

원자력 이슈

대통령을 위한

문답 10선

해공감 클래스
교수진 일동

문주현 윤종일 이정익

이현철 정범진 정용훈

정재준 주한규 최성민

황주호 감수 노동석



원자력 이슈

대통령을 위한

문답 10선

| 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)

Contents

Q1. 우리나라에 원자력이 꼭 필요한 이유는 무엇인가?	02
Q2. 우리나라에서 원전 사고가 난다면 정말 큰일 하나?	04
Q3. 사용후핵연료 문제 해결책은 진짜 없나?	06
Q4. 우리나라는 원전이 밀집된 게 문제라는데 실상은 어떤가?	08
Q5. 원전 추가 수출이 가능한가? 얼마나 어디에?	10
Q6. 원자력 없이 재생에너지만 확대하면 어떤 문제가 있나?	12
Q7. 원자력의 경제성은 신재생 대비 향후 어떻게 될 것인가?	14
Q8. SMR이 진짜 안전한 건가? 실제로 운용하려면 얼마나 있어야 하나?	16
Q9. 원자력 비중 얼마나 적당한가?	18
Q10. 탄소중립을 실현하려면 전기요금이 얼마나 인상될 것인가?	20

우리나라에 원자력이 꼭 필요한 이유는 무엇인가?

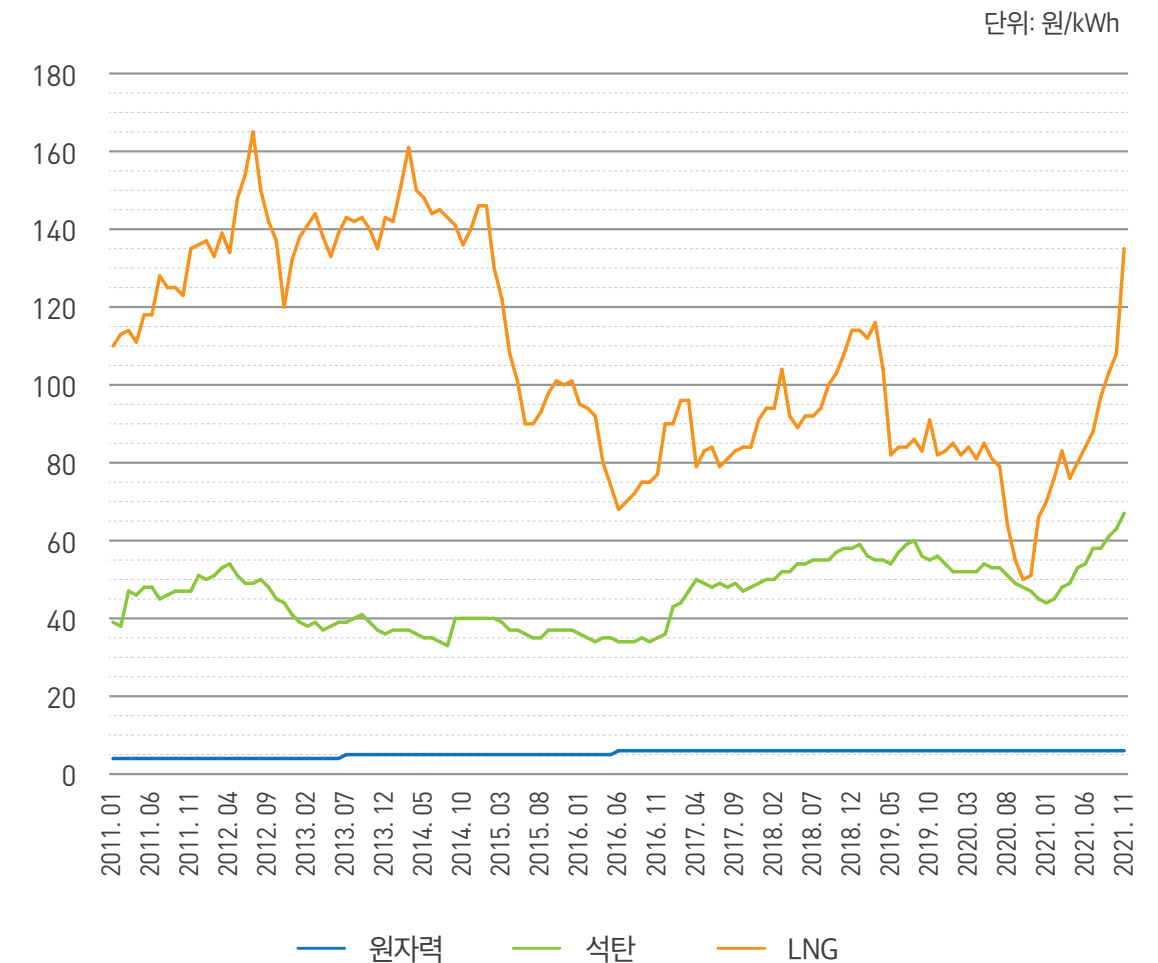
원자력은 우리나라에 가장 적합한 청정 에너지원으로서 에너지 안보 확보의 주역입니다.



A. (원자력은 준국산 에너지로 에너지 안보의 주역) 우리나라는 에너지 자원 빈국이지만 세계 10위의 에너지 사용 대국입니다. 전력 사용량은 8위입니다. 1인당 에너지 사용량을 보면 10대 에너지 사용 대국 중 3위일 정도로 에너지 사용량이 많습니다. 이 막대한 에너지의 93% 이상을 수입에 의존합니다. 그래서 우리나라 경제는 에너지 가격 변동을 초래하는 국제 정세에 매우 민감할 수밖에 없습니다. 원자력은 에너지 자급도를 높일 수 있는 가장 효과적인 에너지입니다. 물론 원전 연료인 우라늄도 수입해야 합니다. 그러나 원자력 발전단가 중 우라늄 비용이 약 8% 정도로 아주 낮고, 나머지 92%는 국내에서 우리 기술로 공급하기 때문에 원자력은 준국산 에너지입니다. 더구나 원자력 연료 소요량은 극히 적습니다. 원전 1기 5년치 연료를 저장하는데 20m² 정도의 작은 면적만 있어도 됩니다. 따라서 원자력은 연료 비축이 용이하고 국제 정치·경제 환경 변화에 따른 발전단가 변동도 작아 우리나라 에너지 안보 확보의 주역을 담당합니다.

(경제적이면서도 안전한 에너지원) 원전은 건설비가 비싸지만 한 번 건설하면 60년 이상 쓸 수 있는 장기 이용 발전 시설이고 연료비 비중이 낮기 때문에 발전단가가 여러 발전원 중 월등히 싸입니다. kWh당 발전단가는 원자력이 약 60원, LNG는 약 120원, 태양광은 약 150원 정도입니다. LNG는 비싸지만 전력 수요에 대한 신속 응동에 어느 정도는 필요하고, 태양광 발전도 석탄 발전 대체를 위해 증가시켜야 하는 상황에서 원자력이 우리나라의 평균 발전단가를 낮게 유지하는 데 크게 기여하고 있습니다. 한편 일반의 오해와는 다르게 원전은 생명 안전성이 아주 높은 에너지원입니다. 전 세계 원전이 약 19,000여년의 누적 가동년을 기록하는 동안에 발생한 원전 사고의 치명률은 1조 kWh당 0.5명으로 극도로 낮습니다. 특히 우리나라 원전은 지난 43년간 약 3.9조 kWh를 생산했지만 단 한 명의 사망자도 없이 안전하게 운영해 왔고 앞으로도 안전한 관리가 가능합니다.

(우리나라에 가장 적합한 청정 에너지원) 전 세계가 2050년 탄소중립을 추구하고 있습니다. 이를 실현하려면 화석 에너지 중심의 에너지원을 이산화탄소뿐만 아니라 미세먼지 발생이 없는 청정 에너지원으로 전환해야 합니다. 청정 에너지원으로 재생 에너지(태양광, 풍력, 수력)와 원자력이 있습니다. 그런데 우리나라의 수력과 풍력 자원은 매우 빈약하여 사실상 가용한 청정 에너지원은 태양광과 원자력뿐입니다. 우리나라는 세계 최고의 원자력 기술력과 가격 경쟁력을 갖추고 있어 그 어느 나라보다 저비용으로 안전하게 원자력 전기를 공급할 수 있습니다. 반면 태양광은 간헐성과 변동성 극복을 위해 고가의 에너지 저장장치(ESS)와 꼭 짝을 이루어 운용해야 하기에 미래에 태양광 발전 비용이 크게 하락하더라도 그 총 운용 비용이 원자력보다 두 배 이상 비쌀 수밖에 없습니다. 따라서 원자력이 우리나라에 가장 적합한 청정 에너지원입니다.



기저 발전 연료비의 지난 10년간 변동

출처: 전력거래소 전력통계정보시스템¹⁾

1) <http://epsis.kpx.or.kr/epsisnew/selectEkmaFucUpfChart.do?menuId=040100>

우리나라에서 원전 사고가 난다면 정말 큰일 나나?

A. (대규모 방사성물질 누출이나 사상이 발생하지 않음) 우리나라 원전은 모두 견고한 원자로 격납건물을 갖춘 가압수형 원전입니다. 전 세계 가압수형 원전의 누적가동 기간은 11,500년에 이르는데 사망자가 발생한 사고가 없었습니다. 이런 유형의 원전에서는 설사 원자로가 녹는 사고가 발생하더라도 원자로 격납건물이 방사성 물질 누출을 잘 차단하여 대규모 방사성 물질 누출과 인명 사상이 발생하지 않습니다.

(방사성 물질 누출이 없었던 TMI 원전 사고) 1979년 스리마일아일랜드(TMI) 2호기에서 원자로가 녹는 사고가 발생했고 이에 따라 발생한 수소로 인해 격납건물 내에서 소규모 폭발도 있었습니다. 그러나 격납건물 내부 공간이 넉넉하고 견딜 수 있는 압력도 충분히 높아 방사성 물질의 누출은 발생하지 않았습니다. 사고 발생 4일째 되는 날 카터 대통령이 방문해 별 보호장구 없이 제어실에 들어가 안전을 확인할 수 있었습니다. 또 주위 환경 오염이 없었기에 그 옆 1호기는 이후 40년간 아무 문제 없이 가동하다 2019년에 퇴역했습니다.

(방사선 피폭 사망자가 없는 후쿠시마 사고) 후쿠시마 사고로 누출된 방사성 물질의 총 양은 최악의 원전 사고인 체르노빌 사고의 약 1/10이 될 정도로 많았습니다. 아직도 일부 지역에서는 방사선량이 거주 기준을 초과하여 이주가 제한되고 있습니다. 그러나 사고 이후 평생 주민이 받을 방사선량이 미미하여 방사선 피폭 사망자가 없으며 암환자 증가는 앞으로도 예상되지 않는다는 것이 UN 방사선과학위원회와 WHO 등 권위 있는 기관의 조사 결과입니다.

(설계가 달라 사고 결과도 다름) 체르노빌 원전은 설계 특성상 출력 폭주가 가능했고 격납건물도 없었습니다. 우리 원전은 출력 폭주가 방지되어 있고 견고한 격납건물이 있습니다. 따라서 체르노빌 사고는 우리 원전의 사고 위험성을 예견하는데 적용될 수 없습니다. 후쿠시마 사고 예 또한 우리나라에 적용될 수 없습니다. 우리 원전 격납건물은 부피가 5배 크고 강건하여 후쿠시마와 같은 사고가 나더라도 대량의 외부 누출은 일어나지 않습니다. 자동차 바퀴가 펑크가 나기 때문에 기차 바퀴도 펑크가 날 것이라고 하면 안 되는 것과 같습니다.

(선진국의 원전 안전성에 관한 인식) 미국, 프랑스, 영국, 캐나다, 일본, 스웨덴, 핀란드 등 여러 선진국이 원자력을 사용하는 이유는 안전성을 신뢰하기 때문입니다. 미국은 기존 원전의 가동 연한을 60~80년으로 연장했습니다. 프랑스는 원전 56기를 운영하며 전력 생산의 70% 이상을 원전이 담당하고 있습니다. 스위스는 전 세계에서 가장 오래된 베츠나우 원전을 53년째 운영하고 있습니다. 원전이 안전하기 때문에 가능한 일입니다.

견고한 격납건물이 있는 우리나라 원전에서는 설사 원자로가 녹는 사고가 나더라도 대규모 방사성 물질 누출과 인명 사상이 발생하지 않습니다.



TMI 원전사고 4일 후 카터 대통령이 별 보호장구 없이 현장 방문하여 점검

출처: New York Times, Associated Press, 2019.5.8.²⁾

2) <https://www.nytimes.com/2019/05/08/us/three-mile-island-shut-down.html>

사용후핵연료 문제 해결책은 진짜 없나?

“ 사용후핵연료는 핀란드 사례에서 볼 수 있듯이 현재 기술로도 안전한 처분이 가능합니다. ”

A. **(직접 처분하는 해결책은 이미 있음)** 핀란드와 스웨덴에서는 지하 500m에 사용후핵연료 처분장을 건설하고 있습니다. 프랑스에서는 처분장 부지를 선정한 후 건설 인허가를 추진 중입니다. 이는 사용후핵연료 심지층 처분의 안전성이 기술적으로 입증되었음을 보여주는 사례입니다. 우리나라도 일부 기술만 개발하면 언제든 적용할 수 있습니다.

(사용후핵연료가 지하처분 후 환경에 미치는 영향은 없음) 사용후핵연료는 5cm 두께, 직경 약 70cm 정도의 커다란 구리용기에 여러 다발을 넣고 밀봉하여 처분합니다. 구리를 쓰는 이유는 구리가 부식이 잘 안 되는 금속이기 때문입니다. 고대 철기 유물은 다 부식되어 사라졌어도 고조선의 다뉴세문경 같은 청동기 유물이 보존이 잘 되는 이유가 이것입니다. 구리용기는 지하 암반에 구멍을 파고 묻는데 그 주위는 벤토나이트라는 점토질 물질로 채웁니다. 벤토나이트는 물을 머금으면 단단해져 방수재 역할을 하면서 설사 방사성 물질이 용기를 빠져나오더라도 이동을 잘 못하게 잡아둡니다. 더군다나 지상의 환경까지는 500m 정도의 지층이 있어 방사성 물질이 구리용기와 점토질을 뚫고 나와 지하수를 통해 지상으로 올라와 위해를 끼치기는 실질적으로 불가능합니다. 방사성 물질이 지표면에 도달하는 극단적 상황에서도 사람에게 대한 방사선 영향은 연간 바나나 몇 개 섭취 수준에 불과합니다.

(수백 년 지나면 방사능은 급감하고 움직일 수 없는 방사성 물질만 남음) 방사성 물질은 크게 나누어 물에 녹을 수 있고 반감기가 짧은 물질과 물에 잘 안 녹고 반감기가 긴 물질로 구분할 수 있습니다. 반감기가 길어야 30년 안팎인 대부분의 방사성 물질은 물에 다소 녹지만 300년 정도 지나면 다 붕괴되어 사라집니다. 사용후핵연료의 1% 내외 정도의 물질이 반감기가 수천 년이 넘는 플루토늄과 같은 초우라늄 물질인데 이들은 물에 거의 녹지 않습니다. 용기가 파손되고 극미량이 물에 녹아 나와도 점토층을 통과하는 데만 수십만 년이 소요되므로 점토층 통과 도중 붕괴되어 사라지게 됩니다. 지상에 도달할 수 있는 것들은 수백 년이면 사라지고, 이후 지상에 도달할 수 없는 것만 지하에 남아있게 되므로 처분장은 마치 미개발 지하 광산과 같은 상태가 됩니다.

(더 나은 방법인 분리후 소멸처리도 연구하고 있음) 물에 녹을 수 있는 것과 녹을 수 없는 것, 반감기가 짧은 것과 긴 것을 분리해 낼 수 있으면 반감기가 긴 것들은 연료로 재활용하고, 반감기가 짧은 것만 골라 처분할 수 있습니다. 이를 소멸처리라고 합니다. 이렇게 하면 처분장 면적도 획기적으로 줄일 수 있고, 반감기 긴 것들도 단시간에 소멸시킬 수 있습니다. 현재 우리나라가 미국과 공동연구하고 있는 파이로프로세싱이 대표적인 예입니다.



내부식성이 탁월한 구리 5cm 두께로 만든 사용후핵연료 처분 용기

출처: 민기복 교수 (서울대학교 에너지자원공학과)

우리나라는 원전이 밀집된 게 문제라는데 실상은 어떤가?

A. **(외국에도 밀집 원전 많지만 문제 없음)** 우리나라는 좁은 국토에 인구와 산업시설이 밀집되어 발전시설도 밀집될 수밖에 없습니다. 원전이 밀집된 사례는 우리뿐만 아니라 캐나다의 브루스 8기와 피커링 8기, 일본의 카시와자키 카리와 7기, 중국의 진산지역 9기, 프랑스 그라벨랭 6기 등 해외에도 다수 있습니다. 그렇지만 아래와 같은 이유로 원전 밀집 자체가 문제가 되지는 않습니다.

(원전 사고는 번지지 않음) 우리 원전과 같은 설계의 미국 스리마일아일랜드(TMI) 원전 2호기 사고 시에도 바로 옆 1호기에는 영향을 미치지 않았습니다. 주위 환경 오염도 없었습니다. 그래서 TMI 1호기는 1979년 2호기 사고 후 40년간 아무 문제 없이 가동하다가 세월가스의 경제성에 밀려 퇴역했습니다. 심지어 체르노빌 원전사고에서도 4기가 있었지만 1기에서만 사고가 나고 나머지 3기에는 사고가 나지 않았습니다.

(자연재해에 각각 대비가 되어 있어 원전 수가 문제가 아님) 후쿠시마 제1발전소에서는 3개 원자로가 쓰나미로 사고가 났지만, 인근 오나가와 원전에 있는 3개 원자로 모두 사고가 나지 않았습니다. 지진에도 잘 대비가 되어 있음은 물론이고 쓰나미에도 대비되어 있었기 때문입니다. 후쿠시마 원전은 지진에는 잘 대비가 되어 있었지만, 쓰나미 대비가 미흡하여 동시에 사고가 난 예가 되겠습니다. 이처럼 원자력 발전소에 동시에 영향을 줄 수 있는 지진, 쓰나미, 정전 등에 각기 원전이 잘 대비되어 있다면 사고는 일어나지 않습니다. 우리나라 원전 각각은 지진과 쓰나미뿐만 아니라 홍수와 정전 등의 자연재해나 외부 사건에 잘 대비되어 있으므로 이들 원인으로 인해 동시다발적 원전 사고가 일어날 확률이 영(Zero)이라고 봐도 무방합니다.

(면적당 원전 수로 밀집을 논하는 것은 무의미) 우리나라에서 세계평균 대비 밀집도가 높지 않은 것은 별로 없습니다. 원전도 밀집되어 있지만, 아파트, 공장, 태양광도 밀집되어 있습니다. 단위 면적당 태양광 발전량도 세계 2위입니다. 단순히 수치상 면적 대비 밀집을 이야기하는 것은 의미가 없습니다.

(인구밀집지역 인근 원전이라고 위험한 것은 아님) 부산, 울산, 경남이 고리에 인접해 있다는 것만으로 위험하다고 주장하는 것은 맞지 않습니다. 유럽의회 공동연구소에서 평가한 원전의 위험성은 해상풍력 수준입니다. 노무현 대통령은 "원자력 발전을 시작하려는 나라들에게 우리 원전들은 도시 인근에 위치할 수 있을 정도로 안전하다는 것을 자랑한다"고 말한 바 있습니다. 부울경 지역 소비 전력의 70% 정도를 지역 내 원전이 공급하고 있습니다. 이를 원전 대비 100배 이상의 면적을 차지하면서 간헐성을 피할 수 없는 태양광으로 대체할 방법은 없습니다.

(인구 밀집 문제도 없는 신한울3·4호기를 중단시킨 것은 더욱 이상함) 신한울 3·4호기는 원전 반대 논리로 내세우는 주변 인구 밀집 문제도 없습니다. 게다가 신한울 3·4호기는 우리나라 원전 중 가장 최신 설계의 안전도 최고 원전입니다. 오히려 주민들은 무단으로 중단된 공사를 재개하기를 청원하고 있습니다.

여러 원전이 한 부지에 있어도 각각 자연재해에 대비되어 있어 밀집이 문제가 안 됩니다.



2호기 사고후 40년간 잘 가동된 1호기가 나란히 보이는 스리마일아일랜드 원전 전경

출처: Alamy Photo³⁾

3) <https://www.alamy.com/stock-photo/three-mile-island.html>

원전 추가 수출이 가능한가? 얼마나 어디에?

A. **(세계적인 원전 건설 확대 추세)** 근래 세계적으로 원전 건설 기류가 확산되고 있습니다. 국제에너지기구(IEA)의 2021년도 세계에너지전망(World Energy Outlook) 보고서에 따르면 순 무배출 (Net Zero Emission) 시나리오가 실현되려면 2050년까지 신흥개발국에는 400GW(1GW 원전 기준 400기)의 원전이 새로 필요하고 기존 원전운영국에도 200GW이상의 신규원전이 노령 원전을 대체하게 됩니다. 세계 원자력 협회 자료에 따르면 세계적으로 건설 계획이 추진 중인 원전은 101기이고 검토 중인 원전은 325기입니다. 특기할 사실은 기존 원전 운영국이 아닌 UAE, 벨라루스, 방글라데시, 터키와 같은 신생 원전 건설국이 늘어나고 있다는 것입니다. 특히 동유럽의 체코, 불가리아, 루마니아, 우크라이나, 헝가리, 폴란드가 원전 건설에 적극적입니다. 또 영국, 사우디아라비아, 이집트, 우즈베키스탄, 아르헨티나, 이란, 핀란드, 파키스탄, 브라질 등이 신규 원전 건설 계획을 추진 중이거나 검토 중입니다. 이 밖에 인도, 중국, 러시아의 대국에서는 대규모 원전 건설을 추진하고 있습니다.

(미국의 적극적인 원전 시장 진출 시도) 미국 정부는 작년에 발간된 미국 원자력 경쟁력 회복 전략 보고서에서 2030년까지 세계 원전 시장을 5000억~7400억 달러(570조~840조원)로 추산하고 활짝 열릴 세계 원전 시장에서 미국 회사의 수주를 진작하기 위한 전략을 수립해 적극적으로 추진하고 있습니다. 이는 현재 세계 원전 시장에서 러시아와 중국의 영향력이 지대한 바 미국의 통제 없이 세계로 확산되는 이들 국가의 원전이 핵확산 가능성을 초래해 자국의 안보에 위협이 된다고 판단했기 때문입니다. 이 결과 미국은 작년 하반기 이후 루마니아(3기), 불가리아, 폴란드, 우크라이나(5기)와 원전도입 양해각서와 관련 계약을 연이어 체결하는 성과를 냈습니다.

(해외 원전 시장에서 한미 공조와 독자 수출) 그러나 원자력 산업기반이 붕괴된 미국은 원전 설비에 대한 자력 공급이 불가능하고 건설단가도 높습니다. 반면 우리나라는 세계 최고의 원전 기술력과 공급을 갖추고 UAE 원전 4기의 성공적인 건설을 통해 세계적으로 이를 입증한 바 있습니다. 이렇기에 미국은 올 상반기 우리나라와 원전 동맹을 결성해 해외 원전 시장 공동 진출에 합의한 것입니다. 우리나라는 미국이 적극적으로 수출을 추진하는 나라에 대해서는 미국형 원전의 주요 설비 공급을 통해 공동 진출을 모색할 수 있습니다. 반면 체코, 사우디아라비아, 영국에 대해서는 우리나라 고유 원전 APR1400이나 APR1000+로 적극적으로 협상에 임하면 우수한 가격 및 기술 경쟁력을 바탕으로 중국과 러시아를 제치고 후속 원전 수출을 성사시킬 수 있을 것입니다.

동유럽 국가, 중동 국가, 영국 등 최근 원전 확대를 활발히 추진하는 국가에서 2030년까지 30여기, 그 이후 130여기의 원전 수출을 시도할 수 있습니다.

세계 주요국 원전 건설 현황과 전망

국가	계획 추진 중	건설 검토 중	국가	계획 추진 중	건설 검토 중
중국	37	168	우크라이나	1	4
러시아	27	21	핀란드	1	0
인도	14	28	터키	1	8
이집트	4	0	아르헨티나	1	2
미국	3	18	벨라루스	0	2
헝가리	2	0	폴란드	0	6
루마니아	2	1	사우디 아라비아	0	16
영국	2	2	남아프리카 공화국	0	8
우즈베키스탄	2	2	방글라데시	0	2
불가리아	1	2	브라질	0	4
체코 공화국	1	3	합계	101	325
우리나라 수주 시도 가능 기수				37	136

출처: World Nuclear Association 세계 원전 및 우라늄 소요 전망 2021년 8월 현재⁴⁾

4) [https://world-nuclear.org/information-library/facts-and-figures/world-nuclear-power-reactors-archive/world-nuclear-power-reactors-and-uranium-requ-\(6\).aspx](https://world-nuclear.org/information-library/facts-and-figures/world-nuclear-power-reactors-archive/world-nuclear-power-reactors-and-uranium-requ-(6).aspx)

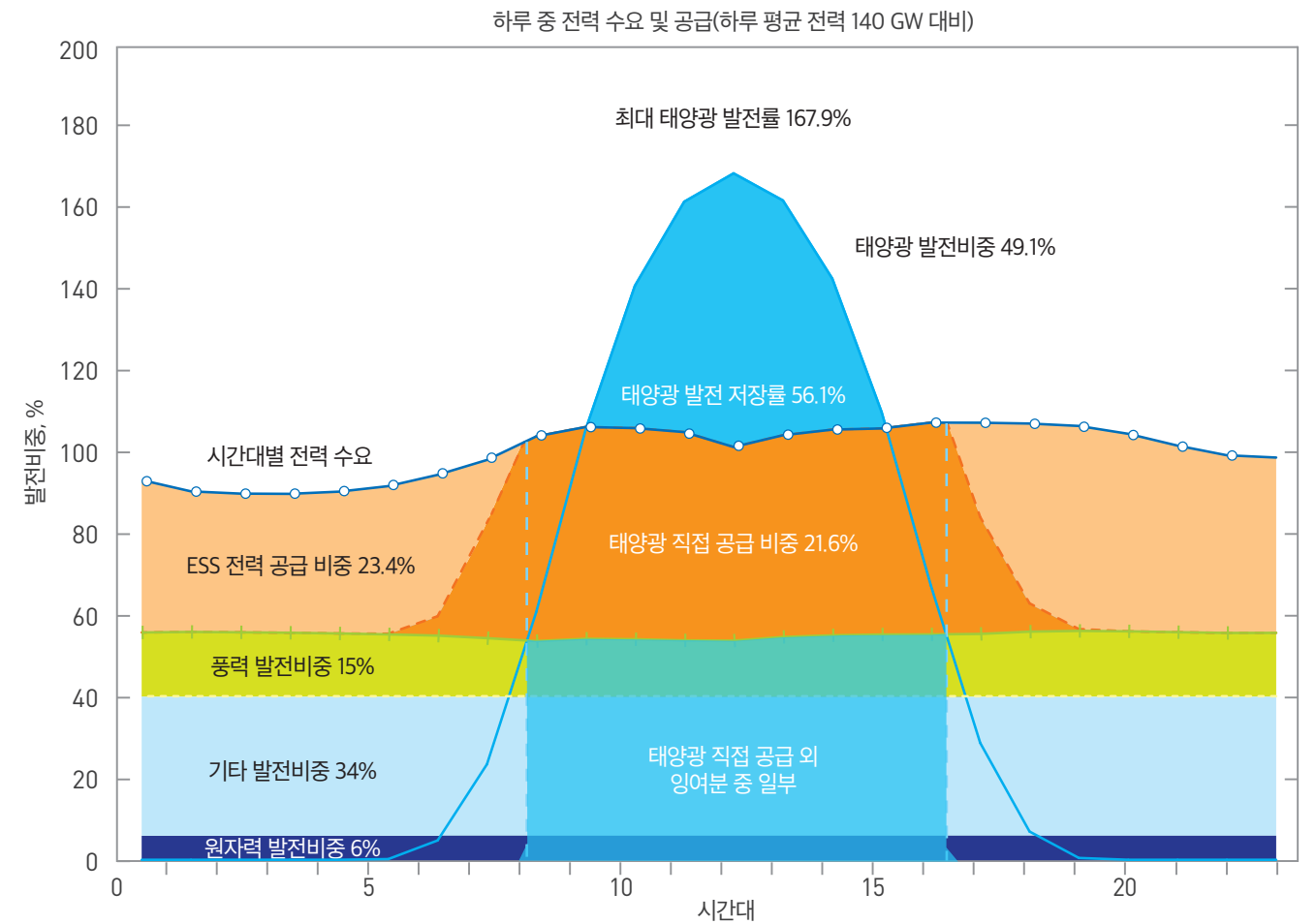
원자력 없이 재생에너지만 확대하면 어떤 문제가 있나?

재생에너지 특히 태양광은 간헐성 때문에 ESS가 꼭 짝을 이루어 운영되어야 하는데 그 저장 비용이 발전 비용을 초과할 만큼 비싸다는 게 재생에너지 확대의 가장 큰 문제입니다.

A. **(재생에너지의 간헐성과 변동성 문제)** 우리나라의 육상풍력 부지는 거의 포화되어 해상풍력 위주로 풍력발전 확대를 추진하고 있습니다. 그런데 우리나라 연안 해상에서 풍속은 북해의 75% 수준에 불과해 같은 발전기를 설치해도 발전량이 반 정도밖에 안 됩니다. 그래서 우리나라 해상풍력 발전단가가 높을 수밖에 없습니다. 그나마 우리나라에 유리한 재생에너지원은 태양광입니다. 그런데 태양광 시설은 낮에만 발전하기 때문에 밤에도 전력을 사용하기 위해서는 에너지저장장치 ESS가 필요합니다. 태양광은 독자적으로만 운용될 수 없는 발전원으로서 꼭 ESS와 짝을 이루어 운영되어야 합니다. 태양광 발전량은 하루에도 정오 근처에는 높고 오전 일찍과 오후 늦게는 낮습니다. 흐린 날, 맑은 날, 비 오는 날, 눈 오는 날 등 날씨에 따라 발전량이 날마다 크게 변동합니다.

(태양광 간헐성을 보완하는 데 막대한 ESS 비용 소요) 따라서 태양광 발전 비중이 일정 수준(예 20%)을 초과할 만큼 발전 시설이 많게 되면 발전이 많이 되는 시간 동안에 발전량의 최소한 반 이상을 ESS에 저장해 두었다가 발전이 안 되거나 양이 적은 시간에 방전하여 써야 합니다. 거기에 필요한 ESS의 용량과 비용이 막대합니다. 2050년 140GW 전력의 50%를 태양광으로 충당한다는 시나리오에 따르면 반나절치 태양광 발전량 저장에 1,160GWh의 ESS가 필요합니다. ESS 비용을 1GWh에 4천억원이라 잡으면 464조원이 듭니다. 그런데 굵은 날씨를 대비해야 하므로 반나절치 저장만으로는 안됩니다. 이틀치 저장에만 2000조원 정도가 듭니다. 향후 ESS 가격이 절반으로 떨어지더라도 이틀치 저장에 1000조원 정도가 듭니다. 리튬 전지 기반인 ESS에 들어가는 물질의 양도 1TWh 당 7백만톤 정도되는 막대한 양입니다. 더군다나 배터리 수명을 고려하면 10년마다 교체해야 합니다. 이렇게 물질 소요량이 많은 특성상 ESS 가격은 기술발전이 되더라도 태양광 패널의 경우처럼 급속히 떨어질 수 없습니다.

(저장비용까지 포함한 태양광 발전 운용은 원자력의 최소 두 배 이상) 현재 kWh당 ESS 운용 비용은 원자력 발전단가보다도 비쌉니다. 향후 태양광 발전 비용이 더 크게 하락한다고 해도 ESS 운용 비용은 발전 비용 자체보다 더 들게 되어 태양광 발전 시설 운용 원가는 최소한 원자력의 두 배 이상이 됩니다. ESS 비용을 포함해야 할 태양광 운용의 고비용이 재생에너지 확대의 가장 큰 문제입니다.



2050년 태양광 발전 비중 약 50%시 예상되는 하루 중 발전과 저장 양태

원자력의 경제성은 신재생 대비 향후 어떻게 될 것인가?

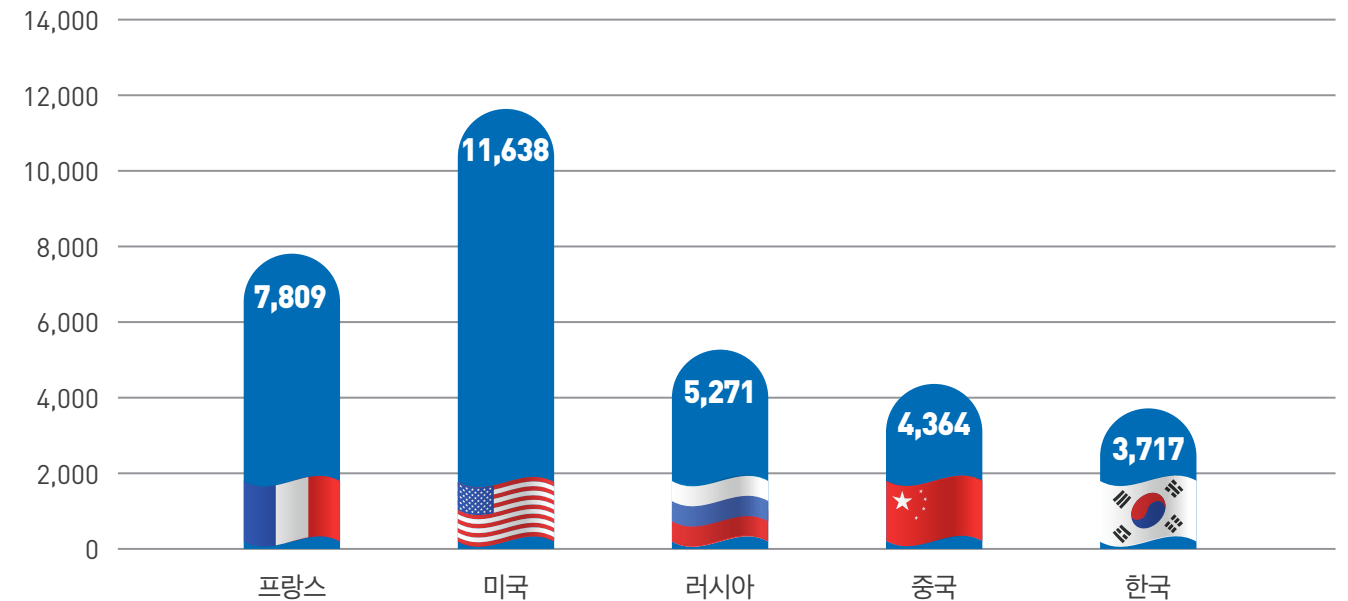
A. (경쟁국 대비 월등한 우리 원전의 경제성) 우리나라 원전 건설비용은 원전을 공급할 수 있는 주요 국가(미국, 프랑스, 일본, 중국, 러시아, 캐나다) 중 가장 낮은 수준입니다. 국내 건설비용은 미국의 1/3, 프랑스의 1/2 수준이며, 러시아와 중국보다도 낮습니다. 이는 근래 지어진 원전의 실제 건설 비용과 블룸버그가 예상한 사우디 원전 건설 단가에서 확인된 사실입니다. 원자력 발전 단가 중 연료비 비중은 약 10%(우라늄 비용은 8% 수준)에 불과하므로 원전의 경제성은 건설비에 크게 영향을 받습니다. 우리나라 원자력 발전 단가가 다른 나라에 비해 월등히 싼 것은 꾸준히 원전을 건설해 온 덕택에 건설비를 낮출 수 있는 원전 공급망과 기술력이 확보되어 있기 때문입니다.

(원전 사후처리비용은 발전단가에 충분히 포함되어 있음) 흔한 오해 중 하나가 사용후핵연료 처분 비용과 폐로 비용과 같은 원전 사후처리비용이 빠져 있어 원자력이 경제적인 것처럼 보인다는 것입니다. 그러나 사후처리비용은 이미 발전원가의 15% 정도인 kWh당 8원 정도로 충분한 액수가 포함되어 있습니다. 1GW 원전 1년 가동에 사후처리비용으로 1년에 600억원, 40년이면 원금만 2조 4000억원 적립됩니다. 사후처리에 충분한 비용입니다. 또한 이 비용은 비용평가위원회에서 매2년 마다 점검하고 발전원가에 반영하고 있습니다.

(원전의 경제성 우위는 변하지 않음) 2025년 건설될 각종 발전소의 경제성을 비교한 국제에너지기구(IEA)의 2020년 보고서에 따르면 우리나라 원전은 태양광, 풍력 대비 2배 이상의 경제성을 가지고 있습니다. 태양광 발전단가의 과거와 같은 급격한 하락 추세가 앞으로도 이어질 수는 없습니다. 그 이유는 태양광 건설비용의 25% 정도를 차지하는 모듈 가격이 향후 기술 발달에 따라 0이 되더라도 전체 비용은 25% 하락하는 데 그치기 때문입니다. 더구나 태양광의 간헐성 때문에 반드시 써야 하는 에너지 저장장치(ESS) 비용까지 고려하면 실제 태양광 운용 비용은 발전 비용의 두 배가 될 수도 있습니다. 반면 원자력은 약 20년 정도 운영하면 초기 건설비용을 회수되게 되어 원전 발전단가는 초기 대비 절반 이하로 떨어지게 됩니다. 따라서 원전의 경제성은 재생에너지 대비 수 배 이상 우위를 계속 유지할 수 있습니다.

(재생에너지는 송전선 효율이 낮고 전력 시스템 안정화 비용도 추가 소요) 대규모 태양광이나 풍력 발전소도 인구나 산업 밀집 지역에는 설치할 수 없기에 송전선로도 발전 시설 용량만큼 대규모로 확충해야 합니다. 그러나 재생에너지는 발전 전력이 심하게 변동하기 때문에 시설 용량으로 확충해 놓은 송전선 용량의 1/3도 제대로 못쓰게 됩니다. 이에 따라 송전선 비용이 낭비될 뿐만아니라 거기에 재생에너지 변동성을 잡아 줄 전력 안정화 시스템 비용까지 추가되면 재생에너지 발전 비용은 얼마나 더 크게 늘어날 지 가늠하기도 힘듭니다.

“우리나라는 세계 최고의 원전 기술력을 바탕으로 원자력 발전 단가가 세계 최저 수준인 반면, 재생에너지는 늘어날수록 막대한 저장 비용 및 송전 비용이 추가되어야 향후 발전 단가 차이가 더 벌어질 수 있습니다.”



5대 원전 수출국 원전 실제 및 예상 건설 단가 (\$/kW)

출처: IEA LCOE 2020 보고서; Bloomberg 사우디 원전입찰국 예상 건설단가

우리나라 2025년 예상 균등화 발전원가 비교 (\$/MWh)

할인율	항목	원자력	태양광	육상풍력	해상풍력
3%	원가	39.4	71.4	86.0	123.8
	상대비	1.0	1.8	2.2	3.1
7%	원가	53.3	98.1	113.3	161.0
	상대비	1.0	1.8	2.1	3.0

출처: IEA LCOE 2020 보고서

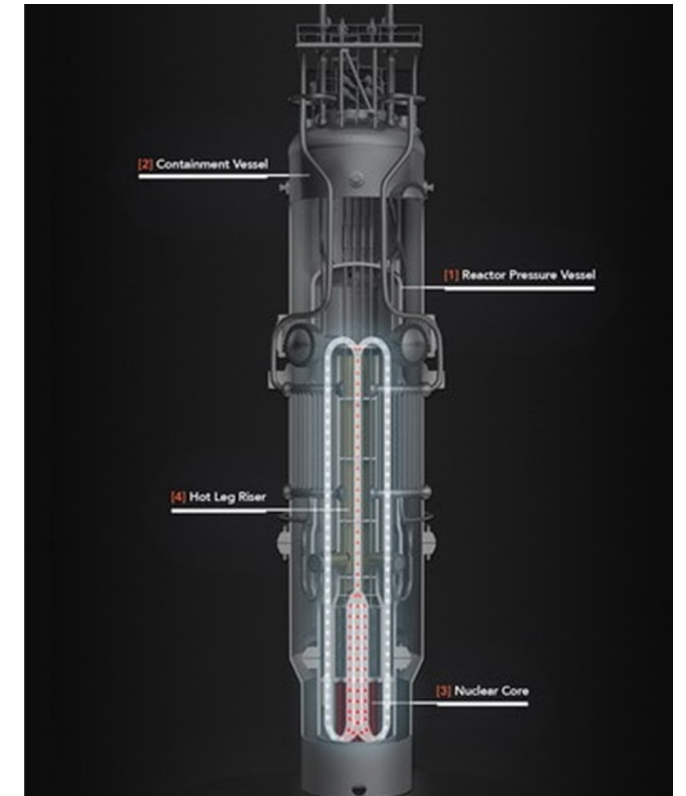
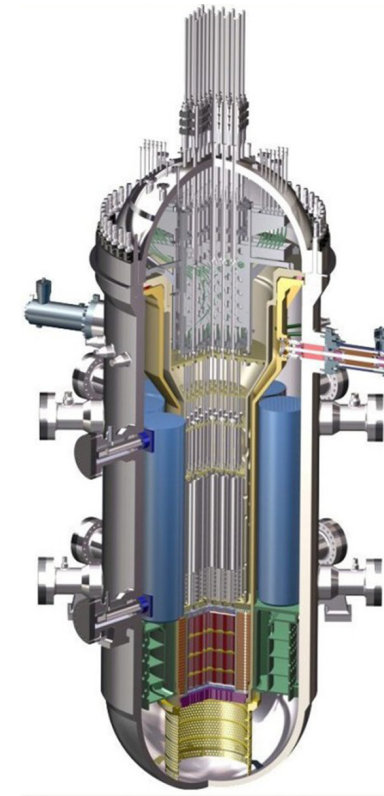
SMR이 진짜 안전한 건가? 운용하려면 얼마나 있어야 하나?

SMR은 규모가 작아 안전성 향상 기술 적용이 용이하므로 수요지 인근에
건설할 수 있습니다. 2030년대 중반에는 대거 운용될 것입니다.

A. (SMR의 안전성 제고 방식) SMR(소형모듈원자로)은 용량이 작기 때문에 여러 방식으로 안전성을 획기적으로 높일 수 있습니다. 그냥 두어도 녹지 않는 연료를 사용한다던가, 전기가 없어도 작동되는 피동 냉각계를 사용한다던가, 계통을 단순화시키거나 일체화시키는 방법을 통해서입니다. 이런 원자로는 전기를 필요로 하는 펌프가 없기 때문에 만약의 경우 정전이 나더라도 원자로를 안전하게 냉각할 수 있게 됩니다. 더구나 이 작은 원자로를 큰 풀에다 담겨 가동하도록 할 수도 있어 비상시에도 원자로 온도가 아주 높게 올라가는 것을 방지해 줄 수 있습니다. 또 원자로 노심 자체가 대형 원전의 1/15 정도에 불과하기 때문에 방사성 물질 함유량도 훨씬 적어 사고로 인한 방사성 물질 외부 유출 가능성과 양이 기존 원전의 1/100 이하로 작습니다. 따라서 거주제한구역이 대폭 줄어들기에 수요지 인근에 건설할 수도 있습니다.

(SMR의 실제 운용 예상 시기) 미국 NuScale 원전은 2029년 첫 가동을 목표로 하고 있지만 이보다 더 빠르게 실증을 목표로 하는 SMR이 2개 있습니다. TerraPower가 개발 중인 Sodium 액체금속 냉각 원자로와 X Energy 사가 개발하고 있는 XE-100이라는 헬륨 가스 냉각 원자로를 미국 에너지부의 지원을 받아 2027년까지 실증을 목표로 개발되고 있습니다. 한편 초기 SMR은 발전단가가 상당히 높을 수 있으므로 반복 건설에 따라 비용이 하락하고 성능이 입증된 후 본격적으로 전력망에 설치되어 유효한 무탄소 전력원으로 활용되려면 2030년대 중반은 되어야 할 것으로 보입니다.

(SMART 개발을 통해 획득한 우리 SMR 기술의 실증 필요) 우리나라는 사실상 SMR 개발의 선두 주자였습니다. 1997년에 SMART라는 열출력 330MW짜리 일체형 SMR 개발에 착수하여 2012년에 세계 최초로 상용 SMR의 표준설계인가를 받았습니다. SMART는 해수담수화와 지역 전력 공급용으로 사우디아라비아에 건설하여 그 성능과 유용성을 실증하기 위한 사업이 추진되다가 정부의 탈원전 기조에 의해 흐지부지 되었습니다. 우리는 속히 SMR 실증로를 건설하여 SMR 선도국 위상을 확보하고 세계 시장을 선점해야 합니다.



가압수형 SMR 대표 SMART와 NuScale Power Module

출처: 한국원자력연구원 및 NuScale Power⁵⁾

5) <https://m.etnews.com/20160413000131>;
<https://www.nuscalepower.com/technology/technology-overview>

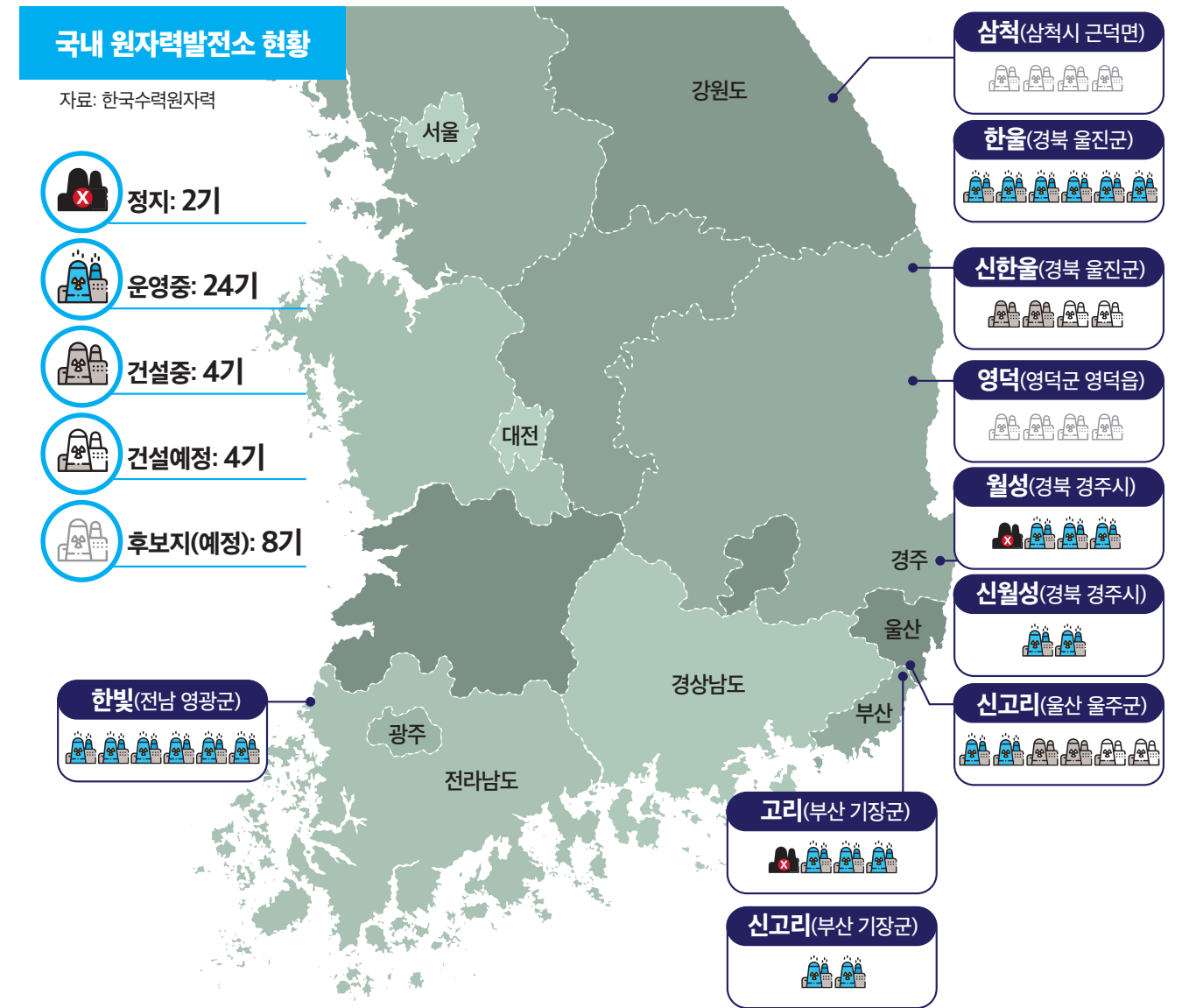
원자력 비중 얼마나 적당한가?

탄소중립 실현에 필요한 2.2배 수준의 전력 수요 증가를 감안할 때 원자력 비중은 30~40%가 적합합니다.

A. (탄소중립 실현 여정에서 무탄소 전력 수요 증대) 2020년 평균 발전 전력이 63GW인 우리나라에서 발전 비중은 석탄 36%, 원자력 29%, LNG 26%, 재생에너지 7%였습니다. 탄소중립을 달성하기 위해서는 현재 62%를 차지하고 있는 화력 발전 비중을 대폭 줄여야 합니다. 줄어든 화력 발전량은 원자력과 재생에너지 확대를 통해 충당해야 합니다. 나아가 산업과 수송 분야에서 열원으로 사용되는 화석에너지의 직접 사용을 줄이고 이를 무탄소 전력으로 대체하여야 합니다. 이렇게 되면 총에너지 사용량 중 전력의 비중이 현 20% 정도에서 약 45% 이상으로 늘어나게 됩니다. 이는 에너지 사용 효율 향상 등에 따라 미래 총 에너지 수요가 늘지 않더라도 발전량은 2배 이상이 되어야 함을 의미합니다. 2050 탄소중립 시나리오에 따르면 2050년 전력은 63GW의 2.2배가 되는 약 140GW가 됩니다. 이 중 40%를 원자력으로 공급한다면 66GW의 원전이 있어야 합니다. 현재 가동 중인 24기 원전 총 용량 23GW의 2.8배가 넘는 규모입니다(85% 이용률 가정).

(확보 가능한 원전 용량) 향후 탈원전 정책이 폐기되어 가동원전의 계속운전이 추진되고 신한울 1~4호기, 신고리 5~6호기의 건설이 완료되어 8.4GW의 용량이 추가되면 10년 후 우리나라 원전 용량은 약 31GW가 됩니다. 만약 원전예정부지 지정고시가 취소됐던 영덕의 천지원전 부지와 삼척의 대진원전 부지를 다시 확보해 1.5GW의 원전을 각 4기씩 총 8기를 건설한다고 하면 향후 20년에 12GW가 추가되어 총 43GW가 될 수 있습니다. 이럴 경우 예상된 전기화율 증가에 따라 소요전력이 매 10년마다 25GW 증가하여 10년 뒤 90GW, 20년 뒤 115GW가 된다면 원자력 발전 비중은 그때까지 약 30%선을 유지할 수 있게 됩니다. 그러나 실제로 우리나라 전력 증가가 그렇게 급격하게 진행되기는 어려울 것으로 보입니다. 그럴 경우 원자력 발전 비중은 30%를 상회하게 됩니다.

(원자력 비중 30~40% 유지 필요) 향후 소요 전력이 급격하게 늘어야 하기 때문에 현실적으로 증설 가능한 원전 용량까지 다 고려하더라도 원자력 발전비중이 30%선에 머무를 수밖에 없는 상황이 될 수도 있겠지만 적정 원자력 비중은 40% 정도 되어야 합니다. 이는 기저 발전인 석탄발전이 대폭 줄어드는 상황에서 원자력 발전이 그 감소량을 충당하지 못하면 태양광 발전 비중이 30% 이상이 되어야 하고 그럴 경우 전력 저장비용이 과도하게 늘어나기 때문입니다. 원자력 비중은 최소 30%를 목표로 하되 향후 필요에 따라 신규 원전 부지를 더 확보하거나 더욱 안전해질 SMR을 추가하는 방안을 통해 40% 이상까지 달성하도록 하는 것이 바람직합니다.



7차 전력수급기본계획에 따른 원전 설비 예상

Q10.

탄소중립을 실현하려면 전기요금이 얼마나 인상될 것인가?

재생에너지 위주로 탄소중립을 실현하려면 현재 대비 2배 이상의 전기요금을 지불해야 할 것입니다.

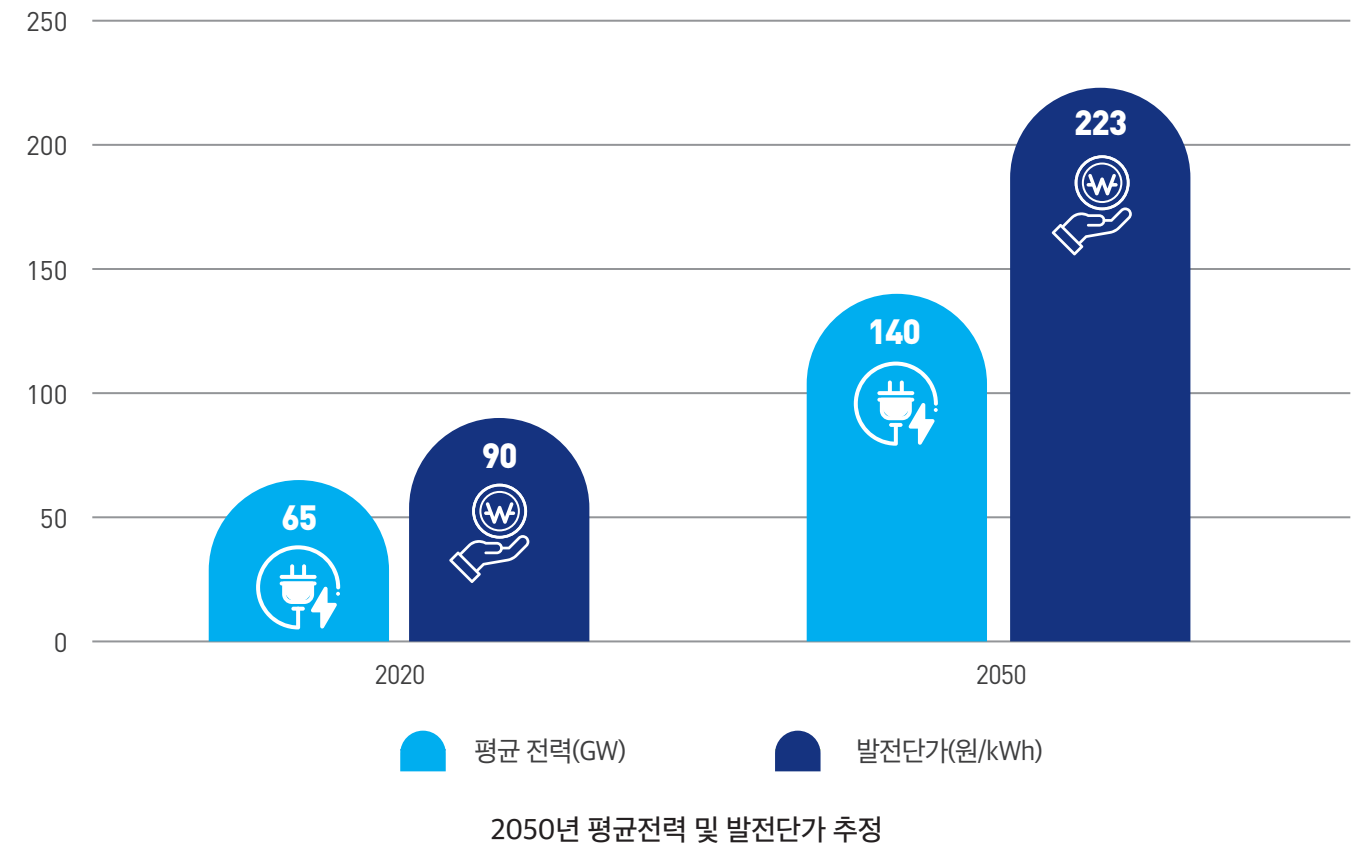
A. (탄소중립으로 가려면 지금보다 2~3배 전기를 사용해야 함) 탄소중립으로 가기 위해서는 전력생산에 있어서 온실가스 배출을 없애야 하는 것은 물론이고 가스 난방에서 전기를 사용하는 히트펌프 난방으로, 가스 조리에서 인덕션을 사용하는 전기 조리, 화석연료(휘발유, 경유, 가스)로 가는 자동차에서 전기로 가는 자동차로, 석유를 태워 열을 만들던 공장에서 전기로 열을 만들어 써야 합니다. 즉 기존의 연료가 모두 전기로 바뀌게 되는 전기화(electrification)가 일어납니다. 이로 인해 전력수요는 기존의 2~3배로 증가할 수밖에 없습니다.

(현재 대비 2~3배 규모 전력을 화석연료 없이 생산해야 함) 탄소중립을 달성하기 위해서는 전기화 뿐만 아니라 전기를 생산하는 과정에서 온실가스 배출이 없어야 합니다. 그래야 최종적으로 조리하고, 난방하고, 자동차를 굴리고, 공장을 가동하는 것이 온실가스 배출 없이 가능하게 됩니다.

(비싼 것을 늘리고 싼 것을 없애면 전기요금은 상승) 현재 원자력의 발전단가는 kWh당 60원 수준이며, 석탄은 90원 수준, 태양광과 풍력 등 재생에너지는 150원을 넘어갑니다. 따라서 석탄발전과 가스발전을 없애는 동시에 원자력까지 없애면서 태양광과 풍력을 늘리는 경우 발전단가는 상승할 수밖에 없습니다. 게다가 태양광과 풍력의 경우 간헐성 보완에 보조발전, 에너지저장장치, 대규모 송전선로 증설 등의 시스템 비용의 현격한 증가를 가져와 발전단가가 현재보다 다소 감소하더라도 시스템 비용은 증가하게 됩니다.

(지금보다 요금이 2배 이상 올라야) 탄소중립 시나리오의 50% 수준인 현재 전력수요를 기준으로 재생에너지 비중을 80% 정도로 늘린다고 가정했을 때 수반될 발전 및 송전 비용 상승폭은 100%를 넘어 소비자는 현재 요금의 2배 이상을 지불해야 합니다.

(독일 가정용 전기요금은 이미 3배 올랐음) 독일의 경우 탈원전과 재생에너지 확충에 의한 요금 상승분을 산업용이 아닌 가정용 전기료에 부과하고 있어 결과적으로 가정용 전기요금은 2000년 대비 3배 정도 요금이 올랐습니다. 자국의 산업 경쟁력은 보호하면서 비용을 충당하기 위해서입니다. 독일이 2022년말까지 현재 가동 중인 원전 6기를 모두 정지하면 전기요금은 더욱 오를 것입니다.



핵공감 클라쓰



'핵공감 클라쓰'는 원자력에 대한 과학적 사실을 함께 알아보는 유튜브 채널입니다. 원자력공학 교수 및 전문가들이 일반인들이 궁금해하는 원자력 관련 사항들을 쉽게 설명하고 있습니다. 원자력을 올바르게 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 과담 깨기
- 우리의 삶을 밝히는 방사선
- 의료방사선 그것을 알려주마
- 탈핵교재에 명드는 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 과담의 실제
- 후쿠시마 해양방류 어떻게 보는 것이 좋을까요?
- 에너지전환포럼의 'SMR 바로보기'가 비뚤어진 이유

 **YouTube 핵공감 클라쓰**

https://www.youtube.com/channel/UCuww9Z_lu6jPhzcPPpOeh1g



대통령을 위한
원자력 이슈 문답 10선

발행처	핵공감 클래스
발행일	2021년 12월 2일
디자인·인쇄	에스와이커뮤니케이션즈
ISBN	979-11-976167-1-6

원자력 이슈

대통령을 위한

문답 10선



9 791197 616716
ISBN 979-11-976167-1-6