

[표 4] 원자력발전소 건설 반대 이유(1순위) 분기별 비교

단위: 명, %

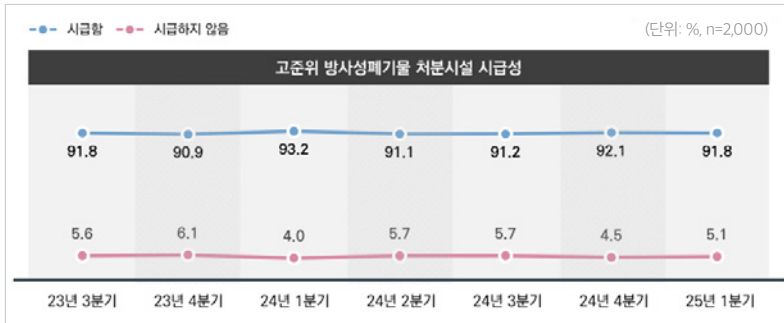
항목	23년 3분기	23년 4분기	24년 1분기	24년 2분기	24년 3분기	24년 4분기	25년 1분기
사례수	(564)	(546)	(565)	(528)	(528)	(551)	(1,026)
방사능 노출 위험이 우려되어서	59.0	59.5	62.1	59.2	59.2	57.0	60.0
원전 건설에 따른 환경훼손 등이 우려되어서	22.9	23.6	24.0	24.4	24.4	26.3	23.6
지역발전 저해 및 재산가치 하락이 우려되어서	8.9	9.3	7.6	10.2	9.4	9.6	9.2
생명에 대한 피해가 우려되어서	2.8	3.1	2.3	3.4	3.6	3.1	4.0
기타	5.6	3.8	3.3	2.0	2.0	2.6	2.5
모름/무응답	-	-	-	-	-	-	0.8

12. 고준위 방사성폐기물 처분시설 시급성

고준위 방사성폐기물 처분시설 마련에 대해 91.8%가 시급하다고 나타남

- 고준위 방사성폐기물 처분시설 마련에 대해 ‘시급함(훨씬+약간 늘려야한다)’ 응답은 91.8%로 ‘시급하지 않음(훨씬+약간 줄여야한다)’ 5.1%보다 높게 나타남.
- ‘시급함’ 응답은 24년 4분기(92.1%) 대비 0.3%p 감소하고 24년 2분기부터 꾸준히 상승하는 경향을 보이며, ‘시급하지 않음’ 응답은 24년 4분기(4.5%) 대비 0.6%p 증가함.

[그림 14] 고준위 방사성폐기물 처분시설 시급성 분기별 추이

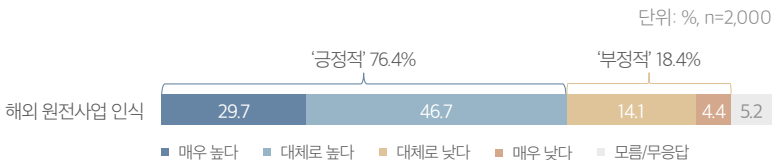


13. 해외 원전사업 인식

일반국민 대부분이 해외 원전사업은 국내 원전 산업 및 경제에 긍정적인 영향을 미칠 것이라고 응답함

- 해외 원전사업에 대해 ‘긍정적(매우+대체로 긍정적이다)’ 응답은 76.4%로 ‘부정적(매우+대체로 부정적이다)’ 18.4%보다 높게 나타남.

[그림 15] 해외 원전사업 인식

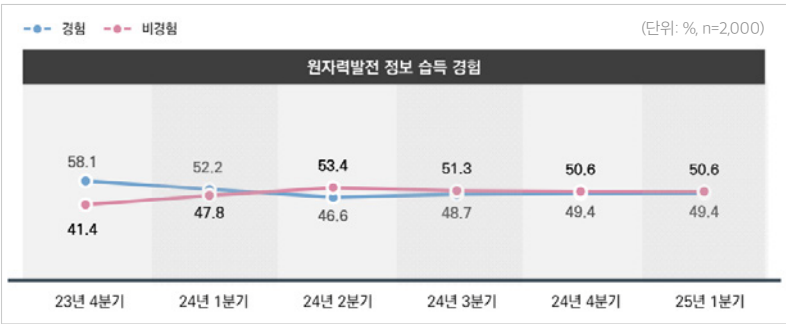


14. 원자력 발전 정보 습득 경험/매체/주제

최근 1년간 ‘방송매체’를 통해 원자력 발전 정보를 습득하고
주로 ‘기후위기 및 탄소중립 관련’ 주제를 접한 것으로 나타남

- 원자력 발전 정보 습득에 대해 ‘경험’ 응답은 49.4%로 ‘비경험’ 50.6%보다 1.2% 낮게 나타남.

[그림 16] 원자력 발전 정보 습득 경험 분기별 추이



- 원자력 발전 정보 매체에 대해 ‘TV/라디오 등 방송매체(34.8%), 인터넷 포털사이트(26.2%), 페이스북, 유튜브 등 SNS(16.9%)’ 등의 순으로 나타남.

[표 5] 원자력 관련 정보 습득 매체 분기별 추이

단위: 명, %

항목	24년 1분기	24년 2분기	24년 3분기	24년 4분기	25년 1분기
사례수	(522)	(466)	(487)	(494)	(989)
TV/라디오 등 방송매체	34.6	37.0	36.0	41.1	34.8
인터넷 포털사이트	28.3	27.2	28.2	21.7	26.2
페이스북, 유튜브 등 SNS	18.6	15.0	15.8	16.7	16.9
신문/잡지 등 인쇄매체	8.3	9.2	7.9	9.3	11.3
주변 사람	3.9	3.5	5.0	5.2	4.6
정부/공공기관 홈페이지	2.6	2.7	1.8	2.4	2.7
기타	3.4	5.2	4.3	3.4	3.4
모름/무응답	-	-	-	-	0.1

- 원자력 발전 습득 정보 주제에 대해 ‘에너지 공급 안정화 관련’(26.4%), ‘기후위기 및 탄소중립 관련’(21.4%), ‘원자력 발전 확대 관련’(19.7%) 등의 순으로 나타남.

[표 6] 원자력 관련 정보 습득 매체 분기별 추이

단위: 명, %

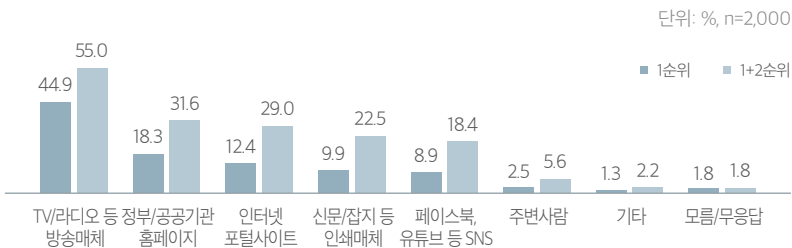
항목	24년 1분기	24년 2분기	24년 3분기	24년 4분기	25년 1분기
사례수	(522)	(466)	(487)	(494)	(989)
에너지 공급 안정화 관련	18.1	19.0	19.9	21.0	26.4
기후위기 및 탄소중립 관련	33.6	32.0	30.2	29.1	21.4
원자력 발전 확대 관련	10.7	10.7	11.7	13.7	19.7
사용후 핵연료 처리 관련	20.5	21.9	18.9	17.5	18.5
원자력산업 및 기술 관련	14.0	13.0	15.6	15.3	11.1
기타	2.2	1.0	2.4	1.9	1.8
모름/무응답	-	-	-	-	1.1

15. 에너지 정보 습득 신뢰 매체

‘TV/라디오 등 방송매체’를 통해 에너지 정보를 얻는 것이
가장 신뢰하고 있는 것으로 나타남

- 에너지 정보 습득 신뢰 매체에 대해 1순위와 종합순위(1+2순위) 모두 ‘TV/라디오 등 방송매체’ (1순위:44.9%, 종합순위:55.0%), ‘정부/공공기관 홈페이지’(1순위:18.3%, 종합순위:31.6%), ‘인터넷 포털사이트’(1순위:12.4%, 종합순위:29.0%) 등의 순으로 나타남.

[그림 17] 에너지 정보 습득 신뢰 매체



함께 만드는 에너지 이야기

발행일	2025년 6월 30일
발행처	한국에너지정보문화재단 02)859-0011 www.e-policy.or.kr
디자인, 제작	소나기크리에이티브 주식회사 http://sonagicreative.com
ISBN	979-11-966940-4-3

ENERGY

함께 만드는 에너지 이야기



한국에너지정보문화재단
Korea Energy Information Culture Agency