기후위기 극복을 위해 화석에너지에서 무탄소에너지로 전환해야 할 때!

에너지정책
대통령을 위한
길라잡이

핵공감 클라쓰
운영진 일동

문주현 윤종일 이정익
이현철 정범진 정용훈
정재준 주한규 최성민
황주호 감수_ 노동석

에너지 빈국에서 에너지 강국으로 탈바꿈하고
더 나아가 에너지 수출국으로 도약할 수 있는 기회!

에너지정책

대통령을 위한

길라잡이

글쓴이

문주현 (단국대 에너지공학과)
윤종일 (KAIST 원자력 및 양자공학과)
이정익 (KAIST 원자력 및 양자공학과)
이현철 (부산대 기계공학부)
정범진 (경희대 원자력공학과)
정용훈 (KAIST 원자력 및 양자공학과)
정재준 (부산대 기계공학부)
주한규 (서울대 원자핵공학과)
최성민 (KAIST 원자력 및 양자공학과)
황주호 (경희대 원자력공학과)
감 수 | **노동석** (서울대 원자력정책센터)

머리말

우리나라에서 지난 4년만큼 원자력이 국민적 관심사가 된 적은 없었다. 정부가 강행한 탈원전 정책이 오히려 원자력을 국민에게 더 가까이 다가가게 했고, 국민이 원자력의 가치를 새롭게 인식하는 계기를 만들어주었다. 탈원전의 역설이라 할 수 있다. 하지만, 정부는 빛바랜 탈원전 정책을 아직도 버리지 못하고 있다.

탈원전 정책은 일견 그럴듯해 보인다. 원전이 위험해 보이고, 사용후핵연료 관리기술도 부족하니 탈원전을 해야 한다고 주장하면 수긍이 갈 수도 있다. 그런데, 우리나라가 소비하는 막대한 에너지를 어떻게 공급해야 할지를 생각해보면 문제가 달라진다. 현대 사회에서 에너지는 공기나 물 같이 국민 생활과 국가 경제활동에 필수적이다. 에너지가 잠시라도 없으면 견디기 어렵다. 그런데 에너지 사용은 달콤하지만, 에너지 공급에는 반드시 대가가 따른다. 우리가 아는 모든 에너지원은 저마다 장단점이 있고, 비용과 부작용을 수반한다. 이런 사실을 알고 에너지원을 바라보면, 원자력을 포함한 모든 에너지원이 다르게 보인다. 탈원전 정책도 마찬가지다.

"대통령을 위한 에너지 정책 길라잡이"는
국가 지도자가 될 분을 비롯해 에너지 정책에 관심 있는 모든 분에게
에너지에 관해 균형 있는 시각을 제공하고자 준비하였다.

2017년 6월 문재인 대통령의 고리 1호기 영구정지 선포식 기념사를 보면, 원전에 대한 뿌리 깊은 오해가 자리 잡고 있음을 알 수 있다. 후쿠시마 원전 사고로 2016년 3월 현재 총 1,368명이 사망했다는 말은 사실과 전혀 다르다. 설계 수명을 다한 원전의 가동 연장이 운항 선령을 연장한 세월호와 같다는 것도 아주 잘못된 비유다. 미국은 운영 중인 원전 94기 중 87기의 가동 연한을 40년에서 60년으로 연장했고, 이 중 6기는 80년까지 재연장했다. 대통령과 참모진이 원전에 관해 바로 알려고 하지 않아 생긴 오류다.

최근 전 세계적으로 거세지는 "탄소중립" 바람은 탈원전보다 우리 현세대와 후손에게 훨씬 더 큰 영향을 미칠 것이다. 탈원전 정책은 주로 전기 공급과 연관되지만, 탄소중립은 에너지 전반에 걸쳐 연관되기 때문이다. 세계 인구는 1800년대 초 10억 명을 넘겼고, 산업혁명을 거치며 폭발적으로 증가하여, 현재 78억 명을 넘어섰다. 그 견인차는 석탄을 필두로 한 화석에너지라 할 수 있다. 그런데 탄소중립은 사실상 화석에너지와의 결별을 의미한다. 산업혁명에 버금가는 역(逆) 에너지 혁명이라고 할 수 있다. 에너지자원 빈국인 우리나라에서 그나마 유망한 무탄소 에너지원은 원자력과 태양광뿐이다. 우리나라의 풍력과 수력 자원은 원천적으로 빈약하다. 사정이 이런데도 정부는 탈원전 방침을 바꾸려 하지 않는다. 앞으로 어떻게 에너지를 공급하겠다는 건지 걱정이 앞설 뿐이다.

지난 8월 초 「2050 탄소중립위원회」가 발표한 "탄소중립 시나리오" 초안은 우리나라 여건을 외면한 비현실적인 계획이다. 국제에너지기구 등은 2050년까지 탄소중립을 달성하려면 전 세계 원자력 발전용량을 2배 이상으로 늘려야 한다고 밝히고 있다. 그런데 우리나라는 도리어 줄이려 한다. 탄소중립위원회는 이해관계자와 일반 국민 500여 명으로부터 수렴한 의견과 부처 간 논의 결과를 반영한 뒤, 탄소중립위원회와 국무회의 의결을 거쳐 정부의 최종안을 확정하고 10월 말 발표하겠다고 한다.

에너지 문제는 여러 분야가 얽혀있는 매우 복잡한 문제다. "탄소중립 시나리오" 선택은 우리의 현재와 미래를 결정하는 일이다. 이 시나리오 중 하나가 시행되면, 우리나라 경제와 산업이 뒤흔들릴 것이다. 이런 계획을 수개월 만에, 그것도 전문가 집단의 숙고와 국민적 동의 절차 없이 결정한다는 것은 어불성설이다. 충분한 시간을 두고 모든 관련 분야 전문가들과 국민이 머리를 맞대고 지혜를 모아야 한다. 500명의 전문가로부터 의견수렴 해도 모자랄 판이다.

이런 현실에 대한 안타까움이 작년 여름부터 유튜브에서 "핵공감 클라쓰"를 운영하던 대학교수들을 다시 모이게 하였다. 대통령뿐만 아니라 에너지 정책 수립에 관련된 사람들, 에너지 공급자와 소비자 모두가 읽어보기를 바라는 마음으로 "대통령을 위한 에너지 정책 길라잡이"를 준비했다.

이 책자는 다음과 같이 네 개 분야로 구성되어 있다.

- **제1장. 에너지의 중요성과 현황**
- **제2장. 기후위기와 무탄소 에너지원**
- **제3장. 탄소중립을 위한 에너지 정책**
- **부 록. 원자력 팩트 체크**

각 장은 몇 개의 세부 주제로 나누고, 독자가 쉽게 읽을 수 있게 주제별로 2쪽 이내 분량으로 작성하였다. 원자력에 관한 오해를 풀기 위해 부록도 덧붙였다. 독자가 처음부터 끝까지 숙독하기를 바라지만, 어디 한 쪽만 읽어도 해당 주제에 대한 이해도를 높일 수 있도록 쉽게 쓰려고 노력하였다. 본문에 쓰인 데이터와 표, 그림의 출처는 편의상 해당 쪽에 각주로 달았다.

원고를 마무리하면서 아쉬움과 두려움이 앞선다. 참여 필진은 원자력 전문가들이지만, 에너지 전 분야의 전문가가 아니고, 미래의 모든 기술 발전을 예단할 수도 없기 때문이다. 설익은 생각을 누구나 볼 수 있는 담벼락에 적는 일도 부담스럽다. 그렇지만 확신과 자신감보다는 아쉬움과 두려움이 모든 발전의 첫걸음이라고 스스로 위안하며, 본 책자를 감히 세상에 내놓는다. 이제는 독자의 시간이다. 독자의 비판과 의견을 겸허히 경청하고자 한다.

2021. 10. 1.

핵공감 클라쓰 운영진 일동

요약

제 1 장. 에너지의 중요성과 현황

현대 사회에서 에너지의 중요성은 아무리 강조해도 지나침이 없다. 여러 가지 에너지 중 전기는 사용하기 편리하고 다재다능하여, 앞으로 사용이 더 늘어날 전망이다. 전기 공급을 위해 다양한 에너지원이 쓰인다. 이들 에너지원은 저마다 장단점이 있다. 세계 각국은 자국 환경에 적합한 에너지원을 적절히 조합하여, 에너지, 특히 전기를 안정적으로 공급할 수 있는 에너지원 조합을 찾는다. 이를 에너지 믹스(Energy Mix)라고 한다.

다른 에너지와 달리 전기는 "매 순간 수요와 공급이 일치"해야 한다. 유럽연합 국가들은 서로 전력망이 연결되어 있어서, 전기가 남거나 부족하면 실시간으로 주고받을 수 있다. 그러나 우리나라는 전력망이 외부와 고립된 에너지 섬과 같아서 전기 수요·공급 문제를 국내에서 어떻게든 해결해야만 한다. 그리고 전력을 안정적으로 공급하기 위해 공급예비율을 적정 수준 이상으로 유지해야 한다

현재 우리나라가 이용하는 에너지자원은 석유, 석탄, LNG 등 화석에너지, 태양광, 풍력, 수력 등 재생에너지 그리고 원자력이다. 우리나라는 석탄, 석유, LNG를 전량 수입한다. 우리나라 재생에너지 발전 여건도 여의치 않다. 원자력은 화석에너지보다 에너지 밀도가 백만 배 이상 높고 연료비축성이 뛰어나, 국토가 좁고 에너지 수요가 큰 우리나라 여건에 적합한 에너지원이다.

제 2 장. 기후위기와 무탄소 에너지원

세계 곳곳에서 기상이변이 빈발하고 있다. 그 원인으로 지구 온난화가 지목되고 있다. 이러한 지구 온난화는 인류가 배출한 온실가스에 기인한 것으로 알려졌다.

2018년 10월 「UN 기후변화에 관한 정부간 협의체(IPCC)」는 지구 평균온도 상승 폭을 산업화 이전 수준 대비 1.5℃ 내로 제한하기 위해, 2050년까지 "탄소중립", 즉, "탄소 순배출 제로(Zero)"를 달성해야 한다는 특별보고서를 발간하였다. 현재 우리나라를 비롯해 미국, 유럽연합, 일본 등 세계 124개국이 2050년까지 탄소중립을 달성하겠다고 선언하였다. 중국 등은 그 시기를 2060년까지로 미뤘다.

탄소중립을 위해서는 에너지 이용방식을 바꿔야 한다. 온실가스를 배출하는 석유, 석탄, LNG 등 화석에너지 사용을 최대한 줄이고 무탄소 에너지원을 주 에너지원으로 삼아야 한다. 국제에너지기구(IEA)는 2050년까지 탄소중립 달성을 위해 전 세계 전기 수요가 2020년 대비 약 2.6배로 증가할 것으로 전망하였다.

전기생산에 사용하는 에너지원의 이산화탄소 배출량은, 발전(發電) 과정뿐만 아니라 발전소 건설, 연료공급 및 발전소 정지 후 폐쇄·해체까지 "발전 생애주기(Life-cycle)" 동안 배출하는 이산화탄소 모두를 포함해 평가한다. 현재 생애주기 전 기간에 걸쳐 이산화탄소 배출이 전혀 없는 무탄소 에너지원은 없다. 이산화탄소 배출이 극히 적은 저탄소 에너지원만 있을 뿐이다. 이 책자에서는 발전 과정 중 이산화탄소를 직접 배출하지 않는 에너지원을 무탄소 에너지원으로 부르기로 한다. 이런 의미에서 무탄소 에너지원은 태양광, 풍력, 수력 등 재생에너지, 원자력 그리고 기타 무탄소 신전원 등이 있다.

태양광 발전은 발전 과정에서 이산화탄소 배출이 없고, 연료비가 들지 않는 장점이 있다. 하지만 발전량 변동성이 크고, 태양광 패널 설치에 넓은 부지가 필요하며, 발전 단가가 높다는 단점이 있다. 국제에너지기구(IEA)와 OECD/NEA의 보고서에 의하면, 우리나라 태양광 발전의 균등화발전단가(LCOE)는 70~120 USD/MWh으로, 우리나라 원자력 발전 LCOE 39~67 USD/MWh보다 약 2배 높다. 「발전량이 날씨에 좌우되어서, 소비자가 필요로 할 때 전기를 공급하지 못할 수도 있다. 또 날씨에 따라 전기를 과잉 생산할 수 있다. 이에 대비해 예비(Backup) 발전원과 전력계통 안정화 수단을 마련해둬야 한다. 이를 위해 막대한 비용이 소요된다.」「1GW 용량의 원전 1기가 생산하는 전기를 태양광 발전으로 생산하려면 약 100㎢의 부지(서울시 면적의 약 1/6)가 필요하다.」

풍력 발전도 발전 과정에서 이산화탄소 배출이 없다. 그러나, 우리나라는 풍력 자원이 풍부한 북유럽과 비교하면 평균 풍력에너지 밀도가 20~30% 수준에 불과하다. 그나마 해상풍력 자원이 육상풍력 자원보다는 좋은 편이긴 하나 해상풍력 발전의 높은 건설비와 전력망 연결비용 때문에 해상풍력 발전이 오히려 육상풍력 발전보다 경제성이 떨어진다. 풍력 발전도 태양광 발전과 마찬가지로 발전량 변동성이 커서 예비 발전원과 전력계통 안정화 수단이 필요하다.

원자력은 "무탄소 고밀도" 에너지원이다. 우리나라는 우라늄을 전량 수입하지만, 우리나라 전체 에너지수입액의 1% 미만이다. 우라늄 가격을 포함한 연료비가 원자력 발전단가에서 차지하는 비중은 약 10% 수준이다. 그래서 원자력 발전 전기는 준국산 에너지로 간주할 수 있다. 또한, 우라늄 연료는 비축성이 뛰어나 에너지 안보에 크게 기여하고 있다.

일부 국가는 신기술을 이용한 무탄소 신전원을 탄소중립 이행방안 중 하나로 고려한다. 그러나 대표적 무탄소 신전원인 수소는 1차 에너지원이 아니다. 별도의 생산 과정을 거치는 2차 에너지원, 즉, 에너지 담체(Carrier)다. 관건은 수소를 친환경적으로, 그리고 경제적으로 생산·수송하는 것이다. 이 과정에서 이산화탄소가 많이 발생하면 무탄소 에너지원이라 할 수 없다. 결국, 수소 생산방법이 문제의 핵심이다. 이산화탄소 포집·활용·저장(CCUS) 기술도 주목받고 있다. 수소나 CCUS 등은 유망한 탄소중립 수단이지만 아직 기술적으로 미성숙돼 있거나 충분한 경제성을 갖추고 있지 않아, 현실화되기까지 지속적인 연구개발이 필요한 상황이다.

제 3 장. 탄소중립을 위한 에너지 정책

우리나라는 2008년부터 “에너지 헌법”이라 불리는 에너지 분야 최상위 법정계획인 “에너지기본계획”을 5년 주기로 수립하고 있다. 에너지 정책은 장기적인 안목을 갖고 수립해야 한다. 상황에 따라 전력수요는 순식간에 급증할 수 있지만, 전력공급은 갑자기 늘릴 수 없기 때문이다. 그래서 정부는 전력수급계획을 수립할 때, 전력수요를 미리 잘 예측하고, 현재 기술·경제적으로 실현 가능한 기술에 바탕을 둬야 한다. 이 원칙을 따르지 않으면 전력 위기가 빈번하게 발생할 수 있다. 최악의 경우에는 대정전으로 이어질 수 있다.

앞으로 우리나라에서 태양광 및 풍력 발전 비중이 늘어날 것이다. 이들의 발전량은 기상 조건에 따라 변하고 인위적 조절이 불가능해서, 수요에 맞춰 전기를 제때 공급하기 어렵다. 전기 수요와 공급량을 맞추기 위해서는 LNG 발전소 등 예비 발전원을 이용해, 시시각각 변하는 재생에너지 발전량을 보완해줘야만 한다. 또한 전력계통 안정화를 위해 여러 가지 에너지저장장치(Energy Storage System; ESS)를 설치해야 한다. 이러한 예비 발전원과 전력계통 안정화 수단 확보를 위해서는 막대한 비용이 소요된다.

현재 우리나라에서 발전 비중이 가장 큰 무탄소 에너지원은 원자력이다. 앞으로 탄소중립을 위해 줄어들 석탄과 가스 발전의 상당 부분을 경제적으로 대체할 수 있는 것은 원자력 발전뿐이다. 재생에너지의 간헐성을 보완할 수 있는 가장 효과적인 방안도 원자력이다. 원전에 조속기(Governor valve)를 설치하면 석탄 발전과 같은 유연 운전이 가능하다. 프랑스처럼 부하추종(Load follow) 운전 기술을 도입해도 재생에너지 간헐성을 보완할 수 있다. 따라서 국가 전력계통 안정성을 유지하며 재생에너지의 탄소중립 기여도를 극대화하기 위해, 원자력과 재생에너지가 공존하는 적정 에너지 믹스를 구성하는 것이 바람직하다.

에너지자원 빈국인 우리나라가 “2050 탄소중립”을 위한 에너지 정책을 수립할 때, 다음 세 가지를 고려해야 한다. 첫째, 우리나라 현실에 맞는 에너지원을 최대한 활용해야 한다. 우리나라는 수력과 풍력 자원이 빈약하다. 그나마 태양광과 원자력이 현실적인 무탄소 에너지원이다. 둘째, 에너지 정책 수립 시에는 이념이나 신념보다 과학기술과 객관적 사실을 우선해야 한다. 셋째, 탄소중립은 전 세계적 추세다. 우리의 뛰어난 기술을 바탕으로 이 기회를 잘 활용하면 에너지 기술 수출국으로 도약할 수 있다.

목차

머리말 _ ii

요약 _ iv

제 1 장. 에너지의 중요성과 현황 _ 02

1.1. 에너지의 중요성 _ 02
1.2. 미래 글로벌 에너지 수요 _ 04
1.3. 우리나라 에너지 소비 현황 _ 06
1.4. 에너지 믹스 _ 08
1.5. 에너지 섬 대한민국의 전기 공급 문제 _ 10
1.6. 우리나라의 제한된 에너지 자원 - 화석에너지, 재생에너지, 원자력 _ 12

제 2 장. 기후위기와 무탄소 에너지원 _ 16

2.1. 기후위기와 온실가스 _ 16
2.2. 글로벌 탄소중립 협력 _ 18
2.3. 우리나라의 온실가스 배출 문제 _ 20
2.4. 에너지원별 생애주기 이산화탄소 배출 _ 22
2.5. 태양광 발전 _ 24
2.6. 풍력 발전 _ 26
2.7. 원자력 발전 _ 28
2.8. 무탄소 신전원 등 _ 30

제 3 장. 탄소중립을 위한 에너지 정책 _ 32

3.1. 우리나라 에너지 관련 계획 _ 32
3.2. 에너지정책의 특성 _ 34
3.3. 재생에너지의 간헐성 문제와 에너지저장장치 _ 36
3.4. 원자력의 탄소중립 기여도 _ 38
3.5. 2050 탄소중립을 위한 에너지 정책 수립 시 유의사항 _ 40

부 록. 원자력 팩트체크 _ 42

A1. 탈원전이 대세라는데 사실인가요? _ 42
A2. 미래의 원자력 기술은 어떤 것이 있나요? _ 44
A3. 우리나라 원자력산업의 경쟁력이 있나요? _ 46
A4. 원자력 발전이 안전한가요? _ 48
A5. 우리나라 원전은 안전한가요? _ 50
A6. 체르노빌과 후쿠시마 원전 사고는 왜 발생했나요? _ 52
A7. 사용후핵연료가 아주 많다던데 사실인가요? _ 54
A8. 사용후핵연료 처분 기술이 없다는데 사실인가요? _ 56



제 1 장

에너지의 중요성과 현황

1.1. 에너지의 중요성

1.2. 미래 글로벌 에너지 수요

1.3. 우리나라 에너지 소비 현황

1.4. 에너지 믹스 (Energy Mix)

1.5. 에너지 섬 대한민국의 전기 공급 문제

1.6. 우리나라의 제한된 에너지 자원 - 화석에너지, 재생에너지, 원자력



제 1 장.

에너지의 중요성과 현황

1.1 에너지의 중요성

인류 역사는 에너지 사용기술과 더불어 진보해왔다. 현대 문명사회는 에너지 사용기술의 비약적 발전 결과라고 할 수 있다. 문명 수준과 에너지 사용량 사이의 관계는 유엔에서 개발한 인간개발지수[1]와 현대 문명사회의 대표적 에너지인 전기 사용량 사이와의 관계로부터 확인할 수 있다. 그림 1[2]은 **인간 개발 지수가 0.9 이상인 선진국 수준에 도달하려면 최소 연간 1인당 4,000kWh[3]이상의 전력이 필요함을 보여주고 있다.**

잠시라도 에너지 공급이 없는 현대 문명사회는 상상할 수 없다. **국민의 인간다운 삶을 보장하기 위해 안정적으로 에너지를 공급하는 것은 국가의 책무라 할 수 있다.**

> 인류 역사는 에너지 사용기술과 더불어 진보해왔다.

1) 각 국가의 실질국민소득, 교육수준, 문맹율, 평균수명 등 인간의 삶과 관련한 여러 가지 지표를 조사해, 각국의 인간 발전 정도와 선진화 정도를 평가한 지수임.

2) http://hdr.undp.org/en/content/human-development-index-hdi
https://www.eia.gov/international/data/world/electricity/electricity-consumption

3) 1 kWh(kilo Watt Hour, 킬로와트시)는 용량 1kW인 전기장치(예: 가정용 다리미)를 1시간 동안 사용할 때 소비되는 에너지의 양 (1 kWh = 3,600,000 Joule)을 말함.

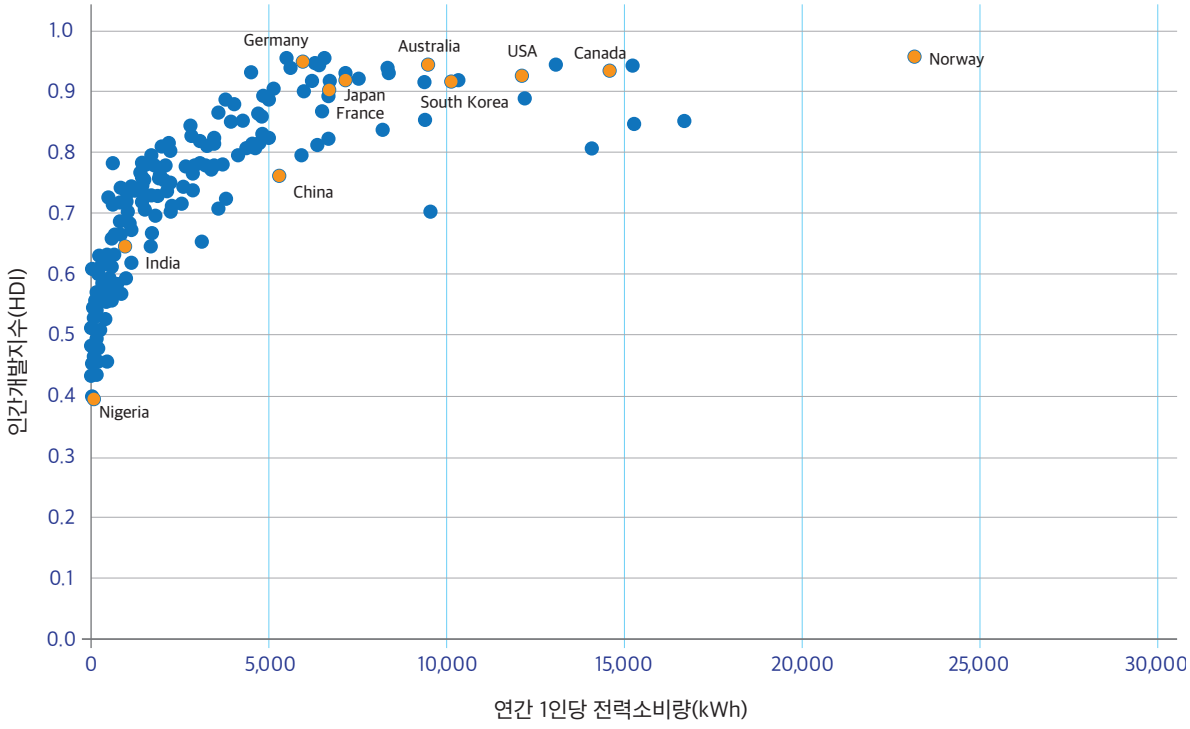


그림 1. 국가별 인간개발지수(Human Development Index)와 연간 1인당 전력소비량

> 국민의 인간다운 삶을 보장하기 위해 안정적으로 에너지를 공급하는 것은 국가의 책무라 할 수 있다.

1.2 미래 글로벌 에너지 수요

우리는 지금 D.N.A.(Data; Network; AI)로 대변되는 4차 산업혁명 시대에 살고 있다. **4차 산업혁명 시대에는 '전기'가 핵심 에너지이다.** 앞으로 글로벌 사회는 친환경 전기를 최종에너지로 이용하는 전기화 사회(Electrified Society)로 빠르게 전환될 것이다.

2021년 **국제에너지기구(International Energy Agency; IEA)는** 2050년까지 "탄소중립" 즉, 탄소 순배출 제로(Net Zero Emission) 달성을 위해, 2020년 대비 세계 에너지 수요가 8% 줄고 **전기 수요는 약 2.6배로**[4] **증가할 것으로 전망**하였다(2020년, 약 23,230TWh[5] → 2050년, 60,000TWh). 또 전 세계적으로 재생에너지를 비롯해 원자력 등 무탄소 에너지원의 역할을 크게 확대해야 한다고 밝혔다(그림 2). 2050년까지 원자력의 전력생산 비중을 "탄소중립"에 기여할 수 있을 만큼 높이려면 **전 세계적으로 매년 원자력 발전소(이하 '원전'이라 함)를 30GW씩 신규 건설해야 한다.**[6]

> 4차 산업혁명 시대에는 '전기'가 핵심 에너지이다.
> 글로벌 사회는 전기화 사회(Electrified Society)로
> 빠르게 전환될 것이다.

4) International Energy Agency, "Net Zero by 2050, A Roadmap for the Global Energy Sector", 2021.

5) TWh(Tera Watt Hour, 테라와트시) = 1,000,000,000 kWh = 1조 Wh(각주 3 참조).

6) 매년 30GW의 원전 증설은 APR-1400 원전(국내에서 개발·건설하고 UAE에도 수출하였음)을 매년 20기씩 건설하는 규모임.

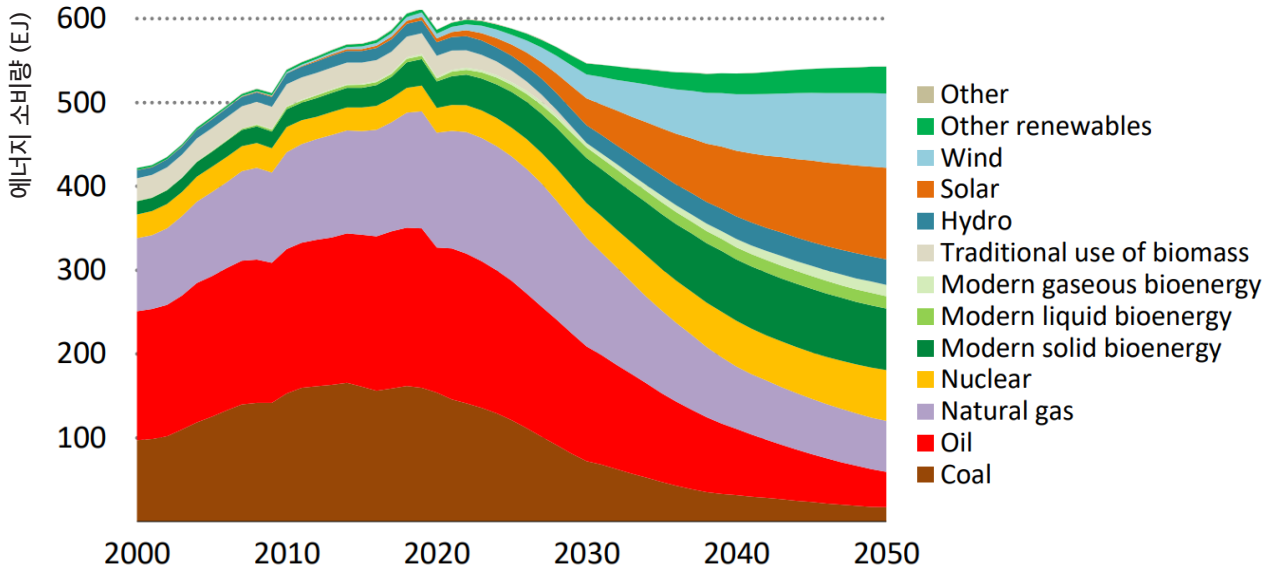


그림 2 . 2050년 탄소중립을 위한 에너지원별 소비량 전망[4)]

> 국제에너지기구(IEA)는 2050년 전기수요가 2020년 대비
> 약 2.6배 증가할 것으로 전망하였다.

1.3 우리나라 에너지 소비 현황

에너지경제연구원이 발간한 "2019 에너지통계연보"[7]에 따르면(그림 3), **우리나라는 2018년 기준, 에너지자원의 93.7%를 수입했다. 에너지자원 수입액은 약 1,460억 달러로, 우리나라 연간 총수입액의 약 1/4에 달한다.**

1차 에너지[8]공급원 비중은 석유 38.5%, 유연탄 26.6%, 액화천연가스(LNG) 18.0%, 원자력 9.2%, 수력·재생에너지 6.1%이었다. **1차 에너지의 40%는 전기로 전환돼 소비되었는데, 그 양은 약 570TWh이었다. 이를 용도별로 구분하면, 산업용 53.9%, 가정·상업용 39.4%, 공공 6.2% 등이다.** 우리나라는 제조업 비중이 높아서 산업용 전력 소비 비중이 높다. 전력생산에 투입된 1차 에너지 비중은 유연탄(석탄) 41.3%, LNG 26.8%, 원자력 23.4%, 신재생에너지 5.6%, 수력 1.3%였다.

"우리나라는 2018년 기준, 에너지자원의 93.7%를 수입했다.
에너지자원 수입액은 약 1,460억 달러로, 우리나라 연간
총수입액의 약 1/4에 달한다."

7) 에너지경제연구원, "2019 에너지통계연보", 2019.

8) 1차 에너지는 타 에너지로 전환되기 위해 투입되는 에너지와 산업, 수송, 가정, 상업용으로 직접 소비되는 에너지의 합임.

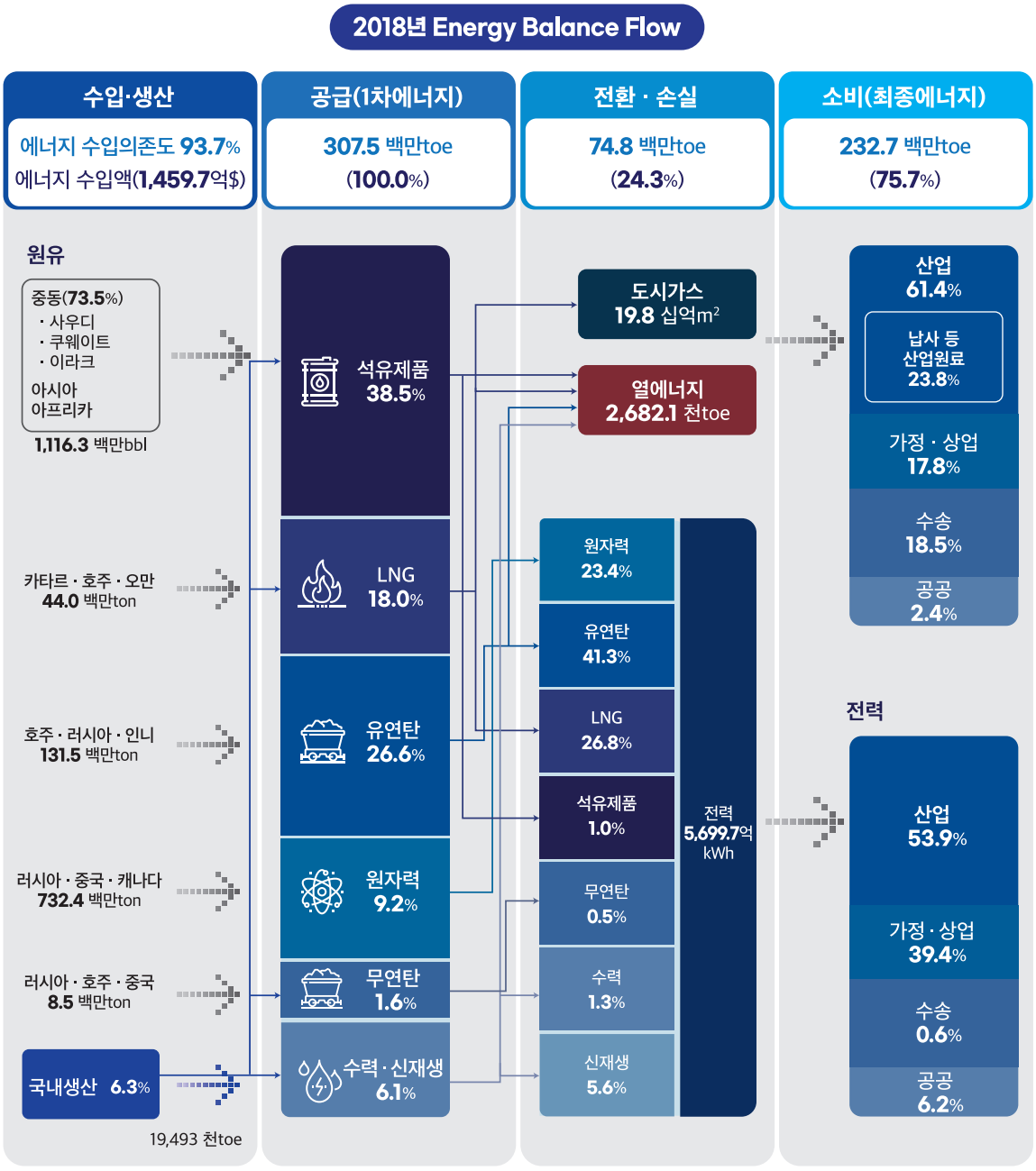


그림 3. 2018년 우리나라의 에너지 흐름[7]

1.4 에너지 믹스

모든 에너지원은 저마다 장단점이 있다. 한두 가지 에너지원에만 의존하면, 상황에 따라 에너지 공급에 실패할 수 있다. 따라서, **각국은 자국 여건하에서 에너지를 안정적으로 공급할 수 있는 최적 에너지원 조합을 찾는다.** 이를 에너지 믹스(Energy Mix)라고 한다.

그림 4[9]에서 보듯이, 에너지 믹스는 각국이 처한 에너지 환경을 최대한 활용하거나 극복하기 위한 고심의 산물임을 알 수 있다. 사우디아라비아, 아랍에미리트, 카타르 등 일부 중동국가는 자국에 풍부한 원유나 천연가스를 주 에너지원으로 삼는다. 북유럽의 노르웨이는 수력으로 총 전력의 약 95%를 생산한다. 스웨덴과 스위스는 수력과 원자력을 주 에너지원으로 이용한다. 풍력 자원이 우수한 덴마크나 영국은 풍력 발전을 최대한 활용하고 있다. 이처럼 각국은 자국의 부존자원과 기술력 등을 고려해 고유의 에너지 믹스를 정한다. **우리나라도 우리 여건에 맞는 적정 에너지 믹스를 찾아야 한다.**

> 각국은 자국 여건 하에 에너지를 안정적으로 공급할 수 있는
> 최적 에너지원을 찾는다.

9) International Energy Agency, “Energy Policies of IEA Countries: United Kingdom 2019 Review”, 2019

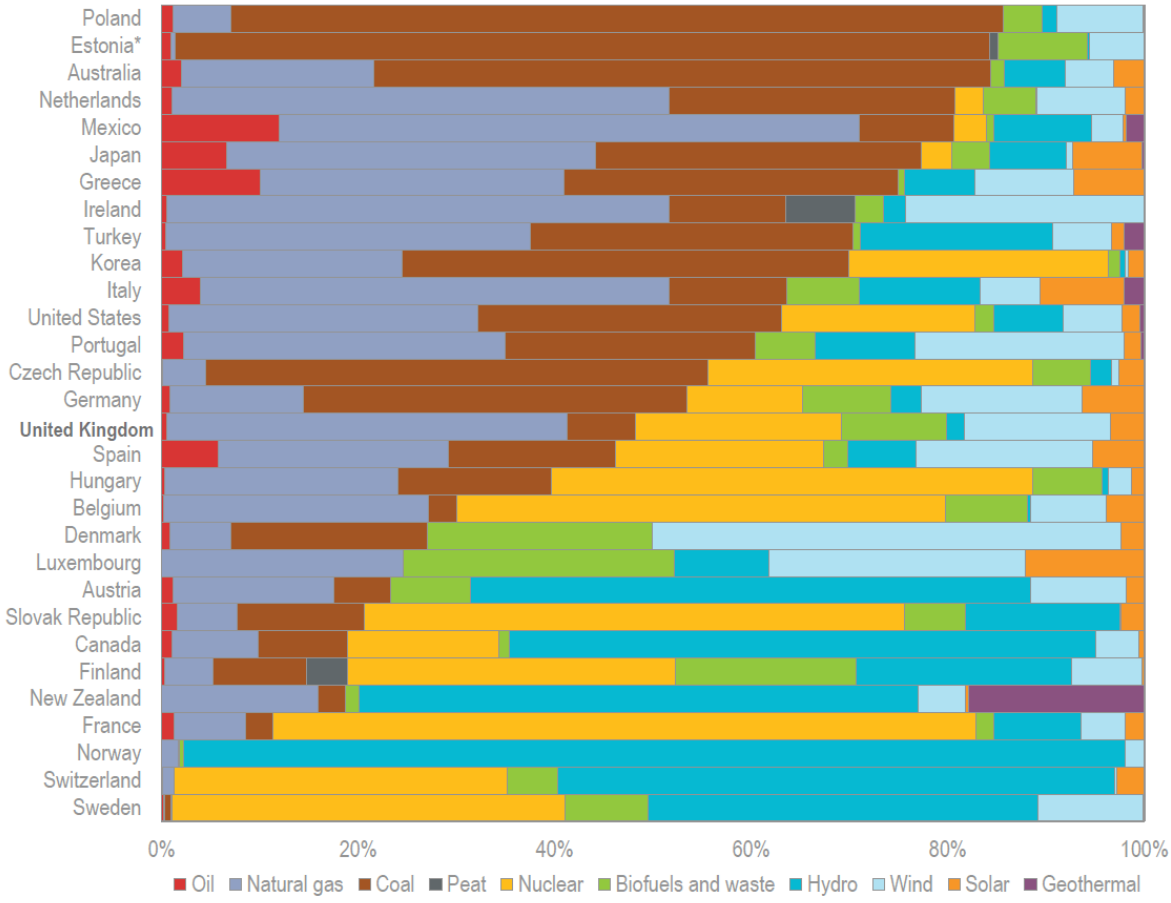


그림 4. 여러 나라의 에너지 믹스

우리나라도 우리 여건에 맞는 적정 에너지 믹스를 찾아야 한다.

1.5 에너지 섬 대한민국의 전기 공급 문제

전기는 "매 순간 수요와 공급이 일치"해야 한다. 즉, 전기 수요에 맞춰 전력을 공급해야 한다. 전기가 남으면 발전량을 줄이거나, 다른 곳에 저장하는 등 어떤 형태로든 소비해야 한다. 전기가 부족하면 발전량을 늘리거나 일부 지역의 전기 공급을 차단한다.

유럽연합 국가들은 서로 전력망이 연결되어 있어서, 전기가 남거나 부족하면 실시간으로 주고받을 수 있다. **우리나라는 전력망이 외부와 고립된 에너지 섬(Energy Island)과 같아서 전기 수요·공급 문제를 어떻게든 국내에서 해결해야만 한다.** 그래서 우리나라 전력계통은 유럽연합 국가에 비해 유연성이 떨어진다. 전기 의존도가 높은 현대사회에서 전력설비 부족으로 대정전이 일어나면, 그 피해는 가늠키 어려울 정도다. 따라서 **우리나라는 안정적 전력공급을 위해 적정 수준의 전력 공급예비율**[10]**을 유지하는 것이 필요하다**(그림5)[11]. 그림 5에서 보듯이, 우리나라는 공급예비율을 적정 수준으로 유지하는 데 어려움을 겪어 왔음을 알 수 있다.

> 전기는 매 순간 수요와 공급이 일치 해야한다.
> /
> 우리나라는 전력망이 외부와 고립된 에너지 섬과 같아서
> 전기 수요·공급 문제를 어떻게든 국내에서 해결해야만 한다.

10) 공급예비율(%) = (공급가능전력-최대사용전력)/공급가능전력*100

11) e-나라지표 (전력수급동향), https://www.index.go.kr/

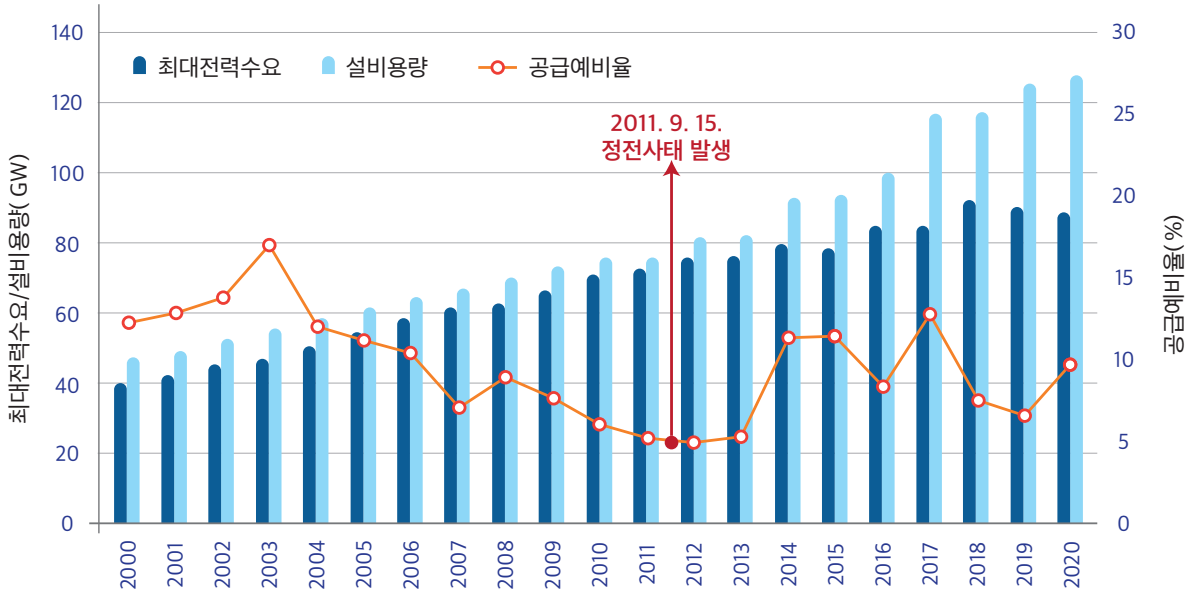


그림 5. 우리나라의 최대전력수요, 설비용량 및 공급예비율 추이

우리나라는 안정적 전력공급을 위해 적정 수준의 전력 공급예비율율을 유지해야 한다.

1.6 우리나라의 제한된 에너지자원 - 화석에너지, 재생에너지, 원자력

현재 우리나라가 이용하는 에너지자원은 석유, 석탄, LNG 등 화석에너지, 태양광, 풍력, 수력 등 재생에너지 그리고 원자력이다.

우리나라는 석유, 석탄, LNG를 전량 수입한다. 우리나라의 재생에너지 발전 여건도 여의치 않다. 그림 6[12]에서 보듯이, **우리나라의 태양광 패널 출력(약 3.5kWh/kWp[13])은 세계 최고수준인 칠레(6.4 kWh/kWp)의 55% 수준이다. 하루 24시간 중 평균 3.5시간 동안 전기를 생산할 수 있다.** 따라서 평균 이용률은 약 15%에 불과하다. **우리나라 해상풍력 자원은 육상풍력 자원보다는 좋지만, 영국과 덴마크와 비교하면 평균 풍력에너지 밀도가 20~30% 수준에 불과하다.** 수력 자원도 현재 국내 총 전력생산의 1~2%밖에 감당할 수 없으며, 환경 문제 등으로 추가 개발도 쉽지 않다.

원자력은 화석에너지보다 에너지 밀도가 백만 배 이상 높고 연료비축성이 뛰어나, 국토가 좁고 에너지 수요가 큰 우리나라 여건에 적합한 에너지원이다.[14]

> 우리나라는 화석에너지 자원뿐만 아니라
> 재생에너지 자원도 빈약한 편이다.

12) International Energy Agency, “Solar Energy Mapping the road ahead”, 2019.

13) 3.5kWh/kWp라는 것은 하루 24 시간중 3.5 시간 동안 태양광 발전을 할 수 있다는 의미임.

14) 원자력 발전에 사용되는 핵연료의 원료 물질인 우라늄은 수입하지만, 우라늄 가격이 원자력 발전 원가에서 차지하는 비중은 7%에 불과함. 나머지는 우리 기술로 하므로, 원자력 발전 전기를 준국산 에너지라 할 수 있음.

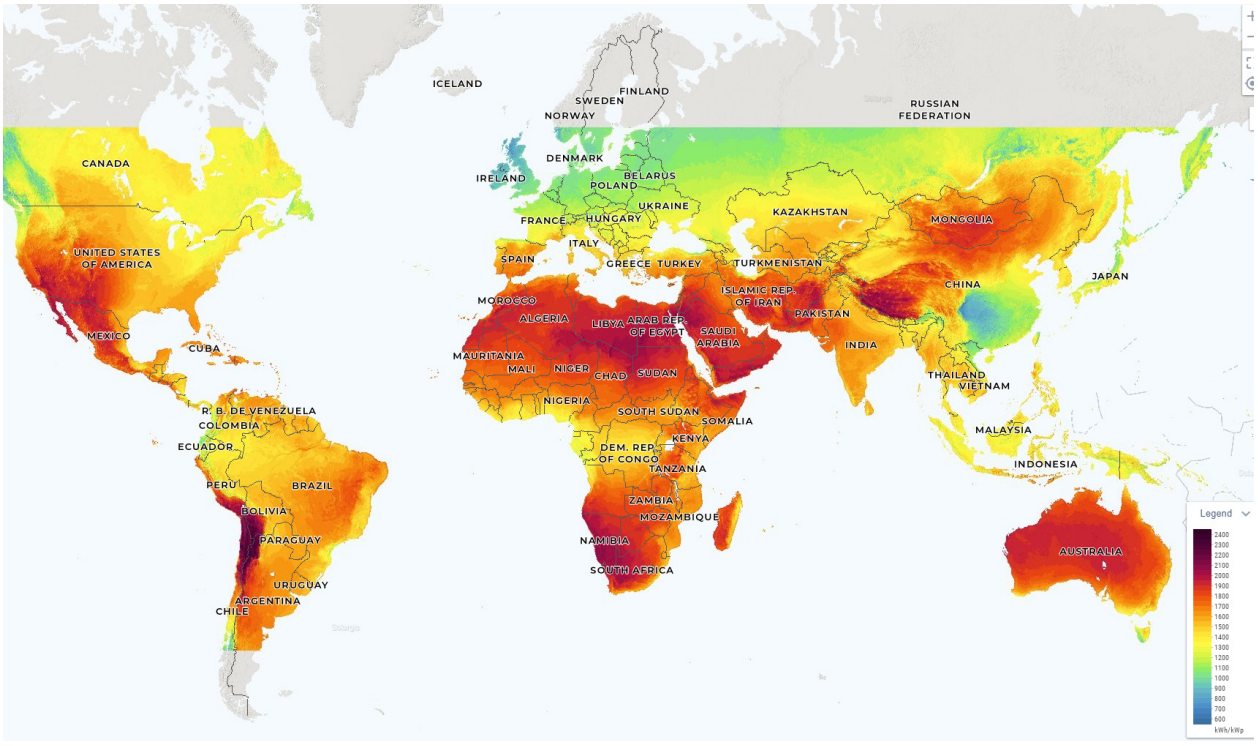


그림 6. 세계 지역별 태양광 패널의 전기생산 가능량

원자력은 국토가 좁고 에너지 수요가 큰 우리나라 여건에 적합한 에너지원이다.



제 2 장

기후위기와 무탄소 에너지원

2.1 기후위기와 온실가스

2.2 글로벌 탄소중립 협력

2.3 우리나라의 온실가스 배출 문제

2.4 에너지원별 생애주기 이산화탄소 배출

2.5 태양광 발전

2.6 풍력 발전

2.7 원자력 발전

2.8 무탄소 신전원 등



제 2 장.

기후위기와 무탄소 에너지원

2.1 기후위기와 온실가스

세계 곳곳에서 기상이변이 빈발하고 있다. 그 원인으로 기후 온난화가 지목되고 있다. 이러한 **기후 온난화는 인류가 배출한 온실가스에 기인한 것으로 알려졌다.**

2021년 8월 "Nature" 학술지에 발표된 논문[15]은 현재 지구 표면 온도가 1850~1900년 평균 지구 표면 온도 대비 약 1.1도 상승하였고(그림 7), 이를 해결하려면 온실가스 발생을 줄여야 한다고 강조하였다. 여러 과학 저널에 발표된 연구논문의 97% 이상도 기후위기는 지난 세기 인간의 화석에너지 사용으로 초래된 것이라고 밝히고 있다. 한편 대기 중 이산화탄소 농도 급등을 설명하는 하키스틱 모형(Hockey stick model)이 잘못된 것이라는 주장도 있다.[16] 기후 온난화 원인에 관해 다소의 논란이 있지만, **국제적으로는 기후위기 극복을 위해 이산화탄소 배출량을 줄여야 한다는 데로 의견이 수렴되고 있다.**

> 기후 온난화는 인류가 배출한 온실가스에
> 기인한 것으로 알려졌다.

15) Tollefson, J. "IPCC climate report: Earth is warmer than it's been in 125,000 years", Nature, 2021.

16) https://www.theatlantic.com/technology/archive/2013/05/the-hockey-stick-the-most-controversial- chart-in-science-explained/275753/

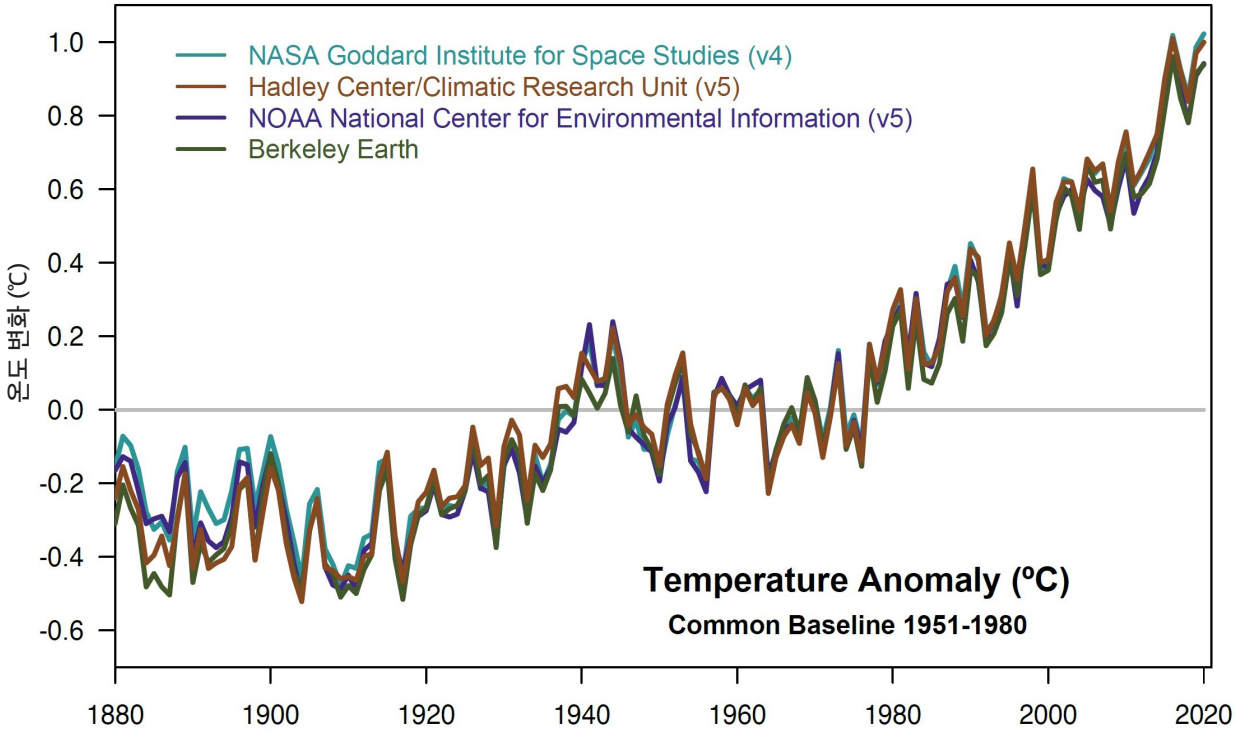


그림 7. 지구 표면 온도 변화(1880-2020)

> 국제적으로는 기후위기 극복을 위해 이산화탄소 배출량을 줄여야 한다는 데로 의견이 수렴되고 있다.

2.2 글로벌 탄소중립 협력

"UN 기후변화협약"은 온실가스에 의해 벌어지는 지구 온난화를 줄이기 위한 국제 협약이다. 1992년 브라질 리우환경회의에서 처음 채택되었다. 이 협약 수정안인 교토의정서는 2005년 발효되었다. 파리기후변화협정은 2015년 채택되었고 이듬해 발효되었다. **2018년 10월 「UN 기후변화에 관한 정부간 협의체(IPCC)」는 지구 평균온도 상승 폭을 산업화 이전 대비 1.5℃ 내로 제한하기 위해 2050년까지 "탄소중립"을 달성해야 한다는 특별보고서를 발간했다.**

지구 온난화 원인에 대한 다소의 논쟁이 있긴 하지만, 현재 대다수 국가는 온실가스 감축 대열에 참여하고 있다. **현재 우리나라, 미국, 유럽연합, 일본 등을 비롯한 세계 124개국**[17]**이 2050년까지 탄소중립을 공식 선언하였다**(그림 8). 중국을 비롯한 일부 국가는 그 시기를 2060년으로 제시하고 있다. 이제 탄소중립은 국제사회 규범이 돼가고 있다.

> 지구 평균온도 상승 폭을 산업화 이전 대비
> 1.5℃ 내로 제한하기 위해
> 2050년까지 "탄소중립"을 달성해야 한다.

17) https://www.visualcapitalist.com/race-to-net-zero-carbon-neutral-goals-by-country/

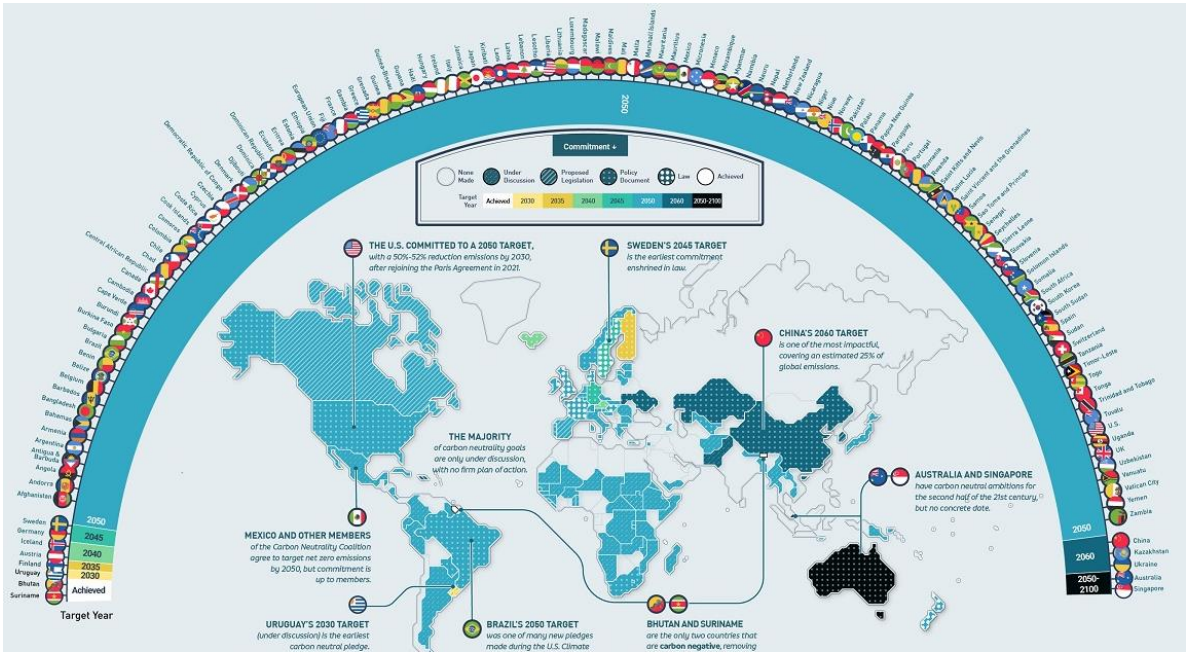


그림 8. 탄소중립 선언 국가 현황

현재 우리나라, 미국, 유럽연합, 일본 등을 비롯한
세계 124개국이 2050년까지 탄소중립을 공식 선언하였다.

2.3 우리나라의 온실가스 배출 문제

유엔을 중심으로 한 국제사회의 기후변화 대응은 1990년대 초부터 시작됐다. 유럽 선진국은 기후변화 대응을 위해 구속력 있는 국제 정책 수립을 주장했다. 그러나 중국, 인도, 아프리카 및 중남미 국가 등 저개발국가는 선진국 주장에 동조하지 않았다. 이들 국가는 경제성장의 디딤돌로 값싼 화석에너지를 포기하기 어려웠다. **각국의 이해관계가 복잡하게 얽히다 보니 그간 국제사회의 일사불란한 기후변화 대응이 전개되지 못했다.**

국제과학자그룹 "글로벌카본프로젝트" 분석 결과 등에 따르면, **우리나라는 2019년 6억 1100만 톤의 이산화탄소를 배출하여, 세계 9번째로 많은 이산화탄소를 배출했다(그림 9).**[18] "탄소중립"이 국제규범이 돼가는 현 상황에서 우리나라도 이를 더 미룰 수 없게 됐다. "탄소중립"을 위한 길은 에너지 이용방식의 전환에서 찾아야 한다. 첫째, 온실가스를 배출하는 석유, 석탄, LNG 등 화석에너지 사용을 최대한 줄여야 한다. 둘째, 이른 시일 안에 무탄소 에너지원을 주 에너지원으로 삼아야 한다.

> 우리나라는 2019년 6억 1100만톤의 이산화탄소를 배출하여,
> 세계 9번째로 많은 이산화탄소를 배출하였다.

18) http://www.globalcarbonatlas.org/en/CO2-emissions

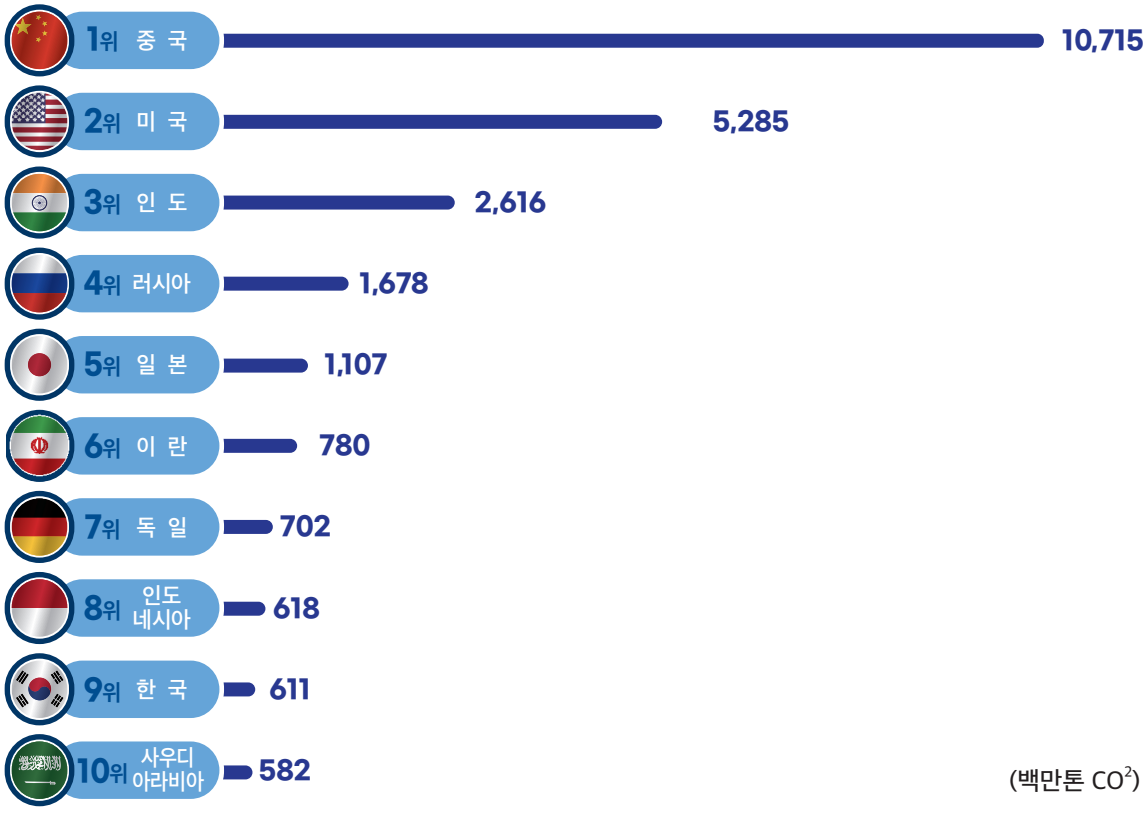


그림 9. 2019년도 이산화탄소 배출량 상위국가

"온실가스를 배출하는 석유, 석탄, LNG 등
화석에너지 사용을 최대한 줄이고,
이른 시일 안에 무탄소 에너지원을 주 에너지원으로 삼아야 한다."

2.4 에너지원별 생애주기 이산화탄소 배출

전기생산에 사용하는 에너지원의 이산화탄소 배출량은, 발전(發電) 과정뿐만 아니라 발전소 건설, 연료공급 및 발전소 정지 후 폐쇄·해체까지 "발전 생애주기(Life-cycle)" 동안 배출하는 이산화탄소 모두를 포함해 평가한다. 그림 10은 「기후변화에 관한 정부간 협의체(IPCC)」가 발표한 발전원별 "발전 생애주기 이산화탄소 배출량"이다.[19)]

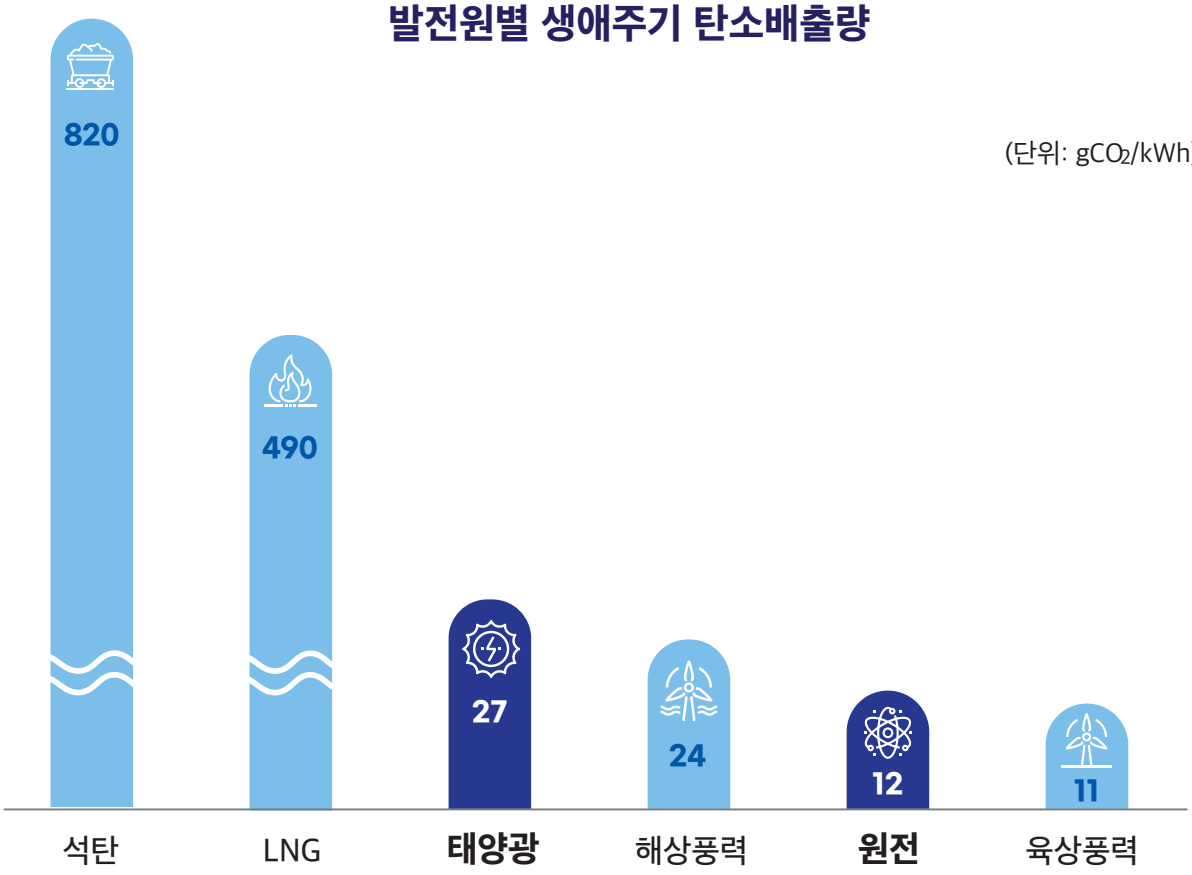
재생에너지와 원자력은 발전 과정에서 이산화탄소 배출이 없다. 태양광 발전은 패널을 제작하는 과정에서, 풍력 발전은 풍차 날개를 제작하는 과정과 수명만료 후 폐기 과정에서 에너지를 많이 쓴다. 이 에너지를 화석에너지로부터 공급받으면 생애주기 중 이산화탄소 배출이 일어난다. 마찬가지로 원전도 건설, 우라늄 농축 및 핵연료 공급, 사용후핵연료 처분과 해체 과정 중 온실가스가 발생한다. **현재 생애주기 전 기간 중 이산화탄소 배출이 전혀 없는 무탄소 에너지원은 없다. 이산화탄소 배출이 극히 적은 저탄소 에너지원만 있을 뿐이다.** 이 책자에서는 발전 과정 중 이산화탄소를 직접 배출하지 않는 에너지원을 무탄소 에너지원으로 부르기로 한다.

> 현재 생애주기 전 기간 중
> 이산화탄소 배출이 전혀 없는 무탄소 에너지원은 없다.

19) IPCC 보고서. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ipcc_wg3_ar5_annex-iii.pdf

발전원별 생애주기 탄소배출량

(단위: gCO_2/kWh)



※ 직접 · 공급망 배출 및 알베도 효과까지 포함한 수치임

그림 10. 발전원별 생애주기 탄소배출량

> 이산화탄소 배출이 극히 적은 저탄소 에너지원으로
> 원자력과 재생에너지가 있다.

2.5 태양광 발전

태양광 발전은 연료비는 안 들지만, 발전 설비 제작 · 설치 비용, 유지 · 관리 비용, 수명종료 후 해체 비용 등이 든다. 국제에너지기구(IEA)와 OECD/NEA의 보고서[20]에 따르면 **우리나라 태양광 발전의 균등화발전단가(LOCE)[21]는 70~120 USD/MWh로 우리나라 원자력 발전(39~67)이나 중국 태양광 발전(37~62)보다 2배 가까이 높다.** 태양광 패널 가격은 급속도로 낮아지고 있지만 발전시설 설치, 운영, 부지 비용 등은 절감에 한계가 있다.

태양광 발전은 발전량 변동성이 크다. 낮에만 전기를 생산하고 그나마 날씨에 따라 발전량이 크게 좌우되어, 소비자가 필요로 할 때 전기 공급을 못 할 수 있다. **이때를 대비해, 전기를 대신 공급할 수 있는 예비 발전원이 꼭 필요하다.** 예비 발전원 설치에 비용이 든다. 또 전체 전력계통에서 태양광 발전 비중이 커지면, **일조량이 많은 시간에 수요보다 많은 전기를 생산해 전력계통 안정성을 해칠 수 있다. 이때를 대비해 배터리 등 에너지 저장장치(Energy Storage System, ESS) 같은 전력계통 안정화 수단을 갖춰야 한다. 여기에도 막대한 비용이 발생**한다.

> 국제에너지기구(IEA)와 OECD/NEA의 보고서에 따르면 우리나라 태양광 발전의 균등화발전단가(LOCE)는 우리나라 원자력 발전이나 중국 태양광 발전보다 2배 가까이 높다.

20) International Energy Agency and Nuclear Energy Agency"Projected Costs of Generating Electricity 2020 Edition", 2020.

21) 균등화발전단가(Levelized Cost of Electricity; LCOE)는 발전설비 수명 기간 중 불규칙적으로 발생하는 모든 비용과 발전량을 화폐의 시간적 가치를 고려해 일정 시점으로 할인하고 연도별로 균일하게 나타낸 단위 가격임.

1GW 용량의 **원전 1기가 생산하는 전기를 태양광 발전으로 생산하려면 서울시 면적의 1/6에 해당하는 약 100 km^2의 부지가 필요**하다. 수명이 60~80년인 원전과 달리 태양광 패널 수명은 15~25년 정도다. 태양광 패널 교체 및 발전시설 해체 시 대량의 폐기물이 발생한다. **한국환경정책평가연구원은 태양광 폐패널 배출량이 2018년 20톤에서 2040년 11만 2천 톤까지 늘어날 것이라고 예상했다**[22].

> **태양광 발전은 발전량 변동성이 크다.**
> **낮에만 전기를 생산하고 그나마 날씨에 따라 발전량이 크게 좌우되어**
> **예비 발전원과 전력계통 안정화 수단을 갖춰야 한다.**

22) "태양광 폐패널의 관리 실태조사 및 개선방안 연구", 한국환경정책평가원 (2018).

2.6 풍력 발전

바람의 힘으로 거대한 바람개비를 돌려 발전하는 풍력 발전은 태양광 발전과 마찬가지로 발전 과정에서 이산화탄소 배출이 없다. 또 자연이 계속 에너지를 제공하는 재생에너지라는 장점이 있다. 반면, 발전 단가가 높고, 발전량 변동성이 크며, 발전시설 설치에 넓은 토지가 필요하다는 단점이 있다.

국제에너지기구(IEA)와 OECD/NEA의 보고서[23]에 의하면, **우리나라의 육상풍력 발전 균등화발전단가는 86~137 USD/MWh로 국내 태양광 발전보다 약간 높은 편이고, 덴마크 육상풍력 대비 4배 가까이 높다.** 이렇게 균등화발전단가가 높은 이유는 그림 11[24]에서 보는 것처럼, 우리나라 풍력 자원이 빈약하여 같은 설비를 설치해도 발전량이 북유럽의 20~30% 수준으로 적기 때문이다. 풍력 자원 측면에서 해상이 육상보다는 좋지만, 해상풍력 발전시설의 높은 건설비, 전력망 연결비용 등으로 인해 해상풍력 발전 경제성은 오히려 육상풍력 발전보다 떨어진다. **풍력 발전도 태양광 발전과 더불어 대표적인 변동성 재생에너지이기 때문에 예비 발전원과 전력계통 안정화 수단을 갖춰야 한다.**

“우리나라 육상풍력 발전 균등화발전단가는
86~137 USD/MWh로 국내 태양광 발전보다 약간 높은 편이고,
덴마크 육상풍력 대비 4배 가까이 높다.”

23) International Energy Agency and Nuclear Energy Agency, “Projected Costs of Generating Electricity 2020 Edition”, 2020.

24) https://globalwindatlas.info/

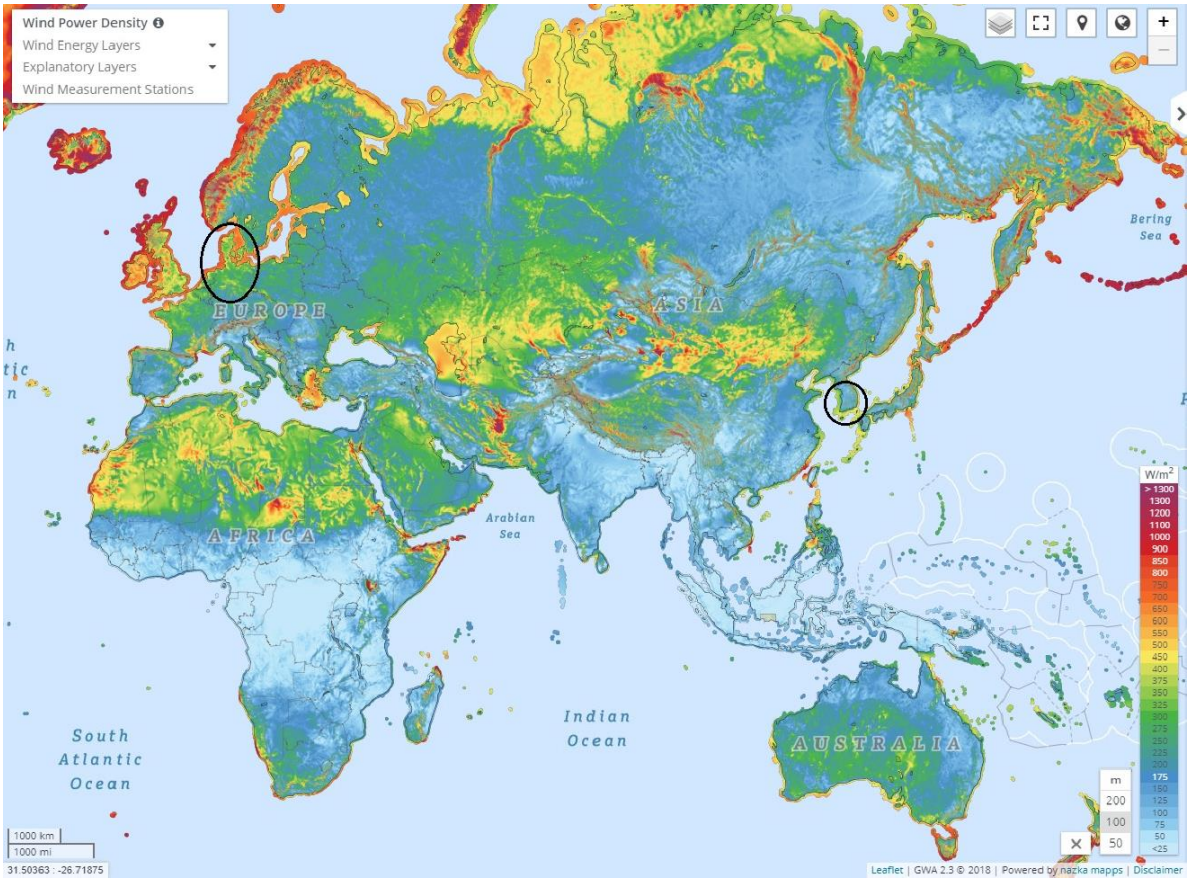


그림 11. 세계 풍력자원 분포: 우리나라 풍력자원은 북유럽의 25% 수준

풍력 발전도 태양광 발전과 더불어
대표적인 변동성 재생에너지이기 때문에 예비 발전원과
전력계통 안정화 수단을 갖춰야 한다.

2.7 원자력 발전

원자력은 "고밀도 무탄소" 에너지원이다. 우라늄(U-235) 1그램이 핵분열하여 발생하는 에너지는 석탄 3톤이 연소해 발생하는 에너지와 맞먹는다. 이 때문에 원자력 발전은 우리가 원하는 출력을 내는데 필요한 연료의 양이 상대적으로 매우 적다. 우리나라는 우라늄을 전량 수입하고 있지만, 우라늄 가격이 원자력 발전원가에서 차지하는 비중은 7%에 불과하다. 핵연료 제작비용 등을 포함해도, 연료비가 원자력 발전원가에서 차지하는 비중은 10% 수준이다. 그래서 **원자력 전기는 준국산 에너지로 간주할 수 있다. 우라늄 연료는 비축성도 뛰어나 에너지 안보에 크게 기여하고 있다.**

원전 이용률은 80~90% 이상이다. **원자력은 계절이나 기상과 무관하게 안정적으로 전력을 공급하고, 경제성도 뛰어나 기저부하를 담당하기에 최적이다.** 그림 12[25]는 우리나라의 발전원별 발전원가에 발전회사의 이익을 더한 전력 판매 단가를 보여주고 있다. **우리나라는 세계 최고수준의 원전기술과 원전부품 공급망을 보유하고 있다.** 그 결과, 우리나라는 대형 원전을 미국이나 유럽 가격의 절반 이하로 값싸게 지을 수 있게 되었다.[26] 이런 장점에도 불구하고 원자력 안전과 사용후핵연료 처분 문제를 우려하는 시각이 있다(부록 참조).

"원자력 전기는 준국산 에너지로 간주할 수 있다. 우라늄 연료는 비축성도 뛰어나 에너지 안보에 크게 기여하고 있다."

25) 전력거래소 전력거래통계, REC 거래동향 리포트

26) MIT, "The Future of Nuclear Energy in a Carbon Constraint World", 2018.

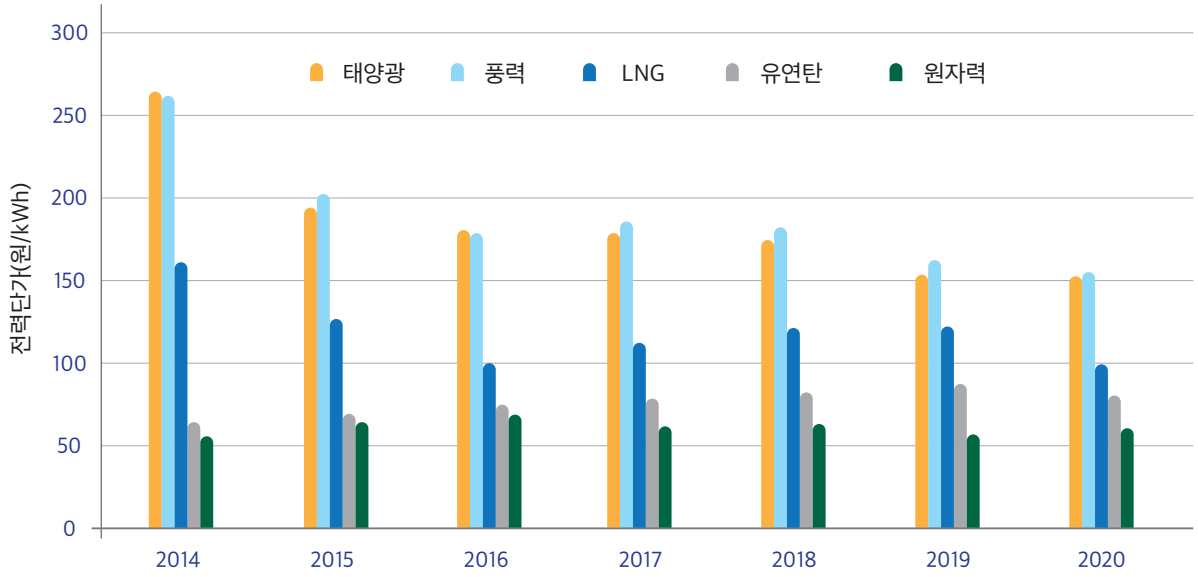


그림 12. 최근 우리나라의 발전원별 전력단가 추이(태양광, 풍력은 보조금 포함한 값임)

**원자력은 계절이나 기상과 무관하게 안정적으로 전력을 공급하고,
경제성도 뛰어나 기저부하를 담당하기에 최적이다.**

2.8 무탄소 신전원 등

일부 국가는 신기술에 기반한 무탄소 신(新)전원을 탄소중립 방안의 하나로 고려하고 있다. 우리 정부도 지난 8월 발표한 "2050 탄소중립 시나리오(안)"에서 무탄소 신전원 비중을 14.1~21.4%까지 고려하고 있다. 대표적 무탄소 신전원인 수소는 시나리오에 따라 2050년 2,750~2,920만 톤이 필요하며, 이 중 80~82.4%를 수입하겠다고 밝혔다.

그런데, 수소(H_2)는 1차 에너지원이 아니라, 별도의 생산 과정을 거치는 2차 에너지원, 즉, 에너지 담체(Carrier)다. **관건은 수소를 친환경적으로, 그리고 경제적으로 생산·수송하는 것이다. 이 과정에서 이산화탄소가 많이 발생하면 무탄소 에너지원이라 할 수 없다.** 수소 생산방법으로는 천연가스 개질, 수전해 등이 있다. 천연가스 개질로 수소 1kg 생산 시, 7kg 이상의 이산화탄소를 발생시킨다. 수전해는 물을 전기분해하여 수소를 생산하므로 이산화탄소 배출이 없지만, 이때 필요한 전기를 경제성을 갖춘 무탄소 전원으로 공급해야 의미가 있다. 또 수소를 수입하는 것은 에너지 안보와 무역수지 측면에서 불합리하며, 수입 수소의 청정성도 담보하기 어려운 문제가 있다.

에너지원은 아니지만, **이산화탄소 포집·활용·저장(Carbon Capture, Utilization and Storage, CCUS) 기술도 주목받고 있다.** 이 기술은 이미 소규모로 사용되고 있지만, 대용량화하려면 막대한 비용이 필요하다. 이처럼 **수소나 CCUS 등과 같이 유망한 "탄소중립" 수단은 아직 기술적으로 미성숙돼 있거나 충분한 경제성을 갖추고 있지 않아, 현실화되기까지 지속적인 연구개발이 필요한 상황이다.**

> 수소나 CCUS 등과 같은 "탄소중립" 수단은
> 아직 기술적으로 미성숙돼 있거나
> 충분한 경제성을 갖추고 있지 않다.



제 3 장

탄소중립을 위한 에너지 정책

3.1 우리나라 에너지 관련 계획

3.2 에너지 정책의 특성

3.3 재생에너지의 간헐성 문제와 에너지저장장치

3.4 원자력 발전의 탄소중립 기여도

3.5 2050 탄소중립을 위한 에너지 정책 수립 시 유의사항



제 3 장.

탄소중립을 위한 에너지 정책

3.1 우리나라 에너지 관련 계획

우리나라는 2008년부터 '에너지 헌법'이라 불리는 에너지 분야 최상위 법정계획인 "에너지기본계획"[27]을 5년 주기로 수립하고 있다. 에너지기본계획은 계획 수립 시점부터 향후 20년 동안의 에너지 수요와 공급 전망, 에너지 확보 및 공급 대책, 에너지 관련 기술개발 등을 담고 있다. 에너지기본계획의 하위 계획도 10여 개에 달한다. "전력수급기본계획"[28], "신재생에너지기본계획", "에너지기술개발계획" 등이 이에 해당한다.

그림 13[29]은 지난 100여년간 유가 변동추세를 보여주고 있다. 에너지자원의 해외 의존도가 높으면 국제정세 등에 따라 에너지 수급 불안정성이 급격히 커질 수밖에 없다. 우리나라는 1970년대 두 차례 석유파동을 겪으면서 안정적인 에너지 공급의 중요성을 인식하게 되었다. 그 후 중장기적인 에너지 수급 계획을 수립하고, 원자력 등 우리나라에 적합한 에너지 기술을 자립하면서 다행히 에너지 수급 실패로 인한 경제 위기는 없었다.

27) 에너지기본계획: 20년을 계획 기간으로 5년마다 수립. 2019년 3차 기본계획(2019~2040)을 수립하였음. 에너지위원회, 녹색성장위원회, 국무회의 등의 3단계로 심의·확정함.

28) 전력수급기본계획: 15년을 계획 기간으로 2년마다 수립(전기사업법 제25조). 2020년, 9차 계획(2020~2034)을 수립함. 에너지원별 설비 비중을 구체적으로 정하기 때문에, 가장 중요한 국가 에너지계획 중 하나임.

29) https://www.macrotrends.net/1369/crude-oil-price-history-chart

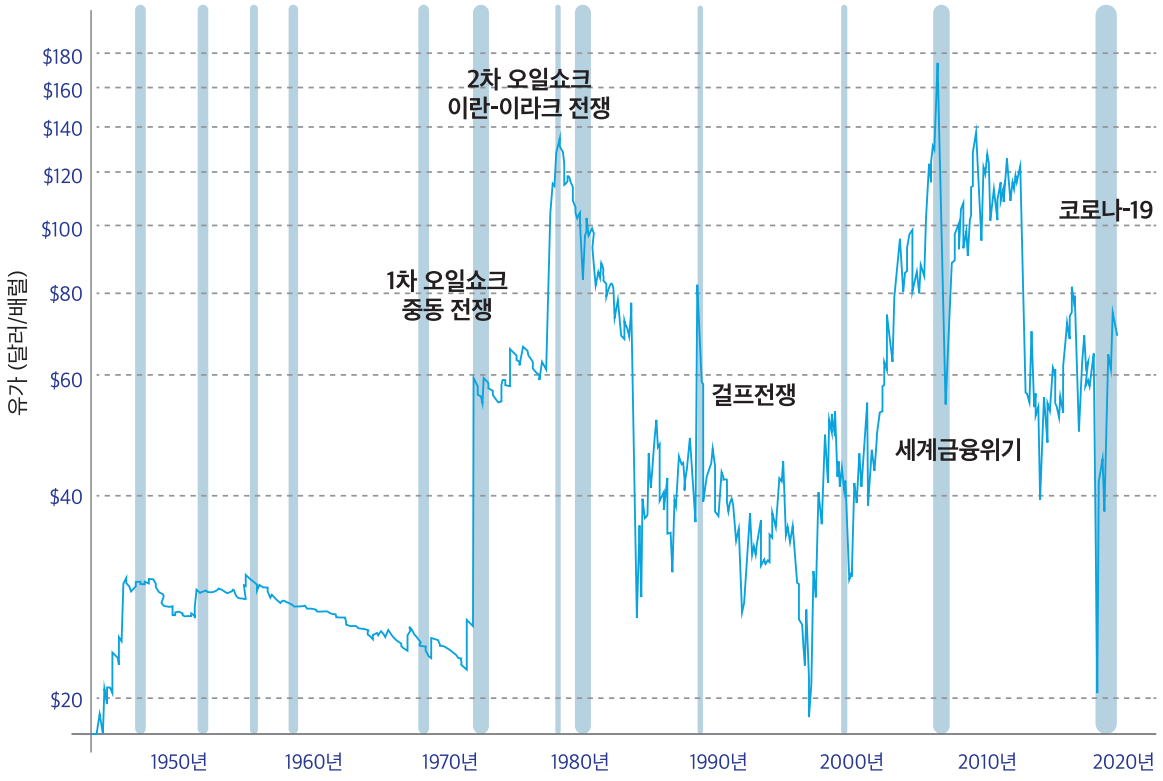


그림 13. 세계 유가 변동 추이

> 우리나라는 2008년부터 '에너지 헌법'이라 불리는
> 에너지 분야 최상위 법정계획인 "에너지기본계획"을
> 5년 주기로 수립하고 있다.

3.2 에너지 정책의 특성

에너지 정책은 장기적 안목으로 수립해야 한다. 상황에 따라 전력수요는 순식간에 급증할 수 있지만, 전력공급은 갑자기 늘릴 수 없다. 원전은 건설에만 7~8년, 석탄 화력발전소도 4~5년은 걸린다. 그뿐 아니라 변전 및 송전 설비도 함께 갖춰야 하므로 장기간이 소요된다. 그림 14[30]에서 보듯이, 2011년 9월 15일 발생한 수도권 대정전은 그 이전 정부 때 발전소 건설을 지체하면서 비롯된 것으로 볼 수 있다.

정부는 어느 순간이든 전기 수요를 감당할 수 있게 발전시설을 준비해 둬야 한다. 이런 점에서 최대 전력수요의 정확한 예측이 중요하다. 최대 전력수요를 과소평가하면 전력 위기가 발생할 수 있으며 최악의 경우 대정전으로 이어질 수 있다.

또한, **현재 실현 가능한 기술에 바탕을 두고 경제성 등을 감안하여 장기 전력수급계획을 수립해야 한다.** 기술성과 경제성이 미확보된 미래 기술에 과하게 의존하는 것은 금물이다. 이런 대표적인 예가 남는 전기를 저장했다가 부족할 때 사용하는 에너지저장장치(ESS)에 크게 의존하려는 에너지 정책이다. 우리나라 전체가 하루 동안 소비하는 전기를 저장하려면 배터리 확보에 약 600조 원이라는 천문학적 비용이 필요하다. 현실성이 아주 떨어진다.

> 정부는 어느 순간이든
> 전기 수요를 감당할 수 있게 발전시설을 준비해 둬야 한다.

30) e-나라지표 (전력수급동향), https://www.index.go.kr/

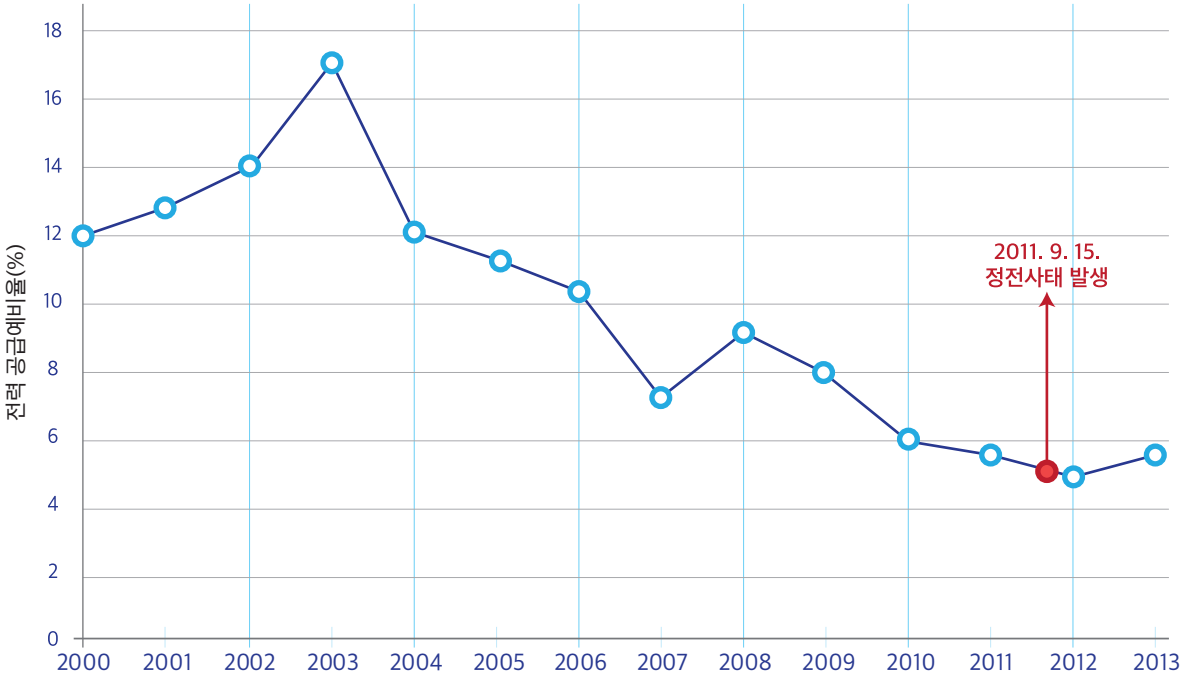


그림 14. 2000~2013년의 전력 공급예비율 변화

현재 실현 가능한 기술에 바탕을 두고
경제성 등을 감안하여 장기 전력수급계획을 수립해야 한다.

3.3 재생에너지의 간헐성 문제와 에너지저장장치

재생에너지의 가장 큰 문제는 간헐성이다. 간헐성은 밤낮과 기상여건에 따라 발전량이 가변적이고 불규칙한 특성을 말한다. 태양광은 밤낮과 기상 조건에 따라 발전량이 변하고 인위적 조절이 불가능해서 수요에 맞춰 전기를 공급하기 어렵다. 풍력발전의 간헐성도 크다. 그림 15[31]는 2016년 1월과 7월 독일의 풍력 및 태양광 발전량 변화를 그린 것으로, 재생에너지의 간헐성을 잘 보여주고 있다. 당시 독일의 재생에너지 발전 설비용량은 약 96GW이었다. 그런데 발전량은 2GW에서 42GW까지 들쭉날쭉했다. 이런 간헐성 보완을 위해 예비 발전원의 발전량을 시시각각 조절하고, 인접국과 전기를 수시로 주고받아야 했다.

에너지 섬이면서 수력발전시설이 미약한 우리나라는 재생에너지의 간헐적 발전에 대응하기 위해 **즉각 대응이 쉬운 LNG 발전을 활용할 수 밖에 없다. 그런데 LNG는 비싸고 석탄화력의 60% 수준의 이산화탄소도 배출한다.** 더구나 재생에너지의 간헐적 발전에 대응하기 위해 LNG 발전을 짧은 주기로 켜고 끄는 걸 반복하면 발전효율은 더욱 떨어지는 문제가 있다. 간헐성에 대응하기 위해 다양한 ESS를 활용할 수 있다. 여분의 전기를 배터리에 저장하거나, 수소 생산, 열저장, 또는 양수 발전을 위한 물 끌어올리기 등과 같은 방법으로 저장해두었다가 필요할 때 다시 사용할 수 있다. 그러나 이러한 **ESS는 설치비용이 아주 비싸고, 양수 발전은 설치에 한계가 있다.**

> 재생에너지의 가장 큰 문제는 간헐성이다.

31) Fraunhofer-Institut fur Solare Energiesysteme ISE, https://www.energy-charts.de/power.htm

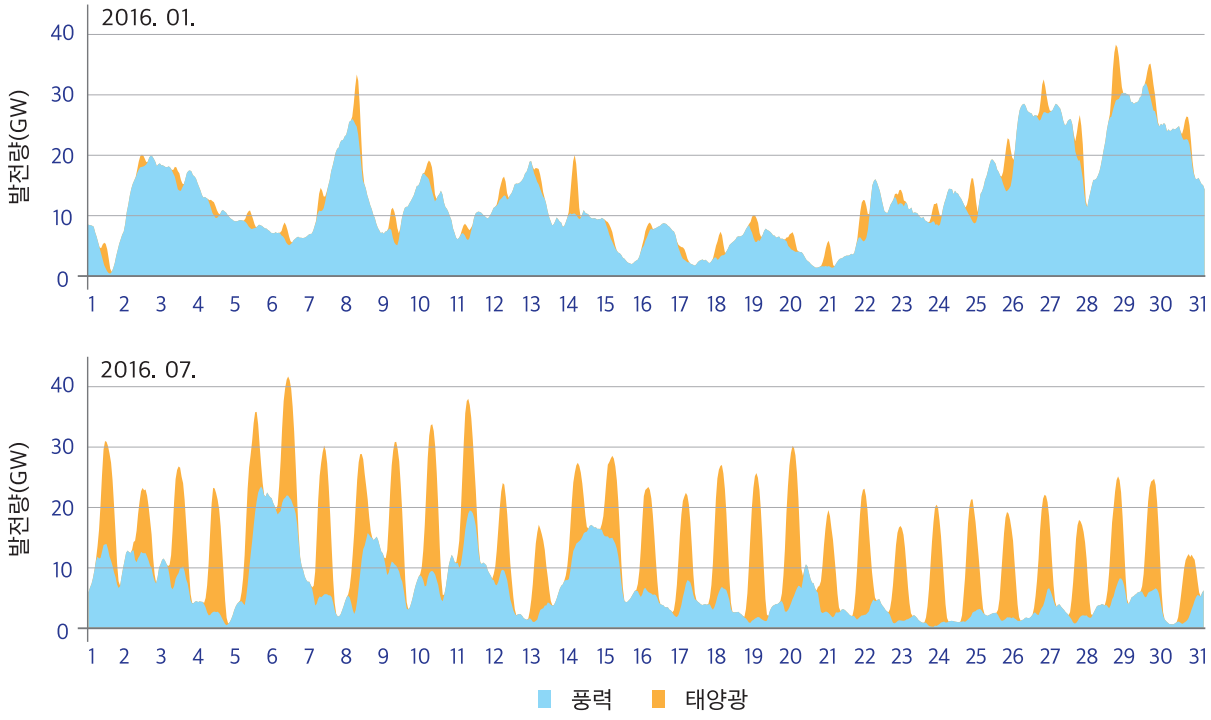


그림 15. 재생에너지 간헐성 사례: 2016년 1월 7월의 독일 풍력 및 태양광 발전용량

간헐성은 밤낮과 기상여건에 따라 발전량이 가변적이고 불규칙한 특성을 말한다.

3.4 원자력 발전의 탄소중립 기여도

원자력은 대용량 무탄소 에너지원이다. 원자력 발전의 생애주기 이산화탄소 배출량(12gCO_2/kWh)은 육상풍력(11 gCO_2/kWh)과 함께 최소 수준이다. 그림 16[32]에서 보듯이, **원자력은 1970년대부터 지금까지 무탄소 에너지를 전 세계에 가장 많이 공급하였다.** 단 440여 기의 원전만으로도 가장 많은 무탄소 에너지를 공급했다는 사실은 원자력이 가장 경제적이면서도 효율적인 "탄소중립" 수단임을 보여주는 방증이다.

현재 우리나라에서 발전 비중이 가장 큰 무탄소 에너지원은 원자력이다. **앞으로 "탄소중립"을 위해 줄어들 석탄과 LNG 발전의 상당 부분을 경제적으로 대체할 수 있는 것은 원자력 발전뿐이다. 재생에너지의 간헐성으로 발생하는 간접비용 문제를 해결할 수 있는 가장 효과적인 방안도 원자력이다.** 그간 원자력은 재생에너지 간헐성 보완이 어려워, 재생에너지와는 공존할 수 없는 에너지라고 매도되어 왔다. 그러나 원전에 조속기(Governor valve)를 설치하면 석탄 발전과 같은 유연 운전이 가능하다. 프랑스처럼 부하추종(Load follow) 운전 기술[33]을 도입해도 재생에너지의 간헐성을 보완할 수 있다.

우리나라는 원자력을 포기한 채 "탄소중립" 목표를 경제적으로 달성할 수 없다. 국가 전력계통 안정성을 유지하며 재생에너지의 "탄소중립" 기여도를 극대화하기 위해서는, **재생에너지와 공존할 수 있는 원자력 비중을 찾아 적정 에너지 믹스를 구성해야 한다.**

> 우리나라는 원자력을 포기한 채 "탄소중립" 목표를
> 경제적으로 달성할 수 없다.

32) International Energy Agency, "Nuclear Power in a Clean Energy System", 2019.

33) 전기 수요에 맞춰 발전량을 조절하면서 원전을 운영하는 기술을 말함.

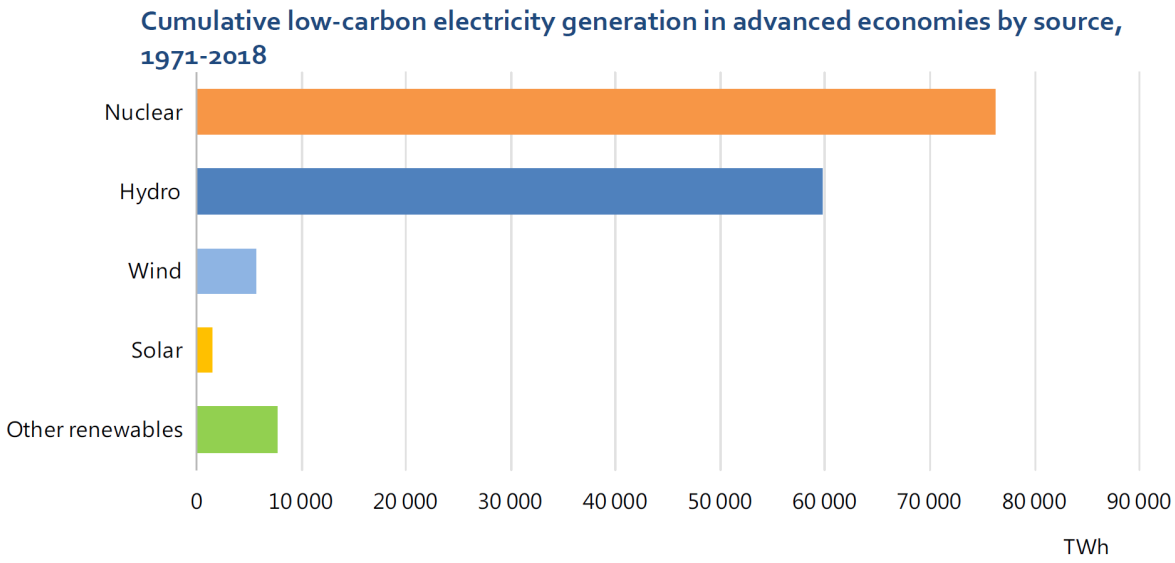


그림 16. 1971년부터 2018년까지 무탄소 에너지원별 누적발전량

재생에너지와 공존할 수 있는 원자력 비중을 찾아
적정 에너지 믹스를 구성해야 한다.

3.5 2050 탄소중립을 위한 에너지 정책 수립 시 유의사항

현재 124개국이 2050년 탄소중립을 선언하였고, 우리나라도 그 대열에 합류하였다. 세계 각국은 자원 보유량과 자연환경 등 자국의 실정을 고려해, 적정 에너지 믹스를 구성하고 있다. 에너지자원 빈국인 우리나라는 에너지 믹스 구성 시 **"안정적 에너지 공급"을 1순위 가치**로 둬야 한다. 또한, 우리나라를 선진국으로 이끌어 왔고 미래 국가경쟁력의 근간이기도 한 **주력 산업을 파괴하는 탄소중립은 곤란하다.** 탄소중립은 퇴보의 단초가 아니라 도약의 계기가 되어야 한다. 향후 에너지 정책을 수립할 때 다음 세 가지를 유의하기 바란다.

첫째, **우리나라 현실에 맞는 에너지원을 최대한 활용해야 한다.** 우리나라는 수력과 풍력 자원이 빈약하다. 그나마 태양광과 원자력이 현실적인 무탄소 에너지원이다. 이런 사실에 기반해 에너지 안보를 지키면서 기술적으로 구현 가능한 에너지 정책을 수립해야 한다. 친환경성과 경제성을 동시에 고려해야 함은 물론이다. 향후 성공 여부가 불확실한 기술에 과도하게 의존하는 비현실적인 장밋빛 청사진을 고집해서는 안 된다.

둘째, **에너지 정책 수립 시에는 이념이나 신념보다 과학기술과 객관적 사실을 우선**해야 한다. 이를 위해 에너지 정책 수립과정에 에너지 및 환경 등 다양한 분야의 전문가와 이해관계자가 함께 참여해야 한다. 특히, 에너지 정책은 산업에 큰 영향을 미치기 때문에 산업 분야별 대표도 반드시 참여하여야 한다. 이 과정에서 사회적 비용 최소화 방안을 찾는 노력도 병행해야 한다.

셋째, **2050 탄소중립을 위한 전 세계적 에너지전환 과정에서 에너지 기술 수출국으로 도약해야 한다.** 2050년까지 세계 신규 원전 시장은 2배 이상 증가할 것으로 보인다. 세계적 수준에 도달한 우리 원자력 기술을 잘 활용하면 수출 활성화 및 일자리 창출에 크게 기여할 것이다.

> 안정적 에너지 공급을 에너지정책 수립의 1순위 가치로 둬야 한다.
> 또한 주력 산업을 파괴하는 탄소중립은 곤란하다.



부 록

원자력 팩트체크

A1. 탈원전이 대세라는데 사실인가요?

A2. 미래의 원자력 기술은 어떤 것이 있나요?

A3. 우리나라 원자력산업의 경쟁력이 있나요?

A4. 원자력 발전이 안전한가요?

A5. 우리나라 원전은 안전한가요?

A6. 체르노빌과 후쿠시마 원전 사고는 왜 발생했나요?

A7. 사용후핵연료가 아주 많다던데 사실인가요?

A8. 사용후핵연료 처분 기술이 없다는데 사실인가요?



부 록.

원자력 팩트체크

A1. 탈원전이 대세라는데 사실인가요?

2021년 현재 31개국이 443기(총 설비용량 393GW)의 원전을 운영하고 있다. 52기가 건설 중이며, 193기는 영구정지되었다 (그림 17[34]).

「UN 기후변화에 관한 정부간 협의체(IPCC)」는 2018년 발행한 "지구 온난화 1.5도 특별보고서"를 통해, **향후 30년간 세계 원전 설비용량이 2.03배로 늘어날 것이라고 예상했다. 국제에너지기구(IEA)도** 2021년 발행한 "A Roadmap to Net Zero"에서 **전 세계 원전이 2020년 대비 2030년까지 40%, 2050년까지 100% 증가한다고 예측**하였다. 선진국에서는 장기 운영 중인 원전의 '교체' 수요가 주종을 이루며, 개발도상국에서는 '신규' 수요가 많을 것으로 내다봤다. 두 보고서 모두 원자력 발전 수요가 연평균 2.3% 성장할 것으로 예측했다.

> 「UN 기후변화에 관한 정부간 협의체(IPCC)」는
> 향후 30년간 세계 원전 설비용량이 2.03배로
> 늘어날 것이라고 예상했다.

34) https://www.worldnuclearreport.org/reactors.html#tab=iso;

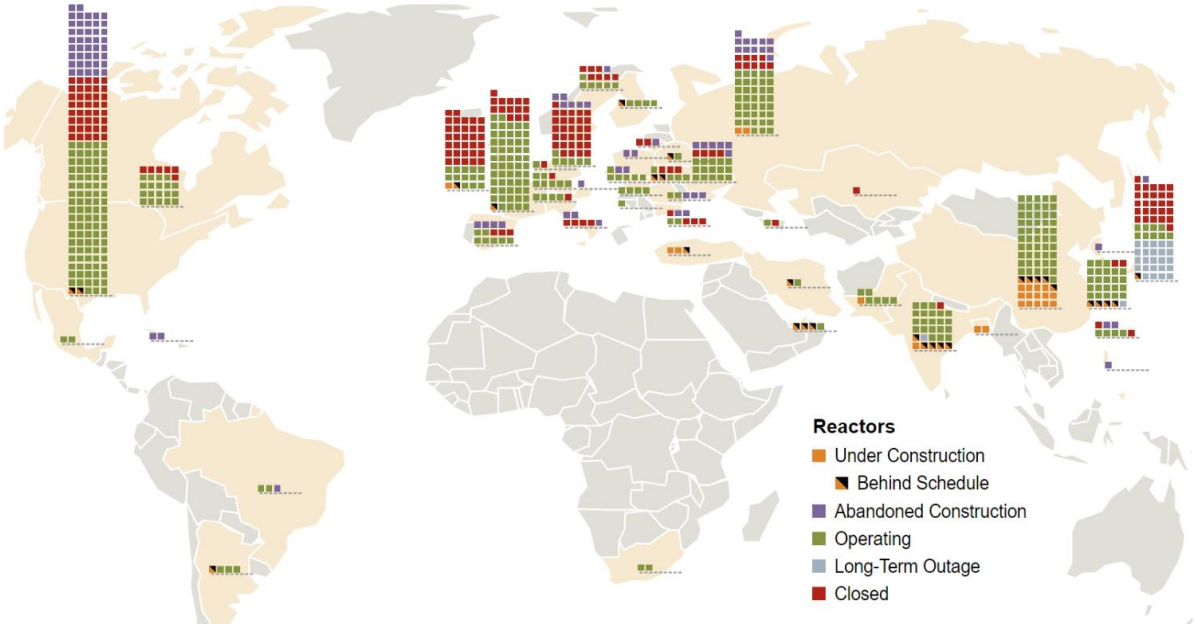


그림 17. 세계 원전 현황

국제에너지기구도 전 세계 원전이 2020년 대비 2030년까지 40%,
2050년까지 100 % 증가한다고 예측하였다.

A2. 미래의 원자력 기술은 어떤 것이 있나요?

최근 **소형모듈원전(SMR)이 전 세계적으로 각광을 받고 있다.** 과거에는 SMR이 대형 원전에 비해 경제성이 떨어진다는 이유로 시장의 선택을 받지 못했었다. 그러나 현재 세계 원전 선진국들은 미래 원자력 시장을 선도하기 위해 치열한 SMR 개발 각축전을 벌이고 있다. 여전히 SMR 경제성을 개선하기 위한 연구가 필요하다. SMR이 세계 원자력 산업계로부터 조명을 받는 이유는 전기생산뿐만 아니라 전력망이 없는 오지나 극지에서 이용, 선박 추진동력원, 우주 개발, 수소 생산 등에 다양하게 이용할 수 있기 때문이다(표 1와 그림 18 참조[35]).

기존 원전에서 생산되는 전기로 물을 전기분해하여 수소를 직접 생산하는 방안도 경제성이 탁월한 것으로 평가되고 있다. 또 **안전성과 경제성이 현저히 향상된 제4세대 원자로 개발도 활발하게 진행 중이다.**

표 1. 영국 국립원자력연구소(National Nuclear Laboratory)의 SMR 시장전망.

SMR 활용용도	국제 시장 규모	용량(MWe)	경쟁 전력원
석탄 화력발전 대체 (On-grid)	100조 이상	150-350	천연가스
오지 전력공급 (Off-grid)	30조	<10	디젤
중공업 증기 공급 (Off-grid)	12조	25-50, 오일샌드: ~250	천연가스
광산 (Off-grid)	3.5조	20	디젤



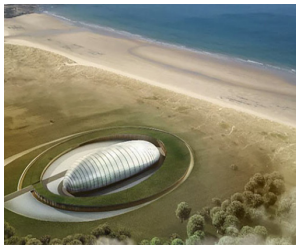
OKLO사 AURORA



NuScale사 NuScale



Westinghouse사 eVinci



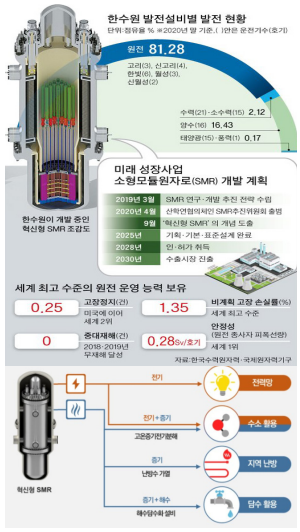
Rolls Royce사 SMR



Core Power



한국 SMART



한수원 혁신형 SMR

35) National Nuclear Laboratory (UK), "Small Modular Reactors (SMR) Feasibility Study", 2016.



노후 석탄화력발전 교체



중공업에 쓰이는 고온증기



해수 담수화



수소생산



광산지역



도서 및 오지 지역

그림 18. SMR의 활용 분야

“

최근 소형모듈원전이 전 세계적으로 각광을 받고 있다.

/

안전성과 경제성이 현저히 향상된

제4세대 원자로 개발도 활발하게 진행 중이다.

”

A3. 우리나라 원자력산업의 경쟁력이 있나요?

우리나라는 미국, 프랑스, 캐나다, 러시아에 이어 세계 다섯 번째로 원전 수출국이 되었다.[36] 지난 40여 년간 꾸준히 원전을 건설하고 기술개발을 병행하면서 세계 최고수준의 기술을 확보한 결과다.

우리나라의 원전산업 경쟁력은 원자력 발전 전기의 구매단가와 원전 건설단가를 통해 확인할 수 있다. 그림 18은 2020년 한전의 에너지원별 전력 구매단가와 사우디아라비아 원전 건설사업 입찰 시 우리나라가 제시한 건설단가[37]를 보여준다. 원자력 발전 전기 구매단가는 석탄, 수력, LNG, 재생에너지보다 현저히 낮다. 또 사우디아라비아 원전 건설사업 입찰 시 우리나라가 제시한 건설단가는 미국 건설단가의 약 32% 수준에 불과했다.

우리나라 원전산업계는 선진국 원전과 동등한 수준의 안전성을 갖춘 원전을 선진국 가격의 절반 이하로 건설할 수 있는 역량을 갖추고 있다. 탈원전 정책을 고수하는 정부도 원전 수출 정책을 유지할 수밖에 없는 이유는 바로 우리나라 원전산업의 우수한 경쟁력을 사장할 수 없었기 때문이다. 현 정부도 우리나라 원전산업의 경쟁력을 인정한 것이다.

> 우리나라 원전산업계는
> 선진국 원전과 동등한 수준의 안전성을 갖춘 원전을
> 선진국 가격의 절반 이하로 건설할 수 있는
> 역량을 갖추고 있다.

36) 과거 독일도 원전을 수출한 적이 있지만, 현재는 원전 공급능력이 없기 때문에, 세계원자력협회는 독일을 제외하고 한국을 다섯 번째 수출국으로 분류하고 있음.

37) 블룸버그 (https://biz.chosun.com/site/data/html_dir/2019/11/18/2019111803299.html 에서 재인용).

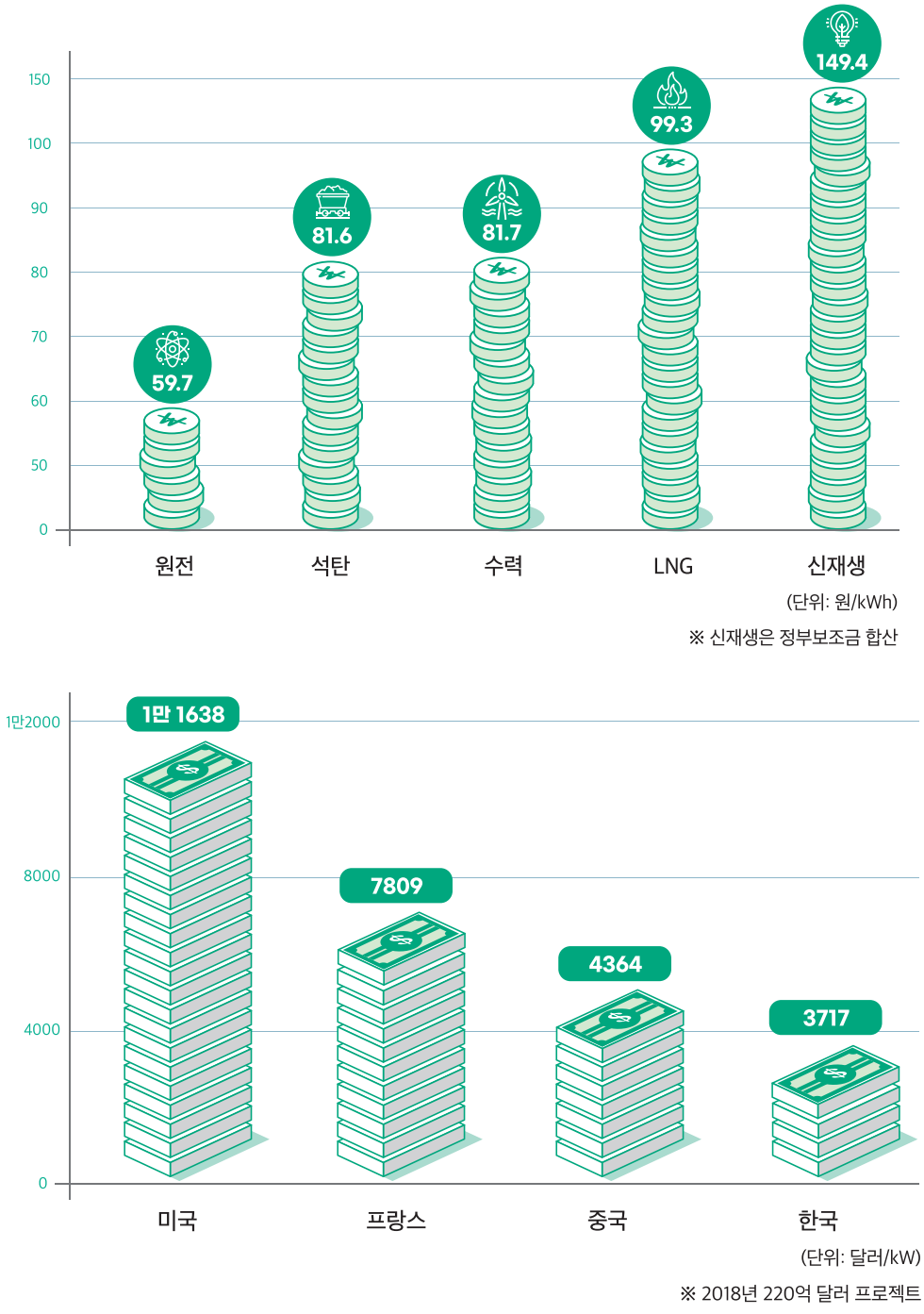


그림 19. (상)2020년 한전의 에너지원별 전력 구입 단가와 (하)사우디아리비아 원전건설 입찰 제출단가

A4. 원자력 발전이 안전한가요?

우리나라 원전(가압경수로 21기, 가압중수로 3기)의 누적가동년수[38]는 590년이고, 전 세계 동일 노형의 누적가동년수는 11,500년에 달한다. 그동안 우리나라가 주력 노형으로 채택한 가압경수로와 가압중수로에서 인명사고가 발생한 적은 없다.

1986년 체르노빌 원전사고와 2011년 후쿠시마 원전사고는 전 세계에 엄청난 충격을 주었다. 그런데 **이들 원전의 노형은 우리나라에서 건설·운영하고 있는 가압경수로와 가압중수로(CANDU)와는 설계특성이 전혀 다르다.** 세계적으로 가압경수로에서 발생한 중대사고는 1979년 미국의 스리마일(Three Mile Island, TMI) 원전 사고가 유일하다. TMI 원전 사고 때는 체르노빌과 후쿠시마 원전 사고 때와 달리 원전 외부로 방사성 물질이 전혀 누출되지 않았다. 우리나라 원전처럼 TMI 원전에 설치된 크고 견고한 격납건물이 방사성 물질 누출을 막아주었기 때문이다.

2012년 6월 10일, Forbes[39]지가 여러 발전원의 위험도 연구결과를 종합한 기사를 게재하였다. 이와 유사한 결과는 Our World in Data[40]에도 나와 있다. 그림 20은 여러 발전원의 단위 전력생산량 당 사망률(1TWh 당 사고나 대기오염 등으로 인한 사망자의 수)을 보여주고 있다. **원자력이 인류가 사용하는 에너지원 중 가장 안전한 에너지원 중 하나임을 알 수 있다.**

> 그동안 우리나라가 주력 노형으로 채택한
> 가압경수로와 가압중수로에서 인명사고가 발생한 적은 없다.

38) 누적 가동년수는 가동됐거나 가동 중인 모든 원전의 가동 기간(년 단위)의 총합임.

39) James Conca, “How Deadly Is Your Kilowatt? We Rank The Killer Energy Sources”, Forbes, 2012.06.10.

40) https://ourworldindata.org/nuclear-energy

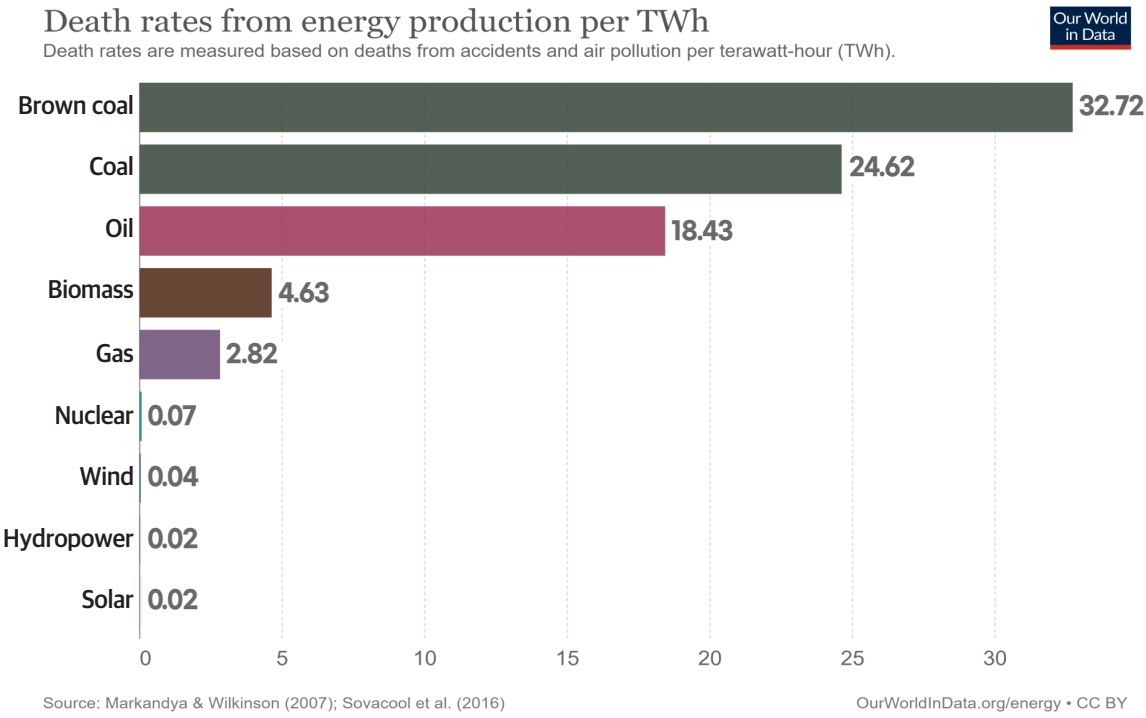


그림 20. 발전원별 단위 전력생산당 사망률(TWh 당 사망자 수)

"원자력이 인류가 사용하는 에너지원 중
가장 안전한 에너지원 중 하나임을 알 수 있다."

A5. 우리나라 원전은 안전한가요?

우리나라 원전의 우수한 안전성은 크게 세 가지 관점에서 설명할 수 있다. 첫째, **노형의 우수성을 들 수 있다. 가압경수로와 가압중수로 원전의 누적가동기간은 우리나라에서 590년, 전 세계에서 11,500년에 이르는데, 그동안 방사선 피폭으로 인한 인명사고가 전혀 없었다.** 이들 원전은 고유의 설계 안전성도 우수할 뿐만 아니라, 아주 튼튼한 격납건물이 있어서, 최악의 상황에서도 방사성 물질 유출을 막을 수 있다.

둘째, **우리나라의 우수한 원전기술도 원전 안전에 크게 기여하고 있다.** 다른 나라에 비해 사건·사고 빈도가 현저히 낮으며 지금까지 이렇다할 방사능누출사고가 단 한건도 없었다. 우리나라 기술의 우수성은 아랍에미레이트에 원전을 수출하면서 국제사회에서도 인정받았다.

셋째, **우리나라 자연환경이 원전 운전에 유리한 환경이다.** 우리나라에는 일본 등에 비해 대형 사고를 유발할 수 있는 극한적 자연재해가 거의 발생하지 않는다. 지진에 관해 우리나라는 일본과 비교할 수 없을 정도로 안전한 나라이다(그림 21)[41]. 후쿠시마 원전 사고는 지진 유발 쓰나미에 의해 발생했다. 지진 유발 쓰나미의 파고는 진앙지 바다가 깊을수록 높은데, 태평양(일본의 동해안)에 비해 우리나라 동해는 깊지 않아 후쿠시마 원전 사고 때처럼 높은 쓰나미가 발생할 수 없다. 또 태평양 쪽에서 발생하는 쓰나미는 일본 열도에 의해 차단되어 한반도에 영향을 미치지 않는다.

> 가압경수로와 가압중수로 원전의 누적가동기간은
> 우리나라에서 590년, 전 세계에서 11,500년에 이르는데,
> 그동안 방사선 피폭으로 인한 인명사고가 전혀 없었다.

41) https://www.bosai.go.jp/e/index.html

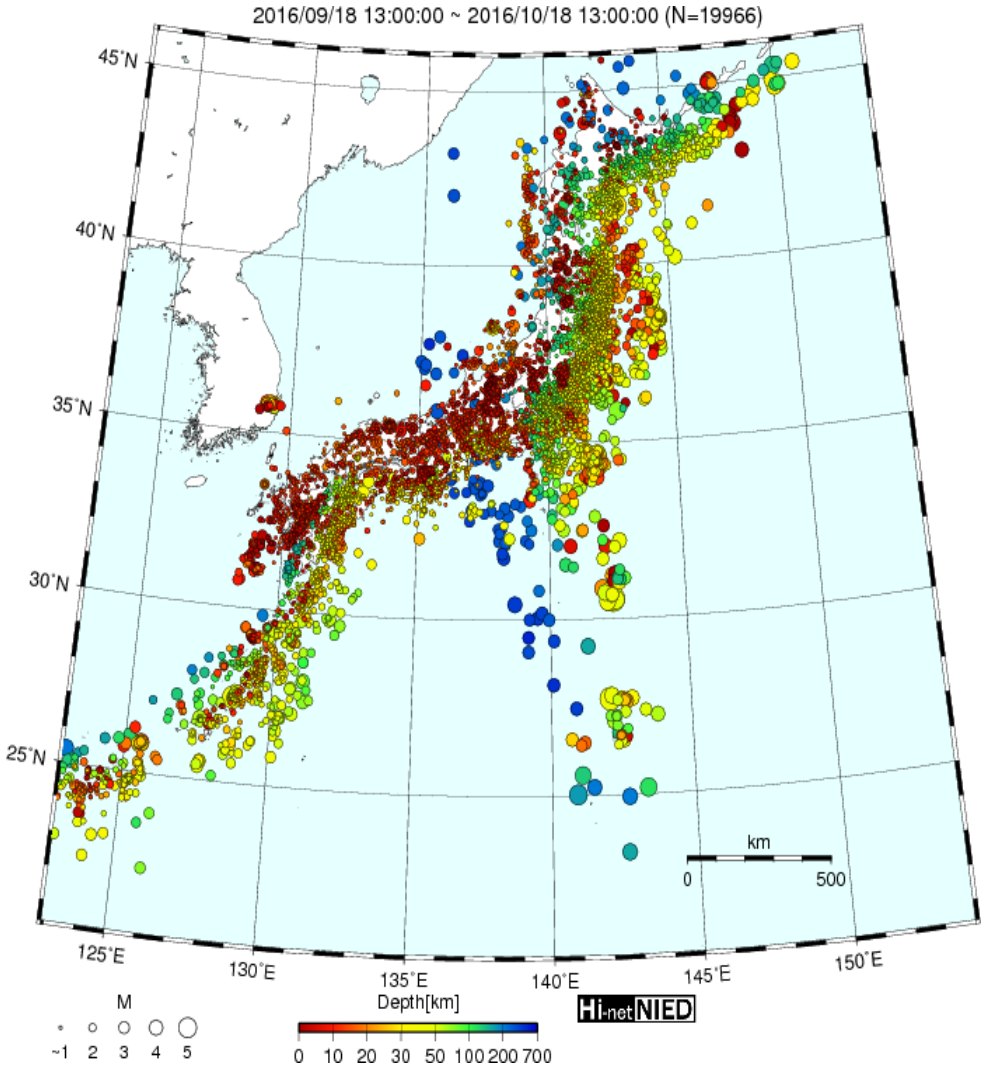


그림 21. 2016년 경주지진 이후 1개월간 일본과 한반도의 지진발생 현황 비교

A6. 체르노빌과 후쿠시마 원전 사고는 왜 발생했나요?

체르노빌 원전 사고는 1986년 4월 26일, 전원공급이 상실된 상황에서 비상전원이 들어오기 전까지 터빈의 관성력으로 원자로를 얼마 동안 운전할 수 있는지 실험하던 중에 일어났다. 이 실험 중 운전원은 운전 규정에 반하여 안전장치를 해제하고 원자로 제어봉을 무리하게 조작하였다. 이런 위험한 상황이 체르노빌 원전의 설계 결함과 결합하면서, 통제 불능의 핵분열 반응이 일어나 원자로와 건물이 파손되었다. 이 결과 방사성 물질이 외부로 대량 방출되었다. 사고 초기 폭발, 헬기 추락 등으로 3명이 사망하고, 방사선에 피폭된 현장 근무자와 소방관 등 28명이 사고 후 수개월 만에 사망했다. 아이오딘-131에 오염된 우유 섭취 등으로 갑상선암이 6,000건 이상 발생하였고, 이들 환자 중 15명이 사망했다[42]. **체르노빌 원전 사고는 원천적인 원자로 설계 결함과 규정을 위반한 운전조작이 결합해 벌어진 참혹한 결과였다. 사고 후 이 원자로형은 단계적으로 모두 폐쇄되었으며, 발전소 운영과정에서 안전을 최우선 가치로 두는 "안전문화"가 제도화되었다.**

> 체르노빌 원전사고는 원천적인 원자로 설계 결함과 규정을 위반한 운전조작이 결합하여 벌어진 참혹한 결과였다.
>
> /
>
> 사고 후 이 원자로형은 단계적으로 모두 폐쇠되었으며, 발전소 운영과정에서 안전을 최우선 가치로 두는 "안전문화"가 제도화 되었다.

42) SOURCES AND EFFECTS OF IONIZING RADIATION, UNSCEAR 2008 REPORT Vol. II, pp. 64-65"
http://www.unscear.org/unscear/en/publications/2008_2.html

후쿠시마 원전 사고는 2011년 3월 11일 동일본 대지진으로 유발된 쓰나미로 인해 발생하였다. 대지진 후 40~50분이 지나 **두 차례의 대형 쓰나미(파고 14~15m)가 덮치면서 원전의 전기 공급 시설과 냉각 설비를 훼손하였다. 당시 운전 중이던 3기의 원자로가 냉각 불능상태에 빠지면서 핵연료가 대량 용융되고, 3차례 수소가스 폭발[43]이 일어나면서 외부로 방사성 물질이 대량 방출되었다(체르노빌 원전 사고의 20% 수준).** 방사선 피폭 예방을 위해, 10만여 명의 지역주민이 대피하였다. 이때 방사선 피폭으로 인한 사망자는 없으나, 장기간의 대피 과정에서 주민들은 이루 말할 수 없는 큰 고통을 겪었다. **이 사고는 인재와 천재지변이 겹쳐 발생한 것으로 평가되고 있다.** 발전소 부지의 높이가 예상할 수 있는 쓰나미 높이보다 현저히 낮은 것이 사고의 근본 원인이다. 참고로 후쿠시마 원전보다 진앙지에 더 가까운 오나가와 원전은 높은 부지와 해안 방벽 때문에 쓰나미 피해를 피할 수 있었다.

“
후쿠시마 원전사고는
동일본 대지진으로 유발된 쓰나미로 인해 발생하였다.
/
후쿠시마 원전보다 진앙지에 더 가까운 오나가와 원전은 높은 부지와
해안 방벽 때문에 쓰나미 피해를 피할 수 있었다.
”

43) 원전 사고 시 핵연료봉의 온도가 매우 높아지면 핵연료를 둘러싼 피복재와 고온의 수증기가 반응하여 상당한 양의 수소가스가 생성될 수 있음. 원전에서의 수소가스 폭발은 산업 현장에서 간혹 발생하는 수소가스 폭발과 같은 형상으로, 수소폭탄의 폭발과는 전혀 다름.

A7. 사용후핵연료가 아주 많다던데 사실인가요?

우라늄(U-235) 1 그램은 석탄 3톤에 준하는 에너지를 생산한다. 이를 폐기물 발생량 관점에서 보면, **같은 양의 전력생산 시 발생하는 사용후핵연료 양은 석탄 등 화석에너지 발전으로 발생하는 폐기물의 양에 비하면 극히 적다는 것을 의미한다.**

원자력 발전이 처음 상용화된 1950년 후반 이래, 미국에서 발생한 사용후핵연료의 총량(전 세계 총량의 약 20%)은 미식축구장 하나의 면적에 9m 높이로 쌓은 양밖에 되지 않는다.[44] 참고로 1990년부터 운영 중인 스위스의 Zwilag 사용후핵연료 중간저장시설[45]은 길이 68m, 너비 41m, 높이 20m의 규모로, 적재중량 135톤의 사용후핵연료 저장용기 200여 개를 저장할 수 있다. 미국 Connecticut Yankee 원전[46]은 1967년부터 30년간 운영한 후 영구정지했는데, 30년간 배출된 사용후연료를 가로 21.3m, 세로 65.9m 크기의 소규모 부지에 저장하고 있다(그림 22 참조).

사용후핵연료 관리상 문제는 폐기물 처분량이 많아서 발생하는 것이 아니라 관리 기간이 장기간이라는 점에서 발생한다. 사용후핵연료는 우라늄 핵이 분열되며 만들어진 다양한 방사성 핵종을 담고 있다. 이들 핵종 중에는 방사선을 오랫동안 방출하는 핵종이 있다. 이들 방사성 핵종이 사용후핵연료 밖으로 유출되지 않도록 장기간 안전하게 관리하는 것이 사용후핵연료 관리의 핵심이다.

> 원자력 발전이 처음 상용화된 1950년 후반 이래,
> 미국에서 발생한 사용후핵연료의 총량은
> 미식축구장 하나의 면적에 9m 높이로 쌓은 양밖에 되지 않는다.

44) https://www.nei.org/fundamentals/nuclear-waste

45) https://www.zwilag.ch/en/operation-_content---1--1021.html

46) https://www.connyankee.com/html/fuel_storage.html



그림 22. (상)스위스 Zwilag 사용후핵연료 중간저장시설(스위스 원자력 발전 회사들이 공동으로 운영)
(하)미국 Connecticut Yankee 원전 사용후핵연료 임시저장 부지

A8. 사용후핵연료 처분 기술이 없다는데 사실인가요?

사용후핵연료 안전관리의 최종 단계는 처분이다. 미국과학한림원(National Academy of Sciences)은 1957년 심지층 처분을 가장 안전하고 신뢰할 수 있는 처분방식으로 권고하였다. **전 세계 처분전문가들도 다양한 사용후핵연료 관리방식 중 심지층 처분이 과학기술적으로 가장 적합한 방식이라는 데 동의하고 있다.** 미국과 유럽 국가는 1970년대 초부터 사용후핵연료 처분 연구개발을 진행해오고 있다.

사용후핵연료 및 방사성폐기물 심지층 처분장은 여느 원전처럼 안전 기능을 갖춘 방벽이 여러 겹 둘러싸고 있다. 최근 **핀란드와 스웨덴은 지하 500m에 위치할 사용후핵연료 처분장의 건설허가를 획득한 후 건설을 진행하고 있다**(그림 23[47),48)]). 프랑스도 처분장 부지를 선정하여 건설허가를 준비 중이다.

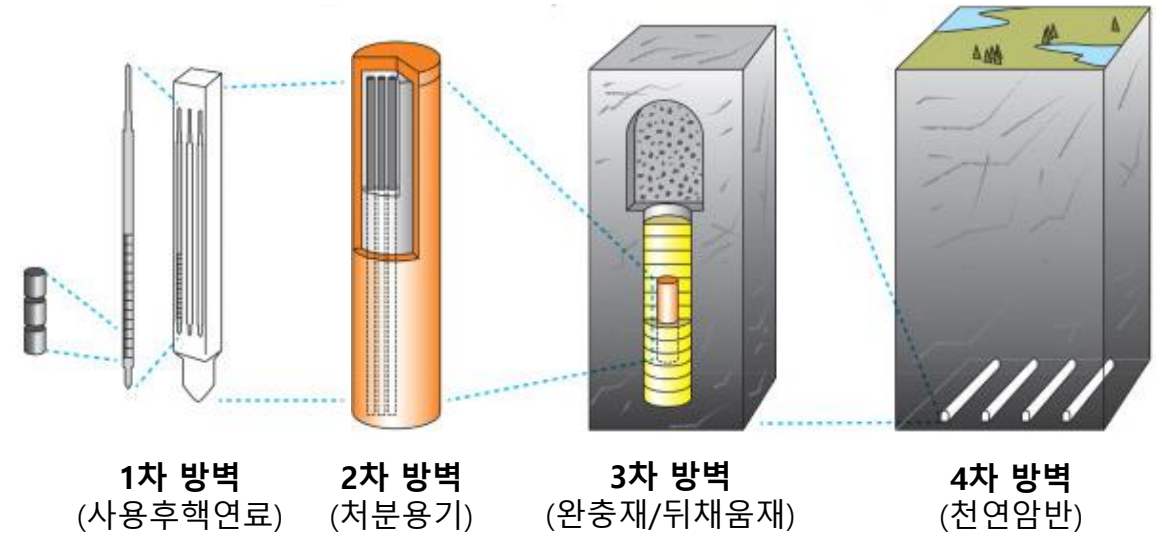
우리나라도 1997년부터 심지층 처분 연구개발을 수행해오고 있다. 사용후핵연료 심지층 처분기술은 현재 충분히 성숙한 기술이나, 심부 지질환경 특성이 나라마다 달라 이를 반영한 고유 처분시스템을 개발할 필요가 있다. **2050년대에는 우리나라 심부 지질환경에 최적화된 최종처분장을 건설하여 운영할 계획이다.**

우리나라는 원전 해체, 사용후핵연료 운반, 저장, 처분 등을 수행하는데 소요되는 모든 비용은 '사후처리비용'이라는 이름으로 전기요금에서 일정비율 떼와서 적립하고 있다. 이는 사용후핵연료 문제를 해결하는데 필요한 재원을 원자력 발전의 혜택을 받은 현세대가 책임지기 위한 것이다. 따라서 사용후핵연료 문제를 후세에 전가하고 있다는 것은 잘못된 주장이다.

> 전 세계 처분전문가들도 다양한 사용후 핵연료 관리방식 중
> 심지층 처분이 과학기술적으로 가장 적합한 방식이라는 데 동의하고 있다.
> /
> 핀란드와 스웨덴은 지하 500m에 위치할 사용후핵연료 처분장의
> 건설허가를 획득한 후 건설을 진행하고 있다.

47) Applied Geochemistry, Volume 131, 105045, 2021.

48) Posiva, https://www.posiva.fi/en/



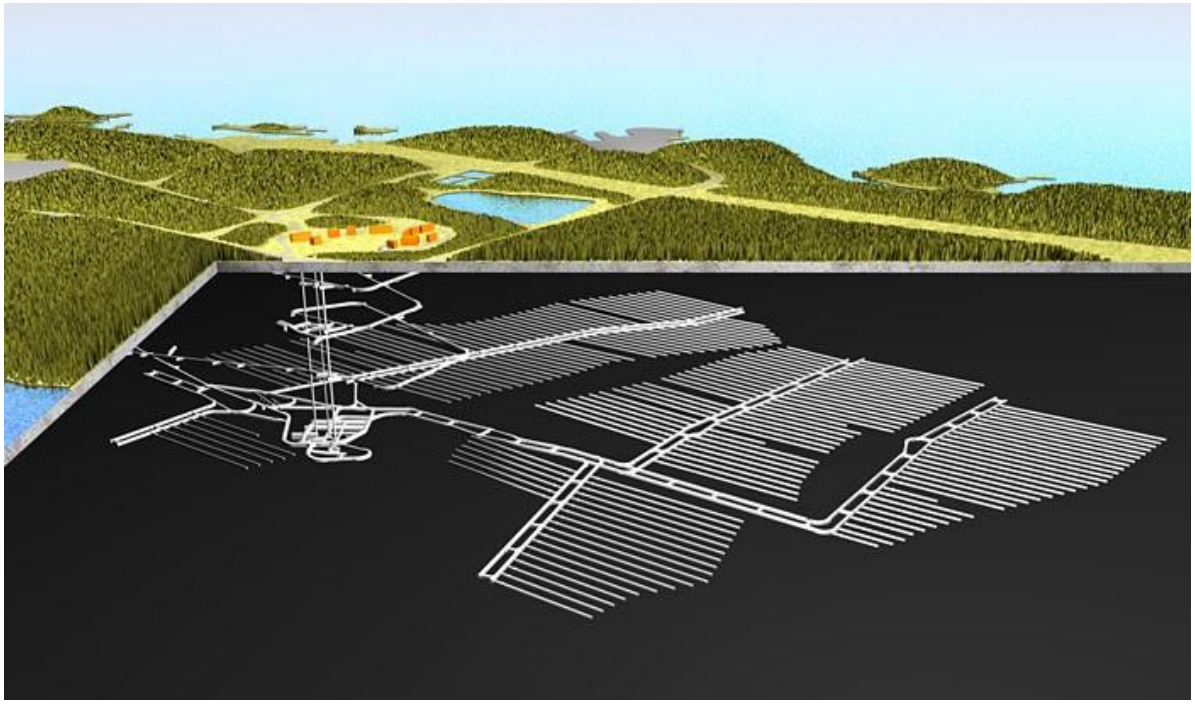


그림 23. (상)사용후핵연료 심지층 처분장 다중방벽시스템 도식도, (하)핀란드의 심지층 처분장 개념도



'핵공감 클라쓰'는 원자력에 대한 과학적 사실을 함께 알아보는 유튜브 채널입니다. 원자력공학 교수 및 전문가들이 일반인들이 궁금해하는 원자력 관련 사항들을 쉽게 설명하고 있습니다. 원자력을 올바로 이해하는 데 조금이나마 도움이 되길 기대합니다. 유튜브에서 '핵공감 클라쓰'를 검색하면 됩니다.

핵공감 클라쓰 주요 주제

- 탈원전? 탈탈원전!
- 탈원전, 대세 맞나?
- 신한울 3,4호기 꼭 지어야만 하는 이유
- 월성1호기 조기 폐기가 부당한 이유
- 커피믹스? 에너지믹스!
- 원자력 정말 안전한가요?
- 원전사고 과연 대재앙인가?
- 사용후핵연료 우리의 해법은?
- 사용후핵연료 사이다 솔루션
- 원전해체를 해체해보자
- 방사능 괴담 깨기
- 우리의 삶을 밝히는 방사선
- 의료방사선 그것을 알려주마
- 탈핵교재에 멍드는 우리 아이들
- K-원전이 세계 최고인 이유!
- 원자력이 청정한 7가지 이유
- 북극곰에게 원자력이 필요한 이유
- 재주 많은 꼬마 원자로 SMR
- 핵융합 인공태양을 만들다

원자력 팩트체크 시리즈

- 원자력발전소 서울에 왜 안짓나요?
- 원전사고, 한번 터지면 끝장난다는데 사실인가요?
- 선진국은 원전을 줄이고 있다는데 사실인가요?
- 우리나라 원전산업은 독자기술이 없고 건설비도 비싸다는데 사실인가요?
- 정부는 탈원전 정책이 공론화를 거쳤다는데 사실인가요?
- 탈원전 정책은 아직 시작도 안했다는데 사실인가요?
- 사용후핵연료와 원전해체 비용을 고려하면 비싸다는데 사실인가요?
- 사용후핵연료는 10만년 이상 관리해야 한다는데 사실인가요?

좌담회

- 월성1호기 조기폐쇄 감사결과에 대한 긴급 좌담회
- 월성원전 삼중수소 괴담의 실체
- 후쿠시마 해양방류 어떻게 보는 것이 좋을까요?
- 에너지전환포럼의 'SMR 바로보기'가 비뚤어진 이유

YouTube 핵공감 클라쓰

https://www.youtube.com/channel/UCuwv9Z_lu6jPhzcPPpOeh1g

대통령을 위한
에너지정책 길라잡이

발행처 핵공감 클라쓰
발행일 2021년 10월 22일
디자인·인쇄 에스와이커뮤니케이션즈
ISBN 979-11-970135-0-8

—

기후위기 극복을 위해 화석에너지에서
무탄소에너지로 전환해야 할 때!

—

에너지 빈국에서 에너지 강국으로 탈바꿈하고
더 나아가 에너지 수출국으로 도약할 수 있는 기회!



93550
9 791197 616709
ISBN 979-11-976167-0-9