

탄소중립과
미래세대를 위한

국가 원자력정책 제안서



2021. 12.



탄소중립과
미래세대를 위한

국가 원자력정책 제안서





목 차 Contents

제안의 배경과 목적	03
10대 정책 제안	
[정책 1] 재생에너지와 원자력이 함께하는 “2050 탄소중립” 추진	04
[정책 2] 국민 눈높이에 맞는 원자력안전 제도 및 조직 정비	05
[정책 3] 신한울 3·4호기 건설 재개를 통한 원전산업 생태계 복원	06
[정책 4] 가장 효과적인 탄소중립 수단인 가동원전 계속운전의 허용	07
[정책 5] 원자력 수출로 국가 경제성장과 일자리 창출의 지평 확대	08
[정책 6] 사용후핵연료 관리 정책의 책임있는 추진을 위한 법제화	09
[정책 7] 재생에너지 간헐성 대응 및 다목적 활용을 위한 소형모듈원전 개발·건설 및 수출	10
[정책 8] 원자력 청정수소 공급으로 탄소중립 및 수소경제 달성	11
[정책 9] 방사선 이용연구 및 산업체지원체계 혁신을 통해 국민 삶의 질 향상과 국가경제 기여	12
[정책 10] 과학과 사실에 기반한 원자력·에너지 정책 추진	13
부록 I 정책 제안 도출의 배경	
(부록 1) 국내외 원자력 이용 현황	15
(부록 2) 탄소중립을 위한 에너지믹스와 원자력	23
(부록 3) 원자력 안전과 안전성 확보체계	40
(부록 4) 신한울 3·4호기 건설과 원전 수출산업체계 복원	49
(부록 5) 가동원전 계속운전	55
(부록 6) 사용후핵연료 안전관리	59
(부록 7) 소형모듈원자로(SMR) 개발 현황 및 전망	67
(부록 8) 원자력에 의한 청정수소 공급	75
(부록 9) 방사선 기술 및 산업	81
(부록 10) 원자력 발전에 대한 국민 인식조사 결과	86

제안의 배경과 목적

- **국내 최초 원전인 고리1호기가 1978년 상업 운전을 시작한 이래 총 26기의 원전이 안정적 전력공급의 중추적 역할을 담당해옴**
 - 원자력은 온실가스와 미세먼지를 배출하지 않는 준국산 에너지로서, 고품질 전기를 가장 경제적이고 안정적으로 공급 가능
 - ※ 2020년까지 원자력 발전량은 총 3.9조 kWh로서, 석탄발전 대비 CO₂ 31.5억 톤(우리나라 2018년 총배출량의 4.6배) 감축
- **2017년부터 시행된 에너지전환(탈원전) 정책은 원전산업 기반을 훼손하고 기술경쟁력을 크게 저해함**
 - 탈원전 정책에 따라 신고리 5·6호기를 끝으로 신규원전 건설이 백지화되면서 원자력 공급산업체 매출액·인력 및 원자력 전공 학생 수가 급격히 감소
- **시대적 사명인 “2050 탄소중립”을 경제적 충격과 에너지 안보의 훼손 없이 달성하기 위해서는 실사구시적 에너지정책이 필요한 상황임**
 - 재생에너지 대폭 확대를 골자로 한 “2050 탄소중립 계획”은 재생에너지 자원이 빈약한 우리나라 현실과는 동떨어진 계획
 - 독일을 제외한 모든 에너지 대량소비 국가(미국, 중국, 인도, 러시아, 프랑스, 일본, 영국 등)가 원자력을 청정에너지로 인정하고 탄소중립 핵심 수단으로 활용
 - 국내에서도 원자력의 가치와 안전성을 재인식하고 지속적 원자력 이용을 찬성하는 분위기 확산
 - ※ 최근 조사에서 국민의 70~80%가 원전 유지 및 확대 지지
- **탄소중립 불확실성 해소와 미래세대 에너지 선택권을 위해 원자력 기술을 발전시키고 원자력을 안전하게 이용하는 방향으로 정책 전환 필요**
 - 탄소중립의 기술의존성과 불확실성 크므로 미래세대의 선택 가능한 에너지 수단으로서 원전산업과 원자력기술의 발전적 도모가 필요
 - ※ 국제에너지기구 등은 원전 이용의 2배 이상 확대를 예측하며, 특히 미·중·러·프·영 등 주요국은 2030년대 소형모듈원전(SMR) 시장 선점을 위한 기술개발 경쟁 치열
- **이에 대통령 후보님께 탄소중립, 에너지 안보, 국가 경제 및 국민복지와 미래세대의 관점에서 바람직한 국가 원자력정책 방향을 건의 드리고자 함**

[정책 1]

재생에너지와 원자력이 함께하는 “2050 탄소중립” 추진

【현황】원자력이 배제된 “2050 탄소중립”은 실현 가능성 희박

- ❖ “2030 국가 온실가스 감축목표(NDC)”와 “2050 탄소중립 시나리오”는 탈원전 정책(원전 추가 건설 중단, 가동원전 운전기간 연장 불허)을 전제로 수립
- ❖ 현 탄소중립 계획은 태양광을 과도하게 확대하고(‘50년 약 500GW, ‘20년 용량의 약 30배) 상용화되지 않은 신기술에 크게 의존
 - 🔔 온실가스 배출량 연간 감축률(4.17%/년)이 주요 선진국의 2배 수준으로, 원자력을 배제하면 다른 모든 가용수단을 동원해도 달성하기 어려운 상황
 - 🔔 현 원자력 발전량보다 훨씬 많은 전기를 수소·암모니아 발전으로 공급할 계획
 - 🔔 간헐성 재생에너지(태양광, 풍력) 비중이 높아지면 전력 공급의 안정성이 크게 저하되므로 대규모 에너지저장시설(ESS) 및 보조전원설비 설치가 필수
 - 🔔 간헐성 재생 비중이 높은 국가(영국, 스페인, 독일 등)에서 이미 에너지공급 불안정 문제 발생
- ❖ “2050 탄소중립 계획” 수립 과정에서 과학과 사실에 기반한 객관적 검토와 사회적 논의가 불충분
 - 🔔 국가 온실가스 감축목표 결정과 2050 탄소중립 시나리오 수립 과정에서 실현 가능성과 경제·사회적 파급영향에 대한 충분한 분석 및 공론화 미흡

【제안】무탄소 에너지인 원자력과 재생에너지가 함께하는 에너지믹스 추진

- ❖ 우리나라의 고유 환경(안전성, 공급안정성, 경제성 등)을 고려해, 원자력과 재생 에너지가 배합된 최적의 에너지믹스(Energy Mix) 전략 수립·추진
 - 🔔 원자력과 재생에너지를 양 날개로 하되, 재생에너지 확대에 대비한 전력 인프라 개선 및 청정발전 신기술 개발 병행
 - 🔔 대규모 재생에너지 공급 중단사태에 대비하여 충분한 예비전력(LNG 발전시설 포함) 유지
- ❖ 원자력 발전비중을 30~50%로 유지하여 전기공급의 안정성·경제성을 확보
 - 🔔 에너지원별 최종 비중은 상세 시나리오 분석을 통해 결정
 - 안정적이고 경제적인 전력 공급과 경제적인 청정수소 생산을 위해 원자력의 역할이 필수
 - 국제에너지기구, 유엔유럽경제위원회 등 중립적 국제기구와 에너지 다소비국 대부분(중국, 미국, 인도, 러시아, 일본, 프랑스 등) 원자력 역할 강조
 - 🔔 안전성 평가를 토대로 가동원전 계속운전, 대형 원전 신규 건설 및 소형모듈원자로(SMR) 개발·건설 방향을 수립

[정책 2]

국민 눈높이에 맞는 원자력안전 제도 및 조직 정비

【현황】국내 원전의 안전성은 높은 수준이나 제도적·기술적 강화 필요

❖ 후쿠시마 원전사고 이후 설계기준을 초과하는 자연재해와 중대사고에 대비한 설비 및 운전절차를 크게 강화하여 높은 수준의 안전성 확보

🔔 쓰나미에 대비한 해안방벽, 방수문 및 방수형 배수펌프, 전력계통 상실에 대비한 이동형 발전기·펌프, 중대사고 대응설비(피동형 수소재결합기 등) 등 설치·보강

🔔 사업자는 전 원전에 대한 중대사고 대응능력을 평가하여 사고관리계획서를 규제기관에 제출

❖ 원자력안전위원회(원안위)가 각종 규제제도를 강화하고 투명성을 크게 높였으나, 규제의 효율성과 국민의 신뢰는 불충분한 상황

🔔 위원회 회의·의사록 및 인허가자료 공개, 민간참여 확대 등 안전규제의 투명성은 크게 향상

🔔 각종 국민 여론조사 결과 70% 이상이 국내 원전을 안전하다고 생각하나 일부는 안전성에 대해 크게 우려(일부 국민이 원전을 거부하는 가장 큰 이유)

🔔 안전규제 행정조직(원안위)과 전문조직(한국원자력안전기술원 등)의 이원화에 따른 비효율성을 극복하고, 규제의 독립성과 전문성을 강화할 필요

【제안】국민이 체감할 수 있는 안전목표 설정 및 규제체계 효율화

❖ 국내 원전에 대해 국민이 체감할 수 있는 新安전목표 설정

“원전사고로 인한 주민대피 필요성의 실질적 제거(Practical Elimination)”

※ 국민이 안심하고 신뢰할 수 있는 국가방사능방재체계 재정립 포함

❖ 원자력 안전규제의 독립성·전문성·효율성·신뢰성 강화를 위한 규제체계 재정립

🔔 최상위 의사결정기구인 위원회(현재 상임위원 2인, 비상임위원 7인으로 구성) 구성 및 운영 개선

- 미·일·프와 같이 상임위원 체계로 개편하고, 조직 안정을 위해 순차적으로 위원 교체

※ 미·일·프에서는 임기 5~6년의 상임위원 5인으로 원자력안전(규제)위원회를 구성

- 위원회 위원의 임기 중 원자력에 대한 찬·반 활동 금지

- 위원회 의사결정을 지원하는 전문위원회(現 원자력안전전문위원회)의 역할 강화

🔔 안전규제 이행조직의 재정립을 통한 전문성과 효율성 확보

- 행정조직(원안위)-전문조직(한국원자력안전기술원, 한국원자력통제기술원)의 수직적 조직체계 재정립

※ 원자력 주요국은 단일 규제조직 운영: 미국(NRC, 약 4,000명), 일본(NRA, 약 1,000명; 후쿠시마 원전 사고 후 규제기관과 전문조직 통합), 프랑스(ASN, 약 600명), 캐나다(CNSC, 약 900명)

🔔 안전규제기관이 원자력·방사선 안전정보의 소통 주체로서 적극적으로 역할

- 안전규제활동과 관련한 정보는 물론 원자력 안전에 대한 과학적·객관적 정보를 체계적으로 제공

- 라돈, 우주방사선, 생활밀착형 방사선 이용에 대한 국민 인식 제고

[정책 3]

신한울 3·4호기 건설 재개를 통한 원전산업 생태계 복원

【현황】탈원전 정책으로 세계 최고수준의 원전산업 생태계 붕괴 중

- ❖ 우리나라는 원전기술을 자립하고 지속적으로 건설하면서 원전 건설·운영의 세계적 경쟁력을 확보했으며, UAE 수출사업 성공을 통해 이를 입증
 - 🔔 한국은 세계 원전시장에서 중·러 대비 경쟁력을 갖춘 유일한 서방권 국가
- ❖ 탈원전 정책으로 원전 공급망 및 원전 산업기반이 급격하게 훼손
 - 🔔 신한울 3·4호기 이후의 신규원전 건설이 백지화되어 관련 산업체 매출액·인력과 원자력전공 학생 수가 급격하게 감소
 - 매출액: 47,140억 원('17) → 44,941억 원('18) → 39,311억 원('19)
 - 인력: 21,682명('17) → 20,735명('18) → 19,449명('19)
 - 원자력전공 재학생수: 2,777명('17) → 2,527명('18) → 2,350명('19) → 2,190명('20)
 - 🔔 신규원전 건설에는 약 2,000여 업체가 참여하나, 신규 원전 발주 물량이 없어서 폐업, 사업축소 등 경영상 큰 어려움을 겪으면서 원전업계가 고사 위기
 - 원전 산업기반 붕괴 시, 가동원전 안전에 악영향을 미치고, 국내건설 및 수출 역량 상실(미국, 영국 등 전례)
- ❖ 탄소중립을 위한 원자력 역할이 재조명되며 세계 원전시장 확대 예상
 - 🔔 미국, 프랑스, 영국, 일본, 중국, 러시아, 인도 등 주요 국가가 원자력 이용 확대 추진
 - 🔔 중동, 동유럽, 남아시아, 아프리카 등 새로운 원전 도입국 확대

【제안】신한울 3·4호기 건설을 재개하여 원전산업 정상화 및 경쟁력 회복

- ❖ 신한울 3·4호기 건설 재개를 통해 국내 원전 공급망 보존 및 수출기반 강화
 - 🔔 국내 원전 건설을 통해 세계 최고수준의 원전기술력과 산업생태계의 복원 가능
 - 🔔 부품·기자재 및 서비스의 적기 공급을 가능하게 하여 가동원전 안전관리능력과 수출 경쟁력이 향상되며, 신규원전 건설 재개로 수출 대상국의 불안감 해소
 - 🔔 특히, 2030년 이전 준공으로 연간 1,700만톤(석탄발전 대비)의 온실가스 배출량을 감축할 수 있어서 국가 온실가스감축목표 달성에 크게 기여(2030년 감축목표의 약 14% 수준)
- ❖ 후속 신규원전 건설은 국민 공감대를 확보하여 투명하게 추진
 - 🔔 신한울 3·4호기 후속 신규원전 건설도 국민과 지역주민의 확고한 공감대 하에 투명하게 추진하여 탄소중립에 기여
 - 🔔 원전 건설부지는 엄격한 입지조건과 지자체 공모를 통해 확보하되, 신규 임해지역뿐만 아니라, 원전 해체부지 재사용, 화력발전소 해체부지 재사용 등도 적극적으로 검토

[정책 4]

가장 효과적인 탄소중립 수단인 가동원전 계속운전의 허용

【현황】탈원전 정책으로 가동원전은 최초 허가기간까지만 운영

❖ 대부분의 원전 운영국은 가동원전의 안전성·경제성 평가 후 안전기준을 만족하면 계속운전을 허용(추가운전을 고려한 안전성 재검토 및 필요 시 개선조치)

🔔 원전 설계수명은 원전을 안전하게 가동할 수 있는 기술적인 운전한계가 아니라 “최초의 운영허가 기간”을 의미

🔔 대부분의 원전 운영국은 안전성이 확인된 가동원전의 계속운전을 허용

- 세계 원전의 30%, 100기 이상이 최초 운영허가기간을 경과하여 40년 이상 운전 중(OECD/NEA, 2021년)
- 미국은 94기 원전의 60년 운전을 승인하고, 그중 6기에 대해서는 총 80년 운전을 승인
- 탈원전 국가인 스위스와 벨기에도 계속운전 시행: 스위스 Beznau 1호기는 전 세계에서 가장 오래된 가동원전으로 현재 53년째 운전 중

🔔 가동원전 계속운전은 가장 효과적인 탄소중립 이행수단으로 평가(OECD/NEA, 2021)

❖ 국내 원전 중 10기의 최초 설계수명(운영허가 기간)이 2030년 이전 만료

🔔 고리 2·3·4호기, 한빛 1·2호기, 한울 1·2호기, 월성 2·3·4호기 등 총 8.45GW 용량

🔔 동일량 발전을 위해 태양광은 45GW, 육상풍력은 29GW 수준의 시설 확충 필요

【제안】안전성이 확인된 가동원전의 계속운전을 허용

❖ 2030년 국가 온실가스감축목표(NDC) 달성을 위한 가장 효율적 수단으로서, 안전성·경제성이 확인된 가동원전의 계속운전 허용

🔔 운영허가 기간이 만료되는 원전 10기(시설용량 8.45GW)를 모두 운영한다면, 연간 석탄 대비 약 5,000만톤, 천연가스 대비 약 3,000만톤의 온실가스 저감(85% 이용률 가정, CO₂ 환산값)

- '30년 총 배출량 목표의 11.5%, 발전부문 배출량 목표의 33.5%에 해당(석탄발전 대비)

❖ 원전을 안전하고 경제적으로 이용할 수 있는 계속운전 허용 환경 및 제도 수립·정착

🔔 우리나라 원자력 및 에너지 환경에 맞는 가동원전의 계속운전 제도 수립

- 미국의 경우, 원전의 최초 운영허가 기간은 40년이나, 안전성이 확인되면 20년씩 추가로 운영허가 기간 갱신(현재 최대 80년까지 운영 허가)
- 다수 유럽 국가는 최초 운영허가 기간을 정하지 않고 10년마다 수행하는 주기적안전성평가를 통해 가동원전의 계속운전을 허용

🔔 계속운전 제도의 정비는 정책적 불확실성을 제거하여 주요 기기의 공급망 유지, 사업자의 지속적 안전 투자 및 인재·기술 확보에도 기여

[정책 5]

원자력 수출로 국가 경제성장과 일자리 창출의 지평 확대

【현황】세계 원전시장의 확대가 예상되나 우리나라 수출 경쟁력은 저하 중

- ❖ 기후위기와 4차산업혁명으로 세계의 원전시장 확대(건설, 운영, 해체 등)
 - 🔔 미·중·영·프·일·인·러의 원전 건설 증가 및 전 세계적인 원자력 역할 확대 예측
 - 폴란드, 체코 등 동유럽 국가의 신규원전 발주가 임박하여 국가 간 경쟁 치열
 - 세계에너지기구(IEA)는 2배 이상, 국제원자력기구(IAEA)는 3배 이상으로 원자력 발전량 증가 예상
- ❖ 최고의 기술력과 공급망을 갖춘 다양한 K-원전, 최고 경쟁력 보유
 - 🔔 UAE에 수출한 APR1400(1400MWe)을 비롯하여 APR1000(1000MWe), SMART(100MWe), i-SMR(170MWe, 개발 예정) 및 다양한 연구로 모델을 보유하여 수요자 요구 충족 가능
 - 🔔 우수한 전문기술인력과 세계 최고의 설계, 시공, 건설 및 운영 능력(On-time On-budget)
- ❖ 탈원전 정책과 국내 원전건설 중단에 의해 수출 경쟁력이 급격하게 저하 중
 - 🔔 신한울 3·4호기 건설 중단과 후속계획 백지화에 따라 원전 산업 인프라 붕괴 중
 - 🔔 에너지전환정책의 영향으로 국내 원전기술에 대한 국제적 신인도 저하

【제안】원자력 수출을 위한 범정부 추진조직 설립 및 지원제도 구축

- ❖ 범정부적 원자력수출 추진조직(가칭 '원자력수출추진체')을 구성하고 대통령 지휘 하에 원자력 수출 추진
 - 🔔 원자력 수출과 관련된 종합 추진 조직으로 외교, 기술, 산업, 국방, 환경, 홍보, 마케팅, 부가지원 등 전반적인 총괄(원전을 비롯한 원자력 수출에 총체적 국가역량의 집중 지원)
 - 🔔 국가적 금융지원 강화(수출입은행, 무역보험공사의 금융지원 제도 개선 등)
 - 🔔 문화교류(한류 열풍 활용), 전문인력 양성 지원, 기술이전 등 전략적 사전포석 강화
- ❖ 원자력수출을 위한 한미의 전략적 동반자관계 강화 및 시장 개척 공조(시너지 효과)
 - 🔔 '한·미 에너지정책대화' 아래 '한·미 원자력수출협력센터'를 설립하여 원자력 수출모델 공조 및 협력, 해외 원전사업 공동 진출 등 추진
 - 러·중의 세계원전시장 과점이 미국의 안보전략과 충돌하므로, 원전 영향력 확대 및 시장 개척 협력
 - 🔔 양국 원전기업 간의 협력 강화로 한·미 간 상호 취약점 보완
 - 미국의 국제사회 영향력과 핵비확산 안보질서, 한국의 대형원전 설계시공 운영관리 및 주기기 제작 능력
 - 지식재산권 공유, 연구시설 공동 활용, 인력 교류 및 기술개발 협력 등

[정책 6]

사용후핵연료 관리 정책의 책임있는 추진을 위한 법제화

【현황】임시저장시설 포화가 임박했으나 정책·제도적 준비가 부족

❖ 국내 일부 원전의 사용후핵연료 임시저장시설은 저장용량 포화상태가 임박

🔔 국내 원전 사용후핵연료 임시저장시설은 월성원전(2022년 초)부터 시작하여 순차적으로 포화될 것으로 전망

※ 시설별 사용후핵연료 저장량 및 포화율(2020년 말 기준)

시설	저장용량(다발)	저장량(다발)	포화율(%)
고리	8,038	6,599	82.1
새울	1,560	296	18.9
한빛	9,017	6,566	72.8
한울	7,066	6,072	85.9
신월성	1,046	520	49.7
월성	489,952	474,176	96.7
하나로	1,032	512	49.6

❖ 사용후핵연료의 안전한 관리는 현세대와 미래세대를 위해 피할 수 없는 과제이나 이를 해결하기 위한 정책·제도적 준비가 크게 부족한 상황

🔔 2021.3월 “사용후핵연료 관리정책에 대한 권고안”이 정부에 제출되었으나, 구체적 방안과 이를 이행하기 위한 제도, 조직, 기술, 사회적 합의 등은 부재한 상황

🔔 사용후핵연료 관리는 국민 안전과 직결되고 장기적인 정책 추진이 요구되는 사안이므로 원전 사업자와 특정 지역만의 현안이 아니라 국가의 책무로 인식할 필요

- 핀란드는 1983년 부지 선정에 착수하여 2001년 올킬루오토 부지 최종 선정(현재 지하 450m 암반에 위치하는 심지층 최종처분장 건설 완료 단계이며, 2025년 경 운영 개시 예상)

- 스웨덴은 1992년 부지 선정에 착수하여 2009년 포스마크 부지를 최종 선정(현재 건설허가 심사 단계)

【제안】사용후핵연료 관리정책의 법제화(여야 합의)를 통한 안정적 사업추진

❖ 합리적이고 일관성 있는 사용후핵연료 저장·운반·처분 정책 추진을 위한 법제화

🔔 사용후핵연료 관리에 대한 구체적인 일정과 이행 절차 등을 국민적 공감 하에 여야 합의로 법제화하여 국가차원에서 일관성 있게 정책 추진

❖ 각 원전의 사용후핵연료 저장용량 포화에 대비하여 부지 내 임시저장시설을 적기 확보

❖ 친환경적인 선진 사용후핵연료 관리방안 모색을 위한 사용후핵연료 처리 대안기술(파이로기술) 연구 병행

🔔 기술발전과 환경 변화에 따라 미래에 최적의 사용후핵연료 관리방안을 선택할 수 있도록 다양한 기술적 대안 제공

[정책 7]

재생에너지 간헐성 대응 및 다목적 활용을 위한 소형모듈원전(SMR) 개발·건설 및 수출

【현황】SMR 개발이 수출 목표로 추진 중이나 국내 탄소중립 대책에서는 배제

❖ 원자력 선도국들은 소형모듈원전(SMR)을 유망한 저탄소 에너지원으로 평가하고 기술개발 및 활용을 적극 추진 중

🔔 마캐영·중라프 등에서 70종 이상의 SMR 개발 중[IAEA, 2020]

🔔 SMR은 다양한 용도(육상, 해상, 극지, 이동식 등)의 전력 공급, 수소 생산 등 열 이용, 선박 동력원 등에 사용될 수 있으며, 일부 건설·운영(러, 중) 및 설계 인증(한, 미)

❖ 국내에서는 혁신형 소형모듈원전(i-SMR) 개발 추진(SMART 원전 수출 노력 병행)

🔔 2020년 말 원자력진흥위원회에서 향후 8년간 i-SMR 개발에 4,000억 원 투입 계획 결정: 과기부·산업부 공동 기술개발사업으로 예비타당성조사 진행 중

🔔 i-SMR은 중대사고 가능성을 제거하면서도 대형원전 수준의 경제성을 목표로 설정

❖ 정부의 “2050 탄소중립 시나리오”에서는 SMR 이용 배제

🔔 SMR은 탄력적 출력 제어가 용이하여 재생에너지 간헐성에 완벽한 대응 가능

🔔 개발될 SMR을 국내 탄소중립 계획에서는 배제하고 수출만을 목표로 하는 것은 비합리적

【제안】SMR 개발을 적극 지원하고, 국가 에너지믹스에 반영

❖ “원자력혁신특별법(가칭)” 제정을 통해 SMR 개발을 전폭 지원하여 기후위기 대응능력과 원전산업 경쟁력을 제고

🔔 혁신형 SMR의 체계적 개발뿐만 아니라 인허가 심사가 예측가능하고 효율적으로 이루어지도록 선진 인허가체계 구축 (※ 미국도 Nuclear Innovation Act 제정)

🔔 2030년대 시장 진입을 위한 국내 실증 및 수출금융 지원체계 확보

❖ 국가 에너지믹스에 SMR 활용계획을 반영하여 재생에너지의 간헐성 보완과 청정수소 생산 등에 활용하고 해외 수출도 적극 추진

🔔 신속한 출력조절이 가능한 SMR을 이용하여 재생에너지의 간헐성을 대응하고, 대량의 수소 또는 열 수요지역에 건설하여 경제적으로 공급

- 2050 탄소중립 실현과 청정수소 생산에 필요한 SMR 국내 건설 규모는 상세 시나리오 분석을 통해 결정

🔔 국내 건설을 통해 실증된 SMR의 해외 수출 적극 추진

🔔 해양, 극지, 우주 활용을 적극적으로 모색하고 북한과의 에너지 협력에도 활용

[정책 8]

원자력 청정수소 공급으로 탄소중립 및 수소경제 달성

【현황】원자력을 청정수소 생산수단에서 완전 배제

- ❖ 원자력은 유망한 청정수소 생산수단으로 평가되어 다양한 기술 개발 중
 - 🔔 상온 수전해 방식인 경우, 재생에너지의 수소 생산단가는 약 8,000원/kg, 원자력은 약 3,800원/kg 수준임
 - 증기발생기 증기를 활용한 고온 수전해 방식은 상온 수전해보다 생산효율이 30% 향상(외국에서 실증 중)
 - 🔔 초고온가스로를 이용하면 수소 생산효율을 더 향상시킬 수 있으므로, 일·중·미 등에서 관련 기술 개발에 적극 투자 중
- ❖ 수소경제활성화로드맵(2019), 2050 탄소중립시나리오(2021) 등에서는 청정수소 소요량 대부분을 수입에 의존하고, 원자력 이용 수소 생산은 배제
 - 🔔 재생에너지를 이용한 청정수소 생산량은 국내 수요의 20% 이하로 계획하여 국내 수소 소요량 대부분을 수입해야 하는 상황
 - 🔔 이용률이 낮은 재생에너지를 활용한 수소 생산은 경제성 확보가 어려움
 - 2050 탄소중립 시나리오 A안에 따라 550만 톤의 수소를 저온 수전해 방식으로 생산하기 위해서는 약 200GW의 태양광(이용률 15% 가정) 또는 약 35GW의 원자력(이용률 85% 가정) 발전설비 필요
 - 🔔 매년 2,000만 톤 이상의 청정수소를 외국에서 수입해야 하는 경우 에너지 안보 위기 초래

【제안】원자력을 청정수소 생산을 위한 핵심 수단으로 활용

- ❖ 탄소배출이 없는 원자력을 청정수소 생산수단으로 인정하고 국가 에너지정책에 반영하여 2050년 탄소중립과 수소경제에 기여
 - 🔔 원자력과 잉여 재생전력(특히, 태양광)으로 청정수소의 대부분을 공급하는 전략 수립
 - 🔔 원자력의 높은 이용률과 안정된 전기공급으로 수소 생산의 경제성 확보
 - 🔔 청정에너지 생산국의 지위를 확보하여 수소경제 선도국의 역할 수행
- ❖ 원자력 청정수소 생산기술 개발 및 실증으로 청정수소의 50% 이상 공급
 - ※ 탄소중립위원회에서 예측한 2050년 수소 소요량 2,750만톤을 저온 수전해로 공급하기 위한 태양광, 육상풍력, 원자력 발전시설용량은 각각 900GW, 610GW, 170GW 수준
 - 🔔 단기적으로 가동원전을 활용한 상온 및 고온 수전해 방법 실증
 - 가동원전의 계속운전과 연계할 경우 청정수소를 경제적이고 안정적으로 공급 가능
 - 🔔 중기적으로 소형모듈원전을 활용하여 수요지 인접지역에서 청정수소 생산
 - 수소 수송 및 저장 비용의 획기적 절감으로 수소 이용 산업의 경쟁력 제고
 - 🔔 장기적으로 초고온가스로 등 혁신형 원전을 활용한 청정수소 생산기술 확보

[정책 9]

방사선이용 연구 및 산업체 지원체계 혁신을 통해 국민 삶의 질 향상과 국가경제에 기여

【현황】지난 5년간 방사선기술 개발과 사업화를 위한 여건 악화

- ❖ 방사선 기술은 의학·바이오·공업·환경 등 다양한 산업 분야에 활용
 - 🔔 연간 약 1,500만 건의 방사선 이용 의료 진단과 약 8만 2,000명의 방사선 이용 종양 치료가 시행되며, 그 수가 매년 5% 수준 증가
 - 🔔 4만 9,000여 기관 및 업체가 방사성동위원소 또는 방사선 발생기기를 이용
 - 🔔 약 14만 6,000명이 방사선 이용 기관이나 산업체에 종사
- ❖ 정부의 방사선기술 투자계획이 잘 이행되지 않고, 개발 기술의 사업화 지원도 미흡
 - 🔔 정부가 약 8,000억 원 투자(2019~2025) 계획을 발표했으나('19년 말) 실제 이행은 부진
 - 🔔 방사선 제품의 국산화율 제고를 위한 기술개발 및 사업화 관련 정책·제도의 변화 필요
- ❖ 방사선이용 연구·산업에 원전 관련 법규를 그대로 적용하는 경우 다수
 - 🔔 불합리한 규제는 안전문화를 저해하고, 방사선이용 연구개발과 산업 활성화에 장애 요소

【제안】기술 개발과 산업화 촉진을 위한 제도 개선

- ❖ 다부처 융합 연구 확대를 통해 투자 효과 극대화
 - 🔔 사회·경제적으로 해결이 필요한 대표분야(Flagship Area)를 정하고 각 부처의 관련 사업(기초·응용·사업화)을 체계적으로 연계하여 투자 효과를 극대화
 - 이를 실현하기 위한 제도 및 행정 개선 필요
- ❖ 대형시설 건설·운영체계 혁신으로 국가 과학기술 및 산업 기여도 증대
 - 🔔 기장 연구로 건설의 적기 추진으로 방사성동위원소 생산 및 전력반도체 분야 발전 도모
 - 🔔 대형 방사선 시설(입자가속기 포함)들의 활용도 제고를 위한 전 주기적 관리·지원체계 구축
- ❖ 시설 특성을 반영한 법규 개선 및 산업체 애로사항 해결 지원
 - 🔔 원자력안전법, 약사법, 먹는물관리법 등 여러 부처 소관으로 분산되어 있는 방사선이용 관련 규정의 일원화 추진
 - 분산된 방사선 이용 관련 규정의 적합성과 상충성을 검토하여 합리적으로 일원화
 - 🔔 방사선이용 연구·산업 규제에서 원전과 다른 시설 및 안전 특성을 합리적으로 반영
 - 🔔 폐기물 처분 등 방사선이용 중소기업의 법적요건 충족을 위한 기술개발 지원

[정책 10]

과학과 사실에 기반한 원자력·에너지 정책 추진

【현황】국가 에너지정책 수립 과정에 원자력 전문가 배제로 편향성 노출

❖ 에너지정책 수립 과정에 원자력 분야 전문가가 배제되면서 과학적 사실에 기반을 둔 균형 있는 정책 수립 및 의결이 불가능한 상황

- 🔔 기후변화 대응 정책을 총괄하는 탄소중립위원회에 원자력 전문가 완전 배제
- 🔔 탄소중립 기술혁신 10대 핵심기술 개발 전략에서 가장 현실성 있는 탈탄소 기술인 원자력기술 배제
- 🔔 원자력안전위원회, 에너지위원회 등 다수의 의사결정체계에서 원자력 전문가의 역할이 크게 약화되고, 탈핵진영 등의 영향력 과다

❖ 원자력 및 에너지와 관련한 객관적·과학적 정보 소통 미흡

- 🔔 원자력문화재단에서 개편된 공공기관인 에너지정보문화재단조차 원자력에 대한 부정적 정보만을 제공
- 🔔 전북교육청의 탈핵교과서 등 교육 현장에서 편파적인 에너지 교육 사례 빈번

【제안】원자력·에너지 정책기구와 제공되는 정보의 전문성과 신뢰성 보장

❖ 탄소중립위원회, 에너지 기본계획 및 전력수급기본계획 워킹그룹 등에 충분한 수의 원자력 및 관련 분야 전문가 참여 보장

- 🔔 2050 탄소중립 시나리오와 이행방안 등을 비롯한 국가 에너지정책에 대해 전문적 분석 및 상호 검토가 가능하도록 충분한 수의 분야별 전문가 참여 보장
- 🔔 산학연 전문가의 참여 비율을 조정하여 특정 분야의 과도한 의견 반영 지양

❖ “에너지정보문화재단”을 객관적 에너지정보 제공기관으로 역할 조정

- 🔔 정부 정책의 일방적 홍보를 지양하고 과학적 사실에 기반을 둔 에너지·원자력·방사선 등에 관한 신뢰성 있는 정보 제공을 에너지정보문화재단의 주된 역할로 설정
- 🔔 각 분야 전문가들이 균형 있게 참여하는 심의위원회에서 콘텐츠 구성 방향 및 정확성 검토

❖ 초·중·고 교육과정에서 과학적이고 균형 있는 에너지 교육이 가능하도록 신뢰성 있는 교재를 개발하여 보급

(부록 1) 국내외 원자력 이용 현황

가. 원자력의 종류와 이용 분야

- 원자력은 원자핵의 반응으로 물질의 질량이 줄어들면서 방출되는 에너지로서, 다음 세 가지가 있음
 - 핵분열(Nuclear Fission): 우라늄, 플루토늄과 같이 무거운 원소의 원자핵이 쪼개지면서 에너지를 방출
 - 핵융합(Nuclear Fusion): 수소(지상에서는 무거운 수소인 중수소와 삼중수소)와 같이 가벼운 원소의 원자핵들이 합쳐지면서 에너지를 방출
 - 방사능(Radioactivity): 불안정한 상태의 원자핵이 방사선 형태로 에너지를 방출하면서 더 안정한 상태로 변화
- 원자력은 다음 표와 같이 광범위하게 이용되고 있거나 개발 중임

구분	원리	이용 분야
핵분열	<p>중성자 우라늄-235 원자핵 불안정한 U-236 원자핵 핵분열 조각 (방사성물질) 핵분열 중성자 에너지 (~200MeV)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • 원자력발전: 전세계 10%(OECD 18%) 전력 공급 • 연구용원자로: 방사성동위원소 생산, 재료시험, 과학연구(물질 특성 규명 등) • 열생산: 지역난방, 해수담수화, 산업용 열공급, 수소 생산 등 • 선박동력: 잠수함, 항공모함, 쇄빙선, 컨테이너선 • 우주원자로: 발전 및 추진체 • 원자폭탄
핵융합	<p>중수소 삼중수소 중성자 (14.1MeV) 헬륨 (3.5MeV)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • 핵융합발전(개발 중) • 소형 중성자원 • 수소폭탄
방사능	<p>전자기파 (엑스선, 감마선 등) Electromagnetic wave 방사성 붕괴 방사선 입자(알파, 베타, 중성자 등) Particles</p>	<ul style="list-style-type: none"> • 의료 진단 및 치료, 공업(측정, 검사, 생산 등), 농업(품종개발, 식품보존 등), 과학연구 • 방사능 전지(원자력 전지): 우주 동력 등

- 현재 가장 광범위하게 이용되는 핵분열 에너지는 다음과 같은 대표적 장단점을 지니고 있음

구분	핵심특성
장점	<ul style="list-style-type: none"> • 고밀도 에너지: 최소 연료량(화력 대비) 및 부지면적(재생, 화력 대비) • 온실가스와 대기오염물질(미세먼지 등)을 배출하지 않는 에너지 • 고품질의 전기를 매우 안정적으로 공급 가능: 재생에너지 대비 우수 • 산소 불필요 및 긴 연료 교체주기: 해저 및 우주 에너지원으로 유리
단점	<ul style="list-style-type: none"> • 원자력 사고와 사용후핵연료(고준위폐기물) 안전관리에 대한 우려 • 수력 및 가스 발전에 비해 급격한 출력 조절 어려움 ※소형모듈원자로(SMR)에서는 출력 조절 기능이 크게 강화

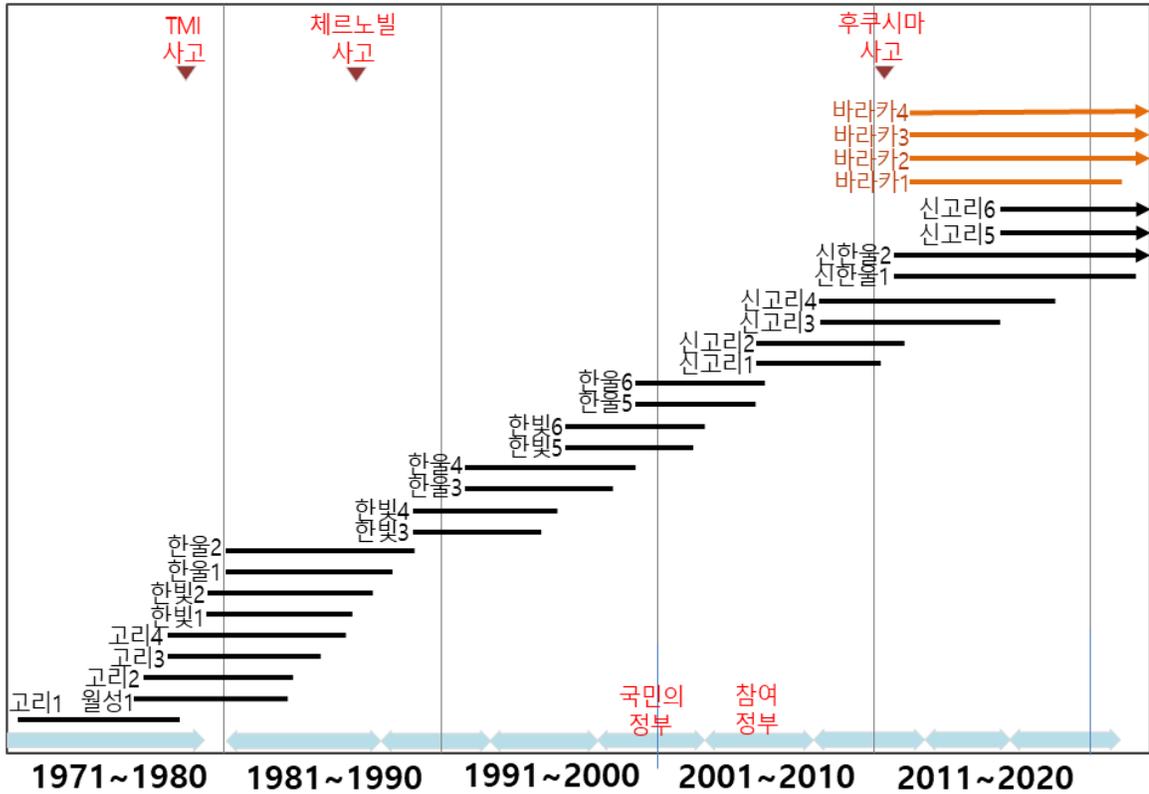
나. 우리나라의 원자력발전 현황

- 우리나라는 1950년대 후반부터 원자력 이용을 모색했으며, 1978년 고리원전 1호기가 상업운전을 시작함으로써 본격적인 원전시대에 진입함
 - 1956년 한·미원자력협정 체결, 문교부 원자력과 설치 및 원자력 국비유학생 파견, 1958년 원자력법 제정 및 연구용원자로 도입계약, 1959년 원자력원 및 원자력연구소 설립 등 신속한 추진체계 구축
 - 1978년 고리1호기 상업운전 이래 총 26기의 원전 운영(현재 2기는 영구정지)
 - 2021년 12월 현재 국내 원자력발전 현황은 다음 그림과 같음

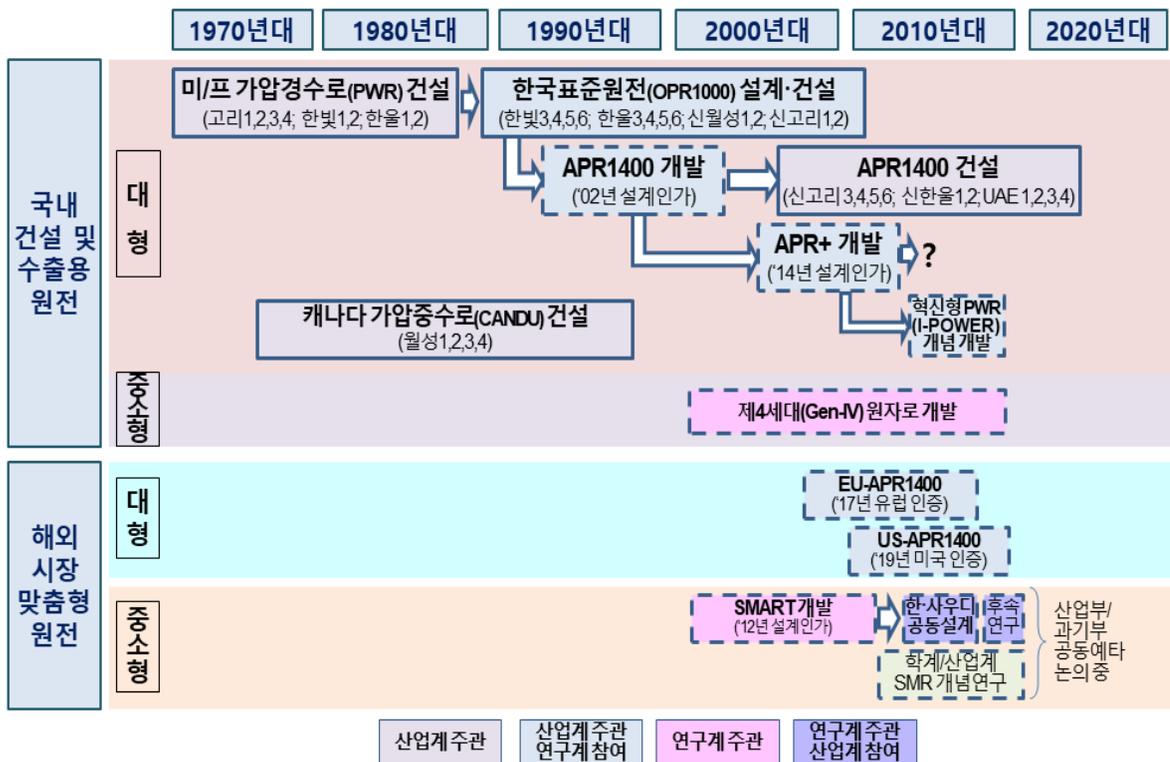


○ 국내 원전은 석유파동이 있었던 1970년대에 매우 적극적으로 건설되었으며, 1980년대 이후에도 지속적으로 건설하면서 기술을 자립하여 고유 모델을 갖추

- 1970년대부터의 국내 원전 건설 과정



- 1980년대부터 원전기술 자립을 적극적으로 추진하여, 1990년대에 한국표준형원전 (KSNP, 후에 OPR1000), 2000년대에 신형경수로(APR1400)를 확보

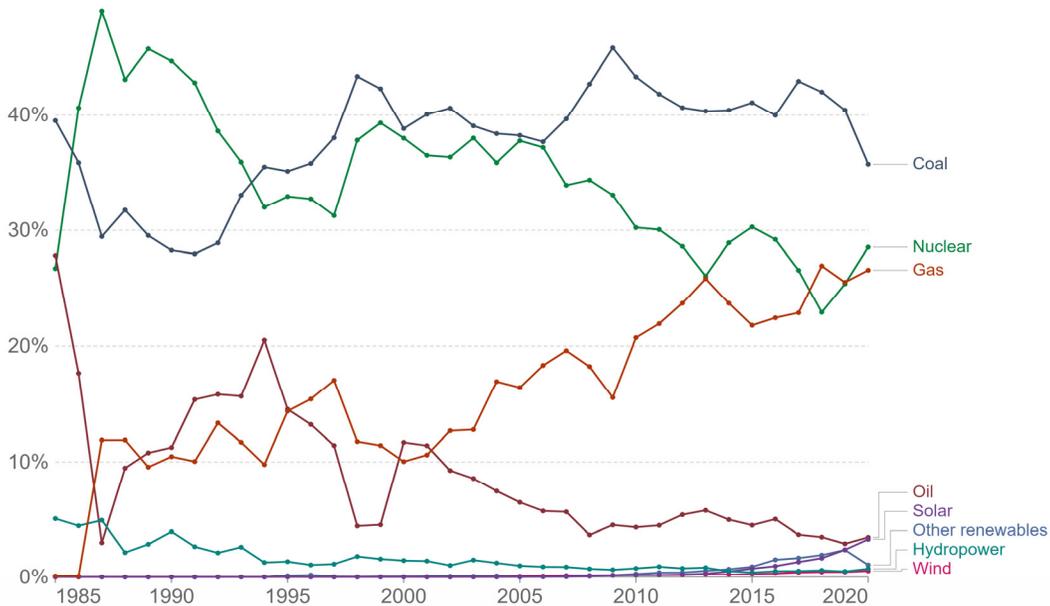


[참고] 국내 원전의 노형과 용량 및 건설·운영 상세 정보

발전소명	원자로형	원자로 공급	용량 (MWe)	건설허가	운영허가	첫입계	상업운전	최초설계수명 (운전 만료일)	
고리	#1	PWR	W/H	587	72.05.31	72.05.31	77.06.19	78.04.29	07.06.18 (17.6.18 영구정지)
	#2	PWR	W/H	650	78.11.18	83.08.10	83.04.09	83.07.25	23.04.08
	#3	PWR	W/H	950	79.12.24	84.09.29	85.01.01	85.09.30	24.09.28
	#4	PWR	W/H	950	79.12.24	85.08.07	85.10.26	86.04.29	25.08.06
신고리	#1	PWR (OPR1000)	두산중	1,000	05.07.01	10.05.19	10.07.15	11.02.28	50.05.18
	#2	PWR (OPR1000)	두산중	1,000	05.07.01	11.12.02	11.12.27	12.07.20	51.12.01
	#3	PWR (APR1400)	두산중	1,400	08.04.15	15.10.30	15.12.29	16.12.20	75.10.29
	#4	PWR (APR1400)	두산중	1,400	08.04.15	19.02.01	19.04.08	19.08.29	79.01.31
	#5	PWR (APR1400)	두산중	1,400	16.06.27				건설중
	#6	PWR (APR1400)	두산중	1,400	16.06.27				건설중
월성	#1	CANDU	AECL	679	78.02.15	78.02.15	82.11.21	83.04.22	12.11.20 (18.6.20 영구정지)
	#2	CANDU	AECL	700	92.08.28	96.11.02	97.01.29	97.07.01	26.11.01
	#3	CANDU	AECL	700	94.02.26	97.12.30	98.02.19	98.07.01	27.12.29
	#4	CANDU	AECL	700	94.02.26	99.02.08	99.04.10	99.10.01	29.02.07
신월성	#1	PWR (OPR1000)	두산중	1,000	07.06.04	11.12.02	12.01.06	12.07.31	51.12.01
	#2	PWR (OPR1000)	두산중	1,000	07.06.04	14.11.14	15.02.08	15.07.24	54.11.13
한빛	#1	PWR	W/H	950	81.12.17	85.12.23	86.01.31	86.08.25	25.12.22
	#2	PWR	W/H	950	81.12.17	86.09.12	86.10.15	87.06.10	26.09.11
	#3	PWR (OPR1000)	두산중	1,000	89.12.21	94.09.09	94.10.13	95.03.31	34.09.08
	#4	PWR (OPR1000)	두산중	1,000	89.12.21	95.06.02	95.07.07	96.01.01	35.06.01
	#5	PWR (OPR1000)	두산중	1,000	97.06.14	01.10.24	01.11.24	02.05.21	41.10.23
	#6	PWR (OPR1000)	두산중	1,000	97.06.14	02.07.31	02.09.01	02.12.24	42.07.30
한울	#1	PWR	프라마툼	950	83.01.25	87.12.23	88.02.25	88.09.10	27.12.22
	#2	PWR	프라마툼	950	83.01.25	88.12.29	89.02.25	89.09.30	28.12.28
	#3	PWR (OPR1000)	두산중	1,000	93.07.16	97.11.08	97.12.21	98.08.11	37.11.07
	#4	PWR (OPR1000)	두산중	1,000	93.07.16	98.10.29	98.12.14	99.12.31	38.10.28
	#5	PWR (OPR1000)	두산중	1,000	99.05.17	03.10.20	03.11.28	04.07.29	43.10.19
	#6	PWR (OPR1000)	두산중	1,000	99.05.17	04.11.12	04.12.16	05.04.22	44.11.11
신한울	#1	PWR (APR1400)	두산중	1,400	11.12.02	21.07.09			건설중
	#2	PWR (APR1400)	두산중	1,400	11.12.02				건설중
	#3	PWR (APR1400)	두산중	1,400					17.02.17 발전사업 허가 후 중단
	#4	PWR (APR1400)	두산중	1,400					17.02.17 발전사업 허가 후 중단

- 국내 전력생산에서의 발전원별 점유율 변화

Share of electricity production by source, South Korea



Source: Our World in Data based on BP Statistical Review of World Energy & Ember

OurWorldInData.org/energy • CC BY

○ 에너지자원이 빈약하고 고립된 에너지 섬인 우리나라에서 원자력은 다음과 같은 중요한 장점을 지님

- 온실가스, 미세먼지, 기타 대기오염 물질을 배출하지 않는 에너지
- 가장 경제적인(해체 및 사용후핵연료 처분비용 포함) 전력원
- 기술집약적 準국산 에너지: 발전원가 중 수입연료비 비중 10% 이하
- 에너지 안보에 크게 기여: 석탄, 가스, 석유를 대체하고 비축성 우수
- 국내 건설뿐만 아니라 수출 경쟁력(기술, 가격, 인지도)도 확보
- 수소경제에 필수적인 청정(그린) 수소를 경쟁력 있는 가격으로 공급 가능
- 화력발전 대체, 해양/극지/우주전원 등 다양한 미래 수요
- 국방 및 우주 개발을 위해 핵심 인프라 유지·강화 필요
- 국내외에서 고급 일자리 지속 창출
- 남북 화해·협력 과정 및 통일 후 북한지역에 안정적 전력공급 가능
- 방사선 이용 분야의 국민복지 및 과학기술·산업 경쟁력 기여

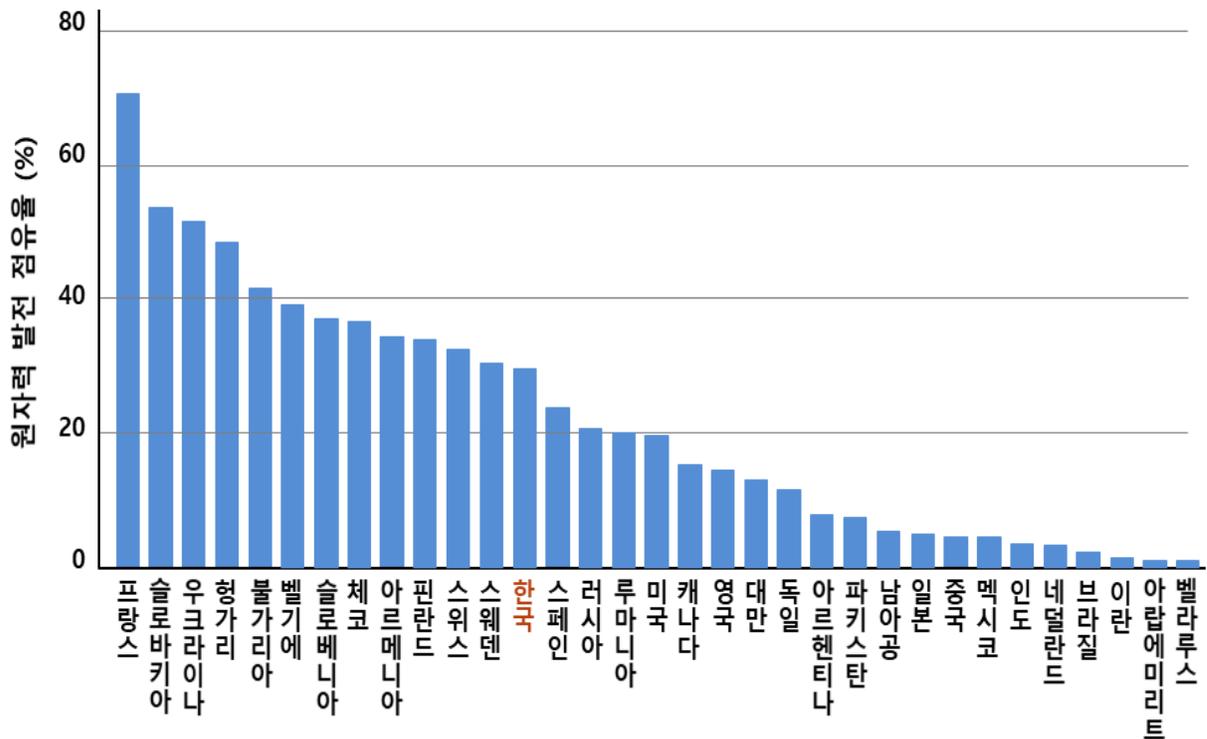
다. 세계의 원자력발전 현황

○ 세계의 원자력발전 현황은 다음과 같이 요약할 수 있음

구분	현황 요약 [IAEA, 2021.12.1]
원전 운영	<ul style="list-style-type: none"> ○ 운전가능 상용원전: 33개국(대만 포함), 442기, 394.5GWe ※ 미 93, 프 56, 중 52, 러 38, 일 33, 한 24, 인 23, 캐 19, 우크라 15, 영 13 ○ 전 세계 전기의 약 10%(OECD 18%), 저탄소 전기의 약 1/3 공급 ○ 가동원전의 평균연령: 약 30년 ※ 설비용량 기준으로 30년 이상 67%, 40년 이상 20%, 50년 이상 1% ○ 원전 누적 가동년수: 19,162년 ○ 64기 원전은 열 공급 병행: 지역난방, 산업용 열 공급, 해수 담수화
신규 건설	<ul style="list-style-type: none"> ○ 19개 국에서 51기(53.9GWe) 신규건설 중 ※ 중 13, 인 6, 한 4, UAE/러/터 각3, 미/영/일/방/우크/슬로바 각 2 등 ○ UAE와 벨라루스는 루마니아 이후 24년 만의 새로운 원전 운영국 ○ 미국은 37년, 영국은 38년 만에 신규 원전 건설 착수

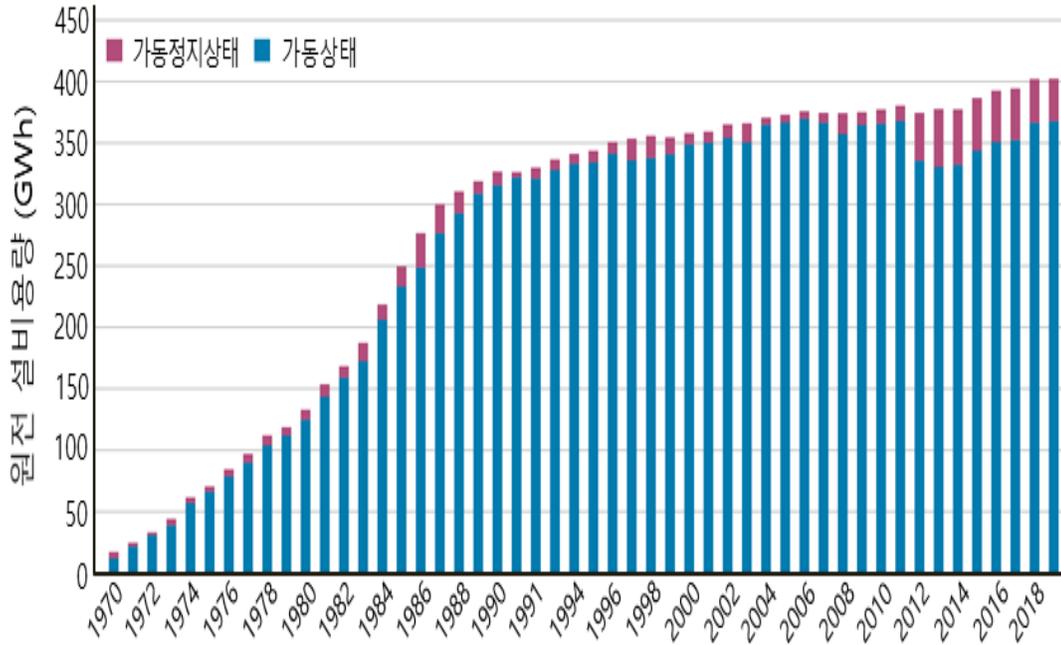
- 세계의 원자력발전량 및 전기생산에서의 점유율[IAEA, 2020년 기준]

- 2020년 2,553TWh(291.4GW_y)의 전기 생산
- 원자력발전 점유율은 프랑스가 가장 높고(70.6%), 동유럽 및 북유럽 국가들도 높은 편

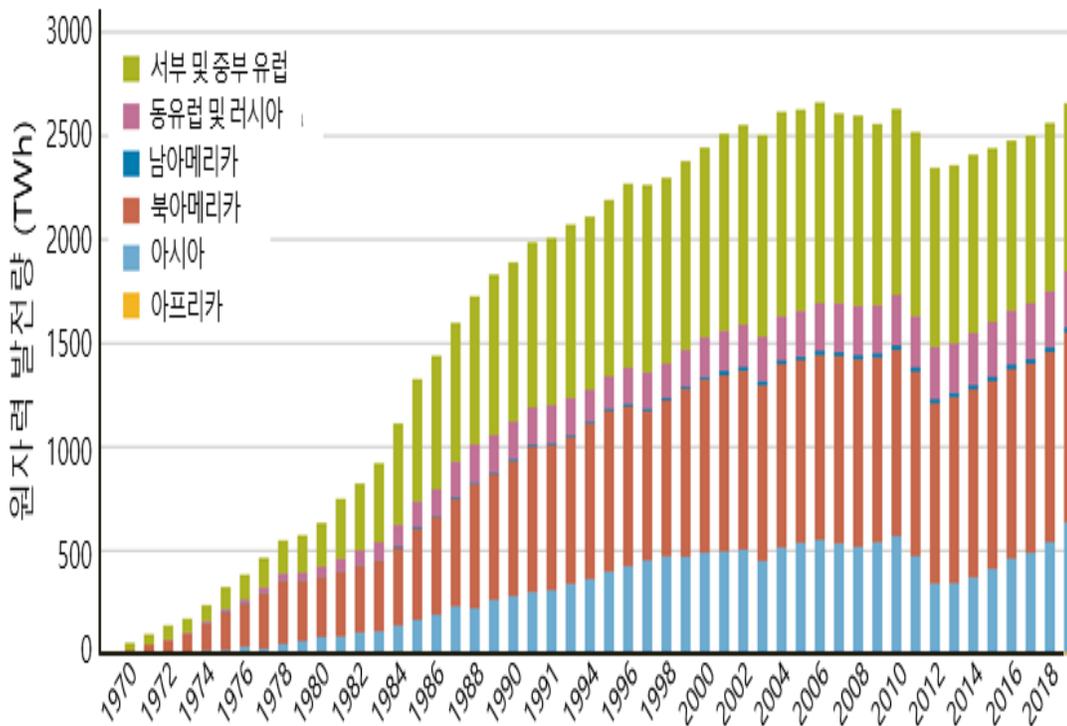


○ 세계 원자력발전 시설용량과 발전량은 1980년대 중반까지 급증하다가 1980년대 후반 부터는 느리게 증가함

- 후쿠시마 원전사고(2011.3.)에 의한 원자력 발전량 급감상황은 현재 회복된 상태
- 전 세계 원전의 설비용량 변화



- 전 세계 원전의 발전량 변화



○ 주요 원자력발전 국가들의 동향은 다음과 같이 요약할 수 있음

국 가	원전 현황(기)			주 요 동 향
	가동	건설	폐지	
미국	93	2	40	<ul style="list-style-type: none"> • 원자력을 주요 저탄소 에너지원으로 적극 지원 • 가동원전 계속 운전(94기 60년 승인, 그 중 6기는 추가 20년 승인) • AP1000 국내 건설 및 수출 • SMR 적극 개발 및 건설 추진
프랑스	56	1	14	<ul style="list-style-type: none"> • 원자력 점유율 70~75%(부하추종운전), '35년 50% 계획 ※ 최근 대통령이 기후위기 대응을 위한 원자력 적극 개발·이용 천명 • EPR 국내 건설 및 수출 • 40년 이상 가동중 원전 18기 • 고준위폐기물 심층처분장 건설 착수 예정
중국	51	13		<ul style="list-style-type: none"> • 국내 원전 대량 건설 및 수출 추진 • 거의 모든 형태의 SMR 개발 및 적극적 실증(경수로, 고온가스로, 액체금속로, 해상부유식 원전 등)
일본	33	2	27	<ul style="list-style-type: none"> • 후쿠시마 사고 후 21기 폐지, 현재 10기 재가동 • 건설중 원전 2기 계속 건설 • '30년 원전 비중 20~22% 계획
러시아	38	3	9	<ul style="list-style-type: none"> • 쇠빙선, 해상부유식 원전 등 다양한 SMR 개발 및 건설 • 세계 원전 수출시장 과점
영국	15	2	30	<ul style="list-style-type: none"> • 대형 원전 건설(수입) 및 SMR 개발 등 적극적 원전 정책 • 붕괴된 인력·기술체계 확보를 위한 적극 노력
독일	6		30	<ul style="list-style-type: none"> • 대표적 탈원전 국가(2011년 17기, 2022년까지 모두 가동 중단)
한국	24	4	2	<ul style="list-style-type: none"> • 원자력발전이 전력공급의 약 30% 담당 • 원전 공급국으로서는 유일한 탈원전 정책 추진
인도	23	6		<ul style="list-style-type: none"> • 적극적 신규원전 건설(자체 개발 및 수입)
캐나다	19		6	<ul style="list-style-type: none"> • SMR 개발 적극 추진(극지, 오지 전력 공급용)
우크라이나	15	2	4	<ul style="list-style-type: none"> • 체르노빌 사고를 겪었으나 원자력 점유율 50% 이상
스웨덴	6		7	<ul style="list-style-type: none"> • 1980년의 세계 최초 탈원전 정책은 폐기, 60년 운전 가능 • 사용후핵연료 심층처분장 건설 착수단계
스페인	7		3	<ul style="list-style-type: none"> • 1981년 이후 신규원전 건설은 없음, 40년 이상 운전 허용
슬로바키아	4	2	3	<ul style="list-style-type: none"> • 신규원전 2기 건설 중이며, 추가 2기 건설 계획(러시아형)
벨기에	7		1	<ul style="list-style-type: none"> • 2003년 탈원전 정책 채택(40~50년 운전 후 2025년까지 폐쇄 계획)
파키스탄	6	1		<ul style="list-style-type: none"> • CANDU 1기를 제외하고는 모두 중국 원전(CNP-300, HPR1000) 건설·운영
체코	6			<ul style="list-style-type: none"> • 원전 확대 정책 유지 (한국 수출 노력 중)
스위스	4		2	<ul style="list-style-type: none"> • 후쿠시마 사고 후 탈원전 정책 천명 • 안전성 확인되면 계속운전 허용(현재 2기는 약 50년 운전)
핀란드	4	1		<ul style="list-style-type: none"> • 원전 지속 건설 및 계속 운전 • 사용후핵연료 심층처분장 건설 완료단계

(부록 2) 탄소중립을 위한 에너지믹스와 원자력

가. 기후변화 관련 동향 및 우리나라 탄소중립 정책

□ 국내외 기후위기 대응 동향

- 국제사회는 온실가스 배출을 혁신적으로 감축함으로써 지구 평균온도 상승을 산업혁명 이전 대비 1.5°C 이하로 억제하여 기후 위기를 예방하기 위해 공동 노력 중임
 - 1988년, 기후변화에 관한 정부간 협의체(IPCC) 발족
 - 1992년, 유엔기후변화협약(UNFCCC) 채택
 - ※ 1995년 제1차 UNFCCC 당사국총회(COP1) 개최
 - 1997년, 교토의정서(Kyoto Protocol; COP3에서 채택)
 - 2015년, 파리협정(Paris Agreement; COP21에서 채택)
 - 2018년, 제48차 IPCC 총회에서 「지구온난화 1.5°C 특별보고서」 채택
 - 2021년, 제26차 당사국총회(COP26) (10.31-11.12, 영국 글래스고)에서 2050 탄소중립 실현을 위한 구체적 대책 논의

〈기후변화 관련 핵심 국제협약〉

구분	UN 기후변화협약 (UNFCCC)	교토의정서 (Kyoto Protocol)	파리협정 (Paris Agreement)
채택/ 발효	채택: 1992.06 발효: 1994.03	채택: 1997.12 발효 : 2005.02~2020	채택: 2015.12 발효: 2016.11(2021.01 시행)
의의	기후변화 대처 관련 최초 국제협약	기후변화협약에 대한 선진국 감축 목표 및 구체적 이행방안 결정	모든 국가가 참여하는 포괄적 체제
목표	온실가스 농도 안정화	온실가스 배출량 감축 -1차: 90년 수준의 5.2% 감축 -2차: 90년 대비 18% 감축	지구 평균온도를 산업화 이전 대비 +2°C보다 상당히 낮게 (Well below) 제한*
주요 내용	선진국과 개도국에 차별 화된 기후변화대응 의무	선진국에만 온실가스 감축 의무	자발적 감축목표 설정(NDC) 및 이행수단 포괄 제시 요구
국가	192개국	선진국 37개국(온실가스 배출기준 상 위 15% 국가)	협약 당사국 195개 (온실가스 배출기준 상위 87%)

※ 지구 평균온도 상승을 1.5°C로 억제하기로 합의하고, 2050년 탄소중립 추구

- 우리나라도 2015년 파리협정(Paris Agreement) 채택과 2018년 IPCC 총회 특별보고서 채택 이후 2050 탄소중립 체제로 전환하고 있음
 - 2050년 탄소중립 선언('20.10월) 및 장기 저탄소발전전략 유엔 제출('20.12월)
 - 탄소중립위원회('21.5월) 출범 및 2050 탄소중립 시나리오 수립
 - 탄소중립·녹색성장기본법(탄소중립기본법) 국회 통과('21.8월) 및 공포('21.9월)

- 2030년 국가 온실가스감축목표(NDC)와 2050 탄소중립 시나리오 확정('21.10월) 및 유엔기후변화협약 당사국총회(COP26)에서 발표('21.11월)

□ 우리나라의 탄소중립 정책 개요

○ 2050 탄소중립 시나리오는 국내 순 배출량을 0으로 하는 2개 시나리오(A안-화력발전 전면 중단, B안-LNG 발전 일부 유지)로 구성됨

- 2050년의 부문별 온실가스 배출 배출목표

(단위: 백만톤 CO₂eq)

구분	부 문	'18년	'50년		비 고
			A안	B안	
배출량		686.3	0	0	
배출	전환(발전)	269.6	0	20.7	▸ 화력발전 전면중단(A안) 또는 LNG 일부 잔존(B안)
	산업	260.5	51.1	51.1	
	건물	52.1	6.2	6.2	
	수송	98.1	2.8	9.2	▸ 도로부문 전기·수소차 등으로 전면 전환(A안) 또는 내연기관차의 대체연료(e-fuel 등) 사용(B안)
	농축수산	24.7	15.4	15.4	
	폐기물	17.1	4.4	4.4	
	수소	-	0	9	▸ 국내생산수소 전량 수전해 수소(그린 수소)로 공급(A안) 또는 일부 부생·추출 수소로 공급(B안)
	탈루	5.6	0.5	1.3	
흡수 및 제거	흡수원	-41.3	-25.3	-25.3	
	CCUS	-	-55.1	-84.6	
	직접공기포집(DAC)	-	-	-7.4	▸ 포집 탄소는 차량용 대체연료로 활용 가정

- 2050년 전원별 발전량 구성

구 분	원자력	석탄	LNG	재생E	연료 전지	동북아 그리드	무탄소 가스터빈	부생 가스	합 계	
A안	TWh	76.9	0.0	0.0	889.8	17.1	0.0	270.0	3.9	1,257.7
	GWy	8.8	0.0		101.6	2.0		30.8	0.4	143.6
	비중	6.1%	0.0	0.0	70.8%	1.4%	0.0%	21.5%	0.3%	100%
B안	TWh	86.9	0.0	61.0	736.0	121.4	33.1	166.5	3.9	1,208.8
	GWy	9.9		7.0	84.0	13.9	3.8	19.0	0.4	138.0
	비중	7.2%	0.0%	5.0%	60.9%	10.1%	2.7%	13.8%	0.3%	100%

※ 1TWh(테라와트시)는 1조 Wh(와트시) 또는 10억 kWh(킬로와트시)와 같은 전력량임

※ 1GWy는 1GW(1,000MW) 발전소가 1년간 전출력(100% 출력)으로 운전할 때 생산하는 전력량으로, 8.76TWh와 같은 양임

- 2050년 수소 수요량 및 공급방안(단위: 백만톤 H₂)

구분	수요량						공급량			
	전환	산업	수송	농축수산	CCUS	계	해외수입	수전해	추출+CCUS	부생
A안	14.2	10.6	1.5	0.003	1.0	27.4	21.9	5.5	-	-
B안	13.5	10.6	2.2	0.003	1.6	27.9	22.9	3.0	1.0	1.0

○ 2030 국가 온실가스 감축목표(NDC)에서는 2018년 대비 2030년의 온실가스 배출량 감축률을 기존 26.3%에서 40.0%로 대폭 상향 조정함

- 부문별 2030년 감축목표 총괄표

(단위: 백만톤CO₂eq)

구분	부문	기준연도('18)	現 NDC ('18년 比 감축률)	NDC 상향안 ('18년 比 감축률)
배출량*		727.6	536.1 (△191.5, △26.3%)	436.6 (△291.0, △40.0%)
배출	전환	269.6	192.7 (△28.5%)	149.9 (△44.4%)
	산업	260.5	243.8 (△6.4%)	222.6 (△14.5%)
	건물	52.1	41.9 (△19.5%)	35.0 (△32.8%)
	수송	98.1	70.6 (△28.1%)	61.0 (△37.8%)
	농축수산	24.7	19.4 (△21.6%)	18.0 (△27.1%)
	폐기물	17.1	11.0 (△35.6%)	9.1 (△46.8%)
	수소	-	-	7.6
	기타(탈루 등)	5.6	5.2	3.9
흡수 및 제거	흡수원	-41.3	-22.1	-26.7
	CCUS	-	-10.3	-10.3
	국외 감축**	-	-16.2	-33.5

- 2030년 전원 믹스 구성안

구분	원자력	석탄	LNG	신재생	암모니아	양수·기타	합계	
발전량	TWh	146.4	133.2	119.5	185.2	22.1	6.0	612.4
	GWy	16.7	15.2	13.6	21.1	2.5	0.7	69.9
비중	23.9%	21.8%	19.5%	30.2%	3.6%	1.0%	100%	

□ 우리나라 탄소중립계획에 대한 검토

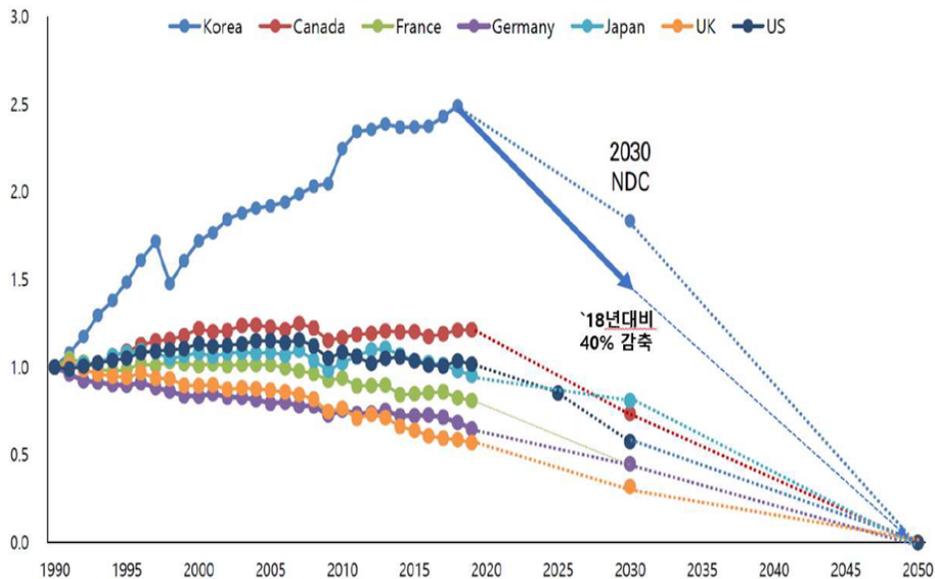
○ 탈원전 정책을 기반으로 신재생에너지와 검증되지 않은 신기술에 과도하게 의존하는 탄소중립계획이 수립되어 실현 가능성이 희박한 것으로 평가됨

- 세계 각국은 자국의 인구, 산업, 에너지자원, 국토환경 등 자국의 특성을 종합적으로 고려한 탄소중립계획을 수립

※ 대부분 국가가 태양광·풍력 등 간헐성 재생에너지, 수력·지열 등 조절 가능 재생에너지 및 원자력을 합리적으로 조합

- 우리나라의 탄소중립계획은 1990년대부터 탄소배출량 증가율이 둔화되거나 오히려 감소추세를 보인 타 선진국에 비해 매우 급격한 배출량 감축률을 요구

< 주요국 탄소중립 목표 ('90년배출량=1 기준)>



- 신규원전 건설과 가동원전 계속운전을 배제함에 따라 신뢰도가 매우 낮은 간헐성 재생에너지(태양광·풍력)에 과도하게 의존

※ 신재생에너지 발전량이 31.1TWh('20) → 185.2TWh('30) → 857~907TWh('50)으로 급격하게 증가

※ 2050년 재생에너지 발전량이 현행 규제조건 하에서 2050년 기술 전망을 고려한 시장잠재량(769.3TWh=87.8GW_y)과 비슷하여 입지에 어려움 예상

- 2050년 무탄소 가스터빈 발전량 166.5~270.0TWh는 2020년 원자력발전량(160.2TWh)보다 많고, APR1400 원전 16~26기 발전량에 해당하는 수준

- B안에서 2050년 동북아 그리드를 통한 수입량 33.1TWh(3.8GW_y)는 APR1400 원전 3.2기의 연간 발전량에 해당하는 수준으로 비현실적 가정

- 수소 이용량도 과다 산정된 것으로 판단되며, 현실적인 공급 대책의 고려 미흡

※ 2050 탄소중립 시나리오 A안에 따라 550만톤의 수소를 수전해로 생산하는데 태양광은 약 200GW, 원자력은 약 35GW의 시설 필요

※ 21.9~22.9백만톤의 수소를 해외 공급에 의존하는 것은 가능성이 희박하고, 에너지 안보를 크게 저해

○ 원자력과 재생에너지의 장단점에 대한 국가적 차원의 논의가 부족하여 에너지믹스에 관한 합리적 의사결정이 이루어지지 않고 있음

- 탈원전 정책을 전제로 충분한 논의 없이 수립된 탄소중립 대책에 대해 낮은 실현 가능성, 전기 품질 저하, 에너지 가격 상승, 산업경쟁력 저하 등 다양한 우려

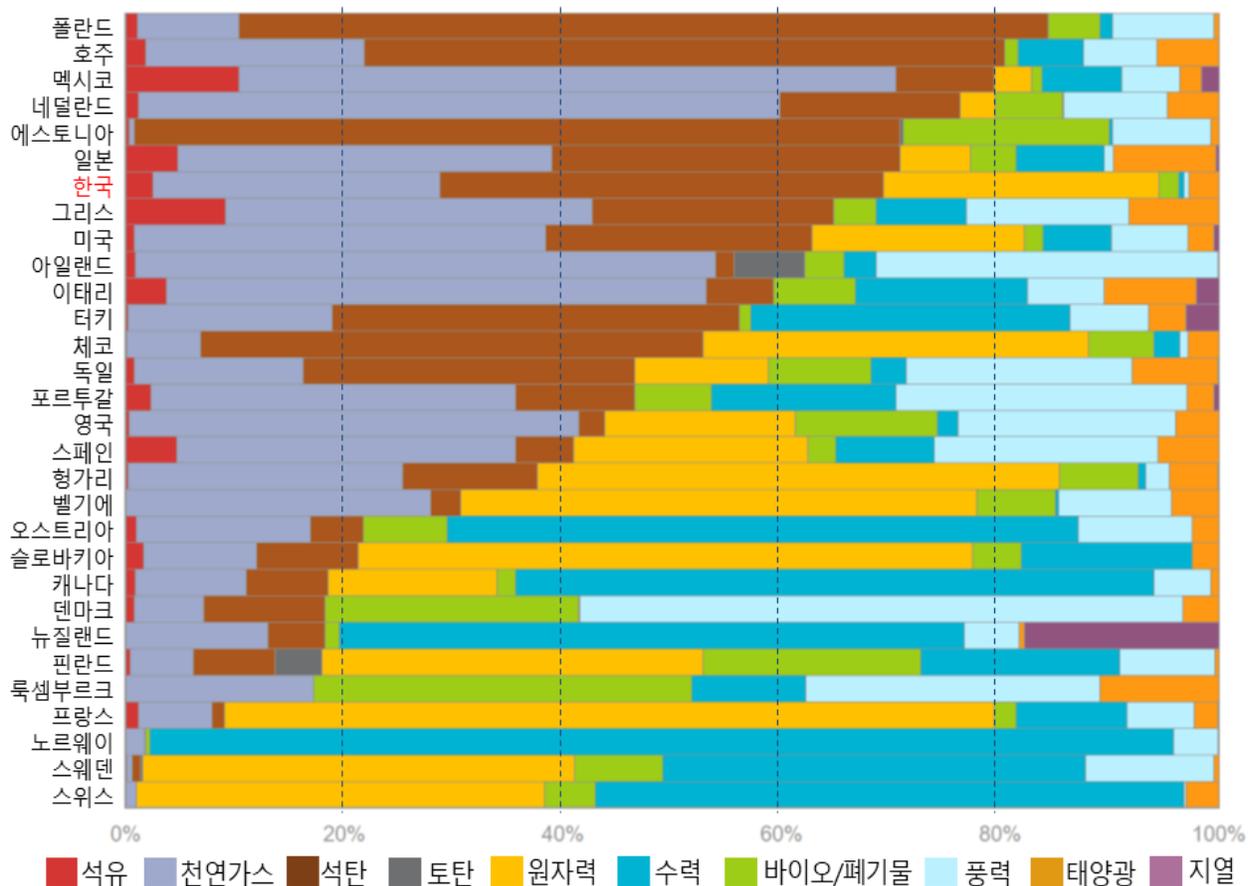
※ 영국, 스페인, 독일, 중국 등 간헐성 재생에너지 비중이 높거나 급격한 탈탄소 정책을 추진하는 국가에서 이미 에너지 공급 불안정 및 가격 급상승 문제가 발생하고 있음

- 에너지공급 불안정성 해소 대책, 에너지 저장 비용 등 정책 수립의 근거가 될 구체적인 전문적인 분석이 이루어지지 않았거나 상세 자료 미공개

나. 에너지 정책 국제 동향

□ 세계 주요국의 에너지믹스 현황

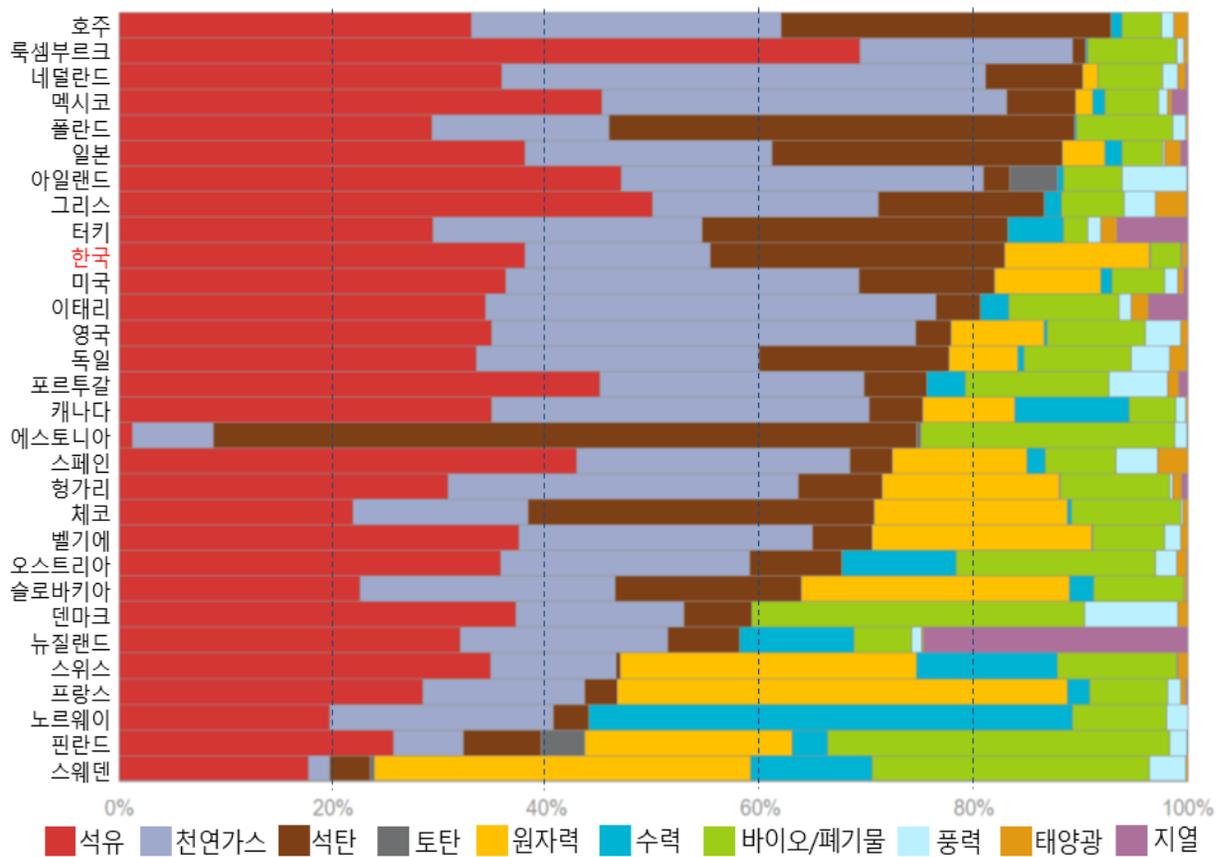
○ 국제에너지기구(IEA) 자료¹⁾에 의하면 IEA 국가의 2019년 발전원별 전력공급 점유율은 다음 그림과 같음



1) IEA(May 2021), Japan 2021 Energy Policy Review, p.134.

- 각국의 발전원은 석탄, 천연가스 등 화력과 수력, 원자력, 풍력, 태양광, 바이오, 지열 등 저탄소 발전원으로 이루어지며, 국가에 따라 발전원 구성에 큰 차이
- 저탄소 전력이 50% 이상인 국가는 수력이 압도적이거나(노르웨이, 캐나다, 뉴질랜드, 오스트리아), 원자력이 많거나(프랑스, 슬로바키아, 벨기에, 헝가리), 원자력과 재생이 모두 많거나(스위스, 스웨덴, 핀란드, 스페인) 인구가 작은 소국(덴마크, 룩셈부르크)들로 한정
- 인구 6,700여만 명의 세계 10위권의 전기 생산·소비국인 프랑스는 70% 이상의 원자력 점유율에 의해 저탄소 전력 비중이 90%를 상회
- 탈원전 정책의 상징인 독일도 원자력 제외 저탄소 전력 점유율은 40% 수준에 불과
 ※ LNG 발전도 많은 양의 온실가스 방출(원자력의 약 50배, 석탄의 50~60%)

○ 국제에너지기구(IEA, 2021) 자료2)에 의하면 IEA 국가의 '19년 1차 에너지원별 공급 비중은 다음 그림과 같음



- 저탄소 에너지 점유율이 50% 이상인 국가는 5개국(스웨덴, 핀란드, 노르웨이, 프랑스, 스위스)에 불과하며, 인구가 적고 수력이 풍부한 노르웨이를 제외하고는 원자력이 크게 기여
- 큰 규모 산업국가 중에서 원자력을 최대한 활용하는 프랑스는 저탄소 에너지 비중이 55% 수준인 데 비해 탈원전 진영의 모델 국가인 독일은 20% 남짓한 수준에 불과

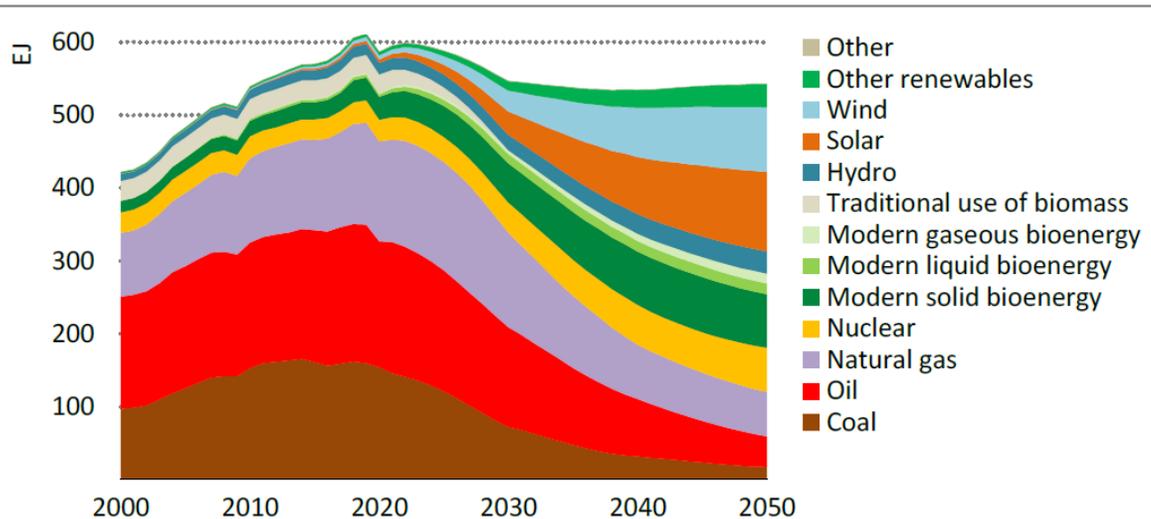
2) IEA(May 2021), Japan 2021 Energy Policy Review, p.23.

- IEA 비회원국으로서 에너지 다소비국인 중국(1위), 인도(3위), 러시아(4위)는 화석연료에 크게 의존하고 있으며, 원자력 이용 확대 노력이 두드러짐

□ 탄소중립을 위한 원자력의 역할

- 국제에너지기구(IEA)의 2050 탄소중립을 위한 로드맵³⁾에서는 2050년의 세계 에너지 수요는 2020년 대비 8% 감소하지만, 전기에너지는 약 2.6배로 증가하고, 재생에너지 뿐만 아니라 원자력의 역할도 크게 확대해야 할 것으로 제시함

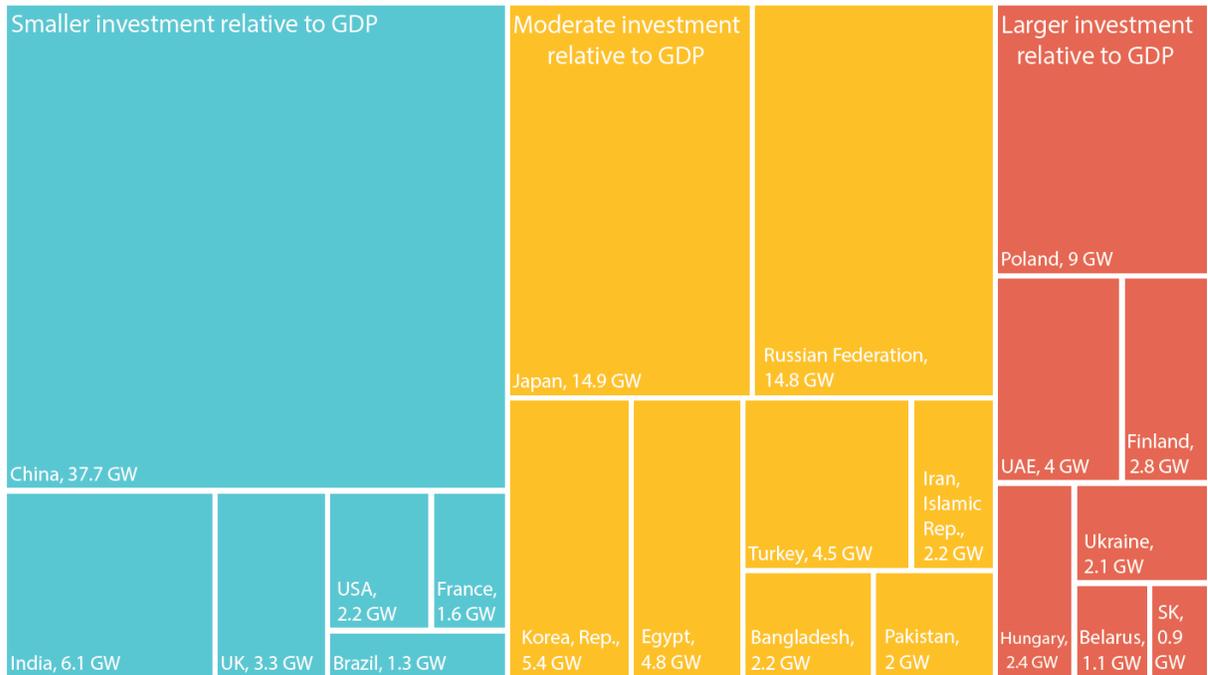
Figure 2.5 ▶ Total energy supply in the NZE



- 국제원자력기구(IEA)는 최근 보고서⁴⁾에서 탄소중립을 위한 원자력의 역할을 다음과 같이 제시함
 - 원자력은 저탄소 전기 및 비전기 에너지 생산을 위한 지속가능 에너지시스템의 일환으로, 재생에너지원 및 다른 저탄소 기술과 협력하여 글로벌 탄소중립 목표를 달성하는데 있어서 핵심 수단
 - 원자력은 연중무휴 24시간 신뢰성 있고 조절 가능한 전기를 제공함으로써 증가하는 재생에너지 발전 점유율에 대한 보완 및 통합 가능
 - 현재 가동 중인 원전의 운영기간을 연장함으로써 저탄소 발전용량을 유지하는 것이 중요하며, 2050년까지 약 550GW의 신규 원전 추가 건설 필요
 - 많은 국가가 기후변화 억제목표를 충족하기 위해 원자력을 선택하고 있으며, 원자력 이용계획이 증가 중
- 2020년 말 기준으로 IAEA에서 파악한 세계 각국에서 건설 중 또는 건설계획 중인 신규 원전 용량은 다음 그림과 같음⁴⁾

3) IEA (2021.5), Net Zero by 2050. A Roadmap for the Global Energy Sector.

4) IAEA (2021.9), Nuclear Energy for a Net Zero World, p.2.



〈2020년 말 기준 세계 각국이 건설 및 건설계획 중인 원전 용량〉

○ Shell 사의 지구온도 상승 1.5°C 억제 시나리오(Shell Sky 1.5 Scenario)⁵⁾에서도 세계 에너지 공급에서 원자력의 역할이 크게 확대되어야 할 것으로 제시함

	EJ / year														
	1980	1990	2000	2010	2019	2020	2025	2030	2040	2050	2060	2070	2080	2090	2100
Oil	131	136	154	174	192	172	197	194	180	160	129	97	72	59	50
Natural gas	51	70	87	115	140	135	148	157	151	115	77	54	53	54	54
Coal	76	94	97	153	159	151	161	155	130	100	73	56	50	51	52
Nuclear	8	22	28	30	30	29	34	42	64	80	97	112	120	123	124
Hydroelectricity	6	8	9	12	15	15	16	16	18	19	21	23	23	23	23
Biofuels	0	0	0	3	4	4	5	5	12	19	36	46	54	59	61
Biomass and waste	10	12	14	19	26	26	30	34	54	81	97	104	126	124	122
Biomass - traditional	21	26	29	29	27	26	25	24	17	9	4	2	1	0	0
Geothermal	0	1	2	2	4	3	3	4	12	28	37	38	39	38	39
Solar	0	0	0	1	4	4	10	25	70	127	218	313	353	379	399
Wind	0	0	0	1	5	5	9	15	42	88	120	130	133	129	123
Other renewables	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1
Total	303	369	421	540	607	570	638	673	750	828	910	975	1,024	1,040	1,049

※ 원자력 사용량은 2019년 대비 2050년 2.7배, 2100년 4.1배로 증가하고 풍력과 유사한 수준의 에너지를 공급해야 할 것으로 예상

5) Shell (2021.6), The Energy Transformation Scenarios

- 각국은 자국의 고유한 에너지 및 정치경제적 환경을 고려하여 에너지믹스를 결정하고 있으며, 원자력을 이용하거나 이용을 고려하는 국가가 증가 중임
 - 원자력은 전기뿐만 아니라 열공급 및 수소생산 등에 활용
 - 현재 원전을 이용하는 에너지 다소비국 중에서는 유일하게 독일만 탈원전을 추진하고, 중국, 미국, 인도, 러시아, 프랑스 등은 모두 원자력 중시
 - 우리나라는 원자력을 기저부하(Base Load)용으로 이용하면서 부하추종 운전을 고려하지 않았으나, 부분적인 설계 보완 및 운전방식 변경을 통해 부하추종운전 가능
 - ※ 다음은 프랑스의 일일 부하추종운전에 따른 원전 출력 변화를 보여주며, 이러한 운전을 통해 특히 태양광발전의 극심한 출력변동 영향을 상당부분 보완할 수 있음



〈프랑스 원전 부하추종 운전의 예〉⁶⁾

다. 합리적 에너지믹스를 위한 고려사항

□ 재생에너지 점유율 급증에 따른 문제점

- 탄소중립을 위해 사용량이 크게 증가할 것으로 예상되는 태양광과 풍력 등 간헐성 재생 에너지는 점유율이 과도하면 전력공급의 안정성 등에 많은 문제를 야기함
 - 태양광은 낮에만 전기를 생산하므로 시설용량 대비 발전량이 작고(국내 이용률 15% 이하), 날씨가 발전량에 큰 영향
 - 풍력은 밤에도 전기를 생산하므로 태양광보다는 출력변동이 작고 이용률도 높으나(이용률은 위치에 따라 20~40% 수준), 바람의 세기에 따라 출력이 계속 변하고, 매우 낮은 출력이 며칠간 또는 일주일 이상 지속되는 경우 발생
 - 수 일 이상 풍력과 태양광이 모두 낮은 발전량을 보이는 경우가 흔하게 발생

6) IAEA (2021.9), Nuclear Energy for a Net Zero World.

- 태양광과 풍력의 극심한 간헐성은 2021년 독일의 발전량 변화⁷⁾에서 확인 가능함
 - 2021년 독일의 발전 기록에 따르면 태양광과 풍력 모두 발전량 변화가 극심

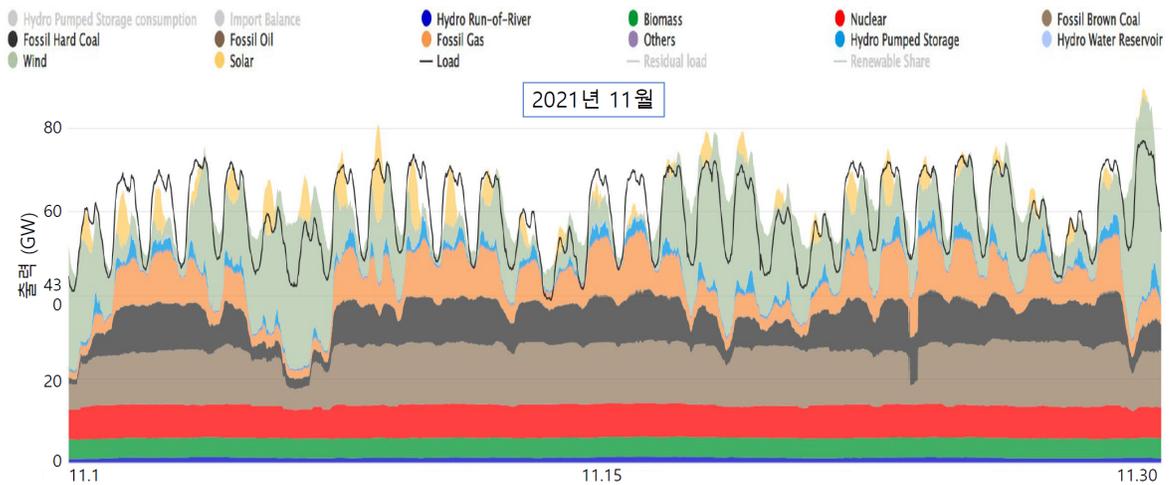


〈2021년 1·5·8·11월의 독일 태양광 및 풍력 발전량 변화〉

- 독일에서는 이러한 재생에너지의 간헐성 문제를 석탄발전과 가스발전으로 보완하고 전력망이 연결된 유럽국가들과의 전기 수출입을 통해 해결 중

7) Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems (ISE), Energy Charts, <https://energy-charts.info/>

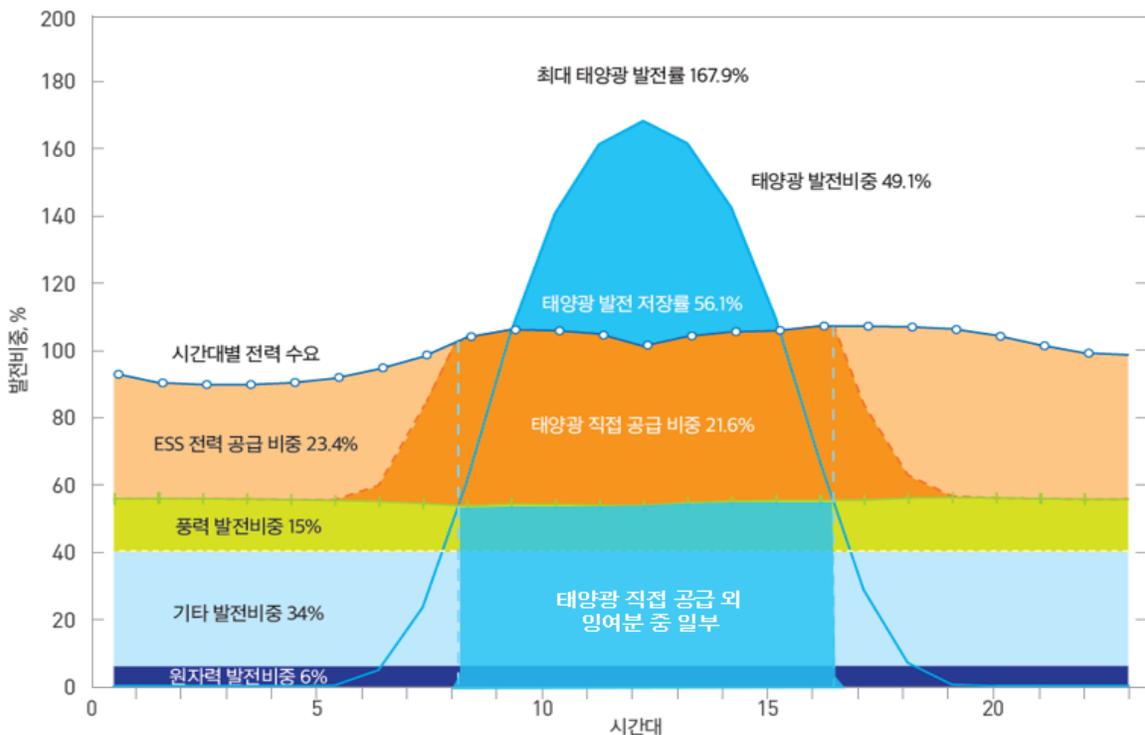
※ 2021년 11월의 독일 전력 수요 및 공급



- 참고로 2020년 독일의 전력생산 비중은 풍력 24%, 석탄 24%, 가스 16%, 원자력 11%, 태양광 9% 순이었음

○ 전력망이 고립된 우리나라의 경우 재생에너지의 간헐성과 변동성 대응이 독일보다 훨씬 어려우며, 막대한 에너지저장 비용이 소요됨

- 정부 탄소중립 시나리오에 따라 2050년 태양광 비중이 약 50%일 때 예상되는 하루 중 전기 수요 및 공급⁸⁾(하루 평균전력 140GW 대비, 약 15%의 안정적 풍력발전 가정)



- 태양광 잉여전력을 에너지저장장치(ESS)로 저장하려면 하루 기준 1,160GWh의 ESS가 필요하며(1GWh 용량의 ESS 설치비용이 4천억 원일 경우 총 464조 원 필요), 태양광·풍력이 수일간 낮게 유지되는 경우에 대비하려면 훨씬 더 많은 저장시설 필요

8) 핵공감 클래스 운영진(2021.11), 대통령을 위한 원자력 이슈 문답 10선, p.13.

- 향후 태양광 설비비용이 크게 하락하더라도 저장비용까지 포함한 태양광발전 운용 비용은 최소한 원자력의 2배 이상일 것으로 예상

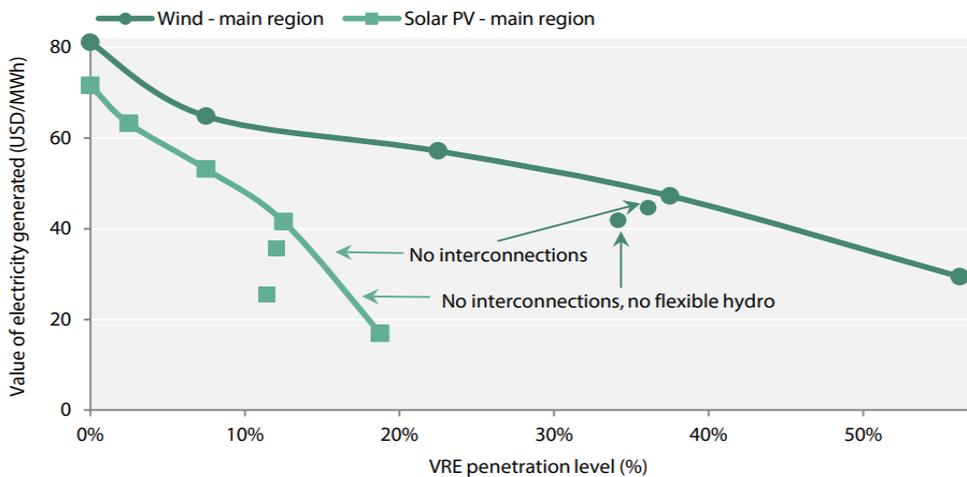
○ 전력망 불안정성 증가로 전기 품질이 저하하여 반도체, 배터리, 정밀기기산업 등에 악영향을 미치고, 최악의 경우 국가 대정전(블랙아웃) 사태 발생 가능

- 2018~2021년 5월의 주파수 유지율 변화(전력거래소 전력계통 운영실적)

	<59.80	59.80~59.85	59.85~59.90	59.90~59.95	59.95~60.00	60.00~60.05	60.05~60.10	60.10~60.15	60.15~60.20	>60.20
2018	1	0	0	521	674,534	663,021	1,124	0	0	0
2019	0	0	12	4,507	668,457	661,751	4,469	4	0	0
2020	0	0	69	16,380	652,928	653,381	16,219	223	0	0
2021	3	6	78	12,102	661,535	641,148	14,072	256	0	0

- 간헐성 재생에너지 증가에 따른 문제들이 미국(캘리포니아, 텍사스), 영국, 유럽 전력망 등 외국에서 이미 자주 발생
- 새만금 태양광, 신안 해상풍력 등 대규모 신재생 단지는 대용량 송전시설을 필요로 하며, 송전량의 급격한 변화로 계통 불안정성을 야기
- 간헐성인 태양광·풍력 발전의 경제적 가치는 점유율이 높아지면 크게 하락하는 것으로 평가⁹⁾

Figure ES9. The market remuneration received by wind and solar PV as a function of their share in the electricity mix

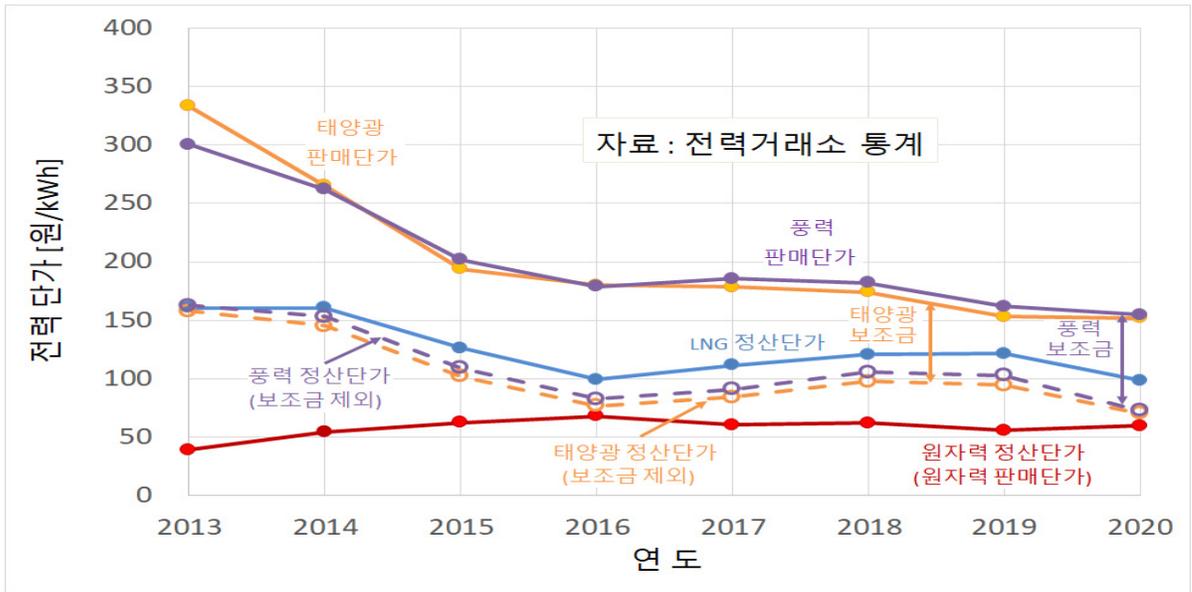


□ 우리나라 원자력발전 환경

○ 우리나라의 원자력발전은 타 발전원과 비교하여 압도적으로 낮은 발전원가를 보이고 있음

9) OECD/NEA (2019), The Costs of Decarbonization.

- 최근 우리나라 발전원별 판매단가는 다음과 같음(자료: 전력거래소 통계)



연도	원자력	유연탄	LNG	유류	태양광			풍력		
					정산단가	REC 보조금	합계	정산단가	REC 보조금	합계
2012	39.5	66.3	168.2	253.1	170.6	179.7	350.3	174.6	58.6	233.2
2013	39.0	58.6	160.8	221.4	157.9	175.5	333.4	162.7	137.8	300.6
2014	54.7	63.3	160.7	220.8	145.3	119.9	265.2	153.2	108.9	262.1
2015	62.7	68.3	126.2	149.9	102.0	91.8	193.8	109.4	92.3	201.7
2016	67.9	73.9	99.4	109.2	76.8	103.3	180.1	82.8	96.3	179.1
2017	60.7	78.5	111.6	165.5	84.2	94.4	178.6	91.2	94.4	185.6
2018	62.1	81.4	120.6	194.5	97.9	76.3	174.2	105.8	76.3	182.1
2019	55.8	86.6	121.6	242.2	94.4	58.8	153.2	103.0	58.8	161.8
2020	59.6	79.6	98.5	200.0	70.3	81.8	152.2	72.9	81.8	154.7

※ 신재생은 REC 비용을 보조금으로 받으므로 판매단가는 정산단가와 REC 비용을 합한 값이 실제 판매단가라 할 수 있음

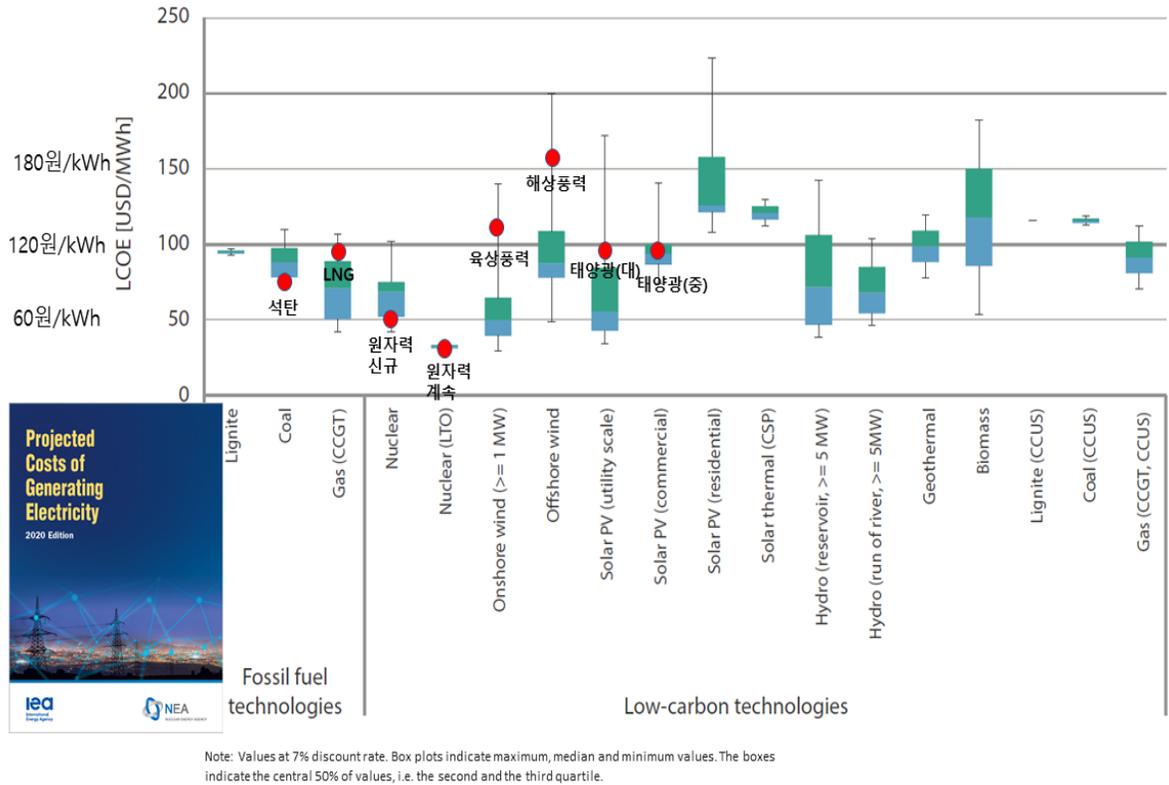
- 원자력 발전원가에는 원전 해체비용과 사용후핵연료 및 방사성폐기물 처리비용이 포함 (주기적으로 재산정하며, 이들 비용이 상승하더라도 원가에 미치는 영향은 제한적)

○ 다양한 기관의 균등화 발전원가(LCOE: Levelized Cost of Electricity) 평가에서 우리나라 원자력발전의 LCOE는 재생에너지에 비해 월등하게 낮게 나타남

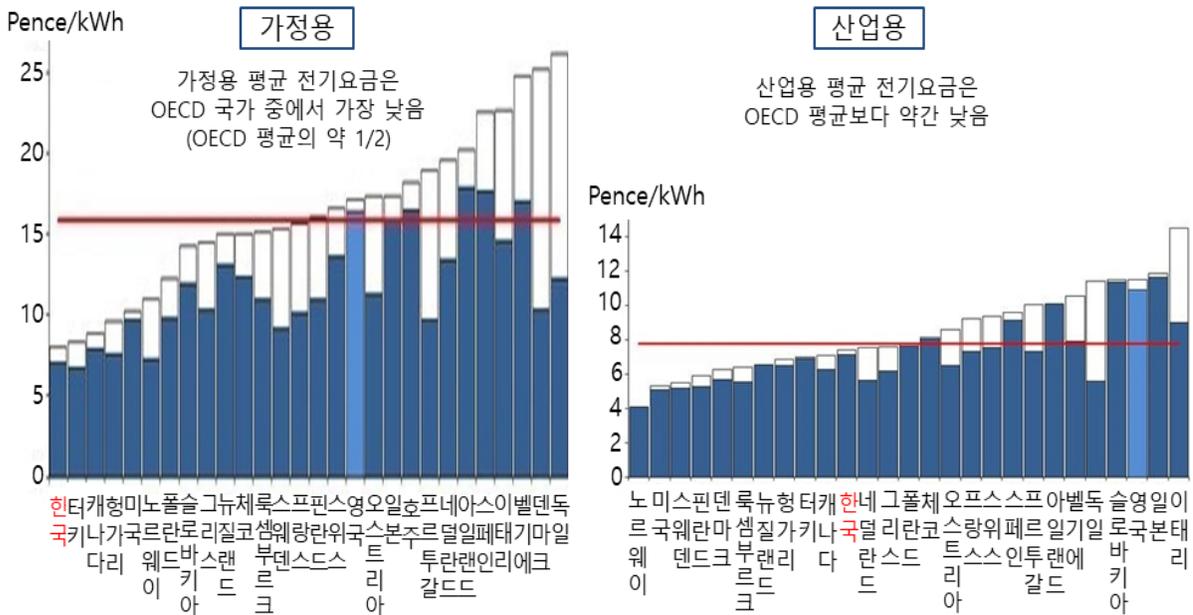
- 에너지경제연구원 연구보고서¹⁰⁾에서 2030년 태양광의 LCOE는 94.2원/kWh(3MW 시설)~128.4원/kWh(100kW 시설), 육상풍력의 LCOE는 130원/kWh(200MW급 시설)로 평가되어 원자력보다 높으며, ESS의 필요성을 고려하면 훨씬 더 큰 차이

10) 이근대·김기환(2020.12), 재생에너지 보급 확대를 위한 중장기 발전단가(LCOE) 전망 시스템 구축 및 운영 (1/5), 에너지경제연구원 기본연구보고서 2020-21.

- 국제에너지기구(IEA)에서 최근 발행한 보고서¹¹⁾에서도 2025년 기준으로 우리나라 원자력 발전의 균등화 발전원가가 타 발전원에 비해 매우 낮은 것으로 제시
- ※ 적색 동그라미가 한국에 대해 산정된 LCOE임



○ OECD 주요국과 비교할 때, 우리나라는 가정용 전기요금이 매우 낮으나(최저), 산업용 전기요금은 평균 수준이며, 가정용 대비 산업용 요금이 상대적으로 매우 높은 편임



〈OECD 주요국의 가정용 및 산업용 평균 전기요금(2019년 기준)〉

11) OECD IEA/NEA (2020), Projected Costs of Generating Electricity.

□ 2050 탄소중립을 위한 원전/신재생 중심의 전력공급 시나리오 분석

○ 본 분석의 배경은 다음과 같음

- 우리나라가 보유하고 있는 무탄소 전원은 원전과 태양광·풍력이 거의 전부(수력, 바이오 등 여타 무탄소 자원은 아주 적음)
- 원전은 안정적 전력공급이 가능하지만 태양광·풍력은 자연조건에 따라 간헐적 공급
- 태양광·풍력 위주로만 전력공급체계를 구축하려면 대량의 전력저장장치 필요
- 따라서 합리적이고 효율적인 무탄소 전력공급체계 구축을 위해 국내 주요 에너지 자원인 원자력과 태양광·풍력 중심으로 예비 분석 수행(2021.7, 한수원 이종호)

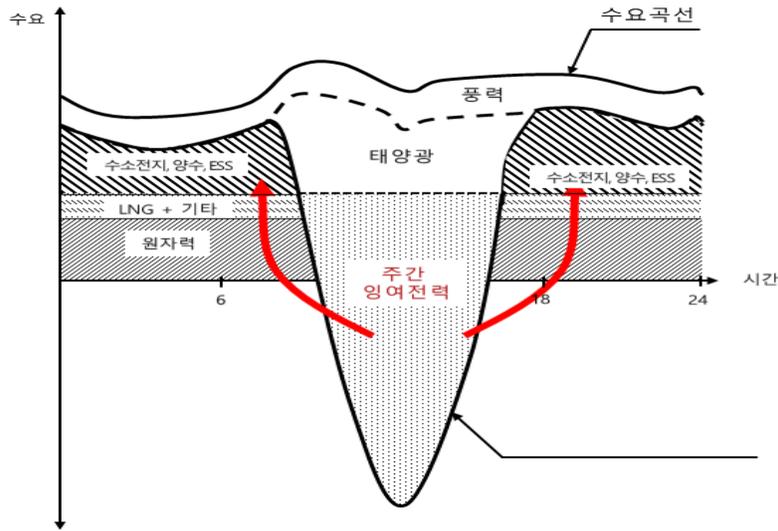
○ 이번 분석에서 사용한 가정은 다음과 같음

- 2050년 전력 수요: 3차 국가에너지기본계획의 2040년 수요에 연 1% 증가율 적용
- 태양광·풍력의 간헐성에 대비한 전력공급을 위해 계절별 일평균(주중, 토요일, 일요일) 부하를 구하여 전력공급 필요량 계산
- 태양광의 효율성이 가장 떨어지는 겨울철을 기준으로 필요 설비량 계산
- 일 기준으로 분석할 때 주간에 태양광 전력을 초과 생산하여 전력저장장치(ESS 및 수소 생산)에 저장 후 야간에 전력 공급
- 보조적으로 전력계통의 안정을 위해 양수 및 LNG를 일정 부분 활용(LNG는 탄소포집 설비와 동시 적용으로 무탄소 전력으로 가정)
- 3개 원전비중 시나리오에 따른 태양광 및 ESS 설비 필요량 계산

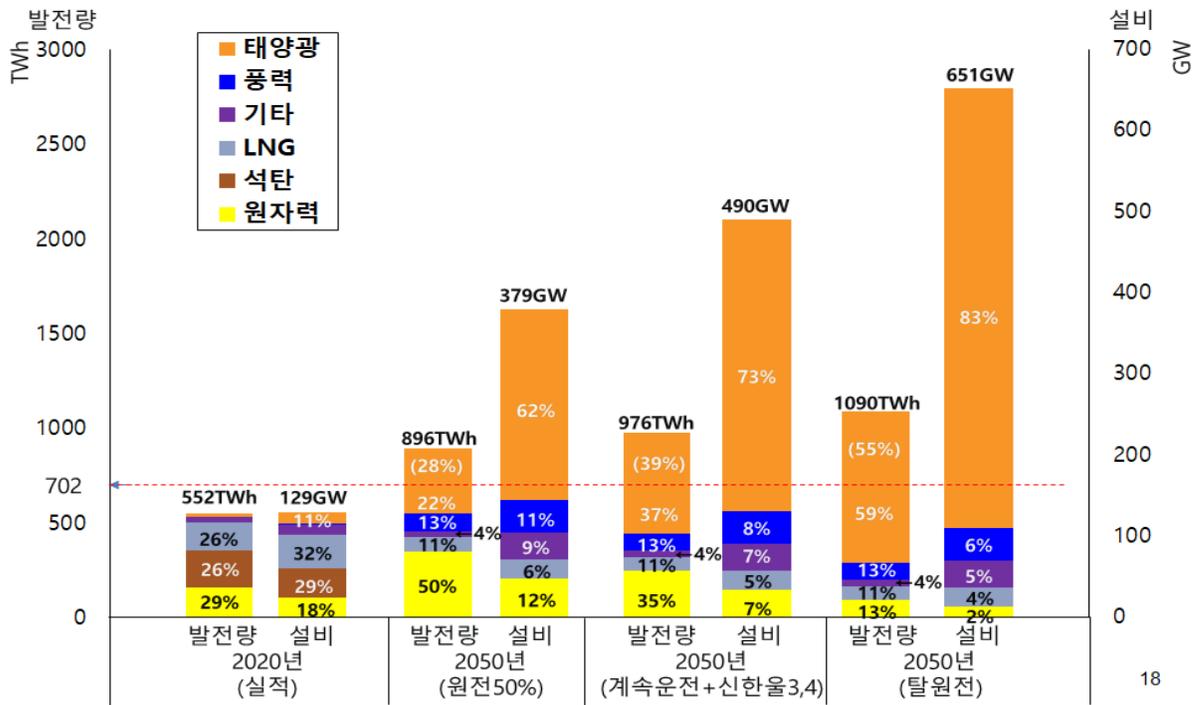
시나리오	I	II	III
원자력 설비	탈원전 추진 (12.4 GW)	계속운전+신한울3,4 (33.2 GW)	원전50%발전 (47.2 GW)

○ 다음과 같은 중요한 분석 결과가 도출됨

- 발전설비: 원전이 50%일 때(시나리오 III)가 탈원전 시보다 설비량 272GW 축소 가능
- 발전량: 원전 비중을 50%로 할 때가 야간 전력공급에 대비한 신재생 발전량 감소로 탈원전 시보다 194GWh(18%)의 발전량 축소 가능
- 비용: 원전을 50%로 하면 탈원전 시 대비 설비투자비를 740조 원, 발전비용은 74조 원 절감 가능(탈원전 추진의 경우 요금은 거의 2.7배로 증가하는 반면, 원전비중을 50% 이상으로 하면 50% 정도의 비용 증가로도 탄소중립이 가능함을 확인함)
- ※ 본 분석은 보수적 데이터를 사용한 예비분석이며, 송전설비 증가, 계통운영 비용 증가, 신재생 전력 공급 장기 중단 가능성 등은 반영하지 않아 실제로는 더욱 증가할 전망



〈신재생에너지 증가 시 일 단위 전력 수요 및 공급 패턴〉



〈시나리오별 설비 및 발전량 추이〉

〈시나리오 별 비용평가 요약〉

비용 항목		시나리오 I (탈원전)	시나리오 II (계속운전)	시나리오 III (원전 50%)
투자비(25 년간)	투자비(조원)	1,394.1	941.7	653.4
	I안 대비(조원)	-	- 452.4	- 740.7
연간 발전비용	발전비용(조원)	171.6	126.3	97.4
	2019년 대비 단가	267%	196%	152%

□ 합리적 탄소중립 전략을 위한 시사점

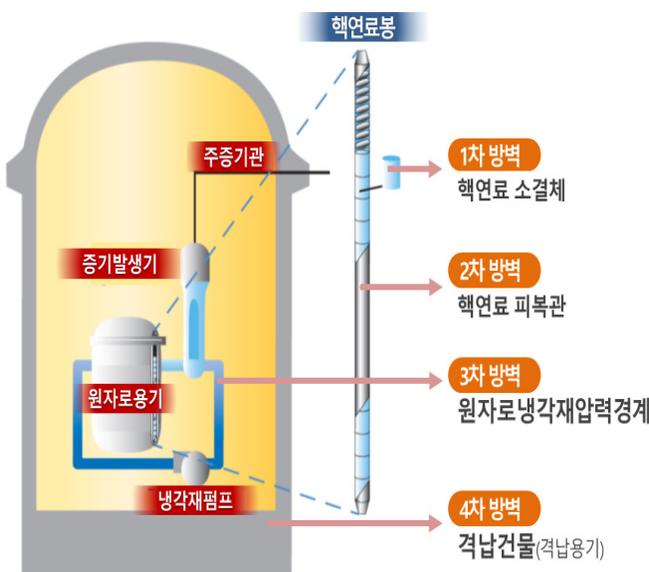
- 전력망이 고립되어 있고, 수력이 미미하고, 인구밀도가 매우 높고, 제조업·IT 국가인 우리나라에서 재생에너지에만 의존하는 탄소중립은 불가능함
 - 각국의 에너지믹스와 탄소중립 전략은 국토환경, 인구 분포, 부존 에너지자원, 전력망, 주력산업 구성에 따라 큰 차이
 - 한국은 전력망이 고립되어 있고(독일 등 유럽과 다름), 수력이 거의 없고(노르웨이, 스위스 등과 다름), 부존 에너지자원도 거의 없고, 인구밀도가 매우 높은 국가(덴마크 등과 다름)
 - 재생에너지(주로 태양광)에만 의존하는 경우 발전설비와 에너지저장시설 확보에 과도한 국토면적과 비용 소요
- 고부가가치 제조업과 IT 산업에는 고품질의 안정적인 전기가 필수적이며, 신재생과 원자력의 최적 조합을 통한 탄소중립 정책이 필수적임
 - 원자력은 우리나라가 최대 장점을 지닌 무탄소 전력원
 - ※ 세계 최우수 경제력, 양질의 일자리(수출+내수), 국토 보전(광범위한 신재생 투자 축소)
 - 원자력과 신재생의 최적 조합을 통해 경제성, 안정성, 전기품질, 에너지 안보, 수출 산업화를 동시에 달성할 수 있음

(부록 3) 원자력 안전과 안전성 확보체계

가. 원자력 안전의 기본 개념

□ 원자력 안전의 특성과 심층방어

- 원자로는 안전성 관점에서 다음과 같은 3가지 고유한 특성이 있음
 - 원자로 운전에 따라 많은 양의 방사성물질이 원자로 안에서 생성되어 축적되므로, 방사성물질과 인간·환경을 격리하는 **다중의 물리적 방벽(Physical Barrier)**이 필요
 - 원자로는 **매우 높은 밀도로 열을 생산하므로, 출력을 확실하게 제어하고 핵연료를 적절하게 냉각해야** 방사성물질을 둘러싼 방벽을 보호하여 외부 누출 예방
 - 원자로는 정지되면 핵분열 반응은 멈추지만, 핵연료 안의 방사성물질에 의한 **붕괴열(Decay Heat)**이 계속 생성되므로 **지속적인 냉각**이 필요
- ⇒ 원자로가 정상상태를 벗어나는 경우 안전하게 정지시킨 후 붕괴열을 제거하여 방사성 물질을 물리적 방벽 안에 억류(격납)시키는 것이 중요
- ⇒ 원자로 정지, 붕괴열 제거, 방사성물질 격납이 가장 중요한 안전기능이며, 원자로 시설은 이를 위한 다양한 안전계통을 구비
- 사회가 수용할 수 있는 수준의 높은 안전성 확보가 원자력 이용의 전제조건이며, 이를 달성하기 위한 핵심적인 개념이 **심층방어(Defense-in-Depth)**임
 - 심층방어는 **다중방벽과 다단계방호**를 통해 원전 사고를 높은 신뢰도로 예방하고(**사고 예방**), 만일의 사고 시에는 그 피해를 최소화(**사고 완화**)하는 개념



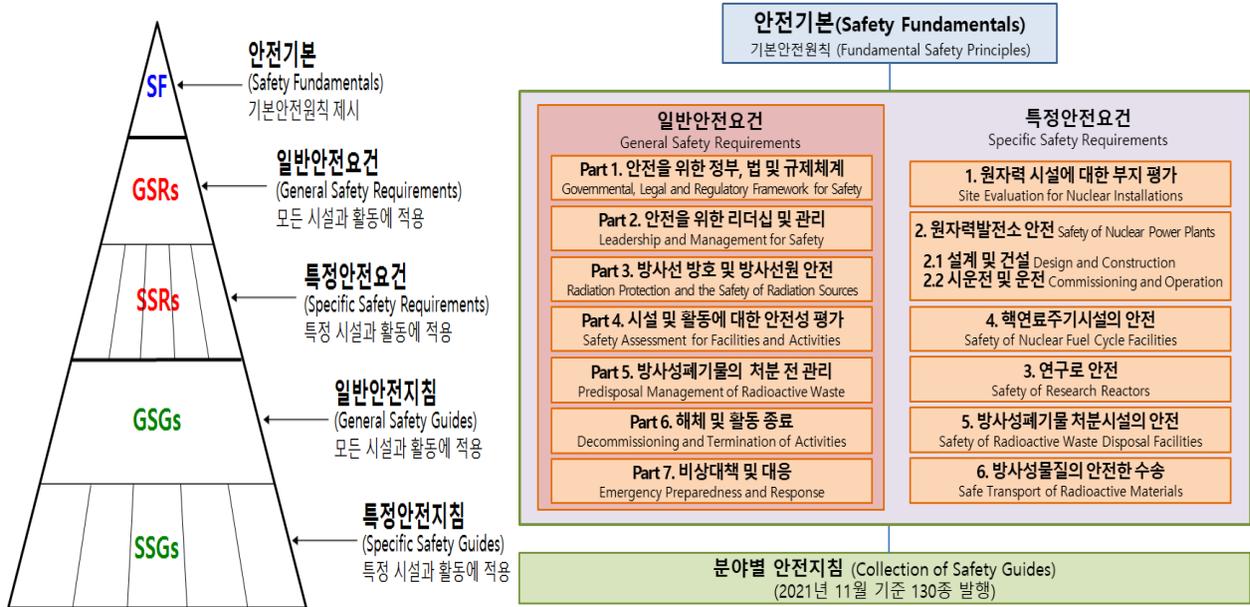
〈원자력발전소의 물리적 다중방벽〉

단계	목 표	핵심 수단
1단계	비정상 운전 및 고장 방지	보수적인 설계와 고품질 건설 및 운전
2단계	비정상 운전의 제어 및 고장 탐지	제어, 제한 및 보호 계통과 감시 기능
3단계	사고를 설계기준 이내로 제어	공학적인 안전설비 및 비상대응절차서
4단계	중대사고의 제어(중대사고 진행 억제와 결과 완화)	추가적 안전 설비 및 사고 관리
5단계	방사성물질 대량 누출로 인한 피해 최소화	소외 비상 대응 (원자력 비상방재대책)

〈사고 예방완화를 위한 다단계 방호〉

□ 국제원자력기구(IAEA)의 안전기준

○ IAEA는 국제적으로 통용될 수 있는 안전기준체계를 개발하여 제공함



○ 최상위 문서인 Safety Fundamentals¹²⁾에서 다음 10가지의 기본안전원칙을 정함

- **안전에 대한 책임(Responsibility for Safety):** 안전에 대한 주된 책임(Prime Responsibility)은 방사선 리스크를 유발할 수 있는 시설과 행위에 책임이 있는 개인이나 조직에 있다.
- **정부의 역할(Role of Government):** 독립적 안전규제기관을 포함하여, 안전을 위한 효과적 법체계 및 정부체제가 확립되고 지속되어야 한다.
- **안전을 위한 리더십 및 관리(Leadership and Management for Safety):** 방사선 리스크와 관련된 기관과 방사선 리스크를 유발할 수 있는 시설 및 행위에 있어서는 안전을 위한 효과적인 리더십과 관리체계가 확립되고 지속되어야 한다.
- **시설 및 행위의 정당화(Justification of Facilities and Activities):** 방사선 리스크를 증가시키는 시설과 행위는 종합적인 관점에서 이득을 제공해야 한다.
- **방호의 최적화(Optimization of Protection):** 방호는 합리적으로 달성할 수 있는 최상의 안전 수준을 제공할 수 있도록 최적화되어야 한다.
- **개인 리스크의 제한(Limitation of Risks to Individuals):** 방사선 리스크 제어 조치들은 어느 개인도 수용할 수 없는 장애 리스크를 감당하지 않도록 보장해야 한다.
- **현재 및 미래 세대의 보호(Protection of Present and Future Generations):** 현재와 미래의 인간 및 환경을 방사선 리스크로부터 보호해야 한다.
- **사고 예방(Prevention of Accidents):** 원자력 또는 방사선 사고를 예방하고 완화하기 위해 현실적인 (Practical) 모든 노력을 기울여야 한다.
- **비상 대책 및 대응(Emergency Preparedness and Response):** 원자력 또는 방사선 사건·사고에 대한 비상 대책 및 대응체계를 갖추어야 한다.
- **기존 및 비규제 방사선 리스크 저감을 위한 보호조치(Protective Actions to Reduce Existing or Unregulated Radiation Risks):** 이미 존재하고 있거나 규제대상이 아닌 방사선 리스크에 대한 보호 조치들은 정당화되고 최적화되어야 한다.

12) IAEA et al. (2006), Fundamental Safety Principles, IAEA Safety Standards Series No. SF-1, IAEA, Vienna.

나. 원자력 안전규제

□ 원자력 안전규제란?

- 원자력시설의 안전에 대한 주된 책임은 운영기관에 있으나, 원자력 개발·이용 과정에서 발생할 수 있는 재해로부터 국민과 국토환경을 보호하기 위해 국가(정부)의 **안전규제** (Nuclear Safety Regulation)가 필요함
 - 관계 법령과 기준의 제정을 통해 안전 요건과 지침을 제시
 - 인허가 심사를 통해 시설의 설계, 건설, 성능 등에 대한 종합적 안전성 확인
 - 운영 중에는 허가조건 범위 안에서 안전하게 운영, 관리되고 있는가를 정기적 및 수시로 점검/확인

□ 우리나라의 원자력 안전규제체계

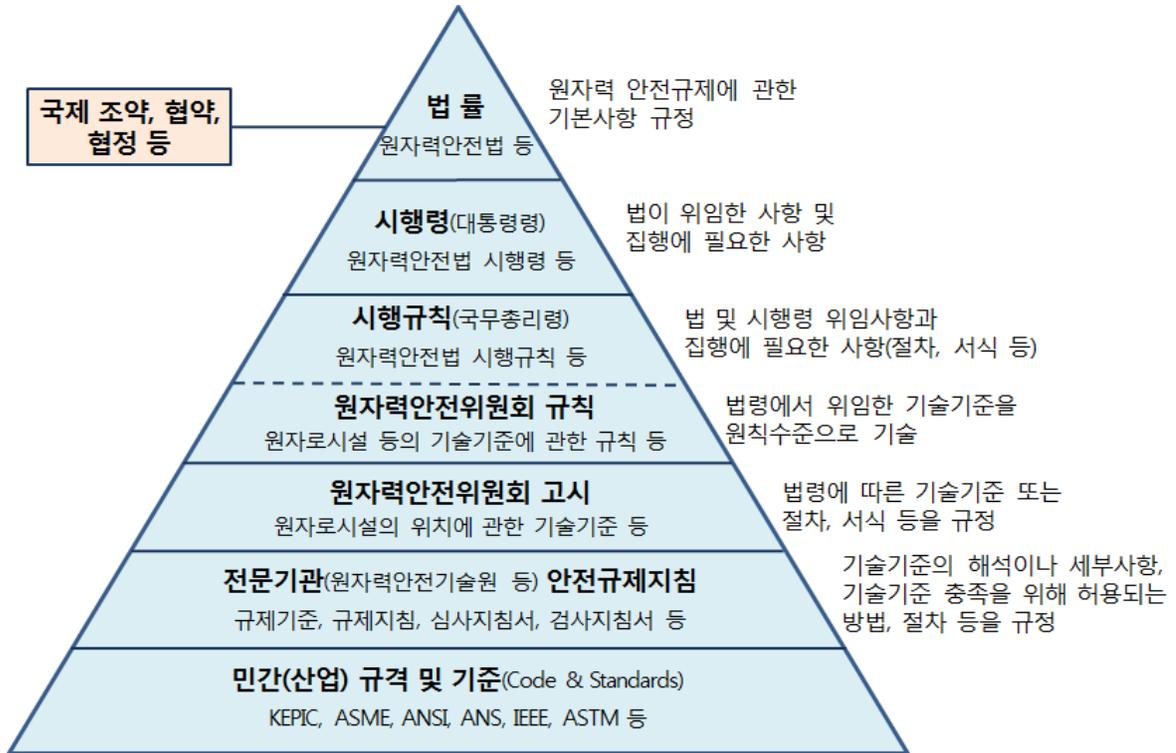
- 우리나라의 원자력 안전규제기관은 원자력안전위원회이며, 산하 조직 및 타 정부조직과의 관계는 다음 그림과 같음



- 최상위 의사결정기구는 위원장, 사무처장(이상 상임위원) 및 7인의 비상임위원으로 구성된 9인 위원회로서, 법령 및 기준, 안전정책, 인허가, 행정조치, 안전현안 등과 관련한 주요 사항에 대해 심의·의결
- 위원회 사무처는 규제업무를 집행하는 행정조직(필요 시 9인 위원회 보고 및 심의를 거침)
- 한국원자력안전기술원은 안전심사, 안전검사, 원자력 방재 등의 규제 실무 수행
- 한국원자력통제기술원은 방호·보안 관련 규제실무 수행

○ 체계적인 원자력 안전규제를 위한 법령 및 기준이 마련되어 있으며, 지속적으로 보완되고 있음

- 우리나라의 원자력 안전규제 법령체계



- 원자력안전위원회 소관 주요 법령

법률	대통령령(시행령)	총리령(시행규칙)	위원회 규칙(행정규칙)
원자력안전위원회의 설치 및 운영에 관한 법률	원자력안전위원회의 설치 및 운영에 관한 법률 시행령		원자력안전위원회 회의 운영에 관한 규칙
	원자력안전위원회와 그 소속기관 직제	원자력안전위원회와 그 소속기관 직제 시행규칙	
원자력안전법	원자력안전법 시행령	원자력안전법 시행규칙	원자로시설 등의 기술기준에 관한 규칙 방사선 안전관리 등의 기술기준에 관한 규칙
원자력시설 등의 방호 및 방사능 방재 대책법	원자력시설 등의 방호 및 방사능 방재 대책법 시행령	원자력시설 등의 방호 및 방사능 방재 대책법 시행규칙	
원자력 손해배상법	원자력 손해배상법 시행령		
원자력 손해배상 보상 계약에 관한 법률	원자력 손해배상 보상 계약에 관한 법률 시행령		
생활주변방사선 안전관리법	생활주변방사선 안전관리법 시행령	생활주변방사선 안전관리법 시행규칙	
한국원자력안전기술원법	한국원자력안전기술원법 시행령		

다. 국내 원자력 안전수준, 안전관리체계 및 개선 방향

□ 국내 원전 안전수준 및 안전관리

- 국내 원전은 대형 방사능 누출사고가 발생하지 않은 가압경수로(PWR)형 및 가압중수로(CANDU-PHWR)형이며, 43년간 26기의 원전을 안전하게 운영
 - 가압경수로인 TMI 원전에서도 중대사고가 발생했으나(1979.3) 방사성물질의 외부 누출이나 환경 영향은 미미
 - ※ 국내 원전은 사건·사고 및 운전 경험을 반영하여 지속적으로 안전성 개선
 - 총 600여년의 가동이력이 축적된 국내 원전에서는 국제원자력사건등급(INES) 체계의 3등급 이상 사건 미발생
- 국내 원전은 후쿠시마 원전사고 이후, 설계기준을 초과하는 자연재해에 대비하여 설비를 개선하고, 이동형 설비(발전기, 펌프 등)를 보강함
 - 쓰나미에 대비한 해안방벽 증축, 방수문 및 방수형 배수펌프 설치, 중대사고에 대비한 피동형 수소제거설비(PAR) 및 냉각수 주입유로 추가 설치
 - 전력계통 상실에 대비하여 이동형 발전기 및 이동형 펌프 등 구비
- 2015년 6월 국회는 원자력안전법을 개정하여, 모든 원전에 대해 '사고관리계획서'를 제출하도록 함
 - ※ 사고관리계획서: 사고가 발생하였을 때 사고가 확대되는 것을 방지하고 사고의 영향을 완화하며 안전한 상태로 회복하기 위하여 취하는 제반 조치를 통해, 설계기준을 초과하는 사고 중 법규에서 정한 사고에 대응하기 위한 계획서
 - 한국수력원자력은 2019년 6월에 가동 중인 모든 원전의 사고관리계획서를 제출
- 현재 규제기관에서 사고관리계획서의 내용이 기술기준에 부합하는지를 검토 중임
 - 사고관리계획서의 주요 내용

- 대상사고: 다중고장사고, 외부재해, 노심용융을 가정한 위협요인
- 사고관리 수단: 사고관리에 사용되는 설비, 사고관리 전략 및 이행체계
- 사고관리 능력의 평가: 결정론적 방법 및 확률론적 방법을 적용

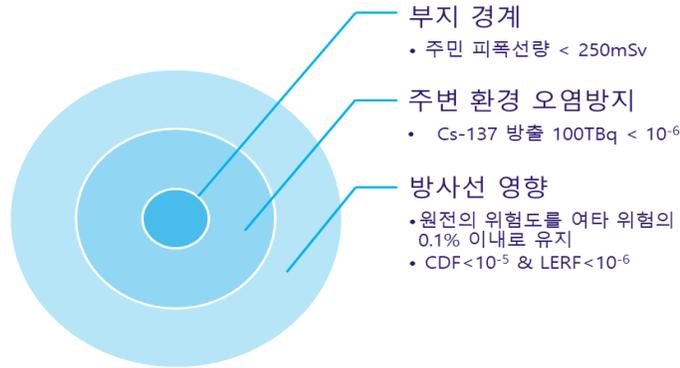
- 안전목표: 원자로시설 등의 기술기준에 관한 규칙(제85조의22 제1항)

1. 사고가 발생하더라도 부지 인근 주민의 건강상 위해를 주거나 장기간의 소외 오염을 초래하는 방사성 물질의 대량 방출을 방지할 것
2. 발전용원자로 및 관계시설의 운영으로 인하여 부지 인근 주민의 건강과 환경에 미치는 위험도(risk)의 증가량을 극히 낮출 것

- 허용기준: 원안위 고시 제2017-34호(원자로. 42) ‘사고관리 범위 및 사고관리능력 평가의 세부기준에 관한 규정’

성능 목표

1. 다중고장 사고 시 핵연료의 현저한 손상 방지
2. 설계기준초과 재해 시 핵연료 냉각기능 및 원자로격납건물의 방호벽 기능 복구·유지
3. 노심의 현저한 손상 이후에도 원자로격납건물의 방호벽기능 상실을 방지



〈허용 기준 요약〉

○ 우리나라의 원전 안전목표는 국제사회에서 설정한 안전목표와 동등한 수준임

- 유럽연합(EU)은 2014년 원전의 안전 수준을 다음과 같이 제시

1. 원전에서 사고가 발생하더라도 방사성 물질의 조기·대량 방출로 인한 주민보호 조치가 필요치 않을 수준으로 설계할 것
2. 가동 중인 원전은 주기적안전성평가를 통해 지속적으로 안전성을 개선할 것

- 한국을 포함한 원자력안전협약(Convention on Nuclear Safety) 당사국들은 2015년 2월 9일 '원자력 안전에 관한 비엔나 선언'을 채택

1. 신규 원전의 경우,
 - 주민보호조치가 필요치 않을 수준¹³⁾으로 방사성 물질의 조기·대량 방출 가능성을 배제하고,
 - 장기간 소외오염이 발생하지 않도록 부지선정 및 설계·건설할 것
2. 가동 원전의 경우, 주기적안전성평가를 통해 안전성 개선사항을 도출하고 적시에 적용하여 상기 안전 목표 달성을 지향할 것

○ 그러나 후쿠시마 원전사고 등으로 인한 국민의 불안감은 여전한

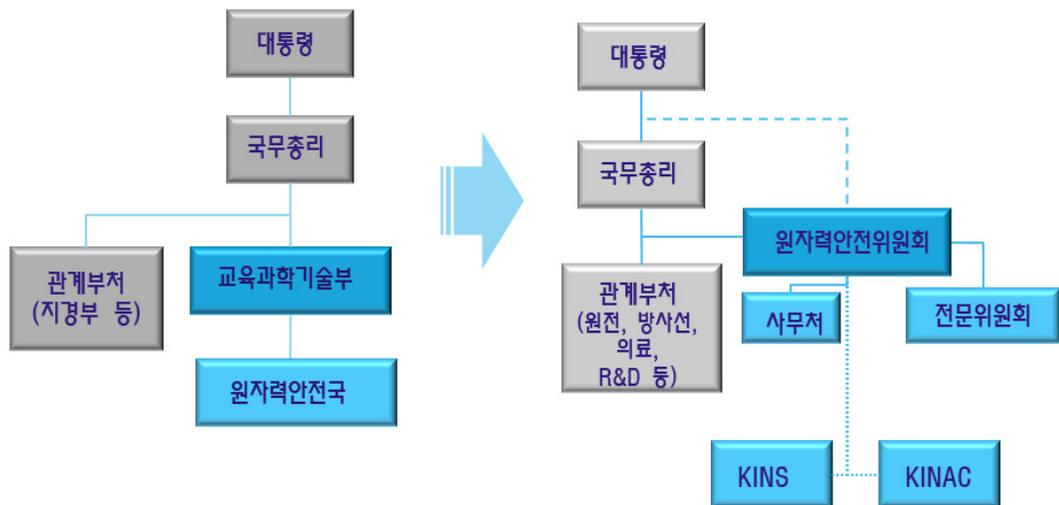
- 방사선 피폭으로 사망한 사람은 없으나, 주민소개와 피난생활 과정 등에서 상당수의 사상자가 발생하고, 아직도 과거의 일상으로 복귀하지 못하고 있는 것도 현실
- 국민이 '사고가 나면 방사능 확산 영향이 광범위하고 장기간 지속된다'는 점을 체감

13) IAEA는 안전기준 GSR Part 7(2016년 개정)에서 사고시 대피 기준을 100mSv(밀리시버트)로 설정하였으며, 이는 후쿠시마 원전사고의 경험을 반영한 것임.

- 특히, 부산 및 울산 등 대도시가 원전 가까이에 있어서 방사성물질 누출로 긴급 주민 보호조치¹⁴⁾가 결정되면 극도의 혼란이 발생할 수 있다는 점이 불안감의 중요한 요인
- 후쿠시마 원전사고의 교훈과 안전목표 및 중대사고 대응 강화 등을 종합적으로 고려하여 국가방사능방재체계도 종합적으로 재검토하여 개선할 필요가 있음
 - 후쿠시마 원전사고에서 준비되지 않은 긴박한 피난이 불필요한 사상자 증가의 원인
 - 방재조직, 방사선비상계획구역(SMR에 대한 고려 포함), 비상대피기준, 커뮤니케이션 등에 대한 재검토 필요
- 국내 원전에 대한 안전목표는 국제동향을 참조하고 국회의 입법조사 또는 공론조사 방법을 통해 국민이 수용 가능한 수준으로 설정해야 함
 - 안전목표에 대한 간결하고 직관적인 표현이 필요

□ 안전규제 체제의 현황 및 문제점

- 후쿠시마 원전사고 후 원자력안전 강화대책의 하나로 「원자력안전위원회」를 독립행정 기구로 설립함
 - 후쿠시마 원전사고 이전에는 교육과학기술부 산하에 원자력 연구개발을 담당하는 부서와 원자력 안전규제를 담당하는 부서가 같은 조직 내에 위치
 - 후쿠시마 원전사고 후에 독립 규제기관의 필요성이 인정되어, 「원자력안전위원회의 설립 및 운영에 관한 법률」이 2011년 6월 28일 국회를 통과
 - 2011년 10월 26일 합의제 행정기관인 「원자력안전위원회」 출범



〈원자력 안전규제 행정체계의 변화〉

(원자력안전위원회 설립 당시 원자력의 이용 및 개발을 담당하는 부서들과 분리되도록 대통령 직속의 독립기관으로 설립하였으나 이후 국무총리 소속으로 변경)

14) 「원자력시설 등의 방호 및 방사능 방재 대책법」 제29조에 따른 대피, 소개, 음식물 섭취 제한, 갑상샘 방호약품 배포 등을 말함.

- 최상위 의사결정기구인 원자력안전위원회는 상임위원 2인(위원장, 사무처장)과 비상임위원 7인(대통령 임명 3인, 국회 추천 4인) 등 총 9인으로 성
- 규제업무의 투명성이 크게 향상되었으나, 독립성과 전문성에서는 아직 한계를 드러냄
 - 위원회 회의록 및 의사록 공개, 각종 인허가자료 공개, 현안 조사 및 의사결정 과정의 민간참여 확대 등 원자력 안전규제의 투명성이 크게 개선
 - 그러나 정부 정책, 정치권, 출신 기관 또는 시민단체의 영향으로부터 만족할 만한 수준의 독립성은 확보하지 못한 것으로 평가
 - ※ 「원자력안전위원회의 설치 및 운영에 관한 법률」 제3조제2항 단서에서 안전규제와 관련된 사항은 정부조직법 제18조에 따른 국무총리의 행정감독권을 적용받지 않도록 명시
 - 원자력안전위원회에 다양한 분야의 전문가들이 포함되어 있으나, 원자력에 대한 지식과 경험이 부족하여, 기술적인 현안에 대한 심층 검토에 한계
- 행정조직(원자력안전위원회 사무처)과 전문조직(원자력안전기술원 등)의 이원화로 비효율성이나 의사소통의 문제점 등이 발생함
 - 원자력안전위원회 산하의 행정조직인 사무처와 전문조직인 KINS 및 KINAC의 이원화로 인한 비효율 발생
 - ※ (사례) 원전 부지 등에 원안위 지역사무소(39명), KINS 주재검사팀(25명) 등이 상주하며, 정기검사는 KINS에서 별도로 수행
 - 이원화된 조직과 다층 구조의 정보 전달 및 의사결정 과정에서 지연과 왜곡 발생
 - ※ (사례) 현장의 현안 제기가 차단 또는 왜곡 처리, 안전과 무관한 생색내기 업무에 동원, 실질적인 기술교류 활동 제약 등
 - 주요 원자력 국가는 다음과 같이 규제기관 및 위원 운영
 - ※ 미국 : 단일 규제기관(~4,000명), 상임위원 5명(임기 5년, 순차 임명)
 - ※ 일본 : 단일 규제기관(~1,000명), 상임위원 5명(임기 5년, 순차 임명)
 - ※ 프랑스 : 단일 규제기관(~600명), 상임위원 5명(임기 6년, 순차 임명)

□ 안전규제 제도의 현황 및 문제점

- 원자력법은 1958년 3월 11일 제정된 이후 수많은 개정이 이루어짐
 - 고리 1호기의 건설·운영 등 원자력의 이용·개발의 확대에 따른 안전성 확보를 강화하기 위하여 안전관계 조항의 보강을 위해 전면 개정(1982)
 - 원자력법은 후쿠시마 원전사고 이후 원자력안전법과 원자력진흥법으로 분리 개정됨 (2011.10.26.)
- 국내외 규제 동향과 경험, 사회적 요청을 반영하여 지속적으로 개정됨

- 미국 TMI 원전사고(1979), 舊소련 체르노빌 원전사고(1986), 일본 후쿠시마 원전사고(2011) 등의 대규모 사고 경험을 반영하여 규제 강화
- 규제 강화의 과정에서 기존 유사제도와 충분히 조정하지 못하여 중복 또는 비효율적인 사례 발생
 - ※ (사례) 가동 원전의 안전성 확인과 사회적 수용성 확보를 위해 주기적안전성평가 제도와 계속운전허가 제도를 중복 적용
- 법적인 근거가 미흡한 제도가 운영되기도 하여 규제 행정의 불신 초래
 - ※ (사례) 불시정지 후 재가동을 원안위에서 승인, 법령에 근거가 없는 위원회 설치 및 운영

□ 안전규제체계 개선 방향

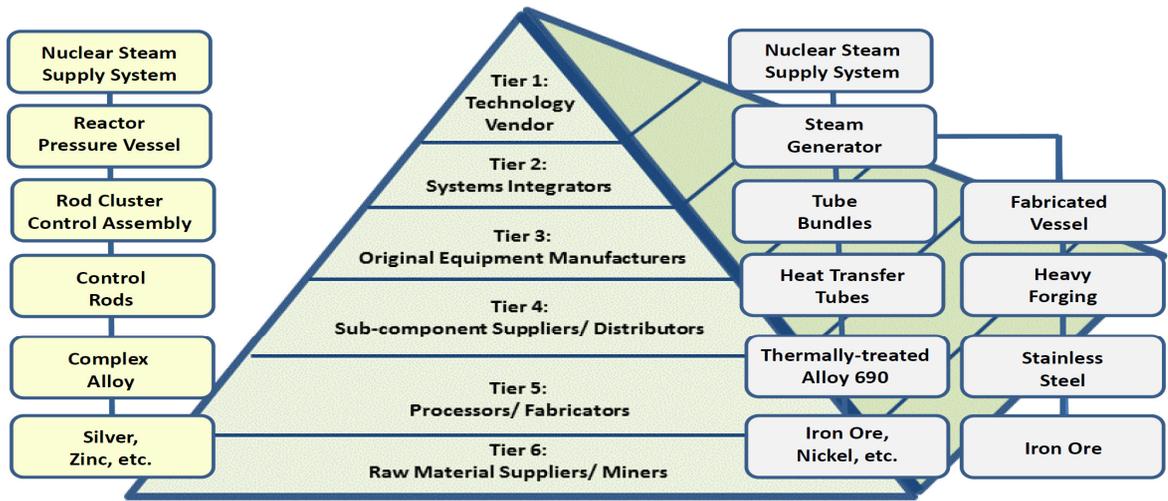
- 안전규제 체계를 재검토하여 원자력안전위원회를 안전규제업무에 적합한 전문기관으로 발전시킬 필요가 있음
 - 원자력안전위원회가 합의제 독립행정기관으로 설립되었으나, 그 역할에 대해 긍정적인 평가가 충분하지 않은 상황
 - 원자력 안전정책을 합리적으로 수립·집행하고, 기술적 현안에 대한 심의를 위해 원자력 안전위원회의 전문성 확보 필요
 - ※ 다양한 분야의 전문가로 구성하되, 원자력에 대한 지식과 경험이 있는 전문가로 구성
 - ※ 임기 중 안전규제 업무에 집중할 수 있도록, 적정수의 상임위원으로 구성 (국내 현실을 고려 하면 임기는 3년으로 하되, 순차 임명으로 연속성 확보)
 - 원자력안전위원회 산하의 행정조직인 사무처와 전문조직인 한국원자력안전기술원(KINS) 및 한국원자력통제기술원(KINAC)의 분리로 인한 비효율 제거를 위한 방안 강구
 - ※ 전문성을 필요로 하는 행정업무의 수행에 적합한 조직으로 개선
- 안전규제 제도를 합리적으로 개선하여 규제의 실질적 효과와 효율성 제고가 필요함
 - 규제가 지속적으로 추가·강화되면서 중복규제 등 불합리한 부분 발생
 - 안전규제 제도를 개선하여 원자력 안전의 투명성과 합리성을 강화
 - 원자력 사업자의 책임을 명시하는 등 안전규제 기본원칙을 포함하도록 원자력안전법을 개정하고, 규제 업무별로 특성을 반영하여 정비
 - 안전 기준은 최신 동향을 반영하여 적시에 개정
 - ※ 국내외 연구결과 및 규제 동향을 분석하여 안전 기준에 반영
 - ※ 사회적 변화와 요구사항을 적시에 반영하여 사회적 수용성을 확보
 - 규제 절차는 안전 중요도를 고려한 차등접근방식(Graded Approach)을 적용하고, 가능한 단순화하여 절차로 인한 비효율과 불합리를 제거

(부록 4) 신한울 3·4호기 건설과 원전 수출산업체계 복원

가. 원전 공급망

□ 원전 공급망(Supply Chain)

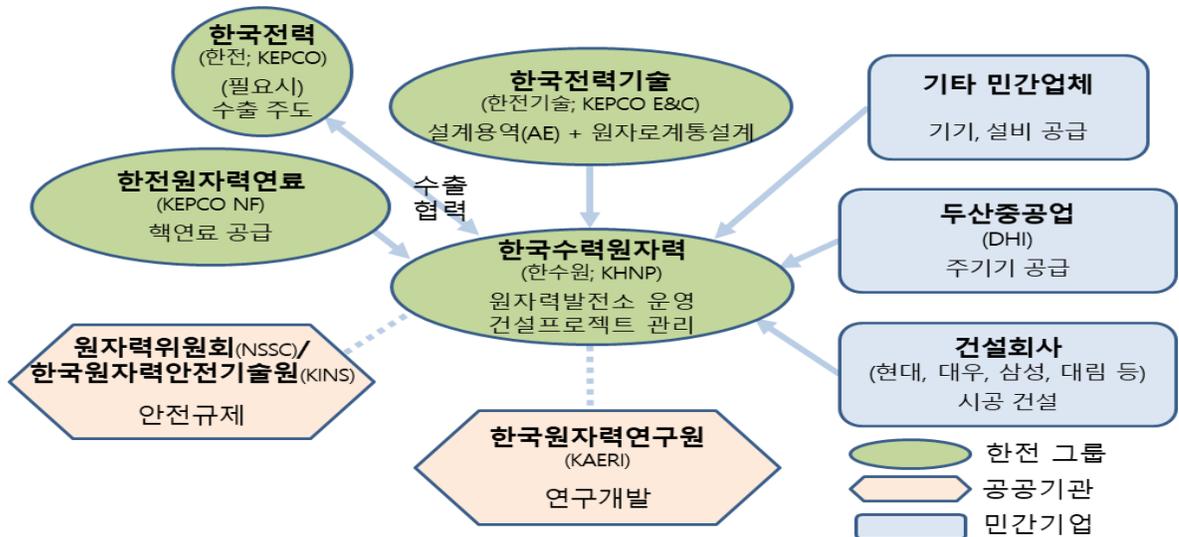
- 원전 건설 및 운영에 필요한 기자재부품과 기술용역 서비스를 제공하는 업체들을 말하며, 아래 그림처럼 핵증기공급계통(Nuclear Steam Supply System, 원자로계통)과 같은 최상위 부문부터 기본 소재(재료)에 이르기까지 여러 계층으로 구성됨



〈원자력발전소 Supply Chain의 예시〉¹⁵⁾

□ 국내 원전 공급망 현황

- 우리나라 원자력 산업의 최상위 체계는 아래 그림과 같이 표현할 수 있음



〈우리나라 원전산업의 최상위 체계〉

15) Greg Kaser, The World Nuclear Supply Chain - An Overview, NEA Workshop, 2014

○ 원전 2기 건설 시에는 2,000여 개 업체, 6만여 명이 투입됨(신고리 5·6호기 기준)

- 원전의 성능과 안전을 위해서는 모든 계층이 최상의 품질 확보 필수

○ 원전 기자재 제작 분야는 다품종 소량생산을 특징으로 하는 중소기업형 특화 분야임

- 주기기 제작 분야 460여 개, 보조기기 제작 분야 1,300여 개의 중소기업 참여

- 원전 주기기 제작 핵심기술 보유 중·소 협력사 중 매출 규모가 100억 원 미만인 소규모업체 비중은 42%임

- 원전 주기기 제작 중·소 협력사 중 원전 핵심기술 보유업체* 현황¹⁶⁾

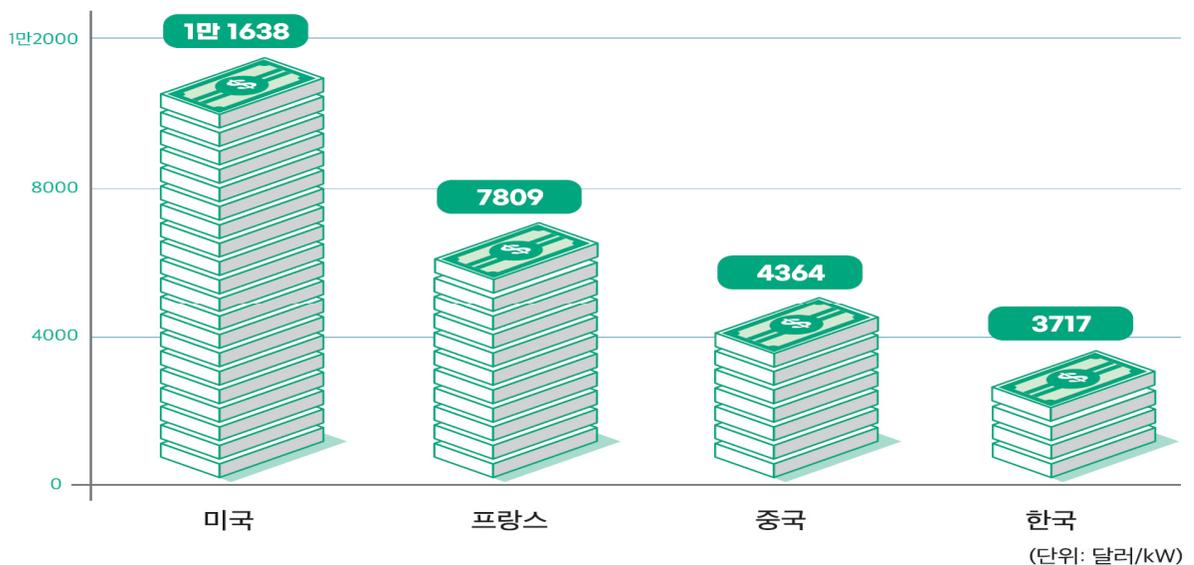
분 야	핵심기술 보유업체 수	인 력	매출 규모에 따른 업체의 비중(%)		
			1000억원 이상	100~1000억원	100억원 미만
원자로설비	65	5,595	6.2	36.9	56.9
터빈/발전기	41	3,907	7.3	43.9	48.8
보조기기	68	1,100	16.7	59.1	24.2
합 계	174	10,602	10.5	47.1	42.4

※ 핵심기술 보유업체: 원전 품질보증요건을 만족하는 특화된 설비, 원전 주요 부품 제작기술과 인력을 보유한 전문업체

○ 우수한 원전 공급망 보유 여부는 원전 품질 및 가격경쟁력 결정에 핵심적인 요소임

- 2018년 사우디아라비아 원전 건설사업 입찰시, 원전 건설 제출 견적가(달러/kW):

한국 3,717, 중국 4,364, 러시아, 5,271~6,250, 프랑스 7,809, 미국 11,638.¹⁷⁾



※ 2018년 220억 달러 프로젝트

※ [그림] 핵공감 클라쓰 운영진(2021), 대통령을 위한 에너지정책 길라잡이

16) 두산중공업 분석자료

17) 조선일보, 2019.11.19. (https://biz.chosun.com/site/data/html_dir/2019/11/18/2019111803299.html)

나. 세계 원전시장 전망

- 현재 전 세계적으로 건설 중인 56기¹⁸⁾ 중에서 36기는 자국 주도로 건설하고(우크라이나, 아르헨티나, 브라질 등은 선진국 기술 지원), 20기는 러·프·한·중이 수출함

수출국	수출 대상국(기수)	총 기수
러시아 ¹⁾	방글(2), 벨라(1), 중(2), 인도(3), 이란(1), 터(3), 슬로바(2)	14
중국 ²⁾	파키(1)	1
한국 ³⁾	UAE(2)	2
미국 ⁴⁾	(우크 4)	(4)
프랑스	핀(1), 영(2)	3
자국 주도 건설	중(16), 한(4), 인도(4), 러(3), 일(2), 미(2), 프(1), 우크(2) ⁵⁾ , 아르헨(1) ⁵⁾ , 브라(1) ⁵⁾ ,	36

- 1) 러시아는 추가로 10기(중국, 이집트 등)를 신규 계약하고, 7기(인도, 헝가리 등)도 계획 확정 단계
- 2) 중국은 '15년 파키스탄의 Karachi 2·3호기 건설에 착수하여 2호기는 '21년 5월 상업운전, 3호기는 '22년 상업운전 예정이며, 파키스탄, 루마니아, 아르헨티나, 영국 등에 다수 건설 계획
- 3) 한국은 UAE에 4기의 원전 건설을 '13년 착수하여 1호기는 '21년 4월 상업운전을 시작하고, 2호기도 '21년 9월 전력망에 연결
- 4) 미국은 정치적 영향력을 활용하여 신규원전시장 진출을 강력하게 추진하여 우크라이나, 폴란드 등에서 성과 가시화 단계
- 5) 장기간 건설 중단 상태였던 원전을 외국의 지원을 받으면서 완공 추진

- 향후 원전 건설이 지속될 것으로 예상되며, 원전 공급국이 아닌 국가에서 건설이 계획되거나 제안되고 있는 원전들이 우리나라의 주된 수출 대상임

- 세계원자력협회(WNA) 자료에 의하면, 101기가 건설 계획 중이고 325기가 추가로 건설 제안 중¹⁵⁾

국 가	건설 계획 중	건설 제안 중	국 가	건설 계획 중	건설 제안 중
중 국	37	268	우크라이나	1	4
러시아	27	21	핀란드	1	0
인 도	14	28	터 키	1	8
이집트	4	0	아르헨티나	1	2
미 국	3	18	벨라루스	0	2
헝가리	2	0	폴란드	0	6
루마니아	2	1	사우디아라비아	0	16
영 국	2	2	남아공	0	8
우즈베키스탄	2	2	방글라데시	0	2
불가리아	1	2	브라질	0	4
체 코	1	2	합 계	101	325
우리나라에 수주 시도가 가능한 기수				37	136

18) World Nuclear Association, World Nuclear Power Reactors & Uranium Requirements <https://world-nuclear.org/information-library> (2021.10. 기준)

- 중동, 동유럽, 인도 등 신흥개발국의 신규원전 도입 확대 및 유럽 등 선진국의 탄소 저감 노력 등으로 대형원전의 지속적인 발주 예상
 - 미국 상무부(Department of Commerce)는 향후 10년간 세계 원전 시장 규모를 5,000~7,400억 달러(약 600~880조원)로 추산(2020.4)
- 세계 원전 시장을 정부의 강력한 지원을 받는 러시아와 중국이 주도하고, 미·프·일 등 서방권 국가는 고전 중이었으나, 최근 미국의 성과가 가시화되고 있음
- 러시아는 현재 압도적 원전 수출국일 뿐만 아니라 계획 중인 원전에 대해서도 점유율이 높을 것으로 예상
 - 중국은 현재 수출 중인 원전은 적으나, 구체적으로 계획 중인 원전이 많아서 세계 2위의 원전 수출국이 될 가능성
 - 미국은 자국 원자력산업의 리더십 회복과 러·중의 세계 원전 시장 독점에 따른 국제 핵비확산체제 훼손 방지를 위해 원전 수출을 적극 추진하여 루마니아, 우크라이나, 폴란드, 불가리아 등에서 성과가 가시화되는 단계
 - 우리나라는 UAE에서 4기의 원전 수주(2009.12) 이후 터키, 이집트 등에서 수주 활동 추진하였으나, 지금까지 추가 수주가 없는 상황
 - ※ 현재 한국은 사우디아라비아, 체코, 폴란드, 영국 등에서 수주 활동 진행 중으로 원전 수출 성사를 위해 긴급한 대책 마련이 절실한 상황

다. 신한울 3·4호기 건설 재개 필요성

□ 신한울 3·4호기 건설사업과 건설 중지의 영향

- 신한울 3·4호기는 전기사업법에 의한 발전사업이 허가되어 부분적인 공사(원자력안전위원회 허가범위 제외)가 진행되는 상황에서 중단됨
- 2002.05월 경북 울진군 사업부지 일대 전원개발사업 예정구역으로 지정·고시
 - 2008.12월 「제4차 전력수급기본계획」에 건설계획 포함
 - 2010.11월 한수원, 이사회를 통해 건설 기본계획 의결
 - 2015.07월 한수원, 산업부에 전원개발사업 실시계획 승인 신청(환경영향평가 완료)
 - 2016.01월 한수원, 원자력안전위원회에 건설허가 신청
 - 2017.02월 산업부, 전기사업법에 의거 발전사업 허가
 - 2017.12월 산업부, 「제8차 전력수급기본계획」에서 제외
 - 2018.06월 한수원, 이사회에서 천지 원전 1:2 및 신규 원전 1:2 건설계획 백지화 의결, 신한울 원전 3·4호기는 결정 보류

- 2020.12월 산업부, 「제9차 전력수급기본계획」에서 제외
- 2021.02월 산업부, 발전사업 허가 기간 연장(~'23.12월)
- 탈원전 정책으로 신규원전 건설이 백지화되면서 원전 공급망이 크게 훼손됨
 - 원전공급 산업체는 신고리 원전 5·6호기 기자재 납품 후 일감이 없는 상황
 - 2017년 당시 공정을 10%였던 신한울 원전 3·4호기는 한국수력원자력(주) 이사회 의결로 4년째 건설이 중지된 상황
 - 2017년 이후 휴·폐업 업체 수가 증가하면서 원자력공급 산업체 매출액과 인력, 그리고 원자력 관련 학과 재학생 수가 지속 감소
 - ※ 원자력공급 산업체 매출액: 47,140억원('17) → 44,941억원('18) → 39,311억원('19)¹⁹⁾
 - ※ 원자력공급 산업체 인력: 21,682명('17) → 20,735명('18) → 19,449명('19)²⁰⁾
 - ※ 원자력 학과 재학생 수: 2,777명('17) → 2,527명('18) → 2,350명('19) → 2,190명('20)²¹⁾
- 원전 공급망 붕괴와 인력 감소는 가동원전 안전성과 수출원전 경쟁력에 위협이 되며, 원전 기술의 계승발전 기반을 약화
 - 원전 공급망 붕괴는 원전 부품기자재 및 엔지니어링 서비스의 적기 공급을 어렵게 해, 가동원전 유지·보수와 수출원전 경쟁력에 악영향
 - 원자력인력 감소는 원전 기술과 지식을 계승·발전시키기 위한 연구개발을 위축시키고 원전산업 유지를 위한 인력기반도 크게 저해

□ 신한울 3·4호기 건설 재개의 효과

- 국가온실가스감축목표(NDC) 달성에 실질적으로 기여할 수 있음
 - NDC(2030년까지 2018년 온실가스 배출량 대비 40% 감축) 달성을 위해서는 2030년까지 발전부문에서 온실가스 1억 2,000만 톤 감축 필요
 - 신한울 원전 3·4호기는 2030년 이전 준공이 가능하며, 준공 후 석탄발전 대비 온실가스 배출량을 연간 약 1,700만 톤*을 감축하여 NDC 달성에 실질적 기여가 가능
 - ※ 2,800MW(용량) x 0.85(이용률) x 8,760h/년 x 0.808톤/MWh(석탄 대비 감축량) = 1,685만톤
- 국내 경제의 활성화와 양질의 일자리 유지가 가능함
 - 신한울 원전 3·4호기는 건설 사업비(총사업비 10조원)가 확보된 상태에서 잠정 중단돼, 정부의 추가 재정 투입 없이도 건설사업 즉시 재개 가능
 - 특히, 원전 기자재 업체가 밀집한 부산·경남지역 등 동남권 지역경제 활성화에 기여하고, 건설예정 지역인 경북·울진주민의 간절한 건설재개 요구에도 부응

19) “2019년도 원자력산업실태조사 보고서(25회)”, 한국원자력산업협회, 2021.04. p.19.

20) 위의 책, p. 69.

21) 위의 책, p. 104.

- 신한울 원전 3·4호기 건설 시 2,000여개 중소기업체에 일감이 제공되어, 일감 고갈로 경영상 위기에 몰린 원전 산업체가 인력과 조직을 유지할 수 있는 여력 제공
- 무엇보다도 원전 수출경쟁력 및 원전산업 생태계 유지가 가능함
 - 원전 수출이 성사된다 해도, 우리 원전 공급 산업체에 일감이 주어져 본격적인 제작 작업이 착수되기까지는 수출계약 성사 후 3~4년이 소요
 - 수출계약 후부터 일감 착수 시기까지의 물량 공백기에도 원전 공급 산업체는 신한울 3·4호기 물량으로 조직과 인력을 유지할 수 있어, 원전산업 생태계 유지가 가능
 - 이를 통해, 세계 최고수준의 원전 공급망을 보존함으로써, 우리 원전의 수출경쟁력 뿐만 아니라 국내 가동 원전에 고품질 기자재를 공급해 안전성 유지에도 기여

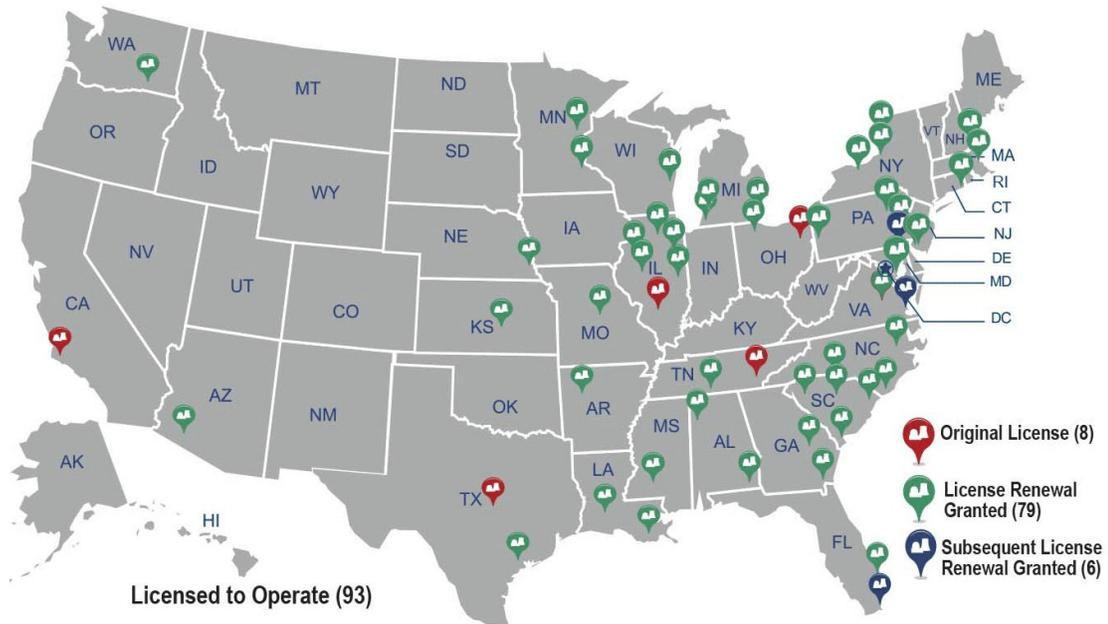
(부록 5) 가동원전 계속 운전

가. 세계 각국의 계속운전 현황

- 미국은 원자력법에 따라 원전의 최초 운영허가 기간은 40년으로 제한하고, 인허가갱신(LR, license renewal) 제도를 이용하여 20년 단위로 허가기간 연장을 승인하고 있음
 - 최초 운영허가 기간 40년은 기술적 고려가 아닌 경제적 측면과 시장 독점을 제한하기 위해 설정

“This original 40-year term for reactor licenses was based on economic and antitrust considerations not on limitations of nuclear technology.”

- 미국 원자력규제위원회(USNRC)는 안전성이 확인되면 추가로 20년씩 운영허가를 갱신하는 인허가갱신 제도를 운영 중
 - ※ 원전 운영자는 허가기간 만료 5~20년 전에 갱신 신청
- USNRC는 총 94기에 대해 인허가 갱신(60년 운전 허용)을 승인했으며, 그 중 6기에 대해서는 2차 인허가갱신(Subsequent LR; 80년 운전 허용)을 승인
 - ※ 9기에 대한 2차 인허가갱신 심사 진행 중
 - ※ 1차 인허가갱신이 발급된 원전 중에서 9기는 다른 이유로 영구 정지
- 현재 가동중 미국원전 중에서 8기는 최초 운영허가, 79기는 1차 운영허가 갱신, 6기는 2차 운영허가 갱신 상태
- 최근에는 100년까지 운전을 위한 기술적 검토를 진행 중



Note: The NRC has issued a total of 94 initial license renewals: 9 of these units have permanently shut down. Data are as of July 2021. For the most recent information, go to NRC Web page at <https://www.nrc.gov/info-finder.html>

(자료: www.nrc.gov)

- 대부분의 유럽 국가들은 정해진 최초 인허가기간이 없이 10년 주기의 주기적안전성평가 (PSR: periodic safety review)를 통해 가동원전의 계속운전을 허용하고 있음
 - 영국의 경우 60~70년대 가동을 시작한 원전들 가운데 안전성 심사와 경제성평가를 통해 선별적으로 40년 이상 계속운전 중
 - 특히, 스위스의 경우, 69년과 71년에 운전을 시작한 Beznau 원전이 50년 이상 성공적으로 운전 중
 - 유럽 전체적으로는 14개 호기의 원전이, 세계적으로도 80개 호기의 원전이 이미 40년 이상 계속운전에 돌입하였으며 운전기간 30년이 경과한 대부분의 원전이 계속운전을 추진할 것으로 예상(탈원전을 선언한 독일 제외)

Figure 56 | Age Distribution of the EU28 Reactor Fleet

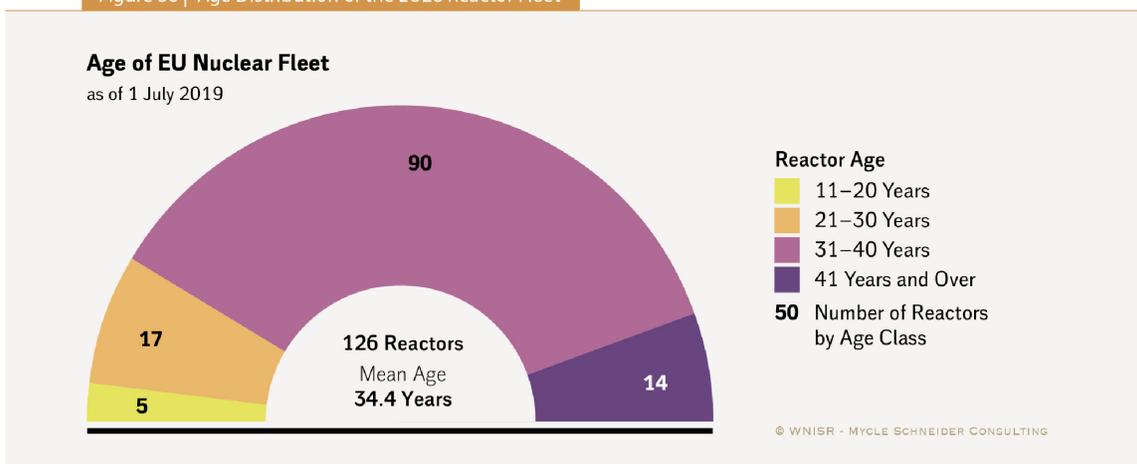
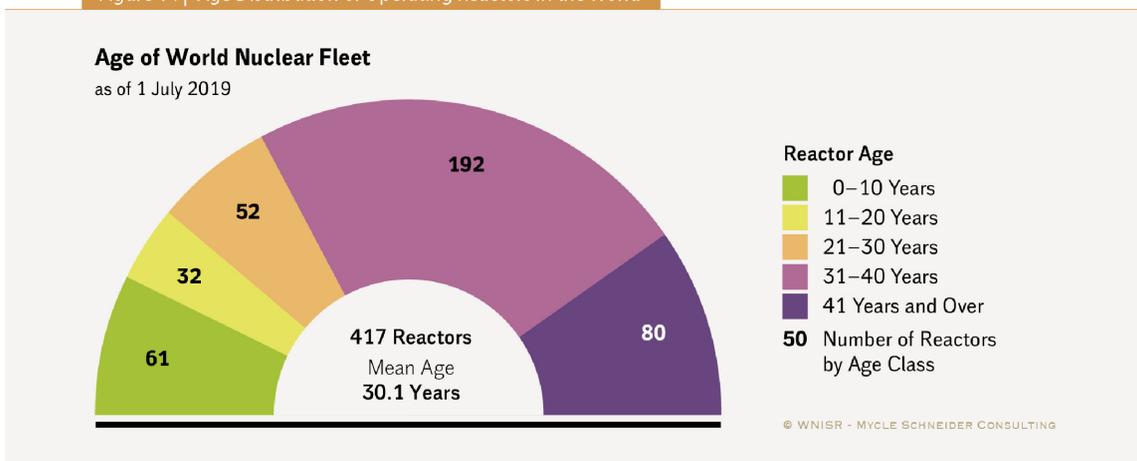


Figure 14 | Age Distribution of Operating Reactors in the World



(자료: The World Nuclear Industry Status Report 2019 - www.worldnuclearreport.org)

- 세계에서 100기 이상의 원자로가 40년 이상 운전하고 있으며, 세계 원자로의 30% 이상이 최초 설계수명을 경과해 운전 중임²²⁾
 - 탄소중립에 가장 효과적으로 기여할 수 있는 방안으로 평가

22) OECD/NEA (2021), Long-Term Operation of Nuclear Power Plants and Decarbonisation Strategies.

나. 우리나라의 가동원전 계속운전 현황

- 우리나라의 가동원전 계속운전 제도는 미국의 인허가갱신(LR) 제도와 유럽의 주기적 안전성평가(PSR) 제도가 혼재되어 있음
 - 모든 가동원전에 대해 매 10년마다 주기적안전성평가 수행
 - IAEA 안전지침²³⁾에 기반하여 14개 항목에 대한 평가 수행
 - ※ 안전성 평가 후 필요하면 안전성 개선조치 요구
 - 설계수명에 도달하는 원전에 대해서는 다음 사항을 추가하여 평가하여 허가만료 2~5년 전에 계속운전을 신청하고, 규제기관은 심사 후 10년 단위로 계속운전 허용
 - 계속운전 기간을 고려한 주요 기기에 대한 수명평가: 계속운전 기간 동안 주요 구조물·계통 및 기기의 기능이 확보되어 있는지를 확인
 - 운영허가 이후 변화된 방사선 환경영향 평가: 계속운전이 환경에 미치는 방사선 영향을 평가
- 계속운전 제도의 운영 과정에서 다음을 포함하여 다양한 개선방안이 제시되어 왔음
 - 허가기간 2~5년 전에 계속운전을 신청함으로써 인허가 심사와 안전개선조치에 충분한 시간을 확보하기 어려운 문제
 - 미국과 유사한 수준의 수명평가를 함에도 불구하고 10년 단위의 연장만 허용되는데 따른 적극적인 안전 투자 동기 약화
 - 허용기준 등에 대한 정확한 정의 필요성
- 정부의 에너지전환정책에 따라 최초 설계수명 또는 허가기간에 도달한 원전의 계속운전은 정책적으로 추진하지 않고 있음
 - 국내 원전 중 10기의 최초 설계수명(운영허가 기간)이 2030년 이전 만료
 - ※ 고리 2·3·4호기, 한빛 1·2호기, 한울 1·2호기, 월성 2·3·4호기 등 총 8.45GW 용량
 - 동일량 발전을 위해 태양광은 45GW, 육상풍력은 29GW 수준의 시설 확충 필요

다. 가동원전 계속운전 제도의 운용 방향

- 원전의 설계수명(인허가 기간)은 안전성이 저하되는 시점을 나타내는 것이 아니므로 엄격한 안전성 확인 후 계속운전을 허용하는 것이 합리적임
 - 대부분의 원전 보유국은 실제 원전 조건과 최신 지식을 고려해 안전성과 경제성을 평가한 후 계속운전을 허용
 - ※ 탈원전 국가인 스위스와 벨기에도 최초 허가기간을 초과하여 운전을 운영하며, 스위스의 Beznau 1호기는 1969년부터, 벨기에의 Doel 1호기는 1974년부터 운영 중

23) IAEA (2012), Periodic Safety Review for Nuclear Power Plants, IAEA Safety Standards Series No. SSG-25

- OECD/NEA의 최근 보고서²⁴⁾에서는 원자력발전은 연간 최대 29억 톤의 CO₂ 배출 (현재 CO₂ 총 배출 수준의 약 10%)을 억제할 수 있으며, 이 중 약 12억 톤의 CO₂ 배출 억제는 가동원전의 계속운전에 의해 달성할 것으로 기대
- 안전성이 확인되는 가동원전의 계속운전을 추진하여 탄소중립을 위한 효과적 수단으로 이용하는 것이 바람직함
 - 운영허가 기간이 만료되는 원전 10기(시설용량 8.45GW)를 모두 운영한다면, 연간 석탄 대비 약 5,000만톤, 천연가스 대비 약 3,000만톤의 온실가스 배출량을 저감(85% 이용률 가정, CO₂ 환산값)
 - 석탄발전 대비 온실가스 배출량 감축분은 '30년 총 배출량 목표의 11.5%, 발전부문 배출량 목표의 33.5%에 해당
- 안전한 계속운전을 담보할 수 있는 안전규제체계의 정비가 필요함
 - 미국식 인허가갱신 제도와 유럽식 주기적안전성평가 제도가 혼재된 형태인 계속운전 규제체계를 합리적으로 정비
 - ※ 실질적인 안전성 확보를 위한 실효성 있는 제도 도입(예: 20년 단위로 허가기간을 연장하고, 수명만료 15~10년 전에 계속운전을 신청하여 안전성 개선조치 기간 확보)
 - 정책적 불확실성을 제거하여 장기에 걸쳐 주요 기기의 공급망 유지와 인재 및 기술을 확보할 수 있도록 가동원전 계속운전에 대한 법적·정책적 장치 마련

24) OECD/NEA (2021), Legal Frameworks for Long-Term Operation of Nuclear Power Reactors.

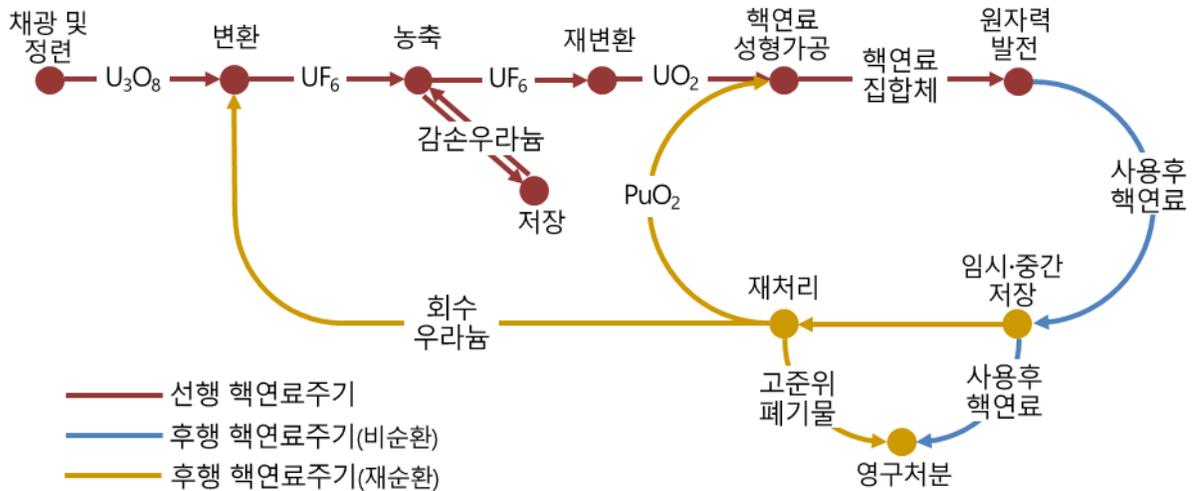
(부록 6) 사용후핵연료 안전 관리

가. 사용후핵연료 관리 국제 동향

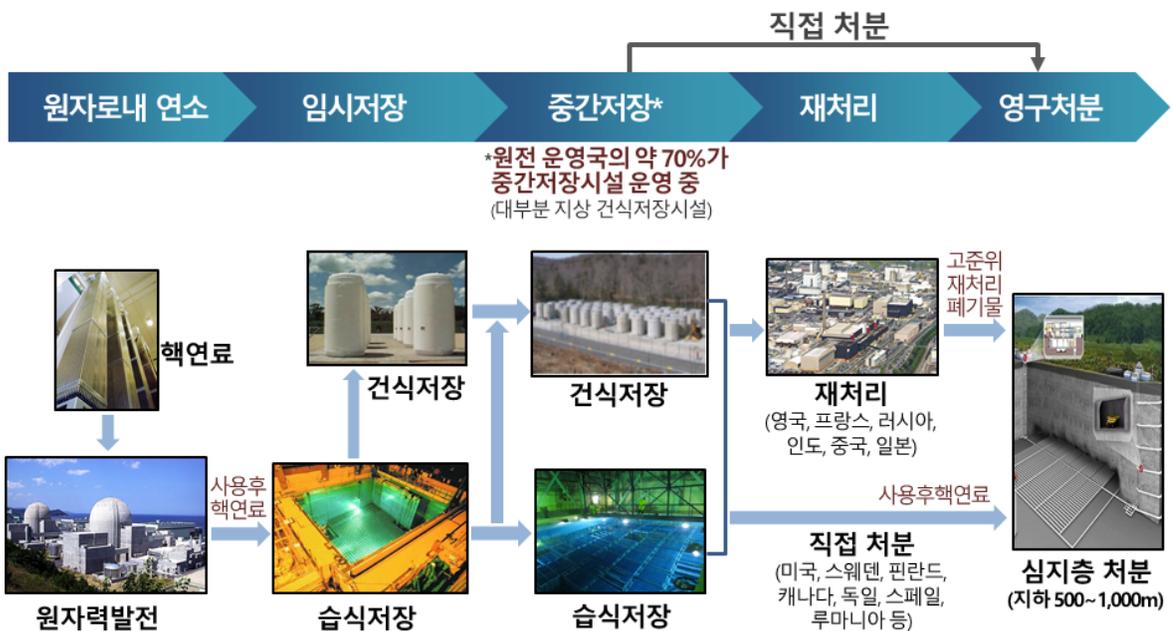
□ 사용후핵연료의 발생과 관리

- 사용후핵연료는 원자로 안에서 핵분열반응으로 에너지를 생산한 후(이를 '연소'라 함) 반출되어 나온 핵연료를 말하며, 고준위 방사성폐기물로 취급하여 직접 처분하거나(열린/비순환 핵연료주기), 재처리하여 유용한 핵연료 물질은 재사용하고 남은 고준위폐기물을 처분함(닫힌/재순환 핵연료주기)

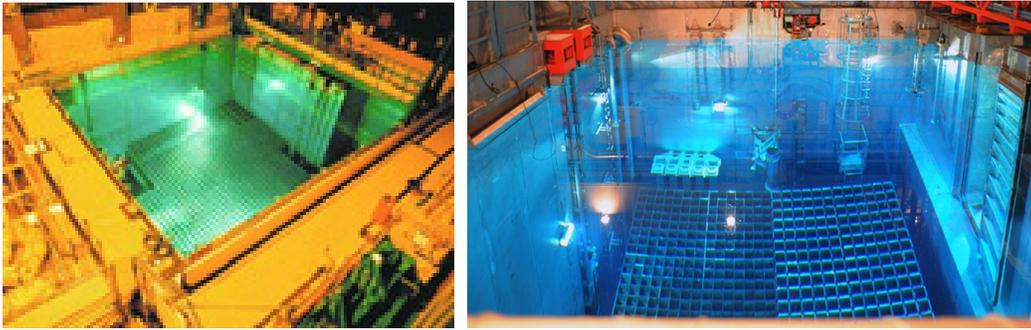
- 경수로형 원전의 핵연료주기



- 사용후핵연료의 발생, 저장 및 처분



- 사용후핵연료 습식 저장시설: 물 속에 저장



- 사용후핵연료 건식 저장시설: 공기로 냉각



○ 사용후핵연료 관리정책은 국가에 따라 크게 다르며, 최근 핀란드, 스웨덴, 프랑스 등은 심지층처분(Deep Geological Disposal)에 큰 진전을 보임

- 사용후핵연료 관리정책 구분 및 해당 국가

구분	해당 국가
직접처분 (10개국)	• 미국, 핀란드, 스웨덴, 스위스, 스페인, 캐나다, 독일, 루마니아, 슬로바키아, 대만
재처리 후 처분 (6개국)	• 프랑스, 일본, 러시아, 인도, 중국, 영국 (일본을 제외한 5개국은 핵무기보유국)
정책결정 유보 (18개국)	• 벨기에, 체코, 남아공, 한국 , 아르헨티나, 아르메니아, 브라질, 불가리아, 헝가리, 이란, 이탈리아, 카자흐스탄, 리투아니아, 멕시코, 네덜란드, 파키스탄, 슬로베니아, 우크라이나

- 주요국의 사용후핵연료 관리정책

국 가	사용후핵연료 관리정책
미 국	<ul style="list-style-type: none"> ○ 정책: 직접처분 <ul style="list-style-type: none"> - 유카마운틴 고준위폐기물 처분장 건설 중단 - 블루리본위원회 권고사항을 바탕으로 국가전략 발표('13.1) ○ 소내/소외 독립저장시설 운영(건설)
영 국	<ul style="list-style-type: none"> ○ 정책: 재처리 <ul style="list-style-type: none"> - 셀라필드 재처리시설 운영 ○ 재처리 시설 및 Wylfa 원전(건설) 내에서 중간저장
프랑스	<ul style="list-style-type: none"> ○ 정책: 재처리 <ul style="list-style-type: none"> - 라하그 재처리 시설 내에서 중간저장
스웨덴	<ul style="list-style-type: none"> ○ 정책: 직접처분 <ul style="list-style-type: none"> - 처분장 부지(포스마크) 확보 ○ 소외 중앙집중 중간저장시설(CLAB) 운영
핀란드	<ul style="list-style-type: none"> ○ 정책 : 직접처분 (지하 500 m) <ul style="list-style-type: none"> - 처분장 부지(올킬루오토) 확보 및 건설허가 취득('15.11) ○ 습식저장시설 운영(원전부지 내 독립시설)
일 본	<ul style="list-style-type: none"> ○ 정책: 재처리 <ul style="list-style-type: none"> - 위탁(프랑스/영국) 및 자체 재처리(도카이 무라/로카쇼 무라) 병행 - 재처리 초과분 소내 건식저장 ○ 소외 중간저장시설 운영(무츠)
스위스	<ul style="list-style-type: none"> ○ 정책: 직접처분('06.7월 프랑스/영국 위탁 재처리 중단) <ul style="list-style-type: none"> - 재처리 영구금지('18년 1월) ○ 소외 중간저장시설 운영(ZWILAG)
독 일	<ul style="list-style-type: none"> ○ 정책: 직접처분('05.7월 프랑스/영국 위탁 재처리 중단) ○ 소외 중간저장시설 운영(Ahaus, Gorleben, Greifswald 등)
벨기에	<ul style="list-style-type: none"> ○ 정책: 미정('01년, 프랑스 위탁 재처리 중단) <ul style="list-style-type: none"> - 관리정책 재결정시까지 50년 이상 장기저장(소내) 전망
캐나다	<ul style="list-style-type: none"> ○ 정책: 직접처분(지하 500~1,000 m, 재활용 가능옵션 포함) ○ 소내 별도 건식저장시설 운영
스페인	<ul style="list-style-type: none"> ○ 정책: 직접처분 ○ 소내/소외 건식저장 병행
러시아	<ul style="list-style-type: none"> ○ 정책: 재처리/직접처분(원자로형별 상이) ○ 재처리시설 내 중간저장 및 집중식 중간저장시설(MCC) 운영

- 사용후핵연료 또는 재처리 후 고준위폐기물의 영구처분장 확보가 지연됨에 따라, 원전 운영 주요국은 발전소내 또는 외부에 저장시설을 구축하여 운영

구 분	국 가	시 설 명	운 영 기 간	비 고
소외 (집중식)	일 본	무츠 중간저장시설	50년	
	스페인	ATC 중간저장시설	60년	건설 중
	스웨덴	CLAB 중간저장시설	60년	연료는 40년 저장 후 최종처분장으로 이송
	독 일	Ahaus 중간저장시설	40년	
소내	미 국	소내 독립저장시설	40년	최장 40년 추가연장 가능(인허가 갱신) ¹⁾
	캐나다	소내 건식저장시설	50년	

※ 미국 원자력규제위원회는 사용후핵연료를 최소 120여 년간 안전하게 저장할 수 있다고 밝히고 있으며, 300년 정도 장기저장 기술을 개발 중임

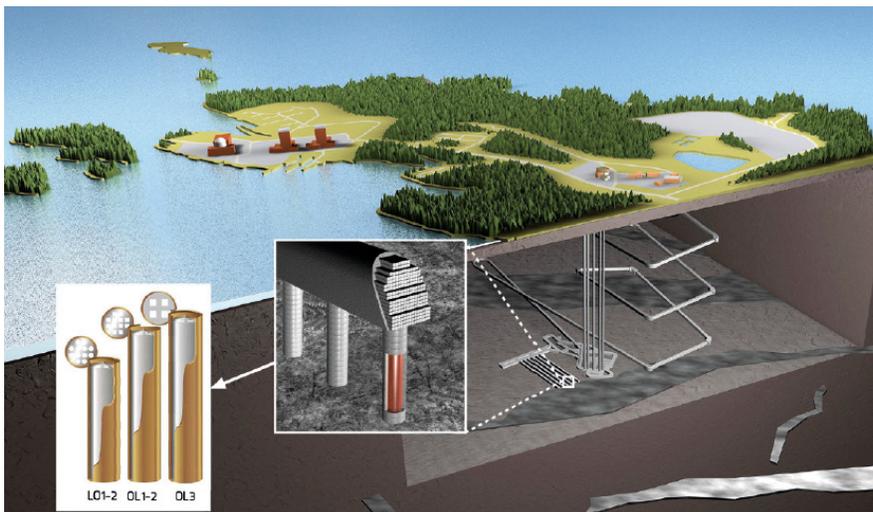
□ 사용후핵연료의 영구처분 추진 현황

- 미국, 스웨덴, 핀란드, 스위스, 프랑스, 일본 등은 사용후핵연료(또는 재처리 고준위폐기물)의 영구처분장 확보에 장기간 노력했으며, 핀란드 심층처분시설은 완공 단계임

국가명	타당성연구 및 부지조사 착수	부지 선정	URL 건설착수	건설허가 신청	건설허가 발급	건설허가 신청까지의 기간(년)	건설 착수	운영 예정기간 (년)
핀란드	1983	2000	2004	2012	2015	29	2016	100
프랑스	1991	1998	2000	(2021)		30	(2022)	100
스웨덴	1976	2009	1990 (Aspo)	2011		34	(‘20년대 초반)	45
미 국 Yucca	1882	1987	1993 (탐색연구시설)	2008		28	(2048)	100
중 국	1985	2018	2020			50	(2041)	
캐나다	1978	(2023)	1982 (AECL)	(2028)	(2032)	46		> 40
독 일	1965	(2031)	1986 (Gorleben)					
스위스	1978	(2022)	1984(Grimmel) 1996(Mont Terri)	(2024)	(2031)			~30
일 본	1976	(2027)	2002					~50

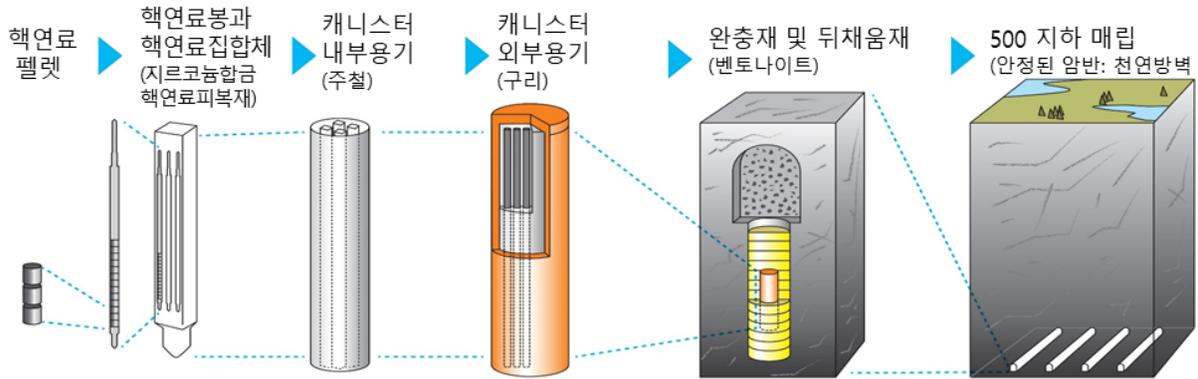
주) 괄호 안의 연도는 예정년도임

- 핀란드의 ONKALO 심층처분장(사용후핵연료 직접 처분)은 건설 완료 단계로서, 조만간 운영허가를 신청하고, 2020년대 중반에 운영을 개시할 계획
- 스웨덴의 Forsmark 심층처분장(사용후핵연료 직접 처분)은 2011년 건설허가를 신청하여 현재 심사 완료 단계
- 프랑스는 고준위 재처리폐기물과 중준위폐기물에 대한 심층처분장 개념을 수립하고, 광범위한 공청회를 거친 후 상세설계 마무리 단계



〈핀란드 Olkiluoto 원전 인근의 ONKALO 처분장[POVISA 웹사이트]〉

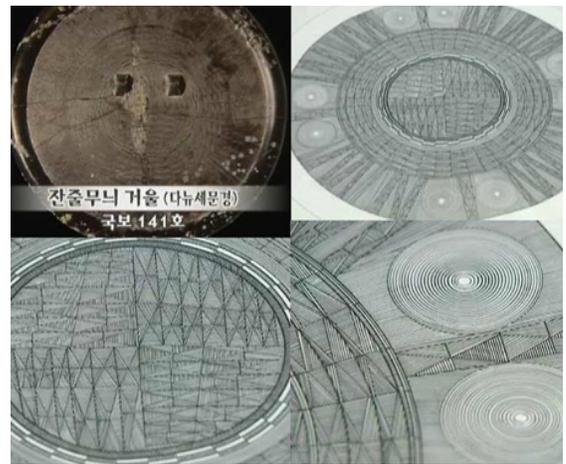
○ 사용후핵연료 또는 고준위폐기물 심지층처분시설은 다중방벽을 통해 안전성을 확보함



- 구리 용기는 부식에 매우 강하며, 고조선 유물인 다뉴세문경에서도 확인



KBS-3 처분용기



고조선 유물 다뉴세문경

나. 우리나라의 사용후핵연료 관리 현황

□ 현황 및 문제점

- 2020년 말까지 경수로형 원전에서 20,053다발, 중수로형 원전에서 474,176다발, 연구용 원자로에서 514다발의 사용후핵연료가 누적 발생함
 - 경수로 사용후핵연료는 모두 발전소 내 습식저장수조(물로 냉각)에 저장 중이고, 중수로의 경우 습식 저장수조(물로 냉각하는 '사용후핵연료저장조')와 건식저장시설(공기 냉각)에 저장 중
 - ※ 8다발(고리 7다발·한울 1다발)은 한국원자력연구원에 연구목적으로 보관 중
 - 일부 원전의 사용후핵연료 임시저장시설은 저장용량 포화상태가 임박하며, 월성원전 (2022년 초)부터 시작하여 순차적으로 포화될 것으로 전망됨

〈시설별 사용후핵연료 저장량 및 포화율(2020년 말 기준)〉

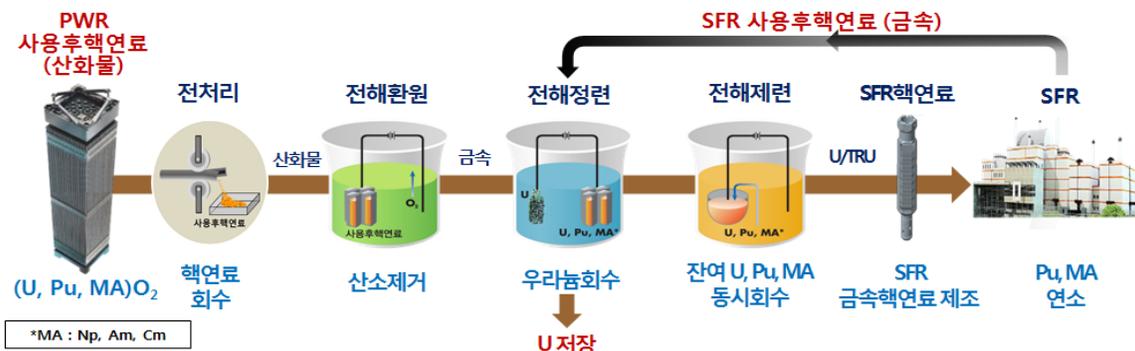
시 설	저장용량(다발)	저장량(다발)	포화율(%)
고 리	8,038	6,599	82.1
새 울	1,560	296	18.9
한 빛	9,017	6,566	72.8
한 울	7,066	6,072	85.9
신월성	1,046	520	49.7
월 성	489,952	474,176	96.7
하나로	1,032	512	49.6

- 2016년 고준위방사성폐기물관리 기본계획에서는 경수로형 약 59,000다발, 중수로형 약 664,000다발의 사용후핵연료가 누적 발생할 것으로 전망했으나, 국가 정책 변화에 따라 발생량이 감소할 것으로 예상
 - 제7차 전력수급기본계획에 따른 원전 36기(경수로형 32기, 중수로형 4기)를 기준으로 최초 설정된 가동연한까지만 운영하는 것으로 가정
 - 현 정부에서 수립·시행된 제9차 전력수급기본계획(2020~2034)에 포함된 원전 28기(경수로형 25기, 중수로형 3기)를 기준으로 재산정할 경우 약 25% 감소 예상
 - 중수로형 월성원전은 '19년 임시저장시설 포화를 예상했으나, 2022년에 포화에 이를 것으로 예상('20년 말 포화율 96.7%)
- 2022년 월성원전을 시작으로 한빛·고리원전, 한울원전, 신월성원전 순으로 소내 임시 저장시설 포화가 예상되나, 월성원전을 제외하고는 구체적 대책이 수립되지 않음
 - 월성원전에는 건식저장시설(맥스터)이 추가 건설 중이며 2022년 초 준공 예정
- 국내 사용후핵연료 관리정책은 관망정책(Wait and See)으로 현재까지 최종 관리정책은 결정이 유보된 상태임
 - 2013년 구성된 사용후핵연료 공론화위원회(2013.10~2015.6)에서는 2051년까지 처분 시설을 운영을 목표로 부지를 조속히 선정하고 2030년 실증연구 착수를 권고
 - 공론화위원회 권고안을 바탕으로 고준위방사성폐기물관리 기본계획 수립(2016.7)
 - ※ 부지확보에 12년, 실증연구에 14년, 처분시설 건설 10년을 고려(2050년대 처분장 운영)
 - 2019년 사용후핵연료 관리정책 재검토위원회 운영(2019.5~2021.3)
 - ※ 2015년 공론화 이후 국민들의 인식변화를 반영하여 ①관리원칙, ②정책결정체계, ③처분/중간저장 시설 확보, ④부지선정절차, ⑤지역 지원원칙, ⑥임시저장시설 확충, ⑦사용후핵연료 발생/포화전망, ⑧기술개발에 대해 권고안을 정부에 제출('21.3월)
 - ※ 방사성폐기물 관리법 제6조에 따라 2차 기본계획 수립 예정
 - 고준위방사성폐기물관리 방안에 관한 발의(2021.9.15)

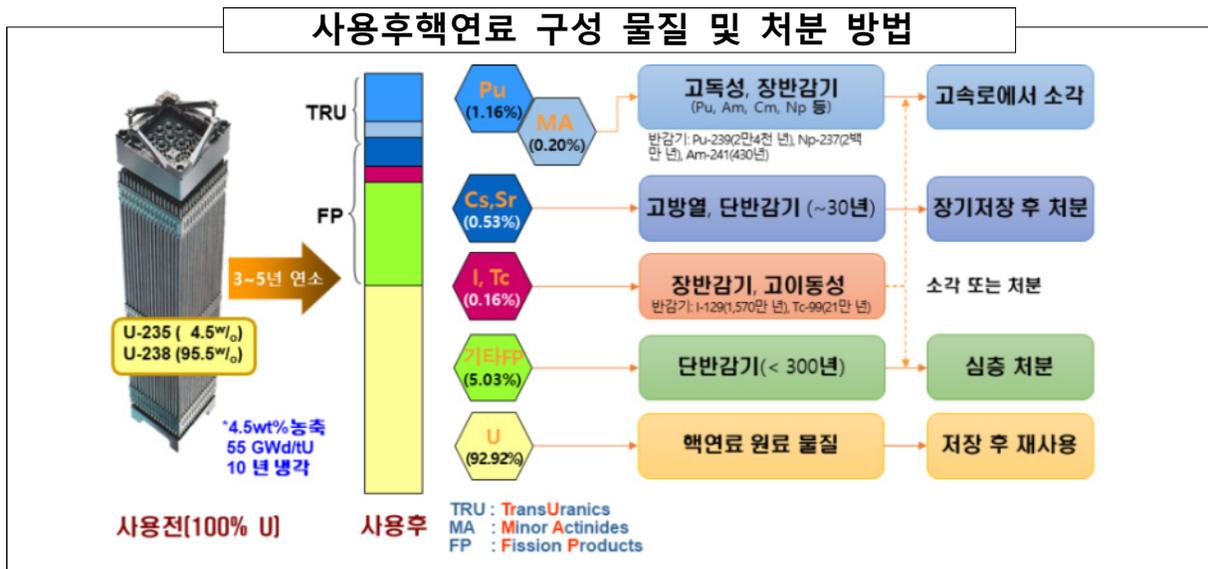
- 사용후핵연료의 안전관리는 물론 가동 원전의 안전 운영을 위해서도 중간저장시설과 영구처분시설 등의 건설은 피할 수 없는 과제이나, 정책 일관성과 사업추진을 위한 제도적 준비가 이루어지지 못하고 있음

□ 사용후핵연료 처리(파이로프로세싱) 기술

- 사용후핵연료 임시저장 및 직접처분장 확보 방안 모색과 아울러 처분대상 폐기물의 양과 독성을 줄여서 최종처분의 부담을 경감하는 대안기술(파이로기술)을 개발해옴
- 사용후핵연료에 포함된 우라늄(U)과 초우라늄(TRU*) 원소 등을 파이로 기술로 회수하여 소듐냉각고속로(SFR) 연료로 재순환하기 위한 기술을 개발 중임
- * 초우라늄원소(TRU): 플루토늄(Pu) + 마이너액티나이드(Np, Am, Cm)의 통칭



- 파이로는 고온(500~650℃)의 용융염(LiCl-KCl 등)에서 사용후핵연료에 포함된 다양한 핵물질을 전기화학적 방법으로 특성 별로 분리·회수하는 기술임
- 국내에서는 사용후핵연료에 포함된 핵물질을 특성에 맞게 분리하여 보다 안전하고 효율적으로 관리하기 위한 목적으로 기술 개발 중
- ※ 초우라늄원소와 같은 고독성·장반감기 핵종은 고속로에서 소각, 세슘(Cs)과 스트론튬(Sr)과 같은 고방열, 단반감기 핵종은 장기저장 후 처분 등



□ 국가 정책 방향

- 사용후핵연료 관리에 대한 구체적인 일정과 이행 절차 등이 포함된 여야 합의의 법제화를 통해 정부의 일관성 있는 정책 추진 및 이행이 필요함
 - 최종처분장 등의 부지조사, 주민투표, 지역지원, 기술개발 등은 20여 년이 소요되는 장기 프로세스이므로, 사용후핵연료 관리를 책임지고 전담하는 정부조직에서 일관성 있는 정책 추진 필요
 - ※ 핀란드는 1983년 부지 선정에 착수하여 2001년 올킬루오토 부지 최종 선정(현재 지하 450 m 암반에 위치하는 심지층 최종처분장 건설 완료 단계이며, 2025년경 운영 개시 예상)
 - ※ 스웨덴은 1992년 부지 선정에 착수하여 2009년 포스마크 부지를 최종 선정(현재 건설허가 심사 중)
 - 사용후핵연료의 저장 및 처분 시설에 대한 지역 주민의 동의를 확보하기 위한 정부의 적극적인 의지와 실행력 필요
 - 원전 부지의 사용후핵연료 저장시설은 10년 이내에 포화될 전망이므로, 부지 내 임시 저장시설 적기 확보 필요
 - ※ 국내 고준위 방사성폐기물 영구처분시설의 운영은 '50년대 중반 이후로 예상되기에, 그 전에 해외의 원전에서 성공적으로 운영 중인 부지 내 임시저장시설의 확보 필요
- 방사성 독성을 감소시켜서 사용후핵연료 처분의 부담을 경감시킬 수 있는 사용후핵연료 처리기술(파이로기술)에 대한 연구 지원이 필요함
 - 기술발전과 환경변화에 따라 미래에 정부와 국민이 최적의 사용후핵연료 관리방안을 선택할 수 있도록 기술적 대안 제공
 - 사용후핵연료에는 다시 활용할 수 있는 우라늄 등의 핵물질이 약 95% 잔존: 사용후 핵연료 처리기술은 에너지 안보 측면에서 원자력 전주기를 완성할 수 있는 핵심기술

[참고] 프랑스 방사성폐기물관리특별법(일명: Bataille 법, 1991~2006)

- 사용후핵연료 재처리/재순환 정책에 따라 재처리 과정에서 발생하는 방폐물의 처분이 필요, 1973년에 처분부지 조사 착수
 - 지역주민 반발로 부지조사 활동이 중단되자 Bataille(바타유) 의원 주도로 사용후핵연료 관리방안 연구에 대한 법률제정(1991.12)
 - 관리 기반기술에 대한 연구개발 결과를 지속적으로 평가하여, 평가 결과를 매년 의회에 제출하여 공개하고 국민수용성 확보

〈Bataille법 주요 내용〉

- 정부는 다음 3가지 관리기반 기술에 대한 집중연구를 수행하고, 연구 결과를 토대로 처분장 건설 여부를 결정한다.
 - ① 사용후핵연료로부터 장반감기 핵종의 분리 및 소멸, ② 지하연구시설 실험을 통한 심지층처분 타당성, ③ 고준위폐기물의 초장기 저장
- 심지층처분 연구를 위한 지하연구시설(Underground Research Laboratory; URL) 설치

(부록 7) 소형모듈원자로(SMR) 개발 현황 및 전망

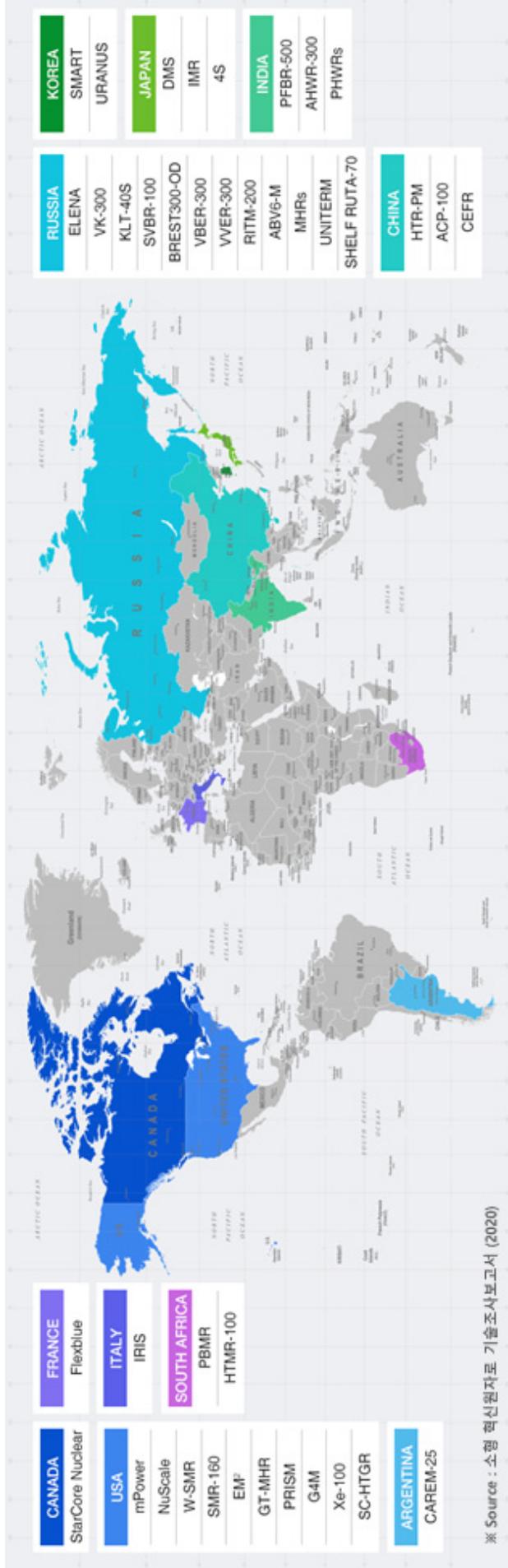
가. 소형모듈원자로 개발 동향

□ 소형모듈원자로란?

- 소형모듈원자로(SMR: Small Modular Reactor)는 공장에서 하나의 모듈로 제작하여 원자로 부지로 수송하여 바로 설치할 수 있는 출력 300MWe 이하의 원자로를 가리킴
 - Small: 전기출력 300MWe 이하
 - ※ 20MWe 이하는 초소형원자로(Micro-reactor)로 다시 구분
 - Modular: 공장에서 동일한 원자로 모듈을 반복 제작
 - ※ 보통 하나의 용기 안에 원자로를 비롯한 주요 기기를 모두 배치하여 소형화·단순화
 - 소형모듈원전은 1기 단독 또는 10여 기까지의 소형모듈원자로로 구성
- SMR에 대해 일반적으로 기대되는 장점은 다음과 같음
 - 저출력과 고유·피동 안전성으로 중대사고를 제거하거나 사고 시 영향을 극소화
 - ※ 피동(Passive) 안전성: 교류전력이 필요한 펌프나 밸브 없이 안전기능 달성
 - 공장에서 원자로 모듈을 반복 제작하여 경제성과 품질을 획기적으로 제고
 - 원자로 모듈 1기의 단독 건설부터 10여기의 중·대용량 구성까지 다양한 출력의 전기 또는 열 공급 가능
 - 분산형 전원, 화력발전 대체, 극지·원격지·이동식 전원, 전력망이 작은 개도국 건설 등 다양한 이용환경에 대응 용이
 - 부하추종 운전능력을 갖추어 재생에너지의 간헐성을 보완하는데 유리
 - 원자로 모듈의 지하·수중 배치를 통해 자연재해(지진, 쓰나미 등)나 인공적 위해(항공기 충돌, 미사일 공격 등)에 대한 방호능력 강화 가능
 - 높은 안전성과 자율운전 기능으로 극지/오지에서 소수 인력으로 운전 가능성
 - 안정적인 전기 및 열공급(수소 생산, 해수담수화)이 가능하고, 육상용 원전 및 열공급원, 해상부유식 원전, 선박용원자로 등으로 다양한 활용 가능
 - 핵연료 농축도를 15~20% 수준으로 높이면 핵연료 교체 없이 10년 이상 운전

□ SMR 개발 현황 및 시장 전망

- 전 세계적인 SMR 개발 현황과 시장 전망을 다음 그림에 요약함

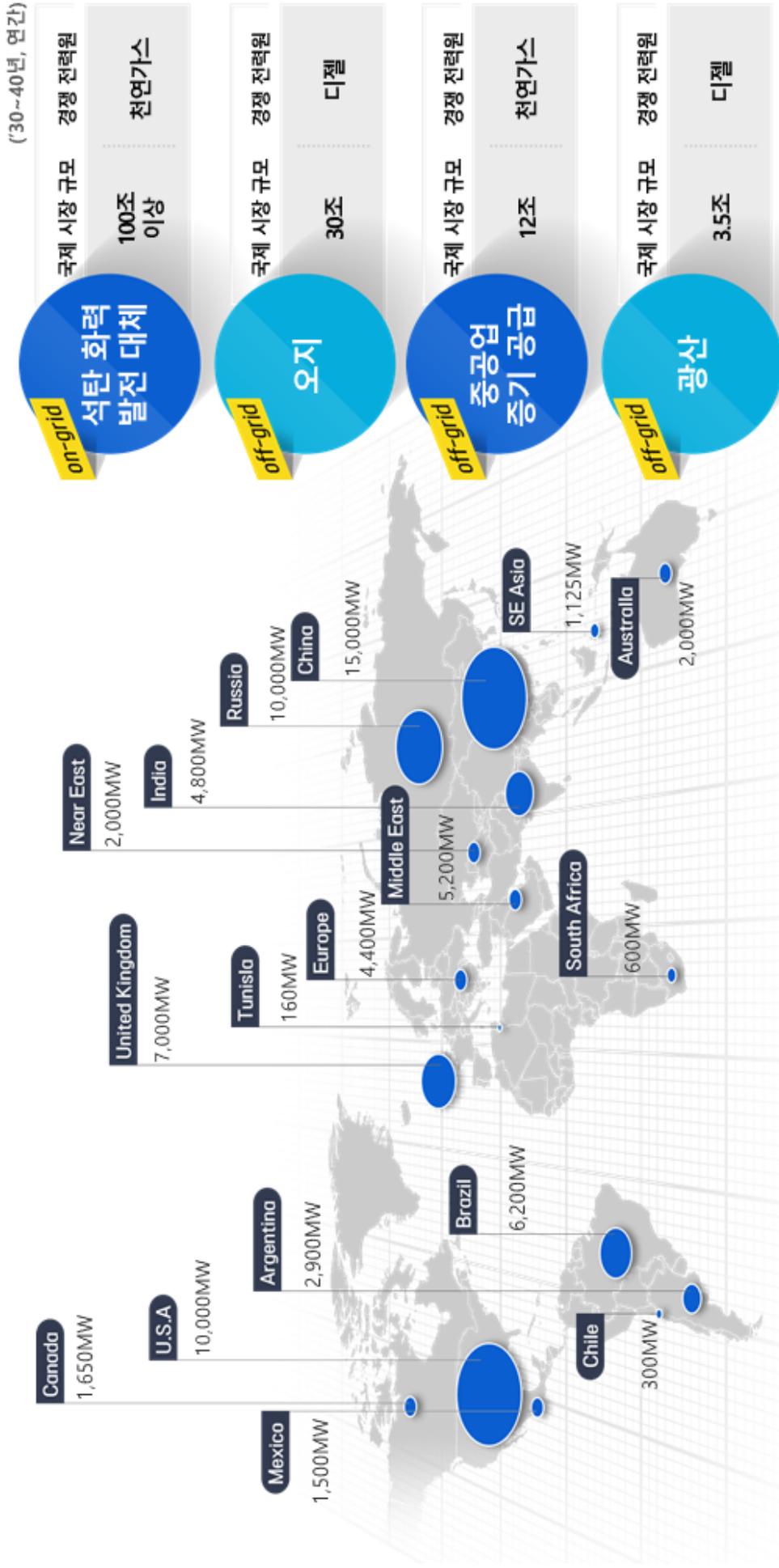


국내 SMR 개발

SMART KAERI '12년 7월 표준설계 인가	BANDI-60S 한진기술(주) 해수담수화 개념설계 단계	URANUS UNIST 부유식 개념설계 단계	REX-10 서울대 토륨 & 자연순환 개념설계 단계	ATOM KAIST sCO ₂ 발전 사이클 개념설계 단계	NuScale 자연순환 개념 '20년 8월 표준설계인가	W-SMR In-Vessel CROM 피동안전계통 개념 개념설계 단계	CAREM In-Vessel CROM 무봉산&나선형SG '22년 건설완료 예정	mPower 무봉산 직관형 SG '17년 개발 중단	KLT-40S 블록형 부유식 상업운전	ACP100 원전부지 선정 '25년 준공 계획
---	---	--	---	---	---	---	--	--	--------------------------------------	---

<세계의 SMR 개발 현황>

['35년 까지 전 세계 65~85GW 규모의 SMR 시장 형성 전망]



※ Source : Small Modular Reactors - once in a lifetime opportunity for the UK (2017)

<SMR 세계 시장 전망>

- 미·러·중·캐·한·프 등에서 전 세계적으로 SMR에 대한 개발 활동이 급증하고 일부 원자로에 대한 건설계획이 구체화되고 있음
 - 경수로, 고온가스로, 액체금속로, 용융염원자로 등 다양한 노형이 개발 중
 - ※ 최근 IAEA 보고서²⁵⁾에 70여 종의 SMR 설계 포함
 - 미국, 영국, 캐나다 등에서는 정부의 적극적 지원 하에 다수의 민간기업(전통적 원전기업, 스타트업, 벤처캐피탈)이 SMR 개발에 능동적으로 참여
 - 미국의 NuScale(경수로), Natrium(액체금속로), XE-100(헬륨가스로) 등이 건설 준비 중일 뿐만 아니라(2020년대 말 가동 예상), 러시아의 부유식 원자로인 KLT-40S는 이미 상업 운전 중이고, 중국에서도 HTR-PM과 ACP100 건설 중

□ 국내외 비경수형 SMR 연구현황

- 주요 원자력 선진국들은 경수형 SMR뿐만 아니라, 아래와 같이 다양한 목적의 비경수형 SMR을 개발하고 있음
 - SFR(소듐냉각고속로): 액체금속인 소듐을 냉각재로 하는 고속로로 사용후핵연료 방사능 저감과 핵연료 효율적 이용을 위해 개발
 - LFR(납냉각고속로): 액체금속인 납이나 납-비스무스 합금을 냉각재로 하는 고속로로 SFR과 마찬가지로 사용후핵연료 방사능 저감과 핵연료 효율적 이용을 위해 개발
 - GFR(가스냉각고속로): 헬륨 기체를 냉각재로 하는 고속로로 사용후핵연료 방사능 저감과 핵연료 효율적 이용을 위해 개발. 고온 수소생산 및 공정열 공급에도 활용 가능
 - VHTR(초고온가스로): 피복입자핵연료, 흑연 감속재 및 반사체, 헬륨 냉각재를 활용하는 원자로로, 높은 노심온도로 고효율 수소 생산, 산업용 증기 및 공정열에 유용
 - MSR(용융염원자로): 용융염(Molten Salt)을 냉각재로 활용하는 원자로로, 고속로로 설계 될 경우 고준위폐기물 저감에 활용될 수 있고, 토륨 핵주기는 경제성 및 핵비확산성 측면에서 많은 장점 보유
 - HPR(히트파이프원자로): 펌프나 배관 대신 히트파이프로 원자로의 열을 전력변환계통으로 이송시키는 원자로로, 우주 탐사 등의 특수 목적용 초소형원자로로 개발
- 비경수형 SMR은 고효율 수소 생산, 공정열 공급, 우주-극지 등 비전력망지역 전력 생산, 사용후 핵연료 방사능 저감 등 경수형 SMR보다 더 다양한 목적으로 활용될 수 있는 원자로임
 - 캐나다는 GFR을 제외하고 위에 언급된 대부분의 노형에 대한 실증과제 협력을 주정부 별로 수행

25) IAEA (2020), Advances in Small Modular Reactor Technology.

- 국내외 비경수로형 SMR 개발 현황을 다음 표에 요약
〈비경수로형 SMR 개발 동향〉

노형	한국	미국 및 캐나다	러시아	중국	유럽	기타
SFR	<ul style="list-style-type: none"> KAERI 주도 실증로 공학설계 완료 	<ul style="list-style-type: none"> 테라파워의 실증로 개발 착수 (~'28) ARC의 ARC-100 실증로 개념 설계 	<ul style="list-style-type: none"> 실험로 BOR-60 운영 및 MBIR 건설 실증로 운영 및 상용로 건설 계획 	<ul style="list-style-type: none"> '11년 러시아 기술 도입으로 실험로 운영 '23년 완료 목표로 실증로 CFR-600 건설 중 	<ul style="list-style-type: none"> (프랑스) 원형실증로 개발 계획 수립 	<ul style="list-style-type: none"> (일본) Monju 원형로 폐로 후 신규 고속로 계획 중 (인도) '20년대 후반까지 실증로 2기 건설 계획
LFR	<ul style="list-style-type: none"> 대학에서 소규모 연구 수행 	-	<ul style="list-style-type: none"> NIKIET의 실증로 건설 허가 발급 및 '25년 완공 계획 	<ul style="list-style-type: none"> 실험로 건설 중(미임계로, '23년 예정, 100MWth) 	<ul style="list-style-type: none"> (벨기에) 실험로(미임계로) 개념설계 (EU, 스웨덴) 실험로 개념설계 	-
GFR	-	<ul style="list-style-type: none"> GA社の 실험로 개념설계 	-	-	<ul style="list-style-type: none"> (EU) 실험로 개념설계 	-
VHTR	<ul style="list-style-type: none"> KAERI 주도로 VHTR을 위한 핵심 기술 개발 	<ul style="list-style-type: none"> X-에너지의 실증로 개발 착수 (~'28) BWXT의 실증로 개념 설계 USNC의 실증로 사업(~'26) 국방부의 초소형 원자로 실증 (~'24) 	<ul style="list-style-type: none"> ROSATOM의 LNG 개질용 고온가스로 개발 	<ul style="list-style-type: none"> 실험로 수소생산 연계 준비 실증로 운전 시작 ('21) 	<ul style="list-style-type: none"> (EU) 공정열 공급용 고온가스로 실증로 개념설계 (GEMINI) 	<ul style="list-style-type: none"> (일본) 초고온실험로 HTTR 재가동 ('21~) (영국) 산업부의 고온가스로 개발 계획 발표 ('21)
MSR	<ul style="list-style-type: none"> 기반 기술 확보 시작 ('21) 	<ul style="list-style-type: none"> 실험로 개발 및 개념-기술 개발 육성 	<ul style="list-style-type: none"> 실험로 건설중('19 시작, 10MWth) 	<ul style="list-style-type: none"> '20년대 후반까지 실험로 건설 (10MWth) 	-	-
HPR	<ul style="list-style-type: none"> KAERI와 대학의 탐색 연구 착수 ('19~) 	<ul style="list-style-type: none"> 달기지 원자로 실증(~'28) 초소형원자로 건설 및 통합 인허가 신청 (~'24) 		<ul style="list-style-type: none"> 개념 개발 		

(참고) 개발 수준: 실험로 (기술 개발) < 실증로 (상용 수준 검증) < 원형로 (경제성까지 검증) < 상용로

나. 우리나라의 소형모듈원자로 개발 현황

□ SMR 개발 현황 요약

- 우리나라는 열출력 330MW인 경수로형 SMR인 SMART를 개발하여 2012년 세계 최초로 설계인가를 받은 SMR이 되었으나, 국내 건설이나 수출은 실현되지 않음

- 전력 공급과 해수 담수화 겸용으로 개발되었으며, 사우디아라비아에 건설하여 실증하기 위한 공동설계를 수행하여(사우디에서 1억 달러 투자) 현재 표준설계인가 심사 중
 - 사우디 건설계획은 본격 추진되지 못하고 있으나, 공동 연구 및 수출 노력 진행 중
 - 국내 실증로 건설이 이루어지지 않은 것이 SMART 수출에 가장 큰 제약 요소
- 국내 원전 기술을 집대성하는 혁신형 소형모듈원자로(i-SMR) 개발이 추진되고 있음
- '20년 말 원자력진흥위원회에서 향후 8년간 i-SMR 개발에 약 4,000억 원을 투입하는 계획을 확정하고, '21.9월에 이 사업에 대한 예비타당성조사 신청
 - ※ 범국가적 기술개발사업으로 산업통상자원부-과학기술정보통신부 공동 예타 신청
 - i-SMR은 일반 대형원전에 비해 중대사고 확률을 1/1,000 이하로 사실상 배제하면서도 대형원전에 비견될 수준의 경제성을 갖도록 개발 목표
 - ※ i-SMR의 안전성 목표: 노심손상빈도 $1.0 \times 10^{-9}/R \cdot Y$ 이하(일반 대형원전 $1.0 \times 10^{-5}/R \cdot Y$ 이하)
 - ※ i-SMR의 경제성 목표: 균등화발전단가 65 USD/MWh 이하 (태양광 106 USD/MWh, 2020년 우리나라 기준)
 - SMART와 비교한 i-SMR의 핵심 특성을 다음 쪽 표에서 비교

□ SMR 개발 관련 논의

- 현 탄소중립위원회의 '2050 탄소중립 시나리오 초안'에는 재생에너지의 간헐성 문제를 완벽하게 해결하고 전력망의 신뢰성을 보장해 줄 무탄소 전원인 SMR 기술 적용이 완전 배제됨
- 운영 중 탄소가 발생하지 않는 발전원은 재생에너지와 원자력밖에 없음
 - ※ IPCC '지구온난화 1.5℃ 특별보고서' 기준 전주기 탄소발생량은 가스복합발전이 490g/kWh인 반면, 원자력과 태양광은 각각 12g/kWh 및 41g/kWh 수준임
 - 태양광 및 풍력 발전의 가장 큰 단점은 기상 변화에 따라 발전출력이 수시로 변화하는 간헐성 문제
 - SMR은 가동 원자로모듈 수를 제어하거나, 소형 원자로가 갖는 고유한 출력제어 용이성으로 인해 낮에는 높은 출력으로, 밤에는 낮은 출력으로 운전할 수 있는 부하추종 운전 성능이 우수(잠수함, 항공모함 등에서 출력조절 능력 입증)
- 현행 원자력 규제체계는 대형 경수로에 맞추어져 있어, i-SMR을 비롯한 다양한 미래형 원자로들은 개발 후 인허가 취득에 불확실성이 매우 큼
- 미국의 경우 신형 원자로의 기술혁신 및 상용화 지원과 인허가 불확실성 완화 등을 위해, 초당적 협력으로 '원자력혁신역량법'(Nuclear Energy Innovation Capability Act of 2017, NEICA, 2018.9)과 '원자력혁신현대화법'(Nuclear Energy Innovation and Modernization Act, NEIMA, 2019.1) 제정

<SMART와 i-SMR의 주요 특성 비교>

계통/기기	SMART	i-SMR	기술 분류
핵연료/노심			
핵연료봉	UO ₂	UO ₂ (신형 핵연료 개발)	신기술
가연성독봉	B ₄ C, Gd ₂ O ₃	B ₄ C, Gd ₂ O ₃ (핵연료 내재형)	신기술
제어봉	B ₄ C	B ₄ C	동일기술
핵연료집합체	17×17 사각집합체	17×17 사각집합체	동일기술
제어봉구동장치	외장형	내장형	신기술
반응도 제어 봉산(액체)	사용	미사용	신기술
원자로계통			
원자로 배치	일체형원자로	일체형원자로	동일기술
원자로냉각재펌프	캔드모터펌프	캔드모터펌프(내장형)	개량기술
증기발생기	나선-관류형 증기발생기	나선-관류형 증기발생기	개량기술
가압기	증기가압기	증기가압기	동일기술
원자로용기 제작	기존 용접 방식	전자빔 용접	신기술
안전계통			
원자로비상정지	제어봉+안전주입+다양성	제어봉+반응도주입	개량기술
잔열제거계통	2차측 피동잔열제거	2차측 피동잔열제거	동일기술
안전주입계통	CMT, SIT (3일)	재순환밸브	신기술
격납용기냉각계통	IRWST 방출+열교환기	철제격납용기 표면	신기술
격납용기(물리적 방벽)	콘크리트 벽체(철제라이닝)	철제격납용기+원자로건물	신기술
제어/보호/감시/운전			
원자로보호계통	RPS	MPS/PPS	신기술
공학적인안전설비작동계통	ESFAS	MPS/PPS	신기술
원자로제어계통	RRS	MCS	개량기술
플랜트제어계통	PCS	PCS	개량기술
제어실	1 MCR/Unit	1 MCR/4 Modules	신기술
운전원 수	4인/MCR	3 /MCR	신기술
부하추종	일일 부하추종	강화된 탄력운전	개량기술
종합설계/보조계통/터빈발전기			
터빈발전기	증기 터빈발전기	증기 터빈발전기	동일기술
주증기/급수계통	랭킨 사이클	랭킨 사이클	동일기술
화학및체적제어계통	수화학/봉산/체적 제어	수화학/체적 제어(모듈화)	개량기술
전력계통	안전/비안전 계통	비안전 계통	신기술
사용후핵연료 냉각방식	수냉각	수냉각	동일기술
원자로용기 배치	1 Rx/Unit	4 Modules/Unit	신기술
순차적 모듈화 가능	불가능	가능	신기술

- ※ NEICA법 Section 3: 적용 전(pre-application) 및 적용(application)을 위한 인허가 심사 비용에 대해 비용분담보조금 제도를 만들어 인허가 비용 부담을 경감함
 - ※ NEICA법 Section 958: SMR을 포함한 첨단 원자로의 혁신기술개발연구 활동 증진을 위해 민간 SMR 개발사업자가 국립연구소와 협력하여 국립연구소 부지 및 에너지부 부지에서 실증로를 건설할 수 있도록 지원하며, 민간사업자와 NRC와의 기술 및 지식 교류를 통해 첨단원자로의 기술 및 안전성 실증에 대한 협력 및 이해를 높이도록 함
 - ※ NEIMA법 Section 103: 예측 가능하고 효율적이며 적기에 인허가 심사가 이루어질 수 있도록 원자력규제위원회(NRC)의 규제개선을 법으로 공식화함. 특히, 2027년 12월 31일 까지 원자력규제위원회는 신형원자로 인허가 신청자를 위한 신기술이 반영된 규제체계를 수립하도록 명시함
- i-SMR을 국내 탄소중립계획에서는 배제하고 수출용으로만 활용하는 것은 비합리적인
 - SMR은 부하추종 운전을 통한 재생발전의 간헐성 보완, 수소 생산, 열 공급 등 다양한 방법으로 탄소중립에 기여할 수 있음

(부록 8) 원자력에 의한 청정수소 공급

가. 수소경제 관련 국내외 동향

- (해외동향) 해외 주요국은 수소생산과정에서 탄소배출 없는 청정수소 중심의 로드맵을 발표함
 - EU 및 유럽 주요국과 호주 등은 청정수소 중심의 수소경제 전략 발표: 10년 내 청정수소 설비 규모가 약 100~200배 성장하여 20~40GW 규모의 생산 능력 확보 예상
 - EU 집행위원회는 수소전략(2020.7)을 통해 2030년까지 청정수소 수전해 설비에 420억 유로(약 57조 원) 투자 발표
 - Hydrogen Europe은 'Hydrogen 2030: The Blueprint (2020.6)'을 통해 2030년 유럽 수소로드맵 달성을 위해 4,300억 유로(약 580조 원)의 투자와 1,450억 유로(약 196조 원)의 공적지원이 필요한 것으로 분석
 - 미국 바이든 행정부는 청정에너지 계획 공약(2020.07)으로 청정수소 사용 확대와 수전해 등을 활용한 청정수소 생산 추진 계획 발표
- (국내 동향) 2019년 수소경제 활성화 로드맵을 통해 수소경제 선도국가 도약 계획을 발표했으나, 에너지 안보, 경제성 확보 및 기후변화 대처에 유리한 방안 마련이 필요함
 - 2030년 재생에너지를 활용한 청정수소 생산 잠재량은 21만 톤 수준으로, 예상되는 수요(194만 톤/년)의 10.8%에 수준에 불과하여 대부분 해외로부터 수입에 의존할 수밖에 없어 에너지 안보에 불리
 - 국내의 높은 재생에너지 발전 비용으로 청정수소 생산의 경제성 확보가 어려움
 - ※ '30년 정부의 수소 판매 가격 목표는 4,000원/kg으로 생산단가 최소화 필요
 - 2040년 공급목표량의 30%인 연간 157만 톤의 수소를 수소추출로 공급할 경우, 이산화탄소 발생량은 1,250만 톤으로 기후변화 대처에 불리

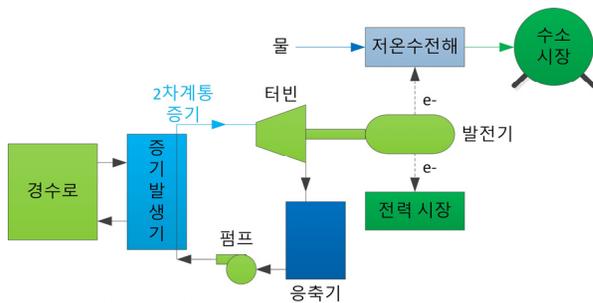
〈정부 수소경제활성화 로드맵('19)상의 수소 수요 및 공급방식〉

구 분	2018년	2022년	2030년	2040년
공급량(수요량)	13만톤/년	47만톤/년	194만톤/년	526만톤/년 이상
공급 방식	①부생수소 1% ②추출수소 99%	①부생수소 ②추출수소 ③수전해	①부생수소 ②추출수소 ③수전해 ④해외생산 ※ ①+③+④ 50% ② 50%	①부생수소 ②추출수소 ③수전해 ④해외생산 ※ ①+③+④ 70% ② 30%
수소 가격	(정책 가격)	6,000원/kg (시장화 초기가격)	4,000원/kg	3,000원/kg

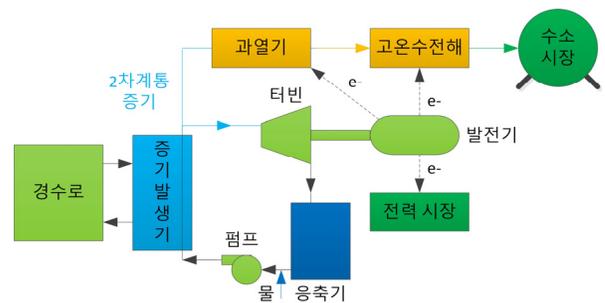
나. 원자력 이용 수소생산 기술

□ 원자력을 이용한 수소생산 기술 개요

- (경수로 이용) 원자력발전소에서 생산한 저렴한 전기를 사용하거나, 전기와 열을 함께 사용하여 수소를 생산하는 기술임
 - (저온 수전해) 100°C 이하에서 물을 전기분해 하는 방식으로 Alkaline, PEM 등의 MW급 상용화 기술 존재
 - (고온 수전해) 650°C 이상에서 고온의 수증기*를 전기분해하여 수소생산 효율을 높인 방식으로 SOEC(Solid Oxide Electrolysis) 기술이 상용화 초기 단계
- * 경수로의 열로 증기를 생산하고 이를 전기로 가열하여 650°C 이상으로 가열

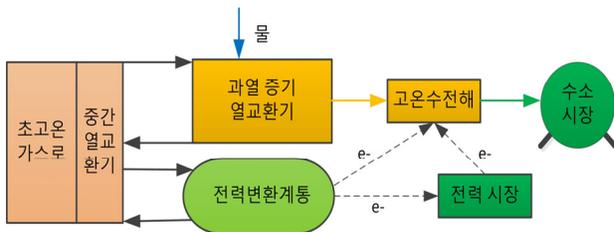


〈경수로 저온 수전해 수소 생산〉

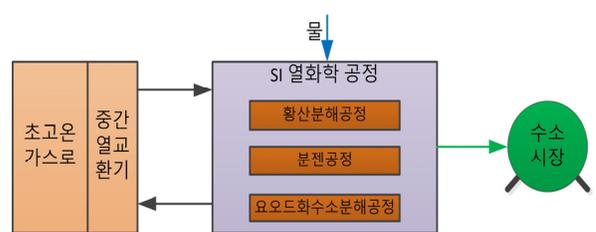


〈경수로 고온 수전해 수소 생산〉

- (초고온가스로(VHTR) 이용) 초고온가스로의 초고온열을 수소생산 공정에 사용하여 효율을 향상시키는 기술임
 - (고온 수전해) 초고온가스로가 생산한 고온증기를 고온수전해 공정에 공급하여 수전해 수소를 생산하는 방식
 - (SI 열화학공정) 황산분해공정, 요오드화수소 분해공정, 분젠공정에 이용하여 물을 열화학 분해시켜 수소를 생산하는 방법으로 초고온 에너지 필요



〈초고온가스로 고온 수전해 수소 생산〉



〈초고온가스로 SI 열화학 수소 생산〉

□ 국내외 원자력 활용 수소생산 기술개발 현황

- 고효율 수소생산이 가능한 고온가스로 위주 연구가 진행돼 왔으나, 최근 수소경제 가치화에 따라 상용원전을 활용한 경제적 수소 대량생산에 관한 연구도 활발히 진행 중임
- (미국) 단기적으로 가동원전을 이용한 수소생산 실증을 지원하고, 장기적으로는 더 경

- 제적인 수소생산에 활용할 수 있는 초고온가스로의 개발 및 실증을 추진함
- 미국 에너지부(DOE)는, Idaho National Lab 주도로 3개의 원전운영사(Xcel energy, Energy Harbor, APS)가 운영 중인 경수로 원전을 활용하여 수소생산을 실증하는 공동 연구를 지원
 - ※ DOE는 수소생산 실증을 위해 초기 자금 총 1,140만 달러 규모 지원
 - NuScale사는 Idaho National Lab.과 NuScale 원자로를 이용한 수소생산 타당성 연구를 통해 대규모 수소생산의 가능성 확인
 - X-energy는 초고온가스로를 이용한 Off-grid 지역의 수소생산 연구를 Canadian Nuclear Lab과 진행 중 (초기 80 M\$ 지원, 7년간 1.6 B\$ 투자)
 - Energy Infrastructure Act 법제화(2021.8)를 통해 수소 연구개발비 지원 예정
 - 장기적으로 수소 생산 효율 최적화를 목적으로 경수로-고온수전해와 초고온가스로를 연계하는 기술 개발
- **(프랑스)** 프랑스 정부는 70억 유로 규모의 원자력에너지를 포함한 청정수소 생산 정책을 2020년 9월에 발표하였고, 원전 운영사인 EDF는 영국의 가동원전을 이용한 수소생산 기술 개발과 사업화를 추진 중임
- EDF는 2019년 원자력과 재생에너지를 이용한 수소생산을 위해 자회사 Hynamics를 설립
 - H2H(Hydrogen to Heysham) 컨소시엄을 통해 영국 Lancashire 원전에서 수전해 수소 생산시설 실증을 추진 중이며, 영국 Sizewell C 원전에 수소생산 파트너 확보 중
- **(영국)** 수소전략보고서(2021.8)를 발표하여 2030년까지 5GW 규모의 저탄소 수소생산 설비 확보하는 데 원자력을 최대한 활용할 예정임
- 저탄소 수소생산설비의 상업화를 위해 2억 4천만 파운드의 탄소제로 수소 기금(Net Zero Hydrogen Fund)을 조성하였고 원자력 수소를 청정수소에 포함
 - 롤스로이스가 개발 중인 중형원자로 12기를 2020년대 후반까지 배치하여, 전기와 수소를 생산할 계획이며, 여기서 생산한 수소는 합성항공유 생산에 투입할 예정
 - 영국 BEIS(산업부)는 2021년 7월에 수소생산에 효율적인 초고온가스로형 중형원자로 개발 계획을 발표
- **(폴란드)** 현재 공정열을 생산하는 석탄플랜트를 고온가스로로 대체하는 연구를 수행 중이며, 장기적으로 수소생산에 활용할 계획임
- **(러시아)** 러시아 정부는 2024년까지 ROSATOM의 원자력수소가 포함된 수소에너지 개발 계획을 승인함
- 단기적으로 경수로 잉여전력을 활용한 수전해 생산 기술 개발

- 장기적으로 초고온가스로의 열에너지와 탄소포집을 사용한 LNG 개질 기술 개발
- (일본) 1969년에 초고온가스로 개발을 착수하였으며, 2010년에 세계 최초로 초고온 시험로(출구온도 950℃)의 50일 연속운전에 성공
 - 미쓰비시社 요청으로 2030년까지 초고온가스시험로와 LNG 개질 공정을 연계한 수소 생산 실증 연구를 수행
 - 초고온시험로와 SI 열화학공정을 연계한 수소생산 실증은 장기적인 연구개발로 '40년까지 완료할 계획
- (중국) 2021년 8월에 세계 최초로 초고온가스로 HTR-PM 운영허가를 획득
 - 수소 생산에 적용성을 실증하기 위해 원자로 출구온도를 기존 750℃에서 950℃로 높이는 연구를 수행 중
 - 칭화대, CNNC, 철강산업체는 철강 제조 분야에 활용할 수 있는 원자력 수소 생산 기술 개발 협력을 추진 중
- (한국) 2004년부터 한국원자력연구원을 중심으로 초고온가스로를 활용한 물 분해 수소 생산 기술을 개발해옴
 - 2006년부터 원자력수소핵심기술 개발을 수행하여 원자력수소의 주요 핵심 기술을 확보하고, 수소 생산을 위한 SI 열화학공정의 연속운전 가능성을 확인
 - 2020년부터 초고온시스템 핵심기술 과제를 수행하여 수소생산에 활용 가능한 초고온 시스템 성능평가 기술, 재료성능 검증 기술, 고온수전해 연계기술을 개발하고 있고 2024년에 완료 예정
 - 산·학·연 협력을 통한 원자력 수소생산 기술 협력 추진 중
 - ※ 한국원자력연구원은 2020년 현대엔지니어링과 USNC 社와 초고온가스로 개발을 위한 MOU를 체결했고, 2021년 현대엔지니어링, POSTECH, 포항산업과학연구원, POSCO, 경상북도, 울진군과 원자력활용 고온 수소 생산 기술의 개발, 실증, 상업화를 위한 MOU를 체결

□ 국내 원전과 연계한 수소생산 방안

- 원자력을 활용한 청정수소 생산방안이 에너지 안보와 경제성을 담보하면서 탄소중립과 수소경제를 달성하기 위한 최적의 수단을 제공함
 - 상온 수전해에 의한 수소 생산 비용이 태양광은 약 8,000원/kgH₂, 원자력은 약 3,800원/kgH₂인 것으로 평가
 - ※ 태양광 이용률 15%, 원자력 이용률 85%, 수소 1kg 생산 전력소요량 51kWh/kg 적용
 - ※ 고온수전해 적용 시 전력소비량 약 30% 절감

- 가동원전을 이용한 청정수소 생산기술 개발의 조속한 착수가 필요함
 - 상용화 개발기간과 투자규모를 고려하여 단기간에 기술을 개발하여 적용할 수 있도록 가동원전을 활용한 저온 수전해 수소 생산 기술을 우선적으로 개발하고, 향후 고온 수전해 공정을 적용시켜 수소생산 효율을 높이는 방향으로 추진
 - 장기적으로 초고온가스로를 활용하여 수소 생산 효율을 더욱 향상시킬 수 있는 기술 개발을 병행
- 원자력 기술과 수소경제 활성화 로드맵을 연계하여 청정수소 대량 생산을 위한 실효성 있는 방안을 마련함
 - 원자력을 활용한 수소생산 기술 상용화를 통해 정부가 목표하는 수소 공급량과 가격을 충분히 만족시킬 수 있는 대량 청정수소 생산 체계 확보
 - 수소기술개발로드맵(2019.10)의 생산 분야 미래형 기술로 분류된 초고온가스로와 기존 경수로의 저렴한 전기를 활용하여 대규모 청정수소 생산 기술 실증에 활용
 - 2022년부터 도입 예정인 수소발전의무화제도(HPS)와 함께 도입 검토 중인 청정수소 생산 판매 의무화와 공공기관 수소 활용 의무화도 충실하게 이행할 수 있도록 지원
 - 실효성 있는 세계 최고 수준의 국내 원전산업을 수소 산업에 적용하여 수소 관련 산업을 육성하고 국제적으로 수소경제를 선도

□ 기대 효과

- 경제적인 청정수소의 대량 국내 생산으로 탄소중립 달성에 기여할 수 있음
 - 기존 LNG 추출을 통한 수소 생산을 대체하여 이산화탄소 발생을 감축하고, 생산된 수소를 에너지 저장수단으로 LNG 발전을 대체하며, 에너지 운반체와 수소 환원제철 등에 활용하여 2050 탄소중립 달성에 기여
 - ※ APR1400 2기 해당 원전 용량으로 수소생산 시 LNG 개질 통한 생산 대비 약 330만톤 이상 탄소 감축 가능(추출수소 1kg 생산 시 이산화탄소 발생량은 8.6kg 수준)하며, 향후 기술개발을 통한 효율 향상으로 감축량 20% 이상 증가 전망
- 재생에너지 간헐성 보완 및 전력계통 안정성 향상에 기여함
 - 재생에너지의 확대에 수반되는 출력변동에 대응하여 잉여전력 발생 시 원전에서 생산한 전력 중 일부를 활용하여 에너지저장 수단으로 수소를 생산하고, 이후 피크 발생 시에 저장된 수소를 전력원으로 활용함으로써 전력계통의 안정성 향상
- 에너지 비축능력 향상으로 에너지 안보를 강화함
 - 에너지 비축능력이 뛰어난 원전과 연계하여 에너지안보 측면에서 유리

- 수소 및 원전 산업 국제 경쟁력 제고에 기여함
 - 세계 최고 수준의 국내 원전산업 기술을 수소 산업에 적용하여 국제적으로 수소경제를 선도할 수 있고, 원자력 발전의 적용 기술 확대로 원전의 수출 경쟁력 제고
- 수소경제 활성화 목표 실현을 촉진함
 - 청정수소 생산의 경제성을 확보하고, 수소의 저장, 공급, 다목적 활용 등 추가적인 사업모델을 통한 부가가치 창출로 수소경제 실현을 촉진

(부록 9) 방사선 기술 및 산업

가. 방사선 기술 개요

□ 방사선 기술 및 산업의 분류

○ 방사선 기술은 다음과 같이 분류할 수 있음

기능	분 류		적 용 예
방사선 발생	방사성 동위원소 생산	연구로	중성자를 조사하여 중성자 과잉 입자 생성 의료, 산업용으로 넓게 사용
		가속기 (사이클로트론 등)	양성자, 중양자 등을 조사하여 양성자 과잉 입자 생성 방사성의약품에 적용 범위가 넓음
	방사선 발생기기		인위적인 상호작용 등의 반응을 통해 방사선 발생 - 중성자 발생기, X-ray 발생기, 가속기 등
방사선 이용	방사선조사		산업소재 - 소재물성 개선, 우주·반도체 등 첨단소재 살멸균 - 농축산물, 목재, 미술품의 살균 및 멸균 육종 - 농업분야의 신품종 개발
	방사선 이용 기기		영상기기 - 의료용 영상장치 및 산업용 영상장치(비파괴) 보안기기 - 극초단파 전자파 이용 공항검색장비 등 방사선 발생기기/계측기 - 입자선/엑스선 발생장치, 방사선계측기
	방사선의학		기초방사선 - 방사선생물학, 방사선화학, 의학물리 임상방사선 - 방사선 종양학, 핵의학, 영상의학

○ 방사선 산업은 일반적으로 다음과 같이 분류함

대분류	소분류	내 용
방사선 기반기술 산업	방사성동위원소 산업	원자로나 가속기를 이용하여 방사성동위원소를 생산하는 산업
	방사선 발생기기 산업	전자선, 엑스선 등 방사선을 인공적으로 발생시키는 기기를 만드는 산업. 분류 방법에 따라 대형기기/소형기기, 입자발생/광자발생, 산업용기기/의료용기기로 분류할 수 있음
	방사선 계측기기 산업	방사선을 계측하기 위한 소재, 소자, 기기 또는 시스템을 만드는 산업
방사선 응용기술 산업	신소재 산업	방사선을 조사하여 무생물의 물성을 변화시켜 형질을 변화시키거나 새로운 소재를 만드는 산업
	생명공학 산업	방사선 조사로 발생하는 생물의 화학적 또는 유전적 변화를 응용하는 산업
	분석·검사 산업	방사선을 이용한 비파괴 검사나 성분 분석 등과 관련된 산업
방사선 의료기술 산업	영상기기 기술 산업	방사선을 영상 신호화하여 활용하는 것과 관련된 산업 분류 기준에 따라, 1차원/2차원/3차원, 엑스선/감마선/중성자선, 산업용/의료용 등으로 분류할 수 있음.
	핵의학 산업	방사성동위원소를 이용하여 신체의 해부학적 또는 생리학적 상태를 진단·평가하거나 치료하는 것과 관련된 산업 표지화합물 관련 산업, 진단 및 치료 관련 신기술의 활용 등
	방사선 치료 산업	의료용 가속기나 동위원소에서 발생하는 방사선을 환자에 쬐어 치료하는 산업. 엑스선 치료, 입자치료, 근접치료 등이 여기에 속함
	영상 의학 산업	방사선을 이용한 진단이나 치료를 위해 영상을 합성하거나 분석하는 기술과 관련된 산업

□ 방사선 기술의 역할

- 방사선과 물질과의 상호작용을 기반으로 하는 방사선 기술은 그 특성상 다양한 분야에 응용되어 왔으며, 생명공학기술(BT), 환경공학기술(ET), 정보통신기술(IT), 우주항공기술(ST) 등 타 분야와 융합을 통해 고부가가치를 창출해왔음
- 우리나라는 방사선 기술의 활용성이 높고 연구기반이 있는 의료 및 농·생명 분야를 중심으로 소재·환경 등 다양한 분야의 기술개발을 지원하여 역량을 확보함
- 한국원자력연구원 등에 구축된 대형연구시설을 활용하고 있음



[국내 대형 방사선 인프라 현황]

□ 방사선 기술 및 산업 동향

- 「방사선 및 방사성동위원소 이용진흥법」에 따라, 원자력진흥종합계획 및 방사선진흥계획 수립 등 정책을 마련하고 투자 유지
 - 방사선기술개발사업(1997년~2019, 일몰), 방사선연구기반확충사업(2011년~2018, 일몰)
 - 제2차 방사선 진흥계획(2017년~2021) 고성장이 예상되는 분야를 중심으로 신산업 발굴, 지속가능한 성장을 위해 필요한 핵심 원천기술 확보 및 기술 국산화 계획
 - 미래원자력기술 발전전략(2017.12) 그간 발전(發電) 분야 중심으로 축적된 원자력 역량을 비(非)발전 분야로도 활용을 확대하는 원자력 R&D 혁신 추진 중

- **고령화 및 암 발병률의 증가와 의료 패러다임 변화로 인해 방사선 의료 산업도 성장 예상**(2015년 35.3조 원 → 2030년 79.9조 원 전망)
 - 연간 방사선기술을 이용한 진단 건수는 1,500만 건에 이룸
 - 연간 8만 2천 명 정도가 방사선을 이용한 종양 치료를 받고 있으며, 그 수는 매해 5% 정도씩 증가하고 있음
- **전 세계적으로 개방과 융합을 통한 혁신형 기술개발이 확대됨에 따라 첨단 기술과 융합한 방사선 이용 기술들이 주목받고 있음**
 - IT소재, 에너지 저장소재 등의 **신소재 개발**, 차세대반도체 제조, 초정밀 가공제품 품질 관리 등의 **공정기술과 방사선 기술을 융합**
 - ※ 이온빔 처리기술 등 방사선 조사를 활용한 전기차·차세대반도체 부품소재 개발, 방사광 가속기 등을 활용한 초정밀 진단 공정 등
 - **인공지능, 고정밀 센서를 활용하여 부작용의 최소화, 치료시간 단축, 정밀 진단 및 치료 등 방사선 의료기술의 고도화 진행 중**
 - ※ 인공지능 기반 방사선치료 솔루션, 면역항암제 등 차세대 암 치료 기술과 방사선 치료 기술융합, 나노기술 기반 동위원소 치료제 운반체 개발 등
- **4차 산업혁명, 사회적 변화(대외정세, 고령화 등)에 따라 제조업, 의·생명 산업 혁신이 요구되고 있으며, 이에 따라 방사선 활용 시장*의 동반 성장 전망**
 - ※ 산업소재·방사선기기·의료 분야가 세계 방사선 이용시장의 75% 이상
 - ※ (세계 방사선산업 시장규모) 2019년 1,282억 달러 → 2024년 1,815억 달러로 확대 전망
(국내 방사선 이용 경제) 2012년 14.8조 원 → 2018년 20.8조 원(연평균 5.8% 증가)
- **자동차, 에너지, 의료시장 등 기존 기술·산업 환경 변화 따라 미래시장 선도를 위한 각 분야별 핵심 소재시장 확대**
 - ※ (방사선소재시장) '20년, 전세계 시장 240조 원, 국내 1.7조 원 규모로 확대 전망
- **국내의 제조, 의료, 바이오산업 등의 방사선기술 이용 및 관련시장은 성장 추세이나 원천 기술을 기반으로 한 자체 생산·제조는 미흡**
 - 비파괴검사 업체를 포함하여 4만 9,000여 기관 및 업체가 방사성동위원소 또는 방사선 발생기기를 이용
 - 약 14만 6,000명이 방사선 이용기관이나 산업체에 종사
 - 2015년 방사선 제조기업 74개 중 30인 이하 43개, 매출 50억원 이하 29개로 대부분 영세
 - ※ 국내 방사선 및 RI 이용기관: 37,931개(2012) → 48,182개(2018)(연평균 4.3% 증가)

- 방사선제품 수입량은 지속적으로 증가하는 반면, 생산량은 불안정한 상태를 보여 국내 자급률 향상을 위한 기술 개발과 산업화를 위한 정책적 변화가 필요

□ 방사선 기술 및 산업 진흥 대책

○ (산업) 방사선이용 시장 성장세에도, 원천기술 보유 기업 부족

- 주무부처인 과기정통부의 방사선기술 관련 사업은 사업화 이전 연구개발 단계 사업(TRL 7단계 이하)에 집중되어 있으며 **사업화 관련 사업은 일몰되었거나 타 부처에 비해 미미한 수준**
- 방사선 산업체가 이전받은 기술의 사업화 성공을 위해서는 추가적인 기술 개발, 예산 및 인력 지원 등을 필요로 하나 **국내 방사선 산업체의 대부분은 중소기업 혹은 영세 규모로 이루어져 있어, 이에 대한 자체 투자가 어렵고 더욱이 관련 정부지원 사업이 부족하여 외부지원을 받기도 어려움**
- 이로 인해 기술을 이전받은 기업이 기술을 상용화 하는 단계까지 필요한 투자와 지원을 확보하지 못하는 경우가 많아 **사업화를 포기하거나 사업화가 지연되는 경우 발생**
- ⇒ 방사선 이용 시장의 대부분을 차지하는 **소재·의료 산업 핵심 원천기술관련 기업의 기술 산업화를 위한 고부가가치 창출 지원 필요**
- ⇒ 기업체 자금지원을 위한 투자자 연결, 금융상품 혹은 기술보증 등 방사선 산업체를 위한 **정부 금융지원책 검토 필요**

○ (기술) 다양한 분야들에 대한 연구역량 확보 위주의 연구개발 추진

- ⇒ **산발적 연구개발 지원을 통한 공급자 역량 확보 관점에서 벗어나, 산업 수요 혹은 사회적으로 해결할 문제 중심(Flagship Area)으로 연구역량(기초, 응용, 실용화, 사업화, 인프라 활용과 구축, 연구인력 등)을 종합 배치하여 사업간 연계성을 높이고 사업의 효과를 극대화하는 필요**

○ (사회) 대외정세 변화, 고령사회 진입 등 현안에 대한 적기대응 필요

- ⇒ 방사선 기술을 적용하여 **핵심소재 등의 자립화를 조기 달성하고, 의·생명분야의 기술도약이 가능한 R&D에 대한 전략적 지원 필요**

○ (규제) 방사선은 원자력안전법에 의거하여 까다로운 규제를 받고 있으며 이는 방사선 기술개발 및 사업화의 걸림돌로 작용하고, 규제 기준이 과거기술 수준에 맞추어진 경우가 대다수로 신기술 개발에 맞는 규제 개선이 느림

- 2018년 방사선 및 방사성동위원소 이용실태조사에서 진행한 설문조사를 살펴보면 산업체의 방사선(RI/RG)에 대한 이용이 감소한 이유로 **까다로운 법적 요구사항(33.3%)을 들었으며 향후 이용 전망에 대해서도 변화가 없거나 감소할 것이라는 의견이**

88% 이상이었음. 또한 방사선 이용진흥을 위해서는 **각종 규제제도의 변화가 필요하다는 응답이 전체의 45.7%였음**

- 정부 부처 내에 분산되어 있는 원자력/방사선 안전 관련 법령을 일원화해서 모순되거나 누락된 규제 기준을 개정하고 효율적인 안전규제 체계를 확보하여 국민의 안전과 사업자의 영업활동 보장 필요
 - ※ 부처 간 관리의 중복과 기준 혼선 : 병원의 경우, 방사선치료와 방사선진단으로 분리되어 원자력안전위원회와 보건복지부가 별도 관리함
 - ※ 현재 월성원전이나 후쿠시마 오염처리수에서 중요한 삼중수소의 경우, 국내 음용수 기준이 마련되어 있지 않고 보건복지부 법령에 제한적인 '염지하수'라는 단 한 가지 항목에 대해서만 국제적으로 인정되지 않는 매우 낮은 기준치를 제시
- 원자력안전법에서 방사선이용 분야 사용자들에 대한 과도한 규제 해소 필요
 - ※ 원자력안전법이 원자력발전소를 기준으로 작성된 이후, 일부 보완이 되어 왔으나 방사선 이용 분야에서 적절한 규제기준을 마련하지 못하고 원자력발전소에 적용되는 규제기준을 준용함으로써 사용자들에게 과도한 규제 부담을 가하고 있음
 - ※ 방사선이용과 관련한 적절한 안전규제 기준이 마련되지 못하는 것은 방사선이용 산업을 위축시키고, 새로운 방사선 이용 산업 태동의 가능성을 제한하고 있음

○ **(방사성 폐기물)** 방사선분야의 기술개발, 제품생산, 및 폐기과정 등에서 발생하는 방사성 폐기물을 처리하는 것이 중요한 문제이나 현재 국내에서 일부 기업이나 대형기관을 제외하고는 **방사성폐기물 처리 및 처분은 매우 어려운 문제로 여기고 있음**

- 방사성동위원소 이용기관에서는 다양한 종류의 중저준위 방사성폐기물이 발생하며, 규모가 크지 않은 기업이 **현재 인수기준(처분장 처분기준과 거의 동일한 수준)을 만족시키는 것은 현실적으로 어려운 실정**
- 예를 들어, RP 폐기물 중 동물사체, 폐밀봉선원, 유기폐액, Tc-99m 제너레이터 폐 컬럼 등은 발생기관에서 처분사업자에게로 인도가 불가능하다고 어려움을 호소

○ **(기장 연구로 사업)** 2012년부터 부산시 기장군에 15MW 출력의 수출용 신형연구로를 건설하는 사업이 진행 중

- 기장연구로 건설 목표는 Tc-99m 등 진단과 치료에 사용되는 방사성동위원소의 자급률 향상과 전력반도체용 소재 생산 능력 향상을 통한 전력반도체 분야 발전
- 2019년 5월에 건설허가 취득, 2027년 4월 첫임계 달성 계획

(부록 10) 원자력 발전에 대한 국민 인식조사 결과

가. 요약

- 국민 72.1% 원자력 발전 이용 찬성
- 국민 72.3% 원자력 발전은 안전하다고 생각
- 18세~20대 젊은 층 79.5% 원자력 발전 비중 유지 또는 확대 찬성

원자력 발전에 대한 국민 인식은 원자력이 지속 가능한 에너지원으로써 국민복지와 국가발전을 위해 그 역할을 제대로 수행하는데 매우 중요한 사안이다. 한국원자력학회는 여론조사 전문기관에 의뢰하여 2018년부터 총 6회의 ‘원자력 발전에 대한 국민 인식조사’를 실시하였다. 조사 시기와 수행 전문기관은 다음과 같다.

2018년 8월(한국리서치), 2018년 11월(한국개발조사연구소), 2019년 2월(한국리서치), 2019년 5월(마이크로밀 엠브레인), 2020년 11월(한길리서치), 2021년 9월(엠브레인 퍼블릭)

제6차 조사는 2021년 9월 5일부터 7일까지 사흘간 만 18세 이상 1,000명을 대상으로 유·무선 전화조사 방식으로 실시되었으며(다른 조사도 유사한 방식으로 진행) 주요 결과는 다음과 같다.

2018년 조사부터 일관되게 국민 10명 중 7명은 원자력 발전 이용에 찬성하는 것으로 나타났다. 2021년 9월 조사에서도 72.1%가 원자력 발전 이용을 찬성하고 있고, 반대(24.2%)보다 3배 이상 높은 것으로 조사되었다. 원자력이 차지하는 전기생산 비중을 앞으로도 유지하거나 확대해야 한다는 의견 역시 69.9% (확대 35.9%, 유지 34.0%)로 축소(28.1%)보다 월등히 높은 것으로 조사되었다. 특히 18세~20대 젊은 층에서는 79.5%가 원자력의 발전을 유지하거나 확대해야 한다고 생각하는 것으로 나타났다. 이러한 조사 결과는 한국개발이 2021년 1월 자체적으로 실시한 국민 인식조사에서도 유사하게 나타났다(원자력 발전 확대 25%, 유지 36%, 축소 29%. 18세~20대 젊은 층의 유지 또는 확대 의견 74%).

원자력 발전의 안전성에 대해서는 안전하다고 생각하는 의견이 72.3% (매우 안전함 19.6%, 대체로 안전함 52.7%)로 안전하지 않다고 생각하는 의견 23.3% (별로 안전하지 않음 19.7%, 전혀 안전하지 않음 3.6%)보다 3배 이상 높게 조사되었다. 이는 2018년 8월의 1차 조사에서 나타난 결과(안전함 55.5%, 안전하지 않음 40.7%)와 비교할 때 원자력 발전의 안전성에 대한 국민적 인식이 현저히 개선되었음을 보여주고 있다. 참고로 원자력 발전이 안전하다고 생각하는 비율은 2018년 1월 55.5%, 2018년 11월 57.6%, 2019년 2월 58.9%, 2019년

5월 62.6%, 2020년 11월 66.4%로 꾸준히 증가해오고 있다. 이는 정부의 탈원전 정책으로 유발된 원자력 발전에 대한 국민적 관심과 원자력에 대한 과학적 사실을 알리는 다각적인 노력과 활동, 그리고 이러한 내용이 주요 언론에 심도있게 보도된 점이 중요한 역할을 했다고 판단된다.

국가 에너지 정책에서 가장 우선시되어야 할 사안에 대해서는 국민 안전성 (28.9%), 온실가스, 미세먼지 저감 등 친환경성 (27.9%), 전력공급의 안정성 (19.8%), 전기요금 등 경제성 (13.2%), 국가 에너지 안보 (9.1%) 순으로 조사되었다.

우리나라의 주력 발전원은 태양광 (33.8%), 원자력(30.6%), 풍력(20.2%), 천연가스(12.1%), 석탄(1.5%)순으로 선정하였습니다. 이는 무탄소 전력원인 원자력과 재생에너지를 함께 이용해야 한다는 국민적 인식을 보여주는 것이다.

최초운영허가기간이 종료되는 원전의 계속운전 여부에 대해서는 안전성, 경제성 등을 평가하여 결정해야 한다는 의견이 78.9%로 바로 영구정지해야 한다는 의견(18.5%)보다 월등히 높게 조사되었다. 또한 신한울 3,4호기 건설 재개 여부에 대해서도 재개해야 한다(38.7%)와 공론화를 통해 결정해야 한다(42.8%)는 의견이 재개하지 말아야 한다(14.8%)보다 압도적으로 높게 조사되었다.

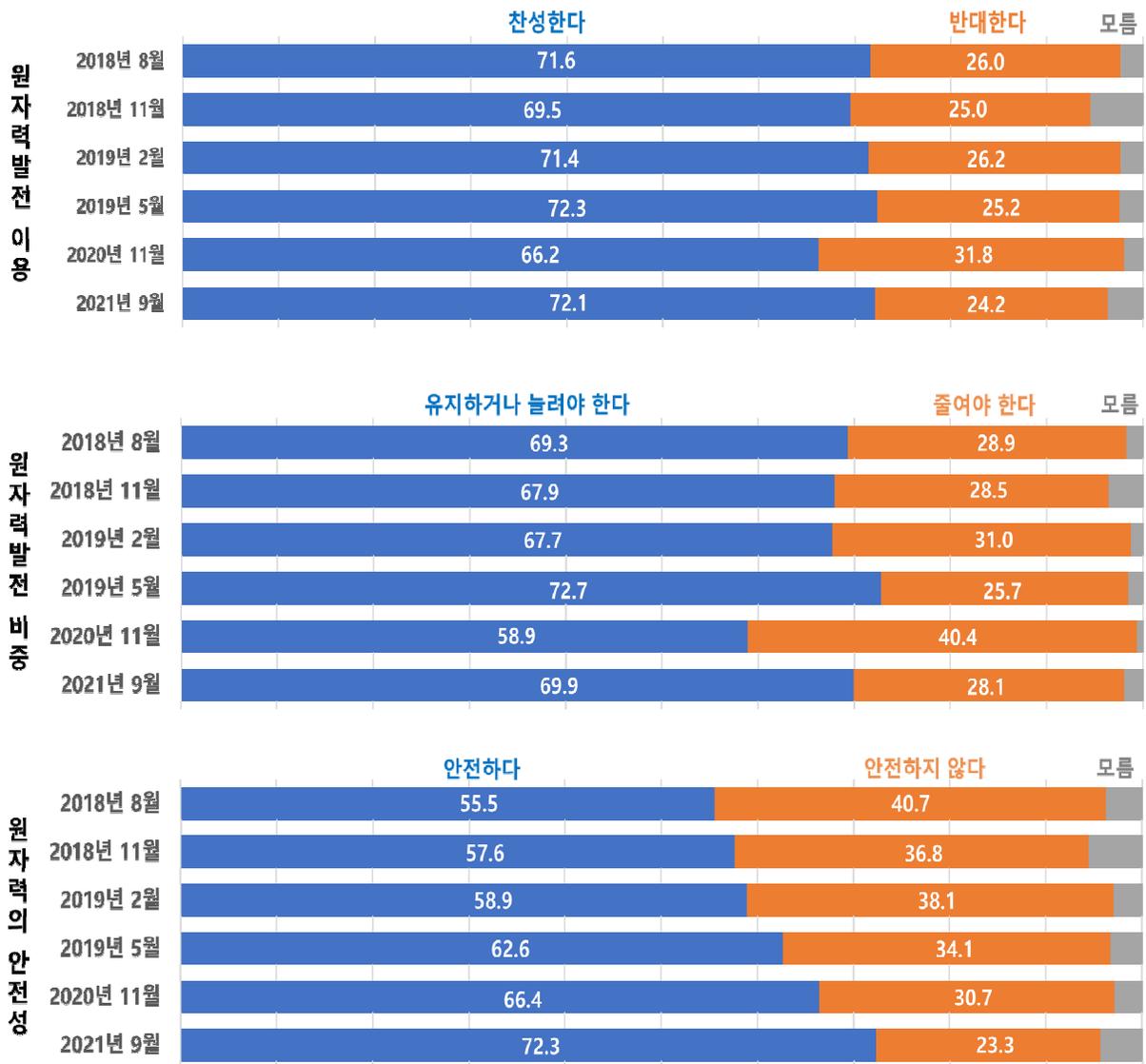
원자력 발전 관련 정보와 메시지를 제공하는 기관 또는 집단에 대한 신뢰도 조사에서는 원자력 학계 및 전문가에 대한 신뢰도가 71.3%로 가장 높게 나타났으며, 탈핵단체 및 운동가에 대한 신뢰도는 36.9%로 상대적으로 낮게 나타났다.

2018년부터 학회가 실시한 총 6회의 원자력 발전에 대한 국민인식 조사결과에서 일관되게 나타났듯이 우리나라 대다수 국민은 원자력 발전의 이용을 찬성하며 원자력 발전의 비중을 유지 또는 확대해야 한다고 생각하고 있다. 이는 정부의 탈원전 정책이 국민의 뜻과 크게 상반된 것임을 명확히 보여주는 것이다. 탄소중립위원회가 무탄소 에너지원인 원자력 발전의 활용을 원천적으로 배제한 채 도출한 탄소중립시나리오는 대다수 국민의 뜻과 정면으로 배치됨은 물론 실현 가능성이 희박한 내용을 담고 있다. 탈원전을 전제로 하는 탄소중립위원회의 활동은 즉각 중단되어야 하며, 정부는 국민의 뜻을 반영하여 과학과 합리성을 바탕으로 국가 백년대계인 에너지 정책을 전면적으로 재검토해야 한다.

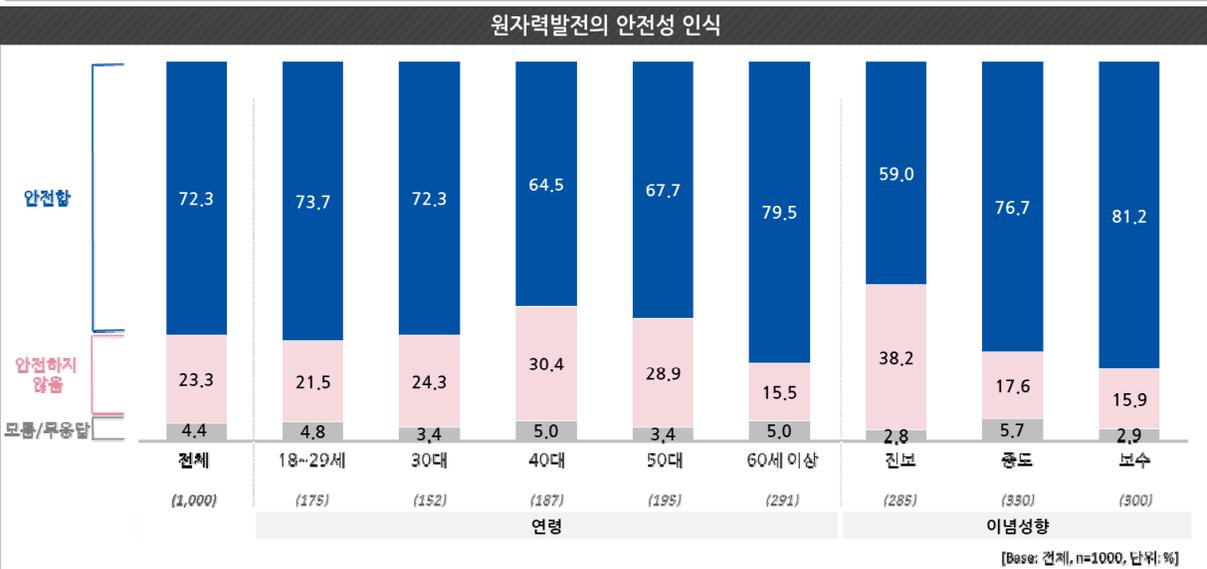
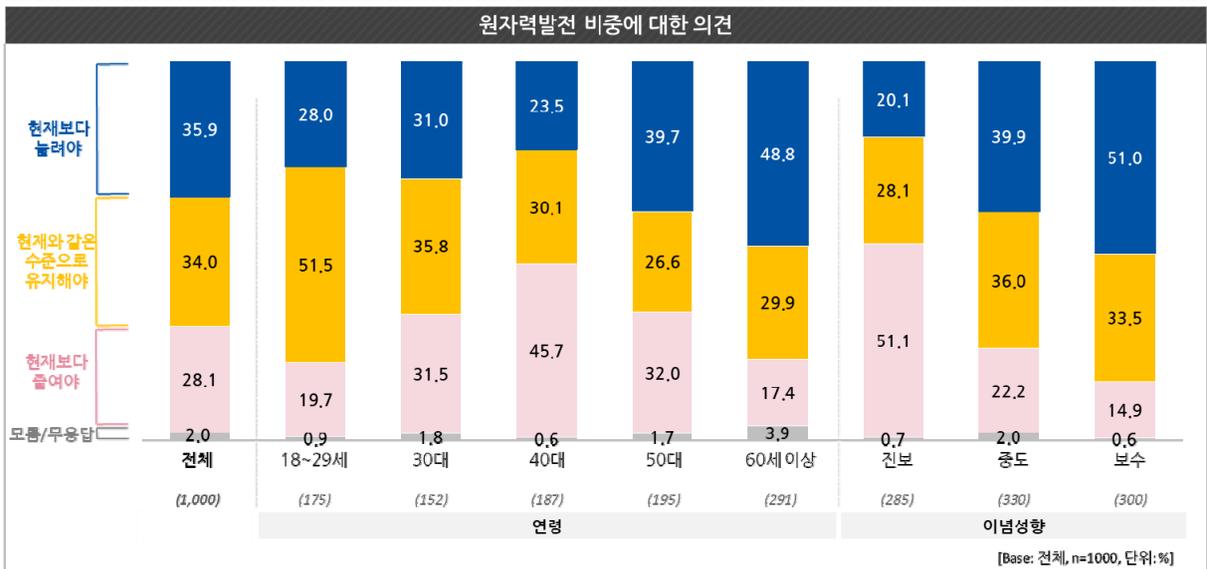
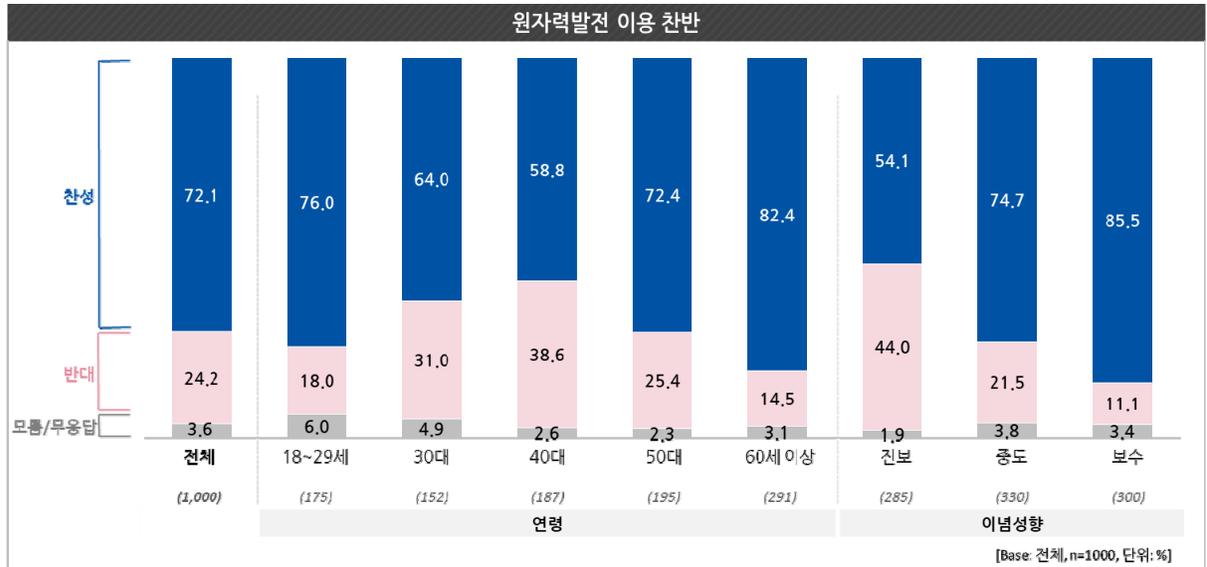
나. 주요 문항에 대한 응답 결과

- [주요 항목 결과 요약] 2018년~2021년 기간에 실시된 ‘원자력 발전에 대한 국민 인식조사’의 주요 항목인 원자력 발전 이용, 원자력 발전 비중, 원자력의 안전성에 대한 조사결과 요약은 다음과 같다.

(2018년~2021년 조사의 주요항목 결과 요약)



- [2021년 조사에서 연령대와 이념성향에 따른 주요설문 답변] 2021년 9월 조사에서 나타난 연령대와 이념성향에 따른 원자력 발전 이용, 원자력 발전 비중, 원자력 발전의 안전성에 대한 응답 결과는 다음과 같다.



탄소중립과
미래세대를 위한
국가 원자력정책
제안서



문의처

한국원자력학회 사무국

대전광역시 유성구 유성대로 794, 4층 (장대동, 뉴토피아빌딩)

Tel. (042)826-2613~2615/2677 | Fax. (042)826-2617 | kns@kns.org | <https://www.kns.org>