

R&D /
RS-2022-
00156149

보안 과제(), 일반 과제() / 공개(), 비공개() 발간등록번호(11-B552989-000880-01)
국토교통연구기획사업(R&D) 최종보고서

R&D / RS-2022-00156149

대용량 청록수소 공급 시스템 기술개발 기획

최종보고서

2023.09.27.

주관연구기관 / (주)이니씹크
공동연구기관 / (주)비츠로넥스텍

국토교통부
국토교통과학기술진흥원

대용량

청록수소

공급

시스템

기술개발

기획

최종보고서

2023

국토교통과학기술진흥원
국토교통부

제 출 문

국토교통부장관(국토교통과학기술진흥원장) 귀하

‘대용량 청록수소 공급 시스템 기술개발 기획’(연구개발 기간 : 2022.05.04. ~ 2023.05.03.)
과제의 최종보고서를 제출합니다.

2023. 09. 27.

주관연구기관명 : (주)이니씽크 (대표자) 이 기 종

공동연구기관명 : (주)비츠로넥스텍 (대표자) 이 병 호



주관연구기관책임자: 이 기 종

공동연구기관책임자: 박 상 훈

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제37조에 따라 최종보고서 열람에
동의합니다.

< 요약 문 >

사업명		국토교통연구기획사업				총괄연구개발 식별번호 (해당 시 작성)		-					
내역사업명 (해당 시 작성)		-				연구개발과제번호		R&D/RS-2022-00156149					
기술 분류	국가과학기술 표준분류	EF 0609	60%	EF 0104	35%	EF 0305	5%						
	부처기술분류 (해당 시 작성)	1순위 소분류 코드명	%	2순위 소분류 코드명	%	3순위 소분류 코드명	%						
총괄연구개발명 (해당 시 작성)		대용량 청록수소 공급 시스템 기술개발 기획											
연구개발과제명		대용량 청록수소 공급 시스템 기술개발 기획											
전체 연구개발기간		2022.05.04. ~ 2023.05.03.											
총 연구개발비		총 200,000 천원 (정부지원연구개발비: 200,000천원, 기관부담연구개발비 : -)											
연구개발단계		기초[] 응용[] 개발[] 기타(위 3가지에 해당되지 않는 경우)[√]			기술성숙도 (해당 시 기재)		착수시점 기준() 종료시점 목표()						
연구개발과제 유형 (해당 시 작성)		-											
연구개발과제 특성 (해당 시 작성)		-											
연구개발 목표 및 내용	최종 목표		대용량 청록수소 공급을 위한 플라즈마트론 기술개발 및 실증 사업 기획										
	전체 내용		① CO ₂ -Free 수소공급도시 설계를 위한 청록수소 사용량 예측기술 개발 기획										
			② 도시내 청록수소 공급을 위한 플라즈마트론 기술개발 기획										
			③ 수소충전소 규모 수소공급이 가능한 파일럿 플랜트 설계 및 제작 기술개발 기획										
			④ 수소 시범도시 규모 수소공급이 가능한 실증플랜트 설계.제작 및 운전 기술개발 기획										
1단계 (해당 시 작성)		목표	대용량 청록수소 공급을 위한 플라즈마트론 기술개발 및 실증 사업 기획										
		내용	• 수소생산과정에서 발생하는 CO ₂ 배출을 최소화하기 위한 탄화수소 직접분배 기술기반의 대용량 청록수소 공급 시스템을 실현하기 위한 기술개발 기획 추진										
n단계 (해당 시 작성)		목표											
		내용											
연구개발성과		• 대용량 청록수소 공급 시스템 기술개발 사업 기획의 타당성 확보를 통해 신규사업 기획 및 예산확보											
연구개발성과 활용계획 및 기대 효과		• (정부 정책이행) 「수소경제 활성화 로드맵」 및 「수소 기술개발 로드맵」 등 정부의 수소경제 전환 정책 달성에 기여 • (수소 공급단가 안정화) 수소와 동시에 고품질 탄소소재 생산가능하므로 수소 공급 단가를 낮춤으로써 수소 경제 활성화 촉진 • (수소 생산·공급 기술 확보) 수소 생산 및 공급 인프라 기술의 확보로 수소 수요의 급증에 대비하고, 청록 수소 생산 기술의 확보로 친환경성 확보에 대비 • (기술자립) 국내 수소경제 관련 기술 개발 및 실증을 통하여 국내 기술의 우수성을 확보하고 세계 수소경제를 선도 • (신기술 확보) 수소 생산 방식에 따른 다양한 실증 데이터 확보 - 탄소중립 실현을 위한 청정수소에너지 공급 기술 확보											
연구개발성과의 비공개여부 및 사유		-											
연구개발성과의 등록·기탁 건수		논문	특허	보고서 원문	연구 시설· 장비	기술 요약 정보	소프트 웨어	표준	생명 정보	생물 자원	화합물	신품종 정보 실물	
		-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
연구시설·장비 종합정보시스템 등록 현황		구입 기관	연구시설· 장비명	규격 (모델명)	수량	구입 연월일	구입가격 (천원)	구입처 (전화)	비고 (설치장소)		ZEUS 등록번호		
		-	-	-	-	-	-	-	-		-		
국문핵심어 (5개 이내)		연구개발 사업기획			CO ₂ -Free 탄화수소 직접분배		대용량 청록수소 공급		시스템 실용화		청록수소		
영문핵심어 (5개 이내)		R&D Project Planning			Decomposition of Hydrocarbons for the CO ₂ -free		Large-scale Turquoise Hydrogen Supply		System Commercialization		Turquoise Hydrogen		

목 차

1장 사업 추진 배경 및 계획 수립 경과	1
1절 사업정의 및 범위	1
2절 추진 배경	4
3절 사업추진 필요성 및 시급성	10
4절 사업추진 근거	16
5절 기획추진구성 및 주요 경과	22
2장 청록수소 개념 및 중요성	27
1절 청록수소 개념	27
2절 청록수소 생산기술의 포지셔닝	31
3절 청록수소 기술개발 이슈 정의 및 전략 도출	33
4절 청록수소 기술 선정 및 규모	40
3장 국내외 환경분석	43
1절 메가트렌드 분석	43
2절 국내외 정책동향	58
3절 국내외 시장·산업동향	75
4절 국내외 기술동향	106
4장 R&D 역량분석	133
1절 정부R&D 투자 현황	133
2절 기술수준 분석	143
3절 유사사업 분석 및 차별성·연계방안	150
4절 연구인력 및 인프라 분석	163
5절 특허 분석	171
6절 수요조사	181

5장 사업 기본설계	187
1절 사업 도출과정	187
2절 세부과제 도출의 적절성	191
3절 사업체계도	194
4절 사업 논리모형	202
6장 중점분야별 추진계획	205
1절 [중점분야1] 청록수소 생산 기술 개발 및 실증설비 제작	207
2절 [중점분야2] 고체탄소 포집 및 고부가가치 전환 기술개발	266
3절 [중점분야3] 도시 내 수소 공급을 위한 플랫폼 개발 및 Plant 구축 운영	301
7장 사업추진체계 및 운영방안	363
1절 사업 추진체계	363
2절 사업 관리전략	365
3절 소요예산 및 소요인력	372
4절 실증계획	373
8장 사전 타당성 분석	387
1절 과학기술적 타당성	387
2절 정책적 타당성	391
3절 경제적 타당성	403
4절 기대효과	418

표 목 차

〈표 I-1〉 동 사업의 구성 및 주요내용	1
〈표 I-2〉 미래경제에 미치는 전지구적 리스크의 발생가능성	4
〈표 I-3〉 국제 주요 기후변화 협정	5
〈표 I-4〉 탄소중립 법제화 국가('21.12 기준)	6
〈표 I-5〉 탄소세, 탄소국경세 도입에 따른 국내 기업 부담 전망	8
〈표 I-6〉 블루수소, 그린수소 장점 및 한계	11
〈표 I-7〉 동 사업의 필요성 및 시급성(요약)	15
〈표 I-8〉 사업추진 근거법령	16
〈표 I-9〉 사업 추진 관련 상위정책 및 계획	17
〈표 I-10〉 플랜트 R&D 관련 추진근거 및 부처별 역할분담	20
〈표 I-11〉 기술기획위원회 구성	22
〈표 I-12〉 사업기획 추진경위	24
〈표 II-1〉 수소 분류 및 정의	28
〈표 II-2〉 주요 수소생산기술 분류	31
〈표 II-3〉 (요약) 기술개발 현황 및 이슈	33
〈표 II-4〉 주요 청정수소생산기술별 수소생산단가 분석	38
〈표 III-1〉 STEEP 분석에 활용한 국내외 보고서 및 연구	43
〈표 III-2〉 STEEP 분석 관점의 대외적 환경변화 트렌드	44
〈표 III-3〉 기술발전으로 인한 미래사회 변화	46
〈표 III-4〉 산업혁명 주요 핵심기술 밸류체인의 영향력	49
〈표 III-5〉 메가트렌드 분석과 사업핵심 유관이슈	57
〈표 III-6〉 국내 정책동향 요약	58
〈표 III-7〉 국정과제 내 연관내용	59
〈표 III-8〉 새정부 수소경제 정책방향	59
〈표 III-9〉 제5차 과학기술기본계획 내 연관내용	60
〈표 III-10〉 수소분야 주요 기술 분류	61
〈표 III-11〉 수소기술 미래전략 내 연관내용	61
〈표 III-12〉 2023년 주요업무 추진계획(국토교통부)	66
〈표 III-13〉 해외 정책동향 요약	67
〈표 III-14〉 인프라 투자 및 일자리 법안 내 기술 관련 투자 내용 중 동 사업 관련 내용	68
〈표 III-15〉 EU 수소전략의 주요 내용	69

〈표 III-16〉 독일 수소·연료전지 기술 혁신프로그램(NIP) 주요 내용	69
〈표 III-17〉 독일 수소전략의 주요 내용	70
〈표 III-18〉 영국 청정수소 지원 방안	71
〈표 III-19〉 영국 청정수소 보급 전략 및 목표	72
〈표 III-20〉 호주 주(州)별 수소전략의 주요 내용	72
〈표 III-21〉 일본 수소전략의 주요 내용	73
〈표 III-22〉 중국 수소연료전지 단계별 목표	74
〈표 III-23〉 중국 수소전략의 주요 내용	74
〈표 III-24〉 국내외 시장·산업동향 요약	75
〈표 III-25〉 독일 수소경제 주기별 시장 규모	79
〈표 III-26〉 EU 주요국 수소 생산시장 규모 전망	80
〈표 III-27〉 미국 수소경제 주기별 시장규모	80
〈표 III-28〉 북미 주요국 수소 생산시장 규모 전망	80
〈표 III-29〉 중국 수소경제 주기별 시장규모	81
〈표 III-30〉 아시아 주요국 수소 생산시장 규모 전망	81
〈표 III-31〉 일본 수소산업 시장 규모 전망	81
〈표 III-32〉 호주 수소경제 주기별 시장 규모	82
〈표 III-33〉 호주 수소 생산시장 규모 전망	82
〈표 III-34〉 주요 기업별 투자 계획(안)	83
〈표 III-35〉 주요 기업 액화수소 플랜트 투자 현황	83
〈표 III-36〉 국내 추출 수소 공급량 확대 계획	85
〈표 III-37〉 국내 청정수소 기업 현황 및 전략	89
〈표 III-38〉 응용시장별 특수 카본블랙 시장 규모	91
〈표 III-39〉 북미 주요국 특수 카본블랙 시장 규모 전망	92
〈표 III-40〉 유럽 주요국 특수 카본블랙 시장 규모 전망	93
〈표 III-41〉 아시아 주요국 특수 카본블랙 시장 규모 전망	93
〈표 III-42〉 천연가스 생산 및 수요 공급(2013~2021년)	96
〈표 III-43〉 미국 내 에너지기업의 천연가스 기술개발 동향	99
〈표 III-44〉 캐나다 내 LNG터미널 현황(서부)	100
〈표 III-45〉 캐나다 내 LNG터미널 현황(동부)	100
〈표 III-46〉 LNG Canada 프로젝트 수출전망	101
〈표 III-47〉 러시아 LNG 수출액 (2018 ~ 2021년)	103
〈표 III-48〉 러시아 내 천연가스 연관 기업 동향	103
〈표 III-49〉 천연가스 생산 및 수요 공급(2013~2021년)	104
〈표 III-50〉 국내 천연가스 공급인프라 현황 및 확대 계획	105

〈표 III-51〉 국내외 기술동향 요약	106
〈표 III-52〉 메탄 열분해(Methane Pyrolysis) 기술 구분에 따른 기업 기술동향	109
〈표 III-53〉 촉매를 이용한 청록수소 공정 개발시 고려해야 할 주요 특징 및 기술적 이슈	113
〈표 III-54〉 카본블랙 종류 및 특성	116
〈표 III-55〉 최근 수소 및 고부가가치 부산물 동시 생산 연구 동향	117
〈표 III-56〉 국내 기업의 수소 관련 투자계획	122
〈표 III-57〉 국내 청록수소 관련 R&D 현황	123
〈표 III-58〉 수소 생산 및 활용 국내 사례	126
〈표 IV-1〉 NTIS 검색 키워드 및 과제 검색 결과(2017~2022)	133
〈표 IV-2〉 정부 R&D 연도별 투자현황 (수소분야)	134
〈표 IV-3〉 정부 R&D 연도별 정부연구비 투자현황	135
〈표 IV-4〉 정부 R&D 부처별 투자현황(2016~2022)	136
〈표 IV-5〉 부처별-연도별 정부연구비 현황	137
〈표 IV-6〉 부처별-연도별 지원과제수 현황	137
〈표 IV-7〉 정부 R&D 연구단계별 투자현황(2016~2022)	138
〈표 IV-8〉 정부 R&D 연구수행주체별 투자 현황	139
〈표 IV-9〉 동 기획사업과의 차별성	140
〈표 IV-10〉 유사과제와의 차별성 및 연계가능성	141
〈표 IV-11〉 수소·연료전지 기술의 범위	143
〈표 IV-12〉 에너지·자원 분야 기술수준 분석	143
〈표 IV-13〉 수소·연료전지 기술 수준 및 격차	144
〈표 IV-14〉 기술수준 및 기술격차 판단의 근거	144
〈표 IV-15〉 동 사업의 범위와 관련성이 높은 국토교통 분야	145
〈표 IV-16〉 플랜트분야 기술수준 및 기술격차(2019)	146
〈표 IV-17〉 신재생에너지 플랜트분야 기술수준 및 기술격차(2019)	146
〈표 IV-18〉 수소생산/인프라 분야 기술수준 및 기술격차(2019)	147
〈표 IV-19〉 수소생산/인프라 기술격차 발생원인	149
〈표 IV-20〉 국가연구개발사업의 중복성 분석 기준틀	150
〈표 IV-21〉 중복성 검토를 위한 검토대상사업 목록	151
〈표 IV-22〉 중복성 조사결과 요약	152
〈표 IV-23〉 유사사업 중복성 조사결과 요약	152
〈표 IV-24〉 수소에너지혁신기술개발사업 주요내용	154
〈표 IV-25〉 미래수소원천기술개발사업 주요내용	155
〈표 IV-26〉 기후변화대응기술개발사업 주요내용	156
〈표 IV-27〉 그린수소생산및저장시스템기술개발 주요내용	157

〈표 IV-28〉 신재생에너지핵심기술개발사업 주요내용	158
〈표 IV-29〉 수소시범도시인프라기술개발 주요내용	159
〈표 IV-30〉 상용급액체수소플랜트핵심기기술개발 주요내용	160
〈표 IV-31〉 해양바이오수소생산상용화기술개발 주요내용	161
〈표 IV-32〉 폐자원에너지화기술개발사업 주요내용	162
〈표 IV-33〉 울산광역시 추진일정표	164
〈표 IV-34〉 국내 총 연구개발인력 현황 및 연도별 국토교통분야 연구개발인력	167
〈표 IV-35〉 수행업무별 국토교통분야 연구개발인력 보유현황	168
〈표 IV-36〉 주체별 국토교통분야 연구개발인력 보유현황	168
〈표 IV-37〉 '20년 국토교통분야 연구원 1인당 연구개발비 및 1억 원당 연구원 현황	169
〈표 IV-38〉 '20년 주체별 국토교통분야 연구원의 학위별 현황	170
〈표 IV-39〉 국토교통분야 연구원의 전공 현황 및 비중	170
〈표 IV-40〉 청록수소 핵심기술 및 기술개발을 위한 기술분류	171
〈표 IV-41〉 검색 DB 및 검색범위	171
〈표 IV-42〉 수소산업 밸류체인 검색식	172
〈표 IV-43〉 기술동향 조사항목	172
〈표 IV-44〉 동 사업의 과제테마별 기술수요 현황(중복포함)	181
〈표 IV-45〉 동 사업 참여의향기업 제출 기업	182
〈표 V-1〉 사업 도출 프로세스	187
〈표 V-2〉 종합분석 시사점	188
〈표 V-3〉 동 사업 SWOT분석과 전략방안	189
〈표 V-4〉 동 사업의 기본방향 정의	190
〈표 V-5〉 기술수요조사 결과(86건)	192
〈표 V-6〉 성과지표 선정을 위한 SMART 특성	195
〈표 V-7〉 성과목표/지표 및 달성목표	196
〈표 V-8〉 성과지표 산출근거	197
〈표 V-9〉 청록수소 공급 시스템 개발 총괄 로드맵	200
〈표 V-10〉 동 사업의 기술구성(안)	201
〈표 VI-1〉 중점분야1 핵심이슈와 해결방안 모색	219
〈표 VI-2〉 청록수소 생산 방식 중 플라즈마 방식의 우수성	221
〈표 VI-3〉 청록수소 생산 원료별 적용성 검토	222
〈표 VI-4〉 중점분야1 성과목표 및 지표	223
〈표 VI-5〉 중점분야1 기술구성	224
〈표 VI-6〉 청록수소 생산 기술 개발 및 실증설비 제작 연차별 추진계획	226
〈표 VI-7〉 핵심기술 확보전략	227

〈표 VI-8〉 중점분야1 추진체계 및 협력방안	228
〈표 VI-9〉 중점분야1 성과물 활용전략	229
〈표 VI-10〉 중점분야1 시장진입 전략	229
〈표 VI-11〉 중점분야1 위험요인 및 대응전략	230
〈표 VI-12〉 중점분야1 연차별 소요예산	230
〈표 VI-13〉 중점분야1 연차별 소요인력	230
〈표 VI-14〉 중점분야1 과제로드맵	231
〈표 VI-15〉 동 사업의 기대효과(As-Is / To-Be)	232
〈표 VI-16〉 핵심기술 1-1의 구성기술 범위	239
〈표 VI-17〉 핵심기술 정량적 성과목표	240
〈표 VI-18〉 핵심기술 개발목표	242
〈표 VI-19〉 차별성 및 연계방안 요약	246
〈표 VI-20〉 민간기술의 한계점 및 개발기술과의 차별성·연계성	247
〈표 VI-21〉 핵심기술 1-2의 구성기술 범위	251
〈표 VI-22〉 핵심기술 정량적 성과목표	252
〈표 VI-23〉 핵심기술 개발목표	252
〈표 VI-24〉 해외 압력변동흡착 관련 특허 동향	253
〈표 VI-25〉 국내압력변동흡착 관련 특허 동향	255
〈표 VI-26〉 차별성 및 연계방안 요약	257
〈표 VI-27〉 민간기술의 한계점 및 개발기술과의 차별성·연계성	258
〈표 VI-28〉 핵심기술 1-3의 구성기술 범위	260
〈표 VI-29〉 핵심기술 정량적 성과목표	262
〈표 VI-30〉 핵심기술 개발목표	263
〈표 VI-31〉 차별성 및 연계방안 요약	264
〈표 VI-32〉 민간기술의 한계점 및 개발기술과의 차별성·연계성	265
〈표 VI-33〉 카본종류별 사용용도 및 가격	267
〈표 VI-34〉 응용시장별 특수 카본블랙 시장 규모	270
〈표 VI-35〉 응용분야별 탄소나노튜브 시장 규모	273
〈표 VI-36〉 고체탄소 소재 기술수준	277
〈표 VI-37〉 중점분야 2의 핵심이슈와 해결방안 모색	278
〈표 VI-38〉 중점분야2 성과목표 및 지표	280
〈표 VI-39〉 중점분야 2의 기술구성(안)	280
〈표 VI-40〉 기술개발 연차별 추진계획(핵심기술 2-1)	281
〈표 VI-41〉 기술개발 연차별 추진계획(핵심기술 2-2)	282
〈표 VI-42〉 핵심기술 확보전략	283

〈표 VI-43〉 핵심기술 성과물 활용전략	284
〈표 VI-44〉 핵심기술 시장진입 전략	284
〈표 VI-45〉 핵심기술 위험요인 및 대응전략	284
〈표 VI-46〉 중점분야2 연차별 소요예산	285
〈표 VI-47〉 중점분야2 연차별 소요인력	285
〈표 VI-48〉 동 사업의 기대효과(As-Is / To-Be)	287
〈표 VI-49〉 고무용 카본블랙의 분류(미국재료시험학회)	290
〈표 VI-50〉 핵심기술 2-1의 구성기술 범위	294
〈표 VI-51〉 핵심기술 개발목표	294
〈표 VI-52〉 차별성 및 연계방안 요약	295
〈표 VI-53〉 핵심기술 2-2의 구성기술 범위	298
〈표 VI-54〉 핵심기술 개발목표	299
〈표 VI-55〉 차별성 및 연계방안 요약	300
〈표 VI-56〉 탄소세, 탄소국경세 도입에 따른 국내 기업 부담 전망	305
〈표 VI-57〉 중점분야1 핵심이슈와 해결방안 모색	321
〈표 VI-58〉 중점분야3 성과목표 및 지표	321
〈표 VI-59〉 중점분야3 기술구성	322
〈표 VI-60〉 기술개발 연차별 추진계획(핵심기술 3-1)	324
〈표 VI-61〉 기술개발 연차별 추진계획(핵심기술 3-2)	325
〈표 VI-62〉 기술개발 연차별 추진계획(핵심기술 3-3)	326
〈표 VI-63〉 중점분야3의 핵심기술 확보전략	327
〈표 VI-64〉 추진체계 및 협력방안(핵심기술 3-1)	328
〈표 VI-65〉 추진체계 및 협력방안(핵심기술 3-2)	328
〈표 VI-66〉 추진체계 및 협력방안(핵심기술 3-3)	329
〈표 VI-67〉 중점분야3 성과물 활용전략	330
〈표 VI-68〉 중점분야3 시장진입 전략	330
〈표 VI-69〉 중점분야3 위험요인 및 대응전략	331
〈표 VI-70〉 중점분야3 연차별 소요예산	332
〈표 VI-71〉 중점분야3 연차별 소요인력	332
〈표 VI-72〉 동 사업의 기대효과(As-Is / To-Be)	334
〈표 VI-73〉 핵심기술 3-1의 구성기술 범위	342
〈표 VI-74〉 핵심기술 정량적 성과목표	344
〈표 VI-75〉 핵심기술 개발목표	344
〈표 VI-76〉 차별성 및 연계방안 요약	345
〈표 VI-77〉 민간기술의 한계점 및 개발기술과의 차별성·연계성	346

〈표 VI-78〉 핵심기술 3-2의 구성기술 범위	347
〈표 VI-79〉 핵심기술 정량적 성과목표	348
〈표 VI-80〉 핵심기술 개발목표	348
〈표 VI-81〉 시설구축 개요	349
〈표 VI-82〉 시설물 개요	349
〈표 VI-83〉 플라스마-화학반응 설비 개요	351
〈표 VI-84〉 수소 분리·정제 설비 개요	352
〈표 VI-85〉 핵심기술 정량적 성과목표	358
〈표 VI-86〉 핵심기술 개발목표	358
〈표 VI-87〉 유사사업 비교 및 목표설정	359
〈표 VI-88〉 차별성 및 연계방안 요약	359
〈표 VI-89〉 민간기술의 한계점 및 개발기술과의 차별성·연계성	360
〈표 VII-1〉 사업추진 주체별 역할 및 기능	364
〈표 VII-2〉 사업 관리체계 및 주체	366
〈표 VII-3〉 선정평가 주요 절차 및 내용	367
〈표 VII-4〉 중간모니터링 항목	368
〈표 VII-5〉 최종평가 주요 절차 및 내용	369
〈표 VII-6〉 최종평가 평가항목 예시	370
〈표 VII-7〉 평가지표 및 배점(안)	371
〈표 VIII-1〉 연구부문별 투자계획	372
〈표 VIII-2〉 연구부문별 투자계획	372
〈표 VII-8〉 참여의향서 제출 지자체의 수소 연관 사업 현황	377
〈표 VII-9〉 공모 신청 유의사항	382
〈표 VII-10〉 서면·발표 평가기준표	383
〈표 VII-11〉 안전관리검토표 체크리스트	383
〈표 VIII-3〉 블루수소, 그린수소, 청록수소 장점 및 한계	388
〈표 VIII-4〉 모노리스社 기술과의 차별성	391
〈표 VIII-5〉 상위계획과의 부합성 조사 결과	392
〈표 VIII-6〉 상위계획과 부합성 평가	392
〈표 VIII-7〉 정부 주요계획과의 부합성 분석결과	393
〈표 VIII-8〉 중복성 검토를 위한 검토대상사업 목록	395
〈표 VIII-9〉 유사사업 중복성 조사결과 요약	395
〈표 VIII-10〉 유사과제와의 차별성 및 연계가능성	397
〈표 VIII-11〉 국가재정운용계획('22-'26) R&D 및 산업·중소기업·에너지 분야 투자계획	398
〈표 VIII-12〉 국토교통부 예산증가 추이	398

〈표 VIII-13〉 WTO 보조금 유형	399
〈표 VIII-14〉 WTO 보조금 위배사항 종합검토	400
〈표 VIII-15〉 주민수용성 제고를 위한 3단계 협의절차	401
〈표 VIII-16〉 연구부문별 투자계획	404
〈표 VII-12〉 R&D부문 예비타당성조사 편익항목	405
〈표 VIII-17〉 사업기여율 추정	407
〈표 VIII-18〉 정부 및 민간 R&D 투자규모 비교(2018)	407
〈표 VIII-19〉 해외 산업시설 건설 수주액 및 국내 유입액	408
〈표 VIII-20〉 편익 추정 결과	409
〈표 VIII-21〉 경제적 타당성 분석결과 요약	410
〈표 VIII-22〉 비용 및 편익현가의 연도별 추이	410
〈표 VIII-23〉 청록수소 플랜트 운영비용 추정	412
〈표 VIII-24〉 Monolith사 청록수소 및 고체탄소 생산단가	412
〈표 VIII-25〉 카본종류별 사용용도 및 가격	413
〈표 VI-90〉 전도성 카본블랙 종류	414
〈표 VIII-26〉 ROI 10년 기준 시의 수소&고체탄소 판매 단가 분석	415
〈표 VIII-27〉 ROI 5년 기준 시의 수소&고체탄소 판매 단가 분석	415
〈표 VII-13〉 ROI 5년 기준 시 고체탄소 가격 대비 수소 판매단가 비교	416
〈표 VIII-28〉 (본 과제목표) 천연가스 가격변동에 따른 민감도 분석 결과	417
〈표 VIII-29〉 동 사업 추진 경제적 파급효과	419

그림 목차

[그림 Ⅰ-1] 주요 국제 기후변화 협상의 전개	5
[그림 Ⅰ-2] 향후 그린수소 시장 전망	8
[그림 Ⅰ-3] 2050 탄소중립을 위한 섹터별 저탄소수소 요구치	9
[그림 Ⅰ-4] 국고지원의 적합성	18
[그림 Ⅱ-1] 수소 생산기술 방식	28
[그림 Ⅱ-2] “제1차 수소경제 이행 기본계획”의 청정수소 생산 활용 계획	29
[그림 Ⅱ-3] 주요 수소생산 기술별 온실가스 배출량 비교	30
[그림 Ⅱ-4] 수소 생산기술별 포지셔닝	32
[그림 Ⅱ-5] 수소생산량 기준 일일 3톤 규모의 청록수소 생산 플랜트의 균등화수소생산 비용 (탄소소재 가치 \$0.1/kg 가정 시)	37
[그림 Ⅱ-6] 고체탄소 가치 제고에 따른 순현재가치 개선	37
[그림 Ⅱ-7] 수소생산량 기준 일일 3톤 규모의 청록수소 생산 플랜트의 균등화수소생산 비용 (탄소소재 가치 \$3/kg 가정 시)	38
[그림 Ⅲ-1] OECD와 비OECD국의 에너지 수요량 비교	46
[그림 Ⅲ-2] OECD와 비OECD국의 인구 증가율 비교	47
[그림 Ⅲ-3] 전 세계 신규 재생에너지·非재생에너지 설비 추이	54
[그림 Ⅲ-4] 에너지원별 세계 재생에너지 발전설비 추이 및 2020년 신규 설비	55
[그림 Ⅲ-5] 탄소중립 기술혁신 추진전략의 목표	62
[그림 Ⅲ-6] 탄소중립 기술혁신 추진전략 중 수소 기술개발 전략 주요내용	62
[그림 Ⅲ-7] 청정수소 자급률 목표치	63
[그림 Ⅲ-8] 청정수소 비중 목표치	63
[그림 Ⅲ-9] 수소 시범도시 추진전략의 단계별 목표	64
[그림 Ⅲ-10] 독일 국가수소전략 거버넌스체계	70
[그림 Ⅲ-11] 세계 수소에너지 산업 전망	76
[그림 Ⅲ-12] 2050 글로벌 수소시장 분야별 수요 전망	77
[그림 Ⅲ-13] 원료에 따른 수소생산 시장규모 및 전망 (백만 달러)	77
[그림 Ⅲ-14] 2020년~2050년 시기별 글로벌 수소생산 방식 비중	78
[그림 Ⅲ-15] 수소 생산 방식에 따른 시장규모 및 전망 (백만 달러)	78
[그림 Ⅲ-16] 수소 사용 용도별 시장규모 및 전망 (백만 달러)	78
[그림 Ⅲ-17] 해외 수소 관련 프로젝트 추진현황	79
[그림 Ⅲ-18] 국내 수소 수요 생산량 및 분야별 분포 전망	84

[그림 III-19] 수소 경제 개념 및 보급 전망	85
[그림 III-20] 세계 청정수소 생산 시장	86
[그림 III-21] 글로벌 청록수소 생산 시장	87
[그림 III-22] 수소생산 방식에 따른 주요 국가별 2030년 LCOH* 전망	87
[그림 III-23] 수소생산 방식에 따른 국가별 수소 2050년 수소생산 밸런스 전망	88
[그림 III-24] 카본블랙 제조 기업 및 특수카본블랙 제조기업 시장 점유율	94
[그림 III-25] 국가별 천연가스 생산량	95
[그림 III-26] 국가별 LNG수출 및 수입 추이	95
[그림 III-27] 천연가스 가격 및 가격변동성	96
[그림 III-28] 국가별 천연가스 수요전망	97
[그림 III-29] 글로벌 LNG액화설비 용량 추이 및 전망	97
[그림 III-30] 미국 내 수요처 및 지역별 천연가스 수요 예측	98
[그림 III-31] 미국의 주요 천연가스 파이프라인 프로젝트	99
[그림 III-32] 러시아 지역별 천연가스 매장량	102
[그림 III-33] 세계 천연가스 시장 내 국가별 비중 (2000~2020년)	102
[그림 III-34] 천연가스 생산 및 수요공급 현황	104
[그림 III-35] 미국 Monolith사 청록수소 생산 플랜트	107
[그림 III-36] 미국 C-Zero사 청록수소 생산 플랜트	107
[그림 III-37] 메탄 직접분해 기술의 역사	108
[그림 III-38] 메탄 열분해 기술 보유 및 개발 기업 또는 기관 현황	111
[그림 III-39] 화학기상증착 반응의 분류 중 촉매를 이용한 반응기술(파란색)	112
[그림 III-40] 촉매의 종류에 따른 메탄 직접분해반응 (pyrolysis) 온도 영역과 생성되는 탄소 소재의 종류	113
[그림 III-41] PSA기술 개념도	114
[그림 III-42] 독일 BASF사 청록수소 생산 플랜트	115
[그림 III-43] 호주 Hazer Group사 청록수소 생산 플랜트	115
[그림 III-44] 일반적 카본블랙 생산 공정도	116
[그림 III-45] 수소 네트워크의 개요	118
[그림 III-46] 영국의 수소공급사슬 최적화 연구사례(A.Almansoori, 2006)	118
[그림 III-47] 캘리포니아 수소스테이션 가이드북(미국)	119
[그림 III-48] HyRAM 프로그램	120
[그림 III-49] 도시의 탄소배출량 비율	121
[그림 III-50] CertifHy 프리미엄 수소의 인정기준	121
[그림 III-51] 수소분리정제 기술	124
[그림 III-52] 두산중공업 폐플라스틱 수소화 공정도	125

[그림 Ⅲ-53] 국내 기업 마이크로 웨이브 기술 개요도	125
[그림 Ⅲ-54] 수소의 저장/운송/활용 개념도	126
[그림 Ⅲ-55] 5만 명 규모 도시의 발전용 연료전지 수요를 위한 부생수소 공급 개요도 ..	127
[그림 Ⅲ-56] 2030년 분산형 저장소 모델의 수소네트워크 최적화 요약도	127
[그림 Ⅲ-57] 수소 네트워크 모델의 수요증가에 대한 단위공급비용 변화 민감도 분석	128
[그림 Ⅲ-58] 국내 수소공급사슬 최적화 연구사례(J.Kim)	128
[그림 Ⅲ-59] 수소생산 8대 기술의 환경성	129
[그림 Ⅲ-60] 수소기술중 LCA 데이터베이스 구축에 대한 설문조사 결과	129
[그림 Ⅳ-1] 플랜트 분야 기술수준 - 기술적 중요도 매트릭스 분석	147
[그림 Ⅳ-2] 플랜트 분야 기술수준 - 기술확보 시급성 매트릭스 분석	148
[그림 Ⅳ-3] 플랜트 분야 기술수준 - 파급효과 매트릭스 분석	148
[그림 Ⅳ-4] 플랜트 분야 기술수준 - 기술 파급효과 매트릭스 분석	149
[그림 Ⅳ-5] 수소 시범도시 모델 및 추진경과	163
[그림 Ⅳ-6] 울산광역시 기본 구상도	164
[그림 Ⅳ-7] 안산시 기본 구상도	165
[그림 Ⅳ-8] 안산시 추진일정표	165
[그림 Ⅳ-9] 전주시·완주군 기본 구상도	166
[그림 Ⅳ-10] '20년 국토교통분야 연구개발인력 수행업무별 비중	167
[그림 Ⅳ-11] '20년 국토교통분야 연구개발인력 수행업무별 비중 추이	168
[그림 Ⅳ-12] 연도별 국토교통분야 연구개발인력 추이	168
[그림 Ⅳ-13] 연도별 국토교통분야 및 우리나라 연구원 1인당 연구개발비	169
[그림 Ⅳ-14] 연도별 국토교통분야 연구원 학위별 비중 추이	169
[그림 Ⅳ-15] '20년 국토교통분야 연구원 전공 비중	170
[그림 Ⅳ-16] 연도별 특허건수 추이	173
[그림 Ⅳ-17] 주요시장국 연도별 특허출원동향	174
[그림 Ⅳ-18] 구간별 출원 점유율	175
[그림 Ⅳ-19] 전체 기술성장 단계	176
[그림 Ⅳ-20] 주요국 기술성장 단계	177
[그림 Ⅳ-21] 특허출원인 동향 분석	178
[그림 Ⅳ-22] 국가별 주요 특허 출원인	179
[그림 Ⅳ-23] 기술분야별 내외국인 점유율	180
[그림 Ⅳ-24] 기술의존도	180
[그림 Ⅴ-1] 세부과제 도출 프로세스	191
[그림 Ⅴ-2] 기술수요조사 기획과정	192
[그림 Ⅴ-3] 동 사업의 논리모형	202

[그림 VI-1] 전세계 2050년 탄소중립을 위한 수소 수요의 증가 및 청정수소의 비중 전망	208
[그림 VI-2] 국내 청정수소 공급비중의 증가	208
[그림 VI-3] 청정수소 인증기준	209
[그림 VI-4] 중점분야1 개술개발 개념도	211
[그림 VI-5] 한국핵융합에너지연구원 KSTAR 설비 전경	217
[그림 VI-6] 다양한 청록수소 생산공정	221
[그림 VI-7] 중점분야1 핵심기술 간 연계도	226
[그림 VI-8] 천연가스 분해를 위한 플라즈마 토치 시스템 구성도	236
[그림 VI-9] 천연가스 분해를 위한 플라즈마 반응기 설계 (예시)	237
[그림 VI-10] 천연가스(또는 메탄) 직접분해 반응을 이용한 청정수소 및 고품질 탄소소재 동시생산 촉매공정 개념도	238
[그림 VI-11] 촉매의 종류에 따른 메탄 직접분해반응(pyrolysis) 온도 영역과 생성되는 탄소 소재의 종류	238
[그림 VI-12] CH ₄ 분해생성물의 평형조성	242
[그림 VI-13] 촉매 상의 탄화수소(또는 메탄) 직접분해 반응에 의한 탄소소재 생성과정 ..	244
[그림 VI-14] 실제 촉매상에 형성된 카본나노튜브 형상의 탄소생성물과 카본나노튜브의 품질 에 따른 가격 차이 비교	244
[그림 VI-15] 고온영역에서의 천연가스(CH ₄)의 분해 과정	249
[그림 VI-16] PSA 시스템 공정도	250
[그림 VI-17] 전남 여수공단 설치된 고순도 수소 PSA 설치 사례 (한국에너지기술연구원 2018년)	250
[그림 VI-18] 대용량 청록수소 공급 실증설비 제작&설계 개요	260
[그림 VI-19] 대용량 청록수소 공급 실증설비 제작(안), 플라즈마-촉매반응 공정	261
[그림 VI-20] 대용량 청록수소 공급 실증설비 제작(안), 수소가스 전처리-PSA 공정	261
[그림 VI-21] monolith사의 천연가스 열분해 공정 및 용량	264
[그림 VI-22] 열분해에 의해 생성되는 고체탄소 종류 및 가치변화	266
[그림 VI-23] 고체탄소 포집 및 고부가가치 전환 개술개발 개념도	268
[그림 VI-24] 카본블랙 종류 및 특성	269
[그림 VI-25] 카본블랙 생산 공정도	271
[그림 VI-26] 카본블랙 제조 기업 및 특수카본블랙 제조기업 시장 점유율	272
[그림 VI-27] 탄소나노튜브 국내 시장	273
[그림 VI-28] 전도성 복합재 응용시장 및 전도성 필러 점유율	274
[그림 VI-29] 전도성 복합재 시장	274
[그림 VI-30] 중점분야 2 핵심기술 간 연계도	281
[그림 VI-31] 중점분야2 과제추진 로드맵	286
[그림 VI-32] 카본블랙 주요 구조	289

[그림 VI-33] 고무충진제 카본블랙 모습	291
[그림 VI-34] 카본블랙의 플라즈마처리에 의한 전기전도도 변화 및 표면처리에 따른 매트릭스와 결합	292
[그림 VI-35] 핵심기술 2-1의 주요 공정기술	293
[그림 VI-36] 전도성 플라스틱 시장 전망	296
[그림 VI-37] 탄소나노튜브와 전도성 카본블랙의 전도성 임계값 비교	297
[그림 VI-38] 핵심기술 2-2의 주요 공정기술	298
[그림 VI-39] 기술개발 요약	303
[그림 VI-40] 중점분야3 기술개발 개념도	304
[그림 VI-41] 국제에너지 협회 및 국제 재생에너지협회의 수소 관련 에너지 전망	307
[그림 VI-42] '50년 기준 핵심 수소 생산 단가 비교 (위: IGU사, 아래: EUI사)	308
[그림 VI-43] 수소 종류별 예상되는 기술 상용화 시기	309
[그림 VI-44] 핵심 수소 생산기술에 따른 CO2 발생량	310
[그림 VI-45] 촉매 종류에 따른 열분해 공정 운전 온도	311
[그림 VI-46] 대표적인 청록수소 생산 기업의 실증 플랜트	312
[그림 VI-47] 탄소 중립시나리오의 요약	314
[그림 VI-48] 수전해 기술의 장단점	315
[그림 VI-49] 플라즈마의 원리 및 상용화 수준	316
[그림 VI-50] 열분해기술의 열원 대체기술	317
[그림 VI-51] 중점분야3 핵심기술 간 연계도	324
[그림 VI-52] 중점분야3 과제추진 로드맵	333
[그림 VI-53] 청록수소 생산 플랜트 운영을 위한 AI 및 디지털 기술 개발 개념도	339
[그림 VI-54] 스마트 그리드 개념도(제3차 지능형전력망 기본계획, 산업통산자원부)	340
[그림 VI-55] 도시 인프라에 적용한 AI 어플리케이션의 사례 및 모델링	341
[그림 VI-56] 하루의 변화되는 에너지 요구량에 대한 머신러닝 결과의 예	342
[그림 VI-57] 규제샌드박스 진행절차	347
[그림 VI-58] 제어동 배치도	350
[그림 VI-59] 제어동 설치 예시	350
[그림 VI-60] 설비동 배치도	351
[그림 VI-61] 플라즈마-화학반응 설비 조감도	352
[그림 VI-62] 수소 분리·정제 설비 조감도	353
[그림 VI-63] 청록구소 실증플랜트 구축계획	355
[그림 VI-64] 수소도시 연계방안	356
[그림 VII-1] 동 사업의 추진체계 구성	363
[그림 VII-2] 사업 관리체계 및 주체	365
[그림 VII-3] 수소 시범도시 기대효과	373

[그림 VII-4] 수소도시 연계방안	374
[그림 VII-5] 포항시 수소도시 조성계획도	378
[그림 VII-6] 광양시 수소도시 조성계획도	379
[그림 VII-7] 순천시 전남도-전남가스공사 수소산업생태계 구축 업무협약	380
[그림 VI-65] 실증부지 공모 및 평가 프로세스	381
[그림 VIII-1] 모노리스 공정 및 핵심기술	390

제 1 장

사업 추진 배경 및 계획 수립경과

제1절 사업 정의 및 범위

제2절 추진배경

제3절 사업추진 필요성 및 시급성

제4절 사업추진 근거

제5절 기획추진구성 및 주요경과

1장 사업 추진 배경 및 계획 수립 경과

1절 사업정의 및 범위

■ 사업개요

- (사업명) 대용량 청록수소 공급 시스템 기술개발
- (주관부처) 국토교통부
- (전담기관) 국토교통과학기술진흥원
- (사업목적) 청록수소 공급시스템 기술개발을 통한 탄소중립 실현
- (사업목표) 대용량 청록수소 공급시스템 기술개발과 통합 실증을 통해 도시단위에 적합한 청록수소 생산 및 실증기술 확보로 탄소중립 수소시범도시 조기실현
- (성과목표) 기술국산화, 경제성확보, 해외시장 진출 기반 확보
- (사업내용) 3개 중점분야와 8개 핵심기술로 사업 구성
- (기간/사업비) 5년 / 415억원(정부 290억원 70%, 지자체 36.16억원 9%, 민간 88.84억원 21%)

〈표 1-1〉 동 사업의 구성 및 주요내용

중점분야	핵심기술
청록수소 생산 기술 개발 및 실증설비 제작	1-1. 플라즈마 토치 및 고효율 반응기 시스템 개발
	1-2. 청록수소 분리/정제 기술 개발
	1-3. 대용량 청록수소 공급 실증설비 설계 및 제작
고체탄소 고부가가치화 전환 기술 확보 및 응용부품 개발	2-1. 대량 고체탄소 회수 및 고성능화 기술 개발
	2-2. 고체탄소 소재의 대규모 고부가가치 응용기술 개발
도시 내 수소 공급을 위한 플랫폼 개발 및 Plant 구축 운영	3-1. 도시 수소 공급을 위한 디지털 플랫폼 및 성과 확산 로드맵 개발
	3-2. 청록수소 플랜트 안전 및 기술 표준화
	3-3. 청록수소 플랜트 구축 및 실증 운영

■ 핵심기술 및 핵심기술 구성요소 정의

- (중점기술1) 청록수소 생산 기술 개발 및 실증설비 제작
 - 목표: 청록수소 및 탄소소재 생산 공정 설계 및 플랜트 실증화
 - 주요 개발기술: 플라즈마 및 화학반응 연계 고효율 청록수소 생산 시스템 개발 및 실증용 플랜트 기술 개발
- (중점기술2) 고체탄소 포집 및 고부가가치 전환 기술 개발
 - 목표: 고체탄소 고부가가치화 전환 기술 확보 및 응용부품 개발
 - 주요 개발기술: 대량 고체탄소의 회수 및 고성능화/고부가가치화 기술 개발
- (중점기술3) 도시 내 수소 공급을 위한 플랫폼 개발 및 Plant 구축 운영
 - 목표: 청록수소 공급 인프라를 위한 도시 플랫폼 구축기술 개발 및 기술 표준화 도출
 - 주요 개발기술: 청록수소 플랜트 탄소중립 효과성 분석 및 기술표준화, 청록수소 도시공급 플랫폼 개발 등

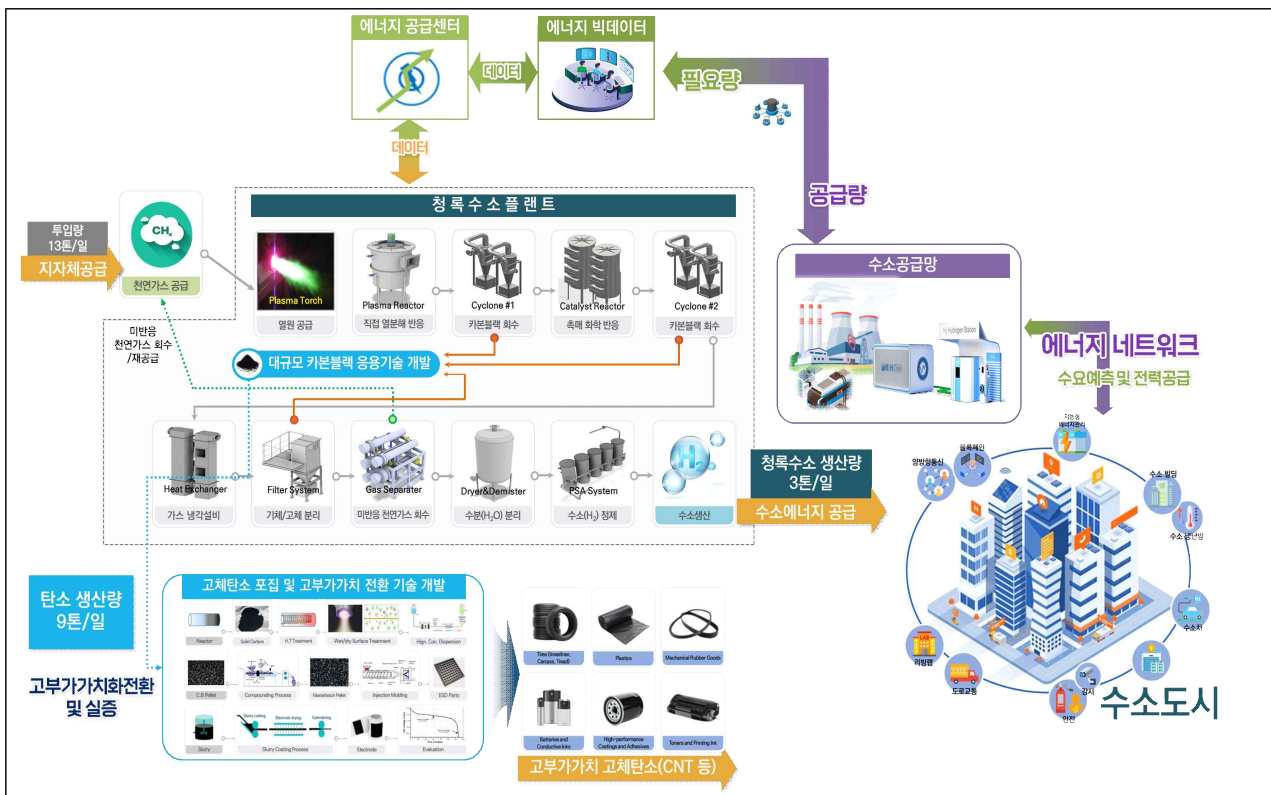
■ 성과관리 및 평가 방법

- 성과목표 : (기술국산화) 청록수소 공급시스템 기술자립, (경제성확보) 청록수소 생산 경제성 확보, (해외시장 진출 기반 확보) 청록수소 대용량 공급 시스템 상용화 및 해외시장 진출을 위한 실적 확보
 - 성과지표 : 실용화 목적의 과제특성을 고려하여 핵심기술에 대한 특허, 시제품 제작, 성능검증 및 현장시험, 상용화를 위한 기술이전 등을 설정. (기술적) SMART 특허등급, (경제적) 수입대체효과(국산화율·매출액·기술료) 등 질적요소와 (인프라) 시제품 제작, 현장적용·시험 등 양적요소로 관리·평가

■ 기대효과

- (기술적) 고온 플라즈마 기술(출력 증가, 수명연장 등) 국산화를 통해 소재공정사업, 폐기물 열분해 처리사업 등 타 분야에 확대·적용 가능
- (경제·사회적) 청정수소 생산 국산화 기술확보를 통한 해외기술 의존도 저감 및 고부가가치 전환기술 마련으로 수소생산 경제성(kg당 4천원 이하) 확보 가능
- (파급효과) CO2가 배출되지 않는 청정수소 생산기술 및 플랜트 건설기술 확보를 통해 탄소중립도시에 부합하는 에너지 시스템 구현에 기여

■ 사업구성도



2절 추진 배경

전지구적 탈탄소화 움직임으로 향후 핵심기술로서 청정수소의 중요성 급부상 중

■ ‘기후변화 대응을 위한 탈탄소 사회로 전환’의 전지구적 어젠다 형성

- 인류의 산업활동 이후 산업화 이전 수준 대비 약 1.09℃의 기온 상승*으로, 기후변화는 전세계가 공조하여 효율적으로 대처해야 할 이슈로 부상

* Inter-governmental Panel on Climate Change (IPCC) 6th Assessment Report(2021)

- '19년 영국 「더 가디언(The Guardian)」지는 ‘기후변화(Climate Change)’ 대신 ‘기후비상사태(Emergency)’나 ‘기후위기(Crisis)’, ‘기후붕괴(Breakdown)’ 등의 용어를 사용하며, 기후변화를 전 세계가 명백히 직시하여야 할 현실적 문제로 규정
- 세계경제포럼(WEF)도 상위 10대 글로벌 리스크로 극심한 기상이변을 5년 연속(18~22) 선정하는 등 기후변화는 정책적 어젠다에서 실체성을 지닌 세계 경제 이슈로 부상

※ 「The Global Risks Report」(WEF)는 최근 5년간 기후변화 관련 이슈를 발생가능성이 가장 큰 리스크로 선정했으며, 그 외의 기후변화 관련 다양한 위험은 상위권에 위치

〈표 1-2〉 미래경제에 미치는 전지구적 리스크의 발생가능성

*  : 기후변화 관련 리스크

구분	2018	2019	2020	2021	2022
1	극단적 기상이변	극단적 기상이변	극단적 기상이변	극단적 기상이변	기후변화 대응실패
2	자연재해	기후변화 대응실패	기후변화 대응실패	기후변화 대응실패	극단적 기상이변
3	사이버 공격	자연재해	자연재해	인간유발 환경재난	생물다양성 손실
4	데이터 사기/절도	생물다양성 손실	생물다양성 손실	감염병 팬데믹	사회적 응집력 약화
5	기후변화 대응실패	사이버공격	인간유발 환경재난	생물다양성 손실	생계위기 (식량위기)

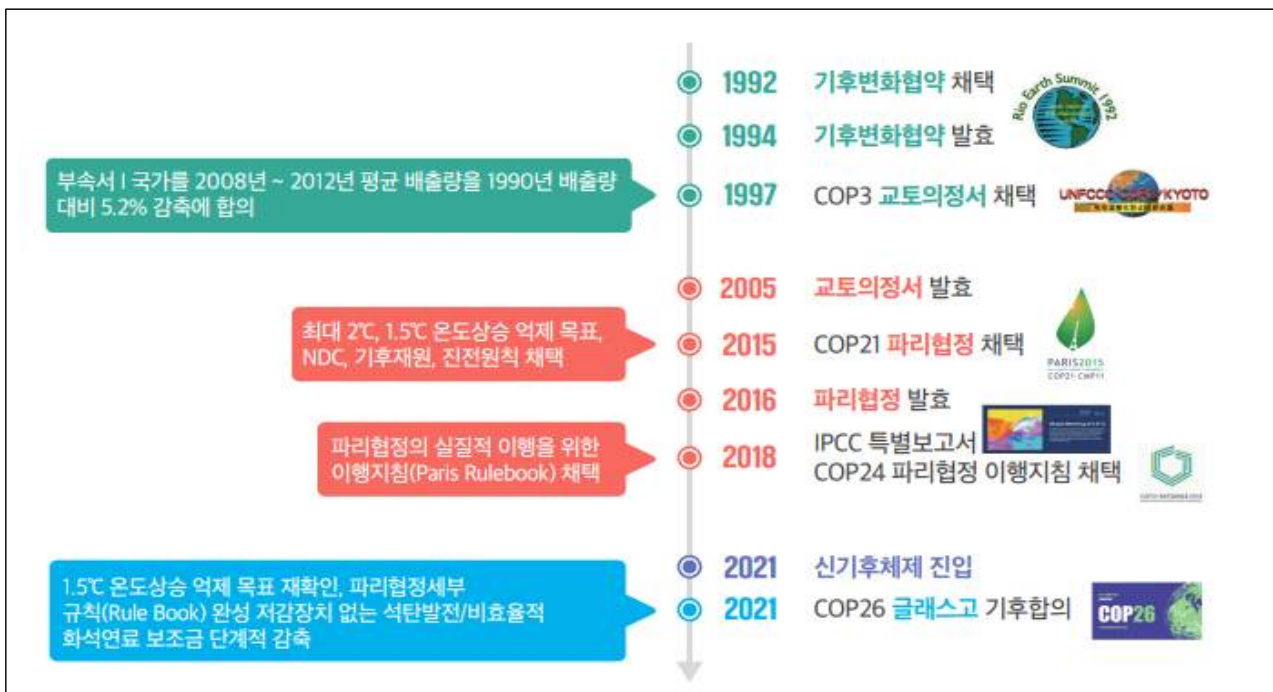
※ 출처 : 2022 국가생존기술(국가생존기술연구회), The Global Risks Report(WEF)를 재구성

- 세계 각국은 리우협약(1992) 이후 교토의정서(1997), 파리기후협정(2015), 글래스고 기후합의(2021) 등을 거치며 기후변화 대응을 위한 목표 설정과 활발한 논의를 지속 중

※ 기후변화에 관한 정부간 협의체(IPCC)는 2100년까지 지구 평균온도 상승폭을 1.5℃로 억제하기 위해 2030년까지 CO2 배출량을 2010년 대비 45% 감축, 2050년 탄소중립 달성을 목표로 제시

〈표 1-3〉 국제 주요 기후변화 협정

연도	협약	내용
1992	리우협약	○ '인간이 기후체계에 위험한 영향을 미치지 않을 수준에서 대기 중 온실가스 농도를 안정화' 함을 목표로 하는 기후변화협약(UNFCCC) 채택 - 선진국에게 온실가스 배출을 2000년까지 1990년 수준으로 복귀할 것을 요구
1997	교토의정서	○ 기후변화협약 목적 달성을 위해 선진국 전체가 2008년부터 2012년까지 기준연도인 1990년 배출 수준에서 최소한 5%의 감축을 요구 ○ 온실가스 감축의무를 비용 효과적으로 이행할 수 있도록 배출권거래제, 청정개발체제, 공동이행제도 등 시장기반 메커니즘 도입 ○ 2012년 교토의정서 당사국 총회에서는 교토의정서 공약기간을 2020년까지 연장 - 해당 기간동안 1990년 대비 온실가스를 18% 감소시킬 것으로 목표 상향조정
2015	파리기후협정	○ 전지구적 위기상황에 적극 대처하기 위해 모든 국가가 참여하는 2020년 이후(Post-2020) 신기후체제 합의 - 선진국, 개도국 구분 없이 모든 국가가 온실가스 감축의무 부담 - 2023년부터 매 5년마다 전지구적 이행점검 시행하여 온실가스 감축 점검
2021	글래스고 기후 합의	○ 2015년 채택했던 파리협정에서 더 나아가 2050년 탄소중립(Net-Zero)을 실현할 수 있도록 2030년 국가온실가스감축목표를 보다 강화



※ 출처 : 한국의 2050 탄소중립 시나리오: 내용과 과제, 에너지경제연구원(22)

[그림 1-1] 주요 국제 기후변화 협상의 전개

- '21년 글래스고 기후 합의(Glasgow Climate Pact)는 2030년 국가온실가스감축목표(Nationally Determined Contribution, NDC)를 보다 강화하기로 합의하며 신기후시대 탄소중립을 더욱 촉진
 - '15년 파리협정에 따라 전세계 국가는 국가온실가스감축목표(NDC)와 장기 저탄소 발전 전략(LEDS)을 UN에 제출하기로 합의했으며, '21년 글래스고 기후합의에 의해 기 설정된 NDC의 목표치 상향 추진
 - ※ 국가온실가스감축목표(NDC)는 이행에 대한 법적 의무가 있으며, 장기 저탄소 발전전략(LEDS)은 이행에 대한 법적의무는 없으나 세계 각국은 자발적으로 탄소 발전전략을 UN에 제출하며 실행 의지 표명
- 파리협정을 탈퇴('19)했던 미국이 재가입('21)하며 탄소중립을 통한 기후위기 대응의 중요성은 전 세계에 재조명
 - '17년 스웨덴을 시작으로 '19년 영국, 프랑스, EU 등이 탄소중립을 선언했으며, '20년도에는 우리나라를 포함한 중국, 일본이 탄소중립을 선언
 - ※ '21년 12월 기준, 총 138개국이 탄소중립을 선언했으며, 14개국은 탄소중립의 법제화를 추진(환경부, '22)
 - 글로벌 기업*은 선제적으로 탈탄소 대응책을 실행해 오고 있으며, 동참 비율은 점점 더 높아질 전망
 - * 기술·전자(구글, 애플, 소니), 소비재(유니레버, 네슬레, 구찌), 에너지/석유화학(오스테드, 브리티시페트롤리엄, 에니), 자산운용/연기금(블랙록, 바클레이스, 노르웨이 국부펀드) 등

〈표 1-4〉 탄소중립 법제화 국가('21.12 기준)

연번	국가	탄소중립 목표(연도)	관련 법
1	EU	2050	○ 유럽기후법
2	독일	2045	○ 연방기후보호법
3	프랑스	2050	○ 녹색성장을 위한 에너지전환법
4	스페인	2050	○ 기후변화 및 에너지전환에 관한 법률
5	덴마크	2050	○ 기후법
6	헝가리	2050	○ 기후보호법
7	스웨덴	2045	○ 기후정책프레임워크
8	룩셈부르크	2050	○ 국가기후법
9	아일랜드	2050	○ 기후행동 및 저탄소개발법
10	일본	2050	○ 지구온난화대책의 추진에 관한 법률
11	영국	2050	○ 기후변화법
12	캐나다	2050	○ 넷제로배출 책임에 관한 법률
13	뉴질랜드	2050	○ 기후변화대응법
14	한국	2050	○ 기후변화 대응을 위한 탄소중립·녹색성장 기본법

※ 출처 : 2021 환경백서, 환경부('22)

■ 탈탄소사회 실현의 핵심 수단으로써 수소가 주요한 투자 분야로 부상하며, 주요국은 넷-제로(Net-Zero) 실현을 위한 수소 활용 에너지전환기술 확보에 주력

※ (넷-제로) 인간 활동에 의한 온실가스의 실질적 배출량을 0으로 만드는 개념

- 넷-제로(Net-Zero) 달성은 다양한 활동으로 배출되는 이산화탄소를 최대한 줄이거나, 탄소포집 기술을 활용하여 제거하는 것이 핵심으로 관련 기술에 대한 관심 급증
- 수소는 온실가스과 미세먼지 등 유해물질 배출이 없는 친환경 에너지로서 탄소중립의 핵심수단으로 급부상하여, 미래 경제체제는 저탄소 청정에너지원인 '수소에너지' 공급 시스템에 기반한 「수소경제사회」로의 재편이 예상됨

※ 탄소국경조정제도, 탄소발자국, 탄소세 개념 등장 등 탄소배출 이슈가 국가간 '통상'의 새로운 기준으로 자리매김 (전기저널, '21.9 ; 한겨레, '21.11.2)

- '17년 세계경제포럼(WEF)은 '수소위원회'를 신설했고, 국제에너지기구(IEA)는 수소차 비율을 '50년 17.7%로 전망
- 수소는 2050년 대한민국 최종에너지 소비량의 20%를 차지하고, 도로 대기오염원 30% 감소, 온실가스 감축량 전체 목표 대비 17% 충족에 기여, 경제효과 70조 원 창출, 고용효과 60만 명에 이를 것('18, 맥킨지)

- 주요국은 향후 2030년까지 수소 생산, 공급, 저장 분야 인프라 구축, 활용분야에 있어 대용량화 추진 및 그린수소, 그레이수소, 블루수소 등 산업 전반에서 에너지 시스템 통합을 통해 효율화 도모를 계획

※ 수소이용의 비약적 확산을 위해 대량의 저렴한 수소 생산·수요·공급 연결체계, 도로운송체계(수소도로 등), 기술·제도적 수용 및 활용 등 수소 전주기 인프라 구축을 강화하는 추세(A hydrogen strategy for a climate-neutral Europe, European Commission, 2020.7)

- 미국, EU 등은 청정수소 기술 개발 및 청정수소를 대규모로 신속하게 보급하는 통합 프로그램 추진 중

※ (美) 에너지 어스샷 이니셔티브, 기후 및 에너지 프로그램 IIJA 등으로 청정수소에 대한 기술개발부터 대규모 인프라 구축 추진

※ (EU) 그린수소에 대한 전략적 연구 및 혁신 아젠다(Startegic Research and Innovation Agenda for Green Hydrogen)로 그린수소 생산, 수송 및 인프라, 시장촉진 등에 관한 통합 연구 지원

- 그 외 여타 주요국은 대도시 중심으로 수소를 활용한 인프라의 친환경 전환, 지속가능한 재생에너지로의 대체 등을 추진하는 탄소전략 추진

※ 바르셀로나(스페인), 코펜하겐(덴마크), 스톡홀름(덴마크) 등 탄소중립 법제화 국가 주요도시 중심으로 탈탄소전략 시행

■ 탈탄소·친환경 동향에 따라 향후 수소산업은 국가 신성장동력으로 여겨지며, 탄소배출량을 획기적으로 저감할 청정수소기술확보가 핵심 이슈로 부상

- 글로벌 그린 뉴딜 및 탄소세 부과 정책 “FIT for 55”(EU)가 수립되면서 전기, 시멘트, 철강, 알루미늄 등 탄소배출 과다 품목에 탄소국경세 적용

※ 우리나라는 석탄 화력이 전력생산의 40% 내외로 탄소 국경세에 큰 영향

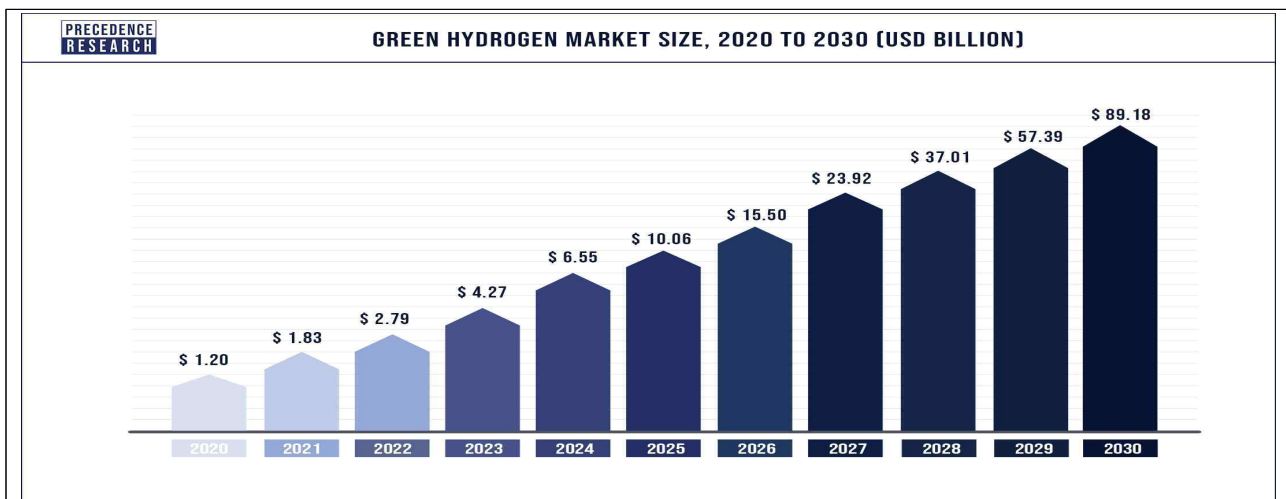
〈표 1-5〉 탄소세, 탄소국경세 도입에 따른 국내 기업 부담 전망

(\$/ tCO2)		탄소국경세 도입시 국가별 과세 전망 (36\$/tCO2 기준)																																
스웨덴	127	EU 탄소 배출 과세 분석 (단위=억달러·%) *과세 금액은 EU가 이산화탄소 1t당 36달러를 부과했을 경우. 자료=대외경제정책연구원  <table><tr><th>국가</th><th>과세 금액</th><th>관세율</th></tr><tr><td>중국</td><td>119.13</td><td>2.6</td></tr><tr><td>러시아</td><td>64.34</td><td>3.9</td></tr><tr><td>미국</td><td>35.41</td><td>1.1</td></tr><tr><td>인도</td><td>24.15</td><td>4.6</td></tr><tr><td>터키</td><td>15.95</td><td>2.0</td></tr><tr><td>한국</td><td>10.61</td><td>1.9</td></tr><tr><td>일본</td><td>7.82</td><td>0.8</td></tr><tr><td>노르웨이</td><td>7.30</td><td>0.9</td></tr><tr><td>스위스</td><td>6.95</td><td>0.5</td></tr></table>			국가	과세 금액	관세율	중국	119.13	2.6	러시아	64.34	3.9	미국	35.41	1.1	인도	24.15	4.6	터키	15.95	2.0	한국	10.61	1.9	일본	7.82	0.8	노르웨이	7.30	0.9	스위스	6.95	0.5
국가	과세 금액				관세율																													
중국	119.13				2.6																													
러시아	64.34				3.9																													
미국	35.41				1.1																													
인도	24.15				4.6																													
터키	15.95				2.0																													
한국	10.61				1.9																													
일본	7.82				0.8																													
노르웨이	7.30				0.9																													
스위스	6.95	0.5																																
스위스	96																																	
핀란드	60~70																																	
노르웨이	59																																	
아이슬란드	31																																	
덴마크	23~26																																	
프랑스	25																																	
영국	24																																	
포르투갈	7																																	
일본	3																																	
평균	36																																	

※ 출처 : 청정수소가 초래하는 사회변화와 주요이슈, 2022

- 증가하는 기업부담에 따라 에너지의 수소전환 물결은 세계적으로 가속화되고 있으며, 청정수소시장은 기업의 산업 위기극복 및 새로운 기회가 되며 향후 초고속 성장 전망

※ 향후 그린수소시장은 '30년까지 연평균 54% 이상의 성장률로 시장규모 약 890억\$(약 113조) 수준에 이를 것으로 전망(Precedence Research)



※ 출처 : Precedence Research

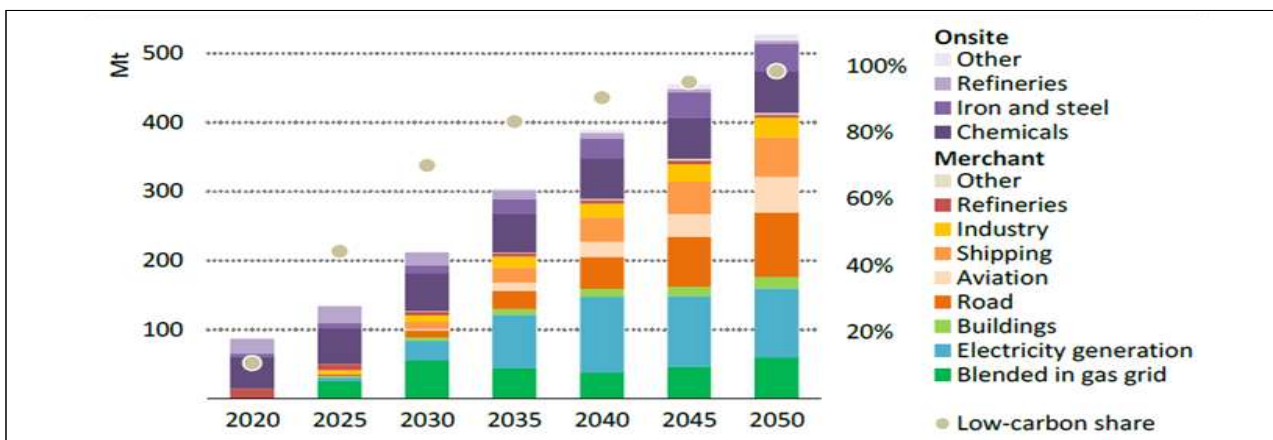
[그림 1-2] 향후 그린수소 시장 전망

- 향후 수소시장의 핵심은 청정수소 중심으로 흘러갈 것으로 예측되며, 수소기업들은 이와 관련된 기술개발을 위해 노력 중

- 현재까지 수소를 대용량으로 생산하는 기술은 기존 전통적인 화석연료로부터 개질반응을 통해 탄소를 배출하는 방식으로, 탄소저감을 위한 대체에너지로서 수소의 역할에 역설적 현상 발생
- 이산화탄소를 저감하여 생산하는 ‘청정수소’ 기술이 향후 수소산업·기술의 중심이 될 것으로 대다수의 보고서는 예측하고 있으며, 세계 주요국 및 기업은 관련 기술 확보 및 상용화에 집중

※ 청정수소 생산을 위한 수전해기술 선도기업 : HYDROGENICS, Siemens Energy, ITM, nel 등

- 국제에너지기구(IEA)는 세계 수소 수요가 2050년까지 5억 2천만톤 규모로 확대될 것이며, 탄소중립 실현을 위해 세계 수소 공급의 약 98%의 청정수소 전환 필요성을 강조



※ 출처 : Net Zero by 2050 - A Roadmap for the Global Energy Sector(IEA 2021)

[그림 1-3] 2050 탄소중립을 위한 섹터별 저탄소수소 요구치

■ 우리나라는 그린수소 개발에 있어 비효율성 및 인프라 등 현실적 문제에 직면

- 무탄소수소인 ‘그린수소’ 는 향후 청정수소가 궁극적으로 지향하는 기술로서 주요국은 그린수소 기술 확보에 노력 중이나, 우리나라의 리소스 및 인프라는 부족
- 우리나라는 그린수소 생산을 위한 재생전력의 대량확보 어렵고, 이에따라 높은 해외 의존도 및 생산단가에 따라 경제성 문제 대두
- 또한 국내 수소 인프라는 미흡하여 청정수소기술 실증 및 보급 등이 어려운 상황

☞ ‘2050 탄소중립’ 실현을 위한 현실적 대비책 마련이 필요한 시점

3절 사업추진 필요성 및 시급성

1. 사업 필요성 및 시급성

수소경제 확산을 위한 수소시범도시 계획, 수소 경제활성화 전략을 추진 중이나 이행을 위한 정책적 수단 부재

- 정부는 수소경제 활성화를 위해 위해 '50년 청정수소 자급률 60% 도달 목표를 계획하고 있으나, 수소경제 산업생태계 조성을 위한 수소공급 인프라 마련은 부족
 - 국토부는 청정수소 생산 및 실증을 통한 수소경제 활성화를 위해 「수소 시범도시 추진전략」(19.10), 「제1차 수소경제 이행 기본계획」(21.11) 등을 추진
 - ※ 수소시범도시는 현재 울산, 안산, 전주완주, 삼척 등이 선정되었으며, 광양, 포항, 보령, 당진, 평택, 남양주가 2기 수소도시로 선정
 - 수소를 도시의 주 에너지원으로 사용하는 도시로 수소생산시설, 이송배관, 연료전지, 수소충전소 등 수소 인프라를 구축하는 친환경도시로 설계할 계획
 - ※ (제1차 수소경제 이행 기본계획) 2050년까지 청정수소 자급률 60% 도달을 목표로 수소경제 산업생태계 조성
 - ※ (수소 시범도시 추진전략) 2040년까지 수소도시 조성을 위한 수소활용기술의 도시 내 실증 추진
 - 이에 대용량으로 수소를 제공하고 활용할 수 있는 인프라 구축은 상위계획을 실현하는데 있어서 필수 선결요소로 대두
 - 국토부는 수소시범도시와 정부 R&D 사업을 연계하여 수소관망 구축, 인프라, 운영기술 등을 확보할 계획을 발표
 - 그럼에도 여전히 재생에너지 인프라 부족과 기 추진되고 있는 저탄소 청정수소 생산전략은 기술적·현실적 한계를 노출
 - 기 청정수소 생산전략은 블루그린수소 중심이나, 블루수소는 대규모 이산화탄소의 저장을 위한 국내 인프라가 부재하여 수소시범도시 시행의 어려움 존재
 - 또한, 그린수소는 친환경적이나 대규모 재생전력의 확보가 어려우므로 시범도시로의 안정적 수소공급에 한계가 있고, 대규모 그린수소의 수입은 경제성 및 에너지 안보 측면에서 부적합

■ 반면 청록수소는 친환경성과 대용량의 공급이 가능해 수소시범도시 인프라에 효과적이고 현실적인 대안

- 청록수소는 천연가스를 고온반응기에 주입하여 수소와 고체탄소의 분해를 통해 생산하는 방식으로 이산화탄소가 발생하지 않아 탄소중립 실현에 기여할 수 있고 수소시범도시 취지에 부합
- 더욱이 세계 최고수준의 천연가스 공급망을 구축한 우리나라에서 이를 활용하여 “도시” 구성 수준에 필요한 ‘대용량 공급’이 가능하다는 측면에서 수소시범도시의 현실 가능한 대안
 - 천연가스를 연료로 사용하므로 운영비용이 높다는 지점을 대량공정을 할 수 있는 기술력 확보로 상쇄 가능

〈표 1-6〉 블루수소, 그린수소 장점 및 한계

구분	블루수소	그린수소	청록수소
생산방식	○ 개질공정(기존 그레이수소 생산방식) + 이산화탄소 포집(CCUS)	○ 재생전력을 활용한 수전해 기술	○ 메탄가스의 열분해를 통해 수소 추출
장점	○ 그린수소에 비해 상대적으로 저렴한 가격	○ 가장 진일보된 친환경적인 수소생산 기술	○ 탄소배출이 적고 부산물인 고체탄소 활용 가능 ○ 적은 전력량으로 생산가능, 적은 건설비용
한계	○ 탄소배출 제로(Zero) 수준 미달 - 탄소배출은 감축할 수 있으나 무배출은 불가능 ○ 대규모 이산화탄소 저장에 대한 부담이 높음 - 이산화탄소 포집 및 저장(CCUS) 기술의 상용화 시점 불확실	○ 대량 수소를 안정적으로 공급하기 어려움 - 재생전력의 높은 단가 - 재생전력 확보의 국지적 편차에 의한 제약 ○ 기술상용화 시점 불확실	○ 천연가스를 연료로 사용하므로 운영비용이 높고 가격변동성이 높아 대량공정이 필수

탄소저감 목표 이행에 대한 기업의 어려움을 해소하기 위한 경제성과 환경성을 갖춘 에너지원 수소 긴급

■ 제조업 중심의 우리나라 산업 구조상 기업은 높은 경제적 부담으로 인해 온실가스 감축에 대한 기민한 대응이 어려움

- 우리나라의 제조업이 국내총생산(GDP)에서 차지하는 비중은 27.5%로 독일(19.1%), 영국(8.7%) 등 주요국들 보다 높은 수준으로 탄소배출 업종 비율이 높아 글로벌 탄소배출 저감 정책에 대한 기업의 경제적 부담이 큰 상황(서울경제, '21.10.24)
- 특히, 중소기업의 경우, 탄소배출 저감을 위한 생산설비 투자, 공정 전환 등 기업의 경제적 부담이 크게 작용해 탄소배출 저감에 대한 기민한 대응이 어려움
- 즉, 사업 전환에 어려움을 겪는 기업에 대한 종합적인 지원책 필요

※ 온실가스 감축에 대한 친환경 기술 투자가 뒷받침되지 않는다면, 실물경제에 부정적 파급효과 발생(한국은행 보도자료, '21.10.28)

■ 기업 생산비용 부담 저감을 위해서는 환경성과 경제성을 갖춘 에너지원인 수소가 반드시 필요

- 2050 탄소중립을 위한 청정에너지원인 수소 공급을 위해 해외 수소 수입 시 수소 액화 운송 및 저장 비용은 66조원으로 수소 가격 현실화에 한계 존재
 - 또한 수소 이송 시 수소 액화에만 에너지(전기요금) 비용 31.5조원이 필요한 상황이며, 이는 한전이 국내에서 판매한 전력량*의 절반 수준

* (2020년 기준) 탄소중립 이행을 위해 수소 2390만t 수입 시 액화에 286.8TWh 전력이 필요하며 이는 한전이 국내에서 판매한 전력량 509.3TWh의 절반 수준

※ 2050 탄소중립 시나리오에 필요한 수소 2,390만톤 수입 시 액화비용만 31.5조원, 액화수소선박 운송 비용 28.7조원으로 수소가격 인하목표에 대한 현실적 한계에 직면(국회 산업통상자원중소벤처기업위원회 한무경 의원실 자료, '21)

- 수소 가격 등은 수소 도입 확대를 추진하는 정부정책과 기업의 탄소저감 목표 이행에 걸림돌로 작용할 것이 예측되는 상황

※ 대표적으로 수소가격이 낮아지지 않는다면 수소환원제철로 전환하는 철강산업은 엄청난 손실과 함께 세계 시장에서 경쟁력 상실 예측(에너지신문, '21.10.14)

- 따라서 장기적으로 국내에서 청정수소를 생산·유통할 수 있는 인프라 구축으로 수소가격 현실화와 안정적인 수소공급망 구축이 긴급

■ 특히, 환경성과 경제성 확보가 가능한 청록수소는 탄소중립 이행을 위한 정부정책과 기업부담 경감에 유효한 수단

- 청록수소 운영비용(OPEX)은 그린수소 대비 높으며, 그레이수소에 탄소저장장치를 결합한 블루수소 대비 탄소 활용성, 천연가스 인프라망 활용 측면에서 확대 가능성이 높은 분야
 - 수전해 기술 대비 수소 생산 과정상 전기 사용량이 적고 초기 설비투자 과정에서 건설비용이 낮은 강점과 부산물인 탄소 카본블랙 판매에 따른 부가적 수익 창출의 경제성 확보
- 이에 청록수소 개발시 수소생산 투자비용 절감과 수소가격 등 현실화로 기업들의 탄소중립 이행 참여를 독려할 수 있는 기반 마련이 가능
 - 그레이수소도 경제성, 효율성이 좋으나 탄소 절감 효과가 낮아 탄소중립 이행에 적합도는 떨어지는 단점이 있어 경제성과 환경성을 모두 고려할 시 청록수소가 효율적 이행방안

**대용량 청정수소 생산 기술수준은
주요국 대비 열위하고, 핵심기술의 해외 의존성 심화**

■ 그간 추진된 수소정책 및 지원은 수소 활용분야에 집중되어, 청정수소 생산기술 실증 및 인프라를 마련은 다소 미흡

- 수소차, 수소 배터리 등 수소 응용분야는 대기업 및 중견기업 중심으로 투자 및 지원이 이루어져 세계를 선도할 수 있는 기술력을 보유 중
 - ※ (수소차) 2013년 세계 최초로 수소차 양산에 성공했으며 세계 최장거리 주행 핵심부품의 99% 국산화 성공 등 글로벌 경쟁력 확보
 - ※ (연료전지) 원천기술을 보유한 국내외 기업과 제휴, M&A 등 통해 세계 최고 수준 기술력 보유
- 그러나 청정수소 생산 및 도입을 위한 기술 및 인프라는 여전히 부족하여 향후 청정수소 기술확보 난제의 해결이 요구
 - 장기적으로 수소는 수전해 방식의 그린수소 기술을 지향할 것이나, 국내 기업의 청정수소 기술경쟁력은 미흡(선진국 대비 60~70%)
 - ※ 선진국에 비해 대규모 재생에너지 단지 부족하여 재생에너지 활용 수전해 기술개발 및 실증·상용화 기술 확보 지연(수소경제활성화로드맵, '19)
 - 기술개발에 장기간·고비용 소요되어 경제적 불확실성 리스크로 민간 투자에 한계

■ 우리나라의 수소경제 이행방안은 수소차, 수소발전 등 활용 분야에 편중되어 기술개발 전반 및 공급측면의 기술수준은 주요국 대비 열위

- 우리나라의 수소활용 분야는 주요국 대비 비교우위를 유지하고 있으나, 수소경제 이행을 위한 기반 기술은 열위

※ 기술수준('19~'20, 최고선도국 대비) : 에너지자원(80.2%), 수소연료전지(75%), 수소생산/인프라(68.5%)

- 핵심기술 및 에너지자원 해외의존도가 높은 우리나라 에너지산업 구조상 국제정세 불안으로 에너지안보에 위협받을 가능성 높아 기술자립화 추진 시급

■ 다수 과학기술 주요 기관은 안정적인 청정수소 생태계 구축을 위한 국내 인프라 기술 확보의 중요성을 지속적으로 역설하였으나, 여전히 투자는 미흡한 실정

- 다수 과기 혁신기관은 수소기술력 향상을 위한 수소 인프라 구축을 가장 시급한 분야로 선정하고, 이를 위한 R&D투자 및 인프라 지원 필요성 강조

※ 수소배관망 등 중장기 수소인프라 구축은 국가의 정책과 지원에 따라 성패가 크게 좌우되며, 정책적 지속성 제시를 통해 민간의 투자 유도 필요 (KISTEP, '20)

※ 수소기술력 제고를 위한 R&D 투자와 인프라 지원 필요성 강조(KAIA, '19)

- 그간 수소생산, 저장·운송에 대한 기술개발은 활발히 이루어지고 있으나, 수소도시를 추진하기 위한 실증, 플랜트 등의 요소기술 개발은 부족한 실정

※ 과기부, 산업부, 환경부 등에서 추진되는 수소관련 R&D는 생산, 저장·운송, 활용기반의 수소기술개발에 집중되어 청록수소 플랜트 건설과 실증, 요소기술 고도화 목적의 사업은 부재

🔊 실현가능성 있는 청록수소 기술개발의 긴밀한 추진으로 수소경제 활성화 정책에 부응 및 2050 탈탄소사회 구현의 기반 마련

〈표 1-7〉 동 사업의 필요성 및 시급성(요약)

	사업추진 필요성	시급성
정책	○ 2050년까지 청정수소 자급률 60% 도달, 2040년까지 수소도시 조성을 위한 수소활용기술의 도시 내 실증을 추진하는 ‘수소 시범도시 추진전략’ 등을 계획하고 있어 동 사업 미 추진시 목표 달성에 애로 - 그간 추진하던 수소개발 전략으로는 한계 노출 ※ '23년 수소시범도시 추진예정이나, 그린, 블루 중심의 그간의 수소개발 전략은 기술적, 환경적 한계 노출	○ 청록수소는 친환경성과 대용량 공급이 가능해 수소시범도시 인프라 확보, 국내 청정수소 자급률(2040년 60% 수준) 달성의 효과적인 방안이나 운영비용이 높아 대량공정을 할 수 있는 기술력 확보가 필수
시장/산업	○ 탄소국경세(EU, 미국), 내연기관차 규제, 온실가스 배출권 거래제 확대 등 탄소중립이 경제적 이슈로 대두 ○ 탄소중립 대응을 위한 친환경 기술투자 부재시 실물경제에 부정적 파급효과 발생(한국은행 보도자료, '21.10.28)	○ 기업 생산비용 부담 저감을 위해서는 환경성과 경제성을 갖춘 에너지원인 청록수소가 반드시 필요 - 청록수소는 수소 생산과정상 전기 사용량이 적고, 부산물인 카본블랙 판매에 따른 부가적 수익 창출이 가능해 기업 참여 독려 기반 마련 가능
기술	○ 대용량의 청록수소 공급시스템을 구축하기 위한 핵심 기술수준은 주요국 대비 열위하고 투자도 저조 ※ 최고기술선도국 대비하여 에너지자원(80.2%), 수소연료전지(75%), 수소생산/인프라(68.5%) 수준 ※ R&D과제 예산 : 탄소중립(41,449.2억원, '16~'20) vs 수소(9,825.5억원, '16~'20) vs 청록수소(28.5억원, '21~'22)	○ 청록수소 생산공정의 고효율 및 대용량화를 위한 핵심요소기술의 해외의존도가 높아 에너지안보 위협요소로 부상해 기술자립화 시급

4절 사업추진 근거

1. 사업추진 근거

- 수소법 제3조, 건설기술진흥법 제7조, 해외건설촉진법 제15조의4, 국토교통과학기술육성법 제8조, 기계설비법 제8조 등에 의거 국고지원의 요건을 갖추

〈표 1-8〉 사업추진 근거법령

근거법령	관련 조항
수소경제 육성 및 수소 안전관리에 관한 법률(수소법)	제3조(국가·지방자치단체 및 사업자의 책무) ① 국가 및 지방자치단체는 수소산업 육성, 청정수소의 개발·생산·보급 및 수소의 안전관리에 필요한 시책을 수립하고 추진 제5조(수소경제 이행 기본계획의 수립) 6. 수소의 공급계획에 관한 사항 ※ ‘수소법 제5조(기본계획의 수립)’에 근거, 수소경제 이행을 효과적으로 추진하기 위한 기본계획 수립하고 ‘30년 생산단가 3,500원/kg 수준의 25만톤급, ‘50년 2,500원/kg 수준의 300만톤급 기반 구축 제시
건설기술진흥법	제7조(건설기술 연구·개발 사업) ① 국토교통부장관은 건설기술을 향상시키고 기본계획을 효율적으로 추진하기 위하여 대통령령으로 정하는 기관 또는 단체와 협약을 체결하여 건설기술 발전에 필요한 건설기술 연구·개발 사업을 할 수 있음 제9조(공동 연구·개발 등) 국토교통부장관은 건설기술의 연구·개발과 관련된 공공기관·법인·단체·대학(이들의 부설연구소 등 포함, 이하 “건설기술연구기관”)의 인력·자금·시험시설 및 기술정보의 효율적 활용과 선진 건설기술 획득을 위해 관계 중앙행정기관의 장과 공동연구를 추진하거나 건설기술연구기관의 건설기술 연구·개발을 지원 제10조(연구시설 및 장비의 지원 등) 국토교통부장관은 건설기술의 연구기반 확충을 위해 건설기술연구기관 연구시설 및 장비의 확보·관리·공동사용 등을 지원하거나 필요한 시책을 수립·추진 제66조(건설공사의 환경관리) 국토교통부장관은 건설공사가 환경과 조화되게 시행될 수 있도록 관련 기술을 개발·보급하고, 다음 각 호의 사항을 관계 중앙행정기관의 장과 협의하여 마련 2. 친환경 건설기술의 보급을 위한 시범사업의 추진
해외건설촉진법	제15조의4(해외건설 정책 및 연구개발 등 지원) ① 국토교통부장관은 해외건설의 진흥을 위하여 다음 각 호의 사항을 지원 5. 해외건설 시장개척을 위한 연구·조사사업
국토교통과학기술육성법	제8조(연구개발사업의 추진) ① 국토교통부장관은 종합계획을 효율적으로 추진하기 위하여 국토교통과학기술연구개발사업(이하 “연구개발사업”이라 한다)을 할 수 있음
기계설비법	제8조(기계설비산업의 연구·개발 등) ① 국토교통부장관은 기계설비산업 발전을 위한 시책을 추진하기 위하여 공공기관, 대학, 민간단체 및 기업과 협약을 체결하여 기계설비산업 발전에 필요한 연구·개발 사업을 실시 제11조(국제협력 및 해외진출 지원) ① 국토교통부장관은 기계설비산업의 국제협력과 해외진출을 촉진하기 위하여 다음 각 호의 사업을 지원할 수 있다. 5. 그 밖에 국제협력 및 해외진출의 활성화를 위하여 필요한 사업
신에너지 및 재생에너지 개발·이용·보급 촉진법	제1조(목적) 이 법은 신에너지 및 재생에너지의 기술개발 및 이용·보급 촉진과 신에너지 및 재생에너지 산업의 활성화를 통하여 에너지원을 다양화하고, 에너지의 안정적인 공급, 에너지 구조의 환경친화적 전환 및 온실가스 배출의 감소를 추진함으로써 환경의 보전, 국가경제의 건전하고 지속적인 발전 및 국민복지의 증진에 이바지

2. 상위 정책 계획

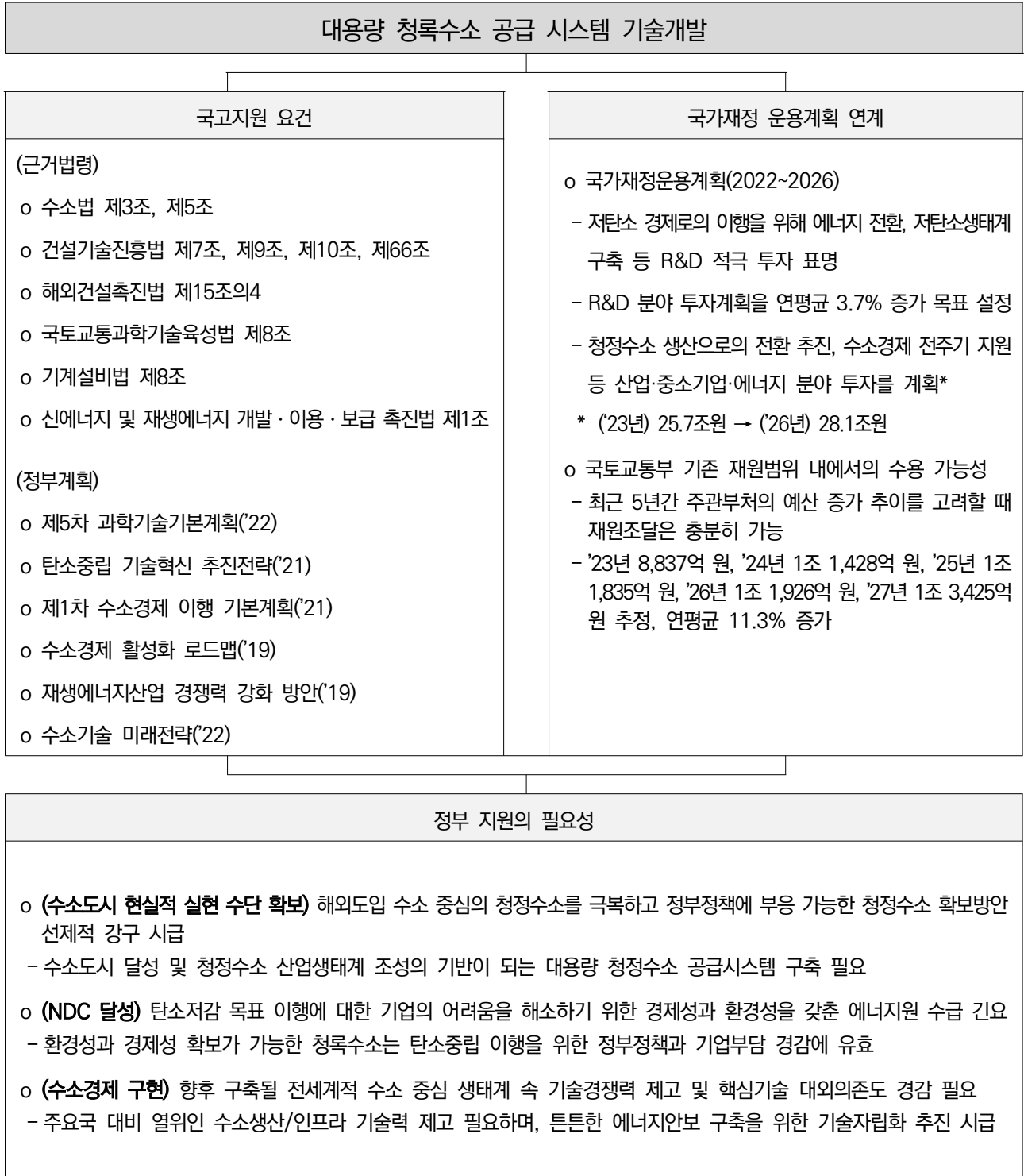
- 국내 상위 정책 및 계획에서 청정수소 확보와 도시 적용에 대한 추진방향을 제시

〈표 1-9〉 사업 추진 관련 상위정책 및 계획

구분		주요내용	키워드
국정 과제	정부 120대 국정과제('22)	○ 미래 수소 원천기술 확보, 청정수소 생산·공급 기반 마련, 신산업 조기 상용화, 폐자원 기반 연료 재활용 등의 내용을 국정과제에 포함	○ 청정수소 생산·공급 기반 마련
	새정부 수소경제 정책방향('22)	○ 청정수소 생태계 중심의 발전을 위한 3대 성장전략을 제시	○ 청정수소 생태계 마련
정부 상위 정책	제5차 과학기술 기본계획('22)	○ 탄소중립 선도 및 지속가능한 환경 마련을 위해 탄소중립 중점기술 육성을 통한 한국형 탄소중립 로드맵 마련과 탄소 다배출 사업의 전환 제시	○ 탄소중립 중점기술 육성
	국가전략기술육성 방안('22)	○ '글로벌 기술패권 경쟁구도 속에서 우리나라의 기술주권 확보를 위해 추진이 필요한 12대 국가전략기술에 “수소” 포함'	○ 국가전략기술 내 수소 분야 초격차 확보 제시
청정 수소 유관 정책	수소기술 미래전략('22)	○ 미래형 수소생산 기술(광분해, 열분해, 바이오수소, 폐자원 가스화 등)의 선제적 개발 및 시장 선점 추진 * 천연가스(메탄) 직접 열분해 반응을 활용하여 고순도의 청록수소를 생산하는 무탄소 수소생산 기술 확보	○ 청록수소 생산기술 확보
	탄소중립 기술혁신 추진전략('21)	○ '수소경제 구현을 위한 수소 전주기 기술 확보'를 목표로 제시 - 수소충전소 공급가와 수소 발전단가를 핵심지표로 설정	○ 수소 경제성 향상 (공급가, 발전단가)
	제1차 수소경제 이행기본계획('21)	○ 수소 수급계획, 제도운영, 자원조달, 기반조성 방안에 대한 중장기 정책 비전·목표, 투자 및 제도 개선방향 제시 ○ '30년, '50년까지의 수소 생산, 유통, 활용에 대한 정책적 목표치 제시 - '30년까지 청정수소 자급률 34%, '50년까지 60% 달성 - '30년까지 청정수소 비중 75%, '50년까지 100% 달성	○ 전주기 수소기술개발을 통한 청정수소 자급확대
	수소 시범도시 추진전략('19)	○ '세계 최초 수소도시 조성으로 수소도시 세계시장 선점'을 비전으로 하여, '40년까지 단계별 목표를 제시 - 도시활동의 핵심인 주거, 교통 분야에 집중하여 수소활용 기술을 실증하고 안전성을 검증	○ 수소활용 기술의 실증 ○ 수소도시 조성
	수소경제 활성화 로드맵	○ 수소 전주기 기술개발, 소재부품 해외 의존 해소 지원 - 수소 밸류체인별 성능 및 경제성 향상 등의 고도화 기술개발, 핵심부품 국산화, 미래유망 기술개발	○ 수소 전주기 기술경쟁력 확보 ○ 수소R&D 기술수준 향상
	청정수소 인증제	○ '청정수소 인증제'는 수소를 생산하거나 수입하는 등의 과정에서 온실가스 배출량이 일정 수준 이하인 경우 청정수소로 인증하고, 인센티브를 지원하는 제도 추진중('24년 시행 예정) * 주요국 청정수소 배출량 기준(안) : (미국) 4, (EU) 3.38, (일본) 3.4 (kgCO ₂ eq/kgH ₂)	○ 청정수소 인증
정부 투자 방향	국가재정운용계획	○ 청정수소 생산, 수소 경제 전주기 지원 등을 포함	○ 수소 전주기 지원 ○ 청정수소 생산 전환
	제1차 국가연구개발 중장기 투자전략('23)	○ 기술패권경쟁 대응을 위한 12대 국가전략기술(수소 포함)에 대한 투자 확대 및 대체 불가 원천기술의 확보와 시장 스케일업을 추진 - 대규모 수소 생산·공급의 경제성 담보를 위한 기술확보 및 청정수소 생산기술 국산화 등 전주기 지원 투자 필요	○ 수소 원천기술 확보 ○ 수소시장 스케일업
	국토부 주요업무 추진계획('23)	○ 수소생산 국가산단 조성, 기후위기 대응을 위한 수소도시 육성을 포함	○ 수소생산 인프라 조성 ○ 수소도시 육성

3. 국고지원의 적합성

- 동 사업은 근거법령과 정부계획, 국가재정 운용계획과의 연계성을 고려했을 때, 국토부 주관 추진사업으로 국고지원이 적합



[그림 1-4] 국고지원의 적합성

1) 국고지원 요건

■ (중기재정) 2022~2026 국가재정운용계획 내 R&D 및 산업·중소기업·에너지 분야에 대용량 청록수소 공급시스템 기술개발 지원을 위한 요건 명시

- (R&D) 저탄소 경제로의 이행을 위해 에너지 전환, 전탄소생태계 구축 등 R&D 적극 투자 추진
 - (산업·중소기업·에너지) 수소 등 에너지 신산업 창출 지원
 - 청정수소(그린·블루) 생산으로의 전환 추진, 상용차(버스 등) 중심의 수소 모빌리티 기반 구
 -
 - (폐기물) 폐플라스틱 공공열분해 시설 10개소(누적) 확충, 통합 바이오가스화 시설* 확대 등 순환경제 전환 촉진
- * 음식물쓰레기·분뇨·하수슬러지 등을 통합처리하여 바이오가스를 생산하는 시설로 청록수소 플랜트와 연계하여 수소생산 가능

■ (정부정책) 수소 인프라 조성 등에 필요한 국산화 R&D 추진 필요성 제시

- 정부는 ‘수소법 제5조(기본계획의 수립)’에 근거하여 수소경제 효과적 이행을 위해 기본계획을 수립하고, 대규모 생산 기반 구축*을 천명
 - * ‘30년 생산단가 3,500원/kg 수준의 25만톤급, ’50년 2,500원/kg 수준의 300만톤급
 - ※ 수소경제 육성 및 수소 안전관리에 관한 법률(수소법)
- 「수소경제 활성화 로드맵(19.01)」 및 「수소 기술개발 로드맵(19.10)」 ‘수소 전주기 기술개발, 소재부품 해외 의존 해소 지원’
- 「탄소중립 기술혁신 전략로드맵(22.11)」 ‘수소경제 구현을 위한 수소 전주기 기술 확보’ (수소공급 분야 탄소중립 기술혁신 전략로드맵)
- 「국가전략기술육성방안(22.10.)」 ‘글로벌 기술패권 경쟁구도 속에서 우리나라의 기술주권 확보를 위해 추진이 필요한 12대 국가전략기술에 “수소” 포함’
- 「수소기술 미래전략(22.11)」 ‘미래형 수소생산 기술(광분해, 열분해, 바이오수소, 폐자원 가스화 등)의 선제적 개발 및 시장 선점 추진’
 - * 천연가스(메탄) 직접 열분해반응을 활용하여 고순도의 청록수소를 생산하는 무탄소 수소생산 기술 확보

2) 국토부 사업 추진 근거 및 타당성

■ 동 사업은 대용량 청록수소 공급을 위한 실증플랜트 구축 및 운영기술을 개발을 통해 궁극적으로 해외 플랜트 건설시장 진출을 목적으로 추진

- 국토부는 건설정책국에 해외건설지원과와 해외건설정책과를 두어 해외 건설정책 입안 및 해외 건설촉진에 힘쓰고 있으므로, 해외 플랜트 건설 시장진출을 위한 동 사업은 국토부의 업역에 해당

- 해외사업 관련 타당성 조사, 시장개척, 금융지원, KIND(한국해외인프라도시 개발지원공사) 업무, 해외건설 수주지원, 시장개척 지원사업, 인력양성 등의 활동을 추진
- 국토부의 주요업무 범위에는 해외건설과 관련하여 통합 플랫폼을 구축을 통한 해외건설 수주 지원을 추진한다는 내용이 포함
- 해외건설 진흥 및 국내 기계설비산업을 위한 연구개발 추진 및 국고지원은 국토부 소관 법령과 상위계획에 제시되어 있음
- 국토교통부는 해외건설촉진법 등 다양한 법령에 의거 해외건설업 신고 및 해외공사 지원 등에 대한 업무를 수행 중
- 국토교통부는 해외건설업의 신고와 해외공사에 대한 지원 등 해외건설을 촉진하는 데에 필요한 사항을 정함으로써 해외건설업의 진흥과 국제수지의 향상에 이바지하기 위한 목적으로 해외건설촉진법을 수립
- 해외건설촉진법은 해외건설사업자에 대한 정부의 지원 항목을 규정하고 있으며, 동 법 제15조의4에 따라 해외건설 시장개척을 위한 연구사업을 지원할 수 있음

■ 국토부는 산업부, 과기정통부 등에서 既 추진한 수소생산 및 분리·정제 기술 등 요소기술 개발 성과와 연계하여 플랜트시스템 구현, 플랜트 건설기술 확보를 위한 최적화 R&D 추진

- 탄화수소 직접 분해기술, 수소 분리·정제 기술, 고체 탄소 포집 기술 등 기 추진 기술개발 성과를 상용급 청록수소 실증플랜트에 적용할 수 있도록 최적화 시스템 기술 개발 추진
- 각 시설(모듈)별 패키지 설계 기술과 플랜트 구축기술 및 운영기술 확보 추진
- 또한, 청록수소 생산플랜트 전과정 평가 및 안전 및 기술 표준화를 추진

〈표 1-10〉 플랜트 R&D 관련 추진근거 및 부처별 역할분담

□ 국토교통부

- (근거법령) 해외건설촉진법 제15조의4(해외건설 정책 및 연구개발 등 지원), 건설기술 진흥법 제9조(공동연구·개발 등) 및 제7조(건설기술 연구·개발사업), 기계설비법 제8조(기계설비산업의 연구·개발 등), 국토교통과학기술육성법 제8조(연구개발사업의 추진) 등
- (추진내용) 국내외 건설사업 주무부처로서 단위 요소기술개발은 지양하고, 기 개발된 단위 요소기술의 연계·통합, 성능개선 등을 통해 실용화 가능한 플랜트시스템 구현에 집중

□ 산업통상자원부

- (근거법령) 엔지니어링산업 진흥법 제9조(엔지니어링 기술의 연구·개발 및 보급지원 등), 산업기술혁신촉진법 제11조(산업기술개발사업) 및 제19조(산업기술기반조성사업) 등
- (추진내용) 부품·소재 및 장비·단위설비, 플랜트용 기자재, 자원 탐사, 기초·원천 엔지니어링기술 등 추진

■ 과학기술기본계획 및 수소기술 미래전략 등 상위계획에 청정수소 생산, 저장·운송 등 기술전략 추진부처로 국토부 명시

- (제5차 과학기술기본계획) 수소 생산·저장·이송 능력 확보 및 활용분야 경쟁력 제고를 위한 R&D 소관부처로 국토부에 임무 부여
 - ‘(전략3) 과학기술 기반 국가적 현안 해결 및 미래 대응’ 중 ‘탄소중립 선도 및 지속가능한 환경으로 전환’, ‘산업 저탄소화 기반 조성 및 탄소 관리 인프라 구축’ 등의 국토부 역할 명시
- (수소기술 미래전략) 2050 탄소중립을 위한 필수분야인 수소를 육성하기 위해 청정수소 생산, 저장·운송, 활용(수송·발전)에서의 핵심 기술 확보와 국산화를 위한 기술전략 추진부처로 국토부를 명시
 - 청록수소 생산 기술개발을 포함한 청정수소 생산기술 국산화를 위한 기술개발 추진부처로 국토부를 명시

■ 또한 국토부는 ‘수소도시 조성사업’ 추진 주관부처로 수소생산시설, 이송시설 등 수소도시 기반시설 구축을 추진하여 향후 수소 공급 新도시 모델 창출 가능

- ‘수소도시 조성사업’은 수소 에너지원이 공동주택, 건축물, 교통시설 등에 활용될 수 있도록 수소생산시설, 이송시설(파이프라인·튜브 트레일러 등), 활용시설(연료전지 등) 등의 도시 기반시설을 구축
- 그러나 기 추진되고 있는 저탄소 청정수소 생산전략은 기술적·현실적 한계를 노출하며 도시 수소공급 인프라는 부족한 실정
 - 블루수소는 대규모 이산화탄소의 저장을 위한 국내 인프라가 부재하며, 그린수소는 친환경적이나 대규모 재생전력의 확보가 어려우므로 수소도시로 안정적 수소공급에 한계가 있고, 대규모 그린수소의 수입은 경제성 및 에너지 안보 측면에서 부적합

■ 한편, 국토부는 UAE 등과 ‘도시내 수소의 생산·유통·저장·활용에 관한 양해각서’를 체결해 수소 관련 해외시장 개척을 추진

- 국토부는 '23년 1월 15일 아부다비에서 UAE 에너지인프라부 장관과 ▲ 도시 내 수소의 생산·유통·저장·활용에 관한 양해각서(MOU) ▲ 미래 모빌리티 협력에 관한 MOU ▲ 스마트 인프라 협력에 관한 MOU를 체결
- 도시 내 수소의 생산·저장·운송·활용에 관한 협력 MOU는 수소를 주 에너지로 활용하는 친환경 수소도시 조성을 목표로 추진

5절 기획추진구성 및 주요 경과

1. 기술기획위원회 구성

■ 동 사업의 필요기술 도출 및 기술개요서 작성을 위해 청록수소 기술분야별 전문가로 구성된 기획위원회 운영

- 산·학·연 전문가로 구성하여 중점분야 아이템 발굴, 목표 설정, 로드맵 및 중점분야별 전략 수립 등 기술기획을 담당
 - 중점분야에 따라 분과를 구성하여 기술·시장 동향 분석, 중점과제 도출 및 상세기획 등을 수행
 - 기술위원의 전문분야 분포는 산(11), 학(11), 연(14)

〈표 1-11〉 기술기획위원회 구성

연번	분과	성명	소속	직위	전문분야	산학연
1	1분과 탄화수소 열분해기술	김우현	에기연 수소에너지연구본부	책임	수소생산기술	연
2		이대훈	기계연 환경시스템연구본부	책임	플라즈마공정	연
3		김유나	한국기계연구원	선임	청록수소 기술개발	연
4		이도연	한밭대	교수	유동층 반응공정 최적설계	학
5		류재홍	고등기술연구원	수석	청록수소	연
6		강홍재	한국기계연구원	선임	우주추진, 아크 플라즈마	연
7		정상현	(주)GPS Lab	이사	전자공학	산
8		조원철	서울과학기술대학교	교수	화학공학, 수소생산기술	학
9		고강석	에너지기술연구원	책임연구원	유동층 기반 촉매 반응시스템 설계	연
10	1분과-(1) 수소 분리 정제기술	김준우	포항산업과학연구원	박사	-	산
11		이찬현	울산대학교	교수	화학공학	학
12		심왕근	순천대학교	교수	고분자재료/수소제조	학
13		한상종	한국건설기술연구원	수석	환경공학/메탄정제	연
14		김신동	이앤캐슬루션	대표	기체분리막	산
15		조원준	바이오플랜트	대표	화학공학	산
16		이충섭	에어레인	상무이사	화학공학	산
17		김학은	가스기술공사	부장	가스 플랜트	산

연번	분과	성명	소속	직위	전문분야	산학연
18	2분과 고체탄소 포집 및 전환기술	박태준	한국지질자원연구원	선임	-	연
19		김장열	포항산업과학연구원	수석	탄소소재	산
20		황민진	전남대	교수		학
21		노기민	한국지질자원연구원	센터장	신소재공학	연
22		김선경	한국지질자원연구원	선임	그래핀 복합체 제조	연
23		양승재	인하대학교	부교수	탄소소재	학
24		최달수	명지대학교	조교수	탄소소재	학
25		노용규	제로시스	대표	화학공학, 수소연료	산
26		장향연	한국건설기술연구원	전임	환경공학/탄소포집광물화	연
27		유동우	군산대학교	연구교수	신소재공학/탄소광물화	학
28		박영수	한국탄소산업진흥원	팀장	탄소나노튜브	연
29		이재훈	가스안전공사 장치연구부	부장	-	산
30	3분과 플랜트 건설 및 운영기술	황인주	건설연 수소인프라클러스터	수소인프라 클러스터장	수소공급네트워크	연
31		차광석	한빛디엔에스(주)	소장	수소공급시스템	산
32		원서경	Spacea	이사	공간건축	산
33		김양균	건설연 화재안전연구소	수석	-	연
34		황용우	인하대학교	교수	-	학
35		황문현	고려대학교	교수	전주기 수소 시스템	학
36		장우식	조선대학교	교수	전주기 경제성 평가	학

2. 기획 추진경과

1) 사업기획 추진경위

■ 동 사업의 기획을 위해 기술기획위원회를 구성·운영하고 전문가 자문, 기술수요조사 등을 통해 기술기획의 적정성을 검토

- 사업기획을 위해 착수 이후 주 단위 연구 진행 상황 협의(서면, 화상 등), 정례회의(월 2회), 수시보고 등 진행
- 국토교통부의 사업기획 총괄 하에, 기술기획위원회 구성·운영, 실무진 워킹그룹을 통한 사업 기획 추진

〈표 1-12〉 사업기획 추진경위

구분	일자	주요내용
사업기획 회의	수시	○ 월2회 정례회의 및 수시회의 개최 ※ '22.05.23.'22.06.22.,
	'22.07.05.	○ 주관기관(국토교통과학기술진흥원) 보고회 - 사업기획 방향 협의, 기획일정 조정 등
	'22.11.07.	○ 국토교통과학기술진흥원 내부점검 - 중점분야 구성 및 개요 구성 방안 기술기획위원 검토를 통해 재논의
	'23.01.11	○ 국토교통과학기술진흥원 중간점검 - 중점별 기술개발 내용 및 연구비 점검
	'23.04.13.	○ 국토교통과학기술진흥원 점검 - 중점별 기술개발간 연계성 및 성과목표·지표 점검
부처보고	'23.04	○ '23년 4월 중순 예정
전문가 자문회의	'22.06.14.	○ 전문가 자문 - 사업 기획 방향 논의
	'22.09.08.	○ 전문가 자문 - 청록수소 생산기술의 장단점 비교, 국내 및 해외 기술수준 파악을 위한 전문가 자문
기술기획 위원회	'22.10.17.	○ 기술기획 Kick-off 회의 - 분과위원회 상세운영계획 공유, 중점분야 및 핵심기술 구성 논의
	'22.11.09.	○ 기술기획 집필진 회의 - 사업구성 및 방향성 논의, 키워드 도출, 수요조사 방안 검토
	'22.11.30.	○ 기술기획 집필진 회의 - 사업구성 및 방향 확정, 사업 경제성 확보 방안 논의
	'22.12.09.	○ 기술위 집필진 회의 - 기술개발, 추진체계, 사업 기간 및 예산 검토 논의 ※ 산업도시 활용을 위한 플랜트 건설 및 운영기술 실증과 이를 위한 중점기술(청록수소 요소기술) 고도화 기술개발
	'23.01.30.	○ 기술기획 점검회의 - 청록수소 포지셔닝(안) 검토, 실증지 선정 관련 지자체 현황 공유 등
	'23.02.10.	○ 기술기획 회의 - 성과지표 점검, 플라즈마 기술 비용 산출 논의 - 기술수요 기업 검토 및 추가 수요조사 방향 협의
	'23.03.29.	○ 기술기획 집필진 회의 - 중점분야별 연계방향 검토, 예산(안) 검토 및 수정·보완 방향 논의 - 지자체 참여의향 현황공유
	'23.04.17. ~ '23.04.18.	○ 기술기획 회의 - 분과별 기술개발 상세내역 점검, 연구비 적정성 검토 - 성과지표·목표 점검
기술 수요조사	'22.11.10. ~ '23.03.31.	○ 1차('22.11.10. ~ '22.12.30.), 2차('22.12.31. ~ '23.03.31.) 기술수요조사를 통해 총 74건의 기술수요조사서 확보
기업참여 의향조사	'22.11.10. ~ '23.03.31.	○ 17개 기업참여의향서 확보
지자체참여 의향조사	'22.12.15. ~ '23.04.15.	○ 3개 지역 지자체참여의향서 확보

제2장

청록수소 개념 및 중요성

제1절 청록수소 개념

제2절 청록수소 생산기술의 포지셔닝

제3절 청록수소 기술개발 이슈 정의 및 전략도출

제4절 청록수소 기술 선정 및 규모

2장 청록수소 개념 및 중요성

1절 청록수소 개념

■ 현재 블루수소, 그린수소 기술로 대표되는 청정수소* 기술들의 한계와 이를 극복할 수 있는 청록수소의 가능성

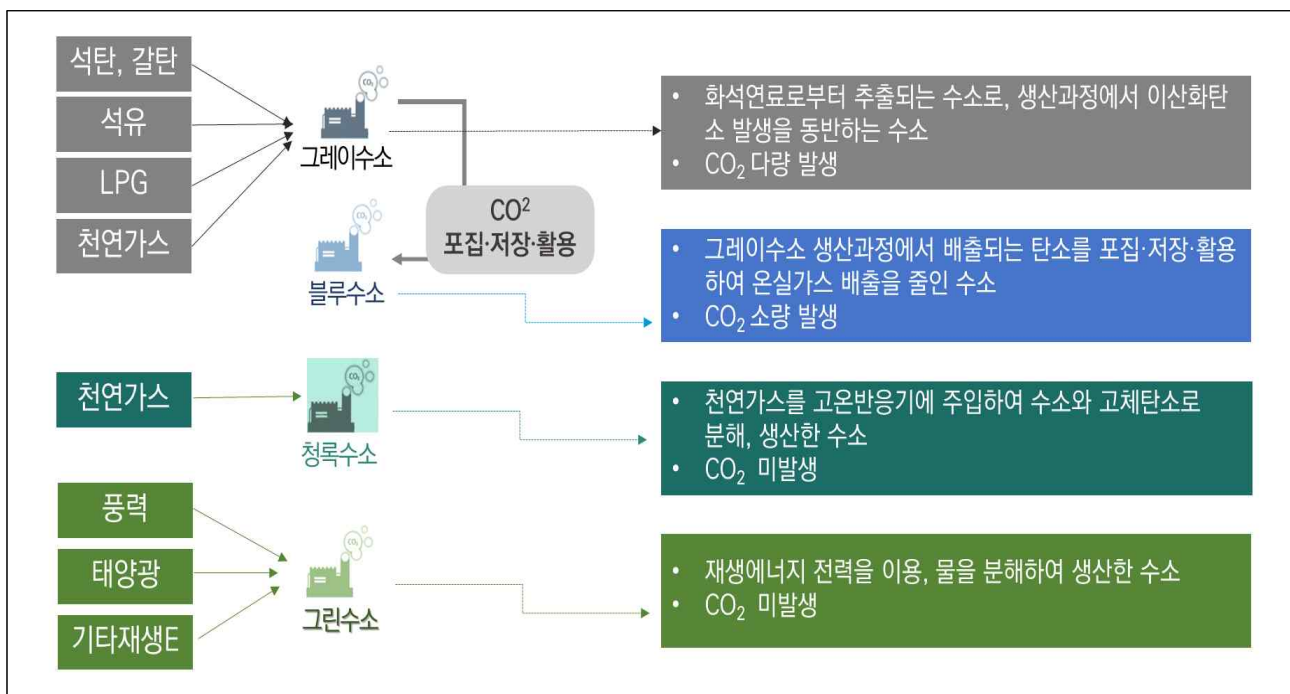
* 청정수소 기준은 부재하나, 수소경제 육성 및 수소 안전관리에 관한 법률(수소법 2조7의2)에 따라 인증받은 무·저탄소 수소 또는 수소화합물을 의미

- (그레이수소) 경제성이 높으나, 수소 생산 과정에서 이산화탄소가 가장 많이 발생하는 수소로 탄소중립을 위한 수소생산기술로 확대에 한계 존재
- (블루수소) 그레이수소 생산공정에 이산화탄소 포집/저장 기술을 결합하여 수소 생산과정에 발생하는 온실가스 배출을 최소화한 기술로서 이산화탄소의 포집률을 최대화할 경우, 청정 수소생산기술로 판단되며 대형 공정 운영 시 경제성이 뛰어나지만, 포집된 이산화탄소의 저장이나 활용에 한계가 있을 수 있음
 - 우리나라는 대용량 그레이수소 생산시스템과 온실가스 포집 기술 개발 수준은 높으나 대량의 이산화탄소 저장 기술 확보는 어려움
 - 포집과 저장 기술의 적용에 따라, 수소생산 단가 절감이 어려움
- (그린수소) 재생전력으로 물을 전기분해하여 수소를 생산하므로 오염물질이 전혀 배출되지 않으나, 높은 재생전력 단가와 전력 소모량의 문제로 경제성 확보의 어려움 존재
 - 전기에너지를 수소로 변환하여 손쉽게 저장하므로(power-to-gas 기술) 재생에너지의 간헐성 보완 가능
 - 그러나 재생전력의 국지성, 간헐성에 따라 우리나라의 경우 대용량화와 경제성 확보가 제한적임
 - 이는 도시 수소에너지 수요 대응을 위한 그린 수소 생산 시설의 가동율 제고를 제한하여 대량생산 및 생산단가 절감의 결정적 장애요인으로 작용
- (청록수소) 탄화수소를 탄소와 수소로 분해($\text{CH}_4 \rightarrow \text{C} + 2\text{H}_2$) 하여, 수소 생산 과정에서 이산화탄소가 생산되지 않고 반응원료 탄화수소의 탄소가 고체 탄소로 확보되므로 탄소 포집/저장(CCS) 부담이 없음

- 블루수소 대비, 이산화탄소 포집/저장에 드는 비용 부담이 없음
- 전력을 사용할 경우 그린수소 대비, 1kg 수소 생산 시, 그린수소 소요전력의 약 1/5 수준으로 재생전력의 소요량이 적음

〈표 II-1〉 수소 분류 및 정의

Brown	갈탄·석탄을 태워 생산하는 개질수소
Purple	원자력에서 발생된 전력을 이용해 만든 수소
Grey	천연가스를 고온·고압 수증기와 반응시키는 개질수소와 석유화학 공정에서 발생하는 부생수소
Blue	그레이수소를 만드는 과정에서 발생한 이산화탄소를 포집·저장(CCS)하여 탄소 배출을 줄인 수소
Pink	원전에서 발생하는 전기와 증기를 이용해 수전해 방식으로 생산
Green	태양광이나 풍력 등 재생에너지에서 나온 전기로 물을 전기분해하여 생산
Turquoise	천연가스를 고온반응기에 주입하여 수소와 고체탄소로 분해하여 생산



[그림 II-1] 수소 생산기술 방식

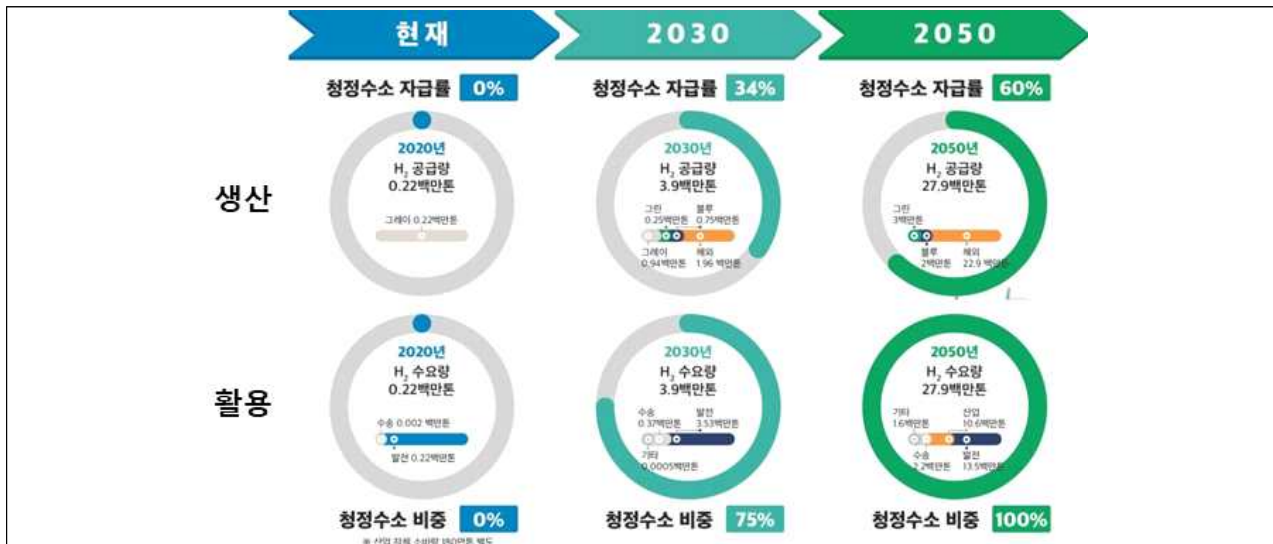
- 또한, 최근 에너지 비용의 변동성과 탄소중립에 기여할 수 있는 청정 에너지기술의 수요가 커짐에 따라 향후 전 세계적으로 청정수소의 수요 증가는 자명
- 이에 따라 해외 수소 도입 시 수입가격의 상승이 예상되어 해외 수소 도입 방법의 경제성 확보 불확실
- 해외 수입 청정에너지에 의존 시 국내 산업 전반의 경쟁력을 약화시킬 우려 존재
- ※ 천연가스 시장의 경우 러시아의 공급 중단에 따른 수급 여건 불확실성으로 급등락 반복 / 국내에너지

시장의 경우 글로벌 에너지 가격 급등에 따라 '22년 472억 3천만 달러로 역대 최고치 무역수지 적자 기록

- 청정수소 자급률 확보* 및 탈탄소 사회 구현**을 위해 청정수소 생산기술 확보가 급선무
- 국내 수소경제 이행을 위해 청정수소 자급률 확보 및 온실가스 감축 의무 이행 필요

* (제1차 수소경제 이행 기본계획) 2050년 청정수소 자급률 60% 목표

** (유엔기후변화협약) 195개 당사국에게 온실가스 감축 의무가 부여되었으며, 우리나라도 2030년까지 온실가스 배출전망치(BAU, Business As Usual) 대비 37% 감축 의무 이행 필요



[그림 11-2] “제1차 수소경제 이행 기본계획”의 청정수소 생산 활용 계획

■ 청록수소, 친환경성 및 경제성 확보 가능한 청정수소 기술

- 청록수소 생산방식*은 이산화탄소가 발생하지 않아 재생전력과 연계할 경우 탄소중립 실현에 기여할 수 있고 수소시범도시 취지에 부합

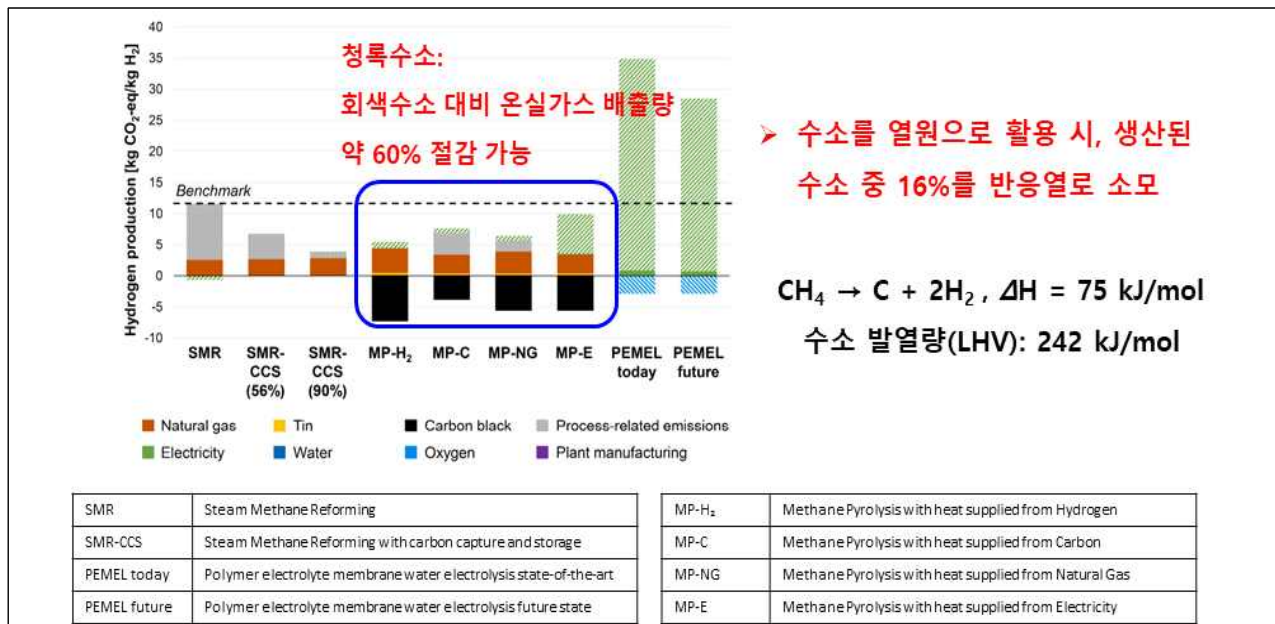
* 천연가스를 고온반응기에 주입하여 수소와 고체탄소의 분해를 통해 생산 ($\text{CH}_4 \rightarrow \text{C} + 2\text{H}_2$)

- 수소 생산기술별 온실가스 배출량 비교 결과, 청록수소 반응시스템의 에너지 공급 방식에 따라 회색수소 대비 60% 수준까지 온실가스 배출량을 절감 가능 (그림II-3)
- 또한, 수소와 함께 생산되는 탄소는 고체 형태의 제품으로 생산·활용 될 수 있어
 - ①수소생산 단가 절감, ②공정 경제성 제고 등의 역할 수행
- kg당 3달러 이상의 탄소 제품 생산 시, “수소경제활성화 로드맵”에서 제안하는 수소가격 목표 달성 가능(표 II-4 참조)

※ 수소와 동시에 생산되는 카본블랙은 전도성이 높은 특수카본블랙으로 톤당 약 2,000~4,000달러 정도이며, 배터리 및 촉매 담지체로 사용되는 에너지용은 보다 높은 가격으로 시장 공급이 가능

- 청록수소 생산기술은 청정수소 에너지 인프라 확보 및 기존 청정수소 기술들의 한계 극복 차원에서 가장 적합

- 도시 에너지 공급 인프라 측면에서 국내 천연가스(도시가스) 및 전력 공급망의 이용이 가능하여 수요처 근접지에서 생산이 가능하고 이산화탄소 포집 및 저장에 대한 비용부담이 없어 저탄소 수소도시의 에너지 수요 대응에 가장 적합
- 그림 II-3에서 제시된 바와 같이, 청록수소는 그레이수소 기술에 비해 약 60% 정도 온실가스 배출량을 절감할 수 있으며 그린수소에 비해 요구되는 전력이 현저히 낮음
- ※ 그린수소의 경우, 재생전력의 사용이 전제되어야 함. 일반 그리드 전력 사용 시, 수전해 수소 생산기술은 그레이수소에 비해 더 많은 온실가스를 배출할 수 있음
- 천연가스 및 재생전력을 동시에 사용 할 경우, 원료 구입 및 전력구매에 따르는 운전비용이 높다는 단점을 ①고효율 대량생산 공정기술 개발, ②수소와 동시에 생산되는 탄소의 고부가화를 통한 경제성 확보로 타개할 수 있음
- 따라서, 이에 대한 기술적 이슈 정의와 극복방안을 제시하기 위한 연구개발이 필요



출처: Hermesmann & Müller, Progress in Energy and Combustion Science 90 (2022) 100996

[그림 II-3] 주요 수소생산 기술별 온실가스 배출량 비교

에너지 안보 및 탈탄소사회 도입을 위해 청정수소 생산기술 확보가 시급하며, 친환경성 및 대용량 공급 가능성 고려 시 청록수소가 가장 적합

2절 청록수소 생산기술의 포지셔닝

■ 수소 생산기술별 비교를 통해 청록수소 생산기술의 기술의 포지셔닝 전략을 도출하고, 기술이슈를 정의

○ 국내외 기술 동향의 분석과 기술의 특징을 고려하여 기술적 이슈를 정의할 필요가 있음

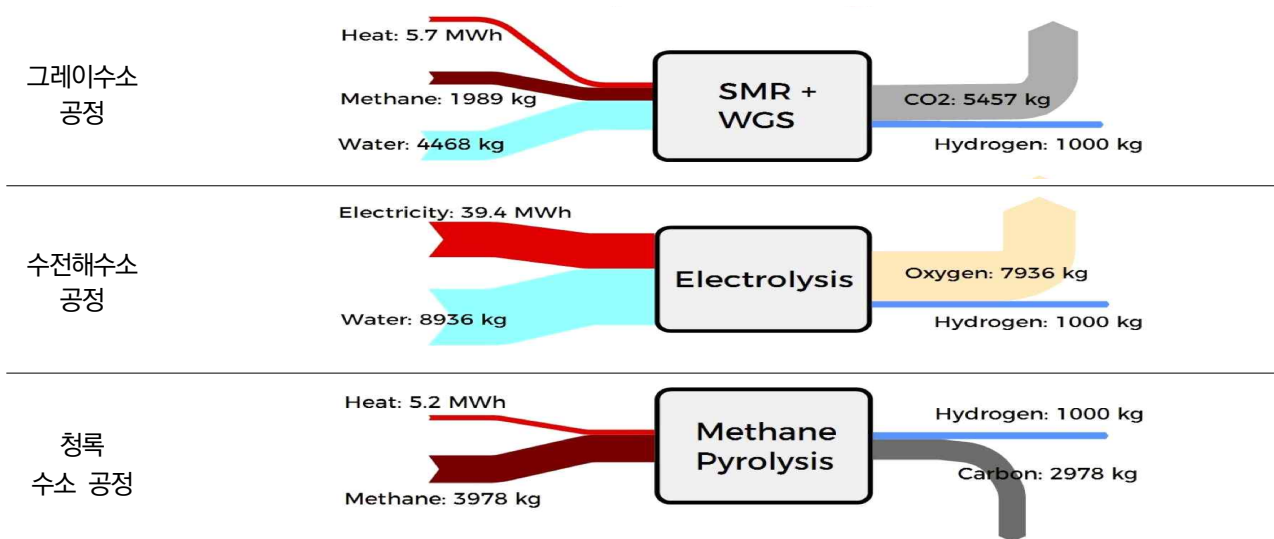
- 청록수소는 블루수소와 같이, 화석연료(천연가스 등)를 기반으로 수소를 생산하지만 CCS 부담없이 청정수소를 생산할 수 있는 것이 장점이며, 그린수소 대비 재생전력 의존도가 낮음

※ 현재 그리드 전력을 이용할 경우 수전해 수소의 온실가스 배출량은 그레이수소의 온실가스 배출량 보다 많음

〈표 II-2〉 주요 수소생산기술 분류

구분 ¹⁾	그레이수소	블루수소	청록수소	그린수소
화학반응	$\text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 4\text{H}_2 + \text{CO}_2$	$\text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 4\text{H}_2 + \text{CO}_2(\text{captured})$	$\text{CH}_4 \rightarrow 2\text{H}_2 + \text{C}$	$2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{H}_2 + \text{O}_2$
수소 1mol 생성 시 필요 반응열	41 kJ/mol H ₂	41 kJ/mol H ₂ +CCS	38 kJ/mol H ₂	285 kJ/mol H ₂
청정수소 분류	불가	가능 (이산화탄소 회수율에 따라)	가능 (반응열 공급방식에 따라)	가능 (재생전력 활용 비중에 따라)
장점	상업적 기술 수준, 높은 수소 생산량	낮은 이산화탄소 배출, 기존 인프라 사용	이산화탄소 발생 Zero, 카본블랙 확보	이산화탄소 발생 Zero, 높은 순수 수소 생산
단점	높은 이산화탄소 배출량	높은 CCUS 비용	상대적으로 낮은 기술수준	많은 재생전력 요구

수소생산 방법 및 이산화탄소 방출량 비교(100% 효율) ²⁾



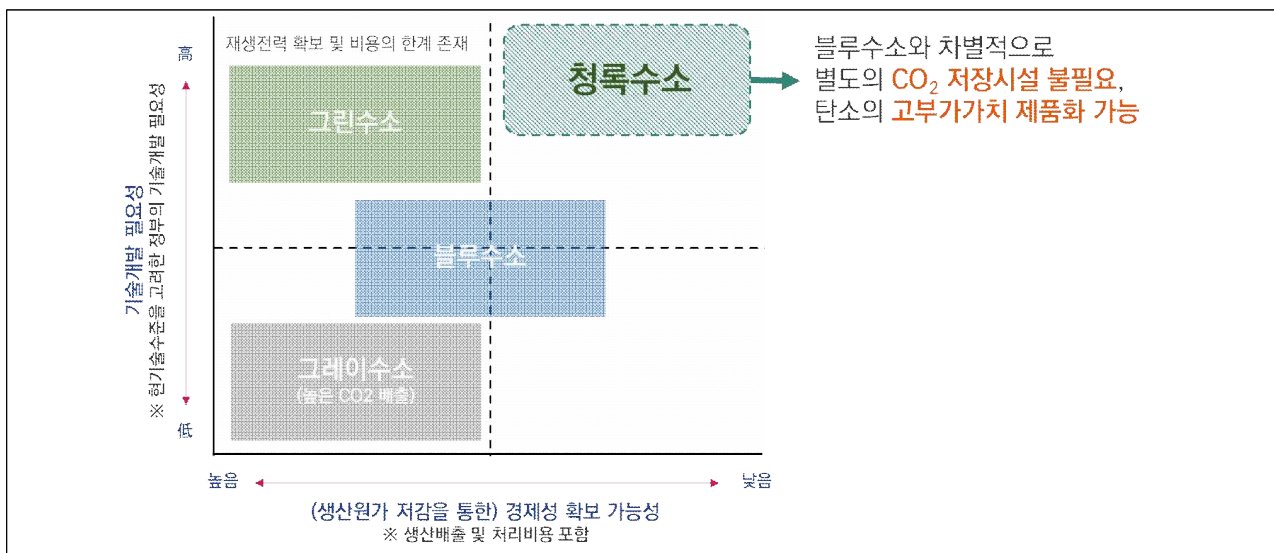
출처: 1) Comparative Analysis of Energy and Exergy Performance of Hydrogen Production Methods, 2020, entropy,

2) Graphic from GTM, February 2020. Colors with descriptions based on Medlock, Forum, May 2021.

* CCUS(Carbon Capture, Utilization, and Storage): 이산화탄소를 포집·저장·활용하는 기술

■ 타 수소생산기술과의 비교를 통한 청록수소 기술 포지셔닝

- 그레이수소를 제외한 대표적 청정수소 생산기술인 블루수소 및 그린수소와의 비교를 통해 청록수소의 기술개발 필요성과 파급효과를 정의
 - 청록수소는 그린수소 대비 적은 재생전력을 요구*하므로 대규모 재생전력의 확보가 어렵고 대규모 이산화탄소 포집/저장 기술이 확보되지 않은 환경에서 청정수소를 공급할 수 있는 유일한 기술이 될 수 있음
 - * 이론상 그린수소 필요 전력의 13.3%
 - 블루수소는 그레이수소 공정에 기반한 기술이므로 기본적으로 100,000Nm³/h급 이상의 대규모 플랜트에만 적용이 가능하고 저렴한 이산화탄소 저장 비용이 담보되어야 경제성을 확보 가능
 - 청록수소는 블루수소와 달리 이산화탄소의 포집이나 저장에 대한 비용이 발생하지 않으므로 대규모 및 소규모 수요 대응 시 온실가스 처리에 대한 비용 부담이 없음
 - 또한 청록수소 생산 시 함께 생산되는 탄소의 경우 고부가화가 가능하여 공정의 경제성을 크게 제고 할 수 있음
- 따라서 청록수소 기술은 ① 낮은 재생전력 의존성에도 불구하고 그린수소 수준의 청정수소 생산이 가능하고, ② 탄소 고부가화를 통해 공정 경제성을 확보할 수 있으며, ③ 우리나라의 우수한 전력 및 가스 공급망을 활용하여 도심 에너지 수요에 대응 가능



[그림 II-4] 수소 생산기술별 포지셔닝

높은 기술적 필요성과 경제성 확보를 위해 청록수소 기술개발 전략 수립이 필요

3절 청록수소 기술개발 이슈 정의 및 전략 도출

1. 기술개발 현황 및 이슈

- 청록수소 기술개발 현황 분석을 통해 기술개발 이슈를 도출

〈표 II-3〉 (요약) 기술개발 현황 및 이슈

	기술개발 현황	기술개발 이슈
해외	○ 플라즈마 기반 CO₂-free 탄화수소 직접분해 기술은 Kvaerner 사가 상용 메탄 직접분해 반응공정을 최초로 개발하고 이를 Monolith 사가 인수함 ○ 촉매 화학적 기술을 이용한 메탄 직접분해를 통한 수소 및 고부가가치 탄소 동시 생산 기술 연구 진행중	☐ 국내 대용량 청록수소 공급을 위한 원천기술의 부재
국내	○ 파일럿 설비 시험 가동을 하였으나 설비의 짧은 수명으로 인한 잦은 유지보수 등의 문제로 기술적 한계를 극복하지 못하고 현재는 운영이 중단된 상황 ○ 메탄 분해를 통한 탄소소재 및 수소 생산 기술을 개발 중이나, 청록수소 대량생산 기술보다는 이차전지 도전재료 활용가능한 수준의 탄소소재 합성 기술이 주 목적	☐ 실증형 연구를 통한 경제성 확보 가능한 기술개발 전략 부재

■ 국내외 청록수소 생산기술 동향

- (해외) 플라즈마 및 촉매화학반응 공정 기반 청록수소 기술 동향

- 현재 청록수소 생산기술 중 TRL이 가장 높은 플라즈마 기반 CO₂-free 탄화수소 직접분해 기술은 Kvaerner 사가 상용 메탄 직접분해 반응공정을 최초로 개발하고 이를 Monolith 사가 인수함
- 노르웨이 회사인 Kvaerner 사에 의해 제안된 Kvaerner process는 메탄, 천연가스, 바이오가스 등의 feed로부터 플라즈마 토치를 활용하여 수소와 carbon black을 생산하는 공정임
- Kvaerner와 공동으로 플라즈마 반응기를 개발한 SINTEF 사는 2000년대 중반 이후 CNT 생산을 위한 2MW 규모의 반응기를 개발하고 이 때 카본 생산 공정 비용은 20kWh/kgC 수준
- Monolith사는 Kvaerner 사의 기술을 기반으로 독자 개발한 반응기에 천연가스를 주입한 뒤 플라즈마 시스템을 통해 열분해하는 방식으로 고순도의 수소를 생산하는 기술을 보유함
- 2021년에는 SK 이노베이션, Mitsubishi 사의 투자를 받아 Goodyear와 타이어 생산 위한 협약 체결
- 온도 조건에 따라 생성되는 carbon black의 quality가 달라지므로 가능한 제한된 공간 내에서 반응조건을 제어하기 위한 연구가 진행
- 촉매 화학적 기술을 이용한 메탄 직접분해를 통한 수소 및 고부가가치 탄소 동시 생산 기술 연구 진행 중

- 촉매 표면에서 탄화수소가 분해되어 탄소 생성물이 증착되어 탄소소재를 생산하는 방식(Catalytic Chemical Vapor Deposition; CCVD)은 카본나노튜브를 비롯한 고결정성의 고부가가치 탄소소재를 생산하기 위한 방법으로 1960년대부터 연구를 진행
- 전통적인 전기방전, 레이저, 플라즈마 기상증착 방식에 비해 에틸렌 등을 원료가스로 고부가가치 탄소나노튜브 소재의 대량생산을 목적으로 연구개발이 이루어지며 이 경우 생산가스 내 수소의 비율이 낮아 수소생산을 위한 기술로 활용은 어려움
- 촉매를 사용할 경우 메탄의 열분해 반응(pyrolysis) 온도를 낮출 수 있고, 주로 촉매 역할을 하는 철, 니켈 등의 전이금속의 입자를 나노 사이즈 수준에서 조절하여 생성되는 탄소물질의 물성 조절 가능
- University of California, Santa Babara의 Eric McFarland 교수진의 제안한 촉매 반응시스템은 용융된 니켈 등의 전이금속을 포함한 bath에 메탄을 공급하여 직접분해 반응을 유도함. 촉매로 사용되는 금속의 용점 이상에서 사용하므로 1,000 °C 이상의 반응온도가 요구되며 생성된 탄소에 포함된 금속 성분에 대한 제거가 필요할 것으로 생각됨. 현재 일일 약 8kg의 수소를 생산하기 위한 반응시스템 개발. C-Zero라는 회사를 설립하여 2022년까지 일일 수소생산량 6톤급의 반응시스템 설계를 목표로 하고 있음
- 독일의 BASF는 고온 조건에서 탄소 입자를 촉매로 사용하여 moving-bed 형태의 반응시스템을 구현함. 2025년까지 파일럿급 시스템 구축 연구 진행 중
- 호주 Hazer Group은 2018년, 수소 8kg/day 및 탄소 29 kg/day 생산 파일럿 스케일 반응시스템 개발함¹⁾. 저가 천연 철광석을 촉매로 활용, 촉매 비용은 매우 낮지만 (\$0.1/kg) 반응활성과 생성탄소 품질에 한계(탄소 수율 500% 이하, 탄소 가격 \$0.5/kg)가 있는 것으로 판단됨

※ 2021년부터 바이오가스를 이용한 수소 270 kg/day, 탄소 1000 kg/day 생산이 가능한 demonstration 플랜트 개발 중²⁾. 용융금속 반응시스템에 비해 상대적으로 낮은 온도 (800 ~ 900 °C) 범위에서 운전 가능

○ (국내) 플라즈마 및 촉매화학반응 공정 기반 청록수소 기술 동향

- 2000년대 후반 (주)에트플라텍에서는 플라즈마를 이용한 폐기물의 가스화를 통해 수소 또는 합성가스를 얻기 위한 공정을 개발하고 파일럿 설비를 운전한 바 있음. 시험 가동을 하였으나 설비의 짧은 수명으로 인한 잦은 유지보수 등의 문제로 기술적 한계를 극복하지 못하고 현재는 운영이 중단된 상황
- (주)제이오 등에서 산업부 연구개발 사업(천연가스로부터 고결정성 전도성 흑연구조를 갖는 탄소소재 개발, 2020 ~ 2024)을 통해, 메탄 분해를 통한 탄소소재 및 수소 생산 기술을 개발 중. 청록수소 대량생산 기술이라기 보다는 이차전지 도전재로 활용가능한 수준의 탄소소재 합성 기술이 주 목적
- 한국에너지기술연구원 등에서 환경부 연구개발 사업을 통해 태양열과 촉매를 이용한 바이오메탄의 분해 반응 연구를 수행함(태양열에너지를 이용한 바이오메탄 분해기술 개발, 2017 ~ 2020)

1) HAZER PILOT PLANT TESTING EXCEEDS CAPACITY TARGETS BY 300%, Hazer Group (2018)

2) AGM CHAIRMAN'S ADDRESS & CEO PRESENTATION, Hazer Group (2021)

■ 청록수소 기술개발 주요 이슈는 ① 국내 대용량 청록수소 공급을 위한 원천기술의 부재, ② 실증형 연구를 통한 경제성 확보 가능한 기술개발 전략 부재 등

○ (이슈 1) 국내 대용량 청록수소 공급을 위한 원천기술의 부재

- 현재 전세계적으로 다양한 청록수소 생산을 위한 기술개발이 진행 중이나 상용화에 가장 근접한 방법은 재생전력 기반 플라즈마 반응시스템으로 알려짐

※ (예시) 미국 Monolith 사 기술이며 국내 기업과 합작법인 설립

- 상용화 수준의 해외기술 대비 국내 청록수소 생산기술은 실험실 수준의 소규모 연구개발만 이루어진 상태
 - 플랜트 수준의 실증 기술개발을 통해 상용화를 위한 대규모 수소 에너지 수요에 대응 가능한 수준의 원천기술, 플랜트 설계, 운영 기술 그리고 표준화 및 사업화 모델 등의 연구가 부재
- 대용량 청록 수소생산 기술의 확보를 위해서는 정부지원을 통해 수소시범도시의 수소공급과 대규모 실증 수준의 연구개발이 필요
 - 해외 청정수소 기술 도입 시, 향후 청정수소 수요 증가에 따라 국내 산업의 에너지 비용 부담이 증가할 수 있고 에너지 안보 차원에서 청정에너지 생산 기술의 국산화 필요

실현 가능성 있는 청록수소 기술개발을 통해 현시점의 그린수소 및 블루수소 단점을 보완한 국가 청정수소 공급 기술 포트폴리오의 강화 필요

○ (이슈 2) 실증형 연구를 통한 경제성 확보 가능한 기술개발 전략 부재

- 국내 기업이 투자한 Monolith 사의 기술은 수소생산 효율, 플라즈마 전극의 내구성 등의 문제로 수소 생산비용의 증가가 클 것으로 예상
- 따라서 실증형 연구개발을 통해 ①고효율 천연가스 분해반응 시스템 설계 핵심기술, ②고순도 수소 생산을 위한 수소 분리/정제 공정 설계기술, ③수소와 함께 생산된 탄소의 고부가가치화, ④플랜트 엔지니어링 및 운영 등의 핵심 원천기술 국산화, 상용화, 운영 및 기술 표준화 등 필요
- 또한, 도시 수준의 대규모 청정수소 수요 확보를 통해 실증연구 수행
 - 수소 시범도시 등을 포함한 실증기술의 즉각적 적용이 가능한 수소 수요처 발굴을 동시 진행하여 기술개발부터 실증까지 단계적 기술레코드 확보

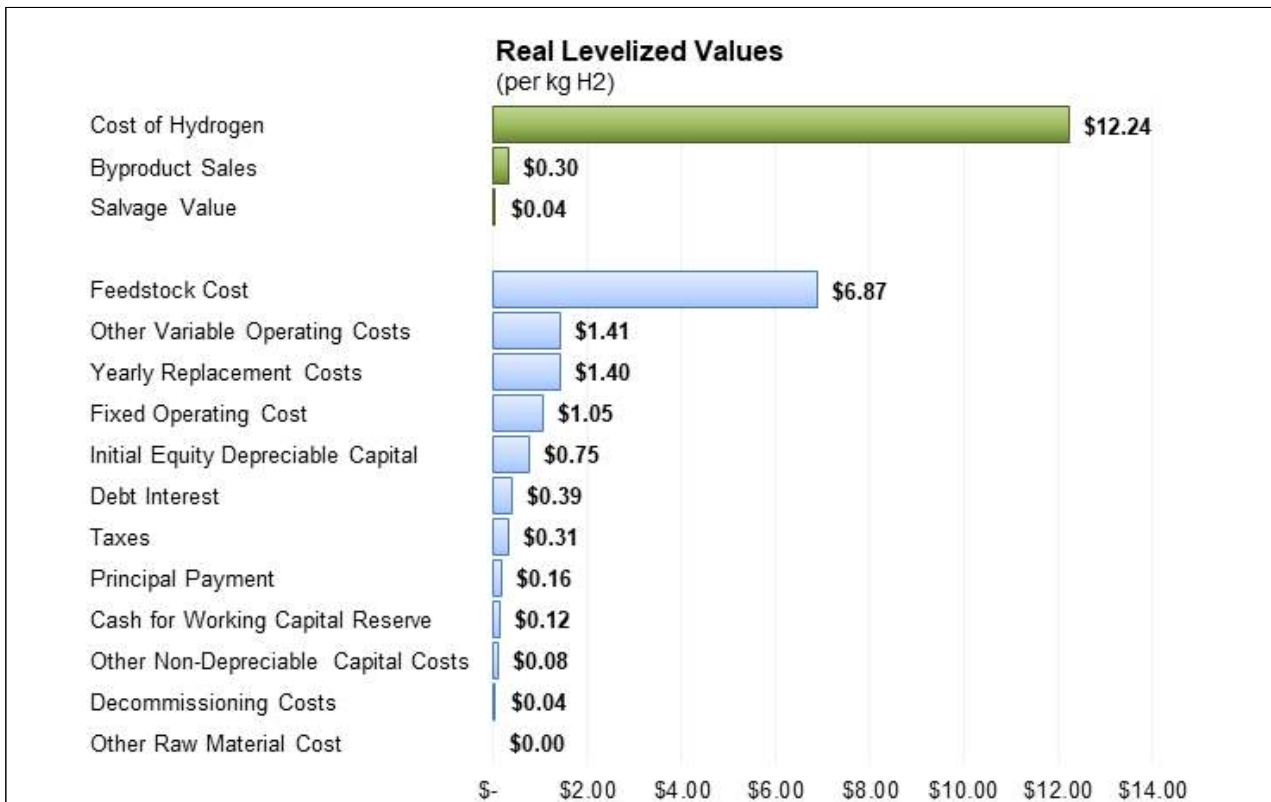
**실험실 수준의 산발적 요소 기술 연구에서 벗어나,
실증형 연구개발 및 실증수요처 동시 발굴 필요**

2. 청록수소 기술개발 추진전략

기술개발 추진전략

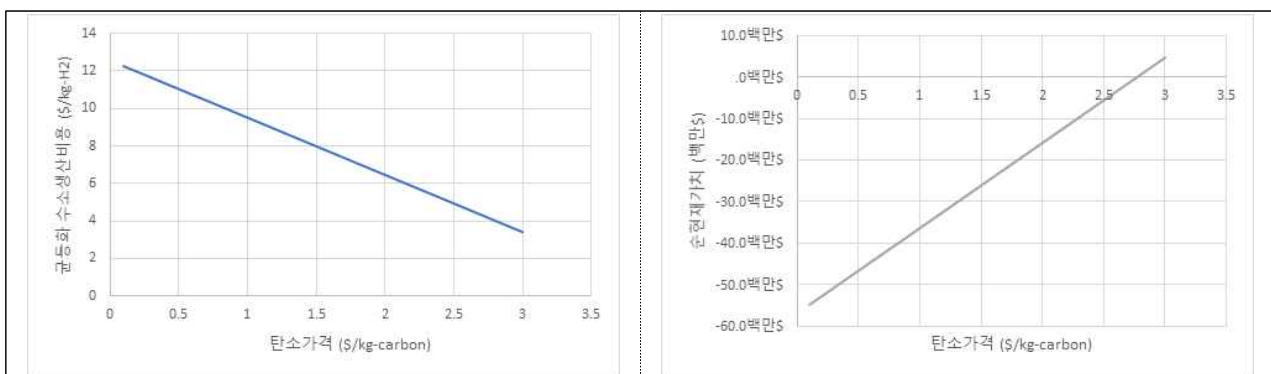
고효율 대용량 청록수소 생산 국산화 기술 개발

- 대용량 기술로 실현 가능성 높은 플라즈마 기술을 기반으로 기존 기술의 단점(낮은 효율, 수소 선택도)을 극복하기 위한 플라즈마-화학반응 연계 기술의 개발로 수소 생산 원천기술 확보
 - 플라즈마 반응시스템 설계기술 개발 : 장기운전 가능한 플라즈마 모듈 설계기술을 개발하여 MW 규모의 공정구성 가능한 기술 확보
 - 플라즈마 연계 화학반응공정 기술 개발 : 플라즈마 유래 가스로부터 수소 생산량을 제고하여(미전환 탄화수소로부터 수소생산) 고순도 수소 생산 시 분리 정제 비용 절감할 수 있고 고품질 탄소 생산이 가능한 화학 반응시스템 설계 기술 확보
 - 플라즈마와 화학반응공정의 연계를 통해 수소생산 효율 및 경제성 제고 가능
- 고순도 수소 생산 및 공급을 위한 대용량 청록수소 생산 공정에 연계한 분리/정제 공정의 핵심기술 개발
 - 핵심소재 및 공정기술 개발 : 수소/탄화수소 정제·고순도화용 흡착제 및 분리 공정기술 확보
- 수소와 함께 생산되는 탄소의 고품질화를 통한 기술 경제성의 제고
 - 고체탄소 고부가가치화 전환 기술을 통해 공정 경제성 확보 및 수소경제 활성화를 위한 저렴한 청정수소 공급 가능
 - 일일 3톤 규모의 소규모 시설임에도 불구하고 생산되는 탄소의 가치가 kg당 3달러 이상일 때, 수소 생산단가는 대형 블루수소 생산 플랜트보다 저렴한 수준으로 떨어짐
 - 수소생산량 기준 일일 3톤 규모의 청록수소 생산 플랜트에서 생산되는 수소의 가격 구조(NREL H2A 모델 이용)는 다음과 같이 계산됨
 - 생산탄소 가격 \$0.1/kg 가정 시, 균등화 수소생산 비용: \$12.24/kg (이중 Feed stock 비용은 \$6.87/kg (천연가스 44%, 촉매 56%))



[그림 11-5] 수소생산량 기준 일일 3톤 규모의 청록수소 생산 플랜트의 균등화수소생산 비용 (탄소소재 가치 \$0.1/kg 가정 시)

- 상기 균등화 수소생산 비용 항목 중 “byproduct sales”가 고체탄소 판매에 의한 수익임. 촉매사용을 통해 고체탄소의 가치가 제고된다고 가정할 경우 균등화 수소생산비용은 크게 감소될 수 있고 투자 가능여부를 판단하는 순현재가치도 크게 개선됨



[그림 11-6] 고체탄소 가치 제고에 따른 순현재가치 개선

- 생산 고체탄소 가격 \$3/kg 가정 시, 균등화 수소생산 비용: \$3.39/kg로 감소



[그림 II-7] 수소생산량 기준 일일 3톤 규모의 청록수소 생산 플랜트의 균등화수소생산 비용 (탄소소재 가치 \$3/kg 가정 시)

- 따라서, 청록수소 생산기술은 도심 내 수소에너지 수요 대응이 가능한 청정수소 생산기술로 활용가능할 뿐만 아니라 탄소 기반 소재 산업에도 응용가능한 미래 에너지 핵심기술

〈표 II-4〉 주요 청정수소생산기술별 수소생산단가 분석

구분	블루수소	PEM수전해수소	청록수소 (C가격 \$0.1/kg)	청록수소 (C가격 \$3/kg)
수소생산량 (톤/day)	400	3	3	3
가동율 (%)	90	90	90	90
수소 생산단가 (\$/kg)*	3.88	6.4	12.24	3.39
비고	○ 블루수소는 대형 공정에만 적용 가능 ○ 본 계산 시 이산화탄소 저장비용 제외	○ 재생전력만 활용할 경우 가동율 90% 불가능하므로 가동율 하락 시 수소생산단가 증가	○ 촉매 가격 \$10/kg, 촉매 소모량 0.33kg/kgH₂ 가정 시 결과 ○ OPEX에서 탄소 판매가 -cost로 반영됨 ○ 재생전기 사용 시, 이산화탄소 발생량 near zero	

* NREL의 H2A Model을 이용하여 계산함

주요 계산조건: 1) 천연가스 가격: \$17/mmBtu, 2) 전기가격: \$0.1/kWh

《(참고) 청정수소생산기술별 수소생산단가 분석 관점 및 기본가정》

- 블루수소, 그린수소(PEM 수전해수소) 등 청정수소 생산단가와 청록수소의 생산단가를 비교
 - ※ 그레이수소(부생수소+추출수소) 등 이산화탄소를 배출하는 수소 생산 방식은 분석대상에서 제외
 - (분석방법) 청정수소 생산단가 비교를 위해 美 국립에너지재생연구소(NREL)의 '수소분석(H2A) 생산 모델'을 적용
 - H2A 모델은 수소생산 경로에 대한 심층적인 기술·경제 분석을 수행하기 위한 美 에너지부의 공식적인 도구
 - (원료비용) 천연가스 가격 17\$/mmBtu, 전기가격 0.1\$/kWh 가정
 - (가동률) 청정수소 생산기술별 플랜트 가동률은 90%로 고정
 - (민감도) 청록수소 생산공정에서 함께 생산되는 고체탄소의 판매가를 고려하여 민감도 분석을 실시
 - 고체탄소 판매가는 청록수소 플랜트 운영단계에서 마이너스(-) 비용을 반영
 - (청정수소 생산기술별 고려사항) 블루수소, 그린수소, 청록수소 등 생산기술별 특성을 고려하여 비용분석에 반영
 - (블루수소) 블루수소는 대형 공정에만 적용가능함을 고려하여 수소생산량은 일당 400톤으로 가정하였으며, 이산화탄소 저장비용을 현재 금전적 추정이 불가하여 분석에서 제외
 - (그린수소) 재생전력만 활용할 경우 플랜트 가동률 90%는 사실상 불가능하며, 이는 수소 생산단가의 증가로 이어짐. 단, 동 분석에서는 이에 대한 추가비용은 분석에서 제외
 - (청록수소) 청록수소 생산공정에서 필요한 촉매 가격 10\$/kg, 촉매 소모량 0.33kg/kgH₂ 가정

기술개발 추진전략

실증 테스트베드 구축을 통해 수소도시 및 타부처 수요사업 연계

- 대용량 청록수소 생산 기술 개발 시 대규모 수소수요를 확보한 연구개발 수행으로 실용화를 가속화 할 수 있고 이를 통해 기술 표준화, 운영기술 확보 그리고 효과적인 사업화 전략 도출 등이 가능
- 청록수소 공급 인프라를 위한 청록수소 플랜트 대형화 설계/시공기술 및 도시 플랫폼 구축기술 개발 필요
 - 대용량 청록수소 플랜트 설계/시공 개발
 - 대용량 청록수소 플랜트 실증 및 운영
 - 청록수소 플랜트의 수소도시 적용 탄소중립 효과성 분석 및 기술표준화
 - 청록수소 생산플랜트 운영을 위한 AI기술 및 디지털 기술개발 등
- 국내 수소도시 연계 실증 추진 : 현재 전남 광양시, 전남 순천시, 경북 포항시 등 3개 지역이 청록수소 실증플랜트 구축에 관심

4절 청록수소 기술 선정 및 규모

■ 기존 기술의 한계를 극복하고, 수소생산과 고부가 탄소소재(카본블랙 등)의 회수를 고려한 경제성 측면에서의 향상된 실증규모의 기술개발 추진 필요

- 탄소중립 도시구현을 위한 청정수소 수요 증가와 도시 내 청정 에너지 수요 지속 증가 및 수소 에너지의 경제성·수용성 문제에 대한 해결책을 제시하기 위한 기술개발 필요
- 저탄소 청정 수소에너지 공급체계 다양화 및 분산화를 통한 수요 대응 가능
- 수소시범도시에 실증함으로서 기술개발 타당성, 경제성 및 수용성 검증 필요
- 기존 청록수소 기술의 한계 극복 필요

■ 일일 3톤 수준의 청록수소 생산 공정 개발을 위한 주요 기술 요소

- 플라즈마 기술을 기반으로 기존 기술의 단점들(낮은 효율, 수소 선택도)을 극복하기 위한 플라즈마-화학반응 연계 기술의 개발로 수소 생산 원천기술 확보
- 고순도 수소 생산 및 공급을 위한 대용량 청록수소 생산 공정에 연계한 분리/정제 공정의 핵심기술 개발
- 수소와 함께 생산되는 탄소의 고품질화를 통한 기술 경제성의 제고
- 핵심 요소기술들의 실증형 플랜트 엔지니어링 기술개발
 - 일일 3톤 규모의 수소생산 가능한 MW급 시스템 개발을 위한 스케일업 설계 및 실증/장기 운전기술
 - 안전관련 인증 및 기술표준화
- 기존 실증형 청정수소 생산 기술개발 사례를 참고하였을 때 도심 내 청정수소 에너지 수요 대응을 위해서는 일일 3톤 규모가 적정
 - 현재 수행 중인 청정수소 생산 기술들의 연구들은 일일 2~3톤 규모의 공정시스템 개발을 목표(TRL 7 이상)로 하고 있으므로 청록수소 생산 기술도 해외 경쟁기술 수준의 경쟁력 조기확보와 도심 청정수소에너지 수요에 대응할 수 있는 수준의 상용화 근접 기술확보를 위해 상기 생산량 수준의 실증형 시스템 개발을 위한 연구가 필요함

※ 블루수소: 수소가격 경쟁력 강화를 위한 2,000 kg/day급 탄소배출 저감형 고효율 중대형 개질기 기술 개발(산업부, 2021.05-01 ~ 2025.04.30.)

※ 그린수소: 12.5MW급 재생에너지 연계 대규모 그린수소 실증 기술 개발(산업부, 2022.04.01 ~ 2026.03.31.)

제3장

국내외 환경분석

- 제1절 메가트렌드 분석
- 제2절 국내외 정책동향
- 제3절 국내외 시장·산업동향
- 제4절 국내외 기술동향

3장 국내외 환경분석

1절 메가트렌드 분석

1. 분석절차 및 방법론

- 대용량 청록수소 공급 시스템 관련 거시적 환경변화를 파악하기 위해 메가트렌드 분석과 연관 이슈 도출
- 주요 이슈별 세부내용 조사의 프로세스에 따라 조사 분석을 실시
 - (메가트렌드 도출) 메가트렌드 도출을 위해 STEEP 분석 틀을 활용하여 사회, 기술, 경제, 환경, 정치·정책 관점의 이슈를 다양한 미래전망 보고서 등 문헌조사 및 웹-서치 등을 통해 도출
 - (대용량 청록수소 공급 관련 주요 이슈 도출) STEEP 분석을 통해 도출된 다양한 미래 사회 환경변화 내용을 구조화함으로써 동 사업과 관련성이 높다고 판단되는 주요 이슈를 도출
 - 메가트렌드별로 대용량 청록수소 공급 관련 주요 기회, 위협, 영향, 해결해야 할 문제 등을 조사하여 공통 내용을 도출하여 이슈 도출

2. 분석 결과

- 미래사회 전망보고서와 미래기술 기술예측 보고서 등 문헌 분석을 통해 글로벌 메가트렌드 주요 내용 도출
 - 유엔 미래보고서 2050, KISTEP, STEPI 등 국가 과학기술혁신기관에서 분석한 글로벌 메가트렌드를 활용하여 동 사업의 추진방향 검토

〈표 III-1〉 STEEP 분석에 활용한 국내외 보고서 및 연구

구분	보고서/연구명	기관명	기준년도
국내	10대 미래유망기술	KISTEP	2020
	2021년 미래유망기술 선정에 관한 연구	KISTEP	2020
	10대 미래 유망 사업화 아이템	KISTI	2020
	대한민국 과학기술 미래전략 2045	과학기술정보통신부	2020
국외	10 Breakthrough Technologies	MIT	2021
	Top 10 Emerging Technologies	WEF	2020
	Top Strategic Technology Trends for 2021	Gartner	2020

〈표 III-2〉 STEEP 분석 관점의 대외적 환경변화 트렌드

분석관점	메가트렌드	상세내용
사회(S)	인구구조의 변화 (에너지 배분 문제)	사회적 취약계층에 대한 관심 증가
		고령인구에 대한 안전관리 및 의료복지 수요 증가
		저출산과 고령화 심화에 따른 총인구 감소
		도시화 진전에 따른 지역불균형과 도시 생태계 변화
		에너지 배분의 사회적 문제(자원소비량 급증, 탄소불균형) 발생
		인구수별 에너지 사용량 증가 가속화
	삶의 질 향상	건강한 삶 및 맞춤형 서비스에 대한 사회적 요구 증가
		여가활동/여행/레저에 대한 니즈 확대
		생활 안전·안심에 대한 사회적 요구 증가
	도시화 및 산업화	소득 수준 증대, 중산층 확대에 따른 에너지 사용량 증가
		도시집중화 가중에 따른 생태적 도시로의 변화 추구 트렌드 확대
	가치관과 라이프스타일의 변화	자의식 강화 및 개인주의 심화
		구매행동(소비패턴) 및 사회적 인식변화
		합리적 소비 및 소비윤리의식 증대
		기술혁신제품에 대한 선호 우세
기술(T)	나노기술의 발전	기술혁신제품에 대한 선호 우세
		소비/생활의 온택트화
	사회적 위험요소의 증가 (코로나19 등)	안전과 안심에 대한 사회적 욕구 증가
		재난성 대규모 안전사고 발생 규모 증대(화재, 전염병 등)
		각종 안전에 대한 사회 요구 증가
		국가 간 기술경쟁 및 기술유출 우려 심화
	ICT 기술의 가속화	기능의 집적화, 기기의 소형화
		나노소재기술을 적용한 제품의 진화
		글로벌 단위의 초고속 네트워크 확대
		웨어러블 디바이스의 활용분야 확대
	첨단(emerging) 기술의 등장	가상현실(VR) 기술을 활용한 신산업 창출 연구 지속
		웹3.0으로 글로벌 규모의 쌍방향 정보교환 극대화
		산업 영역을 넘나드는 3D 프린팅 적용
		전자기술의 패러다임 변화(유기, 광자, 양자 등 대두)
경제(E)	지식 및 기술발전 속도의 가속화 (기술개발전략의 변화)	과학기술적 탐구대상의 확장(우주 및 해양 탐사 개발 가속화)
		재생에너지 핵심기술 경쟁력 확보
		기술확보에서 문제해결형 기술전략 강화
		모방형에서 창조형으로
	융합의 발전	오픈이노베이션 전략의 증가
		정신적 스트레스 증가
		물리공간과 가상공간의 융합
		데이터 순환 생태계 형성
	글로벌화	수소자동차로의 전환을 위한 대용량 배터리 기술 성장
		플랫폼 중심으로 융합 기조 확대
		글로벌 자본유입/해외투자 확대 등 글로벌 아웃소싱 및 국제분업의 심화
		글로벌 경제위기 대응을 위한 내수시장의 중요성 부각
다극화	다극화	FTA 등 국제질서 편입 가속화
		블랙 스완 등 Risk Management 중요성 부각
		합리적 소비 및 소비윤리의식 증대
		다자 지배권력구조(ASEAN / EU / NAFTA 등)의 및 경쟁심화
지역경제통합 심화	지역경제통합 심화	지역경제통합 심화
		신흥국 시장 규모 확대
		저성장과 이에 따른 성장 전략 변화

분석관점	메가트렌드	상세내용
	양극화	국가간 경제적 격차 심화
		가치에 대한 소비의 확대
		복지에 대한 사회적 합의 확대
		사회적 양극화 심화
	산업패러다임의 변화	신흥국의 국제시장 진출에 따른 가격경쟁 심화
		지식서비스/SW 산업의 성장
		기업의 글로벌 분산과 네트워크화 등 기업구조 변화
		기업의 일자리 창출 요구 증대
		협력업체 지원 강화 및 담합금지 등 기업의 사회적 역할 요구 증대
		상호협력에서 상호융합으로 산업간 경계 붕괴
		인공지능, 3D 프린팅 기술 발전으로 인한 제조업 혁명
	비즈니스 모델의 진화	제4차 산업혁명
		대기업-중소기업 간 격차 확대 등 산업구조 양극화
		비즈니스 유형의 다양화(Start up 등)
		제조업의 서비스업화
환경(E)	환경오염/파괴 심화	비즈니스 구현 공간의 변화(Work→Home→Mobile→Ubiquitous)
		재생경제 등 친환경 비즈니스 모델 대두
		식품, 물, 공기 내 미세먼지 등 오염물질 함유 위험 증가
		신산업 및 신소재로부터 신종 유해물질 및 오염물질 발생
	지구온난화, 이상기후 등 기후변화	에너지 고갈과 원자력 활용 증대. 원전사고·방사능 폐기물 처리 갈등
		에너지 수확기술 등 에너지 재활용의 필요성 증가
		기후영향·재해로 자재 수급 불균형 등 사회적 비용 증가
		새로운 유해물질 또는 질병의 등장
	자원고갈	홍수, 태풍, 폭염 등 자연재해 빈도 및 불확정성 증가
		신재생에너지 등 대체에너지 개발
		탈탄소화 기조
정치·정책(P)	지속가능성장전략 강화	자원확보 경쟁 등 국가 간 경쟁 심화
		환경파괴 최소화
		환경국제협력 강화
		환경국제협력 강화
	정부 세출사업의 책임성/투명성 확립요구 증대	국민의 알권리 충족을 위한 공공정보 개방 및 공유(정부 3.0) 강화
		정책효율성 강화를 위한 범부처간 협업·소통 수요증가
		도시간 불균형 해소를 위한 지역균형발전
	성장동력산업 발굴정책 지속	차세대 성장동력 산업의 지속적인 발굴 및 지원
		과학기술을 통한 경제 기반 조성 전략 강화
		신제품 개발을 위한 국가연구개발사업 예산의 지속적 확대
	국민이 안심하는 안전관리 수요증가	안전관리에 대한 정부의 역할 확대
		국민의 정책만족도 모니터링 강화
		국민의 정책만족도 모니터링 강화
	전자민주주의 확대	의사소통 공간의 급격한 확대(사이버참여, 정치적 프로슈머)
		전자정부 서비스 확대
		전자정부 서비스 확대
	글로벌 거버넌스	환경이슈에서의 상호 의존성 증대
		지구 생태계의 지속가능성을 위한 국제협력과 규제강화
		코로나19, 기후변화, 난민증가 등 국제협력이 수반되는 글로벌 대응이슈 증가
	국가간 환경영향 증대	경제블록화 등 국제질서의 다극화
		주변국에 의한 대기오염 물질 유입 증가
		해양 유류 유출사고에 따른 주변국 파장
	주변국과의 지정학적 갈등	중국의 급부상
		미국과 중국의 패권 경쟁

자료: 주요기관 (UN, 국가과학기술혁신기반(KEIT, KISTEP, STEPI 등) 미래전략보고서 참고

1) 사회적 트렌드

■ 첨단기술 확산에 기인한 경제·사회의 획기적 구조 변화

- (미래사회 변화) 기술발전은 에너지 고갈, 기후변화 등 사회 구조적으로 직면하고 있는 한계점을 극복하는 기회를 제공하면서 동시에 새로운 경쟁체제와 사회적 불평등을 야기
 - 국가 내에서뿐 아니라 국가 간 기술경쟁력 확보와 우위 선점을 위한 경쟁이 격화
 - 기술발전은 산업 생산성 향상에 기여하는 긍정적 효과와 함께 경쟁, 긴장 고조 등 사회 불안요소를 확대하는 양면성 존재

〈표 III-3〉 기술발전으로 인한 미래사회 변화

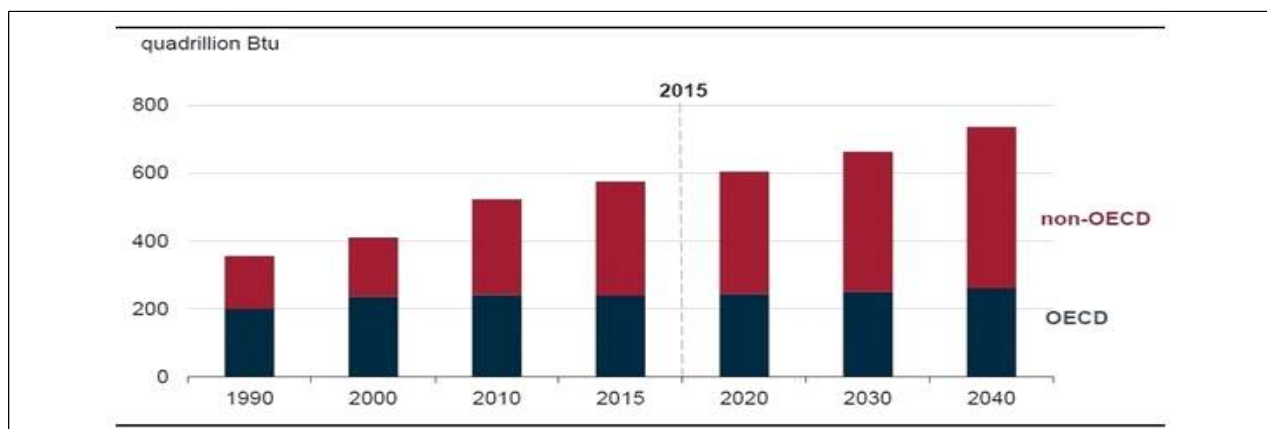
구분	미래사회 변화
국가 간 기술경쟁 심화	○ 국가 간 과학기술 주도성과 경쟁력 우위 선점 등 기술경쟁 격화 전망
사회적 긴장 증대	○ 국가 간 및 국가 내 불평등 심화 ○ 기술의 윤리적 문제와 제도적 미비 등을 통한 사회적 불안, 정치적 갈등 촉발 우려
정부-기업 관계 복잡화	○ 핵심 기술에 대한 국가-기업 간 이해상충
산업 및 일자리 파괴	○ 첨단기술의 도입 및 확산은 기존 일자리를 축소시킴과 동시에 새로운 일자리를 창출

자료: STEPI (2021), 美 NIC Global Trends 2040으로 본 미래 시나리오와 시사점 재구성

■ 인구수별 에너지 사용량 증가 가속화

- (세계 에너지 소비량) 2015년 575 Quadrillion BTU에서 2030년엔 663 Quadrillion BTU로, 2040년엔 736 Quadrillion BTU로 연평균 1% 증가율을 보일 것으로 전망

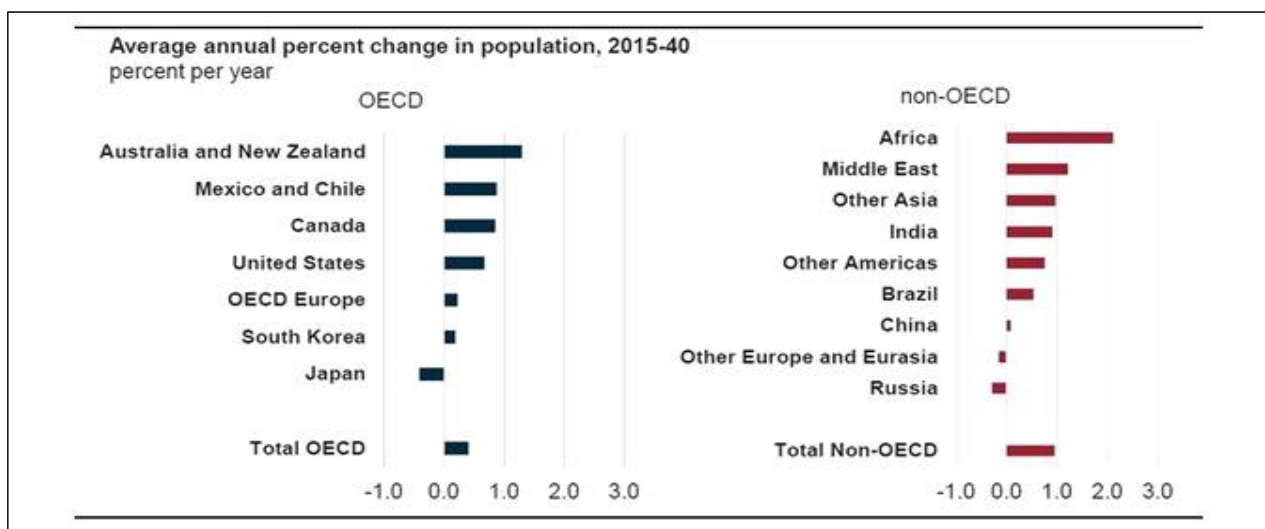
* 2015년과 2040년(예상치) 사이에 OECD국가에선 에너지 수요가 9% 정도 증가하는데 반해, 非OECD국가에선 약 41% 증가할 것으로 전망



자료: IRS 글로벌

[그림 III-1] OECD와 비OECD국의 에너지 수요량 비교

- **(에너지 수요 가속화)** 소득수준과 인구수의 증가는 에너지 수요를 증가시키는 원인이므로 인도와 중국과 같은 소득수준이 가장 가파르게 증가하고 있는 지역의 에너지 수요는 급증할 것으로 전망
- 대부분의 에너지 수요는 경제성장과 인구성장이 모두 폭발적으로 증가하는 非OECD국가에서 발생할 것으로 예상



자료: IRS 글로벌

[그림 III-2] OECD와 비OECD국의 인구 증가율 비교

■ 소득 수준의 변동 따른 에너지 배분 문제 발생

- **(자원소비량 급증)** 인구증가와 경제적 지위의 향상으로 생활수준이 향상되며 개인의 자원소비량이 폭발적으로 급증하고 있음
 - 세계 인구의 14%를 차지하는 고소득국가가 지구 생태 수용력의 52%를 사용하며 한정된 자원을 과용하는 상황
- **(탄소 불균형 심화)** 통계적으로 상위소득 10%에 해당하는 계층이 지난 25년간 탄소 배출량 증가에 기여한 비율이 46%에 육박하는 것으로 조사
 - 반면, 하위 50% 계층이 배출한 증가 기여분은 6%에 불과한 것으로 나타남
 - 선진국을 중심으로 과잉소비가 기후위기에 막대한 영향을 끼치고 있어 기후변화 대응은 사회적으로도 해결할 최우선적 과제로 부상

■ 높은 품질과 성능을 갖춘 혁신 기술 제품의 의존도가 높아짐

- **(소비자 영향력 증대)** 삶의 질 욕구 증대로 인하여 소비자들은 끊임없이 새롭고 혁신적인 기능을 요구하고 있으며, SNS의 발전으로 소비자의 영향력은 지속 증대

- (혁신제품 소비 증가) 개인주의 경향이 등장하며 제품의 구매를 통해 자신을 드러내는 '가치소비' 경향과 혁신제품 선호 경향이 지속
 - 기후위기, 자연 에너지 고갈 등 세계적으로 대두되는 환경문제에 따른 심각성에 공감하고 환경을 보호할 수 있는 소비에 대한 민감도가 높음
 - 첨단소재부품 기술개발의 성공을 위해서는 소비자(수요자)의 니즈를 빠르고 정확하게 파악하고, 소비자(수요자)가 원하는 더 나은 성능과 기능의 소재부품 혁신 필요
- * 글로벌 시장 조사 기업 GfK 따르면 아시아 지역 국가는 높은 품질과 성능을 갖춘 혁신 기술 제품 수요비율(NTAI)이 높고 특히 중국, 싱가포르, 한국 순서로 수요도가 높았다고 발표(뉴스로, '19 재인용)

동 사업 관련 이슈 도출

- 세계적으로 급증하는 에너지 소비 대응을 위해 첨단기술을 접목한 에너지 공급 시스템을 구축하여 안정적 에너지 자원 확보에 기여

2) 기술적 트렌드

■ 4차 산업혁명 시대 도래에 따른 기술혁신 패러다임의 변화

- 최근 기술-기술, 기술-산업, 기술-서비스 간 융복합화(융복합-결합) 등 기술혁신 패러다임이 변화하고, 기술개발 Cycle 단축 추세
 - 전 산업영역의 디지털 전환, 문제해결을 위한 가치기술의 투자 활성화 등이 주목되는 기술 트렌드로 평가
 - 기술의 적용 범위는 무한히 확장되고 있으며, 새로운 부가가치 창출이나 기존방식의 한계를 획기적으로 극복할 핵심역량으로 주목

■ 급변하는 기술·산업환경에 대응하기 위한 새로운 미래 R&D 플랫폼의 등장

- 기술의 상향 평준화 및 융복합화, 시장의 불확실성 증대 등 대내외적 산업 환경이 급변
- 4차 산업혁명 시대 도래 이후 핵심 및 원천기술의 와해성(Disruptiveness), 가치창출을 위한 융복합(Convergence), 기술의 시장가치 전환 속도(Velocity) 등을 핵심 가치로 하는 플랫폼이 요구
 - ① R&D투자를 통해 창출한 기술혁신성과를 ② 합종연횡식으로 연계·조합하여 ③ 빠르게 사회경제적 부가가치를 창출할 수 있는 고도화된 혁신 플랫폼 구축이 미래 국가경쟁력의 핵심 원천으로 역할

■ 청정생산기술, 환경지능기술, 전통산업의 친환경화 지원 기술 등의 환경친화적 기술경쟁 심화 전망

- 청정생산기술에서는 환경친화적인 제품설계, 청결공장, 바이오에너지 관련 기술, 신재생 에너지 등을 중심으로 전개 예상
- 환경지능기술에서는 그린가전, 환경복원시스템, 친환경 재료/소재 기술 등 전통산업의 친환경화 영역에서는 친환경 자동차나 항공기, 그린시티 등에 대한 관심도 증가

■ 초연결 스마트 기술발전

- 2025년에 1조 개의 센서가 인터넷으로 연결되는 등 10년 내에 초연결(Hyper-Connected) 사회가 도래할 전망(WEF, 2016)이며, 스마트홈, 스마트 에너지, 스마트시티, 스마트팩토리 등 스마트기술의 빠른 진화 전망
 - 센서임베디드, 빅데이터, 클라우드서비스, 초고속데이터통신(5G+), 초저전력, 대용량정보처리, 자립형센서, 양자통신 등을 위한 소재부품 혁신수요가 대두

■ ICT·IoT 융합혁신 기술확대 및 융합 기반을 통한 산업 고도화

- 나노, 바이오, 정보 기술의 발전에 따라 분야 간 협력과 기술융합이 빠르게 이루어지고 있고, 융합을 통한 새로운 제품·기술이 등장
- ICT 기반 정보 기술들이 산업 전반의 밸류체인에 미치는 영향력이 급속히 확대되어 제조 공정 변화 확대 전망

〈표 III-4〉 산업혁명 주요 핵심기술 밸류체인의 영향력

기술분야	원료조달	R&D	디자인	제조	물류	마케팅	서비스
AI		●	●	●	●	●	●
IoT				●	●		●
빅데이터	●	●	●	●	●	●	●
모바일				●	●		●
클라우드		●		●	●		●
3D 프린팅				●			
CPS				●			
NT·BT				●			

(자료) 정보통신기술진흥센터 (2018. 1). 4차 산업혁명과 ICT 기술

동 사업 관련 이슈 도출

- 청정에너지 생산기술에 초연결 스마트 기술 등을 융복합하여 환경 친화적인 에너지 공급의 전반에 걸친 관련 기술개발

3) 경제적 트렌드

■ 글로벌 경제 패러다임 변화로 플랫폼의 역할이 산업경쟁력의 원동력으로 역할

- 4차 산업혁명의 급속한 확산으로 경제의 스마트화 및 플랫폼화 등 글로벌 경제구조가 재편되어 사회경제적 패러다임이 변화
 - (스마트 경제) 사람-사물, 제품-서비스, 시공간 등이 지능정보 기술(AI, IoT, 빅데이터 등)과의 접목을 통해 상호 연결 및 지능화되어 제품의 스마트화, 스마트공장 도입 등 생산시스템 변화
 - (경제의 플랫폼화) 기존 제품 위주의 폐쇄적 밸류체인에서 제품뿐 아니라 아이디어와 비즈니스모델 등에 기반한 개방적 밸류체인 모델로 전환
- OECD는 지속가능한 경영의 일환으로 각국이 직면하고 있는 사회문제의 해결을 위한 국가의 중심적인 역할 및 기업 등 경제적 주체의 사회적 참여를 강조
 - (ESG 중요도 증가) 환경경영, 사회책임경영, 지배구조를 의미하는 ESG에 대한 관심도와 글로벌 표준 모두 높아지고 있는 상황
- 글로벌 비즈니스가 플랫폼 경제로 전환되는 상황에서 글로벌 선도기업을 중심으로 한 시장 독과점 현상 우려
 - 일부 선도기업에 의해 시장이 운영되는 승자독식형 구조에서 국내 중소기업은 상대적 경쟁력 열위로 부정적 파급효과에 직면

■ 코로나 19로 공급망 안정성에 대한 관심이 높아져 고부가가치·친환경 중심의 새로운 글로벌 밸류체인(GVC) 체제 구축 노력

- 단일 또는 소수 국가에 집중된 경직된 밸류체인에서 자국 중심 또는 여러 공급국가로부터 안정적인 공급이 가능한 체제로 변화(KOTRA, '20)
- ICT 기술을 보유한 선진국은 고부가가치 기술 중심의 새로운 GVC 체제를 구축하고, 환경규제 등으로 인해 기존 GVC에 제약이 발생할 것으로 전망

* 글로벌 기업들은 환경오염 물질 배출을 줄이기 위해 중간재 아웃소싱 교역을 줄이고 자국 중심의 공급망 체제로의 전환을 고려하기 시작(KOTRA, '20)

■ 다양한 소비자 욕구에 즉각 대응하기 위한 異種기술산업간 융합이 확산되며 획기적인 기술진보 및 산업 재편으로 경제, 산업, 사회에 변화를 가져올 전망

- 獨 Industry 4.0을 기점으로 제조, 시장, 협업체제 등 네트워크의 글로벌화가 혁신적으로

진행되며 제조업·서비스 산업의 융합화 경쟁이 더욱 가속화

- 산업·업종 부문 간, 혁신 조직간, 상품과 서비스 혹은 서비스·서비스 간, 공공과 민간, 물리적 세계와 디지털 세계 등의 기존 경계가 흐릿해지는 추세
- 첨단기술의 혁신성도가 제조업 및 산업시스템과 융합되어 경제성장 및 일자리 창출 및 직역(職域) 변화의 새로운 원동력이 될 전망
- IoT, AI 등 기술 간 결합 및 융합을 통해 새로운 부가가치가 창출되고 기술발전 가속화
- 기술력과 플랫폼을 갖춘 기업들이 다수 등장하면서 기업 내부 경영 효율성이 높아지는 한편, 기업 간의 경쟁은 심화 예측

■ 국내 산업구조에서 대기업-중소기업 간 양극화 문제는 지속 제기되어 왔으며, 코로나19 이후 중소기업이 체감하는 양극화 더욱 심화

- 중소기업중앙회 조사에 따르면, 코로나19 이후 대기업과의 양극화 심화를 체감하는 중소기업의 비중이 43.8%로 나타남(중소기업중앙회, '21)
 - 코로나19로 인한 부정적 여파가 격차의 가장 큰 원인으로 꼽혔으며, 자금조달 능력이나 생산성 면에서의 상대적 열위가 주요한 원인으로 작용
 - * 코로나19 등으로 인한 사회적 재난(60.4%), 자금조달 능력 차이(54.0%), 생산성 차이(45.8%)
- 기업 간 양극화는 대출 잔액 등 기업의 수익성 측면에서도 여실히 드러나 중소기업의 경영 전반의 적신호 확인
 - 한국은행에서 발표한 '21.8월말 기준 중소기업(법인) 대출 잔액은 전년동기 대비 10.3% 증가한 42조 원 수준이며 동 기간 대기업 대출 잔액은 오히려 감소(1.5%)
 - 코로나19로 인한 경기침체의 여파가 중소기업에서 더욱 크게 나타났음을 보여주며, 대기업과 비교하여 회복세 또한 더딘 것을 확인

동 사업 관련 이슈 도출

- 비용대비 고성능·고효율 기술개발과 관련 데이터 확보로 국내 관련 산업의 글로벌 경쟁력 강화

4) 환경적 트렌드

■ 지구 생태계 문제 심화

- (지구온난화 및 생태계 파괴 문제 심화) 폭염, 폭설, 폭우 등 자연재해로 인한 사회적 비용 증가와 이상기후로 멸종위기종 증가 등 생물다양성 파괴 심화
- (국가 간 에너지 및 자원 확보 경쟁 심화) 글로벌 경제성장과 인구증가로 인해 총 에너지 수요는 꾸준히 증가하는데 비해 전통 화석연료의 채굴가능량은 한정
 - 2040년 세계 에너지 수요는 약 182.9억 TOE(Ton of Oil Equivalent)로 '12년 대비 약 37% 증가 전망
 - 현재 채굴 기술 수준 감안 시 석유 53년, 석탄 113년, 천연가스 55년 이후 고갈 전망
- 세계 주요국들은 에너지·자원 고갈 대응과 원전의존도 감축 등을 위해 신재생에너지 개발 및 사용 확대 노력 강화 중
 - ※ (EU) 신재생에너지 사용비율 '30년 27%로 향상, (독일) '22년까지 원전 폐지 등
- (저탄소 에너지 사회) 기후변화에 따른 국제 환경규제에 대응하기 위하여 온실가스 배출 저감을 위한 신재생에너지기술과 에너지 효율 향상 기술이 확대될 전망

■ 탈탄소화 기조 강화

- 주요국 정부는 파리협정에 따라 2050 장기 저탄소 발전전략(LEDs)을 유엔에 제출하고 장기적 목표 달성을 위한 구체적 실행 전략을 수립 중
 - 글로벌 기업*들 역시 선제적으로 대응책을 실행해 오고 있으며, 동참 비율은 점점 더 높아질 것으로 전망
 - * 기술·전자(구글, 애플, 소니), 소비재(유니레버, 네슬레, 구찌), 에너지/석유화학(오스테드, 브리티시페트롤리엄, 에니), 자산운용/연기금(블랙록, 바클레이스, 노르웨이 국부펀드) 등
- 우리나라는 높은 제조업 비중의 산업구조*, 수소 등 대체에너지 기술적 제약**, 기업 및 산업계의 높은 부담 등으로 탈탄소화 추진이 쉽지 않은 상황
 - * 우리나라는 2018년 기준 이산화탄소 배출량 세계 8위, 석탄발전 비중 40%
 - ** 예시) 오염물질 배출을 거의 하지 않는 그린수소(수전해 수소)가 필요하나, 관련 설비비용이 높아 그레이수소와 블루수소에 비해 비용·기술력 측면에서 열위임

■ 국가 간 상호적 환경영향 확대 및 안전한 사회 구현 니즈 증가

- 신기후 체제('15.12, 파리협정) 타결 이후, 한층 강화된 온실가스 감축 의무 속에

지속가능한 경제성장에 필요한 환경변화 대응을 위한 기술개발 요구

- 지구 차원의 자원고갈 이슈가 대두되고 있고, 자원의 순환활용을 위한 3R(Recycle, Reuse, Reduce) 기술의 중요성이 대두

■ 지속 가능한 생활·산업환경 마련이 국가적으로 중요한 의제로 대두되며 이에 대한 실천방안으로 우리나라를 포함한 주요국가에서 ‘탄소중립’을 선언하는 추세

* 우리나라도 기후문제 심각성에 현실적으로 대응하기 위해 2050년까지 국가 온실가스 배출량 (NDC)을 제로화하기 위한 추진전략을 마련

- 탄소중립 선언 배경은 환경오염, 각종 질병, 기후변화, 기대수명의 연장, 도시화의 급진전 등 다양한 이슈와 맞물려 있으며, 이를 해결하기 위한 대책과 전략 마련이 중요
 - 탄소 중립에 대한 대응으로 탄소배출량을 획기적으로 낮추기 위한 노력이 진행되고 있고, 궁극적으로 에너지 전환으로 연결하여 신재생에너지로 발돋움하기 위한 기술개발이 병행 중

* 다만, 에너지 전환 측면에서 수소 환원 제철, 이산화탄소 포집 활용은 아직 상용화에 한계가 존재하는 실정

■ 환경 등 사회적 가치를 중시하는 새로운 소비 트렌드의 등장으로 구조 다변화

- 사회적 가치를 중시하는 소비 트렌드 확산으로 새로운 수요에 대응하는 환경친화적 기술개발 필요성 증가
 - 가치소비(value consumption)뿐 아니라 환경보호, 윤리적 소비 등 사회적 가치를 중심으로 하는 소비 트렌드의 등장으로 소비 구조가 다변화
 - 이에 대응한 기존 제품 및 서비스 생산에서의 친환경적 기술개발 필요성이 증대

■ 기후변화로 인류를 위협하는 다양한 요인의 증가로 지구 생태계 회복과 공존할 수 있는 기술개발과 사회적 니즈를 충족하기 위한 정책적 대응과 규제 증가

- (환경을 고려한 소비 풍조 확산) 환경기준이 무역장벽으로 작용하는 등 사회적 가치를 중시하는 소비가 세계 무역의 흐름에도 영향
 - 환경친화적 기술개발이 증가하고 생산된 제품과 서비스를 공유하는 공유경제의 흐름 지속
 - 바이오 기반 소재 (Bio-based Material)의 활용이 주목받을 전망이며, 바이오 기술의 발전으로 화석자원 대체가 가능한 수준의 경제성 확보기술이 중요
 - 특히 소재의 자원순환을 위한 재활용 가능 소재, 희소금속을 회수 활용하기 위한

폐가전 활용(City Mining) 기술, 설계 단계부터 재활용을 고려한 제품설계 및 개발이 중요해짐

■ 세계 신규 재생에너지 설비 지속 확장

- 세계적으로 2020년 한 해 동안 총 261GW 규모의 신규 재생에너지 설비가 추가되며 2019년에 이어 지속적인 성장세

※ 세계재생에너지기구(International Renewable Energy Agency, IRENA)의 '재생에너지 설비용량통계 2021(Renewable Capacity Statistics 2021)'

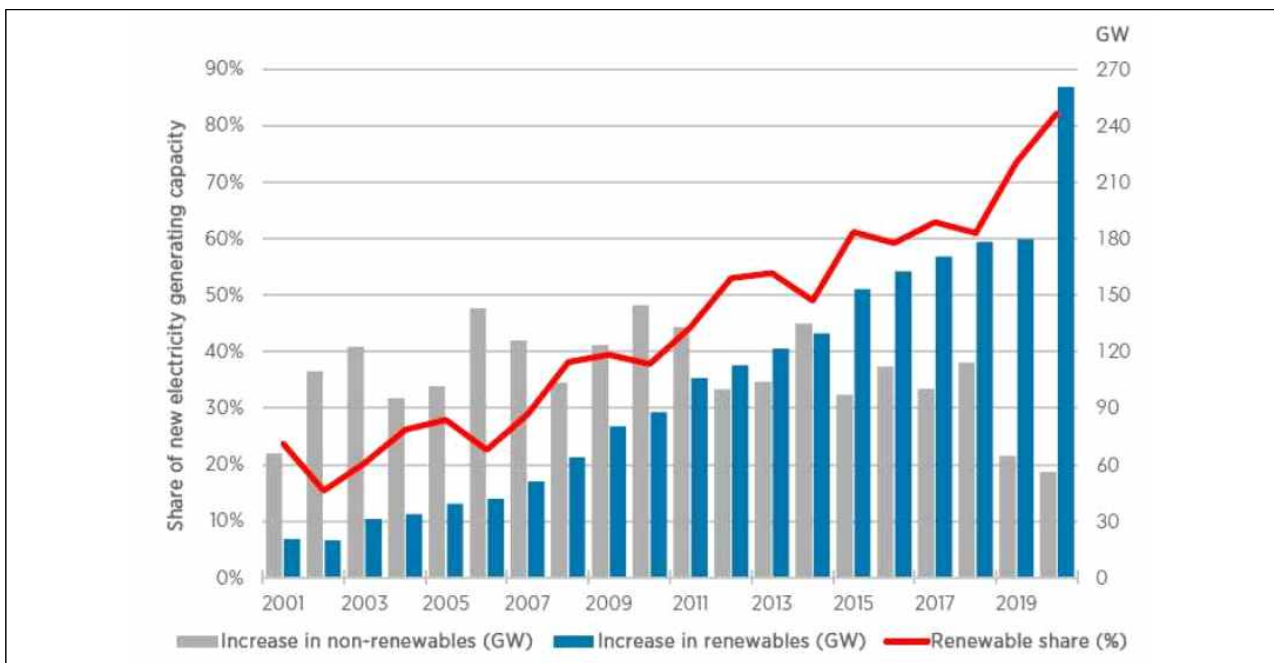
- 전체 신규설비 중 64%가 아시아에서 추가되었으며, 그중 중국의 급격한 재생에너지 확장세가 영향을 미침

※ 중국은 풍력 72GW, 태양광 49GW 등 총 136GW의 신규 풍력·태양광 설비를 추가

- 중국 외 국가 중에서는 미국이 가장 뚜렷한 재생에너지 확장세

※ 2020년 한 해 동안 총 29GW의 신규 재생에너지 설비가 추가되어 2019년보다 80% 증가한 성장세

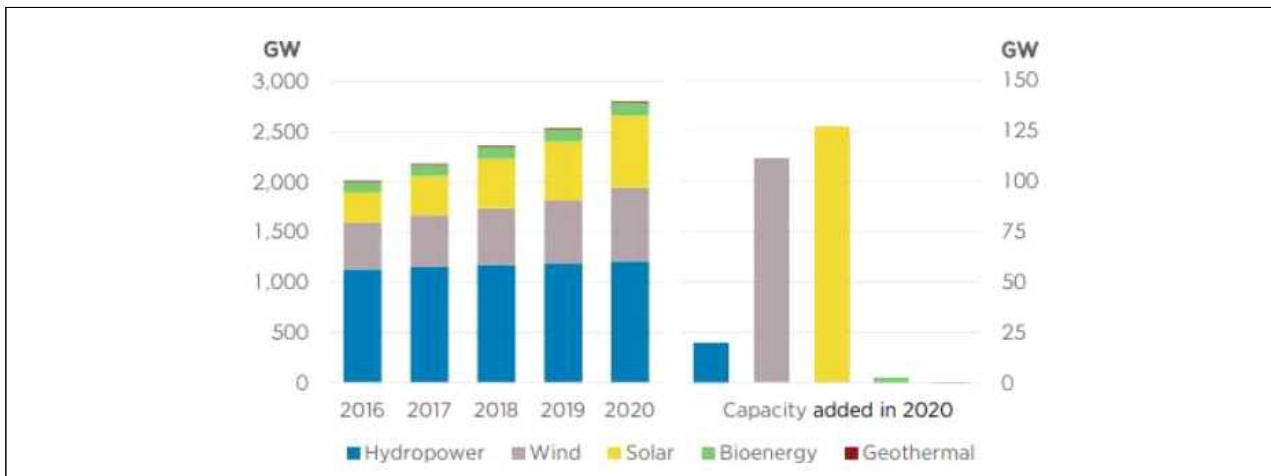
- 반면 신규 화력발전설비 확장세는 둔화되어, 2019년 64GW가 추가됐던 것에 비해 2020년에는 60GW 규모의 신규 설비가 추가되며 최초로 감소 양상



자료: 세계 에너지시장 인사이트(에너지경제연구원, 2021)

[그림 III-3] 전 세계 신규 재생에너지·非재생에너지 설비 추이

- 작년 한 해 세계 신규 재생에너지설비 중 태양광이 총 127GW로 가장 큰 규모로 추가된 것으로 나타나며, 풍력은 111GW, 수력 20GW, 바이오에너지 2GW, 지열에너지 164MW의 설비 추가



자료: 세계 에너지시장 인사이트(에너지경제연구원, 2021)

[그림 III-4] 에너지원별 세계 재생에너지 발전설비 추이 및 2020년 신규 설비

동 사업 관련 이슈 도출

- 탈탄소화 기조에 따라 지속적으로 확장 추세인 새로운 에너지의 변동성이 미치는 영향을 최소화하기 위한 에너지 확보를 위해 대용량 청록수소 공급 기술 확보

5) 정책적 트렌드

■ 국제적으로 경제의 저성장 기조의 장기화로 경제 불확실성이 증가하였고, 이에 따라 자국의 이익을 우선시하는 신국가주의 확산 가속화

- 미국 중심이었던 경제 패권이 중국과 러시아 등 신흥강국의 부상으로 지배력이 분산되면서 글로벌 경제의 새로운 균형이 등장하는 등 대외적 정세의 혼란 발생
- 환경오염 등 국제적 공조가 필요한 글로벌 이슈의 국가적 협력의 중요성이 증대하지만, 국가 간 합의보다는 자국의 이익을 우선하는 체제로 전환
 - 2017년 미국의 한태평양경제동반자협정, 파리기후변화협약, 유네스코 기구 탈퇴 및 파기
 - 2020년 영국의 유럽연합 탈퇴(브렉시트)는 60년 이상 지속된 대표적 국제협력인 유럽연합의 통합에 걸림돌
- 국가 중심주의가 강화되는 동시에 주요국가의 전략적 자율성이 늘어나고 지역적·국제적 협력의 구심력은 약화 될 것으로 예상
 - 국제사회는 국제협력에 필요한 다자주의 공간이 줄어드는 상황에서 국제협력을 더욱 필요로 하는 복잡한 상황에 직면

■ 국가 간의 분쟁에 따른 기술·무역 보호주의 강화

- 한국-일본 양국 간 수출규제, 미-중 보호무역주의 등 국가 간 정치적 이해관계에 따른 기술·무역을 둘러싼 분쟁 발생

[사례] 美-中 무역 갈등이 점차 심화되고 있는 추세

- (관세) 美, 중국산 수입 제품에 25% 관세 부과(약 340억 달러 규모) → 中, 보복성 관세 부과
- (기술 민족주의, 디지털 보호주의) 中 제조 2025 전략은 10대 전략산업 육성으로 '35~'40년 美 수준까지 도달 목표 → 美, 기술 민족주의, 디지털 보호주의 적극 활용 의지 표명('21.6)

- 국가 간 무역 분쟁 발생 시 연관 산업 기술 수준이 높은 국가의 영향력이 크게 작용
 - 제품이나 기술개발 기반이 되는 핵심 원천기술의 확보가 중요
 - 자체 기술개발 역량이 부족하고 활용 가능한 자원이 한정적인 중소기업의 경우 경쟁력을 확보하기 어려움

[사례] 日, 핵심 반도체 소재 수출규제

- 日 정부는 플루오린 폴리이미드, 포토레지스트, 불화수소 등에 대해 수출규제('19.7)
 - 반도체 공정에 필수적인 고순도 불화수소의 경우 일본의 세계점유율이 압도적(95%)이었으며, 국내 대기업(삼성전자, SK하이닉스 등)이 주요 고객사
- 당시 일본으로부터의 수입에 의존하던 국내 반도체산업은 생산 차질 우려를 빚었으나, 국내 중소 소재·부품·장비 기업을 적극 육성하는 계기로 작용

동 사업 관련 이슈 도출

- 해외의존도가 매우 높은 청록수소 생산 기술의 국산화를 통해 국가 간 분쟁·갈등에 선제적 대응 및 에너지안보 확보에 기여

3. 시사점

■ 청록수소R&D 관련 미래 전망과 현안, 문제점, 미래 이슈 등을 통해 도출

- 도출된 이슈는 미래 기술니즈, 사업의 기본방향, 사업목표 및 추진전략, 사업 및 기술 구성에 반영

〈표 III-5〉 메가트렌드 분석과 사업핵심 유관이슈

메가트렌드		사업핵심 유관 이슈
사회	○ (에너지 수요 가속화) 소득수준 및 인구수 증가가 에너지 수요 증가로 연결 ○ (에너지 배분 불균형) 자원소비량 급증, 탄소불균형 심화 등 소득수준에 따른 에너지 배분 문제 지속 ○ (기술변화로 사회구조 변화) 첨단기술로 인해 사회구조와 분야별 패러다임이 획기적으로 변화 ○ (환경문제에 관심 증가) 생태복원성 저하로 인한 기후위기, 환경훼손 등 사회적 문제에 관심 증가	○ 에너지 소비량 및 수요 증가 ○ 에너지 배분 불균형 문제 발생 ○ 다양한 재생에너지 생산과 소비 확대
기술	○ (기술수준 발전) 나노, ICT, AI 등 첨단기술의 발전 가속화로 적용 산업군의 범위가 확대 ○ (기술분야간 융복합화) 산업 생태계 형성과 기술 공유, 확산 등을 위한 플랫폼 경제로 전환	○ 환경친화적 에너지기술 경쟁 심화 ○ 에너지 효율, 지능적 관리를 위한 4차 산업혁명 스마트 기술의 접목
경제	○ (산업패러다임 변화) 제4차 산업혁명을 기점으로 산업의 기술혁신이 촉진되고 산업 간 기술 융복합 경향이 확산 ○ (국제 경제상황 급변) GVC의 변화로 신흥국 시장규모 확대 및 국가간 경제적 격차 심화 ○ (저성장 및 양극화 심화) 국내 경제 또한 저성장 기조로 고착화되고 있으며 대기업-중소기업 간 양극화 또한 심화	○ 산업구조 변동에 따른 경제 체제 전환 ○ 경제 불황으로 국내 산업 타격 ○ 순환경제 풍조 확산
환경	○ (친환경 이슈 관심 증대) 기후변화 및 환경오염 심화라는 글로벌 이슈 해결을 위해 국제적 노력, 사회적 가치를 중시하는 생산·소비 증가 확대 ○ (생태계 문제 심화) 전통 에너지 자원 부족으로 에너지 생산에 대한 관심 증가, 신재생에너지 등 대체에너지 개발 촉진 ○ (탈탄소화 기조 강화) 기후변화 대응 탄소중립 정책 확대	○ 글로벌 환경 이슈 대두 ○ 국가간 에너지 및 자원확보 경쟁 심화 ○ 세계 신규 재생에너지 설비 확장 및 탈탄소화 기조 강화
정치	○ (글로벌 거버넌스) 경제 블록화 등 자국 이익 우선의 국제질서 다극화 ○ (기술보호주의) 전세계적으로 기술보호주의가 심화 되고 있으며, 국가 차원에서 핵심기술유출 방지정책 강화	○ 정치적 이해관계에 따른 기술무역 분쟁 발생 ○ 불확실성 증대로 인한 자국의 기술 확보 중요성 증가

구분	시사점
사회·환경적	○ 세계적으로 기후변화 대응을 위한 친환경·탈탄소화 가속, 주요국의 탄소중립 기조 확대 ○ 친환경 에너지 전환에 따른 재생에너지 보급 확대가 주요 정책 목표로 대두
기술적	○ 에너지 소비량과 수요는 증가하지만 전통자원의 고갈에 따른 신재생에너지 확보 필요 ○ 에너지기술 확보 경쟁이 심화되어 자국의 친환경·대용량 에너지 생산기술 대안 확보 필요
경제적	○ 저성장 경제기조의 고착화, 에너지 분야의 자국 경쟁력 확보를 위한 기술개발의 중요성 증가

2절 국내외 정책동향

1. 국내 정책동향

■ 국내 상위 정책 및 계획에서 청정수소 확보와 도시 적용에 대한 추진방향을 제시

〈표 III-6〉 국내 정책동향 요약

구분		주요내용	키워드
국정 과제	정부 120대 국정과제('22)	○ 미래 수소 원천기술 확보, 청정수소 생산·공급 기반 마련, 신산업 조기 상용화, 폐자원 기반 연료 재활용 등의 내용을 국정과제에 포함	- 청정수소 생산·공급 기반 마련
	새정부 수소경제 정책방향('22)	○ 청정수소 생태계 중심의 발전을 위한 3대 성장전략을 제시	- 청정수소 생태계 마련
정부 상위 정책	제5차 과학기술 기본계획('22)	○ 탄소중립 선도 및 지속가능한 환경 마련을 위해 탄소중립 중점기술 육성을 통한 한국형 탄소중립 로드맵 마련과 탄소 대배출 사업의 전환 제시	- 탄소중립 중점기술 육성
	국가전략기술육성 방안('22)	○ '글로벌 기술패권 경쟁구도 속에서 우리나라의 기술주권 확보를 위해 추진이 필요한 12대 국가전략기술에 "수소" 포함'	- 국가전략기술 내 수소 분야 초격차 확보 제시
청정 수소 유관 정책	수소기술 미래전략('22)	○ 미래형 수소생산 기술(광분해, 열분해, 바이오수소, 폐자원 가스화 등)의 선제적 개발 및 시장 선점 추진 * 천연가스(메탄) 직접 열분해 반응을 활용하여 고순도의 청록수소를 생산하는 무탄소 수소생산 기술 확보	- 청록수소 생산기술 확보
	탄소중립 기술혁신 추진전략('21)	○ '수소경제 구현을 위한 수소 전주기 기술 확보'를 목표로 제시 - 수소충전소 공급가와 수소 발전단가를 핵심지표로 설정	- 수소 경제성 향상 (공급가, 발전단가)
	제1차 수소경제 이행기본계획('21)	○ 수소 수급계획, 제도운영, 자원조달, 기반조성 방안에 대한 중장기 정책 비전·목표, 투자 및 제도 개선방향 제시 ○ '30년, '50년까지의 수소 생산, 유통, 활용에 대한 정책적 목표치 제시 - '30년까지 청정수소 자급률 34%, '50년까지 60% 달성 - '30년까지 청정수소 비중 75%, '50년까지 100% 달성	- 전주기 수소기술개발을 통한 청정수소 자급확대
	수소 시범도시 추진전략('19)	○ '세계 최초 수소도시 조성으로 수소도시 세계시장 선점'을 비전으로 하여, '40년까지 단계별 목표를 제시 - 도시활동의 핵심인 주거, 교통 분야에 집중하여 수소활용 기술을 실증하고 안전성을 검증	- 수소활용 기술의 실증 - 수소도시 조성
	수소경제 활성화 로드맵	○ 수소 전주기 기술개발, 소재부품 해외 의존 해소 지원 - 수소 밸류체인별 성능 및 경제성 향상 등의 고도화 기술개발, 핵심부품 국산화, 미래유망 기술개발	- 수소 전주기 기술경쟁력 확보 - 수소R&D 기술수준 향상
정부 투자 방향	국가재정운용계획	○ 청정수소 생산, 수소 경제 전주기 지원 등을 포함	- 수소 전주기 지원 - 청정수소 생산 전환
	제1차 국가연구개발 중장기 투자전략('23)	○ 기술패권경쟁 대응을 위한 12대 국가전략기술(수소 포함)에 대한 투자 확대 및 대체 불가 원천기술의 확보와 시장 스케일업을 추진 - 대규모 수소 생산·공급의 경제성 담보를 위한 기술확보 및 청정수소 생산기술 국산화 등 전주기 지원 투자 필요	- 수소 원천기술 확보 - 수소시장 스케일업
	국토부 주요업무 추진계획('23)	○ 수소생산 국가산단 조성, 기후위기 대응을 위한 수소도시 육성을 포함	- 수소생산 인프라 조성 - 수소도시 육성

1) 정부 120대 국정과제(2022)

■ 정부는 청정수소 및 국민생활R&D 투자 확대를 120대 국정과제에 포함

- “다시 도약하는 대한민국, 함께 잘 사는 국민의 나라”를 국정비전으로 설정하고, 6개 국정목표와 120개 국정과제를 발표
- 국정과제 20, 21, 24, 28 등에서 청정수소 기반을 확대하고, 주거환경 등 생활체감도가 높은 분야의 R&D 투자 확대 등을 주요내용으로 포함

〈표 III-7〉 국정과제 내 연관내용

국정목표	국정과제 주요내용
(국정목표 2) 민간이 끌고 정부가 미는 역동적 경제	(국정과제 20) 산업경쟁력과 공급망을 강화하는 新산업통상전략 - 각국 환경조치(EU CBAM) 대응, 복수국간 환경보호 협력 등을 위한 WTO·APEC·OECD·G20 등 그린논의에 적극 참여하고, 청정수소 교역 기반 확대
	(국정과제 21) 에너지안보 확립과 에너지 新산업·新시장 창출 - 자원안보의 범위를 수소, 핵심광물 등으로 확대하고 비축 확대, 수입국 다변화, 재자원화로 수급 안정성 제고
	(국정과제 24) 반도체·AI·배터리 등 미래전략산업 초격차 확보 - 수소, CCUS 등 탄소중립·미세먼지 대응 에너지 신산업 조기 상용화
	(국정과제 28) 모빌리티 시대 본격 개막 및 국토교통산업의 미래 전략산업화 - 혁신·도전적인 과제, 안전·미세먼지·주거환경 등 생활체감도가 높은 분야에 R&D 투자 확대

2) 새정부 수소경제 정책방향(2022, 산업통상자원부)

■ 그간 화석연료 기반의 그레이수소 생태계 중심에서 ‘청정수소 공급망 구축’ 및 ‘세계 1등 수소산업 육성’을 제시

- 3대 성장(3up) 전략으로 ①규모·범위의 성장(Scale Up), ②인프라·제도의 성장(Build-Up), ③산업기술의 성장(Level UP)을 제시

〈표 III-8〉 새정부 수소경제 정책방향

정책방향	주요내용
①규모·범위의 성장(Scale Up),	○ 발전수송 분야 내 대규모 수소 수요 창출 ○ 글로벌 수소 공급망 구축으로 청정수소 생태계로 확장 등 - 청정수소 발전 비중 현재 0% → ('30년) 2.1% → ('36년) 7.1%
②인프라·제도의 성장(Build-Up),	○ 청정수소 활용 촉진을 위한 유통인프라 마련 ○ 수소 사업법 제정, 청정수소 인증제 도입 등 제도적 기반 마련 등
③산업기술의 성장(Level UP)	○ 수소 생산, 유통 전주기 핵심 기술 확보 ○ 7대 전략분야 육성과 수소기업 발굴을 통한 지원 강화 - 전략분야 기술수준(선진국 대비) 현재 75% → ('30년) 100% * 수전해, 액화수소 운송선, 트레인러, 충전소, 연료전지(모빌리티/발전), 수소터빈 등

3) 제5차 과학기술기본계획(2023~2027)

■ 국가 당면문제 해결, 미래이슈에 대한 선제적 대응을 위해 ‘탄소중립 선도 및 지속가능한 환경으로 전환’을 주요 과제로 제시

- 탄소중립 중점기술 육성을 통한 한국형 탄소중립 마련과 탄소 다배출 사업의 전환을 제시

〈표 III-9〉 제5차 과학기술기본계획 내 연관내용

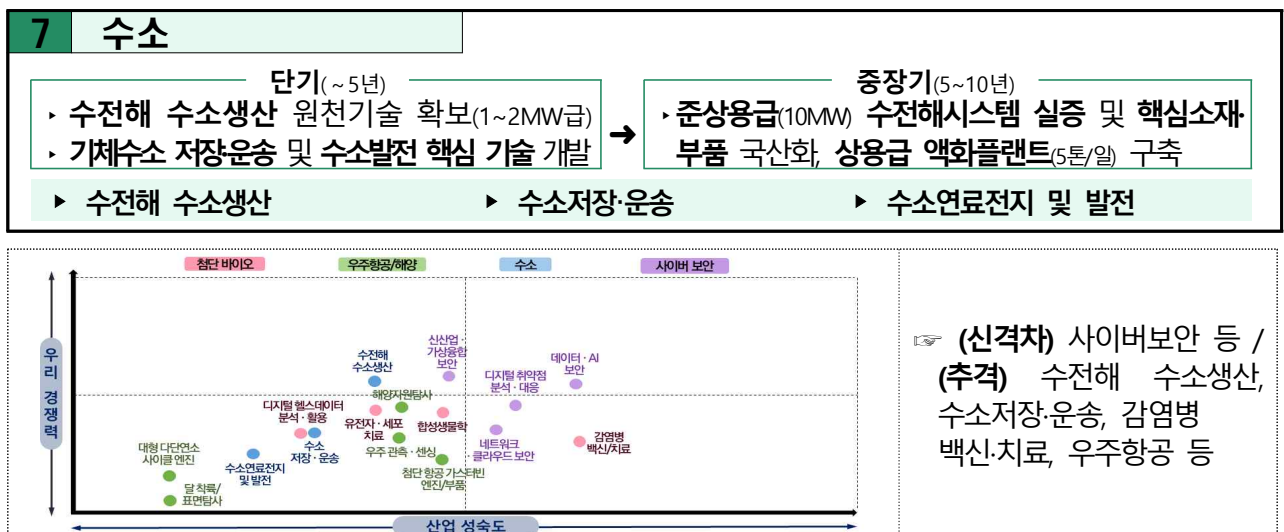
[3-1] 탄소중립 선도 및 지속가능한 환경으로 전환	
3-1-1. 탄소중립 기반의 에너지 전환기술 확보 및 정책 추진체계 구축	○ 탄소중립 도전적 목표 달성을 위한 다양한 에너지원 조화 - 재정립된 에너지 믹스 실현을 목표로 핵심기술 개발 및 자립 추진 - 미래 핵심 에너지원으로 부상한 그린수소 생산·저장·이송 능력을 확보, 수소활용 분야(수소전기차, 수소선박, 수소터빈, 연료전지)의 글로벌 경쟁력 제고를 위한 기술확보 ○ 탄소중립 중점기술 대상 기술혁신 전략로드맵 수립 - 탄소중립에 핵심적으로 기여할 한국형 탄소중립 핵심기술에 대한 현장 의견을 반영한 로드맵 수립
3-1-2. 산업 저탄소화 기반 조성 및 탄소 관리 인프라 구축	○ 탄소중립 관련 글로벌 규제변화 대응역량 강화 - RE100 확산 및 탄소국경세 도입 등 글로벌 기후대응 규제에 대한 기업의 대응력 제고 지원 ○ 탄소 다배출 산업의 대체·유망분야 사업전환 지원 - 탄소기반 주력산업의 저탄소화를 위한 연·원료 전환, 공정효율화, 전기화 등 핵심기술 개발 및 실증, 현장 보급 지원 ※ 수소환원제철, 저에너지 화학공정, 건물·도시 탄소배출 저감, 미래형 친환경 교통수단 및 스마트 철도 물류 등

4) 국가전략기술육성방안(2022, 과학기술정보통신부)

■ ‘국가전략기술 육성으로 미래성장동력 확보’를 미래상으로 12대 국가전략기술*과 50대 중점기술을 제시

- 12대 국가전략기술에 수소를 포함하고 주요 전략으로 수소생산 원천기술, 국산화, 상용급 확보를 주요 전략으로 포함

* 반도체디스플레이, 이차전지, 첨단 이동수단, 차세대 원자력, 첨단바이오, 우주항공해양, 수소, 사이버보안, 인공지능, 차세대 통신, 첨단로봇제조, 양자



5) 수소기술 미래전략(2022, 관계부처 합동)

■ 2050 탄소중립을 위한 필수분야인 수소를 육성 하기 위해 청정수소 생산, 저장·운송, 활용(수송발전)에서의 핵심 기술 확보와 국산화를 위한 기술전략 제시

- 2030NDC, 탄소중립 실현 목표 이행을 위해 수소 생산, 저장·운송, 활용 분야의 중점기술을 선정하여 제시

〈표 III-10〉 수소분야 주요 기술 분류

①생산	②저장·운송	③활용	
		수송	발전
수전해 생산	물리적·화학적 수소저장	육상용	연료전지 발전
차세대 생산(광분해, 열분해, 바이오, 폐자원 가스화 등)	수소 운송	해상용	
	수소 충전	항공용	무탄소 연료발전

- 수소 공급·활용 분야에서 국산화가 시급한 기술을 개발하고, 민·관이 협력하여 지속적으로 시너지를 낼수 있는 기술전략 마련에 초점
 - ①청정수소 대량생산 국산화 기술개발, ②해외 수소 공급 기술 확보를 위한 R&D 추진, ③수소 모빌리티 초격차 기술확보, ④수소 기술 국제표준 선점을 주요 추진방향으로 제시
 - 수소 전주기(생산, 저장·운송, 활용) 분야 내 기술개발 목표 및 민·관의 역할을 분담하여 제시
- 미래형 수소생산기술 원천연구지원을 통해 청록수소 생산 기술의 확보를 제시

〈표 III-11〉 수소기술 미래전략 내 연관내용

[1] 청정수소 생산기술 국산화		
1-1	주요 수전해 생산기술 국산화	<수전해 시스템 평가·실증> ○ 국산 시스템의 성능검증, 그린수소 대량 생산 실증 등을 통해 수소 대량생산 국산화의 기반 마련 - 국산화 시스템 검증, 그린수소 대량생산체계 구축, 민·관협동 R&D 추진으로 시스템 확보 및 고도화 추진 등
1-3	미래형 수소생산기술 원천연구 지원	<열분해> ○ 천연가스(메탄) 직접 열분해반응을 활용하여 고순도의 청록수소를 생산하는 무탄소 수소생산 원천기술 확보
[2] 수소 공급을 위한 저장·운송 기술 고도화		
2-2	전국 수요처 내 수소 보급기술 국산화	○ 지역 간 직접 수소 이송 및 공급 - 기존 천연가스 배관망 활용, 수소전용 배관망 구축 등
2-3	저장·운송기술 국제표준 및 인증체계 확보	○ 안정실증 및 검증으로 소재·부품부터 시공·운영 단계까지 수소 저장·운송 단계의 안전성을 확보하기 위한 기준 마련 - 안정성 실증을 위해 수소도시, 항만기지 등 대용량 수소 저장설비, 배관망 등 안전성 강화 실증연구 및 제도화 지원

6) 탄소중립 기술혁신 추진전략(2021, 과학기술정보통신부)

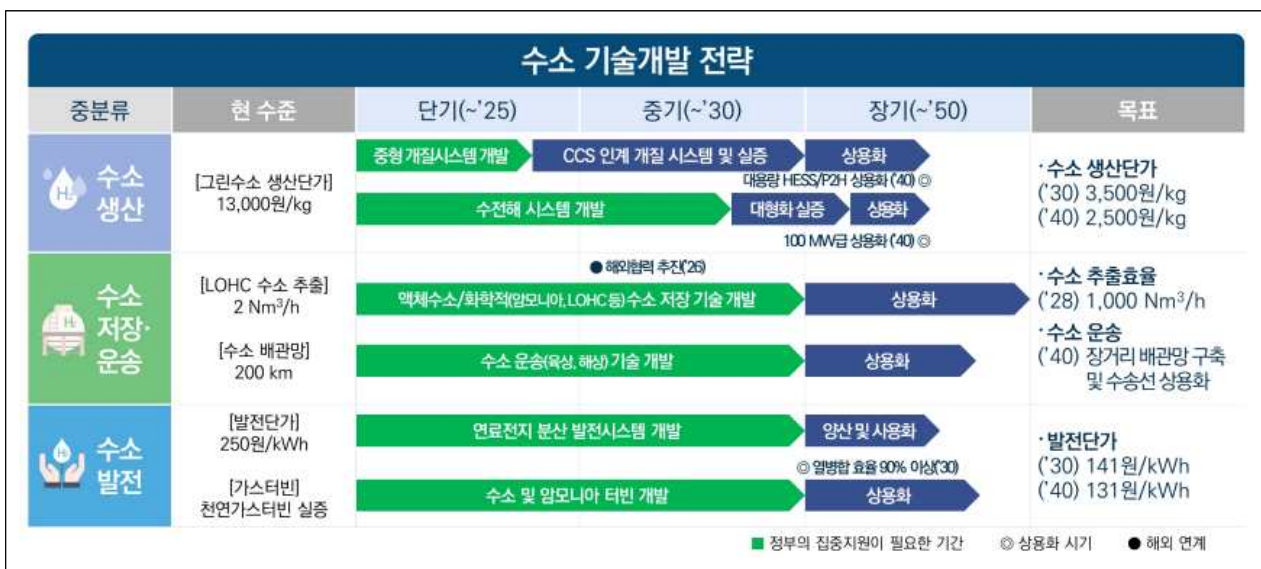
■ 기술혁신으로 2050 탄소중립을 견인하기 위해 10대 핵심기술 개발 전략 제시하였으며, 이에 수소 기술개발 전략이 포함

- ‘수소경제 구현을 위한 수소 전주기 기술 확보’를 목표로 제시하였으며, 수소충전소 공급가와 수소 발전단가를 핵심지표로 설정
 - (수소충전소 공급단가, 원/kg) 현재 7,000원 ⇒ '30년 4,000원 ⇒ '40년 3,000원
 - (수소 발전단가, 원/kWh) 현재 250원 ⇒ '30년 241원 ⇒ '40년 131원



[그림 III-5] 탄소중립 기술혁신 추진전략의 목표

- ① 수소 저가·대량생산 기술, ② 장거리 대용량 수소 저장 운송 기술, ③ 고효율 장수명 연료전지 발전시스템 개발 등 3가지 기술개발 전략을 제시



[그림 III-6] 탄소중립 기술혁신 추진전략 중 수소 기술개발 전략 주요내용

7) 제1차 수소경제 이행 기본계획(2021, 관계부처 합동)

■ 본 계획은 「수소법」에 근거한 수소분야 법정계획으로, 수급계획, 제도운영, 자원조달, 기반조성 방안을 포괄

- 수소경제 이행을 효과적으로 추진하기 위한 기본계획으로, 수급계획, 제도운영, 자원조달, 기반조성 방안에 대한 중장기 정책 비전·목표, 투자 및 제도 개선방향 제시

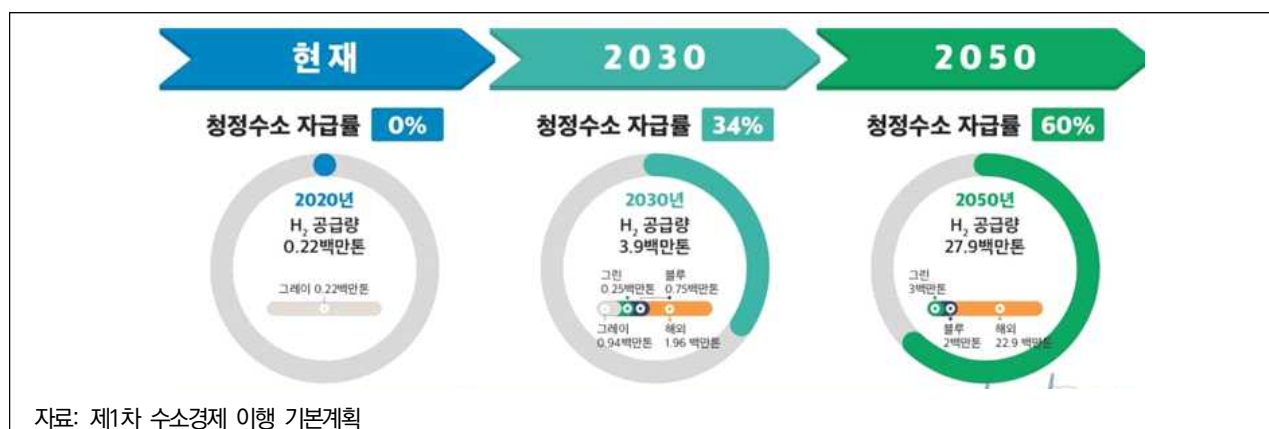
※ 법적근거: 수소경제 육성 및 수소안전관리에 관한 법률 제5조(기본계획의 수립)

- ‘수소경제 전주기 생태계 구축으로 청정수소경제 선도’라는 비전·목표 아래 4대 전략, 15대 과제를 제시

- ① 국내외 청정수소 생산주도, ② 빈틈없는 인프라 구축, ③ 모든 일상에서 수소 활용, ④ 생태계 기반 강화 등

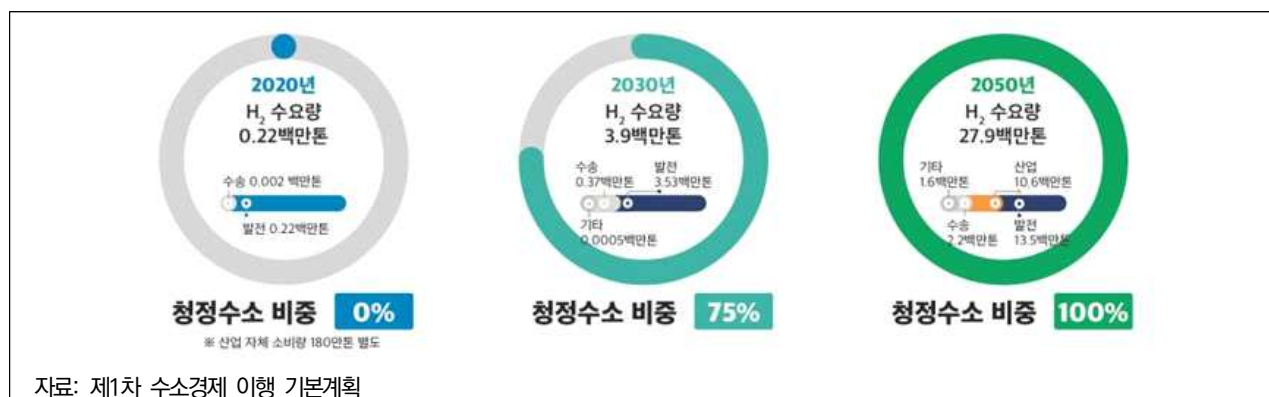
- '30년, '50년까지의 수소 생산, 유통, 활용에 대한 정책적 목표치 제시

- '30년까지 청정수소 자급률 34%, '50년까지 60% 달성



[그림 III-7] 청정수소 자급률 목표치

- '30년까지 청정수소 비중 75%, '50년까지 100% 달성



[그림 III-8] 청정수소 비중 목표치

8) 수소 시범도시 추진전략(2019, 관계부처 합동)

■ 수소활동의 핵심인 주거·교통 분야에 집중하여 수소활용 기술 실증 및 안전성을 검증하고, 수소도시로의 단계적 접근 전략

- 수소도시는 도시내 수소생태계*가 구축되어 수소를 주된 에너지원으로 활용하면서 도시혁신을 시민이 체감하는 건강하고 깨끗한 도시를 의미

* 수소 생산 -수소 저장·이송 -수소 활용

- (생산) 부생수소, 추출수소 뿐 아니라 신재생에너지를 활용한 수전해 기술이 발전하여 마을 건축물 단위의 그린수소 생산
- (저장·이송) 액화 고체 저장기술을 활용하여 도시내 도시간 대용량으로 수소 저장·이송이 가능해져 가격경쟁력 확보
- (활용) 수소 발전시설, 수소 메가스테이션* 등 핵심 기반시설을 통해 주거 교통 산업 등 도시활동 전반에서 수소를 안전하게 활용

* 대용량 수소 저장, 저장된 수소를 건축물 충전소 등에 공급, 안전 모니터링 등

- '세계 최초 수소도시 조성으로 수소도시 세계시장 선점'을 비전으로 하여, '40년까지 단계별 목표를 제시

목표		시범도시 조성기('22년)	수소도시 확산기('30년)	수소도시 고도화기('40년)
	도시	수소 시범도시 3개	전국 지자체(시·군·구)의 10%를 수소도시로 조성	전국 지자체(시·군·구)의 30%를 수소도시로 조성
	-주거	-연료전지 9.9MW (발전용 9.4MW, 주거용 0.5 MW)	-연료전지 98.9MW (발전용 79.8 MW, 주거용 19.1 MW)	-연료전지 296.7MW (발전용 235 MW, 주거용 61.7 MW)
	-교통	-수소차 670대 -수소버스 30대	-수소차 140,750대 -수소버스 2,100대	-수소차 825,000대 -수소버스 12,000대
	-기술	-메가스테이션 계획 확정	-그린수소 분담율 10%	-그린수소 분담율 20%

자료: 수소 시범도시 추진전략

[그림 III-9] 수소 시범도시 추진전략의 단계별 목표

- 세부 추진전략으로 수소 시범도시를 지정하여 단계적으로 접근하는 방안을 제시
 - 도시활동의 핵심인 주거, 교통 분야에 집중하여 수소활용 기술을 실증하고 안전성을 검증, 범부처 R&D로 기술적 제약 해소
 - 타 부처 수소 관련 사업과 연계를 통한 지속 가능성 확보

9) 국가재정운용계획(2022~2026, 기획재정부)

■ 중기적 관점에서 정부의 재정운영 전략과 목표를 제시하는 국가재정운용계획 내 ‘청정수소 생산으로의 전환’을 포함

- 청정수소 생산으로의 전환 추진, 상용차(버스 등) 중심의 수소 모빌리티 기반 구축 등 수소경제 쏠주기 지원을 제시

10) 2024년 국가연구개발 중점 투자분야(2024, 과학기술정보통신부)

■ 국가연구개발 중점 투자방향을 임무중심의 전략적 투자와 적극적인 민·관협업으로 제시

- 기술패권경쟁 대응을 위한 12대 국가전략기술*에 대한 투자 확대 및 대체 불가 원천기술의 확보와 시장 스케일업을 추진

* 반도체·디스플레이, 이차전지, 첨단모빌리티, 첨단바이오, 우주항공·해양, 수소, 사이버보안, 인공지능, 차세대통신, 첨단로봇·제조, 양자

- 또한 ‘제1차 국가연구개발 중장기 투자전략(2023~2027, 과학기술정보통신부)’ 내 12대 국가전략기술 투자를 통한 전략기술 육성을 포함
- 대규모 수소 생산·공급의 경제성 담보를 위한 기술확보 및 청정수소 생산기술 국산화 등 전주기 지원 투자 필요

※ (수소) 글로벌 수소 산업 선도를 위해 청정수소 생산기술 국산화, 저장·운송 기술 고도화, 활용기술 초격차 확보 등 전주기 지원이 집중 투자

- 저탄소생태계 마련으로 탄소중립 사회로의 전환을 위한 미래기술 확보 및 신성장동력화
 - 수소 등 친환경 에너지 기술별* 목표·임무에 부합하는 R&D투자를 추진하고 산업, 수송, 건물 부문별 탄소저감구조로의 전환을 지원하여 실증 및 차세대 기술 확보 추진

* 재생에너지(산업생태계 강화), 원전(에너지 안보), 수소(경제성 확보) ⇨ 탄소중립 실현의 기반

■ 기술분야별 투자전략 내 수소 생태계 구축 및 원천기술 확보를 포함

- 수소경제활성화를 위해 수소 생산, 저장·운송, 활용(수송, 발전 등) 전주기에 걸쳐 핵심기술 국산화 및 차세대 기술개발 등 글로벌 경쟁력 확보 전략적 투자 제시
 - 탄소중립 기술혁신 전략로드맵 마련하여 핵심기술을 중점 지원하고, 원자력에너지 기반 청정수소 생산, 재생에너지와 연계 강화 등 탄소 중립에 기여가능한 혁신 원천기술 개발 지원을 포함

※ 제10차전력수급기본계획(23.), 수소기술 미래전략(22.) 등

11) 국토부 주요업무 추진계획(2023, 국토교통부)

■ 국토부는 부처의 정책 비전을 균형발전, 민생안정, 경제 재도약, 국민안전으로 설정하고 이를 위한 과제를 제시

- 지역 주도 혁신 성장공간 조성, 재해 대응 역량 강화 과제 내 수소생산 국가산단 조성, 기후위기 대응을 위한 수소도시 육성을 포함

〈표 III-12〉 2023년 주요업무 추진계획(국토교통부)

주요 정책과제	주요내용
② 지역 주도 혁신 성장공간 조성	❶ 지역 특화산업 육성 지원 ○ (국가산단) 소형모듈원전, 원자력수소생산, 나노·반도체, 우주발사체 등 지역의 미래첨단전략산업 육성을 위해 국가산단 신규 조성 - 미래첨단전략산업에 대한 국가지원(R&D, 규제자유특구 등)도 병행해 지역산업 육성이 국가경쟁력 강화로 이어지는 선순환 체계 구축 ○ 기존보다 2배 이상 조성(10개 이상)하고, 후보지 발표 前 관계기관 협의(GB·농지 등)를 완료하는 등 추진기간 대폭 단축(1/3 단축) - 기업수요 및 애로사항에 대한 적극적 대응을 위해 기업과 지역·중앙정부가 함께 전담 지원팀 구성 ○ 기존 노후산단은 고밀 복합개발하여 첨단산업에 맞게 리뉴얼 할 수 있도록 활성화 구역 선정(‘23.1분기, 2곳)
③ 재해 대응 역량 강화	❷ 친환경 전환을 통한 기후위기 대응 ○ (교통) 보조금 등을 통해 택배, 버스·화물차의 친환경 전환을 우선 유도하고, 고속도로 충전인프라 확충(‘23년 전기차 487기, 수소차 12기 준공) ○ (건축) 신축 공공건물 제로에너지 건축 의무대상 확대(現 1천㎡→5백㎡), 기존 공공건축 그린리모델링 대상 확대(경로당, 도서관 등 확대) ○ (탄소중립도시) 도시단위 탄소배출량 분석을 위한 탄소공간지도 서비스 개시(‘23.6), 탄소중립도시 종합계획 마련(국토부·환경부 공동) - 친환경 도시에너지원 확대를 위해 수소도시 6개소 신규 추진(‘23)

12) 청정수소 인증제 도입(2023, 산업통상자원부)

■ 산업부는 수소생산-수입과정에서의 청정수소에 대한 인증과, 지원확대를 위한 ‘청정수소 인증제도’ 도입을 추진

* 수소를 생산하거나 수입하는 등의 과정에서 온실가스배출량이 일정 수준 이하인 경우 청정수소로 인증하고, 인센티브를 지원하는 제도

- 수소법 개정(2022.06.)을 통해 법적근거의 마련과 청정수소인증제도 연구용역(2021.11.)을 추진하여 한국 특성에 맞는 인증제 설계를 진행

2. 해외 정책동향

■ 주요국은 청정수소의 생산량 및 활용 확대를 위한 기술개발, 실증, 인프라 구축을 적극 지원

〈표 III-13〉 해외 정책동향 요약

구분	주요내용	키워드
미국	○ 에너지 어스샷 이니셔티브(Energy Earthshots Initiative) - 유망 청정에너지 기술을 대규모로 신속하게 보급할 수 있도록 통합 프로그램 추진 - 청정수소 생산비용 1kg당 1달러로 낮추는 것을 목표로 함 ○ 인프라 투자 및 일자리 법안(IIJA, '21.11.) - 청정수소 등 대규모 인프라 구축 관련 투자 진행 ○ 기후 및 에너지 프로그램: Infrastructure Investment and Jobs Act(IIJA) - 그간 추진한 수소 관련 R&D, 실증을 바탕으로 미국 전역의 지역 청정수소 허브 개발 추진	- 청정수소 생산비용 저감 - 청정수소 대규모 인프라 개발 - 청정수소 기술개발 및 실증
유럽	○ EU는 수소 로드맵('20.7.), 청정수소 대량 생산 등의 내용을 포함하는 수소 전략('20.7) 등을 발표 ○ CertifHy를 통한 청정수소 인증제도 시행과 RED II를 통한 청정수소 정의 및 사용확산에 대한 EU의 재생에너지 지침 및 위임법 시행 예정 ○ 독일은 제 1, 2차 수소연료전지 기술 혁신프로그램(NIP) 발표하며 수소 시장 활성화, 시장 개선 R&D(상용화), 수소 인프라 구축 등을 목표로 하였고, 국가수소전략('20.6)을 통해 청정수소 생산 목표와 분야별 세부 이행계획 제시 ○ 프랑스는 국가 청정수소 개발 전략('20.9)을 통해 수소 R&D 적극 투자 ○ 영국은 청정수소를 수송과 산업 부분으로의 활용 확대를 위한 지원 지속	- 청정수소 대량 생산 - 청정수소 활용 확대
호주	○ 호주국가수소전략을 통해 수소생산·저장·운송 및 활용 정책 목표와 수소 공급 가격 목표 제시 - 호주 주별 수소 생산 전략 수립, 이산화탄소가 없는 수소 기반 산업 육성 등	- 수소산업 개발 촉진 - 수소 산업 육성을 위한 투자
일본	○ 제3차 수소·연료전지 전략 로드맵 수립('19.3) - 수소 서플라이체인 개발 - 미래 에너지원으로 수소로 결정하여 수소 이용을 확대하고 발전 및 공급시스템을 마련하는 전략	- 수소 공급 기반 마련 - 수소 이용 확대
중국	○ 정부 차원의 수소에너지 산업 육성 본격화('19.3) - 수소차 및 충전소 보급 목표 수립('19.3) - '산업구조조정 지침목록'에 수소충전소 사업 추가('19.4) - '21년까지 수소산업 육성에 대한 집중 지원 발표('20.3) - 수소 관련 인력양성, 기술사업화, 신기술 개발 등 지원 계획 수립('20.10) ○ '중국제조 2025'에 따라 미래 수소 활용을 위한 기술개발 적극 지원	- 수소 인프라 확대 - 수소산업 육성 지원

1) 미국

■ 에너지 어스샷 이니셔티브(Energy Earthshots Initiative)(DOE, '21.06.)

- 에너지부(DOE) 산하의 과학부, 응용에너지부, 에너지고등연구계획국(ARPA-E)의 협력을 통해 유망 청정에너지 기술을 대규모로 신속하게 보급할 수 있도록 통합 프로그램 추진
- 프로젝트 내용 중 수소 샷(Hydrogen Shot)은 청정수소 생산비용을 현재 1kg당 5달러에서 1달러로 낮추는 것을 목표로 함
 - ①수소 생산, 자원 인프라 건설 ②특정 지역, 비용, 가치에 따른 최종 사용자 파악, ③온실가스 및 기타 오염원 배출 저감 방안, ④다양성, 공정성, 포용성, 일자리, 환경 정의, ⑤과학 및 혁신 필요 조건 및 과제 등을 주제로 한 정보요구서(Request for Information) 요청

■ 인프라 투자 및 일자리 법안(IIJA, '21.11.)

- 총 1조 2,000억 달러 규모의 인프라 법안으로 교통, 수자원, 에너지, 브로드밴드, 천연자원의 회복성과 복원까지의 주제를 포괄한 프로그램에 예산을 지원
- 청정수소 개발을 위한 대규모 인프라 구축과 투자 지원 내용을 포함

〈표 III-14〉 인프라 투자 및 일자리 법안 내 기술 관련 투자 내용 중 동 사업 관련 내용

구분	내용
청정에너지 교통수단	○ 대중교통수단 현대화를 포함한 약 106조원을 5년동안 대중교통 부문에 투자 ○ 모든 주의 대중교통을 확대하고, 수천 대의 청정에너지나 무탄소 차량으로 전환, 노인과 장애우의 접근성 향상 등을 목표
청정에너지 발전 시설	○ 청정에너지 전환과 그리드에 약 77조원 이상 투자로 수천마일 송전선 신설, 재생에너지와 청정에너지 촉진과 비용 감소, 전력인프라 업그레이드 추진 ○ 최신 청정에너지 기술의 연구, 개발, 시연, 보급을 지원하여 탄소중립 경제로 전환 가속화

자료: “미국, 인프라 투자 및 일자리 법안 내 투자계획 발표”, 글로벌 과학기술정책정보 서비스(2021.11.06.)

■ 기후 및 에너지 프로그램: Infrastructure Investment and Jobs Act(IIJA, '21.11)

- 기후 및 에너지 프로그램을 통해 약 1,150억 달러를 투자계획이며 약 80억 달러는 실증 프로젝트 및 최종 사용 다양성을 목표로 미국 전역에 4개의 지역 청정수소 허브 개발에 배정
 - 정부 수소 전략이나 로드맵은 발표되지 않았으나, 에너지부 주관으로 수소 프로그램(Hydrogen Program)을 발표함('20.11)
 - 미국에서 추진해온 다양한 연구개발 실증 프로젝트를 통합하여 수소 경제의 단계별 전략과 밸류체인별 목표를 제시하고 이외에도 초기 지원을 목적으로 H2@SCALE 프로그램 발표

2) 유럽

가. 유럽연합(EU)

■ 향후 2050까지 수소 생산, 공급, 저장분야 인프라 구축, 활용 분야 시범사업 등에 있어 대용량화 연구개발-산업/기술 분야에서 획기적인 패러다임 변화 추진

- ‘기후 중립 EU 전략 비전’(18)을 통해 기후변화 완화를 위한 수소의 역할을 명시
 - 기후 중립 강화를 위해 미래 에너지 시스템과 클린 수소 계획을 수립하고, 일부 국가에서 추진하던 수소 전략을 EU 차원으로 확대하는 ‘수소 로드맵’ 발표(20.7)
- ’20년 7월 유럽연합 집행위원회(EC)는 ’24년까지 6GW의 수전해 시설로부터 100만 톤, ’30년까지 40GW의 수전해 시설로부터 1,000만 톤의 청정수소 생산을 목표로 하는 수소전략 발표
 - ※ ’50년까지 유럽 재생수소에 1,800~4,800억 유로, 저탄소 화석연료 기반 수소에 30~180억 유로의 투자 계획
 - ※ 부문별로 ‘신재생에너지와의 연계’ 2,200~3,400억 유로, ‘저장·운송·유통’ 650억 유로, ‘수소생산’ 240~420억 유로, ‘탄소포집’ 110억 유로 투자 계획
- 원활한 전략 수행과 유럽 산업의 탈탄소화 및 산업 리더십 유지를 위해 유럽청정수소연맹*을 발족하여 ‘30년까지 4,300억 유로 규모의 산업 투자 계획
 - * 유럽청정수소연맹(European Clean Hydrogen Alliance): 수소전력 이행을 위한 수소생태계 구축 및 대규모 수소파이프라인 구축 목표를 위한 연맹
- CertifHt 및 RED II를 통한 청정수소 인증기준 마련 및 재생에너지 보급 촉진

〈표 III-15〉 EU 수소전략의 주요 내용

2020년~2024년	2025년~2030년	2030년~2050년
EU 내 6GW 이상 규모의 수전해장치 설치 지원	통합에너지시스템에서 수소의 중요성 제고	탈탄소화가 어려운 모든 분야에서 광범위한 재생수소 사용
100만 톤의 재생수소 생산	40GW 이상의 수전해장치 및 1,000만 톤의 재생수소 생산	

자료: EU 집행위원회

나. 독일

■ 2006년부터 기후변화 대응을 위한 방안으로 수소를 주목하여 연방정부 차원의 수소 시장 및 기술 투자 단행했으며, 제 1, 2차 수소·연료전지 기술 혁신프로그램(NIP) 발표

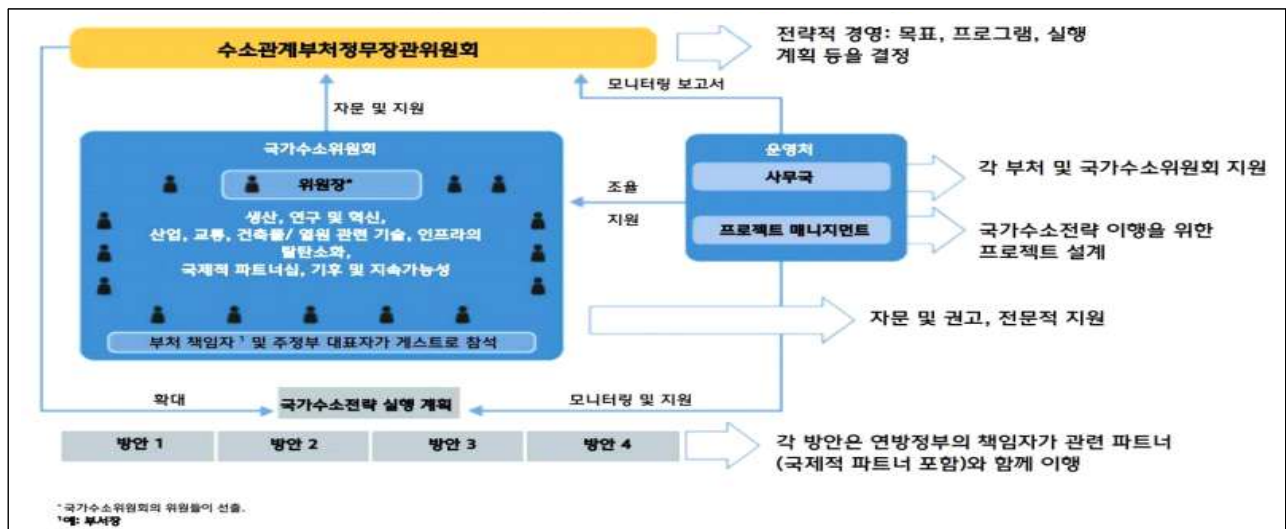
〈표 III-16〉 독일 수소·연료전지 기술 혁신프로그램(NIP) 주요 내용

차수	내용
제1차 NIP	○ 수소 모빌리티와 연료전지 시스템 등의 R&D 진행(’06~’16) ○ 실증 765개 프로젝트, 총 7억 1,000만 유로 투자 단행 ○ 독일의 수소 및 연료전지 산업 상용화에 기여

차수	내용
제2차 NIP	- 수소기술 시장의 활성화와 수소 인프라 구축에 초점('16~'26) - 독일 수소·연료전지 산업의 시장경쟁력 강화를 위한 시장성 개선 R&D, 상용화 등에 대한 프로젝트 진행

출처: 독일정부(2020), 앞으로 다가올 수소경제의 미래, 한국무역협회, 2020.10.

- 독일은 ‘국가수소전략을 발표하고, 2030년까지 14TWh 청정수소 생산 목표 수립과 분야별(생산, 운송, 산업, 난방, 인프라, 연구개발, 국제협력 등) 38개의 세부 이행계획을 발표’(20.6)
 - 이행계획 현황을 관리하기 위한 각 부처 장관으로 구성된 수소 관계부처 장관위원회 및 산·학·연 전문가로 구성된 국가 수소위원회 출범 계획 시사



자료: 주요국 수소경제 정책과 시사점, S&T GPS 글로벌 과학기술정책정보 서비스, 2021.7.

[그림 III-10] 독일 국가수소전략 거버넌스체계

- ‘30년까지 최대 5GW의 수소 생산설비 설치를 추진하고, ’40년까지 5GW 수소 생산설비를 추가 설치 계획

〈표 III-17〉 독일 수소전략의 주요 내용

구분	전략 내용
기구 설치	수소 내각 위원회·수소위원회·컨트론타워를 설치해 수소 전략 수립과 이행 여부 모니터링 등 핵심역할을 수행
투자 확대	- 수소 시장 확대를 위한 90억 유로(국내 70억+국제협력 20억 유로) 투자 - 수소연료전지 기술: 14억 유로(~'26) - 수소 기초 응용연구: 3.1억 유로(~'23) - 수소 기술 응용연구: 2억 유로(~'23) - 수소에너지 전환 실험실 연구 구축: 6억 유로 - 제조공장 탈탄소화 인프라 및 기술: 10억 유로(~'23)
생산설비 확대	5GW 수전해수소 생산설비 구축(~'30) 5GW 수전해수소 생산설비 추가 구축(~'40)
생산운송 인프라	- 산업계 수전해 설비 지원을 통한 수소 전환 촉진 - 천연가스 인프라 활용 및 수소 전용 인프라로 전환
국제협력 강화	글로벌 다자협력 에너지 파트너십을 통한 수소전략 목표 이행

출처: 독일정부(2020), 앞으로 다가올 수소경제의 미래, 한국무역협회, 2020.10.

다. 프랑스

■ 프랑스 환경부에서는 프랑스 수소 기술 수준 발전을 위한 1억 유로 규모의 ‘수소연료 발전 계획’ 발표(18.6)

- 에너지전환청(ADEME) 주도하에 산업용 청정수소 생산, 수소 모빌리티 기술 개발, 분산형 발전시스템 구축 등 3대 분야 프로젝트로 구성

※ ‘28년까지 소형차량 2~5만 대, 대형교통수단 8백~2천 대, 수소충전소 4백~1천 개 상용화 목표

■ 프랑스 국회는 에너지 법(Loi energie)을 발효시켰으며, ‘2050 탄소중립’이라는 EU의 목표에 맞춰 에너지 생산, 수입 및 판매 등 에너지 관련 규정 정립(19.11)

- 2030년까지 산업용 수소 소비량의 20~40%를 저탄소 수소로 대체하는 것을 목표로 수립

■ 수소 인프라 구축 및 기술개발에 70억 유로 투입하는 ‘국가 청정수소 개발 전략’을 발표(20.9)

- 프랑스를 청정수소의 선두주자로 만들기 위해 항공·해운용 수소 연료 시스템 개발, 수소 모빌리티용 연료전자·저장용기 개발, 청정수소 생산용 전해조 개발 등의 수소 산업 기술 R&D 투자 예정

■ 환경부·경제부·산업부가 참여한 수소위원회 개최하여 R&D 및 수소기술통합 프로젝트 27개와 4개 지역*의 수소철도(열차 차량 14대, 3천억 유로) 프로젝트 투자 계획

* 옥시타니, 부르고뉴, 오베르뉴, 그랑-테스트

라. 영국

■ 영국은 2050년까지 온실가스 감축목표를 법제화한 최초의 국가로, 감축 이행 방안으로 청정수소 수송 및 산업부문에 활용을 위한 노력 지속

- 영국 비즈니스·에너지 및 산업전략부(BEIS)는 수소가 보일러 외 고온 공정의 연료전환을 위한 가장 잠재력 높은 대안으로 인식하여 다양한 산업에 수소연료 적용 확대 필요성 강조

〈표 III-18〉 영국 청정수소 지원 방안

기존 정책을 활용한 청정수소 지원방안	청정수소 활성화를 위한 중장기 지원방안
○ 전기분해, 압축, 저장 및 유통 프로젝트에 소요되는 CAPEX 자본보조 상향 ○ 전해조 투입 전력 비용에 대한 부분 할인 ○ 프랑스(재정법 58조)에서 추진 중인 중인 정유공정에 청정수소 활용 장려정책 등 벤치마킹	○ 제 6차 탄소예산(Carbon Budget)에서 기후변화위원회(CCC, Climate Change Committee)는 2022년부터 산업부문의 에너지 소비 25TWh를 수소 및 전기로 대체하고 이를 위한 자본보조 및 운영비 지원을 위한 펀딩 도입 요구

출처: UKHfCA(2021), 주요국 수소경제 정책과 시사점, S&T GPS 글로벌 과학기술정책정보 서비스, 2021.7.

〈표 III-19〉 영국 청정수소 보급 전략 및 목표

계획 기간	목표	전략 내용
2020~2025	5GW	- 소규모 분산형 그린수소 생산 확대 - 국외 생산 재생연료 및 바이오메탄에 고정가격형 인센티브* 확대 - 재생연료인증서를 '40년까지 연장 및 최저 가격 하한선 도입
2025~2030	10GW	- 최초의 해상풍력 활용 청정수소 생산 프로젝트 진행 - 산업 클러스터 및 분산형전원을 위한 대규모 청정수소 생산 허브 구축 - 교통중심지 연계 수소충전소 구축 '30년 이후 청정수소에 자본보조, 관세 CFD 매커니즘 도입
2035~2040	40GW	- 그레이·브라운·블랙 수소 생산 전면 폐지 - 수소 수급을 위한 수소수출입체계 구축 - 최종에너지의 수소비중 5~10% 달성 100% 수소 유통 가능 가스그리드 구축 및 최소 수소 20% 혼입 달성
2040~2050	80GW	'50년 가스그리드 내 수소 비중 100% 달성 - 런던, 주요 국제 수소 거래시장 허브화 - 암모니아, 염공동(Salt cavern), 액화 등 활용 대량 수소 저장소 구축 - 수소 상용차 보급 40% 달성

출처: UKHFC(2021), 주요국 수소경제 정책과 시사점, S&T GPS 글로벌 과학기술정책정보 서비스, 2021.7.

* 신재생 열에너지에 대한 자금지원제도(Renewable Heat Incentive)

3) 호주

■ '호주국가수소전략'을 발표하며 수소생산·저장·운송 및 활용 정책 목표와 수소 공급 가격 목표 제시

- 2030년까지 CO₂-free 수소 기반 내수 수출 산업 육성을 통한 단계별 이행과정을 제시
 - ※ ① 추가 경제성장, ② 일자리 창출, ③ 재생에너지-수소 통합, ④ 수입연료 의존도 감소, ⑤ CO₂ 배출량 감축
- 대규모 수소 유통 및 수출 허브(Hydrogen Hub) 조성으로 수소의 수출자원화 추진
- 호주국가수소전략 내용을 필두로 하여 호주 주별 수소 및 재생에너지 생산 전략 수립

〈표 III-20〉 호주 주(州)별 수소전략의 주요 내용

주(州)	전략 내용
빅토리아	수소투자프로그램(VHIP) 이행하여 '30년 재생에너지 생산비중 50% 달성 및 '50년 온실가스 순 제로 배출 공약 이행을 위한 기후변화 체계 입법화
퀸즐랜드	'30년 호주 내 CO₂-free 수소 생산 선도 및 내수 수출 시장 확립 등 '수소산업전략' 비전 제시하며 1,500만 호주달러 규모 산업육성기금 조성
사우스오스트레일리아	- 국제표준 지침 및 절차를 개발하고 수소 액션플랜 실행 ※ 수소 인프라 관련 투자 촉진, 글로벌 규제 표준 마련, 무역 파트너십 및 공급 역량 강화, 혁신 및 전문인력 기술개발 촉진, 에너지시스템-수소 통합
타즈메니아	'22년까지 100% 재생에너지 달성 목표, 그린경제협력연구센터 설립을 통한 재생수소 생산 및 해양 환경 응용 가능성 연구 진행하여 재생에너지 연계 수소 생산 및 수출 기반 수소산업개발 촉진
캔버라	'20년 100% 재생에너지 활용 전기생산, 재생에너지혁신기금 운용

출처: 주요국 수소경제 정책과 시사점, S&T GPS 글로벌 과학기술정책정보 서비스, 2021.7.

4) 일본

■ 제3차 수소·연료전지 전략 로드맵(2019.3) 수립으로 국제 수소 서플라이체인 개발과 일본 내 재생에너지 자원을 활용한 수소생산 확대의 두 가지 방안을 채택

- 제4차 에너지기본계획(14년), 수소·연료전지 로드맵(16년), 수소기본전략 (17년), 제5차 에너지기본계획(18년) 등 순차적으로 발표, 수소 경제 선도국가로 도약하기 위한 기반을 다지는 중
- 후쿠시마 원전사고 이후 미래 에너지원으로 수소로 결정하여 수소 이용을 확대하고 발전 및 공급시스템을 마련하는 전략 채택

〈표 III-21〉 일본 수소전략의 주요 내용

수소전략 단계	정책 내용
1단계 수소 이용 확대	○ (‘20) 가정용 수소연료전지 시장 자립화, 수소차 4만 대·수소 버스 100대 공급, 충전소 160개 설치 ○ (‘25) 수소차 20만 대 공급, 충전소 320개 설치 ○ (‘30) 가정용 수소연료전지 530만대 도입, 수소차 80만 대·수소 버스 1,200대 공급, 충전소 900개 설치
2단계 수소발전·공급 시스템	○ (‘30) 호주 갈탄 등을 활용한 수소의 생산·저장·운송의 본격 시행, 발전 사업용 수소발전기 도입
3단계 탄소프리 수소공급 시스템	○ (‘40) 재생에너지와의 결합을 통한 이산화탄소 제로 수소 생산·저장·운송 본격화

출처: 일본 경제산업성 수소연료전지전략 로드맵(2019), 앞으로 다가올 수소경제의 미래, 한국무역협회, 2020.10.

5) 중국

■ 중국은 2017년 ‘연료전지자동차 발전로드맵’과 ‘중국제조 2025’를 통해 수소차 보급과 수소 관련 기술 상용화를 중점으로 하여 수소 전략 정책 마련

- 수소에너지 비중은 ‘18년에 2.7%에 그쳤으나 ‘50년에는 10%까지 점차 확대할 예정

■ 전국인민대표회의에서 ‘수소에너지 설비 및 충전소 건설’ 관련 사항을 보고안건으로 상정하여 정부 차원의 수소에너지 산업 육성 본격화(19.3)

- 국가발전개혁위원회, 과학기술부 등 4개 부처 공동 ‘신에너지 차량 보급을 위한 보조금 정책 개선안’ 발표하여 수소차 및 충전소 보급 목표 수립(19.3)
- 국가발전개혁위원회는 ‘산업구조조정 지침목록’에 수소충전소 사업 추가(19.4)
- 국가발전개혁위원회와 사법부가 발표한 ‘녹색생산 및 소비에 대한 규제 및 정책’에서 ‘21년까지 수소산업 육성에 대한 집중 지원 발표(20.3)

- 과학기술부 등 공동으로 '연료전지 차량 시범 사업' 계획 발표하여 인력양성, 기술사업화, 신기술 개발 등 지원 계획 수립('20.10)

〈표 III-22〉 중국 수소연료전지 단계별 목표

구분	2019	단기목표 (2020~2025)	중기 목표 (2026~2035)	장기 목표 (2036~2050)
수소에너지 비중(%)	2.7	4	5.9	10
수소전기차(천 대)	3	50	1,300	5,000
수소충전소(개)	23	200	1,500	10,000
수소연료전지(천 세트)	10	60	1,500	5,500
수소 산업 규모(억 위안)	3,000	10,000	50,000	120,000

출처: 중국 수소에너지 및 연료전지산업백서(2019), 앞으로 다가올 수소경제의 미래, 한국무역협회, 2020.10.

- 수소와 수소연료전지의 대규모 보급을 '50년까지 목표로 '중국제조 2025' 정책에 따라 미래 수소연료전지 및 관련 기술개발 지원

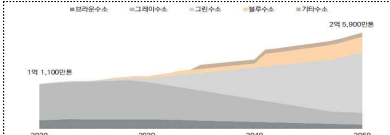
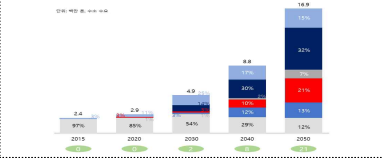
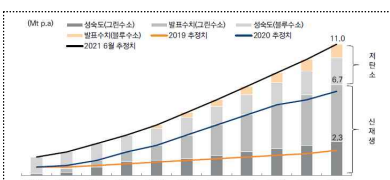
〈표 III-23〉 중국 수소전략의 주요 내용

구분	정책 내용
전략 방향	○ 수소 생산·저장·운송 및 수소충전소 역량 확충 ○ 미래 수소연료전지 연구개발 ○ 수소생산과 연료전지의 일체화 설계 및 시스템 개발
주요 내용	○ ('20) 수소 생산·저장·운송 및 수소충전소 핵심기술 발전 ○ ('30) 수소의 대규모 생산·저장·운송, 수소연료전지 핵심기술 확보 및 산업 가치사슬 구축 ○ ('50) 수소와 연료전지의 대규모 보급 실현

출처: 중국제조 2025(2015), 앞으로 다가올 수소경제의 미래, 한국무역협회, 2020.10.

3절 국내외 시장·산업동향

〈표 III-24〉 국내외 시장·산업동향 요약

구분	해외	국내	시사점										
수소시장	○ (수요) 수소시장 연평균 6.7% 성장 전망 ('50년 기준 5억 2,800만 톤 수요 예측) - 대부분은 산업용 원료로 사용('20), 저탄소수소(및 청정수소) 수요 지배적  (단위: EJ) 연평균 6.7% 성장 전망 2015: 8, 2020: 10, 2030: 14, 2040: 28, 2050: 78 ○ (생산) 연평균 6.7~11.2% 성장 전망 ('50년 기준 2억 5,900만 톤 공급 예측) - 탄소자감을 위해 블루, 그린수소 생산 확대  1억 1,100만 톤 2020: 1.1, 2030: 1.1, 2040: 1.1, 2050: 1.1 ○ (세계) 전세계 대형 수소 프로젝트 추진 하여 수요확대 대응을 위한 공급 다양화	○ (현황) 로드맵 수립 등 집중 지원으로 글로벌 수소시장 빠른 선점 중 - 국내 수소차 시장점유율 70%, 연료전지 시장점유율 40%로 선점 - 현재 생산량은 대부분 자체 소비, 시장공급량 22만톤 수준 ○ (수요) '30년 이후 국내 수요 급증 전망, '50년 1,700만 규모로 수요 시장 성장 - 발전, 수송, 건물 등에 주로 활용 예측  10만 톤 2015: 2.4, 2020: 4.9, 2030: 10.0, 2040: 18.0, 2050: 28.0 ○ (공급) 국내 공급량은 '22년 47만톤 → '40년 526만톤으로 11배 이상 확대 전망 - 국내 수소 안정화를 위한 생산 전략 수립	○ 수소 수요 연평균 6.7%, 생산 연평균 6.7~11.2% 증가 ○ '50년 기준 수소 수요 52억톤, 생산 26억톤 전망, 예상 생산량 부족 - 저탄소수소 수요 지배적 ○ 전세계 576조원 규모 수소 프로젝트 추진 ○ 국내 수소차, 연료전지 분야의 글로벌시장 선도 ○ 국내 수소 공급량 '40년에 11배 이상 확대 전망										
청정수소	○ (생산) '30년 청정수소 생산계획 1,100만톤  (단위: 10만 톤) 2020: 1.1, 2030: 1.1, 2040: 1.1, 2050: 1.1 ○ 그레이수소와 청정수소 단가 교차 예상 - (그레이) 1~1.5\$/kg vs (그린) 1~3\$/kg ○ (글로벌) 청정수소 공급 생태계 구축 - (美) 4개 이상 청정수소 허브 개발지원 - (和) 주변국과 연결, 무탄소 수소 네트워크(백본) 구축 계획	○ 국내 기업의 수소 산업 전환 확대 ○ 그린에너지 부족 및 탄소중립 요구 대응, '50년까지 청정수소로 80% 전환 예정 <table><tr><th>구분</th><th>내용</th></tr><tr><td>SK</td><td>'25년부터 청록수소 시현 예정</td></tr><tr><td>현대중공업</td><td>청정수소 플랜트 구축중</td></tr><tr><td>한국전력</td><td>재생에너지 발전비율 35%로 증가</td></tr><tr><td>한국가스공사</td><td>청정수소 '40년까지 121만 톤 수입 예정</td></tr></table>	구분	내용	SK	'25년부터 청록수소 시현 예정	현대중공업	청정수소 플랜트 구축중	한국전력	재생에너지 발전비율 35%로 증가	한국가스공사	청정수소 '40년까지 121만 톤 수입 예정	○ '30년에 청정수소 1,100만톤 이상 생산 추정 ○ 수소 단가 그레이는 상승, 그린은 하락 전망 ○ (국내) '50년 까지 청정수소로 80% 전환
구분	내용												
SK	'25년부터 청록수소 시현 예정												
현대중공업	청정수소 플랜트 구축중												
한국전력	재생에너지 발전비율 35%로 증가												
한국가스공사	청정수소 '40년까지 121만 톤 수입 예정												
고체탄소	○ (생산) '22년 178억\$ → '27년 234억\$ - 종류 및 쓰임새에 따라 가격차 발생 ※ (일반) 1,260\$, (특수) 2,020\$, (배터리용) 4,020\$	○ 플라스틱, 잉크 용도의 저부가가치 특수 카본블랙이 일부 생산되나, 도전재 등 고부가가치 특수 카본블랙은 전량 수입에 의존	○ 고부가가치 제품 생산 증가로 카본블랙의 수요 성장 ○ 고부가 카본블랙 국산화 필요										
천연가스	○ (수요) '50년까지 연평균 1.3% 성장 전망 ○ (공급) 일부 차질, 지속적으로 확대 전망 ○ (세계) 천연가스 시장 불안 지속 - (美) 높은 매장량을 기반으로 생산 다양화 - (露) 매장량, 생산량 높으나 러-우 사태로 인한 시장 변동 격화	○ (수요) LNG 도입량 세계 3위 - 도입 이래 매년 평균 9.96% 증가 - 최근 전체 수요 일부 감소하였으나 산업발전용 천연가스 수요는 증가 전망	○ 수요 성장을 전망이 수소 대비 비교적 낮음 ○ 산업용 에너지원으로 수요가 높은 반면 공급 과잉 우려 발생 - 불안정한 유통과 신재생에너지 중시 등										

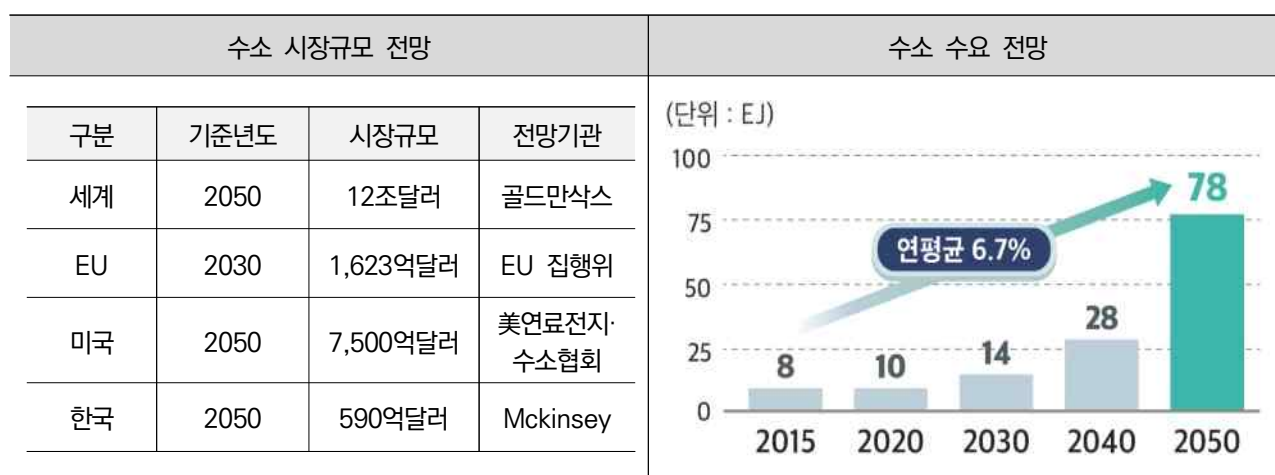
1. 수소 시장

1) 글로벌 수소시장 규모 및 전망

- (수요) 수소는 발전, 저장, 수송, 산업공정 등 산업 전반에 걸쳐 활용되며 수소시장 연평균 6.7% 성장 전망

- '50년 기준 수소 시장규모는 전 세계적으로 12조 달러 수준으로 예상되며, 미국 7,500억달러, EU 1,623억달러 수준

※ (발전) 연료전지·가스터빈, (저장) ESS 등, (수송) 수소차·열차·선박 등, (산업공정) 원료·연소 등



※ 제1차 수소경제 이행 기본계획(관계부처합동, 2021.11.)

[그림 III-11] 세계 수소에너지 산업 전망

- 세계 수소에너지 사용량은 '20년 약 9천만 톤으로 대부분은 산업용 원료로 사용³⁾

- 세계 수소시장은 '30년 2억 톤, '50년까지 5억2,800만 톤 규모로 성장할 것으로 전망, 그 중 약 98%는 탄소 중립사회의 실현을 위해 저탄소 수소(및 청정수소)로 변환 필요
- '50년에는 수소가 글로벌 에너지 수요에서 차지하는 비중이 18%에 육박하고, 이산화탄소는 매년 60억 톤가량 감축할 것으로 전망⁴⁾

※ 18년 기준 세계 수소 생산량은 7,000만 톤 수준이며 이 중 약 75%를 천연가스-수증기 개질 방식, 23%는 석탄 방식으로 생산

- 수소 및 관련 장비에서만 연간 2.5조 달러의 시장과 3,000만 개 이상의 누적 일자리 창출 기대

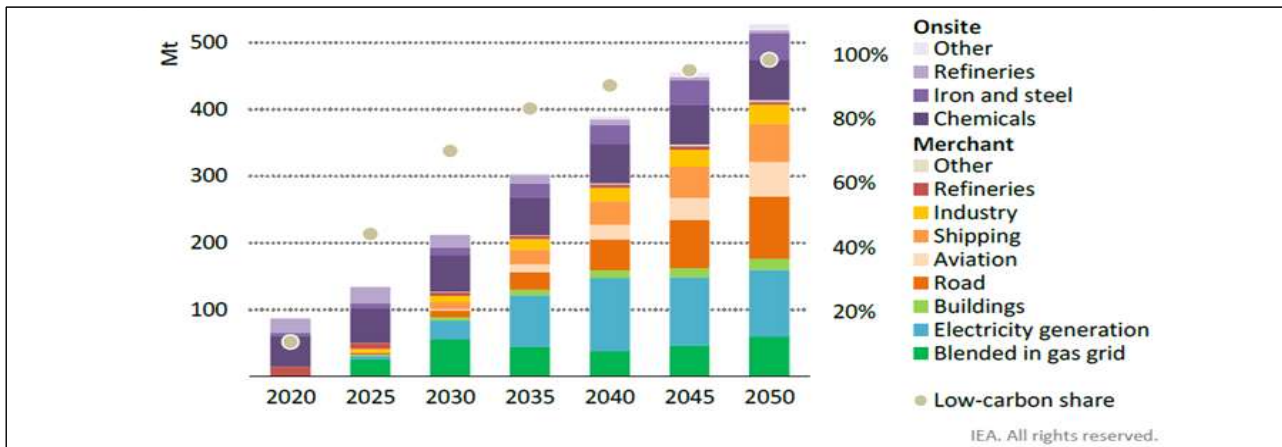
※ 글로벌 수소 수요는 2050년 수송 28%로 가장 크고, 산업용 원료(24%), 산업(21%), 건물(14%), 발전(12%) 순

3) IEA(2019), The Future of Hydrogen

4) McKinsey&Company(2017) Hydrogen scaling up

- 수소는 대부분 산업용 원료로 사용되고 있으며 크게 첨가물이 거의 없는 순수한 수소와 수소가 포함된 합성가스 상태로 공급됨

※ 17년 순수한 상태의 수소 약 7,100만 톤, 합성가스 상태의 수소는 약 3,600만 톤 사용



출처: IEA report(2021) : Net Zero by 2050 - A Roadmap for the Global Energy Sector

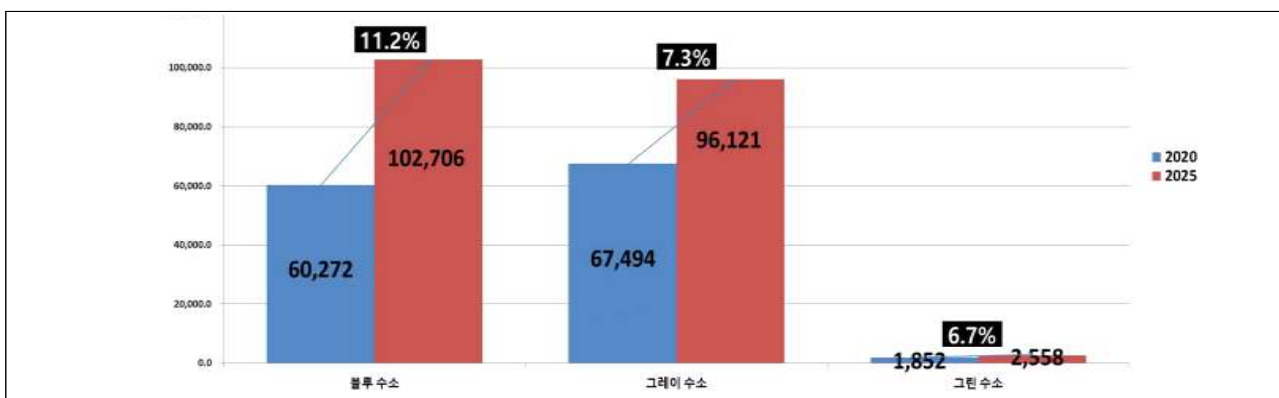
[그림 III-12] 2050 글로벌 수소시장 분야별 수요 전망

■ (생산) 세계 수소 생산시장 규모는 '24년 약 2,013억 달러로 전망되며, 수소생산방식에 따라 6.7~11.2% 성장 예측

- 현재 화석연료를 이용한 그레이수소 생산방식* 가장 많이 이용되고 있으나, 탄소중립적 자원 활용을 위해 청정수소(그린, 블루 등) 생산량이 점차 증가 예상

* 온실가스의 배출량이 많은 개질 방식

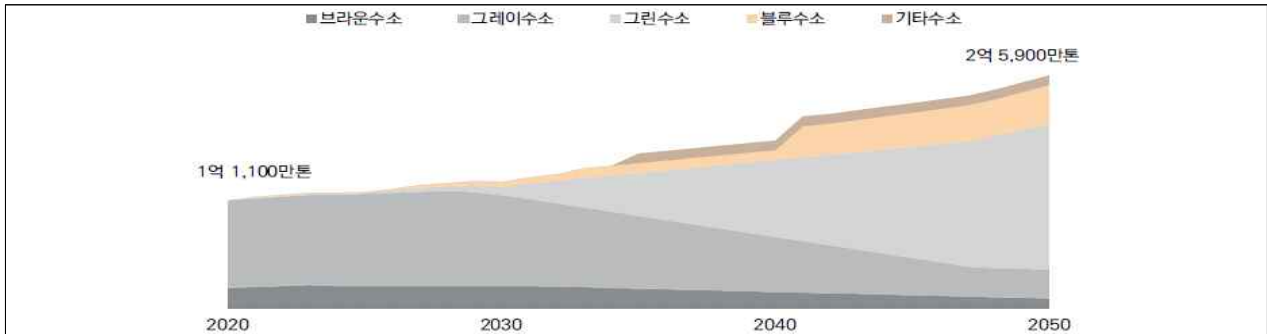
- '20년에는 그레이 수소의 시장규모가 가장 큰 것으로 조사되나, '25년의 시장규모는 블루 수소(1,027억 달러), 그레이 수소(961억 달러), 그린 수소(25억 달러) 순으로 전망
- 수소 생산 과정에서 온실가스 배출량을 현저히 줄일 수 있도록 천연가스 또는 메탄 등으로 수소를 생산하는 블루수소나 그린수소 기술이 빠르게 발전할 것으로 전망



출처: Hydrogen Generation Market(Marketsandmarkets, 2021)

[그림 III-13] 원료에 따른 수소생산 시장규모 및 전망 (백만 달러)

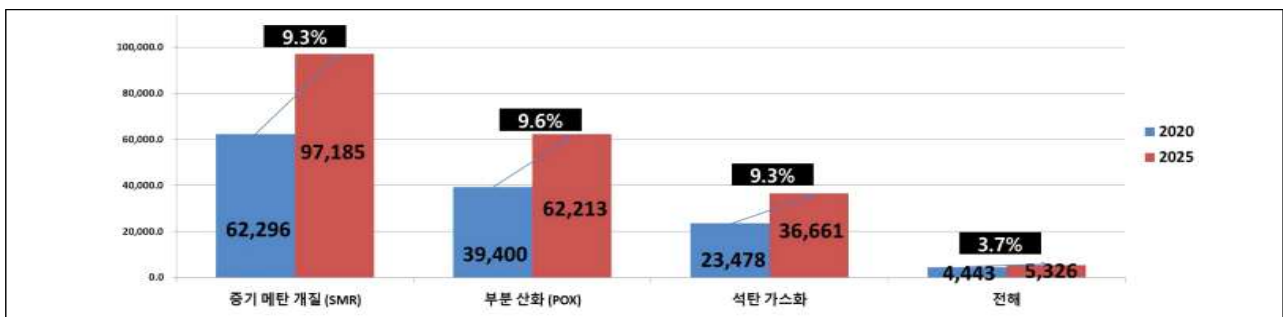
- 수소 생산 규모는 '20년 1억 1,100만톤에서 '50년 2억 5,900만톤으로 약 2배 이상 성장 할 것으로 예측되며, 탄소중립 이행에 따른 청정수소(그린, 블루 등)의 생산비중이 점차 증가
- ※ 2030년 기준, 탄소중립에 필요한 청정수소 생산량은 약 7천만 톤(전체 2억 톤) 수준



출처: Wood Mackenzie, Deloitte, 미래에셋증권 리서치센터

[그림 III-14] 2020년~2050년 시기별 글로벌 수소생산 방식 비중

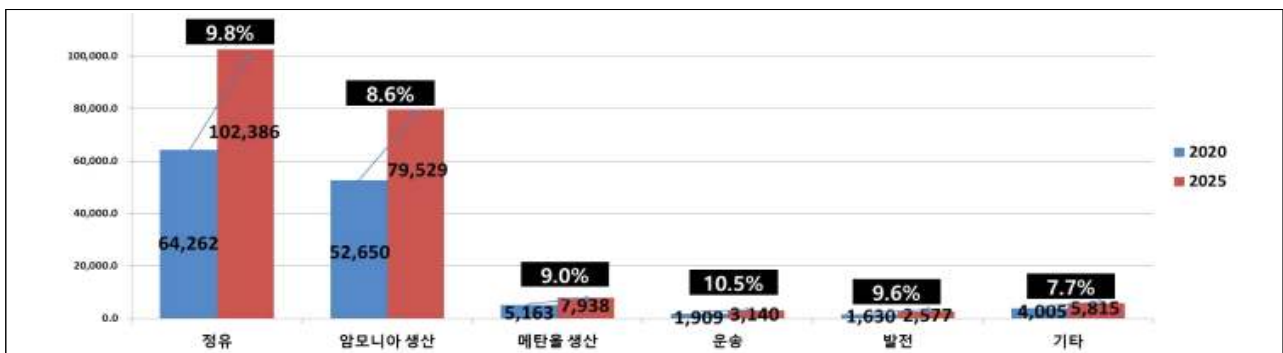
- 수소생산은 방식에 따라 스팀개질, 부분산화, 석탄가스화, 수전해 등으로 분류
- 스팀개질(연평균 9.6%), 부분산화(연평균 9.3%) 방식이 수소 생산 기술을 선도



출처: Hydrogen Generation Market(Marketsandmarkets, 2021)

[그림 III-15] 수소 생산 방식에 따른 시장규모 및 전망 (백만 달러)

- 생산된 수소의 활용은 용도에 따라 정유, 암모니아 생산, 메탄올 생산, 운송, 발전 및 기타로 분류되며, 운송이 가장 빠른 성장(10.5%)이 기대되나 모든 분야가 고르게 성장

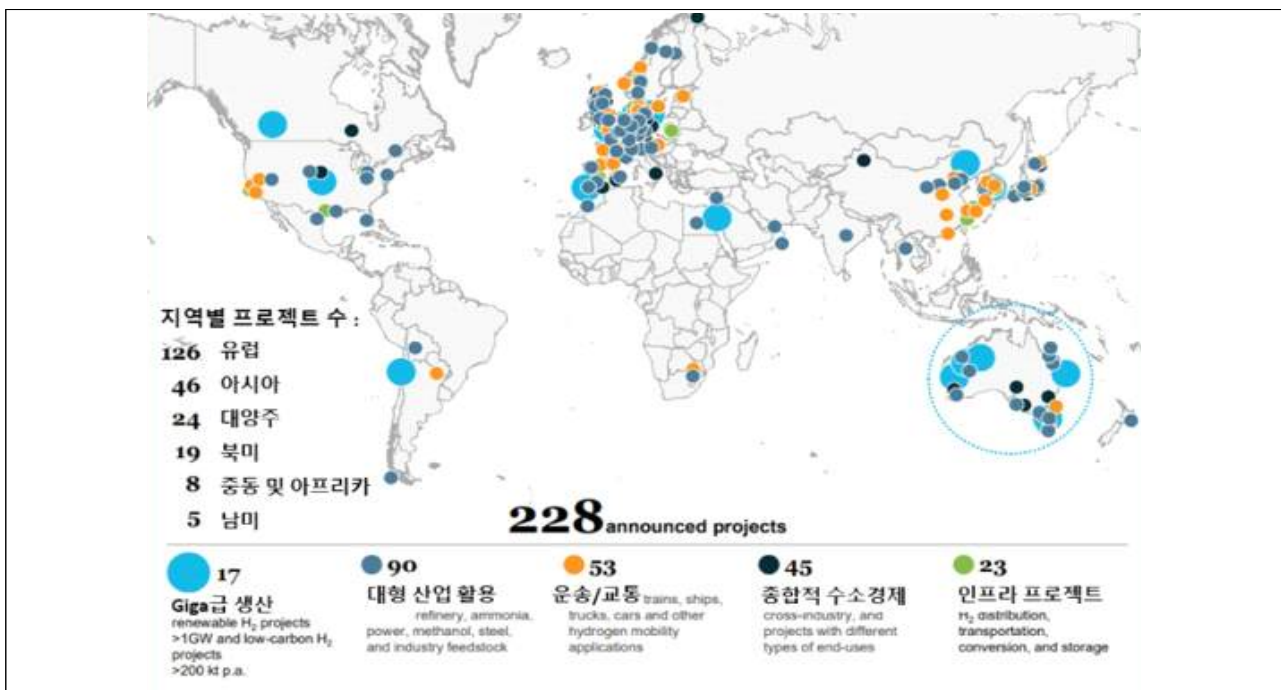


출처: Hydrogen Generation Market(Marketsandmarkets, 2021)

[그림 III-16] 수소 사용 용도별 시장규모 및 전망 (백만 달러)

■ '21년 기준 전 세계에서 228개의 수소 프로젝트가 추진되고 있으며, 10년 후 359개 프로젝트(576조 원 규모)로 글로벌 수소 사업 투자 규모 확대 전망

- 이 중 17개는 이미 발표된 수소생산 분야로 기가(GW) 규모의 생산 프로젝트이며 유럽, 호주, 중동 및 칠레에서 가장 큰 규모로 구축
 - 전체 프로젝트의 55%가 유럽에서 수행되며, 이후 아시아, 대양주, 북미 순
 - 수소의 대형산업 관련 프로젝트가 34.9%로 가장 많고, 운송/교통, 수소 경제 관련 프로젝트 순으로 계획



자료 : 산업기술전략리포트(2020), Hydrogen Council, McKinsey & Company (2021)

[그림 III-17] 해외 수소 관련 프로젝트 추진현황

■ 수소 수요시장 급증이 예상되며 공급방안 마련을 위한 국가별 대비책 마련

- (EU) 국가 중 독일이 최대 수소경제 규모를 지니고 있어 '20년 55TWh에서 '30년 90~110TWh 수준으로 약 2배 성장할 전망

<표 III-25> 독일 수소경제 주기별 시장 규모

(단위: 백만 달러, 글로벌대비 %, %)

생산('20년)			저장('19년)			소비량('20년)
금액	점유율	연평균성장률 ('20~'25)	금액	점유율	연평균성장률 ('19~'24)	
6,032	4.7	9.6	778	5.7	6.6	55TWh

출처: MarketsandMarkets / 주요국 수소경제 동향 및 우리기업 진출전략, Kotra, 2022

- 독일 수소 생산시장은 기간 내('20~'25) 연평균 9.6% 성장하여 '25년 시장규모는 약 95억 달러에 달할 것으로 예상
- 탄소 배출이 없는 청정수소인 그린수소 생산량이 '20년 3.85TWh에서 '30년 14TWh 수준으로 4배 이상 증가할 전망

〈표 III-26〉 EU 주요국 수소 생산시장 규모 전망

(단위: 억 달러, %)

국가명	2020년	2021년	2022년	2023년	2024년	2025년	연평균성장률 ('20~'25)
독일	60	66	72	77	85	95	9.6
프랑스	45	49	53	57	62	69	8.9
영국	38	41	45	47	51	57	8.1

출처: MarketsandMarkets / 주요국 수소경제 동향 및 우리기업 진출전략, Kotra, 2022

- (미국) 수소 소비량은 '20년 1,140만 톤→'50년 최대 4,100만 톤으로 증가 전망, 수소 산업 관련 제품 고려할 경우 '50년까지 11조 달러 규모의 시장 형성 예상

※ Game Changer: How Green Hydrogen Could Fuel Our Future(Bank of America, '20.9월), Road Map to a US Hydrogen Economy(FCHEA, '20.10월)

〈표 III-27〉 미국 수소경제 주기별 시장규모

(단위: 백만 달러, 글로벌대비 %, %)

생산('20년)			저장('19년)			소비('20년)		
금액	점유율	연평균성장률 ('20~'25)	금액	점유율	연평균성장률 ('19~'24)	금액	점유율	연평균성장률 ('19~'24)
23,225	17.9	9.1	5,702	41.4	6.7	17,600	13.0	2.1

출처: MarketsandMarkets / 주요국 수소경제 동향 및 우리기업 진출전략, Kotra, 2022

- 글로벌 2위 수소 생산시장인 미국은 시장규모 '25년 약 359억 달러 전망되며, 풍부한 천연가스 생산·소비량으로 수소 생산 원료 중 천연가스를 가장 많이 활용

〈표 III-28〉 북미 주요국 수소 생산시장 규모 전망

(단위: 백만 달러, %)

국가명	2020년	2021년	2022년	2023년	2024년	2025년	연평균성장률 ('20~'25)
미국	23,225	24,730	26,918	29,154	32,110	35,927	9.1
캐나다	6,681	7,095	7,702	8,347	9,158	10,223	8.9
멕시코	2,093	2,220	2,407	2,532	2,801	3,111	8.2

출처: MarketsandMarkets / 주요국 수소경제 동향 및 우리기업 진출전략, Kotra, 2022

- (중국) '25년 1,450억 달러, '35년 7,250억 달러, '50년 1조 7,410억 달러로 성장 예측⁵⁾

〈표 III-29〉 중국 수소경제 주기별 시장규모

(단위: 백만 달러, 글로벌대비 %, %)

생산('20년)			저장('19년)			소비량('20년)
금액	점유율	연평균성장률 (‘20~‘25)	금액	점유율	연평균성장률 (‘19~‘24)	
27,361	21.1	9.3	1,056	7.7	5.7	1,900만 톤

출처: MarketsandMarkets / 주요국 수소경제 동향 및 우리기업 진출전략, Kotra, 2022

- 현재는 풍부한 석탄 생산·소비를 기반으로 개질수소를 주로 생산하지만 석유화학 시설 규모 확대와 온실가스 감축 계획에 따라 부생수소, 수전해수소 등 수소 생산방식의 다변화 전망

〈표 III-30〉 아시아 주요국 수소 생산시장 규모 전망

(단위: 백만 달러, %)

국가명	2020년	2021년	2022년	2023년	2024년	2025년	연평균성장률 (‘20~‘25)
중국	27,361	29,500	32,055	34,640	38,173	42,718	9.3
인도	9,780	10,768	11,945	13,240	14,867	16,989	11.7
일본	7,359	7,971	8,701	9,568	10,548	11,882	10.1

출처: MarketsandMarkets / 주요국 수소경제 동향 및 우리기업 진출전략, Kotra, 2022

- (일본) '20년 기준 약 1.5억 달러 규모에서 수소 분야 발전으로 인한 급성장으로 '35년에는 약 409억 달러 규모로 '20년 대비 약 268배 가량 급증 기대

- 일본의 수소 생산 시장 규모는 '25년 약 119억 달러로 연평균 10.1%수준 성장 전망
- 암모니아 혼소 발전*, 수소가스터빈 발전의 실증 시험 등이 '24~'25년에 개시되어 에너지 발전 분야에서 수소 수요가 대폭 증가할 전망

* 석탄 등 기존 화석연료 발전 분야에서 탄소배출 저감을 위해 무탄소 연료인 암모니아를 함께 연소하여 전력을 생산하는 방식

〈표 III-31〉 일본 수소산업 시장 규모 전망

(단위: 백만 달러)

'20년도	'21년도 전망	'20년도 대비	'35년 전망	'20년도 대비
약 152 (175억 엔)	약 159 (183억 엔)	1.05배	약 40,901 (4조 7,013억 엔)	268.6배

출처: 「수소 관련 국내 시장과 해외 동향 조사('21.10월)」(후지경제그룹)

5) World Economic Forum, Accenture('20.10.)

- (호주) 현재 수소 생산을 중심으로 산업을 형성 중이며, '30년을 기점으로 글로벌 수요확대로 인해 국제적인 경쟁력을 확보할 것으로 기대
- 전통적인 자원 수출국의 위치를 강점으로 활용하여 수소생산 및 수출 부문을 선도하며, 동아시아 국가를 대상으로 '30년 22억 달러, '40년에는 57억 달러 규모의 수출이 전망 (PwC, '20. 7월)

〈표 III-32〉 호주 수소경제 주기별 시장 규모

(단위: 백만 달러, 글로벌대비 %, %)

생산('20년)			저장('19년)			소비량('20년)
금액	점유율	연평균성장률 ('20~'25)	금액	점유율	연평균성장률 ('19~'24)	
4,398	3.4	10.0	251	1.8	5.0	650ktpa*

출처: MarketsandMarkets / 주요국 수소경제 동향 및 우리기업 진출전략, Kotra, 2022

* kilo-tonnes-per-annum (킬로톤/연)

- 현재 수소 대부분을 천연가스 개질 방식으로 생산 중이며, 수전해수소 생산단가 하락을 위한 인프라 확충 중
- 호주의 수소 생산시장 규모는 '20년 약 44억 달러에서 '25년 연평균 10% 성장하여 약 71억 달러로 확대 전망

〈표 III-33〉 호주 수소 생산시장 규모 전망

(단위: 백만 달러, %)

국가명	2020년	2021년	2022년	2023년	2024년	2025년	연평균성장률 ('20~'25)
호주	4,398	4,731	5,129	5,828	6,300	7,089	10.0

출처: MarketsandMarkets / 주요국 수소경제 동향 및 우리기업 진출전략, Kotra, 2022

2) 국내 수소 시장규모 및 현황

■ (현황) '19년 수소경제 로드맵을 수립하고 지속적인 후속 대책 마련 및 기술개발을 위해 약 3.7천억원을 집중 지원하여 글로벌 수소 시장을 빠르게 선점 중

- 현재 수소 공급 가능량은 연간 160~171만 톤이나, 대부분 정유 및 석유화학 공단 내에서 생산되어 자체 공정에서 소비하기 때문에 시장 공급 가능 양은 22만 톤 수준

※ 수소 운송방식에 따라 대략 kg 당 3~6천원 수준(충전소 8천원/kg 내외)

- 정부의 수소 정책에 호응하여 국내 주요 기업들은 수소 사업에 공격적인 투자 진행중
 - 국내 수소차의 글로벌 시장점유율은 '20년 기준 70%에 육박하며 전년 대비 약 35.3% 성장, 연료전지의 경우 글로벌 보급량의 40%를 보유하여 관련 시장 선점 성공 및 글로벌 선도

※ SK, 현대, 포스코, 롯데, 한화, 효성 등 6개 기업이 그린 및 블루수소 등 생산 분야에 약 15조 원, 액화플랜트 등 저장 및 유통에 8조 원, 발전수소차 등 활용 분야에 24조 원 투자 예정

※ GS칼텍스, 현대오일뱅크, 에스오일 등 정유 기업들도 신산업 차원에서 수소경제 비전 발표

〈표 III-34〉 주요 기업별 투자 계획(안)

기업	투자분야	투자금액*
SK	대규모 액화플랜트 구축, 연료전지 발전 확대 등	18.5조 원
현대차	수소차 설비투자 및 R&D, 연관 인프라 투자	11.1조 원
포스코	부생 수소 생산 및 해외 그린수소 도입, 수소환원철 개발 등	10.0조 원
롯데케미칼	청정 수소 생산 및 탄소 자원화 기술 개발, 수소 연료전지 발전 등	4.4조 원
한화	녹색 수소 R&D 실증 및 생산, 수소 저장 설비 등	1.3조 원
효성	액화플랜트 구축, 액화충전소 보급	1.2조 원

출처 : 언론보도 종합, 삼정KPMG 경제연구원

* 투자금액은 2021년 7월 28일 기준 작성

〈표 III-35〉 주요 기업 액화수소 플랜트 투자 현황

기업	상업운전예상시기	생산량(단위: 톤)	특징
GS칼텍스	2025년	1만	• 한국가스공사와 협업 • 한국가스공사 LNG 인수기지 내 건설
SK E&S	2024년	3만	• SK인천석유화학단지 내 건설 • 미국 Plug Power와 협업 예정
SK가스	2026년	1만 2,000	• 울산 LNG 터미널 내 운영 예정 • LNG 직도입 및 냉열 활용 계획
두산중공업	2023년	1,825	• 창원 수소 액화 사업의 일환 • 프랑스 에어리퀴드로부터 설계 및 엔지니어링, 운영 지원을 받을 예정
효성	2023년	1만 3,000	• 울산 용연 공장 부지 내 건설 • 독일 린데와 합작 법인 설립
한국지역난방공사	2025년	1만	• 한국가스기술공사, SPG와 협업 • LNG 미활용 냉열이용 등 연계 예정

출처 : 언론보도 종합, 삼정KPMG 경제연구원

* 상기 내용은 2021년 7월 28일 기준, 주요 기업들의 투자 현황 요약

■ (수요) 한국의 수소 총수요는 현재 약 290만 톤*으로 '30년 이후 급격히 증가할 것으로 전망되며, 수송 및 건물 분야에 특히 높은 수요 예측

* 국내 수소 수요는 '30년까지 서서히 증가한 후 투자, 기술발전, 고객 확보, 누적된 최종 소비재 구매로 이어지는 선순환으로 인해 '30년 이후 급격히 증가할 것으로 기대

○ 수소 경제효과는 현재까지 누적 1조 원 수준으로 '22년 16조 원, '30년 25조 원으로 규모 성장이 예측, '50년 한국의 수소 수요는 연간 약 1,700만 톤 수준으로 급증 전망

- (발전) 수소 수요는 '30년에 약 120만 톤, '50년에는 약 260만 톤* 전망

* '50년 한국의 전체 중앙 발전량의 약 10%의 전력 생산 추정

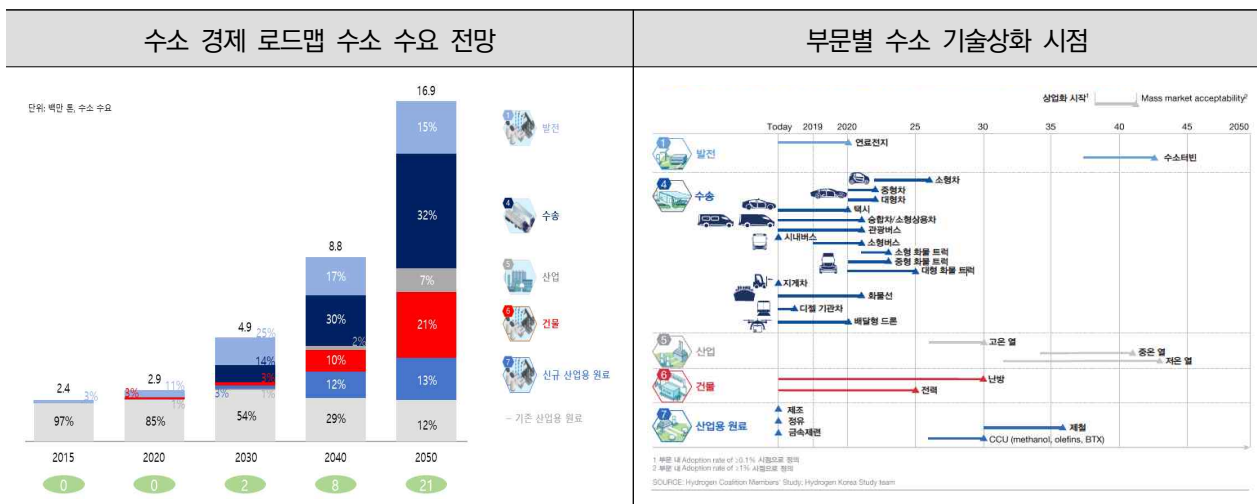
- 고정형 및 이동형 연료전지 기술을 활용한 발전 부문의 수소 수요는 초기에 연료전지 발전소 위주로 발생하나 '30년 약 120만 톤, '50년 약 160만 톤으로 확대될 것으로 추정
- 발전 부문의 수소 터빈은 '40년부터 본격적인 상용화가 시작되어 '50년 약 100만 톤 수준의 수소 수요 기대

- (수송) 수소 수요는 '30년 약 70만 톤에서 '50년 약 540만 톤으로 성장 할 것으로 전망되며, 이는 국내에서 약 800만대 이상의 수소차가 운행 가능한 수준

• 수소버스 '30년 약 2만 톤, '50년 약 20만 톤의 수소 수요 추정

※ 수소차용 연료전지 파워트레인 내연기관 파워트레인 보다 비싸지만, '30년 내연기관 대비 운영비용이 110% 미만까지 감소할 것으로 전망

○ 글로벌 에너지 수요 중 한국의 수요가 2.1%를 차지한다고 가정, 국내 수소 정책이 강력한 수준으로 지속될 경우 '50년에 약 14.6MMT 수요가 발생할 것으로 예측⁶⁾



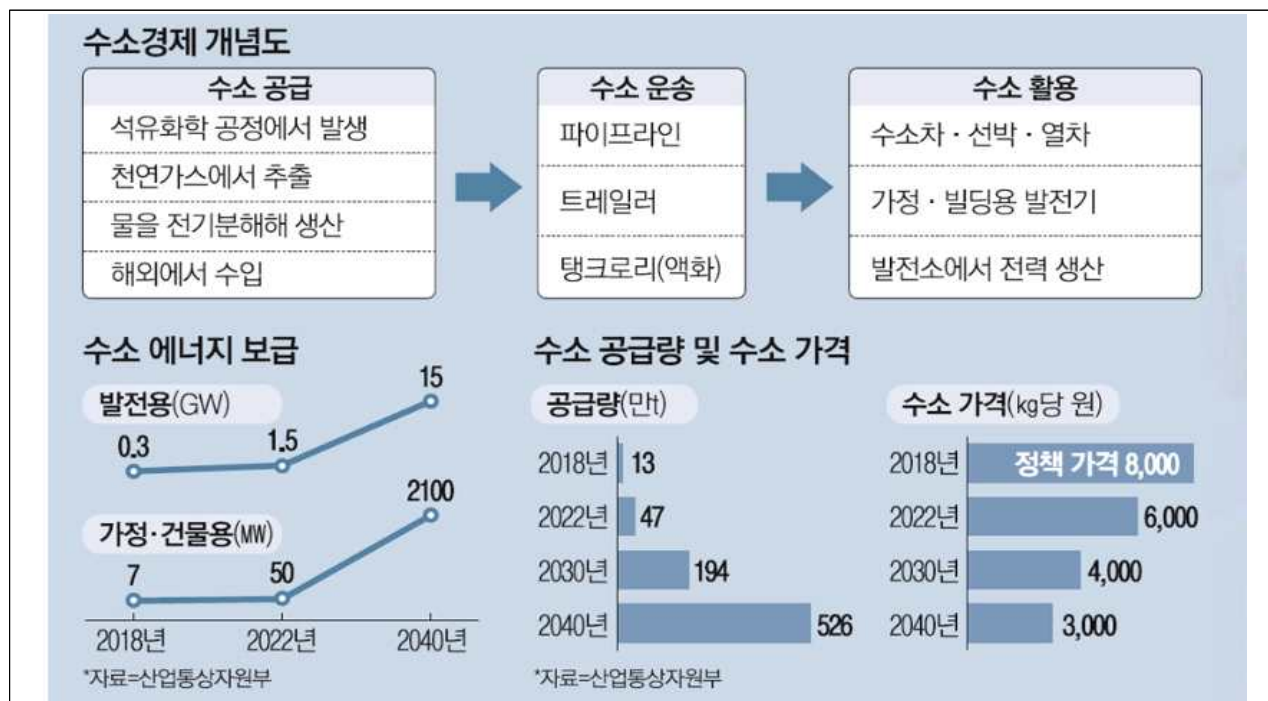
출처: Hydrogen scaling(Hydrogen Council, 2017), 수소생산에서 활용까지, 수소경제에서 찾는 기회(삼정KPMG, 2021)

[그림 III-18] 국내 수소 수요 생산량 및 분야별 분포 전망

6) Bloomberg, 수소생산에서 활용까지, 수소경제에서 찾는 기회(삼정KPMG, 2021)에서 재인용

■ (생산·공급) 수소에너지 보급 및 공급 확대로 2040년 수소공급량은 526만 톤 예상

- '20년 기준 수소 수요는 290만 톤이며, 이 중 86%가 정유 부문에서 발생



[그림 III-19] 수소 경제 개념 및 보급 전망

- 국내 수소생산 전략은 부생수소, 추출수소, 수전해 수소, 해외생산 수소 4가지로 구분하여 추진하며, '22년 47만 톤, '30년 194만 톤, '40년 526만 톤으로 확대 계획

〈표 III-36〉 국내 추출 수소 공급량 확대 계획

연도		2018년	2022년	2030년	2040년
연간 수소 총 공급량(톤)		13만	47만	194만	526만 이상
전체 수소	공급방식	부생 수소 추출 수소	부생 수소 추출 수소 수전해	부생 수소 추출 수소 수전해 해외생산	부생 수소 추출 수소 수전해 해외생산
	공급가 목표 (원/kg)	-	6,000	4,000	3,000
추출 수소 비중 목표		구체적 수치 부재	구체적 수치 부재	50%	30%
추출 수소 공급량(톤)		구체적 수치 부재	구체적 수치 부재	97만	157.8만
생산구성		-	수도권 인근 대규모 생산	해외 수소 활용	CO2 free 수소 대량 도입

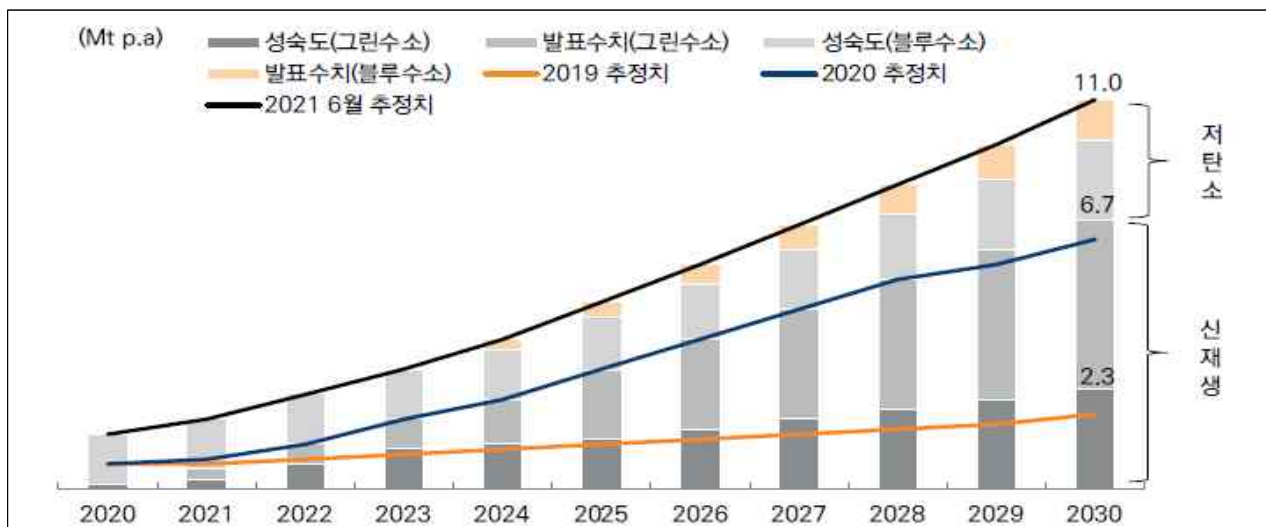
출처: 수소생산에서 활용까지, 수소경제에서 찾는 기회, 삼성KPMG, 2021

2. 청정수소

1) 글로벌 청정수소 시장규모 및 전망

■ (현황) 글로벌 청정수소 시장은 현재 기준 미미한 수준이나 높은 성장 잠재력 가짐

- '20년 수소 생산 시장은 약 1억 톤 수준으로 전 세계 1차 에너지 시장의 2% 수준
 - 2%의 시장도 대부분 그레이수소로 구성되어 있으며, 수소 중 청정수소 생산만 분석하면 블루수소 연간 1백만 톤, 그린·청록수소 시장은 논의하기 어려운 규모
 - 하지만, '25~'30년 청정수소 생산계획을 통해 확인된 규모는 '30년 1,100만 톤 이상으로 추정되므로 청정수소 생산을 위한 기술개발이 절실한 실정



출처: The Hydrogen Council, 미래에셋증권 리서치센터

[그림 Ⅲ-20] 세계 청정수소 생산 시장

- 청정수소 단가의 하락과 화석연료의 고갈 등으로 인해 청정수소와 그레이수소의 교차가 이루어질 것이라 예상
 - 그레이수소 단가는 '30년 1~1.5달러/kg 수준으로 현재 수준을 유지하거나 증가 예상
 - ※ 그린수소 단가는 그린에너지 가격 하락 및 수전해 장치 대량생산 등에 따른 생산가 하락, 정책적 지원 영향 등으로 인해 3~8달러/kg에서 1~3달러/kg 수준으로 크게 하락할 것으로 예상
- 청록수소는 시장은 2023~2030년 동안 연평균 214%~215.2%* 이상의 성장을 전망
 - 2022년 USD 1670만 달러에서 2030년까지 거의 USD 162706.96 MN의 시장 규모에 도달할 것으로 추정

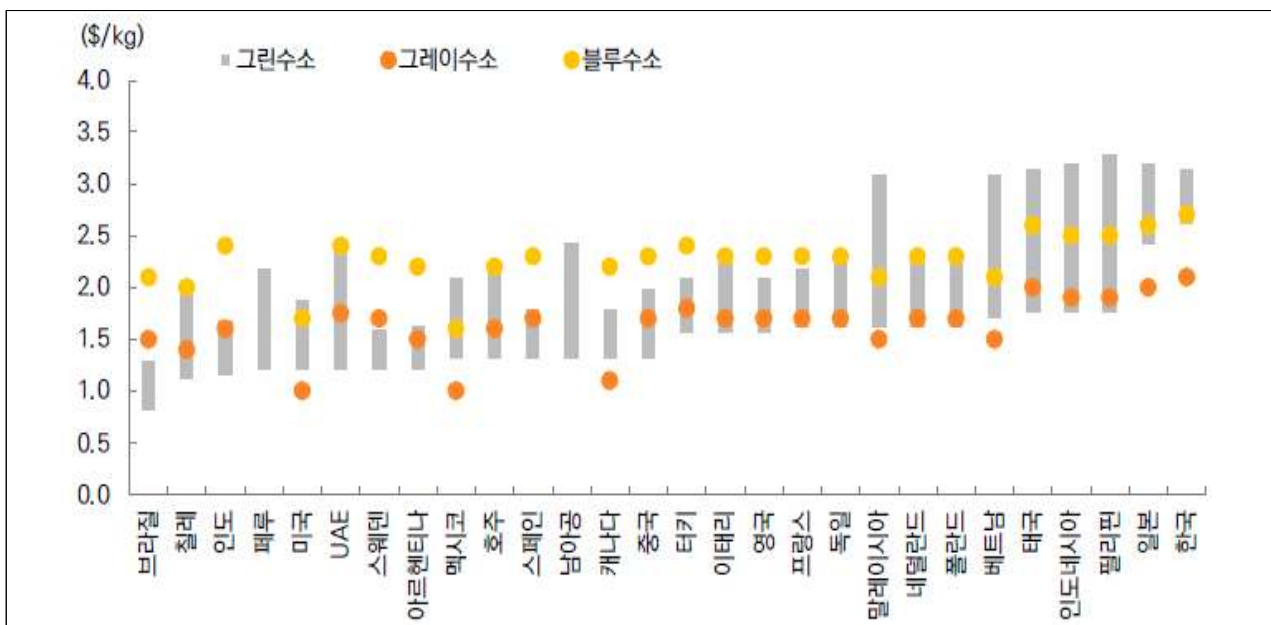
※ Global Turquoise Hydrogen Market Research Report - Industry Analysis, Size, Share, Growth, Trends and Forecast 2023 to 2030(Value Market Research, 2023) 215.2% 성장 전망

- * Feedstock : Renewable Electricity and Natural Gas; and process: Methane Pyrolysis and Molten Salt Pyrolysis – Global Industry Analysis, Size, Share, Growth, Trends, and Forecast, 2023-2031(Turquoise Hydrogen Market, 2023) 214.0% 성장 전망



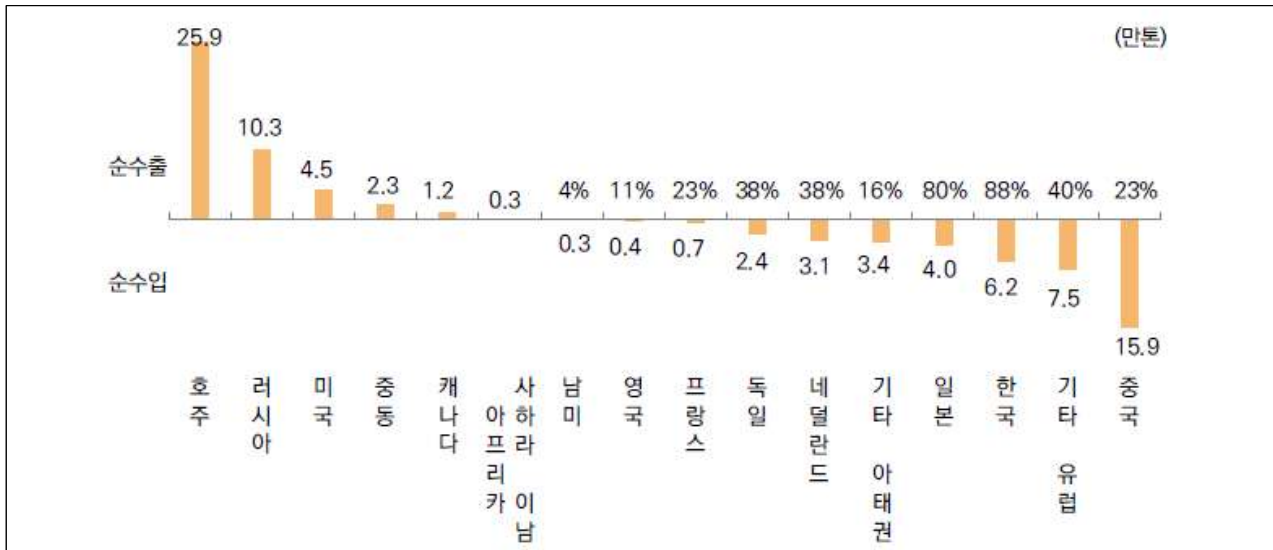
[그림 III-21] 글로벌 청록수소 생산 시장

- 재생에너지 자원량 및 지리적 요건의 차이로 인해 지역별 수소 밸런스에 영향을 미칠 것으로 전망
 - 재생에너지 자원이 풍부한 호주, 중동 등이 수소 수출국화, 수소자원이 부족하지만 높은 수요와 기술을 보유한 한국, 일본 등이 수소 생산국으로 변모가 예상



출처: Deloitte, 미래에셋증권 리서치센터 * 수소단가(LCOH: Levelized Cost of Hydrogen)

[그림 III-22] 수소생산 방식에 따른 주요 국가별 2030년 LCOH* 전망



출처: Deloitte, 미래에셋증권 리서치센터 *수소단가(LCOH: Levelized Cost of Hydrogen)

[그림 III-23] 수소생산 방식에 따른 국가별 수소 2050년 수소생산 밸런스 전망

■ 각국의 청정수소 산업생태계를 구축할 수 있도록 국가 단위에서 전략 구축 및 시행

○ (영국) HyNet North West 시행

- 수소 에너지 및 탄소 포집, 사용 및 저장 (CCUS) 프로젝트, 산업/가정/운송에서 배출되는 탄소 저감, 지역 경제성장 지원
- 2030년까지 최소 1개의 저탄소 클러스터를 구축하고, 2040년까지 세계 최초의 순제로 탄소 산업 클러스터를 구축 전략 목표 계획

○ (미국) 지역 청정수소 허브 개발 지원

- 청정수소의 생산, 처리, 전달, 저장 및 최종 사용과 관련하여 미국 전역에 걸쳐 최소 4개의 청정수소 허브 개발을 지원하기 위해 80억 달러를 지원 계획

○ (네덜란드) Gasunie Hydrogen Backbone 구축

- 수소 백본을 통해 산업, 수소 저장 시설 및 생산 현장은 물론 주변 국가를 연결하는 국가 주요 수소 네트워크 구축을 계획
- 수소 백본을 활용해 무탄소 수소 공급과 수요를 연결하는 국가 네트워크 구축, 5개의 산업 클러스터의 상호 연계 및 국외 수소 저장 시설과도 연결 예정

○ (캐나다) Hydrogen City 기획

- Canadian Hydrogen and Fuel Cell Association (CHFCA)에서 UN World Urbanization Prospects 2018 자료를 분석한 바에 따르면, 세계 인구의 절반 이상이 도시에 거주하며, 이는 2050년까지 67억 명으로 증가하여 세계 인구의 약 68% 전망

2) 국내 청정수소 시장규모 및 전망

■ 국내 청정수소 산업생태계는 기업, 정부가 협력하여 구축

- 국제적 에너지 변화에 맞추어 국내 기업들도 수소 산업의 전환 노력
 - 한국은 그린에너지 자원 부족으로 탄소 중립을 위해 수소가 절대적으로 요구되어 '50년 탄소중립을 이루기 위해 수소에너지 전체의 80%를 청정수소로 전환 예정

〈표 III-37〉 국내 청정수소 기업 현황 및 전략

구분	내용
SK	○ 청정수소를 보완하기 위해 블루수소와 청록수소, 나아가 그린수소까지 분야 투자 확대 중 ○ 탄소를 더욱 효과적으로 저장하는 고체탄소 기술 계획을 밝히고, 관련 업체인 Monolith에 지분 투자 등 활발한 투자 진행 ○ 청록·블루수소는 아직 기술적·경제적으로 완성된 기술은 아니지만(2025년부터 청록수소 시현 예정) 친환경으로의 전환이 필요하여 이 분야로 지속적 확장
현대중공업	○ 해상발전과 탄소포집·저장을 중점으로 한 수소생산 인프라(청정수소 플랜트), 해상운송 및 활용 등 업스트림과 미드스트림을 아우르는 밸류체인 구축 중 ○ 그룹의 특성상 수소 운송에 중점을 두고 투자
한국전력	○ 정부의 탄소중립선언과 제3차 에너지기본계획에 따라 재생에너지 발전비율 30~35%로 증가시킬 예정 ○ 울산과 나주에서 MW급 수소생산 실증 연구하여 수소에 CO₂를 합성시켜 메탄을 생산할 계획
한국가스공사	○ 회색 가스 중심의 수소 사업 전략과는 달리 청정수소로의 전환을 이루기 위해 투자 ○ 청정수소 수입을 적극 도모(40년까지 121만 톤)하여 재생에너지 자원량의 한계를 극복하기 위한 전략 발표

출처: 글로벌 수소 경제, 미래에셋증권 리서치센터, 2021.10

3. 고체탄소

1) 글로벌 카본블랙 시장 규모 및 전망

■ (생산) 전 세계 카본블랙 시장은 '22년 약 178억 달러에서 '27년 234억 달러 규모로 연평균 5.5%씩 꾸준한 성장 전망

※ 생산량은 '22년 1,380만 톤에서 '27년 1,600만 톤으로 연평균 3.3% 증가 예상

- 카본블랙의 생산은 대부분 퍼니스 블랙 공정에 의해 이루어지고 있으며, 평균가격은 톤당 1,260달러 선에서 형성
- 타이어 및 산업용 고무, 플라스틱, 페인트 및 잉크 등에 광범위하게 활용
 - (자동차 타이어) 최대 수요처인 자동차산업 내 타이어의 강도와 내구성을 높이기 위해 타이어의 측벽, 내부 라이너 및 트레드에서 카본블랙 활용 확산
 - (산업용 고무) 공기 스프링, 개스킷, 호스, 벨트 등을 포함한 여러 산업용 고무 제품 제조시 카본블랙에 대한 수요 증가
 - 플라스틱 제품의 전도성 및 자외선 보호 등 기술적 요구, 칠흑색 도료 생산 및 색상 안정성, 열 안정성 등을 제공하기 위한 도료 및 코팅 산업에 사용

■ 전기전도성이 높은 특수 카본블랙의 시장은 '20년 약 24억 달러에서 '25년 28.5억 달러로 연평균 4.5%씩 성장 전망

※ 특수 카본블랙의 생산량은 '20년 120만 톤에서 '25년 180만 톤으로 연간 4.1%씩 성장 전망

- 특수 카본블랙은 전도성 플라스틱 첨가제, 배터리전도체, 특수 잉크 및 코팅 등에 사용
- 특히, 이차전지(전기자동차, 신재생에너지 산업 등)의 매우 높은 성장성으로 인해 고성능 전도성 탄소 소재 필요성이 높아지며 시장 규모 확장 중

※ 아세틸렌블랙의 일종인 '덴카블랙'을 판매하는 덴카(Denka)의 22년 3월기 3분기 보고서에 따르면, xEV* 관련 아세틸렌블랙 판매 신장으로 전년 동기 대비 매출액 16.8% 증가, 영업이익 전년 동기 대비 35% 증가

* xEV: 전기차(EV), 수소연료전지차(FCEB), 플러그인 하이브리드 차(PHEV) 등 전기 구동차 일체

- 특수 카본블랙은 범용 카본블랙과 다르게 ASTM 규격이 없어 적용되는 같은 특수 카본블랙이라 하더라도 제조기업마다 물성이 다름
- Cabot(미국, 중국 공장), 미쓰비시화학-Ketjen black(일본), Denka그룹- Denka black(일본), Degussa(독일), OCI(한국, CCC인수) 등에서 주로 생산

- 국내에서는 플라스틱, 잉크 용도의 저부가가치 특수 카본블랙은 일부 생산되고 있으나 도전재 등 고부가가치 특수 카본블랙은 생산되지 않아 전량 수입에 의존

※ 특수 카본블랙의 평균가격은 톤당 2,020불 정도이며, 배터리용으로 사용되는 특수 카본블랙은 약 4,020불로 약 2배 더 비쌈

〈표 III-38〉 응용시장별 특수 카본블랙 시장 규모

Application	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	CAGR ('19-'27)
o Plastics	1,419.9	1,478.5	1,540.9	1,606.7	1,676.3	1,749.4	1,825.9	1,905.6	1,988.3	2,074.1	4.3%
- Conductive&ESD*	287.4	298.6	310.5	323.0	336.3	350.2	364.8	380.0	395.6	411.8	4.1%
- Wires&Cables	923.7	963.2	1,005.5	1,050.1	1,097.5	1,147.5	1,200.0	1,254.8	1,311.8	1,371.1	4.5%
- Others	208.7	221.9	230.3	239.2	248.3	257.7	267.3	277.4	287.6	298.1	3.8%
o Battery Electrodes	365.3	382.8	401.6	421.5	442.7	465.2	488.9	514.2	541.2	570.1	5.1%
- Li-On Battery Electrodes	156.9	164.6	172.9	181.7	191.0	200.9	211.4	222.6	234.5	247.2	5.2%
- Others	208.3	218.2	228.7	239.8	251.7	264.3	277.5	291.7	306.7	322.9	5.0%
o Paints&Coatings	88.3	92.4	96.8	101.5	106.4	111.7	117.2	123.0	129.0	135.2	4.9%
- Inks&Toners	153.6	160.3	167.4	175.0	183.0	191.5	200.5	210.0	219.9	230.1	4.6%
- Others	62.7	65.1	67.7	70.4	73.2	76.2	79.4	82.7	86.2	90.0	4.1%
Total	2,089.8	2,179.2	2,274.4	2,375.0	2,481.7	2,593.9	2,711.8	2,835.5	2,964.6	3,099.5	4.5%

* ESD : Electro Static Discharge(정전기 방전)

출처 : Special carbon black market, 2021

■ 카본블랙 시장규모가 성장 예측에 따라, 선두그룹은 지속적인 투자로 설비 신규 확장 및 합병을 통한 생산규모 확대 추진

- (Cabot Corporation) Tokai Carbon Group을 인수하여 중국 톈진에 있는 카본 블랙 제조 시설을 구매
- (Orion Engineered Carbons) 이탈리아에 특수 카본 블랙 제조를 위한 새로운 생산 라인 연산(年産) 2.5만 톤을 목표로 개설, 미국의 카본 블랙 생산 능력을 '22년 중반까지 연산 약 3만 톤 증가를 추진하였고, 2021년에는 고성능 특수 카본 블랙 생산을 위해 중국에 두 번째 공장 건설 추진
- (PCBL) 타밀나두에 공장 확장을 통한 연산 147만 톤의 카본블랙 생산 캐퍼 확보 추진
 - 2021년에는 구자라트에 3.2만 톤 용량 확장 및 인도에서는 60만 톤 이상 증가
- (Tokai Carbon) 캐나다에서 연산 0.9만 톤의 써멀 카본 블랙 공장을 확장하여, Thermax 중열 카본 블랙을 생산

■ 선진국 중심의 신규 생산시설에 대한 CO2 발생 절감을 위한 규제 강화로 카본블랙 생산법에 대한 개선 요구

- 카본블랙은 오일 및 탄화가스를 불완전 또는 열분해하여 생산하며, 1톤 생산시 2.6톤의 CO2가 발생하는 등 제조 과정의 CO2절감 필요성 대두
- 글로벌 카본블랙 생산업체는 탄소중립 실현을 위한 노력에 동참하여 탄소 배출 감축 중
 - (Carbot) 텐진의 카본블랙 생산 공정에서 발생한 여열을 회수·재활용을 통해 탄소 배출을 약 22만8천t가량 감소 목표치 달성
 - (Birla carbon) 순환성 및 수명 주기 평가(LCA) 접근 방식을 통해 2050년까지 탄소 배출량을 넷제로(net-zero) 달성 추진
 - (Orion Eng. Carbon) 2022년부터 유럽에서 생산되는 모든 카본블랙에 대해 이산화탄소(CO2) 할증료 시행 추진
 - (Tokai Carbon Group) 2030년 이전에 CO2 배출량을 25%(VS 2018) 줄이고 2050년에는 탄소 중립을 달성 추진을 위해 공정 효율화, 신재생에너지 적용, 새로운 대체 원료 공급 노력
 - (OCI) 카본블랙 공정에서 발생하는 폐열의 회수 및 재사용을 통한 에너지 절감 등 추진

■ 카본블랙의 활용 분야가 넓어지며 특수 카본블랙 시장은 국가별로 꾸준한 성장세를 보이며, 가격 경쟁력을 지닌 아시아 중심의 제조시장 주목

- (미국) 스페셜티 카본 블랙 시장은 2027년까지 5억4660만 달러에 달해 '19~'27년 연평균 4.6%의 성장률을 보일 것으로 예상
 - 미국의 경제 회복과 자동차 및 상업용 건물 활동의 확대에 의해 페인트 및 코팅, 성형 플라스틱, 전선 및 케이블의 제품 수요가 촉발
 - 전기차 및 전자기기의 전력수요 증가로 경량화, 안전성 이슈를 충족하는 리튬이온전지 수요가 증가하며 특수 카본블랙 시장의 수혜 전망

〈표 III-39〉 북미 주요국 특수 카본블랙 시장 규모 전망

(단위: 백만 달러, %)

국가명	2018년	2019년	2020년	2021년	2022년	2023년	2024년	2025년	2026년	2027년	CAGR (‘19~’27)
미국	241.8	252.3	263.6	275.5	288.1	301.5	315.5	330.2	345.5	361.6	4.6%
캐나다	128.2	133.3	138.7	144.4	150.4	156.8	163.4	170.4	177.6	185.1	4.2%

출처: Global Specialty Carbon Black Market Transparency, Market Research, 2019

- (독일) 전기차의 인기로 전도성 플라스틱 및 리튬 이온 배터리 시장이 성장하며 독일의 시장규모는 '27년 기준 1.6억 달러에 달하여 유럽 내 가장 높은 비중을 보일 것으로 분석
 - 반면 EU 전체 시장은 '12년에 도입된 환경, 에너지 효율, 안전한 타이어 제조에 대한 규제가 시행되어 '27년까지 글로벌 시장점유율은 0.3% 감소할 것으로 예상

〈표 III-40〉 유럽 주요국 특수 카본블랙 시장 규모 전망

(단위: 백만 달러, %)

국가명	2018년	2019년	2020년	2021년	2022년	2023년	2024년	2025년	2026년	2027년	CAGR ('19~'27)
독일	105.5	110.3	115.4	120.8	126.5	132.6	139	145.7	152.8	160.1	4.8%
영국	34.7	36	37.4	38.9	40.4	42	43.7	45.5	47.3	49.2	4.0%

출처: Global Specialty Carbon Black Market Transparency, Market Research, 2019

- (중국) 특수 카본블랙 세계 최대 생산국이자 소비국으로 '27년 8.2억 달러 시장규모 달성 전망
 - 중국의 자동차 부문에 대한 투자 증가로 인해 아시아 내 약 50% 시장점유율 차지
 - ※ 차량 수요의 가속화는 타이어 및 고무 기반 제품의 제조 증가로 이어져 카본블랙 수요 확대에 연결
 - 중국과 인도를 중심으로 형성된 낮은 가격과 높은 수요·공급을 발판으로 아시아의 특수 카본블랙 시장 고성장

〈표 III-41〉 아시아 주요국 특수 카본블랙 시장 규모 전망

(단위: 백만 달러, %)

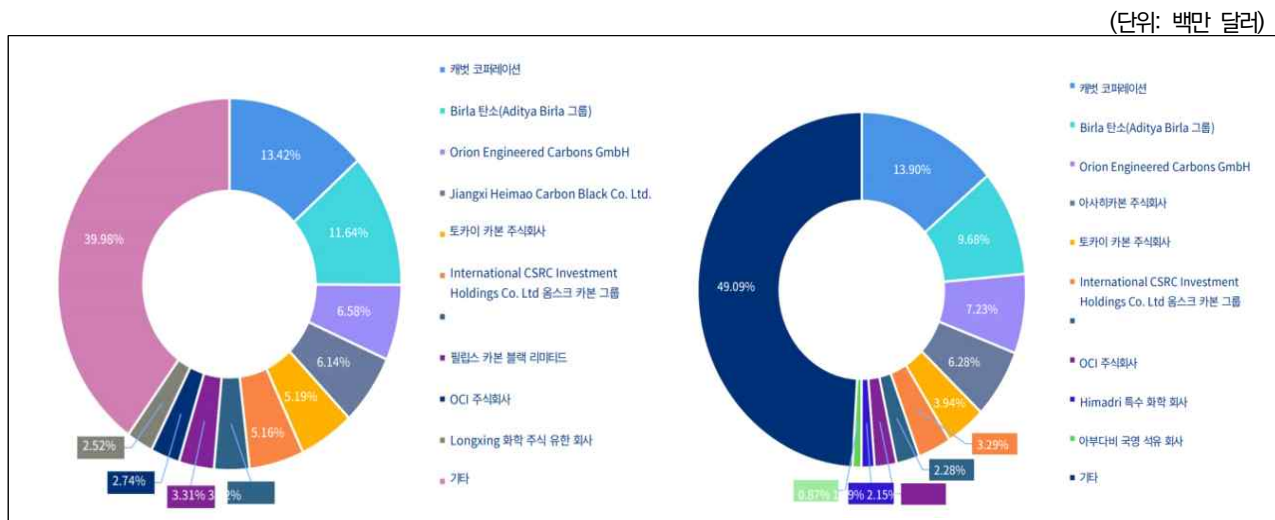
국가명	2018년	2019년	2020년	2021년	2022년	2023년	2024년	2025년	2026년	2027년	CAGR ('19~'27)
중국	548.7	572.9	598.7	625.9	654.6	684.8	716.4	749.5	784.1	820.3	4.6%
인도	160.5	168.4	177	186	195.6	205.7	216.3	227.5	239.3	251.7	5.2%

출처: Global Specialty Carbon Black Market Transparency, Market Research, 2019

2) 국내 카본블랙 시장 규모 및 전망

■ 국내의 카본블랙 시장은 국내 기업 OCI를 비롯한 국외 우수 카본블랙 기업이 진출하여 타이어 및 고무용 카본블랙에 주력

- 국내의 카본블랙 생산 규모는 세계 6위에 해당하며, OCI, Birla Carbon, Orion Eng, Tokai carbon 등이 국내에서 카본블랙을 생산 중
 - 2021년 SK도 Monolith의 카본블랙과 수소 동시생산 기술에 투자, 국내에 생산계획 수립
- 국내의 카본블랙은 타이어 및 고무제품용이며, 국내 자동차 생산량의 증가 예상에 따른 카본 블랙의 수요도 증가 예상
 - 고부가가치인 전기전도성을 갖는 특수 카본블랙은 전량 수입에 의존하는 상황
- 플라스틱, 잉크 용도의 저부가가치 특수 카본블랙은 일부 국내 생산중이나, 전기전도성을 갖는 도전재인 고부가가치 특수 카본블랙의 생산은 전무
- 국내 최대 카본블랙 제조 기업인 OCI는 글로벌 기업 중 9위 (특수 카본블랙 제조사 중 8위)의 규모에 달하나 2~3%대 시장 점유율 확보에 불과



출처 : Asia Pacific Carbon Black Market, Graphical Research, 2021

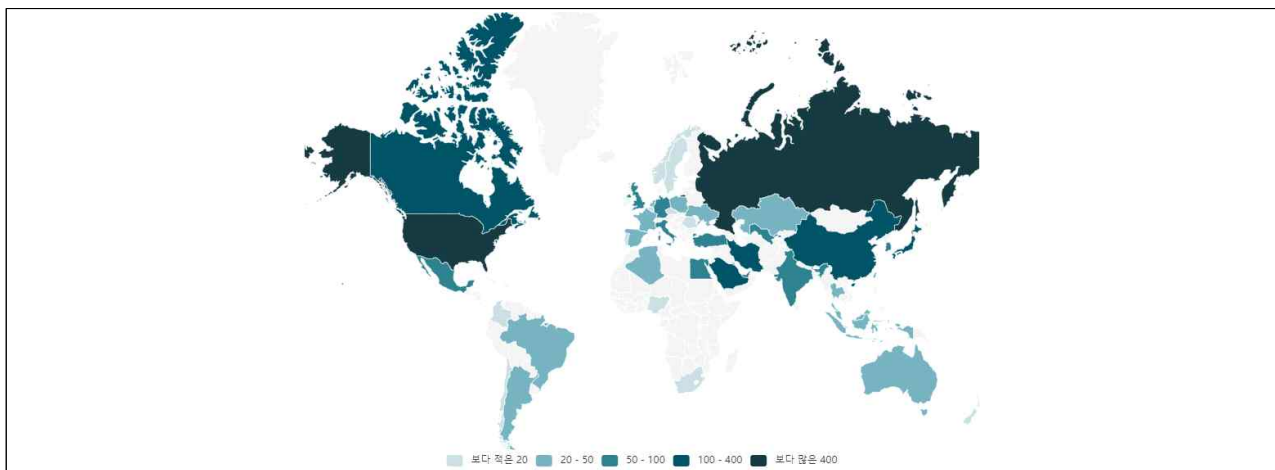
[그림 III-24] 카본블랙 제조 기업 및 특수카본블랙 제조기업 시장 점유율

4. 천연가스

1) 해외 천연가스 시장규모 및 전망

■ '21년 세계 천연가스 시장은 소비기준 4.8% 성장하였으며, 러시아 사태 및 글로벌 액화천연가스(LNG) 공급 문제 등 차질 발생⁷⁾

- 21년 기준, 천연가스 소비는 G7(미국, 영국 등)에서 안정적이며 BRICS국가(브라질, 러시아 등) 내 급증 추세

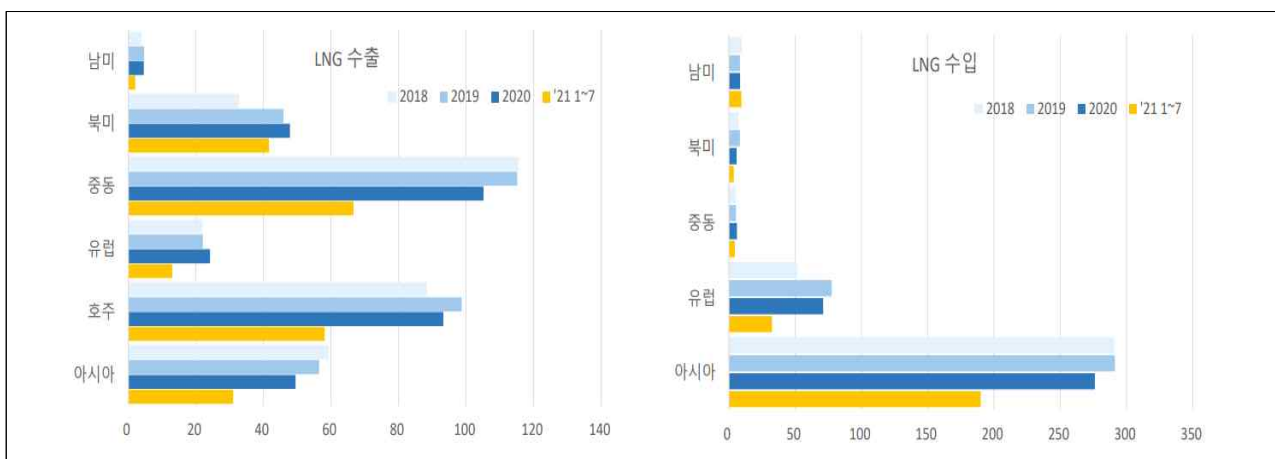


출처 : 2021년 세계 에너지 및 기후 통계(Enerdata, 2022)

[그림 III-25] 국가별 천연가스 생산량

- 천연가스는 파이프라인 공급(PNG) 및 액화-해상수송 공급(LNG) 형태로 분류되며, 과거 PNG 중심의 천연가스 거래에서 LNG중심의 교역 확대 등 천연가스 생산방식의 다변화 추진

※ 러시아-우크라이나 침공에 따른 에너지 안보위기로 가격 상승 및 LNG 확보 경쟁이 치열해지고 있으며, 북미국가 들을 신규 LNG 설비투자 및 프로젝트 추진을 계획



출처 : 최근 LNG 가격상승 요인 분석 및 중단기 전망, Bloomberg(NICE, 2021)

[그림 III-26] 국가별 LNG수출 및 수입 추이

7) Gas Market Report, Q1-2022including Gas Market Highlights 2021(IEA, 2022)

- 각국의 주요 발전, 산업용 에너지원으로 LNG 중심의 수요가 증가하고 있으나, LNG 공급 중단사태, 신재생에너지 기조 등으로 공급 과잉 우려 대두

※ 2년간('20-'21년) 알제리(Arzew의 터빈 손상), 노르웨이('20년 화재 발생 Hammerfest LNG 보수), 호주(Prelude LNG에서 기계적인 문제와 파업 발생), 미국(Freeport LNG 수출터미널 화재) 등 LNG 생산·공급 문제 지속 발생

〈표 III-42〉 천연가스 생산 및 수요 공급(2013~2021년)

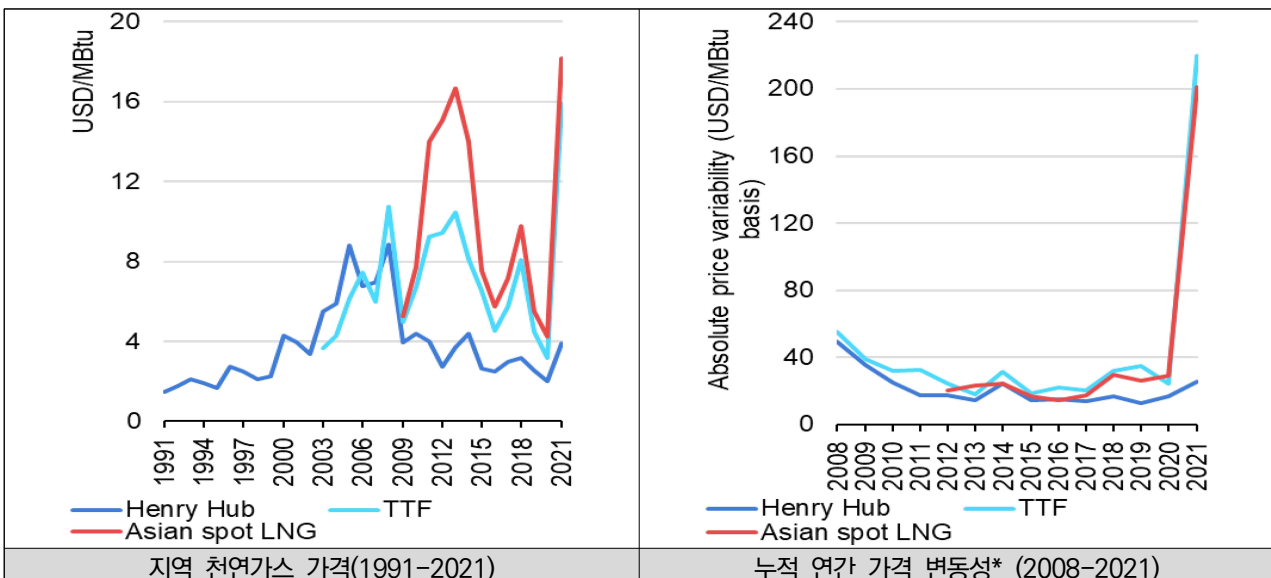
연도	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	연평균 증가율(%)
생산	3,391	3,438	3,515	3,580	3,657	3,937	4,016	3,976	4,167	2.61
수요	3,372	3,380	3,442	3,502	3,575	3,952	-	-	-	3.23
차이	19	58	73	78	82	-15	-	-	-	-

출처: 세계 천연가스 수급 현황 및 가격 전망(세계에너지지정인사이트, 2016), 세계에너지 및 기후통계(Enerdata, 2022) 인용

- 전 세계적으로 천연가스 가격이 상승하였으며, 특히 러시아의 우크라이나 침공 이후 유럽 지역 사상 최고 수준 기록

※ 유럽-러시아간 갈등, 탄소중립에 따른 석탄대체수요 증가, 천연가스 규제 등으로 투자유인 축소 등의 구조적 요인도 수급불균형을 심화

- '21년 기준 천연가스 가격은 미국 4USD/MBtu, 유럽 16USD/MBtu, 아시아 18USD/MBtu로 평균 3배 이상 상승
- 최근 10년 미국, 유럽의 경우 천연가스 가격변동성이 사상 최고치인 200 이상에 도달하였으며, 이는 10년 평균 약 25 대비 8배 증가한 수치



출처: Gas Market Report Q1-2022(IEA, 2021)

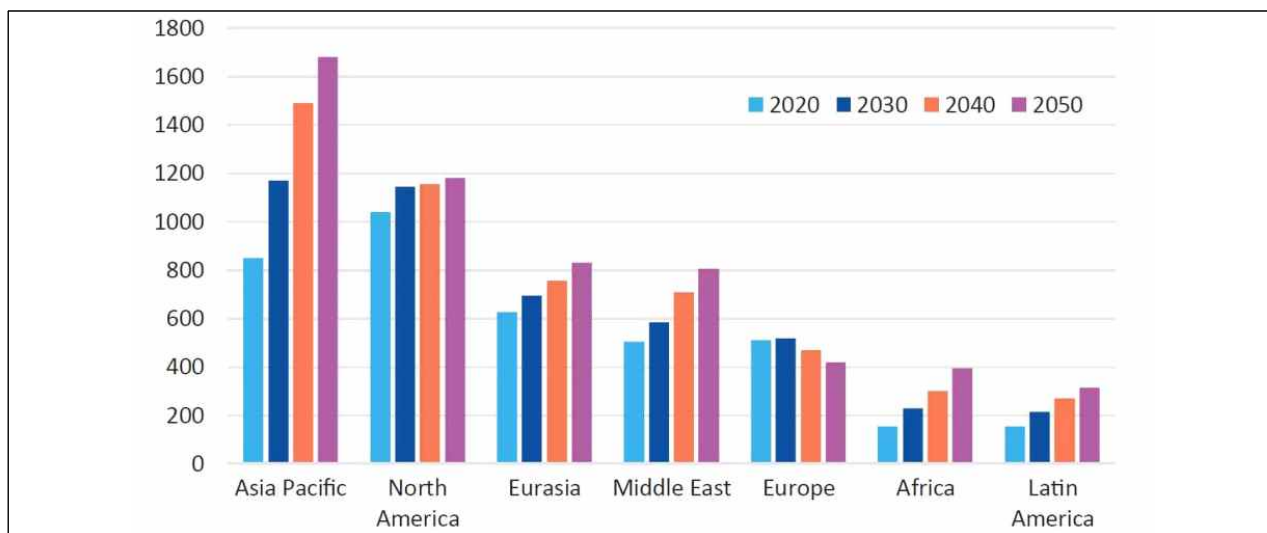
천연가스 가격지표: 미국 Henry Hub, 유럽 TTF

* 일정기간동안의 누적 절대 일일 가격 변동을 의미하며, 주어진 기간 내 정규화된 일일 가격 수익률의 표준 편차

〔그림 III-27〕 천연가스 가격 및 가격변동성

○ 천연가스 수요는 2050년까지 연평균 1.3% 성장이 전망

- (GECF 중립적 시나리오) '20년 세계 천연가스 수요는 3,840bcm에서 2050년 5,625bcm으로 약 46.5% 증가하여 연평균 1.3%의 성장률 예상



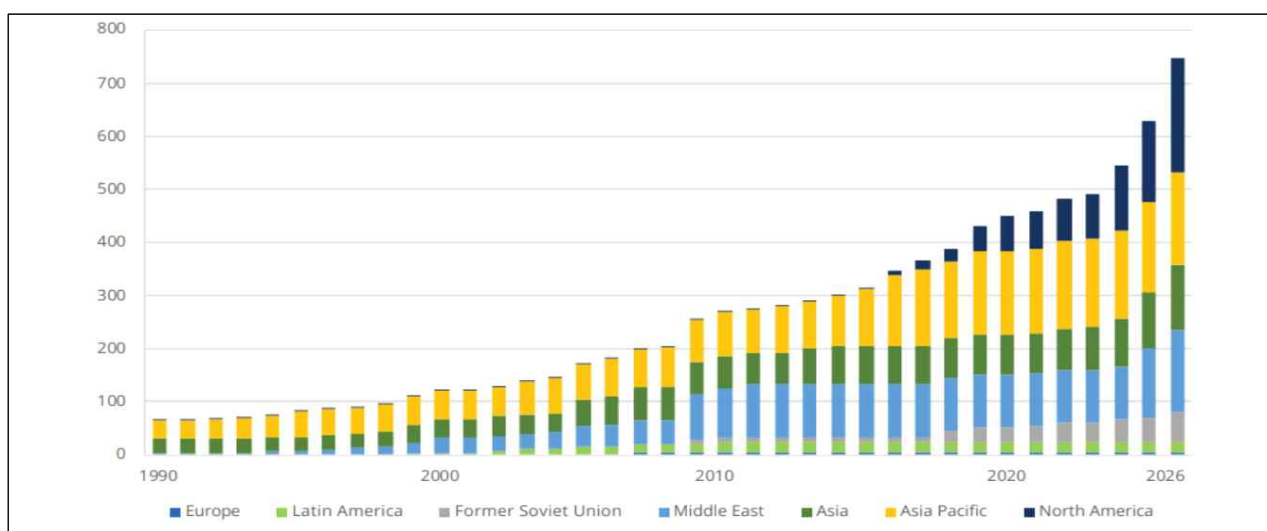
출처 : 세계 LNG산업 및 LNG선 동향과 전망(한국수출입 은행, 2022), Global Gas Outlook Synopsis 2050(GECF, 2022)

[그림 III-28] 국가별 천연가스 수요전망

○ 미국 및 호주를 중심으로 대규모 생산설비 대규모 생산설비 상업가동 제고

- 현재 건설 중이거나 투자결정이 예비된 프로젝트 등을 고려 시 글로벌 천연가스 공급량은 지속적으로 확대 전망

※ 2020년까지 미국의 1세대 LNG 생산 설비의 상업 가동이 마무리되며 단기적으로 성장성이 다소 둔화될 수 있으나, 2021년에 카타르가 세계 최대 단일 비수반 가스전인 North Field의 확장프로젝트에 대한 투자를 결정한 가운데 현재 건설이 진행 중인 미국, 러시아 등의 생산설비가 2025년까지 순차적으로 가동될 예정인 점을 고려 시 중기적으로 공급능력 확대 추세 지속 전망



출처 : 최근 LNG 가격상승 요인 분석 및 중단기 전망(NICE, 2021), World LNG Report(IGU, 2021)

[그림 III-29] 글로벌 LNG액화설비 용량 추이 및 전망

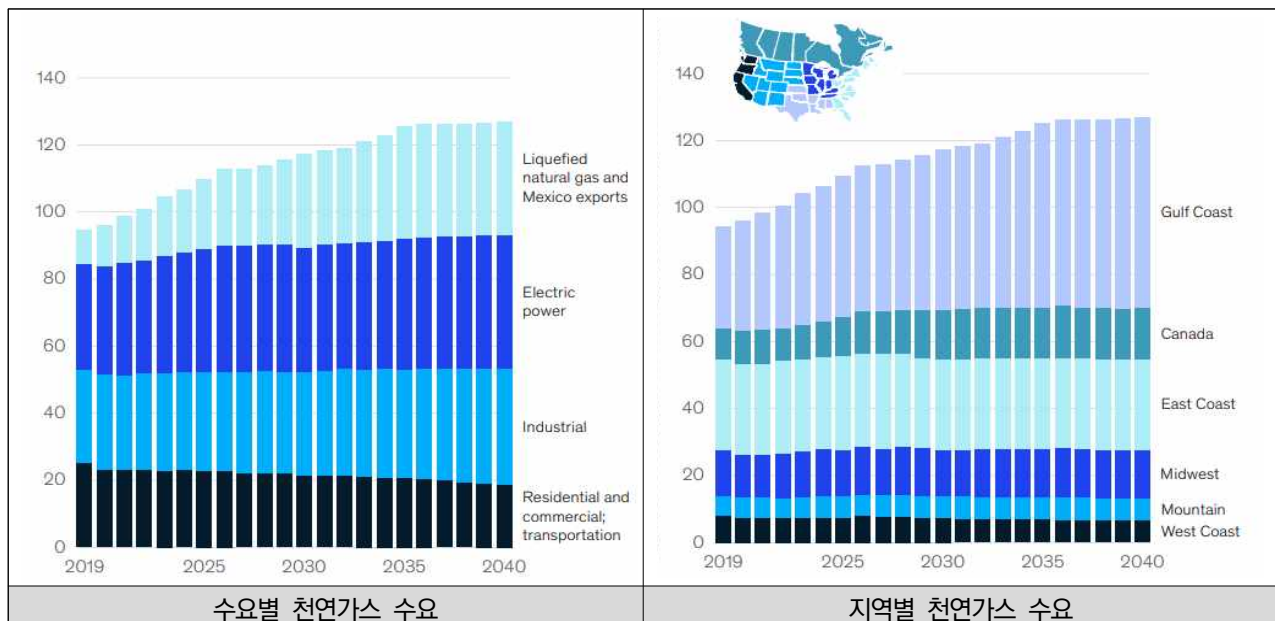
■ 각국의 천연가스 시장은 꾸준히 성장하나 국제 정세 및 유통 환경의 변화에 따른 공급수단 불안정 우려 발생

○ (미국) 높은 매장량을 기반으로 천연가스 수요 및 공급 모두 지속적으로 증가

- '18년 기준 매장량은 '17년 464.3 Tcf에서 9% 증가한 504.5 Tcf로 최고치 수준
- 미국 내 천연가스 수요는 현재 95Bcf/d* 수준이며, 지속적으로 증가하여 125Bcf/d로 증가 전망

* Billion Cubic Feet per Day : 일일 입방 피트

- 미국 내 천연가스 수요의 70%가 LNG 및 멕시코 파이프라인 송출 방식으로 이루어지며, 생산은 크게 캐나다 셰일(Canadian Shale), 스쿱/스택(SCOOP/STACK), 펄미안(Permian) 및 애팔래치아(Appalachian) 산맥 등에 집중



출처 : The future of natural gas in North America(맥킨지, 2020)

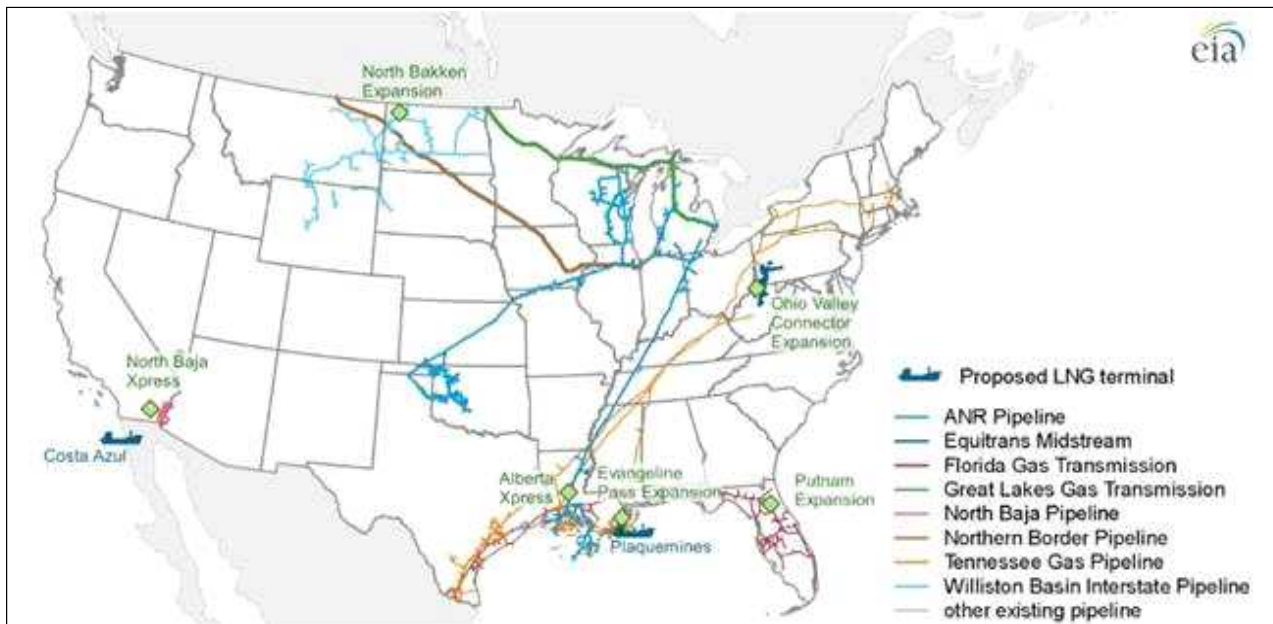
[그림 III-30] 미국 내 수요처 및 지역별 천연가스 수요 예측

- LNG 수출터미널 프로젝트가 활발히 진행 중이며, 총 7개 중 4개가 걸프만 연안에 위치 (LNG 수출터미널 총 처리용량은 8.23Bcf/d)

※ 승인 후 건설 중인 LNG 수출터미널 프로젝트 8건, 건설예정 12건으로 아직 완공되지 않은 LNG 수출터미널까지 추가하면 총 용량은 30.495Bcf/d로 현재 용량의 약 4배 증가 전망

- 미국 연방에너지 규제위원회(Federal Energy Regulatory Commission, FERC)는 '22년 1분기 천연가스 수출 증가를 위해 3건의 파이프라인 프로젝트* 승인
- 신규 천연가스 파이프라인의 용량은 '21년 7.44Bcf/d, '22년 0.43Bcf/d 수준으로 '16년 이후 최저 수준 기록

- * (에반젤린 패스 확장 프로젝트) 루이지애나에 있는 13.1마일의 신규 천연가스 파이프라인 건설, (앨버타 익스프레스 프로젝트) 루지애나 내 기존 ANR 파이프라인을 확장하는 프로젝트, (노스 바하 익스프레스 프로젝트) 미국-멕시코 바하 캘리포니아로 천연가스를 수송하는 기존 86마일의 노스 바하 파이프라인을 확장



출처 : 美, 탄소 수송 파이프라인 프로젝트 활발 기대(Kotra, 2022.06.), EIA(2022.05.)

[그림 III-31] 미국의 주요 천연가스 파이프라인 프로젝트

- 탈탄소 정책 강화로 탄소배출 감축을 위한 기존 에너지 활용 방식의 수소생산, 천연가스 파이프 내 수소공급 테스트 등을 진행

- 미국 에너지기업은 에너지 활용을 위해 수소 생산, 천연가스 파이프 내 수소 공급 테스트 등을 진행하고 청정수소 생산비용 감소를 위한 기술 확보*를 위해 노력

* 수소, 바이오가스, 탄소 제로를 위한 기술 확장을 위한 가수 및 탄소포집·저장과 가스공급원 기술 규모 확대

- Dominion Energy, Sempra Energy 등 최소 24개 미국에너지 관련 기업이 기존 에너지를 활용하기 위해 수소를 생산하거나 천연가스 파이프 내 수소를 넣는 테스트를 진행

※ 거시적 측면에서 2030년 이후부터 천연가스 수요의 유동성, 천연가스 배송이 이루어지는 파이프라인의 대규모 확장이 필요할 것으로 분석

〈표 III-43〉 미국 내 에너지기업의 천연가스 기술개발 동향

구분	내용
Dominion Energy	o 시설 내 5% 수소 혼합 테스트 진행
Sempra Energy, SoCalGas	o 천연가스 운송용 파이프라인 내 수소 혼합을 통한 자사의 파이프라인, 가전제품, 기타 장비 내 영향을 분석하기 위한 파일럿 프로그램 진행

출처: <https://www.h2news.kr/news/article.html?no=9094>

- (캐나다) LNG 수출을 위해 천연가스 매장지 개발 및 터미널 구축 등 파이프라인 구축
 - 캐나다 내 확인된 매장량은 70Tcf로 세계 16위 수준이며, 생산량은 '14년 14.8Bcf/d에서 '18년 16.1Bcf/d으로 연평균 9.3% 증가
 - 천연가스 매장지는 서부에 집중되어 있으며, 앨버타(65.2%), BC(31.8%), 서스캐처원(2.5%) 등 캐나다 총 생산량의 99.5%를 차지
 - 캐나다 내 총 18개 LNG 수출터미널 프로젝트가 진행중이며, BC주 서부해안 13개, 퀘벡 2개, 노바스코샤 3개 등

〈표 III-44〉 캐나다 내 LNG터미널 현황(서부)

프로젝트	위치	규모 (mntpa)	운영기업	사업예산 (Canda\$십억)
Kitimat LNG	Kitimat	10.0	Chevron	15
LNG Canada	Kitimat	12.0	Shell Canada	25-40
Cedar LNG Project	Kitimat	14.5	Haisla Nation	-
Woodfibre LNG	Squamish	2.1	Pacific Oil&Gas	1.6
Triton LNG	Kitimat or Prince Rupert	2.3	AltaGas	-
Kitsault Energy Project	Kitsault	20.0	Kitsault Energy	-
WesPac Marine Terminal	Delta	3.0	WestPac Midstream	-
Steelhead LNG	Sarita Bay	24.0	Steelhead LNG Corp	30
Discovery LNG	Campbell River	20.0	Quicksilver Resources	-
Orca LNG	Prince Rupert	24.0	Orca LNG	-
Stewart LNG	Stewart	29.0	Canada Steward	-
NewTimes Energy	Prince Rupert	12.0	NewTimes Energy	-
Watson Island	-	-	-	-

출처: 북미 에너지시장 환경변화에 따른 우리기업의 진출전략(Kotra, 2020.07.)

〈표 III-45〉 캐나다 내 LNG터미널 현황(동부)

프로젝트	위치	처리용량		사업예산 (Canda\$십억)
		천연가스 (Bcf/d)	LNG(mtpa)	
Energie Saguenay	La Baie, Que	1.56	11.00	7.0
Stolt LNGaz	Becancour, Que	0.07	0.50	0.6
Goldboro LNG	Guyborough County, N.S.	1.40	10.00	8.3
Bear Head LNG	Richmond County, N.S.	1.59	12.00	2-8
AC LNG	Middle Melford, N.S.	2.07	15.50	3

출처: 북미 에너지시장 환경변화에 따른 우리기업의 진출전략(Kotra, 2020.07.)

- LNG Canada 프로젝트가 본격화를 통해 2024년 이후 빠르게 성장 전망

※ '19년 착공 이후 기반공사가 진행 중이며, '24년 완공 예정'

- 초기 수출량은 0.3Bcf/d 수준에서 1차 설비 완공 후 '24년 1.8 Bcf/d까지 급격하게 증가하여 '32년 이후 수출량은 매년 3.7 Bcf/d 규모로 예상

〈표 III-46〉 LNG Canada 프로젝트 수출전망

연도	2024	2025	2026	2032
수출규모(Bcf/d)	0.3	0.9	1.8	3.7

출처: Canada Energy Regulator(CER, 2019). 북미 에너지시장 환경변화에 따른 우리기업의 진출전략(Kotra, 2020.07.)

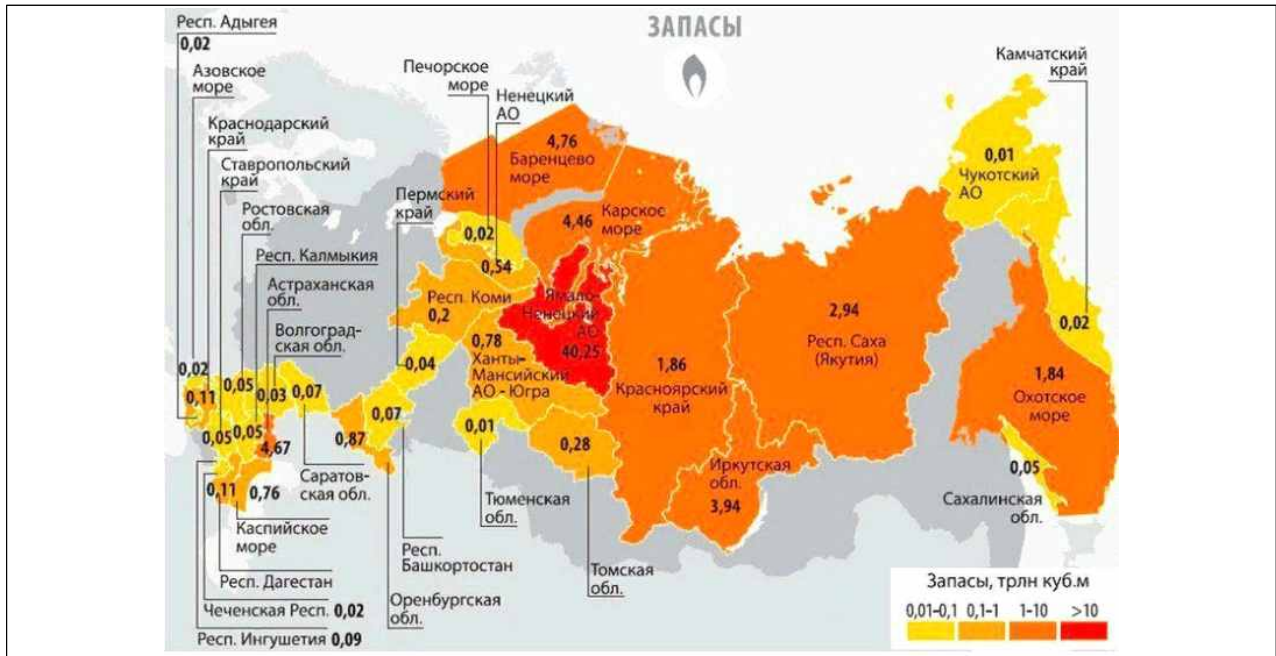
〈 LNG Canada 프로젝트 〉

- (개발지역) BC 북동부 키티마트항(Port of Kitimat, BC로부터 1400km 거리)
- (참여기업) Shell Canada(40%), Petronas(25%), PetroChina(15%), Mitsubishi(15%), KOGAS(5%) 등 총 5개 기업 컨소시엄 구성
- (사업규모) 총 400억 캐나다 달러 투자. 단일 사업으로는 BC 역대 최대 규모 사업
- (건설내용) ①Coastal GasLink 파이프라인 건설(BC 북동부~키티마트항) ②키티마트항 LNG 터미널 건설(LNG 처리장치, 저장장치, LNG 선적설비, 터미널, 철도운송 설비, 물처리설비 등) ③아시아 수출용 LNG 운반선 건조



출처 : 캐나다 에너지 시장정보(Kotra, 2017.12.), 북미 에너지시장 환경변화에 따른 우리기업의 진출전략(Kotra, 2020.07.)

- (러시아) 높은 매장량 보유하여 천연가스 수출량은 많으나 세계 천연가스 시장 내 비중 감소
 - '21년 기준 매장량은 71조 m^3 로 추산되며, 야말-네네츠 자치구 매장량이 40조 2,000억 m^3 로 가장 큰 비중을 차지

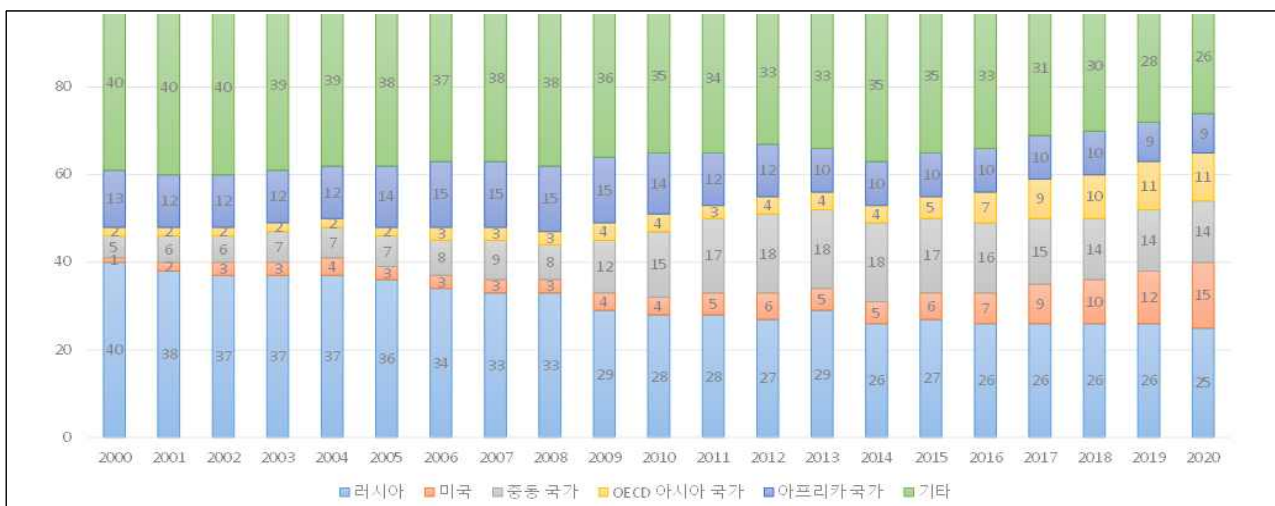


출처 : 2022년 러시아 천연가스 수출 동향(Kotra, 2022.09.)

[그림 III-32] 러시아 지역별 천연가스 매장량

- 전년 대비 6% 증가한 2,040억 m^3 규모('21년)의 천연가스를 수출하였지만, 세계 천연가스 시장 내 러시아의 시장 차지는 25%*로 감소

* 미국, 중동, 아시아 국가의 천연가스 생산량 및 수출량 증가로 20년간 40%를 차지하던 비중이 25%로 감소



출처 : 2022년 러시아 천연가스 수출 동향(Kotra, 2022.09.)

[그림 III-33] 세계 천연가스 시장 내 국가별 비중 (2000~2020년)

- '21년 러시아 LNG 수출량이 396억^{m³}인 점을 감안하여 PNG 수출량(2021년 총 수출량 - PNG 수출량)은 약 1,600억 ^{m³}이었을 것으로 추정

※ 러시아 국영 천연가스 기업인 가스프롬은 공식적 PNG 수출량 미발표

- 국제적 천연가스 가격 상승으로 러시아의 수출액은 전년 대비 2.2배 증가한 555억 달러 기록

※ 국제 가스 가격이 '22년 10월 기준 전년대비 250% 상승하여 러시아의 대유럽 가스공급 제한은 오히려 러시아측에 유리하게 작용 → 각국은 러시아의 석유가스 공급의 외교적 무기화 가능성에 우려 표명

〈표 III-47〉 러시아 LNG 수출액 (2018 ~ 2021년)

(단위: US\$ 백만)

구분	2018	2019	2020	2021	'21년 기준 국가별 비중(%)	연평균증가율(%)
일본	2,914.2	2,792.5	2,216.7	1,747.2	23.87	-15.68
중국	208.9	467.6	670.3	1,368.8	18.70	87.13
프랑스	242.9	564.1	668.8	893.2	12.20	54.35
스페인	57.1	225.8	248.2	589.7	8.06	117.77
한국	698.4	906.7	727.7	545.9	7.46	-7.88
영국	90.1	164.9	335.5	477.5	6.52	74.35
이외*	1,074.3	2,798.5	1,878.6	1,697.9	23.19	16.48
합계	5,285.9	7,920.1	6,745.8	7,320.2	100.0%	11.46

출처 : 2022년 러시아 천연가스 수출 동향(Kotra, 2022.09.), Statista, Ihsmarkit 재가공

※ HS코드 271111 기준

* 네덜란드, 벨기에, 대만, 포르투갈, 리투아니아, 핀란드, 스웨덴, 폴란드, 인도 등

- '22년 7월 기준 러시아-우크라이나 사태 영향으로 러시아의 천연가스 생산량은 전년 대비 12% 감소한 2,624억^{m³}

- '22년 7월 기준 비CIS권 국가* 누적 수출량은 전년 대비 400억^{m³}(34.7%) 감소한 753억^{m³} 수준

* 독립국가연합으로 1991년 소련 해체로 독립한 국가(러시아, 몰도바, 벨라루스, 아르메니아, 우즈베키스탄 등)

- 러-우 사태 영향으로 PNG 수출 비중이 높은 러시아의 파이프라인*을 통한 가스공급이 대폭 감소

* 최근 야말-유럽, 수드자-소흐라노프카, 노드스트림 가스관 순으로 가스 공급량이 대폭 감소

〈표 III-48〉 러시아 내 천연가스 연관 기업 동향

구분	내용
가스프롬	- o '22년 1~4월 시베리아 가스관을 통해 중국으로 가스를 수출하고 지속 증가 - o '노드스트림2*' 완공 단계를 단독적으로 추진
시부르 홀딩스	o 러시아 화학기업인 시부르 홀딩스(Sibur Holdings)와 중국석유화학공(SINOPEC)은 합작법인을 설립해 총 100억 달러 규모의 초대형 에너지사업 추진('20년)

출처: 대러 제재 이후 러-중 경제 협력 확대 동향(Kotra, 2022.07.)

※ 이외 노바텍, 로스네프테가스, 루크오일, 수르구트네프테가스 등

* '21년 9월에 완공되었으나, 유럽 규정(2019년 '자원개발기업의 가스공급 불가' 운영사)에 의해 유럽내 가스공급 미승인

2) 국내 천연가스 시장규모 및 전망

■ 국내 천연가스 수요는 1986년 공급 개시 이후, 1987년 161만톤에서 2021년 3,691만톤으로 연평균 9.96% 증가

- '21년 기준 국내 천연가스는 4,593만톤 도입되었지만, 수요는 3,691만톤 수준으로 연평균 0.66% 감소
- 전 세계적으로 우리나라 LNG도입량은 중국, 일본에 이어 세계 3위를 차지
 - 국내 천연가스 도입은 카타르, 호주, 미국, 오만, 말레이시아 등으로부터 중장기 도입계약을 통해 도입
 - '21년 카타르 1,146만톤으로 가장 많고, 호주 946만톤, 미국 848만톤, 오만 441만톤 등의 순

〈표 III-49〉 천연가스 생산 및 수요 공급(2013~2021년)

(단위: 만톤)

연도	1987	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	연평균 증가율(%)
도입량	117	3,987.6	3,710.7	3,336.6	3,345.3	3,753.7	4,401.5	4,075	3,998.2	4,593.2	11.76
수요량	161	3,867.5	3,517.4	3,145.6	3,277.3	3,216.2	3,621.9	3,359.7	3,236.7	3,691.3	9.96
도시가스	7	1,959.6	1,818	1,692.9	1,738.4	1,839	1,981.3	1,882.3	1,824.7	1,933.1	18.57
발전	154	1,907.9	1,699.4	1,452.7	1,538.9	1,377.2	1,640.6	1,477.4	1,412	1,758.2	7.66

출처: 가스(LNG)수급 동향 및 전망 통계(산업통상자원부, 한국가스공사, 관세청)



출처: 가스(LNG)수급 동향 및 전망 통계(산업통상자원부, 한국가스공사, 관세청)

[그림 III-34] 천연가스 생산 및 수요공급 현황

○ ‘천연가스 발전전략’ 등을 통해 천연가스 산업 경쟁력* 기반의 국내 수요확대 및 신시장 창출과 수출전략 육성 계획을 제시

* 글로벌 LNG 구매력, 배관망 등 인프라, 조선·플랜트 등 연관산업 역량 등

- 전체 천연가스 수요는 ‘14년 36,493천톤에서 ’29년 34,651천톤으로 연평균 0.34% 감소되나, 산업발전을 위한 수요는 증가 전망

• (도시가스용) ‘21년 2,168만톤 → ’34년 2,709만톤 (연평균 1.73% 증가)

• (발전용) ‘21년 2,001만톤 → ’34년 2,088만톤(연평균 0.33% 증가)

※ 천연가스 발전전략(2015), 제9차 전력수급기본계획(2020), 제14차 장기 천연가스 수급계획(2021)

- 국내 공급설비 확충 및 안정적 공급체계 구축을 위한 인프라 확대 계획 제시

• 가스공사 및 민간을 통해 저장 시설, 공급 배관, 기화·송출 설비, 하역·부도 설비 구축

※ (저장 시설) 가스공사 제5기지(당진기지) 건설 및 민간기지 저장 탱크 증설을 위해 ’34년까지 총 1,840만kℓ 저장용량 확보 목표를 통해 도시가스 요금 절감, 민간 과잉투자 방지 및 공동이용서비스를 제공

※ (공급 배관) 신규 수요처 공급을 위한 배관 건설 및 공급배관 안전성 강화를 위해 ’34년까지 천연가스 주배관 789km 추가 건설하여 정보제공 시스템* 도입

* 가스공사 주배관의 계통분석을 통해 권역별 송출 가능한 용량을 직수입자가 사전에 제공

※ (기화·송출 설비) ‘25년까지 시간당 19,920톤의 기화·송출 용량을 확보를 위해 천연가스 사용시설에 안정적인 공급체계 마련하여 출하설비의 민간·공동 이용 확대

※ (하역·부도 설비) ‘25년까지 부도설비 4선좌를 증설하여 총 14선좌 운영하여 가스공사·직수입자 간 하역설비 등 제조시설 공동 이용을 통해 총괄원가를 절감*하여 도시가스 소비자의 편익 증대

〈표 III-50〉 국내 천연가스 공급인프라 현황 및 확대 계획

구분		2021~2025	2026~2027	2028~2029	2030~2034	단위
저장 시설	가스공사 (누계)	108(1,324)	40(1,364)	40(1,404)	40(1,444)	만kℓ
	민간 (누계)	183(336)	-	-	-	
	합계 (누계)	291(1,660)	40(1,700)	40(1,740)	40(1,780)	
공급 배관	증설규모 (누계)	’34년까지 천연가스 주배관 789km 추가 건설 (’20년) 4,945km → (’34년) 5,734km (예정)				
기화·송출 설비	증설규모 (누계)	2,900(19,920)	-	-	-	t/h
하역·부도 설비	증설규모 (누계)	4선좌(14선좌)	-	-	-	선좌

출처: 제14차 장기 천연가스 수급계획(산업부, 2021)

4절 국내외 기술동향

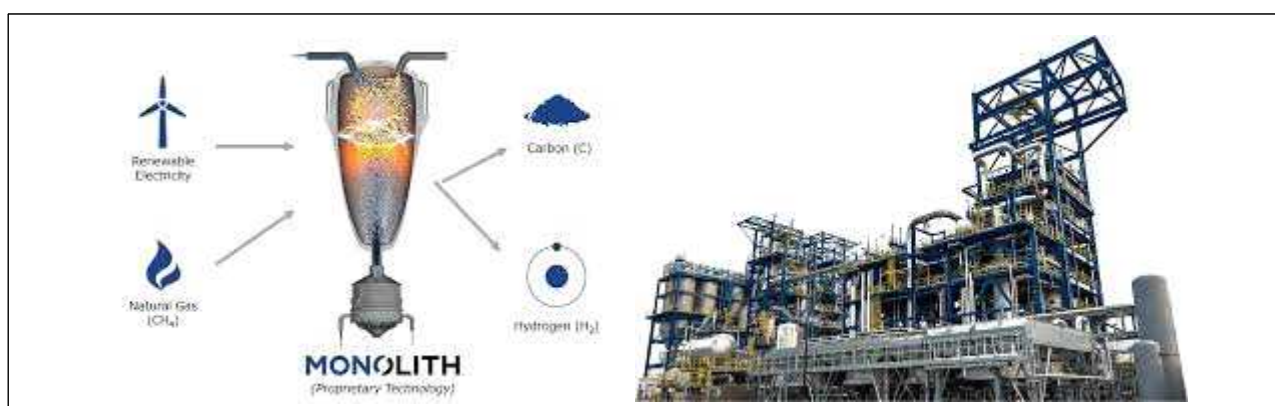
〈표 III-51〉 국내외 기술동향 요약

구분	해외	국내	시사점
청록수소 생산 및 실증 기술 (탄화수소 열분해, 수소 분리·정제 기술)	○ (메탄 직접분해) 모든 기술 플랫폼은 아직 실험 단계, '30년 이전까지 상업적 규모 도달 어려움 ○ (플라즈마 열분해) 저온 플라즈마는 일반적으로 촉매 없이 50% 미만, 고온 플라즈마는 90% 이상의 수소 전환 - Monolith社は 상업적 생산 가능한 수준 ○ (촉매 열분해) 촉매를 사용하여 메탄의 열분해 반응 온도를 낮추고, 탄소 소재 대량생산 목적 ○ 메탄 열분해를 통하여 수소와 탄소 소재를 동시에 생산하는 기술은 미국 Monolith, C-Zero, 독일 BASF, 호주 Hazer Group의 4개사가 주요 기업이 선도 - PSA공정을 통한 고순도 수소 생산기술로 미국, 독일 등이 주도	○ (플라즈마 열분해) 기술특허 점유율은 일본, 미국, 유럽보다 낮은 수준 - 국내 일부 플라즈마 열분해 기술은 파일럿 수준까지 개발되었으나 상비 수명의 기술적 한계로 연구 중단 ○ (촉매 열분해) 메메탄을 기반으로한 수소와 탄소 동시 생산 기술은 R&D 연구 수준 - 단, 에틸렌, 아세틸렌 기반은 탄소나노튜브 생산은 상용화 수준임 ○ SK, LG화학, 금호석화 등의 국내 주요 기업을 중심으로 일부 기술의 상용화 및 청록수소 투자 추진 - 해외 기술 의존 대체를 위해 복합기술을 활용한 수소 분리정제 기술 개발 추진중	○ 일부 플라즈마 열분해 기술은 상업적 생산 가능한 수준 확보 ○ 다만, 대부분 수소 생산효율이 낮고 생산된 카본블랙의 품질이 낮음 ○ 플라즈마 온도 및 촉매 여부에 따른 수소 및 카본블랙 품질 저하 ○ 또한, 생산 단가 저감 영향력 미미 ○ 국내 탄화수소 열분해 등 기술은 관련 분야 R&D만 이루어지는 수준 ○ 다만, 국내 기업 수소 생산시 고체탄소 동시 포집 기술 투자 확산 중
고체탄소 포집 및 전환 기술	○ 카본블랙은 원료와 공정에 따라 구분, 품질에 따라 사용되는 분야, 가격 차이가 크며 최근 TMC, TCD 등을 통해 수소 생산 시 고체탄소를 동시에 포집하는 기술 투자 확산 ○ 현재 기술로는 낮은 수소 생산효율과 생산된 카본블랙의 저품질로 생산단가 저감 영향력 미미 - (Monolith) 연간 수소 5천톤, 카본블랙 1.5만톤 생산, 생산효율은 50%로 낮음 - (Hazer Group) 1일 수소 0.27t, 카본블랙 1t 생산 가능한 상용급 시설 착공	○ 현재 연구실 수준의 수소 생산연구 수행중 - 메탄 분석 외 수전해, 폐플라스틱 활용 등	
청록수소 플랜트 건설 및 운영기술	○ (청록수소 사용량 예측) 대용량 수소공급을 전제로 수요-공급 네트워크 구성 ○ (사용적합성 검증) 시설 계획 및 사후 관리요소의 설계 건전성 ○ (전과정 평가) 유럽연합(EU)에서는 그린수소 인증제도 수행 등 정량적 분석에 따라 청정수소 생산기술의 전과정 분석을 통한 온실가스 배출량을 파악	○ (사용량 예측기술) 일부 연구에서 불확실성을 고려한 비용 최적화 모델 제시 ○ (사용적합성 검증) 수치해석을 통한 위험성 평가체계 정립중 - Hy-KoRAM 프로그램 구축 및 활용 ○ (전과정 평가) 03년 연구 이후 최신 연구 없음	

1. 해외 기술동향

1) 청록수소 생산 주요 플레이어

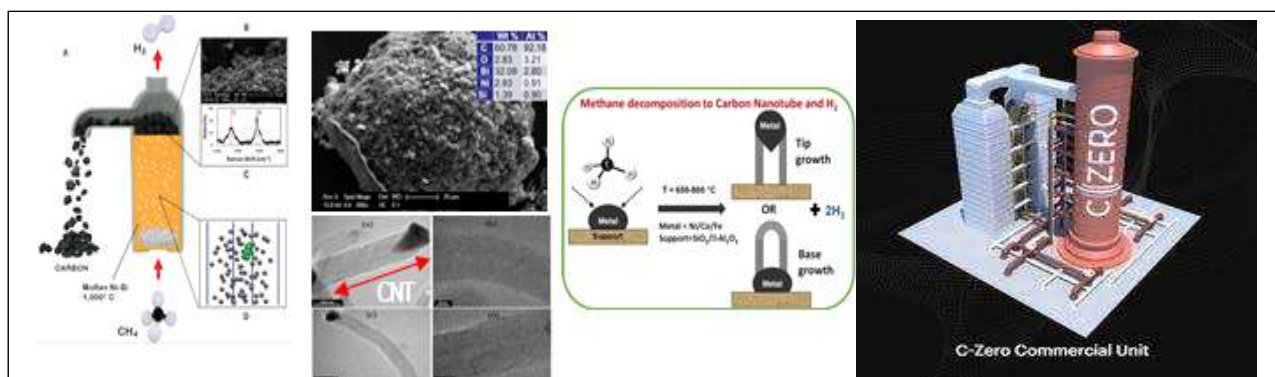
- (Monolith) 현재까지 진행된 청록수소 생산기술 중 가장 높은 TRL 수준 보유
 - 100% 재생전력을 활용한 플라즈마(2000°C) 기반 수소 및 카본블랙 동시 생산
 - 1999년 노르웨이 Kvaerner로부터 기술을 인수, '21년부터 연간 5,000톤의 수소와 연간 15,000톤의 카본블랙을 생산할 수 있는 데모 플랜트 가동
 - 반면, 투입 전력과 원료 메탄의 열량 대비 수소 생산효율은 50%-HHV로 낮은 수준



출처: <https://www.mhi.com/news/201130.html>

[그림 III-35] 미국 Monolith사 청록수소 생산 플랜트

- C-Zero(미국) 촉매 열분해를 통한 청록수소와 카본블랙 생산 중
 - 용융금속(27% Nickel, 73% Bismuth) 상에 메탄 버블링(bubbling)을 통하여 수소와 카본블랙을 동시 생산할 수 있는 기술 보유
 - 미국 DOE의 혁신연구 Arpa-E 프로젝트의 일환으로 10L 규모의 반응시스템 개발 중
 - 다만, 1,000°C 이상의 고온 반응조건과 촉매 공급방식으로 시스템 스케일-업 난항



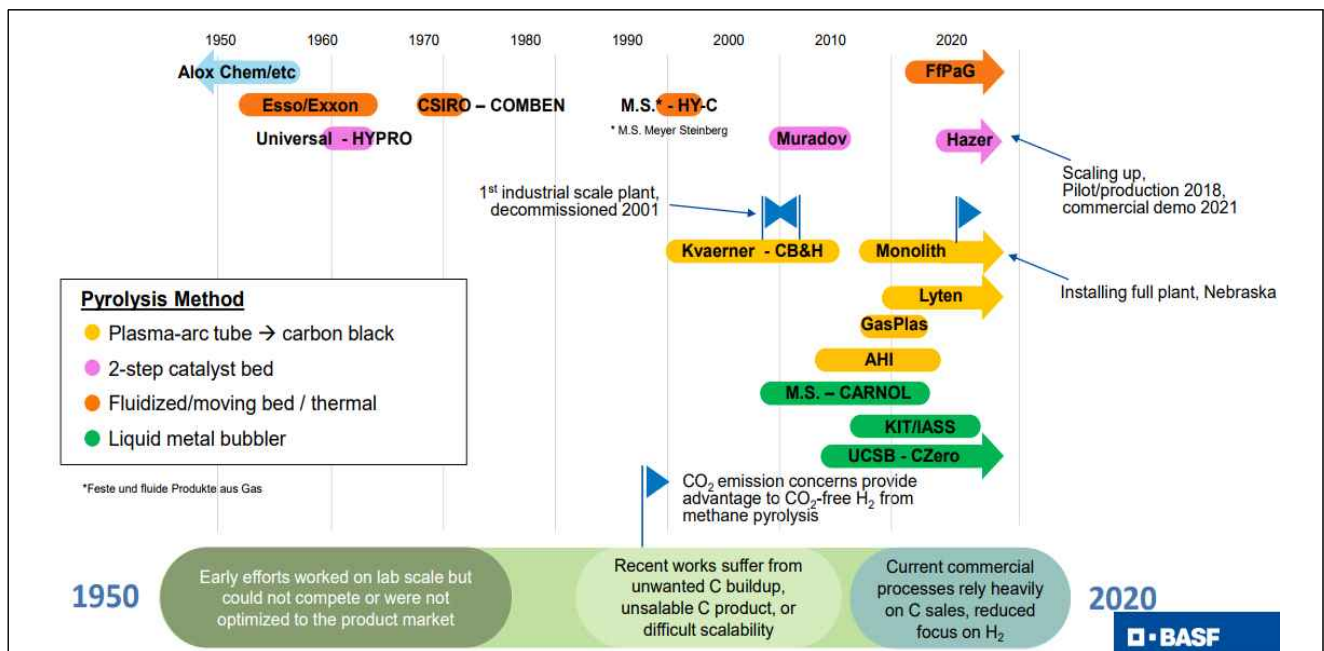
출처: <https://www.sbh4.de/assets/technologies-for-turquoise-hydrogen-production---whl-may-2021.pdf>

[그림 III-36] 미국 C-Zero사 청록수소 생산 플랜트

2) 청록수소 생산 및 실증 기술

(1) 탄화수소 열분해 기술

- 메타 직접분해 반응을 통한 수소 생산 기술은 1950년부터 연구되어 오늘날 일부 기업은 상업적 대량 생산이 가능한 수준으로 발전
- 메탄 및 천연가스를 원료로 탄소소재와 수소를 생산하는 기술은 1950년대부터 연구되어 1990년대에는 전기방전이나 플라즈마를 이용한 메탄 직접분해 기술 활성화
 - ※ Kvaerner(노르웨이)에서 최초로 플라즈마를 이용한 상용 메탄 직접분해 반응공정 개발, 이후 Monolith(미국)가 해당 기술 구입
- 최근, 촉매를 활용한 상용화 기술 개발을 위해 BASF, C-Zero, Hazer Group 등 회사에서 연구 진행 중
- 전 세계적으로 청록수소를 생산할 수 있는 기술력을 보유한 기업 중 상업적 목적으로 대량 생산할 수 있는 기술을 가진 기업은 Monolith가 유일
 - BASF(독일), Hazer(호주), C-Zero(미국) 등의 기업도 다양한 기술들을 통한 청록수소 생산은 가능하나, 상업화 하기는 어려운 수준



출처 : William Daloz, BASF, 2019

[그림 III-37] 메탄 직접분해 기술의 역사

- 현재 플라즈마를 이용한 열분해 기술특허 보유율은 일본 41%, 미국 25%, 유럽 13%인데 반해 한국은 12% 수준으로 열위
 - ※ 한국의 열플라즈마와 아크플라즈마 기술 수준은 독일 기술 대비 80% 수준

■ 메탄 열분해(Methane pyrolysis) 기술의 현황 및 개발 동향

- 메탄 열분해는 주로 대기업이 주도하였으나 기존 개발된 메탄 열분해 기술을 개발 및 배포를 위한 여러 신생 기업이 설립, 기술 수준은 대기업과 스타트업 구분 없이 유사
 - 현재 메탄 열분해는 네덜란드 응용과학연구기구(TNO)와 Karlsruhe 공과대학(KIT)만이 파일럿 설치로 기술을 확장 중
 - 메탄 열분해 기술개발 기관 중 상당수가 중국에 기반을 두고 있어 규모가 확장될 경우 해당 기술이 중국 기업에 흡수될 가능성 농후
 - 가장 상업적인 규모의 플라즈마 기술을 보유한 Monolith도 프로젝트를 둘러싼 세부 사항의 부족과 Kvaerner 공정의 열악한 상업적 이력으로 인해 아직 플라즈마를 메탄 열분해의 대표 기술이라고 부르기 어려움
 - BASF와 TNO는 열분해 플랫폼을 적극적으로 개발하고 있으나 '30년 이전까지 상업 규모의 시설을 달성할 수 없다고 인정, 열분해 기술의 상업화를 목표로 하는 많은 신생 기업들 또한 여전히 상업화 확보하지 못함

〈표 III-52〉 메탄 열분해(Methane Pyrolysis) 기술 구분에 따른 기업 기술동향

기술 구분	기업	내용
열분해 (Thermal)		- 메탄은 1,000~1,500℃ 사이 온도에서 수소와 탄소로 분리 - 열분해의 모든 기술 플랫폼은 아직 실험 단계이며, '30년 이전까지 상업적 규모에 도달하기 어려움
	BASF	1400℃에서 탄소립(입자)이 역류해서 기체와 반대 방향으로 흘러 메탄을 직접 열분해하는 전기가열식 이동층 원자로
	KIT	메탄을 1200℃ 액체형 주석 기포 컬럼 반응기를 통해 분해하여 고체 형태의 탄소를 수소와 분리할 수 있는 기술
	TNO	1,000 °C 이상에서 작동하며 용융염을 사용하여 액체 금속에서 카본 블랙을 분리하는 용융 금속 반응기
플라즈마 (Plasma)		- 메탄 열분해 중 가장 성숙한 기술 단계로 1,000℃(저온 플라즈마, cold plasma)와 2,000℃(고온 플라즈마, hot plasma) 사이 온도에서 메탄가스가 열분해 되는 플라즈마 토치(plasma torch) 사용 - 저온 플라즈마는 일반적으로 촉매 없이 50% 미만, 고온 플라즈마는 90% 이상의 메탄 전환
	Kvaerner (Aker Solutions)	'97년에 고온 플라즈마 기술을 최초 유일하게 상업 규모의 메탄 열분해 시설을 배치한 기업이지만 카본블랙(Carbon black)의 품질이 좋지 않아 2003년에 폐쇄 - 이 시설에서 생성된 수소는 플라즈마 토치(plasma torch)에서 재순환
	Monolith Materials	Kvaerner 기업의 공정을 기반으로 한 고온 플라즈마 기술을 활용하여 '20년 미국에서 첫 데모 시설을 가동하여 1차 생산물로 카본 블랙을 생산
	Gazprom	- 현재 메탄 열분해를 위한 플라즈마 기술을 활용하는 유일한 기업 - 니켈 촉매를 사용한 저온 플라즈마 기술은 80%의 메탄 전환 효율을 보이지만 여전히 실험 단계
촉매 열분해 (Catalytic Pyrolysis)		1,000℃미만의 온도에서 니켈 또는 철 기반의 금속 촉매를 이용하여 수소와 탄소로 분해하는 기술
	Hazer Group	- 촉매 열분해의 선두주자로서 850℃에서 작동하는 철광석 촉매가 있는 유동상반응로(fluidized bed reactor) 사용 - 현재 이 기술은 파일럿 규모로 상용화에 대한 명확한 목표 불분명
	C-Zero	- 최근 촉매 열분해 분야에 진입한 기업 - 촉매 공정을 사용하나 기술은 아직 불분명, 기본적으로 촉매 공정을 사용하나 고체 탄소를 분리하기 위해 용융염(molten salt)도 사용

출처 : Technology Landscape: Key Players in Methane Pyrolysis, Lux Research, 2021.3.

○ 메탄 열분해 기술 환경의 파편화로 정확한 기술개발 내용 및 수준 확인이 어려움

- 플라즈마(Plasma)

- 모노리스(미국)는 '12년 설립 후 '14년 파일럿 설비로 20kg/hr 수소 생산으로 시작하여 '20년에는 상용급 설비를 통해 600kg/hr의 수소 및 연간 14,000톤의 카본블랙 생산
- ※ 독자 개발한 반응기에 천연가스를 주입한 뒤 플라즈마 시스템을 통해 열분해하는 방식으로 고순도의 수소를 생산하는 기술 보유
- MIT(미국)의 Plasma Science & Fusion Center는 다양한 연료에 적용되는 연료전지용 고온 플라즈마 개질기를 개발, 저공해 자동차 엔진개발을 위한 차량 탑재형으로 적용하기 위한 연구 진행 중
- TCC(미국)는 저 발열량의 탄화수소류와 산업 폐기물을 합성가스로 전환하는 고온 플라즈마 토치 방식을 적용한 ICP(Induction-Coupled Plasma) 개질기술 개발
- SINTEF(노르웨이)는 플라즈마 반응기를 통해 CNT 생산을 위한 PPM 공정을 개발하고 90% 정도의 CNT share를 가지는 carbon 생산 공정을 통해 72 t/yr 규모의 플랜트 운전

- 열분해(Thermal)

- BASF(독일)는 탄소를 촉매로 사용하여 고온의 moving-bed 반응시스템을 설계하여 메탄을 직접분해하기 위한 반응기술을 연구 중
- ※ 현재 파일럿 반응시스템 설계를 위한 연구를 수행 중
 - * 유럽은 현재 저탄소 수소인증제도(CertifHy)를 도입하여 해당 기술을 통해 고순도의 탄소 소재와 저탄소 수소를 동시에 생산하는 기술로 상용화를 목표로 하고 있음

- 촉매분해(Catalytic)

- C-Zero(미국)는 University of California, Santa Barbara의 Eric McFarland 교수진이 설립한 회사로 니켈 등이 포함된 용융 금속을 촉매로 사용함
- ※ 미국의 DOE에서 지원하는 혁신 연구프로그램인 Arpa-E 프로젝트를 수행하며, 10L 규모의 반응시스템 개발 (일일 약 8kg의 수소 생산)
- ※ 1000°C 이상의 고온의 반응조건과 촉매 및 열 공급 방식, 생산된 탄소 소재에 비교적 대량으로 포함된 촉매 금속성분의 제거가 기술적 이슈로 남아 있음
- ※ 2022년까지 일일 수소생산량 6t급의 반응시스템 설계를 목표로 하며, 2023년 1분기까지 일일 400kg 수소 생산 파일럿 플랜트 건설예정(국내 대기업 투자)
- HazerGroup(호주)는 철광석을 촉매로 수소와 탄소를 생산하는 저비용 플랜트 개발 중
- Etues Chimiques et Physiques(프랑스)는 플라즈마를 적용한 반응기와 촉매를 결합하여 오일, 탄화수소 등에 범용적으로 사용 가능한 개질기를 연구 개발 중



출처 : Technology Landscape: Key Players in Methane Pyrolysis, Lux Research, 2021.3.

[그림 III-38] 메탄 열분해 기술 보유 및 개발 기업 또는 기관 현황

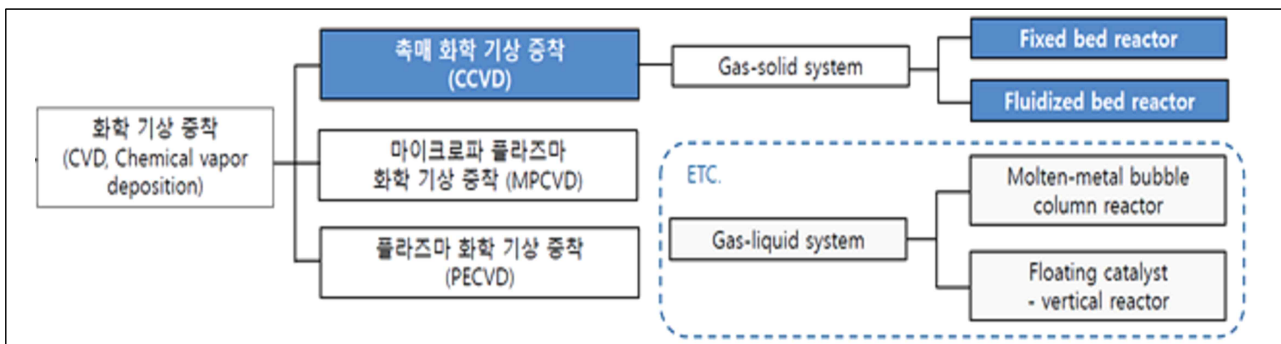
■ 플라즈마토치 기반 CO₂-Free 탄화수소 직접분해 기술

- 1980년대 노르웨이의 Kvaerner사에서 CH₄, 천연가스, 바이오가스 등의 Feed로부터 수소와 carbon black을 생산하는 공정을 개발, 이후 1999년 최초로 상업운전을 개시(KCB&H process)
- Kvaerner는 SINTEF, ScanArc사와 공동으로 플라즈마 반응기를 개발하여 1989년 150kW 규모의 반응기를 SINTEF에서 운영, 1992년 ScanArc를 통해 3MW 규모의 파일럿 플랜트 운전 성공
 - 이후 1998~2001년 캐나다에서 6MW 규모 플랜트가 20,000t/yr 규모로 운전됨

- 플라즈마 반응기에서 1600oC 이상의 온도로 열분해하여 탄소와 수소로 분리
 - 이론상으로는 1kWh/m³_H₂ 정도의 공정 비용이 계산되나 실제로는 2kWh/m³_H₂ 정도로 일부 높은 공정 비용이 소요
- SINTEF 에서는 2000년대 중반 이후 CNT 생산을 위한 플라즈마 공정을 개발
 - 공정 single pass에서 CNT를 20% share로 하는 탄소 생산
 - 2MW 규모의 반응기에서 탄소 생산을 위한 공정 비용은 20kWh/kg_C 수준 (Separation 이후 CNT 생산량은 72t/yr 규모)
- 1990년대 후반 MIT에서 플라즈마토치 이라는 이름으로 열분해 또는 개질용으로 사용될 수 있는 플라즈마 반응기를 제안
- 2014 Monolith社에서 Kvaerner社의 기술을 기반으로 캘리포니아 seaport에 700t/yr 규모의 파일럿 플랜트를 구축
 - 2020년 네브라스카의 Olive creek에 14,000t/yr 규모 상업 플랜트를 통해 카본 생산
 - 2021년 SK Innovation 과 Mitsubishi Heavy Industry의 투자를 받았으며, 2021년 말 Goodyear와 타이어 생산을 위한 협약을 체결

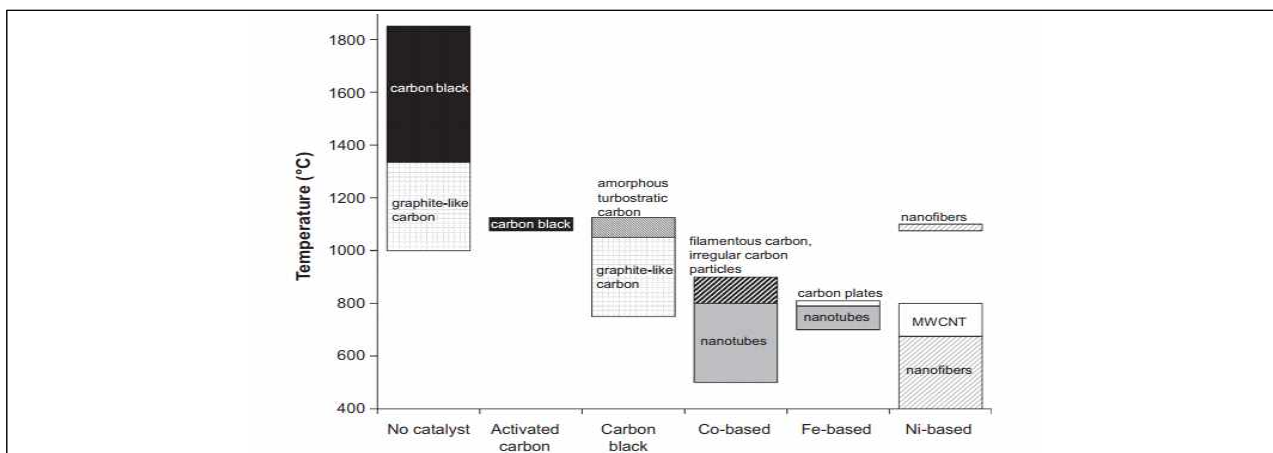
■ 촉매를 이용한 고부가가치 탄소 및 수소 생산 기술

- 촉매 표면에서 탄화수소가 열분해되어 탄소 생성물이 증착되어 탄소소재를 생산하는 방식(Catalytic Chemical Vapor Deposition; CCVD)
 - 카본나노튜브를 비롯한 고결정성의 고부가가치 탄소소재 생산 가능
- 에틸렌 등을 원료로 고부가가치 탄소나노튜브 소재의 대량생산을 목적으로 연구
 - 전통적인 방식은 전기방전, 레이저, 플라즈마 기상증착 등



[그림 III-39] 화학기상증착 반응의 분류 중 촉매를 이용한 반응기술(파란색)

- 촉매를 사용할 경우 메탄의 열분해 반응(pyrolysis) 온도를 낮출 수 있고, 주로 촉매로 사용하는 전이금속(철, 니켈 등)의 입자를 나노 사이즈에서 조절하여 생성되는 탄소물질의 물성을 조절에 유리
 - 그러나 통상의 촉매 반응기 개념과 달리, 반응을 통해 촉매가 소모되므로 메탄과 함께 탄소소재를 생산하기 위한 원료 일부로 인식
- 해외에서는 탄소부터 철, 니켈 등과 같은 다양한 촉매를 이용한 메탄의 직접분해 반응에 대한 연구는 50여 년 이상 이루어짐
 - 사용할 수 있는 촉매의 주 활성 물질의 종류와 물리 화학적 성질에 따라 생성되는 탄소의 품질, 생산성 등이 영향
 - 최근에는 전통적인 기체-고체(촉매) 반응시스템의 한계를 극복하기 위해 용융 금속을 촉매로 사용하는 접근도 시도 중



출처: T. Keipi et al. / Energy Conversion and Management 126 (2016) 923-934

[그림 III-40] 촉매의 종류에 따른 메탄 직접분해반응 (pyrolysis) 온도 영역과 생성되는 탄소소재의 종류

- 천연가스로부터 청록수소 생산을 위한 촉매기반 공정기술에는 아래의 표와 같은 장단점 및 개발이슈 언급
 - 현재, 미국, 유럽, 호주 등을 중심으로 촉매를 이용한 청록수소 및 탄소 소재 생산을 위한 상용 공정기술 개발이 진행 중

〈표 III-53〉 촉매를 이용한 청록수소 공정 개발시 고려해야 할 주요 특징 및 기술적 이슈

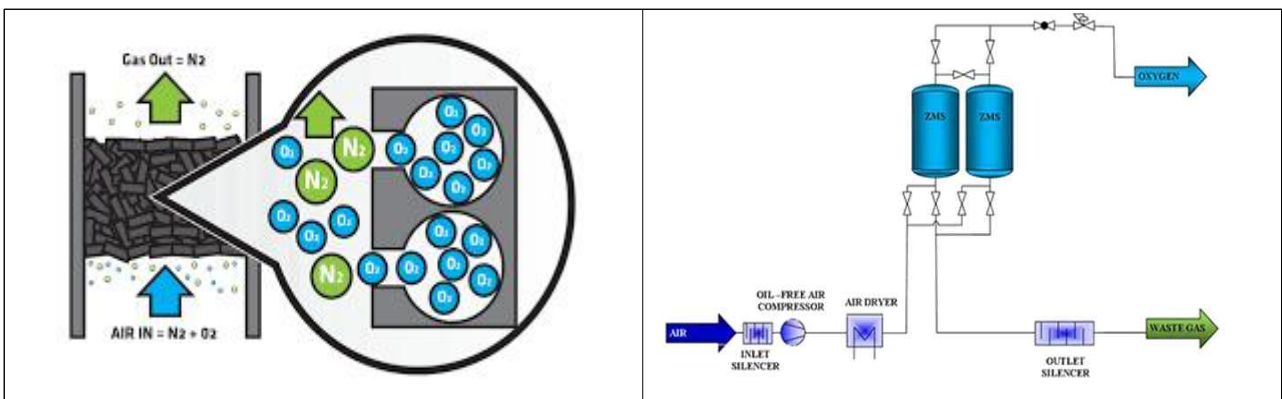
구분	특징 및 기술적 이슈
반응온도	○ 무촉매 공정에 비해 낮으므로 에너지 효율 좋음
반응속도	○ 플라즈마 등 초고온 공정에 비해 낮음 ○ 또한, 기체-고체(촉매) 반응시스템의 경우 카본 생성에 따른 촉매 활성의 저하 동반
대량 생산	○ 유동층 반응 등 전통적인 화학공정 설계 개념을 통해 연속/대량생산을 위한 기술개발 가능
열전달	○ 고온 상태에서 일어나는 흡열반응이므로 촉매 반응기의 대형화를 위한 효율적인 열전달 방법 및 열 회수 시스템의 설계 필요

(2) 수소 분리·정제 기술

- PSA공정(Pressure swing adsorption method)*은 고순도 수소 생산기술로 1970년대부터 미국, 독일, 일본 등에서 상용화해 생산

* 높은 압력에서 더 많은 불순물을 흡수하고 낮은 압력에서 불순물을 배출하는 고형 흡착제에 의한 선택적 흡수에 장점을 가진 가스 분리 방법

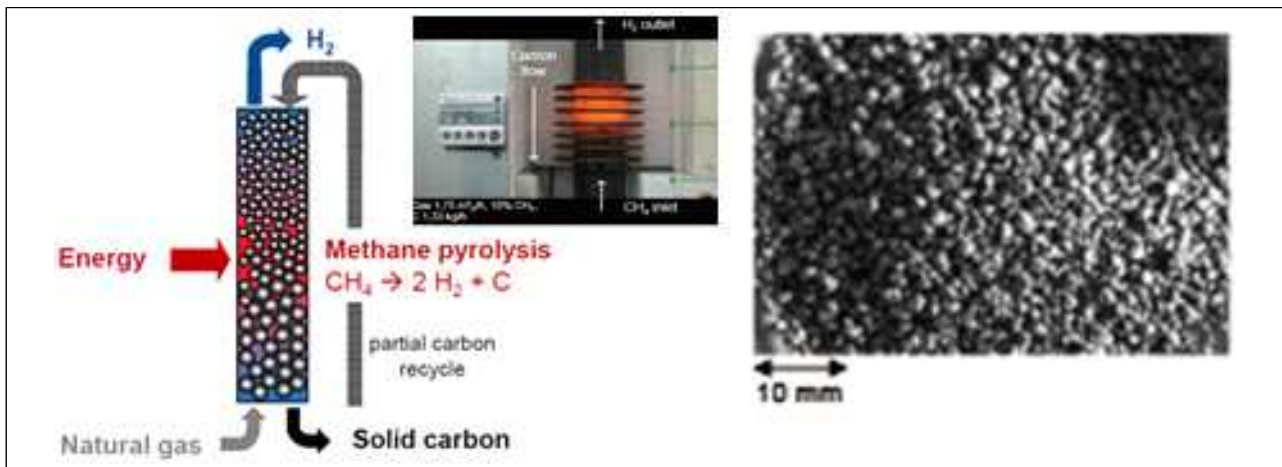
- 수소가 포함된 혼합가스로부터 수소를 고순도로 정제하기 위해 압력이 높은 상태에서 불순물을 흡착시켜 제거하는 공정 기술



출처: Pressure Swing Adsorption (PSA) Technology(APEX GASGEN, 2021)

[그림 III-41] PSA기술 개념도

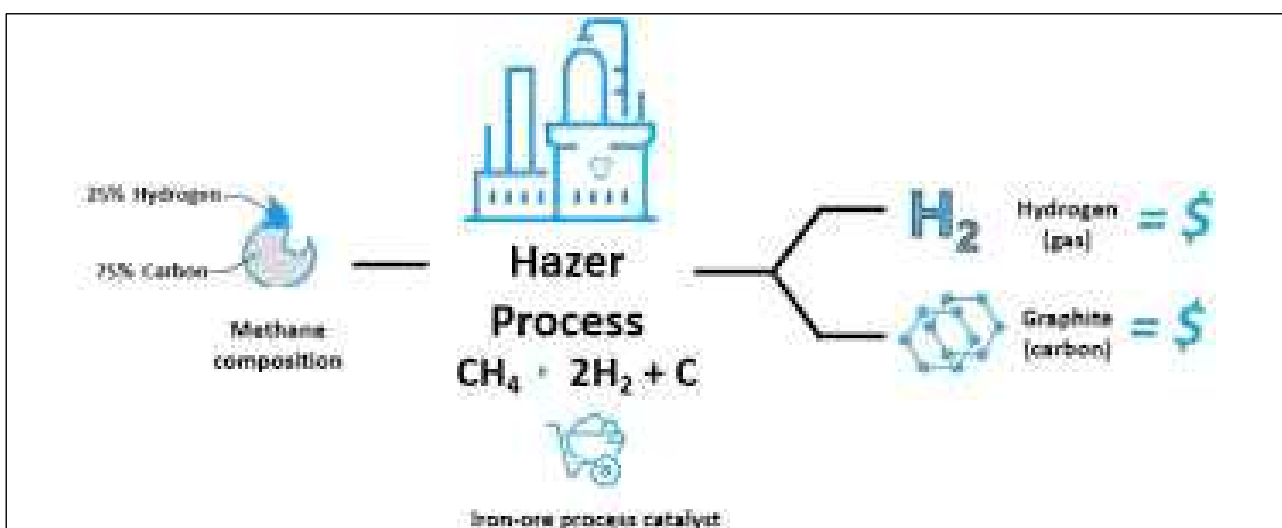
- 메탄 열분해를 통하여 수소와 탄소 소재를 동시에 생산하는 기술은 미국 Monolith, C-Zero, 독일 BASF, 호주 Hazer Group의 4개사가 주요 기업으로 선도
 - 현재 기술로는 낮은 품질의 ‘카본블랙(carbon black)’ 탄소소재 생산 수준에 머물러 탄소소재 생산을 통한 수소 생산단가 저감으로 이어지지 못하는 실정
 - 청록수소와 함께 ‘탄소나노튜브(CNT)’와 같은 고부가가치의 탄소소재가 생산되면 판매 수익을 수소 생산비용에 반영함으로써 수소 생산단가를 낮춰 경제성 확보
- BASF(독일) 탄소를 촉매로 사용하여 메탄을 직접분해하는 반응기술을 연구
 - 1,000℃ 이상의 Moving Carbon Bed 반응기를 통한 메탄 열분해로 수소 및 카본블랙 동시 생산 기술 보유
 - 유럽의 저탄소 수소인증제도(CertifHy) 기준에 부합하는 저탄소 수소와 고순도 탄소 소재를 동시에 생산할 수 있는 기술 상용화를 목표로 연구개발 진행 중
 - 다만, 탄소 그래놀(granule)을 촉매로 활용하므로 전이금속을 촉매로 활용하는 경우에 비하여 메탄분해 활성이 낮아 고품질 탄소소재 생산이 어려움



출처: <https://www.youtube.com/watch?v=4bAmtwwMmpY>

[그림 III-42] 독일 BASF사 청록수소 생산 플랜트

- Hazer Group(호주) 철광석을 촉매로 비교적 저비용으로 수소와 탄소소재 생산 연구
 - 철-촉매를 활용한 유동층 반응기 기반의 메탄 촉매 열분해를 통한 수소 및 탄소소재 동시 생산기술 보유
 - 2018년 1.1 kg/day 수소 및 4.5 kg/day 탄소소재 생산이 가능한 벤치 스케일 반응시스템 개발 완료 후, 2021년 0.27 ton/day 수소 및 1 ton/day 탄소소재 생산이 가능한 상용급 시설 착공
 - 별도의 개발 촉매를 사용하지 않고 저가의 천연 철광석을 촉매로 활용함으로써 촉매 비용은 낮추었지만, 철 금속이 함유된 카본블랙을 생산함으로써 배터리용 탄소소재로 직접 활용하기에는 부적합



출처: <https://hydrogen-central.com/hazer-might-expect-cost-blowout-on-flagship-hydrogen-project/>

[그림 III-43] 호주 Hazer Group사 청록수소 생산 플랜트

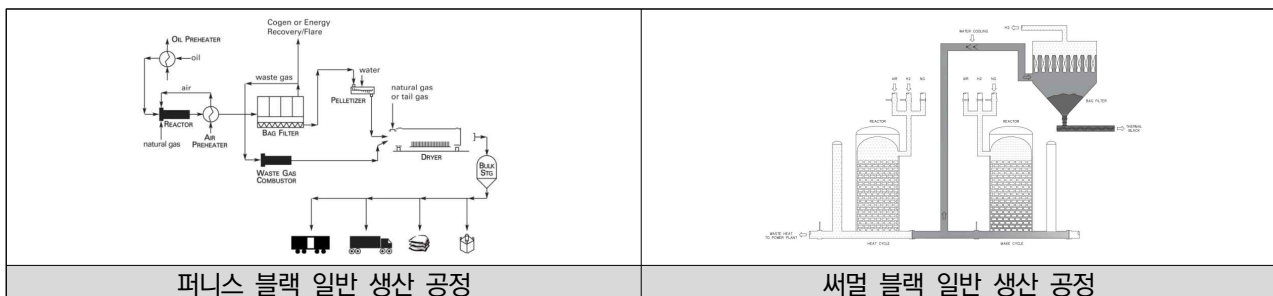
3) 고체탄소 포집 및 전환 기술

■ 카본블랙 수요처 확장 및 생산기술 다양화

* 카본블랙(고체탄소) : 제어된 압력과 온도 하에서 오일 및 천연 가스를 포함하는 탄화수소의 부분 연소 또는 분해로부터 생성되는 탄소 결정 및 물질

○ 카본블랙의 생산방식은 크게 퍼니스 블랙 공정과 써멀 블랙 공정으로 분류되며, 써멀 블랙 공정 사용 시 CO₂ 발생이 저감되는 효과 발생

- 퍼니스 블랙 공정은 탄소가 포함된 오일 및 탄화가스를 연료로 사용, 밀폐된 공간에서 불완전 연소로 생산되며 전세계 카본블랙의 80% 차지
- 반면, 써멀 블랙은 천연가스를 산화시켜 밀폐된 반응기를 고온으로 올린 후, 여기에 천연가스를 공급하여 열분해하는 방식으로 카본블랙과 수소를 동시에 생산



출처: The Hydrogen Council, 미래에셋증권 리서치센터

[그림 III-44] 일반적 카본블랙 생산 공정도

○ 범용 카본블랙은 각국에서 모두 생산이 가능하며, 카본블랙은 공정에 따라 컨택트 블랙(채널 블랙), 퍼니스 블랙, 써말 블랙, 램프 블랙 등으로 분류

- 또한, 제조 원료에 따라 가스 블랙, 오일 퍼니스 블랙, 나프탈렌 블랙, 아세틸렌 블랙, 송연, 유연블랙, 동물성 블랙, 식물성 블랙 등으로도 구분

※ 대부분의 업체가 퍼니스 블랙을 생산하며, Denka 등의 업체에서는 아세틸렌 공법으로 고순도 특수 카본블랙 생산

〈표 III-54〉 카본블랙 종류 및 특성

구분	램프 블랙 (lamp black)	컨택트 블랙 (채널 블랙) (contact black/ channel black)	써말 블랙 (thermal black)	아세틸렌 블랙 (acetylene black)	퍼니스 블랙 (furnace black)
원료	원유	천연가스	천연가스	아세틸렌 가스	원유
공정	불완전 연소	불완전 연소	열분해	열분해(발열)	열분해
특성	-	고휘발분 저회분	저구조	고순도 고구조	생산성
입자경(μ)	50~100	10~27	150~500	30~50	17~70
표면적(/g)	20~95	110~1,125	6~15	60~70	20~200
회분함량(%)	~0.16	~0.1	0.02~0.38	0	0.1~1.0
유황함량(%)	-	~0.1	~0.4	0.02	0.05~1.5

■ 최근 수소 생산 시 고체탄소를 동시에 포집·생산할 수 있는 연구 활성화

- '21~'22년 내 천연가스로부터 수소와 고체탄소를 동시에 생산하는 분해 공정의 연구 및 실증 추진을 위해 글로벌 기업의 투자 및 산학연 협력 확대
- 메탄 열분해(TMC) 및 메탄 열 촉매분해(TCD) 등을 활용하여 이산화탄소 배출 없이 수소와 고체 탄소(카본블랙, CNT등)를 동시에 생산하는 기술을 통해 탄소 중립 이슈 및 수소 단가 저감을 동시에 해소

※ DOE(미국 에너지부)는 수소의 적정 단가를 2\$/kg으로 권고, 이를 달성하는 기업 증가

〈표 III-55〉 최근 수소 및 고부가가치 부산물 동시 생산 연구 동향

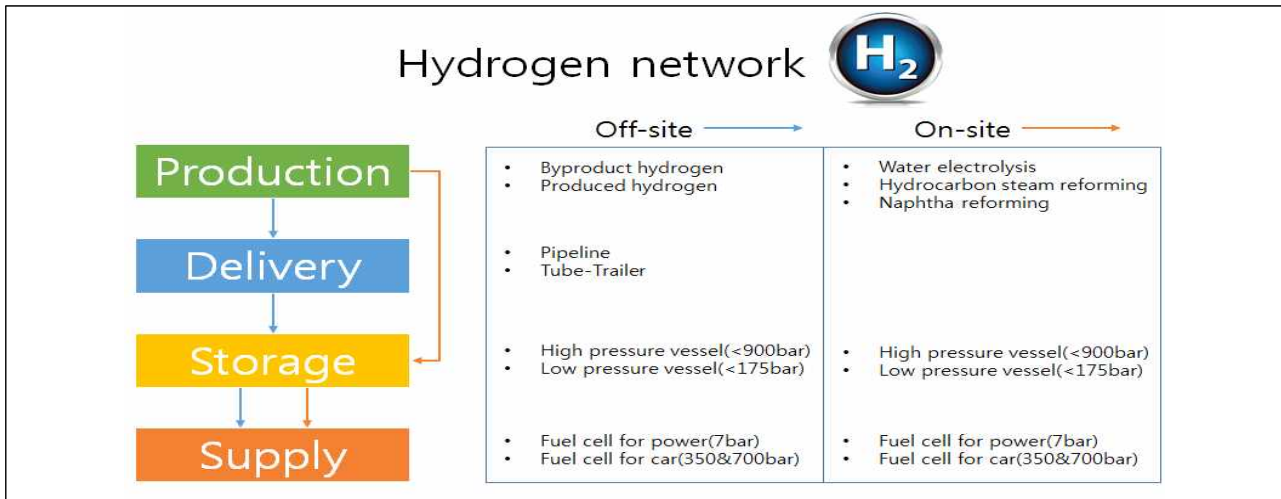
기업명	연구 추진 내용
Warsila (핀란드)	○ ('22) 천연가스 및 바이오가스로부터 수소와 고체탄소 생산을 위한 메탄의 열 촉매 분해기술(TCD) 개발 계약 체결 - 선박에서 LNG를 활용한 수소 및 고급 고체탄소(카본블랙 및 탄소나노튜브) 생산을 통한 경제성 확보
Aurora Hydrogen (캐나다)	○ ('22) 천연가스로부터 수소와 고체탄소를 생성하는 효율적 저탄소 수소생산을 위한 마이크로 열분해 연구 - 기존의 수전해 수소 생산보다 80% 절감된 전력 사용 가능
Hazer Group (호주)	○ ('22) 메탄 촉매 열분해 기술을 이용, 수소와 고체 인조흑연을 생산하는 프로젝트 진행(철광석 촉매 사용) - 이 프로젝트를 통해 연간 2,500톤 규모의 수소 생산 예상
Aramco (사우디아라비아)	○ ('22) Carbon Hub 프로젝트(Rice 대학)에 합류하여 탄화수소로부터 깨끗한 수소에너지와 고급 탄소소재를 동시에 효율적으로 생산하는 연구 개발 진행
Ekona Power (캐나다)	○ ('22) 펄스 메탄 열분해(PMP) 기술 개발을 진행하여 열과 기계 에너지의 펄스 주입을 통한 불안정한 흐름을 통한 탄소축적을 제거
Monolith (미국)	○ ('21) 플라즈마를 이용한 메탄 열분해 기술로 CO2 없이 수소와 고체탄소(카본블랙)를 생산하는 기술 개발 - 최근 SK와 공동 벤처를 통해 한국에도 수소 및 카본블랙 공장 설립을 추진
ATCO (캐나다)	○ ('21) British Columbia 대학과 공동으로 메탄 열분해(TMC) 기술 개발, 단가 2\$/kg 이하 생산 추진 - 수소와 고체탄소(카본블랙)이 형성되어 CO2 배출 제로 달성이 가능, 카본블랙으로 경제성 확보
PNNL (미국)	○ ('21) CO2를 수소와 결합시켜 합성 천연가스로 전환하는 기술(EEMPA)을 연구하여, 170도에서 15bar에서 Ru 촉매로 CO2의 90%를 메탄으로 전환
C-Zero(미국)	○ ('21) 캘리포니아 대학과 공동으로 열촉매를 사용하여 메탄열분해를 통한 수소와 고체탄소를 생성

기관명	연구 추진 내용
DOE (미국 에너지부)	○ Advanced Research Projects Agency(ARPA-E) 추진(1,400만불 규모) ○ Rice 대학, Nanocomp, ETCH, Palo Alto 연구소는 메탄의 열분해를 통한 이산화탄소 배출없이 수소와 고체탄소(카본블랙, CNT등)의 동시 생산을 위한 프로젝트 선정
SoCalGas (미국)	○ 천연 가스를 수소, 탄소 섬유 및 탄소 나노튜브로 변환하는 새로운 프로세스를 발전시켜, 수소 생산 비용을 탄소 섬유 및 탄소 나노튜브 판매로 상쇄 목표 - 수소의 순 비용을 2\$/kg 미만으로 줄여 수소 생산의 경제성 확보 노력
UC Santa Barbara	○ 메탄을 열분해하여 수소를 방출하고 고체 탄소를 형성하는 촉매 용융 금속을 개발 - 용융물 표면으로 떠오른 불용성 탄소는 제거 및 저장하거나 복합 재료에 적용 가능 - 일반적으로 촉매를 비활성화시키는 증기 개질 촉매의 탄소 형성을 방지 ○ Ni-73% Bi 합금(Ni 0.27 Bi 0.73)이 1065°C의 1.1 미터 기포 컬럼에서 95% 메탄 전환율을 달성, CO2 없이 순수한 수소를 생성 - 온도가 1040°C로 낮아졌을 때 메탄 전환율은 86%로 감소

4) 청록수소 플랜트 건설 및 운영기술

■ 청록수소 사용량 예측기술

- 수소도시는 기본적으로 대용량 수소공급을 전제로 하고 있어 도시내 파이프라인을 기반으로 수소 공급 네트워크 구축함으로써 공급자와 수요자간 양방향 직접적인 연계를 통한 의사소통 구조를 구현하는 것이 필요



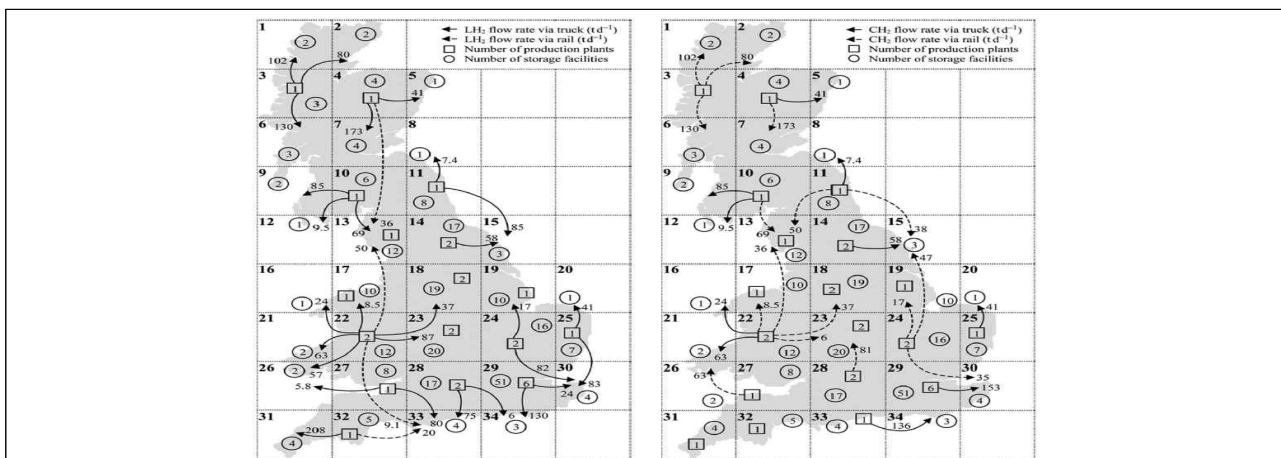
자료 : 100만 명 규모 도시형 복합 수소 네트워크 설계 및 안전성 평가, 관리기술 개발 최종보고서, 2019, 국토교통부

[그림 III-45] 수소 네트워크의 개요

- 미국의 수소 생산방식은 풍부한 자원을 바탕으로 하여 태양광을 이용한 수소생산, 생물학적 수소생산, 천연가스 개질 및 물의 전기분해 등이 연구과제로 진행

* 텍사스 주는 셰일가스 생산을 통해 수소생산량을 증가시키고 있으며, 미국에서 사용되는 수소의 95%는 천연가스 스팀개질 방식으로 생산

- A.Almansoori(2006)는 영국을 34개 구획으로 나누어 FCEV의 수요가 급격히 증가하였을 때 필요한 수소 인프라를 적정 위치에 배치하는 최적화 알고리즘을 구현

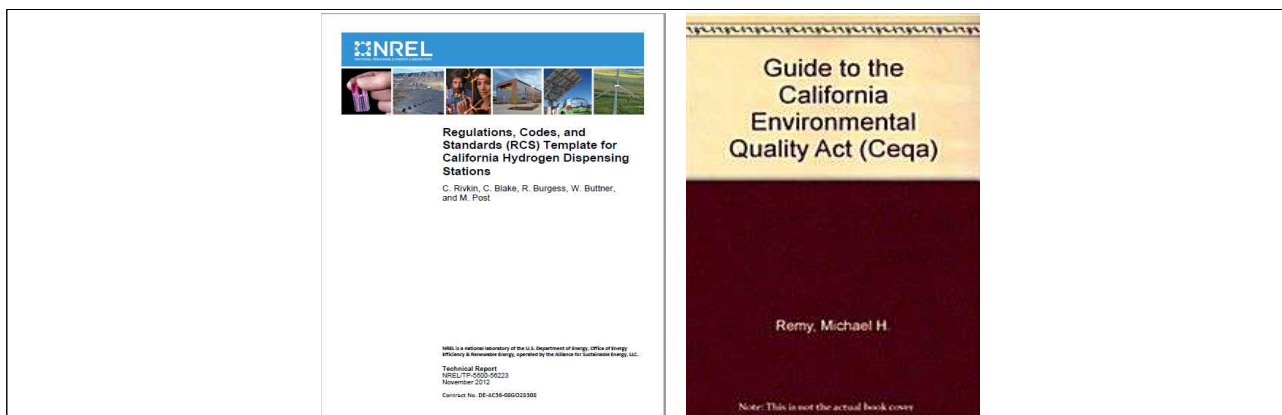


[그림 III-46] 영국의 수소공급사슬 최적화 연구사례(A.Almansoori, 2006)

- 일본의 경우 장기적인 수소 네트워크 구성을 위해 WE-NET 프로그램을 1993년부터 2020년까지 장기연구과제로 선정하여 진행 중
 - R&D의 구성을 Phase 1,2,3로 나누어 각 Phase별로 단계적인 수소 네트워크를 기획 및 연구하는 단계

■ 수소시범도시 수소공급시 사용적합성 검증 기술

- 설계 건전성은 물리적, 사회적 시스템 간에 강건성, 예비성, 수용성, 신속성을 확보하여 외부적인 영향(재해, 고장 등)에 견디며, 기능 중단 시 원상으로 복구하는 수용력
 - 지하 라이프라인의 재해·사고·고장 시 신속한 기능 회복(복구)관리를 위한 의사결정, 자원 배분, 복구시행 등을 위한 기술개발을 포함함 (시설 계획 및 사후 관리요소)
- * T.D. O'Rourke, Critical Infrastructure, Interdependencies and Resilience, 2008
- (미국) 수소충전소 건설비용 및 시간을 줄이고 가용성 및 안전성 향상을 위해 설계/시공방법, 부품, 물리적인 시험방법, 수치해석, 고성능 소재 관련 연구를 수행(2014~, SANDIA&NREL)
- (미국) NFPA 2(압축가스, 수소 설비 등의 안전 이격\거리 기준 수록) 및 55(수소 저장, 활용 및 취급에 활용되는 이동식 저장용기의 위험으로부터 인명 및 재산을 보호하는 안전대책), (국제) ISO 19880-1(충전소의 안전을 위한 최소설계, 설치, 시운전, 작동, 검사 및 유지 보수 요구 사항에 대한 기준)
- (미국) 캘리포니아 주정부에서는 수소스테이션의 허용(가)에 관한 가이드북을 제공하고 있으며, 주요 내용으로는 수소설비 사전 검토, 입지/zoning, architectural Review, California Environmental Quality Act, 화재 및 유틸리티 연결, 설치, 커미셔닝 등에 관한 내용을 담고 있음



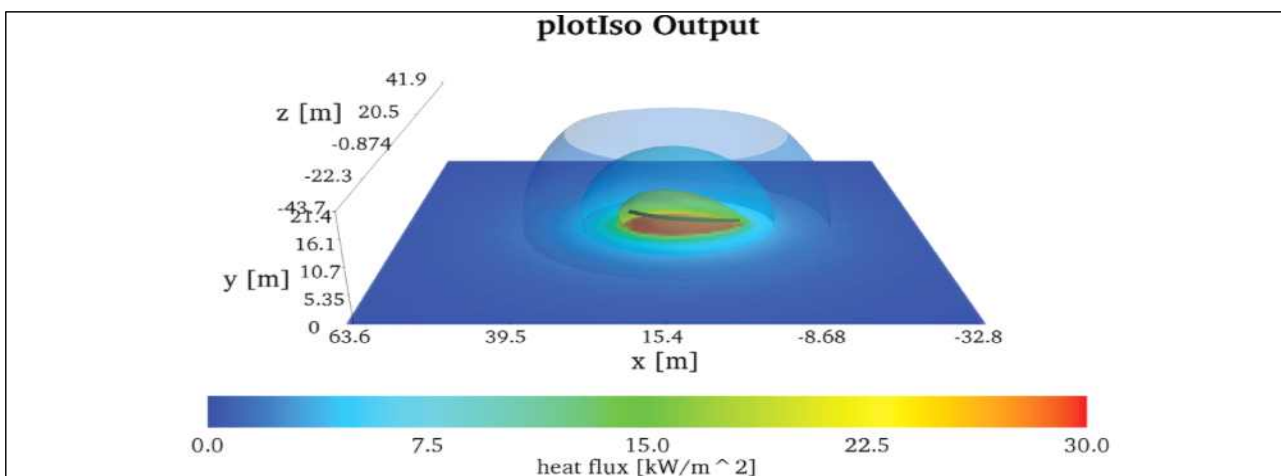
[그림 III-47] 캘리포니아 수소스테이션 가이드북(미국)

- 노르웨이 릴스트롬에 위치한 탄소중립형 블루수소 플랜트(명칭 : BioZEG Plant) : 매립 쓰레기로부터 얻은 바이오가스를 이용해 수소차용 연료를 생산하고, 배출되는 CO₂를 광물 형태로 포집 후 수소생산 공정에 활용하여 전체 블루수소 생산효율을 향상한 성공적 사례에 해당

■ 수소도시 특성을 고려하여 안전한 운영을 위한 기술개발 및 실증방안

- 네덜란드의 TNO는 자체 개발하여 운용하고 있는 EFFECTS와 RISKCURVES를 이용하여 수소 및 HCNG 시설 혹은 설비에 대한 위험성평가를 수행
 - 위험성평가 분야에서 익히 잘 알려진 Coloured Books에 기반하고 있으며, 사용하고 있는 equation이나 위험성평가를 위한 DB가 공개되어 신뢰성 보장
- 미국의 Sandia National Lab.은 DOE의 지원을 받아 수소충전소 위험성평가 프로그램(HyRAM)* 개발 및 업데이트 모델 개발 중 (2003년부터 약 300억원 투자)

* 수소 누출과 제트화염에 대한 실험기반 계산식을 통해 사고 시나리오의 정량화, 물리적 영향 예측, 사람과 구조물에 미치는 영향 특성화가 가능한 톨로 실험 기반 누출 모델 7종 이상 제트화염 모델(~950 bar) 5종 이상 포함



[그림 III-48] HyRAM 프로그램

■ 전과정 평가 기술

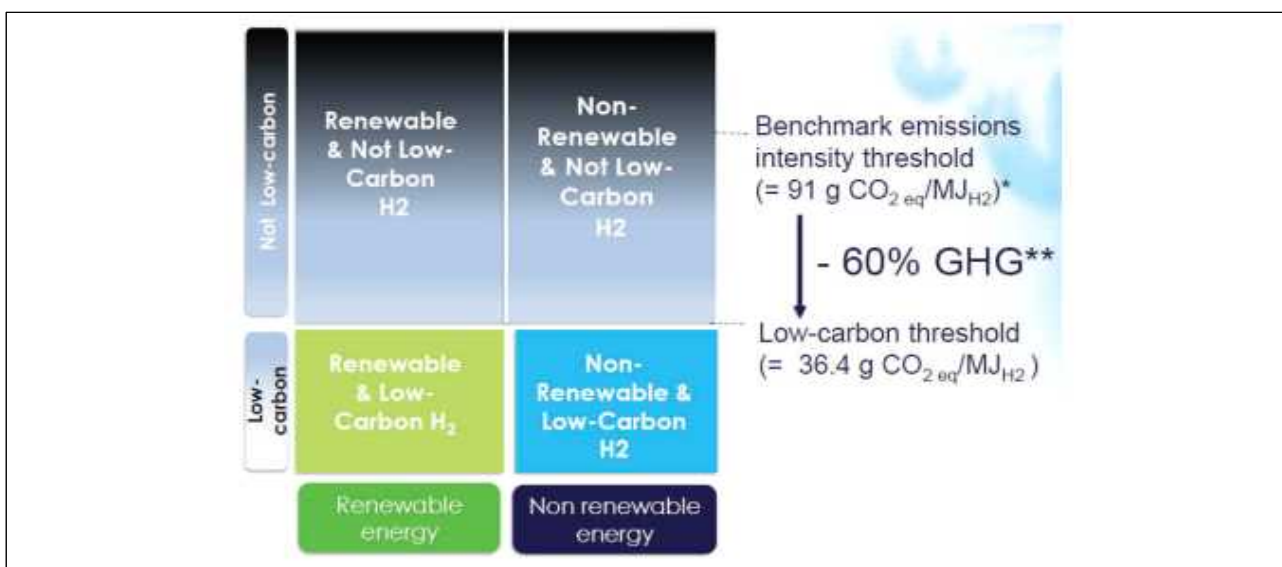
- 전과정 평가(LCA 또는 생애주기 평가)는 제품 또는 서비스 시스템의 전 생애주기에 걸친 환경성과 잠재적 영향을 연구하기 위해 사용되는 국제적 인정 시스템 분석 도구의 하나
 - 천연가스를 활용한 수소생산 방식으로 수증기 개질법이 이용되고 있으나 다량의 CO₂ 방출이라는 근본적인 문제점 존재
 - 탄소중립 대응 CO₂-Free 청록수소 생산체계 구축을 위해서는 모든 설계·제작 및 시운전에서 전과정 평가를 통해 이산화탄소 발생을 억제 효과의 정량적 분석 요구



자료 : 탄소중립을 위한 국토교통분야 수소 기술의 전과정 환경성평가 플랫폼구축연구 기획, 2022, 인하대

[그림 III-49] 도시의 탄소배출량 비율

- 친환경 CO₂-free 수소 생산방식 확정 기준과 관련해서 유럽연합(EU)에서는 그린수소 인증제도(CertifHy Guarantee of Origin(GO))를 수행
 - 현행 EU 그린수소 인증제에서 활용되고 있는 “CertifHy 프리미엄 수소”의 인정기준은 수소생산방식에 대해 수소의 원료 생산과정까지를 포함
 - 수소 생산의 전과정 (life-cycle)에서 발생하는 온실가스 배출계수(g CO₂ eq./MJH₂ : 수소 단위열량(MJ)당 CO₂eq.의 g)를 산정(CertifHy, 2016a; CertifHy, 2016b)



자료 : CertifHy (2016b)

[그림 III-50] CertifHy 프리미엄 수소의 인정기준

2. 국내 기술동향

1) 청록수소 생산 주요 플레이어

■ SK, LG화학, 금호석화 등의 국내 주요 기업은 일부 기술의 상용화와 더불어 청록수소에 대한 투자 추진

- SK E&S는 Monolith(미국)*와 기술 제휴 및 생산 투자를 발표
 - * 모노리스는 청록수소 생산 자체 기술을 보유하고 파일럿 플랜트 구축을 완료하는 등 현재까지 진행된 청록수소 생산기술 중 가장 높은 TRL 수준을 보임
- SK가스는 C-Zero와 투자 계약 체결을 통해 친환경 청록수소 생산 기술을 선점 및 수소 사업의 생태계 조성을 목표
- LG화학, 금호석유화학, JEIO 등
 - 메탄 열분해를 이용한 청록수소와 탄소 소재 생산을 위한 반응시스템 개발 중
- 제주대, 원자력과학기술연구소 등
 - 열 플라즈마 기술 기반 청록 수소 제조 기술 개발
 - 제주대-화성시스텍(주)와 청록수소 원천기술 확보와 사업화를 위한 상호협력 협약 (‘21.8)
- 화학연구원 등
 - 모노리스의 친환경 고체탄소를 2차전지 음극재로 활용하기 위한 연구 착수 (‘21.12)
- 제로시스, RIST, 고등기술연구원
 - 용융염 기반 청록수소 제조 기술 개발
 - 중기부 Net-Zero사업 20Nm³/h 파일럿 진행중
 - 탄소소재의 음극재 활용 기술 개발 중

■ 주요그룹 수소 관련 투자계획

〈표 III-56〉 국내 기업의 수소 관련 투자계획

기업	투자분야	총액
SK	• 대규모 액화플랜트 구축, 연료전지 발전 확대	• 18.5조원
현대차	• 수소차 설비투자 및 R&D, 충전소 등 연관인프라 투자	• 11.1조원
포스코	부생수소 생산, 해외 그린수소도입, 수소환원제철 개발	• 10조원
한화	• 그린수소(수전해) R&D실증·생산, 수소 저장설비	• 1.3조원

출처: SK 19조·현대차 11조·재계 50兆 수소 투자 본격화(헤럴드경제, 2021)

2) 청록수소 생산 및 실증 기술

(1) 탄화수소 열분해 기술

■ 플라즈마 기반 기술 동향

○ 탄화수소 직접분해 기술

- 2000년대 후반 (주)에트플라텍에서는 플라즈마를 이용한 폐기물의 가스화를 통해 수소 또는 합성가스를 얻기 위한 공정을 개발하고 파일럿 설비 운전
 - 시험 가동 후 설비 수명이 짧아 잦은 유지보수 등의 문제로 기술적 한계를 극복하지 못하고 현재는 운영 중단
- 현재, 메탄 개질 반응의 경우 플라즈마와 촉매를 결합한 하이브리드 방식을 이용한 연구 진행 중

■ 촉매 등 화학반응 기반 청록수소 생산 기술 동향

- 산업부 연구개발 사업(천연가스로부터 고결정성 전도성 흑연구조를 갖는 탄소소재 개발, '20~'24)에서 메탄 분해를 통한 탄소소재 및 수소 생산 기술을 개발 중

■ 촉매 기반 천연가스(메탄)을 이용한 고부가가치 탄소 및 수소 생산 기술

- 에틸렌을 원료로 하는 카본나노튜브의 대량생산을 위한 기술은 이미 상용화 되어 국내에서 LG화학, 금호석유화학, 제이오 등의 업체에서 상용 MWCNT(multi-wall carbon nanotube) 생산 중
 - 메탄 열분해를 이용한 청록수소와 탄소소재 생산을 위한 반응시스템은 현재 R&D 단계

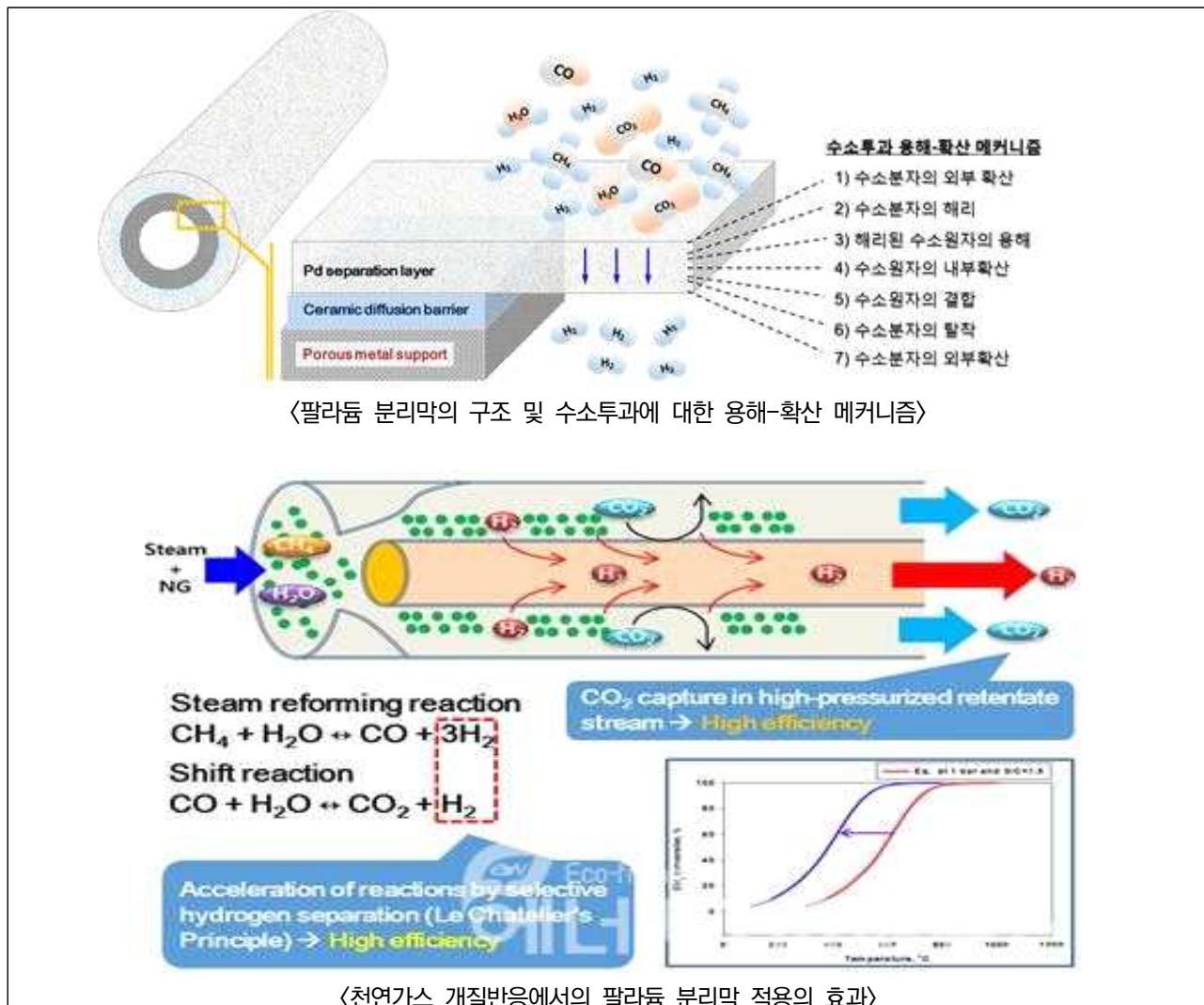
〈표 III-57〉 국내 청록수소 관련 R&D 현황

부처	과제명 (주관기관, 연구기간)	비고
산업부	액상촉매 활용 신개념 CO₂ fee 추출 수소 생산 기술 (한국과학기술연구원, 2020 - 2027)	용융 금속촉매 이용 반응
산업부	고전도성 전극용 카본소재 제조 및 응용기술 개발 (제이오, 2020 - 2024)	탄소소재 생산 및 이차전지 핵심소재 생산이 주목표, 부산물로서 수소생산 및 활용성 연구

(2) 수소 분리·정제 기술

■ 기존 해외에서 수입한 수소 PSA 기술을 대체하기 위한 복합기술을 활용한 수소 분리·정제 기술 개발 추진중

- 한국에너지기술연구원은 기존 기술의 문제를 해결한 ‘복합막 형태의 팔라듐 분리막 기반 수소 생산·정제 핵심 기술’을 개발
 - 천연가스, 바이오매스, 수전해 등 수소 생산 방식과 결합해 기존 기술의 문제를 극복한 효율적 수소를 생산, 정제 기술
 - 기존의 메탄 수증기 변환 방식에 팔라듐 분리막을 활용하면 500~550℃의 낮은 온도에서도 운전이 가능하고, 별도의 정제 공정을 추가하지 않아도 합성가스 중 수소만을 선택적으로 분리·정제해 보다 높은 효율로 고순도 수소를 생산



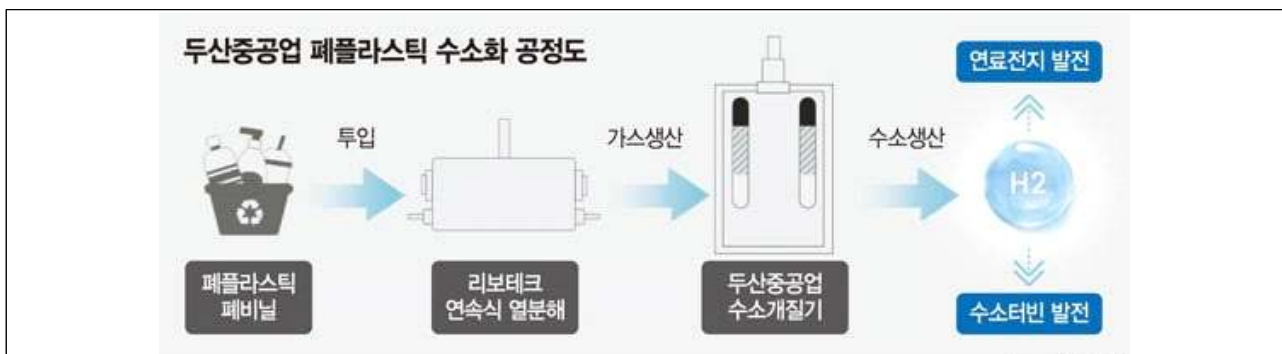
출처: 한국에너지기술연구원

[그림 III-51] 수소분리정제 기술

3) 고체탄소 포집 및 전환 기술

■ 연구실 수준에서 메탄 열분해를 통한 수소 및 카본블랙 생산 연구 진행

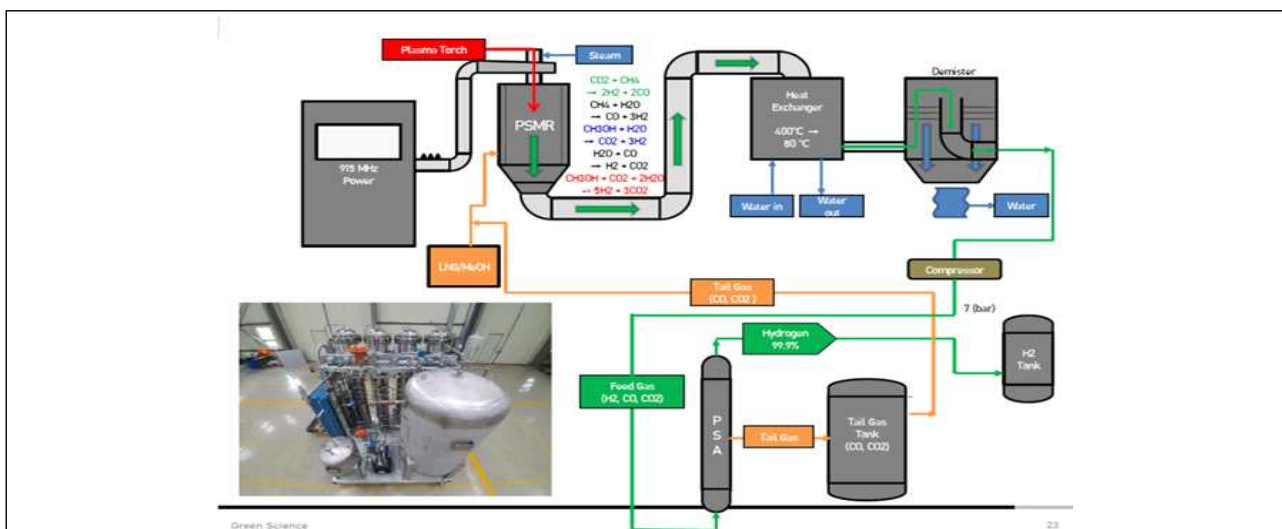
- 주로 수전해, 메탄 개질 또는 폐플라스틱 등을 활용한 수소 생산연구 수행 중
- '21년 5월, 두산중공업과 리보테크가 폐플라스틱을 이용한 수소 생산 협력 추진
 - 폐플라스틱을 물과 같이 연소시키면 수소와 이산화탄소가 생성되며, 이로부터 수소를 분리하는 방식으로 1일 0.3t가량의 수소를 생산



출처: 두산중공업

[그림 III-52] 두산중공업 폐플라스틱 수소화 공정도

- 국내 일부 기업에서 마이크로 웨이브 기술을 이용한 기반기술 확보 하였으나, 실증 및 실용화를 위한 기술 확보 중



출처: Green science

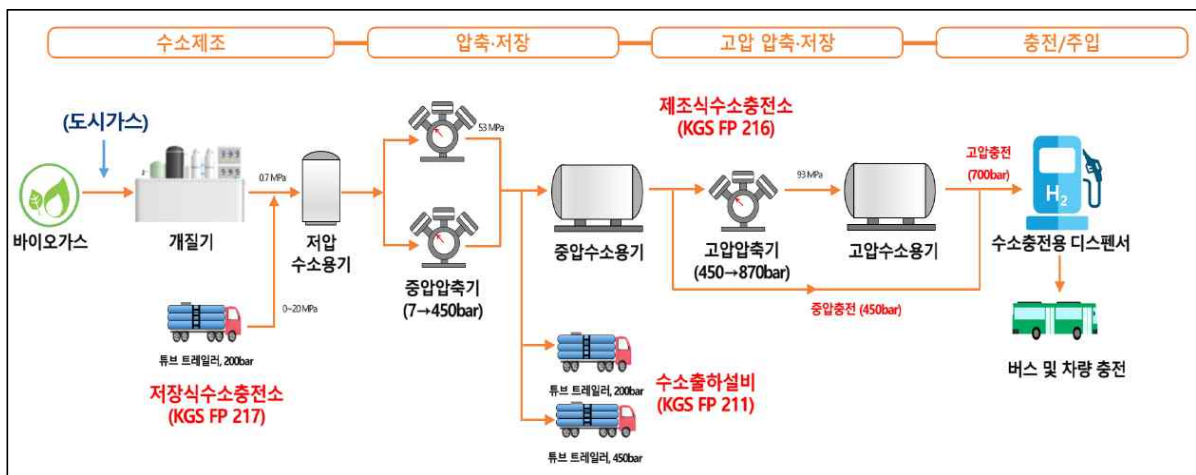
[그림 III-53] 국내 기업 마이크로 웨이브 기술 개요도

- 엘디카본과 스미토모고무공업은 GCB-774G와 GCB-600 시리즈를 공동 사업화하여 기존 카본블랙(N660)을 각각 최대 20%~70% 대체하는 것을 목표로, 2026년까지 목표로 잡은 사업화 물량은 GCB 3500 톤/년, 을 계획

4) 수소의 저장/운송 기술

■ 수소의 저장/운송 기술 및 수소 충전소 사례

- 산업통상자원부 ‘바이오가스를 이용한 수소융복합충전소 기술개발 및 실증, 2019~2022’ 연구 사례 분석
 - 500kg/일 급의 수소 융복합충전소 통합공정 시스템 개발 및 엔지니어링
 - 바이오가스 정제 및 고품질화를 통한 수소추출 시스템 실증
 - 수소 추출/압축 시스템, 수소 충전소, 튜브트레일러 충전 설비 등 구축 및 운영



[그림 III-54] 수소의 저장/운송/활용 개념도

- 한국가스안전공사 수소관련 통합기술검토를 통한 인허가 완료 후 상업운전 진행 중
- 일일 평균 수소차량 충전대수 15대 내외, 잉여수소는 전량 튜브트레일러 외부 공급

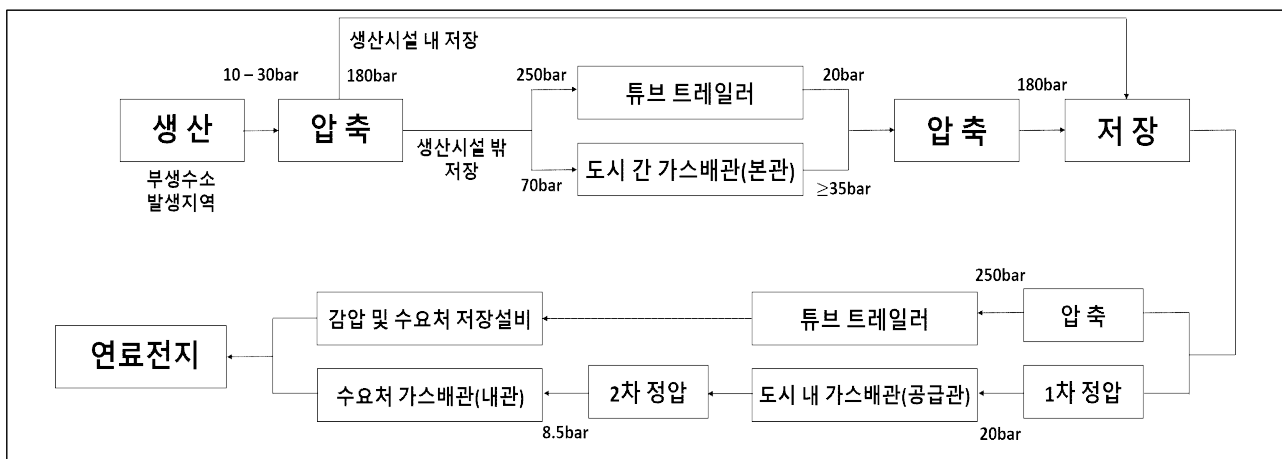


<표 III-58> 수소 생산 및 활용 국내 사례

5) 청록수소 플랜트 건설 및 운영기술

■ 청록수소 사용량 예측기술

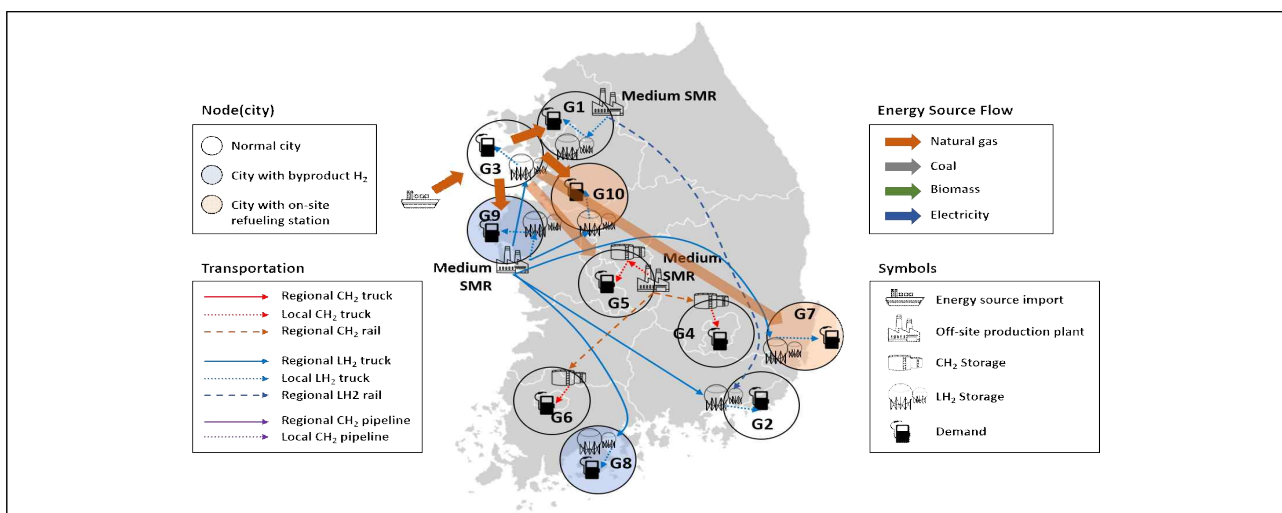
- 청록수소 생산시스템의 대형화/대용량화를 위해서는 도시규모별 수소사용량 예측 수행 및 CO2-Free 수소공급 모델(안) 수립 요구
 - 도시에서 5만 명이 사용 가능한 수소 네트워크를 설계, 정량적 분석을 통해 사고 시 위험에 대한 해석과 방재 및 방폭 등의 적정성 분석 및 평가가 필요



자료 : 100만 명 규모 도시형 복합 수소 네트워크 설계 및 안전성 평가, 관리기술 개발 최종보고서, 2019, 국토교통부

[그림 III-55] 5만 명 규모 도시의 발전용 연료전지 수요를 위한 부생수소 공급 개요도

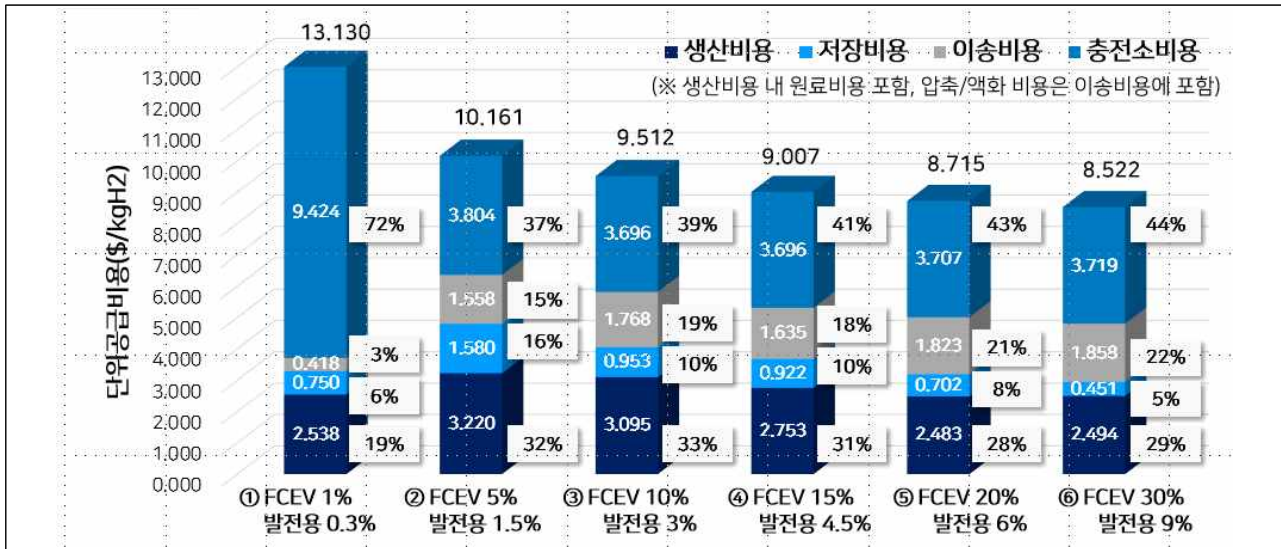
- 비용 최적화 모델을 구성하여 생산된 청록수소의 도시 공급을 위해 수소의 생산, 압축·액화, 저장, 도시 간 이송, 도시 내 이송 및 수소충전소 각 단계에서 필요한 비용을 합산한 총 비용 최소화



자료 : 100만 명 규모 도시형 복합 수소 네트워크 설계 및 안전성 평가, 관리기술 개발 최종보고서, 2019, 국토교통부

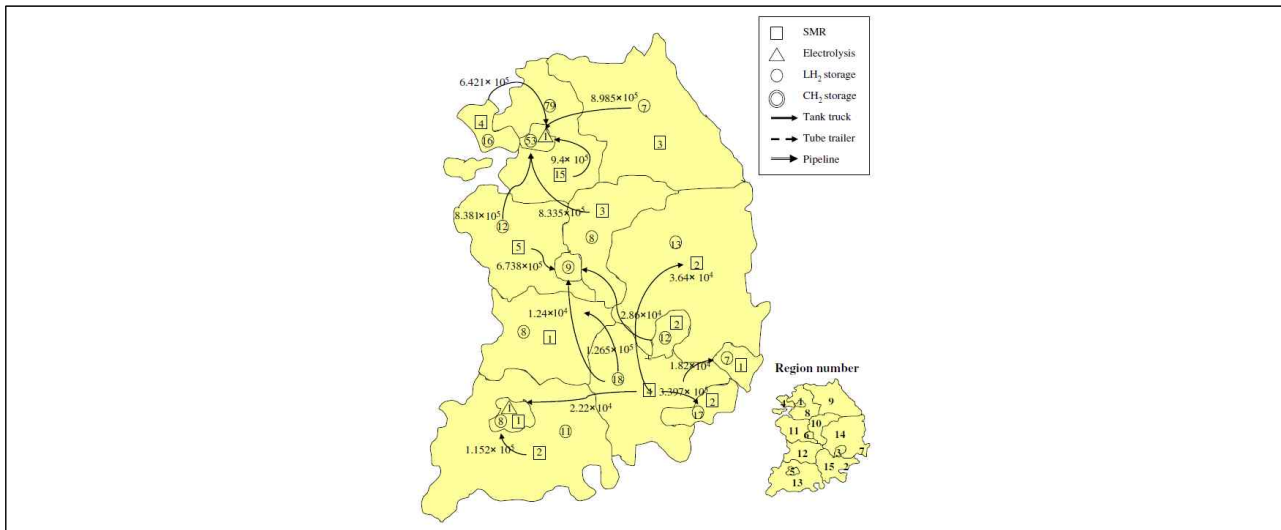
[그림 III-56] 2030년 분산형 저장소 모델의 수소네트워크 최적화 요약도

- 청록수소 생산설비의 설치 시 안전성 평가기법을 적용한 수소도시에 공급을 위한 최적입지 경로 분석 및 OPEX, CAPEX 계산이 요구됨



[그림 Ⅲ-57] 수소 네트워크 모델의 수요증가에 대한 단위공급비용 변화 민감도 분석

- 국내는 J.Kim 등이 수소수요 증가의 불확실성을 고려한 전국 시도별 HSC의 비용최적화 모델 제시



[그림 Ⅲ-58] 국내 수소공급사슬 최적화 연구사례(J.Kim)

■ 수소도시 특성을 고려하여 안전한 운영을 위한 기술개발 및 실증방안

- 국내 수소충전소 및 연료전지실 등 수소 기반시설 대상 실 규모 실험 및 수치해석을 통해 안전 이격거리(separation distance) 등의 핵심 인자를 도출해 위험성 평가 체계가 정립 중(20~21, 김양균, 한국건설기술연구원)
- 국내에서 수소 충전소에 대한 정성적·정량적 위험성평가를 위한 국내 개발 프로그램은 2020년 개발된 Hy-KoRAM을 사용(2016~2018, 강승규, 한국가스안전공사)

■ 전과정 평가 기술

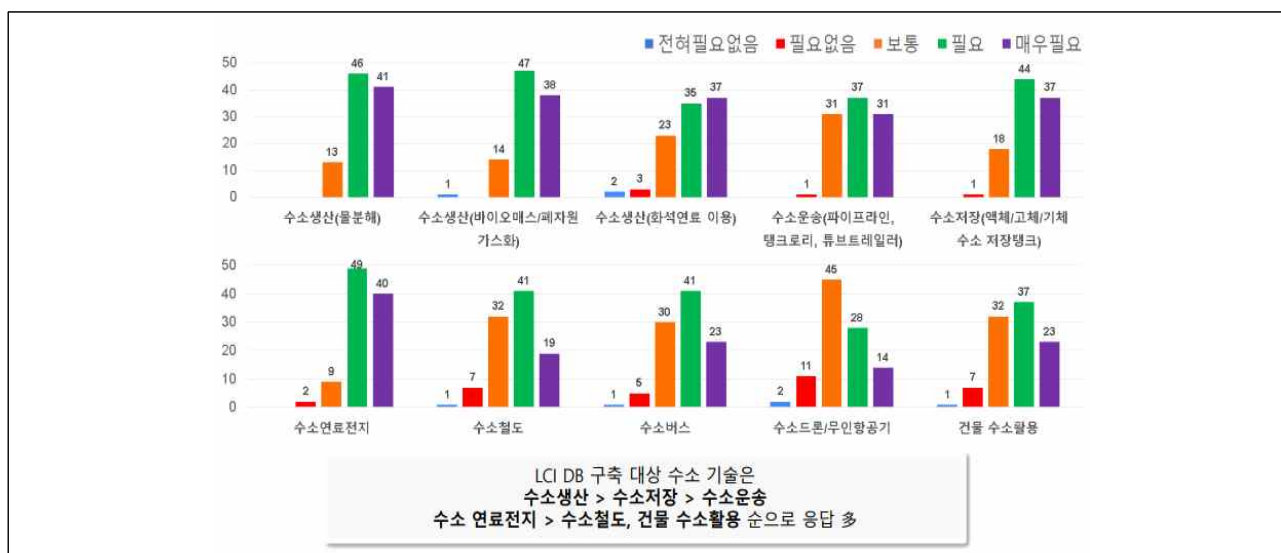
- '03년 전국대학교에서 천연가스 직접 열분해 방법에 의한 수소제조의 전 과정평가 실시
 - 천연가스 직접 열분해를 이용하여 수소 1kg을 제조하는데 전과정에 걸쳐 1.570kg의 CO₂가 배출, 전체 온실가스로 인한 GWP는 1.584 kg CO₂-eq./kg H₂로 차이
- 수소의 제조공정 내에서 사용되는 전기에너지 대신 내부적으로 생산되는 수소를 에너지로 사용할 때 80%의 CO₂ 추가 감축 효과를 기대할 수 있는 것으로 나타남

영향 범주	단위	ATR-Bioeth.	ESR-Bioeth.	ATR-B.M	ATR-F.M	POX-B.M	POX-F.M	SMR-B.M	SMR-F.M
GWP	kg CO ₂ eq.	8.8	9.2	4.9	10.8	4.8	10.7	4.8	11.2
ADP	g Sb eq.	36.7	38.1	-5.1	88.9	-5.1	88.4	-8.7	92.2
EP	g PO ₄ -3 eq.	66.2	70.2	-68.8	0.5	-68.5	0.5	-74.0	0.4
AP	g SO ₂ eq.	49.7	52.0	-42.0	10.4	-41.9	10.4	-47.9	8.4
ODP	mg CFC-11 eq.	2.1	2.2	0.1	0.2	0.1	0.2	0.1	0.1
HTP	g 1,4-DB eq.	694.5	71.51	89.5	176.5	88.6	175.4	7.8	101.4
METP		284.9	293.9	38.4	59.7	38.1	59.4	7.4	30.3
TETP	mg 1,4-DB eq.	9.9	10.1	1.7	10.6	1.7	10.5	0.3	9.8
FETP		86.7	88.7	15.0	22.8	14.9	22.6	2.9	11.3

자료 : LCA평가결과 예시, 한국과학기술정보연구원, 김성호

[그림 III-59] 수소생산 8대 기술의 환경성

- 인하대학교는 탄소중립을 위한 국토교통분야 수소 기술의 전과정 환경성 평가 플랫폼구축 연구 기획연구를 수행중



[그림 III-60] 수소기술중 LCA 데이터베이스 구축에 대한 설문조사 결과

제4장

R&D 역량분석

제1절 정부R&D 투자 현황

제2절 기술수준 분석

제3절 유사사업 분석 및 차별성·연계방안

제4절 연구인력 및 인프라 분석

제5절 특허 분석

제6절 수요조사

4장 R&D 역량분석

1절 정부R&D 투자 현황

1) 분석개요

- (조사목적) 정부R&D투자 비중 비교와 시계열 분석을 통해 동 기획사업의 기술개발을 위한 정부R&D 투자동향, 국내 연구개발 역량 진단의 참고자료로 활용
 - (조사범위) 최근 7년(2016-2022)간 국가연구개발 사업 및 과제 현황을 대상으로 조사
 - 국가과학기술지식정보서비스(이하 NTIS)에서 확보 가능한 자료를 분석
 - (분석항목) 세부과제 단위로 연도별 과제 수, 정부연구비, 연구개발단계, 주관부처, 주관연구기관(연구수행주체) 관점에서 분석
 - 1) 수소 및 탄소소재, 2) 동 기획사업 연관 기술범위로 구분하여 연구개발 동향을 분석
 - (검색범위) 동 사업과 관련 정부 R&D 사업(과제)을 검색하기 위해 국가과학기술표준분류 중 다음의 기술분류에서 아래의 검색어를 활용하여 검색
 - 동 기획사업의 중점개발기술 범위를 고려하여 전문가를 통해 검색키워드 검토
 - 정부과제 중 동 기획사업 관련 지원과제를 도출하기 위해 전문가검토를 통해 핵심키워드(수소, 탄화수소, 탄소소재 등)를 선정하여 과제 도출
- ※ NTIS 키워드 검색을 통해 도출된 과제 목록을 대상으로 분석하여 동 기획사업 범위 전체와 상이할 가능성이 있음

〈표 IV-1〉 NTIS 검색 키워드 및 과제 검색 결과(2017~2022)

구분		검색키워드	R&D과제수
1) 수소 및 탄소		○ 수소, 탄화수소, 탄소소재 등	5,837
2) 동 기획사업 연관 기술	청록수소 유관 요소기술 고도화(중복제거)		4,270
	탄화수소 열분해	○ 메탄, 천연가스, 열분해, 직접분해, 촉매분해, 카본나노튜브, 금속탄화물 등	2,119
	수소 분리·정제	○ 수소분리, 수소정제, 고순도, 전처리, 시스템, 압력변동흡착, 분리막 등	2,121
	고체탄소 포집·전환	○ 열분해 고체탄소, 흑연화, 탄소나노튜브 탄화수소, 고체탄소 고순도화 등	1,009
	플랜트 건설 및 실증	○ 수소시범도시, 플랜트 건설, 플랜트 실증 등	238

자료 : NTIS 과제 검색 (2022.12. 기준)

2) 분석결과

(1) 수소분야

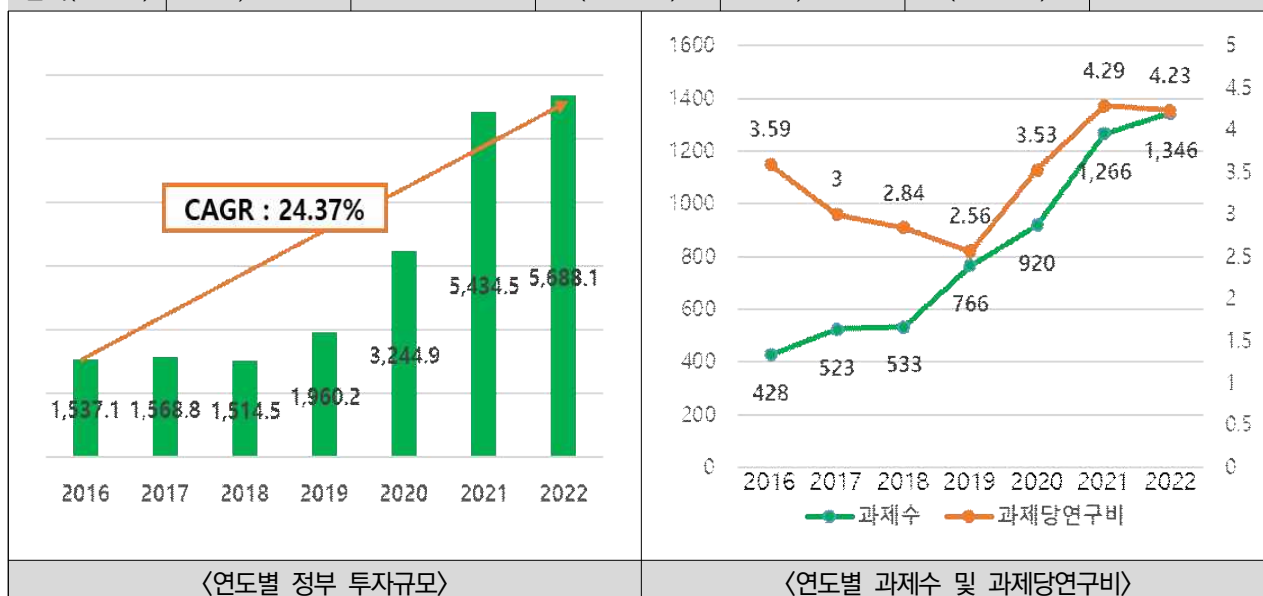
■ 연도별 투자현황 및 추이

- 정부연구비는 지난 7년간 약 2조 948억원 규모로 지속적으로 투자되었으며, '19년 이후 급격하게 증가 추세 (CAGR 약 24.37%)
- 7년간('16~'22) 총 5,782개 과제가 수행되었으며, '19년부터 조금씩 증가하였으나, 이후 감소 추세 (CAGR 약 21.04%)
- 과제당 연구비의 경우 7년간 평균 3.6억 원이며, 2021년부터 급격히 증가

〈표 IV-2〉 정부 R&D 연도별 투자현황 (수소분야)

(단위: 억원, %, 개)

연도	정부연구비			과제수		과제당연구비
	투자규모	백분율	전년대비 증가율(평균)	과제수	전년대비 증가율	
2016	1,537.1	7.3		428		3.59
2017	1,568.8	7.5	2.06	523	22.20	3.00
2018	1,514.5	7.2	-3.46	533	1.91	2.84
2019	1,960.2	9.4	29.43	766	43.71	2.56
2020	3,244.9	15.5	65.54	920	20.10	3.53
2021	5,434.5	25.9	67.48	1,266	37.61	4.29
2022	5,688.1	27.2	4.67	1,346	6.32	4.23
합계(CAGR)	20,948.1	100.0	(24.37%)	5,782	(21.04%)	3.62



자료: 국가과학기술지식정보서비스(NTIS)

(2) 동 기획사업 유관 요소기술 분야

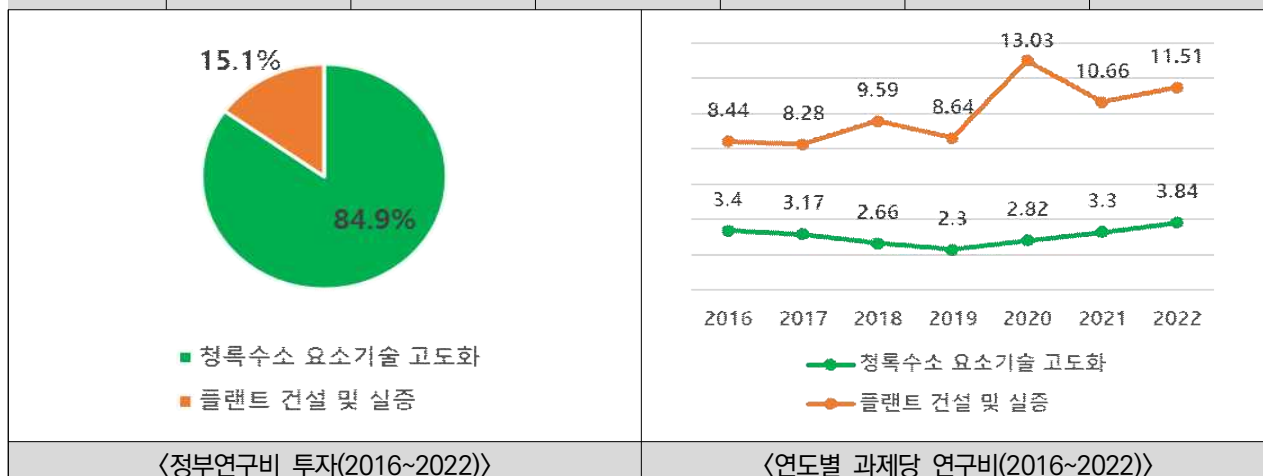
■ 연도별 투자현황 및 추이

- 2016년부터 2022년까지 총 1조 5,546억원의 정부연구비가 투자되었으며 ‘청록수소 요소기술 고도화’ 기술개발의 과제수는 연평균 13.59% 증가
 - 7년간(‘16~’22) 청록수소 요소기술 고도화에 1조 3,199억원, ‘플랜트 건설 및 실증’에 2,346억원 투입
- R&D 과제는 총 4,475개 ‘청록수소 요소기술 고도화’ 4,237개(94.7%), ‘플랜트 건설 및 실증’ 238개로 5.3% 수준
 - 과제당 연구비는 ‘청록수소 요소기술 고도화’ 3.1억원, ‘플랜트 건설 및 실증’ 9.86억원으로 플랜트의 과제당 연구비는 약 3.2배 높음

〈표 IV-3〉 정부 R&D 연도별 정부연구비 투자현황

(단위: 억원, %, 개)

연도	청록수소 요소기술 고도화			플랜트 건설 및 실증		
	투자규모	과제수	과제당 연구비	투자규모	과제수	과제당 연구비
2016	1,357.2	399	3.40	278.4	33	8.44
2017	1,455.0	459	3.17	331.2	40	8.28
2018	1,274.7	480	2.66	316.6	33	9.59
2019	1,384.6	601	2.30	311.0	36	8.64
2020	1,851.2	657	2.82	325.7	25	13.03
2021	2,586.7	784	3.30	415.6	39	10.66
2022	3,290.1	857	3.84	368.2	32	11.51
합 계	13,199.5	4,237	3.12	2,346.7	238	9.86
CAGR	15.90%	13.59%	-	4.77%	-0.51%	-



자료: 국가과학기술지식정보서비스(NTIS)

■ 부처별 투자현황

- 정부의 지난 7년간 ‘청록수소 요소기술 고도화’ 투자는 과기부 5,978.2억원(총 투자대비 45.3%), 산업부 4,051.2억원(총 투자대비 30.7%) 순으로 과기부 중심으로 연구 추진

※ 국토부는 196.7억원(1.5%)로 부처 중 최하위 수준

- 지원과제 수는 과기부가 2,033개, 산업부 461개, 국토부 17개 순이나 과제당 연구비는 국토부 11.56억원, 산업부 8.79억원, 과기부 2.94억원으로 국토부는 대형과제 위주로 수행

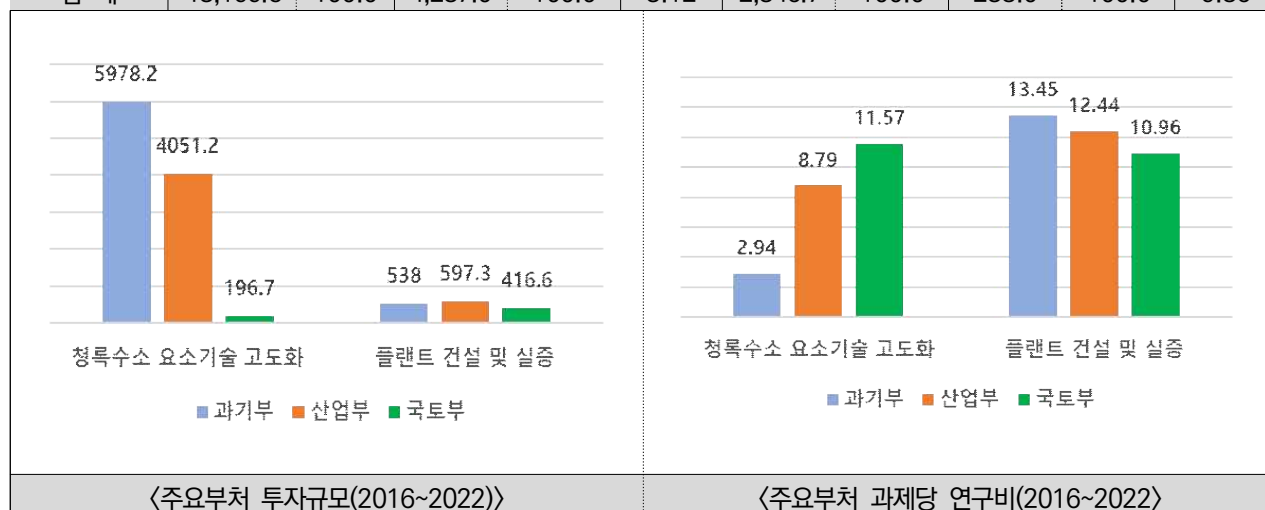
- ‘플랜트 건설 및 실증’ 투자는 산업부 597.3억원(25.5%), 과기부 538억원(22.9%), 국토부 416.6억원(17.8%) 순이며 과제당 연구비도 같은 순으로 높은 추세

※ 과제당 연구비 : 과기부 13.45억원, 산업부 12.44억원, 국토부 10.96억원 / 기재부 제외

〈표 IV-4〉 정부 R&D 부처별 투자현황(2016~2022)

(단위: 억원, %, 개)

부처	청록수소 요소기술 고도화					플랜트 건설 및 실증				
	투자규모		과제수		과제당 연구비	투자규모		과제수		과제당 연구비
	억원	비중	개수	비중		억원	비중	개수	비중	
과기부	5,978.2	45.3	2,033	48.0	2.94	538.0	22.9	40	16.8	13.45
산업부	4,051.2	30.7	461	10.9	8.79	597.3	25.5	48	20.2	12.44
국토부	196.7	1.5	17	0.4	11.57	416.6	17.8	38	16.0	10.96
중기부	698.6	5.3	510	12.0	1.37	41.2	1.8	20	8.4	2.06
해수부	279.4	2.1	108	2.5	2.59	410.1	17.5	59	24.8	6.95
환경부	404.3	3.1	84	2.0	4.81	87.9	3.7	15	6.3	5.86
기재부	802.0	6.1	109	2.6	7.36	187.3	8.0	7	2.9	26.75
이외*	789.1	6.0	915.0	21.6	0.86	68.3	2.9	11.0	4.6	6.21
합 계	13,199.5	100.0	4,237.0	100.0	3.12	2,346.7	100.0	238.0	100.0	9.86



자료: 국가과학기술지식정보서비스(NTIS)

* 중기부, 교육부, 산림청, 농진청, 원자력안전위원회 등

■ 부처별-연도별 투자현황

- 국토부 청록수소 요소기술 고도화. 플랜트 건설 및 실증 투자는 규모면에서 과기부, 산업부에 비해 작으나, 근래 투자가 확대되는 추세로 연평균 성장률은 가장 높음

※ 청록수소 요소기술 고도화 투자 성장률 : (과기부 4.31%) vs (산업부 17.19%) vs (국토부 34.5%)

※ 플랜트 건설 및 실증 투자 성장률 : (과기부 -23.8%) vs (산업부 0.62%) vs (국토부 9.6%)

〈표 IV-5〉 부처별-연도별 정부연구비 현황

(단위: 억원)

구분	부처	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	총합	CAGR
청록수소 요소기술 고도화	과기부	728.1	779.6	695.0	817.8	933.9	1,085.7	938.0	5,978.2	4.31%
	산업부	418.4	366.1	312.3	338.4	579.6	952.4	1,084.0	4,051.2	17.19%
	국토부	3.5	3.9	5.2	17.4	37.2	108.8	20.7	196.7	34.50%
	이외*	207.1	305.4	262.3	211.0	300.5	439.9	1,247.3	2,973.5	34.89%
합계		1,357.2	1,455.0	1,274.7	1,384.6	1,851.2	2,586.7	3,290.1	13,199.5	15.90%
플랜트 건설 및 실증	과기부	105.3	101.2	96.3	92.6	70.6	51.6	20.5	538.0	-23.88%
	산업부	100.2	74.6	71.6	42.5	66.8	137.7	104.0	597.3	0.62%
	국토부	15.9	51.0	32.1	54.2	101.9	133.9	27.6	416.6	9.60%
	이외*	56.9	104.4	116.7	121.7	86.5	92.4	216.1	794.8	24.89%
합계		278.4	331.2	316.6	311.0	325.7	415.6	368.2	2,346.7	4.77%

자료: 국가과학기술지식정보서비스(NTIS)

* 중기부, 교육부, 산림청, 농진청, 원자력안전위원회 등

- 양 기술분야 내 국토부의 연도별 지원과제수의 평균 성장률은 0% 수준으로 지원과제수의 변동은 거의 없으나, 연도별 과제당 연구비는 증가하는 추세

※ 청록수소 요소기술 고도화 과제당 연구비 증가율('16~'22) : 2.04%

※ 플랜트 건설 및 실증 과제당 연구비 증가율('16~'22) : 5.31%

〈표 IV-6〉 부처별-연도별 지원과제수 현황

(단위: 억원)

구분	부처	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	총합	CAGR
청록수소 요소기술 고도화	과기부	172	199	220	338	352	400	352	2,033	12.68%
	산업부	63	58	46	51	63	91	89	461	5.93%
	국토부	2	3	3	3	1	3	2	17	0.00%
	이외*	162	199	211	209	241	290	414	1,726	16.93%
합계		399	459	480	601	657	784	857	4,237	13.59%
과제당 연구비		3.40	3.17	2.66	2.30	2.82	3.30	3.84	3.12	2.04%
플랜트 건설 및 실증	과기부	8	6	6	7	6	5	2	40	-20.63%
	산업부	9	9	8	6	3	7	6	48	-6.53%
	국토부	4	4	2	6	7	11	4	38	0.00%
	이외*	12	21	17	17	9	16	20	112	8.89%
합계		33	40	33	36	25	39	32	238	-0.51%
과제당 연구비		8.44	8.28	9.59	8.64	13.03	10.66	11.51	9.86	5.31%

자료: 국가과학기술지식정보서비스(NTIS)

■ 연구단계별 투자현황 및 연구개발성적

- 그간 청록수소 요소기술은 개발(40.1%), 기초(37.1%), 응용(20.1%) 순으로 투자
 - 과제 수 비중 기준으로는 기초(56.5%), 개발(27.9%), 응용(13.3%) 순
 - 반면, 과제당 연구비는 응용(4.7억), 개발(4.5억), 기초(2억) 순
- 플랜트 건설 및 실증은 개발연구 중심으로 투자되어왔으며(62.6%), 차순으로 응용(20.2%), 기초(12.7%) 순으로 투자
 - 과제 수 비중 기준으로는 개발(60.3%), 기초(21%), 응용(14.1%) 순
 - 과제당 연구비는 응용(13.9억), 개발(10.1억), 기초(5.8억)

〈표 IV-7〉 정부 R&D 연구단계별 투자현황(2016~2022)

(단위: 억원, 개)

연구단계별	청록수소 요소기술 고도화					플랜트 건설 및 실증				
	투자규모		과제 수		과제당 연구비	투자규모		과제 수		과제당 연구비
	억원	비중	개수	비중		억원	비중	개수	비중	
기초연구	4830.7	37.1	2369	56.5	2.0	289.4	12.7	50	21.4	5.8
응용연구	2616.8	20.1	558	13.3	4.7	460.3	20.2	33	14.1	13.9
개발연구	5228.1	40.1	1169	27.9	4.5	1423.6	62.6	141	60.3	10.1
기타	355.7	2.7	98	2.3	3.6	99.8	4.4	10	4.3	10.0
합계*	13031.4	100.0	4194	100.0	3.1	2273.0	100.0	234	100.0	9.7

■ 기초연구 ■ 응용연구 ■ 개발연구 ■ 기타 〈청록수소 요소기술 투자규모 비중〉	■ 기초연구 ■ 응용연구 ■ 개발연구 ■ 기타 〈청록수소 요소기술 과제수 비중〉	■ 기초연구 ■ 응용연구 ■ 개발연구 ■ 기타 〈플랜트 건설 및 실증 투자규모 비중〉	■ 기초연구 ■ 응용연구 ■ 개발연구 ■ 기타 〈플랜트 건설 및 실증 과제수 비중〉

자료: 국가과학기술지식정보서비스(NTIS)

* 항목 구분이 없는 경우를 제외

■ 연구수행주체별 투자현황

- 청록수소 요소기술 고도화 연구는 ‘산’, ‘학’, ‘연’이 비교적 고른 비중으로 참여
 - 투자규모 기준 산(35.4%), 연(35.0%), 학(26.7%), 기타(3.0%)의 비중으로 연구 수행
 - 과제 수 기준으로는 학(57.6%)이 가장 많은 과제를 수행했으며, 차순으로 산(24.0%), 연(16.6%)
 - 그러나, ‘학’은 투자규모 작은 소형 과제를 다수 수행한 것으로 과제당 연구비는 연(6.6억), 산(4.6억)에 이어 1.4억 수준
- 플랜트 건설 및 실증 연구는 주로 ‘연’ 위주로 수행
 - 투자규모 기준 연(47.6%), 산(36.6%), 학(8.4%), 기타(7.5%)의 비중으로 연구 수행
 - 과제 수 기준으로는 전체 과제 수 중 산(47.5%), 연(28.6%), 학(18.1%)의 비중으로 연구 수행
 - 과제당 연구비는 연(16.4억), 기타(12.5억), 산(7.6억), 학(4.6)억 순

〈표 IV-8〉 정부 R&D 연구수행주체별 투자 현황

(단위: 억원, 개)

연구수행 주체	청록수소 요소기술 고도화					플랜트 건설 및 실증				
	투자규모		과제수		과제당 연구비	투자규모		과제수		과제당 연구비
	억원	비중	개수	비중		억원	비중	개수	비중	
산	4,667.1	35.4	1,017	24.0	4.6	858.4	36.6	113	47.5	7.6
학	3,519.1	26.7	2,442	57.6	1.4	196.1	8.4	43	18.1	4.6
연	4,622.0	35.0	705	16.6	6.6	1,117.2	47.6	68	28.6	16.4
기타	391.3	3.0	73	1.7	5.4	175.1	7.5	14	5.9	12.5
합계*	13,199.5	100.0	4,237	100.0	3.1	2,346.7	100.0	238	100.0	9.9

■ 산 ■ 학 ■ 연 ■ 기타	산 학 연 기타	■ 산 ■ 학 ■ 연 ■ 기타	산 학 연 기타
〈청록수소 요소기술 고도화 연구수행주체별 투자규모〉	〈청록수소 요소기술 고도화 연구수행주체별 과제 수〉	〈플랜트 건설 및 실증 연구수행주체별 투자규모〉	〈플랜트 건설 및 실증 연구수행주체별 과제 수〉

자료: 국가과학기술지식정보서비스(NTIS)

(3) 청록수소 유사과제 현황

■ 청록수소 유관 요소기술 정부연구비 총 투자액은 7년간 1조 5,546억원이나, 청록수소 직접연관 기술개발은 7년간 3개 과제로 총 5억원 수준에 불과

○ 국토교통과학기술진흥원 및 NTIS(국가과학기술지식정보서비스) 시스템 등을 활용하여 유사·중복 검토한 결과, 동 사업은 별도 사업으로 추진이 타당

① 기존 수소사업은 생산, 저장·운송, 활용기반의 기술개발에 집중되어 추진 중이며 청록수소 생산 관련 기술은 과제 수준에서 일부 추진 중

② 동 사업은 청록수소 플랜트 건설·실증과 이를 위한 요소기술 고도화를 목적으로 청록수소공급 시스템 개발 및 수소도시 실증으로 차별성이 존재

〈표 IV-9〉 동 기획사업과의 차별성

(사업명) 과제명	기술단계	청록수소 생산기술	차별성
동 기획사업 (대용량 청록수소 공급 시스템 기술개발)	상용화	고온플라즈마	공급시스템 전반 기획
(예기연, 기관고유사업) 청록수소생산을 위한 촉매 후보군 및 고효율/저탄소 공정 개념설계안도출	공정 설계 및 후보군 도출	촉매 열분해	저가 고효율 촉매 개발
(개인기초연구) 메탄 열화학분해 기반 청록 수소 생산 모듈 시스템 개발	파일럿 플랜트 건설	촉매 열분해	모듈시스템 개발
(미래수소원천기술개발) 태양에너지와 액체금속촉매를 이용한 C-X 화합물 열화학적 전환을 통한 CO2-free 수소생산공정 개발	원천기술 확보	촉매 열분해	태양에너지 일부 사용

■ 유사과제와 차별성 및 연계가능성

○ 과기부 중심으로 생산기술개발 추진 중이며 단독 사업 부재하며, 청록수소키워드로 과제검색결과,과기부 위주의 생산기술개발 중심으로 추진하고 있는 것으로 파악

- 미래수소원천기술개발 사업 외에는 개인 및 출연연단위의 과제로 진행, 미래수소원천기술개발 사업은 청록수소외에 다양한 생산방식을 연구

○ 단독 사업, 공급시스템, 고온 플라즈마활용 측면에서 사업 차별성 확보

- 공급시스템전반을 기획함으로 운송/저장기술, 안정성, 인증/표준화 연구 포함

- 고온플라즈마를활용한 수소생산기술개발로 유사과제와기술적 차별성 확보

※ 타과제는직접열분해방식 활용

〈표 IV-10〉 유사과제와의 차별성 및 연계가능성

과제명(사업명)	유사성 및 차별성	연계가능성
청록수소 생산을 위한 촉매 후보군 및 고효율/저탄소 공정 개념설계안 도출 (한국에너지기술연구원)	- 해당 연구개발 과제는 메탄을 직접분해할 수 있는 전이금속 기반 촉매 후보군을 도출하므로 TRL 2 수준의 기초 연구임 - 본 기획연구는 플라즈마를 주로 이용하며 실증형 시스템 개발이 최종 목표임 (TRL 7 이상)	플라즈마와 연계 가능한 촉매화학반응 공정 개발 내용에 기 연구된 촉매후보를 활용할 수 있음
메탄 열화학 분해 기반 청록 수소 생산 모듈 시스템 개발 (개인기초연구)	- 해당 연구개발 과제는 메탄을 직접분해할 수 있는 초고온 촉매 반응시스템에 대한 연구이나 TRL 2 수준의 기초 연구임 - 본 기획연구는 플라즈마를 주로 이용하며 실증형 시스템 개발이 최종 목표임 (TRL 7 이상)	
태양에너지와 액체금속촉매를 이용한 C-X 화합물 열화학적 전환을 통한 CO ₂ -free 수소생산 공정 개발 (미래수소원천기술개발)	- 해당 연구개발 과제는 용융금속을 이용하여 메탄을 직접분해할 수 있는 초고온 촉매 반응시스템에 대한 연구이고 수소생산량 기준 1 ton/day 시스템에 대한 설계안을 도출하는 것이 목표임 - 그러나 본 기획연구는 플라즈마를 주로 이용하며 수소생산량 기준 3 ton/day 시스템 개발 및 실증이 최종 목표임 (TRL 7 이상)	메탄 열분해 시 생성된 탄소생성물의 고품질화에 대한 연구가 포함되어 있으므로 연구결과의 연계 활용이 가능할 것으로 예상함

■ 유사과제 상세내용

○ 청록수소생산을 위한 촉매 후보군 및 고효율/저탄소공정 개념설계안도출

- (부처) 과학기술정보통신부
- (사업명) 한국에너지기술연구원운영비지원
- (수행기관) 한국에너지기술연구원
- (기간) 2022.03.01. ~ 2022.12.31

구분	내용	
연구목표	정성적목표	• 저가/고효율 촉매 설계 전략 수립 및 유력 후보군 도출 • 기체/고체 및 수소 분리를 고려한 고효율 청록수소생산 촉매 공정 설계
	정량적목표	• 비귀금속을이용하여 상압, 900°C 이하 조건에서 7mmol/min·gcat 이상의 메탄 분해반응속도를 1시간 이상 유지 가능한 촉매 후보군 도출 • 상기 촉매를 이용하여, 수소 및 탄소를 연속적으로 대량생산 가능한 고위발열량기준 수소생산효율 60 % 수준의 일일 500 kg급 공정개념 설계(안) 제시
연구내용		1) 전이금속 기반의 저가/고효율 촉매 설계 전략 수립 및 유력 후보군 도출 2) 수소 및 탄소의 연속/대량 생산고효율반응 공정 설계
기대효과	과학기술적	탄소 소재도 생산 가능한 기술로, 미래 에너지 솔루션이 될 수 있는 기술
	경제적	수소 및 탄소기반 전곡소재시장에 동시에 대응 가능한 기술
	사회적	저탄소수소 에너지 공급기술인동시에 이차전지 등에 사용가능한핵심 탄소소재 생산기술

○ 메탄 열화학분해 기반 청록 수소 생산 모듈 시스템 개발

- (부처) 과학기술정보통신부
- (사업명) 개인기초연구
- (수행기관) 서울대학교
- (기간) 2022.03.01. ~ 2023.02.28.

구분	내용	
연구목표 및 내용	1차년도	초고온($T \leq 2,800^{\circ}\text{C}$) 초단시간의차세대 화염 공정 시스템 설계 및 제작
	2차년도	메탄 열분해의 효율적인 반응을 위해높은 활성도와안정성을 지닌 高엔트로피 합금 촉매 개발
	3차년도	열화학반응기(예, 고내구성수직형전기로 등) 개발 및 성능 평가
	4차년도	랩 규모의 열화학 모듈 시스템 (구성품: 반응기, 메탄 공급기, 수소 분리기, 촉매 재생기 등 포함) 개발
	5차년도	디지털 트윈 기술 기반 청록 수소 생산기술의 다양한 경제성분석
기대효과	기술적	화염 공정, 고 효율 촉매, 열화학 반응기와 모듈 시스템 기반의 차세대 청록 수소 생산 모듈화 (파일럿) 플랜트 건설에 기여
	경제적	최대 약 2.3조 달러에 달하는 미래 친환경 수소 시장을 선점하고, 에너지 수출국으로 도약
	사회적	교육 기관으로서 사회 전반에 친환경 수소 전문 석박사급인력 양성
	산업적	촉매, 공정, 반응기, 시스템 관련 원천기술 이전 및 제조업 기반 일자리 창출과 제품의 상용화

○ 태양에너지와 액체금속촉매를 이용한 C-X 화합물 열화학적전환을 통한 CO₂-free 수소생산공정 개발

- (부처) 과학기술정보통신부
- (사업명) 미래수소원천기술개발
- (수행기관) 한국생산기술연구원
- (기간) 2021.07.01. ~ 2026.12.31.

구분	내용
연구목표	수소경제 구현을 위한 대량의 청정수소생산이 가능한 탄화수소계원료의 열화학적전환을 통한 CO ₂ -free 수소생산원천기술 확보
연구내용	- 태양에너지와 액체금속촉매를 이용한 C-X 화합물(CH₄를 중심으로 한 다종 탄화수소)의 직접 열분해 기반 CO₂-free 수소생산 시스템 개발 - 정량적 연구목표 - 생산된 수소에너지 대비 태양에너지 기여도 25% 이상 (태양열 집광 운전조건) - 액체금속촉매: CH₄ 기준 전환율90% 이상, 수소 선택도 90% 이상
기대효과	“수소경제 활성화 로드맵”에제시된 2030년 국내외 CO₂-free 수소 생산 및 도입 목표달성에 기여할 수 있는 대규모 수소 supply chain 구축 - SMR 대비 CO₂ 90% 이상 저감, 3\$/kg-H₂ 수준의 경제적 수소 생산 기술 확보 - 다양한 탄화 수소계원료를 이용한 CO₂-free 대량 수소생산 시장 창출 - 대량 수소생산을 위한 원천특허 및 상용 설계기술 확보 (1ton-H₂/day)

2절 기술수준 분석

1. 국가중점기술분류(KISTEP) 기준 기술 수준 및 격차 진단

1) 분석개요

■ 수소R&D 관련 기술의 수준과 연구개발 역량을 파악하여 본 사업 추진 여건의 시사점 도출

- 본 사업과 연관성이 높은 에너지·자원분야와 중점기술(수소·연료전지 기술)의 수준을 조사하고, 기술수준평가를 통해 동 사업과 연관성이 높은 기술의 수준을 분석

〈표 IV-11〉 수소·연료전지 기술의 범위

- 수소에너지의 생산·저장·이송에 관한 기술과 수소를 연료로 전기와 열을 생산하는 고효율 발전기술인 연료전지 기술을 포괄
- 수소전기차 연료 보급을 위한 수소충전 인프라 기술을 포함
- 주택 건물용 분산전원, 휴대용 전원, 중대형 발전 설비뿐만 아니라 수소전기차, 잠수함, 무인비행기, 인공위성 등 수송용 전원으로 활용할 수 있는 다양한 연료전지 기술을 포함
- 발전기술에 국한하지 않고 재생에너지 기술과의 융복합을 통해 수소를 효과적인 에너지저장 및 이송 매체로 활용하고 에너지 신산업에 활용할 수 있는 복합발전기술로서 미래의 수소경제사회를 구현하기 위한 제반 요소기술을 포함

자료: 2020년 기술수준평가 보고서(KISTEP)

2) 분석결과

■ (에너지·자원) 최고기술보유국인 미국 대비 기술수준은 80.2%이며, 기술격차는 3.7년으로 평가

- 국가별로 기술수준은 미국(100%), EU(98.2%), 일본(91.0%), 중국(81.6%) 순으로, 한국은 최고기술보유국 대비 80.2%, 기술격차 3.7년으로 나타남
- 한국의 기술수준은 '18년 대비 '20년에 3.4%p가 증가(76.8% → 80.2%)하였고, 기술격차는 0.3년 감소(4.0년 → 3.7년)

※ 한국, 중국, 일본, EU 모두 기술수준이 증가한 것으로 나타났으나, 일본의 경우 기술격차는 증가(0.1년), 수준그룹은 한 단계 하락(선도→추격)한 것으로 평가

〈표 IV-12〉 에너지·자원 분야 기술수준 분석

구분	한국		중국		일본		EU		미국	
	'18	'20	'18	'20	'18	'20	'18	'20	'18	'20
기술수준(%)	76.8	80.2	76.8	81.6	90.6	91.0	96.7	98.2	100.0	100.0
기술격차(년)	4.0	3.7	3.9	3.5	1.8	1.9	0.3	0.3	-	-
기술수준 그룹	추격	추격	추격	추격	선도	추격	선도	선도	최고	최고

자료: 2020년 기술수준평가 보고서(KISTEP)

■ (수소·연료전지 기술) 한국은 '20년 최고기술보유국(일본) 대비 기술수준 75.0%, 기술격차는 3.0년으로 추격그룹으로 분석됨

- 기술수준은 '18년에 대비 '20에 3.3%p가 감소하였으며, 기술격차는 3.0년으로 동일
- '20년 연구계역량은 기초분야 우수, 응용개발 우수한 것으로 나타났으며, 연구개발 활동경향은 '18년 유지에서 '20년 상승으로 나타남

〈표 IV-13〉 수소·연료전지 기술 수준 및 격차

구분	기술수준(%)		기술격차(년)		그룹		연구단계 역량		연구개발 활동경향	
	'18	'20	'18	'20	'18	'20	기초	응용개발	'18	'20
한국	78.3	75.0	3.0	3.0	추격	추격	우수	우수	유지	상승
중국	70.7	75.0	5.0	5.0	추격	후발	우수	보통	상승	상승
일본	100.0	100.0	-	-	최고	최고	탁월	탁월	상승	유지
EU	96.0	95.0	1.0	1.0	선도	선도	탁월	탁월	상승	상승
미국	97.5	95.0	1.0	1.0	선도	선도	탁월	우수	유지	상승

자료: 2020년 기술수준평가 보고서(KISTEP), 2018년 기술수준평가 보고서(KISTEP)

- 한국은 아직 그린수소 생산 등에 대한 투자 초기 단계로, 일부 기술에서는 수준 높은 기술력을 보유하고 있으나 부품 소재 국산화, 인프라 보급 등이 충분치 않다고 평가

〈표 IV-14〉 기술수준 및 기술격차 판단의 근거

국가	평가의견
한국	○ 그린수소 생산에 대한 투자가 시작된 지 얼마되지 않았으며, 투자비도 많지 않음 ○ 현대자동차를 중심으로 한 수소연료전지 자동차 개발에 대한 의지는 강하나, 아직 수소 인프라가 충분히 보급되지 않은 상황 ○ 그린수소 생산기술 열위 ○ 수소 대용량 생산, 유통 및 소비를 위한 액화수소플랜트, 저장용기 기술 개발 착수시스템 기술은 높은 수준에 있다고 판단되지만, 부품 소재 국산화와 스택 내구성 등 개선이 필요한 부분들이 많음
중국	○ 원천기술에서 정부의 적극적인 지원으로 우수한 연구 수행 중 ○ 기술개발 및 도입을 공격적으로 진행중이나 기술의 완성도가 상당히 미흡 ○ 저온 수전해 등 그린수소 생산기술 일부를 보유하고 있으나, 규모, 신뢰성 면에서 기술격차 존재 ○ 가격 경쟁력이 가장 뛰어남
일본	○ 수소 관련 상용화 실적 다수, 정책적인 지원 뒷받침 ○ 연료전지 시장 확립, 내구성 또한 확보 ○ 정부 로드맵에 따라 꾸준한 기술개발이 축적, 수소 및 연료전지 전반에 높은 기술수준 확보 ○ 실증 사업 가장 활발
EU	○ 그린수소 생산 분야에서 세계 최고 기술 및 제품 보유 ○ 신재생에너지를 이용한 수소연료전지 기술 선도 중 ○ 수전해 기술이 상당히 우수하며, 알칼리 보급, PEM 수전해 대규모 실증 중
미국	○ 자동차용 연료전지 연구결과 우수, 그린수소 생산에 대한 투자 미흡 ○ 대규모 수소 생산 기술, 실증액화수소 상용화 ○ 발전용 SOFC 연료전지 선도, 차량용 연료전지 선도, 수소 스테이션 다량 보급 ○ 북미에 대용량 수소 밸류체인 형성, 선도기업 보유

자료: 2020년 기술수준평가 보고서(KISTEP)

2. 국토교통 기준 기술수준 및 경쟁력 분석

1) 분석개요

■ 국토교통분야 기술수준분석 총괄보고서를 활용한 동 사업 플랜트 건설 관련 기술수준 분석

- 국토교통분야에 대한 기술수준조사는 '13년부터 추진되었으나 '17년 국토교통과학기술 육성법이 제정됨에 따라 '19년 조사부터 관련 법적 근거를 기반으로 추진
 - 국내 국토교통기술의 수준 및 경쟁력 분석은 유망기술개발 분야를 제시하고, R&D추진전력 수립 및 연구방향설정을 위한 기초자료로서 활용됨
- ※ '13년 및 '15년 「국토교통 연구개발 사업 관리지침」에 의거하여 추진되었으며, '13년 99개 소분류, '17년 113개 소분류에 대해 실시
- 국토교통분야 기술분류 내 8개 대분류(93개 소분류) 중 본 사업에서 추진하고자 하는 바와 연관 있는 대분류는 '플랜트'
 - 세부영역으로 중분류상 '신재생에너지플랜트'이며, 소분류로는 '수소생산/인프라'
 - 7개국(한국, 미국, 일본, 중국, 독일, 영국, 프랑스)에 대한 최고기술국, 상대적 기술수준, 기술격차 기간 등의 기술수준을 조사결과를 활용

〈표 IV-15〉 동 사업의 범위와 관련성이 높은 국토교통 분야

사업내용	연관 대분류	연관 중분류	연관 소분류
○ 청록수소 플랜트 엔지니어링 및 청록수소 도시 공급 운영기술 개발	D.플랜트	D3.신재생에너지 플랜트	D37. 수소생산/인프라

자료 : 2019 국토교통 기술수준분석 총괄보고서(KAIA, 2019)

2) 분석결과 요약

■ 수소생산/인프라 기술적 중요성은 매우 높으나 기술개발의 수준은 낮아 선도적 지원 필요

- 수소생산/인프라 기술의 중요도, 시급성, 파급효과 등 높으나 기술수준은 최고 기술국 대비 68.5% 및 6년의 기술격차 존재
- 정부지원의 필요성이 매우 높은 분야로, 기술경쟁력 재고를 위한 R&D 투자 및 인프라 지원이 절실

3) 분석결과 상세

(1) 기술수준분석

■ 대분류 : 플랜트

- '19년 기준 플랜트 분야의 최고기술보유국은 미국이며, 우리나라는 최고기술보유국 대비 74.3%의 수준 및 5년의 기술수준 격차
 - 주요 7개국 중 우리나라 플랜트 기술수준은 6위로 최하위권
 - 중국은 지속적인 기술수준 향상으로 6위인 우리나라와 대등한 기술수준으로 평가
 - ※ '13년, '15년 최하위에 위치했던 중국의 기술수준은 타 국가 대비 큰 폭으로 향상(56.8% → 68.2% → 73.4%)
- 독일, 영국, 프랑스 등 유럽국가들은 기후변화 대응 및 신재생에너지 사용 등 정책 목표 달성을 위한 투자를 지속적으로 증가시키고 있는 추세로 관련 기술수준이 향상 중

〈표 IV-16〉 플랜트분야 기술수준 및 기술격차(2019)

(단위: %, 년)

구분	한국	일본	미국	중국	독일	영국	프랑스
기술수준(%)	74.3	88.2	100	73.4	93	90	89.7
기술격차(년)	5	2.2	0	5.4	1.3	2.1	1.8

자료 : 2019 국토교통 기술수준분석 총괄보고서(KAIA, 2019)

■ 중분류 : 신재생에너지 플랜트

- '19년 기준 신재생에너지 플랜트 분야 최고기술보유국은 미국으로, 우리나라는 최고기술보유국 대비 73.7%의 기술수준 및 4.8년의 기술격차 존재
 - 전세계적으로 기후변화 대응, 탄소저감 등 정책 목표를 달성하기 위해 투자하고 있는 분야로, 모든 국가의 기술수준이 빠르게 향상 중
 - 주요 7개국 중 우리나라 신재생에너지 플랜트 기술수준은 6위로 주요국과의 격차를 좁히지 못하고 있는 실정

〈표 IV-17〉 신재생에너지 플랜트분야 기술수준 및 기술격차(2019)

(단위: %, 년)

구분	한국	일본	미국	중국	독일	영국	프랑스
기술수준(%)	73.7	87.9	100	71.6	96.8	91.6	90.5
기술격차(년)	4.8	2.3	0	5.2	0.3	1.5	1.5

자료 : 2019 국토교통 기술수준분석 총괄보고서(KAIA, 2019)

■ 소분류 : 수소생산/인프라

- '19년 기준 수소생산/인프라 분야 최고기술보유국은 미국이며, 우리나라는 최고기술보유국 대비 68.5%의 기술수준 및 6년의 기술격차 존재
- 수소생산/인프라 기술은 최고기술보유국도 최근에 성장기에 진입한 기술로 평가되나, 우리나라는 주요 7개국 중 6위로 최하위권에 위치하며 기술격차도 큼
- 플랜트(74.3%), 신재생에너지플랜트(73.7%)의 기술수준격차 대비 수소생산/인프라(68.5%)의 기술수준 격차가 더 큰 실정

〈표 IV-18〉 수소생산/인프라 분야 기술수준 및 기술격차(2019)

(단위: %, 년)

구분	한국	일본	미국	중국	독일	영국	프랑스
기술수준(%)	68.5	90	100	67	95	85	89.5
기술격차(년)	6	2.5	0	6	1	2.5	1.8

자료 : 2019 국토교통 기술수준분석 총괄보고서(KAIA, 2019)

(2) 집중영역 매트릭스 분석

- 수소생산/인프라기술은 R&D투자부족 및 인프라가 부족한 문제로 기술적중요도, 시급성, 파급효과 높으나 기술수준이 낮은 것으로 파악

- (기술적 중요도 ↑, 기술수준 ↓) 수소생산/인프라 기술은 오일샌드/세일가스 추출 기술과 더불어 기술적 중요도가 높지만 기술수준이 낮은 영역으로 평가



자료 : 2019 국토교통 기술수준분석 총괄보고서(KAIA, 2019)

[그림 IV-1] 플랜트 분야 기술수준 - 기술적 중요도 매트릭스 분석

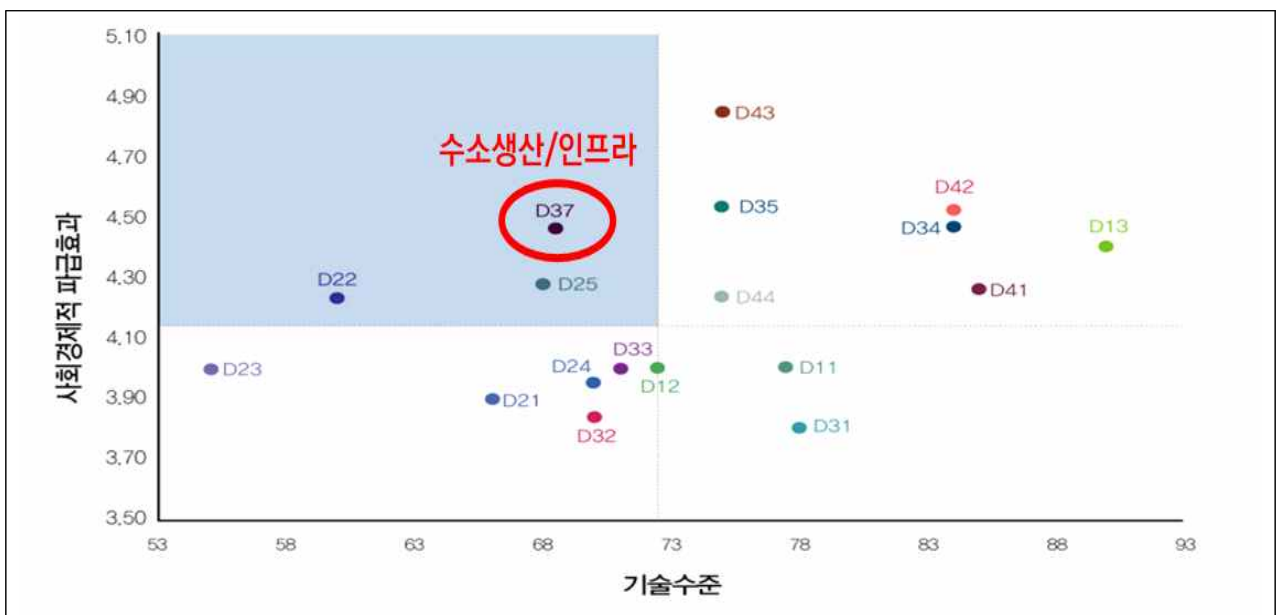
- (기술확보시급성 ↑, 기술수준 ↓) 시급히 개발해야하나 기술수준이 낮은 영역으로 바이오, 오일샌드/세일가스 추출, 극한지역자원개발과 더불어 수소생산/인프라 기술이 선정



자료 : 2019 국토교통 기술수준분석 총괄보고서(KAIA, 2019)

[그림 IV-2] 플랜트 분야 기술수준 - 기술확보 시급성 매트릭스 분석

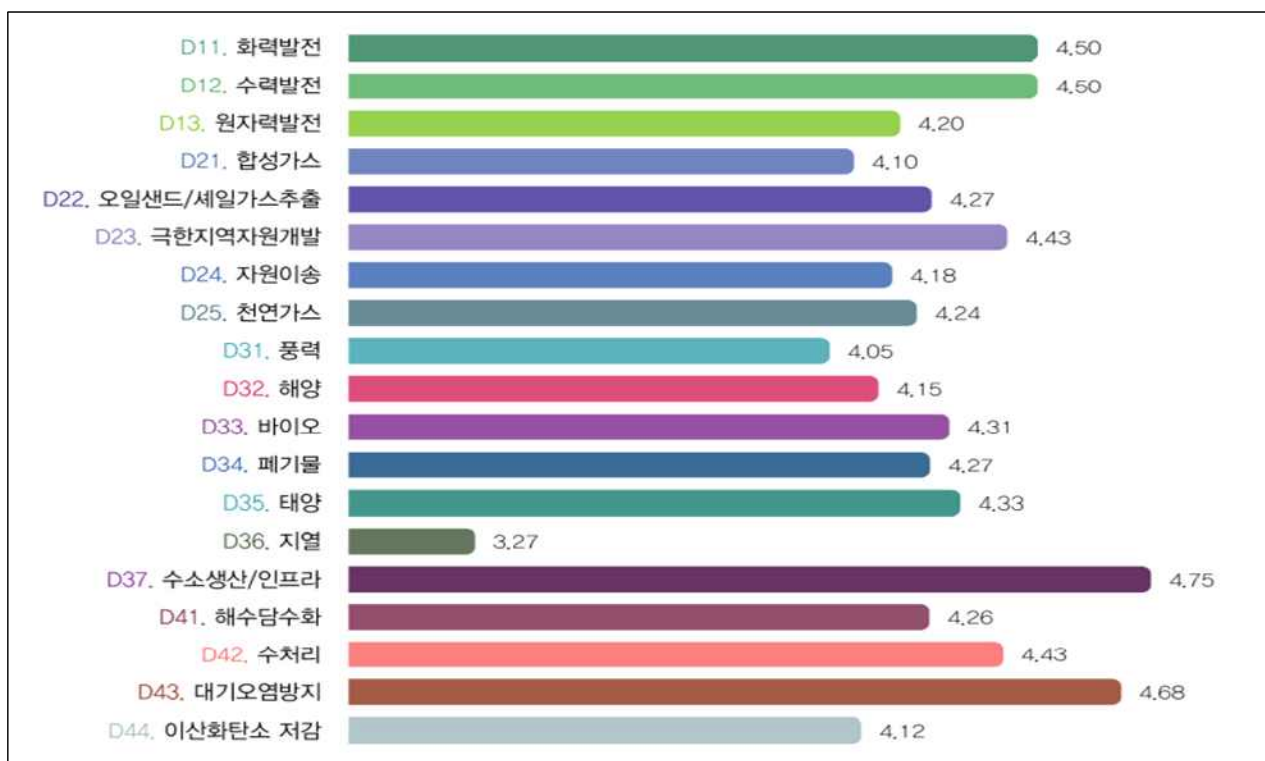
- (기술파급효과 ↑, 기술수준 ↓) 수소생산/인프라는 기술의 파급효과는 높으나 기술수준이 낮은 영역으로 선정



자료 : 2019 국토교통 기술수준분석 총괄보고서(KAIA, 2019)

[그림 IV-3] 플랜트 분야 기술수준 - 파급효과 매트릭스 분석

- (정부지원 필요성) 플랜트 분야 내 정부지원 필요성이 높은 분야 중 수소생산/인프라는 가장 높은 점수를 차지하며, 지원필요가 가장 높은 영역으로 선정



자료 : 2019 국토교통 기술수준분석 총괄보고서(KAIA, 2019)

[그림 IV-4] 플랜트 분야 기술수준 - 기술 파급효과 매트릭스 분석

- (기술격차 해소방안) 수소생산/인프라 분야 기술격차 발생 요인은 'R&D투자 부족'이 제1요인으로 파악
 - 차순으로는 장비/설비 등 인프라를 구축하는 것도 시급한 요인으로 선정되었으며, 기초연구 지원도 필요

〈표 IV-19〉 수소생산/인프라 기술격차 발생원인

중분류	소분류	인프라 (장비/설비) 부족	인력부족	R&D투자 부족	중소기업 지원부족	기초연구 지원부족	법제도 정비 필요	사업화지원 부족
신재생 에너지 플랜트	수소생산/ 인프라	2순위	-	1순위	-	3순위	-	-

자료 : 2019 국토교통 기술수준분석 총괄보고서(KAIA, 2019)

3절 유사사업 분석 및 차별성·연계방안

1. 유사사업 분석 개요

■ 분석목적

- 연구개발 기획 사업과 기존 타 사업과 특성을 비교·분석하여 신규 기획사업의 특징과 차별성을 확보
 - 예비타당성조사 지침을 준용하여 유사사업 분석 수행
 - 예비타당성조사에서 유사사업 분석은 사업단위의 기술개발활동 차별성과 연계방안을 검토
 - 타 사업과의 차별화와 연계요인을 도출하여, 동 사업의 추진이 적절한가를 제시
 - 국가연구개발사업 예비타당성조사의 유사중복성 분석 단위는 사업으로 제시
- ※ 과제수준의 중복검토는 세부활동 및 추진전략의 적절성 도출 목적으로 별도 실시

■ 중복성 조사대상 사업 발굴 방식

- 청록수소 R&D 사업과 사업목표, 지원대상, 지원분야 측면 등 유사사업을 선별·검토하여 국가연구개발사업 포트폴리오의 중복성 여부 점검
 - 유사사업 속성인 목적, 지원분야, 지원내용 등을 문헌조사를 통해 비교·분석
 - 비교·분석의 기준은 예비타당성조사에서 요구하는 판단기준에 근거하여 실시

〈표 IV-20〉 국가연구개발사업의 중복성 분석 기준틀

판단요소	분류기준	판단기준	비고
사업목표	① 사업목적 ② 경제사회적 목적(과학기술표준분류, 적용분야)	분류의 동일성	세부목표
지원대상	연구수행 주체		지원자격, 선정기준
지원분야	① 과학기술표준분류 (연구분야) ② 6T 분류 ③ NTRM 분류		개발단계, 기술수명주기
종합판단	〈원칙〉 사업목표, 지원대상, 지원분야가 모두 유사한 사업은 중복가능성 있음 ① 개별 분석항목 (목표, 대상, 분야)에서 2가지 이상 유사하게 분류될 경우, 유사로 판단 ② 지원분야의 경우 분류의 동일성이 가장 높은 분류체계를 중심으로 분석 〈예외〉 세부 자료가 존재하는 경우 구체적 사안에 따른 분석 수행		

자료: 과학기술기본법 제12조 국가연구개발사업 조사분석

■ 유사·중복 검토대상

- 동 사업의 사업목적, 연구개발 내용, 지원분야 등을 기준으로 중복가능성 검토대상사업을 선정
 - NTIS에서 제공하는 국가 R&D사업과 과제 정보를 통해 동 사업과 목적, 내용, 지원분야 측면에서 유사 가능성이 높다고 판단되는 사업을 선별
 - 유사사업 분석대상으로 미선정한 사업은 주로 수소모빌리티(수소차, 수소선박 등) 중심의 사업으로, 동 사업의 목적과 분리되어 대상에서 제외

〈표 IV-21〉 중복성 검토를 위한 검토대상사업 목록

구분	부처명	중점지원영역*	사업명	최종 검토여부
1	과학기술 정보통신부	수소생산·저장	수소에너지혁신기술개발사업	Y
2			미래수소원천기술개발사업	Y
3			기후변화대응기술개발사업	Y
4	산업부	수소생산·저장	그린수소생산및저장시스템기술개발	Y
5			신재생에너지핵심기술개발사업	Y
6		수소모빌리티	수소모빌리티확대를위한개방형연료전지시스템설계검증플랫폼기술개발사업	N
7			수소버스용충전소실증사업	N
8			수소연료전지기반민군겸용탑재중량200kg급카고드론기술개발	N
9			수소차용차세대연료전지시스템기술개발	N
10			수소충전인프라안전관리핵심기술개발	N
11			수소트럭개조기술개발및실증	N
12			액화수소충전핵심부품및시설안전기술개발	N
13			수소활용·실증	수소시범도시인프라기술개발
15	상용급액체수소플랜트핵심기기술개발	Y		
16	석유코크스활용수소생산실용화	N		
17	해양수산부	수소생산	해양바이오수소생산상용화기술개발	Y
18		수소모빌리티	수소선박안전기술개발사업	N
19			안전기반소형수소추진선박기술개발및실증	N
20	환경부	수소생산	폐자원에너지화기술개발사업	Y

자료: 국가과학기술지식정보서비스

* 제1차 수소경제 이행 기본계획 참고

■ 유사사업 조사결과 요약

- 동 사업은 유사사업과 기술개발 목적, 규모, 단계에서 구분되며, 지원대상에서 차별성을 확보하여 별도의 사업으로 추진이 적절
- (수소 개발분야) 청록수소 생산을 위한 분리·정제 기술부터 탄소 포집 전환 활용까지 기술개발을 추진하며, 개발기술의 플랜트 실증까지 연계 지원
- (기술개발 규모) 동 사업의 기술개발은 청록수소 요소기술 고도화를 위한 랩~벤치 스케일 및 실증을 위한 파일럿 규모까지 개발

〈표 IV-22〉 중복성 조사결과 요약

사업명 (주관부처)	수소 중점 개발분야				연구개발단계(TRL)				기술개발 규모		
	생산	저장	활용	실증	기초 (1~3)	응용 (4~5)	개발 (6~8)	사업화 (9)	랩	벤치	파일럿
동 기획사업	●		●	●	-	●	●	-	○	○	●
①	●	●	-	-	●	●	-	-	●	-	-
②	●	●	-	-	●	●	-	-	●	-	-
③	●	●	●		●	●	●		●	-	-
④	●	-	-	△(배터리)	-	●	-	-	○	-	-
⑤	●	●	○	○	-	●	●	-	-	●	-
⑥	●	●	●	-	-	-	●	-	-	-	●
⑦	●	●	●	-	-	●	●		○	-	-
⑧	●	-	-	-	-	●	●	-	-	-	●
⑨	●	-	-	-	-	●	●	-	-	-	-

※ ① 수소에너지 혁신기술개발사업(과기부), ② 미래수소 원천기술개발사업(과기부), ③ 기후변화대응 기술개발사업(과기부), ④ 그린수소 생산 및 저장시스템 기술개발 (산업부), ⑤ 신재생에너지핵심기술개발사업(산업부), ⑥ 수소시범도시 인프라기술개발(국토부), ⑦ 상용급액체수소 플랜트핵심 기술개발(국토부), ⑧ 해양바이오수소생산상용화기술개발(해수부), ⑨ 폐자원에너지화기술개발사업(환경부)

2. 유사사업 분석결과

1) 분석결과 종합

- 기존 수소사업은 생산, 저장·운송, 활용기반의 기술개발에 집중되어 추진중
- 동 사업은 청록수소 플랜트 건설·실증과 이를 위한 요소기술 고도화를 목적으로 하는 청록수소공급 시스템 개발 및 수소도시 실증을 위해 필수적인 사업

〈표 IV-23〉 유사사업 중복성 조사결과 요약

사업명	사업목적 및 유사성	차별성 및 연계방안
수소에너지 혁신기술개발사업 (과기부)	○ (목적) 친환경·고효율 수소 생산 및 안정적 수소 저장을 위한 원천기술 개발을 통해 수소경제 사회 진입을 위한 기반구축 ○ (유사성) 수소경제 이행을 위한 기반마련	○ (차별성) 수소 생산, 저장을 위한 기초원천 연구에 집중 ○ (연계방안) 위 사업의 성과를 연계하여 활용·실증기술 고도화 가능

사업명	사업목적 및 유사성	차별성 및 연계방안
미래수소 원천기술개발사업 (과기부)	○ (목적) 고효율·경제적·친환경적인 수소 생산·저장을 위해 도전적이고 파급효과가 큰 미래선도형 기술 발굴 및 육성 ○ (유사성) 수소생산·저장 기술발굴 및 육성 목표	○ (차별성) 수소 생산·저장 분야 유망 원천기술 개발에 집중 ○ (연계방안) 기존 수소분리·정제 성과를 연계하여 청록수소 분리·정제 기술고도화에 연계
기후변화대응 기술개발사업 (과기부)	○ (목적) 기후변화 위기에 대응하여 온실가스 저감자원화 및 기후변화 적응 분야에서 세계 선도적 원천기술 확보 및 미래 성장 동력 창출 지원 ○ (유사성) 수소 생산·저장 기술개발을 통한 기후변화 대응 등 사회문제 해결에 기여	○ (차별성) 수전해 수소, 수소저장 기초원천기술 확보에 주력 ○ (연계방안) 수전해 수소 기초원천기술 및 저장기술 성과연계를 통한 청록수소 기술고도화
그린수소 생산 및 저장시스템 기술개발 (산업부)	○ (목적) 재생에너지의 변동성으로 인한 국내 전력계통 불안전성 심화 해소를 위한 대용량 그린수소 생산·저장 기술 실증 ○ (유사성) 청정수소 생산을 통한 국내 수소생산 목표 달성, 전력안정성 문제 해결에 기여	○ (차별성) 그린수소 생산, 국내 전력계통 안정성확보를 위한 기술개발 및 실증에 집중 ○ (연계방안) 청정수소 생산기술 고도화·확산 가능
신재생에너지핵심기술 개발사업(산업부)	○ (목적) 2030년 재생에너지 발전비중 20% 달성을 위한 태양광, 풍력시스템 등 재생에너지 글로벌 경쟁력 확보, 핵심부품 국산화 기술개발 ○ (유사성) 수소 생산·저장 기술개발을 통한 기후변화 대응 등 사회문제 해결	○ (차별성) 수전해, 바이오가스 활용 등 그린수소 생산에 집중 ※ 전단계(원천/응용/실증) 기술개발로 동 사업의 범위(응용, 실증)와 목적을 일부 포함하나 '25년 일몰 예정
수소시범도시 인프라기술개발 (국토부)	○ (목적) 재생에너지 기반의 수소 생산·저장·활용이 가능한 수소타운형 통합 에너지 시스템 개발 ○ (유사성) 도심 내 수소 활용을 위한 기술개발 및 실증에 집중	○ (차별성) 재생에너지 기반의 수소생산, ESS 등 기술개발에 집중 ○ (연계방안) 타운하우스 내 수소, 태양광발전 등을 활용한 에너지 자립형 타운모델 개발 성과를 연계·확대하여 동 사업을 통해 실검증
상용급액체수소 플랜트핵심 기술개발(국토부)	○ (목적) 수소액화 플랜트 공정기술 및 수소액화 핵심설비, 액체수소 저장탱크 기술개발을 통해 수소의 대용량 생산·저장·운송·활용 기반 마련 ○ (유사성) 수소활용을 위한 상용급 수소생산 및 플랜트 기술개발	○ (차별성) 액화수소 플랜트 공정 국산화 및 검증에 집중 ○ (연계방안) 액화 플랜트 국산화 생산 및 공정기술, 실증실적 등 연계로 동 사업의 기술 및 실증 고도화
해양바이오수소생산상 용화기술개발(해수부)	○ (목적) 기존 구축된 해양바이오수소 플랜트 운영 최적화 시스템 및 고효율 바이오 수소 정제시스템을 개발하여 상용화 기반 마련 ○ (유사성) 수소생산을 위한 플랜트 시스템 기술개발 및 운영	○ (차별성) 해양 미생물활용 바이오 수소생산을 목적 ○ (연계방안) 바이오 수소 생산 관련 분리·정제, 자동화 공정 시스템 연계로 청록수소 요소기술 고도화
폐자원에너지화기술개 발사업(환경부)	○ (목적) 매립·소각·해양배출을 대체하여 발생폐자원을 처리와 동시에 에너지 자원으로 활용할 수 있는 한국형 폐자원에너지화 실증시스템 개발 ○ (유사성) 청정수소 생산을 통한 국내 수소생산 목표 달성	○ (차별성) 폐자원 활용 고순도, 대용량 수소생산에 집중 ○ (연계방안) 바이오 수소 생산 관련 분리·정제, 자동화 공정 시스템 연계로 청록수소 요소기술 고도화

2) 유사사업과의 차별성 및 연계방안 상세내용

(1) 수소에너지혁신기술개발사업(과기부)

■ 사업개요

- 친환경 수소 생산 및 저장 원천기술 개발을 통해 수소경제 진입을 위한 기반을 구축하고 수소 혁신기술을 마련

〈표 IV-24〉 수소에너지혁신기술개발사업 주요내용

구분	주요내용			
개요	○ 추진부처: 과기정통부 ○ 전담기관: 한국연구재단		○ 기간: ‘19년 ~ ‘23년 ○ 예산: 492.1억원	
목적/ 목표	○ 친환경·고효율 수소 생산 및 안정적 수소 저장을 위한 원천기술 개발을 통해 수소경제 사회 진입을 위한 기반 구축			
사업내용	○ 차세대 수소혁신기술, 미래수소 혁신기술, 수소 국제협력 네트워크 운영 - ‘30년 이후 상용화가 예측되는 알칼라인·고분자전해질 수전해, 액상유기수소화물 수소저장의 차세대 핵심기술 개발 ※ (차세대 수소 혁신기술 개발 관련 과제) 고분자전해질(PEM) 수전해 핵심원천기술개발, 액상유기수소운반체(LOHC) 핵심원천기술 개발 등			
지원대상	○ 대학, 출연연, 기업 등			
수소중점 개발분야	생산	저장	활용	실증
	○	○	-	-
개발단계 (TRL)	기초(1~3)	응용(4~5)	개발(6~8)	사업화(9)
	○	○	-	-
개발규모	연구실	벤치	파일럿	
	○	-	-	

자료: 국가과학기술지식정보서비스, 수소에너지혁신기술개발 사업 공고(과기부)

■ 차별화 및 연계방안

- (차별성) 청록수소 요소기술 고도화 측면에서 일부 활용이 가능하나, 위 사업은 수소 생산 및 저장을 위한 기초원천 연구를 집중지원하는 한정성 존재
- (연계방안) 위 사업의 성과를 연계하여 활용·실증 기술로 확산 가능

(2) 미래수소원천기술개발사업(과기부)

■ 사업개요

- 친환경 수소 생산 및 저장을 위한 도전적이고 미래형 선도 기술발굴 및 육성

〈표 IV-25〉 미래수소원천기술개발사업 주요내용

구분	주요내용			
개요	○ 추진부처: 과기정통부 ○ 전담기관: 한국연구재단		○ 기간: '21년 ~ '26년 ○ 총사업비: 263억원	
목적/ 목표	○ (목적) 고효율·경제적·친환경적인 수소 생산·저장을 위해 도전적이고 파급효과가 큰 미래선도형 기술 발굴 및 육성 ○ (목표) 수소경제 활성화 로드맵 이행과 선도적 수소생산·저장기술 발굴 - 정책적 : 온실가스 저감 및 수소경제 조기 확산을 위해 '30년 이후 CO ² 프리 수소생산 확대 추진(수소경제 활성화 로드맵 및 수소 기술개발 로드맵) - 기술적 : 고효율·경제적·친환경적인 수소생산·저장을 위해 도전적이고 파급효과가 큰 미래선도형 기술 발굴 및 육성			
사업내용	○ 고효율 태양광 수소생산 원천기술 개발 ○ 고효율 PCEC(프로톤 기반 수전해) 수소생산 원천기술 개발 ○ 고체흡착 수소저장 원천기술 개발 ○ 재생에너지 연계형 열화학적 수소생산 원천기술 개발 ○ [수소기술범위] - (생산) 고효율 태양광 수소생산, 프로톤 기반 수전해(PCEC) 고효율 수소생산, 재생에너지 연계형 열화학적 수소생산 기술개발 - (저장) 고체 흡착 수소저장, 기술개발			
지원대상	○ 산학연			
수소중점 개발분야	생산	저장	활용	실증
	○	○	-	-
개발단계 (TRL)	기초(1~3)	응용(4~5)	개발(6~8)	사업화(9)
	○	○	-	-
개발규모	연구실	벤치	파일럿	
	○	-	-	

자료: 국가과학기술지식정보서비스

■ 차별화 및 연계방안

- (차별성) 위 사업은 수소 생산·저장 분야 유망 원천기술개발을 목적으로하여 동 사업과 차별성 존재
 - 동 사업은 수소도심 내 청록수소 활용을 위한 기반마련과 실증을 위한 기술개발에 집중
- (연계방안) 위 사업의 수소분리·정제 성과를 동 사업의 청록수소 분리·정제 기술고도화에 연계

(3) 기후변화대응기술개발사업(과기부)

■ 사업개요

- 기후변화 위기에 대응을 위해 온실가스 저감·자원화 및 기후변화 적응 분야에서 세계 선도적 원천기술 확보 및 미래 성장 동력 창출 지원

〈표 IV-26〉 기후변화대응기술개발사업 주요내용

구분	주요내용			
개요	○ 추진부처: 과기정통부 ○ 전담기관: 한국연구재단		○ 기간: '09년 ~ '24년 ○ 예산: 6,665.7억원(~'20년)	
목적/ 목표	○ (목적) 기후변화 위기에 대응하여 온실가스 저감·자원화 및 기후변화 적응 분야에서 세계 선도적 원천기술 확보 및 미래 성장 동력 창출 지원 ○ (목표) 온실가스 저감을 통한 기후변화 문제해결 및 국가 신 성장 동력 확보를 위해 세계적 수준의 에너지환경 분야 원천기술 확보			
사업내용	○ 기후변화 위기에 대응하여 온실가스 저감·자원화 및 기후변화 적응 분야에서 세계적 원천기술을 확보하고 미래 성장 동력 창출할 수 있도록 연구지원 및 기반구축 - (탄소저감) 태양전지, 연료전지, 바이오에너지, 이차전지, 이산화탄소 포집 및 저장기술(CCS) 등 핵심기술개발 - (C1가스리파이너리) 석유대비 저렴한 C1가스로 석유기반 화학소재 및 수송용 연료를 대체 생산할 수 있는 핵심기술(바이오 및 화학촉매, 리파이너리) 개발 - (차세대 탄소자원화) 화석원료, 폐기물 등에서 발생하는 온실가스를 석유/석탄 대체 자원으로 활용하여 화학소재 및 연료를 생산하는 핵심 원천 기술 개발 - (기후기술 글로벌 현지 사업화) 국내 기후 기술산업의 글로벌 진출 및 국가 온실가스 감축목표 달성에 기여하기 위해 개도국 대상 기후기술협력 프로젝트 발굴·지원 ○ [수소기술범위] - (생산) 수전해 기초원천기술개발 - (저장·운송) 금속 및 무기수소 화물 저장 기술개발(장치형 수소저장 원천기술개발) - (활용·발전) 연료전지의 성능 및 내구성, 경제성 향상을 위한 소재기술 개발로 특히 MEA에 사용되는 촉매 소재(저백금 비귀금속 소재등) 개발 및 고분자 전해질막 내구성 강화 기술 개발 등			
지원대상	○ 이공계 분야 연구자			
수소중점 개발분야	생산	저장	활용	실증
	○	○	○	-
개발단계 (TRL)	기초(1~3)	응용(4~5)	개발(6~8)	사업화(9)
	○	○	○	
개발규모	연구실	벤치		파일럿
	○	-		-

자료: 국가과학기술지식정보서비스

■ 차별화 및 연계방안

- (차별성) 위 사업은 기후변화 대응기술개발사업은 수전해, 수소저장 기초원천기술 확보에 주력
 - 동 사업은 청록수소 요소기술 고도화를 위한 탄화수소, 고체탄소 포집 기술 등을 중점으로 하며, 이를 활용한 플랜트 및 산업도시 운영을 위한 실증에 집중
- (연계방안) 수전해 기초원천기술, 저장기술 성과를 연계해 활용

(4) 그린수소생산및저장시스템기술개발(산업부)

■ 사업개요

- 수전해 방식 그린수소 생산·저장 기술개발을 통해 재생에너지 증가에 따른 전력계통 불안정성 심화 해소 및 온실가스 감축에 기여

〈표 IV-27〉 그린수소생산및저장시스템기술개발 주요내용

구분	주요내용			
개요	○ 추진부처: 산업부 ○ 전담기관: 한국에너지기술평가원		○ 기간: '20년 ~ '24년 ○ 총사업비: 293억원	
목적/ 목표	○ (목적) 재생에너지의 발전비중(약 10% 이상) 증가 시, 재생에너지의 변동성으로 인한 국내 전력계통 불안정성 심화 해소를 위한 대용량 그린수소 생산·저장 기술 실증 ○ (목표) 수전해 장치 장기 신뢰성과 재생전력 연계 신뢰성 평가 시스템 개발과 운영기술개발			
사업내용	○ 6MWh급(수소600kg, 배터리 2MWh) 저장시스템 기술개발 및 실증, 그린 수소를 활용한 수소충전소 구축 및 수소차량(버스) 실증 ○ 국내외 1MW급 이상 수전해 스택 및 시스템의 비교 실증을 위한 테스트베드 운영을 통해 세계최고 수준의 시스템 기술개발 확보 ○ [수소기술범위] - 재생에너지 연계 MW급 수전해 시스템 구축 및 실증(600kg급 그린수소 및 2MWh급 배터리 저장 시스템 구축 및 실증)			
지원대상	○ 기업, 대학, 연구소 등			
수소중점 개발분야	생산	저장	활용	실증
	○		-	△(배터리저장, 안전성)
개발단계 (TRL)	기초(1~3)	응용(4~5)	개발(6~8)	사업화(9)
		○	-	-
개발규모	연구실	벤치		파일럿
	-	-		-

자료: 국가과학기술지식정보서비스

■ 차별화 및 연계방안

- (차별성) 위 사업의 목적은 재생에너지 연계 수전해 기술개발을 통한 그린수소 생산과 국내 전력계통 안정성확보를 위한 실증에 집중하는 차이가 존재
 - 동 사업은 청록수소 생산 기술개발과 수소도시 실증에 집중
- (연계방안) 동 사업과 연계하여 개발된 청정수소 생산기술 고도화 및 확산

(5) 신재생에너지핵심기술개발사업(산업부)

■ 사업개요

- 2030년 재생에너지 발전비중 20% 달성을 위한 그린수소 생산 및 국산화 기술개발 목표

〈표 IV-28〉 신재생에너지핵심기술개발사업 주요내용

구분	주요내용			
개요	○ 추진부처: 산업부 ○ 전담기관: 한국에너지기술평가원		○ 기간: '88~계속 ○ 예산: '20년까지 기투자액 2조 2,930억원	
목적/ 목표	○ (목적) 2030년 재생에너지 발전비중 20% 달성을 위한 태양광, 풍력시스템 등 재생에너지 글로벌 경쟁력 확보, 핵심부품 국산화 기술개발 - 수소산업 생태계 구축을 위한 그린수소 생산, 수소충전소 국산화, 수소 전주기 안전성 확보, 연료전지 고효율화 기술개발 ○ (목표) 신재생에너지 기술개발을 통한 ① 글로벌 시장 대응을 위한 미래 유망시장 선점 및 신성장동력산업 육성, ② 기후변화협약 등 온실가스 감축에 대응하여 국가의 지속적인 발전을 견인			
사업내용	○ 태양광, 태양열, 풍력, 수력, 해양, 연료전지, 수소, 석탄이용, 바이오, 폐기물, 지열, 수열, 신재생에너지융합, 바이오가스를 이용한 수소융합 충전 시범사업 ○ [수소기술범위] - (생산) 알칼라인, PEM, 고온 수전해 기술개발 등 추진 • (알칼라인) 고안전성 알칼리 수전해 핵심기술개발 실증 • (PEM) 고효율 PEM 수전해 전해질막 개발 • (고온수전해) 20kW급 고효율 SOEC 수전해, 중저온 SOEC 원천기술, 1KW급 MCEC 시스템 개발 등 • (바이오) 50Nm3/h급 바이오가스 이용 수소생산 등 - (저장·운송) 암모니아(NH3) 활용, 액화수소 저장 등 기술개발 추진 • (암모니아) 1,000 Nm3/h급 암모니아 수소생산 • (액체수소) 3톤급 액체수소 탱크 트래일러 개발			
지원대상	○ 기업, 대학, 연구소 등			
수소중점 개발분야	생산	저장	활용	실증
	○	○	○	○
개발단계 (TRL)	기초(1~3)	응용(4~5)	개발(6~8)	사업화(9)
	-	○	○	-
개발규모	연구실	벤치		파일럿
	-	○		-

자료: 국가과학기술지식정보서비스

■ 차별화 및 연계방안

- (차별성) 위 사업은 신재생에너지 보급목표 달성의 일환으로 수소 밸류체인(생산, 저장/운송, 충전, 활용) 전단계(원천/응용/실증) 기술개발로 동 사업의 범위(응용, 실증)와 목적을 일부 포함하나 '25년 일몰 예정
- 위 사업은 수전해, 바이오가스 활용 등을 통한 그린수소 생산을 목적으로 하는 사업으로 청록수소 생산을 목적으로 하는 동 사업과 생산, 방식 등에서 차이가 존재

(6) 수소시범도시인프라기술개발(국토부)

■ 사업개요

- 국산화 기반의 수소기반 주거모델 플랫폼 기술개발 및 실증을 통한 재생에너지 기반의 수소타운형 통합 에너지 시스템 개발

〈표 IV-29〉 수소시범도시인프라기술개발 주요내용

구분	주요내용			
개요	○ 추진부처: 국토교통부 ○ 전담기관: 국토교통과학기술진흥원		○ 기간: '20년 ~ '23년 ○ 총사업비: 170.66억원	
목적/목표	○ (목적) 재생에너지 기반의 수소 생산-저장-활용이 가능한 수소타운형 통합 에너지 시스템 개발 ○ (목표) 수소 시범도시의 기술제약 해소 및 미래 수소도시 기술력 선제적 확보를 위한 국산화 기반의 수소기반 주거모델 플랫폼 기술개발 및 실증 - 에너지 자립률 130%를 달성하는 수소기반 에너지 프로슈머 주택단지 개발 및 실증을 통하여, 주거부문의 수소에너지 확산을 위한 비즈니스 모델 도출			
사업내용	○ 타운 하우스형 수소 생산-저장-공유를 위한 재생에너지 기반의 안전한 수소생산기술, 금속수소화물을 이용한 안전한 수소의 저장, 다양한 연료를 활용하는 연료전지개발, 재생열원 및 수소에너지를 동시에 활용하는 고효율의 열에너지 이용 시스템의 통합 시스템 개발 및 실증 ○ 미래 수소도시 모델 구현 및 생산된 에너지의 거래에 필요한 기술적 과제를 도출하기 위하여 에너지 내·외부거래를 위한 각각 6동, 3동의 단독주택을 설계 및 시공. 수소 생산시설로부터 생산된 에너지의 효율적 관리와 제어를 위하여 통합에너지 운영시스템(T-EMS)을 구축하고 검증함으로써 도시 단위로의 확대 방안을 모색하고 비즈니스 모델을 창출 ○ [수소기술범위] - (활용기반) 수소기반의 에너지 공급-저장-활용 및 재생에너지를 연계한 타운하우스형 통합 시스템 기술개발			
지원대상	○ 기업, 대학, 연구소 등			
수소중점 개발분야	생산	저장	활용	실증
	○	○	○	-
개발단계 (TRL)	기초(1~3)	응용(4~5)	개발(6~8)	사업화(9)
	-	-	○	-
개발규모	연구실	벤치		파일럿
	-	-		○

자료: 국가과학기술지식정보서비스

■ 차별화 및 연계방안

- (차별성) 재생에너지 기반의 수소생산, ESS 등 기술개발에 집중되는 한정성 존재
- (연계방안) 위 사업은 타운하우스 내 수소, 태양광발전 등을 활용한 에너지 자립형 타운모델 개발을 목적으로 하는 사업으로 기술개발 성과(공급망, 운영시스템 등)를 연계·확대하여 동 사업을 통해 실검증

(7) 상용급액체수소플랜트핵심기술개발(국토부)

■ 사업개요

- 수소액화 플랜트 공정기술 및 수소액화 핵심설비, 액체수소 저장탱크 기술개발을 통해 수소의 대용량 생산·저장·운송·활용 기반마련

〈표 IV-30〉 상용급액체수소플랜트핵심기술개발 주요내용

구분	주요내용			
개요	○ 추진부처: 국토교통부 ○ 전담기관: 국토교통과학기술진흥원		○ 기간: '19년 ~ '23년 ○ 총사업비: 381.92억원	
목적/ 목표	○ (목적) 수소액화 플랜트 공정기술 및 수소액화 핵심설비, 액체수소 저장탱크 기술개발을 통해 수소의 대용량 생산·저장·운송·활용 기반마련 ○ (목표) 극저온 수소액화 핵심기술 국산화를 통해 수소의 대용량 생산·저장·운송·활용 기반마련 - 수소액화 공정 설계기술, 핵심설비 제작기술, Track-Record(실증실적)·라이선스 등 고부가가치 국산화 기술 확보로 미래 수소경제·사회의 핵심이 되는 액체수소 인프라 기반 마련			
사업내용	○ 고효율 수소액화 공정기술 개발 ○ 수소액화용 극저온 터보 팽창기 개발 ○ 수소액화용 극저온 열교환기 개발 ○ 수소액화용 Cold Box 개발 ○ 수소액화용 극저온 밸브 개발 ○ 액체수소 저장탱크 개발 ○ [수소기술범위] - (저장) LNG 냉열 활용 수소액화플랜트 기술개발			
지원대상	○ 대학, 출연연, 기업 등			
수소중점 개발분야	생산	저장	활용	실증
	○	○	○	-
개발단계 (TRL)	기초(1~3)	응용(4~5)	개발(6~8)	사업화(9)
	-	○	○	-
개발규모	연구실	벤치	파일럿	
	-	-	-	

자료: 국가과학기술지식정보서비스

■ 차별화 및 연계방안

- (차별성) 위 사업은 수소액화플랜트 공정 국산화 및 검증으로 청록수소 기술고도화를 통해 플랜트 실증과 수소도시 공급·활용을 목적으로 하는 동 사업과 차별성 존재
- (연계방안) 위 사업을 통해 개발된 액화플랜트 국산화 생산 및 공정기술, 실증실적 등 연계를 통해 동 사업의 기술 및 실증 고도화

(8) 해양바이오수소생산상용화기술개발(해수부)

■ 사업개요

- 해양바이오수소 플랜트 운영 최적화 시스템 및 고효율 바이오 수소 정제시스템을 개발하여 상용화 기반 마련

〈표 IV-31〉 해양바이오수소생산상용화기술개발 주요내용

구분	주요내용			
개요	o 추진부처: 해양수산부 o 전담기관: 해양수산과학기술진흥원		o 기간: '21년 ~ '23년 o 총사업비: 77억원	
목적/ 목표	o (목적) 기존 구축된 해양바이오수소 플랜트 운영 최적화 시스템 및 고효율 바이오 수소 정제시스템을 개발하여 상용화 기반 마련 * 해양바이오수소 생산 플랜트 설계, 플랜트 운영 최적화 및 고효율 수소 정제시스템 개발 등 o (목표) 수전해 장치 장기 신뢰성과 재생전력 연계 신뢰성 평가 시스템 개발과 운영기술개발			
사업내용	o (바이오수소 플랜트 운영 최적화 시스템 개발) 既구축된 플랜트의 상업적 활용을 위한 운영시스템 최적화 시스템 개발 - 수소 분리하여 정제하는 시설을 추가적으로 구축하여 수소 생산 추진 o (고효율 바이오 수소 정제시스템 개발) 원료가스·해수 자동공급 시스템, 고효율 정제시스템 개발 및 구축 - 자동화시스템 도입 및 고도 정제시설 구축 등 설비 고도화 및 경제성 개선 등을 통해 상용화 기반 마련 공정 개발 - 자동화 시스템, 공정개선을 구축하여 원가절감, 미생물 배양에 사용되는 원료(이스트 등)의 비용 감축 등을 통해 생산 단가 절감 o [수소기술범위] - (생산) 해양 미생물 활용 바이오매스 수소 생산			
지원대상	o 기업, 대학, 연구소 등			
수소중점 개발분야	생산	저장	활용	실증
	○	-	-	○
개발단계 (TRL)	기초(1~3)	응용(4~5)	개발(6~8)	사업화(9)
		○	○	-
개발규모	연구실	벤치	파일럿	
	-	-	-	

자료: 국가과학기술지식정보서비스

■ 차별화 및 연계방안

- (차별성) 위 사업은 해양 미생물활용 바이오 수소생산에 집중하는 사업으로 수소도시 공급·활용을 목적으로 하는 동 사업과 차별성 존재
- (연계방안) 바이오 수소 생산 관련 분리·정제, 자동화 공정 시스템 등을 연계하여 동 사업의 청록수소 요소기술 고도화

(9) 폐자원에너지화기술개발사업(환경부)

■ 사업개요

- 폐자원 처리와 동시에 에너지 자원으로 활용할 수 있는 한국형 폐자원에너지화 실증시스템 개발

〈표 IV-32〉 폐자원에너지화기술개발사업 주요내용

구분	주요내용			
개요	○ 추진부처: 환경부 ○ 전담기관: 한국환경산업기술원		○ 기간: '13년 ~ '20년 ○ 총사업비: 1,996억원(국고 1,341억원)	
목적/ 목표	○ (목적) 매립·소각·해양배출을 대체하여 발생폐자원을 처리와 동시에 에너지 자원으로 활용할 수 있는 한국형 폐자원에너지화 실증시스템 개발 - 해양투기, 매립지 부족 등 폐기물 분야 현안 해결과 동시에 국가 신재생에너지 목표 달성 기여 - 실증 위주의 사업을 통해 조속한 사업화 성과로 연결하여 국내 폐자원에너지 산업 활성화 및 해외진출 기여 ○ (목표) 폐자원에너지화 분야의 실증기술 개발을 통한 한국형 기술 확보 및 사업화 확대 - 사업화 매출액 4,030억원(총 투자액 1,341억원 대비 3배) 이상 달성 - 국산화율 64.49%(기존 국산화율 45.1%, 대비 43% 향상) 이상 달성			
사업내용	○ (가연성폐자원 에너지화 기술개발) 생활쓰레기 등 가연성폐자원을 활용하여 환경오염 없이 에너지원을 확보할 수 있는 가스화, 매립지 정비 등 실증 기술 개발 ○ (유기성폐자원 에너지화 기술개발) 음식물쓰레기, 슬러지 등 해양배출 금지된 유기성폐자원을 바이오가스화, 고체·액상 연료화하여 육상처리가 가능하고 활용가치 높은 에너지 자원으로 전환할 수 있는 실증 기술 개발 ○ [수소기술범위] ○ (생산) 한국형 유기성 폐자원 바이오가스 에너지화 시스템 및 운영기술 개발, 바이오가스 고품질화 및 CO2 회수·이용 기술 개발 등			
지원대상	○ 기업, 대학, 연구소 등			
수소중점 개발분야	생산	저장	활용	실증
	○	-	-	○
개발단계 (TRL)	기초(1~3)	응용(4~5)	개발(6~8)	사업화(9)
		○	○	-
개발규모	연구실	벤치	파일럿	
	-	-	-	

자료: 국가과학기술지식정보서비스

■ 차별화 및 연계방안

- (차별성) 위 사업은 폐자원 활용을 통한 고순도, 대용량 수소생산에 집중한바, 동 사업의 기술개발 범위 및 목표와 상이
- (연계방안) 20년 종료된 사업으로 위 사업을 통해 개발된 일부 수소 생산기술 시스템, 운영·실증기술을 연계하여 동 사업의 청록수소 요소기술 고도화

4절 연구인력 및 인프라 분석

1. 시범도시 추진현황

1) 1기 수소 시범도시별 추진현황 및 계획

■ ‘수소도시’ 개요

- 수소도시란 도시 내 수소생태계(생산-저장·이송-활용)가 구축되어 수소를 주된 에너지원으로 활용하면서 도시혁신을 시민이 체감하는 건강하고 깨끗한 도시를 의미
 - (수소도시 3요소) 수소를 주된 에너지원으로 활용하는 시민(H^2 citizen), 주거, 교통 등 주된 도시생활에서 수소 활용(H^2 activities), 수소생산·저장·이송·활용에 유리한 기반시설 배치(H^2 infra)

■ 수소 시범도시 추진현황

- 정부는 수소 시범도시 추진전략을 통해 인프라 구축비를 지원해 옴
 - (사업내용) 수소시범도시 3개소 조성을 위해 주거, 교통 등 인프라 구축비 지원
 - (총사업비) 시범도시당 400억원
 - (주요내용) 계획수립비, 연료전자·파이프라인·통합운영센터 등 핵심 인프라 구축비 지원, 산업부·환경부 등 타부처 관련사업 연계



[그림 IV-5] 수소 시범도시 모델 및 추진경과

■ 울산광역시

○ (사업개요)

- (주거) 공공임대주택 373세대, 국민임대주택 437세대 등 건설
- (교통) 수소 시내버스 10대, 수소 시티투어버스 1대 등 운영
- (인프라) 수소배관 10km 구축 등

※ 특화요소 : 수소트램, 수소연료전지선박, 수소유람선 운영 등 지역 특화사업 연계



[그림 IV-6] 울산광역시 기본 구상도

- (추진계획) 울산 석유화학단지 및 (주)덕양에서 생산되는 수소를 수소전용 배관을 통해 각 필요처에 공급 예정

- 더불어 태양광 발전을 통해 생산된 잉여전력으로 수전해 설비를 가동 시켜 친환경 수소도시로 도약 추진

〈표 IV-33〉 울산광역시 추진일정표

구분	사업명	추진일정 ('20년 1월~ '22년 12월)												비고
		2020년				2021년				2022년				
		1/4	2/4	3/4	4/4	1/4	2/4	3/4	4/4	1/4	2/4	3/4	4/4	
기 본	마스터 플랜(MP) 수립 및 설계													
	수소배관 공사													
	주거 (상업공공포함)													
	교통													
	인프라 관리													
특 화	규제특구 사업 연계													
	지역인프라 사업 연계													
	수소차 보급 기반 확대													
	글로벌 수소도시 기획 연계													
			MP 수립 및 설계				인프라 구축				운영 실증			

■ 안산시

○ (추진목표) “글로벌 수소도시, ECO 안산”

- 노후화된 산업단지를 수소생산 및 연관산업을 통해 새로운 활기를 불어넣고, 조력발전과 연계한 청정수소 생산을 통해 수도권의 친환경 도시 모델로 육성할 계획

○ (사업개요)

- (주거) 경기행복주택 232세대, 제조 혁신창업타운 등 건설
- (교통) 수소충전소 3개소, 수소버스 2대, 수소지게차 10대 등 운영
- (인프라) LNG추출기 1기, 수소배관 8km 신설 등

※ 특화요소 : 조력발전과 연계한 청정수소 생산, 수소선박 등 운영



[그림 IV-7] 안산시 기본 구상도

○ (추진계획)

- 주생산기반시설인 LNG 공급망에 수소추출기를 설치하여 수소를 생산하고, 이를 배관을 통해 각 필요처에 공급
- 또한, 안산시 특화요소인 조력발전과 연계하여 청정수소 발전설비를 가동 시키고 이를 통해 친환경에너지 생산 기획

구분	사업내용	2020년			2021년			2022년		
		3월	6월	9월	12월	3월	6월	9월	12월	3월
사	전	기본계획 수립/설계(기본+특화)								
		수소추출기 설치 (1,500kg/일~1.7t)								
기	본	수소파이프라인 매설 (L=8.0km)								
		발전용 연료전지 설치 (440kW~2대, 5kW~2대~2set)								
요	소	수소통합운영센터 구축 (통합관제·제어시스템)								
		수소충전소 건설 (연계사업) (3개소 - 안산도시개발(여), 완송센터, 선착장)								
특	화	수소버스/지게차 운영 (연계사업) (수소버스 2대, 수소지게차 10대)								
		수전해 설비 실증 (수전해설비, 수소탱크 등)								
소	요	그린수소 발전설비 (연료전지발전소 건설 타당성)								
		※ 세부 공정계획은 수소 시범도시 사업 기본계획 수립 용역을 통해 제시 예정(21.8.)								

[그림 IV-8] 안산시 추진일정표

■ 전주시·완주군

○ (추진목표) “지역맞춤형 수소기반 도시 생태계 구축 및 확산”

- 완주군은 수소생산 공장 및 광역공급 기지로, 전주시는 수소 이용도시로 기초자치단체 간 상생협력 모델로 발전계획
- 특히, 매년 1천만 명 이상 관광객이 방문하는 전주 한옥마을 인근에 홍보관을 설치하는 등 수소에너지 홍보에도 기여할 전망

○ (사업개요)

- (주거) 공동주택 408세대, 상업시설 및 공공시설 등 건설
- (교통) 수소버스 49대, 수소셔틀·테마버스 3대 등 운영
- (인프라) 충전소용 배관망 750m, 연료전지용 배관망 3km 등 구축

※ 특화요소 : 수소운송용 대용량 고압용기 구비



[그림 IV-9] 전주시·완주군 기본 구상도

○ (추진계획)

- 완주군 수소생산기지(한솔케미칼) 인근에 수소공급기지 구축을 위해 수소연료 배관을 신설하고, 이를 통한 수소공급 인프라 구축
- 또한, 수소생산기지에 이산화탄소 포집 설비를 구축하여 청정수소 생산 실현 목표

2. 연구인력 현황

■ 국토교통분야의 연구개발 인력

- '20년 국토교통분야의 연구개발인력은 26,258명으로, '10년 이후 연평균 4.7%의 증가율을 나타내며 대폭 상승
- 우리나라 총 연구개발인력은 '20년 74.7만여 명으로 연평균 4.1%의 성장률을 나타내며, 지속적으로 증가 추세를 보이고 있음

〈표 IV-34〉 국내 총 연구개발인력 현황 및 연도별 국토교통분야 연구개발인력

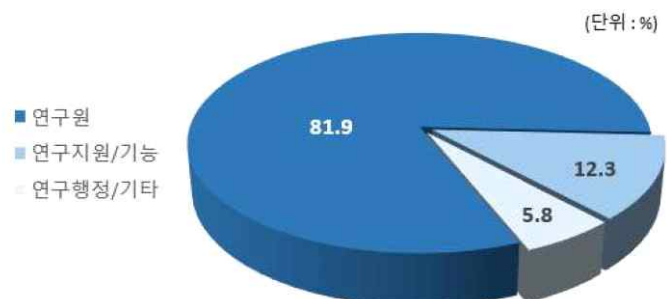
(단위 : 명, %)

구분	'10	'11	'12	'13	'17	'20	CAGR
국토교통분야 연구개발인력	16,633	19,658	17,217	16,951	17,203	26,258	4.7
국내 연구개발인력	500,124	531,131	562,601	569,333	570,000	747,288	4.1
비율	3.3%	3.7%	3.1%	3.0%	3.0%	3.5	-



자료 : KAIA(2022. 5), 국토교통분야 연구개발 2020년도 활동조사 결과보고서

- 국토교통분야 연구개발인력 26,258명 중 연구원 21,487명(81.9%), '연구지원·기능인력' 3,240명(12.3%), '연구행정·기타지원인력' 1,531명(5.8%)으로 나타남



자료 : KAIA(2022. 5), 국토교통분야 연구개발활동조사보고서

[그림 IV-10] '20년 국토교통분야 연구개발인력 수행업무별 비중

〈표 IV-35〉 수행업무별 국토교통분야 연구개발인력 보유현황

(단위 : 명, %)

구분	연구원	연구지원/기능	연구행정/기타	합계
연구개발인력 규모	21,487	3,240	1,531	26,258
비중	81.9	12.3	5.8	100.0

자료 : KAIA(2022. 5), 국토교통분야 연구개발 2020년도 활동조사 결과보고서



자료 : KAIA(2022. 5), 국토교통분야 연구개발 2020년도 활동조사 결과보고서

[그림 IV-11] '20년 국토교통분야 연구개발인력 수행업무별 비중 추이

- 전년도 기업체의 국토교통분야 연구개발인력은 12,531명, 연구기관은 3,418명, 대학은 10,309명으로, 기업체 연구개발인력 비중이 47.7%로 가장 높은 비중 차지

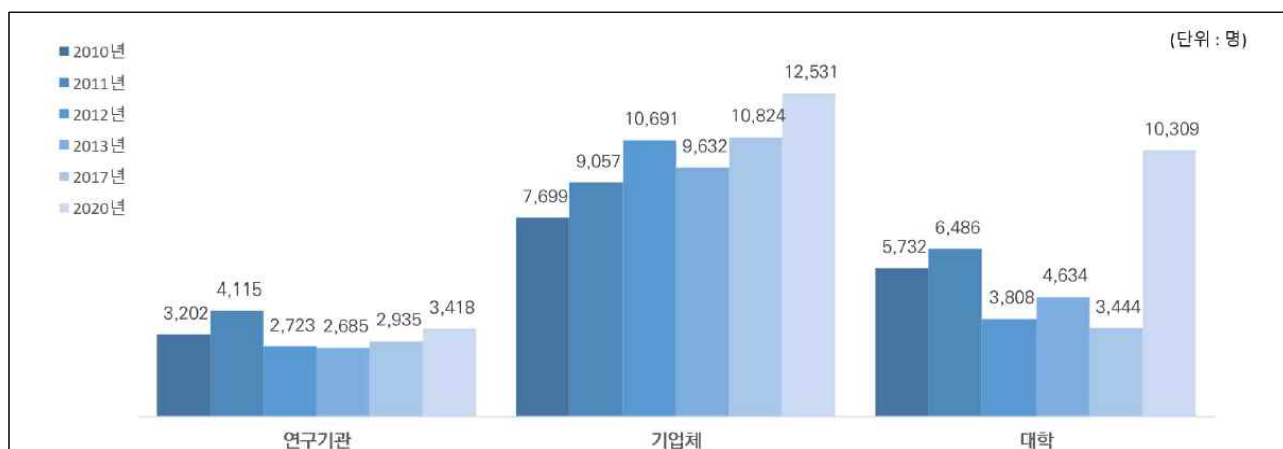
〈표 IV-36〉 주체별 국토교통분야 연구개발인력 보유현황

(단위 : 명, %)

구분	연구기관	기업체	대학	합계
연구개발인력 규모	3,418	12,531	10,309	26,258
비중	13.0	47.7	39.3	100

자료 : KAIA(2022. 5), 국토교통분야 연구개발 2020년도 활동조사 결과보고서

- 기업체의 연구개발인력은 증가하는 추세이며, 연구기관은 유지, 대학은 감소하다 '20년 증가



[그림 IV-12] 연도별 국토교통분야 연구개발인력 추이

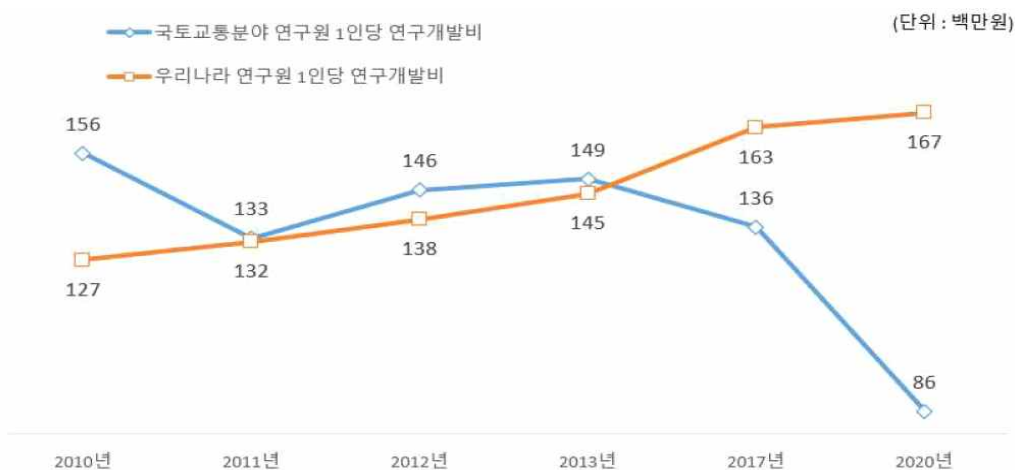
■ 국토교통분야의 연구원 세부 현황

- '20년 국토교통분야의 연구원 1인당 연구개발비는 8.6천만 원, 1억 원당 연구원은 1.16명
- 국토교통분야의 연구원 1인당 연구개발비는 '20년도에 급격히 감소한 반면, 우리나라 연구원 1인당 연구개발비는 지속적으로 증가 추세를 보이고 있음

〈표 IV-37〉 '20년 국토교통분야 연구원 1인당 연구개발비 및 1억 원당 연구원 현황

연구원(명)	총 연구개발비(백만 원)	1인당 연구개발비(백만 원)	1억 원당 연구원(명)
21,417	1,855,659	86.3	1.16

자료 : KAIA(2022. 5), 국토교통분야 연구개발 2020년도 활동조사 결과보고서



자료 : KAIA(2022. 5), 국토교통분야 연구개발 2020년도 활동조사 결과보고서

[그림 IV-13] 연도별 국토교통분야 및 우리나라 연구원 1인당 연구개발비

- 국토교통분야 연구원의 학위별 비중 추이를 살펴보면, 학사 학위가 제일 많으며, '20년에는 '기타*' 학위의 비중이 대폭 상승한 것으로 보임

* 기타는 고졸 이하 및 학위 미기재를 포함한 인원



[그림 IV-14] 연도별 국토교통분야 연구원 학위별 비중 추이

- 기업체의 국토교통분야 연구원은 67%가 학사학위자로 상대적으로 높으며, 대학의 경우 연원의 80%가 기타 학위자로 상대적으로 높음

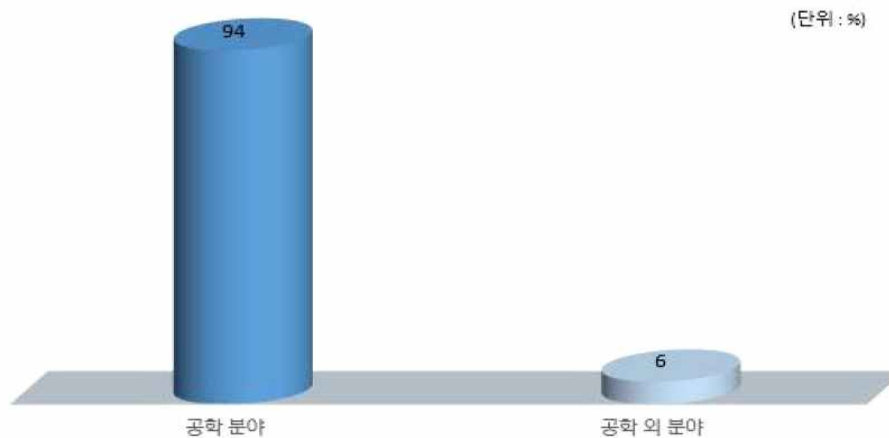
〈표 IV-38〉 '20년 주체별 국토교통분야 연구원의 학위별 현황

(단위 : 명, %)

구분	박사	비율	석사	비율	학사	비율	기타	비율	합계
연구기관	1,107	38.3	1,183	41.0	597	20.7	-	-	2,887
기업체	1,064	9.0	2,721	23.1	7,867	66.9	106	0.9	11,758
대학	817	11.9	322	4.7	239	3.5	5,464	79.9	6,842
전체	2,988	13.9	4,226	19.7	8,703	40.5	5,570	25.9	21,487

자료 : KAIA(2022. 5), 국토교통분야 연구개발 2020년도 활동조사 결과보고서

- 국토교통분야 연구원의 94%가 공학 분야 전공자로 공학 외 분야는 6% 차지



자료 : KAIA(2022. 5), 국토교통분야 연구개발 2020년도 활동조사 결과보고서

[그림 IV-15] '20년 국토교통분야 연구원 전공 비중

- 공학 분야 중에서는 '전자전기' 계열 전공자 비중이 25.8%로 가장 높으며, '기계공학' 계열(22.6%), '도시환경' 계열(10.3%) 등의 순으로 나타나고 있음

〈표 IV-39〉 국토교통분야 연구원의 전공 현황 및 비중

구분	공학계열								공학 외 타계열			합계
전공	건축학/건축공학 계열 전공자	토목/사회환경 계열 전공자	도시환경 계열 전공자	전자전기 계열 전공자	기계공학 계열 전공자	재료/자원공학 계열 전공자	화학/생물공학 계열 전공자	기타 계열 전공자	자연과학 계열 전공자	인문/사회과학 계열 전공자	예체능 계열 전공자	연구원
인력수	1,426	1,923	2,203	5,543	4,852	2,002	1,071	1,174	619	449	225	21,487
비중	6.6	8.9	10.3	25.8	22.6	9.3	5.0	5.5	2.9	2.1	1.0	100

자료 : KAIA(2022. 5), 국토교통분야 연구개발 2020년도 활동조사 결과보고서

5절 특허 분석

1. 분석개요

■ 분석목적

- 청록수소 핵심기술의 추세를 파악하고, 사업추진 방향 설정을 위한 시사점을 도출하기 위해 한국과 주요국의 청록수소산업 관련 특허를 분석
 - 본 분석은 분석대상 기술의 검색 DB 확보의 편의를 위해 분야별 대분류 수준의 기술분류로 분석 수행
 - 분석을 통해 청록수소 핵심기술 및 소부장 국내자립화 사업을 위해 다양한 관련 기술에 관한 특허 동향분석을 통해 향후 전략적 R&D 방향을 수립

〈표 IV-40〉 청록수소 핵심기술 및 기술개발을 위한 기술분류

분야	기술분류범위
수소산업	대용량 청록수소 생산 및 공급 시스템

■ 분석범위

- 본 분석에서는 청록수소산업과 관련하여, 분류 기준에 해당하는 특허를 대상으로 출원년도 2003년 ~ 2022년 까지 공개 및 등록된 한국, 일본, 유럽, 미국, 중국 출원을 검색대상으로 함

〈표 IV-41〉 검색 DB 및 검색범위

자료 구분	국가	검색 DB	분석구간	검색 범위
공개·등록특허 (공개·등록일 기준)	한국 일본 유럽 미국 중국	WIPS	03.01~ '22.06(현)	특허공개 및 등록 전체문서

- 분석대상 기술과 관련한 핵심 키워드를 선정하고, 그 유의어 및 동의어를 통해 검색식을 도출

〈표 IV-42〉 수소산업 밸류체인 검색식

기술분류	검색식
수소 생산기술	(메탄* 메테인* 매탄* methan* methane* 바이오가스* biogas* 생물가스* 생물-가스* 소화가스* 청록수소* 바이오메탄* 매립가스* 포집가스* 매탄가스* 저탄소* 혐기가스* methane* lfg* 천연가스* 엘엔지* lng* 엘엔지* naturalgas* natural-gas*) and (소수* 히드로포빅* 하이드로포빅* hydrogen* hydrophobic* hydro-phobic*) near (생산* manufact* produc* making* creat* generat* manufactur* make* 만드* 제조* 생성* 만듦* 재조* 만든* 프로듀* 만들기* 가공* 발생*) and (분해* 분리* 탈착* 가스분해* 떼어* 해체* 해체* degradation* superannuation* separation* degradat* resolve* degrad* decomposition* deterioration* degrade* degeneracy* thermaliz*) and ((플라즈마* plasma* plazma* icp* 플라스마* 프라즈마* 플래스마* 프라스마* 플래스마* thermalplasma* pyrolysis* 열분해* heat-degradat* pyrolyze* thermal-decomposit* ARC* 아크*) or (recycle* re-cycle* recycl* reutilization* reuse* 재순환* 리사이클* catalyst* 촉매* catalyzer* 카탈리스트* 캐탈리스트* cataly* 캐탈* 觸媒*)) and (@ad)=20030101)

■ 조사항목

- 청록수소산업과 관련한 기술추세와 기술수준을 파악하기 위해 특허동향 및 기술수준 관련 항목을 분석

〈표 IV-43〉 기술동향 조사항목

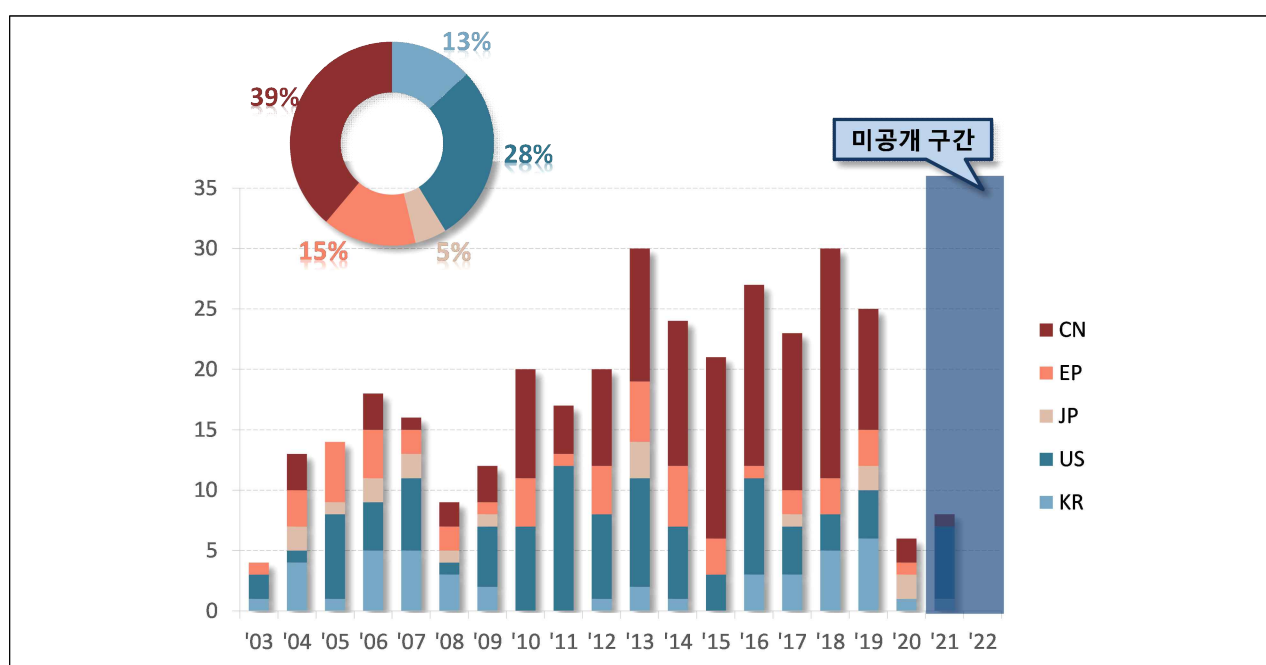
구분	항목	정의 및 의미
특허동향 분석	연도별 특허출원 동향	- 특허출원은 새로운 기술이 개발된 이후 사업화를 염두에 두고 취하는 권리화의 첫 단계임 - 연도별 특허출원 동향을 살펴보면 국가별 해당 분야의 연구개발활동이나 특허활동의 시계열적 추세 파악 가능
	국가별 특허출원 점유율	- 5개 특허청에 공개·공고 및 등록된 전체 특허 중 특정 특허청에 공개·공고 및 등록된 특허의 점유율을 의미함 - 특정 국가에 특허가 많이 출원된다는 것은 해당 국가에서 관련 시장이 크거나, 커질 가능성이 높은 것으로도 해석이 가능함
	내외국인 특허출원 동향	- 각 국 특허청에 출원한 출원인의 내국인 및 외국인 비율을 분석한 지표임 - 내국인의 비율이 높은 경우, 해당 국가의 특허관련 시장이 작아서 시장성이 없거나 외국인의 접근이 어려운 경우 또는 외국인들은 큰 관심이 없지만 내국인들이 큰 사업적 관심을 가지고 있다고 판단할 수 있음
	기술의존도 (RD; Ratio of Dependency)	- 내국인과 외국인의 특허출원건수 비를 이용하여 기술 분야별로 내국인의 기술보호가 어느 정도 이루어지고 있는지를 살펴보는 지표

구분	항목	정의 및 의미
	주요출원인	- 5개 특허청에 공개·공고 및 등록된 특허에 대해 공개·공고 및 등록 건수가 가장 많은 출원인 살펴보기 위해 분석함 - 주요출원인은 주로 글로벌 대기업인 경우가 많기 때문에 해당 분야를 주도하고 있는 기업이 어떤 기업인지 파악이 가능함 - 기업을 중심으로 국가별 산업경쟁력을 간접적으로 파악할 수 있음
	기술성장단계	- 기술의 성장단계인 태동→성장→성숙→쇠퇴→회복을 출원인 수와 출원 건수를 통해 파악하기 위한 분석임 - 특허정보만을 가지고 기술성장단계를 분석하는데는 한계가 있지만 대략적인 단계를 파악하는 것은 가능함 - 특허출원 수가 많이 않은 경우에는 연도별 출원 건수의 변동이 심해서 성장단계에 큰 의미를 두기는 어려움

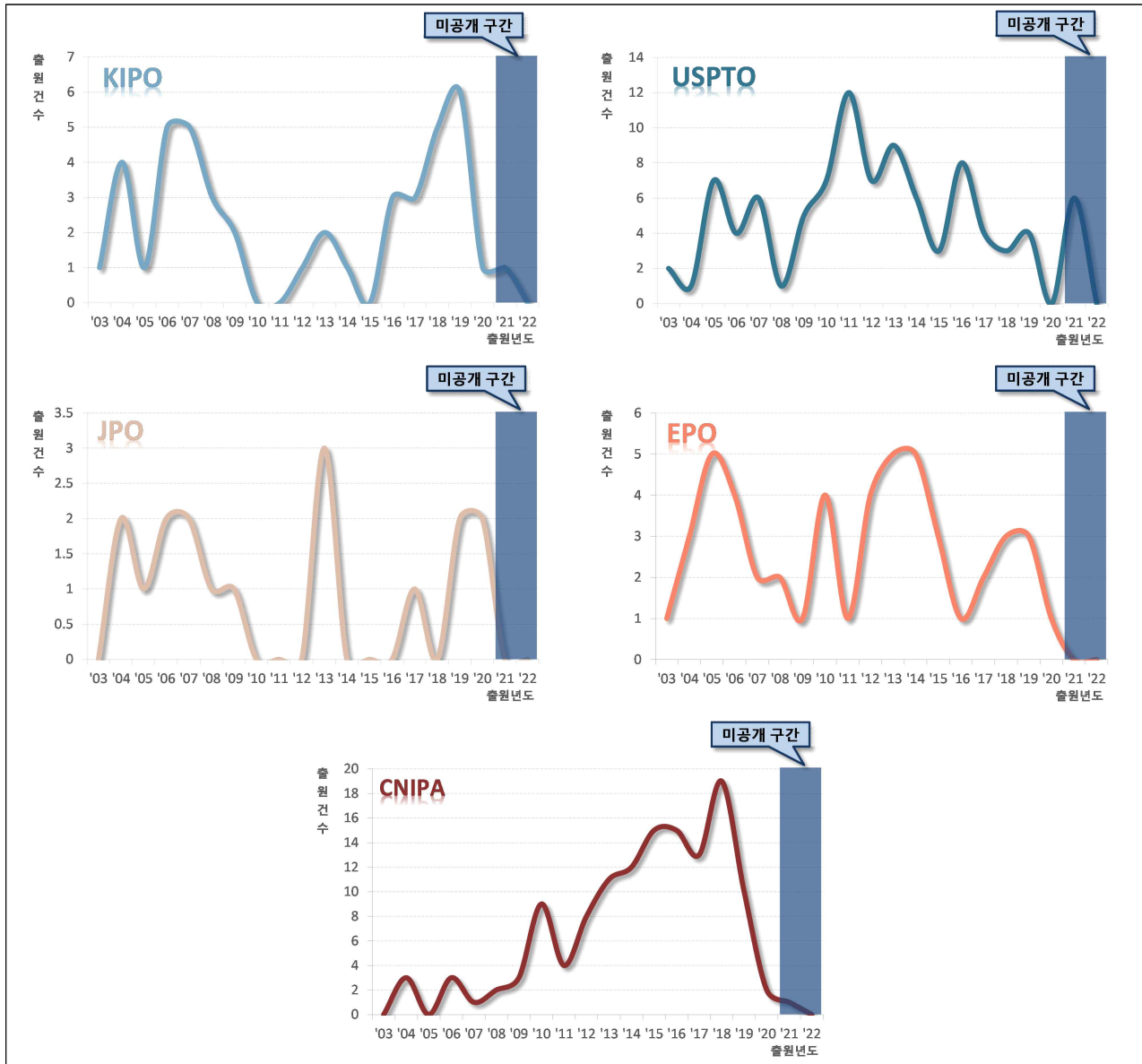
2. 분석결과

1) 주요국 연도별 특허출원 동향

- 전체 분석대상 특허는 337건(미국, 일본, 한국, 유럽, 중국)으로 한국 44건, 미국 95건, 일본 7건, 유럽 50건, 중국 131건이 검색되었으며 중국, 미국, 유럽, 한국, 일본의 순의 특허 출원량을 보이고 있음
- 20년간 전체 출원건수가 점차 증가하는 모습을 보이고 있으며, 전체 출원건수의 증가는 중국 출원건수의 2010년대 급격한 증가에 기반한 것으로 분석됨
- 다만, 연간 출원량이 극히 적은 분야로 아직 활발한 특허출원활동이 나타나고 있는 기술분야로 생각하기 어려움



[그림 IV-16] 연도별 특허건수 추이

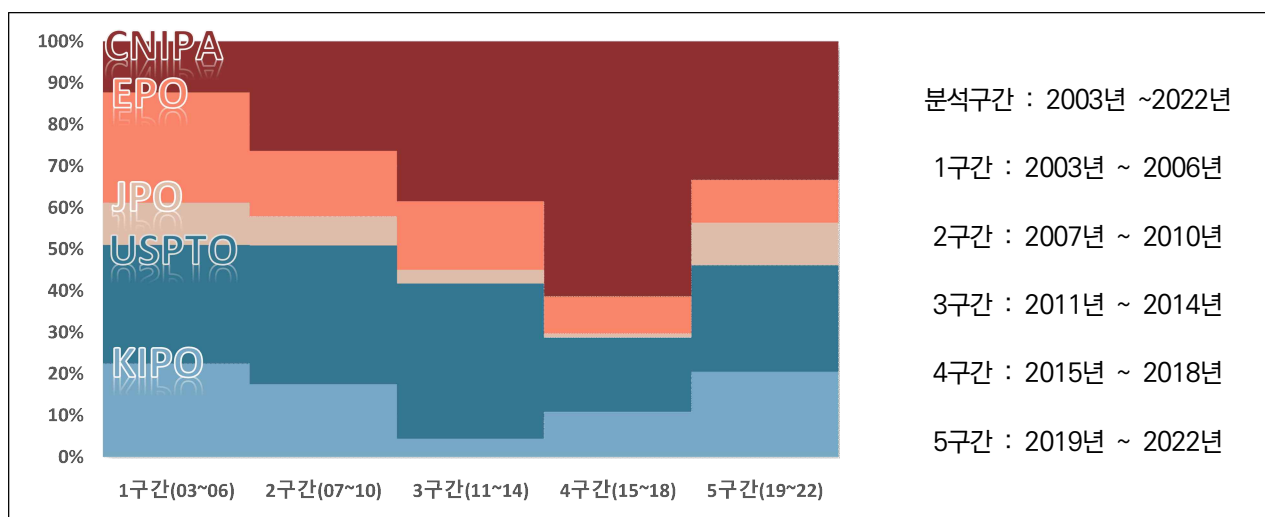


[그림 IV-17] 주요시장국 연도별 특허출원동향

- 한국 특허청의 출원건수는 2000년대에 증가하는 모습을 보인 후 2010년대 중반부터 다시 증가하는 모습을 보이고 있으며, 2019년 가장 큰 출원을 보여, 최근 기술개발이 점차 이루어지고 있는 상태로 판단됨
- 미국 특허청의 출원건수는 2011년 가장 큰 출원을 보이고 있으며, 점차 출원이 감소하는 모습을 보인 후 2021년 미공개 구간에서도 출원이 증가하는 모습을 보여 최근 다시 주목받고 있는 기술로 판단됨
- 일본 특허청의 출원건수는 2013년 가장 많은 출원을 보이고, 전체 출원건수가 적어 추세를 파악하기 어렵지만, 최근 2019년 및 2020년 다시 출원이 상승하는 모습을 보여

최근 연구가 진행되고 있는 것으로 판단됨

- 유럽 특허청의 출원건수는 2000년대부터 출원이 증감을 반복하고 있지만 매년 꾸준히 출원이 이루어지고 있는 것으로 분석됨
- 중국 특허청의 출원건수는 2000년대 후반부터 급격하게 출원이 증가하고 있고, 가장 출원이 많은 지역으로, 기술개발이 가장 활발하게 이루어지고 있는 지역으로 판단됨

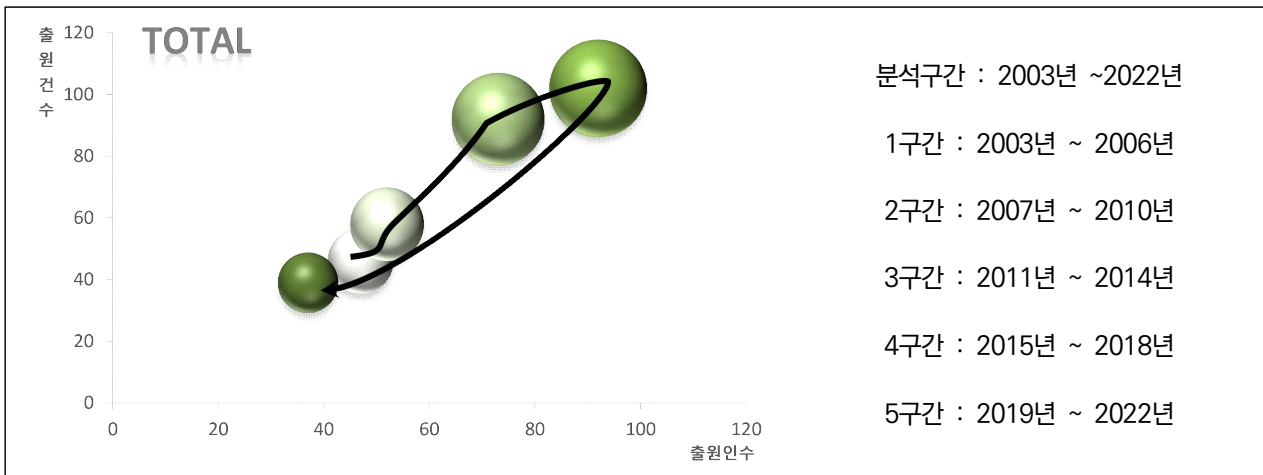


[그림 IV-18] 구간별 출원 점유율

- 구간별 출원점유율을 살펴보면, 1구간(2003년~2006년)에서 유럽과 미국의 출원이 가장 높은 점유율을 가지고 있는 것으로 나타나지만, 유럽의 점유율은 5구간(2019년~2022년)까지 지속적으로 감소하는 모습을 보임
- 미국의 출원 점유율은 3구간(2011년~2018년)까지 약 48%로 상승하는 모습을 보인 후 다시 감소하여, 5구간(2019년~2022년)에서 약 25%의 점유율을 보임
- 반면, 한국은 1구간(2003년~2006년) 약 22%의 점유율을 보이지만 3구간(2011년~2014년)에 3%까지 점유율이 떨어진 후 5구간(2019년~2022년) 다시 약 20%의 점유율로 회복하는 모습을 보여 점차 기술개발이 이루어지고 있는 상태로 판단됨
- 중국 특허청의 점유율은, 1구간(2003년~2006년)에서 약 11%로 상대적으로 적은 점유율을 가지고 있지만, 급격하게 증가하여 4구간(2015년~2018년)에서 50%를 넘기는 점유율을 확보하는 것으로 나타나며, 최근 5구간(2019년~2022년)에서도 약 30%의 점유율을 갖는 것으로 분석되어 기술개발이 가장 활발한 지역으로 분석됨

2) 포트폴리오 기술주기 동향분석

- 관련 기술 분야는 1구간(2003년~2006년)에서 4구간(2015년~2018년)까지 지속적으로 출원인과 출원전수가 상승하는 것으로 나타남,
- 5구간(2019년~2022년)에서 출원인수 및 출원전수가 크게 감소하는 모습을 보이지만, 아직 미공개 특허가 있는 점을 감안해야 하고, 아직 전체 출원전수가 많은 기술분야가 아니기 때문에, 태동기와 발전기 사이에 있는 것으로 판단됨

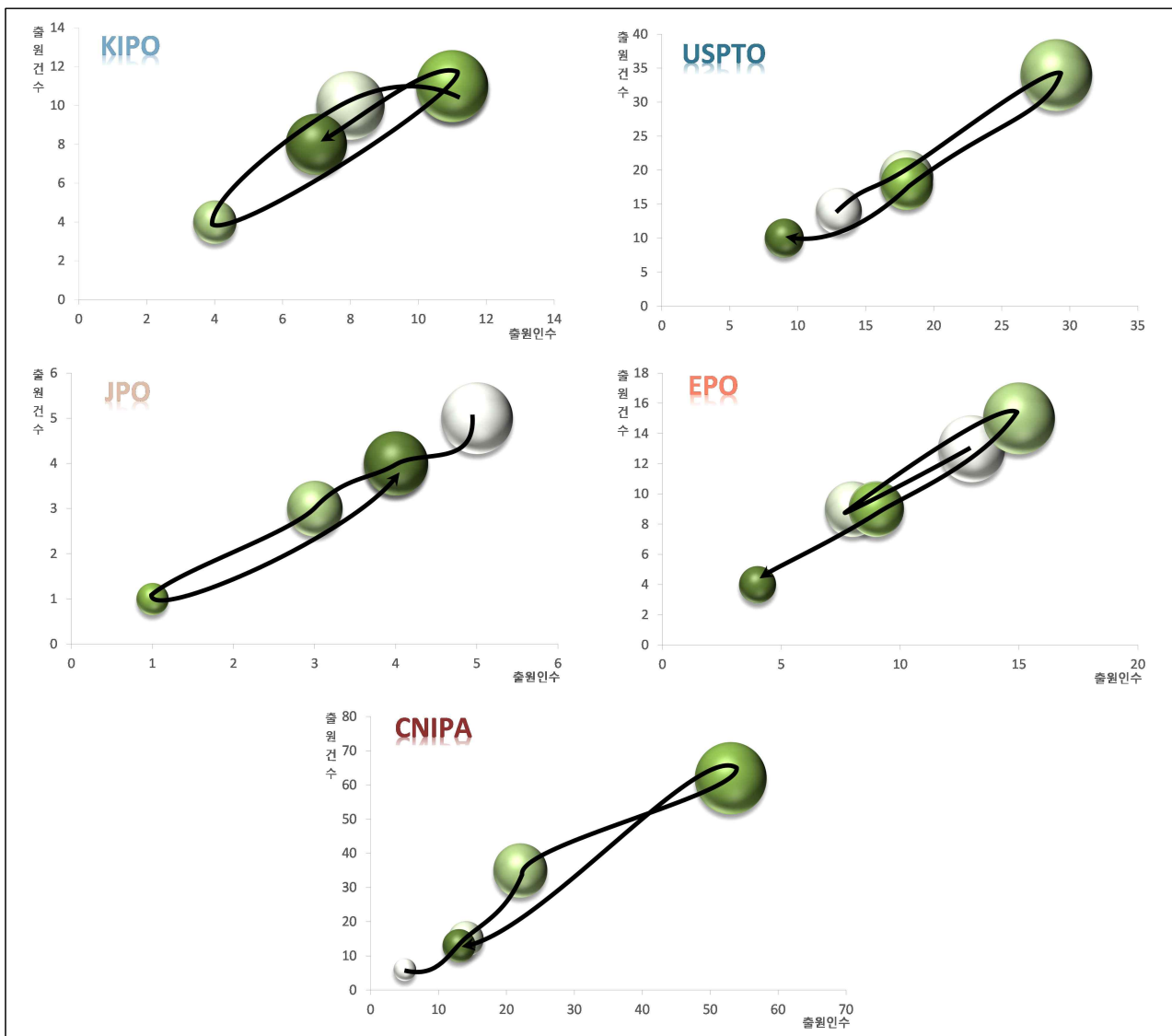


[그림 IV-19] 전체 기술성장 단계

- 한국특허의 성장단계는 1구간부터 4구간까지 증감이 반복하는 모습을 보이고 있어, 기술성장 단계를 명확하게 파악하기 어려운 성장 초기단계로 판단되며, 5구간에서 미공개 출원이 있음에도 출원전수가 상대적으로 크게 나타나 차후 발전기로 들어설 것으로 판단됨
- 한국의 기술위치는 태동기와 발전기 사이로 판단됨
- 미국특허의 기술위치는 1구간부터 3구간까지 출원인구수 및 출원전수가 증가하는 모습을 보이지만, 4구간에서 출원이 감소하는 모습을 보이며, 최근 20년간 100건 미만의 출원만 기록되어 아직 발전기에 들어선 것으로 판단하기 어려움
- 미국의 기술위치는 태동기에 있는 것으로 판단됨
- 일본특허의 성장단계는 1구간부터 4구간까지 지속적으로 감소하는 모습을 보이고, 5구간에서 미공개 출원이 있음에도 급격하게 출원전수 및 출원인수가 증가하는 모습을 보여 아직 추세를 명확하게 하기 어렵고 출원전수가 적은, 태동기로 판단할 수 있음
- 일본의 기술위치는, 향후 출원이 증가하는 모습이 예측되어 태동기에 있는 것으로 판단됨
- 유럽특허의 기술위치는 1구간부터 4구간까지 출원인 및 출원전수가 크게 증감을

반복하고 있는 모습을 보이며, 5구간에서 출원이 및 출원건수가 크게 감소하지만, 미공개 특허를 감안해야 하고, 최근 20년간 단 50건의 출원만 발생함

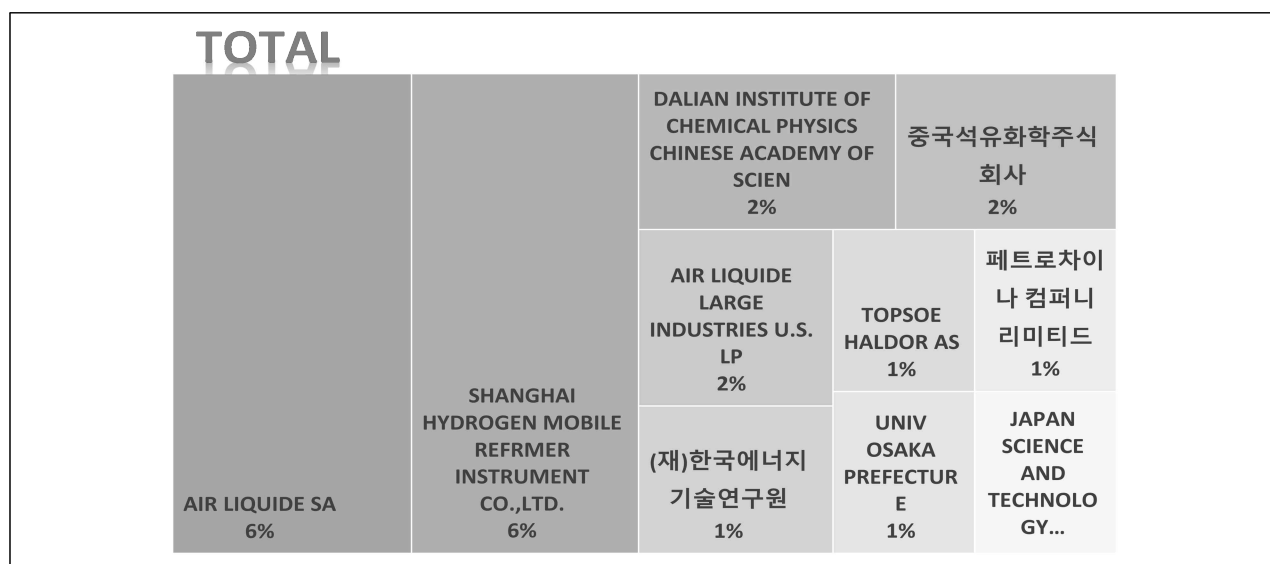
- 유럽의 기술위치는, 아직 태동기에 있는 것으로 판단됨
- 중국특허의 기술위치는 1구간에서 4구간까지 급격하게 출원인과 출원건수가 증가하는 모습을 보이고 있으며, 5구간에서 출원인 및 출원건수가 감소하는 모습을 보이지만 미공개 출원을 감안했을 때,
- 중국의 성장단계는 발전기에 있는 것으로 판단됨



[그림 IV-20] 주요국 기술성장 단계

3) 국가별 출원인 동향

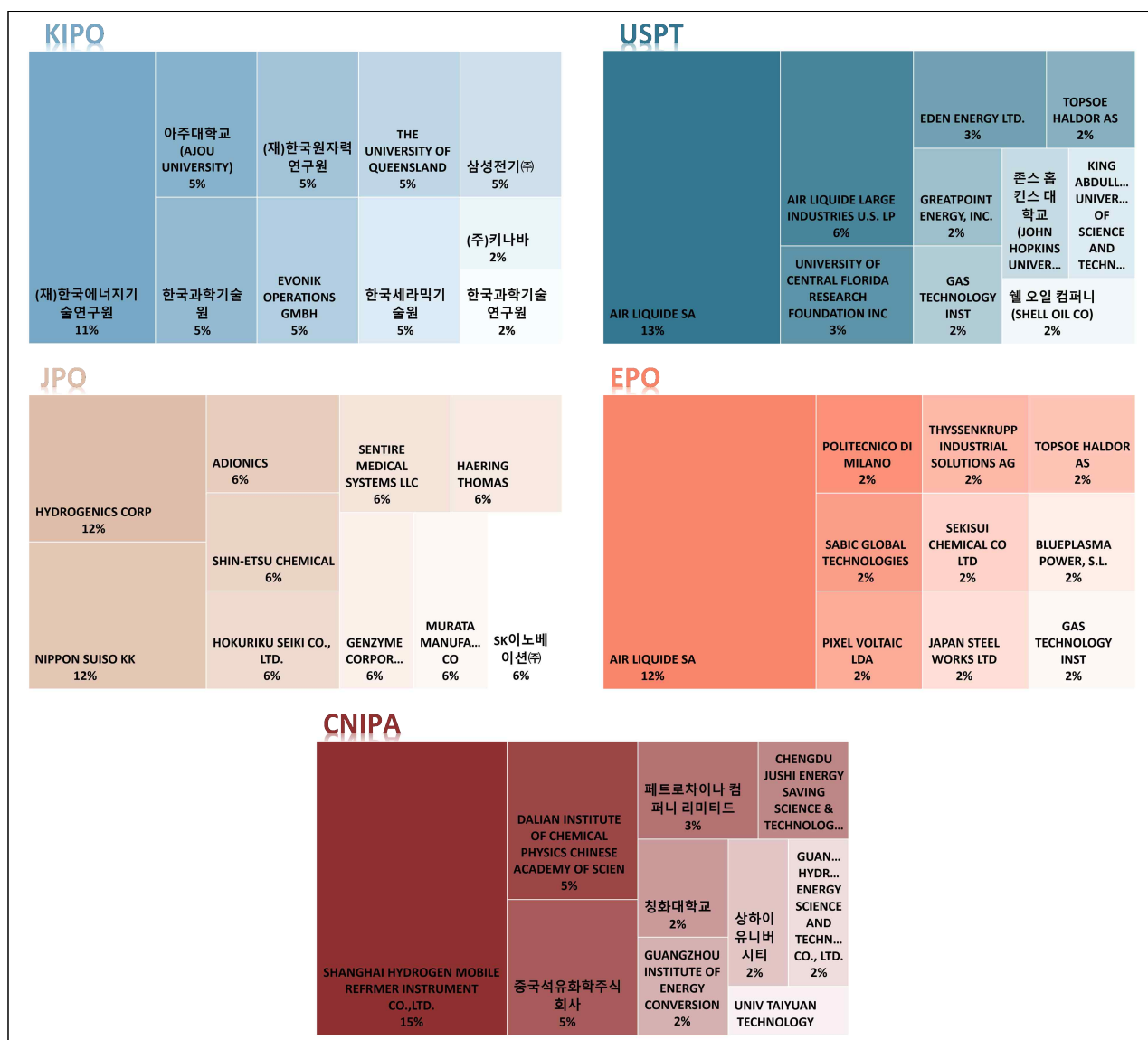
- 청록수소 기술 분야의 다출원인을 살펴보면, 프랑스의 AIR LIQUIDE SA, 중국의 SHANGHAI HYDROGEN MOBILE REFRMER INSTRUMENT CO.,LTD., 중국의 DALIAN INSTITUTE OF CHEMICAL PHYSICS CHINESE ACADEMY OF SCIEN가 글로벌시장에서 강자인 것으로 판단되며, 최상위 그룹에 중국의 기업 및 학술기관 출원인이 가장 많이 포함되어 있고, 한국, 일본, 미국, 유럽의 기업 및 학술기관 역시 다수를 포함되어 있어, 관련 기술은 모든 국가에서 관심이 높은 것으로 판단됨
- 최다출원인인 AIR LIQUIDE SA은 미국에서 12건, 유럽에서 6건의 특허를 출원한 것으로 나타나, 미국과 유럽시장에 가장 큰 관심이 있는 것으로 판단됨
- 또한, 상위 다출원인 10에 중국, 한국 및 일본의 대학과 연구소가 4곳 포함되어 있어, 아직 기술개발이 정부 주도적이며, 상용화에 들어섰다고 판단하기 어려운 것으로 분석됨



[그림 IV-21] 특허출원인 동향 분석

- 한국의 경우 다출원 1위는 (재)한국에너지기술연구원이 차지하였고, 상위 다출원으로 다수의 대학교 및 학술기관이 포함되어 정부 주도적으로 청록수소 관련 기술개발이 이루어지고 있는 것으로 판단됨
- 미국의 경우 AIR LIQUIDE SA社가 12건으로 13%를 점유하는 최다출원인으로 분석되었고, 상위 다수의 출원인으로 대학교 및 학술기관이 다수 포함되어 있어, 미국 시장에서 청록수소 관련 기술이 상용화되었다고 판단하기 어려움
- 일본의 경우 캐나다의 HYDROGENICS CORP社와 NIPPON SUIISO KK社가 2건으로 최다출원인으로 분석되어, 일본시장의 출원건수가 매우 낮아 청록수소 관련 기술개발이 더딘 지역으로 판단됨

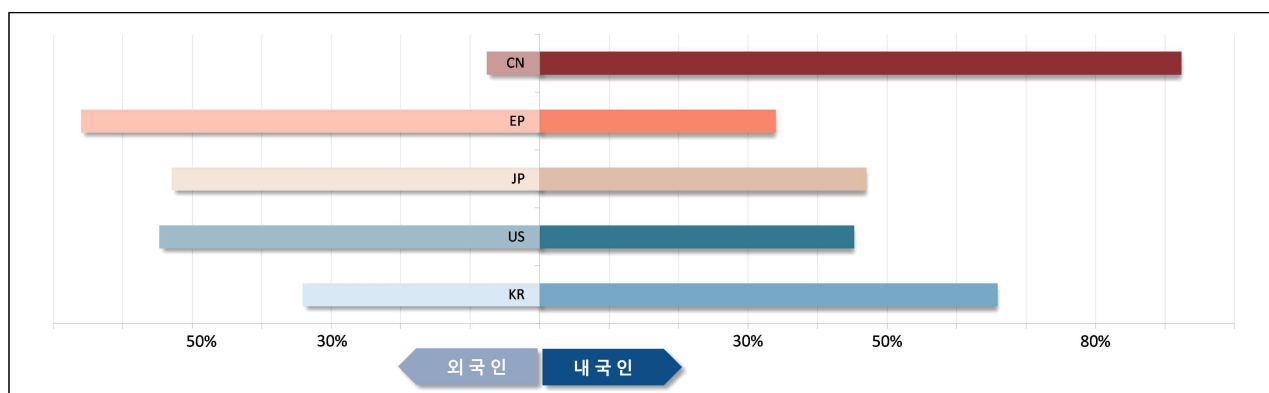
- 유럽의 경우 AIR LIQUIDE SA社가 6건으로 약 12%의 점유율을 확보한 최다출원인으로 나타남, 상위 다출원인은 모두 기업 출원인이 차지한 것으로 나타나, 유럽시장은 기업 주도적으로 기술개발이 이루어지고 있는 시장으로 판단됨
- 중국의 경우 SHANGHAI HYDROGEN MOBILE REFRMER INSTRUMENT CO.,LTD.社가 가장 많은 출원을 기록하였으며, 상위 다출원인의 연구소 및 대학과 같은 학술기관을 나타나, 중국 시장의 기술개발은 정부 주도적인 것으로 판단됨



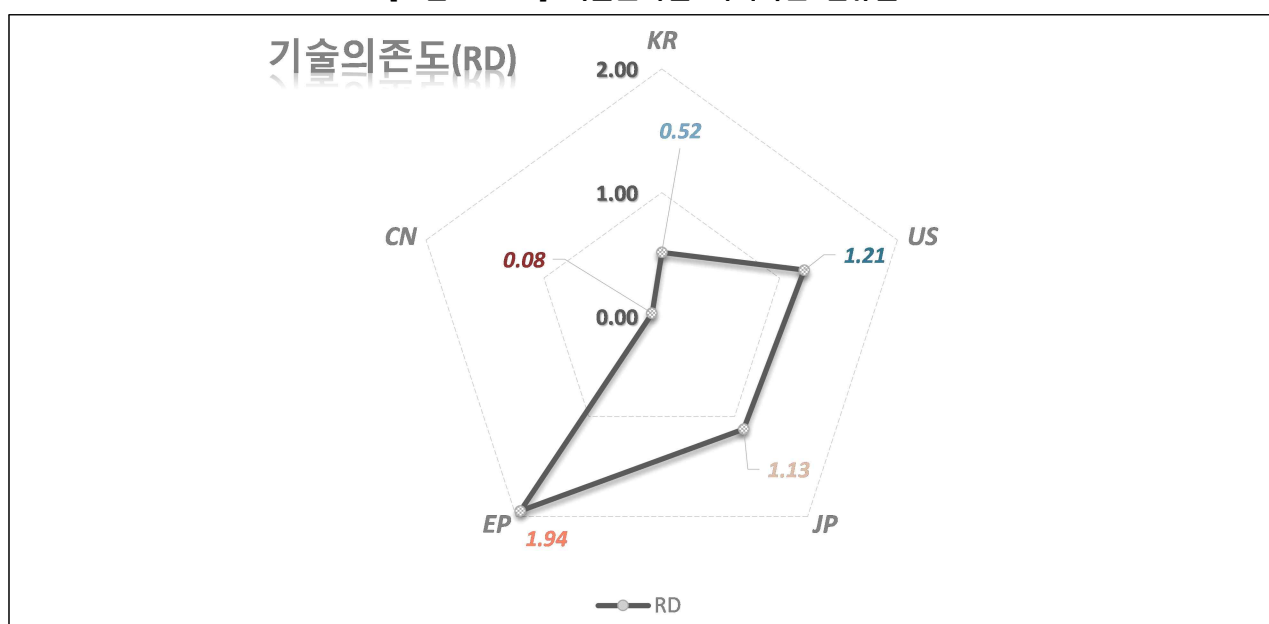
[그림 IV-22] 국가별 주요 특허 출원인

4) 내외국인 점유율 및 기술의존도

- 청록수소 관련 기술에 대한 각 국가별 출원인의 국적을 살펴보면, 미국, 유럽, 일본의 경우 외국인 출원이 활발한 것으로 나타나고, 중국은 내국인 출원인이 출원을 주도하고 있으며, 한국도 비교적 내국인 출원이 더 높은 것으로 나타남
- 한국의 경우, 내국인 출원비중이 약 65%를 넘는 것으로 나타났으며, 이와 같은 모습은 한국시장의 기술개발은 내국인에 의해 이루어지고 있음을 나타내고, 외국인 출원은 약 35%를 차지하여 외국인의 관심도 높은 것으로 분석됨
- 미국, 유럽 및 일본의 시장은 외국인 출원 비율이 50% 이상으로, 청록수소 관련 기술개발이 외국 출원인의 주도로 이루어지고 있는 것으로 판단되고, 특히, 유럽시장의 외국인 출원비율이 가장 높은 것으로 분석됨
- 중국의 경우 내국인 출원비율이 약 92%에 달하는 것으로 나타나, 해외출원인에게 관심받지 못하는 시장으로 판단됨



[그림 IV-23] 기술분야별 내외국인 점유율



[그림 IV-24] 기술의존도

6절 수요조사

1. 기술수요조사

■ 조사개요

- (조사목적) 신규사업 추진을 위해 사전에 연구 수요조사를 실시하여 향후 사업에서 수행해야 할 방향 및 중점연구개발 분야를 도출하는 등 세부계획 수립을 위한 기초자료로 활용
 - 신규사업 세부과제 혹은 개별과제 구성을 전제로 한 유망기술의 수요조사
 - 수요조사 결과는 세부과제 기획과 분과구성의 기초자료로 활용
- (조사대상) 수소 관련 대학교수, 연구자, 출연연, 기업가, 국공립연구소, 협회 등 전문가
- (조사기간) 1차(2022.11.10.~2022.12.30.), 2차(2022.12.31.~2023.03.31.)
- (조사방법) 이메일 발송 및 회수를 통한 설문조사

■ 조사결과

- 전문가 검토를 통해 작성된 기술수요조사 및 과제테마분류*에 따라 수요조사 수행
 - * 탄화수소 열분해, 수소 분리·정제, 고체탄소 포집전환, 플랜트 건설 등
- 국내 산·학·연 수요자(수혜자, 개발기술 및 성과의 최종 활용자)를 대상으로 기술수요조사 실시, 2차례 기술수요조사를 통해 74건의 기술수요 발굴
 - 수요조사서의 완성도가 떨어지거나 동 사업과 관련성이 낮은 조사지는 제외

〈표 IV-44〉 동 사업의 과제테마별 기술수요 현황(중복포함)

동 사업의 중점분야	기술수요 건수		
	1차	2차	합계
탄화수소 열분해 기술	20	2	22
수소 분리·정제 기술	13	2	15
고체탄소 포집 및 전환기술	14	3	17
플랜트 건설 및 운영기술	15	1	16
도시공급시스템, 실증 등	4	-	4
합계	66	7	74

2. 기업 참여의향조사

■ 동 사업 기획에 대한 관심도와 참여의사를 확인하기 위해, 중점분야별로 과제 수행이 가능한 업체를 대상으로 참여의향 조사

- (목적) 사업참여의향조사를 통해 유관기관의 관심과 잠재 수요 확인
- (조사기간) 2022.11.10. ~ 2023.03.31.
- (조사결과) 17개 응답기업의 긍정적 참여의사를 확인
 - 대기업 3개사(17.6%), 중견기업 1개사(5.9%), 중소기업 10개사(58.8%), 기타(대학, 공공기관 등) 3개사(17.6%)

《기업 참여의향조사 의의》

- ☐ 기술개발 및 통합 실증사업을 추진하는 동 사업에 대한 산업현장의 수요를 사전에 파악함
- ☐ 플랜트 산업개발에 있어 산업계의 연구개발 협력은 필수적이기에 연구 수요에 대한 충분한 의지 등을 파악하여 동 사업에서 미래형 성장전략 마련에 기여할 수 있을 것으로 기대

〈표 IV-45〉 동 사업 참여의향기업 제출 기업

번호	기업명	기업규모	출자의향	참여의향
1	수도권매립지관리공사	공공기관	-	○
2	(주)롯데건설	대기업	○	○
3	삼천리	중견기업	○	○
4	(주)제아이엔지	중소기업	○	○
5	(주)엔비유	중소기업	○	○
6	(주)하이리움산업	중소기업	○	○
7	(주)현진이엔피	중소기업	○	○
8	(주)인피니티환경	중소기업	○	○
9	(주)이엠코	중소기업	○	○
10	제로시스	중소기업	-	○
11	인하대학교 산학협력단	기타	○	○
12	(주)에어레인	중소기업	○	○
13	(주)한국수력원자력	대기업	○	○
14	포스코	대기업	-	○
15	동신대학교 산학협력단	대학	-	○
16	(주)위더스세웅	중소기업	○	○
17	(주)인투코어테크놀로지	중소기업	○	○

3. 지자체(실증지) 참여의향조사

■ 대용량 청록수소 공급 시스템 실증을 수행할 지자체를 확인하기 위해, 지자체를 대상으로 참여의향 조사

○ (실증지) 국내 수소도시 연계 실증 추진

- 전남 광양시*, 순천시, 경북 포항시 등 3개 지역이 청록수소 실증플랜트 구축에 참여의향 표명

* 광양 제철소 내 수소환원제철용 수소 공급 등

번호	지자체	제출기관	참여의향
1	전라남도 광양시	광양시청	○
2	전라남도 순천시	순천시청	○
3	경상북도 포항시	포항시청	○

《지자체 참여의향조사 의의》

- ☐ 기술개발 및 통합 실증사업을 추진하는 동 사업의 실증지 수요를 사전에 파악함
- ☐ 플랜트 산업개발에 있어 입지적정성 검토항목에 대한 전력공급, 원료공급, 공급망 지원 등 동 사업의 검토요건을 사전에 마련하고 해소
 - 실증시설 구축에 필요한 부지(면적) 확보 용이성 (동 사업 : 설비규모 약 1,440㎡)
 - 청록수소 생산에 필요한 전력 공급량 충분성 (동 사업 : 약 2MWh 이하)
 - 청록수소 생산 원료(천연가스 등) 공급 용이성
 - 생산된 수소를 활용할 수 있는 활용처 유무 (인접성)
 - 원료 공급 → 청록수소 생산 → 활용 공급망 지원 의지
 - 실증시설 유치와 과제 종료 활용에 대한 지자체 의지
 - 실증시설 구축과 관련된 인허가 지원
 - 실증시설 부지 주변 주민 수용성

제5장

사업 기본설계

- 제1절 사업 도출과정
- 제2절 세부과제 도출의 적절성
- 제3절 사업체계도
- 제4절 사업 논리모형

5장 사업 기본설계

1절 사업 도출과정

■ 동 사업의 주요 추진방향 도출

- 청록수소 관련 사전조사 분석을 통해 동 사업의 문제/이슈를 도출하고, SWOT 분석을 통한 추진전략, 사업 기본방향(중점분야) 및 세부과제 도출을 통해 사업의 전략성과 정부지원의 타당성 및 효과성 확보
- 사업 도출과정을 통해 정부 R&D 투자 기술개발 및 청록수소 기술개발 전략에 부합하는 사업설계 추진

〈표 V-1〉 사업 도출 프로세스



1. 사전조사 및 분석 결과

■ 국내외 동향 및 R&D역량 종합분석을 통한 현안진단 결과, 3개의 주요 시사점 도출

〈표 V-2〉 종합분석 시사점

[주요 동향분석]		[국내 정책동향]		[해외 정책동향]		[주요 이슈]
미래 사회 이슈	○ 전세계적 탈탄소화 기조에 따른 신재생에너지 기술확보 및 보급이 주요 어젠다로 대두	국내 청록 수소 R&D 전략	○ 국정과제 - 청정수소 생산공급 기반 마련 추진 ○ 수소기술개발 로드맵 - 수소 전주기 기술개발 및 경제성 향상을 위한 미래유망 기술개발 ○ 수소시범도시 추진전략 - 수소도시 조성을 위한 수소활용 기술의 실증 ○ 제1차 수소경제 이행 기본계획 - '30년까지 청정수소 비중 75%, '50년까지 100% 달성	 - 유망 청정수소를 대규모로 신속하게 보급할 수 있는 대규모 인프라 개발 및 기술 실증 프로그램 추진 중	수소시범도시 본격 추진을 위한 대용량 수소공급 시스템 인프라 실증	
시장 산업	○ 산업 내 증가하는 수소 수요 대비 생산량 부족 ○ 산업 각 분야 내 수소시장 선점을 위한 기업간 경쟁 치열		 - 수소 로드맵을 통한 청정수소 대량 생산 및 활용 확대 계획 추진			
기술 동향	○ 청정수소의 생산성, 경제성을 제고하기 위한 기술경쟁 치열		 - 수소·연료전지 전략 로드맵 수립으로 수소 공급기반 마련			
기술 수준	○ 주요국 대비 기술격차 3~6년 수준으로, 수소생산인프라 기술력 제고 시급		 - 수소 인프라 확대 및 산업 육성 집중 지원			
정부 R&D 투자 동향	○ 수소 관련 R&D 투자규모는 연평균 24.37% 증가중	근거 법령	○ 건설기술진흥법 ○ 국토교통 과학기술 육성법 ○ 신에너지 및 재생에너지 개발·이용·보급 촉진법		수소의 경제성 문제에 대한 논의	
특허 동향	○ 우리나라 특허 점유율('19~'22)은 약 20% 수준으로 글로벌 사회 치열한 경쟁 중					

2. 추진전략 도출을 위한 SWOT 분석

■ SWOT 분석

- 외부환경 및 내부역량 분석 및 기회·위협요인과 강점·약점요인 도출
- 외부환경 요인과 내부역량을 종합적으로 분석하여 사업추진전략 수립

〈표 V-3〉 동 사업 SWOT분석과 전략방안

외부환경 내부역량		강점(S)	약점(W)
		○ 친환경 및 신재생에너지 이슈와 더불어 수소 시장의 성장 高 - 친환경 수소는 2050년 에너지 수요의 20%를 차지할 전망 ○ 우리나라 수소기술의 효율성 및 기존 IT역량(IoT, Big Data, AI등), 배터리 기술과 결합 잠재력 높음 ○ 수소 생산, 저장운송, 활용, 실증 등 개별 기술에 부처별 꾸준한 R&D투자	○ 국내 수소 시장은 아직 규모가 작으며 획기적 보급 정책 없을 시 상대적 시장 위축 가능성 高 ○ 수소 생산·이동·보관 기술은 선진국에 열세이며, 수소의 경제성 문제
기 회 (O)	○ 전세계적 Decarbonization 추세로 신재생에너지 수요 증가 ○ 수소에너지 생산, 이동, 보관, 활용의 Smart화로 인해 다양한 가치 창출 기회	[SO전략] ① 증가하는 수소에너지 수요에 대응하여, 보다 고효율의 친환경 수소 확보를 위한 R&D 추진 ② 수소 생산 부산물의 활용, 배터리 및 수소 수요영역과 연계 등 다양한 부가가치 창출 기회 마련	[WO전략] ③ 수소 보급 기반 마련으로 세계적으로 증가하는 신재생에너지 시장 수요에 대응 ④ 수소 기술의 고도화를 통한 기술적 열세를 극복 및 다양한 가치창출 기회 마련
	○ 신재생에너지 국가 간 무역마찰 및 정책 환경의 불확실성 - 신재생에너지 제조산업은 중국이, 발전/서비스 산업은 글로벌 IT기업이 주도할 가능성 高 ○ 신재생에너지 사회 수용성 및 보급 제도 개선 미흡	[ST전략] ⑤ 꾸준한 R&D 투자로 에너지 자급률 향상을 도모하여 불안정한 에너지안보 정세 대비 ⑥ 신재생에너지 사회적 수용성을 제고할 수 있는 경제적 효율 높은 수소기술개발	[WT전략] ⑦ 수소 확대·보급의 기반을 위한 테스트베드 구축으로 안정적 공급을 통한 시장 성장의 기반 마련 ⑧ 국산 기술 확보를 통해 불안정한 세계 정세에 대응 및 기술주도권 확보

3. 사업 기본방향 설정

- 문제/이슈와 추진전략에 대응하는 동 사업의 기본방향 도출

〈표 V-4〉 동 사업의 기본방향 정의

문제/이슈		추진전략		기본방향
○ 탈탄소화 구현을 위한 청정수소 기술경쟁 치열		① 증가하는 수소에너지 수요에 대응하여 고효율·친환경 수소 확보를 위한 R&D추진		청록수소 생산 및 실증 요소기술 국산화 (플라즈마토치)
○ 주요국은 청정수소 실증 및 상용화를 위한 대용량 공급시스템 및 실증 추진	+	② 수소 생산부산물의 활용, 배터리 및 수소 수요영역과 연계 등 다양한 부가가치 창출 기회 마련 ③ 수소 보급기반 마련으로 세계적으로 증가하는 신재생에너지 시장 수요 대응 ④ 수소 기술의 고도화를 통한 기술적 열세를 극복 및 다양한 가치창출 기회 마련 ⑤ 신재생에너지 사회적 수용성을 제고할 수 있는 경제적 효율 높은 수소기술 개발		청록수소 경제성을 확보할 수 있는 고체탄소 (카본블랙) 포집 고도화
○ 수소의 경제성 문제에 대한 논의		⑥ 에너지 자급률 향상을 도모하여 불안정한 에너지안보 정세 대비 ⑦ 수소 확대·보급 기반을 위한 테스트베드 구축으로 안정적 공급을 통한 시장성장 기반 마련 ⑧ 국산기술 확보를 통해 불안정한 세계정세에 대응 및 기술주도권 확보		청록수소 대용량 공급을 위한 테스트베드 구축

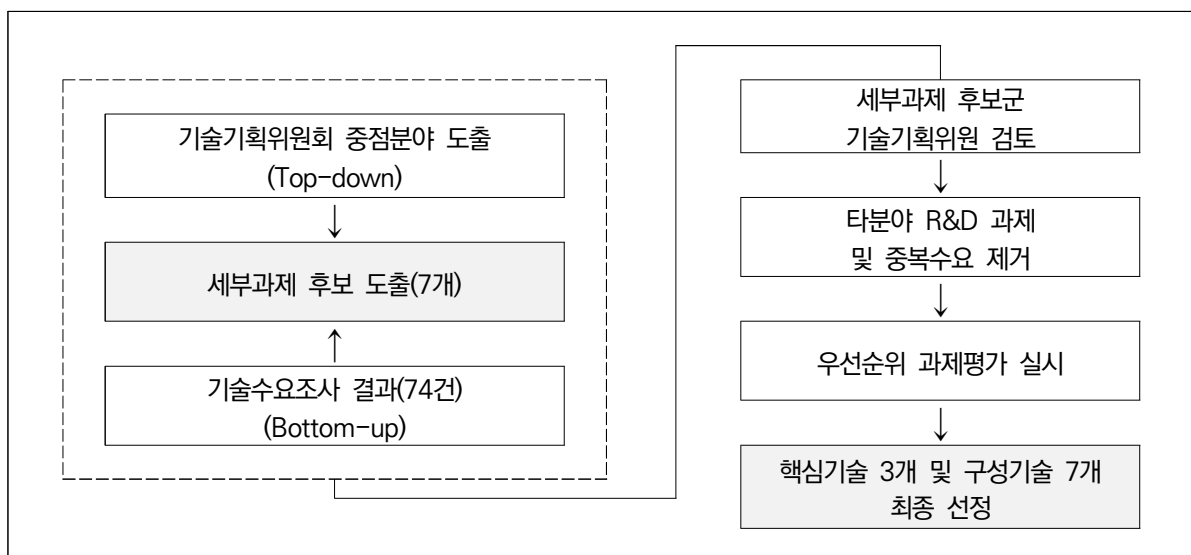
2절 세부과제 도출의 적절성

1. 세부과제 도출 개요

■ 세부과제 도출 프로세스

- 사업기획의 충실성을 위해 예비타당성조사 지침에 근거, 동 사업 관련 범위에서 Top-down과 Bottom-up 방식을 병행하여 중점분야 및 세부과제 발굴
 - Top-down 기술기획을 통해 산업, 시장, 기술 동향을 조사·분석, 동 사업과 관련된 기술적 현안 및 문제, 이슈를 중심으로 동 사업의 중점분야 도출
 - Bottom-up 기술기획을 통해 국내 산·학·연 수요자(수혜자, 개발기술 및 성과의 최종 활용자)를 대상으로 기술수요조사를 실시
 - 청록수소 및 에너지 분야의 현재 및 미래에 요구되는 기술을 Top-down으로 도출된 중점분야별로 조사
 - 기술수요조사에 대하여 적정성을 평가하기 위한 기준을 설정하고 우선순위 평가를 시행하고, 기술기획위원 검토 수행
- ※ 우선순위 평가항목은 공공성(정부역할, 파급효과), 기술성(기술개발성공 가능성, 경쟁력확보 가능성), 시장성(국내시장 성장성, 해외진출 가능성) 등으로 구성

- 세부과제 도출 프로세스 결과, 중점분야 3개, 핵심기술 7개로 선정



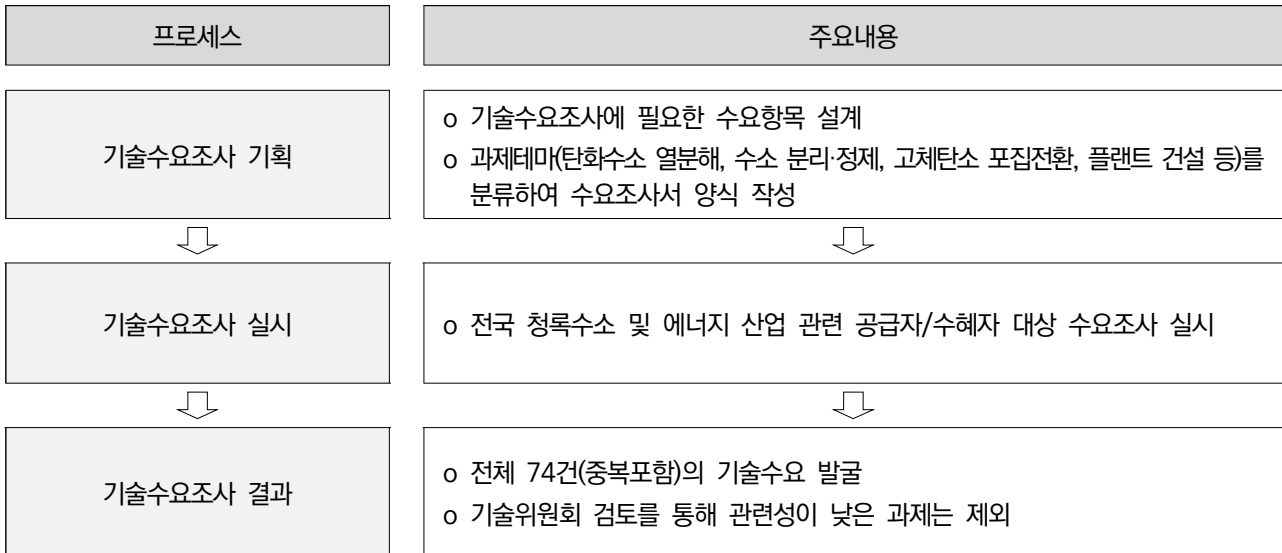
[그림 V-1] 세부과제 도출 프로세스

2. 기술수요조사 개요

- 국내 산·학·연 수요자(수혜자, 개발기술 및 성과의 최종 활용자)를 대상으로 기술수요조사 실시, 2차례 기술수요조사를 통해 74건의 기술수요 발굴

※ 1차('22.11.10. ~ '22.12.30.), 2차('22.12.31. ~ '23.03.31.)

- 수요조사서의 완성도가 떨어지거나 동 사업과 관련성이 낮은 조사지는 제외



[그림 V-2] 기술수요조사 기획과정

〈표 V-5〉 기술수요조사 결과(86건)

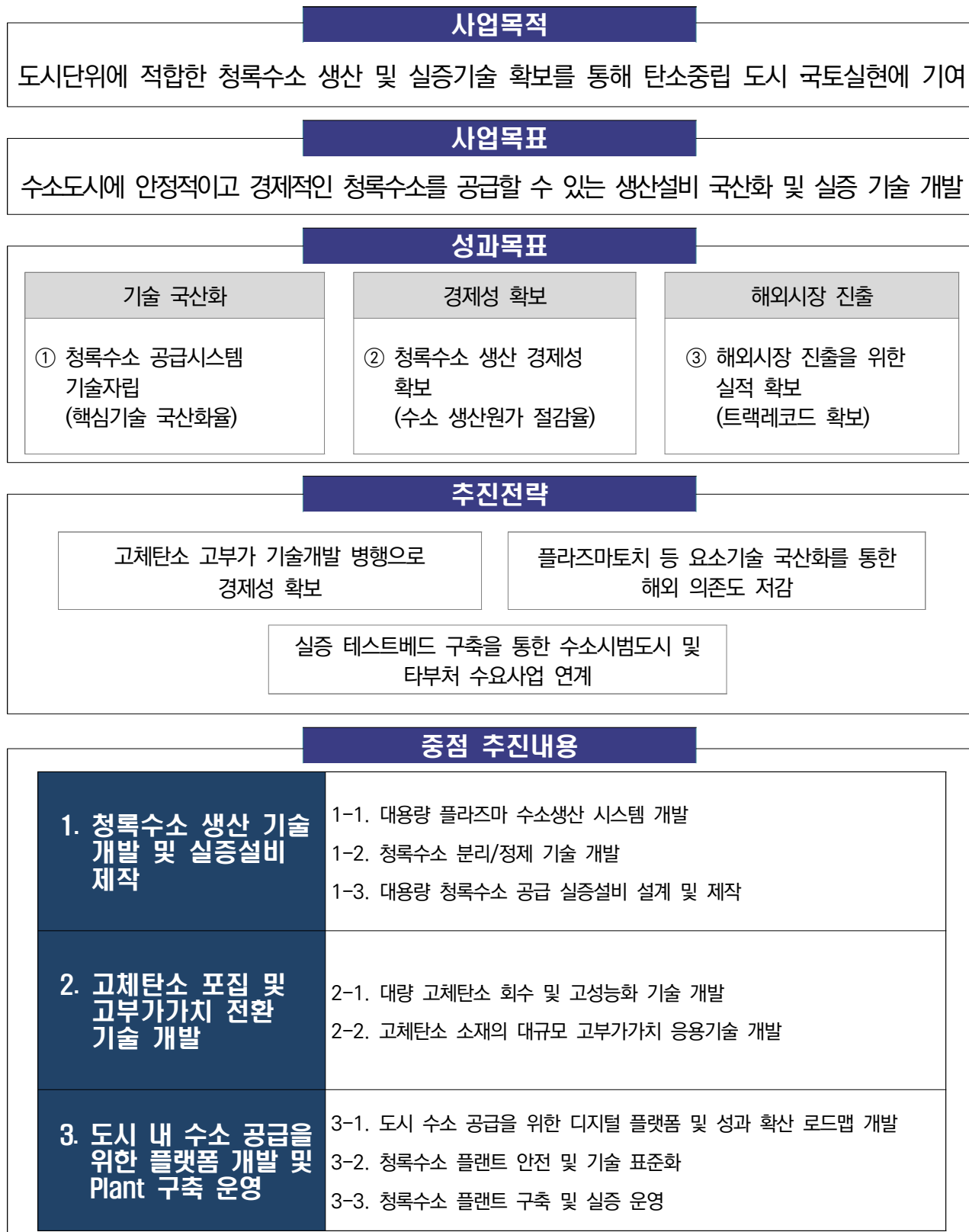
No.	과제명(기술명)	중점분야*
1	탄화수소 활용 CO2free 청록 수소 생산 공정시스템 기술 개발	1
2	청록수소 부산물의 LIB 도전재료의 활용 기술 개발	3
3	청록수소 기반 고체탄소 부산물의 친환경 응용기술 개발	3
4	폐플라스틱 활용 저탄소 수소생산기술	1
5	플라즈마 열분해 공정을 이용한 합수소 바이오가스 생산 기술 개발	1
6	대용량 수소 안전 저장을 위한 저압 고체수소 저장 시스템 개발	1
7	촉매 열분해에 의한 고전도성 탄소나노튜브 합성 기술 개발	2
8	플라즈마로 탄화수소 연료를 개질하는 수소생산 기술의 최적화 및 성능평가	2
9	탄화수소계 혼합가스 (미전환 연료/H2)의 수소 추출을 위한 건식 개질반응 시스템 개발	2
10	탄화수소 열분해 기반 대용량 수소생산 시스템 개발	1
11	유기성 폐기물 바이오가스를 활용한 청록수소 실증플랜트 실용화기술 개발	3
12	촉매를 이용한 탄화수소 직접 열분해 공정 기술 개발	1
13	청록수소 부산물인 저품위 고체탄소의 마이크로파를 활용한 고품질화 기술 개발	3
14	청록수소 부산물인 저품위 고체탄소의 표면개질기술을 통한 고분산성 카본블랙 제조기술 개발	3
15	대용량 청록수소 생산을 위한 탄화수소 연료 무 촉매 열분해 하이브리드 열플라즈마 반응공정 및 실증 기술개발	1
16	저압 수소저장을 통한 안전한 그린수소충전소 건설 및 실증	1
17	CO2-free 수소생산 및 이산화탄소 분리 반응을 포함하는 매체 순환 청록 수소 생성 공정용 입자 개발 및 연구	1

No.	과제명(기술명)	중점분야*
18	액체촉매 이용 열분해 청록 수소생산과 부산물 고체 탄소의 산화그래핀 합성 기술 개발	3
19	도심, 산업단지형 청록수소 생산 및 공급 시스템	1
20	디지털트윈 기반의 대용량 수소이송 루트 및 저장 네트워크 최적화 기술	3
21	하이브리드 열플라즈마 기반 청록수소 생산과 고품질 탄소소재 제조의 one-step 공정개발 및 응용	1, 3
22	포집 고체탄소 기반 에너지 소재용 탄소복합체 활용 기술개발	3
23	대용량 청록수소 생산을 위한 탄화수소 촉매열분해 시스템 실증 및 개발	1
24	용융금속합금을 이용한 천연가스의 수소 및 결정질 탄소 전환공정 개발	1
25	플라즈마 기술을 활용한 50Nm ³ /h급 청록수소 생산 복합 개질 공정 기술 개발	1
26	LOHC 기반 100Nm ³ -H ₂ /h 급 수소 저장-추출 연계 시스템 개발	2,
27	청록수소 인프라 건설 안전 및 품질관리 체계구축	3
28	고수율 청록수소 변환 및 탄소나노소재 동시 생산 및 고부가가치화 기술 개발	1, 3
29	고품질 CNT 및 수소생산을 위한 초균일 초고분산 활성점의 혁신촉매 개발	1
30	플라즈마 열분해 공정 기술 개발	1
31	200 Nm ³ /h급 메탄 플라즈마 열분해 수소에 함유된 카본 더스트 제거를 위한 공정기술 개발	2, 3
32	청록수소 시범도시 모델 구축 및 실증전략 개발	3
33	천연가스/바이오가스 유래 ICP 플라즈마 기술 적용 대규모 청록수소 및 고부가가치 탄소의 생산 및 공급 시스템의 실증 개발	1, 2, 3
34	청록수소 생산·공급기술의 도시적용을 위한 환경/경제/사회적 수용성 평가 기술	3
35	복합재질 페플라스틱 열분해기술 이용 99.9% 고순도 150Nm ³ /h급 청정수소생산 공정 개발	1, 2, 3
36	대용량 청록수소 공급기술 도시기반 실증을 통한 검증 운영 모니터링시스템 개발	3
37	탄화수소 열분해 수소생산을 위한 고온 열원 연계 기술개발	1, 3
38	연료전지 급 대용량 청록수소 생산을 위한 메탄 직접 분해 반응 후단 가스 내 미활용 메탄 및 불순물 포집 및 재활용 분리 기술 개발	2
39	저탄소배출 플라즈마공법을 활용한 청록수소/카본블랙 상용화 기술개발	1
40	60Nm ³ /h급 청록수소 및 카본블랙 생산을 위한 CO ₂ -free 플라즈마 열분해 기술개발	1, 3
41	잉여전력을 이용한 도심형 일일 500kg 청록수소 액화플랜트 설계 및 건설기술	3
42	내열성고분자-다공성 세라믹 나노복합막이 탑재된 지속가능형 저가형 수소 분리정제 시스템 개발	2
43	청록수소 생산 기술에 대한 기술단위 감축잠재량 평가 방법론 개발	3
44	청록수소 밸류체인별 시·공간 감축효과 평가(안)	1, 2, 3
45	석유화학산단 폐유기용제 분리정제를 통한 청록수소 생산 원료화 및 정제공정개발	3
46	청록수소 100kg/h 생산 기준 수소/탄화수소 정제·고순도화용 흡착제 및 분리 공정기술 개발 및 실증	2
47	수소 분리정제 기술	2
48	수소 분리를 위한 열분해 후 기체 분리용 분리막 소재 및 공정 개발	2
49	* 나노구조 다공성 소재를 이용한 플라즈마-촉매 공정에서 생산되는 생성물의 흡착 분리 공정 기술 개발 * 플라즈마-촉매공정에서생산되는탄소구조체를이용한수소및부생가스흡착분리및기타응용기술개발	2, 3
50	원자력 열원을 이용한 탄화수소 직접 열분해 공정 기술 개발	1
51	할로겐화 반응을 이용한 탄화수소 열분해 수소 생산 기술	1
52	탄화수소계 혼합가스 (미전환 연료/H ₂)의 수소 추출을 위한 건식 개질반응 시스템 개발	2
53	천연가스/바이오가스 유래 ICP 플라즈마 기술 적용 대규모 청록수소 및 고부가가치 탄소의 생산 및 공급 시스템의 실증 개발	1, 2, 3
54	청록수소 고체탄소 활용을 위한 이차전지용 전극 소재 전환 기술 개발	1, 3

* 1.청록수소 생산 및 실증설비 기술(수소 분리정제 기술을 포함)/2.고체탄소 포집 및 전환기술/3.플랜트 건설 및 운영기술

3절 사업체계도

1. 사업 목적 및 목표 체계도



2. 성과목표 및 성과지표

1) 성과목표-지표 설정 논리

■ 사업의 논리모형에 따른 핵심지표 설정

- 사업목적을 반영하여, 사업의 작동과 관련된 항목 간의 논리적 연관성을 검토
 - 투입(Input) : 대용량 청록수소 공급시스템 기술 개발을 위한 기술개발 비용과 실증플랜트 구축 비용 등 공모를 통해 일정기간의 R&D자금 지원
 - 과정(Activities) : 기술개발, 설계 및 발주, 설비 구축 및 실증 연구 수행
 - 산출(Output) : 청록수소 도시공급 표준화 기술 도출, 청록수소 생산 기술개발 및 플랜트 실증, 수소 분리·정제 국산화 기술확보, 대용량 청록수소 실증플랜트 등
 - 성과(Outcome) : 청록수소 생산량, 국산화율 제고, 전주기 탄소 배출량 평가 등
 - 영향(Impact) : 수소생산단가 절감, 카본블랙 가격 등

■ 동 사업의 성과지표 후보군 pool 중에서 전문가 검토를 거쳐 최종 성과지표 선정

- 성과지표는 성과지표 5대 원칙, 즉 SMART(명확성/측정가능성/원인성/신뢰성/적시성) 기준에 따라 성과지표를 점검

〈표 V-6〉 성과지표 선정을 위한 SMART 특성

Specific	명확할 것
Measurable	측정 가능할 것
Attributable	사업의 성과와 관련 있을 것
Reliable	신뢰성이 있을 것
Timely	성과측정 시기와 맞을 것

- **(Specific: 명확성)** 일관성 있는 성과 데이터의 수집과 공정한비교를 위해 성과지표는 명확하게 알기 쉽게 정의되어야 함
- **(Measurable: 측정가능성)** 성과지표는 측정을 위한 데이터가 존재해야 하며 사용에 제약이 크지 않아야 함
- **(Attributable: 원인성)** 해당사업 성과의 변화가 성과지표의 변화를 가져와야 함
- **(Reliable: 신뢰성)** 성과지표는 제 3자가 검토하더라도 일관된 결과가 나올 수 있어야 하고, 가급적 공식적이고 객관적인 통계정보를 활용할 수 있어야 함
- **(Timely: 적시성)** 성과측정 대상연도의 성과정보가 성과측정 전에 나와야 함

※ 국가연구개발사업 표준성과지표 5차 (KISTEP, 2020)

2) 성과목표·지표 체계 선정

■ 동 사업 목표 달성 여부 측정을 위한 성과목표별 지표 후보pool 설정

- 대용량 청록수소 공급시스템 기술개발 및 실증 달성을 위한 성과목표 및 지표 도출
 - 동 사업의 당면 이슈와 사업목적 달성에 기여하는 성과목표를 설정
 - 성과목표 달성을 측정할 수 있는 목표별 성과지표 발굴
- (성과목표) 청록수소 공급시스템 기술자립, 청록수소 생산 경제성 확보, 청록수소 대용량 공급시스템 상용화 및 해외시장 진출을 위한 실적 확보 등을 핵심 성과목표로 설정
- (성과지표) 실용화 목적의 과제특성을 고려하여 핵심기술 국산화, 생산원가 절감, 청록수소 대용량 공급시스템 성능달성도 확보 등을 설정

〈표 V-7〉 성과목표/지표 및 달성목표

성과목표	성과지표	목표치(5차년도)
① 청록수소 공급시스템 기술자립	→ ① 청록수소 공급시스템 핵심기술 국산화율(%)	→ 100%
② 청록수소 생산 경제성 확보	→ ② 블루수소* 대비 수소 생산원가 절감율(%) * 현재, 청정수소 중 수소 생산단가가 가장 낮은 기술	→ 10% 이상
③ 청록수소 대용량 공급 시스템 상용화 및 해외시장 진출을 위한 실적 확보	→ ③ 청록수소 대용량 공급(3톤/일) 체계 트랙레코드 확보(건)	→ 4건* * 청록수소 대용량 공급 패키지 설계 1건 * 생산플랜트 구축 1건 * 생산플랜트 최적 운영 1건 * 청정수소 도시공급(도시 수소 수요 예측 및 디지털 플랫폼 등) 1건

- (지표별 측정산식) 등 사업의 성과목표 달성 여부를 측정하기 위한 3개의 성과지표별 구체적인 측정산식을 제시하고 달성가능 범위 내에서 도전적인 목표치를 제시

〈표 V-8〉 성과지표 산출근거

성과목표	핵심성과 지표	측정방법 및 연도별 목표																																																																																
① 청록수소 공급시스템 기술자립	① 청록수소 공급시스템 핵심기술 국산화율(%)	측정 방법	○ (정의) 청록수소 대용량 생산·운영 및 도시 공급 시스템을 구성하는 핵심기술(24건)*의 국산화 기술 확보 정도를 확인 〈청록수소 생산·운영 및 도시공급 핵심기술〉																																																																															
			No.	핵심기술명	목표연도	1	도시 수소 수요 예측 기술	5차연도	2	도시 운영 연계 플랜트 단위 공정 표준화 및 안전성 기준	4차연도	3	청록수소 표준화 및 안전성 기준	4차연도	4	청록수소 생산플랜트 설계 및 구축 기술	4차연도	5	청록수소 생산플랜트 최적 운전기술	5차연도	6	플라즈마 토치 시스템	4차연도	7	플라즈마 반응기 시스템	4차연도	8	촉매 양산기술	4차연도	9	고효율 촉매 반응시스템	4차연도	10	플라즈마-촉매 시스템 설계 및 제작 기술	4차연도	11	H2 순도 3N7(99.97%, ISO 기준) 이상 정제기술	4차연도	12	H2 회수율 85% 이상 공정운전 기술	5차연도	13	분리 효율 향상용 분리막-PSA 혼성 시스템	4차연도	14	시스템 에너지 최적화 및 컴팩트화 설계기술	4차연도	15	수소생산부 생산 부하 변동형 운전 기술	5차연도	16	CH4/H2 선택도 50이상 흡착제	3차연도	17	흡착제 고내구성 성형 기술 및 대량 제조 기술	3차연도	18	미제거 고체탄소 기/고 분리 기술	4차연도	19	탄화수소류/유기화합물 제어기술	4차연도	20	수소 분리·정제 기술 대형화 설계 및 제작	5차연도	21	고체탄소 고순도/고결정/기능화	4차연도	22	고체탄소 고농도 분산	4차연도	23	고체탄소 고함량 Master-batch화	5차연도	24	ESD용 응용 부품 제조 및 실증	5차연도	○ (측정방법) 도시 운영 연계 플랜트 단위기술 표준화, 플랜트 설계 및 구축·운영 기술, 플라즈마 토치 및 반응기 시스템 등 국산화 기술 확보 여부를 판단하기 위해 성능목표 달성한 핵심기술 건수를 조사 ○ (측정산식) $\Sigma(\text{당해연도 성능목표 달성 핵심기술 수} + \text{이전연도 성능목표 달성}$ 핵심기술 수) / $\Sigma(\text{전체 핵심기술 수})$				
			No.	핵심기술명	목표연도																																																																													
			1	도시 수소 수요 예측 기술	5차연도																																																																													
			2	도시 운영 연계 플랜트 단위 공정 표준화 및 안전성 기준	4차연도																																																																													
			3	청록수소 표준화 및 안전성 기준	4차연도																																																																													
			4	청록수소 생산플랜트 설계 및 구축 기술	4차연도																																																																													
			5	청록수소 생산플랜트 최적 운전기술	5차연도																																																																													
			6	플라즈마 토치 시스템	4차연도																																																																													
			7	플라즈마 반응기 시스템	4차연도																																																																													
			8	촉매 양산기술	4차연도																																																																													
			9	고효율 촉매 반응시스템	4차연도																																																																													
			10	플라즈마-촉매 시스템 설계 및 제작 기술	4차연도																																																																													
			11	H2 순도 3N7(99.97%, ISO 기준) 이상 정제기술	4차연도																																																																													
			12	H2 회수율 85% 이상 공정운전 기술	5차연도																																																																													
			13	분리 효율 향상용 분리막-PSA 혼성 시스템	4차연도																																																																													
			14	시스템 에너지 최적화 및 컴팩트화 설계기술	4차연도																																																																													
			15	수소생산부 생산 부하 변동형 운전 기술	5차연도																																																																													
			16	CH4/H2 선택도 50이상 흡착제	3차연도																																																																													
			17	흡착제 고내구성 성형 기술 및 대량 제조 기술	3차연도																																																																													
			18	미제거 고체탄소 기/고 분리 기술	4차연도																																																																													
			19	탄화수소류/유기화합물 제어기술	4차연도																																																																													
			20	수소 분리·정제 기술 대형화 설계 및 제작	5차연도																																																																													
			21	고체탄소 고순도/고결정/기능화	4차연도																																																																													
		22	고체탄소 고농도 분산	4차연도																																																																														
		23	고체탄소 고함량 Master-batch화	5차연도																																																																														
		24	ESD용 응용 부품 제조 및 실증	5차연도																																																																														
연도별 목표	○ (연차별 목표) - 핵심기술별 성능목표를 달성한 핵심기술 확보 목표연도를 적용 * (3차연도) 8.3% = 당해연도 목표 2건 / 전체 24건, (4차연도) 70.8% = (이전연도 목표 2건 + 당해연도 목표 15건) / 전체 24건, (5차연도) 100% = 이전연도 목표 17건 + 당해연도 목표 7건) / 24건																																																																																	
	<table><tr><th>1차연도</th><th>2차연도</th><th>3차연도</th><th>4차연도</th><th>5차연도</th></tr><tr><td>-</td><td>-</td><td>8.3%</td><td>70.8%</td><td>100%</td></tr></table>					1차연도	2차연도	3차연도	4차연도	5차연도	-	-	8.3%	70.8%	100%																																																																			
	1차연도	2차연도	3차연도	4차연도	5차연도																																																																													
-	-	8.3%	70.8%	100%																																																																														

성과목표	핵심성과 지표	측정방법 및 연도별 목표													
② 청록수소 생산 경제성 확보	② 블루수소 대비 수소 생산원가 절감율(%)	측정 방법	○ (정의) 현재, 청정수소 대량 생산기술 중 수소 생산단가가 가장 저렴하다고 평가되는 블루수소 생산기술 대비 더욱 저렴한 수소 생산기술 확보를 통해 청정수소 생산의 경제성 확보 정도를 확인 ○ (측정방법) 블루수소*와 청록수소 생산단가(실증 및 시뮬레이션)를 미국 국립에너지재생연구소 (NREL) '수소분석(H2A) 생산 모델**'을 이용하여 측정 * 블루수소의 경우 대형 공정에서만 적용이 가능 ** 수소생산 경로에 대한 심층적인 기술·경제 분석을 수행하기 위한 美 에너지부의 공식적인 도구 ○ (측정산식) [(청록수소 생산단가 - 블루수소 생산단가) / 블루수소 생산단가] × 100												
		연도별 목표	○ (연차별 목표) - 이론상 설정 가능한 목표치는 -12.89%* 수준으로 계산되나 실증연구임을 감안한 현실적 목표치로 100이상 절감을 최종연도에 달성하는 것으로 설정 ※ 단, 블루수소의 경우 수소 생산과정에서 필연적으로 발생하는 이산화탄소 저장비용 계상이 가능할 경우 청록수소 생산단가 절감율은 더 낮아질 수 있음 * (이론상 가능 절감율) -12.89% = [(청록수소 생산단가 3.38(\$/kg) - 블루수소 생산단가 3.88(\$/kg)) / 블루수소 생산단가 3.88(\$/kg)] × 100 <table><tr><th>1차연도</th><th>2차연도</th><th>3차연도</th><th>4차연도</th><th>5차연도</th></tr><tr><td>-</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td><td>-10% 이상</td></tr></table>					1차연도	2차연도	3차연도	4차연도	5차연도	-	-	-
1차연도	2차연도	3차연도	4차연도	5차연도											
-	-	-	-	-10% 이상											
③ 청록수소 대용량 공급 시스템 상용화 및 해외시장 진출을 위한 실적 확보	③ 청록수소 대용량 공급(3톤/일) 체계 트랙레코드 확보(건)	측정 방법	○ (정의) 수소도시의 청정수소 에너지 수요에 대응할 수 있는 수준의 청록수소 생산규모 확보 요구 수준인 '3톤/일'을 달성 여부 확인 ※ 동 사업에서 구축하고자 하는 실증플랜트는 '3톤/일' 달성이 가능한 상용급 플랜트로 국내외 청록수소 생산 상용플랜트에 적용 가능한 트랙레코드로 활용 가능 ○ (측정방법) 청록수소 생산플랜트 구축 → 청록수소 생산플랜트 최적 운영 → 청정수소 도시공급 등 국내외 청정수소 생산·운영·공급 각 단계별 시스템의 실증 성공 여부를 측정 ○ (측정산식) ∑ 실증 성공(청록수소 대용량 공급 패키지 설계, 생산플랜트 구축, 생산플랜트 최적 운영, 청정수소 도시공급)												
		연도별 목표	○ (연차별 목표) - 해외 플랜트 건설시장에 수출이 가능한 개별 기술 및 시스템*의 트랙레코드를 실증 성공을 통해 최종연도에 달성하는 것으로 설정 * 청록수소 대용량 공급 패키지 설계 1건 * 생산플랜트 구축 1건 * 생산플랜트 최적 운영 1건 * 청정수소 도시공급(도시 수소 수요 예측 및 디지털 플랫폼 등) 1건 <table><tr><th>1차연도</th><th>2차연도</th><th>3차연도</th><th>4차연도</th><th>5차연도</th></tr><tr><td>-</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td><td>4건</td></tr></table>					1차연도	2차연도	3차연도	4차연도	5차연도	-	-	-
1차연도	2차연도	3차연도	4차연도	5차연도											
-	-	-	-	4건											

3. 사업 추진전략

전략 1

고체탄소 고부가 기술개발 병행으로 경제성 확보

- 청록수소 대용량 공급시스템 개발과 병행하여 청록수소 생산 과정에서 산출되는 카본블랙 등 고체탄소 포집 및 고부가 전환기술을 병행개발하여 경제성 확보
 - 청록수소 기술은 기존 개발된 청정수소 중 가장 뛰어난 경제성을 갖춘 SMR 기술에 비해 약 2배의 순수익* 창출 가능
- * 연간 수소판매비용, 고체탄소 판매 단가 등 종합 계산
- 경제성 높은 청록수소 생산기술 개발을 통해 기존 수소 기술개발의 장기간 고위험의 불확실성을 해소하여 민간의 수소개발 투자·수용성 제고

전략 2

플라즈마토치 기술 등 요소기술 국산화를 통한 해외 의존도 저감

- 청록수소 생산에 있어 플라즈마토치 기술은 직접 열분해 기술보다 경제성이 높으나, 국내 기술수준은 부족하며 도입시 해외에 의존해야하는 실정
 - ※ 고온 플라즈마 기술은 높은 공정 효율로 대용량 수소 생산 및 더 많은 카본블랙 확보가 가능하며, 기존의 직접 열분해 기술 대비 약 3배 향상된 순이익 창출 가능
 - ※ 플라즈마 열분해 기술특허 비중 : 일본 41%, 미국 25%, 유럽 13%, 한국 12%
- 세계적 수준의 플라즈마토치 국산 기술확보로 신재생에너지시대 대외 경쟁력 확보

전략 3

수소시범도시 사업과 연계한 청록수소 실증 테스트베드 구축

- 높아진 신재생에너지 도입 필요성에 비해 청정수소 생산·도입을 위한 국내 인프라 구축은 여전히 미흡
- 동 사업으로 구축한 실증플랜트(테스트베드)로 안정적인 청록수소 보급 인프라를 마련하여 국토부 수소시범도시 사업 추진시 안정적이고 경제적인 수소 공급체계로 연계
 - 필요시 타부처 청록수소 수요 사업 연계 및 테스트베드 제공 가능

- 청록수소 실증플랜트를 통해 안정성 및 경제성을 확인하고 이후, 민간주도의 플랜트 초대형화를 통해 상용성 제고 추진

〈표 V-9〉 청록수소 공급 시스템 개발 총괄 로드맵

구분	성능지표	1단계		2단계	3단계 (청록수소 상용성 제고를 위한 스케일업, 플랜트 초대형화 추진)	
		요소기술 및 단위공정 개발		요소기술 고도화 및 실증플랜트 구축·운영	Multi-Type	초대형화
사업 범위	개발품목	요소기술 및 단위공정 개발		요소기술 고도화 및 실증플랜트 구축·운영	Multi-Type	초대형화
수소	플라즈마 출력	30kW	300KW	1,000KW	8,000KW (1,000kW×8기)	8,000KW (8,000kW×1기)
	메탄 전환율	50%	80%	80%	85%	
	생산량	60kg/일	850kg/일	3톤/일	25톤/일	
	생산 단가	16,000원/kg	9,500원/kg	5,250원/kg	3,000원/kg	
고체 탄소	총 생산량	-	2톤/일	9톤/일	72톤/일	
	고품질 생산량	-	0.3톤/일	3톤/일	60톤/일	
	생산 단가	700원/kg	1,800원/kg	3,600원/kg	4,300원/kg	
동사업					후속사업	

4. 사업 구성(안)

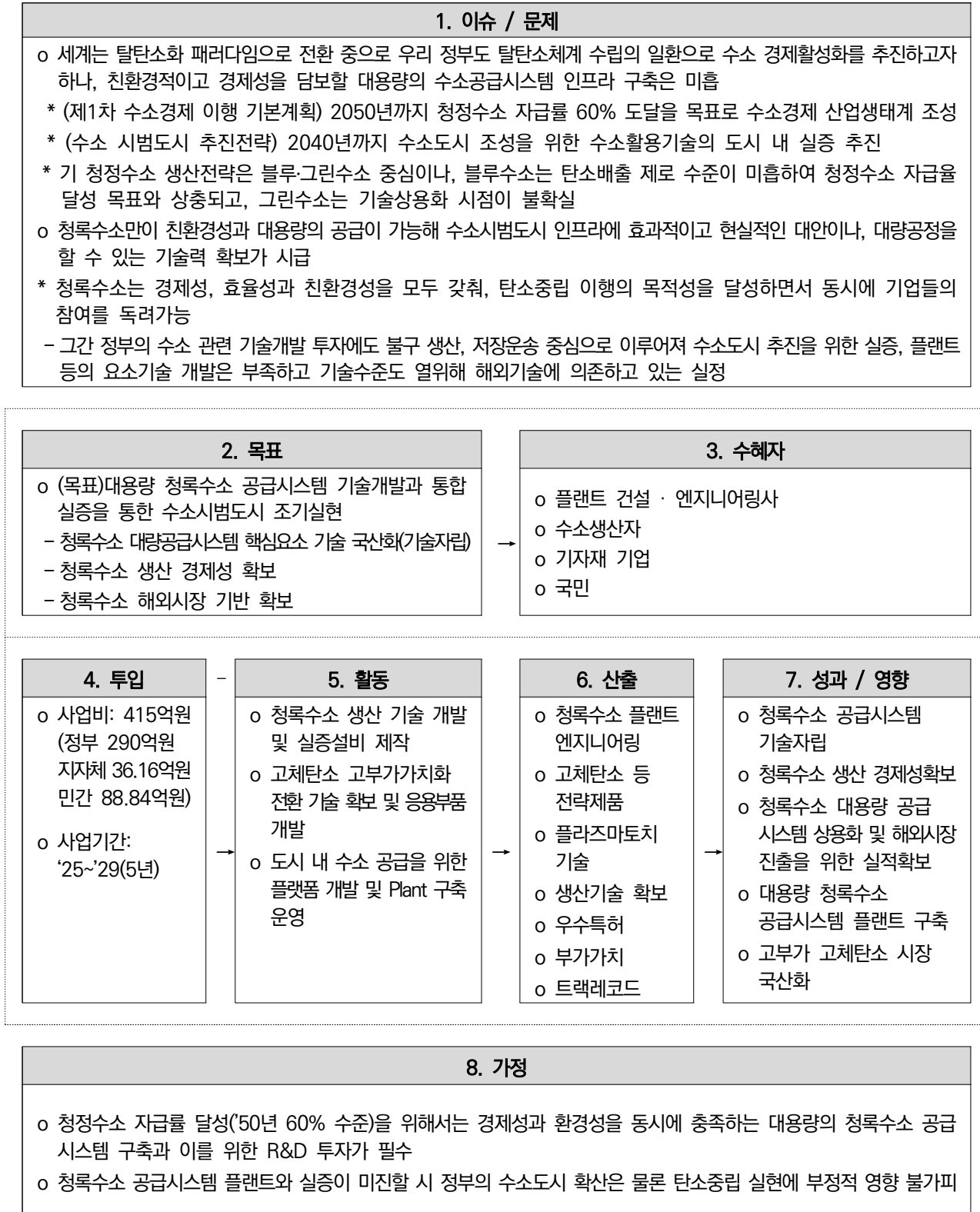
- (사업구성) 동 사업은 3개 중점분야와 8개 핵심기술, 18개 구성기술로 사업 구성(안)을 설정

〈표 V-10〉 동 사업의 기술구성(안)

중점분야	핵심기술	구성 기술
① 청록수소 생산 기술 개발 및 실증설비 제작	1-1. 대용량 플라즈마 수소생산 시스템 개발	플라즈마 토치 시스템 개발
		플라즈마 기반 반응기 시스템 개발
		플라즈마 시스템 연계 수소 및 탄소 동시 생산 고효율 촉매 반응시스템 개발
	1-2. 청록수소 분리/정제 기술 개발	미회수 고체탄소의 기체/고체 분리기술 개발
		잔류 탄화수소 제어기술 개발
	1-3. 대용량 청록수소 공급 실증설비 설계 및 제작	요소기술별 핵심인자 및 Scale-up 설계인자 분석
		대용량 청록수소 생산 핵심기술의 최적모델 설계
		실증설비 제작 및 연계공정 시운전 평가
② 고체탄소 고부가가치화 전환 기술 확보 및 응용부품 개발	2-1. 대량 고체탄소 회수 및 고성능화 기술 개발	고체탄소 고성능화 기술 개발 및 연속처리공정 (300kg/day급) 실증
		고체탄소 소재의 대규모 고부가가치화 응용 기술 개발
	2-2. 고체탄소 소재의 대규모 고부가가치 응용기술 개발	고체탄소 고함량 Master-batch화 기술 개발
		ESD용 응용 부품 제조 및 실증
③ 도시 내 수소 공급을 위한 플랫폼 개발 및 Plant 구축 운영	3-1. 도시 수소 공급을 위한 디지털 플랫폼 및 성과 확산 로드맵 개발	DNA 및 AI 기반 수소 도시 인프라 구축 및 관리를 위한 디지털 플랫폼 기술 개발
		청록수소 플랜트 전과정 평가 기반 성과 확산 DB 구축
	3-2. 청록수소 플랜트 안전 및 기술 표준화	청록수소 플랜트 안전성 확보를 위한 공급 기술 표준화
		청록수소 플랜트 테크트리 및 설치기준 제도화
	3-3. 청록수소 플랜트 구축 및 실증 운영	국내 수소 수요처 Site 엔지니어링 및 실증플랜트 구축
		1MW 플라즈마 공정 기반 Plant 통합운영 및 최적 운영 절차 확보

4절 사업 논리모형

■ 동 사업의 논리모형



[그림 V-3] 동 사업의 논리모형

제6장

중점분야별 추진계획

제1절 청록수소 생산 기술 개발 및 실증설비 제작

제2절 고체탄소 고부가가치화 전환 기술 확보 및
응용부품 개발

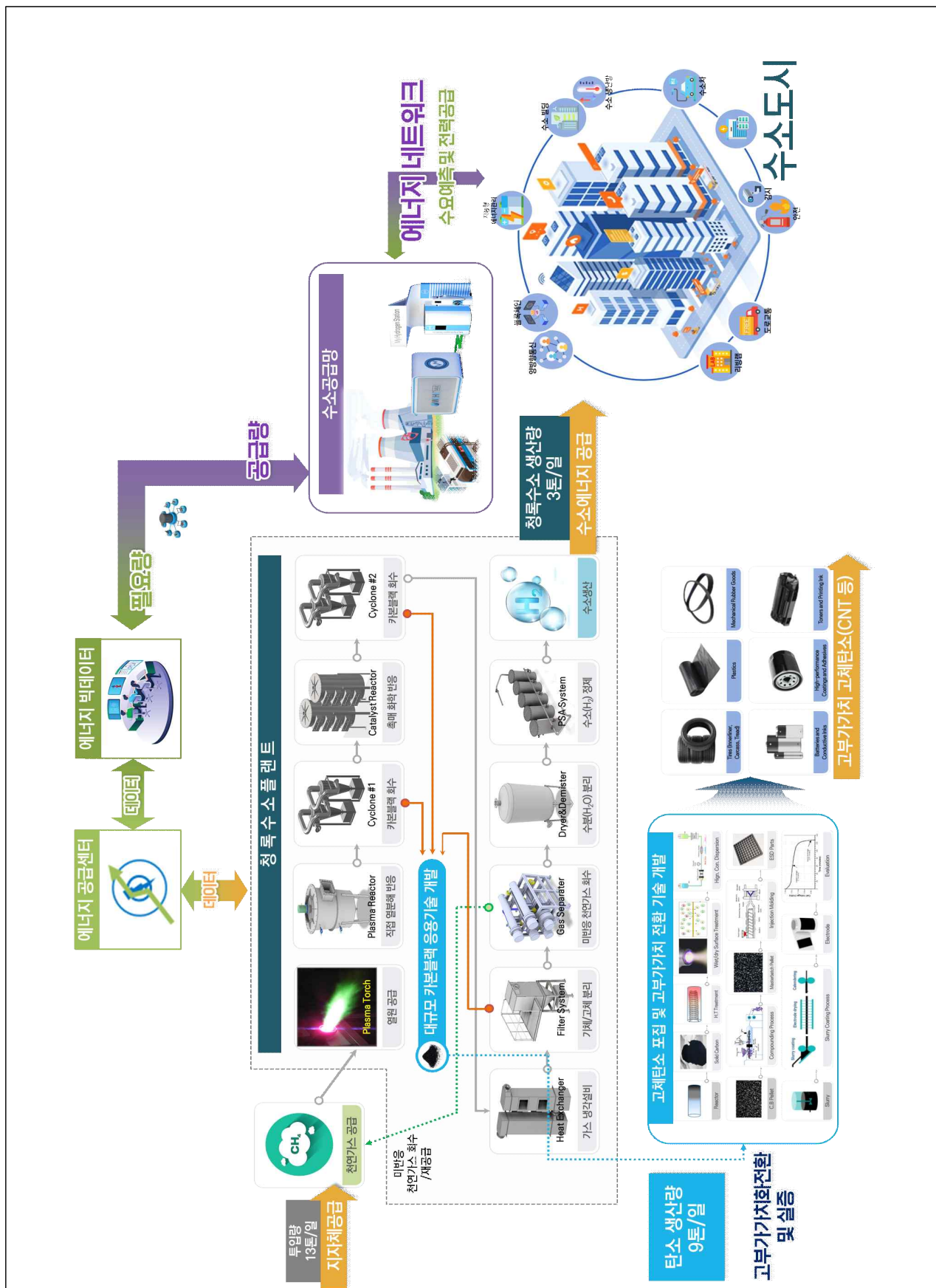
제3절 도시 내 수소 공급을 위한 플랫폼 개발 및
Plant 구축 운영

6장 중점분야별 추진계획

■ 중점분야별 기술개발 내용(요약)

구분	핵심기술	구성기술	소요예산 (억원)
대용량 청록수소 공급 시스템 기술개발			415
중점 1	[중점기술] 청록수소 생산 기술 개발 및 실증설비 제작		251
	1-1. 대용량 플라즈마 수소생산 시스템 개발	플라즈마 토치 시스템 개발	
		플라즈마 기반 반응기 시스템 개발	
		플라즈마 시스템 연계 수소 및 탄소 동시 생산 고효율 촉매 반응시스템 개발	
	1-2. 청록수소 분리/정제 기술 개발	미회수 고체탄소의 기체/고체 분리기술 개발	
		잔류 탄화수소 제어기술 개발	
	1-3. 대용량 청록수소 공급 실증설비 설계 및 제작	요소기술별 핵심인자 및 Scale-up 설계인자 분석	
		대용량 청록수소 생산 핵심기술의 최적모델 설계	
		실증설비 제작 및 연계공정 시운전 평가	
중점 2	[중점기술] 고체탄소 고부가가치화 전환 기술 확보 및 응용부품 개발		80
	2-1. 대량 고체탄소 회수 및 고성능화 기술 개발	고체탄소 고성능화 기술 개발 및 연속처리공정 (300kg/day급) 실증	
		고체탄소 소재의 대규모 고부가가치화 응용 기술 개발	
	2-2. 고체탄소 소재의 대규모 고부가가치 응용기술 개발	고체탄소 고함량 Master-batch화 기술 개발	
		ESD용 응용 부품 제조 및 실증	
중점 3	[중점기술] 도시 내 수소 공급을 위한 플랫폼 개발 및 Plant 구축 운영		84
	3-1. 도시 수소 공급을 위한 디지털 플랫폼 및 성과 확산 로드맵 개발	DNA 및 AI 기반 수소 도시 인프라 구축 및 관리를 위한 디지털 플랫폼 기술 개발	
		청록수소 플랜트 전과정 평가 기반 성과 확산 DB 구축	
	3-2. 청록수소 플랜트 안전 및 기술 표준화	청록수소 플랜트 안전성 확보를 위한 공급 기술 표준화	
		청록수소 플랜트 테크트리 및 설치기준 제도화	
	3-3. 청록수소 플랜트 구축 및 실증 운영	국내 수소 수요처 Site 엔지니어링 및 실증플랜트 구축	
		1MW 플라즈마 공정 기반 Plant 통합운영 및 최적 운영 절차 확보	

■ 기술개발 개념도



1절 [중점분야1] 청록수소 생산 기술 개발 및 실증설비 제작

1. 추진배경 및 필요성

■ 탄소중립 사회의 실현을 위한 저탄소 수소 수요의 증가

- 2050년까지 탄소중립(Net Zero) 달성을 위해 저탄소 수소에너지(2050년 연간 수소 수요 528 Mt으로 추정하며, 이중 저탄소 수소 비중은 98%에 이를 것으로 전망*
- 국내 수소경제 활성화를 위한 정책 목표에서도 청정 수소의 보급 확대를 목표로 하고 있음
- 제1차 수소경제 이행 기본계획(2021)에 따르면, 2030년 국내 수소공급량은 연 3백9십만톤, 2050년까지 연 2천7백9십만톤으로 성장하며 이중 청정수소 자급률 60%이므로 연 1천6백만톤 규모
- 그리고 “수소경제 육성 및 수소 안전관리에 관한 법률 개정안 (2022.6.10)”에 따른 청정수소의 정의*와 인증제 도입이 예정되어 저탄소 청정 수소의 보급을 확대하고자 노력하고 있음

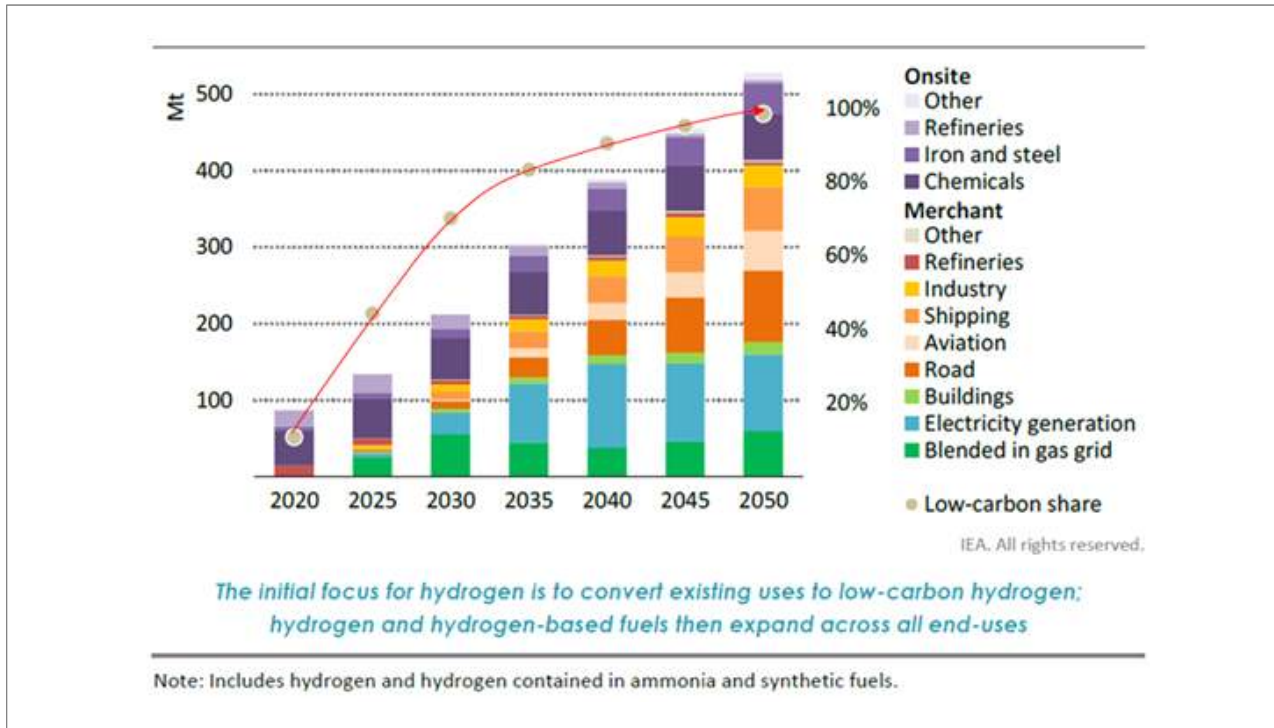
* 청정수소의 정의 : 아래의 각 목의 어느 하나에 해당하는 것 (수소법 제 2조(정의) 7의 2)

- 가. 무탄소수소: 수소의 생산·수입 등의 과정에서 「기후위기 대응을 위한 탄소중립·녹색성장 기본법」 제2조제5호에 따른 온실가스(이하 “온실가스”라 한다)를 배출하지 아니하는 수소
- 나. 저탄소수소: 수소의 생산·수입 등의 과정에서 온실가스를 대통령령으로 정하는 기준 이하로 배출하는 수소
- 다. 저탄소수소화합물: 수소의 운송 등을 위하여 생산된 수소화합물로서 생산·수입 등의 과정에서 온실가스를 대통령령으로 정하는 기준 이하로 배출하는 수소화합물

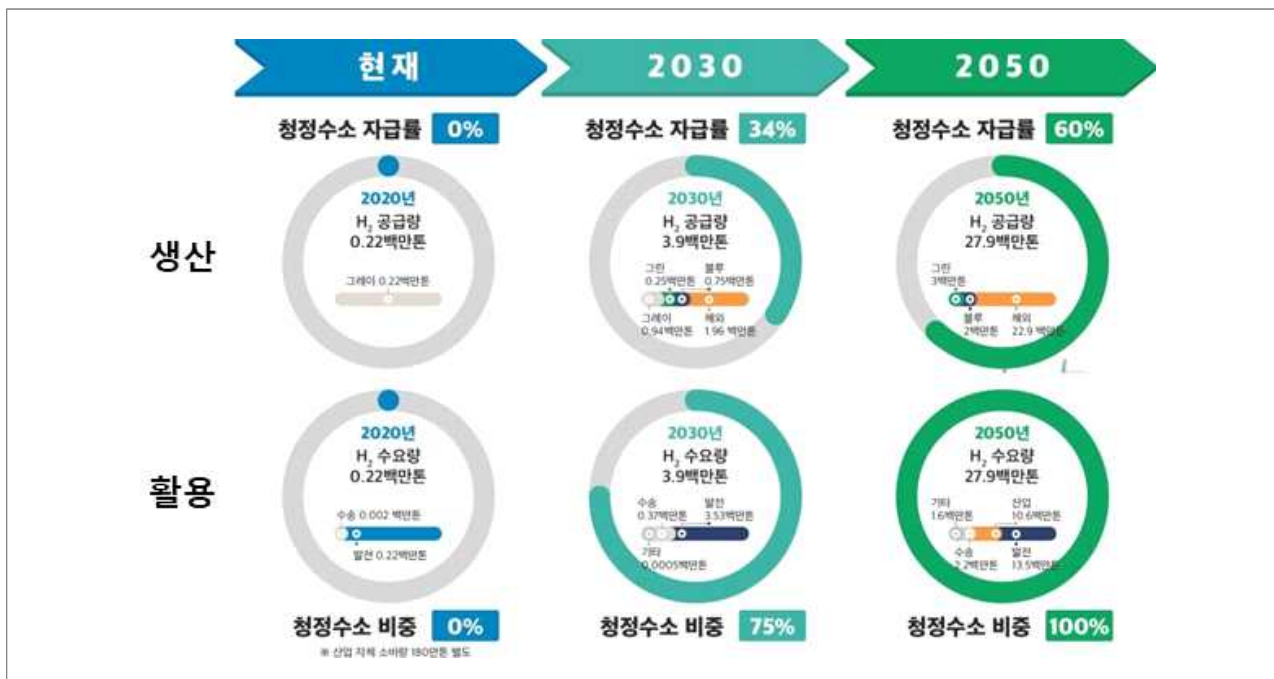
■ 현재 블루수소 및 그린수소로 대표되는 저탄소 수소 생산 기술은 대규모 이산화탄소 배출 및 재생전력 확보 등 명확한 한계를 지님

- 대표적인 저탄소 수소생산 기술 중 하나인 블루 수소 생산공정은 개질공정과 이산화탄소의 포집 및 저장 기술의 조합임. 개질공정에서 수소생산 과정에 발생하는 온실가스의 약 90 % 수준을 포집/저장할 수 있으나 대규모 이산화탄소 저장에 대한 부담이 큼

- 또 다른 저탄소 수소생산 기술인 그린수소 기술은 재생전력을 이용한 수전해 기술이므로 가장 환경친화적인 수소생산 기술이나 재생전력의 높은 단가와 재생전력 확보의 국지적 편차에 의한 제약으로 대량의 수소를 안정적인 가격으로 공급하기 어려움



[그림 VI-1] 전세계 2050년 탄소중립을 위한 수소 수요의 증가 및 청정수소의 비중 전망



출처 : 제 1차 수소경제 이행 기본계획

[그림 VI-2] 국내 청정수소 공급비중의 증가

■ 천연가스 등 탄화수소의 직접분해를 통한 수소 생산 기술(청록수소)은 블루수소 (대규모 이산화탄소 배출) 및 그린수소(재생전력 확보 어려움)의 단점 극복 가능

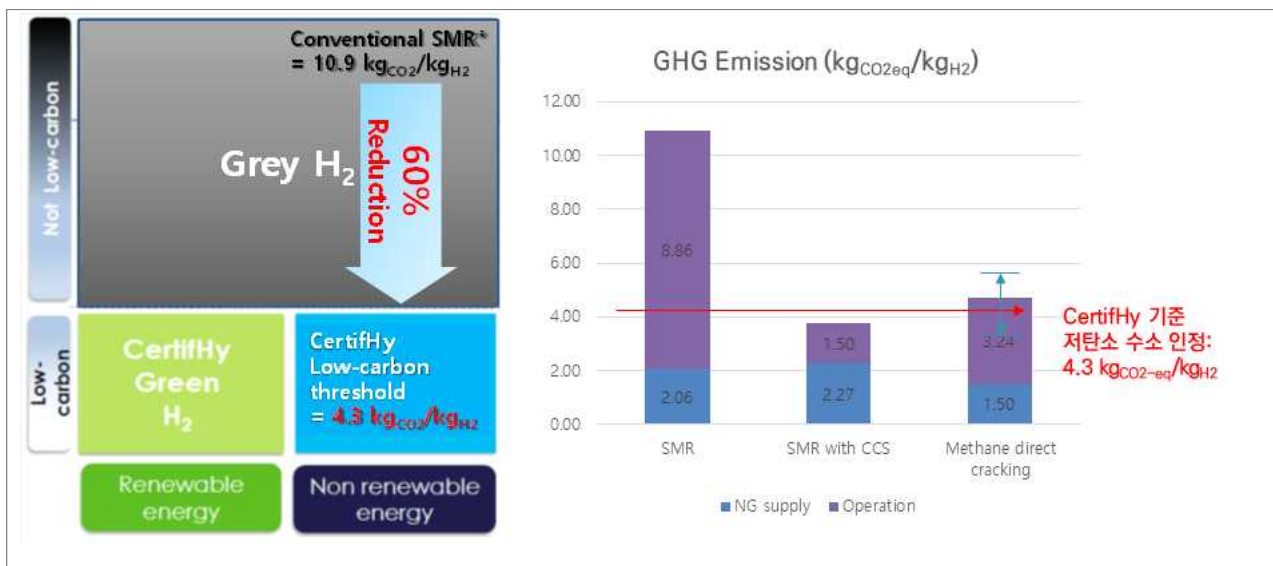
- 탄화수소(메탄 등)의 직접분해 기술은 탄화수소로부터 수소를 생산하기 위한 전통적인 개질반응 기술들과 달리 수소 및 탄소가 생성되는 주반응에서 이산화탄소의 발생이 없으므로 “저탄소 청정수소”의 생산이 가능함

※ 반응식: $\text{CH}_4 \rightarrow \text{C} + 2\text{H}_2$, $\Delta H = 74.9 \text{ kJ/mol}$

- 또한, 수소와 함께 발생하는 탄소도 고부가화가 가능하다면 수소의 생산단가를 절감할 수 있을 뿐만 아니라, 공정의 경제성을 크게 제고할 수 있음

■ 대용량 청록수소 생산기술의 실증연구 필요

- 탄소중립 도시구현을 위한 청정수소 수요 증가
- 도시 내 청정 에너지 수요 지속 증가 및 수소 에너지의 경제성·수용성 문제에 대한 해결책을 제시함
- 저탄소 청정 수소에너지 공급체계 다양화 및 분산화를 통한 수요 대응 가능
- 수소시범도시에 실증함으로서 기술개발 타당성, 경제성 및 수용성 검증 필요
- 청정수소 시장 확대를 위한 정부 정책 추진에 부응



출처 : A Study on Implementation Plan of Clean Hydrogen Certification System, Transactions of the Korean Hydrogen and New Energy Society - Vol. 33, No. 4, pp. 301-308

[그림 VI-3] 청정수소 인증기준

2. 사업정의 및 범위

■ 사업정의

- 청록수소 생산 기술 개발 및 실증설비 제작
 - (핵심기술 1-1) 대용량 플라즈마 수소생산 시스템 개발
 - (핵심기술 1-2) 청록수소 분리/정제 기술 개발
 - (핵심기술 1-3) 대용량 청록수소 공급 실증설비 설계 및 제작

■ 사업범위

- (핵심기술 1-1) 대용량 플라즈마 수소생산 시스템 개발
 - 300kW급 플라즈마 시스템의 Pilot규모 결과를 통한 고내구 MW급 대용량 플라즈마 토치 개발을 위한 설계인자 도출
 - 연속성 및 장기운전이 가능한 플라즈마 모듈 설계기술 개발
 - 플라즈마 토치 기반 Pilot규모 고효율 반응기 시스템 개발
 - 대용량 반응기 시스템 개발을 위한 설계 및 운전인자 최적화 도출
 - 전이금속 기반 저가-고효율-고내구성 촉매를 이용하여 플라즈마 유래 고온가스로부터 수소 수율 제고 및 탄소 소재 동시 생산 기술 확보
 - 플라즈마 유래가스 기반 수소 및 고체탄소 생산용 저가 고효율 촉매 설계기술 개발
 - 고효율 촉매반응 시스템을 통해 수소 및 고체탄소 연속 생산 공정 개발
- (핵심기술 1-2) 청록수소 분리/정제 기술 개발
 - 촉매반응 시스템 후단의 미회수 카본블랙 분리시스템 개발 (기/고 분리)
 - 잔여 카본블랙과 수소, 메탄, 잔류탄화수소 분리
 - 잔류탄화수소(미전환 원료) 제어기술 개발을 통한 PSA 공급가스의 고순도화
 - 분리정제 통합공정(전처리-PSA) 조건 확립 및 설계인자 도출
- (핵심기술 1-3) 대용량 청록수소 공급 실증설비 설계 및 제작
 - 단위공정 요소기술별 핵심인자 및 Scale-up 설계인자 분석

- 플라즈마-촉매반응-분리/정제 시스템 제작 국산화 기술 확보
- 실증설비 대형화 설계 및 단위공정 성능확보 제작
- 실증설비 에너지 최적화 반영 및 대형 Plant의 콤팩트화 제작



[그림 VI-4] 중점분야1 기술개발 개념도

3. 국내외 환경분석

1) 산업·시장 동향

■ 글로벌 수소시장 규모 및 전망

- 세계적 수소 생산량은 7,000만톤 수준으로 이 중 약 75%를 천연가스-수증기개질 방식으로 생산
- 세계 수소시장은 2050년까지 5억2천8백만톤 규모로 성장할 것으로 전망하며 탄소 중립사회의 실현을 위해 이중 약 98%는 생산과정에서 온실가스 배출량이 낮은 저탄소 청정수소가 되어야할 것으로 전망함

■ 국내 수소 시장규모 및 현황

- 현재 수소 공급 가능량은 연간 160~171만 톤이나, 대부분 정유 및 석유화학공단 내에서 생산되어 자체 공정에서 소비하기 때문에 시장 공급 가능 양은 22만 톤 수준
- 수소 경제 효과는 현재까지 누적 1조원 수준으로 '22년 16조원, '30년 25조원의 규모가 예상되며 '50년 한국의 수소 수요는 연간 약 1,700만 톤에 달할 전망

■ 우리나라의 저탄소 청정 수소 시장 현황

- 국내 수소 생산규모는 '30년 194만톤으로 약 15배 성장할 것으로 전망되며 온실가스를 많이 배출하는 추출수소 생산 비중은 감소하고 청정수소 생산 비중은 확대될 전망
- 재생에너지와 연계한 그린수소 생산을 가속화하고 이산화탄소가 없는 블루수소 생산 확대할 계획
 - 그러나 국내에서 저렴한 재생전력을 대규모로 확보하기 어렵고 대규모 이산화탄소 저장 시설의 구축에도 상당한 시간과 투자가 필요하므로 가까운 미래에 그린/블루수소의 생산단가 절감은 어려움
- 한편, 청록수소 기술은 온실가스의 배출이 거의 없으므로 탄소중립을 위한 청정수소 생산기술들 중 유력한 기술로 판단됨
 - 청록수소 기술은 우리나라의 도시가스 연결망과 플라즈마 기술 등을 이용하면 도시 내의 수소에너지 수요에 대응하여 수소를 공급할 수 있음

2) 기술개발 동향

(1) 해외

■ 플라즈마 기반 청록수소 생산 기술 동향

- 플라즈마(Plasma)기반 CO₂-free 탄화수소 직접분해 기술
 - 플라즈마를 이용한 메탄 분해 수소 및 탄소 생산 기술은 Kvaerner사가 상용 메탄 직접분해 반응공정을 최초로 개발하고 이를 Monolith사가 구입함
 - 노르웨이 회사인 Kvaerner사에 의해 제안된 Kvaerner process는 메탄, 천연가스, 바이오가스 등의 feed로부터 플라즈마 토치를 활용하여 수소와 carbon black을 생산하는 공정임
 - Kvaerner와 공동으로 플라즈마 반응기를 개발한 SINTEF사는 2000년대 중반 이후 CNT 생산을 위한 2MW 규모의 반응기를 개발하고 이 때 카본 생산 공정 비용은 20kWh/kg_C 수준
 - Monolith사는 Kvaerner사의 기술을 기반으로 독자 개발한 반응기에 천연가스를 주입한 뒤 플라즈마 시스템을 통해 열분해하는 방식으로 고순도의 수소를 생산하는 기술을 보유함

- 2021년에는 SK 이노베이션, Mitsubishi사의 투자를 받아 Goodyear와 타이어 생산 위한 협약 체결

○ 플라즈마 반응기

- 메탄의 분해를 위해서는 고온 조건의 생성이 필요. 온도 조건에 따라 생성되는 carbon black의 품질(quality)이 달라지므로 가능한 제한된 공간 내에서 반응조건을 제어하기 위한 연구가 진행
- 토치의 경우 초기 co-annular 형태의 graphite 전극을 사용하는 형태에서 환형의 anode를 봉 형태의 cathode 후단에 배치하는 형태로 변경하여 고온 공간을 확보하고자 함
- 전원장치의 경우 주로 DC 형태이며 magnet coil을 이용한 아크 안정화가 용이하고, 3상 전원을 활용하는 경우 환형의 3전극 배치를 통해 반응기 내 고온 열분해 공간을 확보하는 형태로 개발이 진행됨

■ 촉매 등 화학반응 기반 청록수소 생산 기술 동향

○ 천연가스(또는 메탄)의 화학적 직접분해를 통한 수소 및 고부가가치 탄소 생산

- 촉매 표면에서 탄화수소가 분해되어 탄소 생성물이 증착되어 탄소소재를 생산하는 방식(Catalytic Chemical Vapor Deposition; CCVD)은 카본나노튜브를 비롯한 고결정성의 고부가가치 탄소소재를 생산하기 위한 방법으로 1960년대부터 연구가 되어옴
- 전통적인 전기방전, 레이저, 플라즈마 기상증착 방식에 비해 에틸렌 등을 원료가스로 고부가가치 탄소나노튜브 소재의 대량생산을 목적으로 연구개발이 이루어짐
- 촉매를 사용할 경우 메탄의 열분해 반응(pyrolysis) 온도를 낮출 수 있고, 주로 촉매 역할을 하는 철, 니켈 등의 전이금속의 입자를 나노 사이즈 수준에서 조절하여 생성되는 탄소물질의 물성을 조절할 수 있음
- 상용화로는 진행되지는 않았으나 할로젠 화합물을 이용하여 탄화수소를 직접 분해하는 기술도 개발되었음

〈할로겐 화합물 활용 탄화수소 직접분해 기술 사례〉

- 염소와 할로겐 물질을 이용하여 University of California, Santa Babara의 Eric McFarland 교수진의 제안한 촉매 반응시스템은 용융된 니켈 등의 전이금속을 포함한 bath에 메탄을 공급하여 직접분해 반응을 유도함
- 버블컬럼 방식의 3상 유동층 반응 시스템을 사용함. 메탄의 분해에 의해 생성된 탄소 성분은 용융 금속층의 위로 떠올라 분리됨
- 촉매로 사용되는 금속의 용점 이상에서 사용하므로 1000℃ 이상의 반응온도가 요구되며 생성된 탄소에 포함된 금속 성분에 대한 제거가 필요할 것으로 생각됨
- 현재 일일 약 8kg의 수소를 생산하기 위한 반응시스템 개발. C-Zero라는 회사를 설립하여 2022년까지 일일 수소생산량 6톤급의 반응시스템 설계를 목표로 하고 있음
- 단, 용융금속에서 촉매 화학적 반응도 기대되지만 1000℃ 이상의 고온에서 열에너지에 의한 분해반응이 상당히 일어나는 것으로 판단함

- 상기 연구 그룹에서 제안하는 다른 기술 중 염소, 브롬 등의 할로겐 분자를 탄화수소와 반응시켜 할로겐화수소와 탄소를 만든 뒤, 할로겐화 수소를 다시 수소와 할로겐 분자로 전환하는 기술을 이용한 청록수소 기술도 제안함. 촉매의 사용 없이 가능한 기술임
- 독일의 BASF는 카본 입자를 촉매로 사용하여 moving-bed 형태의 반응시스템을 구현함. 2025년까지 pilot-scale 반응시스템 구축을 위한 연구 진행 중
- 호주 Hazer Group은 2018년, 수소 8kg/day 및 탄소 29kg/day 생산 파일럿 스케일 반응시스템 개발함*
 - 저가 천연 철광석을 촉매로 활용, 촉매 비용은 매우 낮지만 (\$0.1/kg) 반응활성과 생성탄소 품질에 한계(탄소 수율 500% 이하, 탄소 가격 \$0.5/kg)가 있는 것으로 판단됨
 - * HAZER PILOT PLANT TESTING EXCEEDS CAPACITY TARGETS BY 300%, Hazer Group (2018)
 - 2021년부터 바이오가스를 이용한 수소 270 kg/day, 탄소 1000 kg/day 생산이 가능한 demonstration 플랜트 개발 중*
 - * AGM CHAIRMAN'S ADDRESS & CEO PRESENTATION, Hazer Group (2021)

■ 수소 분리/정제 기술 동향

- 수소PSA 공정은 수소가 포함된 혼합가스로부터 수소를 고순도로 정제하기 위해 압력이 높은 상태에서 불순물을 흡착시켜 제거하는 공정 기술
- 첨단 산업분야에서 활용되는 수소는 99.999% 이상의 높은 순도를 유지해야 하는데 미량의 일산화탄소가 남아 있을 경우 반도체공정 원료의 품질 저하 초래 우려

- 1970년대 제올라이트 흡착제가 개발된 이후 수소PSA는 미국, 독일, 일본 등에서 상용화해 생산하고 있으며 그동안 우리나라는 외국기술에 의존
- 현재 일부 국내 업체는 1차로 정제된 99.999% 정도의 수소를 공급받은 후, 외국에서 수입한 수소PSA로 다시 정제한 고순도 수소를 사용하고 있는 상황

(2) 국내

■ 플라스마 기반 기술 동향

○ 탄화수소 직접분해 기술

- 2000년대 후반 (주)에트플라텍에서는 플라스마를 이용한 폐기물의 가스화를 통해 수소 또는 합성가스를 얻기 위한 공정을 개발하고 파일럿 설비를 운전한 바 있음
- 시험 가동을 하였으나 설비의 짧은 수명으로 인한 잦은 유지보수 등의 문제로 기술적 한계를 극복하지 못하고 현재는 운영이 중단된 상황
- 메탄 개질 반응의 경우 플라스마와 촉매를 결합한 하이브리드 방식을 이용한 연구가 진행 중임

■ 촉매 등 화학반응 기반 청록수소 생산 기술 동향

- (주)제이오 등 : 산업부 연구개발 사업(천연가스로부터 고결정성 전도성 흑연구조를 갖는 탄소소재 개발, 2020 - 2024)을 통해, 메탄 분해를 통한 탄소소재 및 수소 생산 기술을 개발 중

■ 수소 분리/정제 기술 동향

○ 수소산업 발전 및 수소자동차 등에 대한 수요 증가로 고순도 수소 요구 확대

- 국내 퓨리텍 사는 가스의 용량에 따라 흡착 베드와 컬럼, 흡착탑의 크기가 달라야 하는 문제점 극복을 위하여 일정한 용량의 제품을 하나의 모듈로 확정하고, 수요처가 필요로 하는 가스 용량에 따라 여러 개의 모듈을 연결하는 시스템 개발을 통해 기존 제품 대비 부피와 무게를 80%까지 감소시켜 공간의 효율성을 극대화함

3) 기술수준

(1) 해외

■ 플라스마 기술 수준

○ 수소 및 카본블랙 생산

- 미국 모노리스사는 2014년 수소 20kg/hr 및 700ton/yr의 카본 생산급 Pilot 설비를 시작으로 2020년 600kg/hr 수소생산 및 연간 14,000톤의 카본블랙을 생산함

○ 플라스마 반응기

- 대용량 DC 전원장치의 경우 Huels 공정에서 18MW 용량의 반응기를 운전한 사례가 있음

■ 촉매 등 화학반응 기반 청록수소 생산 기술 수준

- 호주의 Hazer Group의 경우 수소 생산량 기준 일일 270kg 수준의 플랜트 기술 개발 중
- 미국 C-Zero는 용융금속반응시스템을 이용하여 2022년까지 일일 수소생산량 6톤급의 반응시스템 설계를 목표로 하고 있음

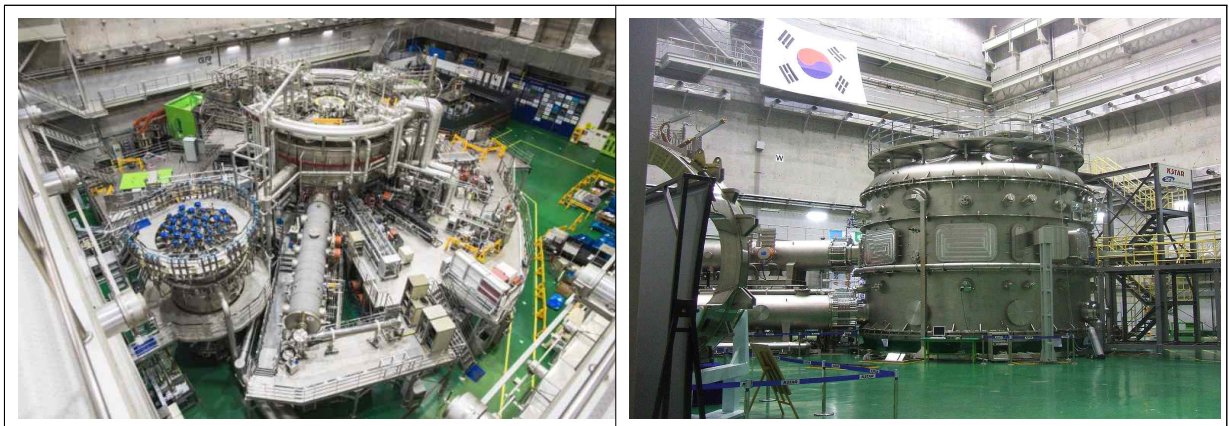
■ 수소 분리/정제 기술 수준

- 미국의 UOP사는 병렬흡착탑 방식의 Polybed PSA공정을 이용하여 고순도의 수소를 생산하고 있으며, 제올라이트를 이용한 Lindox공정에서 산소를 분리하고 있음
- 일본의 Showa Denko사는 3탑식 상압흡착-진공재생법을 이용하여 산소를 생산하고 있으며, Misubishi 중공업은 기존의 흡착탑 크기의 40%를 감소시킨 흡착장치를 운전중에 있음
- 이 외에도 미국과 유럽의 다국적 기업인 Air Products and Chemical, Air Liquide, BOC group, Messer Griesheim, Praxair, Aga, Linde 등은 세계 가스 시장의 70% 이상을 점유하고 있으며, 순도에 따른 다양한 공정을 개발하고, 에너지 소모를 최소화할 수 있는 흡착분리 공정을 개발중에 있음

(2) 국내

■ 플라스마 기반 기술 수준

- 소형급 저온플라스마 기반의 반도체 제조 공정
 - 플라스마를 이용한 식각 및 증착, 금속이나 고분자의 표면처리 등 소용량의 저온 플라스마 적용기술
- 고온플라스마를 응용한 방사성폐기물 감용 처리
 - 수명이 종료한 원자력발전소를 해체 시 과량의 방사성폐기물 발생
 - 플라스마 고온 용융을 통한 방사성폐기물의 부피감용 효과가 우수
 - (주)비츠로넥스텍은 한국수력원자력 중앙연구원에 모의방사성폐기물 감용처리를 위한 100kW급 플라스마 용융시스템과 1MW급 플라스마 용융시스템을 납품/운영 함
- 플라스마 응용기술을 통한 지속적 연구활동 추진 중
 - 생활 및 산업계 폐기물 처리를 위한 플라스마 가스화 기술 개발
 - 폐 배터리 등의 도시광산 자원순환을 위한 건식 플라스마 용융기술 개발 등
- 인공태양 ‘KSTAR’ 핵융합 연구
 - 핵융합 에너지를 내는 데 핵심 조건인 이온 온도 1억도의 초고온 플라스마를 30초간 유지하며 초고온 플라스마 장시간 운전 세계 기록



[그림 VI-5] 한국핵융합에너지연구원 KSTAR 설비 전경

■ 촉매 등 화학반응 기반 청록수소 생산 기술 수준

- 일일 수소생산량 약 1kg 수준의 반응시스템 개발 중
- 대용량 청록수소 생산을 위한 촉매 화학반응 기반 기술은 아직 개발 전

■ 수소 분리/정제 기술 수준

- 국내에서는 UOP와 Sumitomo 등의 PSA 공정을 도입하여 고순도 질소와 산소를 분리정제하고, COG(coke oven gas) 및 석유화학공정 중의 고순도 수소를 분리정제하는 공정에 사용 중
- 수소 스테이션에 적용하기 위한 PSA 공정은 한국과학기술연구원, 한국에너지기술연구원 및 한국가스공사에서 LNG의 스팀개질기로부터 수소를 회수하는 PSA 공정을 개발함
- 한국과학기술연구원과 연세대학교는 LPG의 스팀개질반응과 WGS 반응기를 거친 수소 풍부가스로부터 고순도 수소를 분리정제하기 위한 소형 PSA 공정과 고성능 흡착제를 개발하는 연구를 통해 실적을 확보 중에 있음

4. 현안문제 및 이슈

■ 대용량 고출력 플라즈마 반응기의 장기 운전성

- 대용량 플라즈마 운전 시 전극에서는 10,000K 이상의 고온조건 발생과 함께 전극의 erosion(부식)에 의한 전극 손실이 발생. 이러한 erosion은 플라즈마의 출력이 높아질수록 큰 값을 가지게 됨
- erosion 된 전극 물질은 반응기 생성물과 함께 배출되며, 금속성 전극의 경우 탄소와 함께 배출되어 생산되는 탄소의 순도 문제로 인한 품질저하가 발생
 - 이로 인해 graphite 전극을 사용하게 됨. 모노리스사의 경우 8MW 급의 플라즈마 반응기 운전 과정에서 graphite 전극의 마모에 따른 전극교체와 이로 인한 불연속 운전이 기술적 이슈가 됨

■ 촉매 반응공정 설계 및 핵심촉매 개발

- 기체 상의 물질이 투입되어 기체와 고체가 동시에 생성되는 반응시스템이므로 촉매화학반응공정을 설계할 경우, 원활한 기체/고체의 분리, 반응열의 공급, 촉매의 지속적인 투입방법, 반응기의 스케일업 설계 등에 대한 문제가 발생함
- 유력한 촉매 반응공정기술 중의 하나인 유동층 반응 공정을 채택할 경우, 에틸렌을 이용한 카본나노튜브 생산기술 등의 기존 기술들을 일부 활용할 수 있음
 - 그러나 반응열의 공급과 시스템 스케일업 설계 문제에 대한 해결방법이 필요함

- 플라즈마 반응기와 촉매반응 시스템을 연계할 경우, 플라즈마 반응기로부터 배출된 고온의 수소 함유 탄화수소 가스를 처리하게 되므로 반응물의 예열 및 반응열 공급에 대한 어려움을 상당히 해소할 수 있음
- 저가, 고효율, 장수명의 촉매를 이용해야 반응시스템의 고효율화와 경제성이 확보됨
- 촉매의 특성에 따라 표면에 성장하는 탄소소재의 물성이 달라지므로 이를 제어할 수 있는 촉매의 개발이 필요

■ 청록수소와 혼합 잔류하는 미반응 탄화수소류의 제어기술 개발

- 플라즈마 고온 열분해는 특성상 다양한 라디칼을 생성하고 고온 영역에서 저온 영역으로 전이시 생성물의 재결합 현상 발생
- 특히 이중결합을 갖는 Alkene류의 탄화수소는 PSA 흡착제에 흡착후 탈착이 용이하지 않고, Alkane/Alkene의 분리를 위한 기술은 개발단계 수준이라 제어 기술이 필요

〈표 VI-1〉 중점분야1 핵심이슈와 해결방안 모색

핵심이슈	해결방안
○ Graphite 전극 마모에 따른 연속운전 불가	○ 고전압/저전류 플라즈마 토치기술 적용 ○ 촉매공정 연계로 생성 탄소의 고품질화 및 장기 운전성(연속) 확보
○ 가압형 플라즈마 반응시스템 설계 필요	○ 촉매반응 및 PSA 등의 후단공정과 연계 위한 가압형의 플라즈마 토치 및 반응기 설계기술 적용, ○ 로 내 압력 제어를 위한 저장탱크 등의 기능 설정
○ 탄화수소 직접분해 반응을 위한 촉매 개발 필요	○ 저가, 고효율, 장수명 촉매 개발 ○ 촉매상에 흡착되는 탄소의 품질을 제어할 수 있는 촉매 설계 필요
○ 촉매 반응공정의 고체 생성물 연속 배출 및 촉매의 투입	○ 카본 함유 생성 가스 적용을 위한 유동층 반응시스템 설계반영
○ 촉매 등 화학반응 공정의 반응열공급 방안	○ 플라즈마 분해 열원에 의해 공급 열원 확보, 추가 열원 불필요 ○ 플라즈마+촉매 연계공정 설계로 별도의 추가 열원공급 없이 촉매반응 조건 확보를 통한 처리효율 증대
○ CH ₄ 열분해시 생성되는 탄화수소류의 영향	○ Alkane/Alkene 공존시 Alkene 선택적 산화 촉매 및 제어 기술 개발 ○ 미반응 탄화수소류의 회수 및 플라즈마 공정 재투입(Return) 공정을 통한 분해효율 극대화

■ 청록수소 생산을 위한 타 공정 기술개발 현황 및 플라즈마 기술 적용 가능성

- 메탄의 열분해를 위한 다양한 공정 개발이 진행 중으로, 효율적인 열에너지 공급과 반응기의 구조 다변화를 통하여 CO₂-free 청록수소 생산 공정 도출을 모색

- (공정개발 사례 #1) 메탄의 열분해 공정을 기반으로 미반응 메탄과 불순물을 분리정제하기 위하여 pressure swing adsorption (PSA) 장치를 선정, 별도의 촉매반응 없이 전기에너지를 공급하여(간접가열 전기로 타입) 1,350℃의 반응기 온도로 설계한 공정

※ T. Keipi, V. Hankalin, J. Nummelin, and R. Raiko, “Technoeconomic analysis of four concepts for thermal decomposition of methane: reduction of CO₂ emissions in natural gas combustion”, Energy Conversion and Management, Vol.110, 2016

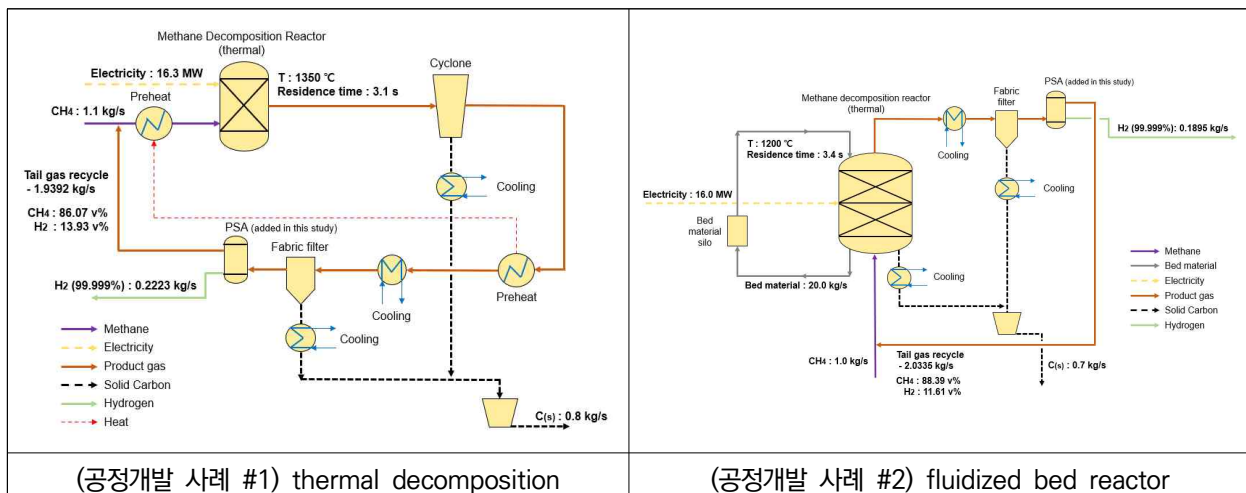
- (공정개발 사례 #2) fluidized bed reactor를 적용한 공정으로 열을 공급하며 메탄(하부에서 상부)과 bed material(상부에서 하부)이 서로 반대 방향으로 흐르면서 열이 전달됨.

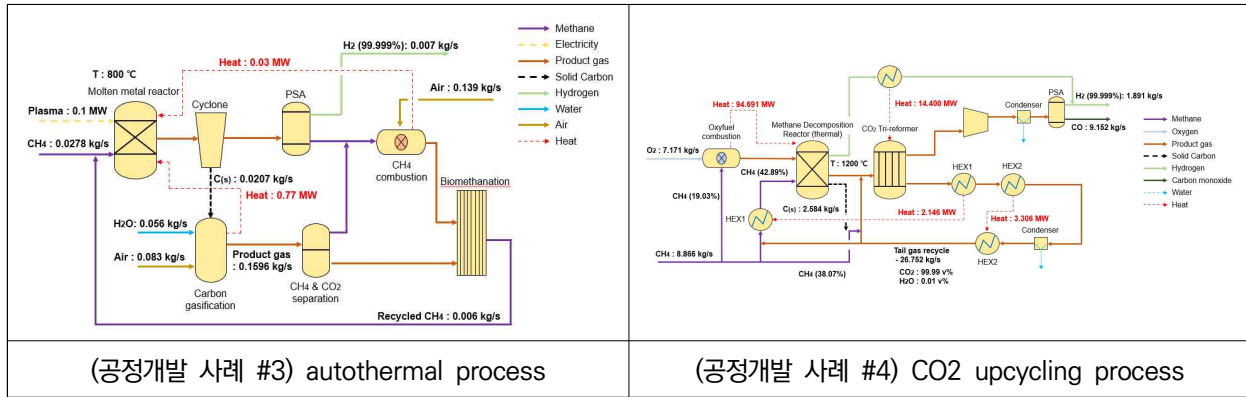
※ T. Keipi, V. Hankalin, J. Nummelin, and R. Raiko, “Technoeconomic analysis of four concepts for thermal decomposition of methane: reduction of CO₂ emissions in natural gas combustion”, Energy Conversion and Management, Vol.110, 2016

- (공정개발 사례 #3) 마이크로웨이브 플라즈마 공정을 적용한 생물학적 메탄화(bio-methanation)공정으로 타 청록수소 공정과는 다르게 고체탄소를 부산물로 배출하지 않지만 가스화 공정을 통하여 생성되는 CO₂를 bio-methanation 과정에 소비하여 전체적으로는 CO₂-free 공정이 구성

※ M. E. Tabat, “Process design, exergy, and economic assessment of a conceptual mobile autothermal methane pyrolysis unit for onsite hydrogen production”, Energy Conversion and Management, Vol. 278, 2023

- (공정개발 사례 #4) CO₂ upcycling 공정은 공기 중의 순산소를 이용하여 메탄을 연소시키고 연소 배가스에서 물을 응축하여 고순도 이산화탄소를 포집, 이때 포집된 CO₂는 CO 전환 반응기를 통하여 산업용 합성가스로 판매하여 수소 생산단가 저감에 일부 기여가 가능





[그림 VI-6] 다양한 청록수소 생산공정

○ 다양한 청록수소 생산 공정 대비 플라즈마 공정의 기술 우수성 검토

- 공급되는 전기에너지(열에너지)를 동일한 조건으로 비교분석 시 간접가열 기술 대비 직접적인 열에너지를 공급하는 플라즈마 공정에서 가장 높은 수소와 고체탄소의 생산효율을 보여 경제성 확보 가능
- 플라즈마 공정은 상대적으로 적은 메탄 공급으로도 과량의 수소와 고체탄소 생산이 가능하며, 약 3%의 재순환 공정 필요에 따라 후처리가 비교적 간단하여 Scale-up의 용이성 보유
- 또한, 플라즈마 열분해 공정에서 발생하는 고온의 미반응 메탄을 대상으로 800°C의 2차 촉매개질 분해 공정을 통하여 메탄 전환율 극대화 가능
- 일정규모 이상의 플라즈마 공정을 통하여 과량의 수소와 고체탄소 생산으로 전력 소모가 큰 플라즈마 공정 이슈 해결

〈표 VI-2〉 청록수소 생산 방식 중 플라즈마 방식의 우수성

구분		thermal decomposition	fluidized bed reactor	autothermal process	CO2 upcycling process	Plasma Process
Electricity		1MW	1MW	1MW	1MW	1MW
input	CH4	0.18 kg/s (66% recycled)	0.19 kg/s (63% recycled)	0.20 kg/s (17% recycled)	0.53 kg/s	0.03 kg/s (3% recycled)
product	H2	0.014 kg/s	0.012 kg/s	0.070 kg/s	0.114 kg/s	0.005 kg/s
	C(s)	0.049 kg/s	0.044 kg/s	None	0.155 kg/s	0.018 kg/s
efficiency		34%	30%	35%	50%	88%

자료 : SOOYONG LEE, "Economic comparison of various turquoise hydrogen production processes" Journal of Hydrogen and New Energy, Vol. 34, No. 3, 2023

■ 청록수소 실증플랜트 적용을 위한 다양한 원료 검토

- CO₂ 배출이 없는 청록수소 생산 공정에 적용 가능한 대상물질(원료)은 탄소(C)와 수소(H)만으로 구성된 탄화수소(C_nH_n)류 검토
- 도심지 내 실증을 위하여 원료 공급이 용이하며, 별도의 전처리 공정 없이 저렴한 비용으로 안정적 공급이 가능한 천연가스 선정
- 수소 생산단가의 최소화를 위하여 다양한 폐기물 처리 시 발생하는 탄화수소 검토
 - 다양한 폐기물(음식물폐기물, 가축분뇨, 하수슬러지 등)의 혐기성 소화 공정에 발행하는 바이오가스는 약 60%의 메탄가스를 함유하며 대부분의 바이오가스는 슬러지 건조 공정 또는 발전소 공급 운영
 - 폐플라스틱의 자원순환을 위한 유화유 생산 공정 시 약 40%의 미응축 탄화수소 가스 발생

〈표 VI-3〉 청록수소 생산 원료별 적용성 검토

종류	주요특징	비고 (적용성)
천연가스	- 공급 위치 : 도심지 외 전국 - 도심지 내 원료공급이 가능하며, 공급용량에 대한 범위가 다양함 - 대부분이 수입에 의존, 경제이슈에 따른 가격 변동 발생 - 실증사업 근거리 내 공급이 가능하며, 기술적 난이도가 매우 낮음	大
바이오가스	- 공급 위치 : 축산도시 (가축, 농업 지역) - 총 바이오가스 생산량 중 약 20%의 미활용 가스 발생 (연소처리) - 국내 6,300만톤/년 발생, 원료 공급단가가 매우 낮음 - 바이오가스 내 포함 된 40%의 이산화탄소 및 소량의 불순물 (황화수소 등)에 대한 추가 선별 공정 필요	中
탄화수소계 미응축 가스	- 공급 위치 : 일부 지방도시 (폐플라스틱 선별공장 근거리) - 회수되는 미응축 가스는 폐플라스틱 열분해 열원으로 일부 재사용 - 국내 폐플라스틱 연간 450만톤 발생, 대형건설사 등의 유화사업 추진 - 미응축 가스 내 다양한 사슬구조의 탄화수소로 존재하기 때문에 혼합원료에 대한 추가적인 운영 노하우 필요	小

5. 사업목적 및 목표

■ 중점분야 목표

〈표 VI-4〉 중점분야1 성과목표 및 지표

전략목표	탄화수소 직접분해 기술 기반 청록수소 생산 기술 개발 및 실증설비 제작	
성과목표	성과지표	목표
① 대용량 플라즈마 수소생산 시스템 개발	①-1 플라즈마 토치시스템	300kW
	①-2 고효율 반응기	천연가스 전환율 60% 이상
	①-3 플라즈마-반응기 연속운전	72hr (300kW 플라즈마 단독공정, 촉매공정 미적용 시)
	①-4 촉매 반응속도	1시간 평균 탄화수소 분해속도 8 mmol/min·g _{cat}
	①-5 촉매 소모량 대비 탄소 생산량	800 % 이상
	①-6 촉매공정 출구 수소생산량	0.06톤/일 이상 (30kW 플라즈마-촉매공정 적용 시)
② 청록수소 분리/정제 기술 개발	②-1 잔류 카본블랙 회수	15mg/Nm ³ 이하
	②-2 미반응 탄화수소(THC) 농도	80ppm 미만
③ 대용량 청록수소 공급 실증설비 설계 및 제작	③-1 실증급 플라즈마 토치 시스템	1,000kW
	③-2 실증급 플라즈마-촉매 시스템	천연가스 전환율 80% 이상
	③-3 잔류 카본블랙 회수	10mg/Nm ³ 이하
	③-4 미반응 탄화수소(THC) 농도	50ppm 미만
	③-5 청록수소 생산시스템 수소 생산량	3.0톤/일 이상
	③-6 청록수소 순도	99.97% 이상
	③-7 청록수소 회수율	85.0% 이상
	③-8 실증설비 연속운전	168hr [중점1 Plant와 연계목표]

6. 기술구성 및 연계성

■ 기술구성

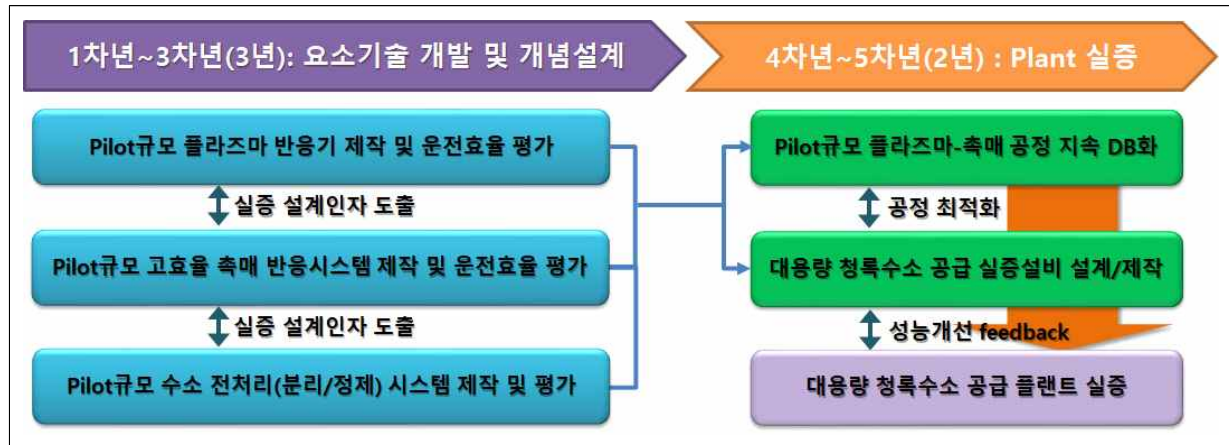
- 3개 핵심기술, 8개 구성기술로 구성
- 기간/예산 : 총 5년, 188억원

〈표 VI-5〉 중점분야1 기술구성

구 분		기술개발활동	주요 산출물	기간 (총 년)	예산 (억 원)
핵심기술명		대용량 플라즈마 수소생산 시스템 개발			45
연구 개발 내용	구성기술 1	○ 플라즈마 토치 시스템 개발	플라즈마 토치	5	10
	구성기술 2	○ 플라즈마 기반 반응기 시스템 개발	플라즈마 반응기	5	15
	구성기술 3	○ 플라즈마 시스템 연계 수소 및 탄소 동시 생산 고효율 촉매 반응시스템 개발	촉매반응 시스템	5	20
핵심기술명		청록수소 분리/정제 기술 개발			28
연구 개발 내용	구성기술 1	○ 미회수 고체탄소의 기체/고체 분리기술 개발	기/고 분리 시스템	5	10
	구성기술 2	○ 잔류 탄화수소 제거기술 개발	탄화수소 제어시스템	5	18
핵심기술명		대용량 청록수소 공급 실증설비 설계 및 제작			115
연구 개발 내용	구성기술 1	○ 요소기술별 핵심인자 및 Scale-up 설계인자 분석	Pilot 운전 결과보고서	3	5
	구성기술 2	○ 대용량 청록수소 생산 핵심기술의 최적모델 설계	실증설비 표준모델 도면화	3	10
	구성기술 3	○ 실증설비 제작 및 연계공정 시운전 평가	실증설비 플라즈마-촉매-정제	3	100

■ 핵심기술 간 연계성

- (핵심기술 1-1) 대용량 플라즈마 수소생산 시스템 개발
 - (구성기술 1-1-1) 플라즈마 토치 시스템 개발 : 탄화수소계 고효율 분해용 플라즈마 토치 설계/제작 및 핵심 운영기술 확보를 통한 적용성 및 효율성 확보
 - (구성기술 1-1-2) 플라즈마 기반 반응기 시스템 개발 : 플라즈마 토치 기술이 적용된 천연가스의 분해효율 극대화를 위한 가압형 플라즈마 반응기 설계 적용으로 안전성 확보, 후단 촉매공정 최적 적용조건 확보
 - (구성기술 1-1-3) 플라즈마 반응기 연계 청록수소 및 탄소 동시 생산 고효율 촉매 반응시스템 개발 : 플라즈마 유래 혼합가스로부터 수소 생산량을 증폭하고 탄소를 동시에 배출할 수 있는 고효율 촉매 양산 기술 확보 및 Pilot 규모 플라즈마 반응기 (핵심기술 2-1-2의 결과) 연계 촉매 반응시스템 설계기술 개발
- (핵심기술 1-2) 청록수소 분리/정제 기술개발
 - (구성기술 1-2-1) 미회수 탄화수소의 기체/고체 분리기술 개발 : 촉매 반응 후단 잔류 고체탄소의 회수를 위한 고효율 기/고 분리 시스템 개발 및 Pilot규모 성능평가
 - (구성기술 1-2-2) 잔류 탄화수소 제어기술 개발 : 촉매 반응 후 미반응 천연가스 및 잔류 탄화수소(THC) 회수 기술 개발 및 플라즈마 반응기 재공급 공정기술 확보
- (핵심기술 1-3) 대용량 청록수소 공급 실증설비 설계 및 제작
 - (구성기술 1-3-1) 단위공정 요소기술별 핵심인자 및 Scale-up 설계인자 분석 : Pilot 시스템의 설계 및 운전결과 DATA를 기반(핵심기술 2-1 및 2-2 결과)으로 실증급 플라즈마 토치 및 고효율 반응기 설계/제작
 - (구성기술 1-3-2) 대용량 청록수소 생산 핵심기술의 최적모델 설계 : 대형급 플라즈마 토치 및 반응기 시스템의 표준모델 도면화 및 운영 핵심기술 확보를 통한 국산화 기술 확보
 - (구성기술 1-3-3) 실증설비 제작 및 연계공정 시운전 평가 : 단위공정별 성능 검증 및 DATA 확보를 통한 통합 실증설비 제작 및 시운전 성능평가



[그림 VI-7] 중점분야1 핵심기술 간 연계도

7. 기술개발 계획

1) 기술개발 연차별 추진계획

〈표 VI-6〉 청록수소 생산 기술 개발 및 실증설비 제작 연차별 추진계획

연차	기술개발 주요내용 및 추진계획
1차년	• (핵심기술 1-1) 천연가스 분해용 소형 플라즈마 분해시스템 설계/제작 • (핵심기술 1-1) 300kW급 플라즈마 토치 및 고효율 반응기 설계인자 도출 • (핵심기술 1-1) 전이금속 기반 저가-고효율-고내구성 촉매 후보군 도출 • (핵심기술 1-1) 플라즈마 반응기 유래 가스 조성에 따른 고효율 촉매 반응시스템 설계 • (핵심기술 1-2) 카본블랙 및 잔류 탄화수소 회수 관련 프로그램 해석 및 설계인자 도출
2차년	• (핵심기술 1-1) 100kW급 플라즈마 토치 및 고효율 반응기 설계/제작 • (핵심기술 1-1) 전이금속 기반 저가-고효율-고내구성 촉매 recipe 도출 • (핵심기술 1-1) 플라즈마-촉매 연계 Pilot 반응시스템 개발 • (핵심기술 1-2) 카본블랙 및 잔류 탄화수소 회수 공정 Pilot 제작 및 성능평가
3차년	• (핵심기술 1-1) 300kW급 플라즈마 토치 및 고효율 반응기 시운전 및 DATA 평가 • (핵심기술 1-1) 플라즈마-촉매 화학반응 연계 청록수소 생산 Pilot 반응시스템 개발 및 최적화 • (핵심기술 1-1) 전이금속 기반 저가-고효율-고내구성 촉매 recipe 최적화 • (핵심기술 1-1) 실증급 반응시스템 개발을 위한 스케일업 설계인자 확보 • (핵심기술 1-2) 카본블랙 및 잔류 탄화수소 회수 공정 개선 및 스케일업 설계인자 확보
4차년	• (핵심기술 1-1 & 3) 1 MW급 대용량 플라즈마 시스템 모듈화 기술 개발 • (핵심기술 1-1 & 3) 청록수소 생산용 플라즈마 공정 핵심 운영기술 확보 • (핵심기술 1-1 & 3) 실증급 규모 촉매양산기술 개발 • (핵심기술 1-1 & 2 & 3) 대용량 청록수소 생산 공정 핵심 설계기술 확보 • (핵심기술 1-3) Pilot 운영결과 기반 실증급 대용량 청록수소 생산시스템 제작 • (핵심기술 1-3) 실증 현장 Plant 구축을 위한 운영조건 및 인프라 검토 및 작업 수행

연차	기술개발 주요내용 및 추진계획
5차년	• (핵심기술 1-1 & 2) Pilot 플라스마-촉매-정제 시스템 지속 연구를 통한 운전인자 평가 및 실증설비 고도화 • (핵심기술 1-3) 실증급 플라스마-촉매-정제 연계공정 핵심 운영기술 확보 • (핵심기술 1-3) 연속운전 최적화 및 최적 운영/정비 절차 표준화

2) 기술개발 추진전략

(1) 기술 확보전략

○ 핵심기술 선행연구 분석 및 평가

- 국내 기반기술 수준 및 환경조사, 관련 정책 분석을 통해 핵심기술 현황을 분석
- 관련 문헌 분석, 주요 선진국 연구결과&특허&정책 분석, 전문가 인터뷰 조사, 관련 공무원 및 과학기술 연구&정책 전문가 등과의 세미나 추진
- 다양한 의견 수렴과정을 통한 현 기술수준 판단 및 극복 방안 도출

○ 핵심기술 선행사업 분석 및 국산화 확보

- 국외 모노리스 사 특허 및 운영정보 분석을 통한 보유 핵심 기술&실적 분석
- 국외 핵심기술 대비 부문품, 결합체 및 구성품 등의 경제성 확보를 위한 국산 제작 기술력 평가
- 플라스마 전극 및 촉매 등의 주요 유지 부품에 대한 국산제작 거래처 다변화 및 국산화 제조설비 도입
- 국산화를 통한 주요부품 원가절감 및 납품기일 단축 등 설비 오퍼레이터 공감대 형성 확대

〈표 VI-7〉 핵심기술 확보전략

핵심기술명	구성기술	성과 연계	자체 개발	기술 도입	글로벌 협력	아웃 소싱
탄화수소 직접분해 기술 기반 청록수소 생산 기술 개발 및 실증설비 제작	플라스마 토치시스템	○	●			
	고효율 플라스마 반응기	○	●			
	고효율 촉매 제조 원천기술	○	●			
	플라스마 반응기 연계 고효율 촉매 반응시스템	○	●			
	고체탄소 및 잔류 탄화수소 회수 시스템	○	●			

● : 주, ○ : 부

(2) 추진체계 및 협력방안

■ 추진 협력체계

- 산학연 구성을 통한 대용량 청록수소 공급시스템 개발 추진
- 산학연 보유 원천기술, 연구성과, 기술정보의 공유를 통한 구성체 혁신 역량 증대
- 실증설비 수요기관(지자체 및 산업체)과의 산업성장 및 정책협의(행·제정 지원)를 통한 유기적 협력관계 확보

〈표 VI-8〉 중점분야1 추진체계 및 협력방안

중점기술명	탄화수소 직접분해 기술 기반 청록수소 생산 기술 개발 및 실증설비 제작
성과물	○ 1 MW급 실증 수소 생산 시스템 - 모듈화된 플라즈마-촉매 반응기 시스템 ○ 고순도 청록수소 생산 위한 전처리(분리/정제) 시스템 ○ 직접 분해반응 시스템 최적 운전 기술
수행조직	○ 정부출연연구기관, 대학 그리고 기업 간의 협력체계를 통해 연구개발 진행 - 출연연 및 대학 : 반응기 기초/기본 설계 연구, 단위 토치 운전 기술, 핵심소재(촉매 등) 개발 등 - 기업 : 실증 수준 전환 시스템 제작 및 운영 기술 확보
수행방법	○ 출연기관에서의 기본 반응기 설계기술 개발 및 운전 수행 → 출연기관의 유사사업 연구결과 정리 및 검토 ○ LAB규모의 기초연구 수행 (촉매 기본 물성, 반응특성 등) → 학교-출연기관 간의 협력 기초연구 ○ 출연기관 Site에서의 기본 규모 플라즈마-촉매 반응 시스템 구성 및 운전 기술 개발 → 출연기관-출연기관 간 협력 연구 ○ 출연기관과 연계하여 주관 기업의 공동 연구를 통해 토치 scale up 기술 확보 → 출연기관-기업 간 협력 연구 ○ 대용량 Scale up 장비의 기업 Site 설치 및 운전을 통해 시스템화 연계 → 출연기관-기업 간 협력 연구 ○ 개발 기술을 활용하여 실증 Site 에서의 시스템 구성 및 운전 → 실증 Site 에서의 참여기관(산-학-연) 간 협력 연구

■ 추진전략 및 활용방안

- 기술개발 측면
 - 참여 기관 간 협력을 통한 scale flexibility를 가지는 설계 기술 확보
 - 30kW급에서 확보된 설계기술의 30kW → 300kW → 1,000kW 단계적 scale up 적용을 통해 scale flexibility를 가지는 design principle 도출
 - 기 보유 기술과 신규 설계기술의 병행 추진을 통한 연구개발 속도 제고

- 수백 kW급 토치 제작 경험을 토대로 30kW급 기본 토치 설계 연구와 300kW급 토치 시스템 기반 구축을 병행하여, 설계기술의 1차 scale-up이 바로 적용 평가될 수 있도록 하는 가속화된 연구 개발 방법론 적용

○ 사업화 측면

- 대용량 청록수소 공급 시스템의 도시지역 적용을 위한 안정성 및 안전성 확보 모델 개발을 통하여 수소를 주 에너지원으로 사용하는 도심지역 도입 가능
- 도시에너지 공급 인프라 측면에서 국내에 구축된 천연가스(도시가스) 공급망을 이용가능하며, 타기술 대비 별도의 이산화탄소 포집 및 저장에 대한 부담이 없음
- 또한, 수소와 함께 발생하는 고체탄소의 고부가화를 통하여 공정 경제성 및 수소생산 단가 절감 효과가 있음

(3) 성과물 활용 전략

〈표 VI-9〉 중점분야1 성과물 활용전략

중점기술	핵심기술	성과물	성과물 활용전략
탄화수소 직접분해 기술 기반 청록수소 생산 기술 개발 및 실증설비 제작	대용량 플라즈마 수소생산 시스템 개발	○ 모듈화 가능한 플라즈마 토치 ○ 탄화수소 분해 촉매 ○ 플라즈마-촉매 반응연계 시스템 ○ 고체탄소 회수 및 잔류 탄화수소 재공급 시스템 ○ 반응 시스템 스케일업 설계 및 최적 운전조건	○ 청록 수소 생산 실증을 기반으로 상용화 추진 ○ 플라즈마 토치, 촉매 기술은 spin off 형태로 다양한 열화학 공정에 적용 가능 ○ 폐플라스틱 유화유 생산 공정에서 발생하는 약40%의 탄화수소계 미응축 가스를 대상으로 성과물 적용에 따른 수소생산 및 유화설비 운영 전력 공급 가능 ○ 기 개발된 폐플라스틱 유화공정과 성과물의 패키지를 통한 친환경 이미지 제고 및 설비구매 경제성 확보 ○ 기존 하수 및 음식물 폐기물 처리 시 발생하는 바이오가스 중 약 30% 미활용 가스를 대상으로 성과물 적용 및 청록수소 생산/활용

(4) 시장진입 전략

〈표 VI-10〉 중점분야1 시장진입 전략

중점기술	핵심기술	단기 전략	중장기 전략
탄화수소 직접분해 기술 기반 청록수소 생산 기술 개발 및 실증설비 제작	대용량 플라즈마 수소생산 시스템 개발	○ 1MW 플라즈마-촉매 도심지역 적용 ○ 도심 내 구축되어있는 도시가스 연계를 통한 천연가스 확보 및 ○ 소형화를 통한 공간활용성 확보 ○ CO₂-Zero 기술의 차별성 극대화 ○ 안전성 확보를 통한 도심 진입형 판매 ○ 카본블랙 응용기술 확보를 통한 청록수소 생산단가 절감	○ 1MW 표준품 양산화 ○ 대량의 청록수소 필요 산업체 내 다수 공급 ○ 국산화 기술 확보를 통한 해외진출 및 수출 경쟁력 강화 ○ 산업체 주변 재생전력과 연계하여 탄소중립 기업 이미지 실현 ○ 고체탄소의 고부가가치화를 위한 대형 양산 설비 별도 운영 및 전담 연구소 설립

(5) 위험요인 및 대응전략

〈표 VI-11〉 중점분야1 위험요인 및 대응전략

중점기술	핵심기술	위험요인	대응전략
탄화수소 직접분해 기술 기반 청록수소 생산 기술 개발 및 실증설비 제작	대용량 플라즈마 수소생산 시스템 개발	장기운전 내구성 미확보	o 토치 모듈화 및 플라즈마-촉매 공정 연계 방식의 최적화를 통해 플라즈마 전력 사용량 절감, 이를 통해 전극 침식 완화로 장기 운전성 제고
		carbon 침적으로 인한 토치 쇼트	o 토치 설계시 carbon 회수 및 침적 방지 구조 설계 기술 개발
		플라즈마-촉매 연계공정 상의 carbon 침적	o 벽면 온도 조건 제어를 통해 벽면 침적 최소화 및 벽면 유동 생성 기술을 통해 침적 방지
		전극 과침식으로 인한 냉각수 유출	o 전극 설계 시, 침식 예측 설계를 통해 운전내구 예측 및 교체 관리. 냉각수 압력 모니터링을 통한 상태 진단 실시
		누전 및 감전	o 반응기 설계 시부터 고전압 부 외부 노출이 최소화된 절연구조 적용. 고전압 선 경로에 물리적 접촉 가능성을 막는 passivation 구조 사용

3) 소요예산 및 인력

■ 중점기술 소요예산

〈표 VI-12〉 중점분야1 연차별 소요예산

(단위: 억 원)

중점	구분	1차년	2차년	3차년	4차년	5차년	총계
(중점분야1) 탄화수소 직접분해 기술 기반 청록수소 생산 기술 개발 및 실증설비 제작	정 부	30	30	68	35	25	188
	지자체						
	민 간	10	10	23	11.5	8.5	63
	소 계	40	40	91	46.5	33.5	251

■ 중점기술 소요인력

〈표 VI-13〉 중점분야1 연차별 소요인력

(단위 : 명)

구분		1차년	2차년	3차년	4차년	5차년	계
탄화수소 직접분해 기술 기반 청록수소 생산 기술 개발 및 실증설비 제작	박사급	7	7	7	9	9	39
	석사급	10	10	10	12	16	58
	학사급	10	10	10	15	18	63
합계		27	27	27	36	43	160

4) 중점분야1 로드맵

- 1단계 (1차년~3차년) : 고효율 청록수소 생산 요소기술, 공정설계 및 Scale-up 설계인자 도출
- 2단계 (4차년~5차년) : 대용량 청록수소 생산 기술의 국산화를 위한 설계인자 확보 및 실증설비 제작

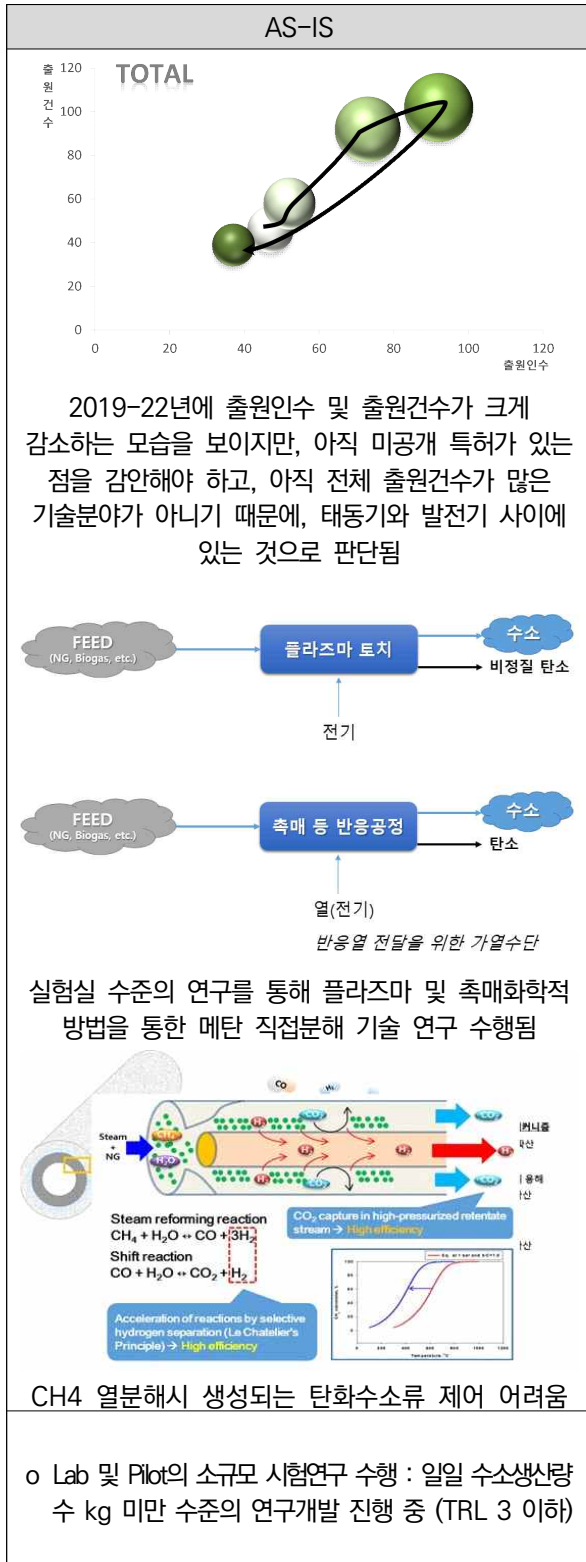
〈표 VI-14〉 중점분야1 과제로드맵

구 분	1차년도	2차년도	3차년도	4차년도	5차년도	주요 성과물
대용량 플라즈마 수소생산 시스템 개발						○ 플라즈마 토치 개발
						○ 플라즈마 반응기 개발
						○ 플라즈마-반응기 공정 기술 개발
						○ 전이금속 기반 저가 고효율 촉매 개발
						○ 고효율촉매 양산기술 개발
						○ 플라즈마 연계 고효율 촉매 반응시스템 개발
청록수소 분리/정제 시스템 개발						○ 미회수 고체탄소 분리기술 개발
						○ 잔류 탄화수소 제어기술 개발
						○ 청록수소 전처리공정 확립
대용량 청록수소 공급 실증설비 설계 및 제작						○ 핵심인자 및 Scale-up 설계인자 분석
						○ 대용량 청록수소 생산 핵심기술의 최적모델 설계
						○ 실증설비 제작 및 연계공정 시운전 평가

8. 동 사업의 기대효과(As-Is/To-Be)

■ 기대효과

〈표 VI-15〉 동 사업의 기대효과(As-Is / To-Be)



■ 사업대상 및 수혜자

○ 국내 수소 도시 추진 실증 (지자체)

- 울산, 안산, 전주 등의 수소 시범도시 선행실적 결과 분석을 통한 대용량 청록수소 시스템의 수소 도시 참여 기반 마련
- 기존 수소생산 기술 대비 청정수소 생산에 따른 친환경적 이미지 제고
- 추가 부산물인 고체탄소 활용 고도화기술 개발을 통한 청록수소 시스템의 경제성 확보 모델 제안

○ 국내 산업단지 추진 실증 (사업체)

- 석탄을 기본으로 사용하는 철강 산업의 온실가스 배출량 억제공정 개발 중
- 이산화탄소 배출을 최소화 할 수 있는 수소환원제철기술의 수요처 집중 공략
- (수소환원제철) 유럽 탄소 규제에 영향을 받는 가장 큰 산업 중 하나로 국내 포스코 및 현대제철을 포함한 철강산업계가 가장 큰 수혜자로 평가
- (친환경 자동차) 수소자동차의 핵심은 비교적 저렴한 대용량 수소의 공급이며 현재까지 추출 수소가 공급되었으나, 탄소 중립을 위한 약점 보유하였으므로 이를 대체할 대용량 수소 공급 기술로 수소 자동차 업계의 활성화 가능
- 사업체 내 대용량 청록수소 생산설비의 Site 및 운영인프라(원료, 전력 등) 제공/협조를 통한 조기 진출이 가능
- 3.0톤/일의 청록수소 생산 표준품의 양산 보급을 통한 생산능력 확대로 구매 경제성 강화 및 제조기업 매출 확보

9. 핵심기술별 추진계획

1) (핵심기술 1-1) 대용량 플라즈마 수소생산시스템 개발

(1) 배경 및 필요성

가. 추진배경

○ 청록 수소를 통한 청정 수소 생산

- 기후변화에 대응하기 위해 정부는 ‘탄소중립 2050’ 선언과 이의 실행을 통해 국제사회의 탄소저감 노력에 선도적으로 대응 추진
- 정부는 수소경제 활성화 로드맵, 수소경제이행 기본계획 등을 통해 탄소중립 도시 구현을 추진 중이며 이는 ‘탄소중립 2050’ 실현의 주요한 수단이 될 것으로 예상

※ 수소경제 활성화 로드맵 상 2040년 까지 발전용 연료전지 15GW (내수 8GW), 가정·건물용 연료전지 2.1GW(94만 가구) 목표 제시

- 수소 기술개발 로드맵의 5대 분야(생산, 저장·운송, 수송, 발전, 안전·환경·인프라) 기술 중 수소 생산 방식은 수전해와 CO₂-free 탄화수소 직접 분해 방식 등 두 가지 기술이 실현 가능한 대안

※ 제1차 수소경제이행기본계획(‘21)에서는 4대 전략으로 1) 국내외 청정수소 생산 주도, 2) 빈틈없는 인프라 구축, 3) 모든 일상에서 수소 활용, 4) 생태계기반 강화를 제시

- 청록수소는 고온 반응기에서 천연가스 등의 탄화수소 성분이 수소와 고체탄소로 직접 분해되어 생산과정에 이산화탄소가 발생하지 않아 이산화탄소 포집/저장 장치(CCS)가 필요 없고 고체탄소를 통한 부가가치 창출이 가능하여 비용적 측면에서 효율적인 청정수소 생산 기술이 될 수 있음.

○ 청록 수소를 통한 탄소중립 도시 구현

- 청록수소는 친환경성과 대용량의 수소공급이 가능해 수소도시 인프라에 효과적이고 현실적인 대안으로, 현재 핵심 단위 요소기술 개발 단계에 있으며, 상용화를 위해 시스템 엔지니어링 기술과의 접목이 필요함

- 메탄 직접분해반응을 이용한 청록수소 생산은 촉매 미사용 시 1200℃ 수준의 고온이 필요하며 니켈 철 등의 전이금속 촉매를 사용하면 700-1000℃ 범위에서 반응 가능하고 반응온도와 촉매 특성에 따라 수소와 함께 다양한 종류의 고부가가치 탄소소재 생산도 가능

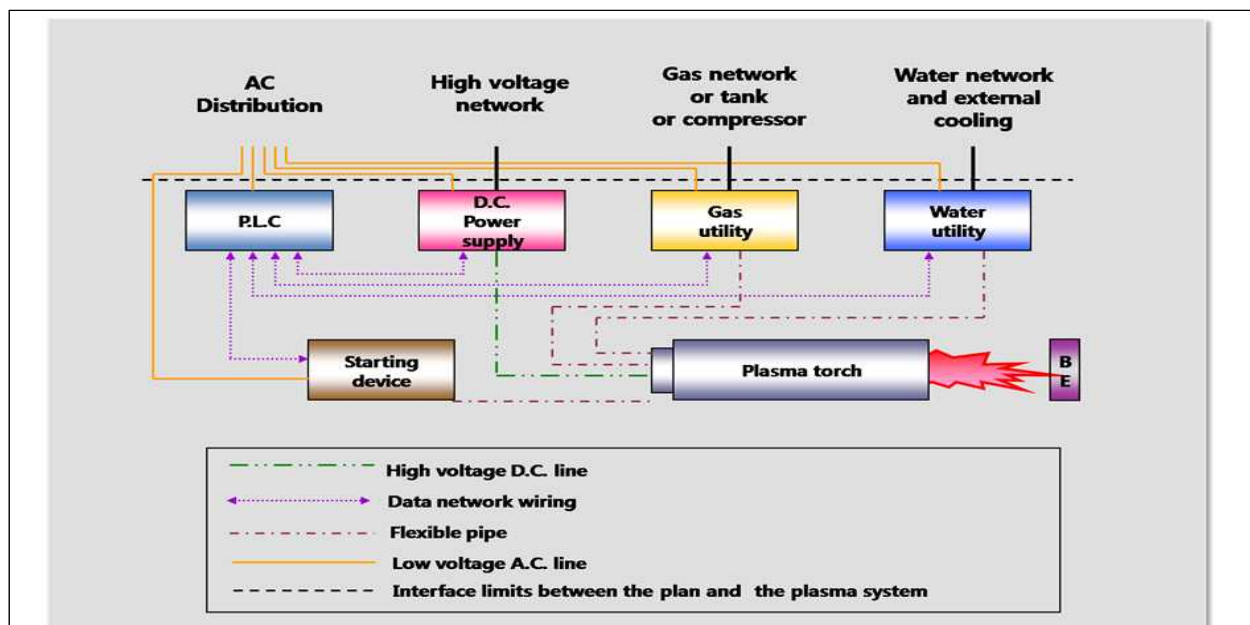
나. 필요성

- 청록수소는 천연가스를 고온반응기에 주입하여 수소와 고체탄소의 분해를 통해 생산하는 방식으로 이산화탄소가 발생하지 않아 탄소중립 실현에 기여할 수 있고 수소시범도시 취지에 부합
 - 기 청정수소 생산전략은 블루그린수소 중심이나, 블루수소는 탄소배출 제로 수준이 미흡하여 수소시범도시 추진 목적과 상충되며, 그린수소의 경우 기술상용화 시점이 불확실하다는 한계 노출
 - 더욱이 그린수소는 친환경적이거나 대용량의 수소공급이 어려워 시범도시 구성에 한계가 있고, 에너지를 수입하는 방식으로 해소하기에는 경제성 측면의 현실성이 낮음
 - 따라서, 탄소배출이 적고 국내의 도시가스 공급망을 활용할 수 있으며 수전해 기술에 비해 적은 전력 소모량으로 수소를 생산할 수 있으므로 도시의 수소에너지 수요에 필요한 ‘대용량 청정수소 공급’을 위한 청록수소 생산을 위한 핵심 기술개발 필요
- 플라즈마를 이용하여 천연가스 등의 탄화수소 직접분해 반응을 유도할 경우, 고온에 의해 반응속도는 빠르지만 미전환 탄화수소 및 부반응에 의한 탄화수소가 다량 잔류할 수 있음
 - 이러한 플라즈마 반응기의 생산 가스에서 수소를 분리 정제하는 비용이 증가함
 - 그리고 플라즈마 반응기에서 생산되는 카본은 카본블랙 이하 수준의 비정질 저가 탄소소재가 대부분임
- 그러나 플라즈마 반응기 생산가스를 전이금속계 촉매와 반응시킬 경우, ❶ 수소생산량의 증대가 가능하며, ❷ 촉매특성에 따라 결정성의 고부가가치 탄소소재를 생산할 수 있고, ❸ 수소 생산량과 최종 생산가스의 수소 농도를 제고하여 수소 분리/정제 비용을 절감할 수 있음

(2) 핵심기술 개요

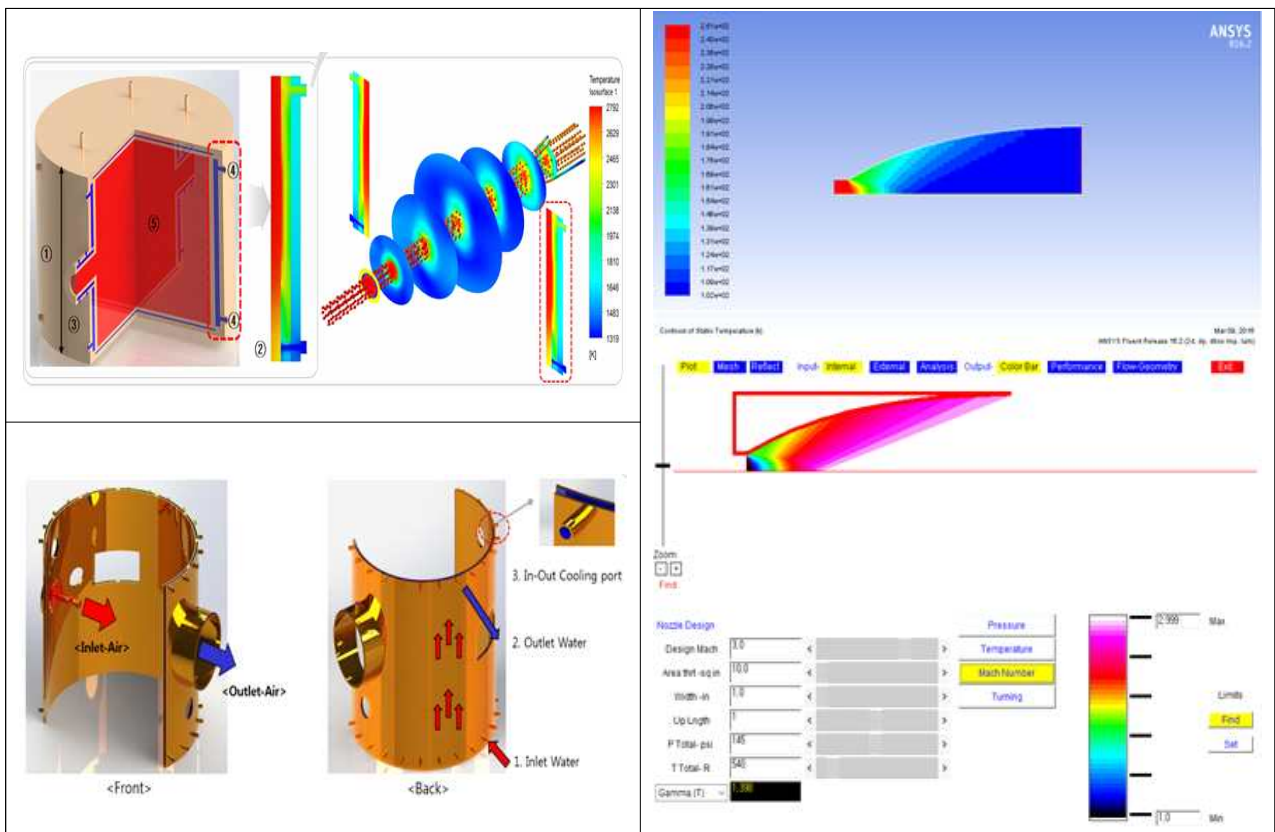
가. 개념

- 플라즈마를 이용한 고온의 열분해 조건에서 탄화수소(메탄 등)의 열분해를 유도하여 수소와 solid carbon(고체탄소)을 생산하여 이산화탄소의 배출을 원천적으로 제거하는 처리기술
- 특히, 부생산물로 얻어지는 고체탄소의 정제를 통한 고품질화 카본생산과 기존 수소제조 공정에서 발생하는 CO₂ 처리비용 없이 수소를 제조하는 본 핵심기술은 열분해에 의한 천연가스로부터 수소제조 시 피할 수 없는 에너지비용을 절감하여 기존의 수소제조 공정의 경제성과 비교하는데 필수적인 역할을 담당함
- 플라즈마는 불활성 기체로부터 전기에너지를 사용하여 만들어질수 있고, 전기에너지에 의해 형성된 Arc가 가지는 높은 엔탈피는 천연가스의 엔탈피 증가 및 변화 반응에 필요한 에너지의 공급원으로 이용
- 플라즈마 상태를 운영·유지하기 위해서는 전기에너지를 공급하는 전원설비, 불활성 기체 공급장치, 토치 전극의 열적 피해를 최소화하기 위한 냉각수 공급장치, 이를 제어하기 위한 제어시스템을 기본으로 함
- 수소 및 고부가가치 탄소 동시생산을 위한 플라즈마 분해기술을 적용, 주요 기술은 플라즈마 토치와 열분해 반응기 등의 핵심기술을 활용하여 장기적인 운영 가능한 요소기술로 구성됨



[그림 VI-8] 천연가스 분해를 위한 플라즈마 토치 시스템 구성도

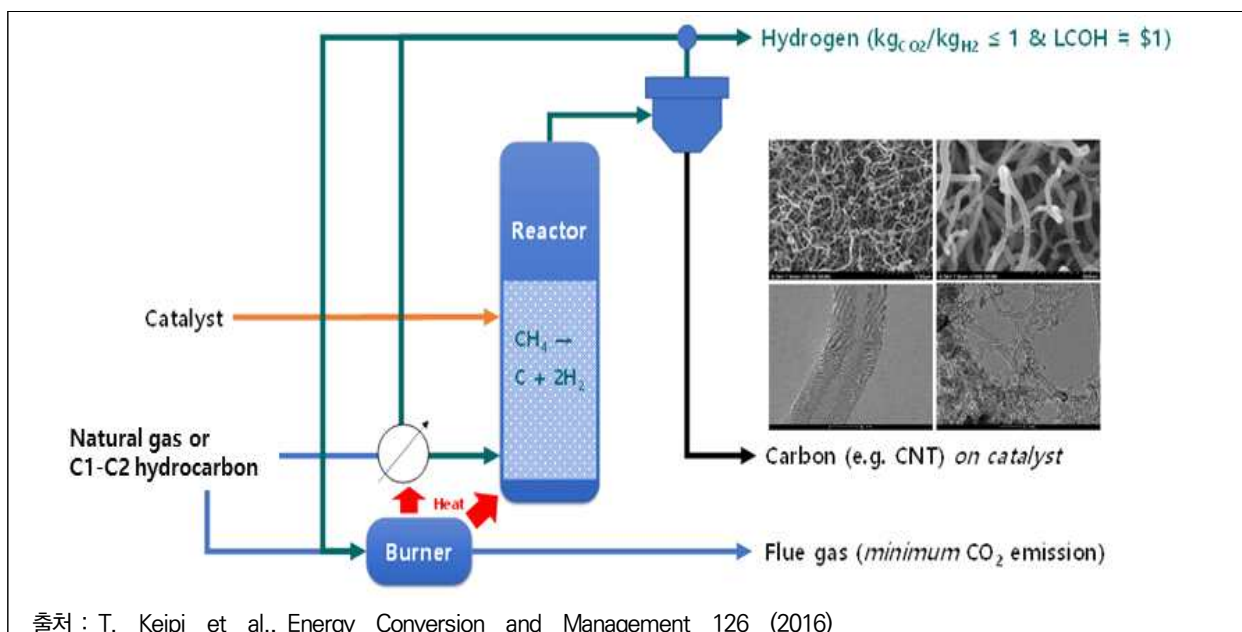
- 천연가스의 직접 열분해를 통하여 대량의 수소를 생산하고 고품질의 카본블랙을 생산하여 수소단가의 절감을 통한 경제성 확보에 목적이 있음
- 플라즈마 영역 안에서 천연가스와 수소와 카본블랙으로 분해되는 영역은 1,000~2,000℃ 온도범위로 매우 예민하게 조절되며, 이는 반응기 내부의 온도제어와 구조 선정에 중요한 설계인자로 작용됨
- 따라서, 반응기의 설계에 있어 다양한 프로그램을 통한 열/유량/구조 해석을 바탕으로 천연가스의 공급, 플라즈마 토치 위치, 카본블랙의 침적 현상을 고려 설계함



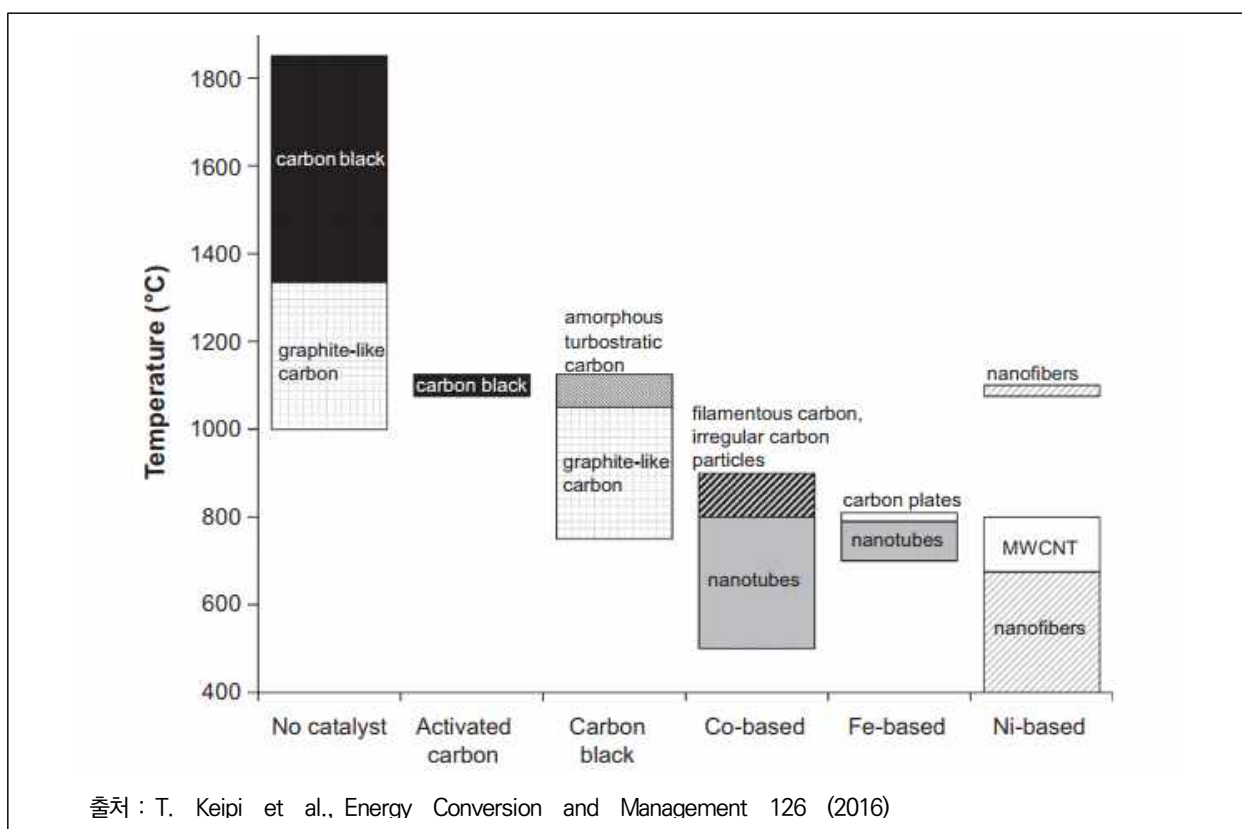
[그림 VI-9] 천연가스 분해를 위한 플라즈마 반응기 설계 (예시)

- 니켈, 철 등의 전이금속 촉매 사용 시 700 - 1000℃ 범위에서 반응 가능(촉매 미사용 시 1200℃ 수준의 고온 필요)하고 촉매특성 및 반응조건에 따라 수소와 함께 고부가가치 탄소소재 생산(탄소나노튜브 등) 생산 가능
- 플라즈마 반응기 유래가스의 온도, 압력 그리고 조성에 따라 수소 생산성과 고품질 탄소를 생산할 수 있는 저가, 고효율 촉매 원천 설계기술과 이를 양산하기 위한 대량제조 기술 개발 필요

- 플라즈마 반응기 유래가스의 온도, 압력 그리고 조성에 따라 수소 생산성을 최대화하고 고품질 탄소를 동시에 생산할 수 있는 고효율 촉매반응시스템 설계 기술 개발 필요



[그림 VI-10] 천연가스(또는 메탄) 직접분해 반응을 이용한 청정수소 및 고품질 탄소소재 동시생산 촉매공정 개념도



[그림 VI-11] 촉매의 종류에 따른 메탄 직접분해반응(pyrolysis) 온도 영역과 생성되는 탄소소재의 종류

나. 범위

■ 핵심기술 범위

- (구성기술 1) 플라즈마 토치 및 고효율 반응기 개발
 - 청정수소 생산을 위한 플라즈마 소스 개발
 - 고전압/저전류 플라즈마 토치 및 전원공급장치 개발
 - 고효율 분해용 플라즈마 반응기 개발
- (구성기술 2) 고효율 플라즈마 기반 반응기 시스템 개발
 - 최적 반응제어를 위한 반응기 설계기술 개발
 - 반응기내 온도/압력/시간 최적 제어기술 개발
 - 최적 제어를 통한 최적 분해조건 개발
 - 단위 평가를 통한 플라즈마 열분해 공정 검증
- (구성기술 3) 플라즈마 시스템 연계 청록수소 및 탄소 동시 생산 고효율 촉매 반응시스템 개발
 - 전이금속기반 저가 고효율 촉매 recipe 도출
 - 실증설비 적용 대비 촉매 양산기술

〈표 VI-16〉 핵심기술 1-1의 구성기술 범위

구성기술명	기술개발 정의 및 범위
플라즈마 토치 및 고효율 촉매반응기 개발	- 고전압/저전압 플라즈마 토치 및 발생장치 개발 • 대용량 탄화수소 분해를 위한 플라즈마 토치구조 개발을 통한 천연가스 분해율 최적화 • 플라즈마 방전기체 종류/공급 구조에 따른 반응 최적화조건 설정 - 천연가스 분해를 위한 고효율 플라즈마 반응기 개발 • 플라즈마 직접 분해 및 최적 반응조건 설정 • 반응기체 특성에 따른 최적의 반응기 구조 설계기술 • 반응 분위기에 적합한 내화물 및 구조 최적화조건 설정 • feed 공급 및 반응 온도/시간 제어조건 설정 • 최적의 촉매공정 연계조건 설정 - 플라즈마 연계 고효율 촉매반응 시스템 개발 • 플라즈마 유래가스의 조성을 고려하여 우수한 반응활성을 가진 촉매 고유 recipe 도출 • 고유 recipe를 바탕으로 실증 플랜트에 촉매를 공급할 수 있는 수준의 양산 기술 확보 • 30kW 플라즈마 반응기와 연계한 촉매반응시스템으로 0.06톤/day 이상 청록수소 생산

(3) 기술개발 목표

가. 핵심기술의 개발 목표

■ 정성적 목표

- 플라스마 토치 및 고효율 반응기 개발
 - 탄화수소계 분해를 위한 플라스마 토치 및 반응기 설계 및 제작
 - 탄화수소계 분해용 pilot plant(300kW 플라스마 토치) 설계/제작
- 플라스마-반응기 시스템 운전 DATA 축적
 - 실증설비 핵심기술 설계인자 확보 및 기본/상세설계 기술 확보
 - 촉매 기반 화학반응 연계공정 검토 및 통합운영 공정 도출
- 플라스마 반응시스템과 연계하여 수소 생산량을 제고하고 탄소를 동시에 생산할 수 있는 고효율 반응시스템 개발
 - 플라스마 반응기 유래가스의 조성에 따라 수소 생산성과 고품질 탄소를 생산할 수 있는 최적 저가, 고효율 촉매 개발
 - 플랜트 수준의 실증에 대응할 수 있는 촉매 양산기술 개발

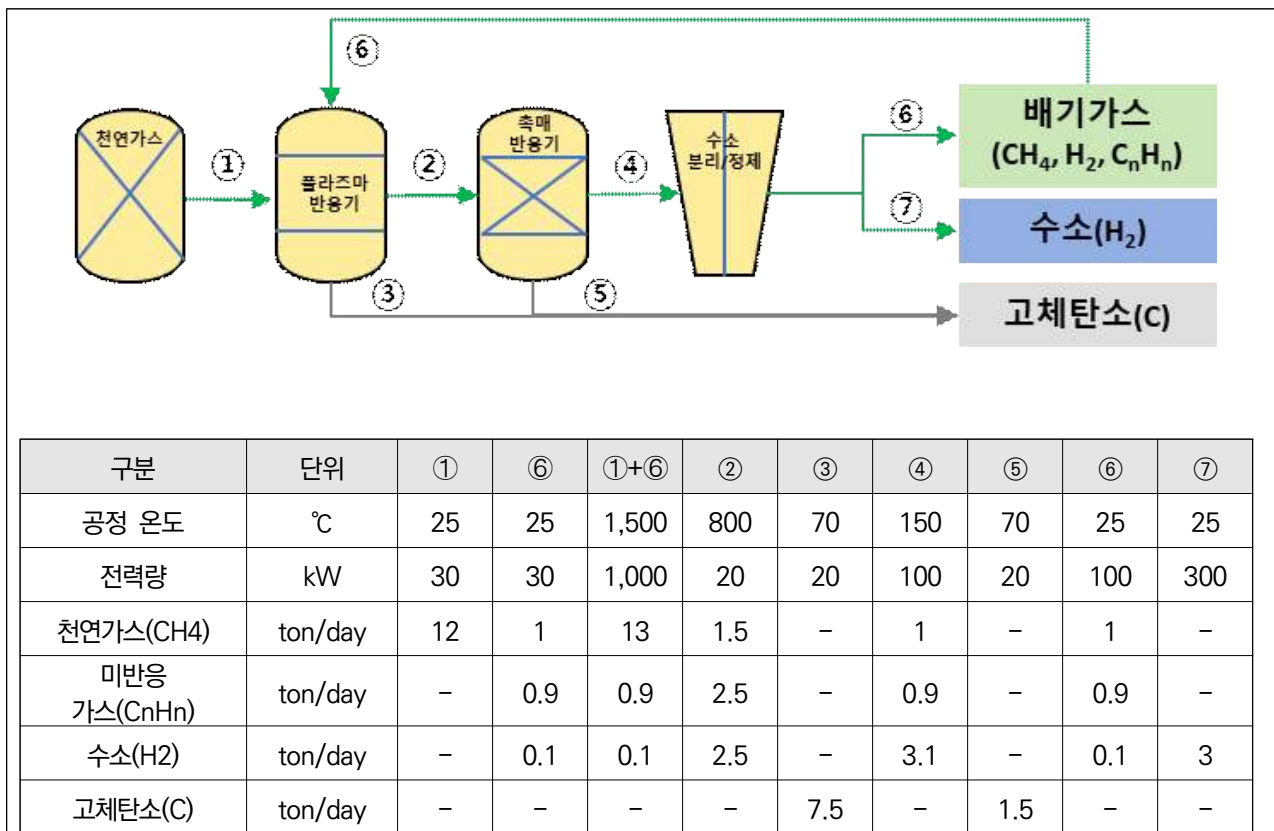
■ 정량적 목표

〈표 VI-17〉 핵심기술 정량적 성과목표

단계별 목표(정성적)	
1단계	2단계
- 천연가스 분해용 플라스마 토치 개발 - 천연가스 분해용 플라스마 반응기 개발 - 플라스마-반응기 시스템 운영 DATA 분석/평가 - 플라스마 반응기 유래가스의 조성에 따라 수소 생산성과 고품질 탄소를 생산할 수 있는 최적 저가, 고효율 촉매 개발	- 촉매 화학반응 연계공정 검토 - 촉매 화학반응 연계공정 운영DATA 분석/평가 - 천연가스 분해용 대용량 플라스마 설계인자 도출 - 플랜트 수준의 실증에 대응 가능 촉매양산기술 개발 ↓ [핵심기술 2-3] 대용량 청록수소 공급 실증설비 설계 및 제작

정량적 성과목표						
성과지표명	1단계			2단계 [핵심기술 2-3 연계]		계
	1차년	2차년	3차년	4차년	5차년	
플라스마 출력	30kW	100kW	300kW	도면화	1,000kW	1,000kW
천연가스(메탄) 전환율	-	50%	60%	-	80%	80%

정량적 성과목표						
성과지표명	1단계			2단계 [핵심기술 2-3 연계]		계
	1차년	2차년	3차년	4차년	5차년	
연속가동 운전증명	-	-	72hr	-	168hr	168hr
1시간 평균 탄화수소 분해반응속도 (mmol/min·g _{cat} , 800°C 이하)	6 이상	7 이상	8 이상	촉매 양산기술 확보	8 이상	8 이상
촉매소모량 대비 탄소 생산량 (wt%)	500 이상	600 이상	800	-	800	800
플라즈마-촉매 연계반응 시스템 수소 생산량	-	0.05톤/일 (30kW급 플라즈마와 연계)	0.06톤/일 이상 (30kW급 플라즈마와 연계)	-	3.0톤/일	3.0톤/일



■ 성능 목표

○ 국내 유사 선행연구 결과 대비 개발목표 설정

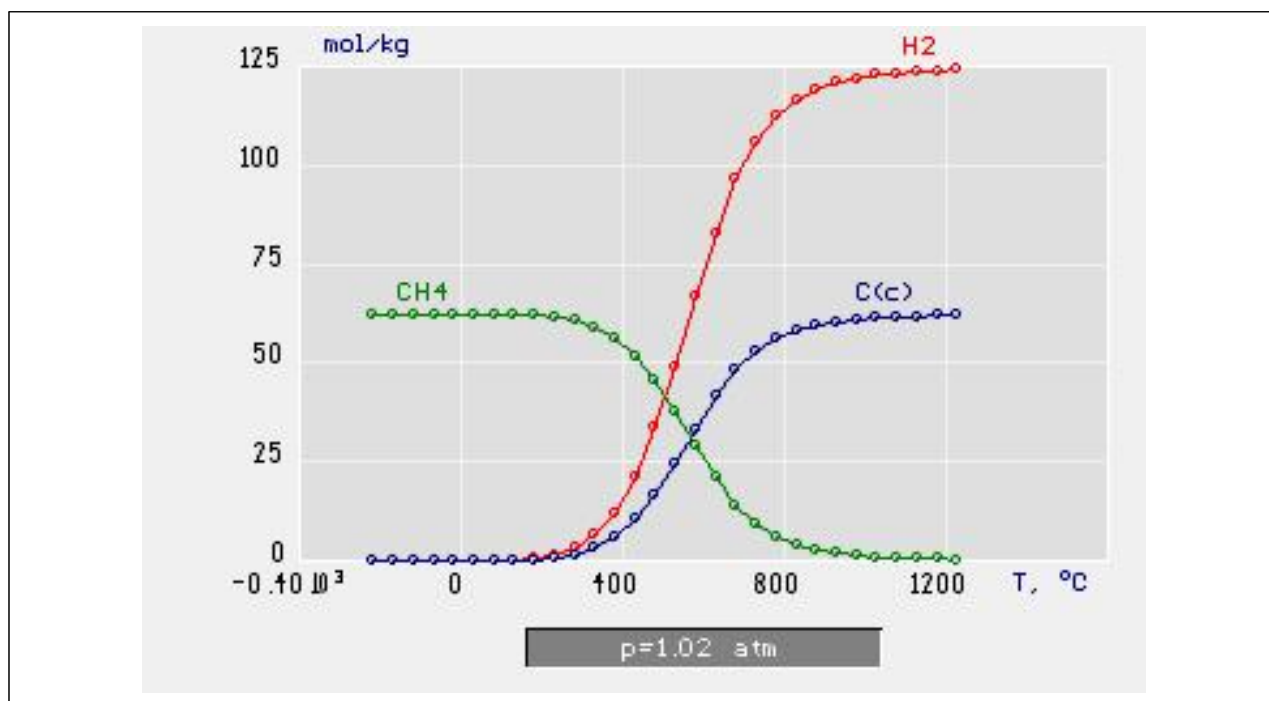
- * (산업부) 천연가스로부터 대량 수소제조 및 수소저장 기술개발, 한국가스공사 연구개발원, 2006
- * (과기부) 청록수소 생산 위한 촉매후보군 및 고효율/저탄소 공정 개념설계안 도출_한국에너지기술연구원, 2022

〈표 VI-18〉 핵심기술 개발목표

핵심기술명	성능지표	현재 스펙	개발 목표 스펙	
			1단계	2단계[핵심기술 2-3 연계]
플라즈마 토치 직접열분해 수소생산 기술	플라즈마 토치 출력	150kW	300kW	1,000kW
	천연가스(메탄) 전환율	약 50%	60%	80%
	연속가동	60hr	120hr	168hr
화학반응 기반 고효율 촉매 반응시스템 기술	1시간 평균 탄화수소 분해반응속도 (mmol/min·g _{cat} , 800°C 이하)	5-6	8	8 (Scale-up)
	촉매 소모량 대비 탄소 생산량 (wt%)	~ 500	800	800 (Scale-up)
	플라즈마-촉매 연계반응 시스템 수소 생산량	-	0.06톤/일 이상 (30kW급 플라즈마와 연계)	3.0톤/일 (1,000kW급 플라즈마와 연계)

나. 목표 설정 근거

■ 천연가스(CH₄)의 온도영역별 분해생성물 평형조성 Simulation 해석

[그림 VI-12] CH₄ 분해생성물의 평형조성

- CH₄의 수소전환 필요에너지는 플라즈마 토치, 반응기, 공정 효율 등을 고려하여 설정 필요
- 플라즈마 토치시스템 및 반응기의 효율은 분해공정의 핵심기술로 공정효율을 고려하여 약 2.8kW/kg-CH₄ 설정 반영 (플라즈마 토치기술에 따라 변동)

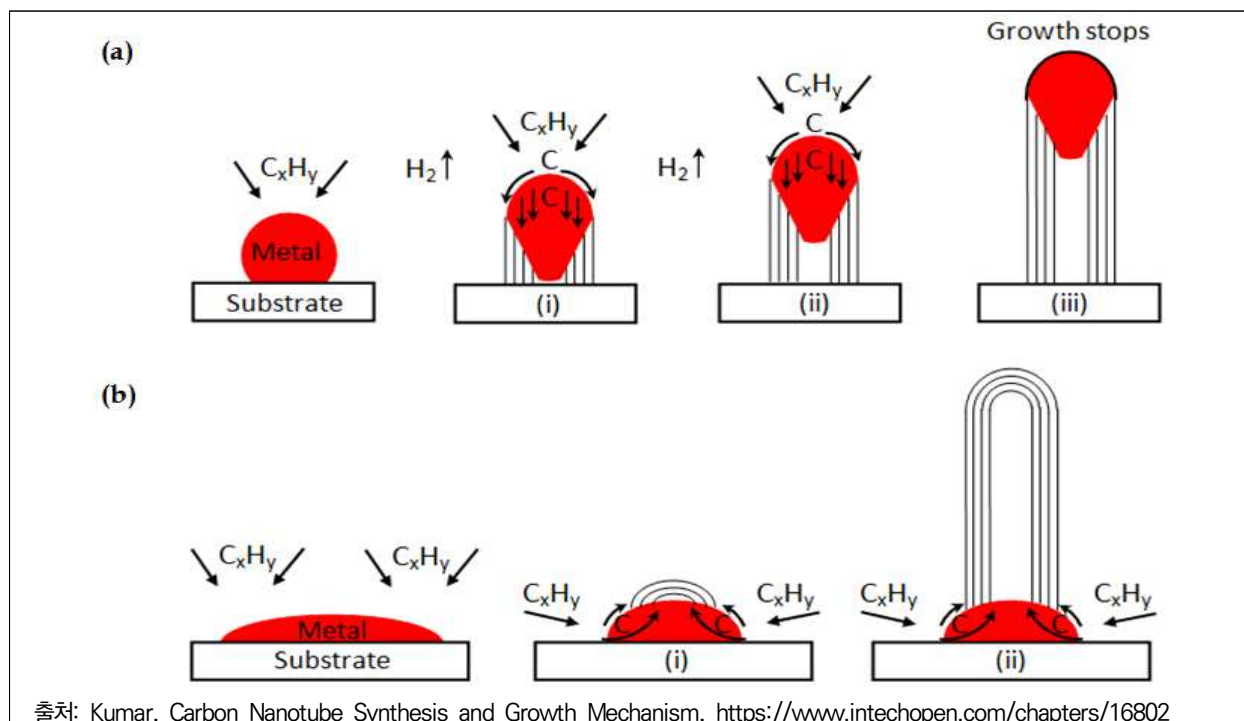
- 시뮬레이션 상의 CH₄의 열분해 종료는 약 1,000℃ 반응온도 유지 시 수소 전환율 70% 이상(대용량) 확보 예상, 촉매공정 연계로 최종 수소 전환율 80%이상 확보 목표 (공정 효율 고도화 목표, 2단계 실증설비 수소 전환율 80% 설정)

■ 메탄의 분해반응 속도

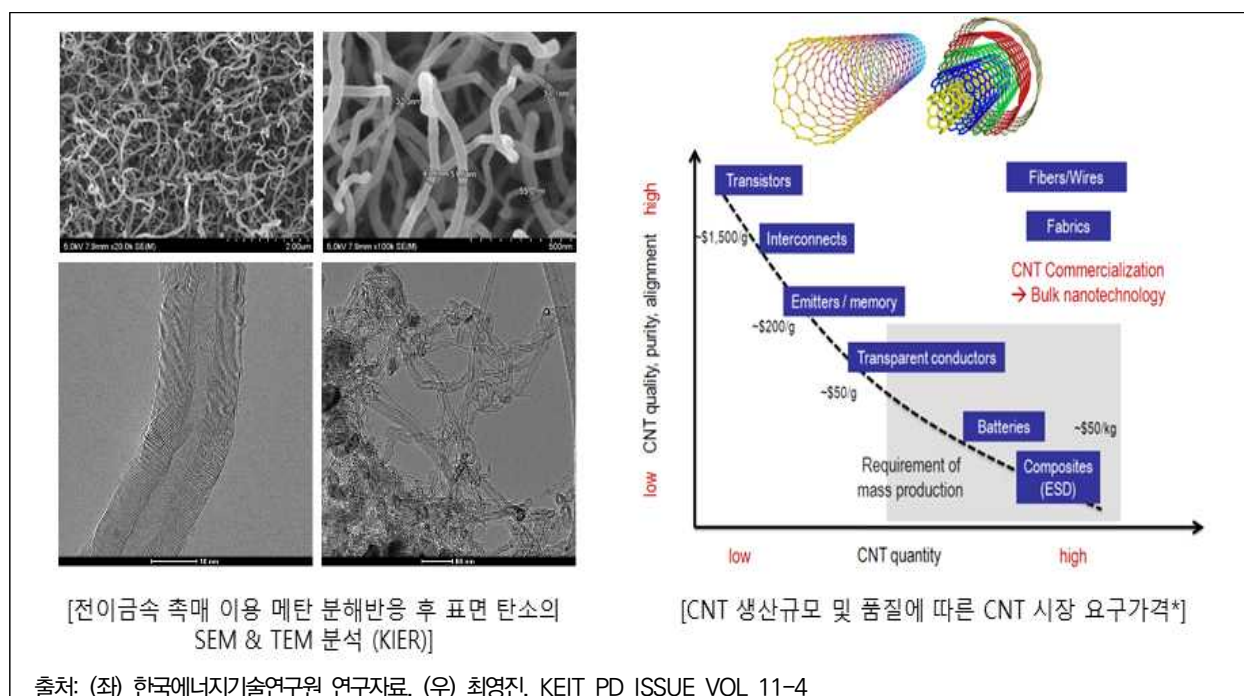
- 탄화수소들 중 메탄은 구조가 가장 간단한 유기화합물
- 메탄은 1200℃ pyrolysis 실험(촉매 없는 조건)에서 메탄 분해반응 속도는 약 7.9 mmol/min* 수준임
 - * Malek Msheik, Sylvain Rodat, Stephane Abanades. Experimental comparison of solar methane pyrolysis in gas-phase and molten-tin bubbling tubular reactors. Energy, 2022
- 촉매의 사용을 통해, 약 800℃ 수준의 반응조건에서 열분해 반응속도 수준으로 탄화수소 화합물의 직접분해 반응을 촉진하여 수소와 탄소를 동시에 생산할 수 있음
- 플라즈마 공정과 연계할 경우, 플라즈마 공정에서 배출되는 고온의 가스를 추가적 예열 없이 그대로 사용할 수 있으므로 플라즈마 반응시스템의 원료가스 전환율 부담을 경감시킬 수 있음
- 그리고 사용 촉매에 따라 촉매 표면에 생성되는 탄소의 품질을 조절할 수 있으므로 고품질 탄소 생산이 가능함

■ 촉매 소모량 대비 탄소 생산량

- 고체 촉매를 사용할 경우, 탄화수소의 직접분해반응의 생성물인 고체가 촉매의 표면 위에 성장함. 이는 촉매의 활성점을 제거하거나 변형시켜 촉매의 활성에 비가역적 손상을 일으킬 수 있음
- 촉매 활성이 비가역적으로 현저히 낮아졌을 때 촉매반응기의 성능 유지를 위해 사용된 촉매의 일부는 탄소 생성물과 함께 배출되고 새로운 촉매(fresh catalyst)가 투입되어야 함
- 따라서, 탄소 생성물의 배출(생산)에 따라 촉매의 지속적인 공급이 필요하다는 점에서 촉매의 공급은 원료의 공급과 같은 운전비용의 증가요인이 되므로 촉매 표면에 상당량의 탄소소재가 생성될 때까지 촉매의 활성을 유지하여 반응기 내에서 활용할 수 있어야 함



[그림 VI-13] 촉매 상의 탄화수소(또는 메탄) 직접분해 반응에 의한 탄소소재 생성과정



[그림 VI-14] 실제 촉매상에 형성된 카본나노튜브 형상의 탄소생성물과 카본나노튜브의 품질에 따른 가격 차이 비교

- 청록수소와 유사한 공정인 유동층 반응기 기반의 에틸렌을 이용한 카본나노튜브 합성 공정에서 촉매 소모량 대비 탄소소재(카본나노튜브 등)의 생성량은 일반적으로 700 wt%(질량저장밀도) 이상의 수준임(산업부, CNT 대량 기상합성 장치 및 공정 개발, 2003 - 2008)

- 따라서, 저가/장수명/고효율의 촉매를 사용하여 촉매의 사용비용을 최소화하고 우수한 품질의 탄소소재를 생산하여 공정의 경제성을 확보할 필요가 있음

■ 국외 사례를 기반으로 해당사업 기술개발 목표 설정

- 미국 모노리스 사의 플라즈마 토치 기술의 주요 이슈 분석
 - 모노리스 사의 경우 고순도의 고체탄소 생산을 위하여 그라파이트 소재의 플라즈마 전극을 사용
 - 그라파이트 소재의 경우 전극의 마모에 따라 발생하는 불순물이 카본 성분으로 구성되어 공정 상에 회수되는 고체탄소의 순도에 큰 영향이 없으나, 높은 마모도 및 파손에 대한 Risk로 전극의 수명이 짧은 단점을 보유
 - 반복적인 플라즈마 토치 전극 교체 작업으로 인하여 연속적인 Plant 운영에 문제가 발생 (연간목표 생산량 미달 등)
- 해당사업 플라즈마 기술개발 주요 목표
 - 다양한 플라즈마 전극 소재 적용에 따른 수명 장기화 대안 마련
 - 그라파이트 전극에 대한 열류해석을 통하여 전극 구조에 대한 수명 연장 대안 도출
 - 고온이 발생하는 플라즈마 Arc 특성을 고려하여 냉각 효율이 높은 구리(Cu) 재질 검토, 이에 따라 회수되는 고체탄소 고품질화 연구 시 구리의 영향 분석 등
 - 전극교체 작업의 자동화 설비 적용 및 Spare 플라즈마 토치 운영 방식 등의 적용으로 전극 교체 작업에 대한 연속 운영 Risk 최소화
- 동 사업에서는 대용량 청록수소 공급을 위해 필요한 1MW급의 플라즈마-촉매 반응 시스템의 표준화 개발 및 실증 추진
 - 일일 3.0톤 수소생산 표준품 개발 (1MW 플라즈마-촉매 반응 시스템)
 - 이동 용이성 및 공간이 협소한 도심지 적용을 위하여 Compact-Module type의 양산형 시스템 개발
 - 또한, 3톤/일 이상의 청록수소 필요량에 대한 대응책 마련을 위하여 1MW 표준품에 대한 멀티형 공정 개발 연계 (6톤/일 수소 필요 시 1MW 표준품 2set 설치 구성)
 - (후속 사업) 산업단지 및 초대용량 수소 요구도시 등에 대안으로 1MW 표준품의 Scale-up 사업 연계 (국외수준 이상규모 : 모노리사 사 8MW 플라즈마 공정 이상)

(4) 과제 중복성·차별성·연계방안

가. 타 연구과제와의 차별성 및 연계성

- 청록수소 생산과 직간접적으로 연관된 연구과제가 최근 수행되었으나 대부분 실험실 규모의 소재 및 개념 확인 수준의 실험장치에서 이루어진 연구가 대부분
- 블루 및 그린 수소로 대표되는 청정수소 생산 기술과 유사한 TRL의 확보를 위한 실증형 연구는 현재까지 없음

〈표 VI-19〉 차별성 및 연계방안 요약

사업명 (부처)	과제명 (과제기간)	주요내용	본 과제와의 차별점	연계 추진방안
특정기초연구 지원사업 (과기부)	○ PEMFC 연료전지용 Glidarc 플라즈마 고농도 수소생산 개질장치 개발 (2007.01.~2008.12.)	○ 고속 3단계 메탄 발표 시스템으로 바이오가스 생산 ○ 바이오 가스 개질을 통한 PEMFC 용 수소 생산	○ 바이오가스를 feed로 하는 플라즈마 개질 공정으로 수소 생산	○ 수소 고도화를 위한 WGS, PROx 반응 개념 관련 연구에 참조
개인기초연구 (과기부)	○ 수소생산 저비용 촉매를 위한 붕화금속 나노입자 및 CNT-금속 나노복합재의 열플라즈마 합성 (2020.01.~2021.12.)	○ 열플라즈마로 나노촉매 합성 공정 개발 ○ 합성된 촉매를 활용한 수전해 수소 생산	○ 플라즈마 공정을 이용한 수소 생산이 아닌, 수전해 촉매 생산	○ 열플라즈마 발생 기술 관련 정보 참보
신재생에너지 기술개발사업 (지식경제부)	○ 폐기물의 플라즈마 가스화 용융-수소회수-연료전지 발전 실증시설 구축 (2009.06.~2011.09)	○ 폐기물을 플라즈마 가스화 하여 합성가스를 생산하고 WGS 및 PSA를 통해 고순도 수소 회수 및 연료전지 발전에 활용	○ 폐기물 기반의 가스화 기술로 수소 생산	○ 열플라즈마 기술 및 고온 가스화 반응 기술 관련 정보 참조
한국에너지기술 연구원 주요사업 (과기부)	○ 청록수소 생산을 위한 촉매 후보군 및 고효율/저탄소 공정 개념설계안 도출 (2022.01.~2022.12.)	○ 전이금속 기반의 저가/고효율 촉매 설계 전략 수립 및 유력 후보군 도출 ○ 수소 및 탄소의 연속/대량 생산고효율 반응 공정 설계	○ 핵심소재인 촉매 후보군을 도출하기 위한 연구에 국한됨 (TRL 2 수준)	○ 알려진 유력 촉매 후보군을 바탕으로 저가/장수명/고 효율 촉매 설계 및 양산기술 확보를 위한 기초연구 정보로 활용 가능
미래수소 원천기술 개발사업 (과기부)	○ 태양에너지와 액체금속촉매를 이용한 C-X 화합물 열화학적 전환을 통한 CO ₂ -free 수소생산 공정 개발 (2021.07.~2026.12.)	○ 액체금속촉매 이용 반응시스템 개발 ○ 탄소 생성물의 회수 및 고품질화	○ 용융금속을 이용하므로 통상 1000℃ 수준의 초고온 반응조건이므로 고품질 탄소 생산이 어렵고 대량생산을 위한 반응시스템 스케일업이 어려운 기술을 채택	○ 초고온 환경에서 생성된 탄소의 품질 관련 데이터 활용
전략핵심 소재자립화기술 개발 (산업부)	○ 천연가스로부터 고결정성전도성 흑연구조를 갖는 탄소소재 개발 (2020.04.~2024.12.)	○ 메탄의 직접분해를 통한 고결정성/전도성 흑연소재를 생산하기 위한 촉매 및 반응시스템 설계 기술 개발	○ 수소 생산보다는 이차전지 전극소재로 활용가능한 탄소소재의 생산 위주의 연구임	○ 촉매 기반 고품질 탄소소재 생산을 위한 연구내용 활용가능 ○ 이차전지 전극소재로 활용가능한 탄소소재의 품질 관련 연구내용 활용 가능

나. 민간기술과 차별성 및 연계성

■ 플라스마-촉매 화학반응 공정을 이용한 청록수소 생산관련 상용화된 국내 민간기술은 없음

■ 독일의 BASF 및 호주의 Hazer Group이 고체 상태의 촉매를 이용한 기체-고체 다상반응시스템을 이용하고 있음

- 호주 Hazer Group : 2018년, 수소 8kg/day 및 탄소 29kg/day 생산 파일럿 스케일 반응시스템 개발*

* HAZER PILOT PLANT TESTING EXCEEDS CAPACITY TARGETS BY 300%, Hazer Group (2018)

- 저가 천연 철광석을 촉매로 활용, 촉매 비용은 매우 낮지만(\$0.1/kg) 반응활성과 생성탄소 품질에 한계(탄소 수율 500% 이하, 탄소 가격 \$0.5/kg)가 있는 것으로 판단됨
 - 2021년부터 바이오가스를 이용한 수소 270kg/day, 탄소 1000kg/day 생산이 가능한 demonstration 플랜트 개발 중*

* AGM CHAIRMAN'S ADDRESS & CEO PRESENTATION, Hazer Group (2021)

- 독일 BASF : 1000℃ 이상 고온의 반응조건에서 카본 그레놀을 moving-bed 반응기로 운영하여 메탄 분해 유도, 비정질 탄소체 배출

■ 용융된 금속촉매를 사용하는 미국의 C-Zero의 기술은 최근 우리나라의 대기업(SK 가스)이 투자를 하여 관심을 모음

- 미국 C-Zero : 니켈 등이 포함된 용융 금속을 촉매로 사용
 - 미국의 DOE에서 지원하는 혁신 연구프로그램인 Arpa-E 프로젝트를 수행하며, 10L 규모의 반응시스템 개발을 위한 연구과제 수행 중이며 1000℃ 이상 고온의 반응조건과 반응기의 낮은 생산성이 극복해야 할 기술적 과제임

〈표 VI-20〉 민간기술의 한계점 및 개발기술과의 차별성·연계성

민간기술명	민간기관 (지원기관)	주요 연구내용	개발기술과의 차별성 및 연계방안
플라스마 열분해	모노리스	- o Graphite 전극 기반 플라스마 열분해 - o Carbon 생산을 주목적 공정운영	o 개발기술은 플라스마-촉매 방식의 열분해 공정으로 수소 생산을 주목적으로 함

민간기술명	민간기관 (지원기관)	주요 연구내용	개발기술과의 차별성 및 연계방안
촉매 열분해	LG화학	에틸렌 feed를 활용한 batch식 CNT 제조 기술	개발기술은 메탄을 feed로 활용한 플라즈마 분해 생성물을 촉매 반응기로 공급하는 연속식 수소/carbon 생산기술
300kW 플라즈마 토치	국내 제철소	300kW 플라즈마 토치 기술 개발 - 비철금속 용융 시스템 개발	카본 발생-회수 기능을 포함하는 반응 시스템에 활용하는 토치 기술과 연계 개발 추진
용융금속촉매 이용 반응시스템	C-Zero	- 용융금속과 메탄 버블 계면의 촉매 반응이 일부 일어나지만 고온에 의한 열분해 반응을 이용 - 기체/고체 분리가 쉬운 장점이 있으나 고온을 유지할 수 있는 대형 반응시스템의 설계에 대한 기술적 이슈가 있으므로 이를 극복하기 위한 스케일업 설계 연구 진행	상용기술 개발을 위해 보다 낮은 온도에서 작동가능하고 생산성이 높은 촉매 반응시스템의 개발을 위한 비교 대상 기술로 검토 가능
탄소입자를 촉매로 활용한 moving-bed 반응시스템	BASF	1000℃ 이상 고온에서 카본입자를 촉매로 이용한 반응공정 개발	기체-고체 유동층 반응시스템에서의 효과적인 열전달 방법에 대한 기술들을 참고할 수 있음
철광석을 촉매로이용한 유동층 반응기술	Hazor Group	- 저렴한 미분 철광석을 촉매로 사용하여 촉매로서의 낮은 활성문제를 상쇄함 - 다단 기체-고체 유동층 촉매 반응기의 설계 기술 개발 중	- 철광석 수준의 저렴한 촉매 물질 개발 시 참고 - 고효율 유동층 반응시스템 설계기술 개발 시 참고 및 응용 가능

2) (핵심기술 1-2) 청록수소 분리/정제 기술 개발

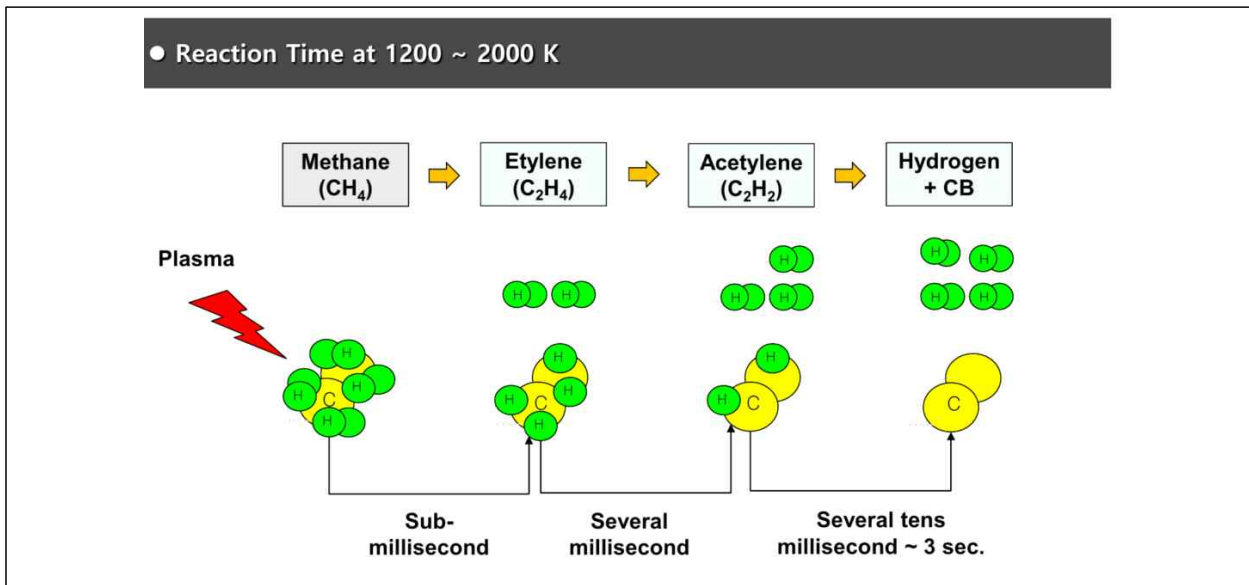
(1) 배경 및 필요성

가. 추진배경

- 수분, CO₂와 같이 강한 흡착능력을 가진 불순물들이 원료 기체 속에 들어 있으면 흡착제의 흡착능력을 크게 감소 시킴
- 불순물이 쉽게 탈착되지 않는 경우에 더욱 심하며, 이러한 경우 원료기체가 PSA장치로 들어가기 전에 적당한 흡착제에 통과시켜 불순물을 제거시키는 전처리 방법이 사용 됨
- 한편 불순물이 거의 흡착이 되지 않는 경우에는 주성분의 생성물속에 불순물이 함께 포함된 채로 얻어지므로 생성물의 순도를 떨어뜨림

나. 필요성

- 플라즈마 고온 열분해는 특성상 다양한 라디칼을 생성하고 고온 영역에서 저온 영역으로 전이시 생성물의 재결합 현상 발생
- 특히 이중결합을 갖는 Alkene류의 탄화수소는 PSA 흡착제에 흡착후 탈착이 용이하지 않고, Alkane/Alkene의 분리를 위한 기술은 개발단계 수준이라 제어 기술이 필요



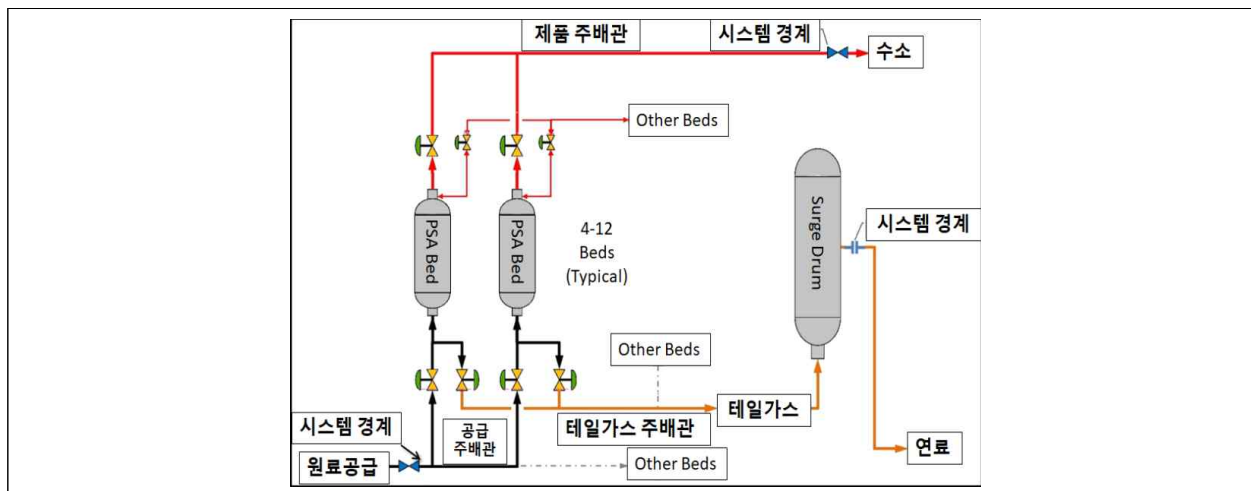
[그림 VI-15] 고온영역에서의 천연가스(CH_4)의 분해 과정

(2) 핵심기술 개요

가. 개념

- 정부는 2019년 수소경제 활성화 로드맵 발표를 통해 부생수소 및 추출수소를 초기 수소경제 이행의 핵심 수소 공급원으로 활용토록 계획 중
 - 부생수소는 석탄의 건류과정에서 발생되는 부생가스, 탄화수소 수증기 개질반응, NCC(Naphtha Cracking Center)공장의 열분해가스, 염소제조공장의 소금 전기분해 과정 등에서 발생됨
 - 또한 추출수소는 천연가스 공급망과 연계되어 개질반응을 통해 생산함
- 그러나 부생수소 및 추출수소 생산을 위해서는 반드시 수소 정제 작업이 필요하며, 정제작업은 생산량 및 경제성 측면에서 대부분 PSA시스템에서 수행
 - PSA는 기체 혼합물로부터 특정 성분을 분리하거나 혹은 제거시켜 분리, 정제하는 공정임

- 흡착제로 채워진 흡착탑(Psa Bed)을 수소가 많이 포함된 원료기체가 고압상태로 통과하고 선택도가 높은 성분(제품)들을 우선 흡착하게 되고 선택도가 낮은 성분(테가스)들은 흡착탑 밖으로 배출함
 - 흡착된 성분들을 제거하기 위해 흡착탑 내 압력을 떨어뜨려 재생하고 고압 생성물의 일부로 탑을 세척함
 - 연속적인 수소 생산을 위해 PSA시스템은 통상적으로 다수의 흡착탑(최소 4개 이상)으로 구성됨
- PSA는 순환시간이 5분정도로 극히 짧으며 흡착탑의 크기도 작고 열을 필요로 하지 않기 때문에 경제성이 높음



[그림 VI-16] PSA 시스템 공정도



[그림 VI-17] 전남 여수공단 설치된 고순도 수소 PSA 설치 사례 (한국에너지기술연구원, 2018년)

나. 범위

■ 핵심기술 범위

- (구성기술 1) 미회수 탄화수소의 기체/고체 분리기술 개발
 - 촉매 반응 후단 잔류 고체탄소의 회수를 위한 고효율 기/고 분리 시스템 개발
 - Pilot규모 성능평가 및 개선사항 도출 (실증설비 설계 반영)
- (구성기술 2) 잔류 탄화수소 제어기술 개발
 - 촉매 반응 후 미반응 천연가스 및 잔류 탄화수소(THC) 회수 기술 개발
 - 회수된 탄화수소의 플라즈마 반응기 재공급 공정기술 확보
 - Pilot규모 성능평가 및 개선사항 도출 (실증설비 설계 반영)

〈표 VI-21〉 핵심기술 1-2의 구성기술 범위

구성기술명	기술개발 정의 및 범위
청록수소 분리/정제 기술 개발	- 미회수 탄화수소의 기체/고체 분리기술 개발 • 촉매 반응 후단 잔류 고체탄소의 회수를 위한 고효율 기/고 분리 시스템 개발 • Pilot규모 성능평가 및 개선사항 도출 (실증설비 설계 반영) - 잔류 탄화수소 제어기술 개발 • 촉매 반응 후 미반응 천연가스 및 잔류 탄화수소(THC) 회수 기술 개발 • 회수된 탄화수소의 플라즈마 반응기 재공급 공정기술 확보 • Pilot규모 성능평가 및 개선사항 도출 (실증설비 설계 반영)

(3) 기술개발 목표

가. 핵심기술의 개발 목표

■ 정성적 목표

- 플라즈마-촉매 반응에서 1차 회수 후 잔류한 고체탄소 2차 회수 공정 개발
 - 기체/고체 분리 프로그램 해석 기반의 콤팩트형 시스템 구성
 - Pilot규모 제작을 통한 개선사항 평가 및 실증설계 인자 확보
- 플라즈마의 고온영역 및 촉매반응에서 미반응한 Alkene류의 탄화수소와 저온영역 전이 시 재결합하는 탄화수소 생성물 등의 THC 제어 기술 확보
 - THC 제어 촉매 후보군 설정 및 최적모델 도출

- Pilot규모 제작을 통한 개선사항 평가 및 실증설계 인자 확보
- 회수 THC의 버퍼탱크 구성 및 플라즈마 시스템 재공급 연계기술 개발

■ 정량적 목표

- 미회수 고체탄소 분리 기술 : 고체탄소 10mg/Nm³ 이하
- 잔류 탄화수소(THC) 농도 : 50ppm 이하
- PSA 공정 수소 회수율 및 순도 : 85.0% 이상 (순도 99.97% 이상)

〈표 VI-22〉 핵심기술 정량적 성과목표

단계별 목표(정성적)						
1단계			2단계			
- 미회수 고체탄소 회수시스템 개발 - 잔류 탄화수소 제어시스템 개발 - Pilot 제작 및 성능평가 (플라즈마-촉매공정 연계)			- Pilot 제작 개선사항 도출 및 실증설비 인자 확보 - 전처리공정 개발기술 기반의 고효율 PSA 선정			

정량적 성과목표						
성과지표명	1단계			2단계		계
	1차년	2차년	3차년	4차년	5차년	
미회수 카본블랙 회수 (PSA 공급가스 내 농도)	프로그램 해석	20mg/Nm ³	15mg/Nm ³	12mg/Nm ³	10mg/Nm ³	10 mg/Nm ³
잔류 탄화수소 농도	후보군 내 최적안 선정	100ppm	80ppm	60ppm	50ppm	50ppm
PSA 공정 수소 순도	-	-	-	99.97%	99.97%	99.97%
PSA 공정 수소 회수율	-	-	-	80.0%	85.0%	85.0%

■ 성능 목표

〈표 VI-23〉 핵심기술 개발목표

핵심기술명	성능지표	현재 스펙	개발 목표 스펙	
			1단계	2단계
청록수소 분리/정제 기술 개발	미회수 카본블랙 회수 (PSA 공급가스 내 농도)	싸이크론&벨픽터 Dust 처리설비 (소각 10~20mg/Nm ³)	15mg/Nm ³	10mg/Nm ³
	잔류 탄화수소 농도	촉매 연구개발 단계 (대형화 실증 부재)	80ppm	50ppm
	PSA 공정 수소 순도	수소 생산 640kg/일 대비 99.995%	SPEC. 선정	99.97% 이상
	PSA 공정 수소 회수율	순도 99.995% 기준 80% 수준	SPEC. 선정	85.0% 이상

나. 목표 설정 근거

○ 국내외 압력변동흡착(PSA) 기술 특허 분석

〈표 VI-24〉 해외 압력변동흡착 관련 특허 동향

출원인	발명의 명칭	출원번호	출원일	국적	등록번호	등록일
Japan Air Gases Ltd., JFE STEEL CORPORATION	일산화탄소(carbon monoxide) 가스 또는 일산화탄소(carbon monoxide) 가스 및 이산화탄소(carbon dioxide) 가스의 혼합물에 포함된 질소 가스를 흡착법에 따라 제거하는 방법	57130899	1982.07.27	일본	01480730	1989.02.10
JFE STEEL CORP, JFE ENGINEERING CORP	용광로 가스의 분리 방법	2013-121738	2013.06.10	일본	5567185	2014.06.27
MITSUBISHI KAKOKI KAISHA LTD	고순도 일산화탄소의 제조 방법	1997-190745	1997.07.02	일본		
AIR WATER INC	일산화탄소 가스 제조 장치 및 일산화탄소 가스 제조 방법	2018-185227	2018.09.28	일본		
IWATANI INDUSTRIAL GASES	일산화탄소 가스의 분리 회수 방법	1993-219323	1993.09.03	일본	2529929	1996.06.14
TAIYO NIPPON SANSO CORP	흡착제, 흡착제 제조 방법, 일산화탄소 제거 장치 및 일산화탄소 제거 방법	2015-210568	2015.10.27	일본		
TAIYO NIPPON SANSO CORP	흡착제, 수소 가스 정제 장치 및 수소 가스 정제 방법	2015-207063	2015.10.21	일본		
Kansai Coke and Chemicals Co.	CO분리 회수용 흡착제, 그 제조 방법 및 그것을 이용하여 CO를 분리 회수하는 방법	1985-255465	1985.11.13	일본		
KOBE STEEL LTD	PSA 방식 고순도 수소 제조 방법	2011-038075	2011.02.24	일본	5690165	2015.02.06
KANSAI COKE & CHEM CO LTD, KOBE STEEL LTD	CO 흡탈착제 제조 방법	2011-117378	2011.05.25	일본	2012-245446	2012.12.13
SUMITOMO SEIKA CHEM CO LTD	일산화탄소의 분리 회수 방법 및 분리 회수 장치	2012-035096	2012.02.21	일본	5875111	2016.01.29
ARKEMA FRANCE	ZEOLITIC ADSORBENT MATERIAL, PREPARATION METHOD AND USE FOR THE SEPARATION OF NON-CRYOGENIC INDUSTRIAL GAS	PCT-FR2017-053335	2017.12.01	PCT	WO2018-100318	2018.06.07
Kunming University of Science and Technology	Method for producing hydrogen, nitrogen and carbon monoxide by semi-coke furnace	2021-10781351	2021.07.11	중국		

출원인	발명의 명칭	출원번호	출원일	국적	등록번호	등록일
Yang Hao	Process for concentrating carbon monoxide from blast furnace gas	2020-10886429	2020.08.28	중국		
XINJIANG TIANYE (GROUP) CO., LTD. XINJIANG TIANZHI CHENYE CHEMICAL CO., LTD.	Gas transformation deep purifying technique for separating and purifying CO and H ₂ of calcium carbide furnace	2013-10090878	2013.03.21	중국	103204470	2015.04.01
THE SOUTHWEST RESEARCH & DESIGN INSTITUTE OF CHEMICAL INDUSTRY	Method for purifying and concentrating CO from calcium carbide furnace gas	2011-10196752	2011.07.14	중국	102627280	2014.02.12
CNGC Yinguang Group Gansu Yinguang Juyin Chemical Industry Co., Ltd., Gansu Yinda Chemical Co., Ltd.	Method for separating and purifying CO from water gas by pressure swing adsorption	2010-10584331	2010.12.13	중국	102080000	2013.05.22
AIR PRODUCTS AND CHEMICALS, INC	Production of hydrogen, carbon monoxide and mixtures thereof	1990-114491	1990.07.27	EP		
GTLpetrol LLC	Systems and processes for processing hydrogen and carbon monoxide	13/195712	2011.08.01	미국	8753427	2014.06.17
EXXONMOBIL RESEARCH AND ENGINEERING COMPANY	INTEGRATION OF STAGED COMPLEMENTARY PSA SYSTEM WITH A POWER PLANT FOR CO ₂ CAPTURE/UTILIZATION AND N ₂ PRODUCTION	15/339972	2016.11.01	미국	10071337	2018.09.11
EXXONMOBIL RESEARCH AND ENGINEERING COMPANY	High temperature pressure swing adsorption for advanced sorption enhanced water gas shift	15/653833	2017.07.19	미국	10350538	2019.07.16
AIR PRODUCTS AND CHEMICALS, INC.	히스테리시스를 갖는 보조 흡착제	10-1995-0010047	1994.04.29	미국		
PRAXAIR TECHNOLOGY, INC.	Silver-exchanged zeolites and methods of manufacture therefor	11/170104	2005.06.30	미국	7455718	2008.11.25

〈표 VI-25〉 국내압력변동흡착 관련 특허 동향

출원인	발명의 명칭	출원번호	출원일	국적	등록번호	등록일
한국에너지기술연구원	일산화탄소를 선택적으로 포집할 수 있는 제올라이트 기반 흡착제, 이의 제조방법 및 이를 이용하여 일산화탄소를 선택적으로 포집하는 방법	10-2020-0031915	2020.03.16.	한국	10-2309890	2021.09.30
한국에너지기술연구원	제올라이트 기반 일산화탄소 선택성 흡착제 및 이의 제조방법	10-2019-0122470	2019.10.02.	한국	10-2259072	2021.05.26
한국에너지기술연구원	일산화탄소 선택성 흡착제 및 이의 제조방법	10-2018-0129904	2018.10.29.	한국	10-2200419	2021.01.04
한국에너지기술연구원	일산화탄소 고선택성 흡착제 및 이의 제조방법	10-2016-0148772	2016.11.09.	한국	10-2044877	2019.11.08
한국에너지기술연구원	일산화탄소 분리방법 및 일산화탄소 분리시스템	10-2017-0172304	2017.12.14.	한국	10-2033456	2019.10.11
한국에너지기술연구원	일산화탄소 분리용 흡착제 및 이의 제조방법	10-2015-0155295	2015.11.05.	한국	10-1734410	2017.05.02
한국에너지기술연구원	일산화탄소를 선택적으로 분리하기 위한 흡착제 및 그제조방법	10-2007-0054275	2007.06.04.	한국	10-0884350	2009.02.11
RIST	일산화탄소 분리용 흡착제 및 이의 제조방법	10-2019-0171555	2019.12.20.	한국	10-2270006	2021.06.22
RIST	일산화탄소의 분리 및 회수를 위한 압력변동흡착 공정	10-2018-0162116	2018.12.14.	한국	10-2156825	2020.09.10
RIST	일산화탄소를 선택적으로 흡착하는 흡착제 및 그 제조방법	10-2011-0145191	2011.12.28.	한국	10-1957125	2019.03.06
RIST	일산화탄소의 선택적 흡착제 및 그 제조방법	10-2015-0186820	2015.12.24.	한국	10-1778412	2017.09.07
RIST	일산화탄소 선택성 흡착제를 이용하는 압력변동흡착 공정	10-2014-0173368	2014.12.04.	한국	10-1594893	2016.02.11
RIST	일산화탄소 흡착제 및 그 제조 방법	10-2013-0081779	2013.07.11.	한국	10-1521548	2015.05.13
포스코/RIST	일산화탄소 회수를 위한 흡착제 제조 방법 및 제조장치	10-2012-0155512	2012.12.27.	한국	10-1459731	2014.11.03

출원인	발명의 명칭	출원번호	출원일	국적	등록번호	등록일
RIST	제강 공정 부생가스를 이용한 수소 및 액체연료 생산 방법	10-2005-0129111	2005.12.23.	한국		
RIST	일산화탄소 가스의 제거용 흡착제 및 제거방법	10-2000-0080388	2000.12.22.	한국		
포스코	천연 제올라이트를 이용한 일산화탄소 가스 흡착제 제조방법	10-1994-0033444	1994.12.09.	한국	10-0146889	1998.05.13
연세대학교 산학협력단	일산화탄소에 대한 선택적 흡착능을 갖는 일산화탄소 흡착제 및 이의 제조방법	10-2018-0048495	2018.04.26.	한국	10-2123793	2020.06.11
연세대학교 산학협력단	일산화탄소에 대한 선택적 흡착능을 갖는 일산화탄소 흡착제 및 이의 제조방법	10-2018-0047888	2018.04.25.	한국		
한국화학연구원	고순도 수소 및 일산화탄소의 제조를 위한 일산화탄소를 선택적으로 흡착하는 황 및 니켈 기반 흡착제 및 그 제조방법	10-2019-0054094	2019.05.09	한국	10-2223605	2021.02.26
한국화학연구원	일산화탄소의 선택적 흡착을 위한 흡착제 제조 방법	10-2019-0062005	2019.05.27.	한국	10-2223603	2021.02.26
한국화학연구원	산화방지 기능을 가진 일산화탄소 흡착제 및 이의 제조방법	10-2017-0156706	2017.11.22.	한국	10-2068008	2020.01.14
주식회사 원테크에너지	스팀 플라즈마를 이용한 일산화탄소 제조장치 및 제조방법	10-2015-0138910	2015.10.02.	한국	10-1664833	2016.10.05
삼성SDI(주)	연료전지용 일산화탄소 흡착제, 연료전지용 일산화탄소정화기, 연료전지 시스템 및 일산화탄소 흡착제를 이용한 일산화탄소 제거방법	10-2004-0050761	2004.06.30.	한국	10-1117633	2012.02.10
대한중석광업주식회사	천연 제올라이트를 이용한 일산화탄소 흡착제의 제조방법	10-1991-0007352	1991.05.07.	한국		

(4) 과제 중복성·차별성·연계방안

가. 타 연구과제와의 차별성 및 연계성

〈표 VI-26〉 차별성 및 연계방안 요약

사업명(부처)	과제명(과제기간)	주요내용	본 과제와의 차별점	연계추진방안
○ 융합연구단 사업 (과기정통부)	○ 철강산업 부생가스를 이용한 수소 rich 가스 생산 원천기술 개발 ○ 2015.01.01.~2020.1 2.31.	○ 부생가스(LDG) 내 CO 이용 수소전환 및 수소 및 잔류 CO, CO2 분리 정제	○ 원료차이: 부생가스 (CH4 미포함) ○ 공정차이: WGS+막분리기+PSA ○ PSA 별도 공정 개발 안함	○ PSA 공정 기술 활용 가능
○ 고효율 수소에너지 제조 저장 이용기술 개발사업 (교육과학기술부)	○ 수소충전소용 천연가스 수증기 개발 수소 제조공급 시스템 개발 ○ (2006.05.01~2009.0 3.31)	○ LNG 개질기 및 정제설비 국산화 개발	○ 원료동일: 메탄 ○ 공정차이: 스팀개질기 이용 수소 생성으로 생성된 가스 조성 차이 ○ 75% H2/20% CO2/3%CO/2%CH4 ○ 메탄 농도가 낮아 일반 흡착제 사용	○ PSA 공정 기술 활용가능
○ 신재생에너지핵 심기술개발 (산업통상자원부)	○ 수소가격 경쟁력 강화를 위한 2,000kg/day급 탄소배출 저감형 고효율 중대형 개질기 기술 개발 ○ (2020.05.01~2023.0 4.30)	○ LNG 개질기 및 정제설비 국산화 개발(2톤/일급)	○ 원료동일: 메탄 ○ 공정차이: 스팀개질기 이용 수소 생성으로 생성된 가스 조성 차이 ○ 75% H2/20% CO2/3%CO/2%CH4 ○ 메탄 농도가 낮아 일반 흡착제 사용 ○ PSA 별도 공정 개발 안함	○ PSA 공정 기술 활용가능
○ 신재생에너지핵 심기술개발 (산업통상자원부)	○ 부생가스 활용 대용량 고효율 수소분리막 연계 수소 분리정제 공정 개발 ○ (2021.05.01~2024.0 4.30)	○ 부생가스 기반 H2 생산 정제 막+PSA 혼성 기술 개발	○ 원료차이: 부생가스 (부생가스 내 CH4 농도 5% 미만) ○ 공정차이: 막분리기+PSA ○ 부생가스 내 타 가스 분리용 흡착제 개발: CO, CO2 등	○ CH4 흡착제 활용 성능 개선 연계
○ Net-zero 기술혁신개발사 업 (중기부)	○ 발전산업의 탄소중립을 위한 청록수소 생산 및 활용 시스템 개발 ○ (2022.7~2025.6)	○ 용융염 방식의 청록수소 생산기술 개발	○ 청록수소 방식: 용융염 ○ 생성물 차이: 부생성 탄화수소 없음 ○ 메탄농도 차이: ~50% ○ 유사 과제로 메탄 농도가 높은것은 비슷하나 불순물인 탄화수소가 없고 메탄 농도가 높아 2단 PSA 연구중	○ CH4 흡착제 활용 성능 개선 연계

나. 민간기술과 차별성 및 연계성

〈표 VI-27〉 민간기술의 한계점 및 개발기술과의 차별성·연계성

민간기술명	민간기관 (지원기관)	주요 연구내용	개발기술과의 차별성 및 연계방안
소형 수소추출기	현대로템	SMR(Steam Methane Reforming) 공정을 통하여 천연가스 또는 바이오가스로부터 99.995% 이상 고순도의 수소를 하루 640kg까지 생산 가능하며, 압축-개질-정제 시스템을 하나의 패키지로 구성하여 설비 크기 최소화 및 운반/포장/설치 용이성을 고려한 스킵 구조로 제공하는 고품질 최적화 수소 생산 설비	3.0톤/일 대용량 수소 생산 기술 개발 필요 - 소형규모 국산화 기술 벤치마킹 및 정보 확보 (협력사 기반) - 충주 수소충전소 운영현황 조사 및 기술 이슈분석 등
PSA 시제품 개발	퓨리텍	수소 PSA 시스템은 일정한 용량의 제품을 하나의 모듈로 확정하고, 필요로 하는 가스 용량에 따라 여러 개의 모듈을 연결해 하나의 시스템을 구축한 결과 사이즈를 기존 대비 30% 축소 가능	모듈화 컴팩트형 기술을 통해 도심지 진입이 가능한 공간활용성 모델 구축 고려
가스정제장치	아스페	석유, 화학 공정에서 발생하는 배가스 (CH₄, CO₂, CO, H₂)를 이용하여 수소를 분리 정제하는 PSA 공정 개발	설계, 성능보장 및 운전 시 안전을 확보하기 위한 추가 필요사항 반영, 수소 관련 운영 인허가 승인 등

3) (핵심기술 1-3) 대용량 청록수소 공급 실증설비 설계 및 제작

(1) 배경 및 필요성

가. 추진배경

- 친환경성/대용량 청록수소 공급시스템 표준모델 실증
 - 1MW 플라즈마 토치 출력을 활용한 3.0톤/일의 청록수소 공급 목표
 - 최적화된 플라즈마 반응기 및 고효율-저가형 촉매 화학공정의 실증설비 상세설계
 - 플라즈마-촉매-정제 연계공정 최적화를 통한 청록수소 생산설비 국산화 도출 목표
- 수소도시 조성 추진 및 탄소중립 실현 인프라 마련
 - 도심 중심의 대용량 청록수소 공급 인프라 마련은 부족한 상황
 - 공간활용성 및 안전성이 우수한 친환경 청정수소 공급 시스템 계획 대응

나. 필요성

○ 대용량 청록수소 생산의 원천기술 부재

- 현 시점의 그린수소 및 블루수소의 단점을 보완하고 국내 청청수소 공급 기술의 포트폴리오의 강화 필요
- 플라즈마 기반 CO₂-free 탄화수소 직접분해 기술을 이용한 Monolith사는 플라즈마 및 반응기의 연구개발을 통한 원천기술 확보로 대용량 수소사업을 진행 중
- 국내 청록수소 생산 기술은 실험실 수준의 소규모 연구개발만 진행 수준
- 플랜트 수준의 대용량 청록수소 생산 실증 기술개발을 통하여 실증 상용화 실적 확보 강화
- 대용량 실증설비 구축을 통한 원천기술, 플랜트 설계&제작 및 운영기술 확보로 수소 생산단가 절감 필요
- 실증설비의 표준화 및 사업화모델 개발을 통한 효과적인 해외시장 진출 기반 확보

(2) 핵심기술 개요

가. 핵심기술 개념

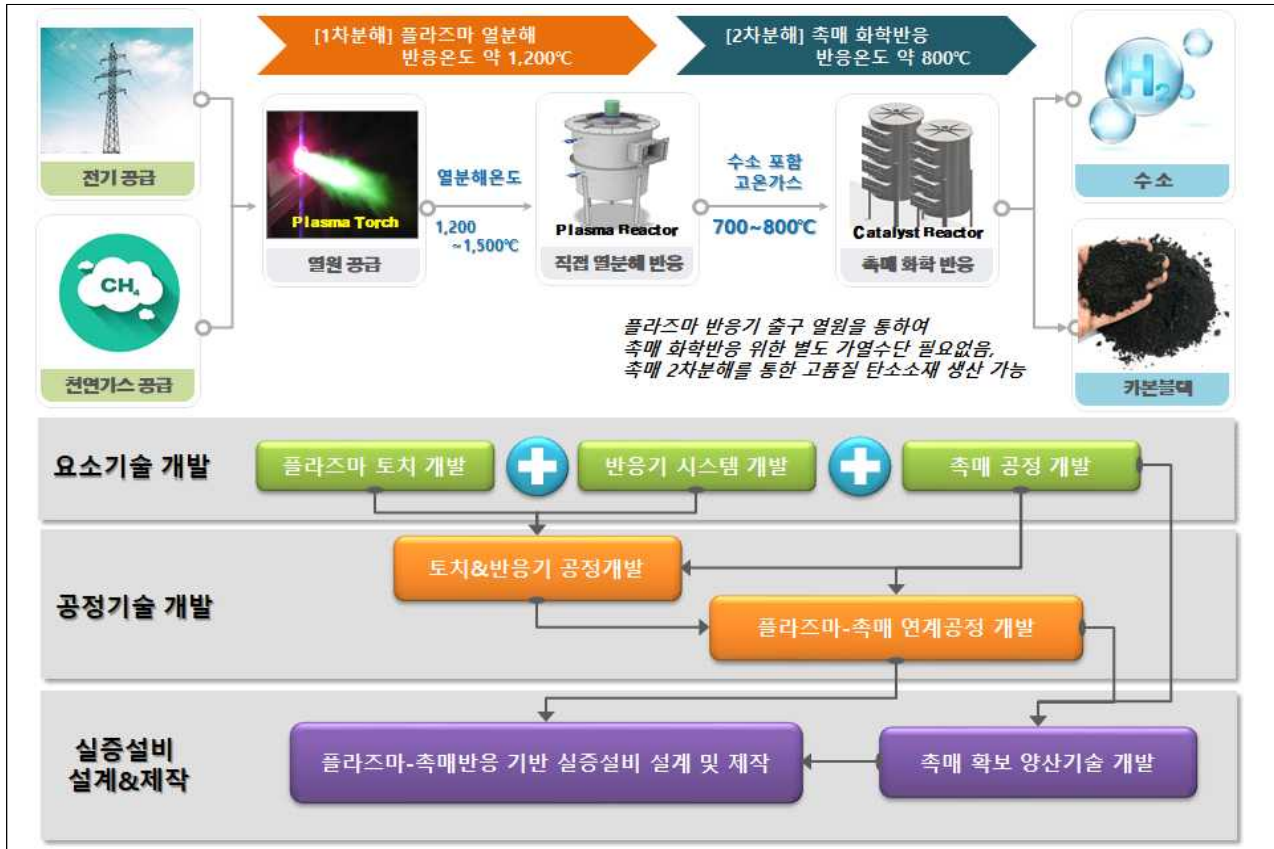
○ 1MW급 플라즈마 도치 및 반응기 실증설비 설계/제작

- Pilot 규모의 청록수소 공급시스템의 운영결과를 통하여 대형화 설계인자 확보
- 플라즈마 및 반응기 상세설계 도면을 통한 수소생산 기술 국산화 접근
- 단위공정별 시험운전 및 성능평가 결과 도출 및 수정/개선사항 보완
- 실증설비 제작절차서 수립 및 품질 확보를 통하여 표준모델 상용화 기반 마련

○ 고효율-저가형 촉매 화학공정 연계 및 대용량 촉매 반응기 설계/제작

- 1단계 촉매 화학반응 개발을 통한 대용량 촉매 및 반응기 설계인자 확보
- 플라즈마 유래가스의 촉매반응 공정의 연계를 통한 실증설비 성능목표 도달
- 운영 Factor의 다양성을 고려한 실증설비 수정/개선사항 보완
- 대용량 청록수소 생산을 위한 촉매 양산 기술 확보로 연속운영 기반 마련

- PSA 공급가스 전처리(불순물 제거) 설비 설계/제작
 - PSA 공정효율 극대화를 위한 미회수 고체탄소의 제거
 - 열분해 과정의 발생 가능한 잔류 탄화수소 회수 및 재공급 시스템



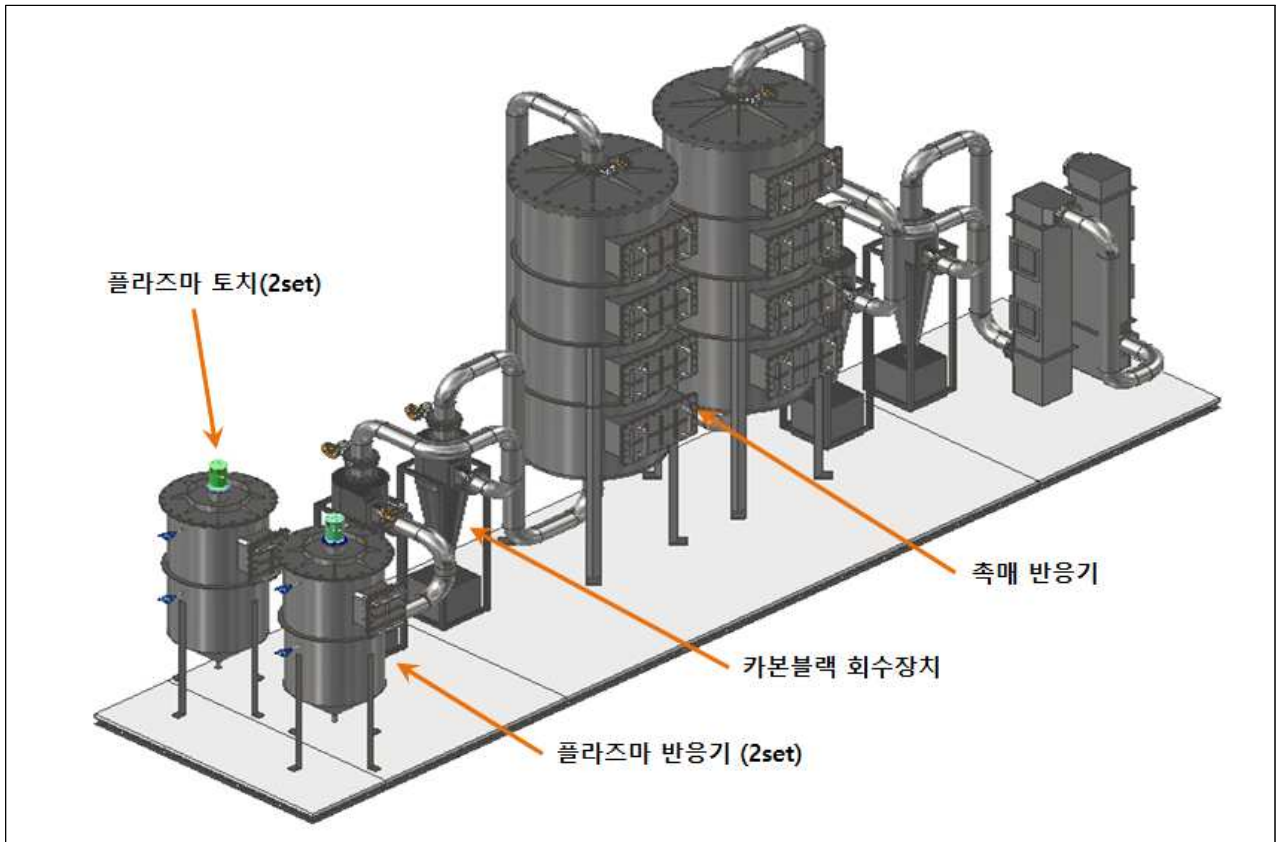
[그림 VI-18] 대용량 청록수소 공급 실증설비 제작&설계 개요

나. 범위

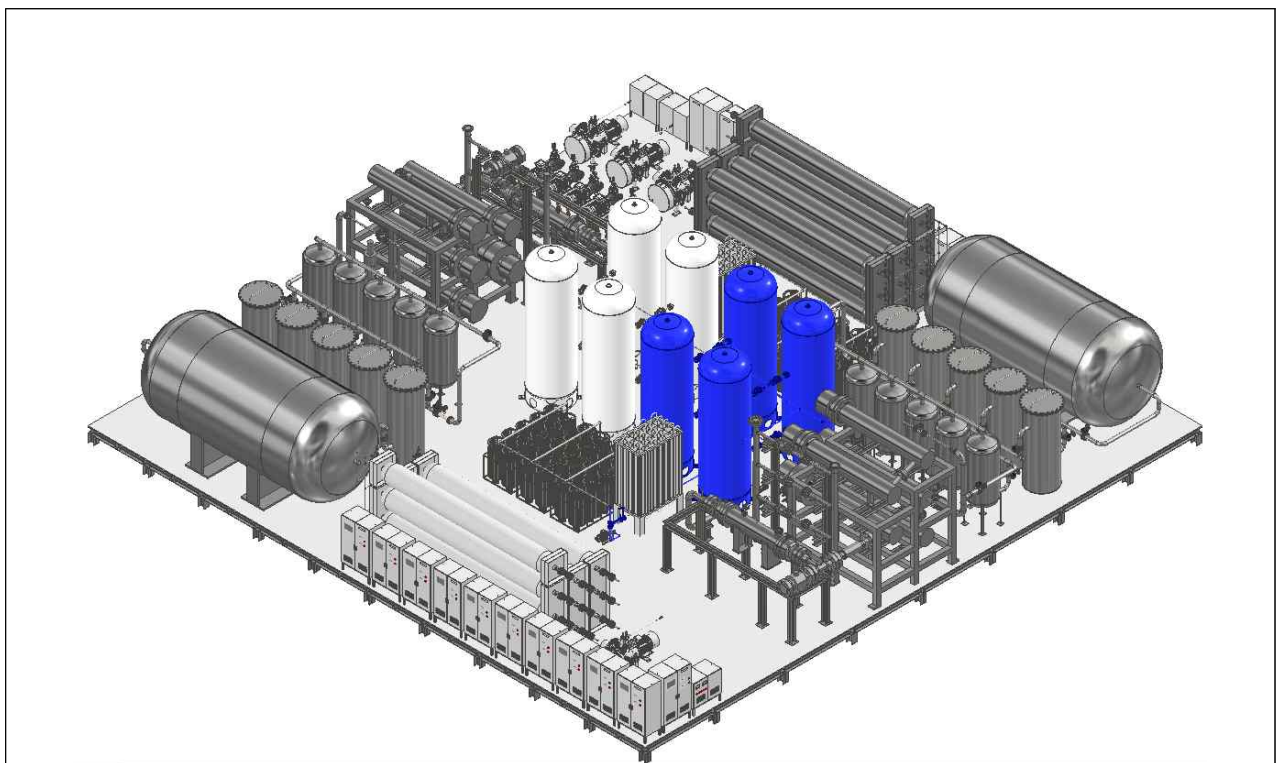
- (구성기술 1) 요소기술별 핵심인자 및 Scale-Up 설계인자 분석
- (구성기술 2) 대용량 청록수소 생산 핵심기술의 최적모델 설계
- (구성기술 3) 실증설비 제작 및 연계공정 시운전 평가

〈표 VI-28〉 핵심기술 1-3의 구성기술 범위

구성기술명	기술개발 정의 및 범위
요소기술별 핵심인자 및 Scale-Up 설계인자 분석	○ Scale-up 설계를 통한 1MW 플라즈마 토치 시스템 상세설계 도면화 도출 ○ Pilot 설비 운영결과를 기반으로 고효율 플라즈마 반응기 설계인자 확보
대용량 청록수소 생산 핵심기술의 최적모델 설계	○ 핵심기술의 도면화 및 제조기술 확보를 통한 국산화 기술 확보 ○ 플라즈마-촉매-정제 연계공정 개발을 통한 대용량 청록수소 생산모델 도출
실증설비 제작 및 연계공정 시운전 평가	○ 플라즈마-촉매반응-정제 공정의 대용량 실증설비 제작 및 성능목표 확인 ○ Compact 모듈화 제작을 통한 Plant 구축 기반 확보



[그림 VI-19] 대용량 청록수소 공급 실증설비 제작(안), 플라즈마-촉매반응 공정



[그림 VI-20] 대용량 청록수소 공급 실증설비 제작(안), 수소가스 전처리-PSA 공정

(3) 기술개발 목표

가. 핵심기술의 개발 목표

■ 정성적 목표

- Pilot-Test 결과 DATA 분석을 통한 운영 핵심인자 도출
- 요소기술 및 공정기술에 대한 도면화 및 표준모델 도출에 따른 국산화 확보
- 1MW 실증규모의 플라즈마 및 촉매-정제 공정 설계/제작 (현장조건 반영 제작)

■ 정량적 목표

- 1MW 플라즈마 토치 용량 확보
- 플라즈마-촉매 연계공정을 통한 천연가스 전환율 80% 이상 검증
- 일일 수소 생산량 3.0톤 확보 및 생산량 증대방안 도출

〈표 VI-29〉 핵심기술 정량적 성과목표

단계별 목표(정성적)						
1단계			2단계			
○ Pilot 규모의 플라즈마-반응기 효율 확보 ○ 고효율-저가형 촉매 개발 및 연계공정 검토 ○ 촉매 양산기술 확보 ○ PSA 공정을 위한 수소가스 전처리 공정			○ (4차년도) 실증설비 상세설계 도면화 및 제작 ○ (5차년도) 현장 인프라 및 Plant 구축 ○ (5차년도) 실증설비 최적운전 도출 및 성능목표 확인			
정량적 성과목표						
성과지표명	1단계			2단계		계
	1차년	2차년	3차년	4차년	5차년	
플라즈마 출력(kW)	30	100	300	도면화	1,000	1,000
천연가스(메탄) 전환율(%)	-	50	60	-	80	80
연속가동 운전증명(hr)	-	-	72 (300kW 플라즈마 단독공정)	-	168 (중점1 Plant 구축 연계목표)	168
1시간 평균 탄화수소 분해반응속도 (mmol/min·g _{cat} , 800°C이하)	6	7	8	촉매 양산 기술 확보	8	8
촉매소모량 대비 탄소 생산량 (wt%)	500	600	800	-	800	800
미회수 카본블랙 회수 (PSA 공급가스 내 농도)	프로그램 해석	20mg/Nm ³	15mg/Nm ³	12mg/Nm ³	10mg/Nm ³	10mg/Nm ³
잔류 탄화수소 농도	후보군 내 최적안 선정	100ppm	80ppm	60ppm	50ppm	50ppm
PSA 공정 수소 순도	-	-	-	99.97%	99.97%	99.97%
PSA 공정 수소 회수율	-	-	-	80.0%	85.0%	85.0%
플라즈마-촉매-정제 공정 수소 생산량	-	0.05톤/일 (30kW급 플라즈마와 연계)	0.06톤/일 이상 (30kW급 플라즈마와 연계)	-	3.0톤/일	3.0톤/일

■ 성능 목표

○ 국외 모노리스 사 대비 차별성 및 핵심기술 확보

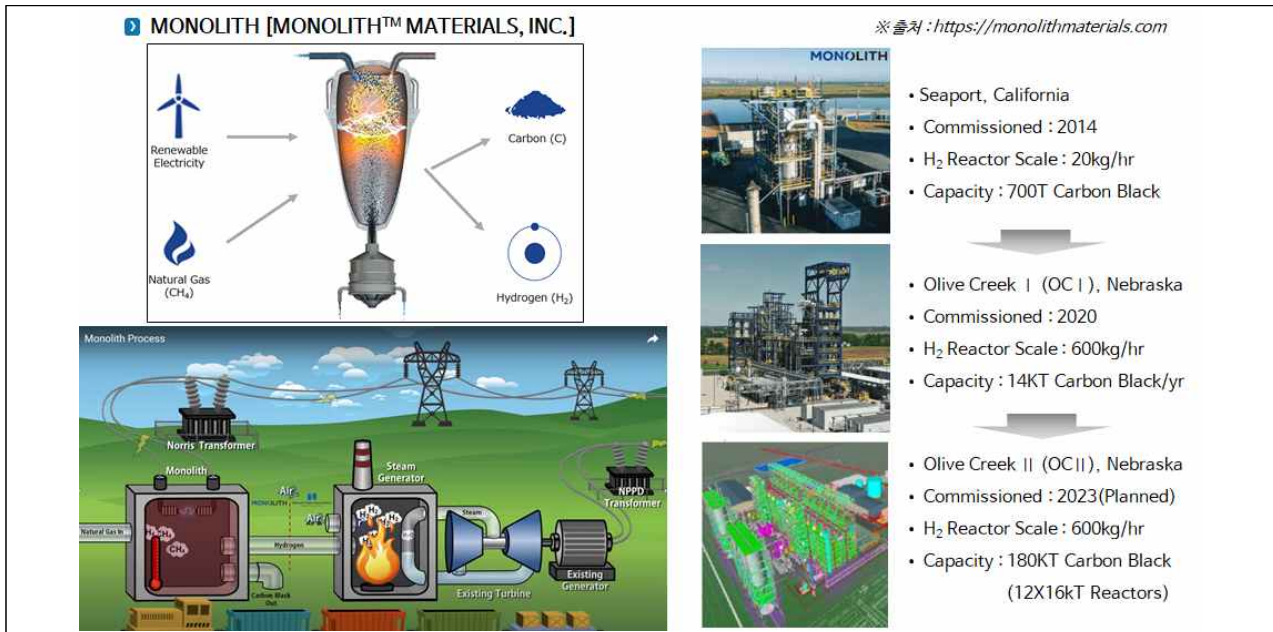
〈표 VI-30〉 핵심기술 개발목표

핵심기술명	성능지표	현재 스펙	개발 목표 스펙	
			1단계	2단계
대용량 청록수소 공급 실증설비 설계 및 제작	플라즈마 출력	8MW (전극 내구성 문제)	300kW	1MW
	천연가스(메탄) 전환율	정보없음	60%	80%
	연속가동 운전증명	정보없음	72hr	168hr
	1시간 평균 탄화수소 분해반응속도 (800°C이하)	5-6 mmol/min·g _{cat}	8 mmol/min·g _{cat}	8 mmol/min·g _{cat}
	촉매소모량 대비 탄소 생산량	~ 500wt%	800wt%	800wt% 이상
	미화수 카본블랙 회수 (PSA 공급가스 내 농도)	싸이크론&밸빅터 Dust 처리설비 (소각 10~20mg/Nm ³)	15mg/Nm ³	10mg/Nm ³
	잔류 탄화수소 농도	촉매 연구개발 단계 (대형화 실증 부재)	80ppm	50ppm
	PSA 공정 수소 순도	수소 생산 640kg/일 대비 99.995%	SPEC. 선정	99.97% 이상
	PSA 공정 수소 회수율	순도 99.995% 기준 80% 수준	SPEC. 선정	85.0% 이상
	플라즈마-촉매-정제 공정 수소 생산량	1MW 기준 약 2.0톤/일	천연가스 전환율 60% 이상	1MW 기준 3.0톤/일

나. 목표 설정 근거

■ 국외 사업수행 실적을 토대로 설정 (MONOLITH 사)

- 고품질 카본블랙 회수 메인공정 (저순도 수소 생산 후 스팀발전, 카본블랙 판매)
- OC1 설비 플라즈마 용량 8MW (수소 생산용량 5,000톤/년, 카본블랙 14,000톤/년)
- 플라즈마 토치 / 반응기 설계 / 카본블랙 생산공정 등 특허 다수 보유



[그림 VI-21] monolith사의 천연가스 열분해 공정 및 용량

(4) 과제 중복성·차별성·연계방안

가. 타 연구과제와의 차별성 및 연계성

〈표 VI-31〉 차별성 및 연계방안 요약

사업명 (부처)	과제명 (과제기간)	주요내용	본 과제와의 차별점	연계 추진방안
연구개발 특구육성(R&D) (과학기술 정보통신부)	플라즈마-촉매 융합반응 개질로 생산된 합성가스로부터 수소생산 패키지 개발 및 실증 (2019.07.15. ~ 2020.07.14)	○ 저급자원(매립장가스, 바이오매스, 폐기물, 한계 가스전등)을 “플라즈마-촉매 융합반응 개질시스템”로부터 합성가스 제조 ○ 수소생산 시제품 모듈제작(SKID Module)	○ CO₂ 건식 개질반응을 통한 합성가스 발전 공정 ○ 합성가스를 수소로 정제하여 일체형 소형수소스테이션으로 패키지 개발	○ 촉매를 단독 이용한 건식 개질 공정은 탄소잡작의 문제로 인해 공정의 운전조건이 제한적 ○ 플라즈마 와 촉매 연계공정을 통하여 수소와 고체탄소 회수 고도화기술 확보 ○ 소형 모듈화 제작을 통한 수출모델 개발
신재생에너지기 술개발사업 (지식경제부)	폐기물의 플라즈마 열분해 가스화에 의한 수소화수 기술 개발 (2009.06.01 ~ 2011.09.30)	○ 파일럿 규모의 수소화수 시설을 건설하고 여기서 회수되는 수소를 사용하여 연료전지 발전까지 실증 ○ 생활폐기물 5톤/일의 플라즈마 처리 후 99.999+% 수소 60Nm³/h 회수 - 50kW 연료전지 발전	○ 폐기물의 플라즈마 가스화를 통한 합성가스 생산 ○ 소형급(100kW) 플라즈마 토치 개발 ○ 플라즈마 토치의 내구성 문제	○ 1MW급 대용량 플라즈마 토치와 반응기 최적 공정 개발 및 실증 ○ 플라즈마 운영 기반 수소 분리/정제 연계 공정 분석 및 운영결과 참조 ○ 1단계 Pilot 후 Scale-up 설계인자 도출에 따른 평가방법 비교검토
개인기초연구 (과학기술 정보통신부)	메탄 열화학 분해 기반 청록 수소 생산 모듈 시스템 개발 (2022-03-01 ~ 2027-02-28)	○ 고 엔트로피 합금 촉매에 사용될 다양한 원소 후보 (예, Ni, Co, Fe, C 등) 연구 ○ 메탄 100% 연소를 이한 차세대 화염 공정 제작	○ LAB 규모의 소형설비 DATA를 통한 상용설비 대안 제시	○ 열원 공급방식에 따른 차이점 비교분석을 통해 경제성 확보 청록수소 생산모델 도출

나. 민간기술과 차별성

〈표 VI-32〉 민간기술의 한계점 및 개발기술과의 차별성·연계성

민간기술명	민간기관 (지원기관)	주요 연구내용	개발기술과의 차별성 및 연계방안
방사성폐기물 플라즈마 용융 Mock-up 설비	원전해체연구소 (진행중)	○ 200KW 플라즈마 토치 개발 ○ 모의 방폐물 2000℃ 용융	○ 준 상용급 플라즈마 시스템으로 플라즈마 효율과 수명에 대한 성능지표 비교분석
플라즈마 토치	비츠로넥스텍	○ 대용량 토치 기술 개발 ○ 토치 용융로 시스템 개발	○ 카본 발생-회수 기능을 포함하는 반응 시스템에 활용하는 토치 기술과 연계 개발 추진
카본블랙 생산	모노리스	○ 대용량 토치 기술 개발 ○ 대용량 반응기 기술 개발 ○ 고품질 카본블랙 회수기술 ○ 저순소 수소 생산-발전 기술	○ 고효율 반응기기술 관련 다수 특허 보유 및 분석 ○ 국산화 기술개발을 바탕으로 스케일업 설계/제조기술 확보 ○ OC1 모델 및 OC2(계획) 모델에 대한 수소&카본 생산량에 대한 경제성 분석을 통해 본사업 모델 비교검토 ○ 플라즈마 토치 내구성 문제를 보요중인 모노리스 대비 고수명-고효율 플라즈마 토치 개발 ○ Plant 구축 현장(도심, 산업지역)을 고려한 맞춤형 실증설비 제작

2절 [중점분야2] 고체탄소 포집 및 고부가가치 전환 기술개발

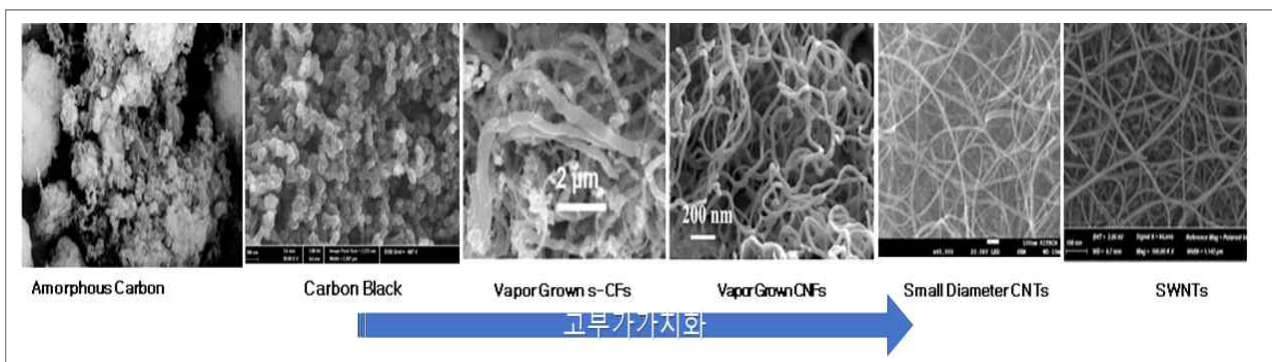
1. 추진배경 및 필요성

■ 수소생산 부산물 고체탄소의 고부가가치 전환 필요성

- 현재 수소를 생산하는 비용이 약 \$15/kg로 추정되고 있어 미국 에너지부가 설정한 \$2/kg에 현저히 높은 수준이며, 천연가스 개질을 통한 수소비용을 낮출 수 있으나, 함께 배출되는 온실가스(CO₂)의 활용 없이는 탄소중립을 이룰 수 없음
- 수소생산의 경제성 및 온실가스 배출을 최소화할 수 있는 방안으로 천연가스 열분해 방법이 있음
- 수소생산과 이와 함께 생성되는 고체탄소 부산물의 가치에 의해 경제성 있는 수소 생산이 가능한 것으로 알려져 있으나, 국내에서는 소규모 연구단계를 통해서 이루어지고 있는 실정
- 대규모의 수소 생산시 발생하는 고체탄소는 수소 생산량의 3배 수준으로 이 고체탄소의 활용이 곧 수소의 경제성 확보와 직결되어 있으므로, 부산물로 생성되는 고체탄소의 고부가가치 전환 기술의 개발이 반드시 필요

■ 메탄의 열분해를 생성되는 탄소물질은 비정질탄소, 카본블랙, 탄소나노섬유, 탄소나노튜브 등이 있으며, 형태에 따라 응용분야 및 그 가격이 달라짐

- 카본블랙은 합성된 특성에 따라 응용분야가 달라지며, 톤당 가격이 1,000~4,000달러로 차이가 있음
- 탄소나노튜브 또한 특성에 따라 응용분야가 달라지며, 범용의 경우는 톤당 가격이 30,000~70,000달러, 배터리용은 80,000~200,000달러의 높은 가격으로 형성



출처 : 탄소산업진흥원 발표자료

[그림 VI-22] 열분해에 의해 생성되는 고체탄소 종류 및 가치변화

- 본 과제에서 생산되는 고체탄소는 플라즈마에 의한 메탄열분해에 의해 생성되는 카본블랙과 촉매열분해를 통해 합성되는 탄소나노튜브가 혼합된 형태로 존재함으로써, 카본블랙과 탄소나노튜브의 사이의 부가가치가 있을 것으로 예상
- 메탄 분해로 생성된 탄소나노튜브와 탄소 블랙의 혼합물은 탄소나노튜브와 탄소 블랙의 비율, 제품 순도 및 잠재적 응용 분야에 따라 중간 정도의 경제적 가치를 가질 수 있음
- 메탄 열분해에 의해 부산물로 생성되는 고체탄소는 반응 조건, 사용된 촉매 및 반응기 설계에 따라, 저급의 비정질카본 및 결정질 카본블랙 등이 생성되며, 아래와 같이 사용용도와 가치가 다름
- 후처리 공정을 통해 고체탄소의 성능향상을 통한 고부가가치화 전환 및 이를 대량 활용 분야에 대한 실증이 필요

〈표 VI-33〉 카본종류별 사용용도 및 가격

카본종류	열분해 카본	일반카본블랙	혼합형태 (카본나노튜브와 카본블랙)	특수카본블랙 (배터리용)
사용용도	용광로 철환원	타이어, 고무용	전도성 플라스틱	배터리, 촉매담지
가격(\$/kg)	0.3~0.7	1~2	3~6	>10
비고		monolith사	본과제 목표	-

- 메탄의 플라즈마 열분해에 의해 생성되는 고체탄소는 열분해 온도 및 플라즈마에서 분해 및 재결합되는 위치에 따라 저품질 또는 범용의 카본블랙이 혼합되어 형성

■ 고체탄소 활용분야 중 고부가가치 분야로 전도성 플라스틱 시장으로 10.9%의 고성장 분야임

- 고체탄소의 대규모 고부가가치 응용분야로 전도성 플라스틱, 배터리 도전제 등의 시장이 있으며, 그 중 전 세계 전도성 플라스틱 시장은 2021년 110억불에서 연평균 성장률 10.9%로 성장하여 2031년 306억 달러에 이를 것으로 전망
- 모노리스에서 생산하고 있는 카본블랙은 타이어 및 고무 첨가제용으로 사용되는 수준임. 모노리스가 생산된 카본블랙을 판매하기 위한 기존의 타이어 업체 등과의 협의를 지속적으로 하고 있음

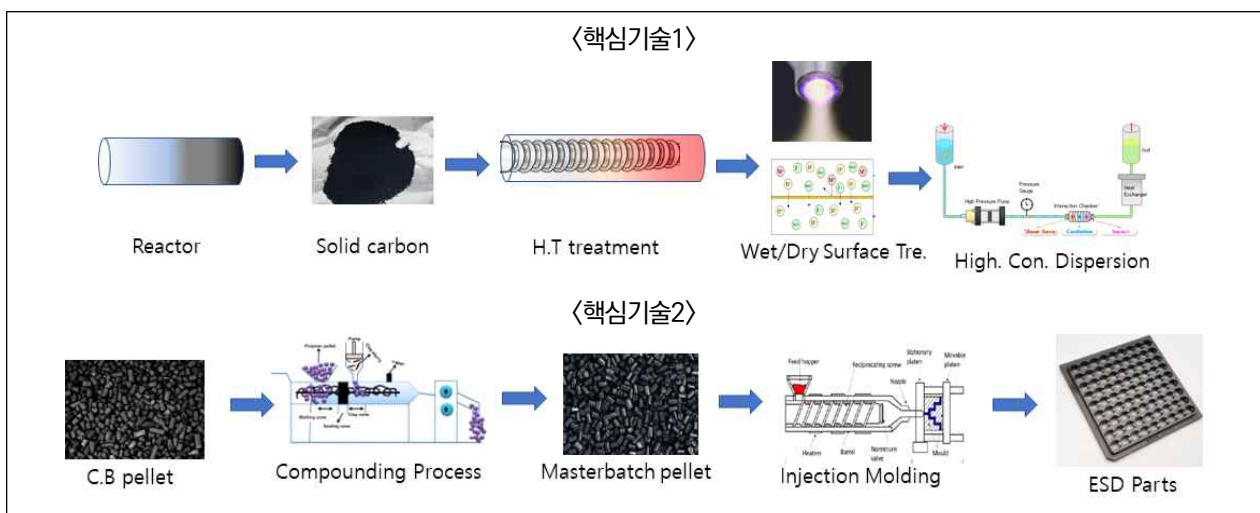
2. 사업정의 및 범위

■ 사업정의

- 청록수소 경제성 확보를 위한 수소와 동시 생산되는 고체탄소 포집 고부가가치 전환 기술 개발 및 실증
 - (핵심기술 2-1) 고체탄소 고부가가치화 전환 기술 개발 및 실증
 - (핵심기술 2-2) 고체탄소 적용 대용량 적용 응용부품 개발 및 실증

■ 사업범위

- (핵심기술 2-1) 열분해 공정에 의해 제조된 고체탄소의 고부가가치 전환을 위한 고체탄소의 고성능화를 위한 “고체탄소의 네트워크 구조 향상 기술”, “고결정성 연속 열처리기술”과 이를 바탕으로 한 고체탄소 고성능화 실증장비 제작을 포함
 - 고체탄소의 전기전도성 고체탄소로의 고부가가치 전환을 위한 고성능화는 매트릭스 내에서 전기전도성 향상을 위한 고체탄소 간의 네트워크 형상할 수 있는 구조 향상 연속 기술과 자체 전기전도도 향상을 위한 연속 고결정성화 기술 개발 및 이를 바탕으로한 연속 공정이 가능한 고성능화 장비 제작 및 실증하고자 함
- (핵심기술 2-2) 고체탄소소재의 대규모 “고부가가치 응용 실증”은 전도성 마스터배치 컴파운딩 및 “전도성 복합재 응용 부품 제조 및 실증”을 포함
 - 고부가가치 및 대규모로 응용할 수 있는 고체탄소 40%이상 고함량의 전도성 마스터배치의 제조 기술 및 고체탄소의 경제성 확보를 위한 전도성 마스터배치로부터 실제 전도성 복합재 부품 제품 제조 및 실증 추진



[그림 VI-23] 고체탄소 포집 및 고부가가치 전환 기술개발 개념도

3. 국내외 환경분석

1) 산업·시장 동향

(1) 카본블랙 시장

■ 전 세계적의 카본블랙 시장은 2022년 약 178 억 달러(생산량 1,380 만톤)에서 2027년 약 234 억 달러(생산량 1,600 만톤)으로 연간 5.5%(생산량 3.3%)씩 증가 예상

○ 범용카본블랙은 각국에서 모두 생산이 가능하며, 카본블랙은 그 제법에 따라 컨택트블랙(contact black), 퍼니스 블랙(furnace black), 써말블랙(thermal black), 램프블랙(lamp black) 등이 있음

○ 카본블랙의 응용분야에서 가장 큰 비중을 차지하는 분야는 타이어 및 고무산업으로 약 81% 해당

※ 카본블랙의 생산은 대부분 퍼니스 블랙 공정에 의해 이루어지며, 평균가격은 톤당 약 1,260불

○ 대부분의 업체가 퍼니스 블랙(furnace black)을 생산하고 있으며, Denka 등의 업체에서는 아세틸렌 공법으로 고순도의 스페셜티 블랙을 생산

○ 제조 원료에 따라 가스블랙, 오일 퍼니스 블랙, 나프탈렌 블랙, 아세틸렌 블랙, 송연, 유연블랙, 동물성 블랙, 식물성 블랙 등이 있음

	램프블랙	채널블랙	써말블랙	아세틸렌블랙	퍼니스블랙
원료	원유	천연가스	천연가스	아세틸렌가스	원유
공정	불 완전연소	불 완전연소	열분해	열분해(발열)	열분해
특성		고 휘발분 저 회분	저 구조	고 순도 고 구조	생산성
입자경(μm)	50~100	10~27	150~500	30~50	17~70
표면적(cm ² /g)	20~95	110~1125	6~15	60~70	20~200
회분함량(%)	~0.16	~0.1	0.02~0.38	0	0.1~1.0
유황함량(%)	-	~0.1	~0.4	0.02	0.05~1.5

[그림 VI-24] 카본블랙 종류 및 특성

■ 카본블랙 시장 규모가 성장 예상됨에 따라, 선두그룹은 지속적인 투자로 설비 신규 확장 및 합병을 통한 생산규모 확대 추진

○ Cabot Corporation은 Tokai Carbon Group을 인수하여 중국 톈진에 있는 카본 블랙 제조 시설을 구입

○ Orion Engineered Carbons는 이탈리아에 특수 카본 블랙 제조를 위한 새로운 생산 라인

연간 2.5만톤 개설 및 미국의 카본 블랙 생산 능력을 2022년 중반까지 연간 약 30,000톤 증가 추진, 2021년에는 고성능 특수 카본 블랙 생산을 위해 중국에 두 번째 공장 건설 추진

- PCBL은 타밀나두에 공장확장을 통한 연산 147만톤의 카본블랙 생산 캐퍼 확보 추진. 2021년에는 구자라트에 3.2만톤 용량 확장 및 인도에서는 60만톤 증가시켰음
- Tokai Carbon은 캐나다에서 연산 0.9만톤 썬덜 카본 블랙 공장을 확장하여, Thermax 중열 카본 블랙을 생산

■ 전기전도성이 높은 특수 카본블랙의 시장은 24억 달러(생산량 120 만톤)이며, 2025년 28.5억 달러(생산량 180 만톤)으로 약 연간 4.5%(생산량 4.1%) 씩 성장할 것으로 보고 있음

- 특수카본블랙은 미국(Cabot), 일본(미쓰비시화학-Ketjen black, Denka그룹- Denka black), 독일(Degussa), 한국(OCI-CCC인수), 중국(Cabot중국공장) 등에서 주로 생산
- 국내에서는 플라스틱, 잉크 용도의 저부가가치 특수카본블랙은 일부 생산되고 있으나 도전재 등의 고부가가치 특수카본블랙의 생산이 전무하여 수입에 의존
- 특수카본블랙은 범용카본블랙과 다르게 ASTM규격이 없어 적용되는 같은 특수 카본블랙이라 하더라도 제조기업마다 물성이 다름
- 특수 카본블랙이 사용되는 분야는 전도성 플라스틱 첨가제이며, 전기자동차 및 신재생에너지 시장의 리튬배터리 사용의 증가로 인한 사용량이 크게 증가할 것으로 예상

※ 특수 카본블랙의 평균가격은 톤당 2,020달러이며, 배터리용으로 사용되는 특수 카본블랙 약 4,020달러 수준

〈표 VI-34〉 응용시장별 특수 카본블랙 시장 규모

(단위 : 백만 달러)

Application	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	CAGR (2019-2027)
Plastics	1,419.9	1,478.5	1,540.9	1,606.7	1,676.3	1,749.4	1,825.9	1,905.6	1,988.3	2,074.1	4.3%
- Conductive_ & ESD	287.4	298.6	310.5	323.0	336.3	350.2	364.8	380.0	395.6	411.8	4.1%
- Wires_ & Cables	923.7	963.2	1,005.5	1,050.1	1,097.5	1,147.5	1,200.0	1,254.8	1,311.8	1,371.1	4.5%
- Others	208.7	221.9	230.3	239.2	248.3	257.7	267.3	277.4	287.6	298.1	3.8%
Battery_Electrodes	365.3	382.8	401.6	421.5	442.7	465.2	488.9	514.2	541.2	570.1	5.1%
- Li-On Battery Electrodes	156.9	164.6	172.9	181.7	191.0	200.9	211.4	222.6	234.5	247.2	5.2%
- Others	208.3	218.2	228.7	239.8	251.7	264.3	277.5	291.7	306.7	322.9	5.0%
Paints_ & Coatings	88.3	92.4	96.8	101.5	106.4	111.7	117.2	123.0	129.0	135.2	4.9%
- Inks_ & Toners	153.6	160.3	167.4	175.0	183.0	191.5	200.5	210.0	219.9	230.1	4.6%
- Others	62.7	65.1	67.7	70.4	73.2	76.2	79.4	82.7	86.2	90.0	4.1%
Total	2,089.8	2,179.2	2,274.4	2,375.0	2,481.7	2,593.9	2,711.8	2,835.5	2,964.6	3,099.5	4.5%

출처 : Special carbon black market, 2021

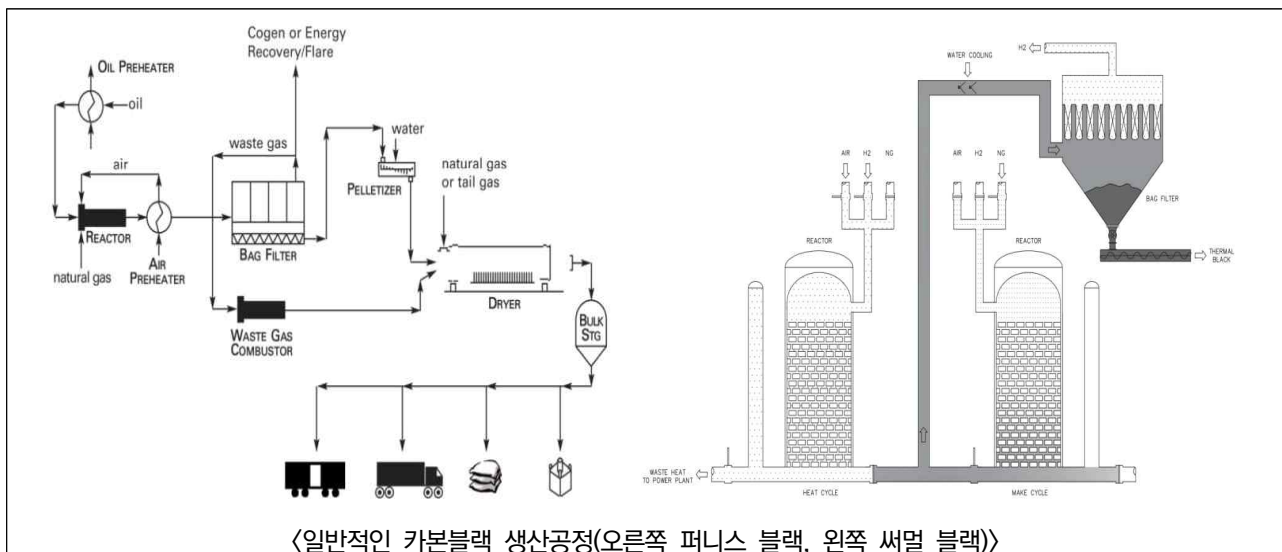
- 특수 카본블랙 시장은 전기자동차 및 신재생에너지 산업에서 이차전지의 매우 높은 성장성으로 인한 고성능 전도성 탄소소재의 필요성에 의해 시장 규모가 점차 확대

■ 카본블랙 생산은 오일 및 탄화가스를 불완전 또는 열분해를 통해 생산하고 있으며, 선진국 중심으로 신규 생산시설에 대한 CO2 발생 절감을 위한 규제 강화

※ 카본블랙 1ton 생산시 2.6t의 CO2 발생하며, 카본블랙 1280만톤 생산시 3,340만톤의 CO2 발생

○ 카본블랙의 생산방식은 크게 퍼니스 블랙 공정과 써멀 블랙 공정으로 나뉨

- 퍼니스 블랙 공정은 탄소가 포함된 오일 및 탄화가스를 연료로 사용, 밀폐된 공간에서 불완전 연소로 카본블랙을 생산하는 것으로, 전세계의 생산되는 카본블랙의 80%를 이 방식을 통해 이루어지고 있음
- 써멀블랙은 천연가스를 산화시켜 밀폐된 반응기를 고온으로 올린 후, 여기에 천연가스를 공급하여 열분해하는 방식으로 카본블랙과 수소의 동시 생산 중



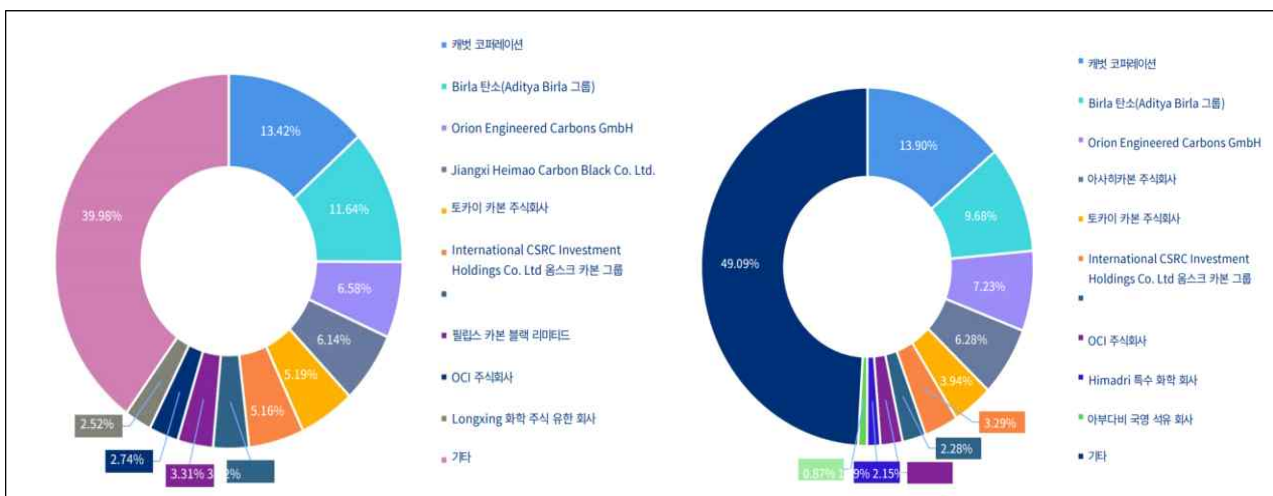
[그림 VI-25] 카본블랙 생산 공정도

■ 카본블랙 글로벌 생산업체의 탄소중립 실현을 위한 노력에 동참

- Carbot은 텐진의 카본블랙 생산공정에서 발생한 여열을 회수·재활용을 통해 탄소 배출을 약 22만8천 톤 가량 감소
- Birla carbon은 순환성 및 수명 주기 평가(LCA) 접근 방식을 통해 2050년까지 탄소 배출량을 넷제로(net-zero) 달성 추진
- Orion eng. Carbon은 2022년부터 유럽 생산 카본 블랙에 대해 이산화탄소 할증료 시행
- Tokai Carbon Group은 2030년 이전 CO2 배출량을 2018 대비 25% 줄이고 2050년 탄소중립을 달성 추진을 위해 공정효율화, 신재생에너지 적용, 새로운 대체 원료 공급 노력
- OCI는 카본블랙 공정에서 발생하는 폐열의 회수 및 재사용을 통한 에너지 절감 등 추진

■ 국내의 카본블랙 시장은 국내 기업 OCI를 비롯한 국외 우수 카본블랙 기업이 진출하여 타이어 및 고무용 카본블랙에 주력

- 국내는 카본블랙 생산의 6위에 해당하며, OCI, Birla Carbon, Orion Eng, Tokai carbon 등이 카본블랙을 생산하
 - 2021년 SK도 Monolith의 카본블랙과 수소 동시생산 기술에 투자, 국내에 생산계획 수립
- 국내의 카본블랙은 타이어 및 고무제품용이며, 국내 자동차 생산량의 증가 예상에 따른 카본 블랙의 수요도 증가 예상
 - 상대적으로 고부가가치인 전기전도성을 갖는 특수 카본블랙은 배터리 및 전도성플라스틱, 잉크/토너 등의 수요가 증가하고 있으나, 전량 수입에 의존하는 것으로 보임



[그림 VI-26] 카본블랙 제조 기업 및 특수카본블랙 제조기업 시장 점유율

(2) 탄소나노튜브 분야

- 탄소나노튜브 시장은 2020년 31억달러(생산량 2,800톤)에서 2025년 70억달러(12,700톤)로, 연평균 17.5%(생산량 35.1%) 성장할 것으로 예상되며 배터리용 및 헬스케어용에서 크게 성장할 것으로 보임

〈표 VI-35〉 응용분야별 탄소나노튜브 시장 규모

(단위 : 백만불, %)

End-user_Industry	2016	2017	2018	2019	2020	2025	CAGR
Electronics	492.46	578.99	682.97	809.93	870.76	1,616.47	13.17
Aerospace_and_Defense	232.06	273.11	322.06	380.63	373.92	521.38	6.87
Automotive	160.69	190.26	225.5	267.48	283.51	453.29	9.84
Textiles	96.04	112.44	131.93	155.2	169.95	329.5	14.16
Healthcare	175.38	206.21	242.9	286.66	361.77	1,415.69	31.37
Energy	440.77	522.15	620.08	738.53	843.33	2,226.33	21.43
Other_Industries	148.38	171.93	199.56	232.1	255.73	501.24	14.41
Total	1,745.78	2,055.09	2,425.00	2,870.53	3,158.97	7,063.90	17.46

출처 : Special carbon black market, 2021

- 국내 탄소나노튜브 시장은 2021년 423 톤의 시장규모를 나타내며, 연평균 25.6% 성장률을 보이며, 2026년 1,325톤의 시장규모를 나타낼 것으로 전망
- 금액기준으로 보았을 때, 우리나라의 2021년 시장규모는 580만 달러의 시장이며, 2026년 104백만 달러의 시장을 나타낼 것으로 기대(연평균 15.80%)
- 아시아 태평양 시장을 중심으로 탄소나노튜브 시장이 빠른 성장을 나타낼 것으로 기대되며, 우리나라의 경우 중국, 일본 다음의 큰 규모의 시장을 형성

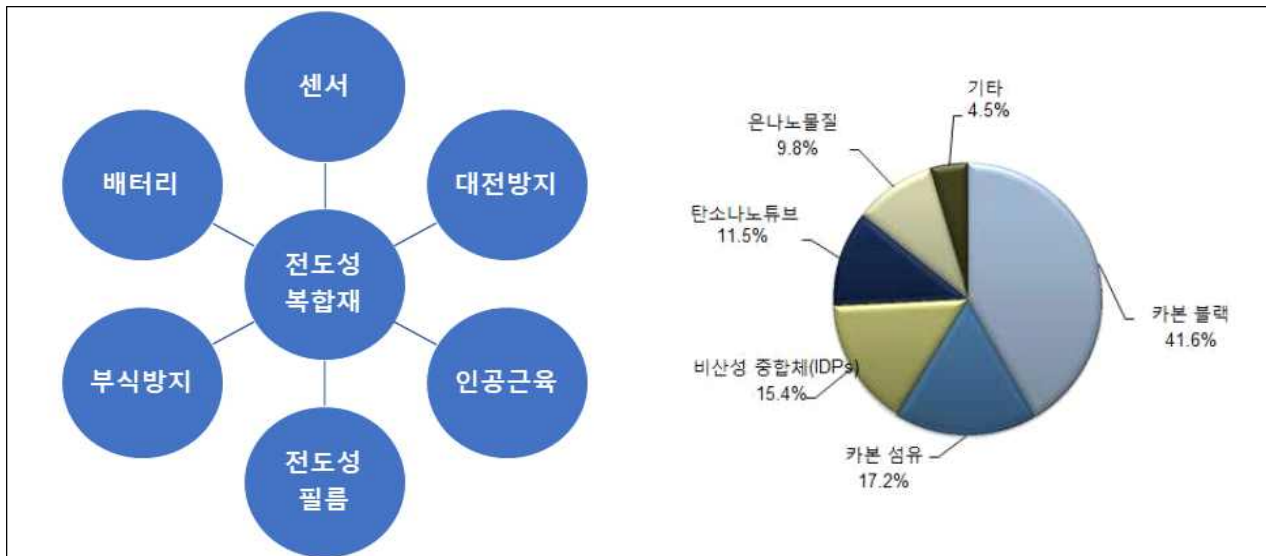


출처 : Secondary Literature, Expert Interviews, and MarketsandMarkets Analysis, 2021

[그림 VI-27] 탄소나노튜브 국내 시장

(3) 전기전도성 복합재 분야

- 전도성 복합재 시장은 2012년 20억달러에서 2022년 35억달러로, 연평균 5.49% 성장할 것으로 예상



[그림 VI-28] 전도성 복합재 응용시장 및 전도성 필러 점유율



출처 : Frost & Sullivan, Global Conductive Polymers Market, Forecast to 2022, 2016

[그림 VI-29] 전도성 복합재 시장

2) 기술개발 동향

(1) 해외 기술 동향

■ 수소 생산시 경제성 확보를 위해 청록수소 및 고부가가치 부산물 동시생산 연구 활발히 진행

- 2022년 11월 핀란드 기업 바르질라(Warsila)는 천연가스 및 바이오가스로부터 수소와 고체탄소 생산을 위한 메탄의 열촉매 분해기술(TCD) 개발 계약을 체결
 - 선박에서의 LNG를 활용한 수소 및 고급 고체탄소(카본블랙 및 탄소나노튜브) 생산을 통한 수소의 경제성 확보 추진
- 2022년 8월 Aurora Hydrogen은 효율적 저탄소수소생산을 위하여 천연가스의 마이크로 열분해를 연구중이며, 이 열분해를 통하여 천연가스로부터 수소와 고체탄소가 생성됨. 기존의 수전해 수소 생산보다 80% 절감된 전력 사용 가능
- 2022년 7월 호주의 Hazer Group은 메탄 촉매 열분해 기술을 이용하여 수소와 고체 인조흑연을 생산하기 위한 프로젝트 진행 중이며, 이 프로젝트를 통해 연간 2,500톤 규모의 수소 생산 예상. 촉매로는 철광석 공정 촉매를 사용
- 2022년 3월 사우디아라비아의 Aramco는 Rice 대학의 Carbon Hub에 합류하였으며, Carbon Hub에서는 탄화수소로부터 깨끗한 수소에너지와 고급탄소소재를 동시에 효율적으로 생산하는 연구 진행중임
- 2022년 2월 캐나다의 Ekona Power는 과 기계 에너지의 펄스 주입을 통한 불안정한 흐름을 통한 탄소축적을 제거하는 펄스 메탄 열분해(PMP) 기술개발 진행
- 2021년 12월 Monolith는 플라즈마를 이용한 메탄열분해 기술을 통한 이산화탄소 없이 수소와 고체탄소(카본블랙)을 생산 기술을 개발하였으며, 최근 SK와 공동 벤처를 통해 한국에도 수소 및 카본블랙 공장 설립을 추진
- 2021년 10월 ATCO는 British Columbia 대학과 공동으로 메탄 열분해(TMC) 기술 개발을 추진하고 있으며, 미국 DOE에서 정한 1kg당 수소 가격을 2불이하로 생산을 목표
 - 본 기술은 수소와 고체탄소(카본블랙)이 형성되어 CO2 배출 제로 가능
- 2021년 9월 미국 PNNL은 CO2를 수소와 결합시켜 합성 천연가스로 전환하는 기술(EEMPA)을 연구하여, 170도에서 15bar에서 Ru 촉매로 CO2의 90%를 메탄으로 전환
- 2021년 2월 미국의 C-Zero사는 캘리포니아 대학과 공동으로 열촉매를 사용하여 메탄열분해를 통한 수소와 고체탄소를 생성

- 2019년에 미국 에너지부는 14백만불 규모의 Advanced Research Projects Agency(ARPA-E)를 추진
- Rice 대학, Nanocomp, ETCH, Palo Alto 연구소는 메탄의 열분해를 통한 이산화탄소 배출없이 수소와 고체탄소(카본블랙, CNT 등)의 동시 생산을 위한 프로젝트 선정
- 2018년 SoCalGas는 천연 가스를 수소, 탄소 섬유 및 탄소나노튜브로 변환하는 새로운 프로세스를 발전시켜, 수소 생산 비용을 탄소 섬유 및 탄소나노튜브 판매로 상쇄하여 수소의 순 비용을 킬로그램당 2달러 미만으로 줄여 수소 생산의 경제성 확보 노력
- 2017년 11월 UC Santa Barbara는 메탄을 열분해하여 수소를 방출하고 고체 탄소를 형성하는 촉매 용융 금속을 개발
 - 불용성 탄소는 용융물 표면으로 떠오르며, 여기에서 제거 및 저장하거나 복합 재료에 적용 가능
- 일반적으로 촉매를 비활성화시키는 증기 개질 촉매의 탄소 형성을 방지 가능
 - Ni-73% Bi 합금(Ni 0.27 Bi 0.73)이 1.1 미터 기포 컬럼에서 1065℃에서 95% 메탄 전환율을 달성했으며 CO₂ 없이 순수한 수소를 생성하였다고 보고. 온도가 1040℃로 낮아졌을 때 메탄(CH₄) 전환율은 86%로 감소

(2) 국내 기술 동향

- 국내에서는 일부 연구실 수준에서 메탄 열분해를 통한 수소 및 카본블랙 생산 연구가 진행되고 있으며, 수전해, 메탄 개질 또는 폐플라스틱 등을 활용한 수소 생산연구 중심
 - 2021년 5월 국내에서는 두산중공업이 레보텍과 폐플라스틱을 이용한 수소 생산 협력을 하였으며, 폐플라스틱을 물과 같이 연소시키면 수소와 이산화탄소가 생성되어 이로부터 수소를 분리하는 방식임
 - 엘디카본은 페타이어의 무산소 열분해를 통한 재생 카본블랙(Recovered Carbon Black, rCB)을 생산하고 국내외 타이어 및 고무제품 제조 업체에 공급을 목표로 연구개발을 진행중
 - 엘디카본과 스미토모고무공업는 GCB-774G와 GCB-600 시리즈를 공동 사업화하여 기존 카본블랙(N660)을 각각 최대 20%~70% 대체하는 것을 목표로, 2026년까지 목표로 잡은 사업화 물량은 GCB 3500톤/년, 을 계획

3) 기술수준

(1) 국내외 기술수준

■ 해외는 고가의 특수 카본블랙의 제품을 개발하여 이차전지용으로 공급중이나, 국내는 저부가가치 특수 카본블랙과 일반용 카본블랙을 생산하고 있음

- 특수카본블랙은 미국(Cabot), 일본(미쓰비시화학-Ketjen black, Denka그룹-Denka black), 독일(Degussa), 한국(OCI-CCC인수), 중국(Cabot중국공장) 등에서 주로 생산
- 국내에서는 플라스틱, 잉크 용도의 저부가가치 특수카본블랙은 일부 생산되고 있으나 도전재 등의 고부가가치 특수카본블랙의 생산이 전무하여 수입에 의존
- 한국탄소산업진흥원은 OCI, 현대차, 비나텍 등과 수소연료전지의 촉매 담지용 카본블랙을 국과과제를 통하여 연구를 진행하고 있음

■ 이차전지 도전제용 고체탄소는 전기자동차의 공급계획에 따라 크게 성장 예상

- 현재는 카본블랙이 주를 이루고 있으나 2026년을 기점으로 탄소나노튜브가 카본블랙을 대체함으로써 카본블랙의 수요는 점차 줄어들 것으로 예상
 - 연산 3,000톤 규모로 세계에서 가장 큰 생산량으로, 도전성 복합재용은 국외 기업이 시장을 가지고 있으며 고품질 CNT의 경우도 Ocial 사가 90% 이상 점유
 - LG화학이 3,000톤, 제이오 약 900톤, 금호석유화학 100톤의 MWNT 캐퍼 확보중이며, 12,000톤 및 4,000톤 규모로 생산 캐퍼 확대 추진중

〈표 VI-36〉 고체탄소 소재 기술수준

구분	카본블랙			탄소나노튜브(CNT)		
	소재		장비	소재		장비
	범용	고성능		범용	고성능	
일본	100	100	100	-	80	95
미국	100	100	100	-	-	-
독일	100	100	95	90	100	100
중국	100	85	85	90	-	90
한국	100	50	55	100	80	90
비고	○ 고성능 제품 (고전도성) 개발 중			○ 범용 MWNT 생산 중 고성능 SWNT 저가 생산기술 부재		

출처 : 한국탄소산업진흥원 내부자료

4. 현안문제 및 이슈

■ 메탄 열분해에 의한 수소 및 고체탄소 동시 파일럿 생산에 대한 연구는 경험이 거의 전무

- 국내의 수소생산은 주로 수전해 방식과 메탄(천연가스) 개질에 의한 수소 생산 중
- 플라즈마에 의한 고온 열분해 연구가 일부 진행되었으나, 메탄 공급량이 30SLM으로 소규모 연구진행
- 메탄 촉매 열분해의 경우에도, 장시간 메탄 분해 촉매에 대한 연구가 미비하며, 아직까지 CNT의 양산은 메탄이 아닌 에틸렌에서 이루어지고 있음
 - 플라즈마 메탄 개질 연구 결과 및 장비 활용 노력을 통한 고체탄소의 생성 조건의 DB화 및 시뮬레이션 등을 통한 연구 추진
 - 작은 파일럿 장비 도입/개선을 통한 수소-고체탄소 동시 생산 공정조건 확립 및 이를 토대로 규모의 시설 장비 추진

■ 카본블랙 및 탄소나노튜브 분야는 대체로 공급-수요 사슬이 거의 완성되어 가고 있어, 신규 사업자의 진입이 어려움

- 기존 사업자를 본 사업의 컨소시엄에 포함시켜 수요-공급망 사슬에 사업단을 포함되도록 추진 노력

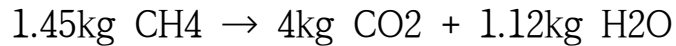
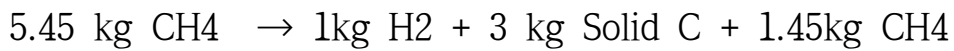
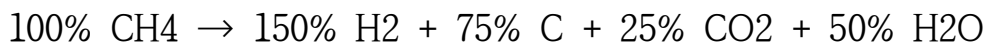
〈표 VI-37〉 중점분야 2의 핵심이슈와 해결방안 모색

핵심이슈	해결방안
○ 메탄 열분해 및 메탄 촉매 열분해 경험 부족 - 플라즈마를 이용한 메탄 개질에 따른 수소생산 연구가 진행되어옴 ○ 소규모 촉매 열분해에 의한 CNT 합성연구가 실험실 규모에서 진행되었으나, 대규모의 연구 사례 없음 - 또한 수소 전환율은 약 50%로 미비한 수준 ○ 열분해 고체탄소의 낮은 결정성 및 불균일 크기 등으로 인한 응용 산업에서의 이용 기피 및 기존 밸류체인 내 신규 기업의 진입의 어려움	○ 메탄 플라즈마 개질연구 장비 및 연구결과를 메탄 열분해 공정에 활용 참조 ○ 국외 성공사례에 대한 구체적 검토 및 벤치마킹을 통한 국내 독자의 플라즈마 열분해 카본블랙 생산기술 확립 ○ 메탄 촉매 열분해를 위한 촉매 및 고온 고수율 촉매 설계 및 이를 바탕으로 한 독자 촉매 기술 확보 ○ 카본블랙 및 에너지 관련 수요업체를 연구개발에 포함시켜, 밸류체인 내 사업단을 포지셔닝화 추진

■ 고품질 고체탄소(카본블랙) 생산 시, 친환경성 문제 극복을 위해서는 국내 청정수소 기준(4kgCO₂eq/kgH₂) 충족을 위한 메탄(천연가스) 분해율인 75% 확보 필요

- 고품질 고체탄소(카본블랙)의 생산을 위하여 메탄(천연가스) 분해율이 75% 이하로 낮아지게 되면 수소 1kg당 CO₂ 발생량이 4kg 이상으로 됨
- 국내의 청정수소 기준(수소 1kg당 4kg 이내의 CO₂ 발생)을 넘어서게 되어 친환경성을 해치게 됨. 그러므로, 본 과제에서의 메탄의 수소전환율이 75% 이상이 되어야 함

〈메탄 연소 반응식 예시〉



- 동 사업은 메탄(천연가스) 분해율(전환율) 80%를 목표로 설정하고 있어, 청정수소 기준 및 친환경성 확보

5. 사업목적 및 목표

■ 중점분야 목표

〈표 VI-38〉 중점분야2 성과목표 및 지표

전략목표	고체탄소 고부가가치 전환 기술개발 및 실증	
성과목표	성과지표	목표
고체탄소 고부가가치 전환 및 연속처리 공정 실증	❶-1 처리량	300kg/day급 이상
	❶-2 결정화도	LC>2.9nm
	❶-3 분말전기전도도	20S/cm
고체탄소 적용 응용부품 실증	❷-1 C.B 함량(Master-batch)	40% 이상
	❷-2 응용부품 전기전도도	10 ³ Ωcm at 15%

6. 기술구성 및 연계성

■ 기술구성

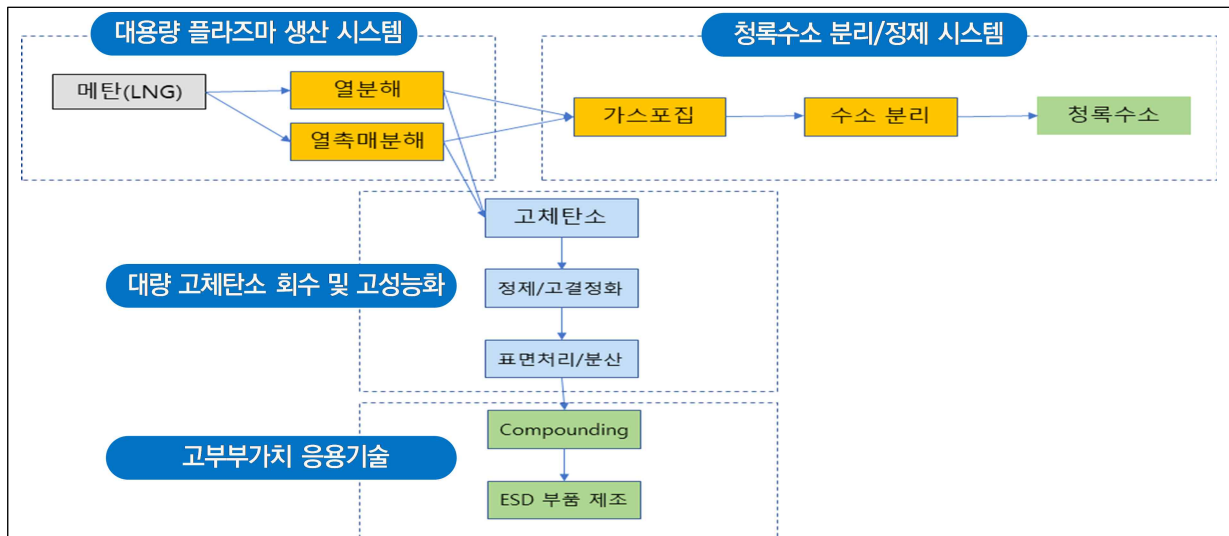
- 2개 핵심기술, 4개 구성기술로 구성
- 기간/예산 : 5년, 60억원

〈표 VI-39〉 중점분야 2의 기술구성(안)

구 분		기술개발활동	주요 산출물	기간 (총 년)	예산 (억 원)
핵심기술명		고체탄소 고성능화 기술 개발 및 연속처리공정(300kg/day급) 실증	고부가가치 고체탄소 (C.B & CNT)	5	40
연구개발내용	2-1	o 고체탄소 고전도성(네트워크향상)/고결정화	고전도성 및 고결정성 고체탄소	5	40
		o 고체탄소 고기능화 연속 장비 제작 및 실증 (300kg/day급)	연속 실증 장비(300kg/day)		
핵심기술명		고체탄소 소재의 대규모 고부가가치화 응용 기술 개발	Master-batch pellet 및 부품	5	20
연구개발내용	2-2	o 고체탄소 고함량 Master-batch화	Master-batch	5	20
		o ESD용 응용 부품 제조 및 실증	전도성 복합재 부품		

■ 핵심기술 간 연계성

- (핵심 기술 2-1)은 플라즈마 열분해 및 촉매열분해에 생성되는 대량의 고체탄소를 고부가가치의 전기전도성 소재로의 전환을 위한 고체탄소의 네트워크 구조 향상 공정 및 고체탄소 자체의 결정성 향상을 위한 고온 열처리공정 개발 및 최적화를 통한 기존의 전도성 필러로 사용이 가능한 특수카본블랙 수준의 성능을 구현 추진
 - 고체탄소 300kg/day급의 연속 및 대량처리 공정 장비의 개발 및 실증·운영
- (핵심 기술 2-2)는 핵심기술 2-1에 의해 성능향상된 고체탄소를 전도성 복합재 마스터 배치를 제조하고, 실제 전도성 복합재 응용부품에 적용 및 제품 제조하여 평가/실증함으로써, 본 과제에 생산한 고체탄소의 고부가가치 제품화까지 고려하여 추진



[그림 VI-30] 중점분야 2 핵심기술 간 연계도

7. 기술개발 계획

1) 기술개발 연차별 추진계획

■ (핵심기술 2-1) 고체탄소 고성능화 기술 개발 및 연속처리공정 (300kg/ day급) 실증

〈표 VI-40〉 기술개발 연차별 추진계획(핵심기술 2-1)

연차	개발목표	개발내용 및 범위
1차년도	기존 고체탄소 후처리 기술 조사/설계 및 TEST	- 고체탄소 후처리 공정설계(네트워크향상 및 열 및 표면처리등) - 합성 고체탄소 분석 - 기 카본블랙을 이용한 후처리 공정 TEST - 열처리온도, 네트워크 구조 향상 방안 등

연차	개발목표	개발내용 및 범위
2차년도	- Lab-scale 후처리(네트워크 향상, 고온 열, 표면처리 등)연구 및 분석 - 후처리 연속공정 및 장비 설계	- Lab-scale 후처리(고온 열, 네트워크 향상 등)요소기술 연구 및 분석 - 고온열처리 공정(온도, 분위기가스, 시간 등)에 따른 특성 변화 - 네트워크 향상(구형 및 섬유상 고체탄소 하이브리드화) - 합성 고체탄소 구조 및 표면 분석 - 구형 및 섬유상 고체탄소 비율 및 분말 전도도, 결정성 등 - Lab-scale 분산 TEST - 후처리 연속공정 및 장비 설계 - 축매 연속 코팅(Rotary Vacuum Drum Dryer) 및 네트워크 향상 연속 공정 장비(Rotary Kylin Reactor) 등 설계
3차년도	- 카본블랙 특성향상 연속 후처리(네트워크 향상, 열, 표면처리 등) 기술 개발 - 후처리 연속공정 및 장비 제작	- 합성 고체탄소 연속 후처리 공정 조건 확립 - 연속 열처리 공정조건(온도, 분위기 가스, 등) 변화 - 네트워크 향상 연속 공정(온도, 가스량, 축매량 등) 변화 - Lab용 후처리 연속장비 개선 - 고체탄소 결정성 및 전도성 등 분석 - 후처리 연속장비 제작(300kg/day급) - 연속 열처리/네트워크 향상 장비(Rotary Drum, Rotary Kylin Reactor 제작)
4차년도	고체탄소 특성향상 연속 후처리(열, 네트워크 형성 등) 기술 최적화 및 후처리 연속공정 장비 개선 및 실증 추진	- 고체탄소 연속 후처리 공정 기술별 최적화 - 열처리 공정조건(공급위치/공급속도/온도/가스종류 및 가스량) 최적화 - 네트워크 향상공정 저온(공급속도/공급위치/온도/처리용가스 및 캐리어가스 비율 등) 최적화 - 후처리 연속장비 개선(공급/배기/반응부 등)
5차년도	고체탄소 특성향상 연속 후처리(열, 네트워크 향상 등) 양산(실증) 기술 확보	- 열처리 및 네트워크 향상 등의 후처리 최적화 기술 토대로 양산 적용 및 공정 최적화 - 공정별 결과 분석 및 피드백 - 고체탄소 연속 처리 공정 최적화

■ (핵심기술 2-2) 고체탄소 소재의 대규모 고부가가치화 응용 기술 개발

〈표 VI-41〉 기술개발 연차별 추진계획(핵심기술 2-2)

연차	개발목표	개발내용 및 범위
1차년도	제품 성능 요구 특성 파악 기 카본블랙 활용 요소기술 연구	- 마스터배치용 고분자 수지 선정 - 타사 제품 고전도성 카본블랙 활용 컴파운드 및 요소기술 파악 - 함량에 따른 특성 분석 및 방향 설정
2차년도	- 합성 고체탄소 활용 Lab-scale 혼합 및 컴파운딩 요소기술 확보 $10^6 \Omega \text{cm}$ at 25% 30% 고체탄소함유 마스터배치	- 전도성 마스터배치 컴파운딩 공정별 요소기술 개발 및 확보 - 컴파운딩 공정조건(구간온도, 공급/압출속도, pellet cutting 등) 연구 - 고체탄소/고분자수지/분산제 등 비율 및 Premixing 등 연구 - 제품 특성 평가 및 피드백 - 조건별 인장, 전기전도도, 충격 등의 특성 평가
3차년도	- 합성 고체탄소활용 전도성 마스터배치 및 제품 컴파운딩 공정 최적화 $10^4 \Omega \text{cm}$ at 20% 35% 고체탄소함유 마스터배치	- 전도성 마스터배치 컴파운딩 공정별 요소기술 최적화 - 고분자소재 및 고체탄소 함량별 컴파운딩 공정조건(구간온도, 공급/압출속도, pellet cutting 속도 등) 최적화 - 제품 특성 평가 및 피드백 - 조건별 물리적, 전기적, 열적 특성 평가

연차	개발목표	개발내용 및 범위
4차년도	- 전도성 복합재 부품 제조/평가(필드테스트) $10^3 \Omega \text{cm}$ at 20% 40% 고체탄소 함유 마스터배치	- 고체탄소 고함량 전도성 마스터배치 제조 - 마스터배치와 고분자수지 혼합 컴파운딩 및 제품 제조 - 제품 특성 및 성형성 평가
5차년도	- 카본블랙 마스터배치 컴파운딩 양산 공정 확보 $10^3 \Omega \text{cm}$ at 15% 40% 고체탄소 함유 마스터배치	- 고함량 고체탄소 마스터배치 컴파운딩 양산 공정 확보 - 외부업체 공급을 통한 시장 평가 - 양산 공정별 최적화

2) 기술개발 추진전략

(1) 기술 확보전략

■ 고체탄소 고성능화 기술 개발 및 연속처리공정 (300kg/ day급) 실증

- 생성된 고체탄소를 고부가가치 전환을 위한 기술 개발을 위하여 핵심기술인 고체탄소 네트워크 향상 기술, 고온열처리 기술 및 표면처리 기술을 선정하고, “네트워크 향상기술” 및 “고온 열처리” 및 “표면처리 기술”의 일부를 글로벌 협력과 자체 개발 추진
- 핵심기술의 연속처리 공정(300kg/day급) 장비 개발/개선 및 실증을 통한 고부가가치의 고성능화 고체탄소 생산기술 확보

■ 고체탄소의 고부가가치 응용 실증

- 대규모 고체탄소의 고부가가치 응용인 고전도성복합재 적용을 위하여 핵심기술인 “고체탄소 고함량 Master-batch화” 및 “ESD용 응용 부품 제조 및 실증”의 일부를 국내외 협력과 자체 개발 추진

〈표 VI-42〉 핵심기술 확보전략

핵심기술명	구성기술	성과 연계	자체 개발	기술 도입	글로벌 협력	아웃 소싱
고체탄소 고성능화 기술 개발 및 연속처리공정 (300kg/ day급) 실증	고체탄소 네트워크 향상/고결정화/기능화 기술	●	●			
	고체탄소 고기능화 연속 장비 제작 및 실증 (300kg/day급)	●	●			
고체탄소 소재의 대규모 고부가가치화 응용 기술 개발	고체탄소 고함량 Master-batch화	●	●			
	ESD용 응용 부품 제조 및 실증	●	●			

● : 주, ○ : 부

(2) 성과물 활용 전략

〈표 VI-43〉 핵심기술 성과물 활용전략

핵심기술	구성기술	성과물	성과물 활용전략
고체탄소 고성능화 기술 개발 및 연속처리공정 (300kg/ day급) 실증	고체탄소 네트워크 향상/고결정화 기술	○ 전도성 특수카본블랙 ○ 300kg/day급 고체 탄소 고기능화 장비	○ 수요기업 및 공급 기업과의 연계 through 실증 및 사업화 추진
	고체탄소 고기능화 연속 장비 제작 및 실증(300kg/day급)		
고체탄소 소재의 대규모 고부가가치화 응용 기술 개발	고체탄소 고함량 Master-batch화	○ 마스터배치 펠렛 ○ 전도성 복합재 응용 부품	○ 관련 기업에 기술 이전 및 사업화 추진
	ESD용 응용 부품 제조 및 실증		

(3) 시장진입 전략

〈표 VI-44〉 핵심기술 시장진입 전략

핵심기술	구성기술	단기 전략	중장기 전략
고체탄소 고성능화 기술 개발 및 연속처리공정 (300kg/ day급) 실증	고체탄소 네트워크 향상/고결정화 기술	○ 국내의 수소도시 등에 사용하고 해외 진출을 위해서는 상용규모 test-bed 실증을 통한 기술개발이 추진	○ 원료를 바이오 가스 등의 전환을 통한 수소 가격 경쟁력 확보
	고체탄소 고기능화 연속 장비 제작 및 실증(300kg/day급)		
고체탄소 소재의 대규모 고부가가치화 응용 기술 개발	고체탄소 고함량 Master-batch화	○ 국내의 고체탄소 생산·공급기업 및 수요기업을 과제내 포함함으로써, 개발 고체탄소의 국내 시장의 대용량 공급망 확보 및 제품 적용성 증대	○ 생산 고체탄소 내 탄소나노튜브의 함량 증가를 통한 기존의 제품대비 성능 향상을 통한 경쟁력 확보를 통한 국외 수출 추진
	ESD용 응용 부품 제조 및 실증		

(4) 위험요인 및 대응전략

〈표 VI-45〉 핵심기술 위험요인 및 대응전략

핵심기술	구성기술	위험요인	대응전략
고체탄소 고성능화 기술 개발 및 연속처리공정 (300kg/ day급) 실증	고체탄소 네트워크 향상/고결정화 기술	○ 고온열처리에 의해 고체탄소의 결정화도는 높아지나, 크기의 변화가 없어 사용이 어려운 카본블랙 및 CNT 생성 가능	○ 고체 탄소 생성 공정조건의 최적화를 통한 고체탄소 생산 균일화도 확보
	고체탄소 고기능화 연속 장비 제작 및 실증(300kg/day급)	○ 메탄(천연가스)의 국제 가격이 요동을 치고 있어, 향후 천연가스의 가격으로 인한 수소 및 카본블랙 안정성 확보 필요 ○ 네트워크 향상을 위한 촉매 가격의 변동 및 후처리공정 추가에 의한 고체탄소 생산 비용 증가	○ 천연가스 외의 바이오 가스 등을 활용한 수소 및 카본블랙 제조 ○ 촉매 공정 및 네트워크 공정 최적화를 통한 비용 절감 최대화 추진

핵심기술	구성기술	위험요인	대응전략
고체탄소 소재의 대규모 고부가가치화 응용 기술 개발	고체탄소 고함량 Master-batch화	o 고체탄소내 카본블랙 및 탄소나노튜브의 생성 비율의 변화에 따른 마스터배치의 균일 특성 미발현으로 인한 시장 요구에 불응	o 고체탄소 생산 공정과의 지속적인 피드백을 통한 고체탄소 생산 균일 특성 확보
	ESD용 응용 부품 제조 및 실증		

3) 소요예산 및 인력

■ 중점기술 소요예산

〈표 VI-46〉 중점분야2 연차별 소요예산

(단위: 억 원)

중점	구분	1차년	2차년	3차년	4차년	5차년	총계
고체탄소 고부가가치화 전환 기술 확보 및 응용부품 개발	정 부	4.5	12	14.8	14.8	13.9	60
	지자체	0	0	0	0	0	0
	민 간	1.5	4	5	5	4.5	20
	소 계	6	16	19.8	19.8	18.4	80

■ 핵심기술 소요인력

〈표 VI-47〉 중점분야2 연차별 소요인력

(단위 : 명)

구분		1차년도	2차년도	3차년도	4차년도	5차년도	계
고체탄소 고성능화 기술 개발 및 연속처리공정 (300kg/ day급) 실증	박사급	4	6	7	7	6	30
	석사급	-	-	-	-	-	-
	학사급	-	-	-	-	-	-
합계		4	6	7	7	6	30
고체탄소 소재의 대규모 고부가가치 응용기술 개발	박사급	7	11	12	12	10	52
	석사급	-	-	-	-	-	-
	학사급	-	-	-	-	-	-
합계		7	11	12	12	10	52

4) 중점분야2 로드맵

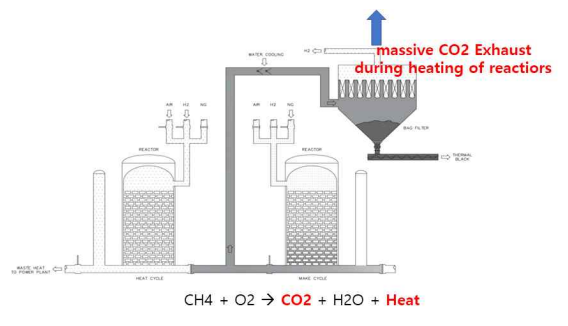
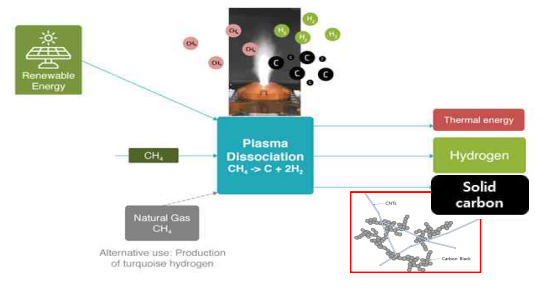
구 분		1차년도	2차년도	3차년도	4차년도	5차년도	주요 성과물
고체탄소 고성능화 기술 개발 및 연속처리공정 (300kg/ day급) 실증	고체탄소 네트워크 향상/고결정 화 기술						o 네트워크 및 결정성 향상 요소기술
							o 네트워크 및 결정성 향상 기술 개발
							o 요소기술 최적화
	고체탄소 고기능화 연속 장비 제작 및 실증(300kg/ day급)						o 실증용 연속장비 설계
							o 실증용 연속장비 제작 및 개선 (300kg/day)
							o 실증 장비 요소기술 최적화 및 평가
고체탄소 소재의 대규모 고부가가치화 응용 기술 개발	고체탄소 고함량 Master- batch화						o 컴파운딩 요소기술 확보
							o 마스터배치 최적 혼합 레시피
							o 전도성 마스터배치 펠렛
	ESD용 응용 부품 제조 및 실증						o 마스터배치 희석 기술
							o 전도성 복합재 최적 사출 레시피
							o 전도성 복합재 부품

[그림 VI-31] 중점분야2 과제추진 로드맵

8. 동 사업의 기대효과(As-Is/To-Be)

■ 기대효과

〈표 VI-48〉 동 사업의 기대효과(As-Is / To-Be)

AS-IS	To-Be
 CH₄ + O₂ → CO₂ + H₂O + Heat	 Plasma Dissociation CH₄ → C + 2H₂ Alternative use: Production of turquoise hydrogen.
○ 수소 중심생산시 발생 대규모 고체탄소의 저부가가치로 인한 수소의 경제성 하락 ○ 메탄 열분해에 의한 고체탄소 중심 생산시 대규모 이산화탄소 발생으로 인한 생산 규제 ○ 메탄열분해 공정에 의한 고부가가치 고체탄소 생산 기술 부재	○ 동시 생산 고체탄소의 고부가가치로 인한 청록수소 생산의 경제성 확보 ○ 친환경 메탄열분해 고부가치 고체탄소 생산 공정에 의한 신규 고체탄소 생산 공정 적용 확대 ○ 고부가가치 메탄열분해 공정기술 확보 및 국제 경쟁력 확보에 따른 고체탄소 및 생산기술 수출 증대

○ 과학기술적 측면

- 고부가가치 소재·부품의 개발을 통한 국가 경쟁력 강화
 - 고순도 수소 생산이 가능하며 폐기물화 될 수 있는 고체탄소를 고부가가치화 달성을 통한 다양한 응용분야에 적용
- 저렴한 수소 생산 및 가격경쟁력 확보 실현
 - 수소전기차 등에 필요한 수소 생산 가격을 낮춰, 수소의 경쟁력을 확보를 통한 응용분야 확대
- 수소생산과 더불어 부산물로 생성되는 폐기물 또는 저부가가치 고체탄소의 고부가가치 전환 기술의 확보
- 본 기술을 바탕으로 다양한 폐기 탄소원료(매립가스, 축산가스 등)의 고부가가치 고체탄소 전환 가능

○ 사회경제적 측면

- 국가의 탄소중립 실현에 기여
 - 기존 수전해 대비 효율적인 수소 생산이 가능하고, 폐에너지 회수율을 높여 온실가스를 감축가능
- 바이오 및 합성 가스의 수소 및 고체탄소 제조 기술 확보
 - 합성가스의 산업용 대체 연료로 활용하고, 합성가스를 중장기적으로 석유화학 유래 제품 생산 기술로 확대
 - 합성가스에서 고순도 CO, H₂를 분리 정제 생산하여 기존 화석연료에서 생산되는 화학 원료를 대체하여 폐기물/바이오매스의 고부가가치로 재활용
- 국가산업의 전기/전자산업 및 탄소 산업의 경쟁력 확보 및 수입 대체
 - 기존 수입에 의존하던 전도성 복합소재의 고성능화 및 국산화에 따른 관련기업의 가격 및 제품 경쟁력 확보로 인한 수입대체 효과
- 탄소원료로부터 수소 생산 및 고체탄소 생산시 발생하는 CO₂의 저감을 통한 탄소중립 실현에 기여
 - 수소 생산시 수소 대비 20배 발생하는 CO₂와 고체탄소 생산시 배출되는 CO₂를 Zero화 함으로써, 국가의 탄소배출량 절감에 기여

■ 사업대상 및 수혜자

- 동 중점분야 기술개발 직접적인 수혜자는 탄소 소재·부품 기업이며 CO₂ 배출 저감을 통해 탄소중립에 기여함으로써 정부·지자체 및 국민에 간접적인 수혜를 줌
- 주요 기업으로는 국내 카본블랙 업체(OCI, 현대OCI, 카본블랙코리아 등) 및 이를 활용한 전도성 플라스틱 업체(영진테크, 성호폴리텍, 에코폴리텍 등)가 직접적인 수혜자이며, 이를 활용한 부품기업인 전기·전자·디스플레이 등 다양한 분야의 관련 기업이 간접적 수혜자로 예상됨
- 수소와 함께 발생하는 고체탄소의 고부가가치를 통하여 공정 경제성 및 수소생산 단가 절감 효과가 있음
- 특히, 부생산로 얻어지는 고체탄소의 정제를 통한 고품질화 카본생산과 기존 수소제조 공정에서 발생하는 CO₂ 처리비용 없이 수소를 제조하는 본 핵심기술은 열분해에 의한 천연가스로부터 수소제조 시 피할 수 없는 에너지비용을 절감

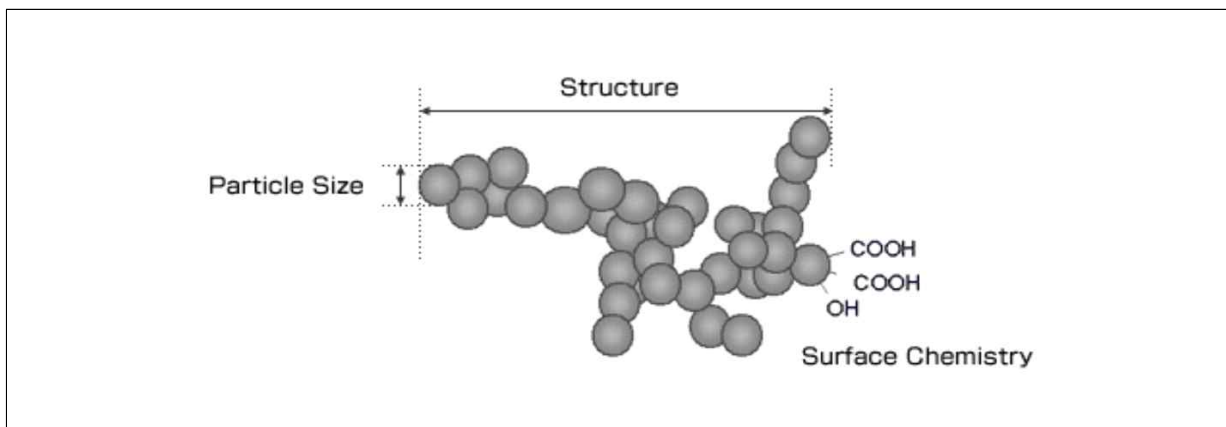
9. 핵심기술별 추진계획

1) (핵심기술 2-1) 고체탄소 고성능화 기술 개발 및 연속처리공정 (300kg/ day급) 실증

(1) 배경 및 필요성

가. 추진배경

- 천연가스(메탄)의 열분해(촉매열분해) 방법을 통한 수소수소 생산 방법은 부산물로 열분해카본(Pyro-carbon) 및 섬유상 나노카본이 형성
 - 본 과제에서는 공정조건을 개선하여 열분해 카본 대신 카본블랙을, 섬유상 나노카본 대신 탄소나노튜브를 부산물로 얻고자 함
- 카본블랙은 크게 범용의 고무충진용 카본블랙과 도색용 및 전기전도성의 활용하는 특수카본블랙으로 구분하고 있으며, 사용용도에 따라 카본블랙 제품 가격이 1.5배에서 5배 이상으로 높은 부가가치를 지니고 있음
- 카본블랙은 구형 입자 일부가 융합되어 복잡한 구조를 가지고 있으며 이러 인해 다양한 특성이 나타나게 됨
 - 구형 입자의 크기를 "입자 크기"라고 하고 입자 사슬의 크기를 "구조"라고 하며, 카본블랙의 표면에는 수산기, 카르복실기 등의 다양한 작용기가 존재하며 그 양이나 조성을 "표면 화학"이라고 함



[그림 VI-32] 카본블랙 주요 구조

- 고무용 카본블랙은 카본블랙 시장의 대부분을 차지하고 있으며, 자동차, 항공기 및 산업용 타이어등 고무 관련 제품의 필수 보강제로서 사용되고 있으며, ASTM(미국재료시험학회) 규격에 따라 분류
 - 고무충진용 범용 카본블랙은 각국에서 생산이 모두 가능한 기술로서, 기술단계는

성숙단계로 신규의 진입이 어려운 실정

〈표 VI-49〉 고무용 카본블랙의 분류(미국재료시험학회)

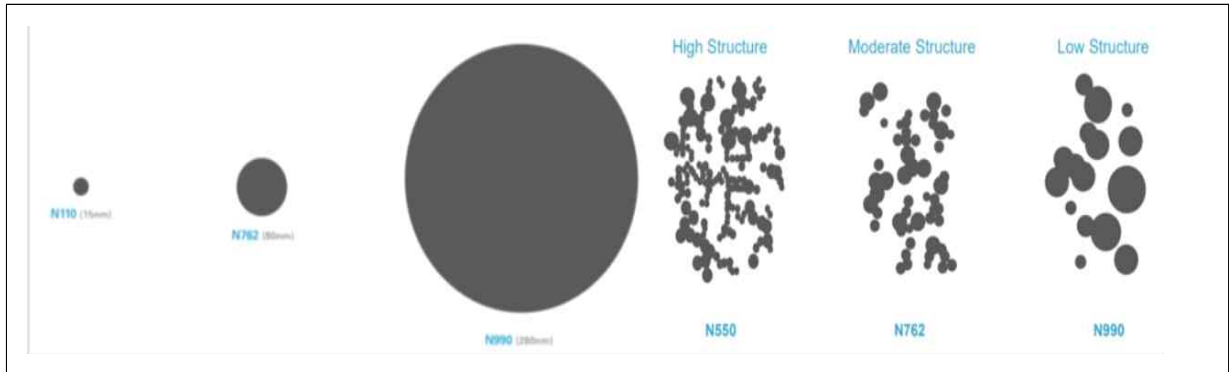
ASTM CODE	일반명칭	입자경(nm)
N100	SAF(Super Abrasion Furnace: 초내마모성)	11 ~ 19
N200	ISAF(Intermediate Super Abrasion Furnace : 준초내마모성)	11 ~ 19
N300	HAF(High Abrasion Furnace : 고내마모성)	26 ~ 30
N400	XCF(Extra Conductive Furnace : 초전도성)	31 ~ 39
N500	FEF(Fast Extruding Furnace : 양압출성)	40 ~ 48
N600	GPF(General Purpose Furnace : 범용성)	49 ~ 60
N700	SRF(Semi Reinforcing Furnace : 중보강성)	61 ~ 100
N800	FT(Fine Thermal : 미립열분해)	101 ~ 200
N900	MT(Medium Thermal : 중립열분해)	201 ~ 500

- 이에 비해 특수카본블랙은 아직 성장하고 있는 단계로, 플라스틱, 잉크 등에 사용되는 저부가가치 용도와 도전제, 페인트, 잉크 등에 사용되는 고부가가치로 분류
 - 국내에서는 저부가가치 스페셜티 카본블랙은 일부 생산되고 있으나 고부가가치 특수카본블랙의 생산이 전무하여 수입에 의존
 - 현재 범용 카본블랙과 달리 규격이 별도로 정해지지 않고, 카본블랙 기업이 각각 다른 형태의 전도성 카본블랙을 제조하여, 수요기업에 각각 납품
- 탄소나노튜브는 현재, 국내외에서 에틸렌 기반의 대량 생산이 이루어지고 있어, 결정성이 낮은 단점을 가지고 있으며, 향후 점 더 높은 전기적 특성 향상을 위하여 메탄(천연가스) 기반의 생산이 이루어질 것으로 예상
- 기상 합성된 카본블랙 및 탄소나노튜브는 겉보기 밀도가 매우 낮아(10~50kg/m³), 작업장 및 작업자에 위해가 되며, 물류 비용을 증가시키는 요인이 되기도 함
- 본 과제를 통해 합성되는 고체탄소(카본블랙 및 탄소나노튜브)의 고부가가치화 전환을 위한 고순도화, 고결정화 및 고전도성 부여를 위한 기술 개발이 필요

나. 추진 필요성

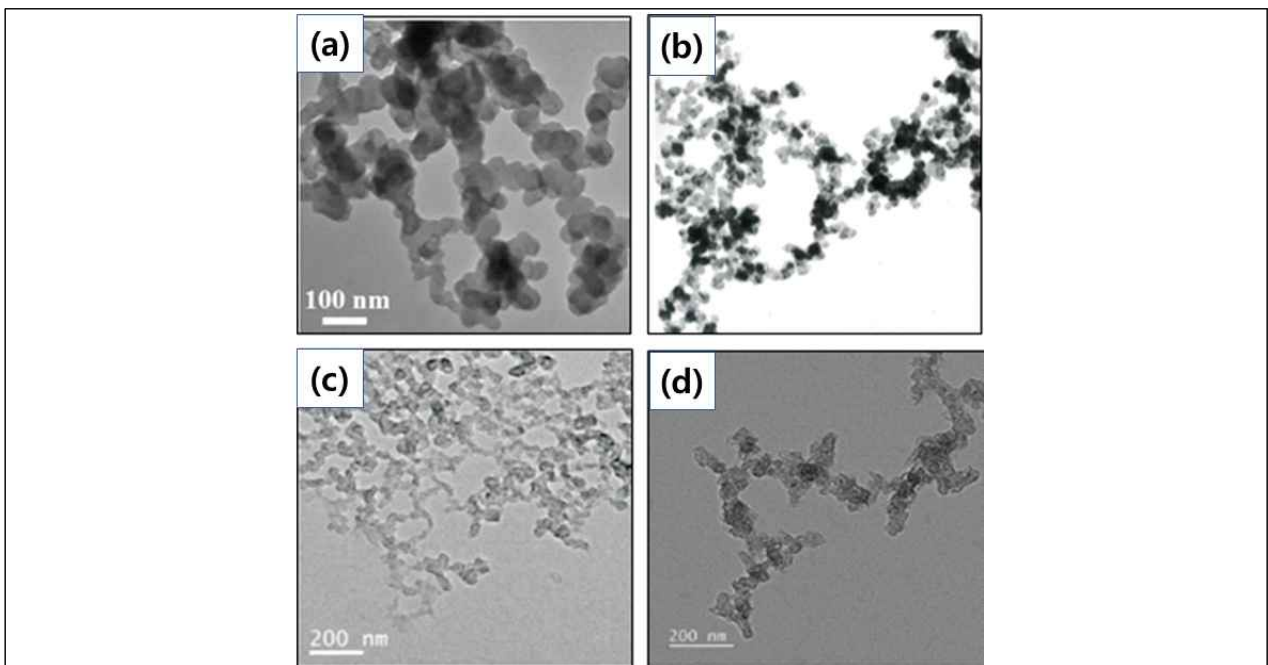
- 본과에의 열분해 및 열촉매분해 공정에 의해 생성되는 수소의 경제성의 확보를 위하여 반드시 부산물로 생성되는 고체탄소의 고부가가치 전환이 필요
 - 탄소소재는 순도, 결정성, 크기 등에 성능이 결정되며, 본 과제에 의해 생성되는 고체카본의 경우도 고순도화, 고결정화, 기능화 등의 과정을 통하여 고부가가치를

지닌 고순도, 고결정성 고체탄소로의 전환이 필요



[그림 VI-33] 고무충진제 카본블랙 모습

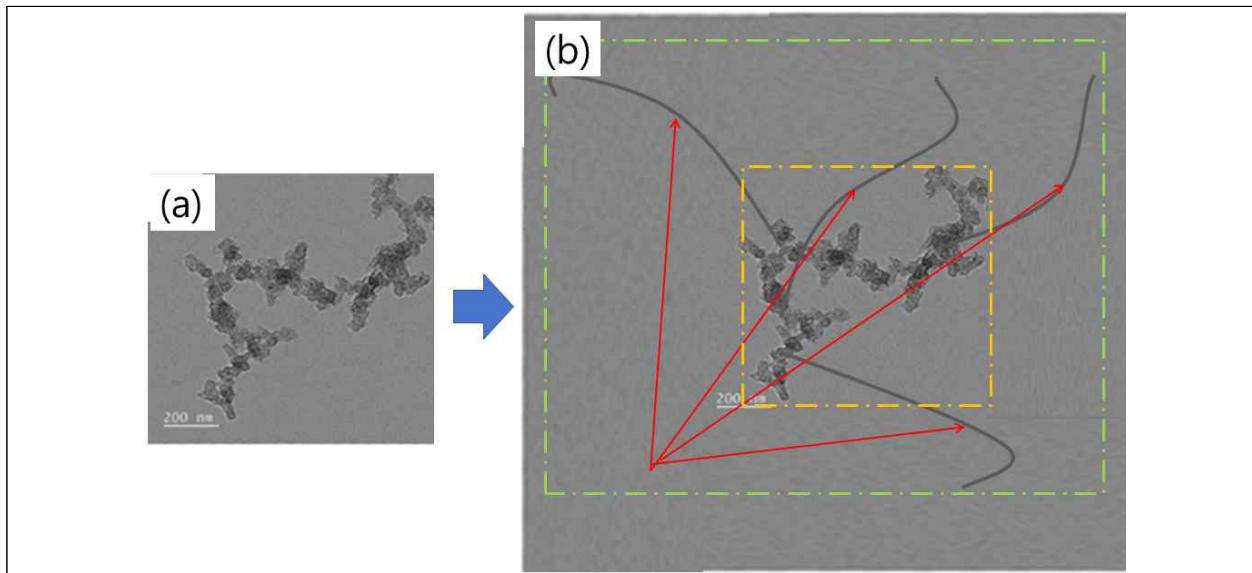
- 전도성 카본블랙은 입자크기가 약 30~40nm 정도이며, 구조는 카본블랙끼리 연결된 길이(체인길이, 구조(structure 발달))가 길수록 전도성이 우수하며, 표면처리를 통한 다양한 기능기의 부착으로 분산 및 고분자 수지와의 결합성을 향상 가능
- 대표적인 전도성 카본블랙으로 (a) Super P, (b) Denka Black, (c) Ketjen black가 있으며, 아래의 그림과 같이 입자크기가 작고 구조가 잘 발달되어 있는 형태인데 반해 (d)의 모노리스사의 카본블랙도 유사한 입자 크기를 가지고 있으나, 상대적으로 구조가 발달이 적게되어 있음을 보여줌



[그림 VI-1] 전도성 카본블랙 종류 (a) Ketjenblack EC, (b) XCF carbon, (c) Denka Black, (d) Monolith사

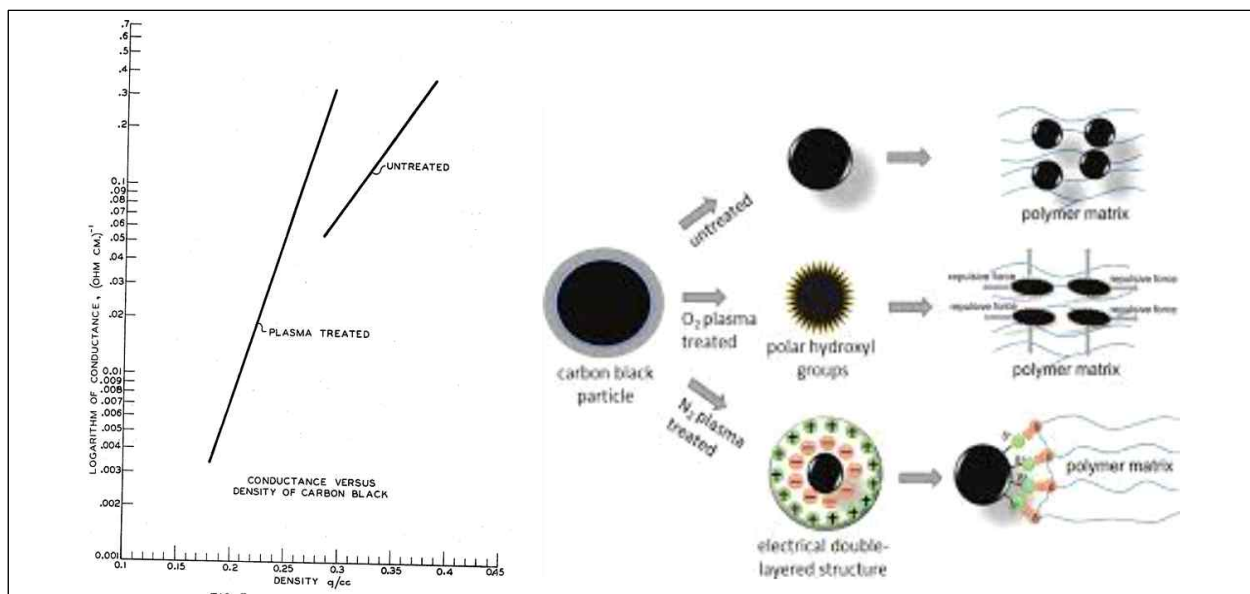
- 카본블랙 입자사슬의 크기가 클수록 복합재 내에서 카본블랙이 이루는 전도성 네트워크가 쉽게 형성되어 적은 양으로도 높은 전도성을 이룰 수 있음

- 본 과제에서 형성되는 카본블랙은 모노리스사와 유사한 형태로 생성될 것으로 보여, 후처리를 통한 구조 발달, 즉 네트워크 향상을 통한 우수한 전도성 소재로의 고부가가치 전환이 필요함



[그림 VI-2] 고체탄소 네트워크 향상 기술 예시 (a) monolith사 carbon black, (b) 본과제에서의 네트워크 향상된 carbon black

- 고체탄소의 복합재 등의 응용을 위한 대량의 고체탄소의 표면개질을 위한 기상 또는 액상의 대량처리 기술 개발 필요



출처 : US3408164A(1966, J. Nano. & Nanotech, 2020

[그림 VI-34] 카본블랙의 플라즈마처리에 의한 전기전도도 변화 및 표면처리에 따른 매트릭스와 결합

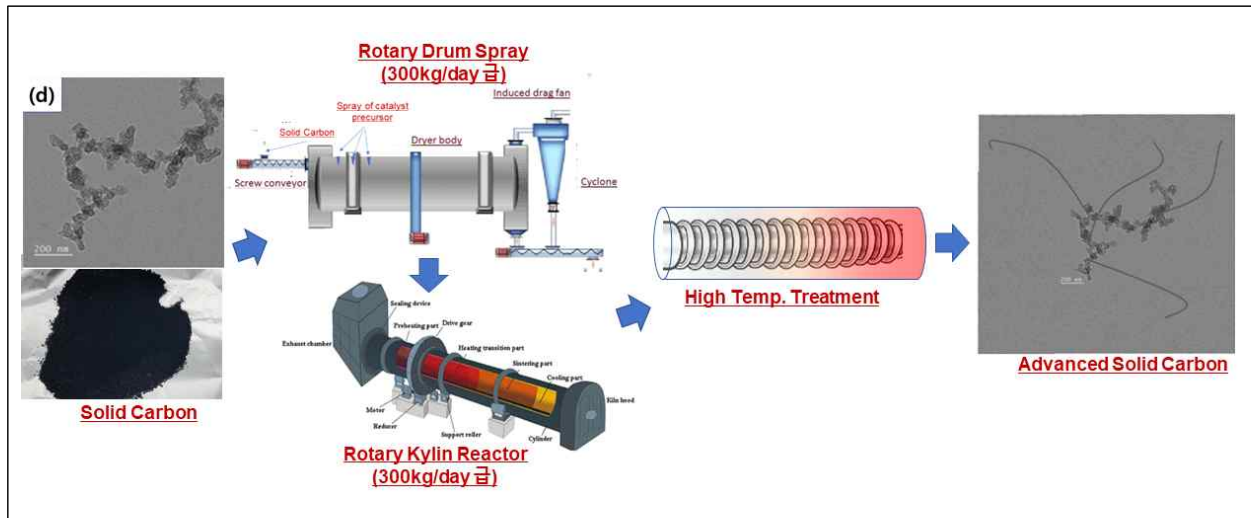
- 현재의 플라즈마에 의한 천연가스 열분해에 의해 합성되는 고체탄소는 수소 생산에 중점을 가지고 있어, 후처리에 의한 고성능화가 필요

- 고순도화, 고결정, 기능화된 고체탄소에 대해 대규모 응용이 가능하면서도 상대적으로 고부가가치가 높은 전도성 복합재 분야에 적용 실증을 위해서는 고함량 고체탄소 마스터 배치 및 이를 활용한 대전방지용 응용부품의 제조 및 평가 필요

(2) 핵심기술 개요

가. 개념

- 메탄 열분해에 의해 수소 생산시 부산물로 생성되는 고체탄소는 수소 대비 약 3배의 양이 생성되며, 수소생산 중심의 공정기술로 인한 저부가가치의 고체탄소가 형성
- 이러한 고체탄소를 고네트워크화 및 고결정화 공정을 통해 고성능 전기전도성 소재로 전환 기술의 개발 및 이를 바탕으로 300kg/day급 규모의 장비 제작 및 실증을 통한 상업적 적용을 추진



[그림 VI-35] 핵심기술 2-1의 주요 공정기술

나. 범위

- 열분해 수소 장치로부터 회수한 고체탄소의 네트워크 향상 및 고결정화 함으로써, 고부가가치의 고전도성 고체탄소 후처리 기술 개발 및 300kg/day급 장비 구축 및 실증 추진
 - (구성기술 1) 고체탄소 네트워크 향상 기술 및 고결정화 기술
 - (구성기술 2) 고체탄소 고기능화 연속 장비 제작 및 실증(300kg/day급)

〈표 VI-50〉 핵심기술 2-1의 구성기술 범위

구성기술명	기술개발 정의 및 범위
고체탄소 네트워크 향상 기술 및 고결정화 기술	대량 생산된 고체탄소의 고전도성 소재로의 전환을 위한 "네트워크 향상" 과 비정질 카본 및 낮은 결정성을 가진 고체탄소의 결정성을 높이는 "열처리 기술" 을 포함
고체탄소 고기능화 연속 장비 제작 및 실증(300kg/day급)	대량 생산된 고체탄소의 연속 및 대량 처리를 위한 "300kg/day급 고기능화 연속 장비의 제작 및 실증"을 통한 고전도성 필러로서의 적용성 평가

(3) 기술개발 목표

가. 핵심기술의 개발 목표

■ 정성적 목표

- 합성된 고체탄소의 성능 향상을 통한 전도성 복합재에 사용이 가능한 고체탄소로의 전환을 위한 고부가가치화 기술 개발

■ 정량적 목표

- 고체탄소 성능 : 카본블랙(Lattice crystalline) > 2.9nm, 분말전기전도성 20S/cm),
- 고체탄소 처리 장치 용량 : 300kg/day급 실증

■ 성능 목표

〈표 VI-51〉 핵심기술 개발목표

핵심기술명	성능지표	현재 스펙	개발 목표 스펙	
			1단계	2단계
고체탄소 고성능화 기술 개발 및 연속처리공정 (300kg/ day급) 실증	고체탄소 결정성 LC(nm)	1.0	2.0	3.0
	고체탄소 전기전도도(S/cm)	C.B : 10S/cm (0.1S/cm)	10	20
	장비 처리용량	-	-	300kg/day

나. 목표 설정 근거

- 고체탄소 순도 : 현재 사용하고 있는 전도성 카본블랙의 순도가 현재 95% 이상임
- 고체탄소 결정성 : 현재 전도성 카본블랙의 분체 저항임(Denka black 기준)
- 고체탄소 전기전도성 : 현재 전도성 카본블랙의 분체 저항임(Denka black 기준)
- 고체탄소 농도 : 마스터배치 용액에서의 카본블랙 농도는 약 20% 정도

(4) 과제 중복성·차별성·연계방안

가. 타 연구과제와의 차별성 및 연계성

■ 산업부 소재부품자립화사업

- 천연가스로부터 탄소소재를 개발하는 연구가 진행중이나, 탄소소재 생산 중심의 연구개발이 이루어져 수소생산율이 낮은 실정
 - 본 과제와의 연계를 통해 수소 생산성 향상시킬 방안 모색 및 추진

■ 산업부 핵심소재부품개발사업

- 수소자동차에 사용되는 촉매의 담지체인 아세틸렌 블랙 개발과제로, 소규모 파일럿을 이용하여 아세틸렌 가스를 열분해하여 탄소소재를 생산하는 방식이나, 아세틸렌의 발열반응으로 메탄의 흡열반응과는 차이가 있음
 - 기 구축 장비의 활용을 통한 연계로, 메탄 분해의 연구를 일부 진행할 수 있을 것으로 예상됨

〈표 VI-52〉 차별성 및 연계방안 요약

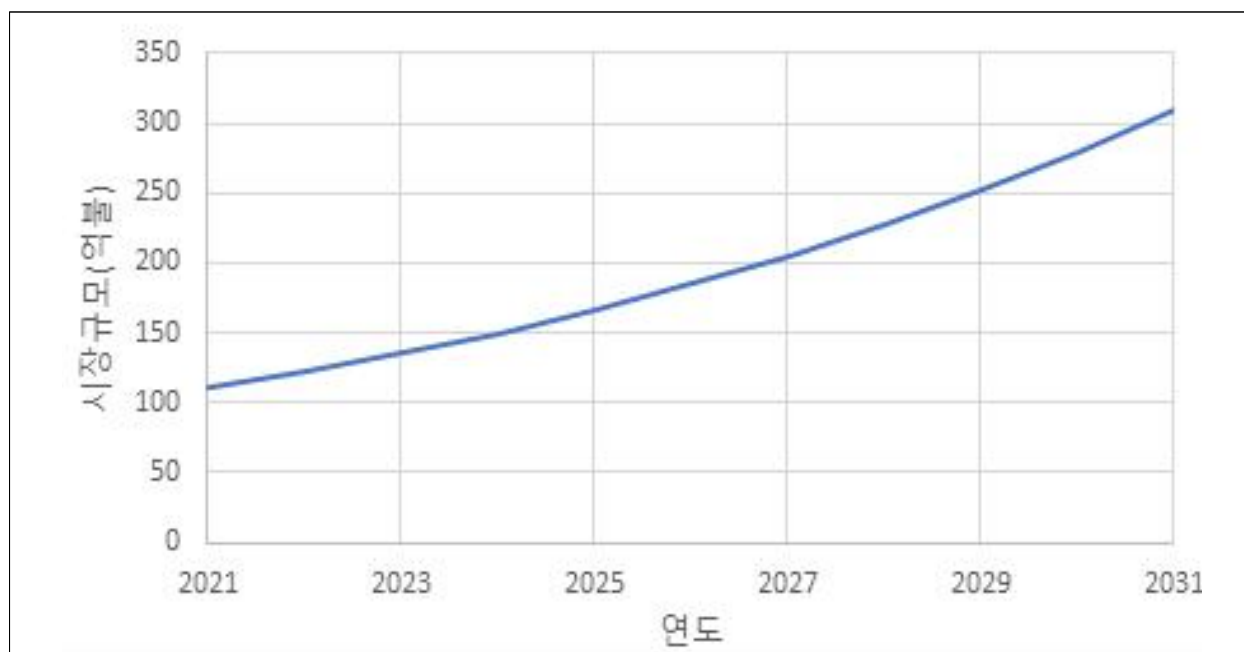
사업명 (부처)	과제명 (과제기간)	주요내용	본 과제와의 차별점	연계 추진방안
○ 소재부품자립화 사업 / 산업부	○ 천연가스로부터 고결정성 전도성 흑연구조를 갖는 탄소소재 개발 ○ 2020.01.01.~2024.12.31.	○ 천연가스 열분해를 통한 흑연구조를 갖는 탄소소재로의 변환	○ 소재중심의 생산으로 수소 생산의 한계	○ 연구진행 파악 및 수소의 생산성 향상시킬 기술의 방안 모색
○ 핵심소재 개발사업	○ 수소전기차 연료전지용 전극용 카본소재 개발 ○ 2019.04.01.~2025.12.31	○ 아세틸렌 블랙의 고온열분해를 통한 카본블랙 제조	○ 아세틸렌의 열분해로 방열반응 공정임	○ 기 구축 장비를 활용한 메탄 열분해 연구 연계 추진

2) (핵심기술 2-2) 고체탄소 소재의 대규모 고부가가치화 응용 기술개발

(1) 배경 및 필요성

가. 추진배경

- 본 과제에서 대용량으로 생성되는 고체탄소는 연간 3,000톤 이상의 규모로, 플라즈마 열분해에 의해 생성되는 고체탄소 부산물은 대체로 카본블랙 형태일 것으로 예상
- 카본블랙의 대규모 응용분야는 고무충진용으로 약 80% 이상의 카본블랙의 수요처이나, 성숙단계의 기술로, 신규 진입이 어려운 실정
 - 이에 비해 전도성 복합재 분야는 현재도 그 수요가 크게 필요하면서도 표준화 되어 있지 않는 분야임
- 국내에서는 고성능 전도성 카본블랙에 대한 수요가 매우 높은 실정이나, 국내 생산기술로 공급되는 양에는 한계가 있는 것으로 보임
 - 전세계의 전도성 복합재의 시장은 2021년 약 110억불이며, 연평균 11% 성장으로, 2030년 약 300억불의 시장 규모를 가질 것으로 예상
 - 가장 큰 시장을 형성하고 있는 분야는 전기 및 전자기기분야로 약 36%의 시장을 점유하고 있음. 이외에도 전기자동차 및 바이오 산업에서의 수요가 증가 추세

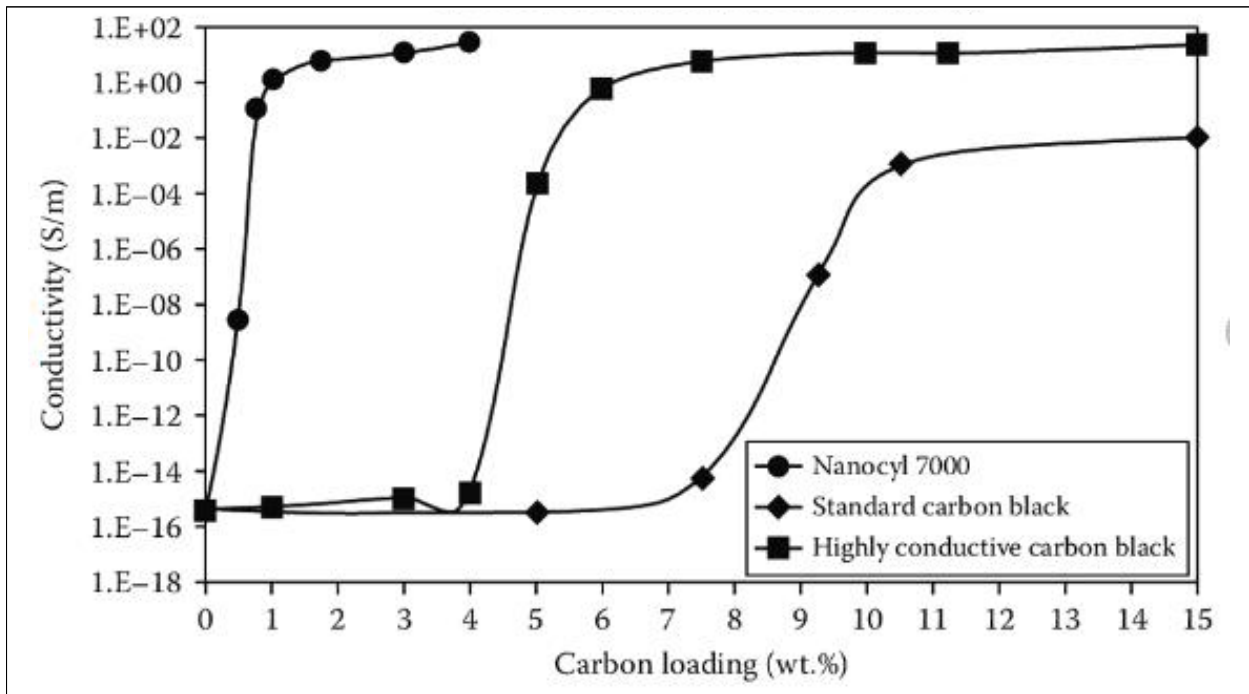


출처 : transparency, global conductive plastic compounds markets, 2022

[그림 VI-36] 전도성 플라스틱 시장 전망

나. 추진 필요성

- 본 과제에서 대용량으로 생성되는 카본블랙은 연간 3,000톤 이상의 규모이며, 수소생산 및 카본블랙의 경제성 확보를 위한 대규모의 적용 및 고부가가치 응용 분야 발굴 필요
 - 모노리스사가 개발한 수소동시 생산시 합성되는 대규모 카본블랙을 적용하기 위하여 타이어 기업과 고무 기업과의 협의 진행중이며, 본 과제의 수소 생산의 성공적인 요소는 부산물로 생산되는 고체탄소의 대량의 수요가 필요한 응용처의 발굴 필요



출처 : Carbon nanotube/polymer composites, 2010

[그림 VI-37] 탄소나노튜브와 전도성 카본블랙의 전도성 임계값 비교

- 본 과제에서 생성될 것으로 보이는 고체탄소는 대부분의 카본블랙과 일부 탄소나노튜브가 혼합된 형태로 배출될 것으로 예상
 - 카본블랙과 탄소나노튜브 혼합 고체탄소를 전도성 충전제로 사용되는 경우 기존 전도성 카본블랙과 탄소나노튜브의 전도성 및 기계적 특성의 중간 정도 특성을 보여 카본블랙만으로 이루어진 전도성 복합재보다 높은 특성을 보일것으로 예상
- 탄소나노튜브 만으로 이루어진 경우, 고분자 수지내의 좋은 분산을 위해서는 많은 에너지가 소모되지만, 탄소나노튜브와 탄소나노튜브 상이의 카본블랙은 공간적 분산제 역할을 함으로써, 분산이 유리할 것으로 보임
- 플라즈마를 이용하여 생산된 카본블랙을 포함한 카본블랙은 아직까지 적용사례가 없으며, 카본블랙과 탄소나노튜브 혼합 고체탄소는 더욱 사용한 경우가 없으므로 국가

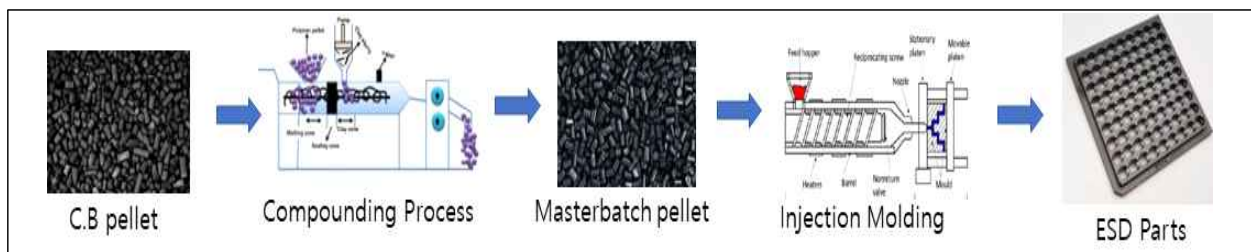
과제를 통한 플라즈마 생산 혼합 고체탄소에 대한 전도성 복합재 적용 연구 및 실증을 통해 예상되는 잠재 수요기업에 수용성을 높일 필요가 있음

- 본 과제를 통해 고순도화, 고결정, 기능화된 고체탄소에 대해 대규모 응용이 가능하면서도 상대적으로 고부가가치가 높은 전도성 복합재 분야에 적용 실증을 위해서는 고함량 고체탄소 마스터 배치 및 이를 활용한 도전성 복합재 응용부품의 제조 및 평가가 반드시 필요함

(2) 핵심기술 개요

가. 개념

- 고체탄소를 대규모로 사용되는 전도성을 필요로 하는 전도성 복합재 응용부품에 적용을 위한 마스터배치 컴파운딩화 및 전도성 복합재 응용부품의 제조 및 평가를 통한 실증 추진



[그림 VI-38] 핵심기술 2-2의 주요 공정기술

나. 범위

■ 고성능화된 고체탄소와 고분자수지와의 혼합을 통한 고함량 고체탄소 마스터배치 전도성 플라스틱 컴파운딩 및 이를 이용한 ESD 부품 제조 및 실증

- (구성기술 1) 고체탄소 고함량 Master-batch화 기술
- (구성기술 2) ESD*용 응용 부품 제조 및 실증

* Electro Static Discharge(정전기 방전)

〈표 VI-53〉 핵심기술 2-2의 구성기술 범위

구성기술명	기술개발 정의 및 범위
고체탄소 고함량 Master-batch화	○ 후처리 공정에 의해 성능 향상된 고체탄소를 대규모로 고부가가치 응용분야에 적용을 위한 중간재 제조를 위한 “고분자수지와의 고함량 혼합의 마스터배치 컴파운딩 기술”을 포함함
ESD용 응용 부품 제조 및 실증	○ 고함량의 고체탄소가 혼합된 마스터배치 컴파운딩을 목적한 함량으로 희석하여 부품을 제조 및 평가하는 “사출성형 기술 및 평가”를 포함함

(3) 기술개발 목표

가. 핵심기술의 개발 목표

■ 정성적 목표

- 합성된 고체탄소의 성능 향상을 통한 고부가가치화 기술 개발

■ 정량적 목표

- 마스터배치 : 고체카본 함량 40% 이상의 전도성 복합재
- 전도성복합재 전도도 : $10^3 \Omega\text{cm}$ at 15% 고체탄소 함량

■ 성능 목표

〈표 VI-54〉 핵심기술 개발목표

핵심기술명	성능지표	현재 스펙	개발 목표 스펙	
			1단계	2단계
고체탄소 소재의 대규모 고부가가치화 응용 기술 개발	고체탄소함량 (wt%)	30%	30%	40%
	시편전도도 (Ωcm) at 15wt%	$10^2 \sim 10^5$	10^4	10^3

나. 목표 설정 근거

- 고체탄소 함량 : 현재의 30%보다 높은 도전적 목표 설정
- 시편 전도도 : 현재의 전도성 카본블랙의 전도성은 필러 함량 15%에서 약 $10^4 \Omega\text{cm}$ 의 전도도를 나타냄

(4) 과제 중복성·차별성·연계방안

가. 타 연구과제와의 차별성 및 연계성

■ 산업부 소재부품자립화사업

- 천연가스로부터 탄소소재를 개발하는 연구가 진행중이나, 탄소소재 생산 중심의 연구개발이 이루어져 수소생산율이 낮은 실정
 - 본 과제와의 연계를 통해 수소 생산성 향상시킬 방안 모색 및 추진

■ 산업부 핵심소재부품개발사업

- 수소자동차에 사용되는 촉매의 담지체인 아세틸렌 블랙 개발과제로, 소규모 파일럿을 이용하여 아세틸렌 가스를 열분해하여 탄소소재를 생산하는 방식이나, 아세틸렌의 발열반응으로 메탄의 흡열반응과는 차이가 있음
 - 기 구축 장비의 활용을 통한 연계로, 메탄 분해의 연구를 일부 진행할 수 있을 것으로 예상

〈표 VI-55〉 차별성 및 연계방안 요약

사업명 (부처)	과제명 (과제기간)	주요내용	본 과제와의 차별점	연계 추진방안
○ 소재부품자립화 사업 / 산업부	○ 천연가스로부터 고결정성 전도성 흑연구조를 갖는 탄소소재 개발 ○ 2020.01.01.~2024.12.31.	○ 천연가스 열분해를 통한 흑연구조를 갖는 탄소소재로의 변환	○ 소재중심의 생산으로 수소 생산의 한계	○ 연구진행 파악 및 수소의 생산성 향상시킬 기술의 방안 모색
○ 핵심소재 개발사업	○ 수소전기차 연료전지용 전극용 카본소재 개발 ○ 2019.04.01.~2025.12.31	○ 아세틸렌 블랙의 고온열분해를 통한 카본블랙 제조	○ 아세틸렌의 열분해로 방열반응 공정임	○ 기 구축 장비를 활용한 메탄 열분해 연구 연계 추진

3절 [중점분야3] 도시 내 수소 공급을 위한 플랫폼 개발 및 Plant 구축 운영

1. 추진배경 및 필요성

- 현대 도시는 에너지 수요처로서 탄소 중립을 실현시키기 위해서는 반드시 에너지 공급 전략이 수립될 필요가 있음
 - 에너지 최종의 수요처로서 도시는 전력 공급 그리고 연료로서 수소 공급 사이의 연계성 확보가 미래 도시 발전을 위한 최종 지향점임
- 도시의 수소 공급은 안전성 기반의 사회적 합의가 필요한 정책이며, 또한 도시 전체의 안정적 에너지 공급을 위한 예측 및 운영기술이 필요함
 - 사회적 합의 구성 요소를 위한 환경 조성 및 안전망 구축이 필요하며, 이는 수소 도시 실증을 통한 수용성 확보를 통해 이루어질 수 있음
 - 현 수소에 대한 막연한 불안감 해소를 위해서 민·관·산·학·연의 끊임없는 의사소통 창구가 필요하며, 직·간접적인 수소 사회 경험을 위한 공간 창출이 필요
 - 아울러, 도시의 안정적 에너지 공급을 위해서는 에너지 원별 수요와 공급을 예측하고, 에너지 공급망을 운영하는 기술이 요구됨
- 도시의 에너지 공급은 다양한 에너지와의 역할분담 및 안정적 에너지 공급 체계의 실증에 있으므로 대도시, 산업 도시 등에 따른 에너지 간의 연계성에 중점을 두고 운영 전략을 수립해야 함
 - 대도시와 산업도시는 사용되는 에너지의 영역이 구분될 수 있으므로, 각 도시별 에너지 운영전략을 차별화해야 함
 - 이를 위한 다양한 전략 수립체계 및 데이터 확보는 미래 탄소중립 도시를 위해 중요한 사항이며, 각 운영전략 및 도시 별 맞춤형 수소 공급을 위한 다양한 수소 생산기술 확보가 필수임

- 수소는 다양한 기술에 의해 생산이 가능하나, 저탄소 혹은 무탄소는 재생에너지 기반 수소와 열분해 기반 수소 등이 유일함
 - 재생에너지 기반이 열악한 지역에서는 청록수소 기술이 특히 더 중요하며, 향후 CCSU 기반 추출 수소, 수전해 수소 등과 핵심기술로 역할을 담당할 것임
 - 따라서, 현 상용화된 수전해 및 추출 기술외 청록수소 생산을 위한 기술의 실증은 미래 도시 운영을 위해 중요함
- 청록수소 생산 기술은 선진국 등과 기술 개발 경쟁 중인 기술로 기술 표준화를 통한 기술 선점이 필요함
 - 청록 수소가 청정 수소 생산 기술로 시장의 한 축을 담당하기 위해서는 기술적 완성도와 탄소 중립 방향성과의 적합성 등의 평가가 요구되며, 이를 통한 법적/사회적 요건의 기준 마련이 필요함
 - 또한 청록 수소 산업 생태계 구성을 위해서는 수소산업 가치사슬과의 적합도 및 기술 표준화가 요구되므로, 도시에서의 에너지 공급체계 내 하나의 축으로 활용가능성을 평가해야 함
- 청록수소는 현재 핵심 단위 요소기술 개발 단계에 있으며, 상용화를 위해 시스템 엔지니어링 기술과의 접목이 필요함
 - 청록 수소 생산 기술은 선진국 중심으로 현재 요소 기술이 상용화 단계에 있으나, 에너지 공급을 위한 체계적인 시스템 구축은 아직 파일럿 단계로 스케일업을 통한 시스템 엔지니어링 기술이 상용화를 위한 필수적 요소임
 - 따라서, 청록수소 기술은 도시 실증과 접목하고 이를 통해서 시장 확대를 위한 사업화 모델 개발 및 데이터 확보가 향후 시장 선점의 필수적 요소임
 - 또한 향후 청록수소 플랜트 상용화시 시장 선점을 위해서는 기술의 표준화를 위한 작업이 필수적이며, 이를 위해서 DB 구축과 제도적 정비가 요구됨



[그림 VI-39] 기술개발 요약

2. 사업정의 및 범위

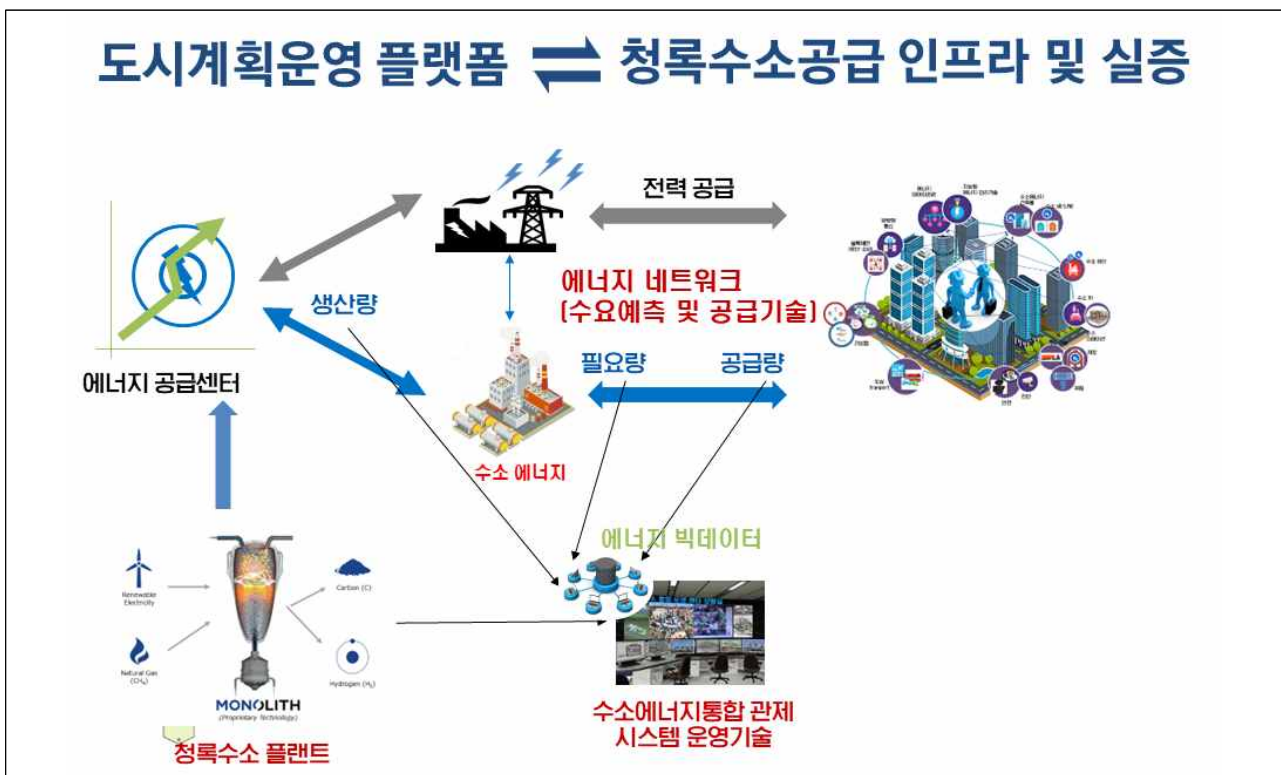
■ 사업정의

- 도시 내 수소 공급을 위한 플랫폼 개발 및 기술 표준화와 Plant 구축·실증 운영
 - (핵심기술 3-1) 도시 수소 공급을 위한 디지털 플랫폼 및 성과 확산 로드맵 개발
 - (핵심기술 3-2) 청록수소 플랜트 안전 및 기술 표준화
 - (핵심기술 3-3) 청록수소 플랜트 구축 및 실증 운영

■ 사업범위

- (핵심기술 3-1) 중점 1, 2에서 개발된 청록수소 플랜트 기술 및 운영 데이터를 활용한 “각 기술별 통합 플랜트 운영에 따른 탄소 발생량 분석기술 및 전과정 평가”, “전체 플랜트 경제성 평가 기술”, 그리고, “도시 에너지 사용에 따른 탄소 추적/발생량 맵 및 탄소 중립 효과성 분석을 토대로 성과 확산 로드맵”을 개발
 - 각 중점별 data를 토대로 DB를 구축하고 시뮬레이션 툴을 개발
 - 플랜트 운영 결과를 토대로 현재와 미래의 플랜트 경제성 평가
 - 도시 전체로 확대할 수 있는 AI 알고리즘과 도시내 에너지 밸런스를 위한 디지털 공급 플랫폼을 개발

- (핵심기술 3-2) 청록수소 플랜트의 “세부적인 단위 공정들에 대한 안전과 진단 기술”, 각 핵심 기술들에 대한 기술 표준화 및 제도화”를 포함
 - 청록수소 플랜트의 단위 공정에 대한 안전 평가 기술을 개발하고 기술 표준화를 위한 제도화*를 추진
 - * 제도화 추진을 위해 사용자 및 수요대상에 대한 테스트 실시
 - 또한 각각의 단위 공정에 대한 기술 트리를 만들고 설치 기준에 대한 제도를 마련하고 추진
- (핵심기술 3-3) “1MW급 플라즈마 직접열분해와 촉매화학반응 연계공정”으로 대용량 청록수소 생산 후 “수소 분리·정제 공정”의 후공정을 통한 고순도 수소를 공급하는 통합 Plant 구축 및 실증 운영
 - 플라즈마-촉매 연계공정 및 수소 분리·정제 공정의 3.0톤/일 수소 생산 실증
 - 국내 수소 수요처 Site 디지털 엔지니어링 및 실증플랜트 구축
 - 1MW 급 Plant 통합운영 및 최적 운영절차 확보



[그림 VI-40] 중점분야3 기술개발 개념도

3. 국내외 환경분석

1) 산업·시장 동향

■ '15년 파리협약을 통해 글로벌 탄소저감 목표를 수립

- '92년 UN 기본 협약 이후 '15년 파리협약까지 글로벌 협력 논의를 통해 “지구 평균온도 상승폭을 산업화 이전 대비 2℃ 이하로 유지”하는 목표를 수립
 - '12년 이후 세계 누적 온실가스 배출량은 1,000 GtCO₂, 연간 배출량은 2030년 42 GtCO₂ 수준에서 제한할 것을 협약
 - * 191개국에서 참여하였으며, '21년 “국가 온실가스 감축목표” 보고서를 발표
- 글로벌 그린 뉴딜 및 탄소세 부과 정책 수립
 - '22년 7월 탄소 국경 조정제도 도입을 포함한 입법 “FIT for 55” 발표를 통해 전기, 시멘트, 철강, 알루미늄 등의 탄소배출 과다 품목에 탄소국경세 *적용
 - * 지구 온난화 화석에너지 사용량에 따라 부과하는 세금
 - 한국은 석탄 화력이 전력 생산의 40% 내외이므로 탄소 국경세 영향이 큼

〈표 VI-56〉 탄소세, 탄소국경세 도입에 따른 국내 기업 부담 전망

(\$/ tCO2)		탄소국경세 도입시 국가별 과세 전망 (36\$/t CO2 기준)			
스웨덴	127	EU 탄소 배출 과세 분석 (단위=억달러·%) *과세 금액은 EU가 이산화탄소 1t당 36달러를 부과했을 경우. 자료=대외경제정책연구원 	국가	과세 금액	관세율
스위스	96		중국	119.13	2.6
핀란드	60~70		러시아	64.34	3.9
노르웨이	59		미국	35.41	1.1
아이슬란드	31		인도	24.15	4.6
덴마크	23~26		터키	15.95	2.0
프랑스	25		한국	10.61	1.9
영국	24		일본	7.82	0.8
포르투갈	7		노르웨이	7.30	0.9
일본	3		스위스	6.95	0.5
평균	36				

출처 : 청정수소가 초래하는 사회변화와 주요이슈, 2022

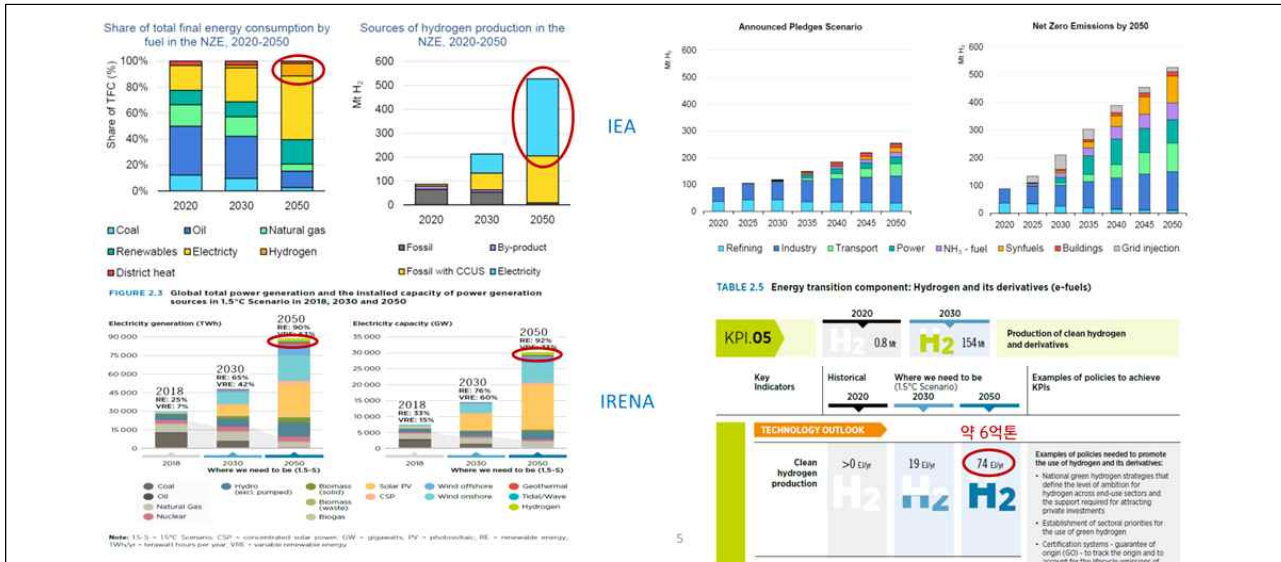
- 글로벌 탄소 중립을 위한 탄소 저감의 핵심은 에너지 효율화와 재생에너지 확대를 통한 화석 에너지 저감에 있음
 - 국제 에너지 기구 등은 보고서 등을 통해 재생에너지 확대를 주장하였으나, 재생에너지의 간헐성에 의하여 ESS 혹은 수소에너지 등의 보완수단이 요구됨

■ '15년 파리협정 이후 탄소저감을 위한 에너지 정책은 재생에너지 활용에 집중함에 따라 재생에너지 및 수소에너지 시장의 확대가 예상

- 파리협정 목표 달성을 위해 국가별 탄소배출 절감 정책을 수립하여 실행 중에 있음
 - (EU) 탄소중립 지역을 위한 그린딜 정책 발표
 - * 태양광, 풍력 등 신재생에너지 비중 확대 및 2030년 기준 수소경제 규모 70배 확대
 - (미국) 글로벌 그린 뉴딜 트렌드 확대
 - * 친환경 인프라 투자의 확대: 태양광 및 풍력 등의 재생에너지 관련에 집중투자
 - (일본) 5차 에너지 기본계획을 통한 재생에너지 수급 및 수소 활용정책 수립
 - * 해외 저가 수소 수입과 국제적 수소공급망 구축 그리고 연료전지에 초점
 - (중국) 수소차 및 수소 충전소 중심의 정책 수립을 통해 자체 수소 5,000만톤 생산 목표 및 수소 비중 10%로 확대
 - * 수소 시범도시 구축을 주요 목표로 추진
 - (호주) 세계 3대 수소 수출국을 목표로 수소 허브를 위한 정책 수립
 - * 한국, 일본, 싱가포르 등의 국가간 협력을 중점적으로 추진
- 국제 에너지 협회 및 재생에너지 협회는 탄소 중립을 위한 에너지 사용 전망을 발표
 - '50년 기준 NZE (Net Zero Emission)을 위해서 요구되는 수소 요구량은 5-6억톤/년 범위에 있을 것으로 발표
 - 수소 생산을 위한 기술은 재생에너지 기반이 60%, 화석 기반 (CCU 포함)이 40%로 발표함
 - 이러한 전망은 향후 수소 시장의 핵심 기술은 재생에너지 기반의 수전해 기술이 될 것을 암시함

■ 향후 수소 시장은 '30년까지 연평균 54% 이상의 성장률을 보일 것으로 예측되며, 시장규모가 약 890억\$ 수준으로 성장할 것으로 조사

- 전반적인 시장 주도 기술은 수전해 기술이 될 것으로 발표하였으며, '21년 기준으로 유럽시장이 활성화될 것으로 예상되나 향후 중국을 중심으로 아시아의 성장이 예상
- 성장률 46.5%를 기준으로 '30년 기준 310억불 내외의 시장 성장을 예측한 결과도 있음
 - * RESEARCH AND MARKETS의 2022 보고서 (Green Hydrogen Global Market Opportunities and Strategies to 2031: COVID-19 Impact And Recovery)



[그림 VI-41] 국제에너지 협회 및 국제 재생에너지협회의 수소 관련 에너지 전망

■ 청록수소의 생산 단가는 '30년까지 경제적으로 그린수소에 비해 경쟁력이 있을 것으로 예측함

○ IGU 사는 '50년 기준으로 핵심이 될 것으로 예상되는 수전해, SMR, 열분해 수소 생산 방식을 각각 비교한 가격 경쟁력에서 현재 기준으로는 수전해에 비해 열분해 방식이 경제적인 것으로 발표

- EUI사도 유사한 결과를 발표한 바 있음

- IGU와 EUI사는 '50년 기준 Blue 수소의 가격 경쟁력 면에서 다른 견해를 나타내고 있음

○ 따라서, 현재 기준으로 재생에너지 환경이 좋지 못한 국가에서는 청록수소 생산 방식을 고려할 필요가 있음

- 단, 이러한 결과값은 천연가스의 가격과 연동되기 때문에 국내처럼 전량 수입에 의존하는 국가는 별도의 검증이 필요함

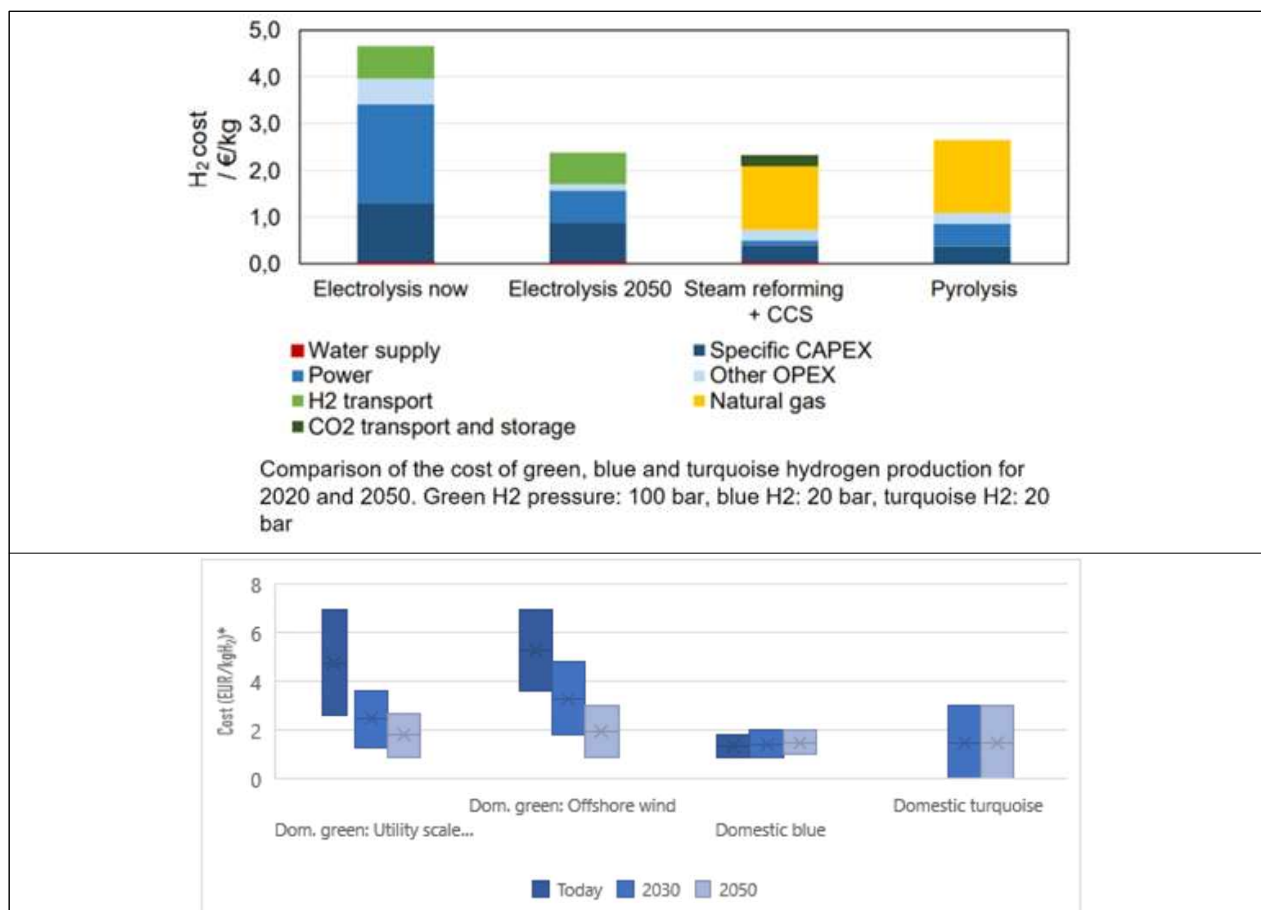
○ 청록수소의 대표적인 기업은 모노리스 사(미국)로 '12년 파일럿 플랜트 개발 이후 첫 번째 유닛이 건설되었음

- 약 2,000톤의 천연가스로부터 1,500톤의 블랙카본과 5,000톤의 수소를 생산

- 추가적으로 11개의 플랜트를 건설할 계획하에 있음

- 현재 일본 미츠비시 중공업과 SK E&S가 모노리스 기술에 투자함

- 미국의 NW Natural, 영국의 HiiROC 사도 열 플라즈마 공정, 캐나다의 PyroGenesis사, 그리고, 독일의 Zukunft Gas 사도 유사한 공정을 개발함



[그림 VI-42] '50년 기준 핵심 수소 생산 단가 비교 (위: IGU사, 아래: EUI사)

2) 기술개발 동향

(1) 해외

■ 유럽을 중심으로 탄소중립을 위한 도시 운영의 핵심기술은 스마트 에너지 시티로의 진입으로 규정

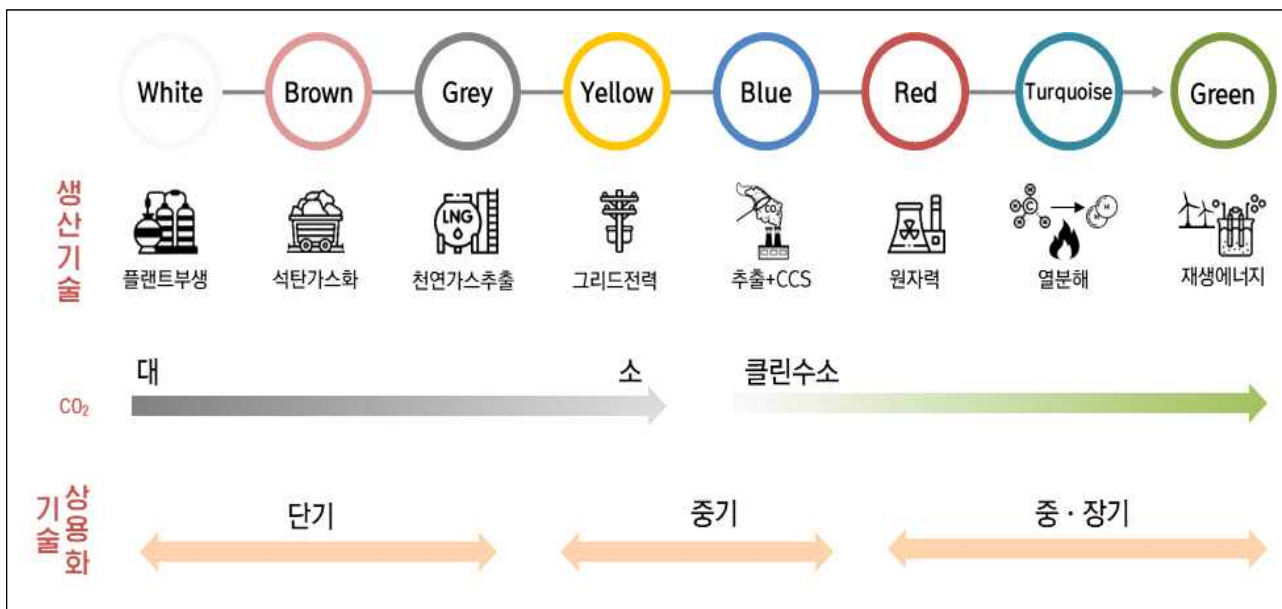
- 유럽에서 제시하는 도시 에너지 효율화를 위한 기술은 스마트, 디지털, 그리고 데이터의 활용임
 - 제로에너지 빌딩 (인프라 전환), 재생에너지에 의한 전력 공급 (에너지 네트워크 및 스마트 전력 그리드), 순환경제 체계 구축 (폐자원 재이용), 스마트 에너지 시티를 위한 에너지 통합 관리 시스템 (디지털 트윈, AI),
 - 빅데이터 및 디지털 기술(5G, 사물인터넷 등)을 통한 디지털 탄소발자국 평가 기술
 - 디지털 트윈 기반의 계획 도시
- 대부분의 탄소 중립 도시를 위한 과제는 3가지로 구분될 수 있음*

- 건물, 교통 그리고 산업의 사용 연료에서 온실가스 무배출
- 에너지 공급망에서의 온실가스 무배출
- 도시내 발생 폐기물의 처리공정에서 온실가스 무배출

* C40CITIES Research & Analysis의 Carbon neutrality for cities Report 참고

■ 도시의 에너지 전환 목표 중 핵심은 재생에너지 활용이며, 이에 따른 다양한 전략적 보안책으로서 수소 생산 및 수소를 활용한 전력생산 기술에 주목

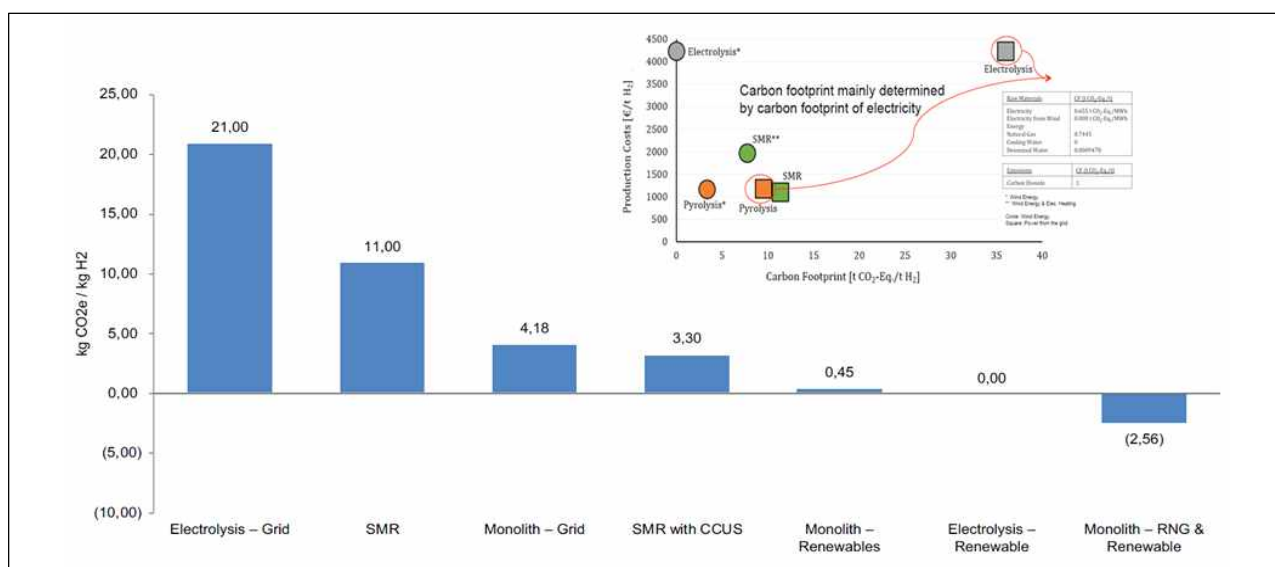
- 수소는 다양한 분류가 가능하나, 생산을 위한 에너지 소스와 생산기술의 탄소배출을 기준으로 색깔별 수소를 구분하는 것이 일반적임
 - (탄소 배출) 흰색 수소, 갈색 수소, 회색 수소, 노랑 수소
 - (클린 수소) 파랑 수소, 빨강 수소, 청록 수소, 그린 수소
 - 실제 청정 수소는 엄격한 의미에서 그린 수소외에는 없음
- 수소 생산 기술에 따른 중장기적 수소 생산 기술에 대한 로드맵을 검토
 - 단기적으로 SMR에 의한 추출 수소로부터 장기적으로 재생에너지 활용 수전해 기술까지 연계하기 위해 추출수소 생산기술과 그린수소 생산기술 사이를 연계시켜주기 위한 기술적 검토가 필요한 상황



[그림 VI-43] 수소 종류별 예상되는 기술 상용화 시기

■ 클린 수소 카테고리에서 현실적인 중기 대안으로서 탄소 중립을 위한 수소 생산 기술로 청록수소 생산기술이 주목받고 있음

- 중기에서 장기로 연계되는 무탄소에 근접한 기술은 청록수소가 대안
 - 특히 그린 수소가 생산단가 면에서 경제성이 부족한 현 시점에서 가장 무탄소에 근접한 청록수소 기술에 주목
 - 비록 추출 방식보다는 가격경쟁력이 없으나, 그에 비해 이산화탄소 배출량이 없으며, 발생하는 카본의 고 부가가치화에 따라 경제성 확보가 가능할 수 있다는 장점이 있음
- 각각의 수소생산별 CO₂ 발생량은 비록 CCUS에 의한 SMR 보다는 많지만, 다른 비교적 클린 수소에 근접할 수 있음
 - 모노리스사에서 발표한 이산화탄소 발생량은 4.18 CO₂/kg H₂이며, 이는 전력사용을 통한 수전해 수소의 21 CO₂/kg H₂에 비해 약 5배 효율화한 것임
 - 또한 BASF 사에서 '18년 유사한 결과를 발표한 바 있음



[그림 VI-44] 핵심 수소 생산기술에 따른 CO₂ 발생량

■ 수소 생산 기술에 따른 경제성은 결국 에너지 효율성에 의해 결정되며, 현재 기술수준으로 가장 효율이 좋은 것은 추출 수소

- 이상적으로 석탄 가스화는 효율이 60%, 추출 수소 75%, 수전해 50-70%, 메탄 열분해 55% 등의 에너지 효율로 계산될 수 있음
 - 그러나, 실 플랜트에서의 효율은 다양한 변수에 의해 더 떨어질 수 있으며, 이러한 수치는 열역학적으로 계산된 것임

■ 청록수소 생산은 메탄에 의한 추출수소 생산 시 발생하는 이산화탄소 문제를 해결하고자 연구되고 있으며, 이산화탄소 대신 순수 탄소가 발생되며, 이러한 탄소는 그래핀, 탄소나노튜브 등의 고부가가치를 가지는 생성물로 변환

○ 청록수소를 생산하기 위한 기술은 열 분해, 플라즈마 분해, 촉매 분해 등으로 구분되며, 촉매 반응은 열분해 기술에 소요되는 열량을 낮추기 위해 개발됨

- 그러나, 실제 플라즈마 분해 기술에도 메탈 기반의 촉매가 사용됨

○ 기술개발 중 핵심은 전체 공정 효율 증대, 생산된 수소의 고순도화, 그리고 높은 생산단가 등이며, 이에 초점을 맞춘 연구가 진행

- 가장 중요한 요소는 메탄 에너지에 비해 낮은 에너지를 생성한다는 것으로 최대 효율을 증가시키기 위한 촉매 반응 혹은 대체 반응 개발임

※ 반응식 : CH_4 (804 MJ) + 외부에너지 (전기 75 MJ) $\rightarrow$ 2H_2 (484 MJ) + C (그래핀 화)

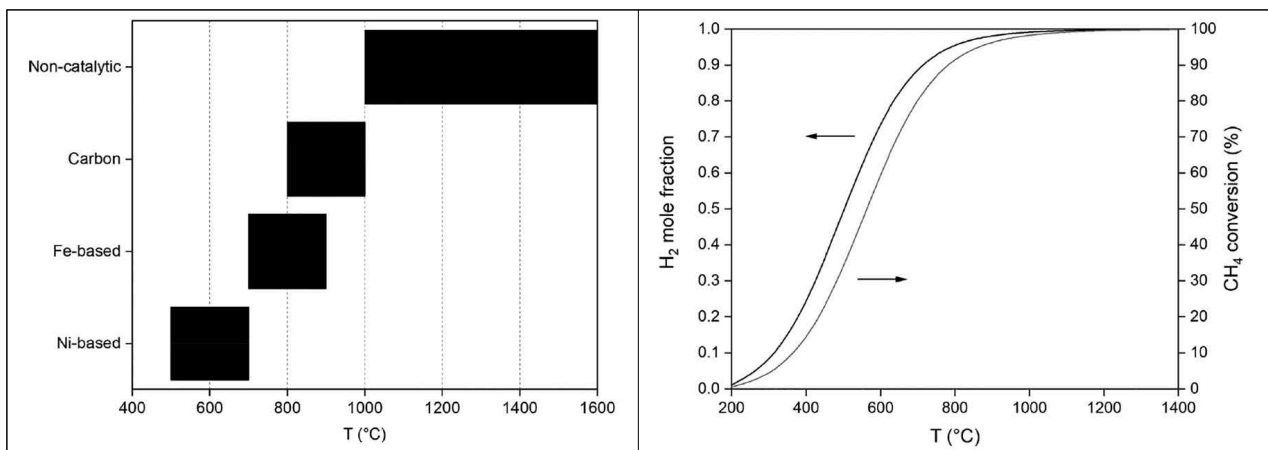
- 생성 반응식에서 이론적인 효율은 약 55%이며, 이는 실 운전에서 생산할 수 있는 다양한 변수를 고려시 플랜트 기술 목표는 “약 40~50%” 내외 임을 알 수 있음

■ 청록수소 생산의 경제성 확보를 위한 변수로서 열 대체 기술과 효율 확대를 위한 기술 개발이 필요함

○ 일반적인 메탄의 열분해를 통한 운전조건은 1,200℃ 전후에서 효율적이며, 이러한 온도를 낮추기 위해 촉매 연구 및 열 대체 연구가 실시

○ 현재 연구되는 촉매는 Ni, Fe, Co와 CeO_2 , La_2O_3 , SiO_2 등의 조합이 있음

- 촉매 사용시 온도를 700~800℃까지 낮출 수 있는 것으로 알려짐



출처 : Sanchez-Bastardo et al, Ind. Eng. Chem. Res. Vol. 50, pp. 11855-11881, 2021 참고

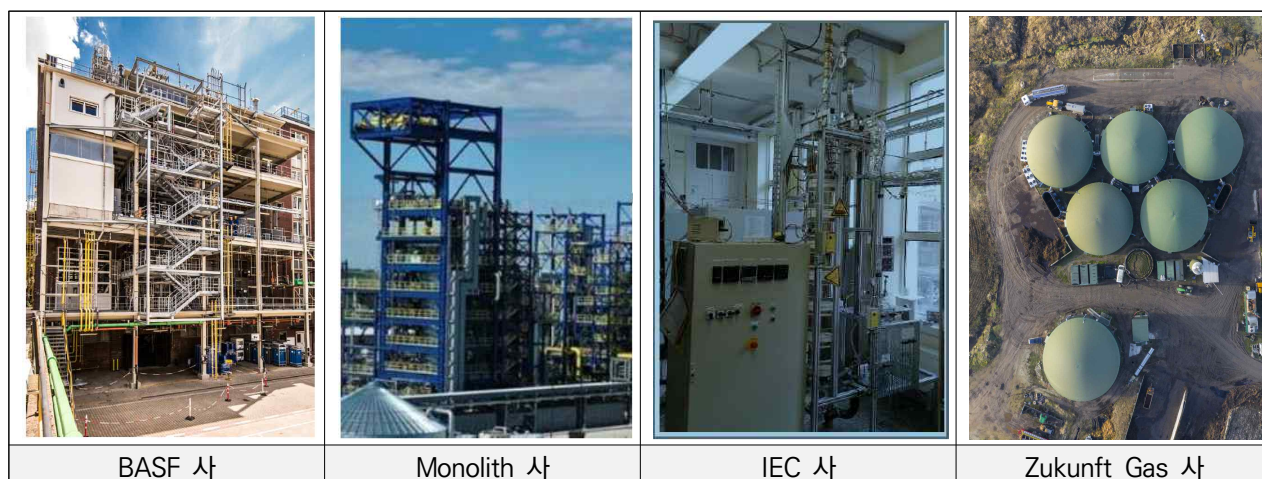
[그림 VI-45] 촉매 종류에 따른 열분해 공정 운전 온도

- 모노리스를 포함한 다양한 회사의 초점은 플라스마에 의한 전기 열 방식으로 이를 해결하고자 하고 있음
- 또한 순수 카본 전환기술이 동반되어야 하며, 메탄전환율이 높을수록 효율적이므로 이를 위한 촉매기술, 그리고 대형화 기술이 지속적으로 연구되고 있음

- 적용 장소에 고온의 폐열이 존재할 경우 이를 대체하는 엔지니어링 기술이 필요

■ 현재 모노리스사는 상용 플랜트를 운영하고 있으며, IEC 사를 포함한 다양한 기업에서 파일럿 연구를 진행중에 있음

- 대표적으로 모노리스, IEC, BASF, Zukunft Gas사 등이 있으며, 청록수소 생산 플랜트의 상용화 선두 그룹들임
- 최근 SK 에너지와 미츠비시 중공업도 이 기술에 관심을 가지고 모노리스사에 투자를 한 바 있음



[그림 VI-46] 대표적인 청록수소 생산 기업의 실증 플랜트

■ 플라스마 반응은 열 플라스마와 비평형 플라스마로 구분되어 적용되나, 일반적으로 수소 생산을 위해서 열 플라스마를 적용함

- 상대적으로 microwave를 활용하는 비평형 플라스마 기술로 상용화가 시도되고 있음
 - 대표적으로 캐나다의 Aurora Hydrogen사가 스타트업 기업으로 이 기술을 가지고 상업화를 준비하고 있음
 - 그러나, 실제 열 플라스마에 비해 메탄 전환율이 낮은 것으로 알려짐

■ 재생에너지는 수소와의 연계성으로 인하여, 다양한 수소 생산 로드맵을 추진 중

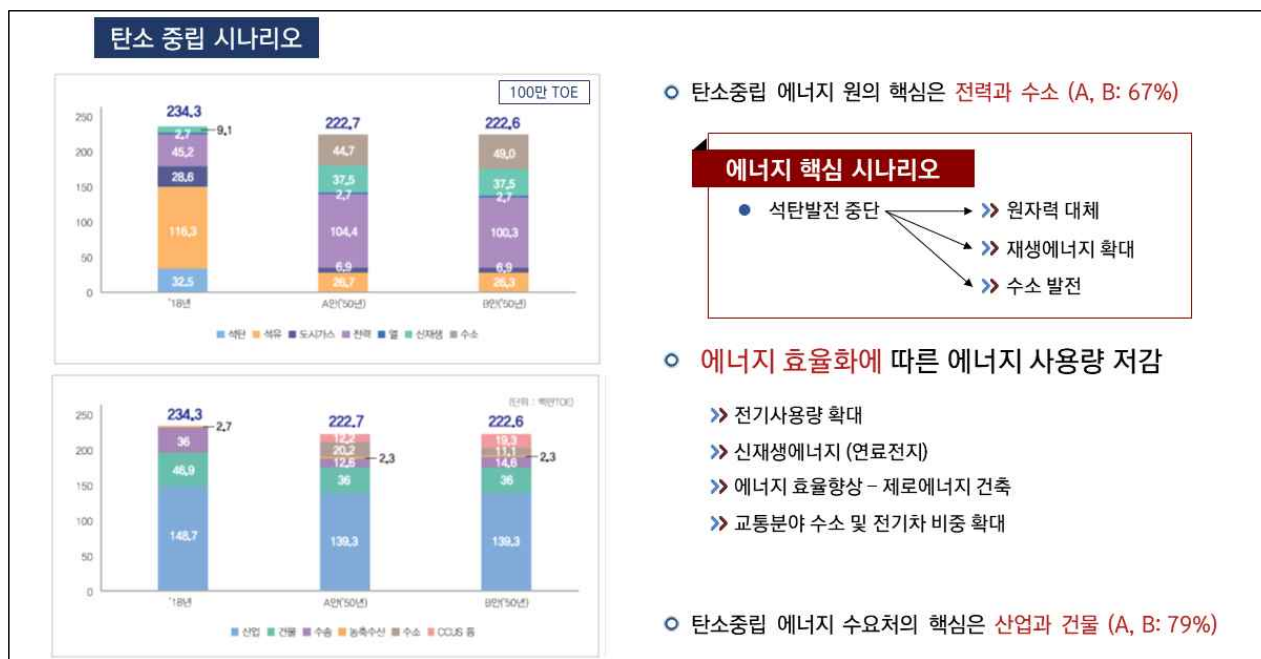
- 유럽을 중심으로 도시의 넷 제로에 대한 전략을 실행중에 있으며, 핵심은 재생에너지로의 전환, 친환경 자동차 전환, 건물에너지 효율화 그리고 폐기물 자원화 및 에너지화로 요약될 수 있음
 - 단기적으로는 추출수소 생산방식이나, 최종 궁극적인 목표는 재생에너지와 수전해 기술을 통한 그린 수소라는것에 이견이 없음
 - 청록수소의 핵심은 추출수소에 비해 경제성이 부족하나 이산화탄소가 발생하지 않으면서 천연가스를 분해하여 수소를 생산할 수 있다는 것임
- 추출수소 방식과 수전해 수소 생산 방식 사이의 연계고리로서 청록수소에 대한 기업의 관심도가 증가하고 있음
 - 청록수소 생산기술은 열분해와 플라즈마 분해로 크게 구분되나, 대부분의 기술적 초점이 플라즈마 분해에 있음
 - 열분해는 열원 공급 문제가 있으며, 촉매 기술개발에 초점이 맞추어짐
- 다양한 에너지 네트워크의 핵심은 스마트 에너지 시티로의 전환이며, 이를 위한 디지털 기술 및 운영을 위한 AI 기술 등의 개발이 필요함
 - 스마트 에너지 네트워크는 결국 도시내 존재하는 다양한 에너지의 그리드화로 귀결될 수 있으며, 이에 대한 데이터 및 AI를 통한 관리 시스템 운영이 중요

(2) 국내

■ 국내 도시의 넷 제로 탄소 배출 저감은 도시 건물과 전력 공급 수단에 의존

- 일반적인 해외의 대도시 넷 제로 탄소 배출 저감 전략과 유사한 전략을 추진
 - 건물의 에너지 효율화, 친환경 교통수단, 재생에너지 전력 공급 등으로 정리됨
- 핵심 시나리오는 석탄 및 석유 등의 활용을 원자력, 재생에너지 및 수소 발전으로 대체하는 것이며, 결국 이를 달성하기 위한 에너지 사용량 저감이 중요함
 - 특히, 산업과 건물이 전체 에너지 사용량의 79%를 나타내고 있으므로, 상대적으로 국내에서는 친환경 교통에 비해 중요한 사항임
- (건물) 건물 에너지 전환의 핵심은 에너지 효율화이며, 에너지 플러스 혹은 넷 제로 건물로의 전환 기술이 중요함
- (산업) 다양한 산업이 있으나, 국내에서 시급한 것은 철강으로 사료되며 산업부를 중심으로 수소 환원제철 기술을 개발중에 있음

- 수소공급 방식에 대한 고민이 부족하며, 추출 수소를 공급할 경우 이산화탄소 발생으로 인하여 수소 환원제철로의 의미가 부족해질 우려가 있음
- 따라서 경제적이고 이산화탄소 발생이 없는 수소 공급기술에 대한 필요성이 큼
- 수전해 기술을 통한 그린 수소가 이상적인 대안이나 아직은 경제성이 부족함



[그림 VI-47] 탄소 중립시나리오의 요약

■ 산업계 탄소 배출저감을 위한 다양한 기술을 개발 중

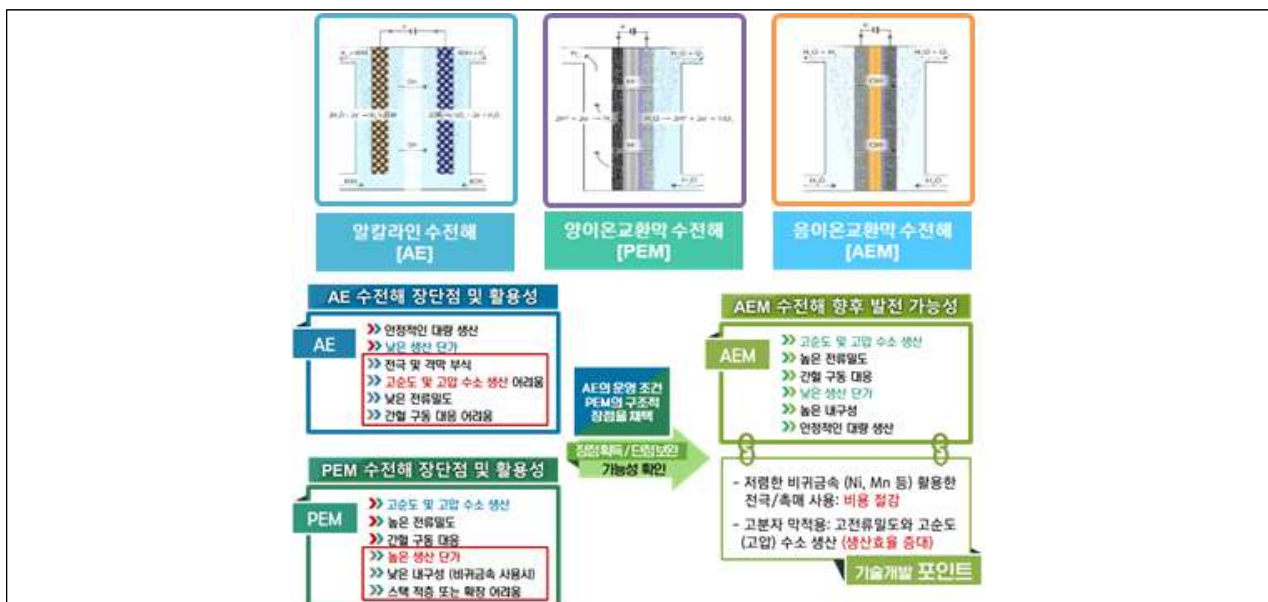
- 철강업계의 탄소계 공정이 현 유럽의 탄소 국경세 정책에 의해 수소 환원제철 기술로 대체되고 있음
- 시멘트업계는 연료전환에 따른 배출량 감소가 핵심으로 기존 유연탄을 폐합성수지, 수소열원 (바이오매스 등)으로 대체하고 있음
- 석유화학 및 정유업계는 연료전환을 위해 전기 가열로와 바이오매스 보일러의 도입을 지속적으로 추진
- 실제 산업계의 핵심 전략은 결국 화석연료를 다양한 재생에너지원으로 대체하는 것이 있으며, 수소 활용이 전략 중 하나로 주목받고 있음

■ 산업계 탄소 배출저감 기술의 핵심은 수소 환원제철이며, 타업종은 원료 및 연료 대체 등의 단순한 전략이나, 수소 환원제철 기술은 국내 기술의 상업화를 위한 기술개발이 요구되는 분야임

- 철강업계의 탄소계 공정이 현 유럽의 탄소 국경세 정책에 의해 수소 환원제철 기술로 대체되고 있음
- 현 탄소 고로 기술은 석탄 등의 화석연료를 활용한 일산화탄소 환원에 의한 기술이 사용되나, 수소 환원제철은 일산화탄소 대신 수소를 활용하는 기술임
 - 일산화탄소 환원에 비해 수소 환원기술은 열이 요구되는 특징이 있으나, 발생하는 물질이 물이라 친환경적인 요소를 가지고 있음
 - 단, 요구되는 수소 공급량 및 단가에 의해 경제성이 좌우되므로, 일반적으로 가장 경제적인 천연가스 추출에 의해 공급하고 있음
- 수소 공급을 위해 천연가스 추출 기술을 사용할 경우 경제적이라는 장점이 있으나, 유럽의 탄소 국경세 대응에 대한 약점을 가지게 되므로 수소 생산기술의 대체가 요구됨
 - 경제성을 동반한 수소 생산기술이 요구되므로, 상대적으로 취할 수 있는 기술의 선택지가 부족한 상황임

■ 수소 생산 기술로서 청록수소는 기술개발의 초입 단계이며, 실질적인 핵심 기술인 플라즈마 토치 개발이 파일럿 단계에 있음

- 핵융합연구소에서 플라즈마 토치 개발이 일부 이루어진 것으로 알려지나, 실제 상용 플랜트까지 진입하기에는 부족한 상황임



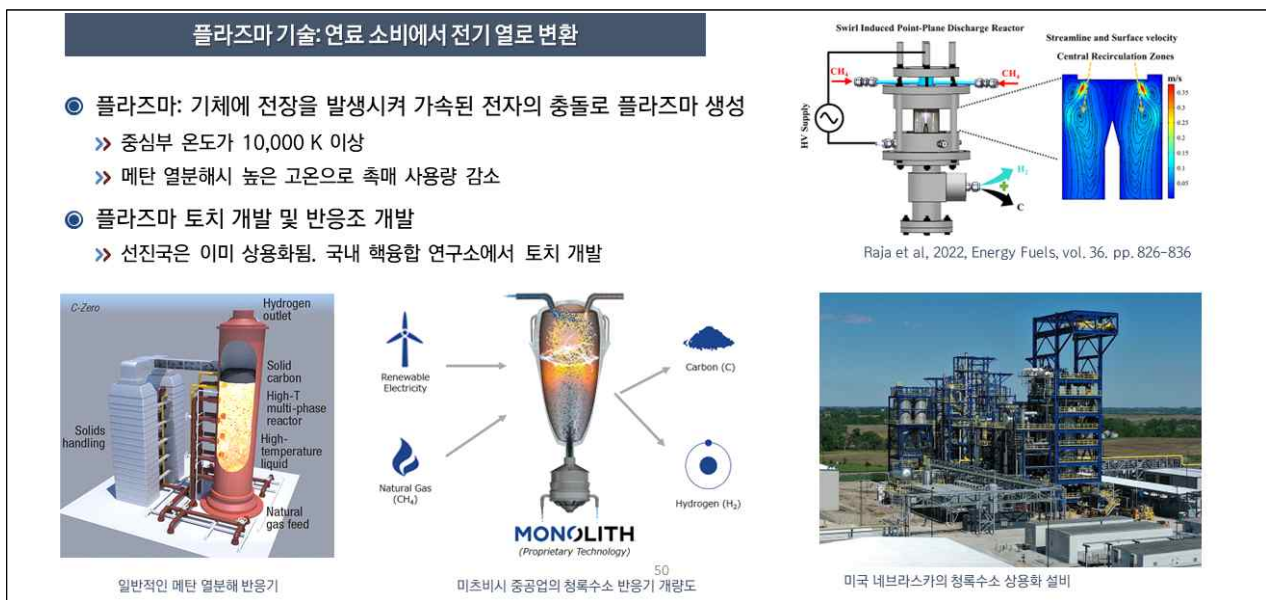
[그림 VI-48] 수전해 기술의 장단점

- 특히 요소 기술 개발이 일부 이루어진 상황이나, 전체 공정 플랜트까지 진입하지 못한 상황으로 알려짐

- 단, 플라즈마 기술 자체는 상당한 기술력을 확보한 상황으로 일반적으로 산업계에서 널리 적용되는 기술임
 - 반도체 및 디스플레이 제조 공정상 플라즈마를 활용한 공정이 널리 적용되고 있으며, 또한 라디칼 발생에 의한 소독 공정에서 사용되고 있음
 - 특수한 경우로, 핵융합 및 전자유체 발전 등에도 핵심 기술로 사용되고 있음
 - 국내에서는 국산화 기술이 아닌 해외 기술에 의존하고 있으며, 이는 아직 시장 활성화가 부족한 상황이기 때문임

■ 청록수소 생산기술의 핵심은 전체 플랜트 공정에 대한 실증이며, 또한 이를 위한 국산화 기술이 중요함

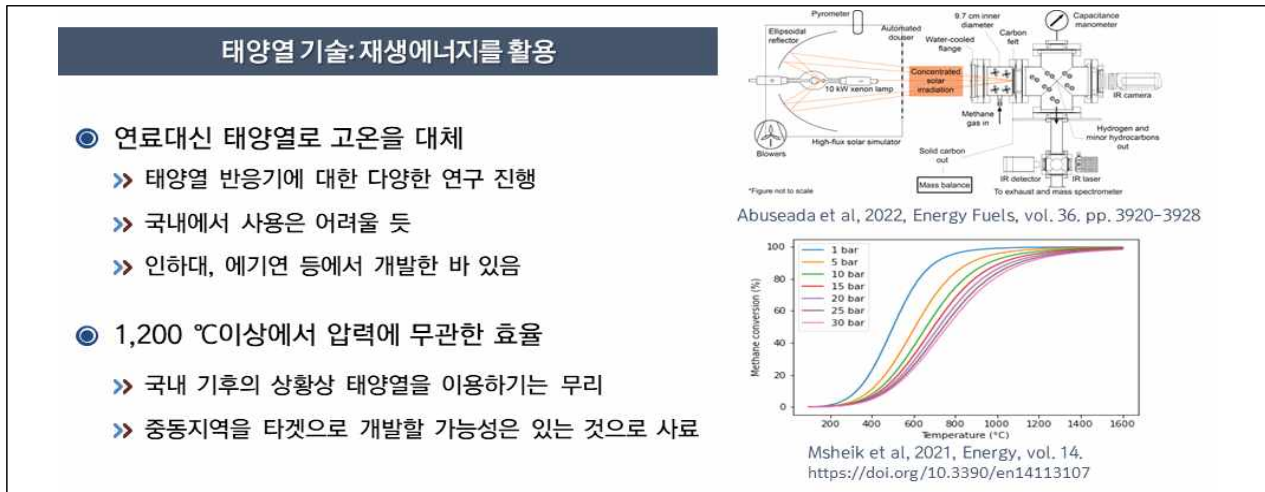
- 일반적으로 플라즈마는 기체에 전장을 발생시켜 가속된 전자의 충돌로 열을 발생시키는 기술이며, 열분해에 적용시 높은 고온으로 촉매사용량을 감소시킬 수 있음
- 플라즈마는 열분해 기술의 가장 큰 단점인 열원을 전기소스로 대체할 수 있다는 장점이 있어 선진국 중심으로 기술 상용화를 준비중이나, 국내에서는 SK에너지에서 관련 기술에 투자를 하는 것으로 조사됨



[그림 VI-49] 플라즈마의 원리 및 상용화 수준

- 열분해 기술의 열원 공급을 위해 태양열로 대체하는 방안이 연구되었음
 - 인하대 및 에너지 기술연구원에서 개발하였으나, 국내 기후 상황을 보면, 안정적인 운영을 하는 것이 어려울 것으로 예상됨

- 실제 해외 중동지역 등에서는 사용이 가능하나, 중동 지역은 경제적인 태양광 단가로 인하여 청록수소의 경제성에 대해 심도있는 논의가 요구됨



[그림 VI-50] 열분해기술의 열원 대체기술

3) 기술수준

(1) 해외

■ 유럽연합의 다양한 도시를 대상으로 탄소 중립 도시에 대한 실험을 진행

- 유럽은 풍부한 재생에너지 자원을 바탕으로 수전해 설비에 대한 상용화가 시작되었으며, 여러개의 수소 생산 설비를 갖추고 있음
 - 수전해 설비 최고 효율 및 최대 설비 등이 존재하며, 미국의 지멘스, 넬 사등과 경쟁하는 에어리퀴드사 IHT사 등이 존재
- 원활한 수소 공급을 바탕으로 파리, 바르셀로나, 코펜하겐 등이 성공적으로 탄소 중립 도시로의 실험을 추진중
 - 파이프라인의 수소 공급을 위한 프로젝트로 HYGRID 프로젝트를 실시하여 경제성 평가 등이 실시되어, 10% 이내의 메탄과의 혼소를 통한 이송체계가 문제없음을 보여줌
- 스마트에너지 시티 분야의 핵심은 스마트미터링, 에너지 데이터분석, X-EMS, 에너지 거래, 모빌리티 전기 인프라 등으로 조사됨

■ 도시내 수소 활용은 수소 자동차를 중심으로 확장되고 있으나, 수소 터빈 개발 수준이 미흡하여 대용량 수소 활용은 중·장기적인 계획이 필요

- 연료전지 대부분은 아직까지 천연가스를 기반으로 대형 발전이 이루어지고 있으나, 블루에너지 사를 중심으로 SOFC 연료전지에 순수 수소를 적용하는 기술 상용화 추진

- PEMFC는 자동차에 적용되는 연료전지로 순수 수소를 활용하나, 아직 대형화에 성공하지는 못한 것으로 알려짐

■ 청록수소 생산은 미국을 중심으로 빠르게 상업화되고 있음

- 미국의 모노리스사는 상용화 수준으로 기술 개발을 완성
 - 아직까지 청록수소는 전반적인 산업 생태계 구성이 되지 못하였으나, 미국과 유럽을 중심으로 적용가능성에 대해 검토가 실시되고 있음
 - 특히, 추출수소 생산 공정에서 발생하는 이산화탄소를 저감하거나 혹은 무탄소화할 수 있다는 장점이 부각되어 향후 지속적인 적용가능성이 검토될 것으로 예상됨
- 청록수소 생산은 전력을 활용하는 플라즈마 기술 활용 방향으로 상업화되고 있음
 - 천연가스 열분해 기술은 고온에서 공정이 운영되므로, 고온을 위한 연료 소비시 탄소발생이 있어 이를 전력으로 대체하는 방안으로 상업화가 진행
 - 플라즈마 기술은 미국을 중심으로 다양한 분야에서 상업화되었으나, 아직 수소 생산 분야에서는 경제성 확보를 위한 효율 향상 등의 실험이 진행

(2) 국내

■ 수소 도시 구축을 국토교통부를 통해 울산에 포함한 몇 개의 도시를 통해 실험중

- 국내 수소 도시내 수소 활용은 수소자동차 활용 인프라를 위한 충전소와 연료전지 활용이나, 실제 연료전지는 가정용 공급을 위한 실험 수준으로 진행됨
- 대다수 수소 도시의 핵심은 생산기술과 인프라 구축을 중심으로 구성되었으나, 생산기술이 재생에너지 활용 수전해 혹은 부생수소로 실제 활용도 면에서 어려움이 있음
- 울산 도시 내 수소 배관 및 이송 기술은 이미 검증이 끝난 상황으로 가능성은 충분히 보여주었으나, 생산기술과 산업에 대한 적용성 검증은 없었음
 - 에너지 활용에 대한 데이터 활용 등에 대한 기술적 검토가 부족하고, 일반적인 활용성에 대한 검증을 실시
 - 스마트 시티 기술에 대한 기반 기술로서 통신 기술은 세계 선도 기술(5G)이므로, 타 서비스 기술에 대한 기술 수준 향상이 필요함

■ 수소 생산 기술은 추출 수소를 위한 기술개발이 상업화되었으나, 수전해 기술은 선진국에 비교할 수 없는 수준으로 현재 파일럿 단계

- 한국의 두산중공업, 이엠솔루션, 삼성엔지니어링 등에서 수전해 기술에 대해 관심이 있으나, 아직 국내 기술은 파일럿 단계에 있음
- 청록수소 생산 기술은 아직 실시된 바가 없으며, 핵융합 연구소에서 플라즈마 토치를 개발한 것으로 알려짐
- 열분해 기술은 석탄, 폐기물을 중심으로 다양하게 상용화되었으나, 수소 생산이 목적이 아니고, 또한 많은 양의 이산화탄소 발생으로 본 기술에서 접목하기에는 거리가 있음

■ 청록수소 생산기술은 SK에너지가 모노리스에 투자함으로써 본격적인 검토가 시작된 것으로 평가될 수 있으며, 아직 국내 기술 수준은 평가하기가 어려움

- 일반적으로 플라즈마 기술이 수처리분야(소독) 등의 다른 산업에 결합되어 적용되고 있으나, 수소 생산기술 적용성은 검토된 적이 없음

■ 전력 그리드는 재생에너지를 중심으로 한전에서 실시하고 있으나, 도시를 중심으로 구성되는 것이 아닌 전체 에너지를 대상으로 실시하고 있음

- 스마트 시티에 대한 다양한 기술이 개발되었으나, 에너지 분야는 검토단계에 있음
 - 이러한 이유는 현 에너지 정책이 건물의 에너지 효율화에 있기 때문이며, 재생에너지 활용이 지역에 특화되어 있기 때문인 것으로 분석

■ 국내 스마트시티와 관련된 기술 수준은 미국에 비해 80-86% 범위에 있으며, 기술 격차는 1.5년 수준임 (KISTEP, 기술수준 평가 2020)

- 스마트 에너지 그리드는 미국에 비해 80% 수준으로 기술 격차가 2.5년으로 분석됨
- 한국은 중국이나, 일본에 비해서도 뒤처지는 수준으로 이는 투입되는 예산과 정책적 의지 면에서 부족하기 때문인 것으로 조사됨
- 한국 전력공사 주도의 기술개발이 이루어지나, 전력시장의 독점화에 따른 성숙도가 낮으며, 재생에너지 분야의 RPS 사업화외에는 특별한 민간 확산도가 낮음
 - 단, ESS 기술은 세계적인 수준인 기업을 보유함으로써 기술력 확보
 - 그에 비해 재생에너지 인프라가 부족하며, 이는 환경적 요건에 의한 것으로 극복이 어려울 것으로 사료
- 그러나, 스마트시티의 기본 기술인 통신기술 면에서 세계선도기술(5G)을 보유하고 있음. 따라서 스마트시티 서비스가 통신 서비스와 연동되는 형태로 사업화가 진행됨

4. 현안문제 및 이슈

■ 국내 현 산업 생태계에서 수소 생산, 저장, 이송 및 활용에 대한 인프라가 부족하며, 따라서 수소 산업 가치사슬 확보가 어려움

- (생산기술) 수소기술 로드맵에 의해 초기 추출수소, 장기 그린수소로 구성되어 있으나, 그린수소를 위한 재생에너지 인프라가 부족
 - 추출수소는 이산화탄소가 필연적으로 발생되기때문에, 궁극적으로 국내 탄소중립 정책에 적합하지 않은 문제가 있음
 - 그린수소는 재생에너지 기반으로 구성되나, 국내 재생에너지 생산 단지 부족 및 경제성 부족으로 인하여 그린 수소 경제성 확보가 어려울 것으로 예상
- (저장 및 이송 기술) 상용화된 기술로 압축 및 수소 트레일러가 있으나, 모두 소량의 수소 활용시 활용이 가능한 기술로 수소 사회 도입을 위해서는 부족
 - 배관기술이 울산시를 중심으로 검토되었으나, 대용량 수소 활용 수단이 없어 인프라 구축 예산 확보가 어려움
 - 저장은 기체 압축방식이나, 상대적으로 대용량 저장이 어렵기 때문에 액화 등의 대형 저장기술 개발이 필요함
- (활용 기술) 도시 내 수소 활용처는 수소 자동차 외에는 현재 개발된 곳이 부족하여 수소 산업 생태계 구성이 산업도시 외에는 단기간 확보하기 어려울 것으로 예상
 - '22년 초 현대자동차를 포함한 글로벌 자동차 회사는 수소 승용차 개발언기를 발표
 - 따라서, 국내 모빌리티는 전기차 위주로 개발될 것으로 예측
 - 도시의 수소 활용을 위해서는 수소 연료전지를 포함하여, 수소 발전을 위한 터빈 개발이 필요함
 - 대용량 수소 활용은 현재 산업도시 외에는 찾기 어려움
- (스마트 에너지 도시) 도시내 수소 활용처 부족과 수소의 안전성에 대한 인식 부족에 따라 인프라 구축이 어려움
 - 연료전지 발전 등에 대한 사용 주민간의 이견차로 인하여 인프라 구축이 어려움
 - 사용 주민과의 의사소통기구가 필요하며, 안전성에 대한 인식 제고를 위한 수단 필요

- 대용량 수소 활용처를 위해 수소가 요구되는 산업과의 연계성 확보가 필요

〈표 VI-57〉 중점분야1 핵심이슈와 해결방안 모색

핵심이슈	해결방안
○ 국내 기술 및 산업 부족에 따른 수소 생태계 구성 및 기업 육성 전략 부재 ○ 수소 활용 시범사업을 위한 수소 활용처 부재 ○ 무탄소 대용량 수소 생산 기술의 부재 ○ 국내 수소 발전 및 수소 인프라에 대한 안전성 인식 부재	○ 국내 수소 생태계 구성을 위한 시범사업을 통해 국산화 및 수소 시장 가능성 점검 ○ 도시와 산업 등의 이원화를 통한 수소 활용 전략 수립과 함께 미래 도시 구성을 위한 핵심 기술을 실증 ○ 기존 대용량 추출수소대신 청록수소 가능성을 분석 ○ 시범사업을 위한 산업내 주민과의 의사소통기구로서 리빙랩 등의 플랫폼을 활용

5. 사업목적 및 목표

■ 중점분야 목표

〈표 VI-58〉 중점분야3 성과목표 및 지표

전략목표	청록수소 공급을 위한 도시 운영 플랫폼 개발 및 기술 표준화	
성과목표	성과지표	목표
① 청록수소 플랜트 기술 표준화	❶ 기술 트리 및 표준화 등재 ❷ 단위 공정 안전 코드 등재	ISO 등재 제도 반영
② 도시에 따른 탄소 추적 기술 개발 및 데이터베이스 구축	❶ 도시 종류별 수소 활용 맵핑화 ❷ 탄소 추적 및 수소 대체율의 DB 화	시범사업 도시내 수소 필요량 맵핑 DB 누적 데이터 10건 이상
③ 도시내 수소 공급 및 활용 디지털 플랫폼 개발	❶ 청록수소 활용을 위한 통합 DB 및 성과 활용 로드맵 구축 ❷ 도시 에너지 그리드 AI 알고리즘 개발	맵핑률 100% 및 적용 로드맵 AI 알고리즘 등록
④ 청록수소 플랜트 구축 및 실증 운영	❶ 수소 및 환경 관련 인허가 ❷ 수소 생산량 ❸ Plant 누적운전 ❹ Plant 연속운전	상용운전 인허가 3.0톤/일 1,440hr 168hr (7일)

6. 기술구성 및 연계성

■ 기술구성

- 3개 핵심기술, 6개 구성 기술로 구성
- 기간/예산 : 5년간, 84억 원

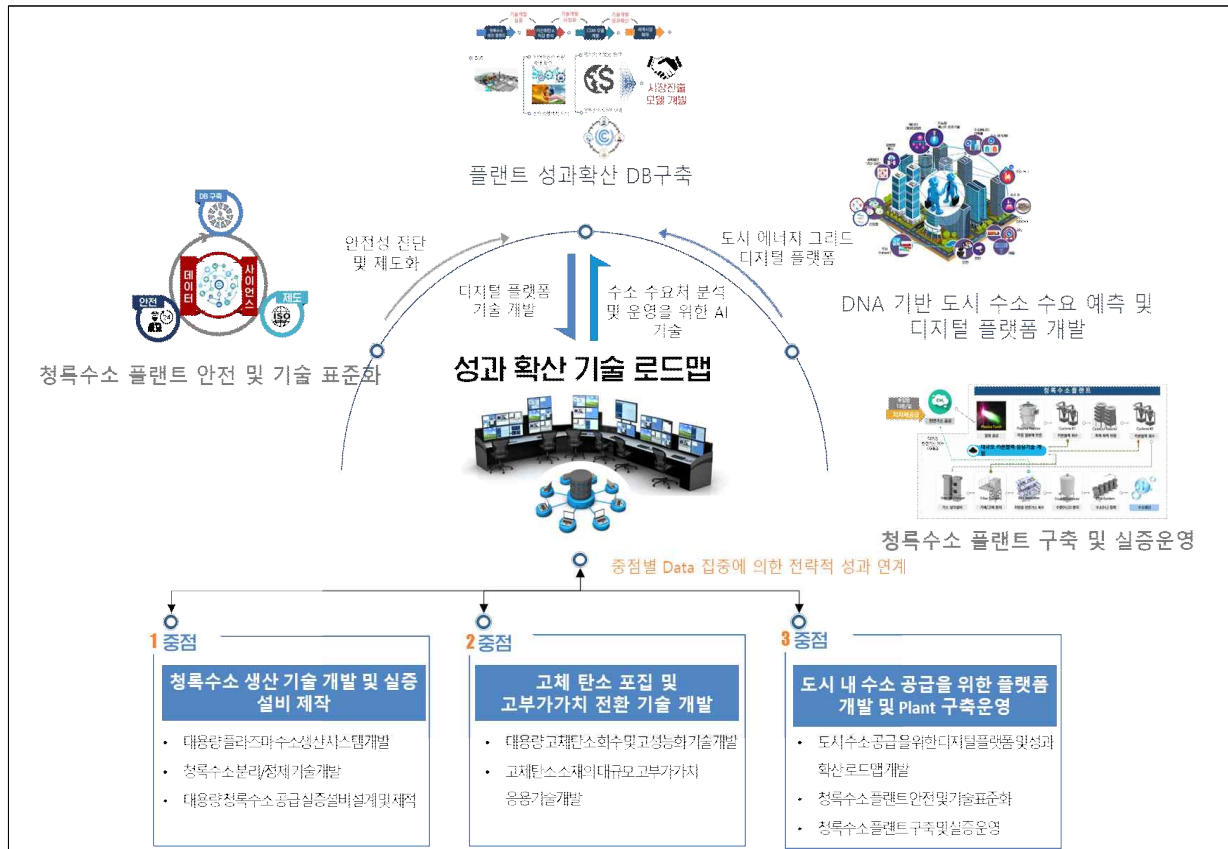
〈표 VI-59〉 중점분야3 기술구성

구 분		기술개발활동	주요 산출물	기간 (총 년)	예산 (억 원)
핵심기술명 (3-1)		도시 수소 공급을 위한 디지털 플랫폼 및 성과 확산 로드맵 개발	수소 인프라 및 환경 인과성에 따른 사용량 예측 알고리즘 및 성과 확산 로드맵	5	10
연구 개발 내용	구성기술 1	○ DNA 및 AI 기반 수소 도시 인프라 구축 및 관리를 위한 디지털 플랫폼 기술 개발	도시 수소 수요 예측 및 운영 디지털 플랫폼을 위한 AI 알고리즘	5	7
	구성기술 2	○ 청록수소 플랜트 전과정 평가 기반 성과 확산 DB 구축	DB 및 도시별 기술 확산 로드맵	5	3
핵심기술명 (3-2)		청록수소 플랜트 안전 및 기술 표준화	탄소 저감을 위한 도시 운영 연계 플랜트 단위 공정 표준화 및 안전성 기준	5	10
연구 개발 내용	구성기술 1	○ 청록수소 플랜트 안전성 확보를 위한 공급 기술 표준화	청록수소 표준화를 위한 제도화 및 안전성 기준	5	5
	구성기술 2	○ 청록수소 플랜트 테크트리 및 설치기준 제도화	청록수소 단위공정 기술트리	5	5
핵심기술명 (3-3)		청록수소 플랜트 구축 및 실증 운영	플라즈마-촉매 및 수소 분리·정제 Plant	2	64
연구 개발 내용	구성기술1	○ 청록수소 기반 통합 플랜트 디지털 엔지니어링 기술	상용운전을 위한 수소&환경 관련 인허가	2	22
	구성기술2	○ 청록수소 통합 플랜트 운영 및 경제성 평가 기술	3.0톤/일 수소 생산 (누적운전 1,440hr)	2	42

■ 핵심기술 간 연계성

- (핵심 기술 3-1) 연구단 성과를 확산하기 위해 각 중점별 연구결과를 집대성하고 평가를 통해 성과의 현황을 정리함. 또한 전과정 평가 결과를 기반으로 도시내 수소 공급을 위한 디지털 가상 플랫폼을 개발하고 비즈니스 모델까지 연계함. 따라서, 핵심 기술 3-1은 기술 개발 총괄의 성격을 가지며, 이를 전체적인 기술 확산 로드맵으로 추진
 - (구성기술 1)은 도시 수소 사용량을 예측할 수 있도록 지자체 특성에 따른 수소 인프라 등을 디지털로 구현하고, 이를 통해 그리드 운영 가능성을 분석함. AI 알고리즘은 청록수소 플랜트 데이터를 통합한 연구단 총괄의 DB를 기반으로 구축
 - (연구단 총괄)은 청록수소 플랜트 실증 결과, 탄소 중립 효과성 분석 기반의 표준화 등의 자료를 기반으로 통합 오픈 DB를 구축하여 구성 기술 1의 지자체 기반 수소 활용성 분석 AI 개발과 연계
 - 최종적으로 연구단내 자료를 체계적으로 정리하여 도시 청록수소 활용 로드맵을 도출
- (핵심 기술 3-2) 핵심기술 3-1의 성과 확산을 위한 제도화를 핵심 연계성으로 플랜트 단위 공정에 대한 안전 진단과 함께 제도화를 추진함으로써 사회적 요건을 마련
 - 플라즈마 핵심기술의 안전성 평가와 함께 이를 위한 제도적 요건 마련
 - 도시 적용을 위한 제도적 요건과 인증절차를 수립함으로써 성과확산을 위한 제도적 요건을 마련
- (핵심 기술 3-3) Plant 구축 및 실증 운영
 - (구성기술 1)은 “국내 수소 수요처 Site 엔지니어링 및 실증플랜트 구축”의 상용운전 추진
 - 도시지역 지자체 및 산업체 등 수요기관과의 계약조건 최종 협의
 - 기본설계에서 규정된 요구사항과 설계조건에 따라 Plant 건설&운영을 위한 상세설계 도출
 - Plant 공사현장의 부지 및 시공조건을 바탕으로 Master Schedule 확보
 - 안전성 및 현장환경에 대한 고려를 통해 인허가(수소&환경) 및 민원사항 점검
 - (구성기술 2)는 “1MW 플라즈마 공정 기반 Plant 통합운영 및 최적 운영절차 확보”를 통하여 모듈타입의 표준모델 도출

- 대용량 청록수소 통합운동을 통한 성능목표 검증 (수소생산량 : 3.0톤/일)
- Plant 연속운전과 누적운전을 통한 안정성 검증 및 운영효율 최적화로 신뢰성 확보
- 시운전 유지관리, 시설안전 모니터링 등 점검 및 수명예측, 보수/보강 Know-how 축적
- 통합 plant의 청록수소 생산 검증 운전자료 및 엔지니어링 디자인 패키지 도출



[그림 VI-51] 중점분야3 핵심기술 간 연계도

7. 기술개발 계획

1) 기술개발 연차별 추진계획

■ (핵심기술 3-1) 도시 수소 공급을 위한 디지털 플랫폼 및 성과 확산 로드맵 개발

〈표 VI-60〉 기술개발 연차별 추진계획(핵심기술 3-1)

연도	기술개발 주요내용 및 추진계획
1차년도	○ 청록수소 도시 수소 수요처 분석 자료 구축 ○ 국내·외 수소 기술 현황 및 수소 도시 사례에 대한 DB 구축 ○ 청록수소 플랜트 실증을 위한 국내외 환경 조사 및 분석 ○ 청록수소 플랜트 기술 인증에 대한 국내외 현황 조사 및 DB화 전략 수립 ○ 타 연구단 혹은 유사 기술의 활용 전략 수립 및 TB 구축을 위한 전략 수립

연도	기술개발 주요내용 및 추진계획
2차년도	○ 도시 수소 수요 데이터 EDA, 통계 분석, 전처리 및 피처 엔지니어링 ○ 국내·외 수소 도시 기반 기술 활용성 조사 및 DB화 ○ 국제적인 청록수소 플랜트 협력 기반 및 시장 현황 조사 ○ 수소 생산 기술별 경제성 분석 기반 확보 ○ 국내 TB 구축을 위한 지자체 협력 기반 구축
3차년도	○ 도시 내 청록수소 도시수소 수요 예측 모델 개발 ○ TB내 청록수소 플랜트 적용을 위한 환경 분석 및 탄소 발생 현황 조사 ○ 청록수소 경제성 분석 방법 개발
4차년도	○ 도시 수소 수요 예측 모델 성능평가 및 고도화 ○ 청록수소 플랜트 단위 공정 및 기술의 open DB화 ○ TB 및 국내 수소 도시 구축을 위한 기술 로드맵 작성 전략 수립 ○ 잠재적 청록수소 확산 도시 및 가능성 분석
5차년도	○ 도시 내 도시수소 수요 예측 모델 실증 ○ 국내 성과 확산을 위한 기술 로드맵 구축 및 확산 전략 개발 ○ 청록수소 플랜트 전주기 open DB화 ○ 청록수소 플랜트 전주기 효과성 및 경제성 분석

■ (핵심기술 3-2) 청록수소 플랜트 안전 및 기술 표준화

〈표 VI-61〉 기술개발 연차별 추진계획(핵심기술 3-2)

연도	기술개발 주요내용 및 추진계획
1차년도	○ 실증형 청록수소 플랜트 관련 국내·외 안전성능 평가항목 분석 - 청록수소/수소 공정설비의 재료·구조·성능 관련 상세기준 분석 - 실증형 청록수소 플랜트 설치 안전기준 항목 도출 방안 분석 ○ 실증형 청록수소 플랜트 관련 안전항목 도출 - 실증형 청록수소 플랜트 특성에 따른 실증 안전항목 도출
2차년도	○ 실증형 청록수소 플랜트 위험요소 분석 - 실증용 플랜트 사고시나리오 도출 및 FMEA 평가 적용모델 설정 - 위험요소 분석을 통한 화재폭발 대응 개발 방향 도출 ○ 실증형 청록수소 플랜트 안전성능 평가항목 개발 및 실증기준안 도출 - 실증형 청록수소 생산설비 및 설치 안전성능 평가항목 개발

연도	기술개발 주요내용 및 추진계획
3차년도	○ 실증형 청록수소 플랜트 위험인자 원인 분석 및 안전프로토콜 개발 - 플랜트에 대한 “안전성평가” 실시 및 안전성 향상 대책 수립 ○ 실증형 청록수소 플랜트 정량적 위험성 평가 - 사고의 종류와 형태, 사고 시의 환경조건, 비상시를 대비한 손실감소 대책 마련 ○ 시설기준 마련을 위한 수소누출, 확산 및 화재폭발 해석 - 사고 시나리오를 설정 및 방호벽 등 주요 안전구조물 대상 화재폭발 전산해석
4차년도	○ 실증형 청록수소 플랜트 주요부품 위험요소 분석 - 청록수소 제조공급설비 저장탱크, 안전밸브 등 주요부품 위험요소 도출 ○ 실증형 청록수소 플랜트 안전성능 평가항목 제시 - 실증용 플랜트 운영(사용자 실제 테스트) 결과 분석, 법제도 및 절차상의 문제점 도출 및 해소 대책 수립안 제시 ○ 실증형 청록수소 플랜트 안전기준 개정(안) 도출
5차년도	○ 청록수소 플랜트 안전기준 및 평가항목안 개선 - 화기, 다른 설비, 사업소경계, 도로 및 철도와의 거리 등 ○ 청록수소 제조공급설비 안전기준 개정(안) 제도화 추진

■ (핵심기술 3-3) 청록수소 플랜트 구축 및 실증 운영

〈표 VI-62〉 기술개발 연차별 추진계획(핵심기술 3-3)

연도	기술개발 주요내용 및 추진계획
1차년도	○ 대용량 청록수소 공급시스템의 수요기관 협의 - 도시지역 또는 산업단지 등 Plant 구축 필요사항 검토
2차년도	○ 대용량 청록수소 공급시스템 수요기관 선정 및 기초업무 추진 - 도시지역 또는 산업단지 등 Plant 구축 현장 선정
3차년도	○ 대용량 청록수소 공급시스템 수요기관 상세업무 협의 - Planr 현장 조건 및 인프라 검토 (천연가스 공급, 공급전력, 인허가, 교통 등)
4차년도	○ 도시지역 지자체 및 산업체 등 수요기관과의 계약조건 최종협의 ○ 기본설계에서 규정된 요구사항과 설계조건에 따라 Plant 건설&운영을 위한 상세설계 도출 ○ Plant 공사현장의 부지 및 시공조건을 바탕으로 Master Schedule 확보 ○ 안전성 및 현장환경에 대한 고려를 통해 인허가(수소&환경) 및 민원사항 점검 ○ 현장 토목/건축 및 Plant 구축 공사 추진
5차년도	○ 대용량 청록수소 통합운영을 통한 성능목표 검증 (수소생산량 : 3.0톤/일) ○ Plant 연속운전과 누적운전을 통한 안정성 검증 및 운영효율 최적화로 신뢰성 확보 ○ 시운전 유지관리, 시설안전 모니터링 등 점검 및 수명예측, 보수/보강 Know-how 축적 ○ 통합 plant의 청록수소 생산 검증 운전자료 및 엔지니어링 디자인 패키지 도출

2) 기술개발 추진전략

(1) 기술 확보전략

■ 청록수소 플랜트 전주기 안전확보 기술 및 Plant 상용 운전절차 최적화

- 청록수소플랜트의 사업신뢰성 확보를 위한 기본성능 및 안전성을 검증하고 플랜트 운영시 발생할 수 있는 사고 시나리오에 따른 위험 해석을 통해 제도 마련을 위한 장애요인 해소
- [중점 1] 청록수소 생산 기술 개발 및 실증설비 제작을 통한 통합 Plant 구축
- 지자체 상생협력을 바탕으로 성능목표 도달 신뢰성 및 누적운전 검증으로 안정성 확보

〈표 VI-63〉 중점분야3의 핵심기술 확보전략

중점	핵심	성과 연계	자체 개발	기술 도입	글로벌 협력	아웃 소싱
도시 내 수소 공급을 위한 플랫폼 개발 및 Plant 구축 운영	도시 수소 공급을 위한 디지털 플랫폼 및 성과 확산 로드맵 개발	○	●			
	청록수소 플랜트 안전 및 기술 표준화		●			
	청록수소 플랜트 구축 및 실증 운영	○	●			

● : 주, ○ : 부

(2) 추진체계 및 협력방안

■ (핵심기술 3-1) 도시 수소 공급을 위한 디지털 플랫폼 및 성과 확산 로드맵 개발

- 연구단 성과확산을 위하여 타 중점기술과의 협력을 통해 성과 확산 기반 마련
 - 연구단 성과에 대한 통합 open DB화를 통해 연구 성과 확산 전략을 수립하고 수소 산업 생태계 구성을 위한 지자체 등과의 연계성 강화
 - 다양한 지자체의 현황 분석과 기술을 연계하고 또한 효과성 및 경제성 분석 결과를 통해 성과 확산 전략을 수립

〈표 VI-64〉 추진체계 및 협력방안(핵심기술 3-1)

중점기술명	o 도시 수소 공급을 위한 디지털 플랫폼 및 성과 확산 로드맵 개발
성과물	o 디지털 수소 공급 플랫폼 o 도시내 수요 예측을 위한 AI 알고리즘 o 청록수소 전주기 탄소 저감 효과성 및 경제성 분석 보고서 o 청록수소 단위 기술 open DB
수행조직	o 산·학·연 컨소시엄
수행방법	o 중점 기술 간의 기술 개발 결과를 공유하고 성과 확산을 위한 방법론 개발 및 로드맵화 o 엔지니어링 기술의 디지털화 및 도시내 수소 공급 예측량 분석을 연계하여 향후 수소 도시로의 변화를 위한 전략적 로드맵을 구축 o 연구성과의 확산을 위한 open DB구축을 통해 수소 산업 생태계 구축 전략을 수립 o 디지털 수소 공급 플랫폼 구축을 통해 수소 도시 구축 전략의 명확성을 확보

■ (핵심기술 3-2) 청록수소 플랜트 안전 및 기술 표준화

〈표 VI-65〉 추진체계 및 협력방안(핵심기술 3-2)

핵심기술명	o 실증형 청록수소 플랜트 전주기 안전성 확보를 위한 제도마련
성과물	o 생산설비 및 제조/공급설비 실증기준 및 안전기준 개정(안)
수행조직	o 수요기관(지자체)-산·학·연 컨소시엄
수행방법	o 플랜트 기본설계 및 실증기준안 도출 o 규제샌드박스 신청 및 심의 o 상세설계 및 제작, 시운전 o 위험성 평가 및 실증기준안 보완 o 시설기준 개정안 도출

■ (핵심기술 3-3) 청록수소 플랜트 구축 및 실증 운영

- o 청록수소 수요기관의 현장 구축 협력 및 상용운전 인허가 확보
 - 지자체 협력 기반의 Plant 구축 Site 엔지니어링 추진
- o Pilot 설비 운영 DATA를 통한 실증 Plant 상세 설계&제작
 - 산·학·연 기초연구 및 Pilot 설비의 DATA를 통한 Scale-up 설계인자 확보
 - 1MW 플라즈마-촉매화학반응과 수소 분리·정제를 통한 고순도 수소 공급 상용운전 실증

〈표 VI-66〉 추진체계 및 협력방안(핵심기술 3-3)

중점기술명	o Plant 구축 및 실증 운영
성과물	o Plant 실증지 (지자체 또는 산업체) 협력 승인서 o 중점기술 개발 통합 Plant 구축 o 3.0톤/일 청록수소 생산 Plant 상세설계도서 o 통합 Plant 운전 DATA 및 최적 운영절차서
수행조직	o 수요기관(지자체)-산·학·연 컨소시엄
수행방법	o 지자체와 협력을 통한 실증 Site 및 Plant 인프라 제공에 대한 소통 o 지자체와 실증설비 구축간의 연계 협력을 통한 지역상생발전 생태계 조성 o 협력제도를 활용하여 사업 추진 시 이해상충관계 협의를 통한 갈등 예방 및 지자체간 강점을 결합한 복합서비스 제공 o 중점 기술 간의 Pilot 기술개발 운전 DATA 기반의 스케일업 설계인자 확보 o 출연기관 및 학교의 실증플랜트 관련 기술문헌과 경험을 보유한 연구자/전문가 인터뷰를 통한 Risk 최소화 전략 수립 o 민간기업의 실증플랜트 구축 결과보고서 및 엔지니어링 단계별 결과보고서 등의 유사사례 시사점 도출로 방안 제시 o Plant 실증 운전에 따른 자체평가 및 최적 운영절차 도출을 위한 산·학·연 개별업무 및 공동업무 지속 추진

■ 추진전략 및 활용방안

- 수소 생산 기술의 제도화와 연계를 통해 청록수소 생산 기술에 대한 기준 마련
- 청정수소로서의 청록수소 등재를 위해 명확한 전주기 평가 결과 등을 바탕으로 안전성 및 경제성을 평가
- 실증 운영 결과에 대한 홍보를 통해 각계 의견 수렴

(3) 성과물 활용 전략

〈표 VI-67〉 중점분야3 성과물 활용전략

중점기술	핵심기술	성과물	성과물 활용전략
도시 내 수소 공급을 위한 플랫폼 개발 및 Plant 구축 운영	도시 수소 공급을 위한 디지털 플랫폼 및 성과 확산 로드맵 개발	- 수소 수요 예측 AI 알고리즘 및 디지털 수소 공급 플랫폼 - 도시 수소 요구량 맵핑 툴	국내 수소 도시 구축을 위한 수소 생산 및 공급 플랫폼으로 활용
		- 청록수소 성과 확산 로드맵 - 플랜트 전주기 효과성 분석 보고서 및 기술 open DB	수소 도시 구축을 위한 전략 구축 및 산업 생태계 구축을 위한 기초 자료로 활용
	청록수소 플랜트 안전 및 기술 표준화	실증기준	본 사업 추진을 위한 인허가에 활용
		시설기준 개정안	본 사업 종료후 상용화에 활용
	청록수소 플랜트 구축 및 실증 운영	3.0톤/일 청록수소 생산 표준모델	- 실증사례 확보를 통한 수소도시 상용화 - 표준모델 해외시장 진출 Base 활용

가. 시장진입 전략

〈표 VI-68〉 중점분야3 시장진입 전략

중점기술	핵심기술	단기 전략	중장기 전략
도시 내 수소 공급을 위한 플랫폼 개발 및 Plant 구축 운영	도시 수소 공급을 위한 디지털 플랫폼 및 성과 확산 로드맵 개발	국내 수소도시의 수소 수요 예측 기반으로 활용	글로벌 스마트 에너지 시티로의 기술 확대 추진
		청록수소 플랜트의 산업 구축을 위한 간접적 기반으로 활용	국내 수소 도시내 수소 공급 수단으로 활용
	청록수소 플랜트 안전 및 기술 표준화	직접적인 시장진입보다는 중점별 핵심 기술과 전체 플랜트의 시장 진입을 위한 간접적 제도화를 마련	도시 혹은 근거리 청록 수소 생산 플랜트 설치 기준을 제공함으로써, 수소 산업 생태계내 청록수소가 진입할 수 있는 근거를 제공
	청록수소 플랜트 구축 및 실증 운영	- 대용량 청록수소 생산기술의 국산화 - 소형-모듈을 통한 공간활용성 극대화로 도시지역 진입형 모델 확보	기존 해외시장 대비 고내구-고효율 청록수소 생산기술 확보 (연속/누적운전 검증)

나. 위험요인 및 대응전략

〈표 VI-69〉 중점분야3 위험요인 및 대응전략

중점기술	핵심기술	위험요인	대응전략
도시 내 수소 공급을 위한 플랫폼 개발 및 Plant 구축 운영	도시 수소 공급을 위한 디지털 플랫폼 및 성과 확산 로드맵 개발	○ 수소도시 발전 계획에 따른 변수의 변동성 확대 반영의 어려움	○ 기 구축된 수소 도시의 수소 활용 패턴 등을 분석함으로써 시행착오 대응 및 다양한 실 운영 결과의 DB화를 통한 완성도 증대
		○ 수소 산업 생태계 미구축 및 수소 사용자의 인식 개선 미비	○ 구축되는 DB를 Open data화함으로써 연구단 성과가 타 사업으로 확대될 수 있도록 추진
	청록수소 플랜트 안전 및 기술 표준화	○ 제도화를 위한 다양한 계층간 합의 도출의 어려움이 있음. 특히 수요처인 주민 동의	○ 안전성에 대한 기준을 마련하고 홍보를 통한 각계의견 수렴 및 반영 루트를 마련
		○ 청록수소 플랜트의 상용화에 대한 기술적 범위에 대한 명확성이 아직 부족	○ 전주기 평가를 통한 명확한 상용화 범위를 설정
	청록수소 플랜트 구축 및 실증 운영	○ 실증플랜트 건설규모의 증가로 투자비용이 증가하고 건설기간이 장기화되는 추세	○ 해당사업 비용 외에 자자체의 기술지원 자금 및 현장 인프라(Site, 전력 등) 제공을 통한 협력방안 모색 ○ Plant 운영이라는 복잡도를 고려하여 초기단계부터 체계적이고 구체적인 수행계획 마련

3) 소요예산 및 인력

■ 중점기술 소요예산

〈표 VI-70〉 중점분야3 연차별 소요예산

(단위: 억 원)

핵심기술명	구분	1차년도	2차년도	3차년도	4차년도	5차년도	총계
도시 수소 공급을 위한 디지털 플랫폼 및 성과 확산 로드맵 개발	정 부	1	2	2	3	2	10
	민 간	-	-	-	-	-	-
	소 계	1	2	2	3	2	10
핵심기술명	구분	1차년도	2차년도	3차년도	4차년도	5차년도	총계
청록수소플랜트 전주기 안전확보 기술	정 부	1	2	2	2	3	10
	민 간	-	-	-	-	-	-
	소 계	1	2	2	2	3	10
핵심기술명	구분	1차년도	2차년도	3차년도	4차년도	5차년도	총계
청록수소 플랜트 구축 및 실증 운영	정 부	-	-	-	16.5	5.5	22
	민 간	6.16	-	-	2	2	10.16
	지방비	-	-	-	4.125	1.715	5.84
	소 계	6.16	0	0	22.625	9.215	38
합 계		8.16	4	4	27.625	14.215	58

■ 핵심기술 소요인력

〈표 VI-71〉 중점분야3 연차별 소요인력

(단위 : 명)

구분		1차년도	2차년도	3차년도	4차년도	5차년도	계
도시 수소 공급을 위한 디지털 플랫폼 및 성과 확산 로드맵 개발	박사급	2	3	3	3	3	14
	석사급	2	2	2	2	2	10
	학사급	1	1	1	1	1	5
소계		5	6	6	6	6	29
구분		1차년도	2차년도	3차년도	4차년도	5차년도	계
도시 수소 공급을 위한 디지털 플랫폼 및 성과 확산 로드맵 개발	박사급	1	1	1	1	1	5
	석사급	2	2	2	2	2	10
	학사급	2	2	2	2	2	10
소계		5	5	5	5	5	25
구분		1차년도	2차년도	3차년도	4차년도	5차년도	계
청록수소 플랜트 구축 및 실증 운영	박사급	-	-	-	2	3	5
	석사급	-	-	-	3	4	7
	학사급	-	-	-	3	3	6
소계		-	-	-	8	10	18
합 계		10	11	11	19	21	72

※ '청록수소 플랜트 구축 및 실증 운영'의 연차별 소요인력은 [중점1]의 연차별 소요인력과 별도

4) 중점분야3 로드맵

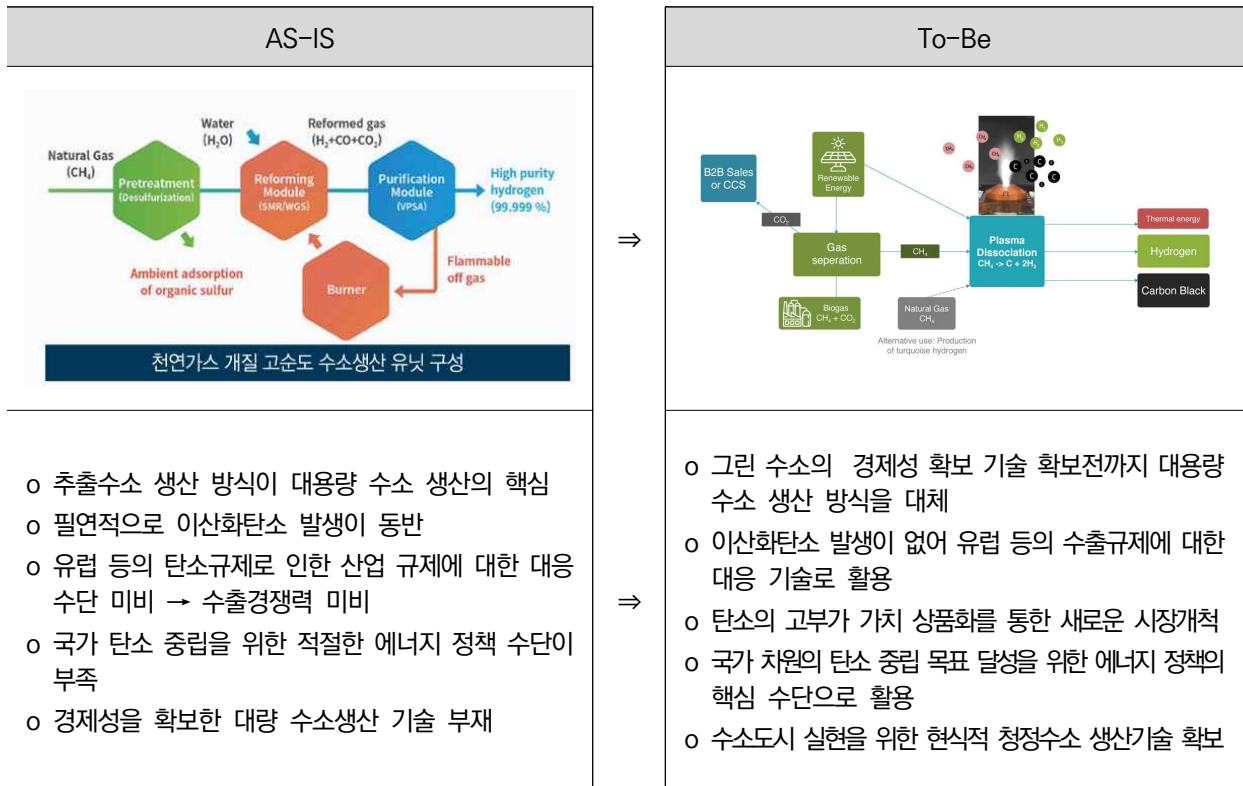
구 분		1차년	2차년	3차년	4차년	5차년	주요 성과물
도시 수소 공급을 위한 디지털 플랫폼 및 성과 확산 로드맵 개발	DNA 및 AI 기반 수소 도시 인프라 구축 및 관리를 위한 디지털 플랫폼 기술						o 디지털 수소 공급 플랫폼
							o 수요 예측 AI 알고리즘
							o 도시 수소 요구량 맵핑
	청록수소 플랜트 탄소중립 전 과정 평가 기술 및 성과 확산 DB 구축						o 성과확산 로드맵
							o 플랜트 기술 DB 구축
							o 플랜트 전과정 효과성 평가
청록수소 플랜트 안전 및 기술 표준화	청록수소 플랜트 안전성 확보를 위한 공급 기술 표준화						o 플랜트 안전성 평가
	청록수소 플랜트 테크트리 및 설치기준 제도화						o ISO 등재 및 단위 공정 안전 코드
청록수소 플랜트 구축 및 실증 운영	청록수소 기반 통합 플랜트 디지털 엔지니어링 기술						o 대용량 청록수소 공급 Plant (3.0톤/일 H ₂)
	청록수소 통합 플랜트 운영 및 경제성 평가 기술						o 상용운전 DATA 축적 표준모델 확보

[그림 VI-52] 중점분야3 과제추진 로드맵

8. 동 사업의 기대효과(As-Is/To-Be)

■ 기대효과

〈표 VI-72〉 동 사업의 기대효과(As-Is / To-Be)



○ 과학기술적 측면

- 디지털 트윈 스마트 그리드 기술은 데이터, 네트워크, 인공지능 기술 등이 집약된 분야로 국내의 관련 산업 분야의 연구개발을 촉진함
- 디지털 트윈 기술을 활용하면 실제 물리적인 환경에서 실험하는 대신 디지털 환경에서시뮬레이션이 가능해 다양한 연구개발 시나리오 수행 가능
- 디지털 환경에서 에너지의 생산, 흐름 및 소비의 전 주기를 모니터링하고 데이터를 축적할 수 있어 추후 관련 사업 및 연구 분야의 기초 자료를 제공할 수 있음
- 천연가스를 분해하여 이산화탄소 발생 없이 수소 생산과 생산된 수소를 수요처에 공급을 위한 청록수소 플랜트 안전성 확보
- 수소도시 실현을 위한 현실적인 청정수소 생산기술 확보 및 수소생산플랜트 트랙레코드 확보

○ 사회경제적 측면

- 에너지 효율성과 안정성을 향상시켜 비용을 절감하고 안정적인 에너지를 공급하여 에너지 접근성을 향상시킬 수 있음
- 실시간으로 에너지의 생산과 유통, 소비를 모니터링하여 에너지 수요에 따라 적절하게 생산하고, 이상 소비 데이터를 감지하는 등 낭비되는 에너지를 감소시켜 친환경적이고 지속 가능한 에너지 공급망 구축이 가능
- 다양한 청정수소 생산방법 확보 및 이에 수반되는 안전성 확보 기술 병행 개발로 사회적 수용성 제고
- 대용량 청록수소 생산플랜트 구축 및 운영 트랙레코드를 바탕으로 천연가스 생산국 등 해외 플랜트 건설시장 진출 기반 확보

■ 사업대상 및 수혜자

- 국가적 정책목표로서 탄소중립을 위한 에너지 정책의 핵심 중 하나는 재생에너지 및 수소에너지임
- 특히 수소는 에너지 원으로서 다양한 산업에 활용될 수 있으며, 이는 곧 유럽 등의 탄소규제에 대한 대응 수단으로 활용될 수 있음을 의미
 - (수소환원제철) 유럽 탄소 규제에 영향을 받는 가장 큰 산업 중 하나로 국내 포스코 및 현대제철을 포함한 철강산업계가 가장 큰 수혜자로 평가
 - (친환경 자동차) 수소자동차의 핵심은 비교적 저렴한 대용량 수소의 공급이며 현재까지 추출 수소가 공급되었으나, 이산화탄소 발생에 의해 탄소 중립을 위한 약점이 있었음. 따라서 이를 대체할 대용량 수소 공급 기술로 수소 자동차 업계의 활성화가 가능
- 수소 발전은 아직까지 대용량 수소 공급 수단이 없어 메탄을 기반으로 발전하였으나, 청록수소 기술로 대용량 수소 공급이 가능해지면, 메탄이 아닌 순수 수소 발전시장이 커질 가능성이 높음
- 차세대 교통 수단으로서 도심 공항 등의 연료로서 수소 공급 수단으로 활용함으로써 친환경 모빌리티 산업으로 확대

9. 핵심기술별 추진계획

1) (핵심기술 3-1) 도시 수소 공급을 위한 디지털 플랫폼 및 성과 확산 로드맵 개발

(1) 배경 및 필요성

가. 추진배경

- 선진국을 중심으로 탄소 중립을 위한 다양한 정책을 발표하고 실행 전략을 추진
 - 미국, EU, 중국, 일본 등 다양한 국가에서 자국의 상황에 맞춘 정책을 실행
 - 재생에너지 발전과 전기 인프라 확대 그리고 보완적인 수소 에너지 활용을 중심으로 실행전략을 추진
 - 국내 정책은 탄소 중립 국가 비전 (2020)과 감축 시나리오 (2021)을 중심으로 탄소저감 정책을 추진
 - 국내 에너지 정책은 도시의 인프라를 중심으로 에너지 효율화 및 산업 도시의 에너지 전환이 전략 추진 방향이며, 화석연료 저감, 재생에너지 발전 확대, 수소에너지 및 전기 기반의 인프라 구축이 주요 골자임
 - 재생에너지의 단점인 간헐성으로 인하여 탄소중립을 위해서 도시는 다양성을 기반으로 에너지 인프라가 구축될 수밖에 없음
 - UN의 보고서는 도시 인프라와 관련하여 교통, 재생에너지를 중심으로하는 통합에너지 인프라, 산업도시의 에너지 효율성, 생태도시로의 변화 등을 탄소 중립 도시 방향성의 핵심으로 기술하고 있음 (Climate Neutral Cities, 2011, UNECE)
- ※ 화석연료 저감 (재생에너지 확대), 분산형 발전 연계등의 에너지 그리드 등이 핵심
- (도시 건물) 전력 기반의 에너지 효율화 및 연료전지 시스템
 - (교통인프라) 전기 및 수소 자동차로의 전환 및 이를 위한 충전 인프라 확대
 - (발전) 재생에너지 발전 확대 및 분산형 수소 발전
 - (연료) 일부의 화석연료, 수소, 전력 (원자력, 재생에너지)
- 수소의 생산이 재생에너지에 의존할 수 있는 환경적인 기반 부족으로 인해 국내는 다양한 수소 생산 기술이 적용될 수밖에 없어 블루, 그린, 청록, 레드 수소로 귀결될 것으로 예측
 - 온실가스 배출의 70%가 도시에서 발생되므로 도시 공급 에너지 소스에 대한 적절한 조절이 탄소 중립 정책의 핵심이 될 것으로 예상

- 향후 이를 위한 다양한 기술 개발과 인프라 구축 및 변화 등에 대한 체계적이고 전방위적인 전략과 실행이 요구될 것이 명확함
- 특히 재생에너지 발전 확대는 도시 에너지 공급과 조율을 위한 다양한 인프라의 효율적 운영을 위한 기술적 그리고 전략적 검토가 동반되어야 함

나. 추진 필요성

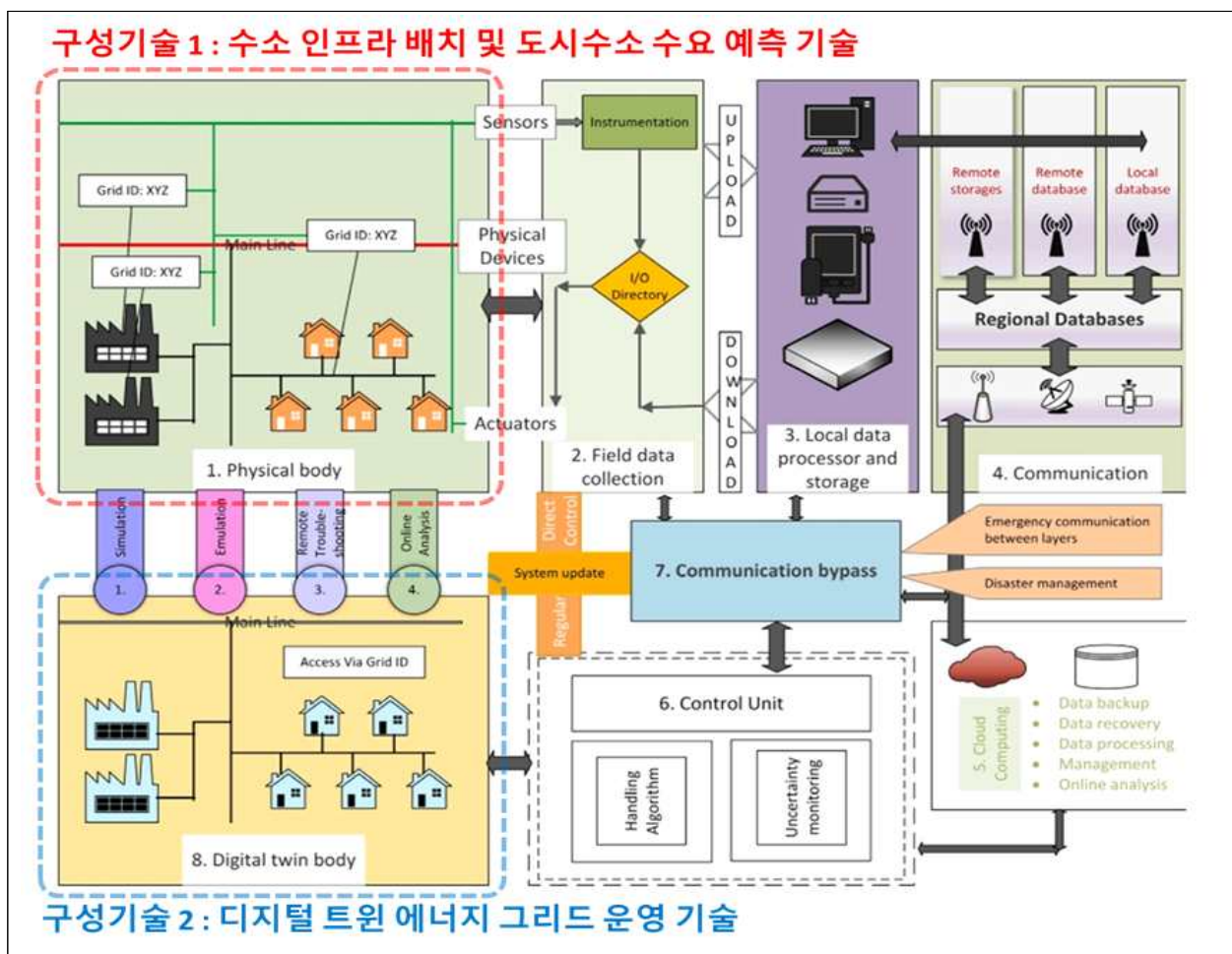
- 현 도시의 에너지 공급 체계는 도시의 성격과 무관하게 전기와 화석연료 시스템으로 비교적 단순하게 운영되고 있으나, 향후 에너지 원이 다양화되면, 복잡한 공급 체계로 변화될 것으로 예상됨
 - 도시의 성격에 맞추어 필요로 하는 에너지 소스의 구성이 달라질 것으로 예상
 - 태양광 및 풍력에 기반한 재생에너지의 간헐성 보완을 위해 원자력 및 수소 에너지 공급 확대
 - 산업 도시의 안정적 에너지 공급을 위해 일부의 화석 연료 공급
 - 발전 설비의 변화: 화석연료 위주의 발전설비 → 재생에너지 (태양광, 풍력) 발전, 연료전지 발전, 원자력 발전 등의 다변화
- * 이산화탄소 감축 시나리오 (2021) 참고
- 에너지 전환을 위한 장단기적 검토와 에너지 인프라 확대에 따른 에너지 공급 조절 등이 탄소 중립을 위해 필연적인 기술적 검토사항이 될 것임
 - 필요한 에너지 소스와 공급량을 적시 적소에 공급하는 것은 인력만으로는 충분한 효과성을 기대하기 어려움
 - 청록수소 플랜트의 특성상 수소와 블랙 카본 생산 및 공급을 위해서는 열 혹은 전력 공급을 위한 다른 인프라와 연계되어야 하며, 또한 생산된 수소의 공급이 다른 에너지 원 공급과 효율적으로 연계되어야 함
 - 따라서, 다양한 도시의 요구사항에 맞춘 data를 기반으로 인공지능의 개발은 향후 에너지 공급체계의 다양성을 위해 필수적임
- 탄소 중립을 위한 도시는 재생에너지 기반의 분산형 발전이 핵심이나, 이러한 전략적 방향성에 따른 인프라 구축의 어려운 점은 발전 및 활용 인프라의 간헐성에 있음
 - 탄소중립 도시 에너지의 핵심 활용 인프라는 전기자동차와 함께 풍력, 태양광 등의 재생에너지를 중심으로 구성

- (재생에너지) 국내 재생 에너지의 99%는 태양광과 풍력이며, 이는 국내 발전 총량의 10% 내외 비중을 차지함. 이는 태양광과 풍력이 계절 및 시간에 따라 강도의 변화에 기인하는 간헐적 특성으로 인함
- (전기자동차) 국내 전기자동차는 '20년 46,909대에서 '22년 162,987대로 최근 3년간 약 3.47배 성장할 만큼 변동성이 큰 시장임
- 따라서, 안정적인 전기자동차 및 재생에너지 가용성 확보를 위해서는 탄소중립적 새로운 에너지원 및 이를 위한 소스의 확보가 핵심이며, 또한 간헐적 발전량을 대체할 수 있는 변동성 대비를 위한 운영체계 확보가 중요함
- AI를 통한 청록 수소 플랜트와 수소 활용 시설간의 연계는 도시의 에너지 운영을 위해 필연적이며, 장기적인 전망에서 수소 도시 운영을 위해 필수적 기술임
 - 청록수소는 레드수소의 기반인 원자력 발전에 대한 부정적 인식을 대체하고 재생에너지의 간헐성을 보완할 수 있는 좋은 대안이나, 도시 전체에 대한 간헐적 재생에너지 그리고 에너지 활용 수단의 변동성에 대한 보완적 성격의 공급 가능성에 대한 검토가 반드시 필요로 함
 - 청록수소 공급은 활용 인프라 즉 수소 자동차 및 연료전지 그리고 산업 기술 등과 연계되어야 하며, 시범사업 이후 플랜트 운영과 도시 활용을 위해 장기적인 공급 로드맵을 필요로 함
 - 청록수소 플랜트를 포함한 수소 생산설비와 활용설비의 연계 그리고 전력공급 등과의 효율적 공급망 구축은 인력만으로는 모니터링과 효율적 운영이 어려우므로, 인공지능 기반의 네트워크 연결과 운영 방식이 합리적인 대안이 될 수 있음
 - 이러한 그리드 운영 개념의 중요성은 모두 인지하고 있으나, data와 기술적 실증 개념의 부족으로 인하여 아직까지 구현된 적이 없어 현실에 대한 적용 가능성이 구체적으로 분석된 적이 없음
 - Data의 확보는 실질적인 재생에너지의 무탄소 발생이 없으므로, 청록수소 플랜트 등의 탄소저감 효과 등에 대한 다양성 확보가 중요함
 - 그러므로 실증사업을 통한 data의 질적, 양적 확보 및 이를 활용할 수단적인 database의 구축 그리고 이와 함께 도시내 인프라의 활용성 확보를 위한 수단의 연구는 미래 탄소중립 및 수소도시 운영을 위해 필연적임

(2) 핵심기술 개요

가. 개념

- (개념) 수소 수요 예측을 위한 청록수소 생산 플랜트 운영 및 디지털 기술 개발
 - 탄소 중립 도시 구성을 위한 핵심 인프라로서 분산형 발전설비들과 함께 전기/수소차 및 충전 인프라에 대한 수소 공급 등을 상호 연결하여 각각의 변동성에 대처할 수 있는 디지털 운영 플랫폼을 의미
 - 본 과제에서는 단/장기적인 개념을 도입하여 테스트 베드에서의 변화를 예측하고 핵심이 되는 변동성에 대한 예측 AI 알고리즘을 개발



[그림 VI-53] 청록수소 생산 플랜트 운영을 위한 AI 및 디지털 기술 개발 개념도

- (스마트 그리드) 전력망에 ICT(Information & Communication Technology) 과 D.N.A(Data, Network, Artificial Intelligence) 기술 등을 활용하여 공급자와 수요자 사이에서 실시간 양방향 정보 교환을 통해 지능형 전력 수요관리, 에너지 프로슈머* 및 신재생에너지 연계 등이 가능한 전력 인프라 시스템

* 생산자(producer)와 소비자(consumer)의 합성어로 생산에 참여하는 소비자를 뜻하는 합성어로, 에너지 생산에도 참여하는 소비자를 칭함

- 기존 전력망의 경우 중앙 집중형태로 공급자 중심의 인프라 운영 및 공급방식으로 운영되는 반면 스마트 그리드의 경우 양방향 정보 교환을 통해 보다 효율적으로 운영됨

○ (스마트 그리드 구성요소) 전력망 자체 뿐 아니라 전력망 데이터, 전력 관련 시장 및 제도, 인프라 등을 통하여 스마트 그리드를 구현할 수 있음

- 에너지 저장시스템(Energy Storage System, ESS), 지능형 원격 검침 인프라(Advanced METERing Infrastructure, AMI), 에너지 관리시스템(Energy Management System, EMS), 마이크로 그리드(Micro grid) 등이 대표적인 스마트 그리드 기반 인프라임

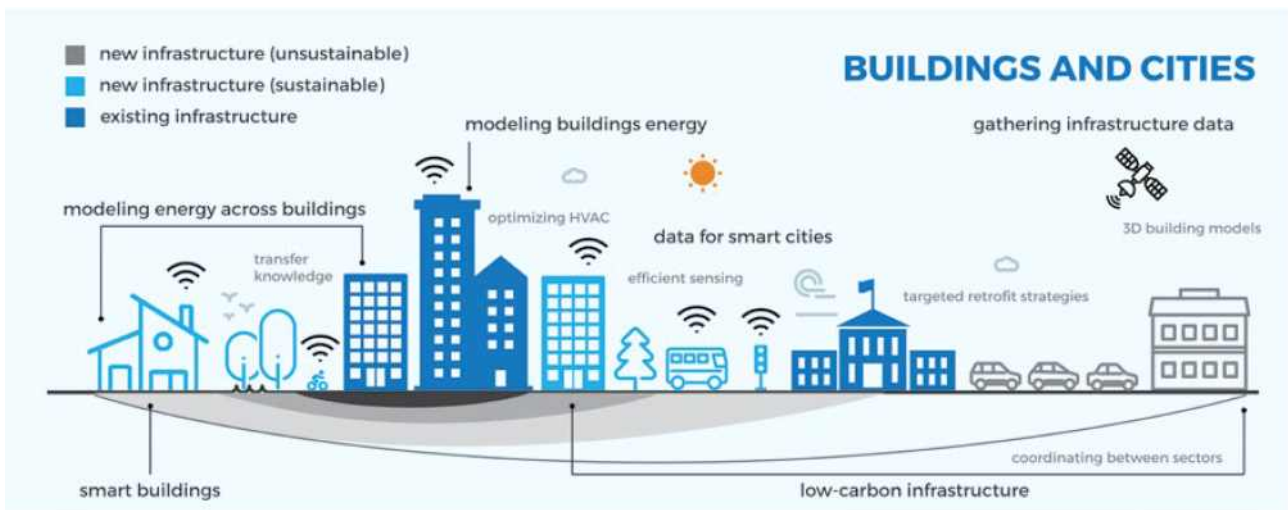


[그림 VI-54] 스마트 그리드 개념도(제3차 지능형전력망 기본계획, 산업통산자원부)

○ (스마트 그리드 핵심기술) 성공적인 스마트 그리드 시스템을 구축하기 위해서는 인공지능, 인프라, 네트워크, 시스템 등의 보안 기술이 핵심이며, 개인 사생활 침해의 소지를 고려해야 함

- 인공지능 기술을 활용한 전력 수요 및 발전량 예측, 에너지 소비 이상 감지, 에너지 저장 및 유통 최적화 등을 통해 효율적인 전력망을 운영할 수 있음
- 전통적인 전력망의 경우 아날로그 형태의 중앙 집중형태로 운영되는데 반해, 스마트 그리드의 경우 네트워크에 연결된 분산형 디지털 체계로 물리적 보안 뿐 아니라 네트워크를 통한 공격 등 다양한 보안 취약점을 갖기에 이를 위한 대비가 반드시 필요함
- 개인의 에너지 소비와 관련된 데이터를 통해 활동 시간 및 내역 등 개인의 사생활과 관련된 데이터가 수집되는 만큼 개인의 사생활 보호와 관련된 대책이 필요함

- (탄소중립 도시 AI 운영기술) 분산형 발전을 포함한 인프라 간의 연계를 통해 변동성에 대처하는 다양한 네트워크 연결을 자동화함. 이를 위해 다음과 같은 조건들이 필요함
 - (전력 단가, 날씨, 전기 소비 패턴 등의 data) AI를 사용하여 패턴을 인식하고 데이터 내에서 식별된 패턴을 기반으로 미래 결과에 대한 확률론적 예측을 제공
 - (AI를 위한 이미지 및 비디오) 이미지의 개체 또는 조건을 시각화한 data. 예를 들면 구름 패턴 등에 따른 태양광 발전량 예측
 - (장비 및 센서 data) 센서와 통신 및 네트워킹을 활용한 에너지 네트워크의 실시간 data 수립을 위한 장비
 - (다양한 AI 어플리케이션) 실제 다양한 data를 활용할 수 있는 기본 알고리즘과 함께 각각의 인프라 맞춤형을 위한 응용 AI 알고리즘 개발



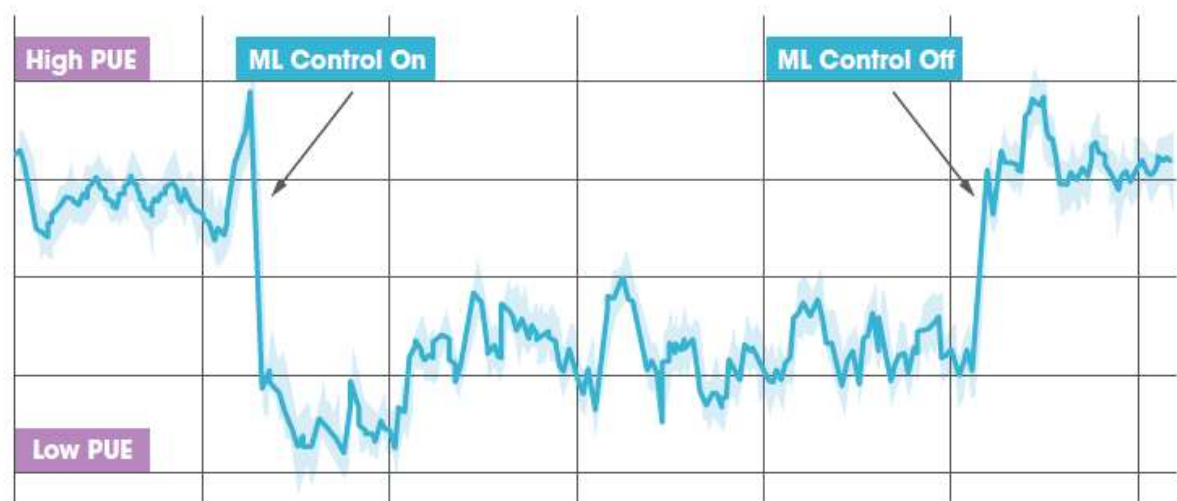
Selected AI-for-climate applications within buildings and cities.

Figure reproduced with permission from Tackling Climate Change with Machine Learning (Rolnick et al. 2019)

[그림 VI-55] 도시 인프라에 적용한 AI 어플리케이션의 사례 및 모델링

- (Power 섹터에서의 AI) 파워그리드에서의 AI의 응용 분야는 크게 4가지, 즉 재생에너지 발전 예상, 그리드의 안정성을 위한 유지관리, 전력 요구량 예측, 그리고 효율적인 요구량 관리 등임*

* IRENA, Artificial Intelligence and Big Data: Innovation Landscape Brief, 2019



Source: Evans and Gao (2016).

ML = machine learning; PUE = power usage effectiveness. The data centre industry uses the measurement PUE to measure efficiency. A PUE of 2.0 means that for every watt of computing power, an additional watt is consumed to cool and distribute power to the IT equipment. A PUE closer to 1.0 means nearly all the energy is used for computing.

[그림 VI-56] 하루의 변화되는 에너지 요구량에 대한 머신러닝 결과의 예

나. 범위

■ 핵심기술 범위

- (구성기술 1) DNA 기반 도시 수소 수요 예측 및 디지털 플랫폼 개발
- (구성기술 2) 플랜트 성과 확산 로드맵 구축 (총괄)

〈표 VI-73〉 핵심기술 3-1의 구성기술 범위

구성기술명	기술개발 정의 및 범위
DNA 기반 도시 수소 수요 예측 및 디지털 플랫폼 개발	○ 청록 수소 인프라의 입지에 영향을 미치는 요인 분석 ○ 수소 도시의 특성을 고려하여 도시 내 수요처 별 전력 수요 예측 기술 개발 ○ 예측 수요를 기반으로 한 수소 인프라 입지 선정 최적화 기술 개발 ○ 수집한 데이터를 분석하여 에너지 사용 패턴, 이상 감지 등 데이터를 기반으로 서비스 구현 ○ 테스트베드내 가상화 모델 적용을 통한 디지털 운영플랫폼 개발
플랜트 전과정 평가기반 성과확산 로드맵 구축	○ 청록수소 플랜트 운영 DB 구축 ○ 청록수소 플랜트 기술 확산을 위한 로드맵 구축

(3) 기술개발 목표

가. 핵심기술의 개발 목표

■ 정성적 목표

- 테스트베드 가상화 모델 개발 및 디지털 운영 플랫폼 개발
 - 테스트베드 적용성 평가를 통한 AI 기술 개발 및 적용성 평가
 - 수소 수요량 예측 알고리즘 개발 및 등록
- 청록수소 플랜트 전주기 효과성 분석 툴 개발
- 청록수소 플랜트 DB 구축 및 성과 확산 로드맵 도출

■ 정량적 목표

- 수소 인프라 입지 선정 알고리즘 만족도 4.5/5 이상
- 수요예측 알고리즘 정확도 95% 이상
- DB 구축
 - 시불변(time-invariant) 데이터 종류(사양 등) 10건 이상
 - 시변(time-variant) 데이터 (발전량, 상태, 환경 등) 10건 이상
 - 청록수소 안전, 구축 및 운영 관련 데이터 10건 이상 (중점 2, 3, 4 협력)
- 수집 데이터 유사도 95% 이상
- 실시간 데이터 반영 시간 1분 이내 확보

〈표 VI-74〉 핵심기술 정량적 성과목표

단계별 목표(정성적)								
1단계				2단계				
수소 인프라 배치 및 도시수소 수요 예측 기술 개발				가상화 모델 적용을 통한 디지털 운영 플랫폼 개발				
정량적 성과목표								
성과지표명	1단계			2단계				계
수소 인프라 입지 선정 알고리즘 만족도 (5점 만점)	4	4.5						4.5
수요예측 알고리즘 정확도(%)	0.9	0.95						0.95
시불변(time-invariant) 데이터 종류(종)				5	10			10
시변(time-variant) 데이터 종류(종)				5	10			10
수집 데이터 유사도(%)				0.9	0.95			0.95
실시간 데이터 반영 시간(분)				2	1			1

■ 성능 목표

〈표 VI-75〉 핵심기술 개발목표

핵심기술명	성능지표	현재 스펙	개발 목표 스펙		
			1단계	2단계	3단계
청록수소 생산 플랜트 운영을 위한 AI 및 디지털 기술 개발	수요예측 알고리즘 정확도(%)	Facebook의 Prophet서비스 MAPE(Mean Absolute Percentage Error) 7.5% 수준	15%	10%	5%
	수집 데이터 유사도(%)	정보없음 DTW(Dynamic Time Warping) 유사도 95% 수준	85%	90%	95%
	실시간 데이터 반영 시간(분)	정보없음 1분 이내	2분	1분 30초	1분

나. 목표 설정 근거

○ 수요예측 알고리즘 정확도(%)

- 수요예측 모델의 성능평가는 MSE, RMSE, MAE, MAPE 등으로 표현

- $MAPE = (1/n) * \sum (|(y\_true - y\_pred)/y\_true|) * 100$

* y_true = 실젯값, y_pred = 예측값, n = 데이터 포인트 수

- 세계 최고수준 시계열 예측 모델은 Prophet(페이스북) 서비스로 MAPE 7.5% 수준

○ 수집 데이터 유사도(%)

- 시계열 데이터의 유사도는 피어슨 상관계수, 유클리드 거리, 코사인 유사도, DTW 활용

- DTW 유사도는 시계열 데이터 간의 시간적인 차이와 스케일의 차이를 고려하여 보다 정확한 관계 평가 가능

○ 준실시간 데이터 반영 시간(분)

- 데이터 반영 시간(분) = (서버 데이터 수신시간 - 장비 데이터 측정 시간) / 데이터 포인트 수

(4) 과제 중복성·차별성·연계방안

가. 타 연구과제와의 차별성 및 연계성

〈표 VI-76〉 차별성 및 연계방안 요약

사업명 (부처)	과제명 (과제기간)	주요내용	본 과제와의 차별점	연계 추진방안
재생에너지 디지털트윈 및 친환경교통 실증연구 기반구축 사업(산업부)	○ 재생에너지 디지털 트윈 시스템 및 운영 플랫폼 개발 ○ 2020.11.01.~2022.12.31.	○ 재생에너지 디지 털 트윈 구축 및 새 만금 단지 내 실증	○ 발전량 모니터링 위 주의 운영 플랫폼으 로 본 과제에서 제안 하는 다양한 시나리 오 수행 불가능	○ 다양한 발전 플 랜트와 연계할 수 있는 모델 설 계
에너지 클라우드 기술개발 사업(과기부)	○ 에너지클라우드 가상물리시스템 설계 및 최적 운영 기술 개발 ○ 2019.06.20.~2023.12.31	○ 재생에너지 연계 를 고려한 에너지 클라우드 가상물 리시스템 설계 및 운영 기술 개발	○ CPS(Cyber-Physi cal System) 알고 리즘 개발 위주의 과 제	○ 실제 에너지 스 마트 그리드 구 축 시 개발 알고 리즘 활용 가능

나. 민간기술과 차별성 및 연계성

〈표 VI-77〉 민간기술의 한계점 및 개발기술과의 차별성·연계성

민간기술명	민간기관 (지원기관)	주요 연구내용	개발기술과의 차별성 및 연계방안
iTwin	두산중공업	Microsoft Azure Digital Twin 서비스를 활용한 풍력발전 디지털 트윈 구현	○ 상용 API 사용 ○ 제공하는 서비스 형태 등 참고
Factova	LG CNS	생산라인 데이터를 수집, 분석하여 스마트 팩토리 구현	○ 제조업 디지털트윈 특화 솔루션 ○ 수소 발전 인프라에 스마트 팩토리 관련 기능 연계 가능
AI 기가트윈	KT	도시 인프라를 모니터링하고 데이터를 통해 예측하는 서비스	○ 도시 인프라 특화 디지털트윈 ○ 추후 도시 규모로 확장 시 연계 가능

2) (핵심기술 3-2) 청록수소 플랜트 안전 및 기술 표준화

(1) 배경 및 필요성

가. 추진배경

- 메탄을 원료로 하는 수소 생산기술은 대표적으로 고온 (700~1000℃)에서 수소와 이산화탄소로 분리하는 기술임
 - 가장 효율적이고, 경제적인 수소 생산 방식이나, 반응의 특성상 이산화 탄소가 반드시 발생한다는 단점이 있어 탄소 중립을 위한 전략 추진을 위해서는 CCS 혹은 CCUS 기술과 병행해야 함
- 메탄 추출시 이산화탄소 발생 단점을 해결하기 위한 대안 중 하나로 메탄 열분해 기술이 대두됨
 - 열분해는 에너지 소요량이 크다는 단점이 있으나, 발생하는 고체 탄소를 고부가가치화 함으로써 이를 상쇄할 수 있음
 - 메탄 열분해에 의한 수소 생산 기술의 잠재적 가치로 인해 유럽 및 미국을 중심으로 기술의 효율성과 경제성 증대를 위해 연구되고 있음

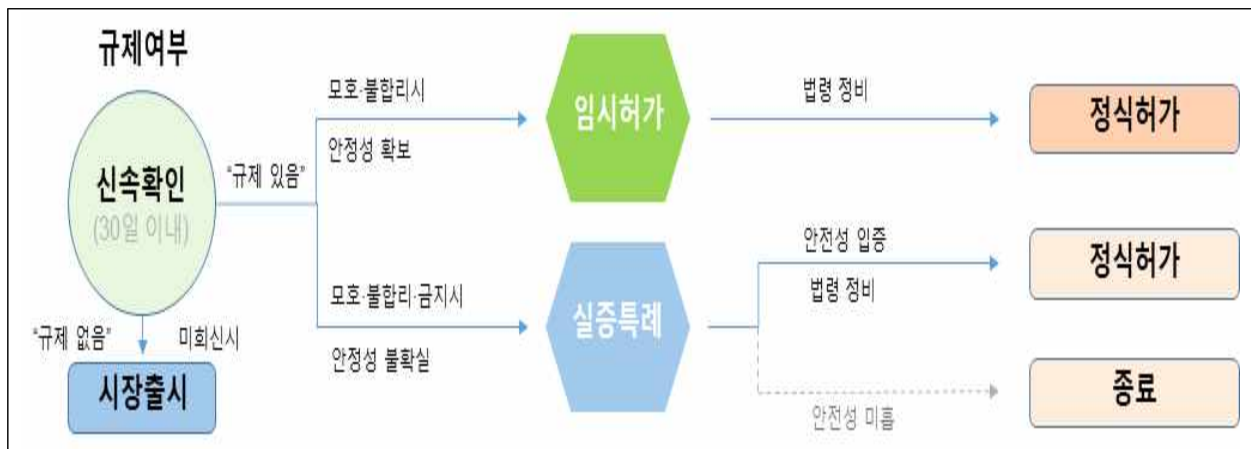
나. 추진필요성

- 천연가스를 활용한 청록수소의 생산/운송/활용에 대한 전주기 안전 기술 개발
 - 천연가스를 열분해하여 이산화탄소 발생 없이 수소 생산과 생산된 수소를 수요처에 공급을 위한 실증형 청록수소 생산/저장/공급설비 시설안전 확보 필요

(2) 핵심기술 개요

가. 개념

- 천연가스를 활용한 청록수소의 생산설비는 수전해 설비와 마찬가지로 KGS CODE에 의한 제품검사 대상으로 분류될수 있으며, 생산설비와 연계된 저장/공급설비는 시설기준으로 분류가능
- 또한, 청록수소 생산설비의 실증시 제품기준 및 시설기준이 마련되어 있지 않아 규제 샌드박스를 이용한 임시허가와 임시허가에 필요한 실증기준 마련이 요구됨
 - 따라서, 본 사업 추진을 위해서는 규제샌드박스 신청시 실증기준안 도출이 필요하며 사업화를 위해서는 제품검사기준 및 시설검사기준 개발 및 적용방법 검토가 필요함



[그림 VI-57] 규제샌드박스 진행절차

나. 범위

- (구성기술 1) 실증형 청록수소 플랜트 안전 확보를 위한 기준 마련

〈표 VI-78〉 핵심기술 3-2의 구성기술 범위

구성기술명	기술개발 정의 및 범위
청록수소플랜트 전주기 안전확보 기술	○ (정의) 청록수소 생산/저장/공급설비 안전 확보를 위해 필요한 위험 요인을 분석하고 실증기준 마련 및 안전기준 개정을 통해 상용화/사업화를 촉진하는 기술 ○ (범위) 청록수소 생산설비와 저장/공급설비에 적용가능한 실증기준 및 안전기준 개정(안) 도출과 적용타당성 평가를 통한 제도화를 기술개발의 범위로 설정함

(3) 기술개발 목표

가. 핵심기술의 개발 목표

■ 정성적 목표

〈표 VI-79〉 핵심기술 정량적 성과목표

단계별 목표(정성적)						
1단계				2단계		
• 규제샌드박스용 생산/저장/공급설비 실증기준안 도출				• 상용화용 생산/저장/공급설비 안전기준 개정(안) 제도화		
정량적 성과목표						
성과지표명	1단계			2단계		계
	1차년	2차년	3차년	4차년	5차년	
실증기준(안)			1건			1건
안전기준 개정(안)					1건	1건

■ 성능 목표

〈표 VI-80〉 핵심기술 개발목표

핵심기술명	성능지표	현재 스펙	개발 목표 스펙	
			1단계	2단계
청록수소플랜트전주기 안전확보기술	안전기준(건)	건	1	1

나. 목표 설정 근거

- 천연가스를 이용한 청록수소설비의 인허가를 위해서는 설계와 병행하여 규제샌드박스 신청 시 적용가능한 실증기준안 마련이 진행되어야 하며 상업화를 위해서는 개발된 실증기준을 토대로 제도화를 위한 안전기준 개정안 마련이 필요
- 현재는 청록수소에 대한 기준과 안전성에 대한 제도화가 미비하여 성과의 확산 및 산업 생태계 구성에 대한 근거가 미비함
- 또한, 청록수소 플랜트의 설치를 위해서는 규제 샌드박스에 대한 기준 마련이 시급

3) (핵심기술 3-3) 청록수소 플랜트 구축 및 실증 운영

(1) 국내 수소 수요처 Site 엔지니어링 및 실증플랜트 구축

가. 범위

- 지자체 협력을 바탕으로 Plant 운영을 위한 현장 공사 및 인프라 공사
- 청정수소 생산/공급 및 건축물 축조 일환의 인허가 승인(수소&환경&안전)
- 표준화된 모듈형 청록수소 생산시스템의 상세설계 도서

나. 구축 예정 시설물 목록

■ 사업 일반현황

- 대용량 청록수소 공급시스템은 제어동 1개와 설비동 1개로 총 2개의 건축물로 구성
 - 설비위치 : 수소도시 추진 지자체(광양시, 포항시, 순천시 등) 및 국내 수소 및 고체탄소 수요기업(제철소, 화학, 소재 기업 등) 중 1개 부지를 선정하여 구축
 - 설비면적 : 약 1,440m², 용도 지역별에 따른 건폐율 및 용적을 법적기준 적용

〈표 VI-81〉 시설구축 개요

시설명	대용량 청록수소 공급 시스템	사업명	대용량 청록수소 공급 시스템 기술개발
시설구축 총사업비	20억 원	전체사업비	288억 원
시설구축 사업기간	4차년~5차년 (총2년)	전체사업기간	1차년 ~ 5차년 (총5년)
부지 후보지	광양시, 포항시, 순천시 지자체 및 국내 제철소 등		
시설용도	3.0톤/일 청록수소 생산/공급 시스템		
층수	지상 1층 2개소(제어동 1개소, 설비동 1개소)		

다. 시설물 세부 구축계획

■ 시설물 개요

- 제어동은 제어실과 플라즈마 부대장비실 총 2개의 Room으로 구성
- 설비동은 플라즈마 기반의 청록수소 생산 및 공급설비로 구성되며, 설비의 유지/관리 공간을 충분히 확보 활용

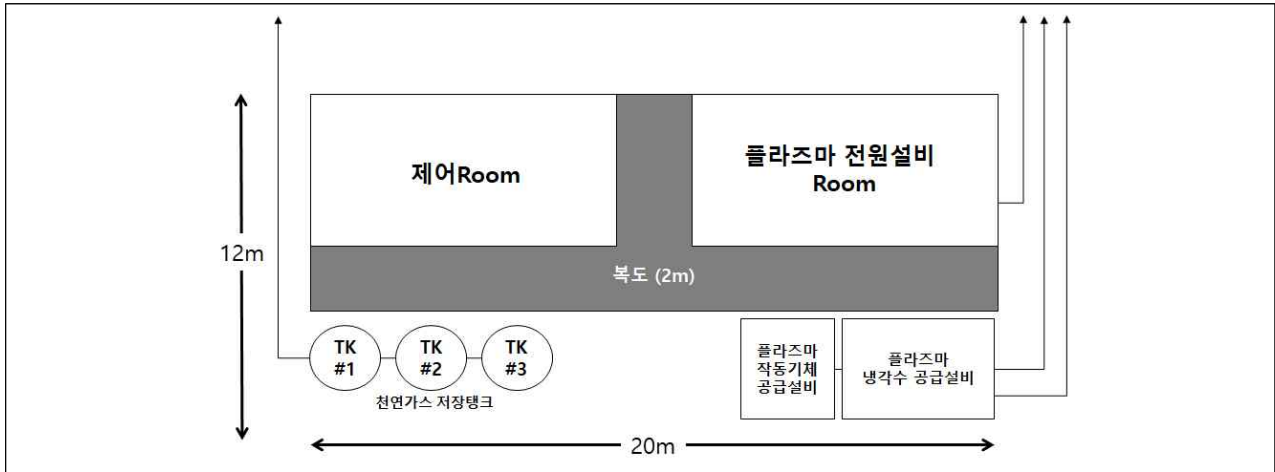
〈표 VI-82〉 시설물 개요

구분	건물명	층수	면적	용도 및 특이사항
필수시설	제어동	1층	240m ²	제어실 및 플라즈마 부대장비실
필수시설	설비동	1층	1,200m ²	대용량 청록수소 생산설비

■ 제어동

- Room #1 : 대용량 청록수소 생산시스템을 운영하는 본관 역할을 수행하며, 시스템의 제어, 계측 모니터링 및 운영인력 상주 등을 계획
 - ※ 'Room #1(제어Room)'은 동 사업기간 동안 실증플랜트 제어 및 실증연구 공간으로 활용
- Room #2 : 플라즈마 부대장비 중 실내공간(우천대비) 관리가 필요한 플라즈마 전원공급설비 위치 계획

- 제어동 주변 : 플라즈마 부대장비 일부를 실외 공간 보관 (천연가스 저장탱크, 플라즈마 냉각수 공급설비 및 작동기체 저장소 등)



[그림 VI-58] 제어동 배치도

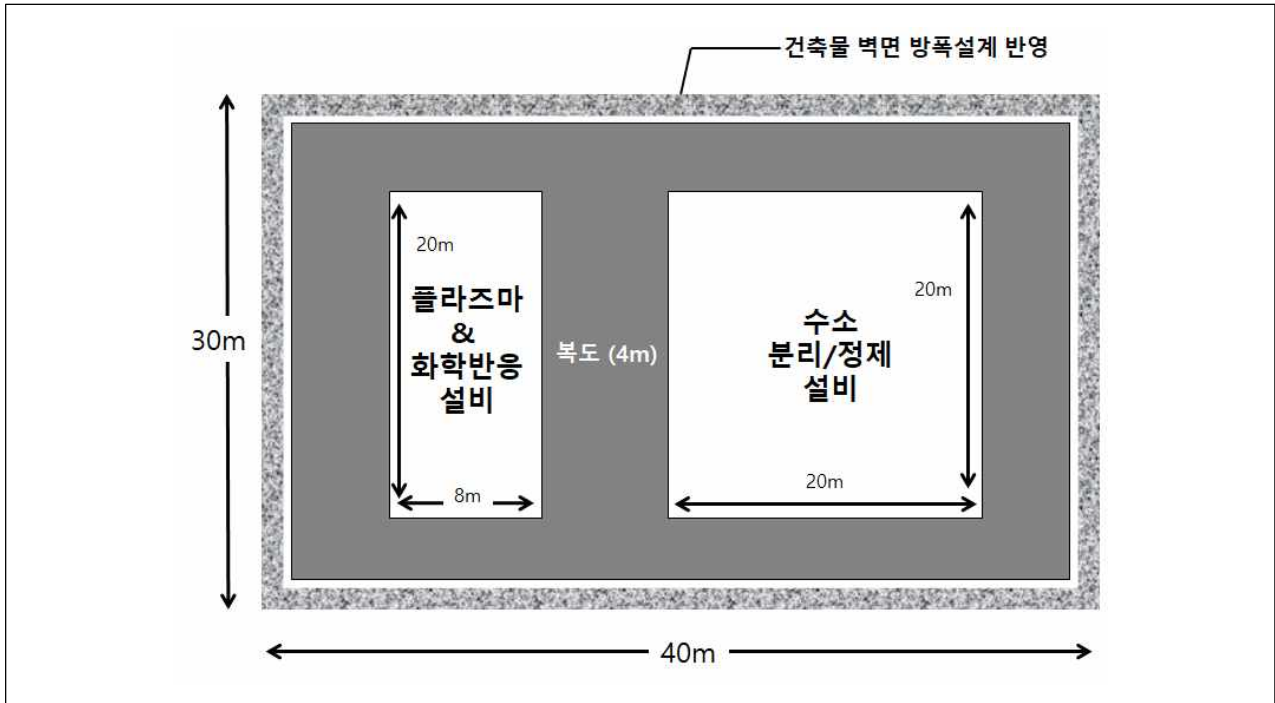


[그림 VI-59] 제어동 설치 예시

■ 설비동

- 제어동과의 이격거리를 고려하여 설비동 위치 계획

- 수소 취급의 안전성을 고려하여 안전기준에 따라 설치된 설비 및 설비동 외벽의 방폭구조 반영
- 플라즈마-화학반응 기반의 청록수소 생산설비 및 수소 분리·정제설비가 위치하며, 단위설비별 유지/관리 작업 용이성을 고려한 공간 확보

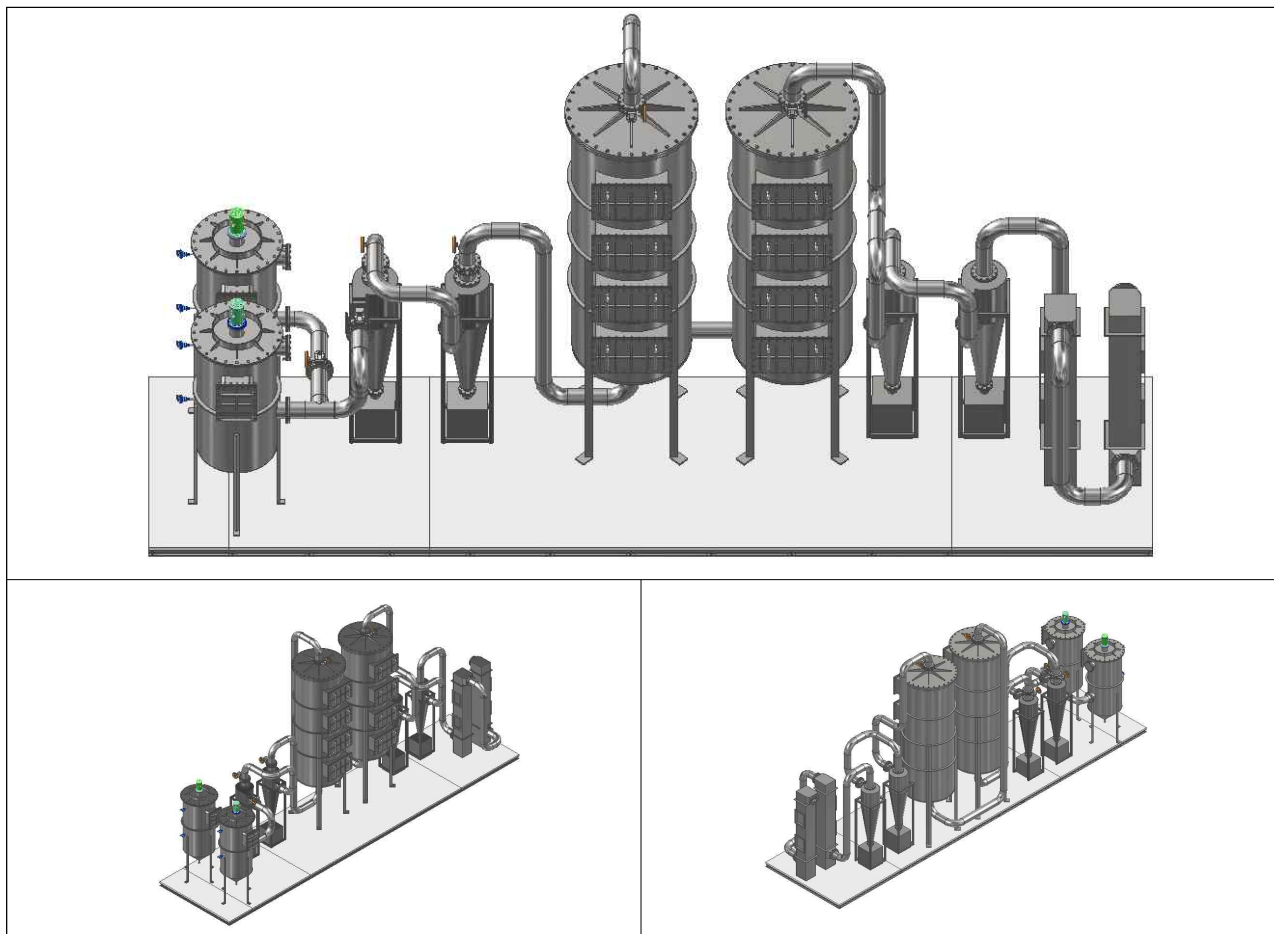


[그림 VI-60] 설비동 배치도

- (플라즈마-화학반응 설비) 동 사업을 통해 개발되는 플라즈마 토치, 플라즈마 반응기, 촉매 반응기 등으로 구성

〈표 VI-83〉 플라즈마-화학반응 설비 개요

구분	내용	비고
설비명	플라즈마-화학반응 설비	
SIZE	8 × 20 × 5(H)m	상세설계 변동가능
구성설비	메탄공급장치	
	1MW 플라즈마 토치	2Set 교대운영
	플라즈마 반응기	2Set 교대운영
	화학반응 촉매 반응기	
	사이클론(카본블랙 회수)	
	열교환설비	

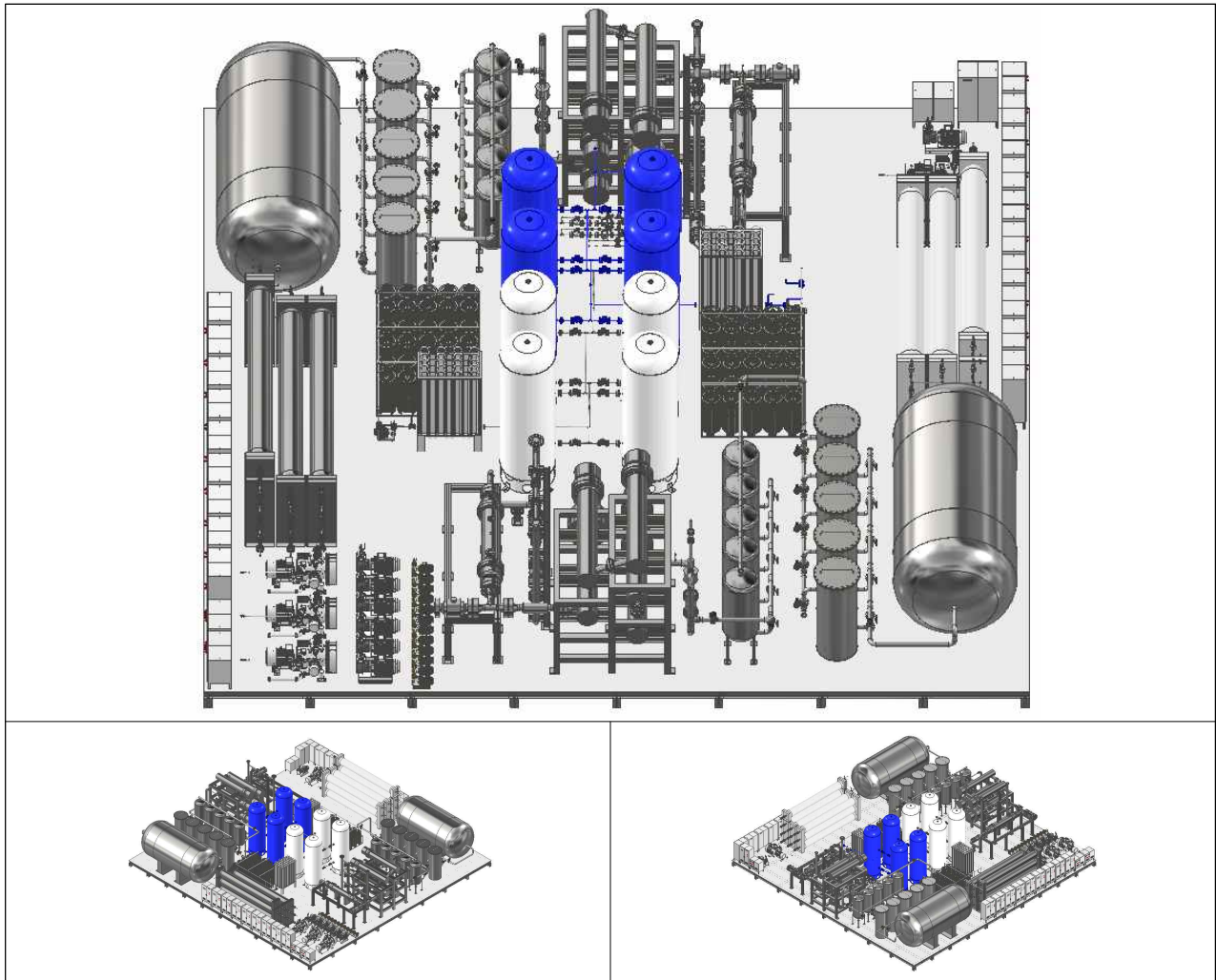


[그림 VI-61] 플라즈마-화학반응 설비 조감도

- (수소 분리·정제 설비) 동 사업을 통해 개발되는 기체/고체 분리설비 및 미반응 천연가스 분리설비 등으로 구성

〈표 VI-84〉 수소 분리·정제 설비 개요

구분	내용	비고
설비명	수소 분리·정제 설비	
SIZE	20 × 20 × 6(H)m	상세설계 변동가능
구성설비	기체/고체 분리설비	
	미반응 천연가스 분리설비	
	데미스터 (수분 분리)	
	압축설비	
	PSA 설비	
	기타 탱크류	



[그림 VI-62] 수소 분리·정제 설비 조감도

라. 비용계획

■ Plant구축 비용계획

구분			금액 (원)	비고
현장 공사비	용지보상비	용지보상비	563,976,000	지방비
		지장물보상비	-	
		소계	563,976,000	
	공사비	부지조성공사비	-	
		토목공사비	250,000,000	국고
		건축공사비	550,000,000	국고
		기계/전기/통신/소방	200,000,000	국고
		조경공사비	-	
		소계	1,000,000,000	
	시설부대경비	설계비	-	참여기관
		감리비	-	참여기관
		조사 및 측량비	-	
		영향평가 및 인허가비	500,000,000	국고
		소모성자재(Spare Part)	500,000,000	국고
		소계	1,000,000,000	
	총계		2,563,976,000	

※ 용지보상비는 참여의향 지자체 중 광양국가산업단지 내 부지를 제시한 광양시의 산업단지내 부지를 가정하여 추정함

■ 연차별 투자계획 (단위 : 억원)

구분	PLANT 구축비	연차별 투자계획				
합계	25.64	1차년	2차년	3차년	4차년	5차년
국고	공사비	-	-	-	10	-
	시설부대비	-	-	-	5	5
민자 (지방비)	공사비(부지매입)	5.64	-	-	-	-
	시설부대비	-	-	-	-	-

《참고》 용지보상비 산정 근거》

- (위치) 전라남도 광양시 금호동 646번지(광양국가산업단지 내, 표준공시지가) 가정

소재지	전년가격(원/㎡)	금년가격(원/㎡)
전라남도 광양시 금호동 646	201,500	186,500

- (부지면적) 1,440㎡

- (보상배율) 2.10

- 국가연구개발사업 예비타당성조사 수행 총괄지침 제25조 제3항 제3호에 의한 보상배율적용방법을 활용함.
해당 용도지역과 이용상황의 산술평균 적용

구분	전체	용도지역				이용상황				
		주거 상업 공업	녹지	관리	농림 자보	주거용 공업용	상업용 주상용	논밭	임야	공공 기타
전남	2.5	2.03	2.75	2.62	2.47	2.17	1.72	2.4	4.5	5

자료 : 국가연구개발사업 예비타당성조사 수행 총괄지침 ([별표 2] 지역별·지목별 보상배율(제25조제3항제3호 관련))

- (용지보상비) 563,976,000원

= 용지보상비 563,976,000원 = ㎡당 지가 186,500원 × 부지면적 1,440㎡ × 보상배율 2.10

마. 시설구축계획

- 동 사업은 1차년 연구개발을 시작으로 5차년 실증플랜트 구축 및 실증검증 완료를 목표로 총 5년간 추진
 - 사업기간 : 총 5년 (Y1 ~ Y5)
 - 실증장비 설계 및 제작 기간 : 총 4년 (Y1 ~ Y4)
 - Site 엔지니어링 및 Plant 구축 기간 : 총 2년 (Y3 ~ Y4)
 - 대용량 청록수소 공급시스템 실증운전 및 검토 : 총 1년 (Y5)

[그림 VI-63] 청록구소 실증플랜트 구축계획

항목			3차년				2028년(4차년)			
			Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4
청록수소 실증 플랜트 구축	설계 단계	건축								
		토목/조경								
		전기/기계/소방								
	시공 단계	건축								
		토목/조경								
		전기/기계/소방								
	감리단계									
시운전										
전체 누적 공정률			-		10%		80%		100%	

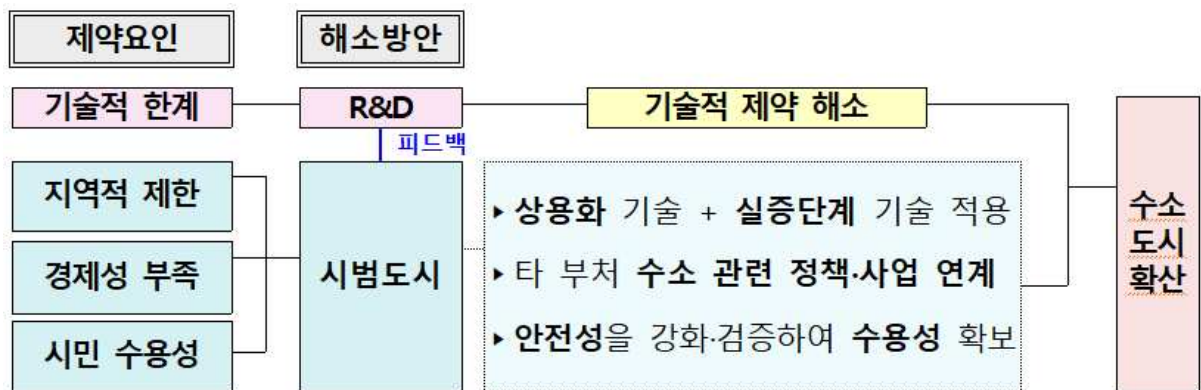
(2) 1MW 플라즈마 공정 기반 Plant 통합운영 및 최적 운영 절차 확보

가. 범위

- 플라즈마-촉매반응 연계공정 시운전 및 연속운전
- 수소 분리·정제 개발공정 시운전 및 연속운전
- 통합 Plant 정상운전 및 유지/관리 운영메뉴얼 개발
- [중점2] 카본블랙 고품질화 연구개발을 위한 운영 DATA 공유

나. 수소도시 연계

- (수소도시) 기 선정된 수소시범도시 10곳 중 우선순위를 고려하여 1곳에 연계 추진
 - * 단, 수소시범도시로 선정되지 않은 지자체의 경우도 수소도시 추진의지를 고려하여 후보지로 고려
- (추진방향) 1기, 2기 시범도시 추진 시 노출된 다양한 문제점 보완 및 기술적 한계를 극복하고 청록수소 도시공급을 위한 표준모델 개발 및 실증이 목표
 - ‘수소도시의 수소관망 구축·운영기술 개발 및 실증 사업(국토부)’과 연계를 통한 도시 공급 실증 추진



[그림 VI-64] 수소도시 연계방안

다. 실증 및 운영계획

■ 운영 계획

- (연구수행 중) 운영기간은 시운전을 포함 1년 이상 계획
 - (시운전_누적운전) 청록수소 실증플랜트 구축 후 당시 성능확인 위한 정상운전 (1,440hr, 60일 이상) 목표, 최적 운영절차 도출 완료

- (연속운전) 168hr(7일) 이상 연속상태 정상운전 수행 목표(개발된 시스템 및 설비의 문제점 보완 추진)

* 다양한 운전조건에서 통합적인 성능 확인이 목적이며, 장기운용이 필요할 경우 지자체에서 설치 예정인 통합안전관리센터와 연계

- (연구종료 후) 각 지자체에서 추진 예정인 수소도시의 인프라 구축 운영 및 소유권은 사업추진주체에 귀속됨에 따라 지자체에 이전

☞ 대부분의 설비·시스템에 대한 실·검증은 1년 내·외(사업기간 내) 완료하고, 사업 종료 후에도 지자체 주도로 도시 내 수소 공급 인프라(수소관망)에 대한 장기 운영 추진

(3) 기술개발 목표

가. 핵심기술의 개발 목표

■ 정성적 목표

- 대용량 청록수소 생산/공급을 통합 Plant 구축
 - 지자체 협력을 바탕으로 Plant 운영을 위한 현장 공사 및 인프라 공사
 - 청정수소 생산/공급 및 건축물 축조 일환의 인허가 승인(수소&환경&안전)
 - 표준화된 모듈형 청록수소 생산시스템의 상세설계 도서
- 통합 Plant 시운전 및 최적화 운영절차 도출
 - 플라즈마-촉매반응 연계공정 시운전 및 연속운전 DATA 축적
 - 수소 분리·정제 개발공정 시운전 및 연속운전 DATA 축적
 - 통합 Plant 정상운전 및 유지/관리 운영메뉴얼 확보
 - [중점3] 카본블랙 고품질화 연구개발을 위한 운영 DATA 공유

■ 정량적 목표

- 청록수소 생산 및 공급량 : 3.0톤/일_H₂
- 통합 Plant 누적운전 1,440hr(20일) 이상을 통한 유지/관리 DATA 확보
- 통합 Plant 연속운전 168hr(7일) 이상을 통한 최적 정상운전절차 확보

〈표 VI-85〉 핵심기술 정량적 성과목표

단계별 목표(정성적)						
1단계 (1~3차년)				2단계 (4~5차년)		
• [중점 2] 1MW 플라즈마 반응시스템의 실증설비 제작 • [중점 2] 촉매 화학반응시스템의 실증설비 제작 • [중점 3] 수소 분리·정제 개발설비의 실증설비 제작 • [중점 4] 고체탄소 고부부가치 응용 연구				• Plant 구축 및 실증운영 - 지자체 협력/계약 (SITE, 전력, 인허가 등) - [중점 2]와 [중점 3]의 실증설비 Plant 구축 - [중점 4] 카본블랙 응용 연구개발과 연계 운영 - Plant 최적화를 위한 시운전 및 연속운전 DATA 도출		

정량적 성과목표						
성과지표명	1단계			2단계		계
	1차년	2차년	3차년	4차년	5차년	
통합Plant 누적운전	중점기술별 기술개발을 통한 3.0톤/일의 청록수소 생산			- (Plant 구축)	1,440hr	1,440hr
통합Plant 연속운전	실증설비 제작			- (Plant 구축)	168hr	168hr

■ 성능 목표

〈표 VI-86〉 핵심기술 개발목표

핵심기술명	성능지표	현재 스펙	개발 목표 스펙	
			1단계	2단계
청록수소 플랜트 구축 및 실증 운영	누적운전	모노리스 OC1 모델 2020년 06월 완공	3.0톤/일 청록수소 생산 실증설비 제작 (중점분야 1 연계)	1,440hr 이상 통합 Plant 구축 및 핵심기술 국산화
	연속운전	정보없음 (모노리스 플라즈마토치의 내구성 문제 이슈)		168hr 이상 통합 Plant 핵심기술 내구성 강화
	Plant 적용사업	모노리스 OC1 모델 수소 생산능력 5,000톤/년 H ₂		1,000톤/년 H ₂ 소형-모듈화를 통한 복잡한 도심지 적용 모델 개발

나. 목표 설정 근거

○ 고내구성-고효율 공정개발을 통한 핵심기술 국산화

〈표 VI-87〉 유사사업 비교 및 목표설정

구분	모노리스 OC1 모델	본 사업 Plant 목표설정
Plant 용량	- 수소 : 5,000톤/년 - 카본블랙 : 14,000톤/년	- 수소 : 1,000톤/년 (대도시 진입형 모델 개발) - 카본블랙 : 3,000톤/년 (고부가가치 응용 개발)
Plant 연속운영	정보 없음(플라즈마 토치 내구성 문제보유)	168hr(7일)이상 연속운영으로 연간 300일 이상 운영
플라즈마 토치	8MW 플라즈마 출력 - 전극 소재 : Graphite(전극 소모성 높음)	1MW 플라즈마 출력 + 촉매화학반응 연계공정 - 전극 소재 : Copper, Tungsten 등 개발 통한 내구성 확보
수소 생산전력	12.8kWh/kg_H₂	12.5kWh/kg_H₂ 이하를 통한 경제성 강화
차 별 성	플라즈마 토치 의존도 높음	- 플라즈마 기술과 촉매 화학반응 연계공정 개발 - 천연가스와 플라즈마 반응 시 미반응 천연가스에 대한 촉매 분해공정 연계를 통한 원천기술 확보

(4) 과제 중복성·차별성·연계방안

가. 타 연구과제와의 차별성 및 연계성

〈표 VI-88〉 차별성 및 연계방안 요약

사업명 (부처)	과제명 (과제기간)	주요내용	본 과제와의 차별점	연계 추진방안
해양바이오수소 생산 상용화 기술개발 (해양수산부)	바이오수소 플랜트 운영 최적화 시스템 개발 ('21.04.01~'23.12.31)	기 구축된 해양 고세균 이용 바이오수소 생산 실증플랜트 통합운영 및 고도화 기술개발을 통한 시설 상용화 및 실증	0.5톤/일급 바이오수소 실증플랜트 최적화 운전 - 해양수소 신기술 (NET) 인증	- 청록수소 상용플랜트 운전 매뉴얼 최종안 도출 - 최적화 조건을 확립, 수소 생산시스템의 위험요소, 안정성 비교검토 - Plant 운영의 자동운전 적용 비교 검토
지하공간 활용도시 기반 복합플랜트 실증연구 (국토교통부)	복합플랜트 Compact화 기술 개발 ('20.04.17~'24.12.31)	도시복합폐기물로 부터 부산물 50% 저감, 공간집적율 40% 향상, 유효에너지 생산량 50% 증가 가능 지하 복합플랜트 실증	- 기존 대비 유효에너지 생산량 50% 증가 지하복합플랜트 요소 기술 연구 - 기존대비 40% 플랜트 집약화를 위한 연구수행	- 지역 수용성 제고 모델개발을 위한 통합 Plant 개발 - 실증플랜트 연속운전 및 운영을 위한 단계적 업무 흐름 참조 - Plant compact화 기술 발굴 및 적용 가능성 검토

나. 민간기술과 차별성 및 연계성

〈표 VI-89〉 민간기술의 한계점 및 개발기술과의 차별성·연계성

민간기술명	민간기관 (지원기관)	주요 연구내용	개발기술과의 차별성 및 연계방안
천연가스 기반 청록수소 생산기술 상용 플랜트 운영 및 기술개발 추진 중	○ BASF(독일) ○ 헤이저(호주) ○ C제로(미국) ○ 모노리스(미국) 등	○ 미국과 동유럽 국가는 플라즈마 개질기를 이용 수소생산 연구 중 ○ 모노리스는 아크플라즈마를 이용 유일한 상용설비 운영 중 ○ 국내 아크플라즈마 기술은 해외 대비 80% 수준	○ 플라즈마-촉매 연계공정을 통한 안정성 및 경쟁력 확보 ○ 고내구성 플라즈마 토치 및 고효율 저가형 촉매 개발을 통한 핵심기술의 국산화 ○ 소형-모듈화를 통한 복잡한 도심지역 공간활용성 극대화 모델 개발 ○ 수소&카본블랙을 통한 수소생산단가 절감효과 강화 ○ 지자체 및 산업체와의 협력을 통한 다양한 형태의 수소 생산 경쟁력 확보 및 글로벌 수소시장 진출 제고

제 7 장

사업추진체계 및 운영방안

제1절 사업 추진체계

제2절 사업 관리전략

제3절 소요예산

제4절 실증계획

7장 사업추진체계 및 운영방안

1절 사업 추진체계

- 동 사업 주관은 국토교통부, 전담기관 국토교통과학기술진흥원으로 하며, 사업의 효율적인 운영과 통합 실증을 위해 청록수소 플랜트기술 연구사업을 수행하는 총괄과제가 포함된 연구단으로 추진
 - 동 사업은 사업의 목적 및 특성을 등을 고려하여 기술개발과 통합 실증이 혼합된 R&D 사업
 - 사업은 총 5년('25년~'29년)으로 기술개발, 플랜트 건설 및 통합실증 단계별 전략 사업으로 3개 중점분야, 8개 핵심기술을 포함
 - 예산은 총 415억원으로 국고 290억원(70%), 지자체 36.16억원(9%), 민간 88.84억원(21%)로 산정



[그림 VII-1] 동 사업의 추진체계 구성

■ 사업추진주체별 역할

- 국토교통부 주관, 지자체 및 관련 산업계 관계자 등의 추진위원회 구성, 사업의 효율적인 운영관리 및 연구수행 제고를 위해 연구단을 구성하여 추진
 - 국토교통부(주관부처), KAIA, 유관기관 등 사업추진 관련 모든 참여주체 간 명확한 역할을 정의함으로써 효율적 사업추진을 도모
 - 사업 내 R&D 총괄역할 수행을 위해 ‘(가칭) 청록수소 생산 및 통합실증 연구단’을 구성·운영하여 효율성과 책임성을 확보

〈표 Ⅶ-1〉 사업추진 주체별 역할 및 기능

주체	역할 및 기능
주관부처 (국토교통부)	○ 사업총괄 부처(최상위 의사결정기관) ○ 사업의 추진과 관련된 정책적 판단 및 의사결정, 사업 시행계획 수립, 사업 투자우선순위 결정 등
국토교통과학기술진흥원 (전담기관)	○ 연구단 진도 및 실적 점검, 연구단 및 중점, 세부과제 선정·단계·최종평가 ○ 기술 확산 및 정책 활용성 검토 등, 그 외 사업추진 관리 관련 업무 지원
추진위원회 (지자체, 관련 협회 및 수요기업, 연구자 등)	○ 전담기관이 요청한 사항에 대한 검토·심의·조정 - 사업추진 방향과 운영에 관한 실무 자문, 세부과제 수행기관 선정평가 참여 ○ 연구단 및 발전사업자 협의 지원 ○ 사업 관리, 성과 관리, 산업계 의견 제시 등 ○ 해외 건설시장 진출을 위한 네트워크 구축 지원
연구단	○ 청록수소 플랜트 건설 및 실증 R&D 사업 추진 총괄 및 타임스케줄 관리 ○ 실증 주관 및 운영(전담기관 지정), 지자체 협의 ○ 요소기술 고도화 관련 연구성과 종합서비스 제공 및 관리

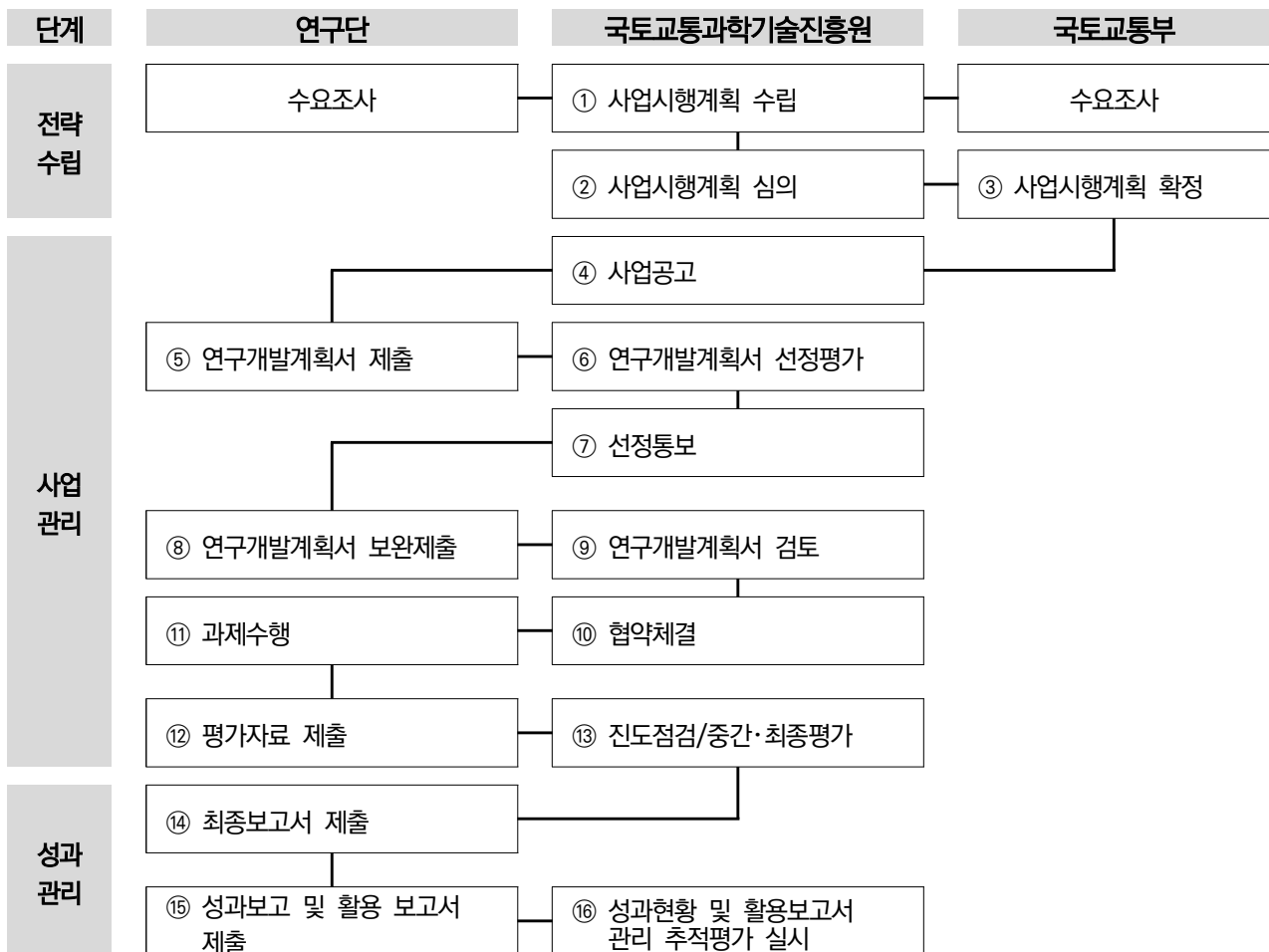
2절 사업 관리전략

1. 사업 관리체계 및 프로세스

■ 개요

- 동 사업은 국토교통부(정책총괄 및 재정지원), 국토교통과학기술진흥원(사업기획, 평가, 관리), 연구단을 중심으로 ‘전략수립→사업관리→성과관리’ 3단계의 사업관리 체계를 구축하여 운영
 - (전략수립) 선행과제와의 중복성 및 차별성 검토를 강화하고 유사과제와의 구체적인 연계활용방안을 계획함으로써 과제 추진의 목적 지향성을 확보
 - (사업관리) 성과창출 및 활용을 장려하기 위해 주기적인 성과 조사관리 및 평가와 연동한 과제 진도수행 점검으로 연구성과의 효과성을 강화
 - (성과관리) 연구수행 과정을 평가결과에 반영하고, 단계(연차) 및 최종평가위원회를 구성·운영하여 평가의 내실화와 평가결과 환류체계 등 평가의 실효성 강화

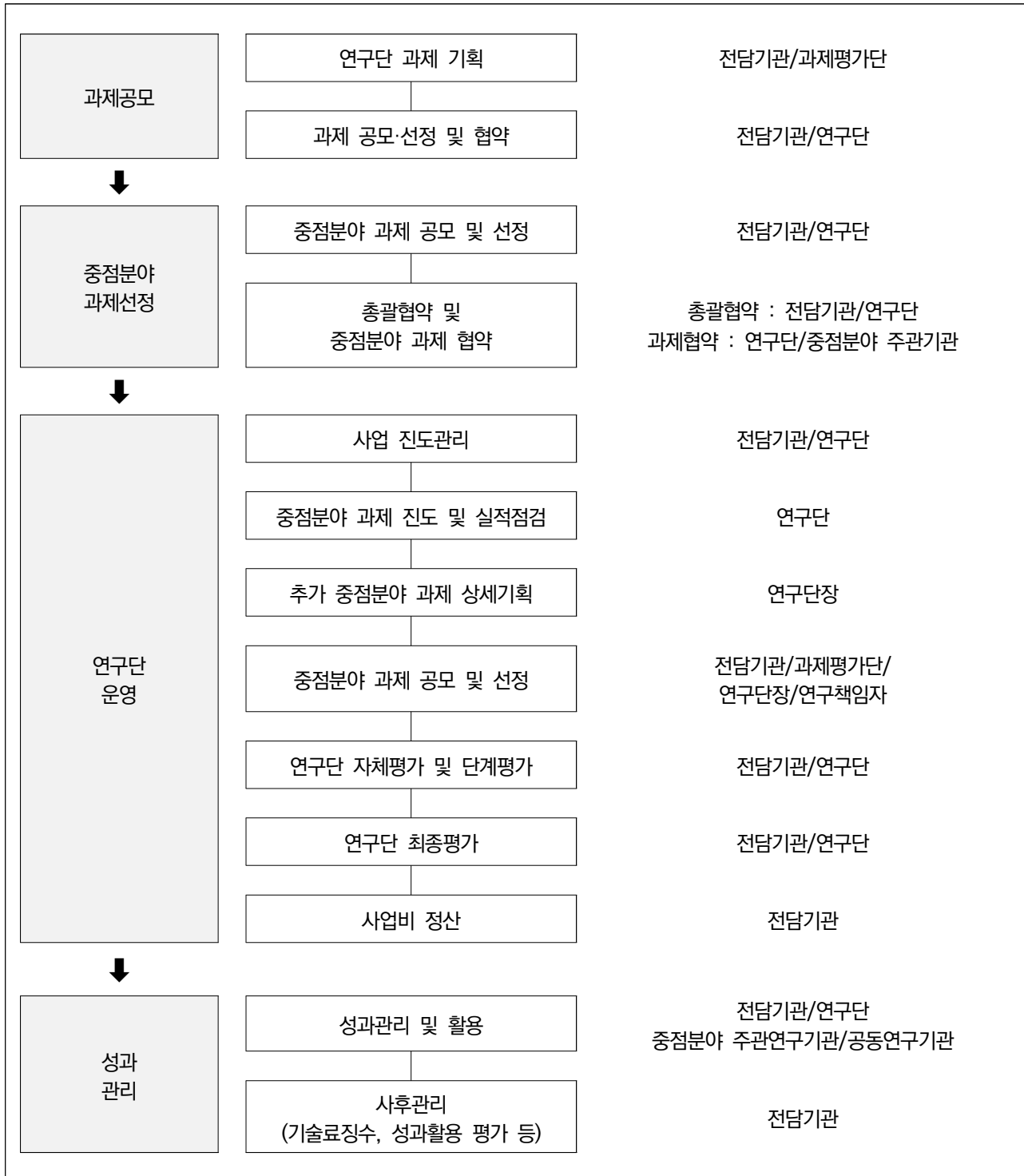
[그림 VII-2] 사업 관리체계 및 주체



■ 관리체계 및 프로세스

- 사업기획부터 공고, 선정 및 연구수행, 사후관리까지 세부 프로세스 및 수행주체별 명확한 역할분담을 통한 R&D 전주기적 관리 프로세스 확립

〈표 VII-2〉 사업 관리체계 및 주체



2. 단계별 평가/관리 절차 및 기준

■ 선정평가

- 사업추진 방식에 따라 평가항목의 가중치를 다르게 부여하여 사업 실효성 제고
 - 기술개발 추진계획의 타당성 및 구체성, 기술의 우수성 등에 대한 가중치를 높게 평가를 시행하여 목적지향형 R&D 사업 추진
 - 매년 기술동향조사를 통한 트렌드 발굴 등을 통해 우수성과 창출을 위한 연구개발 방향성에 적극 반영

〈표 Ⅶ-3〉 선정평가 주요 절차 및 내용

주요 절차	주요 내용
신청서류 접수 (전담기관)	○ 연구개발계획서 등 신청서류 접수
↓	
선정평가 계획수립 (전담기관)	○ 선정평가 절차 및 일정 계획수립 및 안내
↓	
사전검토 (전담기관)	○ 과제담당자 사전검토 - 신청서류 적합성 - RFP 부합여부 - 중복성 조사내용 등
↓	
과제평가단 구성 (전담기관)	○ 전문가 중심 과제평가단 구성 - 이해관계인 제척
↓	
선정평가 실시 (과제평가단)	○ 서면평가, 온라인평가, 발표평가, 현장평가 중 하나 선택 ○ 고가(3천만 원 이상) 연구장비 심의
↓	
평가결과 보고 및 통보 (전담기관)	○ 선정평가 결과 국토부 보고 ○ 평가결과 신청기관 통보 및 협약체결 안내
↓	
협약체결 (전담기관↔주관연구기관)	○ 선정기관은 평가위원 의견을 반영 조치 ○ 협약체

- (사전검토) 주관연구기관이 제출한 연차(단계)실적·계획서, 성과증빙자료 등을 중간모니터링 위원회에 미리 송부하여 사전 검토토록 하고, 전담기관 담당자는 사전검토 내역을 중간모니터링 위원회에 평가 당일 제공 가능
 - (평가방법) 과제단위로 실시하되, 필요한 경우 세부과제 단위로 모니터링하고 서면검토를 원칙으로 하며, 컨설팅 중심으로 진행
 - 전년도 목표달성과 수행내용에 대한 항목위주로 위원 간 논의와 합의에 의해 중간모니터링 종합결과서 작성
- ※ 과제특성 및 수행단계 등 고려하여 필요시 연구책임자가 참여한 질의·응답 실시 가능
- (모니터링 항목) 과제의 특성 등을 고려하여 개별 평가계획 수립시 모니터링 항목을 달리할 수 있음
 - (대상) 개발 부품의 적정성 → 중간평가 과정에서 부품기술의 변화 및 환경변화 등 고려하여 부품 개발 필요성이 저감된 경우, 혹은 새로운 신규부품 개발 필요성이 발생한 경우 사업품목 변경으로 조정

〈표 Ⅶ-4〉 중간모니터링 항목

구분	착안 사항
성과 달성도	○ 해당 연차 질적·양적 성과지표 및 목표의 달성 정도(성과점검기준표) ○ 연구성과물의 기술적/경제적 우수성 ○ 최종 성과목표 달성을 위한 중간성과물의 기여도 및 활용가능성
계획의 적정성	○ 최종목표 대비 다음 연차 추진계획의 적합성 ○ 연구개발성과 활용방안(실용화사업화 등)의 적정성 ○ 목표달성을 위한 질적·양적 성과지표 및 목표의 적정성(성과점검기준표) - 관련 환경 변화의 반영 여부 ○ 연구내용 대비 연구기간, 연구기관 구성, 인력투입 계획 등의 적합성 ○ 다음 연차 신청연구비 및 비목별·기관별 예산 배분의 적정성 ○ 연구비 이월신청 사유 및 내역 적정성(해당시) ○ 장비구축계획 등 장비도입 적정성 심의(해당시) ○ 실적 평가결과에 따른 다음 연차 계획의 수정·보완 의견 및 대책 등

- (모니터링 결과의 조치) 중간모니터링 결과에 따라 ‘계속지원’ 또는 ‘연차평가대상’으로 판정, 연구단을 세부과제단위로 모니터링 한 경우 연구단에 대한 ‘계속지원’ 또는 ‘연차평가대상’ 여부는 중간모니터링위원회에서 판정
 - ‘계속지원’ 과제에 대해서는 종합결과서를 연구기관에 통보하여 보완대비표, 보완연차(단계)실적·계획서, 협약체결 관련 서류 등 제출 요청
 - ‘연차평가대상’ 과제는 연차평가 절차 및 방법에 따라 평가 실시

■ 최종 평가

- 최종평가를 통해 당초 계획대비 최종목표의 달성 여부 및 사업화 가능성을 확인

〈표 VII-5〉 최종평가 주요 절차 및 내용

주요 절차	주요 내용
최종평가 자료 제출 (주관연구기관)	○ 최종보고서, 성과점검기준표, 자체평가보고서, 연구개발결과 활용계획서(SMK 포함) 등 평가자료 제출
↓	
최종평가 계획수립 (전담기관)	○ 최종평가 절차 및 일정 계획수립 및 안내
↓	
사전검토 (전담기관)	○ 과제담당자 사전검토 - 연구성과 질적·양적 달성도 - 당초 연구개발계획 대비 수행여부 - 연구성과 활용계획의 적정성 등
↓	
과제평가단 구성 (전담기관)	○ 전문가 중심 과제평가단 구성 - 이해관계인 제척
↓	
최종평가 실시 (과제평가단)	○ 연구개발 목표 달성여부, 연구성과 우수성 등에 대한 평가
↓	
최종평가 결과 보고 및 통보 (전담기관)	○ 최종평가결과 국토부 보고 ○ 최종평가결과 주관기관 통보 및 보완요청
↓	
최종보고서 발간·배포 (주관연구기관)	○ 최종보고서 보완본 필수배포처 배포

- (사전검토) 주관연구기관이 제출한 연구개발 최종보고서·요약서 등 평가자료에 대한 사전검토결과를 연구과제 평가단에 미리 송부하여 사전검토토록 하고, 전담기관 담당자는 사전검토 내역을 평가단에 당일 제공 가능
- (평가방법) 과제단위로 실시하되, 필요한 경우 세부과제 단위로 평가하고 대면(발표)평가, 현장평가 중에서 하나 이상의 방법을 선택하여 실시
- (평가항목 및 배점) 개별 평가계획 수립시 「국토교통R&D 평가 업무매뉴얼」의 평가항목 및 배점을 참고하되 연구과제의 유형을 고려하여 평가항목과 배점을 달리할 수 있음

- (평가결과의 산정) 종합평가점수를 산정시 연구과제 평가단 평가점수(90%) 및 진도관리 평가결과(10%)를 기준으로 종합평가점수를 정하되, 진도관리평가 생략시 평가단 결과만으로 종합평가점수를 정함
- 연구단과제를 세부과제 단위로 평가한 경우 연구단 종합평가점수는 세부과제 종합평가점수의 평균으로 정함
- (평가결과의 조치) 종합평가점수에 따라 과제의 ‘성공’(60점 이상) 또는 ‘실패’(60점미만) 판정
- 실패과제(60점미만)는 연구개발과제 수행실태 등 점검통해 성실수행 여부 확인

〈표 Ⅶ-6〉 최종평가 평가항목 예시

구분	착안 사항
목표 미달성 사유	○ 연구목표의 도전성 - 당초의 연구목표가 리스크를 감안하고 도전적으로 설정되어 실패의 가능성이 인정되는지 여부 ○ 외부요인으로 인한 목표달성 실패 - 시장의 미성숙, 환경 변화, 타 과제에서 유사기술 개발 완료, 정부 정책변화 등 외적인 요인 존재 여부
연구수행 방법 및 과정의 적절성	○ 수행방법의 평가 - 연구 성격 상 반복수행이 가능한 연구의 경우 연구목표 도출 실패 후 1회 이상 재시도 했는지 여부 ○ 수행과정의 평가 - 연구노트 등 기술개발과정에 대한 자료 및 각종데이터가 체계적이고 충실한지 여부 - 연구진행과정을 입증하는 초기·수정모델, 실험데이터 등 유·무형적 발생물의 존재 여부

■ 성과관리계획

- 정부업무평가 기본법은 성과관리를 “정부업무를 추진함에 있어 기관의 임무, 중장기 목표, 연도별 목표 및 성과지표를 수립하고 그 집행과정 및 결과를 경제성, 능률성, 효과성의 관점에서 관리하는 일련의 활동”이라고 정의⁸⁾
- 정부사업 성과관리 기본구조에 계획→집행→점검→평가→환류 기본구조로 설계
- 동 사업의 성과관리 계획은 정부 업무평가기본법의 기본철학을 준수하여 도출
- 국토교통부는 매년 자체적으로 성과계획을 수립하고, 매년 당해 연도 협약종료 1개월 전에 중간(연차)보고서, 주관기관 자체평가 의견서, 세부과제별 연구개발결과 활용계획서(최종연차시)를 제출 받음
- 중점분야별로 연구성과 활용유형 및 성과지표를 설정하여 체계적으로 관리

8) 정부업무평가기본법 제2조 6항

○ 추적평가 및 성과활용 관리

- 동 사업의 기술이전확산, 기술혁신 성공사례 발굴, 우수과제 인센티브 부여 등 연구개발결과의 활용을 촉진하기 위해 추적평가 실시
- (체계 및 담당기관) R&D 전담기관 성과활용조사·평가 전문가가 성과평가 실무를 담당하고, 연구단과 유기적으로 협력하여 성과평가 실시
- 성과활용 추적평가 시, 사업 특성을 고려한 중점분야별 평가항목을 차별화하여 구성함으로써 평가기준의 형평성 확보

※ 중점분야별 특성을 반영하여 사업화, 지식창출 평가항목에 가중치를 높게 부여하거나, 지식창출 우선평가 기준(논문·특허 실적) 등에 가중치를 높게 부여하는 등 사업특성에 따른 평가의 차별성 기준 마련

〈표 Ⅶ-7〉 평가지표 및 배점(안)

구분	평가항목	평가지표	평가배점			
			중점1	중점2	중점3	중점4
사업화	추가투자	○ 사업화를 위한 추가투자의 적정성 ○ 활용 건수(실증과제의 경우)	20	10	10	10
	제품·공정 시장출시	○ 시장 출시 여부 ○ 시장 지배도	-	20	15	15
	매출실적	○ 투입대비 매출성과 규모 및 관련 매출의 증가 추이 ○ 수입대체 및 수출 효과	-	25	20	20
	인력고용	○ 사업화에 따른 추가인력고용 효과	-	15	20	20
지식 창출	특허출원 및 등록	○ 수행과제와의 관련성 및 투입대비 특허성과의 적정성 ○ 특허확보에 따른 기술선점 효과	10	15	10	10
	논문실적	○ 수행과제와의 관련성 및 내용의 우수성 ○ 투입대비 논문 성과의 적정성	20	5	5	5
활용 전망	사업화 잠재력	○ 향후 시장진입·확대 가능성 ○ 고용창출 효과, 시장규모, 수익성 투자 대비 효과	20	5	10	10
	추가 활용 가능성	○ 관련 분야에 추가 사업화 가능성 ○ 응용기술로서 타 분야 파급효과 ○ 시험 인증 건수(실증과제 경우)	30	5	10	10
평가배점 합계			100	100	100	100

3절 소요예산 및 소요인력

■ (소요예산) 동 사업은 415억원(국고 290억원, 지자체 36.16억원, 민간 88.84억원) 소요예정

- 중점1. 청록수소 생산 기술 개발 및 실증설비 제작 : 251억원
- 중점2. 고체탄소 고부가가치화 전환 기술 확보 및 응용부품 개발 : 80억원
- 중점3. 도시 내 수소 공급을 위한 플랫폼 개발 및 Plant 구축 운영 : 84억원

〈표 Ⅷ-1〉 연구부문별 투자계획

(단위: 억원)

중점	구분	1차년	2차년	3차년	4차년	5차년	총계
탄화수소 직접분해 기술 기반 청록수소 생산 기술 개발 및 실증설비 제작	정 부	30	30	68	35	25	188
	지자체	-	-	-	-	-	-
	민 간	10	10	23	11.5	8.5	63
	소 계	40	40	91	46.5	33.5	251
고체탄소 고부가가치화 전환 기술 확보 및 응용부품 개발	정 부	4.5	12	14.8	14.8	13.9	60
	지자체	-	-	-	-	-	-
	민 간	1.5	4	5	5	4.5	20
	소 계	6	16	19.8	19.8	18.4	80
도시 내 수소 공급을 위한 플랫폼 개발 및 Plant 구축 운영	정 부	2	4	4	21.5	10.5	42
	지자체	6.16	-	-	10	20	36.16
	민 간	-	-	-	4.125	1.715	5.84
	소 계	8.16	4	4	35.625	32.215	84
합 계		54.16	60	114.8	101.925	84.115	415

■ (소요인력) 동 사업은 총 314명의 인력투입 예정

- 박사급 145명, 석사급 85명, 학사급 84명

〈표 Ⅷ-2〉 연구부문별 투자계획

중점	구분	1차년	2차년	3차년	4차년	5차년	총계
탄화수소 직접분해 기술 기반 청록수소 생산 기술 개발 및 실증설비 제작	박사급	7	7	7	9	9	39
	석사급	10	10	10	12	16	58
	학사급	10	10	10	15	18	63
	소계	27	27	27	36	43	160
고체탄소 고부가가치화 전환 기술 확보 및 응용부품 개발	박사급	11	17	19	19	16	82
	석사급	0	0	0	0	0	0
	학사급	0	0	0	0	0	0
	소계	11	17	19	19	16	82
도시 내 수소 공급을 위한 플랫폼 개발 및 Plant 구축 운영	박사급	3	4	4	6	7	24
	석사급	4	4	4	7	8	27
	학사급	3	3	3	6	6	21
	소계	10	11	11	19	21	72
합 계		48	55	57	74	80	314

4절 실증계획

1. 실증계획 수립(수소도시 연계·운영)

1) 실증계획 개요

■ 수소시범도시의 개념

- (추진방향) 현 시점에서 기술적 한계, 수용성 등의 문제로 인해 전면적으로 수소도시를 조성하는 것은 현실적으로 어려움
 - 「수소시범도시」를 지정, 도시활동의 핵심인 주거, 교통 분야에 집중하여 수소 활용 기술을 실증하고, 안전성을 검증
 - R&D를 통해 제약요소를 해소하고 수소 활용을 확산시켜 나가는 단계적 접근이 필요

《도시요소》

《수소도시 요소》



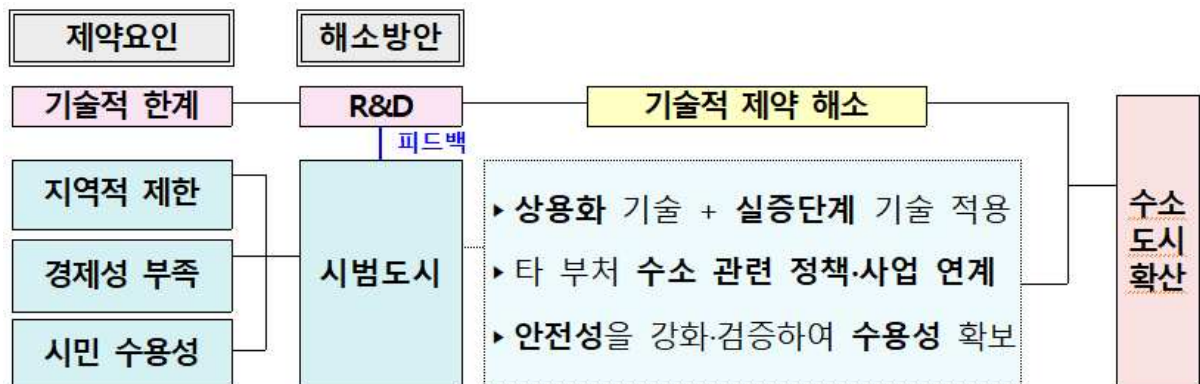
[그림 VII-3] 수소 시범도시 기대효과

- (추진결과) 안산, 울산, 전주·완주 및 광양, 포항 등 1-2기 수소시범도시가 선정되어 친환경 도시 조성을 목표로 신재생에너지를 이용한 실증을 추진하였으나, 사업추진 과정에서 설계, 시공, 운영 및 유지보수 분야 다양한 기술적 한계도 노출
 - 본 사업에서 구축되는 시설·설비별로 운영·유지보수의 주체, 관련 비용의 조달·분담 방안, 구체적 운영·유지보수 계획 미비

- 수소 소요량/공급량 예측 부재, 구체적 공급방식/분담 계획 미흡 등 문제를 해결하기 위한 향후 수소도시 확산 시 활용이 가능하도록 다양한 매뉴얼 마련 필요
- ※ (예시) 도시에 공급가능한 수소공급 인프라 마련, 인허가 추진 과정, 주민수용성 확보방안, 설비의 경제성 분석 등 문제해결에 대한 매뉴얼 마련
- (참고) 동 기획 초기 청록수소 도시공급망을 동 사업 내에 포함하였으나 수소배관 공사비용 등 예산 조달·확보에 애로

■ 수소도시 연계

- (수소도시) 기 선정된 수소시범도시 10곳 중 우선순위를 고려하여 1곳에 연계 추진
 - * 단, 수소시범도시로 선정되지 않은 지자체의 경우도 수소도시 추진의지를 고려하여 후보지로 고려
- (추진방향) 1기, 2기 시범도시 추진 시 노출된 다양한 문제점 보완 및 기술적 한계를 극복하고 청록수소 도시공급을 위한 표준모델 개발 및 실증이 목표
- ‘수소도시의 수소관망 구축·운영기술 개발 및 실증 사업(국토부)’과 연계를 통한 도시 공급 실증 추진
- 현 기술수준에서 주거 인근에 즉시 적용하는 애로를 극복하기 위해 산업단지에서 청록수소 공급 시스템 기술 및 운용에 관한 기술적 제약을 해소(안정성검증연구, 상용화연구 등)하고, 보다 체계적인 보급을 위한 기술체계(국가건설기준, 지침 및 매뉴얼 등)를 확립
- ※ 본 사업 추진을 위한 실증 상용화 계획 부재, 도시 내 즉시 활용 가능한 사용처 확보, 도시 내 연료전지 발전에 관한 주민수용성 문제해소 등
- ※ 동 과제는 도시 전반에 수소를 공급 가능성을 확보하는 것이 최종적인 목적이거나 현재 가정에 직접공급은 불가능하며 수소차 외 적용처가 명확한 곳이 없고, 산업용 외에는 대용량 수소 활용처가 없어 수소도시의 적용 범위 적용은 어려움



[그림 Ⅶ-4] 수소도시 연계방안

- (워킹그룹 운영) 실증 대상 지역 지자체 주도 청록수소 플랜트 구축 및 운영 효율성 제고를 위해 도시 수소공급과 관련하여 ‘수소도시를 위한 수소공급 워킹그룹(가칭)’ 구성·운영
 - 실증 대상지역 지자체가 주도하는 수소공급 워킹그룹(가칭)을 구성·운영 추진
 - ※ 실증 대상지역 지자체는 에너지, 안전, 환경, 지역경제, 건축, 건설, 교통, 수도 등 청록수소 플랜트 실증과 관련된 부서 책임자 반드시 참여 필요
 - 워킹그룹은 청록수소 플랜트 인허가부터 부지조성, 플랜트 건설, 원료공급, 생산된 수소 및 고체탄소 활용까지 실증플랜트 구축·운영과 관련된 전반을 지원
 - ※ 청록수소 생산 원료(천연가스 등) 공급사, 생산수소 활용(철강산업체, 발전사 등)기업, 생산된 고체탄소 활용 기업 등 청록수소 도시공급 관련 기업 지원 역할도 수행

□ 충남 보령시 ‘H2 워킹그룹’ 사례

- (개요) 충남 보령시는 ‘친환경 블루수소플랜트 구축사업’*의 원활한 추진을 위해 시청 관련 부서 책임자들로 구성된 워킹그룹 발족
 - * ‘친환경 블루수소플랜트 구축사업’은 한국중부발전과 SK그룹이 공동으로 오는 2025년까지 5조원을 투자해 보령발전본부 유희부지 약 59만4000㎡(18만평)에 종합 청정수소 생산기지를 건설하는 사업
- (구성) 부시장을 단장으로 에너지과, 안전총괄과, 환경보호과, 지역경제과, 건축허가과, 건설과, 교통과, 도로과, 도시재생과, 산림공원과, 수도과 등 11개 부서 책임자로 구성
- (역할) 수소플랜트의 부지 조성부터 건립 완료까지 각종 인허가, 기관 협의 등 행정적인 지원과 주변 지역에 필요한 도로, 교통, 생활 인프라 등을 확충하고 수소산업 생태계 육성 기반을 마련할 수 있도록 적극 지원

■ 실증부지 후보지(안) : 지자체 참여 의향

- (실증지) 국내 수소도시 연계 실증 추진
 - 전남 광양시*, 순천시, 경북 포항시, 광주광역시 등 4개 지역이 청록수소 실증플랜트 구축에 참여의향 표명
 - * 광양 제철소 내 수소환원제철용 수소 공급 등

번호	지자체	제출기관	참여의향
1	전라남도 광양시	광양시청	○
2	전라남도 순천시	순천시청	○
3	경상북도 포항시	포항시청	○

《지자체 참여의향조사 의의》

- 기술개발 및 통합 실증사업을 추진하는 동 사업의 실증지 수요를 사전에 파악함
- 플랜트 산업개발에 있어 입지적정성 검토항목에 대한 전력공급, 원료공급, 공급망 지원 등 동 사업의 검토요건을 사전에 마련하고 해소
 - 실증시설 구축에 필요한 부지(면적) 확보 용이성 (동 사업 : 설비규모 약 1,440㎡)
 - 청록수소 생산에 필요한 전력 공급량 충분성 (동 사업 : 약 2MWh 이하)
 - 청록수소 생산 원료(천연가스 등) 공급 용이성
 - 생산된 수소를 활용할 수 있는 활용처 유무 (인접성)
 - 원료 공급 → 청록수소 생산 → 활용 공급망 지원 의지
 - 실증시설 유치와 과제 종료 활용에 대한 지자체 의지
 - 실증시설 구축과 관련된 인허가 지원
 - 실증시설 부지 주변 주민 수용성

2) 실증 및 운영계획

■ 운영 계획

- (연구수행 중) 운영기간은 시운전을 포함 1년 이상 계획
 - (시운전_누적운전) 청록수소 실증플랜트 구축 후 단시 성능확인 위한 정상운전(1,440hr, 60일 이상) 목표, 최적 운영절차 도출 완료
 - (연속운전) 168hr(7일) 이상 연속상태 정상운전 수행 목표(개발된 시스템 및 설비의 문제점 보완 추진)
 - * 다양한 운전조건에서 통합적인 성능 확인이 목적이며, 장기운용이 필요할 경우 지자체에서 설치 예정인 통합안전관리센터와 연계
- (연구종료 후) 각 지자체에서 추진 예정인 수소도시의 인프라 구축 운영 및 소유권은 사업추진주체에 귀속됨에 따라 지자체에 이전

☞ 대부분의 설비·시스템에 대한 실·검증은 1년 내·외(사업기간 내) 완료하고, 사업 종료 후에도 지자체 주도로 도시 내 수소 공급 인프라(수소관망)에 대한 장기 운영 추진

2. 실증지 사전검토

1) 수소생산·활용 가능 부지 확보 여부

■ 지자체 참여의향서 제출 현황 및 실증부지 제공희망 여부

- 현재 전남 광양시, 순천시, 경북 포항시 등 3개 지역이 청록수소 실증플랜트 구축에 참여의향을 표명

〈표 VII-8〉 참여의향서 제출 지자체의 수소 연관 사업 현황

지자체	입지/특성	수소인프라	특화요소	참여의향서 제출여부
경상북도 포항시	제철소 부생수소 공급여건 우수	○ 공공주택, 공공건물 연료전지 ○ 수소충전소 구축, 수소버스 도입 ○ 수소배관 15.4km 구축 ○ 통합안전운영센터 구축	수소연료전지 개발 및 수전해수소 생산 실증	○
전라남도 광양시	지자체 수소경제로의 전환 선언	○ 전남 포스코 광양제철소에서 생산되는 부생수소충전소와 연료전지 발전소 및 광양항에 공급을 위한 19km 수소 배관 매설 등 수소 인프라 구축 계획	○ 400억원 규모의 수소도시 조성사업 추진	○
전라남도 순천시	업무협약 (전라남도-순천시)을 통해 수소산업 활성화 추진	○ '23년 특수 수소충전소(버스·트럭·승용차 등 충전가능) 1곳 이상 구축 예정 ○ 공공유희 부지 등을 활용해수소연료전지발전소 구축 목표 제시	○ 친환경 수소경제 생태계 구축 계획 수립, 수소 연관사업 추진 관련 규제 개선 및 행정적 지원* 추진	○

■ 참여의향 지자체 사전검토

① 경상북도 포항시

- 평택, 남양주, 당진, 보령, 광양, 포항 6개 지자체를 대상으로 수소를 주거, 교통 등 생활에 활용할 수 있도록 수소 인프라를 구축하는 ‘수소 도시 조성사업*’을 본격적으로 추진

* 수소도시 조성사업은 수소 에너지를 공동주택, 건축물, 교통시설 등에 활용 할 수 있도록 수소생산시설, 이송시설(파이프라인, 튜브 트레일러 등), 활용시설(연료전지 등) 등 도시기반시설을 구축하는 사업(수소도시 조성사업 예산설명자료, 2023)

- 포항시 인근 블루밸리산단 내 수소연료전지산업을 위한 기반구축 사업 추진중(예타규모)
 - 공공주택, 공공시설 등에 수소연료전지 설치, 수소버스 보급 및 수소충전소 구축
 - 제철소 수소생산시설과 수소연료전지, 수소충전소, 블루밸리산단 등을 연결하는 약 15.4km의 수소배관과 통합안전운영센터 등 수소도시 인프라를 구축 추진

- 주거용 연료전지를 통해 LH행복주타 408세대, 포항테크노파트 테크노빌 60세대, 문화·체육복합센터 등에 전기 및 온수 공급
- 지역특화산업으로 블루밸리산단 내 그린수소 생산을 위한 수전해 수소생산시설 실증 추진



[그림 Ⅶ-5] 포항시 수소도시 조성계획도

② 전라남도 광양시

- 수소도시 조성사업 선정과 정부의 탄소중립정책에 맞춰 ‘2050 수소경제 비전 선포식’을 통해 수소경제로의 전환을 선언
- ’23년 수소도시 조성사업의 세부 추진계획 수립, 실무 추진단 구성, 마스터플랜수립 등을 통해 본격적 사업 추진
 - 광양 지자체는 광양읍, 금호동, 도이동 일원을 중심으로 4년간(2023~2026) 약 400억원 규모의 수소도시 조상사업을 추진
 - ’22년 4월 ‘광양시 수소산업 육성 및 지원에 관한 조례’를 제정하고, 수소산업 유치 및 육성에 관한 관심과 이해를 위해 ’22년 12월 ‘광양시 수소산업 육성포럼’ 개최
 - 전남 포스코 광양제철소에서 생산되는 부생수소를 수소충전소와 연료전지 발전소 및 광양항에 공급을 위한 19km 수소 배관 매설 등 수소 인프라 구축 계획
 - 수소도시 조성사업 내 통합운영센터*, 홍보센터** 구축 추진 중
 - * 수소의 생산·저장·이송·활용 현황 실시간 모니터링
 - ** 시민 대상수소에너지 체험 및 안전성 홍보
- 항만 내 야드 트랙터와 항만 내 감시 기능을 하게 될 드론을 수소연료전지로



[그림 Ⅶ-7] 순천시 전남도-전남가스공사 수소산업생태계 구축 업무협약

2) 실증부지 공모방안

(1) 공모개요

■ 동 사업의 실증은 수소 시범도시 추진 및 관련 인프라를 확보하고 있는 지자체와 연계하여 실증하기 위해 실증 공모 계획을 제시

- 수소 시범도시 및 관련 인프라의 운용을 위해 ‘대용량 청록수소 공급 시스템’이 필수적인 상황이며, 이를 위한 실증 추진을 위해 지자체와 협업을 추진
- 국가예산이 투입되는 실증계획으로 참여를 희망하는 지자체에 대해 공정한 평가를 위해 ‘대용량 실증 가능성’ 및 ‘추진역량’ 평가지표를 바탕으로 공모형태의 방식을 추진
- 공모를 통해 선정된 지자체는 사업기간 동안 본 기획과제 사업에 적극적으로 참여하고, 사업기간 종료 후 지정하는 기간 내 실증부지 및 부지내 설치된 설비의 운영을 통해 DB 구축을 수행

(2) 공모계획(안)

■ 사업지원 대상 및 범위

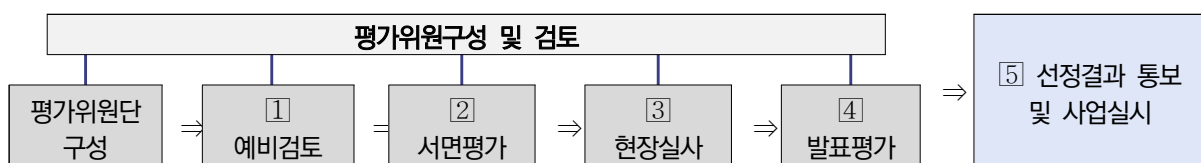
- (지원대상) 지방자치단체(특·광역시, 특별자치시, 시·군·구)
- (지원범위) 대용량 청록수소 공급 시스템을 통해 일정 구역에서 다양한 분야(주거·교통 등)에서 수소를 신규 에너지원으로 활용하기 위해 청록수소 생산·공급·활용을 필요로 할 경우 본 기획과제를 통해 개발되는 기술을 바탕으로 실증을 통한 기술력 지원

■ 사업지원 규모

- (지원규모) 대용량 청록수소 공급 시스템 실증을 위한 설계, 구축, 운영 등 최대 288억 원(국비) 지원
- (선정대상) 지자체 1곳 선정
- (지원기간) 5년간

■ 사업 추진 일정

- 실증부지 공모 이후 부지 선정을 진행하고 자문단 설립·운영, 인프라 구축, 운영 순으로 절차 진행



[그림 VI-65] 실증부지 공모 및 평가 프로세스

(3) 실증부지 지원부지 평가계획(안)

■ 평가위원회 구성

- 수소도시 및 수소에너지와 관련된 산·학·연 관련 전문가 후보군을 구성하고 내부검토를 통해 평가위원을 선정하고 실증부지 평가위원회를 최종 구성

■ 평가방법

- 1차 예비검토, 2차 서면평가(평가지표 활용), 3차 현장실사, 4차 발표평가 등 총 4단계의 과정을 통해 최종 실증부지를 선정
 - 신청요건(전력공급, 원료공급, 공급망 지원 등)을 충족하는 지자체를 대상으로 평가를 수행하여 부지를 선정

〈표 Ⅶ-9〉 공모 신청 유의사항

구분		내용
신청 요건		○ 실증시설 구축에 필요한 부지(면적) 확보 용이성 (설비규모 약 1,440㎡) ○ 청록수소 생산에 필요한 전력 공급량 충분성 (약 2MWh 이하)
평가 기본요건		○ 청록수소 생산 원료(천연가스 등) 공급 용이성 ○ 생산된 수소를 활용할 수 있는 활용처 유무 (인접성) ○ 생산된 고체탄소를 활용할 수 있는 활용처 유무 (인접성) ○ 원료 공급 → 청록수소 생산 → 활용 공급망 지원 의지 ○ 실증시설 유치와 과제 종료 활용에 대한 지자체 의지 ○ 실증시설 구축과 관련된 인허가 지원 ○ 실증시설 부지 주변 주민 수용성 계획
가점 요소		○ 지자체 사업비 매칭비율이 높은 경우 ○ 타기관 및 기업의 투자계획을 확보하였을 경우(참여의향서 등) ○ 지자체 내 기구축 수소인프라(충전소, 파이프라인 등)를 활용할 경우 ○ 지자체 내 또는 인근 타 지자체와 인프라(LNG 배관망, 수소그리드 등)를 연계·활용할 경우 ○ 주요 수소인프라의 국산화 비율이 일정기준(70%) 이상인 경우 ○ 주민수용성이 높을 경우(관련 서류 제출 필요 등) ○ 주민협의체 구성 및 운영 계획이 우수할 경우
선정 절차	① 예비검토	○ 접수된 신청서류 검토를 통해 누락 서류, 지원 제외 대상 등 문제점을 파악하고 해당 지자체에 적합성 여부 공지 및 보완 요청
	② 서면평가	○ 접수된 서류에 대해서 평가 지표를 활용하여 3곳 이내의 후보지 선정 ○ 평가 지표 중 한가지 분야라도 기준 이하(만점 기준 50% 이하)일 경우 탈락으로 처리
	③ 현장실사	○ 후보지로 선정된 부지에 방문을 통한 실사 진행 ○ 발표평가 대비 평가위원회의 보완 사항 반영 요청
	④ 발표평가	○ 부지 설명, 보완 사항 설명, 평가위원회 질의응답을 진행하고 최종 평가하여 최종 실증부지 1곳 선정

■ 평가기준표

〈표 Ⅶ-10〉 서면·발표 평가기준표

분야	항목	배점	내용
입지 적합성	수소 수급 여건	15	실증을 위한 수소량 공급 능력
	부지 적정성	15	실증 기술 적용 가능 여부
실증 수행체계	관리방안	10	실증 추진 일정, 관리 관련 법/지침 이해도 등
	담당 인력	10	수소 관련 전문 인력 배치
지속 가능성	재원조달	10	실증 추진을 위한 지방비 조달 방안 사업 종료 후 설비 운영, 모니터링을 위한 지방비 조달 방안
	운영유지관리	15	실증 완료 후 구축 설비 활용 방안 (추가 운영, 운영 DB 구축 등)
안전성	안전성	10	안전관리 평가 기준에 따라 심사
기존 인프라 활용	기존 인프라 활용	15	실증 이해도 및 기 구축 인프라* 활용을 통한 연계 방안
합계		100점	

* 수소 생산 시설, 수소 저장·운반 시설(탱크, 튜브트레일러, 배관 등), 수소 활용 시설(산단 주거지역, 충전소 등)

■ 안전관리 검토표

〈표 Ⅶ-11〉 안전관리검토표 체크리스트

항목	내용	해당항목 체크
인허가 계획서 작성	○ 사업계획서의 특성을 반영한 안전관리 계획서 및 제안된 안전관리 계획서에 포함된 안전관리 요소를 분석하고, 각 요소별 적용기준의 적절성	✓
안전한 설계	○ 플라스마 설계, 대용량 청록수소 공급 시스템, 활용 연결 부위 설비 등 설계 시 전주기 안전성 확보 계획 여부의 적절성	✓
시공 전주기 및 시운전시 안전 계획	○ 발주에서 검사까지 시공전주기 및 수소배관 및 연결된 수소설비 시운전시 안전성 확보 계획의 적절성	✓
설비부품의 검증	○ 플라스마, 청록수소 공급 시스템 등 시공 중 검사 또는 인증을 받아야 하는 설비부품에 대한 검증계획의 적절성	✓
사고발생 대응절차	○ 플라스마, 청록수소 공급 시스템 등 연결된 설비의 사고 발생 시 절차와 내용의 적절성	✓
수용성 제고	○ 플라스마, 청록수소 공급 시스템 등 연결된 설비 등의 입지 선정 시 원활한 사업추진을 위한 주민 수용성 및 홍보계획의 적절성	✓

제8장

사전 타당성 분석

제1절 과학기술적 타당성

제2절 정책적 타당성

제3절 경제적 타당성

제4절 기대효과

8장 사전 타당성 분석

1절 과학기술적 타당성

1. 도시규모 실증 추진의 타당성

■ 전 세계적인 탄소중립정책에 맞추어 국내 에너지정책 핵심 중 하나인 수소 공급체계에 대한 전략 개발 필요

- 탈 탄소 및 탄소 중립을 위한 에너지 정책의 두 축인 재생에너지와 원자력 발전은 전력생산이 목적이며, 산업 및 도시 운영을 위한 화석연료를 대체하기에 부족
- 전력을 기반으로 생산되는 수소는 도시 및 산업의 화석연료를 대체할 수 있는 대안으로 탄소 중립 정책 실현을 위한 중요한 수단임

■ 정부는 탄소중립을 실현하고 수소도시 확산을 본격 추진하고자 계획하고 있으나, 블루수소 및 그린수소를 통한 청정수소 생산전략은 기술적·현실적 한계 노출

- 국토부는 청정수소 생산 및 실증을 통한 수소경제 활성화를 위해 「수소 시범도시 추진전략」(19.10), 「제1차 수소경제 이행 기본계획」(21.11) 등을 추진

※ 수소시범도시는 현재 울산, 안산, 전주완주, 삼척 등이 선정되었으며 광양, 포항, 보령, 당진, 평택, 남양주가 2기 수소도시로 선정

- 수소를 도시의 주 에너지원으로 사용하는 도시로 수소생산시설, 이송배관, 연료전지, 수소충전소 등 수소 인프라를 구축하는 친환경도시로 설계할 계획

※ (수소 시범도시 추진전략) 2040년까지 수소도시 조성을 위한 수소활용기술의 도시 내 실증 추진

※ (제1차 수소경제 이행 기본계획) 2050년까지 청정수소 자급률 60% 도달을 목표로 수소경제 산업생태계 조성

- 이에 수소도시에 대용량으로 수소를 제공하고 활용할 수 있는 인프라 구축은 상위계획을 실현하는 데 있어서 필수 선결요소로 대두

- 국토부는 수소시범도시와 정부 R&D 사업을 연계하여 수소관망 구축, 인프라, 운영기술 등을 확보할 계획을 발표

- 그럼에도 여전히 재생에너지 인프라 부족과 기 추진되고 있는 저탄소 청정수소 생산전략은 기술적·현실적 한계를 노출

※ 기 청정수소 생산전략은 블루·그린수소 중심이나, 블루수소는 탄소배출 제로 수준이 미흡하여 수소시범도시 추진 목적과 상충되며, 그린수소의 경우 기술상용화 시점이 불확실하다는 한계 노출

■ 반면, 청록수소는 친환경성과 대용량의 공급이 가능해 수소도시 인프라에 효과적이고 현실적인 대안

- 청록수소는 천연가스를 고온반응기에 주입하여 수소와 고체탄소의 분해를 통해 생산하는 방식으로 CO₂가 발생하지 않아 탄소중립 실현에 기여할 수 있고 수소도시 취지에 부합
- 더욱이 “도시”를 구성하는 수준에서 필요한 ‘대용량 공급’이 가능하다는 측면에서 수소도시의 현실 가능한 대안*

* 천연가스를 원료로 사용하므로 운영비용이 높다는 지점을 대량공정을 할 수 있는 기술력 확보로 상쇄 가능

〈표 VIII-3〉 블루수소, 그린수소, 청록수소 장점 및 한계

구분	블루수소	그린수소	청록수소
생산방식	○ 개질공정(기존 그레이수소 생산방식) + 이산화탄소 포집(CCUS)	○ 재생전력을 활용한 수전해 기술	○ 메탄가스의 열분해를 통해 수소 추출
장점	○ 그린수소에 비해 상대적으로 저렴한 가격	○ 가장 진일보된 친환경적인 수소생산 기술	○ 탄소배출이 적고 부산물인 고체탄소 활용 가능 ○ 적은 전력량으로 생산가능, 적은 건설비용
한계	○ 탄소배출 제로(Zero) 수준 미달 - 탄소배출은 감축할 수 있으나 무배출은 불가능 ○ 대규모 이산화탄소 저장에 대한 부담이 높음 - 이산화탄소 포집(CCUS) 기술의 상용화 시점 불확실	○ 대량 수소를 안정적으로 공급하기 어려움 - 재생전력의 높은 단가 - 재생전력 확보의 국지적 편차에 의한 제약 ○ 기술상용화 시점 불확실	○ 천연가스를 연료로 사용하므로 운영비용이 높고 가격변동성이 높아 대량공정이 필수

■ 수소도시로의 친환경, 대용량 수소 공급을 위해서는 청록수소 생산기술의 국산화, 생산플랜트 구축 기술 개발과 도시 전체에 안전하고 안정적 에너지 공급을 위한 예측 및 운영기술 필요

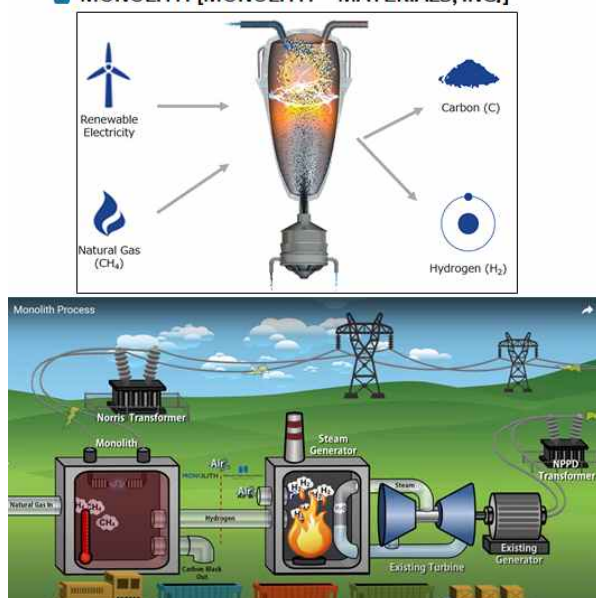
- 현 수소에 대한 막연한 불안감 해소를 위해서 민·관·산·학·연의 끊임없는 의사소통 창구가 필요하며, 직·간접적인 수소 사회 경험을 위한 공간 창출이 필요
- 아울러, 도시의 안정적 에너지 공급을 위해서는 에너지원별 수요와 공급을 예측하고, 에너지 공급망을 운영하는 기술이 요구됨

■ 수소도시 실현을 위해서는 다양한 에너지와의 역할분담 및 안정적 에너지 공급 체계 구축이 필수적이며, 수소 생산공급 시스템의 도시규모 실증이 반드시 필요

2. 기존 청록수소 생산플랜트 기술과의 차별성

- 모노리스는 '12년 설립 후 '14년 파일럿 설비로 20kg/hr 수소 생산으로 시작하여 '20년에는 상용급 설비를 통해 600kg/hr의 수소 및 연간 14,000톤의 카본블랙 생산
 - 고품질 카본블랙 회수 메인공정 (저순도 수소 생산 후 스팀발전 연계, 카본블랙 판매)
 - OC1 설비 플라즈마 용량 8MW 예상 (수소 생산용량 5,000톤/년, 카본블랙 14,000톤/년)
 - 플라즈마 토치(싱글&멀티형) / 반응기 설계 / 카본블랙 생산공정 등 특허 다수 보유

 MONOLITH [MONOLITH™ MATERIALS, INC.]



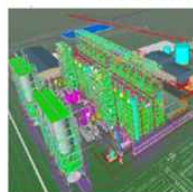
※ 출처 : <https://monolithmaterials.com>



- Seaport, California
- Commissioned : 2014
- H₂ Reactor Scale : 20kg/hr
- Capacity : 700T Carbon Black

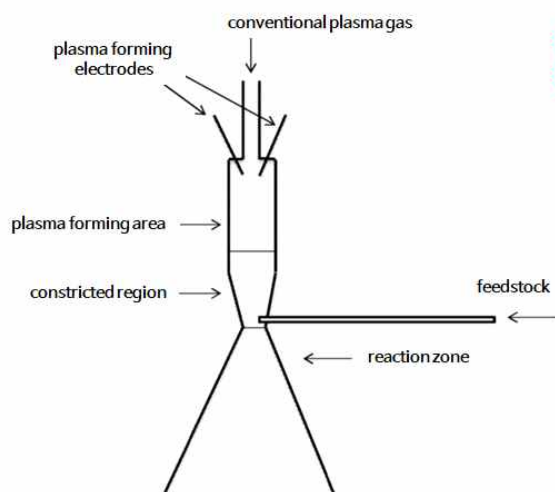


- Olive Creek I (OC I), Nebraska
- Commissioned : 2020
- H₂ Reactor Scale : 600kg/hr
- Capacity : 14KT Carbon Black/yr



- Olive Creek II (OCII), Nebraska
- Commissioned : 2023(Planned)
- H₂ Reactor Scale : 600kg/hr
- Capacity : 180KT Carbon Black
(12X16kT Reactors)

▶ MONOLITH 특허명: Plasma Gas Throat Assembly And Method (2018)



Properties	Units	Sample 1	Sample 2	Sample 3
Grade		N234	N550	N762
Q in*	kW	8000	6466	9000
thermal efficiency	%	95%	95%	95%
Q heat	kW	7600.0	6142.4	8550.0
H2 temp @ inlet	C	150	150	150
	K	423	423	423
H2 temp @ throat	C	3200	3200	3200
	K	3473	3473	3473
Reaction Temperature	C	1800	1450	1400
	K	2073	1723	1673
Reactor pressure	atm	1.2	1.2	1.2
H2 to plasma formation	kg/sec	0.071	0.057	0.080
	kg/hr	255	206	286
	Nm3/hr	2829	2287	3183
carbon yield	%	95%	95%	95%
CH4 feed temp	C.	150	150	150
CH4 Reaction temp	C.	1800	1450	1400

*Q is energy flow.

Q_{in} is the power into the plasma torch.

Q heat is the heat coming out of the plasma torch.

The efficiency is shown as 95% (the 5% being lost in the power supply, water cooling of parts of the torch etc).

[그림 VIII-1] 모노리스 공정 및 핵심기술

- 동 사업 추진 기술은 현재 상용운전중인 모노리스社 플랜트 이상의 성능 구현을 목표로 추진

〈표 Ⅷ-4〉 모노리스社 기술과의 차별성

구분		모노리스	현 국내기술 수준	과제목표																					
Plant 특징	Plant 용량	o 수소 : 5,000톤/년 o 카본블랙 : 14,000톤/년	o LAB 규모의 플라즈마 기반 청록수소 o 생산기술 연구 단계	o 수소 : 1,000톤/년 (3.0톤/일) o 카본블랙 : 2,970톤/년 (9.0톤/일)																					
	수소 1kg 생산 전력	o 12.8kWh/kg_H2 이상	o 수소도시 내 탄소중립 실현을 위한 o 대용량 청정 수소공급 인프라 미흡	o 12.5kWh/kg_H2 이하 (TRL 8)																					
	공정 연속성	o 공개정보 없음	o 대용량 청록수소 기술개발 실적 無	o 공정 연속성 확보 (실증 성능지표 : 30일) - 플라즈마 전극교체를 위한 1MW×2기 토치 (고대운전) - 촉매 기반 화학반응 연계공정을 통한 연속성 추가 확보																					
	기타	o 저순도 수소의 스팀발전 o 고품질 카본블랙 생산	o CO2 발생, 국산화 기술 필요	o 고순도 수소 공급 시스템 o 저품질 카본블랙의 고부가가치 응용 개발																					
핵심 기술 특징	플라즈마 반응기	o 5,000톤/년_H2 실증 완료	o 한국가스공사(2006) 과제 : 150kW급 o 대용량 기술개발 실적 無	o 고효율 플라즈마 반응기 & 촉매 반응기 개발 - 30kW~300kW급 고효율 반응기 개발 및 선행 연구 - 3.0톤/일 수소 생산을 위한 고효율 반응기 실증 및 최적화																					
	플라즈마 전극 소재	o 그래파이트 (Graphite)	o 그래파이트 o 구리(Copper) o 구리 & 텅스텐(Tungsten)	o 그래파이트 or 구리 등 소재 최적화 <table><tr><th>구분</th><th>그래파이트</th><th>구리</th></tr><tr><td>냉각손실</td><td>낮음</td><td>비교적 높음</td></tr><tr><td>전극수명</td><td>낮음</td><td>높음</td></tr><tr><td>전압손실</td><td>낮음</td><td>높음</td></tr><tr><td>Arc 불안정성</td><td>매우 높음</td><td>매우 낮음</td></tr><tr><td>전극용융 Particle</td><td>그래파이트</td><td>구리</td></tr><tr><td>기 타</td><td>고순도 카본블랙 회수</td><td>카본블랙 회수 시 구리 30% 함유</td></tr></table>	구분	그래파이트	구리	냉각손실	낮음	비교적 높음	전극수명	낮음	높음	전압손실	낮음	높음	Arc 불안정성	매우 높음	매우 낮음	전극용융 Particle	그래파이트	구리	기 타	고순도 카본블랙 회수	카본블랙 회수 시 구리 30% 함유
	구분	그래파이트	구리																						
	냉각손실	낮음	비교적 높음																						
전극수명	낮음	높음																							
전압손실	낮음	높음																							
Arc 불안정성	매우 높음	매우 낮음																							
전극용융 Particle	그래파이트	구리																							
기 타	고순도 카본블랙 회수	카본블랙 회수 시 구리 30% 함유																							
플라즈마 출력 (Power)	o 8,000kW (싱글형or멀티형)	o 그래파이트 : ~50kW o 구리 : ~10,000kW o 구리 & 텅스텐 : ~300kW o 사용 중 (전극봉 소모 높음)	o 청록수소 공급 전용 1MW 플라즈마 토치 국산화 - 30kW, 300kW 플라즈마 토치 개발 및 Scale-up 기술개발 (소재,수명 등) - 1MW 플라즈마 토치 국산화 및 실증 (성능확보 검증)																						
차별성	o 촉매 화학반응기술 미보유	o 소형급 플라즈마 단일 수소공정 연구 o Pilot 규모 촉매반응 단일 수소공정 연구	o 플라즈마와 촉매반응의 연계를 통한 수소생산 효율 극대화 - 1차 플라즈마 열분해 시 미반응 천연가스의 2차 촉매 화학반응 - 플라즈마-화학반응 통한 수소생산 원천기술 확보																						

2절 정책적 타당성

1. 상위계획과의 부합성

- (검토방법) 범부처 및 중앙부처에서 수립한 주요계획을 목적, 목표, 내용 간 비교분석을 통해 연계성·부합성 확인
 - 동 사업과 관련된 법정계획을 기본으로 분석하며, 그 외 중장기계획 등을 조사대상에 추가
 - 과학기술분야 최상위 계획인 「제5차 과학기술기본계획」과 청록수소 공급 시스템 유관 정책과 계획으로서 「수소기술 미래전략」, 「제1차 수소경제이행기본계획」 등을 조사
- (검토결과) 동 사업의은 정부의 적극적인 친환경 에너지 전환 정책 기조에 부합하며, 수소경제 구현을 위한 미래형 수소생산 기술 확보 등의 역할 측면에서 주요 법령과 상위계획이 제시하는 방향과 부합

〈표 VIII-5〉 상위계획과의 부합성 조사 결과

구분	주요 내용	부합도		
		낮음	보통	높음
필수계획	제5차 과학기술기본계획			●
선택군	정부 120대 국정과제			●
	수소기술 미래전략			●
	제1차 수소경제 이행 기본계획			●
	제1차 국토교통과학기술 연구개발종합계획		●	
	탄소중립 기술혁신 추진전략		●	
	국가전략기술육성방안		●	

- 검토 결과, 친환경·고효율 양수발전플랜트 기술개발 및 실증 사업은 상위계획과의 부합성이 매우 높아 정책적 타당성을 확보하고 있는 것으로 판단됨

〈표 VIII-6〉 상위계획과 부합성 평가

필수계획	부합도 낮음	부합도 보통	부합도 높음
선택군 계획			
부합도 높음	보통	대체로 적절	적절
부합도 보통	대체로 부적절	보통	대체로 적절
부합도 낮음	부적절	대체로 부적절	보통

■ 상위계획과의 부합성

- (국정목표·과제) 현 정부의 국가정책 기조를 반영하는 120대 국정과제의 내용과 연계하여 연구개발 추진 부합성을 확보
- (제5차 과학기술기본계획) 과학기술분야 최상위 계획인 ‘제5차 과학기술기본계획’은 5년마다 국가 과학기술 발전목표와 정책 방향을 범정부적 관점으로 제시
- (제1차 국토교통과학기술연구개발종합계획) 「국토교통과학기술 육성법」 제4조에 의한 국토교통 과학기술분야 최상위 계획으로 국토교통 과학기술에 관한 장기적이고 종합적인 정책방향을 설정하고 중장기 투자계획을 제시

〈표 Ⅷ-7〉 정부 주요계획과의 부합성 분석결과

구분	부합내용	기획내용과의 관련성
정부 120대 국정과제 (2022)	(국정과제 20) 산업경쟁력과 공급망을 강화하는 新산업통상전략 - 각국 환경조치(EU CBAM) 대응, 복수국간 환경보호 협력 등을 위한 WTO·APEC·OECD·G20 등 그린논의에 적극 참여하고, 청정수소 교역 기반 확대 (국정과제 21) 에너지안보 확립과 에너지 新산업·新시장 창출 - 자원안보의 범위를 수소, 핵심광물 등으로 확대하고 비축 확대, 수입국 다변화, 재자원화로 수급 안정성 제고 (국정과제 24) 반도체·AI·배터리 등 미래전략산업 초격차 확보 - 수소, CCUS 등 탄소중립·미세먼지 대응 에너지 신산업 조기 상용화	사업추진 목적/목표
제5차 과학기술기본계획 (2023~2027)	[3-1] 탄소중립 선도 및 지속가능한 환경으로 전환 ○ (3-1-1) 탄소중립 기반의 에너지 전환기술 확보 및 정책 추진체계 구축 - 미래 핵심 에너지원으로 부상한 그린수소 생산·저장·이송 능력을 확보, 수소활용 분야(수소전기차, 수소선박, 수소터빈, 연료전지)의 글로벌 경쟁력 제고를 위한 기술확보 ○ (3-1-2) 산업 저탄소화 기반 조성 및 탄소 관리 인프라 구축 - 탄소기반 주력산업의 저탄소화를 위한 연·원료 전환, 공정효율화, 전기화 등 핵심기술 개발 및 실증, 현장 보급 지원 ※ 수소환원제철, 저에너지 화학공정, 건물·도시 탄소배출 저감, 미래형 친환경 교통수단 및 스마트 철도 물류 등	사업추진 목적/목표 중점분야 및 핵심기술 구성 사업추진계획 (절차, 방향)
수소기술 미래전략 (2022)	○ (1-3) 미래형 수소생산기술 원천연구 지원 - 천연가스(메탄) 직접 열분해반응을 활용하여 고순도의 청록수소를 생산하는 무탄소 수소생산 원천기술 확보 ○ (2-3) 저장·운송기술 국제표준 및 인증체계 확보 - 안정성 실증을 위해 수소도시, 항만기지 등 대용량 수소 저장설비, 배관망 등 안전성 강화 실증연구 및 제도화 지원	사업추진 목적/목표 중점분야 및 핵심기술 구성 사업추진계획 (절차, 방향)

구분	부합내용	기획내용과의 관련성
제1차 수소경제 이행 기본계획 (2021)	○ ‘수소경제 전주기 생태계 구축으로 청정수소경제 선도’라는 비전·목표 아래 4대 전략, 15대 과제를 제시 - ① 국내외 청정수소 생산주도, ② 빈틈없는 인프라 구축, ③ 모든 일상에서 수소 활용, ④ 생태계 기반 강화 등 ○ ‘30년, ’50년까지의 수소 생산, 유통, 활용에 대한 정책적 목표치 제시 - ’30년까지 청정수소 자급률 34%, ’50년까지 60% 달성	사업추진 목적/목표
제1차 국토교통과학기술연구개발 종합계획 (2018~2027)	○ (스마트 자원플랜트) 합성가스, 액화수소, 합성유 등 가스에너지의 생산·액화·활용을 위한 플랜트 설계·건설·운영 기술 개발로 新산업 분야 진출 - 저급자원 등에서 고순도 수소 및 일산화탄소를 제조하고 촉매반응을 통해 합성유를 제조 하는 GTL(Gas to Liquid) 기술 등 개발	사업추진 목적/목표 중점분야 및 핵심기술 구성
탄소중립 기술혁신 추진전략 (2021)	○ ‘수소경제 구현을 위한 수소 전주기 기술 확보’를 목표로 제시하였으며, 수소충전소 공급가와 수소 발전단가를 핵심지표로 설정 - (수소충전소 공급단가, 원/kg) 현재 7,000원 ⇒ ’30년 4,000원 ⇒ ’40년 3,000원 ○ ① 수소 저가대량생산 기술, ② 장거리 대용량 수소 저장 운송 기술, ③ 고효율 장수명 연료전지 발전시스템 개발 등 3가지 기술개발 전략을 제시 - (수소 생산단가, 원/kg) ’30년 3,500원 ⇒ ’40년 2,500원	사업추진 목적/목표 중점분야 및 핵심기술 구성
국가전략기술육성방안 (2022)	○ 12대 국가전략기술*에 수소를 포함하고 주요 전략으로 수소생산 원천기술, 국산화, 상용급 확보를 주요 전략으로 포함 * 반도체·디스플레이, 이차전지, 첨단 이동수단, 차세대 원자력, 첨단바이오, 우주항공·해양, 수소, 사이버보안, 인공지능, 차세대 통신, 첨단로봇·제조, 양자	사업추진계획 (절차, 방향)

2. 사업 추진체제 및 추진 의지 : 기존사업과의 차별성

1) 사업 중복성 검토 결과

■ (검토방법) 중복투자를 방지하기 위해 사업목표, 사업목표와 연계되는 사업활동, 추진전략, 지원대상, 추진체제 등 사업 설계요소 비교

- 동 사업의 사업목적, 연구개발 내용, 지원분야 등을 기준으로 중복가능성 검토대상사업을 선정
- NTIS에서 제공하는 국가 R&D사업과 과제 정보를 통해 동 사업과 목적, 내용, 지원분야 측면에서 유사 가능성이 높다고 판단되는 사업을 선별

〈표 Ⅷ-8〉 중복성 검토를 위한 검토대상사업 목록

구분	부처명	중점지원영역*	사업명	사업비(억원)
1	과학기술 정보통신부	수소생산·저장	수소에너지혁신기술개발사업 ('19년 ~ '23년)	492.1
2			미래수소원천기술개발사업 ('21년 ~ '26년)	263
3			기후변화대응기술개발사업 ('09년 ~ '24년)	6,665.7('20년까지)
4	산업부	수소생산·저장	그린수소생산및저장시스템기술개발 ('20년 ~ '24년)	239
5			신재생에너지핵심기술개발사업 ('88~계속)	22,930('20년까지)
6	국토교통부	수소활용·실증	수소시범도시인프라기술개발 ('20년 ~ '23년)	170.66
7			상용금액체수소플랜트핵심기술개발 ('19년 ~ '23년)	381.92
8	해양수산부	수소생산	해양바이오수소생산상용화기술개발 ('21년 ~ '23년)	77
9	환경부	수소생산	폐자원에너지화기술개발사업 ('13년 ~ '20년)	1,996

자료: 국가과학기술지식정보서비스

* 제1차 수소경제 이행 기본계획 참고

■ (검토결과) 기술개발 범위, 주요내용 측면에서 차별성 확보

- 청록수소 공급 시스템 R&D 사업 중복성 조사결과 관련 사업과 연구내용 및 지원대상 측면에서 차별성을 확보하고 있으며 별도의 사업으로 추진이 적절

〈표 Ⅷ-9〉 유사사업 중복성 조사결과 요약

사업명	사업목적 및 유사성	차별성 및 연계방안
수소에너지 혁신기술개발사업 (과기부)	○ (목적) 친환경·고효율 수소 생산 및 안정적 수소 저장을 위한 원천기술 개발을 통해 수소경제 사회 진입을 위한 기반구축 ○ (유사성) 수소경제 이행을 위한 기반마련	○ (차별성) 수소 생산, 저장을 위한 기초원천 연구에 집중 ○ (연계방안) 위 사업의 성과를 연계하여 활용·실증기술 고도화 가능

사업명	사업목적 및 유사성	차별성 및 연계방안
미래수소 원천기술개발사업 (과기부)	○ (목적) 고효율·경제적·친환경적인 수소 생산·저장을 위해 도전적이고 파급효과가 큰 미래선도형 기술 발굴 및 육성 ○ (유사성) 수소생산·저장 기술발굴 및 육성 목표	○ (차별성) 수소 생산·저장 분야 유망 원천기술 개발에 집중 ○ (연계방안) 기존 수소분리·정제 성과를 연계하여 청록수소 분리·정제 기술고도화에 연계
기후변화대응 기술개발사업 (과기부)	○ (목적) 기후변화 위기에 대응하여 온실가스 저감자원화 및 기후변화 적응 분야에서 세계 선도적 원천기술 확보 및 미래 성장 동력 창출 지원 ○ (유사성) 수소 생산·저장 기술개발을 통한 기후변화 대응 등 사회문제 해결에 기여	○ (차별성) 수전해 수소, 수소저장 기초원천기술 확보에 주력 ○ (연계방안) 수전해 수소 기초원천기술 및 저장기술 성과연계를 통한 청록수소 기술고도화
그린수소 생산 및 저장시스템 기술개발 (산업부)	○ (목적) 재생에너지의 변동성으로 인한 국내 전력계통 불안전성 심화 해소를 위한 대용량 그린수소 생산·저장 기술 실증 ○ (유사성) 청정수소 생산을 통한 국내 수소생산 목표 달성, 전력안정성 문제 해결에 기여	○ (차별성) 그린수소 생산, 국내 전력계통 안정성확보를 위한 기술개발 및 실증에 집중 ○ (연계방안) 청정수소 생산기술 고도화·확산 가능
신재생에너지핵심기술 개발사업(산업부)	○ (목적) 2030년 재생에너지 발전비중 20% 달성을 위한 태양광, 풍력시스템 등 재생에너지 글로벌 경쟁력 확보, 핵심부품 국산화 기술개발 ○ (유사성) 수소 생산·저장 기술개발을 통한 기후변화 대응 등 사회문제 해결	○ (차별성) 수전해, 바이오가스 활용 등 그린수소 생산에 집중 ※ 전단계(원천/응용/실증) 기술개발로 동 사업의 범위(응용, 실증)와 목적을 일부 포함하나 '25년 일몰 예정
수소시범도시 인프라기술개발 (국토부)	○ (목적) 재생에너지 기반의 수소 생산·저장·활용이 가능한 수소타운형 통합 에너지 시스템 개발 ○ (유사성) 도심 내 수소 활용을 위한 기술개발 및 실증에 집중	○ (차별성) 재생에너지 기반의 수소생산, ESS 등 기술개발에 집중 ○ (연계방안) 타운하우스 내 수소, 태양광발전 등을 활용한 에너지 자립형 타운모델 개발 성과를 연계·확대하여 동 사업을 통해 실검증
상용급액체수소 플랜트핵심 기술개발(국토부)	○ (목적) 수소액화 플랜트 공정기술 및 수소액화 핵심설비, 액체수소 저장탱크 기술개발을 통해 수소의 대용량 생산·저장·운송·활용 기반 마련 ○ (유사성) 수소활용을 위한 상용급 수소생산 및 플랜트 기술개발	○ (차별성) 액화수소 플랜트 공정 국산화 및 검증에 집중 ○ (연계방안) 액화 플랜트 국산화 생산 및 공정기술, 실증실적 등 연계로 동 사업의 기술 및 실증 고도화
해양바이오수소생산상용화기술개발(해수부)	○ (목적) 기존 구축된 해양바이오수소 플랜트 운영 최적화 시스템 및 고효율 바이오 수소 정제시스템을 개발하여 상용화 기반 마련 ○ (유사성) 수소생산을 위한 플랜트 시스템 기술개발 및 운영	○ (차별성) 해양 미생물활용 바이오 수소생산을 목적 ○ (연계방안) 바이오 수소 생산 관련 분리·정제, 자동화 공정 시스템 연계로 청록수소 요소기술 고도화
폐자원에너지화기술개발사업(환경부)	○ (목적) 매립·소각·해양배출을 대체하여 발생폐자원을 처리와 동시에 에너지 자원으로 활용할 수 있는 한국형 폐자원에너지화 실증시스템 개발 ○ (유사성) 청정수소 생산을 통한 국내 수소생산 목표 달성	○ (차별성) 폐자원 활용 고순도, 대용량 수소생산에 집중 ○ (연계방안) 바이오 수소 생산 관련 분리·정제, 자동화 공정 시스템 연계로 청록수소 요소기술 고도화

2) 과제 중복성 검토 결과

■ (검토방법) 국가과학기술지식정보서비스(NTIS)를 통해, 동 사업의 세부과제별 유사과제를 도출하고 차별성 및 연계가능성을 검토

■ 유사과제와 차별성 및 연계가능성

- 과기부 중심으로 생산기술개발 추진 중이며 단독 사업 부재하며, 청록수소키워드로 과제검색결과,과기부 위주의 생산기술개발 중심으로 추진하고 있는 것으로 파악
 - 미래수소원천기술개발 사업 외에는 개인 및 출연연단위의 과제로 진행, 미래수소원천기술개발 사업은 청록수소외에 다양한 생산방식을 연구
- 단독 사업, 공급시스템, 고온 플라즈마활용 측면에서 사업 차별성 확보
 - 공급시스템전반을 기획함으로 운송/저장기술, 안정성, 인증/표준화 연구 포함
 - 고온플라즈마를활용한 수소생산기술개발로 유사과제와기술적 차별성 확보

※ 타과제는직접열분해방식 활용

〈표 Ⅷ-10〉 유사과제와의 차별성 및 연계가능성

과제명(사업명)	유사성 및 차별성	연계가능성
청록수소 생산을 위한 촉매 후보군 및 고효율/저탄소 공정 개념설계안 도출 (한국에너지기술연구원)	○ 해당 연구개발 과제는 메탄을 직접분해할 수 있는 전이금속 기반 촉매 후보군을 도출하므로 TRL 2 수준의 기초 연구임 ○ 본 기획연구는 플라즈마를 주로 이용하며 실증형 시스템 개발이 최종 목표임 (TRL 7 이상)	○ 플라즈마와 연계 가능한 촉매화학반응 공정 개발 내용에 기 연구된 촉매후보를 활용할 수 있음
메탄 열화학 분해 기반 청록 수소 생산 모듈 시스템 개발 (개인기초연구)	○ 해당 연구개발 과제는 메탄을 직접분해할 수 있는 초고온 촉매 반응시스템에 대한 연구이나 TRL 2 수준의 기초 연구임 ○ 본 기획연구는 플라즈마를 주로 이용하며 실증형 시스템 개발이 최종 목표임 (TRL 7 이상)	
태양에너지와 액체금속촉매를 이용한 C-X 화합물 열화학적 전환을 통한 CO ₂ -free 수소생산 공정 개발 (미래수소원천기술개발)	○ 해당 연구개발 과제는 용융금속을 이용하여 메탄을 직접분해할 수 있는 초고온 촉매 반응시스템에 대한 연구이고 수소생산량 기준 1 ton/day 시스템에 대한 설계안을 도출하는 것이 목표임 ○ 그러나 본 기획연구는 플라즈마를 주로 이용하며 수소생산량 기준 3 ton/day 시스템 개발 및 실증이 최종 목표임 (TRL 7 이상)	○ 메탄 열분해 시 생성된 탄소생성물의 고품질화에 대한 연구가 포함되어 있으므로 연구결과의 연계 활용이 가능할 것으로 예상함
천연가스로부터 고결정성 전도성 흑연구조를 갖는 탄소소재 개발 (소재부품자립화사업)	○ 해당 연구개발은 천연가스 열분해를 통한 흑연구조를 갖는 탄소소재로의 변환을 연구 ○ 그러나 소재중심의 생산으로 수소 생산 측면에서 명확한 한계	○ 연구진행 파악 및 수소의 생산성 향상과 고품질 탄소소재 변환 기술의 연계 활용방안 모색
수소전기차 연료전지용 전극용 탄소소재 개발 (핵심소재개발사업)	○ 아세틸렌 블랙의 고온열분해를 통한 카본블랙 제조 기술 개발 ○ 동 사업 기술개발과는 다른 아세틸렌의 열분해로 방열반응 공정임	○ 기 구축 장비를 활용한 메탄 열분해 연구 연계 추진

3. 사업추진상의 위험요인

1) 재원조달 가능성

■ 중장기 재정운용계획 반영 여부

- 저탄소 경제로의 이행을 위해 에너지 전환, 저탄소생태계 구축 등 R&D 적극 투자 표명
 - (R&D) 저탄소 경제로의 이행을 위해 에너지 전환, 저탄소생태계 구축 등 R&D 적극 투자 추진
 - (산업·중소기업·에너지) 수소 등 에너지 신산업 창출 지원
 - ※ 청정수소(그린·블루) 생산으로의 전환 추진, 상용차(버스 등) 중심의 수소 모빌리티 기반 구축 등 수소경제 쏠주기 지원
 - (환경) 과학적·실용적 NDC 달성을 위해 수송, 폐기물 등 부문 중점 투자
 - ※ (수송) 전기차 및 수소 상용차(버스·트럭 등)를 중심으로 무공해차 보급을 확대+
 - ※ (폐기물) 폐플라스틱 공공열분해 시설 10개소(누적) 확충, 통합 바이오가스화 시설* 확대 등 순환경제 전환 촉진
 - * 음식물쓰레기·분뇨·하수슬러지 등을 통합처리하여 바이오가스를 생산하는 시설로 청록수소 플랜트와 연계하여 수소생산 가능
- R&D 분야 투자계획을 연평균 3.7% 증가 목표 설정
- 청정수소 생산으로의 전환 추진, 수소경제 전주기 지원 등 산업·중소기업·에너지 분야 투자를 계획*
 - * ('23년) 25.7조원 → ('26년) 28.1조원

〈표 VIII-11〉 국가재정운용계획('22-'26) R&D 및 산업·중소기업·에너지 분야 투자계획

(단위 : 조 원, %)

구분	'22	'23	'24	'25	'26	CAGR
• R&D	29.8	30.7	32.0	33.2	34.4	3.7
• 산업·중소기업·에너지부문*	31.3	25.7	26.6	27.4	28.1	△ 2.6

* 산업·중소기업·에너지부문은 '22년 대비 '23년

자료 : 2022~2026 국가재정운용계획, 기획재정부

■ 국토교통부 기존 재원범위 내에서의 수용 가능성

- 최근 5년간 주관부처의 예산 증가 추이를 고려할 때 재원조달은 충분히 가능

〈표 VIII-12〉 국토교통부 예산증가 추이

(단위 : 억 원, %)

구분	2023(추정)	2024(추정)	2025(추정)	2026(추정)	2027(추정)	CAGR
부처R&D 예산	8,837	11,428	11,835	11,926	13,425	11.3%

자료 : 국토교통부 내부자료

2) 법·제도적 위험요인

(1) WTO 보조금 위반 검토

■ 사업 산출물이 국제 교역재에 사용될 때의 고려사항으로, 국가연구개발사업의 지원이 WTO 금지보조금 및 조치가능보조금에 해당하여 외국과의 마찰 가능성이 있는지 검토

- 보조금이란 정책당국이 특정한 정책목표를 달성하기 위하여 산업 및 기업 활동에 제공하는 각종 지원을 의미
- ‘WTO 보조금 및 상계조치협정(Agreement on Subsidies and Countervailing Measures, 이하 보조금 협정)’ 제2조에 따르면 동 협정은 ‘특정성’ 있는 보조금만을 규제 대상으로 하고 있음
- 보조금은 크게 ‘금지보조금’과 ‘조치가능보조금’으로 구분되며 예비타당성조사에서의 보조금에 대한 사항은 두 보조금 모두에 대한 검토가 이루어져야 함

〈표 VIII-13〉 WTO 보조금 유형

분류	내용
금지 보조금	○ 그 자체로 특정성이 있는 것으로 간주되어 특정성 존재 여부와 관계없이 WTO 차원에서의 신속하고 직접적인 제재의 대상이 되거나, 수입국이 자국법에 의해 상계관세를 부과할 수 있음 ○ WTO 보조금 협정상 금지보조금의 운용은 회원국의 경제개발 정도에 따라 적용 시점이 달리 규정되어 있으나, 일부 예외를 제외하면 유예기간이 종료되어 거의 모든 회원국의 수출보조금과 수입대체보조금이 예외 없이 금지되고 있음 ○ 유형 - 수출보조금(export subsidies) : 법률상 또는 사실상 수출실적에 따라 공여되는 보조금 - 수입대체보조금(local content subsidies) : 수입품 대신 국산품의 사용을 조건으로 하여 공여되는 보조금
조치 가능 보조금	○ ① 정부 또는 공적 기관에 의한 재정적 기여로 인해, ② 혜택이 부여되고, ③ 특정성이 있을 경우의 3가지 요건이 모두 충족되면 그러한 재정적 기여는 조치가능 보조금에 해당 ○ 다른 회원국의 이익에 부정적인 효과(adverse effect)를 초래하였을 경우에는 WTO 제소 또는 피해국으로부터의 직접적인 상계조치를 받을 수 있음 ○ 다른 회원국의 국내 산업에 대한 피해(injury), 1994년 GATT협정에 의한 양허혜택의 무효화 또는 침해, iii) 다른 회원국의 이익에 대한 심각한 손상(serious injury) 등

(자료) 국가연구개발사업 예비타당성조사 수행 세부지침, 한국과학기술기획평가원, 2020.1

■ 동 사업은 직접적으로 상품무역과 관련될 가능성은 없음

○ 금지보조금에 대한 검토

- (수출보조금) 정부의 연구개발 지원은 관련 산업의 수출 증진을 목표 또는 기대효과로 인식하고 있는 부분이 없는 것은 아니나, 에너지 및 플랜트 연구개발 사업의 경우, 반드시 기업의 수출을 위한 보조금형태로 지원하는 부분이 없음
- (수입대체보조금) 본 연구개발사업의 목적상, 수입품을 국산제품으로 대체하는 부분이 일부 존재하나, 유지보수가 필요한 부품에 성능을 향상시켜 유지보수 주기 증가 및 안정성 확보를 위한 기술개발이 주된 목적이고 수입대체보조금형태로 지원하는 부분은 없음

○ 조치가능보조금에 대한 검토

- (재정적 기여) WTO 보조금 협정 제8조에 따르면, 'R&D 보조금은 산업적 연구비용의 75%를 초과하지 않아야 한다'고 연구개발 보조금 규범을 명시하고 있는데, 본 사업은 「국가 연구개발사업의 관리 등에 관한 규정」에 따라 R&D 정부부분담금 비율을 최대 75% 이내로 지원할 예정이므로 WTO 재정적 기여에 대한 위배사항은 없음

※ 국가연구개발혁신법 시행령 제19조 제3항 관련 '정부지원연구개발비의 지원기준 및 기관부담연구개발비의 부담기준'에 의거, 대기업 50% 이내, 중견기업 70% 이내, 중소기업 75% 이내로 규정

- (혜택여부) 본 연구개발 사업은 기술개발 부분만 다를 뿐 개발된 기술을 상품화, 사업화하기 위한 시설투자, 시장개척 등은 기업의 역할이므로 동 사업 지원범위에 해당하지 않아 직접적인 혜택이 발생하는 것으로 볼 수 없음
- (특정성) 본 연구개발 사업은 플랜트 산업 이외에도, 에너지산업, ICT 산업 등 다양한 산업분야가 포함되어 진행되며 기업 매칭과 경쟁공모에 의해 사업이 추진되므로 특정성이 있다고 보기 어려움

〈표 Ⅷ-14〉 WTO 보조금 위배사항 종합검토

본 연구개발사업 WTO 보조금 위배 규정항목		위배사항 검토	관련 내용
금지보조금	수출보조금	×	○ 기업의 수출을 위한 보조금 지원 부분 없음
	수입대체보조금	×	○ 국산화제품 양산이 주된 목적이 아닌 성능향상 및 안정성 확보 추구
조치가능 보조금	재정적 기여	×	○ WTO 보조금 협정 내 산업적 연구비용 최대 75% 이내 지원 기준 준수
	혜택여부	×	○ 정부는 기술개발만 지원, 시설투자 및 시장개척은 기업이 담당
	특정성	×	○ 타 산업과의 연계가 가능하며 기업 경쟁공모에 의한 사업 추진

(2) 기타 사업추진상의 위험요인

가. 실증플랜트 구축 주민수용성 제고

② 동 사업의 주민수용성 제고방안

■ 민원 발생 가능성이 낮은 실증지를 선정

- 청록수소 실증플랜트가 구축될 실증지(지자체)의 참여 의향을 확보하는 등 지자체와의 우선 협의를 통해 민원 발생 가능성 자체를 최소화
- 민원발생 가능성이 낮은 부지(산업단지 내) 선정을 고려

■ 실증입지를 결정하기 전, 기획단계에서 주민 대상 협의를 적극 수행

- 지자체-실증플랜트 사업자-주민대표 바탕의 ‘(가칭)지역발전협의체’를 구성
 - 다양한 이해관계를 가지고 있는 지역주민들을 폭넓게 참여시켜 쟁점별 협의를 수행
 - ※ 예상쟁점 : 청록수소 실증플랜트 추진의 필요성 및 정당성, 입지의 타당성, 플랜트 규모의 타당성, 청정 수소도시 실현 가능성, 환경훼손과 대책, 폭발 위험, 지역발전방안, 보상 원칙과 규모, 주민설명회 운영 원칙 등
 - 지자체는 중립적이고 공정한 규칙 제정과 대화채널을 통해 설계자와 운영자 역할을 담당
- 사업입지 결정 전 기획단계에서, 플랜트 건설과 운영, 장점과 효과, 단점과 피해, 대책과 보상 등 관련된 쟁점에 대해서 주민들과 균형잡힌 소통절차를 설계·운영
 - 수소도시 실행을 위해 도시에 대용량 수소공급을 담당하는 플랜트로 지역사회와 장기간 동안 지속가능한 관계 속에서 진행되어야 하므로 사업초기 입지선정 단계부터 주민들과의 협력적이고 신뢰할 수 있는 관계를 형성하는 것이 매우 중요
 - ※ 사업의 장점과 효과, 유리하고 긍정적인 측면만 이외에도, 사업의 정당성 및 입지와 규모의 타당성, 환경훼손, 경관훼손, 지역이미지 등 지역주민 입장에서 다소 부정적인 쟁점 또한 공정하게 논의할 계획

〈표 Ⅷ-15〉 주민수용성 제고를 위한 3단계 협의절차

① 대표자 선정과 쟁점진단	② 쟁점논의와 해소	③ 합의 추진과 공동모니터링
○ 지역발전협의체 구성, 원칙, 운영규정 수립 ○ 청록수소 플랜트 사업과 관련된 다양한 쟁점을 도출	○ 쟁점별 논의를 통해 공동의 이해 형성 - 청록수소 플랜트, 법제도 등 전문가 참여 ○ 필요시 쟁점별 소위원회를 구성하여 해소를 위한 토의 진행	○ 지역발전협의체에서 도출된 합의 기반 지역 주민 동의절차 수행 - 전체 주민 대상 설명회 개최, 의견 수렴 ○ 지역주민의 합의안을 충실히 수행하는지 검토할 수 있는 채널 구축

■ 청록수소 플랜트 구축을 통하여, 장기적인 관점에서의 지역경제 활성화에 기여할 방안 검토

- 플랜트 구축 이후 청록수소 플랜트는 30년 이상 장기적으로 운영될 예정으로, 지역 자산으로 역할할 수 있는 방안을 적극 모색

나. 사업 종료 이후 실증플랜트 운영계획

■ 실증설비 소유권 문제

- 국가연구개발혁신법 시행령 제32조 제1항에 따라 유형적 성과는 협약으로 정하는 바에 따라 성과를 창출한 연구개발기관(세부과제의 경우 협동연구기관)의 소유

제32조(연구개발성과의 소유) ① 법 제16조제2항에 따라 여러 연구개발기관이 공동으로 연구개발과제를 수행하는 경우 그 연구개발성과의 소유에 관한 세부기준은 다음 각 호와 같다.

1. 여러 연구개발기관이 각자 연구개발성과를 창출한 경우: 연구개발성과를 창출한 연구개발기관이 해당 연구개발성과를 소유한다.
2. 여러 연구개발기관이 공동으로 연구개발성과를 창출한 경우: 연구개발성과를 창출한 기여도를 기준으로 소유비율을 정하되, 연구개발기관 간의 협의에 따라 연구개발성과의 소유비율 및 연구개발성과실시(연구개발성과를 사용·양도·대여 또는 수출하거나 연구개발성과의 양도 또는 대여의 청약을 하는 행위를 말한다. 이하 같다) 등에 관한 사항을 정한 경우에는 그 협의에 따른다.
3. 위탁연구개발기관이 연구개발성과를 창출한 경우: 주관연구개발기관이 소유한다.

※ 지적재산권 등 무형적 성과는 국가 규정에 따라 연구기관 소유

- 유형적 성과인 실증설비(시스템)은 연구기관 협약시 실증부지 제공기관에게 이관하도록 추진
 - 실증 이후 실증설비를 원상복구(철거 포함)하는 추가비용 부담이 발생하지 않으며, 지속적으로 활용하여 장기 운영실적 확보가 가능

■ 사업 종료 후 실증설비 운영방안

- 실증설비(시스템)가 상용설비로 전환되어 지속적으로 운영될 수 있도록 청록수소 플랜트로부터 생산된 수소 및 고체탄소를 판매하여 운영비로 활용

⇒ 연구개발기관이 선정되면 혁신법 및 성과관리법 등에 따라 연구기관과 실증플랜트 부지제공 기관(지자체) 간 상세협약을 통해 추진할 예정

■ 후속사업 연계방안

- 동 사업을 통해 구축된 양수발전실증플랜트는 타 국가연구개발사업 및 R&D과제에서 필요시 활용할 수 있도록 연계

3절 경제적 타당성

1. 비용편익분석

1) 분석개요

■ (분석목적) 동 사업에 대한 비용편익분석을 통해 국가적 관점에서 본 사업의 경제적 타당성을 분석

- 예비타당성조사 운용지침(과기정통부), 예비타당성조사 수행총괄지침(과기정통부), 예비타당성조사 수행 세부지침(KISTEP)에 의거하여 편익 및 비용 항목 추정

■ (분석관점) 예비타당성조사 수행 세부지침에서 제시한 비용분석 및 편익분석 방법론을 적용

- (비용분석) 예비타당성조사 수행 세부지침(KISTEP, 2023)에서 제시하고 있는 7가지 비용 추정방법론 중 동 사업에 적합한 방법론을 선택하여 절차에 따라 비용 추정의 적절성 검토

- 연차별, 과제별 예산세부 내역 및 비용 산정 근거가 제시되어 있는지, 예산 과다산정 여부 확인

- 정확한 비용 산정이 중요하며 예산 과다산정은 B/C 비율 하향 원인

- (편익분석) 사업목표 분석을 통해 편익항목을 도출하고 시장수요 추정 가능 여부에 따라 계량화가 가능한 경우 비용편익 분석, 불가능할 경우 비용효과 분석 실시

- 편익의 종류와 범위는 사업목표에 근거하여 설정하고, 직접 편익만을 편익 분석에 포함

- 직접적 편익 : 부가가치 창출, 비용절감 편익

- 간접적 편익 : 생산·고용·취업 유발, 연구능력 향상 등

- 경제성 판단 기준

- (편익/비용비율) 운영 후 연도별 발생하는 편익과 투입되는 비용을 적정 할인율로 할인하여 기준연도 가격으로 환산한 금액의 비율을 말하며, 일반적으로 (편익/비용비율) ≥ 1 이면 경제성이 있다고 판단

- (순현재가치) 사업에 수반된 모든 비용과 편익을 기준연도의 현재가치로 할인하여 총 편익에서 총 비용을 제한 값이며 (순현재가치) ≥ 0 이면 경제성이 있다고 판단

$$\text{편익·비용 비율}(B/C) = \frac{\sum_{t=0}^n \frac{B_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=0}^n \frac{C_t}{(1+r)^t}}$$

$$\text{순현재가치}(NPV) = \sum_{t=0}^n \frac{B_t}{(1+r)^t} - \sum_{t=0}^n \frac{C_t}{(1+r)^t}$$

여기서 B_t : 시점 t 에서의 편익
 C_t : 시점 t 에서의 비용
 r : 할인율(이자율)
 n : 내구연도(분석연도)

2) 비용 분석

■ (비용) 동 사업은 총사업비 415억원 투자를 계획

- 3개 중점분야 8개 핵심기술에 총 415억 원(정부투자액 기준) 투자
- 연도별 투자금액은 다음과 같으며 3차년도까지 투자비용이 점증하다가 감소하는 역U자형 투자계획을 가짐
 - 청록수소 플랜트 설비 및 시스템 기술개발 완료 시점과 실증 적용 시점을 고려하여 시간적 선후관계에 따라 실증플랜트 구축 및 운영 계획을 반영

〈표 Ⅷ-16〉 연구부문별 투자계획

중점	구분	1차년	2차년	3차년	4차년	5차년	총계
탄화수소 직접분해 기술 기반 청록수소 생산 기술 개발 및 실증설비 제작	정 부	30	30	68	35	25	188
	지자체	0	0	0	0	0	0
	민 간	10	10	23	11.5	8.5	63
	소 계	40	40	91	46.5	33.5	251
고체탄소 고부가가치화 전환 기술 확보 및 응용부품 개발	정 부	4.5	12	14.8	14.8	13.9	60
	지자체	0	0	0	0	0	0
	민 간	1.5	4	5	5	4.5	20
	소 계	6	16	19.8	19.8	18.4	80
도시 내 수소 공급을 위한 플랫폼 개발 및 Plant 구축 운영	정 부	2	4	4	21.5	10.5	42
	지자체	6.16	-	-	10	20	36.16
	민 간	-	-	-	4.125	1.715	5.84
	소 계	8.16	4	4	35.625	32.215	84
합 계		54.16	60	114.8	101.925	84.115	415

3) 편익 추정 개요 및 방법론

■ 편익 항목 설정에 사업의 목표 및 수혜자 고려

- (사업목표) 동 사업은 수소도시에 안정적이고 경제적인 청록수소를 공급할 수 있는 청록수소 플랜트 구축·통합 실증을 통해 해외 건설시장 진출 청록수소 플랜트 수출모델 및 트랙레코드 확보를 목표로 함
- (수혜자) 플랜트 설비 및 시스템 제작 중소·중견기업, 플랜트 건설·엔지니어링사 등

■ 해외 건설시장 진출 성과목표를 고려하여 부가가치 증대 편익 도출

- 예비타당성조사 수행 세부지침에 따르면 연구개발사업의 수행으로 인해 발생할 수 있는 편익을 정(+)의 가치증가와 부(-)의 가치감소의 측면으로 구분
- 정(+)의 가치증가 측면에서는 신기술 적용을 통한 생산량 증가, 기술이전에 의한 로열티 수입에 의한 기술거래 편익이 대표적임
- 부(-)의 가치감소 측면에서는 생산투입 자원 및 시간의 절감과 연구 기간, 출장회수, 등의 연구수행 절감, 물류비용 절감, 자연재해로 인한 피해감소, 질병·환경 비용절감 등이 예비타당성조사의 비용편익 분석 시 편익으로 반영될 수 있음
- 반면 논문, 특허 등의 과학기술 지식 및 산업파급효과 등은 편익이 간접적으로 발생하거나 화폐화하기 어려운 관계로 비용편익분석에서 편익으로 반영하지 않음

〈표 VII-12〉 R&D부문 예비타당성조사 편익항목

구분	예비타당성조사 비용편익분석 시 편익 반영	예비타당성조사 비용편익분석 시 편익 미반영	
정(+)의 가치 증가	부가가치 증대 신기술 적용을 통한 생산량 증가 기술거래 기술이전에 의한 로열티 수입	과학기술 지식(논문, 특허 등)* 국민의 과학기술 이해도 향상 과학기술자의 교육훈련 국가위상의 제고 지역개발효과 시장권의 확대 지역산업구조 개편	생산유발효과 부가가치 유발효과 고용유발효과 수입유발효과 수출유발효과 소득분배효과 취업유발효과
부(-)의 가치 감소	비용 절감 생산투입 자원 및 시간의 절감 연구기간, 출장회수 등의 연구수행 비용 절감 물류비용 절감 피해 비용 감소 자연재해로 인한 피해 감소 질병비용절감** 환경비용절감**		

* 논문이나 특허는 비용효과분석으로 반영할 수 있음

** 질병비용절감과 환경비용절감은 사업이 기여한 부분만의 산출과 이중계산 배제에 제약이 있을 경우 비용편익분석이 아닌 비용효과분석으로 수행 가능

(자료) KISTEP(2023) 「국가연구개발사업 예비타당성조사 수행 세부지침」,

■ 동 사업의 사업목표 및 직접적 수혜자를 감안하면 동 사업의 편익은 정(+)의 가치증가 중 부가가치 증대에 해당

- 청록수소 플랜트 구축·운영 및 국산화 기술개발 등을 통해 국내외 시장에 진출함으로써 부가가치를 창출
- 부가가치 창출편익은 국가연구개발사업 예비타당성조사 수행 세부지침(KISTEP)에 따라 다음과 같이 추정

$$\text{편익} = \text{세계 시장규모} \times \text{시장점유율} \times \text{사업기여율} \times \text{사업화성공률} \times \text{부가가치율} \times \text{R\&D기여율}$$

■ (미래 시장규모) 청록수소 생산(플랜트)시장을 대상시장으로 선정하고 수소 생산시장 중 청록수소 생산시장 비중을 적용하여 미래 시장규모를 추정

- (시장규모) 글로벌 청정수소 생산시장 전망 자료*에 청정수소 시장규모**에서 청록수소***가 차지하는 비중 약 25%를 청정수소 생산시장에도 동일한 규모로 적용된다고 가정하여 청록수소 생산 시장을 추정

* 글로벌 청정수소(블루수소+그린수소) 생산시장은 2020년 621.24억 달러에서 2025년 1,052.64억 달러로 증가 전망(Hydrogen Generation Market(Marketsandmarkets, 2021))

** 글로벌 청정수소 시장규모는 2030년 6,420억 달러 전망(2023 글로벌 그린수소 시장(딜로이트, 2023))

*** 글로벌 청록수소 시장규모는 2030년 1,627.1억 달러 전망(Global Turquoise Hydrogen Market Research Report - Industry Analysis, Size, Share, Growth, Trends and Forecast 2023 to 2030 (value Market Research, 2023))

○ (시장점유율)

- 해외시장 점유율의 경우 Top 250 기업의 세계 플랜트 건설시장의 매출액 규모 대비 국내 기업의 해외 플랜트 건설 수주 규모인 9.2%(최근 5년) 중 국내 9대 건설사의 수출 실적 비중을 적용한 6.5%*로 추정함**

* 시장점유율은 편익기간 10년 간 점차 증가하여 6.5%를 달성함을 가정함(편익발생 1년차 0.65%에서 편익발생 10년차 6.50% 달성)

** 비전통오일 생산플랜트 건설 핵심기술 개발사업 예비타당성조사 보고서(KISTEP, 2020)의 추정 방법 적용

■ 사업기여율

- NTIS에서 유사과제 검색을 통해 2018-2022년간 청록수소 및 플랜트 건설·실증 유사 정부투자액을 조사한 후, (동 사업비) / (동 사업비 + 유사 정부투자액 + 유사 민간투자액)의 비중을 산출

〈표 Ⅷ-17〉 사업기여율 추정

(단위: 억 원, %)

유사 정부투자액 (‘18~’22년 평균)	유사 민간투자액 (연평균)	동 사업비 (연평균)	사업기여율 (%)
347.4	2.34	83.0	6.7%

- 유사 민간투자액은 직접적 산출이 어렵기 때문에 '2021년 정부연구개발 투자방향 및 기준 (국가과학기술자문회의)'에서 발표한 조선해양/플랜트 분야와 신재생에너지 분야의 정부 대비 민간 투자 비율 2.34을 적용하여 도출

〈표 Ⅷ-18〉 정부 및 민간 R&D 투자규모 비교(2018)

(단위: 억 원)

구분	조선해양·플랜트	신재생에너지	합계
정부(A)	3,148	8,715	11,863
민간(B)	10,587	17,176	27,763
B/A	3.36	2.00	2.34

출처: 2021년 정부연구개발 투자방향 및 기준, 국가과학기술자문회의

■ 사업화성공률

- '2020 산업기술혁신사업 성과활용조사 종합분석보고서(한국산업기술평가관리원, 2021)' 기준 기계·소재 분야(42.4%), 에너지·자원(25.0%)의 산술평균값 33.7%를 적용

■ 부가가치율

- 2015년 한국은행 산업연관표(2015년 실측기준) 투입산출표 생산자가격 기본부문중 기초가격거래표를 기준으로 활용하여 산업시설 건설 중 산업플랜트 부가가치율 43.0%의 국내유입 비중 77.9%*에 해당하는 33.5%를 적용함

* 산업설비 해외 공사 중 국내유입 비중은 해외건설협회 내부자료를 통해 최근 5년간 수주액 총액 대비 유입액 비율은 77.9%에 달하는 것으로 확인됨

〈표 Ⅷ-19〉 해외 산업시설 건설 수주액 및 국내 유입액

(단위: 천 달러)

구분	2014	2015	2016	2017	2018	합계	5년간 유입/수주
수주액	520,977	160,687	19,785	9,122	303	710,874	77.94%
유입액	461,837	73,246	10,642	8,046	277	554,048	

자료: 해외건설협회

■ R&D기여율

- 국가연구개발사업 예비타당성조사 수행 세부지침(KISTEP, 2020)에 따라 35.4% 적용

■ 회임기간

- 국가연구개발사업 예비타당성조사 수행 세부지침(KISTEP, 2020)에 따라 응용·개발연구의 회임기간 3년을 적용함

■ 편익발생기간

- 2021년 기술평가실무가이드(산업부, 2021)에서 제시한 'F25B 플랜트'의 기술수명인 10년을 적용

■ 사회적 할인율

- 사회적 할인율은 기준이자율, 사회적 시간선호율, 재무적 할인율 등을 종합적으로 고려하여 도출되는데, 예비타당성조사 수행 총괄지침에서 이를 4.5% 적용

■ 기준연도

- 각기 다른 연도에 발생하는 비용과 편익을 비교 분석하기 위해서는 특정연도를 기준으로 불변가격으로 전환해야 하며, 이 기준이 되는 연도를 기준연도로 설정
 - 분석에 사용되는 모든 수치는 2022년 기준의 불변 가치로 환산

4) 편익 추정 결과

■ 2033-2042년 동안 연간 9.9~143.0억 원의 편익이 발생하며, 총 705.9억원의 편익 발생

〈표 Ⅷ-20〉 편익 추정 결과

연도	시장규모(억 원)	시장점유율	편익(억 원)		비고
			명목가치	현재가치	
2033	570,669.0	0.00650	9.9	6.1	
2034	598,919.6	0.01300	20.8	12.2	
2035	627,170.1	0.01950	32.6	18.4	
2036	655,420.7	0.02600	45.5	24.5	
2037	683,671.2	0.03250	59.3	30.6	
2038	711,921.8	0.03900	74.1	36.6	
2039	740,172.4	0.04550	89.8	42.5	
2040	768,422.9	0.05200	106.6	48.3	
2041	796,673.5	0.05850	124.3	53.9	
2042	824,924.0	0.06500	143.0	59.3	
합계	6,977,965.2		705.9	332.5	

5) 비용편익분석 결과

■ 동 사업의 편익/비용비율은 1.008이며 동 사업을 통해 수반되는 청정수소 확대에 따른 탄소중립 기여 등 효과를 고려할 때 더 큰 경제적 효과가 기대됨

○ 동 사업은 편익/비용비율(B/C ratio)이 1.008, 순현재가치(NPV)는 2.6억 원

〈표 Ⅷ-21〉 경제적 타당성 분석결과 요약

편익(B)	비용(C)	B/C Ratio	NPV(억 원)
332.5	330.0	1.008	2.6

■ 비용 및 편익 현재가치의 상세한 추이는 다음과 같음

〈표 Ⅷ-22〉 비용 및 편익현가의 연도별 추이

연도	비용		편익		비고
	명목가치	현재가치	명목가치	현재가치	
2025	54.2	47.5			사업기간
2026	60.0	50.3			
2027	114.8	92.1			
2028	101.9	78.3			
2029	84.1	61.8			
2030					회임기간
2031					
2032					
2033			9.9	6.1	편익기간
2034			20.8	12.2	
2035			32.6	18.4	
2036			45.5	24.5	
2037			59.3	30.6	
2038			74.1	36.6	
2039			89.8	42.5	
2040			106.6	48.3	
2041			124.3	53.9	
2042			143.0	59.3	
합계	415.0	330.0	705.9	332.5	

2. 청록수소 생산의 경제성

1) 분석 개요

■ (분석목적) 탄소중립, 수소도시 실현 및 수소경제 이행을 위해 청정수소의 도시 공급 수단 확보 관점에서 동 사업의 경제적 타당성을 분석

- 수소경제 활성화 로드맵(2019년 1월) 및 제1차 수소경제 이행 기본계획(2021년 11월)을 통하여 제시한 그레이수소, 블루수소, 그린수소 등 수소생산 계획의 효과적 대안으로 청록수소의 경제성을 확인 제조
- 수소 가격을 2040년까지 3,000원/kg 이하로 하락 유도 관점에서의 청록수소 생산 공정 중 발생하는 고체탄소의 고부가가치화 가격 목표 설정 검토

■ (분석 관점 및 기본가정) 3.0톤/일 규모의 청록수소 생산설비 구축의 초기 투자 비용(capital expenditure, CAPEX) 설정과 운전비용(operating expenditure, OPEX) 분석을 바탕으로 ROI(return on investment) 기반의 청록수소 및 고체탄소 판매 수익 평가

- (설비비용, CAPEX) 사업비 총 200억원 설정
 - 플라즈마&촉매 반응설비 100억, 수소 분리/정제설비 50억
 - 엔지니어링 및 상세설계, 부지구매 및 Plant 구축비용 50억
- (운전비용, OPEX) 고정비, 변동비 및 기타관리비 118억/년
 - 운영인력 : 16인 (4인/4조/3교대, 24시간 연속운영 설비)
 - 전력사용비 : 총 1,700kWh (플라즈마장치 1,200kW + 부대장치 500kW)
 - 천연가스량 : 13,333kg/일 (이론적 필요량 12,000kg/일, 90% 효율 고려)
 - 천연가스단가 : 1,396원/kg (국내 SK가스 및 E1(주) 공급 단가)

〈표 VIII-23〉 청록수소 플랜트 운영비용 추정

항 목		단 가 (원)	단 위	산출내역	연간 총액 (원)
고정비	인건비	4,000,000	원/인/월	인/월 × 16인 × 12월	768,000,000
	사무비 (인건비 5%)	200,000	원/인/월	인/월 × 16인 × 12월	38,400,000
	소 계	806,400,000			
변동비	메탄(천연가스) 구매비	1,396	원/kg	일 필요량 : 13,333kg/일	6,141,520,000
	전 력 비	계약전력	6,550	원/kW/월 × 2,000kW × 12월	157,200,000
		사용전력	150	사용전력 : 1700kWh	2,019,600,000
	공업용수비	1,000	원/톤	원/톤 × 10,000톤/년	10,000,000
	촉매비	20,000	원/kg	원/kg × 5,000톤/년	100,000,000
	수선유지비	기계 및 전기 보수공사 (토치 소모성 자재 포함)		{(설비비) × 5%} × 2회	2,000,000,000
	소 계	10,428,320,000			
기타 관리비	기타 관리비	검사/점검비 및 시험측정비		(고정비+변동비) × 약 5%	561,736,000
	소 계	561,736,000			
합 계		11,796,456,000			

■ 국외 실증사례 Monolith사 분석

○ (Monolith 현황) Monolith Materials' Olive Creek Plant II (OCII)

〈표 VIII-24〉 Monolith사 청록수소 및 고체탄소 생산단가

구분	생산량	kg 단가	비고
수소	42,300 톤/년 [약 130 톤/일]	1.8 \$/kg [2,400 원/kg]	
카본블랙	180,000 톤/년 [약 550 톤/일]	1.343 \$/kg [1,800 원/kg]	

※ 출처 'Why tritium hydrogen will be a game change for the energy transition, Jad Diab 외, 2022년'

■ 동 사업에서 목표로 하는 전도성 플라스틱 용도의 고체탄소 가격을 고려하여 경제성 분석에 활용

- 본 과제에서 생산되는 고체탄소는 플라즈마에 의한 메탄열분해에 의해 생성되는 카본블랙과 촉매열분해를 통해 합성되는 탄소나노튜브가 혼합된 형태로 존재함으로써, 카본블랙과 탄소나노튜브의 사이의 부가가치가 있을 것으로 예상
- 메탄 분해로 생성된 탄소나노튜브와 탄소 블랙의 혼합물은 탄소나노튜브와 탄소 블랙의 비율, 제품 순도 및 잠재적 응용 분야에 따라 중간 정도의 경제적 가치를 가질 수 있음

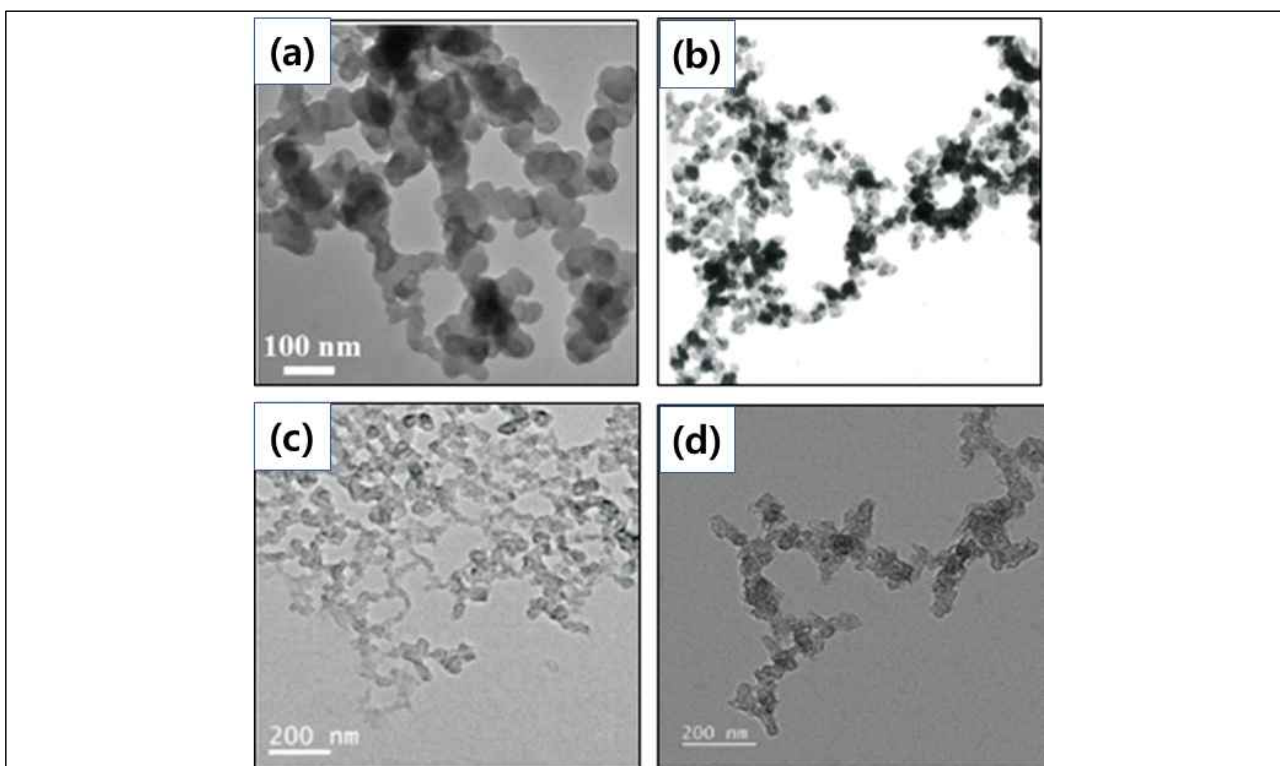
- 메탄 열분해에 의해 부산물로 생성되는 고체탄소는 반응 조건, 사용된 촉매 및 반응기 설계에 따라, 저급의 비정질카본 및 결정질 카본블랙 등이 생성되며, 아래와 같이 사용용도와 가치가 다름

※ 메탄의 플라즈마 열분해에 의해 생성되는 고체탄소는 열분해 온도 및 플라즈마에서 분해 및 재결합되는 위치에 따라 저품질 또는 범용의 카본블랙이 혼합되어 형성

〈표 Ⅷ-25〉 카본종류별 사용용도 및 가격

카본종류	열분해 카본	일반카본블랙	혼합형태 (카본나노튜브와 카본블랙)	특수카본블랙 (배터리용)
사용용도	용광로 철환원	타이어, 고무용	도전성 플라스틱	배터리, 촉매담지
가격(\$/kg)	0.3~0.7	1~2	3~6	>10
비고		monolith사	본과제 목표	-

- 전도성 카본블랙은 입자크기가 약 30~40nm 정도이며, 구조는 카본블랙끼리 연결된 길이가 길수록 전도성이 우수하며, 표면처리를 통한 다양한 기능기의 부착으로 분산 및 고분자 수지와의 결합성을 향상 가능
- 대표적인 전도성 카본블랙으로 (a) Super P, (b) Denka Black, (c) Ketjen black가 있으며, 아래의 그림과 같이 입자크기가 작고 구조가 잘 발달되어 있는 형태인데 반해 (d)의 모노리스사의 카본블랙도 유사한 입자 크기 및 구조가 발달되어 있음



[그림 VI-1] 전도성 카본블랙 종류 (a) Ketjenblack EC, (b) XCF carbon, (c)Denka Black, (d) Monoliths사

〈표 VI-90〉 전도성 카본블랙 종류

전도성 카본블랙 종류	입자크기(nm)	다공성(porosity) %	비표면적(m ² /g)
Ketjenblack EC	36	69	950
XCF carbon (Cabot)	37	25	214
Denka Black	41	13.9	76
Super P	40	11	62

■ 청록수소 및 고체탄소 판매에 따른 수익구조 설정

- 실제 사업 수익성을 확인하기 위해서는 Plant 위치/지역에 대한 정확한 토지 구입 비용, 법인세, 보험료, 건설기간 동안의 이자, 예비비(contingency) 등의 추가적인 고려사항이 경제성 분석에 계산되어야 하나, Plant 구축비를 바탕으로 4가지 Case에 대한 수소&고체탄소의 단가를 검토함
- (설정 #1) 청록수소 생산량 3.0톤/일, 고부가가치 고체탄소 생산량 9.0톤/일
- (설정 #2) Plant ROI : 10년 또는 5년
- (Case #1) 카본블랙 수익 'Zero' 시 청록수소 생산 단가 분석
- (Case #2) 카본블랙 1.343 \$/kg(Monolith 동일) 시 청록수소 생산 단가 분석
- (Case #3) 2040년 수소 로드맵 상의 수소생산단가 3,000원/kg 설정 시 고체탄소의 단가 분석
- (Case #4) 수소생산단가 'Zero' 설정 시 고체탄소의 단가 분석

2) 분석결과

■ 청록수소는 고체탄소 판매가격이 kg당 3달러 수준일 경우 '수소 경제 활성화 로드맵' 상의 수소 가격 3,000원/kg 하락 유도에 대한 효과적 대안으로 판단됨

- 고체탄소 고부가가치화 전환 기술을 통해 공정 경제성 확보 및 수소경제 이행을 위한 수소생산 효율적 대안으로 청록수소 생산의 타당성을 확인
- 일일 130톤의 수소를 생산하는 Monolith 사 대비 일일 3톤 수준의 상대적 소규모 시설임에도 불구하고 고체탄소의 가치가 kg당 3달러 수준일 경우 대형규모 청록수소 플랜트보다 규모의 경제성면에서 가치가 높다고 판단

- Monolith 사 130톤/일 2,400원/kg_H₂, 본과제 3톤/일 3,000원/kg_H₂
- 또한, 카본블랙의 고부가가치 응용부품 개발 적용 시 ROI 측면에서 상업적 가치가 높음을 확인

〈표 VIII-26〉 ROI 10년 기준 시의 수소&고체탄소 판매 단가 분석

구분	CASE #1	CASE #2	CASE #3	CASE #4
	고체탄소 단가 'Zero'	Monolith사 고체탄소*	수소 로드맵 3,000원/kg	수소 단가 'Zero'
ROI 설정 (년)	10	10	10	10
수소 판매단가 (원/kg)	13,900	8,500	3,000	-
고체탄소 판매단가 (원/kg)	-	1,800	3,650	4,650
비고			과제목표 : 고체탄소 가치 3~6 \$/kg	

* Monolith 사의 고체탄소 금액 : 1.343 \$/kg [1,800원/kg]

〈표 VIII-27〉 ROI 5년 기준 시의 수소&고체탄소 판매 단가 분석

구분	CASE #1	CASE #2	CASE #3	CASE #4
	고체탄소 단가 'Zero'	Monolith사 고체탄소*	수소 로드맵 3,000원/kg	수소 단가 'Zero'
ROI 설정 (년)	5	5	5	5
수소 판매단가 (원/kg)	16,000	10,500	3,000	-
고체탄소 판매단가 (원/kg)	-	1,800	4,300	5,300
비고			과제목표 : 고체탄소 가치 3~6 \$/kg	

* Monolith 사의 고체탄소 금액 : 1.343 \$/kg [1,800원/kg]

■ 본과제의 청록수소 생산기술은 타 수소 생산기술 대비 경제성을 확보하고 있으므로 도시 수소 공급을 위한 최적의 수소 생산기술로 판단됨

○ Monolith사의 Olive Creek Plant II(OCII)와의 본과제의 Scale 검토

- 본과제 기술을 적용하여 Monolith사와 수소 생산 용량이 동일 가정 (130톤/일) 시 본과제 설비비 및 운영비 43배 설정

- 130톤/일 수소생산 단일설비 혹은 멀티형(43기) 설비 등의 전략적 구축 가능
 - ※ 130톤/일 수소 생산설비의 단일 Plant 구축 또는 멀티형 구축 시 설비비 및 운영비 절감 효과 미반영
- 지자체 및 민간자본 투자방식의 사업 추진 시 ROI 평균 5년 산정
 - ※ 100톤~200톤/일의 폐기물 처리 사업 기준 ROI 5~10년으로 다양하게 분포
- Monolith사 대비 동일 수소단가 도달을 위한 고체탄소 개발 목표 수립
 - 수소 단가 2,400원/kg 도달을 위한 고체탄소 단가 3,180원/kg 산출
 - 다양한 형태의 고체탄소 발생이 가능함을 고려하여 공정효율 90% 가정 시 약 3,600원/kg (3.0\$/kg)의 고부가가치 개발 목표
- 청록수소는 고체탄소 판매가격이 kg당 3달러 수준일 경우 ‘수소 경제 활성화 로드맵’ 상의 수소 가격 3,000원/kg 하락 유도에 대한 효과적 대안으로 판단됨

〈표 VII-13〉 ROI 5년 기준 시 고체탄소 가격 대비 수소 판매단가 비교

구분	Monolith사	ROI 5년 기준			
		동 사업 기술 (수소 130톤/일 생산설비 가정) *			
		CASE #1	CASE #2	CASE #3	CASE #4
		Monolith사 고체탄소 기준	수소판매 목표 5,250원/kg	수소 로드맵 3,000원/kg	Monolith사 수소판매 기준
수소 생산량 [톤/일]	130	130	130	130	130
고체탄소 생산량 [톤/일]	550	550	550	550	550
수소 판매단가 (원/kg)	2,400	8,200	5,250	3,000	2,400
고체탄소 판매단가 (원/kg)	1,800	1,800	2,500	3,033	3,180
비고					본과제 목표

* 동사업 기준 : 3.0톤/일 청록수소 생산설비 구축비&운영비의 43배 Scale-up 적용

■ 천연가스 가격 변동에 대한 민감도 분석 결과 천연가스 가격이 100원/kg 상승 시 수소 판매단가는 약 460원/kg 상승하는 것으로 확인됨

- 청록수소 생산 공정 중 발생하는 고체탄소를 본 과제 고체탄소 판매가격 목표(3,600원/kg) 기준으로 고정하고 천연가스 가격변동에 따른 민감도를 분석
- 천연가스 가격 설정 최소 700원/kg에서 최대 1,600원/kg 변동에 대한 수소 생산단가 분석

○ 천연가스 가격이 100원/kg 상승 시 수소 판매단가는 약 460원/kg 상승

〈표 Ⅷ-28〉 (본 과제목표) 천연가스 가격변동에 따른 민감도 분석 결과

구분	CASE #1	CASE #2	CASE #3	CASE #4
	천연가스 700원/kg	천연가스 1,000원/kg	천연가스 1,300원/kg	천연가스 1,600원/kg
ROI 설정 (년)	5	5	5	5
총 운영비용 (원/년)	86억 (천연가스 30억_36%)	100억 (천연가스 44억_44%)	114억 (천연가스 57억_50%)	128억 (천연가스 70억_55%)
수소 판매단가 (원/kg)	1,900	3,300	4,700	6,100
고체탄소 판매단가 (원/kg)	3,600	3,600	3,600	3,600
비고			'23년 8월 기준	

* 본사업 목표 고체탄소 고품질화 판매단가 : 약 3 \$/kg [3,600원/kg]

〈(참고 모노리스社) 고체탄소 1,800원/kg 적용 시의 천연가스 가격변동에 따른 수소 판매 단가 분석〉

구분	CASE #1	CASE #2	CASE #3	CASE #4
	천연가스 700원/kg	천연가스 1,000원/kg	천연가스 1,300원/kg	천연가스 1,600원/kg
ROI 설정 (년)	5	5	5	5
총 운영비용 (원/년)	86억 (천연가스 30억_36%)	100억 (천연가스 44억_44%)	114억 (천연가스 57억_50%)	128억 (천연가스 70억_55%)
수소 판매단가 (원/kg)	7,300	8,700	10,100	11,500
고체탄소 판매단가 (원/kg)	1,800	1,800	1,800	1,800
비고			'23년 8월 기준	

* Monolith 사의 고체탄소 금액 : 1.343 \$/kg [1,800원/kg]

4절 기대효과

1. 경제·사회적 기대효과

■ 고효율 플라즈마 시스템 개발을 통해 청록수소 생산비용 절감하고 수소공급 비용 절감 기대

- 플라즈마 토치 열효율, 사용수명 증가 및 저렴한 작동기체 활용을 가능하게 하여 청록수소 생산단가 절감 가능

〈청록수소 생산원가 절감 방안〉

- 플라즈마 토치의 열효율 증가
 - (기존) 토치 내부 온도 조절을 위한 냉각수 순환 열손실 30% 이상
 - (계획) 토치 내부 온도 조절을 위한 냉각수 순환 열손실 20% 이하
 - * 고온플라즈마 토치의 열손실 최소화를 통한 반응기 승온의 에너지 절감 효과
- 플라즈마 토치 소모성 자재의 사용수명 증가
 - (기존) 300kW급 플라즈마 토치 전극 수명 300시간
 - (계획) 300kW급 플라즈마 토치 전극 수명 400시간 이상
 - * 소모성 자재의 구조 개선연구를 통하여 수명 증가와 교체시간 단축으로 설비 연속성 확보
 - * 소모성 자재의 다양한 소재 적용 연구를 통한 소모성 자재비용 절감
- 플라즈마 토치 운영을 위한 작동기체의 다양화 연구
 - (기존) 플라즈마 토치의 작동기체 Air, N₂, Ar 등
 - (변경) 플라즈마 토치의 작동기체의 다양화 연구 H₂, CH₄, LPG 등
 - * 소모되는 플라즈마의 작동기체를 청록수소 생산공정 내 원료/생산되는 기체를 재사용하여 추가적인 설비비용을 감소

■ 청록수소 생산플랜트 표준설비의 적용분야 확대를 통해 신시장 창출

- 청록수소 생산 표준설비는 하수/분뇨/음식물류 등 유기성폐자원 처리공정 연계를 통해 수소생산이 가능하며 폐자원을 활용한 수소는 그린수소로 분류 가능
 - 혐기성 소화에 따른 바이오가스 생산 시 미활용 가스(CH₄) 발생
 - 약 20%의 미활용 가스를 대상으로 표준설비 적용을 통한 청록수소 생산
- 또한 폐플라스틱 유화 공정의 미응축 가스의 수소화에 연계 가능
 - 폐플라스틱 유화 공정 시 약 40~60%의 탄화수소(C_nH_n 미응축 가스) 발생
 - 미응축 가스의 청록수소화를 통한 추가 경제성 확보 가능
 - 확대 진행중인 폐플라스틱 유화설비의 연계공정으로 사업화 확대

■ CO₂가 배출되지 않는 청정수소 생산 및 수소도시 공급을 통해 탄소중립도시 실현에 기여

- 탄소중립 실현을 위한 산업계 대규모 청정수소 수요 대응 및 수소도시 에너지 공급에 현실적 대안으로 역할 가능
- 환경성과 경제성을 갖춘 청록수소의 안정적 공급을 통해 친환경 에너지 전환체계 마련으로 탄소중립 실현에 기여
- 청록수소 공급시스템 핵심 요소기술 국산화로 에너지 안보 기반 마련

■ 탄소의 고부가가치 상품화를 통한 새로운 시장개척

- 전도성 고체탄소, 탄소나노튜브 등 고부가가치 상품화를 통해 새로운 시장개척 기대

■ 동 사업추진을 통해 673억원의 생산유발, 359억원의 부가가치유발, 218명의 고용유발 효과 기대

※ 각 유발계수는 산업연관표(2019년)에서 제시한 산업플랜트(산업시설 건설), 소프트웨어 개발 공급, 기타 IT서비스, 연구개발(비영리)의 산술평균 적용

〈표 VIII-29〉 동 사업 추진 경제적 파급효과

생산유발효과(억원)	부가가치유발효과(억원)	고용유발효과(명)
673	359	218

2. 과학·기술적 기대효과

■ 고온 플라즈마 기술(출력 증가, 수명연장 등) 국산화를 통해 소재공정사업, 폐기물 열분해 처리사업 등 타 분야에 확대·적용 가능

- 국내 독자적 수소제조 기술 확보 및 대용량 청록수소 시스템의 표준모델 확보
- 동 사업을 통해 개발되는 청록수소 생산기술은 유기성폐자원, 폐플라스틱 등 처리과정에 응용하여 수소생산이 가능한 기술

■ 탄소소재도 생산 가능한 기술이며 메탄자원(천연가스)이 풍부한 지역에 대용량 청록수소 플랜트 구축·운영기술 수출 가능

- 이산화탄소 발생이 없어 유럽 등의 수출규제에 대한 대응 기술로 활용
- 국가 차원의 탄소 중립 목표 달성을 위한 에너지 정책의 핵심 수단으로 활용

붙임

과제 제안요구서(RFP)

과제 제안요구서(RFP)

연구과제명	대용량 청록수소 공급 시스템 기술개발
1. 연구개발목표	대용량 청록수소 공급시스템 기술개발과 통합 실증을 통해 도시단위에 적합한 청록수소 및 고체탄소 동시 생산 및 실증기술 확보로 탄소중립 수소시범도시 조기실현
<대용량 청록수소 공급시스템 기술개발 개념도> 대용량 청록수소 공급시스템 기술개발 개념도 에너지 공급센터 ↔ 에너지 빅데이터 (데이터) ↔ 필요량 (수요) → 공급량 (수소공급망) 투입량 13톤/일 (지하자재공급) → 천연가스 공급 (CH₄) → 열원 공급 (Plasma Torch) → 직접 열분해 반응 (Plasma Reactor) → 카본블랙 회수 (Cyclone #1) → 촉매 회각 반응 (Catalyst Reactor) → 카본블랙 회수 (Cyclone #2) 미반응 천연가스 회수/재공급 → 대규모 카본블랙 응용기술 개발 → 수소생산 (수소에너지 공급) 탄소 생산량 9톤/일 (고부가가치화 전환 및 실증) → 고부가가치 고체탄소(CNT 등) 수소공급망 → 에너지 네트워크 (수요예측 및 전력공급) → 수소도시	
2. 연구개발 필요성 및 기술동향	
□ 연구개발 필요성	○ ‘기후변화 대응을 위한 탈탄소 사회로 전환’의 전지구적 탈탄소화 움직임으로 향후 핵심기술로서 청정수소의 중요성이 급부상 - 인류의 산업활동 이후 산업화 이전 수준 대비 약 1.09℃의 기온 상승으로, 기후변화는 전 세계가 공조하여 효율적으로 대처해야 할 이슈로 부상 * The Global Risks Report(WEF)는 최근 5년간 기후변화 관련 이슈를 가장 큰 리스크로 선정하였으며, 이외 기후변화 관련 다양한 위험이 상위권에 위치 ○ 탈탄소·친환경 기조에 따라 향후 수소산업은 국가 신성장동력으로 여겨지며, 탄소배출량을 획기적으로 저감할 청정수소 기술확보 핵심 * 글로벌 그린 뉴딜 및 탄소세 부과 정책 “FIT for 55”(EU)가 수립되면서 전기,

- 시멘트, 철강, 알루미늄 등 탄소배출 과다 품목에 탄소국경세 적용
- 국제에너지기구(IEA)는 세계 수소 수요가 2050년까지 5억 2천만톤 규모로 확대될 것이며, 탄소중립 실현을 위해 세계 수소 공급의 약 98%의 청정수소 전환 필요성을 강조
 - 정부는 수소경제 활성화와 수소도시로의 확산을 위해 '23년 수소시범도시 추진을 계획하고 있으나, 도심 내 공급가능한 수소공급인프라 마련은 부족
 - * 2040년 수소도시 조성을 위한 '수소 시범도시 추진전략', 2050년 청정수소 자급률 60% 도달을 목표로 하는 '제1차 수소경제 이행 기본계획' 등
 - 또한 수소생산, 저장·운송에 대한 기술개발은 활발히 이루어지고 있으나, 수소도시를 추진하기 위한 실증, 플랜트 등의 요소기술 개발은 부족한 실정
 - * 선진국에 비해 대규모 재생에너지 단지 부족하여 재생에너지 활용 수전해 기술개발 및 실증·상용화 기술 확보 지연(수소경제활성화로드맵, '19)
 - 장기적으로 국내에서 청정수소를 생산·유통할 수 있는 인프라 구축으로 수소가격 현실화와 안정적인 수소공급망 구축의 현실적 문제해결 긴요
 - 청록수소는 친환경성과 대용량의 공급이 가능해 수소시범도시 인프라에 효과적이고 현실적인 대안*이나, 핵심요소기술의 해외의존도가 높아 에너지안보 위협 요소 존재
 - * 청록수소는 1) 이산화탄소 미발생으로 탄소중립 실현에 기여할 수있어 수소시범도시 취지에 부합, 2) 청록수소 생산과정상 전기 사용량이 적음, 3) 부산물인 카본블렌 판매로 부가적 수익 창출이 가능해 기업 참여 독려 기반 마련 가능
 - ** 그간의 수소 R&D 생산, 저장·운송, 활용기반의 수소기술개발에 집중되어 청록수소 플랜트 건설과 실증, 요소기술 고도화 목적의 사업은 부재
 - 수소도시 정책에 부응 및 2050 탈탄소사회 구현의 기반으로써, 청록수소의 생산공정의 고효율 및 대용량화 핵심요소기술 및 탄소소재 고부가가치화 등 기술자립화를 위한 연구 필요

☐ 기술동향 ☐ 국내 기술동향

- 플라즈마 및 촉매화반응 공정 기반 파일럿 설비 시험을 가동하였으나, 설비의 짧은 수명으로 인한 잦은 유지보수 문제, 운영 중단 사태 등 문제로 기술적 한계에 봉착
- 메탄분해를 통한 탄소소재 및 수소 생생산 기술을 개발중이나, 청록수소 대량생산 기술이 아닌, 이차전지 도전재로 활용하기 위한

탄소소재 합성 기술이 주목적

□ 국외 기술동향

- 플라즈마 기반 CO₂-free 탄화수소 직접분해 기술은 Kvaerner 社가 상용 메탄 직접분해 반응공정을 최초로 개발하고 이를 Monolith 社가 인수
 * Monolith사는 Kvaerner 사의 기술을 기반으로 독자 개발한 반응기에 천연 가스를 주입한 뒤 플라즈마 시스템을 통해 열분해하는 방식으로 고순도의 수소를 생산하는 기술을 보유
- 촉매 화학적 기술을 이용한 메탄 직접분해를 통한 수소 및 고부가가치 탄소 동시 생산 기술 연구 진행중

3. 연구개발내용

- 사업목표 ○ 대용량 청록수소 공급시스템 기술개발과 통합 실증을 통해 도시 단위에 적합한 청록수소 및 고체탄소 동시 생산 및 실증기술확보로 탄소중립 수소시범도시 조기 실현
- 성과목표(성과지표)
- ① 청록수소 공급시스템 기술자립(청록수소 공급시스템 핵심기술 국산화율, %)
 - ② 고체탄소의 고부가가치 전환을 통한 청록수소 생산 경제성 확보(블루수소 대비 수소 생산원가 절감율, %)
 - ③ 청록수소 해외시장 진출 기반 확보(청록수소 대용량 공급 체계 트랙레코드 확보, 건)

AS-IS	TO-BE
• 천연가스 기반 수소생산 주변기술 및 대용량 확보 기술 부재 • 플라즈마 기반 생산 청록수소 고순도화 기술력 미흡	• 대용량 청록수소 시스템의 표준모델 도출 • 국내 독자적 수소제조 기술확보 • 탄소 중립 실현을 위한 산업계 대규모 청정수소 수요 대응 실용화 및 상용화 추진 및 수소도시 에너지 공급
• 친환경 및 저탄소가스 배출 고체탄소 제조 기술 부재 및 고부가가치 고체탄소 전량 수입 의존 - 탄소규제로 인한 고체탄소 국내 생산 중단시 국가산업경쟁력 약화 - 에너지 관련 핵심 고체탄소 공급망 부재 * 탄소가스 무배출 고체탄소 제조 기술 및 고부가가치 고체탄소 기술 필요	• 저에너지 및 저탄소 생산 공정 확립에 따른 카본블랙 증설시 본 공정 도입 • 에너지용 고부가가치 탄소소재 수입 대체 및 자립화
• 국토교통분야 수소 기술의 탄소중립 도시 맞춤형 공급 및 운영기술 부재 - 탄소규제 수단 미비로 국가산업 경쟁력 약화 - 국가 탄소중립을 위한 에너지 정책 수단 부족 * 청록수소 통합 플랜트 설계 및 시공기술개발, 운영을 위한 기술 표준화, 디지털기술 등 필요	• 탄소의 고부가가치 상품화를 통한 새로운 시장개척 • 국가 차원의 탄소 중립 목표 달성을 위한 에너지 정책의 핵심 수단으로 활용 • 국내 가스 및 전기그리드 활용 도심 청정 수소 에너지 공급 중심 기술로 활용

□ 사업 세부내용

- 청록수소 생산 기술 개발 및 실증설비 제작
 - 플라즈마-화학반응 기반 청록수소 및 탄소소재 동시 생산 공정 설계 및 실증설비 개발기술
- 고체탄소 고부가가치화 전환 기술 확보 및 응용부품 개발
 - 청록수소 경제성 확보를 위한 수소와 동시 생산되는 고체탄소 포집 고부가가치 전환 기술 개발 및 실증
- 도시 내 수소 공급을 위한 플랫폼 개발 및 Plant 구축 운영
 - 청록수소 공급 인프라를 위한 청록수소 플랜트 설계/시공기술 및 도시 플랫폼 구축기술 개발

중점분야	핵심기술	구성기술
① 청록수소 생산 기술 개발 및 실증설비 제작	1-1. 대용량 플라즈마 수소생산 시스템 개발	플라즈마 토치 시스템 개발
		플라즈마 기반 반응기 시스템 개발
	1-2. 청록수소 분리/정제 기술 개발	플라즈마 시스템 연계 수소 및 탄소 동시 생산 고효율 촉매 반응시스템 개발
		미화수 고체탄소의 기체/고체 분리기술 개발
	1-3. 대용량 청록수소 공급 실증설비 설계 및 제작	잔류 탄화수소 제어기술 개발
		요소기술별 핵심인자 및 Scale-up 설계인자 분석
대용량 청록수소 생산 핵심기술의 최적모델 설계		
② 고체탄소 고부가가치화 전환 기술 확보 및 응용부품 개발	2-1. 대량 고체탄소 회수 및 고성능화 기술 개발	실증설비 제작 및 연계공정 시운전 평가
		고체탄소 고성능화 기술 개발 및 연속처리공정 (300kg/day급) 실증
	2-2. 고체탄소 소재의 대규모 고부가가치 응용기술 개발	고체탄소 소재의 대규모 고부가가치화 응용 기술 개발
		고체탄소 고함량 Master-batch화 기술 개발
③ 도시 내 수소 공급을 위한 플랫폼 개발 및 Plant 구축 운영	3-1. 도시 수소 공급을 위한 디지털 플랫폼 및 성과 확산 로드맵 개발	ESD용 응용 부품 제조 및 실증
		DNA 및 AI 기반 수소 도시 인프라 구축 및 관리를 위한 디지털 플랫폼 기술 개발
	3-2. 청록수소 플랜트 안전 및 기술 표준화	청록수소 플랜트 전과정 평가 기반 성과 확산 DB 구축
		청록수소 플랜트 안전성 확보를 위한 공급 기술 표준화
	3-3. 청록수소 플랜트 구축 및 실증 운영	청록수소 플랜트 테크트리 및 설치기준 제도화
		국내 수소 수요처 Site 엔지니어링 및 실증플랜트 구축
		1MW 플라즈마 공정 기반 Plant 통합운영 및 최적 운영 절차 확보

4. 연구개발 추진방법

- 추진전략 ○ 수소도시 안정적 청록수소 공급을 위한 국산화 생산기술 연구와 실증 연구 병행
- (고체탄소 고부가 기술개발 병행으로 경제성 확보) 경제성 높은 청록수소 생산기술 개발을 통해 기존 수소 기술개발의 장기간·고위험의 불확실성을 해소하여 민간의 수소개발 투자·수용성 제고
 - (플라즈마 토치 기술 등 요소기술 국산화를 통한 해외 의존도 저감) 세계적 수준의 플라즈마토치 국산 기술확보로 신재생에너지시대 대외 경쟁력 확보
 - (수소시범도시 사업과 연계한 청록수소 실증 테스트베드 구축) 동 기술

개발 사업으로 구축한 테스트베드로 안정적인 청록수소 보급 인프라를 마련하여 국토부 수소시범도시 사업 추진시 안정적이고 경제적인 수소 공급체계로 연계

- (수소도시를 위한 수소공급 워킹그룹(가칭) 운영) 산·학·연 전문가 및 중앙정부·지자체가 참여하는 워킹그룹 운영을 통해 수소도시 대용량 수소 공급시스템 기술개발 효율성 제고

○ 실증 추진방안

- 기 선정된 수소시범도시 10곳 중 우선순위를 고려하여 1곳에 연계 추진
 - * 단, 수소시범도시로 선정되지 않은 지자체의 경우도 수소도시 추진의지를 고려하여 후보지로 고려
- 1기, 2기 시범도시 추진 시 노출된 다양한 문제점 보완 및 기술적 한계를 극복하고 청록수소 도시공급을 위한 표준모델 개발 및 실증이 목표
 - * 수소도시의 수소관망 구축·운영기술 개발 및 실증 사업(국토부)'과 연계를 통한 도시 공급 실증 추진

- 추진체계 ○ 3개의 중점기술 개발을 위해 산·학·연 협동 연구체계로 사업 추진
- (국토교통부) 총괄 부처로 사업 기본·시행계획 수립, 정책적 판단 및 의사결정
 - (국토교통과학기술진흥원) 사업 전담기관으로, 총괄적 사업관리 역할 담당과 기획평가운영위원회 구성 및 운영, 연구단 선정, 평가, 진도관리 등 수행
 - (추진위원회) 사업 세부시행계획, 주요 내용변경, 지원 우선순위 등 전문기관의 요청 사항에 대한 검토·심의·조정
 - (연구단) 동사업 수행을 총괄하고, 자체 진도관리, 성과 관리 및 사업화 지원, 세부 기술을 통합 구현하고 단계별 기술 검증 및 실증을 주도

 국토교통부  KAIA 국토교통과학기술진흥원 사업추진단 플랜트건설/운영기술및도시수소에너지공급기술 • 플랜트 실증 지원 • 산업도시 운영 및 공급 지원 사업운영관리 R&D총괄 청록수소 생산 기술 개발 및 실증 고체탄소 포집 및 전환기술 도시 내 수소 공급 플랫폼 개발 및 Plant 구축	
5. 최종 연구개발성과물	
○ 중점과제 1 - 대용량 플라즈마 수소생산 시스템 개발 - 청록수소 분리/정제 기술 개발 - 대용량 청록수소 공급 실증설비 설계 및 제작 ○ 중점과제 2 - 고체탄소 고부가가치 전환 및 연속처리 공정 실증 - 고체탄소 적용 응용부품 실증 ○ 중점과제 3 - 청록수소 플랜트 기술 표준화 - 도시에 따른 탄소 추적 기술 개발 및 데이터베이스 구축 - 도시내 수소 공급 및 활용 디지털 플랫폼 개발 - 청록수소 플랜트 구축 및 실증 운영	
6. 활용방안 및 기대효과	
☐ 활용방안 ○ 청정수소 생산을 통해 정부·지자체의 정책목표달성과 수소생산 및 탄소소재 관련 다양한 이해관계자와 R&D 성과 사용화 및 사업화 가능 - 그린수소의 경제성 확보 기술 확보전까지 대용량 수소 생산 방식을 대체	

- 이산화탄소 발생이 없어 유럽 등의 수출규제에 대한 대응 기술로 활용
- 탄소의 고부가 가치 상품화를 통한 새로운 시장개척
- 국가 차원의 탄소 중립 목표 달성을 위한 에너지 정책의 핵심 수단으로 활용
- 수소도시 실현을 위한 현식적 청정수소 생산기술 확보

- 수요처/활용처 : 정부/지자체, 수소생산 및 탄소 소재·부품 기업
 - (정부/지자체) CO₂ 배출 저감을 통해 탄소중립에 기여함으로써 정부·지자체 및 국민에 간접적인 수혜 효과 발생
 - * 연구단 성과에 대한 통합 open DB화 활용을 통해 수소 산업 생태계 구성을 위한 지자체 등 연계성 강화 가능
 - (기업) 개발된 기술의 이전 또는 도입으로 탄소 소재·부품 기업에 직접적인 연구 효과 창출
 - * 카본블랙 업체(OCI, 현대OCI, 카본블랙코리아 등) 및 이를 활용한 전도성 플라스틱 업체(영진테크, 성호폴리텍, 에코폴리텍 등)가 직접적인 수혜자이며, 이를 활용한 부품기업인 전기·전자·디스플레이 등 다양한 분야의 관련 기업이 간접적 수혜자로 예상

☐ 기대효과

- 경제·사회적 기대효과
 - 고효율 플라즈마 시스템 개발을 통해 청록수소 생산비용 절감하고 수소 공급 비용 절감 기대
 - 청록수소 생산플랜트 표준설비의 적용분야 확대를 통해 신시장 창출
 - CO₂가 배출되지 않는 청정수소 생산 및 수소도시 공급을 통해 탄소중립도시 실현에 기여
- 과학·기술적 기대효과
 - 고온 플라즈마 기술(출력 증가, 수명연장 등) 국산화를 통해 소재공정 사업, 폐기물 열분해 처리사업 등 타 분야에 확대·적용 가능
 - 탄소소재도 생산 가능한 기술이며 그린수소의 경제성 기술 확보전까지 대용량 수소 생산 방식을 대체

7. 연구개발기간 및 연구개발비

- ☐ 총 연구개발기간 : 2025.04.~2029.12.

□ 총 정부지원연구개발비 : 290억원

○ 1년차 정부지원연구개발비 : 3,650백만원 이내

- ※ 정부지원연구개발비는 선정평가 결과 또는 정부예산사정 등에 따라 조정될 수 있음
- ※ 영리기관 참여시 기관부담연구개발비는 연차별로 「국가연구개발혁신법 시행령」 [별표 1]을 따르되, 추가 부담 가능

8. 기 타

- 본 과제의 보안등급은 “일반 과제”임
- 연구개발계획서는 과제제안요구서(RFP)에 제시된 연구내용을 참고하여 작성하되, 연구개발목표 달성을 위해 반드시 필요하다고 판단되는 경우에는 일부 연구개발내용을 가감할 수 있으나, 그 사유와 근거를 명확히 제시하여야 함
- 필요시 공모된 연구개발과제명 외에 연구개발목표·내용에 대한 대표성을 가지고 타 연구과제와 차별화되면서 알기 쉬운 연구개발과제명으로 수정하여 제안할 수 있음
- 기 수행하였거나 현재 수행 중인 유사 연구개발과제와 연구개발내용이 중복되지 않도록 연구개발계획서를 작성하여야 함
 - ※ www.kaia.re.kr, <http://www.ntis.go.kr>의 유사과제목록 참조
 - 공모과제와 관련하여 기 수행되었거나 현재 수행중인 연구개발과제의 결과물과의 구체적인 연계·통합 및 활용방안을 연구개발계획에 포함
 - 제안된 연구개발내용이 타 유사 연구개발과제와 연구개발방법이나 목표 등에서 차별화되는 경우에는 포함하여도 무방하되, 그 근거를 명확히 해야 함
 - ※ 연구개발 수행 도중 과제의 중복성이 사후에 발견되거나 연구개발목표가 다른 연구개발에 의하여 성취되어 연구개발을 계속할 필요성이 없어진 때에는 협약을 해약할 수 있음
- 연구 착수시점 현황과 개발종료 후의 대비가 가능하도록 세부과제별로 As-Is와 To-Be를 구체화·가시화하여 제시
- 연구개발계획서에 구성기술 간 연구내용 및 성과의 연계/활용을 위한 전략 제시
 - 기획보고서에서 제시한 기술개발 TRM을 기반으로 전체 개발기술과 성과물간의 유기적 연계를 파악할 수 있는 체계 제시
 - ※ (예시) 개발기술 상호간, 성과물 상호간, 개발기술-성과물간 연계성
 - 과학기술적 성과물을 포함하여 최종성과물을 구체화하여 제시
- 연구신청자는 연구개발 성과목표(성과지표/달성목표치/가중치) 및 연구개발일정과 이에 대한 관리계획 등을 연구개발계획서에 제시
 - 개발된 기술 및 성과물의 목표수준 달성도를 확인할 수 있는 구체적 방안을 제시해야 함

- ※ 연구개발과제선정 후 진도점검·관리 및 성과평가 등의 근거자료로 활용
 - 제시한 성과지표는 사전검토, 선정평가를 통해 조정(추가) 가능
- 국제공동연구 또는 전문가 활용방안
 - 필요시 관련 기술 해외 선도기관과의 공동연구 추진방안 및 전문가 활용계획을 연구계획에 포함
- 추후 연구개발계획 등은 수정·보완될 수 있으며, 이에 따라 연구개발과제 내 특정 기술개발에 대한 추진방식 등이 변경될 수 있음
 - 본 과제의 연구개발기간은 추후 협약 시 변경될 수 있음
 - 전문기관은 필요시 선정된 주관연구개발기관(연구책임자)과 협의를 거쳐 연구개발계획서를 수정·보완(연구목표, 내용 및 범위 등을 구체화·명확화)할 수 있음
 - 연구추진과정에서 관련기술 환경변화에 따라 연구내용(연구비 포함)이 조정될 수 있음
- 추진할 과제의 기술성숙도(TRL) 범위를 설정 및 제안하고 전문기관 및 연구개발과제 컨소시엄과 협의하여 확정
- 국토교통과학기술 연구개발사업의 성과로 구축된 12개 대형 실험시설 적극 활용

주 의

1. 이 보고서는 국토교통부에서 시행한 국토교통연구기획사업의 대용량 청록수소 공급 시스템 기술개발 기획과제 최종보고서이다.
2. 이 연구개발내용을 대외적으로 발표할 때에는 반드시 국토교통부(국토교통과학기술진흥원)에서 시행한 국토교통연구기획사업의 결과임을 밝혀야 한다.
3. 국가과학기술 기밀 유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안 된다.