

2026년도  
에너지기술개발사업  
연구개발과제기획보고서

수 소

# 목 차

|                          |    |
|--------------------------|----|
| I . 동향분석 .....           | 1  |
| 1. 개 요                   |    |
| 2. 산업·기술동향               |    |
| 3. 특허동향                  |    |
| 4. 표준화동향                 |    |
| 5. 정부R&D 지원현황            |    |
| 6. 시사점                   |    |
| II . 기획대상연구개발과제 도출 ..... | 12 |
| 1. 연구개발과제기획방향            |    |
| 2. 개발위험 관리방안             |    |
| 3. 기획연구개발과제 품목개요서        |    |

## 1. 개 요

### □ 개 념

- (차세대 수소생산) 태양광 등 재생에너지를 직접 활용하여 수소를 생산하는 기술로, 화석연료를 기반으로 하는 수소 생산 기술에 비해 이산화탄소를 발생 하지 않고, 한정된 화석연료를 소모하지 않은 친환경 수소 생산 기술임
- (광전기화학/광촉매 시스템) 태양광을 이용하여 반도체 광전극에서 물을 직접 분해하여 수소를 생산하는 기술로, 광전극은 광촉매가 전극에 담지된 형태인 전극 형태이고, 광촉매 기술은 입자 타입임
- \* (광전기화학) 전해질 내에 담지된 광전극을 통해 광흡수와 표면 반응을 매개합하여 비교적 낮은 시스템 복잡성 대비 높은 효율을 보인다는 큰 장점이 있지만, 성공적인 상용화를 위해서는 효율 및 장기 안정성 개선이 필수적이며, 특히 대면적화 전략의 부재가 극복해야 할 주요 한계로 지적됨
- \*\* (광촉매) 광흡수, 전하 생성 및 분리, 표면 반응이 하나의 입자 내에서 모두 동시에 이루어져 시스템 구성이 매우 단순하다는 것이 장점이지만, 전하 재결합 및 역반응을 억제하여 효율을 높이고 혼합된 수소와 산소를 효율적으로 분리해야 하는 기술적 난제가 있으며, 장기 안정성 확보 역시 상용화를 위해 반드시 해결해야 할 한계로 작용됨

### □ 주요이슈

- (차세대 수소생산 - 광전기화학/광촉매 시스템) 태양광을 직접 활용하여 수소를 생산할 수 있는 광전기화학/광촉매 시스템은 에너지 변환 단계를 최소화할 수 있는 차세대 수소 생산 기술로 주목받고 있으며, 재생에너지 기반 수소 생산 확대를 위한 핵심 기술로 부각되고 있음
- 기존 금속 산화물 기반 광전극은 높은 안정성을 가지나 제한적인 광흡수 능력과 낮은 전하 전달 효율로 인해 광전환 효율 향상에 한계가 존재
- 입자형 광촉매는 전극 제조 및 전력 변환 단계를 최소화할 수 있는 장점이

있으나, 수소·산소 분리, 역반응 억제 및 전하 재결합 제어가 어려움

⇒ 효율과 경제성을 동시에 만족할 수 있는 차세대 광전극/광촉매 소재 및 구조 개발 필요

○ 최근 페로브스카이트, 실리콘, 유기 반도체, 칼코젠화물, III-IV족 화합물 등 고효율 광전극/광촉매 소재 기반 연구가 진행되고 있으며, 높은 광전환 성능을 확보할 수 있는 기술로 주목받고 있음

- 상기 소재는 우수한 광흡수 특성과 전하 생성 효율을 보이나 수용액 환경에서의 낮은 안정성 및 장기 운전 시 성능 저하 문제 존재
- 이에 따라 보호층 설계, 계면 공학 및 구조 안정화 기술을 통한 내구성 확보가 핵심 기술로 부각되고 있음

⇒ 고효율 소재의 안정성 확보를 통한 실질적 수소 생산 기술로의 전환 필요

○ 현재 광전기화학/광촉매 시스템은 주로 소면적 수준에서 성능 검증이 이루어지고 있으며, 실제 수소 생산 시스템으로의 확장에 기술적 한계 존재

- 대면적화 과정에서 전하 이동 저항 증가, 광 흡수 불균일 및 계면 반응 손실로 인해 성능 저하 발생
- 전극 간 전기적 연결 및 모듈 구성 시 저항 손실 및 시스템 설계 문제가 추가적으로 발생

⇒ 성능 저하 없이 확장 가능한 대면적 광전극/광촉매 모듈 설계 기술 확보 필요

○ 재생에너지 기반 수소 생산 확대 및 분산형 에너지 시스템 수요 증가에 따라, 광전기화학/광촉매 기반 수소 생산 기술의 실증 및 상용화 요구 증가

- 온사이트 수소 생산 및 분산형 공급 시스템 구축을 위해 시스템 단위 기술 확보 필요
- 장시간 운전 시 부식 및 계면 열화로 인해 안정적인 수소 생산 유지에 어려움 존재

⇒ 대면적 모듈 및 시스템 통합을 기반으로 한 실증 가능한 광전기화학/광촉매 수소 생산 기술 개발 필요

## 2. 산업·기술 동향

상용화 수준 효율의 대면적 그린수소 생산을 위한 광전기화학/광촉매 시스템 개발

### □ 해외 동향

- 광전기화학(PEC) 기반 수소 생산 기술은 아직 대규모 상용 플랜트 단계에는 이르지 않았으나, 유럽 및 미국을 중심으로 대면적 광전극 및 모듈 기반 실증 연구가 활발히 진행되고 있음
  - 헬름홀츠 센터(Helmholtz-Zentrum Berlin, HZB) 및 스위스 EPFL 등에서는 페로브스카이트/실리콘 탠덤 광전극을 기반으로 10% 이상의 무전원(unbiased) 태양광-수소 변환 효율을 달성하였으며, 소면적 셀을 넘어 모듈 수준으로 확장하기 위한 연구를 수행 중
  - 특히 보호층 및 캡슐화 기술을 적용한 광전극 안정화 연구를 통해 수십 시간 수준의 연속 운전이 가능한 시스템이 보고되고 있음
  - 미국 NREL 및 Caltech 등에서는 광전기화학 시스템의 스케일업을 위해 다중 셀 연결 및 패널형 반응기 설계 기술을 개발하고 있으며, 수십 cm<sup>2</sup> 이상의 대면적 광전극 기반 수소 생산 실증 연구가 진행 중
  - 일본 동경공대, Panasonic, Toshiba 등은 광전기화학 및 광촉매 기반 수소 생산 기술을 장기적 관점에서 연구 중이며, 태양광-수소 직접 변환 기술을 차세대 수소 생산 기술로 지속적으로 투자하고 있음
- 광촉매(PC) 기반 수소 생산 기술은 일본, 미국 및 유럽을 중심으로 광촉매 시트, Z-scheme 및 입자형 광촉매 기반 전체 물분해 연구가 활발히 진행되고 있으며, 최근에는 대면적 패널형 광촉매 반응기 기술 개발이 확대되고 있음
  - 특히 일본은 광촉매 시트 기반 태양광 수소 생산 기술을 중심으로 장기 실증 연구를 추진하고 있으며, 미국 Caltech 및 유럽 EPFL 등을 중심으로 입자형 광촉매 기반 전체 물분해 연구가 진행되고 있음

## □ 국내 동향

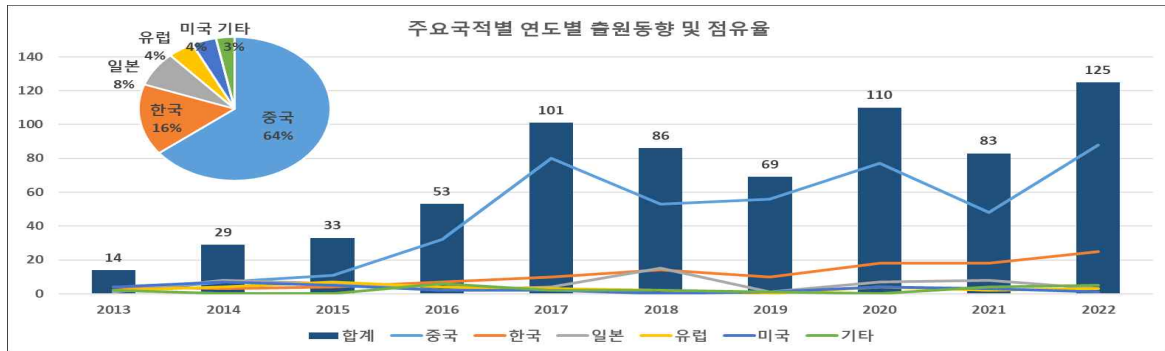
- 광전기화학(PEC) 관련, 국내에서는 UNIST, KAIST, POSTECH 등을 중심으로 광전기화학 수소 생산 기술 연구가 수행되고 있으며, 주로 고효율 광전극 소재 개발 및 계면 제어 기술에 집중되어 있음
  - 최근 페로브스카이트 및 실리콘 기반 광전극을 활용한 고효율 PEC 수소 생산 연구가 보고되고 있으며, 일부 연구에서는 무전원 조건에서 수소 생산이 가능한 수준의 성능을 확보
  - 그러나 대부분 연구는  $\text{cm}^2$  수준의 소면적 셀 기반 성능 평가 단계에 머물러 있으며, 대면적 모듈 및 시스템 수준으로의 확장 연구는 제한적인 수준
  - 국내 기업의 경우 광전기화학 기반 수소 생산 기술에 대한 직접적인 플랜트 구축 사례는 아직 부족하며, 주로 수전해 중심의 그린수소 사업이 추진되고 있는 상황
  - 이에 따라 향후 차세대 수소 생산 기술 확보를 위한 기술 개발 및 대면적 실증 연구 필요성이 증가하고 있음
- 광촉매(PC) 관련, 국내에서는 탄소질화물, 산질화물 및 산화물 기반 입자형 광촉매를 활용한 태양광 수소 생산 및 전체 물분해 연구가 수행되고 있음
  - 입자형 광촉매 기반 수소 생산 기술은 단순한 시스템 구조와 저비용 대면적화 가능성을 가지나, 수소·산소 분리 및 역반응 억제가 주요 기술 과제로 제시되고 있음

### 3. 특허 동향

○ 차세대 수소 생산 - 광전기화학 시스템(PEC)/광촉매(PC)

- 전세계 주요 5개국 광전기화학 수소생산 관련 특허('13~'22년)는 CAGR 25%로 성장해오고 있으며, 한국 또한 CAGR 20%로 꾸준한 성장세를 보임

<주요 국적별 시계열 특허출원 동향('13~'22)>



- 전세계 주요 5개국 특허 점유율은 중국 64%, 한국 16%, 일본 8% 순으로, 중국이 과점(Oligopoly)하고 있으며 한국, 일본이 뒤를 이음

<주요 국적별 특허출원 동향>

| 국적 | '13 | '14 | '15 | '16 | '17 | '18 | '19 | '20 | '21 | '22 | 합계  | CAGR | 해외비중(%) |
|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|---------|
|    | 1   | 7   | 11  | 32  | 80  | 53  | 56  | 77  | 48  | 88  | 453 | 56.3 | 2.4     |
|    | 4   | 3   | 4   | 7   | 10  | 14  | 10  | 18  | 18  | 25  | 113 | 20.1 | 13.3    |
|    | 1   | 8   | 6   | 2   | 4   | 15  | 1   | 7   | 8   | 3   | 55  | 11.6 | 90.9    |
|    | 2   | 4   | 7   | 4   | 3   | 2   | 0   | 4   | 2   | 3   | 31  | 4.1  | 71.0    |
|    | 4   | 7   | 5   | 2   | 2   | 0   | 1   | 4   | 3   | 1   | 29  | 0    | 48.3    |
| 기타 | 2   | 0   | 0   | 6   | 2   | 2   | 1   | 0   | 4   | 5   | 22  | 9.6  | 54.5    |
| 합계 | 14  | 29  | 33  | 53  | 101 | 86  | 69  | 110 | 83  | 125 | 703 | 24.5 | -       |

\* 해외특허비중: 전체 출원특허 중 특허출원인이 자국 외 타국에 출원한 특허 비율(특허패밀리 국가 2개국 이상)

- 전세계 광전기화학 수소생산 관련 주요 출원인은 울산과학기술원 22건 (3%), 텐진대 19건(2.6%), 라오닝대 18건(2.4%)의 순

<주요 출원인별 특허출원 동향>

| 순위 | 전세계        |     |        |        | 국내        |        |        |
|----|------------|-----|--------|--------|-----------|--------|--------|
|    | 출원인명       | 국적  | 출원수(건) | 점유율(%) | 출원인명      | 출원수(건) | 점유율(%) |
| 1  | 울산과학기술원    | 한국  | 22     | 3      | 울산과학기술원   | 22     | 19.4   |
| 2  | 텐진대        | 중국  | 19     | 2.6    | 한국과학기술연구원 | 8      | 6.7    |
| 3  | 랴오닝대       | 중국  | 18     | 2.4    | 한국세라믹기술원  | 7      | 5.9    |
| 4  | 쑤저우대       | 중국  | 16     | 2.1    | 한국광기술원    | 7      | 5.9    |
| 5  | 장쑤대        | 중국  | 16     | 2.1    | 연세대       | 6      | 5      |
| 6  | 화난이공대      | 중국  | 15     | 2.0    | 서울대       | 6      | 5      |
| 7  | 일본전신전화주식회사 | 일본  | 15     | 2.0    | 전남대       | 5      | 4.2    |
| 8  | 서북사범대      | 중국  | 13     | 1.7    | 에쓰대시오일    | 5      | 4.2    |
| 9  | 타이저우학원     | 중국  | 12     | 1.6    | 울산대       | 4      | 3.3    |
| 10 | 킹파드 석유광물대  | 사우디 | 9      | 1.2    | 광주과학기술원   | 4      | 3.3    |

## 4. 표준화 동향

### □ 해외 동향

- 차세대 수소 생산을 위한 광전기화학 셀(PEC, Photoelectrochemical Cell), 광촉매(PC, Photocatalytic), 양성자 세라믹 전기화학 셀(PCEC, Protonic Ceramic Electrochemical Cell) 기술의 경우 초기 연구 단계이며 국제 표준이 부재한 상황으로 표준화 개발 필요
- 광전기화학 셀(PEC, Photoelectrochemical Cell) 기술의 경우 ISO/IEC 등 국제 표준이 없는 상황으로 미국 NREL에서는 광전기화학 셀의 주요 표준화 요소로 ① STH의 핵심 성능 지표화, ② 시험 장치 구성 표준화, ③ 광원(빛) 조건 표준화, ④ 수소 측정 방법 표준화, ⑤ 데이터 처리 보고 방식 등을 연구하여 표준화 방향을 제시
  - \* 출처: Best Practices in PEC Water Splitting: How to Reliably Measure Solar-to-Hydrogen Efficiency of Photoelectrodes, NREL, 2022
- 광촉매(PC, Photocatalytic) 기반 수소 생산 기술은 현재 ISO/IEC 등 국제 표준이 없는 상황으로 최근 Nature Publishing Group의 “Photocatalytic Water Splitting” 논문에서는 광촉매 수소생산 분야에서 반드시 필요한 핵심 표준화 항목들로 ①광원(Light Source) 조건, ②광촉매 성능지표, ③반응기 형상, ④장기 안전성 시험 ⑤ 광촉매 수소 발생량 검증 등 표준화 방향을 제시
  - \* 출처: Photocatalytic Water Splitting, Nature Reviews Methods Primers, 2023



## 5. 정부R&D 지원현황

상용화 수준 효율의 대면적 그린수소 생산을 위한 광전기화학/광촉매 시스템 개발

### □ 투자 동향

- 정부의 광전기화학(PEC)/광촉매(PC) 수소 생산 분야 R&D는 2000년대 이후 주요 과제 기준 최소 580억 원대 규모로 지원된 것으로 추정되며, 이 중 PEC 분야는 최소 470억 원대, PC 분야는 최소 110억 원대 규모임
  - \* 국가과학기술지식정보서비스(NTIS)에서 “광전기화학”, “태양광 수소생산”, “광전기화학 물분해”, “광전극”, “인공나뭇잎”, “광촉매” 혹은 “광화학적 물분해” 등 키워드를 사용한 조회 결과임
- 광전기화학(PEC) 분야는 그동안 광전극 소재, 촉매, 보호막 등 기초·원천연구 중심으로 지원 되어왔으며, 최근에는 대면적화 및 시스템화를 목표로 한 중장기 기술개발로 확대되는 추세임
- 광촉매(PC) 분야 역시 광촉매 소재, 광흡수, 전하분리 효율, 반응 활성화 등 기초·원천연구가 지속되어 왔으나, PEC에 비해 대면적 시스템화 과제는 아직 제한적인 수준임

### □ 기술개발 현황

- 미국 에너지부(DOE) 및 국내 “수소기술 미래전략(22)”에서는 광전기화학/광촉매 수소 생산 기술의 상용화를 위해 고효율(Solar-to-Hydrogen), 장기 안정성, 대면적 시스템 구현을 핵심 목표로 제시하고 있음. PEC는 고효율 시스템 구현, PC는 저비용·대면적 전개 측면에서 각각 장점을 가지며, 두 기술 모두 상용화를 위해 소재·시스템 통합 기술 고도화가 요구됨
- PEC 관련 국내외 기술은 그동안 소면적 광전극 기반 원천연구 중심으로 발전해 왔으나, 최근에는 대면적 광전극 및 시스템 구현 단계로 확장되는 추세이며, 국내는 세계 최고 수준 효율을 달성하는 등 (Nature Energy 9, 272 - 284 (2024)) 원천기술 경쟁력을 확보하고 있음
  - 그러나 현재 국내외 성과는 대부분 소면적·단기 조건에 국한되어 있으며, 효율, 내구성, 대면적화 및 시스템 통합 측면에서 상용화 수준에는

미치지 못하는 상황임

- 특히 금속 산화물은 안정성은 높으나 낮은 효율 등 효율 - 경제성 trade-off 문제가 존재하여, 페로브스카이트, 실리콘, 칼코젠화물, III-V족 반도체 등 차세대 소재 개발 요구됨
- 또한 대면적 시스템 구현 시 효율 저하, 광전극 열화, 장기 안정성 부족 문제가 발생하므로, 이를 해결하기 위해 대면적 제조 공정, 장기 안정성 확보, 수소 생산 시스템 설계 및 전주기 평가 기술 확보 필요함
- PC 관련 국내외 기술은 그동안 기초·원천연구 중심에서, 최근 해외 주도로 100 m<sup>2</sup>급 광촉매 패널 반응기 실증(Nature 598, 304 - 307 (2021)) 등 대면적 전개 가능성이 제시됨. 국내의 대면적 시스템 개발은 해외 대비 아직 제한적이나, 최근 1 m<sup>2</sup>급 광촉매 반응기 등 관련 시도가 이루어지고 있음(Nature Nanotechnology 18, 754 - 762 (2023))
- 그러나 현재 국내외 성과는 모두 효율이 낮아 상용화 요구 수준에 미치지 못하고 있으며, 고효율 수소생산을 위해서는 가시광 응답 광촉매 소재, 전하 재결합 억제, 조촉매, Z-scheme 기반 전하분리 구조, 광촉매 시트화 및 장기 안정성 확보가 필요함
- 또한 대면적 시스템 구현을 위해서는 광촉매 패널 제조공정, 역반응 억제, 생성가스 회수·분리, 폭발 안전 설계, 장기 운전 안정성 평가 및 수소 생산단가 분석이 필요함

< 광전기화학(PEC) 시스템 분야 주요 R&D 현황 >

| 사업명                   | 과제명                                                           | 주요내용                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 부처명<br>(전문기관)         | 기간                |
|-----------------------|---------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|-------------------|
| 수소에너지<br>혁신기술<br>개발사업 | 포톤제어기술에 의한 스케일업<br>PEC 수소생산 고효율화<br>핵심원천기술 개발                 | <ul style="list-style-type: none"> <li>대면적 PEC 수소생산의 효율 저하 극복 위한 포톤제어 기반 핵심원천기술 개발</li> <li>저저항 투명전극, 광전극 구조 제어, 나노 기술 기반 광흡수·전하분리 효율 향상 기술 개발</li> <li>스케일업 PEC 모듈 설계·제작 및 CO<sub>2</sub>-free 태양광 PEC 수소생산 시스템 구현 추진</li> </ul>                                                                                                                                                                                                     | 과학기술정보통신부<br>(한국연구재단) | '19.09<br>~'23.12 |
| 미래수소원천<br>기술개발사업      | 광전극 탠덤 소자 기반 저가<br>고순도 그린수소 생산 시스템<br>개발                      | <ul style="list-style-type: none"> <li>저가 원소 기반으로 고품질 광전극 소자를 개발하고, 상부층 계면 개질 (접합면 개질, 촉매, 보호층)과 고성능 이온 전달 멤브레인을 통해서 산소 없이 고순도(95%)의 그린 수소 생산 시스템을 구현</li> <li>1. 저가원소 기반 광전극의 성능 향상 기술</li> <li>2. 전기화학 반응 및 구조 이해를 통한 대량 수소 생산 연구</li> <li>3. 반영구적 수소 생산을 위한 고안정성 소재 심화 연구</li> <li>4. 나노시트 기반 layer 설계를 통한 고효율 수소 발생 광전극 소재 탐색</li> <li>5. 고순도 수소 생산을 위한 탠덤 시스템 개발</li> </ul>                                                      | 과학기술정보통신부<br>(한국연구재단) | '21.04<br>~'25.12 |
| 미래수소원천<br>기술개발사업      | 광손실 에너지 활용을 통한<br>고효율, 대면적, 광에너지 융합형<br>PEC 수소생산 기술 개발        | <ul style="list-style-type: none"> <li>전기촉매, 광촉매, 열촉매 결합된 대면적 광전극 개발</li> <li>집광 및 태양열 활용 통해 PEC 구동전압 낮춰 외부전압 없이 고효율 수소생산 시스템 구현</li> <li>태양전지와 PEC를 일체형 또는 분리형으로 결합한 PV-PEC 시스템 설계하고 분리막·MEA 구조·전해질 공급 및 수소 분리 구조 최적화</li> </ul>                                                                                                                                                                                                     | 과학기술정보통신부<br>(한국연구재단) | '21.07<br>~'22.12 |
| 미래수소원<br>천기술개발<br>사업  | 고효율 100cm <sup>2</sup> 광전기화학 셀<br>기반 물분해 핵심요소기술<br>개발         | <ul style="list-style-type: none"> <li>외부 전원 없이 구동 가능한 100 cm<sup>2</sup>급 PEC 물분해 셀 및 고순도·고압 수소 생산 기반기술 개발</li> <li>대면적 전극 제작·코팅·전사, PV-PEC 소자 최적화, 수소 분리막·이온교환막 적용기술 개발</li> <li>10×10cm<sup>2</sup> PV-PEC 시스템, STH ≥7%, 수명 ≥ 50시간 구현 목표</li> </ul>                                                                                                                                                                                | 과학기술정보통신부<br>(한국연구재단) | '21.07<br>~'24.12 |
| 미래수소원천<br>기술개발사업      | 유기금속 할라이드<br>페로브스카이트 기반<br>고효율 무전압<br>광전기화학 수소생산<br>시스템 개발    | <ul style="list-style-type: none"> <li>광전기화학에 적합한 안정성이 확보된 대면적(혹은 모듈로 구성된) 유기금속 할라이드 페로브스카이트를 제작하는 기술 개발. 페로브스카이트 소재를 금속 포일과 유기용매를 포함하지 않는 전도성 페이스트를 기반으로 차폐하는 기술 개발. 고효율 고안정성의 페로브스카이트 광전극을 무전압 상태로 구동하기 위한 이중 광조사 및 대면적(혹은 모듈) 광전극 제조 기술 개발.</li> <li>1. 고효율 및 안정성이 확보된 페로브스카이트 소재 개발</li> <li>2. 페로브스카이트 기반 광전기화학 물분해 셀 제조 기술 개발</li> <li>3. STH 10% 이상, 작동면적 100 cm<sup>2</sup> 이상, 구동시간 50시간 이상, 수소생산량 16 mmol/시간 이상.</li> </ul> | 과학기술정보통신부<br>(한국연구재단) | '21.07<br>~'26.12 |
| 미래수소원천<br>기술개발사업      | 무독성, 저비용 소재 기반<br>인공 나뭇잎형 광전기화학<br>탠덤 소자 및 고압 수소 생산<br>시스템 개발 | <ul style="list-style-type: none"> <li>무독성·저비용 소재(BiVO<sub>4</sub>-Si) 기반 인공 나뭇잎형 PEC 탠덤 물분해 소자 개발</li> <li>열적 안정성을 갖는 TCO 증착공정, MOD 기반 BiVO<sub>4</sub> 증착공정 및 안정성 개선</li> <li>외부 전원 의존도 낮춘 일체형 PEC 물분해 소자 및 고압 수소 생산 시스템 설계·실증</li> </ul>                                                                                                                                                                                           | 과학기술정보통신부<br>(한국연구재단) | '21.07<br>~'26.12 |

< 광촉매(PC) 시스템 분야 주요 R&D 현황 >

| 사업명                   | 과제명                                                            | 주요내용                                                                                                                                                                                                                                                 | 부처명<br>(전문기관)         | 기간                |
|-----------------------|----------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|-------------------|
| 개인기초연구<br>(과기정통부)     | 물 분해 수소 생산을 위한<br>고성능 유기 초분자 광촉매<br>소재 개발                      | <ul style="list-style-type: none"> <li>유기 초분자 기반 광촉매 물분해 수소생산 시스템 개발</li> <li>기존 희토류·금속 중심 광촉매를 유기 공액성 분자 기반 소재로 대체하여 저비용·친환경 수소생산 가능성 제시</li> <li>태양광 물분해 수소생산 성능 및 구조-성능 상관관계 규명</li> </ul>                                                        | 과학기술정보통신부<br>(한국연구재단) | '17.11<br>~'22.10 |
| 개인기초연구<br>(과기정통부)     | 산화물 반도체와 탄소 기반<br>소재를 결합한 고효율 녹색<br>수소생산 광촉매 핵심기술<br>개발        | <ul style="list-style-type: none"> <li>산화물 반도체와 탄소 기반 소재를 결합한 고효율 광-수소 변환 광촉매 개발</li> <li>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>@N-doped graphene 및 단일원자 조촉매 기반 코어-셸 광촉매 구조 설계·제작</li> <li>DFT 모델링과 물성 분석을 통해 광촉매 구조 최적화, 높은 수소생산 속도 및 양자 효율 달성 목표</li> </ul>   | 과학기술정보통신부<br>(한국연구재단) | '22.03<br>~'25.02 |
| 이공학학술연<br>구기반구축사<br>업 | 양자빔 조사 활용 0차원 결합<br>제어를 통한 물 분해 수소발생<br>광촉매 활성 향상에 관한 기초<br>연구 | <ul style="list-style-type: none"> <li>광촉매/탄소 복합체에 양자빔 조사하여 0차원 결합 및 이중원소 생성을 제어하고 수소발생 활성을 향상시킴</li> <li>전기방사·열처리 기반 광촉매/탄소 복합체 제조 및 태양광 물분해 수소발생 평가</li> <li>하전입자·중성자 조사에 따른 결합 구조, 전하거동 및 수소발생 활성 향상 메커니즘 규명</li> </ul>                           | 교육부                   | '22.05<br>~'27.06 |
| 개인기초연구<br>(과기정통부)     | 전하거동 정밀 제어를 통한<br>그린수소생산용 Z-scheme<br>광촉매의 전하전달 최적화<br>연구      | <ul style="list-style-type: none"> <li>가시광 감응형 광촉매로 구성된 고효율 물분해 수소생산 Z-scheme 광촉매 개발</li> <li>도핑 및 표면 리간드 제어, transient absorption 기반 전하거동 분석 통해 전하전달 효율 최적화</li> <li>Solar-to-hydrogen (STH) 효율 3% 달성 및 5 × 5 cm<sup>2</sup> 광촉매 모듈 구현</li> </ul>   | 과학기술정보통신부<br>(한국연구재단) | '22.06<br>~'25.02 |
| 개인기초연구<br>(과기정통부)     | 그린 수소 생산을 위한 물분해<br>유기광촉매 개발                                   | <ul style="list-style-type: none"> <li>효과적인 물분해 수소생산을 위한 p형/n형 광흡수 고분자 및 유기반도체 기반 광촉매 개발</li> <li>도너-억셉터 구조 및 전도성 유기광촉매 설계를 통해 광흡수 영역, 전하 생성·이동, 물과의 계면 전하전달 특성 최적화</li> <li>고분자-유기반도체 기반 물분해 광촉매 물질 스크리닝, 높은 수소생산 효율 및 가시광 영역 양자효율 달성 목표</li> </ul> | 과학기술정보통신부<br>(한국연구재단) | '24.05<br>~'29.04 |

## 6. 시사점

상용화 수준 효율의 대면적 그린수소 생산을 위한 광전기화학/광촉매 시스템 개발

### □ 원천기술 경쟁력 기반 고효율·고안정성 확보 및 시스템 확장을 위한 R&D 투자 확대 필요

- 국내외 광전기화학(PEC)/광촉매(PC) 기반 수소 생산 기술은 그동안 광전극 소재 중심의 원천기술 개발(소면적 기반 연구)에 집중되어 왔으며, 최근에는 이러한 연구 성과를 기반으로 대면적 광전극, 입자형 광촉매 및 시스템 구현 단계로 확장되는 추세를 보이고 있음. 특히 국내의 경우 다중접합 기반 고효율 PEC 시스템 등에서 세계 최고 수준의 성능이 보고되는 등 원천기술 경쟁력을 확보하고 있음
- 그러나 현재까지의 기술개발은 대부분 소면적·단기 운전 기반의 실험실 연구에 머물러 있어, 상용화를 위해서는 소면적 고효율(Solar-to-Hydrogen) 및 장기 안정성 확보를 기반으로 시스템 설계 및 실증으로 확장하는 중장기 R&D 투자 확대가 필요함

### □ 대면적 시스템 구현을 위한 성능 유지·경제성 확보 핵심기술 개발 필요

- 현재 PEC/PC 기술은 금속 산화물 기반 소재를 이용하여 안정성은 우수하나, 낮은 효율 문제가 존재함
- 또한 대면적 시스템으로 확장 시 광전극 균일도 저하, 전하 전달 및 모듈 간 전기적 손실 증가로 인해 소면적 대비 효율 크게 감소하며, 광전극 열화 및 광부식으로 인한 장기 안정성 확보에도 한계가 있음
- 더불어 수소/산소 분리, 가스 수집 및 안전 운전, 시스템 제어, 플랜트 설계 및 생산단가(LCOH) 분석 등 시스템 수준 기술이 부족하여 산업화 단계로의 진입이 제한되고 있음
- 따라서 고효율·저비용 광전극/광촉매 소재 개발과 함께, 대면적 제조 공정, 모듈 연결 시 성능 유지, 장기 운전 안정성 확보, 시스템 설계 및 경제성 검증 기술 확보가 핵심 과제로 요구됨

## II.

## 기획대상연구개발과제 도출

### 1. 연구개발과제기획 방향

#### ☐ 연구개발과제기획 기본방향

- 청정수소 생산 확대를 위한 차세대 수소 생산 상용화 기술 개발

#### ☐ 신규 예산 지원 계획안

(단위 : 억원)

| 구 분  | 원천기술 | 혁신제품형 | 계 |
|------|------|-------|---|
| 지정공모 | -    | -     | - |
| 품목지정 | -    | 7     | 7 |
| 자유공모 |      | -     | - |
| 계    | -    | 7     | 7 |

#### ☐ 기획대상연구개발과제 현황

| 연구개발과제(품목)명                                         |                                                     | 연계 수요 (도출근거)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
|-----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 기획대상주제명                                             | 기획대상<br>연구개발과제(품목)명                                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| 상용화 수준 효율의<br>대면적 그린수소<br>생산을 위한<br>광전기화학 시스템<br>개발 | 상용화 수준 효율의<br>대면적 그린수소<br>생산을 위한<br>광전기화학 시스템<br>개발 | <ul style="list-style-type: none"> <li>○ 정부정책 <ul style="list-style-type: none"> <li>- (새정부 국정과제) 에너지고속도로 구축을 위<br/>한 청정수소 생태계 구축</li> <li>- (10대 탄소중립 전략) 재생에너지 기반 청정<br/>수소 생산 기술 확보 및 경제성 향상 추진</li> </ul> </li> <li>○ 기술수요조사명 <ul style="list-style-type: none"> <li>- 상용화 목표 효율을 초과하는 광전기화학 그린<br/>수소 대면적 시스템 개발 (일부반영)</li> <li>- 광촉매(PC) 기반 태양광 직접수소 생산 1 kW급<br/>통합 증 및 가스처리 시스템(BOP 스킴) 기술<br/>개발 (일부반영)</li> <li>- 태양광 기반 수소 생산기술 개발 및 실증 (일부반영)</li> <li>- GaN/InGaN Tandem 광전극 기반 무바이어스<br/>PEC 차세대 수소생산 원천 및 모듈화 기술개발<br/>(일부반영)</li> </ul> </li> </ul> |

□ 사업화 연계성과 발생 가능성

| 연구개발과제(품목)명                                                 |                                                         | 지식재산권 |    |       |                  | 표준 <sup>2)</sup> | 인증 <sup>3)</sup> |
|-------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|-------|----|-------|------------------|------------------|------------------|
|                                                             |                                                         | 등록특허  |    | 소프트웨어 | 기타 <sup>1)</sup> |                  |                  |
| 기획대상<br>주제명                                                 | 기획대상<br>연구개발과제<br>(품목)명                                 | 해외    | 국내 |       |                  |                  |                  |
| 상용화 수준<br>효율의 대면적<br>그린수소 생산을<br>위한<br>광전기화학/광촉<br>매 시스템 개발 | 상용화 수준 효율의<br>대면적 그린수소<br>생산을 위한<br>광전기화학/광촉매<br>시스템 개발 | △     | ○  | △     | ×                | △                | △                |

\* 동 기획과제 수행을 통해 발생할 수 있는 사업화 연계성과(지재권, 표준·인증)를 예측하여 발생가능성을 ○(높음) / △(보통) / ×(낮음) 중 선택하여 제시

1) 실용신안, 디자인, 상표 등 기타 지식재산권

2) 국제표준, 국가표준, 단체표준의 제·개정(표준화연계형 과제는 보통 이상으로 제시 必)

3) 법적임의 인증(KS인증, 고효율에너지기자재인증, 신제품인증(NEP), 신기술인증(NET), 녹색인증, 제로에너지건축물인증, 소프트웨어품질(GS)인증 등)

## 2. 개발위험 관리방안

상용화 수준 효율의 대면적 그린수소 생산을 위한 광전기화학/광촉매 시스템 개발

### □ 기술개발 위험요인

- 고효율 광전기화학/광촉매 소재의 안정성 확보가 어려움
  - 페로브스카이트, 유기 반도체, 칼코젠화물, III-IV족 반도체 등 고효율 소재는 수용액 환경에서 광부식 및 계면 열화로 인해 장시간 운전 시 성능 저하 발생 가능
  - 보호층 설계, 계면 공학 및 이종접합 구조를 통한 안정화 기술 개발이 필수적임
- 대면적 광전극/광촉매 시스템 확장 시 성능 저하가 발생함
  - 소면적에서 확보된 광전류 및 효율이 대면적화 과정에서 전하 이동 저항 증가, 광 흡수 불균일 등으로 인해 감소할 가능성 존재
  - 대면적 전극 및 광촉매 시스템 설계 최적화, 전극 간 전기적 연결 및 반응기 구조 설계 등을 통해 성능 저하 최소화 필요
- 시스템 통합 및 운전 안정성 확보 어려움
  - 광전극, 광촉매, 전해질 및 반응기 통합 시 기체 발생, 전해질 순환 및 열 관리 등 다양한 운전 변수로 인해 시스템 안정성 확보에 한계 존재
  - 반응기 설계 및 운전 조건 최적화, 모듈 단위 성능 검증을 통한 시스템 안정성 확보 필요
- 수소생산시스템의 화학적 위험요소 있으며, 수소가스에 의한 화재·폭발 등의 위험이 내포되어 있으므로 안전관리형 과제로 지정이 적합함

### □ 사업화 애로사항

- 광전기화학/광촉매 시스템의 초기 경제성 확보 한계
  - 기존 수전해 대비 기술 성숙도가 낮아 초기 투자 비용 및 시스템 단가 경쟁력 확보에 어려움 존재



- 공정 단순화 및 저비용 소재 적용, 대면적 제조 공정 개발을 통해 경제성 확보 전략 필요

#### ○ 시스템 수준 실증 및 데이터 부족

- 대부분 연구가 실험실 수준에 머물러 있어, 시스템 단위 수소 생산 성능 및 장기 운전 데이터 부족
- 모듈 기반 연속 운전 실증을 통해 성능 및 신뢰성 데이터 확보 필요

### □ 사회환경 위험요인

- (수소 생산 시스템의 안전성 확보 필요) 광전기화학/광촉매 수소 생산 시스템은 수소와 산소를 동시에 발생시키는 특성상 가스 누출 및 혼합에 따른 폭발 위험성이 존재하며, 특히 대면적 시스템으로 확장 시 안전 설계 및 운영 기준 확보가 필수적임. 이에 따라 수소 생산·분리·저장 과정 전반에 대한 안전성 검증 및 관리 기준 마련 필요
- 태양광 기반 분산형 수소 생산 시스템의 경우 주거 지역 또는 산업 현장 인근 설치 가능성이 높아, 수소 설비에 대한 안전성 인식 부족 및 주민 수용성 문제가 발생할 수 있음. 이에 따라 안전성 검증 데이터 확보와 함께 제도적 기준 마련 및 사회적 수용성 확보 방안이 요구됨
- 광전기화학/광촉매 시스템은 전해질, 소재 사용에 따라 폐기물 및 화학 물질 처리 문제가 발생할 수 있으며, 장기적으로 환경 영향 최소화를 위한 소재 선택 및 공정 관리 필요

### □ 기술영향 검토

- 광전기화학/광촉매 기반 수소 생산 기술은 재생에너지를 직접 활용하는 분산형 수소 생산 체계를 가능하게 하여, 기존 중앙집중형 에너지 공급 구조에서 분산형 에너지 시스템으로의 전환을 촉진할 것으로 예상
- 기존 수전해 중심의 수소 생산 기술과 달리 태양광-수소 직접 변환 기술이 확대될 경우, 전력망 의존도가 낮은 새로운 에너지 생산 방식이 도입되며 에너지 산업 구조 변화 및 관련 산업 생태계 재편 가능성 존재

- 광전기화학/광촉매 시스템의 대면적화 및 상용화가 이루어질 경우, 수소 생산 단가 절감 및 온사이트 수소 공급 확대를 통해 수소 모빌리티, 발전 및 산업 공정 등 다양한 분야로의 적용 확대가 기대됨
- 반면, 초기 단계 기술의 산업 적용 과정에서 성능 및 안정성 검증이 충분하지 않을 경우 기술 신뢰성에 대한 우려가 제기될 수 있으며, 이에 따라 실증 데이터 확보 및 표준화 기반 마련이 필요

### 3. 기획연구개발과제 품목개요서

[품목개요서]

품목명 : 상용화 수준 효율의 대면적 그린수소 생산을 위한 광전기화학 시스템 개발 ..... 18

# '26년도 에너지기술개발사업 신규연구개발과제 품목개요서 (품목지정)

|      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |                |        |        |
|------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|--------|--------|
| 관리번호 | 2026-신재생-수소-품목-1                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 산업<br>기술<br>분류 | 중분류 I  | 중분류 II |
| 과제유형 | <input type="checkbox"/> 원천기술 <input checked="" type="checkbox"/> 혁신제품<br><input type="checkbox"/> 실증형                                                                                                                                                                                                   |                | 신재생에너지 | -      |
| 해당여부 | <input type="checkbox"/> 통합형 <input checked="" type="checkbox"/> 안전관리형 <input type="checkbox"/> 표준연계 <input type="checkbox"/> 경쟁형 R&D <input type="checkbox"/> 국가핵심기술<br><input type="checkbox"/> 국제공동 <input type="checkbox"/> 공기업협력 <input type="checkbox"/> 혁신도전형 <input type="checkbox"/> 규제샌드박스 연계형 |                |        |        |
| 품목명  | 상용화 수준 효율의 대면적 그린수소 생산을 위한 광전기화학/광촉매 시스템 개발<br>(TRL : [시작] 4단계 ~ [종료] 6단계)                                                                                                                                                                                                                               |                |        |        |

## 1. 개념 및 개발내용

### ☐ 개념

- 광전기화학 (Photoelectrochemical, PEC)/광촉매 (Photocatalytic, PC) 시스템의 기술 목표치인 태양광 그린수소 생산율= $1.2 \times 10^{-6} \text{ kg s}^{-1} \text{ m}^{-2}$  (또는 Solar-to-hydrogen conversion(STH), 15%)을 대면적 모듈 셀(최소 100~1,000  $\text{cm}^2$  모듈)에서 유지할 수 있는 PEC/PC 그린수소 생산 기술 개발
- ※ 본 과제의 그린수소 생산은 태양광을 직접 물에 조사하여 물분해를 통한 수소생산방식으로 분리정제를 포함한 생산 전주기 공정의 탄소배출이 청정수소 기준(<4kgCO<sub>2</sub>eq/kgH<sub>2</sub>) 충족 필수
- ※ 태양광 수소생산율: 1-sun에서 단위 면적( $\text{m}^2$ ), 단위 시간(sec) 당 수소 생산량(kg, 1-sun hydrogen productivity)

**\* 핵심목표 : 대면적 모듈 셀 (최소 100~1,000  $\text{cm}^2$  모듈) 에서  
태양광 그린수소 생산율 =  $1.2 \times 10^{-6} \text{ kg s}^{-1} \text{ m}^{-2}$  (또는 STH = 15%) 기술 개발**

### ☐ 개발내용

- 소면적 셀에서 태양광 그린수소 생산율= $1.6 \times 10^{-6} \text{ kg s}^{-1} \text{ m}^{-2}$  (또는 STH=20%) 이상의 성능 달성 기술 개발
- 대면적 모듈(최소 100~1,000  $\text{cm}^2$  이상)에서 태양광 그린수소 생산율= $1.2 \times 10^{-6} \text{ kg s}^{-1} \text{ m}^{-2}$  (또는 STH=15%) 이상의 성능 달성 기술 개발
- 본 대면적 시스템( $\geq 5,000 \text{ cm}^2$ )에서 1,000 시간(필드 태양광 조사, 수소생산 운전시간) 이상 태양광 그린수소 생산 안정성을 확보하는 기술 개발 (1,000 시간 안정성 테스트 후 기존의 70% 이상의 효율 유지)
- 본 PEC/PC 시스템 상용화를 목표로 그린수소 생산공정 패키지 (Process Package) 수준 설계 도면을 제시하고, 수소 생산단가 경제성 분석 및 태양전지/수전해(PV-EC) 시스템 대비 경제성 비교 분석

연구개발계획서 제출시 다음의 항목의 정량적 목표치 및 상용화 수준 제시 필수  
- 태양광 수소생산율(kg/s ·  $\text{m}^2$ ), 대면적 모듈 면적( $\text{cm}^2$ ) 및 총 면적( $\text{cm}^2$ ), 수소 생산 가동 시간(h), 수소 가격(원/kg), PV-EC 비교 경제성 분석 결과(건) 수소 생산 플랜트 설계 도면(건) 제시 등

### ☐ 개발위험 극복방안

- 수소 발생 및 전해질 사용 환경에서의 안전성 확보를 위해 가스 분리 구조, 누출 감지 시스템 및 안전 운전 프로토콜 구축 필요
- 대면적 시스템( $\geq 5,000 \text{ cm}^2$ )의 경우, 실제 자연 태양광 조건에서 현장 테스트 필수

## □ 안전관리 사항

- 본 연구개발과제는 「안전관리형 연구개발과제」로 연구개발계획서 제출시 ‘연구개발 과제별 안전관리계획’을 제출해야 함 (적정성을 검토하여 부적정시 지원 제외함)
- 위험물질 취급연구개발과제 여부 : 해당(수소)
- 공정 설계 시 수소와 산소의 분리 정제공정을 포함한 생산 전 공정에서의 안전성 방안 제출 필수

## 2. 지원 필요성

### □ 지원 필요성

- **(정책적)** 2050 탄소중립 실현을 위해 재생에너지 기반 그린수소 생산 기술 확보가 필수적이며, 광전기화학(PEC)/광촉매(PC) 기반 그린수소 생산 기술\*은 무탄소 전원 연계 차세대 핵심 기술로서 국가 전략기술 확보 측면에서 중요함  
\* 태양광 발전과 수전해 시스템을 결합한 기존방식 (PV-EC) 대비 시스템 간소화 및 저가의 비용으로 인해 그린수소 생산단가를 획기적으로 낮출 수 있는 차세대 원천 기술임
- **(기술적)** 기존 연구에서  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{BiVO}_4$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  등 안정한 금속 산화물 기반 광전극/광촉매는 낮은 효율( $\leq 0.4 \times 10^{-6} \text{ kg s}^{-1} \text{ m}^{-2}$ , 5 %)과 대면적시 급격한 효율 감소를 보여 상용화에 한계가 있음. 기존의 안정한 물질의 효율 향상 접근에서 벗어나, 페로브스카이트, 실리콘, 유기물, 칼코젠화물(chalcogenide), III-V족 반도체 등 효율이 높은 광전극/광촉매 소재의 불안정성을 극복하는 전략과 시스템 간소화 및 생산성 향상을 통한 경제성을 확보하는 전략으로 기술개발 추진 필요
- **(시장적)** 광전기화학/광촉매 수소생산 기술은 그린수소 생산의 잠재 핵심기술로 2035년까지 약 2,300억 달러(약 300조 원) 규모의 그린수소 시장 형성에 기여 기대
- **(사회적)** 분산형 수소 생산 및 공급 인프라 구축과 산업용 수소 수요 증가에 대응하기 위해 현장형(온사이트) 수소 생산 기술 확보가 필요하며, 향후 에너지 전환 및 자원 순환 산업으로의 확장 가능성이 큼

### □ 활용분야

- 태양광 온사이트 그린수소 생산 시스템, 수소 충전소 및 분산형 수소 공급 인프라

## 3. 지원기간/예산/추진체계

### □ 기간 : 42개월 이내

### □ 정부지원연구개발비 : '26년 7억원 내외 (총 정부출연금 45억원 이내)

### □ 주관연구개발기관 : 제한없음

### □ 기술료 징수여부 : 징수

### □ 기타사항 : 기업 참여 필수 (수요기업 참여 권고)

※ 광전기화학(PEC)/광촉매(PC) 시스템 개발 중 택1 하여 연구개발계획서 작성·제출