

KNS(R)-001-2020

원자력 미래 전망예측 및 대처방안

2020. 12. 31



한국원자력학회
Korean Nuclear Society

제출문

한국원자력학회 회장 귀하

한국 원자력 학회 (KNS) 제2기 미래특별위원회에서 수행한 “원자력 미래전망 예측 및 대처방안” 과제 내용과 최근 코로나 사태의 영향을 반영하여 개선된 내용을 세계원자력학회 연합회에 제출되는 영문보고서와 함께 최종보고서를 다음과 같이 제출합니다.

참여자

과제 책임자: 박군철 서울대 명예교수

참여자:

조형규 서울대 조교수

김찬수 한원연 책임연구원

노백식 (전) 한수원 본부장

박찬오 (전) 한전연료 전무

박석빈 (전) 두산중공업 상무

간사: 민현정 원자력학회 실장

요 약

에너지 전환의 정책적 제안과 무탄소 에너지원에 대한 수요로 인해 에너지 상황이 빠르게 변화하고 있습니다. 이러한 상황에서 국내 원전 업계는 기술, 공급망, 인력의 붕괴를 피할 수 있는 장단기 대책을 모색하고 있습니다. 이 보고서에서는 에너지, 경제, 원자력 발전소에 대한 글로벌 및 국내 전망과 정책을 조사했습니다. 주요 목적은 이들로부터 시사점을 도출하고 미래 사회의 환경 및 기술 수요 변화에 대응하기 위한 원자력 정책 및 R&D 추진 계획을 마련하는 것이었습니다. 분석에 채택된 접근 방식은 미래 예측 방법론 중 시나리오 기법이었습니다. 정치적 의사 결정과 에너지 믹스의 우선순위가 미래 원자력의 역할에 중대한 영향을 미치기 때문에 이와 관련되는 현상 유지 시나리오, 화합 시나리오 및 대결 시나리오의 세 가지 시나리오가 고려되었습니다. 기후 변화, 코로나의 대유행, 4차 산업혁명, 우주기술 혁신, WTO 체제 변화 등 미래의 메가-트렌드를 고려했다. 분석을 위한 국내 원자력 기술 개발의 전략적 방향은 세계 원자력에 대한 국제 협력 강화를 포함해서, 소형 모듈형 원자로 및 마이크로 원자로의 개발, 원자력의 해양 응용, 원자력에 의한 수소 생산 등, 잠재적인 미래의 원자력 응용 분야를 전망 및 분석했습니다.

세 가지 시나리오에 따라 원자력 기술의 변화 방향이 제시되었습니다. 현상 유지 시나리오에서 미래 원자력의 키워드는 에너지 저장, 디스패치 가능성, 분산 시스템, 낮은 자본 비용, 혁신적인 소형 원자로 개발, 다목적 마이크로 원자로 기술 개발, 차세대 전력 변환 시스템 개발, 그리고 우주 원자로이고, 화합 시나리오에서는 원전 및 가상 원전에 4 차 산업 혁명 기술 적용, 무인 장비 개발, 방사선 피해 복원 및 저항 제어, 양자 FAB 기술 개발, 미래 신소재 핵심 기술 개발을 제안하며, 대립 시나리오에서는 원자핵과학 응용 분야 활성화, 사용후핵연료의 환경 부하 저감 기술 개발, 에코 돔 사용후핵연료 연구센터, 해안/해저 암 처리 등을 제안하여, 세 가지 시나리오의 혼합적 구성 시, 본 시나리오 분석의 예측 전망은 미래 원자력의 역할에 대한 광범위한 이미지로 사용될 수 있습니다.

목 차

제출문	2
요약	3
목차	4
1. 서론	5
2. 미래의 기여에 대한 고려	8
2.1 에너지 수요 전망과 미래의 국제사회 예측 시나리오의 상관관계	8
2.2 미래 에너지 수요 전망	9
2.3 미래의 국제사회 예측 시나리오	9
2.4 미래의 MEGA TREND들	10
2.5 국내 원자력 기술의 발전 방향	16
3. 시나리오 전제에 따른 미래 예측	68
3.1 세 가지 대응 시나리오의 전개	68
3.2 시나리오 전개에 따른 에너지 및 원자력 전망	73
4. 원자력 기술의 변화 방향	77
5. 종합적 전망 및 건의	83
6. 참고문헌	85

별첨 1. 자문회의록

별첨 2. 전문가 자문 발표자료 [학회 Homepage 참조]

별첨 3. 영문보고서

1. 서론

● 배경

- 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.

- 원전 산업의 장단기 대응방안 모색
 - ◆ 국내 원전 전망 or 세계 원전 전망, 단기 대응 or 장기 대비
 - ◆ 국내 원전 산업의 붕괴를 피할 수 있는가, 할 수 있는 또는 해야 할 일은 무엇인가?

- 에너지와 경제, 원전에 대한 세계와 국내 전망, 정책을 비교하여 국내 원전업계의 시사점 도출
 - ◆ 불확실한 미래를 대비하기 위한 기초자료 활용
 - ◆ 미래 사회의 환경과 기술 수요의 변화에 대응하는 원자력 정책 및 연구개발 추진 방안 작성

- 마지막으로, COVID-19로 인한 현재의 대유행 상황은 에너지 계획과 원자력 지속 가능성을 포함한 모든 지구 환경과 정책 방향들의 극적 변화 초래
 - ◆ 이런 상황에서의 원자력의 미래는 무엇이며, 어떻게 그리고 왜 될 것인가? 에 대한 도출

● 검토기법 및 활용방안

- 작성 기법: 과학적 접근을 위해 미래예측조사 방법론 참조

- 미래사회 전망을 위한 다양한 예측 방법론 활용.
 - ◆ 델파이, 교차영향분석(Cross-impact analysis), 시나리오, 전문가패널, 환경스캐닝, 추세외삽법 등 많은 예측 방법이 존재

- 미래사회 전망은 한 가지 방법만을 사용하는 것이 아니라 다수의 방법을 종합적으로 사용

● 미래예측 기법 중 시나리오 기법의 선정 사유

- 미래예측에 대한 가정

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

구분	방법론	개념 및 방법
화물적 방법	델파이	• 전문가 패널을 구성하여 설문조사를 반복적으로 실시, 의견수렴 과정을 이용 • 설문조사 반복 실시는 통산 2회 정도로 하고 있음.
	교차영향분석	• Delphi 기법이 발전된 형태 • 예측대상에 대해 상호 영향을 미치는 요인을 분석
정성적 방법	시나리오	• 미래의 가상적 상황에 대한 묘사 • 타 예측기법을 바탕으로 여러 시나리오를 구상할 수 있음
	전문가 패널	• 다양한 분야의 전문가 Pool로부터 일정 정도의 전문가패널 구성 • 정해진 기간동안 주기적 모임을 통해 주어진 주제에 미래전망에 대해 토론하고 전략을 수립하는 방법
	환경스캐닝	• 아래 박스내용 참조
정량적 방법	추세외삽법	• 일련의 데이터에 연관성을 갖는 방법으로 추세를 예측할 수 있으며, 현대에는 수학적이고 통계적인 피팅 방법을 사용
	다이나믹모델링	• 수학적 모델을 이용하여 변수들의 상호관계를 모형화하여 분석하는 시뮬레이션 기법

- ◆ 시나리오(일관된 일련의 가정을 기반으로 한 계획) 안에서 예상되는 상황의 전개를 상상하는 것이 바람직함.
 - 한번 만들어진 시나리오에는 기본 가정이 광범위하게 충족되는 한 유효
 - 사건의 발생 시점부터 전개가 용이
 (예) 두 차례의 석유 위기 때부터 현재까지의 천연가스 시장에 대한 전망은 어려웠지만, 장기적으로 미래의 특정 시점에 석유 위기가 터질 수 있다고 가정하여 대비책으로 활용함.

● 도출 방향 및 핵심 고려사항

- 미래 원자력의 역할 전망: 한 나라와 세계가 설정한 목표와 그 목표를 달성하는 경로로 에너지 시장을 이끌기 위해 선택 가능한 정책 시나리오 등을 바탕으로 미래의 원자력의 모습을 그리는 것.
- 목표: 미래의 국제사회의 변화 속에서의 세계의 에너지 믹스의 방향과 이를 고려하는 국내의 지속 가능한 에너지 믹스 개발
 - ◆ 지속경제성장을 위한 에너지 방향
 - ◆ 안전, 효율 및 안보 상황을 고려하는 미래의 에너지 믹스
- 미래 원자력의 역할 전망은 단순한 에너지와 원자력 시장의 미래 예측이 아님
 - ◆ 한 나라와 세계가 설정한 목표와 그 목표를 달성하는 경로로 원자력을 포함한 에너지 시장을 이끌기 위해 선택 가능한 정책 시나리오 등을 바탕으로 제시하는 미래 원자력의 모습
 - 당면한 최대의 위기인 온실가스 억제를 위한 기후 목표
 - 진보와 성장을 위한 SDG(Sustainable Development Goal)

● 미래 원자력 전망의 가변성

- 각국이 선택할 정치/경제적 및 기술적 정책에 대한 여러 가정과 에너지 기술의 발전의 정도에 의해 폭 넓게 변화
- 전망하는 주체의 정치적인 입장에 따라, 이러한 전망의 범위가 극단적으로 표현됨.
 - ◆ 현실적 미래 예측과 괴리(제외 필요)
 - (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

2. 미래의 기여에 대한 고려

2.1 에너지 수요 전망과 미래의 국제사회 예측 시나리오의 상관관계

- 정치적 의사결정과 기술/경제적 요소를 고려한 국제사회에서의 에너지 믹스 우선순위가 미래의 원자력의 역할에 대한 영향 중요 (시나리오 전개 방식 채택)

- 현상유지 시나리오: 현재 예측되는 경제 동향 및 정책의 큰 변화 없이 추진되는 경우
- 화합 시나리오: 범지구적인 지속성 현안 해결에 국제사회가 동일한 정책의 이행에 혁신적인 노력의 경우
- 대립 시나리오: 국가 간의 국제 관계가 서로 대립함에 따라 자국의 이익이 정책의 주요 요소인 경우

- 전체적인 에너지 수요 전망은 시나리오 방향과 무관하게 예측될 수 있으나 에너지 믹스의 구성은 크게 차이가 나리라고 추정됨

- 지구 온난화에 전력을 다하는 국제사회에서의 에너지 믹스는 저탄소 에너지의 대폭 확대와 화석에너지 사용의 최소화로 제시
- 국가 간의 분쟁이나 자국 이익에만 몰두하는 국제사회가 될 경우에는 에너지 믹스의 방향은 에너지 안보에 치중케 될 것으로 보임.
- 시나리오 별 에너지 믹스에서 원자력이 차지하는 비중과 역할에 따라 원자력의 지속성 여부가 평가될 것으로 보여 이에 대한 분석 필요

2.2 미래 에너지 수요 전망¹⁾

- 에너지소비와 경제성장이 탈 동조화되는 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

2.3 미래의 국제사회 예측 시나리오

- 미래의 국제사회는 정치적 의사결정과 미래 성장 역할에 대한 기술/경제적 의사결정에 따라 변화 (시나리오 전개 방식 채택)
- 정치적 의사결정 및 기술/경제적 의사결정에 따른 각국의 정책 방향의 조합을 크게 세 분류로 고려하여 아래의 현상유지, 화합 및 대립의 3가지 시나리오²⁾로 분류
- 미래의 세계는 화합과 대립의 시나리오의 어느 중간에 있겠지만 어떤 한 시점에서 보면 때로는 화합으로 때로는

1) IEA 2019 Outlook 수치 자료 참조

2) “에너지 수요 전망과 미래의 국제사회 예측 시나리오의 상관관계” 항의 세 가지 시나리오 참조

대립으로 표현될 수 있음.

- 파리 협약 수립 당시는 세계는 뚜렷한 장밋빛 화합의 장이었음.
- 그 후 자국의 경쟁적 이익을 우선하는 미국 트럼프 정부의 등장이나 영국의 브렉시트 현실화는 다분히 대립으로의 방향 전환 상황.
- 2020년 갑자기 세계에 몰아닥친 코로나 대유행 위기는 세계를 급격히 대립의 길로 유도

2.4 미래의 MEGA TREND들

● 지구 환경의 변화

- 기후환경
 - ◆ 탈탄소 지구환경 / 미세먼지 저감
- CV-19 관련 환경

● 과학 기술의 변화

- 4차산업혁명
- 우주기술혁신

● 경제활동의 변화

- WTO 체제의 유지 또는 변화
- 다자간 경제체제 활성화 여부

2.4.1 기후환경

● 기후변화

■ 수십 년 또는 그 이상 지속되는 통계적으로 중요한 기후의 변동

◆ 지구온도 상승 → 지구온난화

- 2014년 발표된 기후변화에 관한 정부 간 패널(IPCC) 제5차 보고서에 따르면, 지난 133년(1880~2012년)간 지구 평균 기온은 0.85℃가 상승. 과거 1만년 동안 지구온도가 1℃ 이상 변한 적이 없던 것에 비하면, 지구온도 상승이 가파르게 진행되고 있는 것.

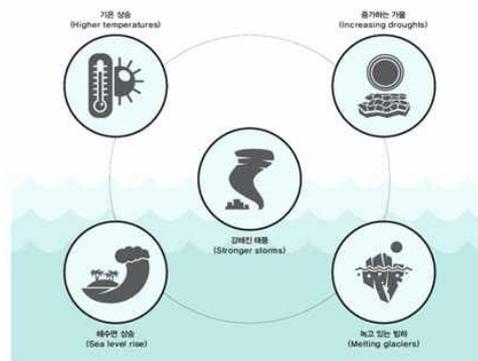
◆ 해수면의 상승

- 지구온난화는 전 세계의 빙하를 녹여 해수면의 상승 초래
- 아시아개발은행(ADB) 보고서에 따르면, 2016년 2월 기준으로 전 세계 평균 해수면 높이는 1993년보다 74.8mm 상승했음.
- 2100년에는 1990년보다 0.75~1.9m 더 상승할 전망.

■ 향후 전망

◆ 현재와 같이 지구의 평균 기온상승률이 유지된다면 21세기 말 지구 평균기온은 3.7℃ 상승

- 2080~2100년 즈음에는 해수면이 63cm 상승하여 전 세계 주거가능 면적의 5%가 침수 예상.



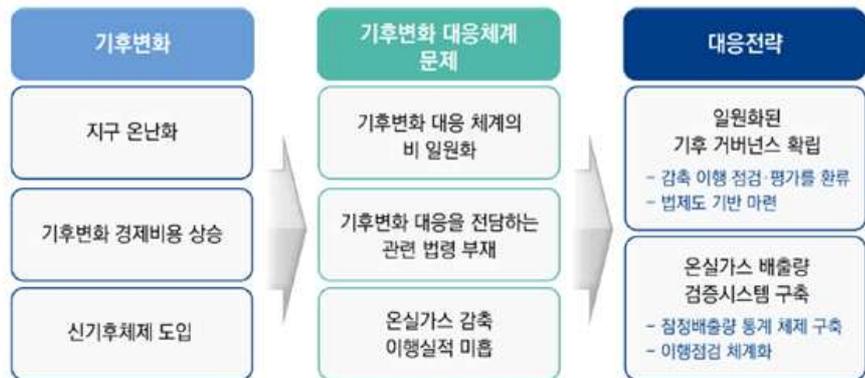
■ 전세계적 영향

- ◆ 급속한 기온상승으로 집중호우 및 태풍이 빈번하게 발생하여 막대한 인명 및 재산상의 피해 초래

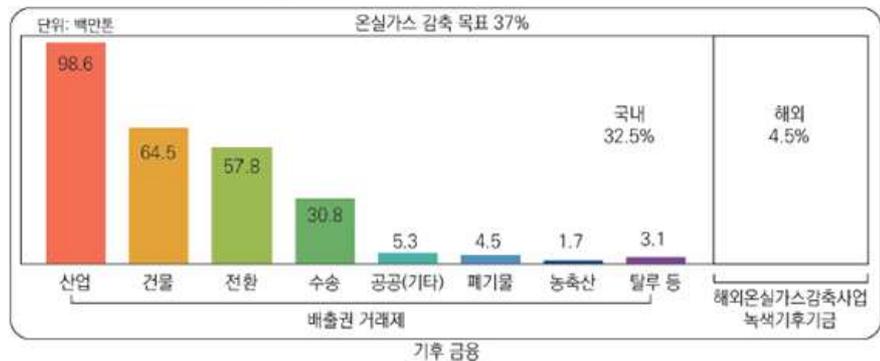
■ 기후온난화의 억지 방향

- ◆ IPCC(International Panel of Climate Change) 보고서는 지구 평균기온 상승을 2℃ 이하로 유지하기 위해 2050년까지 2010년 기준 배출량의 40~70%를 줄여야 한다고 밝힘
 - 이를 위해서는 산업계를 중심으로 저탄소 경제사회로의 패러다임 전환 필수.
 - 신기후체제에서는 선진국과 개도국 모두 온실가스 감축의무를 가지므로 에너지 이용, 산업생산방식, 수송방식 등 경제구조 전반이 영향을 받을 수 있기에 선제적인 대응전략 수립이 필요

온실가스 감축을 위한 거버넌스 부분 대응 전략



기후변화 대응 관련 금융·투자 부분 개요



● CV-19 환경 분석

- 코로나19가 3월 이후 전 세계적으로 확산되면서 세계 경제에 미치는 영향에 대한 우려가 고조
- 빠른 속도의 전염과 이에 대한 불안감 확대로 주요국 경제에 부정적 영향이 가시화
 - ◆ 향후 코로나19의 전개양상에 대한 불확실성이 매우 높은 가운데 세계경제에 미치는 충격이 전례 없이 클 것으로 전망
 - ◆ 각국의 이동제한, 사회적 거리두기 등에 따른 수요 및 공급 충격은 실물경제 전반에 부정적 영향을 초래
 - ① 주요국 경제의 동반 부진
 - ② 상품교역 큰 폭 둔화
 - ③ 인적교류 위축
 - ④ 공급망 훼손
 - ⑤ 금융부문을 통한 위기 증폭
- 코로나19 확산은 전 세계적인 경기침체뿐만 아니라 경제주체들의 행태에도 변화 유발
 - ◆ 가계는 생계와 안전에 위협을 겪으면서 위험회피성향이 높아지고, 기업은 예기치 못한 생산차질을 겪으면서 효율성뿐만 아니라 복원력·유연성에도 큰 가치를 부여할 것으로 예상됨
 - ◆ 가계 및 기업의 비대면 활동 유인이 커지면서 디지털 경제로의 전환이 가속화되고 보호무역 강화, 인적교류 약화로 탈세계화 추세도 강화될 전망이다
 - 탈세계화 추세의 확산으로 세계교역 성장세 이전보다 둔화
 - 디지털경제 가속화로 정보통신기술(ICT) 기반 교역 확대
 - 제조업의 스마트화 촉진 / 비대면 산업, ICT서비스, 친환경, 바이오 헬스 중심 산업구조로의 전환 가속화
 - 노동시장의 대면업무 비중이 높은 직업군의 고용이 감소하는 반면 비대면 산업을 중심으로 다양한 형태의 일자리 창출

단절 우리 → 나
통제 단체 → 개인
폐쇄 이동 → 머뭇
고립 보호주의
부족 민족주의

DISRUPTIVE CHANGES

“ CORONA가 가져온 변화는 어쩌면 21세기의 가장 중요한 변화의 모멘텀을 알리는 신호탄 일지 모른다. CORONA는 단절과 통제를 가져왔고 이 단절과 통제는 21세기의 새로운 보호주의 모델을 탄생 시켰다. '우리'에서 '나'로 옮겨가는 패러다임의 변화는 산업과 사회를 통째로 변화 시키고 있다. CONTACTLESS 로 시작된 INDUSTRY의 변화는 과연 무엇일까? ”



Q2(May - Jul) 2020 \$663M, 7900억원
YoY 355% Growth

zoom

2019 \$330M, 3900억원

DIGITAL TRANSFORMATION

TECHNOLOGY SHIFT FOR CONTACTLESS

- 바이오 산업(진단, 치료, 백신)
- 비대면 활성화 디지털 산업
- 안정화된 에너지 공급 산업
- 비대면 관련 인간관계 산업



국가의 성격 및 역할(?)

2.4.2 기술의 변화와 원자력

● 기술의 변화 방향



우주기술



우주기술은 비대면 사회에서 각광을 받게 될 것임.



2.4.3 경제활동의 변화

● WTO 체제의 유지 또는 변화 (다자간 경제체제 활성화) 여부

- GATT와 WTO 체제 아래
 - ◆ 2차 대전 후 22%이던 관세율 3% 이하로 떨어뜨리고
 - ◆ GDP 대비 교역량은 1970년 27%에서 지금은 60%로 제고

- 트럼프의 보호무역정책은 전 세계가 75년간 공들여온 세계무역질서에 대한 실질적 위협
 - ◆ 미-중 관세 전쟁은 미 GDP 0.3%, 중 GDP 1.9% 감소

- 코로나19는 수입이 아닌 수출을 제한하는 상황
 - ◆ 코로나19 같은 예외적 위험까지 포함하는 세계무역질서 필요

2.5 국내 원자력 기술의 발전 방향

2.5.1 원자력 해외시장 개발

● 필요성

- 정부의 에너지전환 정책 추진에 따라 원전산업체의 환경이 악화되고 있고 축적된 원전기술과 숙련 인력의 유지와 발전이 쉽지 않을 것으로 전망됨

- 그러나 세계적으로는 점진적인 경제성장 등으로 에너지 수요가 지속적으로 증가하는 상태에서 파리기후변화 협약의 이행을 위해 수력, 태양광, 원전 등 저탄소 에너지원에 대한 수요가 증가하고 있음

- 따라서 국내원전산업의 지속발전을 위해서는 국내외 원전시장 동향을 면밀히 분석하고 체계적인 전략을 수립하여 다양한 해외원전시장 개발에 적극 참여할 필요성 있음

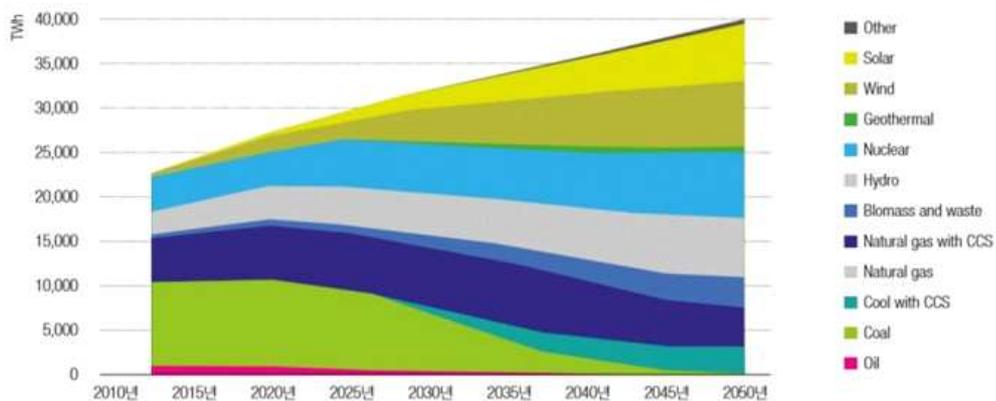
● 세계 원전시장 현황 및 전망

- 에너지 시장의 전반적인 현황 및 전망

- ◆ 증가하는 전력 수요를 충족시키기 위한 신규 발전소 증설 필요
- ◆ 세계 발전 이력을 살펴보면 1990년대 대비 현재 발전량은 2배 증가했으나 비중에는 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

■ 세계적으로 에너지 소비의 탈탄소화의 지속 예상

- (비관적 전망) 화석연료는 여전히 1/2 수준 이상 차지
 - 화석연료 발전소 특히, 이산화탄소를 많이 배출하는 석탄화력발전소 대체에 애로
- (낙관적 전망) 2/3 정도가 무탄소 전원에서 공급.
 - 수력을 포함한 재생에너지는 절반 수준 증가, 원자력은 1/4정도 공급
- ◆ 2°C 이내로 기후변화를 잡기 위해서는 비탄소 에너지(수력, 태양광, 풍력, 원자력)가 2/3 이상이 되어야 함. (아래 그림 참조)
 - 석탄과 천연가스도 이산화탄소 포집 및 저장 병행 필요



IEA 2도 시나리오에 따른 발전원별 전력생산량(IEA)

그림 IEA 2도 시나리오에 따른 발전원별 전력생산량

■ 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 필요³⁾
 - 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

2020년7월 기준

구분	기수	설비용량(MWe)	국가수	보기
운전중	441	390,113	31개국	IAEA
건설중	54	57,441	20개국	IAEA
계획중	153	156,882	22개국	WNA
영구정지	188	83,961	21개국	IAEA

표. 세계원전현황(출처 : 한국원자력산업회의)

- ◆ 독일, 대만 등 일부 국가의 탈원전 정책 추진 현황
 - 전력요금 증가, 이산화탄소의 효과적인 저감 불가, 전력 공급 불안정성 증가 등의 문제점 표면화

3) OECD IEA 발간 World Energy Outlook 2017

- ◆ 기후변화 완화를 위해, 즉각적인 전세계 온실가스 배출량 감소 필요⁴⁾
 - 최종에너지 소비의 전기 전환 촉진
 - 증가되는 전력수요의 저탄소 발전화
 - = 원자력 발전량 - 2050년까지 평균 2.5배 정도 증가 필요.

● 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
 - 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

■ 한국의 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

4) IPCC 1.5° C의 지구온난화 특별보고서(2018. 10)

설비개선, 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, 원전에 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 공급망을 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

● 한국의 원전산업동향

■ 중장기 에너지정책

- ◆ 신재생에너지 보급을 확대하고 원전 비중을 점진적 축소하는 정책을 반영한 제8차 전력수급기본계획이 그대로 이행된다면 2019년 12월 기준 설비용량기준 18.6%, 발전량기준 22.9%의 원전비중이 중장기적으로 2030년 원전비중이 설비용량기준 11.7%, 발전량기준 16.6%까지 감소가 예상됨

■ 가동원전 동향

- ◆ 현재 고리 5기, 한빛 6기, 월성 5기, 한울 6기, 새울 2기로 총 24기의 원전이 운영중에 있으나 고리1호기 및 월성1호기의 폐로결정에 이어 이후 운영허가기간이 도래되는 원전의 계속운전은 하지 않는 방향으로 정부의 정책이 추진 중에 있음
- ◆ 향후의 국내 중장기 전력수요전망 및 정부의 온실가스 배출저감 이행계획, 정권에 따른 에너지 정책에 따라 향후 정책의 변동가능성은 있으나 단기적으로는 변동가능성은 클 것으로 보기 어려움

■ 신규원전 건설동향

- ◆ 현재 진행중인 신한울1,2호기 및 신고리3,4호기 이후의 추가 신규원전 건설전망은 어려울 것으로 전망됨
- ◆ 실시계획승인 직전 보류되어 있는 신한울3,4호기는 원전산업계 등 각계에서 건설재계를 요청하고 있으나 단기적으로는 건설재개가 불투명하고, 차기정부의 에너지정책방향에 따라 APR1400노형 또는 SMART, APR1000 등 수출대상 노형의 건설 또는 타 목적으로 전용될 수도 있음



● 한국의 해외 신규원전시장 개발 동향

■ UAE원전산업의 성공적 추진

- ◆ 1400MW 4기 신형경수로 건설사업 턴키방식 계약
- ◆ UAE원전1호기 단계별 제반 시운전시험후 100% 출력 도달 성공
 - 세계의 다수 원전건설의 차질, 지연 상황과 달리 계획된 기간에 계획된 예산으로 높은 품질의 원전을 건설 완성함
- ◆ UAE원전 2,3,4호기도 착공, 건설, 최초전원가압, 압력계통 건전성시험 등이 계획대로 순차적으로 잘 진행되고 있으며 현재

시운전 진행중

- ◆ 원전산업을 계기로 한국과 UAE국가간 협력 범위와 깊이가 대폭 확대됨

■ 체코 신규원전 건설사업 참여 추진

- ◆ 두코바니, 테믈린 부지별 1200MW 이하 1~2기 건설
- ◆ 21년 입찰제안서(RFP) 발급 예상, 2036년 준공목표 추진
- ◆ 공기업의 주관회사가 경쟁입찰방식으로 EPC턴키 또는 아일랜드 분할발주 방식 추진
- ◆ 한수원이 로사툼, CGN, 웨스팅하우스, 아레바 등과 경쟁 중

■ 폴란드 신규원전 신규원전 건설사업 참여 추진

- ◆ 탄산가스 배출량 저감을 위해 원전을 도입하고 석탄발전 의존도를 저감하고자 함
- ◆ 2043년까지 6000~9000MW 규모로 1000MW급이상 PWR 3기씩을 북부해안가 2곳에 총 6기 건설 추진
- ◆ 20년 건설부지 선정 후 2021년 입찰착수 예상, 2026년 최초호기 착공 2033년 시운전 착수 일정으로 추진
- ◆ 정부소유 법인이 경쟁 또는 정부간 협력사업으로 하되 22년 공급사 선정
- ◆ 한수원이 미국 웨스팅하우스사, 중국, 프랑스, 일본 등과 경쟁 예상

■ 사우디아라비아 신규원전 건설사업 참여 추진

- ◆ Saudi Vision 2030에 의거 2030년까지 1400MW급 신규원전 2기 준공을 목표로 계획으로 추진하였으나 미국과 사우디간 원자력협력협정체결 문제 지연
- ◆ 한국, 미국, 러시아, 프랑스, 중국이 경쟁 중

■ 소형로(SMART) 해외 건설사업 추진

- ◆ 피동형 안전개념 적용되고 다목적용 100MW급 소형원전 해외 수출 추진

- ◆ 사우디(KSA)와 한국이 상호 출자하여 공동협력사업으로 최초 추진
- ◆ '12년 최초 표준설계인가 취득후 안전성을 대폭 강화한 후 2차 표준설계인가 심사 진행중

■ 기타 영국, 남아공, 카자흐스탄 등 대상 신규원전 건설사업 참여 추진중

■ 기존원전운영국가 기술공유 및 협력사업 추진

- ◆ 루마니아, 대만, 슬로베니아, 우크라이나 원전의 안전성 강화와 설비노후화 및 계속운전에 따른 대규모 설비교체, 신규설비 설치를 추진함에 따라 한국의 산업체는 공동으로 국내원전의 운영 및 정비 경험기술을 교류하고, 설비개선 시장에 참여하기 위해 적극적으로 추진 중에 있음
- ◆ 또한 미국의 웨스팅하우스가 추진 중인 인도신규원전사업, 러시아 로사토크의 이집트 터키 신규원전사업 등에 국내원전산업체가 공동으로 전략적인 협력사업으로 참여 타진 중에 있음

● 국내외 원전시장 동향에 따른 시사점

■ (세계시장)

- ◆ 세계 경제의 점진적 성장과 생활환경 변화에 따라 증가하는 전력수요를 충족하기 위해서는 신규발전설비의 지속적 증설이 필요함
- ◆ 설비의 증설과정에서는 국가별로 파리기후변화협약의 이행을 고려, 수력, 태양광, 풍력 등 신재생에너지는 물론 원자력에너지의 이용 확대가 예상됨
- ◆ 따라서 전세계적으로 기존 가동원전의 이용효율 향상과 노후원전의 계속운전 노력이 강화될 것으로 예상되고 일부 국가에서는 신규원전의 건설수요도 지속될 것으로 예상됨
- ◆ 그러나 이러한 원자력에너지의 수요증가 경향에도 불구하고 세계원전산업계는 원전안전성에 대한 강화 요구와 국민수용성 확보, 사용후연료관리 정책 수립, 원전성능 및 안전성 향상관련

기술 향상 등 여러 가지 현안이 지속적으로 대두될 것이므로 관련국가 또는 기업간 긴밀한 협력이 필요 할 것임

■ (국내시장)

- ◆ 한편 한국 국내에서는 정부의 에너지전환 정책의 이행에 따라 2023년을 기점으로 원전의 설비 및 발전량이 감소하기 시작하여 2030년에는 원전비중이 설비용량기준으로 11.7%, 발전량기준으로 16.6%까지 지속적으로 감소할 것으로 예상되고 있음
- ◆ 따라서 국내원전 산업계는 현재 안정적으로 구축되어 있는 원전기자재 공급망과 숙련 기술인력의 지속 확보가 점점 어려워 질 것으로 예상됨

● 한국의 해외시장 개발 전략 및 방안

■ 국내외 원전시장 SWOT 분석(한국중심)

<p>S(강점)</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ 원전 적기건설능력 보유 및 입증 ○ 경제성이 입증된 노형 포트폴리오 확보 ○ 풍부한 설계 및 기자재 공급망 보유 ○ 한국원전의 건설성/안전성 국제 입증 ○ 다양한 원자로형 우수 운영정비경험 보유 ○ SMR 투자 등 신규사업개발 노력 지속 	<p>W(약점)</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ 에너지전환정책으로 원전비중 점진감소 ○ 사용후핵연료 정책 미정/후행핵연료 기술 미흡 ○ 상용로 폐로 전체기술 미자립 ○ 경쟁국대비 금융조달 경쟁력 열세 ○ 글로벌 비즈니스 네트워크 인적역량 취약 ○ UAE사업 외 원전 해외비즈니스 경험미흡
<ul style="list-style-type: none"> ○ 저탄소 에너지원 필요성 증대 ○ 에너지수요의 지속적 성장(신흥국) ○ 중소형원전시장 수요 점진적 증가 ○ 원전 운영/정비기술 고도화 필요 증가 ○ 노후 및 폐로원전 점진적 증가 ○ 서방 일부 공급사의 사업환경 악화 <p>O(기회)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ○ 원전안전성 강화 요구 증대 세계적 추세 ○ 신규원전 도입국의 패키지딜 요구 증대 ○ 원전기자재사 물량 감소로 공급망 취약우려 ○ 기술이전 및 장기 협력 가능성이 중요 ○ 우수 원전인력의 이탈 증가 및 신규유입 감소 ○ 러시아, 중국의 국가차원 공격적 수주 추진 <p>T(위협)</p>

【SO전략】 선택과 집중의 역량발휘

- ◆ 해외 신규원전 건설사업 참여 적극 추진
 - 국제기구에서 제공하는 정보에 의하면 해외에서 신규원전을 도입을 추진하는 국가는 다수가 있는 것으로 나타나고 있지만 한국 등 국제공급사가 비교적 용이하게 접근 가능한 국가는

- 제한적이라는 평가가 타당하고 접근 가능한 국가도 사업 참여 요건이 국가별 상황이 쉬울 것으로 보이지 않음
- 사업환경이 열악하고 수주 성공에 상당한 시간이 필요한 어려움이 수반되기는 하나 사업규모가 대규모이므로 성공 시 경제적 효과 등 원자력산업체가 받을 수 있는 혜택이 크므로 전략적으로 잘 선택해서 역량을 집중할 필요가 있음
 - 파리기후변화 협약에 따른 이산화탄소 배출량 저감을 위해 기존의 화력발전의존도를 줄이거나 국가별 에너지정책 차원에서 신규원전을 추진 중인 유럽의 체코, 폴란드, 루마니아, 영국 등의 유럽 국가는 사업추진체계가 비교적 명확하고 투명하므로 경쟁력만 갖춘다면 이들 국가를 적극적으로 공략할 가치가 있는 것으로 나타남
 - 이외 2018년 적극적으로 추진하다가 대내외 환경 등으로 지연되고 있는 사우디아라비아와 신규로 추진 중인 중앙아시아 카자흐스탄 등도 철저한 준비와 인내를 갖고 추진할 가치가 있는 것으로 평가됨
 - 케냐 등 아프리카지역 일부 국가들과 아시아지역의 인도네시아, 말레이시아, 태국 등이 신규원전을 도입한다는 정보가 일부 나타나기도 하나 국가별 경제 및 정치적 환경 등을 고려할 때 단시간에 사업이 구체화되기는 어려울 것으로 전망됨
 - 최근 원전의 경쟁력, 건설기술력 등으로 어려움을 겪고 있는 미국의 신규원전시장에 진출을 검토할 필요가 있다는 일부 의견이 있기는 하나 주별 전력거래시장 상황, 노동시장 환경을 면밀히 검토하고 웨스팅하우스사 등기존의 미국기업들과 긴밀한 협력이 필요할 것임

◆ 중소형 원전 해외수출 적극 추진

- 최근 전 세계적으로 중소형원자로에 대한 기술개발이 활발히 진행되고 있고 중동사막국가, 섬이 많은 국가 등의 외곽지역에 대한 분산형 전원 확대, 지역난방, 해수담수 등의 다목적으로

- 중소형원자로에 대한 수요가 증가하고 있는 추세임
- 상용로 대비 1기당 사업비용이 적어 사업추진주체의 의사결정이 비교적 용이하고 특히 안정성이 대폭 향상되어 사업을 위한 사회적 수용성 확보에도 유리한 이점이 있고 설계 및 시공기법을 개선할 경우 경제성도 향상시킬 수 있는 것으로 평가됨
 - 한국의 SMART원전은 현재 2012년 최초 인가된 버전에서 개선된 설계에 대한 인허가를 새로 받고 있고 경쟁노형인 미국 Nuscale사가 규제기관으로부터 설계인가 취득 작업이 마무리단계에 있는 것으로 알려짐에 따라 우리나라가 해외 다른 노형에 비해 계속 앞서 있다고 평가하기는 어려움
 - 한국의 SMART원전이 미국 Nuscale사 등과의 경쟁우위를 점하기 위해서는 SMART원전이 건설비용, 건설기법, 발전단가 등에서 경쟁력이 향상될 수 있도록 지속적인 투자와 연구개발이 추진되어야 할 것임
 - 한국형 SMART 노형의 도입에 관심을 가지고 있는 것으로 알려진 사우디아라비아와 필리핀 등을 대상으로 다른 수출경쟁국이 우위 경쟁력을 확보하기 이전에 국내 관련기관이 한발 빠르게 사업개발에 대한 의사결정을 한후 수출대상국의 니즈를 파악하고 해외 등과 전략적 파트너십을 적극적으로 구축하며 신속하게 사업구도를 만들어 추진하면 미래의 새로운 먹거리 사업으로 발전할 수 있을 것으로 전망됨

【WO전략】 수출상품 다양화 및 신규사업기회 포착

- ◆ 원전 운영 및 정비 기술활용 사업 개발
 - 해외원전시장에서 대규모 플랜트사업의 수주에 성공하면 UAE원전사업에서 나타난 바와 같이 경제적 측면과 연계사업측면 등에서 많은 긍정적 효과가 나타날 수 있으나 수주가능성이 있는 국가 또는 사업의 수가 제한적이고 해외선진국과의 경쟁에서 우위를 점하기가 결코 쉽다고 볼 수 없다는 점과 UAE원전수출이후 지금까지의 상황을 볼 때 장기간

수행 사업이 부족하여 관련기업이 배고픔에 어려움을 겪을 가능성이 있음

- 더욱이 한국은 현재 정부의 에너지전환정책으로 건설 중인 원전의외 신규원전을 추진할 계획이 없어 그동안 형성된 많은 기자재 공급사가 일감 부족으로 현재 어려움을 겪고 있고 우리나라의 장점인 우수한 기자재공급망의 유지가 우려되는 상황임
- 한국원전의 사례를 보면 원전1기당 1년에 수백 ~ 수천억원의 운영정비 비용이 소요되는 것과 2020년 7월 현재 전 세계 441기의 원전이 운영 중인 것을 고려하면 해외 원전운영 및 정비시장의 규모는 상당한 규모가 될 것이라는 것을 알 수 있음
- 특히 한국은 우수한 원전기자재망을 갖고 있을 뿐만 아니라 해외원전국과 달리 미국, 캐나다, 프랑스에서 기술적 근거를 갖고 있는 다양한 노형에 대한 오랜 우수한 운영정비 경험을 효과적으로 활용하여 시장을 개발하면 어려움을 겪고 있는 기자재망 유지에 도움이 될 수 있고 새로운 틈새 먹거리로 자리 매김할 수 있을 것으로 전망됨
- 대규모 사업인 플랜트 사업과 달리 아이템 별로는 비교적 소규모 사업이고 국가별 시장별 기술별 진입장벽이 있다는 점을 고려하면서 효과적인 전략만 잘 수립 추진하면 기대이상의 결실도 기대 할 수 있을 것임

◆ 원전원전 폐로사업 개발 추진

- 우리나라는 현재 에너지전환정책의 추진으로 신규시장이 감소됨에 따라 새로운 먹거리 사업 확보를 위해 우리나라 기준으로 호기당 약 8,129억원이 소요될 것으로 추정하고 있는 폐로사업의 기술확보에 적극적인 투자를 기울이고 있음
- 전 세계적으로 현재 188기가 영구정지 되어있는데 이중 21기만 해체가 완료 된 상태이고 현재 운영중인 441기 원전의 운영기간이 대부분 많이 경과하고 있다는 점을 고려하면 영구정지후 해당시설과 부지를 철거하거나 방사성오염을 제거하는 폐로사업의 규모는 점진적으로 증가 할 것임을 쉽게 알 수 있음

- 그러나 한국은 현재 원전해체에 필요한 전체 기술중 일부부분은 확보하지 못한 상태이므로 정부와 산업체가 적극 협력하여 조기에 기술을 확보하고 최초호기인 고리1호기를 통해 경험을 확보함과 동시에 세계시장의 개발을 위해 처음부터 준비할 필요가 있음

【ST전략】 위협요인의 전략적 극복 및 미래대비 철저

◆ 해외 유력 관련사와 전략적 제휴 강화

- 대규모 국가적 사업인 해외의 신규원전사업을 수주하기 위해서는 경쟁국 경쟁사 대비 경제적 건설비용, 적기건설 능력 및 경험, 인적기술역량, 금융조달역량, 다분야 경제협력의지 등 종합적인 역량이 요구되고 있음
- 또한 발주국의 비즈를 충족시킬 수 있는 핵비확산 정책 이행 능력, 기술전수 기반 및 역량, 원전 전주기 기술협력 환경 등이 필요할 뿐만 아니라 때로는 국가간 정치적 이해관계 중재능력까지 필요한 경우도 있음
- 이러한 사업수주에 필요한 요소들은 특정국가나 회사가 모두 보유하기는 현실적으로 쉽지 않으므로 세계 원전공급사들은 그동안 수주경쟁력을 제고하고 끊임없이 변화하는 세계원전시장에서 살아남기 위해 다양한 합종연횡을 하며 성장해왔음
- 우리나라는 그동안 축적된 기술과 경험, 기자재 공급망, 경제적인 원전의 적기 건설역량 등의 분야에서는 해외경쟁사와 당당히 경쟁할 수 있는 역량은 충분한 것으로 평가되나 이외 다른 분야에서는 경쟁력이 있다고 평가하기는 쉽지 않은 편임
- 따라서 이러한 부족역량을 보완하고 장기적이고 궁극적으로 수주사업을 증대시키기 위해서는 단기적으로 손실이 초래되는 경우가 있더라도 장기적인 관점에서 해외 우수 경쟁사가 가지는 장점과 국가별 사업별 특성을 잘 고려하여 전략적 협력 체계를 구축하여 대응하면 사업수주 가능성이 한층 제고될 것임

◆ 원전 안전성 강화 및 미래기술 확보

- 원전사업을 수행함에 있어 가장 큰 장애중 하나는 사회적수용성 확보이고 이를 위한 노력중 하나는 원전의 안정성을 제고하는 것임
- 원전사업은 그동안 여러 가지 상황을 거치면서 끊임없이 새로운 기술을 개발하고 보완하며 안정성을 강화해 왔음
- 현재의 원전이 충분히 안전하다고 평가되어도 일반 대중의 안전성에 대한 요구는 앞으로도 증대되고 다양화될 것 이므로 미래의 환경변화에 대응하는 노력이 반드시 필요할 것임
- 우리나라는 1970년대 후반 외국에 의존해서 원전을 시작한후 그동안 지속적인 투자와 연구개발로 원전안전성을 향상하고 좀더 경쟁력 있고 안전한 원전을 보유하고 발전시켜 왔음
- 앞으로도 우리나라는 물론 미래의 원전 수출대상국에서는 안전한 원전을 확보하고 더욱 안전하게 운영하기 위해 새로운 기술, 새로운 노형의 제시와 검증을 요구할 것으로 예상되므로 이와 관련된 기술을 개발하고 확보하기 위한 투자와 노력을 지속적으로 기울여야 할 것임

【WT전략】 수출경쟁력 강화를 위한 취약점 보완

◆ 사업 금융조달 역량 확보 및 강화

- 전세계적으로 다수의 신규원전 사업이 추진 중에 있지만 자국기술로 건설을 추진 중인 국가 이외 해외기술에 의존하여 신규원전의 도입을 추진중인 국가는 지금까지 추세와는 다르게 대부분 공급사의 사업 전체를 위한 사업금융 투자 또는 대여를 요구하거나 심지어 공급사가 금융을 조달하여 신규원전을 건설하고 운영 매출로 금융을 회수하고 수익을 창출하는 형태의 사업을 요구하는 경우도 많음
- 따라서 정부자금을 해외원전사업에 이용하는 러시아나 중국에 비해 한국과 미국은 OECD 가이드라인을 따라야하고 필요시 민간금융을 이용해야 하는 등 금융조달 여건이 불리할 수밖에 없으므로 수출입은행 등 공적인 금융기구의 몸집을 키워

지원하거나 필요시 조건을 개선 또는 완화하는 장치를 마련하는 등의 지원방안의 마련이 효과적 일 것임

- 아울러 금융환경이 비교적 좋은 미국, 영국 등의 전략적 협력을 통해 금융조달 역량을 강화할 필요가 있음

◆ 한국형 원전기술의 국제성 강화

- 우리나라의 원전산업은 단기간에 급속한 발전을 이룩하였으나 대부분 국내사업 위주였고 해외 해외진출사업은 UAE수출 정도임
- 원전 및 관련기술의 수출이 가능하려면 수출대상 국가에서 요구하는 규제요건과 기술기준을 충족시킬 수 있는 역량도 갖추어야 함
- 한국은 그동안 다양한 국제 요건을 충족시키기 위해 미국과 유럽의 설계인증 취득 등의 노력을 추진해왔으나 지속가능한 사업 환경을 구축하기 위해서는 다양한 노형에 대한 인증 노력을 지속할 필요가 있음
- 또한 수많은 국내 기자재 공급사들도 해외 수출대상국 요구 기술기준을 충족할 수 있도록 사전준비와 대응 노력이 필요할 것임

◆ 민관 수출협력체제 강화

- 대규모 플랜트 사업인 해외 신규원전사업은 Buyer's 시장으로 구매국가 또는 사업주체가 이 사업을 매개로 산업, 과학, 경제, 의료 등 다양한 팩키의 제공을 요구하는 경우가 많은 추세임
- 따라서 발주주체의 다양한 요구를 수주기업이 단독으로 요구사항을 충족시키기에는 역량이 부족할 수밖에 없으므로 필요시 수출 대상국과 관련되거나 필요한 모든 분야의 역량을 결집하고 활용할 수 있도록 정부와 관련기업이 모두 참여하여 논의하고 협력할 수 있는 체계의 구축과 운영이 수주경쟁력 제고에 효과적 일 것으로 평가됨

● (종합시사점)

- 전 세계적인 저탄소에너지원에 대한 수요 증가에 따라 일부국가에서 신규원전건설과 노후원전의 대규모 유지정비 등 해외원전시장의 확대가 예상됨
- 풍부한 원전산업 인프라와 함께 국내외 원전운영 및 건설경험, 적기건설 능력 등 강점을 잘 이용하고 금융조달 능력 등 약점을 보완하여 통합역량을 강화하고 유력공급사와의 전략적 제휴를 통하여 선택과 집중의 전략을 발휘 한다면 긍정적인 결실도 가능할 것으로 평가됨
- 그리하면 기본적으로는 축적된 기술과 원전생태계를 유지를 통한 가동중인 원전의 안전성이 지속 담보되고 더불어 원전산업계의 경제 활력 제고와 국가적 현안인 일자리 창출에 기여할 것임

■ 추진방향

- ◆ 한국원전산업계가 이러한 어려운 환경을 극복하고 원자력산업생태계를 잘 유지하여 필연적으로는 국내가동원전의 안전성을 지속적으로 담보하고 부수적으로는 한국 원자력산업계의 경제활동 활력제고와 일자리 창출에 기여하기 위해서는 향후에도 지속적으로 성장할 것으로 전망되는 해외원전시장을 적극적으로 개발하고 참여하여야 할 것임
- ◆ 이를 위해 전 세계 시장 현황과 경쟁사들의 동향, 우리나라의 강약점 등을 체계적으로 분석하고 세밀한 세부전략을 수립한 후 국내원전생태계 유지 및 숙련인력의 양성, 지속적인 투자와 기술개발, 정부의 적극적인 지원 등으로 경쟁력 있는 수출환경과 체계를 구축하고 정부와 관련기관, 민간산업체 등 모두가 일체가 되어 해외시장에 진출하여야 할 것임

2.5.2 차세대 소형원전(Small Modular Reactor(SMR))의 개발과 활용

● 소형원전의 활용성

- 소규모 전력시장 (오지 전원/열 공급, 낙도/극지/군사기지 분산 전원, 해양플랜트 전력/열 공급) 개척
 - ◆ 해양플랜트 전력 및 공정열 공급을 위한 소형 분산 에너지원으로 역할
 - ◆ 기존 오지 전력생산용으로 활용되고 있는 화석연료 대체로 온실가스 저감에 기여

- 소형원자로의 잠재 시장 규모 평가

- ◆ 캐나다는 전 세계 SMR 잠재 시장의 규모를 2030~2040년 사이에 연 1,500억 캐나다달러로 평가

- 소형원전의 장점:

- ◆ 적은 투자비, 작은 전력망도 수용
 - 소형원자로는 규모가 작은 특성 때문에, 계통의 단순화를 통해, 대부분 공장-제작이므로 건설비용 최소화 가능.
- ◆ 발전 외의 여러 분야에의 활용 가능

※ 시사점: 40년 이상 확보한 대형로, 연구로, 중소형모듈원전 SMART 기술을 바탕으로 소형원자로 기술 확립 및 세계 시장 진출용 수출형 소형원자로 국내 건설 및 운용 필요 및 원자력 기술의 우위를 유지하려면, 차세대 소형원전 기술개발에의 지속적 투자로 차세대 소형원전 상용화에의 선도 역할 수행 필요

2.5.2.1 초소형원자로 개발 및 응용

● 초소형원자로 소개

- 정의

- ◆ 25MWe이하 플러그애플레이가 가능한 아주 작은 원자로임.
 - 출처에 따라 초소형원자로의 최대출력이 다르나, 대부분 전기출력 10MWe 이하로 설계됨.

	1000 MW	~100 MW	~10 MW	~1 MW	~1 kW	
화력 및 신재생 에너지 활용	화력발전	화력발전	가스터빈	가스터빈 연료전지	연료전지 태양력/풍력	이차전지
원자력 에너지 활용 영역	대형 원자로	중형 원자로	소형 모듈 원자로	초소형원자로	우주용 원자로	동위원소

그림 19 출력에 따른 원자로 분류

- ◆ 단순히 기존 소형원자로보다 출력이 작은 원자로가 아님.

■ 설계특성

◆ 모듈화

- 기기 및 구성품은 공장에서 제작/조립 완료 후 현장에서 직접 설치
- 원자로의 신속한 설치 및 제거가 가능함.
- 공사기간 단축 및 소규모 출력으로 자본 비용의 획기적인 감소 가능

◆ 이동성

- 원자로의 초소형화로 트럭, 철도, 배 항공기 등으로 운송 가능

◆ 자가 출력 제어

- 단순하고 혁신적인 설계를 통해 별도의 운전원 조치 없이 출력 제어가 가능함.
- 전문 운전원 수 최소화 및 원격 운전 가능
- 노심용융사고의 원천적인 배제가 가능한 피동안전 적용 및 안전성 극대화



그림 20 초소형원자로 설계 특성(미국 에너지부)

■ 활용분야

- ◆ 연료 운송이 비용이 높은 비전력망지역 전력 공급원
 - 기존 디젤발전기 대체로 온실가스 저감 및 전력생산을 과 산업적 응용을 위한 안정적인 열원 제공
 - 마이크로 그리드 내 신재생에너지의 간헐성을 흡수하는 대용량 에너지원
 - 극지/오지 광산 및 마을을 위한 에너지 생산 시스템
- ◆ 특수목적에 활용가능한 안정적인 초소형 전력 및 열원 공급
 - 전방/오지 군사기지를 위한 이동형 에너지 생산 시스템
 - 자연재해지역 복구를 위한 긴급 에너지 생산 시스템
 - 데이터센터, 우주기지 등 안정적 장수명 출력이 필요한 독립시스템



극지 광산(Lead Cold社)



군사기지(웨스팅하우스社)



오지 지역 사회(Oklo社)

그림 21 초소형원자로 활용 분야

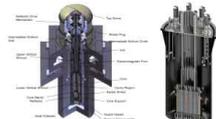
● 초소형원자로 개발 현황

- '70년대까지 과거 미국과 (구)소련 등 군사강대국은 원격기지 에너지원을 초소형원자로를 개발하여 활용한 바 있음.
- 최근 개발되고 있는 초소형원자로는 극지 광산과 군사기지를 위한 에너지 공급원으로 개발되고 있음.
- 미국 국방부의 Pele 프로젝트(군사기지용 초소형원자로 개발)
 - ◆ 군사기지용 디젤발전기를 대체하는 대체에너지원⁵⁾
 - 충전용 디젤의 빈번한 수송이 필요 없는 에너지원
 - 단기적으로는 방사성동위원소발전시스템, 장기적으로는 초소형 고온가스로와 열전도관 원자로가 대체 가능한 것으로 평가됨.
 - ◆ '27년 미국 내 군사기지에 건설을 목표로 개발함.
 - '20년 3월에 선정된 후보노형: 고온가스로와 열전도관원자로
 - 핵연료로 HALEU 피복입자핵연료 사용을 요구함. (안전성)
 - 선정산업체: BWXT社, 웨스팅하우스社, X-energy社
- 캐나다원자력연구소(CNL)의 초소형원자로 개발
 - ◆ '26년 실증을 목표로 캐나다 북부 비전력망 지역 광산과 거주지역 에너지원으로 개발.
 - ◆ 캐나다원자력연구소는 19개의 산업체 또는 연구기관으로부터 참여의향서를 접수받았음.
 - ◆ 캐나다원자력규제기관(CNSC)은 7개의 원자로 노형에 대한 사전검토를 진행 중임.
- 별도의 공학적안전설비 없이 중대사고를 배제하고 자율운전 고유 설계 특성 확보를 위해 비경수형 원자로로 개발됨.
 - ◆ 제4세대원자로를 기반으로 다양한 노형이 개발됨.
 - 일본 Toshiba社는 '00년대에 소듐냉각고속로 4S를 설계하여 미국인허가 절차를 진행하고 있음.

5) 미국 국방부, Final Report of the Defense Science Board Ad. Hoc. Committee on Energy Systems for Forward/Remote Operating Bases, August 2016.

- 스웨덴 LeadCold社는 3~10MWe 납냉각고속로 SEALER를 개발 중임.
- 미국 Gen4社는 25MWe Pb-Bi 냉각 고속로 Gen4 Module을 개발하고 있음.
- 미국 USNC社, 캐나다 Starcore社, 영국 Urenco社는 초소형 고온가스로를 개발하고 있음.
- 미국 HolosGen社는 BOP일체형인 초소형가스로 HOLOS를 설계 중이며, 모듈화 방식으로 3~13MWe의 다양한 설계 옵션에 대하여 개발을 진행함.
- ◆ 우주용원자로 기술을 기반으로 열전도관원자로를 개발함.
 - 미국 Oklo社는 ‘20년 3월17일, NRC에 금속핵연료(UZr)를 사용하는 1.5MWe 열전도관 고속로 Aurora의 건설 및 운영을 위한 통합인허가신청서를 제출하였고, ‘20년 6월 16일, NRC는 신청서를 접수하고 검토를 시작함.
 - 미국 웨스팅하우스社는 0.2~5MWe 열전도관원자로 eVINCI를 개발하였고, NRC는 사전안전성평가를 진행하고 있음.
 - 미국의 국립연구소와 대학들은 열전도관원자로 설계 및 실증 지원 연구를 수행 중임. ‘20년대 초반에 공학실증이 완료될 예정임.
 - 미국 NuScale社도 MWe급 열전도관원자로를 개발 중임.

표 4 초소형원자로 개발 현황

원자로형	원자로 이름/전기출력/개발사	
가스로	U-battery / 4MWe / Urenco(영) Starcore / 10~20MWe / Starcore(캐) Holos / 3~13MWe / Holosgen(미) MMR / 5MWe / USNC(미) Kilopower / 1~10 kWe / NASA, LANL(미)	 USNC社의 MMR
액체 금속로	Gen4 Module / 25MWe / Gen4(미) Sealer / 3~10MWe / LeadCold(스) 4S Nuclear Battery / 10MWe / Toshiba(일) ANGSTREM / 6MWe / OKB Gridropress(러)	 4S & Sealer
열전도관 원자로	eVINCI / 0.2~5MWe / WEC(미) Aurora / 1.5MWe / Oklo(미) NuScale Micro / 1~10MWe / NuScale(미)	 eVINCI

● 초소형원자로 전망

- 초소형원자로는 비전력망지역에서 온실가스 감축을 위해 기존 디젤발전기 및 노후 석탄화력을 대체할 수 있을 것으로 기대됨.
- '27년경에 건설될 것으로 전망되는 초소형원자로는 우선적으로 군사기지와 극지 광산용으로 활용될 것으로 전망됨.
- 이를 통한 초소형원자로의 안전성 및 경제성 실증 후, 활용 분야가 오지 광산과 지역사회를 위한 상업용 독립 전원으로 확대될 것으로 전망됨.
- 전력망 지역 내 연결된 마이크로그리드에서는 기존 대형 경수로가 신재생에너지의 간헐성을 흡수하면서 그리드 안정성을 유지하는 역할을 장기간 수행할 것으로 전망됨.

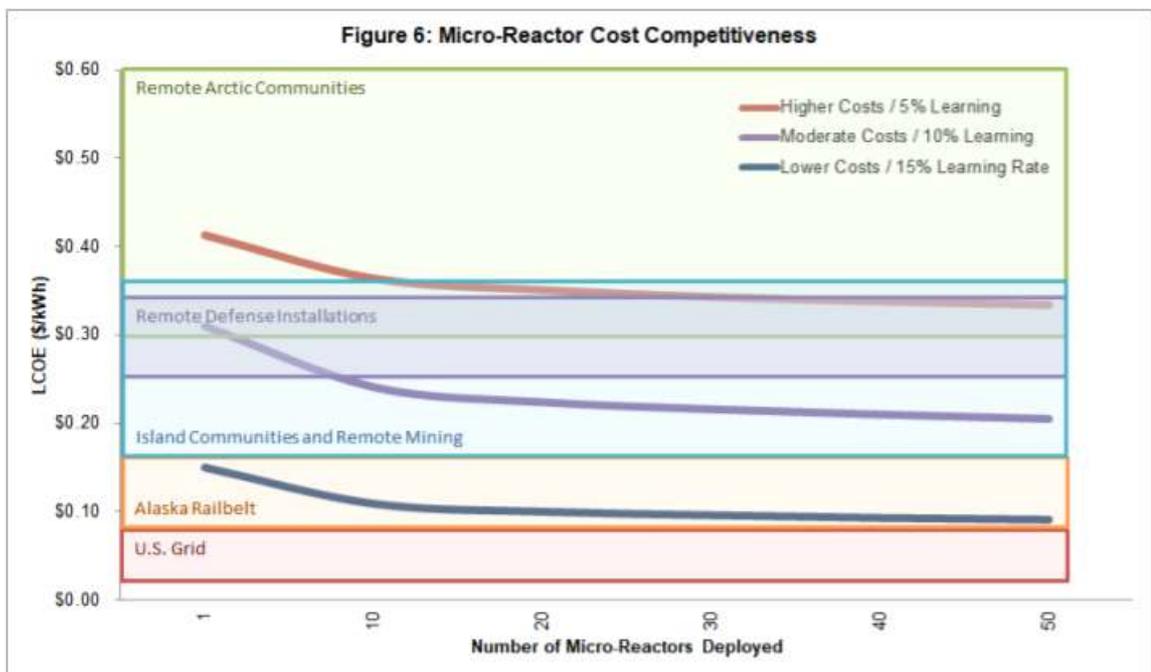


그림 22 활용분야에 따른 초소형원자로 단가 경쟁력 평가
(NEI, 2019)⁶⁾

6) Nuclear Energy Institute, Cost Competitiveness of Micro Reactors for Remote Markets, 2019.

- 현재 기반 기술이 활발하게 개발 중인 열전도관원자로의 경우 NASA와 INL이 진행 중인 ‘27년에 예정된 달기지 전력 생산을 위한 열전도관원자로 실증과의 시너지로 관련 기술개발이 더욱 가속화될 것임.
- 이동성이 중요하지 않은 비전력망지역을 위한 초소형원자로의 경우 수소생산, 공정열 공급 등 다양한 에너지원 생산이 가능한 가스로 노형도 고유 피동안전성과 높은 작동온도 때문에 많이 건설될 것으로 기대됨.
- 캐나다 SMR로드맵 운영위원회는 전 세계 소형모듈원자로 잠재시장 규모를 ‘30~40년 사이에 연 1500억 캐나다인 달러로 평가함.⁷⁾
 - ◆ 이 시장 규모에는 전력생산, 원격지 광산, 도서국가 및 지역, 비전력망 지역 수요 등의 초소형원자로 시장이 포함됨.
 - MWe급 초소형원자로가 필요한 오지 지역 사회 79개
 - 현재 운영 중이거나 개발 중인 오지 광산 24개

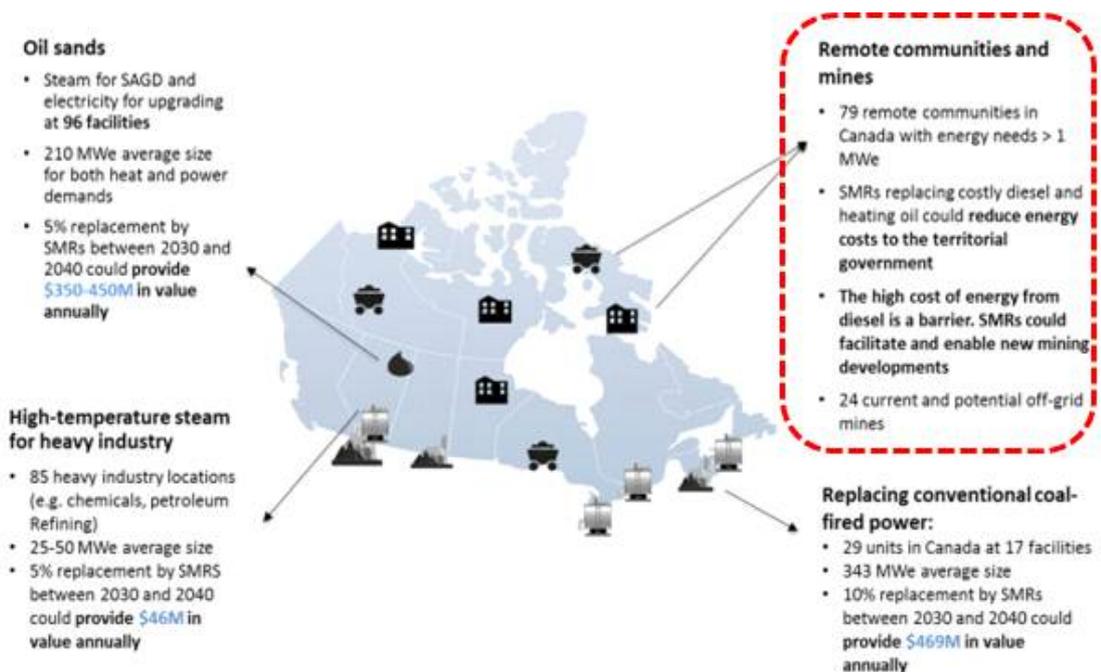


그림 23 캐나다 SMR Roadmap

7) Canadian Small Modular Reactor Roadmap Steering Committee, A Call to Action: A Canadian Roadmap for Small Modular Reactors, Ottawa, Ontario, Canada, November 2018.

- 영국에너지기후변화부(DECC)는 아래의 표와 같이 초소형 원자로의 잠재적인 시장규모를 30GW로 평가하고, 30~35년 시장규모는 5MW 초소형원자로 570기가 예상됨.⁸⁾

표 5 초소형원자로 용처별 필요 규모 및 시장 규모

용처	필요 규모 (MW)	필요 이유	시장 규모 (GW)	30~35년 예상기수 (5MWe)
대형원전 예비전원	10	자율성, 전원교체 가능성	2.36	60
데이터 센터	10	경제성, 자율성, 전원교체 가능성	2.5	50
군사기지	20	자율성, 안정된 연료공급, 전원교체 가능성	1.2	60
광산지역	high	원격지, 자율성, 안정된 연료 공급	1.2	25
	low	경제성, 원격지, 안정된 연료 공급	1.5	30
고립된 도서	10~50	경제성, 원격지, 안정된 연료공급	2.5	50
철강산업		경제성, 안정된 연료공급, 열/전원 공급	8.5	0
대규모 상업시설	5~15	경제성, 열/전원 공급	0.2	0
원유/가스 터미널	10~100	경제성, 자율성	-	0
대형 화학 단지	10~100	경제성, 열/전원 공급	3.0	0
해수 담수화	10~50	경제성	2.5	25
유동성 기저 전원	10~50	경제성, 안정된 연료공급, 유연성	5.0	100
합계			30.46	570

● 초소형원자로 기술 개발 및 정책

■ 기술 개발

- ◆ 제4세대 원전 기반 초소형 가스로나 액체금속로의 경우, 대부분의 핵심기술이 개발되어 개념설계 착수가 가능한 수준으로 평가됨.
- ◆ 열전도관 원자로의 경우, 단순한 설계 특성으로 개발비용과 시간이 크게 절감되기 때문에 기존 비경수로와 같은

8) NUVA, Market and Technical Assessment of Micro Nuclear Reactors, 80755/REP/001/C, A Report produced for DECC, March 2016.

장기간의 연구개발이 필요하지 않음.

- ◆ 초소형원자로는 다음과 같은 목표 달성이 요구되는 기술 확보가 필요함.
 - 안전성: 사고 시 외부 개입 없이 원자로 잔열을 충분히 제거할 수 있는 피동안전성이 확보되어야 되고, 궁극적으로 Zero EPZ 개념을 적용할 수 있어야 함.
 - 경제성: 독립된 분산전원에서 기존의 디젤 발전에 비해 경쟁력을 가지도록 자본비용 절감을 위한 건설/해체 공기 단축 및 운전원 최소화를 위한 무인 자율/원격 운전이 가능해야함.
 - 장수명: 극한 환경에서 운용 시 유지 보수 없이 장기간 운전이 가능하도록 요구되며, 수년 이상의 재장전 주기는 필수적임.
 - 이동성: 다양한 환경 및 운영 조건에서의 설치를 위하여 크기나 계통 구성, 내륙 이동성 제고, 초소형원자로의 모듈화/소형화/단순화 기술 확보 필요

◆ 주요 연구개발 내용

- 초소형원자로 시스템 개발: 열전도관 포함
- 자율/원격운전을 위한 진단 감시 기술 개발
- 중대사고가 배제 핵연료 및 노심 구조물 제조 기술 개발
- 기술 검증을 위한 MW급 성능시험
- 선진동력변환계통 개발
- 다목적 열원 응용 기술 개발: 수소생산, 열저장, 부하추종

◆ 연구개발 추진 전략

- 1단계: 초소형원자로 개념/기본 설계 및 사전안전성 분석보고서 작성 (TRL 5)
- 2단계: 인허가 추진을 위한 상세설계를 수행하고 실제 크기에 가까운 시험장치에서 성능 실증 및 핵연료 조사시험을 별도로 수행, 예비안전성분석보고서 발행 및 FOAK 건설 추진 (TRL 8)

■ 인허가 정책

- ◆ 현재 경수로 위주의 인허가 정책 및 기준은 초소형원자로 적용에 부적합하며, 각 국가별로 초소형원자로 인허가기간에

대한 불확실성이 매우 큼.

- ◆ 원자력 선진국인 미국, 캐나다가 현재 비경수로 기반 선진원자로 인허가 신청 및 사전 안전성평가를 추진하며 인허가 단계에 진입하게 될 것으로 전망됨.
- ◆ 초소형원자로를 포함한 선진원자로의 효과적이고 효율적인 인허가를 위해 규제 체제의 개선, 조기 현안 도출과 해결 방안을 모색해야 함. 특히 비경수로의 기술특이성 반영이 필수적임.
- ◆ 미국 NRC와 캐나다 CNSC의 초소형원자로 첫 번째 인허가가 미래 초소형원자로 시장 활성화에서 매우 중요함.
- ◆ 초소형원자로의 인허가 및 검증 과정은 안전성 및 경제성에 대한 국민수용성 확보를 위해 투명하게 이루어져 함.

● 요약 및 정책 건의

- 초소형원자로는 플러그앤플레이가 가능한 10MWe급 이하의 작은 출력을 가지는 원자로임.
 - ◆ 소형모듈원자로(SMR)에 비해 모듈화, 이동성, 자가출력 제어 등이 향상된 설계 특성을 가지고 있음.
- 초소형원자로는 연료운송비용이 높은 비전력망지역 및 특수목적 활용을 위해 기존 디젤발전기를 대체하는 에너지원으로 활용될 수 있음.
- 초소형원자로는 현재 미국과 캐나다에서 '20년대 중반 내에 자국내 1호기 건설을 목표로 다양한 서구권 원자력 산업체들이 개발하고 있음. 현재 개발중인 초소형원자로 노형은 제4세대 원자로 기반 고온가스로 및 액체금속로와 우주용 원자로 기반 열전도관 원자로로 분류할 수 있음.
- 초소형원자로는 우선적으로 극지 광산과 군사기지에 활용될 것임. 초소형원자로의 안전성과 경제성 검증 이후 비전력망 지역의 노후 디젤발전과 석탄화력을 대체하면서 온실가스 감축에 기여할 것으로 기대됨.

- 영국 에너지기후환경부는 초소형원자로의 글로벌 시장규모를 30GW로 평가하였으며, '30~'35년에 총 570기의 5MWe 초소형원자로가 건설될 것으로 전망함.
- 제4세대 원자로 기반 노형의 경우 대부분의 핵심 기술이 개발되었고, 열전도관 원자로의 경우 단순한 설계 특성으로 개발비용과 시간이 크게 절감되기 때문에 기존 비경수형 원자로와 같이 장기간의 연구개발이 요구되지 않음.
- 초소형원자로는 Zero EPZ가 가능한 안전성, 자율운전 및 플러그 앤 플레이로 인한 경제성, 장수명, 이동성 등을 갖추고 있어야 하며, 이를 위한 시스템, 측정 및 제어, 선진 동력 변환 계통, 다목적 열원 응용 관련 기술들을 개발해야 함.
- 현재 경수로 위주의 인허가 정책 및 기준은 초소형원자로 인허가에 부적합하며, 원자로 개발과정에서 설계 특성이 반영된 규제체계 개선 및 조기 현안/해결방안 도출이 필요함.
- 현재 미국과 캐나다에서 진행 중인 초소형원자로 첫 번째 인허가가 초소형원자로 시장 활성화에 매우 중요하며, 인허가 및 검증 과정은 초소형원자로 안전성 및 경제성에 대한 국민수용성 확보를 위해 투명하게 진행되어야 함.

2.5.2.2 해양 원자력시스템 개발 및 미래 활용방안

● 해양 원자력시스템의 필요

- IMO의 온실가스배출 규제 단기 조치가 마련됨에 따라, 친환경 연료를 사용하는 선박에 대한 수요가 급증할 것으로 예상됨. 현재 LNG 기반의 연료전환이 추진 중이나, 2050년 이후 목표치 달성을 위해서는 추가적인 저감 기술이 요구되는 상황임. 이에 원자력추진 선박이 미래 해운산업에 활용될 가능성이 높음. 특히 높은 운항 속도를 요구하는 고속 컨테이너선, 대형 유조선, 벌크선 등의 선박은 원자력추진 선박이 경제성을 유지할 수 있을 것으로 전망됨. 심해저 자원 개발 및 탐사를 위한 해양플랜트, FPSO, 무인 수중 드론 등도 원자력의 해양 응용이 가능한 분야임. 본 연구에서는 해양 원자력시스템 현황과 전망, SWOT 분석을 통한 미래 전략을 제시하고자 함.

● 현황

- 현재 원자력추진은 잠수함 (약 150척), 항공모함 (12척), 쇄빙선 (5척), 원자력 상선 (1척) 등 160척 이상의 선박에 적용 중이며, 200기 이상의 소형 해양원자로가 운영 중임⁹⁾.
- 과거 운영되었던 원자력추진 상선은 NS Savannah (미국, 1962-1972), Otto Hahn (독일, 1968-1979), Mutsu (일본, 1970-1992) 등이 있으며, 현재까지 운영 중인 원자력추진 상선은 러시아가 운영 중인 Sevmorput (1988-)이 유일함. 러시아는 2020년 5월 부유식 원자로인 Akademik Lomonosov의 운영을 시작함.
- 현재 가동 중인 비군사용 해양원자력 시스템은 아래와 같음¹⁰⁾. 모든 원자로는 35MW~175MW 출력을 갖는 가압경수형임.

9) World nuclear association, Nuclear-Powered Ships (updated November 2020)

10) Piro et al., Current Status of Reactors Deployment and Small Modular Reactors Development in the World, Journal of Nuclear Engineering and Radiation Science, 2020,

Name	Reactor	Developer	Power	Type	Operation
Akademik Lomonosov	KLT-40S ×2	OKBM	150 MWt ×2	PWR	May. 2020
Sevmorput	KLT-40 ×1	OKBM	135 MWt ×1	PWR	Dec. 1988
Taymyr	KLT-40M ×1	OKBM	171 MWt × 1	PWR	Jun. 1989
Vaygach	KLT-40M ×1	OKBM	171 MWt × 1	PWR	Aug. 1990
Yamal	OK-900A ×2	OKBM	171 MWt × 2	PWR	Oct. 1992
50 Let Pobedy	OK-900A ×2	OKBM	171 MWt × 2	PWR	Mar. 2007
Arktika	RITM-200M ×2	OKBM	175 MWt × 2	PWR	Oct. 2020

- KEPCO-E&C는 2019년부터 부유식 소형원전 Bandi-60s 개발에 착수함. 이는 200 MWt, 60 MWe 출력의 가압경수로이며, 대형 배관 없이 노즐로 연결하는 블록형 설계 개념을 도입하여 대형냉각재상실사고를 배제함. 부유체 내에 2개의 원자로를 설치하는 개념 개발 중



<Bandi-60s 개념도, 출처: KEPCO-E&C¹¹⁾>

- 국외 해양원전 개발 현황은 아래와 같음. 중국은 경수로 기반 부유식 원전을 개발 중임. 러시아는 쇠빙선 및 다목적 활용을 위한 부유식 개발 중이며, 가압경수로와 납-비스무스 고속로를 개발 중임. 영국 기반 다국적 기업 Corepower사는 해양용 용융염 원자로를 개발 중이며¹²⁾, HolosGen사는 가스냉각로 기반 해양원전을 개발 중임¹³⁾.

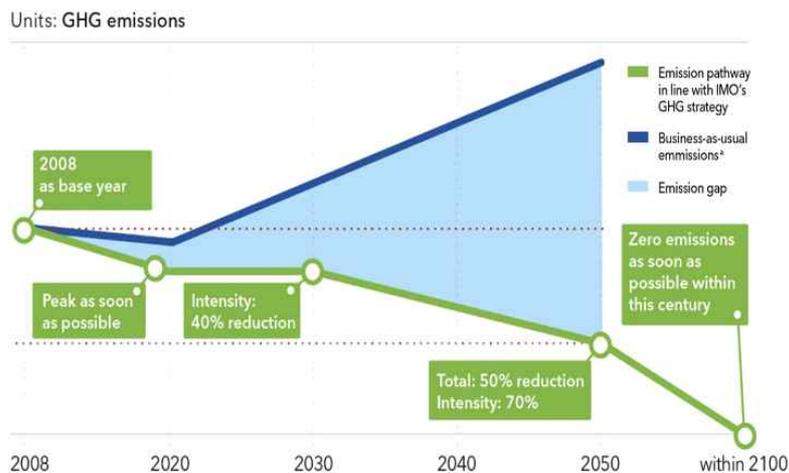
11) I.Kim et al., Development of Floating Nuclear Power Plant BANDI-60s, Korean Society for Fluid Machinery Summer Meeting, 2020.

12) <https://corepower.energy/>

13) <http://www.holosgen.com/applications/>

Name	Developer	Power	Type
ACPR50S	CGN	50 MWe	PWR/floating reactor
ACP100s	CNNC	125 MWe	PWR/floating reactor
m-MSR	Corepower	23-81 MWe	Molten chloride fast reactor/propulsion
HolosTitan	HolosGen	80 MWe	Gas cooled reactor/propulsion
KLT-40S	OKBM	35 MWe	PWR/floating reactor (in operation)
RITM-200M	OKBM	50 MWe	PWR/icebreaker, floating reactor (in operation)
VBER-300	OKBM	325 MWe	PWR / floating reactor
ABV-6E	OKBM	9 MWe	PWR / multipurpose floating reactor
SVBR-100	JSC AKME	100 MWe	Molten lead-bismuth fast reactor / multipurpose
Shelf	Nikiet	6.6 MWe	PWR / underwater energy source

- 해양원자로 개발의 가장 큰 동력은 IMO의 이산화탄소 배출 규제 강화 및 북극항로 활용임. 세계 온실가스 전체 배출량의 2.7-3.3%가 해양 운송 중 발생하는 것으로 추정됨. 국제해사기구(IMO)는 온실가스 감축을 위해 2008년 발생량 대비 탄소배출 집약도를 2030년까지 40% 감축, 2050년까지 70% 감축하는 목표를 제시¹⁴⁾.



<IMO 온실가스 저감계획 (출처: DNV-GL^{15))>}

- 이에 따라 대표적 온실가스인 이산화탄소 배출 절감에 대한 해결책이 해운업계와 조선업계에 요구되고 있으며, 대체 연료 및 에너지원에 대한 수요가 급증할 것으로 예상됨.

● 전망

- 미국 대선에서 바이든의 당선으로 미국의 파리기후변화 협약

14) IMO, Imo action to reduce greenhouse gas emissions from international shipping, 2019

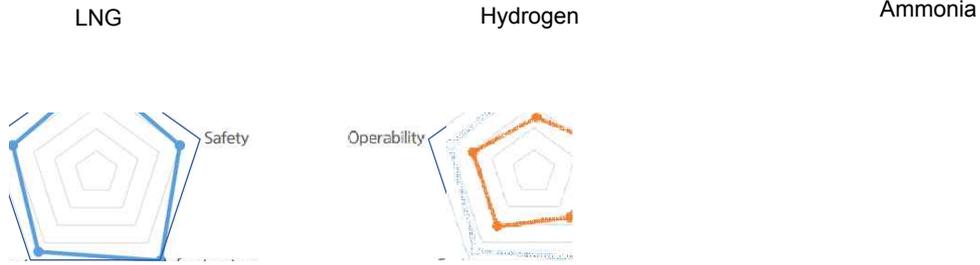
15) DNV-GL, <https://www.dnvgl.com/>, decarbonization in shipping.

재가입이 예상되며, 이에 IMO의 탄소배출 저감 규제가 더욱 강화될 것으로 예상됨. 배출권거래제도, 국제온실가스펀드 등이 시장기반조치로 실행될 것임.

- 미래 선박 기술은 에너지 효율 향상, 온실가스 저감, 대체 연료 활용을 중심으로 진행될 것임¹⁶⁾. 에너지 효율 향상은 조파저항감소, 공기저항 감소, 선체경량화를 포함한 선형 개량, 고효율 추진개발을 통한 추진성능 향상, 태양광, 풍력의 보조 동력 활용, 하이브리드 기관 개발을 포함함. 온실가스 저감 기술의 예는 CO₂ 포집, 연소가스 후처리 등임. 대체연료로는 LNG, 메탄올, 암모니아, 바이오연료, 수소, 연료전지, 배터리, 원자력 등이 사용될 것으로 전망됨.
- 대체연료 중 단기적으로 가장 많이 선택될 연료는 LNG임. 암모니아는 LNG 대비 1.8배의 연료탱크가 필요하며, 독성으로 인한 안전성 확보 및 규정확보가 필요함. 수소는 LNG 대비 2.4배의 연료탱크가 필요하며 낮은 액화온도로 보온성능, 누설, 극저온 액화 등에서 기술적 어려움이 있음.
- 다양한 운송 선박 중 고속 컨테이너선, 유조선(tanker)과 산적화물선(벌크선, bulk carrier)은 2050년대 배출목표 기준을 위해 LNG 추진 외에 추가적인 대응이 필요할 것으로 전망됨. 이에 원자력추진 선박은 이들 중 높은 운항 속도를 요구하는 선박을 대상으로 하는 것이 적절할 것임. Hirdaris et al.¹⁷⁾의 연구에 따르면 특정 항로, 특정 항구를 운행하는 대형 벌크선은 100 MW 추진력이 요구됨.
- 조선해양업계의 전망⁸⁾에 따르면 컨테이너선의 투자 회수 기간은 9~12년으로 예상됨. (원자로 관리비를 육상 원전 대비 130% 가정). 전주기 연료봉 무교체를 가정하고 탄소배출이 없는 30 KTS 초고속 선박 개발 시 경제성 확보 가능성이 높음.

16) 신현준, 원자력 해양 이용 전망, 한국조선해양, KNS 제2기 미래특별위원회 자문, 2020.

17) Hirdaris S.E et al, Considerations on the potential use of Nuclear Small Modular Reactor (SMR) technology for merchant marine propulsion, Ocean Engineering 2014.



<LNG, 수소, 암모니아 연료의 장단점 비교 (출처: 한국조선해양^{18))>}

- 화물선박 외에도 기존 항로 대비 거리 30% 단축이 가능한 북극항로의 물동량 증가가 전망되며, 러시아 북극 지역의 자원 개발 정책 추진 등으로 쇄빙선의 중요성이 높아질 것임. 이에 원자력추진 쇄빙선 또한 원자력-조선해양 분야의 중요 협력 분야가 될 수 있음.

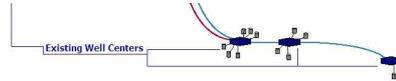


<러시아의 Lider 쇄빙선 개념도 (출처: Rosatom^{18))>}

- 미래 사회에 심해 열수광산, 망간단괴 등 고부가 가치 심해 자원 활용을 위한 해양 플랜트 개발, 심해 탐사 및 채굴 등이 활발히 진행될 것으로 예상됨. 해양 자원 개발, 대체연료 생산 기지, 부유식 생산 저장 하역 설비 (FPSO)의 전력원으로 부유식(Floating type) 또는 착저식(GBS type) 해상 원자력 발전소가 유용하게 활용될 수 있음.
- 심해저 자원개발 선박 출력: Chikyu (일본, 35 MWe), Gemonod (프랑스, 32 MWe, 타당성 조사)
- FPSO 출력: Modec (일본, 85 MW), 드릴쉽 출력: Stena Drillmax

18) Rosatom Global, Rosatom Leader Nuclear Icebreaker, 2019.

(삼성중공업, 44 MW), Transocean Invictus (대우조선해양, 42 MW)



<심해 자원 개발 (출처: dw.com) 및 FPSO 개념도 (출처: Wikipedia)>



<심해저시추선 Chikyu (출처: jamstec.go.jp/chikyu) 및 Modec FPSO (출처: modec.com)>



<드릴쉽 Stena Drillmax (출처: stena-drilling.com) 및 Transocean Invictus (출처: offshore-mag.com)>

- 인공지능, 자율주행 기술의 비약적 발전과 함께 미래 심해저 탐사 및 군사적 목적으로 수중 무인 드론의 활용이 확장될 수 있음. 보잉사는 심해 탐사 목적의 Echo Voyager와 해군용 무인 잠수정 Orca를 개발 중¹⁹⁾. 이들은 전기배터리 (18kW)와 디젤 하이브리드 엔진을 탑재함. 잠항 시간 연장을 위해 초소형원자로 적용이 가능한 분야임.

19) Boeing, Boeing's Echo Voyager, 2016.



<보잉사 Echo Voyager (출처: boieng.com)>

- 미래 사회에 초대형부유체 (VLFS: Very Large Floating Structure) 기술이 상용화될 경우, 해양거주지 개발 (seasteading), 부유식 항만 등 새로운 해양공간 활용이 본격화될 것임. 이들의 에너지원으로 초소형원자로가 활용될 수 있음.



<미래 부유식 항만 (출처: publicdomainarchitects) 및 해양거주지 개발 개념 (출처: seasteading.org)>

- 미국에서 우주용 원자로를 위해 추진된 Kilopower 개발이 성공하고, 그 후속 연구로 다양한 수 MW급 육상용 초소형원자로 개발이 진행 중임²⁰⁾. 이들은 2020년대 후반 실증로 건설을 목표로 함. 이들의 개발이 성공적으로 진행될 경우, 기존 가압경수로 기반 소형원자로 대비 설치, 교체가 용이한 원자로가 가용해짐. 이는 다양한 범위의 출력이 필요한 해양 원자력시스템에 높은 적용성을 가질 것으로 기대됨.

● 필요기술 및 정책

20) Yan et al., The technology of micro heat pipe cooled reactor: A review, Annals of Nuclear Energy, 2020.

■ 해양 원자력시스템에 대한 SWOT 분석 수행

■ SWOT 시사점: 한국은 세계 최고 수준의 조선산업과 원자력기술을 확보하고 있으며, 소형원자로 설계 경험을 확보하여 향후 해양원전 분야 진출에 필요한 기반을 갖추고 있음. 그러나 군사용 목적으로 해양원자로를 사용하고 있는 원전 주요국과 비교하면 실증 경험과 건조, 운전, 안전 관련 법규가 부재함. 사용후연료 처분시설을 갖추고 있지 않은 것도 약점임. IMO의 온실가스배출규제 강화 및 국내 해군의 원자력추진 잠수함 도입 고려는 해양원전 상용화를 위한 기회가 될 수 있으나, 정부의 탈원전 정책 및 경쟁국의 기술 진보로 비교 우위를 장담하기 어려움.

		Strengths	Weaknesses
INTERNAL	<ul style="list-style-type: none"> ▪ SMART 설계 인증 경험 확보 ▪ Bandi-60s 등 해양 적용이 가능한 소형원자로 기술 개발 중 ▪ 우수한 산학연 연구 인력 확보 ▪ 세계 최고 수준의 조선 산업 		<ul style="list-style-type: none"> ▪ 해양원전 실증 경험 부재 ▪ 해양원전 건조/안전 관련 법규 부재 ▪ 비경수형 소형원전 실증 경험 부재 ▪ 해양원전 연구, 교육 시설 등 인프라 부족 ▪ 사용후연료 처분시설 부재
		Opportunities	Threats
EXTERNAL	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 조선해양분야 탈탄소 규제 강화 ▪ 친환경 선박 수요 급증 예상 ▪ 해군의 원자력추진 잠수함 도입 고려 ▪ 해외 초소형원자로 기술 개발 가속화 ▪ 해외 선박용 원자로 기술 안정화 단계 ▪ 해양플랜트 시장 성장 		<ul style="list-style-type: none"> ▪ 국내 탈원전 정책 ▪ 중국의 해양 원자로 기술 확보 ▪ 중국의 조선산업 경쟁력 강화 ▪ 해외 초소형원자로 기술과의 격차 증가 ▪ 원자력선 항만 시설의 주민수용성

〈해양 원자력시스템 SWOT 분석〉

■ SWOT 분석에 기반한 해양 원자력시스템 개발 추진 전략 제시.

■ 해양 원자력시스템 개발을 위해서는 기개발한 소형원자로를 선박, 해양플랜트 등에 탑재하기 위한 최적화 기술, 미래 사회의 다양한 응용 분야를 고려해 다수 유닛 설치를 통한 확장성을 갖춘 비경수형 초소형원자로 기술, 무인 운전이 가능한 원자로설계 기술, 장주기 노심 및 고신뢰도 피동안전계통 기술 등이 필수적으로 확보되어야 함. 국내 해양원전 운영 경험이 없기에 이에 대한 규제기술/안전성평가 기술의 개발이 필요함.

SO strategies

- 기 보유한 소형경수로 기술을 해양원전에 적용하기 위한 투자 필요
- 비경수형 초소형원자로 원천기술 개발 착수
- 해양플랜트, 심해탐사정 등 다양한 수요에 대비한 해양원전 포트폴리오 구성 필요
- 국가 주도의 원자력-조선해양 분야 공조를 통한 국제 경쟁력 확보가 가능한 모델 제시

WO strategies

- 쇄빙선, 심해탐사선 등 국가 주도 사업을 통한 국내 해양원전 실증 필요
- 실증로 - 사업화 연계 방안 마련 필요
- 해외 원자력화 운영 및 규제 절차 및 법규에 대한 벤치마크 필요
- 해양원전 보유국과의 국제협력 모색
- 해양원전 인력양성 인프라 구축

ST strategies

- 해양원전 개발을 통한 우수인력 및 공급망 유지 방안 마련 필요
- 경쟁국과의 비교우위 확보를 위한 장주기, 고안전 소형 원자로 개발 필요
- 선박건조 인프라가 없는 해외 초소형원자로 스타트업과 협력해 원자력선박의 해외 수출 교두보 마련
- 원자력 실증단지, 조선소, 항만 시설을 연계한 산업-지역 win-win 전략 개발 필요

WT strategies

- 국방 강화의 일환으로 원자력선박 개발 추진
- 탈원전정책으로 부족한 자원과 인력의 효율적 활용을 위해 육상용 초소형원자로 개발 시 해양 적용이 가능한 노형 선정
- 비발전 분야에서 발생한 사용후연료 관리 정책 연구 필요
- 수용성 증진을 위해 부유식 항만과 원자력 추진선에 기반한 미래 해양 비전 제시
- 해양원전 안전성 및 특장점에 대한 사회적 공감대 확보 노력 지속

● 요약 및 정책 건의

■ 해양 원자력시스템 현황: 해외 원전 주요국은 이미 군사적 목적의 해양원자로를 운영 중. 최근 러시아는 부유식 원자로를 개발하여 운영을 시작했으며, 중국과 우리나라에서도 부유식 소형원자로를 개발 중. 해외 스타트업들은 비경수형 해양원전 개발에 착수함. 용융염 원자로 및 고온가스로를 이용한 노형이 제안되었음.

■ 해양 원자력시스템 전망: IMO의 이산화탄소 배출 규제 강화로 친환경 연료를 채택한 선박 수요가 증가할 것으로 예상됨. LNG, 수소, 암모니아 등의 대체 연료 대비 원자력은 탄소배출 측면 및 OPEX (operational expenditure) 측면에서 우위에 있어 미래 조선해양 분야에 활용될 가능성이 큼. 특히 고속 컨테이너선, 대형 유조선과 벌크선 중 높은 운항 속도를 요구하는 선박은 원자력추진 선박이 경제성을 유지할 수 있을 것으로 전망됨.

■ 원자력추진 선박이 활용되기 위해서는 아래와 같은 원자력 고유의 문제점에 대한 비전 제시가 필요함.

◆ 경제성: 긴 연료 교체 주기로 획기적인 OPEX 절감이 기대되나 원자로 금액 고려 시 초기 설치 비용이 높을 것으로 예상되는

만큼 연료별 균등화발전비용 예측 및 초기 자본투자 감소 방안 마련 필요

- ◆ 수용성 및 안전성: 국제사회의 원자력추진 합의를 이끌 수 있는 외교 필요. 충돌, 침몰 등 외부 재해에 대응할 수 있는 안전성 확보 필수. 산업-지역 공통 발전을 이끌 수 있는 개발 전략 필요.
- ◆ 핵비확산성: 원자로의 핵물질 인출 불능화 방안 마련 필요
- ◆ 해양/해사 규정: 국제해상인명안전협약과 같은 해양 및 해사 규정의 극복 또는 규정의 개정 필요

■ 정책 건의

- ◆ 국방력 강화, 심해 자원 개발, 북극항로 활용 등 국가적 아젠다로 해양원전 추진 필요
- ◆ 경수형 소형원자로의 해양 응용을 우선적으로 추진하고, 비경수형 초소형원자로는 다양한 응용 가능성에 대비하여 다수 유닛 설치가 용이하고 무인운전이 가능한 노형으로 개발. 육상용 초소형원자로 개발 시, 해양 적용이 가능한 노형으로 개발 추진
- ◆ 국가 주도의 원자력-조선해양 분야 공조를 통한 국제 경쟁력 확보가 가능한 모델 제시
- ◆ 해외 원자력합 운영 및 규제 절차 및 법규에 대한 벤치마크가 필수적이며 해양원전 보유국과의 외교 및 국제협력 필요
- ◆ 원자력 실증단지, 조선소, 항만 시설을 연계한 산업-지역 win-win 전략 개발, 수용성 증진을 위해 부유식 항만과 원자력추진선에 기반한 미래 해양 비전 제시, 해양원전 안전성 및 특장점에 대한 사회적 공감대 확보 방안 등의 정책 연구가 필요함. 또한, 비발전분야에서 발생한 사용후연료 관리 정책에 관한 연구가 필요함.

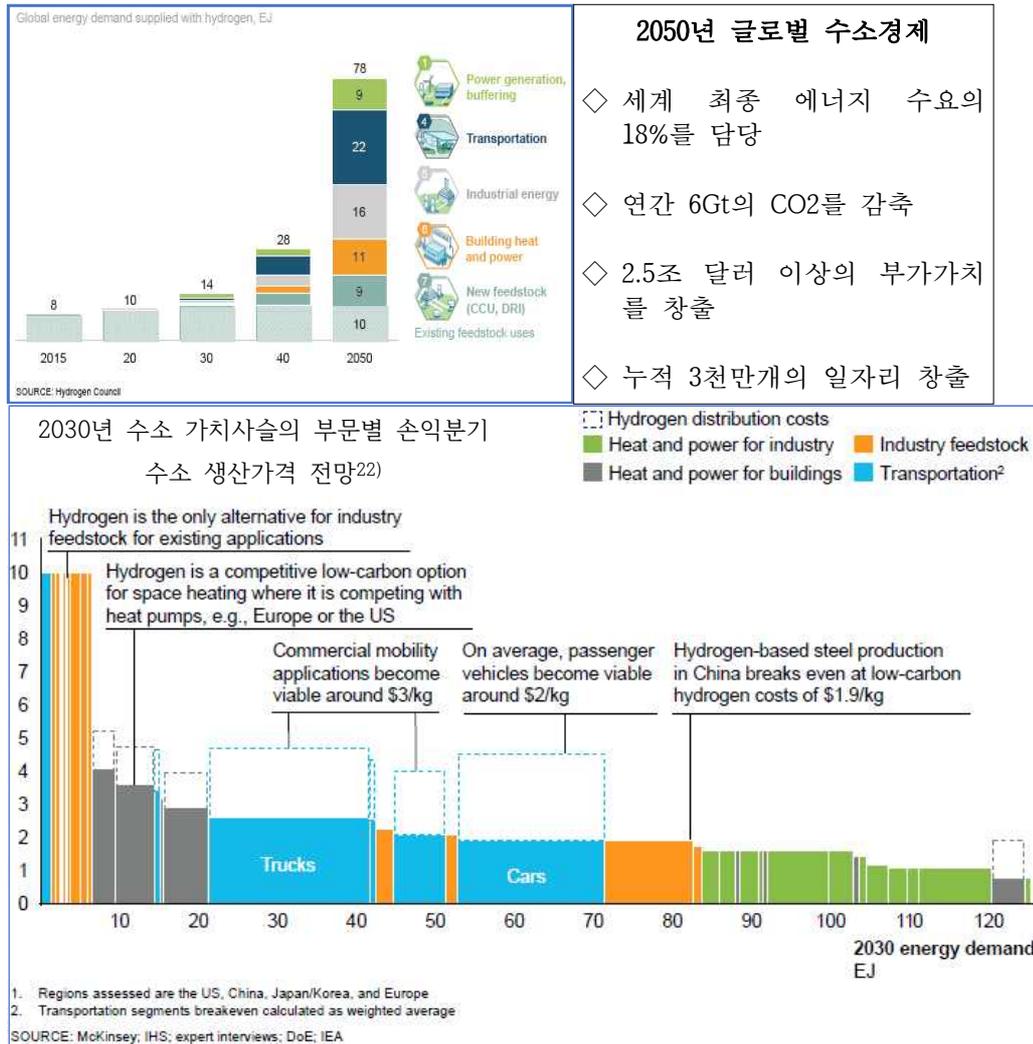
※ 시사점 : 해양 원자력시스템의 미래 활용 가능 분야를 분석함. 무탄소 에너지원이며 장기간 연료 교체 없이 운전 가능한 원자력의 장점으로 미래 사회에 원자력추진뿐만 아니라 심해자원개발, 탐사, 해양공간 활용 등의 해양 산업에도 적용성이 높을 것임. 국외에서 활발한 개발이 진행 중인 비경수형 초소형원자로는 설치 및 제거의 편의성, 무인 운전 가능성, 다수 유닛 설치 용이성 등의 장점이 있어 해양 환경 적용 시

유용성이 클 것으로 판단됨. 이미 해양원전을 도입하여 운영 중인 국가와의 경쟁을 위해서는 국방력 강화, 자원 개발 등의 국가적 아젠다로 해양원전 추진이 필요하며, 원자력선 운영에 대한 사회적 공감을 얻기 위한 정책 수립이 함께 진행되어야 할 것임.

2.5.3 원자력 수소의 미래 전망

● 글로벌 수소경제 전망

■ 지구 온난화 2°C 시나리오시 글로벌 수소 경제 전망²¹⁾



■ 청정 수소 공급가격이 글로벌 수소 경제 활성화의 핵심적 요소

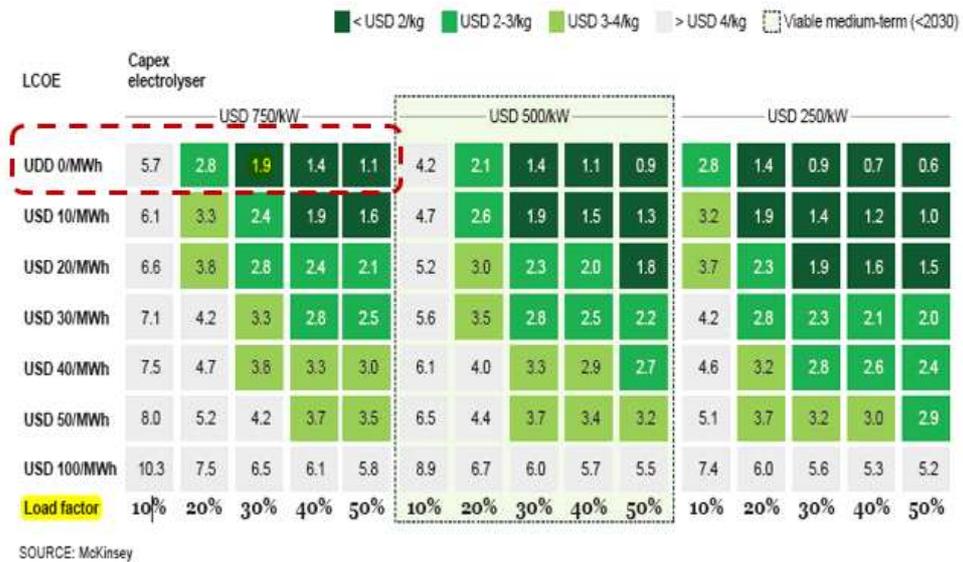
- ◆ \$2.5/kg이면 ‘30년까지 세계에너지 수요의 8%, \$1.8/kg 이면 15%를 담당
- ◆ 손익분기 가격: 상용트럭 ~\$3/kg, 승용차 ~\$2/kg, 직접환원 제철 ~\$1.9/kg

21) Hydrogen Council, “Hydrogen scaling up: A sustainable pathway for the global energy transition”, November, 2017

22) Hydrogen Council, “Path to hydrogen competitiveness: A cost perspective”, Jan. 20, 2020

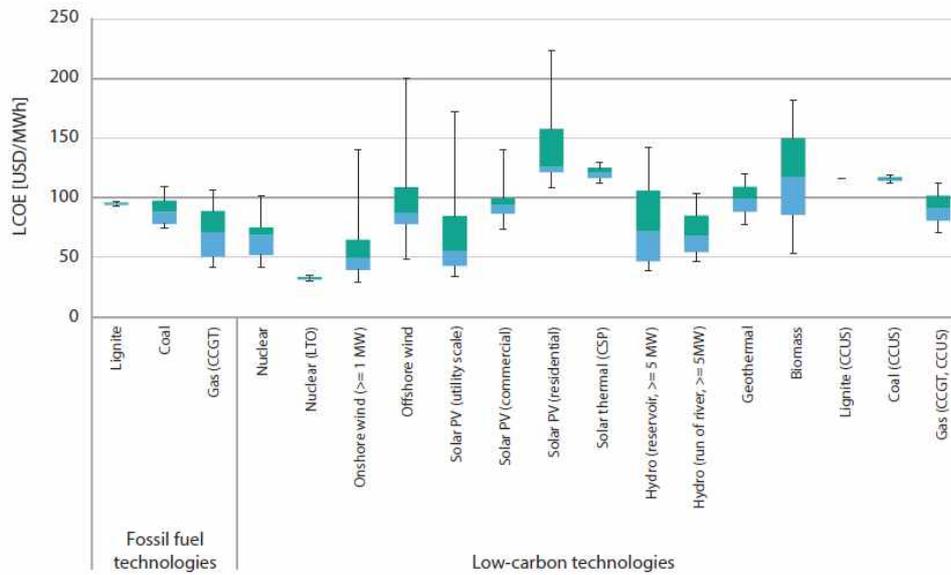
■ 청정 수전해 수소의 가격을 좌우하는 청정 전력 단가와 청정 수전해 시설 이용률은 국가별 지역별로 편차가 매우 큼.

◆ 청정 수전해 수소 생산 단가는 사용하는 전력 단가에 거의 비례하며 시설 이용률이 낮을 경우 이용률 변화에 민감함 (수전해 수소생산 효율에 비례하고 수소시설 건설단가에도 상대적으로 둔감하지만 영향을 받음)



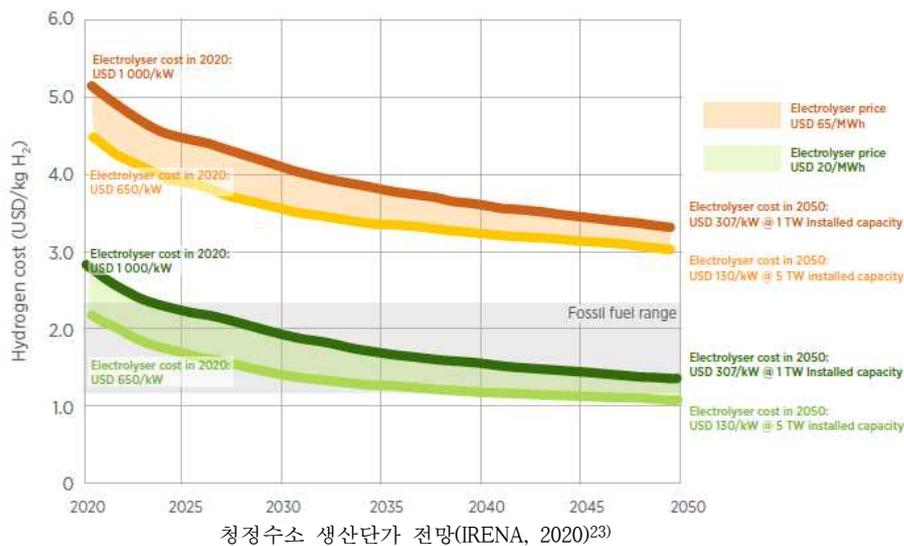
전기요금, 수소생산 시설 이용률 및 수소시설 건설단가에 따른 수전해 수소 생산 단가(수소위원회, 2020)

- ◆ 재생에너지 발전단가는 풍력이나 태양광 자원이 풍부하고 광활한 국토 및 호조건의 자원조달 등 재생에너지 발전 여건이 좋은 일부 국가나 지역에서 이미 가장 저렴한 발전원으로 부상
- ◆ 우리나라의 경우 상대적으로 태양광 및 풍력발전 이용률이 낮아 재생에너지 전력단가가 높고 이를 이용한 청정 수소생산 설비 이용률은 낮을 것이므로 재생에너지 수소 생산단가는 추출수소 보다 훨씬 높을 것으로 예상됨
- ◆ 반면에 우리나라의 원자력은 낮은 원전건설 단가와 짧은 건설공기로 국내에서 모든 발전원 중 발전단가 가장 낮으며 20년 계속운전이 허용될 경우 전 세계 발전원을 통털어서 가장 낮은 수준일 것이므로 원자력 수소 생산 단가는 추출수소 보다 낮을 것으로 전망됨



발전원별 평균화발전단가(LCOE) 전망 (IEA/NEA, 2020)

- ◆ 지난 10년간 재생에너지 비용이 80% 이상 하락하였고 향후도 지속적으로 하락할 것으로 예상됨. 사우디, 칠레와 같이 재생에너지 자원이 좋은 국가는 추출수소 대비 그린 수소 가격이 조만간 경쟁력을 갖출 것으로 전망



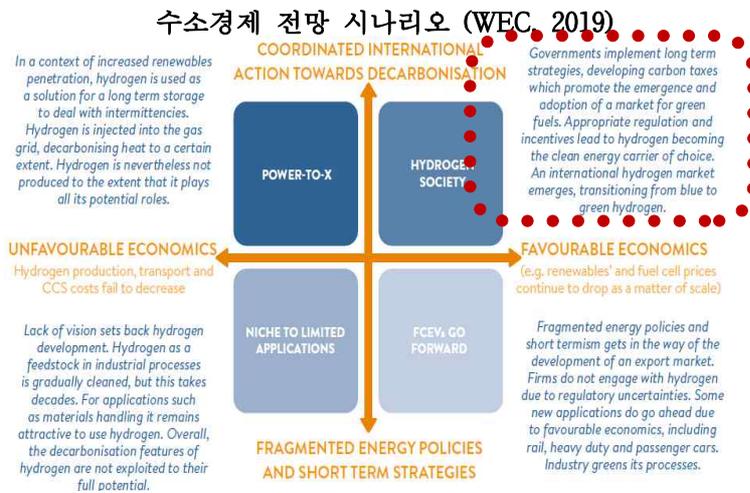
청정수소 생산단가 전망(IRENA, 2020)²³⁾

- 최근 주요국의 기후변화 대응 강화와 COVID-19 경제위기 해법으로 청정수소에 대규모 재정이 투입됨에 따라 글로벌 수소사회로의 모멘텀은 더욱 탄력을 받고 있음

23) IRENA, 'Green Hydrogen Cost Reduction', December 2020

- ◆ EU, 중국, 일본, 한국을 포함하여 32개국이 늦어도 2060년까지 탄소 중립 달성을 선언하였으며 바이든 미국 민주당 정권도 동참할 가능성이 큼
- 전 세계 GDP의 70% 이상을 차지하는 18개국이 자국의 수소전략 로드맵을 제시하고 이를 이행하고 있음
 - ◆ EU 수소전략('20. 7): 2024년 까지 6GW, 2030년까지 북아프리카 등 역외에 40GW 포함 총 80GW의 수전해 용량 확보, ' 30년까지 440억유로 투자 및 9천만톤 탄소감축
 - ◆ 독일 수소전략(' 20. 6): 2030년까지 90억 유로 투자, 수소 연간 소요량 2배 증가
 - ◆ 프랑스 수소전략('20.9): 2030년까지 72억 유로 투자, 6.5GW 수전해 설치
 - ◆ 미국 바이든 당선자 공약: 기후변화 고등연구사업국(ARPA-C) 신설 및 이를 통하여 추출수소 가격의 수전해 기술과 기존원전 대비 반값의 SMR 기술 개발
 - ◆ 일본 수소기본전략('17. 12): 2030년까지 수소충전소 900개소 설치, 수소 승용차 80만대, 수소 버스 1200대, 국제수소 공급망 구축을 통한 해외수소 도입 추진
 - ◆ 중국 (2019년) ' 수소 및 연료전지 백서 ' ' 50년까지 수소의 1차 에너지비중 10%, 수소산업 매출 12조위안, 수소차 500만대, 수소충전소 1만개소
- 글로벌 수소 사회로의 진입이 가시권에 들어 온 것으로 평가됨
 - ◆ 전 세계적인 수소에 대한 기후변화 대응책의 필수적 요소로의 인식이 확산됨에 따라 수소 우호적인 에너지 정책이 지속될 것으로 전망 됨
 - ◆ Scale-up과 기술혁신으로 수소가치 사슬 전 분야에 걸쳐 선순환적인 가격하락이 이어질 것으로 전망됨
 - ◆ WEC 제시 수소경제 전망시나리오²⁴⁾에서 수소사회로 진입할 가능성이 큼

24) WEC, 'New HydrogenEconomy - Hope or Hype?', Innovation Insights Brief (2019)



● 우리나라의 수소경제 전망

■ 수소 경제 활성화를 위한 정부 발표 정책

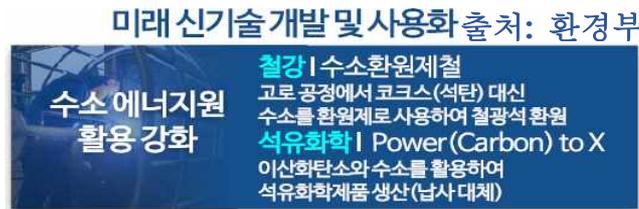
- ◆ 수소경제 활성화 로드맵(2019. 1), 수소기술 개발 로드맵 (2019. 10)
 - 2040년까지 수소차와 연료전지 세계시장 점유율 1위 달성
 - 2040년까지 연 526만톤(산업용 제외)의 수소를 kg당 3,000원 이하로 공급

	2022	2030	2040
Demand	470K(ton-H ₂)	1.94M(ton-H ₂)	5.26M(ton-H ₂)
Supply	① Byproducts ② Extraction ③ Electrolysis	① Byproducts ② Extraction ③ Electrolysis ④ Import ② : 50%	① Byproducts ② Extraction ③ Electrolysis ④ Import ② : 30%
Price	₩6,000/kg-H ₂	₩4,000/kg-H ₂	₩3,000/kg-H ₂
FCV	81K		620K
FC Power	1.5GW		15GW

- ◆ 수소 관계법 제정 (2020. 2)
- ◆ 한국판 그린 뉴딜 (2020. 7)
 - 2025년까지 전기차 및 수소차 등 그린 모빌리티 보급 확대에 18.7조 투자
 - 2025년까지 수소차 20만대 보급, 수소 충전소 450개소 설치
- ◆ 탄소 중립선언('20. 10) 및 관계부처 합동 2050 탄소중립

전략('20. 12) 발표

- 대규모 탄소 배출 산업의 수소 활용으로 대규모 신규 수소 수요 발생(현행 고로 방식의 제철을 수소직접환원 제철로 전환 시, 연간 300만 톤 추가 소요)
- 2050년까지 청정 수소비중을 80% 이상으로 확대



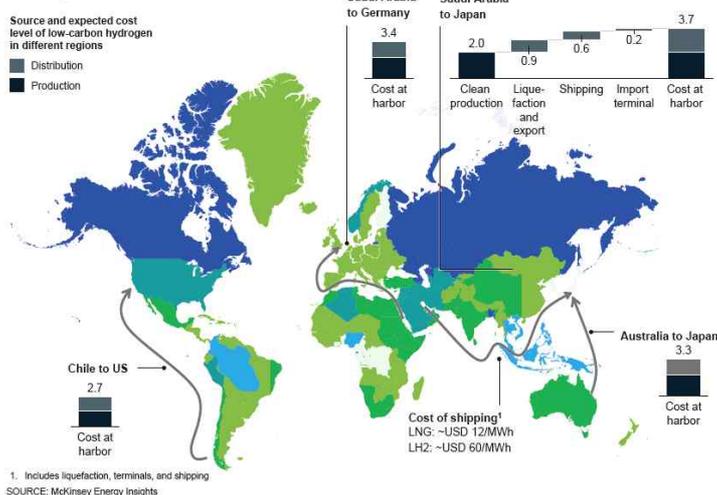
■ 우리나라에서 요구되는 대규모 청정 수소를 목표 가격에 공급할 가능성 평가

◆ 부생수소 : 생산 확대에 한계가 있으므로 대규모 공급 곤란

◆ CCS 이용 추출수소

- 액화/운송/인수기지 비용 포함 LNG 도입 가격 및 CCS 비용에 따라 불확실
- 원료 가스의 100% 해외 의존에 따른 에너지 안보의 취약 구조 심화
- LNG 도입가격, CCS 설치운영 및 미포집 탄소(10% 이상) 비용 등을 고려 시, 목표가격 미충족 가능성이 큼

Cost of shipping liquid hydrogen across regions, 2030
USD/kg



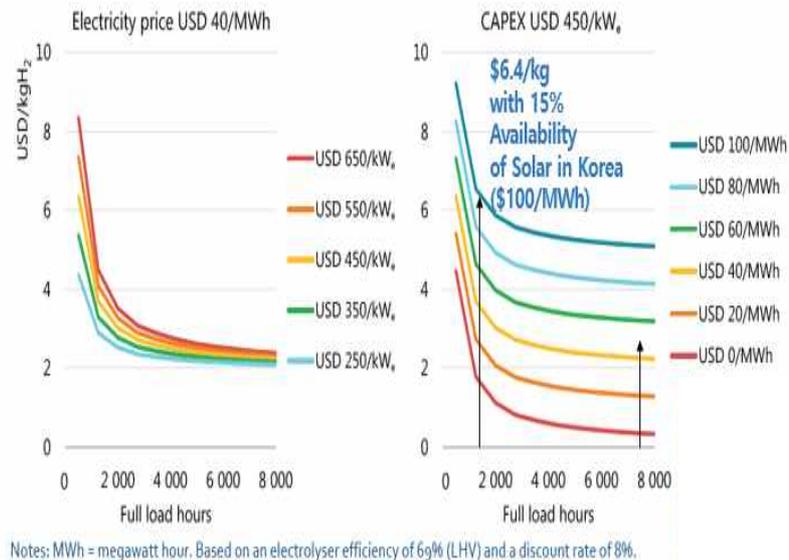
2030년 도입 수소 가격 구성 전망(수소위원회, 2020)

◆ 해외 도입 수소

- CCS, 액화, 수송, 인수기지 비용 포함 시, 목표가격 미충족 가능성이 큼
- [현지생산 수소단가(CCS 설치/운영 포함): \$1.5/kg-H₂, 액화: \$0.9/kg-H₂, 운송: \$0.6/kg-H₂, 인수기지설치 운영: \$0.2/kg-H₂]²⁵⁾
 ⇒ **합계 ~ \$3.2/kg-H₂** ⇒ 년 목표 생산가격(3,500원/kg-H₂) 미충족 가능성이 큼

◆ 재생 에너지 수소

- 우리나라는 북유럽, 중동, 북아프리카, 미 캘리포니아, 칠레 등 태양광이나 풍력자원 부국에 비하여 재생에너지 발전설비 이용률이 낮고 국토가 좁아 여기서 생산되는 전력 단가는 높을 수밖에 없는 구조임



Notes: MWh = megawatt hour. Based on an electrolyser efficiency of 69% (LHV) and a discount rate of 8%.

수전 전력요금 및 이용률에 따른 수소생산단가 민감도(IEA, 2019)

- 재생에너지 전력을 이용한 수소생산 단가는 따라서 정부가 목표로 하는 생산단가를 충족하기가 어려울 것으로 전망됨
- 재생에너지 잉여전력을 사용할 경우 수소설비의 수전 가격은 낮출 수 있으나 설비 이용률이 낮아지므로 수소 생산단가 인하요인을 상쇄시킴

25) Hydrogen Council, "Path to hydrogen competitiveness: A cost perspective", Jan. 20, 2020

- 재생에너지 수소는 생산 단가도 문제이지만 대규모 공급에 필요한 설비 구축에 막대한 비용이 소요됨. 연산 100만 톤 규모의 태양광 수소 생산 시, 37GW(전해효율 49kWh/kg-H₂, 수소설비 이용률 15% 기준) 용량의 태양광 시설 신설이 필요하여 33.6조(태양광 설치비 \$750/kW 기준) 투자가 소요

◆ 원자력 수소

- 우리나라의 원전은 국내 발전원 중 가장 낮은 발전단가를 보여 왔으며 앞으로도 최저 수준을 유지할 것으로 전망됨
- 2016년도 국회예산정책처 보고서의 원자력 발전원가는 54원/kWh이고 근년의 정산단가도 60원/kWh 안팎으로 타 발전원에 대비하여 월등히 저렴함
- 2020년 IEA/NEA의 국가별 전원별 평준화 발전비용 보고서²⁶⁾에서도 우리나라 원전은 월등한 경제성을 보여주고 있음

LCOE(¢/kWh) by technology in Korea

	Offshore Wind	Solar	Nuclear	
			New	20-year extended
LCOE	16.1	12.0	5.4	3.1*
C.F	30%	15%	85%	85%

*) average of foreign data

Source: IEA/NEA(2020)

- 원자력의 낮은 전력 단가와 높은 이용률로 알칼라인 수전해를 이용한 원자력 수소 생산단가는 3,550원/kWh로 2030년 목표 공급가격(4,000원/kWh)을 충족시킴

알칼라인 수전해 수소생산 단가

공통 자료 ²⁷⁾	수전해효율: 49kWh/kg-H ₂ CAPX: 480유로/kW, OPEX: CAPX*1.02 시스템 수명: 20년, 스택 교체비 215유로/kW, 할인율: 8%	
	태양광 수소	원자력 수소
이용률	15%	85%
사용전기요금	120원/kWh	60원/kWh
수소생산단가	9,330원/kg-H ₂	3,550원/kWh

26) IEA/NEA, 'Projected Costs of Generating Electricity'. 2020 Edition

- 기존의 가동중 원전에서 생산되는 증기와 전기를 이용한 고온전해(SOEC)로 수소 생산 시, 저온 수전해 대비 효율이 30% 이상 향상되므로 2040년 목표공급가(3,000원/kWh)도 충족할 것으로 전망됨

수전해 기술별 건설단가 및 효율²⁸⁾

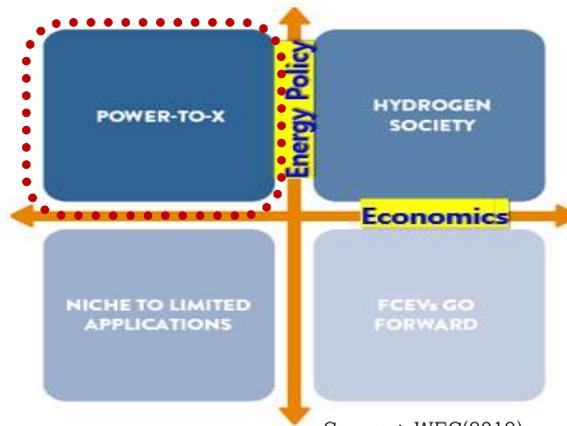
TABLE 1. SUBSYSTEM CAPITAL AND OPERATING COSTS AND REFERENCES

Subsystem	Overnight Capital Cost	Fixed O&M Cost	Electricity Requirement	Thermal Energy Requirement
Nuclear Reactor [11]	\$3,716/kWe	\$95/kWe-yr	N/A	N/A
High Temperature Electrolysis (HTE) [9]	\$662/kWe	\$58.69/kWe-yr	35.1 kWh/kg H ₂	11.15 kWh/kg H ₂
Low Temperature Electrolysis (LTE) – Higher Capital Cost [9]	\$616/kWe	\$42.73/kWe-yr	50.2 kWh/kg H ₂	N/A
Low Temperature Electrolysis (LTE) – Lower Capital Cost [9]	\$154/kWe	\$42.73/kWe-yr	55.2 kWh/kg H ₂	N/A

kWe: kilowatt electric
O&M: operations and maintenance

■ 우리나라 수소 경제 한계 상황

- ◆ 우리나라는 매우 강고한 수소경제 활성화 정책을 펴고 있으나 가장 비용효과적인 원자력 수소가 고려되고 있지 않음
- ◆ 원자력을 이용하지 않은 청정 수소생산 또는 도입 가격은 수소가치사슬의 각 부문별 손익분기 수소공급 가격보다 비쌀 것으로 전망됨
- ◆ 따라서, 우리나라는 원자력 수소를 활용하지 않을 경우 세계에너지위원회(WEC)가 제시하는 수소경제 시나리오 중 제한적 수소 활용 시나리오에 그칠 가능성이 큼



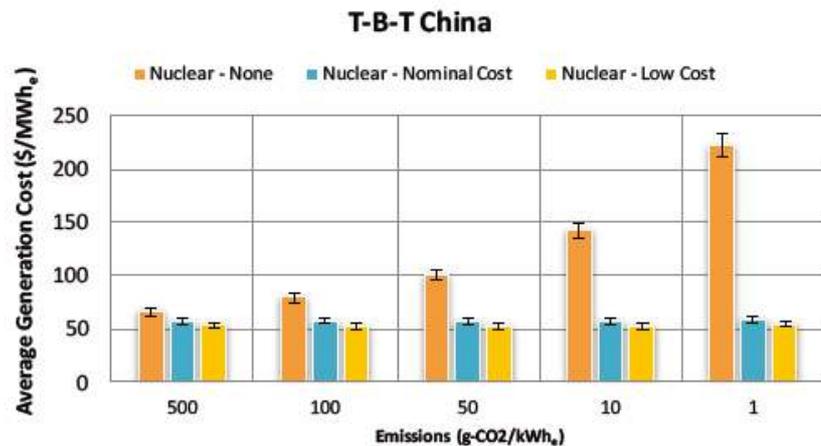
Source: WEC(2019)

27) IRENA, 'Hydrogen from renewable Power'(2018. 9) 표 1의 2025년 알칼라인 자료

28) NREL, 'Opportunities and Challenges for Nuclear-Renewable Hybrid Energy System'(2018. 10)'

● 원자력 수소의 성공조건 및 정책제안

- 원자력 수소의 성공은 원자력과 수소가 다른 재생에너지와 함께 기후변화 대응의 핵심적 수단이라는 국가 정책적 인식과 이들의 경제적 실천 가능성에 대한 신뢰성 입증에 전제되어야 함
 - ◆ 원자력과 신재생의 상생적 확장이 기후변화 대응에 가장 비용 효과적임 (MIT 보고서²⁹⁾)



탄소배출에 따른 발전 시스템 단가

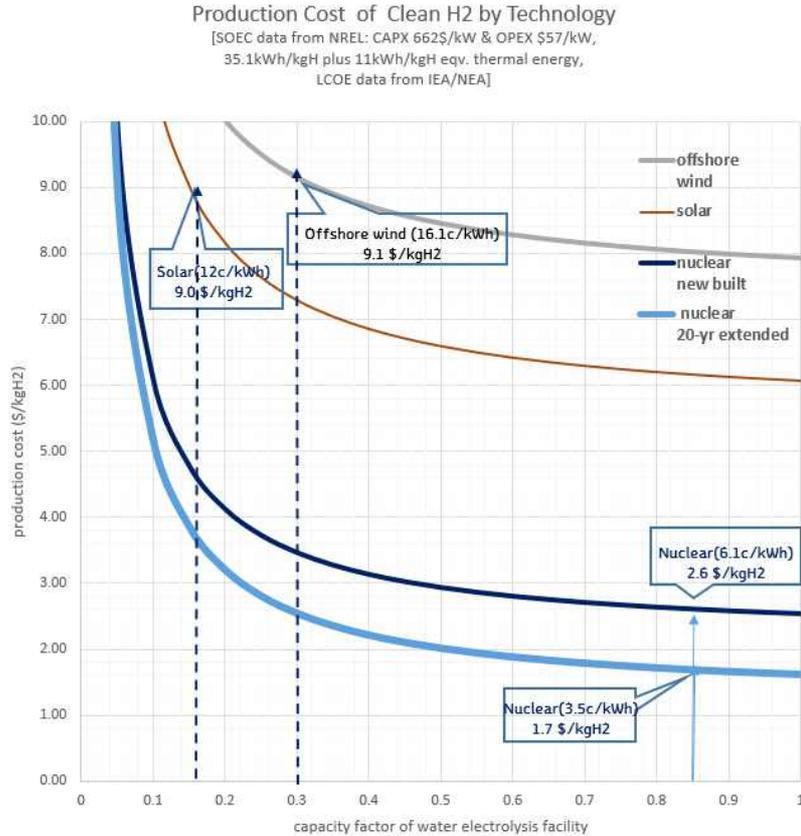
- 원전 확대 장애 요인은 안전 기술적 문제가 아니라 근년에 발생한 미국의 AP1000과 프랑스 EPR의 신규건설의 공기 지연과 비용초과에 따른 원전의 고비용임
- 비용저감 방안으로 모듈화 등 신건설 공법, 설계완성도 제고, 표준화, 입증된 공급망, 숙련 노동력, 치밀한 프로젝트 관리가 제안되나 우리나라는 신건설 공법을 제외하고 이미 시행 중으로 세계에서 가장 낮은 수준의 원전 발전단가를 보여줌
- 건설 리스크를 줄이고 재원조달이 상대적으로 용이하며 특수목적 수요대응이 용이한 SMR이 대형원전이 갖는 시장 확장 한계의 극복 방안으로 부상
- ◆ 원자력 수소는 상용화 초기 단계에 있는 고온증기전해 기술의 고도화와 이의 대규모 실증과 아울러 원자력 수소에 대한 인허가 및 국민 수용성이 전제되어야 함

- 원전의 열과 전기를 이용한 고온증기전해 수소 생산은 우리나라의

29) MIT, 'The Future of Nuclear Energy in a Carbon-Constrained World' (2018. 9)

수소 경제 활성화에 핵심적 역할을 할 수 있을 것으로 예상됨

- ◆ 가동원전을 이용한 원자력 수소생산은 현 정부의 에너지 정책(신규원전 건설 불허)과 충돌하지 않으면서 대규모의 청정 수소를 목표 가격 이하로 공급 가능



- 대규모 고온증기전해(SOEC) 설비의 성능이 실증될 경우 기존의 가동원전을 이용하여 청정 수소를 2030년 목표 생산가(3,500원/kWh) 미만으로 대규모 공급 가능
- 기존의 가동 원전을 20년 계속운전할 경우는 2040년 목표생산가인 2,500원/kWh 미만으로 공급이 가능할 것으로 전망됨
- 신한울 3,4호기 건설재개와 20년 계속운전 허용시, 2040년에 8차 전원기본계획 대비 16.4GW 용량의 원전 설비가 추가로 가용하며, 이를 고온 수전해에 활용시 연간 약 350만톤의 청정 수소 공급이 가능함

- ◆ 수소를 매개로 하는 솔라-원자력에너지 하이브리드

시스템(SNEHS: Solar Nuclear Energy Hybrid System)을 구축하여 재생에너지 출력제한을 비용 효과적으로 감축 할 수 있음

- 재생에너지 잉여전력 발생시 원자력 수전해 시설에서 이를 수전하여 수소를 추가 생산함으로써 재생에너지 출력제한을 감축
- 원자력 수전해 시설은 평상시 100% 정격 용량보다 낮게 운전하다 잉여전력 발생시만 전용량 운전을 하게 되어 설비 이용률이 감소하게 되나 수소생산단가에는 영향이 미미함
- 원전은 수소설비가 전용량 운전시 즉 잉여전력 수전시 평상시보다 원전증기 공급을 약간 증가해야 하나 그 양이 매우 적기 때문에 이로 인한 원전의 전기출력 감소는 무시할 정도임

◆ 제철이나 유화 등 온실가스 감축곤란 산업(harder-to-abate sector)에 저렴한 대량의 청정수소를 안정적으로 공급함으로써 2050년 탄소중립 목표에 기여할 수 있음

원자력 수소 이용 직접환원 제철소(100만톤) 경제적 타당성

화학 반응 밸런스	철(6)	335	
	탄소(9)	108	
	유연탄내 탄소비율	0.7	
	유연탄	154	
	수소	20	
	수소:철 비율	0.06	
석탄 절감액 및 탄소세	연간 고로 철강 생산량	1,000,000	톤
	유연탄 단가	60	\$/ton
	연간 유연탄 소비량	4.60E+05	톤
	유연탄가격	3.32E+10	원
	고로방식 CO2 발생량	2,000,000	톤
	탄소배출권(20\$/t)	4.80E+10	원
	탄소배출권(50\$/t)	1.20E+11	원
	탄소배출권(100\$/t)	2.40E+11	원
수소 비용	직접환원시 소요 수소량	59,687	톤
	원자력 수소단가/kg (40년 목표 생산가)	2,500	원
	수소비용	1.49E+11	원
수지	탄소배출권(20\$/t)	-6.81E+10	원
	탄소배출권(50\$/t)	3.93E+09	원
	탄소배출권(100\$/t)	1.24E+11	원

■ 정책제안

- ◆ 기존 가동원전을 이용한 고온증기 전해 수소 생산 실증, 인허가 및 소통 추진
- ◆ 고온증기전해 기술 고도화 및 이의 대규모 실증 추진
- ◆ 수소를 매개로하는 솔라-원자력에너지 하이브리드 시스템 실증 추진
- ◆ 직접환원 제철 등 대규모 수소 소요 신산업과의 협력체계 구축 및 해외진출 지원

※ 시사점:

- 세계 주요국의 강화된 기후변화 대응과 코로나-19 관련 경제 대책의 일환으로 수소 관련 산업에 대규모 재정이 투입되는 등 세계는 수소 사회로의 여정에 탄력이 붙고 있음
- 우리나라도 야심차게 수소경제 활성화 계획을 추진하고 있으나 값싸고 친환경적인 대규모 수소 생산 방법을 제시하지 못하고 있음
- 우리나라의 강점인 값 싸고 질 좋은 원전의 열과 전기를 이용한 고온증기전해 수소생산 타당성과 미래 전망을 기술하는 것이 이 절의 목적임
- 세계 주요국의 강화된 기후변화 대응과 코로나-19 관련 경제 대책의 일환으로 수소 관련 산업에 대규모 재정이 투입되는 등 세계는 수소 사회로의 여정에 탄력이 붙고 있음
- 글로벌 수소경제의 성공조건은 일관성 있는 정책 의지와 수소가치사슬의 각 부문별 가격 경쟁력임. 주요국의 적극적 수소 정책 동향과 청정수소 가격 인하추세로 볼 때 세계는 수소사회로의 진입 가능성이 큰 것으로 분석됨
- 우리나라도 야심차게 수소경제 활성화 계획을 추진하고 있으나 수소사회에 걸 맞는 값싸고 친환경적인 대규모 수소 생산 방법을 제시하지 못하고 있음
- 우리나라의 강점인 값 싸고 질 좋은 원전의 열과 전기를 활용할 경우 값 싼 청정수소의 대규모 공급이 가능하여 수소 경제를 견인할 수 있을 뿐만 아니라 수소 경제 일등국 달성과 글로벌 탄소 감축에 기여할 수 있을 것으로 전망됨

3. 시나리오 전개에 따른 미래 예측

3.1 세 가지 대응 시나리오의 전개

- **현상유지 시나리오: 국제적 영향력이 큰 국가나 기관들의 정책 공유**
 - 기후협약의 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
 - 국가나 기관 내 갈등 구조 유지
 - ◆ 국제적 공조화 유지 관련 내부 갈등의 해결에 몰두 경향 표면화
 - ◆ 국제 무역량은 현상 유지
 - 국제 경제력 유지가 핵심 화두로 등장
 - ◆ 자국의 기술 보호와 독자 기술 확보에 주력화
 - 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 지속연구·개발과 기술 개발은 지정학적 전개와 무관

■ 현상유지 시나리오의 경제 성장

◆ 세계 GDP 성장률은 지난 25년간 평균보다 둔화되며, 2008년 금융위기 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

● **화합 시나리오 : 국제사회 공조화 극대 - 환경과 에너지의 공존**

■ 국제기관, 국제법 체제 및 무역 협정의 질서 유지

- ◆ 중국, 브라질 및 인도와 같은 신흥 경제국도 국제질서에 동참
- ◆ 국제 협력이 정책 주도의 지정학적 정치적 환경 조성
- ◆ 여러 부문이 공동 협력하여 목표 달성 추구

■ 지구 온난화 방지 - 파리협약의 준수 이행

- ◆ 지구 온난화 완화 요건인 지구온도 2℃ 준수 목표에 최우선 목표
 - 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°C 준수 목표 달성
 - 각국이 파리 협정의 약속(2°C 목표 준수) 성실 수행
 - 각 국가 정책 의제는 지구 온난화 위협이 급진적인 행동을 요구하고, 필요한 정책의 심각성은 공동의, 조정된 대응을 요구한다는 사실을 깨달음으로써 형성

■ 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

- ◆ 주요 부문의 급진적인 전기화

■ 초기의 전 세계 경제성장은 저 성과

- ◆ 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
 - (예) 대규모 CCS의 개발 및 배포 장려 등
 - (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

● **대립 시나리오 : 국가별 정치적 결정에 따르는 국제질서 무력화**

- 인기 영합주의, 민족주의, 국내 지향적이고 단기적인 정책 우선
 - ◆ 기후 온난화 악영향에 대한 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

- 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 하위 순위화
 - ◆ 무탄소 연료로의 전환 투자 미미
 - ◆ 신규 CCS 개발 프로젝트 미 고려

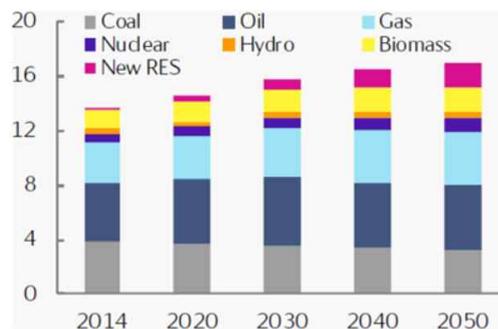
- 국지적 환경 문제에 대한 정책 및 규제 관심은 유지되지만 전 세계적 환경 문제에 대한 무관심 고조

- 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

3.2 시나리오 전개에 따른 에너지 및 원자력 전망

● 현상유지 시나리오:

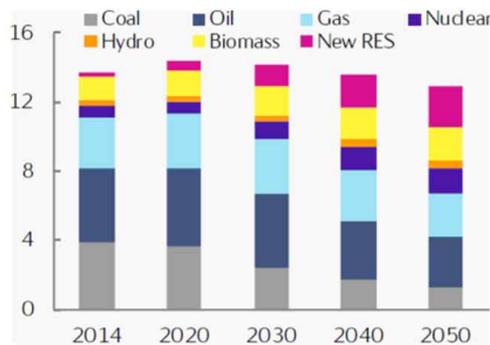
- 원자력은 2050년까지 매년 평균은 1.2 %/년 증가
- 2050년 세계 발전량의 비율은 15 %이며, 3840 TWh
- 해당 기간 동안 수요는 44 % 증가
- 예상되는 경제 성장률 저하는 지역간 기술 교환 및 협력 부족으로 인한 것
- 자본은 적지만 국제 무역 부족 및 보호주의로 인한 공급 안보의 필요성 때문에 원자력이 필요.



현상유지 시나리오의 세계 1차 에너지 수요 (Btoe) Statoil, Energy Perspectives 2017: Long-Term Macro and Market Outlook, Statoil ASA, Stavanger (2017).

● 화합 시나리오:

- 원자력은 2050년까지 매년 2.3 %/년으로 증가하여 총 124 % 성장하여 두 배 이상 증가
- 온실가스 배출 감소 목표 달성을 위해, 화석 연료의 대체와 전력 수요의 증가분을 감당할 수 있는 원자력 필요
- 2050년에 원자력은 총 전력 생산량의 16%를 차지하며 총 원자력 용량은 5600 TWh
- 원자력 에너지 믹스의 중요 부분이며 기저 부하 전기의 핵심 부분.

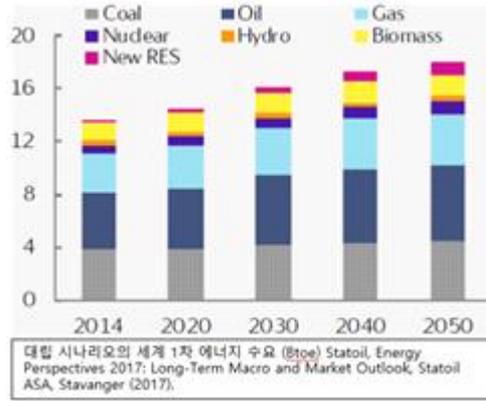


화합 시나리오의 세계 1차 에너지 수요 (Btoe) Statoil, Energy Perspectives 2017: Long-Term Macro and Market Outlook, Statoil ASA, Stavanger (2017).

● 대립 시나리오:

- 복잡하게 얽힌 국제정치 상황 때문에 에너지 안보를 최우선 순위
- 이런 조건 속에서도 2050년의 원자력 전망치는 3.64 PWh
 - ◆ 이는 참고 사례인 '현상유지' 시나리오의 예측치인 3.84 PWh와 유사.
 - ◆ 원자력은 에너지 안보에서 다른 에너지원보다 비교 우위에 있기 때문.
 - ◆ 에너지 안보의 중요성에 따라 원자력을 개발하였던 1970년대와 1980년대와 유사

- 낮은 성장률, 증가하는 보호주의 등 세계 경제에 대한 낙관적이지 않은 시나리오에서도 원자력이 그로 인해 발생하는 에너지 안보 위험에 대비하는 헛지에 사용될 것으로 예상.

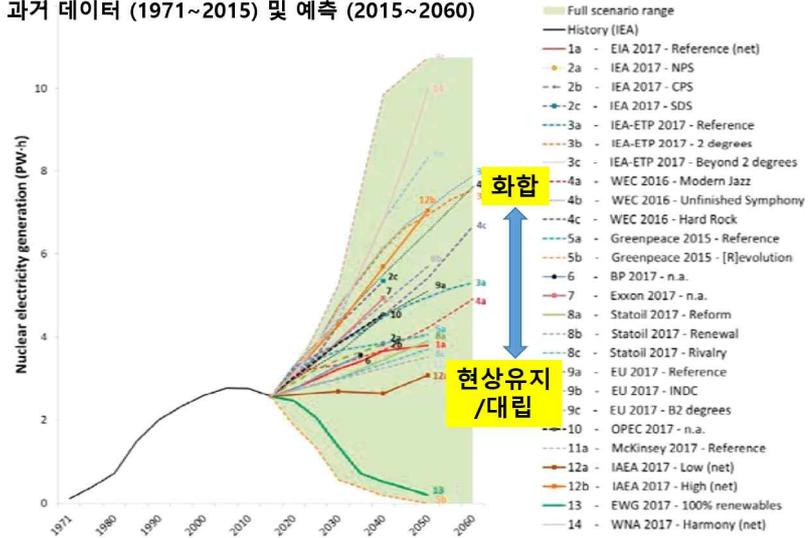


대응 시나리오 요약

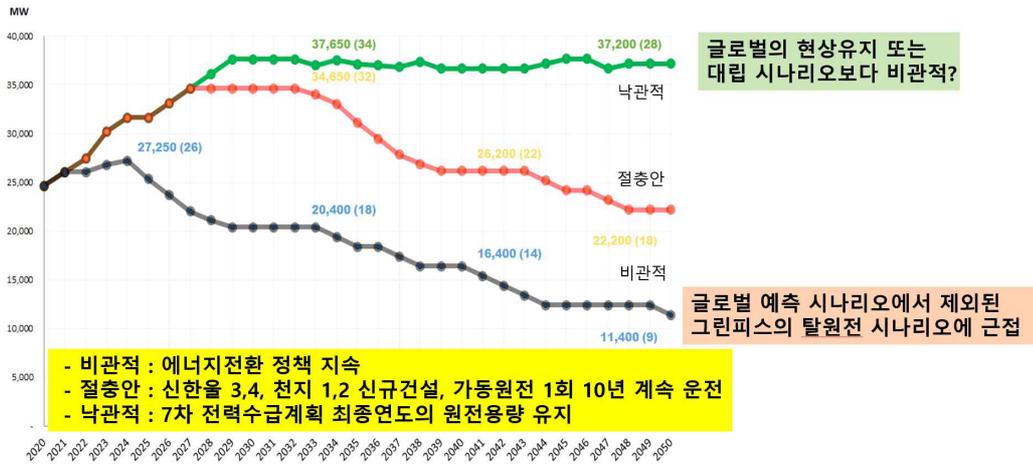
	현상유지	확합	대립
속성	<ul style="list-style-type: none"> 소극적 NDC 이행, 국제질서 현상유지 무 보조금 시장중심 (혁신과 기술개발) 저탄소 기술 상용화 탄소가격체계 미작동 (CCS는 비경제 대안) 	<ul style="list-style-type: none"> 2°C 제한 요건 준수, 국제협력발전 탈탄소화, 전기차 시장기반 ESS 기술 성숙 송배전 네트워크 강화 주택, 건물 개조 경제는 현상유지에 비해 더 성장 	<ul style="list-style-type: none"> NDC 파기, 국가이익 우선 지정학적 경쟁 고조, 국제적 이득 보다 물리적 장벽과 국경통제로 세계화 후퇴 기후회의론 경제성장 훨씬 낮음
에너지	<ul style="list-style-type: none"> 수송, 건물 효율개선 전기차 보급 확대 신재생과 전기차에 대한 규제 및 인센티브, 보조금 점차 폐지 GDP>효율개선으로 에너지소비 증가 에너지원단위 1.9%/년 개선 에너지소비 2014-2050 0.6%/년 증가(총 24% 증가) 	<ul style="list-style-type: none"> 에너지원단위 감소속도가 경제성장을 압도 에너지원단위 2.8%/년 감소 2050 에너지수요 2014의 94% 수준(6% 감소) 	<ul style="list-style-type: none"> 화석연료 수요증가와 에너지가격 상승, 변동성 증가 탄소가격은 정책의제에서 멀어짐 신기술에 대한 인센티브 배제(CCS 불고려) 지구적 기후문제 무시 전기차 보급 속도 둔화 에너지원단위 1.1%/년 개선 에너지수요 32% 증가
전력비중	→ 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 탈성 실패	CO2 크게 감소	현상유지 보다 오히려 증가

● 글로벌 미래 원자력 예측 시나리오: 기후변화가 가장 큰 동인

과거 데이터 (1971~2015) 및 예측 (2015~2060)



● 우리나라 미래 원자력 예측 시나리오: 국가 정책이 가장 큰 동인?



4. 원자력 기술의 변화 방향

● 현상유지 시나리오: 전력계통/시장의 핵심 키워드와 원자력 기술

■ 신시장의 적응과 신제품 개발

◆ Energy Storage(에너지저장)

- 재생에너지 확대에 따른 에너지저장장치 수요가 대폭 확대
- 기존 battery는 대용량, 장주기 에너지 저장에 한계가 있으며 기술 대안들은 여전히 경제성에 문제가 있음
- Isotope energy storage, 용융염전지 등 원자핵공학에 기반한 새로운 기술 개발 필요
 - = 원자력발전소에 적합한 그리고 기술 특성에 부합하는 에너지저장기술 개발

◆ Dispatchability(급전가능성)

- 간헐성을 갖는 재생에너지 확대에 따라 부하 추종 능력에 대한 수요가 점증
- 제한적이거나 기존 원전의 출력제어를 위한 제어 알고리즘 개발, 안전성 검증 필요.
- 기존 원전의 출력제어가 제한적인 경우 기존 ESS와의 결합을 통해 출력제어 능력을 향상시키는 방안도 고려
- 출력제어 능력 보강을 위해 2차측에서 전기출력을 제어할 수 있는 시스템이 가능
 - = 미래 원자로는 출력제어능력을 갖추도록 설계 되어야 함.

■ 에너지시장에서의 역할 지속

◆ 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 분산화가 확대되고 있음.
 - = 소규모 분산 전력시스템에 적합한(소형, 용이한

유지관리, 높은 출력제어 성능을 갖춘) 원자로 기술 개발 필요

◆ Low capital cost(자본비용)

- 경쟁전력시장은 미래 수입에 대한 불확실성이 커서 초기자본투자비가 적은 LNG 복합발전에 대한 선호가 높았음. 향후 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 원자로로는 초기자본투자비와 폐로비가 대폭 축소되어야 함.

■ 원자력 에너지 기술(원자로)

◆ 혁신형 소형원자로 개발

- 인쇄기관형증기발생기
- 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 등

◆ 차세대 동력변환시스템 개발

- 독립전원 이용 가능 메가와트급 초임계 CO2 발전시스템 설계
- 메가와트급 초임계 CO2 발전시스템 핵심기기 기술 검증
- 플랜트급 수메가와트 초임계 CO2 발전시스템 상세 설계

■ 우주용 원자로

◆ 우주추진체

◆ 우주전력공급원

● **화합 시나리오: 4차산업혁명 기술의 원자력 응용**

■ 4차산업혁명 기술의 원자력 응용

◆ 4차산업혁명 기술의 적용

- 인공지능/딥러닝(Deep Learning), 로봇, 자율주행, 사물인터넷(IoT), 신소재, 3D프린팅 등 선진제작 기술의 적용을 통한 에너지 시장에서의 성장
- 방사선 기술, 원자력 외부 분야의 제품 생산기술을 통한 기술 영역의 확장

■ 원자력 응용 분야

- ◆ 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)

■ 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/대처를 위한 지능형 의사결정 지원 플랫폼 개발
- ◆ 사고진행 평가 및 방사성물질 방출 저감기술 개발
- ◆ 방사성물질 환경누출 저감을 위한 무인장비 개발·방사성물질 환경방출에 따른 개인맞춤형 재난대응 솔루션 제공

- 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 향상방사선 융합 생물분자공학 원천기술 개발
 - ◆ 생체분자 재조합기술 세포공장구현기술 천연고분자 가공기술사회 인프라·먹거리 정밀 안전진단용 방사선 기술개발
 - ◆ 구조 안전진단, 먹거리 안전진단, 방사선 안전·감시 등
- 양자 팸(Quantum FAB) 기술 개발
 - ◆ 양자팸 핵심요소기술 개발 (설계-합성-측정-제어-분석) 전주기 양자소재물질 연구개발 플랫폼 구축
 - ◆ 다중극한환경 융합 멀티스케일 복합양자빔 측정기술 개발
 - ◆ 양자컴퓨팅/양자기능성/양자에너지 소재물질 개발
- 미래 신소재 핵심기술-양자빔 이용 복합기능 미래소재 기술개발
 - ◆ 고성능 경량 중성자흡수재 개발
 - ◆ 기체 분리막 소재 개발
 - ◆ 중성자빔 활용 소재 평가기술 개발

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 선원량 예측이 가능한 딥러닝 시스템	딥러닝
		무인비행체-딥러닝 기반 재난현황 실시간 분석 시스템	딥러닝, 자율주행
		사고 대응용 원격 로봇시스템	로봇, IoT, 자율주행
	환경	재난대응용 개인 맞춤형 솔루션 딥러닝 시스템 개발	딥러닝
		딥러닝 기반 환경방사선 모니터링 분석 자동화 시스템	딥러닝
		해양방사능 측정 자동화 시스템	딥러닝, 로봇
안보	딥러닝 기반 환경시료 방사능 분석 자동화 시스템	딥러닝	
유체계통	기기	중요 원전시설 보호를 위한 안티드론 시스템	드론
		딥러닝 기반 최적설계기술 (증기발생기 등)	딥러닝
	안전해석	블록형 시스템 기기 개념	선진제작
		유동해석 딥러닝 기술	딥러닝
원자로	시스템	딥러닝 기반 비파괴 유동안전 평가기술	딥러닝
		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	인공지능기반처분장공학적방법적화설계기술개발	딥러닝
	고준위 방사성폐기물 처분 종합관리 시스템 개발	딥러닝, IoT	

● **대립 시나리오: 원자력과학기술로의 전환**

대분류	소분류	분야	적용미래기술
의학	진단	진단을 위한 초고해상도화 기술	딥러닝
		중양 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 NDT 반도체 최적도평 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
양자컴퓨터	양자칩 핵심소재 물질 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	로봇, 딥러닝
우주	우주	우주방사선 측정 기술	미래기술
		핵전지 기술	선진제작
		위성용 소형-경량 원자력 발전기술	선진제작

■ 원자핵과학기술(Nuclear Science and Technology)

- ◆ 원자로(Reactor), 가속기(Accelerator), 핵변환/반응(Nuclear Transmutation/Reaction), 방사선조사 (Irradiation)를 이용한 모든 활동

■ 원자핵 응용연구 (Nuclear Application) 분야 활성화

- ◆ 기초연구(측정, 분석기술)
- ◆ 환경보호
- ◆ 수자원 확보
- ◆ 의료(암진단, 치료)
- ◆ 신소재
- ◆ 양자기술(기초연구)
- ◆ 산업응용(공정진단, 비파괴검사 등)
- ◆ 식품 농생명에너지(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 넘비현상을 완화하여 지역사회의 수용성을 향상시킬 수 있는 방안으로 처분영역을 5km이내의 연안 대륙붕에 건설하는 개념

5. 종합적 전망 및 건의

- 세계 에너지수요는 2040년까지 시나리오에 따라 연평균 $-0.3\% \sim 1.2\%$, 전력수요는 $0.4\% \sim 1.2\%$ 증가를 전망함. 원전은 $1.1\% \sim 2.2\%$ 증가 예상
- 국내 에너지수요는 2040년까지 연평균 -0.1% 로 약간 감소, 전력은 0.6% 증가. 원자력은 -0.01% 감소 전망
- 세 시나리오의 혼합 구성 시, 미래 원자력의 역할에 대한 광범위한 이미지로 활용 가능.
- 코로나 사태와 같은 범지구적 환경오염 문제가 빈번할 시,
 - 결국 신뢰할만한 소규모 집단으로 인류는 세분화되어 갈 것이며,
 - 분산, 독립 에너지원의 안정성이 인류의 생존과 직결되는 사안으로 등장함과 동시에
 - 청정 기술에 대한 완벽성을 추구하게 될 것으로 보임.
 - 한편, 직접 대면하는 것보다 비대면 Communication이 매우 성장할 것으로 보이며,
 - 현재의 지구보다 더 나은 환경을 찾아 떠나는 기술의 발전으로 이어질 것으로 보임.
- 전 세계적으로 에너지 수요는 꾸준히 증가할 것이며, 온실가스 완화 시나리오 상 2050년까지 원자력의 활용의 지속 전망.
- 원자력이 비 기후적인 이점인 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 예상되고, 그 이후 영구정지발전 고려 시, 장기적으로 총 300여 기의 신규 원전건설이 전망되는 바, 원전기술 수출경쟁력 유지 및 전략적 협력체계 구축 필요. 이를 위해, 원전기술 및 기기공급 산업체 유지발전과 지속적인 원전안전성 강화 기술연구개발, 인적 자원 육성 및 유지가 필요함.

- 또한 풍부한 원전산업 인프라와 함께 국내외 원전운영 및 건설경험, 적기건설 능력 등 강점을 잘 이용하고 금융조달 능력 등 약점을 보완하여 통합역량을 강화하고 유력공급사와의 전략적 제휴를 통하여 선택과 집중의 전략을 수립하여야 할 것임.
- 소형원전(SMART), 최신기술중형원전(APR1000) 등 수출대상 노형을 국내에 건설 운영하여 수출노형의 경쟁력을 강화하고 새로운 수출대상 노형을 개발하여 포트폴리오 상품을 확보하는 등 다양한 원전수출 노형화 전략 필요.
- 원자력 기술의 우위를 유지하려면, 차세대원전 기술개발에의 지속적 투자로 차세대원전 상용화에의 선도 역할 수행 필요하며, 원자력 수소생산을 포함한 그린수소 생산의 추구 시, 수소사회로의 진입 가능 전망됨.
- 온실가스 완화와 에너지 보안에 탁월한 특성을 보유한 원자력은 미래에도 지속가능한 에너지원으로 고려되니 적극적인 원자력 성장에 매진 필요.
- 에너지 수요와 환경보호라는 공동의 목표 달성에 한 축이 원전수출이며, 이에는 소형원전과 수소사회도 포함되니 이에 대한 적극 지원 필요.

6. 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_-_apr_2018.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)
 - 1. [24] 제2기 미래특별위원회, 한국원자력학회 “원자력 미래 전망예측 및 대처방안”

별첨 1. 자문회의록

1. 원자력수출 분야

- 일 시 : 1차(2020.10.7.)/2차(2020.12.09.)
- 전문가 : 한수원 원전수출처 김용수 처장, 삼일회계법인 한정탁 이사
- 1차 자문내용 요약(김용수 처장, 한국수력원자력 원전수출처)
 - : 원전기술 수출 추진현황 및 전략
 - 한국원전산업의 수출경쟁력 현황
 - 세계 최고수준의 건설역량과 안정적인 공급망, 풍부한 기술인력을 확보하고 있는 등 강점이 있는 반면 경쟁사 대비 글로벌 조직 및 인적 역량, 해외 네트워크와 금융역량이 부족한 약점도 있음
 - 정부의 에너지전환정책의 유지에 따라 중장기적으로 원전산업계 환경이 위축되는 등의 위협요인이 있는 반면 전 세계적인 저탄소발전원의 수요 증가로 원전의 수요가 지속적으로 증가될 것으로 예상되는 기회 요인도 함께 상존 함
 - 주요 수출전략
 - 해외기업과 전략적 파트너십 강화
 - 보유노형을 기반으로 국가별 customized 설계 개발 공급
 - 기타 금융능력 강화, 국내원전기술의 국제성 강화 등
 - 해외 원전사업 참여 대상국가
 - 체코, 폴란드, 사우디, 남아공, 루마니아 등
- 2차 자문내용 요약(삼일회계법인 한정탁 이사)
 - ; 발표내용 : 해외원전사업 진출을 위한 재무적 고려사항
 - 세계에너지시장 전망
 - 저탄소에너지원 기조의 지속으로 신재생에너지와 함께 원자력에너지의 수요도 지속적으로 증가가 예상됨
 - 글로벌 원전사업 현황
 - 총 31개국 441기 원전 운영중

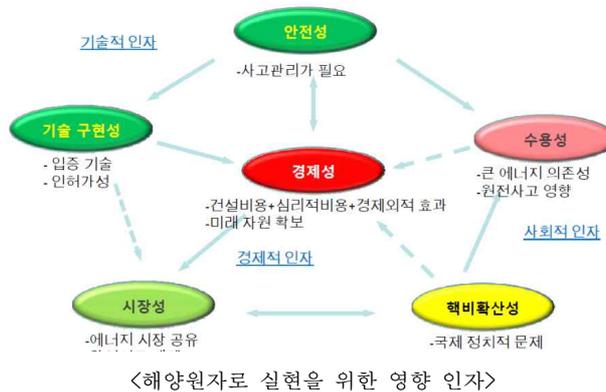
- 전 세계적으로 건설 중인 원전은 54기, 계획 중인 원전은 91기 정도임
- 예비타당성 조사 제도
 - 공공기관운영에 관한 법률에 따라 공기업, 준정부기관은 총사업비 1000억원 이상 이면서, 국가의 재정지원 및 공공기간 부담금의 합이 500억원인 신규투자사업, 자본출자에 해당하는 사업은 정부의 예비타당성 조사 및 승인을 받아야 함
 - 원칙적으로 사업시행 전년도 1월말 또는 5월말, 9월말까지 정부에 신청
 - 사업타당성 및 재원조달 가능성 등 수익성 부분이 65%를 차지하고 나머지는 정책성과 국내경제파급효과의 공공성을 평가함
- 해외원전의 M&A 전략
 - 해외원전사업의 효과적 진출방안의 하나로 M&A전략을 선택할 수 있으며 이때에는 지배력 보유, 이중과세방지협약, 소득에 대한 원천징수 등에 대한 세밀한 검토가 필요할 것 임
- 해외원전사업을 위한 재원조달 방안
 - 해외원전사업의 재원조달 방안에는 정부지원과 기업금융 등의 여러 가지 방법이 있으나 보통 복수의 방안이 사용되고 정부의 지원 및 ECA참여는 필수적일 것으로 예상

2. 원자력과 해양 자문 요약

- 일시: 2020년 11월 12일
- 전문가: 박찬홍 한국해양과학기술원 독도전문연구센터장
- 자문내용
 - 국내외 해양 현황 및 연구 정리
 - 세계 표층 수온 상승률 및 미래 전망: 동해 및 독도 주변 해수 온도 100년에 5도 이상 증가 예상. 현재의 온난화 지속될 시 한반도에 제주도 면적 만큼이 없어질 가능성 제기
 - 해양 자원 소개: 해양광물 자원인 메탄가스 하이드레이트, 망간단괴, 망간각, 열수광상 다금속 황화물 등. 특히 심해 망간단괴 자원의 경우 하와이 클라리온 균열대 및 클리퍼턴 균열대 인근 심해저 광구에 대한 한국 독점 개발권 확보
 - 동해 해양 자원 소개: 천연가스 자원, 동해 메탄가스 하이드레이트

부존 확인. 매장량 6억톤 추정. 이에 따른 해저 지형 지질 탐사, 심해 조사의 필요성 설명

- 다양한 무인 자동 조사 시스템 소개: 자율 무인 잠수정, 수중 글라이더 등 심해 탐사 장비 소개
- 해양-원자력 융복합 발전 방안 제시: 컨테이너선의 초대형화 및 환경 규제 강화에 대응하기 위한 원자력 추진 적용 가능성 제안. 안전성, 기술 구현성, 경제성, 시장성, 핵비확산성, 수용성 등 해양원자로 실현 조건 제시.



○ 일시: 2020년 11월 30일

○ 전문가: 신현준 한국조선해양 미래기술연구원 미래선박연구실장

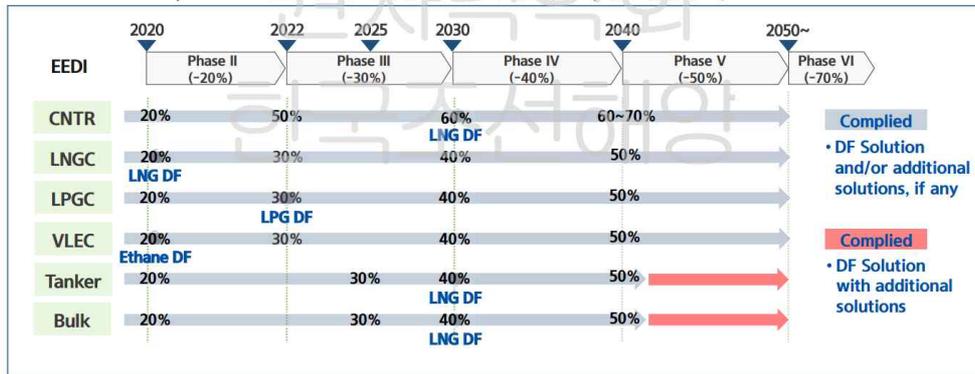
○ 자문내용

- 선박시장 트렌드: IMO 온실가스 배출 감축 계획 발표에 따른 해운 시장 환경 규제 강화. 현존선 운항 기반 조치 및 시장기반조치 설명
- 그린선박기술 소개: 에너지 효율 향상, 온실가스 저감, 대체연료 사용으로 구분된 그린쉽 기술 소개
- 친환경 대체 연료 개발 현황 소개: 현재 검토 중인 LNG, 메탄올, 암모니아, 바이오연료, 수소, 연료전지, 배터리, 재생에너지의 장단점 요약. 가장 널리 사용될 것으로 전망되는 LNG와 수소, 암모니아 등 무탄소 연료 간 장단점 비교 분석. 2040년 이후 대형 유조선, 벌크선 등에 추가적인 탄소 배출 저감 기술 필요성 설명.
- 원자력 추진 선박 및 해양분야 적용 전망: 원자력추진 일반 상선은 높은 출력을 필요로 하는 초고속 컨테이너선, 대형 유조선등 40

KTS 이상의 속도를 갖는 선박에 적합. 전주기연료무교체, 원자로 관리비 130% 가정 시 9-12년의 투자회수기간 전망. 원자력추진 쇄빙선은 기존 항로 대비 거리 30% 단축이 가능한 북극 항로 물동량 증가에 대비하여 준비 필요. FPSO, 부유식원전 등 다양한 활용 가능성 제시.

- 실현을 위한 검토 사항으로 경제성 (낮은 OPEX, 높은 CAPEX), 수용성, 안전성, 핵비확산성, 해양 및 해사 규정 등을 제시.

- 대양항해 대형선박 기준 LNG DF, LPG DF, Ethane DF EEDI Phase V by 2050 최적 해결방안 으로 인식
- Tanker, Bulk Carrier 는 추가적인 솔루션이 필요(ESD, 연료질감장치)



<IMO 이산화탄소 저감 목표 만족을 위한 선형별 해결방안>

3. 수소경제 이행현황과 향후 과제

- 일시: 2020년 11월 12일
- 전문가: 에너지경제연구원, 김재경 박사
- 자문내용
 - 수소경제 활성화 로드맵 비전과 목표 소개
 - 수소경제 활성화를 위한 상세 추진전략: 수소차, 수소충전소, 연료전지, 수소공급, 수소 저장 및 운송 분야 별 상세 계획 제시
 - 수소경제 활성화를 위한 상세 추진 경과 소개: 2019년 로드맵 발표 이후, 3차에너지 기본계획, 수소기술개발로드맵, 수소법 제정 등이 추진됨
 - 에너지전환정책과 그린수소 정책 추진 배경: 간헐성, 공급 과잉 문제 해결을 위한 재생에너지 연계 수소 생산 추진 중
 - 수소경제 이행을 위한 수소 생산 및 공급 전략의 보완점 분석
 - (1) 수소 활용 부문별 수소 조달계획(생산방식 믹스(포트폴리오))

구체화

(2) 전체 수소 생산방식의 믹스(포트폴리오) 목표의 구체화

(3) 친환경 CO₂-free 수소 생산공급 확대

- 수소생산 방식의 포트폴리오 권고안 소개
 - ▶ 수소생산의 탈탄소화: 수소생산 방식 별 온실가스 배출량 분석
 - ▶ 수소가격 경쟁력 확보: 충전소 공급가격 3000원/kg 달성 필요
 - ▶ 적정 수소생산 방식: 천연가스 추출방식의 비중이 절대적, 대체 방식 부재. 2040년까지 수입량이 57%에 이르는 포트폴리오 제안. 수소 해운 이송 기술 개발 필요. 친환경 수소 인증제도 도입 필요성 제시.
- 현재 그린뉴딜 정책에 원자력을 이용한 수소생산이 포함되어 있지 않으며, 현 정부 하에서의 추진은 어려울 것으로 전망됨
- 탄소중립선언, 그린수소 실현은 원자력의 이용과 양립할 수 있음
- 원자력을 이용한 고온증기분해 시 2000원/kg 달성 가능 예상
- 수입 시 단가 전망이 낙관적이라 판단됨
- 향후 수소경제화 로드맵에 대한 단가평가, 계획평가가 진행될 예정임
- 탄소중립 선언 이후 정부 부처별 대응 준비 중

4. Development and Future Application of Micro Reactor

○ 일시: 2020년 10월 22일

○ 전문가: 전력연구원 차세대전력그룹 김찬기 처장

○ 자문 내용 ;

■ 기존 국내 전력 계통

- ◆ 다른 나라와 연계되지 않은 독립계통
- ◆ 대부분의 발전소는 해안가에 분포
- ◆ 대부분의 전력수요는 수도권에 밀집
- ◆ 국토 면적이 좁아 발전소 당 발전규모 대용량화
- ◆ 세계적인 고품질 전력 공급, 저렴한 전기요금

■ 국내 신재생 확대와 마이크로 그리드

- ◆ 신재생 발전량 변동성 및 불확실성: 계통고장, 재래식 발전량, 부하 변동
- ◆ 마이크로 그리드 원천 기술 부족
- ◆ 그리드 별 연계에 대한 정밀한 분석 부재

- ◆ 매크로 그리드와 마이크로 그리드의 결합 필요: 병렬구조의 전력망으로 에너지 공급 제어
- 독일, 스위스, 일본을 참고한 국내 신재생에너지 정책 권고사항
 - ◆ 기존 계통에 신재생에너지, LNG, 에너지 저장장치 추가는 기하급수적인 비용 증가 야기
 - ◆ 기존 전력망에 멀티마이크로 그리드와 전력시장 자유화 추가 필요
 - 전력시장 자유화, 기존 기술+통신+전력거래+에너지원 선택
 - 대형원전은 저렴한 에너지로 안정적인 기저전원 역할을 수행하는 국가 관리 전원
 - 초소형원자로나 소형모듈원자로는 전력망에서 낮은 효율성
 - ◆ 신재생에너지의 비즈니스화(에너지 화폐화)
 - 전력계통/통신/전력전자/전력 경제의 결합
 - ◆ 현재의 한전체제의 통합된 전력망으로는 자기 회복 및 고장 자가 복구 불가능
 - ◆ 공기, 식량, 안보, 전기는 국가의 의무임.

5. 미래국방 미래국방 미래국방 미래국방 전력화 성공 보장을 위한 新 에너지 활용방안

- 일시: 2020년 11월 30일
- 전문가: 육군사관학교 김주희 교수
- 자문 내용 ;

● 국방 전력화 성공을 위한 신에너지 활용 방안

- 국방녹색기술정책
 - ◆ 국방녹색기술 개발을 통한 군사력 건설
 - ◆ 국방녹색기술로 저탄소 녹색성장을 견인
 - ◆ 방산 녹색시장 선점으로 신성장동력 확보
 - 친환경 녹색에너지 활용 기술 개발
 - 저탄소 미래에너지 기반 체계 적용 기술 개발
- 국방용 에너지
 - ◆ 에너지 수요 증가로 기존 전원체계 한계
 - ◆ 기존 에너지원 대비 무소음, 고출력밀도 에너지원 개발 필요
 - ◆ 원자력에너지원: 전략적 이용 가능, 출력 대비 작은 요구면적
- 미 육군의 1~5 MWe급 이동식 초소형 원자로 개발('23년 실증)

- ◆ 지속적인 연료 공급 없이 고품질 전력을 전장에 공급 가능
- ◆ 다양한 지역에서 대규모 작전 에너지 공급 가능
- ◆ 화석연료에 대한 군수지원 감소, 핵연료 교체 최소화
- ◆ 경제적 이점
 - 안전성, 이동성, 용량 변화 및 저장 보관 용이
 - 총 제작비 절감, 운영 및 유지 비용 최소화, 전기세 절감
- 한국의 이동식 초소형원자로 필요성
 - ◆ 고풍력 에너지가 필요한 무기체계 (게임 체인저)
 - ◆ 고 에너지 무기 및 작전 지휘소 운용: 이동형 1~2MWe
 - ◆ 디젤발전기 운용 시 작전지역 연료 수송/ 저장 문제
 - 1MW급 디젤발전기(12시간) 1일 32드럼, 연간 12,000드럼
 - ◆ 사단급 이동형 에너지 스테이션: 군수지원소요 획기적 절감
 - ◆ 민군 겸용: 도서지역 분산 및 독립전원으로 활용 가능(수출)
 - ◆ 정책적 대안
 - 개발자: 안전성, 초소형, 단순한 설계 및 운전
 - 군: 필요성/유용성에 대한 공감대 형성, 규제 정책 제안
 - 수요분석: 육군→해/공군→민간분야(수출)
 - IAEA와의 관계, 물리적 방호 및 방사능 대책 추가