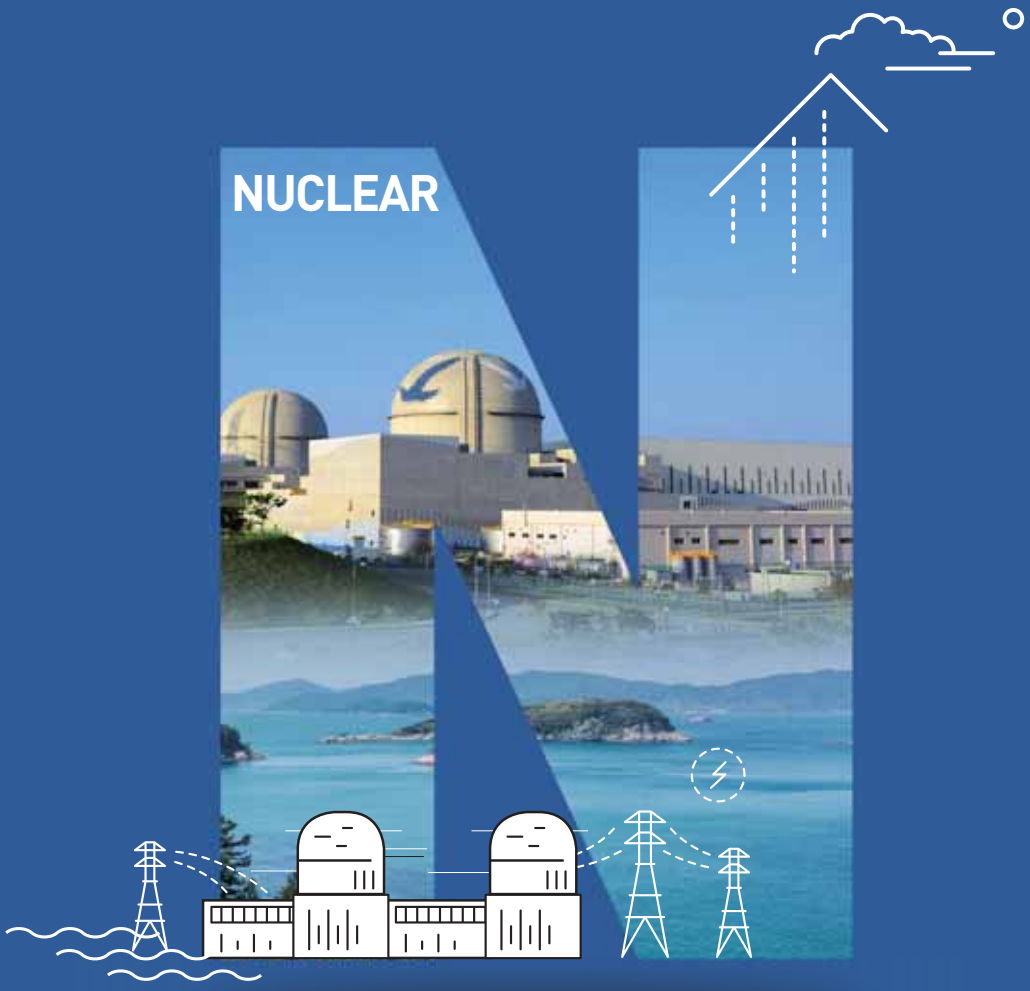
2024-1

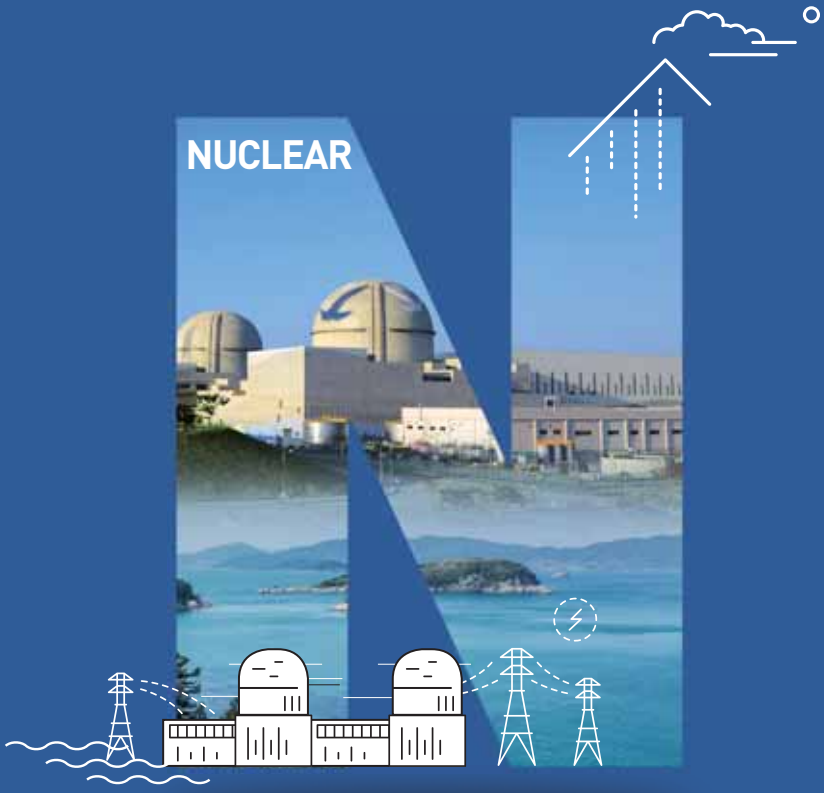
알기 쉬운 에너지·원자력



KEIA 한국에너지정보문화재단
Korea Energy Infomation Culture Agency

2024-1

알기 쉬운
에너지·원자력



KEIA 한국에너지정보문화재단
Korea Energy Infomation Culture Agency

CONTENTS

004

머리말

1

006

IEA의 세계 에너지 시장 현황과 전망(2023)

조일현
에너지경제연구원 연구실장

정귀희
에너지경제연구원 전문원

2

030

인공지능, 원자력, 무탄소 에너지 100%(CF100)

정용훈
카이스트 원자력및양자공학과 교수

3

054

원자력발전의 경제성

이만기
서울대 원자력정책센터 연구위원

4

080

탄소 중립의 매력적인 대안, 소형모듈원전(SMR)

이종호
서울대 원자력정책센터 책임연구원

5

100

원전산업의 발전을 위한 담론 '원전 수출과 SMR을 중심으로'

손금주
법무법인 율촌 변호사

2024-1

알기 쉬운
에너지·원자력 이슈

발행일 2024년 9월 12일

발행처 한국에너지정보문화재단
02) 859-0011
https://www.e-policy.or.kr

디자인 방형식디자인
인쇄 02) 2082-6388

6

122

아랍에미리트연합국(UAE) 원자력 정책 동향 및 제언

연승모
KAIST 원자력및양자공학과 박사과정

7

150

원전민간환경감시기구 :
프랑스 지역정보위원회가 주는 시사점을 중심으로

김슬아
법무법인 영민 변호사

8

176

사용후핵연료, 우리는 안전하게 관리할 수 있을까?

문종원
고려대학교 정치외교학과 학사과정

9

196

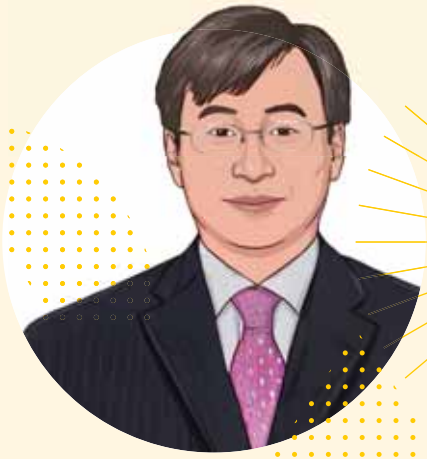
원자력발전, 오해와 진실

고범규
사실과 과학 네트웍 정책 기획본부장

부록

232

2024년 에너지 국민인식조사 결과보고서



기상이변 빈도의 증가, 우크라이나-러시아 전쟁 등 에너지 수급 여건이 급변하고 있으며, 에너지 정책 방향 설정의 불확실성이 더욱 높아지고 있는 시기입니다. 화석연료 소비의 축소와 에너지 안보 제고가 에너지정책의 확실한 목표라 할 수 있지만 이 두 가지 명제는 서로 대치된다고 할 수 있습니다. 경제적인 측면도 간과될 수 없습니다. 우·러간의 전쟁은 에너지수급 불안과 가격 급등 현상을 가져왔고 현재까지도 에너지 요금 인상의 압박요인이 되고 있습니다. 에너지 자급도가 매우 낮은 우리에게 있어서 에너지안보를 제고하고 무탄소에너지의 소비를 확대하며 에너지가격의 안정 요구 등의 미래에도 과제로 남을 것으로 생각됩니다. 이같은 목적에 부합하는 에너지 믹스를 찾는 것이 에너지 문제의 핵심일 수 있으며 원자력과 재생에너지가 유력한 대안이 될 것입니다.

이러한 시대적 요구를 반영하여 정부는 에너지안보 및 탄소중립 수단으로서 원전을 적극 활용하기로 했습니다. 이 결과로 제11차 전력수급기본계획에서는 이전 계획에 비해 원자력과 재생에너지의 비중을 확대하기로 했습니다.

또한 원전 건설·운영 기술을 수출산업화하기 위한 노력을 지속적으로 전개하여 우리나라가 체코 두코바니원전 5,6호기 건설의 우선협상대상국으로 선정되는 쾌거를 이루어 내기도 했습니다.

에너지정보문화재단은 에너지현안에 대한 올바른 지식과 정보를 국민들께 서비스하는 기관입니다. 이를 위하여 에너지 인식조사, 에너지시설 현장교육, 토론회·세미나 개최, 동영상 제작 등 다양한 방식의 사업을 수행하고 있습니다. 또한 에너지현안 이슈를 발굴하고 관련분야 전문가들과 협력하여 다양한 형태의 이슈페이퍼를 발간·배포하기도 합니다.

하지만 이러한 이슈페이퍼 발간 방식은 정보 제공자의 일방적인 지식 전달이라는 한계점이 있었습니다. 또 기존의 이슈페이퍼는 산발적 발간되어 자료로서 축적과 활용이 어려운 점도 있었습니다.

「알기쉬운 에너지·원자력 이슈」는 정보 소비자의 관점에서 알고 싶은 이슈와 내용을 자율적으로 정하는 방식의 이슈 모음집입니다. 주제는 되도록 원자력으로 한정되지 않도록 선정했고 에너지문제에 관심있는 일반인, 학생들도 참여할 수 있도록 필진을 개방했습니다. 이해하기 어려운 학술적 내용을 지양하고 정보 전달력 가중치를 높여 읽기 쉬운 자료자 작성될 수 있도록 했습니다.

공모에 응해 주신 모든 분들게 감사드리며, 제출 원고를 꼼꼼히 읽어주시고 평가해 주신 편집위원 여러분께도 깊은 감사를 드립니다. 「알기쉬운 에너지·원자력 이슈」는 정기간행물을 지향하고 있습니다. 다음 호는 더 개선된 모습의 이슈 모음집이 발간될 있도록 노력하겠습니다. 많은 분들의 조언과 투고를 기대합니다.

2024.7

에너지정보문화재단 원전소통지원센터장 노 동 석

IEA의 세계 에너지 시장 현황과 전망(2023)

국제에너지기구(International Energy Agency, IEA)는 세계적인 석유공급 부족과 석유 가격 폭등이 발생했던 제1차 석유파동 직후인 1974년 11월에 세계 석유 시장의 안정을 도모하고 석유공급 위기에 공동 대응하고자 설립된 국제기구이다.

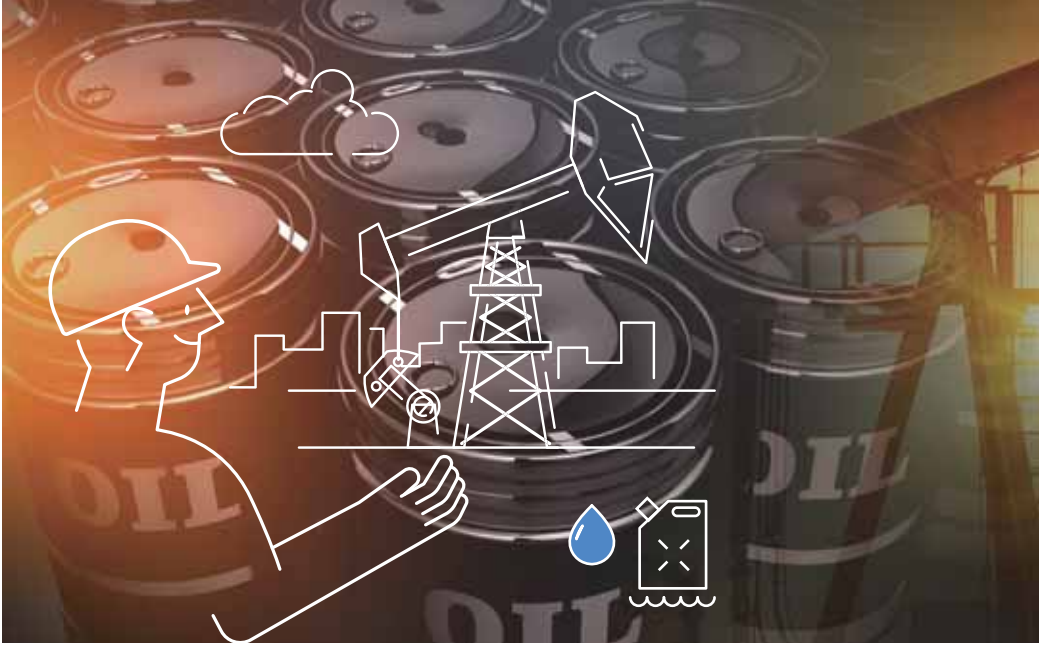
이에, 전세계 에너지시장의 IEA의 연례 보고서를 통한 현황과 전망에 대한 객관적인 사실을 전달하고 에너지·원자력 시장의 현황 및 전망을 알리고자 한다.

조일현

에너지
경제연구원
연구실장

정귀희

에너지
경제연구원
전문원



1. 서론

국제에너지기구(International Energy Agency, 이하 **IEA**)는 세계적인 석유공급 부족과 석유 가격 폭등이 발생했던 제1차 석유파동 직후인 1974년 11월에 세계 석유 시장의 안정을 도모하고 석유공급 위기에 공동 대응하고자 설립된 국제기구이다. 발족 초기 IEA 회원국은 미국, 영국, 캐나다, 스페인, 서독, 네덜란드, 일본 등 16개국이었으나, 현재는 31개국이 참여하고 있다.[1] IEA는 산유국의 이익을 대변하는 석유수출국기구(Organization of the Petroleum Exporting Countries, 이하 **OPEC**)에 대응하기 위해 주요 석유 소비국이 결성한 기구로서, 석유 위기에 대한 공동 대응에 초점을 두고, 에너지 시스템 합리화를 위한 정책권고와 협의, 에너지기술 연구·개발을 위한 국제협력 촉진에 주력해 왔다.[2] 또한, 석유뿐만 아니라 가스와 전력 등 에너지 전반에 걸친 공급 안정성 확보와 지속

1) IEA 홈페이지, https://www.iea.org/, 검색일(2024.6.1.)
2) 김정관, 「국제에너지기구(IEA)와 석유 시장 위기 대응능력 제고」, OECD Focus, 2024.7월

가능한 발전을 위한 에너지 시스템 추구를 도모해 왔다. 최근에는 청정에너지 전환으로 인해 청정기술, 핵심광물 등의 중요도가 높아짐에 따라 IEA의 활동영역이 꾸준히 확대되고 있다.[3)]

IEA는 회원국에 에너지 시스템의 모든 측면에 대한 깊이 있는 분석과 전략적 통찰을 제공하기 위해 석유, 가스, 석탄 등 화석연료에서부터 온실가스 배출량, 청정에너지 기술, 핵심광물 등에 이르는 다양한 보고서를 발간한다. 그 중 「세계에너지전망(World Energy Outlook, 이하 **WEO**)」은 IEA의 대표 보고서로서 에너지 분야에서 가장 권위 있는 분석 자료와 전망을 제공한다. WEO는 1998년부터 매년 발간되어 왔으며, 객관적인 자료와 중립적인 분석을 바탕으로 세계 에너지 수급을 전망하고, 이를 통해 에너지 안보, 기후변화 목표, 경제발전과 관련한 중요한 통찰력을 제공한다.

2023년 발간된 WEO(WEO-2023)는 세계 경제와 에너지 소비 구조의 변화에 따라 에너지 수요 충족 방식이 어떻게 변화되는지 탐색한다. 또한, 투자, 무역, 전기화, 에너지 접근성 등 주요 트렌드를 살펴보고, 이들이 미래 에너지 산업 구조 변화에 미치는 영향을 연구한다. WEO-2023은 이를 통해 정책 결정자들이 신속하고, 안전하며, 포용적인 에너지 전환을 추진할 수 있도록 가이드를 제공한다.

WEO-2023은 미래에 대한 하나의 관점을 제시하기보다, 정책 및 기술의 전개 방향에 따른 세 가지 시나리오를 바탕으로 전망한다.

---

3) 도현재, 「IEA 에너지협력 대응방안 연구」, 에너지경제연구원 정책연구보고서, 2004.12월

첫째, 2050 탄소중립 시나리오(Net Zero Emissions by 2050 Scenario, 이하 **NZE**)는 2100년 지구 온도 상승을 산업화 이전 대비 1.5℃ 이하로 제한하는 데 기여하는 에너지 부분의 경로를 보여준다.

둘째, 공약 달성 시나리오(Announced Pledges Scenario, 이하 **APS**)는 각국 정부가 선언한 에너지·기후 목표가 제때 완전히 달성될 것으로 가정한다.

셋째, 기존 정책 시나리오(Stated Policies Scenario, 이하 **STEPS**)는 지금의 정책 환경을 바탕으로 하며, 청정에너지 공급망을 지원하는 산업 정책 및 에너지·기후와 관련된 조치의 영향을 고려한다.[4)]

이에 IEA의 대표적인 연례 보고서인 WEO-2023을 통해 먼저 세계 에너지 부문 현황을 파악하고(2장), 이어서 2023년 세계 에너지 수요 및 각 시나리오별 전망을 살펴본다(3장). 마지막으로 현 에너지 시장에 대한 시사점으로 안전한 에너지 전환을 위해 필요한 조치를 정리하며(4장) 세계 에너지 시장의 현황과 전망에 대한 이해를 높이고자 한다.

2. 2023년 에너지 부문 현황과 진단[5)]

2023년에는 세계 에너지 위기가 일부 완화되었으나, 여전히 에너지 시장, 세계 경제는 불안정하다. 화석연료 가격은 2022년 기록한 최고치에서 떨어졌으나, 시장 긴장과 변동성은 높은 상황으로 러시아의 우크라이나 침공 이후 지속된 전쟁과 중동의 분쟁 위험도 있다.

인플레이션, 고금리, 높은 부채 수준으로 거시경제의 전망은 암울하다. 현재 세계 평균 온도는 이미 산업화 이전 대비 약 1.2℃ 높고,

4) IEA, World Energy Outlook 2023, 2023.10월
5) IEA, World Energy Outlook 2023 Chapter 1, 2023.10월

이로 인해 폭염 및 다른 이상기온 현상이 촉발되고 있으나 온실가스 배출량은 아직 정점에 이르지 않았다.

이 같은 상황에서도 태양광과 전기차가 견인하는 새로운 청정에너지 경제의 출현은 희망적이다. 청정에너지에 대한 투자는 2020년 이후 40% 증가했고 2023년 증설된 재생에너지 설비용량은 역대 최고 수준이다. 2022년에는 판매된 자동차 25대 중 1대가 전기차였으나, 2023년에는 5대 중 1대가 전기차였다. 태양광 보급에는 매일 10억 달러 이상이 투자되며, 태양광 모듈과 전기차 배터리와 같은 청정에너지 시스템의 핵심 부품 제조 용량은 빠르게 확대되고 있다.

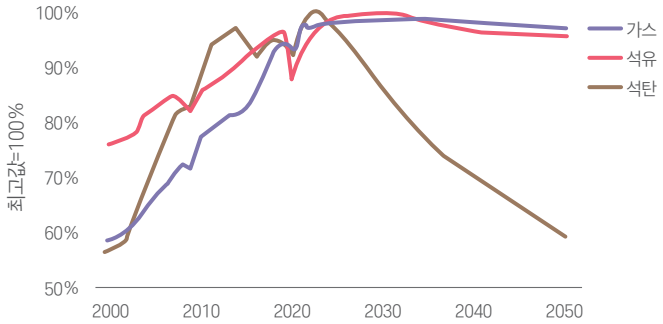
1) 화석연료 정점 도달

세계 에너지 위기로 인해 화석연료 수요가 정점에 도달하는 시기가 빨라졌다. STEPS에 따르면 현재 청정에너지로의 전환 모멘텀은 2030년 전에 세계 석탄, 석유, 가스 수요가 정점에 이르기에 충분하다. 세계 에너지 공급에서 석탄, 석유, 가스의 비중은 과거 수십 년간 약 80%로 유지되어 왔으나, 이제 하향 곡선을 그리기 시작해 2030년까지 73%로 감소할 것으로 전망된다.

세계 주요국에서 청정에너지 지원 정책이 빠르게 수립되고 있다. STEPS에서는 2030년 미국 내 신규 등록 차량의 50%가 전기차가 될 것으로 전망되는데, 2년 전 발간된 WEO-2021에서는 해당 수치는 12%에 불과했다. 그리고 STEPS에서 2030년 EU의 히트펌프 설치 규모는 NZE에서 필요한 수준의 2/3에 달하나, 2년 전에는 1/3에 그쳤었다.

현재 중국의 2030년 태양광·해상풍력 증설 전망은 WEO-2021 전망치 대비 3배 높은 상황이다. 우리나라를 비롯해 일본, 미국 등이 기존 원자로의 수명 연장을 지원한 데다, 다른 여러 국가가 신규 원전 건설을 지지함에 따라, 주요국의 원자력 전력 전망 역시 높아졌다.

[그림 1]
STEPS 상 화석연료 수요 전망(2000~2050년)



출처: WEO-2023, 26쪽

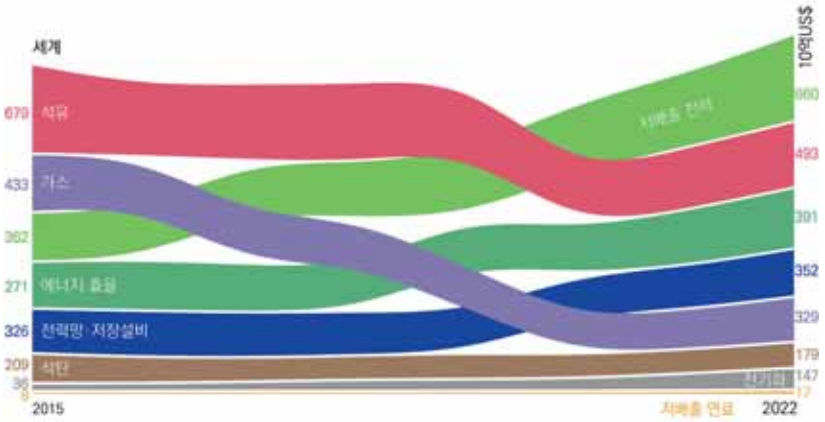
최근 몇 년 동안 화석연료 수요가 높기는 했으나, 저배출 대안 보급과 더불어 에너지 시스템에서 화석연료 기반 신규 자산의 증설 속도가 둔화했다. 내연기관 자동차 판매량은 코로나19 이전보다 훨씬 낮고, 전력 부문의 석탄화력 및 가스화력 발전소 증설 규모는 기존 최고치 대비 최소 50% 낮은 수준이다. 가정용 가스보일러 판매는 감소세를 보이고 있는데, 현재 유럽과 미국 등 많은 국가에서 히트펌프 판매량이 가스보일러 판매를 앞섰다.

2) 투자 양상 변화

에너지 위기는 새로운 청정에너지 경제의 등장을 앞당겼다. 특히 러시아가 유럽으로의 천연가스 공급을 중단한 이후 시장의 불안정성은 대체 화석연료 공급을 촉진했다. 코로나19 이전에는 에너지 시스템에 연간 약 2조 달러가 투자되었는데, 이는 화석연료와 청정에너지 사이에 대략 균등하게 분배되었다.

2023년 에너지 부문에 약 2.8조 달러가 투자될 것으로 전망된다. 화석연료에 대한 지출은 2020년의 급격한 감소 이후 서서히 증가하고 있지만, 5년 전과 비슷한 수준에 머물고 있고 투자 증가분은 모두 청정에너지에서 나왔다.

[그림 2]
에너지 부문에 대한 투자 흐름



출처: WEO-2023, 80쪽

그럼에도 현재 화석연료에 대한 투자 수준은 높은 상황이다. 화석연료 수요 증가 시대의 종말이 화석연료에 대한 투자 종말로 이어지지는 않지만, 화석연료에 대한 투자를 확대할 근거는 약화되고 있다. 2023년까지는 STEPS의 수요를 충족시키기 위해 2020년대까지 석유·가스 투자 확대가 필요했으나, 청정에너지에 대한 전망 개선과 화석연료 수요 감소 전망으로 인해 상황이 달라졌다.

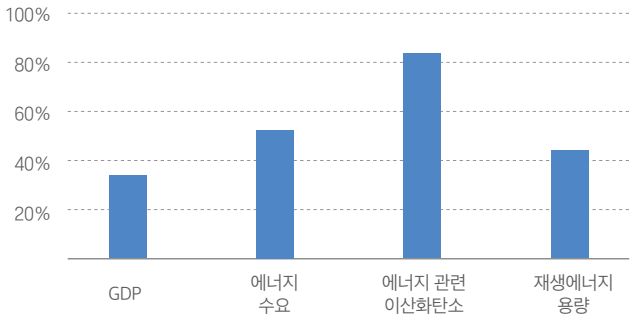
현재 석유·가스 투자 규모는 NZE에서 제시된 2030년 필요한 수준보다 약 2배 높고, 이로 인해 화석연료 이용이 장기간 지속될 위험이 있다. 이 경우, 1.5℃ 목표 달성은 요원해질 수 있다.

3) 중국 경제성장 둔화

중국의 경제성장 둔화, 사회구조 변화, 청정에너지 이용 증가 등은 세계 에너지 시장에 상당한 영향을 미치고 있다. 중국의 경제 성장으로 지난 10년간 중국은 세계 석유 소비 증가의 2/3와 가스 소비 증가의 1/3을 점유하고, 석탄 시장을 주도해 왔다.

그러나 현재 중국 경제 성장은 변곡점에 이르고 있다. 중국의 인프라는 매우 빠르게 구축되었으나, 최근에는 확충 규모가 축소되고 있다. 중국은 1인당 GDP는 낮지만, 이미 세계 최고 고속열차 네트워크를 보유하며, 1인당 주거 면적은 일본과 동일하다. 이는 앞으로 시멘트와 철강 등 에너지 다소비 부문의 수요가 낮아진다는 의미이다. 중국은 또한 청정에너지 강국으로, 2022년 세계 풍력 및 태양광 증설의 약 25%와 세계 전기차 판매량의 50% 이상을 차지했다.

[그림 3]
세계 경제 및 에너지 부문에서 중국의 비중(2012~2022년)



출처: WEO-2023, 31쪽

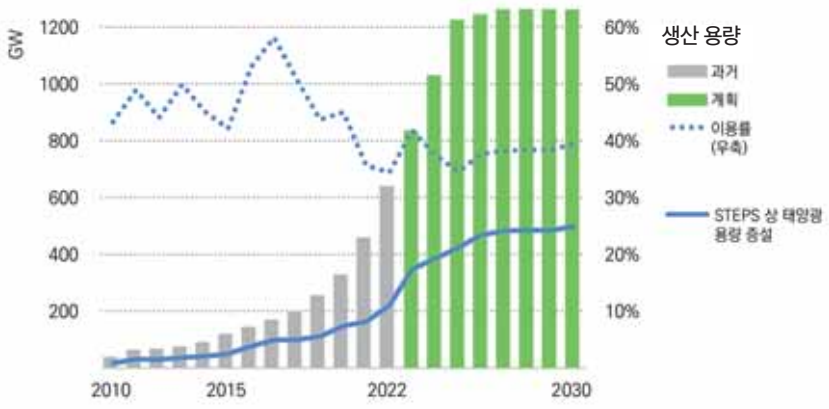
중국의 경제성장을 뒷받침해 왔던 모멘텀이 서서히 사라지고 있는 상황에서 성장이 더욱 둔화되면, 세계 화석연료 수요 감소폭이 더욱 커질 수 있다. IEA 시나리오에서 2030년까지 중국의 GDP 성장률은 연평균 4%에 소폭 못 미친다. 따라서 중국의 전체 에너지 수요는 2020년대 중반 정점에 달하고, 청정에너지가 대폭 확대됨에 따라 전체 화석연료 수요와 배출량이 감소세로 돌아설 것으로 전망된다. 중국의 단기 성장이 1%p 둔화되면, 2030년 중국의 석탄 수요는 현재 유럽 전체의 석탄 소비만큼 감소할 것이다. 또한, 중국의 석유 수입은 5%, LNG 수입은 20% 이상 감소할 것이다. 이 같은 변화는 세계 에너지 균형에 막대한 영향을 미친다.

4) 태양광 제조설비 증설

STEPS에서는 재생에너지가 2030년 신규 발전설비 용량의 약 80%를 구성하고, 그중 태양광이 50% 이상을 차지할 것으로 전망한다. 태양광은 제조 설비와 기술 경쟁력을 고려할 때 향후 더 크게 성장할 수 있는 상당한 여지가 있다. 태양광 제조설비는 대규모 증설 중이며, 예상 태양광 제조 용량의 70% 활용으로 NZE 수준으로 보급이 가능할 전망이다. 태양광만으로 전 세계가 기후 목표 달성 궤도에 오를 수는 없지만, 다른 어떤 청정에너지보다 태양광이 가장 큰 역할을 할 것이다.

하지만, 태양광 보급이 대폭 확대되면 복잡한 문제가 발생한다. 전력 시스템에 태양광을 추가 통합하고 그 효과를 극대화하려면 특히 전력망 확대/강화, 저장설비 추가 등 여러 조치가 필요한 상황이다. 그리고 현재 태양광은 중국 중심의 공급망 구조를 가지고 있고 과잉 공급 상태이다. 제조설비는 중국 중심으로 고도로 집중되어 있는데, 중국의 태양광 제조설비 용량은 세계 최대 규모이며, 설비 확대 계획도 다른 국가를 앞서고 있다. 따라서 태양광을 세계적으로 보급하려면 지속적이고 안정적인 교역이 필요한 상황이다.

[그림 4]
태양광 제조설비 증설 추이 및 전망(2010~2030년)



출처: WEO-2023, 37쪽

5) 가격 수용성과 복원력

러시아가 대유럽 가스 공급을 축소한 지 1년 만에 중동에서 긴장이 고조되자, 세계는 석유 시장의 위험 요소를 다시금 상기하게 되었다. 청정에너지 전환기에도 석유·가스 안보는 중요하다. 따라서 IEA의 전망은 교역의 균형과 잠재적 취약성이 어떻게 변화하는지 강조한다. STEPS에서 2050년 중동의 해상수송 원유 교역에서 아시아가 차지하는 비중은 오늘날 약 40%에서 50%로 확대된다. 아시아는 중동산 추가 LNG의 대부분이 공급되는 최종 목적지이기도 하다.

세계 에너지 위기는 급격하고 순조로운 에너지 전환에 대한 주의를 환기하는 계기가 되었다. 가격 수용성에 대한 리스크, 전력 안보, 청정에너지 공급망의 복원력 등 상호 연결된 문제가 드러나고 있다. 2022년, 각국 정부는 급등한 연료 가격 상승으로부터 소비자를 보호하는 데 9,000억 달러 이상의 긴급 지원을 투입했다. 앞으로 이 같은 지출을 줄이려면 비용효율적인 청정기술을 대규모 도입해야 하며, 특히 선행 투자금 마련에 어려움을 겪는 빈곤 가정, 지역, 국가에서의 청정기술 보급이 중요하다. 전기화된 재생에너지 기반의 시스템이 구축되면, 전력 공급 안보 역시 중요해진다. 디지털 그리드에 대한 투자 확대는 단기 유연성을 지원하는 배터리 및 수요반응 조치와 더불어 계절적 변화에 대응하는 저배출 기술(수력, 원자력, CCS(탄소저장포집 기술, Carbon Capture Storage) 연계 화석연료, 바이오에너지, 수소, 암모니아 등을 수반할 필요가 있다.

다변화와 혁신은 청정에너지 기술과 핵심광물의 공급망 의존도를 관리하는 최선의 전략이다. 청정에너지 공급망의 복원력 강화 및 집중도 완화를 위한 다양한 전략이 실행되고 있으나, 성과를 내기까지 시간이 걸린다. 세계적으로 핵심 광물(리튬, 코발트, 니켈, 희토류 등) 탐사, 생산, 투자가 증가하고 있으나, 2022년 세계 3대 생산자의 비중은 2019년과 동일하거나 오히려 확대되었다. 2030년에도 특히 정제 및 가공 등의 집중도가 여전히 높을 것으로 보이며,

다수의 중류부문 프로젝트는 현재 주요 생산지역에서 추진되고 있다. 공급 다변화에 대한 투자와 함께 혁신, 광물 대체, 재활용 등을 장려하는 정책은 수요 측면에서 새로운 트렌드를 만들어낼 수 있기 때문에 핵심광물 안보에 있어 매우 중요하다.

6) 국제 공조 필요성

기존 정책과 기술을 활용해 에너지 안보와 지속가능성 목표 간 보조를 맞추고 변화 속도를 높인다면, 1.5℃ 목표 달성이 가능하다. 2030년까지 배출량을 감축하기 위해 필요한 핵심 조치는 이미 널리 알려져 있고, 대부분 상당히 비용 효율적이다. 재생에너지 발전설비용량 3배 확대, 에너지 효율 개선 속도 2배 향상(연 4%), 전기화 확대, 화석연료 생산 시 메탄 배출량 저감 등을 실현하면 1.5℃ 목표 달성을 위해 에너지 부문에서 필요한 배출량 저감의 80% 이상을 달성할 수 있다. 또한, 신흥국과 개도국에서 청정에너지 투자를 지원하기 위해서는 혁신적인 대규모 자금 조달 방법과 함께 화석연료 소비를 순조롭게 줄이기 위한 조치(예: 저감장치 없는 신규 석탄화력 발전소 승인 종료 등)가 필요하다. 각국이 스스로 적합한 경로를 모색해야 할 것이며, 대중 수용성을 확보하려면 각 경로는 포용적이고 공정해야 한다.

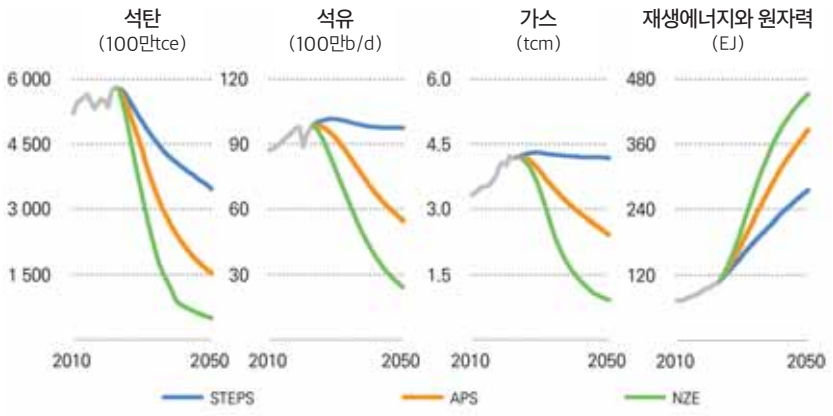
어떤 국가도 기후변화로부터 안전하지 않으며, 협력의 필요성은 그 어느 때보다 높은 상황이다. 특히 지금처럼 긴장이 고조된 시기에는 각국 정부가 에너지·기후 공조를 확대하는 방법을 모색할 필요가 있다. 규정에 기반을 둔 국제 교역 시스템의 활용, 혁신과 기술 이전 촉진 등이 여기에 포함된다. 그러지 않으면, 지구 온도 상승을 1.5℃로 억제할 수 있는 기회는 사라질 것이다.

3. 2023년 에너지 수요 및 전망[6)]

화석연료는 수십 년 동안 전체 에너지 수요의 약 80%를 차지해 왔다. 재생에너지의 빠른 성장과 원자력 덕분에 앞으로는 화석연료의 비중이 감소할 것이며, 2030년까지 시나리오에 따라 62~73%로 줄어들 전망이다.

재생에너지원은 모든 시나리오에서 확대된다. 현재 현대적인 바이오에너지가 전체 재생에너지 수요의 50% 이상을 차지하지만, 앞으로는 특히 전력 부문을 중심으로 태양광과 풍력이 빠르게 확장될 전망이다. 현재 저탄소 발전원은 원자력(발전량의 9%)과 재생에너지(발전량의 32%)로, 원자력의 비중은 모든 시나리오에서 안정적으로 유지된다. 현재 39%인 저탄소 발전량이 2030년까지 시나리오에 따라 57~71%로 확대되는데, 이는 태양광과 풍력의 가격 경쟁력 향상, 제조설비와 보급에 대한 정책적 투자 유인이 반영된 것이다.

[그림 5]
시나리오·연료별 세계 에너지 수요(2010~2050년)



출처: WEO-2023, 104쪽

6) IEA, World Energy Outlook 2023 Chapter 3, 2023.10월

1) 최종에너지

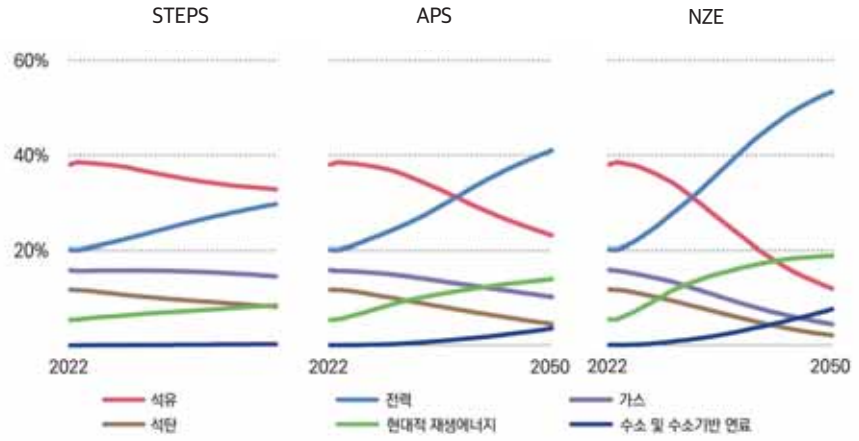
현재 세계 최종에너지 소비는 442EJ(exa Joule)로, 산업 부문이 167EJ, 건물 부문 133EJ, 수송 부문 116EJ, 최종사용 부문 27EJ 등으로 구성된다. 세계 최종에너지 소비에 대한 2050년 전망은 시나리오에 따라 다소 차이를 보인다. STEPS의 경우, 최종에너지 소비는 2050년까지 증가하나, 증가세는 점차 둔화한다. APS에서는 2020년대 중반까지 증가한 이후 2020년대 후반부터 점차 감소하고, NZE에서는 현재부터 2050년까지 매년 연평균 0.9% 감소한다.

최종에너지 소비 전망의 가장 큰 차이는 에너지 효율의 개선 정도인데, APS에서는 STEPS 대비 건물 부문에서 리모델링 목표 추가 및 건축 에너지 법규 개정, 수송 부문에서 더욱 엄격한 연비 표준 적용, 산업 공정에서 효율 개선 등이 이뤄진다. NZE에서는 이로 인해 2030년까지 에너지 집약도가 전년 대비 2배 개선된다. 전기화도 다른 중요한 요인으로, 히트펌프와 전기차로 대표되는 전기화 기술이 더욱 빠르게 확대되면서 2030년까지 APS의 에너지 소비가 STEPS 대비 약 10% 감소한다. APS와 NZE에서는 STEPS에서보다 전기화 기술이 빠르게 확대됨에 따라 최종에너지 소비에서 전력이 차지하는 비중도 증가한다.

2) 전력 부문

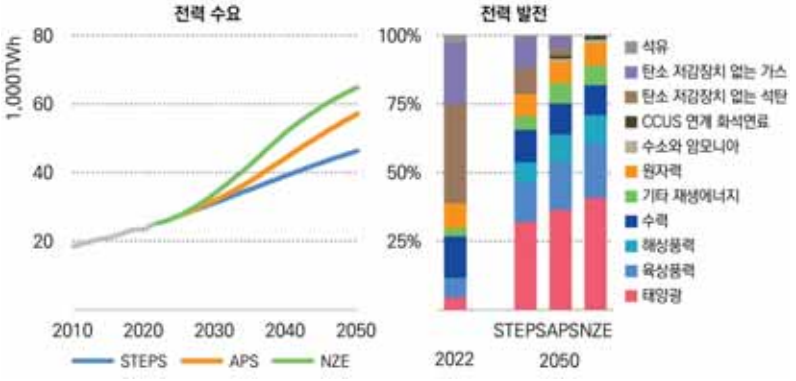
세계 전력 수요는 인구, 소득, 최종소비 증가 등으로 인해 2050년까지 모든 시나리오에서 빠르게 증가할 전망이다. 전력 수요는 현재 수준에서 2050년까지 시나리오별로 80~150% 증가한다. 화석연료의 비중은 전체 발전량에서 빠르게 감소하며, 추가 전력 수요는 재생에너지, 원자력, 탄소포집 설비를 갖춘 화력발전, 수소 및 암모니아 발전 등으로 충당된다. 2050년까지 화석연료의 전체 발전량 중 비중은 시나리오에 따라 2022년 대비 1/3에서 거의 줄어든다.

[그림 6]
시나리오·연료별 세계 최종에너지 소비(2022~2050년)



출처: WEO-2023, 108쪽

[그림 7]
세계 전력 수요(2010~2050년) 및 시나리오별 전원믹스(2022~2050년)

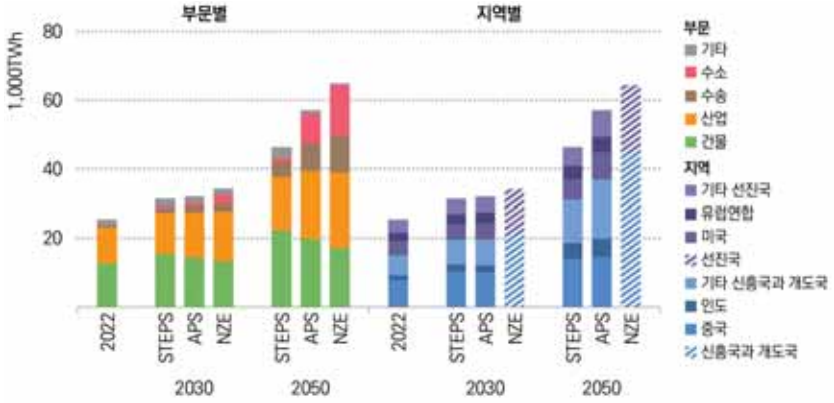


출처: WEO-2023, 123쪽

2050년까지 신흥국과 개도국이 모든 시나리오에서 세계 전력 수요 증가의 약 3/4을 차지하면서 세계 전력 수요 증가를 주도한다. 세계 전력 수요는 모든 부문과 모든 시나리오에서 증가한다. STEPS와 APS에서는 건물 부문이 지금과 마찬가지로 가장 큰 비중을 차지

하지만, NZE에서는 건물 부문의 에너지 효율이 더욱 빠르게 개선되면서 산업 부문의 전력 소비가 가장 큰 비중을 차지한다. STEPS에서 전기차는 2050년까지 전체 전력 수요 증가의 약 15%를 차지하며, 전기차 보급이 더욱 빠른 APS와 NZE에서는 그 비중이 더욱 높다.

[그림 8]
시나리오·부문·지역별 전력 수요



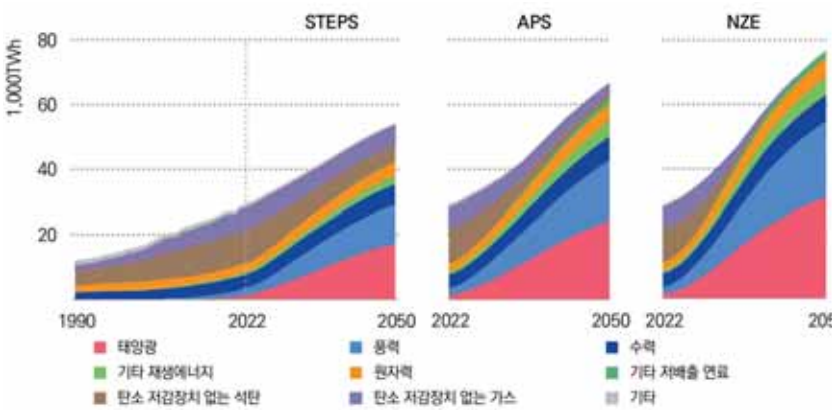
출처: WEO-2023, 124쪽

2022년 에너지 위기 이후 많은 국가가 전력 부문 전환을 가속화함에 따라 재생에너지와 원자력 발전의 전원 비중 전망이 상향 조정되었다. 저탄소 발전원의 보급이 모든 시나리오에서 가속화되며, 이들의 발전량은 2022년부터 2050년까지 시나리오에 따라 4~7배 증가한다. 이로 인해 2050년까지 세계 발전량에서 저탄소 발전원의 비중(2022년 39%)도 크게 증가해 NZE에서는 거의 100%에 이른다. 재생에너지 설비용량 증가분의 95%는 태양광과 풍력이 차지한다.

원자력은 수력에 이은 세계 2대 저탄소 발전원이며, 선진국에서는 원자력이 최대 저탄소 발전원이다. 동일본 대지진 이후 원전 보급은 둔화되었으나, 정책 환경 변화 덕분에 원자력을 확대할 수 있는 새로운 기회가 생겨나고 있다. 원자력에 우호적인 국가에서의 대형 원전의 수명 연장 및 신규 건설, 소형 모듈 원자로 개발 덕분에

2022년 417GW였던 원자력 설비용량이 2050년까지 STEPS에서는 620GW로 증가하고, APS에서는 770GW, NZE에서는 900GW를 상회한다.

[그림 9]
시나리오·발전원별 발전량(1990~2050년)



출처: WEO-2023, 126쪽

3) 에너지원별 수급 전망

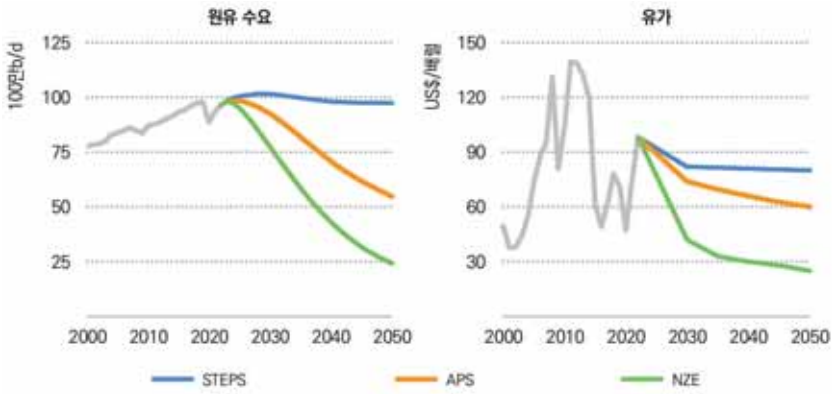
(1) 석유

석유 소비가 정점에 도달하는 시기는 전기차의 빠른 보급 속도를 반영해 WEO-2022 대비 약 5년 앞당겨졌으며, 2050년까지 공급 감소폭도 더욱 클 것으로 전망된다. 석유 수요는 모든 시나리오에서 2030년 이전에 정점에 도달한 후 감소세에 접어들 것으로 예상되는데, STEPS에서는 2020년대 후반 최고치(1억 200만b/d)에 도달한 후 2050년까지 9,700만b/d로 감소할 것으로 전망된다. 석유 수요의 감소 정도는 전기차 확대 속도에 의해 좌우되며, 도로 수송 부문에서의 수요 감소가 석유화학 및 항공 부문의 수요 증가를 상쇄해 전체적인 석유 수요가 감소한다.

석유 공급 측면에서 보면, 러시아의 생산량 감소가 WEO-2022의 전망처럼 즉각적으로 나타나지는 않았지만, 전체 석유 공급의 장기적인 감소세는 비슷한 수준에서 계속될 것으로 전망된다. STEPS에서 대부분 지역의 2050년 석유공급 전망은 WEO-2022 전망치대비 하향 조정되었는데, OPEC 회원국과 중남미 및 카리브해 지역 국가의 생산량은 각각 하루 약 200만 배럴, 북미 지역의 생산량은 하루 약 100만 배럴 감소한다.

WEO-2022에서는 STEPS의 원유 가격이 2030년까지 하락한 이후 2050년까지 다시 소폭 상승하나, WEO-2023에서는 이를 수정해 2030년 이후 계속해서 배럴당 80달러 수준을 유지한다.

[그림 10]
세계 원유 수요 및 국제유가(2000~2050년)



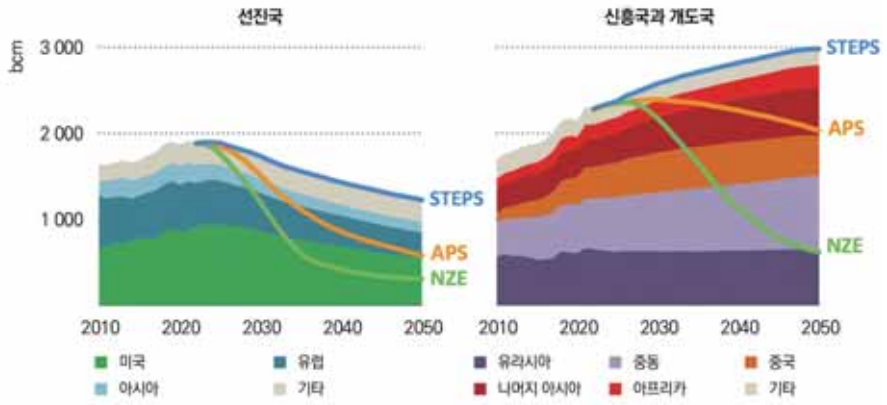
출처: WEO-2023, 131쪽

(2) 천연가스

전력 및 건물 부문의 가스 수요가 더는 확대되지 않을 것으로 예상됨에 따라, 세계 가스 수요 증가세는 둔화할 것으로 전망된다. 2011년 이후 연평균 약 2%를 유지해 온 가스 수요 증가율은 2030년까지 약 0.4% 밑으로 떨어질 전망이다. 천연가스 수요 전망은 지역별로 차이를 보이는데, 모든 시나리오에서 선진국의 수요는 감소하는

반면, 2030년까지 신규 LNG의 공급으로 인해 낮은 가격이 유지되면서 신흥국과 개도국의 가스 수요는 증가한다. STEPS에서는 2030년 이후에도 신흥국과 개도국의 가스 수요가 계속해서 증가하나, APS와 NZE에서는 재생에너지의 급속한 성장으로 인해 발전 부문에서 가스 비중이 축소되면서 전체 가스 수요도 줄어든다.

[그림 11]
지역·시나리오별 가스 수요(2010~2050년)



출처: WEO-2023, 137쪽

2022년 에너지 공급 위기에 대응해 LNG 프로젝트에 대한 투자가 단기적으로 증가했으나, 2030년 이후로는 증가세가 둔화되거나 감소할 전망이다. STEPS에서는 2022년부터 2030년까지 상류부문 가스 개발에 연간 1,900억 달러가 투자되며, LNG 인프라에 연간 400억 달러가 투자된다. APS에서는 2030년까지 총 투자가 STEPS 수준의 80% 수준에 그치고, NZE에서 상류부문 투자는 기존 프로젝트의 공급 유지 및 배출량 저감을 최소화하는 수준으로 제한될 것이다.

4) 청정에너지 기술

(1) 재생에너지

재생에너지 보급은 2030년까지 대폭 증가할 것으로 전망된다. STEPS와 APS의 전체 재생에너지 설비용량은 2030년까지 현재 수준 대비 2배 이상 높고, NZE에서는 3배로 증가한다. 태양광과 풍력의 신규 보급을 살펴보면, 우선 태양광은 2022년 신규 설비용량이 220GW로 사상 최고치를 기록했는데, STEPS에서는 2050년 580GW로, APS에서는 증설 규모가 더욱 빨라지고, NZE에서는 2030년 820GW에 달한 이후 2050년까지 비슷한 수준에서 유지된다. 풍력의 2022년 신규 설비용량은 75GW로 2020년 이후 줄었지만, STEPS에서는 2050년 195GW로, APS, NZE에서는 더욱 크게 확대된다.

[그림 12]
시나리오별 태양광·풍력 신규 보급 규모(2018~2030년)

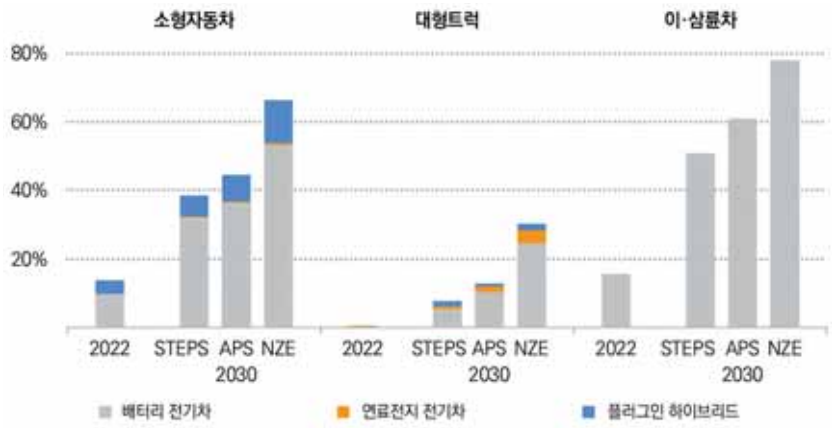
출처: WEO-2023, 147쪽

(2) 전기차

전기차 판매 전망은 WEO-2022 전망치 대비 크게 상향 조정되어 STEPS에서는 2030년까지 신차 판매량의 40%를 차지한다(WEO-2022의 2030년 전망치는 25%). 이 상향 조정은 중국, EU,

미국의 새로운 자동차 기준과 보조금 정책, 그리고 주요 자동차 제조업체들의 자발적 전기차 보급 목표를 반영한 결과이다. 신흥국과 개도국에서는 주로 이륜차와 삼륜차를 중심으로 전기차 보급이 활발히 이루어지고 있으나, 전체 판매량의 1%에 불과한 대형차 시장까지 확장하기 위해서는 보다 광범위한 충전 인프라의 구축이 필요하다.

[그림 13]
시나리오별 전기차 판매 비중(2022~2030년)



출처: WEO-2023, 149쪽

4. 맺음말 - 안전한 에너지 전환을 위한 조치[7)]

안전한 에너지 전환은 지구 평균 기온 상승을 1.5℃ 이하로 억제할 수 있는지에 달려있다. 현재 지구의 평균 온도는 산업화 이전 대비 1.2℃ 높으며, 전 세계 배출량은 아직 최고점에 이르지 않았다. 2022년 세계 에너지 관련 이산화탄소 배출량은 370억 톤에 달해 역대 최고치를 기록했다. STEPS에서는 2050년 지구 온도가 1.9℃

7) IEA, World Energy Outlook 2023 Chapter 4, 2023.10월

상승할 것으로 전망되나, 이는 파리기후협정에서 약속한 것보다 훨씬 높은 수준이다. APS와 NZE에서 2100년 지구 온도는 산업화 이전 대비 각각 1.7℃와 1.4℃ 높아진다. 따라서 단기적으로 가장 큰 온실가스 저감 효과를 낼 수 있는 메탄 저감 조치를 비롯한 대기의 질 개선 노력이 필요하며, 이와 함께 안전한 에너지 전환을 위해서 연료 및 전력 안보 확보, 청정에너지 공급망 구축과 핵심광물 공급 다변화 등을 위한 조치가 요구된다.

1) 연료 안보

청정에너지로의 전환에도 불구하고, 전통적인 에너지 안보 위험은 여전히 존재한다. 세계 석유·가스 교역이 점차 중동과 아시아에 집중됨에 따라 수입국들은 다양한 리스크에 노출된다. 석유·가스 생산자와 소비자가 서로 다른 조치를 취하면, 에너지 안보 리스크와 지정학적인 긴장이 높아질 수 있다. 석유·가스 생산자와 소비자가 상호 협력하지 않으면, 신규 석유·가스 생산 용량에 대한 과도한 투자나 기존 인프라의 조기 폐쇄가 발생할 수 있다. 이 같은 상황을 방지하기 위해 각국과 기업이 함께 노력해야 한다. 대규모 소비국과 주요 소비 부문이 분명한 장기 계획을 수립하면, 생산자의 인프라 및 자본 투자 결정을 도울 수 있다. 소비자와 생산자는 정기적인 양자 또는 다자 간 대화를 통해 정책 목표에 대한 상호 이해를 높이고 좌초자산 발생 위험을 줄여야 한다.

2) 전력 안보

전력 시스템은 점차 복잡해지고 있으며, 변동성이 높은 재생에너지(풍력과 태양광)의 비중 증가와 전력 수요 상승으로 인해, 앞으로 전력 시스템의 유연성이 더욱 중요해질 것이다. 현재 요구되는 유연성은 대부분 급전 가능한 화력과 수력(양수발전 포함)으로 제공

되며, 추가 단기 유연성은 대부분 배터리와 수요 반응에 의해 충족될 전망이다. 따라서 시장 설계 및 규정 수립을 통해 수력(양수), 기타 에너지 저장설비가 전력 시스템의 유연성 필요성에 부합하도록 조치해야 한다. 또한, 점차 빨라지는 전기화 속도와 가속화되는 재생에너지원 보급에 맞추어 전력망 개선이 요구된다.

3) 청정에너지, 핵심광물 공급망

청정에너지 제조 설비 증설은 특히 태양광 패널과 배터리에서 두드러진 성과를 보였다. 하지만, 청정에너지 기술용 핵심광물 공급 속도는 이에 못 미쳐 전반적인 에너지 전환을 저해할 수 있기에 핵심광물 공급을 확대하기 위한 노력이 필요하다. 또한, 지금의 청정에너지와 핵심광물 공급망은 화석연료 공급망에 비해 지리적으로 더 집중되어 있으며, 이는 새로운 에너지 안보 문제로 부각되고 있다. 따라서 안전한 에너지 전환에 필요한 공급망 다변화를 위해 각국은 산업 전략을 개발하고 국제 공조를 확대해야 한다.

참고문헌

국내 문헌

- 김정관, 「국제에너지기구(IEA)와 석유시장 위기 대응능력 제고」, OECD Focus, 2024.7월
- 김해지, 「IEA의 세계에너지 전망(World Energy Outlook 2023)」, 에너지경제연구원 세계에너지시장 인사이트 제23-21호, 2023.11.6.
- 도현재, 「IEA 에너지협력 대응방안연구」, 에너지경제연구원 정책연구보고서, 2004.12월

외국 문헌

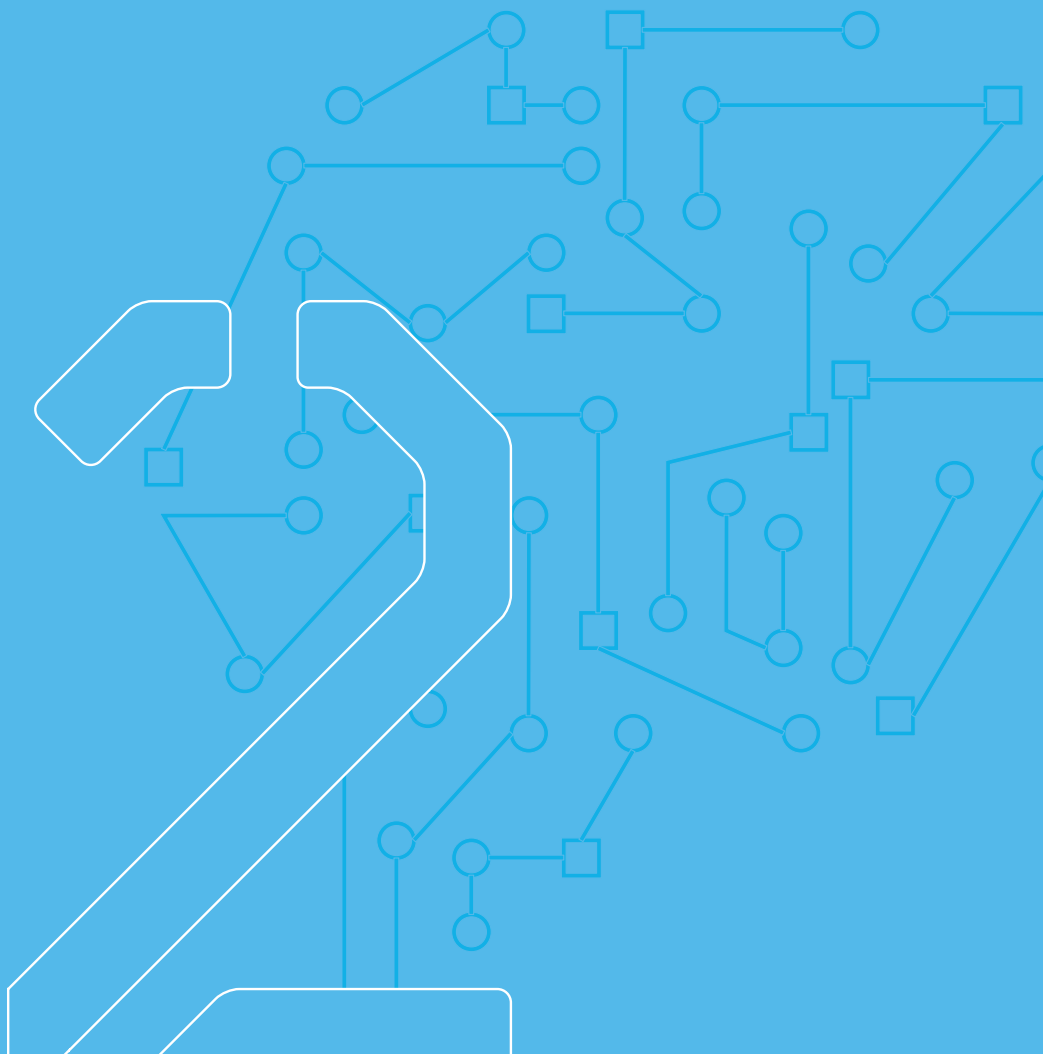
- IEA, World Energy Outlook 2023, 2023.10월

웹사이트

- IEA, https://www.iea.org/, 검색일(2024.6.2.)

인공지능, 원자력, 무탄소 에너지 100%(CF100)

RE100만 고집할 것이 아니라 CF100으로 한 단계 더 나가야 하고, 원자력을 포함한 모든 무탄소 에너지를 활용해 전력뿐만 아니라 비 전력 분야에도 무탄소 에너지를 공급할 수 있도록 우리의 시각을 한 차원 높이고 기술중립적이고 현실적으로 탄소중립 접근방식을 바꾸어야 한다.



정용훈

카이스트
원자력및
양자공학과
교수

1. 인공지능 서버의 시작

2015년 일론 머스크는 인공지능 기술개발 스타트업인 오픈에이아이(OpenAI)를 창업했다. 그다음 오픈에이아이는 엔비디아 젠슨 황 대표로부터 엔비디아 최초의 인공지능 서버인 DGX-1을 기증받는다. 아래 사진은 2016년 젠슨 황 대표가 일론 머스크에게 서버를 기증하는 장면을 일론 머스크 대표가 자신의 트위터에 올린 것이다.

[그림 1]
엔비디아 젠슨 황 대표가 일론 머스크 오픈AI 대표에게 서버를 기증하는 장면[1)]

1) Image credit: Elon Musk on X / Twitter

당시 그는 트위터에 "Would like to thank @Nvidia and Jensen for donating the first DGX-1 AI supercomputer to @OpenAI in support of democratizing AI technology." 라고 썼다.

당시 기증된 서버의 가격은 $129,000였고, 소모 전력은 약 3.2kW였다. 1petaflops (초당 1015개의 연산)의 연산기능을 가진 서버였다. 현재 이들 두 사람 모두 IT 거장들이기에 이들의 예전 만남이 더욱 의미가 있어 보인다. 이들이 만났던 2016년 당시에는 현재와 같은 인공지능 서비스에 대한 수요가 현실화하지 않았던 시기라 이들 둘의 만남이 향후 어떤 의미가 있는지 100% 알 수는 없었다.

2016년 알파고와 이세돌 9단의 대국이 불러온 인공지능(기계학습) 열풍이 생성형 AI로 이어지고 폭발적 관심을 끌게 될 것이라고 누구도 알 수 없었다. 특히 이렇게 빨리 대중화될 것으로 생각하지 않았다.

몇 년의 시간이 지나 1세대 서버는 현재 4세대까지 발전했다. 현재 판매되는 4세대 서버는 가격이 $480,000이고, 전력 소모는 10kW 정도 된다. 연산성능은 1세대 대비 32배 좋아졌다. 대략 2016년 1세대에 비해 2024년 4세대가 되면서 성능은 30배, 전력 소모는 3배가 된 것이다. 효율도 올라갔지만, 연산 능력이 늘어나면서 전체 전력 소비는 늘어났다.

[그림 2]
엔비디아의 4세대
인공지능 서버의 예[2)]

Datasheet

NVIDIA

NVIDIA DGX H100

The gold standard for AI infrastructure.

2. 4세대 서버 1대 가동 전기요금은?

4세대 서버가 연간 약 60%의 이용률을 보인다면, 즉 최대 전력 수요 대비 평균 60% 정도의 전력을 소모한다면 연간 전기요금은 140원/kWh 기준으로 약 700만 원 정도가 될 것이다. 6억 5천만 원 서버의 연간 전기요금 700만 원 큰 금액은 아닌 것 같다. 그러나 다시 생각해 보면 10kW의 전력도, 연간 700만 원의 요금이 적은 것이 아니다. 만약 6억 5천만 원짜리 아파트의 전기요금이 연간 700만 원 이라면 굉장히 큰 금액이라고 할 수 있다.

3. 인공지능 서버와 전기차의 전력 사용 비교

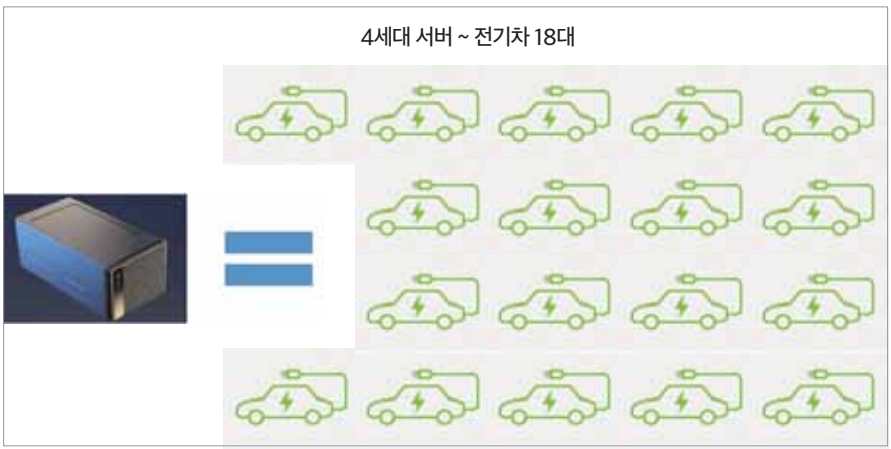
서버를 전기차와 비교해 보면 전력 사용량이 만만치 않음을 알 수 있다. 6,500만 원짜리 전기차 10대를 운영한다면 연간 소모 전력량은 얼마나 될까? 1대가 연간 15,000km를 주행하고, 전비가 5.5km/kWh이며, 충·방전 효율이 100%라는 단순 가정을 한다면 140원/kWh 기준으로 전기요금은 약 40만 원 정도 될 것이다. 10대를 운영하면 400만 원 정도가 될 것이다.

2) NVIDIA Datasheet

즉, 4세대 인공지능 서버 1대를 운영하는 것은 전기차 17.5대를 운영하는 것과 같은 전력량을 사용하는 것이다. 따라서 앞으로 인공지능 서버가 늘어나서 추가될 전력 수요는 같은 수의 전기차가 늘어나서 추가될 전력 수요의 10배를 훨씬 초과한다.

이런 인공지능 서버가 100만 대 판매된다면 전기차 1,000만 대 이상이 판매된 것과 같은 효과라고 할 수 있다. 2023년 인공지능 서버 시장은 123억 달러[3)]였다. 정확한 모델과 판매 수는 공개된 바 없으므로 이를 엔비디아 4세대 서버의 가격과 소모전력을 바탕으로 추산해 보면 약 25만 대 엔비디아 4세대 서버가 판매된 것과 같다는 것을 알 수 있다. 이는 전기차로 환산한다면 약 440만 대에 해당한다. 2023년 전기차 판매가 1,000만 대[4)]이므로 이미 인공지능 서버의 전력소모는 전기차로 인한 전력소모의 거의 절반 수준까지 와 있다고 볼 수 있다.

[그림 3]
4세대 인공지능 서버의 전력 사용량과 전기차 전력사용량 비교



3) AI Server Global Market Report 2024, The AI Journal
4) EV Volumes(part of J.D. Power), 2023

인공지능 서버로 인한 전력소모 추정에 불확실성이 있고, 전기차 모델별로, 사용자별로 주행거리가 차이가 있는 등의 변수를 고려하더라도 적어도 인공지능 서버로 인한 전력수요가 전기차로 인한 전력수요에 필적할 수준이 되었다는 것은 알 수 있다.

앞으로 폭증할 인공지능 서버의 수와 그에 따른 전력 사용 증가는 전기차가 가지고 있는 폭발적인 수요와 적어도 같은 수준에서 고려해야 할 것이다.

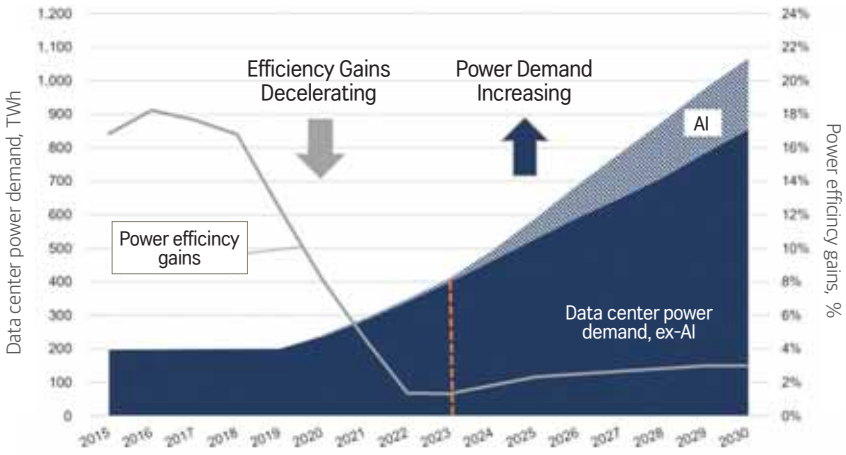
4. 인공지능 서버 전력수요 폭증

아직 인공지능 서비스는 태동기에 있다. 현재까지 IT 서비스와 관련한 전력수요는 대부분 데이터센터에서 비롯되었다. 아래 자료에서 볼 수 있듯이 인공지능 서버의 전력수요는 무시할 크기는 아니지만 데이터센터에 비하면 아직 작다. 기술 발전에 따라 데이터센터와 인공지능 서버의 에너지 효율은 개선되었지만, 연산 능력과 서버 수가 늘어나면서 전체적인 전력수요는 증가하고 있다.

2023년 현재 400TWh 수준의 인공지능 서버와 데이터센터 전력수요가 2030년에는 1,000TWh 수준으로 증가할 것이라는 전망이다. 그 대부분은 데이터센터가, 일부를 인공지능 서버가 차지할 것으로 전망된다.

비교해 보자면, 2023년 현재 우리나라의 연간 전력 소비량이 550TWh 수준이다. 따라서 현재 데이터센터와 인공지능 서버의 세계 전력 소비량은 우리나라 수준에 약간 못 미치는 수준이다. 이것이 2030년에는 우리나라 연간 전력 소비의 2배 수준으로 성장할 것이다.

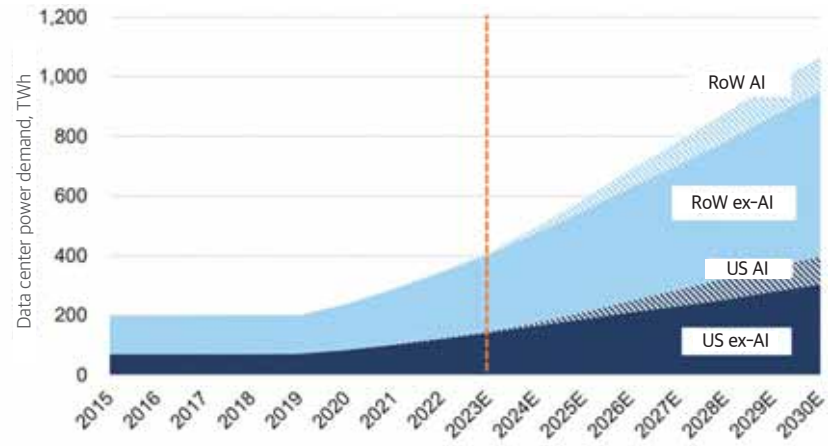
[그림 4]
인공지능 서버와 데이터센터의 전력수요 실적 및 전망



출처: Masanet et al. (2020), Cisco, IEA, Goldman Sachs Global Investment Research.

경제성장에 따른 전력수요 증가가 개발도상국에 집중되는 것과 달리 데이터센터와 인공지능 서버는 수요 대부분이 미국, 유럽, 한국, 일본, 중국 등이다. 이 중 중국을 제외한 선진국의 경우 10년 이상 전력수요가 정체되어 있었는데 갑자기 새로운 수요가 발생한다는 점에서 대처하기 어려운 특성이 있다. 특히 미국은 2000년대 들어 전력수요가 제자리걸음을 하고 있었는데, 인공지능과 데이터센터로 인해 새로운 수요가 발생하면서 신규 전력공급 설비를 확충하고, 전력망을 늘려야 하는 어려움에 직면하고 있다.

[그림 5]
데이터센터와 인공지능 서버의 전력수요는 미국 중심으로 증가



출처: Masanet et al. (2020), Cisco, IEA, Goldman Sachs Global Investment Research.

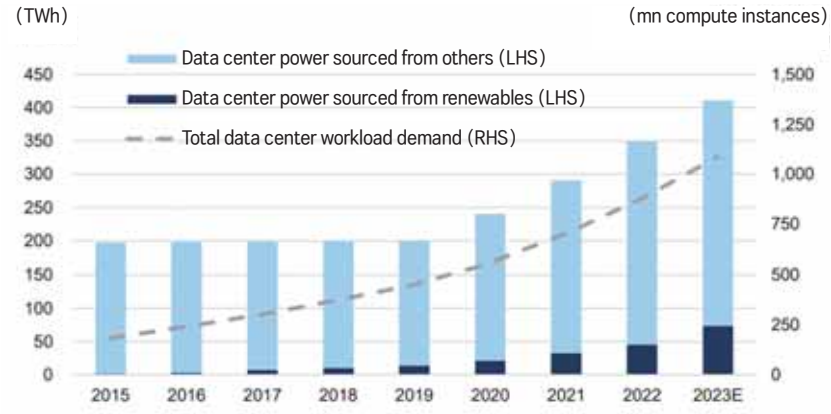
5. 데이터센터·인공지능 서버의 전력 공급은?

2015년부터 2023년까지 데이터센터의 전력 공급원을 보면 재생에너지 사용량도 증가했지만, 대부분은 비 재생에너지가 감당해 오고 있다.

소위 RE100이라는 민간 캠페인에 따라 재생에너지만으로 향후 데이터센터 전력수요를 충족할 수 있을 것이라 주장하지만, 그 목표는 실현 가능성이 없다고 할 수 있다.

현재까지의 공급 실적을 봐도 가능성이 없고, 전망은 더욱 어둡다. 에너지 효율성이 개선되기에 수행한 서비스의 양에 비해 전력 사용 증가는 다소 완만하게 증가하지만 4년 만에 전력수요가 2배 증가하는 속도는 향후 더 가속화될 전망이다.

[그림 6]
데이터센터의 전력 공급원



출처: Masanet et al. (2020), Cisco, IEA, Goldman Sachs Global Investment Research.

6. RE100이 탄소중립의 유일한 수단인가?

RE100은 기업이 사용하는 전력을 모두(100%) 재생에너지(RE)로 공급하자는 민간의 캠페인이다. RE100은 The Climate Group이 주도하고 있으며, 다양한 달성 방법이 제공되고 있다.

1) 자체 생산한 재생에너지 전력,
2) 그리드(전력망)에서 구매한 재생에너지 전력,
3) 재생에너지 크레딧을 구매한 양,
4) 타지의 재생에너지 사업에 참여한 지분,
5) 녹색 프리미엄 요금제로 사용한 양 등을 모두 합해서 기업이 1년간 사용한 전력량을 모두 채우면 그해 RE100 달성을 인정하는 방식이다. 즉 RE100을 달성하기 위해서는 실시간으로 그리고 물리적으로 재생에너지만 100% 사용하지 않아도 가능하다. 사용한 전력량에 해당하는 양의 재생에너지를 만들거나, 구매하거나, 인증서를 사거나, 요금을 더 내면 되는 것이다.

사실 1번을 제외한 2, 3, 4, 5번은 실제 사용한 전력의 출처와 무관한 것이다. 1번에서도 발전 당시 수요를 넘어가는 발전량이 있다면 그 양은 사실 실제 사용한 전력량이 아니다. 실제 사용한 전력을 모두 재생전력으로 공급하려면 자체 공급만으로 충당하거나 전체 그리드를 재생전력으로 바꾸지 않는 한 물리적으로 100%는 달성할 수 없다. 또 대상 기업이 직접 사용한 전력과 대상 기업이 전력이나 열을 사용하는 데 수반된 간접 사용 전력, 대상 기업의 전반적인 활동에 수반된 전력 사용 등으로 범위를 I, II, III로 나누기도 한다.

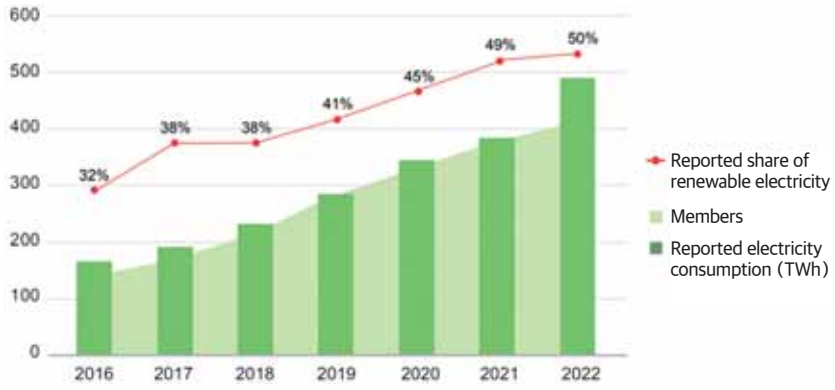
만약 해당 국가의 전체 전력 사용량 중 10%가 재생 전력이라면 RE100은 전체의 10%에서만 가능하다. 즉 RE100을 달성했다는 기업이 있어도 실제로는 RE100*0.1=RE10에 불과한 것이다. 만약 산업용 전력수요가 전체 수요의 10%에 불과하다면 이 경우 RE100을 모든 기업이 장부상이라도 달성할 수 있다. 그러나 산업용 전력수요가 50%라면 재생 전력이 50%에 이르지 않을 경우 모든 기업의 RE100은 근원적으로 달성 불가능하다.

RE100에서도 실시간 전력 사용을 재생에너지로 공급하고, 관련 공급망에서도 100% 재생에너지를 사용해서 명실상부 진짜 RE100을 달성하는 것을 목표로 하고 있다.

그러나 이를 달성한 기업은 없다. 더불어 기대되는 기업도 없는 것이 현실이다.

[그림 7]의 그래프는 현재 RE100을 선언한 기업들이 사용하는 전체 전력량과 재생에너지 공급비중을 나타낸다. 현재 약 500TWh 정도의 전력을 사용하고 있으며, 240TWh 정도의 전력을 재생에너지로 공급하고 있다. 물론 실제, 실시간 사용한 것은 240TWh 중 일부다.

[그림 7]
RE100 가입 기업의 총 전력 소비와 재생에너지 비중



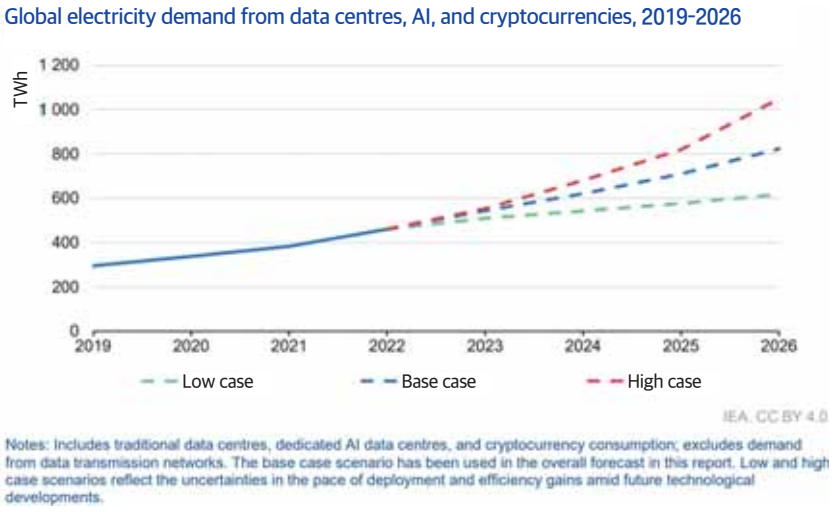
앞서 본 바와 같이 2030년까지 추가로 필요한 인공지능 서버와 데이터센터 전력수요가 500TWh에 달한다. 인공지능 서버와 데이터센터 비즈니스가 RE100을 선언한 주요 IT 기업들의 주요 사업영역 혹은 관련 사업임을 고려한다면 앞으로의 인공지능 서버나 데이터센터 전력수요는 RE100 기업들 위주로 발생할 것이다. 따라서 현재 서버와 데이터센터 연간 총 전력 사용량 500TWh 중 절반을 재생에너지로 공급하는 데 그치고 있어, 2030년까지 새로운 500TWh가 추가된다면 이를 재생에너지로 충당(직접 사용이 아닌 것으로 충당한다고 하더라도)하는 것은 불가능에 가깝다.

심지어 국제에너지기구의 전망에 따르면 2026년까지 신규 수요만 400TWh에 이를 것이기 때문에 폭증하는 인공지능 서버와 데이터센터 수요를 재생에너지만으로 감당하는 것은 실현 가능성이 없다. 수년간 재생에너지 사용을 확대해 온 RE100 기업의 총 재생에너지 사용량이 240TWh에 불과한데 불과 2년 만에 400TWh 중 상당 부분(데이터센터 및 인공지능서버 수요 증가가 RE100 기업에만 일어나는 것이 아니므로) 공급한다는 것은 불가능하다. RE100을 달성한 기업도 만약 데이터센터와 인공지능 서버 수요를 그대로 충족

하기 위해 증설한다면 RE100에서 후퇴해야 하는 일도 발생할 수 있다.

전력수요가 급증하고 있어서 인공지능 서버와 데이터센터에 전력을 공급하는 것이 이들 서비스 확대에 있어서 병목이 될 것으로 예상한다. 즉, 장래 서버와 데이터센터의 증가가 결국 전력공급 속도에 맞춰질 수밖에 없을 것이다. 아무리 유전적으로 1년에 10m씩 크는 나무라도 영양분 공급이 제한된다면 크는 속도는 영양분 공급 속도에 따라 결정될 수밖에 없다.

[그림 8]
데이터센터, 인공지능 서버, 암호화폐 채굴에 필요한 전력수요 전망[5)]



5) IEA, Electricity 2024 – Analysis and forecast to 2026

7. RE100을 넘어서 무탄소 에너지 100%로

RE100은 탄소배출을 줄이고, 0 혹은 음수로 만드는 데 재생에너지만 배타적으로 사용하자는 민간의 캠페인이다. 애플, 구글, 마이크로소프트 기업이 이를 달성했고, 삼성, SK 등 대기업이 앞으로 달성하겠다고 선언했다. 그러나 한계가 분명하다.

재생에너지 실시간 사용만을 고려한 것이 아니기 때문에 실제 무탄소 운영과는 거리가 있다. 또한 직접 사용한 것이 아닌 관련 공급망에서 사용한 전력에서 발생한 탄소배출을 줄이는 대책이 공급망 업체에 RE100을 요구하는 것 외에는 뾰족이 없는 상황이다 보니 명실상부 RE100을 달성하는 것은 요원하다. 관련 공급망의 하위로 갈수록 하드웨어 비중이 높아지는데 하드웨어 생산에는 에너지가 더 많이 필요하므로 RE100을 달성하기는 더 어려워진다.

즉, 부품을 납품받아 조립해서 판매하는 회사의 전력 소모와 그 부품을 생산하는 회사의 전력 소모를 비교해 본다면 당연히 부품 생산 쪽이 전력 사용이 많을 수밖에 없다.

이런 한계점을 극복하고자 구글과 마이크로소프트 등의 기업들은 이미 달성한 장부상의 RE100을 넘어 실제 모든 기업활동에서 탄소배출을 급속하게 줄이기 위한 움직임을 시작했다.

탄소배출 저감을 가속하고 실효성을 높이기 위해, 사용되는 무탄소 에너지의 종류를 신재생에 국한하지 않고, 실시간 실제 사용하는 전력의 근원을 무탄소 에너지로 하는 Carbon Free Energy(CFE) 이니셔티브를 추진하고 있다. 하루 24시간 매시간, 월화수목금토일 7일간 매일, 즉 1년 365일 매시간 실제 사용하는 에너지를 무탄소로 실제 물리적으로 공급하자는 이니셔티브로 그 성격을 대표해 CFE 24/7 이니셔티브(이하 CFE)라고 명명하였고, **CF100**이라고 부르기도 한다.

8. CFE 24/7의 시작

2021년 9월 각국 정부 수반, 장관, UN 기관 및 국제기구의 수장, CEO 및 기타 다중 이해관계자 대표를 포함한 130명 이상의 글로벌리더가 에너지 고위급 대화에 참여해 CFE를 발족했다. 보편적인 에너지 접근 및 탄소중립을 달성하기 위한 변혁적 행동과 대담한 투자가 골자였다.

에너지 협약(Energy Compacts)의 형태로 정부와 민간 부문이 4천억 달러 이상의 새로운 재정 및 투자를 약속했다. 이 약속은 전기 사용을 못 하던 수억 명의 사람들이 청정에너지를 사용하고, 화석연료에서 무탄소 에너지로의 전환을 가속하는 동시에 일자리를 창출하는 것을 목표로 한다. UN 총회에서 40년 만에 처음으로 에너지에 관한 지도자급 회의를 개최한 이 대화는 2030년까지 여전히 전기가 부족한 약 7억 6천만 명의 사람들에게 깨끗한 에너지를 제공하고, 2050년까지 탄소중립을 달성한다는 것이다. CFE는 에너지원을 재생에너지원에 국한하지 않고, 원자력을 포함한 모든 무탄소 에너지원을 포함하고 있어, 보다 현실적이며, 실시간 실제 사용하는 에너지를 무탄소로 제공한다는 측면에서 RE100보다 한 차원 높은 접근이라고 할 수 있다. 원자력과 다른 비재생 무탄소 에너지도 모두 사용한다는 측면에서는 기존 RE100 대비 쉬워진 부분이 있다면, 실시간 사용만 고려한다는 측면에서는 어려워진 측면이 존재하지만 실제 탄소배출을 줄이기 위해서는 꼭 필요한 접근이다.

9. 탄소중립, RE100, CFE 24/7 한 줄 요약

- 탄소중립은 배출한 탄소량에 해당하는 탄소 배출량을 어디에서 어떤 방식으로건 줄이면 달성한다.
- RE100은 1년간 사용한 전력량만큼의 재생에너지를 여러 방법으로 구매하거나 재생에너지 인증서를 구매하면 달성한다.
- CFE 24/7은 처음부터 배출하지 않아야 달성한다.

10. CFE가 지닌 의미

구글이 UN에너지와 CFE를 발족한 목적은 RE100을 넘어서서 원자력 등 모든 무탄소 에너지를 포함해 실제 탄소배출 저감 속도를 높이고, 무탄소 에너지 조달에 있어 실시간성을 확보해 실제 탄소배출 줄이는 효과를 극대화하는 것이다.

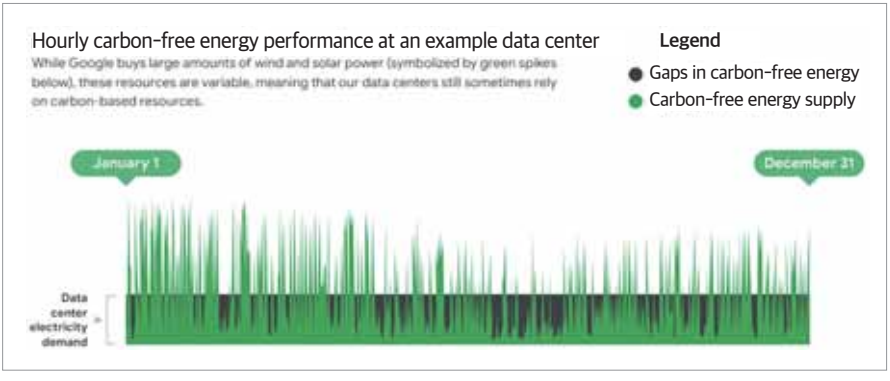
아래 그림은 실제 구글의 데이터센터가 연간 사용한 전력의 종류를 나타낸 것이다. 데이터센터에서 사용한 전력 중 녹색은 재생에너지, 빈 검은 부분은 비 재생에너지 사용에 해당한다.

이 데이터센터는 RE100을 달성했다. 그러나 연간 총 전력량에 해당하는 재생에너지를 구매했을 뿐 실시간 사용한 전력에는 비재생이 상당 부분 있다.

즉, RE100을 달성했지만 상당 부분 화석연료 등에 의존하고 있다는 것이다.

그래프의 검은색 부분을 무탄소 에너지로 채우는 것이 간헐성 없는 무탄소 에너지, 즉 원자력과 같은 에너지의 역할일 것이다.

[그림 9]
구글 데이터 센터의 연중 재생에너지 사용 현황[6)]



6) Google Environmental Report, 2023

구글이라는 대기업의 재생에너지 100% 달성은 상당한 의미가 있지만, 실제 매우 제한적인 의미가 있을 뿐이다. 첫째, 실시간 사용한 에너지가 모두 재생에너지인 것이 아니며, 둘째, 전체 사용 전력량 차원에서도 매우 적은 양이다. 구글이 사용하는 전력량은 연간 약 22TWh로서 APR1400 원자로 2기(예를 들어 신한울 3&4호기)의 연간 전력생산량과 비슷하다. 구글이 달성한 RE100의 가치는 원전 2기가 추가되는 것과 같은 효과이다. 혹은 원전 12기 용량의 태양광이 우리나라에 추가된 것과 같은 효과라고 할 수도 있다(같은 용량의 원전과 태양광의 실제 생산 전력량은 원전이 6배 정도 많다.). 구글이라는 기업 이미지로부터 연상되는 심정적 탄소중립 효과와 비교하여 실제 파급효과는 극히 작다고 할 수 있다.

다른 주요 IT 대기업들도 마찬가지다. 2023년 전력 사용량은 아마존 30TWh, 마이크로소프트 15TWh, 애플 5TWh, 삼성전자 28TWh이다. APR1400 원자력 발전소 1기가 연간 10TWh를 생산하므로 이들 기업의 총사용 전력량은 원전 8개 정도에 해당한다.

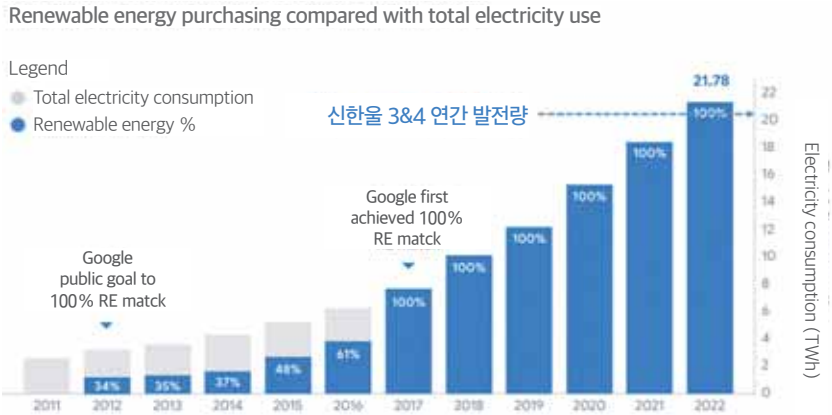
전 세계 전력생산량 29,000TWh(2022년)[7]와 비교해 보면 RE100의 실적(240TWh)과 앞으로의 파급효과가 매우 미미하다는 것을 알 수 있다. 애플, 구글, 마이크로소프트, 삼성, SK 등 참여 기업과 달성 기업의 리스트를 보면 세계 주류 에너지를 하루아침에 바꿀 정도의 파급효과가 있을 것 같지만 실상은 그렇지 않다. 현재 RE100 달성 기업이 사용한 총 재생전력량 연간 240TWh는 전 세계 전력 사용량의 1/100에 미달하는 수치다.

현재 전세계적으로 매년 약 700TWh의 추가적인 전력수요가 발생하고 있으며 이는 우리나라의 연간전력 소비량(약 550TWh)을 초과하는 규모이다. 즉, 지구에 대한민국이 매년 1개씩 추가되는 것이다. 현재 달성한 RE100 기업의 총 재생에너지 조달량은 1년 증가분의

7) Statistical Review of World Energy Data, Energy Institute, 2023

1/2에 불과하다. 우리에게 필요한 솔루션은 29,165TWh의 대부분을 24시간 365일 안정적으로 공급할 수 있으며, 탄소배출 없고, 경제적으로 효율적인 대안이어야 한다.

[그림 10]
구글의 전력 사용량과 재생에너지 조달 비중[8)]



구글은 현재 재생에너지 구매를 통해 RE100을 달성하고 있으며, 별도로 CFE 달성도도 보고하고 있다. 특히 데이터센터에 대한 CFE 달성도를 보고하고 있는데 우리나라의 경우 31%로 보고된다. 원자력과 재생에너지로 공급된 모든 전력이 청정전력으로 계수되기 때문이다. 탈원전 정책을 추진하고 있는 타이완의 경우 18%에 불과한 것과 대비된다. 일본의 경우에도 간사이전력이 있는 곳의 CFE는 32%, 동경전력이 있는 곳에는 16%로 CFE 진척도에 원자력 비중이 상당한 역할을 하고 있다.

8) Google Environmental Report, 2023

11. CFE 고득점 비결 '무탄소 에너지믹스'

CFE 달성도를 보면 원자력, 수력, 풍력, 태양광의 기여가 어떠한지 알 수 있다. 자연환경에 따라 수력이 풍부한 국가(캐나다, 브라질, 스위스 등)의 CFE는 예상대로 높았으며, 원자력을 이용한 국가들도 높은 비중을 보였다(벨기에, 캐나다, 프랑스, 우리나라 등). 풍력으로 높은 비중을 달성한 국가(덴마크)도 있으며, 대부분의 무탄소 에너지를 조합해 CFE 비중이 높은 핀란드와 같은 국가도 있다.

우리나라가 원자력을 제외한다면 싱가폴이나 이스라엘 수준으로 최하위의 CFE 비중을 보이게 될 것이다. 탄소배출을 줄이기 위해서는, 그것도 빨리 줄이기 위해서는 재생에너지만 고집할 것이 아니라 비 재생에너지를 모두 합해서 빠른 시간에 낮은 가격으로 달성해야 한다.

[표 1]
각국에 위치한 구글 데이터센터의 CFE 비중[9)]

국가	지역 전력망	Grid CFE [%]	Google CFE [%]
Australia (NSW)	AEMO, Australia	27	27
Australia (Victoria)	AEMO, Australia	34	34
Belgium	Elia, Belgium	74	80
Brazil	ONS, Brazil	89	89
Canada	IESO, Canada	90	90
Canada	Hydro-Québec, Canada	100	100
Chile	Sistema Interconectado Central, Chile	53	90
Denmark	Energinet, Denmark	82	90
Finland	Fingrid, Finland	86	97
France	RTE, France	87	87
Germany	Germany	56	96
Great Britain	National Grid ESO, Great Britain	58	85
Hong Kong	Hong Kong	28	28
India	North India Regional Grid, India	23	23
India	West India Regional Grid, India	24	24
Indonesia	PPLN, Indonesia	13	13
Ireland	EirGrid, Ireland	39	39

9) Google Environmental Report, 2023

국가	지역 전력망	Grid CFE [%]	Google CFE [%]
Israel	Israel Electric Corporation (IEC)	2	2
Italy	Terna, Italy	42	42
Japan	Kansai Electric Power Company, Japan	32	32
Japan	TEPCO Power Grid, Japan	16	16
Netherlands	Tennet, Netherlands	42	57
Poland	PSE, Poland	24	24
Singapore	Energy Market Authority, Singapore	4	4
South Korea	KPX, South Korea	31	31
Spain	Red Eléctrica, Spain	67	67
Switzerland	Swissgrid, Switzerland	85	85
Taiwan	Taiwan Power Company, Taiwan	18	18
U.S.	BPA, U.S.	89	89
U.S.	CAISO, U.S.	56	56
U.S.	Duke Energy Carolinas, U.S.	59	63
U.S.	Texas (ERCOT), U.S.	41	41
U.S.	Midcontinent (MISO), U.S.	35	96
U.S.	Nevada (NVE), U.S.	27	27
U.S.	PacifiCorp East (PACE), U.S.	31	31
U.S.	PJM, U.S.	40	60
U.S.	South Carolina(Santee Cooper), U.S.	26	26
U.S.	Southern Company (SOCO), U.S.	28	40
U.S.	Southwest Power Pool (SPP), U.S.	47	87
U.S.	Tennessee Valley Authority (TVA), U.S.	52	63

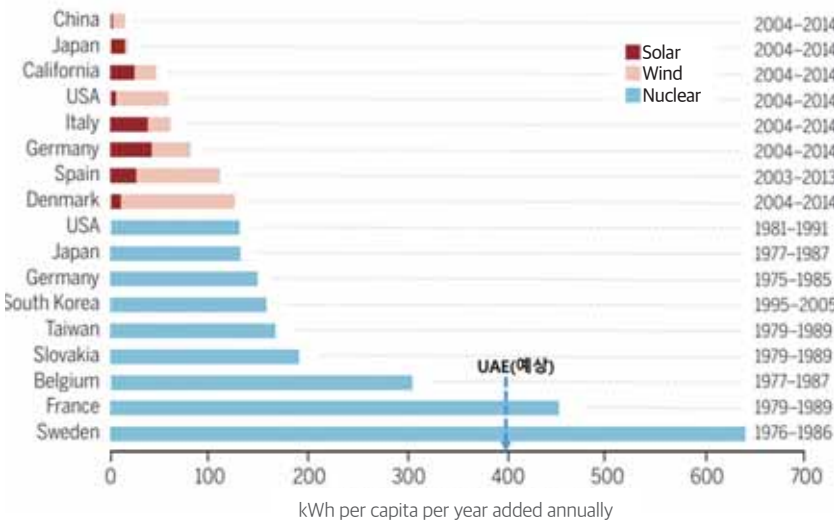
12. 무탄소 전력공급은 '원자력'

UAE에는 우리나라가 수출한 APR1400 원자력발전소 4기가 건설되어 운영되고 있다. 이들 4기가 생산하는 전력은 UAE 총사용량의 1/4에 해당한다. 2009년부터 시작된 프로젝트가 15년이 지난 지금 UAE 전력의 25%를 무탄소로 공급하는 데 이른 것이다. 2009년 UAE는 100%에 가까운 전력을 천연가스로 생산하고 있었으나 현재는 1/4을 원자력, 나머지 3/4의 대부분을 천연가스로 생산하고 있다.

UAE는 최근 발행한 자국의 최고액권 지폐 1,000디르함(한화 35만 원 상당)의 도안으로 바라카 원전 4기의 사진을 사용하기도 했다. 이는 UAE의 경제발전과 과학기술 발전의 상징으로서 바라카 원전이 자리 잡았다고 할 수 있다.

[그림 11]
UAE 최고액권 화폐 도안의 APR1400 원자력 발전소

[그림 12]
재생 및 원자력 전력의 공급 증가 속도가 가장 빨랐던 시기의 증가 속도 비교[10)]



10) Science 353 (6299), 547-548

[그림 12]는 현재까지 재생에너지와 원자력의 증설을 통한 무탄소 전력원 공급이 가장 피크를 이루었던 10년간의 국민 한 사람당 평균 무탄소 전력 생산량 증가를 나타낸 것이다. 원자력 발전의 증설이 한참을 이루었던 시기가 무탄소 에너지 증가가 가장 빨랐었다는 것을 알 수 있다. 태양광이나 풍력 대비 증설 속도 또한 원자력이 우수함을 알 수 있다. 역사상 가장 빠른 무탄소화는 스웨덴의 원자력 발전 증설을 통한 것이었으며, 프랑스, UAE 등이 그 뒤를 잇는다.

탈원전을 추진한 독일도 역사상 원자력 전력공급 증가 속도가 재생에너지보다 빨랐다. 따라서, 무탄소 에너지 공급 속도를 높이기 위해서는 원자력의 기여를 중요하게 가져가야 할 것이다.

2023년 두바이에서 개최된 기후변화당사자국총회에서 22개국이 원자력을 2050년까지 현재의 3배로 늘리겠다고 약속한 것도 이런 측면을 고려한 것이다. 차세대 대형원전 및 소형모듈원전의 건설을 통한 무탄소 전력공급의 가속화가 기대된다.

13. 전기가 전부가 아니다

세계 전력 사용량은 연간 29,000TWh이다.

반면 세계 에너지 사용량은 168,000TWh이다. 전력을 생산하는 데 투입된 에너지는 47,000TWh이므로 우리가 사용하는 에너지에서 전력은 30% 정도 된다. 나머지 70%는 난방, 자동차 연료, 공장 연료 등 다양하게 사용되고 있다.

전력공급을 탄소배출 없이 하더라도 전체 에너지 사용량에서 30%만 감당할 뿐이다. 모든 기업과 가정이 RE100을 실시간으로 달성하더라도, CFE100을 달성하더라도 지구 차원에서는 RE30, CFE30일뿐이다.

따라서, 현재 전기를 사용하지 않는 난방, 공정 열, 이동 수단의 연료

등을 모두 무탄소 연료로 치환하거나(탄소가 없는 연료는 사실 수소나 암모니아 등 특별한 연료 외에는 없음) 전기를 쓰도록 하는 것이 방법이다. 무탄소 연료도 연료를 생산하는 데는 열이나 전기가 필요하므로 결국 전기 수요 증가로 귀결되거나 새로운 열원을 공급해 줘야 한다.

가장 이상적인 해법은 기존의 비 전력 분야의 에너지 수요를 전기 수요로 돌리고(전기 수요는 한 단계 더 폭증하게 된다), 열이 있어야 하는 곳에는 원자력 열원을 공급하는 등 무탄소화 하는 것이다. 즉, 자동차도 원자력이나 재생전기로 작동하는 전기자동차나 수소연료전지차로 바꾸고, 제철소에 사용하는 석탄도 원자력이나 재생에너지로 만든 수소로 대체하고, 공장에 필요한 고온의 열은 원자로에서 공급하는 등 종합적 에너지믹스 차원에서의 변혁이 성공해야 탄소중립은 달성할 수 있다.

RE100만 고집할 것이 아니라 CF100으로 한 단계 더 나가야 하고, 원자력을 포함한 모든 무탄소 에너지를 활용해 전력뿐만 아니라 비 전력 분야에도 무탄소 에너지를 공급할 수 있도록 우리의 시각을 한 차원 높이고 기술중립적이고 현실적으로 탄소중립 접근방식을 바꾸어야 한다.

원자력발전의 경제성

발전원에는 원자력, 석탄, 가스, 태양광 및 풍력 등의 여러 발전원이 있다.

주어진 전력수요를 충족시키기 위해서는 이들 발전원을 선택해 적절히 조합하는 과정을 거치게 되는데 이 경우 가장 기본적인 선택 기준 중의 하나가 경제성이다.

이만기

서울대
원자력정책센터
연구위원

우리나라의 원자력발전은 에너지믹스의 한 축을 담당하고 있다. 에너지믹스는 에너지 안보, 탄소배출 감축 및 경제성을 종합적으로 분석해 설정하고 있다.

본 원고에서는 원자력발전의 경제성을 중심으로 원자력발전의 경제적 특성을 소개하고자 한다. 원자력발전의 경제성은 발전단가 분석을 통해 접근하는 협의의 관점과 국민경제에 미치는 파급효과를 통해 접근하는 광의의 관점으로 나눌 수 있다. 본 원고에서는 원자력발전의 경제성에 대한 일반 대중의 이해를 돕기 위해 원자력의 발전단가 분석과 더불어 원자력발전의 국민경제 및 지역경제에의 기여효과에 대해서도 간단히 소개하고자 한다.

1. 발전단가 분석

발전원에는 원자력 이외에도 석탄, 가스, 태양광 및 풍력 등이 있다. 주어진 전력수요를 충족시키기 위해서는 이들 발전원을 선택해

적절히 조합하는 과정을 거치게 되는데, 이 경우 가장 기본적인 선택 기준 중의 하나가 경제성이다. 발전원의 경제성은 편익 대비 비용으로 측정할 수 있다. 발전단가는 kWh 당 비용으로 표시되는데 여기서 kWh는 발전원의 편익을 나타낸다. 따라서 분석의 편의상 발전원의 편익이 모두 동일하다고 가정한 것이다.

발전단가는 용도에 따라 실적발전단가와 평준화 발전단가로 나뉜다. 실적발전단가는 해당 회계 연도를 대상으로 총운영비용(지급이자, 연료비, 운전유지비 등의 제반비용)과 발전량 실적자료를 이용해 산출되는 회계적 원가의 개념으로, 주로 발전회사의 연간 수익성 분석에 사용된다. 한편, 평준화 발전단가는 미래에 투입될 후보 발전원을 대상으로 경제성을 평가하는 데 주로 이용되며, 발전소 수명 기간 동안 발생할 것으로 예상되는 총발전량 대비 총비용을 도출해 평준화 발전단가를 산출한다. OECD, IAEA 등 국제기구와 여러 나라에서 자국의 전원간 경제성 평가에 평준화 발전단가를 이용하고 있으며 우리나라의 전력수급기본계획에서도 참고 자료로 활용하고 있다.

전력은 수요와 공급이 실시간으로 항상 일치해야 하는 특성이 있다. 전력수요는 수시로 변하는데 이러한 전력수요를 항상 충족시키기 위해서는 전력시스템 운영자는 발전기의 출력조정을 지시하게 되고 이러한 지시를 받아 출력을 조정할 수 있는 발전원을 급전가능 발전원이라고 한다. 급전가능 발전원으로는 LNG복합화력, 석탄 및 원자력 발전을 들 수 있다. 이들 발전원에 대해서는 전력시스템 운용자가 출력조정 능력의 차이를 고려해서 전력부하의 특성에 따라 적절한 급전 지시를 내릴 수 있다. 그러나 이들 발전원과는 달리 햇빛 및 바람 등 자연현상의 영향을 받아 발전하는 태양광과 풍력발전에

대해서는 전력시스템 운용자가 급전 지시를 내릴 수 없으므로 이들 발전원은 비급전발전원으로 분류된다.

1) 급전가능 발전원의 평준화 발전단가

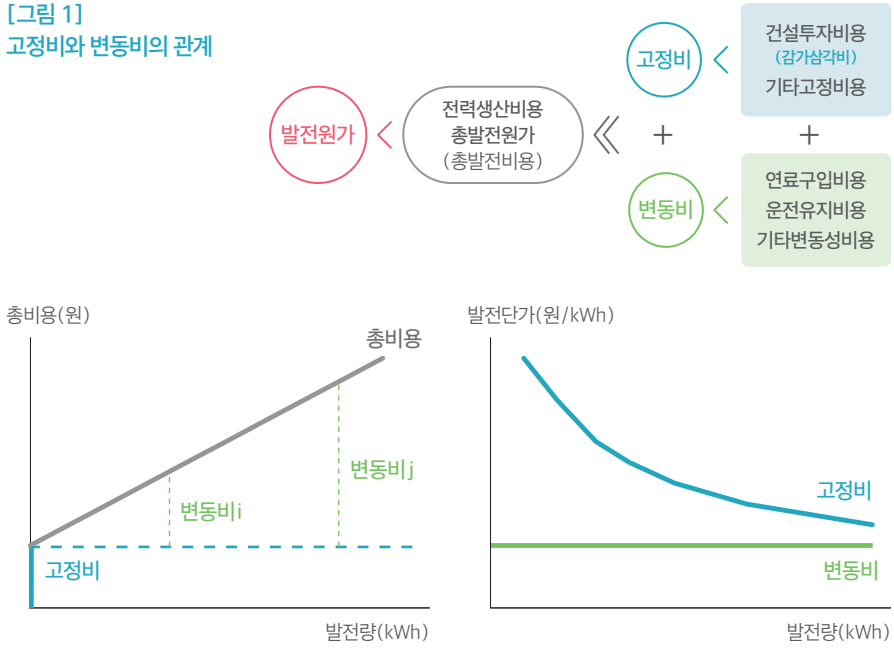
발전비용은 크게 건설비, 운전유지비, 연료비로 구성된다. 건설비는 순건설비[1]와 건설 중 이자로 구성된다. 이를 세부적으로 살펴보면 건설비는 직접비(기자재비, 시공비)와 간접비(설계기술용역비, 외자조작비, 사업주비, 용지비, 예비비)로 이뤄진다. 운전유지비는 발전소 운전 유지와 관련한 인건비, 수선유지비, 경비, 일반관리비 이외에도 원자력발전의 경우 원전해체, 중저준위 방사성폐기물, 사용후핵연료처분비 등의 원전 사후처리비를 포함하고 있다.[2] 원전의 연료비는 일반적으로 핵연료주기비(nuclear fuel cycle)라고 알려져 있다. 핵연료주기비는 핵연료의 원자로 장전과 인출을 기준으로 장전 이전에 발생하는 비용을 선행 핵연료주기비[3]라고 하고 인출 이후에 발생하는 비용을 후행 핵연료주기비라고 한다. 우리나라의 경우 원전의 연료비는 선행 핵연료주기비만을 의미하며 후행핵연료주기비는 운전유지비에 포함되어 있다.

건설비와 같이 발전량 증감과 관계없이 발생하는 비용을 고정비라고 하고, 운전유지비와 연료비와 같이 발전량에 비례해 증감하는 비용을 변동비라고 한다. 고정비와 변동비의 관계는 [그림 1]과 같다.

평준화 발전단가를 산정하기 위해서는, 경제 및 기술 변수에 대한 일정한 가정이 필요하다. 평준화 발전단가는 발전소 건설 및 운전에

1) 영어로는 overnight cost로 표현하며, 발전소의 건설이 '하룻밤 사이'에 이루어질 경우의 가상적인 건설비를 말한다.
2) 운전유지비의 범위는 나라마다 차이가 나는데 우리나라의 경우 원전사후처리비가 원자력 운전유지비에 포함되어 있다.
3) 선행 핵연료주기비는 정광, 변환, 농축, 성형가공 과정에서 발생하는 비용을 말한다.

[그림 1]
고정비와 변동비의 관계



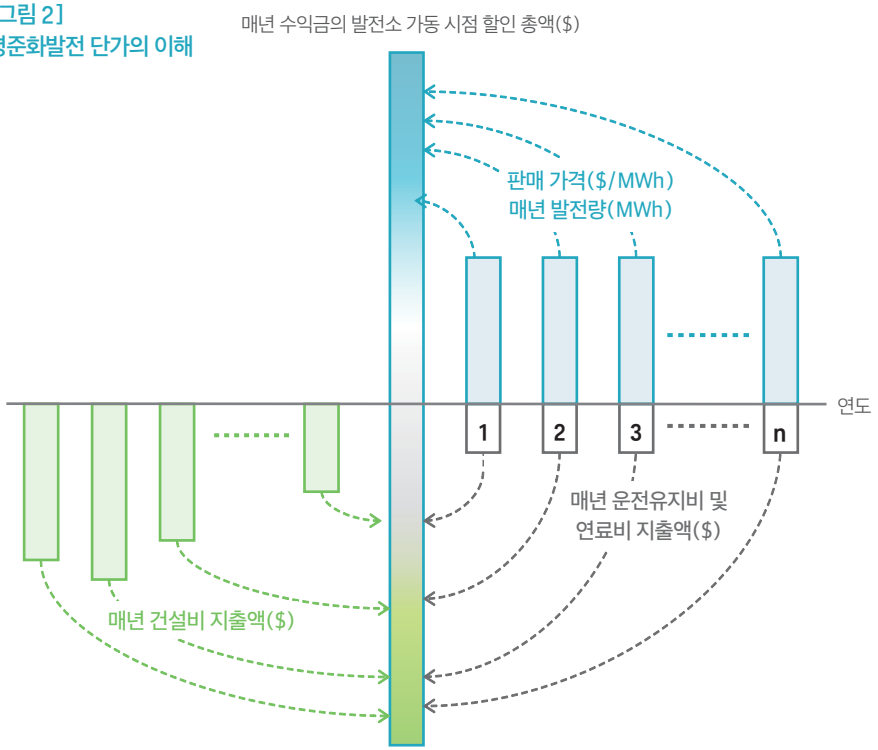
출처 : 한국 전력 거래소

소요될 것으로 예상되는 총비용을 회수할 수 있도록 설계된 인위적인 판매가격이다. 그런데 화폐는 시간적 가치를 가진다. 현재의 1달러 가치는 수년 후에 확정적으로 받게 될 1달러 가치보다 더 크다. 이는 화폐가 이자 및 투자를 통해 수익을 창출하기 때문이다. 따라서 서로 다른 시점에서 발생하는 화폐 흐름의 시간적 가치를 고려해야 하며 이를 위해 적절한 율로 할인 혹은 할증과정을 거쳐 동일한 시점(여기서는 발전소 가동 시점)에서의 가치를 평가해야 한다.

[그림 2]에서는 이러한 과정을 보여주고 있다. 매년의 발전량에 인위적인 가격을 곱하면 그해의 수익이 계산되는데 매년의 수익을 발전소 가동 시점으로 적정 율로 할인해서 모두 합하면 발전소 수명기간 동안 발생할 것으로 예상되는 수익의 총액이 산출된다. 한편, 건설비는 발전소 가동 시점 이전에 수년에 걸쳐 지출이 발생하므로 발전소 가동 시점으로 할증해 모두 합하고 여기에 더하여, 매년 발생할 것으로 예상되는 운전유지비 및 연료비도 발전소 가동 시점으로

할인해 모두 합한다. 이제 발전소 가동 시점에서 평가한 총비용과 총수익이 서로 일치하도록 하는 판매가격을 도출할 수 있는데 바로 이 판매가격이 평준화 발전단가이다. 여기서는 편의상 발전소 가동 시점으로 할인했는데 할인 시점을 어느 연도로 정하든지 동일한 평준화 발전단가가 산출된다.

[그림 2]
평준화발전 단가의 이해



발전원별 발전단가를 산정하기 위해서는 주요 발전원별로 건설비, 운전유지비, 연료비 산정을 위한 구체적인 자료가 필요하다. 이러한 발전원별 경제성 자료는 적정 전원구성을 결정하는 중요한 역할을 한다. 우리나라는 전력수급기본계획을 수립하고 있는데 그 과정에서 발전원별 경제성 자료를 활용하고 있다. 그런데 전력수급기본계획의 주요 입력자료를 공식적으로 공개하지 않기 때문에 이번 원고에서

활용할 수 없지만 OECD의 출판물[1]에 수록된 우리나라 발전원의 경제성 자료를 원용하고 합리적인 가정하에 주요 발전원의 발전단가를 산출해 비교하고자 한다[4].

[표 1]
전원별 발전단가 산정 입력자료

	원자력	석탄	LNG복합
용량(MW)	1455	1000	1000
순건설비(천원/kW)	2,246	1,208	905
건설공기(년)	7	4	3
수명기간(년)	60	40	30
운전유지비(천원/kW.년)	135	36	27
연료비(원/Gcal)	2,492	33,497	73,647
소내전력 소비율(%)	5.4	4.6	1.8
이용률(%)	85		
할인율(%)	4.5%		

[표 1]의 주요 입력자료 중에서 순건설비, 건설공기, 수명기간, 이용률은 OECD 출판물[1]의 한국 자료를 참조했다.[5] 운전유지비는 편의상 순건설비 총액의 일정 비율을 적용했는데 원자력 6%, 석탄 및 LNG 복합화력은 3%를 각각 적용했다. 원자력의 운전유지비 적용 비율이 타 발전원보다 2배 높은 것은 원전사후처리비(원전해체비, 중저준위방사성폐기물, 사용후핵연료처분비)가 포함되었기 때문이다. 연료비는 전력통계정보시스템[2]의 2019~2023년 평균치를 활용했다. 할인율은 최근의 제10차 전력수급기본계획에서 적용한 4.5%를 적용했다.

발전원별 발전단가(원/kWh)는 원자력 43.8, 석탄 85.2, LNG 복합화력 122.1로 각각 산출됨으로써 원자력이 가장 저렴한 발전원임을 보여주고 있다. 발전원별 평준화 발전단가를 그 구성요소별로 살펴보면 [표 2]와 같다.

4) OECD에서는 5년마다 회원국이 제공하는 발전원별 경제성 자료를 취합하여 평준화발전단가를 산정하고 있다.
5) OECD 보고서 작성 당시의 달러당 환율인 1,100원을 적용했다.

[표 2]
전원별 평준화 발전단가 산정결과

단위: 원/kWh

	원자력	석탄	LNG 복합화력
자본투자비	18.5	10.3	8.3
운전유지비	19.1	5.1	3.7
연료비	6.2	69.7	110.1
총계	43.8	85.2	122.1

원자력은 자본투자비가 석탄의 1.8배, LNG 복합화력의 2.2배로 가장 높지만, 연료비가 매우 저렴한 특징을 보인다.

여기서는 온실가스 배출비용을 고려하지 않았는데 온실가스 배출비용을 고려하면 석탄 및 LNG 복합화력의 발전단가가 상승한다. OECD 자료에서는 CO2 톤당 30$의 비용을 적용하고 있는데 이를 발전단가로 환산하면 석탄발전의 경우 25.6원/kWh, LNG복합화력의 경우 11.4원/kWh의 온실가스배출비용이 추가되어 원자력발전의 상대적 경제성은 더욱 향상된다.

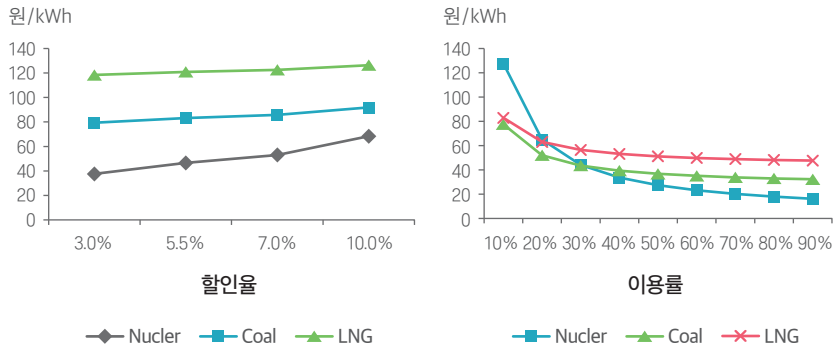
원자력의 발전단가에 가장 큰 영향을 미치는 매개변수는 이용률과 할인율이다. 이용률과 할인율에 대한 발전단가 민감도 분석결과는 발전원별로 [그림 3]과 같다.

할인율에 대한 발전단가의 민감도를 보면, 할인율의 상승은 모든 발전원의 발전단가 상승으로 이어지고 있음을 알 수 있다. 상승폭은 원자력이 가장 높고, 그다음이 석탄, LNG 복합화력의 순임을 보여주고 있다. 원자력의 발전단가가 할인율에 가장 민감한 것으로 나타나지만, 10%와 같이 높은 할인율에서도 원자력의 발전단가가 여전히 가장 낮은 것을 알 수 있다.

높은 할인율을 적용한다는 것은 그 사회가 단기적인 관점으로 발전원의 경제적 타당성을 평가하겠다는 것을 내포하는 것이다. 단기적인 관점에서는 초기투자비가 적고 편익이 단기에 많이 발생하는 사업이 선호된다. 한편, 낮은 할인율을 적용하면 그 사회는 장기적 시각으로 발전원의 경제성을 평가하며 비록 초기투자비가 많더라도

편익이 장기에 많이 발생하는 사업을 선호함으로써 미래세대에 대한 배려를 고려하고 있다고 볼 수 있다. 따라서 높은 할인율 하에서는 LNG 복합화력의 경제성이 유리해지고 낮은 할인율 하에서는 원자력발전의 경제성이 유리해지는 경향이 있다. 공공투자의 경우 선진국의 할인율은 낮은 반면 개발도상국의 할인율은 높은 것이 일반적인 현상이다. 우리나라의 장기 전력수급계획에서는 1990년대에는 8%의 할인율을 사용해 왔었는데 2000년대 들어서면서 점차 낮아지다가 최근의 제10차 전력수급기본계획에서는 4.5%의 할인율을 적용하고 있다. OECD(2015) 보고서에 따르면 안정적인 수익률을 보장받는 정부 소유의 발전회사의 경우 3%, 그렇지 않고 수익률이 시장의 리스크에 노출되어 있는 투자자의 경우 10%를 적정 할인율로 제시하고 있다[3].

[그림 3]
할인율 및 이용률에 대한 발전단가 민감도



이용률에 대한 발전원가의 민감도를 보면, 이용률이 상승하면 모든 따라 발전량이 증가하면 건설비와 같은 초기 투자비의 발전량당 비용이 하락하기 때문이다. 원자력발전은 타발전원(유연탄, LNG)에 비해 고정비인 건설비의 비중이 큰 반면, 연료비는 매우 작으므로 이용률이 증가해 발전량이 많아지면 많아질수록 원자력발전의 총 발전단가가 더욱 빠르게 감소하는 특성이 있다.

전원별 발전단가는 발전량에 따라 경제적 우위가 서로 다르게 되는데, 연간발전량이 적은 경우(이용률이 10% 이하)에는 LNG발전이 가장 저렴한 것으로 나타나고 이용률이 10% 이상 30% 이하에서는 유연탄화력이, 그리고 이용률이 30% 이상에서는 원자력이 가장 저렴한 발전원임을 보여주고 있다. 첨두부하처럼 지속시간이 짧아 적은 발전량이 필요한 시간대에는 LNG복합화력이 가장 경제적이므로 LNG복합화력을 투입하고, 기저부하와 같이 일 년 내내 발생하는 전력수요에 대해서는 원자력 발전을 통해 수요를 충족시키는 등 적절한 에너지믹스를 구성하는 것이 전력시스템의 총운용비용을 최소화하는 방법이다. 여기서는 경제성만 언급했는데, 수요와 공급을 항상 일치시켜야 한다는 전력의 특성 때문에 발전원의 순간적인 출력변동이 필요하며, 원자력은 순간적인 출력변동이 용이하지 않으므로 LNG복합화력과 같이 출력변동이 유연한 발전원도 전력시스템에 필요하다. 즉 적절한 에너지믹스는 경제성 측면과 아울러 발전의 기술적 측면에서 필요하다고 본다.

2) 비급전발전원인 태양광 및 풍력의 발전단가

태양광 및 풍력 발전의 평준화 발전단가 산출을 위해서는 신뢰할 수 있는 구체적인 경제성 자료가 필요하다. 여기서는 우선 OECD(2020) 자료를 근거로 이들 재생에너지의 평준화 발전단 산출을 시도했다. OECD 보고서의 우리나라 태양광 및 풍력 발전의 평준화 발전단가 입력자료 및 분석결과는 [표 3]과 같다.[6)7)]

6) OECD 보고서에서는 할인율을 3%, 7%, 10%로 설정해 분석했는데 이 원고에서는 4.5%를 적용했다.

7) 태양광의 발전효율이 매년 0.5%씩 감소하는 것으로 가정했다(OECD(2020))

[표 3]
태양광 및 풍력의 발전단가

		태양광[7]	육상풍력	해상풍력
입력 자료	용량(MW)	3	15	100
	순건설비(천원/kW)	1,335	2,158	3,833
	건설공기(년)		1	
	수명기간(년)		25	
	운전유지비(천원/kW.년)	17	62	129
	소내전력 소비율(%)		1.0	
	이용률(%)	15	23	30
	할인율(%)		4.5%	
평준화 발전단가(원/kWh)		89.6	107.3	153.5

분석 결과, 평준화 발전단가(원/kWh)는 태양광 89.6, 육상풍력 107.3, 해상풍력 153.5으로 각각 나타났다.

평준화 발전단가에 가장 큰 영향을 미치는 입력자료인 순건설비를 미국과 일본의 OECD 출판물[1]에 수록된 자료와 비교해 우리나라의 순건설비의 적정성을 살펴보았다[표 4].

[표 4]
OECD(2020)에 수록된 태양광과 풍력발전 순건설비 국제비교

	태양광		육상풍력		해상풍력	
	용량 (MW)	순건설비 ($/kW)	용량 (MW)	순건설비 ($/kW)	용량 (MW)	순건설비 ($/kW)
미국	100	1,072	100	1,637	600	2,350
일본	2	2,006	20	2,282	100	4,039
한국	2.97	1,226	14.85	1,982	99	3,520

발전설비 용량이 작아지면 규모의 비경제가 발생해 순건설비($/kW)가 증가하는 것이 일반적인 경제현상이다. 그런데 우리나라의 재생에너지 용량은 일본에 비해 작거나 비슷한데도 불구하고 순건설비는 일본에 비해 오히려 더 낮은 것으로 나타났다. 미국의 경우는 우리나라보다 용량이 훨씬 더 크므로 순건설비가 우리나라보다 매우 더 적어야 한다. 그런데 용량의 크기에 비해 우리나라보다 순건설비가 크게 작지 않은 것으로 나타났다. 용량의 크기를 고려하여 순건설비를 비교하는 방법으로 용량보정계수를 활용할 수 있다.

태양광의 경우 미국과 우리나라의 순건설비 용량 보정계수의 구체적인 산출과정은 다음과 같다.

$$\text{한국의 태양광 순건설비} = \text{미국의 태양광 순건설비} \times \left(\frac{\text{미국의 설비용량}}{\text{한국의 설비용량}}\right) \times \left(\frac{\text{한국의 설비용량}}{\text{미국의 설비용량}}\right)^{\text{보정계수}}$$

보정계수가 1이면 용량에 관계없이 양국의 태양광 순건설비가 동일하다는 것을 의미하고 보정계수가 1보다 작으면 작을수록 한국의 태양광 순건설비가 미국보다 더욱더 높아진다는 의미이다.

미국과의 비교를 위해 용량보정계수를 산출한 결과, 태양광 0.96, 육상풍력 0.90, 해상풍력 0.78로 각각 나타났다. 적정 용량보정계수는 비교 대상의 용량 차이에 따라 다르게 평가되는 것이 일반적이다. 참고로 우리나라의 제4차 전력수급기본계획에서는 500MW의 순건설비를 기준으로 100MW 순건설비를 추정하기 위한 용량보정계수로 0.55를 제시하고 있다[4].

미국, 일본과의 순건설비를 비교한 결과, OECD(2020) 보고서 작성 과정에서 우리나라가 재생에너지 순건설비를 너무 낮게 제시되었다고 판단된다.

3) 발전시장에서의 발전단가

앞서 언급한 평준화 발전단가를 활용한 우리나라의 재생에너지 경제성평가는 한계가 있으므로 발전시장에서 실제로 판매되고 있는 정산단가를 살펴봄으로써 재생에너지의 경제성을 가늠하고자 한다.

이상적인 발전시장에서는, 시장 참여 발전원이 계통한계비용과 일치하는 가격에 전기를 판매하도록 가격을 설정하고 있다. 따라서 계통한계비용은 매우 중요한데 그 결정 과정은 다음과 같다. 주어진 전력수요를 최소의 비용으로 충족시키기 위해 변동비용이 가장 저렴한 발전기부터 투입을 시작해 점차 변동비용이 높은 발전기를

추가로 투입한다. 이러한 발전기의 투입 순서는 주어진 수요를 모두 충족시킬 때까지 지속된다. 수요를 충족시키는 마지막 투입 발전기의 변동비가 그 시간대의 계통한계비용이다.

일반적으로 전력수요는 시간에 따라 변한다. 주로 새벽 시간대의 전력수요는 다른 시간대에 비해 낮다. 가정과 기업의 경제활동이 시작되는 시간대로 시간이 경과 되면 전력수요가 점차 더 높아진다. 그런데 새벽 시간대의 낮은 전력수요는 이를 충족시킬 수 있는 발전기 중에서 변동비가 가장 낮은 발전기가 공급한다. 여기에서 변동비는 1kWh 추가 발전에 소요되는 비용이므로 한계비용으로 불린다. 다시 말하면 한계비용이 가장 저렴한 발전기가 투입되어 수요를 충족시키는 데 활용된다. 이 발전기가 가장 효율적인 발전기이다. 왜냐하면 가장 적은 비용으로 주어진 수요를 공급할 수 있기 때문이다. 이제 수요가 이보다 더 증가하게 되어서 가장 효율적인 발전기의 공급 능력을 초과하게 되면, 그다음으로 효율적인 발전기가 추가 투입되어 추가된 수요를 공급한다.

수요가 지속적으로 증가하게 되면 전력수요를 공급하고 있던 발전기의 발전 공급량을 수요가 또다시 초과하게 되고 초과된 수요에 대해서는 그다음으로 효율적인 발전기가 추가 투입되어 전력을 공급한다. 이러한 과정은 주어진 전력수요를 모두 충족시킬 때까지 지속된다. 그러다가 저녁 시간대로 접어들면 전력수요가 줄어들게 되고 이에 따라 가장 한계비용이 높은 발전기부터 발전시장에서 퇴출당한다.

이러한 과정을 급전(dispatch)이라고 하는데 이러한 방법으로 급전하면 전력시스템 총 운용비용이 최소가 된다[8]. 이는 발전시장에서

8) 급전가능 발전원 중에서 한계비용이 가장 낮은 발전원은 원자력이고 가장 비싼 발전원이 LNG 발전이다. LNG 발전의 연료비가 타발전원에 비해 가장 높기 때문에 급전과정에서 한계발전기로 작용해 LNG 발전의 연료비가 전력시스템가격을 주로 결정하게 된다.

주어진 전력수요를 가장 낮은 비용으로 공급할 수 있는 발전기만 시장에 참여하게 되기 때문이다. 우리나라에서는 전력거래소가 급전을 담당하고 있다. 여기서 매 시간마다 맨 마지막으로 투입되어 전력을 공급하는 발전기를 한계발전기라고 하며 한계발전기의 한계비용이 바로 계통한계비용(System Marginal Cost)이 된다. 시장에 참여하는 발전기 중에서 한계발전기를 제외한 모든 발전기가 직면하는 가격이 그 자신의 한계발전비용 보다 높으므로 초과이윤을 얻게 된다. 따라서 하루 중 24시간에 해당하는 24개의 한계발전기와 그와 동일한 개수의 한계비용이 산출된다.

그런데 한계비용과 동일한 값을 가격으로 설정하는 것이 주어진 자원을 가장 효율적으로 배분하는 가격설정 방법이라는 것이 경제학의 기본적인 가격설정 방법이다. 따라서 계통한계비용을 통상적으로 계통한계가격(System Marginal Price)으로 명명하고 있다.

이와 같은 가격설정을 통해 주어진 자원을 가장 효율적으로 배분할 수 있다는 것이 경제학의 주요 담론 중 하나다. 우리나라에서는 발전시장에서의 전력판매가격의 설정은 발전원별로 서로 다르게 설정되어 있는데, 태양광과 풍력을 위시한 신재생에너지는 계통한계가격으로 판매되지만, 그 외의 발전원은 이보다 낮은 가격에 판매되도록 가격을 설정하고 있다. 2022년의 경우 발전원별 판매단가 및 계통한계가격은 [표 5]와 같다.

[표 5] 발전시장에서의 발전원별 판매단가 및 계통한계가격('22)

단위: 원/kWh

원자력	석탄	LNG	태양광	풍력	계통한계가격
52.5	156.7	239.3	191.0	191.5	196.7

2022년의 발전시장 정산단가를 살펴보면 원자력이 52.5원, 석탄 156.7원, LNG 239.3원, 태양광 191.0원, 풍력 191.5원으로, 원자력이 가장 저렴하고 그다음이 석탄, 재생에너지, LNG 순으로 나타나서 LNG 발전의 정산단가가 가장 높으며, 태양광과 풍력이 LNG보다 더

저렴한 것으로 나타났다. [표5]의 발전시장에서의 발전원별 판매단가를 [표2]의 전원별 평준화 발전단가와 비교해보면, 발전시장에서의 판매단가가 평준화 발전단가보다 더 높은 것으로 나타났다. 이러한 현상은 석탄과 LNG발전에서 더 두드러진다. 이는 평준화 발전단가 산정에서는 연료비를 최근 4년간 평균치를 사용한 반면, 발전시장에서의 이들 판매단가는 2022년의 값이 적용되었기 때문이다.[9)]

발전시장에서의 태양광과 풍력의 판매단가는 평균적으로 계통한계가격과 비슷하지만 LNG발전은 계통한계가격보다 평균적으로 약 22% 더 높은 것으로 나타났다. 계통한계가격은 매시간 마다 결정되므로 일 년에 8,760개의 계통한계가격이 형성되는데 [표5]에서는 2022년의 매시간의 계통한계가격의 평균값을 보여주고 있다[10)]. 우리나라는 발전시장에서 원자력과 석탄발전의 판매가격을 계통한계가격보다 매우 낮은 수준으로 설정함으로써 전기요금 안정화를 도모하고 있는 것으로 나타났다. 특히 원자력의 판매가격은 매우 낮아서 전기요금 안정화에의 기여가 매우 큰 것을 알 수 있다.

4) 태양광과 풍력의 발전 외 시장에서의 발전단가

태양광은 발전시장에서 거래될 뿐만 아니라 발전 외 시장인 직접전력거래계약(PPA)[11)]을 통해서 발전시장을 거치지 않고 한전과 직접 거래되고 있으며 계통한계가격(SMP)으로 판매되고 있다. 태양광 발전은 발전시장뿐만 아니라 발전 외 시장인 직접전력거래계약(PPA)을 통해서도 전력을 판매한다. 2022년의 태양광 발전의 판매단가는 발전시장에서 191원/kWh인데 직접전력거래계약을 포함하면 193.0원/kWh가 된다.

---

9) 2022년은 러시아 우크라이나 전쟁으로 화석연료가격이 대폭 상승한 해이다.

10) 매시간의 계통한계비용과 발전량의 가중평균치이다.

11) PPA는 Power Purchase Agreement로 발전시장을 통하지 않고 한국전력이 전력을 생산자로부터 직접 구입하는 계약이다.

이외에도 신재생에너지 공급자는 신재생에너지 1MWh당 1REC (신재생에너지 공급인증서; Renewable Energy Certificate, 이하 REC)를 부여받아 REC 시장에서 판매해 수익을 창출할 수 있다. 한편, 신재생에너지의무할당제(Renewable Portfolio Standards, 이하 RPS)에 의해, 일정규모(500MW) 이상의 발전사업자는 자신의 총 발전량의 일정 비율 이상을 신재생에너지를 이용하여 발전하도록 의무화되어 있다. 2024년의 RPS 의무비율은 13.5%이므로, 발전사는 발전량의 13.5%를 신재생에너지로 공급해야 한다. 그런데 RPS 의무비율은 해마다 오르도록 규정되어 있다. 이들 발전사업자는 신재생에너지 의무공급량을 확보하기 위해서 자신이 직접 신재생에너지 발전소를 건설해 발전하거나 그렇지 않으면 REC 시장에서 REC를 구입해야 한다. REC 가격은 REC 시장에서 REC에 대한 수요와 공급에 의해 결정된다. 신재생에너지의 발전단가를 이야기할 때는 발전시장과 발전 외 시장인 직접전력거래계약 이외에도 REC 시장까지 망라한 신재생에너지의 kWh당 판매단가를 살펴보아야 한다.

REC 시장에서의 태양광 및 풍력을 위시한 신재생에너지의 판매단가는 명시적으로 발표되지 않고 있는데, 이들 신재생에너지가 공급하는 REC를 국민이 일정 가격을 지불하고 구입하고 있으므로 이를 신재생에너지의 비용으로 간주해야 한다. 소비자가 수령하는 전기요금 고지서의 전기요금 부과항목으로 기후환경요금이 2021년 1월부터 신설되어서 당시 5.3원/kWh를 전기소비자에게 부과했다. 그 후 해마다 올라 현재 9원/kWh을 기후환경요금으로 부과하고 있다. 기후환경요금의 약 86%가 신재생이행 비용으로 주로 REC 재원 확보 비용이다.

신재생에너지의 REC 가격은 연도에 따라 50~90원/kWh의 범주로 추정된다.[12)]

12) 한국원자력연구원 내부자료 참조

발전시장 및 발전 외 시장인 직접전력거래계약(PPA)과 REC 시장을 망라한 태양광 및 풍력의 판매단가는 241~283원/kWh로 추정되어 발전시장에서의 이들 발전원의 명시적인 정산단가보다 약 26~48%나 더 높은 것으로 나타남으로써 발전단가가 가장 높은 발전원으로 분석됐다.

이와 더불어, 재생에너지는 간헐성으로 인해 전력시스템의 운용에 비용을 가중시킨다. 이러한 비용을 전력계통 통합비용이라고 한다. 통합비용은 재생에너지 점유율이 증가할수록 커지며, 이러한 현상은 우리나라와 같은 고립된 송전망의 경우 더욱 심각하다. OECD/NEA(2019)[5]는 재생에너지 비중이 10%일 때 $7/MWh, 30%일 때 $17/MWh, 50% $30/MWh를 재생에너지 통합비용으로 제시했다. 발전단가에 근거한 재생에너지의 경제성을 논할 때는 이러한 전력계통 통합비용까지도 언급해야 할 것이다.

전 세계적으로 재생에너지인 태양광 및 풍력발전의 점유율이 증가하고 있는 추세이다. 그런데 재생에너지의 경제성은 자연조건에 좌우되므로 나라마다 크게 차이가 나게 마련이다.

우리나라의 경우 재생에너지의 발전단가가 매우 높은 것으로 분석됐다. 원자력발전과는 비교할 만한 수준이 못 되고, 다른 발전원보다도 경제적 열위에 있는 것으로 분석됐다. 그런데도 재생에너지를 확대해야 하고자 한다면 그로 인해 사회에서 부담해야 하는 경제적인 추가 부담을 충분히 인식해야 할 것이다.

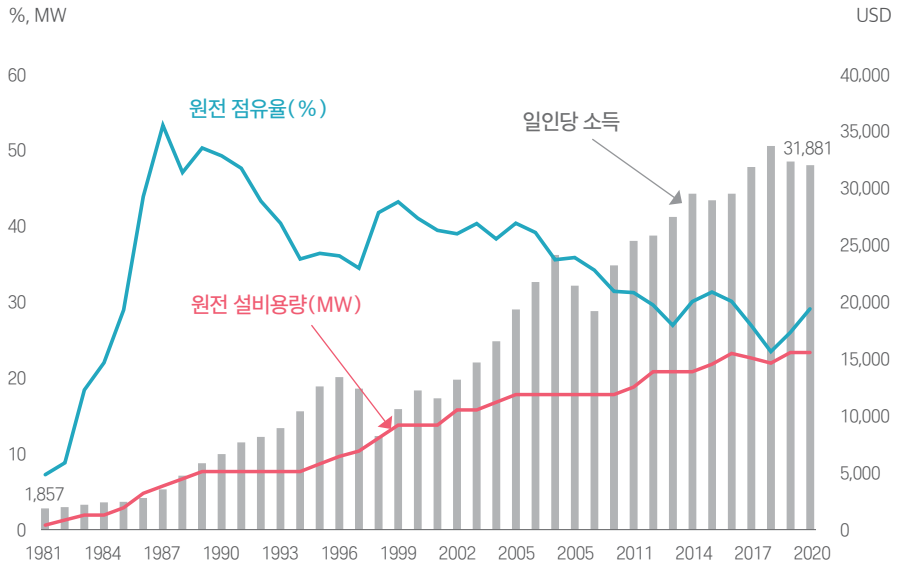
향후 재생에너지의 점유율 증가는 재생에너지에 대한 객관적인 경제성 평가를 전제로 해야 하며, 이를 위해서는 재생에너지 비용에 대한 신뢰성 있는 통계자료 생산이 매우 필요하다고 본다.

2. 원자력발전의 국민경제 및 지역경제적 기여

1) 원자력발전의 국민경제적 기여

우리나라는 과거 40년 동안 괄목할 만한 경제성장을 이룩해냈다. 일인당 소득은 1981년의 1,857달러에서 2020년 3만 달러를 상회해 국제적인 선진국으로 인정을 받기에 이르렀다. 이러한 경제성장을 이룩하는데 기여한 요인은 여러 가지가 있겠지만 본고에서는 원자력발전에 초점을 두고 원전이 우리나라의 경제성장에 기여한 바를 소개하고자 한다[그림 4].

[그림 4]
우리나라의 원자력발전과 일인당 소득 증가 추이



원자력발전의 역할은 전통적으로 주어진 에너지 수요를 충족시키는 에너지 공급원의 측면에서 다뤄져 왔다. 이러한 에너지 공급 측면에 더해, 원자력발전은 국민경제를 구성하는 주요 경제부문 중 하나이며 하나의 산업으로서 국민경제에 기여해 왔다.

그런데 국민경제를 구성하는 산업은 각 산업의 경제활동을 통해 서로 연관되어 있다. 그런 이유로 한 산업에 대한 투자는 다른 경제 부문에

파급효과를 일으킨다. 이러한 파급효과는 후방 연쇄효과와 전방연쇄효과로 정의된다. 원자력발전의 후방연쇄효과는 원자력발전부문 생산 증가가 이에 필요한 중간재나 원료를 공급하는 타 산업을 활성화시키는 효과를 말한다. 원전 건설과 관련해 설명하면, 원전건설은 일반기계설비 산업의 생산을 유발하고, 1차 금속제품 산업의 생산을 유발하며, 기타 관련 산업의 생산을 유발한다. 원전건설로 인한 후방연쇄효과는 이와 같은 방식으로 관련 산업에 연쇄적인 파급효과를 가져온다.

반면에 전방연쇄효과는 원자력발전 부문의 생산물인 전기를 중간투입물로 사용하는 타 산업을 활성화하는 효과를 말한다.

원자력발전의 편익을 국민경제적 측면에서 종합적으로 평가한 보고서로는 IAEA(2009)[6]가 있다. 동 보고서에 수록된 연구결과는 우리나라와 IAEA가 공동으로 협력하여 수행한 것이다[13]. 이 보고서에서는 원자력발전의 GDP에의 기여를 1980년부터 2005년까지 5년 간격으로 추정했다. 2005년의 추정결과는 [표 6]과 같다.

[표 6]
원자력발전의
GDP 기여(2005)

	후방연쇄효과		전방연쇄효과	총효과	비고
	건설	운전			
총기여	0.2%	1.1%	0.8%	2.1%	
	1.3%				
순기여	0.3~0.4%		0.3%	0.6~0.7%	원전과 화석연료 발전의 대체 고려

이 보고서(IAEA, 2009)에서는 원자력발전의 후방연쇄효과만 수록하고 있는데 전방연쇄효과는 원자력연구원의 내부자료에 의한 것이다.

13) 우리나라에서는 한국원자력연구원, 한국안전기술원, 한국수력원자력(주), 경북대의 전문가가 참여했고 IAEA에서는 Planning and Economic Study Section의 전문가가 참여했다.

[표 6]에서는 우리나라의 2005년의 GDP 중 2.1%는 원자력발전이 기여한 것으로 나타났다. 그리고 원자력발전과 화석연료 발전의 대체를 고려한 원자력발전의 순기여는 2005년 GDP의 0.6~0.7%인 것으로 추정됐다. 즉, 우리나라가 원자력발전을 도입하지 않았다면 2005년의 GDP가 0.6~0.7% 감소했을 것이라는 의미다.

원자력발전의 GDP에의 기여에 관한 또 다른 우리나라의 사례분석이 IAEA TecDoc [7]에 수록되어 있다. 동 사례분석은 IAEA가 개발한 전산모형인 EMPOWER[14)]를 활용해 원자력발전이 2009년의 GDP에 기여한 효과를 추정했다. 동 사례분석에서는 GDP에의 순기여만을 추정했는데 추정결과는 화석연료의 연료비 상승 정도에 따라 0.57%~0.82%의 범위를 가지는 것으로 나타났다. 화석연료 가격이 상승할수록 원자력발전의 국민경제적 기여는 더 커지는 것으로 나타났다. 원자력발전의 GDP에의 순기여효과는 두 연구에서 서로 비슷한 범위를 보이고 있어서 연구결과가 비교적 일관성을 유지하고 있다고 판단된다. 이상의 두 사례분석을 통해 원자력발전의 GDP 기여효과는 순기여 0.6~0.7%, 총기여 2.1%인 것으로 추정됐다.

2) 원자력발전의 지역경제적 기여

고리1호기의 영구정지(2017년 6월 18일)가 지역경제 손실에 미치는 효과 추정을 통해 원전의 지역경제에의 기여를 살펴보기로 한다. 고리1호기는 설비용량 587MW로 통상적인 1000MW 원전의 약 60%에 해당한다.

고리1호기 영구정지의 지역경제 손실 유발은 주로 발전량 감소에 기인한다. 발전량이 감소하면 원자력발전과 관련된 지역협력업체

14) Extended Input-Output Model for Sustainable Power Generation

(immediate supply chain)의 경제적 손실과 이로 인한 부차적인 제2, 제3의 supply chain의 연쇄적인 경제적 손실이 발생한다. 또한 발전량감소는 발전소 주변지역 지원사업의 규모 축소로 이어져 지역경제의 손실을 가중시킨다. 지역경제 파급효과는 지역산업 연관표를 이용해서 산출할 수 있다[8]. 필자가 분석한 바에 의하면, 고리1호기 영구정지의 기장군 지역경제 손실 유발액은 부가가치로 평가했을 때, 연간 약 800억 원인 것으로 나타났다. 이는 기장군 GRDP(2016년기준)의 1.5%에 해당한다[9].

기장군에 위치한 고리1호기의 영구정지가 유발하는 부가가치 손실액은 기장군에 국한되지 않고 인근 지역인 부산과 전국으로 확대된다. 부가가치 감소액은 부산지역 950억원, 전국은 1,760억 원인 것으로 추정되었다. 이는 고리2호기의 영구정지에 따른 기회비용으로 해석할 수 있다.

이러한 기회비용은 고리1호기를 영구정지하지 않았다면 우리 사회가 누릴 수 있는 기회손실을 의미하는 것이다.

3. 원자력발전의 사회적 비용 및 편익에 대한 고찰

사회적 비용은 생산자가 부담하는 비용에다 부정적 외부효과를 더해 결정된다. 발전비용 중에서 생산자가 부담하지 않는 비용이 있다면 이러한 비용은 부정적 외부효과에 속하고, 생산과정에서 발생하는 편익 중에서 생산자에게 귀속되지 않고 사회에 귀속되는 부분이 있을 수 있는데, 이를 긍정적 외부효과라고 부른다. 국가 및 사회적 차원에서 수행하는 경제성 분석에서는 사회적 비용뿐만 아니라 사회적 편익도 같이 고려하는 것이 바람직하다.

후쿠시마 원전사고 이후 원전의 사회적 비용에 대한 관심이 고조되고 있는데 부정적 외부효과를 주로 언급하고 있다.

부정적 외부효과는 적절한 비용추정을 통해 생산자에게 전가시켜 내부화시키는 것이 바람직하다. 원전과 관련해 일반적으로 논의되고 있는 부정적 외부효과로는 사고위험비용, 입지갈등비용, 정책비용, 미래세대 비용(원전사후처리비 등)이 있다. 사고위험비용은 주어진 사고 발생확률과 피해금액 하에서 사고위험의 기댓값을 산출하는 방식으로 추정하는 것이 일반적인데 원전 사고발생 확률과 피해금액의 크기에 따라 사고위험비용이 크게 차이가 나므로 이에 대한 면밀한 선행연구를 전제로 산출해야 한다. 2011년에 발생한 후쿠시마 원전 사고와 같은 중대 사고의 발생 확률을 일반화하는 것이 현실적으로 불가능하고 피해규모도 원전 입지나 국가적 특성에 따라 크게 다를 것으로 예상되기 때문에 사고위험비용의 해석 및 적용에 세심한 주의가 필요하다.

에너지경제연구원에서 수행한 원전사고비용 추정결과를 보면 3.8원/kWh~4.3원/kWh[10]으로 2015년에 확정된 제7차 전력수급기본계획의 원전사고대응비용 5.72원/kWh보다 낮은 수준이다[15]. 입지갈등비용은 원자력 발전 관련 시설의 입지 선정 과정에서 발생하는 사회적 갈등에 따른 비용이다. 정책비용은 원자력발전을 유지하기 위해 정부가 지원하는 각종 사업비를 의미한다. 여기에는 연구개발비, 원전주변지역 지원사업, 홍보사업, 원자력 관련 규제기관 운영비 등이 있다[11]. 미래세대 비용은 현세대가 사용하는 원자력발전의 비용중 미래세대가 부담하게 될 비용으로 원전해체, 방사성폐기물 처분, 사용후핵연료 처분비가 여기에 해당한다. 이러한 외부비용 중에서 상당 부분은 원자력발전비용에 이미 내부화되어 생산자가 부담하고 있다.

적정 전원구성은 일국에 주어진 유한한 자원을 효율적으로 활용하는 방향으로 추진돼야 한다. 이러한 측면에서 우리 사회가 원전의

15) 전력수급기본계획은 2년마다 갱신하고 있는데 이후에 수행된 전력수급기본계획에서도 적절한 사고비용을 고려하고 있는 것으로 알려져 있다.

사회적 비용 및 편익에 관심을 가지는 것은 매우 바람직하다고 할 수 있다. 이러한 관심이 적정 적원구성으로 이어지기 위해서는 원전뿐만 아니라 타 전원에 대해서도 사회적 비용 및 편익에 대한 추정이 이루어져야 할 것이다. 이와 더불어,사회적 편익을 구성하고 있는 긍정적 외부효과에 대해서도 그 가치를 인정해야 할 것이다. 긍정적 외부효과에는 에너지 안보, 환경보호, 연구개발의 기술파급효과, 국민경제적 기여(전력가격 안정화, 부가가치 창출) 등을 들 수 있다.

이 원고에서는 원자력발전의 국민경제적 기여가 적지 않다는 연구결과를 소개했다. 국민경제적 기여는 원자력발전이 우리 사회에 기여하는 긍정적 외부효과 중 하나다.

참고문헌

[1] OECD(2020), "Projected Costs of Generating Electricity"

[2] https://epsis.kpx.or.kr

[3] OECD(2015), "Projected Costs of Generating Electricity"

[4] 제4차 전력수급기본계획, 지식경제부, 2008

[5] OECD(2019), The Costs of Decarbonisation: System Costs with High Shares of Nuclear and Renewables

[6] IAEA(2009), Nuclear Technology and Economic Development in the Republic of Korea

[7] IAEA(2018), Assessing National Economic Effects of Nuclear Programmes, Final Report of a Coordinated Research Projct, IAEA-TECDOC-1962

[8] 지역산업연관표, 한국은행, 2015

[9] Technical meeting on measuring macroeconomic impacts of a nuclear power plant programme, IAEA headquarters, Vienna, Austria 18-21 June 2019 Ref No: EVT 1701920

[10] 원자력발전 외부비용의 이해, 에너지경제연구원, 조성진, 2015. 0.4(발표자료)

[11] 원자력 발전비용의 쟁점과 과제, 국회예산정책처, 허가형, 2014. 3

탄소 중립의 매력적인 대안, 소형모듈원전(SMR)

캘리포니아, 호주 등에서와 같은 수 주일 동안 계속되는 대형 산불, 국지적으로 내리는 심각한 폭우, 물 부족 및 식량난, 인도네시아, 영국, 네덜란드 등 해양국가의 침수 등의 기후변화는 우리 삶에 큰 영향을 미치고 있다.

기후위기는 이제는 지구의 현재와 미래를 위해 외면할 수 없는 전 지구적 제일의 과제가 되었다.

이종호

서울대
원자력정책센터
책임연구원

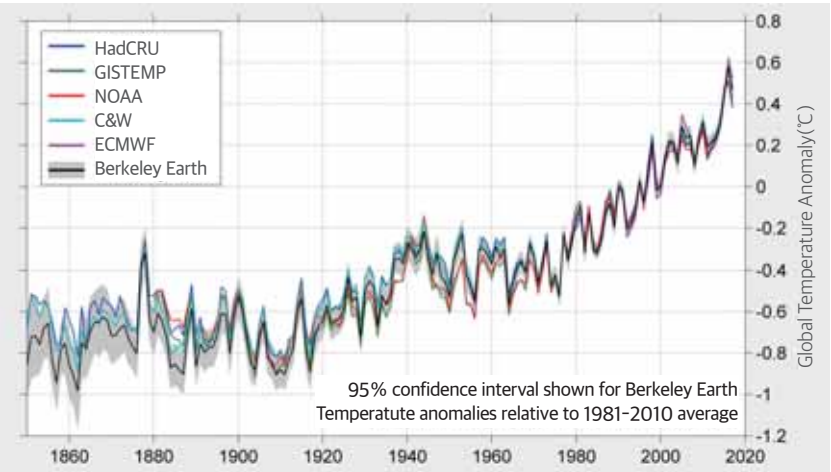
1. 현실이 된 기후위기 시대

기후위기는 더 이상 먼 미래의 얘기가 아니다. 올해는 유난히 사과가 비싸 금 사과라고 불리기도 한다. 그러나 앞으로는 한반도의 기온은 더욱 높아져 금 사과는 물론 한국산 사과를 볼 수 없을 수도 있다. 전문가들은 한반도의 기온 상승 속도는 지구 평균보다 빨라 지난 100년간 지구 평균기온이 0.74℃ 상승하는 동안, 우리나라는 1.7℃나 올랐다고 한다. 2100년쯤이면 지구 평균 기온은 많게는 지금보다 4.7℃ 상승할 것이라 예상하고 우리나라도 5.7℃ 이상 상승할 것이라고도 예상한다. 물론 이산화탄소 배출이 많은 경우의 예측이겠지만 지구상의 탄소 배출량이 제로가 되는 탄소 중립을 유지한다고 해도 상당한 온도상승은 피할 수 없게 되었다. 기후변화는 캘리포니아, 호주 등에서와 같은 수 주일 동안 계속되는 대형 산불, 국지적으로 내리는 심각한 폭우, 물 부족 및 식량난, 인도네시아, 영국, 네덜란드 등 해양국가의 침수 등 이루 헤아릴 수 없이 우리 삶에 변화를 초래할 것이다. 기후위기는 이제는 지구의 현재와 미래를 위해 외면할 수 없는 전 지구적 현실이 된 것이다.

산업혁명 이후 지속적인 지구 온도의 상승은 화석연료 사용 증가가

지구 온난화의 원인이라는 것을 이제는 더 이상 부정하기 어렵게 되었다. 세계 다양한 기관에서 독립적으로 측정 또는 추정한 지구 온도 이력을 보면 일관되게 산업혁명 이후 지구 온도는 1℃ 이상 상승된 것으로 나타난다[그림 1]. 이 이산화탄소의 증가 추이는 문명의 발전에 따른 인류의 에너지 사용 증가와 합치되는 것이다. 결국, 2015년 12월 프랑스 파리에서 개최된 제21차 유엔기후변화협약 당사국총회(COP21; Conference of the Parties 21)에서 197개 국가는 지구 온실가스 배출을 줄여 세기 내 지구 온도 상승을 2℃로 제한하면서 가능한 경우 증가율을 1.5℃로 감소하는 것을 목표로 하는 '파리협정(Accord de Paris)'을 채택했다. 아울러 세계 각국은 국가온실가스감축 목표를 유엔에 제출했고 2021년 파리협정의 본격적 이행에 앞서 2020년까지 이를 갱신하기로 합의한 바 있다.

[그림 1]
산업혁명 이후 지구의 온도 변화



이에 우리나라도 2020년 10월, '2050년까지 탄소중립'을 선언했고 2021년 10월, 2030년까지 2018년 대비 40%를 감축하는 국가온실가스감축목표(NDC)를 정하였다. 제26차 유엔 기후변화협약 당사국 총회(COP26)에서 국제사회에 발표했다. 원전을 중시하는 현 정부도 전 정부의 탄소중립 정책을 이어받아 원전과 재생에너지의 조화로운 믹스를 통해 탄소중립을 달성한다는 목표 아래 2030년까지 2018년 대비 40%를 감축하는 국가온실가스감축목표(NDC)를 포함한 제1차 국가 탄소중립·녹색성장 기본계획을 수립했다.

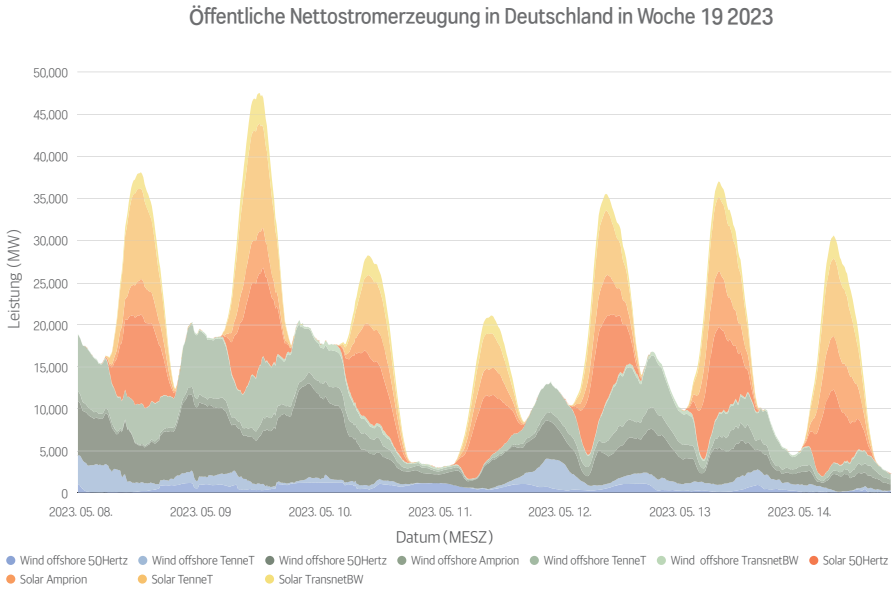
2. 기후위기 대응 위한 재생에너지와 원자력

기후위기는 급격한 화석연료 사용 증가에 따라 초래된 현상이라 결론짓고 이를 해결하기 위해 탄소중립을 목표로 한 에너지전환을 전 세계적으로 추진하고 있다. 에너지전환의 정의는 탄소를 배출하는 화석연료로부터 탄소를 배출하지 않는 무탄소전원으로 전환하는 것으로 무탄소전원에 대한 또 다른 제한이 없다. 탄소중립 이행 초기에는 후쿠시마 원전 사고 등으로 인한 안전에 대한 우려로 재생에너지에 비해 생애주기 탄소배출량이 상대적으로 적은 원자력에너지를 중요한 에너지전환의 대안으로 활용하는 데 주저하고 있었다. 그러나, 간헐성 등 재생에너지의 제한성, 상대적으로 원자력 에너지의 편이성, 우크라이나 전쟁으로 인해 부각된 에너지 안보의 중요성 및 원전 안전에 대한 신뢰 증진 등의 영향으로 이제는 원자력 에너지를 에너지전환의 중요한 수단으로 고려하게 되었다. 유럽은 2022년 7월, 녹색분류체계(Green Taxonomy)에 원자력을 포함했으며, 미국은 인플레이션 감축법을 제정해 기후변화 대응을 위해 대형 원전, 소형모듈원전(Small Modular Reactor, 이하 SMR) 등 무탄소전원인 원전에 대한 여러 가지 세제 혜택을 주고 있으며 우리나라의 경우도 녹색분류체계에 포함하는 등 세계적으로 원자력에너지를 탄소중립의 중요한 수단으로 활용하기 위한 제도를 구비하고 지원하게 되었다.

최근까지 선진국을 중심으로 화석연료를 무탄소 에너지원으로 대체하려는 에너지전환 노력이 활발히 추진되어 왔다. 2021년 IAEA 보고서에 따르면 몇몇 국가에서 56기, 58.1GW의 원전을 건설하고 있지만, 대부분은 태양광, 풍력 중심의 재생에너지로 화석연료를 대체하고 있었다. 2012년부터 2022년까지 10년 동안 수력을 제외한 변동성 재생에너지(태양광, 풍력) 설비량 증가를 살펴보면 총 356.9GW에서 2,076.4GW로 5.8배나 증가했으며 태양광 설비만은 2012년 95.6 GW에서 2022년 1020.4TWh로 무려 12.3배나 증가했다.

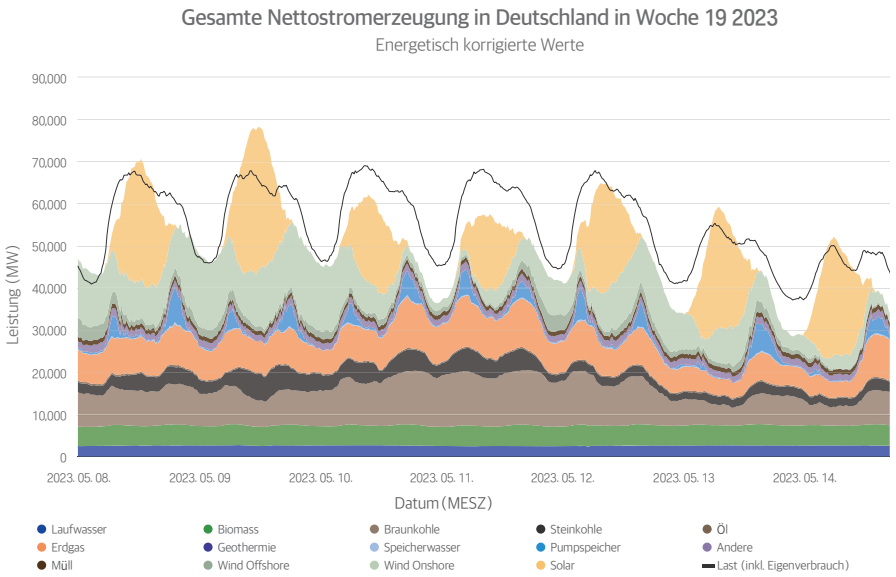
더불어, 2030년까지의 전망을 살펴보아도 현재의 태양광, 풍력 설비량의 4배 정도까지 계속 증가할 것으로 예상하고 있다.

[그림 2]
독일의 풍력, 태양광 발전량(2023년 19주)

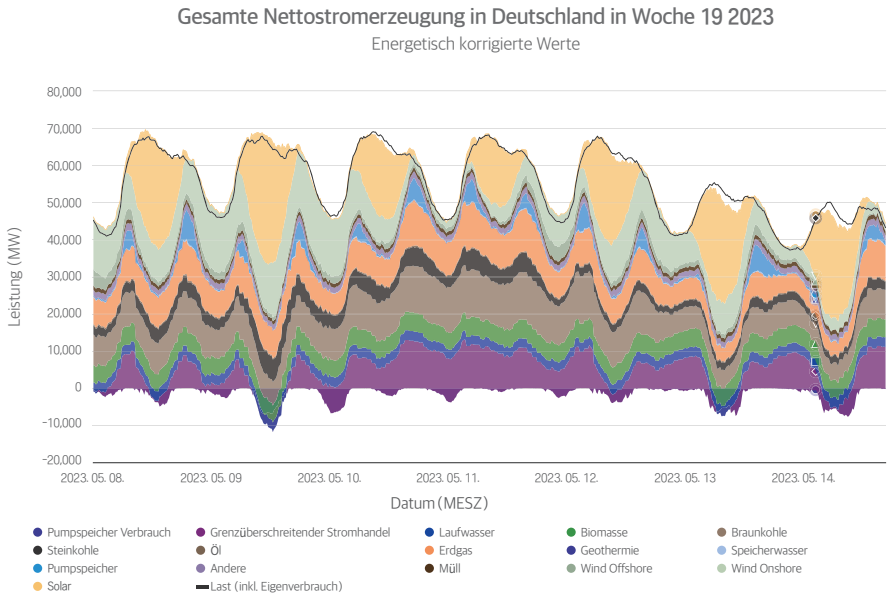


그러나, 재생에너지 비중의 증가에 따라 가변적 재생에너지(Variable Renewable Energy)는 안정적이고 경제적인 전력 공급에 여러 가지 어려움을 보여주고 있다.

[그림 3]
독일의 총 전력 수요 및 발전량(2023년 19주)



[그림 4]
독일의 수출입을 포함한 총 전력 수요 및 발전량(2023년 19주)

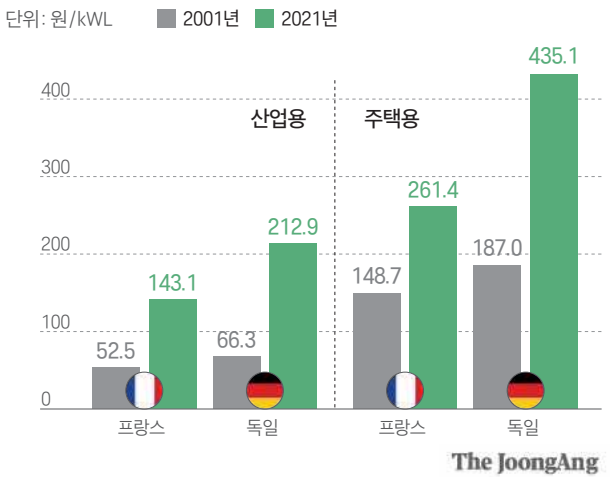


유럽의 경우 단일전력 계통을 유지하고 있어 특정 국가 재생에너지의 급격한 변화를 주변 국가와의 연계로 해결하고 있지만 가변적 재생에너지 공급 비율 증가에 따른 전력저장 비용, 일시적 과잉 생산에 따른 비효율 증가는 그 나라의 전력요금 증가로 나타나고 있다.

참고로 독일의 2023년 19주 차의 전력수요와 발전량을 예로 살펴보면 재생에너지의 발전량은 자연조건에 따라 총 수요의 20%(5월 9일, 오후2시)에서 90%(5월10일, 오후 9시)까지 큰 변동성을 가지게 된다.

이러한 재생에너지 변동성에 대처하기 위해 상대적으로 가격이 높은 양수발전, LNG 등을 활용해 전력공급의 안정을 기하고 있으나 급격한 변동성과 간헐성으로 인해 [그림 3]에서 같이 대응하지 못하는 전력 수요(실선)와 공급 발전량(색칠 부분) 간 차이가 발생하게 된다. 결국, 독일의 경우 많은 양의 전력을 주변 국가로부터 구입하거나 수출해 전력수급의 안정을 기하고 있다.

[그림 5]
독일과 프랑스의 전력요금 변화



출처: 한국에너지정보문화재단

전력 구입 및 수출은 자유롭게 이루어지는 것이 아니고, 반드시 필요하거나 부족할 때 이루어져야 하므로 경제적일 수는 없는 것이다. 결국, 2023년 기준으로 재생에너지 발전 비율이 50% 이상인 독일의 전력요금은 원자력 발전 비율이 70% 정도인 주변 국인 프랑스에 비해 2021년 기준으로 산업용은 거의 50%, 주택용은 66%나 비싼 원인이라 할 수 있다[그림 5].

그런데 우리나라와 같이 주변 국가와 독립된 전력계통에서는 재생에너지의 비율이 높을 경우, 급격한 간헐성을 극복하기 위해서는 양수발전과 가스터빈만으로는 한계가 있고 주변 국가로부터 전력을 융통할 수도 없어 고비용의 에너지저장장치인 배터리를 채용할 수밖에 없다. 특히, 독일에 비해 풍력 자원이 부족한 우리나라의 경우는 태양광이 재생에너지의 상당 부분을 공급해야 하며, 더욱더 밤낮의 재생에너지 발전량의 편차는 커질 수밖에 없다. 그러나 원자력 발전 비중을 증가시킨다면 재생에너지의 간헐성 영향도 감소해 이러한 영향도 감소하게 된다.

참고로 2050년에 대해 문재인 정부의 탈원전 경우와 원전 구성비가 50%인 경우를 비교해 보면 원전 증가에 따른 발전비용 감소와 재생에너지 간헐성 대처를 위한 비용의 감소로 전력요금을 거의 반으로 줄일 수 있다고 평가하고 있다.

결론적으로 탄소중립을 위해서는 경제적이고 안정적인 원전의 역할이 필요하다. 그래서 지난해 12월 UAE에서 열린 COP28에서 미국, 프랑스, 우리나라를 비롯한 22개 국가가 기후변화 대응을 위해 원자력의 중요성을 공동 인식하고 2050년까지 원자력발전을 지금의 3배로 증가시키기로 선언하기도 했다. 탄소중립을 위해서는 원전, 재생에너지 등 특정 에너지에 대한 편견이 없어야 하며 그 나라 실정에 적합한 재생에너지와 원자력의 조합이 필요한 것이다. 우리나라도 우리나라에 적합한 원전·재생에너지 구성에 대해 더 심도 있고 다양한 연구와 고민이 필요한 절실히 요구되는 시기이다.

3. 세계는 왜 SMR에 관심을 가질까?

전 세계적으로 기후위기 대처를 위해 원자력의 활용에 많은 검토를 하고 있다. 그러나 중국 등 일부 국가를 제외하고는 대부분의 나라에서 재생에너지에 비해 원전 건설 규모는 크다고 할 수 없다. 그 이유는 무엇일까? 후쿠시마 원전사고로 인한 안전성에 우려도 있지만 첫 번째 이유는 경제적 이유다. 미국, 유럽 등 원전 선진국은 지난 30여 년간 원전을 건설하지 않아 원전산업은 붕괴되었고, 그 결과 원전 건설비가 대폭 증가했다. 미국의 경우 우리나라의 1,400MWe급 원전인 APR1400보다 작은 1,200MWe급 원전, AP1000을 건설하는데 우리나라보다 무려 3배 이상의 비용이 소요되고 있다. 또한 프랑스는 핀란드와 자국 내 건설 중인 원전의 건설 기간이 계획보다 2배 이상 지연되어 건설비용의 대폭 증가를 초래했다. 물론, 우리나라와 같이 아직 원전의 경제성이 있는 나라에서는 예외이지만 많은 나라에서의 원전건설은 전력 공급 안정성에 비해 비용과 사업 리스크가 너무 큰 것이다.

두 번째는 풍력, 태양광 등 재생에너지 기술의 발전으로 상대적으로 양질의 재생에너지를 보유한 나라가 많다는 것이다. 북유럽의 경우 양질의 풍력 자원을 보유하고 있으며 미국도 사막 등 넓은 대륙에 걸쳐 풍력과 태양광 자원을 보유하고 있다. 중동 또한 양질의 태양광 자원을 보유하고 있다.

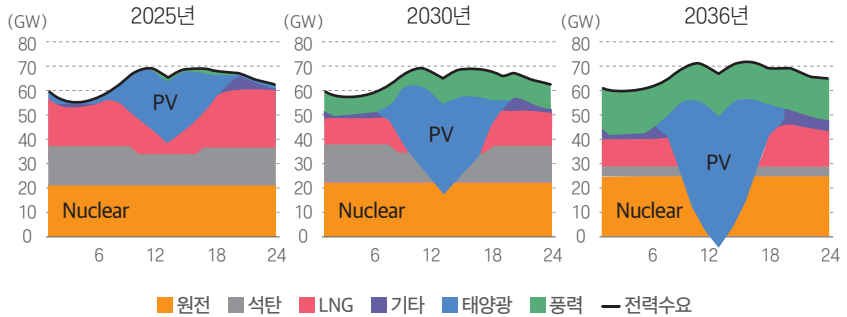
그런데 지난해 UAE의 COP28에서와 같이 많은 나라들이 원전 확대에 관심 많은 이유는 무엇일까?

첫째는 재생에너지만으로는 전력 공급의 안정성을 보장하기 어렵다는 것이다. 재생에너지의 비중이 높으면 상대적으로 유연성 전원인 LNG 발전이 많이 필요하며 LNG는 몇몇 국가에 편중되어 있어 유사시에는 안정적 공급이 어렵다. 이번 우크라이나 전쟁 시 유럽의 경우에서 보듯이 과도한 에너지원의 대외 의존은 에너지 안정 공급이라는 에너지 안보를 확보에 어려움을 보여주고 있다. 즉 안정적인 자국의 에너지원으로 원자력의 가치가 인정되는 계기가 된 것이다.

두 번째는 재생에너지 비율이 증가함에 따라 간헐성에 따른 전력생산 비용이 대폭 증가하게 된다. 재생에너지 비중이 작을 때는 Duck Curve라 하여 재생에너지 공급을 제외한 전력 수요를 낮추는 효과가 있지만, 재생에너지 비중이 높으면 과도한 재생에너지로 인해 독일 처럼 많은 양의 전력을 저장해야 하거나 주변국과 전력거래를 해야하는 것이다.

우리나라 경우도 10차 전력수급기본계획을 기준으로 2036년에는 총 발전량에서 재생에너지가 31%, 원자력이 36% 정도 차지하도록 계획되어 있다. 우리나라는 양질의 유연성 전원인 수력자원이 거의 없는 상황이며 주변 국가에서 전력을 융통할 수도 없다. 이미 2036년에 태양광 발전량이 많은 주간에, 재생에너지만으로도 전력 수요를 초과하는 경우가 발생하게 되어 배터리, 양수발전 등 전력저장 장치나 수소생산 등 전력 수요를 대폭 확충하지 않으면 정상적인 전력 수급이 불가능할 것으로 예상된다[그림 6]. 우리나라와 같이 수력이나 상대적으로 변동성이 덜한 풍력 자원이 부족한 나라에서는 원전이 전력의 일정 비율을 안정적으로 공급한다면, 변동성 재생에너지인 태양광의 공급량도 그만큼 줄어들게 되고 상대적으로 재생에너지 간헐성의 영향도 감소하게 되는 것이다.

[그림 6]
10차 전력수급기본계획 기준 평균 전력수급 전망



출처: 한국전력거래소

이와 같이 각 나라가 처한 여건에 따라 차이는 있지만 원자력은 탄소 중립의 중요한 수단으로 고려되고 있다. 그런데 SMR은 아직 사용 대형원전에 비해 저렴하다고 입증되지도 않았고 본격적인 상용화 실적이 부족한 상태이다. 그럼에도 여러 나라가 SMR을 개발 중이며 건설을 추진하는 이유는 무엇일까? 한마디로 대형원전과는 다른 에너지 생산 상품이기 때문이다. 어쩌면 초기의 모바일폰과 현재의 스마트폰 용도가 전혀 다른 것과 같이 그 기능과 용도가 다양화될 수 있기 때문이다.

셋째, SMR은 전력생산 이외에 다양한 용도로 활용될 수 있기 때문이다. 탄소 중립은 전력 부문에서 뿐만 아니라 산업열, 제철, 수송 등 다양한 분야에서 이산화탄소 발생을 줄여야 한다. SMR은 기존원전 대비 1만 배 정도의 획기적인 안전성 향상을 바탕으로 도시 주변에도 설치할 수 있다는 개념으로 개발되고 있어 다양한 용도의 안정적 전원과 산업열 등의 에너지를 공급할 수 있으며 이산화탄소 다량 배출원인 석탄화력발전소를 대체할 수 있다. 또한 수소 생산, 담수화, 도서, 오지 및 새로 조성되는 신도시나 산업단지의 전력과 열 등 에너지의 안정적 공급 역할을 담당할 수 있는 것이다.

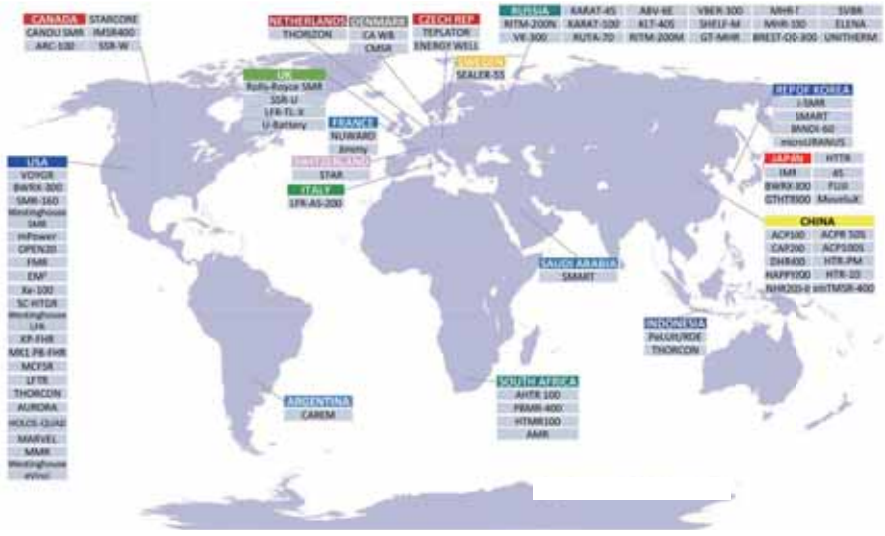
또 다른 이유는 기존 대형원전의 투자 리스크를 줄일 수 있기 때문이다. SMR은 고유 안전 설계를 통해 필요한 설비를 최소화하고 주요 기기를 모듈화해 건설 공기를 대폭 단축시켜 용량이 적은 소형임에도 불구하고 반복, 대량 생산을 통해 건설 단가를 대형 원전 수준을 목표로 개발하고 있다. 기존 대형원전이 다수의 공공을 대상으로 전력을 공급하는 것을 목적으로 함에 비해, 상대적으로 작은 규모의 전력 수용가나 지역의 소비자 집단이 적은 투자 비용으로 단기간 내에 에너지 공급설비를 확보할 수 있다는 장점이 있어 반도체, 철강 등 전력 다소비 산업이나 전력 및 에너지 사용을 위한 집단수요자에 경제적 이점과 투자의 리스크를 줄여줄 수 있는 장점이 있다.

[그림 7]
SMR 활용 예상 분야

4. 세계 SMR 개발 동향

SMR 개발 동향을 살펴보면 미국, 프랑스, 중국, 러시아, 캐나다, 일본 등 대부분의 원전기술 보유국은 물론, 영국, 덴마크, 네덜란드, 체코, 이탈리아 등 여러 유럽 국가들과 인도네시아, 사우디 등 신흥 국가들까지 포함해 전 세계적으로 여러 국가에서 80여 종의 SMR을 개발하고 있는 등 미래 SMR 시장 선점에 노력하고 있다[그림 8]. 이렇게 많은 국가에서 벤처기업을 포함한 여러 기관이 SMR 개발에 참여하는 것은, 그만큼 탄소중립 시대에 SMR의 미래가 밝다는 것을 보여주는 것이라 할 수 있다. 미국 NuScale사는 20년 8월에 NuScale SMR에 대해 미국 규제기관의 표준설계인가를 획득해 여러 나라에 건설을 추진 중이며, 러시아는 KLT-40S라는 해상원전용 SMR을 개발해 운영 중이고, 중국은 ACP100 이라는 SMR을 25년에 준공할 예정으로 건설 중에 있는 등 다양한 SMR이 개발되고 건설이 예정되어 있다.

[그림 8]
세계적 SMR 개발 동향

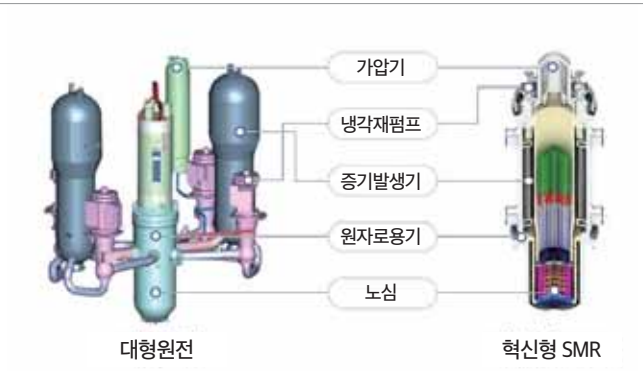


출처: 국제원자력기구(IAEA) (2022.9.)

SMR은 300MWe급 이하의 원전으로 대형원전에 비교해 원자로 용량이 적어 자연재해 등으로 인해 만약의 사고가 발생하더라도 충분한 원자로 냉각수를 보유해 3일~1주일 이상, 아무런 조치를 하지 않아도 원자로가 안전하게 유지될 수 있는 고유의 안정성을 갖도록 설계하고 있다.

[그림 9]에서와 같이 많은 기기와 장치를 단순화하고 일체화해 비용을 절감하고 모듈화 등을 통해 건설 기간을 단축해 경제성을 확보한다는 개념으로 설계된다. 따라서 기존의 대형원전은 발전소 1km 정도 주변에 민간이 거주하는 것을 제한하는 반면, SMR 발전소는 바로 부지 옆에서도 주민이 거주할 수 있도록 안전성을 대폭 향상시켜 주민 수용성을 높이고, 단순화, 모듈화, 일체화 등을 통해 소형이지만 경제성을 유지하고 총투자비와 건설 기간을 단축해 국가가 아닌 일반 수요자도 투자할 수 있을 정도의 투자 매력을 갖게 하는 것이다.

[그림 9]
SMR 개발 시 단순화 개념도



5. 세계적 수준의 SMR 국내개발 현황

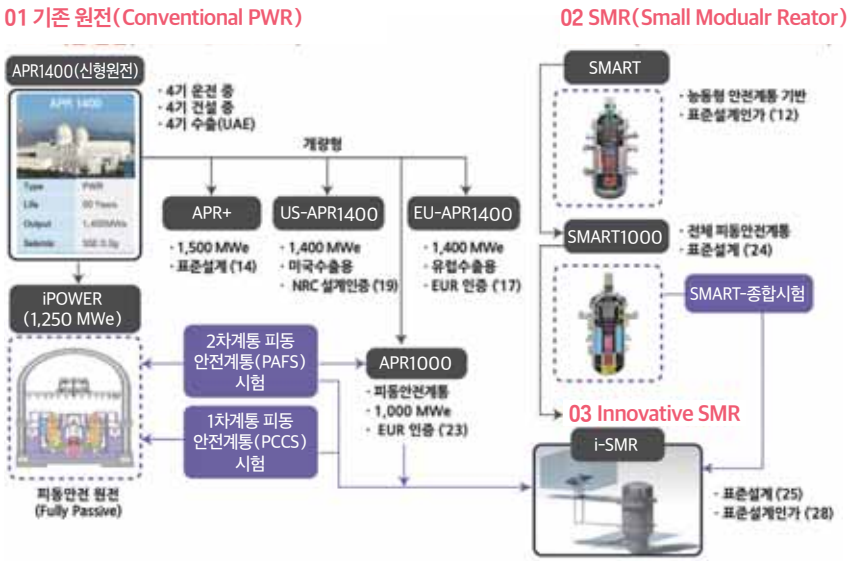
우리나라 SMR 기술은 개발의 역사는 2000년대부터 시작되었다. 2000년대 중반부터 한국원자력연구소를 중심으로 SMART라는 SMR을 개발해 세계 최초로 SMR에 대해 2012년에 규제기관으로부터 표준설계를 획득했다. 그러나, 후쿠시마 원전 사고의 영향과 탈원전 등으로 국내 건설과 해외 진출이 지지부진했고 최초 개발한 SMART SMR의 안전수준과 경제성에 대한 이견이 많아 새롭게 피동형 안전계통을 채용하고 단순화한 SMART1000을 개발해 규제기관에 인허가 서류를 제출해 올해 표준설계를 획득할 예정이다. 이 SMART1000은 사우디와 공동으로 개발했으며 사우디 내에 건설도 목표로 하고 있다.

2023년부터 혁신형 원전인 i-SMR 개발이 범부처 국가사업으로 추진되며 본격적으로 세계 시장 수출을 목표로 SMR 개발 사업은 시작되었다. 이전부터 한수원을 주도로 i-SMR 개념설계가 추진하고 있었으며 이를 바탕으로 2025년까지 표준설계를 완성해 2028년까지 규제기관의 인허가를 획득하는 것을 목표로 하고 있다.

이 사업에는 산업부, 과기부, 원자력안전위원회 등 3개 관련 부처가 참여하고 있으며 혁신형 SMR기술개발사업단을 설립해 2028년까지 약 4천억 원을 투자해 성공적 개발에 노력하고 있다.

i-SMR은 2031년경 상업운전을 목표로 하고 있어 외국의 다른 SMR에 비해 짧은 기간에 개발·건설하는 것이라는 우려의 시각도 있다. 그러나, 우리나라는 이미 SMART나 SMART1000 등 SMTR을 이미 개발했고 대형원전으로 APR1400을 자체 개발했으며, APR+, i-POWER, APR1000 등의 개발을 통해 많은 핵심요소 기술을 개발해 확보한 기술을 바탕으로 i-SMR를 설계하는 것이라 최초 설계에 비해 기술적 리스크는 크지 않다고 한다. 특히, [그림 10]에서와 같이 원전 핵심기술인 피동형 안전설계 기술과 종합시험을 이미 I-POWER와 SMART1000 개발 시 수행한 결과를 활용할 수 있어 기술의 신뢰성을 이미 대부분 확보했다고 할 수 있다.

[그림 10]
우리나라 원전 기술개발 과정 및 i-SMR 개발 전략



따라서, 아직 i-SMR의 설계는 완성되지 않았지만, 우리나라의 원전 기술의 강점과 건설 공기와 비용 등에서의 사업성을 인정하는 나라는 개발될 i-SMR의 자국 내 건설을 위해 벌써 입찰서 제출을 요구하는 등 관심이 많은 상황이다. 스웨덴에는 이미 i-SMR 건설을 위한 예비입찰서를 제출한 상태이며 핀란드, 체코, 캐나다 등 여러 나라에서 i-SMR에 관심을 보이고 있다.

6. SMR 개발 성공과 대중화를 위해 풀어야 할 과제

우리나라는 탈원전 정책 등 여러 가지 원인으로 본격적인 SMR 개발이 늦추어진 점이 있다. 현재 정부의 적극적인 지원으로 체계적으로 기술개발이 추진 중이지만, 성공적 SMR 개발과 세계 시장의 선점을 위해서는 다음과 같은 과제 해결에 적극 노력해야 할 것이다.

첫째, 일관성 있는 정책지원이다. 우리나라가 세계 최초로 SMART라는 SMR을 개발해 표준설계를 인가받았음에도 불구하고 직접 건설 및 수출, 지속적인 기술개발에 성공하지 못한 경험이 있다. 원전산업은 세계적으로 국가의 정책이 아주 중요하게 작용한다. 특히, 우리나라와 같이 공공 분야 주도로 원전산업이 추진되는 나라에서는 더욱 그렇다. 세계의 많은 나라가 SMR에 관심이 많은 것은 SMR이 탄소중립을 위한 편리하고 신뢰성 있는 수단이 될 수 있다는 믿음 때문이다. 이제는 우리나라도 에너지 분야에 대해서는 정치적 이해관계를 떠나 국가 미래를 보고 일관성 있게 정책적 지원이 계속되었으면 한다.

둘째는 SMR 사용 확대를 위해 전력시장 법적, 제도를 구축하는 것이다. 현재와 같이 단일 전력요금제도, 단일거래 시스템으로는 전력공급, 수소생산, 산업열 공급 등 다양한 형태의 SMR 이용이 불가능하다. SMR이 재생에너지 과잉 시의 부하추종을 통한 전력 수급의 안정이나 다양한 분야의 탄소배출 감소를 위해 폭넓게 활용될 수

있도록 전력시장의 법과 제도로 선제적으로 구비해야 할 것이다.

셋째는 SMR사업에 민간이 참여할 수 있도록 지원제도를 마련하고 법적 제한을 푸는 것이다. 원전 사업은 공중 안전이라는 목표와 핵물질 사용에 따른 제한이 따른다. SMR 사업은 대형 원전 사업과는 다르게 다양한 분야, 상대적으로 규모가 작은 분야에 활용이 예상된다, 반도체 등 산업단지에서 열과 전력 공급, 수소생산 및 활용 분야, 데이터센터 운영, 화력발전소 대체 등에서 기존 소수의 공공기관 중심만으로는 한계가 있어 다양한 민간사업자의 참여가 요구된다. 이러한 민간사업자가 원전 안전 유지, 핵연료 처리 등 초기에 겪는 원전사업 진출의 어려움 해소를 지원해 주고 이익을 창출할 수 있도록 새로운 제도와 법을 정비가 필요하다.

마지막으로 SMR 개발 종사자들과 관계자들의 사명감과 헌신적인 노력이 필요하다. 그동안 탈원전 등으로 우리나라 원전기술개발이 정체된 점이 있다. 따라서, 이번 국가적으로 추진하는 혁신형 SMR 개발은 다시 한번 우리나라 원전기술이 세계 최고가 되고 세계 시장을 선도할 수 있는 절호의 기회로 활용할 필요가 있다. 원전산업은 아직 국민의 이해를 바탕으로 하는 산업으로 국민이 흔쾌히 받아들일 수 있는 안전한 SMR이 되어야 하며 세계 최고의 성능으로 적기에 개발하도록 종사자들과 관계자들의 헌신적 노력을 부탁하고자 한다.

참고문헌

[1] 조선일보, 민승규 세종대 석좌교수, “금사과는 기후변화 대응 시급하다는 경고… AI 농업에서 해법 찾아야”, ´24. 04. 09.

[2] IEA(International Energy Agency),“Renewables 2023, Analysis and forecast to 2028”, 2024. 1.

[3] https://www.energy-charts.info/, “The site for interactive graphics displaying energy production and spot market prices”

[4] 서울대 원자력정책센터, 이종호, “CF100 이행을 위한 원전의 역할과 정책분석 : 부록, 2050 탄소중립 달성을 위한 바람직한 원전/재생에너지 구성비 연구”, 2023.10.,

[5] IAEA(2022), “Advances in Small Modular Reactor Technology Developments. A Supplement to: IAEA Advanced Reactor Information System (ARIS)”, 2022 Edition

[6] 에너지경제신문 제7회 원자력세미나, 백원필, “민간중심 i-SMR 사업화와 K-원전의 글로벌 시장 확대”, 2024.3.

원전산업의 발전을 위한 담론
‘원전 수출과 SMR을 중심으로’

러시아의 우크라이나 침공으로 시작된 전 세계적 에너지 공급망 위기로 인해 재생에너지 일변도의 에너지믹스 정책이 흔들리게 되었다.

유럽 특히 독일을 중심으로 추진됐던 원전 제한, 재생에너지 확대정책이 우크라이나 전쟁으로 인한 전력공급망 위기, 전력요금 급등 및 재생에너지의 한계 노출 등으로 재생에너지 중심의 에너지믹스 정책이 한계를 보이고 있다.

이러한 상황에서 가장 집중을 받게 된 에너지원은 아이러니하게도 탄소배출량이 적은 원자력발전이다.

손금주

법무법인(유)
율촌 변호사

1. 서론 - 원전산업의 재조명과 급격한 인식 변화

우리는 대전환의 시대에 살고 있다. 그리고 그 핵심은 디지털 전환과 에너지 전환에 있다. 4차 산업혁명을 얘기하면서 디지털 전환과 에너지 전환이 별개의 가치를 목표로 하는 것으로 인식하는 경향이 있다. 에너지 전환이 기후온난화에 대응하기 위한 에너지 자원의 변화, 탄소중립, 재생에너지 비중 확대 등에 초점을 맞추고 있다고 보는 시각이다. 그러나 우리 사회는 Open AI의 ChatGPT가 등장한 이후 AI의 발전, 상용화 및 확대 속도가 급격하게 빨라지면서 AI, Big Data, Cloud를 핵심으로 하는 디지털 전환에 폭발적인 전력 공급이 필요하다는 사실을 새삼 깨닫게 되었다. 더욱이 러시아의 우크라이나 침공으로 시작된 전 세계적 에너지 공급망 위기로 인해 재생에너지 일변도의 에너지믹스 정책이 흔들리게 되었다. 기존에 유럽 특히 독일을 중심으로 추진됐던 원전 제한, 재생에너지 확대정책이 우크라이나 전쟁으로 인한 전력공급망 위기, 전력요금 급등 및 재생에너지의 한계 노출 등으로 재생에너지 중심의 에너지믹스 정책이 한계를 보이고 있다.

이러한 상황에서 가장 집중을 받게 된 에너지원은 아이러니하게도

탄소배출량이 적은 원자력발전이다. 이에 따라 EU 전체적으로 신규 원전 건설 등 원자력발전에 대한 정책 변화가 일어나고 있다. 단순히 EU만의 현상이 아니고, 미국, 중동, 동남아, 일본 및 우리나라에서도 원자력발전이 탈탄소 전력 공급의 해결책으로 각광을 받기 시작하고 있다.

이러한 세계적 흐름을 지켜보고 있으면, 우리나라가 정부를 바꿔가면서 탈원전 등 원전 정책에 대해서 국내에서 대립하고 분열했던 것들이 얼마나 부질없는지 아쉬움이 남는다. 에너지 전환의 시기에 에너지 정책의 의사결정이 정치적 또는 이념적 논쟁거리가 되지 않고 근시안적인 접근이 되지 않도록 장기적 안목을 갖춘 전문가 그룹 중심의 중립적인 의사결정 시스템을 만들 필요가 있지 않을까?

2023년 세계원자력협회(World Nuclear Association, WNA) 발표 자료에 따르면, 총 36개국에서 441기의 신규 원전이 계획 또는 검토 단계에 있다고 한다. 최근 AI, 데이터 센터 등으로 인한 전력수요의 폭발적 증가, 신재생에너지의 구조적 한계, 실질적인 기후변화 대응책 필요(CF100-Carbon Free 100% 등) 등의 이유로 원전의 중요성이 전 세계적으로 다시 부각되고 있다고 볼 수 있다. 특히 자원 빈국인 우리나라의 입장에서는 에너지 안보의 달성, 디지털 전환에 따른 전력수요 충족, 저탄소 에너지원의 확보, 탄소중립 구현을 위해 국내 원전의 효율적 활용방안을 마련할 필요가 있다. 한편, 이러한 분위기에 편승해 세계 원전시장에 대한 적극적인 공략이 필요하다. 후쿠시마 원전사고 이후 러시아와 중국이 사실상 독점하던 세계 원전시장의 주도권을 두고 우리나라를 비롯한 세계 각국이 현재 치열한 경쟁을 벌이고 있다. 우리나라는 지속적인 원전 건설 및

운영 경험, UAE 원전의 성공적 건설 및 운영, 상대적으로 적은 건설 비용과 짧은 건설기간, 완벽한 Supply chain 보유 등을 장점으로 UAE 원전 수출에 이어 이집트 원전 건설에 참여 중이며, 체코, 폴란드, 영국, 사우디아라비아 등 많은 국가에서 원전 수출을 목표로 민관이 총력을 기울이고 있다.

2. 우리나라의 원전기술 자립과 해외 원전수출을 위한 과제

1) 우리나라의 원전기술 자립

우리 정부는 1984년 원자력발전 경제성 제고방안 정책을 발표하고 원전건설 기술자립을 추진했고, 이에 따라 현재의 웨스팅하우스에게 1987년부터 1997년까지 원전기술을 전수받는 기술도입계약(TTA)을 체결했다. 우리나라는 이를 바탕으로 당시 한국 표준형 원전(OPR 1000)을 설계, 건설하게 되었는데, 한빛원전 3~6호기, 한울원전 3~6호기, 신고리원전 1, 2호기, 신월성원전 1, 2호기가 당시 건설된 원전이다.

그 후 1997년 기술도입계약의 만료에 따라 2007년까지 도입기술의 실시권을 연장하는 기술사용협정(LA)을 체결했고, 이를 통해 신형 경수로 APR1400을 개발, 건설하게 되었다. 신고리원전 3~6호기, 신한울원전 1, 2호기, UAE 바라카 원전 1~4호기가 이에 해당한다. 우리나라는 현재 미자립 원전 핵심기술을 개발하고 설계기술을 독자적으로 개발하는 등 사실상 원전기술 자립 단계에 이르렀다고 평가할 수 있다.

그러나 우리나라의 원전기술 자립화는 최근 웨스팅하우스와 한국수력원자력 사이의 소송, 중재 등에서 이슈가 된 바와 같이 원전수출과 관련해서 여전히 미국 정부의 통제를 받아야 하는지와 관련해서 입장차가 있다. 현재와 같이 세계적으로 신규 원전 건설을 추진하는 등 원전산업이 다시 각광을 받는 시기에 우리나라가 세계 원전

시장에서 프랑스, 중국, 러시아 등과 경쟁하면서 우리의 장점을 구현해 내기 위해서 우리나라는 어떠한 전략적 선택을 해야 하는가, 우리에게 주어진 숙제이다.

2) 원전수출 관련 규정

원전수출 관련 주요 국제 규범으로는 국제원자력기구(International Atomic Energy Agency, 이하 IAEA)의 원자력안전협약(Convention on Nuclear Safety), EU의 원자력안전지침(2014/87/EURATOM) 및 원자력폐기물지침(2011/70/EURATOM) 등이 존재한다.

(1) 국제원자력기구(IAEA) 안전조치 협정

IAEA는 원자력 사용과 관련해 생명과 재산에 대한 위험을 최소화하기 위해 전력 원자로, 원자로, 연료 사이클 시설을 비롯한 모든 종류의 핵 설치에 있어서 기준이 되는 국제 안전 표준을 수립했고, 최근에는 보다 포괄적이고 체계적인 안전성 확보를 위한 원자력안전협약 제정으로 국제협력을 강화하고 있다.

IAEA 안전조치협정을 체결한 국가들에 대해 IAEA는 안전조치협정 이행 여부를 임시사찰(ad hoc inspection), 일반사찰(routine inspection), 특별사찰(special inspection)을 통해 확인할 수 있고, 안전조치협정 불이행(non-compliance)이 발생하는 경우 IAEA 사무총장은 이를 이사회에 보고해 이사회는 불이행에 대한 시정을 요청하고 UN 안전보장이사회와 모든 IAEA 회원국에 보고해 필요 시 결의를 거쳐 외교적, 경제적, 군사적 방법을 통한 제재가 이루어질 수 있다.

IAEA 안전조치협정의 종류는 다음과 같다.

- 전면안전조치협정(CSA): 핵무기비확산조약(NPT) 당사국인 모든 비핵보유국은 IAEA와 포괄적인 안전조치협정인 전면안전조치협정을 체결하여야 한다. 우리나라는 1975년 NTP를 비준하고, 같은 해 IAEA와 전면안전조치협정을 체결하여 국제 핵비확산 노력에 적극적으로 동참해 왔고, 1997년 IAEA가 안전조치 체제를 강화하기 위해 채택한 추가의정서가 2004년 2월 발효됨에 따라 확대신고와 추가접근 등을 명시한 안전조치를 적용받고 있다.

- 부분안전조치협정(Item specific SA): NTP 비당사국은 핵물질, 비핵물질, 시설 및 안전조치협정에 명시된 기타 품목만을 대상으로, 핵무기 제조나 그 이상의 군사적 목적을 위해 협정의 대상이 되는 핵물질, 시설 또는 기타 품목을 사용하지 않을 것을 약속하는 부분안전조치협정에 가입할 수 있다. NPT 비당사국 중 3개국이 부분안전조치협정을 적용받고 있다.

- 자발적안전조치협정(VOA): NTP 당사국인 핵보유국은 IAEA와 안전조치협정을 체결할 의무는 없으나, 이에 해당하는 5개국은 IAEA와 자발적안전조치협정을 체결하고 지정된 시설에 대해 안전조치를 적용하고 있다.

- 추가의정서(additional protocol) 및 소량의정서(small quantities protocol): 추가의정서는 안전조치협정의 유형을 불문하고 협정 당사국들이 체결할 수 있는 약정이고, 소량의정서는 전면안전조치협정을 체결한 당사국들이 이와 연계하여 체결할 수 있는 규약이다. 기존의 소량의정서는 전면안전조치협정의 많은 조항을 적용 유예하기 위하여 사용되었지만, IAEA는 이후 소량의정서 표준안을 개정하여 적용 유예되는 조항을 줄이고 핵물질 신고와 사찰 실시 등의 핵심 조항이 적용될 수 있도록 하고 있다.

(2) EU 원자력 안전 법제

- 원자력안전지침(2014/87/EURATOM): EU는 2011년과 2012년에 수행된 원자력 위험 및 안전성 평가, 후쿠시마 원전 사고에서 얻은 교훈, 서유럽 원자력규제협회(WENRA)와 IAEA의 안전 요구사항 등을 근거로 원자력안전지침(2014/87/Euratom)을 개정하여 전 세계적으로 원자력 안전에 대한 리더십을 크게 강화했다. 이 지침은 EU 국가들이 원자력 발전소의 생애주기 전 단계에서 신규 원자력 발전소 건설 이전에 안전성 평가를 수행하거나, 노후 원자로에 안전 강화를 보장하는 등으로 원자력 안전에 최우선 순위를 부여하도록 정하고 있다.

- 원자력폐기물지침(2011/70/EURATOM): EU는 2011년 원자력 폐기물 지침을 통하여, 사용후 핵연료와 방사능 폐기물의 안전한 체제를 구축하는 것을 목적으로 모든 회원국에 대하여 적용되는 국가별 관리체계 기준을 제공하고, 폐기물 관리 프로그램에 대한 점검에 필수적인 요소를 제시하고 있다.

(3) 미국의 원자력 수출통제 관련 규정 - 원자력에너지법(Atomic Energy Act) 123조 및 한미원자력협력협정

미국의 원자력안전법제는 연방의회의 제정법과 연방규제기구인 원자력규제위원회(NRC)의 규칙으로 구성되어 있다. 그 중 원자력에너지법 123조('123 협정')은 미국 외의 국가가 협력에 의거하여 미국의 핵 물질, 핵 원료, 원자로, 장비 및 기술을 사용하려는 경우 해당 국가와 미국 사이에 원자력협력협정 체결을 위해 적용되는 사용조건과 절차를 명시하고 있다. 123 협정에 의하면, 미국의 핵 물질, 핵 원료, 원자로, 장비 및 기술 등을 사용하려는 경우 해당 국가는 9가지의 핵 비확산 기준[1)]에 동의하여야 한다.

한미원자력협력협정은 사용후핵연료의 안전한 관리, 원전 연료의 안정적 공급, 원전수출 증진, 핵안보 등을 목표로 상호 협력할 수

있도록 한국의 외교부 차관과 미국의 에너지부 부장관이 공동의장이 되어 원자력 협력의 제반 사항을 매년 협의하는 상설 고위급위원회를 두고 있다. 한미원자력협력협정에 따르면 미국에서 한국으로 이전된 장비 및 구성품이 제3국으로 이전되는 경우 미국 정부의 승인을 필요로 하고 있다. 한편 이전에는 우리나라가 수출하는 원전에 미국산 부품이 들어갈 경우 건별로 동의를 받아야 했으나 일괄 동의 방식으로 개정하여 수출통제에 따른 절차가 다소 간소화되었다.

미국의 수출통제규정으로는 미 원자력법 제57조와 미 연방규정 10CFR810이 있는데, 특별허가 대상국에 미국의 원전기술이 수출되는 경우 미 에너지부의 사전 특별허가를 필수적으로 받도록 규정하고 있다. 수출 대상국과 미국 간 원자력협력협정 체결여부, 수출 대상국의 NPT 가입여부, 핵비확산 통제 적용여부 등을 허가기준으로 고려하고 있다.

3) 신속한 원전수출 확대를 위한 전략적 접근 필요성

우리나라는 최근까지 미자립 원전기술에 대한 기술고유화 R&D가 성공적으로 추진되어 미국의 수출통제 없이 독자적 수출도 가능한 상태라고 평가할 수 있지만, 미국 정부와 웨스팅하우스는 여전히 우리나라의 APR1400 원전기술에 미국의 기술이 포함되어 있다는 전제 아래 해외수출의 경우 통제를 받도록 요구하고 있다. 즉,

1) (1) 국가로 이전 핵물질과 기자재는 영구 사찰대상임 (2) 비핵보유국은 모든 주요 원자력 시설에 대해 IAEA의 전 범위 사찰 수용할 것 (3) 비핵보유국은 이전 핵물질, 기자재, 기술의 핵무기 개발 또는 군사목적에 전용 금지 (4) 비핵보유국이 핵실험을 하거나 IAEA의 규정을 위반할 경우 이전물을 미국에 반환할 것 (5) 핵물질이나 보안자료를 재이전 시 미국의 동의가 필요함 (6) 이전 또는 생산된 핵물질, 시설은 물리적 방호가 충분해야 함 (7) 20% 미만의 농축이나 재처리 시 미국의 사전 동의가 필요 (8) 20% 이상 농축이나 재처리 시 새로운 협정을 통한 미국의 사전 승인 필요 (9) 상기 8개 핵 비확산 조건은 핵물질, 생산시설, 이용 시설에 공히 적용됨

우리나라 원전은 웨스팅하우스에서 전수받은 기술을 바탕으로 독자적 기술력을 개발해 우리나라의 고유한 원자로형(OPR 1000 및 APR1400)으로 해외에 원전을 건설하고 운영하는데 아무런 문제가 없으나, 웨스팅하우스는 우리나라 원자로에 대한 원천기술 보유를 이유로 한국이 원전을 수출하려면 미국의 수출통제가 적용되고 이에 따라 미국 에너지부의 특별허가가 필요하다고 주장하고 있다.

웨스팅하우스가 미국 워싱턴 연방지방법원에 제기한 소송은 웨스팅하우스의 소송적격을 이유로 각하되었고, 웨스팅하우스가 2023. 10. 16. 항소해 항소심이 진행 중이다. 미국 정부는 웨스팅하우스의 소송제기 등을 통해 문제삼고 있는 수출통제 대상 여부와 관련해서 명확한 입장을 내놓고 있지 않지만, 미국 정부 및 웨스팅하우스사가 한국의 독자기술로 미국 정부의 수출통제 없이 수출이 가능하다는 한국 측 입장에 대해서 상당한 이견과 거부감을 보여온 것은 사실이다. 또한 웨스팅하우스의 이러한 문제 제기가 한국전력, 한국수력원자력 등의 해외 원전수출 과정에서 해당 국가들과 사이에 잠재적 리스크로 작용할 우려가 있다.

원전수출은 국제규범, 수출통제, 국가별 정책 등 다양하고 복잡한 사안이 얽혀 있는 국가 장기 프로젝트이다. 현재 상황에서 한국형 원전의 기술자립에 따라 미국 정부의 수출통제를 받지 않고 수출이 가능하다는 의견도 있지만, 첫째 끝까지 소송으로 가는 경우 승소가 확실한 지, 무엇보다 그러한 결론에 이르기까지 생각보다 복잡하고 긴 시간이 소요되기 때문에 우리나라의 원전수출을 위한 잠정적 불확실 상태가 너무 오래 지속되는 점(소송기간 및 결과에 대한 우려), 둘째 미국과의 분쟁 상황이 현재 진행 중인 원전수출 프로젝트의 사업자 선정을 지연시키거나 불이익을 받게 될 가능성이 있다는 점(미국 정부와 웨스팅하우스의 전략에 대한 대응 필요성) 등에서 우리나라 역시 소송, 중재 외 합의 등 신속하고 전략적, 능동적 접근이 필요하다.

UAE 원전수출 당시의 상황을 생각해 보자. 당시 우리나라는 원자로냉각재펌프 등 일부 원전기술을 자립하지 않은 상태였고 UAE는 미국 수출통제규정상 특별허가 대상국이었다. 그럼에도 불구하고 우리나라는 한국전력, 한국수력원자력을 비롯한 원전 관련 기업들이 웨스팅하우스와 사업협력협정 체결을 통해 웨스팅하우스가 미자립 기술, 자재 등을 공급하게 함으로써 단 3개월 만에 미국의 UAE 원전수출에 대한 포괄적인 특별허가를 받은 바 있다. 물론 우리나라의 원전기술이 이미 자립 수준에 이른 현 시점에서 UAE 원전수출 사례를 그대로 참고할 필요는 없지만, 우리나라가 해외 원전수출을 함에 있어서 미국 정부나 웨스팅하우스를 어떻게 활용할 것인지에 대해서 전략적 고민이 필요한 시점이다.

무엇보다 웨스팅하우스와의 IP 관련 분쟁이나 기타 소송이 단기간에 끝나지 않을 가능성이 높고, 신규 원전 건설을 추진하는 국가들이 그 추이나 결과를 지켜보거나 불확실성을 제거하는 수단을 요구할 가능성이 있다는 점에서 현재의 원전수출 기회를 살리기 위해 우리가 어떠한 전략으로 세계 시장을 두드려야 하는지 우리나라 정부와 관련 기업들이 머리를 맞댈 필요가 있다.

3. SMR 원전시장의 미래와 선점 전략

1) SMR 개발과 새로운 원전시장

최근 원전시장에서 각광을 받고 있는 소형 모듈 원전(Small Modular Reactor, 이하 SMR)은 원전을 구성하는 주요 기기를 일체화한 모듈 방식으로 제작한 출력 300MW 이하 원자로를 의미한다. 기존 대형 원전에 비해서 안전성과 경제성 및 탄력성이 뛰어나 차세대 원전기술로 주목받고 있다.

국내에서는 한국원자력연구원을 중심으로 1997년부터 SMART (System-integrated Modular Advanced ReacTor) 개발을 시작

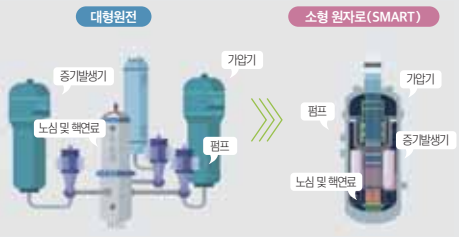
했고, 2012년 세계 최초로 SMR 설계인증을 취득했으며, 2015년 사우디아라비아와 MOU를 체결하는 등 SMR을 개발해 왔다. 특히 2022년 혁신형 소형모듈원자로(i-SMR) 기술개발사업이 예비타당성조사를 통과하면서 본격적으로 i-SMR 표준설계 개발이 추진되었다. 정부는 2023년 7월 혁신형 소형모듈원자로 기술개발사업단을 발족하고 혁신형 SMR 개발을 추진 중이다.

[그림 1]
SMR 장점 및 대형원전과 비교

• 기존 대형 원전에 비해 안전성과 경제성, 탄력성이 뛰어나 차세대 원전기술로 주목받고 있음

안전성	피동적 냉각시스템, 주요 기기의 일체화 등으로 노심손상확률이 현저히 낮고 사고시 방사능 유출 가능성이 낮음
경제성	모듈화 기법을 통해 제조단가를 낮출 수 있고 건설기간을 단축할 수 있음
탄력성	대규모 냉각수, 대규모 송전선로 등이 불필요하여 입지 선정이 자유롭고, 발전용 설비 외 다양한 목적의 산업용 설비로도 활용이 가능함

대형원전과 SMR 비교



대형원전 (APR1400, 신고리 3·4호기)	구분	SMR (한수원 혁신형 SMR)
주요 기기 배관 연결	설계	주요 기기 일체형
1200~1600W	노심 출력	100~300W
100만개	부품 수	1만개(모듈)
100만년에 한번	중대사고 확률	10억년에 한번
반경 16㎞	비상 대피 구역	반경 300m
48개월	건설 기간	24개월
4조~5조원	건설 비용	1조원
3~4센트/KWh	발전 단가	6~10센트/KWh

자료: 한국수력원자력, 한국원자력연구원, 에너지관리공단

2) SMR 단계별 법, 제도적 지원

빠르게 성장하고 있는 세계 SMR 시장에서 우리나라가 선도적인 역할을 담당하기 위해서는 한국수력원자력과 함께 민간사업자들의

시장 진입 여부를 결정하기 위해서는 사업의 전망에 대한 예측가능성이 전제되어야 한다. 이러한 점을 보완하고 민간사업자의 SMR 시장 진입을 통한 산업 활성화를 촉진하기 위해서 SMR의 산업적 특성을 고려한 법적, 제도적 지원책을 마련할 필요가 있다.

SMR 사업을 체계적이고 효과적으로 지원하기 위해서는 법과 제도의 정비과정에서 SMR의 생애주기를 고려해야 하는바, (i) 연구 및 개발(Research and Development, 이하 "R&D"), (ii) 건설, (iii) 운영 등 각 사업 단계별로 법령 개정 및 단계별 지원제도를 만들 필요가 있다.

[표 1]
단계별 제도 및 지원 추진 사항

R&D 단계	건설 단계	운영 단계
• 민간투자 세제 지원 • 실증 지원제도 수립	• SMR 수요 확보 - CF100 기조 확대 - 석탄화력발전소 대체 촉진 - 분산전원으로서의 SMR 활성화 • 사업모델 지원 • 사업비용 지원	• PPA 제도 도입 검토 • 시장 불확실성 해소를 위한 독자적 요금제도 수립 검토

(1) 연구 및 개발 단계의 지원

우선, R&D 단계의 경우 SMR이 아직 상용화 되지 않은 새로운 기술이라는 점에서 어느 정도의 불확실성을 안고 진행할 수밖에 없는바, 정부 주도의 투자 촉진 등 재정적 지원을 통해 민간 사업자들에게 개발 동력을 마련해 주는 것이 중요하다.

조세특례제한법상 국가전략기술에 SMR 관련 연구성과를 포함시켜 기존에 부여하던 세액공제 혜택의 범위를 확대할 필요[2)]가 있고,

2) 조세특례제한법 제10조 제1항 제2호에 따라 국가전략기술의 경우 연구·인력개발비의 최대 40%, 소기업의 경우 최대 50%까지 세액공제 혜택이 부여되어, 신성장기술에 비해 추가 10%의 세액 공제가 가능해 진다.

지방세특례제한법상의 세액공제 관련 규정을 SMR에 대해서도 적용하는 방안[3] 을 검토하여야 한다. 한편, 기술개발의 진척 정도에 따라 그 실증을 위한 적합한 지원을 제공하는 미국 차세대 원자로 실증 프로그램(ARDP[4]) 제도를 모델로 하여, 한국형 실증지원제도 내지 한국형 ARDP를 검토하는 것도 고려할 수 있다.

특히 기술의 개발 수준 및 상용화 전망 시점에 따라 지원내용을 차등화하는 기본 틀을 유지하되, 우리나라 SMR 시장의 특성을 고려해 (i) 초도호기에 적극적인 지원을 제공하되, (ii) 민간사업자가 국내에서 사업을 추진하는 해외노형 역시 지원대상에 포함하고, (iii) 규제혁신사항을 시범적, 선제적으로 적용하며, (iv) 실증부지를 지원하는 등의 구체적 지원방안을 마련할 필요가 있다.

나아가 이 같은 실증지원제도의 초기 투입자금 마련을 위해 원자력기금[5], 전력산업기반기금[6], 기후대응기금[7] 등 다양한 법정 기금의 투입 역시 적극적으로 검토해야 한다.

AI 성장에 따른 폭발적인 전력수요로 인해 전 세계적으로 SMR에 대한 관심과 투자가 진행되고 있는 현 시점에서 우리의 SMR 경쟁력을 강화하기 위해 정부와 국회의 관심과 신속한 지원이 필요하다.

(2) 건설 단계의 지원

다음으로 건설 단계의 진입을 촉진하기 위해 SMR의 수요처를 다각화해 사업의 추진 가능성을 높이는 한편, 다양한 사업모델에 대한

---

3) 지방세특례제한법 제102조는 신성장동력·원천기술연구개발비용 중 일정한 유형의 비용에 대해 세액공제 혜택을 부여하고 있는바, 신성장동력·원천기술의 범주에 SMR을 포함시킴으로써 SMR 기술개발과 관련한 비용이 지방세특례제한법 상의 공제 대상에 포함될 수 있다.

4) Advanced Reactor Demonstration Program

5) 원자력진흥법 제17조

6) 전기사업법 제48조

7) 탄소중립 • 녹색성장 기본법 제69조

지원을 포함한 종합적인 검토를 할 필요가 있다. 최근 제11차 전력수급기본계획이 발표되면서 대형 원전 3기 외에 SMR 건설 목표를 구체적으로 반영하고 있지만, SMR 산업계 입장에서는 양적으로 미흡하다고 평가할 수 있다. 전력 수요처에서 SMR을 대체 에너지원으로서 적극적으로 활용할 수 있도록 CF100(Carbon Free 100%) 인증제도를 구체화하고 기반 정책을 마련해, 기업들에게 재생에너지에 국한되지 않고 무탄소에너지를 활용할 유인을 제공해야 한다.

나아가 CF100의 연장선상에서, SMR이 탈탄소의 효과적인 수단이 될 수 있음을 고려해 기존 석탄화력발전소를 SMR로 대체하는 방안을 권장할 필요가 있다. 조세특례제한법상 SMR을 통한 탄소중립 달성 관련 시설에도 세액공제 혜택을 부여하고, 발전공기업 등 석탄화력발전사업의 주된 이해관계자들이 SMR 사업에 활발하게 참여할 수 있도록 SMR 주요사업자들과의 컨소시엄 구성 등 다양한 사업모델을 제시하는 것이 바람직하다. 장기적으로 석탄화력발전소 대체 유인을 높이기 위해서는 대체 전원의 건설 및 운영이 최소한 석탄화력발전소에 상응하는 실질적인 이익을 가져다줄 수 있도록 하는 제도를 마련할 필요가 있으며, 이는 전력요금을 통한 수익성 보장을 통해 가능할 것이다.

또한, 이 같은 모델을 통한 사업추진시 초기 단계의 장애요소를 경감하기 위해 석탄화력발전사업자의 기존 전기사업 허가를 신설법인 등이 승계할 수 있도록 전기사업법상의 규정 승계 요건을 완화하는 등 인·허가 관계 법령의 개선이 요구되며, 기존 석탄화력발전소의 부지를 활용하는 경우 조기부지허가(ESP) 제도를 적극적으로 적용함으로써 조기 부지 마련을 통해 사업의 안정성을 확보하도록 할 필요가 있다.

한편, SMR은 전력 수요지 인근의 소규모 분산전원으로서도 적합한 성격을 가지고 있다. 최근 시행된 분산에너지 활성화 특별법(이하 "분산에너지법")에서도 '중소형원자력발전사업', 즉, SMR을 분산

에너지사업의 한 유형으로 명시했다. 그러나 현행 분산에너지법 체계는 그 내용이 다소 협소해서 SMR에 대해서 적용 및 활용가능성이 높지 않다는 비판이 제기되고 있다. 분산에너지법은 분산에너지 설치의무제도의 도입(제13조 내지 제15조), 분산에너지특화지역의 지정 및 지정지역 대한 직접 전력판매의 허용과 규제특례의 적용(제33조 내지 제44조) 등 분산전원 활용을 활성화하기 위한 각종 지원제도를 규정하고 있는바, 분산전원으로서 SMR의 활용을 촉진해 SMR의 향후 수요를 안정적으로 확보하기 위해 분산에너지특화지역에 대한 특례를 포함해서 분산에너지법상 마련된 각종 지원 및 진흥정책을 SMR에도 적극적으로 도입, 적용할 필요가 있다.

(3) 운영 단계의 지원

마지막으로 SMR 운영단계에서 지원제도를 살펴보면, 궁극적으로 SMR을 통해 생산한 전력의 판매 수익성을 높여 SMR 사업의 장기적 안정성을 확보하는 것에 초점을 맞출 필요가 있다. 현행 제도에서는 단일 전력시장을 중심으로 가격이 경직적으로 결정되기 때문에 에너지원별로 발전사업자들의 수익성 확보에 적합하지 않은 측면이 있다. 특히 민간사업자들 위주로 운영될 것으로 예상되는 SMR 사업의 수익성을 높이기 위해 SMR 전력요금과 기저 전원인 대형 원전의 전력요금 결정이 차별화될 필요가 있고, SMR 전력요금 결정에 있어서 어느 정도 자율성이 확보되어야 한다.

예를 들면 자율적인 가격결정이 가능하도록 전기사업법에서 허용하고 있는 재생에너지에 대한 직접 PPA 제도[8)]를 SMR에도 도입하는 방안을 가정해 볼 수 있다. 이 경우 PPA에 따른 전력요금 산정 시 부가되는 부대비용을 최소화하고 궁극적으로 분산형 전원으로서 송전편익을 고려한 요금산정이 가능하도록 함으로써 SMR 사업의 수익성 및 예측가능성을 확보할 수 있는 장점이 있다. 그 외에도

8) 전기사업법 제16조의5

SMR 시장이 초기 단계인 점을 고려해서 SMR 발전사업에 대해 수익성을 확보해 주는 SMR 특화요금제도를 도입하는 방안도 고려해 볼 수 있다.

해외 사례를 살펴보면, 미국 인플레이션감축법(IRA)은 신규 원전을 통해 생산한 전력 수입에 대해 세제혜택을 부여함으로써 사실상 전력생산의 수익성을 높이는 효과를 가져오고 있으며, 일부 국가에서는 무탄소에너지에 대해 전력요금을 일정 수준으로 보장하는 차액지원제도 등의 형태로 탈탄소화에 대한 지원 모델을 설계하고 있다.

3) SMR의 기술적 특성을 고려한 별도의 안전규제 도입

원자력발전소에 관한 안전규제 제도는 대형 원전을 중심으로 확립되어 있는바, SMR에 관해 동일한 규제를 그대로 적용하기 어렵다. 이에 따라 SMR의 기술적 특성을 고려한 별도의 안전규제를 도입할 필요성이 제기된다.

안전규제의 개선이 특히 필요한 분야로서, (i) 인허가 취득 소요기간 단축 및 예측가능성 제고, (ii) 사전인허가제도의 도입, (iii) 통합인허가제도의 도입, (iv) 주민의견수렴절차의 정비 등을 예로 들 수 있다.

(1) 인허가제도의 개선

국내의 원자력발전 인허가절차는 2단계 인허가절차로써 발전용 원자로 및 관계시설을 건설하거나 운영하고자 할 경우 각 단계별로 원자력안전위원회(이하 "원안위")의 허가를 받아야 한다[9].

원자력안전법 시행령 제19조는 원안위는 건설허가 및 운영허가 신청을 받은 경우 24개월 이내(다만, 이미 건설을 허가한 원자로시설의

9) 원자력안전법 제10조 제1항, 제2항, 제21조

발전용원자로와 용량·원자로형 및 원안위가 정하는 주요 설비의 설계제원이 동일한 경우 및 법 제12조 제1항 본문의 전단에 따라 인가 받은 표준설계와 동일한 원자로시설에 대한 건설허가신청을 받은 경우에는 15개월 이내)에 처리하여야 한다고 규정하고 있으나, "신청서류의 보완 또는 수정이 필요한 기간", "원자로시설이 설치되지 아니하여 사용 전 검사가 불가능한 기간"(운영허가의 경우) 및 "그 밖에 안정성을 확인하기 위한 실험 등 부득이한 사유로 인하여 추가로 필요한 기간"은 위 허가 처리기간에 산입하지 아니한다고 규정하여 예외사유를 폭넓게 인정하고 있다. 실제 위 예외사유 조항을 근거로 신청 이후 허가를 받기까지 24개월이 초과되는 경우가 빈번하게 발생하고 있다.

원안위 입장에서 원전의 안정성에 대한 면밀한 검토를 위해서 추가로 기간이 필요한 경우가 있을 수 있으나, 사실상 허가 발급이 무기한으로 연장될 수 있고 허가 신청자로서는 허가 발급까지 소요되는 기간을 예측하기 어렵다는 문제가 자주 제기되어 왔다. 더욱이 SMR의 경우에는 건설기간이 단축되어 특히 신속하게 인허가가 발급될 필요가 있기 때문에 인허가기간의 예측 및 단축이 필요하다.

이에 대한 개선 방안으로 원자력안전법 시행령에서 허가 처리기간에 산입하지 아니하는 예외사유를 보다 구체적으로 명시하고, 원안위에서 그러한 사유가 발생했다고 판단해 허가 처리기간에 산입하지 아니하는 것으로 결정하는 경우에는 그 사유, 진행상황 및 향후 허가처리 계획 등을 신청자에게 통보하도록 의무화하는 규정을 추가하는 것을 고려해 볼 수 있다.

(2) 사전인허가제도의 도입

기존 원자력시설의 기술 기준은 대형 원전을 중심으로 정립되어 있기 때문에, 소형화, 모듈화 등 새로운 설계 특성을 갖고 있는 SMR에 대해서는 기존 기술 기준을 그대로 적용해 안정성을 확인하기 어려운 경우가 발생할 것으로 예상된다. 더욱이 설계가 완료된 이후

인허가서류를 검토하는 기존의 인허가 방식으로는 개발과정의 시행착오 및 불확실성이 커질 수 있으므로, 이를 최소화하기 위해서 규제기관이 사전인허가제도를 통해서 초기 설계 단계에서부터 사업자에게 대략적인 입장을 선제적으로 제시할 필요가 있다. 미국의 PAR(Pre Application Review) 및 캐나다의 VDR(Vendor Design Review)이 사전인허가제도를 도입한 사례로서 참고할 수 있다.

한편, 원안위는 현재 i-SMR에 대해서는 '사전설계검토'를 추진하고 있으나, 사전인허가제도 등에 대한 법적 근거가 없다는 이유로 사전설계검토 결과의 구속력을 인정하지 않고, 또한 다른 노형에 대한 사전 검토에 대해서는 추가적으로 수용하지 않는 입장이다. 원안위 고시 등으로 사전인허가제도의 근거를 마련하게 된다면, SMR 시장에서 민간사업자의 시장 진입을 확대할 수 있을 것으로 예상된다.

(3) 통합인허가제도의 도입

국내 원자력발전소에 관한 인허가절차는 건설허가 및 운영허가의 2단계로 운영되는데, 건설허가 이후 운영허가 단계에서 중첩적 규제 이슈가 발생하거나 새로운 규제기관의 신설 또는 기존 규제요건의 강화 등으로 인허가에 소요되는 기간이 지속적으로 증가되는 문제가 지적되어 왔다. 현재의 2단계 인허가절차는 당초 규제 정보가 부족한 상황 하에서 불가피하게 도입된 측면이 있는데, 우리나라가 그간 원전 설계, 건설 및 운영에 관한 축적된 경험을 갖고 있는 현재로서는 통합인허가제도를 도입해서 인허가 기간을 단축시키는 노력이 필요하다.

미국은 원전 건설 전 건설허가 및 운영허가를 통합해 신청할 수 있도록 사업자에게 선택권을 부여하고, 건설허가 및 조건부 운영허가를 발급하도록 하며, 조건이 충족되는 경우 운전을 개시할 수 있도록 하는 등 이미 통합인허가제도를 운영하고 있다[10].

(4) 주민의견수렴절차의 정비

현행 원자력안전법은 신청자로 하여금 방사선환경영향평가서[11] 초안을 작성해 공람하게 하고, 일정한 인원 이상의 주민의 요구가 있는 경우 공청회 등을 개최해 주민의 의견을 수렴하게 하며[12], 이를 방사선환경영향평가서의 내용에 포함시키도록 정해서 주민의견수렴절차를 신청자에게 전담시키고 있지만, 최종적인 의사결정 권한을 가지고 있는 원자력안전위원회의 책임 및 역할에 대해서는 규정하고 있지 않다. 원자력안전법에서 주민의견수렴절차를 의사결정 권한이 없는 사업자에게 전담시키는 것은 주민의견수렴절차의 질과 범위를 축소시킬 수 있을 뿐만 아니라, 인근 주민이 이의가 있는 경우 원안위에 대해 의견을 전달할 수 있는 법적 절차조차 존재하지 않는다. 이에 따라 주민의견수렴절차의 실효성이 저해되고, 원안위로 대표되는 정부와 인근 주민의 관계를 오히려 악화시킬 수 있으며, 이로 인해 주민의 원자력 안정성에 대한 의심을 해소하지 못하고 주민의 반대의사를 더욱 강화시켜 사업의 지연을 초래할 수 있다는 문제가 제기된다.

특히 대형 원전은 공기업인 한국수력원자력이 건설을 주관하고 있기 때문에 사실상 정부 차원에서 주민수용성 제고를 위한 지원이 이루어질 여지가 있지만, 민간 사업자가 추진하는 SMR의 경우 주민수용성 제고를 민간 사업자에게만 맡기는 경우 사실상 주민의견수렴절차가 실효적으로 진행되지 못할 가능성이 높고, 결국에는

---

10) 미국의 NRC는 1989년 규제의 효율성과 인허가 절차의 예측가능성을 향상시키기 위한 목적에서 새로운 인허가절차(10CFR52)를 도입했다. 10CFR 52는 조기부지허가(Early Site Permit, ESP), 표준설계인증(Standard Design Certification, SDC) 및 통합인허가(Combined License, CL) 제도를 규정하고 있다.

11) 방사선환경영향평가는 원자력시설의 수명기간 동안 운영과 사고로 예상되는 방출 또는 누설된 방사선 물질이 환경에 미치는 영향(일반인에 대한 피폭선량)을 평가하는 제도이다. 방사선 영향은 인간에게 미치는 영향과 비인간 생물에 대한 미치는 여향으로 구분되는데, 현재 우리나라의 경우 인간에 미치는 영향만 평가하고 있으며, 중대사고를 방사선환경영향평가서의 검토 대상에 포함시키지 않고 있다.

12) 원자력안전법 제103조, 동법 시행령 제145조

SMR의 안정성에 대한 의심을 해소하지 못해 사업 지연을 초래하게 될 것이다.

또한 원자력안전법이 상정하는 현행 공청회는 사업자의 설명회와 유사하게 운영되고, 이해관계인의 의견 개진이 제대로 이루어지지 못하고 있으며, 주민이 공청회의 개최를 거부하는 경우도 있어 행정의 수용성을 제고하기 보다는 상호 간의 불신을 오히려 증폭시켜 사업의 시행을 저지시키는 효과를 가져오는 경우도 적지 않다. 공청회가 주민에 의한 수용성 제고 기능을 제대로 수행할 수 있도록 하기 위해서는 정부 차원에서 보다 적극적인 역할을 수행해 사업자 측의 의견과 주민 측의 의견을 듣고 상호간의 협의를 이끌어 내도록 제도적 보완을 할 필요가 있다[13].

(5) 기타

현행 방사능방재법 및 관련 규정상 SMR은 기존 대형 원전과 동일하게 방사선비상계획구역이 일률적으로 정해지게 되는데, 방사능비상계획구역은 주민보호를 위한 비상대책의 실효성 등을 고려해 적절한 범위로 설정하는 것이 바람직하다. SMR은 그 특성상 기존 대형 원전과 동일한 크기의 방사선비상계획구역이 요구될 필요가 없다. 만약 SMR의 특성을 고려하지 아니한 채 기존 대형 원전과 동일한 크기의 방사선비상계획구역이 설정된다면 현실적으로 사업이 진행되기 어려울 것이다.

한편, 원자력안전법은 원자로를 발전용 원자로와 연구용·교육용 원자로로 구분해 인허가절차를 운영하고 있으나, SMR이 다양한 방식으로 탄력적으로 운영될 가능성이 높다는 점에서 SMR을 포섭할

13) 공청회의 주관자를 사업자에서 원안위로 변경하거나, 적어도 주민의견수렴절차에 대한 원안위의 주재자로서의 역할 또는 감독 책임 등을 규정하는 방안을 고려할 수 있다.

수 있는 새로운 원자로 개념에 대한 검토도 필요하다. SMR이 수소 생산을 목적으로 하는 등 상업적 전기 생산을 목적으로 하지 않는 경우를 포섭할 수 있는 새로운 원자로 개념을 신설하는 방안을 고려해 볼 수 있다.

4. 결론

에너지 전환, 디지털 전환이 앞으로 다가올 미래가 어떻게 변할 지 알 수 없다. 그러나 분명한 것은 과거보다 더 전기에너지에 대한 수요 및 의존도가 늘어난다는 것이다. 기후온난화의 위기를 극복하고 탄소중립의 목표를 달성하기 위한 인류의 노력이 가끔은 후퇴하고 화석연료의 부활로 나타날 수 있지만 커다란 흐름은 변하지 않을 것이다. 태양광, 수력 등 재생에너지와 수소, 원자력을 얼마만큼 효율적으로 균형 있게 배분하느냐에 따라 탄소중립의 목표 달성이 더 가까워질 것으로 확신한다.

원전의 안전성을 제고하는 노력, 사용후 핵연료 처리를 위한 노력이 성과를 낼 수 있기를 기대하면서 우리나라가 가지고 있는 경쟁력 있는 원전 기술을 세계 시장에서 마음껏 활용하고 SMR이라는 새로운 원전시장에서 우리나라가 기술표준을 선점하고 시장을 장악할 수 있기를 기대한다.

아랍에미리트연합국(UAE) 원자력 정책 동향 및 제언

UAE는 바라카 원자력 발전소를 성공적으로 도입하고 운영하면서 원자력 관련 법령 제정과 규제기관 설립 등 필수적인 원자력 제도 시스템을 구축했다.

이는 원자력 신흥국으로의 원전 수출이 단순한 하드웨어 수출이 아닌 법적·제도적 시스템의 수출이 동반된다는 것을 보여준다.

연승모

KAIST
원자력및
양자공학과
박사과정

1. 서론

온실가스 배출로 인한 기후변화를 억제하기 위해 2015년 유엔기후변화협약(UNFCCC)에서 채택된 파리기후협정은 각 국가가 온실가스 배출을 감축하도록 의무화하고 있다. 이에 따라 전력 생산 부문에서 온실가스 배출을 위해 여러 국가가 원자력 발전소의 활용 확대를 고려하고 있다.

원자력 발전소를 신규로 도입하는 국가는 원자력 관련 법령 제정, 규제기관 설립, 인허가 시스템 수립 등 많은 절차를 거쳐야 한다. 대한민국의 원전 수출 사례인 아랍에미리트연합국(UAE)의 경우, 첫 원자력 발전 정책 보고서의 발표(2008.04.)부터 바라카 원자력 발전소 1호기의 상업운전(2021.04.)까지 13년의 기간이 소요됐다. 이는 원자력 발전소 수출이 하드웨어인 원자력 발전소뿐만 아니라 소프트웨어인 원자력 제도 전반의 수출도 동반된다는 것을 보여준다.

원자력 관련 법령의 제정 및 규제기관의 설치와 같은 원자력 제도들은 발전소 운영을 위해 반드시 선행도 필요하지만, 제도의 마련에는

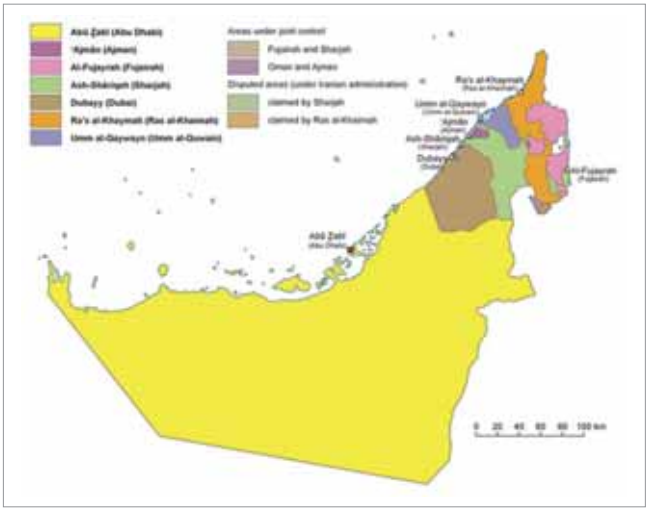
국가별 정치구조 및 법제의 세심한 고려가 필요하다. 대한민국은 UAE의 원자력 인허가 및 규제 절차 개발을 지원하며 원자력 발전소 수출과 더불어 원자력 제도를 수출했다. 각 국가의 상황에 맞춘 원자력 제도의 수출은 앞으로도 원자력 발전소 수출에 중요한 메리트로 역할을 할 수 있다.

원전 도입 이후에도 UAE는 자국의 원자력 정책을 발전시켜나가고 있다. 본고에서는 UAE의 원자력 법령과 정책 동향을 분석하고 국내 정책과 비교하며 향후 UAE의 원자력 정책에 대해 제언한다. 이러한 원자력 정책 연구를 통해 향후 UAE의 추가 건설 원전 수주 및 타 국가로의 신규 원전 수출에 도움이 될 것으로 전망된다.

2. UAE 정부의 구성

아랍에미리트연합국(UAE)은 아라비아반도의 페르시아만에 접하고 있으며, 서쪽으로는 사우디아라비아를, 동쪽으로는 오만을 접한다. UAE는 아부다비(Abu Dhabi), 두바이(Dubai), 샤르자(Sharjah), 라스알카이마(Ras Al Khaimah), 아즈만(Ajman), 움알콰인(Umm Al Quwain), 푸자이라(Fujairah)의 7개 에미리트(토후국)로 구성된 대통령 중심제의 연방국가이다.

[그림 1]
아랍에미리트연합국을
구성하는
7개의 에미리트



1) 연방정부 입법부

(1) 연방최고회의(Federal Supreme Council)

연방최고회의(Federal Supreme Council)는 아랍에미리트연합국의 최고의사결정기구이며 7개 에미리트의 통치자(국왕)로 구성된다. 연방최고회의는 대통령과 부통령에 대한 선출권과 외교, 안보, 국방, 노동, 보건 등 연방정부의 주요 정책을 결정한다. 연방최고회의의 의장은 대통령이 맡는다. 연방최고회의는 연방평의회에서 상정한 법률 또는 명령을 공포하고, 국제협약을 비준해 승인한다. 의사결정은 다수결을 원칙으로 하고, 중대한 사안에 한해 아부다비와 두바이를 포함한 총 5표 이상으로 결정한다.

(2) 연방평의회(Federal National Council)

연방평의회(Federal National Council)는 아랍에미리트 연방정부의 의회 기능을 담당한다. 의석수는 40석이며 에미리트별 인구수에 비례해 아부다비와 두바이에서 8석을, 샤르자와 라스알카이마에서

6석을, 아즈만·움알콰인·푸자이라에서 4석을 할당받는다. 연방평의회 위원의 임기는 4년이며 연임할 수 있다.

2006년까지는 각 에미리트의 통치자가 의원을 지명했으나 2006년부터 에미리트별로 배정된 의석 중 절반을 통치자가 지명하고, 나머지 절반을 에미리트 내에서 국민투표로 선출하도록 변경됐다. 「아랍에미리트연합국 헌법」 제68조와 제71조는 연방평의회 위원이 장관직을 포함해 연방정부에서 다른 직책을 맡는 것을 금지한다.

「아랍에미리트연합국 헌법」상 연방평의회는 법안발의권이 없다. 때문에 내각(행정부)에서 제출한 법안 및 국제조약에 대해 논의와 승인을 하되 법안을 발의하지는 못한다. 논의 및 승인 절차가 종료된 후에는 아랍에미리트의 최고의사결정기구인 연방최고회의에 법안을 상정한다.

2) 연방정부 행정부

(1) 대통령

대통령(President)은 연방정부의 국가원수이다. 관례상 아부다비의 통치자가 대통령으로, 두바이의 통치자가 부통령으로 연방최고회의를 통해 선출된다.[1)]

대통령과 부통령의 임기는 5년이고, 연임이 가능하다. 대통령은 연방정부의 내각을 임명하는 권한을 갖고, 대통령의 부재 시 부통령이 전권을 위임받는다.

---

1) 2023년 11월 기준, UAE 대통령직으로 무함마드 빈 자이드 알 나하얀 전하, UAE 부통령이자 국무총리직으로 두바이의 통치자 무함마드 빈 라시드 알막툼 각하, UAE 2번째 부통령이자 부총리로 만수르 빈 자이드 알 나하얀 각하

(2) 국무총리 및 내각

국무총리(Prime Minister)는 연방정부행정부의 수반이다. 관례상 두바이의 통치자가 부통령직과 함께 겸임한다.

내각(Cabinet, Council of Ministers)은 아랍에미리트 연방정부에 관한 법안을 연방평의회에 제출하고, 법률시행에 필요한 규정을 공포하며 그 시행을 감독한다. 내각은 연방정부의 장관들로 구성되고 국무총리가 이끈다. 현재 내각은 19개 행정각부와 33개의 연방기관(Federal Entity)을 감독한다.[2)]

입법부 기관인 연방평의회에서 법안을 발의할 수 없기 때문에, 내각 내부에서 법안을 제안하고 초안을 작성한 뒤 이를 연방평의회에 제출해 법안심사를 받는다.

3) 법원(法源)

UAE 내 모든 에미리트에 적용되는 법원(法源)은 헌법, 연방법(Federal laws), 법률법령(Decree-laws), 일반법령(Ordinary decrees), 내각결정명령(Cabinet decision), 장관결정명령(Ministerial decision) 그리고 장관결정규정(Regulation)으로 구성한다.[3)] 모든 에미리트에 적용되는 법원 외에 각 에미리트에 내에서 적용되는 에미리트법(Local laws)과 에미리트 칙령(Local decrees)을 각 에미리트 내에서 제정할 수 있다. 연방법과 에미리트법에서도 규정하지 아니한 경우에는 관행 또는 관습을 적용한다.

2) 2023년 11월 기준 UAE정부의 내각 현황

3) 「아랍에미리트연합국 헌법」 제110조부터 제112조는 연방법, 제113조는 법률법령, 제114조와 제115조는 일반법령에 대해 명시한다.

(1) 아랍에미리트연합국 헌법

1996년에 연방평의회와 최고회의는 1971년에 제정됐던 임시헌법의 개정을 통해 「아랍에미리트연합국 헌법」을 제정했다. 현행 「아랍에미리트연합국 헌법」은 2009년 개정됐으며, 아랍에미리트 연방 소속 모든 에미리트에 대한 헌법이다.

(2) 연방법

연방법은 상위법원으로 아랍에미리트연방 전체에 적용된다. 연방법은 각 행정각부 장관이 초안을 작성해 연방평의회에 제출한 후 평의회 산하 위원회에서 심사한다. 「아랍에미리트연합국 헌법」 제120조에서는 연방정부가 각 에미리트에 대해 독점적으로 법률 제정과 집행을 관할하는 분야를, 제121조에서는 연방정부가 법률 제정만을 독점적으로 행사하는 분야에 대해 명시한다.

[표 1]
「아랍에미리트연합국 헌법」 제120조와 제121조에 따른 연방정부와 에미리트의 입법 및 집행 분야 구분

연방정부에서 법률 제정과 집행을 관할하고 에미리트의 자치가 불가능한 분야 (아랍에미리트연합국 헌법 제120조)	연방정부에서 법률 제정만을 관할하고 에미리트의 집행이 허용되는 분야 (아랍에미리트연합국 헌법 제121조)
외교	노사관계 및 사회보장제도
교육	부동산 소유권 및 공익을 위한 수용
통화(화폐)	범죄자 인도
국방(국방군 및 특수군)	동식물 보호
수도(아부다비)의 보안, 치안	인쇄 및 출판
무선 통신(우편, 전신, 전화)	모든 종류의 은행 및 보험
항공 교통 관제	형법, 민사 및 상거래법, 회사법, 민사 및 형사 법원 절차 규정과 관련된 주요 법률
연방 도로의 건설, 유지 관리 및 개선	지적, 기술 및 산업 재산권 보호 저작권
연방 공무원 및 연방 사법부	군대 또는 토후국에 속한 보안군이 사용하는 것을 제외한 화기와 탄약의 수입
연방 재정, 세금 및 수수료	기타 항공 업무
교통 조직	영해의 결정과 공해 항해의 규제
공중 보건 및 보건 서비스	금융자유구역의 설치 및 구성방안 결정
무게, 측정 및 표준	
전기 서비스	
국적, 여권, 거주지 및 이민	
연방 인구 조사 및 통계 등 연방 정보	

(3) 에미리트법

「아랍에미리트연합국 헌법」 제116조는 "각 에미리트는 헌법에 따라 연방정부에 위임하지 않은 모든 권한을 행사할 수 있다"고 명시한다. 또한 「아랍에미리트연합국 헌법」 제122조에서는 "각 에미리트는 연방정부가 관할하는 제120조와 제121조의 분야를 제외한 모든 분야에 관할권을 단독으로 행사할 수 있다"고 명시한다. 이에 에미리트는 연방법 외에 각 에미리트에 내에서 적용되는 에미리트법(Local laws)을 제정할 수 있다. 에미리트법은 각 에미리트 내 집행위원회에서 법안을 발의해 자문위원회에 제출하면, 자문위원회에서는 논의와 심사를 거쳐 에미리트 통치자에게 제출하고, 에미리트 통치자는 이에 서명하고 공포한다.

(4) 법률법령(Decree-laws)

「아랍에미리트연합국 헌법」 제113조는 아래와 같이 법률법령(Decree-laws, 긴급명령)에 관해 규정한다. 법률법령은 연방최고회의가 긴급하게 연방법을 제정할 필요가 있는 경우 공포하며, 이를 통해 제정된 법령은 법률대위명령으로 연방법과 같은 효력을 갖는다. UAE에서 법률법령을 영문으로 번역 시 "Federal Decree-Law" 또는 "Federal Law by Decree"로 번역한다.

دستور الإمارات العربية المتحدة

الفصل الثاني

المراسيم بقوانين

المادة 113

مراسيم لها قوة القوانين

اذا حدث فيما بين أدوار انعقاد المجلس الأعلى ، ما يوجب الإس ا رع على إصدار قوانين اتحادية لا تحتمل التأخير ، فلرئيس الاتحاد ومجلس الوز ا ء مجتمعين اصدار ما يلزم منها ، وذلك في شكل مراسيم لها قوة القانون بشرط الا تكون مخالفة للدستور.

ويجب أن تعرض هذه المراسيم بقوانين على المجلس الأعلى خلال اسبوع على الأكثر للنظر في إق ا ررها أو إلغائها ، فإذا أقرها تأيد ما كان لها من قوة القانون ، ويخطر المجلس الوطني الاتحادي بها في أول اجتماع له.

أما اذا لم يقرها المجلس الأعلى فيزول ما كان لها من قوة القانون ، الا اذا أ رى اعتماد نفاذها في الفقرة السابقة ، أو تسوية ما ترتب عليها من آثار بوجه آخر. بوجه آخر.

아랍에미리트 헌법

제2장 법률법령

제113조 (법률의 효력을 갖는 법령)

연방최고회의의 회기 사이에 연방법의 긴급한 제정이 필요한 경우, 대통령과 내각은 헌법에 위배되지 않는 한 법률의 효력을 가지는 법령의 형태로 공포할 수 있다.

이러한 법률법령은 최대 일주일 이내에 연방최고회의에 제출해야 하며, 가결되면 법률의 효력을 갖고 다음 연방평의회 회의에 통보한다.

다만, 최고위원회에서 부결될 경우, 법률의 효력을 제재하거나, 법률로 인해 발생하는 효과를 다른 방법으로 해결하기로 결정하지 않는 한, 법률의 효력을 상실한다.

(5) 일반법령(Ordinary decrees)

「아랍에미리트연합국 헌법」 제114조와 제115조는 아래와 같이 일반법령(Ordinary decrees)에 관해 규정한다. 제114조에서 법령을 발행할 수 있는 "각 권한"은 대통령, 국무총리, 행정각부 장관을 의미하며 각각 대통령령, 총리령, 부령(장관령)을 발행할 수 있다. 법령의 공포는 내각의 승인과 대통령 또는 연방최고회의의 비준을 받아야 하며, 제115조에서는 연방최고회의의 비준을 대통령에게 위임할 수 있는 법령의 내용에 관해 규정한다.

دستور الإمارات العربية المتحدة

الفصل الثالث

المراسيم العادية

المادة 114

اصدار المراسيم ونشرها

لا يصدر مرسوم الا اذا أقره مجلس الوز ا ء وصدق عليه رئيس الاتحاد أو المجلس الأعلى كل حسب اختصاصه ، وتنشر المراسيم بعد توقيعها من رئيس الاتحاد في الجريدة الرسمية .

المادة 115

اصدار مراسيم عند غياب المجلس الأعلى المختص

للمجلس الأعلى أن يفوض رئيس الاتحاد ومجلس الوز ا ء مجتمعين في اصدار ما يقتضي الأمر إصداره في غيبة المجلس الأعلى من المراسيم التي يختص المجلس المذكور بالتصديق عليها على ألا يشمل هذا التفويض الموافقة على المعاهدات والاتفاقيات الدولية أو إعلان الأحكام العرفية ورفعها ، أو إعلان قيام الحرب الدفاعية ، أو تعيين رئيس أو قضاة المحكمة الاتحادية العليا .

아랍에미리트 헌법

제3장 일반법령

제114조 (법령의 발행 및 공포)

법령은 각 권한에 따라 내각의 승인과 대통령 또는 연방최고회의의 비준을 받지 아니하면 공포할 수 없다. 법령은 대통령이 서명한 후 공식 관보에 공포한다.

제115조 (연방최고회의의 부재 시 법령의 공포)

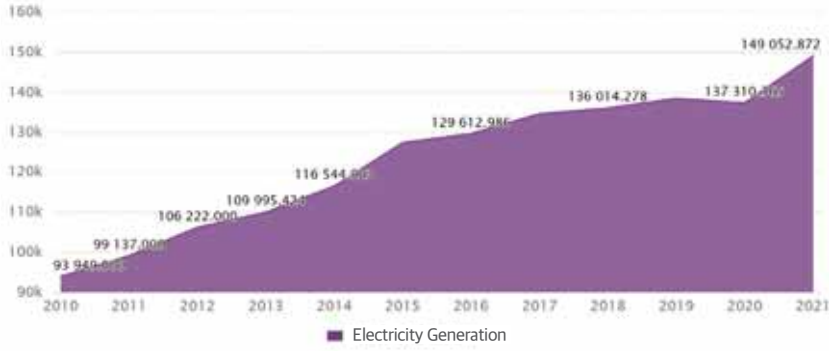
연방최고회의는 법령에 국제조약과 협정의 승인, 계엄령의 선포 및 해제, 방어전의 선포 또는 연방 대법원장 또는 법관의 임명 등이 포함되지 않는 한, 연방최고회의의 부재 시에 모든 법령을 발표하도록 대통령과 내각에 함께 위임할 수 있다.

3. UAE의 원자력 정책 현황

1) UAE의 원자력 발전 도입

2000년대 초까지 UAE는 국내 모든 전력생산을 천연가스와 화력발전을 통해 충당했다. 이후 UAE 국내 전력수요의 급증과 심각한 천연가스 공급부족으로 인해 2007년 여름 천연가스가 부족해 디젤화력발전을 통해 전력을 충당한 사건[4] 을 계기로 UAE 내에서 원자력 개발의 필요성이 강력하게 대두됐다.

[그림 2]
2010년부터 2021년까지의 UAE의 연간 전력 생산량 추이(GWh)



출처: WWW>CEICDATA.COM I Ministry of Energy and Infrastructure

UAE의 전력생산을 위한 천연가스의 공급부족은 외부요인이 아닌 UAE의 전력수요 증가로 인해 발생했다. 2005년부터 2007년까지 UAE 전체 천연가스 소비는 연비율 10%으로 급증했으며, UAE 에너지 및 인프라부에서 예측한 필요발전능력은 2007년 13,224MW에 대비해 2020년에는 40,858MW으로 3배로 증가할 것으로 판단했다.[5)]

이를 바탕으로 UAE는 추가적인 에너지원 개발과 이를 기반으로 한 지속적인 경제발전을 달성하기 위해 태양열과 풍력 에너지 등을 고려했으나, 2020년 필요발전능력의 6~7%를 충당할 것으로 예상했다. UAE 정부는 온실가스 배출을 비롯한 환경 이슈와 전력 공급의 안정성, 지속가능한 자국 내 산업 발전을 고려해 원자력에너지를 통해 전력수요의 일부를 충당하기로 결정했다.

---

4) 두바이 최대의 민간 석유기업인 Emirate(Emirates General Petroleum Corporation)의 간부인 Khaled Al Awadi는 2008년 2월, 아부다비에서 개최된 "Gas Arabia 2008" 컨퍼런스에서 UAE의 천연가스 공급부족과 천연가스의 연료 전환 가능성에 대한 발표에서, UAE에 있어서 가스공급의 위기상황이 심각하게 발생해 2007년 성수기에 1,000 Mmcf/d에 해당되는 가스가 부족해 디젤유로 대체됐다고 함

5) UAE Ministry of Energy and Infrastructure

UAE는 2008년 4월 정부정책보고서 '평화로운 원자력에너지의 평가 및 잠재적 개발에 관한 아랍에미리트의 정책'(Policy of the United Arab Emirates on the Evaluation and Potential Development of Peaceful Nuclear Energy)을 통해 원자력에너지 개발 프로그램(Nuclear Energy Program)의 계획을 발표했다.

보고서는 아래 6개의 원칙을 제시하며 UAE의 원자력 정책의 기본 원칙으로 정했다.

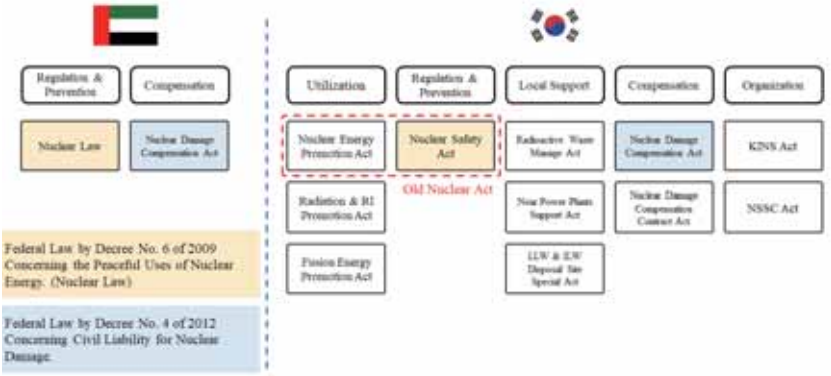
[표 2]
UAE의 원자력 발전 정책의 기본 6원칙

UAE의 원자력 발전 정책의 기본 6원칙
- 완전한 원자력 운영의 투명성 (Complete operational transparency) - 최고 수준의 핵비확산을 위한 정책 (The highest standards of non-proliferation) - 최고 수준의 안전·안보 정책 (The highest standards of safety and security) - 국제원자력기구(IAEA)와의 직접적인 협력 기준 준수 (Working directly with the IAEA and conforming to its standards) - 원자력 공급에 책임 있는 국가 및 전문기구와의 협력 (Partnerships with responsible nations and appropriate expert organizations) - 원자력 발전 정책의 지속가능성 (Long-term sustainability)

또한 UAE는 원자력 안전과 핵비확산을 기반으로 원자력에너지 개발 프로그램을 추진하기 위해, 핵연료주기의 핵비확산 측면에서 취약한 일부분인 우라늄의 농축과 사용후핵연료의 재처리를 포기하겠다고 선언했다.

2) UAE의 원자력 법률

[그림 3]
한-UAE 간 원자력 관계 법령 비교



UAE의 원자력 관련 연방법으로 2009년 10월 3일 공포된 '원자력평화적이용법'(또는 '원자력법')과 2012년 8월 13일 공포된 '원자력손해배상법'(또는 '원자력손해보상법')을 두고 있다.

(1) UAE 원자력법

UAE의 '원자력평화적이용법'(영문명 「Federal Law by Decree No. 6 of 2009 Concerning the Peaceful Uses of Nuclear Energy」)은 원자력에너지 개발 프로그램을 위해 UAE에서 처음 제정된 원자력 관련 법률로, 2008년 정부정책보고서[6]에서 제시한 6개의 원칙에 따라 다음과 같이 구성된다.

6) Policy of the United Arab Emirates on the Evaluation and Potential Development of Peaceful Nuclear Energy

원자력평화적이용법

Federal Law by Decree No. 6 of 2009 Concerning the Peaceful Uses of Nuclear Energy

제1장 (정의 및 관할)

Chapter One DEFINITIONS - JURISDICTION

제1조 (정의)

재2조 (목적)

제3조 (법률의 적용 범위)

제2장 (규제기관의 설립과 목표)

Chapter Two ESTABLISHMENT OF THE AUTHORITY AND ITS OBJECTS

제4조 (규제기관의 설립)

제5조 (규제기관의 의무와 권한)

제6조 (규제기관의 면허발급)

제7조 (규제기관의 업무협조)

제8조 (규제기관의 면책)

제9조 (규제기관의 정보공개)

제3장 (규제기관의 운영)

Chapter Three THE MANAGEMENT OF THE AUTHORITY

제10조 (위원회의 구성)

제11조 (위원회의 권한)

제12조 (위원의 임기)

제13조 (위원의 결격사유)

제14조 (원장)

제15조 (원장의 권한)

제16조 (원장의 임기)

제17조 (직원)

제4장 (규제기관의 재정)

Chapter Four FINANCIAL AFFAIRS OF THE AUTHORITY

제18조 (재원)

제19조 (회계연도)

제20조 (감사)

제21조 (면세)

제22조 (사업 및 결산보고)

제5장 (허가의 발급, 갱신, 취소)

Chapter Five LICENCES (Granting- Revocation- Suspension)

제23조 (적용범위)

제24조 (허가)

제25조 (허가 대상)

제26조 (허가의 범위)

제27조 (허가를 받은 자)

제28조 (허가 신청 및 기록)

제29조 (허가를 받은 자의 책무)

제30조 (허가의 한계)

제31조 (허가의 취소)

제6장 검사 및 통제

Chapter Six INSPECTION AND CONTROL

제32조 (대상)

제33조 (국제표준의 준용)

제34조 (수의계약)

제35조 (검사)

제36조 (검사 기준)

제37조 (규제 및 집행)

제7장 규제, 규제지침, 안전조치

Chapter Seven REGULATIONS- GUIDELINES- SAFEGUARDS

제38조 (규제, 규제지침)

제39조 (안전조치의 이행)

제8장 방사성폐기물 및 해체

Chapter Eight RADIOACTIVE WASTE AND DECOMMISSIONING

제40조 (발생자의 책무)

제41조 (방사성폐기물 규정)

제42조 (방사성폐기물 및 해체 신탁기금)

제9장 안전관리 및 품질보증

Chapter Nine MANAGEMENT OF SAFETY AND QUALITY ASSURANCE

제43조 (운영자의 책임)

제44조 (검사)

제45조 (물리적 방호)

제46조 (방사선비상계획)

제47조 (제한구역)

제48조 (물리적 방호 준수)

제49조 (비상계획)

제50조 (소외비상계획)

제51조 (소외비상계획을 위한 재원)

제52조 (소내비상계획)

제53조 (소내비상계획 숙지)

제54조 (운영자 책무)

제55조 (국가의 책무)

제56조 (규제기관의 업무협조)

제10장 벌칙 및 과태료

Chapter Ten CIVIL LIABILITY- PENALTIES

제57조 (운영자의 책임)

제58조 (원자력손해보상)

제59조 (비용청구)

제60조 (무허가 원자력시설 이용 벌금)

제61조 (무허가 방사선원 이용 벌금)

제62조 (과태료)

제63조 (과태료)

제64조 (과태료)

제11장 부칙

Chapter Eleven CLOSING PROVISIONS

제65조에서 제72조 (부칙)

UAE '원자력법'의 주요 내용으로, 제2장부터 제4장까지는 UAE 내각 소속 연방기관으로의 원자력 규제기관 FANR(Federal Authority for Nuclear Regulation, 연방원자력규제청)의 설립, 운영, 재정 운용에 관해 규정한다. 제5장과 제6장에서는 FANR의 허가(라이선스) 발급과 검사에 대해 규정한다. 제7장에서는 FANR의 규제지침(Regulatory Guide, RG)의 발행과 핵비확산을 위한 안전조치의 이행에 관해 규정한다.

제8장에서는 방사성폐기물과 '방사성폐기물 및 해체 신탁기금'(Decommissioning Trust Fund)에 대해 규정한다. 제40조 제1항은 방사성폐기물 발생자의 책임에 대해 명시하고, 제41조는 방사성폐기물 처분 기관으로 방사성폐기물 또는 사용후핵연료가 전달될 때 방사성폐기물과 사용후핵연료의 소유권이 이관된다고 명시한다. 제42조는 '방사성폐기물 및 해체 신탁기금'에 대해 규정하며, 원자력

시설 운영자가 기금에 납부해야 하는 비용의 산정, 기금의 운용에 대해 규제기관인 FANR에서 규정하도록 한다.

'원자력평화적이용법' (아랍에미리트연합)

제40조

① 규제 대상 물질을 다룰 수 있는 면허를 보유한 자는 방사성폐기물이 발생한 후 처분 목적으로 내각에서 결정한 기관에 전달되기까지 방사성폐기물을 안전하게 보관할 책임이 있다.

② 사업자는 규제당국이 정한 원자력 안보 및 원자력 안전규칙 준수 외에도 방사성폐기물의 안전한 운반에 대한 의무와 책임을 준수해야 한다.

제41조

① 내각은 사용후핵연료 및 방사성폐기물의 장기 관리 및 처분에 관한 정책을 공포하고, 해당 정책의 시행을 담당할 기관을 정해야 한다. 방사성폐기물과 사용후핵연료는 국가 또는 내각에서 지정한 기관에 인도된 시점부터 국가의 재산이 된다.

② 방사성폐기물 발생자가 내각에서 지정한 기관으로 방사성폐기물을 전달하는 조건과 절차는 규정에 의해 명시된다. 규정은 기관으로의 운송 대상이 아닌 방사성폐기물의 종류, 배송 기한, 방사성폐기물 발생자가 국가에 지불해야 하는 수수료를 포함한다.

③ 국가 토지 및 현장에서 장기간 저장 또는 처분할 목적으로 국가 외부의 원자력에너지 이용에서 발생한 방사성폐기물 및 사용후핵연료를 수입하는 것은 본 법령에 의해 금지한다.

제42조

① 방사성폐기물을 생성하거나 생성할 원자력시설의 운영 허가를 받은 자는 규제기관 위원회의 권고에 따라 내각의 결정에 따라 설치된 "방사성폐기물 및 해체 신탁기금"이라는 신탁기금에 수수료를 납부해야 한다. 수수료에는 다음이 포함된다.

가. 방사성폐기물 관리시설의 건설, 운영 및 폐쇄 비용(이 목적에 필수적인 연구 및 개발 활동 비용 포함한다.)

나. 원자력 시설 해체 비용

다. 본 조에 언급된 활동에 대한 규제 감독 비용

라. 신탁기금 관리비용

② 본 조 1항에 언급된 활동에 대한 전체 비용 중 정식 사용자가 부담해야 하는 비용을 기준으로 하며 원자력 시설 운영 허가가 유효한 동안 정식 사용자가 지불해야 한다. 원자력 시설 운영자가 국가 또는 그 정치적 하부 기관이 소유하거나 통제하는 회사인 경우, 원자력 시설 운영자는 앞서 언급된 조항에 언급된 활동과 관련된 원자력 시설 운영자의 재정을 충당하기 위해 신탁기금에 지불금을 미리 예치할 수 있다.

③ 규제기관 위원회가 공포한 시행 규칙은 절차를 명시해야 한다.

가. 신탁기금에 대한 수수료의 계산 및 징수 방법

나. 신탁기금에 예치될 유가증권의 금액과 성격

다. 신탁기금의 자산관리

라. 위 각 목에 대한 신탁기금의 비용지불

제9장은 원자력 시설의 안전관리 및 품질보증에 관해 규정하며, 원자력 시설 운영자의 품질보증계획과 방사선비상계획 마련에 관해 규정한다. 제10장은 벌칙 및 과태료 규정에 관해 명시한다.

(2) UAE 원자력손해배상법

UAE의 '원자력손해배상법'(영문명 「Federal Law by Decree No. 4 of 2012 Concerning Civil Liability for Nuclear Damage」)은 원자력 손해에 대한 사업자 및 국가의 무과실책임을 선언하고, 손해의 사업자집중책임 및 원자력사업자의 최소배상책임액을 설정한다.

UAE는 '원자력손해배상법'을 바탕으로 2014년 7월 '원자력 손해를 위한 보충배상협약'(「Convention on Supplementary Compensation for Nuclear Damage」, CSC)에 비준해 CSC 협약국에 가입했다. '원자력 손해를 위한 보충배상협약'은 원자력 손해에 대한 사업자

및 국가의 무과실책임을 선언하고, 손해의 사업자집중책임 및 원자력 사업자의 최소배상책임액으로 3억 SDR(국제통화기금 특별인출권)을 설정한 국가가 가입할 수 있다. 가입국에 원자력사고에 대응할 수 없는 손해가 발생한 경우, 가입국의 출연금으로 추가적 손해보상을 실시한다.

(3) UAE 비준 국제협약

UAE에서 비준한 국제협약 중 다자조약은 다음과 같다.

1. 핵사고 또는 방사능 비상 대응 지원 협약 (1987년 가입)[7)]
2. 핵사고 조기 통보 협약 (1987년 가입)[8)]
3. 핵무장 금지조약 (1995년 가입)[9)]
4. 종합핵실험금지조약 (2000년 비준)[10)]
5. 아랍에미리트와 국제원자력기구(IAEA) 간의 종합적인 핵 안전 보장 협약 (2002년 서명)[11)]
6. 핵물질 물리적 보호 협약 (2003년 가입)[12)]
7. 유엔 안전보장이사회 결의 1540 (2004년 시행)[13)]
8. 핵테러리즘 방지 국제협약 (2008년 가입)[14)]
9. 사용후핵연료 관리 및 방사성폐기물 관리안전 공동협약 (2009년 가입)[15)]
10. 원자력 손해를 위한 보충배상협약 (2014년 비준)[16)]

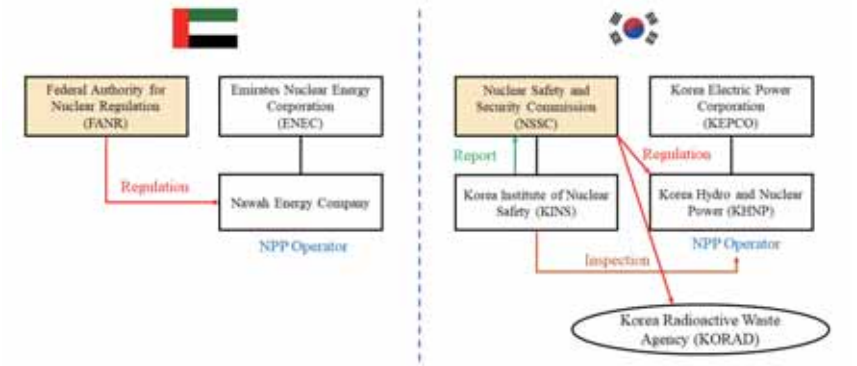
---

7) Convention on Assistance in the Case of a Nuclear Accident or Radiological Emergency
8) Convention on Early Notification of a Nuclear Accident
9) Treaty on the Non-Proliferation of Nuclear Weapons
10) Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty
11) Comprehensive Safeguards Agreement between the UAE and the IAEA
12) Convention on the Physical Protection of Nuclear Material
13) United Nations Security Council Resolution 1540
14) International Convention for the Suppression of Acts of Nuclear Terrorism January 2008)
15) Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management

3) UAE의 원자력 행정체계

UAE의 원자력 규제기관은 UAE '원자력법'에 따라 2009년 설립된 FANR(Federal Authority for Nuclear Regulation, 연방원자력규제청)로, 원자력 시설 및 방사선동위원소에 대한 허가(라이선스)발급과 검사, 규제지침(Regulatory Guide, RG)발행, 핵비확산을 위한 안전조치의 이행 감시를 수행한다. FANR은 내각 소속 연방기관으로 대한민국의 원자력안전위원회에 상응한다.

[그림 4]
한-UAE 간 원자력 행정체계 비교



ENEC(Emirates Nuclear Energy Corporate, 아랍에미레이트원자력공사)는 원자력에너지 개발 프로그램의 일환으로 국제원자력기구(International Atomic Energy Agency; IAEA)의 권고에 따라 2009년 UAE 연방정부에서 설립했다. ENEC는 바라카 원자력 발전소(BNPP) 운영기관인 Nawah Energy Company의 지분 대부분을 소유하고 있다. 또한 FANR의 설립 이전에 UAE '원자력법'에 따라 원자력 발전소 부지선정조사를 진행하고, 원자력 발전소의 안전과

16) UAE Ratifies Convention On Supplementary Compensation For Nuclear Damage (Gulf News, 14.07.09)

관련해 지진, 지질학, 환경영향에 대한 연구를 시행하는 등 공공기관으로서의 성격을 가지고 있다.

Nawah Energy Company는 한국전력(KEPCO)과 ENEC의 합작회사로, 바라카 원자력 발전소(BNPP)를 운영하고 있다. Nawah Energy Company의 지분은 ENEC와 한전이 지분을 각각 82%와 18%를 보유한다.

4) UAE의 「사용후핵연료 관리 및 방사성폐기물 관리 안전 공동협약」 국가보고서

「사용후핵연료 관리 및 방사성폐기물 관리 안전 공동협약」(Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management)은 1994년 9월 국제원자력기구(IAEA) 제38차 정기총회에서 채택된 국제협약으로, UAE는 2009년에 이 협약에 가입했다. 협약에 가입한 당사국은 IAEA의 방사성폐기물 안전 원칙을 기반으로 사용후핵연료 및 방사성폐기물 관리의 법적·제도적 체제를 마련하도록 규정하고 있다. 또한 당사국은 3년 주기로 사용후핵연료 관리 및 방사성폐기물 관리에 대한 국가보고서를 IAEA에 제출하고, 검토회의(Review meeting)를 통해 국가 간 교차 검토를 통해 협약의 준수 여부를 확인한다.

2022년 6월 진행된 제7차 사용후핵연료 관리 및 방사성폐기물 관리 안전 공동협약 당사국 검토회의에서 UAE는 「사용후핵연료 관리 및 방사성폐기물 관리 안전 공동협약」에 대한 제4차 국가보고서(Fourth National Report on Compliance with the Obligations of the Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management)[17]를 발표했다.

해당 보고서에서는 UAE의 방사성폐기물과 관련된 주요 현안과 진행 상황을 아래와 같이 밝혔다.

[표 3]
UAE의 「사용후핵연료 관리 및 방사성폐기물 관리 안전 공동협약」에 대한 제4차 국가보고서에 따른 방사성폐기물 관련 주요 현안과 진행 상황

주요 현안	진행 상황 (2020년 기준)
방사성폐기물 관리	방사성폐기물 관리 주체가 설립되지 않았으며, 방사성폐기물 관리와 관련된 정보를 통합하고 진행 상황을 추적하기 위해 아랍에미레이트원자력공사(ENEC) 산하에 방사성폐기물 관리 부서(Radioactive Waste Management Division)가 구성됐음
방사성폐기물 관리 분야 인력 채용 및 유지	249명의 연방원자력규제청(FANR) 직원 중 67%가 내국인, 33%가 외국인으로, 원자력 규제 관련 전문경력을 가진 외국인을 채용했음 인력 양성을 위해 해외 유학 장학금과 대학생의 FANR에서의 인턴십, FANR 직원의 역량개발 프로그램을 운영했음
방사성폐기물 및 사용 후 핵연료 관리시설	바라카 원전 부지에 사용후핵연료 독립저장시설(ISFSI)과 중·저준위 방사성폐기물 임시저장시설을 건설해 원전의 지속적인 운영을 지원하는 계획이 진행되고 있음

4. UAE의 원자력 정책 제언

UAE의 '원자력평화적이용법' 제41조에서 "내각은 사용후핵연료 및 방사성폐기물의 장기 관리 및 처분에 관한 정책을 공포하고, 해당 정책의 시행을 담당할 기관을 정해야 한다."고 명시되어 있다. 또한 같은 조문에서 방사성폐기물 또는 사용후핵연료가 방사성폐기물 처분 기관으로 전달될 때 방사성폐기물과 사용후핵연료의 소유권이 함께 이관된다고 명시하고 있다. UAE의 국가보고서(방사성폐기물 관리 안전 공동협약 제4차 국가보고서)에서 확인된 바와

17) United Arab Emirates Fourth National Report on Compliance with the Obligations of the Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management (2020.10. IAEA 제출, 2022.06. 발표)

같이, 원자력 발전소의 안전과 관련한 연구를 시행하는 아랍에미레이트원자력공사(ENEC) 산하에 방사성폐기물 관리 부서가 신설되어 사용후핵연료 및 방사성폐기물의 처분에 관한 업무를 일부 수행하고 있으나, 사용후핵연료 및 방사성폐기물 처분을 담당할 방사성폐기물 처분 기관이 아직 설립되지 않았다.

이러한 배경에서 방사성폐기물 처분을 담당할 전담 기관(Radioactive Waste Management Organization, RWMO)[18]을 설립할 필요가 있으며, '원자력평화적이용법'을 통한 연방원자력규제청(FANR)의 설립과 마찬가지로, 방사성폐기물의 관리와 전담 기관의 설립을 정하는 법령의 제정이 필요하다.

UAE는 국가 원자력 프로그램 운영의 기반이 되는 인적 자원의 관리 전략에 주목하고 있으며, 자국 대학생을 대상으로 원자력 인력 양성을 위해 해외 유학 장학금과 FANR에서의 인턴십의 기회를 제공하고 있다. 이러한 인력 양성 프로그램의 재원의 출처가 법률로 보장되어 있지 않기 때문에, 대한민국의 「원자력 진흥법」의 경우와 같이 방사성폐기물 및 해체 신탁기금과 구분되는 원자력 기금을 설치함으로 UAE의 원자력 인력 양성을 진흥할 수 있다.

18) IAEA 및 원자력계에서 사용하는 방사성폐기물 전담 기관의 통칭

5. 결론

UAE는 바라카 원자력 발전소를 성공적으로 도입하고 운영하면서, 원자력 관련 법령 제정과 규제기관 설립 등 필수적인 원자력 제도 시스템을 구축했다. 이는 원자력 신흥국으로의 원전 수출이 단순한 하드웨어 수출이 아닌 법적·제도적 시스템의 수출이 동반된다는 것을 보여준다.

원자력 발전소를 신규로 도입하는 국가는 반드시 원자력 제도 시스템을 수립해야 한다. 이러한 제도 시스템은 수출 대상 국가의 정치 환경과 법제 구조를 고려해 준비돼야 한다. 따라서 원전 수출을 성공적으로 이루기 위해서는 해당 국가의 정부 구성, 법제 시스템, 정책 등을 깊이 이해하는 것이 중요하다.

대한민국의 원자력 관련 기관들은 다양한 국제 원자력 인력 양성 프로그램과 UAE 원전 수출을 통한 원자력 제도 수출의 경험을 가지고 있다. 현재 사우디아라비아를 비롯해 원전 도입을 계획하고 있는 여러 국가들이 있다. 이 국가들을 대상으로 한 원자력 정책 연구와 원자력 분야의 국제협력은 앞으로 원전 수출의 중요한 기반이 될 것이다.

수출 대상 국가의 정책 연구를 바탕으로 한 국가 맞춤형 원자력 제도 수출은 원자력 신규 도입국으로 대한민국의 원자력 수출 경쟁력을 한층 강화하는 요소로 작용할 것이다.

참고문헌

[1] 대한민국, 「원자력안전법」, 2023
[2] 대한민국, 「원자력 진흥법」, 2021
[3] 대한민국, 「방사성폐기물 관리법」, 2017
[4] 대한민국, 「방사성폐기물 관리비용 및 사용후핵연료관리부담금 등의 산정기준에 관한 규정」, 2022
[5] 아랍에미리트연합국, 「아랍에미리트연합국 헌법」, 2009
[6] 아랍에미리트연합국, 「Federal Law by Decree No. 6 of 2009 Concerning the Peaceful Uses of Nuclear Energy」, 2009
[7] 아랍에미리트연합국, 「Federal Law by Decree No. 4 of 2012 Concerning Civil Liability for Nuclear Damage」, 2012
[8] WTO, "WT/TPR/S/262/Rev.1 Trade Policy Review UNITED ARAB EMIRATES", 2012
[9] IAEA, "MISSION REPORT ON THE INTEGRATED NUCLEAR INFRASTRUCTURE REVIEW (INIR) - PHASE 3", 2018

원전민간환경감시기구 : 프랑스 지역정보위원회가 주는 시사점을 중심으로

프랑스의 지역정보위원회는 먼저 환경법전에 법률로 그 인적 구성과 정보를 제공받을 권한 등이 명시적으로 규정돼 있고, 인적구성의 경우 발전소 소재 지역의 다양한 이해관계를 대변하는 대표자들 및 관련 전문가 집단으로 이뤄져 있다.

김슬아

법무법인 영민
변호사

1. 서론

대한민국은 원전 수출국이며, 원자력을 통한 전력공급으로 지난 46년간 국내 반도체, 철강, 조선, 자동차 산업을 이끌어 온 것이 사실이다. 이러한 현실은 2023년 한국에너지정보문화재단이 발표한 에너지 국민인식조사결과에서 75.6%의 응답자가 원전의 필요성에 대해 동의하고 있다는 점에서도 엿볼 수 있다. 하지만 위 응답자의 대다수가 원전의 필요성에 관해 동의하고 있으면서도 절반 이상인 56.4%가 본인의 거주지역에 원전을 건설할 경우 반대할 것이라고 답했다.

한국에너지정보문화재단의 해당 발표결과에 따르면, 거주지역 원전건설 반대 이유로는 방사능 노출 위험 우려(59%), 원전건설에 따른 환경훼손 우려(22.9%), 지역발전 저해 및 재산 가치 하락 우려(8.9%), 생업에 대한 피해 우려(2.8%) 순이었다.

결국 방사능 노출 위험에 대한 우려가 본인 거주 지역 내 원전건설을 반대하는 1순위 이유로, 대다수의 국민들이 원자력 발전 자체에

관해서는 부정적인 입장이 아님에도 방사능 노출 위험 등 안전성에 대한 불안이 해소되지 못해 원전에 관한 계속된 사회적 논란이 정치적 분쟁으로까지 이어지고 있음을 미뤄 짐작할 수 있다.

이와 같은 원자력 발전소의 안전성에 대한 사회적 불안은 급기야 필요한 법률의 공백 상태가 초래되는 결과로까지 이어지고 있다.

지난 46년간 발생하고 쌓여 원전 부지 내 저장 중인 사용후핵연료를 처리하기 위한 법률인 고준위 방사성폐기물 관리를 위한 특별법(이하 "고준위 특별법")은 국회 통과에 현재까지도 고전을 겪고 있다.

프랑스는 원전 운영에 대한 주민참여와 이를 통한 안전성 및 신뢰 강화라는 취지로 1977년부터 이미 지역정보위원회라는 것을 먼저 도입해 국제 사회에서 원전 관리에 관한 성공사례로 자주 언급되고 있다.

국내에서도 동일한 취지로 민간환경감시기구를 1997년에 도입한 바 있다. 비록 프랑스 지역정보위원회만큼 역사가 깊지는 않지만, 같은 취지로 도입된 국내 민간환경감시기구가 원전을 둘러싼 현재의 사회적 갈등을 완화하는 데 어떠한 역할을 기대하며, 본 원고에서는 프랑스의 사례를 소개하고, 프랑스 사례가 주는 시사점을 통해 국내 원전민간환경감시기구가 나아가야 할 방향에 대해 살펴보도록 하겠다.

2. 프랑스의 지역정보위원회(CLIS) 제도 소개

1) 도입배경 및 역사[1)]

페센하임 원자력 발전소는 프랑스의 가장 오래된 발전소로 1977년 기동을 시작했다. 프랑스의 페센하임은 우리나라의 고리 원자력 발전소에 해당하는 것으로, 지역정보위원회는 1977년 페센하임 발전소의 운영과 오작동을 모니터링하기 위해 최초로 등장했다.

지역정보위원회는 그 지역 소재 원전시설의 방사성폐기물 관리, 방사능 방호, 긴급사태, 원자로 해체 등 다양한 안전문제를 다루는 다중대화포럼이다. 이러한 지역정보위원회는 1981년 미테랑 대통령 재임 당시 전국적으로 확대되도록 권고됐다. 그리고 2006년 '원자력 투명화법(TSN)'의 제정 및 2008년 동법 시행령으로 지역정보위원회는 조직, 역할, 기금 등에 관해 법적 근거를 가지고 프랑스 전국으로 확산됐다. 이에 현재 프랑스에는 원전시설이 위치한 지역 거의 대부분에 지역정보위원회가 조직되어 있다.

지역정보위원회는 지역 선출직 대표(국회의원 또는 지방의회의원), 환경보호협회 대표, 노동조합 대표, 그리고 의료분야 전문가 등으로 구성된다. 2008년 제정된 '원자력기본시설의 지역정보위원회에 관한 시행령'에서는 위원회의 참여자와 그 구성비율을 규정하고 있는데, 과반수(50%) 이상은 지역선출 대표로 구성되도록 하면서 노동조합, 환경보호단체, 전문가 등의 참가가 각각 10% 이상일 것을 요구하고 있다.

페센하임의 경우 20명의 지역 선출직 대표, 7명의 환경보호협회 대표, 6명의 노동조합대표 및 7명의 전문가 중 2명은 독일인으로 위원회를 구성했다. 이는 발전소 인근에 독일이 있어 해당 지역 독일

1) 해당 부분은 전홍찬, 2014. "원전 소재지 안전협의체 비교 연구: 영국, 프랑스, 일본의 지자체 및 주민 참여 제도가 주는 시사점." 『사회과학연구』, 30(4). 293-316. 및 Dossier: La poursuited'exploitation des centrales nucléaires(2009) 중 페센하임(Fessenheim) 부분(pp.46-52)을 참고해 작성함.

주지사 등을 위원회 구성원으로 포함시킨 것이다. 뿐만 아니라 발전소 반경 5km 이내에 위치한 독일 지방자치단체 4곳의 시장 등은 자문자격으로 업무에 참여하고 있다.

2) 프랑스 환경법전과 지역정보위원회

위 원자력 투명화법(TSN)은 다른 관련 법률들과 함께 2012년 이뤄진 환경법전의 대대적인 개정으로 인해 프랑스 환경법전에 편입됐다. 환경법전에는 원자력기본시설에 관한 규정부터 공공에 대한 정보제공정책과 투명성 및 원자력 관련 활동에 대한 책임 조항들이 동일한 하나의 법률에 규정돼 원자력 관련 법제의 일원화가 이뤄졌다.[2] 지역정보위원회 또한 그 과정에서 환경법전의 일부로 다음과 같이 그 구성, 역할 및 권한, 의무 등에 관해 상세한 규정을 두고 있다.

[그림 1]
프랑스 원자력발전소 위치

2) 김지영, 2013. "프랑스 원자력안전법제의 현황과 과제- 우리나라 원자력안전법제로의 시사점 도출을 중심으로." 『환경법연구』. 35(3). 169-208.

프랑스 환경법전(Code de l'environnement)
방사성폐기물 관련 조항(제5권 제4편 제2장) 번역[3] 제L.542-13조

① 모든 지하연구소에 지역정보 및 모니터링 위원회(un comité local d'information et desuivi, CLIS)를 설치해 방사성폐기물 관리, 특히 심층처분에 대한 연구에 관해 모니터링, 정보 및 협의 등의 일반적 임무를 담당한다.

② 이 위원회[CLIS]에는 국가 및 레지옹의 보건기관의 대표, 두 명의 하원의원과 두 명의 상원의원, 공청회에서 협의를 했거나 제L.542-6조가 예정하는 예비연구작업에 영향을 받는 지방자치단체의 선출직 공무원들, 환경보호 사단법인, 농업조합, 전문가조직, 노동자대표연맹, 의료전문가 등의 대표들, 적격한 개인 및 제L.542-10-1조가 예정하는 허가를 득한자로 구성된다.

③ 그[CLIS]는 사단법인의 정관에 따라 법인격을 가질 수 있다. 그[CLIS]는 연구소 범위에 걸친 도(道)들의 도위원회의 의장들의 공동결정으로 전국 또는 지역에서 선출된 구성원 중 1인에 의해 주재된다.

④ 이 위원회[CLIS]는 최소 1년에 2회 소집한다. 그[CLIS]는 프로그램의 목적, 작업의 성격 및 달성한 결과에 대한 정보를 통지받는다. 그[CLIS]는 제L.542-3조 상의 국가위원회 및 제L125-34조 상의 원자력안전의 투명성과 정보에 관한 고등위원회(le Haut Comité pour la transparence et l'information sur la sécurité nucléaire)에 회부할 수 있다. 국가위원회는 방사성물질 및 방사성폐기물의 지속가능한 관리에 관한 프로그램에 대한 2006. 6. 28.자 법률 제2006-739호 제3조에 정해진 3가지 연구 분야의 연구 진행 상황에 대한 평가보고서를 CLIS에 매년 제출한다.

⑤ CLIS와 원자력안전의 투명성과 정보에 관한 고등위원회는 그들의 임무 수행에 유용한 모든 정보를 상호전달하고 공동의 정보활동에 기여한다.

⑥ 위원회[CLIS]는 환경과 상린관계에 영향을 미치는 실험실 운영에 관한 모든 쟁점에 대해 협의한다. 그[CLIS]는 승인된 실험실을 통해 청문회나 재감정 절차를 진행하게 할 수 있다.

⑦ CLIS를 설치하고 운영하는 데 드는 비용은 국고보조금과 심층 방사성폐기물 처분 활동을 영위하는 기업의 보조금으로 균등하게 충당된다.

3) 지역정보위원회의 역할

프랑스 지역정보위원회의 인적 구성은 법률로 "국가 및 레지옹의 보건기관의 대표, 두 명의 하원의원과 두 명의 상원의원, 공청회에서 협의를 했거나 제 L.542-6조가 예정하는 예비연구작업에 영향을 받는 지방자치단체의 선출직 공무원들, 환경보호 사단법인, 농업조합, 전문가조직, 노동자대표연맹, 의료전문가 등의 대표들, 적격한 개인 및 제 L.542-10-1조가 예정하는 허가를 득한자"로 규정돼 있다.

지역정보위원회는 원전 운영사와 원자력 안전청으로부터 원전운영 상황을 보고받고 주요 정보를 얻을 수 있도록 돼 있다. 이를 바탕으로 정례회의 및 주민의견청취 회의를 진행하고, 전문기관에 연구·조사·모니터링을 위탁하기도 한다.

이와 같이 지역정보위원회는 원자력시설과 그 주변에 실시하는 모든 사업계획에 포괄적인 참여권한을 가지고 그 의사결정 과정에 참여하면서 이를 모니터링하는 기관으로 활동하고 있다. 특히 주민들의 의견청취가 필요한 사업계획에 관해서는 지역정보위원회 협의를 의무사항으로 규정하고, 위원회의 지출을 정부 재원 및 기업 보조금 등 법적으로 보장함으로써 그 활동의 안정성과 권위를 확보하고 있다.

페센하임의 경우에도 1989년 지역정보위원회가 방사능 전문기관에 부지 주변환경에 대한 방사능 생태학적 연구를 위탁해 수소 관련 위험 등 여러 가지 문제점을 사전에 발견하는 성과를 발휘했다.

---

3) 프랑스 환경법전 원문을 한글로 번역한 자료에서 지역정보위원회 부분을 발췌

3. 한국의 원전민간환경 감시 기구 제도

1) 국내 민간환경감시 기구 도입 배경 및 현황[4)]

프랑스의 지역정보위원회와 유사한 목적으로 국내 민간환경감시기구는 원자력에 대한 수용성을 높이기 위한 정책수단으로 1997년부터 발전소가 소재하고 있는 5개 지역(기장, 영광, 경주, 울주, 울진)에 도입됐다. 민간환경감시기구는 원자력 발전소 건설·가동으로 인한 주변 지역 환경 영향을 지역주민이 직접 조사·확인함으로써 원전 등에 대한 투명성 및 신뢰성을 향상시키고, 원전 등 주변지역에 대한 환경 및 방사선 안전 등을 감시하기 위해 설립됐다.

이에 관한 법령은 1997년 「발전소 주변지역 지원에 관한 법률」로, 발전소 주변지역 지원사업 중 발전소가 위치한 주변지역에 대한 환경 및 방사선 안전 등에 관한 감시를 위한 기구의 설치 및 운영에 대한 사업으로, 발전소가 소재하고 있는 지역을 관할하는 지방자치단체의 장이 시행하도록 규정하고 있다. 현재 국내 민간환경기구 설치 현황은 다음 [표 1]과 같다.

[표 1] 국내 원자력시설 민간환경감시기구 설치 현황[5)]

지역	원자력 시설	명칭	설립시기
전남 영광군	한빛원전	한빛원자력발전소 원전민간환경 · 안전감시기구	1999년
부산 기장군	고리원전	고리원전민간환경감시기구	1998년
경북 울진군	한울원전	한울원전민간환경감시기구	2003년
경북 경주시	월성원전 및 원자력환경공단 환경관리센터	월성원전 · 방폐장 민간환경감시기구	2007년
울산 울주군	신고리원전	신고리원전민간환경감시기구	2006년

4) 김주경, 김도윤, 고대유. 2018. "원전 지역 민간환경감시기구 성과지표 개발에 관한 연구". 『한국지방행정학보』15(3). 29-54 중 원전민간환경감시기구의 현황 및 역할 부분을 참조해 작성

5) 위 논문 p.31 [표 1] 원자력시설 관련 민간환경감시기구 설치 현황표 인용

2) 관련법령:

발전소주변지역 지원에 관한 법률 및 동법 시행령

민간환경감시기구는 발전소주변지역법 제10조 제1항 제4호에 따른 "그 밖에 주변지역의 발전, 환경 · 안전관리와 전원 개발의 촉진을 위해 필요한 사업" 중 일환으로 동법 동조 제2항에서 구체적인 사항을 대통령령으로 정하도록 하고 있다. 이에 대통령령인 발전소주변지역법 시행령 제25조 제1항 제2호는 "원자력발전소 주변지역의 환경 및 방사선 안전 등에 관한 감시를 위한 기구의 설치와 운영에 대한 지원사업"으로, 제2항에서 발전소 소재 관할 지방자치단체의 장이 이를 시행하도록 돼 있다.

이와 같이 발전소주변지역법 내지 동법 시행령에는 민간환경감시기구의 구체적인 구성, 역할 및 권한에 관해서는 규정하고 있지 않고, 이를 모두 지방자치단체 조례를 통해 정하도록 하고 있다.

발전소주변지역 지원에 관한 법률

(약칭: 발전소주변지역법)

[시행 2023. 5. 16.]

[법률 제19037호, 2022. 11. 15., 일부개정]

제10조(지원사업의 종류 등) ① 지원사업의 종류는 다음 각 호와 같다.

1. 기본지원사업 : 주변지역의 개발과 주민의 복리를 증진하기 위해 시행하는 지원사업
2. 특별지원사업 : 발전소가 건설 중이거나 건설이 예정된 주변지역과 그 특별자치도·시·군 및 자치구(이하 "지방자치단체"라 한다)지역에 대해 시행하는 지원사업
3. 홍보사업 : 전력사업(電力事業)에 대한 국민의 이해를 증진하기 위한 사업
4. **그 밖에 주변지역의 발전, 환경·안전관리와 전원 개발의 촉진을 위해 필요한 사업 (조사 · 연구 활동을 포함한다)**

② 제1항에 따른 지원사업의 종류별 지원내용, 대상 지역, 시행 기간, 지원방법 등에 관한 구체적인 사항은 대통령령으로 정한다.

발전소주변지역 지원에 관한 법률 시행령
(약칭: 발전소주변지역법 시행령)
[시행 2023. 1. 12.]
[대통령령 제33225호, 2023. 1. 10., 타법개정]

제25조(그 밖의 지원사업) ① 법 제10조 제1항 제4호에 해당하는 사업은 다음 각 호와 같다.

1. 지원사업의 관리·연구·평가 및 홍보 사업
2. **원자력발전소 주변지역의 환경 및 방사선 안전 등에 관한 감시를 위한 기구의 설치와 운영에 대한 지원사업**
3. 화력발전소 주변지역의 환경보전 및 감시를 위한 지원사업
4. 그 밖에 발전소의 건설과 운영을 원활하게 하기 위하여 필요한 사업으로써 위원회의 심의를 거쳐 산업통상자원부장관이 정하는 사업

② 제1항제1호부터 제3호까지의 사업은 발전소가 있는 지역을 관할하는 지방자치단체의 장이 시행하고, 같은 항 제4호의 사업은 발전사업자가 시행한다.

③ 제1항 제2호 및 제3호에 따른 사업에 필요한 사항은 산업통상자원부장관이 정해 고시한다.

3) 관련조례

원자력발전소와 방사성폐기물 처분장이 있는 5개 지자체에 설립돼 운영되고 있는 민간환경감시기구는 다음과 같이 각 지방자치단체의 조례를 통해 관할구역 내 환경 및 원전의 고장 등 원전운영을 모니터링하고, 방사능 내지 방사선을 측정해 원전이 주변지역 환경의 안전성을 해치지 않는지 확인하는 업무를 수행하도록 규정돼 있다.

부산광역시 기장군 고리원전 민간환경감시기구 설치 및 운영에 관한 조례

[시행 2022. 10. 7.]

[기장군조례 제1298호, 2022. 10. 7., 일부개정]

제3조(감시기구의 구성) 감시기구는 고리원전주변지역주민이 직접 참여하는 고리원전민간환경감시위원회(이하 "위원회"라 한다)와 위원회 산하에 고리원전환경감시센터(이하 "감시센터"라한다)로 구성한다.

제4조(위원회 기능) 위원회는 다음 각 호의 사항을 심의 및 의결한다.

1. 원전주변지역의 환경 및 방사선 안전성에 대한 평가 및 공표
2. 환경 및 방사선 안전에 대한 민원 및 언론보도에 관한 사항
3. 환경 및 방사선 안전과 관련 정부와 사업자에 대한 건의
4. 해양환경 및 해양오염에 관한 사항
5. 그 밖의 위원회에서 중요하다고 인정되는 사항

제5조(위원회구성) ① **위원회는 위원장 1명, 부위원장 2명을 포함한 위원 20명 이하로 성별을 고려해 구성한다.**

② **위원장은 군수가 되고**, 부위원장은 위원 중에서 호선한다.

③ 위원은 다음 각 호에 따라 **위원장이 위촉하는 사람으로 한다.**

1. 주민대표는 고리원자력발전소주변지역에 속하는 행정구역의 **읍면장이 추천하는 5명 (장안읍 3명, 일광읍 2명)**
2. 기장군의회에서 추천하는 **군 의원 4인**
3. 고리원자력본부장이 추천하는 **2직급 이상의 직원 1명**
4. **전문가 3인**, 그 밖에 지역발전과 환경 및 원자력 분야에 학식과 경험이 풍부한 자 (이하 생략)

제17조(자료등의 요청) 위원회는 그 소관 사항의 심의 및 감시요원의 감시업무 수행에 있어 필요하다고 인정될 때는 원자력발전소에 대해 타법령에 저촉되지 않는 범위에서 **자료 요구 및 시 정건의, 시설공개 안내** 등을 받을 수 있다.

제18조(예산) 감시기구 설치 및 운영에 필요한 예산은 「발전소주변지역 지원에 관한 법률」에 따른 **정부지원금으로 한다.**

영광군 한빛원자력발전소 민간환경·안전감시기구 설치 및 운영 조례

[시행 2022. 5. 10.]

[전라남도영광군조례 제2806호, 2022. 5. 10., 일부개정]

제3조(감시기구의 설치 및 운영) 효율적인 한빛원전환경·안전감시를 위해 한빛원자력발전소 민간환경·안전감시위원회(이하 "위원회"라 한다)를 두고 위원회 산하에 한빛원자력발전소환경·안전감시센터(이하 "감시센터"라 한다)를 설치·운영한다.

제4조(위원회의 기능) ① 위원회는 다음 각호의 사항을 심의한다.

1. 한빛원전의 환경·안전에 관한 감시
2. 환경방사능 측정·분석·평가 결과에 대한 공표
3. 한빛원전관련 민원사항 및 문제발생시 조사에 공동참여
4. 한빛원전으로 인한 환경·주민안전에 관한 유해사항 발생시 이의 시정 및 개선 요구
5. 조사결과의 관계기관 통보
6. 방사성폐기물의 감시 및 안전관리에 관한 사항
7. 방사선 재해대책에 관한 사항
8. 사업계획서 및 결산서 작성에 관한 사항
9. 삭제 〈2000.11.18〉
10. 그 밖의 위원회가 필요하다고 인정하는 사항

② 삭제 〈2000.11.18〉

제5조(위원회의 구성) ① 위원회는 위원장, 부위원장을 포함한 **20명 이하**의 비상임 위원으로 구성하며, 원활한 운영을 위하여 운영위원회를 두고 필요에 따라 특별위원회를 구성할 수 있으며 위원회의 자문에 응하기 위해 자문위원 약간명을 위촉할 수 있다.

② **위원장은 군수가 되고, 부위원장은 위원 중에서 호선한다.**

③ 당연직위원은 안전관리과장으로 하고 위촉위원은 다음 각 호에 따라 위원장이 위촉하는 사람으로 한다.

1. 원자력발전소의 안전성 및 환경영향에 기여할 수 있는 **기관사회단체 대표 및 주민 11명(백수읍, 홍농읍, 법성면 주민 각각 1명 포함)**
2. 영광군의회 의장이 추천하는 **영광군의회 의원 또는 주민 3명**
3. **고창군수가 추천하는 사람 2명**
4. 한빛원전 본부장이 추천하는 **한빛원전 본부 소속 2직급 이상 직원 1명**
5. 원자력학계 **전문가 1명**

④ 위원장이 제3항의 위촉위원에 대해 별지 서식에 의한 위촉장을 교부한다.

제19조(협조 요청) 위원회 및 운영위원회는 직무수행과 관련해 필요한 때에는 감시센터요원, 관계기관의 공무원 및 직원을 위원회에 출석하게 해 의견청취 및 자료제출 등 협조를 요청하거나 전문가의 자문을 구할 수 있다.

경주시 월성원전·방폐장 민간환경감시기구 설치 및 운영 조례

[시행 2023. 4. 13.]

[경주시조례 제1697호, 2023. 4. 13., 일부개정]

제3조(감시기구 설치 및 운영) 월성원전 및 한국원자력환경공단 월성지역본부와 관련한 환경 및 방사선 안전 등에 대한 효율적 감시를 위해 경주시월성원전·방폐장민간환경감시위원회(이하 "위원회"라 한다)를 두고 그 산하에 경주시 월성원전·방폐장 민간환경감시센터(이하 "감시센터"라 한다)를 설치·운영한다.

제3조의2(감시기구의 의무) 감시기구는 다음 각 호에 따른 의무를 준수해야 한다.

1. 운영 과정에서 취득한 정보는 환경조사·감시 목적으로만 사용
2. 환경조사·감시결과를 고의로 조작·왜곡 또는 허위 공표 금지
3. 환경조사·감시 활동으로 원전 등의 건설·운영에 불법 부당한 지장을 주지 않을 것
4. 원전사고로 인한 방사선 비상시 주민보호를 위한 대응조치를 수행할 것

제3조의3(감시기구의 감시범위) ① 감시기구의 감시 범위는 월성원전·방폐장 및 그 주변지역으로 한다. 다만, 원전의 고장·사고 등 운영에 대한 감시 활동의 범위는 원자력안전위원회의 "원자력이용시설의 사고·고장 발생시 보고·공개 규정" 제4조(보고대상)에 한한다.

② 다음 각 호에 해당하는 경우 사업자는 법적인 제한이 없으면 출입에 협조해야 한다.

1. 환경조사 중 법정 기준치를 초과한 환경영향이 발견된 경우
2. 원전 등에 고장·사고 등급 상의 고장·사고가 발생한 경우
3. 정부, 지방자치단체 또는 사업자의 요청이 있는 경우
4. 원전 등에 관한 언론 및 사회여론 대두 시 위원회 위원 2/3 이상의 요청이 있는 경우
5. 부지 내의 시료채취를 할 경우(사업자와 협의해 공동 시료채취)
6. 원전 등에 방사능 방재 훈련이 있을 경우
7. 원전 등의 계획예방정비 시(참관)

제4조(위원회 구성) ① 위원회는 위원장을 포함한 25인 이내의 위원으로 구성하는 것을 원칙으로 한다.

② **위원장은 시장**이 되고, 부위원장 1인, 감사 2인은 위원 중에서 호선한다.

③ 위원은 다음 각 호의 1에 해당하는 자 중에서 위원장이 위촉한다.

1. 경주시의회에서 추천하는 **시의회 의원 3인**
2. 관계공무원 중 **시장이 지명하는 자 2인**
3. 월성원전 및 한국원자력환경공단 월성지역본부의 **직원 중 본부장이 지명하는 자 각 1인**
4. 각 주변지역 읍면장 및 주민단체가 추천하는 **주민대표 6인**
5. **시민단체의 추천을 받은 자 4인**

6. 원전 및 방사성폐기물관련 방사능·환경·생물·의학·안전분야에 관한 전문지식과 풍부한 경험을 갖춘 자 중 **시장과 시민단체·지역주민대표가 추천하는 자 7인**

④ 제1항에 따른 위원회 구성에 있어서 최근 3년 내 관할사업자와 사업상 거래 등 이해관계가 있었던 자 및 그 4촌 이내의 친·인척(그가 대표자로 있는 법인을 포함한다)을 위원으로 선임해서는 아니 된다.

제5조(위원회 기능) 위원회는 다음 각 호의 사항을 심의·의결한다.

1. 사업계획서 및 예산안 확정
2. 사업보고서 및 결산안 승인
4. 환경 방사능 측정·분석·평가 결과에 대한 공표
5. 월성원전 및 한국원자력환경공단 월성지역본부 및 그 주변 지역에 대한 환경 및 방사선 안전에 관한 감시
6. 월성원전 및 한국원자력환경공단 월성지역본부 관련 현안 문제 발생 시 조사입회
7. 월성원전 및 한국원자력환경공단 월성지역본부로 인한 주민의 환경안전에 유해사항 발생 시 이의 시정 및 개선요구
9. 월성원전 및 한국원자력환경공단 월성지역본부 감시활동 전반에 관해 그 결과를 관계기관 및 주민에게 공표
10. 감시센터의 장 및 센터직원의 임면과 징계에 관한 사항
11. 외부기관이나 개인에 대한 자문 및 연구원의 위촉
12. 기타 위원회가 필요하다고 인정하는 사항

울진군 한울원전 환경감시기구설치 및 운영에 관한 조례

[시행 2021. 5. 24.] [울진군조례 제2520호, 2021. 5. 24., 일부개정]

제3조(환경감시기구의 구성등) 환경감시기구는 한울원전환경감시위원회(이하 "위원회"라 한다)와 위원회 산하에 한울원전환경감시센터(이하 "감시센터"라 한다)로 구성한다.

제4조(위원회의 구성) ① 위원회는 위원장을 포함한 20인 이하의 위원으로 구성하고 **위원장은 군수**가 되며 위원은 다음 각 호의 자가 된다.

1. 관계 **공무원 중 군수가 지명하는 자 1인, 환경감시센터소장**
2. 한울원자력발전소 **2직급 이상의 직원** 중 본부장이 추천하는 자 1인
3. 지역발전과 환경 및 원자력분야에 학식과 경험이 풍부한 자중 **위원장이 위촉하는 자 12인**(울진군의회 의장이 추천하는 자 9인 포함)
4. **학계전문가 3인, 시민단체에 소속되어 활동 중인 자 1인**

② 부위원장은 위원 중에서 호선한다.

③ 제1항 제3호 및 제4호의 규정에 의한 위원의 임기는 2년으로 하되, 2회 이내 중임할 수 있다.

④ 위촉위원 중 결원이 발생한 때에는 전임자의 잔임기간 동안 보궐위원을 위촉할 수 있다.

⑤ 위원회의 원활한 운영을 위해 운영위원회를 두고, 필요에 따라 특별위원회를 구성할 수 있다.

⑥ 제1항에 따른 위원회 구성에 있어서 위원회 운영의 투명성·객관성 확보를 위해 최근 3년내 관할사업자와 사업상 거래 등 이해관계가 있었던 자 및 4촌 이내의 친·인척(그가 대표자로 있는 법인)을 위원으로 선임해서는 안 된다.

⑦ 제1항 위원 구성에 있어 어느 한 성(남성 또는 여성)이 10분의 6을 초과하지 않도록 한다. 다만, 어느 한 성의 인재부족 등 부득이한 경우에는 그러하지 아니한다.

제6조(위원회의 기능) ① 위원회는 다음 각 호의 사항을 심의·의결한다.

1. 원전 주변지역의 환경 및 원전의 고장 등 원전 운영 감시
2. 방사성폐기물 관련 안전 현안에 대한 정보교환 및 감시
3. 환경감시 조사결과의 공표에 관한 사항
4. 환경 및 방사선안전에 관련한 정부·사업자에 건의사항
5. 원자력발전소의 전원설비, 주변지역 및 건설·운영과정에 대한 환경 및 방사선 안전등에 관한 감시를 위한 사항
6. 기타 위원회가 중요하다고 인정하는 사항
7. 원전 주변지역 주민이 제기하는 원전 등에 대한 현안 협의 및 소통

② 위원회의 운영에 관한 필요한 사항은 위원회의 의결을 거쳐 위원장이 따로 정할 수 있다.

제14조(환경감시범위 등) ① 환경감시기구의 환경감시 범위는 원자력발전소 등 전원설비로 인해 환경에 영향을 미칠 우려가 있는 원전주변지역 및 원전주변지역 외 비교지점을 포함할 수 있고, 위원회가 필요하다고 인정하는 경우 조사지점을 확대 선정할 수 있다.

② 다음 각 호의 1에 해당하는 경우에는 **원전본부에 관련 자료를 요구할 수 있고, 원전부지를 포함한 제한구역 내의 시설 또는 지역에 대해 감시센터 직원의 조사입회를 요구할 수 있으며 한울원자력 본부는 이에 적극 협조**해야 한다.

1. 환경조사중 법정 기준치를 초과하는 환경영향이 발견된 경우
2. 원전사고·고장 등급상의 사고·고장 발생한 경우
3. 정부 또는 한울원자력본부의 요청이 있거나 원전에 관한 언론 및 사회여론 대두시 환경감시위원회 위원 2/3의 요청이 있는 경우
4. 원전본부와 공동으로 부지내의 시료채취 및 공간감마선량률을 측정할 경우
5. 원전 방사능 방재훈련이 있을 경우
6. 원전의 계획예방정비시 입회
7. 기타 원전관련 현안 문제에 관해 원전본부와 협의를 할 경우

제15조(관계기관의 협조 등) ① 한울원자력본부는 다음 각 호에 해당하는 환경감시 관련 정보·자료를 환경감시기구에 제공해야 한다.

1. 반기별 원전 주변의 환경(방사선, 해양)조사 결과를 반기종료 후 90일까지
2. 분기별 방사성폐기물 저장현황을 분기종료 후 30일까지
3. 월별 원전의 발전량, 가동률, 발전정지 현황을 익월 10일까지
4. 환경방사선감시기로 측정한 공간선량률 실시간 제공
5. 원전의 사고·고장 발생 시
6. 자체처분 물질처리·처분시 수량 및 방사능준위 관련자료 통보
7. 기체·액체방사성폐기물 방출 현황 제공
8. 한울원전의 사업장 폐기물 반출 현황에 대한 자료제출 요구 시
9. 기타 주변환경에 영향을 미칠 수 있는 원전의 비정상 상태

② 환경감시기구가 환경조사와 관련해 공개를 요청하는 기타 자료에 대해서 한울원자력본부는 자료제공 또는 열람을 허용해야 한다.

③ 고장정지, 방사능 유출 등 사회적 영향을 미치는 사안에 대하여는 48시간 이내에 사업자가 환경감시기구에 주요 상황을 설명해야 한다.

제16조(조사결과의 관리 및 공개) ① 환경감시기구가 수행한 조사결과는 원전폐지 시까지 위원회 위원장이 보존·관리한다.

② 위원회 위원장은 조사결과를 유인물의 제작, 배포, 주민설명회 등의 방법으로 공표할 수 있다.

③ 환경감시기구는 감시센터에서 수행한 감시조사 결과 원전 안전에 대한 이상 징후의 판단 시 정부 및 원전사업자에게 통보하고, 원전사업자는 조치결과를 즉시 서면으로 감시기구에 통보해야 한다.

④ 원전보안관련 규정의 저촉 우려가 있는 정보의 경우 사전에 제공자(사업자 등)의 확인을 거쳐 위원장의 승인 하에 공개할 수 있다.

울산광역시 울주군 신고리원전 민간환경감시기구 설치 및 운영에 관한 조례

[시행 2011. 8. 4.]

[울산광역시울주군조례 제651 호, 2011. 8. 4.]

제3조(감시기구의 구성) 감시기구는 울산광역시 울주군 신고리원전 민간환경감시위원회(이하"위원회"라 한다)와 위원회 산하에 울산광역시 울주군 신고리원전 환경감시센터(이하"감시센터"라 한다)로 구성한다.

제4 조(위원회 기능) ① 위원회는 다음 각 호의 사항을 심의·의결한다.

1. 감시센터의 연간 환경감시계획 및 평가에 관한 사항
2. 환경감시기구의 예산 및 결산에 관한 사항
3. 환경감시 조사결과의 공표에 관한 사항
4. 환경 및 방사선 안전에 관련한 정부·사업자에 건의사항
5. 그 밖에 위원회에서 중요하다고 인정하는 사항

② 위원회의 운영에 관해 필요한 사항은 위원회의 의결을 거쳐 위원장이 따로 정할 수 있다.

제5조(위원회의 구성) ① 위원회는 위원장을 포함한 20명 이내의 위원으로 구성한다.

② 위원장은 **울산광역시 울주군수(이하 "군수"라 한다)**가 되고 부위원장은 위원 중에서 호선한다.

③ 당연직 위원은 감시기구업무 담당 국장 또는 단장으로 하고, 위촉직 위원은 다음 각 호의 어느 하나에 해당하는 사람 중에서 위원장이 위촉한다.

1. 울산광역시 **울주군의회 의원 3명**
2. 삭제
3. **서생면 단체대표 2명(주민자치위원장 1명, 이장협의회 회장 1명)**
4. 울주군 관내 발전소 주변지역 인근마을 주민대표 5명
5. **학계 전문가 1명(방사능 또는 환경분야 교수)**
6. 고리원자력본부장이 추천하는 **2직급 이상의 소속 직원 1명**

7. **기장군수가 추천하는 발전소 주변지역 주민 1명**
8. 그 밖에 지역사회 발전에 기여했거나 원자력 분야에 풍부한 경험과 식견을 갖춘 사람

제16조(환경감시 범위 등) ① 감시기구의 환경감시 범위는 원자력발전소로 인하여 환경에 영향을 미칠 우려가 있는 울주군의 행정구역까지로 한다. 다만, 감시기구는 신고리원전건설 및
운영 전반에 대해 감시활동을 실시한다.
② 다음 각 호의 어느 하나에 해당하는 경우에는 신고리원전 부지 경계 내의 시설 또는 지역에
대해 조사를 요구할 수 있으며 고리원자력본부는 이에 적극 협조해야 한다.
1. 환경조사 중 법적 기준치를 초과하는 환경영향을 발견한 경우
2. 원전사고, 고장 등급상의 사고 및 고장을 발견한 경우
3. 그 밖에 위원장의 요청이 있는 경우

제17조(자료 등의 요청) 위원회는 그 소관 사항의 심의 및 감시센터의 감시업무 수행에 있어 필요하다고 인정하면 고리원자력본부에 대하여 타 법령에 저촉되지 아니하는 범위에서 자료요구 및 시정 건의, 시설 공개 안내 등을 받을 수 있다.

제18조(조사결과의 관리 및 공개) ① 감시기구가 수행한 조사결과는 원자력발전소의 폐지 시까지 위원장이 보존관리 한다.
② 위원장은 조사결과를 유인물로 제작, 배포, 주민설명회 등의 방법으로 공표할 수 있으며, 공표 시 현저한 공익을 저해할 우려가 있는 경우에는 공표하지 아니할 수 있다.

4) 감시기구의 구성, 위원회의 인적 구성 및 권한

각 지방자치단체의 조례에 따르면 감시기구는 민간환경감시위원회(이하 "위원회")와 위원회 산하에 환경감시센터(이하 "감시센터")로 구성돼 있다. 위원회는 위원장과 위원으로 이뤄지며, 경주시 조례가 시장을 위원장으로 정하는 것을 제외하고는 모두 군수가 위원장이 되도록 정하고 있다. 위원회 인원은 경주시 월성원전은 25인 이내, 나머지는 모두 20인 이하로 규정돼 있다. 위원의 구성은 각 조례 별로 상이한데, 주민대표들, 시·군 의원, 2직급 이상 원전 직원, 기관사회단체대표, 학계 전문가, 군수 내지 읍명장이 추천하는 자, 관계공무원, 시민단체가 추천하는 자 등으로 하도록 돼 있다.

환경 감시를 위한 정보제공을 받을 수 있는 권한 또한 각 조례별로 차이가 있음을 알 수 있다. 울진군 조례가 가장 구체적으로 정보요청 권한과 관련 기관의 협조의무를 규정하고 있는데 반해 단순히 자료를 요청할 수 있다는 규정만 있을 뿐 요청을 받는 기관의 정보제공 의무 등에 관해서는 관련 규정이 없는 기장군과 울주군 조례, 관계기관의 관계자를 위원회에 출석시켜 협조를 받는 방식으로 자료를 제공 받도록 돼 있는 영광군 조례 등 각 지방자치단체별 민간환경감시기구의 정보접근에 대한 권한행사 범위에 차이가 있다(아래 [표 2] 참조).

[표 2] 각 지방자치단체별 민간환경감시기구 조례 비교

	기장군 고리원전	영광군 한빛원자력 발전소	경주시 월성원전·방폐장	울진군 한울원전	울주군 신고리원전
	기장군조례	영광군조례	경주시조례	울진군조례	울주군조례
위원회 구성	20명 이하	20명 이하	25인 이내	20인 이하	20명 이내
위원장	군수	군수	시장	군수	군수

	기장군 고리원전	영광군 한빛원자력 발전소	경주시 월성원전·방폐장	울진군 한울원전	울주군 신고리원전
위원	(1) 주민대표 : 읍면장 추천 5인 (2) 군 의원 4인 (3) 2직급 이상의 직원 1인 (4) 전문가 3인	(1) 기관사회단체대표 및 주민 11인 (2) 영광군의회 의원 또는 주민 3인 (3) 영광군수가 추천하는 사람 2인 (4) 원전 본부 소속 2직급 이상 직원 1인 (5) 원자력학계 전문가 1인	(1) 시의회 의원 3인 (2) 관계공무원 중 시장이 지명하는 2인 (3) 월성지역본부 직원 1인 (4) 주민대표 6인 (5) 시민단체 추천 받은 자 4인 (6) 시장과 시민단체 및 지역주민대표 추천하는자 7인	(1) 공무원 1인, 환경감시센터 소장 (2) 발전소 2직급 이상 직원 1인 (3) 위원장 위촉하는 자 12인 (4) 학계전문가 3인, 시민단체 소속 1인	(1) 울주군의회 의원 3인 (2) 서생면 단체 대표 2인 (3) 인근마을 주민대표 5명 (4) 학계 전문가 1인 (5) 군수 추천 주변지역 주민 1인
정보 접근 권한	원자력 발전소에 대해 자료요구 및 시정건의, 시설공개 안내 가능(제17조 자료 등의 요청)	감시센터요원, 관계기관의 공무원 및 직원을 위원회에 출석하게 해 의견청취 및 자료체출 등 협조요청(제19조 협조요청)	일정한 요건이 충족되는 경우 사업자에 관련 자료를 요구하거나 시설 또는 지역에 대해 정부 또는 사업자의 조사에 감시센터 직원의 입회 요구 가능 및 사업자의 출입 협조의무(제3조의3 감시기구의 감시범위 제2항)	일정한 요건이 충족되는 경우 원전본부에 자료요구, 시설 또는 지역에 대해 감시센터 직원의 조사입회 요구 가능 및 원자력본부 적극협조의무(제14조 환경감시범위 등 제2항) 원자력 본부의 환경감시 관련 정보 및 자료 제공의무 사업자의 48시간 이내 설명의무(제15조 관계기관의 협조 등) 원전사업자의 조치결과 서면으로 감시기구 통보의무(제16조 조사결과의 관리 및 공개)	원자력본부에 자료요구 및 시정건의, 시설 공개 안내 가능(제17조 자료 등의 요청)

4. 결론 : 프랑스 사례가 주는 시사점

프랑스의 지역정보위원회는 먼저 환경법전에 법률로 그 인적 구성과 정보를 제공받을 권한 등이 명시적으로 규정돼 있고, 인적구성의 경우 발전소 소재 지역의 다양한 이해관계를 대변하는 대표자들 및 관련 전문가 집단으로 이뤄져 있다.

이러한 프랑스 지역정보위원회의 인적 구성은 원전 안전과 관련해 그 피해에 일차적으로 노출되는 지역사회가 원전 관련 의사결정과정에 충분히 그리고 적극적으로 참여 할 수 있도록 하면서, 독립된 감시기관으로 적절한 권한과 역할을 수행하도록 각 이해관계를 대변할 수 있는 관련 자격요건을 충족하는 위원으로 구성되도록 하고 있다.

반면 국내 위원회의 위원은 위 조례에 따르면, 각 분야의 이해관계를 대표하는 자격을 갖춘 위원보다는 지역 주민 내지 군수의 추천을 받은 자 등 추천자가 원하는 인사를 별다른 자격요건 검증 없이 위원으로 위촉 가능하게 돼 있는 것으로 보인다. 이는 원전이 소재한 지역의 거주하는 주민이 원전 관련 의사결정에 직접 참여한다는 부분에서 의미가 있다고 할 수 있지만, 별다른 자격 검증 없이 단순히 지역 내 주민이고 추천을 받으면 위원으로 활동한다는 부분에서 다양한 이해관계를 각 대변하며 독립성을 가지고 활동 할 수 있는지에 관해 신뢰를 얻기가 어려울 수 있다.

다수의 원전사고가 설계자체 결함 내지 노후가 아닌 부품납품비리, 시험성적 위조부품 사용 등으로 발생하는바, 이러한 위험을 위원회가 독립된 감시기관의 역할을 수행함으로 예방할 수 있어야 한다는 점이 주민이 참여 기능과 더불어 위원회 구성에서 고려돼야 한다. 그리고 위원회의 투명하고 독립적인 운영을 확보하려면 위원회의 구성이 단순한 지역 주민 참여를 넘어서 각 대립하는 이해관계를 적절히 대변하는 검증된 인적 구성을 가질 수 있도록 할 필요성이 있다.

프랑스 지역정보위원회의 인적 구성은 보건기관의 대표, 하원과 상원의원, 공청회에서 협의 등으로 결정된 지방자치단체의 선출직

공무원들, 환경보호사단법인, 농업조합, 전문가조직, 노동자대표연맹, 의료전문가 등의 대표들로 위원회를 구성하도록 법률로 정하고 있다. 이러한 다양한 이해관계의 대표자들로 이뤄진 프랑스 지역정보위원회는 이해관계 담합의 위험이 적고 독립된 기구로 투명하게 운영될 가능성이 높으며 결과적으로 위원회의 권한과 판단에 대해 사회적 신뢰를 얻기에도 용이해 보인다.

아울러 프랑스는 지역정보위원회의 인적 구성을 포함한 그 역할과 권한을 법률로 일괄 규정하고 있어 모든 위원회가 동일한 권한으로 정보에 접근할 수 있다. 이에 반해 국내 위원회는 원전이 소재한 위치에 따라 각기 다른 조례로 정보접근에 대한 권한 및 인적 구성이 상이해지는 상황이 발생한다.

원전에 대한 위험과 이에 대한 위원회의 역할이 각 원전이 소재한 지역에 따라 달라지지 않는다는 점에서 민간환경감시위원회의 인적 구성과 권한에 관해 국내에도 일원화된 규정이 필요하다고 생각한다. 현재 관련 국내법령은 민간 환경감시위원회에 관한 모든 사항을 지방자치단체가 개별적으로 정하도록 하고 있어 통일된 제도로 운영될 수 있는 법령정비가 우선돼야 할 것으로 사료된다.

그리고 위원회의 인적 구성 또한 자격요건과 다양성을 강화하는 방식으로 프랑스와 같이 법률에 그 요건을 명시해 국내 민간환경감시기구가 독립된 기구로의 권한과 위상을 강화시킨다면, 그 본연의 역할인 투명한 관리 감독기능을 더 잘 수행할 수 있을 것으로 판단된다.

이와 같이 민간환경감시위원회가 독립된 감시기구로 자리 잡고 사회적 위상과 신뢰를 얻게 된다면, 갑작스러운 사고로 방사능에 노출되는 피해에 대한 사회적인 우려가 줄고, 공포감 기반의 소모적인 사회적 논쟁에서 벗어나 실질적인 논의를 형성하는 데 일정한 역할을 할 것으로 기대해 본다.

참고문헌

[1] 김지영. 2013. "프랑스 원자력안전법제의 현황과 과제-
우리나라 원자력안전법제로의 시사점 도출을 중심으로" 『환경법연구』. 35(3). 169-208.

[2] 김주경, 김도윤, 고대유. 2018.
"원전 지역 민간환경감시기구 성과지표 개발에 관한 연구"
『한국지방행정학보』. 15(3). 29-54.

[3] 전홍찬. 2014. "원전 소재지 안전협의체 비교 연구:
영국, 프랑스, 일본의 지자체 및 주민 참여 제도가 주는 시사점"
『사회과학연구』. 30(4). 293-316.

[4] 이만섭. "[원전여론조사]국민인식 '이중적 태도'… 국가적으론 원전 필요 그러나 내집 앞 건설은 반대" 산경e뉴스, 2023.11.6.

[5] 프랑스. 2009. "Dossier: La poursuite d'exploitation des centrales nucléaires" 46-52.

사용후핵연료,
우리는 안전하게 관리할 수 있을까?

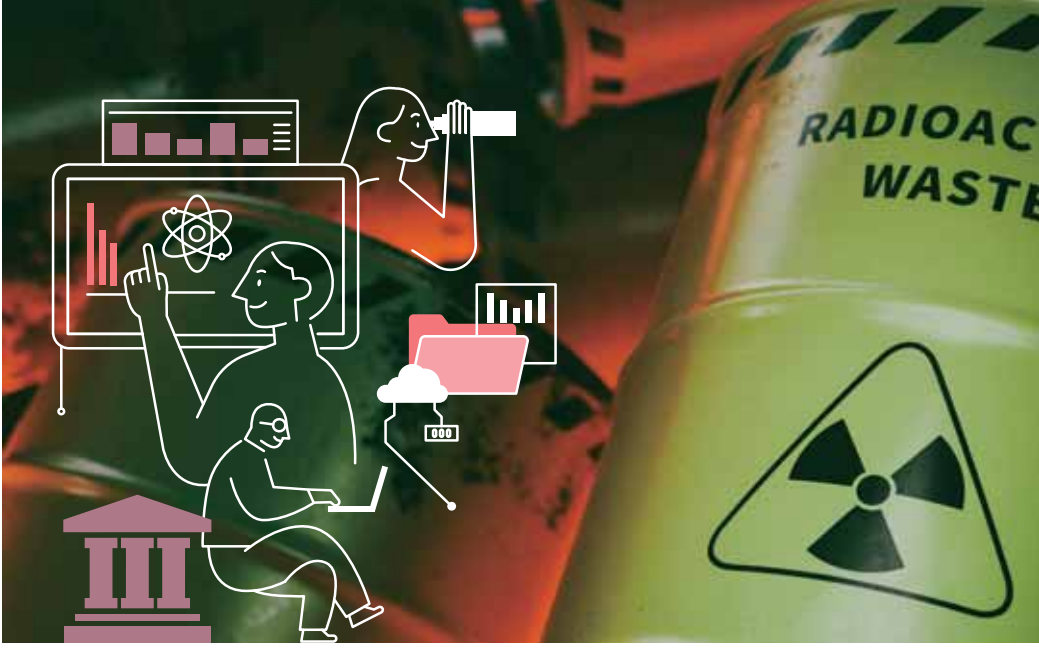
우리나라가 사용후핵연료 장기적으로 안전관리 기반을 완비하기 위해서는 현재 부족한 관리시설을 확보하고, 사용후핵연료 영구처분장 부지선정에 관한 고준위방사성폐기물 관리를 위한 특별법을 조속히 제정할 필요가 있다.

사용후핵연료는 오랜 기간 관리가 필요하다.

이 때문에 사용후핵연료를 장기간 안전 관리를 하기 위해서는 처분 기술과 시설 그리고 이들 기술 및 시설의 지속성 보장을 위한 제도적 장치의 3박자가 갖춰져야 한다.

문종원

고려대학교
정치외교학과
학사과정



1. 사용후핵연료 발생원인

사용후핵연료는 더 이상 핵분열 연쇄 반응을 지속시킬 수 없어 원자로에서 배출된 핵연료를 말한다. 따라서 원자력발전소를 가동할수록 사용후핵연료 배출은 늘어나게 된다. 현재 운영 중인 발전소는 연료를 태워 열을 발생시키고 이 열을 이용해 물을 끓여 증기를 생산한다. 이렇게 생산된 증기가 터빈을 돌리고, 이어서 터빈과 연동된 발전기가 회전하면서 전기를 만든다. 그런데 여기서 열을 어떤 연료를 이용해 발생시키느냐에 따라 발전소의 종류를 구분할 수 있다. 무연탄이나 유연탄처럼 석탄을 태워 열을 발생시키면 석탄화력발전소가 되고, 우라늄을 연소[1)]시켜 열을 발생시키면 원자력발전소가 된다.

원자력발전소에 사용하기 위해 만든 우라늄 연료를 '핵연료(Nuclear fuel)'라고 한다. 우라늄 핵연료에 사용되는 우라늄은 우라늄-235 동위원소[2)]의 비중이 0.7%인 천연 우라늄이나, 3~5%까지 농축

1) 원래는 '물질이 산소와 화합해 열과 빛을 내는 화학적 현상'을 지칭하는 용어지만, 원자력 발전에서는 우라늄-235가 핵분열해 열을 내는 현상을 일컫는다.

시킨 저농축 우라늄을 사용한다. 우리나라에 있는 원자로 중, 월성에 있는 가압중수로(Pressurized heavy water reactor, PHWR)[3]는 천연 우라늄 핵연료를 사용하며, 가압경수로(Pressurized water reactor, PWR)[4]는 저농축 우라늄을 핵연료로 사용한다.

우라늄 핵연료는 원자로(Reactor)[5] 안에서 중성자에 의해 핵분열을 하며 열을 발생한다. 우라늄-235 원자 하나가 핵분열을 하면, 두 개의 다른 원자로 쪼개지면서 2~3개의 중성자와 약 200MeV의 에너지를 방출한다. 이들 중성자는 주변에 있는 다른 우라늄-235 원자를 핵분열시키는데, 즉, 연쇄 핵분열 반응을 일으키는 데 사용된다. 200MeV의 에너지는 원자로 안을 순환하는 물을 끓이는 열원(Heat source)으로 사용된다.

우라늄 핵연료가 원자로에서 연소가 될수록, 핵연료 안에 있는 우라늄-235가 줄어든다. 더 이상 연쇄 핵분열 반응을 일으키기 어려운 수준까지 줄어들게 되면, 새로운 우라늄 핵연료로 교체해야 한다. PWR 핵연료는 다발당 우라늄 무게가 450kg으로, 4~5년 정도 사용된다. PHWR 핵연료는 다발당 우라늄 무게가 24kg으로, 9개월 정도 사용된다. 이렇게 원자로에서 교체돼 나온 우라늄 핵연료를 사용후 핵연료(Spent Nuclear Fuel)라고 말한다.

---

2) 동위원소란 원자번호는 같지만, 질량수가 다른 원소를 말한다. 천연의 우라늄은 우라늄-238(99.284%)과 우라늄-235(0.7%) 동위원소 등으로 구성돼 있다.
3) 중수(D_2O)를 감속재와 냉각재로 사용하고, 냉각재가 끓는 것을 방지하기 위해, 압력관 내부를 약 100기압의 압력으로 가압하는 원자로를 말한다.
4) 경수(H_2O)를 감속재와 냉각재로 사용하고, 냉각재가 끓는 것을 방지하기 위해, 원자로 계통을 약 150기압의 압력으로 가압하는 원자로를 말한다.
5) 핵연료를 연소하는 장치로서 원자력발전소를 구성하는 핵심 장치이다. 원자력발전소는 원자로 이외에 증기를 생산하는 증기발생기, 증기로 구동하는 터빈, 전기를 만드는 발전기 등으로 구성돼 있다.

2. 사용후핵연료 특성과 안전관리

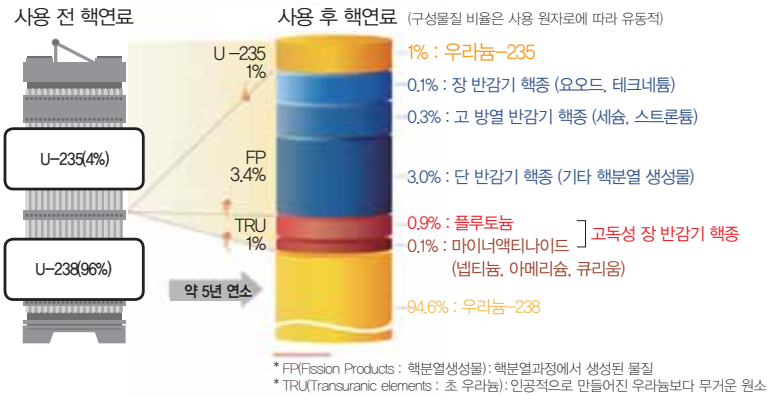
사용후핵연료는 매우 오랫동안 열과 방사능을 방출하기 때문에 원자력 발전소에서 배출된 이후에도 오랫 동안 냉각하고 방사선을 차폐해야 한다. 그래서 이를 위한 별도의 저장 시설이 필요하다. 사용후핵연료는 외형상 새 핵연료와 차이가 없으나, 그 안에는 우라늄 연소 과정 중 일어난 핵분열반응과 핵변환 반응을 통해 만들어진 세슘, 스트론튬 등 수백 종의 핵분열 생성물(Fission products)과 넵투늄, 아메리슘, 퀴륨 등 초 우라늄 원소(Transuranic elements)[6]들이 들어있다. 이들 물질은 방사선과 열을 방출하는 방사성 핵종[7]이다. 원자로에서 연소 전후에 핵연료 내부 성분 구성이 어떻게 변하는지는 [그림 1]을 통해 쉽게 이해할 수 있다.

사용후핵연료 안전관리에 특별한 관심을 둬야 하는 이유는 오랫동안 높은 방사능과 열이 방출된다는 것 때문이다. 핵연료를 원자로에서 끄집어내면, 원자로에 있을 때처럼 핵분열 반응을 더 이상 하지 않는다. 그렇지만 원자로에서 연소하는 동안 만들어졌던 핵분열 생성물과 초 우라늄 원소들이 사용후핵연료 안에 남아 있으면서 방사성 붕괴[8]를 한다. 이때 방사선과 열이 계속 방출된다. 그런데 이들 방사성 핵종 중에는 반감기(Half-life)[9]가 매우 긴 것들이 있어서, 오랜 기간 방사선과 열을 방출한다. PHWR 사용후핵연료의 방사능은 PWR 사용후핵연료 방사능의 약 5% 수준이며, 열 발생량은 약 15%에 불과하다. 방사능이 천연 우라늄 수준까지 감소하기까지 PWR 사용후핵연료는 10만 년 이상, PHWR 사용후핵연료는 약 1만 년이 걸리는 것으로 알려져 있다.[10]

---

6) 원자번호 92번인 우라늄보다 원자번호가 큰 인공 방사성 원소들을 일컫는다.
7) 방사성은 '방사선을 방출할 수 있는', 핵종은 '원자핵의 종류'라는 뜻이다. 따라서 방사성 핵종은 방사선을 방출하면서 다른 원자핵으로 바뀔 수 있는 원자핵의 종류라는 의미를 띤다.
8) 하나의 원자핵이 방사선을 내면서 다른 원자핵으로 변화하는 과정을 말한다. 이때 방출하는 방사선의 종류에 따라 알파 붕괴, 베타 붕괴, 감마 붕괴 등으로 구분한다.
9) 방사성 핵종의 방사능이 처음의 절반으로 줄어드는 기간을 말한다.
10) 출처: https://www.korad.or.kr/webzine/202112/sub2-4.jsp

[그림 1]
연소 전후 경수로 핵연료의 구성 변화



출처 : 사용후핵연료 이야기(2016), 한국원자력환경공단

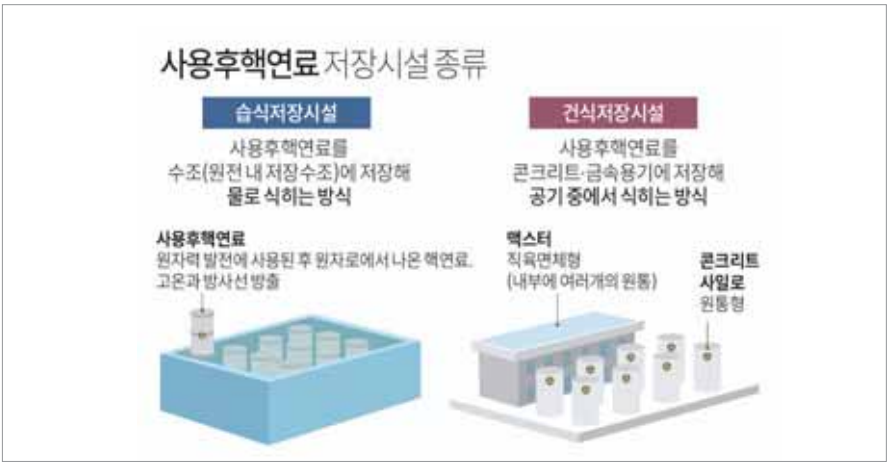
이 같은 사용후핵연료 특성 때문에, 사용후핵연료는 원전에서 배출된 이후에도 오랫동안 냉각하고 방사선을 차폐해야 한다. 그래서 이를 위한 별도의 저장시설이 필요하다. 원자로에서 갓 배출한 사용후핵연료는 열과 방사능이 높아서, 원자력발전소 안에 붕산을 섞은 물로 채워진 시설[11]로 옮겨 저장해야 한다. 이 시설에 채워진 물은 사용후핵연료에서 나오는 열을 식히고 방사선이 외부로 빠져나가는 것을 차폐하는 역할을 한다. 이렇게 물로 채워진 저장시설에 사용후핵연료를 저장하는 것은 '습식 저장'이라고 부른다.

그런데 사용후핵연료 관리 측면에서 습식 저장시설 저장용량이 문제가 되곤 한다. 원자력 발전소를 가동하면 사용후핵연료가 주기적으로 발생한다. 그런데 습식 저장시설의 저장 공간은 한정돼 있어서, 무한정 사용후핵연료를 저장할 수 없다. 습식 저장시설에 저장 공간이 없어지면 원자력 발전소에서 배출되는 사용후핵연료를 저장하지

11) 이를 '습식 저장시설' 또는 '임시 저장시설'이라고 부른다.

못하여 원자력 발전소 가동을 멈춰야 한다. 따라서 원자력 발전소를 계속 가동하려면, 원자력발전소 부지 안이나 밖에 별도의 저장시설을 건설하고, 사용후핵연료를 옮길 수 있는 습식 저장시설의 여유 저장 공간을 만들어줘야 한다.

[그림 2]
습식 및 건식저장시설 비교



출처: https://www.yna.co.kr/view/GYH20230207001700044

이렇게 부지 안팎에 별도로 만드는 저장시설은 사용후핵연료를 무엇으로 냉각하느냐에 따라, [그림 2]와 같이 '습식 저장시설'과 '건식 저장시설'로 구분한다. 습식 저장시설은 물로 냉각하며, 건식 저장시설은 공기로 냉각한다. 건식 저장은 사용후핵연료를 콘크리트나 금속용기에 집어넣고 밀봉한 후 공기로 냉각한다.

건식 저장은 습식 저장에 비해 운영비가 적게 들고 용량 확장 측면 등에서 유리하다. 우리나라는 현재 월성원자력발전소에 [그림 3]에서 보는 바와 같이 두 종류의 건식 저장시설을 설치해 운영 중이다. 이들 시설은 원자력발전소 부지 안에 지었기 때문에 '부지 내 건식 저장시설'이라고도 부른다. 캐나다, 중국, 아르헨티나, 루마니아 등 중수로를 운영하는 나라는 1990년대부터 건식 저장시설을 운영해

오고 있다. 우리나라도 월성원자력발전소에 30여 년 동안 건식 저장 시설을 안전하게 운영해 오고 있다.

[그림 3]
월성원자력발전소의 건식 저장시설 종류

Concrete Silo

Macstor

출처 : https://www.yna.co.kr/view/GYH20230207001700044

원자로에서 배출된 사용후핵연료를 임시 저장시설이나 부지 내 건식 저장시설에 저장하고, 안전하게 관리하는 책임은 원자력 발전소를 운영하는 사업자에게 있다. 그런데 원자력 발전소는 운영허가 기간이 정해져 있다. 그래서 원자력 발전소 운영을 지원하는 시설인 임시 저장시설과 부지 내 건식 저장시설도 한정된 기간 안에서만 운영할 수 있다. 그 후 사용후핵연료를 안전하게 관리하고 영구처분[12] 하는 책임은 국가에 있다.

그런데 사용후핵연료를 영구처분하기에 앞서 재활용할 수도 있고, 영구처분시설 부지를 확보하는 데 오랜 시간이 걸리기 때문에, 국가(또는 국가가 지정한 관리사업자)가 별도의 저장시설을 확보해 임시 저장시설이나 부지 내 건식 저장시설에 저장된 사용후핵연료를 옮겨와 일정 기간 저장·관리할 수도 있다. 이를 '중간 저장(Interim storage)'이라고 한다. 중간 저장시설은 원자력 발전소 근처에 하나씩 지어 운영할 수도 있고(분산식 중간 저장), 한 곳에 지은 후 모든 원자력 발전소에 있는 사용후핵연료를 이곳으로 옮겨올 수도 있다

12) 원자력안전법 시행령 제2조 제8호에서는 "영구처분"을 "방사성폐기물을 회수할 의도 없이 인간의 생활권으로부터 영구히 격리하는 것"으로 정의하고 있다.

(중앙집중식 중간 저장). 중간 저장시설은 [표 1]에서 보듯이, 국가에 따라 차이가 있으나 통상 50~60년 운영한다.

[표 1]
주요 국가별 사용후핵연료 중간저장시설 운영 현황

국가	시설명	운영기간	특이사항
일본	무츠 중간저장시설	50년	-
스페인	ATC 중간저장시설	60년	-
미국	소내 독립저장시설	40년	최장 40년 추가연장 가능
스웨덴	CLAB 중간저장시설	60년	연료는 40년 저장 후 최종처분장으로 이송
독일	Ahaus 중간저장시설	40년	-
캐나다	소내 건식저장시설	50년	-

중간 저장은 습식 또는 건식 저장을 할 수 있으며, 최근에는 건식 저장시설을 위주로 운영하는 추세이다.

습식 저장방식은 차폐 및 냉각 성능이 뛰어난 물을 이용해 사용후핵연료의 붕괴열과 방사선을 효과적으로 냉각 및 차폐할 수 있고, 저장한 상태에서 사용후핵연료에 대한 검사를 비교적 쉽게 수행할 수 있는 장점이 있다. 반면, 물을 계속 순환 및 정화를 시켜야 하므로 운영비가 많이 들고 비교적 많은 방사성폐기물이 발생하는 등의 단점이 있다.

[그림 4]
국외 사용후핵연료 중간 저장시설 사례

미국 소내독립저장시설
(Connecticut Yankee)

스웨덴 습식저장시설
(CLAB)

건식 저장방식은 공기 자연 대류를 이용해 냉각하므로 운영비가 거의 들지 않고 운영 중 폐기물의 발생이 거의 없는 장점이 있다. 반면, 사용후핵연료 저장 중 검사가 어렵고 운영 경험이 습식방식에 비해 짧다는 등의 단점이 있다. 사용후핵연료 중간 저장방식별 장·단점을 정리하면 [표 2]와 같다.

[표 2]
사용후핵연료 중간 저장방식별 장·단점 비교

구분		장점	단점
습식		• 건설/운전 경험 풍부 - 실증된 기술 - 인허가 용이 • 핵물질 보장조치* 용이 • 부지 소요면적이 작음 • 다양한 종류의 핵연료 취급 용이	• 운영 중 2차 폐기물 다량 발생 • 수납 종료 후 시설 운전 지속 필요 - 시설의 신뢰도 낮음 - 기기장치 유지보수 필요 • 용수 등 유틸리티 소요량 과다 - 운영비 고가 - 부지 선정 시 제한 요소 • 상대적으로 작업자 피폭 높음 • 능동적 냉각 시스템 유지 필요 - 중대사고 대처 능력 미흡 - 고가의 유지 보수비
건식	금속 용기	• 실증된 기술(경험 풍부) • 용량 확장성이 용이함 • 운영 폐기물이 거의 없음 • 피동 냉각(Passive cooling) • 소내외 저장용량 확장용으로 실용성 높음 • 작업자의 피폭률 낮음	• 고가의 용기 제작비용 • 저장 중 핵연료 검사 어려움 • 핵연료 피복관 온도 높음
	콘크리트 사일로		• 저장 중 핵연료 검사 어려움 • 저장밀도 낮음 • 핵연료 피복관 온도 높음 • 콘크리트의 장기 건전성 문제 유발 가능 • 국민 수용성 측면에서 불리
	볼트		• 가압경수로형(PWR) 핵연료 저장 경험 없음 • 저장 중 핵연료 검사 어려움 • 저장밀도 낮음
	콘크리트 용기	• 용기 용량 확장성 좋음 • 용기 가격 저렴 • 운영 폐기물 거의 없음	• 콘크리트 열전도 낮음 • 장기 저장시 콘크리트 건전성 문제 유발 • 콘크리트 내벽 온도 제한 문제

* 사용후핵연료가 군사 목적으로 전용되는 일이 없도록 감시하기 위해 시행하는 조치를 말한다.

출처 : 사용후핵연료 저장 현황 및 소재기술 동향(2014), KEIT PD ISSUE REPORT

그런데 부지 내 저장시설이나 중간 저장시설은 사용후핵연료를 한시적으로 보관하는 용도여서, 사용후핵연료를 영구처분하기 위한 처분시설이 필요하다. 이때 사용후핵연료를 어떤 형태로 영구처분[13]할 것인가에 대한 결정이 필요하다.

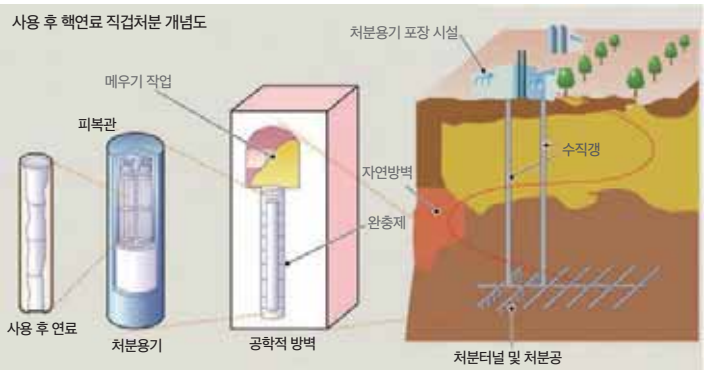
사용후핵연료에는 우라늄-235나 플루토늄 등 핵연료의 원료로 사용할 수 있는 유용한 물질이 들어있기 때문이다. 이들 핵물질을 회수하지 않고 사용후핵연료 자체를 영구처분(직접 처분)하거나, 이들 유용한 물질을 사용후핵연료로부터 회수(재처리)하고 나머지를 처분에 적합한 형태로 만들어 영구처분할 수 있다.

[그림 5]
상충 처분시스템 개념

고준위폐기물 심층처분(2/3)

심층처분시스템 개념

고준위폐기물 심층처분은 지하 500m 이하의 안정한 지층에 수평터널을 일정 간격(약 40m) 평행하게 설치하고 각 터널의 바닥에 일정 간격(약 6~9m)으로 처분공을 만들고 그 안에 처분용기를 거치하여 다중방벽 개념으로 처분하는 개념



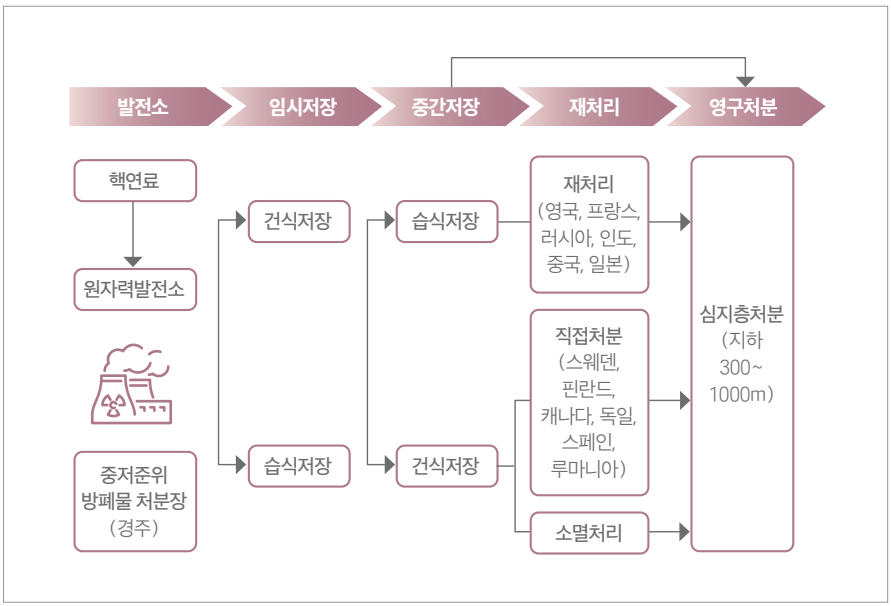
출처: https://www.hellodd.com/news/articleViewAmp.html?idxno=99933

13) 국내 원자력안전법 시행령 제2조 제9호에 따르면, 영구처분을 "방사성폐기물을 회수할 의도 없이 인간의 생활권으로부터 영구히 격리하는 것"으로 정의하고 있다.

사용후핵연료를 직접 처분하는 방법으로는 ① 해양 처분(1990년 런던 투기 협정 체결에 의거 금지), ② 빙하 처분(남극의 경우에는 남극조약으로 금지), ③ 우주 처분, ④ 심층 처분(300m~1,000m), ⑤ 초장심도 처분(약 3,000m~5,000m)이 있는데, 현실적으로 가능한 방법은 심층 처분과 초장심도 처분이다. 국제원자력기구 IAEA는 경제성과 안정성 등 종합적으로 고려해, 사용후핵연료 영구 처분 방법으로 심층 처분이 가장 적절하다고 권고하고 있다.

심층 처분은 [그림 5]에서 보듯이, 지질학적 구조가장기적으로 안정된 암반(결정질암, 암염, 점토 등)의 지하 300~1,000미터 깊이에 처분시설을 만들고, 사용후핵연료를 처분용기에 넣은 후 처분시설에 처분하는 방식이다.

[그림 6]
사용후핵연료 관리 단계



출처: https://www.hankyung.com/article/2013102233781

재처리 후 처분 방식은 사용후핵연료를 재처리해 유효자원은 분리하여 재활용하고, 나머지 폐기물은 심지층에 영구처분하는 방식이다. 재처리는 프랑스, 일본, 중국, 러시아 등이 시행하는 것 같이 재처리를 통해 회수한 플루토늄을 경수로에서 한 번 재순환시키는 방법과 우라늄, 플루토늄뿐만 아니라 다른 물질도 함께 회수해서 계속 재순환시키는 방법으로 구분할 수도 있다. 여기서 주의할 점은 사용후핵연료를 재처리하더라도, 고준위 방사성폐기물[14]이 발생하기 때문에 심층 처분장 건설·운영은 필요하다는 것이다.

지금까지 기술한 사용후핵연료 발생부터 영구처분까지 과정을 단계별로 정리하면 [그림 6]과 같다.

3. 주요 나라의 사용후핵연료 관리 상황

1) 주요국의 사용후핵연료 관리 정책

일부 국가는 자국 여건에 따라 사용후핵연료를 '직접 처분' 또는 '재처리 후 처분'하기로 결정했으나, 우리나라를 비롯한 다수 국가는 관망(Wait and See) 정책을 견지하고 있다.

총 31개 원전 운영국의 사용후핵연료 관리정책을 살펴보면, 10개[15]국은 '직접 처분' 정책을, 6개국[16]은 '재처리 후 처분' 정책을 채택하고 있다. 그러나 우리나라를 포함해 나머지 국가는 관망(Wait and See)하는 중이다. 이를 정리하면 [표 3]과 같다.

14) 원자력안전법시행령 제2조 제1호에 따르면, 방사성폐기물 중 그 방사능 농도 및 열발생률이 원자력안전위원회가 정하는 값 이상인 방사성폐기물을 고준위 방사성폐기물 정의하고 있으며, 사용후핵연료도 여기에 포함된다.

15) 핀란드, 스웨덴, 독일, 캐나다, 스페인, 미국, 루마니아, 스위스, 슬로바키아, 대만

16) 프랑스, 중국, 러시아, 인도, 일본, 영국

[표 3]
주요국의 사용후핵연료 관리 정책

국가	가동원전 수 ('24.5)	사용후핵연료 관리정책
미국	94기	**[직접처분]** - 유카마운틴 고준위폐기물 처분장 건설 중단 - 블루리본위원회 권고사항을 바탕으로 국가전략 발표 - 소내/소외 독립저장시설 운영(건식)
영국	9기	**[재처리]** - 셀라필드 재처리시설 운영 - 재처리시설 및 Wylfa 원전 내에서 중간저장(건식) 뫼즈·오트마른 (Meuse·Haute Marne) 경계를 처분장 부지로 결정('10)
프랑스	56기	**[재처리]** - 라하그 재처리 시설 내에서 중간저장
스웨덴	6기	**[직접처분]** - 처분장 부지(포스마크) 확보('09) 및 건설허가 획득('22) - 소외 중앙집중 중간저장시설(CLAB) 운영
핀란드	5기	**[직접처분]** - 처분장 부지(올킬루오토) 확보 및 운영허가 취득('21) - 습식 저장시설 운영(원전부지 내 독립시설)
일본	12기	**[재처리]** - 위탁(프랑스/영국) 및 자체 재처리(도카리/로카쇼) 병행 - 재처리 초과분 소내 건식 저장 - 소외 중간저장시설 운영 예정(무츠시)
독일	0기	**[직접처분('05년 프랑스/영국 위탁 재처리 중단)]** - 소외 중간저장시설 운영(Ahaus, Gorleben, Greifswald 등)
캐나다	19기	**[직접처분(재활용 가능 옵션 포함)]** - 소내 별도 건식저장시설 운영
러시아	38기	**[재처리/직접처분(원자로형별 상이)]** - 재처리시설 내 중간저장(중간저장시설 별도 확보 추진 중)

2) 주요국의 사용후핵연료 처분사업 현황

주요국은 자국 여건에 따라 사용후핵연료 처분 개념과 방식을 개발하고, 이를 처분사업과 연계하고 있다.

1) 핀란드

핀란드는 사용후핵연료를 직접 처분하는 나라로서, 처분사업을 선도하고 있다. 핀란드는 1983년부터 처분시설 부지확보에 나서, 2001년 올킬루오토(Olkiluoto)를 영구처분시설 부지로 결정했다. 그 이후 규제기관(STUK)으로부터 건설 허가를 획득하고, 2016년부터 영구처분시설을 건설하기 시작했다. 영구처분시설 운영허가는 2021년 신청했다. 영구처분시설 준공은 당초 일정이 늦어져 2024년안에 이뤄지고, 운영허가는 2025년 획득할 것으로 예상된다. 핀란드는 영구처분시설 운영허가를 획득한 이후에는 2년간 시운전을 할 예정이다. 따라서 영구처분시설의 본격적인 운영은 2027년부터 시작될 것으로 보인다.

2) 스웨덴

스웨덴도 사용후핵연료를 직접 처분하는 나라로서, 1985년부터 오스카샴(Oskarshamn) 원전 부지 내에 중간저장시설(CLAB)을 운영하고 있다. 2022년 6월, 이 시설을 확장했다. 스웨덴은 SKB사가 1992년 발표한 연구개발 실증 프로그램에 따라 1993년부터 영구처분장 후보 부지의 수를 줄여나가기 시작했으며, 마침내 2009년 포스마크(Forsmark)를 영구처분장 최종 후보 부지로 선정하였다. 스웨덴은 핀란드보다 앞서 영구처분시설 건설 허가를 신청했지만, 신청 직후 후쿠시마 원전 사고가 발생하면서 심사 기간이 길어졌다. 2022년 1월이 돼서야, 세계에서 두 번째로 영구처분시설 건설 허가가 나왔다. 스웨덴은 이후 10년간 영구처분시설을 건설하고, 2030년대 초에 운영할 예정이다.

3) 프랑스

프랑스는 사용후핵연료를 직접 처분하지 않고, 사용후핵연료 재처리한 후 처분한다. 프랑스는 1976년부터 라하그(La Hague) 지역에 재처리시설과 중간 저장시설을 함께 운영 중이다. 1987년부터

프랑스는 처분시설 부지확보에 나섰으며, 2010년 뫼즈·오트마른(Meuse·Haute Marne) 경계를 영구처분장 부지로 결정했다. 이 과정에서 프랑스는 법률을 단계적으로 제정하고 이를 뒷받침하는 기술개발 프로젝트를 수행해 영구처분장 부지확보를 지원했다. 프랑스 방사성폐기물 관리 전담기관 ANDRA는 점토층으로 이뤄진 뷰흐(Bure) 지역에 지하연구시설을 건설하고, 20여 년간 실험을 수행했다.

프랑스는 처분시설 부지선정 과정의 지역주민 설득과 처분시설 건설허가 신청 문서 작성에 지하연구시설 연구 결과를 적극 활용했다. 현재 계획대로라면, 프랑스는 2040년대 초 영구처분시설을 운영할 수 있을 것으로 보인다.

4) 미국

미국은 1983년부터 영구처분시설 부지확보에 착수해, 1987년 유카산(Yucca Mountain)을 영구처분시설 부지로 결정했다. 하지만 오바마 대통령은 주민 수용성 미확보를 이유로 2009년 유카산 프로젝트를 무기 연기했다. 사업 중단과 함께 블루리본위원회가 발족됐다. 블루리본위원회는 2012년 "합의에 근거한 새로운 부지선정 절차 마련, 전담기구 설치, 중간저장시설 · 처분시설 확보 등"을 담은 권고안을 발표했지만, 그 이후 처분사업은 큰 진전을 이루지 못했다. 미국은 원전 부지 내 저장시설을 운영해 사용후핵연료를 저장하고 있다. 민간 회사 주도로 중간 저장시설 확보를 추진 중이나, 반원자력 단체의 소송 제기로 어려움을 겪고 있다. 하지만 미국은 원전부지내 건식 저장시설이 비교적 원활히 운영돼, 사용후핵연료 임시 보관과 원전 운영에는 큰 문제는 없다.

4. 우리나라의 사용후핵연료 발생 및 저장 현황

우리나라 원자력 발전소 임시 저장시설 포화가 임박해 있어서, 부지 내 건식 저장시설을 비롯해 영구처분시설을 시급히 확보하는 것이 필요하다. 우리나라는 2024년 기준 발전용 원자로 26기를 운영하고 있다. 이 외에도 첨단 연구개발을 지원하기 위한 연구용 원자로 1기, 원자력 전공 학생 교육을 위한 교육용 원자로 1기를 운영하고 있다. 이런 구분과 상관없이 원자로 운영에 사용된 후 인출된 핵연료들 모두 사용후핵연료이다. 그런데 우리나라에 보관 중인 사용후핵연료 대부분은 발전용 원자로에서 발생한 것이다. 따라서 여기서는 발전용 원자로, 즉, 원자력발전소에서 발생한 사용후핵연료만 다루기로 한다.

2023년 말 기준으로, 국내에는 총 508,892다발의 사용후핵연료가 5개 원자력발전소 부지에 분산 저장돼 있다. 국내 원자력 발전소 부지별 저장 현황을 정리하면 [표 4]와 같다.

[표 4]
국내 원자력발전소 부지별 사용후핵연료 저장 현황

부지(저장방식)		저장용량(다발)	저장량(다발)	포화율(%)
경수로	고리(습식)	8,038	7,163	89.1
	새울(습식)	1,560	596	38.2
	한빛(습식)	9,017	7,093	78.7
	한울(습식)	8,669	6,876	79.3
	신월성(습식)	2,588	794	30.6
	소계	29,872	22,522	75.3
중수로	월성(습식)	150,352	141,812	94.3
	부지내 저장시설(건식)	498,000	367,080	73.7
	소계	648,352	508,892	78.4

출처: 한국수력원자력 홈페이지

지금 상황으로 보면, ▲한빛 2030년 ▲한울 2031년 ▲고리 2032년 ▲신월성 2042년 ▲새울 2066년 순으로 원자력 발전소 임시 저장시설이 포화할 것으로 보인다. 중간 저장시설이나 영구처분시설을 확보하지 않는다면, 원전 부지 내 저장시설의 추가 건설이 필요한 상황이다. 하지만 이들 시설이 사용후핵연료 영구처분시설로 둔갑

하는 것이 아닌가 하는 지역주민의 우려로 발전사업자는 추가 건설에 어려움을 겪고 있다.

하지만 해당 시설도 사용후핵연료 관리 측면에서 임시방편에 불과하다. 장기적인 관점에서 안전하게 관리할 수 있는 영구처분 시설과 방안을 마련해야 한다. 우리나라는 원자력발전소 26기를 운영하는 세계 5위의 원자력 강국이지만, 사용후핵연료 처분 분야에서는 아직 영구처분장 부지 선정 절차조차 시작하지 못한 후발국이다.

다만, 우리 정부가 고준위 방사성폐기물 영구처분장 부지를 확보하기 위해 노력하지 않은 것은 아니다. 정부는 고준위 방사성폐기물 영구처분장 부지 선정 작업을 1980년대부터 시작했다. 울진·영덕·영일(1986~89년), 안면도(1990~91년), 굴업도(1994~95년), 부안군(2003) 등에 건설을 추진했으나, 9차례나 실패했다. 유치 지역에 대한 법률적 지원 근거가 없어 주민의 반대를 설득하지 못했기 때문이다. 여기에 정권이 교체될 때마다 부지 선정 계획이 수정되면서 일관된 정책 추진도 불가능했다.[17] 이에 따라 21대 국회에서는 영구처분장 등을 마련하기 위한 '고준위 방사성폐기물 관리 특별법' 제정안을 발의했으나, 여·야 정쟁으로 법률 제정이 무산됐다.

5. 향후 과제

우리나라가 사용후핵연료 장기적인 안전관리 기반을 완비하기 위해서는 현재 부족한 관리시설을 확보하고, 영구처분장 부지 선정에 관한 고준위 방사성폐기물 관리 특별법을 조속히 제정할 필요가 있다.

앞서 기술한 바와 같이 사용후핵연료는 오랜 기간 관리가 필요하다. 이 때문에 사용후핵연료를 장기간 안전관리를 하기 위해서는

17) 출처: https://www.dnews.co.kr/uhtml/view.jsp?idxno=202403021747240290317

처분 기술과 시설, 그리고 이들 기술이 시설의 지속성 보장을 위한 제도적 장치의 3박자가 갖춰져야 한다.

위의 3가지 측면에서 살펴보면, 우리나라는 관련 기술을 거의 갖춘 것으로 평가할 수 있다. 우선 사용후핵연료 저장 및 관리에 관한 기술은 갖춰진 것으로 보인다. 지금까지 사용후핵연료 저장 및 관리와 관련한 사고가 발생하지 않았다는 점이 이를 방증한다. 다만 사용후핵연료 영구처분에 관한 기술이 현재로선 부족하지만, 2029년이면 우리나라는 모든 사용후핵연료 처분 기술을 확보할 것으로 보인다.[18)]

시설 측면에서는 크게 부족해 보인다. 가장 시급히 확보해야 할 시설은 부지 내 저장시설이다. 우리나라 원자력발전소의 임시 저장시설 포화가 얼마 남지 않았기 때문이다. 앞서 설명했듯이, 임시 저장시설이 포화하는데 다른 저장시설을 구하지 못하면 원자력발전소를 더 이상 가동하기가 어렵다. 이렇게 되면, 원자력발전소의 대규모 정지에 따른 전력부족 사태가 발생해, 우리 경제에 치명적 타격을 줄 수 있다. 이러한 상황이 발생하지 않도록 추가 저장시설을 적기에 마련해야 한다.

또 확보해야 할 시설은 중간저장시설과 영구처분시설이다.

이들 시설은 우리나라의 사용후핵연료를 안전하게 저장 및 영구처분하기 위해, 또 원자력 이용 확대를 위해 꼭 필요한 인프라 시설이다. 하지만 이들 시설의 확보 여부는 국민 동의를 얻느냐에 좌우되므로, 지금부터라도 과학적 사실과 투명한 절차를 바탕으로 지역주민과 국민을 설득하는 작업을 꾸준히 해나가야 한다.

18) 출처: 사용후핵연료관리핵심기술개발사업단 홈페이지(https://www.iksnf.or.kr/)

마지막으로 제도적 장치 측면에서는 일부 보완이 필요하다.

우리 정부가 과거 9차례 방사성폐기물 처분장 부지 선정에 실패한 가장 큰 이유는 '정부 정책의 일관성 부재'였다. 이 문제를 해결하기 위해서는 정권 교체와 상관없이 일관되게 처분사업을 추진할 수 있는 제도적 장치를 마련해 놓을 필요가 있다. 「고준위 방사성폐기물 관리 특별법」이 제정되고, 영구처분장 부지 선정을 위한 절차가 시작될 수 있다. 21대 국회에서 4개의 법안이 발의됐으나, 여·야 정쟁 때문에 특별법이 통과되지 못했다. 국회는 22대 국회 임기 시작과 함께 영구처분장 등의 부지 선정에 관한 절차와 기준 등을 담은 특별법 제정 절차를 밟아 특별법을 조기에 통과시켜 줘야 한다.

지금까지 우리나라는 사용후핵연료를 안전하게 저장·관리해 왔다. 그러나 지금까지보다 더 오랜 기간 사용후핵연료를 안전관리하고, 궁극적으로는 영구처분까지 해야 한다. 이런 국가적 책무를 완수할 수 있도록, 정부는 현재 미비한 관리시설과 특별법이 조속히 마련될 수 있게 최선을 다해야 한다.

원자력발전, 오해와 진실

원자력발전은 꾸준한 연구 개발과 기술의 발전을 바탕으로 온실가스와 대기오염 물질을 배출하지 않으면서도 값싸고 질 좋은 전기를 공급해왔다.

또한 안전성의 측면에서도 일반인들의 오해와 달리 가장 우수한 축에 속하는 매우 안전한 에너지원이다.

신뢰성, 환경성과 경제성 등이 충분히 검증된 원전은 현재 인류가 직면하고 있는 가장 심각한 환경 위기인 기후위기에 대처하기 위한 가장 유효한 수단이다.

고범규

사실과 과학
네트워 정책
기획본부장

1. 들어가며

지난 정부가 추진한 에너지 정책의 방향은 탈원전 정책과 급격한 재생에너지 확대정책이라는 두 가지 키워드로 요약할 수 있다. 특히 문재인 전 대통령은 취임 첫해부터 상당히 강도 높은 탈원전 정책을 펼쳤는데, 대표적 사례를 살펴보면 다음과 같다. 신고리 5, 6호기 원전의 건설 일시중단, 신한울 3, 4호기 건설중단, 천지 원전을 비롯한 추가원전에 대한 건설허가 및 계획취소, 설비교체가 완료돼 새 원전과 동일한 상태로 볼 수 있었던 월성 1호기에 대한 계속운전 중단, 기존 원전에 대한 계속운전 불허방침 등이 대표적 사례다.

이처럼 탈원전 정책이 이뤄진 방식을 태양광으로 대상을 바꿔본다면 태양광 발전소의 신규건설을 금지하고, 착공 및 건설이 진행 중이던 태양광 발전소의 건설도 중단하며, 패널과 인버터를 전량 교체한 태양광 발전소를 노후 발전소라 부르며 폐쇄하고, 20년 이상 된 태양광발전의 정비에 따르는 설비 상태와 관련 없이 발전소의 연장운영을 금지한 것과 같다. 만약 이런 식의 태양광 관련 정책이 수립 및 추진된다면, 국내 태양광 산업 또한 크나큰 타격을 입을 수 밖에 없으며 급격한 반태양광 정책이 아니라고 하기 어렵다.

그러나 안타깝게도 원자력 및 재생에너지에 대한 담론은 정치진영 싸움의 도구로까지 변질되고 있다. 이처럼 소모적인 논쟁에서 벗어나 탄소 중립을 통한 우리나라의 산업과 경제의 지속성 보장을 위해 차분히 사실관계에 집중할 필요가 있다.

특히 원전 산업 분야는 우리나라가 에너지 산업 부문에서 상당한 경쟁력을 갖춘 분야다. 현 정부가 들어서면서 급격한 탈원전 정책에서는 벗어났지만, 그 후유증은 여전히 남아있다. 또한 정치 진영 논리에 따라 집권 정당이 바뀐다면 탈원전 정책이 다시 추진될 위험성도 여전히 높다. 따라서 탈원전 정책의 근본 배경 중 하나인 원자력발전에 대한 오해사례들을 살펴보는 한편, 사실관계를 대중에 알리고자 한다.

2. 탈원전 및 재생에너지 확대 추진의 전제 조건들에 대한 검토

지난 정부에서 추진됐던 탈원전 및 재생에너지 확대 정책의 기저에 깔린 정책 입안 및 결정권자의 인식을 몇 가지 살펴본다면 다음과 같이 요약할 수 있다.

① 원자력은 위험하고, 재생에너지는 안전하다.
② 원자력에는 숨은 비용이 있고, 재생에너지에는 숨은 비용이 없다.
③ 사용후핵연료는 10만 년간 보관해야 하기에 안전한 처분이 불가능하다.
④ 재생에너지 발전단가는 앞으로 원전 발전단가보다 저렴해질 것이다.
⑤ 재생에너지를 늘리면 온실가스를 감축할 수 있을 것이다.

⑥ 탈원전과 재생에너지 확대는 전 세계적인 추세이므로 우리도 따라가야 한다.

그러나 위에서 언급한 사항들은 대부분 단편적인 정보 및 일종의 가정을 기반으로 한 것들로 원자력발전을 둘러싼 진실과는 거리가 멀다. 또한 정확한 사실이 아닌 가정의 가정에 기반한 에너지 정책은 산업 경제와 국익에 크나큰 후유증을 남길 가능성이 크다. 그래서 정책 수립의 기반이 되는 정보는 사실과 사실의 집합으로 완성된 진실이어야 한다. 그렇다면 원자력에 대해 시중에 유통되고 있는 정보 중 무엇이 사실이고, 무엇이 거짓일까?

3. 원자력발전을 둘러싼 오해의 핵심은 방사선과 방사성 물질

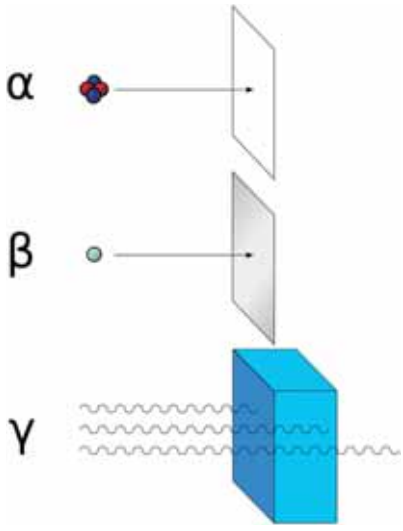
1) 방사선과 방사성 물질

방사선은 에너지를 띠고 전파되는 모든 종류의 입자선과 전자기파(=빛)를 통칭하는 개념이다. 방사선이 살아있는 세포에 영향을 끼치는 방식은 온도를 올리거나, 이온화 방사선처럼 세포 내 분자구조를 끊거나 변형시키는 방식 등이 있다. 특히 원자핵으로부터 전자를 떼어낼 정도로 에너지가 높은 방사선을 이온화 방사선, 혹은 전리 방사선이라 부르는데 우리가 흔히 알고 있는 방사선은 보통 이온화 방사선을 의미한다.

이온화 방사선의 종류에는 크게 알파선, 베타선, 중성자선과 같이 고에너지 입자의 흐름에 의한 것이 있고, 감마선, X선처럼 고에너지 전자기파(=빛)도 있다. 알파선의 정체는 헬륨 원자핵의 고에너지 흐름으로 분자구조를 직접 끊어낼 정도로 에너지가 높지만, 종이 한 장으로 차폐되며 공기 중에서 수 mm밖에 나아가지 못한다. 베타선은 고속으로 운동하는 전자의 흐름이며, 베타선이 다른 원자핵에 의해 제동을 당할 때 방출되는 빛이 X선이다. 감마선은 알파선 방출 등으로 들뜬[1] 상태의 원자핵이 내놓는 전자기파로 알파선과

베타선에 비해 에너지는 낮으나, 투과력이 높아 주된 관심의 대상이 되는 방사선이다.

[그림 1]
방사선 종류와 투과력 비교



2) 이온화 방사선이 인체에 영향을 끼치는 방식

이온화 방사선이 인체 내에서 주로 영향을 끼치는 방식은 활성산소종을 형성해 DNA 분자 구조 등을 끊어내는 방식인데, 이는 생리작용 과정에서 일상적으로 DNA가 절단되거나 변형되는 방식과 다르지 않다. 자연적으로 세포 1개당 하루에 생성되는 활성산소의 양은 90억 개이며, 이로 인한 DNA 손상도 매일 1000~100만 개가량 발생한다.[2)]

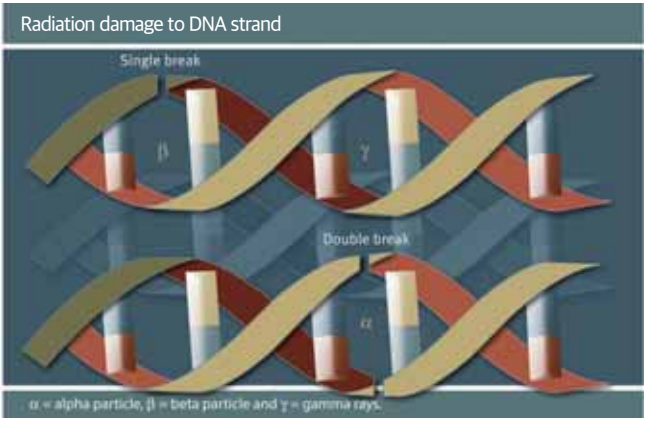
---

1) 바닥 상태에 있던 전자가 에너지를 흡수해 높은 에너지 준위로 이동하면 들뜬 상태에 놓이는데, 원자핵 역시 방사성 붕괴를 하는 과정에서 들뜬 상태가 된다. 전자 오비탈이 다양한 형태를 취하는 것과 마찬가지로, 원자핵 역시 에너지 준위에 따라 구형, 타원형, 서양배 모양, 도넛 모양 등 다양한 형태와 크기로 바뀌며, 들뜬 원자핵은 감마선을 방출하면서 바닥 상태로 변화한다.

2) Lodish H, Berk A, Matsudaira P, Kaiser CA, Krieger M, Scott MP, Zipursky SL, Darnell J. (2008).

1Gy(그레이)[3]의 이온화 방사선에 피폭된 세포는 단일 가닥의 경우 1천여 회, 이중 나선의 손상은 25~40회가 추가로 발생하게 되는데[4], 이렇게 손상된 DNA는 자가수복 기전에 의해 대부분 복구된다. 복구되지 않은 DNA의 경우 세포자살에 의해 제거되므로 이 경우에도 문제되지 않는다. 그러나 DNA가 복구되지도 않고, 세포자살에 의해 제거되지도 못한 경우 암세포로 변형이 되어 건강과 생명에 위협이 될 수 있다. 세포분열이 활발할수록 DNA가 손상된 세포의 수가 늘어나기에 방사선 피폭에 의한 암발병 위험은 영유아 집단에서 가장 높다.

[그림 2]
방사선 종류별 DNA 손상방식[5]



3) Gy(그레이)는 1kg의 물질에 1J(줄)의 에너지가 흡수됐을 때의 선량을 의미한다. 1Gy 방사선 급성피폭에 의한 세포 온도 상승은 0.00024도에 불과해 열에 의한 단백질 변성 효과는 무시되지만, 활성산소종 형성에 의한 DNA 손상 등으로 인해 오심, 무력감, 구토 증세와 같은 급성방사선피폭증후군(Acute radiation syndrome, ARS)을 일으킬 수 있다. 같은 선량을 장기간에 나눠 피폭당할 경우의 생물학적 영향은 세포 자가수복 기전에 의해 크게 줄어든다.

4) 방사선 이용 생체방어 기능성 식품 개발, KAERI/CM-1139/2004

5) UNSCEAR 2000

3) 저선량 방사선과 인체 영향

전 인구의 암 사망률은 18%가량인데, 100mSv[6]의 방사선에 단기 피폭이 되면 암사망률은 0.5%씩 증가한다. 즉, 100mSv의 방사선에 초과 피폭당하는 경우 암사망 위험도는 18%에서 18.5%로 증가한다고 볼 수 있다. 반면, 100mSv[7] 미만의 방사선에서는 급성 영향은 물론이거니와 만성적인 암발병률 역시 일관된 과학적 연구조사를 통해 입증되지 않았다.

이처럼 100mSv 미만의 선량에서는 암발병 위험이 증가한다는 확실한 과학적 근거가 없음에도 국제방사선방호위원회(ICRP)는 100mSv 미만에서도 암발병 위험성이 증가한다고 "가정"을 하고 방호원칙 수립에 활용하고 있다. 사실, 히로시마 원폭 피폭자들의 장기간 역학 조사 결과 등을 자세히 살펴보면 20mSv 부근 피폭자들의 경우 도리어 백혈병 등이 감소하는 방사선 호르메시스 효과도 관찰된다. 일정 수준의 선량에서 건강에 유익한 결과가 나타나는 방사선 호르메시스는 이외에도 여러 과학 연구조사에서 보고된 바 있다.

그러나 방호 관점에서는 호르메시스 효과 등은 모두 무시하고 유해성이 관찰되지 않는 선량인 100mSv의 100분의 1에 해당하는 1mSv를 일반인의 "비의도적 연간 권고 선량"으로 결정했다. 이렇게 결정한 이유는 X선 및 CT 촬영과 같은 의료 진단 목적의 의도적 방사선 피폭에 대비하기 위한 목적이 가장 크며, 일반인이 방사선 피폭관리를 굳이 할 필요가 없게 하기 위함이다. 또한 오늘날 산업안전법이나 발암물질에 대한 각종 법령 등은 석면, 벤젠, 비소, 기타 발암물질 등의 환경기준치를 추가발암확률 1/10,000에서

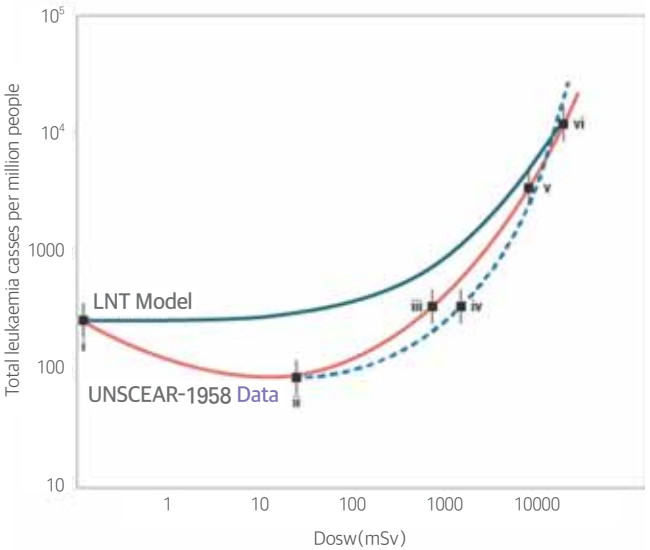
---

6) 유효선량 : 인체에 흡수된 방사선량에 조직별 민감도를 고려해 정량화한 수치. 따라서 방사선의 생물학적 영향의 정도를 판단하기 위해서는 유효선량의 크기로 판단함이 옳다. 단위로는 Sv(시버트), mSv(밀리시버트), μSv(마이크로시버트) 등을 사용한다.

7) 100mSv는 복부CT를 10회 촬영했을 때 받는 선량, 혹은 흉부 X레이를 1,000회 촬영했을 때 받는 선량에 해당한다.

1/1,000,000 사이에서 결정하는데, 연간 1mSv라는 권고기준 역시 이러한 맥락에서 이해해야 한다.

[그림 3]
히로시마 원폭 생존자들의 방사선 피폭량과 백혈병 발병률



출처: Cuttler 2013 & 2014/UNSCEAU

4) 방사선 피폭과 대기 오염물질에 의한 건강 영향 비교

방사선 피폭에 의한 인체 영향은 대부분 만성적 암발병률의 증가로 나타나며, 유전적 영향은 암발병 영향에 비해 훨씬 적다. 반면, 초미세먼지의 경우 만성적 암발병률의 증가와 유전적 영향, 그 이외 심혈관 질환의 증가 등 세간의 인식과 달리 방사선 피폭보다 훨씬 큰 건강 영향을 끼치고 있음이 반복적으로 확인되고 있다. 2016년 홍콩대학교와 영국 버밍엄대학교의 공동 연구에서 PM2.5에 해당하는 초미세먼지 농도가 10㎍/㎥ 증가할 때마다 모든 암 사망률이 22%가량 증가한다는 결과가 나왔다.[8] 이는 우리나라에서 수행된 메타분석에서도 엇비슷한 결과가 나온다. 명지대 김홍배 교수팀에

따르면 PM2.5에 해당하는 초미세먼지 농도가 10㎍/㎥ 증가할 때마다 모든 암 사망률이 17%가량 증가하는 것으로 나왔다.

[표 1]
초미세먼지와 방사선의 생물학적 영향 비교[9)]

	초미세먼지	방사선
유전적 영향	있음	있음
기형아 출생률	10㎍/㎥ 증가당 0.38~0.57% 증가[10)]	1000mSv 피폭량당 0.2% 증가[11)]
기형아 형성에 관계되는 시기	임신 12주 이내의 초기	임신 12주 이내의 초기
암 사망률	10㎍/㎥ 증가당 3% 증가[12)]	100mSv 증가당 0.5% 증가[13)]
국내 1인당 연평균 노출량	25㎍/㎥	7.29mSv[14)]
상대적 암사망 위험도	205.8	1
기타 만성적 영향	심혈관 질환 사망률 증가	없음

이러한 연구조사들을 참고한다면 연평균 초미세먼지 농도가 10㎍/㎥ 증가하는 것은 단일 피폭 사건을 기준으로 600~800mSv의 방사선에 추가 피폭당하는 것과 비슷하다고도 볼 수 있다. 이와 비슷한 수준의 방사선 피폭은 후쿠시마 원전사고에서조차 사고 당일 수소폭발이 발생했던 3호기 부근에 있던 원전 관리자 1명을 제외하면

8) Cancer Mortality Risks from Long-term Exposure to Ambient Fine Particle. Chit Ming Wong. et al.
9) 도표상의 수치는 공개된 논문자료를 바탕으로 한 산술적 계산이므로 이를 학술적으로 인용하는 것은 신중해야 한다.
10) Periconception Exposure to Air Pollution and Risk of Congenital Malformations, Sheng Ren et al.
11) BEIR3 Report, ICRP P103
12) Long-Term Exposure to Air Pollutants and Cancer Mortality: A Meta-Analysis of Cohort Studies. Hong-bae Kim et al.
13) ICRP P103
14) 자연방사선 피폭량 5.24mSv와 인공방사선 피폭량 2.05mSv(한국원자력안전기술원, 우리나라 국민의 자연 및 인공방사선 피폭량 조사)

없다. 심지어 주민집단에서는 인체에 유의미한 영향이 나올만한 100mSv를 초과하는 방사선 피폭조차 없었다. 이런 이유로 방사선 관련 전문가들 사이에서는 후쿠시마에서 연 단위를 초과하는 장기 피난 조치가 과도한 조치였다는 지적도 있다.[15)]

4. 원전사고는 인류의 생명과 안전에 치명타를 가하는가?

1) 방사선에 의한 영향도 양적 축적이 질적 영향을 판가름한다

앞에서 언급한 것처럼 100mSv 미만의 방사선 피폭량은 인체에 유의미한 영향을 끼치기 어렵다. 그러나 앞서 지적한 것처럼 유전적 독성을 지니는 발암물질의 환경 기준치는 경험적으로 관찰되는 역치와 사회적, 환경적 상황 등을 종합 고려해 1/10,000~1,000,000의 추가발암확률 미만으로 제한한다. 발암물질을 비롯한 인체에 위해성을 지니는 물질에 대한 방호 및 관리 기준에는 보수성이 필요하다고 인정되기 때문이다. 이러한 측면을 고려해 원자력 발전소나 화력 발전소[16)] 주변 거주민에 대한 추가 방사선 피폭에 대한 환경 기준치는 연간 0.1~1mSv 사이로 제한하고 있다. 따라서 노심용융과 같은 최악의 원전사고가 발생하더라도 주변에 거주하는 이들의 추가피폭량이 일반인의 비의도적 피폭 권고선량인 1mSv를 넘지 않는다면 충분히 안전한 원전으로 평가할 수 있다. 그렇다면 실제 상업적으로 가동되고 있는 대형 원전에서의 관리 수준 및 실적은 어떠할까?

---

15) J-value assessment of relocation measures following the nuclear power plant accidents at Chernobyl and Fukushima Daiichi. Process Safety and Environmental Protection, 112A, 16-49. DOI: 10.1016/j.psep.2017.03.012

16) 석탄화력발전소 운영과정에서도 석탄에 포함된 우라늄과 토륨 등의 자연방사능 물질로 인해 발전소 주변에 거주하는 주민들의 방사선 피폭이 발생하며, 이는 통상적인 가압수형 경수로 주변 거주민이 피폭당하는 것보다 3~6배가량 더 많다.(참고문헌 : Radiological Impact of Airborne Effluents of Coal-Fired and Nuclear Power Plants, ORNL)

2) 가압수로형 경수로는 중대사고에서도 안전성을 입증한 원전

대규모 상용원전에서 노심이 녹아내리는 심각한 사고가 발생한 사례는 스리마일 원전사고, 체르노빌 원전사고, 후쿠시마 원전사고, 이렇게 세 가지다.

노심용융 사고가 원전에서 발생 가능한 가장 심각한 사고인 이유는 평소엔 원자로와 핵연료봉 안에 머물러 있어야 할 핵분열생성물이 끓는점이 낮은 물질부터 기화해 원자로 외부로 새어 나올 수 있기 때문이다. 특히 세슘은 끓는점이 671℃로 비교적 낮은 데다 생성 수율이 높고 반감기도 30년 정도여서 중대사고 발생 시 외부 환경에 가장 큰 영향을 끼치는 핵분열생성물이다.

[표 2]
핵분열생성물 종류에 따르는 물리적 특성

	끓는점	반감기	비고
Xe-133 (비활성 기체)	-108℃	5.25일	
I-131 (할로젠 원소)	184℃	8.02일	
Cs-137 (알칼리 금속)	671℃	30.1년	중대사고 발생 시 외부 환경에 가장 큰 만성적 영향을 끼침
Sr-90 (알칼리 토금속)	1382℃	28.8년	
Pu-239 (악티늄족 원소)	3232℃	24,065년	

체르노빌 원전은 흑연을 감속재로 하는 비등형 원자로로 고유안전 설계[17]가 이뤄져 있는 서방의 경수로와 달리 일정한 출력범위에서

17) 원자로에서 핵분열이 원활히 이뤄지기 위해서는 중성자가 적절한 속도로 감속이 돼야 한다. 이처럼 중성자 감속을 위해 쓰이는 재료를 감속재라 불리는데, 체르노빌 원전은 고체인 흑연을 감속재로 사용했고, 서방의 경수로는 물을 감속재로 사용한다. 경수로는 특정 원인으로 중성자 수가 갑자기 증가하면 핵분열 횟수가 증가하게 되고 이에 따라 출력이 급상승한다. 출력이 급상승하면 감속재이자 냉각재인 물의 온도가 급격히 증가하게 되고, 물의 부피가 팽창하면서 밀도는 떨어지게 된다. 물의 밀도가 감소하면 단위부피당 중성자의 속도를 늦추는 물의 양이 줄어들게 되므로 중성자와의 충돌 횟수가 줄어든다. 이에 따라 원자로의 출력과 온도는 다시 내려가게 된다. 이처럼 경수로에서 출력에 따른 변화가 발생할 때, 변화에 대한 영향을 억제해 처음의 출력 상태로 되돌리는 특성을 고유 안전성이라 한다.

출력 폭주 위험성이 있는 원자로였다. 구소련의 원자력 전문가들은 이러한 위험성에 대해 경고한 바 있으나, 소련 공산당이 이를 묵살했다. 전문가 집단의 의견이 정치적 이유로 받아들여 지지 않았던 것이다. 또한 체르노빌 원전에는 방사성 물질의 유출사고 발생 시 최후의 보루라 할 수 있는 격납용기도 없어서 방사성 물질의 외부 유출을 막아낼 수 없었다.

한편 후쿠시마 원전은 물을 감속재로 사용했기에 체르노빌과 달리 출력 폭주가 일어나지 않는 고유안전설계가 되어있다. 그러나 원자로 안에서 물을 직접 끓여서 발생시킨 증기가 격납용기 바깥을 나가서 터빈을 돌리기 때문에 가압수로형 원자로에 비해 중대사고 발생 시 취약한 부분이 있다. 또한 방사성 물질의 외부 유출을 막기 위한 격납용기는 있었지만, 크기가 작고 부실했다.

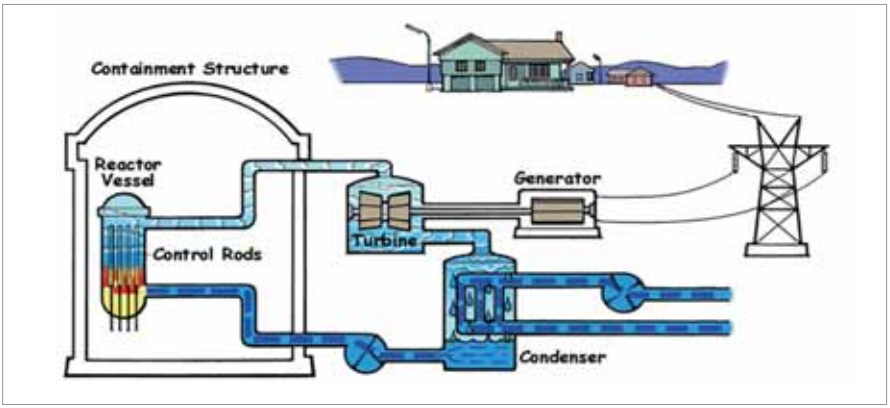
반면, 스리마일 원전은 앞의 두 원자로와는 달리 가압수로형 경수로로 중탕의 원리로 물을 끓이기에 원자로 내부의 물이 격납용기 바깥으로 나가지 않는다. 또한 1.2미터 두께의 아주 견고하고 부피가 큰 대형 철근콘크리트 격납건물[18] 내부에 원자로를 수납하고 있었기에 노심용융 사고 및 소규모 수소 폭발에도 불구하고 방사성 물질의 외부 유출이 발생하지 않았다.

이처럼 똑같이 노심용융 사고가 발생해도 원자로의 유형에 따라 결과는 완전히 달라진다. 우리나라의 모든 원전은 방사성 물질의 외부 유출이 발생하지 않았던 스리마일 원전사고와 같은 유형의 가압수로형 원자로만 건설-운영하고 있으며, 사고 당시의 스리마일 원전보다 안전성이 훨씬 향상돼 있다.

---

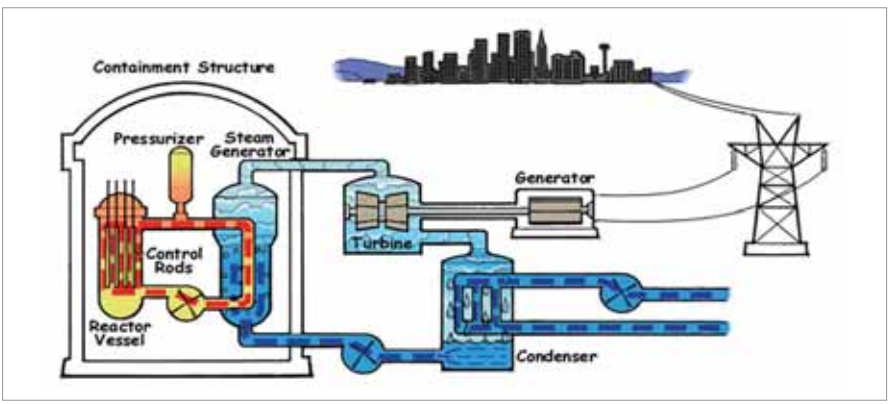
18) 격납건물은 항공기충돌, 폭탄테러, 규모 9.0에 해당하는 지진발생 등 극한상황에서도 견딜 수 있을 정도로 매우 견고하며, 노심손상과 같은 중대사고 발생 시 내부의 방사능 물질이 유출되지 않도록 막는 최후의 보루다. 체르노빌 사고 발생 이후 방사성 물질의 추가 유출이 발생하지 않도록 만든 '석관'이라 불리는 콘크리트 구조물의 역할이 바로 격납 건물의 역할이다. 즉, 체르노빌은 사고가 발생하고 나서야 격납건물을 세웠지만, 서방의 가압수로형 원전은 처음부터 격납건물 안에 원자로를 수납한다는 점에서 안전성의 격차가 매우 크다.

[그림 4]
비등형 경수로 발전구조(BWR MARK3 이후 버전)[19]



따라서 우리나라에서는 노심이 녹아내리는 최악의 사고가 발생해도 유해성이 관측되는 100mSv는 고사하고 평상시 권고선량인 1mSv를 초과하는 방사선 피폭조차 발생하기 어렵다.

[그림 5]
국내 가압형 경수로 발전구조[20]



19) 후쿠시마 제1원전과 제2원전, 오나가와 원전 등에 건설된 노형은 BWR MARK1으로 비등형 경수로의 초창기 모델에 해당하며, 대형 격납 건물이 없었다. 그러나 BWR MARK3부터는 가압형 경수로와 마찬가지로 대형 격납건물 내부에 원자로를 수납하기 때문에 중대사고 발생 시 안전성이 크게 향상됐다.(그림 출처 : 미국 원자력안전규제위원회)

20) 출처 : 미국 원자력안전규제위원회(NRC)

[표 3]
원자력발전소 중대사고 사례 비교

		스리마일 2호기	후쿠시마 제1원전	체르노빌 사고
노심 사고 발생 호기 수		1	3	1
사고원인		기기고장, 운전원 실수	쓰나미에 의한 침수	설계결함 및 운전원 과실
설비용량(MW)		959	2,028	1,000
세슘137 누설량		1.2m 두께 PC구조 대형 격납건물	3cm 두께 강철 재질 소형 격납용기	없음
세슘137 누설률		0PBq	6~20PBq (1.9~6.3kg)	85PBq (26.6kg)
방사선 피폭 사망자		0명	0명	43명 (암 사망자 포함)
대피면적, 인원	초기	200㎢ 면적, 임산부와 어린이 임시대피	1,150㎢ 면적, 164,865명 대피	4,000㎢ 면적, 335,000명 반영구 소개
	2018년 말	없음	371㎢ 면적, 43,214명	초기방침 유지

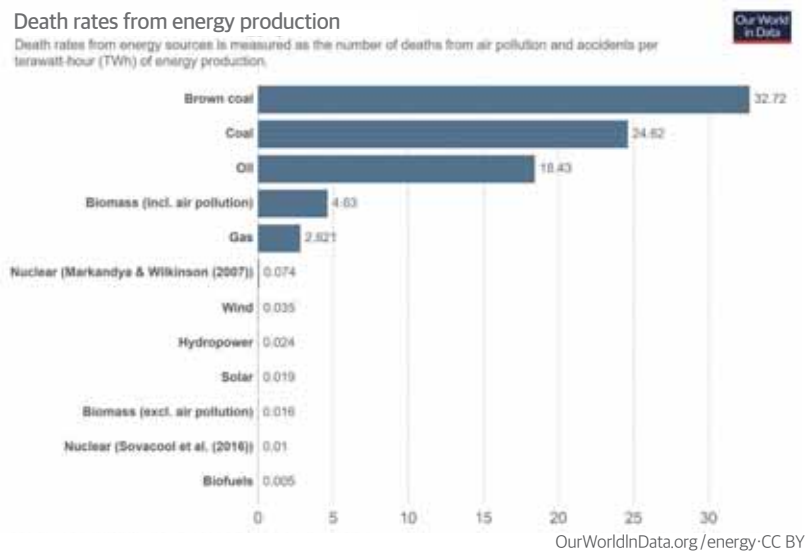
출처: UNSCEAR 2000 Report, ANNEX J: UNSCEAR 2013 Report, ANNEX A

5. 원전은 가장 안전한 에너지원

1) 에너지원별 수명주기 사망 발자국과 원전 안전성의 우수성

앞에서 언급한 모든 요인들을 종합 검토할 때 체르노빌 원전사고와 후쿠시마 원전사고의 사례를 감안해도 원자력 발전소는 매우 안전한 에너지원이다. 최악의 원전사고인 체르노빌에서조차 방사성 물질에 의한 영향은 일반인들의 인식과는 달리 매우 제한적인 영향만 나타났으며, 후쿠시마에서는 아예 방사선 피폭 관련 사망자가 발생하지 않았다. 이러한 이유로 자원채굴, 원료가공, 수송, 발전소 건설, 운영, 폐로, 폐기물 처리 등 수명주기 전 과정에 걸쳐 환경영향 및 중대사고로 인한 사망자수를 다른 에너지원과 비교할 때 원자력 발전소는 1TWh 전력 생산량당 0.074명의 사망자가 발생해 태양광 및 풍력발전과 비슷한 수준의 안전성을 지닌다.

[그림 6]
1TWh 전력 생산량당 치명률



출처: Markandya & Wilkinson (2007); & Sovacool et al.(2016)

2022년 3월 유럽 공동연구위원회(EU JRC)에서 내놓은 최신자료에서도 이는 반복적으로 확인이 되는데, 에너지원별 1조 KWh당 중대사고 치명률의 비교에서 석탄은 14명, 천연가스는 8명, 해상풍력은 1명, 2세대 원전은 0.5명, 육상풍력은 0.2명, 태양광은 0.03명, 3세대 원전은 0.0008명으로 3세대 원전이 가장 안전한 것으로 나타났다.[21)]

2) 국내 발전현장 산업재해 발생에서도 원전이 가장 안전

모든 산업현장과 마찬가지로 전기를 생산하는 발전소 역시 산업재해가 발생하며, 그로 인한 사망자도 발생한다. 발전소 현장에서

21) 국내 원전에서는 고리 1호기~OPR1000(한국형표준원전)까지가 2세대에 해당하고, 신고리 3, 4, 5, 6호기 및 신한울 1, 2호기의 노형인 APR1400은 3세대에 해당한다.

발생하는 치명적인 산재 사망사고의 유형으로는 추락, 전도, 협착, 감전, 질식, 온열, 화재사고 등이 있다. 이 중 故 김용균 씨 사망사고를 계기로 한동안 관심의 대상이 됐던 국내 화력발전소의 경우 2013~2018년 사이 26명이 목숨을 잃었다. 그러나 국내의 모든 석탄 및 가스화력발전소에서 발생하는 산재 사망자보다 많은 노동자가 목숨을 잃는 발전현장은 다름 아닌 태양광 발전소다. 조사 기간이 조금 다르지만, 태양광 발전소 현장에서는 2014~2019년 사이 34명이 산업재해로 목숨을 잃었다. 반면, 원전은 같은 시기 7명이 목숨을 잃어 가장 적은 산재 사망자가 발생했다.

원전은 건설과 정비 기간을 제외하면 작업자들이 발전현장에 투입되는 일이 매우 드물며, 고밀도 에너지 생산으로 안전 매뉴얼 개발과 작업자 관리가 상대적으로 용이하기 때문이다. 반면, 태양광발전은 토지집약적, 노동집약적 특성을 지니기 때문에 발전단가를 낮추려면 저렴한 인건비에 의존한 건설비 및 정비단가 낮추기가 필수적이다. 이러한 사정상 국내에서 태양광 발전소 건설 및 정비는 영세 사업자들에 의해 주도적으로 이뤄지며, 안전관리에 대한 비용투자 및 매뉴얼 개발에 상대적으로 소홀해지기 쉽다.

6. 원전은 사후처리 비용을 포함해 비싸지는가?

반핵운동을 하는 이들을 중심으로 사후처리비용에 대해서도 몇 가지 잘못된 정보가 여전히 유통되고 있는데 요약하면 다음과 같다.

1) 원자력발전은 사용후핵연료 처리비용과 폐로비용 등 숨은 비용이 반영돼 있지 않다.
2) 발전단가에 사후처리비용 반영은 돼 있는데, 다른 나라에 비해 터무니없이 낮은 가격이 책정돼 있다.

결론적으로 이러한 주장은 허위정보이다. 원전의 발전단가에는 7~8원/kWh 정도의 사후처리 비용이 이미 반영되어 적립되고 있다.

[표 4]
연도별 국내 원전 사후처리비용 적립금

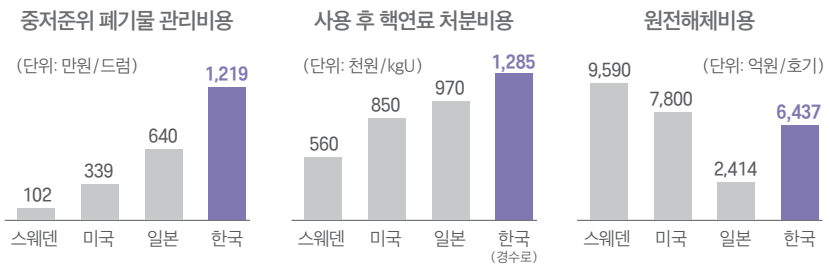
연도	호기당 폐로비용 (단위 : 억 원)	사용후핵연료 처리비용 (단위 : 억 원/다발)		중저준위 폐기물 처리비용 (단위 : 만 원)
		경수로	중수로	
2015	6,437	3.2	0.132	1,219
2016	6,437	3.2	0.132	1,219
2017	7,515	3.2	0.132	1,373
2018	7,515	3.2	0.132	1,373
2019	8,129	3.2	0.132	1,519
2020	8,129	3.2	0.132	1,519
2021	8,129	3.2	0.132	1,519

출처 : 공공데이터 포털(한국수력원자력㈜_원전 사후 처리비용 납부 기준단가_20210701)

그럼에도 2020년 원전 발전단가는 59원/kWh이었고, 이 중 8원/kWh 정도가 한수원의 마진에 해당했다. 즉, 원전의 손익분기점에 해당하는 발전단가는 사후처리비용을 모두 포함하고도 50원/kWh 대 초반인 것이다.

조금 더 자세히 살펴보면 중저준위폐기물 처리비용과 사용후핵연료 처리비용은 다른 나라보다 더 높은 금액을 책정해 적립하고 있으며, 원전 해체비용의 경우 2016년도까지는 호기당 6,437억 원, 2021년에는 8,129억 원을 책정해 적립하고 있다.

[그림 7]
각국 사후처리 비용 비교



출처 : '14년 방폐기금 운용계획, 한국원자력연구원 - 고준위폐기물시스템 기술현황,프랑스회계 감사원 - 프랑스의 원자력 비용('12.1월)

폐로비용에서 가장 큰 비중을 차지하는 것은 노무비용이기에 이마저도 일본이나 미국, 스웨덴과 같은 국가들의 임금 수준과 우리나라의 임금 수준을 고려한다면 충분한 비용을 적립하고 있다고 할 수 있다.

더불어 태양광 발전소에는 아직 폐기물 처리비용 및 발전소 해체비용, 원상복구 비용 등이 반영돼 있지 않다. 따라서 사후처리비용을 이유로 원전이 태양광 발전소보다 앞으로 비싸질 것이라고 주장하는 것은 오류다.

7. 원자력 발전소는 처분하기 어려운 대량의 폐기물을 남기나?

이것 역시 사실이 아니다. 원자력 발전소는 전기 생산을 위해 매우 적은 부피의 핵연료가 사용된다. 예를 들어 1GW의 한국형 표준원전 1기를 1년간 운영하기 위해 필요한 핵연료봉은 40개 정도인데, 이러한 핵연료봉은 적당히 이격거리를 둬도 1.5평의 공간 안에 모두 보관할 수 있다. 반면, 원자력발전 없이 태양광발전 비중을 늘리기 위해서는 역설적으로 화석연료인 LNG 화력 발전소의 비중을 늘리는 것이 불가피한데, 1GW의 원전과 동일한 전력량을 LNG로 1년간 생산하려면 30만 평 넓이에 해당하는 삼척 LNG기지[22]의 모든 저장 탱크를 꽉 채울 정도로 많은 연료가 필요하다.

열과 방사선을 내뿜는 사용후핵연료를 기준으로 본다면, 원자로에서 꺼낸 직후의 사용후핵연료는 물속에서 보관해야 하지만, 5~10년이 경과한 뒤에는 캐스크(Cask)라 불리는 용기에 집어넣고 공기 중에서 보관하는 것이 가능해진다.

스위스의 중간저장시설[23]의 경우 가로세로의 길이가 각각 68미터와

22) 강원도 삼척시 원덕읍이 소재지이며, 총 저장용량 261만 KL에 달하는 초대형 LNG 저장시설

23) https://www.zwilag.ch/

41미터 크기의 공간인데, 이 정도의 공간이면 원전 3기를 47년간 가동할 때 발생하는 모든 사용후핵연료를 보관할 수 있다. 사용후핵연료 저장용기는 미사일에도 견뎌낼 정도로 견고하며, 방사선 차폐가 완벽하기에 저장시설 내부는 방호복 없이도 활동 가능하다.

[그림 8]
삼척 LNG 저장시설

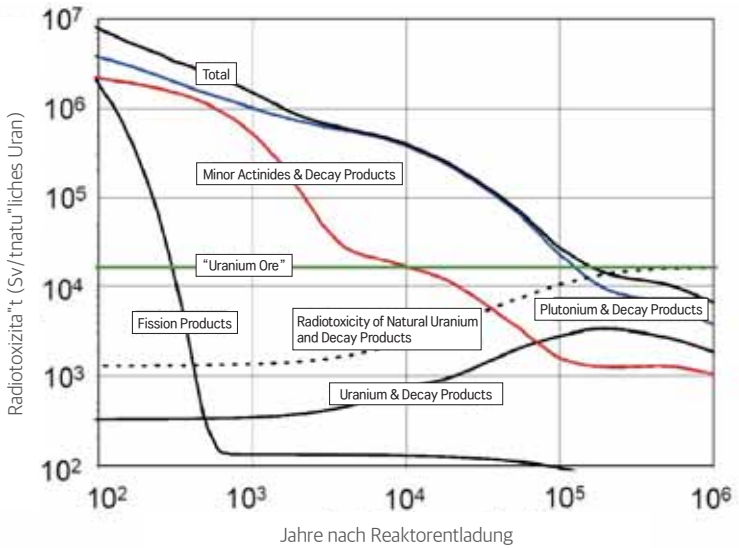
[그림 9]
스위스 사용후핵연료 중간저장시설

8. 사용후핵연료를 10만 년간 "보관"해야 한다는 주장에 대한 검토

반핵단체와 상당수의 언론은 사용후핵연료가 방출하는 공간 방사선량이 0.2~0.3% 정도의 품위에 해당하는 우라늄 원광과 비슷해지는 기간을 오해해 사용후핵연료는 10만 년간 "보관"해야 한다고 주장하는 경우가 많다. 그러나 사용후핵연료의 영구처분은 보관이 아닌, 묻어놓고 잊어버리는 개념에 가깝다.

우라늄 원광이 내뿜는 방사선량은 품위에 비례하는데, 1% 품위의 천연 우라늄은 1미터 거리에서 0.083mSv/h 정도의 공간 방사선량을 내뿜는다.[24] 오늘날 세계에서 소비되는 우라늄의 10%가량이 10~20%에 달하는 고품위 우라늄이며, 수십 년 전에는 30%나 되는 매우 높은 품위의 우라늄 광산도 존재했다.

[그림 10]
처분 후 시간 경과에 따르는 방사선량 감소추이



24) Mark Sonter(2000)

이러한 고품위 우라늄의 상당수는 영구 처분장보다 훨씬 깊이가 얕은 위치에 매장돼 있는 경우가 많다. 심지어 국내에도 소량이긴 하지만 9~10퍼센트 품위의 천연 우라늄이 사람들이 많이 다니는 경기도의 한 야산의 지표면 부근에 매장돼 있기도 하다.[25)]

[그림 11]
약 1~2% 품위의 우라늄이 지표에 노출된 경기도의 한 야산[26)]

이렇게 지하에 매장돼 있는 우라늄이나 토륨, 혹은 사용후핵연료는 공간 방사선량보다는 처분장과 처분장이 모두 파괴될 경우 지하수를 통해 내부의 물질이 어느 정도의 환경 영향을 끼칠 수 있느냐가 핵심이다. 그러나 지하수에 녹을 수 있는 세슘 등의 핵분열생성물은 300~600년 정도의 시간이 경과하면 모두 사라지고 플루토늄이나 초 우라늄 핵종과 같은 장수명 핵종은 물에 거의 녹지 않기 때문에 환경에 대한 영향력이 극히 미미하다.

이러한 이유로 실제 사용후핵연료의 지하수에 대한 환경독성은 300년이 경과한 뒤에 3% 품위의 우라늄 원광, 혹은 약 6% 품위의 납 원광과 비슷한 수준으로 떨어진다.[27)]

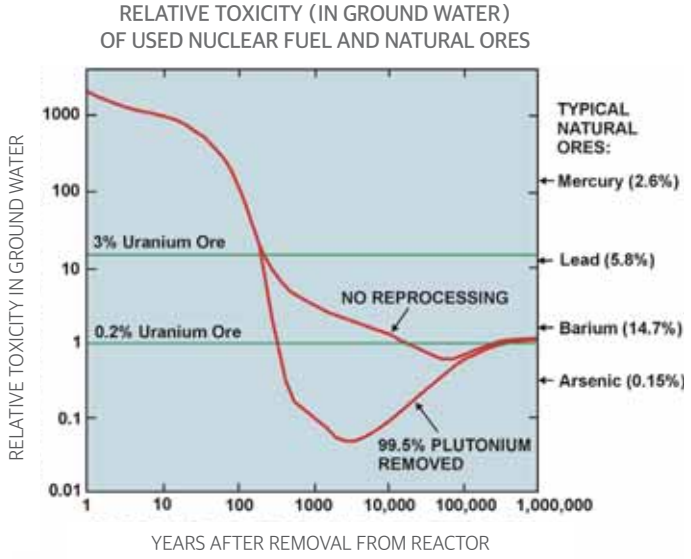
---

25) 양평지역 우라늄 광상조사연구(KIGAM, 1980)

26) 시간당 113마이크로시버트(필자가 직접 측정), 이 야산에는 이 지점에 노출된 우라늄보다 최대 5배 높은 고품위 우라늄도 소량이지만 지표면 부근에 존재한다.

27) 납 원광은 보통 아연과 함께 존재하며, 국내의 아연-납 매장량은 1,737만 톤, 품위는 2~46% 범위 내에 있다. 아연-납 원광에서 납은 30% 정도의 비율을 차지한다.

[그림 12]
광물 종류 및 품위에 따르는 지하수 독성 크기 비교



출처: J.Boulton, Ed., 'Management of Radioactive Fuel Wastes; The Canadian Disposal Program', AECL-6314, 1978.Adapted for the Canadian Nuclear FAQ, www.nuclearfaq.ca

지하수 독성을 지니는 수많은 중금속 및 지하광물 광산은 채산성이 떨어질 경우 무방비하게 방치되거나 지하수 환경에 대한 적절한 조치 없이 폐광처리가 되는 경우도 많다. 반면 사용후핵연료는 내식성이 탁월하고 연성과 전성이 뛰어난 구리로 밀봉한 다음, 벤토나이트라고 불리는 흡착성이 아주 뛰어난 점토 물질로 되메움 처리까지 한 뒤에 500~1,000미터 깊이의 심지층에 처분한다. 따라서 사용후핵연료는 현재의 기술로도 안전하게 처분 가능하다.

여기에 그치지 않고 재처리와 고속로의 연계 및 토륨을 원료로 사용하는 용융염 원자로가 개발되고 있다. 이 기술로 유형의 원자로 및 사용후핵연료 처리기술은 폐기물의 부피를 1/5~1/100 수준으로 줄일 수 있다. 우리나라는 탈원전 정책 때문에 사용후핵연료의 건식재처리 및 소듐냉각고속로 연구가 사실상 중단 상태에 놓여있었으나 벨기에를 중심으로 여러 국가들이 참여하는 MYRRAH를 비롯,

세계 각국에서 중대사고를 원천적으로 차단하면서 사용후핵연료의 양을 절대적으로 줄이는 연구가 진행되고 있다.

9. 재생에너지 발전단가는 원전 발전단가보다 낮아질 것인가?

모든 발전 산업은 초기에는 많은 비용이 들어가지만, 반복적인 플랜트 건설을 통해 건설비용을 낮추게 된다. 미국이나 유럽 국가들의 경우 오랜 기간 원전 건설을 중단하면서 건설 노하우와 인프라를 상실했고, 이로 인해 대형원전 건설비용이 높아지게 됐다. 그러나 우리나라는 외국과는 상황이 다르다. 우리나라는 원전 건설을 꾸준히 반복하면서 노하우를 축적했고, 그 결과 설계 요건대로 정확히 건설하면서도 건설비용을 낮출 수 있게 됐다.

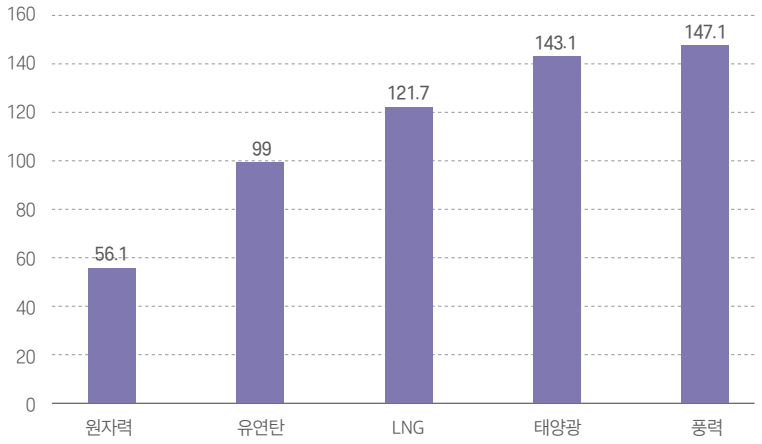
[그림 13]
대한민국의 연도별 원전 건설비용[28)]

28) Historical construction costs of global nuclear power reactors, Jessca R. Lovering et al.(Overnight Cost 기준)

원전 발전단가의 상당 부분은 건설비용에 의해 결정된다. 미국이나 프랑스 등의 국가는 앞에서 짚은 것처럼 건설 노하우를 상실한 상태이기 때문에 신규원전의 건설비용도 비싸고, 발전단가 역시 높다. 그러나 우리나라는 신규원전을 기준으로 하더라도 발전단가가 60원/kWh 부근으로 낮게 유지되고 있다. 앞에서 짚었지만, 원전 발전단가에는 당연히 사용후핵연료 처리비용 및 중저준위 폐기물 처리비용, 폐로 비용 등이 이미 넉넉히 반영돼 있다.

한편 최초 운영허가 기간이 만료된 원전에 대해서도 설비교체 및 안전성 평가를 거쳐 계속 운전을 하게 되면 발전단가는 더 낮출 수 있게 된다. 최초운영 허가가 만료된 원전은 초기투자비용이 모두 환수된 상태이기 때문에, 운영비용과 사용후핵연료 처분비용 등만 발전단가에 포함하면 되기 때문이다. 이러한 이유로 신규원전의 발전단가가 60원/kWh 내외인 것과 달리 20년간 계속 운전을 하는 원전의 발전단가는 30~45원/kWh 수준으로 매우 저렴하다.

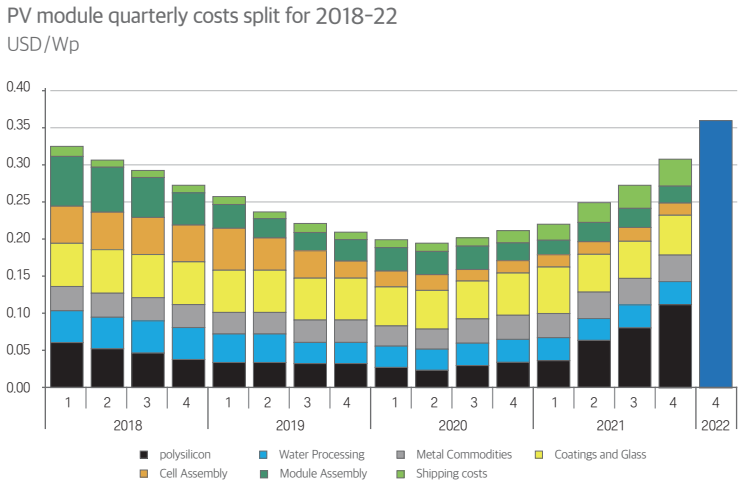
[그림 14]
에너지원별 2021년 발전단가[29)]



29) 전력거래소

태양광발전소의 경우 일조량이 우수하고, 토지비용과 인건비가 저렴한 국가에서는 우리나라의 원전만큼 값싼 전기를 생산할 수 있다. 그러나 우리나라는 인구대비 국토면적이 좁으며 인건비도 상대적으로 비싸고, 일조량도 미국이나 호주 등의 국가들보다 불리하다. 태양광 발전단가를 좌우하는 것은 건설비용인데, 모듈 가격이 건설원가에서 차지하는 비중은 이미 30% 정도의 수준까지 떨어졌다.

[그림 15]
2018~2022년 1분기 태양광 모듈 가격 추이



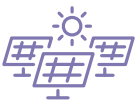
나머지는 공사비용과 자재비용, 인허가 비용 등이 차지하고 있으며, 이들 비용은 극적인 절감이 어렵다. 이러한 이유로 2020~2023년 사이의 4개년간 3MW 설비용량의 상용태양광 건설단가는 약 124만 원~136만 원/KW 범위에서 오르내리며 큰 변화를 보이지 않았다.[30)]

이러한 상황을 고려할 때 장기적으로 태양광 발전단가가 100원/kWh 안팎의 수준으로 내려가는 것까지는 가능할지 몰라도 원전 수준으로 떨어지는 것은 적어도 우리나라에서는 매우 어렵다.

30) 재생에너지 공급확대를 위한 중장기 발전단가(LCOE) 전망 시스템 구축 및 운영 (4/5, 에너지경제연구원)

또한 변동성과 간헐성이 심한 태양광 발전 및 풍력발전의 특성상 비중이 증가하게 되면 송배전 비용 부담을 크게 늘리게 되기 때문에 경제성을 고려할 경우 우리나라에서 변동성 재생에너지의 비중을 늘리는 것은 아주 신중히 접근해야 한다.

10. 우리나라가 독일처럼 탈원전을 하고 태양광·풍력발전 비중을 늘린다면?



원전과 재생에너지가 현재 이슈화되고 있는 이유는 이들이 인위적 온실가스 배출의 증가로 인해 발생하는 지구 온난화 및 기후위기에 대비하기 위한 수단이기 때문이다. 그러나 탈화석 에너지 정책을 추진하는 방법은 각 나라의 자연적 여건과 산업 경제의 상황, 기술적 수준에 따라 선택하는 것이 바람직하다. 지난 정부에서 추진한 에너지 정책에 큰 영향을 끼쳐온 반핵성향의 환경 운동가들은 독일을 에너지전환 성공 사례로 보고, 우리나라가 따라가야 할 롤모델로 주장하는 경향이 있다. 그러나 위에서 언급한 것처럼 독일과 우리나라의 여건이 다르기 때문에 독일의 에너지 정책을 무작정 따라하는 것은 위험하다. 게다가 독일은 탈원전과 재생에너지 확대정책을 추진했을 뿐, 전력생산 부문에서 온실가스 감축을 하고 있다고 보기 어렵다.

전력공급의 전제 조건은 다음과 같다.

1) 전기는 저장이 매우 어렵기에 수요량과 생산량이 거의 동일해야 한다.
2) 전력수요와 전력 생산량의 균형이 조금이라도 틀어지면 전력품질 저하로 이어지며, 심할 경우 대정전(블랙아웃) 사태가 벌어진다.
3) 전국적 규모의 대정전 사태는 복구에 수주~수개월이 소요되며, 대지진이나 슈퍼태풍에 비견할 만한 천문학적 인명피해와 재산피해를 야기한다.

4) 따라서 어떠한 경우라도 대정전 사태는 피하도록 전력수급 계획이 치밀해야 한다.

5) 전력수요는 주간에 증가하고, 야간에는 감소한다.

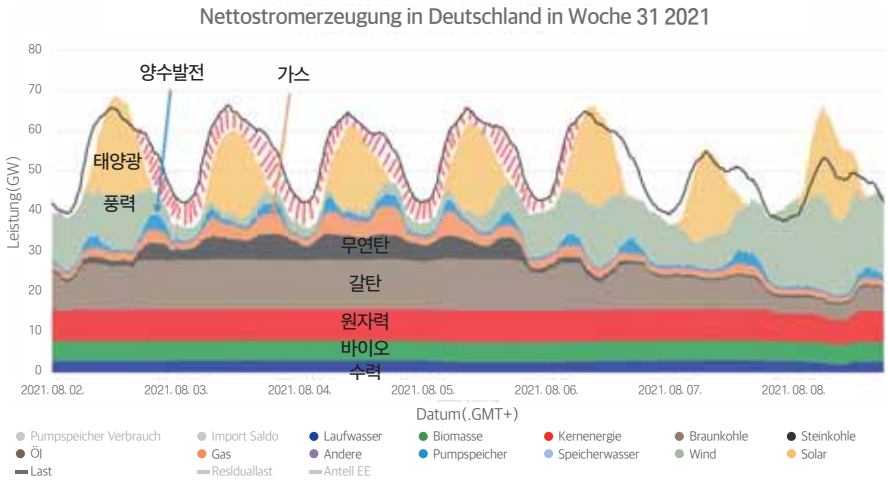
6) 태양광과 풍력발전은 낮과 밤의 변화, 날씨 등에 따라 전력 생산량이 0~100% 사이에서 급격히 변화하는 양상을 보인다.

7) 변동성 재생에너지의 비중이 늘어나면 가스 화력발전과 석탄화력발전의 출력을 수시로 조정해야 한다.

8) 발전설비는 정상 가동을 위해 정기적인 정비와 수시 정비를 하므로 필요에 따라 아무 설비나 가동할 수 있는 것이 아니다.

위의 전제 조건을 기반으로 독일의 상황을 짚어보면, 2021년 말을 기준으로 독일의 태양광과 풍력발전 비중은 전체 전력생산량의 28.9%나 됐다. 그러나 태양광과 풍력발전은 낮과 밤의 변화와 구름의 양, 바람의 양에 따른 전력 생산량의 변화폭이 크다. 이러한 이유로 독일은 가스와 무연탄, 갈탄, 양수발전소까지 총 동원해 수시로 출력조정을 해야만 했다.

[그림 16]
독일 2021년 8월 2일~8일 전력수급 현황[31)]



31) https://www.energy-charts.info/index.html?l=de&c=DE

[그림 16]은 2021년 8월 2일부터 8월 8일까지 독일의 전력수요(검은색 곡선) 및 에너지원별 발전현황인데, 풍력발전량의 변동이 심했음을 볼 수 있다. 그리고 이로 인한 전력공급 불안정성을 보완하기 위해 화석연료인 가스 화력발전과 무연탄, 갈탄, 양수발전의 출력을 수시로 조정했다. 그렇게 했음에도 필요한 전력수요를 감당하지 못하는 날도 발생했음을 알 수 있다. 특히 붉은색 빗금으로 표시한 영역이 부족한 전력량이며, 90시간 동안 약 600GWh에 달하는 전력을 수입했다.

독일은 유럽 대륙의 중앙부에 위치하면서 인접 국가와 전력망 공유를 하고 있기에 모자라는 전력을 프랑스 등 이웃 국가에서 수시로 끌어오는 것이 가능하며, 반대로 남는 전력을 수출하는 것도 가능하다. 그러나 우리나라는 에너지섬으로 고립된 국가이기 때문에 양수발전소나 에너지 저장 시스템(Energy Storage System, 이하 ESS) 배터리를 대대적으로 늘려 충분한 양의 전력을 항상 보관해 두고 있어야 한다.

만약 위의 빗금 친 영역을 ESS 배터리를 통해 공급한다면 수백 조 원 단위의 막대한 비용이 필요하다. 그러나 우리나라는 독일과 달리 풍력 자원이 부족하며, 수력 자원도 부족하기 때문에 변동성이 더욱 심한 태양광 위주의 재생에너지 확대정책을 펼칠 수밖에 없다. 이렇게 되면 우리나라는 훨씬 많은 ESS 배터리 확보를 위해 천문학적인 비용을 투자해야 한다.

러·우 전쟁 등의 여파로 인한 여파로 전기요금이 크게 상승한 2023년도에도 한전의 연간 전기판매수익은 총 83조 원이었다. 이러한 점을 고려해본다면 전기요금과 산업 경제의 결합이 매우 긴밀한 우리나라에서 ESS 설비 확보에만 수백 조 원 이상 투자하는 것은 자기 파괴적 행동에 가깝다.

11. 배울점이 전혀 없는 독일 발전 부문 온실가스 배출량

더 큰 문제는 비용적인 손해를 감수하고 탈원전·재생에너지를 늘린다 해도 원래의 목표인 발전 믹스에서의 온실가스 감축이 실패할 수 있다는 점이다. 실제로 2019년과 2021년 사이 독일의 전체 전력 믹스에서 배출된 온실가스의 양은 우리나라와 비슷했다.

구체적으로 살펴보면 2019년 독일과 우리나라의 전력 생산량은 각각 603TWh와 563TWh였고, 화석에너지 비중은 각각 44%와 66%로 우리나라의 화석에너지 비중이 독일보다 약 50%가량 높았다. 그러나 독일의 발전부문 온실가스 배출량은 2억 5,900만 톤, 우리나라는 2억 5천만 톤으로 두 나라의 발전부문 온실가스 배출량에는 의미 있는 차이가 없었다.

2021년도에도 이러한 양상은 마찬가지였다. 2021년 독일과 우리나라의 전력 생산량은 각각 584.5TWh와 576.8TWh로 거의 비슷했으며, 발전부문 화석에너지 의존률은 각각 44%와 65.4%였다. 두 나라의 총발전량 격차가 줄어들고, 화석연료 의존율의 격차가 비슷했다면, 우리나라가 훨씬 많은 온실가스를 배출해야 하지만, 결과는 비슷했다. 2021년 독일 발전부문 온실가스 배출량은 2억 4,700만 톤으로 소폭 감소한 반면, 우리나라 전환부문에서는 2억 1,800만 톤으로 감소했다. 이는 같은 기간 우리나라 발전부문에서 석탄발전량이 감소하고 원전의 전력생산량이 증가했기 때문이다.

화석연료 비중과 온실가스 배출량 사이의 불일치가 벌어지는 이유는 독일이 탈원전 정책을 채택하면서 노후 석탄발전소를 유지해온 탓도 있으나, 태양광과 풍력발전이 변동성 재생에너지라는 점도 영향을 끼친다. 태양광발전은 구름이 없거나 적은 낮 시간대에만 하루 평균 3.5시간에 불과한 전력생산이 이뤄지고, 풍력발전은 초속 4~25m 사이의 바람이 불 때 전력생산이 가능하기 때문에 하루평균 발전 시간이 5.3시간에 불과하다. 게다가 구름의 양과 바람의 속도에 따라 전력 생산량도 들쭉날쭉 실시간으로 변화하기 때문에 전력수요에 맞추기 위해서는 [그림 16]에서 볼 수 있는 것과 같이 가스화력발전소와 석탄화력발전소의 출력을 수시로 조정해야 한다.

급가속과 급정지를 반복하는 자동차의 연비가 나빠지는 것과 마찬가지로 가스화력발전소나 석탄화력발전소도 출력을 수시로 조정하게 되면 연료소비 효율이 나빠지고 온실가스 배출량이 증가하게 된다. 우리나라도 전 정부가 강력한 탈원전 정책과 재생에너지 설비의 급격한 증가를 추진하면서 전력공급 불안정성이 커지게 됐고, 이에 대비하기 위한 LNG 화력발전소의 수시 기동 횟수가 급격히 증가하고 있다.

[표 5]
연도별 LNG 화력발전소 수시가동 횟수

2017년	2018년	2019년	2020년
8,536회	8,959회	9,392회	10,789회

석탄화력발전소 및 가스화력발전소의 수시가동에 따르는 온실가스 배출량을 줄이자면 무탄소 전기로 생산된 ESS 배터리의 양을 훨씬 많이 늘리는 길밖에 없는데, 이러한 방법은 앞에서 살펴본 것처럼 천문학적인 비용이 들기 때문에 우리 현실에서 채택하기 어렵다.

12. 원자력과 재생에너지, 적대적 관계가 아닌 상생의 길을 모색할 때

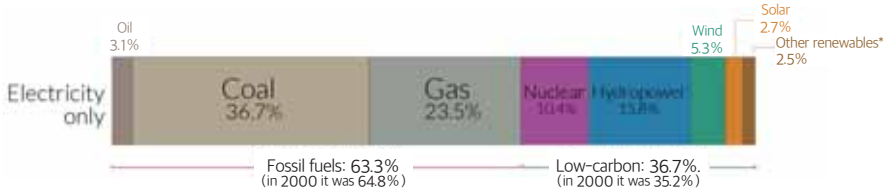
1) 수력 자원이 부족한 여건에서 설치 위주의 변동성 재생에너지 정책은 지양해야

재생에너지는 자연환경에 크게 좌우되는 에너지원이기 때문에 다른 나라의 사례를 보고 무작정 따라 하면 크게 낭패를 볼 수 있다. 예를 들어 2020년 기준 전 세계적으로 재생에너지 비중은 26.3%[32]에 달하지만, 그 실상을 자세히 들여다보면 수력발전이 15.8%, 풍력발전이 5.3%로 태양광발전 비중은 고작해야 2.7%에 불과하다.

32) BP Statistical Review of World Energy 2020.

그러나 우리나라는 유감스럽게도 수력 자원이 크게 모자란 탓에 수력발전의 비중이 0.74%, 풍력발전 역시 0.55%로 풍력발전을 주도하는 유럽 국가들과는 비교 불가능일 정도로 기본적인 재생에너지 환경이 열악하다.

[그림 17]
에너지원별 2020년 세계 전략생산 비율



반면 그나마 유리한 태양광발전에서는 이미 2013년도부터 매년 신규태양광 설비 기준으로 세계 10위 안에 드는 국가였다. 그러나 태양광발전소도 인구대비 국토면적이 좁은 우리나라의 여건을 고려하면 아주 신중히 접근해야 한다.

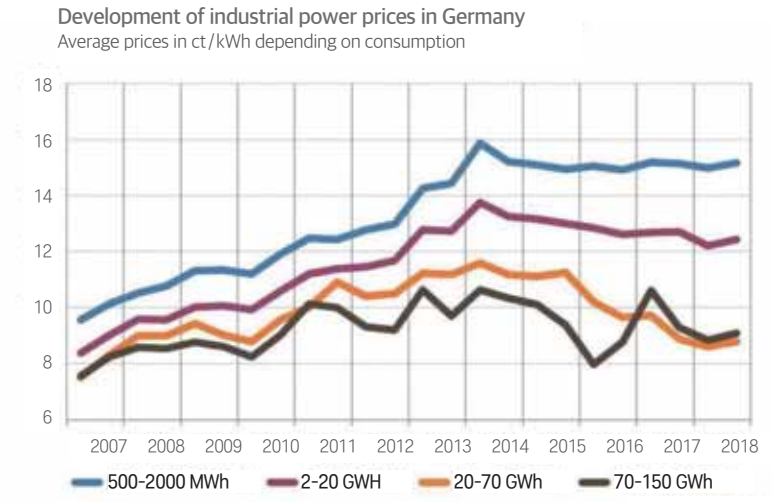
예를 들어 설비용량 6.04GW인 당진 석탄화력발전소를 태양광발전소로 대체하려 한다면, 30GW 안팎의 초대형 태양광발전 설비가 필요한데, 이를 건설하기 위해서는 서울 면적의 절반에 가까운 광대한 건설부지가 필요하다.

이러한 상황을 고려할 때 석탄화력발전소는 원전으로 대체하고, 태양광발전과 풍력발전은 수출시장을 염두에 둔 산업적 측면에서 접근하는 것이 바람직하다.

2) 재생에너지 산업, 원자력발전이 든든히 뒷받침할 수 있다

지난 정부에서 탈원전 정책에 큰 영향력을 행사한 반핵성향의 환경단체 인사들은 원전이 재생에너지 산업의 성장을 가로막는다고 주장하면서 탈원전-재생에너지 정책의 추진으로 2030년도까지 재생에너지 관련 산업 일자리를 10만 명까지 늘릴 수 있다고 주장한 바 있다.[33] 이러한 주장은 우리나라의 산업 경제가 전력 소비와 아주 밀접한 결합이 돼 있다는 점을 간과한 것이다. 우리나라 외에도 일본과 독일, 대만과 같이 제조업 혹은 수출산업의 비중이 높은 국가들에서 값싼 전력을 공급하는 원자력과 같은 전원이 흔들리거나 무너지게 되면 산업 경제 전반이 위기에 처하게 된다. 이러한 이유로 우리와 마찬가지로 제조업의 비중이 높은 독일은 [그림 18]에 보이는 것처럼 대규모 제조공장일수록 전기요금을 적게 내도록 요금체계를 개편하고 있다.

[그림 18]
독일 산업용 전기요금



출처: VCI 2019

33) 신고리 5, 6호기 공론화위원회 자료집

특히 태양광산업의 경우 잉곳과 폴리실리콘 제조산업 등 고부가가치 산업에 해당하는 영역에서는 제조비용의 35~50%를 전기요금이 차지한다. 그래서 태양광산업이 성장하는 초기 단계에는 값싸고 안정적 전력을 공급해줄 수 있는 원자력과 같은 기저 전원의 역할이 매우 중요하다. 그래서 정말로 태양광을 비롯한 재생에너지 산업을 성장시키고 고용인원을 늘리고자 했다면, 원전 설비용량을 단계적으로 늘리고, 이를 바탕으로 산업용 전기요금 체계를 개편한 뒤 태양광 산업에 대한 보조금 지원을 해야 했다.

그러나 지난 정부에서는 원전 비중을 줄여나가면서 재생에너지의 비중을 늘리는 정책을 선택했다. 결과적으로 국내의 태양광발전 설비용량은 매년 세계 상위 10개국에 들어가는 기염을 토했지만, 문재인 대통령 임기 내내 태양광산업은 수출감소와 고용자 수 감소추세에서 벗어나지 못했다.

[표 6]
연도별 국내 재생에너지 산업 고용인원

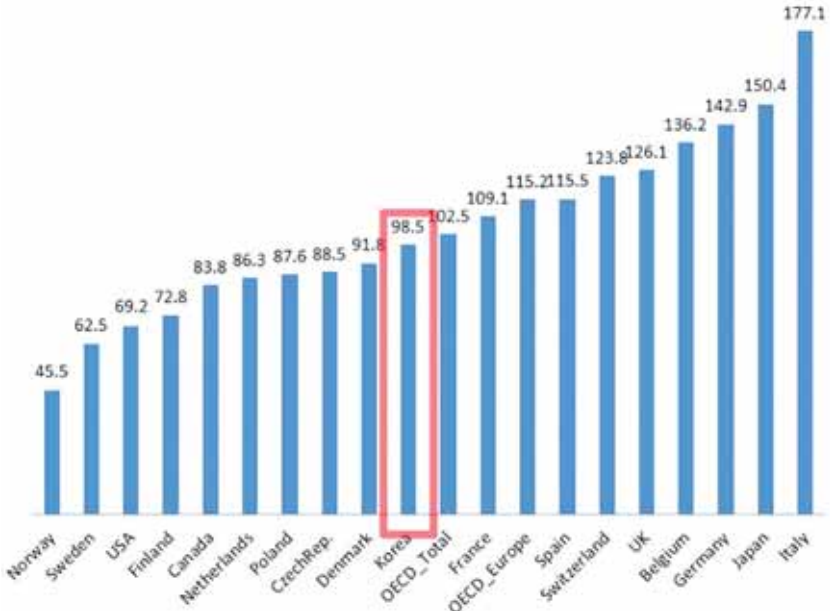
구분	2015년	2016년	2017년	20108년	2019년
태양광	8,639	8,360	7,909	7,732	7,538
태양열	229	219	195	140	85
풍력	2,232	1,718	1,778	1,580	1,524
연료전지	748	675	751	827	815
지열·수열	587	464	360	346	305
수력	83	86	100	79	71
바이오	1,493	1,604	1,647	1,595	1,750
소계	**14,011**	**13,126**	**12,740**	**12,299**	**12,088**
폐기물[주1)]	1,899	1,454	1,662	1,531	390
합계	**15,910**	**14,578**	**14,402**	**13,830**	**12,478**

주1) 근거법령 개정에 따라 2019년 실적부터 폐기물에너지 중 비재생폐기물은 조사대상에서 제외
*원별 고용인원 해당 에너지원 품목별 고용인원의 합계임
※기 공표된 2019년 이전 수치에 응답오류 등이 발결돼 일부 정정함

늦은 감이 있지만, 국내 재생에너지 산업의 불씨는 원자력발전을 기반으로 하는 산업용 전력요금 체계 개편을 통해 되살릴 수 있다. 태양광발전 및 풍력발전 설비의 건설은 우리의 여건을 고려할 때 주력 에너지원으로서의 위치가 아닌, 해외 시장으로의 진출을 염두에 두고 기술 실증 차원에서의 건설 및 설치가 이뤄져야 한다.

현재 국내의 가정용 전기요금은 적자를 감수하고 책정되고 있기 때문에 OECD 국가 중 가장 저렴한 편에 속한다. 그러나 산업용 전기요금은 OECD 평균보다 살짝 저렴한 수준을 유지하고 있어서 제조업 수출의 비중이 높은 우리나라의 상황을 고려할 때 요금체계를 손질할 필요가 있다.

[그림 19]
OECD 주요국 산업용 전기요금



결론적으로 국내 재생에너지 산업의 부흥을 위해서는 원전의 뒷받침이 반드시 필요하다. 온실가스 감축의 핵심동력 및 재생에너지 산업 성장을 위한 지원군으로서 원전의 설비용량은 40% 이상을 목표로 점진적으로 늘리는 한편, 재생에너지는 해외 시장 진출을

목표로 하고 국내에서의 재생에너지 설치는 이를 뒷받침하기 위한 실증적 차원에서의 사업추진을 해나감이 바람직하다.

또한 우크라이나 전쟁 발발을 전후로 천연가스가 에너지 수급 안보의 측면에서 불안정한 에너지라는 것이 드러나면서 신규원전 건설을 추진하는 국가가 늘고 있다. 프랑스는 14기의 신규원전을 건설하기로 했으며, 영국도 9기의 신규원전을 건설하기로 했다. 꾸준히 원전 건설을 반복해온 우리나라는 정해진 기간 안에 설계 요건대로 정확히 원전을 건설할 수 있는 거의 유일한 국가다. 그래서 신한울 3, 4호기 등 신규원전 건설재개를 바탕으로 해외에 우리나라 원전을 수출해야 한다.

원자력발전은 꾸준한 연구 개발과 기술발전을 바탕으로 온실가스와 대기오염 물질을 배출하지 않으면서도 값싸고 질 좋은 전기를 공급해왔다. 또한 안전성의 측면에서도 일반인들의 오해와 달리 가장 우수한 축에 속하는 매우 안전한 에너지원이며, 사용후핵연료 등 폐기물 처리에 대한 대책도 확실히 마련돼 있다. 이처럼 신뢰성과 환경성, 경제성 등이 충분히 검증된 원전은 현재 인류가 직면하고 있는 가장 심각한 환경 위기인 기후위기에 대처하기 위한 가장 유효한 수단이다. 따라서 당분간은 원전을 중심으로 온실가스를 감축하고 산업용 전기요금 체계를 개편하여 현재를 살아가는 우리들의 이익과 미래 후손들의 이익을 동시에 도모하는 것이 현명한 선택이다.

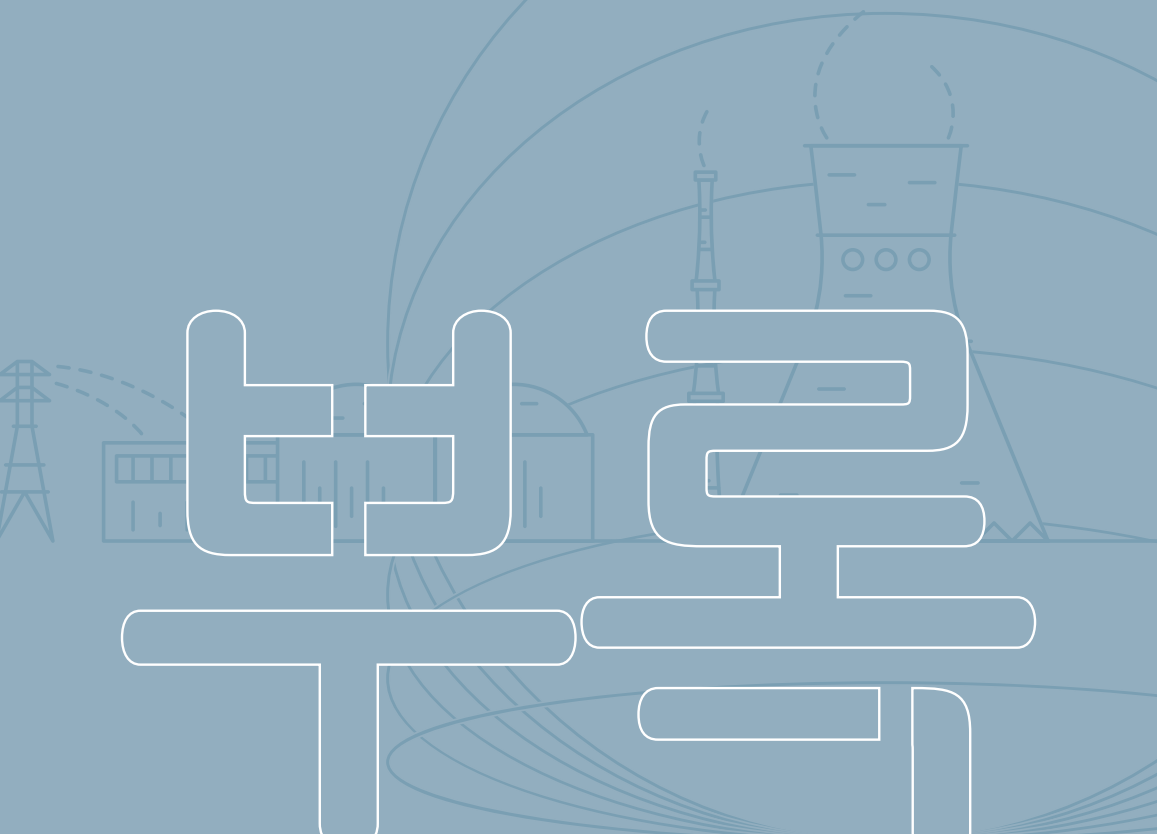
2024년 에너지 국민인식조사 결과보고서

한국에너지정보문화재단은 2023년 하반기부터 원자력 및 에너지에 대한 국민의 인식을 조사하기 위해 일반 국민과 원전 소재 지역 주민을 대상으로 설문조사를 실시하고 있습니다.

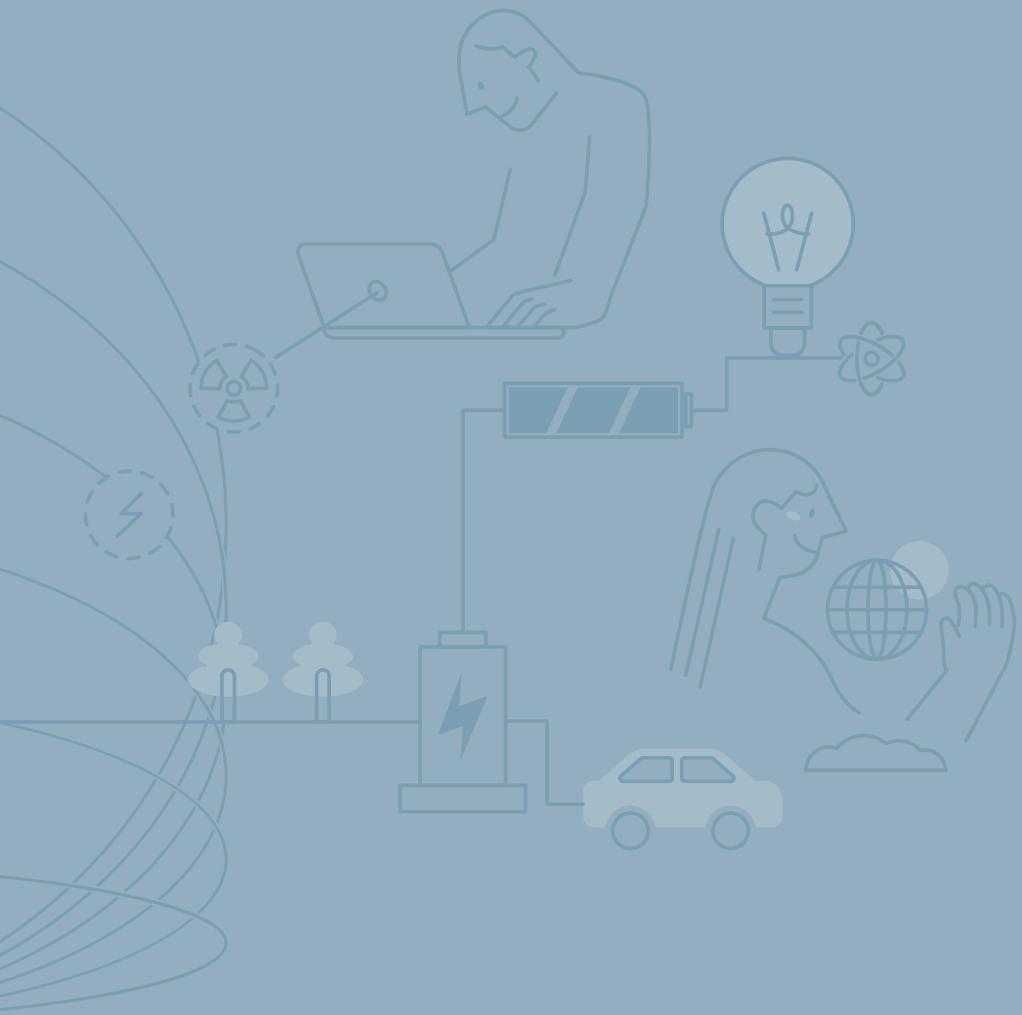
2024년 상반기, 일반 국민과 지역 주민을 대상으로 원자력 및 에너지 인식 조사를 실시했습니다.

일반 국민 조사는 전국 16개 시·도에 거주하는 만 18세 이상의 성인 남녀 1,000명을 대상으로 1차는 2024년 3월 28일부터 31일까지, 2차는 6월 2일부터 5일까지 두 차례에 걸쳐 유·무선 RDD 전화조사(CATI) 방식으로 진행되었습니다.

지역 주민 조사는 원전이 소재한 기장군, 울주군, 경주시, 영광군, 울진군에 거주하는 만 18세 이상의 주민 1,000명을 대상으로 2024년 5월 20일부터 6월 5일까지 가구 방문 대면 면접조사(TAPI) 방식으로 실시되었습니다.



지속적인 조사를 통하여 국민과 지역 주민의 원자력 및 에너지에 대한 인식을 파악하고, 에너지 정보 제공 및 정책 개발에 반영하여 국민의 에너지 이해도를 높이는 데 기여하고자 합니다.



제1장 조사 개요

1. 조사 결과 요약

1) 조사 개요

조사기간

- 일반국민 1차: 2024.3.28(목) ~ 3.31(일) / 4일간
- 일반국민 2차: 2024.6.2 (일) ~ 6.5 (수) / 4일간
- 지역주민 1차: 2024.5.20(월) ~ 6.5 (수) / 17일간

조사대상

- 일반국민 조사: 전국 16개 시·도 18세 이상 성인 남녀 1,000명 (95% ±3.1%p)
- 지역주민 조사: 원전 소재 지역 (기장군, 울주군, 경주시, 영광군, 울진군) (거주 만 18세 이상 지역 주민 1,000명(95% ±3.1%p)

조사방법

- 일반국민 조사: 유·무선 RDD를 통한 전화조사(CATI)
- 지역주민 조사: 가구방문을 통한 대면면접조사(TAPI)

실사기관

㈜코리아리서치인터내셔널

2) 조사 목적

본 조사는 에너지·원자력에 대한 국민들의 인식과 가치를 파악함으로써 대국민 에너지 소통 방안 모색 및 우리나라 에너지정책 수립에 필요한 기초 자료를 제공하기 위해 기획

[그림1] 조사목적

조사 대상	조사 내용	활용 방안
전국 16개 시·도 거주 만 18세 이상 성인남녀	원자력발전에 대한 인식 + 원자력발전 관련 향후 정책 방향 인식 + 원자력발전 관련 현안에 대한 인식	에너지·원자력에 대한 국민인식과 가치 파악 + 대국민 에너지 소통 방안 모색 + 향후 에너지정책 수립의 기초자료로 활용

3) 조사 설계

[일반국민 전화조사 설계]

구 분	내 용
조사 대상	만 18세 이상 일반 국민
조사 지역	전국 16개 시·도 *세종특별자치시의 경우 충청남도에 포함
표본 규모	1차 : 유효표본 총 1,000명 2차 : 유효표본 총 1,000명
표본 오차	95% 신뢰수준에서 ±3.1% Point
표본 배분	1차 : 2024년 2월 말 기준 행정안전부 주민등록 인구통계 기준 비례배분 2차 : 2024년 4월 말 기준 행정안전부 주민등록 인구통계 기준 비례배분
표본 추출	1단계: 16개 시·도별 층화 후, 인구비례에 근거한 표본 할당 2단계: 성/연령별 인구 구성비에 근거한 비례 할당 3단계: 전화번호 무작위 추출 및 유·무선임의전화걸기 (RDD)
조사 방법	유·무선 임의 전화번호 걸기(RDD: Random Digit Dialing)를 이용한 전화면접조사(CATI : Computer Aided Telephone Interview)유선(10%) 무선(90%)
조사 기간	1차: 2024년 3월 28일(목) ~ 3월 31일(일) (4일간) 2차: 2024년 6월 2일 (일) ~ 6월 5일 (수) (4일간)

[지역주민 대면조사 설계]

구 분	내 용
조사 대상	원전 소재 지역 거주 만 18세 이상 지역 주민
조사 지역	5개 원전 소재 지역 (기장군, 울주군, 경주시, 영광군, 울진군)
표본 규모	유효표본 총 1,000명
표본 오차	95% 신뢰수준에서 ±3.1% Point
표본 배분	1단계 5개 원전 소재 지역 시군별 균등 할당 2단계 5개 시군 내 동부/읍면부 및 주택유형별 비례배분
표본 추출	1단계 원전 소재 지역 내 집계구 확률비례계통추출 2단계 집계구 내 가구 계통추출 3단계 가구 내 최근 생일법에 따른 적격가구원 선정
조사 방법	전문 면접원에 의한 TAPI(Tablet Assisted Personal Interview) 활용 가구방문 대면조사
조사 기간	2024년 5월 20일 ~ 6월 5일

[지역주민 대면조사 설계]

구 분	내 용
조사 대상	에너지 및 원자력 관련 산학연 전문가
표본 규모	총 21명(학계: 10명 / 유관기관: 8명 / 민간기업: 3명)
표본 배분	임의 배분
조사 방법	개별심층면접(IDI, In Depth Interview)
조사 기간	2024년 6월 4일 ~ 28일, 25일간

2024 에너지 국민인식조사(상반기)

(단위 : %, n=1,000)

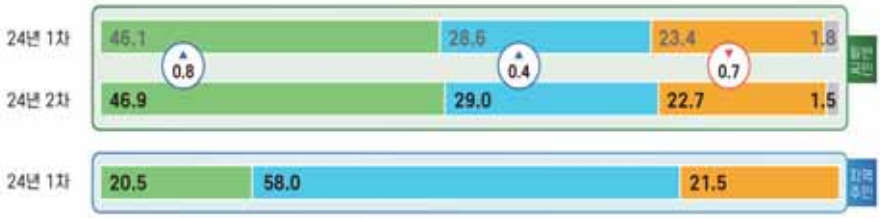
조사 개요

● 일반국민
- ✔ 조사 대상: 전국 만 18세 이상 일반국민
- ✔ 조사 방법: 전화면접조사
- ✔ 조사 기간: 1차 - 2024년 3월 28일 ~ 3월 31일 / 2차 - 2024년 6월 2일 ~ 6월 5일

● 지역주민
- ✔ 조사 대상: 원전 소재 지역 거주 만 18세 이상 지역주민(기장군, 울주군, 경주시, 영광군, 울진군)
- ✔ 조사 기간: 2024년 5월 20일 ~ 6월 5일
- ✔ 조사 방법: 가구방문 대면조사

✔ 조사 주관: 한국에너지정보문화재단 ✔ 조사 수행: ㈜코리아리서치인터내셔널

에너지 이용 관련 인식 (1순위 기준)



원자력발전 항목별 인지

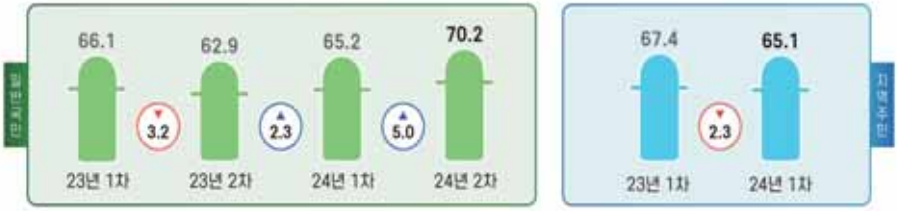
원자력발전 필요성 인식

한국에너지정보문화재단

2024 에너지 국민인식조사(상반기)

(단위 : %, n=1,000)

원자력발전소 안전성 인식



방사성폐기물 관리 안전성 인식

원자력 발전량 증가 필요 의견

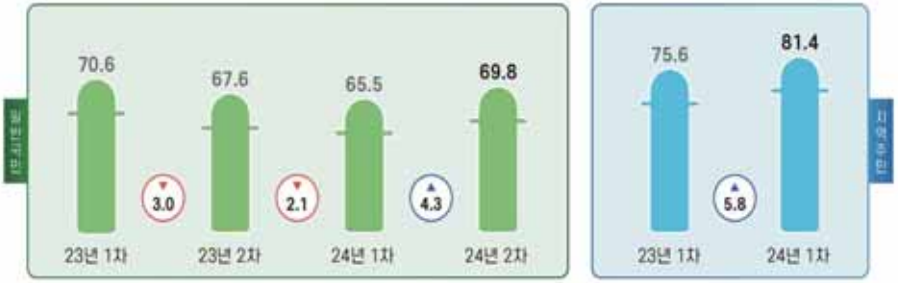
원자력발전소 거주지 수용성

한국에너지정보문화재단
Korea Energy Information Culture Agency

2024 에너지 국민인식조사(상반기)

(단위 : %, n=1,000)

원자력발전소 계속운전 의견



고준위 방사성폐기물 처분시설 시급성

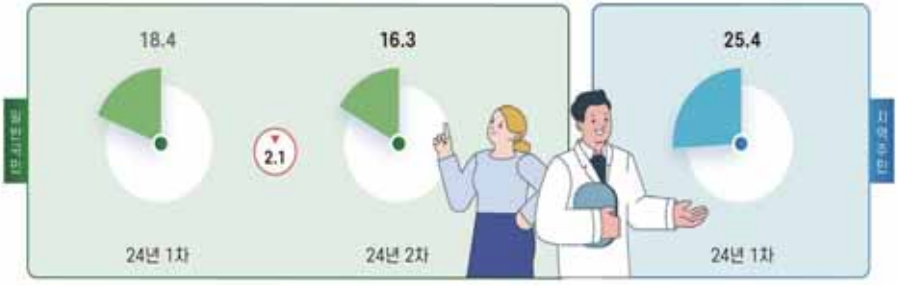
고준위 방사성폐기물 처분시설 거주지 수용성

한국에너지정보문화재단
Korea Energy Information Culture Agency

2024 에너지 국민인식조사(상반기)

(단위 : %, n=1,000)

고준위 방사성폐기물 특별법 미제정 인지



원자력발전 관련 정보 접촉 경험

관련 정보 접촉 매체 (Top 3)

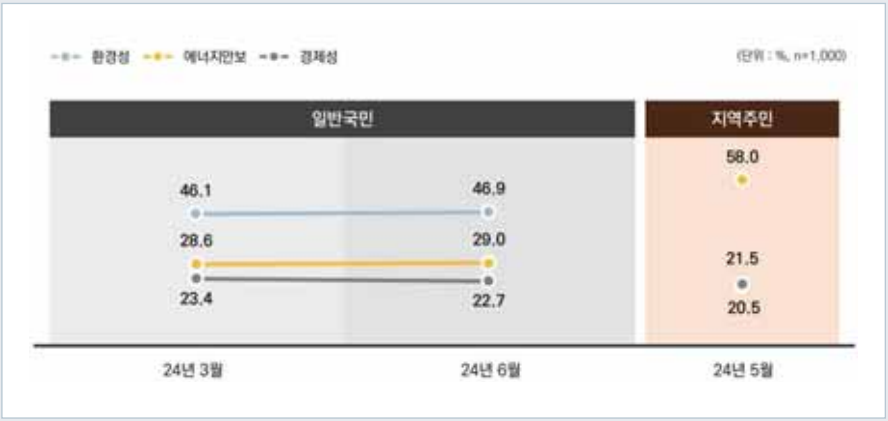
한국에너지정보문화재단
Korea Energy Information Culture Agency

제2장 조사 결과 분석

1. 에너지·원자력 발전에 대한 인지

1) 에너지 이용 관련 인식

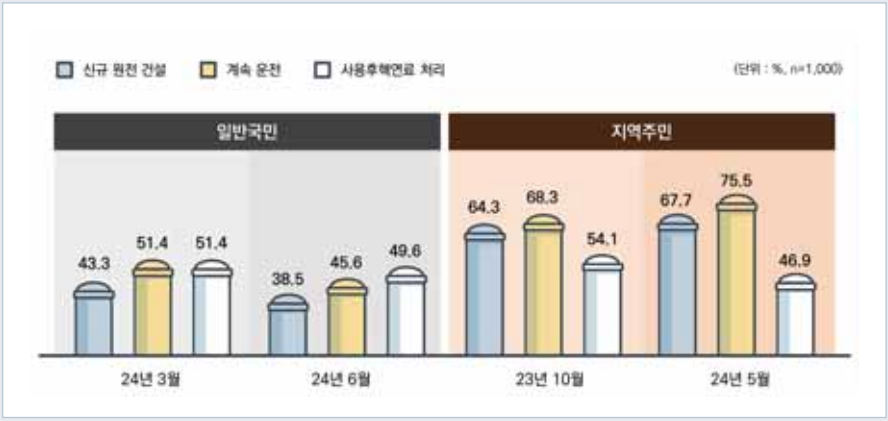
Q. 에너지 선택과 이용에 관련된 아래 요소 중, 중요하다고 생각하시는 순서대로 말씀해주세요.



에너지 선택과 이용에 있어 중요하다고 생각하는 요소를 물어본 결과, 일반국민은 '환경성 - 친환경성 및 지속가능성'이, 원전 지역주민은 '에너지안보 - 안정적인 에너지 공급'이 가장 높게 나타남.

2) 원자력발전 항목별 인지

Q. 선생님께서는 원자력발전과 관련된 아래 사항에 대해 얼마나 알고 계십니까?



원자력발전과 관련하여 '신규 원전 건설', '계속 운전', '사용후핵연료 처리'에 대한 인지 정도를 살펴보면, 일반국민은 '사용후핵연료 처리'에 대해, 원전 지역주민은 '계속 운전'에 대해 '알고 있다(잘 + 어느 정도 알고 있다)'는 응답이 높았음.

한편 원전 지역주민의 '신규 원전 건설' 및 '계속 운전'에 대한 인지도는 일반국민보다 비교적 높게 나타난 반면, '사용후핵연료 처리'에 대해서는 일반국민과 비슷한 수준을 보임.

2. 원자력발전에 대한 인식

1) 원자력발전 필요성 인식

Q. 현재 우리나라의 에너지 상황을 고려했을 때, 원자력발전이 필요하다고 생각하십니까? 필요하지 않다고 생각하십니까?

현재 우리나라에서의 원자력발전 필요성[1)]에 대해 '필요하다(매우 + 어느 정도 필요한 편이다)'는 응답이 전체 조사에서 모두 높았고, 원전 지역주민의 '필요' 인식이 일반국민 보다 높은 편임. 한편 일반국민의 경우, 2024년 6월의 '필요하다'는 응답이 2023년 9월 결과 대비 6.3%p 상승했음.

1) 2022년 기준 우리나라의 에너지원별 전력 발전량 비중에 대해 설명 후 질의문 시행(화력발전 60.4%, 원자력발전 29.6%, 신재생에너지 8.9%, 기타 1.1%, 한국전력통계 에너지 통계)

2) 원자력 발전소/방사성폐기물 안전성 인식

Q. '우리나라 원자력 발전소는 안전하다.'에 대하여 얼마나 동의하십니까?

'우리나라 원자력 발전소는 안전하다'에 대해 '동의한다(매우 + 동의한다)'는 응답은 일반국민 70.2%(2024년 6월 기준), 원전 지역주민 65.1%(2024년 5월 기준)로 나타났으며, 일반국민의 '동의' 응답은 2023년 12월 이후 점차 증가하는 경향을 보임.

Q. (원자력 발전소 안전 '동의' 응답자 대상) 그렇다면, 선생님께서 원자력 발전소가 안전하다고 생각하시는 이유는 무엇입니까?

(단위: %, base: 동의 응답)

구 분		사례수	설계·건설·운영 등 기술 전반에 대해 신뢰할 수 있어서	전 세계적으로 이미 운전 중이어서	정부 및 규제기관이 철저하게 안전 관리를 하고 있어서	전문가나 관리 종사자들이 안전하다고 해서	기 타
일반국민	23년 9월	(661)	38.9	19.8	19.1	18.8	1.3
	23년 12월	(629)	36.7	21.9	19.7	17.4	2.4
	24년 3월	(652)	37.9	19.3	22.1	18.2	1.3
	24년 6월	(702)	38.5	21.2	20.4	17.9	0.8
지역주민	23년 10월	(674)	26.7	44.8	20.8	7.4	0.3
	24년 5월	(651)	21.1	39.0	24.0	16.0	-

Q. (원자력 발전소 안전 '비동의' 응답자 대상) 그렇다면, 선생님께서 원자력 발전소가 안전하지 않다고 생각하시는 이유는 무엇입니까?

(단위: %, base: 비동의 응답)

구분		사례수	예상 외의 사고가 우려되어서	안전하게 관리할 수 있는 기술이 부족하다고 생각해서	연구자 및 기술자의 운영 오류가 우려되어서	언론, 온라인 매체, 영화 등에서 위험하다고 해서	기 타
일반 국민	23년 9월	(307)	57.6	21.0	10.5	5.9	3.8
	23년 12월	(342)	59.1	16.1	12.0	8.4	3.1
	24년 3월	(319)	62.3	19.0	11.0	5.3	2.2
	24년 6월	(263)	57.9	20.2	13.6	5.8	1.4
지역 주민	23년 10월	(326)	65.3	15.6	5.2	13.8	-
	24년 5월	(349)	52.1	14.9	10.6	22.3	-

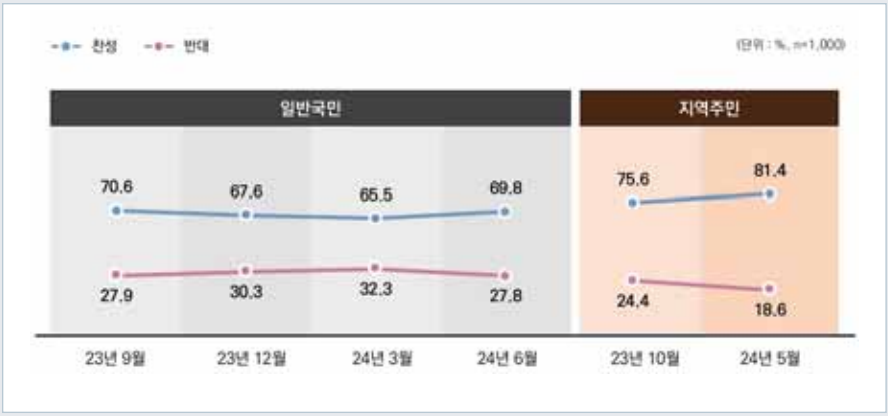
이에 대해 동의하는 응답자들을 대상으로 우리나라 원자력 발전소가 안전하다고 인식하는 이유(1순위)에 대해 물어본 결과, 일반국민은 '설계·건설·운영 등 기술 전반에 대해 신뢰할 수 있어서'를, 원전 지역주민은 '전 세계적으로 이미 운전 중이어서'를 가장 많이 꼽았음. 한편 동의하지 않는 응답자들은 안전하지 않다고 인식하는 이유(1순위)로 일반국민, 원전 지역주민 모두 '예상 외의 사고가 우려되어서'를 가장 많이 선택함.

Q. '국내 원전의 방사성폐기물은 안전하게 관리되고 있다.'에 대하여 얼마나 동의하십니까?

'국내 원전 방사성폐기물이 안전하게 관리되고 있다'에 대해 '동의한다(매우 + 동의한다)'는 응답은 일반국민, 원전 지역주민 모두 높게 나타난 편이나, 2024년 5월 원전 지역주민의 경우, '동의' 응답이 2023년 10월 대비 큰 폭으로(17.5%p) 감소했음.

3) 원자력 발전소 계속운전 의견

Q. 선생님께서는 원전 계속운전에 대해 찬성하십니까? 반대하십니까?



원자력 발전소 계속운전[2)]에 대한 찬반 의견으로 일반국민, 원전 지역주민 모두 '찬성한다(적극 + 대체로 찬성한다)'는 응답 비중이 높았고, 일반국민보다 원전 지역주민의 '찬성' 비율이 상대적으로 높게 나타남. 일반국민의 경우, '찬성' 응답이 2023년 9월부터 2024년 3월까지 감소하는 경향을 보였으나, 2024년 6월 소폭(4.35%p) 증가했고, 원전 지역주민의 경우, 2024년 5월 '찬성' 응답은 2023년 10월 대비 5.8%p 증가함.

4) 원자력 발전량 증감 의견

Q. 2023년을 기준으로 전력생산의 약 30%를 원자력발전이 담당하고 있습니다. 선생님께서는 앞으로 우리나라가 원전을 이용한 전력 발전량을 늘려야 한다고 생각하십니까, 줄여야 한다고 생각하십니까?

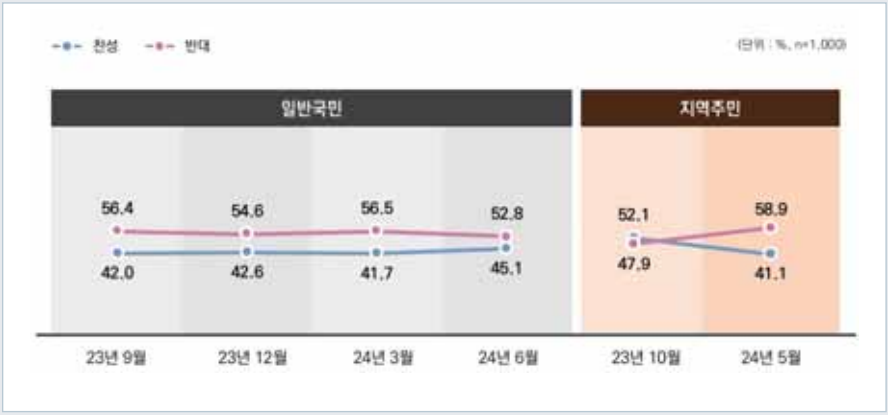
원자력 발전소를 이용한 전력 발전량 증감 의견에 대해 살펴보면, '늘려야 한다(현재보다 훨씬+약간 늘려야 한다)'는 응답이 일반국민, 원전 지역주민 모두 높았고, 비슷한 비중으로 나타남. 일반국민의

2) 원자력 발전소 계속운전(최초 운영허가 기간이 만료된 원전이 법으로 정한 안전기준을 만족해 안전상의 문제가 없다고 확인되는 경우, 허가 획득을 통해 계속 운전하는 것)에 대해 설명 후 질의 시행

경우, 20023년 9월부터 2024년 3월까지 '늘려야 한다'는 응답 비중이 비슷한 수준을 유지하다가 2024년 6월, 약간(3.4%p) 증가했음. 반면, 2024년 5월 원전 지역주민의 '늘려야 한다'는 응답은 2023년도 10월 대비 감소함.

5) 원자력 발전소 거주지 수용성

Q. 만일, 거주하시는 지역에 원자력 발전소가 건설된다면, 선생님께서는 이에 대해 찬성하십니까, 반대하십니까?



원자력 발전소의 거주 지역 내 건설에 대한 의견을 물어본 결과, 일반국민, 원전 지역주민 모두 '반대한다(적극 + 대체로 반대한다)'는 의견이 '찬성한다(적극 + 대체로 찬성한다)'보다 비교적 많았음.

한편 원전 지역주민의 경우, 전년도 10월 조사 결과와 달리 '반대' 응답 비율이 큰 폭으로(11.0%p) 상승해 '찬성' 비율보다 높아짐.

Q. (거주지 원자력 발전소 건설 '찬성' 응답자 대상) 그렇다면, 선생님께서 거주하시는 지역에 원자력 발전소 건설을 찬성하시는 이유는 무엇입니까?

(단위: %, base: 찬성 응답)

구 분		사례수	에너지 자립을 위해 필요하다고 생각해서	지역 경제 및 산업 활성화	인구 유입 및 일자리 창출	지역 주민에 대한 보상	기 타
일반 국민	23년 9월	(420)	51.1	23.1	16.3	6.0	2.1
	23년 12월	(426)	54.7	21.0	15.4	5.9	1.9
	24년 3월	(417)	54.7	19.4	17.7	4.6	2.5
	24년 6월	(451)	54.2	21.9	13.7	5.8	2.6
지역 주민	23년 10월	(521)	25.1	23.6	32.6	18.6	-
	24년 5월	(411)	23.6	27.2	41.1	8.1	-

Q. (거주지 원자력 발전소 건설 '반대' 응답자 대상) 그렇다면, 선생님께서 거주하시는 지역에 원자력 발전소 건설을 반대하시는 이유는 무엇입니까?

(단위: %, base: 찬성 응답)

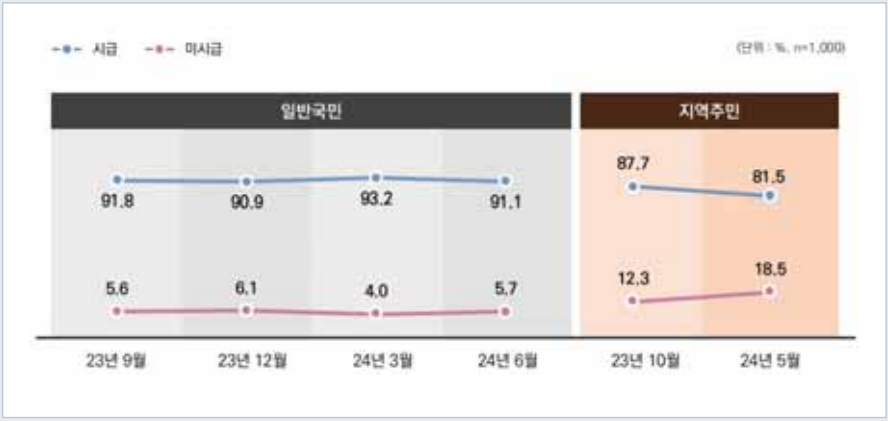
구 분		사례수	방사능 노출 위험이 우려되어서	원전 건설에 따른 환경훼손 등이 우려되어서	지역발전 저해 및 재산가치 하락이 우려되어서	생업에 대한 피해가 우려되어서	기 타
일반 국민	23년 9월	(564)	59.0	22.9	8.9	2.8	5.6
	23년 12월	(546)	59.5	23.6	9.3	3.1	3.8
	24년 3월	(565)	62.1	24.0	7.6	2.3	3.3
	24년 6월	(528)	59.2	24.4	10.2	3.4	2.0
지역 주민	23년 10월	(479)	53.9	20.5	17.3	7.1	1.3
	24년 5월	(589)	53.7	16.8	20.2	9.3	-

거주하는 지역에 원자력 발전소 건설하는 것에 찬성하는 응답자를 대상으로 찬성 이유에 대해 물어본 결과, 일반국민은 '에너지 자립을 위해 필요하다고 생각해서'를, 원전 지역주민은 '인구 유입 및 일자리 창출'을 가장 많이 꼽음. 한편 거주지 원전 건설 반대 응답자의 과반이 반대 이유로 '방사능 노출 위험이 우려되어서'를 가장 많이 선택함.(일반국민, 원전 지역주민 모두 해당)

3. 원자력 현안에 대한 인식

1) 고준위 방사성폐기물[3] 처분시설 시급성

Q. 선생님께서는 고준위 방사성폐기물 처분시설 마련이 시급하다고 생각하십니까? 시급하지 않다고 생각하십니까?



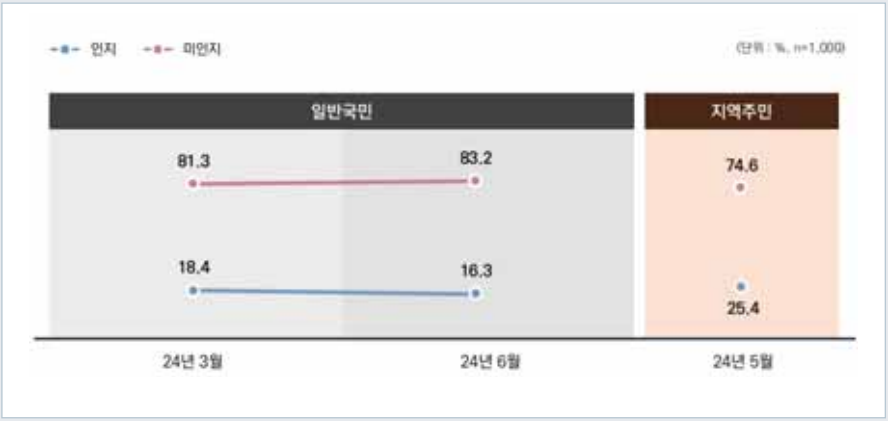
고준위 방사성폐기물[4] 처분시설 마련 시급성에 대해 일반국민 응답자 10명 중 9명 이상이 '시급하다(매우 + 약간 시급하다)'고 응답함. 한편 원전 지역주민의 경우 '시급하지 않다(전혀 + 별로 시급하지 않다)'는 응답이 일반국민보다 높은 편이며, 2023년 10월 조사 대비 소폭(6.2%p) 상승했음.

3) 고준위방사성폐기물의 경우 '23년도에는 '사용후핵연료'로 조사하였으나, '24년도는 '고준위방사성폐기물'로 명칭변경하여 조사

4) 고준위 방사성폐기물 설명 및 고준위 방사성폐기물 처분시설 완공 시기 등 설명 후 질의 시행

2) 고준위 방사성폐기물 관리 특별 법안 발의 후 미제정 인지

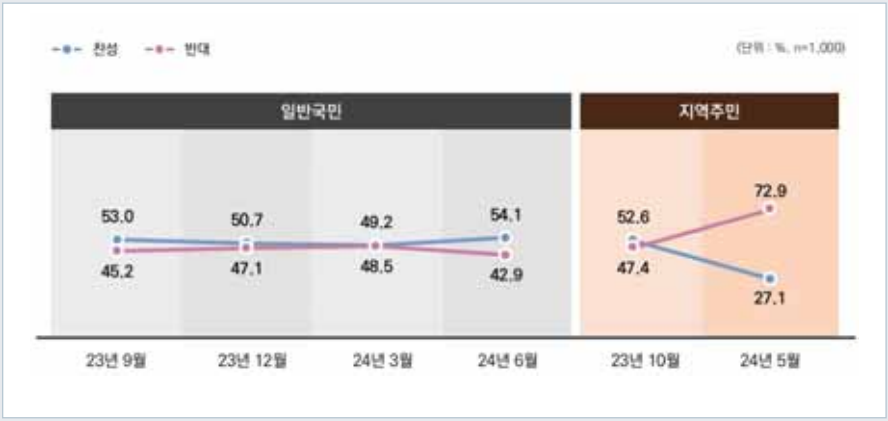
Q. 2022년 고준위 방사성폐기물 처분시설 마련을 위한 '고준위방사성폐기물 관리' 특별 법안이 발의된 후, 현재까지 제정되지 않은 사실에 대해 알고 계십니까?



2022년 '고준위 방사성폐기물 관리' 특별 법안이 발의된 후, 현재까지 제정되지 않은 사실에 대해 일반국민, 원전 지역주민 대부분이 '모른다'고 응답함.

3) 고준위 방사성폐기물 처분시설 거주지 수용성

Q. 만일 거주하시는 지역에 지역주민에 대한 적절한 보상과 함께 안전성이 보장된 고준위 방사성폐기물 처분시설이 건설된다면, 선생님께서는 이에 대해 찬성하십니까? 반대하십니까?



적절한 보상과 안전성이 보장된 고준위 방사성폐기물 처분시설이 거주지역에 건설되는 것에 대한 의견을 물어본 결과, 일반국민은 '찬성할 것이다(적극 + 대체로 찬성할 것이다)'는 응답이 '반대할 것이다(적극 + 대체로 반대할 것이다)' 응답보다 높게 나타났으나, 두 응답 간 큰 차이가 나지 않음.

반면 원전 지역주민의 경우에는 '반대' 응답이 높게 나타났고, 전년도 10월 대비 큰 폭으로(25.5%p) 상승했음.

4) 원자력발전 정보 습득 경험·매체·주제

Q. 선생님께서는 최근 1년간 원자력발전 관련 정보를 접해본 적 있으십니까?

최근 1년간 원자력발전 관련 정보 경험 여부를 살펴보면, 일반국민의 '경험 있다' 응답은 2023년 12월 조사부터 점차 감소하는 경향을 보임.

한편 원전 지역주민의 경우, '경험 있다'는 응답이 '경험 없다'는 응답보다 높게 나타남.

Q. (원자력발전 정보 습득 경험자 대상) 선생님께서는 주로 어떤 매체를 통해 원자력 관련 정보를 습득하십니까?

(단위: %, base: 정보 경험자)

구분		사례수	TV/라디오 등 방송매체	인터넷 포털 사이트	페이스북, 유튜브 등 SNS	신문/잡지 등 인쇄매체	주변 사람	정부/공공기관 홈페이지	기타
일반국민	24년 3월	(522)	34.6	28.3	18.6	8.3	3.9	2.6	3.4
	24년 6월	(466)	37.0	27.2	15.0	9.2	3.5	2.7	5.2
지역주민	24년 5월	(734)	56.1	18.0	5.0	2.3	15.7	2.7	0.1

Q. (원자력발전 정보 습득 경험자 대상) 선생님께서 최근 1년간 접하신 원자력발전 관련 정보는 주로 무엇과 관련된 정보입니까? 주로 접하시는 순서대로 2가지 선택해 주십시오.

(단위: %, base: 정보 경험자)

구분		사례수	기후위기 및 탄소중립 관련	사용후 핵연료 처리 관련	에너지 공급 안정화 관련	원자력 산업 및 기술 관련	원자력 발전 확대 관련	기타
일반 국민	24년 3월	(522)	33.6	20.5	18.1	14.0	10.7	2.2
	24년 6월	(466)	32.0	21.9	19.0	13.0	10.7	1.0
지역 주민	24년 5월	(734)	15.3	14.9	26.4	3.7	39.8	0.1

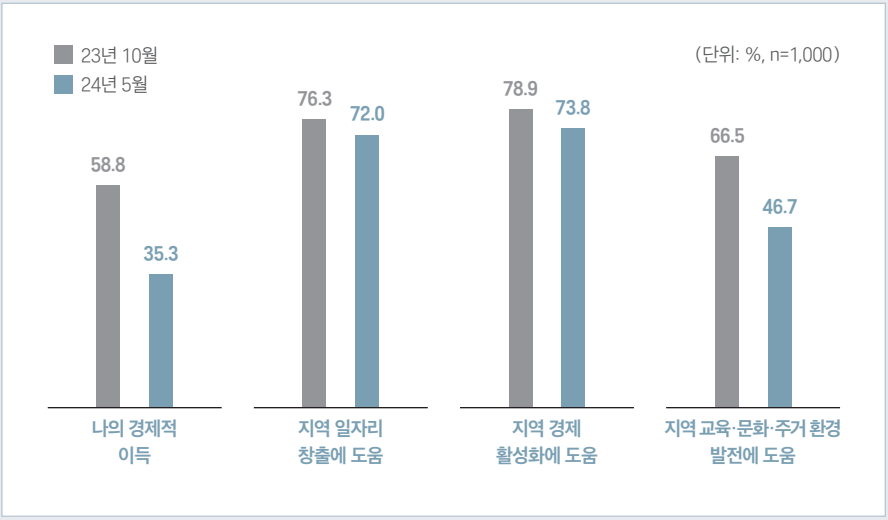
최근 1년간 원자력발전 정보를 접한 경험이 있는 응답자들을 대상으로 정보 습득의 주 매체가 무엇이었는지 물어본 결과, 일반국민, 원전 지역주민 모두 'TV/라디오 등 방송매체'가 가장 높았음.

한편 정보의 주 주제에 대해서는 일반국민과 원전 지역주민의 응답 경향이 다르게 나타났음(1순위 기준). 일반국민의 경우, '기후위기 및 탄소중립 관련', '사용후핵연료 처리 관련' 정보가 주를 이뤘으나, 원전 지역주민의 경우에는 '원자력발전 확대 관련', '에너지 공급 안정화 관련' 정보를 주로 접하는 것으로 조사됨.

4. 원자력 발전소 지역 지원 관련[5)]

1) 원자력 발전소 항목별 지역 지원 인식

Q. 선생님께서는 지역 인근에 있는 원자력 발전소와 관련한 아래 내용에 대해 얼마나 동의하십니까?

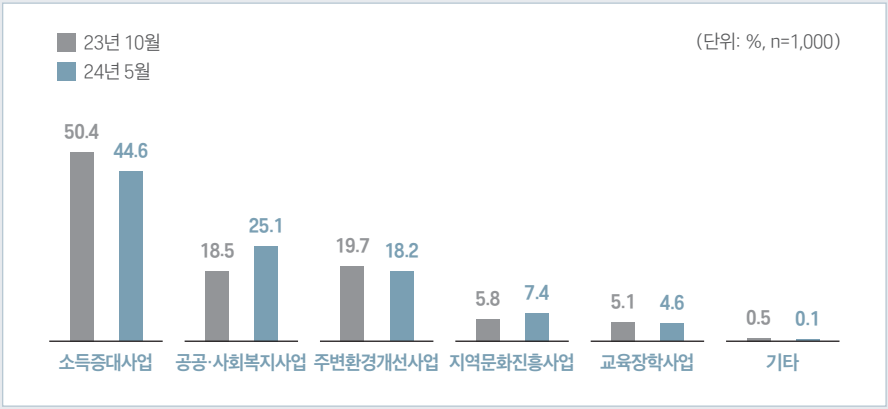


원전 지역주민들을 대상으로 지역 인근에 있는 원자력 발전소와 관련한 4개 항목에 대해 동의하는 정도를 살펴보면, '원자력 발전소는 지역 일자리 창출에 도움이 된다'에 '그렇다(매우 + 대체로 그렇다)' 응답이 가장 높게 나타났으며, 다음으로 '원자력 발전소는 지역 경제 활성화에 도움이 된다', '원자력 발전소는 우리 지역 교육·문화·주거환경 발전에 도움이 된다', '원자력 발전소는 나에게 경제적 이득을 준다' 순으로 나타남. 전년도 10월 조사 대비 '나에게 경제적 이득이 된다', '지역 교육·문화·주거환경 발전에 도움이 된다'에 대한 동의 응답은 크게(각 -23.5%p, -19.8%p) 감소함.

5) 해당 부분은 원전 지역주민 대상으로만 조사를 진행

2) 필요한 원자력 발전소 주변 지역 지원사업

Q. 선생님께서는 다음의 원자력 발전소 주변 지역 지원사업 중 어떤 사업이 가장 필요하다고 생각하십니까? 중요하다고 생각하시는 순서대로 3가지 선택해 주십시오.



원자력 발전소 주변 지역 지원 사업 중 가장 필요하다고 생각하는 사업에 대해 원전 지역주민에게 물어본 결과(1순위 기준), '소득증대사업'을 가장 많이 선택했고, 뒤이어 '공공·사회복지 사업', 주변 환경개선사업', 지역문화진흥사업', '교육장학사업' 순으로 나타남. 2023년 10월 조사와 비교해보면, '소득증대사업' 응답이 5.8%p 감소한 반면, '공공·사회복지 사업' 응답이 6.6%p 증가함.

5. 전문가 조사

1) 에너지 현안 인식

에너지믹스에 대해서는 화력발전을 줄이고 무탄소 에너지원을 늘려야 한다는 의견 다수. 한편, 에너지 결정요인에 대해 에너지안보, 환경성, 경제성을 모두 동등하게 고려해야하나, 우선순위를 둔다면 '에너지안보'

에너지믹스(에너지원별 비중)에 대한 의견

- 우리나라 전력 사용 현황을 고려했을 때 적합한 에너지믹스 비율, 그에 따른 에너지원별 증감 필요성에 대해 물어본 결과, 무탄소 에너지원인 재생에너지 또는 원자력 발전 비중이 높아져야 하며, 화력 발전 비중은 점차 줄여가야 한다는 의견이 다수임.

에너지 결정요인(환경성/에너지안보/경제성) 중요성 인식

- 인터뷰에 참여한 모든 전문가들은 에너지를 선택하고 이용하는데 있어 '환경성', '에너지안보', '경제성' 모두 동등하게 고려해야 한다고 응답하였음.

- 그중에서도 우선순위를 물어봤을 때, 10명은 '에너지안보', 5명은 '경제성', 3명은 '환경성'을 1순위로 꼽았으며, 그 외 필요 요소들로 '수용성', '산업적 측면', '사회적 영향' 등이 언급됨.

2) 탄소중립 관련 이슈

'RE100[6]'의 방향성은 공감하지만 실현가능성에 대해서는 회의적인 태도를 보이는 한편, 우리나라 상황에는 원자력 발전을 포함하는 'CF100[7]'이 적합하다고 인식

탄소중립 의제에 대한 의견

- RE100, CF100(CFE) 등의 탄소중립 의제에 대한 의견을 물어본 결과, 탄소중립으로 가는 데 있어 재생에너지만을 인정하는 'RE100'의 방향성에 대해 공감하지만, 실현가능성이 낮으며, 우리나라 상황의 경우엔 원자력발전을 포함한 'CF100'이 바람직하는 의견이 주를 이룸.

탄소중립 추진을 위한 기술 개발 방향

- 탄소중립 추진을 위한 기술 개발 방향으로 CCUS(탄소 포집·활용·저장 기술), ESS(에너지 저장 시스템), SMR(소형 모듈 원자로) 기술 관련 의견이 있었음.

- 이 외에도 다양한 기술 개발이 필요하며, 이에 대한 투자 및 지원이 확대 의견이 있었음.

6) 클라이밋 그룹과 CDP에서 주도한 기업이 사용하는 전력 100%를 태양광, 풍력, 수력 등 재생에너지 전력으로 구매하거나, 자체 생산으로 조달하는 캠페인

7) UN, 구글 등이 주도하고 있으며, 24시간 일주일 내내 기업이 사용하는 전력 100%를 풍력, 태양력, 원자력발전 등 무탄소 에너지로 공급받아 사용한다는 개념

2024-1

알기 쉬운
에너지·원자력

KEIA 한국에너지정보문화재단
Korea Energy Infomation Culture Agency