

# 2050 탄소중립 에너지기술 로드맵

## — 청정연료발전



탄소중립은 이제 글로벌 뉴노멀이자 새로운 성장 패러다임으로 자리잡았습니다. 전세계 140여개국 이 탄소중립을 선언하고, 미국·EU 등 주요국들은 탄소중립 이행 계획을 수립하고 대규모 재정투입 및 탄소국경세 도입 등 본격 착수단계에 돌입하였습니다. 우리나라도 '20년 10월 2050 탄소중립 선언, '21년 10월 2050 탄소중립 시나리오 및 2030 NDC 상향 확정·발표하였습니다. SK하이닉스, LG에너지솔루션 등 13개 우리 기업들도 글로벌 RE100에 가입하고 탄소감축 투자확대, ESG 경영에 적극 나서고 있습니다.

탄소중립은 우리 경제의 새로운 도약 기회이나, 그 도전 과정에서 죽음의 계곡과 다윈의 바다를 건너야 하는 부담감도 따릅니다. 정부는 12월 10일 탄소중립 실현을 위한 중장기 비전과 정책과제를 담은 '산업·에너지 탄소중립 대전환 비전과 전략'을 발표하였습니다. 동 전략에 따르면 '50년 재생에너지 전원 비중은 '18년 3.6%에서 '50년 70.8%로, 또한 '50년 청정수소 공급률은 60%로 끌어올릴 계획입니다.

탄소중립 실현을 위해서는 화석 연·원료 기반인 현재 산업·에너지 구조의 근본적인 전환이 요구되며, 특히 기존의 생산 방식과 효율을 뛰어넘는 한계돌파형 기술개발이 필요합니다. 이에 정부는 금년 11월 17일 '탄소중립 산업·에너지 R&D 전략'을 발표하고 2030 NDC, 2050 탄소중립 실현을 위한 핵심기술과 개발 이정표를 제시하였습니다. 동 전략의 기초가 되는 본 로드맵은 청정연료발전, 전력계통, 그린수소 등 에너지 13대 분야 197개 핵심기술 개발 일정을 담고 있으며 향후 30년간 탄소중립 에너지 기술개발의 밑그림이 될 것입니다.

끝으로, 산업통상자원부는 본 로드맵 집필을 위해 13개 작업반을 올해 4월부터 11월 까지 약 8개월간 구성하였으며, 동 작업반을 통해 각고의 노력을 기울여주신 180여 명의 산·학·연 전문가와 정부 관계자 여러분께 진심 어린 감사의 말씀을 전합니다. 기업을 위한 탄소중립 원칙 아래 2050 탄소중립 달성을 위해 모든 정책역량을 모아 원천 기술을 확보할 수 있는 새로운 기회 창출이 이루어지도록 최선을 다하겠습니다.

2021년 12월  
산업통상자원부 제2차관 박기영



코로나 팬데믹과 기후 위기는 탄소중립이라는 국제 합의를 끌어냈으며, 현재까지 140여 개국이 2050년 온실가스 배출제로 선언에 동참했습니다. 美 바이든 행정부는 파리협약에 재가입했고, 2050년 100% 청정에너지시대 실현을 선언하였습니다. 중국은 시진핑 주석의 탄소중립 선언에 힘입어 2020년 133GW의 재생에너지를 설치했습니다. 독일도 지난해 재생에너지 발전 비율이 46%로 증가했고, 특히 1분기에는 52%로 전통 에너지를 넘어섰습니다. 제조업 비중이 큰 독일은 최근 30년간 국내총생산(GDP) 54% 증가, 에너지 소비 14% 감소 양상을 보여, 산업분야 탄소배출 비중이 큰 우리나라에 시사하는 바가 큼니다.

우리 정부도 이러한 세계적 추세에 발맞추어 지난해 10월 탄소중립 목표를 선언하고, 12월 관계부처 합동으로「2050 탄소중립 추진전략」을 발표하였습니다. 현재 정부가 추진하는 탄소중립은 에너지 공급 차원의 전환뿐만 아니라, 多배출 제조업의 산업구조 전환 부문까지 포괄하는 쏠 부문의 전환을 뜻합니다.

탄소중립의 성공적 달성을 위해서는 무엇보다 현 기술을 뛰어넘는 혁신기술 확보와 저탄소 혁신성장 산업으로의 전환이 중요합니다. 한국판 그린뉴딜을 통해 기확보된 기술경쟁력을 중심으로 글로벌 탄소중립 속도 경쟁에서 우위를 다지고 신시장을 선점해 나가야 할 것입니다. 또한, 탄소중립의 새로운 성장동력으로서 에너지 혁신을 가속하기 위해 산학연 모두가 뜻을 모아야 합니다. 이러한 시점에서, '2050 탄소중립 에너지기술 로드맵'이 우리의 에너지 시스템을 근본적으로 혁신하고, 앞으로 미래 에너지산업의 투자를 견인할 것이라고 확신합니다.

끝으로, '2050 탄소중립 에너지기술 로드맵 수립'을 위해 아낌없는 헌신과 노력을 해주신 모든 분과위원님과 관계자 여러분께 진심으로 감사 인사드립니다.

2021년 12월

한국에너지기술평가원장 권기영

권기영



| 청정연료발전 |



## I. 개요

1. 분야 정의 .....	2
2. 전략방향 설명 .....	3
3. 선정배경(탄소중립 관점) .....	5
4. 핵심수단 및 전략도출 .....	10
5. 전략방향-핵심기술 로드맵 .....	11



## II. 비전 및 목표

1. 비전 및 목표 .....	14
------------------	----



## III. 전략방향 및 핵심기술

1. 수소/암모니아 터빈 기술 .....	16
2. 무탄소 보일러 기술 .....	41
3. 신발전 및 재생에너지 연계 기술 .....	61



2050 탄소중립  
에너지기술 로드맵

# I

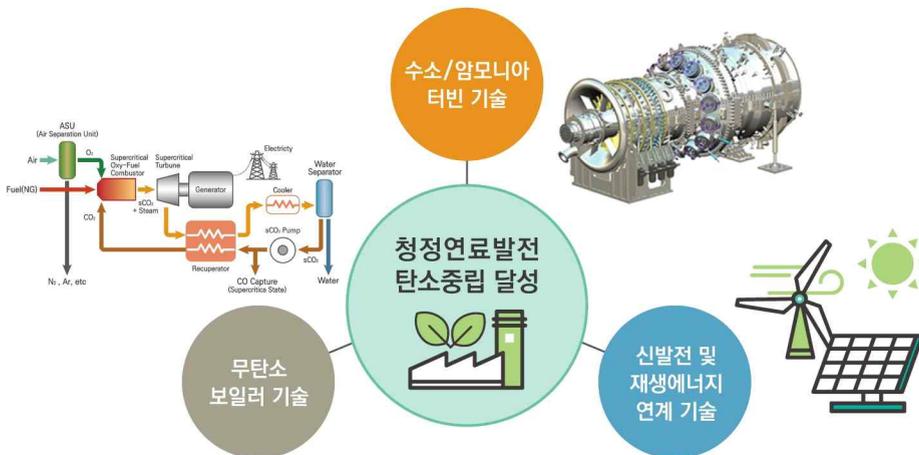
## 개요

1. 분야 정의 .....	2
2. 전략방향 설명 .....	3
3. 선정배경(탄소중립 관점) .....	5
4. 핵심수단 및 전략도출 .....	10
5. 전략방향-핵심기술 로드맵 .....	11

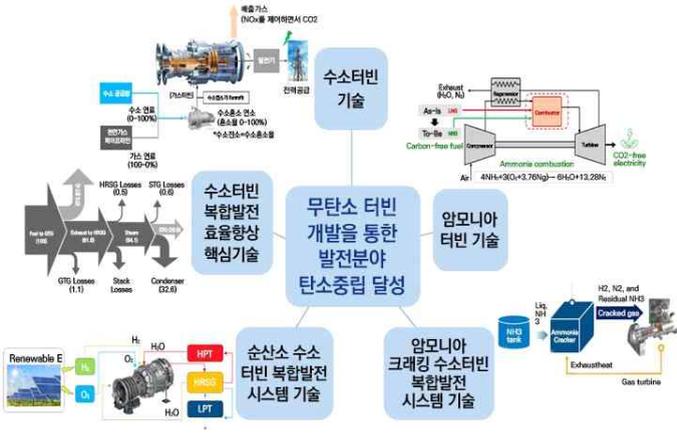
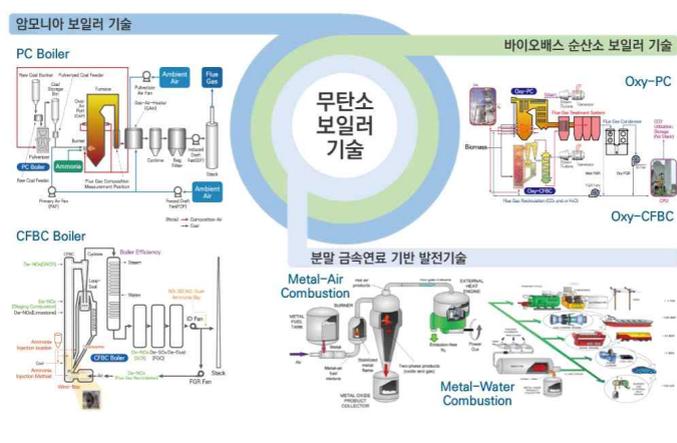
## 01 분야 정의

- 기존 화석연료의 무탄소 연료로의 전환 혹은 재생에너지와의 연계 등을 통해 이산화탄소를 배출하지 않거나 혹은 획기적으로 저감함으로써 탄소중립(Net Zero)에 기여할 수 있는 청정연료 발전 기술
- 수소/암모니아 터빈 기술 : 기존 LNG 대신 무탄소 연료인 수소 또는 암모니아를 사용하는 가스터빈으로서, LNG 복합발전의 에너지원 전환을 통해 발전 부문 2050 탄소중립 달성에 기여하는 기술
- 무탄소 보일러 기술 : 화력발전 보일러의 기존 연료인 석탄을 무탄소배출 또는 역배출(negative emissions)이 가능한 암모니아, 바이오매스 또는 분말금속 연료로 전환하고, CCUS(Carbon Capture, Utilization and Storage), 순산소 연소기술과 연계함으로써 이산화탄소와 미세먼지 배출을 혁신적으로 저감하는 기술
- 신발전 및 재생에너지 연계 기술 : 발전 분야에서 배출되는 이산화탄소의 혁신적 저감을 위해 타 산업군 혹은 타 발전 시스템과 융합된 신발전 기술과 재생에너지와 연계되어 시스템 효율 제고, 간헐성 보완을 통한 전력계통 안정성 향상 등을 도모하는 발전 기술

### 청정연료발전 분야 탄소중립 기술 개요



## 02 전략방향 설명

전략명	개요	목표
<p>수소 /암모니아 터빈 기술</p>	 <ul style="list-style-type: none"> <li>• 가스터빈의 기존 연료인 LNG 대신 수소 또는 암모니아를 사용하는 가스 터빈으로서, 발전 부문 탄소중립(Net Zero) 달성을 위하여 기존 LNG 복합 발전을 2050년 무탄소 발전으로 전환하는 에너지원 전환 기술</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 복합발전 분야 100% 무탄소 연료(수소/암모니아) 전환</li> <li>· 수소/암모니아 터빈 발전시스템 상용화</li> </ul>
<p>무탄소 보일러 기술</p>	 <ul style="list-style-type: none"> <li>• 무탄소 연료(carbon-free fuel)인 암모니아와 분말 금속연료, 탄소 중립 연료(carbon-neutral fuel)인 바이오매스로 연료를 다변화하고, CCUS (CO<sub>2</sub> capture, utilization and storage)와 연계 가능한 순산소 연소기술을 통해 화력발전소에서 배출되는 이산화탄소 및 2차 미세먼지 (NO<sub>x</sub>) 배출량을 혁신적으로 저감시키기 위한 기술</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 상용급 발전 플랜트 국산화</li> <li>· 암모니아 전소, 분말 금속 연소 → 온실가스 100% 감축</li> <li>· 바이오매스 순산소 연소 +CCUS → negative CO<sub>2</sub> emissions</li> </ul>

전략명	개요	목표
<p>신발전 및 재생에너지 연계 기술</p>	 <p>• 발전 분야에서 새로운 패러다임을 제시할 수 있는 융복합 신발전 기술과 재생에너지원과의 디지털화를 통해 간헐성을 보완하여 온실가스를 혁신적으로 저감할 수 있는 기술</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 신발전 원천기술 확보</li> <li>· 융복합 발전시스템 상용화</li> <li>· 재생에너지 간헐성 대응 10분 이내 가스터빈 급속기동</li> </ul>

## 03 선정배경

### 가 수소/암모니아 터빈 기술

#### ● 이슈사항

- '19년 세계 최고 수준의 수소경제 선도국가로의 도약을 목표로 하는 '수소경제활성화 로드맵' 발표 및 '21년 세계 최초의 '수소법' 시행
- 국내 LNG 발전은 지속적으로 수요가 증가할 예정('34년 58.1GW\*)이며, 이를 수소터빈으로 전환시 발전분야 탄소중립과 더불어 대규모 수소 활용처 확보 가능  
\* 제9차 전력수급기본계획
- 해외 수소의 경제적 도입을 위한 수소 캐리어인 암모니아의 시장 확대가 예상됨에 따라 암모니아를 발전 연료로서 직접 활용하는 기술 필요
- 무탄소 연료인 수소와 암모니아는 LNG 대비 연소 특성이 매우 다르므로, 혼소/전소를 위한 연소기 개발과 엔진 최적화 과정 및 실증이 필요
- 세계 5번째로 H급 가스터빈의 국내 독자개발에 성공하였으나, 수소/암모니아 연소기 및 고온 부품 분야의 선도국과의 기술 격차 해소를 위한 민관 합동 전략 마련 시급

#### ● Dilemma(난제)

- 수소/암모니아 터빈의 연소기 설계·제작, 엔진 최적화 및 실증 등에 대해 국내 기술이 부재하거나 선진사 대비 격차 존재
- 연소기와 수소/암모니아 터빈에 대한 국내 시험 설비, 성능검증 및 인증절차 부재
- 연료 수급의 안정성, 연료공급 설비 및 인프라를 위한 대규모 투자 불가피

#### ● Solution(해결방안)

- LNG 가스터빈을 대체하는 국가 차원의 선제적이고 다양한 수소/암모니아 터빈 기술의 개발 및 실증
- 발전용 수소 혼소/전소 터빈 및 분산전원용 수소전소 터빈 상용화를 통한 온실가스 저감 기여
- 발전용 대용량 수소복합발전의 고효율화 달성
- 향상된 연소성능, 저 NOx 배출이 가능한 암모니아 혼소/전소 터빈의 개발
- HPS와 등과 같은 정책, 제도적 지원과 수소/암모니아 연료의 공급망 구축  
\* Hydrogen Energy Portfolio Standard(수소 발전 의무화 제도)

## 나

## 무탄소 보일러 기술

## ● 이슈사항

- 재생에너지로의 전환 과정 중 석탄 화력발전소의 설비 투자 및 변경을 최소화하면서 이산화탄소 배출 저감 효과를 극대화할 수 있는 중단기적 국산화 기술 개발 시급
- 탄소 무배출 무탄소계 연료로 전환하거나, 탄소중립 연료인 바이오매스를 이용한 탄소역배출(negative CO<sub>2</sub> emissions) 기술을 활용하여 불가피하게 배출되는 온실가스의 상쇄 필요
- 암모니아 혼소/전소 보일러 기술, 바이오매스 순산소 연소 보일러 기술 및 금속연료와 공기/물과의 반응열을 활용하는 발전 기술 등의 연구개발과 상용화 필요성 대두
- 탈석탄 및 석탄 화력발전소 운영 감축 정책으로 인해 초래될 것으로 예상되는 좌초자산 발생 및 일자리 감소 문제를 해결하여 탄소중립 사회로의 공정한 전환 필요

## ● Dilemma(난제)

- 안전한 암모니아 저장 및 공급 기술의 개발, 연료로서 암모니아의 안전한 사용을 위한 코드 개발 및 관련법 개정 등 필요
- 발전플랜트에서 CCUS 기술 적용에 따라 발생하는 발전효율 저하와 이산화탄소 포집 기술로서의 순산소 연소와 이산화탄소 활용·저장 기술과의 연계 부족
- RPS\* 의무비율 상한 및 석탄화력발전 플랜트에서 해외 바이오매스 펠릿 사용에 따른 RPS 확보 및 REC\*\* 인증 논란
  - \* Renewable Portfolio Standard(신·재생에너지 공급의무화 제도)
  - \*\* Renewable Energy Certificate(신·재생에너지 공급 인증서)
- 바이오매스 연료의 무탄소 논쟁과 국내산 미이용 바이오매스 공급망 확보 방안 필요
- BECCUS\* 플랜트의 탄소역배출(negative CO<sub>2</sub> emissions)에 대한 CDM\*\* 인증 방법론 부재
  - \* Bio Energy Carbon Capture, Utilization and Storage
  - \*\* Clean Development Mechanism(청정개발체제)
- 향후 연구개발을 통해 확보될 암모니아 및 바이오매스 순산소 보일러 기술들의 상용화를 위해 운영 중인 석탄 화력발전소와의 협업 문제
- 분말 금속연료 기반 발전 기술의 국내 부재

## ● Solution(해결방안)

- CO<sub>2</sub> 활용-저장 기술 분야와 연계된 융합 기술 개발을 위한 지원(투자)과 제도 개선
- Negative CO<sub>2</sub> emission을 위한 해외 BECCUS 플랜트 선행 기술 벤치마킹

- 산림청과 협업을 통한 국내 미이용 바이오매스 수급 확대 및 미이용 바이오매스 활용에 따른 REC 가중치 상향 및 열 공급 인센티브 신설 등의 정책적 제도 필요
- 화력발전과 CCUS 공정을 연계하는 융합발전의 경제성 확보를 위해 carbon pricing 및 negative CO<sub>2</sub> credit 정책 마련 필요
- CDM 집행위원회에서 지정하는 국제공인 CDM 인증기관인 국내 DOE (Designated Operational Entity)와의 협업을 통해 BECCUS의 탄소역배출 인증 방법론 개발로부터 국내 및 해외에서도 실질적인 온실가스 감축이 가능한 방안을 마련하여 신시장 육성
- 분말 금속연소 기반 발전 기술에 대한 장기적인 정부지원과 이를 통한 기술성숙도 향상

## 다

## 신발전 및 재생에너지 연계 기술

## ● 이슈사항

- 온실가스의 주요 배출 분야 중 하나인 에너지 분야에서는 신재생에너지 보급/확대 및 무탄소계 연료로의 전환 정책이 주로 제시되고 있으며, 이를 달성하기 위한 新발전 기술을 개발함에 있어 필수적으로 탄소 저배출 혹은 무배출이 가능해야 함
- 이러한 시점에서 타 산업으로의 융합 및 파생이 가능한 새로운 개념의 온실가스 무배출 에너지(전력 및 열) 생산시스템의 도입이 장기적 관점에서 필요

## ● Dilemma(난제)

- 초고압, 초고온 환경에 적합한 연소 및 소재 기술에 대한 낮은 기술성숙도
  - 국내외에서 검토 및 추진되고 있는 新발전 기술의 핵심 키워드는 초고압, 초고온에 의한 고효율화(high efficiency) 및 소형화(minimization)임
  - 이를 위해 초고압, 초고온 환경에 적합한 연소 및 소재 기술이 필수적이나 국내 관련 기술성숙도가 낮아 기술 확보의 어려움이 예상됨
- 新발전 기술 보급에 대한 국민적, 산업적 측면의 보수적 시각
  - 안정적인 전력 생산은 국가적으로 매우 중요한 사안이므로 전력 생산 분야에서의 신규 기술에 대한 시각은 타 산업에 비해 보수적이며 기술 도입 속도가 느릴 수 있음
- 온실가스 포집, 저장, 활용(CCUS) 기술 확산 정도에 의존적일 수밖에 없는 기존 발전 기술
  - 수소 전소 가스터빈을 제외하고 국내외에서 접근되고 있는 온실가스 저감 관련 발전 기술 중(sCO<sub>2</sub>, pressurized oxyfuel combustion, chemical looping combustion 기술 등)에는 CCS 혹은 CCUS와의 연계가 전제되어야 실질적인 온실가스 저감이 가능한 기술이 많음
- 재생에너지 확대에 따른 관성(동기발전기) 발전원 및 백업 전원확보를 위한 새로운 개념의 온실가스 무배출 에너지(전력/열) 생산시스템 및 대용량 열에너지 저장기술 개발을 위한 장기적 관점의 전략 필요
- 간헐성 발전원(풍력, 태양광)의 급격한 확대에 따른 계통 유연성, 안정성 확보를 위한 디지털 발전소 및 운영기술 개발 필요

## ● Solution(해결방안)

- 자기유체역학 발전, 초임계 이산화탄소 발전, 수소터빈-SOFC 하이브리드 발전 등 온실가스 배출의 혁신적 저감을 위한 산업 융합형 고효율 발전 시스템 개발
- 신재생에너지 연계효율 및 발전 속응성 극대화를 통한 경제적 계통 안정화 및 온실가스 저감에 기여하는 기술의 개발

- 장기적인 관점의 정부지원(R&D 투자 및 정책 포함)을 통한 기술성속도 향상
  - 新발전 기술 확보는 속도전이므로 적극적 지원을 통한 기술성속도를 향상시킴과 동시에 新발전 기술 개발 히스토리 확보가 필요
  - 탄소중립 달성을 위한 기술 개발의 조기 완료를 위한 다양한 방식의 정부지원을 통해 전력 생산 분야에서의 Follower가 아닌 Leader로서의 기술 확보가 가능할 것으로 예상

## 04 핵심수단 및 전략도출

### 전략품목 : 청정연료발전



#### Pillar (핵심수단)

#### 〈 무탄소 청정발전 기술 확보를 통한 에너지 공급 혁신 〉

- (수소/암모니아 전환) LNG 발전의 무탄소 배출을 위한 수소/암모니아 터빈 기술 확보
- (연료다변화) 무탄소·탄소중립 연료를 활용한 화력발전소 배출 온실가스의 혁신적 저감 기술 확보
- (新발전) 온실가스 무배출을 위한 산업 융합형 新발전 미래대응 기술 확보
- (재생에너지 연계) 재생에너지원의 효율과 간헐성을 보완하여 온실가스 저감에 기여하는 기술 확보

### 전략도출

Dilemma		Solution	
		해결 방안	
Dilemma 1	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 수소/암모니아 연소기 제작기술, 엔진 최적화 및 실증 등 수소/암모니아 터빈 기술의 선진사 대비 기술격차 존재</li> <li>- 연료 공급의 안정성, 연료 경제성·안전성 확보 및 연료공급 설비 및 인프라를 위한 대규모 투자 불가피</li> </ul>	Solution 1	<ul style="list-style-type: none"> <li>• LNG 가스터빈을 대체하는 수소/암모니아 터빈을 활용한 무탄소 고효율 발전 기술 확보</li> <li>- 발전용 수소 혼소/전소 터빈 및 분산전원용 수소전소 터빈 상용화, 발전용 대용량 수소복합 발전 고효율화</li> <li>- 향상된 연소성능, 저 NOx 배출이 가능한 암모니아 혼소/전소 터빈 개발</li> <li>- 수소터빈을 HPS 등과 같은 정책적 지원에 반영</li> </ul>
Dilemma 2	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 기존 화력발전소의 설비 변경을 최소화하고 이산화탄소 배출 감축을 극대화할 수 있는 연료 전환 기술 필요</li> <li>- 현재 국내 석탄 화력에서 무탄소 연료의 적용 사례가 없고 바이오매스 혼소율이 낮아 다량의 이산화탄소 배출이 불가피</li> </ul>	Solution 2	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 화력발전소 암모니아 혼소 및 바이오매스 순산소 발전 등의 상용화</li> <li>- 대용량 석탄발전의 암모니아 혼소 전환 및 바이오 순산소 연소 기술 개발을 통한 무탄소 발전 전환</li> </ul>
Dilemma 3	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 재생에너지 확대에 따른 관성(동기발전기) 발전원 및 백업전원 확보를 위한 새로운 개념의 온실가스 무배출 에너지(전력/열) 생산시스템 및 대용량 열에너지 저장기술 개발을 위한 장기적 관점의 전략 필요</li> </ul>	Solution 3	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 초임계 이산화탄소 발전, 수소터빈-SOFC 하이브리드 발전 등 산업 융합형 고효율 新발전시스템의 개발</li> <li>- 자기유체역학 발전, 분말금속연료 기반 발전 등 무탄소 연료 다변화 新발전 기술의 개발</li> </ul>
Dilemma 4	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 간헐성 발전원(태양광, 풍력)의 급격한 확대에 따른 계통 유연성, 안정성 확보를 위한 디지털 발전소 및 운영기술 개발 필요</li> </ul>	Solution 4	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 신재생에너지 연계효율 및 발전 속속성 극대화를 통한 경제적 계통 안정화 기여 기술 개발</li> </ul>

## 05 전략방향-핵심기술 로드맵

### 청정연료발전

전략방향	Baseline	단기(~2025)	~2030	~2040	~2050	전략방향 목표	
수소/암모니아 터빈 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>270MW급 LNG 터빈</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>수소터빈 기술 개발 (발전용)</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>혼소(30)/전소(40) 실증</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>상용화</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>(50)380MW급 이상 복합화력의 수소전소 전환</li> <li>(30)1MW/5MW 수소전소 가스터빈 상용화</li> </ul>
		<ul style="list-style-type: none"> <li>수소터빈 기술 개발 (분산전원용)</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>전소 실증</li> <li>상용화</li> </ul>			
	<ul style="list-style-type: none"> <li>파일럿 규모 기술개발 중</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>암모니아 터빈 기술 개발</li> </ul>			<ul style="list-style-type: none"> <li>실증</li> <li>보급확산</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>(50)혼소/전소 100 MW 이상 상용화</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>국내기술 없음</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>암모니아 크래킹 수소터빈 복합발전 시스템 기술 개발</li> </ul>			<ul style="list-style-type: none"> <li>실증</li> <li>상용화</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>(50)500MW 이상 플랜트 상용화</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>시스템 해석 단계</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>순산소 수소터빈 복합발전 시스템 기술 개발</li> </ul>			<ul style="list-style-type: none"> <li>실증</li> <li>상용화</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>(50)100MW 이상 플랜트 상용화</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>LNG 복합효율 60%</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>수소터빈 복합발전 효율향상 핵심기술 개발</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>복합효율 63%</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>복합효율 68% ↑</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>(40)수소전소, 복합효율 65% 이상 실증</li> </ul>	
무탄소 보일러 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>암모니아 혼소율 0%</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>암모니아 보일러 기술 개발</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>실증</li> </ul>			<ul style="list-style-type: none"> <li>(40) 50% 혼소 실증 및 확대적용</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>파일럿 규모 기술개발 중</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>바이오매스 순산소 보일러 기술 개발</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>CCUS 연계 실증</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>BECUS 발전 플랜트 보급확산</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>상용화</li> <li>연료 전환</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>(50)500MW 이상 Oxy-CFBC, Oxy-PB 시스템 상용화</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>파일럿 규모 기술개발 중</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>분말 금속 연료 기반 발전 기술 개발</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>10MW급 실증</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>10MW급 실증</li> <li>상용화</li> <li>연료 전환</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>(50)분산전원급 발전시스템 상용화</li> </ul>
신발전 및 재생에너지 연계 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>타당성 연구 중</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>수소 자기유체역학(MHD) 발전 기술 개발</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>1~10MW 실증</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>보급</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>(50)MHD 단독 발전 (규모 10MW 이상, 효율 15% 이상)</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>파일럿 규모 기술개발 중</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>초임계 순산소 가스터빈 발전 기술 개발</li> </ul>			<ul style="list-style-type: none"> <li>실증</li> <li>보급확산</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>(50)100 MW급 발전시스템 상용화</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>10kW급 기술개발 중</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>수소터빈-SOFC 하이브리드 고효율 발전시스템 기술 개발</li> </ul>			<ul style="list-style-type: none"> <li>실증</li> <li>상용화</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>(50)1MW 이상 발전시스템 상용화</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>타당성 연구 중</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>폐지 기력발전소 활용 열저장 발전 기술 개발</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>아중계압 실증</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>초임계압 실증</li> <li>보급확산</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>(50)500MW급 전환 상용화</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>모델 구현 60% 수준</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>신재생에너지 연계 디지털 발전 기술 개발</li> </ul>			<ul style="list-style-type: none"> <li>실증</li> <li>보급</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>(35) 모델 구현 90% 이상 예측 오차 ±1% 이내</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>250kW급 설비구축</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>간접 가열식 초임계 이산화탄소 발전 기술 개발</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>2~100MW 실증</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>보급확산</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>(50)100MW급 초임계 융복합 발전 상용화</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>급속기동 20분</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>간헐성 대응용 급속 기동 터빈 및 하이브리드 플랜트 통합제어 기술 개발</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>실증</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>신속 동형GT 확대보급</li> <li>하이브리드 발전시스템 확대보급</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>(30) 급속기동 10분 이내</li> </ul>

범례: 정부주도 (개발, 실증, 보급확산, 자립상용화) / 민간주도 (개발, 실증, 보급확산, 자립상용화) / 기술화보전력 / 자체개발 / 국제공동연구 / 기술도입 / 라이선싱



2050 탄소중립  
에너지기술 로드맵

## II

## 비전 및 목표

1. 비전 및 목표 .....	14
------------------	----

## 01 비전 및 목표

### 비전

2050년 온실가스 100% 저감 청정발전 실현

### 목표

- ☑ 청정 연료 활용 무탄소 고효율 발전 상용화

연도	주요 목표
~2030	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 분산전원용 수소전소 터빈 상용화</li> <li>• 발전용 가스터빈 수소 혼소율 50% 실증</li> <li>• 암모니아 터빈 연소기술 확보 및 실증</li> <li>• 석탄발전소 보일러 암모니아 20% 혼소 실증/상용화</li> </ul>
~2040	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 대형 LNG복합발전 수소혼소 상용화</li> <li>• 석탄발전소 보일러 암모니아 50% 혼소 실증/상용화</li> </ul>
~2050	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 대형 수소전소 복합발전 상용화</li> <li>• 암모니아 전소 터빈 상용화</li> <li>• 바이오매스 활용 Oxy-CFBC 및 Oxy-PB 시스템 상용화</li> <li>• 수소터빈-SOFC 하이브리드 발전시스템 상용화</li> </ul>

### 전략 방향

#### 🔍 전략 방향

- ☑ 수소/암모니아 터빈 기술
  - LNG를 대체하는 수소/암모니아 터빈을 활용한 무탄소 고효율 발전기술 확보
- ☑ 무탄소 보일러 기술
  - 화력발전소 암모니아 혼소 및 바이오매스 순산소 발전 등 상용화 기술 확보
- ☑ 신발전 및 재생에너지 연계 기술
  - 초임계 CO<sub>2</sub> 발전, 수소터빈-SOFC 하이브리드 발전 등 산업 융합형 新발전 기술 확보
  - 재생에너지 연계 디지털 발전소 및 발전 유연성 제공을 통한 계통 안정화 기술 개발

#### 🔍 추진 전략

- ☑ 소형에서 중대형까지 수소터빈 라인업 구축 및 운용 중인 LNG 가스터빈의 수소혼소전환 리트로핏 기술개발을 통한 온실가스 저감, 무탄소 발전 기반 구축
- ☑ 기존 석탄화력발전소의 설계변경 및 설비투자를 최소화하는 가운데 온실가스 배출저감 효과를 극대화할 수 있는 기술의 개발
- ☑ 新 사이클 발전기술 개발 중 초고압·초고온 환경下 고효율/소형화 달성을 위한 연소, 소재 기술 등 기반기술에 대한 지속적 투자
- ☑ 기술 개발 후 단계적 scale-up 및 실증의 조속한 완료 후 보급확산 및 상용화 추진

# III

## 전략방향 및 핵심기술

- 1. 수소/암모니아 터빈 기술 ..... 16
- 2. 무탄소 보일러 기술 ..... 41
- 3. 신발전 및 재생에너지 연계 기술 ..... 61

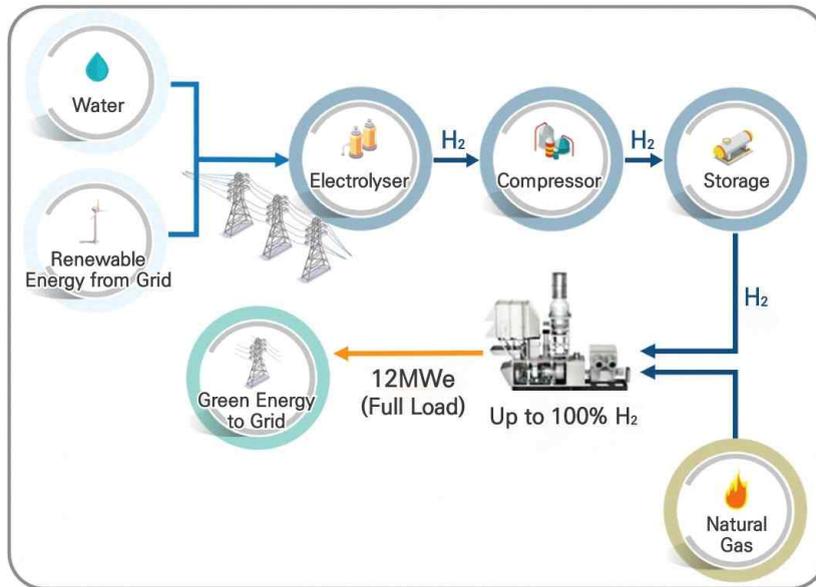
## 01 수소/암모니아 터빈 기술

### 가 전략방향 대상정의

#### ● 개념 및 범위

- “수소/암모니아 터빈 기술”은 가스터빈의 기존 연료인 LNG 대신 수소 또는 암모니아를 사용하는 가스터빈으로서, 발전 부문 탄소중립(Net Zero) 달성을 위해 기존 LNG 복합 발전을 2050년 수소 또는 암모니아 발전으로 전환하는 에너지원 전환 기술임 (2018년 발전부문 온실가스 배출(2.5억톤) 대비 100% 감축 가능)
- 공간적 편재성, 시간적 간헐성, 계절적 변동성을 갖는 재생에너지 보급 확대에 대응하기 위한 유연한 백업 발전 기술인 동시에, 기존의 가스복합화력의 효율을 뛰어넘는 고효율 발전시스템 개발을 통해 국내 재생에너지 P2G 연료와 해외 수입 연료의 효율적·경제적 활용이 가능하고, 국내·외 발전 플랜트 시장에서 경쟁력을 확보하여 미래 먹거리 창출이 가능한 기술임

#### 신재생에너지 잉여전력으로부터 그린수소 생산과 수소터빈 발전의 예시



출처 : Siemens Press Release, 2020. 5.29., “<https://press.siemens.com/global/en/pressrelease/hyflexpower-worlds-first-integrated-power-x-power-hydrogen-gas-turbine-demonstrator>” (접속일 : 2021. 9. 14)

● 기술 요구사항

- (연료전환을 위한 연소기술) 기존 LNG 연료와 매우 다른 특성을 갖는 수소와 암모니아의 연소 특성으로 인하여 안정적인 수소/암모니아 혼소/전소 구현이 가능한 연소기와 넓은 범위에서 유연한 운전이 가능한 연소기 제어 기술이 요구되며, 엔진 차원의 시스템 최적화 기술이 필요
- (시장 경쟁력을 위한 고효율화 기술) 국내·외 발전플랜트 시장에서 기술 경쟁력을 확보하기 위해 복합화력 자체의 효율 향상 기술과 수소-순산소 시스템 등 수소터빈 복합발전 초고효율화 기술을 선점해 나갈 필요가 있음
- (재생에너지 보급에 기여하는 단계적 연료전환 기술) 재생에너지 보급 단계에는 수소혼소 복합발전을 통한 안정적인 저탄소 발전 기술이 요구되며, 재생에너지 확산 단계에는 P2G와 연계한 수소전소 발전과 급속 백업 발전 효율 향상 기술이 요구되고, 해외도입 연료의 다양성에 대응하여 암모니아 활용 발전 기술 역시 확보할 필요 있음
- (후발주자인 국내 기업의 경쟁력 확보를 위한 지원) 우리나라는 가스터빈 분야 후발주자로서, 세계 다섯 번째 H급 가스터빈 독자개발에 성공하였으나, 해외 가스터빈 선진사와는 아직 기술 격차가 존재하며, 수소/암모니아 터빈 개발 경쟁이 격화되고 있는 상황에서 국내 발전시장 잠식을 막고, 국내 기업의 기술 자립화를 통해 시장 경쟁력을 확보하기 위해 민·관 합동으로 체계적이고 적극적인 기술 개발 및 실증 추진에 필요한 인프라 투자가 절실
- (정책 지원) 그린수소 확보량과 연료 가격의 불확실성에 따른 수소터빈 산업의 위험요소를 최소화하고 수소터빈 산업의 경쟁력 확보와 조기 정착을 위해 청정수소발전 의무화제도(CHPS) 시행 필요

**나 전략방향별 핵심기술**

**청정연료발전 수소/암모니아 터빈 기술**

핵심기술	Baseline	단기				중기			목표	
		2022	2023	2024	2025	~2030	~2040	~2050		
수소터빈 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>수소혼소율 : 0%</li> <li>복합효율 : 60%</li> <li>NOx : 15ppm</li> </ul>	(부)표준GT 수소혼소기술			(사)GT 최적화	(사)실증			수소혼소율	100%
	<ul style="list-style-type: none"> <li>수소혼소율 : 0%</li> <li>단독효율 : 25%(1MW), 30%(5MW)</li> <li>NOx : 64ppm(1MW), 25ppm(5MW)</li> </ul>	(부)운영중GT 리트로핏기술	(부)1MW수소전소GT기술	(부)5MW수소전소GT기술	(사)GT 최적화	(사)GT 최적화	(사)실증	(사)실증	복합효율	>65%
암모니아 터빈 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>NOx배출 : &gt;500ppm (SCR미적용) (&lt;10ppm (SCR적용))</li> <li>규모 : 50kW (일본, 암모니아 전소) 2MW (일본, 암모니아 혼소 20%)</li> </ul>	(부)5MW 암모니아 연소성능 향상 및 저NOx 기술	(부)10kW/h 암모니아 연소기 핵심 기술 개발	(부)5MW 암모니아 전소 MGT	(부)암모니아 GT 인편기준 코드 개발	(정) 암모니아 GT 시스템 통합	(사)50MW 암모니아 GT 실증	(사)암모니아 발전연료 안전표준 제정	NOx 배출	<10ppm @ 15% O <sub>2</sub>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>NOx : &gt;50ppm</li> <li>LNG 복합발전 효율 : 60%</li> <li>규모 : 없음</li> </ul>	(부)복합화력 통합형 암모니아 분해시스템 설계	(부)복합화력 통합형 암모니아 분해시스템 개발	(부)암모니아 분해연료 연소 기술	(사)Pilot 실증	(사)대형 실증			NOx	<25ppm
암모니아 크래킹 수소터빈 복합발전 시스템 기술									복합발전 효율	>63%
									규모	>500MW

범례 (소): 소재, (부): 부품, (정): 장비, (사): 시스템 [진행중 기술] 기초연구 R&D 응용 R&D 실증/상용화 R&D [개발할 기술] 기초연구 R&D 응용 R&D 실증/상용화 R&D

청정연료발전

수소/암모니아 터빈 기술

핵심기술	Baseline	단기				중기			목표	
		2022	2023	2024	2025	~2030	~2040	~2050		
수소/암모니아 터빈 복합발전 시스템 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>LNG 복합발전 효율 : 60%</li> <li>규모 : 없음</li> </ul>					(부) 수소-수소/암모니아 연소기 개발	(사) Pilot 플랜트 기술 실증	(사) 대형 플랜트 실증	복합 발전 효율	>75%
			(사) 수소-수소/암모니아 터빈발전사이클 해석기술				(부) 작동유체내부 순환 제어기술 및 통합시스템 개발			규모
수소터빈 복합발전 효율향상 핵심기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>수소혼소율 : 0%</li> <li>GT효율 : 40%</li> <li>복합효율 : 60%</li> </ul>		(부) 수소터빈 파워블록 고효율화기술		(사) GT 통합	(사) 플랜트 실증	(사) 수소터빈 플랜트 통합실증	수소혼소율	100%	
			(부) 수소터빈 하부사이클 고효율화기술			(사) 수소 전소/혼소시스템의 지속적 최적화			GT효율	>45%
								복합효율	>65%	

범례 (소): 소재, (부): 부품, (장): 장비, (사): 시스템 [진행중 기술] 기초원천R&D 응용 R&D 실증/상용화 R&D [개발할 기술] 기초원천R&D 응용 R&D 실증/상용화 R&D

## 다

## 핵심기술 개요

## 핵심기술 1 • 수소터빈 기술

## ● 기술개요

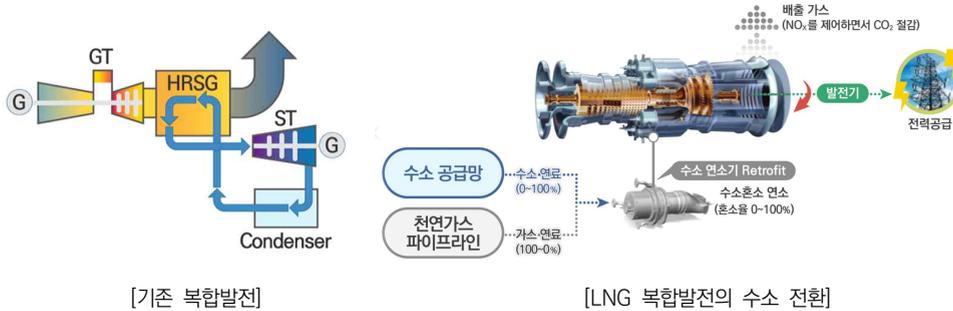
## (개요)

- 수소터빈은 기존 연료인 LNG 대신 수소를 사용하는 설비로서, 수소와 LNG의 혼합연료를 사용하는 혼소 방식 또는 100% 수소를 사용하는 전소 방식으로 운전 가능함과 동시에, 기존 LNG 가스터빈과 동등 수준의 성능(효율, 배출가스, turn-down, 내구성 등)을 확보하는 가스터빈 기술
- 대용량 수소터빈의 경우, 단기적으로는 국내 표준 복합발전용 및 운영 중인 기존 가스터빈의 수소혼소 전환 리트로핏 기술개발을 통하여 수소경제활성화의 기초 및 수소복합 발전을 위한 기반을 구축하고, 장기적으로는 대용량 복합발전 가스터빈의 전소 기술 개발 및 실증을 통하여 에너지 분야 2050 탄소중립 달성에 기여
- 10MW 이하의 소용량 수소터빈의 경우 천연가스 대비 수소의 체적유량 0~100% 범위 내에서 안정적으로 작동하면서, 분산발전용, 열병합발전용, 산업용 등 다양한 어플리케이션에 적용 가능

## (필요성)

- 향후 국내에 LNG발전 용량은 지속적으로 증가('20년 : 41.3GW → '34년 : 58.1GW)할 예정이고, 발전분야 탄소중립 달성을 위해서는 기존 LNG 설비를 수소로 전환하여 온실가스 저감 필수 (수소 전소시 무탄소 대용량 발전 구현 가능)
- LNG를 수소로 대체함으로써 현재의 가스터빈 복합발전소에 대한 투자를 장기적으로 유지/사용할 수 있음 (가장 경제성이 높은 대용량 무탄소 발전원)
- 대용량 수소터빈 복합발전 운전시, 대규모이면서 안정적이고 유연한(천연가스와 수소 상시 전환 가능) 수소 소비 활용처가 확보됨으로써, 안정적인 수소경제 정착 가능
- 분산에너지 체계로의 전환, 재생에너지 변동성 대응 등을 고려시 수 MW 이하 소용량 수소 가스터빈에 대한 시장 역시 활성화될 것으로 예상되고, 수소시범도시와 도서지역 및 도심 개별 단지의 분산전원으로써의 역할뿐만 아니라, 타 발전원 대비 높은 에너지밀도와 무탄소 배출 특성 및 온수 공급원으로 활용 가치 보유
- 국내 기업 및 연구기관에서 보유한 가스터빈 기술과 LNG 가스터빈 산업생태계 및 인프라 활용이 가능하고, 국내외 시장 확대 등을 고려할 때, 수소터빈은 미래 핵심산업이 될 잠재력이 매우 높음

수소를 활용한 복합 발전



[기존 복합발전]

[LNG 복합발전의 수소 전환]

출처: 수소 가스터빈 기술개발 로드맵 (2021)

● 기술 동향

(해외)

- (美, GE) 대형 가스터빈인 7HA.02를 기반으로 Long Ridge Energy Terminal에서 수소혼소율 20 ~ 30% 상업 운전을 실시 중이며, 이를 수소전소로 전환하기 위한 기술 개발을 진행 중
- (獨, Siemens) 대형 가스터빈에서 수소혼소율 30% 수준을 달성하였으며, SGT-400 가스터빈 (12MW)를 이용한 HYFLEXPOWER 프로젝트를 '20년에 착수, '23년까지 SGT-400 가스터빈을 100% 수소전소로 전환 목표 추진 중이며, 이를 이용해 대형 가스터빈에서도 수소 전소를 목표로 기술 개발 중
- (日, MHI) 신에너지 산업 기술종합개발기구(NEDO) 주관 EAGLE 프로젝트에서 개발된 IGCC용 합성가스 가스터빈 기술을 바탕으로 multiple injection dry low NOx 연소기를 이용해 G급/J급 가스터빈 수소혼소 30% 실증, 100% 수소 전소를 목표로 하는 연소기 개발 중
- (美, Capstone) 기존 시스템에서 큰 변경 없이 수소혼소가 가능함을 확인하였고, 수소용 인젝터에 대한 특허를 취득 후 이를 적용한 시험이 최종 100% 수소 전소 목표로 시행될 예정
- (日, Kawasaki HI) NEDO 프로젝트를 통해 천연가스-수소 혼소 발전 요소 기술 개발 및 실증 추진 중이며, '18년 4월 고베시 포트아일랜드에 1MW 가스터빈 이용 수소연료 100% 투입 수소발전을 이용하여 도심 공공시설에 전기와 열 공급에 성공
- (美, Solar) 5.67MW급 Taurus 모델에 수소혼소율 50% 이상을 달성하고, 이를 확대하여 수소전소로 기술개발 중에 있음. 가스터빈인 7HA.02를 기반으로 Long Ridge Energy Terminal에서 수소혼소율 20 ~ 30% 상업 운전을 실시중이며, 이를 수소전소로 전환하기 위한 기술 개발을 진행 중

(국내)

- (두산중공업) 80MW급 LNG 가스터빈의 개발에 착수하였고, 동 엔진을 기반으로 수소전소 중형 GT를 개발에 착수. 국책과제로 개발 중인 270MW급 50% 혼소 연소기를 수소 전소로 전환 개발하기 위한 Micromixer 타입의 연료노즐 개발에 착수
- (두산중공업) 5MW 소형 가스터빈을 국책과제로 개발하여 천연가스 및 바이오가스에 대해 발전소 실증 운전 완료(김포매립지 landfill gas 활용). 동 엔진에 적용가능한 수소전소 연소기를 개발 중이며 '24년까지 연소기 고압시험을 통한 수소전소 기술개발 예정임 (NOx 15ppm 이하 목표). 수소시티의 열병합 발전소 적용을 목표로 함
- (한국기계연구원) 기존 천연가스용 연소기를 기본 모델로 하여 화염역화 성능을 고려한 설계 개선과 운전 특성을 반영한 연소기 제어 기술을 통해 300MW급 대형 가스터빈 적용을 위한 수소 혼소 연소기술 개발이 진행 중
- (전력연구원) 합성가스 적용 가스터빈 연소기 및 발전용 가스터빈 연소기 시험 및 연소튜닝 기술개발 실적 보유. 발전사가 운영 중인 가스터빈을 수소혼소 복합화력으로 전환하기 위한 운영·기반기술 개발을 추진 중
- (한화에어로스페이스) 수백 kW~5MW까지 항공용 가스터빈 기술개발 완료 및 진행 중이며, 수소 가스터빈 조기기술 확보를 위해 항공용 가스터빈에 기반한 1MW급 수소 전소용 마이크로 가스터빈 독자개발 중

일본 고베시의 수소전소 MW급 열병합발전소



출처 : NEDO News, 2020. 7. 21., "[https://www.nedo.go.jp/english/news/AA5en\\_100427.html](https://www.nedo.go.jp/english/news/AA5en_100427.html)" (접속일 : 2021. 9. 14)

● 핵심기술 목표

핵심기술-세부기술별 기술수준 및 목표

핵심기술-세부기술	현재기술수준(Baseline)	목표
<b>핵심</b> 수소터빈 기술	270MW 가스터빈용 수소 혼소용 연소기 기술개발중 - 수소혼소율 : 0% - 복합효율 : 60% - NOx : 15ppm	('30) 대용량 수소터빈 혼소실증 완료 (규모 : 380MW급, 수소혼소율* : 50%, 복합효율 63%, NOx 15ppm) ('40) 대용량 수소혼소(~50%) 복합화력 상용화 ('50) 대용량 수소전소 복합화력 상용화 및 발전시장 확대 (규모 : 380MW급 ↑, 수소혼소율 : 100%, 복합효율 65% ↑, NOx 15ppm ↓)
	천연가스용 5MW 가스터빈 및 항공용 수백 kW~5MW 가스터빈 기술 개발 - 단독 효율 : 25% (1MW급), 30% (5MW) - NOx : 64ppm (1MW급), 25ppm (5MW)	('28) 1MW/5MW 수소전소 GT 개발 및 실증 완료 (효율 : 25%(1MW), 30%(5MW), NOx : 25ppm(1MW), 15ppm ↓(5MW)) ('30) 1MW/5MW 수소전소 GT 상용화 및 발전시장 확대 (효율 : 28%(1MW), 33%** (5MW), NOx : 15ppm(1MW), 10ppm ↓(5MW))
<b>세부</b> 표준 가스터빈 수소 50% 혼소 기술 개발 및 실증	270MW 가스터빈용 수소 혼소용 연소기 기술개발중 - 수소혼소율 : 0% - 복합효율 : 60% - NOx : 15ppm	('28) 270MW 가스터빈 50% 혼소* 기술 개발 및 실증 완료 ('30) 380MW 가스터빈 50% 혼소* 기술 개발 및 실증 완료
<b>세부</b> 운영중 가스터빈 수소 50% 혼소 리트로핏 기술 개발 및 실증	수소혼소율 : 0% 복합효율*** : 55% NOx*** : 15ppm ↓	('28) 150MW 가스터빈 50% 혼소* 기술 개발 및 실증 완료 ('30) 250MW 가스터빈 50% 혼소* 기술 개발 및 실증 완료
<b>세부</b> 중·대형급 수소전소 가스터빈 기술 개발 및 실증	국내 수소 전소 기술 전무	('30) 80MW 가스터빈 수소전소 기술 개발 및 실증 완료 ('40) 380MW 가스터빈 수소전소 기술 개발 및 실증 완료
<b>세부</b> 1MW급 수소전소 가스터빈 개발 및 실증	항공용 수백 kW~2MW 가스터빈 기술 보유	('28) 수소전소 1MW급 가스터빈 실증 완료
<b>세부</b> 5MW 수소전소 가스터빈 개발 및 복합발전 실증	천연가스용 5MW 가스터빈 기술 보유	('28) 수소전소 5MW급 가스터빈 실증 완료

\* 수소혼소율 : 체적유량 기준

\*\* 열병합발전 적용시, 예상 시스템 효율 : 60%

\*\*\* 운영중인 F급 가스터빈(7F.03) 기준

**세부기술 : 표준 가스터빈 수소 50% 혼소 기술 개발 및 실증**

- (기술정의) 단순사이클 기준 200MW 이상의 출력을 가지면서, 천연가스 대비 수소의 체적유량 0~50% 범위내에서 안정적으로 작동함과 동시에 기존 천연가스 가스터빈과 동등 수준의 성능 및 배출가스 특성을 확보하는 가스터빈을 의미
- (필요성) 기존 LNG 발전 인프라 활용을 통한 저비용 수소발전 및 탄소저감 발전 기술의 조기 상용화를 이끌고, 발전플랜트 운전 안정성과 수소혼소 경제성을 확인하고, 궁극적으로 대형 수소전소 기술 확립과 발전분야 탄소중립을 위한 과도기적 역할을 수행

**세부기술 : 운영중 가스터빈 수소 50% 혼소 리트로핏 기술 개발 및 실증**

- (기술정의) 운영 중인 국내 복합화력 가스터빈을 기존과 동등 수준의 효율, 환경성능 및 시스템 안정성을 유지하면서, 50% 이상의 수소혼소용으로 전환하기 위한 연소 및 제어시스템 등을 의미
- (필요성) 국내 복합화력 가스터빈 수소혼소 리트로핏 전환을 통하여 저비용 수소발전 용량을 확보하고, 운영중 복합화력의 친환경화 및 탄소배출 저감을 통하여 활용성 확대 및 자산가치 하락 방지

**세부기술 : 중·대형급 수소전소 가스터빈 기술 개발 및 실증**

- (기술정의) 단순사이클 기준 40MW 이상의 출력을 가지면서, 천연가스 대비 수소의 체적유량 0~100% 범위 내에서 안정적으로 작동함과 동시에 기존 천연가스 가스터빈과 동등 수준의 성능 및 배출가스 특성을 보이는 가스터빈을 의미
- (필요성) 온실가스 배출이 전무한 대용량 발전 기술로서, 경제성과 발전용량 측면에서 에너지 분야 2050 탄소중립 달성의 중추적 역할을 수행할 것으로 기대되며, 중형부터 대형까지 발전용 수소터빈 라인업 구축을 통하여 국내 수소 및 가스터빈 산업 생태계 구축에 기여

**세부기술 : 1MW급 수소전소 가스터빈 개발 및 실증**

- (기술정의) 도심의 다양한 수요처(관공서·아파트·백화점·종합병원·데이터센터·공장 등) 또는 도서지방에 설치되어 비상전원 및 상용전원 공급이 가능한 1MW급 이하 수소전소 가스터빈
- (필요성) 국내 이미 개발된 1MW급 이하 항공용 가스터빈을 활용하여 수소전소 가스터빈 개발이 가능하고, 수소시범도시와 도서지역 및 도심 개별 단지의 분산전원으로써의 역할로, 타 발전원 대비 높은 에너지밀도와 무탄소 배출 특성 및 온수 공급원으로 활용 가치 보유

**세부기술 : 5MW 수소전소 가스터빈 개발 및 복합발전 실증**

- (기술정의) 5MW급으로 천연가스 대비 수소의 체적유량 0~100% 범위 내에서 안정적으로 작동함과 동시에 기존 천연가스 가스터빈과 동등 수준의 성능 및 배출가스 성능을 갖는 가스터빈
- (필요성) 분산발전용, 열병합발전용, 산업용 등 다양한 분야에 적용가능한 유연한 구조와 적용성을 보유한 가스터빈 기술로서, 중대형 가스터빈과 비교하여 친환경 Advanced 수소전소 기술 접목과 초미게 CO<sub>2</sub> 발전 시스템과 연계를 통한 복합발전 구현이 가능하며, 분산발전, 산업용, IPP(Independent Power Plant)용 등 다양한 해외시장 수요에 대응 가능

핵심기술 2 • 암모니아 터빈 기술

● 기술개요

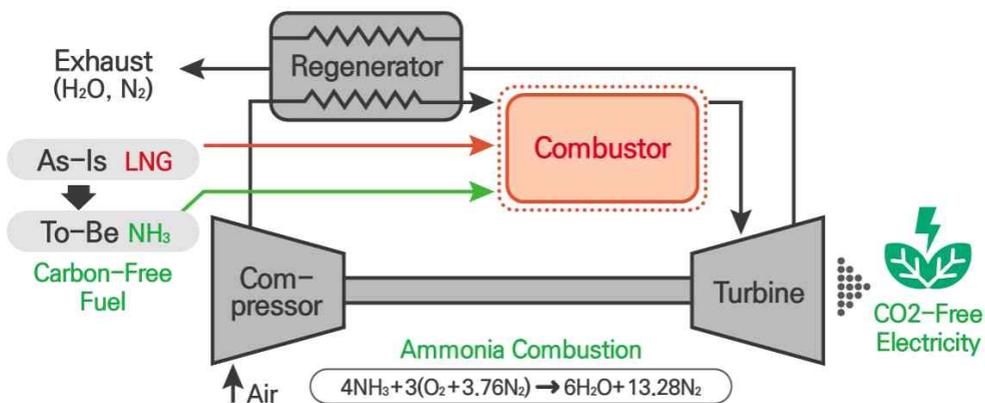
(개요)

- 무탄소(carbon-free) 연료인 암모니아(NH<sub>3</sub>)를 기존 탄화수소계 연료와 혼합 혹은 전부를 대체하여 탄소 감축 및 탄소 중립을 달성할 수 있는 암모니아 가스터빈 연소 및 발전 기술
- 열량 기준으로 암모니아 혼소 비율에 따라 이산화탄소 감축 가능

(필요성)

- 경제적인 해외 수소 도입을 위한 수소 캐리어 암모니아 시장 확대에 따른 암모니아 원료를 발전 연료로써 직접 활용 기술 필요
- LNG 가스터빈 발전소에 무탄소 연료인 암모니아로의 전환 기술을 개발 및 적용하여 발전소에서 배출되는 이산화탄소를 혁신적으로 감축 가능
- 세계적으로 개발 초기 단계인 암모니아 가스터빈 분야 선제적 기술 개발을 통해 가스터빈 국산화 기술을 적시 확보 및 활용하여 탄소중립에 기여할 필요

암모니아 가스터빈 기술 개발 개념도



● 기술 동향

(해외)

- (일본) '14년-'18년, 전략혁신 창조프로그램(SIP\*) 수행 완료, 'Energy Carriers' 프로젝트 (1억 5천만 USD 정부 자금)의 일환으로 암모니아 가스터빈 개발 연구 수행  
\* SIP: Cross-ministerial Strategic Innovation promotion Program
- (일본) 50kW급 암모니아 전소 및 2MW급 암모니아 혼소율 20% 가스터빈 기술 개발 수행 완료
- (일본) Mitsubishi Power는 '21년 3월, 40MW급 암모니아 전소 가스터빈 개발 시작을 발표
- (영국) 카디프 대학, 지멘스 등은 암모니아 가스터빈 엔진 개발을 목표로 기초 연구 및 반응 메커니즘 개발을 수행 중
- (영국) '20년, 과학기술시설위원회(STFC)는 항공유 대신 암모니아 연료 사용하는 가스터빈 엔진 개발 중
- 비영리 단체 Ammonia Energy Association (<https://www.ammoniaenergy.org>)를 통한 국제교류 활발히 진행 중

(국내)

- KIER, '13년 암모니아-가솔린 자동차 기술개발 완료 (암모니아 혼소율 70%)
- 성균관대학교, 한국연구재단 지원으로 암모니아 연료 기초 연소 특성 연구 수행 중
- KIER, '21년부터 기본사업 창의형 과제로 암모니아 가스터빈 연소기 개념설계를 위한 기초 연구 수행 중

● 핵심기술 목표

핵심기술-세부기술별 기술수준 및 목표

핵심기술-세부기술	현재기술수준(Baseline)	목표
<b>핵심</b> 암모니아터빈 기술	암모니아 혼소 용량 : 2MW 암모니아 혼소율 : 20% 이하 암모니아 전소 용량 : 50kW	('30) 혼소 및 전소 용량 5MW 이상 기술개발, 혼소율 50% 이상 실증 (50) 혼소 및 전소 용량 100MW 이상 상용화
<b>세부</b> 암모니아 연소 성능 향상 및 저 NOx 기술	SCR 미적용시 500ppm 이상 SCR 적용시 10ppm 미만	('30) NOx: 10ppm 이하 (SCR적용)* (40) NOx: 10ppm 이하 (SCR미적용)*
<b>세부</b> 암모니아 전소 마이크로가스터빈 개발	암모니아 전소 용량: 50kW	('30) 5MW (단일 운전) (40) 50MW (Cascade 운전**)
<b>세부</b> 암모니아 연료 안전기준 개발	고안가스안전관리법 및 화학 물질안전관리법에서 독성가스인 암모니아의 취급기준이 마련 암모니아 연료 및 연소 관련 안전기준 없음	('25) 암모니아 가스터빈 안전기준 코드 개발 (40) 암모니아 발전연료 안전 표준 재정

\*15% O<sub>2</sub> 농도 기준

\*\*Cascade 운전: 다수의 마이크로 가스터빈(MGT)들을 병렬로 연결하여 요구 전력을 공급하는 기술

**세부기술 : 암모니아 연소 성능 향상 및 저 NOx 기술**

- (기술정의) 암모니아 화염의 안정성을 확보하기 위한 연료 노즐 설계 기술 및 가스터빈 연소기에서 발생하는 NOx의 생성을 억제하거나 제거하는 기술
- (필요성) 암모니아는 기존 탄화수소 계열 연료에 비해 연소속도가 1/5 수준으로 매우 낮아 화염 안정성을 확보하기 어려운 연료이므로 이에 대한 연료노즐 설계 기술 개발이 필요. 또한 암모니아에 포함된 질소는 고온의 산화분위기에서 산소와 반응하여 NOx 생성이 급격하게 증가하므로 이를 억제하거나 제거하는 기술 개발이 필요

**세부기술 : 암모니아 전소 마이크로가스터빈 개발**

- (기술정의) 소형 열병합 분산전원으로 활용할 수 있는 암모니아 전소용 마이크로 가스터빈 시스템
- (필요성) 소형 열병합 분산전원 시장이 확대됨에 따라 무탄소 연료의 활용 가능성도 증가하는 상황에서 연료 호환성 확보를 위한 기술 개발 및 실증 필요. Cascade 운전기술을 통해 재생에너지 간헐성을 극복하고, 마이크로그리드 소형 분산 전원 시스템의 유연 전력공급 기술 개발 필요

**세부기술 : 암모니아 연료 안전기준 개발**

- (기술정의) 암모니아 가스터빈 시스템의 소재, 부품, 장비 및 시스템 운용에 대한 안전기준 또는 법
- (필요성) 암모니아 연료에 대한 국민 인식 제고 및 수용성을 향상하고, 안전한 설비 운용을 위한 표준 코드 개발 필요

**핵심기술 3** ● 암모니아 크래킹 수소터빈 복합발전 시스템 기술

● 기술개요

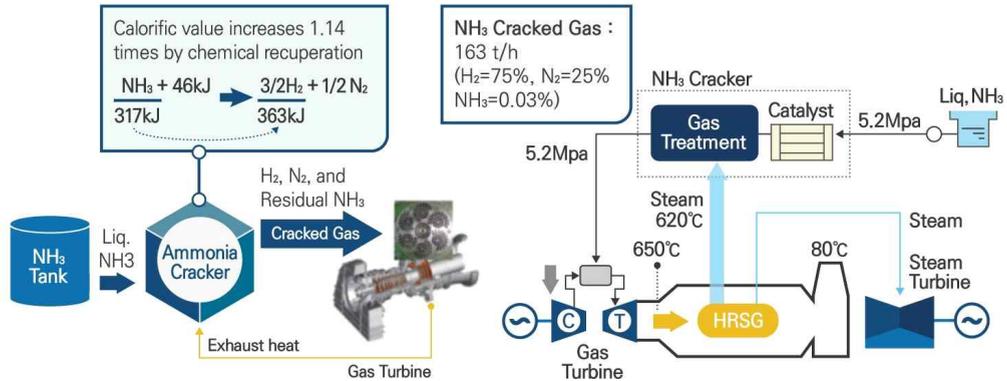
(개요)

- 기존 암모니아 연료를 수소로 분해하는 크래킹(cracking) 과정을 수소터빈 복합발전 사이클 내에 포함시켜 분해과정의 에너지 손실 문제를 해결한 발전 시스템

(필요성)

- 연료수급의 안정성과 경제성을 고려하여 무탄소 발전시스템의 연료 다변화를 구현하기 위해 수소와 암모니아를 모두 연료로 활용이 가능한 발전시스템 필요
- 수소 캐리어인 암모니아를 직접 활용하기 때문에 연료 이송이 용이하고, 기존 가스복합화력 발전부지 및 송전설비를 그대로 활용할 수 있어 신규 송전설비 구축비용과 주민수용성 문제를 동시에 해결할 수 있는 기술

암모니아 크래킹-수소터빈 복합발전 통합 시스템 개략도



출처 : Mitsubishi Power, Ltd., Journal of the Combustion Society of Japan, Vol.61, No.198 (2019) 293-298

● 기술 동향

(해외)

- (일본, Toyota Energy Solutions) 50kW 및 300kW급 100% 암모니아 마이크로가스터빈을 개발하여 암모니아의 가스터빈 적용성 연구를 수행
- (일본, IHI) 2MW급 가스터빈에서 천연가스에 암모니아를 약 20% 혼소하는 암모니아 혼소 가스터빈 기술 개발을 수행
- (일본, MHI) 중대형 가스터빈용 암모니아 연료 활용 연구를 통해 암모니아 크래킹 과정의 에너지 손실을 해소하는 가스터빈 복합발전시스템 연구를 수행

(국내)

- (두산중공업) 가스터빈 원천 기술사로서 기보유한 5MW, 270MW 가스터빈 모델을 기반으로 국내 산학연과 함께 국책과제로 수소 혼소/전소 연소기 개발 중
- 암모니아 활용 연소기술 연구는 국내 대학과 연구소에서 일부 기초 연구가 수행된 바 있음
- 국내 암모니아 활용 가스터빈 개발 연구는 시작 단계에 머물러 있으나, 기존 국내 가스터빈 제작사가 보유한 기술을 바탕으로 암모니아 직접 연소 및 분해 수소 발전으로 확장 가능

● 핵심기술 목표

핵심기술-세부기술별 기술수준 및 목표

핵심기술-세부기술	현재기술수준(Baseline)	목표
<b>핵심</b> 암모니아 크래킹 수소터빈 복합발전 시스템 기술	(국외) 사이클 해석 (국내) 없음	(‘30) 암모니아크래킹 수소터빈 통합시스템 개발 (‘40) 500MW 이상 플랜트 실증 (효율 >63%) (‘50) 500MW 이상 플랜트 상용화
<b>세부</b> 복합화력 통합형 암모니아 분해 기술	없음	(‘35) 100ton/h급 (복합발전 250MW급) (‘40) 200ton/h급 (복합발전 500MW급)
<b>세부</b> 암모니아 분해연료 연소기술	(국외) pilot 엔진 연구 (>100ppm) (국내) 실험실 기초연구 (>50ppm)	(‘35) NOx <45ppm (pilot 엔진 실증) (‘40) NOx <25ppm (대형 플랜트 실증)

세부기술 : 복합화력 통합형 암모니아 분해 기술

- (기술정의) 암모니아 연료를 고온의 스팀과 촉매 반응기를 활용하여 수소와 질소로 분해하여 수소터빈 연소기에 직접 활용이 가능하게 하는 기술
- (필요성) 수소 연료의 장거리 이송 비용을 감안하여 수소 캐리어(hydrogen carrier)로써 암모니아를 수소터빈에 적용하기 위한 필수 기술이며, 개별 연료 분해시스템에서 발생하는 에너지·비용 손실을 제거하여 에너지 효율과 경제성을 확보하기 위해 복합화력 통합 시스템으로 개발될 필요성이 높음

세부기술 : 암모니아 분해연료 연소기술

- (기술정의) 수소, 질소 및 잔류 암모니아로 구성되는 암모니아 분해 연료를 수소터빈 연소기에 적용하여 동등한 연소 성능을 확보하기 위한 연소기 리트로핏(retrofit) 기술
- (필요성) 수소연료를 기반으로 개발된 수소터빈 연소기에 암모니아 분해 연료를 적용할 때 발생할 수 있는 연소성능 변화에 대응하는 기술 개발이 필요. 질소 성분을 포함한 연료 사용으로 인한 NOx 발생 증가 억제와 연소진동 특성 변화를 제어하는 기술이 필요

● 핵심기술 4 ● 순산소 수소터빈 복합발전 시스템 기술

● 기술개요

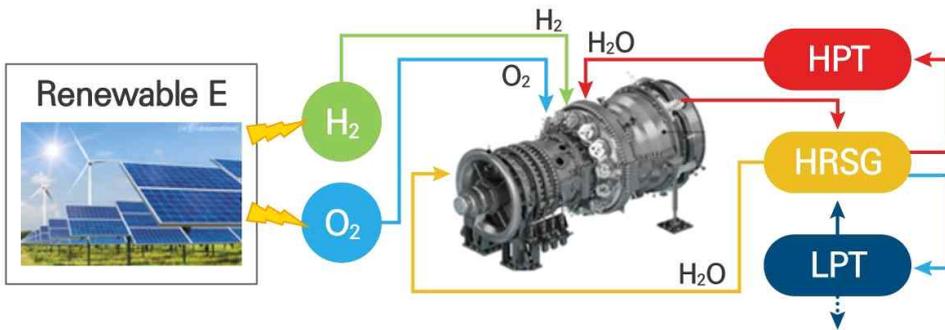
(개요)

- 수소터빈에 공기대신 순산소를 사용하는 특징을 가지며, 작동유체를 재순환시키는 사이클(semi-closed cycle) 구성을 통해 발전효율 75%이상의 초고효율 발전이 가능하며, 탄소가 없는 수소와 질소가 없는 산소를 활용함으로써 CO<sub>2</sub>와 NOx의 발생 자체가 없는 시스템이므로 SCR(Selective Catalytic Reduction)과 CCS(Carbon Capture and Storage) 등의 후처리 설비가 필요 없는 기술

**(필요성)**

- 재생에너지 자원을 활용하는 P2G2P(power-to-gas-to-power) 시스템의 효율 극대화를 위하여 수소와 산소를 활용하는 초고효율 발전 시스템 필요
- 재생에너지 간헐성에 대응하는 백업 역할 수행이 가능하고, 급속 기동과 부분부하에서도 높은 효율을 유지할 수 있는 고효율 유연발전 시스템이 요구됨

재생에너지 연계형 수소 순산소 터빈 복합발전 시스템 구성도



출처 : 1. 태양광-풍력 사진 dreamstime, "http://m.solartodaymag.com/news/articleView.html?idxno=7779"  
 2. 가스터빈 엔진 사진 = 두산중공업  
 3. 전체 도식 재구성 = 기계연구원

**● 기술 동향**

**(해외)**

- 국외 Top Tier 기업 (GE, Siemens, MHI 등)을 중심으로 경쟁적으로 수소전소 가스터빈 개발에 주력하고 있으며, 미래 발전설비 시장 점유를 위해 고효율 수소-순산소 연소 발전 기술 개발을 추진 중
- (일본, Kawasaki HI) 독일 Aachen 공대와 협력하여 수소전소 가스터빈을 개발하고, NEDO 주관으로 고베시에 실증을 통해 열병합 발전 시험 운전을 진행한 바 있음. HIT를 중심으로 발전효율 75%를 얻을 수 있는 순산소-수소 연소 터빈 발전시스템(oxygen-hydrogen combustion turbine) 연구를 수행 중
- (오스트리아) 터빈입구온도 1500℃에서 발전효율 68.4%를 얻을 수 있는 수소-순산소 연소 그라프 사이클(Graz cycle plant for hydrogen combustion) 연구를 수행 중
- (네덜란드) 터빈입구온도 1700℃에서 발전효율 75.6%를 얻을 수 있는 수소-산소 발전사이클 (hydrogen oxygen cycles)에 대한 연구를 수행 중
- 수소 산소 가스터빈 기술은 주로 사이클 해석 위주로 진행되어 왔으며, 플랜트 실증 사례가 없는 신기술에 해당

(국내)

- CCS 기반의 순산소 연소 시스템 원천기술 개발 과제가 수행된 바 있으나 석탄, LNG, 바이오가스 등의 기존 탄화수소 계열의 연료가 대상이었으며, 실증 단계에 이르지 못함
- 수소사회 전환을 위한 수소생산 기술 개발을 목적으로 수전해 수소생산 시스템 개발이 활발히 진행 중이며, 5MW 가스터빈용 수소-공기 전소 연소기 개발 과제가 '20년에 시작하여 '24년 연소기 개발 완료를 목표로 진행중에 있으나, 수소-산소 연소기 개발 사례는 없음

● 핵심기술 목표

핵심기술-세부기술별 기술수준 및 목표

핵심기술-세부기술	현재기술수준(Baseline)	목표
<b>핵심</b> 순산소 수소터빈 복합발전 시스템 기술	(국외) 사이클 해석 단계 (국내) 없음	('35) 수MW급 pilot 실증 (40) 100MW급 이상 상용 플랜트 실증 (발전효율 >75%) (50) 100MW급 이상 플랜트 상용화
<b>세부</b> 순산소 수소터빈 발전 사이클 해석 기술	(국외) 사이클 고효율화 연구 수행 (국내) 없음	('25) 사이클 발전효율 >75%
<b>세부</b> 순산소 수소연소 기술	(국외) 천연가스-순산소 발전기술 실증 연구 (Allam cycle 등) (국내) 50kW급 천연가스-순산소 발전기술 실증	('27) 화염온도 >1500℃ (30) 화염온도 >1700℃
<b>세부</b> 작동유체 내부순환 제어 기술 및 통합 시스템 개발	(국외) 싸이클 해석 단계 (국내) 없음	('28) 작동유체 내부순환 핵심부품 개발 (30) Pilot 플랜트급 통합발전 시스템 개발 (40) 100MW급 상용 플랜트 실증 (발전효율 >75%)

세부기술 : 순산소 수소터빈 발전 사이클 해석 기술

- (기술정의) 다양한 구성 및 작동점을 포함한 순산소 수소 터빈 발전 사이클 해석 기술
- (필요성) 순산소 수소 터빈을 포함하는 다양한 구성품이 조합된 사이클 해석과 작동점 최적화 연구수행을 통해 구현 가능한 초고효율 사이클을 도출

세부기술 : 순산소 수소 연소기술

- (기술정의) 수소와 순산소를 사용하는 연소기술로 비활성 가스(H<sub>2</sub>O 등)를 이용한 화염온도 제어 기술과 화염역화 방지 기술을 포함
- (필요성) 수소와 순산소의 높은 반응성을 제어하여 연소기 및 터빈의 내구성을 확보하고 다양한 부하조건에서 안정적인 운전범위를 확보하는 순산소-수소 터빈 복합발전 시스템의 핵심 기술

### 세부기술 : 작동유체 내부순환 제어 기술 및 통합시스템 개발

- (기술정의) 고비열의 작동유체를 재순환시킴으로써 냉각유량을 최소화하고, 액상압축과정을 포함하여 압축일 감소 등 통합 발전 시스템의 성능을 향상시켜 70% 이상의 고효율 발전이 가능하며, 재순환되는 유량을 제어하여 부분부하 성능을 향상시키는 기술
- (필요성) 재생에너지 P2G 자원의 효율적인 이용과 실시간 백업 전력생산 능력을 확보하기 위해서는 정격부하뿐만 아니라 부분부하에서도 높은 효율을 유지할 수 있는 고효율 유연발전 시스템이 필요

## 핵심기술 5 • 수소터빈 복합발전 효율향상 핵심기술

### ● 기술개요

#### (개요)

- 수소터빈 복합발전의 효율향상은 수소 연료의 화학적 에너지로부터 수소터빈 구동을 위해 최대한의 열출력/열에너지를 이끌어 내는 것을 의미하며, 수소터빈 복합화력 플랜트는 크게 수소터빈 파워블록과 하부사이클(스팀터빈 파워블록)로 구분할 수 있음

#### (필요성)

- 수소터빈 복합발전의 효율향상은 연료비를 절감하고 공해물질 배출을 최소화하는데 있어 가장 원천적인 접근 방식임. 수소터빈은 기존 천연가스 복합발전 대비 온실가스의 배출을 줄일 수 있는 장점이 있으나, 질소산화물 배출 수준은 천연가스 복합발전 대비 동등 수준이거나 소폭 상회하는 수준이므로 질소산화물 배출을 저감하기 위해서는 효율향상을 통해 단위 연료공급량에 대한 발전량을 극대화하고 대기배출물을 최소화할 필요성이 있음
- 수소터빈 복합발전은 수소를 주연료로 사용하고 풍력 및 태양광과 같은 재생에너지와는 달리 발전단가 중 연료비 비중이 매우 높음. 따라서 수소생산 비용의 경제성 여부가 수소터빈 복합발전의 매우 중요한 고려사항임. 수소터빈 복합발전에서 효율을 향상시키는 것은 이러한 연료경제성에 큰 영향을 미치게 되므로 수소터빈 복합발전의 효율향상 기술은 핵심 영향 인자라고 볼 수 있음
- 수소터빈 복합발전의 효율향상 기술은 수소터빈 자체 뿐만 아니라 HRSG(Heat Recovery Steam Generator) 성능 향상, 스팀터빈의 효율 향상 기술, 발전기 효율 향상 등과 밀접한 관련이 있으며, 이러한 구성품들의 효율 향상은 공력설계 개선, 제작기술의 향상, 소재기술의 발달 및 신규 소재 적용 등과 밀접한 관련이 있음. 효율향상을 위한 설계 기술과 제작, 소재 기술의 개발은 발전분야 뿐만 아니라 다른 기기 및 관련 산업으로의 기술 파급 효과가 크며, 상위 기술에 속하는 터빈 핵심 구성품 기술은 기계산업의 선도 역할을 하므로 기술개발 필요성이 매우 크다고 할 수 있음

가스터빈의 효율향상 기술

### Siemens HL-Class gas turbines

Derived from Proven G-class Design  
450,000 operating hours with 99.5% reliability

Capacity of gas turbine  
8000HL 50Hz 453MW  
9000HL 50Hz 545MW  
9000HL 60Hz 374MW

Large blade 4

Inovative coatings for blades

Advanced combustion system for higher firing temperatures

Optimized sealing

3D-design of blades and vanes

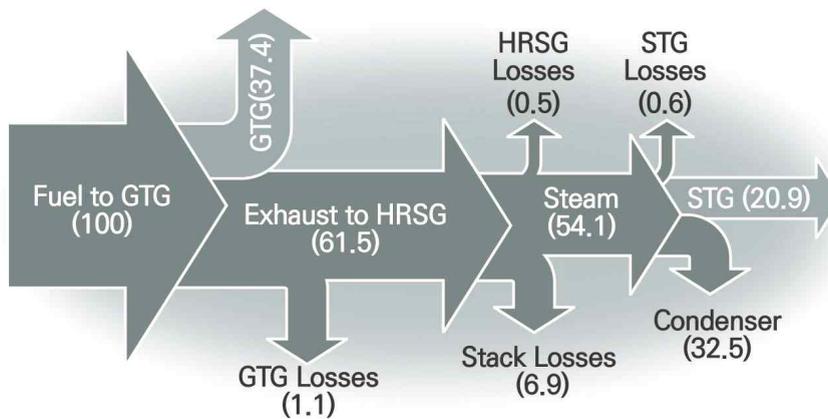
Ultra-efficient internal cooling features for blades and vanes

**>63%**  
efficiency in CCGP mode  
with a clear roadmap to 65%

Latest HL-technologes will be rolled out to complete Siemens gas turbine portfolio subsequently to optimize output and life-cycle costs.

출처 : Power Technology Newsletter, 2017. 8. 17, "https://www.power-technology.com/news/newssiemens-develops-new-hl-class-of-turbines-to-improve-power-plant-efficiency-5897163/"(접속일 : 2021.9.14.)

가스터빈 복합발전(CCGT)에서의 에너지 손실



출처 : S. Can Gulen, Gas Turbines for Electric Power Generation, Cambridge University Press, 2019

## ● 기술 동향

### (해외)

- 최신 가스터빈 기술개발 트렌드는 압축비와 터빈입구온도(TIT)를 증가시켜 효율 증대 기술을 개발하고 있으며, 압축기 공기 유량 증대와 더불어 연소기, 터빈 용량을 증대시켜 발전용량을 400MW 급으로 증가하는 추세로 개발 중
- 수소터빈의 구성품인 압축기/연소기/터빈/이차유로 등의 부품 수준에서의 효율 향상, 신뢰성(안정성) 향상, 수명 연장 등을 위한 꾸준한 연구 개발이 지속되고 있으며, 각 부품의 적층제조기법(AM, additive manufacturing, 3D printing) 등을 통하여 첨단 제작 기술개발 및 소재 개발에 대한 투자와 공정에 대한 혁신도 지속적으로 진행 중에 있음
- 수소터빈 복합발전의 하부사이클(bottoming cycle) 분야에서는 아임계압 수준의 증기조건 ( $180\text{kg}/\text{cm}^2$ ,  $600^\circ\text{C}$ )을 적용하고 있으며, 각 가스터빈 메이커를 중심으로 가스터빈과 연계하여 최대효율을 구성할 수 있는 가스터빈 및 증기터빈의 1 on 1 CCPP(Combined Cycle Power Plant) 및 2 on 1 CCPP로 구성된 플랜트 모델을 구성함. 수소터빈 또한 기존 가스터빈 복합발전의 하부사이클에 적용된 기술을 토대로 수소터빈에 최적화된 하부사이클을 개발 중에 있음
- 국외 Top Tier 기업들은 가스터빈, 스팀터빈과 발전기를 모두 설계 및 제작하고 새로운 용량의 가스터빈을 개발할 때 이에 대응하는 발전기 모델을 개발하여 해당 가스터빈과 발전기 조합에서 최대의 효율을 보이도록 하고 있으며, 복합발전소 전체가 최대의 효율을 낼 수 있도록 해당 터빈들의 출력에 맞는 발전기 모델을 패키지로 개발하고 있음. 수소터빈 복합발전에서도 이러한 가스터빈 발전기의 최신 기술을 원용하여 수소터빈에 최적화된 발전기 모델을 개발 중임

### (국내)

- 최근 국내 가스복합발전 기술개발 트렌드는 플랜트 종합 효율 63% 달성을 위해 터빈입구온도  $1,600^\circ\text{C}$  이상의 가스터빈 기반이며, 높아진 배기가스 온도의 효율적인 사용으로 높은 증기 온도를 통해 하부사이클 효율 개선이 이뤄지고 있음. 수소터빈 복합발전 또한 기존 천연가스 복합발전에서 사용되는 기술을 인용, 개발하고자 추진 중임
- 국내에서 개발 중인 가스복합화력 및 수소터빈 복합발전의 하부사이클 및 증기터빈은 아임계압 수준의 증기조건( $180\text{kg}/\text{cm}^2$ ,  $600^\circ\text{C}$ )을 적용하고 있지만, 향후 수소터빈에 적용될 기술은 가스복합화력에 적용되는 USC급 증기 조건 적용을 통해 효율을 높일 예정이며, 신재생 에너지 전력 간헐성에 따라 발생할 수 있는 급전 지령에 대응 가능한 급속기동기술을 추가할 예정
- (두산중공업) 270MW급 가스터빈에 대하여 산업부 지원으로 복합화력 발전소 실증 준비 중이며, 핵심 기술 개선을 통해 380MW급 고효율, 대형 가스터빈 후속 모델을 개발 추진 중

● 핵심기술 목표

핵심기술-세부기술별 기술수준 및 목표

핵심기술-세부기술	현재기술수준(Baseline)	목표
<b>핵심</b> 수소터빈 복합발전 효율향상 핵심기술	270MW LNG 가스터빈 실증 단계 및 380MW 개발 단계 - 수소혼소율 : 0% - GT효율 : 40% (270MW 기준) - 복합효율 : 60% (270MW 기준)	(‘30) 380MW급 구성품 효율향상 기술 개발 및 시스템통합과 실증(수소혼소율 50%, GT효율 43%, 복합효율 63%) (‘40) 380MW급 이상 수소전소 실증 완료 및 복합효율 향상 (수소혼소율 100%, GT효율 45% ↑, 복합효율 65% ↑)
<b>세부</b> 수소터빈 파워블록 고효율화 기술	압축비 : 23~24 압축기 효율 : 92.5 ~ 93.5% 터빈입구온도(TIT) : 1600~1670℃ 터빈효율 : 90~91% 냉각유량 : 17~18%	(‘30) 압축비 25~26, 압축기 효율 94% ↑, TIT 1700℃, 터빈효율 92% ↑, 냉각유량 17~18% ↓ (‘40) TIT 1750℃ ↑ 달성을 통한 GT 효율 45% ↑ 달성
<b>세부</b> 수소터빈 하부사이클 고효율화 기술	증기터빈 효율 : 40%(180MW급) 복수기 배압 : 0.05bar 재열증기 배관압력손실 : 10%	(‘30) 증기터빈 효율 41%, 복수기 배압 0.04bar, 재열증기 배관 압력손실 7~8% (‘40) 하부사이클 고효율화 기술을 통한 복합효율 65% ↑ 달성

세부기술 : 수소터빈 파워블록 고효율화 기술

- (기술정의) 수소터빈의 효율향상을 위해 필요한 기술로서, 핵심기술은 1) 압축기의 압축비 향상과 polytropic 효율개선, 2) 높은 터빈 입구 온도, 3) 높은 터빈 팽창비 및 isentropic 효율의 향상, 3) 냉각 및 이차유로 유량의 최소화, 4) 기계적 손실 및 단열 성능의 개선으로 구분
- (필요성) 발전분야 탄소중립 달성을 위해서는 기존 대용량 LNG 발전으로부터 수소전소 터빈으로의 전환이 필수적이며, 수소터빈 발전은 타 신재생에너지 발전 대비 운영비용 중 연료비의 의존성이 매우 높은 관계로, 경쟁력 확보와 조기 발전 기술 상용화를 위해서는 수소터빈의 효율향상으로부터 연료비 절감 기술 확보가 지속적으로 병행되어야 함

세부기술 : 수소터빈 하부사이클 고효율화 기술

- (기술정의) 수소터빈 복합발전의 효율향상 기술은 수소터빈 자체 뿐만 아니라, 하부사이클의 효율향상 기술 개발이 동반되어야 하며, 1) 증기터빈 효율향상, 2) HRSG 효율 향상, 3) 복수기 성능 최적화, 4) 배관압력손실(piping pressure loss) 최소화 기술로 정의됨
- (필요성) 하부사이클 구성품들의 고효율화 기술은 수소터빈 복합발전의 효율향상을 통한 경쟁력 강화와 궁극적인 탄소중립 구현에도 큰 영향을 미칠 뿐만 아니라, 다른 기기와 관련 산업으로의 기술 파급 효과가 매우 높은 분야임

## 라

## 기술확보 전략

## ● 소재-부품-장비 확보전략

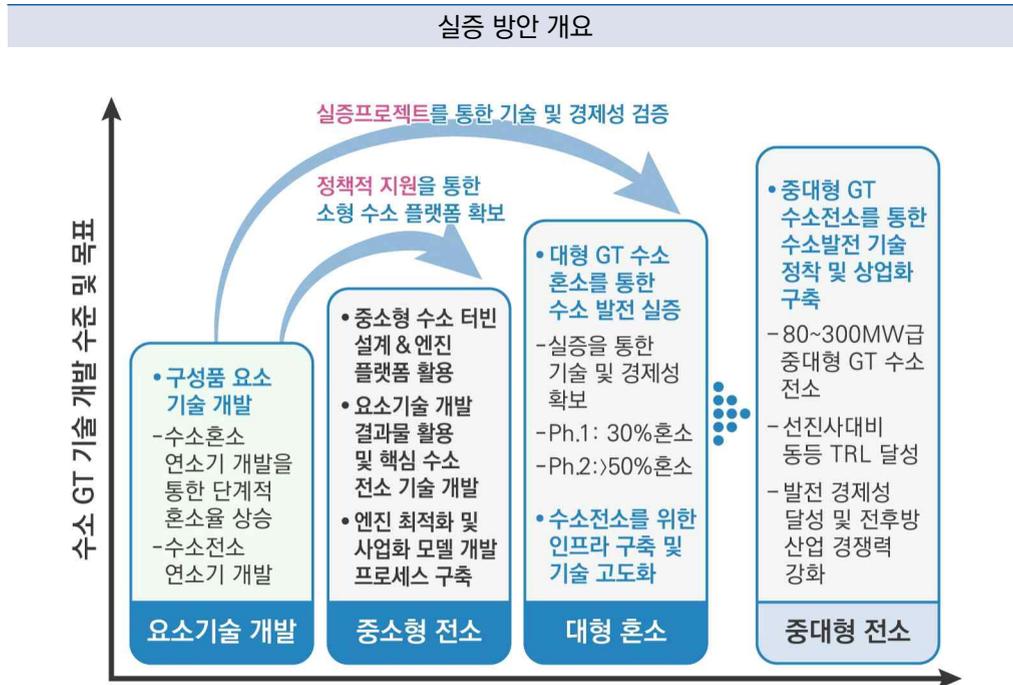
- (소재) 수소/암모니아 터빈 개발을 위한 소재 기술확보는 기본적으로 설계를 위한 HGP(Hot Gas Path) 부품용 소재의 물성치 데이터베이스를 확보하는 일과 더불어, 원소재 제작기술을 확보하는 two-track이 존재함. 소재 물성의 DB 확보는 국내외 연구기관 및 소재 DB 시험기관, 민간회사와의 협력관계를 통해 장기 과제로 추진되어야 하며, 원소재는 안정적인 조달 전략과 함께 원소재-주조-후처리에 이르는 일관 공정개발을 해외 선진 소재 회사와 함께 개발하는 전략이 필요
- (부품) 수소/암모니아 터빈 제작사가 모든 부품들을 제작할 수 없는 현실이므로, 핵심 부품은 국내 중소기업과 산업생태계를 이용해 확보하는 전략과 함께 정부 주도의 국산화 연구개발과제를 통해 터빈 생태계가 부품 국산화를 시도할 수 있는 기반을 구축하여야 함
- (장비) 수소/암모니아 터빈 제작 및 시험관련 장비, 설비는 국내 수요가 크지 않고, 해외에 비해 전문역량을 보유한 회사가 많지 않으므로 기술제휴 및 장기적 수요를 바탕으로 한 안정적인 도입전략을 추진함과 동시에 연소기 고압성능시험 설비 등 필수 개발설비 등에 대해서는 국내 산·학·연 연계 체제하에서 공동활용 형태로 구축하는 것을 고려하여야 함

## ● 시스템 확보전략

- (설계·제작) 설계, 제작 기술은 기존 가스터빈 생태계 및 기술 기반을 충분히 활용하되, 수소/암모니아 터빈 및 복합발전 효율향상에 필요한 핵심 요소기술들은 정부 R&D 과제의 기획, 수행을 통하거나 산·학·연 공동연구체제 구축을 통해 확보
- (시험) 수소/암모니아 터빈 복합화력의 시험 시스템은 크게 구성품 시험과 엔진시험으로 나눌 수 있는데, 구성품 시험은 각 부품 공급사 및 터빈제작사 자체적으로 수행하되, 엔진시험은 규모를 감안하여 국내 산·학·연이 컨소시엄 형태로 연구시험발전소 등을 구성하여 공동활용하는 형태의 확보전략이 바람직함
- (인증) 가스터빈 인증 절차는 단시간내 국내 기준을 확립하기 어려운 분야이므로, 선진사 벤치마킹을 통해 기반을 구축하되, 연구시험발전소 등을 활용하여 인프라 구축과 동시에 시험절차 및 시험결과 보증 등에 대한 연구를 병행 추진하는 전략 필요

● 국내외 실증(Scale-up) 방안

- 수소터빈 실증(Scale-up) 방안은 다음과 같음



● 기반조성 방안

- (인력양성) 수소/암모니아 터빈 분야의 핵심인력 양성을 위한 국책과제 (ex. 현재 에기평 과제로 진행 중인 에너지융합대학원 설립) 등을 지속적으로 발굴, 수행하여 수소터빈 분야의 인력을 육성
- (국제협력) 소재 DB확보, 고압연소시험, 압축기 리그 시험, 터빈 주조개발 등 아직 국내 개발 역량이 부족한 분야에 대한 국제협력을 확대하고 안정적인 기술과 소재, 부품을 공급받기 위한 협력 다변화 전략 추진
- (법·제도 개선) 실증 플랜트와 연구시험발전소를 위한 제도 개선이 뒤따라야 하며, 실증 플랜트의 전력망 연계 과정에 있어 급전 순위 조정 및 비정상 기동/정지에 따른 계통 불안요인 제거 등의 제도적 지원이 필요하며, 수소터빈 활성화를 위한 CHPS 제도의 제정 및 정비 필요

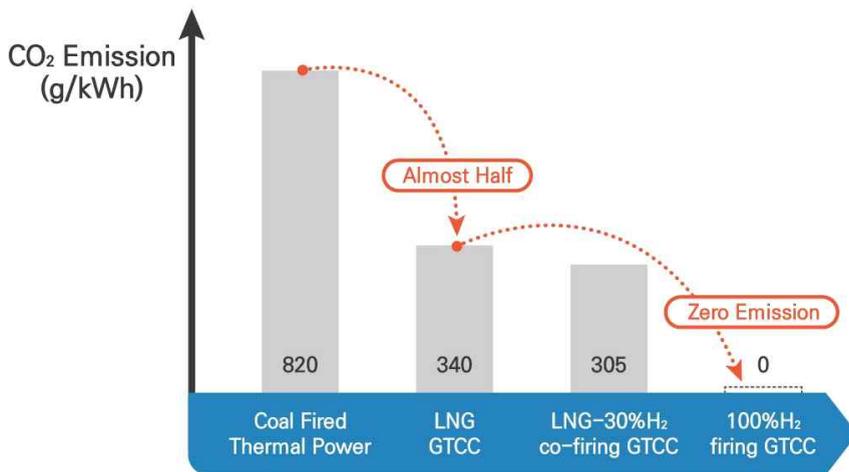
## 마 탄소중립 기여 효과

### ● 탄소중립 기술과의 연계성

#### 수소터빈 기술

- 기존 화석연료 기술 중에서 가스터빈은 탄소 배출 측면에서 가장 청정 발전원으로 여겨짐. 석탄 발전소 대신 천연가스 연소 방식 개방 사이클 가스터빈을 사용하면 탄소 배출량을 25%에서 50%까지 줄일 수 있음. 단순 사이클 장치를 복합 사이클 발전소로 전환하여 추가로 20~23% 감소 가능
- 국내 천연가스 발전은 '20년 41.3GW에서 '34년 59.1GW까지 증가하여 전원믹스 중 실효용량 기준 47.3% 비중을 차지할 전망(9차 전력수급기본계획). 기존 천연가스 발전을 수소로 전환하여 전소시 온실가스 배출이 전무하고, 천연가스를 수소로 대체함으로써 현재의 가스터빈 복합발전소에 대한 투자를 장기적으로 유지/사용되는 것이 가능
- 분산에너지 체계로의 전환, 재생에너지 변동성 대응 등을 고려시 소용량 가스터빈에 대한 시장이 활성화될 전망. 소형 가스터빈에 사용되는 연료를 100% 수소로 전환시에 탄소 배출 전무
- 신재생에너지의 급격한 증가에 따른 잉여전력을 수소(그린수소)로 전환하고, 수소터빈을 통하여 수소를 활용할 경우, 신재생에너지의 부하변동성 단점을 보완하면서 전력망 계통 안정성을 달성하여, 수소경제 활성화 및 탄소중립 실현에 기여 가능

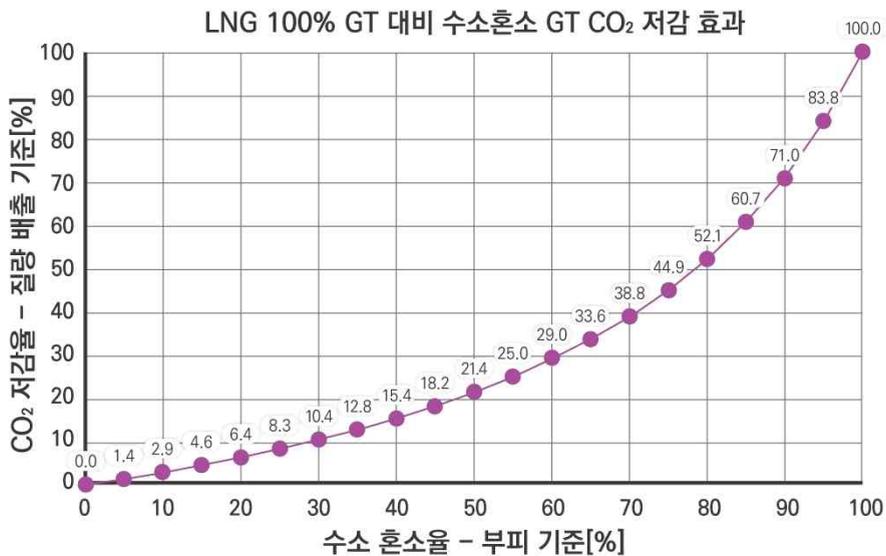
석탄 발전과 LNG 발전 및 수소터빈 복합발전의 CO<sub>2</sub> 배출량 비교



출처: MHI Energy Transition, Hydrogen Gas Turbine, "https://solutions.mhi.com/solutions/hydrogen-gas-turbine/" (접속일: 2021. 9. 29)

- 경제성과 발전용량 측면에서 연료전지 대비 수소터빈이 유리하고, 특히 대용량 발전 분야에서 수소터빈 복합발전은 가장 높은 경쟁력을 가지고 있는 발전 설비
  - \* 수소 가스터빈 기술개발 로드맵('21년)에 따르면 LNG 사용시 복합화력의 LCOE(균등화발전원가)는 81원/kWh인 반면 연료전지의 경우 175원/kWh
- 수소전소 대용량 발전의 과도기적 기술로서, 수소-천연가스 혼소로의 선제적인 전환은 수소 공급 인프라 상황에 유동적 대응을 가능하게 하면서 기존 천연가스 발전 대비 단기적인 탄소저감 실현 가능

연료의 수소 부피 비율(vol %)에 따른 연소 과정에서 배출되는 상대적 CO<sub>2</sub>



- 수소도시 추진전략에 따른 소형 가스터빈의 시장을 예측하면, 1MW급의 총 수소발전 용량은 '30년 60MW, '40년 300MW 규모, 5MW급 가스터빈은 '30년 20MW, '40년 300MW급 규모로 성장할 것으로 전망
- 이를 수소전소로 운전하고, 설비가동율 100%를 가정하면, 1MW급과 5MW급의 수소터빈을 통한 CO<sub>2</sub> 감축량은 '40년 500만톤 이상일 것으로 예상

#### 암모니아터빈 기술

- 무탄소 연료인 암모니아는 투입 열량을 기준으로 기존 탄화수소 계열 연료와 함께 혼소할 경우, 혼소 비율에 비례하여 탄소 저감 가능
- 해외 수소 도입에 있어 에너지 캐리어로서 암모니아의 시장이 확대되고, 암모니아 직접 연료 활용 시장이 함께 성장할 경우, 암모니아 단가 하락이 기대되고 수소 가격의 하락 유도 가능

### 암모니아 크래킹 수소터빈 복합발전 시스템 기술

- 수소 캐리어(carrier)로서의 경제적 이점을 갖는 암모니아 연료를 수소터빈 복합발전 시스템에 직접 활용하는 기술로서 활용 가능한 무탄소 연료의 다변화를 통해 경제적이고 효율적인 무탄소 발전 달성
- 공간적으로 편재된 재생에너지 플랜트와 기존 가스 복합화력 전력망을 연계하기 위하여 장거리 연료 수송이 용이한 P2G기반의 암모니아를 생산-이송하여 기존 복합화력 전력망을 활용하는 수소터빈 복합화력에 직접 적용하여 신규 송배전망 구축 비용을 절감하여 탄소중립에 기여
- 재생에너지를 활용한 수소, 질소 생산(EC, ASU)과 합성을 통해, 이산화탄소 배출 없이 암모니아 생산이 가능하며, 낮은 연소성능으로 가스터빈 적용이 어려운 암모니아 연료를 외부 개질로 인한 효율 감소가 없이 복합발전 시스템 내부에서 수소 기반의 분해 연료로 개질하여 수소터빈에 직접 적용함으로써 수소터빈 활용도를 극대화

### 순산소 수소터빈 복합발전 시스템 기술

- 재생에너지의 잉여전력을 활용하여 P2G 시스템을 통해 수소와 산소를 생산-저장하고 필요한 시점에 다시 전력을 생산하는 순산소-수소 터빈 발전 시스템으로 재생에너지 중심의 탄소중립 발전기술의 보급과 안정적인 운영에 기여
- 재생에너지 P2G 자원의 효율적인 이용과 실시간 백업 전력생산 능력을 확보하기 위해서는 정격부하뿐만 아니라 부분부하에서도 높은 효율을 유지할 수 있는 고효율 유연발전 시스템이 필요하며, 작동유체의 재순환 시스템 구현을 통해 70% 이상의 고효율 발전이 가능하여 재생에너지와 연계된 전체 발전원 믹스의 효율 향상을 통해 지속가능한 탄소중립 사회 실현에 기여

### 수소터빈 복합발전 효율향상 핵심기술

- 기존 LNG 가스터빈 복합발전의 총 발전용량은 지속적으로 증가할 전망이다('34년 59.1GW, 9차 전력수급기본계획). 또한 가스터빈의 연료다변화 특성(천연가스 ↔ 수소 혼·전소 가변 운영)은 수소 공급량 확보 속도에 유연하고 신속하게 대처 가능하며, '34년 이후로 수소경제가 정착하는 과정에서도 그 수요가 지속될 것으로 예상
- 가스터빈 및 하부 사이클 성능 개선을 통한 종합 복합효율의 향상은 기존 LNG 발전 뿐만 아니라, 대용량 수소혼소 발전에서 '50년 수소전소 100% 전환을 통한 탄소중립 달성시까지 과도기 시점에서의 단·중기적인 탄소 저감을 위하여 요구되는 핵심 선행 기술
- 또한, 수소전소 복합발전 시스템에서도 타 신재생에너지 대비 전체 발전비용 중 연료비가 차지하는 비중이 매우 높기 때문에, 효율 향상을 통한 비용 절감은 전체 수소전소 발전의 경쟁력을 높일 수 있고, 이는 수소전소 발전의 상용화 시기를 앞당겨서 탄소중립의 견인차 역할을 수행

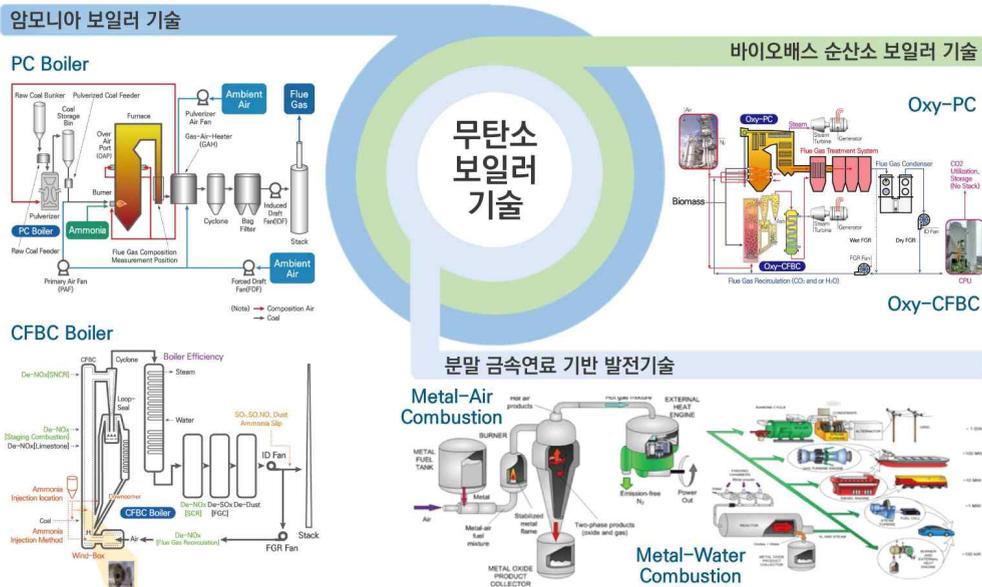
## 02 무탄소 보일러 기술

### 가 전략방향 대상정의

#### ● 개념 및 범위

- 무탄소 연료(carbon-free fuel)인 암모니아와 분말 금속연료, 탄소중립 연료(carbon-neutral fuel)인 바이오매스로 연료 다변화하고 CCUS (CO<sub>2</sub> Capture, Utilization and Storage)와 연계 가능한 순산소 연소기술을 통해 석탄 화력발전소에서 배출되는 이산화탄소 및 2차 미세먼지(NOx) 배출량을 혁신적으로 저감시키기 위한 기술
  - 기존 석탄 화력발전소를 암모니아 혼소 발전소로 전환
  - 기존 석탄 화력발전소를 바이오매스 순산소 발전소로 전환
  - 분산 전원용 분말 금속연료 기반 발전 기술

### 무탄소 보일러 기술 개념도



출처 : IHI Engineering Review vol. 53(2020), 한국에너지기술연구원, Applied Energy 186 (2017) p.13-27

## ● 기술 요구사항

- (무탄소 연료 전환 기술) 기존 화력발전소의 설비 변경을 최소화하고 이산화탄소 배출 감축을 극대화할 수 있는 중단기적 연료 전환 기술이 필요
  - 암모니아의 안전한 저장, 공급 및 연소 기술 개발
  - 분말 금속연료 기반 발전기술의 국내 부재에 따른 장기적인 정부지원과 이를 통한 기술성숙도 향상
- (Negative CO<sub>2</sub> emission 기술) 탄소중립(net-zero) 달성을 위해 온실가스 배출원에서 최대한 감축해도 불가피하게 배출되는 온실가스를 상쇄하기 위한 기술의 개발
  - CO<sub>2</sub> 포집 기술인 순산소 연소와 CO<sub>2</sub> 활용, 저장 연계 기술 개발 및 CCUS 적용에 따른 플랜트 효율 저하 해결
  - CO<sub>2</sub> 활용-저장 기술 분야와 연계된 융합 기술개발을 위한 지원(투자)과 제도 개선
  - 해외에서 개발 중인 탄소중립 연료인 바이오매스를 이용하는 BECCUS(Bio-Energy CO<sub>2</sub> Capture, Utilization and Storage) 기술 벤치마킹
  - BECCUS 기술의 탄소역배출(negative CO<sub>2</sub> emission)으로서의 국제적인 인증 방법론 개발 필요
- (공정한 탄소중립 사회로의 전환) 2050 탄소중립을 위해 재생에너지의 확대는 필수이지만 재생에너지의 간헐성, 변동성 극복 및 안정적인 전력수급을 위해 기존 석탄 화력발전소를 청정한 발전소로 활용할 수 있는 기술 개발 필요
  - 폐지 및 폐지 예정 석탄화력발전소의 좌초자산 방지를 통한 지역 경제 활성화 및 일자리 문제 해결

**나 전략방향별 핵심기술**

청정연료발전		무탄소 보일러 기술								
핵심기술	Baseline	단기				중기			목표	
		2022	2023	2024	2025	~2030	~2040	~2050		
암모니아 보일러 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>연소효율 : (99.9%)</li> <li>규모 : 10MWh(일본)</li> <li>온실가스 저감 : 20%(일본)</li> </ul>	(사)미분탄보일러 암모니아혼소전환기술 				(사) 20% 혼소 실증	(사) 혼소율 상향 설계	(사) 50% 혼소 실증	연소효율	> 99.9%
		(사)유동층 보일러 암모니아혼소전환기술 								
									온실가스 저감	100%
바이오매스 순산소 보일러 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>규모 : 0.1~10 MWh Oxy-CFB 1 MW Oxy-PC</li> <li>CO<sub>2</sub> 원천 분리 : 80~90% 이상</li> <li>순산소 연소-CO<sub>2</sub> 활용-저장 연계 : 개발된 바 없음</li> </ul>	(사)(10MWh 이상)바이오매스순산소 연소중 NOx, H <sub>2</sub> O, 클링커 감축기술 				(사) 100 MW 이상 실증	(사) CO <sub>2</sub> 활용-저장 연계 운전 실증	규모		
		(사)산소농도(30% 이상) 변화에 따른 플랜트 효율 향상 및 부하 변동 운전 기술 							(사) CO <sub>2</sub> 활용-연계 운전	(사) CO <sub>2</sub> 활용-저장 연계 운전 실증
		(사)(0.1 MWh급) 바이오매스 순산소 연소 중 원천 분리된 CO <sub>2</sub> 의 활용 연계 기술 								
		(사)바이오매스 순산소 연소-CO <sub>2</sub> 활용, 저장 통합 공정(BECCUS) ODM 방법론 								
분말 금속연료 기반 발전 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>분말금속 발전기술 없음</li> <li>규모 : 없음</li> </ul>	(사)분말금속 공기연소발전기술 				(사) 실증	(사) ~10MW급 Scale-up	(사) 상용급 실증	규모	분산전원급 발전시스템
		(사)분말금속 물반응발전기술 								

범례 (소): 소재, (부): 부품, (장): 장비, (시): 시스템 [진행중 기술] 기초원천R&D 응용 R&D 실증/상용화 R&D [개발할 기술] 기초원천R&D 응용 R&D 실증/상용화 R&D

## 다 핵심기술 개요

### 핵심기술 1 • 암모니아 보일러 기술

#### 기술개요

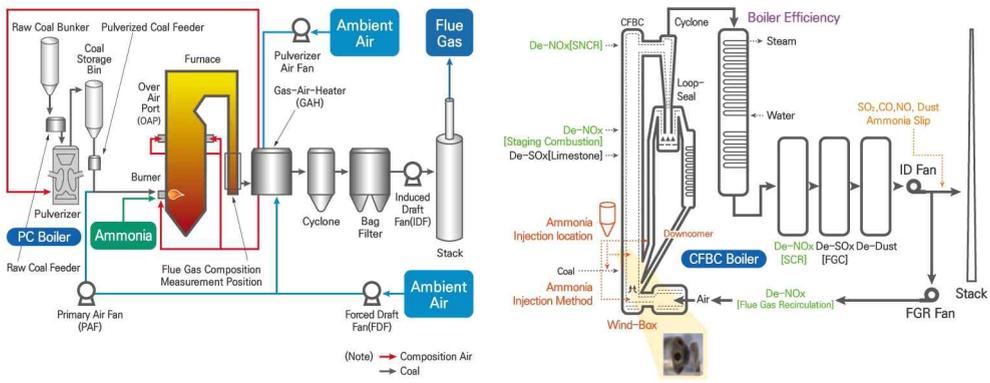
##### (개요)

- 기존 석탄 화력(미분탄/순환유동층)발전소를 대상으로 무탄소 연료인 암모니아를 석탄과 혼합 연소하여, 온실가스 배출을 감축하는 암모니아 연소 발전 기술
- 폐지 예정 석탄화력 등 매몰성 설비를 활용한 온실가스 감축이 가능한 중기적 대안 기술
- 암모니아는 기 구축 유통인프라(생산/수송/저장) 활용이 가능한 무탄소 원료

##### (필요성)

- 2030 국가온실가스감축목표(NDC) 등의 정부 정책에 부응하기 위해 이산화탄소 배출이 적고 수소/암모니아 등 탄소무배출 연료 수요 창출이 가능한 친환경 발전기술의 개발 및 보급이 시급
- 궁극적으로 암모니아 전소를 실현함으로써 '2050 탄소중립' 이행을 위해 정부가 요구하는 이산화탄소 배출량 감축 가능

### 석탄-암모니아 혼소 발전 시스템[미분탄(좌),순환유동층(우)] 개념도



출처: IHI Engineering Review vol. 53 No. 1 2020, 한국에너지기술연구원

● 기술 동향

(해외)

- (일본) 최대 발전사인 JERA는 '30년까지 효율이 저조한 노후 석탄 화력을 폐지할 계획이며, 고효율 발전소를 대상으로 암모니아 혼소 및 전소 설비로 활용하기 위한 기술을 개발하고 있음
  - 10MWth 시험연소소에서 석탄-암모니아 20% 혼소 실증('17) 및 1GW 미분탄 보일러 20% 혼소 실증('21)
  - 1,000MW 초초임계(USC) 발전소 대상 암모니아 20% 혼소 실증 예정 (~'23)
  - '20년대 후반 암모니아 발전을 개시 후 20% 혼소 (~'35) 및 전소(~'45) 추진
- (일본) IEEJ(Institute of Energy Economics)는 암모니아 혼소발전에 대한 경제적 타당성 평가 결과를 근거로 그린 암모니아를 사용한 20% 혼소 발전을 '30년 이후 적용할 계획

(국내)

- KIER는 LPG와 가솔린 겸용의 엔진을 개조하여 암모니아 엔진을 개발하였으며, 70%의 암모니아와 30%의 가솔린을 혼합한 연료를 사용하는 자동차(AmVeh)를 개발
- 한전 전력연구원에서 암모니아 혼소 발전 기술을 국내 석탄 화력에 적용하기 위한 타당성 조사를 진행 중
- 롯데정밀화학, 휴켄스, 현대건설, 대림산업, POSCO 등이 암모니아 취급 설비의 건설, 운영 능력을 보유

● 핵심기술 목표

핵심기술-세부기술별 기술수준 및 목표

핵심기술-세부기술	현재기술수준(Baseline)	목표
<b>핵심</b> 암모니아 보일러 기술	(국내) 암모니아 혼소 발전의 기술·경제적 타당성 연구 수행 중 (국외) 1GW 보일러 20% 혼소 실증연구 착수(日,'21)	('30) 암모니아 20% 혼소 실증 및 확대/상용화 ( '40) 암모니아 50% 혼소 실증 및 확대/상용화 ( '40) 열생산용 암모니아 전소 시스템 실증
<b>세부</b> 미분탄 보일러 암모니아 혼소 전환 기술	(국내) 암모니아 혼소 전산화 및 연료 공급시스템 개조 설계 중 (국외) 1GW 보일러 20% 혼소 실증연구 착수(日,'21)	('30) 미분탄 보일러 암모니아 20% 혼소 실증(초초임계압 이상 상용급) 및 확대/상용화 ( '40) 미분탄 보일러 암모니아 50% 혼소 실증 및 확대/상용화
<b>세부</b> 유동층 보일러 암모니아 혼소 전환 기술	없음	('30) 유동층 보일러 암모니아 20% 혼소 전환 실증(초초임계압 이상 상용급) 및 확대/상용화 ( '40) 유동층 보일러 암모니아 50% 혼소 전환 실증 및 확대/상용화
<b>세부</b> 암모니아 전소 보일러 기술	없음	( '40) 열생산용 암모니아 전소 시스템 실증

th: thermal input (연료 투입 열량)

### 세부기술 : 미분탄 보일러 암모니아 혼소 전환 기술

- (기술정의) 기존 미분탄 보일러를 암모니아 혼소로 전환하기 위한 핵심부품(암모니아 저장·공급 시스템, 암모니아 혼소용 버너, 환경오염물질 제거설비 등) 설계기술 및 미분탄 발전시스템 운영 기술
- (필요성)
  - 기존 미분탄 보일러에 석탄과 암모니아를 혼합하여 연소시킴으로써 암모니아 혼소량에 비례하여 온실가스 배출량 감축이 가능함
  - 미분탄 보일러에 대한 암모니아 혼소를 위해 전산해석과 파일럿 규모 적용 시험을 수행 후 적용성을 평가·분석하고 이를 바탕으로 암모니아 주입 버너 개발 등의 기존 보일러 개조 설계 및 버너별 암모니아 주입 전략 등의 운영 기술 개발 수행 필요
  - 미분탄 보일러 내 암모니아 주입 위치에 따른 분배비율 최적화로 질소산화물 배출 증가를 억제하고 SCR과 같은 후단 환경설비 등의 보안을 통한 영향성 완화 기술은 혼소 발전 상용화에 중요
  - 암모니아 혼소 미분탄 발전소의 안정적 운영을 위해 암모니아 공급망·안전시스템 구축 등에 대한 기술개발을 병행하여 실증과 보급·확산에 따른 시행착오 최소화 필요

### 세부기술 : 유동층 보일러 암모니아 혼소 전환 기술

- (기술정의) 기존 순환유동층 보일러를 암모니아 혼소로 전환하기 위한 핵심부품(암모니아-연소공기 혼합기, 암모니아 공급 장치, 환경오염물질 제거설비 등) 설계기술 및 유동층 발전 운영 기술
- (필요성)
  - 기존 순환유동층 보일러에 석탄과 암모니아를 혼합하여 연소시킴으로써 암모니아 혼소량에 비례하여 온실가스 배출량 감축이 가능함
  - 연료다변화 및 질소산화물 배출 측면에서 장점을 보유한 유동층 보일러에 암모니아를 혼소하기 위한 시스템 및 운영 기술의 개발 필요. 보일러 하부 공기분산판과 유동물질 등의 유동층 보일러에 적합한 암모니아 혼소 전환 기술 개발을 위해 노내 전산해석과 파일럿 규모 적용 시험을 수행하여 암모니아 혼소 적용성의 평가·분석을 기반으로 최적 암모니아 주입 위치 선정 및 주입 설비개발 등 기존 유동층 보일러의 개조 설계가 선행되고, 실증을 통한 암모니아 혼소 운영 기술 개발 또한 필요
  - 유동층 보일러 내 암모니아 주입 위치와 방법은 미분탄 보일러와 큰 차이를 보이는데, 이를 최적화하여 fuel NOx 증가에 따른 질소산화물 발생을 최소화하고 노내 질소산화물 발생 특성의 후단 환경설비와의 영향성 분석은 유동층 발전소 대상 암모니아 혼소 발전의 보급·확산에 중요
  - 암모니아 혼소 유동층 발전소의 안정적 운영을 암모니아 공급망·안전시스템 구축 등에 대한 기술개발을 병행하여 실증과 보급·확산에 따른 시행착오를 최소화 필요

### 세부기술 : 암모니아 전소 보일러 기술

- (기술정의) 단일 암모니아 연료를 활용하는 보일러 및 BOP 시스템의 설계 및 운영 기술
- (필요성) 에너지분야 탄소중립 구현을 위해 암모니아 적용율을 100%까지 높이는 것이 필요하며, 이를 위해 산업분야 등 열공급 등을 위한 신규 암모니아 전소 보일러의 설계 기술 확보가 필요

핵심기술 2 • 바이오매스 순산소 보일러 기술

● 기술개요

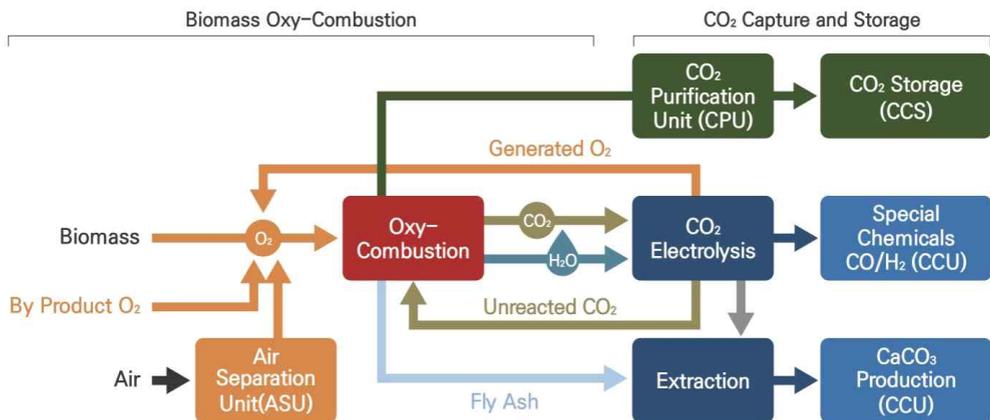
(개요)

- 기존 석탄 화력발전소에서 바이오매스 연료로 전량 대체하고 순산소 연소 기술을 적용하여 고농도로 원천 분리되는 CO<sub>2</sub>를 활용, 저장함으로써 대기 중으로 배출되는 CO<sub>2</sub>가 없는 탄소역배출(negative CO<sub>2</sub> emission\*)이 가능한 BECCUS\*\* 발전 기술
    - 순산소 연소 기술: 별도의 포집 설비 없이 연소 중 90% 이상 CO<sub>2</sub> 원천분리 가능
    - 기존 공기 연소 방식 대비 배출되는 배기가스량이 80% 이상 감축 가능
- \*Negative CO<sub>2</sub> emission : 불가피하게 배출되는 CO<sub>2</sub>를 상쇄(음수화)시킬 수 있는 기술  
 \*\*BECCUS : bio energy carbon capture, utilization and storage

(필요성)

- 전 세계 CO<sub>2</sub> 감축을 위한 6대 수단 중 BECCUS 기술은 탄소역배출(negative CO<sub>2</sub> emission) 기술로서 발전, 열병합 설비, 산업 등에서 중요한 역할을 할 것으로 보고됨 (IEA, '20년)
- 기존 석탄 화력발전소에서 CO<sub>2</sub> 포집을 위해 넓은 부지면적과 추가 설비가 필요한 연소 후 CO<sub>2</sub> 포집 공정(post combustion)과 달리, 기존 설비 변경의 최소화 및 부지면적 소요가 적은 순산소 연소 기술 개발 및 적용 필요
- 바이오매스 순산소 연소 중 원천 분리되는 CO<sub>2</sub>를 활용, 저장할 수 있는 연계 운전 최적화 기술 개발로부터 주민수용성을 확보가 가능한 굴뚝 없는 화력발전소 구현 가능

바이오매스 순산소 연소-CO<sub>2</sub> 활용, 저장 통합 공정 개념도



● 기술 동향

(해외)

- 기존 석탄 화력발전에서의 BECCU 관련 프로젝트는 진행된 바 없으며 BECCS 관련 프로젝트는 진행 혹은 계획 중(Global CCS Institute, '19년)
  - (일본) 49MW Mikawa power plant (순환유동층 석탄 발전플랜트)에서 바이오매스 전소 후 CO<sub>2</sub> 포집공정과 연계하여 0.18Mt/year offshore storage (BECCS) 예정
  - (영국) Drax power는 660MW 기존 미분탄 발전플랜트 6기 중 4기를 바이오매스 전소 발전으로 전환하였으며 '30년까지 BECCS 2기를 개발하여 연간 4Mt의 CO<sub>2</sub>를 흡수하여 offshore storage 예정
- 석탄 순산소 연소를 통한 CO<sub>2</sub> 포집 기술은 실증규모 수준에서 개발되고 있지만 원천 분리되는 고평도 CO<sub>2</sub>를 활용 및 저장하는 연계 기술은 개발된 바 없음
  - (스페인) CIUDEN에서 30MWth급 석탄 순산소 순환유동층 연소 실증연구를 완료하였으며, 300 MW 규모 설계/운전인자 등에 대한 핵심기술 도출함. 스페인 내 부르고스에서 CCS를 위한 CO<sub>2</sub> onshore storage 연구 중

(국내)

- KIER에서는 0.1MWth급 바이오매스 순산소 연소를 통해 90% 이상의 CO<sub>2</sub> 원천분리 기술 개발 확보함. 10MWth급 석탄 순산소 순환유동층 연소로부터 80% 이상 CO<sub>2</sub> 원천분리를 달성, 90% 이상을 목표로 연구 수행 중('21년 종료)
- 한전 전력연구원에서는 GTI와 함께 플랜트 효율 향상을 위해 가압 순산소 순환유동층 연소기술을 개발 중에 있음
- KITECH은 가압 순산소 연소 원천기술개발을 통해 미분탄 순산소 연소 공정 개발을 수행한 바 있음
- 하지만, 순산소 연소 공정과 CO<sub>2</sub> 활용, 저장 기술을 직접 연계하는 통합공정 개발 연구는 수행된 바 없음

● 핵심기술 목표

핵심기술-세부기술별 기술수준 및 목표

핵심기술-세부기술	현재기술수준(Baseline)	목표
<p><b>핵심</b> 바이오매스 순산소 보일러 기술</p>	<p>규모 : 0.1-10 MWth Oxy-CFBC*, 1MWth Oxy-PC** CO<sub>2</sub> 원천분리 : 80-90% 이상 순산소 연소-CO<sub>2</sub> 활용, 저장 연계 : 개발된 바 없음</p>	<p>( '30) 규모 : 10MWth 이상 Oxy-CFBC 및 Oxy-PB*** 시스템 개발 CO<sub>2</sub> 원천분리 : 93% 이상 ( '40) 규모 : 100 MW 이상 Oxy-CFBC 및 Oxy-PB 시스템 실증 CO<sub>2</sub> 원천분리 : 93% 이상 ( '50) 규모 : 500 MW 이상 Oxy-CFBC 및 Oxy-PB 시스템 상용화 CO<sub>2</sub> 원천분리 : 93% 이상 원천분리 CO<sub>2</sub> 활용, 저장량 : 발생량 기준 95% 이상</p>

핵심기술-세부기술	현재기술수준(Baseline)	목표
<b>세부</b> 바이오매스 순산소 연소 중 질소산화물(NOx), H <sub>2</sub> O, 클링커 감축 기술	NOx 감축 : 다단연소, SNCR, SCR 적용 수분 감축 : Flue gas condenser 적용 규모 : 0.1MWth Oxy-CFBC, 1MWth Oxy-PC 클링커 감축 : 첨가제 공급 규모 : 0.1MWth Oxy-CFBC	(‘30) 규모 : 10MWth 이상 Oxy-CFBC 및 Oxy-PB 시스템 적용 (‘40) 규모 : 100MW 이상 Oxy-CFBC 및 Oxy-PB 시스템 실증 (‘50) 규모 : 500MW 이상 Oxy-CFBC 및 Oxy-PB 시스템 상용화
<b>세부</b> 산소 농도 (30% 이상) 변화에 따른 플랜트 효율 향상 및 부하변동 운전 기술	규모 : 0.1MWth Oxy-CFBC	(‘30) 규모 : 10MWth 이상 Oxy-CFBC 적용 (‘40) 규모 : 100MW 이상 Oxy-CFBC 실증 (‘50) 규모 : 500MW 이상 Oxy-CFBC 상용화
<b>세부</b> 바이오매스 순산소 연소 중 원천 분리된 CO <sub>2</sub> 의 활용, 저장 연계 기술	없음	(‘30) 규모 : 1 MWth 이상 순산소 연소-CO <sub>2</sub> 활용 연계 운전 기술 (‘50) 규모 : 500 MW 이상 순산소 연소 시스템-CO <sub>2</sub> 활용 저장 연계를 통한 CO <sub>2</sub> 감축 원천분리 CO <sub>2</sub> 활용 저장량 : 발생량 기준 95% 이상
<b>세부</b> 바이오매스 순산소 연소-CO <sub>2</sub> 활용, 저장 통합 공정(BECCUS) CDM 방법론	없음	(‘25) BECCUS의 negative CO <sub>2</sub> emission을 위한 CDM 방법론 도출 (‘50) 실증/상용 BECCUS 플랜트 CDM 인증 사업

\*Oxy-CFBC : Oxy-circulating fluidized bed combustion (순산소 순환유동층 연소)

\*\*Oxy-PC : Oxy-pulverized coal combustion (순산소 미분탄 연소)

\*\*\*Oxy-PB : Oxy-pulverized biomass combustion (순산소 미분 바이오매스 연소)

th: Thermal input (연료 투입 열량)

### 세부기술 : 바이오매스 순산소 연소 중 질소산화물(NOx), H<sub>2</sub>O, 클링커 감축 기술

- (기술정의) Negative CO<sub>2</sub> emission 기술인 BECCUS 플랜트의 안정적인 운영을 위해 바이오매스 순산소 연소 중 발생하는 질소산화물(NOx), H<sub>2</sub>O 그리고 바이오매스 내 알칼리 금속(K, Na 등), 황(S), 염소(Cl) 성분에 의한 클링커 제거 기술
- (필요성)
  - 바이오매스 내 질소함량과 순산소 연소 시 외부 공기 유입에 의한 질소함량에 의해 순산소 연소 중 질소산화물이 생성 → BECCUS를 위해서는 배기가스 내 질소산화물 농도 최소화 필요. 또한, 강화된 질소산화물 배출부과금 제도 대응 필요 → 플랜트 운영비용을 절감하기 위해 로 내 탈질기술인 SNCR, 다단연소(oxidant staging combustion) 기술 연계 필요
  - 순산소 연소는 산소와 재순환되는 배기가스가 혼합되어 연소용 산화제(O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, 미량 NO, SO<sub>2</sub>, CO 등)로 사용되는데 특히, 배기가스 재순환 시 다량 H<sub>2</sub>O가 존재할 경우, 각종 설비 및 파이프들의 부식 및 안정적인 순산소 연소 운전을 방해 → Flue gas condenser를 이용하여 배기가스를 응축(냉각)하여 물을 제거하거나 응축잠열을 회수하는 기술 필요

- 바이오매스 연료 내 알칼리 금속 및 황(S), 염소(Cl) 성분에 의한 클링커 생성을 억제하기 위한 첨가제 투입을 통한 안정적인 바이오매스 발전소 운영 필요

#### 세부기술 : 산소 농도(30% 이상) 변화에 따른 플랜트 효율 향상 및 부하변동 운전 기술

- (기술정의) 순산소 연소 시 산소 농도를 30% 이상 증가하여 운전할 경우 동일 연소 설비에서 더 많은 연료를 연소시킬 수 있으며 이를 2세대 순산소 연소 기술라고 함. 순환유동층 보일러의 경우, 연료 투입량 증가에 따른 연소로 내 온도를 열매체제인 순환 고체량에 의해 제어 가능
- (필요성)
  - 산소를 생산하는 ASU(air separation unit) 공정은 순산소 연소 플랜트의 효율을 낮추는 주요 요인으로 플랜트 효율을 향상시킬 수 있는 운전 기술이 필요. 순산소 연소 시 배기가스 재순환율을 최소화하면 산소 농도를 높일 수 있어 동일 연소 설비에서 더 많은 연료를 연소시킬 수 있으며 이 때 발생하는 추가 열을 외부열교환기에서 회수하게 되면 플랜트 효율 향상이 가능
  - 산소 농도 제어는 동일 연소로에서 바이오매스 공급량을 조절할 수 있어 부하변동 운전이 가능

#### 세부기술 : 바이오매스 순산소 연소 중 원천 분리된 CO<sub>2</sub> 활용, 저장 연계 기술

- (기술정의) 바이오매스 순산소 연소 중 생성되는 93% 이상 CO<sub>2</sub>를 직접 활용하여 탄산광물화, 합성연료(CO 등) 생산하거나 CPU(CO<sub>2</sub> purification unit)를 거쳐 지중, 해양에 저장할 수 있는 연계 기술
- (필요성)
  - 바이오매스 순산소 연소-CO<sub>2</sub> 활용, 저장 연계 공정은 negative CO<sub>2</sub> emission 기술로서 어쩔 수 없이 배출되는 CO<sub>2</sub>를 흡수(상쇄)시킬 수 있는 기술이며 국제적으로도 에너지 분야 탈탄소화를 위한 핵심기술로서 개발이 필요하다고 언급됨
  - 순산소 연소는 발생하는 배기가스 중 80%가 연소로로 재순환되기 때문에 공기연소 대비 배출되는 배기가스양이 20% 수준으로 감소하게 되며 배출되는 배기가스 내 원천 분리된 93% 이상의 고농도 CO<sub>2</sub>를 활용, 저장 기술과 연계한다면 골똥 없는 청정 화력발전소 구현이 가능해짐
  - (IEA, '21년) CO<sub>2</sub> 거래비용 역시 '25년 75\$/ton에서 '50년 250\$/ton으로 증가가 예상되어 BECCUS 플랜트는 더욱 경제성을 가질 것으로 전망되므로 선제적 기술 개발과 확보가 시급

#### 세부기술(정책) : 바이오매스 순산소 연소-CO<sub>2</sub> 활용, 저장 통합 공정(BECCUS) CDM 방법론

- (기술정의) BECCUS 기술이 negative CO<sub>2</sub> emission으로서 국제적으로 온실가스 감축량 인증을 위한 타당성 검토 및 방법론 개발
- (필요성) Negative CO<sub>2</sub> emission에 대한 온실가스 감축량 인증 방법론 개발을 위해 국제 공인 CDM(Clean Development Mechanism) 검증기관인 청정기반체제운영기구인 DOE(Designated Operational Entity)와 협업 필요

핵심기술 3 • 분말 금속연료 기반 발전 기술

● 기술개요

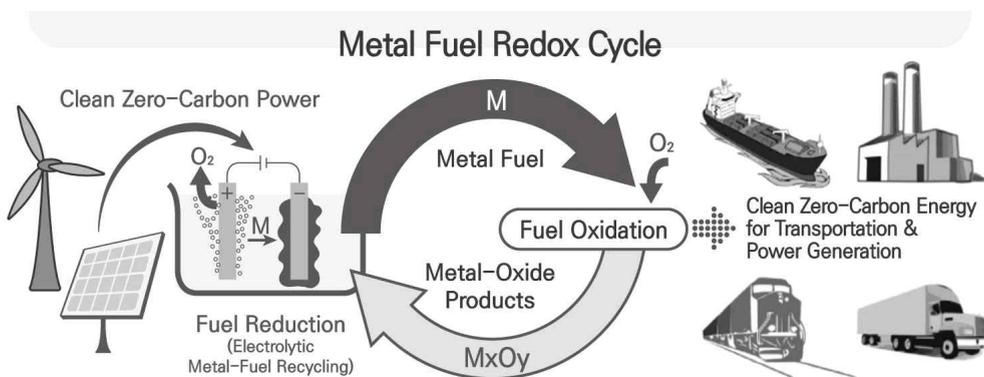
(개요)

- 화석(탄화수소) 연료를 대체하여 금속을 공기 또는 물과 함께 반응하는 과정에서 발생하는 열을 활용하여 발전하는 기술
- 최초 분말 금속의 생산에 투입되는 에너지는 재생에너지를 기반으로 충당하고 반응(공기 연소 및 물 반응) 결과물을 다시 연료인 금속으로 환원시키는 에너지 역시 재생에너지를 사용
- 연료로서 활용되는 분말 금속은 탄소 성분이 포함되지 않은 무탄소 연료이며, 반응 산화물은 친환경적이며 재활용이 가능
- 연료의 산화 환원 반응에 따른 질량 및 체적 손실 없이 재활용 가능

(필요성)

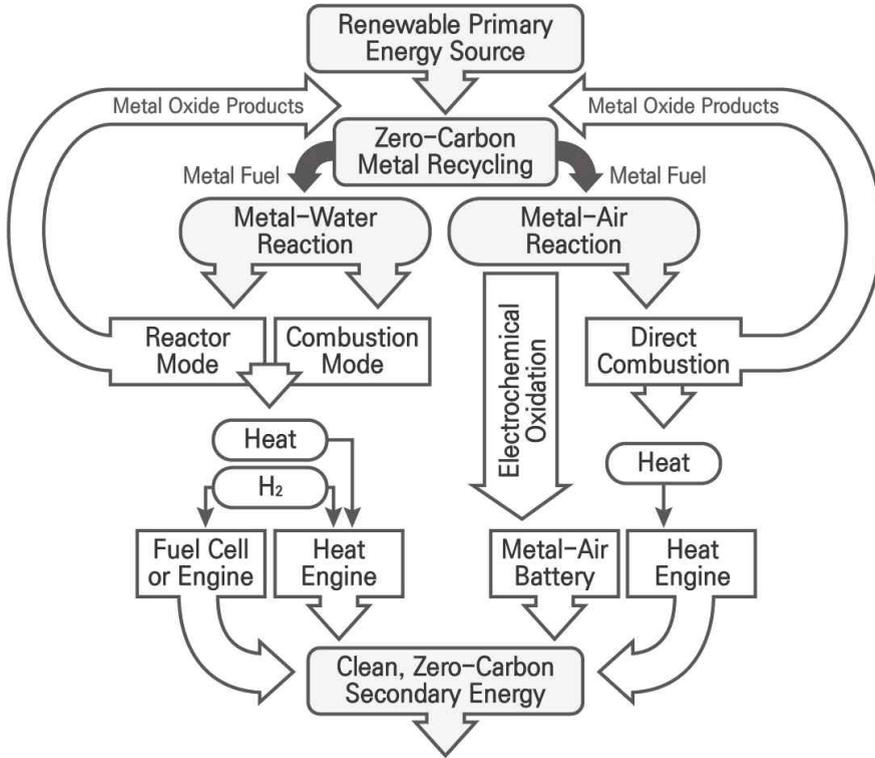
- 청정에너지이면서 재활용 가능한 금속 연료는 에너지 캐리어(energy carrier)로서 탄소 무배출(zero carbon) 실현을 위해 기존 전통 발전시스템 활용 측면에서 화석 연료의 유망한 대안임
- 기술 확보를 통한 발사체, 잠수함, 가스터빈, 수소생산 등 산업생태계 연계 가능

분말 금속연료 발전 개요



출처 : Progress in Energy and Combustion Science 68 (2018) 169-196 (www.elsevier.com/locate/pecs)

분말 금속연료 발전의 흐름도



출처 : Progress in Energy and Combustion Science 68 (2018) 169–196 ([www.elsevier.com/locate/pecs](http://www.elsevier.com/locate/pecs))

● 기술 동향

(해외)

- 우주왕복선 고체 로켓 booster의 첨가제 또는 ducted 로켓의 주 에너지로 활용
- Metal oxidation 기술은 화석연료 대비 엔진의 에너지밀도 극대화가 입증됨
- (캐나다) 맥길대에서 화석연료엔진과 동일한 수준 동력생산 성공
- (네델란드) '20년 아이트호벤공대에서 산업용 분말금속 연소설비 실증. '21년 1MW급, '24년 10MW급 적용이 예정되어 있으며 '30년 석탄 화력의 금속 연료 대체 착수 예정

(국내)

- 항공, 우주, 국방 분야 중심의 금속연료 연소기술 보유 및 학계 연구 수행
- 적절한 금속 분말 크기 및 이종금속 간의 혼합비율, 알맞은 화력을 찾는 연구 진행 중
- 분말 금속의 반응 속도 제어 및 반응 후 포집기술 개발 예정

● 핵심기술 목표

핵심기술-세부기술별 기술수준 및 목표

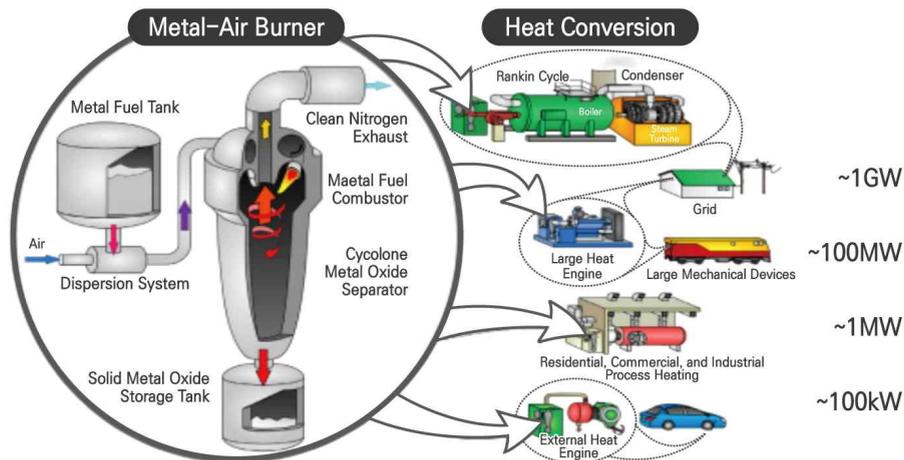
핵심기술-세부기술	현재기술수준(Baseline)	목표
<b>핵심</b> 분말 금속연료 기반 발전기술	(국내, 해외) Lab-scale 실증	(‘40) ~10MW급 실증 (‘45) 화석연료 대체 착수(연료전환) (‘50) 분산전원급 발전시스템 상용화
<b>세부</b> 분말금속-공기 연소 발전시스템 기술	(국내) 없음 (해외) 산업용 연소기 실증 완료, ‘21년 1MW 적용예정	(‘30) 금속-공기 연소제어 실증 (‘40) 실증(~10 MW급 Scale-up) (‘45) 상용급 실증
<b>세부</b> 분말금속-물 반응 발전시스템 기술	(국내) 없음 (해외) FC 허부사이클 적용 중	(‘30) 금속-물 반응 실증 (‘40) 실증(~10 MW급 Scale-up) (‘45) 상용급 실증

\* 네덜란드 산업용 분말금속 연소 실증(‘20), 1MW급 적용(‘21), 10MW급(‘24), 석탄화력 대체(‘30)

세부기술 : 분말금속-공기연소 발전시스템 기술

- (기술정의) 철과 같은 금속연료에 점화온도를 낮추고 산소와의 산화피막을 방지하기 위한 니켈 등과 같은 이종금속을 혼합하여 산소와의 산화 연소반응을 통하여 에너지를 활용하는 발전기술로 기존 랭킨 사이클(Rankine cycle)을 이용하는 기술
- (필요성) 기존 석탄연료의 대체 및 전통적인 발전시스템의 지속, 금속 연소측면에서 안정적 운영이 가능한 탄소중립에 부합하는 CO<sub>2</sub> Free 무탄소 발전시스템

Metal-Air 연소반응 발전기술 예시도



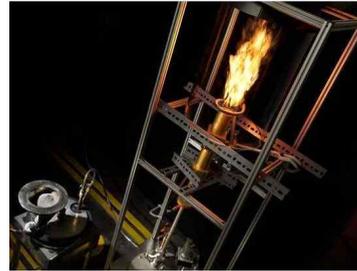
출처 : Progress in Energy and Combustion Science 68 (2018) 169-196

네델란드 산업체 : 금속연료를 사용한 발전설비



출처 : World first: Dutch brewery burns iron as a clean recyclable fuel, NewAtlas, "https://newaenergy/bavarian-brewery-carbon-free-renewable-iron-fuel/underfiend"(접속일: 2020.11.04.)

아이트호벤공대 금속연료 연소제어 실험

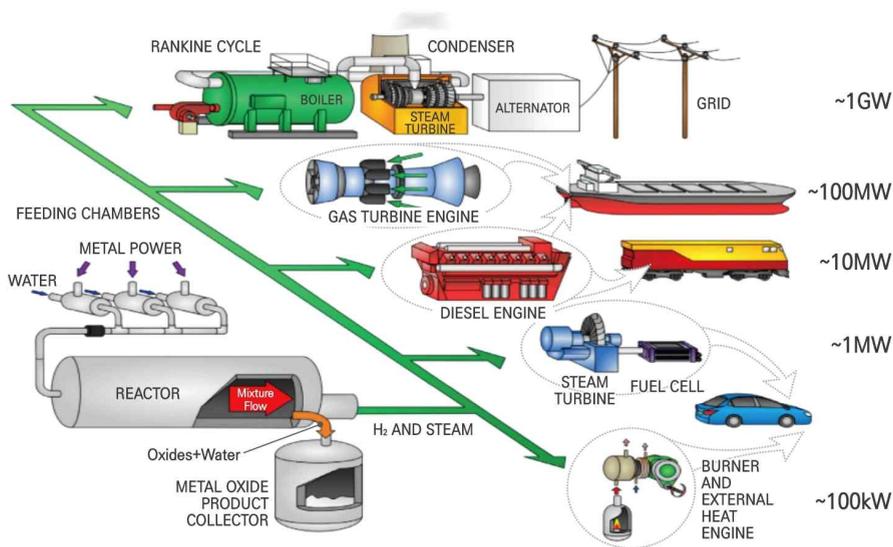


출처 : Iron Powder Passes First Industrial Test as Renewable, Carbon Dioxide-Free Fuel, IEEE Spectrum, "https://spectrum.ieee.org/iron-powder-passes-first-industrial-test-as-renewable-co2free-fuel#toggle-gabr"(접속일 2020.11.13)

**세부기술 : 분말금속-물 반응 발전시스템 기술**

- (기술정의) 알루미늄과 같은 금속연료를 물과 반응시키면 수산화이온과 반응하면서 물이 끓어오르고 수소와 열이 나오는데, 이러한 수소는 연료전지와 가스터빈에 활용하고 열을 이용해 증기를 만들어 기존 발전시스템인 랭킨(Rankine Cycle)로 이용하는 기술
- (필요성) 무탄소 연료인 금속의 산화반응을 통해 열과 수소를 생산하여 직접 전력생산 및 수소 생산설비로 활용이 가능하여 탄소중립에 활용가능

**Metal-H<sub>2</sub>O 반응을 통한 발전기술 예시도(캐나다 맥길대)**



출처 : Progress in Energy and Combustion Science 68 (2018) 169-196

라

기술확보 전략

● 소재-부품-장비 확보전략

• (소재)

- (분말 금속연료 기반 발전기술) 연소 측면에서 철과 실리카, 물과의 반응에서는 알루미늄이 유력한 금속연료임. 분말 금속연료 확보는 재생에너지를 기반으로 하는 금속 분말 생산설비의 조합 및 기존 제철 등 산업부문에서의 금속분말 대량 생산 기술을 이용하는 전략 필요

• (부품)

- (분말 금속연료 기반 발전기술) 금속연료 연소 반응의 경우 에너지 밀도가 높아 연소반응이 일어날 때 약 2000℃ 이상의 고온이 발생하기 때문에 고온에 견딜 수 있는 세라믹 재료로 구성된 부품 필요. 이를 위해 산·학·연 협동 국내 자체 개발 또는 국내 기술 개발이 어려운 경우 일부 해외 부품 수입

• (장비)

- (암모니아 보일러 기술) 암모니아 혼소/전소 기술은 국내에서 수행된 바가 없어 암모니아 연소를 위한 설비 개선 및 추가 장비에 대한 리스트업 필요. 일본의 암모니아 혼소사례를 벤치마킹하여 리스트업하고 추가적으로 필요한 장비(암모니아 저장, 이송, 공급 설비 및 버너)들은 국내·외 SCR 운영 사례 분석, 미분탄 버너 또는 가스버너의 개선 혹은 신규 암모니아 버너에 대한 국내 제조사 자체 기술개발을 통해 확보

- (바이오매스 순산소 보일러 기술) 배기가스 내 물 제거와 오염물질 감축을 위한 FGC(flue gas condenser) 확보를 위해 국내외 기성품 개선 혹은 연구기관과 중소/중견 부품업체와 공동 개발하여 장기 운전 실적 및 성능검증을 통해 확보

- (분말 금속연료 기반 발전기술) 분말 금속연료의 연소 시 반응속도 제어와 반응물 회수를 위해 국내외 자력 포집(선별)장비의 조합, 개선을 통한 최적화 기술 확보

● 시스템 확보전략

• (설계·제작)

- (암모니아 보일러 기술) 연구기관에서의 암모니아 혼소 원천기술을 확보한 후 연구기관-발전사-발전 주기기 공급사-EPC 제작사들의 기술협력을 통해 '30년까지 석탄화력 보일러 대상 암모니아 20% 혼소 실증, '35년까지 암모니아 혼소율 50%~전소 상향 설계 및 '40년까지 암모니아 50% 혼소 실증 완료

- (바이오매스 순산소 보일러 기술) 연구기관에서 현재 보유중인 순산소 미분탄 연소, 순산소 순환유동층 연소 원천기술을 토대로 10MWth급 바이오매스 순산소 연소 공정과 가장 경제성이 있는 CO<sub>2</sub> 활용 기술과의 연계에 고려한 설계/제작 완료 후, 100~500MW 이상 BECCUS 플랜트 실증 및 상용 시스템 제작은 연구기관-발전사-발전 주기기 공급사-EPC 제작사와 협력하여 기술 개발

- (분말 금속연료 기반 발전기술) 보일러 제작-설계사-연구기관-학계의 국책 과제를 통해 실증하는 전략으로 1단계 설계, 제작기술 확보 연구개발 후 2단계 파일럿 플랜트 실증 연구개발

- (시험)

- (암모니아 보일러 기술) 연구기관에서 미분탄, 순환 유동층 파일럿 설비에서 암모니아 혼소/전소 운전기술(NO<sub>x</sub>저감, 암모니아 슬립 방지)을 확보한 후, 연구기관-발전사의 컨소시엄을 통해 각 규모 격상 단계별 객관화된 시험방법론 개발 및 적용

- (바이오매스 순산소 보일러 기술) 연구기관에서 바이오매스 순산소 연소 중 CO<sub>2</sub> 93% 이상 원천분리를 위한 운전(Air ingress 방지) 방법 확보, NO<sub>x</sub> 저감(다단연소+배기가스 재순환+SNCR+SCR), CO<sub>2</sub> 활용/저장 공정과 연계 기술 개발 확보 후, 연구기관-발전사의 컨소시엄을 통해 시스템 규모별로 실증 완료 후 보급 확산

- (분말 금속연료 기반 발전기술) 보일러 제작 및 설계사 및 연구기관과 국책 과제를 통해 금속연료 기반 발전기술 적용성 확인

- (인증)

- (암모니아 보일러 기술) 각 규모 격상 단계별 시스템 성능 인증, 암모니아 혼소, 전소 안전한 운영과 수용성 향상을 위한 암모니아 연료 표준 개발

- (바이오매스 순산소 보일러 기술) 엔지니어링 단계에서 관련기관(설계사, 건설사, 발전사)의 BECCUS 플랜트 시스템의 기술 타당성 평가, 표준 설비 인증 후 상용화 전략 수립 및 국제 CDM 공인인증 기관인 국내 청정개발체제운영기구(DOE)와 함께 BECCUS의 negative CO<sub>2</sub> emission 방법론 개발 및 온실가스 감축 인증 마련

- (분말 금속연료 기반 발전기술) 보일러 제작 및 설계사 및 연구기관과 국책 과제를 통해 분말 금속연료 공기 연소 보일러 설비 효율 90% 이상 확보를 위한 시스템 성능 인증 확보

- 국내외 실증(Scale-up) 방안

- (국내 실증)

- (암모니아 보일러 기술) 기술 개발 로드맵에 따른 단계적 스케일업으로 암모니아 혼소 20% 실증 → 암모니아 혼소 50% 상향 상용화

- (바이오매스 순산소 보일러 기술) 로드맵에 따른 단계적 스케일업으로 파일럿 규모 시스템 개발 후, CO<sub>2</sub> 활용-저장 연계 100MW 이상급에서 실증 → 500MW급 이상 BECCUS 플랜트 도입확산

- (분말 금속연료 기반 발전기술) 발전사와 산학연으로 구성된 연구개발 참여기관에서 실증 후 기존 화력발전소의 연료전환 기술로 도입확산

- (국외 실증)

- (바이오매스 순산소 보일러 기술) 발전 주기기 납품사와 EPC사에서 확보할 BECCUS 국산화 기술들을 바이오매스가 풍부하고 전력공급이 부족한 아시아 신흥 개도국들에 상용화하여 국외 CO<sub>2</sub> 감축 방안 확보를 통한 신시장 창출

● 인프라 구축 방안

- (인력양성)
  - 발전분야, 학계 등 관련 교육기관에 암모니아 보일러 기술, BECCUS 기술, 분말 금속연료 발전기술에 대한 전문 인력 양성 프로그램 신설
  - 실증설비 현장운전을 통한 고급기술자 과정 개설 및 산업체 고급인력 육성
- (법·제도 개선)
  - 암모니아 혼소 발전설비 대상 CHPS 등 제도 기준 마련
  - 국내·외 바이오매스 활용 확대 방안 마련, BECCUS 플랜트에 대한 REC, carbon pricing, negative CO<sub>2</sub> credit 마련
- (국제협력)
  - 국가 온실가스 감축을 위해 암모니아 혼소/전소 및 BECCUS 플랜트 실증을 먼저 진행하고 있는 국외 전문기관과의 기술교류
  - Open Innovation을 통한 발전시스템에 분말 금속연료 적용을 준비하고 있는 국가들(캐나다, 네덜란드 등)과의 국제 협력을 통한 기술 확보에 따른 시행착오 회피

## 마 탄소중립 기여 효과

### 탄소중립 기술과의 연계성

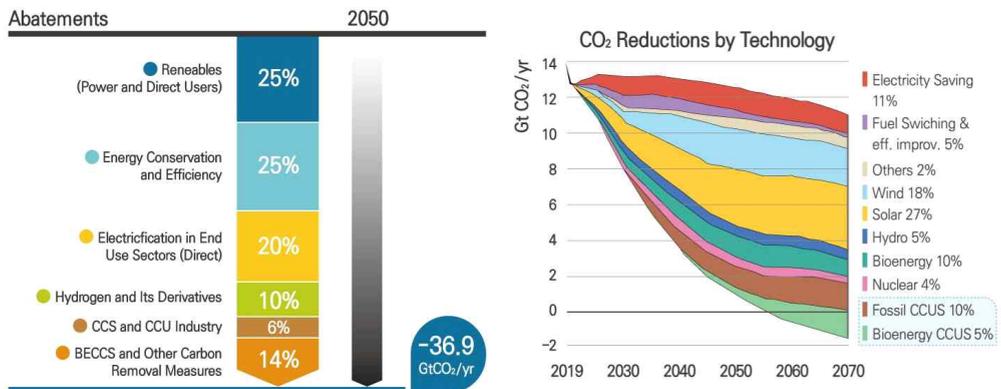
#### 암모니아 보일러 기술

- 무탄소 연료인 암모니아(NH<sub>3</sub>)는 연소 시 온실가스 배출이 없는 친환경 연료로서 기존의 탄소기반 화석연료 발전 설비에 화석연료 대신 사용함으로써 혼소량에 비례하는 CO<sub>2</sub> 배출 저감을 통해 탄소중립에 기여할 수 있음

#### 바이오매스 순산소 보일러 기술

- IEA의 '21년 보고서 'Net zero by 2050 - A roadmap for the Global Energy Sector' 에 따르면, 발전부문은 '40년 전까지 zero로 감축, 산업/수송/건물 부문은 '50년에도 배출량이 일부 존재, 기타 부문의 배출량을 음수화(negative CO<sub>2</sub> emission)을 통해 에너지 부문 CO<sub>2</sub> 순 배출량을 zero로 감축해야 한다고 보고됨
- 전 세계 에너지 시스템의 탈탄소화를 위한 핵심수단 중 바이오에너지, CCUS, BECCUS 등 포함

1.5°C 기후목표 달성을 위한 '50년 전 세계 CO<sub>2</sub> 순배출량 zero 시나리오      시나리오별 발전 부문 전 세계 CO<sub>2</sub> 배출량과 기술 유형별 감축량



출처 : IRENA, World Energy Transitions Outlook - 1.5°C Pathway (2021)

출처 : IEA, Net Zero by 2050 - A roadmap for the global energy sector (2021)

- 또한 동 보고서에 따르면, 탄소중립을 위한 전 세계 발전 부문 전환을 위한 핵심 마일스톤 중 전략방향2에 해당하는 CCUS기반 바이오에너지 발전소, CCUS 기술이 도입된 석탄 및 가스 발전소, 석탄화력발전에서 암모니아 혼소/전소기술들이 모두 포함

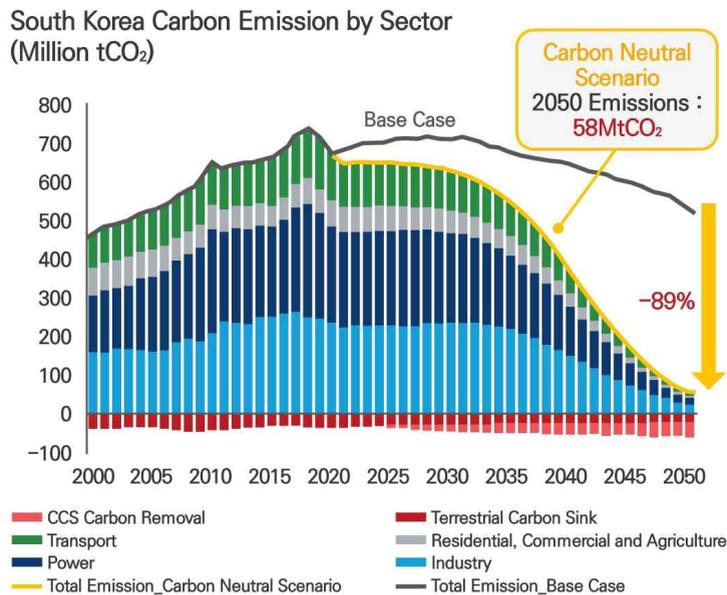
2050년 net-zero 시나리오에서 전 세계 발전 부문 전환을 위한 핵심 마일스톤

카테고리	2020	2030	2050
총 발전량(TWh)	26,800	37,300	71,200
재생에너지			
설치 용량(GW)	2,990	10,300	26,600
총 발전량에서 재생에너지가 차지하는 비율	29%	61%	88%
총 발전량에서 태양광과 풍력이 차지 비율	9%	40%	68%
CCUS 발전량(TWh)			
CCUS 기술이 도입된 석탄 및 가스 발전소	4	460	1,330
CCUS 기반 바이오에너지 발전소	0	130	840
수소 및 암모니아			
전 세계 석탄화력발전에서 평균 혼소율(CCUS 미포함)	0%	3%	100%
전 세계 가스화력발전에서 평균 혼소율(CCUS 미포함)	0%	9%	85%
비저감 화석 연료			
총 발전량에서 비저감 석탄의 비율	35%	8%	0.0%
총 발전량에서 비저감 천연가스의 비율	23%	17%	0.4%
원자력			
연 평균 설비용량 추가(GW)	2016-20	2021-30	2031-50
연 평균 설비용량 추가(GW)	7	17	24
기반 시설			
전력망 투자액(10억 US\$, 2019년 US\$)	260	820	800
변전소 용량(GVA(기가볼트암페어))	55,900	113,000	290,400
배터리 저장(GW)	18	590	3,100
공공 EV 충전(GW)	46	1,780	12,400

출처 : IEA, Net Zero by 2050 – A roadmap for the global energy sector (2021)

- Wood Mackenzie의 보고에 따르면 대한민국 2050 탄소중립 달성 시나리오 중 negative CO<sub>2</sub> emission 기술로서 CCS carbon removal의 역할이 타 국가에 비해 중요하다고 언급

대한민국의 부문별 온실가스(carbon) 배출량 (MtCO<sub>2</sub>)



출처 : Wood Mackenzie Webinar, 2020. 11.30

### 분말 금속연료 기반 발전 기술

- 전통적인 에너지원인 탄소 기반의 화석 연료가 아니기 때문에 CO<sub>2</sub>를 완전히 배출하지 않고 반응을 통해 전력을 생산한다는 점에서 탄소 중립의 게임 체인저가 될 수 있음
- 반응 후에 만들어지는 생성물 또한 친환경적이기 때문에 지구 환경에 무해하며, 반응물과 생산물 각각 질량 등의 손실이 없고 재생에너지를 통해 다시 금속 분말연료로 환원을 시킬 수 있어 지속가능한 에너지원이 될 수 있음

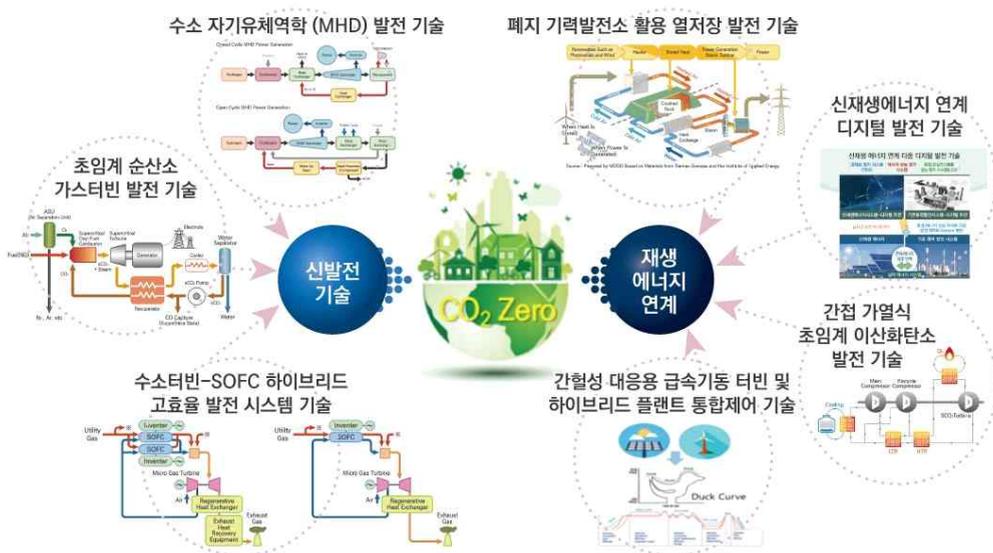
## 03 신발전 및 재생에너지 연계 기술

### 가 전략방향 대상정의

#### ● 개념 및 범위

- 발전 분야에서 새로운 패러다임을 제시할 수 있는 융복합 신발전 기술과 재생에너지원의 효율과 간헐성을 보완하여 온실가스를 혁신적으로 저감할 수 있는 신발전 및 재생에너지 연계 기술
- 수소 자기유체역학(MHD) 발전 기술
- 초임계 순산소 가스터빈 발전 기술
- 수소터빈-SOFC 하이브리드 고효율 발전시스템 기술
- 폐지 기력발전소 활용 열저장 발전 기술
- 신재생에너지 연계 디지털 발전 기술
- 간접 가열식 초임계 이산화탄소 발전 기술
- 간헐성 대응용 급속 기동 터빈 및 하이브리드 플랜트 통합제어 기술

### 개 요



## ● 기술 요구사항

- 2050 탄소중립에 따라 온실가스의 최대 배출원 중 하나인 에너지 분야에서는 신발전 및 재생에너지 연계 기술을 개발하는 데 있어 효율 향상과 더불어 탄소 저배출 혹은 무배출 요구
- 기존에 기저부하 발전시스템을 활용하면서 신발전 및 재생에너지 기술과 융합 및 파생이 가능한 새로운 개념의 온실가스 무배출 에너지(전력 및 열) 생산시스템의 장기적인 관점에서 도입 필요
- 신발전 기술의 시장 경쟁력 확보를 위해서는 고효율화(high efficiency) 및 소형화(minimization)가 중요하며, 이를 위한 발전설비 내 핵심기기, 공정, 운전기술 확보 및 에너지소비 최소화 중요
- 신재생에너지의 보급 증가에 따라 전력생산 대응력이 높은 직접발전(direct power generation) 기술 확보 필요성 증대 및 국가 차원에서 기존 발전 시스템과의 연계뿐만 아니라 항공, 우주, 제조산업 등 전방위 분야로의 파급효과를 가져올 수 있는 산업융합형 첨단 발전 원천기술 확보 필요성 대두
- 탄소중립(net-zero)을 위한 중장기적 관점에서 저비용 이산화탄소 포집 연계 저탄소 연료 발전과 이산화탄소 무배출 무탄소 연료 발전에 효과적으로 대응하고 에너지 전환의 가교로서 기저부하를 담당할 수 있는 혁신적인 가스터빈 신발전 기술의 개발 필요
- 수소터빈-SOFC 하이브리드 시스템의 주요 구성품(수소터빈, SOFC)에 대한 국내 기업과 해외 선도기업 간의 기술격차가 큰 상황으로 완제품 개발 및 성능 향상 기술을 포함한 추격 전략이 필요하며, 하이브리드 시스템 조기 실증을 통한 통합 운전 기술 확보가 시급
- 기존 기력발전소의 발전설비(랭킨 사이클) 등 인프라를 유지하고 보일러 설비를 열에너지 저장 및 열-전력변환 설비로 전환시켜 잉여 재생에너지를 대용량, 장시간으로 열저장 후 전력 필요시 저장된 열을 활용하여 기존 증기터빈을 구동하는 기술이 주목받고 있음
- 기존 국내 전력 생산시스템과 신재생에너지원의 최적 연계 기술은 친환경 저탄소 에너지 구조로의 전환에 가속도를 낼 수 있는 기반이 되나, 선진국들과 비교해 국내의 계절적, 지리적 한계로 인해 보다 정교한 디지털 발전 및 운영 기술 개발과 관련 정책의 뒷받침이 필요
- 물을 매체로 하는 광범위한 기존 발전 시스템의 온실가스 저감 또는 청정 발전량 증대를 위한 이산화탄소를 매체로 사용하는 고효율 신발전 사이클의 개발 및 실증 필요
- 간헐성 발전원(풍력, 태양광)의 급격한 확대에 따른 계통 유연성 및 안정성을 확보하기 위한 국산화 기술개발 필요
- 재생에너지 급증으로 유발될 수 있는 전력계통의 duck-curve 현상을 완화할 수 있는 발전설비의 빠른 기동·출력 증감 및 최저부하 확대 필요

**나 전략방향별 핵심기술**

핵심기술	Baseline	단기				중기			목표	
		2022	2023	2024	2025	~2030	~2040	~2050		
수소 자기유체 역학(MHD) 발전 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>MHD 단독 발전 규모: 없음</li> <li>MHD 단독 발전 효율: 없음</li> </ul>	(소) 수소 Closed cycle MHD 발전 기술 				(시) MHD 통합발전 엔지니어링 기술 	(시) 1MW급 Scale-up (시) 10MW 이상 상용급 실증 	MHD 단독 발전 규모	10MW 이상	
		(소) 수소-순산소 Open cycle MHD 발전 기술 						MHD 단독 발전 효율	15% 이상	
초임계 순산소 가스터빈 발전 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>연소기 운전 압력: 117 bar</li> <li>허용 응력: 160 MPa @ 1315°C</li> <li>터빈 입구 온도: 700°C</li> <li>발전 사이클 기초설계</li> </ul>	(부) 초임계 순산소 연소 핵심원천 기술 	(부) 초임계 순산소 연소기 설계 기술 (0.5 MWh 300 bar급 단일 인젝터) 				(시) 3 MW급 주주기 개발 및 Test Loop 시험 (시) 10 MW급 실증 (시) 분산형 상용화 (시) 100 MW급 대형 실증 	연소기 운전 압력	300 bar	
		(소) 고강도 세라믹 복합소재 원천 기술 	(소) 고강도 내열내압 소재 기술 (200 MPa @ 1315°C급 세라믹 복합소재 설계) 					허용 응력	200 MPa @ 1315°C	
		(부) 초임계 가스터빈 설계 기술 (300 bar 입구 온도 1300°C급) 				터빈 입구 온도		1300°C		
		(시) 시스템 기술(발전사이클 해석, Test Loop 및 주주기 설계) 				발전 효율		>60% (10MW급) >70% (100MW급)		
수소터빈-SOFC 하이브리드 고효율 발전 시스템 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>발전단가: 241 원/kWh</li> <li>LNG 복합발전 효율: 60%</li> <li>규모: 없음</li> </ul>	(부) 하이브리드 MGT용 수소 연소기 개발 				(부) 고효율 수소 MGT 개발 			발전단가	< 131 원/kWh
		(부) SOFC 모듈 완전 기술 개발 				(부) SOFC 모듈 개발 및 고효율화 			발전효율	> 70%
				(부) Pilot급 통합 시스템 개발 			(시) Pilot급 실증 (시) Scale-up (시) MW급 실증 	규모	> 1MW	

범례 (소) 소재, (부) 부품, (장) 장비, (시) 시스템 [진행중 기술] 기초원천 R&D 응용 R&D 실증/상용화 R&D [개발할 기술] 기초원천 R&D 응용 R&D 실증/상용화 R&D

청정연료발전

신발전 및 재생에너지 연계 기술

핵심기술	Baseline	단기				중기			목표	
		2022	2023	2024	2025	~2030	~2040	~2050		
<b>폐지 기력발전소 활용 열저장 발전 기술</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>총 효율(RTE): 25~35%</li> <li>규모: 1~100MW</li> <li>LCOS: \$50/kWh</li> </ul>	(소) 고효율 열저장 매체 개발	(사) 대용량 고효율 열저장 시스템	(사) 고효율 전력-열 전환 기술	(사) 열-전력 전환 최적 운용 제어 및 기초 기술	(사) 아임계압 실증	(사) 초임계압 실증		총 효율 (RTE)	>50%
									규모	500 MW
									LCOS	\$0.3/kWh
<b>신재생 에너지 연계 디지털 발전 기술</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>모델 구현: 60%</li> <li>예측 정확도: 없음</li> </ul>	(사) 디지털 트윈 발전 시스템 운영 기술		(사) 신재생에너지 최적 관리 시뮬레이션 기술	(사) 신재생에너지 연계 다중 디지털 발전 운영 기술	(사) 상용급 실증	(사) 상용급 실증		모델 구현	90% 이상
									예측 정확도	예측 오차 ± 1% 이내
<b>간접 가열식 초임계 이산화탄소 발전 기술</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>터보기기 용량: 100kW급</li> <li>고온부 온도: 500℃</li> <li>규모: Lab scale</li> </ul>		(부) 2MW급 터보기기 개발			(부) 30~100MW			LOE	>5% 절감
									효율향상	>2 pt %
									규모	100MW 이상
<b>간헐성 대응용 급속기동 터빈 및 하이브리드 플랜트 통합 제어 기술</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>급속기동: 20분 이하</li> <li>출력증감률: 14%/분</li> <li>GT-ESS 연계 응답시간: N/A</li> </ul>		(사) 급속기동형 고정밀 transient 예측 기술	(부) 이차요로 및 간극 제어 최적화 기술	(부) 급속기동용 고정성 로터 및 베어링 설계	(사) 하이브리드 플랜트 통합 제어 기술 개발	(부) 유연성 향상 구성품 설계	(사) 급속기동 및 하이브리드 발전 실증	급속기동	<10분
									출력 증감률	>20%/분
									GT-ESS 연계 응답시간	<200ms

범례 (소): 소재, (부): 부품, (장): 장비, (시): 시스템 [진행중 기술] 기초원천R&D 응용 R&D 실증/상용화R&D [개발할 기술] 기초원천R&D 응용 R&D 실증/상용화R&D

다

핵심기술 개요

핵심기술 1 • 수소 자기유체역학(MHD) 발전 기술

● 기술개요

(개요)

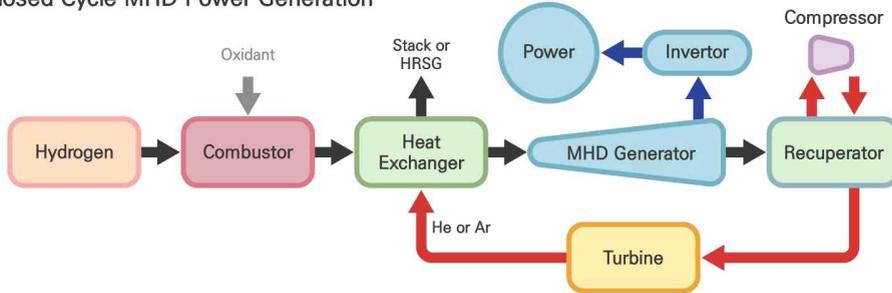
- 기존의 발전 시스템은 원동기(터빈, 수차, 엔진)의 힘(회전력)과 자기장에 의해 발생하는 기전력으로 전력을 생산하고 있음
- 자기유체역학(magnetohydrodynamics, MHD) 발전은 원동기의 회전력 없이 이온화된 유체(전기전도성 유체)와 자기장을 이용하여 패러데이의 전자기 유도 법칙\*에 의한 기전력으로 전력을 생산하는 새로운 방식임  
\*패러데이의 전자기유도법칙 : 자기장의 변화(자기 선속의 변화)가 발생할 때, 이로 인해 기전력이 발생하는 현상
- MHD 발전은 유체의 이온화를 위해서는 초고온(1600~2500℃)의 환경을 요구하기 때문에 수소 전소 기술이 필수적이며, 수소 가스터빈과의 연계가 가능하여 탄소 무배출, 발전효율과 경제성을 동시에 충족할 수 있음
- 소재 및 시스템 기술에 대한 항공, 우주산업에서의 기술활용도가 높아 타 산업과의 융합이 가능

(필요성)

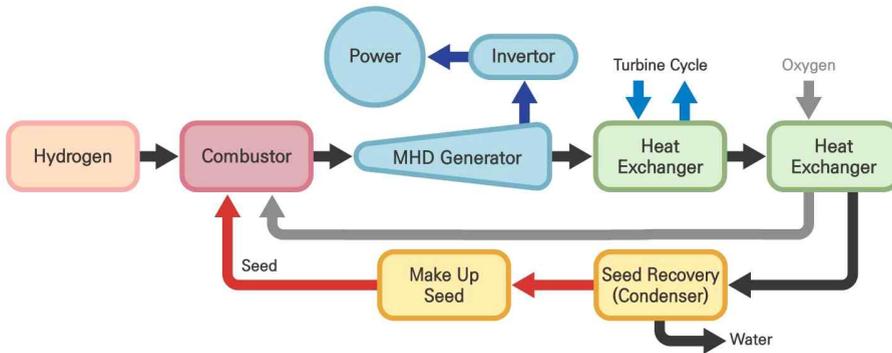
- 2050 탄소중립(net-zero)을 달성하기 위한 지속 가능한 시나리오 적용시 '40년까지 천연가스 발전량 감소와 동시에 천연가스 대체에 의한 온실가스 저감에 의한 탄소중립을 기대하고 있음
- 산업통상자원부는 '21년 2월 「탄소중립 R&D 전략」을 발표하였으며, 에너지 공급(전환) 부문에서의 탄소중립을 위한 전략으로 재생에너지, 그린수소, 신에너지원 등을 제시하고, 중장기 기술개발 및 민간의 도전적 R&D 촉진을 요청하고 있음
- 이에 대한 정부 정책 대응을 위해서는 천연가스를 대체하고, 기존의 발전 방식이 아닌 새로운 발전 패러다임을 제시할 필요가 있으며, 도전적인 기술 개발에 적극적으로 동참해야 함
- 이에 대한 대안 중 하나인 MHD 발전은 여러 산업 분야에서의 기술활용도가 높음에도 불구하고 기술 개발의 난이도가 높고, 전 세계적으로 성공 사례가 없기에 적극적인 기술 개발에 의한 기술 선점이 필요한 시점임

수소 자기유체역학(MHD) 발전 개략도

Closed Cycle MHD Power Generation



Open Cycle MHD Power Generation



● 기술 동향

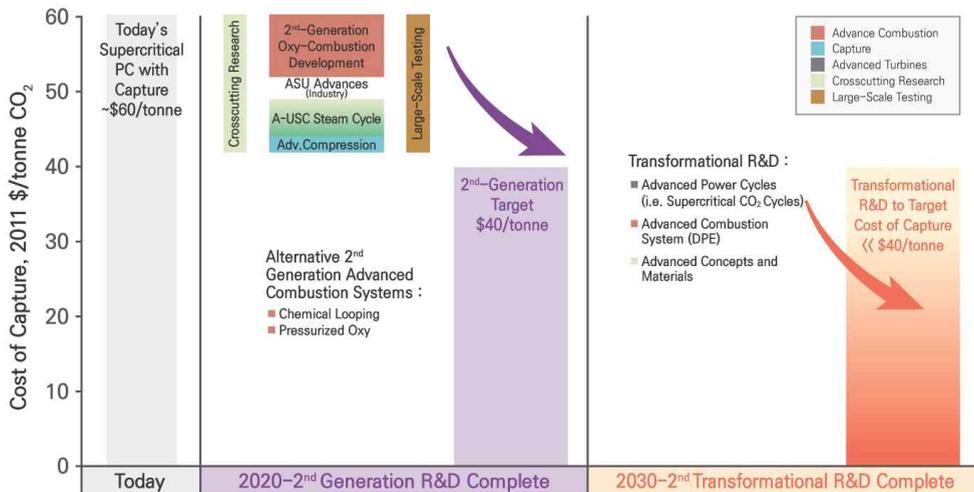
(해외)

- '60~'80년대까지 미국과 러시아(구소련)를 중심으로 300MWth급의 MHD 직접발전 시스템을 개발하여 운영한 바가 있으나, 발전효율이 낮은 특징을 보였음
- '80년대 말에 (구)소련에서 500MWth급 천연가스용 MHD 발전소를 운영하였으나, 연방붕괴로 인한 경제 사정 악화와 초전도자석에 의한 고자기장 발생한계 문제로 연구가 중단되었음
- 미국 DOE에서는 '14년부터 COE와 CCS 비용을 절감하기 위해 ACS(Advanced Combustion System)를 설정하고, '30년까지 개발 완료 및 '40년 보급·확산을 목표로 Transformational technology 내 DPE(Direct Power Extraction)를 선정
- 한편 DPE 기술 중 MHD 발전이 대표적으로 고려되고 있음
- 35년 이상 MHD 발전 연구를 중단했던 미국이 '18년 에너지부 산하의 연구기관인 NETL(National Energy Technology Laboratory)에서 MHD 발전에 대한 연구 재개를 발표
- 현재, NETL은 MHD 발전기 내부에서 플라즈마를 지속적으로 생성하고, 세슘이나 칼륨 등의 알칼리 금속물질(이온화 Seed)을 첨가하지 않는 'Seed-free MHD 시스템'의 연구개발을 수행 중

(국내)

- '90년대초 저온 용융합금을 전도성 유체로 사용하여 저온열원을 이용할 수 있는 닫힘-순환 액체금속(Closed-Cycle Liquid Metal) MHD 연구를 수행
- 발전을 포함하여 항공·우주용 MHD 추진엔진과 추진동력 기술과 관련된 연구개발 수행 경험 부족

미국 DOE 신발전 기술개발 전략



출처: MHD Power Generation Workshop, NETL, DOE (2014)

● 핵심기술 목표

핵심기술-세부기술별 기술수준 및 목표

핵심기술-세부기술	현재기술수준(Baseline)	목표
<b>핵심</b> 수소 자기유체역학(MHD) 발전 기술	수소 자기유체역학(MHD) 기술 개발 사례 없음	( '35) 수소 자기유체역학(MHD) 발전 기술 확보 ( '40) 1MW 이상 scale-up 및 실증 ( '45) 상용급(MHD 단독 발전 규모 10MW 이상, MHD 단독 발전효율 15% 이상) 실증
<b>세부</b> 수소 closed cycle MHD 발전 기술	수소 closed cycle MHD 발전 기술 개발 사례 없음	( '35) 수소 closed cycle MHD 시스템/소재 기술 확보 ( '40) 1MW 이상 scale-up ( '45) 10MW 이상 상용급 실증
<b>세부</b> 수소-순산소 open cycle MHD 발전 기술	수소-순산소 open cycle MHD 발전 기술 개발 사례 없음	( '35) 수소-순산소 open cycle MHD 시스템/소재 기술 확보 ( '40) 1MW 이상 scale-up ( '45) 10MW 이상 상용급 실증
<b>세부</b> MHD 통합 발전 엔지니어링 기술	MHD 통합 발전 엔지니어링 기술 개발 사례 없음	( '40) MHD 통합 발전 엔지니어링 기술 확보

**세부기술 : 수소 closed cycle MHD 발전 기술**

- (기술정의) 수소-공기 연소를 기반으로 전기전도성 유체를 간접적으로 가열하여 이온화 후 MHD 발전기를 이용해 전력을 생산하는 기술
- (필요성) Closed cycle MHD 발전은 요구되는 연소 온도가 낮고(약 1600°C), 이온화가 용이하여 MHD 발전의 기술성숙도를 빠르게 높일 수 있으며, 기존의 HRSG 설비와 같은 배열회수 기술의 활용성이 높음. 또한 수소 전소 발전으로 온실가스 무배출이 가능함

**세부기술 : 수소-순산소 open cycle MHD 발전 기술**

- (기술정의) 수소-순산소 연소를 기반으로 초고온, 초고속의 배가스와 알칼리 금속을 직접 이온화 후 MHD 발전기를 이용해 전력을 생산하는 기술
- (필요성) Open cycle MHD 발전은 요구되는 연소 온도가 높아(약 2000°C 이상) 수소-순산소 연소 기술이 필수적임. 또한 수소와 순수 산소만 사용하기 때문에 온실가스와 미세먼지를 포함한 대기오염원의 무배출이 가능하며, 수소 가스터빈의 직접적인 연계 가능성이 높음

**세부기술 : MHD 통합 발전 엔지니어링 기술**

- (기술정의) MHD 발전 기술과 수소 가스터빈 발전 및 암모니아 전소 발전 등 타 발전 기술과의 연계를 위한 통합 발전 엔지니어링 기술
- (필요성) 낮은 MHD의 단독 발전효율(약 15%)을 극복하기 위해서는 가스터빈 및 스팀터빈 등 기존 발전 시스템과의 연계가 필수적이며, MHD 발전의 초고온 환경을 가스터빈 및 스팀터빈과의 연계 혹은 복합발전으로 활용함으로써 전체 발전효율을 약 70%까지 높일 수 있음

**핵심기술 2** ● 초임계 순산소 가스터빈 발전 기술

## ● 기술개요

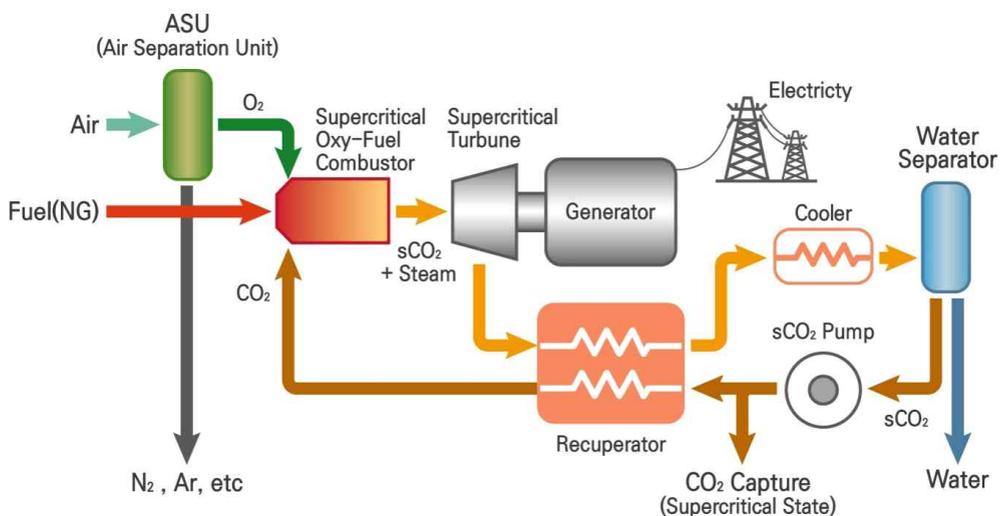
**(개요)**

- 수소 또는 LNG를 순산소 연소기에서 초임계 상태\*로 연소시키고 가스터빈을 구동하여 전력을 생산하는 발전 기술
  - \* 초임계 상태 : 액체와 기체의 구분이 사라지는 고온 고압의 상태로서, 열전달 효율이 높고 압축일이 작아서 발전 설비의 효율 상승에 유리
- 여타의 가스터빈 발전과 달리 300기압 내외의 초임계 조건에서 운전하여 고효율 발전이 가능(재생 산소 적용시 효율 70% 이상, ASU 산소 적용시 60% 이상)
- 공해물질(CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, CO)의 배출이 전혀 없는 무공해 발전 가능. LNG 적용 시 무비용 CO<sub>2</sub> 포집이 가능(CO<sub>2</sub>를 포집하지 않는 상용 복합화력 대비 우수한 발전 효율)

**(필요성)**

- 2050 탄소중립 실현을 위해 발전부문 무탄소/저탄소 연료 기반 고효율 무공해 발전기술 개발 필요 (장기적 관점에서 그린 수소에 대응 가능하고, 중기적 관점에서도 탄소중립에 기여)
- 재생에너지 공급 변동성 대응 및 분산발전 시대 안정적 에너지 공급을 위한 중대형급(10~100MW급) 청정 발전기술 필요
- 상용 가스터빈 기술 국산화의 후속 조치로서 미래 가스터빈 기술 선점 필요

**초임계 순산소 연소 가스터빈 발전 기술 개략도**



출처: 직화식 초임계 CO<sub>2</sub> 발전용 초임계압 순산소 연소 핵심원천기술 개발, 국가과학기술연구회 보고서(한국에너지기술연구원, 2020)

**기술 동향**

**(해외)**

- 초임계 순산소연소 가스터빈의 장점(고효율 발전, 무공해, 플랜트 소형화)을 탄소 중립기술로서 활용하고자 하는 공공 및 민간투자가 미국을 중심으로 확대 중
- 그린 수소로 가는 중간단계로서 LNG 사용 초임계 순산소 연소 가스터빈 발전기술이 선행 개발 중이며, 최신 가스터빈 복합화력의 효율(CO<sub>2</sub> 포집비용 포함 시 약 52%) 대비 월등한 발전효율(59%) 예상
- 미국 NET Power社 주도로 발전 사이클 및 비용한계 극복을 실증하기 위한 대규모 프로젝트 진행 중(50MWth, '14년~)이며, '25년까지 280MW급 상용발전소 2기 건설 계획 발표('21년)

**(국내)**

- 핵심기술인 초임계 순산소 연소기 설계기술과 무냉각 터빈소재기술 및 사이클 설계기술 개발을 정부출연연구소, 한전 및 대학을 중심으로 진행 중
- 한국에너지기술연구원은 전 세계에서 두 번째로 초임계 순산소 연소 달성('20년, 117기압), 세계 최장시간 운전 기록 달성, 연소기 설계 및 제어기술 일부 확보, 극한환경(고온고압)용 세라믹 복합소재 개발(160MPa @ 1315°C), 터빈소재 활용을 위한 내열성 검증 완료
- 전력연구원은 10MW 순산소연소 가스터빈 사이클을 개발하였고 서울대와 함께 인젝터 설계 완료
- 중저온급 초임계 가스터빈 설계 기술 및 발전 사이클 설계/운전기술 일부 확보

**● 핵심기술 목표**

**핵심기술-세부기술별 기술수준 및 목표**

핵심기술-세부기술	현재기술수준(Baseline)	목표
<b>핵심</b> 초임계 순산소 가스터빈 발전 기술	규모 : 0.3MWth (연소기 및 소재 원천기술 확보)	('30) 3MWth급 주기기 개발 및 Test Loop 시험 (35) 10MW급 데모 플랜트 실증 ('35~: 10 MW급 분산형 발전시스템 상용화), 발전효율 60% 이상 (40) 100MW급 실증 ('40~: 100MW 대형 발전플랜트 상용화), 발전 효율 70% 이상 (50) 100MW급 발전시스템 상용화
<b>세부</b> 초임계 순산소 연소기 설계 기술	규모 : 0.3MWth 운전 압력 : 117bar	('25) 규모 : 0.5MWth, 운전압력 : 30 bar (단일인젝터초임계순산소연소기설계기술 확보) (30) 규모 : 3MWth, 운전압력: 300bar (멀티 인젝터 연소기 개발) (35) 10MW 상용급 연소기 개발
<b>세부</b> 고강도 내열내압 소재 기술	고온 내열소재 허용응력 : 160 MPa @ 1315°C	('25) 고온 내열 소재 허용응력: 200MPa @ 1315°C급 세라믹 복합소재 DB 기반 다차원 설계 형상화 기술 확보 (30) 3MWth급 터빈 부품 및 열교환기 개발 (35) 10MW 상용급 터빈 부품 및 열교환기 스케일업
<b>세부</b> 초임계 가스터빈 설계 기술	규모 : 10MW 입구 온도 : 700°C 운전 압력 : 270bar	('25) 규모 : 0.5MWth, 압력 : 300bar, 입구온도 : 1300°C급 초임계 터빈 설계 기술 확보 (30) 규모 : 3MWth, 압력: 300bar, 입구온도 1300°C급 초임계 터빈 개발 (35) 10MW 초임계 터빈 개발
<b>세부</b> 시스템 설계/통합/운전 기술	기초 사이클 설계	('25) 발전사이클 해석, Test Loop 및 주변기기 설계 (30) 3MWth급 Test Loop 시험 및 10MW급 발전시스템 FEED 설계 확보 (35) 10MW급 데모 플랜트 건설 및 실증 (40) 100MW급 대형 발전플랜트 건설 및 실증

th: Thermal input (연료 투입 열량)

**세부기술 : 초임계 순산소 연소기 설계 기술**

- (기술정의) 수소 또는 천연가스 등의 가스 연료에 산화제로서 공기 대신 산소를 사용하여 연소 생성물인 물 또는 CO<sub>2</sub>의 임계점 이상의 고온·고압 조건에서 운전하는 연소기로서 가스터빈을 구동하여 발전을 가능하게 함. 효율적인 발전을 위해 약 300bar의 초고압 운전이 필요한 극한 기술
- (필요성) 초임계 가스터빈 발전을 구성하는 핵심 주기기로서, 300bar의 초고압에서 운전하는 순산소 연소기는 개발 사례가 매우 드물고(미국·일본 컨소시움 1건) 국내 기술이 이를 빠르게 추격하는 상황으로서 적극적인 연구개발을 통해 글로벌 기술 선도 가능. 초고압 환경에서 혼합지연 극복을 위한 인젝터 설계 및 연소 안정성 확보기술, 형상 설계 및 라이너 냉각기술, 배기가스 내 불순물 최소화를 위한 Near-stoichiometry 운전기술, 기동 등의 탈설계점 운전을 위한 고 TDR(Turn-Down Ratio) 운전 설계 기술 등의 연구 개발 필요

**세부기술 : 고강도 내열내압 소재 기술**

- (기술정의) 초고효율 발전을 가능하게 하는 핵심 소재 기술로서 금속의 내열한계 극복을 위한 세라믹 기반의 복합소재가 대상. 입구온도 1300℃급 고속 회전 터빈 블레이드의 무냉각 내열을 실현하고, 고온(800℃) 고압력비(약 300:30 bar) 콤팩트 열교환기의 내압을 실현하여 발전효율의 한계 극복이 가능한 기술
- (필요성) 초고효율 발전을 위해서는 터빈 입구온도 1300℃ 및 열교환기 입구온도 약 800℃ 이상에서 내열 내압 가능한 소재 개발이 필수. 기존의 금속기반 터빈 블레이드 적용 시 초고압 운전에 따라 소형화된 터빈 내에서 냉각기술 적용이 난해하며, 기존의 금속기반 PCHE(Printed Circuit Heat Exchanger)는 800℃ 이상의 고압 조건에서 사용 불가

**세부기술 : 초임계 가스터빈 설계 기술**

- (기술정의) 입구온도 1300℃ 압력 300bar에서 스팀 또는 CO<sub>2</sub>를 작동유체로 하여 구동하여 발전하는 핵심 주기기. 기존의 상용 가스터빈 운전압력(20bar)의 15배에 달하는 압력조건으로 인해 콤팩트한 발전이 가능하며, 100MW급의 대규모 발전소나 10MW급 이하의 분산 발전 등에 모두 대응 가능한 기술
- (필요성) 300bar 초고압 조건에서 연소 배가스로 구동하는 초임계 가스터빈은 개발 사례가 1건(미국·일본 컨소시움)에 불과하며, 최근 국산화에 성공한 국내 기술을 바탕으로 적극적인 연구개발을 통해 글로벌 선도 가능. 초고압 터빈의 공력 설계, 고속 회전체·베어링 및 초고압 씰(seal), 초정밀 가공 기술 등의 연구 개발 필요

**세부기술 : 시스템 설계/통합/운전 기술**

- (기술정의) 핵심 주기기 외의 BOP(산소제조기, 압축기, 펌프, 기수 분리기 등) 설계 및 시스템 통합 설계와 발전 플랜트의 고효율 발전 실증/운전 기술
- (필요성) 발전 효율 극대화를 위한 사이클 최적화 설계, 초고압 운전을 위한 기동/설계점/탈설계점 운전 시나리오 개발, 통합 제어 및 모니터링 시스템 개발 등의 연구 개발 필요

**핵심기술 3** 수소터빈-SOFC 하이브리드 고효율 발전 시스템 기술

**기술개요**

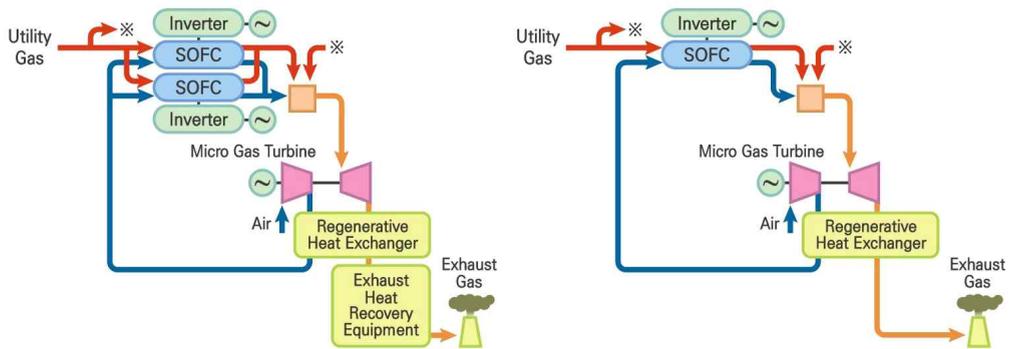
**(개요)**

- 가압형 연료전지와 수소터빈이 결합된 하이브리드 발전시스템으로 전기(>70%)와 열을 동시에 공급 가능하며, 열전비가 높고 발전 설비용량이 10MW 이내인 소형 또는 초소형 열병합 분산발전 시스템

**(필요성)**

- 저탄소 사회 구현을 위해 에너지효율이 높고, 환경 친화적 발전시스템 확보가 요구되며, 저소음 발전설비로써 설치면적이 작고, 열수요가 높은 도심·주거 지역 안에서 운용이 가능한 분산형 열병합발전 시스템 필요

수소터빈-SOFC 하이브리드 발전 시스템 (MHI)



출처 : Mitsubishi Power, Ltd., Hydrogen power general handbook, p. 50

**기술 동향**

**(해외)**

- (미국, ARPA-E) INTEGRATE 프로그램을 통해 70% 이상의 발전 효율을 얻을 수 있는 천연 가스 연료 분산 발전 시스템 개발을 진행 중이며, LHV 기준 70% 이상의 발전효율을 가지면서, 100kW 이상의 발전용량을 가지고 최종 사용자의 설치비가 \$1.8/W 이하인 발전시스템 개발을 목표로 함
- (일본, MHI) 고온에서 작동하는 고체산화물연료전지(SOFC)를 마이크로 가스터빈과 연계한 가압형 하이브리드 시스템을 개발하여 도쿄가스 센쥬테크노 스테이션에서 '13년 3월부터 가동을 시작하여 세계 최초 10,000시간의 연속운전을 달성, 수요처 현장에서 안정적인 운전이 가능함을 실증

(국내)

- (STX 중공업, 미코 등) 발전용 SOFC 개발이 진행되고 있음, 개발된 SOFC와 엔진을 연계하는 하이브리드 시스템을 개발하는 연구가 진행된 바 있음
- (대성셀텍에너지스) 연료전지를 이용한 가정용 열병합시스템을 개발하고 있고, FC Power는 1kW의 PEMFC를 이용한 연료전지 열병합발전시스템을 판매 준비 중
- (경동나비엔) 산업부의 지원을 받아 SOFC 및 스팀링엔진을 이용한 초소형 열병합발전시스템을 개발한 바 있으며, 최근 미국의 Qnergy사와 함께 1kW 및 7kW 스팀링엔진 열병합발전시스템 상용화 연구 진행 중

● 핵심기술 목표

핵심기술-세부기술별 기술수준 및 목표

핵심기술-세부기술	현재기술수준(Baseline)	목표
<b>핵심</b> 수소터빈-SOFC 하이브리드 고효율 발전시스템 기술	(국외) 250kW급 가압형 SOFC-MGT 하이브리드 발전 기술 실증, 1MW급 시스템 개발중 (국내) 가압형 SOFC 모듈 개발 및 통합 실증은 진행된 바 없음 발전단가(SOFC) : 241원/kWh	(‘35) pilot 발전시스템 실증(200kW급) (‘45) 하이브리드 발전 시스템 실증 (1MW이상, 131원/kWh 이하, 발전효율 >70%) (‘50) 1MW 이상 발전시스템 상용화
<b>세부</b> 수소 MGT 개발	(국외) 1MW급 확산화염 수소터빈 상용화 (국내) 50kW급 예혼합 천연가스-순산소 발전기술 실증	(‘32) 20kW급 예혼합MGT (‘35) 100kW급 예혼합MGT
<b>세부</b> SOFC 모듈 개발 및 고효율화	(국외) 200kW급 가압형 모듈 기술 실증 완료 (국내) 1~10kW급 가압형 SOFC 원천기술 연구 중	(‘35) 200kW급 가압형 SOFC 모듈 실증 (‘45) 1MW급 가압형 SOFC 모듈 실증
<b>세부</b> 통합 시스템 개발	(국외) 250kW급 통합 시스템 기술 실증 완료 (국내) 없음	(‘35) 200kW급 통합시스템 실증 (‘45) 1MW급 통합시스템 실증

세부기술 : 수소 MGT(마이크로가스터빈) 개발

- (기술정의) 수소를 연료로 사용하는 고효율 마이크로 가스터빈 엔진으로 환경설비(SCR 등) 적용이 어려운 소형 GT 특성을 고려하여 NOx 배출 억제를 위한 예혼합 연소와 화염역화 방지기술이 적용된 엔진

- (필요성) 하이브리드 발전 시스템 구성의 핵심 부품으로 다양한 부하조건에서 높은 효율과 안정성을 확보하여 전체 시스템 성능을 향상시키며, 수소연료 적용을 통한 무탄소 발전 시스템 구현을 위해 필수적임

#### 세부기술 : SOFC 모듈 개발 및 고효율화

- (기술정의) 허부사이클인 수소터빈과의 정합성을 고려한 가압형 고체산화물연료전지 모듈로써 고효율 발전 시스템 구성의 핵심 구성품이며, 열, 작동유체, 전기 등의 제어 최적화를 위한 고성능 BOP 시스템을 포함하여 효율 향상과 내구성 개선이 가능한 기술
- (필요성) 고온-가압 환경과 같이 가혹한 연료전지 작동환경에서 높은 수명을 요구 받기 때문에 기술적 난이도가 높으나, 무탄소 연료를 사용하는 70%이상의 고효율 발전 시스템으로써 미래 탄소중립 사회에서 분산발전원으로써 중요한 역할을 수행할 것으로 판단됨

#### 세부기술 : 통합 시스템 개발

- (기술정의) 수소MGT와 SOFC 두 개의 발전시스템을 통합하여 운전 단계별 최적화가 가능한 엔지니어링 기술과 시스템 내외부의 작동 환경의 변화에 능동적으로 대응하여 발전효율을 극대화하고, 시스템의 내구성을 확보할 수 있는 기술
- (필요성) 두 개의 발전 시스템을 하나의 시스템으로 통합하는 엔지니어링 기술 없이는 고효율 발전 시스템 구현이 불가능 하며, 내구성과 경제성을 극대화 하여 시장경쟁력을 확보하기 위해서는 반드시 필요한 기술

### 핵심기술 4 • 폐지 기력발전소 활용 열저장 발전 기술

#### ● 기술개요

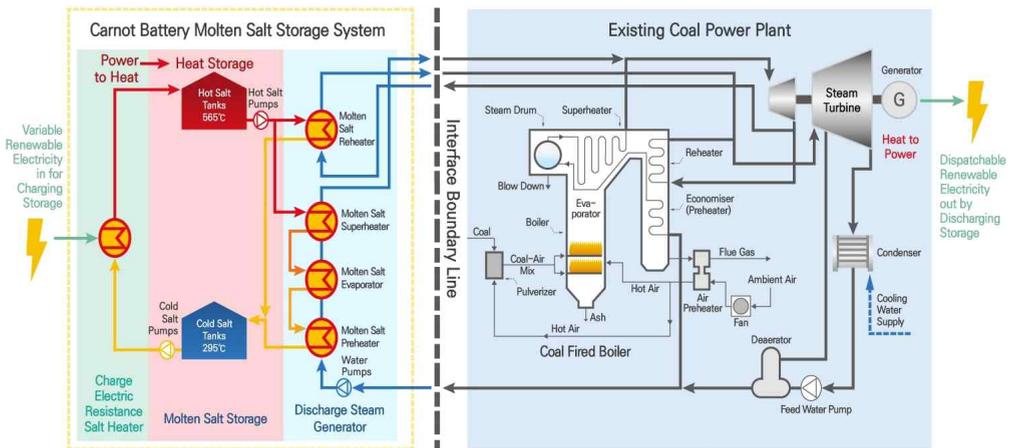
##### (개요)

- 폐지 대상인 기력발전소(미분탄, 중유, NG 등)의 보일러 설비를 열저장설비로 전환하며, 열저장 설비에는 용융 염 등 고밀도 에너지 매체 및 열교환(히트펌프 등) 기술을 접목하며, 기존 증기터빈 등 전력생산 설비를 유지하여 기본 발전소의 운영 및 설비를 활용하는 기술
- 잉여 전력을 히터, 히트펌프 등에 사용하여 열로 저장하였다가, 필요시 해당 열을 안정된 전력으로 다시 변환하여 송전하는 기술
- 고온 열을 이용해 전력을 생산하는 기술을 근간으로 하기 때문에 기존 화력발전 설비와 매우 유사해 관련 설비의 재이용(retrofit) 및 기술 전환을 통해 신속하게 상용화 기술로 구현 가능할 것으로 기대되며, 이를 통해 경제성이 높을 뿐만 아니라 안전하고 신뢰도 높은 대용량의 전력저장 기술 확보가 가능

**(필요성)**

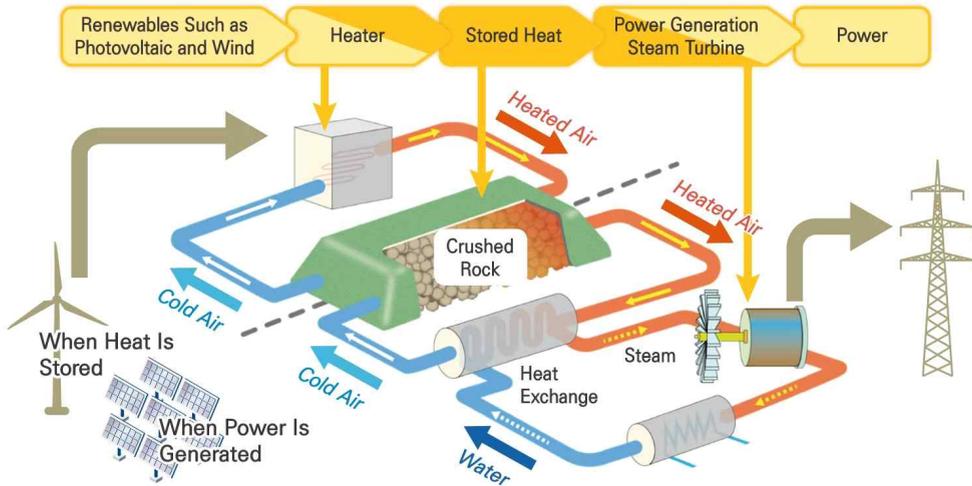
- 국제 에너지정책(탄소중립, net-zero)으로 인한 석탄발전소의 점진적 폐쇄와 계절적 요인으로 인한 재생에너지의 급격한 증가로 잉여 전력발생
  - 기후에 따라 재생에너지 발전이 일시적으로 수요를 초과하는 경우가 많으며, 과잉 공급에 따른 전력망 불안으로 출력 제한(curtailment)이 빈번히 발생
  - 과잉 공급된 잉여 전력을 저장할 수 있는 설비와 기존 인프라를 활용하면서 폐쇄된 석탄발전소를 전환할 수 있는 통합 기술개발 필요
- 전력저장 기술(양수 발전, 수소 에너지, 배터리 등) 중 열에너지 저장\*이 가장 효율적
  - \* 재생에너지로 잉여 전력발생시 전기를 열로 변환하고 일시적으로 열로 저장했다가 전력수요 증가시 필요할 때 전력으로 변환
  - 양수 발전은 댐 건설을 위한 적합한 부지확보가 어렵고, 수소의 경우 고 비용 문제
  - 열 에너지 저장은 대용량 전력 저장시 기존 배터리보다 저장시간 및 저장용량(100~1,000MW) 측면에서 더 효율적임
  - 기존 노후화된 화력발전소의 인프라를 유지 및 활용 가능하여 구축시 비용 절감
- 국내 폐지 또는 예정인 아임계압 보일러의 증기 조건은 169기압, 538℃ 조건으로 현 기술을 통해 에너지 저장장치로 전환 활용이 가능함. 단, 500MW급 표준석탄 보일러의 경우 255기압, 540℃로 압력 향상(유량 증대)을 위한 기술 개발이 요구됨
- 풍력 출력제한이 큰 제주도의 제주화력(아임계압 보일러, 바이오 중유) 75MW 2기에 대한 전환공사 시 제주도 재생에너지 확대에 큰 기여할 것으로 판단

**CSP 용융염 저장설비를 이용한 화력발전소 개조 구조도**



출처 : 수소 가스터빈 기술개발 로드맵 (2021)

열저장 발전 기술 개념도 예시



출처: MITSUI&Co. Global Strategic Studies Institute(MGSSI), "Thermal Energy Storage Developing for a Decarbonized Society," Mitsui & Co. Global Strategic Studies Institute Monthly Report ( 2021)

● 기술 동향

(해외)

- (칠레, Abengoa) 용융염을 이용한 집광형 태양광 발전(CSP) 건설하는 Cerro Dominador 프로젝트\* 진행 중
  - \* 지구상에서 가장 건조한 곳인 아타카마 사막에 위치한 칠레 북부지역에 100MW 태양열 발전소를 건설하고 운영하는 프로젝트
  - 고온의 용융염 저장시설을 현존하는 석탄발전소와 통합하면서, 랭킨사이클 이용
  - 110MW 태양열 타워를 이용하여, 낮 동안 태양 에너지를 수집하고 용융염을 가열하여 열 교환기를 통해 증기 생성 후 터빈에 공급하여 110MW의 전력을 생산할 수 있으며 최대 17시간 가동 가능
- (독일, RWE) 석탄화력발전소와 용융염을 이용한 열 저장 결합
  - 에너지 유틸리티 RWE 참여하에 석탄발전소를 열 저장 발전소로 시범 전환하는 프로젝트(store to power) 수행 중이며, 추후 석탄화력발전이 폐지되면 완전한 열 저장시설로 전환할 계획 구상 중
  - 기존 석탄화력발전소와 열 저장을 결합하여, 잉여 재생에너지는 용융염을 가열하는데 사용되며, 석탄을 태울 때 발생하는 열과 함께 발전용 증기를 생성하는데 사용
- (프랑스, Eco-Tech Ceram) 화력발전소의 폐열 저장설비 개발로 굴뚝에서 대기로 방출되는 폐열을 회수, 저장하여 발전소 내 열원으로 재사용(열에너지 저장온도는 600℃이며, 최대 2MW까지 저장 가능)
  - 잉여 재생에너지를 이용한 저장설비 개발이 주류이지만, 1차 에너지의 40%가 열로 버려지는 것을 고려하여 폐열을 이용한 저장설비도 개발 중

- (일본, J-power) 미국 현지법인을 통해 폐쇄된 Birchwood 석탄발전소\*(240MW)를 태양광(50MW) 및 배터리 저장(190MW) 발전소로 전환하는 프로젝트 수행
- 석탄발전소 전환 공사는 내년에 시작되어 '23년에 시설 가동 예정
- \* '96년 버지니아주 킹 조지에서 가동되어 '07년 J-power가 50% 소유하게 된 석탄화력발전소로 현재 폐쇄 상태

**(국내)**

- 고온 열저장 분야 국내 산업기반은 전무하며, 연구소와 학교 중심으로 기초 연구들이 진행 중이며, 최근 CSP 시장 확대에 따라 국내 산업계에서도 관심 증대
- 세종대, 열화학식 고밀도 에너지 저장 기술 ('17~'26년)
- 한국원자력연구원, 한국에너지기술연구원, 알칼리금속 기반 열저장 및 고효율 열전기 직접변환 연계 시스템 핵심기술 개발 ('20~'25년)
- 한국항공대, 초임계 나노유체를 사용한 고온용 고밀도 태양열 에너지 축열 및 흡수 시스템 특성 연구('17~'21년)
- 군산대, 고전도 초고성능 콘크리트를 이용한 400°C 이상의 열사이클 조건에서의 열저장 기술 개발 ('19~'20년)
- 한국에너지기술연구원, 24시간 신재생 발전을 위한 카르노 배터리 핵심기술개발 한-영 협력 사전 기획 연구 ('20~'21년)
- 한국에너지기술연구원, IEA 카르노배터리 국제공동연구 참가 ('19.10월~)
- 한국에너지기술연구원, 영국 에너지저장 컨소시엄 Supergen Energy Storage Network+ 참가 ('19.10월~)
- 한국에너지기술연구원-한국생산기술연구원-한국기계연구원 컨소시엄으로 국가과학기술 연구회 선행융합 연구사업 카르노 배터리 기술개발 선행연구 수행 ('19~'20년)
- 국내에서는 히트펌프를 활용한 열에너지 저장-발전에 관한 개념적 연구를 한국에너지기술연구원 [백영진 외, 2014] 및 한국기계연구원[김영민 외, 2013]에서 일부 진행하였으나 실제 시스템을 구현한 사례는 현재까지 없음
- 히트펌프-열저장-발전사이클로 구성되는 카르노 배터리의 각 요소들에 대한 개별 연구들은 다양한 분야에서 진행되어 왔음
- 에너지기술연구원 등 CSP 연구 분야에서 molten-salt 관련 열저장 연구 진행
- 한국생산기술연구원 molten metal 관련 열저장 연구 진행
- 한국에너지기술연구원은 120°C 스팀 생산 고온 히트펌프 기술 보유 (압축기 토출온도 180°C)
- 한국에너지기술연구원 및 한국기계연구원은 초임계 CO<sub>2</sub> 발전 핵심 기술 개발 연구 진행 ('15년~)

● 핵심기술 목표

핵심기술-세부기술별 기술수준 및 목표

핵심기술-세부기술	현재기술수준(Baseline)	목표
<b>핵심</b> 폐지 기력발전소 활용 열저장 발전기술	용융염 이용 고온 태양열 발전 (CSP) 분야 상용화(해외, 수십~수백MW급) - 열저장발전단가: 50USD/kWh	(‘30) 아임계압 169 kg/cm <sup>2</sup> , 540°C급 실증 및 확산 (‘40) 초임계압 255kg/cm <sup>2</sup> , 540°C급 실증 및 확산 (‘50) 500MW급 전환 상용화
<b>세부</b> 대용량 고효율 열저장 기술	용융염 외 고온에서 효율적인 금속, 무기물 등의 열저장매체 기술개발중 - 용융 염 : CSP 분야 TRL9 - 금속, 암석, 콘크리트 등 : TRL3	(‘30) 용융염이용 아임계 실증 열저장 발전단가: 15\$/kWh (‘40) 고효율 열저장매체 이용 초임계압 실증 열저장 발전단가: 0.3\$/kWh
<b>세부</b> 고효율 전력-열 전환 기술	스팀발전 적용 사이클 데모 플랜트 연구중 (지멘스 ETES) - 총 효율(RTE) : 25~35% - 용량 : 1.2~30 MW	(‘30) 아임계압 실증 총 효율(RTE) : 40% (‘40) 고효율 히트펌프 이용 초임계압 실증 총 효율(RTE) : 50%
<b>세부</b> 열-전력 전환 최적 운용 제어 및 개조 기술	Cerro Dominador 프로젝트 - 용융염 CSP+석탄화력 발전소 - 110MW, 최대 17시간 가동	(‘30) 아임계압 169 kg/cm <sup>2</sup> , 540°C급 실증 (‘40) 초임계압 255kg/cm <sup>2</sup> , 540°C급 실증

세부기술 : 대용량 고효율 열저장 기술

- (기술정의) 대용량 고효율 열저장 매체 운영 기술 및 열저장 매체를 활용한 장시간 축열 및 방출하는 기술: 고온의 열을 대용량으로 장시간 축열하여 열에너지를 저장시킨 후 전력 필요 시 기존의 증기터빈 발전 기동이 가능하도록 직접/간접 열교환 방식을 통해 물을 고온/고압 스팀으로 변환시키는 기술을 포함
- (필요성) CSP 분야에서 상용화된 용융염 열저장 기술이 존재하나, 제조기술 및 작동 온도 범위 등이 제한되어 있어 이러한 단점을 극복하고 기존 기력발전소 증기터빈 발전 방식에 적용이 가능한 고효율 열저장 매체 개발이 필요하며, 열저장 효율 및 운전 안전성을 향상시키기 위한 열저장 매체 운영 기술과 고온 히트펌프, 발전기 등과의 시스템 통합 기술이 필요

세부기술 : 고효율 전력-열 전환 기술

- (기술정의) 신재생 에너지의 변동성 전력을 열로 전환하는 기술: 전력을 열로 전환시키는 방법은 전기히터 및 히트펌프 기술이 대표적이며, 전기히터 방식은 간편하게 전력을 열로 변환(90~95% 이상의 효율) 시킬 수 있으며, 전환효율을 향상시키기 위한 방법으로 발전(방전) 후 저온의 열을 히트펌프를 이용하여 다시 고온의 열로 변환(충전)시키는 기술 등이 적용 가능

- (필요성) 충전-방전 총 효율(RTE) 50% 시스템을 실제로 구현하기 위해서 전기히터 방식은 최소 800도 이상의 열저장-발전 시스템이 필요하며 기존 500~600°C 영역의 증기터빈 방식에서 총 효율을 향상시키기 위해서는 고온 히트펌프 등 기술을 이용하여 전환 효율 향상이 필요

**세부기술 : 열-전력 전환 최적 운용 제어 및 개조기술**

- (기술정의) 기존 화력발전 설비에서 보일러를 제외한 증기터빈 발전, 수처리, 송배전 계통 등을 활용하여 열을 안정된 전력으로 발전하는 기술로 발전단, 충전단, 열저장 매체, 열교환기 방식 등 전체 사이클의 구성 및 작동조건 변화에 따른 시스템 통합 기술이 포함
- (필요성) 기존 기력발전소에서 발전단, 충전단, 열저장 매체, 열교환기 방식 등 전체 사이클의 구성 및 작동조건이 변화되기 때문에 전체 시스템 공정의 안전성 및 안정된 전력 전환 공급, 기존 증기터빈 발전 기동 소요시간과 출력 등을 제어할 수 있는 기술 필요

**핵심기술 5** 신재생에너지 연계 디지털 발전 기술

**기술개요**

**(개요)**

- 화력발전 중심의 중앙 집중형 에너지 생산시스템(전력, 열 생산)과 같이 에너지 다소비 설비를 갖춘 산업군에서는 전력 소비가 지속적으로 발생함
- 발전사에서는 2050 탄소중립 시나리오 충족을 위해 신재생에너지와 화력발전을 동시에 운영하고 있으며, 두 발전원의 지속적인 발전을 위해서는 상호 연계가 고려되어야 함
- 4차 산업 혁명 및 탄소중립 시대에 걸맞은 디지털 트윈(신재생에너지+화력발전)을 통해 신재생에너지와 화력발전의 상호 연계를 통해 소비 전력을 최소화하여 저탄소 달성과 대기오염물질 저감을 동시에 달성하면서 경제성까지 확보할 수 있음

**(필요성)**

- 기존 에너지 생산시스템에서 신재생에너지원의 최적화 기술 도입을 통한 실질적 저탄소 달성 요구 증대
- 디지털 트윈 발전 기술 개발을 위해서는 저탄소 배출 (신재생에너지 사용 극대화+에너지 효율 극대화), 환경성 (기존 화석연료 사용 최소화 및 사용 시 대기오염물질 최소화) 및 경제성을 동시에 달성 가능한 디지털 트윈 기술 기반 신재생 하이브리드 시스템 사용 최적화 기술 확보가 필요
- 전 세계적으로 NRE-H(신재생 하이브리드) 시스템은 개별 신재생에너지원(특히, 태양광, 풍력, 해양에너지 등)에 비해서 주로 소규모로 개발하여 상업화 진행 중
- FCE : 화력발전 및 가스터빈 연계 MCFC(Molten Carbonate Fuel Cell)을 통해 다양한 하이브리드 시스템 수요 확대

- GE Energy : 화력발전과 풍력, 수력, 태양광, 바이오매스 등과 같은 신재생에너지와 재생에너지를 연계하는 하이브리드 발전 기반의 분산 발전 시스템을 공급 중
- NRE-H 시장은 지역/환경에 맞춘 독립형('24년 27.6조원) 또는 분산형('24년 55.2조원) 발전 시스템을 중심으로 성장 전망됨(신재생에너지 하이브리드 시스템 국내외 산업동향, 2015, KISTI)
- 국내 하이브리드 신재생에너지 발전 시스템은 도서 지역 등 한국전력의 공급이 어려운 지역에 디젤 발전 시스템과 연계하여 신재생에너지를 활용 중
- 신재생에너지 연계 디지털 발전 시장은 아직 형성되어 있지 않으나 국내 2050 탄소중립 추진전략에 기반하여 온실가스 감축 정책이 가속화됨에 따라 향후 관련 시장의 빠른 형성 예상됨

신재생에너지 연계 디지털 발전 운영 최적화 플랫폼 개략도



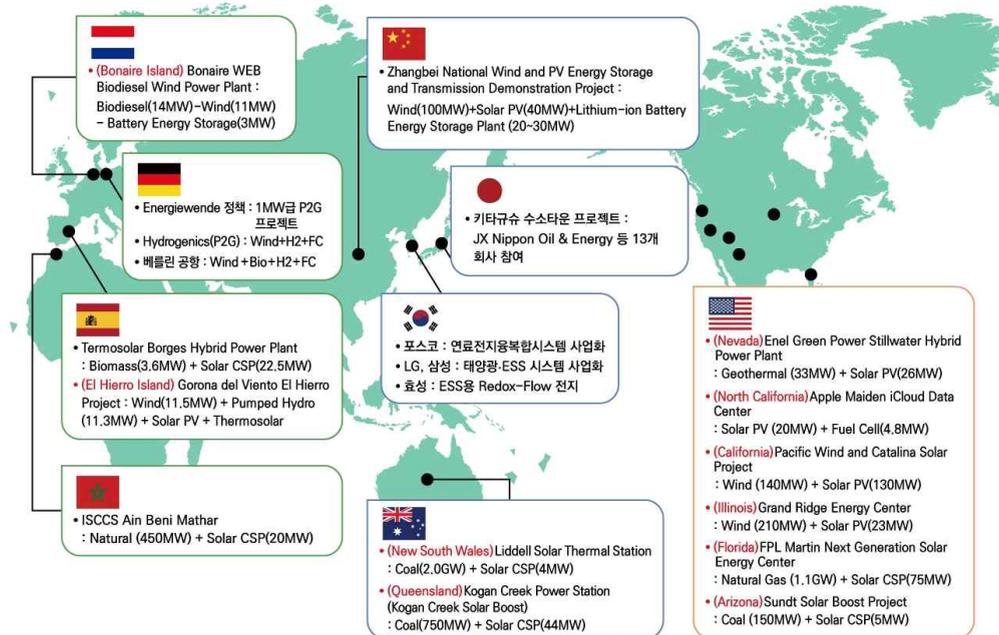
● 기술 동향

(해외)

- 미국과 유럽 국가를 중심으로 신재생 에너지원의 연계 시스템과 아래와 같이 신재생에너지와 기존 에너지 생산시스템(기존 화력발전)의 연계 기술/사업 개발이 수행 중임
- (미국) 가스화 열병합과 태양광을 연계함으로써 운영비 최소화와 생산 신뢰성 증가를 위한 연구 개발 중이며 가스발전과 풍력을 연계하여 이산화탄소 배출 저감 연구를 진행 중임

- (독일) 1MW 규모의 P2G(power to gas) 프로젝트 추진 및 미래 에너지 시스템 실증단지 구축 중
- (호주) 태양열과 디젤 하이브리드 시스템을 연계하여 마블 바(Marble bar)와 놀라진(Nullagine) 지역의 전력 수요 30% 충당하기 위한 기술 개발 진행 중
- 신재생에너지 연계 디지털 발전 관련 에너지 시스템 해석은 프로세스 및 경제성 연계 해석을 통한 시스템 최적화 연구가 진행 중이나, 온실가스 배출 성능 평가 시스템까지 연계하는 연구는 초기 수준

신재생에너지 하이브리드 시스템 기술개발 동향



출처: 신재생에너지 하이브리드 시스템 국내외 산업동향, KISTI(2015)

(국내)

- 최근 국내의 신재생에너지 연계 활용에 대한 관심이 증대됨에 따라 지역 특성에 따른 태양광/열-지열 하이브리드 시스템, 독립 형 하이브리드 발전 시스템 및 태양광-ESS 시스템 적정 설계 기술과 관련하여 해석적 연구가 진행되고 있으며 연구개발 초기 단계임
- 국내에서는 마이크로그리드 관련 연구개발을 진행, 분산전원의 최적 조합과 경제성 평가 분석이 가능한 엔지니어링 프로그램을 개발 중이지만 대부분 배전 시스템 등의 전력계통 분야에 치중됨
- 제주도 풍력발전기 설비 감시 및 마이크로 그리드 관리 시스템 개발을 위한 지능형 소프트웨어 개발 프로젝트 ('20~'22년)

● 핵심기술 목표

핵심기술-세부기술별 기술수준 및 목표

핵심기술-세부기술	현재기술수준(Baseline)	목표
<b>핵심</b> 신재생에너지 연계 디지털 발전 기술	신재생 에너지 연계 디지털 발전 구성 기술 중 일부 초기 단계 연구 진행 중	(‘30) 신재생에너지 연계 디지털 발전 기술 확보 (‘35) 상용급 실증(모델 구현 90% 이상, 예측 정확도 ±1% 이내)
<b>세부</b> 디지털 트윈 발전 시스템 운영 기술	디지털 트윈 기반 발전 시스템 연구 개발 초기 단계	(‘25) 디지털 트윈 발전시스템 운영 기술 확보 (‘35) 상용급 실증
<b>세부</b> 신재생에너지 최적 관리 시뮬레이터 기술	신재생 에너지 최적 관리 시뮬레이터 연구개발 초기 단계	(‘30) 신재생에너지 최적 관리 시뮬레이터 기술 확보 (‘35) 상용급 실증
<b>세부</b> 신재생에너지 연계 다중 디지털 발전 운영 기술	신재생 에너지 연계 다중 디지털 발전 운영 기술 개발 사례 없음	(‘30) 신재생 에너지 연계 다중 디지털 발전 운영 기술 확보 (‘35) 상용급 실증

세부기술 : 디지털 트윈 발전 시스템 운영 기술

- (기술정의) 기존 하드웨어 중심의 화력발전소를 IoT 기반의 빅데이터 및 디지털 변환을 통해 열효율 및 환경성을 최적화하는 디지털 트윈 기반 발전 운영 기술
- (필요성) 신재생에너지의 비중 증대에 따른 기존 화력 발전설비의 기동 정지 및 부하 변동 운전이 요구되며, 이 과정에서 화력발전소 운영에 다양한 문제가 발생할 수 있음. 이러한 운영 문제점을 디지털 트윈 발전 시스템 개발을 통해 안정적으로 전력을 생산함과 동시에 운영 및 진단, 예측에 의한 정비 최적화, 에너지 고효율 달성을 위한 소프트웨어 기반의 최적 운영 해법 도출 필요

세부기술 : 신재생에너지 최적 관리 시뮬레이터 기술

- (기술정의) 신재생 에너지원의 전력생산 간헐성을 극복하고 운영 효율을 높이기 위해 다양한 신에너지와 재생에너지 시스템들의 상호 연계 및 최적 운영 관리할 수 있는 시뮬레이터 기술
- (필요성) 신재생에너지의 전력 생산 간헐성 문제에 대한 대응력을 높이기 위해 신재생 에너지원의 전력 생산에 대한 다양한 분석 기법을 도입하여 사전에 예측하고, 이에 대한 전략을 제시할 필요가 있음. 신재생에너지원의 간헐성 극복을 위해 전력 생산 가변성을 고려한 신재생에너지 간의 전력 생산량 관리 및 적정 활용을 위한 최적의 가상 시뮬레이터 개발 필요

세부기술 : 신재생에너지 연계 다중 디지털 발전 운영 기술

- (기술정의) 디지털 트윈 기반의 신재생에너지 및 화력 발전시스템을 복합적으로 연계하여 에너지 효율/환경성/경제성을 고려하여 운영 최적화가 가능한 신재생에너지 연계 다중 디지털 발전 기술
- (필요성) 디지털 트윈 발전 시스템과 신재생에너지 최적 관리 시뮬레이터 연계를 통한 대기오염 물질 배출 및 온실가스 배출(저탄소 달성)의 대폭 감소 및 경제성 확보가 가능하도록 환경/에너지 성능 최적화 및 실 플랜트의 경제성을 고려한 최적 운영 솔루션이 제공 가능한 운영 플랫폼 개발 요구 증대

**핵심기술 6** ◦ 간접 가열식 초임계 이산화탄소 발전 기술

**기술개요**

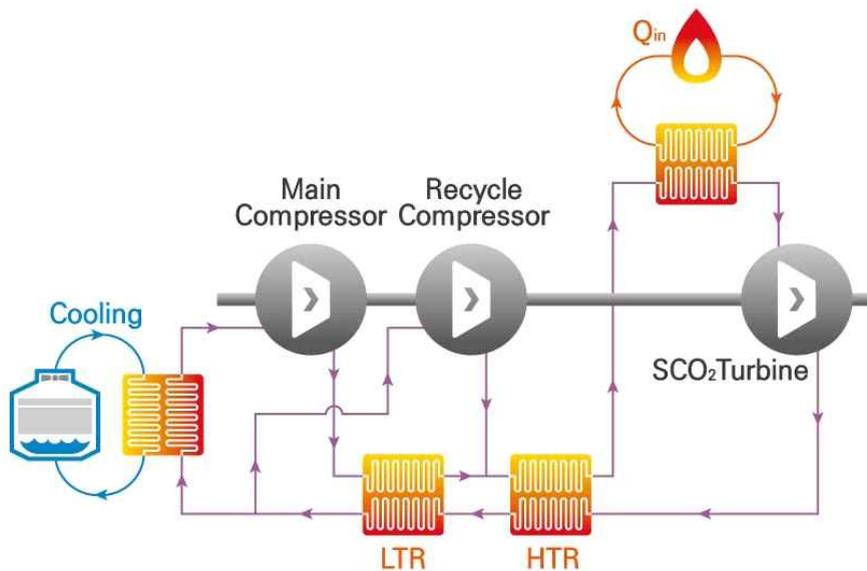
**(개요)**

- 초임계 이산화탄소 발전은 기존 화력발전소에서 쓰이는 물(증기) 대신 이산화탄소를 가열해 발전용 터빈을 돌리는 방식으로, 증기터빈의 최대 20분의 1 수준의 터빈 크기 감소와 발전효율 향상 가능
- 설비 단순화와 효율 향상으로 발전비용 및 온실가스 배출 절감
- 다양한 열원(화력, 원자력, 신재생, 폐열, 열전력 저장 등)에 활용 가능

**(필요성)**

- (탄소중립 기여) 다양한 발전시스템에 적용된 증기터빈 시스템을 이산화탄소를 매체로 하는 고효율 발전 시스템으로 전환하여 온실가스 저감
- (분산전원 확대) 기존 기술 대비 최대 20분의 1 수준의 시스템 소형화, 공기 냉각 방식 적용 등을 통해 발전시스템의 적용·경제성 및 열·전력저장/수요관리 대응성 향상

초임계 CO<sub>2</sub> 발전 개념도 (재압축사이클)



출처 : Technology Development for Supercritical Carbon Dioxide Based Power Cycles, NETL, “ <http://www.netl.doe.gov/research/coal/energy-systems/turbines/supercritical-co2-power-cycles>” (접속일 2020.5.20.)

## ● 기술 동향

### (해외)

- 미국 DOE 지원을 받는 산학연을 중심으로 광범위한 연구 중이며, 유럽/일본/캐나다 등에서 기술 catch-up 중에 있음
- SNL에서 수백 kW급 초임계 이산화탄소 발전 시스템 기술개념 검증('11년)
- 미국 DOE에서 공통기반 기술로 선정('14년) 이후, 10MW 실증을 위한 STEP 프로그램에 GE, GTI, SWRI가 참여하여 연구 수행 중

### (국내)

- 한국원자력연구원에서는 제4세대 원전인 소듐냉각고속로에 적용을 위해 '05년 미국 아르곤국립 연구소와 국제공동 연구 착수 → 100kW급 발전시스템 구축('15년)
- 한국에너지기술연구원에서는 500°C급 축류형 초임계 이산화탄소(sCO<sub>2</sub>) 터빈-발전기 개발 수행 ('20년)
- 한국기계연구원에서는 자체사업('15년~)을 통해 250kW급 통합시험루프를 구축하여 실험 수행
- 한전 전력연구원은 세계 최초로 엔진 폐열을 이용한 초임계 이산화탄소 발전 과제 수행. 국내 최초 2MW급 초임계 이산화탄소 발전 설계, 핵심설비 제작 및 단위기기 시험 완료

## ● 핵심기술 목표

### 핵심기술-세부기술별 기술수준 및 목표

핵심기술-세부기술	현재기술수준(Baseline)	목표
<b>핵심</b> 간접가열식 초임계 이산화탄소 발전 기술	(국내) 250kW급 설비 구축 (국외) 10MW 실증 DOE 프로그램 진행중(美)	('28) 수소/가스 터빈연계 2MW급 실증 (50) 재생에너지 연계 100MW급 초임계 융복합 발전 상용화(효율 50% @ 700°C)
<b>세부</b> 터보기기 개발	250kW급 터보기기 실험	('27) 2MW급 압축기, 터빈 (35) 30MW급 압축기, 터빈 (40) 100MW급 압축기, 터빈
<b>세부</b> 열교환기 개발	재열기 500°C, 가열기 500°C	('27) 600°C급 열교환기 (40) 750°C급 열교환기
<b>세부</b> 시스템 통합 개발	250kW급 시스템 운전, 제어	('28) 2MW급 시스템 설계 및 실증 (40) 30MW급 시스템 설계 및 실증 (45) 100MW급 시스템 설계 및 실증

**세부기술 : 터보기기 개발**

- (기술정의) 초임계 이산화탄소 발전용 터빈, 압축기의 개발로서 이를 구성하는 블레이드, 씰링, 윤활, 베어링, 회전축, 밸브, 발전기, 기어, 제어 등의 개발을 포함
- (필요성) 초임계 이산화탄소 발전 시스템의 핵심 요소. 터빈의 경우 실제 고온, 고압의 유체를 이용한 발전을 위해 필요하고, 압축기는 임계영역 근처에서 견실한 운전이 가능해야 하므로 기술적 난이도가 높음. 작동유체의 누설 등의 문제 해결 필요

**세부기술 : 열교환기 개발**

- (기술정의) 외부 열원과 초임계 이산화탄소 발전 시스템을 연계하는 가열기, 물 또는 공기로 발전 시스템을 냉각하는 냉각기, 터빈 출구의 열로 압축기 출구의 유체에 열을 공급하는 재열기(복열기)의 개발
- (필요성) 가열기에서는 고온 재료 개발, 재열기는 인쇄회로형 열교환기(PCHE, Printed Circuit Heat Exchanger) 타입의 기술 개발 필요. 인쇄회로형 열교환기는 고온, 고압의 초임계 이산화탄소 사이클 시스템에 적용 가능하고 내구성/소형화에 적합한 타입으로써 타 산업 분야에도 활용 가능성 높음

**세부기술 : 시스템 통합 개발**

- (기술정의) 핵심기기, 주변기기 및 인프라의 설계, 통합, 구축하고 시스템의 운전, 제어, 최적화로 활용성 향상
- (필요성) 시스템 성능 검증 및 최적화를 위해 요소 기기 및 시스템의 구축·통합 필요. 정상상태, 과도상태, start-up, shut-down, 비상 정지시 제어 시나리오 개발 시스템의 위험성 및 운전성 평가를 통해 견실성, 안전성 강화

**핵심기술 7** ● 간헐성 대응용 급속기동 터빈 및 하이브리드 플랜트 통합제어 기술

● 기술개요

(개요)

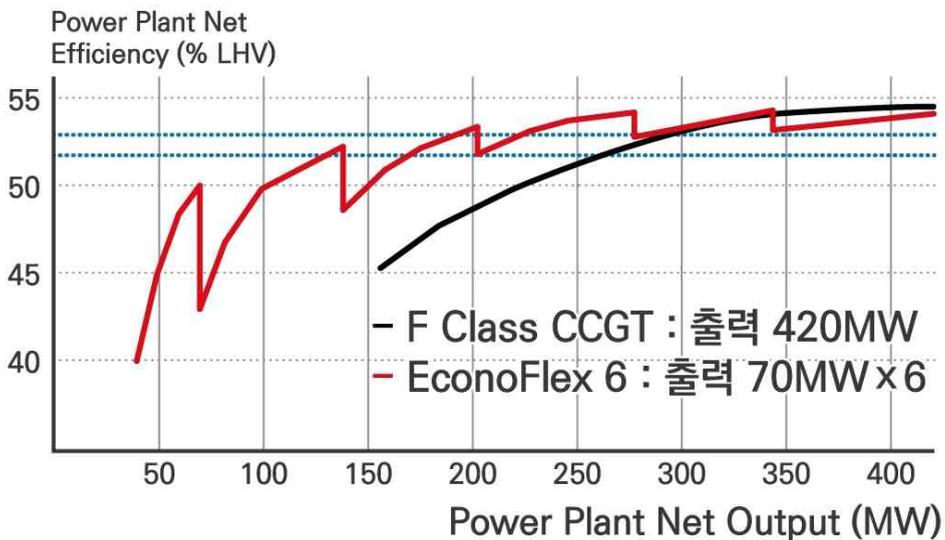
- 간헐성 대응 유연 발전은 기존의 장기간 정격운전 개념의 대형 복합발전이 아닌 중형급 가스터빈을 이용하여 신재생에너지와 연계, 신재생에너지의 단점인 부하변동성에 신속히 대응하기 위한 발전 형식으로, 기존 대비 빠른 가스터빈 기동시간 및 잦은 발전소 기동 횟수, 부하 운전 중 급변하는 전력수요에 대응하기 위한 긴급 출력 조정 등의 기술을 갖춘 복합발전 기술을 의미
- 간헐성 대응 유연발전은 빠른 기동시간 및 잦은 발전소 기동에도 안정적으로 작동할 수 있는 가스터빈이 핵심이며, 전력수요에 대응이 가능한 용량인면서 신재생에너지의 변동성에 대응할 수 있는 기동성을 가진 50~100MW급의 중형 가스터빈이 최적 용량임

- 이러한 간헐성 대응 중형 가스터빈의 핵심기술은, 1) 부분부하 성능향상 및 급속기동을 위한 고정밀 transient 예측 기술 2) 급속기동을 위한 이차유로 최적 설계 및 최적 간극제어 기술 3) 급속기동을 위한 고강성 로터 및 베어링 설계 4) ESS와 연계된 하이브리드 플랜트 통합제어시스템 개발 5) 유연성 향상을 위한 각 압축기, 연소기, 터빈 구성품 요소 기술 등을 들 수 있음

**(필요성)**

- 신재생에너지의 폭발적인 증가에 따라 전원 믹스에서 풍력, 태양광이 차지하는 비율이 급속도로 증가하고 있음. 풍력과 태양광은 자연환경 변화에 따라 발전량이 매우 불규칙하거나 발전량 예측이 불가능한 점 등 전력망 계통 안정성에 심각한 영향을 줄 수 있고 회전관성이 없는 발전원이므로 전력품질 유지에도 어려움이 존재함
- 이러한 신재생에너지의 단점을 보완하기 위해 기존 가스터빈 복합발전의 안정성에 간헐성 대응 및 급속부하 대응성을 추가하여 효율적인 전원믹스를 구성할 필요성이 있음
- 순간적인 기후 조건 변화로 신재생에너지원 발전이 원활하지 못할 경우, 간헐성 대응 가스터빈을 급속 기동시켜, 부족한 전력을 단시간내 공급하여 전력망을 안정화할 뿐만 아니라 전력품질 향상에도 기여할 수 있는 간헐성 대응 유연발전 기술이 필요함
- 통상적으로 하루 1~2회 기동 정지 사이클을 갖는 대형 가스터빈 복합 발전에 비해 단기간 많은 기동 정지를 수행함으로써 이러한 전력망 불안정성에 더욱 적극적으로 대처할 수 있는 기술임

대형 GT와 중형 GT의 운전 특성 비교



● 기술 동향

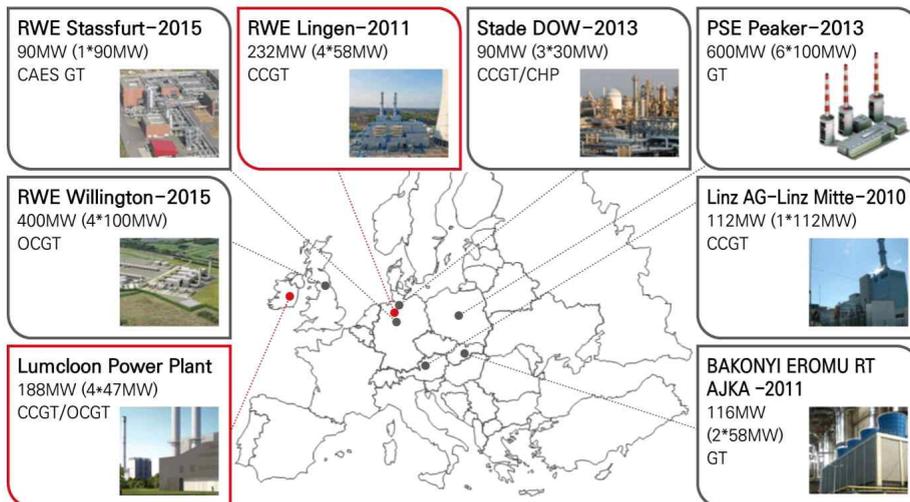
(해외)

- (미국, MCGS) 50MW급 가스터빈과 10MW급 ESS가 결합된 Hybrid EGT를 활용하여, 첨두부하 및 재생에너지 부하 변동성 대응 목적으로 활용
  - 50MW급 GT와 10MW급 ESS(4.3MWh Li-ion)를 결합하여 발전소를 항상 고효율로 운전하며, 5~10분 이내에 최대출력(50MW) 공급 가능
  - ESS와 가스터빈을 연계 운전함으로써, 가스터빈의 연료량을 절감하고, 효율 향상 및 부품 수명 증가
- (독일, RWE Lingen) 대형 가스터빈과 다수의 유연발전용 가스터빈을 결합하여 열병합 발전 능력과 재생에너지 변동성 대응 문제를 동시에 대응
  - 281MW급 GT 2기를 복합운전을 통하여 열병합 발전을 실시하고, 47MW급 Aero derivative GT 4기의 복합 운전을 통해 부분부하에 대응
- (아일랜드, Lumcloon) 다수의 유연발전용 가스터빈을 단독 혹은 복합 발전으로 운전하여 부분부하 및 첨두부하 환경에서 40~350MW의 광범위한 발전 가능
  - 47MW급 4대 단독운전으로 부하 변동성에 대응 가능하고, 47MW급 2대 결합으로 열병합발전 가능

(국내)

- 현재 국내는 재생에너지를 이용한 유연발전 기술을 도입하지 않고 있으나, 관련기술 개발이 진행 중. 두산중공업은 5MW 천연가스/수소터빈을 제주도의 재생에너지와 연계한 유연발전원으로 개발 중. 또한 80MW급 중형 수소전소 터빈을 재생에너지 및 ESS와 연계한 유연발전원/간헐성 대응 전원으로 개발 중.

유럽 내 가스터빈 기반 유연발전 사례



● 핵심기술 목표

핵심기술-세부기술별 기술수준 및 목표

핵심기술-세부기술	현재기술수준(Baseline)	목표
<b>핵심</b> 간헐성 대응용 급속기동 터빈 및 하이브리드 플랜트 통합제어 기술	급속기동 시간 : 20분 이내 출력 증감발율 : 14%/분 GT-ESS 연계 응답시간 : 없음	(‘30) 급속기동 및 하이브리드 플랜트 실증 급속기동 시간 : 10분 이내 출력 증감발율 : 20%/분 GT-ESS 연계 응답시간 : 200ms 이내 (‘40) 신속기동형 GT 확대보급 및 하이브리드 발전시스템 확대 보급
<b>세부</b> 부분부하 성능향상 및 급속기동을 위한 고정밀 Transient 예측 기술	Transient 간극-성능 예측 정확도 : 미적용	(‘30) Transient 간극-성능 예측 정확도 : ±5% 이내
<b>세부</b> 급속기동을 위한 이차유로 최적 설계 및 최적 간극제어 기술	이차유로 냉각 유량 : 현 기준	(‘30) 이차유로 냉각유량 절감량 : 10%이상
<b>세부</b> 급속기동을 위한 고강성 로터 및 베어링 설계	위험속도 마진 : 미적용	(‘30) 위험속도 마진 : 정격속도 대비 2차 급힘모드 위험속도 30% 향상
<b>세부</b> ESS와 연계된 하이브리드 플랜트 통합제어시스템 개발	현재 통합제어시스템 없음	(‘30) GT-ESS 연계 응답시간 : 200ms 이내
<b>세부</b> 유연성 향상을 위한 압축기, 연소기, 터빈 구성품 요소 기술	정격부하 운전용 GT 구성품 요소기술 확보	(‘30) 유연성 향상용 advanced 압축기 설계 기술 (‘30) 유연성 향상용 고응답성 & 초저 NOx DLN 연소기

세부기술 : 부분부하 성능향상 및 급속기동을 위한 고정밀 Transient 예측 기술

- (기술정의) 급속기동과 같은 Transient 운용 환경에서 가스터빈 성능에 큰 영향을 미치는 회전계와 비회전계 사이의 간극에 따른 성능을 예측하는 기술
- (필요성) Transient 간극과 성능은 Trade-off 관계로, 급속기동형 가스터빈의 핵심적인 기술임

세부기술 : 급속기동을 위한 이차유로 최적 설계 및 최적 간극제어 기술

- (기술정의) 성능향상을 위해 고온부품 냉각을 위한 이차유로의 유량을 최소화하고, 간극을 최적으로 제어하는 기술
- (필요성) 이차유로는 고온부품 냉각을 위해 필수적인 요소이나, 과공급시 가스터빈 성능을 저하시키므로 최적 성능을 유지하면서 이차유로 유량을 최소화하는 기술이 필요

**세부기술 : 급속 기동을 위한 고강성 로터 및 베어링 설계**

- (기술정의) 급속기동과 같은 가혹 환경 운영시, 로터의 뒤틀림 방지 및 베어링 성능을 보장하기 위한 신뢰성 설계 기술
- (필요성) 로터 강성 확보와 안정적인 베어링 작동은 급속 기동을 위한 필수 조건임

**세부기술 : ESS와 연계된 하이브리드 플랜트 통합제어시스템 개발**

- (기술정의) 발전원인 가스터빈과 저장원인 ESS를 연결, 통합제어하는 기술
- (필요성) 계통 안정성 및 안정적 전원 공급을 위해서는 발전단과 저장단 사이의 연계가 매우 중요하며, 이 둘을 통합제어할 수 있는 시스템 필요

**세부기술 : 유연성 향상을 위한 압축기, 연소기, 터빈 구성품 요소 기술**

- (기술정의) 급속기동 및 부분부하 성능향상, 내구성 향상을 위한 압축기, 연소기, 터빈의 공력설계 기술 및 제작 기술
- (필요성) 급속기동 및 잦은 부분부하 운전을 위해 기존 기저부하 운용 가스터빈보다 넓은 작동범위, 높은 신뢰성과 내구성을 갖춘 가스터빈 구성품 설계 및 제작 기술 필요

## 라

## 기술확보 전략

## ● 소재-부품-장비 확보전략

## ● 소재

- (수소 자기유체역학(MHD) 발전 기술) 내열 소재 관련 핵심요소기술을 보유한 국내 출연(연), 대학을 중심으로 정부 R&D를 통한 내열 소재 조성 발굴, 성능테스트를 통한 원천기술 확보 및 산업체를 중심으로 한 소재 양산 기술 확보
- (초임계 순산소 가스터빈 발전 기술) 현재 일부 확보된 국내기술(고강도 세라믹 복합소재 기술)을 보완·발전시켜서 초고압(300bar) 고온(1300℃) 고속회전 조건 하에서 무냉각 터빈을 구현할 수 있는 신뢰도 높은 소재 개발

## ● 부품

- (간접 가열식 초임계 이산화탄소 발전 기술) 간접가열식 초임계 이산화탄소 발전용 터보기기 및 열교환기의 국내 제작사 연계 개발
- (초임계 순산소 가스터빈 발전 기술) 현재 일부 확보된 국내기술(117bar급 초임계 순산소연소기 설계기술)에 고도화된 설계, 계측 및 제작기술(급속혼합 인젝터 설계, 라이너 냉각 설계, 초임계 연소장 해석 및 광학계측)을 적용하여 극한 요구조건(300bar 초고압, 고농도 CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O 분위기, 저 잉여산소 연소, 큰 turn-down 비)을 만족하는 연소기 설계 및 제작기술을 확보하고 test loop에 탑재하여 실 운전 조건(1300℃, 300bar)에서의 성능 검증
- (초임계 순산소 가스터빈 발전 기술) 현재 일부 확보된 국내기술(270bar, 700℃급 초임계 가스터빈 설계 기술)을 고도화하기 위해 고강도 세라믹 복합소재 기반 무냉각 터빈 설계를 채용함으로써 구조를 단순화하고 누설의 우려를 경감시킬 수 있는 혁신적인 터빈 설계기술을 확보하고 test loop에 탑재하여 실 운전 조건(1300℃, 300bar)에서의 성능 검증
- (초임계 순산소 가스터빈 발전 기술)개발 확보된 고강도 세라믹 복합소재 기술을 복잡한 터빈형상 및 컴팩트 열교환기에 대응할 수 있도록 다차원 형상화 및 미세 성형/가공기술을 확보

## ● 장비

- (간헐성 대응용 급속 기동 터빈 및 하이브리드 플랜트 통합제어 기술) 간헐성 대응 유연발전 기술을 개발하기 위한 중요 장비 중의 하나로 팁 간극을 정확하게 측정하고 제어하는 기술이 필요. 이러한 팁 간극을 측정하기 위해서는 BTC (Blade Tip Clearance) 측정기술이 필요하며 이 기술을 적용하기 위한 센서 및 설치 기술, 관련 장비가 필수적임. 초기 단계 확보전략으로 해외 전문제작사의 제품을 안정적으로 도입, 활용하고 향후 국산화 개발을 통한 자체 역량을 확보하는 이원화 전략이 바람직할 것임
- (폐지 기력발전소 활용 열저장 발전 기술) 열저장매체 : 용융염은 상용 시스템에서 작동온도 280~550℃로 주로 고온 태양열 발전(CSP) 분야에서 활발하게 연구되고 있는 열저장 매체이나 녹는점 이하의 온도에서 고체로 굳으므로 추가적인 가열 및 시동/정지 운전 절차가 용이하지 않음.

따라서 용융염은 단기 실증 단계에 적용하고, 다음 단계에서는 가용 온도 영역이 넓고 용융염 대비 높은 고온에서 안정한 열저장매체 확보가 필요함. 현재 금속이나 무기물 등을 열저장 매체로 활용하는 연구가 다수 진행 중이며, 실증 대상에 적합한 매체를 선별하여 열저장 매체 원천기술을 확보하고자 함

### ● 시스템 확보전략

#### ● 설계·제작

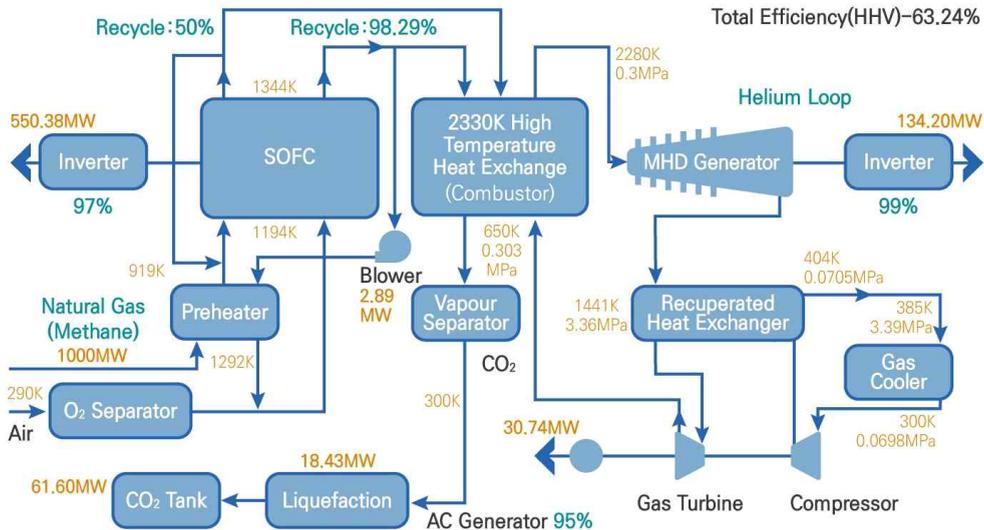
- (수소 자기유체역학(MHD) 발전 기술) 출연(연)과 대학을 중심으로 정부 R&D를 통한 요소 설비에 대한 설계 기술 확보 및 국내 설비 제작사와의 협력을 통한 시스템 제작 기술 확보
- (초임계 순산소 가스터빈 발전 기술) 발전 플랜트 해석과 IP R&D를 병행하여 원천특허화가 가능한 고효율(60% 이상) 발전 사이클을 설계하고 현재 국내 보유중인 초임계 순산소연소 시험설비를 활용한 3MWth급 test loop를 제작하여 '30년까지 주기의 개발과 성능 시험에 활용
- (초임계 순산소 가스터빈 발전 기술) Test Loop 운전 결과를 토대로, '35년까지 실제 발전 출력이 가능한 10MW급 demo plant 설계·건설 및 '35년 이후 10~100MW급 발전 플랜트 상용화
- (폐지 기력발전소 활용 열저장 발전 기술) 열저장, 충전단, 발전단 비용을 고려한 LCOS(Levelized Cost of Storage) 값의 평가가 중요하며, 이 지표는 시스템의 고온/저온부 작동온도, 작동유체, 열저장 시스템, 사이클 레이아웃에 의하여 결정되므로, LCOS 값을 최소화하기 위한 최적 설계 및 제작을 수행해야 함
- (신재생에너지 연계 디지털 발전 기술) 디지털 발전 기술 자체는 출연연과 대학을 중심으로 소프트웨어 기반 기술 확보하되 국내 발전사 중심으로 현장 중심의 제작 기술 적용 후 확보
- (간접 가열식 초임계 이산화탄소 발전 기술) 수소터빈 복합화력용 2MW급 압축기, 터빈, 열교환기 설계('27년, 국내), 중형 복합화력용 30MW급 압축기, 터빈, 열교환기 설계('35년, 국내), 화력 발전용 100MW급 압축기, 터빈, 열교환기 설계('45년, 해외 공동)
- (간헐성 대응용 급속 기동 터빈 및 하이브리드 플랜트 통합제어 기술) 간헐식 대응 유연발전 기술 부분에서 가스터빈 운전과 ESS 연계 시스템 개발이 매우 중요하며 이를 확보하기 위해서는 기계와 전기전자, 제어 부문을 아우르는 융복합 개발 추진 체계가 필요함. 가스터빈 제어시스템(GTCS)와 배터리관리시스템(BMS)간의 유기적인 작동 시스템을 구축하기 위해서 시스템 통합 연구개발 과제 진행 필요

#### ● 시험

- (수소 자기유체역학(MHD) 발전 기술) 국내 공인시험기관과의 협력을 통한 시스템 성능의 객관적 성능 시험 데이터베이스 확보
- (초임계 순산소 가스터빈 발전 기술) Test Loop(3MWth급) 이용 주기 시험 및 발전 시스템 운전제어 시험 필요
- (연소기) 예열된 고농도 CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O 분위기와 저 잉여산소 조건 하에서 초임계 순산소 연소기의 성능시험 및 최적화

- (터빈) 고온 고압 분위기에서 고속 회전하는 터빈 블레이드의 무냉각 내구성 시험, 구동부 leak-free 설계 검증 및 성능 곡선 확보/최적화
- (사이클) 설계점 운전을 통한 성능 검증 및 기동·정지를 포함한 탈설계점 운전 시나리오 확보, 플랜트 운전 제어 및 모니터링 시스템 개발 및 시험
- (초임계 순산소 가스터빈 발전 기술) Demo plant(10MW급) 이용 ASU와의 연계 운전, 발전 성능 시험, 통합 운전제어 모니터링 시스템 검증, 상용 플랜트 FEED 설계 확보
- (폐지 기력발전소 활용 열저장 발전 기술) 소규모 실증 및 통합 시스템 데모 플랜트 시험을 통한 실증 설계 기술 확보
- (신재생에너지 연계 디지털 발전 기술) 국내 발전사 중심으로 성능 시험 데이터베이스 확보
- (간접 가열식 초임계 이산화탄소 발전 기술) 간접가열식 초임계 이산화탄소 발전용 시험 인프라(구축 필요) 활용 시험
- (간헐성 대응용 급속 기동 터빈 및 하이브리드 플랜트 통합제어 기술) 간헐성 대응 유연발전 시스템에서 가장 중요한 재생에너지-배터리 연계된 Battery Island와 가스터빈으로 구성된 GT island를 통합 테스트할 수 있는 시험설비 구축이 반드시 필요하며, 실제 재생에너지의 간헐성을 모사하여 ESS 연계반응 속도를 측정하고 이를 통해 시스템 안정성을 검증할 수 있는 설비를 구축하되 가스터빈 인프라 구축과 연계한 시험설비 구축 전략이 필요함
- 인증
  - (수소 자기유체역학(MHD) 발전 기술) 수유기업을 대상으로 한 현장 중심의 성능 시험 평가
  - (초임계 순산소 가스터빈 발전 기술) 초고압 발전 플랜트의 안전성 평가를 위해 사전 엔지니어링 단계에서 관련기관(설계사, 건설사, 공사)의 위험성 평가를 실시하여 표준 설비 인증 후 상용화 전략 수립
  - (폐지 기력발전소 활용 열저장 발전 기술) 총 효율, 열저장 발전 단가, 충/방전 시간 등 핵심 지표들의 공인시험기관 인증 및 국내 발전사를 대상으로 한 현장 중심의 시험 평가
  - (신재생에너지 연계 디지털 발전 기술) 국내 발전사를 대상으로 한 현장 중심의 성능 시험 평가
- 국내외 실증(Scale-up) 방안
  - 수소 자기유체역학(MHD) 발전 기술
    - MHD 발전 기술의 국내 수준은 TRL 2~3 정도로 핵심 원천기술 확보 후 단계적인 Scale-up이 필요하며, 1MW 이상의 실증 규모의 MHD 발전 기술 확보
    - 대형 발전 시설보다 분산 발전용 수소 가스터빈과 MHD 발전의 연계를 통한 복합발전 시스템을 통해 발전효율 확보

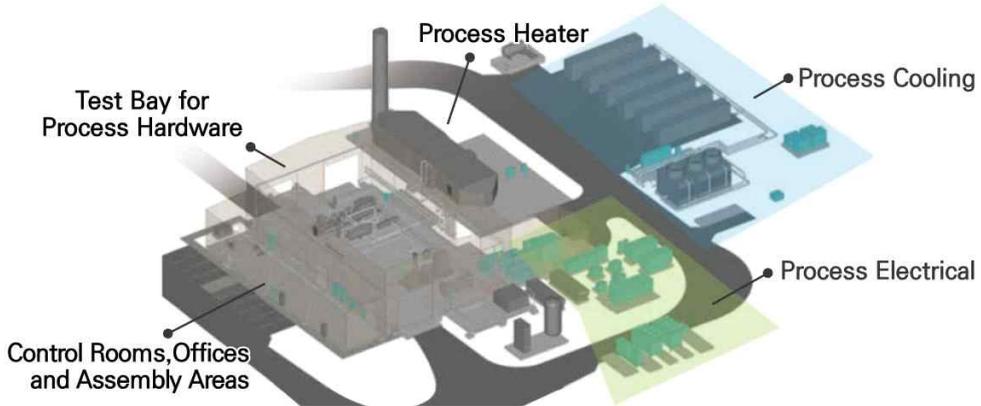
MHD 연계 복합발전 공정 예



출처 : IEA CCC Report, High-efficiency power generation - review of alternative systems (2015)

- 초임계 순산소 가스터빈 발전 기술 (국내 실증)
  - '25년까지 TRL 5수준의 주기기 설계 기술을 확보
  - '30년까지 국내 보유 설비를 확장한 3MWth급 test loop를 건설하여 TRL 6 수준의 기술을 실증
  - '35년까지 TRL 7 수준의 전력생산이 가능한 10MW급 Demo plant 실증
  - '35년 이후 기술 인증, 표준화 및 사업화
- 신재생에너지 연계 디지털 발전 기술
  - 이미 실증 규모의 발전소의 디지털 기술이 개발 중에 있으며, 신재생에너지 연계시 단계적인 scale-up보다 실증 규모의 신재생에너지 디지털 모델을 직접 개발할 필요가 있음
  - 국내 발전사를 중심으로 실증을 수행하면서 발전시스템 이외에 신재생에너지 연계 공장, 산업단지의 에너지 최적화를 위한 실증 및 보급 확산
- 간접가열식 초임계 이산화탄소 발전 기술
  - 2MW급 수소터빈 복합화력용 발전시스템 실증('28년)
  - 30MW급 간접가열식 초임계 이산화탄소 발전 실증('40년)
  - 100MW급 간접가열식 초임계 이산화탄소 발전 실증('45년)

초임계 이산화탄소 발전 개요



출처 : U.S. DOE NETL, Technology Development for Supercritical Carbon Dioxide Based Power Cycles, ["http://www.netl.doe.gov/research/coal/energy-systems/turbines/supercritical-co2-power-cycles"](http://www.netl.doe.gov/research/coal/energy-systems/turbines/supercritical-co2-power-cycles) (2016.05.20.)

- (폐지 기력발전소 활용 열저장 발전 기술) 국내 아임계압 기력발전소 대상 실증

구분	단위	보령 #1,2	삼천포 #1~4	호남 #1,2	울산 #4~6	평택 #1~4	
주증기	온도	℃	540	541	541	541	571
	압력	kg/cm <sup>2</sup>	176.4	177.8	169	187.5	175.5
용량	MW	500	560	250	400	350	

● 인프라 구축 방안

- 설비
  - (초임계 순산소 가스터빈 발전 기술) 기 확보된 고온 고압 시험설비를 확장하여 극한환경 신기술의 개발에 필요한 관련 기술개발 인프라 구축
- 국제협력
  - (수소 자기유체역학(MHD) 발전 기술) MHD 발전 기술은 현재 미국과 일본이 중심이 되어 기술 개발이 진행되고 있어, 국제 공동 과제 혹은 국제 기술교류 협력을 통한 기술 확보 및 인프라 구축 관련 노하우 확보
  - (신재생에너지 연계 디지털 발전 기술) 미국과 유럽 국가를 중심으로 신재생 에너지원의 연계 시스템과 아래와 같이 신재생에너지와 기존 에너지 생산 시스템(기존 화력발전)의 연계 기술/사업 개발이 수행 중에 있으며, 국제 공동 과제 혹은 국제 기술교류 협력을 통한 기술 확보 및 인프라 구축 관련 노하우 확보
  - 태양열 등 해외 신재생에너지 자원 적용 실증 추진

- 인력양성
  - (초임계 순산소 가스터빈 발전 기술) 연구단 규모의 산·학·연 협력 거점을 마련하여 지속적인 고급인력 배출 및 현장 운영인력의 교육 체계 마련
- 법·제도 개선
  - (초임계 순산소 가스터빈 발전 기술) 극한환경 신발전 기술에 부합하는 고압가스 안전 관리법을 비롯한 법제 개정
  - 탄소중립 위한 신발전 적용시 인센티브 부여 검토 필요

## 마

## 탄소중립 기여 효과

## ● 탄소중립 기술과의 연계성

## 수소 자기유체역학(MHD) 발전 기술

- 수소 자기유체역학(MHD) 기반 발전 기술은 수소를 에너지원으로 사용하면서 수소 가스터빈과 연계시 발전효율 향상을 기대할 수 있어 수소 사용량 감축 및 이산화탄소 무배출을 동시에 달성할 수 있어 탄소중립의 기여도가 높음

## 초임계 순산소 가스터빈 발전 기술

- 탄소 중립 실현과 안정적인 에너지 공급을 동시에 실현하기 위해서는 저탄소 기반의 발전기술과 융합한 저비용(무비용) 이산화탄소 포집 기술이 반드시 필요
- 기존 발전소에 별도의 포집설비를 설치한 연소 후 포집(post-combustion capture)을 적용할 경우 고비용 이산화탄소 포집에 따른 발전량 저하로 인해 추가 발전이 불가피함에 반해, 순산소 연소를 통한 발전은 이산화탄소 포집 비용의 한계 극복이 가능하여 발전량 저하에 따른 추가 발전의 악순환 극복
- 초임계 순산소 연소 가스터빈 발전의 경우 기존 대형 발전소의 대체뿐만 아니라 콤팩트 발전소가 가능한 이점으로 인해 재생에너지의 변동성을 보완할 중소규모 분산발전이 가능하며, 에너지 전환시대의 탄소 중립과 안정적인 에너지 공급의 중추적인 역할 가능

## 수소터빈-SOFC 하이브리드 고효율 발전 시스템 기술

- 연료전지와 수소 가스터빈이 결합한 발전시스템으로 열전비가 높은 특성을 갖는 분산발전 시스템으로 수요처 근방에 설치가 가능한 장점을 갖춤으로써 다양한 형태의 적용처에서 활용이 가능하여 탄소중립 사회 구현에 기여

## 폐지 기력발전소 활용 열저장 발전 기술

- 태양광 및 풍력 발전은 간헐적 발전원의 특성상 24시간 이상 안정적 발전이 어려워 부가적 ESS가 필수
- 우리나라의 경우 현재 논의 중인 제3차 국가에너지기본계획에서는 '30년 20% 신재생 발전 공급비율을 목표로 논의 중에 있으며, 이에 재생에너지 3020 이행계획에서는 '30년까지 총 63.8GW의 신재생발전원을 도입할 계획 (산업통상자원부, 재생에너지 3020 이행계획, '17.12월)
- 약 수십 GW의 분산전원에 대응 가능한 단위 모듈 용량 수 MW급 이상(총 용량 수MW-수백MW급)의 대용량 에너지저장 장치가 필수적
- 신재생 발전 그리드 탄력성, 안정성 및 성능을 증대시키기 위해 최소 10시간 이상(그리드 전력 부하 추종을 위한 필요조건, IEA)의 시간 동안 미리 저장한 에너지로부터 전력을 생산할 수 있는 대용량, 저비용, 장기 전력저장-발전 시스템에 대한 기술 요구가 증대

- 본 기술이 완성될 경우 대규모 태양광 발전, 대규모 풍력 발전과 함께 연계하여 연속적인 전력 생산을 통해 신재생 발전원을 기저전원으로 안정적으로 사용할 수 있게 되므로 전력공급체계의 패러다임을 변화시킬 수 있을 것으로 기대
- 기존 배터리 기반 소용량, 짧은 작동시간 한계를 가진 전력저장장치의 한계를 넘어 전체 전력 그리드 레벨에서 전력 부하변동에 대응 가능해져, 분산전력 체계의 탄력성(resiliency)과 신뢰성(reliability)이 증대될 것으로 기대

#### 신재생에너지 연계 디지털 발전 기술

- 신재생에너지 연계 다중 디지털 발전 기술을 통해 신재생에너지 하이브리드 시스템(신재생에너지 + 전통 발전원)의 효율 상승과 이를 통한 기존 전통 발전원의 탄소계 연료(전통에너지원)의 사용량 감소에 따른 탄소배출 저감 효과를 기대할 수 있음

#### 간접 가열식 초임계 이산화탄소 발전 기술

- 간접가열식 초임계 이산화탄소 발전기술은 기존 발전기술에 비해 고효율 및 시스템의 소형화, 단순화가 가능한 기술로 신재생에너지, 폐열, 화력, 원자력, 열전력저장 등 다양한 분야의 열원에 적용 가능하며, 공랭식 발전이 가능하여 발전소의 부지 제한 극복이 가능하고, 속응성이 좋아 유연 운전이 가능하여 분산전원으로 유망함. 간접가열식 초임계 CO<sub>2</sub> 발전기술의 온실가스 저감은 화력발전과 폐열발전의 효율향상 및 수소터빈, 태양열, 지열 등 재생에너지의 고효율화를 통해 기여 가능함

#### 간헐성 대응용 급속기동 터빈 및 하이브리드 플랜트 통합제어 기술

- 간헐성 대응 유연발전 기술의 핵심은 재생에너지의 출력 불안정성 및 간헐성을 보완하고 발전기 회전관성을 부여함으로써 전력망의 안정성을 도모하는데 있음. 따라서 간헐성 대응 유연발전 기술이 확보되고 보급된다는 의미는 이러한 재생에너지의 출력 변동성 및 간헐성에 충분히 대응 가능한 계통 안정성을 확보했다는 의미이므로 재생에너지 확충을 통한 탄소중립에 기여하는 것이 가능함
- 또한, 전력계통망의 급전 요구 조건에 따라 신속하게 부하 변동 및 기동, 정지가 가능하므로 전력예비율을 최적으로 유지하거나 잉여전력을 최소화하는 것이 가능함. 따라서 이러한 전력예비율 및 잉여전력의 최소화로 천연가스 연소 혹은 천연가스-수소 혼소과정에서 배출되는 온실가스를 최소화할 수 있으며, 궁극적으로 탄소중립을 뒷받침할 수 있는 핵심 기술이 됨

## 위원회 명단

성명	소속	직위
장중철	한국에너지기술평가원	PD(위원장)
연인모	한국에너지기술평가원	PM
김대식	강릉원주대학교	교수
김민국	한국기계연구원	책임
김태형	한국남동발전	그룹장
문태영	한국에너지기술연구원	책임
박정극	한전전력연구원	책임
안종기	한화에어로스페이스	팀장
이동훈	두산중공업	팀장
이영재	한국생산기술연구원	수석
전한욱	한국에너지기술평가원	간사

## 2050 탄소중립 에너지기술로드맵

발행일	2021년 12월
발행인	권기영
발행처	한국에너지기술평가원
주소	(06175) 서울특별시 강남구 테헤란로 114길 14
전화	02-3469-8400
홈페이지	www.ketep.re.kr
편집·인쇄	현대아트컴·한국장애인문인복지후원회

본 보고서는 에너지기술정보서비스 ETIC([www.etic.kr](http://www.etic.kr))를 통해서도 보실 수 있습니다.  
무단 전재 및 복사를 금합니다.

2050 탄소중립 에너지기술로드맵  
KOREA INSTITUTE OF ENERGY TECHNOLOGY  
EVALUATION AND PLANNING