

2050 탄소중립 에너지기술 로드맵

그린수소



탄소중립은 이제 글로벌 뉴노멀이자 새로운 성장 패러다임으로 자리잡았습니다. 전세계 140여개국이 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 자급률은 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 대통령은 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 쉰 부분의 전환을 뜻합니다.

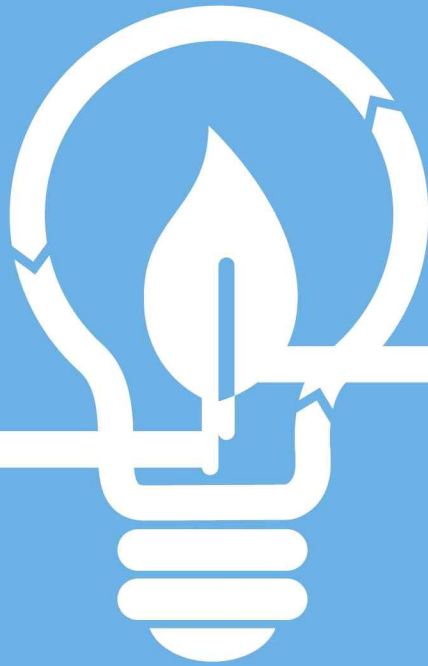
탄소중립의 성공적 달성을 위해서는 무엇보다 현 기술을 뛰어넘는 혁신기술 확보와 저탄소 혁신성장 산업으로의 전환이 중요합니다. 한국판 그린뉴딜을 통해 기확보된 기술경쟁력을 중심으로 글로벌 탄소중립 속도 경쟁에서 우위를 다지고 신시장을 선점해 나가야 할 것입니다. 또한, 탄소중립의 새로운 성장동력으로서 에너지 혁신을 가속하기 위해 산학연 모두가 뜻을 모아야 합니다. 이러한 시점에서, '2050 탄소중립 에너지기술 로드맵'이 우리의 에너지 시스템을 근본적으로 혁신하고, 앞으로 미래 에너지산업의 투자를 견인할 것이라고 확신합니다.

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

2021년 12월

한국에너지기술평가원장 권기영

권기영



| 그린수소 |



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. CO ₂ free 청정수소의 저가 대량 생산기술 확보 | 16 |
| 2. 청정 암모니아 기반 고순도 그린수소 기술 | 48 |
| 3. 경제성 확보 가능한 액체수소 저장·운송·인수·충전 기술 | 61 |
| 4. 고효율 에너지 저감 액상유기수소저장물질 수소화 및 탈수소화 기술 | 81 |



2050 탄소중립
에너지기술 로드맵

I

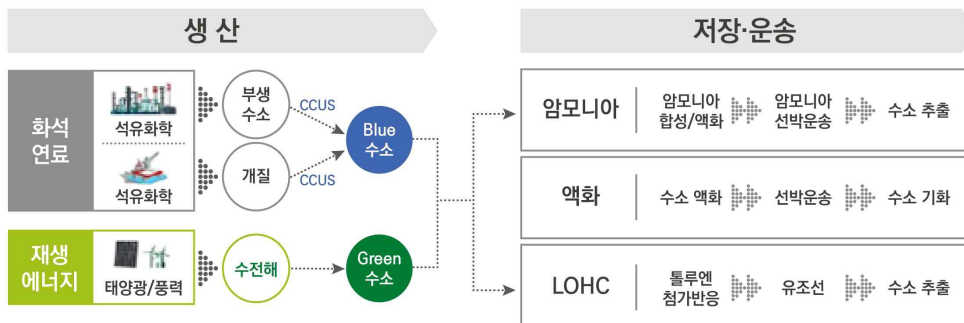
개요

| | |
|------------------------|----|
| 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

- 수소 에너지는 재생에너지의 확대에 따른 전력생산의 간헐성 문제와 기존 배터리만으로는 대용량 에너지의 장기간 저장이 어려운 문제를 해결할 수 있는 미래 에너지 시스템의 잠재적 대안으로, 수소의 생산부터 저장, 운송 및 활용까지의 전 밸류체인이 구축되어야 유기적으로 작동이 가능함. 수소 산업을 기반으로 한 2050 탄소중립을 실현하기 위해서는 재생에너지와 연계한 CO₂ free 청정수소 생산기술 확보와 재생에너지 발전단가가 낮은 국가에서 청정수소를 생산·도입할 때 에너지의 낭비가 적고 경제적이며 친환경적으로 운송할 수 있는 저장 및 운송기술의 확보가 시급함
- CO₂ free 청정수소의 저가 대량 생산기술 확보
 - CCS 연계 추출수소 생산
 - 재생에너지 연계 알칼라인 수전해, PEM 수전해 및 AEM 수전해 등 그린수소 생산
- 대규모 청정수소 액화 및 액상 전환/저장/운송/추출 기술
 - 청정 암모니아 기반 고순도 그린수소 기술
 - 경제성 확보 가능한 액체수소 저장·운송·인수 및 충전 기술
 - 고효율 에너지 저감 액상유기수소저장물질 수소화 및 탈수소화 기술

개요

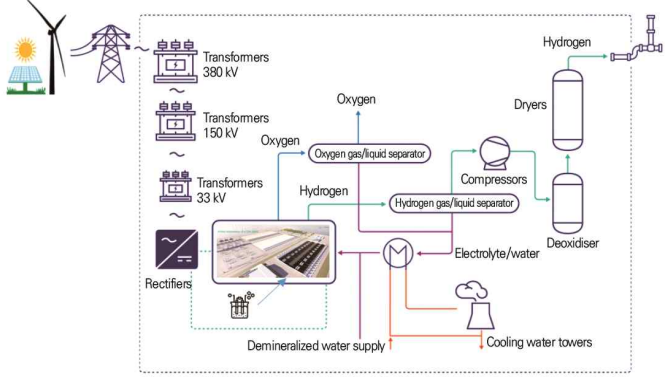
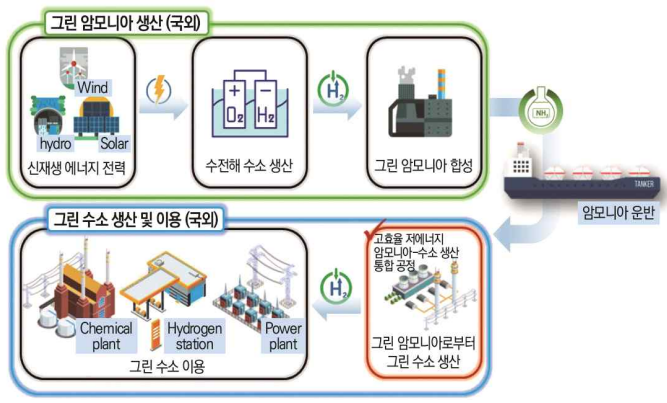


- Blue 수소(개질수소+CO₂제거)
 - 천연가스 개질 후 CO₂를 포집/제거

- Green 수소(수전해수소)
 - 재생에너지 활용하여 수전해를 통해 수소 생산

- 액화/액상 수소 저장/운송
 - 대륙 간 또는 대규모 운송 시, 액화 수소 또는 암모니아로 전환 필요
 - 수소 터미널 및 액체 탱크로리 활용 육상 운송
 - 수소 액화/액상 시 경제적 운송 가능

02 전략방향 설명

| 전략명 | 개요 | 목표 |
|--|--|---|
| <p>CO₂ free 청정수소의 저가 대량 생산기술 확보</p> |  <p>• 생산과정에서의 탄소배출량이 36.4g CO₂eq/MJH₂ 이하로 기존 방식에 비해 탄소출량이 40% 이상 저감된 수소를 대량으로 값싸게 생산하는 기술. 알칼리 수전해/고분자막 수전해/AEM 수전해 등 그린 수소 기술과 이산화탄소 포집 기술을 활용한 블루수소 기술을 포함. 경제적이고 안전한 수소를 화석연료 대체 에너지원으로 생산하고 탄소중립에 기여</p> | <p>('50) 알칼라인 수소생산 전력량 45kWh/kg (71% 효율, LHV), 스택규모 10MW</p> <p>PEM 생산압력 수소생산 전력량 42kWh/kg (78% 효율, LHV), 스택규모 10MW</p> <p>AEM 수소생산 전력량 42kWh/kg (78% 효율, LHV), 스택규모 3MW</p> |
| <p>청정 암모니아 기반 고순도 그린수소 기술</p> |  <p>• 재생에너지 요건이 좋은 해외 국가와 연계하여 그린 암모니아를 현지에서 생산하고 기존 암모니아 수입 인프라를 통해 국내로 도입 후, 저온에서 암모니아로부터 수소를 생산 및 분리/정제함으로써 에너지효율과 탄소중립에 기여하는 그린 수소 생산기술</p> | <p>암모니아-수소 생산 통합공정 ('40) 91% (LHV 기준), CO₂-free, >100,000 Nm³/hr</p> |

| 전략명 | 개요 | 목표 |
|---|--|---|
| <p>경제성 확보 가능한 액체수소 저장·운송·인수·충전 기술</p> | <p>〈액체수소 저장·운송 기술의 경제성 확보 개념도〉</p> <ul style="list-style-type: none"> • 국제적인 기후 변화를 대응하기 위하여 2050 탄소 중립 달성이 필수적이며 그린수소 생산 및 해외 도입이 필요 • 그린수소를 안전하게 도입하고 대용량 보급 및 활용하는 전주기(생산-운송-활용)기술 개발 및 확보가 필수적 • 수소 액화 기술개발 <ul style="list-style-type: none"> - 액체수소 운송선 핵심기술 개발 - 액체수소 메가스테이션 시스템과 핵심 기자재 국산화 및 실증 - 액체수소 인수기지 국산화 및 실증 | <p>수소액화 기술 ('50) 50톤/일급 상용화</p> <p>액체수소 운송선 ('50) BOR 0.1%/day 설계, 160K급 액체수소 운송선 상용화</p> |
| <p>고효율 에너지 저감 액상유기 수소저장물질 수소화 및 탈수소화 기술</p> | <p>〈LOHC 기반 대용량 장거리 수소 저장·운송 개념도〉</p> <p>출처: 포항공과대학교 윤창원</p> <ul style="list-style-type: none"> • LOHC 소재 핵심기술 개발 • LOHC (탈)수소화 촉매, 반응기, 공정 핵심기술 개발 • LOHC (탈)수소화 시스템 고효율화/대용량화 기술 개발 • LOHC 기반 해외 수소 도입 및 활용 실증 | <p>LOHC 수소 저장 및 추출 ('40) 수소저장 및 추출용량: 10,000 Nm³/h (효율: 75%)</p> |

03 선정배경

가 CO₂ free 청정수소의 저가 대량 생산기술 확보

● 이슈사항

- 탄소중립을 위한 화석연료 사용 제한 및 수소 에너지 활용의 정부 정책 발표로 탄소 배출이 적은 그린수소 생산에 대한 중요도가 크게 증대되고 있음. 그러나, 그린수소 생산을 위한 생산가격이 현재 화석연료 개질을 통한 그레이 수소 생산가에 비해 높으며, 재생에너지 연계를 위한 부하변동전력 및 전력간헐성 대응 운전기술 개발의 역사 또한 길지 않음
- 천연가스 개질을 통한 수소생산은 상대적으로 경제적이고, 대량 생산이 가능하지만 CO₂ 발생이 불가피

● Dilemma(난제)

- 경제성이 상대적으로 높은 수전해 기술은 변동부하 대응에 불리하고, 변동부하 대응운전이 유리한 수전해 기술은 요소부품이 고가로, 재생에너지 연계 그린수소 생산을 확대하기에 핵심기술별 취약점이 존재함. 또한, 국내 수전해 산업 생태계 형성의 역사가 선진국에 비해 짧아 관련 산업에서 규모의 경제가 아직 실현되지 못하였음. 이에, 경제성이 높으면서 그린수소를 대량으로 생산할 수 있는 기술개발이 필요함
- 천연가스 개질을 통한 수소의 생산과정에서 발생하는 CO₂를 포집하는 것은 기술적으로 가능하나 포집한 CO₂를 국내에서 대량으로 저장할 수 있는 공간이 없음

■ Solution(해결방안)

- 변동부하 연계 실증 및 시스템 규모 확대를 통해 재생에너지 연계 그린수소 생산기술의 경제성을 높일 필요가 있음. 수전해 요소부품 가격저감 및 내구성 향상과 함께, 지속적인 재생에너지 보급 확대로 기존 개질수소 대비 높은 경제성을 확보하고 대량생산을 통한 탄소중립에 기여
- 수증기 개질(2톤/day 이상)에 의한 수소생산 공정에서 포집된 CO₂를 원료로 사용하는 사용처(드라이아이스, 폴리머 원료, 발표제 등)를 발굴하여 적용하거나, CO₂의 발생이 없는 것으로 간주되는 혐기 발효 가스나 매립가스를 정제하여 수증기 개질 공정 수소생산에 활용. 천연가스를 직접 분해하는 기술개발을 통해 CO₂ 발생 없이 카본과 수소를 생산하는 공정으로 대체

나

청정 암모니아 기반 고순도 그린수소 기술

● 이슈사항

- 수소 경제 활성화 로드맵에 따라 수소 공급량을 2022년에 연간 47만 톤, 2040년까지 연간 526만 톤을 확보해야 함. 하지만, 국내에는 충분한 재생에너지 확보가 어렵고 수전해 수소 생산 기술로부터 값싼 수소 공급량을 충당하기 어려운 실정임
- 이에 따라, 2030년부터는 해외에서 수소를 수입하여 수소 공급량을 충당하기 위한 계획을 세우고 있으며, 그 중 암모니아는 carbon-free 수소 저장체 중 높은 수소저장 밀도와 더불어 수입에 대한 인프라가 이미 구축되어 있어 현재 접근성이 가장 높은 기술로 주목받고 있음

● Dilemma(난제)

- 그러나, 암모니아는 현재 150기압 이상의 매우 높은 생산압력과 수소추출 온도로 인해 에너지 다소비 공정에 속하여, 현재는 다량의 CO₂가 배출되고 있음
- 에너지 효율 향상과 CO₂-free를 위한 저에너지 암모니아 합성과 분해, 촉매 및 반응기 기술, 에너지 저소비 분리/정제 요소기술 개발이 필요함
- 이와 더불어 실증 통합공정 개발을 통한 요소기술들의 효율화 및 통합공정 최적화를 통해 에너지 효율이 고려된 통합 공정 설계 기술이 필요함
- 암모니아 특성상 도심에 직접 적용 시 주민 수용성 문제가 야기 될 수 있으며, 이를 해결하기 위한 대응 방안도 마련되어야 함

● Solution(해결방안)

- 암모니아 합성 압력을 50기압 이하로 낮출 수 있는 고효성 촉매 및 반응기 기술 개발 또는 전기화학 방식의 암모니아 합성 기술개발, 재생에너지 연계 저에너지 공정기술 개발 추진
- 저온에서 구동 가능한 암모니아 기반 수소 생산 촉매 및 반응기, 고순도 수소의 확보를 위한 분리/정제 기술, 탈탄소 열원 활용을 위한 off-gas 혼소 및 에너지 효율화 기술 개발을 통해 요소기술의 효율 증진 및 실증화 개발 추진
- 암모니아 탱크/파이프라인 등 기존 인프라가 구축된 산업체와 연계하여 암모니아의 국내 도입 후 산업단지와 항만 지역을 중심으로 그린 수소를 생산하는 상용화 가능 통합 실증공정 추진, 대규모 그린 수소 생산을 위한 수소 생산 플랜트 공정기술 및 인프라 확보
- 도심 외각 지역에 위치하는 플랜트에서 수소를 생산한 후 파이프를 이용하여 공급하거나, 도시 외각 지역의 발전소 또는 소규모 연료전지 시스템에서 전력을 생산하여 공급함으로써 주민 수용성 제고 및 주민 불안 해소

다

경제성 확보 가능한 액체수소 저장·운송·인수·충전 기술

● 이슈사항

- 정부는 탄소중립 및 재생에너지 확대를 위한 핵심 수단으로 재생에너지와 연계한 청정 수소 에너지 활용 정책을 추진 중
 - 수소경제활성화 로드맵 공표하고 '30년까지 194만톤/年, '40년까지 526만톤/年 이상의 수소 공급 정책 추진
 - 기후변화에 적극 대응하기 위해 주요 국가는 탄소중립 선언과 더불어 대규모 그린 투자계획 발표
 - 국제해사기구(IMO)에서는 선박의 온실가스 배출량 감축을 위한 전략을 채택
- 국내외 생산된 청정수소를 대용량·장거리로 수소 수요처까지 공급하기 위해서는 현재 사용되고 있는 기체수소로는 운송과 저장에 한계가 있으며 이를 극복하기 위해서는 액체수소 공급 및 활용 체계 구축과 관련된 기술개발이 필요함
- 액체수소는 기체 수소 대비 부피가 1/800로 줄어 운송 효율이 10배 높으며 특히 해외 도입 시 액체수소 공급 체계 구축을 위해 액체수소 생산·저장/운송 및 활용 기술 개발이 필요함
- 해외의 청정수소를 국내로 대용량 도입하기 위해서는 수소 액화 기술 및 액체수소 운송선 개발, 국내 수요처에 안정적 공급을 위한 액체수소 메가스테이션 개발이 필수적임

● Dilemma(난제)

- 국내의 기체수소 저장·운송 방식은 낮은 저장 밀도와 고압에 대한 안전문제로 인해 보급확산에는 어려움이 있으므로 저압으로 저장하고 대용량·장거리 이송이 가능한 액체수소 공급 및 활용 체계 구축이 필요함
- 반면, 액체수소 저장 및 운송 방식은 오랜 기간 동안 미국, 유럽, 일본 등 일부 선진국 중심으로 기술 개발이 진행되었으며, 액체수소 활용은 전세계적으로 일부 기업만 기술을 보유하고 있음
- 국내는 소규모 파일럿 단위의 기초 연구가 추진되고 있으며, 액체수소 관련 국내 기술 경쟁력 확보를 위해서는 지속적인 연구 개발 및 관련 인프라 확보가 절실함
- 수소액화, 액체수소 운송 및 메가스테이션에 필요한 핵심기술이 확보되지 않으면 해외 기술에만 의존하여 기술 종속의 우려가 있음

● Solution(해결방안)

- 지속적인 국내 기술 개발 지원 및 인프라 투자를 통해 액체수소 관련 핵심 원천 기술 확보
- 액체수소 기술 조기 확보를 위해 국내 기술 개발 추진뿐만 아니라 일부 해외 선진 기술 도입 추진 필요
- 국내외 대규모 그린수소 도입을 통한 수소경제 활성화
- 해외수소 도입에 필요한 전주기 밸류 체인을 구축 및 액체수소 생태계 조성 필요

라

고효율 에너지 저감 액상유기수소저장물질 수소화 및 탈수소화 기술

● 이슈사항

- 글로벌 탄소중립 실현을 위해서는 재생에너지 생산 확대 및 활용 증가가 필요함
- 재생에너지는 확대와 더불어 재생에너지 활용 제고를 위한 에너지 운반체로 수소가 주목받고 있음
- 재생에너지와 연계하여 수전해를 통해 그린수소를 생산할 수 있으며, 이산화탄소 포집-전환-저장기술(CCUS, Carbon Capture, Utilization, and Storage)과 연계하여 화석연료로부터 블루수소를 생산할 수 있음
- 그러나, 저가 재생에너지를 활용하여 생산된 대규모 CO₂-free 수소를 저장하고 수소수요처까지 운송하는 상용화 기술이 부재함
- 특히, 대용량 장거리 운송의 경우 에너지 저장 밀도로 인해 기체의 형태로 운송하는데 한계가 있어 부피대비 저장용량을 높이기 위한 수소의 액상화 기술개발이 요구됨

● Dilemma(난제)

- 수소를 -253℃ 이하로 낮춰 액체수소로 제조하는 기술은 글로벌 산업가스 기업을 중심으로 상용화되어 있지만, 경제성이 확보된 대규모 액화플랜트 및 장거리 수소운송용액체 수소 운송선의 부재와 관련 인프라 구축의 대규모 투자비용의 이슈가 존재함
- 상기 액체 수소저장 기술과 보완적으로 사용할 수 있는 방법으로서 액상유기수소운반체(Liquid Organic Hydrogen Carrier, LOHC)기술(액상 화합물이 가지는 탄소-탄소 이중결합을 이용하여 분자 내 수소를 저장하여 액상화하고 필요 시 저장된 수소를 재추출하는 기술)이 있으나, 효율성 항상 측면에서의 해결해야 할 이슈가 존재
- LOHC 내 저장된 수소의 추출 반응에 요구되는 온도가 높으며, 현재는 화석연료 기반의 열원 공급시스템 사용으로 인해 수소 추출 시 CO₂가 배출되고 있는 상황임
- 향후 에너지 효율 향상과 동시에 수소화/탈수소화 공정 구현을 위한 LOHC 수소 저장·추출 원천 촉매 및 반응기 기술과 병행하여 에너지 저소비 열원공급 및 분리/정제 요소기술 개발이 필요함

- 또한 도심에서 사용하는 경우, 기존 화석연료(가솔린, 디젤 등)와 비교할 수 있는 LOHC 안정성 및 환경성 검증이 필요함

● Solution(해결방안)

- 저온에서 H₂-rich LOHC로부터 수소추출이 가능한 소재 설계 및 대량 제조 기술 확보
 - 높은 반응 엔탈피로 인해 LOHC 탈수소화반응에 고온을 필요로 하므로 분자의 전자구조 변화 유도에 기반한 신규 소재 설계를 통해 반응 온도 저온화
- LOHC 소재로부터 가역적으로 수소 저장·추출을 가능케 하는 고효율·고내구성 촉매 제조 기술 개발 추진
- LOHC (탈)수소화 반응기, 가열기(preheater), 기화기(vaporizer)에 필요한 에너지를 공급하는 열원 구성 기술 및 LOHC 탈수소화 반응 시 폐열 회수 및 열손실 최소화를 통한 수소추출시스템 고효율화 기술 개발 추진
- 대용량 해외 수소의 국내 보급을 위한 LOHC 연속 수소저장 및 추출시스템 대형화 공정 설계 기술 및 반응기 고성능화·고내구화 기술 개발 추진
- LOHC 수소저장 및 추출 열화학 반응기, 열원공급장치 등 부대장치 다수와 효과적으로 연계하는 기술 확보를 통한 시스템 대형화 및 고성능화 추진
 - 대형 시스템 운전 안정성 확보를 위한 운전 프로토콜 확보
- LOHC 환경성 및 안정성 검증을 통한 LOHC 활용 다변화 전략 수립

04 핵심수단 및 전략도출

그린수소



Pillar (핵심수단)

< 탄소가 배출되지 않는 청정수소 대량생산 및 저장 운송 기술 확보 >

- 그레이 수소는 탄소중립 기여도가 미비하여, CCS를 연계한 블루수소 및 재생에너지를 연계한 그린수소의 대규모 공급이 필요함
- 정부는 수소경제활성화로드맵(19.01.)에 따라, '30년까지 194만톤/년, 40년까지 526만톤/년' 이상의 수소 공급을 정책 목표로 추진 중이며, 이를 위한 대규모 블루수소 및 그린수소 생산 관련 기술 개발 및 보급이 필요함
- 재생에너지 발전단가가 낮은 국가에서 그린수소를 생산하여 도입할 때, 부피당 에너지 저장밀도가 높은 액화수소, 암모니아, LOHC 등 액체형태로의 변환이 필수적임
- 따라서, 2050 탄소 중립을 위한 수소 분야 핵심수단으로 단계적으로는 CCS연계한 블루수소를 대량 공급하고, 장기적으로 재생에너지를 연계한 그린 수소의 대량 생산이 필요하며, 관련한 대용량 저비용 수소 저장 및 운송 기술 개발을 추진해야함

전략도출

| Dilemma | | 난제 | Solution | | 해결 방안 |
|-----------|---|----|------------|---|-------|
| Dilemma 1 | <ul style="list-style-type: none"> • 탄소 중립 실현을 위하여 CO₂ free 청정수소 기술의 상용화 및 내재화가 필요하나, 그린수소 등에 대한 핵심 원천기술, 상용화, 신뢰성 확보 및 실증 등 부족 | | Solution 1 | <ul style="list-style-type: none"> • 청정수소 핵심기술 확보, 산업생태계 육성 및 고도화 <ul style="list-style-type: none"> - 수소전환효율 향상, 수소생산량 확보를 위한 핵심부품 국산화, 시스템화 기술 및 신뢰성 확보 - 재생에너지 실증, 운영데이터 확보 및 비즈니스 모델 도출 | |
| Dilemma 2 | <ul style="list-style-type: none"> • 액화수소의 경우 초저온 단열(-253°C) 및 높은 Boil-off gas 손실률 등 고려할 때, 대규모 액화 수소 운송선 개발은 최소 10년 이상 소요 전망 | | Solution 2 | <ul style="list-style-type: none"> • 고효율 수소액화, 초저온 단열, BOG 회수 등 기술 확보 <ul style="list-style-type: none"> - 수소액화 플랜트 효율 목표 : 10 kWh/kg.H₂ → 6kWh/kg.H₂ - 단열 및 BOG 손실률 : 1.0%/일 → 0.2%/일 | |
| Dilemma 3 | <ul style="list-style-type: none"> • 암모니아는 상대적으로 액화 단열(-33°C)이 용이하나, 암모니아로부터 대규모 수소 추출의 검증과 전환 및 추출 과정의 에너지효율 최적화가 필요함 | | Solution 3 | <ul style="list-style-type: none"> • 암모니아 전환 및 수소추출 효율을 현수준의 50%까지 절감 <ul style="list-style-type: none"> - 암모니아 전환효율 : 10 kWh/kg.H₂ → 4 kWh/kg.H₂ - 수소 추출효율 : ~ 8 kWh/kg.H₂ → 5 kWh/kg.H₂ | |
| Dilemma 4 | <ul style="list-style-type: none"> • 암모니아의 독성과 규모 수소 추출 어려움 고려하여, 액상 유기화합물로의 전환 운송 기술이 연구 개발이나, LOHC 합성 후 수소 비중이 낮아 운송 효율이 매우 낮음 | | Solution 4 | <ul style="list-style-type: none"> • LOHC 내 수소 비중 향상 및 전환효율 향상 <ul style="list-style-type: none"> - LOHC 내 수소 질량비중 : 6% → 10% 이상 - 전환 및 추출 round-trip 효율 75% 이상 확보 | |

05 전략방향-핵심기술 로드맵

그린수소

| 핵심기술 | Baseline | 단기(~2025) | ~2030 | ~2040 | ~2050 | 전략방향 목표 |
|---------------------------------------|---|---|---|---|--|---|
| CO ₂ free 청정수소 생산 기술 확보 | 그린수소 • 소비전력: 55 kWh/kg (60% 효율, LHV) • 내구성: 5만 시군(해외) • 스택규모: 1 MW (해외) • 시스템 가격: \$1000/kW (해외) • 블루수소 • CO ₂ 저장: 0% • 효율: SMR 공정 80%(HHV) • 규모: 0.5-0.64톤/day | ○ 알칼리인 그린수소 생산요소 및 스택-시스템 ○ PEM 그린수소 생산 요소 및 스택-시스템 ○ AEM 성능 및 내구향상을 위한 원천기술 개발 ○ 재생에너지연계 MW급 수전해 시스템 개발 ○ 가점형 중형 2톤/day 이상 블루수소 생산 기술 개발 a) WTT(Well To Tank) 과정에서 발생 CO ₂ 를 포함하며 SMR 공정에서 90% 이상 포집 | ○ 알칼리인 시스템 효율 및 내구성 향상 ○ 고효율 고내구 PEM 시스템 개발 ◎ 100MW급 시스템 ○ 효율 향상 및 실증 | ○ 실증 ○ 실증 ○ 내구성 확보 ◎ 100MW급 시스템 | ○ 알칼리인 수소 생산 ○ 알칼리인 수소 생산 ○ AEM 시스템 실증 ○ 그린수소 생산 ○ 상용화 | 그린수소 • 소비전력 (42 kWh/kg) • 스택 내구성 10만시간 • 스택규모: 10MW • 시스템가격: \$300 /kW 블루수소 • 용량: 2톤/day 이상 • 온실가스 저장: 천연가스 개질 대비 60% 이상 저감) • 효율: >80% (HHV) |
| | | 경제성 확보 가능한 액체수소 저장-운송-인수-충전 기술 • 개념설계: 160k • 화물창 및 선박 용량: 125k (K)에 • 액체수소 플랜트 • 액화규모: 30톤/일(독일, 프랑스, 미국) • 액화효율: 10kWh/kg • 액체수소 메가스테이션 • 국내외 기준 없음 • 규모: 없음 | ● 30TPD 수소 액화압축, 예냉각 기술 도입, 국산화 ○ 1Ton급 LTLG/LTGS 개발 ○ 액체수소 운송선(160k급) 설계 및 pilot 선박(20k급) 실증 ○ 대용량 액체수소 인수기지 설계 | ○ 50TPD 극저온 액화기술 ○ 실증 ○ 10Ton급 LTLG/LTGS 실증 ○ 실증 ○ 실증 | ○ 실증 ○ 실증 ○ 80k급 실증 ○ 80k급 실증 | ○ 상용화 ○ 상용화 ○ 160k급 실증 ○ 520k급 실증 |
| 청정 암모니아 기반 고순도 그린수소 기술 | 암모니아 분해 • 규모: >20 Nm ³ /h • 에너지: 8.0 kWh/kgH ₂ • 암모니아 합성 • 규모: >3,000 톤/일(해외) • 에너지: 10.0 kWh/kgH ₂ | ○ 고효율 저에너지 암모니아 수소 생산 요소기술 개발 및 통합공정 개발 ○ 저에너지 암모니아 생산을 위한 암모니아 합성 요소기술 및 통합공정 개발 | ○ 순도/효율 향상 ○ 1 TPD Pilot | ○ 생산규모 향상 | ○ 상용화 ○ 보급 확산 | 암모니아 분해 • 규모: >100,000 Nm ³ /h • 에너지: 5.0 kWh/kgH ₂ 암모니아 합성 • 규모: >3,000 톤/일 • 에너지: 4.0 kWh/kgH ₂ |
| 고효율 에너지 저장 액상유기 수소 저장물질 수소화 및 탈수소화 기술 | LOHC 저장/추출 • 저장-추출 용량: 1.0 Nm ³ H ₂ /h • 시스템 수소 Round-trip efficiency: 60% • 수소 질량비중: 6% • LOHC 물질 탈수소화 흡열량 및 반응온도: 68 kJ/mdH ₂ , 320°C | ○ 100Nm ³ /hr 연속 수소 저장-추출 시스템 실증 ○ RTE 65% 달성 ○ 신규 LOHC 물질 및 촉매 개발 (흡열량 및 반응온도: 68 kJ/mdH ₂ , 320°C) | ○ 1,000Nm ³ /hr 실증 ○ RTE 70% ○ 63 kJ/mdH ₂ , 300°C | ○ 실증 ○ RTE 75% 실증 ○ 55, 250 | ○ 실증 ○ 확산 ○ 확산 ○ 확산 | LOHC 저장/추출 • 저장-추출 용량: 10,000Nm ³ H ₂ /h • 시스템 수소 Round-trip efficiency: 75% • 수소 질량비중: 10% • LOHC 물질 탈수소화 흡열량 및 반응온도: 55kJ/mdH ₂ , 250°C |

범례: 정부주도 (개발, 실증, 도입/확산, 자립/상용화) 민간주도 (개발, 실증, 도입/확산, 자립/상용화) 기술화노출형태: ○ 자체개발 ◎ 국제공동연구 ● 기술도입 ◇ 라이선싱



2050 탄소중립
에너지기술 로드맵

II

비전 및 목표

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

01 비전 및 목표

비전

CO₂ free 그린수소 사회로의 성공적 전환

목표

- ☑ CO₂ free 청정수소 생산 (‘50) 알칼라인 수소생산 전력량 45kWh/kg, PEM/AEM 수소생산 전력량 42kWh/kg
- ☑ 암모니아-수소 생산 통합공정 (‘40) 91%(LHV), CO₂-free, >100,000 Nm³/hr
- ☑ 수소액화 기술 (‘50) 50톤/일급 상용화, 160K급 액체수소 운송선 상용화
- ☑ LOHC 수소 저장 및 추출 (‘40) 수소저장 및 추출용량 10,000 Nm³/h (효율 75%)

전략 방향

장거리 대용량 운송이 가능한 수소 운송기술 확보, 저가 대량 그린수소 생산



전략 방향

추진 전략

| 그린수소 대량 생산 및 저장·운송 기술 확보 |

- ☑ 재생에너지로 생산된 전기로 수소를 제조하는 CO₂ free 그린수소의 저가 대량 생산기술 확보
- ☑ 기체 저장·운송을 고도화하여 운송량을 증대하고, 안정성 있게 대량 저장·운송할 수 있는 액체수소·액상수소화물 저장·운송 기술의 경제성 확보
 - 청정수소 인증제도입과 관련 인프라 구축
 - 액화수소 안전규정 마련 및 밸류체인 전반 지원
 - 저온 수전해 소재-부품-장비 개발 및 신뢰성 R&D 강화
 - 선진기업과 연계하여 액화수소 저장 운송기술 조기 국산화
 - 암모니아, LOHC 등 관련 기술개발에 수요기업 조기 참여 및 관련 시장개발

III

전략방향 및 핵심기술

1. CO₂ free 청정수소의 저가 대량 생산기술
 확보 16
2. 청정 암모니아 기반 고순도 그린수소 기술 48
3. 경제성 확보 가능한 액체수소 저장·운송·
 인수·충전 기술 61
4. 고효율 에너지 저감 액상유기수소저장물질
 수소화 및 탈수소화 기술 81

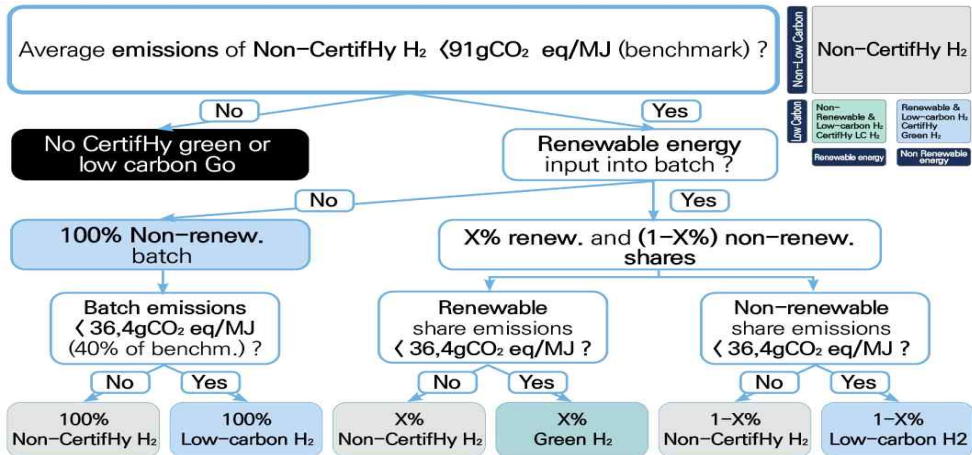
01 CO₂ free 청정수소의 저가 대량 생산기술 확보

가 전략방향 대상정의

● 개념 및 범위

- 그린수소라 함은 그 생산과정에서의 탄소배출량이 천연가스의 증기개질 방식으로 생산되는 수소에 비해 60% 이하인 재생에너지를 이용하여 생산되는 수소를 지칭함(EU CertifHy, 2016)
- 현재 전세계 수소의 95% 이상을 생산하는 방법인 천연가스 증기개질 방식에서 발생하는 탄소배출량을 91g CO₂eq/MJH₂로 하며, 저탄소 수소는 그 생산과정에서 탄소발생량이 36.4g CO₂eq/MJH₂ 이하인 수소를 말함. 상기 저탄소 수소 중 에너지원으로 재생에너지를 사용하여 생산되는 수소를 그린수소로 정의함

개요



출처: "Definition of Green Hydrogen", EU CertifHy, 2016

● 기술 요구사항

- 그린수소의 경제성 제고를 위하여 수소생산 장치의 가격을 저감시키고 수소생산 공정의 효율을 높여야 하는 이슈가 있음. 이를 통해 화석연료 기반 수소와 동등하거나 그보다 낮은 시장가격을 확보하여 보급과 활용을 확대 촉진시킬 필요가 있음. 또한 변동성이 높은 재생에너지를 대응하기 위한 운전 시스템 기술의 확보가 추진되어야 함

나 전략방향별 핵심기술

그린수소

CO₂ free 청정수소의 저가 대량생산 기술 확보

| 핵심기술 | Baseline | 단기 | | | | 중기 | | | 목표 | |
|---|----------|-------------------------------------|------|------|------------------|-------|-------|--|-------|-------------|
| | | 2022 | 2023 | 2024 | 2025 | ~2030 | ~2040 | ~2050 | | |
| <p>효율향상 및 가격저감을 위한 (ABM) 그린수소 생산 원천기술 개발</p> <ul style="list-style-type: none"> 전력소비: 50-66 kWh/kg 내구상: 1만 시간 스택 규모: 10kW 스택가격: \$1,500/kW | | (부) AEM 막전극접합체 원천기술개발 | | | (소) 고내구성 막전극개발 | | | (부) 3MW급 스택 모듈개발 (시) 생산압력 100bar 수소생산 전력량 42kWh/kg, 78% 효율 LHV, 10MW급 시스템 | 전력 효율 | < 42 kWh/kg |
| <p>알칼리인 그린수소 생산시스템</p> <ul style="list-style-type: none"> 전력소비: 47-66 kWh/kg* 내구상: 2만 시간 스택 규모: 1MW 스택가격: \$500 ~ \$1,000/kW | | (소) 부) 고효율 촉매/전극/분리막 소재 및 부품 원천기술개발 | | | (소) 고효율 촉매/전극 제조 | | | (시) 생산압력 50bar, 수소 생산 전력량 45kWh/kg, 71% 효율 LHV | 전력 소비 | < 45 kWh/kg |
| <p>고분자 전해질막 (PEM) 그린수소 생산시스템</p> <ul style="list-style-type: none"> 전력소비: 47-66 kWh/kg* 내구상: 2만 시간 스택 규모: 1MW 스택가격: \$400/kW | | (소) 부) 고효율 촉매/전극/분리막 소재 및 부품 원천기술개발 | | | (소) 고효율 촉매/전극 제조 | | | (시) 생산압력 100bar, 수소생산 전력량 42kWh/kg, 78% 효율 LHV | 전력 효율 | < 42 kWh/kg |

*Green Hydrogen Cost Reduction, IRENA, 2020

| 그린수소 | | CO ₂ free 청정수소의 저가 대량생산 기술 확보 | | | | | | | 목표 | |
|--|---|---|---|------|------|-------|-------|-------|------|--------|
| 핵심기술 | Baseline | 단기 | | | | 중기 | | | 진력효율 | 시스템 규모 |
| | | 2022 | 2023 | 2024 | 2025 | ~2030 | ~2040 | ~2050 | | |
| 재생에너지 연계 GW급 수전해 시스템 기술개발 및 실증 • 시스템 규모: 3 MW • 시스템내구성: 10만 시간 • 부하변동: 5~120% • 냉시동 시간: 1시간 | (부) BOP 고도화, 스택 대형화 (시) 시스템 대용화 (~10MW급 scale-up) (시) 운전 안정화 기술 | (시) ~100MWt scale-up (부) 10MW 스택 모듈 개발 (시) GW급 재생에너지 실증 | 전력효율 <42 kWh/kg 시스템 내구성 20만시간 부하변동 5~300% 냉시동 시간 <1분 | | | | | | | |
| 거점형 2톤/day 이상 블루수소 생산 기술 개발 실증 및 보급 • CO ₂ 저장: 천연가스 SMR 대비 0% • 효율: 80 %HHV • 규모: 0.3 톤/day | (시) 2톤/day 이상 개발 및 CO ₂ 포집 기술 적용 실증 (시) 액상 촉매 활용 신개념 CO ₂ free 추출수소 생산 기술(0.5Nm ³ /h) 개발 (시) 천연가스 직접분해 블루수소 생산 기술 실증/상용화 | (시) 자기회 및 실증 (시) 천연가스 직접분해 | CO ₂ 저장 > 천연가스 SMR 대비 60% 감축 ^{a)} 효율 > 80 %HHV 규모 ≥ 2 톤/day | | | | | | | |

^{a)} WTT(Well To Tank)과정에서 발생 CO₂를 포함하며 SMR 공정에서 90% 이상 포집

범례 (소) 소재, (부) 부품, (장) 장비, (시) 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

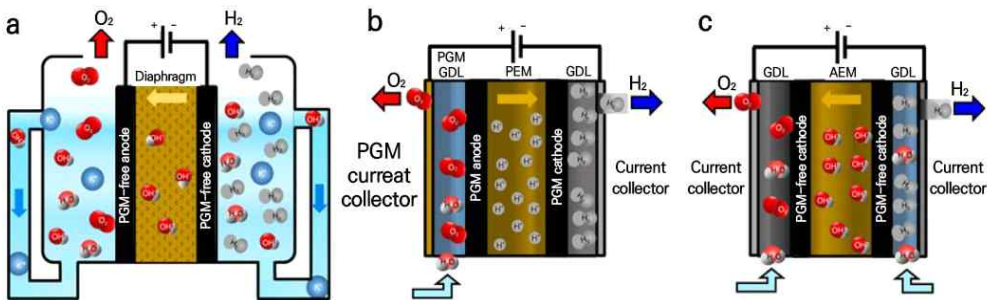
다 핵심기술 개요

핵심기술 1 • 효율 향상 및 가격 저감을 위한 그린수소 생산 원천 기술 개발

기술개요

- 수전해 그린수소 생산 시스템 : 전력으로 물을 분해하여 수소와 산소를 생산하는 수전해 장치로 수소생산전극과 산소생산전극 사이의 이온전달체 및 가스차단막으로 사용하는 장치를 이용하는 그린수소 생산 시스템
- 두 전극 사이에 다공성 가스차단막을 사용하는 알카라인 수전해, 고분자 이온전도막을 사용하는 양이온 및 음이온 전도 고분자전해질막(PEM, AEM) 수전해, 고체무기산화물 이온전도막을 사용하는 고온 수전해(SOEC) 수전해 생산 시스템 등으로 구분함
- 수전해 생산 기술은 전력을 이용하여 저탄소 수소 혹은 그린수소를 생산하여 탄소중립에 기여할 수 있으며, 이의 효율과 내구성을 향상시켜 경제성을 제고시키고 기술의 보급과 활용을 확장시킬 수 있음

수전해 기술별 모식도



알카라인 (원), PEM (중), AEM (우) 수전해 그린수소 생산 시스템의 모식도.

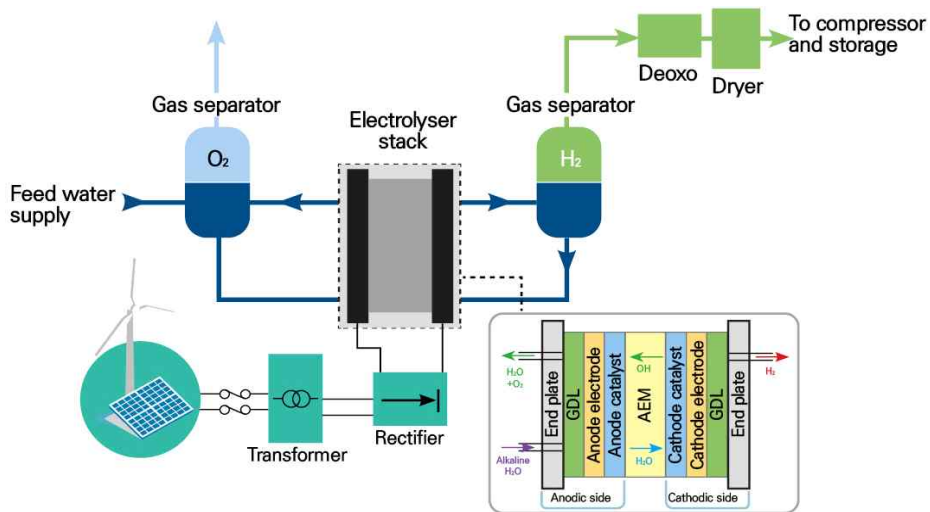
출처 :Nature Energy (5) 378-385 (2020)

- 알카라인 수전해 기술은 가장 오래된 개발 역사를 가지고 있으며, 대규모 운전과 최적화를 거쳐 현재 가장 경제적인 수전해 기술임. 저가 소재를 사용하여 시스템을 저렴하게 만들 수 있는 장점이 있어 시장 지배적인 위치를 가지고 있음. 수력발전 등과 연계되어 100MW 이상의 장치가 오랜기간 운전되는 등 스택과 시스템 기술 성숙도가 높으며, 변동부하 운전 영역을 넓히고 수소생산 압력을 높이기 위한 기술개발이 지속되고 있음
- PEM 수전해 기술은 고분자전해질막을 사용하여 변동부하 운전과 가압수소 생산이 가능한 기술임.

알칼라인 수전해에 비해 개발 역사가 짧으며 고가의 촉매 및 유로 소재를 사용하여 장치 가격이 비싸다는 단점이 있으나, 재생에너지원에서 생산되는 간헐성이 큰 전력을 사용하여 가압 그린수소 생산을 담당할 수 있어 많은 수전해 업체에서 신규 개발 및 신규 실증을 진행하고 있음

- 음이온 전달 고분자전해질막을 사용하는 AEM 수전해는 알칼라인 수전해의 작동 원리와 양이온교환막(PEM) 수전해의 구조적 장점을 함께 갖출 수 있는 가능성이 있음. 연구 개발의 역사가 가장 짧으나 기술의 성공적인 적용시 경제성과 안정성이 높은 기술이 될 수 있음. AEM 수전해 중 알칼리 액체 전해질 분위기에서 작동하는 방식은 저가의 비귀금속 촉매 및 GDL을 사용하므로 양산 시에 수전해 기기가격을 대폭 저가화할 수 있음. 순수 분위기에서 작동하는 AEM 그린수소 생산시스템은 궁극적인 게이-체이저 기술 분야이므로, 순수 분위기에서 성능과 내구성이 보장되는 음이온교환막 및 전극기술은 장기적인 관점에서 반드시 확보해야 할 주요 기술임
- 고온수전해 (SOEC) 기술은 고온 전기화학 반응에 필요한 전력이 저온 수전해에 비해 작고, 저가의 전극과 전해질막을 사용하여 장치 경제성이 높으며 고품질의 열원(600-800℃)를 제공하여 열효율을 포함한 시스템 효율이 높은 등 장점이 많음. 그러나 아직 기초연구단계의 기술로, 고온 수전해 기술을 상용화하기 위해 전극-전해질막-유로 등의 내구성을 높이고, 운전온도를 600℃ 이하로 낮추어 가용한 소재군을 넓히고, 전극과 스택을 대면적/대형화/모듈화 하는 등의 연구개발이 필요함

AEM 수전해 시스템 모식도



출처: "Green Hydrogen Cost Reduction", International Renewable Energy Agency (2020)

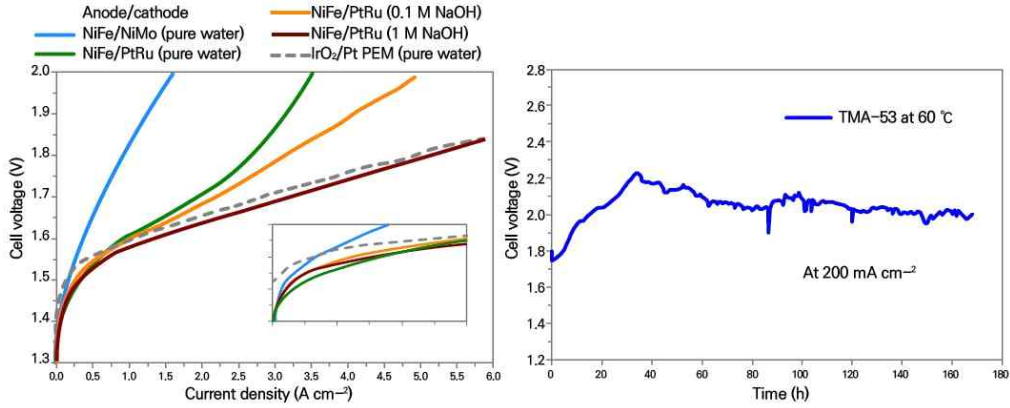
● 기술 동향

- 차세대 AEM 수전해의 경우, 1세대 알칼라인 수전해와 2세대 PEM 수전해의 장점이 융합된 형태로써, 고 전류밀도 및 고압·고순도 수소생산을 통한 고효율화와 비귀금속 촉매 사용 및 간헐적

구동이 가능함을 통한 제조비용 저가화 달성 측면에서 유리함

- 국내에서는 AEM 수전해 핵심소재인, 음이온교환막과 촉매가 연구개발단계에 있으며, 국외에서는 AEM 수전해 핵심소재의 개발, 실증 및 상용화 초기단계에 있어, 국내 부품들(전극, MEA, 스택)과 시스템으로 연계하는 전주기 통합 기술 개발이 시급함
- 국외에서는 선진사(Enapter)가 1Nm³급 AEM 수전해를 병렬, 연결하여 통신기지국 백업파워 분야에서 실증, 판매 중에 있으며, 클러스터(cluster) 방식 및 스택모듈과 중앙 BOP 기술인 멀티코어(Multicore)방식으로 MW급 수전해도 개발 중이며, 성능과 내구성 향상을 위해 음이온교환막과 전극 등의 원천 소재 개발에 집중하고 있음
- 향후, 해외 선진사 제품과 비교하여 국제적 경쟁력을 확보하기 위해서는, 장기적인 관점에서 순수(pure water) 분위기에서 작동하는 AEM 그린수소 생산시스템 기술 선점/우위가 매우 중요하며, 음이온교환막과 전극제조기술 및 대면적 MEA 공정기술, 스택 및 시스템 설계 및 운영 기술 등의 원천기술 확보를 위한 지속적인 연구개발이 필요함
 - 성능 및 내구성이 있는 음이온교환막 (전류밀도: 3A/cm², 열화율: 1μV/hr이하)
 - 소재·부품의 지속적인 물성 고도화
 - 스택 및 시스템 부품 등 내구성 극대화
 - 시스템 실증 다변화 및 안전성 확보
- AEM 수전해 그린수소 시스템은 다음과 같은 장점을 가지고, 향후 경제적이며 효율적인 그린수소 생산을 가능하게 하는 차세대 기술로 기대되고 있음
 - 부식성이 강한 알칼리 용액 대신 순수(DI Water)를 사용한 수전해
 - Pt, IrO₂ 등 귀금속이 아닌 Ni, Fe 등 비귀금속 촉매를 사용한 수전해
 - Ti-PTL를 대체하는 저가 다공성 물질확산층을 사용한 수전해
- AEM 수전해 기술은 상기 언급한 장점을 통해 기존 알칼리/PEM 수전해 기술의 단점(부식성이 높은 전해질 사용 및 다공성 가스차단막 사용에 따른 고압/변동부하 운전 제한(알칼리), 양성자 고분자막 사용에 따른 고가 귀금속 촉매 사용(PEM))을 극복할 수 있으나, 그 성능과 내구성을 향상시키기 위해 AEM 수전해용 고분자막, 이오노머, 촉매 등에 대한 기반기술 개발이 매우 필요함
 - 미국 로스알라모스 등에서 관련 연구 결과를 보고하고 있으며, 고분자막과 이오노머의 내구성은 저전류밀도 운전에서 200시간 정도로 보고되어 그 개선이 시급함 (아래 그림)

그림. AEM 수전해 최신 연구결과에 따른 성능 및 내구성 예



출처 : 미국 로스앨러모스 연구소, Nature Energy (5) 378-385 (2020)

- 고온수전해 기술은 미국의 Fuel Cell Energy에서 2 A/cm² 운전을 하는 등 고전류밀도 운전을 통한 성능 향상 연구가 지속되고 있고, 600°C 이하에서 1A/cm² 이상의 전류밀도로 운전하여 저온 구동에 따른 가용 소재군을 확대 (Fuel Cell Energy, PNNL)하려는 시도 등이 계속되고 있음. 수전해 스택 규모에 있어서는 단위셀 면적 100cm² 이상, 스택 용량 1 kW 이상의 소형 스택 실증이 이루어지고 있으며, 전극 및 스택 대형화에 따른 열 분포/스팀 분포/구성요소 균일화 등에 대한 연구 개발이 지속되고 있음. 이와 같은 고성능화/운전온도 저감/대형화를 통해 고온수전해 기술의 상업성을 높이고 향후 원자료를 포함하여 고온 열원과 연계된 수전해 기술로 활용될 수 있음

● 핵심기술 목표

핵심기술-세부기술별 기술수준 및 목표

| 핵심기술-세부기술 | 현재기술수준(Baseline) | 목표 |
|--|--|--|
| 핵심 효율 향상 및 가격 저감을 위한 그린수소 생산 원천 기술 개발 | 수소생산 전력량 55 kWh/kg (60% 효율, LHV), 생산압력: 30 bar, 부하변동 5-120%, 스택규모 1 MW, 내구성 5만시간, 시스템 가격 \$400-1000/kW | (2030) - AEM: 1 A/cm ² @ 1.8 V, 10 mV/khr, 시스템 가격: \$350-700/kW, 부하변동: 5-200% - 알카라인: 0.8 A/cm ² @ 1.8 V, 내구성 5 mV/khr, 시스템 가격 \$350-700/kW, 부하변동 10-150% - PEM: 2.5 A/cm ² @ 1.8 V, 내구성 5 mV/khr, 시스템 가격 \$400-850/kW, 부하변동 5-200%, PGM 촉매량: 0.8 mg/cm ² |

| 핵심기술-세부기술 | 현재기술수준(Baseline) | 목표 |
|---|--|---|
| | | (2050) - 공통목표: 3 A/cm ² @ 1.8 V, 내구성 1 mV/khr - 알카라인: 부하변동 5-200%, 시스템 가격: \$200/kW - AEM, PEM: 부하변동 5-300%, 시스템 가격: \$300/kW, PGM 촉매량: 0.2 mg/cm ² |
| 세부 PEM 수전해 그린수소 생산 기술 | 수소생산 전력량 55 kWh/kg (60% 효율, LHV), 생산압력: 30 bar, 부하변동 5-120%, 스택규모 1 MW, 내구성 5만시간, 시스템 가격 \$400-1000/kW | (2030) 2.5 A/cm ² @ 1.8 V, 내구성 5 mV/khr, 시스템 가격 \$400-850/kW, 부하변동 5-200%, PGM 촉매량: 0.8 mg/cm ² (2050) 3 A/cm ² @ 1.8 V, 내구성 1 mV/khr, 부하변동 5-300%, 시스템 가격: \$300/kW, PGM 촉매량: 0.2 mg/cm ² |
| 세부 알칼리 수전해 그린수소 생산 기술 | 수소생산 전력량 55 kWh/kg (60% 효율, LHV), 생산압력: 10-30 bar, 부하변동 20-100%, 스택규모 1 MW, 내구성 5만시간, 시스템 가격 \$400-1000/kW | (2030) 0.8 A/cm ² @ 1.8 V, 내구성 5 mV/khr, 시스템 가격 \$350-700/kW, 부하변동 5-150% (2050) 3 A/cm ² @ 1.8 V, 내구성 1 mV/khr, 부하변동 5-200%, 시스템 가격: \$200/kW |
| 세부 고내구성 AEM 및 전극제조 기술 (알칼리 전해질) | 수소생산 전력량 55 kWh/kg (60% 효율, LHV), 전류밀도 0.6 A/cm ² , 열화율 30~100μV/hr | (2030) 수소생산 전력량 49kWh/kg (68% 효율, LHV), 전류밀도 1 A/cm ² , 10μV/hr이하 (2050) 수소생산 전력량 42kWh/kg (78% 효율, LHV), 전류밀도 3 A/cm ² , 1μV/hr이하 |
| 세부 고압 고효율 수소생산용 스택 기술 (알칼리 전해질) | 생산압력: 30 bar, 전류밀도 0.4 A/cm ² , 부하변동 5-120% | (2030) 생산압력: 40 bar, 전류밀도 1 A/cm ² , 부하변동 5-150% (2050) 생산압력: 50 bar, 전류밀도 3 A/cm ² , 부하변동 5-200% |
| 세부 고효율 고내구 AEM 수소생산 시스템 기술 (알칼리 전해질) | 스택규모 2.5kW, 내구성 1만시간, 시스템 가격 \$1,500-3,000/kW | (2030) 스택규모 1 MW, 내구성 5만시간, 시스템 가격 \$350-700/kw (2050) 스택 3MW, 시스템 10 MW, 내구성 10만시간, 시스템 가격: \$300/kW |
| 세부 AEM 수전해 그린수소 생산 기술 (순수 전해질) | 전류밀도 0.5 A/cm ² @ 2V, 내구성 160 시간 | (2030) 수소생산 전력량 49kWh/kg (68% 효율, LHV), 전류밀도: 1 A/cm ² @ 1.8 V, 10 mV/khr, 시스템 가격: |

| 핵심기술-세부기술 | 현재기술수준(Baseline) | 목표 |
|----------------------------|---|---|
| | | \$350-700/kW, 부하변동: 5-200% (2050) 수소생산 전력량 42kWh/kg (78% 효율, LHV), 전류밀도: 3 A/cm ² @ 1.8 V, 내구성 1 mV/khr, 부하변동 5-300%, 시스템 가격: \$300/kW, PGM 촉매량: 0.2 mg/cm ² |
| 세부 고온수전해 그린수소 생산 기술 | 전류밀도 0.9 A/cm ² @ $\eta = 0.2V$, 열화율 10 mV/kh 이상, 운전온도 700°C 이상 | (2030) 전류밀도 0.9 A/cm ² @ 1.4 V, 열화율 8 mV/kh 이하, 운전온도 600°C 이하 (2050) 전류밀도 1 A/cm ² @ 1.4 V, 열화율 4 mV/kh 이하, 운전온도 550°C 이하 |

세부기술 : PEM 수전해 그린수소 생산 기술

- (기술정의) 고분자전해질막(PEM) 수전해 그린수소 생산 시스템은 수전해 장치 중 양이온 전도 고분자막을 수소생산전극과 산소생산전극 사이의 이온전달체 및 가스차단막으로 사용하는 장치임
- (필요성) PEM 수전해 그린수소 생산 시스템은 현재 고가의 백금, 이리듐 촉매, 티타늄 확산체 및 유로, 불소계 전해질막 등을 사용하여 다른 수전해 기술에 비해 경제성이 떨어지는 문제가 있음. 재생에너지 등에 연계한 PEM 수전해 그린수소 생산 기술을 대량보급하기 위한 경제성 및 안전성을 확보하기 위해 귀금속 촉매 사용량 절감, 티타늄 PTL 가공성 향상 및 대체 소재 발굴 포함 소재·부품의 지속적인 물성 고도화, 촉매, 고분자막, 시스템 부품 등 내구성 극대화 등에 대한 연구개발이 필요함
- 고효율 PEM 수전해 그린수소 생산을 위해, 현재 상업적으로 사용 중인 175 um 두께의 불소계 이온전달막 두께를 50 um 이하로 줄여 겹보기 저항을 3배 이상 감소 (0.07 ohm cm² 이하)시키며 차압운전과 변동부하 운전에 견딜수 있는 물리화학적 내구성을 갖춰야 함 (Tensile 강도 40 MPa 이상). 촉매 및 전극은 귀금속 사용량을 수소극/산소극에 더하여 0.2 mg/cm² 이하로 줄이며, 상기 고분자박막을 이용한 MEA 성능에서 3 A/cm²@1.8V를 만족시켜야 함. PTL은 가공성이 좋은 철-니켈 등 저가금속의 조성제어 및 표면개질을 통하여 경제성이 우수하며 내부식성이 탁월하여야 함. 이와 같은 고전류밀도 운전을 만족시키며 시스템 효율을 높이기 위해 섭씨 80도 이상의 운전에서 고분자막 및 전극 내구성은 스택 내구 4만시간을 만족시켜야 함 (이는 정격 전류밀도 운전 기준 열화율이 1 uV/hr 이하)

세부기술 : 알칼리 수전해 그린수소 생산 기술

- (기술정의) 알칼라인 용액을 전해질로 사용하여 수산화 이온(OH⁻)이 양극의 사이로 이동하면서 전기화학 반응을 통하여 물을 분해하여 수소/산소를 발생시키는 기술

- (필요성) 변동성과 간헐성이 높은 재생에너지에 대한 응답성, 비귀금속 소재 사용을 통한 경제성, 100년 넘게 운전되어 확보된 내구성을 확보한 가장 경제적이고 높은 기술 성숙도를 갖춘 그린수소 생산기술

세부기술 : 고내구성 AEM 및 전극제조 기술 (알칼리 전해질)

- (기술정의) 음이온교환막(AEM)은 음이온(hydroxyl ion(OH⁻)) 전도 고분자막과 비귀금속 수소생산전극 및 산소생산전극 그리고 기체확산층(GDL)로 구성된 막전극접합체(MEA)에서 수소를 생산하는 기술임
- (필요성) 음이온교환막은 가교화 및 복합화 등의 성능/내구성 향상, 저스웰링 및 기계적 강도 등의 제조공정 고도화가 필요하며, 전극 제조기술은 음이온교환막과 전극 내의 반응 활성점을 연결하는 통로를 설계하는 막전극접합체(MEA)의 중요기술로 촉매물질 바인더 역할을 하는 고전도성 이오노머가 적용된 전극화 기술이지만 활성과 내구성의 한계로 인해 이를 향상시키는 기술개발이 필요함

세부기술 : 효율 고내구 AEM 수소생산 시스템 기술 (알칼리 전해질)

- (기술정의) AEM 수소생산시스템은 음이온교환막(AEM) 수전해 스택과 액체펌프, 기액분리기 등으로 구성된 전해질 순환부와 기액분리부, Deoxo, 재생형 흡착기, 열교환기 등으로 구성된 수소생산부와 수전해 스택에 DC전원을 공급하는 가변형 전원공급부 및 제어안전 기기로 구성됨
- (필요성) AEM 수소생산시스템은 핵심 부품인 수전해 스택과 고효율 전원공급부와 시스템 기능 구성부품들로 구성되므로, 수전해 스택에서는 구성 부품들의 고내구성과 운전환경에 적합한 분리판, 집전체, 가스켓 및 엔드플레이트의 설계기술 및 고효율·저가형 가변형 전원공급부 기술개발이 필요하고, 저농도 알칼리 전해질에 적합한 기액분리기, 열교환기, 재생형 흡착기 등의 기능부품 모듈화 기술개발과 수소/산소 혼합 방지 설계기술과 비가역 열화 최소화 운전알고리즘 기술개발이 필요하며, 상기 시스템의 핵심 부품인 수전해스택과 BOP류 등의 고효율, 고내구성 및 고안전성 기술이 필요함

세부기술 : AEM 수전해 그린수소 생산 기술 (순수 전해질)

- (기술정의) 음이온 교환막(AEM) 수전해 그린수소 생산 시스템은 수전해 장치 중 음이온 전도 고분자막을 수소생산전극과 산소생산전극 사이의 이온전달체 및 가스차단막으로 사용하는 장치임
- (필요성) AEM 수전해 그린수소 생산 시스템은 비귀금속 촉매 및 저가의 유로를 사용하는 알카라인 수전해의 장점과 순수를 사용하여 전해질 관리가 쉽고, 넓은 변동부하 운전과 수소/산소극 사이의 차압운전이 가능한 PEM 수전해의 장점을 모두 가질 수 있는 차세대 수전해 기술로 여겨지고 있음. 이와 같은 장점을 실현하기 위해 상기 언급한 저가 요소 부품을 사용한 AEM 그린수소생산 기술이 연구개발의 초기단계에 있으나, 순수 전해질과 비귀금속 촉매를 사용하였을 경우 아직 그 성능과 내구성이 다른 수전해 기술에 비해 크게 떨어짐. 이에, 재생에너지 연계 그린수소 생산의 경제성과

활용성을 높이기 위한 도약형 기술로 순수 전해질을 사용한 AEM 수전해 그린수소 생산 장치의 요소부품과 반응기에 대한 지속적인 기술개발이 필요함

세부기술 : 고온수전해 그린수소 생산 기술(SOEC)

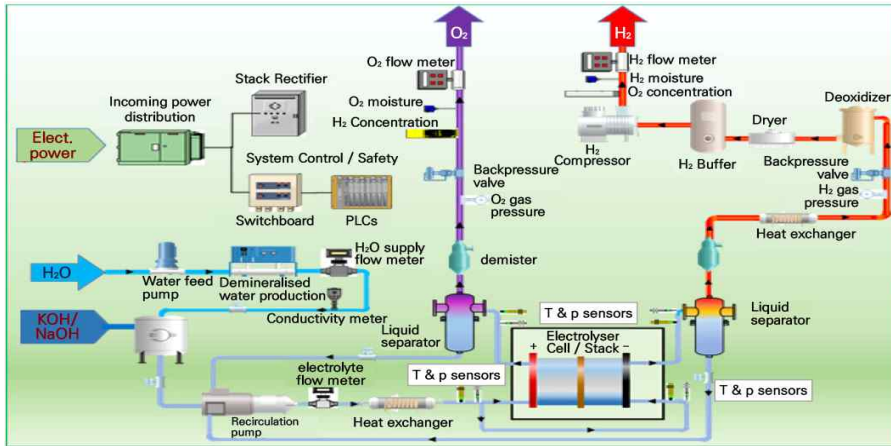
- (기술정의) 고온수전해 그린수소 생산 시스템은 수전해 장치 중 섭씨 수백도의 고온에서 이온 전도 무기질막을 수소생산전극과 산소생산전극 사이의 이온전달체 및 가스차단막으로 사용하는 장치임
- (필요성) 고온수전해(SOEC) 기술은 고온 전기화학 반응에 필요한 전력이 저온 수전해에 비해 작고, 저가의 전극과 전해질막을 사용하여 장치 경제성이 높으며 고품질의 열원(600-800℃)을 제공하여 열효율을 포함한 시스템 효율이 높은 등 장점이 많음. 그러나 아직 기초연구단계의 기술로, 이와 같은 장점을 실현하고 고온 수전해 기술을 상용화하기 위해 전극-전해질막-유로 등의 내구성을 높이고, 운전온도를 600℃ 이하로 낮추어 가용한 소재군을 넓히고, 전극과 스택을 대면적/대형화 하는 등의 연구개발이 필요함
- 고효율 SOEC 그린수소 생산을 위해, 현재 상업적으로 사용 중인 전해질막의 두께를 20 um 이하로 줄여 겹보기 저항을 감소시키고, 고온 운전에서도 수만시간을 견딜수 있는 물리화학적 내구성을 갖춰야 함. 촉매 및 전극은 현행 비귀금속 전극을 사용하면서도, 섭씨 550도 이하의 낮은 온도에서도 상기 박막전해질막을 사용한 MEA 성능에서 1 A/cm²@1.4V를 만족시켜야 함. 내부식성이 탁월한 전극/전해질막/유로 부품을 사용하면서 100 cm² 이상의 면적에서 균질한 품질이 나오는 반응기를 제작하고, 운전시 온도 분포가 고르고 스택 등이 균일하게 전달될 수 있어야 함. 이와 같이 운전온도를 낮추어 시스템 운전 가능 범위를 넓히고 내구성을 높이면서도 고전류밀도 운전을 만족시켜 시스템 효율을 높이고, 스택 열화율은 4 mV/khr 이하를 만족시켜야 함
- 고온 열원, 예를 들어 경수로와 고온 수소생산설비를 연계하는 설비를 효율적으로 구성하여 안정적인 수소생산시스템 구축 필요

핵심기술 2 알칼라인 그린수소 생산 시스템

기술개요

- 알칼라인 수전해 : 직류전원을 전극에 인가하고 물(H₂O)을 분해하여 산화전극에서는 산화반응을 통해 산소가 발생하고, 환원전극에서는 환원반응을 통해 수소를 생산하는 기술로서 격막과 수산화이온(OH⁻)의 전도성을 갖는 액체 전해질을 사용하는 기술
- Ni/Fe 기반 전이금속을 기반으로 다양한 전이금속을 촉매/전극으로 사용할 수 있고 내구성이 입증되어 현재 가장 경제적으로 수소생산이 가능한 기술
- 변동성이 높은 재생에너지와 직접 연계하여 가압 수소생산이 가능함

알칼라인 수전해 기술 모식도



출처 : EU HARMONISED PROTOCOLS FOR Testing of LOW TEMPERATURE WATER Electrolysers

● 기술 동향

- 일본: NEDO의 기술개발 프로젝트로 2017년에 시작하여 Toshiba 에너지 시스템에서 아사히 카세이에 알칼라인 수전해 시스템을 주문하여 2020년 3월에 세계 최대 규모인 10MW 시스템을 후쿠시마에서 운전하기 시작함. 1200 Nm³/hr의 수소생산량. 단일 스택. 2009년 11월 완공후 수소 품질 기준을 맞추기 위하여 시험 분전하다가 2020년 3월부터 운전하기 시작. 부하변동이 시험될 것이며 여름부터 본격 운전 예정
- Thyssenkrupp Industrial Solutions AG (독일)과 De Nora S.p.A.(이탈리아)는 현재 1GW급 알칼라인 수전해 장치 개발 가능한 수준으로 암모니아 또는 메탄올 생산 등 power to x 에 활용 예정
- 독일 전기 시장인 E.ON's virtual power plant에 연계하고 있으며 수소 플랜트의 건설을 단순화하고 경제성을 확보하기 위하여 조립식 스킵드 장착 모듈로 수전해 장치를 제공

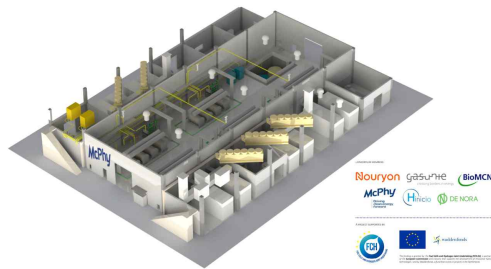
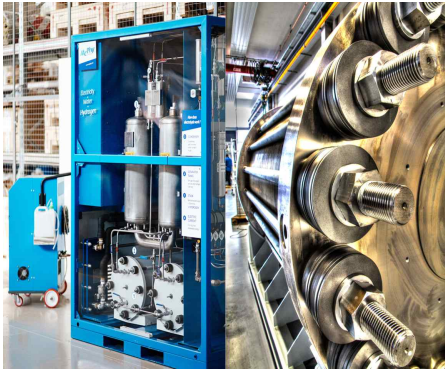
Thyssenkrupp 알칼라인 수전해



출처 : <https://www.chemengonline.com/>

- McPhy (프랑스)는 30 bar의 수소를 시간당 800 Nm³ 생산할 수 있는 상용 알칼라인 수전해 제품 보유하고 있으며 4 MW급 수전해 장치 모듈을 이용하여 100 MW급 이상의 알칼라인 수전해 설비 설치 기술 보유 중
- 유럽에서 시행되는 최초의 대규모 carbon-free 수소 프로젝트에서 McPhy에서 생산된 Augmented McLyzer를 활용하며 연간 3,000톤(20MW급)의 carbon-free의 수소를 생산할 것으로 예상
- Nouryon과 Gasunie와 협업하여 네덜란드 Delfzijl에 수전해 설비 구축하여 CO₂ 배출량을 연간 최대 27,000 톤 감소시킬 것으로 예상하며 EU의 보조금 1,100만 유로와 네덜란드의 프로젝트 투자 회사 Waddenfonds로부터 추가 500만 유로의 보조금을 확보

McPhy 사의 large scale 알칼라인 수전해 장치(McLyzer)



출처 : (좌), 네덜란드에 구축 중인 20MW급 그린 수소 생산 설비 (우)자료: <https://mcphy.com/en/press-releases/>

- 알칼라인 수소 생산 기술은 '15년 이후 정부 지원을 기초로 하여 촉매, 전극, 분리막, PTL, 등 소재 기초 소재는 랩 수준에서 세계 최고 수준의 결과를 도출해 내고 있음. 또한 MW급 실증을 통하여 재생에너지 연계 기술도 확보 중
- 정부의 수소 사업에 대한 투자 증가, 언론 홍보, 그린 수소 사업 시작에 대한 기대감으로 기업의 관심이 고조되고 있음
- 해외 선도국은 2000년부터 다양한 실증 경험을 통하여 기초 소재 연구와 실증 연구가 서로 유기적인 협력 관계가 잘 구축되어 기초 기술이 상용화되어 기술 발전에 기여하는 선순환 구조가 갖추어 짐
 - 국내 연구소, 대학에서 개발한 고성능 소재가 기업의 상용 제품에 더욱 활용되기 위해서는 산/학/연 협력 연구를 장려하기 위해서 신뢰할 수 있고 검증된 연구 결과에 대한 연구 과제 선정 및 평가 제도 정착이 요구됨
 - 국제 협력 과제를 적극 장려하여 해외 선도 기술의 빠른 도입이 필요
 - 기초 소재의 상용화를 위하여 대면적화 양상 공정 시스템 기술 개발 필요

● 핵심기술 목표

핵심기술-세부기술별 기술수준 및 목표

| 핵심기술-세부기술 | 현재기술수준(Baseline) | 목표 |
|---|--|--|
| 핵심 알칼라인 그린수소 생산 시스템 효율 및 내구성 향상 기술 | 수소생산 전력량 55 kWh/kg (60% 효율, LHV), 생산압력: 10-30 bar, 부하변동 20-100%, 스택규모 1 MW, 내구성 5만시간, 시스템 가격 \$400-1000/kW | (2030) 생산압력: 40 bar, 수소생산 전력량 48kWh/kg (67% 효율, LHV), 스택규모 3 MW, 내구성 8만시간, 부하변동 5-110%, 시스템 가격 \$200-850/kW (2050) 생산압력: 50 bar, 수소생산 전력량 45kWh/kg (71% 효율, LHV), 스택 10MW, 시스템 100 MW, 내구성 10만시간, 부하변동 5-300%, 시스템 가격: \$150-300/kW 상용화 |
| 세부 고효율 촉매/전극 및 다공성 격막 제조 기술 | 수소생산 전력량 51 kWh/kg (63% 효율, LHV), 전류밀도 0.8 A/cm ² | (2030) 수소생산 전력량 48kWh/kg (69% 효율, LHV), 전류밀도 0.8 A/cm ² (2050) 수소생산 전력량 45kWh/kg (74% 효율, LHV), 전류밀도 2 A/cm ² |
| 세부 고압 고효율 수소생산 스택 기술 | 생산압력: 30 bar, 전류밀도 2 A/cm ² , 부하변동 5-120% | (2030) 생산압력: 40 bar, 전류밀도 0.8 A/cm ² , 부하변동 5-150% (2050) 생산압력: 50 bar, 전류밀도 2 A/cm ² , 부하변동 5-200% |
| 세부 고효율 고내구 알칼라인 시스템 기술 | 스택규모 1 MW, 내구성 5만시간, 시스템 가격 \$400-1000/kW | (2030) 스택규모 3 MW, 내구성 8만시간, 시스템 가격 \$350-700/kW (2050) 스택 10MW, 시스템 100 MW, 내구성 10만시간, 시스템 가격: \$200/kW |

세부기술 : 고효율 촉매/전극 및 다공성 격막 제조 기술

- (기술정의) 알칼라인 수전해 시스템에서 일어나는 전기화학 반응이 유용한 속도로 진행되기 위해서 고효율 촉매가 코팅된 전극에서의 과전압과 다공성 격막에서의 물질전달 저항과 오믹 저항을 낮추기 위한 촉매/전극 및 다공성 격막 제조 기술
- (필요성) 알칼라인 수전해 장치에 사용되는 촉매는 니켈과 철 등 풍부하고 저렴한 전이금속을 사용함. 전해질 이동과 및 가스차단 역할을 하는 다공성 격막은 주로 나노입자/고분자 복합막이 사용되고 있으며, 전해질의 차압에 의한 투과도는 수전해의 유연성 및 안전에 영향을 미침. 전극 표면에 고효율 촉매가 안정적으로 정착하기 위한 코팅, 도금 등 기술이 필요함. 알칼라인 수전해 기술은 내구성, 대면적화, 및 경제성이 확보된 기술로써 전류밀도 향상을 위한 고효율 촉매 기술 개발, 고전도도 및 저가스투과도 다공성 격막 개발, 촉매/전극 대면적화 기술 개발이 그린수소 생산에 필수적임

- 고효율 알칼라인 수전해 그린수소 생산을 위해, 현재 상업적으로 사용 중인 500 um 두께의 나노입자/고분자 복합막 두께를 100 um 이하로 줄여 겔보기 저항을 3배 이상 감소 (<math><0.01 \text{ ohm cm}^2</math> 이하)시키며, 차압운전과 변동부하 운전에서 견딜수 있는 물리화학적 내구성을 갖춰야 함 (기체 투과점(bubble point pressure) 10bar 이상) 촉매 및 전극의 사용량 및 비용에 대한 제약은 비교적 적은 편이며 제로갭 조건에서 $2 \text{ A/cm}^2 @ 1.7\text{V}$ 를 만족시켜야 함

세부기술 : 고압 고효율 수소생산 스택 기술

- (기술정의) 변동성이 높은 재생에너지를 이용하여 알칼라인 수전해를 운전하기 위하여 오믹 저항과 물질 저항을 최소화하면서 가압에서 운전되는 최적 스택 기술 개발
- (필요성) 생산된 수소의 추후 저장 및 이송을 위하여 시스템 압력을 가압으로 유지해야 하며 동시에 영향을 받는 압력, 온도, 전류 흐름을 최적화 하기 위하여 셀 구조 및 스택 구조를 최적화 해야 함
- 고압 수소 생산을 위하여 MW급 가압 스택킹 기술 개발이 요구됨. 이를 위하여 셀 프레임 형상 최적화, 셀 프레임 사출 기술 개발, 전극 형상(평탄도, 균일도) 최적화, 전극/막/셀 프레임 스택킹 기술의 확보가 필수적임

세부기술 : 고효율 고내구 알칼라인 시스템 기술

- (기술정의) 변동성이 높은 재생에너지를 이용하여 알칼라인 수전해를 운전하기 위하여 수전해 부하 범위와 연계된 전력 변환 기술 개발 및 시스템 경제성 확보를 위한 양상 공정 기술 확보 및 GW급 시스템 운영 기술 개발
- (필요성) 수전해에 공급되는 변동성 및 간헐성을 가지는 재생에너지가 수전해의 운전 범위와 응답성 성능에 적합하게 공급되어야 안전하고 효율적으로 수전해가 작동될 수 있으므로 정류기의 최적화할 필요가 있음. 또한 그린수소 경제성 확보를 위하여 GW급 시스템 개발이 필요하고 동시에 양상 기술 확보를 통하여 저가화할 수 있음
- 수전해 장수명 및 고효율 기술 확보를 위하여 우선 부식성의 전해질의 농도를 낮추어 전극, 셀, 기타 BOP 부식 방지 및 수명 연장에 기여해야함. 또한 잦은 On-off시 동반되는 셀 프레임의 열 변형을 최소화 하기위한 열 관리 기술 개발이 필요함. 기액 분리 반응기 또는 셀 프레임 outlet, PTL에서 일어나는 버블 적체 현상 및 슬러깅 현상을 억제하기 위한 최적 설계 기술 확보가 필요

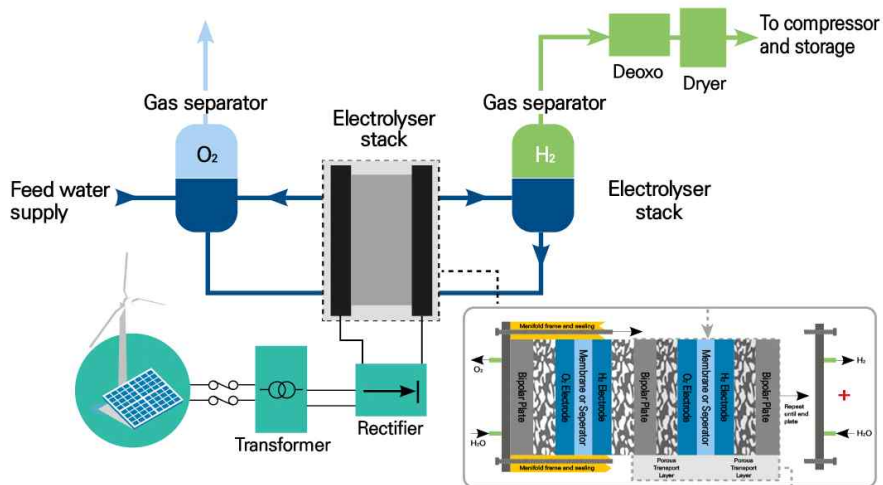
핵심기술 3 • 고분자전해질막 (PEM) 그린수소 생산 시스템

• 기술개요

- 고분자전해질막(PEM) 수전해 그린수소 생산 시스템: 전력으로 물을 분해하여 수소와 산소를 생산하는 수전해 장치 중 고분자막을 수소생산전극과 산소생산전극 사이의 이온전달체 및 가스차단막으로 사용하는 장치를 이용하는 그린수소 생산 시스템

- PEM 그린수소 생산 시스템은 순수(Deionized water)를 반응원료로 사용하여 재생에너지 변동부하 운전에 대응하는 가압 그린수소 생산이 가능함
- 고분자막을 수소생산전극과 산소생산전극 사이의 가스차단막으로 사용함으로써 큰 폭으로 변동하는 재생에너지 전력에 맞춘 운전 안정성이 뛰어나
- 가압 수소-상압 산소생산에 필요한 차압운전이 가능하여, 가압 수소생산 경제성이 높을 수 있음
- 그린수소 생산 기술 중 운전 전력밀도가 큰 장점이 있어 높은 수소생산밀도를 가질 수 있어 수소생산량 대비 반응기 크기가 작음. 수소생산 반응기에는 물이 순환하지 않는 Dry-시스템으로 시스템의 유동 제어가 상대적으로 단순하여 시스템이 간소함

PEM 수전해 시스템 모식도



출처 : “Green Hydrogen Cost Reduction”, International Renewable Energy Agency (2020)

● 기술 동향

- 수전해 그린수소 생산은 전세계 수소생산의 4%를 담당하고, '20년 9월 기준 전세계 약 320개 프로젝트(200MW)의 그린수소 생산 실증이 진행 중임. 2020년 이후 그린수소의 경쟁력 확보 및 탄소중립 실현을 위하여 EU중심으로 GW급 Power-to-gas (PtoG) 프로젝트가 기획/진행되고 있음. (프랑스 (6GW), 독일 (5GW), 포르투갈 (5GW), 스페인 (3GW) 등)
- 주요기업은 NEL(노르웨이), Siemens(독일), Cummins(미국) 등이 있으며, 현재 1-2 MW급 스택을 이용하여 최대 20 MW급 시스템을 운영하고 있음. 해외 수전해 기술 선진사에서는 고기능성 박막전해질막, 저귀금속 전극 등을 적용하여 성능과 경제성을 높인 차세대 요소기술 및 운전기술을 개발하고 있음

- 현재 국내 수전해 그린수소 생산 기술은 1~3MW급 개발 단계에 진입해 유럽 등 수전해 선진국과 비교하면 기술력에 있어 차이가 있음. 2020~2022년 제주도 풍력 에너지 연계 3MW 수전해 시스템의 실증연구가 진행되고 있음
- 수소 충전소 등 활용을 위한 중소형 시스템과 재생에너지 연계 대형 시스템 등 다양한 활용을 위한 PEM 수전해 시스템의 기반기술 개발도 진행 중임
- 촉매, 전극, PTL, 유로 등 소재/소자에서 선진기술 추격형 고효율 및 고내구화 연구가 꾸준히 진행되고 있으며 시스템 국산화 및 대형화 연구도 기초연구와 병행하여 진행되고 있음. 현재 촉매, PTL-유로의 기본 소재와 부품들은 전량 수입하고 있으며, 부품 국산화 및 상용화를 위한 양산기술 연구가 시급히 필요함
- 재생에너지 보급에 따라 대형 그린수소 생산에 대한 수요가 지속적으로 증가할 것으로 보이며, 이에 희귀금속 사용량 저감 및 변동부하 대응 시스템에 대한 지속적인 연구개발이 요구됨
- 향후 해외 선진사 제품과 비교하여 국제적 경쟁력을 확보하고, 재생에너지 등에 연계한 PEM 수전해 그린수소 생산 기술을 대량보급하기 위해, 경제성 제고와 내구성, 안전성을 확보하기 위해 지속적인 연구가 필요함
 - 귀금속 촉매 사용량 절감
 - 티타늄 PTL 가공성 향상 및 대체 소재 발굴 포함 소재·부품의 지속적인 물성 고도화
 - 촉매, 고분자막, 시스템 부품 등 내구성 극대화
 - 재생에너지 연계/수소 충전소용 시스템 운전 등 시스템 실증 다변화 및 안전성 제고

● 핵심기술 목표

핵심기술-세부기술별 기술수준 및 목표

| 핵심기술-세부기술 | 현재기술수준(Baseline) | 목표 |
|--|---|---|
| 핵심 PEM 그린수소 생산 시스템 효율 및 내구성 향상 기술 | 수소생산 전력량 55 kWh/kg(60% 효율, LHV), 생산압력: 30 bar, 부하변동 5-120%, 스택규모 1 MW, 내구성 5만시간, 시스템 가격 \$400-1000/kW | (2030) 생산압력: 40 bar, 수소생산 전력량 49kWh/kg (67% 효율, LHV), 스택규모 3 MW, 내구성 8만시간, 부하변동 5-200%, 시스템 가격 \$400-850/kW (2050) 생산압력: 100 bar, 수소생산 전력량 42kWh/kg (78% 효율, LHV), 스택 10MW, 시스템 100 MW, 내구성 10만시간, 부하변동 5-300%, 시스템 가격: \$300/kW 상용화 |
| 세부 고효율 촉매, 고분자막 및 전극 제조 기술 | 수소생산 전력량 55 kWh/kg (60% 효율, LHV), 전류밀도 2 A/cm ² | (2030) 수소생산 전력량 49kWh/kg (68% 효율, LHV), 전류밀도 2.5 A/cm ² @1.8V (2050) 수소생산 전력량 42kWh/kg (78% 효율, LHV), 전류밀도 3 A/cm ² @1.8V |
| 세부 고압 고효율 수소생산용 반응기 기술 | 생산압력: 30 bar, 전류밀도 2 A/cm ² , 부하변동 5-120% | (2030) 생산압력: 40 bar, 전류밀도 2.5 A/cm ² @1.8V, 부하변동 5-200% (2050) 생산압력: 100 bar, 전류밀도 3 A/cm ² @1.8V, 부하변동 5-300% |
| 세부 고효율 고내구 PEM 수소생산 시스템 기술 | 스택규모 1 MW, 내구성 5만 시간, 시스템 가격 \$400-1000/kW | (2030) 스택규모 3 MW, 내구성 8만 시간, 시스템 가격 \$400-850/kW (2050) 스택 10 MW, 시스템 100 MW, 내구성 10만 시간, 시스템 가격: \$300/kW |

세부기술 : 고효율 촉매, 고분자막 및 전극 제조 기술

- (기술정의) PEM 수전해 장치에서 수소생산, 산소생산의 반응속도를 높이기 위해 필요한 촉매와 이온전달 및 가스차단막으로 사용되는 고분자전해질막, 그리고 이를 이용하여 물과 가스의 유동이 원활하고 전자 및 이온 전달저항이 작은 전극을 제조하는 기술
- (필요성) PEM 수전해 장치에 사용되는 촉매는 백금과 이리듐과 같은 희귀금속으로 매장량이 작고 가격이 높음. 이온전달 및 가스차단막으로 사용되는 고분자전해질막은 주로 불소계 박막이 사용되고 있으며, PEM 수전해 성능과 안전에 매우 큰 영향을 끼침. 또한 이와 같은 촉매 및 고분자막을 사용하여 제작되는 수소생산 및 산소생산 전극은 유체의 유동, 전자 전도, 이온 전도 등을

복합적으로 고려하여 제작됨. PEM 수전해의 보급과 활용을 촉진시키기 위해서는 상기 요소들의 성능, 내구성, 경제성을 높여야 하며, 특히 귀금속 저감 혹은 비귀금속 촉매개발, 안전성이 높으면서도 이온전도도가 우수한 고분자 박막 개발, 그리고 이를 합친 고효율 다공성 전극개발은 그린수소 생산 전력량을 저감하고 효율 및 경제성을 향상시키는 필수 기반 기술임

- 고효율 PEM 수전해 그린수소 생산을 위해, 현재 상업적으로 사용 중인 175 um 두께의 불소계 이온전달막 두께를 50 um 이하로 줄여 겔보기 저항을 3배 이상 감소 (0.07 ohm cm^2 이하)시키며, 차압운전과 변동부하 운전에 견딜수 있는 물리화학적 내구성을 갖춰야 함 (Tensile 강도 40 MPa 이상). 촉매 및 전극은 귀금속 사용량을 수소극/산소극에 대하여 0.2 mg/cm^2 이하로 줄이며, 상기 고분자박막을 이용한 MEA 성능에서 $3 \text{ A/cm}^2 @ 1.8\text{V}$ 를 만족시켜야 함

세부기술 : 고압 고효율 수소생산용 반응기 기술

- (기술정의) PEM 수전해 그린수소 생산은 입력전력이 지속적으로 변하는 변동부하 아래 운전이 가능하며, 이때 수소의 압력을 높은 상태로 수전해반응기를 운전할 수 있음. 이때, 안전과 효율을 고려하여 PEM 수전해 운전의 기준 전압-전류에 대비 변동부하 운전폭 및 가압운전 범위가 정해짐
- (필요성) 수전해 시스템은 가압 운전 때 따른 효율 저하 및 안전을 고려해야 하며, 특히 가압 변동부하 운전에서 안전/성능/내구성이 크게 저하될 가능성이 있음. 그린수소생산을 위해서는 간헐성이 큰 재생에너지를 전력원으로 활용하는 것이 필수적이며, 이때 안전하고 효율적인 PEM 수전해 그린수소생산을 위해 높은 압력범위와 넓은 변동부하 운전범위를 가지는 스택 및 시스템을 개발하는 것이 PEM 수전해의 경제성을 높이는 데 중요함
- 반응기 요소 중 PTL 및 유로는 가공성이 좋은 철-니켈 등 저가금속의 조성제어 및 표면개질을 통하여 경제성이 우수하며 내부식성이 탁월하여야 함. 이와 같은 고전류밀도 운전을 만족시키며 시스템 효율을 높이기 위해 섭씨 80도 이상의 운전에서 스택 내구 4만시간을 만족시켜야 함 (이는 정격 전류밀도 운전 기준 열화율이 1 uV/hr 이하)

세부기술 : 고효율 고내구 PEM 수소생산 시스템 기술

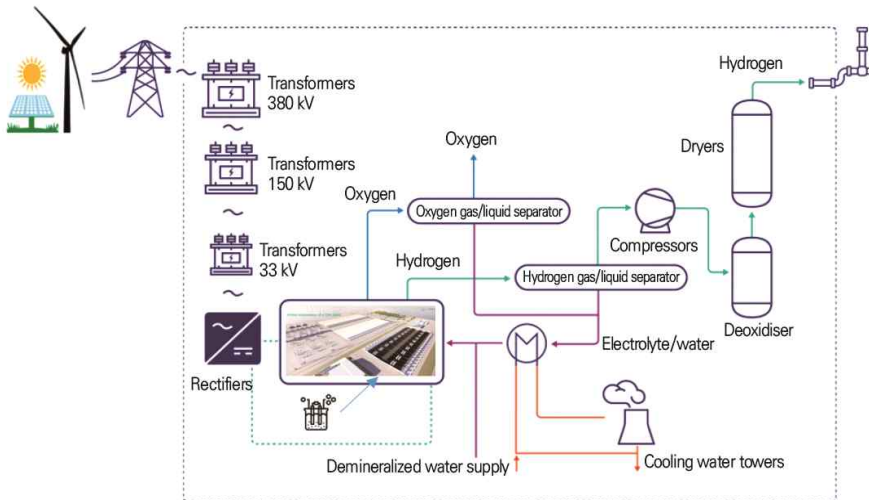
- (기술정의) PEM 수전해 시스템은 수전해 스택, 정제기, 전해질 공급장치, 전력조절기 등으로 이루어져 있음. 이때, PEM 수전해 그린수소 시스템의 효율, 내구성 등 경제성은 장치의 운전방법과 규모 등에 의해서 결정됨
- (필요성) PEM 수전해 스택의 규모를 적정수준으로 늘려 시스템 수준의 경제성을 높일 수 있음. 또한, 성능과 내구성이 개선된 요소 부품을 스택 및 시스템에 적용하고 적합한 운전법을 사용하여 가용연한을 늘리는 것은 그린수소 생산 수소 단가를 낮추기 위해 필수적임. 이를 위해, 시스템 설치와 운영의 다양한 변수를 고려한 고효율-고내구 수소생산 시스템 기술을 개발하는 것이 필요함
- 넓은 변동부하 운전폭 및 높은 차압운전을 경제성 있게 실현하기 위하여 수소생산 시스템의 BOP 부품 고도화가 필요하며, 수소생산의 안전을 위해 높은 신뢰성과 안전성이 요구됨. 수소생산 시스템은 최적화된 보조전력 및 전력제어 시스템을 활용하여 재생에너지 변동에 대응하며 안정적인 수소생산 시스템 구동을 확보함

핵심기술 4 • 재생에너지 연계 GW급 수전해 시스템 기술 개발 및 실증

● 기술개요

- 재생에너지 연계 그린 수소 생산 시스템은 재생에너지 전기를 이용하여, 물을 전기분해하고, 고순도의 수소를 생산하는 시스템임
- 수전해 시스템은 재생에너지 전력변환 시스템, 수전해 스택, 물 관리, 수소 정제, 제어 공정등으로 구성됨
- 그린 수소 생산 시스템에서 수소 생산 가격을 낮추기 위해서는 규모의 scale-up, 수전해 시스템내 스택외 주변 구성 요소의 고효율화 및 저가화, 재생 에너지의 타입별 운영 기술(제어 및 최적화)등이 확보되어야 함
- 재생에너지원인 태양광, onshore 및 offshore 풍력, 조력, 파력, 수력등은 특성들이 매우 다르기 때문에, 전력원에 대한 전력공급 방법 및 운영전략이 짐
- 그린 수소 생산 시스템은 재생에너지 이용율(turn down 비율) 최대화, 높은 반응성(cold start(off 상태에서 기준부하 까지 도달시간), hot start), 부하 추종성 등의 동특성 요구 기준을 만족해야함

재생에너지 연계 그린수소 공장 모식도



출처 : 4차 이노베이션 로드맵(2020.3)

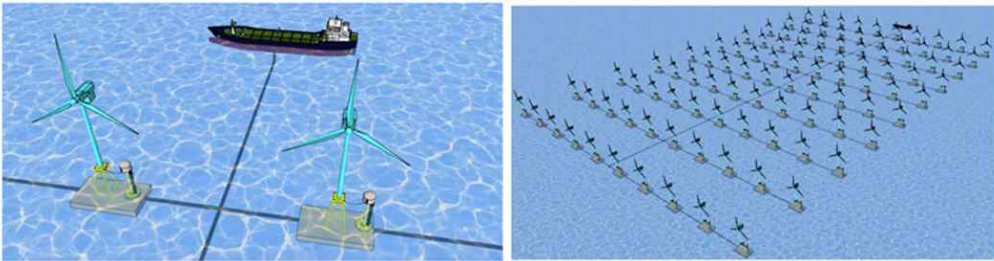
● 기술 동향

- 2016년 소금물 전기분해 기술을 보유한 기업이 alkali형 수소생산 시장에 진입(독일 thyssenkrupp사, 일본 ashi kasei)

- PEM과 알카라인 모두 단일 스택 규모는 1~2 MW 수준(NEL hydrognics, Siemens)이며, 일본의 ashi chemical은 10MW 실증중임
- PEM 대표기업으로는 Siemens(독일), ITM(영국), Giner(미국), 알카리는 thyssenkrupp(독일), ashi kasei(일본)등이며, PEM과 알카리 두가지 기술은 보유한 기업으로 Hydrogenics 및 Nel(노르웨이)가 있음
- 수소 생산 시스템에 공급하는 재생에너지 타입은 태양광, onshore 풍력 및 offshore 풍력이며, 현재 TRL 5이하의 Offshore 풍력을 이용하여 onsite 해저에서 수소를 생산하는(미 DOE, 수전해 설비비(capex) \$100/kW 목표) 연구가 진행중임. 현재 국내에서 수소 생산 시스템에 공급하는 재생에너지 타입은 태양광, onshore 풍력임

A One Gigawatt Offshore Windfarm

Scalable Electrolytic Systems for Renewable Hydrogen Production(NREL, 2018)



The Parallels with Offshore Gas & Oil
100 X 10 MW = 1 GW H2 Farm

출처 : NREL(2018)

- 수전해 시스템 가격은 스택이 50%, 나머지 50% 중 스택외 주변 장치 전력변환기, 수소 정제공정등이 대부분 차지하고 있음. 미 NREL에서는 주변장치의 가격 저감, 효율향상 및 동특성 개선 연구를 진행중임
- 현재 수전해 그린수소 스택은 1 MW급 개발 단계이며, 2020~2022년 제주도 풍력 에너지 연계 3MW 수전해 시스템의 실증연구가 진행되고 있음

● 핵심기술 목표

핵심기술-세부기술별 기술수준 및 목표

| 핵심기술-세부기술 | 현재기술수준(Baseline) | 목표 |
|--|---|--|
| 핵심 재생에너지 연계 GW급 수전해 시스템 기술 개발 및 실증 | 3MW급 재생에너지 연계 수전해 시스템, 30 bar, 부하변동 운전 5-120%, 시스템 내구성 10만 시간 | (2030)10 MW급 재생에너지 연계 수전해 시스템, 시스템 부하변동 운전 5-200%, 시스템 내구성 20만 시간 (2050)100 MW급 재생에너지 연계 수전해 시스템, 시스템 부하변동 운전 5-300%, 시스템 내구성 20만 시간 |
| 세부 수전해 시스템 내 BOP 고도화 및 동특성 향상 | BOP 전력량 8 kWh/kg, BOP 가격 \$800/kg, 부하변동 운전 5-120%, cold start: 1시간, Hot start: 5분, 시스템 내구성 10만 시간 | (2030) BOP 전력량 6 kWh/kg, BOP 가격 \$400/kg, 부하변동 운전 5-200%, cold start: 5분내, Hot start: 3분내, 시스템 내구성 20만 시간 (2050) BOP 전력량 4 kWh/kg, BOP 가격 \$200/kg, 부하변동 운전 5-300%, cold start: 1분내, Hot start: 1분내, 시스템 내구성 20만 시간 |
| 세부 재생에너지 연계 수소 생산 시스템 대형화 및 효율향상 기술 | 3MW급 재생에너지 연계 수전해 시스템 실증, 30 bar, 부하변동 운전, 5-120% | (2030) 10MW급 재생에너지 연계 수전해 시스템, 부하변동 운전 5-200% 대응 수전해 시스템 동특성 성능 및 열화 검증, 시스템 내구성 20만 시간 (2050) 100 MW급 재생에너지 연계 수전해 시스템, 부하변동 운전 5-300% 대응 수전해 시스템 동특성 성능 및 열화 검증, 시스템 내구성 20만 시간 |
| 세부 재생에너지 연계 수소 생산 시스템 내구 및 운전 안정화 기술 개발 | | (2030) 수전해 시스템 동특성 고려 장기 열화, 안전 검증: 40bar 가압-부하변동 5-200% 가혹환경 실증, 시스템 내구성 20만 시간 (2050) 수전해 시스템 동특성 고려 장기 열화, 안전 검증: 100bar 가압-부하변동 5-300% 가혹환경 실증, 시스템 내구성 20만 시간 |

세부기술 : 수전해 시스템 내 BOP 고도화 및 동특성 향상

- (기술정의) 수전해 시스템에서 스택을 제외한 BOP 공정(전력변환기, 산소제거기, 수분정제기, 물관리 공정)등에 대하여 에너지 소비량과 설치비 저감등을 위한 기술. 재생에너지 연계 수전해

시스템의 전력 간헐성 및 변동성 대응 기술

- (필요성) 수전해 시스템의 BOP는 전체 시스템에 대하여 가격은 50%, 에너지 효율은 90% 수준임. 이에, 각 단위공정에 대하여 산소 제거 공정(촉매 개발, 반응기 개발 및 운전 최적화), 수분 제거 공정(흡착제 개발, 흡착장치 및 운전 최적화), 전력 변환기 등에 대한 설비비 개선 및 효율 향상을 위한 연구가 필요함. 또한, 재생에너지와 수전해 시스템을 연계하는 경우, 수전해 시스템은 부하변동에 대응할 수 있는 능력이 요구됨. 요구 KPI(key performance index)는 빠른 cold start, hot start와 수전해 시스템의 정격전류 대비 최소-최대 부하변동 범위가 커야함. 수전해 시스템이 넓은 부하변동 범위에서 빠른 startup 특성을 가지게 되면, 재생에너지 이용율을 높이게 되어 수소 생산시 제조원가를 낮출 수 있음

세부기술 : 재생에너지 연계 수소 생산 시스템 대형화 및 효율향상 기술

- (기술정의) 대규모 재생전원 연계 수전해 수소생산 시스템의 규모화(10MW, 100 MW, 1000 MW)에 따른 scale-up 기술
- (필요성) 수소 생산에서의 제조 원가를 낮추기 위해 수소 생산 시스템이 대형화되고 있음. 2050년 최종 목표 1 GW (1000 MW) 수준의 수전해 plant에 대비한 스택의 병렬화 기술, BOP 단위 공정의 scaleup 기술, 구성요소 배치 최적화, 설치 및 운영 기술이 확보되어야 함

세부기술 : 재생에너지 연계 수소 생산 시스템 내구 및 운전 안정화 기술 개발

- (기술정의) 재생에너지 종류(전력공급의 특성)에 따라, 수전해 시스템의 입력전원 설계 및 시스템의 운영 방법 등에 따라 전해 시스템의 내구 및 운전 안정성 향상을 위한 운영 최적화 기술
- (필요성) 재생에너지는 종류가 다양하며, 재생에너지별 전력 패턴이 상이함. 재생에너지 종류 예 풍력, 태양광, 조력등의 부하특성에 적합한 전력변환, 재생에너지 이용률 최대화 방법(수전해 및 BOP 운전)이 요구됨. 이와 같은 재생에너지 연계 변동부하 운전에서 요소 부품과 장치의 내구성과 운전 안정성은 그 운영법에 큰 영향을 받음. 이에, 수전해 시스템이 재생에너지 이용율을 높이며 수소생산 시스템의 내구 및 운전 안정성을 담보할 수 있는 재생에너지 동특성 대응 수전해 운전 기술이 필요함

핵심기술 5 ● 저점형 중형 2톤/day 이상 블루수소 생산 기술 개발 실증 및 보급

● 기술개요

- (개요) 천연가스를 이용하여 추출방법으로 수소를 생산하는 과정에서 발생하는 이산화탄소를 포집하거나 천연가스를 직접 분해하여 수소와 탄소의 형태로 변환하여 공정. 기존 이산화탄소 포집을 적용하지 않은 천연가스 수증기 개질에 의한 수소 생산 시 발생 CO₂의 60%이상을 줄일 수 있음. (Well To Tank 개념에서 60%이며 일반적으로 채굴되어 국내로 도입된 천연가스의 경우 개질이나 분해공정에서 90%이상의 이산화탄소 포집하여야 함)

- 추출방법*에 의한 블루수소**생산 : 천연가스나 정제된 바이오가스***를 반응을 통해 합성가스로 변환하고 이를 전환, 정제하여 수소를 생산하고 생산과정에서 발생한 CO₂를 포집하는 공정

* 추출방법 : 천연가스를 물과 함께 촉매 반응(steam methane reforming)을 시키거나 산소 및 물과 함께 촉매 반응(Autothermal reforming)을 시켜 수소, 일산화탄소, 이산화탄소를 만들고 이를 다시 WGS(Water Gas Shift) 반응을 통해 일산화탄소를 수소와 이산화탄소로 전환하고 수소를 분리하여 수소를 생산하는 공정

** 블루수소: CCS가 적용되지 않은 천연가스수증기개질에 의한 수소 생산 시 발생 CO₂의 60%이상 줄인 수소를 Low carbon hydrogen으로 CerifHy에서는 정의함

*** 바이오가스 : 바이오가스를 정제한 메탄으로부터 생산된 수소는 별도의 CO₂의 포집이 없어도 블루수소로 간주

(필요성)

- 천연가스의 수증기개질을 통한 수소의 생산은 기술성숙도가 높아 CO₂ 포집기술과 함께 적용하여 대량/저가의 수소 공급 가능하여 국내 및 해외에서 기술수요가 매우 높은 기술임

- 거점형 중형 수증기 개질 기술은 개발 시 바이오가스를 활용한 청정수소의 생산 기술로 바로 적용할 수 있음

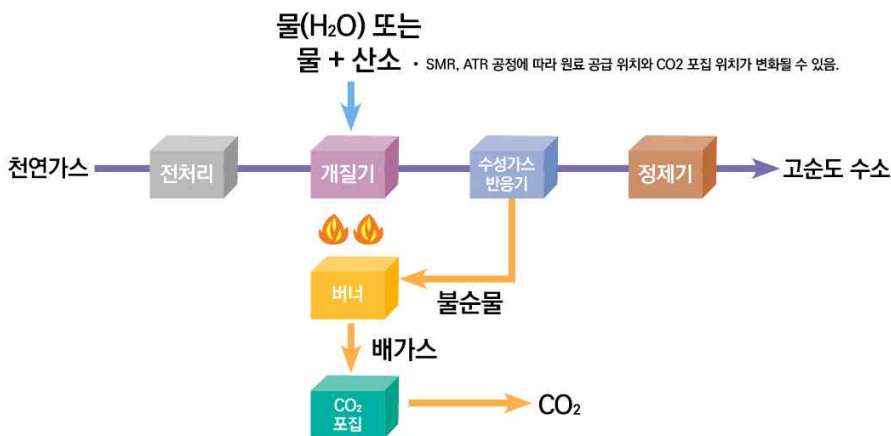
- 천연가스의 직접 열분해 기술은 온실가스 배출 없이 수소를 생산하는 공정

* 직접 천연가스 열분해 기술은 반응기 열원을 제외하고 수소와 탄소의 형태로만 생성되기 때문에 이산화탄소 배출이 없어 친환경적인 공정임

* 생성된 수소 1몰당 에너지 요구량은 천연가스 수증기 개질보다 낮은 에너지를 요구하며, 생성되는 고체 탄소의 경우 이차전지 소재, 타이어 첨가제, 수소 저장용기 등 다양한 산업에 쓰일 수 있어 수소 생산 비용을 절감할 수 있음

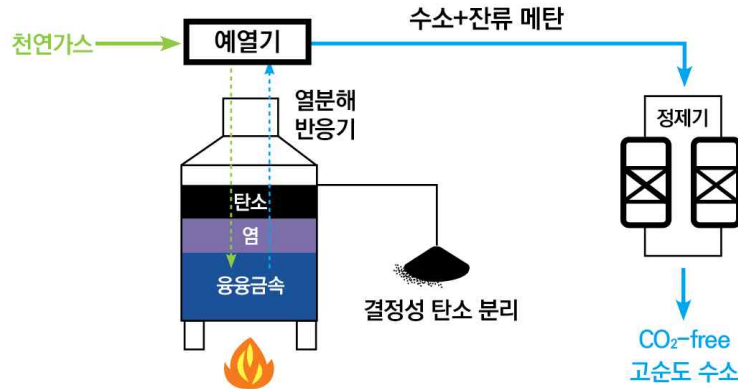
* 이산화탄소 포집 등의 공정이 생략되어 수소 생산 공정으로 단순화를 통해 비용을 절감할 수 있음

천연가스 추출방식에 의한 블루수소 생산 공정



출처 : 한국에너지기술연구원, 강경수

천연가스 직접분해에 의한 블루수소 생산 공정



출처 : KIST, 윤창원

● 기술 동향

(해외)

- 중형 (2,000 kg/day 이상) 추출 수소생산 유닛은 기존 산업용 수소생산 플랜트 형태의 제품으로 시공, 공급 중
 - * Linde(獨), Caloric(獨), Haldor Topsoe(덴마크) 등
 - * 대형(100 ton/day 이상) 산업용 공정의 설계를 스케일-다운한 방식으로 70% (HHV) 초반의 낮은 수소생산 효율을 보임
 - * Union Engineering(덴마크)는 Indura SA(칠레)의 메탄스팀개질 수소제조 공정 내 PSA off gas에서 CO₂를 회수하는 공정(FlashCO₂)을 적용하여 \$30/톤-CO₂ 이하로 CO₂를 회수함
 - * GTI(미국)는 반응과 동시에 고온 CO₂를 포집하는 흡착부과 메탄스팀개질 공정을 적용하여 \$16.8/톤-CO₂로 CO₂를 포집 가능하다고 보고함
- 중·대형 개질기의 CO₂ 포집 실증과 파일럿 수행 사례
 - * CO₂ 포집 1백만톤/년이상의 경우 Air Product의 Port Arthur Project(Texas, USA): PSA에서 CO₂를 분리하여 EOER에 이용, Shell의 Quest Project(Alberta, Canada) MDEA(Adip-X technology 적용)를 적용하여 CO₂를 포집하고 이를 saline aquifer에 저장
 - * CO₂ 포집 10만톤/년이상의 경우 Air Liquide의 Port Jerome Project(Normandy, France): 저온에서 막분리를 통해 CO₂ 포집, 포집 CO₂는 dry ice로 사용, Japan CCS company의 Tohokamai Project(Hokkaido, Japan): BASF의 MDEA 기술을 적용하여 CO₂를 포집하고 파일럿 해저 저장시설에 저장
- 천연가스 직접 열분해를 통해 중형 추출 수소생산 유닛 개발 진행 중
 - * Monolith(미국)의 경우 2012년부터 탄소를 친환경적으로 만드는 기술을 연구하였고, 2015년 미국내 최초로 파일럿 스케일 (400 kg/h) 탄소 생산 공정을 가지는 공장을 건설함. 2019년 이후로 수소의 중요성이 대두되면서 공장 site를 증설하며, 현재는 탄소와 수소를 생산 판매하고 있음. 플라즈마를 활용한 열분해 기술을 이용하여 천연가스를 탄소와 수소로 직접 분해하는 기술을 갖고 있으며, 탄소의 표면적이나 사이즈를 조절하여 다양한 고부가가치 탄소를 얻을 수 있음
 - * C-Zero(미국)의 경우 액상 용융 금속을 촉매로 이용하여 액상형태의 촉매와 고상형태의 탄소를 지속적으로

분리해서 촉매의 피독이 없이 연속 수소를 추출할 수 있는 반응기 및 통합 시스템을 구축 중임. 본 기술개발은 2022년 중형 (6,000 kg H₂/day) 스케일 급의 플랜트 개발을 목표로 하고 있음

- * Hazer Group(호주)의 경우, 철광석 기반의 촉매를 이용하여 천연가스로부터 수소와 흑연을 생산하는 기술을 구현한 바 있으며, ARENA로부터 자금을 유치 받아 파일럿 플랜트를 구축하고 있음
 - * KIT(독일) 및 BASF(독일) 에서도 메탄 직접 열분해 기술을 랩 스케일의 반응기 (0.012 m³/h 급)에서 평가 완료 후 산업 규모로 확장하기 위한 연구를 수행 중. 2025년 및 2030년 까지 각각 파일럿 플랜트 및 대형 스케일 플랜트 급 생산을 진행 중
 - * 미국에서는 ARPA-E 프로젝트를 통해 직접 메탄 열분해 기술에 대하여 촉매, 반응기, 공정 등 다양한 측면에서 연구 개발을 진행하고 있음
- 1) Molten-Salt Methane Pyrolysis Optimization Through in-situ Carbon Characterization and Reactor Design (UC Santa Barbara, 22억 연구비, 05.20~04.22)
 - 2) Co-Synthesis of Hydrogen and High-Value Carbon Products from Methane Pyrolysis (Stanford University, 27억 연구비, 04.20~04.22)
 - 3) High-throughput Methane Pyrolysis for Low-cost, Emissions-free Hydrogen (Palo Alto Research Center (PARC), 44억 연구비, 06.19~12.22)

(국내)

- 현장생산 방식의 소형(500~643 kg/day 급) 추출 수소생산 유닛은 스킵드 형태로 개발 된 바 있으며 보급 초기 단계
 - * 제이엔케이이더(주)는 2017~2019 기간 동안 산업부 지원으로 “수소총전소용 대용량(500 kg/day) 수소제조장치 개발” 과제 수행
 - * 한국에너지기술연구원은 과기정통부 지원으로 “500 kg/day급 가압형 모듈화 고순도 수소생산유닛 설계기술개발” 사업을 2017년부터 수행중이며 2020년 5월 ㈜원일티엔아이에 기술이전 완료
- 현장생산 방식의 중형(2,000kg/day급) 추출 수소생산 유닛과 CO₂ 포집 및 이용에 대한 연구개발이 2021년에 시작하여 2025년까지 한국에너지기술평가원을 통해 추진 중
- 국내 기업을 중심으로 수만/년~ 수십만톤/년 규모의 해외 상용 개질기와 CO₂ 포집기술을 활용한 블루수소 생산 계획을 제시하고 있음
- 직접 천연가스 열분해 기술을 활용한 국내 기술 개발은 기초 원천 단계
 - * 한국가스공사에서 마이크로웨이브 플라즈마 반응기를 이용해서 천연가스로부터 열분해 반응을 통해 카본블랙 및 수소의 제조공정에 대한 특허를 2003년에 출원하였음
 - * 한국에너지기술연구원에서는 나노촉매입자를 활용하여 메탄으로부터 탄소나노튜브와 수소 가스를 생산하는 연구를 진행된 바 있고, 고온에서 탄소를 촉매로 유동층의 형태로 메탄을 분해하는 기술도 보고하였음
 - * 한국세라믹기술원에서는 다양한 종류의 전이금속 고체 촉매를 활용하여 탄화수소가스를 직접 분해한 후 수소와 고체탄소를 제조하는 방법에 대한 특허를 출원한 바 있음
 - * 언급된 특허 외에도, 국내 연구진에서 직접적 메탄 열분해로부터 수소 및 탄소 생산 기술의 특허로는 약 19건이 출원됨. 주로 촉매를 사용하지 않는 열분해 반응, 플라즈마 반응, 탄소를 이용한 열분해 반응, 고체 촉매 등이 활용되었으며 응용 금속 촉매를 활용한 직접적 메탄 열분해의 관련 특허는 거의 없음. 뿐만 아니라 대부분의 연구는 메탄을 고온에서 수소와 탄소가 아닌, 수소와 에틸렌 (고부가가치 기체) 또는 화학물질로 가치가 높은 화합물 생산에 목적을 두고 있음
 - * 국내 연구진에서 직접적 메탄 열분해로부터 수소 및 탄소 생산 기술의 특허로는 약 19건이 출원됨. 그러나 기존의 특허는 촉매를 사용하지 않는 열분해 반응, 플라즈마 반응, 탄소를 이용한 열분해 반응, 고체 촉매 등을

활용하였으며 용융 금속 촉매를 활용한 직접적 메탄 열분해의 관련 특허는 거의 없음. 뿐만 아니라 대부분의 연구는 메탄을 고온에서 수소와 탄소가 아닌, 수소와 에틸렌 (고부가가치 기체) 또는 화학물질로 가치가 높은 화합물 생산에 목적을 두고 있음

* 한국과학기술연구원은 한국산업기술평가관리원 지원으로 “액상촉매 활용 신개념 CO₂-free 추출 수소 생산 기술” 사업을 2020년부터 수행 중이며, 본 과제를 통해 랩 스케일 규모 (<0.5 Nm³/h) 급의 CO₂-free 수소 생산 반응기 및 촉매 개발을 진행 중임

● 핵심기술 목표

핵심기술-세부기술별 기술수준 및 목표

| 핵심기술-세부기술 | 현재기술수준(Baseline) | 목표 |
|---|--|---|
| 핵심 거점형 2톤/day 이상 블루수소생산 기술개발 실증 및 보급 | CO ₂ 저감: 0% 효율: SMR 공정 80%(HHV) 규모: 0.5~0.64톤/day | (2040) CO ₂ 저감 : 천연가스 SMR 추출 대비 60%이상 저감 ^{a)} 효율: SMR 공정 80%(HHV)이상 규모: ≥ 2톤/day |
| 세부 2톤/day 이상 추출 수소 기술을 이용한 블루수소생산기술 | CO ₂ 저감: 0% 효율: SMR공정 80%(HHV) 규모: 0.5~0.64톤/day | (2030) CO ₂ 저감 : 천연가스 SMR 추출 대비 60%이상 저감 효율: SMR 공정 80%(HHV)이상 규모: ≥2 톤/day (2040) 저가화 및 실증 |
| 세부 천연가스 직접 분해 블루수소생산 기술 개발 | 효율: - 규모: 0.5 Nm ³ /h이하 | (2040) 효율 : 80%(HHV) 규모: ≥2 톤/day |

a) WTT(Well To Tank)과정에서 발생 CO₂를 포함하며 SMR 공정에서 90%이상 포집

세부기술 : 2톤/day 이상 추출 수소 기술을 이용한 블루수소* 생산 기술

- (기술정의) : 천연가스를 물과 함께 촉매 반응(SMR, Steam Methane Reforming)을 시키거나 산소 및 물과 함께 촉매 반응(ATR, AutoThermal Reforming)을 시켜 수소, 일산화탄소, 이산화탄소를 만들고 이를 다시 WGS(Water Gas Shift) 반응을 통해 일산화탄소를 수소와 이산화탄소로 전환하고 수소를 분리하여 수소를 생산하는 공정

* 블루수소: CCS가 적용되지 않은 천연가스수증기개질에 의한 수소 생산 시 발생 CO₂의 60%이상(Well To Tank과정에서 발생 CO₂를 포함하며 SMR 공정에서 는 90%이상 포집) 줄인 수소를 Low carbon hydrogen으로 CerifHy에서는 정의하며, 바이오가스를 정제한 메탄으로부터 생산된 수소는 별도의 CO₂의 포집이 없어도 블루수소로 간주함

- (필요성) : 천연가스의 수증기개질을 통한 수소의 생산은 기술성숙도가 높아 CO₂ 포집기술과 함께 적용하여 대량/저가의 수소 공급 가능하여 국내 및 해외에서 기술수요가 매우 높은 기술임. 또한 ≥ 2 톤/day 용량의 거점형 중형 수증기 개질 기술은 개발 시 바이오가스를 활용한 청정수소의 생산 기술로 바로 적용할 수 있음

세부기술 : 천연가스 직접 분해 블루수소생산 기술 개발

- (기술정의) 메탄으로부터 열화학적 반응을 이용하여 수소와 탄소를 생산하는 기술임. ($CH_4 \rightarrow 2 H_2 + C$) 고온 열분해 하여 수소와 탄소만 생성하므로 이산화탄소 발생이 전무한 반응임. 분해하는 방법에 있어 촉매를 사용하지 않고 1000도 이상의 온도에서 열분해, 플라즈마의 이용 혹은 촉매를 이용하는 방법 등으로 개발되어 옴. 촉매를 이용하는 경우 촉매의 종류로는 탄소, 고체 금속, 액상 용융 금속 등이 있음
- (필요성) 궁극적인 수소경제 사회 도달을 위해, 이산화탄소가 발생하지 않는 대규모의 수소 추출 기술 개발이 필수적임. 메탄 직접 열분해 기술은 수소의 높은 전환율 및 촉매 종류에 따라 생성되는 고상 탄소의 고부가가치화를 통해 값싼 수소 생산 기술을 목표할 수 있음. 또한 기존의 국내 LNG 공급망과 연계할 수 있는 높은 잠재력을 가진 기술임

라

기술확보 전략

● 그린수소 요소 기술 및 시스템 확보전략

- AEM 수전해에는 음이온 전도도가 우수하며 내구성과 가스차단성이 양이온 교환막과 견줄 수 있는 고분자전해질막이 필요함. 또한, 가스투과도가 높고 내구성이 높은 이오노머의 개발이 필수적이며, 이를 통해 재생에너지 연계 그린수소 생산에 필요한 저가-고효율 AEM 수전해 기술을 완성할 수 있음
- 알카라인 수전해는 경제성이 높은 기존 전극 및 요소부품이 존재하나, 재생에너지 연계 그린수소 생산에 그 활용성을 높이고 가압수소 생산 등을 통한 경제성을 더욱 제고하기 위하여 가스 차단성과 이온전도도가 높은 다공성 막 개발이 지속적으로 필요함
- PEM 수전해는 재생에너지 연계 변동부하 운전에 유리한 기술로 그린수소 생산에서의 활용이 기대되나, 현재 희귀금속인 이리듐과 백금, 고가의 티타늄 소재를 다량 사용하여 그 경제성과 보급확장에 어려움이 있음. 이에, 저귀금속-비귀금속 촉매 소재를 비롯하여 가공성이 우수한 저가의 유로 부품을 지속적으로 발굴-검증하고 개발하는 것이 필요함
- PEM 수전해 스택 및 시스템의 대형화에 따라 기존 양이온 교환막보다 얇으며 전도도가 우수한 전해질막 개발이 필요하며, 이를 통해 기술 활용성을 더욱 높일 수 있음
- 고온 수전해 기술 개발에 있어 현재 kW급 시스템 개발 및 실증 완료 필요하며, 향후 MW급으로 Scale-up 시스템 개발 및 실증 필요
- 상기 기술별 개발이 필요한 소재에 대하여, 표준 성능 및 내구에 관한 실증 검사와 인증을 담당할 수전해 검사 센터 건립이 필요함. 이를 통해, 소재-부품-장비 개발 개별기업의 개발부담을 경감하고, 해당 소재를 적용한 시스템의 안전성을 높일 수 있음
- 그린 수소 생산 시스템 관점에서의 요소 기술은 스택외 전력변환기, 수소정제 공정, 산소제거공정 및 안전 요소 기술등이 있음. 시스템의 구성요소들은 산학연 국내 기술로 기술 확보함과 동시에,

기개발되어 활용 중인 해외 선진기술에 대한 공동연구 협력 및 공동 실증사업을 통해 기술 개발 가속화 추진

- 그린 수소 생산 시스템의 운영 측면에서의 요소 기술은 재생에너지 별로 이용율 최대화를 위한 시스템 최적화 설계, 설치 및 운영기술이 있음. 시스템의 운영 기술은 산학연 국내 기술로 확보하는 방안과 함께, 해외에서 2021년 현재 진행 중 혹은 확보된 재생에너지 연계 그린수소 생산 자료와 노하우를 도입하여, 국내 기술개발을 가속화하는데 공동 협력할 수 있음
- 해외 대규모 재생에너지 전력생산 거점을 활용하여 국내 및 해외 그린수소생산 시스템에 대한 그린수소 생산 기술 국제공동 연구협력을 추진하여 제반기술에 대한 성숙도를 높임. 독일 프라운호퍼, 노르웨이 SINTEF, 네덜란드 ISPT, 미국 NREL 등 재생에너지 연계 그린수소 생산에 기술력을 가진 선진기관과 공동 연구협력 혹은 별개로 생산된 해외 그린수소 대하여 이송-저장을 포함한 대규모 실증을 추진하여 그린수소 생산-이송-저장에 대한 기술 개발을 조속히 완료하는 것을 추진함
- 수소법에 따른 그린수소 제조 수전해 장치에 대한 인증이나 검사 관련 하위 규정이나 코드 제정 시 인증 절차를 수행

● 블루수소 요소 기술 및 시스템 확보전략

- 블루수소 생산에 대하여 2021년 현재 한국에너지기술평가원의 개발 과제로 “수소가격 경쟁력 강화를 위한 2톤/day급 탄소배출 저감형 고효율 중대형 개질기 기술 개발이 수행 중임
- 블루수소 생산 시스템에 대한 설계 및 제작은 기존 고압가스안전법과 산업안전법 등 관련법에 따라 수행하며, 이때 핵심기술인 추출시스템에 대한 개발을 주로 수행하여 개발이 완료되거나 상용화된 PSA와 CO₂포집은 시스템 통합 운전을 통해 성능 확보함
- (시험) : ISO-16110-1 추출식 수소제조장치의 안전기준에 따라 720시간 이상 누적운전 자료 제출
- (인증) : KGS AH171(수소추출설비 제조의 시설, 기술, 검사 기준)에 따른 인증
- 수소법에 따른 추출식 수소제조 장치에 대한 인증이나 검사 관련 하위 규정이나 코드 제정 시 인증 절차를 수행

● 국내외 실증(Scale-up) 방안

- AEM-알칼리-PEM 수전해 시스템은 공통적으로 그린수소 생산에 있어 더 넓은 변동부하 운전과 가혹한 압력 및 온도에서의 작동을 요구받고 있음. 이에, 각 기술별로 개발된 개발소재를 적용한 스택-시스템에 대하여 다양한 가혹 조건에서의 수전해 시스템 안전도를 실증 및 검증할 안전시험 검증센터가 필요함
- 그린수소 생산은 재생에너지를 필요 전력의 일부 혹은 전부로 활용하는 것이 필요함. 이때 재생에너지 전력원의 부하변동성에 따른 수전해 시스템과 성능과 내구성 확보에는 지역별-계절별 특성을 고려한 실증이 필수적이며, 이를 담당하여 개발 요소를 적용한 수전해 시스템에 대해 개발

초기 재생에너지 연계 운전이력을 확보해 주고 실증을 담당할 그린수소 생산 시스템 검증센터가 필요함

- AEM-알칼리-PEM 수전해 시스템은 공통적으로 MW급 스케일업을 위해서 핵심 소재(전극, 분리막, PTL, 등) 양산 공정 확립이 요구됨. 대면적 소재의 균질성, 내구성, 신뢰성을 담보하기 위하여 최적 양산 공정 개발이 필요함
- 블루수소 생산 관련 연구개발 과제로 확보된 2 톤/day의 수소추출시스템의 scale-up이나 보급, 확산은 민간영역에서 수행하여 거점형 생산기지 사업에 적용하도록 유도

● 인프라 구축 방안

- 각종 그린수소 생산 기술별 신제품 실증, 안전시험, 및 그린수소 생산 시스템 검증센터의 운영과 더불어 해당 기술의 원천기술 개발을 위해, 권역별 그린수소 기술인력 양성을 위한 기관 지정 및 지원이 필요함. 이를 통해, 관련 기술 인력의 안정적 확보와 국내 기술 수준의 지속적 향상이 가능함
- 국내 재생에너지 자원의 활용 범위와 속도를 고려하여 해외생산 그린수소의 도입과 활용이 필요할 수 있음. 이에, 국제협력을 통해 각국의 재생에너지 활용 성숙도와 맞물린 관련 연구개발 및 실증의 공동협력을 추진하고 국산 그린수소 생산 시스템 수출 및 해외 그린수소 거점 확보를 추진함
- 국내 그린수소 생산은 풍력 및 태양광 등 재생에너지 전력원에 손쉽게 접근이 가능한 지역을 중심으로 확대 보급될 예정임. 이에, 재생에너지 보급에 따른 그린수소 생산용 전력 및 수소저장/운송 인프라 구축이 필요함. 또한, 그린수소 생산과 연계된 재생에너지 변동부하 추종을 효율적으로 하기 위해 그린수소 생산 거점을 단계적으로 확대하여 통합 운영할 필요가 있음
- 생산된 그린수소는 수개월 단위의 장주기-대규모 저장 및 활용이 필요할 것으로 예상되며, 이를 위해 그린수소 생산처와 수요처를 효율적으로 연결하며 안전성과 안정성이 우수한 저장-운송 인프라를 구축함
- 그린수소의 주 수요처는 재생 전력으로는 온실가스 감축이 비효율적인 분야인 항공, 해운, 철강, 시멘트 분야일 것이므로 상기 분야에 그린수소 활용 기술 개발 및 인프라 구축에 대한 추진 계획의 동기화를 통하여 유기적으로 고려되어야 함. 예를 들어 시멘트 분야에 활용되어 온실가스를 감축하기 위해서는 그린 수소 기반 산업 열 공급 기술 개발 추진 계획이 그린 수소 인프라 구축 일정과 동기화 되어 인프라 구성에 차질이 없도록 해야함
- 블루수소의 경우 소형수소추출 및 거점형 수소추출기 보급사업의 연장선에서 지자체와 민간의 사업 참여와 정부의 지원을 통한 인프라 구축과 보급을 진행. 특히 지역별 혐기발효가스나 매립가스의 발생지역에 적용하여 설비비용의 저감과 온실가스의 배출이 없는 블루수소 생산 인프라 확대 도모

마

탄소중립 기여 효과

● 탄소중립 기술과의 연계성

- 물을 재생에너지 전력으로 분해해 생산하는 그린수소는 탄소 배출이 전혀 없는 친환경 수소로써 수송, 산업공정 전반에서 화석연료를 대체하고 재생에너지의 안정적인 공급을 지원하는 에너지저장 역할로 탄소중립시대에 중요성과 그 역할이 커질 전망이다 (산업통상자원부, 2021.04.14.)
- 그린수소 생산은 기존 화석연료 개질에 의한 탄소배출을 최소 60% 이상 억제하는 기술로 그 중요성이 점점 커지고 있음. 수소는 제철, 암모니아 합성 등을 비롯하여 산업 전반에 중요하게 쓰이는 물질로서, 2020년 현재 전세계 수소 사용은 1975년에 비교하여 약 3배 늘어났으며, 이를 위해 전세계 천연가스 사용의 6%, 석탄 사용의 2%를 사용. 이에 생산되는 이산화탄소 양은 8억3천만 톤으로 영국과 인도네시아에서 배출되는 전체 이산화탄소량에 버금감(IEA, 2021). 그린수소의 활용은 2020년 기준 개질수소 대체로 연간 8억3천만톤의 이산화탄소 배출을 줄이고, 수소의 활용도 증가에 따라 탄소중립에 기여하는 정도는 더욱 커질 수 있음
- 대한민국 정부는 2050 탄소 중립 기본방향을 '지속가능한 녹색사회 실현을 위한 대한민국 2050 탄소중립 전략'으로 발표하였으며, 기본방향 1로, 깨끗하게 생산된 전기와 수소의 활용 확대를 들고 있음(환경부, 2020)
- 상기 2050 탄소중립 전략의 구체적 방안으로 기존 탄소자원 중심의 에너지 패러다임을 친환경 에너지원인 수소 중심으로 전환하며, 그린수소 공급 비율 확대 정책을 펼칠 것으로 선언함
- 또한 탄소중립 전략의 핵심인 재생에너지 보급에 있어, 재생에너지의 간헐성과 피크 부하를 안정적으로 관리하기 위한 그린수소의 역할을 강조함
- 매립지 가스나 음식물쓰레기 혐기발효조 등의 바이오가스 생산지에 거점형 수소추출기술을 적용하여 차량용 수소연료 생산 공급 (2020, 12. 탄소중립 추진전략)
- 포집 CO₂의 활용을 연계한 거점형 수소제조 시설 보급에 적용하여 이를 수소전기차나 버스 등에 활용함으로써 수송 분야에 탄소중립 기여(2020, 12. 탄소중립 추진전략)

● 탄소중립 기여도

- 그린수소 수전해 생산에 필요한 현재 소비전력 60 kWh/kg을 '40년 46 kWh/kg 으로 개선 시, 재생 에너지 소비 절감량 12 TWh, 온실가스 배출 감축량 522 만tonCO₂
* '40년 그린수소 생산량 80만톤, 0.466 kgCO₂eq/kWh(전력 배출계수)
- 소비전력 14 kWh/kg 감축 : 60 kWh/kg → 46 kWh/kg
- '40년 그린수소 생산량 80만톤
- 연간 온실가스 감축량: 522 만tonCO₂=14 kWh/kg×80 만톤×0.466 kg CO₂eq/kWh(전력 배출계수)

- 천연가스 증기개질(SMR) 탄소배출량 91g CO₂/MJ_H₂(10.92 kg_CO₂/kg_H₂)로 CertifHy에서 추정(천연가스 채굴과 이송과정 CO₂ 발생 포함)
 - H₂ LHV 33.3 kWh/kg = 120 MJ/kg
- 천연가스 채굴과 이송을 제외한 천연가스증기개질과정에서 발생하는 CO₂는 보고된 자료¹⁾에 따라 8.6 ~ 9.8 CO₂ kg/kg_H₂임. 평균 9 kg CO₂/kg_H₂로 가정하고 SMR과정에서 90% 발생 CO₂를 포함하면 0.9 kg CO₂/kg_H₂의 이산화탄소가 발생함. 하지만 좀 더 자세히 보면 천연가스의 채굴 및 이송과정 발생 CO₂, 개질기에 사용된 전기나 포집된 CO₂의 처리과정까지 고려하여야 함. 실제 CO₂포집 실증결과가 90%이상을 달성한 사례가 적으며 이러한 경우 CertifHy에서 제시한 60%의 저감한 4.4 kg_CO₂/kg_H₂는 달성이 쉽지 않음

Table 6: Summary of hydrogen production GHG emissions (CO₂e/MJ)

| Source | SMR | SMR + CCS | Electrolysis (Grid) | Commentary |
|-----------------------------|--------|-----------|---------------------|--|
| CONCAWE 2014 | 108 | 43 | 232 | WTT - Extraction/processing of natural gas, EU pipeline to UK, SMR, distribution by road tanker, compression at refuelling station, EU-electricity grid 2014 |
| DfT 2018 | 100 | 35 | 160 | WTT - Electrolysis uses 2017 grid factor, SMR based on CONCAWE 2014 data. |
| E4Tech 2019 | 61-90 | 24 | | SMR/SMR+CCS includes natural gas upstream emissions |
| CCC 2018 | 83-99 | 11-26 | 80-99 | Electrolysis only (based on 2017 grid) SMR includes natural gas upstream emissions |
| Balcombe et al 2019 | 80-96 | 6-41 | 138 | SMR/SMR+CCS includes natural gas upstream emissions. Electrolysis only |
| CertifHy 2019 | 90 | 45 | 220 | SMR/SMR+CCS includes natural gas upstream emissions. Electrolysis only, EU electricity grid 2014 |
| Mahmeti et al (2018) | 74-107 | | | SMR + upstream |

출처 : A review of well-to-tank GHG emission values and pathways for natural gas, biofuels and hydrogen. Prepared by Gloria Esposito Final report: January 2020, Low carbon vehicle partnership

- 탄소중립기여도를 계산하기 위해 간략화하여 SMR를 통한 수소생산시 9 kg/kg_H₂ 온실가스 발생을 가정하고 90% 포집을 가정하여 SMR+CCS 0.9 kg/kg_H₂ 가정
 - 2050 탄소중립위원회 탄소중립 시나리오 초안에서 1.5 백만톤 추출수소+CCUS 임으로 135만톤 내외의 온실가스 저감 예상

1) 김재경 (2019a), 수소경제 활성화 로드맵 수립 연구, 산업통상자원부, 맥킨지 (2018), 한국의 수소 국가 로드맵 : 한국의 미래 수소 경제 비전과 이를 달성하기 위한 로드맵 및 제언, Salkuyeh, Y. K., B. A. Saville and H. L. MacLean(2017), Techno-economic analysis and life cycle assessment of hydrogen production from natural gas using current and emerging technologies, International Journal of hydrogen energy Vol. 42, pp. 18894-18909.

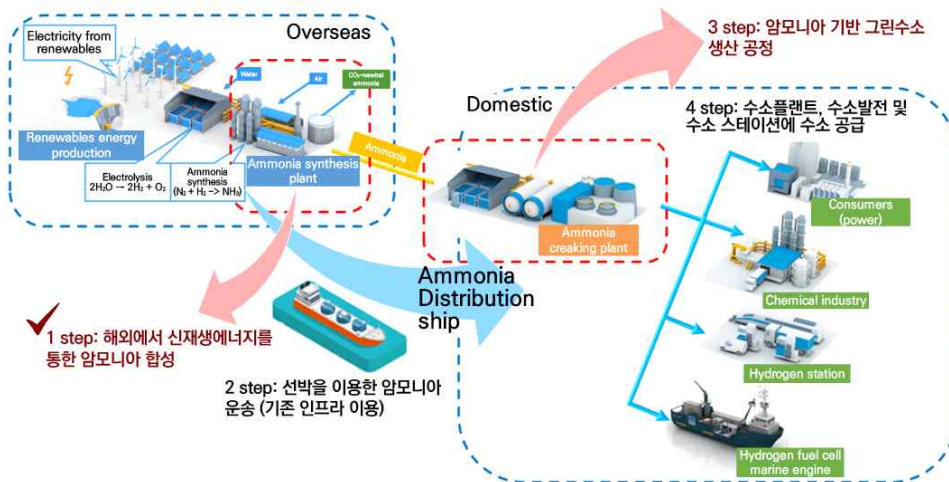
02 청정 암모니아 기반 고순도 그린수소 기술

가 전략방향 대상정의

● 개념 및 범위

- 그린 암모니아 기반 청정 수소 생산 플랜트 상용화 및 핵심요소 기술
- 저에너지 그린 암모니아 생산 플랜트 상용화 및 핵심요소 기술
- 전기화학 기반 그린 암모니아 합성 원천 기술 개발

그린 암모니아 생산, 이송, 수소 전환, 활용 기술 개요



출처 : 한국화학연구원 편집, 채호정

● 기술 요구사항

고효율 저에너지 암모니아-수소 생산 요소기술 개발 및 통합공정 개발

- (기술한계) 현재 높은 암모니아 분해 온도와 반응열에 따른 에너지 다소비와 화석연료 사용으로 인한 다량의 CO₂ 배출

- (이슈사항) 에너지 효율 향상과 CO₂-free를 위한 저에너지 분해 및 분리 시스템 기술과 탈탄소 기반 에너지 활용 기술이 필요
- (이슈사항) 암모니아 기반 수소 적용성 확장을 위해서는 환경안전 관련 기술 및 정책적 제도 보완 필요

저에너지 그린 암모니아 생산을 위한 합성 요소기술 개발 및 통합공정 개발

- (기술한계) 현재 150 - 300 bar의 고압에서 암모니아 생산을 위한 수소전환 에너지가 평균 10 MWh/ton-H₂ 이상으로 에너지 다소비
- (이슈사항) 중소 규모 암모니아 합성 시 현 시스템은 경제성 확보가 어려움
- (이슈사항) 그린암모니아 합성 에너지를 낮추기 위한 저압 그린암모니아 생산 기술 및 신재생에너지 연계 공정 기술 또는 전기화학 기반 원천 기술 개발이 필요

나 전략방향별 핵심기술

| 그린수소 | | 청정 암모니아 기반 고순도 그린수소 기술 | | | | | | | 목표 | | |
|---|----------|---|------|------|------|-----------------------------|-------|--------------------------------|------|-----------------------------|--------------------|
| 핵심기술 | Baseline | 단기 | | | | 중기 | | | 에너지 | CO ₂ 발생 | |
| | | 2022 | 2023 | 2024 | 2025 | ~2030 | ~2040 | ~2050 | | | |
| 고효율 저에너지 암모니아-수소 생산 요소기술 개발 및 통합공정 개발 • 규모: 20Nm ³ /h • 소모 에너지(대상) >10kWh/kgH ₂ (신응용열원에 잠열, 한걸, 에너지손실 등 공정 에너지 포함, LHV 기준 70%) • 수소가격 >10,000 원/kgH ₂ • CO ₂ 발생 >1.0kgCO ₂ /kgH ₂ | | (소, 부) 고효율 저에너지 촉매 및 반응기 기술 (195 / 550 °C) | | | | (사) 195 < 450 °C | | | 규모 | >100,000 Nm ³ /h | |
| | | (소, 부) 고효율 저에너지 분리/정제 기술 (사) >99.97% | | | | | | | | | 에너지 |
| | | (소, 부) Off-gas 혼소/탈탄소 열원 활용 및 에너지 효율화 | | | | (사) 3.0kWh/kgH ₂ | | | 수소가격 | <3,000원/kgH ₂ | |
| | | (사) 에너지 통합 및 통합공정 최적화 기술 (1,000 Nm ³ /h) | | | | (사) scale-up | | (사) >10,000 Nm ³ /h | | | CO ₂ 발생 |
| 저에너지 그린 암모니아 생산을 위한 암모니아 합성 요소기술 및 통합공정 개발 • 규모: lab, Scale • 소모 에너지: 10.8kWh/kgH ₂ • CO ₂ 발생 >1.0kgCO ₂ /kgNH ₃ | | (소, 부) 저압 암모니아 합성 촉매 및 반응 효율 향상 기술 | | | | (사) 1.0 g/gcat/hr | | | 규모 | >1,000TPD | |
| | | (소, 부) 신재생에너지 연계 저압 암모니아 합성 공정 기술 | | | | (사) 4kWh/kgH ₂ | | | | | 에너지 |
| | | (소, 사) 전기화학 기반 암모니아 합성 촉매 및 시스템 원천 기술 | | | | (사) scale-up | | (사) >10,000 Nm ³ /h | | CO ₂ 발생 | |
| | | (사) 통합 공정 최적화 기술 | | | | (사) 1TPD급 | | (사) >1,000T PD급 실증 | | | |

*Green Hydrogen Cost Reduction, IRENA, 2020

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

다

핵심기술 개요

핵심기술 1 • 고효율 저에너지 암모니아-수소 생산 요소기술 개발 및 통합공정 개발

● 기술개요

(개요)

- **그린 암모니아* 기반 수소생산**: 해외 생산 그린 암모니아를 국내로 도입 후, 저온에서 암모니아로부터 수소를 생산 및 분리/정제할 수 있는 기술

* 그린 암모니아: 신재생에너지 기반 그린 수소와 탈탄소 에너지로부터 생산된 암모니아

● 기술의 구성요소

- 구성요소: 저온, 고효율 암모니아 기반 **수소생산 촉매 및 반응기**, 연료전지-grade 수소 확보를 위한 **분리/정제 기술**, Off-gas*를 재순환하여 연소함으로써 반응열을 공급하는 **off-gas 혼소/탈탄소 열원 활용 및 에너지 효율화 기술**, 인프라 연계 안전을 고려한 **통합 시스템 설계 및 운영 기술**로 구성

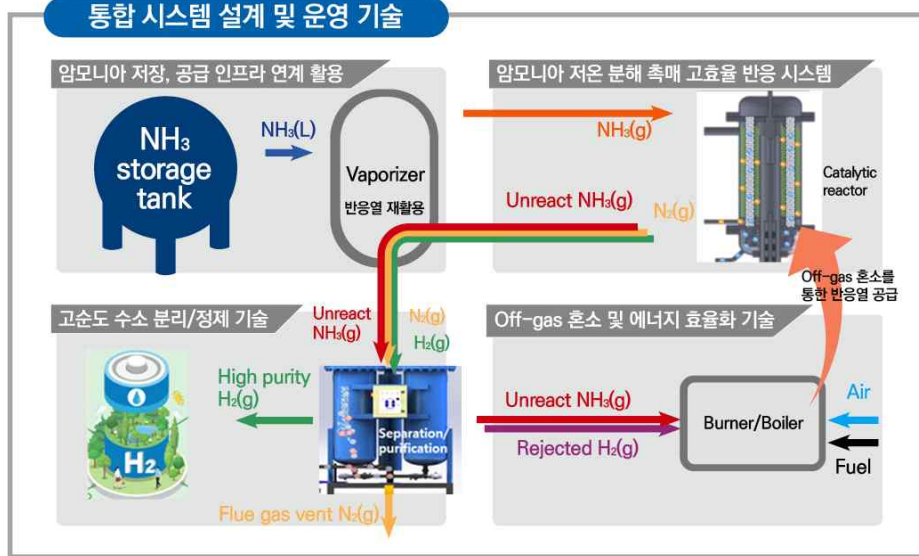
* Off-gas: 미반응 암모니아 또는 분리/정제되지 않은 수소

- 성능 인자: 수소 생산 **촉매의 성능**, 수소 분리/정제 기술의 **수소분리능**, 혼소 기술의 **통합공정 에너지 효율** 등이 성능에 영향을 주는 주된 요소로 작용

(필요성)

- 암모니아는 carbon-free 수소저장체 중 가장 높은 수소밀도를 가지며, 저장 및 운송이 용이하고 생산 및 수입에 대한 인프라가 이미 구축되어 있는 장점이 있음
- 암모니아를 활용한 수소 전환기술은 가장 안전하며 효율적인 그린수소 생산 방법으로 정부가 추진하는 지역분산형 저탄소에너지 정책인 그린뉴딜의 핵심전략으로 자리매김 가능
- 그린 암모니아 기반 수소 생산 시스템 실증 기술이 필요하며 각 요소기술에 대한 연계 및 최적화를 통해 에너지효율 증진이 필요함

그린 암모니아 기반 수소생산 공정 모식도



출처 : 한국화학연구원, 채호정

● 기술 동향

(해외)

- 일본, 미국 등 암모니아 기반 수소 생산 및 전력 생산 기술개발이 중, 소규모로 진행되고 있음
- 일본의 다이요닛산, 히로시마대학, 일본과학기술진흥기구의 **“암모니아 수소충전소 기반기술”** 공동연구를 통해 20 Nm³/h 규모의 암모니아 기반 수소 정제 시스템을 개발함
- 미국의 Bettergy사는 ARPA-E programe를 통해 **“Ammonia Cracking Membrane Reactor”** 연구를 수행하고 있으며, 촉매를 이용하여 암모니아를 낮은 온도에서 분리함과 동시에 Membrane을 통해 분해된 수소와 질소를 직접 분리할 수 있는 분리막 반응기를 개발중에 있음
- 호주 Fortescue사는 정부로부터 300만 달러의 지원을 받아 **“Renewable hydrogen mobility project”**를 수행하고 있으며, 200kg H₂/day 규모의 plant 실증연구를 수행중에 있음

(국내)

- 한국에너지기술연구소 주관 “그린 암모니아 기반 수소 생산 기술개발”의 연구가 진행되고 있으나, 연구개발 도입기 수준의 기초기술 연구임
- (주) 씨이에스를 주관 “암모니아 분해 수소 생산/정제 시스템 개발” 연구가 진행되고 있으며, 20 Nm³/hr 규모의 암모니아 개질기 및 수소정제기술을 개발하는 실증단계의 연구과제로 유일함

- 한국화학연구원 자체 펀드를 이용하여 벤치 규모 암모니아 분해 수소 생산 촉매 및 반응기 개발 연구
- 하지만 향후 수요증가에 대응하기 위해 해외 그린 암모니아 기반 대량 수소 생산 및 공급이 필요하여 암모니아 기반 대규모 거점 그린수소 생산을 위한 수소생산 플랜트 공정기술 및 인프라 확보가 필요함

● **핵심기술 목표**

핵심기술-세부기술별 기술수준 및 목표

| 핵심기술-세부기술 | 현재기술수준(Baseline) | 목표 |
|---|--|--|
| 핵심 고효율 저에너지 암모니아-수소 생산 요소기술 개발 및 통합공정 개발 | ~75% (LHV 기준) CO ₂ >1.0kgCO ₂ /kgH ₂ 20 Nm ³ /hr | (2030) 85%(LHV 기준), CO ₂ 50% 저감, 20,000~50,000 Nm ³ /hr (2040) 91% (LHV 기준), CO ₂ -free, 100,000 Nm ³ /hr (2050) 상용화, 보급확산 |
| 세부 고효율 저에너지 촉매 및 반응기 기술 *효율 향상 | T95 > 600 °C | (2030) T95 < 500 °C (2040) T95 < 450 °C |
| 세부 고효율 저에너지 분리/정제 기술 *순도 향상 | H ₂ >99%, NH ₃ <1ppm | (2030) H ₂ >99.97%, NH ₃ <0.1ppm (ISO 연료 품질 기준) |
| 세부 Off-gas 혼소/탈탄소 열원 활용 및 에너지 효율화 *에너지효율 향상 | 8.0kWh/kgH ₂ , ~75% (LHV 기준) CO ₂ >1.0kgCO ₂ /kgH ₂ | (2030) 5.0kWh/kgH ₂ ⁺ , 85% (LHV 기준) (2040) 3.0kWh/kgH ₂ ⁺⁺ , 91%(LHV 기준), CO ₂ -free |
| 세부 에너지 통합 및 통합공정 최적화 기술 *수소 생산 규모 향상 | 20 Nm ³ /hr | (2025) 1,000 Nm ³ /hr (2030) 20,000 ~ 50,000 Nm ³ /hr (2040) 100,000 Nm ³ /hr (2050) 상용화 ⁺⁺⁺ , 보급확산 |

⁺ 독립 공정 에너지 기준 목표, ⁺⁺ Complex 에너지 통합을 통한 에너지효율 최적화 기준 목표,
⁺⁺⁺ 상용화 에너지효율 목표 : < 5.0 kWh/kgH₂

세부기술 : 고효율 저에너지 촉매 및 반응기 기술

- (기술정의) 암모니아로부터 수소를 생산하기 위한 촉매 및 반응기 기술
- (필요성) 암모니아로부터 수소를 생산하기 위한 핵심 촉매 기술 및 반응기 기술로써 에너지 효율 증진을 위한 저온 구동형 암모니아 분해 수소 생산 촉매의 개발과 우수한 열전달 소재 및 열효율이 고려된 응용 공정별 최적 반응기 개발이 요구됨

세부기술 : 고효율 저에너지 분리/정제 기술

- (기술정의) 생산된 수소를 부산물인 질소와 미반응 암모니아로부터 분리 및 정제하여 고순도 수소를 확보하기 위한 기술
- (필요성) 암모니아 분해 촉매를 통해 생산된 수소의 순도를 높이기 위한 기술로써 에너지를 낮추고 공정 활용성을 고려한 질소와 암모니아를 분리 기술과 수소의 원활하고 응용성 확대를 위해 수소에 포함된 암모니아를 <0.1 ppm 이하로 낮추기 위한 정제 기술이 필요함

세부기술 : Off-gas 혼소/탈탄소 열원 활용 및 에너지 효율화 개발

- (기술정의) 탈탄소 계열의 연료를 사용하여 암모니아로부터 수소를 생산하기 위한 열원을 제공함으로써 전체공정의 CO₂ 배출 zero를 달성하기 위한 혼소 및 탈탄소 열원 활용 기술
- (필요성) 기존의 경우 암모니아 분해 촉매에 필요한 열원을 공급하기 위해 탄소계열의 연료를 사용함에 따라 공정 운전시 발생하는 CO₂가 배출되기 때문에, CO₂ 배출 zero의 달성과 완전한 그린수소를 생산하기 위해서는 궁극적으로 off-gas의 혼소 및 탈탄소 열원을 활용하기 위한 연소 및 열원 공급 시스템 기술 개발이 필요함

세부기술 : 에너지 통합 및 통합공정 최적화 기술

- (기술정의) 암모니아로부터 수소를 생산하기 위한 촉매 반응기, 분리 및 정제 기술, 열원 공급을 위한 off-gas 혼소/탈탄소 열원 활용 기술과 같은 각각의 요소기술을 통합하여 독립 상용공정 에너지효율을 최적화뿐만 아니라 미활용 외부 열원이나 신재생에너지 등과 연계한 에너지 효율 극대화를 위한 에너지 통합 공정기술
- (필요성) 각각의 개발된 요소기술을 통합하여 전체 시스템을 설계하고 각각의 에너지효율을 고려하여 독립적인 통합공정의 에너지 효율 최적화와 더불어 암모니아 분해 반응의 경우 흡열반응으로 필수적으로 요구되는 흡열에너지 대한 보안을 위하여 complex에서 손실되는 외부 열원이나 신재생 에너지와 연계한 통한 에너지 통합 및 공정 최적화 기술이 필요함

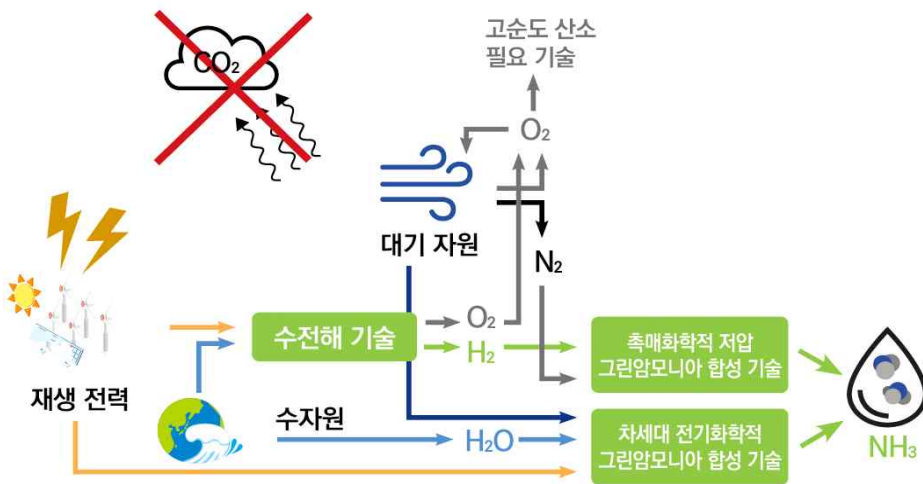
핵심기술 2 저에너지 그린 암모니아 생산을 위한 합성 요소기술 개발 및 통합공정 개발**기술개요****(개요)**

- 저가 그린 암모니아 생산을 위한 저압 촉매 및 고효율 시스템 기술 개발
- 저압 암모니아 합성 촉매 개발 (50bar 미만)
- 고효율 암모니아 생산 시스템 개발 (90% 이상)
- TPD급 그린 암모니아 생산 실증

(필요성)

- 현재 150 - 300 bar의 고압에서 암모니아로의 수소전환 에너지가 평균 10 MWh/ton-H₂ 이상으로 에너지 다소비
- 재생에너지 연계 시 수전해 수소 생산의 간헐성에 대응이 용이한 시스템 필요
- 중소규모 분산형 생산시 경제성 확보가 용이한 고효율 생산시스템 필요

탄소배출이 없는 그린 암모니아 생산 기술 개발



출처 : 한국에너지기술연구원, 윤형철

● 기술 동향

(해외)

- 일본 JGC와 AIST는 2019년에 수전해 수소와 연계하여 50 bar의 저압에서 최대 50 kg/day 그린 암모니아 합성 실증 성공 ('19)
- 미국 starfire energy와 idaho national lab에서는 수전해 연계하여 저압에서 10 kg/day 그린 암모니아 합성 실증 성공 ('19)
- 전기화학적 그린 암모니아 생산 기술의 경우 Wicha 주립대, Wisconsin-Madison 대학, 등 미국 대학 및 Brookhaven National Laboratory, Research Triangle Institute, 등 국가 연구소, 그리고 SAFCell, Giner, Storaenergy Tehchnologies 사 등에서 연구개발 중

(국내)

- 한국에너지기술연구원에서 저가 그린 암모니아 생산을 위한 저압 (50 bar 이하) 암모니아 합성 촉매 및 시스템 기술개발 중
- 전기화학적 암모니아 합성연구는 KIST, UNIST, DGIST, 한양대, 한국에너지기술연구원 등 연구실 단위의 소규모 연구개발 중

● 핵심기술 목표

핵심기술-세부기술별 기술수준 및 목표

| 핵심기술-세부기술 | 현재기술수준(Baseline) | 목표 |
|--|--|--|
| 핵심 저에너지 그린 암모니아 생산을 위한 합성 요소기술 개발 및 통합공정 개발 | (2023)2TPD (Starfire Energy 社, ARPA-E project) | (2030) 1 TPD 급 Pilot, 90% 효율 (2040) >1,000 TPD급 실증 (2050) >3,000 TPD급 상용화, 국내외 보급 확대 |
| 세부 저압 암모니아 합성 촉매 및 반응 효율 향상 기술 | 암모니아 합성률: 0.6 g/gcat/hr 암모니아 합성압력: 50 bar | (2030)>0.8 g/gcat/hr (@50 bar) (2040)>1.0 g/gcat/hr (@50 bar) |
| 세부 신재생에너지 연계 암모니아 합성 공정 기술 | 10.0kWh/kgH ₂ | (2030) 5kWh/kgH ₂ (2040) 4kWh/kgH ₂ , CO ₂ Free |
| 세부 전기화학 기반 암모니아 합성 촉매 및 시스템 원천 기술 | 전기화학 시스템 생산속도: 7.63 μmol/cm ² /h | (2030) 전기화학 시스템 생산속도: 6.12 mg/cm ² /h (2040) 전기화학 시스템 생산속도: 61.2 mg/cm ² /h |
| 세부 통합 공정 최적화 기술 | 없음 | (2030) 1TPD급 Pilot 플랜트 (2040) >1,000 TPD급 실증 (2050) >3,000 TPD급 상용화, 국내외 보급 확대 |

세부기술 : 저압 암모니아 합성 촉매 및 반응 효율 향상 기술

- (기술정의) 저압에서 암모니아를 합성하기 위한 촉매 및 반응기 기술
- (필요성) 기존 하버-보쉬 공정은 200기압 이상의 높은 압력에서 반응이 이루어짐으로 에너지 소모가 매우 큼, 따라서 소요되는 에너지를 낮추기 위해서 반응 압력을 50기압 이하에서도 활성이 높은 촉매와 반응기를 개발이 요구됨

세부기술 : 신재생에너지 연계 암모니아 합성 공정 기술

- (기술정의) 신재생에너지 연계 및 공정 에너지 최소화와 탈탄소 에너지원을 활용하여 전체공정의 CO₂ 배출 zero를 달성하기 위한 시스템 개발 기술
- (필요성) 기존의 경우 암모니아 공정 운전에서 사용되는 에너지나 반응 시작 또는 재가동 시 필요한 열원을 공급하기 위해 탄소계열의 연료를 사용함에 따라 CO₂가 배출되기 때문에, CO₂ 배출 zero의 달성과 완전한 그린암모니아 생산하기 위해서는 궁극적으로 신재생에너지 활용 및 공정에너지 최소화와 탈탄소 에너지를 활용하기 위한 시스템 개발이 필요함

세부기술 : 전기화학 기반 암모니아 합성 촉매 및 시스템 원천 기술

- (기술정의) 전기화학 기반 암모니아 합성을 위한 촉매 및 시스템 효율 향상 기술
- (필요성) 현재의 전기화학에 의한 암모니아 합성은 그 수율이 매우 낮은 단계로 이를 극복하기 위한 핵심 기술이 전극촉매의 효율과 시스템 효율 향상이 가장 중요하므로 이에 대한 원천기술 개발이 필요함

세부기술 : 통합공정 최적화 기술

- (기술정의) 그린암모니아 생산을 위하여 촉매 반응기 및 각각의 요소기술을 통합하여 에너지효율을 최적화할 뿐만 아니라 신재생에너지와 연계한 통합 상용공정 개발 기술
- (필요성) 각각의 개발된 요소기술을 통합하여 전체 시스템을 설계하고 각각의 에너지효율을 고려하여 최종적인 통합공정의 설계와 더불어 시스템 scale-up에 따른 공정 통합 및 공정 최적화 기술

라

기술확보 전략

● 소재-부품-장비 확보전략

- (소재) 기 확보된 저온 구동형 암모니아 분해 수소생산 촉매 소재, 고순도 수소 확보를 위한 미반응 암모니아 및 질소 분리/정제 요소기술의 해외 특허를 확보하고 이를 활용하여 실증과 상용화를 추진과 더불어 촉매 소재 개질을 통한 신규 촉매 소재의 원천 특허 확보 및 에너지효율 극대화
- (소재) 해외 암모니아 생산 기업과 저압 암모니아 합성 촉매 원천 및 양산 기술 확보를 위해 협동 연구
- (부품) 암모니아 공급을 위한 암모니아 기화기, Off-gas의 혼소를 위한 재순환 장치 부품, Off-gas 혼소 및 탈탄소 열원을 이용한 반응열 공급 장치, 열효율이 고려된 반응가스 및 배가스 라인 등의 핵심부품 개발
- (장비) 열효율이 고려된 암모니아 분해 수소 생산 촉매 반응기, Off-gas 혼소 및 탈탄소 연료를

사용하기 위한 연소 및 열원 공급 장치, 고순도 수소 확보를 위한 분리/정제 반응기 등의 해외 특허를 확보하고 각각의 요소 장비들의 연계를 통해 에너지효율을 극대화

● 시스템 확보전략

- (설계·제작) 소재 부품 장비 등 개발된 각 요소기술에 대해 시스템 설계 및 상세 제작을 암모니아에 대한 인프라가 구축된 산업체(기업)에서 진행하고 이에 대한 이론적 효율 및 설계 반영시 필요한 디자인 컨셉 등은 학교 또는 연구기관에서 실험 및 시뮬레이션 등을 통해 최적화 설계가 가능하도록 지원함으로써 최적 설계 방안이 도출될 수 있도록 함
- (설계·제작) 재생에너지 조건이 좋은 해외 현지에서 그린 암모니아 생산을 위한 통합공정 플랜트 설계 및 운전 기술 확보를 위해 국내·외 산학연 협력 체계 마련 및 협동 연구
- (시험) 최적화된 시스템 설계를 바탕으로 산업계에서 시스템 제작 및 구축 후 학교 및 연구 기관에서 시험 평가를 통해 시스템의 성능 분석 및 기술 개선 등을 진행하며, 암모니아 안전기준에 근거하여 시험을 진행
- (인증) 개정 되는 수소법에 따라 수소 생산 장치에 대한 인증을 확보
- (시험 및 인증) 국내외 실증을 통한 track record 확보

● 국내외 실증(Scale-up) 방안

- 해외 그린 암모니아 생산 플랜트 구축과 신재생에너지 자원 확보를 위한 호주 및 사우디아라비아 암모니아 생산 기업과 연계하여 통합 실증공정 개발 추진
- 국내 암모니아 추출 수소 수요기업 주도하에 공장 단지내 암모니아 공정 인프라와 연계한 암모니아 활용 안정성 고려 관리 규정/기술 확보 및 상용화 가능 통합 실증 공정 개발 추진
- 경제적 수소 생산단가 확보와 공정효율 극대화를 위한 수소 생산 통합공정 기술을 생산, 공급, 활용 기업들 간의 협력 개발 및 실증

- 우리나라는 신재생에너지의 지리적 환경적 제한성에 의해 해외에서 그린수소를 수입하여 공급할 필요가 있으며 효율적인 수소저장 및 운송 방법이 요구됨
- 암모니아는 carbon-free 수소저장체 중 가장 높은 수소밀도를 가지며 저장 및 운송이 용이하고 생산 및 수입에 대한 인프라가 이미 구축되어 있음
- 암모니아 기반 수소 생산은 탈탄소 대량 수소 생산기술로써 탄소 배출 자체가 없는 공정이 가능하므로 2050 탄소중립 정책에 핵심적인 기여가 가능함
- 현 암모니아 수소 전환 시스템은 열원으로 CH₄ 또는 LPG를 사용해야 하는 실정이나 CO₂ 발생량을 기존 CH₄ 추출 수소보다 10배 이상 낮추는 것이 가능하고, 암모니아/수소 혼소 연소 기술 접목시 CO₂ 배출을 원천 차단하는 것이 가능함
- 저가 그린 암모니아 생산을 위한 합성 요소기술 및 통합공정 개발은 현재의 고압 암모니아 합성 기술보다 1/5의 저압에서 암모니아를 생산하는 기술로서 에너지 저감이 가능하여 경제성 확보가 용이함. 따라서 저가 암모니아 기반 대량 그린수소 도입 및 국내 공급을 통해 탄소중립 달성에 기여하는 것이 가능함
- 또한 AP-Neom, Yara-호주 등에서 그린 암모니아 생산 설비 구축을 진행하고 있으므로 이를 활용할 경우 원료 생산 및 수소 전환 과정에서 CO₂ 발생을 원천 차단하는 것이 가능함
- 암모니아 기반 수소는 암모니아의 범용성에 의해 수소에너지 사회 조기 정착을 위하여 가장 빠르게 추진 가능하며, 아직 글로벌 선점 기술이 없는 단계이므로 기술 선점을 통한 수소에너지 사회 진입이 가능함

● 탄소중립 기여도

- 원료내 탄소가 함유되지 않는 암모니아를 통해 수소를 생산하기 때문에 CO₂ 저감 효과가 높으며 off-gas와 암모니아의 연소를 통한 개질기 온도 유지로 CO₂ 배출 제로 달성 가능
- 로드맵 기준 2040년 해외수소도입량 중 50%를 그린 암모니아로 도입 시 연 79만톤 수소 (443만톤 암모니아) 만큼의 온실가스 감축이 가능함
- 그린 수소 생산을 위해 추가적인 CCS를 고려하지 않아도 되므로 에너지절감 및 효율 향상이 가능
- 수소 인프라 및 관련 산업 조기 창출과 확장으로 국내 신재생에너지 보급에 크게 기여할 수 있음
- 개발기술의 상업화 및 수출로 탄소세절감 등 수익창출 가능

03 경제성 확보 가능한 액체수소 저장·운송·인수·충전 기술

가 전략방향 대상정의

● 개념 및 범위

- 수소액화플랜트 : 수소액화기술은 '2050 탄소중립'을 달성하기 위한 대용량의 수소저장·운송 핵심기술로서, 상온의 기체수소를 극저온냉각을 통해 저압의 액체수소(-253℃, 2bar)로 전환하는 시스템으로 수소압축·냉각계통 및 질소냉각계통으로 구성
- 액체수소 메가스테이션 : 에너지 밀도가 높은 액체수소를 모빌리티 및 연료전지 분산 발전에 고압 기체수소나 저압 액체수소로 변환하여 공급하는 시스템으로 액체수소 고압펌프, 기화기, 안전밸브 등으로 구성된 고압 기체수소 공급 시스템과 액체수소 저압펌프, 플렉시블 배관, 충전 및 회수건으로 구성된 저압 액체수소 공급 시스템 및 BOG 재액화 냉동기로 구성
- 액체수소 운송선 : 액체수소를 대용량으로 운송하는 선박으로 액체수소를 저장하는 화물창(CCS: Cargo Containment System), 액체수소를 관리하는 시스템(CHS: Cargo Handling System), 발생하는 BOG(BOil-off Gas)를 관리하는 BOG 처리 시스템으로 구성

수소액화플랜트



출처 : Linde

액체수소 메가스테이션, 운송선



< 액체수소 메가스테이션 개략도 >



< 2,500m³급 액체수소운송 선박 pilot선박 >

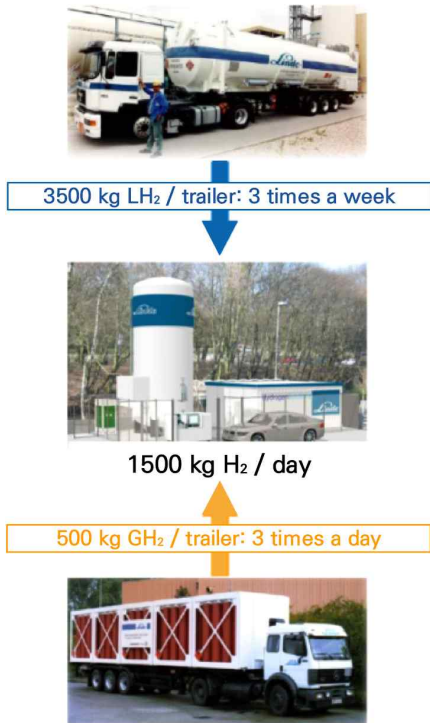
출처 : KIMM, Rexroth.com

● 기술 요구사항

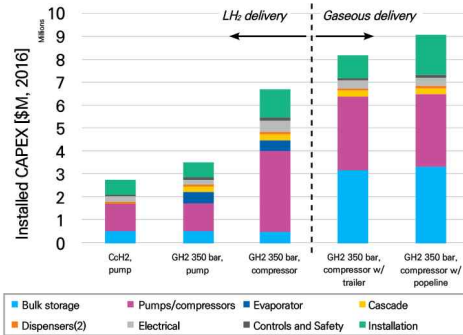
수소액화플랜트

- 국내 LNG 플랜트 사업단 사업을 통해 LNG 플랜트 Test bed에 대한 경험과 소규모 수소액화시스템을 연구개발한 실적을 보유하고 있으나 대용량 수소액화플랜트에 대한 연구 개발 및 경험은 미흡한 실정임
- 상용급인 30톤/일급 수소액화공정 시스템 기술, 수소액화 핵심부품, 플랜트 설계·건설·운영 기술 국산화 개발 및 실증을 기술 확보 필요
- 중기 목표로 핵심 기술인 저압/고압 수소 압축기 기술, 예냉용 액체질소 열교환기 기술, 극저온냉각기술에 대해 원천기술사 협업을 통해 단계적 국산화가 필요
- 장기 목표로 50톤/일급 이상 규모 및 효율 증대를 위한 국내 자체기술개발 필요
- 액체수소 메가스테이션
 - 에너지 밀도를 향상하기 위해 고압기체(700bar)를 활용한 모빌리티를 위한 기체수소 충전소가 상용화되고 있음
 - 수소경제가 활성화되면 운송비 저감을 위해 액체수소가 운송될 것으로 예상되며 상대적으로 효율이 좋은 액체수소를 활용한 고압 기체수소 공급시스템 개발이 필요함
 - 또한 고출력 및 장선화 등이 필요한 모빌리티(에어버스, 철도, 비행기, 선박 등)는 에너지밀도가 높은 액체수소가 적용될 것으로 예상되고 이런 액체수소 모빌리티에 액체수소를 공급할 수 있는 저압 액체수소 공급 시스템 개발이 필요함
 - 액체수소를 활용한 고압 기체수소 공급시스템은 선진국에서 활발히 연구되고 있으며 현재 독일 Linde사는 상용화하여 운영 중이며 저압 액체수소 공급 시스템은 액체수소 모빌리티 개발과 함께 활발히 연구되고 있음
 - 국내는 고압 액체수소 펌프 및 고압 기체수소 공급 시스템에 대한 기초연구가 수행중이나 저압 액체수소 공급 시스템 개발은 전무한 실정임
 - 가연성이고 극저온인 액체수소 관련 국내 기술은 초기 연구 단계이며 향후 액체수소 시장 활성화에 따른 수요 증가를 대비한 국내 기술력 및 산업 경쟁력 확보를 위해 많은 연구 및 투자가 필요함

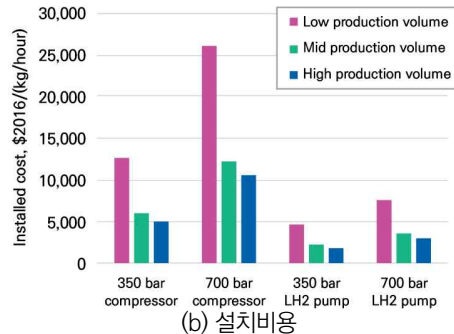
액체수소와 기체수소의 수송량 차이



기체수소와 액체수소 비교



(a) CAPEX



(b) 설치비용

참조 : BMW Hydrogen Storage Workshop 2011

참조 : Lawrence Livermore National Lab 2018

액체수소 운송선 핵심기술 개발

- 2050 탄소중립을 구현하기 위해서 수소의 수요확대가 예상되고, 필요한 수소는 해외의 그린수소를 국내로 이송하는 선박기술이 필수임
- 암모니아의 경우 이미 해외에서 수입을 하는 상황으로 기존의 국내 인프라 및 기술 활용이 가능하고, LOHC의 경우에도 석유 제품의 수입 인프라를 활용 가능함
* LOHC(액상 유기 화합물: Liquid Organic Hydrogen Carrier)
- 그러나, 액체수소의 경우 아직 기술 개발 초기 단계로 저장 용량의 대형화 및 운송 중 발생하는 BOG 최소화 기술이 우선 확보되어야 함
- 또한, 기술검증을 위한 테스트베드, 핵심시스템(CCS, CHS, BOG treatment) 설계기술, 안전성 확보를 위한 선급 승인기준이 필수 요건임
- 이와 동시에 무탄소연료(암모니아 및 수소)를 활용하는 추진체계의 개발도 필요

다 핵심기술 개요

핵심기술 1 • 수소 액화 기술개발

● 기술개요

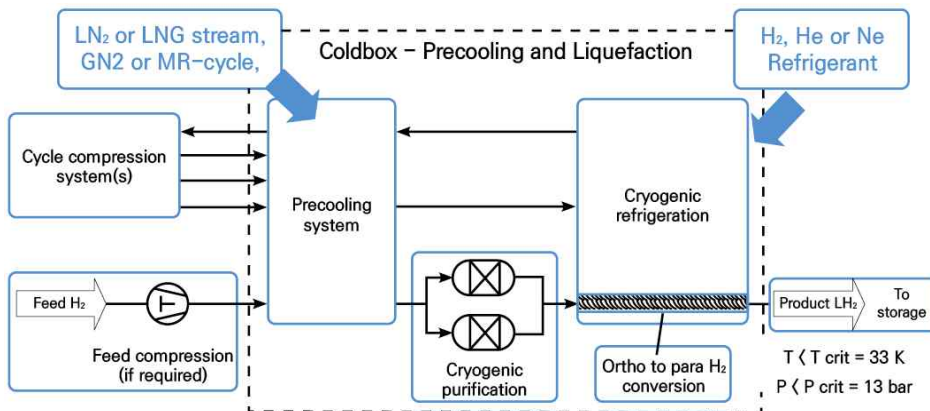
(개요)

- 수소액화기술은 극저온냉각을 통해 저압의 액체수소(-253℃, 2bar) 생산하는 기술
- 수소액화공정 수소 압축기 및 예냉각기술, 극저온 액화기술, 시스템 기술로 분류

(필요성)

- 수소경제 활성화 로드맵에서 '30년 연간 수송용 수소 37만톤 대용량 공급 필요
- 주민수용성, 운송효율성 제고 위해 수소액화플랜트 30톤/일 약 34기 필요

수소 액화 플랜트 개념도



출처 : Linde, Large-scale Liquid Hydrogen Production and Supply Chain, U. Cardella, Perth 2019

● 기술 동향

(해외) 전세계 약 45개 상용급 수소액화플랜트 운영중, 총 생산용량은 약 580톤/일 수준

- 메이저 3사[Linde (독일), Air Liquide (프랑스), APCI (미국)] 수소 액화기술 독점 보유
- 일본 Iwatani와 중국 CALT 등에서도 개발 진행중이나, 상기 3사 원천기술에 의존

(국내) 소용량 파일럿 규모 국산화 연구개발중, 현재 생산량 제로, 상용급 구축 추진중

- 파일럿 규모(0.5톤/일, '19~'23년) 국산화 개발, 국토부, 한국기계연구원 등이 참여
- 5톤/일급(창원, '20~'22년) 액화수소 플랜트 구축, 두중 EPC / 에어리퀴드 기술제공
- 상용급 구축은 효성/린데(35톤/일, 울산, '21~'23년), SK/에어리퀴드(90톤/일, 인천, '21~'23년), 한국지역난방공사/미정(30톤/일, 평택, '22~'24년, 국산화 검토중)

● 핵심기술 목표

핵심기술-세부기술별 기술수준 및 목표

| 핵심기술-세부기술 | 현재기술수준(Baseline) | 목표 |
|-------------------------------|---|--|
| 핵심 수소액화기술 | 규모: 한국 0.5톤/일 파일럿 개발중('19~23년) 미국 54톤/일(Praxair, '82년) | (2030) 30톤/일급 상용화 (2040) 50톤/일급 실증 (2050) 50톤/일급 상용화 |
| 세부 수소 압축기, 예냉각 열교환기 기술 | 규모: 한국없음 해외 50톤/일급 | (2030) 30톤/일급 상용화 (2040) 50톤/일급 실증 |
| 세부 극저온 액화 기술 | 규모: 한국없음 해외 50톤/일급 | (2040) 50톤/일급 개발·실증 (2050) 50톤/일급 상용화 |
| 세부 수소액화 시스템 기술 | 규모: 한국없음 해외 50톤/일급 | (2030) 30톤/일급 상용화 (2040) 50톤/일급 Scale-Up |

세부기술 : 수소압축기, 예냉각 열교환기 기술 개발

- (기술정의) 청정수소를 액화하기 위해 기체수소를 압축하고, 액체질소 열교환기를 통해 예냉각(-190℃ 수준) 하는 요소기술
- (필요성) '23년부터 국내 액체수소 시장 확대 전망에 따라, 수소액화 플랜트 구축과 연계한 국내기술 개발, 실증 통해 기술상용화와 국내 수소산업 육성 필요

세부기술 : 극저온 액화기술 개발

- (기술정의) 극저온 냉각·액화기를 통해 고압의 예냉각 기체수소를 대기압의 액체수소(-253℃ 수준)로 전환하는 핵심 요소기술
- (필요성) 수소 액화 핵심설비 기술로써, 부가가치가 높은 소재·부품·장비 (소부장)의 국내 자체개발, Scale-Up 및 해외시장 개척을 위해 필요

세부기술 : 수소액화 시스템기술 개발

- (기술정의) 청정수소를 대규모로 저장운송하기 위하여, 압축-예냉각-극저온냉각-출하 등의 시스템 설계기술

- (필요성) 액화에너지 효율 제고, 기화손실 최소화, 공정 안전 및 Scale-Up을 위하여 시스템 프로세스 엔지니어링 기술, 안전성 평가 기술 등 개발 필요

핵심기술 2 액체수소 메가스테이션 시스템과 핵심 기자재 국산화 및 실증

기술개요

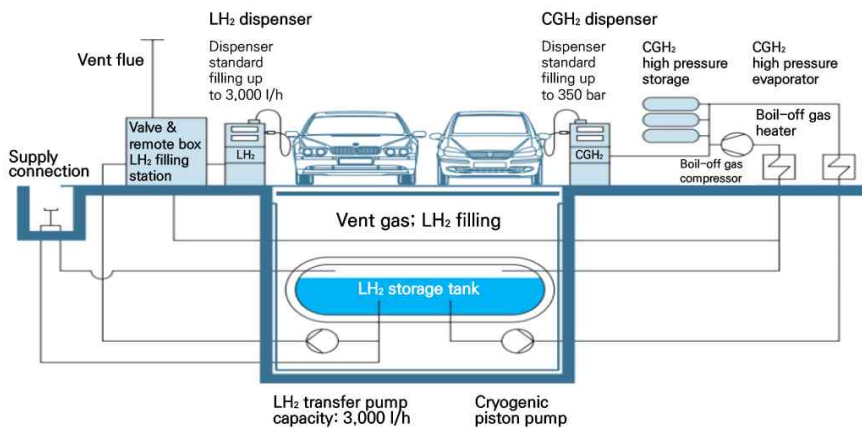
(개요)

- 액체수소를 기반한 고압 기체수소 공급시스템 및 핵심 기자재 고도화 개발
- 액체수소를 기반한 저압 액체수소 공급시스템 및 핵심 기자재 국산화 개발
- 액체수소 메가스테이션(고압 기체수소 공급시스템 및 저압액체수소 공급시스템) 실증 및 상용화

(필요성)

- 수소경제활성화에 따라 대용량 수소 저장, 운송 및 활용을 위해서는 현재의 기체수소기반 인프라에서 부피가 1/800으로 줄어 운송 효율이 10배 높고 대기압으로 저장이 가능한 액체수소 기반인프라 변화가 필수적이고 전세계 선진국은 활발한 연구개발 추진 중
- 현재 국내 액체수소 기반 고압 기체수소 공급시스템은 기초연구 수행중이고 고도화 및 최적화를 통한 국산화 개발이 필요하고 저압 액체수소 공급 시스템은 연구개발은 전무한 실정으므로 조속한 연구개발이 필요함
- 액체수소 기반한 고압 기체수소 공급시스템과 저압 액체수소 공급 시스템을 개발을 통하여 모든 수소 모빌리티(자동차, 철도, 에어버스 및 비행기, 선박)에 안정적인 수소를 공급할 수 있는 메가스테이션 개발이 필요함

액체수소 기반 충전소 개념도



출처 : Munich Airport by Linde

● 기술 동향

(해외)

- 해외 선진사인 Linde가 세계 최초로 액체수소 펌프를 활용한 액체수소 충전소 모델을 제시하고 상업적인 건설을 시작함
- 액체수소 저압펌프(미국, Barber & Nichols), BOG 재액화 냉동기(Linde, Air liquide), 기화기(유럽, Fives Cryo, Linde) 등 액체수소 충전소 관련 주요 기기가 개발되었고 액체수소를 취급할 수 있는 일부 해외 선진 기업(Air Liquide 등)도 액체수소 충전소 개발 및 상용화 추진 중

(국내)

- 국내 상용화된 액체수소가 부재하여 액체수소 충전소 관련 기술 및 인프라가 전무한 실정임
- 국내 수소를 액화하는 상용급 플랜트 기술 개발과 액화수소 충전소용 100 kg/h, 90MPa급 극저온 왕복동 펌프 개발 및 액체수소 공급시스템 핵심 기자재 개발 사업이 추진 중
- 액체수소 충전소 관련 기기 및 시스템 개발을 위하여 국내 액체수소 연구 개발 및 관련 인프라 구축이 필요함

● 핵심기술 목표

핵심기술-세부기술별 기술수준 및 목표

| 핵심기술-세부기술 | 현재기술수준(Baseline) | 목표 |
|--|--|---|
| 핵심 액체수소 메가스테이션 시스템과 핵심 기자재 국산화 및 실증 | 국내외 기준 없음 | (2030) 메가스테이션 및 핵심 기자재 개발 (2040) 10톤/일급 메가스테이션 및 핵심 기자재 실증 (2050) 상용화 |
| 세부 고압 기체수소 공급시스템 및 핵심 기자재 고도화 개발 | (국내) 90MPa급 극저온 왕복동 펌프 개발 중, 고압 기체수소 공급 시스템 기초연구 수행 중 (국외) 70MPa, 100kg/h급(Linde/독) | (2030) 70MPa 기체수소 공급시스템 및 핵심 기자재 연구 개발 (2040) 70MPa 기체수소 공급시스템 및 핵심 기자재 실증 및 국산화 |
| 세부 저압 액체수소 공급시스템 및 핵심 기자재 국산화 개발 | 국내외 기준 없음 | (2030) 저압 액체수소 공급시스템 및 핵심 기자재 연구 개발 (2040) 저압 액체수소 공급시스템 및 핵심 기자재 실증 및 국산화 |
| 세부 액체수소 메가스테이션 성능평가 및 실증 | 국내외 기준 없음 | (2030) 액체수소 메가스테이션 성능평가 시스템 구축 (2040) 10톤/일급 메가스테이션 실증 설비 구축 (2050) 10톤/일급 메가스테이션 상용화 |

세부기술 : 고압 기체수소 공급시스템 및 핵심 기자재 고도화 개발

- (기술정의) 액체수소를 기반으로 고압 액체수소 펌프를 이용하여 가압하고 기화기를 통해 기화시킨 후 연료전지 자동차에 고압 기체수소를 공급하는 시스템으로 액체수소 저장탱크, 고압펌프, 기화기, 안전밸브 등으로 구성됨
- (필요성) 수소경제 활성화로 대용량 수소 저장 및 이송을 위해 액체수소 기반 인프라 변화 초래가 예상되며 고압 액체수소 펌프와 액체수소 냉열을 활용할 수 있어 기체수소 충전시스템(압축기, 칠러) 대비 에너지 효율 및 경제성이 높으며 연속 충전에 유리한 액체수소를 활용한 고압 기체수소 공급시스템 개발 필요

세부기술 : 저압 액체수소 공급시스템 및 핵심 기자재 국산화 개발

- (기술정의) 액체수소를 연료로 사용하는 액체수소 모빌리티(트럭, 철도, 선박, 비행기 등)에 저압 액체수소 펌프를 이용하여 액체수소를 공급하는 시스템으로 액체수소 저압펌프, 플렉시블 배관, 충전 및 회수건 및 재액화장치 등으로 구성됨
- (필요성) 기후변화로 친환경 연료 Needs가 높아짐에 따라 수소 모빌리티가 활발히 개발되고 있으며 장거리 및 고출력 등이 필요한 모빌리티는 고압 기체수소 대비 에너지 밀도가 높은 저압 액체수소 사용이 필수적임에 따라 저압 액체수소 펌프를 이용하여 액체수소를 모빌리티에 공급하는 저압 액체수소 공급 시스템 개발 필요

세부기술 : 액체수소 메가스테이션 성능평가 및 실증

- (기술정의) 액체수소를 기반한 고압 기체수소 공급시스템과 저압 액체수소 공급시스템 및 관련 기자재를 성능을 검증하고 실증하는 시스템
- (필요성) 개발한 시스템 및 기자재의 기술 고도화 및 검증을 위하여 성능 및 신뢰성을 확인할 수 있는 성능평가 시스템 구축이 필요하고 안전성 및 건전성 확인과 Track record 확보가 가능한 실증 시스템 구축이 필요

핵심기술 3 액체수소 운송선 핵심기술 개발**기술개요****(개요)**

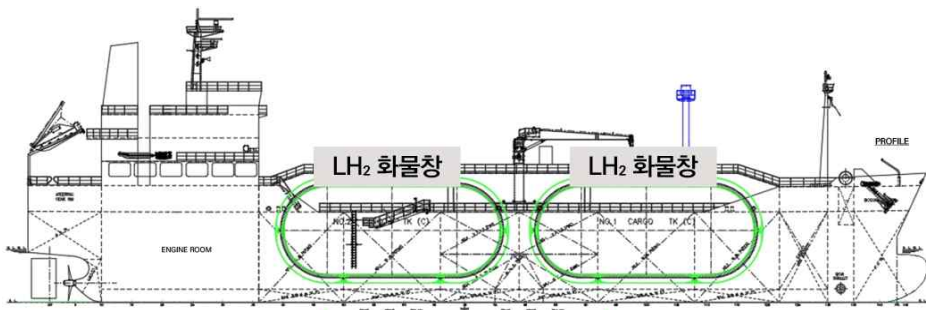
- 독립형(C-type 등) 화물창, 일체형(Membrane type 등), 카고핸들링 시스템, BOG 처리시스템, 극저온 단열시스템 설계 기술
- 단열기술, 화물창 피로해석, 액체수소 극저온 취성 분석, 슬로싱 해석, mock-up, 육상 테스트베드 성능 검증

- 극저온 환경에 대한 가공성, 내구성을 고려한 재료 선정, 용접법 개발, 극저온 기자재 제작, 단열시스템 시공 기술
- BOG 활용 기술, 연료전지 기반 전기추진 기술

(필요성)

- 대한민국은 2019년 초 수소 경제 활성화 로드맵을 시작으로 수소 기술 개발 로드맵('19.10), 수소 시범도시 추진 전략('19.10), 수소 안전관리 종합 대책('19.12) 등 다수의 인프라·수요 관련 법규를 제정하고 기술 지원을 시행 중
- 현재 국내 환경 조건 제약을 고려할 때 국내에서 청정수소를 대량으로 생산/공급하는 데에는 한계가 있음(경쟁력 있는 가격으로 천연가스를 공급하기 어려우며, 개질수소를 블루수소로 전환하기 위해 필수적인 CCS(이산화탄소 포집 및 저장) 공간도 부족)
- 수요 측면에서는 발전, 모빌리티, 산업용 수요가 모두 집적도가 높은 편으로 장기적으로 수천 톤 수준의 수소 수요가 예상되기 때문에 청정수소의 해외 도입은 필수적임
- 해외에서 수소를 도입하기 위한 유일한 수단은 선박을 이용하는 것이며, 암모니아, LOHC 등 기존 기술인프라를 이용할 수 있는 수소캐리어(Hydrogen Carrier) 외 액체수소(LH₂)를 운송할 수 있는 운송기술 개발은 수소경제 구현을 위한 필수 요소임

IMO C-type 액체수소 운송선박 예시



출처 : 한국선급 노길태

● 기술 동향

(해외)

- 미국, 유럽, 일본을 중심으로 액체수소 운송선박의 기술선점을 위해 기술 개발 및 표준화 진행 중임
 - ClassNK(일)에서는 액체수소 운송선박의 승인을 위해 “Guidelines for Liquefied Hydrogen Carriers”(2017)를 발간하였고, 2.5k 선박을 진수(2019)하여 실증 진행 중임

- 가와사키 중공업(일)은 세계 최초의 액화수소 운반선 ‘수소프론티어’를 2019년 말 건조하여, 호주-일본 갈탄 추출 수소운송 파일럿 프로젝트에 활용
- 미국 NASA의 John C. Stennis Space Center에서는 900m³ 규모의 액화수소 운송용 바지선을 개발, 건조하여 로켓 연소 실험에 필요한 수소를 수송하고 있음

(국내)

- 2016년 “액화수소운송선용 CCS 설계 및 검증기술 개발” 과제(산업부)를 통해 화물창에 대한 설계를 시작하였으나, 적하역, BOG 처리, 연료공급시스템과 같은 핵심기술 개발은 시작하지 못함
- 현대미포조선은 세계 최초로 20k급 액체수소운반선에 대해 한국선급(KR)에서 기본 인증(AIP: Approval In Principle)을 획득함(2020.10)
 - 2030년 기술개발 완료 후 수주 및 신조 개시 예정
- 2040년 액화수소 수출입터미널 등 제반 인프라 구축 및 액화수소 도입 경제성 확보 이후 대형 액화수소 운송선 본격 도입

핵심기술 목표

핵심기술-세부기술별 기술수준 및 목표

| 핵심기술-세부기술 | 현재기술수준(Baseline) | 목표 |
|---|--|---|
| 핵심 액체수소 운송선(160k급) 설계 및 pilot 선박(20k급) 실증 | (국내) 규모 : 없음 (국외) (KHI/日) 설계: 160k 개념설계, 실증: 1.25k급 | (2030) 설계 BOR 0.2%/day, 20k급 액체수소 운송선* 실증 (2050) 설계 BOR** 0.1%/day, 160K급 액체수소 운송선 상용화 |
| 세부 액체수소 핵심시스템(화물창, BOG 처리시스템, CHS시스템) 국산화 모델 | (국내) 규모 : 없음 (국외) (KHI/日) 화물창: C-type 1.25k급 | (2025) 핵심시스템 국산화모델 설계완료 (2030) 20k급 액체수소 운송선 실증 |
| 세부 대용량 액체수소 운송선박 핵심기술개발 및 주요 기자재 검증 테스트베드 구축 | 규모 : 없음 | (2030) 액체수소 운송선 핵심기자재 검증 테스트베드 구축, 선급승인 완료 (2040) 기자재 검증, 대용량 운송선박(80k급) 실증 |
| 세부 대용량 액체수소 운송선박 건조 및 실증 | (국내) 규모 : 없음 (국외) (KHI/日) 1.25k급 운송선박 진수(2019) | (2030) 160k급 액체수소 운송선 설계 (2050) 160k급 액체수소 운송선 실증 |

* 20k급 액체수소 운송선: 한번에 수송할 수 있는 액체수소의 양이 20,000m³(1,400ton)으로 자동차(Nexo, 1회 충전 5kg기준)으로 280,000대를 동시 충전 가능한 양

** 현재 상용 160k급 LNG Carrier(Membrane type)의 BOR은 0.08~0.125% 수준으로 LH₂ Carrier의 경우 2050년 경제성 및 국내 기술경쟁력 확보를 위해 목표 BOR을 설정함

세부기술 : 액체수소 핵심시스템(화물창, BOG 처리시스템, CHS시스템) 국산화 모델

- (기술정의) 액체수소를 선박으로 운송하기 위한 핵심기술로 화물창(CCS) 및 적하역시스템(CHS), 증발가스 처리시스템(BOG treatment)의 설계와 극저온시스템 해석기술
- (필요성) 대용량의 수소를 선박으로 운송하기 위한 기반기술, 핵심 설계 기술, 검증 및 안전성 확보를 위한 기술 확보는 필수이며, 핵심기술의 국산화를 통해 해외정정수소 도입에 필요한 선박 기술을 확보하기 위함

세부기술 : 대용량 액체수소 운송선박 핵심기술개발 및 주요 기자재 검증 테스트베드 구축

- (기술정의) 액체수소운송선박의 핵심기술에 대한 검증, 주요 기자재의 개발 및 평가를 위한 테스트베드를 구축하고, 액체수소 운송선박 기술의 신뢰도 향상을 위한 기술 및 인프라
- (필요성) 설계/검증을 수행한 액체수소운송선박의 핵심 기자재, 선박에 대한 테스트베드 검증을 통해 선박 건조 전 탑재 단계까지 기술 신뢰성 확보

세부기술 : 대용량 액체수소 운송선박 건조 및 실증

- (기술정의) 해외에서 생산된 그린수소를 국내로 안전하게 이송할 수 있도록 액체수소 운송선박 건조하여 실증
- (필요성) 대용량의 수소를 선박으로 운송하기 위한 기반기술, 핵심 설계 기술, 검증 및 안전성 확보를 위한 기술 확보는 필수이며, 이를 국내로 도입하기 위한 선박 건조가 우선적으로 수행되어야 함

핵심기술 4 • 액체수소 인수기지 국산화 및 실증

● 기술개요

(개요)

- 해외수소 인수기지는 수입된 수소를 하역 및 저장하였다가 수요에 따라 송출/불출하는 시설로, 하역설비, 저장탱크, 송출/불출 설비, 증발가스 처리설비, 안전/소방설비로 구성
- 액체수소는 -253℃에서 대기압보다 약간 높은 압력으로 액체수소 운반선에 의해 운송되고 인수기지에 도착하여 하역 설비를 통해 지상 저장탱크로 이송
- 액체수소저장탱크는 내부압력을 고려하여 경보 및 긴급차단설비를 설치하여 안전도를 최대로 하고, 진공 이중구조 및 단열재를 통한 열유입을 최소화하여 증발가스 발생을 최소화함

(필요성)

- 액체수소의 끓는점이 매우 낮고 증발열 또한 작아, 증발되는 액체수소의 양을 최소화하기 위해서는 -253℃에 근접하게 온도 유지가 가능한, 단열 성능이 우수한 저장 탱크가 필요함

- 공기 중의 질소와 산소의 어는점이 $-200\sim-219^{\circ}\text{C}$ 임을 고려하면 액체수소 저장탱크의 단열이 제대로 안되는 경우 저장탱크 표면에 질소나 산소가 얼어붙을 수 있음. 따라서 액체수소 저장탱크는 일반적으로 이중 쉘 구조의 진공 단열 방식을 채택함
- 진공단열은 극저온 액체를 저장하는 내부용기와 상온에 노출된 외부용기를 일정한 공간을 사이에 두고 이중용기로 제작하고, 그 사이 공간에 위치한 기체를 제거하여 인위적인 진공을 생성함으로써 대류열전달의 형태로 전달되는 외부로부터의 열유입을 차단하는 기술로 모든 극저온 액체용 저장탱크는 진공단열 기술을 기본으로 적용함
- 진공 단열은 탱크에 최소한 1기압의 하중을 전달하게 되며, 탱크 자체 하중과 증기압 및 수두압을 견뎌야 하므로 압력탱크여야 함. 액체수소 저장탱크가 대형화되면 이중 쉘 사이의 진공도를 높이기 어려워지고, 단열유지용 외부 쉘의 무게가 내부 탱크의 무게와 비슷해지게 되어 열 유입 방지가 어려워지며, 누출에 의한 진공 파괴의 가능성도 높아지게 됨
- 상온으로부터 극저온 액체를 저장하고 있는 탱크 내로 유입되는 열유입 중 상당부분을 차지하는 금속 벽을 통한 열유입은 저장탱크 표면에 주름진 표면을 삽입하여 얇은 벽두께로 인한 설계압력의 감소를 보완하고, 비금속, 저 열전도도물질과 이중 접합기술을 통하여 열유입을 최소화함
- 수소경제 활성화 로드맵에 따라 2030년까지 해외로부터의 액체수소 수입이 예정된 바, 액체수소 수입 터미널 핵심기술 확보 및 실증 시급
- 에너지 안보 차원에서 다양한 국가로부터 수소 수입 필요
- 향후 막대한 건설 수요가 예상되는 육상용 대용량 액체수소 저장탱크 및 수출입 터미널 기술 국산화 시급

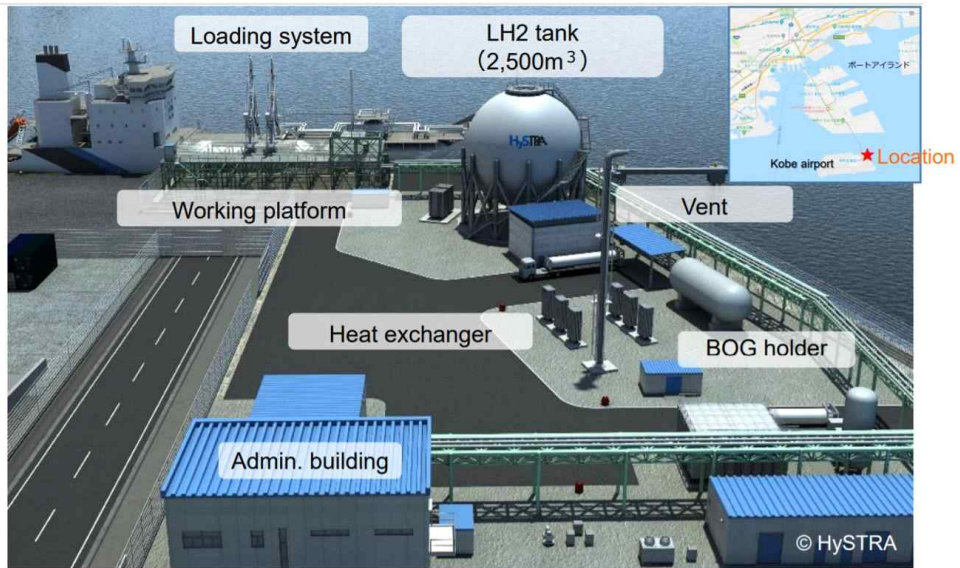
● 기술 동향

(해외)

- 일본은 수소 2030 로드맵을 기반으로 수소 경제사회로 진출하기 위해 실증용액체수소인수터미널을 2021년 준공하였음
- 가와사키중공업은 저장용량 $2,500\text{m}^3$ 의 구형 액화수소 저장탱크(설계압력 7 bar, 진공 Perlite 단열 사용, 증발손실률 0.1%/일 미만)를 설치하였고 액체수소 운반선에서 육상터미널로 액체수소를 이송하기 위해 액체수소 전용 하역/인입시스템을 갖춤
- 미국은 1960년대 Apollo 우주프로그램이 본격화 되면서 대량으로 수소를 저장하는 기술을 활발히 개발하였음
- 미국 Florida주에 위치한 NASA의 케네디 우주센터에는 $3,400\text{m}^3$ 의 2기의 액체수소저장탱크가 30년 넘게 사용되어 왔음. 각각의 저장탱크는 직경 18.9m의 스테인레스강으로 만든 내부쉘과 직경 21.3m의 탄소강으로 만들어진 외부쉘, 진공 Perlite 단열 시스템으로 구조화되어 있음. 증발손실률은 0.1%/일 미만이나 30년 이상 장시간 사용에 따라 증발손실률이 상승하는 문제를 경험함

- 미국 NASA는 최근 저장용량 4,700m³의 액체수소 저장탱크 1기를 신규로 건설 중에 있음
- Linde, Air Liquide, Plaxair, Air Products&Chemicals 등 액체수소 선도기업들은 10~1000m³ 급 액체수소 저장탱크 기술을 보유

일본 고베항의 2,500m³급 실증용 액체수소인수터미널 ('21년 1월 준공)



출처 : HySTRA

(국내)

- 국토교통부의 '상용급 액체수소 플랜트 핵심기술개발사업'을 통하여 0.5 톤/일 파일럿 수소액화플랜트 기술개발을 진행 중에 있는데 이 과제를 통하여 35m³급의 액체수소 저장탱크(설계압력 10 bar, 증발손실률 1%/일)를 개발 중에 있음

● 핵심기술 목표

핵심기술-세부기술별 기술수준 및 목표

| 핵심기술-세부기술 | 현재기술수준(Baseline) | 목표 |
|--|--|--|
| 핵심 액체수소인수기지 (80k급) 설계 및 Pilot 인수기지(10k급) 실증 | (국내) 없음 (국외) 실증 : 2.5k급 | (2030) 설계 BOR 0.1%/day, 10k급 액체수소인수기지 실증 (2040) 설계 BOR 0.1%/day, 80k급 액체수소인수기지 실증 (2050) 설계 BOR 0.08%/day, 520k급 액체수소인수기지 실증 |
| 세부 수소(기체/액체) 이송용 금속 및 비금속 배관 국산화 개발 | (국내) 금속 배관, 직관 6m 이중단열 배관 (국외) 금속 배관, 직관 6m 이중단열 배관 | (2030) 수소(기체/액체) 이송용 배관 설계 및 제작 기술 확보 (2040) 대용량/장거리 수소 배관 실증 |
| 세부 액체수소인수기지 핵심시스템(저장탱크, 하역/인입/불출시스템) 국산화 개발 | (국내) 없음 (국외) 실증 : 2.5k급 | (2027) 10k급 액체수소인수기지 핵심시스템 국산화 설계완료 (2030) 10k급 액체수소인수기지 실증 |
| 세부 대용량 액체수소인수기지 설계 | (국내) 없음 (국외) 실증 : 2.5k급 | (2027) 10k급 액체수소인수기지 설계완료 (2035) 80k급 액체수소인수기지 설계완료 |
| 세부 대용량 액체수소인수기지 실증 | (국내) 없음 (국외) 실증 : 2.5k급 | (2030) 10k급 액체수소인수기지 실증 (2040) 80k급 액체수소인수기지 실증 (2050) 520k급 액체수소인수기지 실증 |

세부기술 : 액체수소인수기지 핵심시스템 (저장탱크, 하역/인입/불출시스템) 국산화 개발

- (기술정의) 해외에서 운송된 액체수소를 육상 인수기지에 안전하게 저장하기 위한 핵심기술로, 액체수소 저장탱크, 액체수소 하역/인입시스템(로딩암/스위블 조인트/극저온호스), 액체수소 불출시스템의 설계/제작/시운전/성능평가 기술
- (필요성) 액체수소는 끓는점이 매우 낮고 증발열 또한 작아, 액체수소 운송선에서 육상의 저장탱크로 액체수소를 하역 및 저장하는 과정 중에 증발되는 액체수소의 양을 최소화 하기 위해서는 -253℃에 근접하게 온도 유지가 가능한, 단열 성능이 우수한 하역/육상저장/불출시스템 기술 개발이 필요함. 향후 막대한 건설 수요가 예상되는 육상용 대용량 액체수소 저장탱크 및 해외수소 인수기지 핵심기술의 국산화 시급.

세부기술 : 수소(기체/액체) 이송용 금속 및 비금속 배관 국산화 개발

- (기술정의) 해외에서 운송된 액체수소를 육상 인수기지 및 수요처에 안전하게 수소(기체/액체)를 공급하기 위한 기술로써, 수소 취성을 고려한 금속 및 비금속 재료/설계/제작 기술과 설치/관리 시스템 기술 등으로 구성함
- (필요성) 극저온(20K, 253℃)인 액체수소가 외부 열침입에 의해 증발되지 않고 안전하게 수요처까지 이송할 수 있는 배관(플렉시블 호스 등)과 인수기지에서 수요자까지 대용량 장거리 이송이 가능한 수소 공급망 배관 기술개발이 필요함

세부기술 : 대용량 액체수소인수기지 설계

- (기술정의) 해외 도입 액체수소인수기지 설계조건 및 기준 검토, PFD, UFD, 열물질 수지계산, 장비리스트, Plot Plan, P&ID, MSD, 프로세스 D/S, 압력 수지 계산, 유틸리티리 수지 등 기본설계 기술 개발, 시뮬레이션을 통한 scale-up 설계 기술 개발
- (필요성) 액체수소인수기지는 초기에는 수천m³의 용량에서 건설되었다가 점진적으로 수만m³에서 수십만m³으로 용량이 확대될 것이며, 이를 위해서는 시뮬레이션 기반 scale-up 설계기술 확보가 필요함. 운반선으로부터 인수기지로의 액체수소 이송을 위한 액체수소 하역/육상저장/인입/불출 시스템 공정모사 및 scale-up 설계기술을 확보

세부기술 : 대용량 액체수소인수기지 실증

- (기술정의) 해외 도입 액체수소인수기지 부지선정, 토목공사, 실증 인허가, 하역/육상저장/인입/불출 시스템 제작/설치, 전기공사/건축공사/소방공사/배관공사, 성능평가, 인증
- (필요성) 실증은 연구실에서 개발된 기술성고가 현장 환경에서 작동가능한지를 확인하는 과정으로, 해외수소 인수기지의 성공적인 사업화를 위해서는 연구개발 성과의 scale-up, 현장적용성 및 기능구현성을 검증하는 실증 수행이 반드시 선행되어야 함. 실증 수행을 통해 확보한 경험이 시장 진입을 위해 필요한 track-record로 이용 가능. 실증연구를 시행하지 않을 경우 실험실 수준에서 우수 기술을 확보해도 논문, 특허 등의 무형의 성과에 머물 뿐 기술성과 활용을 통한 사업화 및 시장진입은 불가능함

라

기술확보 전략

● 소재-부품-장비 확보전략

- (소재) 액체수소 환경(극저온 및 취성 등)에 사용이 가능한 소재* 개발을 위해 기초 연구와 관련 인프라 구축이 필요하며 장기적인 과제로 추진이 필요함
* 액체수소 관련 소재 : 액체수소 저장탱크용 후판·강판, 단열재, 배관, 촉매 등
- (부품) 수소액화 플랜트, 액체수소 운송 선박 및 메가스테이션에 필요한 핵심 기자재*는 다년간의 노하우와 전문적인 기술이 필요하므로 중기적인 정부 주도의 국산화 연구 개발 과제를 통한 개발이 필요함. 관련 전문 산학연 협력을 통한 연구 개발을 추진하고 개발한 핵심 기자재 성능 파악을 위한 성능평가용 시험 인프라 구축 추진이 필요함
* 펌프, 압축기, 팽창기, Coldbox, 열교환기, J/T 밸브, 계측기 등
- (장비) 국내 액체수소 관련 전문 기업이 부재하므로 '25년내 단기적으로 원천기술사, 에너지 및 산업계와의 협업을 통해 관련 인프라 구축 및 안정적인 기술 확보를 추진함. 장기적으로 액체수소 관련 시스템 국산화를 위해 국내 산학연 협력을 통하여 시스템 성능 및 건전성 확보를 위한 기술 개발과 공동활용이 가능한 실증 설비 구축이 필요함

● 시스템 확보전략

- (설계·제작) 액체수소 관련 시스템 및 기자재 연구개발 경험이 있는 전문 산학연과 활발한 협력을 통해 정부 R&D 과제로 수행하여 기술 축적함
국내 가스 및 방폭에 대한 인증 전문 기관과 설계부터 공동 협력하여 안전 기준 및 개발 방향 등을 공동으로 선정함
- (시험) 액체수소 관련 시험 기준이 부재하여 시험 규격 제정을 먼저 한 후 부품 단위 시험과 장비 단위 시험 설비로 나누어서 구축 추진이 필요함. 극저온 및 가연성 유체를 취급하고 관련 시험 설비 구축 경험이 있으며 시험절차 개발이 가능한 기관과 관련 전문 산학연을 참여하여 추진
- (인증) 액체수소 관련 국내외 성능 및 안전 규격이 부재하므로 연구 개발 초기부터 검증 방향을 설정하고 전문가들과 논의하여 국내외 규격 제정 추진하며 KOLAS 등 국제인증 경험이 있는 기관을 필두로 관련 전문 산학연이 공동으로 사업 추진

● 국내외 실증(Scale-up) 방안

- 개발되는 액체수소 핵심 기자재 및 시스템의 성능 및 건전성 확인을 위한 액체수소 관련 시험 인프라 구축 필요
- 개별 핵심 기자재의 성능 검증을 위해서는 성능이 검증된 기자재로 구성된 시스템 구축이 필요하므로 해외 선진사 기자재 및 시스템으로 구성된 시험 인프라를 통한 병렬 운전을 통한 성능 검증 추진

- 검증된 기술을 통하여 Scale-up 설계를 추진하고 개발된 시스템 및 기자재의 Track record 확보 및 신뢰성 검증을 위한 실증 설비 구축 필요
- 액체수소 운송선박은 설계 기술 개발, 육상 검증, 해상시운전을 통한 실증이 필요한데, 국내에는 인프라가 전혀 없는 상태로 검증용 테스트베드 구축 및 해상실증을 위한 Pilot 선박 건조 후 실증 추진
- 해상실증 후 대용량(160k급) 액체수소 운송선박으로 scale up을 위한 기술 개발 및 상용화 실증 프로젝트 추진

● 인프라 구축 방안

- (인력양성) 산학연 연계한 연구개발 및 교육 프로그램을 통하여 연구 및 기술 인력 확보 필요
- (국제협력) 액체수소 경제 활성화 및 가속화를 위해서는 국제적인 액체수소 관련 안전 및 성능평가 등에 대한 규격이 필요하며 이를 위해 국제표준화기구(ISO) 등에 상정하여 국제적인 협력 및 논의를 통한 표준화가 필요함
- (국제협력) 대규모 액체수소 플랜트 국산화를 위해서는 국내 연구 개발된 액체수소 플랜트의 성능 검증 및 실증이 반드시 필요하며 이를 위해 대규모 재생에너지가 있는 해외 그린수소 생산 기지와 연계한 해외 실증 사업이 필요함(국내 재생에너지 부족으로 대규모 액체수소 플랜트 유지 및 운영 어려움 보유)
- (법·제도 개선) 국내외 액체수소 관련 법령 및 제도가 현재 부재하므로 개발 목표 및 방향 설정 시 관련 법 및 제도 제정을 위한 관련 기관과의 위원회 활동 추진
- (시험설비) 확보된 액체수소를 기반으로 여러 가지 친환경 시스템(모빌리티 및 발전 등)에 안전하고 효율적으로 액체수소를 공급할 수 있는 할 수 있는 기반 개발 및 확보 필요

마

탄소중립 기여 효과

● 탄소중립 기술과의 연계성

- 기후변화에 적극 대응하기 위해 저탄소·친환경 사회 실현을 위해 국제적인 탄소중립 선언이 가속화되고 있으며 글로벌 규제 강화 및 경영 활동이 변화하며 향후 친환경 시장 성장이 예상되며 이를 선점하기 위해 재생에너지 및 수소 등에 투자를 확대하고 있음
- 정부는 2050 탄소중립을 공표하고 경제구조의 저탄소화, 신유망 저탄소산업 생태계 조성, 탄소중립 사회로의 공정전환이라는 3대 추진 전략을 수립하여 탄소중립, 경제성장, 삶의 질 향상을 동시 달성하고자함
- 국내 전력 공급체제를 재생에너지로 전환하고 안정적인 전력공급을 위해 수소 등 보조 발전원 활용을 병행하고 부족한 재생에너지 확보 위해 대규모 해외 그린수소 도입 등 수소경제로드맵 수립·이행 계획함

- 수소액화 기술은 수소 대량저장·공급에 필요한 핵심기술로, 국내외 생산되는 그린수소를 액체수소로 변환하여 현재 기체수소 대비 운송효율이 10배 향상(CO₂ 저감) 되는 탄소중립기술임
- 액체수소 운송선 기술은 해외 풍부한 재생에너지를 통하여 대규모로 저렴하게 생산되는 그린수소를 해상 운송(CO₂ 저감)으로 수입하기 위한 기술로 무탄소 연료추진(CO₂ 저감)에 따른 탄소중립기술임
- 액체수소 운송선을 통해 액체수소를 국내 도입하면 국내 에너지를 거의 사용하지 않고 바로 에너지원으로 사용이 가능하므로 탄소중립기술임
- 액체수소 메가스테이션 기술은 도심지 수송용(CO₂ 저감) 및 건물용 연료전지 분산발전(CO₂ 저감)에 필요한 수소를 공급 및 변환하는 기술로 탄소중립 기술임
- 대용량 고압 기체수소 공급 인프라를 통해 친환경 모빌리티 전환을 가속화할 수 있고 대용량 저압 액체수소 공급 인프라는 고출력 및 장거리 이동이 필요한 친환경 대모빌리티(버스, 철도, 비행기, 선박 등) 개발을 촉진할 수 있으므로 수송 탄소배출량을 저감할 수 있으므로 탄소중립기술임

● 탄소중립 기여도

- 수송용 연료전지 CO₂ 저감량 = 경유차 대비 온실가스저감효과 x 수소차량 댓수
 - * 기체 수소와의 차별적 요인 :
 - 1) 도심지 (부지면적 부족에 따른 기체수소충전소 설치불가 지역) 수소버스 확대에 탄소배출 저감
 - 2) 모빌리티(트럭, 철도, 항공, 선박 등)의 친환경 액체수소 사용으로 인하여 탄소 배출 저감
 - 3) 충전소(가스압축기 → 액체펌프)의 소요동력 절감되고 액체수소 냉열 활용으로 -40℃용 칠러가 없어도 됨에 따라 탄소배출 저감
 - 4) 액체수소는 기체수소보다 운송효율 증대(약 10배 수준)에 따른 탄소배출 저감
- 건물 연료전지 CO₂ 저감량 = 수소연료전지 연간발전량 x 상당 전력계통상 평균발전기와의 CO₂ 배출량의 차이
- 액체수소 운송선 CO₂ 저감량 = 기존 화석연료 대비 온실가스 저감 효과 x 운송횟수

04 고효율 에너지 저감 액상유기수소저장물질 수소화 및 탈수소화 기술

가 전략방향 대상정의

● 개념 및 범위

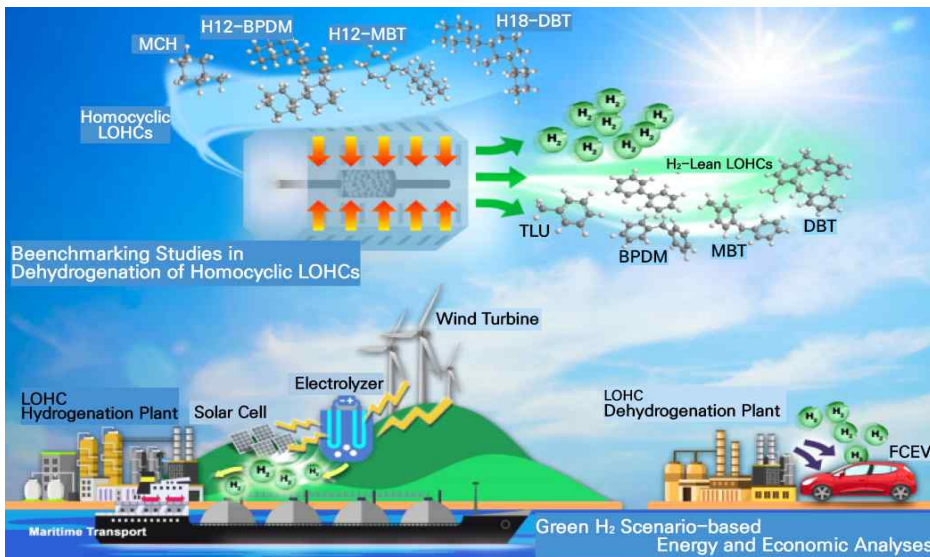
- (개념) LOHC* 수소저장 및 추출 시스템 : LOHC 內 저장된 수소의 연속 저장 및 추출을 가능하게 하는 시스템

* LOHC : Liquid Organic Hydrogen Carrier의 약어로서 액상유기수소운반체로 명명

(범위)

- (i) 수소저장시스템의 경우, 높은 수소저장 밀도를 가지는 LOHC-소재 (materials, H₂-lean form), LOHC-저장탱크(storage tank), 수소저장 촉매(hydrogenation catalyst), 수소저장 반응기(reactor), 열원공급장치(heat supply system)을 포함한 다수의 부대장치(BOP)로 구성되며, (ii) 수소추출시스템의 경우, 수소가 저장된 LOHC+ 소재 (materials, H₂-rich form), LOHC+ 저장탱크(storage tank), 수소추출 촉매 (dehydrogenation catalyst), 수소추출 반응기 (reactor), 열원공급장치(heat supply system)을 포함한 다수의 부대장치(BOP)의 구성 요소를 가짐

LOHC 연속 수소화 탈수소화 공정 활용 해외 그린 수소 저장-운송-추출



출처 : 한국과학기술연구원 수소·연료전지연구단 김용민, Energy conversion and management 2021

● 기술 요구사항

- LOHC의 경우 수소를 추출하는 반응이 열역학적으로 흡열반응이며 상용화 가능성이 상대적으로 높은 톨루엔 (Toluene), 벤질톨루엔 (Mombenzyltoluene) 및 디벤질톨루엔(Dibenzyltoluene)과 같은 homocycles 기반의 LOHC의 경우 320 oC 이상의 수소추출 반응온도가 요구됨
- 따라서 LOHC 수소저장 및 수출시스템의 경우, (i) 수소화/탈수소화 공정 효율 향상 및 CO₂-free 열원공급 기술 개발과 더불어 (ii) 높은 무게 및 부피대비 수소저장밀도를 가지며 동시에 탈수소화 반응 엔탈피를 낮출 수 있는 신규 LOHC 소재 발굴 및 소재에 최적화된 촉매/공정 개발을 통한 탈수소화 온도 저감이 요구됨

나 전략방향별 핵심기술

그린수소 고효율에너지저감액상유기수소저장물질수소화및 탈수소화기술

| 핵심기술 | Baseline | 단기 | | | | 중기 | | | 목표 | | | |
|---|--|--|-----------------------|------|----------------|-------|-------------------------------|--------------|-----------|---------------------------|------|------|
| | | 2022 | 2023 | 2024 | 2025 | ~2030 | ~2040 | ~2050 | | | | |
| CO ₂ -free 연속 수소 저장 및 추출 시스템 대형화 | • 수소추출시스템 용량: 25 Nm ³ -H ₂ /h | (A) LOHC 수소추출시스템 (2.5 Nm ³ /h) | | | | | | | 수소저장 추출용량 | 10,000 Nm ³ /h | | |
| | | (B) 저장-추출반응기(추출용량: 1,000 Nm ³ /h) | | | | | (B) 10,000 Nm ³ /h | | | | 효율 | 75% |
| | | (A) 저장-추출공정및시스템구축(효율 70%) | | | | | (A) 효율 75% | | | | | |
| LOHC 수소화 및 탈수소화 시스템 고효율화 | • 수소 저장-추출시스템 RTE: 60% ※ RTE: Round Trip Efficiency | | (B) 열원공급 및 열관리 장치 효율화 | | | | | | 폐열 회수율 | 88% | | |
| | | | | | (A) 저장-추출 통합연계 | | (A) RTE 75% | | | | RTE | 75% |
| LOHC 소재 및 촉매/공정 개발 | • 수소추출 엔탈피: 68 kJ/md+H ₂ • 반응온도: 320℃ | (A) LOHC 신규소재발굴 | | | | | | | 수소추출 엔탈피 | 55 kJ/md | | |
| | | (A) LOHC 신규소재발굴 | | | | | (A) 63 kJ/md | (A) 55 kJ/md | | | 반응온도 | 250℃ |
| | | (A) LOHC(탈수소화촉매 제조기술) | | | | | (B) 95%, 10,000시간 | | | | | |

범례 (A) 소재, (B) 부품, (C) 장비, (D) 시스템 [진행중 기술] 기본원천 R&D 응용 R&D 실증/상용화 R&D [개발할 기술] 기초원천 R&D 응용 R&D 실증/상용화 R&D

다 핵심기술 개요

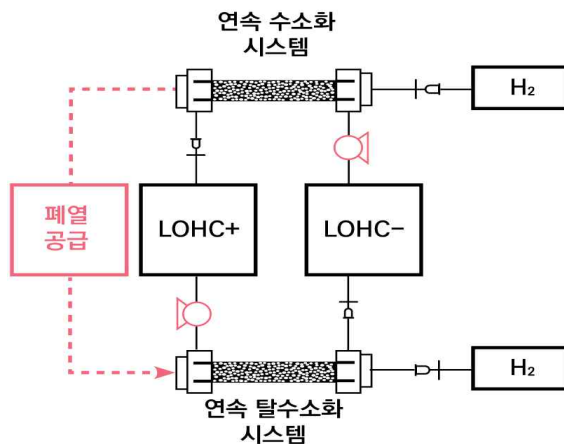
핵심기술 1 • CO₂-free 연속 LOHC 수소 저장-추출 시스템 개발

기술개요

(개요)

- LOHC 기반 수소 저장·운송 방식은 다음의 3단계로 요약할 수 있음
 - (i) 해외에서 생산된 저가의 그린 및 블루수소를 LOHC 수소저장시스템을 통해 저장 (LOHC- + H₂ → LOHC+), (ii) 수소가 저장된 액상 LOHC를 선박을 이용하여 장거리 운송을 통해 국내로 도입, (iii) 국내에서는 LOHC 수소추출시스템을 통해 수소추출 (LOHC+ → LOHC- + H₂)
- 따라서, LOHC 기반 가역적 수소저장 및 추출기술에 있어 요구되는 기술은 신규 LOHC 소재 개발, 고효율 수소저장시스템, 및 고효율 수소추출시스템임
- 국내에서 고효율 LOHC 수소저장 및 추출 시스템을 개발하고 검증하기 위하여 LOHC 연속 수소저장시스템 및 수소추출시스템을 통합 연계하여 실증하고, 이를 통해 Round Trip Efficiency와 요구 에너지에 대한 정보 및 CO₂-free 공정 구현을 위한 전략을 확보함

LOHC 수소화-탈수소화 연속 통합 공정 시스템



출처 : 한국과학기술연구원 수소·연료전지연구단 김용민

(필요성)

- 해외 초저가 재생에너지 연계 그린수소 생산 및 미활용 화석연료 이용 블루수소 생산은 탄소중립 실현을 위한 핵심 기술임
- 해외에서 생산된 그린 및 블루수소의 국내 도입을 위해서는 대용량 수소를 안전하게 저장하고 장거리로 운송하기 위한 기술이 요구됨
- 수소경제활성화로드맵에 따르면 우리나라는 2040년 기준 연간 526만톤의 수소가 보급되어 사용될 예정이며, 해외 도입 수소 비율을 50%로 가정하면 연간 약 263만톤의 해외 CO₂-free 수소의 저장·운송 기술이 요구됨
- 수소를 가역적으로 저장하고 추출할 수 있는 LOHC는 단위 부피당 높은 수소저장밀도 (>45 kg H₂/m³)를 가지고 있으며 동시에 현존하는 화석연료 저장·운송 인프라를 그대로 활용할 수 있어 경제성이 우수한 대용량 장거리 저장·운송 기술 후보로 크게 주목받고 있음

● 기술 동향

(해외)

- 일본 치요다화학건설, 미츠비시상사, 미츠이물산, 니혼유센을 중심으로 구성된 AHEAD(Advance Hydrogen Energy Chain Association for Technology Development)는 2020년 세계 최초로 브루나이에서 생산된 수소를 MCH 형태로 저장하고 이를 브루나이 Muara 항구에서 일본 가와사키 市까지 운송하는 수소공급망 실증(210톤/년 급)을 세계 최초로 성공하였으며, 향후 최대 3000톤 급 수소공급망 안정성을 확인하고 2030년까지 상용화를 목표로 함
- 독일 Friedrich-Alexander University (FAU) 및 Hydrogenious Technologies社は 연속으로 수소를 저장하고 저장된 수소를 추출할 수 있는 시스템을 개발하였으며, 대용량 연속 수소저장 및 추출 시스템 설계 기술 확보 중임
- 독일 바이에른주 에어랑엔 소재 스타트업 기업 Hydrogenious Technologies社は dibenzyltoluene 계 LOHC를 이용하여, 미국과 독일 시장에 연료전지와 연계할 수 있는 LOHC 탈수소화 시스템 등을 출시하였음

(국내)

- LOHC를 이용한 대용량 수소의 저장·추출 및 활용 기술은 최근 수소의 대규모 저장 및 장거리 운송 분야의 수요가 증가함에 따라 많은 관심을 받고 있으며, 최근에 대기업을 중심으로 적극적인 기술의 개발 및 사업추진을 검토하고 있음
- 현재 국내 LOHC 기반 수소화 및 탈수소화 시스템 기술의 수준은 기초 연구 단계이며, 한국과학기술연구원(KIST)는 '15년 산업통상자원부 지원 하 한국에너지기술평가원(KETEP, Korean Energy Technology Evaluation and Planning) 과제를 통해 LOHC 관련 연구가 추진되었고 바이페닐 및 디페닐메탄이 특정 비율로 혼합된 신규 homocycle 기반 LOHC가 발굴되었음

- 한국화학연구원(KRICT), 한양대, 포스텍 등은 산업통상자원부 지원 하 KETEP 과제를 통해 질소가 포함된 heterocycle인 2-(N-methylbenzyl)-pyridine(MBP) 기반 LOHC 소재 등을 개발하였음
- KIST은 과기정통부 지원을 통해 한국연구재단 수소혁신기술개발사업 중 하나인 'LOHC 원천기술개발 연구단' 사업을 추진 중이며, 해당 연구단을 통해 신규 LOHC 소재 발굴, LOHC 수소추출 촉매, 및 소규모 LOHC 수소추출시스템 개발을 수행 중임

● 핵심기술 목표

핵심기술-세부기술별 기술수준 및 목표

| 핵심기술-세부기술 | 현재기술수준(Baseline) | 목표 |
|---|--|---|
| 핵심 CO ₂ -free 연속 LOHC 수소 저장 및 추출 시스템 개발 | LOHC 연속 수소 저장-추출시스템 용량: 1.0 Nm ³ -H ₂ /h (KIST) | |
| 세부 LOHC 저장 공정 및 반응기 구축 기술 | LOHC 연속 수소저장 시스템 용량: 2.0 Nm ³ -H ₂ /h (KIST) | (2030) 수소저장 및 추출용량: 1,000 Nm ³ /h (효율: 70%) |
| 세부 LOHC 추출 공정 및 반응기 구축 기술 | LOHC 연속 수소추출 시스템 용량: 2.5 Nm ³ -H ₂ /h (KIST) | (2040) 수소저장 및 추출용량: 10,000 Nm ³ /h (효율: 75%) |
| 세부 LOHC 연속 저장-추출 통합 공정 설계 및 고효율화 기술 | 수소 연속 저장-추출 공정 용량 및 효율 1.0 Nm ³ -H ₂ /h, 60% (KIST) | |

세부기술 : LOHC 저장 및 추출 공정 및 반응기 기술

- (기술정의) LOHC를 이용한 수소의 연속 저장 및 추출을 위한 열화학 반응기 내부 구성을 위한 핵심기술 및 대형화를 위한 공정 설계 기술
- (필요성) LOHC 연속 수소저장 및 추출 반응기는 목표 시스템의 핵심 부품이며, 2040년까지 LOHC 연속 수소저장 및 추출용량을 10,000 Nm³/hr로 스케일업하기 위한 대형화 공정 설계 기술 및 대형화 반응기 고성능화/고내구화 기술 확보가 필요

세부기술 : LOHC 저장-추출 공정 및 시스템 구축 기술

- (기술정의) (i) LOHC 연속 수소 저장 및 추출용 열화학 반응기, 열원공급장치(heat supply system), 및 다수의 부대장치(BOP)을 효율적으로 상호 연계하고 제한된 공간 내 패키징 기술; (ii) 구축된 시스템을 바탕으로 공정 사이클 (시동-운전-정지) 운전 기술 및 비상 상황시 대처 프로토콜 구축 기술
- (필요성) (i) LOHC 수소저장 및 추출 열화학 반응기, 열원공급장치, 다수의 부대장치의 효과적인 연계 기술 확보를 통한 시스템 대형화/고성능화 필요; 대형 시스템 운전 안정성 확보를 위해서 시스템 운용 시 발생 가능한 다양한 상황에서의 운전 프로토콜 구축 필요

핵심기술 2 Round Trip Efficiency 수소화-탈수소화 통합 효율) 75% 고효율 기술 확보

| 핵심기술-세부기술 | 현재기술수준(Baseline) | 목표 |
|---------------------------------------|--|--|
| 핵심 LOHC 수소화 및 탈수소화 시스템 고효율화 기술 | 수소 저장-추출시스템 RTE: 60% ※ RTE: Round Trip Efficiency | (2030) RTE: 70% (2040) RTE: 75% |
| 세부 열원 공급 및 열관리 장치 효율화 기술 | 탈수소화 폐열 회수율: 84% | (2030) 폐열 회수율: 86% (2040) 폐열 회수율: 88% |
| 세부 LOHC 기반 수소 저장-추출 통합 연계 기술 | LOHC 기반 수소 저장-추출 통합 연계 시스템 RTE: 60% | (2030) RTE: 70% (2040) RTE: 75% |

세부기술 : 열원 공급 및 열관리 장치 효율화 기술 개발

- (기술정의) LOHC (탈)수소화 반응기, 가열기(preheater), 기화기(vaporizer)에 필요한 에너지를 공급하는 열원 구성 기술 및 LOHC 탈수소화 반응 시 폐열을 회수 및 열손실 최소화를 통한 수소추출시스템 고효율화 기술
- (필요성) Homocycle 기반 LOHC 탈수소화는 일반적으로 320℃ 이상의 온도를 요구하는 흡열반응으로서 폐열 회수 등을 통한 반응열 공급 방식 다각화 및 열손실 방지는 필수

핵심기술 3 신규 LOHC 물질 및 촉매 개발을 통한 탈수소화 흡열량 및 반응온도 저감

| 핵심기술-세부기술 | 현재기술수준(Baseline) | 목표 |
|--------------------------------|--|--|
| 핵심 LOHC 소재 및 촉매/공정 개발 | 수소추출 엔탈피: 68 kJ/mol-H ₂ 반응온도: 320 °C | (2030) 63 kJ/mol, 300 °C (2040) 55 kJ/mol, 250 °C |
| 세부 LOHC 신규 소재 설계 기술 | 수소추출 엔탈피: 68 kJ/mol-H ₂ 반응온도: 320 °C | (2030) 63 kJ/mol, 300 °C (2040) 55 kJ/mol, 250 °C |
| 세부 LOHC (탈)수소화 촉매 제조 기술 | LOHC 수소화-탈수소화율: 80%, 내구성: 100시간 | (2030) 90%, 5,000시간 (2040) 95%, 10,000시간 |

세부기술 : LOHC 신규 소재 설계 기술

- (기술정의) LOHC (탈)수소화시스템 고효율화를 위하여 수소추출 엔탈피와 탈수소화 반응 온도 저감을 위한 신규 소재 설계 및 제조 공정 기술
- (필요성) 현재 상용화 추진 중인 homocycle 기반 LOHC 소재의 경우 상대적으로 높은 수소추출엔탈피(62-68 kJ/mol-H₂)를 가지며, 흡열량 공급을 위해서는 추출된 수소의 약 28% 정도를 탈수소화 반응열로 사용해야 함. 따라서 수소 저장-추출 RTE 75% 달성을 위해서는 소재의 수소추출엔탈피가 MCH-toluene 대비 약 20% 이하로 낮출 수 있는 소재 설계가 필요

세부기술 : LOHC (탈)수소화 촉매 제조 기술

- (기술정의) 신규 LOHC 소재로부터 가역적으로 수소 저장-추출을 가능케 하는 고효율/고내구성 촉매 제조 기술
- (필요성) 현재 다양한 LOHC 소재를 활용한 수소화 및 탈수소화 반응용 고효율성 및 고내구성 촉매가 존재하지 않으며, 따라서 개발된 신규 LOHC로부터 장기 성능이 확보된 (탈)수소화 촉매 개발이 반드시 필요

라

기술확보 전략

● 소재-부품-장비 확보전략

- (소재) 단기적으로 상용화가 추진 중인 MCH-toluene, Monoenzyltoluene (MBT)-H12MBT, dibenzyltoluene (DBT)-H18DBT, 및 바이페닐 기반 LOHC의 경우 관련 기 확보된 (탈)수소화 촉매의 해외 특허를 확보함. 중·장기적으로는 신규 LOHC 소재의 원천 특허 및 LOHC 물질 및 촉매 저장화 기술 특허를 확보
- (부품) (i) 가변압 반응기 내 LOHC를 공급할 수 있는 액체 펌프, (ii) 생성물에 포함된 LOHC 및 수소를 분리시킬 수 있는 기액 분리기, (iii) 미반응 수소를 순환하여 촉매 반응에 사용 가능한 수소 재순환장치 내 부품, (iv) 다양한 열원을 이용하여 반응열을 공급할 수 있는 다중 열원 공급 장치 내 핵심부품을 개발하고 관련 특허를 확보
- (장비) (탈)수소화 반응기 모듈, 열원공급 장치, 및 열관리 장치에 대한 원천 기술은 일본, 독일, 미국을 중심으로 확보되어 있으므로, 기 등록된 해외 특허의 면밀한 분석을 통해 공백 기술을 파악하고 LOHC 분야의 후발주자에서 핵심기술을 선점할 수 있는 기회를 모색

● 시스템 확보전략

* 기업공동활용센터 구축, 신기술 신제품 실증, 안전시험 검증센터 구축, 운전이력 확보 등을 통한 시스템 안정성 확보

- (설계·제작) 국내 LOHC 관련 시스템 기술은 정부출연연구소와 한국전력연구원의 주도로 확보되었음. KIST는 2017년 국내 최초로 신규 호모시클릭 기반 LOHC를 바탕으로 소규모 연속 수소저장 및 추출시스템을 구축하였으며, 2019년부터 과기정통부 지원 하 수소혁신기술개발사업을 통해서 LOHC 수소추출시스템 원천기술을 개발하였음. KRICT(수소추출용량: 2.3 Nm³-H₂/h)의 경우 신규 헤테로시 클릭 기반 LOHC를 바탕으로 소규모 연속 수소 저장 시스템을 개발하였음. 한국전력연구원은 2017년 자체사업을 통해서 LOHC 시스템 기술을 확보하기 시작했으며, 2019년 산업자원부 수전해 P2G 기술개발 사업을 통해서 배치타입의 20 Nm³-H₂/h 급 회분식 LOHC 수소 저장 및 추출시스템을 개발 중임 (TRL4 수준). 상기 기술개발을 통해 축적된 기술을 기반으로 스케일업 설계 기술 확보 및 제작·실증 추진

- (시험·인증) 기 확보된 시스템 설계안을 바탕으로 수소 안전 및 시험 평가에 전문성을 가진 인증 기관을 중심으로 지속적인 성능 검증을 수행함. 추출식 수소 제조 장치의 국제 표준 안전기준인 ISO 16110-1을 참고하여서, LOHC 시스템의 오버홀(overhaul) 간격으로 예상하는 8,000시간 정도의 연속 운전 실증 자료를 확보해 나감. 그 외에 LOHC 특화된 시험 규격이 필요한 경우, 이와 관련 국제 표준을 제정한 후 소재·부품·시스템 단위에서 장기 안전성 시험을 시행함. 이와 관련해서 산업계 주관으로 수행하되, 필요에 따라서 전문 연구소나 학교 부설 연구기관을 참여시킴

● 국내외 실증(Scale-up) 방안

- 대규모 LOHC 기반 수소 추출 시스템 구성을 위해서 산·학·연간의 협력과 다수의 기업 협력이 필수적임. 일본 치요다화학건설의 LOHC 대형 시스템 실증 성공사례를 살펴보면, LOHC 핵심 연구 역량은 일본 정부와 회사 내부 과제로 수행했지만, 대규모 대형 시스템 실증 (> 300 Nm³-H₂/hr)의 경우 치요다화학건설 (플랜트 건설), 미츠비시상사 (종합상사), 미츠이물산 (종합상사), 니혼유센 (해운사)을 중심으로 구성된 기업 연합체 (The Advanced Hydrogen Energy Association for Technology Development, AHEAD)에 의해서 수행되었음
- 국내 실증 방안은 다음과 같음. 먼저 화학 플랜트 건설 기업이 중심이 되어서, 산·학·연 연계로 LOHC 관련 소재, 장비, 시스템 전 영역의 핵심 기술을 빠른 시일 내에 확보하고, 동시에 에너지·자원 공기업, 종합상사, 해운사와의 협력을 통해서 전세계적으로 가격경쟁력 및 탄소중립성을 확보한 재생전력 및 수소 자원을 발굴한 후 LOHC를 통한 해상 운송 전략을 수립함
- LOHC 관련 주요 소·부·장 관련 핵심기술 확보 후, 국내에서 연속 수소화-탈수소화 연계 시스템 실증을 통해 중대형 LOHC 수소화 및 탈수소화 플랜트 (> 100 Nm³-H₂/hr)의 성능, 장기 내구성, 및 운전기술을 확보. 이는 이전에 일본 치요다화학이 진행한 '50Nm³-H₂/hr급 연속 수소화-탈수소화 연계 시스템 실증 (>10000 시간)을 통한 스케일업 연구개발'의 예를 국산 기술로서 벤치마킹하는 것임
- 초기 연구개발을 통해서 확보된 LOHC 연속 수소화 및 탈수소화 플랜트 관련 기술을 바탕으로 해외 수소 (블루·그린 수소) 생산 거점에 LOHC 수소화 플랜트를 설치하고, LOHC 수소저장시스템의 고효율화 및 고내구성화 기술을 확보함. 동시에 해외에서 도입된 LOHC+의 탈수소화를 통한 효과적이고 경제적인 국내 수소 공급 방안을 마련하고, 이를 바탕으로 LOHC 수소추출시스템을 대용량 거점형 수소생산기지로서 확대

● 인프라 구축 방안

- (인력양성) 다양한 학문 분야 연계 및 융합 전공의 학생 양성이 필수적임. 경쟁력이 확보된 에너지 솔루션을 제시할 수 있는 “에너지 인력 양성”을 위해서, 다양한 전공분야에 지식을 확보한 인재 양성을 위한 학부 교육 프로그램이 필수적임. 또한 LOHC 소재 및 촉매, 반응기, 시스템 전 분야에서 연구 개발을 이끌 수 있는 인재를 확보하기 위해서, 화학, 화공, 재료, 기계 분야에 대해서 대학원생 지원 프로그램이 필요함

- (국제협력) LOHC 기반 CO₂-free 청정수소의 저가 대량 생산 기술 확보를 위해서는 국제 협력이 필수임. 청정수소의 생산은 재생전력과 미활용 화석연료가 풍부한 해외 국가(예: 미국, 사우디아라비아, 호주, 캐나다, 여러 동남아 국가 등)이 주도할 가능성이 높고, 따라서 청정수소를 활용한 LOHC 수소저장시스템은 해외 수소생산시스템과 상호 연계하여 개발되어야 함. 그러므로, LOHC 기반 해외 수소 도입을 위한 전주기 과정의 효율화 및 경제성 확보를 위해서는 국제협력이 반드시 필요함
- (법·제도 개선) LOHC의 물리 화학적 특성은 가솔린 디젤과 비슷하기 때문에, 기존의 석유 산업과 관련된 법·제도를 그대로 승계할 수 있다는 장점이 있음. 다만, 신규 제안되는 LOHC의 경우는 아직 안정성 및 환경성 평가가 이뤄져 있지 않아서 관련 법규와 제도가 미비한 경우가 있기 때문에, 향후 연구 개발 및 기술 활용 시 제약이 있을 수 있음. 신규 LOHC의 제안 후, 관련 촉매, 반응기, 시스템 기술이 갖춰지기 전부터 사용 관련 법 제도를 개선할 필요가 있음

마

탄소중립 기여 효과

● 탄소중립 기술과의 연계성

- 탄소중립을 위해서는 재생에너지 보급이 중요하며, 글로벌 재생에너지 보급 확대를 위해서는 장거리 운송이 가능한 고효율 수소 저장·운송 기술이 반드시 요구됨
- LOHC 기술은 현존하는 저장·운송 인프라를 활용할 수 있어 해외에서 생산된 대용량 수소를 장거리 운송을 통해 경제적인 방법으로 국내로 보급할 수 있는 후보기술이며, 수소를 저장하고 추출하는 반응에서 CO₂ 배출이 관여하지 않음
- 그러나 LOHC를 활용한 수소저장 및 추출반응에서 반응에 필요한 열원을 공급해야 하므로, 탄소중립 실현을 위해서는 높은 Round Trip Efficiency (RTE > 75%) 달성이 필요하고 이를 위한 핵심 기술 개발이 요구됨

● 탄소중립 기여도

- 1,000 · 10,000 Nm³-H₂/hr 급 LOHC 시스템 도입에 따른 CO₂ 감축량 계산(도시가스 수소 추출 방식 대비 감축량)
- H₂ 1 Nm³ 생산 시 도시가스 사용량 = 0.36 LNG Nm³(오사카가스 hyserve-300 자료 참고)
- 연간 수소생산량: 1,000 Nm³/h급 제품: 1,000 × 24 × 365 = 8,760,000 H₂ Nm³/year·unit, 10,000 Nm³/h급 제품: 10,000 × 24 × 365 = 87,600,000 H₂ Nm³/year·unit
- 1,000 Nm³/h급 도시가스 제품 1대: 0.36 LNG Nm³/H₂ Nm³ × 0.608 TC (ton of carbon equivalent)/LNG Nm³ × 8,760,000 H₂ Nm³/year·unit × 1unit = 1,917,389 TC/year, 10,000 Nm³/h급 도시가스 제품 1대: 19,173,890 TC/year

위원회 명단

| 성명 | 소속 | 직위 |
|--------|------------|---------|
| 정기석(★) | 한국에너지기술평가원 | PD(위원장) |
| 정성일 | 한국에너지기술평가원 | PM |
| 강경수 | 한국에너지기술연구원 | 책임 |
| 김용열 | 한국지역난방공사 | 부장 |
| 김호석 | 아크로랩스 | 소장 |
| 노길태 | 한국선급 | 수석 |
| 문상봉 | 엘캠텍 | 대표이사 |
| 박은덕 | 아주대학교 | 교수 |
| 박현서 | 한국과학기술연구원 | 책임 |
| 윤창원 | 포항공과대학교 | 교수 |
| 이근태 | 한국기계연구원 | 책임 |
| 이임철 | SK 주식회사 | 팀장 |
| 정상열 | 효성중공업(주) | 팀장 |
| 조원철 | 한국에너지기술연구원 | 책임 |
| 조은애 | 한국과학기술원 | 교수 |
| 채호정 | 한국화학연구원 | 책임 |
| 박수영 | 한국에너지기술평가원 | 간사 |

2050 탄소중립 에너지기술 로드맵

| | |
|-------|--------------------------------|
| 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)를 통해서도 보실 수 있습니다.
무단 전재 및 복사를 금합니다.

2050 탄소중립 에너지기술 로드맵
KOREA INSTITUTE OF ENERGY TECHNOLOGY
EVALUATION AND PLANNING