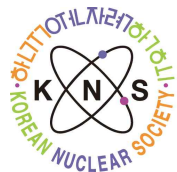


원자력 미래 전망예측 및 대처방안

2020. 7.

제2기 미래특별위원회



한국원자력학회
Korean Nuclear Society

위원회 구성

○ 위원장 : 박군철 서울대 명예교수

○ 간사 : 권민지 사업이사

- 제1분과(에너지 · 경제 예측)

- 분과위원장 : 노동석
- 위원 : 오진호, 이만기, 정기호, 변재령

- 제2분과(원자력산업 예측 및 사나리오 작성)

- 분과위원장 : 박석빈
- 위원 : 김용수, 노재만, 주형국, 박찬오, 이정익,
김기현, 황해룡

- 제3분과(원자력미래기술 예측)

- 분과위원장 : 임채영
- 위원 : 정익, 김용균, 김한곤, 강보선, 노재형,
김송현

- 제4분과(원자력인력양성 및 학회의 역할)

- 분과위원장 : 황용석
- 위원 : 심형진, 최성민, 문주현, 홍서기, 김신애,
김학모

요 약

□ 본보고서는 시나리오 기법을 활용하여 미래 역할을 전망함.

- 국내원전산업은 에너지전환 정책의 추진으로 급속한 위축을 경험하고 있음.
- 미래위원회 위원들은 에너지 사용의 기후변화 대응을 원자력의 미래를 결정하는 주요 변수로 주목하였음.
- 에너지와 경제, 원전에 대한 세계와 국내 전망, 정책을 비교하여 국내 원자력산업의 장기적 대응방안 도출
 - 불확실한 미래를 대비하기 위한 기초자료로 활용
 - 미래 사회의 환경과 기술 수요의 변화에 대응하는 원자력 연구개발 추진 방안 작성
- **미래 원자력의 역할 전망:** 우리나라와 세계가 설정한 목표와 그 목표를 달성하는 경로로 에너지 시장을 이끌기 위해 선택 가능한 정책 시나리오 등을 바탕으로 미래의 원자력의 모습 제시
- **목표:** 인류가 당면한 최대의 위기인 지구 온난화를 억제하기 위한 기후 목표와 지구의 환경을 보호하면서도 인류의 번영을 촉진하기 위한 지속 가능 개발
 - 지속경제성장을 위한 CO₂ 절감 및 에너지 안보.
 - 안전, 효율 및 준비 상황을 고려하는 미래의 에너지 믹스
- 미래 사회에 대한 예측 ⇨ 융·복합 기술의 사회 전망
 - 깨끗하고 안전한 사회
 - 혁신적인 신기술로 편리한 사회
 - 스마트한 초연결 사회

□ 현재까지의 온실가스 배출 방지에 대한 원자력의 성과

- 1980년대 중반까지 원자력의 빠른 증가는 GHG 배출량 억제에 크게 기여했으며, 이후 일정 수준의 원전용량 유지는 온실가스 완화에 크게 기여하는 중임.

□ 미래 원자력의 역할

- 세계 에너지수요는 2040년까지 시나리오에 따라 연평균 -0.3%~1.2%, 전력수요는 0.4%~1.2% 증가를 전망함. 원전은 1.1%~2.2% 증가 예상
- 국내 에너지수요는 2040년까지 연평균 -0.1%로 약간 감소, 전력은 0.6% 증가, 원자력은 -0.01% 감소 전망
- **현상유지, 성장 및 대립**의 세 시나리오의 혼합 구성 시, 미래 원자력의 역할에 대한 광범위한 경로로 활용 가능
- 전세계적으로 에너지 수요는 꾸준히 증가할 것이며, 온실가스 완화 시나리오에서 2050년까지 원자력의 활용의 지속 전망
- 원자력 장점중 하나는 에너지 안보 우수성으로, 코로나 대유행 등과 같은 대립 시나리오로 전개 가능성이 커진 시점에서 볼 때, 미래 원자력의 역할이 기대됨.
- 2040년 내에 약 100여 기의 신규 원전건설 시장이 열리며, 그 이후 장기적으로 300여 기의 신규 원전건설이 예상되는 바, 원전수출 경쟁력 확보 및 유지 필요. 이를 위해, 수출 후 60년 이상 운영기간 동안의 기술/부품 지원 및 공급과 원전 계속운전 및 지속적인 원전 기술개발 역량과 인력 필요
- 신규원전 건설 노형의 원전수출 노형화 전략 필요
- 40년 이상 확보한 대형로, 연구로, 중소형모듈원전 SMART 기술을 바탕으로 소형원자로 기술 확립 및 세계 시장 진출용 수출형 소형원자로 국내 건설 및 운용 필요
- 원자력 우위를 유지하려면, 차세대원전 기술개발에의 지속적 투자로 차세대원전 상용화에의 선도 역할 수행 필요.
- 원자력 수소생산을 포함한 그린수소 생산의 추구 시, 수소사회로의

진입이 가능할 것으로 전망됨.

- 국민 안심 원자력 교육: 일반인에게 올바른 원자력 지식 확산 및 미래세대 교육 관점에서 진행.
- 산업체 전문인력 교육: 문제해결 능력을 갖춘 핵심 인력 유지 방안 마련 필요
- 전문 연구인력 교육: 꿈을 주는 원자력과 일자리를 제공하는 원자력에 대한 비전 제시 필요

□ 제언

- 온실가스 완화와 에너지 보안에 탁월한 특성을 보유한 원자력은 미래에도 지속가능한 에너지원으로 고려되므로 예측된 모든 미래시나리오에 대해서도 원자력의 지속적 성장은 필요
- 에너지 수요와 환경보호라는 공동의 목표 달성에 한 축이 원전수출이며, 이에는 소형원전과 수소사회도 포함됨. 이에 대한 적극 지원 필요
- 대국민 소통 활동의 지속적 추진을 위해 학회에 전담조직을 두어, 미래 임계기술 예측, 대국민 홍보/교육활동 기획, 조직 및 이에 필요한 자료의 생산·관리를 담당할 수 있도록 강력히 권고함
- 대학교육과 관련하여 원자력 지속을 위한 핵심역량 유지와 미래 원자력 신기술 확보를 위한 선진적 교육중심으로 재개편하고 현장 친화되어야 할 것임.

목 차

위원회 구성	2
요약	3
목차	6
그림 목차	7
표 목차	9
1. 서론	10
2. 원자력의 성과	14
3. 미래의 기여에 대한 고려	19
3.1 에너지 수요 전망	19
3.1 에너지 수요 전망과 GHG 완화 시나리오의 상관관계	25
4. 원자력 대책	38
4.1 현재 정책 하에서의 원전수출 현황 예측	38
4.2 소형원자로와 Advanced Reactor	46
4.3 원자력수소	58
4.4 연구용원자로	72
5. 대응 시나리오와 원자력 기술의 미래 전망	75
6. 미래 인력양성 - 학회의 역할	87
7. 결론	91
〈부록 I〉 주요 소형원자로 및 초소형원자로 개발 현황	94
〈부록 II〉 소형원자로 개요	97
〈부록 III〉 현상유지, 성장, 대립의 세 가지 시나리오 전개 시의 에너지 수요 전망	114
〈부록 IV〉 참고문헌	128

그림 목차

그림 1. 미래사회에서의 원자력	13
그림 2. 에너지 환경 변화	13
그림 3. 전기 부문에서 배출되는 전 세계 CO ₂ 배출량 및 3가지 저탄소 발전기술 사용으로 억제된 배출량	16
그림 4. 세계 에너지 소비 추정	21
그림 5. 세계 원전용량 전망(IEA vs. IAEA, GW)	23
그림 6. 전력수급계획별 최종연도 원전용량	23
그림 7. EIA가 전망한 한국의 발전부문 미래	24
그림 8. 원자력 발전 시나리오 : 과거 데이터 (1971~2015) 및 예측 (2015~2060)	27
그림 9. NPS와 비교하여 SDS를 통해 달성하는 2025~2040년간의 각 기술에 의한 추가적인 CO ₂ 배출량 감축량	31
그림 10. 미래의 원자력 발전 용량에 대한 최근의 IAEA 전망 비교.	34
그림 11. 2011년부터 2018년까지의 미래 원자력 전력 생산 용량에 대한 IAEA의 높은 전망	34
그림 12. 시나리오별 원전 설비용량(GW)	38
그림 13. IEA 2도 시나리오에 따른 발전원별 전력생산량	40
그림 14. SMR의 다양한 적용성	46
그림 15. on-grid SMR의 전력생산단가 비교 (6% discount rate 가정)	50
그림 16. off-grid SMR의 디젤발전 대비 전력생산단가 비교 (6 및 9% discount rate 가정)	50
그림 17. 캐나다의 SMR Road Map	51
그림 18. SMR 활용처	53
그림 19. 수소사회로의 추진 동력과 모멘텀 증가 지표	60
그림 20. 이용부문별 손익분기 수소생산단가	62
그림 21. 수소경제 전망 시나리오	63
그림 22. 우리나라의 수소공급 및 가격 목표	64
그림 23. 설비가동시간, 건설비, 전기요금에 따른 수소생산단가	65
그림 24. 수전해시설 이용률에 따른 수소생산단가 거동	70
그림 25. 운전중인 연구로 수의 변화	72
그림 26. 현상유지 시나리오의 세계 1차 에너지 수요	78
그림 27. 성장 시나리오의 세계 1차 에너지 수요	80
그림 28. 대립 시나리오의 세계 1차 에너지 수요	81
 그림 II-1. SMR의 대표적인 5가지 특징	98
그림 II-2. 세계시장에서의 분산전원과 중앙전원 설비용량 변화	105
그림 II-3. NuScale (좌) 단일 모듈 조감도 (우) 플랜트 개념도	107

그림 II-4. SMART 기술개발 이력 및 주요 성과	108
그림 II-5. 비경수로형 SMR 중 최초의 통합인허가를 지원한 Oklo사의 뉴스 기사	111
그림 III-1. 권역별 1차 에너지 수요	116
그림 III-2. 세계 1차 에너지 수요 vs. GDP 증가율	116
그림 III-3. 연평균 에너지 강도 변화	119
그림 III-4. 세계 1차 에너지 수요	120
그림 III-5. 현상유지 시나리오의 세계 1차 에너지 수요 변화	123
그림 III-6. 성장 시나리오의 세계 1차 에너지 수요 변화	123
그림 III-7. 대립 시나리오의 세계 1차 에너지 수요 변화	124
그림 III-8. 세계 1차 에너지믹스(2014 - 2050)	124
그림 III-9. 총 최종 에너지 소비 중 전기 비중	127

표 목차

표 1. 미래예측방법론	11
표 2. WEO의 시나리오별 주요전제	20
표 3. 세계 1차에너지 수요 전망(IEA)	20
표 4. 에너지·전력수요전망	22
표 5. 국가별 전력수요전망 비교(%)	22
표 6. 시나리오별 원전용량(GW)	38
표 7. 세계 원전 현황	41
표 8. 초소형원자로 군사기지 적용성 평가	49
표 9. 소형원자로 용처별 필요규모 및 시장규모	52
표 10. 2025년과 2035년의 국가별 건설용량(단위: GWe)	52
표 11. 운전중인 Advanced Reactor	57
표 12. 건설중인 Advanced Reactor	57
표 13. 출시중인 Advanced Reactor	57
표 14. 알칼라인 수전해 시설 자료	67
표 15. 원자력 알칼라인 수전해 수소 생산 단가	68
표 16. 연구로의 기능에 따라 요구되는 출력	73
표 17. IAEA RRDB에 수록된 건설중 또는 계획중인 연구용원자로 목록	74
표 18. 세 가지 대응시나리오 요약	82
표 19. 4차산업혁명 기술의 적용분야(1)	85
표 20. 4차산업혁명 기술의 적용분야(2)	85

1. 서론

□ 배경 및 작성 방향

- 에너지전환의 추진으로 에너지정세가 급변하고 있음.
 - 계획원전 취소, 가동원전 계속운전 금지, 미래 전력공급을 위한 대안으로서 신규원전 불고려 등을 골자로 하는 탈원전 정책으로 원전산업은 매출액 감소, 인력이탈, 지역경제 부진 등 혹독한 시련을 겪고 있음.
 - 원자력산업계와 학계의 장단기 대응방안 모색이 필요함.
- 이에 따라 불확실한 원자력산업의 향후 미래의 합리적 예측을 통한 분석기반이 도출되어야 함.
 - 국내외 에너지수요의 불확실성에 대한 예측
 - 필요한 기술개발 예측 및 인력양성 방향 도출
- 에너지와 경제, 원전에 대한 전망과 정책을 비교하여 국내 원자력산업의 장기적 발전을 향한 대응방안 도출
 - 불확실한 미래를 대비하기 위한 기초자료로 활용
 - 미래 사회의 환경과 기술 수요의 변화에 대응하는 원자력 연구개발 추진 방안 작성

□ 검토기법 및 활용방안

- 작성 기법: 과학적 접근을 위해 미래예측조사 방법론¹⁾ 검토
 - 미래사회 전망을 위한 다양한 예측 방법론 활용
 - 델파이, 교차영향분석(Cross-impact analysis), 시나리오, 전문가 패널, 환경스캐닝, 추세외삽법 등 많은 예측 방법이 존재
 - 미래사회 전망은 한 가지 방법만을 사용하는 것이 아니라 다수의 방법을 종합적으로 사용
- 결과물의 활용방안: 원자력 일방적 편중보다는 정부와 기관 등에서 활용할 미래 에너지기술 발전/규제 계획 수립을 위한 객관성, 공정성,

1) Park, Goon-Cherl, Chairman and Emeritus Professor SNU, 미래기술 예측조사방법론, Jan 9, 2019

시나리오 다양성에 초점

구분	방법론	개념 및 방법
확률적 방법	델파이	<ul style="list-style-type: none"> • 전문가 패널을 구성하여 설문조사를 반복적으로 실시, 의견수렴 과정을 이용 • 설문조사 반복 실시는 통산 2회 정도로 하고 있음.
	교차영향분석	<ul style="list-style-type: none"> • Delphi 기법이 발전된 형태 • 예측대상에 대해 상호 영향을 미치는 요인을 분석
정성적 방법	시나리오	<ul style="list-style-type: none"> • 미래의 가상적 상황에 대한 묘사 • 타 예측기법을 바탕으로 여러 시나리오를 구상할 수 있음
	전문가 패널	<ul style="list-style-type: none"> • 다양한 분야의 전문가 Pool로부터 일정 정도의 전문가패널 구성 • 정해진 기간동안 주기적 모임을 통해 주어진 주제의 미래전망에 대해 토론하고 전략을 수립하는 방법
	환경스캐닝	<ul style="list-style-type: none"> • 아래 박스내용 참조
정량적 방법	추세외삽법	<ul style="list-style-type: none"> • 일련의 데이터에 연장선을 긋는 방법으로 추세를 예측할 수 있으며, 현대에는 수학적이고 통계적인 피팅 방법을 사용
	다이나믹모델링	<ul style="list-style-type: none"> • 수학적 모델을 이용하여 변수들의 상호관계를 모형화하여 분석하는 시뮬레이션 기법

환경스캐닝은 2)의 p. 5 참조

표1. 미래예측방법론²⁾

□ 미래예측 기법 중 시나리오 기법 선정 사유

○ 미래예측에 대한 가정

- 기여와 관련된 모든 요인들이 미래에 어떻게 진화하는가는 예측하기 어렵고 요인들 서로가 영향을 미치는 상관관계에 있음.
- 시나리오(일관된 일련의 가정을 기반으로 한 계획) 안에서 예상되는 상황의 전개를 전망하는 것이 바람직함.
 - 설정된 시나리오는 기본 가정이 광범위하게 충족되는 한 유효
 - 사건의 발생 시점부터 전개 용이

(예) 두 차례의 석유 위기 때부터 현재까지의 천연가스 시장에 대한 전망은 에너지 부문의 주요 큰 충격의 발생 시점의 예측은 어려웠지만, 장기적으로 미래의 특정 시점에서 터질 수 있다고 가정하여 대비책으로 활용됨.

2) 과학기술예측조사를 위한 방법론 및 프레임워크 개선연구('07.2)

□ 도출방향 및 핵심 고려 사항

○ 미래 원자력의 역할 전망: 우리나라와 세계가 설정한 목표와 그 목표를 달성하는 경로로 에너지 시장을 이끌기 위해 선택 가능한 정책 시나리오 등을 바탕으로 미래의 원자력의 모습을 그리는 것.

○ 목표: 인류가 당면한 최대의 위기인 지구 온난화를 억제하기 위한 기후 목표와 지구의 환경을 보호하면서도 인류의 번영을 촉진하기 위한 지속 가능 개발 목표

- 지속경제성장을 위한 CO₂ 절감 및 에너지 안보
- 안전, 효율 및 준비 상황을 고려하는 미래의 에너지 믹스

□ 미래 원자력의 역할 전망은 단순히 에너지와 원자력 시장의 미래 예측이 아님.

○ 세계적 에너지 정책의 핵심 목록

- 바탕이 되는 세계적인 목표 중 가장 중요한 것;
 - 당면한 최대의 위기인 지구 온난화 억제를 위한 기후 목표
 - 진보와 성장을 위한 SDG(Sustainable Development Goal)

○ 융·복합 기술 사회에 대한 예측(그림 1 - 2 참조)



그림 1. 미래사회에서의 원자력³⁾



그림 2. 에너지 환경 변화⁴⁾

3) 도전기술 2035년에 도전한다, 한국공학한림원 연구보고서 15-01-03, 2015

4) 도전기술 2035년에 도전한다, 한국공학한림원 연구보고서 15-01-03, 2015

□ 미래 원자력의 전망의 가변성

○ 각국이 선택할 정치/경제적 및 기술적 정책에 대한 여러 가정과 에너지 기술 발전의 정도에 의해 폭 넓게 변화

○ 전망하는 주체의 정치적인 입장에 따라 전망의 범위가 극단적으로 표현됨. - 현실적 미래 예측과 괴리

(예1) 2050년까지 에너지믹스(Mix)에서 원자력이 완전히 사라질 것으로 가정하는 그린피스의 전망

(예2) 2050년까지 원자력이 지금의 세 배로 팽창할 것이라고 예상하는 세계 원자력 협회의 전망

□ 본 보고서에서는 시나리오 방법론을 활용하여 미래 원자력의 역할 전망

□ 뿐만 아니라 기후 변화와 무관한 원자력 분야의 미래도 함께 전망

2. 원자력의 성과⁵⁾

□ 화석에너지 활용의 결과

○ 화석 에너지 자원은 석탄으로 출발하여 석유로 이어지며 지금까지 세계 경제를 지배

- 산업 사회는 이용 가능한 범위가 넓고 대체로 에너지 밀도가 높으며 수송이 쉬운 화석 연료 덕분에 크게 성장

- 초기 화석 연료는 새로 태어난 산업 단지들에 에너지를 공급함으로써 경제 성장의 귀중한 원동력

- 1920~1930년대까지는 화석 연료를 대체할 실용성 있는 대량의 대체 에너지 전무했음.

○ 화석 연료 에너지 사용은 필연적으로 CO₂ 배출을 증가시켰고 지구 온난화 초래

5) International Atomic Energy Agency, Climate Change and Nuclear Power 2018

- 1950년대까지 화석 연료와 다르게 탄소를 배출하지 않는 대규모의 에너지원은 수력이 유일함.
 - 수력은 적절한 수자원과 그 수자원을 이용할 수 있는 지형과 지리적 위치 등에 의해 제한
- 20세기 후반기 새로운 에너지 기술의 실용화
 - 원자력의 실용화
 - 탄소를 상대적으로 적게 배출하는 천연가스의 활용
 - 풍력 및 태양 에너지와 같은 새로운 가변 재생 에너지 (Variable Renewable Energy, VRE) 등장

□ 에너지믹스에 비 화석 대체재 추가 동인

- 최근 화석 연료 연소로 인한 대기 오염을 포함한 환경 문제, 경제적인 이유, 에너지 보안 등과 같은 비 기후적 요인에 의해 비 화석 대체재를 통한 에너지믹스가 주도됨.
 - 기후 변화가 지구 환경 문제의 핵심 문제로 대두되기 훨씬 이전부터 비 화석 에너지원은 CO2 배출량 절감에 이바지함.
- 비 화석 대체재(원자력, 수력 및 재생 에너지)로 1970년대 초부터 2015년까지 억제된 GHG 배출량(그림 3 참조)
 - 배출량 계산: 매년 발간되는 국제 에너지 기구(International Energy Agency, IEA)의 세계 에너지 밸런스(World Energy Balances)[2]에 있는 여러 가지 에너지원에 의한 발전량 자료를 기반으로 국제 원자력 에너지 기구(International Atomic Energy Agency, IAEA)가 계산
 - 막대 그림 검은 부분: 주어진 해에 세계 전기 부문에서 배출된 실제 이산화탄소 배출량
 - 막대의 총 높이: 화석 연료만으로 같은 양의 전기를 공급할 경우 추정된 총배출량(원자력, 수력 및 기타 재생 에너지 사용으로 억제되는 배출량과 동등)

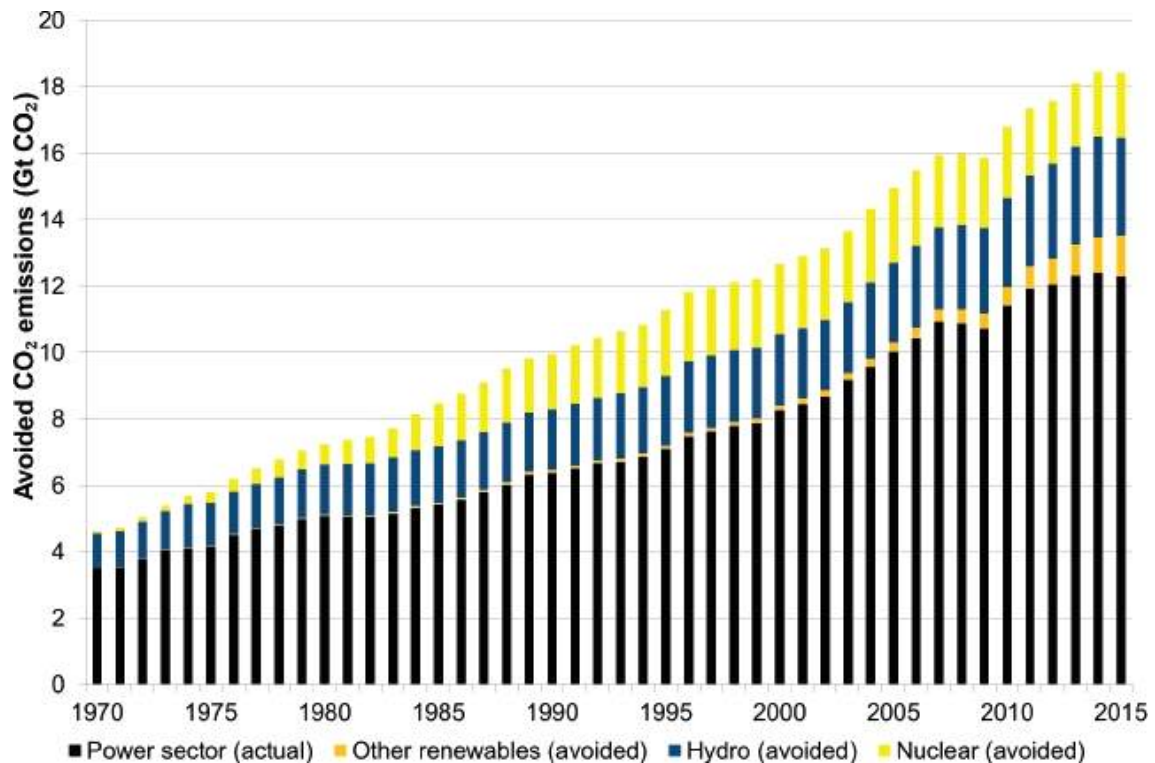


그림 3. 발전부문에서 배출되는 전 세계 CO₂ 배출량 및 3가지 저탄소 발전기술 사용으로 억제된 배출량⁶⁾

- 1970년대 - 1980년대에는 주요 에너지 수입국들이 석유 수입에 대한 의존도 저하에 노력 집중
 - 에너지 안보가 정치적 의제로서 큰 역할 수행
 - 석유 대체 에너지의 부족으로 인한 에너지 공백을 석탄으로 충당함에 따라 더 많은 온실가스 배출
 - 1970년대 발전에서 억제한 CO₂ 배출량의 대부분은 수력(약 1 Gt-CO₂)이고 이는 전력 부문에서의 실제 배출량의 30%)
 - 1990년대 후반에 점차 감소하여 2015년에는 24%
- 1990년대 이후, 경제적, 정치적 긴장 완화와 천연가스의 증가로 인해 석탄의 역할 약화
- CO₂ 배출량 억제에의 원자력의 역할

6) International Atomic Energy Agency, Climate Change and Nuclear Power 2018 (2018)

- 1970년대와 1980년대에 빠르게 증가
 - 억제한 배출량은 1970년에는 0.1 Gt-CO₂ 미만이었다가 원전의 평균 성장률이 23%/년으로 증가하여 1980년에 0.62 Gt-CO₂가 됨.
 - 그 후 다소 둔화된 성장을 10%/년으로 증가하여 1990년에 1.69 Gt-CO₂에 도달(억제한 배출량 측면에서 수력과 거의 유사)

□ 2000년대 이후 비 화석 대체재 간의 경쟁

- CO₂ 배출량을 억제하는 데에 수력이 다시 주도권을 잡음.
 - 수력 발전으로 인한 배출량은 2000년 2.14 Gt-CO₂에서 2015년 2.95 Gt-CO₂로 증가한 반면, 원자력으로 인한 배출량은 2000년 2.12 Gt-CO₂에서 2015년 1.95 Gt-CO₂로 오히려 약간 감소
 - 1970~2015년 동안 원자력은 총 68 Gt-CO₂를 억제했으며 이는 2010~2015년 전력 부문의 전체 실제 배출량과 유사
 - 1970~2015년 동안 수력은 90 Gt-CO₂를, 다른 재생 에너지는 약 10 Gt-CO₂를 억제
- 다른 재생 가능 에너지원(태양광, 풍력, 지열 및 바이오 연료)은 2000년 이후 이산화탄소 배출을 억제하는 데 이바지하기 시작하여 2003년 0.2 Gt-CO₂로 그해 실제 전력 부문 배출량의 2%에 도달
 - 이 억제 배출량은 10년 동안 연평균 14%의 성장률로 증가하여 2010년에 0.57 Gt-CO₂ (이런 성장세는 1980년대의 원자력과 유사)
 - 재생 에너지가 억제한 배출량은 그 후 5년 동안 평균 성장률이 16%/년으로 두 배 이상 증가하여 2015년 1.21 Gt-CO₂ (그 해의 원자력의 기여도의 약 62%)

□ 추가 고려 사항: 그림 3의 억제 배출량은 CO₂에 대한 것만 표현

- 억제한 CH₄ 및 기타 GHG (예, N₂O)를 포함하면 감소한 GHG의 총량은 훨씬 더 큼.
 - CO₂에 비해 다른 GHG 억제 배출량의 절대량은 훨씬 적지만, 비-CO₂ GHG의 지구 온난화 지수(Global Warming Potential, GWP)는 CO₂보다 훨씬 큼(대기에 미치는 영향이 훨씬 큼).

7) IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change) 5차 평가 보고서

- 원자력으로 감소시킨 CH₄ 배출량⁸⁾
 - 1971년에 0.008 Gt-CO₂-eq(감소 CO₂ 방출량의 약 8%)
 - 1981년에는 0.056 Gt-CO₂-eq
 - 1991년에는 0.16 Gt-CO₂-eq
 - 2009년에는 0.2 Gt-CO₂-eq
 - 이후 약간 감소
 - GWP 측면에서 원자력에 의한 CH₄ 배출량은 1971~2014년 동안 매년 CO₂ 배출량의 8~10%에 해당

□ 1970~2015년의 온실가스 배출 방지에 대한 원자력의 성과와 전망

- 첫 번째 단계(1970년대): 원자력이 가파르게 성장하여 GHG 배출량을 억제하는 속도가 크게 증가
- 두 번째 단계(1980년대): 일정하게 성장하며 온실가스 완화에 크게 기여
- 2000년대 이후: 그 후에는 비교적 일정하게 온실가스 배출 억제 증가
- 파리 협약(Paris Agreement)[5]의 목표: 전 세계 연간 평균 온도의 증가를 산업화 이전 수준과 비교해 2℃ 미만으로 유지
 - 이 목표를 달성하기 위한 미래 원자력의 역할에 대한 전망

- 기타 기후 변화와 무관한 원자력 부문 성과: 원자력 이론 교육 및 훈련, 방사성 동위원소 생산, 중성자 방사화 분석, 중성자 빔의 이용 연구, 핵 연료 및 재료 조사 시험, 중성자 도핑에 의한 반도체 생산, 중성자 포획 암 치료, 차폐 연구 등 기초에서부터 첨단에 이르기까지 광범위하고, 이러한 연구 및 기술은 환경 과학, 지구 우주과학, 재료과학, 의학, 농학, 약학, 생명 공학, 고고학 등의 다양한 분야에 걸쳐 시대의 변화에 따른 과학기술의 선진화를 선도하는 핵심적 실험도구로서 변천하면서 우리의 생활과 직·간접적으로 연관되어 활용됨.

8) Emissions Database for Global Atmospheric Research (EDGAR), Global Emissions EDGAR v4.2 FT2012 (2014)

3. 미래의 기여에 대한 고려

3.1 에너지 수요 전망

□ 전제

○ IEA의 세계에너지전망(WEO, 2019)

- 2000년대 이후 선진국을 중심으로 경제성장과 에너지소비 증가의 탈동조화(decoupling) 현상 발생
 - 건물·수송·가전부문 등의 에너지 효율 규제와 소비효율 개선, 산업구조의 변화 등
- IEA는 WEO에서 기후변화 대응 정도를 주요 결정변수(온실가스 배출의 약 85%가 에너지소비로 발생)로 다음의 세 가지 시나리오를 설정하고, 시나리오별 에너지수요를 전망
 - 선언정책 시나리오(SPS, stated policies scenario) : 각국이 파리기후변화협약(2015)에서 국제사회에 약속한, 자국의 온실가스 감축안에 따른 에너지수요
 - 지속가능개발 시나리오(SDS, sustainable development scenario) : 지구적 협력관계 속에서 지구온도 상승을 2° C 내지 1.5° C 이내로 억제
 - 현정책 시나리오(CPS, current policies scenario) : 각국의 현재 에너지정책 지속
- 미래 원전규모의 관점이라면 WEO의 SDS는 낙관적, CPS는 비관적 시나리오로 설정할 수 있음. WEO는 SDS와 두 시나리오의 중간값을 가지는 SPS를 기준으로 인식

○ 시나리오 전제 비교

- SDS : 에너지소비는 2040년까지 -0.3%/년 감소하고 경제는 저성장, 저유가, 온실가스가격은 매우 높음.
- CPS : 에너지소비는 1.3%/년으로 높은 증가세를 보이며 경제는 고성장, 고유가, 온실가스 가격은 낮음.

	SDS	SPS	CPS
에너지수요(연평균)	-0.3% 감소	1.0% 증가	1.3% 증가
경제성장(%)	저성장, 세계평균 3.4% 증가, 고성장		
유가(2040)	\$59/b	\$103/b	\$134/b
온실가스 가격	매우 높음(\$140/톤) ~ 낮음(\$39/톤)		

표 2. WEO의 시나리오별 주요전제

○ 국내 에너지계획

- 파리협약에 제출된 ‘국가결정기여(NDC, Nationally Determined Contributions)’를 준수. 따라서 온실가스 배출목표는 변수가 아니라 상수이며, 경제성장전망이 에너지소비의 주요변수임.
- 경제성장전망: 7차 전력수급계획 3.06%/년(~2029), 8차 전력수급계획 2.43%/년(~2031), 3차 에기본 2.0%/년(~2040)

□ 에너지수요 전망

○ 세계(WEO)

- CPS의 2040년까지 에너지수요는 연평균 1.3%의 증가 예상, 전력수요는 에너지수요에 비해 빠르게 성장함(2.2%/년). 원자력은 전력수요 예상 증가율 보다 낮은 1.3% 증가
- SDS의 에너지수요는 연평균 -0.3% 감소함. 그러나 전력수요는 연평균 1.9%의 높은 증가율을 예상. 원전도 연평균 증가율 2.2%의 높은 성장 전망

	실적	SPS		SDS		CPS	
	2018	2030	2040	2030	2040	2030	2040
TPD(MToe)	14,314	16,311	17,723	13,750	13,279	16,960	19,177
CAAGR(%)			(1.0)		(-0.3)		(1.3)
전력(TWh)	23,031	29,939	36,453	28,090	34,562	30,540	37,418
CAAGR(%)			(2.1)		(1.9)		(2.2)
원자력(TWh)	2,718	3,073	3,475	3,435	4,409	3,112	3,597
CAAGR(%)			(1.1)		(2.2)		(1.3)

주: 각주9),10)참조

표 3. 세계 1차에너지 수요 전망(IEA)

9) 원자력관점의 비관(SPS), 낙관(SDS)적 시나리오

10) TPD(total primary demand), CAAGR(compounded average annual growth rate)

- 한편, DOE/EIA는 2019년도 판 IEO(international energy outlook)에서 2050년까지 세계 에너지 소비로서 현 수준 대비 약 50%(약 1.13%/년) 증가 전망, 이 증가율 전망치는 IEA 전망 중 CPS의 결과와 유사함.
- 미래 에너지 증가의 대부분은 비OECD 국가에서 발생 예상

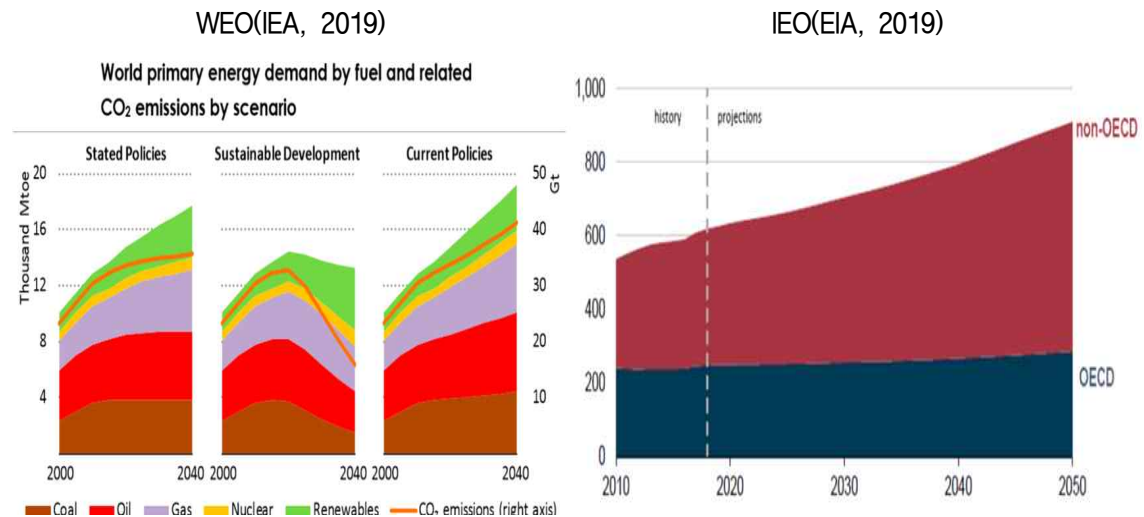


그림4. 세계 에너지 소비 추정

○ 국내

- 예기본에서는 최근 차수일수록 에너지수요의 큰 폭 감소 전망
- 예기본의 2030년 목표수요는 1차(수립년도, 2008년) 300.4백만TOE, 2차(2014) 220.5백만TOE, 3차(2019) 175.3백만TOE로, 3차의 목표 수요 전망치는 10년 전 예측치(1차 예기본)에 비해 68%에 불과
- 경제성장전망의 하향 조정과 에너지소비 효율 개선 반영
- 반면 1차에서 7차까지 전력수급기본계획에서 전력수요는 계속적인 증가를 예측하였으나, 에너지전환 정책의 추진 반영으로 (8차, 2017) 2030년의 예측수요가 7차에 비해 12% 감소
- 이후 수립된 3차 예기본에서 전력수요가 더욱 감소 예상 수요예측치 감소 이유는 역시 경제성장전망 하향과 소비효율 개선이지만 과소예측(underforecasting)의 논란이 있음.

	실적	7차 전력계획	8차 전력계획	3차 예기본	
	2017	2029	2030	2030	2040
TPD(백만TOE) CAAGR(%)	176.0	-	-	175.3 (-0.2)	171.8 (-0.1)
전력(TWh) CAAGR(%)	507.7	656.9 (2.2)	579.5 (1.0)	569.8 (0.9)	577.9 (0.6)
원자력(GW) CAAGR(%)	22.5	38.3 (4.5)	20.4 (-0.01)	20.4 (-0.01)	16.4 (-0.01)

표 4. 에너지·전력수요전망

□ 전력수요와 원자력

○ 전력수요

- 세계 전력수요는 2040년까지 1.0%/년 ~ 2.1%/년 증가 예상, 미국과 EU는 0.5%/년, 중국은 2.5% 증가 전망(WEO SPS)
- 국내 전력수요는 2040년까지 0.6%/년 증가 예상(3차 예기본)
- 7차와 8차 전력수급계획의 전력수요 증가율 전망치는 각각 2.1%, 1.0%로 7차 대비 8차의 증가폭이 1.0%p.(절반) 이상 감소

			2030	2040	2050
WEO (SPS)	세계			2.1	
	미국			0.5	
	EU			0.5	
	중국			2.5	
IEO	OECD				1.0
	비OECD				2.3
한국	7차 수급계획		2.1		
	8차 수급계획		1.0		
	3차 예기본			0.6	

표 5. 국가별 전력수요전망 비교(%)

○ 원자력

- 세계: 비관, 낙관적 시나리오에서 2040년까지 1.1%~2.2% 증가 예상, 낙관적 시나리오의 2040년의 원전수요는 2018년의 1.62배로 증가함.
- 낙관적 시나리오에서 원전증가는 지구온도 상승을 2℃~1.5℃ 이내로 억제하기 위해서는 원전의 역할 증대가 필요하기 때문임.

- IAEA는 2040년 원전용량으로 353GW~628GW 전망, IEA 전망치와 비교하여 비관적 시나리오는 더 낮고 낙관적 시나리오는 더 높음. 참고로 현재 원전용량은 390GW임.

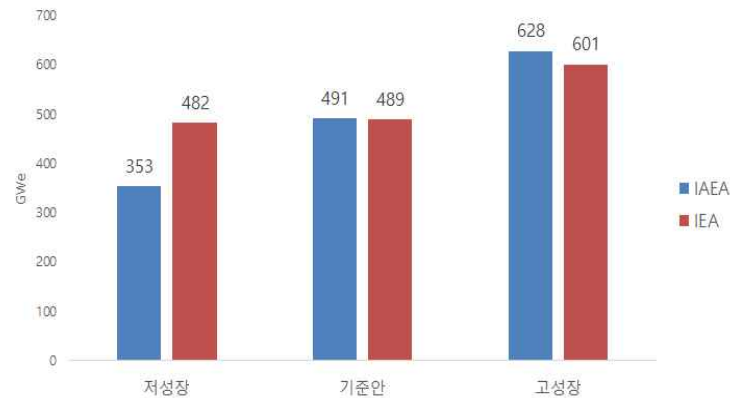


그림 5. 세계 원전용량 전망(IEA vs. IAEA, GW)

- 국내

- 8차 전력수급계획에서 원전용량은 2023년 28GW를 정점으로 2030년 20GW, 2040년에는 16GW로 감소 전망. 반면 7차 계획은 2030년까지 38GW로 확대할 예정이었음.

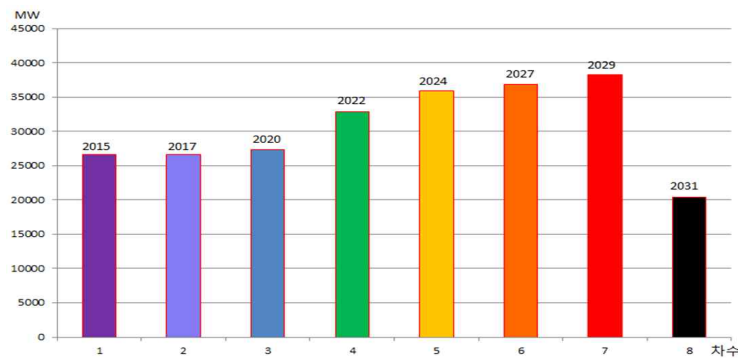


그림 6. 전력수급계획별 최종연도 원전용량

- 한편 미국 EIA는 한국의 전력수요가 2050년까지 연평균 1.4%/년 증가할 것이고, 에너지전환 정책이 원전의 단계적 폐지를 요구하고 있지만, 원자력 발전은 CO2 배출 감소에 기여하는 등의 이유로 발전 부문의 역할을 지속할 것으로 예상함. 2050년 원전 발전비중을 25%로 예상했음.

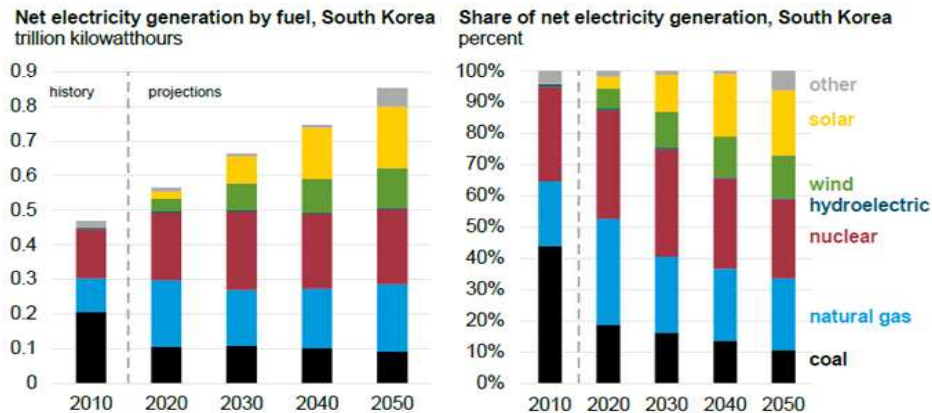


그림 7. EIA가 전망한 한국의 발전부문 미래

□ 미래 에너지 수요 전망

- 에너지소비와 경제성장이 탈동조화되는 상황에서 미래 에너지수요를 결정할 결정적 변수는 에너지소비에 의한 온실가스 배출의 규제 또는 탄소가격 등임.
- 세계 에너지수요는 2040년까지 시나리오에 따라 연평균 -0.3%~1.2%, 전력수요는 0.4%~1.2% 증가를 전망함. 원전은 1.1%~2.2% 증가 예상
- 국내 에너지수요는 2040년까지 연평균 -0.1%로 약간 감소, 전력은 0.6% 증가 원자력은 -0.01% 감소 전망
- 선진국에서 원자력은 가스, 재생에너지에 비해 비경제적 전원으로 인식됨.
- 우리의 경우 정부 정책으로 탈원전이 진행 중이며, 이는 전기요금 인상의 원인이 될 것임. 핵주기 미완성, 정부 에너지정책 등으로 원전 수출도 낙관할 수 없음.
- 탈원전 정책 지속 시에 대비하여 핵심인력의 이탈방지, 관련 산업계의 일감 개발 등을 통해 원전산업의 유지와 연착륙을 도모할 필요가 있음.

3.2 에너지 수요 전망과 GHG 완화 시나리오의 상관관계

□ GHG 완화에 대한 기여

○ 원자력의 기술 개선에 의한 기여

- 안정적인 운전 기록, 최대 50~60년 이상의 발전소 수명 관리 프로그램 구현, 운전비용 절감, 기술 혁신, 경쟁력 및 안전 기록을 포함한 원자력 산업 자체가 이룩한 성과

○ 원자력 제외 GHG 완화 에너지 기술에 의한 기여

- 신규 출현 에너지 기술, 그 기술들의 상대적인 경제적 성과와 여러 국가에서의 필요 에너지 자원의 가용성 확대 등 일반적인 에너지 부문의 상황 전개로 구성

○ 국가들의 경제 및 정치 정책 결정

- GHG 완화를 위한 경제 및 정치적 의사결정
 - 에너지 소비 절감에 대한 인센티브 등

□ 미래예측에 대한 가정

- 기여와 관련된 모든 요인들이 미래에 어떻게 진화하는지는 예측하기 어렵고 요인들 서로가 영향을 미치는 상관관계에 있음.

- 시나리오(일관된 일련의 가정을 기반으로 한 계획) 안에서 예상되는 상황의 전개를 전망하는 것이 바람직함.

- 한번 만들어진 시나리오는 기본 가정이 충족되는 한 유효
- 사건의 발생 시점부터의 전개가 용이
 - 두 차례의 석유 위기 때부터 현재까지의 천연가스 시장에 대한

추가 고려 전망은 에너지 부문의 주요 큰 충격에 대해, 과거 순간에는 예측할 수 없었지만, 장기적으로는 미래의 특정 시점에서 발생할 수 있다고 가정하여 대비책으로 활용함.

□ GHG 배출 억제와 관련된 원자력 시나리오

○ 확장 가능한 원자력의 규모:

- 미래 원자력 역할의 크기에 대한 문제
- 시간이 지남에 따라 다른 에너지 기술의 변화
 - 어떤 기술이 새로운 기술로 대체되는지에 대한 문제
 - 원자력은 단위 전기 에너지 생산 (MWh) 당 배출량을 줄이는 모든 저탄소 에너지 기술과 경쟁할 가능성 상존
 - 대체 에너지원들의 탄소 억제 순위 변경 가능
 - 파리 협약 체제 하의 에너지 생산자에게 기후 변화 완화 가속화 압력 증대

○ 어제 지식과 오늘의 목표 및 정책 의제 등을 바탕으로, 다양한 전망과 시나리오(2060년까지의 원자력 발전에 대한 주요 전망 시나리오 - 그림 6. 참조)를 사용하여 미래 원자력의 역할을 조명해 보는 것이 중요

- 향후 정책 선택과 기술 개발에 대한 여러 가정과 향후 수십 년 동안 전 세계 에너지 시스템에 의해 달성될 목표에 대한 기대에 따라 원자력 전력 생산의 예상이 넓은 범위로 변함.
- 때로는 전망의 범위가 시나리오 한계 밖으로도 돌출되기도 함.
- 26개의 시나리오 검토 기반 예측 원자력 발전량: 2015년에 2.571 PWh¹¹⁾ 에서 2050년에는 0 ~ 11 PWh 범위¹²⁾
 - 극단적인 값들(그 값을 만든 사람들의 현실을 배제한 영원적인

11) 10^{15} KWh

12) OECD International Energy Agency, World Energy Statistics and Balances (2018)

목표로 만들어진 특이값)의 무시 시, 5가지 극단적 시나리오 배제 가능¹³⁾

- 극단적 시나리오 배제 시, 예상 범위 3~7 PWh로 추정
- 2017년에 예측한 IAEA의 전망치¹⁴⁾: 3.079 ~ 7.041 PWh
- 배제된 5가지 시나리오를 제외한 21개 시나리오는 2050년 원자력 발전량 예측이 2017년 IAEA의 예측치와 유사
- 그림 6의 시나리오 중 6개는 2060년으로 확대하여 전망
- 21 시나리오 모두 미래 원자력의 역할이 커질 것이며 따라서 기후 변화 완화에 절대적인 기여를 할 것으로 전망

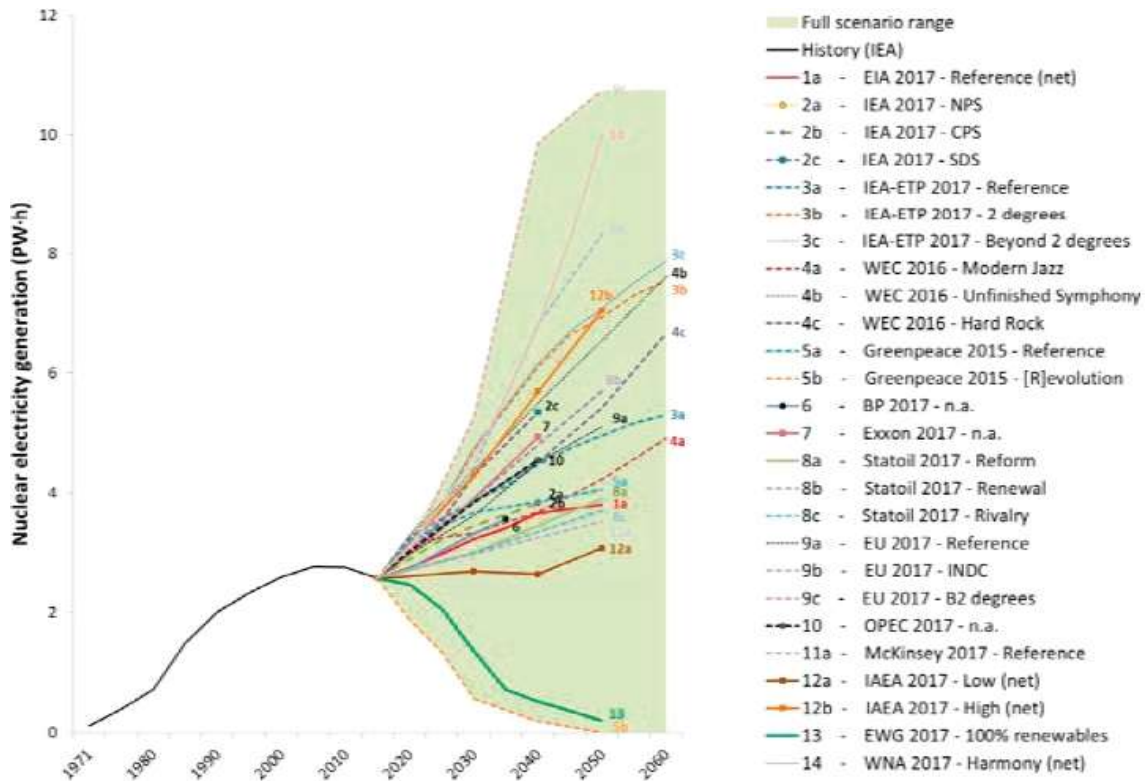


그림 8. 원자력 발전 시나리오 : 과거 데이터 (1971~2015) 및 예측¹⁵⁾ (2015~2060)¹⁶⁾

13) 배제된 5가지 시나리오 중 2개는 2050년까지 에너지믹스에서 원자력이 사라진다고 가정(그린피스와 에너지 감시 그룹이 제안). 나머지 3가지 시나리오는 너무 높은 전망 사례로 2050년까지 8 PWh 이상이 될 것을 예측(유럽 연합에서 제안한 두 가지 시나리오 (B2 Degrees 및 INDC)와 세계 원자력 협회(World Nuclear Association)가 제안한 한 가지 시나리오).

14) International Atomic Energy Agency, Energy, Electricity and Nuclear Power Estimates for the Period up to 2050, 2017 Edition, Reference Data Series No. 1, IAEA, Vienna (2017)

15) 그림의 약자: IEA — 국제 에너지기구, EIA — 에너지 정보 행정, NPS — 새 정책 시나리오, CPS — 현재 정책 시나리오, SDS — 지속 가능한 개발 시나리오, ETP — 에너지 기술 전망, WEC — 세계 에너지 협의회, EU —

□ 에너지 믹스에서의 우선순위 및 정치적 의사결정과 미래 원자력의 역할에 대한 영향의 상관관계

○ 일반적인 에너지믹스 정책 우선순위 및 정치적 의사결정이 미래 원자력의 역할에 미치는 영향을 고려하여 아래의 '현상유지', '성장' 및 '대립'의 3가지 시나리오로 분류¹⁷⁾;

- '현상유지' 시나리오는 기후 변화 대응에 현재의 경제 동향 및 정책을 큰 변화 없이 그대로 가져가는 경우
- '성장' 시나리오는 지구 온난화를 2°C (파리 협약 목표) 미만으로 유지하기 위해 온실가스 배출을 제한하는 데 혁신적인 노력을 기울이는 경우
- '대립' 시나리오는 국제 관계의 본질이 더욱 서로 대립될 것이라고 가정하고 에너지 안보를 미래 에너지 정책의 주요 요소로 간주

○ 미래의 세계는 '성장'과 '대립'의 시나리오의 어느 중간에 있겠지만 어떤 한 시점에서 보면 때로는 '성장'으로 때로는 '대립'으로 표현될 수 있음.

- 2015년 파리 협약 수립 당시를 되돌아보면 세계는 뚜렷한 장밋빛 '성장'의 상황
- 그 후 자국의 경쟁적 이익을 우선하는 미국 트럼프 정권의 등장이나 영국의 브렉시트 현실화는 다분히 '대립'으로의 방향 전환 상황
- 2020년 갑자기 세계에 몰아닥친 코로나 대유행 위기는 세계를 급격히 '대립'의 길로 유도
 - 전염병 사태를 극복하는 과정에서 등장한 극단 처방들이 새로운 표준(New Normal)으로 자리 잡으면서 개별국가 단위의 권력을 강화하고 민족주의의 재 발흥 우려
 - 자국 바깥으로부터의 부품 수급 차질 등 국제 생산 공급망의 취

유럽 연합, INDC — 자발적 결정 기여 시나리오, B2 Degrees — 2도 그 이상의 시나리오, EWG — 에너지 감시 그룹, OPEC — 석유 수출국 기구, WNA — 세계 원자력 협회, na — 해당 사항 없음 표시

16) International Atomic Energy Agency, Climate Change and Nuclear Power 2018 (2018)

17) Statoil, Energy Perspectives 2017: Long-Term Macro and Market Outlook, Statoil ASA, Stavanger (2017)

약성이 드러나면서 자급자족 경제, 보호 무역주의 풍조의 확산 우려

- 자국 우선주의 기조가 강화되면서 이민자나 외국인 혐오 확산, 기후 변화 등 전 지구적 문제를 해결하는 데 필요한 국제 공조 약화
- 전염병 통제를 위해 강화된 권력은 전염병이 물러나면서 같이 물러나는 대신 다른 목적의 정치적 경제적 이익을 위해 그대로 대중 위에 군림 가능성 있음.

○ 이 시나리오들 모두 2017년 IAEA 예측치(3.079 ~ 7.041 PWh) 내에 존재

- '성장' 시나리오에서는 대부분의 기후 친화적 시나리오와 유사하게 원자력은 다른 시나리오보다 가장 높은 성장률을 보여서 2014년 대비 124% 성장하며 2050년에 5~6 PWh에 도달함.
- '대립' 시나리오에서는 복잡하게 얽힌 정치 추세 때문에 에너지 안보를 최우선 순위로 둬 따라 2050년의 원자력 전망치는 3.64 PWh에 도달함.
- '현상유지' 시나리오의 2050년 원자력 예측치는 3.84 PWh임.

○ 시사점: 이 세 시나리오를 조금씩 섞어서 편집 시, 미래 원자력의 역할에 대한 광범위한 스펙트럼 구현 가능.

□ 에너지 믹스와 CO₂ 배출량의 차이 분석

○ 기후 보호에 대한 미래 원자력의 기여를 이해하기 위해서는 전체 에너지믹스의 추세에 대한 조사 필요

- 다양한 시나리오를 비교하고 그들의 CO₂ 배출량의 차이 분석
 - 관련 시나리오의 가정에 따른 추진 요인에 의해 분리 가능
(예) IEA가 WEO에서 제안한 두 가지 시나리오인 NPS와 SDS의

비교

· BAU 사례와 '기후 변화 완화' 사례간의 차이 분석

→ 오랫동안에 걸친 두 사례의 GHG 배출 차이 분석 가능

→ SDS의 추가 GHG 배출 감소의 주요 요소는 에너지 효율의 개선(그림 9 참조).

○ 기후 친화적인 시나리오에서 IEA가 따르는 접근법은 전 세계적으로 기후 변화 완화 목표를 달성하기 위해 모든 이용 가능한 체제와 도구가 사용되어야 한다는 생각에 기반을 둠.

- 파리 협정의 틀 내에서 다른 가능한 모든 고려 사항보다도 배출 감소가 우선
- 지구 온도가 2℃ 미만으로 유지되도록 하는 데에 원자력과 재생가능 에너지 등 저탄소 에너지원과 에너지 효율 개선을 포함하여 현재 산업 규모로 이용 가능한 모든 기술을 완전히 사용할 것임을 의미
- 그림 8에 제시된 대부분 시나리오에서 전제되며 모든 시나리오에서 적어도 절대적인 관점에서 원자력 및 재생 가능 에너지 생산이 증가

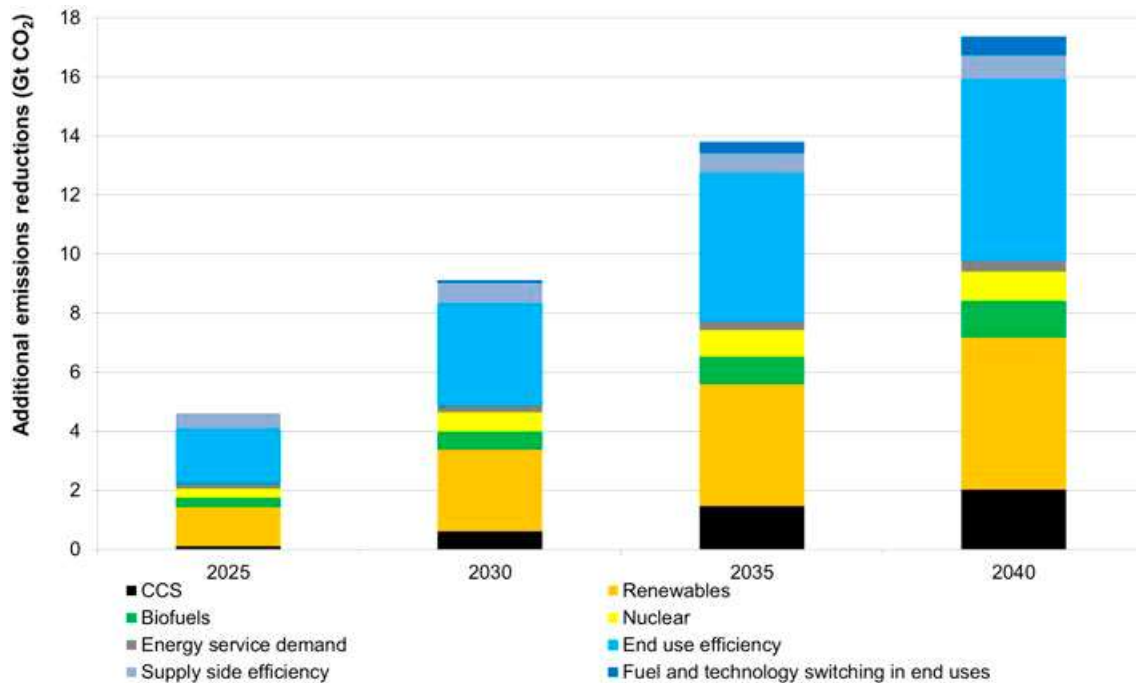


그림 9. NPS와 비교하여 SDS를 통해 달성하는 2025~2040년간의 각 기술에 의한 추가적인 CO₂ 배출량 감축량¹⁸⁾

○ 일반적으로, 전 세계 에너지믹스에서 저탄소 에너지원의 상대적인 비중도 향후 수십 년간 증가할 것으로 예상됨.

- 기후 변화 완화에 우선순위를 둔다는 기본 가정이 유지되는 경우에만 그림 8의 접근법이 합리적임.
- 그린피스와 혁명 시나리오(Greenpeace Revolution Scenario)¹⁹⁾ 또는 에너지 감시 그룹 (Energy Watch Group)의 100% 재생 가능 시나리오²⁰⁾와 같이 재생 가능 에너지로 전환하는 것이 주요 목표인 경우, 미래 원자력의 역할은 미미함.
 - 스마트 그리드와 전기 저장 장치에서 매우 중요한 발전 필요
- 에너지 안보 우선시 시나리오('대립' 시나리오)에서 미래 원자력의 역할은 확장됨.
 - 에너지믹스에서 재생 에너지의 기여는 제한적으로 유지

18) International Atomic Energy Agency, Climate Change and Nuclear Power 2018 (2018)

19) Greenpeace International, Global Wind Energy Council, Solarpower Europe, Energy [R]evolution 2015, Greenpeace, Amsterdam (2015)

20) Ram, M., et al., Global Energy System Based on 100% Renewable Energy - Power Sector, Study by Lappeenranta University of Technology and Energy Watch Group, Lappeenranta and Berlin (2017)

- 21세기 동안 화석 연료는 여전히 세계 에너지와 경제에서 지배적인 자원 성격 유지

□ 우선순위와 가정 변경 시, 타 저탄소 에너지 미래 전망 시나리오 구성 가능

○ 저탄소 에너지원의 역할을 고려한 3개의 개념적 그룹

- (i) 원자력 및 재생 에너지 모두 확장
- (ii) 재생 에너지만 확장
- (iii) 원자력 확장

□ 단기적인 CO₂ 배출 억제용 원자력의 기여는 현재 운전, 건설 및 준비 중인 NPP(Nuclear Power Plant)에 의해 달성됨.

○ 단기 기여의 첫 번째 요소는 운전하고 있는 발전소의 수명 연장

- 현재 원자력은 유럽 저탄소 전력의 절반, 세계 저탄소 전력의 1/3 생산
- 원전의 조기 퇴역은 기후 변화 충격 악화
 - 원전 발전량의 감소는 다른 부문의 배출량 감축 정책에서의 진전을 부분적으로 상쇄
 - 재생 에너지로 달성한 배출량 감소 이익 상쇄
 - 재생 에너지의 분담률 증가로 인한 그리드 불안정
 - 그리드 안정화를 위해 많은 화석 발전소 백업 시, 또는 더 빠른 스마트 그리드로의 전환이 요구 시, 원전 유지 시보다 비경제적이고 불안정적임.

□ 2017년 추정치에 비해 IAEA 원전 용량 예측의 2018년 평가치 하락

○ 원자력이 2017년 예상보다 기후 변화 완화에 덜 기여함을 의미

- 향후 수십 년 동안 전력 수요가 급격히 증가할 것이므로 CO₂ 배출 추세는 아직 완화되지 않는 상황에서, 원자력 에너지 감소는 기후 변화 완화 전망에 대한 심각한 우려 제기
- 저탄소 공급원은 화석 연료 연소 발전 용량을 대체하여야 할 뿐만 아니라 추가적인 전력 수요 증가 충족 필요
 - 수요 증가의 이유 중 하나는 전 세계의 수많은 국가가 전기 생산으로 증가하는 총 에너지 수요의 비중을 충족해야 하는 경제 발전 단계에 있기 때문
 - 모든 저탄소 에너지원이 필요하며, 그 어느 것도 배제 불가
- 모든 저탄소 에너지 기술의 적정 기여를 위해 정책 개발 필요

□ 에너지 공급에 있어서 원자력 발전에 대한 불확실도의 규모 심각

○ 최신 전망 사이의 126GWe의 발전 용량 감소는 온실가스 배출, 대안적인 저탄소 기술의 배치, 투자 및 인프라 요구 사항 및 에너지 시스템 성능에 악영향 끼침.

- 2018 년 IAEA 원자력 발전 전망에서 2050년에 대한 높은 추정치는 2017년에 계획된 874 GWe에서 748 GWe로 수정됨. (그림 10 참조).
- 그림 11에서 볼 수 있듯이 후속 전망에서 추정치가 계속 하향 조정되는 추세는 최근 수 년 동안 지속됨.
 - 원자력에 대한 대중 수용성 하락과 이로 인한 정치적 논란에 기인

○ 원자력 용량의 지속적인 감소로 인해 발생하는 2018 ~ 2050 년 동안 누적 GHG 배출량이 최대 12 Gt-CO₂-eq로 상승

- 파리 협약 목표 달성 노력 손상
- 감소되는 원자력 용량의 타 저탄소 재생 가능 발전 용량으로 완전

대체 시, 2018 ~ 2050년에 걸쳐 재생 가능 에너지에 대한 투자 및 자금 지출이 약 1조 달러 증가될 것으로 추정됨.²¹⁾

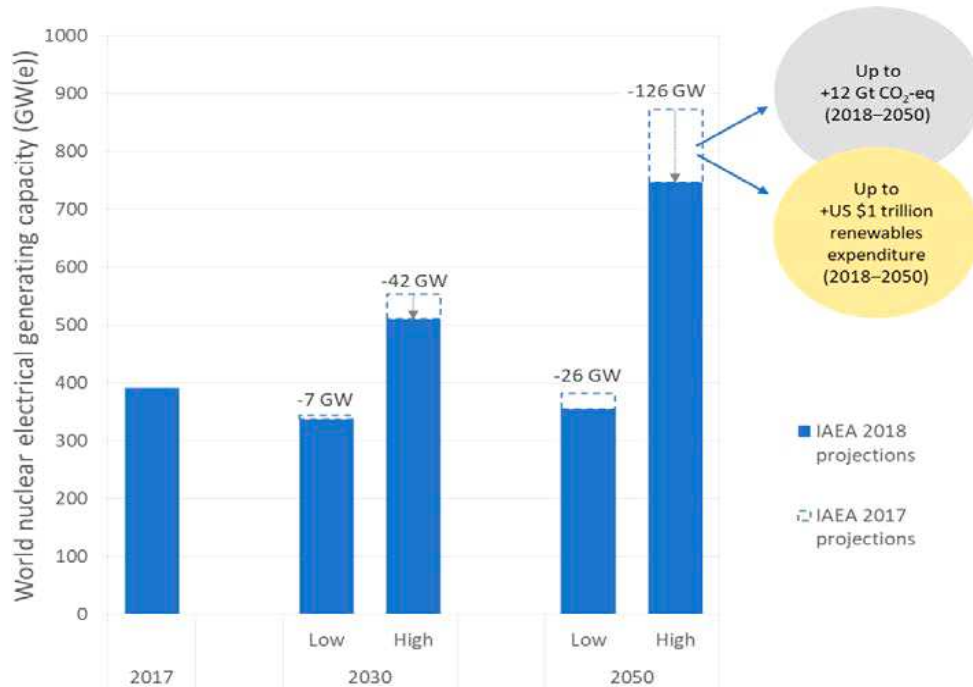


그림 10. 미래의 원자력 발전 용량에 대한 최근의 IAEA 전망 비교.

출처: 참고문헌 [1].

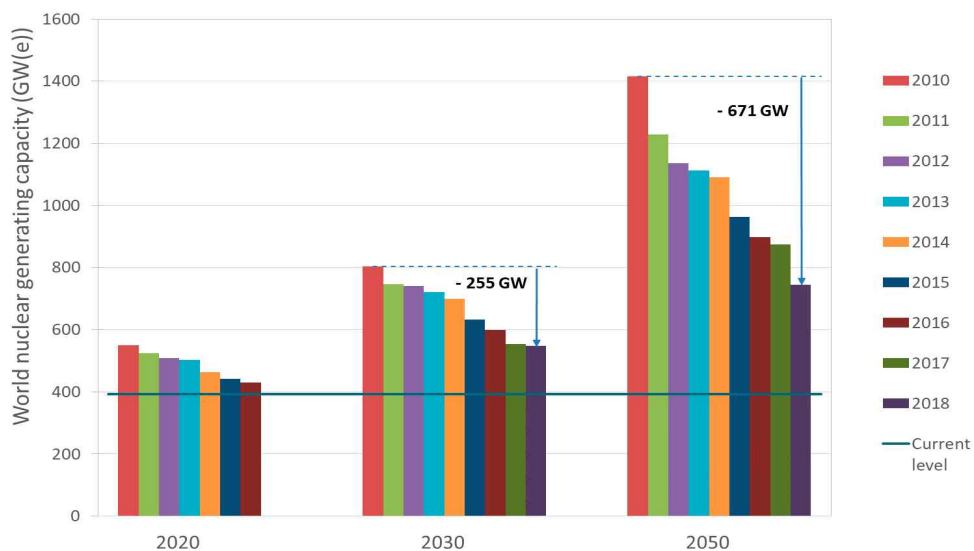


그림 11. 2011년부터 2018년까지의 미래 원자력 전력 생산 용량에 대한 IAEA의 높은 전망

출처: 참고문헌 [1]

21) Murphy, D., Berkman, M., Impacts of Announced Nuclear Retirements in Ohio and Pennsylvania (2018), http://files.brattle.com/files/13725_nuclear_closure_impacts_-_oh_pa_-_apr2018.pdf

□ 시사점: 전세계적으로 에너지 수요는 꾸준히 증가할 것이며, GHG 완화 시나리오 상 2050년까지 원자력의 활용은 지속될 것으로 전망 됨.

□ 현재의 원자력 용량, 한계 및 장점

○ 2015년, 전세계 원자력 용량: 약 2.5 PWh(전체 발전량의 11.5%)

- 10 개의 새로운 원자로가 가동됨.
- 중국은 새로운 원자력 용량에 가장 크게 기여
 - 중국의 원자력 용량은 지난 10년 동안 크게 발전했으며 2050년 까지의 성장의 대부분을 차지할 것으로 예상
- 타 성장 지역은 러시아, 유라시아, 인도 및 중동임.
- 2015년에 8개의 건설 프로젝트가 시작되면서 2020년까지 추가 용량이 도입될 것으로 예상
 - 2015년에 시작된 새로운 원자로의 평균 건설 시간은 6.2 년으로 이는 2014년에 시작된 원자로의 7.6년에 비해 개선됨.
 - 최근까지 완공된 46개의 원자로의 평균 제작 기간은 10.4년 (언제 가동될 수 있는지에 대한 불확실성 암시)

○ 현재 14개국이 원자력 발전소를 건설중

- 2016년 7월 현재, 58개의 원자로 건설중
- 건설중 용량은 유럽 (13.9GW), 아시아 (47.4GW), 남미 (1.4GW) 및 북미 (6.2GW)에 분산
- 건설중 모든 원자로 중에서 14개 국가 중 9개 국가에서 상당한 중단 경험 - 전체 프로젝트의 2/3가 지연
 - 지연은 주로 도매 전기 가격 하락, 높은 부채 부담, 비용 증가 및 재생 에너지와의 경쟁으로 인해 자금의 어려움을 겪고 있는 원자력 발전회사 때문임.

○ 현재 원전의 한계

- 신규 원전은 자본 비용이 많이 들지만, 발전소 수명 동안 대부분의 다른 기저 부하 전력원과 가격 경쟁력이 있을 것으로 예상됨.
- 가변적인 재생 에너지와 결합할 수 있는 백업전원용으로의 사용은 제한되며, 타 백업 전원 및 저장 장치와 경쟁에 애로
- 원자력 안전, 폐기물 처리 및 해체 분야의 주민수용성이 성장에의 중대한 장애이며, 강력하고 독립적인 규제 기관이 미래 원자력의 성장에 필수적임.
- 노후원전의 단계적인 폐지 필요성 감안 시, 현재 수준의 원자력 용량 유지에 애로

○ 그럼에도 불구하고, 원자력 발전은 GHG 배출량 저하와 안정적인 기저 부하 공급 보장에 지속적인 중요 역할 담당

□ GHG 완화 시나리오와 미래 원자력 용량 수요

○ “현상유지” 시나리오에서 원자력은 2050년까지 54 % 증가하여 매년 평균은 1.2 %/년 증가함.

- 2050년 세계 발전량의 비율은 15 %이며, 3.84 PWh임.

○ “대립” 시나리오에서는 총 원자력 발전량은 3.64 PWh임

- 5 %의 차이는 “대립” 시나리오에서 예상되는 경제 성장을 저하와 지역간 협력 부족 사유로 인한 것임.
- 국제 무역 분쟁 및 보호주의로 인한 전력공급 안정의 필요성 때문에 원자력 수요가 생성됨.
- 복잡하게 얽힌 정치 추세 때문에 에너지 안보를 최우선 순위 (원자력은 에너지 안보에서 다른 에너지원보다 비교 우위)
- 낮은 성장률, 증가하는 보호주의 등 세계 경제에 대한 낙관적이지 않은 시나리오에서도 원자력이 그로 인해 발생하는 에너지 안보

위험에 대비하는 헷지에 활용될 것으로 예상

- “성장” 시나리오에서는 원자력은 2050년까지 매년 2.3 % 증가하여 총 124 %까지 성장하여 두 배 이상 증가
 - GHG 배출 감소를 달성하기 위한 기저 부하 공급원으로써 화석 연료를 대체함과 동시에 세계 전력 수요의 상당 부분 감당
 - 2050년에 원자력은 총 전력 생산량의 16% 차지하며 총 원자력 용량은 5.60 PWh임.
 - 원자력은 에너지믹스의 중요 부분으로 고려되며 타 기저 부하 전력원의 대체재 역할 수행
- 시사점: 원자력이 GHG 완화 목표에 지속적으로 기여하면서도 비기후적인 잇점인 에너지 안보 우수성으로, 코로나 대유행으로 인한 “대립” 시나리오로 전개 가능성이 커진 시점에서 볼 때, 미래 원자력의 역할이 기대됨.

□ 시나리오별 국내원전용량 전망

○ 시나리오 설정

(현상유지는 절충안, 성장은 낙관적, 대립은 비관적으로 가정)

- 비관적 : 탈원전 정책 지속, 신한울 3,4호기를 포함하여 신규원전 건설은 고려하지 않으며, 가동원전의 계속운전도 고려하지 않음. 따라서 최초 운영허가일이 종료된 원전은 폐쇄함.
- 낙관적 : 제7차 전력수급계획의 원전용량이 장기적으로 유지되는 것으로 가정. 신한울 3,4호기, 천지 1,2호기, 신규 1,2호기 건설, 가동원전은 10년 1회 계속운전, 가동원전이 폐지되면 동일용량의 원전이 건설된다고 가정함. 2030년 가동 원전기수는 30기 수준임. 가동원전 30기는 국내 전력시스템에 수용가능한 최대기수임. 이는 장기적인 원전 설비비중 29%를 목표로 정한 제2차 에너지 기본계획에서 결정된 것임. 원전 설비비중이 29%일 경우 발전량 비중은 50% 내외를 차지함.

- 절충안 : 7차 전력수급계획에서 입지가 확정된 신한울 3,4호기와 일부 부지매수가 진행된 천지 1,2호기를 건설하고, 가동중인 원전은 10년 1회 계속운전됨을 가정함.

○ 원전용량 전망

- 비관적 : 2050년까지 현재 원전용량의 절반 수준인 11.4GW로 감소
- 절충안 : 2030년까지 원전용량 증가, 2050년에는 22.2GW 수준 유지
- 낙관적 : 2030년 이후 37~38GW의 원전용량이 유지됨.

	2030	2040	2050
비관적	20.4	16.4	11.4
절충안	34.7	26.2	22.2
낙관적	37.7	36.7	37.2

표 6. 시나리오별 원전용량(GW)

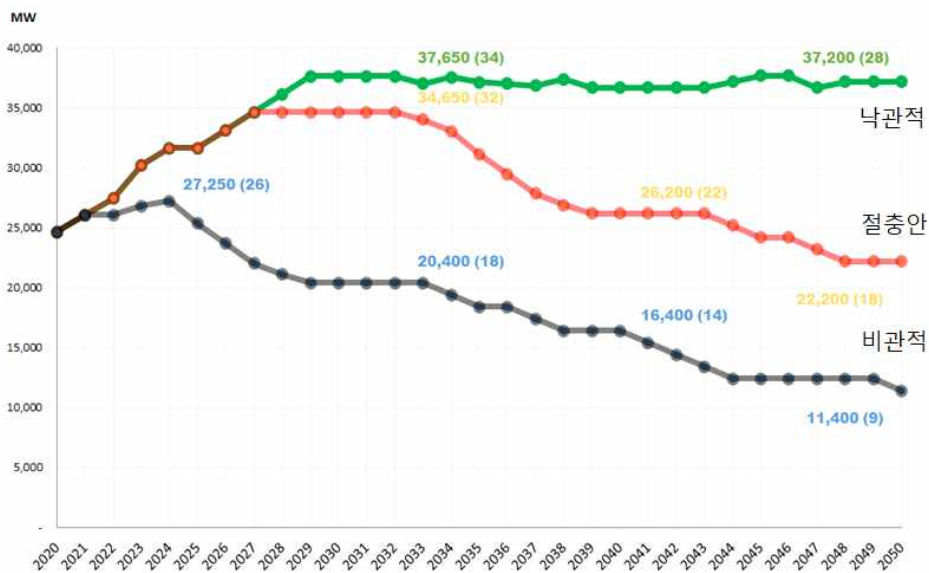


그림 12. 시나리오별 원전 설비용량(GW)

4. 원자력 대책

4.1 현재 정책 하에서의 원전수출 현황 예측

4.1.1 세계시장 전망

4.1.1.1 에너지 시장의 전반적인 전망

□ 증가하는 전력 수요를 충족시키기 위한 신규 발전소 증설 필요

- 세계 발전 이력을 살펴보면 1990년대 대비 현재 발전량은 2배 증가했으나 비중에 있어서는 지속적으로 화석연료가 2/3를 차지
 - ‘40-’ 50년까지 1~2%/년의 에너지 소비 증가 예측
 - 전력소비는 에너지 소비의 2배 수준으로 가파르게 증가 예상
 - 원자력 발전량은 소폭 상승에 그치고 있고 수력을 제외한 재생에너지의 비중은 아직 미미
 - 2050년에는 전 세계 전력생산량이 40 PWh 이상 증가할 것으로 예상(현재 대비 80% 정도 증가).

□ 세계적으로 에너지 소비의 탈탄소화의 지속 예상

(비관적 전망) 화석연료는 여전히 1/2 수준 이상 차지
화석연료 발전소 특히, 이산화탄소를 많이 배출하는 석탄 화력발전소 대체에 애로

(낙관적 전망) 2/3 정도가 무탄소 전원에서 공급.
수력을 포함한 재생에너지는 절반 수준 증가, 원자력은 1/4정도 공급

- 2℃ 이내로 기후변화를 잡기 위해서는 비탄소 에너지(수력, 태양광, 풍력, 원자력)가 2/3 이상이 되어야 함. (그림 13 참조)
 - 석탄과 천연가스도 이산화탄소 포집 및 저장 병행 필요

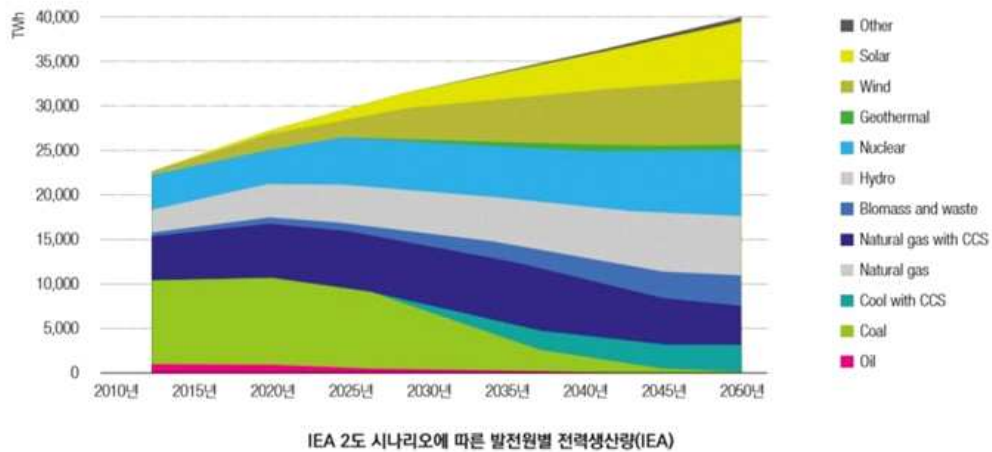


그림 13. IEA 2도 시나리오에 따른 발전원별 전력생산량

4.1.1.2 원전시장 동향

- 후쿠시마사고 이후 감소했던 발전량이 재가동 및 신규원전 추가로 인해 증가 추세
 - 기후협약의 이행과 관련하여, 원자력 발전의 중요성 인식 가속화
 - 2040년까지 원자력을 전체 발전의 15%로 유지
 - 원전 발전량 5.345 PWh 및 설비용량 720 GWe 규모 필요
 - 2021년부터 연간 25 GWe의 원전 증설 필요²²⁾
 - 1980년대 원전 건설 속도와 비슷한 속도로 건설할 경우 달성이 가능한 수준
 - 2040년까지 APR1400급 대형원전 매년 18기 건설 필요
 - 원전수출 전망 청신호(전 세계적인 ‘신규 원전건설의 큰 장’)
 - (인도) 2030년까지 1500억달러 투입 신규 원전 15기 건설
 - (영국) 2030년까지 16기 건설 방침
 - 터키, 필리핀, 체코, 베트남, 남아프리카공화국, 폴란드 등도 신규 원전 건설 준비
 - 미국, 프랑스, 중국 등의 국가는 신규 원전 건설 프로젝트 추진
 - 일본은 후쿠시마 사고에도 불구하고 ‘30년 에너지수급계획에서 원자력 비중을 20~22%로 설정

22) OECD IEA 발간 World Energy Outlook 2017

< 2018년 7월 기준, 세계 원자력 현황 >

구분	기수	설비용량(MWe)	국가수	보기
운전 중	453	397,649	30개국	IAEA
건설 중	57	57,890	17개국	IAEA
계획 중	153	156,882	22개국	WNA
영구정지	166	66,463	20개국	IAEA

*출처: 한국원자력산업회의

표 7. 세계 원전 현황

- 독일, 대만 등 일부 국가의 탈원전 정책 추진 현황
 - 전력요금 증가, 이산화탄소의 효과적인 저감 불가, 전력 공급 불안정성 증가 등의 문제점 표면화
- 기후변화 완화를 위해, 즉각적인 전세계 온실가스 배출량 감소 필요²³⁾
- 최종에너지 소비의 전기 전환 촉진
- 증가되는 전력수요의 저탄소 발전화
 - 원자력 발전량 - 2050년까지 평균 2.5배 정도 증가 필요.
- 시사점: 일, 이십년 내에 약 100여 기의 신규 원전건설 시장이 열리며, 그 이후 장기적으로 300여 기의 신규 원전건설이 예상되는 바 원전수출 경쟁력을 확보 및 유지하는 것이 바람직함.

4.1.1.3 수출시장 환경

- 저탄소에너지 기업 간 경쟁 심화
- 전 세계적인 저탄소에너지 기조에 따라 신재생에너지 공급 비중이 확대되고 있는 상황에서 글로벌 원전기업들은 원전 경쟁력 유지를 위한 신기술 개발과 더불어 중소형원전 개발 및 건설 추진 등 에너지 간 경쟁이 심화

23) IPCC 1.5° C의 지구온난화 특별보고서(2018. 10)

- 현 글로벌 원전시장은 Buyer's Market으로 발주사의 금융지원 요구 증대에 따라 러시아, 중국이 정상외교를 포함한 국가 차원의 강력한 재정지원 및 국방·의료 협력 등 신규원전 도입국 지원방안 제시를 통해 최근 글로벌 원전시장 주도

□ 원전수출 경쟁력

○ 국내 원자력산업계는 국제적으로 기술성 및 경제성이 입증된 노형 보유

- 지속적 신규원전 건설로 세계 최고수준의 건설 및 운영 역량과 더불어 안정적인 공급망 유지

○ 국내위주의 원전사업 추진으로 해외 경쟁사대비 글로벌 조직 및 인적역량, 해외 네트워크 및 영업망이 부족

- 지금까지 원전 플랜트 위주의 해외사업 추진으로 가동원전 설비 개선, 운영·정비 서비스, 기자재 공급 수출시장 미확보
- 국내보유 기술 및 공급망을 활용한 수출상품 발굴 및 사업모델 수립 미진으로 경쟁사대비 수출 경쟁력 미비

○ 원전수출 경쟁국 현황

(러시아)

- ROSATOM이 원자력 산업 전 분야를 관장
- 모든 분야(우라늄 개발 및 채굴, 농축과 변환, 핵연료 생산 및 공급, 기계공학, 원전 설계 및 건설, 발전과 해체, 사용후핵연료와 방사성폐기물 관리 등)에서 자산과 역량을 보유하고 사업 다각화가 완성된 기업임.
- ROSATOM은 최근에 BOO(Build-Own-Operate) 사업형태로 해외 사업을 확장하고 있음. 이 사업형태로 ROSATOM은 원전 사업의 건설에서 운영까지 전반적으로 참여하고 있으며, 이론적으로 원전과 원자력에 대해 잘 모르는 국가들도 손쉽게 원전을 건설 및

운영할 수 있음.

(중국)

- 지난 40년간 지속적인 원전 건설을 통해 국산화를 달성하고 자체적으로 연간 10기의 원전 기자재를 공급할 수 있는 supply chain을 구축
- 2007년 이후부터 현재에 이르기까지 국산화 비율은 85% 정도로 상승하였고, 연간 8~10기의 기자재 공급 가능한 완성 단계의 supply chain 구축

(프랑스)

- 공급사인 Areva NP는 1차 계통의 100% 공급 능력을 확보하고 있으며, 그 외 안전등급 기기, 보조 장비 및 I&C 부분의 50%는 Areva 자체 또는 국제 supply chain을 통해 공급함
- 안전등급 기기, 보조 장비 및 I&C 부분의 나머지 50%는 공개 구매를 통해 확보하며, 참여 기업에 고도의 원자력 자격 인증 요건을 요구함
- 프랑스는 현지화를 통해 동유럽, 중국 등에서 많은 공급자를 발굴한 경험이 있으며, 이 과정에서 공급자 등록부를 유지하고 최우수 공급자를 확인하여 전 세계적인 supply chain을 구성하고 있음

(미국)

- 대표적 공급사인 Westinghouse 사는 보유한 기술을 토대로 현지 자원을 이용하여 국제적, 권역별, 지역별 경쟁력을 갖춘 supply chain 구축을 추구
- 현지화 과정에서 얻은 중요한 교훈으로 현지 공급사 능력에 대한 편견 극복이 필요하며 현지 법규, 요건, 예측 등에 대한 전문성 확보가 중요함이 대두

- 시사점: 원전수출하기 위해서는 수출 후 60년 이상의 운영기간 동안의 기술/부품 지원 및 공급과 원전 계속운전 역량 보유 필요하며, 이를 위해 지속적인 원전 기술 개발 역량 및 인력 필요

4.1.2 원전수출 필요요건 및 대책

□ 필요요건

- 차세대 기술을 포함한 원전 기술개발이 지속적으로 진행된다는 신뢰를 세계시장에 주어야 함.
 - APR+ 개발 시, 피동보조급수계통 개발로 피동원자로 개발에 앞서 나갔으나 현재는 개발이 중단된 상태로 원전수출을 위해서는 최종 단계의 기술(실증) 확보 필요²⁴⁾
- 원전산업의 자생 생태계가 조성되도록 정부의 지원과 수출 재정에 대한 보증 필요
 - 안전 원전에 대한 신뢰감 조성
 - 수출원전에 대한 지속적인 지원 및 공급 가능 보증
 - 원전기술 최상위 역량 유지 보장

□ 대책

- 신규원전 건설 노형의 원전수출 노형화
 - 원전수출을 나라의 성장 동력으로 삼겠다는 의지 표명 필요
 - 신한울 3,4호기의 수출노형화 및 실증 추진
 - 세계시장의 발주처들의 실증부문 의문 해소와 함께 원전수출을 위해 유지해야 할 기반 요건에 대한 투자를 지속적으로 하고 있다는 신호를 수출 대상국에 보내어 원전수출 분위기를 조성
 - 신한울 3,4호기에 피동시스템의 보완을 통해 원전관련 기술개발 지속성 유지 정책 제시

□ 원전수출의 경제적 효과(UAE 원전수출을 통해 확인)

- 원전수출의 경제성 효과
 - 에어버스 380 15대 수출
 - 15만톤급 초대형 유조선 45척 수출
 - 소나타 25만대 수출

24) AP1000, VVER1200, HPR1000 등 경쟁노형 모두 피동 안전계통 강화

- 최신 스마트폰 500만대 수출

- 원전건설시 부가가치는 약 70조 정도, 약 십만 명 정도 고용창출 효과 발생

4.1.3 수출전략 및 원전수출 전망

□ 원전수출전략

- 한국형원전 단독 진출과 더불어 글로벌 원전기업과의 전략적 협력을 통한 플랜트사업 수주 다각화 및 재원조달 역량 강화
- 글로벌 원전시장에서 중소형원전 수요가 증대되고 있어 이에 대한 기술성 및 경제성 제고 노력과 더불어 정부 간 협력을 통한 수출 추진
- 신규원전 도입 및 설비개선사업 추진국가 대상으로 가동원전 운영·정비 서비스, 기자재 공급 사업의 국내 원전기업 동반진출을 통해 국내 원전생태계 활성화 및 신규 원전건설사업 수주기반 강화

□ 원전수출전망

- 단기: 사우디아라비아, 영국 또는 체코로부터 원전수주
- 중기: 미국과 유럽 및 중동 국가들로부터 지속적인 원전 수주 (2 ~ 3 년 주기)
- 장기: Post-APR+ 기술 접목 원전의 추가 수주 목표로 기술 및 시장 개발

4.2 소형원자로와 Advanced Reactor

□ 소형원자로²⁵⁾의 활용성(그림 14 참조)

- 소규모 전력시장 (오지 탄광 전원/열 공급, 낙도/극지/군사기지 분산 전원, 해양플랜트 전력/열 공급) 개척에 활용
- 오지, 탄광 등 전력 공급원으로 해외 자원개발 사업에 활용
- 해양플랜트 전력 및 공정열 공급을 위한 소형 분산 에너지원으로 역할
- 기존 오지 전력생산용으로 활용되고 있는 화석연료 대체로 온실가스 저감에 기여

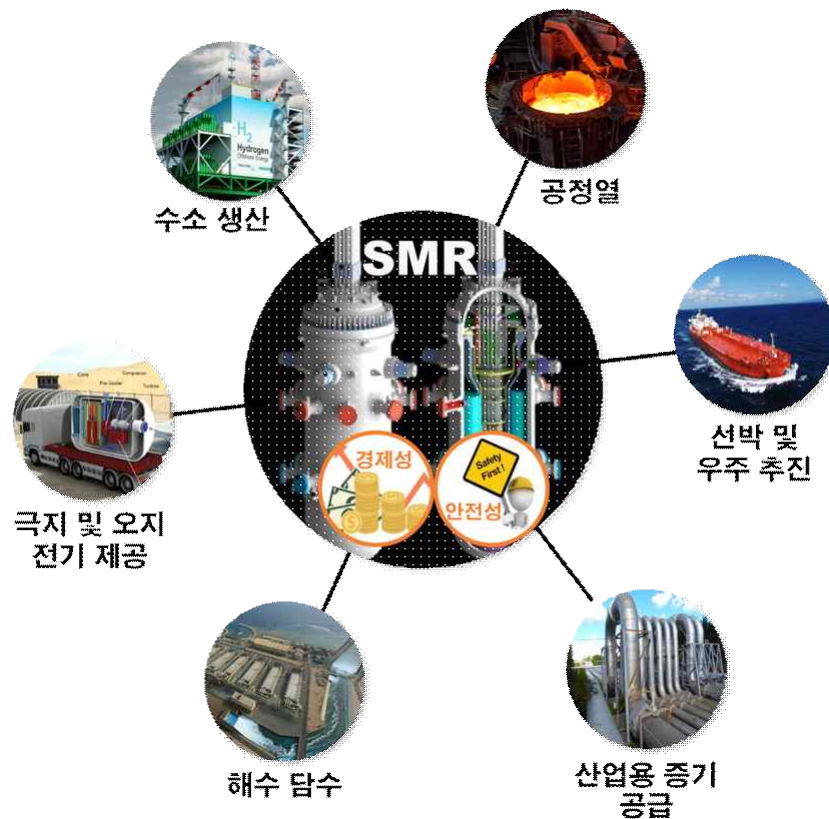


그림 14. SMR의 다양한 적용성

25) 소형원자로의 상세 내용은 ‘부록 II. 소형원자로 개요’ 참조

□ 소형원자로의 시장성

○ 소형원자로 시장 개척 동향

(미국) - 건설 준비 단계에 돌입

- 소형로(SMR)시장을 위한 출발: UAMPS(Utah Associated Municipal Power System)와 TVA(Tennessee Valley Authority)에 의한 소형로 건설 프로젝트
 - UAMPS는 NuScale Power 및 Energy Northwest와 협업으로 Idaho National Laboratory 부지에 SMR 건설 추진
 - TVA는 Clinch River Site에 SMR 건설을 위한 early site permit 접수(2016년 12월, NRC 발행).
- 미국의 DOE는 2012년부터 SMR 개발을 위하여 7억5천5백만달러의 예산 지원
- 군사용 초소형로 건설과 관련하여 미의회는 2018년 8월 “2019 National Defense Authorization Act (NDAA)”를 통과시켰으며, DOE 또는 DOD 시설에 초소형원전을 최소 1기 건설하고 운영할 수 있는 pilot program을 수립하여 재출토록 DOE에 요구²⁶⁾
- NEI(Nuclear Energy Institute)는 초소형로 pilot 프로그램에 대한 일정과 도전 과제 등 guideline 제시²⁷⁾
(2027년 12월 말까지 초소형 첫 호기 건설 제안)

(캐나다) - 개발 최종 단계

- CNL(Canadian Nuclear Laboratories)은 2026년까지 CNL site에 SMR 건설 계획 2017년에 수립
- REI(Request for Expressions of Interest) 착수
- 학계, 전력회사, 잠재적인 수요자, SMR 유치 희망 지역, 기기공급업체 등으로부터 80개의 답변 접수
- 19개의 기술개발자로부터 원형로 또는 실증로 건설에의 참여 의사 접수
- 프로젝트에의 참여 초청 절차 진행
- 5MWe HTGR 형태 MMR의 Chalk River site 건설 제안

26) NEI, Micro-Reactors Could Power Remote Military Bases Within a Decade October 4, 2018.

27) NEI, Road Map for the Deployment of Micro-Reactors for U.S. Department of Defense Domestic Installations, October 4, 2018,

- Global First Power(Ontario Power Generation, Ultra Safe Nuclear Corporation) 주도
- 2019년 7월 기준, 3단계(Stage-3) 업무인 CNSC의 환경평가 착수
- 14MWe HTGR 2기 건설 제안
 - StarCore Nuclear design이 주도
 - Whiteshell 및 Chalk River site 두 곳에 건설 제안
 - 19.2.15. 1단계 통과
- Terrestrial Energy는 190MWe IMSR(integral molten salt reactor) 건설 사업 제안(1단계 통과, 19.2.15.)
- University of Manchester와 Delft University of Technology 등이 주관으로 4 MW high-temperature gas reactor인 U-battery 건설 제안 (1단계 최근 참여)
- CNSC(Canadian Nuclear Safety Commission)는 CNL의 SMR 사업과는 별개로 개발중인 SMR에 대해 pre-licensing vendor review 수행
- “Canadian Roadmap for Small Modular Reactors”²⁸⁾ 수립
 - 국제 SMR 시장의 교두보 역할 기대
 - 산업체, 정부, 발전사 및 관련 사업체 전문가들이 10개월간 활동
 - Roadmap 실행 전, 3단계 조치 제안
 - 이 로드맵에서 SMR이 Canada 경제에 미치는 효과를 2030~2040년 사이에 연간 6천개의 직/간접 일자리, 100억불 규모의 직접 경제효과 및 연간 90억불의 간접 경제효과 제시

(영국) - 개발 착수 단계

- 차세대 원전 개발용 Initiative(SMR Competition) 착수(2015년 11월)
 - 경제적 효율성이 가장 좋은 SMR 설계 완성 프로그램 착수
 - 5년간 2.5억 파운드(4억2천만 달러) 규모의 원자력 R&D 투자
- 2억 파운드 규모의 Nuclear Sector Deal을 발표(2018년 6월)
 - 개량형 모듈러 원자로 개발과 인허가를 위한 0.56억 파운드, Canada의 SMR 경쟁을 위해 manufacturing분야의 연구개발 지원금 0.32억 파운드 포함
- 8개의 비경수로(non-LWR) SMR에 대해, 각각 상세 타당성 검토용으로 4백만 파운드 지원

28) Canadian Small Modular Reactor Roadmap Steering Committee (2018), A Call to Action: A Canadian Roadmap for Small Modular Reactors, November 2018.

- 2019년에 8개 중 3~4개에 원자로개발 지원예산을 2년간 0.4억 파운드 추가 지원 계획
- 영국내 규제기관에는 New SMR 인허가를 위해 5백만 파운드와 추가로 7백만 파운드 지원 예정

□ 소형원자로의 경제성

- 미국 초소형로의 발전단가가 초기호기를 포함하여 0.14~0.41 \$/kWh로 디젤발전 단가의 0.15~0.60 \$/kWh 보다 가격 경쟁력이 있는 것으로 평가됨.²⁹⁾
 - 초소형로의 다수기 건설 시, 발전단가는 0.09~0.33 \$/kWh로 하락.
- 미국 군사기지 에너지원으로 충전용 연료의 빈번한 수송 불필요 대체 에너지원으로 원자력이 주목됨.³⁰⁾
 - 초소형고온가스로, 열전도관냉각원자로, 방사성동위원소발전기 등이 기존 디젤발전보다 비용 등 면에서 우위로 평가됨.

항목	StarCore HTGR (고온가스로)	LANL HPR (열전도관냉각원자로)	RPS (방사성동위원소발전기)
연료선적감소량	5MWe 1기당 연간 1287 tankers	2MWe 1기당 연간 515 tankers	200kWe 1기당 연간 50 tankers
디젤발전 대비 면적	35%	50%	180%
작동 후 운송시간	7일 이상	~4일	< 1일
조약 및 정책	필요	필요	불필요
디젤발전 대비 비용	35%	32%	42%
방어 수준	High	High	Moderate
선행 투자 비용	Large	Large	Moderate-Large

표 8. 초소형원자로 군사기지 적용성 평가

○ 캐나다 SMR의 전력생산단가의 천연가스 및 수력과 비교 분석 결과³¹⁾

29) Nuclear Energy Institute, NEI Report, Cost Competitiveness of Micro-Reactors for Remote Markets, April 15, 2019.
 30) 미국 국방부, Final Report of the Defence Science Board Ad. Hoc. Committee on Energy Systems for Forward/Remote Operating Bases, August, 2016.
 31) Canadian Small Modular Reactor Roadmap Steering Committee (2018), A Call to Action: A Canadian Roadmap for Small Modular Reactors, November 2018.

- on-grid환경에서 LCOE(Levelized Cost Of Electricity)³²⁾만으로 천연가스, 수력 및 풍력과 가격경쟁력 유지
- off-grid site에서 디젤발전 대비 가격 경쟁력 유지

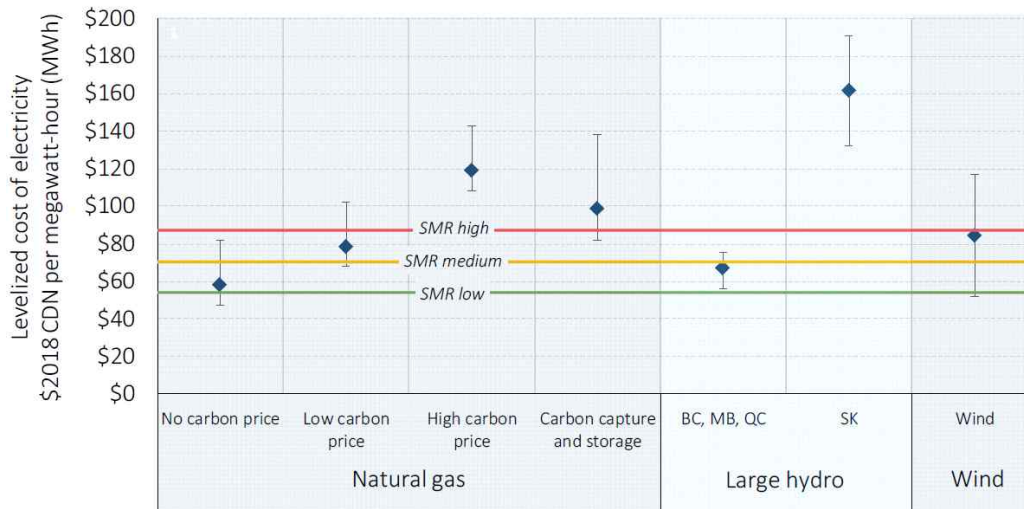


그림 15. on-grid SMR의 전력생산단가 비교 (6% discount rate 가정)

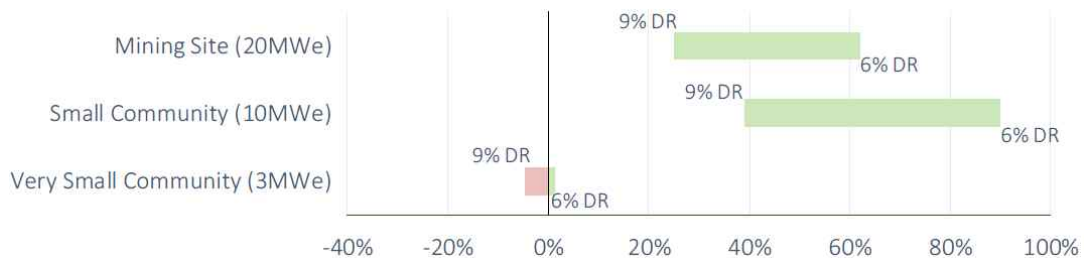


그림 16. off-grid SMR의 디젤발전 대비 전력생산단가 비교 (6 및 9% discount rate 가정)

□ 소형원자로의 잠재 시장 규모 평가

○ 캐나다는 전 세계 SMR 잠재 시장의 규모를 2030~2040년 사이에 연 1500억 캐나다달러로 평가³³⁾

- 이 시장 규모에는 전력생산, 원격지 광산, 도서국가 및 지역, 전력망이 없는 지역에서의 수요가 포함됨.
 - SMR의 석탄화력 대체로 GHG 완화 요건인 2℃ 시나리오(“성

32) 재생에너지에 필요한 backup 발전 및 ESS 비용은 미반영

33) Canadian SMR Roadmap, Technology Working Group Report, issued October 26, 2018

장”) 만족 시, 1,100 GWe의 수요 예상
(연간 1천억 캐나다인-달러의 시장 규모)

- 7만 개 이상의 원격 도서지방 및 전력망이 없는 지역사회
(연간 3백억 캐나다인-달러의 시장 규모)
- 광산지역을 위한 열 및 전기 생산 규모
(연간 35억 캐나다인-달러 규모의 시장)
- 중공업 산업단지에의 증기 공급하는 경우
(연간 120억 캐나다인-달러 규모의 시장)

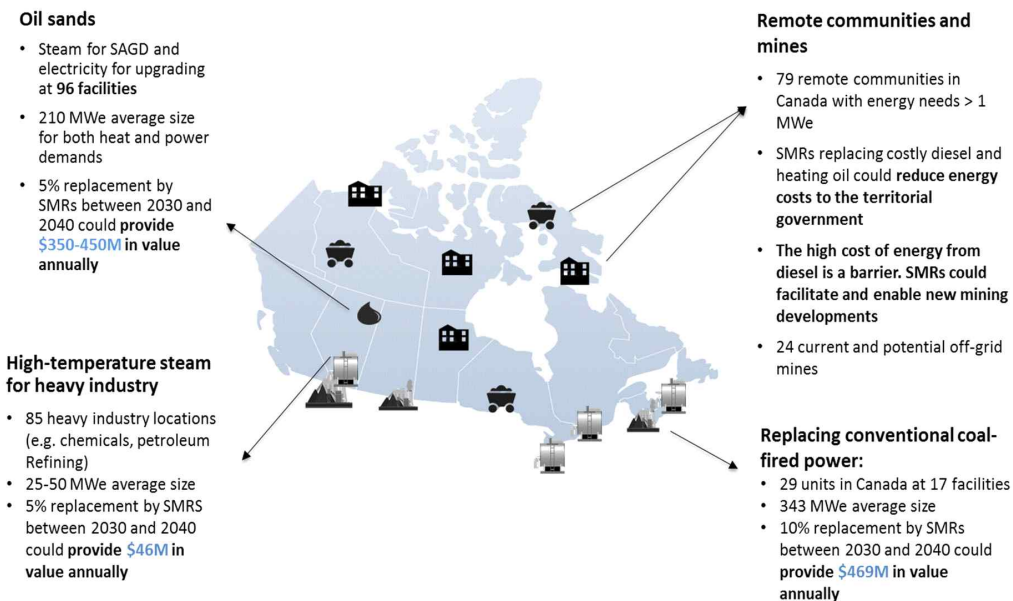


그림 17. 캐나다의 SMR Road Map

- 초소형원자로 잠재적인 시장 규모 약 30GW로 추정³⁴⁾
2030 ~ 2035년의 시장 규모 2,850MW (1기당 5MW로 할 경우,
570기)

34) 2016년 영국 DECC (Department of Energy and Climate Changes)에서 발간한 보고서

용처		필요 규모 (MW)	필요 이유	시장 규모 (MW)	30~35년 예상 기수 (5MW)
대형원전 예비전원		10	자율성, 전원교체 가능성	2,360	230
데이터 센터		10	경제성, 자율성, 전원교체 가능성	2,500	50
군사기지		20	자율성, 안정된 연료공급, 전원교체 가능성	1,200	60
광산 지역	high	5~20	원격지, 자율성, 안정된 연료공급	1,200	25
	low	10~40	경제성, 원격지, 안정된 연료공급	1,500	30
고립된 도서		10~50	경제성, 원격지, 안정된 연료공급	2,500	50
철강 산업			경제성, 안정된 연료공급, 열/전원공급	8,500	0
대규모 상업시설		5~15	경제성, 열/전원공급	2,00	0
원유/가스 터미널		10~100	경제성, 자율성	-	0
대형 화학단지		10~100	경제성, 열/전원공급	3,000	0
해수 담수화		10~50	경제성	2,500	25
유동성 기저 전원		10~50	경제성, 안정된 연료공급, 유연성	5,000	100
합 계				30,460	570

표 9. 소형원자로 용처별 필요규모 및 시장규모

- 세계의 소형로 시장 규모 - 평가기관마다 다소 상이
 - 2035년까지 5,000억 달러(600조원)³⁵⁾
 - (2018년 GHG 완화 분야 전세계 투자 금액: 3,320억 달러)³⁶⁾
 - 소형로의 가격경쟁력 확보 시, 소형로 시장 규모
 - 2035년까지 2,500 ~ 4,000억 파운드 규모로 예측³⁷⁾
 - (SMR 건설 용량 65 ~ 85 GW)

목표년도	미국	러시아	중국	영국	Scenario A 국가	기타 국가	계
2025년	7.5	5	2.5	0 ~ 1.5	0	~5	20 ~ 21.5
2035년	15	10	15	7 ~ 21	5	~ 20	70 ~ 85

표 10. 2025년과 2035년의 국가별 건설용량(단위: GWe)³⁸⁾

- 세계시장: 4000억 파운드 규모로 평가³⁹⁾

35) Nuclear Energy Insider, 2019, 'Expert Global Analysis on SMRs from 80+ Sources', <https://eloqua.nuclearenergyinsider.com/LP=23195>

36) Bloomberg NEF, 16 Jan 2019, 'Clean Energy Investment Exceeded \$300 Billion Once Again in 2018', <https://about.bnef.com/blog/clean-energy-investment-exceeded-300-billion..>

37) UK National Nuclear Laboratory, December 2014, 'Small Modular Reactors (SMR) Feasibility Study', <http://www.nnl.co.uk/media/1627/smr-feasibility-study-december-2014.pdf>

38) Scenario A 국가는 소형로가 대형로보다 가격경쟁은 없지만, 대형로가 필요치 않은 틈새 시장 의미함.

39) Rolls-Royce, 12 Sept 2017, 'British small nuclear plants can deliver low cost, low carbon electricity - report issued today',

- 40,000개의 숙련된 일자리, 1000억 파운드의 경제 효과
- 2035년 까지 건설되는 SMR 설비용량 규모: 1 ~ 21GW⁴⁰⁾
 - 보수적인 경우 ~1GW
 - 낙관적인 경우(SMR 인허가와 공장설비 및 부품공급선이 원활한 경우) 21GW로 평가
- 소형원전을 개발하고 있는 NuScale은 2035년 까지 세계 SMR 시장을 보수적으로도 55~75GW 규모로 평가⁴¹⁾
- SMR Start consortium은 2035년 미국내 소형로 시장 규모를 6~15 GWe 규모로 평가⁴²⁾
- Power Engineering magazine은 2035년까지 세계 SMR 시장을 1조 달러 규모로 평가⁴³⁾



노후 석탄화력발전 교체

- 석탄의 15%, 천연가스의 5%를 소영원자로 대체할 경우
- 연간 90조원 잠재 수요 발생



중공업에 쓰이는 고온증기

- 화석연료 대신 5% 정도 소영원자로 대체할 경우
- 연간 10.8조원 잠재 수요 발생



해수 담수

- 2020~2024년 동안 해수담수 규모는 16GWe 규모
- 연간 9조원 잠재 수요 발생



수소생산

- 2050년 기준으로 수소 및 관련산업 활성화 예상
- 연간 2,250조원 잠재 수요 발생



광산지역

- 30년부터 디젤의 61%를 소영원자로 대체할 경우
- 연간 8.15조원 잠재 수요 발생



도서 및 오지 지역

- 7만개 이상의 지역사회가 디젤로 전력 생산
- 연간 27조원 잠재 수요 발생

그림 18. SMR 활용처

<https://www.rolls-royce.com/media/press-releases/2017/12-09-2017-rr-brit...>

40) OECD Nuclear Energy Agency, 2016, 'Small Modular Reactors: Nuclear Energy Market Potential for Near-term Deployment', <https://www.oecd-neo.org/ndd/pubs/2016/7213-smrs.pdf>.

41) NuScale, 12 Jan 2017, 'NuScale Submits First Ever Small Modular Reactor Design Certification Application (DCA)', <https://newsroom.nuscalepower.com/press-release/company/nuscale-submits-...>

42) SMR Start, 'The Economics of Small Modular Reactors', September 2017.

43) Russell Ray, 13 June 2018, 'Can SMR Technology Revitalize the Business of Nuclear Power?', <https://www.power-eng.com/articles/2018/06/can-smr-technology-revitalize...>

□ 소형원자로의 향후 역할

- GHG 완화 요건의 이행은 무탄소 에너지원への 의존 필수
 - 간헐적이고 변동성 많은 재생에너지에 전적으로 의존할 수 없으므로 원자력의 활용은 불가피
- 대형원전의 경우, 중국과 인도 등 전력망이 큰 일부 국가를 제외하고는 부지, 투자비용 등의 문제로 수요가 작을 것으로 예상됨.
 - 신규 도입국의 경우, 용량이 국가 전력망 크기에 비해 상대적으로 거대하고, 이들 국가의 재정능력이 원전을 감당할 만큼 확보되어 있지 않아 대형 원전 운용에 애로
- 소형원전의 장점
 - 적은 투자비, 작은 전력망도 수용
 - 소형원자로는 규모가 작은 특성 때문에, 계통의 단순화 및 피동계통 활용(대형원전 이상의 안전성 확보 가능)을 통해, 대부분 공장제작함에 따라 건설비용이 적게 듦.
 - 발전 외의 여러 분야에의 활용 가능
- 예상 소형원전 수요
 - 전력 그리드가 작은 국가의 발전원 - 신규 및 화력 발전 대체
 - 산업공정열, 해수담수화, 수소생산 등 발전 외 산업적 이용
 - 독립적 시설 운용 가능
 - 군사시설, 전기집약 산업단지, 고립지역, 해안 지역 및 도서지역
 - 틈새시장 공략
 - 대형 원자력발전소의 대기 전력, Data Center 전원, 군사 기지용 전원 및 에너지 공급원, 광산 지역용 전원, 도서 지역, 철강 산업 에너지 및 대규모 전력원, 대형 화학단지 및 상용 단지 전원 등

□ 시사점 - 소형로의 국내 건설 및 운용 시

- 기술적 측면
 - 극지, 오지 등의 특수 환경에 사용될 수 있는 국내 고유의 초소형원자로 기술 확보

- 피동냉각 잔열제거로 노심용융사고 가능성이 없는 초소형원자로 개발로 원자력 안전성 향상 기술 제고
- 고온/기기 재료에 대한 초고온 실험연구로 관련 기술력 확보
- 미래사회를 위한 다목적 열원 응용 기술(공정열, 합성연료 및 수소 생산)로 활용
- 해외 선진국의 관련 기술 수준은 기본설계 초기 단계이기 때문에 기술격차가 크지 않아 초소형원자로 분야도 빠른 시일 내에 세계 수준에 도달 가능

○ 군사적 측면

- 군사기지 에너지원으로 적합
 - 설치하면 1회 연료 장전으로 설계수명 또는 10년 이상 핵연료 교체 없이 운용이 가능하여 단주기의 연료 운송이 필요 없는 독립적이고 안정적인 전력 및 열에너지(담수, 증기) 공급 가능
 - 필요 시, 기 제작된 기기의 신속 현장 수송 및 설치를 통해 즉각 전력공급 가능
 - 한정된 격리 공간에서 장기간 안정적 에너지 공급 가능
(예: 핵 공격시 지하벙커에서 장기간 대피해야하는 상황 등)

○ 40년 이상 확보한 상용경수로, 중수로, 연구로, 중소형모듈원전 SMART 기술을 바탕으로 소형원자로 기술을 확립하여 방대한 세계 시장 진출하기 위해 수출형 소형원자로 국내 건설 및 운용 필요

□ Advanced Reactor(AR)

○ Advanced Reactor(AR)의 정의 - 핵융합로 제외

- 제3세대원자로(Generation III Reactor), 제4세대원자로(Generation IV Reactor) 그리고 소형모듈형원자로(SMR)⁴⁴⁾

○ AR 현황⁴⁵⁾

- 전세계적으로 진보된 원자력설계 기술 지속적으로 개발 중
- 첫 번째 3세대원자로인 원자로가 1996년 이후 일본에서 운전중
- 신형 원자로는 자본 비용을 줄이기 위해 단순 설계 채택
 - 고 효율 연료 기술
 - 향상된 고유 안전성
- AR의 대부분은 소형임(300MWe 이내).
- 제3세대원자로의 특징
 - 인허가 용이
 - 표준화 설계 채택(자본 비용 절감, 건설 기간 단축)
 - 단순하고 견고한 설계로 운전이 용이하고 과도 운전 시의 안전 여유도 향상
 - 가동율 향상 및 운영 수명 연장(일반적으로 60년)
 - 노심 용융 사고 가능성 현저히 저하
 - 발전소 정지후 운전원 조치전 (일반적으로) 72시간 이상 안전상태 유지
 - 항공기 충격 시에도 방사선 방출 방지
- 전 세계적으로 운전, 건설 또는 곧 출시될 제 3세대 원전
(표 11, 12, 13 참조)

44) 2019년 4월 18일 발표된 미국의회조사국(Congressional Research Service)이 발표한 ‘Advanced Nuclear Reactors: Technology Overview and Current Issues’ 에서 소개한 정의

45) Advanced Nuclear Power Reactors (Updated Feb. 2020) WNA,
<https://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-power-reactors/advanced-nuclear-power-reactors.aspx>

Developer	Reactor	Size – MWe gross	Design progress, notes
GE Hitachi, Toshiba	ABWR	1380	Commercial operation in Japan since 1996-7. US design certification 1997. UK design certification application 2013. Active safety systems.
KHNP	APR1400 (PWR)	1450	Shin Kori 3&4 operating in South Korea. Under construction: Shin Hanul 1&2 in South Korea, Barakah in UAE. Korean design certification 2003. US design certification August 2019.
Gidropress	VVER-1200 (PWR)	1200	Novovoronezh II, from mid-2016, Leningrad II from 2018, as AES-2006. Under construction at Akkuyu in Turkey and Rooppur in Bangladesh.
OKBM	BN-800	880	Beloyarsk 4, demonstration fast reactor and test plant.
Westinghouse	AP1000 (PWR)	1250	Four units operating in China and under construction in the USA; many units planned in China (as CAP1000).
Areva (& EdF)	EPR (PWR)	1750	Two units operating in China, under construction in Finland and France.

표 11. 운전중인 Advanced Reactor

Developer	Reactor	Size – MWe gross	Design progress, notes
Gidropress	VVER-TOI (PWR)	1300	Under construction at Kursk II, planned for Nizhny Novgorod and many more in Russia.
CNNC & CGN (China)	Hualong One (PWR)	1170	Main Chinese export design, under construction at Fangchenggang and Fuding, also Pakistan.
INET & CNEC (China)	HTR-PM, HTR-200 module	2x105 (one module)	Demonstration plant being built at Shidaowan.

표 12. 건설중인 Advanced Reactor

Developer	Reactor	Size – MWe gross	Design progress, notes
GE Hitachi	ESBWR	1600	Planned for Fermi and North Anna in USA. Developed from ABWR, but passive safety systems. Design certification in USA Sept 2014.
Mitsubishi	APWR	1530	Planned for Tsuruga in Japan. US design certification application for US-APWR, but delayed. EU design approval for EU-APWR Oct 2014.
Areva & Mitsubishi	Atmea1 (PWR)	1150	Planned for Sinop in Turkey. French design approval Feb 2012. Canadian design certification in progress.
Candu Energy	EC6 (PHWR)	750	Improved CANDU-6 model. Canadian design certification June 2013.

표 13. 출시중인 Advanced Reactor

- 미국의 경우, 원자력을 국가 안보 차원에서도 중요시
 - 원자력 기술 우위 확보 차원에서 정부와 민간이 함께 AR 기술 개발을 지속 유지할 것으로 판단됨.
- 연구·개발 중인 6개의 제4세대원자로의 상용화가 2045년 경 달성 가능하다는 목표 하에, FOAK는 2037 ~ 2040년에 착수 예상됨.

□ 시사점: 원자력 기술의 우위를 유지하려면, AR 기술개발에의 지속적 투자로 AR 상용화에의 선도 역할 수행 필요

4.3 원자력 수소

□ 수소사회 진입 현황

- 지난 수십 년 동안 기대와 좌절의 사이클을 걸어왔던 수소사회로의 글로벌 여정이 기후변화 대응 의무와 재생에너지의 빠른 보급으로 새로운 변곡점을 맞고 있음.
 - 수소는 화석연료자원이 갖는 불안한 속성 즉 에너지 안보, 지속가능성, 환경문제를 해결해 줄 대체 에너지원의 중요한 축으로 여겨져 왔지만 장밋빛 계획만 무성했지 성과 미미.
 - ‘70년대에 세계를 강타한 두 차례의 석유파동과 2000년대 러시아와 우크라이나간의 가스분쟁으로 인한 EU의 에너지 위기도 수소사회로의 연결 불발 원인
- 수소기술의 산업적 이용
 - 석유화학, 비료, 식품 등 다양하며 전 세계적으로 연간 5,500만톤이 생산 소비
 - 많이 쓰이는 부문은 석유정제 33%, 암모니아 생산 27%, 메타놀 생산 11%의 순
 - 우리나라에서도 일제강점기 시절 수소를 이용한 동양최대규모의 질소비료공장 운영
 - 함경도 개마고원의 낙차를 이용한 수력발전 전기를 이용한 수전해 수소 생산 후 비료합성에 이용

- 현재 국내의 정유공장 등에서 연간 약 180만톤 정도 생산하여 대부분 자체 소비

□ 수소사회 가능성 전망 - 기후변화에 대한 국가적 대응의무가 강화되고 미국, EU 등 일부 국가에서 경쟁력을 갖추기 시작한 재생에너지 및 이의 보급 확대가 수소사회로 가는 모멘텀을 제공할 것인가와 이것이 과연 우리나라 여건에 그대로 적용 가능할 것인지 또 아니라면 어떤 성공 조건을 갖춰야 하는지에 대한 분석 및 전망^{46), 47)}

○ 글로벌 수소경제 전망

- 수소경제 사회(수소의 활용 확대)
 - 기존의 산업적 용도 외에 에너지 산업 즉 발전, 운송, 산업열, 건물난방/전력 부문 확대
 - 수소환원제철과 같은 새로운 산업적 용도의 발굴 확대
- 온난화에 의한 대기온도 증가 2°C 제한 시, 수소 에너지의 탈탄소화를 위한 에너지 전환 주요한 역할 담당 예측
- 2050년, 전 세계 최종에너지 총수요의 18% 담당
 - 이산화탄소 60억 톤 감축(필요감축량의 20%에 해당)
 - 연 2.5조 달러의 부가가치와 누적 3,000만개의 신규일자리 창출
- 2050년, 재생에너지 간헐성 기인 출력제약 500 TWh 감소
 - 국내 로드맵 - 재생에너지의 잉여전력 이용 청정 그린수소 생산
- 전망치 실현 전제 - 수소 인프라 확충과 대량생산을 통한 가격경쟁력 확보 및 수소 생산 및 이용 가치사슬 전반에 걸쳐 획기적인 조치 필요
 - 매년 200~250억불 투자(2030년까지 약 2,800억불) 필요
 - 이중 40%는 수소생산에, 30%는 수소의 저장/운송/배급에, 25%는 제품과 생산규모 확장에, 나머지는 새로운 비즈니스 모델에 투입
 - 대량생산을 통한 가격인하 필요

46) Hydrogen scaling up, 수소위원회 (2017. 11)

47) Path to hydrogen competitiveness, A cost perspective, 수소위원회 (2020. 1)

수소생산과 재생에너지 전기단가 인하 필요. 수소충전소와 전해스택 가격은 절반이하로 가격이 낮아졌으나 추가 인하 필요

□ 수소사회 가능성 평가⁴⁸⁾

○ 수소경제 모멘텀의 추진력 지표(그림 19 참조)

- 탄소중립 약속 국가의 수 증가(66개국), 재생에너지 가격의 대폭감소(80%) 및 전해용량 증가(55배)
- 세계 주요국(18개국)의 수소전략 로드맵 발표
- 산업체의 관심 대폭 확대

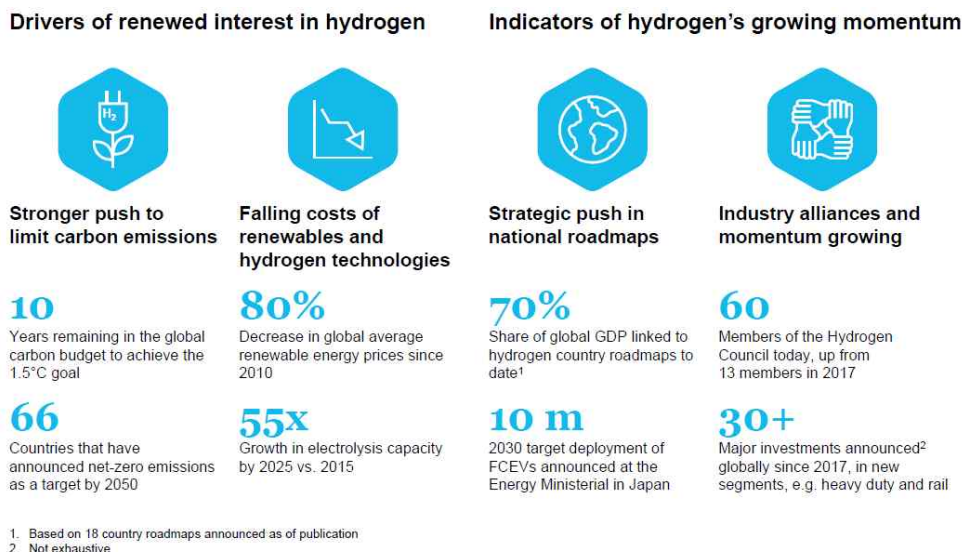


그림 19. 수소사회로의 추진 동력과 모멘텀 증가 지표

○ 수소 사이클의 각 부문별 가격 현황과 전망 - 수소 사회로의 가속화 핵심 관건

- 대량생산 및 기술혁신 시, 대규모 가격인하 가능

(예) 수소자동차의 경우, 연간 60만대 생산 시, 수명기간 중 총 소유비용(TCO: Total Cost of Ownership) 현재 대비 45% 인하 (30% - 자동차 자체 가격인하, 5% - 수소생산비용 감소, 10%

48) 2020년 1월에 발간한 수소위원회 보고서

- 수소충전소 가격 인하로 구성).
- 수소생산 단가와 수요의 상관관계 전망
 - 2.5불/kg 시, 세계 에너지 수요의 약 8% 차지
 - 1.8불/kg 시, 세계 에너지 수요의 15%까지 확대 전망
- 수소생산 단가 전망
 - 재생에너지의 전기가격 인하 및 수전해시설의 가격 인하로 저탄소 그린 수소 생산가격이 2030년까지 현재 대비 60%까지 감소
 - 산유국의 천연가스 증기개질법 이용 시,
 - 1kg당 수소생산단가는 약 0.9불
 - 탄소포집저장(CCS) 추가 시, 약 1.5불 수준이나 대규모 시설 건설 경우 2025년까지 1.2불까지 전망
 - 재생에너지 전원 이용 수전해 시,
 - 중동의 사막이나 캘리포니아와 같이 태양광 자원이 풍부하거나 영국 등 북해 연안국 같이 풍력자원이 좋은 지역은 현재 kg당 수소 생산가가 6불 수준에서 2030년 까지 2.5불 수준으로 떨어질 전망
 - 한국이나 일본과 같이 재생에너지 자원이 제한적인 지역은 비싼 가격의 액화(~0.9불/kg) 운송(0.6불/kg)과 집안비용(0.2불/kg)을 감안하더라도 해외수입이 더 경제적

○ 수전해 수소생산 단가 결정에 가장 큰 인자 - 사용전력 요금 및 수전해시설의 이용률

- 수전해 설비 이용률은 재생에너지 전력만 사용 시, 재생에너지 설비 이용률 이하임.
- 사용전력 요금의 경우, 재생에너지 전력단가는 큰 폭으로 하락 중
 - 20% 상회 태양광 이용률 고려 시, 재생에너지 이용 수전해시설 이용률 향상의 경우 경쟁력 제고 가능(그림 20 참조)

(예) 2019년 상업 운전 개시 UAE의 1.17GW 규모 Noor 태양광⁴⁹⁾ 전기 계약 요금 2.4센트/kWh

2020년 계약 Al Dhafra 태양광⁵⁰⁾ 전기 요금 1.35센트/kWh

Cost of renewable hydrogen with varying LCOE and load factors
USD/kg H₂

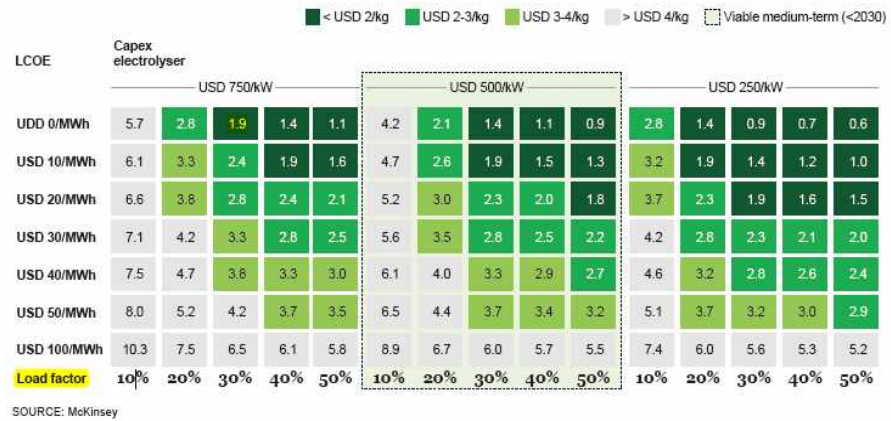


그림 20. 수전해 시설이용률과 수소생산단가

○ 탈탄소화를 앞세운 수소사회 활성화는 수소 가치사슬의 전 부문에서 가격 경쟁력이 필수 전제

- 그린 수소생산 단가의 대폭 인하가 필수

- 재생에너지의 발전단가와 수소시설 건설비의 대폭 하락으로 국내 수소위원회 제시 글로벌 수소경제 전망 밝음.

- 세계에너지위원회(WEC)의 재생에너지 및 연료전지 가격 대폭인하, 기후변화 요건 준수, 중국 참여 등으로 수소 경제 가시화 전망⁵¹⁾

- 시스템 전환으로서 수소 인식 (정책적 의지와 일관성)
- 지속가능한 수소생산 (증기개질 추출수소 대비 경쟁력 확보)
- 국제 수소시장 조성 (소비/생산국간의 수송 문제 해결)
- 비용효율성 달성 (대규모 수소 생산/소비에 대한 정부의 의지)
- 통합 인프라 구축 (생산, 저장, 운송, 배급, 충전소 등)

- 수소사회 실현의 변수 - (에너지정책) / (수소 경제성 + 기술발전)

- 예측가능하고 지속적인 에너지 정책 필요 (그림 21 참조)

49) www.techspot.com/news/80740-uae-powers-noor-abu-dhabi-world-largest-solar.html

50) <https://www.biznesstransform.com/al-dhafra-solar-project-to-power-160000-uae-households-at-lowest-tariff-1-35kwh/>

51) 'New Hydrogen Economy - Hope or Hype?', Innovation Insights Brief(2019), WEC

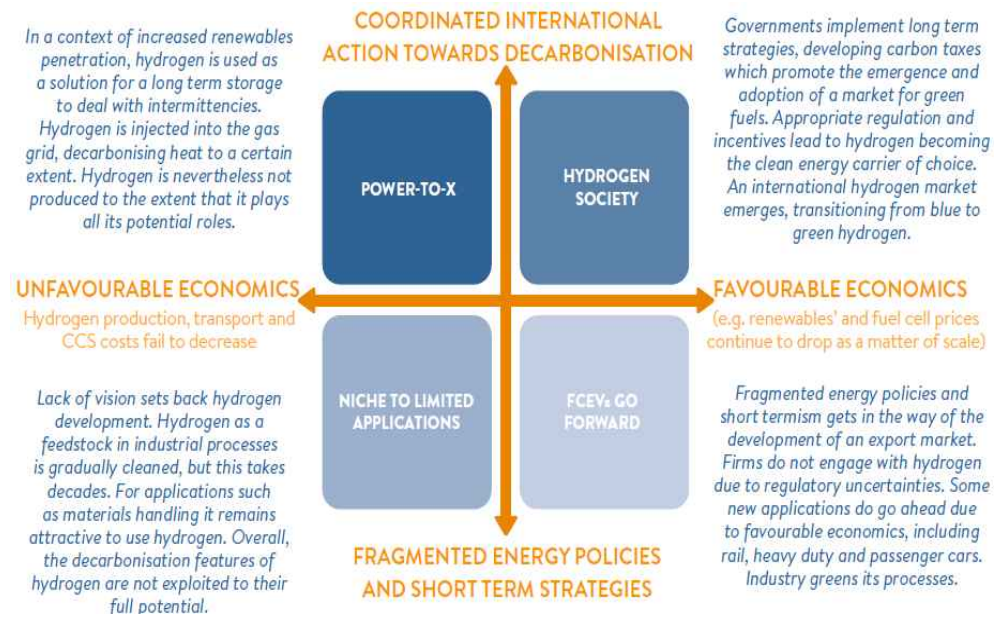


그림 21. 수소경제 전망 시나리오

□ 우리나라 수소사회 전망

○ 재생에너지를 활용한 수소사회 전망

- 태양광 전기 이용 수전해 경우, 우리나라는 태양광 이용률이 15% 인 반면 캘리포니아와 칠레 등은 25%를 상회하기 때문에 이들 자원 부국과는 수소 가격 경쟁력 측면에서 구조적으로 불리
- 수소경제 활성화 로드맵(2019)⁵²⁾
 - 2040년까지 수소차 / 연료전지 세계시장 점유율 1위 달성
 - 수소차 620만대, 수소충전소 1,200개소, 연료전지 17.1GW(8GW는 수출) 공급 또는 설치예정
 - 화석연료 자원빈국에서 그린 수소 산유국으로 진입
 - 3,000원/kg 이하 가격의 수소 연 526만톤 공급 (산업용 제외)
 - 30%는 추출수소로 / 나머지 70%는 수전해, 해외생산 및 부생 수소로 생산 공급

52) 수소경제 활성화 로드맵 수립 연구(2019. 4)

- 세계 최고 수준의 수소경제국가로 도약

		2018년	2022년	2030년	2040년
공급 · 가격	공급량 (=수요량)	13만톤/年	47만톤/年	194만톤/年	526만톤/年 이상
	공급방식	①부생수소(1%) ②추출수소(99%)	①부생수소 ③추출수소 ④수전해	①부생수소 ②추출수소 ③수전해 ④해외생산 ※ ①+③+④ : 50% ② : 50%	①부생수소 ③추출수소 ④수전해 ④해외생산 ※ ①+③+④ : 70% ② : 30%
	수소가격	- (정책가격)	6,000원/kg (시장화 초기가격)	4,000원/kg	3,000원/kg

그림 22. 우리나라의 수소공급 및 가격 목표

- 수소생산 경제성

- 부생수소는 생산량 확대에 한계성 노출
 - 석유화학 공정 등의 부산물로 나오는 부생수소 가격 저렴
 - 2017년 여유생산 능력 - 수소차 25만대 분량인 약 5만톤 (대부분인 164톤은 생산공정내 사용)
- 추출수소는 생산은 용이하나 환경문제/가격경쟁력 취약
 - 수소수요처 인근 생산시설 구축용이
 - 기존의 도시가스망 활용용이
 - 추출과정에서 이산화탄소 배출하는데 따른 환경문제
 - ▶ LNG 추출 수소의 경우 수소 1톤을 추출해 내는데 3.8톤의 LNG가 소모되면서 8톤의 이산화탄소가 발생
 - 가격경쟁력 취약
 - ▶ 2040년, 추출수소 생산량 158만톤(총 생산량의 30%) 계획
 - 추출과정에서 1,264만톤의 이산화탄소 배출
 - 1톤당 75불의 탄소세⁵³⁾ 부과 적용 시 LNG 추출 수소 1 kg 당 약 900원의 원가 상승 예상
 - 천연가스 추출수소 단가⁵⁴⁾가 1kg 당 2,500원 정도이므로 30% 정도의 원가상승 요인 발생

53) 2019년 10월에 발간된 국제통화기금(IMF) 보고서 기준

54) Solar Hydrogen Production <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/hydrogen-production-cost>

○ 재생에너지 수소의 경제성 전망

- 무탄소 수전해의 경우 추출수소 대비 가격 경쟁력 확보가 관건
 - 수전해시설의 단위 건설투자비: 400 ~700\$/kWhe
 - 원전(~3,500\$/kWhe)의 약 1/9 ~ 1/5 정도 수준
 - 수전해 수소단가: 시설투자비보다 사용전력요금에 크게 좌우

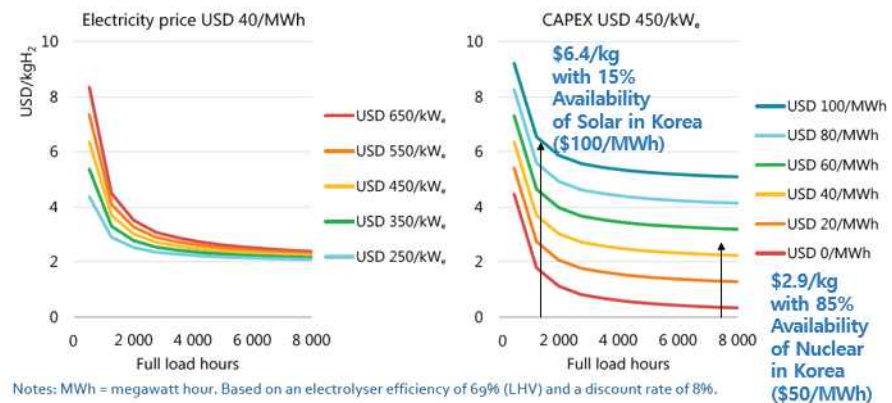


그림 23. 설비가동시간, 건설비, 전기요금에 따른 수소생산단가

- ▶ 그림 23의 시설 투자비와 전력요금에 따른 수소 생산 단가 변화는⁵⁵⁾ 시설 이용률이 낮을 때만 단가가 민감하게 영향을 받고 높을 때는 둔감한 특성을 보여주고 있음.
- ▶ 사용 전력요금에 따른 수소단가는 요금에 비례하여 거의 선형적으로 변하는 특성이 있음.
- 재생에너지 활용 수소생산은 경제성 낮음.
 - 국내 2018년 태양광 활용 수소생산 단가는 약 11,500원 정도임.
 - 태양광 발전단가(약 180원/kWh) 및 연간 가동시간(약 1,300시간(이용률 ~15%)) 기준
 - 국내 2040년 태양광 활용 수소생산 단가는 7,700원.
 - 2040년의 공급 목표가격인 3,000원 대비 2.5배가량 비쌈.
 - 태양광 발전단가(120원/kWh = \$100/MWh) 기준
 - ▶ 태양광 발전단가는 고정비 투자회수로 100원 이하로 인하에 애로 예상
 - ▶ 100원 이하 인하 시에도 평균 이용률 ~15% 인 상황에서 이용률 25% 정도인 캘리포니아, 칠레, 중동 지역과는 가격경쟁 불가

55) 'The Future of Hydrogen' . IEA, 2019. 6 <https://www.iea.org/publications/reports/thefutureofhydrogen/>

- 재생에너지의 잉여전력 활용 시 사용 전기요금 인하는 가능하나 잉여전력 사용 기간의 사유로 설비이용률 또한 더욱 낮아질 것이므로 수소생산단가 인하효과에 면밀한 검토 필요
- 연간 100만톤 규모의 수소 생산용 태양광 전기공급에 38GWe(전해효율 50kWh/kg 가정)의 설비⁵⁶⁾ 신설 필요
- 재생에너지 수소의 비싼 생산단가와 대규모 설비 설치의 어려움 고려 시, 2040년 공급량 368만톤의 대부분(추출수소 제외) 해외 수입 의존 불가피 - 재생에너지를 통한 무탄소 수소 산유국 목표와 큰 괴리 발생.

○ 액화 수입수소(화석연료 보유국 생산기지에서 수입) 경제성 전망

- 현지에서의 생산가격은 매우 싸지만 탄소포집저장(CCS) 장치 설치 운영(0.5\$/kg), 액화(~0.9불/kg), 운송(0.6불/kg)과 인수기지설치운영(0.2불/kg)에 들어가는 비용을 고려하면 총비용이 3불/kg 이상으로 추정됨.
- 탄소포집효율이 80~90%이기 때문에 외부로 배출되는 미포집 이산화탄소에 대한 페널티 고려시 수입수소의 비용 추가 리스크 존재
- CCS나 액화운송 부문의 예상비용 대비 추가적인 단가 절감이 없으면 해외도입 수소가 우리나라의 수소경제를 지속가능하게 전인할 추진력 제공 불가

○ 시사점: 재생에너지 활용이나 해외기지 수소생산 부문의 가격경쟁력이 취약하기 때문에, 해당 활용부문에 대한 정부의 정책의지가 강하더라도 수소의 활용은 재생에너지의 잉여전기를 저장하는 틈새시장에서의 역할로 그칠 것으로 예상됨.

□ 원자력수소의 역할과 전망

○ 원자력은 이용률이 높고 전기가격이 무탄소 발전원 중 가장 저렴하

56) ‘제8차 전력수급 기본계획’의 2030년 태양광 시설 용량인 33.5GWe 보다 14% 더 많은 양

기 때문에 재생에너지 수전해 보다 경제성 탁월함.

- 원자력 발전원가 54원/kWh⁵⁷⁾, 원전 이용률 85% 추정 시, 수전해 수소 생산단가는 약 3,500원/kg 수준 (그림 22 참조)
- 2030년 수소 공급 가격 목표 4,000원/kg 만족
- 수소 생산 규모: 외국과 같이 가동 원전의 계속운전 허용 시, 운영 허가 기간 만료 이후 20~40년 더 운전 가능하여 한다면 별도의 신설이나 증설 없이 대규모 수소 공급 가능
- 계속운전과 신한울 3,4호기 건설 허용 시, 2040년에 16GWe 정도의 원자력 시설 추가 가용
 - 수소생산 활용 시, 연간 238만톤(전해효율 50kWh/kg, 이용률 85% 가정)의 청정 그린수소 생산 가능

○ 원자력 저온 수전해 수소의 경제성

- 원자력 수전해의 경제성은 국제재생에너지기구(IRENA)의 비용자료⁵⁸⁾에서 확인 가능
- 알칼라인 수전해 수소생산 단가 평가용 자료 - 표 14 참조
 - 2017년 자료 - 실제 시장의 가용 자료
 - 2025년 자료 - 기술발전과 생산규모 확대 고려 예상치

항목	2017년	2025년	단위
수소 생산효율	51	49	kWh/kg-H ₂
스택 수명	80,000	90,000	시간
건설단가(CAPEX)	750	480	유로/kW
운영비(OPEX)	2%	2%	* CAPAX
스택 교체비용	340	215	유로/kW
시스템 수명	20	20	년

표 14. 알칼라인 수전해 시설 자료

- 표 14의 자료의 수치 하에, 원전 전기요금 60원/kWh⁵⁹⁾ 가정 시,

57) 2016년도 국회 예산정책처 보고서

58) “Hydrogen From Renewable Power” IRENA (2018. 9)

59) 1kWh 당 원자력 생산단가(전력거래소) : 2018년 62원, 2019년 56원

2017년 및 2025년 수소 생산단가는 3,728원/kg 및 3,350원/kg임.
(표 15 참조)

항목		2017년	2025년	단위
전제	수전해 용량	10	10	MW
	할인률	0.08	0.08	
	원자력 전기가격	60	60	원/kWh
	시설 이용률	0.85	0.85	
	유로환율	1,300	1,300	원/유로
비용	초기건설비	97.5	62.4	억원
	(1년 감가상각비)	4.9	3.1	억원
	수전해시설교체비 1회	44.2	28.0	억원
	(1년 감가상각비)	2.2	1.4	억원
	1년 운영비	2.0	1.3	억원
	1년 비용 + 이자	9.8	6.2	억원
	1년 전기요금	44.7	44.7	억원
	1년 총비용	54.4	50.9	억원
수소 생산단가 및 수익	1년 수소 생산량	1,460	1,512	톤-H ₂
	생산단가	3,728	3,350	원/kg-H ₂
	수소판매 단가	4,000	4,000	원/kg-H ₂
	수소판매액	58.4	60.9	억원
	전기판매 대비 이익	4.0	9.9	억원
	(전기판매 대비 수익률)	7.3	19.4	%

표 15. 원자력 알칼라인 수전해 수소 생산 단가

- 2030년 정부의 공급 목표가격인 4,000원(약 3.3불)/kg 미만
(원자력 저온 수전해 생산수소의 경제성 제시)

○ 원자력 고온증기 전해 수소의 경제성 전망

- 저온 수전해 방식보다 우수한 전해 효율을 갖는 고체산화물전해 (Solid Oxide Electrolyzer Cell, SOEC) 방식의 채택 시, 원자력 수소의 경제성 제고 가능
 - SOEC의 고효율 및 고가의 촉매 절감 효과와 양방향 운전(수소 생산 또는 연료전지 기능) 가능의 장점
 - 실용화 단계
 - 짧은 스택 수명 개선 및 대규모 실증 - 현안 사항
- 고온증기전해 - 700 ~ 850℃의 증기 분해 방식
 - 고온증기 생성비용 절감효과가 있는 열 공급 장치 확보

(경제성 확보의 핵심 요소)

- 경수로 원전의 이차측 증기(온도 약 280℃) 활용 고온증기 생성비용 절감 방안 연구 중⁶⁰⁾
 - ▶ 이차측 증기의 일부를 분기하여 원전에서 1km 거리의 고온증기전해 시설로 보내 전해용 물의 일차 가열 후, 전기 가열기에서 원하는 온도까지 이차 가열하여 전해 스택에서 전기분해 수소생산
- 고온 수전해 수소생산단가는 2,960원(약 2.5불)/kg로 추정됨.
 - 저온 수전해에 비하여 약 20%정도 생산 단가 절감 가능 (2030년, 생산가(3,500원(약 2.9불)/kg⁶¹⁾ 보다 15% 정도 저가)
 - 대량생산 및 기술발전 시, 생산원가 추가 절감 가능
 - ▶ 원전의 계속운전 허용 시, 이용 전기요금의 하락으로 인한 추가 수소생산 원가 절감 가능 - 우리나라의 수소사회 진입 전인차 역할 전망

□ 원자력과 재생에너지의 상생

- 원자력 수소의 기술·경제적 특성 효과적 활용 시, 우리나라에서도 수소 사회를 매개로 하는 원자력과 재생에너지의 상생 가능
 - 수소생산 원자력-태양광 하이브리드 방식 추진
 - 재생에너지 보급 확대로 발생하는 잉여전력의 원자력 수전해시설에서의 이용
 - (잉여전력 발생전 부분용량 가동) → (잉여전력 발생시 전용량 가동) → (잉여전력 소진시 부분용량 가동)
 - 원전 전기출력의 변동 폭이 작아 원전 경제성 영향 미미
 - 하이브리드 방식 채택에 따른 수소시설 이용률 저하에 의한 원자력 수소생산 단가 영향 미미

60) 'Evaluation of Hydrogen Production Feasibility for a Light Water Reactor in the Midwest', INL/EXT-19-55395 (2019. 9)

61) “수소 기술개발 로드맵(안)” 과학기술관계장관회의 (2019. 10)

- 태양광으로만 수소 생산 시, 원자력수소대비 생산비 증가 불가피
 - 2040년 수요의 약 20%인 수소 100만톤의 태양광 발전 공급 시,
 - 33.6GW(효율 42kW/kgH기준)의 태양광 시설 필요
 - 30조원(250억불) 소요(건설비 750불/kW기준)
 - 하이브리드 수소 대비 4.5조원(37억불)/년 의 생산비용 추가
 - 태양광 수소 단가(4.9불/kgH₂) > 수입액화수소 단가(약3불/kg 추정)
 - 경제적인 수입으로 결정 시, 에너지 안보에 부정적 영향
- 하이브리드 단가(2.2불/kgH₂) < 수입가(약3불/kg 추정)
 - 국내생산 비중이 늘어나 에너지 안보에 긍정적 영향
 - 투자비 회수가 끝난 원전의 계속원전 시(전기단가의 인하; 60원(5센트)/kWh→3센트/kWh), 수소생산 단가는 1.4불/kgH₂로 대폭 하락하며, 수소이용 손익분기 가격(1.9불/kgH₂)보다 저렴하여, 원자력 수소는 우리나라 수소경제 활성화의 전인차 역할 담당 가능

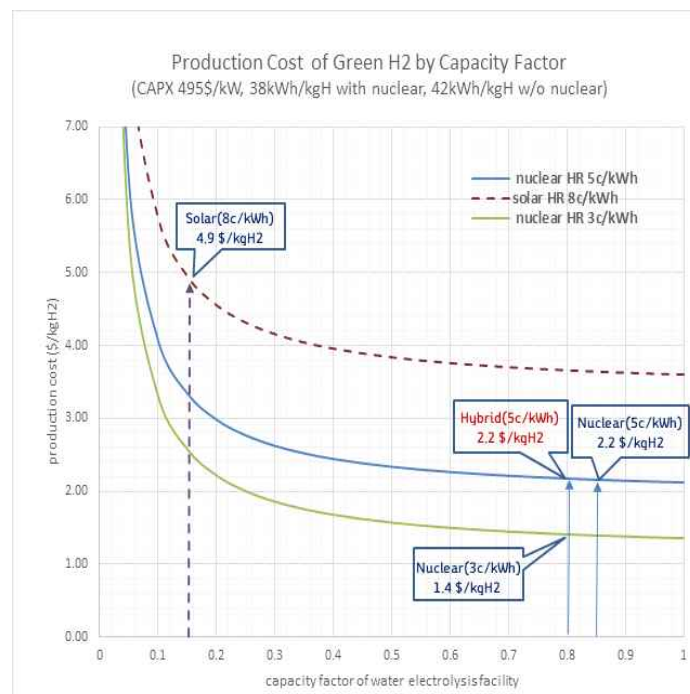


그림 24. 수전해시설 이용률에 따른 수소생산단가 변화⁶²⁾

62) “Hydrogen From Renewable Power” IRENA (2018. 9) 자료 수치에서 계산하여 도표화

□ 시사점

- 기후변화에 대한 국가적 대응의무의 강화 및 재생에너지의 보급 확대가 수소사회를 여는 중요한 모멘텀 제공
 - 탈탄소 사회에서의 수소 역할론에 대한 주요국의 인식 제고로 우리나라를 포함하여 18개국이 수소전략 로드맵 발표
 - 그린수소의 경쟁력 제고
 - 재생에너지의 지속적 가격하락으로 재생에너지 자원이 풍부한 몇몇 국가에서는 이들 전기를 이용한 그린수소가 천연가스 추출 수소와 경쟁력을 수년 내에 갖출 수 있을 것으로 전망
 - 수소경제 가치사슬의 전 부문에 걸친 기술발전 및 가격인하 지속
- 수소시장 확대로 규모의 경제성 도달 시, 글로벌 수소사회 진입속도 가속화 전망
 - 우리나라의 경우, 야심찬 수소경제 비전을 제시하였지만 수소가치사슬의 출발점인 수소생산 부문에 있어 경쟁력 매우 취약
 - 화석자원 뿐만 아니라 재생에너지 자원에 있어서도 미국이나 EU 국가 등과 비교하여 상당히 열악
 - 태양광이나 이의 잉여전력을 이용한 수소생산은 높은 전기요금 및 수소설비의 낮은 이용률로 경쟁력 있는 수소생산 애로
 - 해외 수입액화수소 비용은 3불/kgH₂ 이상으로 전망되어 수소경제 활성화 견인 역할 부족(에너지 안보 리스크 상존)
 - 국내 원자력 이용 고온 수전해 시, 2.1불/kgH₂로 대규모의 수소 생산을 통한 수소시장 확대 가능
 - 계속운전 허용 시, 수소생산 단가 하락 가속화 가능
 - 태양광-원자력 하이브리드 시스템 도입 시, 경제적으로 재생에너지 보급 확대와 글로벌 탈탄소화 기여 가능
- 원자력 수소생산을 포함한 그린수소 생산의 추구 시, 수소사회로의 진입 가능 전망됨.

4.4 연구용원자로

□ 연구용 원자로 현황과 전망

○ 1950~70년대에 건조된 노후 연구용원자로들은 그 성능이나 기능면에서 취약하여 이용 수요가 전반적으로 감소하고, 또한 수명 기한의 도래로 인한 운전 정지 및 휴지가 크게 늘고 있음.

- 선진국은 1970년대 정점을 지난 후 수명이 다되거나 이용 경제성이 저하되어 정지 및 폐로로 인한 지속적인 감소 추세이며, 개도국은 1990년까지 꾸준히 증가하였으나 이후는 거의 정체되어 전체적으로는 1975년 370여기를 정점으로 서서히 감소하고 있음.

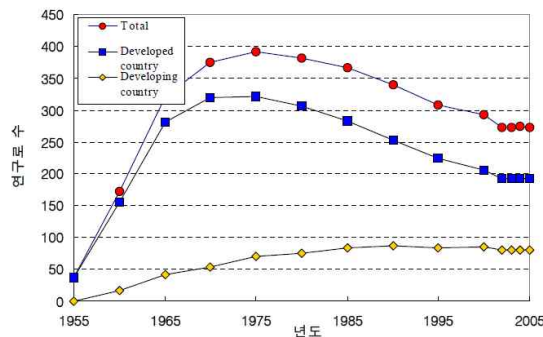


그림 25. 운전중인 연구로 수의 변화⁶³⁾

○ 연구로의 이용이 나노, 생명 공학, 환경 기술 개발 등 새로운 이용 분야의 확대, 연구로를 대신할 경제적이고 안정적인 중성자원의 개발에는 오랜 시간이 소요되는 점을 감안하면 연구로의 역할은 계속 유지될 것임.

- 기술 선진국은 기존의 연구로 설비를 보강 및 개선, 수명 연장을 통하여 연구로가 수행해 온 역할을 지속하면서 대형의 양성자가속기를 이용하는 대체 중성자원 개발에 관심을 두고 있으며, 경향이고, 상대적으로 기술 중진국은 경제적 및 기술적인 면과 자국의 환경을 고려하여 다목적으로 사용할 수 있는 연구로를 건설할 것으로 예상

63) “박철 외, 연구로 수요 전망 및 수출방안 연구, KAERI/AR-820/2008, 2008” 에서 발췌

- 현재 전 세계적으로 운전중인 연구로는 약 240여기가 있으며 이 가운데 운전기간이 40년 이상 된 연구로가 약 154기임. 연구로의 수명을 평균 40년 정도로 가정하면 조만간 활용 가능한 연구로의 수는 현재의 1/3 수준으로 줄어 들 것이며, 이중 약 100여기 정도는 새로운 원자로로 대체될 것으로 예상됨.

○ 연구로의 기능에 따라 요구되는 출력

- 10MW 이상의 원자로는 요구되는 대부분의 기능 수행 가능
- 이용 분야 대부분에 활용할 수 있는 10MW급 이상 연구로는 현재 약 24%인 55기 정도이고, 500kW 이상의 연구로도 향후 대체시 10MW급 이상의 연구로가 될 가능성이 크므로 향후 10~20MW급의 대형 연구로가 주가 될 것으로 예상됨.

Power Level	Education & Training	NAA	Isotope Production	Geochronology		Transmutation Effects		
				Ar/Ar	Fission Track ⁽¹⁾	Silicon Doping	Materials Irradiation	Gemstone Colouring
30 kW	○	△	△	-	-	-	-	-
250 kW	○	△	△	-	-	-	-	-
1 MW	○	○	△	△	△	△	△	△
2 MW	○	○	○	△	○	△	○	○
≥10 MW	○	○	○	○	○	○	○	○
Power Level	Neutron Radiography ⁽²⁾	Material Structure Studies ⁽³⁾	PGNAA ⁽²⁾	Positron Source ⁽²⁾	NCT ^(1or2)	Testing		
						Instr. & Calib.	Nuclear Fuels ⁽³⁾	
30 kW	-	-	-	-	-	△	-	
250 kW	○	-	-	-	△	○	-	
1 MW	○	△	△	△	○	○	-	
2 MW	○	○	○	○	○	○	-	
≥10 MW	○	○	○	○	○	○	○	

△: 일부가능, ○: 가능,

(1): thermal column 필요, (2): beam tube 필요, (3): loop 또는 특수조사설비 필요

표 16. 연구로의 기능에 따라 요구되는 출력⁶⁴⁾

- 상용 원자로 개발을 위한 실험로 역할의 일부 연구용원자로를 제외하면, 대부분이 높은 출력과 중성자속을 갖는 원자로가 주를 이루고 있음. (표 17 참조)

64) 한국원자력학회 원자로시스템기술부회, 소형 혁신원자로 기술조사보고서, 2020년 2월

원자로명	출력 (MW)	Flux Level (Thermal/Fast)	Purpose
RMB(브라질)	30MW	$2 \times 10^{14} / 2 \times 10^{14}$	Multipurpose
TMSR-SF1(중)	10MW		실험로
TFHR Thorium (중)	2MW		실험로
TMSR-LF1(중)	2MW		실험로
High Flux RR(인도)	40MW	$1.0 \times 10^{15} / 1.8 \times 10^{14}$	Material Test, Isotope production. Activation Analysis, Transmutation
Thermal RR(인도)	125MW		Material Test, Isotope production. Nuclear Data Measurement, Activation Analysis, Radiography
KJRR(한국)	15MW	$3.2 \times 10^{14} / -$	Material/Fuel Test, Isotope production. Transmutation
PALLAS(네덜란드)			
MRR(나이지리아)	10MW	$1.0 \times 10^{14} / -$	Material/Fuel Test, Isotope production. Transmutation/Activation analysis, E&T
SUT MNSR(태국)	45kW	$1.0 \times 10^{12} / -$	
Ukraine MRR	20MW	$- / 2.0 \times 10^{14}$	Material Test, Isotope production. E&T
Viet Nam MRR	15MW	$3.5 \times 10^{13} / -$	Material Test, Isotope production. Neutron Scattering, Activation Analysis, Transmutation, E&T
CAREM 25 (아르헨티나)	100MW		SMR Prototype, Material Test,
RA-10 (아르헨티나)	30MW	$3.0 \times 10^{14} / -$	Material Test, Isotope production. Neutron Scattering, Transmutation
RJH (프랑스)	100MW	$5.5 \times 10^{14} / 1.0 \times 10^{15}$	Material Test, Isotope production. Transmutation
IRV-2M	4MW		Neutron Therapy, Radiation Physic Test
MBIR	150MW	$- / 5.3 \times 10^{15}$	Material Test, Isotope production. Transmutation, Reactor Development
PIK	100MW	$4.0 \times 10^{15} / 8.0 \times 10^{14}$	Material Test, Isotope production. Neutron Scattering, Activation Analysis, Transmutation, Radiography

표 17. IAEA RRDB에 수록된 건설중 또는 계획중인 연구용원자로 목록

○ 미래 연구로의 방향

- 빔 이용 연구, 재료 시험, 동위원소 생산 등 특정 목적을 위한 연구로
- 여러 분야의 요건 수용 가능 고 중성자속 다목적 연구로
- 효율적 실험을 위해 최신의 실험설비 구비
- 이용자 편의성, 공간 활용성 등 추가 설비 구축
- 핵연료의 농축도 20%이하의 저농축으로 제한함에 따라 고밀도의 핵연료의 사용도 고려

○ 연구용 원자로 수요 전망

- 100여기의 대체가 예상되는 연구로 가운데 미국, 프랑스, 러시아, 캐나다, 중국, 아르헨티나, 독일, 인도, 일본의 9개국은 자체 설계 및 건설 능력이 있어 자체적으로 수요를 충당하게 된다고 가정하면, 연구로 기술 수출의 수요는 약 50여기 정도로 파악
- 현실적으로 연구로 시장은 발전로에 비해 수요가 적고, 건설비가 상대적으로 매우 작아 전문 공급업체 수가 제한적인 틈새시장의 형태를 띠고 있으며, 연구로 교체에 따른 새로운 연구로의 수요 발생은 운전 조건, 대외 여건 등이 복잡하게 고려되어야 하므로 실질적인 수요는 더욱 제한적임.

- 시사점: 우리나라는 하나로와 요르단 JRTR 및 기장 연구로 사업 경험을 보유한 바, 최근 세계 경쟁국의 연구로 사업 경험이 부족한 것에 비추어 볼 때 연구로 수출 전망은 밝은 것으로 평가됨.

5. 대응 시나리오와 원자력 기술의 미래 전망

- 기후 변화 관점에서 주요 세 가지 시나리오의 전개를 통해 미래의 에너지 기술과 그 세부 기술인 원자력 기술의 전망
- 미래 에너지 전망은 전 세계 에너지 시장에 대한 장기적인 전개 및 관련된 불확실성을 고려해 본 미래의 결과임.
- 세 가지 시나리오는 모두 기술적으로 가능하며 광범위한 결과 범위에 걸쳐 있지만, 현실화 가능성을 확률로 언급하는 것은 아님(시나리오 기법의 특징).
 - 각 시나리오는 해당 시나리오 사건의 발생 시, 세계 경제와 세계 에너지 시장의 미래 결과치에 대한 예측과 그와 관련된 가정으로 구성됨.

□ 세 가지 기후 변화 대응 시나리오의 전개

○ 현상유지 시나리오: 시장 세력이 기후 정책과 공존

- 파리 협정에서 전 세계 국가들이 약속한 NDC 이행 기반
 - NDC는 에너지 산업 변화의 근간 형성
 - 시장에 최적화된, 보조금이 없는 투자환경 가정
 - 의무적인 표준 및 규정도 시장 세력과 공존하여 소비자 결정을 내리는 데 중요한 역할을 하며 혁신 및 기술 개발에 이바지
 - 경제적인 저탄소 에너지 기술의 발달로 인위적 시장 개입 대신 시장 자율기능 유지
- 2020년대 후반부터 배출 목표와 정책의 일부 강화 발생

⇒ 현상유지 시나리오의 국제 지정학적 틀

- 국제적 정책의 흐름보다는 국가의 정책 결정에 따라 변화
 - 정책 결정에 따라 강화되는 국가와 민간 경제의 관심사 반영
- 심각한 파멸이 아닌 정도의 지역적 지정학적 긴장 발생
 - 미국의 세계적 지도력에 의문 제기
 - 중동 지역의 국부적 및 지역적 갈등 지속
 - 유럽은 브렉시트에 의해 제기된 역내 도전과 EU 붕괴에 대한 우려에 계속 몰두
 - 중국과 러시아의 도전적인 세계적 역할 시도의 약화
 - 인구 통계학적, 경제적, 환경적, 정치적 발전과 관련된 각각의 여러 내부 도전 사유
- 정책 일관성 약화
 - 테러리스트 공격과 난민이주와 같은 국제적 현안에 공조 필요
 - 국제기구와 질서 유지 지속
- 연구·개발과 기술 개발은 지정학적 전개와 무관

⇒ 현상유지 시나리오의 경제 성장

- 세계 GDP 성장률은 지난 25년간 평균보다 둔화되며, 2008년 금융 위기 이전의 5년보다 현저히 낮아질 것으로 예상
 - 전 세계 인구는 증가하고 특히 선진국들의 인구 노령화가 심화되며 시간이 지남에 따라 성장률이 저하됨.
- 신흥 경제국의 생산성 향상으로 선진 경제를 따라잡는 그들의 성장 잠재력은 지속됨.
- 2030년대 중반부터 지구 온난화와 극심한 기후 사건이 다소 경제적인 활동을 위축시키며, 2040년대에 그 영향이 확대됨.
- 저가의 화석 연료와 국가별 다양한 NDC 요건에 따라 예측 대상 기간 초기에 석유 및 가스 수요 상승
 - EU 배출량 거래 시스템 (EU ETS) 및 기타 국가 및 지역 탄소 가격 체계 작동
 - 탄소세는 국가별로 연계되지 않은 상태 유지
 - 탄소세의 저수준 유지로 CCS (탄소 포획 및 저장)의 대규모 출시 지연
 - ▶ CCS는 상대적으로 발전이 이루어지지 않아서 주요 기후 위험 완화 도구로서의 역할 약화

⇒ 현상유지 시나리오의 에너지 시스템

- 에너지 원단위(Intensity)의 연평균 개선율은 지난 25년 동안 나타난 개선율의 두 배 이상인 1.9%가 됨.
 - 차량의 연료 효율 표준을 비롯한 다양한 정책 수단과 건물, 산업, 전력 및 전체 에너지 하위 부문과 관련된 기술의 발전을 통해 달성
- 에너지믹스는 주로 점진적이지만 탄소 연료에서 녹색 에너지 기술로 변화함.
 - 전기 자동차의 가격 경쟁력 확보 후, 전력 부문에서 녹색 에너지 기술로의 변화 가속화
 - 경장비 차량에 관한 기술 변화로 전 세계 자동차 차량의 전기화 가속화

- 풍력 및 태양 에너지 및 전기 자동차에 대한 규제 인센티브 및 보조금은 단계적으로 점차 폐지되고 수익성 있는 청정에너지 기술로 전환 전망

⇒ 지속적인 전 세계 GDP의 성장으로 에너지 수요는 서서히 증가 예상

- 무탄소 연료로의 느린 전환으로 CO₂ 배출량도 서서히 감소
- 장기적으로 지속 가능한 시나리오 미흡 전망

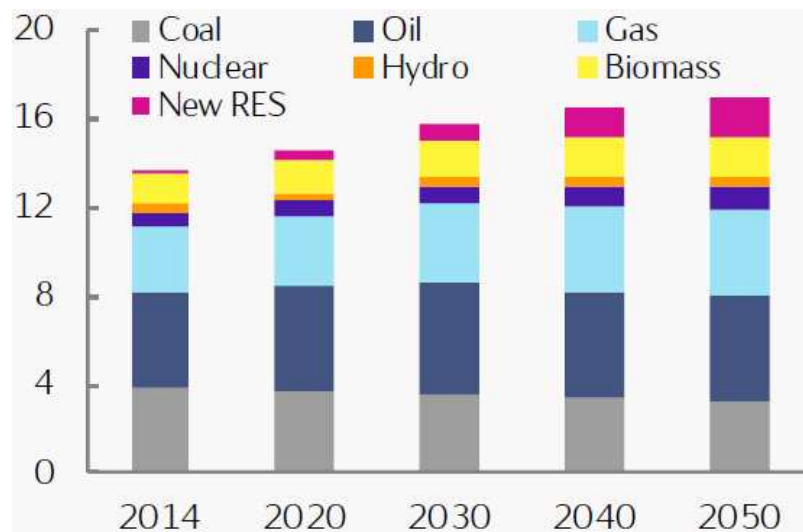


그림 26. 현상유지 시나리오의 세계 1차 에너지 수요 (Btoe)⁶⁵⁾

○ 성장 시나리오 : 파리 협정의 완전 이행 - 환경과 에너지의 공존

- 지구 온난화 완화 요건 지구온도 2℃ 준수 목표에 최우선 목표
- 여러 부문이 공동 협력하여 목표 달성 추구
 - 목표 달성에 맞게 에너지 믹스를 포함한 전반적인 부문의 재구성 허용
 - 2040년까지 전 세계 에너지 부문 누적 CO₂ 배출량을 IEA의 450 시나리오 수준보다 약간 아래로 제한하는 목표
 - 2050년까지 지구온도 2℃ 준수 목표 달성

65) Statoil, Energy Perspectives 2017: Long-Term Macro and Market Outlook, Statoil ASA, Stavanger (2017).

- 국제 협력이 정책 주도의 지정학적 정치적 환경 조성
 - 각 국가 정책 의제는 지구 온난화 위협이 급진적인 행동을 요구하고, 필요한 정책의 심각성은 공동의, 조정된 대응을 요구한다는 사실을 깨달음으로써 형성
 - 각국이 파리 협정의 약속(2℃ 목표 준수) 성실 수행
 - 국제기관, 국제법 체제 및 무역 협정의 질서 유지
 - 중국, 브라질 및 인도와 같은 신흥 경제국도 국제질서에 동참
- ⇒ 화석연료(석탄과 석유 등) 의존도 탈피 및 에너지 다각화로 에너지 효율 향상을 통한 선진국과 신흥국의 실질적인 발전 및 성장
 - 화석 연료 보조금의 신속한 폐지
 - 고 탄소가격 추진과 국제 탄소시장의 조성에 따른 관련 투자 및 기술 이전 촉진
 - 친환경적 에너지 시스템 구축용 부가가치 신속 창출
(예) 대규모 CCS의 개발 및 배포 장려 등
 - 주요 부문의 급진적인 전기화
(예) 재생 가능 기술 및 자동차 배터리 비용 감소, 전기 자동차 충전 지점의 광범위한 가용성, 대규모 전기 저장 장치의 기술 성숙도 및 저렴한 가격, 스마트 그리드, 전송 네트워크의 실질적인 강화 및 상당한 양의 주택 및 공공건물 품목 개조 등
- ⇒ 초기의 전 세계 경제성장은 저성과
 - 초기에는 단기적인 경제적 수익보다 전 세계 CO2 배출량 감소에 따른 합의된 목표 달성하기 위해 녹색 경제에 투자가 선행
 - 그 후에 녹색 투자의 고 수익 창출로 경제성장률 증가
- ⇒ 에너지 성장률 < 경제성장률 → 에너지 관련 CO2 배출량 안정화
 - 전례 없는 에너지 효율 증대 속도가 경제 성장의 영향보다 우위

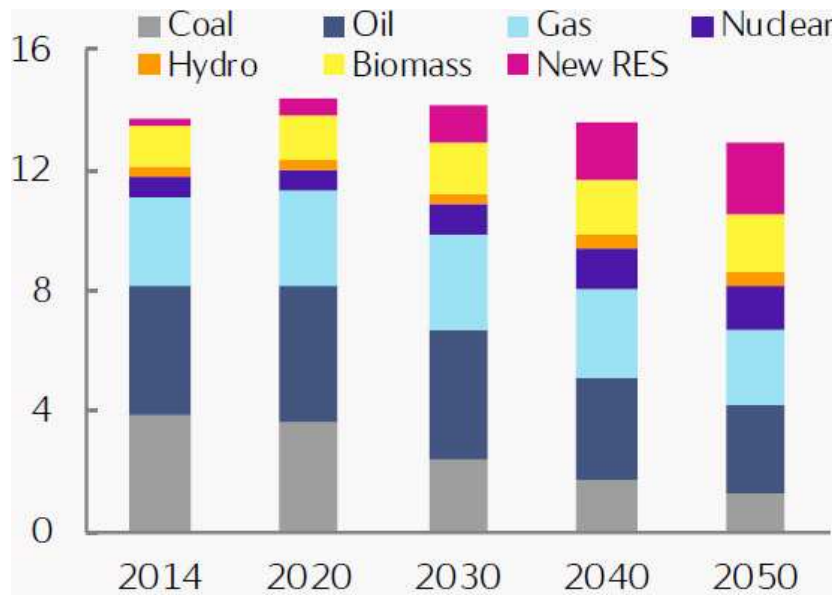


그림 27. 성장 시나리오의 세계 1차 에너지 수요 (Btoe)⁶⁶⁾

○ 대립 시나리오 : 국가별 정치적 결정에 따르는 파리협약 무력화

- 인기 영합주의, 민족주의, 국내 지향적이고 단기적인 정책 우선
 - 기후 회의론 고조
 - 국제 공동이익 추구보다 국가이익에 관한 관심 고조
- 개별 국가들의 성장과 퇴보가 상존함에 따른 국가간 갈등 고조
 - 나라 간의 경제 불평등은 사회적, 국제적 응집력 약화
 - 기존의 국제 정치 및 원칙의 외면과 보호주의 기승
 - 기존 군사강국 미 관리 지역 중, 신흥 군사강국의 추가 관리 외면으로 인한 지정학적 분쟁 지속 고조
 - 유엔 등 국제기관들의 세계의 문제 중재에 한계 노출
 - 냉전 이후 존재했던 평화로운 세계화 추구의 종말

⇒ 국가간 대립의 지정학 상황은 국제 무역과 신기술의 배치 방해

- 정치 및 경제 자원은 덜 생산적인 목적에 이용
 - 파리협정의 기후 변화 완화 약속의 이행 무산 위기

66) Statoil, Energy Perspectives 2017: Long-Term Macro and Market Outlook, Statoil ASA, Stavanger (2017).

- 저 경제성장 지속
 - 신기술 생산 능력에 대한 장기간의 저투자 및 화석 연료에 대한 수요 증가로 인해 고비용 에너지 이용의 지속화 진행
 - 에너지 가격 상승
 - 에너지 생산 국가의 불안과 관련된 변동성 증가
 - 탄소 가격 체제의 운용은 정책 의제에서 하위순위화
 - 무탄소 연료로의 전환 투자 미미
 - 신규 CCS 개발 프로젝트 미 고려
 - 국지적 환경 문제에 대한 정책 및 규제 관심은 유지되지만 전 세계적 환경 문제에 대한 무관심 고조
- ⇒ 에너지 안보에 대한 불안 의식 고조
- 에너지 효율과 토착 신재생 에너지에 관한 관심 표명
 - 국내 화석 연료 자원 활용 의지 가시화
 - 석탄, 석유 또는 가스가 풍부한 지역의 화석 연료 의존 지속화
- ⇒ 전 세계 자동차 차량의 전기화 상당 기간 지연

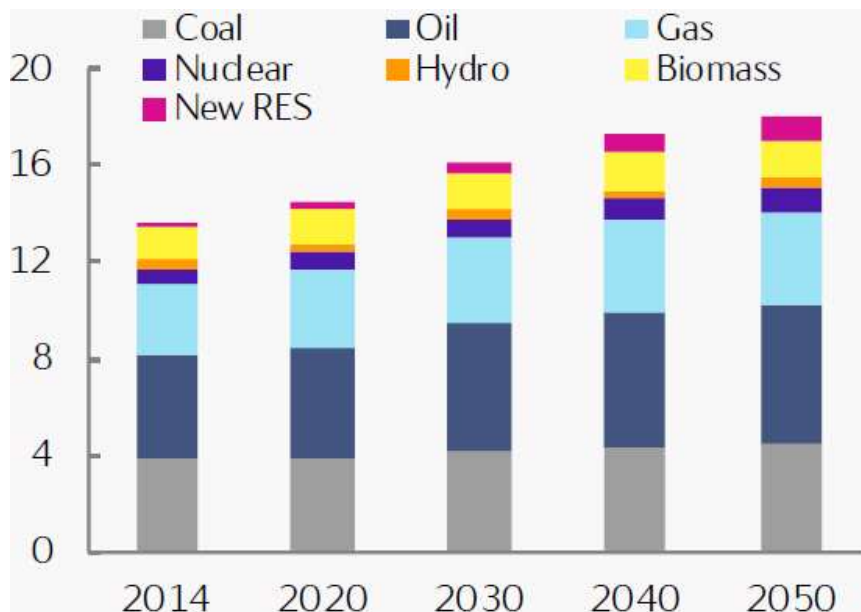


그림 28. 대립 시나리오의 세계 1차 에너지 수요 (Btoe)⁶⁷⁾

67) Statoil, Energy Perspectives 2017: Long-Term Macro and Market Outlook, Statoil ASA, Stavanger (2017).

□ 대응 시나리오 요약(상세 내용: 부록 III 참조)

	현상유지	성장	대립
속성	NDC 이행 보조금 없는 시장중심 (혁신과 기술개발) 저탄소 기술 상용화 국제질서 현상유지 탄소가격 체계 미작동 (CCS는 비경제 대안)	2°C 제한, 국제협력 발전 탈탄소화, 전기차 시장기반 ESS 기술 성숙 송배전 네트워크 강화 주택, 건물 개조 경제는 현상유지에 비해 더 성장	포퓰리즘과 민족주의 국제적 이득 보다 국가 이익 우선 지정학적 경쟁 고조 물리적 장벽과 국경통제 로 세계화 후퇴 기후회의론 경제성장 훨씬 낮음
에너지	수송, 건물 효율개선 전기차 보급 확대 신재생과 전기차에 대한 규제 및 인센티브, 보조 금 점차 폐지 GDP>효율개선으로 에너지소비 증가 에너지원단위 1.9%/년 개선 에너지소비 2014~2050 0.6%/년 증가(총 24% 증가)	에너지원단위 감소속도 가 경제성장을 압도 에너지원단위 2.8%/년 감소 2050 에너지수요 2014 의 94% 수준(6% 감소)	화석연료 수요증가와 에 너지가격 상승, 변동성 증가 탄소가격은 정책의제에 서 멀어짐 신기술에 대한 인센티브 배제(CCS 불고려) 지구적 기후문제 무시 전기차 보급 속도 둔화 에너지원단위 1.1%/년 개선 에너지수요 32% 증가
전력비중	2014 18%→2050 25%	→2050 30%	→2050 20%
원전비중	5~6% 현상유지	11.5%로 증가	5~6% 현상유지
신재생	확대	빠르게 확대	확대
CO2	배출 안정화, 파리협약 달성 실패	CO2 크게 감소	현상유지 보다 오히려 증가

표 18. 세 가지 대응시나리오 요약

□ 대응 시나리오 전개 시의 원자력 기술의 미래 전망

○ 현상유지(Reform) 시나리오; 신시장의 적응과 신제품 개발
(시나리오 상황)

- 전력계통/시장의 핵심 키워드와 원자력 기술

• Energy Storage(에너지저장)

- 재생에너지 확대에 따른 에너지저장장치 수요가 대폭 확대
- 기존 battery는 대용량, 장주기 에너지 저장에 한계가 있으며

타 기술 대안들은 여전히 경제성에 문제가 있음.

- Isotope energy storage, 용융염전지 등 원자력 기반 신기술 개발 필요

⇒ 원자력발전소에 적합한 그리고 요구 기술 특성에 부합하는 에너지저장기술 개발

- Dispatchability(급전가능성)

- 간헐성을 갖는 재생에너지 확대에 따라 부하추종 수요 점증
- 기존 원전의 출력제어를 위한 제어 알고리즘 개발, 안전성 검증 필요
- 기존 원전의 기존 ESS와의 결합을 통해 출력제어 능력을 향상시키는 방안도 고려
- 출력제어 능력 보강용 2차측 전기출력 제어 시스템 필요

⇒ 미래 원자로는 출력제어능력을 갖추도록 설계

- Distributed System(분산형시스템)

- 송배전망 건설의 어려움, 산불 등 자연재해 발생 빈도 증가, 대형 전력회사에 대한 신뢰성 하락 등으로 인해 마이크로그리드, 지역공동체개별구매(Community Choice Aggregator) 등 전력시스템 분산화의 확대

⇒ 소규모 분산 전력시스템에 적합한(소형, 용이한 유지관리, 높은 출력제어 성능을 갖춘) 원자로 기술 개발

- Low capital cost(자본비용)

- 재생에너지 확대에 따라 전력시장가격 하락, 가격 변동성 심화 등으로 자본비용 회수 불확실성이 더욱 확대되고 있음.
- 이에 따라 평균발전단가가 낮다 하더라도 초기자본투자비가 높은 발전원은 시장에서 선택되기 어려움.

⇒ 미래의 원자로는 초기자본투자비와 폐로비가 대폭 축소되는 방향으로 개발

- 수요 원자력 기술

- 혁신형 소형원자로 개발

- 인쇄기판형증기발생기
- 고성능 원자로 냉각재 펌프
- 다수호기 블록화 개념 지능형 자율운전
- 원자로용기장착형 밸브

- 피동안전계통 최적화 등
- 다목적 초소형 원자로 기술 개발
 - 초소형 원자로 시스템 개발- 초임계 CO2 동력변환계통
 - 성능 실증용 축소 상용장치 구축 및 검증
 - 중대사고 배제 핵연료 설계/제조기술, 다목적 열원 응용기술
- 차세대 동력변환시스템 개발
 - 독립전원용 메가와트급 초임계 CO2 발전시스템 설계
 - 메가와트급 초임계 CO2 발전시스템 핵심기기 기술 검증
 - 플랜트급 수메가와트 초임계 CO2 발전시스템 상세 설계
- 우주용 원자로
 - 우주추진체
 - 우주전력공급원

○ 성장(Renewal) 시나리오; 4차산업혁명 기술의 원자력 응용 (시나리오 상황)

- 4차산업혁명 기술의 적용
 - 인공지능/딥러닝(Deep Learning), 로봇, 자율주행, 사물인터넷(IoT), 신소재, 3D프린팅 등 선진제조 기술의 적용을 통한 에너지 시장에서의 성장
 - 방사선 기술, 원자력 외부 분야의 제품 생산기술을 통한 기술 영역의 확장
- 원자력 응용 분야; 표 19, 20 참조
 - 원자로시스템(초소형원자로, 자율운전, 사고저항핵연료)
 - 유체계통(기기 개발, 유동 안전)
 - 안전(진단, 재난, 환경, 안보)
 - 폐기물/해체(자동화, 흡착제, 처분, 해체, 제염)
 - 신소재(반도체, 양자컴퓨팅, 신기능소재)
 - 의학(진단, 치료, 선량평가)
 - 농생명(개량, 동위원소)
 - 비파괴(자동화)
 - 우주(전지, 발전기술)

대분류	소분류	기술명	적용미래기술
안전일반	진단	자율주행 로봇/드론을 이용한 원자력 시설 및 방사선안전 진단	자율주행, 로봇, IoT
		기계학습 기반 기기 이상탐지(Anomaly Detection)	딥러닝
	재난	원전 사고시 선원항 예측이 가능한 딥러닝 시스템	딥러닝
		무인비행체-딥러닝 기반 재난현황 실시간 분석 시스템	딥러닝, 자율주행
		사고 대응용 원격 로봇시스템	로봇, IoT, 자율주행
		재난대응용 개인 맞춤형 솔루션 딥러닝 시스템 개발	딥러닝
	환경	딥러닝 기반 환경방사선 모니터링 분석 자동화 시스템	딥러닝
		해양방사능 측정 자동화 시스템	딥러닝, 로봇
		딥러닝 기반 환경시료 방사능 분석 자동화 시스템	딥러닝
	안보	중요 원전시설 보호를 위한 안티드론 시스템	드론
유체계통	기기	딥러닝 기반 최적설계기술 (증기발생기 등)	딥러닝
		블록형 시스템 기기 개념	선진제작
	안전해석	유동해석 딥러닝 기술	딥러닝
		딥러닝 기반 비파괴 유동안전 평가기술	딥러닝
원자로	시스템	원자로 자율운전기술	딥러닝
		피동안전계통 최적화	선진제작
		고성능 냉각재 펌프	선진제작
		초소형 원자로 시스템	선진제작
		초임계 CO2 발전시스템 및 계통기술	선진제작
	핵연료	중대사고 방지용 핵연료 설계-제조기술	선진제작
폐기물	자동화	폐기물 균질도 자동평가 기술	딥러닝
		폐기물 핵종분석 자동화 딥러닝 기술	딥러닝
	흡착재	방사성물질 흡착재 성능 최적화를 위한 딥러닝 기술	딥러닝
	처분	인공지능기반처분공학적방벽최적화설계기술개발	딥러닝
		고준위 방사성폐기물 처분 종합관리 시스템 개발	딥러닝, IoT

표 19. 4차산업혁명 기술의 적용분야(1)

대분류	소분류	분야	적용미래기술
의학	진단	진단을 위한 초고해상도화 기술	딥러닝
		종양 진단을 위한 특이 마커 발굴	딥러닝
		의학 진단 자동화 기술	딥러닝
	방사선치료	방사선 암치료 자동화 딥러닝 기술	딥러닝
	선량평가	생물학적 피폭평가 자동화 딥러닝 시스템	딥러닝
신소재	반도체	딥러닝 기반 NDT반도체 최적도핑 기술 개발	신소재, 딥러닝
	소재	강도, 내열성 등 물성향상을 위한 딥러닝 기반 방사선조사 최적화 기술	딥러닝, 신소재
		경량/고강도 중성자 흡수재	신소재
		기체 분리막 소재 개발	신소재
농생명	농업	딥러닝 기반 Mutation 최적화 기술 개발	딥러닝
		Life Span 확장 기술 개발	딥러닝
	생명	방사선 돌연변이 육종 최적화를 위한 방사선 조사 기술	딥러닝
		표지기술에 최적화된 방사성 동위원소 생산 기술	딥러닝
비파괴	자동화	방사선에 대한 생물체 반응연구 지원기술	딥러닝
		중성자 비파괴분석 자동화 기술	딥러닝
		비파괴분석 자동화 시스템 기술	로봇, 딥러닝
우주	우주	우주방사선 측정 기술	미래기술
		핵전지 기술	선진제작
		위성용 소형-경량 원자력 발전기술	선진제작

표 20. 4차산업혁명 기술의 적용분야(2)

- 수요 원자력 기술(안전 분야)
 - 가상원전
 - 가상원전 통합 플랫폼 구축 및 세계최고 수준의 원전 비정상상태 예측 정밀도 확보

- 정밀 시뮬레이션 기반 사고진행 예측 및 운전원 지원 기술
- 압력경계 기기 비정상·고장 진단/예측 신뢰도 향상
- 고정밀 핵연료 해석 기술을 활용한 핵연료 안전성 평가 기술
- 지능형 원전재난 대응
 - 최적 사고관리/대처용 지능형 의사결정 지원 플랫폼 개발
 - 사고진행 평가 및 방사성물질 방출 저감기술 개발
 - 방사성물질 환경누출 저감을 위한 무인장비 개발
 - 방사성물질 환경방출용 개인맞춤형 재난대응 솔루션 제공
- 수요 원자력 기술(방사선기술 분야);
 - 방사선 손상복원 및 내성제어 M&S 기술 연구
 - 방사선 반응 모델링&시뮬레이터(M&S) 개발연구를 통한 방사선 손상복원
 - 정밀 예측기술 확립과 방사선 내성강화 제품개발 효율성 향상
 - 방사선 융합 생물분자공학 원천기술 개발
 - 생체분자 재조합기술 세포공장구현기술 천연고분자 가공기술
 - 사회 인프라·먹거리 정밀 안전진단용 방사선 기술개발
 - 구조 안전진단, 먹거리 안전진단, 방사선 안전·감시 등

○ 대립(Rivalry) 시나리오; 원자력과학기술⁶⁸⁾로의 전환

(시나리오 상황)

- 복잡하게 얽힌 국제정치 상황 때문에 에너지 안보를 최우선 순위
 - 낮은 경제성장률, 증가하는 보호주의
 - 탄소가격은 정책의제에서 멀어지고 지구적 기후문제 관심저하
 - 신기술에 대한 인센티브 배제(CCS 불고려)
 - 원자력발전량 감소 예상. 그러나 원자력은 에너지 안보에서 다른 에너지원보다 비교 우위에 있기 때문에 기초분야로 원자력개발 지속 예상.
- 원자핵 응용연구 (Nuclear Application) 분야 활성화
 - 기초연구(측정, 분석기술)

68) 원자핵과학기술(Nuclear Science and Technology) - 원자로(Reactor), 가속기(Accelerator), 핵변환/반응(Nuclear Transmutation/Reaction), 방사선조사 (Irradiation)를 이용한 모든 활동

- 환경보호
- 수자원 확보
- 의료(암진단, 치료)
- 신소재
- 양자기술(기초연구)
- 산업응용(공정진단, 비파괴검사 등)
- 식품 농생명
- 에너지(RI, 태양전지 개선)
- 사용후핵연료 환경부담 저감 기술 개발
 - 심부시추공처분(DBD, Deep Borehole Disposal) 연계 처분대상 핵물질 회수기술 확보
 - DBD 대상 고방사성핵물질 안정화기술(고화체 제조)
 - 고화체 장기 안전성 시험자료 확보 분리 U 활용/관리
 - 방열성핵종(Cs,Sr) 저장 · 관리방안 확보
 - 환경부담저감기술 안전성/실효성/경제성 평가자료 확보
 - 기술집약적 사용후핵연료 안전관리 솔루션 제공
- 에코-돔 연구센터
 - 국민 안심 “미래의 사용후핵연료 관리 도시” 개발
 - 원전 해체로부터 생긴 '브라운(그린) 필드' 활용
- 연안 해저암반 처분
 - 심층처분시설의 안전성을 제고하고, 심리적 님비현상을 완화하여 지역사회의 수용성을 향상시킬 수 있는 방안으로 처분영역을 5km이내의 연안 대륙붕에 건설하는 개념

6. 미래 인력양성 - 학회의 역할

- ☐ 우리나라 미래 원자력 예측 시나리오에서는 기후변화와 에너지전환정책이 중요한 동인이 되어 탈원전을 추구하는 비관적 시나리오를 고려해야 하는 상황이 예측됨.
- ☐ 에너지전환정책과 같은 정부 정책의 변화가 없으면 비관적 시나리오를 벗어날 수 없으므로 산업인력과 연구인력을 양성하는 대학 교육에 더해

원자력의 사회적 수용성 증진을 위한 미래세대를 포함한 일반 국민에게 원자력 관련 지식 확산을 위한 교육활동까지 포함하여 광범위하게 논의하기로 함.

○ 원자력 산업 지속을 위한 인력 양성

○ 미래 원자력기술 개발을 위한 고급 인력 양성

○ 일반인 대상 지식 확산 및 미래세대 교육

- 미래 시나리오 변화 추구

□ 일반인 대상 지식 확산과 미래 세대 교육

(탈핵 진영의 활동과 원자력 유관기관의 활동 현황 분석 토대)

○ 탈핵 진영의 주요 프로그램

- 전라북도교육청: 탈핵교재 “탈핵으로 그려보는 에너지의 미래” 제작·배포, 교사 연수 지속
- 맘 카페 및 한살림 활동(한살림은 농산물 유통업체임에도 탈핵운동을 주요 활동으로 명시): 인터넷 카페를 통해 엄마들에게 관련 책자 판매/배포, 강연회 실시 등
- 서울에너지드림 센터 : 어린이대상 탈핵학교 운영
- 서울대 지속가능발전 연구소 교육프로그램: 그린리더십 과정, 그린리더 양성
- 탈핵/탈원전 서적/만화: 초등학생부터, 청소년, 어른까지 다양한 계층을 대상으로 하는 많은 책

○ 원자력 유관기관 활동 프로그램

- 서울대 원자력정책센터에서 ” 탈핵교재 팩트체크” 를 발간
- (사)한국여성원자력전문인협회(WiNK): 2019년 서울대학교 원자력정

책센터에서 지원 받아 “생활방사선안전지도사” 양성 프로그램을 개발하고 시범운영

- (사)안전생활실천시민연합(안실연): KAERI 원자력교육센터와 협력하여 안실연 회원 230여 명에 대한 교육과 중고교사 약 50명 대상 워크숍 등 실시

○ 학회가 중심이 되어 다음과 같은 구체적 활동이 필요

- 국민 안심 원자력 교육: 원자력 및 방사선 안전, 생활방사선 알리기 등
- 프레임 싸움 대응, 젊은 층에 대한 홍보와 소통 강화 방안 마련, SNS (동영상)활용을 통한 효과적인 원자력정보 전달
- 중·고등학교 교사들에 대한 정보전달 또는 교육을 통한 젊은 세대로의 올바른 정보전달 중요(원자력에 대한 직접 홍보와 함께 에너지 믹스 중심의 강연 활동도 추진)
- 생활방사선안전지도사 양성(WinKorea와 학회간 지속 예정)
- 온라인 오프라인을 통한 “탈핵 교재 및 서적 팩트 체크 자료” 배포
- 친원전 자료 및 도서 출판 확대 방안 마련
- 학회에 전담조직을 두어 회장단 임기와 무관하게 지속적 활동 필요

□ 시나리오 기반의 대학교육 현황분석과 방향모색

- 에너지전환정책으로 원전산업 생태계 붕괴가 걱정되는 비관적 시나리오까지 고려

- 국내: 일부 원자력 관련 학과의 존립이 어려운 상황(단국대 등 다수의 원자력공학과는 에너지공학과 등에 병합, 학생 진로 지도에 어려움 등등)
- 국외: 대만 원자력공학과는 원전 관련 교육을 포기하고 방사선 응용 등 타 분야로 전환 진행 중이며, 일본 대학 교수들은 책을 쓰는 등 먼 미래를 준비하고 있음. 오래 전 무너진 영국은 원자력 분야 교육 시스템 복원을 위해 여러 대학들로 흩어진 원자력 전공 교수들을 모으려 시도 중

○ 산업체 인력 공급과 미래 원자력 인재 양성을 위한 대학 원자력 교육의 방향 모색

- 원전 수출 등을 통해 원자력 산업 생태계 유지 시나리오
→ 원자력 지속을 위한 핵심역량 유지
- 원전 산업 붕괴가 오더라도 산업 기반이 약한 항공우주 분야의 약진을 고려할 때 미래 원자력 신기술 확보를 위한 활동을 중심으로 미래 대비 필요
→ 꿈을 주는 미래 원자력 기술 제시를 통해 원자력에 대한 비전 제시

□ 교육 요약

○ 국민 안심 원자력 교육 일반인에게 올바른 원자력 지식 확산 및 미래세대 교육 관점에서 진행

- 프레임 싸움 대응, 젊은 층에 대한 홍보와 소통 강화 방안 마련, SNS (동영상)활용을 통한 효과적인 원자력정보 전달
- 중고등학교 교사들에 대한 정보전달 또는 교육을 통한 젊은 세대로의 올바른 정보전달 중요

○ 산업체 전문인력 교육: 문제해결 능력을 갖춘 핵심 인력 유지 방안

마련 필요

- 산업 분야(제2소위원회)의 시나리오와 연계한 인력 양성 방향 설정 및 대학별 역할 분담
 - 1세대 원자력 산업 기술자의 은퇴를 메울 핵심 인력 확보 방안 필요: 경력직 은퇴자 데이터 베이스 확보를 통한 인력유지 및 경험/전문기술의 젊은 세대로의 전수 프로그램 필요
- 전문 연구인력 교육: 꿈을 주는 원자력과 일자리를 제공하는 원자력에 대한 비전 제시 필요
- 연구개발 분야의 시나리오와 연계한 인력양성 방향 설정
 - 오랜 시간과 투자를 통해 확보한 원자력 핵심기술을 유지/발전시키기 위한 노력 병행 필요(대학의 경우 원자로 분야 핵심 과목에 대한 학생들의 관심 저하 해결 노력 필요) SMR, Micro-Reactor 등의 미래 원자로에 대한 연구지원을 통한 핵심역량 유지

7. 결론

- ☐ 세계 에너지수요는 2040년까지 시나리오에 따라 연평균 -0.3%~1.2%, 전력수요는 0.4%~1.2% 증가를 전망함. 원전은 1.1%~2.2% 증가 예상
- ☐ 국내 에너지수요는 2040년까지 연평균 -0.1%로 약간 감소, 전력은 0.6% 증가, 원자력은 -0.01% 감소 전망
- ☐ 시나리오의 혼합 구성 시, 미래 원자력의 역할에 대한 광범위한 스펙트럼 구성 가능.
- ☐ 전세계적으로 에너지 수요는 꾸준히 증가할 것이며, 온실가스 완화 시나리오 상 2050년까지 원자력의 활용의 지속 전망.

- ☐ 원자력이 비 기후적인 잇점인 에너지 안보 우수성으로, 코로나 대유행 등과 같은 대립 시나리오로 전개 가능성이 커진 시점에서 볼 때, 미래 원자력의 역할이 기대됨.
- ☐ 2040년 내에 약 100여 기의 신규 원전건설 시장이 열리며, 그 이후 장기적으로 300여 기의 신규 원전건설이 예상되는 바, 원전수출 경쟁력 확보 및 유지 필요. 이를 위해, 수출 후 60년 이상의 운영기간 동안의 기술/부품 지원 및 공급과 원전 계속운전 및 지속적인 원전 기술 개발 역량 및 인력 필요
- ☐ 신규원전 건설 노형의 원전수출 노형화 전략 필요
- ☐ 40년 이상 확보한 대형로, 연구로, 중소형모듈원전 SMART 기술을 바탕으로 소형원자로 기술 확립 및 세계 시장 진출용 수출형 소형원자로 국내 건설 및 운용 필요
- ☐ 원자력 기술의 우위를 유지하려면, 차세대원전 기술개발에의 지속적 투자로 차세대원전 상용화에의 선도 역할 수행 필요
- ☐ 원자력 수소생산을 포함한 그린수소 생산의 추구 시, 수소사회로의 진입 가능 전망됨.
- ☐ 국민 안심 원자력 교육 일반인에게 올바른 원자력 지식 확산 및 미래 세대 교육 관점에서 진행
- ☐ 산업체 전문인력 교육: 문제해결 능력을 갖춘 핵심 인력 유지 방안 마련 필요
- ☐ 전문 연구인력 교육: 꿈을 주는 원자력과 일자리를 제공하는 원자력에 대한 비전 제시 필요

□ 제언:

- 온실가스 완화와 에너지 안보에 탁월한 특성을 보유한 원자력은 미래에도 지속가능한 에너지원으로 고려되므로 원자력 산업의 유지, 성장 정책 필요.
- 에너지 수요와 환경보호라는 공동의 목표 달성에 한 축이 원전수출이며, 이에는 소형원전과 수소사회도 포함됨. 이에 대한 적극 지원 필요
- 대국민 소통 활동의 지속적 추진을 위해 학회에 전담조직을 두어, 대국민 홍보/교육 활동 기획, 조직 및 이에 필요한 자료의 생산·관리를 맡도록 강력 추진
- 대학교육과 관련해서는 원자력 지속을 위한 핵심역량 유지와 미래 원자력 신기술 확보를 위한 활동을 중심으로 진행할 것을 제안함.

〈부록 D〉 주요 소형원자로 및 초소형원자로 개발 현황

원자로명	출력 (MWe)	원자로 형태	개발사	개발 진도	특성
CNP-300	300	PWR	SNERDI/CNNC (파키스탄/중국)	운전중	1991년 운전시작, 중국최초 상용 원전, Quinsan
PHWR-220	220	PHWR	NPCIL(인도)	운전중	인도에 16기 가동중
EPG-6	11	RBMK	IPPE(러)	운전중, 곧 폐쇄	RBMK 축소형 모델, 1974년 운전시작, Bilibino (Siberia)
ACPR50S	60	PWR	CGN (중국)	건설중	중국최초 해상원전, 2016년 건설 시작
CAREM	27~30	iPWR	CNEA, INVAP (아르헨티나)	건설중	1984년 최초 계획이 중단후 2006년 재개, 2020 운전 목표로 건설중
HTR-PM	210	HTR	INET, CNEC (중국)	건설중	twin Reactor with single Turbine, HTR-10 기반, 2012건설착수
KLT-40	35	PWR	OKBM Afrikantov(러)	건설중	선박용 원자로
RITM-200	50	iPWR	OKBM Afrikantov(러)	건설중	7년 재장전주기, icebreaker용, 2016년 건설착수. 2020완공 계획
ACP100	125	iPWR	CNNC(중국)	건설중	2010년 설계착수, Changjiang에 2019년 7월 건설 시작
ARC-100	100	SFR	ARC Nuclear (캐나다)	vendor design review	EBR-II 경험 기반, CNSC vendor design review phase-1 완료
BREST-OD-300	300	LFR	Atomenergoprom (러)	상세설계	2026~2028 완공 목표
BWRX-300	300	BWR	GEH (미/일)	상세설계	ESBWR를 기반으로 한 BWR형 SMR, 자연대류, 피동안전계통
NuScale	45~50	iPWR	NuScale power LLC (미국)	인허가 진행중	2017 NRC DC 신청,
SMART	100	iPWR	KAERI(한국)	인허가 완료	2012 표준설계 인가 획득, 사우디내 건설 추진
SMR-160	160	PWR	Holtec(미국)	개념설계	CNSC vendor design review phase-1 중, 2026 건설 목표
S-PRISM	311	SBR	GEH(미/일)	상세설계	EBR-II 기반 SFR, metal fuel
VBER-300	325	PWR	OKBM Afrikantov(러)	인허가 진행중	barge mounted, 2030년 완공 목표
4S	10~50	SFR	Toshiba(일본)	상세설계	Alaska Galena의 전력원으로 제안된바 있으나, 프로젝트 취소됨
ACPR100	140	iPWR	CGN (중국)	?	산업단지 또는 원격 산악지역의 에너지 공급용으로 개발

원자로명	출력 (MWe)	원자로 형태	개발사	개발 진도	설계 특징
AHWR-300	300	PHWR	BARC (인도)	건설착수 미정	LEU와 토륨사용 개량중수로
CAP200	220	PWR	SNERDI/SPIC (중국)	?	LandStar-V, 열병합발전소 대체 목적, 지하에 건설
CUBE-100	100	MSR	Seaborg Tech. (덴마크)	개념설계	nuclear waste burning, Transportable by truck
EM2	240	GFR	GA (미국)		underground, 30년 refueling period, He cooled
Flexblue	160	PWR	DCNS(프랑스)	개념설계	심해 원자력발전, Naval Group, AREVA, EdF, CEA 개발
Fuji MSR	200	MSR	Intl' Thorium Molten Salt Forum(일본)	개념설계	Thorium fuel cycle for thermal breeding
GT-MHR	285	HTGR	GA(미)/OKBM Afrikantov(러)	개념설계 완료	개스터빈 모듈러헬륨 원자로 미/러/프/일 공동 개발, TRISO, Prismatic
HTMR-100	35	HTGR	HTMR Ltd. (남아공)		He cooled, Pebble Bed, 남아공 Steenkampskraal Thorium Limited(STL) 개발
IMR	350	iPWR	Mitsubishi(일)	'20 이후 인허가 착수	쿄토대, CRIEP, JAPC 개발 참여, 지역나방, 담수, 공정열 이용 등
IMSR400	185~192	MSR	Terrestrial Energy(캐나다)	개념설계	ORNL의 Denatured MSR기반, CNSC의 pre-licensing design review 2단계 진행중(2018부터), CNL 사업 참여
IRIS	335	iPWR	Westinghouse 주도 international	기본설계	2000년초 개발 시작, 2002 NRC pre-application license 절차 밟 음
MCFR		MSR	Southern(미국)	개념(?)설계	TerraPower 참여, TWR 프로그램을 보완하는 프로젝트
MHR-100	25~87	HTGR	OKBM Afrikantov(러)	개념설계	single reactor unit design in various plant configuration
MHR-T	205.4x4	HTGR	OKBM Afrikantov(러)	개념설계	수소생산용(steam methane reforming process or high-temp solid oxide electrochemical process)
mPower	195	iPWR	BWXT(미국)	2017 개발 중단	2009년 mPower 개념 개발, TVA 건설 추진했었음.
MRX	30~100	iPWR	JAERI(일본)	개념설계	marine reactor (선박 추진, 전기, 담수화 등)
NP-300	100~300	PWR	Areva TA(프)	개념설계	
Nuward	300~400	PWR	consortium(프)	개념설계	기본설계완료 (2022~2025), 2030까지 인허가 완료 목표
PBMR-400	165	HTGR	Eskom(남아공)	개발 연기	AVR 및 THTR을 기본개념. 2010년 남아공정부의 재원 중단으로 중단
PB-FHR	100	MSR	UC Berkeley(미)		Pebble-Bed Fluoride-Salt-Cooled High Temperature Reactor
R-R SMR	220~440	PWR	Rolls-Royce(영)	설계중	2028까지 건설 목표

원자로명	출력 (MWe)	원자로 형태	개발사	개발 진도	설계 특징
SNP350	350	PWR	SNERDI (중국)		파키스탄에 건설한 CNP-300 개량 모델
SVBR-100	100	LFR	OKB Gidropress (러)	상세설계	lead-bismuth cooled, FOAK 2021까지 건설허가, 2025운전 목표.
SSR-W	300~1000	MSR	Moltex Energy(영)	개념설계	stable salt reactor, 150MWe Rx Module, 8개 까지 설치가능
TerraPower	10	TWR	Intellectual Ventures (미)	개념설계	2015년 중국CNNC와 공동개발 협정(2018~22에 pilot plant 건설 목표). 2019년 초 트럼프정부의 기술수출 제한조치로 중단
Thorcon MSR	250	MSR	Martingale(미)		ORNL의 MSRE scale-up, 2019년 인도네시아 500MWe 건설타당성
TMSR-SF	100	MSR	SINAP (중국)		pebble bed형 solid fuel, 토륨증식, TMSR-LF는 liquid fuel version
VK-300	150~250	BWR	Atomstroyexport(러)	상세설계	co-generation, 1997년 개발 시작, 2020~2030 건설 목표
VVER-300	300	PWR	OKB Gidropress (러)	개념설계	PWR형 중소형로
W SMR	225	iPWR	W (미국)	개념설계 완료	AP1000기반, 2012중반 Ameren Missouri, NexStart와 컨소시엄 구성, 당초 2022까지 인허가 등 개발 완료계획했으나, 지연됨
W LFR	300	LFR	W (미국)	개념설계	2015개념제안, 2018년 Italy와 MOU체결, 건설 목표 년도 등 미정
ABV-6	6~9	PWR	OKBM Afrikantov(러)	상세설계	Floating type, ABV-3,6,6M 변종
ANGSTRE M	6	LFR	OKB Gidropress(러)	개념설계	modular transportable power/heating plant, remote site
ELENA	0.068	PWR	Kurchatov(러)	개념설계	marine/space reactor 기술, 1500~2000명 거주 오지용(전기, 열)
eVinci	0.2~5	Heatpipe	W (미국)	개념설계	Factory built, 10yrs refuelling period,
Leadir-PS100	36	iLFR	Northern Nuclear(미국)	개념설계	integral type, 캐나다 오지/oil sand resid, Rx module w common TBN
MMR-5&10	5	HTGR	UltraSafe(미국)	vendor design review	He coolant, molten salt loop, CNL SMR project 참여
Sealer	3~10	LFR	LeadCold (스웨덴)	개념설계	-Arctic (3~10MWe, 20% UO2), -UK(55MWe, 12% UN)
Starcore	10~20	HTGR	Starcore (캐나다)	개념설계	CNL SMR project 참여
G4M	25	LFR	Gen4 Energy(미국)	개념설계	이전 Hyperion, UN fuel, Pb-Bi, 2010초반 이후 개발활동 둔화
U-Battery	4	HTGR	Urenco (영)	개념설계	CNSC pre-licensing(vemdor design review) 참여중, 2025 건설목표
Xe-100	35	HTGR	X-energy (미)	개념설계 개발	pebble-bed, 8개 모듈 설치 가능

〈부록 II〉 소형원자로 개요

소형원자로(Small Modular Reactor, SMR)는 IAEA의 2018 Advanced Reactors Information System (ARIS) 보고서에서는 300MWe 이하의 전기출력을 가지는 원자력 시스템으로 정의한다. SMR은 원자로 시스템 내에 있는 구성기기 혹은 계통들이 수요가 있는 장소에서 건설되는 것이 아닌 Shop-Fabrication 방식으로 모듈화되어 해당 장소까지 운송되는 방식을 주로 채택, 설계 단순화 및 공정화를 통해 신뢰성 및 경제성을 향상 시킨다. 대부분은 출력이 대형 원자력발전소에 비해서 낮아서 외부 전원 없이 자연적인 물리 현상을 이용하는 피동형 안전계통을 채택하기 쉬워서 높은 고유안전성을 가질 수 있다. 시스템 자체가 모듈화되어 있어서 수요 출력 혹은 규모에 따라 설계 모듈을 단일 혹은 다중 배치하여 단순성 및 경제성을 극대화한다. SMR의 작은 부피 덕분에 지하매립 방식, 냉각 수조에 넣는 방식, 해양부유식 방식 등 다양한 방식으로 대중에게 누출되는 방사성 물질의 양을 억제 가능하다. 또한 우수한 중성자 경제성으로 장주기 및 초장주기 노심 운영이 가능하여 핵연료를 대형경수로와 비교해서 효율적으로 이용할 수 있으며, 핵연료 재장전 및 운송에 필요한 인프라 및 인력을 최소화할 수 있어서 핵보안성도 증진된다.

SMR은 대형 원자력발전소와 달리 다양한 목적으로 활용할 수 있다. 수송이 쉬운 SMR을 통해 분산 전원으로서 극지 및 오지에 전력공급이 가능하다. 고온의 노심을 갖는 SMR의 활용을 통해 수소의 운송 없이 지역 사회에 대량의 수소공급, 산업단지에 공정열 공급 및 산업용 증기를 공급할 수 있다. 또한, 부하 추종 응답이 빠르거나 장주기 노심 특성을 갖는 초소형 모듈 원전의 활용을 통해 선박 및 우주 추진 분야에 활용된다. 수자원이 부족한 지역의 해수 담수를 통한 수자원 및 지역난방을 공급할 수도 있다.

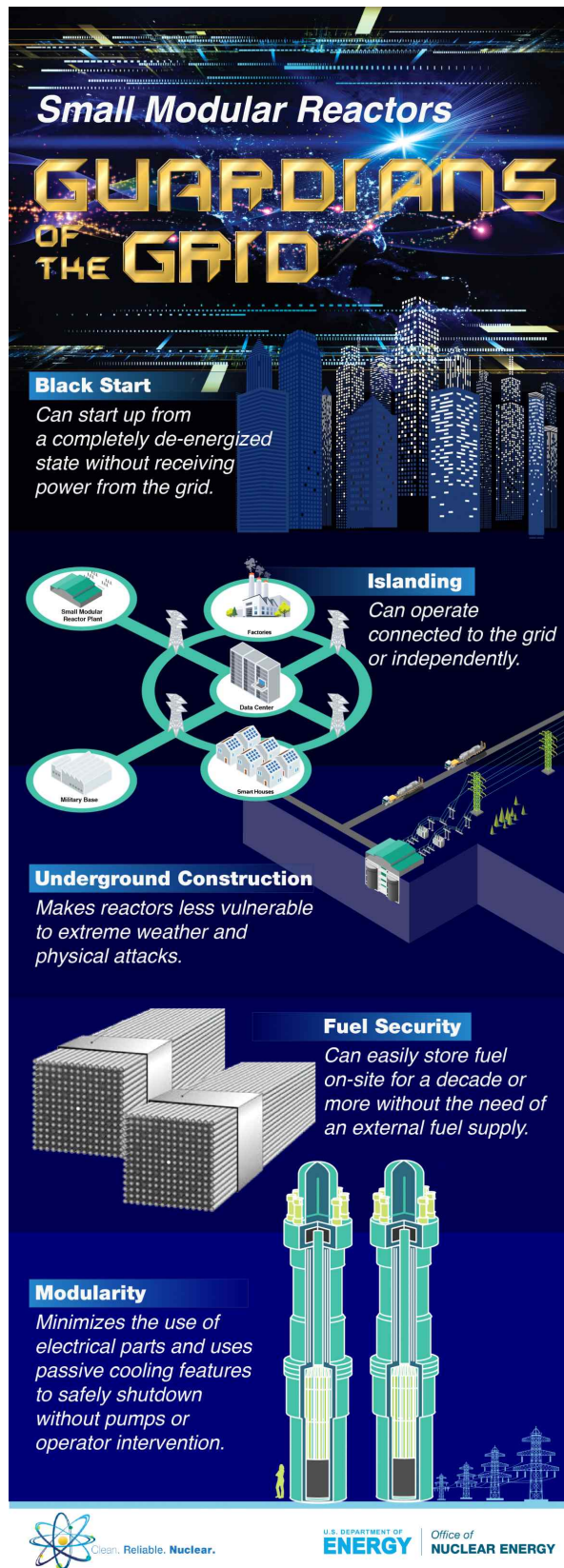


그림 II-1. SMR의 대표적인 5가지 특징

1950년대 이후 개발된 원자로의 크기는 전기생산용으로는 작게는 60MWe로부터 크게는 1600MWe 까지 개발되어 운영되었으며, 군사용으로는 열출력 170MWt 이하 규모의 작은 원자로도 수백기가 운용된 경험에 있다. 소형원전은 그 명칭이 의미하는 바와 같이 현재 운용되고 있는 대형원전보다 출력이 적은 원자로를 의미한다. IAEA는 일반적으로 출력이 300MWe 이하의 소형원자로(SMR)로 분류하고 있으며, 특히 이 중에서도 30MWe 이하는 초소형원자로 분류되고 있다. 초소형원자로 중에 1MWe이하는 주로 우주용 원자로로 분류된다. 용량이 300MWe 이하로 작은 소형로는 대형원전의 주 역할인 발전 외에도 산업공정열, 해수담수화, 수소생산 등 차별되는 틈새시장에 활용할 가능성이 많다. 초소형로의 구분은 일반적으로 출력 1MWe에서 30MWe 까지의 소규모 원자로를 의미한다. 10MWe초소형로가 생산하는 전력 규모는 가구당 필요한 전력 규모를 약 1kWe로 볼 때 약 1만 가구가 있는 지역에 저탄소 전력을 일 년에 365일, 매일 24시간 중단 없이 공급할 수 있다. 일부 소형로나 초소형로는 공장에서 제작하여 필요한 장소까지 트럭, 기차, 배 등의 운송수단을 통해 완제품을 운송하여 설치하므로써, 원자로의 설치 및 제거를 빠르게 할 수 있고, 소형의 원자로인 특성을 살려 원자로계통을 단순하고 피동안전성이 뛰어난 원자로를 실현할 수 있다. 또한 원자로는 한번 핵연료장전을 하면 10년간 핵연료 교체 없이 장기간 운전할 수도 있다. 이와 같이 초소형로는 출력이 작고, 운반성, 안전성이 뛰어나 생활환경과의 인접성 등의 장점으로 그 활용 분야도 대형원전 보다는 다양한 특성이 있다. 소규모 전력 시장 (오지 탄광 전원/열 공급, 낙도/극지/군사기지 분산 전원, 해양플랜트 전력/열 공급) 개척, 오지나 탄광 등 전력 공급원으로 해외 자원 개발 사업에 활용될 수 있다. 해양플랜트 전력 및 공정열 공급을 위한 소형 분산 에너지원으로 역할하며 기존에 오지 전력생산용으로 활용되고 있는 화석연료 대체로 온실가스 저감에 기여한다. 수소생산, 산업용 공정열 제공 등 산업분야에 다양하게 활용할 수 있다. 현재 연구개발 중인 차세대 SMR은 대형원자력 발전소에서 파생된 경수로형과 4세대 원자력 시스템과 연계된 차세대 SMR 노형으로 구분할 수 있으며, 각 노형별 원리 및 장·단점은 다음과 같다.

경수로형 SMR

경수로형 SMR은 냉각재와 감속제로 물을 사용하는 원자로로서 1차 계통에서 수증기를 직접 생산하여 증기 터빈을 통해 전기를 생산하는 비등경수로형과 1차 계통의 고온 고압의 냉각재를 2차 계통과 열교환을 통해 간접

적으로 증기를 생산하는 가압경수로형이 있다. 대형경수로와 비교하였을 때 경수로형 SMR은 노심 출력대비 충분한 냉각수를 보유하고 있고 주요 구성기기를 압력용기 내에 배치하는 일체형 원자로 시스템의 형태를 주로 채택하여 획기적으로 고유안전성을 높일 수 있다. 경수로형 SMR은 기존에 널리 상용화되어 있는 대형경수로 기술과 연계하여 60년 이상의 시스템 운영 경험을 보유하고 있으며, 대형경수로 관련 인허가 시험성 역시 경수로형 SMR에 적용성이 매우 높다. 대형경수로에 사용되는 핵연료 설계 및 제작 인프라, 증기발생기, 원자로냉각재펌프, 압력용기와 같이 핵증기공급계통 요소기술 설계 및 제작 인프라를 보유하고 있어서 경수로형 SMR의 요소기술에 대한 높은 신뢰성을 확보한다. 경수로형 SMR은 실제 60년간 잠수함, 쇄빙선, 원자력 상선 등에 적용되어 운용해왔던 경험이 있어서 실제 상용화에 매우 가깝다. 기존에 전 세계에 구축되어있는 공급, 기술, 인력 인프라를 활용하여 추가투자가 필요한 산업인프라를 최소화할 수 있어 경제적이다. 노심 출구 온도가 320oC 정도로 제한되어있어 낮은 열효율을 가지며 원자력의 열을 이용하는 다양한 적용성은 제한된다.

소듐냉각 SMR

소듐냉각 SMR은 중성자 감속 능력이 없고 열전도율이 좋은 소듐을 냉각재로 하여 고속중성자 영역에서 원자로 임계를 달성하는 고속로이다. 물보다 전열 성능이 매우 우수하여서 다양한 출력의 노심을 효율적으로 냉각 가능하고 대기압에서 비등점이 약 883° C 이기 때문에 1차 계통 가압 없이 높은 노심출구 온도에 달성한다. 특정 금속과의 양립성이 우수하여 구조재와 기기들의 부식 문제없이 높은 신뢰도를 갖고 운전이 가능하다. 고속중성자 영역에서 운전되므로 장반감기 고독성을 갖는 초우라늄 원소 소각에 효과적이기 때문에 사용후핵연료의 방사능 저감과 핵연료의 효율적 이용이 가능하다. 대부분의 소듐냉각 SMR은 원자로 노심, 중간 열교환기, 냉각재펌프 등 주요기기와 배관이 원자로용기 내부에 설치되어 배관 파단에 의한 냉각재 상실 가능성을 배제할 수 있는 풀형 원자로를 채택한다. 특히 소듐냉각 SMR 설계 특성은 용기내에 다량의 소듐냉각재를 보유하여 출력과도 시에도 냉각재의 열관성에 의해 온도변화가 심하지 않도록 하며 초기의 높은 붕괴열을 일차열전달계통 소듐냉각재가 흡수하도록 설계된다. 임계에 도달하기 위해 상대적으로 높은 농축도의 핵연료를 사용해야 하며 만약 소듐이 누출됐을 때 공기 중에 있는 수분 혹은 증기사이클에 있는 물과 격렬한 반응을 한다는 단점이 있어서 대처 설계 및 안전 설비가 필요하다.

납냉각 SMR

납냉각 SMR은 액체금속인 납을 냉각재로 사용하기 때문에 소듐냉각 SMR과 같이 고속중성자 영역에서 운영되며 냉각재가 높은 전열 능력을 갖추었다. 납은 녹는점(327°C)이 높으므로 과도상태 운전 시에 국부적 응고현상이 일어날 수 있고 이는 냉각재의 원활한 흐름을 방해할 수 있으므로 납-비스무스 공융반응을 이용하여 녹는점(1230°C)을 낮춘 냉각재를 채택하기도 한다. 반면 사고 시에 노심에 잔열 수준의 열만 발생한다면 납의 높은 녹는점 때문에 노심 내에서 고체 상태로 남아있게 되며, 이는 노심에 있는 방사선 물질을 가두는 효과가 있다. 액체 납은 공기 중의 물과 화학반응을 하지 않는 장점이 있고, 우수한 자연순환 능력으로 좋은 성능의 피동냉각 안전계통 구현이 가능하다. 고온에서 구조재에 부식을 유발한다는 단점과 냉각재의 높은 비중 때문에 새로운 개념의 냉각재 펌프 개발이 필요하다. 중금속 물질인 납이 외부에 누출되는 문제와 비스무스에 중성자가 조사됐을 때 방사성을 갖는 폴로늄 원소로 변환되어서 이에 대응하는 안전 설비 및 기술이 필요하다.

가스냉각 SMR (고속로)

가스냉각 SMR은 냉각재로 초임계 이산화탄소 (sCO₂), 헬륨, 초임계수 (SCW)와 같은 냉각재를 사용하여 원자로 노심을 고속중성자 영역에서 운전하는 SMR이다. 냉각재의 원자번호가 낮아서 개별 원자의 중성자 감속 능력은 높지만, 거시적으로는 냉각재의 밀도가 낮아서 종합적으로는 중성자 감속 능력이 낮게 되고, 따라서 원자로 노심이 고속중성자 영역에서 운전한다. 가스냉각 SMR은 소듐냉각 SMR과 달리 누출 시에 외부 공기 혹은 동력변환계통 유체와의 격렬한 화학반응이 없으며, 납냉각로 대비 인체에 대한 낮은 독성, 구조재와의 높은 양립성과 같은 장점이 있다. 납-비스무스냉각 SMR과 달리 냉각재의 중성자 흡수 단면적이 낮아 냉각재의 방사화 비율이 낮고, 과도 상태시 냉각재의 상이 항상 단상으로 존재하기 때문에 반응도 변화율이 작다. 원자로 노심과 동력변환계통을 직접 연결하여 원자로 노심에서 터빈까지 냉각재를 직접 순환시키는 직접냉각 시스템을 고안하여 원자로와 동력변환계통을 하나의 모듈로 설계하는 것이 가능하다. 냉각재의 낮은 밀도는 냉각재 압축 및 순환에 많은 에너지 소비로 이어지고, 헬륨과 같은 경우는 7MPa, sCO₂는 20MPa, 초임계수는 25MPa 수준의 높은 계통압력이 요구된다.

고온가스형 SMR (열중성자로)

고온가스형 SMR은 직경 0.5mm의 우라늄 커널을 3중 코팅한 TRISO 핵연료를 사용하여 높은 핵비확산성과 방사성 물질의 외부 방출 방지 기능을 제공하며 1000°C 수준의 초고온에서도 핵연료의 건전성을 유지한다. 비활성 기체인 헬륨을 냉각재로 사용하고 있어 냉각재 누설이 되어도 방사능의 방출이 거의 없고, 고온에서도 상변화와 화학반응이 없다. 높은 중성자 감속 능력과 열용량을 가지는 흑연감속재를 사용하여 노심이 낮은 출력밀도를 가지게 되고 사고시 핵연료 최대온도 도달 시간이 낮은 출력밀도와 흑연으로 인해서 지연된다. 원자로 공동냉각계를 설치하여 사고 시 피동적으로 원자로 표면에서 복사열전달을 통해 지속적으로 열 제거뿐만 아니라 지하건설시 토양의 열전도를 통해 피동적으로 열 제거가 가능하다. 900°C 이상의 고온열을 이용한 고온 전기분해 또는 황-요오드 열화학 물분해 방법으로 수소의 수요가 있는 지역에 CO₂ 배출 없이 대량공급 할 수 있다. 높은 노심온도를 기반으로 오지 및 산업단지에 고효율 전력생산 및 산업용 증기와 열공급이 가능합니다. 고온가스로는 출력밀도가 낮아서 단위 출력 당 많은 부피가 필요하므로 소형화 및 모듈화 기술개발이 필요하다.

용융염냉각 SMR

용융염냉각 SMR은 토륨, 우라늄, 플루토늄 혹은 초우라늄 원소들을 불소 또는 염소화합물의 염과 혼합하여 공융 상태의 핵연료로 사용하는 SMR로 핵연료 물질 비산을 막아주는 피복관이 없고 핵연료 용융염 자체가 열전달 매체로 사용된다. 제어봉 없이 액체 상태의 핵연료 유량을 제어하여 노심출력을 제어한다. 노심 내에 피복관 및 핵연료봉 지지구조물이 없어서 중성자 손실이 적으며 운전 중 핵연료 추가와 핵분열 생성물 분리 가능하다. 용융염냉각 SMR에 사용되는 우라늄에 비해 자원이 풍부한 토륨 핵주기는 경제성 및 핵비확산성 측면에서 많은 장점을 보유한다. 대기압으로 원자로 운전이 가능하고 잉여 반응도를 낮게 유지하여 높은 안전성 유지한다. 용융염이 방사성 물질을 구속하고 핵분열 생성물이 운전 중에 지속적으로 제거되어서 원자로 정지 시의 잔열도 고체 핵연료 대비 40% 정도로 줄어들어서 고유안전성을 확보한다. 사고 시에 푸즈 밸브의 개방으로 용융염을 모두 배출하여 사고를 방지하는 (Drain tank) 설비 설치와 순환 펌프의 회전수와 용융염 보유량으로 출력을 조절하여 제어봉 이탈사고를 원천적으로 배제 하는 피동안전성을 보유한다. 노심 출력 밀도가 높아서 소형제작이 가능하며, 핵분열시 발생하는 핵분열 생성물이 용융염에 혼재하고 있어서 노심 내 구조물과 화

학 반응을 일으키며 노심 내 피복관 및 지지구조물의 부재로 배관 및 기타 구조물들이 높은 중성자속에 피폭된다.

초소형원전

초소형 원전은 전기출력 10MW 출력 내외의 원전으로 설치 및 운전이 용이하고 극지 및 오지 분산 전원 공급 및 다목적 열원 제공 기능을 갖추었다. 일반적으로 안전계통 및 동력변환계통까지 하나의 모듈로 하여 전체 원자력 플랜트 자체를 트럭, 바지선, 트레일러 등과 같이 통상적인 이동 수단을 통해 수요가 발생하는 지역에 운송하는 개념을 채택한다. 모듈화, 단순화, 표준화를 통해 공기를 단축하여 경제성을 확보합니다. 발전, 수소 및 담수 생산, 지역난방, 산업용 공정열 제공 등 시장에서 다목적용 갖도록 설계하며 또한 군사기지, 우주탐사 등의 특수목적에 역시 적합한 원자로이기 때문에 넓은 범위에서 시장수요 및 국가전략적 수요를 만족한다. 초소형원전이 활용되는 지역은 일반적으로 급격한 출력변동을 요구하므로 수요에 맞도록 원자로 출력 및 동력변환계통 제어를 자율적으로 조절하는 설계가 요구된다. 핵연료 교체 및 유지보수/검사 최소화를 통해 장기간 운영 가능한 장수명 노심이 필요하며, 적용 특성상 최소한의 운전원이 상주하기 때문에 다중성과 다양성을 갖춘 피동형 안전계통이 필수이다.

SWOT 분석을 통한 소형원자로의 장단점⁶⁹⁾ 으로는 소형원전은 그 규모가 작아서 대형원전보다 건설비 등 투자비용이 적게 들어 소규모의 전력회사나 재정이 약한 나라가 운영할 수 있다는 점은 대표적인 장점이나, 그 반대로 규모가 작아 “economics of scale” 을 잃고 에너지생산 단가가 비싸진다는 점과 새로운 원자로에 대한 인허가과정에서의 위험도가 가장 큰 단점으로 작용한다. 소형원전의 기회로는 대형전력망에의 전원공급의 기존의 원전시장으로부터 벗어나 원격지에의 전원공급, 산업체에의 열공급 등 시장의 다양화를 들 수 있으며, 원자로가 소형으로 대량으로 제작되어 설치되다 보니 핵확산 위험성, 대중 수용성 문제가 대표적인 위협요소로 작용한다. 먼저 소형원자로의 장점을 언급하면 기존 대형원전에 비해 총건설비가 상대적으로 저렴하다. 투자 위험도가 낮기 때문에 산업체 투자 유치와 참여 확대로 산업화가 상대적으로 쉽다. 연료교체 없는 장수명(10년 이상) 고체형/초소형 노심, 입자형 핵연료 특성과 사고 시 피동냉각 안전성을 확보한다. 모듈화

69) Siapartners, Energy Outlook, 18/03/2015 Modular nuclear reactors, a promising market for the future?

설계/제작, 빠른 설치 등으로 저렴한 건설비 및 운영비 등의 장점을 통해 투자 위험도 감소 및 경제성을 확보한다. 하지만, 원전 규모가 작아 “economics of scale” 개념에 따라 에너지생산 단가가 비싸진다. 새로운 원전으로 인허가 불확실성이 존재한다. 원전 건설전 필수 사항인 인허가 과정이 입증된 기술위주로 되어 있어서 새로운 원자로에 대해서는 커다란 장애 요소로 작용한다. 특히 소형원전을 다량 건설하는 경우나, 원자력 신흥국에의 건설은 인허가 업무를 수행할 여력이 부족하다는 점을 볼 때 건설의 지연 요인으로 작용할 수 있다. 소형로 용도의 다양화는 새로운 원자로 시장 개척의 동력이 될 수 있다. 도서/오지 등 고립된 지역에서의 전원공급, 전력심화 산업에서의 전원 공급, 열생산원, 담수화 등 산업체 증기 공급원, 전력수요가 작은 나라/지방에서의 독립된 전원 공급 등 용처의 다양화로 새로운 시장을 열 수 있다. 소형원자로의 다수 제작, 원자력 도입국이 상대적으로 쉽게 원자로를 취득할 수 있다는 점은 핵확산 위험성에 대한 우려를 가중시키며, 원자력에 대한 대중 수용성 문제의 확산 가능성이 있다.

□ 소형원자로 개발 현황

소형원자로 개발 환경

SMR은 활용 관점에서 보면 기존 국가전력망의 한 부분의 역할 수행 독립된 지역의 전력원 제공, 산업용 공정열(수소생산 등) 제공 역할의 세 가지로 나눌 수 있다. 최근 청정에너지 및 분산전원의 비중이 높아지는 세계 전력시장의 환경변화가 진행되고 있는 가운데, 미국, 캐나다, 영국을 중심으로 전력망이 없는 오지 광산, 주민 거주지, 군사기지 및 대형원전의 비상전원 등에 사용되는 디젤 발전을 대체할 목적으로 초소형원자로 개발에 착수하고 있다. 2017년 이래로 세계 에너지 시장은 전력망 연결방식 대규모 기저발전의 추가 수요는 둔화되고 격지(오지, 극지, 도서) 대상 분산형 에너지 공급 수요는 확대되는 추세가 지속되면서 소규모 분산전원 시대가 도래하고 있다.

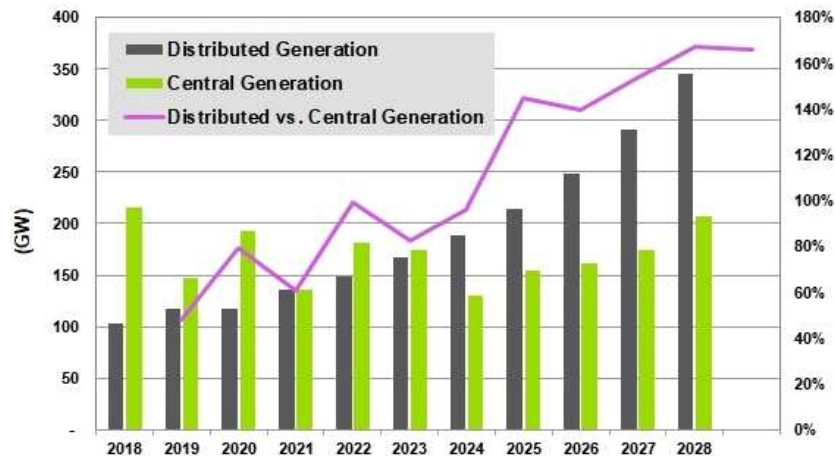


그림 II-2. 세계시장에서의 분산전원과 중앙전원 설비용량 변화⁷⁰⁾

신재생에너지의 간헐성으로 인한 전력수급 불안정 문제 및 기존 화석 연료 발전의 미세먼지 및 온실가스 배출 현안을 해결하기 위하여 안정적이면서 친환경적인 소형로나 초소형원자로의 필요성이 부각되고 있다. 2030년대 급격한 수요증가가 예상되는 분산형 미래 전력 시장의 필요 기술로서 특히 초소형원자로의 활용성이 기대되고 있다. 초소형원자로는 원격지 에너지원으로 수명기간 동안 핵연료를 교체하지 않는 초장주기 노심 설계, 원격 운전이 가능할 수 있도록 중대사고를 배제하는 고도의 안전성 확보, 독립 분산 에너지 시스템을 위한 부하추종 및 전기, 열, 수소와 같은 다양한 에너지 생산에 활용 등 기존 상용원자로와 차별화된 특성을 요구하고 있다. 초소형원자로를 이용하여 격리지역에 보급된 기존 디젤발전기들을 대체하면 연료 수송의 어려움으로 인한 연료수급 안정성 문제, 시설 노후화 및 정비 현안 등을 극복할 수 있을 것으로 예상된다. 미래 원자력 신산업으로 초소형원자로가 부상하고 있으나 원자력기술 선진국도 개발 초기단계이기 때문에 우리나라도 그동안 확보한 미래원자력기술과 우수한 전문인력을 기반으로 기술개발에 착수한다면 단기간에 기술 경쟁국으로 진입할 수 있을 것으로 예상되므로, 수출을 통한 고부가가치 창출에 기여할 수 있는 핵심 연구개발 아이টে็ม으로서 국가정책적인 연구 지원 및 기술 개발 로드맵 설정이 요구된다.

소형원자로 개발 국외 환경 및 동향

경수로 기반 소형원자로로는 미국, 영국, 캐나다, 중국, 러시아 등이 상용

70) Navigant Research, Pritil Gunjan, Investment in DER will Accelerate the Energy Transition, April 18, 2019.

화를 추진 중이며 기존 상용원전과 같이 기술 및 시장 확보 경쟁이 심화되고 있다. 틈새시장인 소형원자로로는 대부분의 국가가 개념개발 단계 수준으로 먼저 기술을 확보한 나라가 시장을 주도할 수 있다. 소형원자로로는 최근의 대형원전의 건설기간과 공사비가 초기 계획을 훨씬 초과하는 문제가 생기자 소형원자로가 이를 해결할 수 있다는 기대로 개발됩니다. 소형로는 기존 전력망에 전력공급 외에도 용량이 작은 특징으로 인하여 전력망이 작거나 없는 원격지, 오지 광산 및 전력 외에 산업에 이용할 수 있는 열생산 등 그 활용범위는 대형원전 보다는 다양하다. 시장은 단기적으로 전력망이 없는 오지 광산 및 주거 지역이 목표 시장이 될 것이며 향후 기술 실증이 완료된 후 동남아시아 및 북아프리카 등의 비전력망 지역으로 확대된 시장이 형성될 것으로 기대하고 있다. 소형원자로 시장에는 비전력망 거주지 또는 오지 자원개발 에너지 공급용 초소형원자로 수요도 포함하며, 영국 URENCO사는 2035년 약 300기의 초소형원자로(열출력 10MW) 시장을 예상하고 2019년 8월 영국 기업·에너지·산업전략부(BEIS)는 소형모듈원자로 개발을 위해 영국기업 Rolls-Royce 주도 컨소시엄에 최대 1,800만 파운드 지원을 발표하고 첨단 모듈 원자로 프로그램에 4,000만 파운드를 추가 지원하기로 하였다. 캐나다는 2030~40년대 전세계 70,000개 격지(격리 도서지역 포함) 및 비전력망 지역에 전력 및 에너지를 공급하기 위해 연간 300억불(CAD)의 열/전력 공급시장을 예측하고 있고, 캐나다 원자력연구소는 세계 각국의 19개 산업체 또는 연구기관에서 소형원자로 개발에 대한 참여 의향서를 접수 받았으며, 이 중에서 7개 노형이 캐나다 규제기관 CNSC의 사전 검토 절차인 VDR(Vender Design Review)을 신청했다. 미국 국방부는 작전지역에 투입할 수 있는 이동형 초소형원자로 후보 기술로서 U-Battery, MegaPower, eVinci, HOLOS 등을 검토한 보고서를 발행했다.

소형원자로 국외 개발 동향

소형원전에 관심이 큰 국가는 캐나다, 미국, 영국, 러시아와 중국 5개국으로 대부분이 공적자금으로 SMR의 연구개발을 지원하고 있다. 많은 원자로가 LWR형이며, 미국과 캐나다는 non-LWR 형태의 SMR에도 관심을 갖고 있으며, 영국은 자국내 유일한 개발업체인 Rolls Royce가 주도하는 LWR형에서 최근에는 non-LWR설계로 관심이 전환되는 경향을 보이고 있다. 현재 다수의 소형원자로가 개발되고 있으나, 개발 진도가 많이 된 것으로 평가되는 일부 소형로에 대해 그 현황을 기술하면 아래와 같다. 참고로 개발되었거나 개발중인 소형 원전에 대한 요약을 부록 1의 표에 간단히 정리하였다.

- Nuscale은 PWR으로 용량은 2014년 45 MW, 2018년 50MW에서 현재 60MW으로 증가합니다. 원자로를 12기 까지 cluster화 설치하도록 설계되었습니다. 2008년 NRC에 pre-application을 신청하였고, 2011년에는 Fluor Corporation(미국계 대형 엔지니어링 및 건설사)가 주 투자사가 된다. NuScale은 전기생산 뿐 아니라 해수 담수화, 공정열 생산으로도 이용될 수 있도록 설계하고 있다. 2017년 NRC에 Design certification을 신청하여 현재 phase-4의 심사단계에 있다. 설계인가에 대한 최종 승인은 2021년으로 기대하고 있다. 캐나다 CNSC의 vendor design review 에도 참여하고 있다.

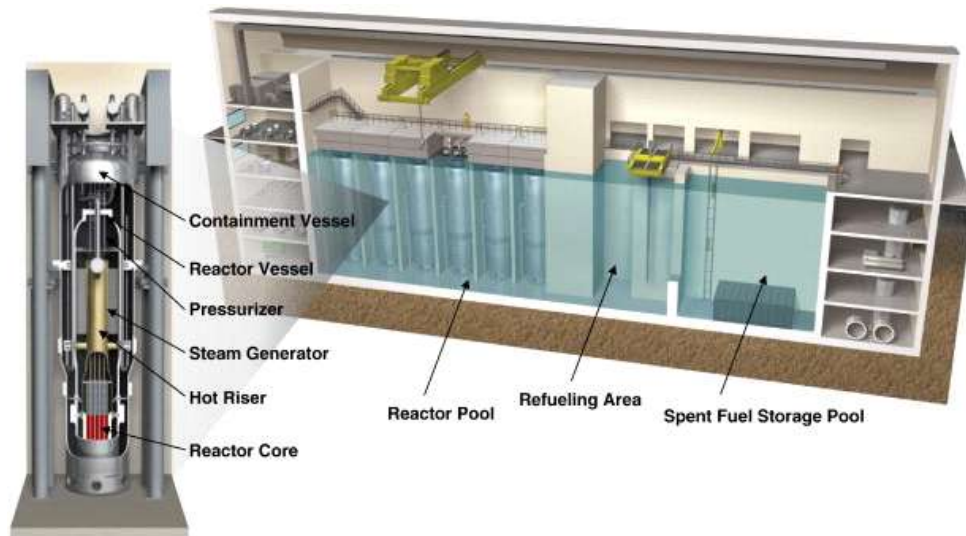


그림 II-3. NuScale (좌) 단일 모듈 조감도 (우) 플랜트 개념도

- KAERI SMART의 경우 SMART (System-integrated Modular Advanced Reactor)는 전기생산 및 해수담수화용 100MW PWR로 2012년 한국 인허가기관으로부터 표준설계인가를 받았다. KAERI는 2015년 KA-CARE와 사우디내 2기 건설을 염두에 둔 MOU를 체결하였다.



그림 II-4. SMART 기술개발 이력 및 주요 성과

- Holtec SMR-160은 2010년 부터 미국에서 개발된 160MW PWR으로 10개의 원자로 까지 Cluster화 하도록 설계되었다. Holtec사는 일본의 Mitsubishi Electric, 캐나다의 SNC Lavalin, 미국의 Exelon과 공동으로 원자로설계를 개발 중이다. Ukraine내에서 SMR-160을 제작하고 건설관 관련된 내용의 MOU를 2019년 Ukraine과 체결. SMR-160은 현재 캐나다 CNSC의 preliminary review에 참여하고 있으며, Ukraine State Nuclear Inspectorate과도 설계검토를 위한 협력을 진행 중이다.
- CNNC ACP100은 전기생산, 열생산 및 해수담수화용으로 중국의 China National Nuclear Corporation에서 개발하고 있는 100MW PWR로 현재는 출력이 125MW로 상승되고 있다. 8개의 원자로 까지 Cluster화 하도록 설계된다. 2014년부터 첫 호기 건설이 시작될 것이라고 예상했었으나 2019년에도 건설은 시작되지 않았다.
- CNEA CAREM-25은 CAREM-25는 Argentine Atomic Energy Commission (CNEA)가 설계한 32MW PWR로, 2014년 실증로의 건설이 시작되었다. 2018년 까지 건설을 완료할 계획이었으나 2019년까지 아직 운전을 시작하지 못하고 있다. 실증로 후속으로 120~300MW 원자로를 아르헨티나 Formosa에 건설계획을 수립하고 있다.
- Westinghouse SMR은 225MW PWR로 대형원전인 AP1000(2011년 NRC의 설계인증 획득)을 기반으로 개발된다. 2012년에 웨스팅하우스사는 Westinghouse SMR를 2022년 까지 건설 및 인허가 획득을 목적으로

Ameren Missouri와 함께 NextStart SMR Alliance를 결성하였다. NextStart는 DOE의 funding에 지원하였으나, Bobcock and Wilcox와 NuScale이 DOE funding의 수혜자로 결정하자 2014년 Westinghouse SMR 개발은 보류되었으며, 그 이래로 SMR 개발 업무는 이루어지지 않았다.

- GE-Hitachi BWRX-300은 2018년 개발이 발표된 BWRX-300은 300MW BWR로 GE- Hitachi의 1500MW ESBWR을 축소한 버전이다. ESBWR은 2014년 미국 NRC의 generic approval을 받았으나, 건설은 이루어지지 않았다. BWRX-300설계에는 전력회사인 Dominion과 Exelon가 재정적인 지원을 했으며, DOE로 부터의 지원도 받아 개발 중이다.
- Rolls Royce SMR은 Rolls Royce는 SMR 개발을 2013년 시작하였으며, Rolls Royce SMR은 잠수함 추진용 원자로의 경험을 활용하여 개발된 450MW 용량의 PWR로 다른 SMR에 비해 늦은 시점인 2017년 발표된다.
- HTR-PM은 Roll중국의 China Huaneng, China Nuclear Engineering Corporation 및 Tsinghua University 컨소시엄에 의해 개발된 고온가스로이다. 1980년대 Siemens와 ABB 각 개발한 80MW HTR-MODUL이 HTR-PM설계의 원조이다. HTR-PM의 당초 건설은 2007년에 시작하려 했으나, 계획보다 5년 정도 늦어진 2012년 건설에 착수했다. HTR-PM의 완공은 2017년 까지가 목표였지만, 2019년에도 운전되지는 않고 있으며, 2020년 초에 완성될 것으로 예상된다.
- PRISM은 GE-Hitachi의 PRISM은 300MW 소듐냉각고속도로 1980년대부터 개발이 간헐적으로 되어왔다. 미국 Savannah River site에 첫 호기를 건설하는 것이 DOE에 의해 검토되기도 하였으나, 현재까지 정해진 계획은 없다. 현재는 DOE가 건설하려는 VTR(Versatile Test Reactor) 설계의 참조호기의 역할을 한다.
- ARC-100은 ARC-100은 2006년 Delaware에서 창립된 Advanced Reactor Concepts 사가 개발한 100MW 소듐냉각고속로(SFR)이다. 1965~2005년 운전된 ANL의 EBR-2(20MW)를 참조로 개발되었으며, 재장전주기는 20년이다. 2017년 캐나다 CNSC의 pre-licensing vendor design review에 참여하고 있으며, 캐나다 New Brunswick에 건설 가능성을 모색 중이다.
- Terrestrial IMSR은 195MW MSR(Molten Salt Reactor)로 New York에서 2013년 설립한 Terrestrial Energy사에 의해 개발된다. 2020년대 말 건설하는 것을 계획하고 있으며, CNSC의 pre-licensing vendor design review

와 CNL(Canadian Nuclear Laboratories)의 SMR 건설 프로젝트 경합과정에도 참여하고 있다.

- SSR은 영국의 Moltex사에 의해 개발된 SSR(Stable Salt Reactor)로 원자로의 출력은 150MW로 8개의 원자로를 하나의 cluster로 하여 1200MW의 전기를 생산할 수 있다. 캐나다 New Brunswick의 SMR 건설에 관심을 보이고 있으며, CNSC의 pre-licensing vendor design review에 참여하고 있다.

초소형원자로 국외 개발 동향

1960년대에서 80년대까지 우주 개발을 주도하고 있던 미국과 러시아는 우주 발사체에 싣기 위하여 경량/저출력(~수 kW급)으로 설계된 우주용 원자로(SNAP-10A, Romashka, TOPAZ-I&II 등)를 개발하여 인공위성 등에 전원을 공급하는 역할로 활용하였다. 미국에서 1954년부터 1977년까지 미 육군의 ANPP(Army Nuclear Power Program) 계획에 따라 1~10MWe급의 원자로 8기(SM-1, SM-1A, PM-1, PM-2A, PM-3A, SL-1, MH-1, ML-1)가 건설되었다. 당시는 발전용 원자로 개발이 최초로 이루어지던 시기로 미국 최초의 PWR/BWR/가스로 운전이 이루어졌다. 군사용 전기/난방열/담수 공급 및 운전원 훈련 등의 다양한 용도로 사용되었으며, 이동형, 기지형 등 다양한 형태의 원자로 개발이 시도되었다. 2010년대에 들어서 분산형 전원의 필요성과 군사적 수요가 대두되면서 초소형원자로 개발 연구가 가장 활발히 진행되고 있다. HolosGen사에서는 BOP 일체형의 초소형가스로인 HOLOS를 설계 중이며 모듈화 방식을 이용하여 3~81MWe급의 다양한 설계 옵션에 대하여 개발을 진행하고 있다. Oklo사는 소듐 열전도관 기술을 이용하여 금속핵연료가 장착된 2MWe급 초소형원자로를 설계하여 현재 NRC 예비 인허가 절차 수행 중이다. LANL에서는 2MWe급의 칼륨 열전도관원자로인 MegaPower를 개념설계하였으며, Westinghouse사에서는 0.2~5MWe급 열전도관원자로 eVinci를 설계하여 NRC 인허가를 진행 중이며 2023년 첫 데모를 앞두고 있다. 2018년 DOD에서는 U-Battery, MegaPower, eVinci, HOLOS 등에 대하여 이동형원자로 후보로서 검토를 수행한 보고서를 발행했다.

Oklo submits first advanced reactor licence application

18 March 2020



California-based Oklo Inc has submitted a combined licence application (COLA) for its Aurora "powerhouse" to the US Nuclear Regulatory Commission (NRC). This is the first COLA to be submitted using a new application structure for advanced fission technologies and the first privately funded application for a commercial advanced reactor.



Oklo representatives with NRC staff and the Nuclear Reactor Regulation management team (image: Oklo)

그림 II-5. 비경수로형 SMR 중 최초의 통합인허가를 지원한 Oklo사의 뉴스 기사

러시아는 1960년대에서 80년대에 걸쳐서 러시아에서는 탱크 탑재용 PWR 방식의 2MWe급 TES-3과 트럭 2대 분의 크기로 제작된 N_2O_4 냉각방식의 원자로인 0.6MWe급 Pamir-630D를 개발하였다. 러시아의 OKBM은 2014년 부유식 선박용 가압경수로 6~9MWe급 ABV-6E를 설계했고, NIKIET은 2017년 6.6MWe급 가압경수로 SHELF를 설계하였다. 이상의 두 원자로는 건설 준비를 앞둔 상세설계 단계이다. 일본은 Toshiba는 2000년대에 10MWe급 소형 SFR인 4S를 설계하여 미국 인허가 절차를 진행하고 있다. 영국은 2010년대 영국 U-Battery사는 2MWe급 He 냉각가스로 개념설계를 수행하였다. 캐나다는 2017년 광산/오지용 초소형원자로 개발에 착수하였으며, CNSC에서는 세계 각국의 7개의 후보 노형들에 대하여 예비 인허가(VDR) 절차를 진행 중이다.

소형원자로 개발 국내 환경 및 동향

정부의 에너지전환정책에 따라 대형원전 건설이나 신규 시스템 개발이 현실적으로 어려운 상황에서 그동안 확보한 미래원자력 핵심기술의 역량 유지와 활용 방안이 필요하다. 에너지전환정책에도 불구하고 정부는 ‘3차 에너지기본계획’을 통하여 원전산업 생태계 유지와 원전 수출 시장 개척을 적극적 추진하고 있으며, 또한 재생에너지 백업전원을 신기후체제에 온실가스 감축 목표에 부합하는 수단으로 마련하고자 한다. 2035년까지 분산전원·수요관리 등의 기술에 4조원 투자, 원전기술 투자규모는 2022년까지 3배 이상 확대 계획이며, 국내 청정 도서지역의 디젤발전을 대체할 수 있는 분산형 청정 전력/에너지 공급원으로 초소형원자로 수요가 가능하며, NOAK 개념 도입을 통해 현재의 디젤발전 대비 경제성 확보가 가능하다. 또한 향후 남북문제 해결 후 북한의 비전력망 지역 개발 등 다양한 활용분야가 있을 것으로 기대된다. 국내 보유한 미래원자력시스템 기술 역량과 세계최고 수준의 원전 인프라를 구축한 원자력 산업체가 협력하여 10년 이내에 세계 최고 성능의 초소형원자로 기술개발과 실증을 완수한다면 해외 수출시장 개척뿐만 아니라 국내 군사기지 또는 도서지역 분산 에너지원으로 미래 활용가치가 높은 기술을 확보하게 된다. 국방분야에서는 미래국방 전력 변화에 대응하기 위한 높은 출력밀도의 안정적 에너지원 수요, 격지 또는 특수목적 적용 분야(공군 비행장 등)의 비상/독립전원 및 열 공급 에너지원 수요, 지속적인 연료 보급이 어려운 조건에서 장기 에너지원에 대한 수요가 있을 것으로 전망된다.

국내 소형원자로 개발의 대표주자는 한국원자력연구원이 개발하고 있는 SMART(System-integrated Modular Advanced Reactor)로 100MWe 출력의 소형모듈원자로이다. SMART는 국내에서 설계인허가를 획득한 상황이며, 사우디아라비아와의 협력으로 ‘건설 전 설계(PPE)’ 사업을 진행하였다. 국내의 초소형원자로 기술은 국외에 비하면 뒤처져있는 편이며, 초기에 서울대학교내 기초전력연구소에서 10MWth REX10이 2000가구 도서의 지역 난방열 및 전기 공급용으로 원격무인운전개념을 도입하여 개발되었고 최근에 들어 한국원자력연구원과 한국과학기술원에서 수행된 초소형 가스로와 열전도관 원자로 개발은 개념 연구 수준(TRL 1 ~ 2)이며, 초소형원전연구단(울산과학기술원 등)의 초소형 납냉각로의 경우 2019년부터 개념설계에 착수한 상태이다. 한국원자력연구원은 2012년부터 2014년까지 우주 및 오지

용 열전도관 냉각 원자로 노심 설계 개념 연구를 수행하였다. 2017년 한국 원자력연구원은 10MWe급 초소형가스로 개념연구를 착수하여 20년 장주기 노심 및 피동안전성 개념을 개발하고 있다. 한국과학기술원은 2013년부터 12MWe급 sCO₂-가스로 방식의 BOP 일체형 초소형원자로 개념 연구를 수행하고 있다. 울산과학기술원의 초소형원전연구단은 2019년부터 20MWe급 해양조선용 초소형 납냉각고속로 개발에 착수하였다.

〈부록 III〉 현상유지, 성장, 대립의 세 가지 시나리오 전개 시의 에너지 수요 전망

○ 일반적 전망

- 에너지 수요 시나리오는 개별 에너지원의 수요와 공급, 가격 및 GHG 방출 시나리오의 출발점임.
- 에너지 수요는 경제 성장, 성장 관련 개별 부문 기여도, 기술 개발 및 투자자/소비자 결정 등의 변화에 의해 결정됨.
 - 이러한 결정은 시장 신호, 생활 방식 및 기타 광범위한 사회 동향 및 정책의 영향을 받음.
 - 시장 경제에서 투자자/소비자는 구매를 통해 수요를 변화시키고, 정책 결정자는 에너지 효율 및 기타 표준을 설정하고 세금 및 보조금을 도입함으로써 기술 개발을 조정하고 선택을 제한하면서 수요의 변화를 꾀함.
- 에너지 절약에 관한 기술 범위는 일반적으로 주어진 상품과 서비스를 표준 장비로 생산하는 데 필요한 에너지의 양을 비교함으로써 상향식으로 추정
- 시장에서 가장 에너지 효율적인 장비를 사용할 때 얼마나 많은 에너지양이 필요한가를 비교
 - $(\text{현재 에너지 사용량}) - (\text{현재의 장비를 최상의 가용 장비로 교체했을 때의 에너지 사용량}) = (\text{손실 없이 줄일 수 있는 에너지 수요량})$
- 실제 에너지 절약은 현실 생활 상황에 따라 변화 가능성 상존.
 - 효율성이 우수한 장비는 종종 비용이 많이 들기 때문에 투자자에게는 가능성 있는 기술 교체 중 아주 일부만 경제적으로 의미가 있음.
 - 교체 결정은 일반적으로 장비 수명에 따라 결정
 - 투자자는 모든 선택 사항을 알지 못할 수도 있음.
- 에너지 효율 정책은 당근으로 정보 및 재정을 지원하고

채찍으로 명령(mandate) 및 표준을 부과하여 최고의 이용 가능한 기술로 투자자를 이끄는 것이어야 함.

- 지금까지 역사는 에너지 소비가 더욱 효율적으로 되고 있음을 보여주는 동시에 또한, 정치적으로 높은 개선 속도를 추진하기가 쉽지 않다는 것을 보여줌.

- 명확한 결론에 도달할 수 있는 기존 에너지 효율 정책의 영향에 관한 연구는 많지 않음.

- ▶ 정책 개입의 직접적인 좋은 결과 사례 - 에너지 효율의 증가

- ▶ 에너지 수요가 정책 인센티브에 대응하지 못하거나 일시적인 개선 후 되돌아간 사례도 적지 않음.

- 세계의 에너지 수요는 GDP와 상당히 안정적인 관계로 성장

- IEA 데이터에 따르면 1972~2014년 기간 동안 전세계의 [GDP 성장률에 대한 1차 에너지 수요 증가율의 비]는 0.70임.

- 최근 1990~2014년 기간 동안 [GDP 성장률에 대한 1차 에너지 수요 증가율의 비]는 OECD 국가의 경우 0.32, 비OECD 국가의 경우 0.62임.

- ▶ 경제가 성숙함에 따라 더 많은 서비스와 첨단 산업가 생성 및 필요해 지는 한편, 효율적 성장을 함에 따라 더 적은 에너지만 필요함.

- ▶ OECD 지역의 1차 에너지 소비는 일정한 것으로 보임.

- ▶ IEA 자료에 따르면 2009년에서 2014년 사이에 GDP는 1.8 %/y로 증가했지만, 에너지 수요는 단지 0.1 %/y로 증가한 것으로 나타남.

- ▶ 비OECD 지역에서는 5.5 %/y의 GDP 성장이 3.8 %/y 에너지 수요의 증가를 나타냄.

- ▶ 세계 에너지 수요의 비OECD 국가의 비중은 1990년 48%에서 2015년 62%로 증가했으며 계속 증가하고 있음.

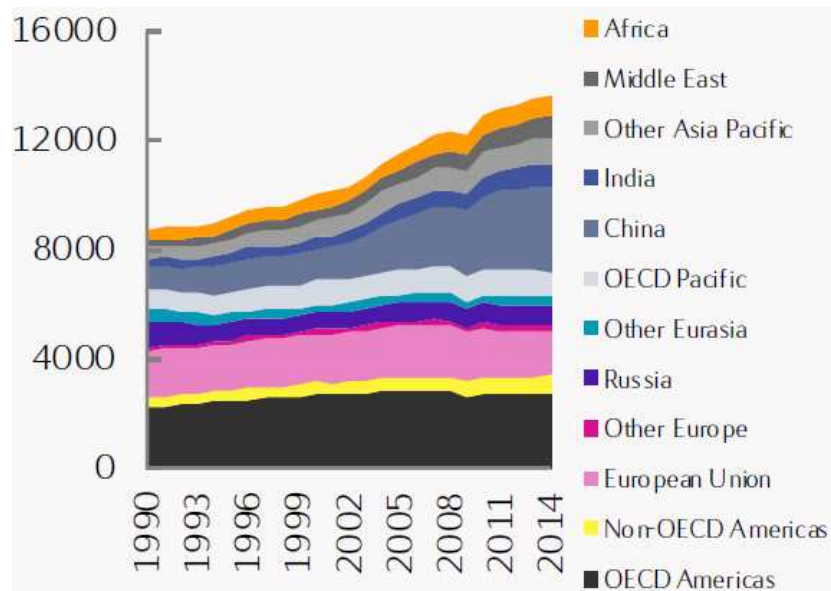


그림 III-1. 권역별 1차 에너지 수요 (1999~2014, Mtoe)⁷¹⁾

- 현재 OECD 국가들의 에너지 수요가 정점에 이르렀으며 향후 30~40년 동안 완만하게 하락하는 추세임.
 - 정체되고 고령화한 인구, 완화된 경제 성장, 에너지 효율 증대 기술 기반의 스마트 시티, 스마트 그리드, 전기 자동차, 카풀 등의 사유로 에너지 수요의 하락이 예상됨.

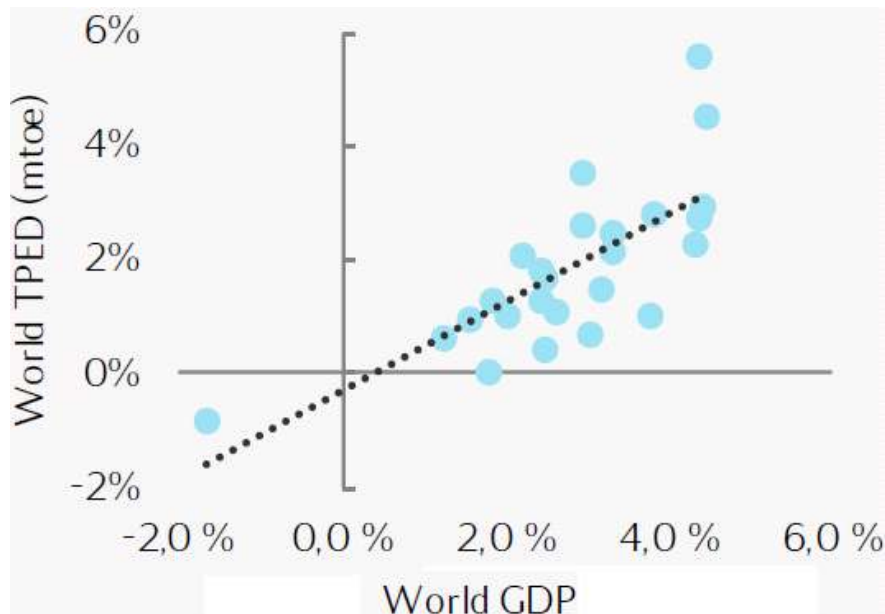


그림 III-2. 세계 1차 에너지 수요 vs. GDP 증가율 (1999~2014)⁷²⁾

71) Statoil, Energy Perspectives 2017: Long-Term Macro and Market Outlook, Statoil ASA, Stavanger (2017).

72) Statoil, Energy Perspectives 2017: Long-Term Macro and Market Outlook, Statoil ASA, Stavanger (2017).

- 비OECD 에너지 수요는 인구 증가율이 높고 역동적인 경제로 인해 계속 증가
 - 에너지 고효율의 현대식 조명, 난방, 가전 및 운송 이용에 애로
 - ▶ 비OECD 세계에 에너지 효율 기술 및 시스템 신속 배치 및 해당 시스템에 대한 신뢰 구축
 - 비OECD 국가 중 주요국인 중국은 최근 전 세계 에너지 수요 집중의 완화에 기여
 - ▶ 경제 자유화와 빠른 성장으로 1980년에 비해 2010년 중국 경제 규모는 약 23배로 커짐.
 - ▶ 2000년대 이후, 인프라, 건물과 중공업에 대한 투자의 급증으로 에너지 수요는 매년 거의 9%씩 증가함.
 - ▶ 최근 6.5~7% 범위의 경제 성장률을 이루면서도 에너지 수요 증가율을 2~4%로 낮추었고, 2015년에는 1~1.5 %로 더 낮춤.
 - ▶ 제13차 5개년 계획(2016 ~ 2020년) 목표에서 실질 GDP 성장률은 매년 6.5%, 에너지 수요 증가율은 매년 3% 로 제한함.
 - 비OECD 국가 중 주요국인 인도는 2015년 현재 2억 4천만 명의 인구가 전기를 사용하고 있지 못한 실정임.
 - ▶ 에너지 부문을 현대화하기 위해 노력하고 있지만, 인도는 전년도보다 2015년에 5~6% 더 많은 에너지를 사용함.
 - ▶ 인도의 에너지 수요는 여전히 중국 수요의 3분의 1 미만이지만 2050년까지 중국 수요의 절반으로 증가 예상됨.

○ 시나리오 영향

- 현상유지(Reform) 시나리오

- 세계 1차 에너지 수요는 2014년에서 2050년 사이에 매년 평균 0.6 %씩 총 24% 증가하며, 세계 경제의 에너지 강도는 매년 1.9%/년씩 총 약 50% 감소함.
 - 에너지 집약도의 개선 성과는 1990년과 2014년 사이에 이룩한 성과의 두 배 이상임.
 - OECD 지역의 에너지 수요는 2014년에서 2050년 사이에 총 14% 감소하지만, 비OECD 수요는 49% 증가함.
 - 2030년대에는 성장이 둔화하고 2040년대에는 성장 둔화가 심화하지만 비OECD 유럽과 러시아를 제외한 대부분의 비OECD 지역은 2050년까지 에너지 수요가 여전히 상승 예상됨.
 - 에너지 강도는 지역마다 다르지만, 과거보다 미래에 더 빨리 낮아짐.
 - OECD 지역과 일부 비OECD 지역에서는 기술 혁신과 정책이 중요한 역할을 하며, 그 외의 비OECD 지역에서는 구조적 변화가 더 중요한 역할을 함.
- **성장(Renewal) 시나리오**
- 세계 경제의 에너지 강도가 1990-2014 기간의 3배인 연간 2.8 %로 감소하고 세계 에너지 수요는 총 6% 감소함.
 - OECD 지역의 에너지 사용은 총 37% 감소하고 비OECD 지역의 에너지 소비의 결합 수요는 총 16% 증가함.
 - 2040년경에는 비OECD 수요 집중도 완화되며, 아프리카, 중국과 인도 등 비OECD 아시아에서만 에너지 소비가 계속 증가 예상됨.
- **대립(Rivalry) 시나리오**
- 세계 에너지 수요는 32% 증가하고, 경제 성장 둔화로 에너지 성장이 둔화하였지만 세계 경제의 에너지 집약도가 1.1%로 감소함으로 인해 수요 성장이 **현상유지** 시나리오 수준보다 높아짐.
 - OECD 수요는 감소하지만 감소 폭은 3.5 %이고 비OECD 수요는 55% 증가함.

- 에너지 효율은 에너지 안보 위험 및 환경 저하를 완화하는 한 가지 방법으로 **대립** 시나리오에서 가치가 인정됨.
- 자국의 내면을 바라보는 국가에서는 에너지 수요 측면보다는 에너지 공급 측면 더 중시함.
- 비OECD 지역에 대한 에너지 효율 관련 아이디어와 기술의 보급에 대한 투자는 보호주의 영향으로 지연됨.
- 국제적 긴장으로 에너지 소비가 적은 소비자 지향적 서비스에서 소비가 많은 방위와 중공업 분야로 투자가 전환됨.

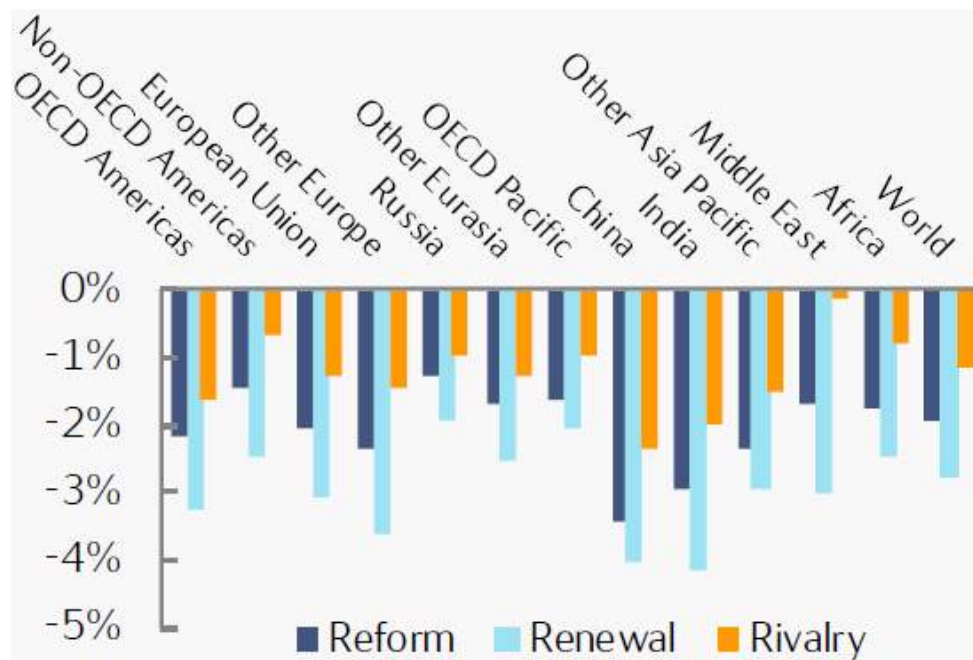


그림 III-3. 연평균 에너지 강도 변화 (2014~2050, TPED/GDP)

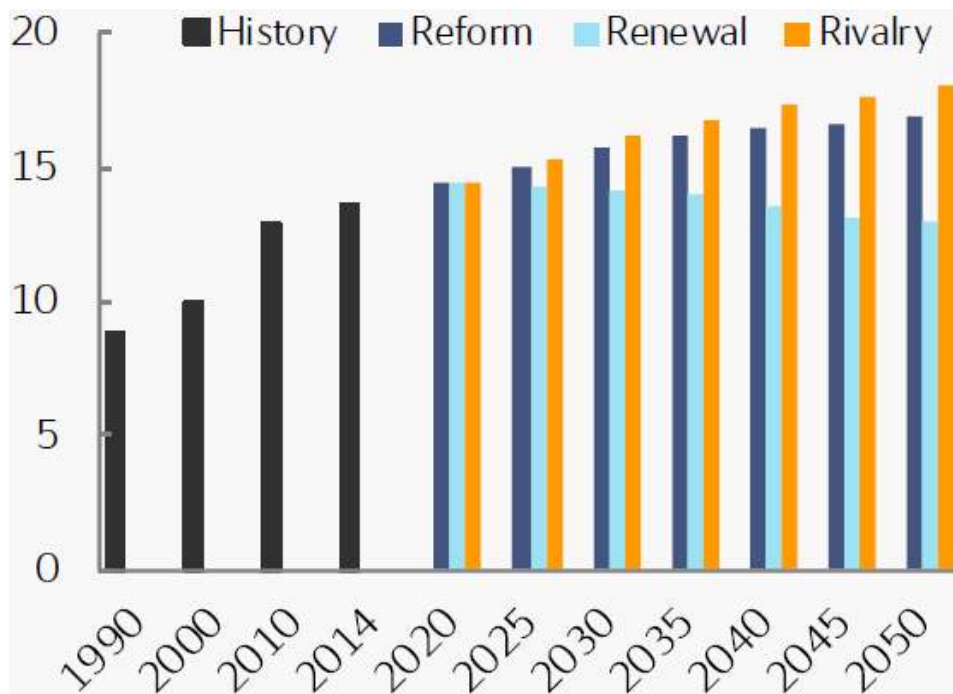


그림 III-4. 세계 1차 에너지 수요 (Btoe)

□ 세 가지 시나리오 전개 시의 에너지믹스 전망

○ 일반적 전망

- 지구 온난화 완화 관점에서 신속하지는 않지만, 전 세계 에너지믹스는 변화하고 있음.
- 1990년 국제 해상 및 항공 병커시유 때문에 화석 연료는 전 세계 총 1차 에너지 소비의 85.5 %를 차지함.
- 2014 년 화석 연료는 82.6 %로 감소했고, 석유 점유율은 36.9 %에서 31.3 %로 크게 감소하고, 천연가스 점유율은 19.0 %에서 21.2 %로, 석탄 점유율은 25.2 %에서 28.6 %로 증가했음.
- 에너지 소비의 비 화석 비중에서 1990 ~ 2014년 기간 동안 바이오매스와 수력의 우위 유지 및 원자력 비중 감소
 - 풍력, 태양열 및 지열 에너지를 포함한 재생 에너지의 비중은 1990년 0.4 %에서 2014년 1.4 %로 증가함.

- 석유의 시장 점유율은 자동차는 에너지 효율이 높아지고 중동 지역을 제외한 모든 곳에서 전력 부문 연료에서 소외됨에 따라서 감소함.
 - 천연가스는 비용, 환경 및 공급 측면의 이유로 전력 부문 연료로서 인기가 높아짐에 따라 시장 점유율 크게 증가
 - 아시아의 빠른 경제 및 전력 수요 증가로 석탄은 증가함.
 - 체르노빌 및 후쿠시마 재난으로 강한 NIMBY 태도 유발 및 안전 규정 강화로 추가 비용 급증으로 원자력 점유율은 감소함.
 - 풍력 및 태양광 발전은 정치적 지원과 점진적인 경제성 향상을 기반으로 비중 증가함.
- 2010년 이후의 에너지믹스 상황
- 석탄의 시장 점유율 감소 뚜렷
 - 1차 에너지로서의 세계 석탄 수요는 2011년에 29%로 정점을 찍고 그 이후로 감소
 - ▶ OECD 에너지 소비의 석탄 비중은 주로 북미 셰일 가스 혁명으로 인해 2008년 무렵 감소
 - ▶ 중국 석탄 수요는 2003년에서 2013년 사이에 매년 평균 7.5 %, 2011년보다 15% 증가했지만, 성장 둔화, 경제의 구조적 변화와 다른 환경친화적 연료와의 경쟁에 따라 2014년과 2015년에는 매년 3-4% 감소함.
 - ▶ 13 차 5년 계획하의 중국은 1차 에너지 소비에서 석탄의 점유율이 2014년 65%에서 2020년 58%로 감소하고, 가스 비중은 5%에서 10%로 증가하며, 비 화석 연료는 12%에서 15%로 증가할 것으로 예상
 - ▶ 인도와 동남아시아의 경우는 석탄 사용이 증가할 것으로 예상되어 전 세계 에너지 수요의 석탄 점유율 감소 속도 완화에 기여하고 있으나, 이 국가들도 궁극적으로 석탄의 의존도를 줄이는 것이 최종 목표라고 함.
 - 재생 에너지의 괄목할 성장세
 - 풍력 및 태양광 위주의 신규 재생 에너지의 끊임없는 성장이

추세 계속 예상

○ 시나리오 영향

- 현상유지(Reform) 시나리오

- 2014년 29%였던 전세계 TPED의 석탄 점유율은 2050년에 20%로 감소
- 2014년에 31%에서 2050년에 28%로 석유 점유율 감소
- 가스 점유율은 2014년 21%에서 2050년 23%로 증가
- 원자력 비율은 5~6%의 범위 유지

- 성장(Renewal) 시나리오

- 석탄 점유율은 2020년까지 **현상유지** 시나리오에서와 같이 많이 발전하지만 2050년까지는 10%에 불과한 정도로 감소.
- 2014년에 31%에서 2050년에 22%로 석유 점유율 감소
- 가스 점유율은 2014년 21%에서 2050년 19%로 감소
- 원자력의 무탄소, 급전 가능 전력의 필수 공급원으로서의 가치 인정으로 2050년까지 점유율 11.5%까지 증가 예상

- 대립(Rivalry) 시나리오

- 더 안전한 대안의 부족으로 석탄 의존성 유지에 따라, 2050년까지 TPED에서 화석 연료의 비율이 25%로 약간 감소
- 2014년에 31%에서 2050년에 32%로 석유 점유율 유지 지속
 - 석유의 점유율은 둔화한 경제 성장과 석유 공급 우려의 에너지 안보에 대한 대비책으로 감소할 것으로 추정되지만, [에너지 효율성 제고 및 도로 운송의 전기화]의 미진으로 인한 상쇄 효과로 석유 점유율 유지 지속 예상
- 가스 점유율은 2014년 21%에서 2050년 22%로 증가
- 원자력 비율은 5~6%의 범위 유지

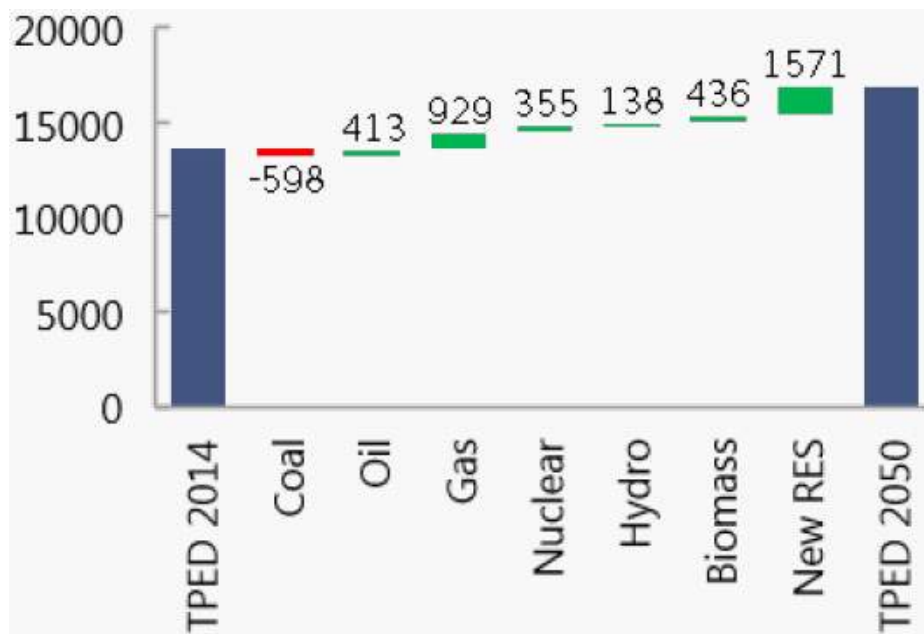


그림 III-5. 현상유지 시나리오의 세계 1차 에너지 수요 변화 (Mtoe)

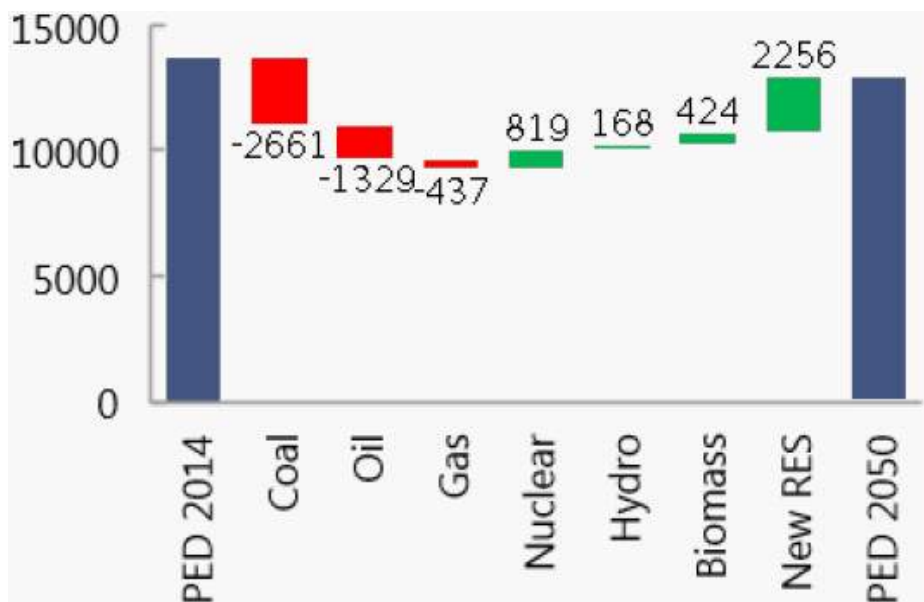


그림 III-6. 성장 시나리오의 세계 1차 에너지 수요 변화 (Mtoe)

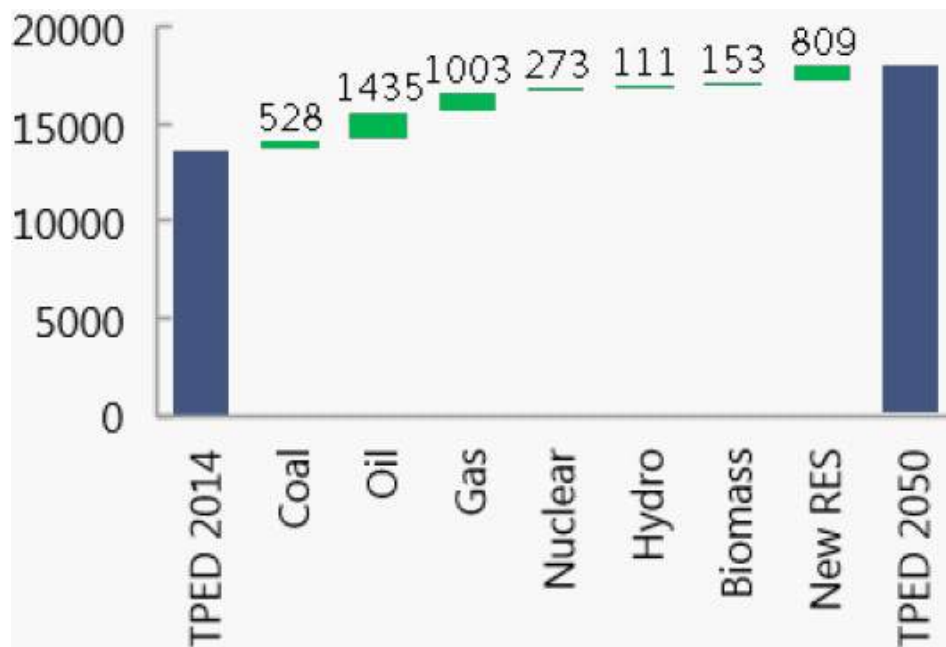


그림 III-7. **대립** 시나리오의 세계 1차 에너지 수요 변화 (Mtoe)

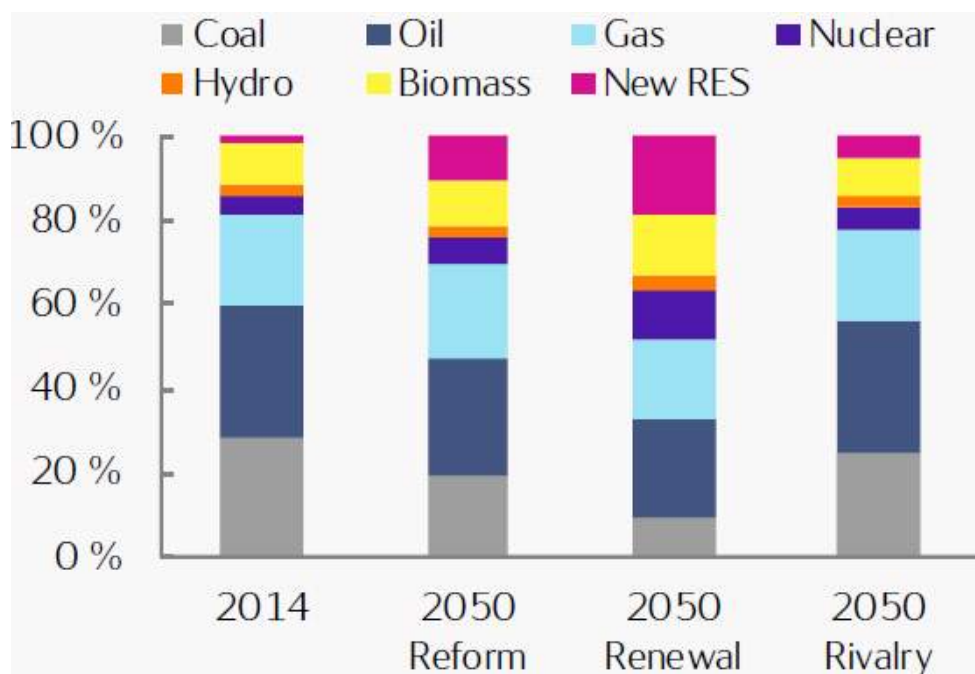


그림 III-8. 세계 1차 에너지믹스 (2014 - 2050)

□ 세 가지 시나리오 전개 시의 전력 부문 전망

○ 일반적 전망

- 기술, 시장 및 정책상의 이유로 전 세계 최종 에너지 소비에서 전기 점유율이 증가할 것으로 예상됨.
 - 현대 생활에서 활용되는 기기는 거의 예외 없이 전기 기반임.
 - IT 혁명은 특히 전기 집약적임.
 - 탈탄소화 목표 달성의 2단계 절차
 - 첫 번째 단계: (에너지 효율 개선은 별개로 하고) 가능한 한 많은 연료 사용을 전기 사용으로 전환
 - 두 번째 단계: 전기공급의 탈탄소화
- 세계 최종 에너지 소비의 전력 점유율은 18%에서 2050년에 **현상유지(Reform)** 시나리오에서 25%, **대립(Rivalry)** 시나리오에서 20%, **성장(Reform)** 시나리오에서 30%로 증가할 것으로 예상됨.
- 석탄은 여전히 가장 큰 전력 공급원으로 2014년 세계 발전량의 41%를 차지함.
 - 석탄 발전은 점점 더 아시아 신흥 경제에서만 증가세 유지
 - OECD 지역에서 발전량의 석탄 비중은 1983년에 43%로 정점에 달했으며 2015년에는 30%로 감소.
 - 이러한 상충하는 추세는 아시아의 급격히 증가하는 전기 수요 및 토착의 저렴한 연료에 대한 자연적인 의지와 OECD 지역의 정제된 전기 수요 및 원자력, 가스 및 최근의 풍력 및 태양 등 석탄을 대체하는 광범위한 대체재들의 공급 상황에서의 진입 등을 반영함.
- 가스는 2014년 전 세계 총발전량의 22%를 차지함.
 - 1990년대 초에는 가스가 너무 소중해서 전력 부문에 쓰기엔 아깝다고 생각했으나, 몇몇 국가들이 그런 생각을 바꿨을 때 가스의 성장이 시작됨.
 - 2010년 이후 전기 사업자들이 연료 가격 신호에 응답하여

가스에서 석탄으로 전환하고 정책 신호에 응답하여 새로운 재생 가능 용량이 그리드에 편입됨으로써 가스의 정체 징후가 있었음.

- 풍부한 내부 가스 자원 및 / 또는 주요 석탄 관련 배출 문제가 있는 국가에서는 여전히 전력을 공급하는 데에서 있어서 가스의 장래는 청신호

○ 시나리오 영향

- **현상유지(Reform)** 시나리오에서 세계 전력 공급의 석탄 비중은 2014년 41%에서 2030년 27%, 2050년 19%로 저하됨.
 - OECD 지역에서 정부는 파리 협약에 대한 공약과 지역 배출 문제에 대해 적극적으로 조치하고, 투자자는 관련 기술과 비용 신호에 대해 투자를 이행함에 따라, 그 결과 석탄 전력 점유율이 10~12% 범위로 저하됨.
 - 중국, 인도 및 기타 비OECD 아시아 석탄은 여전히 중요하지만, 중국에서는 27%, 다른 지역은 40~45%로 감소함.
 - 전 세계 가스 점유율은 2030년까지 24%로 약간 증가하지만 신규 재생 에너지의 활성화로 인해 2050년에는 20~21%로 저하됨.
- **성장(Renewal)** 시나리오에서는 전력 생산을 위한 석탄은 거의 배제됨.
 - 중국, 인도 및 기타 비OECD 아시아 국가만이 상당한 규모의 석탄 발전산업을 유지하나 전 세계적으로 총발전량에서 석탄의 비중은 2050년에 5%를 약간 상회하는 수준으로 저하되며, 가스의 비중도 8%로 급감함.
- **대립(Rivalry)** 시나리오에서 석탄은 개혁 시나리오보다 시장 점유율이 높지만 2050년까지 26%로 여전히 감소함.
 - 석탄은 기후 정책 압력이 낮지만, 지역 오염으로 인해 여전히 인기가 없으며 새로운 재생 에너지와 비용 상의 경쟁도 심화함.
 - 가스 전력 점유율은 24~25% 수준 정도로 유지됨.

- 가스가 이용 가능하고 저렴한 비용으로 자본을 이용할 수가 있는 일부 지역에서는 발전에 가스를 사용하는 것이 **현상유지(Reform)** 시나리오보다 **대립(Rivalry)** 시나리오에서 더 효과적임이 나타남.
- 원자력은 점유율이 약간 감소할 것으로 예상되나, 우라늄 연료의 안정 공급이 가능한 나라에서는 에너지 안보의 차원으로서 공급 안정화에 중점을 둬으로써 선호 대상이 됨.



그림 III-9. 총 최종 에너지 소비 중 전기 비중

〈부록 IV〉 참고문헌

- [1] International Atomic Energy Agency, Climate Change and Nuclear Power 2018 (2018),
http://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/CCNAP-2018_web.pdf
- [2] OECD International Energy Agency, World Energy Statistics and Balances (2018),
<http://dx.doi.org/10.1787/data-00512-en>
- [3] International Panel on Climate Change, Climate Change 2013: The Physical Science Basis, Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge (2013).
- [4] Emissions Database for Global Atmospheric Research (EDGAR), Global Emissions EDGAR v4.2 FT2012 (2014),
<http://edgar.jrc.ec.europa.eu/overview.php?v=42FT2012>
- [5] Paris Agreement, United Nations Framework Convention on Climate Change, Bonn (2015).
- [6] OECD International Energy Agency, World Energy Statistics and Balances (2018),
<http://dx.doi.org/10.1787/data-00512-en>
- [7] Greenpeace International, Global Wind Energy Council, Solarpower Europe, Energy [R]evolution 2015, Greenpeace, Amsterdam (2015).
- [8] Ram, M., et al., Global Energy System Based on 100% Renewable Energy – Power Sector, Study by Lappeenranta University of Technology and Energy Watch Group, Lappeenranta and Berlin (2017).
- [9] Keramidas, K., Kitous, A., Global Energy and Climate Outlook 2017, European Commission Joint Research Centre, EUR 28725 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg (2017).
- [10] World Nuclear Association, The Nuclear Fuel Report: Global Scenarios for Demand and Supply Availability 2017–2035, WNA, London (2017).
- [11] International Atomic Energy Agency, Energy, Electricity and Nuclear Power Estimates for the Period up to 2050, 2017 Edition, Reference Data Series No. 1, IAEA, Vienna (2017).
- [12] World Energy Council, World Energy Scenarios 2016, WEC, London

- (2016).
- [13] Statoil, Energy Perspectives 2017: Long-Term Macro and Market Outlook, Statoil ASA, Stavanger (2017).
 - [14] OECD International Energy Agency, World Energy Outlook 2017, OECD Publishing, Paris (2017).
 - [15] OECD International Energy Agency, World Energy Outlook 2014, OECD Publishing, Paris (2014).
 - [16] OECD International Energy Agency, Energy Technology Perspectives 2017, OECD Publishing, Paris (2017).
 - [17] International Atomic Energy Agency, Going Long Term: US Nuclear Power Plants Could Extend Operating Life to 80 Years (2018),
<https://www.iaea.org/newscenter/news/going-long-term-us-nuclear-power-plantscould-extend-operating-life-to-80-years>
 - [18] International Atomic Energy Agency, Energy, Electricity and Nuclear Power Estimates for the Period up to 2050, Reference Data Series No. 1, 2018 Edition, IAEA, Vienna (2018).
 - [19] Murphy, D., Berkman, M., Impacts of Announced Nuclear Retirements in Ohio and Pennsylvania (2018),
http://files.brattle.com/files/13725_nuclear_closure_impacts_-_oh_pa_-_apr2018.pdf
 - [20] Advanced Nuclear Reactors: Technology Overview and Current Issues, Congressional Research Service (2019)
 - [21] Advanced Nuclear Power Reactors (Updated Feb. 2020) WNA,
<https://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-power-reactors/advanced-nuclear-power-reactors.aspx>
 - [22] Nuclear Fuel Cycle Evaluation and Screening – Final Report, INL/EXT-14-31465(2014).
 - [23] Transitions: Argonne’s pioneering study of nuclear energy future(2019)