시점확인
미검증
2024/08/14
11:00:23
KST
정부시점확인센터

과제번호

RS-2023-00279503

핵융합에너지 장기 연구개발 로드맵 수립 기획연구

A study on the establishment of long-term R&D roadmap for Fusion Energy

연구기관 : 한국핵융합에너지연구원
연구책임자 : 정 현 경

2024.06.30

과 학 기 술 정 보 통 신 부

안 내 문

본 연구보고서에 기재된 내용들은 연구책임자의 개인적 견해이며 과학기술정보통신부의 공식견해가 아님을 알려드립니다.

과학기술정보통신부 장관 이 종 호

제 출 문

과 학 기 술 정 보 통 신 부 장 관 귀하

본 보고서를 “ 핵융합에너지 장기 연구개발 로드맵 수립 기획연구 "의 최종보고서로 제출합니다.

2024 . 06 . 30 .

연구기관명 : 한국핵융합에너지연구원
연구책임자 : 정 현 경
연 구 원 : 최 원 재
연 구 원 : 이 은 상
연 구 원 : 도 현 수
연 구 원 : 조 아 라
연 구 원 : 권 순 원
연 구 원 : 안 무 영
연 구 원 : 장 민 호
연 구 원 : 권 성 진
연 구 원 : 권 재 민
연 구 원 : 왕 선 정
연 구 원 : 오 상 준
연 구 원 : 문 성 보

요 약 문

과제번호	RS-2023-00279503		연구기간	2023년 06월 01일 ~ 2024년 06월 30일	
과제명	(한글) 핵융합에너지 장기 연구개발 로드맵 수립 기획연구 (영문) A study on the establishment of long-term R&D roadmap for Fusion Energy				
연구책임자 (주관연구기관)	정 현 경 (한국핵융합에너지연구원)	참 여 연구원수	총 13명	연구비	100,000천원

요약

o (연구목표) 핵융합 전력생산 실증에 필요한 핵심기술의 체계적 연구개발 추진을 위한 장기 연구개발 로드맵 수립

o (연구내용) 핵융합 전력생산 실증로 핵심기술 개발을 위한 우리나라의 장기 연구개발 로드맵 수립

– (국내외 동향 분석) 국내외 핵융합 정책, 기술, 산업·인력 현황, 등 최근 환경변화 분석 및 추진방향 시사점 도출

– (연구개발 로드맵 수립) 핵융합 전력생산 실증로 핵심기술 확보를 위한 8대 핵심기술* 기준 로드맵 수립

* 8대 핵심기술 : 노심플라즈마, 증식블랑켓, 핵융합 소재, 연료주기, 디버터, 가열 및 전류구동, 초전도 자석, 안전·인허가

– (추진전략 마련) 핵융합 실증로 핵심기술 확보전략 및 기반역량 강화를 위한 추진전략, 실천과제 마련

※ (전략1) 단계적 핵심기술 확보, (전략2) 선도적 제도기반 구축, (전략3) 견실한 생태계 구축, (전략4) 전략적 이행체계 강화

o (연구방법) 다양한 산·학·연 전문가 위원회 구성·운영을 통한 로드맵 전문성 제고

– (전문가 위원회) 정부·민간 공동위원장 下 총괄위원회 및 기술, 설계·안전, 전략 분과위원회 구성을 통해 로드맵 수립 추진

※ 관련 산학연 전문가 70여명 참여

o (기대효과) 핵융합 장기 연구개발 로드맵 수립 및 체계적 이행을 통해 핵심기술 확보

– 핵융합 전력생산 실증로 핵심기술 개발의 장기적 기준과 추진체계 마련으로 향후 발생하는 환경변화에 유연한 대응과 효율적 이행 추진

비공개 사유	해당사항 없음	비공개 기간	해당사항 없음

목차

1. 개요 ····· 1
(1) 추진 배경 ····· 1
(2) 연구 목표 ····· 3
(3) 추진 체계 ····· 4
(4) 추진 경과 ····· 7

2. 국내외 동향 ····· 9
(1) 해외 핵융합에너지 개발 동향 ····· 9
(2) 국내 핵융합에너지 개발 여건 ····· 58
(3) 핵융합 환경변화 시사점 ····· 78

3. 핵융합 핵심기술 장기 연구개발 로드맵 수립 ····· 80
(1) 로드맵 기본 방향 ····· 80
(2) 설계·인허가 로드맵 ····· 84
(3) 핵융합 핵심기술 로드맵 ····· 87

4. 로드맵 이행 장·단기 추진전략 ····· 243
(1) 핵심기술 확보 전략수립 기본 방향 ····· 243
(2) 단계적 핵심기술 확보 ····· 251
(3) 선도적 제도기반 구축 ····· 256
(4) 견실한 생태계 구축 ····· 258
(5) 전략적 이행체계 강화 ····· 261

5. 결론 ····· 264
(1) 기대효과 및 활용방안 ····· 264
(2) 한계점 및 후속연구 방향 ····· 265

[참고자료] ····· 266
[약어설명] ····· 267

1. 개요

(1) 추진 배경

○ 세계적인 기후변화와 미래 높은 전력수요 대응을 위해서 세계 선진국은 핵융합 에너지를 차세대 에너지원으로 주목

– 핵융합에너지는 연료의 무한함, 저탄소, 고준위 방사선폐기물 및 폭발위험 無 등 특징으로 전통 에너지와 기존 신재생에너지의 한계점을 극복할 수 있는 미래 에너지원으로 주목

– 특히, 전 산업의 AI, 디지털화로 미래 사회는 전력수요가 급증할 전망이며, IT 데이터 센터 등 도심 근접에서 대량의 안정적인 전력을 공급할 수 있는 에너지원이 요구되는 상황

※ 전 세계 데이터 센터의 전력 소비는 '22년 460TWh에서 '26년 1000TWh 이상 급증할 전망이며 이는 일본의 한해 전력소비량과 같은 수치(IEA, '24)

※ 미국 투자은행 Well Fargo의 전망에 따르면, 인공지능 등 데이터 센터의 영향으로 2030년까지 미국의 전체 전력수요가 20% 상승(323TWh)할 전망(Well Fargo, '24)

○ 세계 주요 국가는 기후변화에 따른 2050 탄소중립 달성의 수단으로 핵융합에너지를 주목하고 있으며, 특히 민간 스타트업이 급증하며 공격적인 전력생산 일정 가속화 움직임

– ITER 공동개발 참여국인 핵융합에너지 개발 주요 국가는 기존 50년대 핵융합 전력생산 실증에서, 30~40년대 전력생산을 위한 가속화를 추진 중

• EU는 ITER와 DEMO(실증로)의 병행개발을 통해 전력생산 일정 가속화를 논의중이며, 일본은 핵융합 혁신전략('24.3월) 수립을 통해 산업 협력을 통한 실증로 건설 결정 시점을 단축(30년대 중반), 중국은 독자적인 경로를 토대로 CFETR 건설을 통해 2040년대 전력생산 목표 달성 계획

• 최근 영국, 미국은 ITER 일정과 관계없이 독자적인 핵융합 파일럿 플랜트 건설을 통해 2030년대 후반 ~ 2040년대 핵융합에너지 전력생산 실현을 계획

– 특히, 최근 5년간 민간 스타트업이 핵융합에너지 실현 경쟁에 뛰어들며, 막대한 투자를 바탕으로 다양한 개념의 핵융합 장치 개발을 통한 전력생산 가속화 목표 수립

• 해외 스타트업 기업 수는 '23년 기준 약 43개가 운영 중이며, 누적투자 8조 원 이상의 거대한 투자를 유치

• 특히, CFS, General Fusion, Helion Energy 등 민간 스타트업은 독자적인 핵융합 장치 개발을 통해 20년대 후반 ~ 30년대 전력생산을 실현하겠다는 과감한 목표 설정

○ 최근 급격한 핵융합에너지 개발의 환경 변화 속에서 한국의 고유 강점을 기반으로 장기적인 관점에서의 연구개발 경로와 기반 조성 전략 수립의 중요성 제고

– (장기 연구개발 기준) 핵융합 장기 연구개발 로드맵은 단계적인 계획 수립을 통해 한국의 핵융합에너지 개발 기준(baseline)을 마련

※ 단계적 계획수립 : ('21.12월) 제4차 기본계획 핵심기술 확보 장기 일정 수립→('23.2월) 핵융합 전력생산 실증로 기본개념 확정→('24.上) 핵융합 장기 연구개발 로드맵 수립

• 핵융합 장기 연구개발 로드맵 수립은 '장기 연구일정(제4차 기본계획)'의 구체화와 '장기 목표(기본개념)'의 효율적 달성을 위한 경로 설정 목표

• 핵융합 8대 핵심기술 확보를 위한 단계적 세부 목표와 핵심기술별 전략적 확보 방향 수립을 통해 체계적 연구개발 추진의 기준으로 활용 필요

– (연동계획 수립) 장기적으로 추진되는 핵융합 개발의 특성을 반영하여 환경변화의 유연한 대응을 위해 연동계획(Rolling-wave plan)으로 수립 필요

• 로드맵 이행에 따른 8대 핵심기술 연구개발의 결과와 핵융합 전력생산 실증로 설계활동(설계 TF)의 상호 연계·반영

• 기본계획의 5년주기 이행점검(제4차 기본계획)과 연계하여 로드맵 마일스톤 달성 여부, 설계 결과 등 추진현황을 점검하고 차기 단계의 이행 여부·방향을 결정

※ 급격한 환경변화에 따라 계획수립의 변경이 필요한 경우, 국가핵융합위원회 심의를 통해 변경·반영

– (안정적 추진 기반 마련) 핵융합에너지의 안정적인 연구개발 환경(법·제도, 산업, 인력 등) 조성을 위한 추진전략 마련 필요

• 장기적으로 추진되는 핵융합에너지 연구개발의 안정적인 추진을 위한 분야별 세부 추진 전략 마련으로 '핵융합 전력생산 실증로 개발' 목표 달성 기여

(2) 연구 목표

○ (연구 목표) 핵융합 전력생산 실증에 필요한 핵심기술의 체계적 연구개발 추진을 위한 장기 연구개발 로드맵 수립

– (세부 내용) 핵융합 전력생산 실증로 핵심기술 확보를 위한 연구개발, 시설장비, 기반조성 관련 주요 일정, 마일스톤, 추진전략 마련

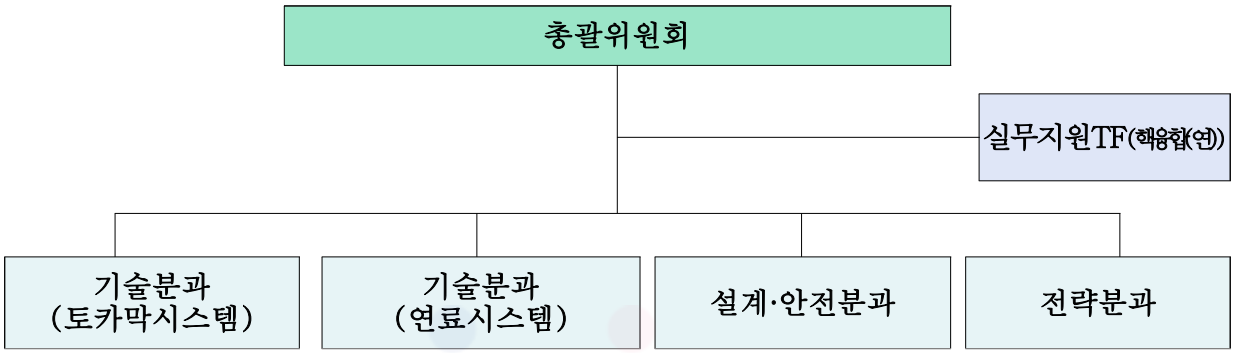
연구 목표	세부 연구목표
1 핵융합에너지 국내외 환경 및 주요국 연구개발 동향 분석	① 국내외 핵융합 정책, 기술, 산업·인력 현황, 등 최근 환경변화 분석
	② 핵융합에너지 개발 환경변화에 따른 추진방향 시사점 도출
2 핵융합 핵심기술 장기 연구개발 로드맵 수립	① 핵융합 전력생산 실증로 설계·인허가 로드맵 수립 * 설계 단계별 주요 일정, 마일스톤, 인허가 요건 등 목표 설정 및 기술로드맵 반영
	② 핵융합 전력생산 실증로 핵심기술* 중심 장기 연구개발 및 연구시설장비 로드맵 수립 * 노심 플라즈마, 증식블랑켓, 연료주기, 핵융합 소재, 디버터, 가열 및 전류구동 장치, 초전도자석, 안전·인허가 ※ 목표, 마일스톤, 성과지표, 개발일정, 소요예산 및 인력 등
3 핵융합 핵심기술 개발 로드맵 이행을 위한 장·단기 추진전략 마련	① 종합적 국내외 환경변화, 기술확보 수준 등을 고려한 핵융합 핵심기술 확보전략 마련
	② 핵융합 전력생산 실증로 개발 목표 달성 및 기반조성을 위한 추진전략 마련 ※ 핵융합 전력생산 실증로 경제성·안전성 달성 목표, 추진체계, 산업생태계, 인력양성 등 기반조성 목표

(3) 추진 체계

○ 정부(과기정통부 거대공공연구정책관)·민간 공동위원장 下 총괄위원회(10인 내외) 및 기술·정책 분과위원회로 구성된 기획위원회 운영

– (총괄위원회) 소관 국장 및 민간 전문가 1인을 공동 위원장으로 하고, 분과위원장 4인, 핵융합전문가를 포함하여 총 14명으로 구성

– (전문가위원회) 토카막 및 연료시스템 기술분과 2개, 설계·안전분과, 전략분과로 구성(각 분과별 10명)



총괄위원회		▹ (위원장) 과기정통부 거대공공연구정책관, 민간 위원장(2명) ▹ (위원) 분과별 전문가위원회 위원장(4명), 핵융합 전문가(4명) * 간사 : 핵융합연 정현경 정책전략부장(로드맵 기획과제 과제책임자) ▹ (역할) 기획연구 진행상황 점검, 분과간 조정 등 전체 총괄
전문가 위원회	기술	▹ (구성) 토카막시스템, 연료시스템 분과로 구분, 분과별 산 · 학 · 연 전문가 각 10명 내외로 구성 ▹ (역할) 8대 핵심기술별 환경, 기반현황 분석 및 로드맵 수립, 소요 연구시설, 인력·예산 소요 도출
	설계·안전	▹ (구성) 기술 및 설계전문가 총 10명 내외로 구성 (설계·인허가, 법제도 관련 전문가 구성) ▹ (역할) 실증로 설계·인허가 일정 검토, 안전·인허가 환경, 기반현황 분석 및 로드맵 수립, 인력·예산 도출
	전략	▹ (구성) 정책, 특허, 실증 관련 전문가 약 10명 내외로 구성 ▹ (역할) 종합적 환경기술정책 분석을 통해 핵융합 장기 연구개발 로드맵의 추진 전략 및 실천과제 도출
실무지원TF (핵융합연)		▹ (구성) 핵융합(연) 실무지원TF 구성 ▹ (역할) 국내외 환경분석, 전문가 위원회 간사, 최종보고서 작성 등 실무지원 총괄

○ 기획위원회 참여 전문가 리스트(약 60여명)

번호	위원회	역할	성명	구분	소속	직위/직책
1	총괄	총괄위원장	홍○근	학	전북대학교	교수
2	총괄	분과위원장	강○선	학	건양대학교	교수
3	총괄	분과위원장	황○석	학	서울대학교	교수
4	총괄	분과위원장	조○연	연	한국핵융합에너지연구원	본부장
5	총괄	분과위원장	진○은	학	연세대학교	객원교수
6	총괄	위원	유○재	연	한국핵융합에너지연구원	원장
7	총괄	위원	최○호	학	한국과학기술원	교수
8	총괄	위원	권○	연	IBS 중이온가속기연구소	전문위원
9	총괄	위원	정○정	연	한국핵융합에너지연구원	사업단장
10	총괄	위원	이○재	연	한국과학기술기획평가원	명예연구위원
11	총괄	위원	오○호	산	한국수력원자력㈜	기술혁신처장
12	총괄	위원	장○선	연	한국연구재단	단장
13	전략	전략분과위원장	강○선	학	건양대학교	교수
14	전략	위원	전○오	연	IBS 중이온가속기연구소	책임연구원
15	전략	위원	장○석	연	과학기술정책연구원	선임연구위원
16	전략	위원	신○정	연	에너지경제연구원	부연구위원
17	전략	위원	정○경	연	한국핵융합에너지연구원	정책전략부장
18	전략	위원	김○우	산	무한IPC	대표변리사
19	전략	위원	김○주	연	한국기초과학지원연구원	장비정책팀장
20	전략	위원	김○수	산	한국전력공사	선임
21	전략	위원	박○영	연	경제사회연구원	기술정책센터장
22	설계안전	설계안전분과위원장	진○은	학	연세대학교	객원교수
23	설계안전	위원	방○신	산	KEPCO E&C	부장
24	설계안전	위원	김○헌	산	한국수력원자력㈜ 중앙연구원	연구총괄부장
25	설계안전	위원	최○호	연	한국핵융합에너지연구원	책임
26	설계안전	위원	김○석	학	서울과학기술대학교	교수
27	설계안전	위원	정○동	학	㈜마이크로우라너스	책임연구원
28	설계안전	위원	이○곤	연	한국핵융합에너지연구원	본부장
29	설계안전	위원	허○일	연	한국핵융합에너지연구원	부장

번호	위원회	역할	성명	구분	소속	직위/직책
30	설계안전	위원	박○민	연	한국핵융합에너지연구원	박사
31	설계안전	위원	문○현	학	단국대학교	교수
32	설계안전	위원	김○환	산	㈜ 비즈	기술고문
33	연료시스템	연료시스템분과위원장	조○연	연	한국핵융합에너지연구원	본부장
34	연료시스템	위원	이○원	연	한국원자력연구원	부장
35	연료시스템	위원	안○영	연	한국핵융합에너지연구원	부장
36	연료시스템	위원	윤○수	학	가천대학교	교수
37	연료시스템	위원	박○현	연	한국핵융합에너지연구원	팀장
38	연료시스템	위원	정○찬	산	DIG 에어가스㈜	팀장
39	연료시스템	위원	장○호	연	한국핵융합에너지연구원	팀장
40	연료시스템	위원	조○진	학	POSTECH	교수
41	연료시스템	위원	권○진	연	한국핵융합에너지연구원	팀장
42	연료시스템	위원	조○희	학	연세대학교	교수
43	토카막시스템	토카막시스템분과위원장	황○석	학	서울대학교	교수
44	토카막시스템	위원	윤○수	학	포항공과대학교 물리학과	교수
45	토카막시스템	위원	김○철	학	한국과학기술원	교수
46	토카막시스템	위원	최○미	학	울산과학기술원	교수
47	토카막시스템	위원	배○순	산	㈜다원메닥스	상무
48	토카막시스템	위원	임○수	학	한국에너지공과대학교	교수
49	토카막시스템	위원	한○용	학	서울대학교	교수
50	토카막시스템	위원	윤○우	연	한국핵융합에너지연구원	부원장
51	토카막시스템	위원	권○민	연	한국핵융합에너지연구원	부장
52	토카막시스템	위원	왕○정	연	한국핵융합에너지연구원	팀장
53	토카막시스템	위원	오○준	연	한국핵융합에너지연구원	팀장
54	실무지원 TF	총괄위 간사	정○경	연	한국핵융합에너지연구원	부장
55	실무지원 TF	전략위 간사	최○재	연	한국핵융합에너지연구원	팀장
56	실무지원 TF	연료시스템위 간사	이○상	연	한국핵융합에너지연구원	담당
57	실무지원 TF	토카막시스템위 간사	도○수	연	한국핵융합에너지연구원	담당
58	실무지원 TF	설계안전위 간사	조○라	연	한국핵융합에너지연구원	담당
59	실무지원 TF	총괄 실무지원	권○원	연	한국핵융합에너지연구원	담당

(4) 추진 경과

□ 핵융합 장기 연구개발 로드맵 수립 위원회 개최 및 전략 마련

※ 선행연구(핵융합에너지 핵심기술 개발을 위한 기술분류체계 수립 기획연구)와 연계하여, 핵융합 장기 연구개발 로드맵(안) 마련을 위한 위원회 개최 운영

○ 제5차 전략분과위원회 개최 ’23.07.04

– 해외 핵융합 정책동향 및 기술보고서 초안 검토 및 의견수렴

○ 제4차 토카막시스템 기술분과위원회 개최 ’23.07.20

– 토카막시스템 기술보고서 초안 검토 및 의견수렴

○ 제6차 전략분과위원회 개최 ’23.08.07

– 핵융합 로드맵 종합조정 기준 및 방안(안) 의견수렴

○ 로드맵 분과위원장 회의 ’23.08.11

– 제2차 총괄위원회 보고자료 검토 및 의견수렴

○ 제2차 총괄위원회 개최 ’23.08.17

– 핵융합 로드맵 수립 중간보고 및 의견수렴

○ 핵심기술 로드맵 종합조정기준 마련 ’23.08.18

– 핵융합 로드맵 종합조정기준 마련 및 추가요청자료 작성

○ 제7차 전략분과위원회 개최 ’23.09.01

– 기술보고서 전략분과 서면검토 의견수렴

○ 핵융합 기술보고서 인터뷰

– 8대 핵심기술별 전략분과 기술보고서 인터뷰(8회) ’23.09.15~’23.10.17

○ 제5차 토카막시스템 기술분과위원회 개최 ’23.09.20

– 핵심기술별 전략방향(전략분과 작성) 초안 검토 및 의견수렴

○ 제4차 연료시스템 기술분과위원회 개최 ’23.11.07

– 핵심기술별 전략방향(전략분과 작성) 초안 검토 및 의견수렴

○ 핵융합 로드맵 전략방향(안) 마련

– 8대 핵심기술별 장단기 전략방향(안) 마련 ’23.11.16

○ 제6차 토카막시스템 기술분과위원회 개최 ’23.11.17

– 2차 핵심기술별 전략방향(전략분과 작성) 초안 검토 및 의견수렴

○ 핵융합 장기 연구개발 로드맵(안) 마련

– 추진 전략 및 실천과제 작성·검토(7회) ’23.11.22~’24.02.20

○ 제8차 전략분과위원회 개최 ’24.03.22

– 핵융합 장기 연구개발 로드맵 전략 및 실천과제 서면검토

○ 로드맵 분과위원장 회의 ’24.03.18

– 제3차 총괄위원회 보고자료 검토 및 의견수렴

○ 제3차 총괄위원회 개최 ’24.04.23

– 핵융합 장기 연구개발 로드맵(안) 검토 및 의견수렴

2. 국내외 동향

(1) 해외 핵융합 연구개발 동향

① 정책 동향

◆ 해외 주요 국가들은 핵융합에너지의 2050 탄소중립 기여를 위한 전력생산 실증 가속화 목표를 수립하고, 장기적 실행전략 수립

□ **(핵융합 탄소중립 기여)** 주요국은 2050 탄소중립 기여와 장기적 에너지 안보 확립을 위해 핵융합에너지(전력생산) 활용을 기대

○ (영국) 녹색산업혁명 10대계획 핵융합 플랜트 반영, (일본) 청정에너지전략, 에너지기본계획 핵융합 연구개발 반영, (미국) 2050 넷제로 달성을 위한 게임체인저 기술 인식

□ **(핵융합 전력생산 실증 가속화)** 핵융합에너지의 2050 탄소중립 기여를 위해 주요 국가들은 핵융합 전력생산 실증 일정 가속화* 추진

* (기존) 2050년대 전력생산 → (가속화) 2030~40년대 전력생산

○ (미국) 개념 및 예비설계('21~'28년) → 최종 설계 및 건설('28~'32년) → 운전 착수('32~'35년) → 1단계 운전('35~'40년) → 2단계 운전('40~'45년)

○ (영국) 개념설계(~24.3월)* → 상세설계 및 본공사 준비('24.4월~'32년) → 본공사('31년~'40년) → 시운전 및 운전('39년~)

○ (일본) 예비개념설계(~'20년경)* → 개념설계('20년~'25년) → 공학설계 및 full-scale 기술 개발('25~'32년) → 제조 설계('32~'35년) → 건설('35~'45년) → 운전('45년~)

○ (EU) 개념설계('20년대)* → 공학설계('30년대) → ITER 플라즈마 운전·기술 최적화 및 DEMO 건설('40년대)→ 운전('50년대)(가속화 로드맵 개정 중)

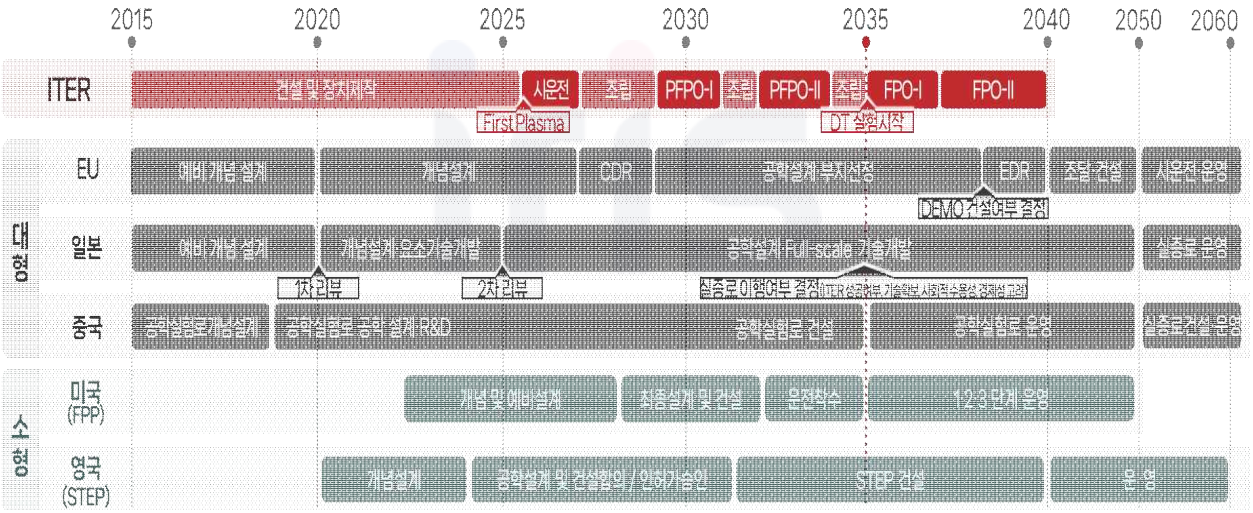
○ (중국) EAST 등 자국 토카막 장치 활용 핵융합연구(1단계, '15~) → ITER 사업참여 및 실험결과 반영(2단계, '25~) → CFETR 완공 및 핵심요소기술 실험(3단계, '30~'40s) → 핵융합 프로토타입 발전소(PFPP) 건설 추진(4단계, '50~)

※ CFETR 단계 목표 : (1단계) CFETR 안정적 운영 및 삼중수소 자가증식을 통해 Q=1~5, 200MW 달성, (2단계) 상용화 가능한 핵융합 발전을 위해 Q>10, 1GW 이상 달성

※ 핵융합 전력생산 실증 가속화를 위해 CFETR 이외의 BEST(D-T 토카막) 건설 착수('24, 약 1.5조원 투입)

○ (독일) 연구개발(30년대) → 프로토타입 건설(30~40년대 초) → 핵융합 발전소 운영('40년대)

(미국)	• (목표) '30년대 전력생산 실현 • 민관협력 기반 핵융합 전력생산 소형 파일럿플랜트 건설(`30s) 지원	(영국)	• (목표) '40년대 전력생산 실현 • STEP(구형토카막) 건설 계획 발표 및 개념설계(2.2억 파운드) 추진
(일본)	• (목표) '40년대 후반 전력생산 실현 • '국가 핵융합에너지혁신전략(안)' 마련('23.04), '통합혁신전략 2023' 각의 결정으로 실증 가속화 추진('23.06)	(중국)	• (목표) '40년대 전력생산 실현 • ITER 건설과 별개로 CFETR, BEST(1.5조원) 건설 단독 추진
(EU)	• (목표) '50년대 전력생산 실현(가속화 예정) • 핵융합 실증로 연구와 ITER의 병행개발을 통해 전력생산 가속화 추진(예정)	(독일)	• (목표) '40년대 전력생산 실현 • 전력망에 공급 가능한 핵융합 파일럿 플랜트 건설 목표 수립

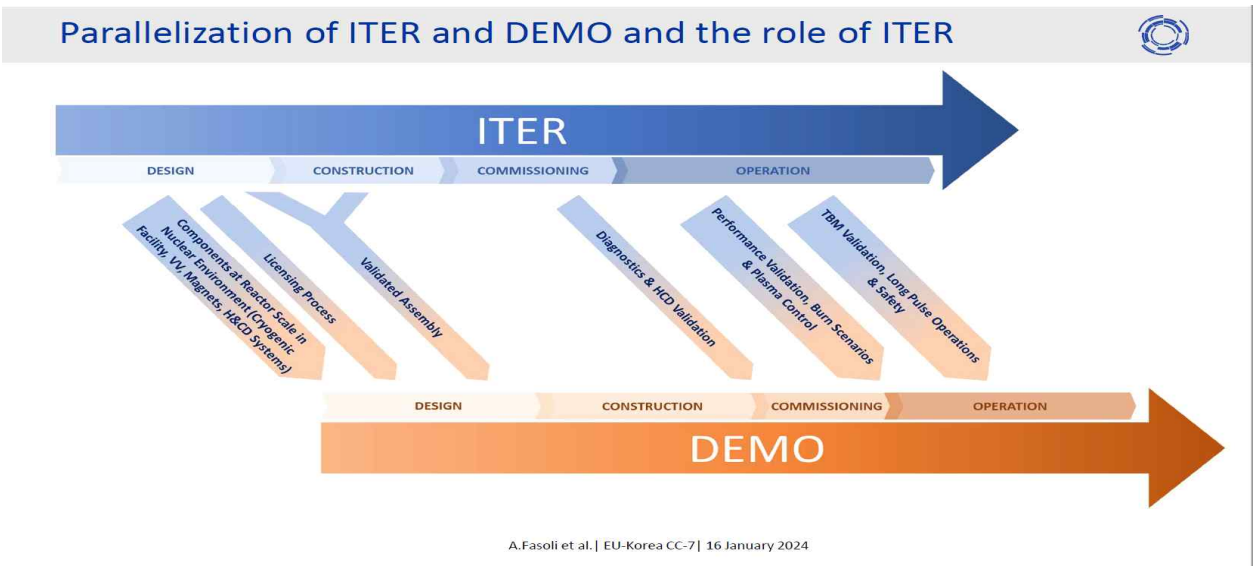


< 국가별 핵융합에너지 전력생산 실증 로드맵 >

□ **(ITER 일정 영향 최소화)** ITER 국제핵융합실험로 건설의 일정 지연이 예상됨에 따른 주요 국가별 실증로 개발 전략* 변화

* 기존 연속적인 실증로 개발(자국실험로→ ITER → 실증로)에서, 실증로와 ITER의 병렬적 개발(EU, 일본, 중국), 혹은 ITER의 의존성 저감(미국, 영국) 노력 지속 추진

○ (EU) ITER 일정 지연이 예상됨에 따라, 전력생산 실증 가속화를 위해 ITER와 DEMO의 병렬화 추진



< ITER-DEMO의 병렬적 개발 >

※ 출처 : The European path towards fusion electricity, 한-EU 양자회의, '24.1월

- 현 로드맵은 JET-ITER-DEMO의 순차성(sequential)을 기반으로 각각이 연계되어 있으며, 일정 지연은 ITER뿐 아니라 JT-60SA, IFMIF-DONES, DTT에 영향을 미침
- 이에, ITER 사업의 각 단계별로부터 얻은 경험과 교훈을 로드맵에 반영하여 DEMO 프로그램의 가속화 필요

< DEMO 프로그램 가속화 방안 >

a. ITER 마일스톤과 DEMO 의사결정 지점 간의 순차적 결합(sequential coupling)을 약화시킬 수 있는 활동 병렬 추진

b. 규명된 갭 분야에서의 R&D 강화

c. 플라즈마 및 엔지니어링을 위해 시뮬레이션 분야에 대한 노력 증가

d. 상호 도움을 주는 새로운 국제 협력

e. 충분한 인력 개발 및 유지

f. 지식 관리

g. 인허가가 간소화된 핵융합 규제 프레임워크 및 부지 식별(identifying)

h. DEMO 설계 및 건설에서의 산업체 참여(공공-민간 파트너쉽)

※ 출처 : The European path towards fusion electricity, 한-EU 양자회의, '24.1월

< DEMO까지의 기술격차(Gap) >

구분	기술 격차(Gap)
삼중수소 및 블랑켓 기술	• TBM 프로그램이 지연되고 있으며, <0.1dpa의 예상 damage dose로는 의미있는 결과값(effect) 도출이 어려움
. IFMIF-DONES	• 작은 샘플을 활용한 재료 분석을 위해, 충분한 중성자 스펙트럼과 조사량(fluence)을 활용할 수 있는 유일한 시설일 될 것으로 예상 • 여기에 더해 DEMO의 위험성 저감을 위해 거대 부품을 테스트할 수 있는 Volumetric 14 MeV 중성자원에 대한 기술적, 정치적 타당성 검토 중
재료	• FPP의 경제성 확보에 필요한 > 20dpa에서의 재료 분석(qualify) 필요 • 이와 병행하여, 산업체의 제조 및 가공, 접합, 생산 공정의 성숙도(maturity) 및 견고성(robustness) 제고 필요 • 30년대 초경에 IFMIF-DONES 운전을 통해, FPP의 설계 및 인허가, 건설, 안전성 확보에 필요한 충분한 neutron spectrum irradiation 하에서의 재료 분석 가능
열배출	• 새로운 대안 디버터(alternatives)의 경우 장치 설계 및 원격 유지보수에 큰 영향을 미침
통합 플라즈마 시나리오	• 개별 요소(core, edge, exhaust)의 의미있는 해결책들이 제시되고 있으나, 각 요소에 대한 통합은 여전히 난제임
안전성 및 폐기물	• 중요 radiological source에 대한 보다 정확한 정량화 • 운전으로 발생하는 폐기물이 저준위폐기물 기준을 만족시키는 데 소요되는 기간에 대한 평가 • 중준위폐기물을 탈장중수소화, 탈탄소화 또는 차단(barriers) 기술을 적용해 근표면 폐기시설(near surface disposal facilities)에서의 관리 가능성
원격 유지보수	• damage 상황도 장치 제거 가능, 유지보수 기간의 최소화, 안전성 요건을 준수 보장

※ 출처 : The European path towards fusion electricity, 한-EU 양자회의, '24.1월

- ITER는 Q = 10, 연소 플라즈마 영역 실증을 통해 DEMO 시나리오 기반 제공

- ITER TBM 프로그램이 DEMO 설계를 위해 적절한 시점에 되기는 어려울 것으로 예상

- 그러나, TBM은 DEMO에 필요한 중요 정보(nuclear 플라즈마 환경에서의 블랑켓 정량화, 인허가, 제작, 통합운전)를 제공해주다는 점은 변함없음

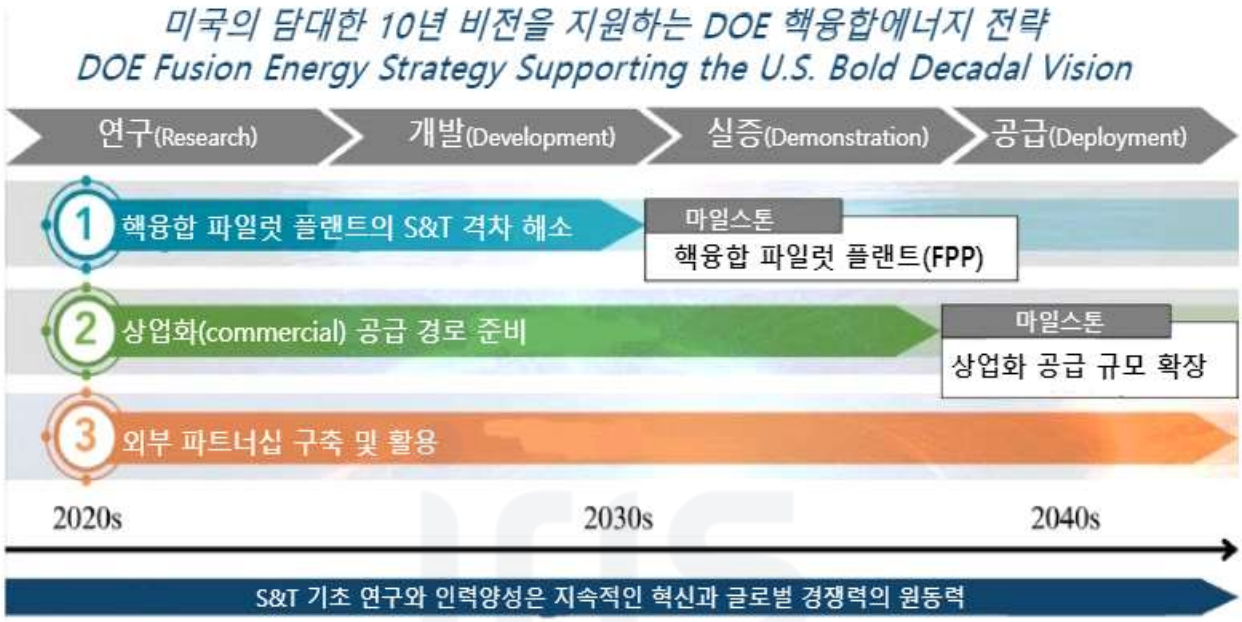
- 안전성 및 폐기물 발생, RH, 토목 엔지니어링, 핫셀, 삼중수소 관리 및 방사성 폐기물) 관련 ITER 경험은 DEMO의 중요 참고자료

○ (미국) 상업용 핵융합에너지 이용을 위한 10년 비전*을 목표로, 핵융합 파일럿 플랜트 개발 계획을 발표하고, 이를 지원하기 위한 전략 수립

* 미국의 핵융합 실현을 위한 담대한 10년 비전(Bold Decadal Vision)(DoE, '22.3월)

– (비전 목표) ① 핵융합 R&D 가속화, ② 핵융합 파일럿 플랜트(Fusion Pilot Plant: FPP) 시범 운용('30년대), ③ 대규모 상업적 보급 준비, ④ 핵융합 공평성 보장(경제, 사회, 환경)

– (핵융합 실현 3대 추진 전략)



< 담대한 10년 비전 지원을 위한 DOE 핵융합 전략의 세 가지 pillars >

※ 출처 : Fusion Energy Strategy 2024, Department of Energy, U.S. '24.6월

< 핵융합 실현 3대 추진전략 세부내용 >

추진 전략	주요 내용
① pillar 1 FPP 실현을 위한 과학기술(S&T) 격차 해소	▸ DOE 산하 과학프로그램(SC FES) 재정비 ▸ 국가 핵융합 과학기술(S&T) 로드맵 개발 및 이행 ▸ 공공-민간 파트너십을 통한 혁신적 연구개발 가속 ▸ SC FESAC 프로그램 지원을 위한 부서(ESP) 설립
② pillar 2 상업적 핵융합 보급 준비	▸ DOE ARL 프레임워크 활용 ▸ 핵융합 상업화를 위한 위험 해결 방안 제시 ▸ 핵융합 자산 및 활동 조정을 위한 크로스컷팀(FCT) 운영
③ pillar 3 외부 파트너십 구축 및 활용	▸ 기존 파트너십의 범위 확장 및 개발 ▸ 다양한 파트너십 강화(기관, 민간, 학계, NGOs, 비영리 단체, 자선단체, 주/지방자치단체 및 커뮤니티 등) ▸ 전략적 국제 파트너십 구현 지원 부서(ESP) 운영

※ 출처 : Fusion Energy Strategy 2024, Department of Energy, U.S. '24.6월

○ (영국) STEP 건설을 통해 핵융합에너지 상용화 가능성 제시 및 핵융합 기술의 수출 역량 확보를 위한 세계 최고의 핵융합 산업체 육성 추진

– ’40년 운전을 목표로, STEP(Spherical Tokamak for Energy Production) 로드맵 추진

– (최종 목표) 중소형급 구형 토카막 장치 운전을 통해 핵융합에너지 상용화 가능성 제시

– (세부 목표) △ 100MW 이상의 전력생산, △ 핵융합에너지의 다양한 활용을 위한 혁신, △ 삼중수소 자가증식 기술 확보, △ 핵융합 조건에 적합한 재료 및 장치 개발, △ 핵융합발전소 경제성 확보 가능성 제시(핵융합발전소 전주기 비용 타당성 제시)

– (핵융합에너지 개발 3대 추진 전략)

< 핵융합에너지 개발 3대 추진전략 세부내용 >

① 국제 리더쉽	① 과학 리더쉽	①상업적 리더쉽
▸ 핵융합에너지 상용화 가속화를 위해 국제협력 적극 활용 ▸ 지적 재산권 및 경쟁력 우위 확보와 함께, 국제협력을 통해 핵융합 프로그램 비용 및 위험성 감소 ▸ 핵융합의 안전성 확보 및 글로벌 잠재력 극대화, 글로벌 중요 시장 확보를 위해 국제 핵융합 표준(standards) 및 규제 개발 선도	▸ 핵융합 기술 및 시설 분야의 글로벌 과학 리더십 공고화 ▸ 엔지니어링 분야 지원을 포함해, 세계 수준의 핵융합 인재 유입 및 양성, 유지	▸ 영국 내에 역동적인(vibrant) 핵융합 기술 클러스터 구축 ▸ 핵융합 및 관련 기술에 대한 내부 투자 유치 ▸ 핵융합 조달 지원 및 영국 기업의 미래 글로벌 핵융합 시장에서의 경쟁력 확보를 위한 공급망 및 기술 기반 구축

※ 출처 : Towards Fusion Energy : The UK Government’s Fusion Strategy, BEIS, `21.10월

< STEP 개발 일정 >

※ 출처 : An update on the UK fusion programme, I. Chapman, ’22.12월

□ **(민·관 협력 주도)** 핵융합 실증로 설계·건설, 핵심기술 확보 가속화를 위해 핵융합 산업기반과 연계한 민·관 협력 주도 전략 강조

○ (미국) Bold Decadal Vision을 통해 미국의 핵융합 에너지를 가속화하력는 목표로 주요 국가 중에서 민관협력(Public-Private Partnership)가 가장 활발하게 진행

- ARPA-E ARPHA(종료): 총 9개의 프로젝트에 3천2백만70만달러(한화 약 440억) 지원하였으며, 운영의 플라즈마 상태와 가열 시스템 및 자석에 중점 추진

※ Zap Energy와 Helion Energy의 스타트업이 ARPA-E ARPHA에서 탄생

- ARPA-E BETHE(진행): 18개의 프로젝트에 약 4천3백70만달러(한화 약 600억) 를 지원하며, 핵융합 접근 방식에 대한 연구, 핵심기술(HTS 자석, 가열 시스템, 소프트웨어 및 모델링 시뮬레이션)에 중점 추진

※ Commonwealth Fusion Systems, Type-One Engergy, Zap Energy등의 스타트업이 펀딩을 받았으며, Realta Fusion과 Princeton Stellarators는 해당 프로그램에서 직접/간접적으로 출발된 스타트업

- ARPA-E GAMOW(진행): 14개의 프로젝트에 2천 6백만 50만달러(한화 약 363억)을 지원하며, 핵융합 핵심기술(중성자내성물질, 트리튬 자급자족)에 중점 추진

- 마일스톤 프로그램(종료): 총 4천6백만 달러(한화 약630억)를 핵융합 기술접근방식(토카막, ICF, 스텔레레이터)에 지원했으며, 최대 50% 민간 파트너 비용부담으로 컨소시엄을 이끌며, 연구소 및 민간(기업) 협력

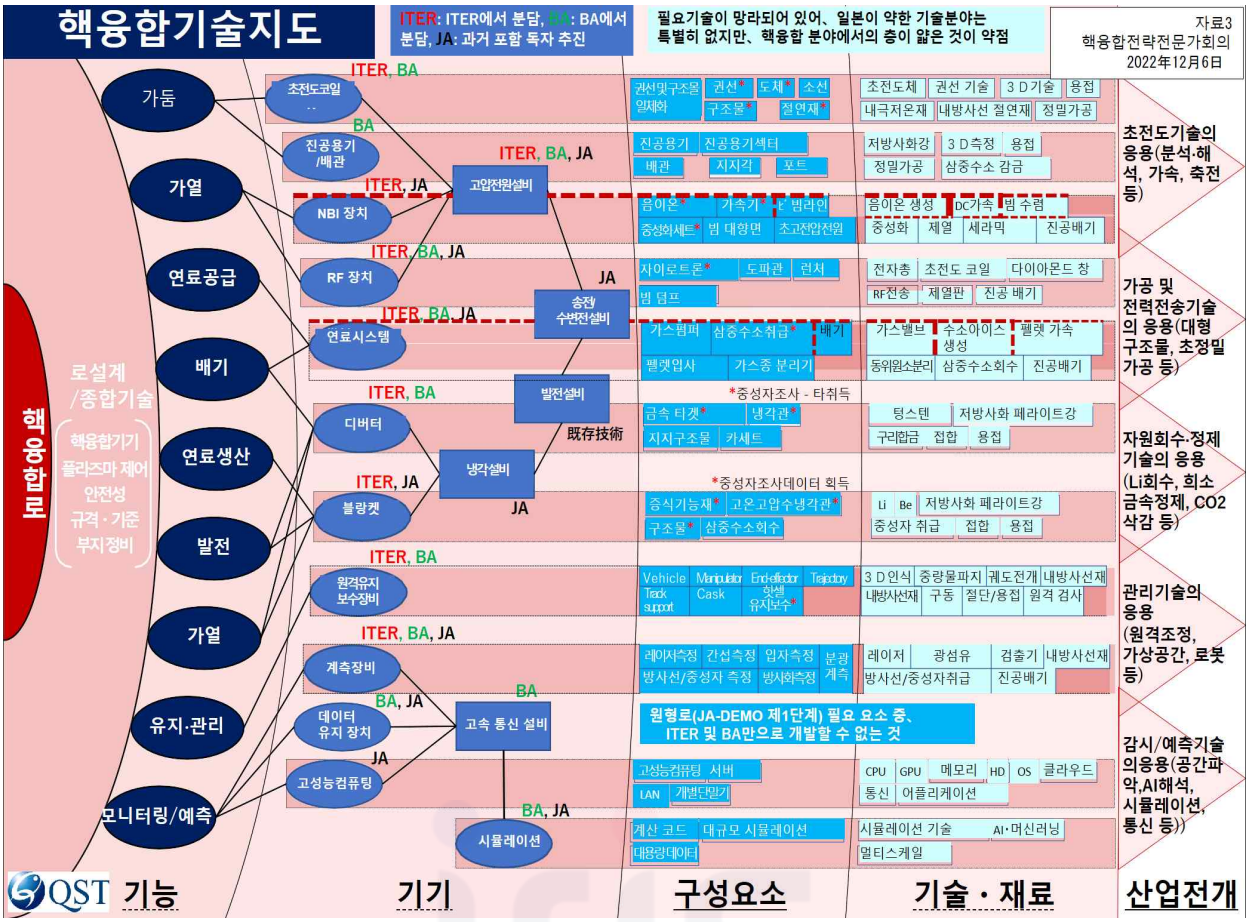
- INFUSE: 산업(민간)이 연구소의 기술관련 정보에 접근할수 있는 개념의 제도, 민간의 20%의 비용부담이 요구되며, 민간부분에서 혁신적인 핵융합 에너지 기술을 개발하기 위한 기초 연구 가속화하는 것에 목표

○ (일본) 핵융합을 새로운 산업으로 인식하고 이를 바탕으로 세계의 핵융합 공급망 경쟁에서 일본의 주도권 확보를 위해 혁신전략 수립 및 민관 협력 프로그램 추진

- 핵융합 산업 공급망·참여자(parties) 정리 및 산업체 참여촉진을 위해, 산업체 수요 및 타분야로의 파급효과 예상 기술의 시각화를 위한 기술·산업 맵 작성(QST 작성)

- 필요영역 자원 집중투입 필요성* 및 외국현황 등을 종합 고려하여, 연구개발 및 산업육성시 일본이 강점을 갖는 핵심영역 중, 특히 경제안보상 중요영역에 최우선 순위 부여

* 핵융합에너지는 여러 기술들의 집합체이지만 자원(자금, 인력, 시간 등)이 제한으로 인해 모든 영역에 충분한 투자 어려움



< 일본 핵융합 기술맵 >

※ 출처 : 핵융합 혁신 전략(국가 전략에 입각한 대처 방안), 일본 내각부, '24.3월

< 핵융합 연구개발 및 산업육성 접근법 >

※ 출처 : 핵융합 혁신 전략(국가 전략에 입각한 대처 방안), 일본 내각부, '24.3월

– 중소기업 혁신 창출 촉진 사업(SBIR페이즈3) : 일본에서 스타트업 등이 보유한

선진 기술의 사회 실현으로 이어지도록 대규모 기술 실증을 실시하고 스타트업 등이 보유한 선진 기술의 사회 실현을 촉진하는 제도로 공모방식으로 이루어짐

※ (기술분야) 핵융합 분야(핵융합 원형로 등을 향한 핵융합 기술의 실증)

– 문샷(MS, Moon Shot) 프로젝트 : 문샷 프로젝트는 2050년까지 핵융합에너지의 다면적인 활용을 통해 지구 환경과 조화를 이루고, 자원 제약에서 벗어난 사회 실현을 목표로 추진

※ '50년까지 다양한 분야에서 핵융합에너지가 구현된 사회 실현, '35년까지 전기에너지에 한정되지 않은 다양한 에너지원으로서의 핵융합에너지 활용 실증, '35년까지 에너지원으로서의 활용 외에, 핵융합 반응에서 생성된 입자와 요소기술 등의 다각적 활용으로 핵융합에너지의 응용 실증

< 목표달성을 위한 연구개발 방향성 >

목표시점	마일스톤	연구개발	파급효과(예)
2050년	소형화 등 **혁신적인 핵융합에너지 시스템(혁신적인 아이디어 기반 가둠 방식과 요소기술을 통합한 시스템) 실현**	혁신적인 핵융합에너지 시스템 요소기술, 핵융합로 양산화에 기여하는 자원확보 및 저비용화	플랜트 기술을 핵융합 이외 열원에 응용
2030년	핵융합에너지 조기실현을 위한 **혁신적인 핵융합에너지 시스템 원리 실증**, 핵융합에너지의 다양한 **사회적용을 위한 혁신활용 실증**, 도전에 기여하는 **혁신기반기술의 다양한 응용 및 산업기반 구축**	**전략적인 포트폴리오 구축** 및 **도전적이고 체계적인 연구개발** 추진	핵융합 반응을 통해 생성된 입자 등을 활용한 **의료기술 및 환경기술, 고온초전도 기술의 항공기 추진용 초전도 모터·발전기** 등에 응용, **고열속제거장치(디버터) 재료 및 구조의 우주분야(로켓)에 응용, 제작기술의 항공기 제작** 등에 응용

※ 출처 : 핵융합 혁신 전략(국가 전략에 입각한 대처 방안), 일본 내각부, '24.3월

< 핵융합에너지 파급효과 >

※ 출처 : 핵융합 혁신 전략(국가 전략에 입각한 대처 방안), 일본 내각부, '24.3월

○ (영국) 변화하는 핵융합에너지 개발의 영역(공공 단독→공공+민간 협력)을 고려하여,

STEP 개발을 중심으로 핵융합 공급망 선점 및 민간 역량활용 극대화를 위한 민관 협력 (Public-Private Partnership) 프로그램 추진 중

- 영국의 PPP 프로그램은 3가지 목표로, 도전과제계획(민간 부문 공급내에서 지적자산과 역량을 개발), 바우처 계획(민간이 핵융합 기술의 전문성을 제공하는 시설 접근 가능, 전문 지식과 기술 접근할수 있도록 지원), 교육 계획(핵융합 전문인력 양성)를 내세우고 있음

- STEP을 전달하기 위해 2023년 2월에 배달 기관(delivery body)으로, UK Industrial Fusion Solutions Ltd, UKIFS 설립 의도를 발표했으며, 2024년 8월까지 완전히 구성할 예정

- STEP의 개발은 공급망 개발을 통해 지역과 영국의 전역에 엄청난 경제적 기회임. 정부는 정부의 'Levelling Up' 아젠다의 일환으로, STEP의 이점을 극대화하기 위해 지방과 지역 당국과 협력 예정

- Fusion Industry Programme, FIP 프로그램은 2024/25년까지 운영될 예정이며, 영국은 Fusion Future의 일환으로 이전 자금(4,200만 파운드)에 추가로 3,500만 파운드까지 투자 약속

- Fusion Future의 일환으로, 영국 정부는 컬햄(Culham) 캠퍼스를 변화시키기 위해 Fusion Foundations에 추가로 최대 5천만 파운드를 투자할 계획

- UKAEA 프로그램의 상업적인 성공과 영국 민간 부문 구축

- 영국의 세계 선도적인 연구와 수출되거나 통합될 수 있는 보호된 IP 사이의 전 세계의 프로그램 사이의 격차에 가교 역할을 하는, Technology Transfer Hub 구축을 위해 최대 1,800만 파운드 투자 목표

○ (EU) EU는 청정하고 저렴하며 안전한 에너지를 제고하는 핵융합 발전소를 건설하고, 연구, 혁신 및 산업 경쟁력 측면에서 유럽의 리더십을 지원한다는 포괄적인 목표를 수립

- EU가 제시하는 핵융합 발전소(FPP)로 가는 단계를 3단계로 구분하였는데, ITER→DEMO→FPP의 단계로 점진적인 민간참여를 확대, 이를 통해 민간 핵융합 스타트업들은 독창적인 경로로 개념 증명장치에서 시연장치, 상업용 FPP로 나아갈것으로 기대

- DEMO를 주요 목표로 삼는 접근: 단기-중기적으로 공공연구 커뮤니티와 엔지니어링 및 설계(민간) 간의 파트너십을 통해 개념 설계 및 기타 설계 요소와 사양을 발전시키는데 중점, 영국의 STEP 프로그램이 가장 유사한 사례를 제공

- 핵심 기술(KET)을 주요 목표로 삼는 접근: DEMO 및 최종적으로 핵융합을 위한 주요 기술 해결과제 (트리튬 연료 주기, 첫 번째 벽 재료, 원격제어)를 목표로 설정하는 방식, 핵융합 산업 및 다른 부분에 넓은 적용과 관련성을 가질 수 있음

- PPP가 스타트업에 대한 접근 방식을 맞춤화할지의 여부는 설정된 목표에 따라 결정될 수 있으며, PPP의 목표로 DEMO건설을 우선순위에 두면 EU 공공 지원(자금)이 DEMO와 유사한 파일럿 단계에 도달한 핵융합 스타트업 지원 가능성 낮아짐(중복 이슈)

- 미국 모델(ARPA-E, INFUSE)은 핵융합 접근 방식에 더 개방적인 관점을 두고 있고, 스타트업에 맞춰져 있고, 스타트업의 성공이 공급망 혁신을 일으키고 민간 자본을 끌어 들임, 반면 스타트업은 낮은 TRL 수준의 접근 방식에 집중함으로 인해서 집중적이고 단일 접근 방식의 지원(자금)이 아닌 분산될 위험 존재

※ 미국의 Mileston프로그램에서 비미국 기업의 미국 자회사가 많은 신청자를 차지한 경향을 EU 해당 사안에 대해 적절한 보호조치 마련에 대한 문제 인식

< 핵융합 PPP 접근 방식의 요약 및 비교 >

구분	공동프로그래밍 유럽 파트너십(CPEP)	유럽 혁신 기술 연구소(EIT-KIC-InnoEnergy)	F4E 혁신 파트너십
장점	▪ 산업, 연구, EC간의 공식화된 협력 ▪ 산업(민간)이 주도하고 소유권 가짐 ▪ 입증된 기존 자금 지원 및 운영 모델활용 ▪ 다양한 유형의 공고와 잠재적 초점 영역을 허용하는 모델	▪ 이미 EU 핵융합 스타트업에 자금을 지원함 ▪ 민간 산업 주도 아이디어 기반이며 기술 중립적 ▪ 핵융합 비전/전략이 필요없고, 일부 예산 할당과 잠재적 상업적 타당성만 필요 ▪ 계약 메커니즘 존재	▪ 산업의 매칭 기여에 대한 유연성 ▪ 조달 및 기술 전문 지식을 보유 ▪ EU 전략 목표와 일치하는 목표 ▪ ITER Project와 적업의 연속성
단점	▪ 산업으로부터 매칭 기여(시간, 자원, 현금)가 EU 기여와 최소한 동등하게 요구 ▪ 조직 및 연구 의제에 대한 합의 도출하는데 시간이 걸릴수 있음 ▪ 비교적 느린 EU 프로세스에 묶여 있음(언제 시작하는지 불확실)	▪ 상대적으로 제한된 자금 지원 ▪ 스타트업 및 중소기업을 제외한 적합성은 불분명 ▪ EUROfusion 로드맵과 일치하지는 않음	▪ 산업에서 관료주의 및 대형 ITER 프로젝트 스타일의 절차 ▪ 계약기반으로 인한 산업(달성하지 못할 위험)의 특성 ▪ 핵융합연구커뮤니티와 본질적으로 협력적이지 않음
도전	▪ 산업 및 연구부분을 대표할 단일 조직이 필요 ▪ 다른 파트너십들과 후보 경재 가능성 ▪ 산업이 매칭 기여를 하도록 확보하기	▪ InnoEnergy내에서 핵융합에 충분한 범위를 확보하기 ▪ 새로운 EIT-KIC를 시작하는 것은 어렵고 시간이 많이 걸릴수 있음	▪ 사용되지 않는 메커니즘 사용 ▪ F4E내에서 자금 확보 필요(사용가능한 자금이 충분하지 불확실) ▪ 현재 ITER 지연상황에서 예산 정당화하는 것
결론	▪ 강력하고 긍정적인 면이 있으나 도전적인 부분 있음 ▪ 산업의 역할이 크게 요구되고, 특히 급박한 상황에서 해당 파트너십이 얼마나 생성될 수 있는지에 대한 의문 ▪ 예산 편성을 위한 재정프레임워크(MFF)인 2028년까지 기다려야함	▪ 긍정적이지만 한계가 있음 ▪ 핵융합 공급망의 중소기업을 육성할 수 있는 효과적인 메커니즘을 제공 ▪ 핵심기술에 중점을 두는 한계를 보완할 수 있음	▪ 긍정적인지만 위험이 있음 ▪ 단기적으로 산업 혁신을 촉진할 잠재력을 가지고 있음 ▪ ITER의 상황에서 F4E 자금의 우선 순위를 재조정하는데 위험이 있음

※ 출처 : Analysis on a strategic public-private partnership approach to foster innovation in fusion energy, European Commission, '23.10월

《 참고. 주요 국가 민관 협력 추진 프로그램 》

□ **(일반현황)** 주요 국가는 글로벌 핵융합 시장 선점을 위해 **핵융합 기술개발 및 실증로 설계·건설에서 민관협력을 확대**

○ **(미국)** **`40년대 핵융합에너지 상용화를 목표**로, **민관협력 기반** 핵융합 전력 생산 **소형 파일럿플랜트 건설(`30s)** 지원

- 공공-민간 파트너십 기반 기술개발을 위한 **FIRE(Fusion Innovation Research Engine)센터 신설**('24예정)
- **공공연구기관의 기술지원**을 통해 **산업체의 핵융합에너지 개발 난제 해결**을 지원하는 **다양한 민-관협력 프로그램* 추진**

* INFUSE(Innovation Network for Fusion Energy), Milestone-based Fusion Development program, ARPA-E(CHEDWICK, BETHE, GAMOW) 등

○ **(영국)** **`40년경** 전기생산이 가능한 **세계 최초 중·소형급 구형 핵융합 플랜트 'STEP' 적기 조달을 위한 민-관 전략적 협력체계 구축**

- 개념설계(~`24) 단계에서 실증플랜트 건설을 주도할 'UK Industrial Fusion Solutions Ltd'을 설립(`23.2)하여 **민·관협력 추진**

○ **(일본)** 최근 핵융합 **산업화 추진을 위한 산업육성전략 발표*** 및 **핵융합 스타트업 지원 프로그램 운영 추진**

* 실증로 건설 추진 및 민간기업 육성을 위해 QST를 중심으로 산·학이 결집

- 핵융합 스타트업지원을 위한 **"핵융합 원형로 등을 위한 핵융합기술군 실증"사업** 확정('23.9) 및 **문샷 연구개발 프로그램 추진**('24)

<주요 국가별 민관협력 현황>

구분	주요내용
미국	·**민간 경쟁 기반**으로 다양한 노형의 **핵융합 파일럿플랜트 개발 추진** ·다양한 공공-민간 파트너십(PPP) 프로그램 운영(INFUSE, ARPA-E 등) ·원자력과 별도의 핵융합 **규제방향 제시**(NRC, 원자력규제위원회)
영국	·**STEP 설계·건설**을 위해 UKAEA 주도의 민관협력체계 운영(**엔지니어링업체 중심**) ·컬햄캠퍼스 內 **스타트업 실증시설 건설** 추진 지원 ·세계최초 핵융합 **규제체계**(원자력과 별도의 규제) **수립**
일본	·핵융합산업 활성화를 위한 **핵융합에너지혁신전략(안) 마련** ·핵융합 스타트업지원을 위한 **"핵융합 원형로 등을 위한 핵융합기술군 실증"사업** 및 **문샷 연구개발 프로그램 운영**

□ **(규제체계)** 핵융합 고유 안전성을 토대로 규제 체계 기본방향을 마련하여 불확실성을 해소하고, 핵융합에너지 전력생산 일정 가속화 추진

○ (영국) 보건안전청(HES) 및 환경청(EA) 주관 핵융합에너지개발 안전 규제 기본방향 확정('22) 및 법적 규제 불확실성 해소('23.10)

– 현재 핵융합 연구시설은 HES/EA 규제 체계* 적용 유지 결정**

* 근로자보건안전법, 전리/비전리방사선규제, 환경허가규제 등

** 영국원자력청(UKAEA) 기술보고서 마련('21), 정부 규제 기본(안) 공개('22), 대국민 의견수렴('22) 등을 거쳐 기본방향 최종 결정

– "에너지법 2023"(Energy Act 2023) 신설('23.10월)로, 원자력설치법(Nuclear Installation Act 1965)에 명시된 원자력시설 인허가 요건에서 핵융합시설 분리 확정

– 애자일 네이션스(Agile Nations) 핵융합 워킹그룹* 참여, 글로벌 핵융합에너지 규제 조화(harmonization)에 관한 권고사항 발표('23.10)

* 애자일 네이션스는 혁신적인 규제활동에서의 협력 촉진을 위한 정부간 규제 네트워크로, 핵융합 워킹그룹에는 (정회원) 영국, 일본, 캐나다, (옵저버) 싱가포르, 바레인 참여

< 애자일 네이션스 공동권고 및 합의사항('23.10월) >

① 핵융합이 기후변화와 에너지 안보라는 세계적인 문제에 중요한 기여를 할 수 있다는 것을 인식하는 것
② 핵융합 기술과는 무관하게, 핵융합 시설에 적용될 규제의 프레임워크를 명확히 하기 위한 노력을 모든 국가가 시작하는 것
③ 국제적으로 합의에 의해서 도출된 접근방식이 여러 국가에서 핵융합 규제로 채택이 될 때 이점을 각국이 인식하는 것
④ 각 국가간의 투명성을 유지하고 혁신을 촉진하면서, 인간과 환경에 대한 적절한 보호를 보장하고 동시에 핵융합 기술의 위험을 고려한 규제 프레임워크를 구축하는 것
⑤ 각국의 안전 보호 수준이 적절하다는 것을 자국 국민이 충분히 인지하고 그 중요성을 인식하며, 이해도를 높이기 위한 방법을 검토하는 것

※ 출처 : 핵융합 혁신 전략(국가 전략에 입각한 대처 방안), 일본 내각부, '24.3월

○ (미국) 핵융합 고유 안전성을 반영한 독립적 규제체계 개발(Fusion Energy Act) 추진 및 국제협력을 통한 프레임워크 공유 추진

– 핵융합에너지 규제를 핵분열 규제로부터 영구적이고 완전히 분리하여 미국 핵융합 규제 체계를 간소화하기 위해 상원의원 '핵융합에너지 개발 가속화를 위한 초당적 법안(bipartisan bill)–Fusion Energy Act of 2024'를 발의('24.4월)

< 핵융합에너지 개발 가속화를 위한 초당적 법안(Fusion Energy Act of 2024 주요내용 >

구분	주요내용
목적	▸1954년 Atomic Energy Act 및 Nuclear Energy Innovation and Modernization Act를 수정하여, 핵융합 장치와 관련된 기존 요구사항을 명확히 하고 기타 목적을 위해 법률로 제정
수행내용	▸NRC의 만장일치이자 초당적 결정을 법제화하여, NRC의 부산물 재료 과정 하에 핵융합에너지 시스템을 위한 규제 프레임워크 제정, ▸NRC에게 1년 이내에 상업용 핵융합 장치 라이선스에 대한 연구 및 보고를 의회에 요구하며, 그 과정을 간소화(streamlining)하는 고려사항 포함
필요성	▸글로벌 경쟁(Global Competition): 중국이 매년 15억 달러 이상을 핵융합에 투자함에 따라, 미국은 상업용 핵융합으로 가는 국제 경쟁에서 승리하기 위해 연방 규제를 간소화할 필요가 있음 ▸무탄소 에너지(Carbon Free Energy): 핵융합에너지는 원자력 발전소의 핵분열 반응보다 연료 kg 당 4배 더 많은 에너지 생성 ▸규제의 확실성(Regulatory Certainty): 상업 시설을 구축하여 핵융합 기술을 발전시키려는 기업들은 건설 노력을 간소화하면서도 공공 안전과 보안을 최대한 보장하는 일관된 규제 프레임워크에 의존할 수 있을 것. 안정된 핵융합 규제 체제는 민간 부문이 핵융합에너지의 장기적 경제적 생존 가능성에 대한 확신을 갖게 하여, 더 큰 투자와 혁신을 장려할 것

※ 출처 : The Fusion Energy Act of 2024, 미 상원의원, '24.4월

– 미국은 적기 핵융합 발전소 구축을 위한 기반 마련을 위해, 핵융합 규제 프레임워크 및 정책 실행에 관한 조속한 국제협력 촉진을 추진하고자 함

※ 출처 : International Partnerships in a New Era of Fusion Energy Development, 미국 백악관 과학기술정책실, '23.12월

– 주요 국제협력 분야

- 핵융합 규제 및 수출제한 프레임워크 조화(harmonization)에 관련 기술적, 정책적 이슈에 대한 공통의 입장(common position) 확립을 위해, 주요 파트너 국가 및 국제조직과의 경험 공유

- 워크숍, 화상회의, 기술자문, 현장방문 등을 통해 잠재적 새로운 참여자(newcomers)들에 대한 역량* 구축을 위한 노력 개진

* (역량) 안보/안전/인허가/규제/부지선정/전문성, 인력개발, 이해관계자 참여, 폐기물관리 계획 등

- 다양한 핵융합에너지 기술의 대규모 글로벌 상용로 구축에 상응하는, 핵융합에 대한 적절한 안보 및 비확산 프레임워크에 대한 국제협력

○ (일본) 핵융합 안전 규제 TF 구성운영을 통해 일본의 규제 기본방향에 대한 논의에 착수하였으며, 국제협력을 통한 규제 프레임워크 조화 추진

– 안전규제 TF는 핵융합전략전문가회의 산하에 설치되어, 원자력과 다른 핵융합 안전성 요건 및 국내외 핵융합 규제 동향 등을 종합 검토할 계획이며, 일본 정부는 대국민의견 수렴을 거쳐, 2024년 말까지 핵융합 안전 규제 기본방향을 수립할 예정

※ 주요 검토사항 : 국내외(미국, 영국 등) 상황, 설비·장비의 특성(핵분열과의 비교 포함), 안전 확보의 목적, 달성을 위한 요건

– 또한 영국 주도의 에자일 네이션스(규제 워킹그룹) 참여 및 미-일 전략적 파트너쉽 체결을 통해 규제 프레임워크의 국제적인 조화를 위한 노력 지속

< 미(DOE)-일(MEXT) 전략적 파트너쉽 체결 핵심 요소>

▪ STA(Research and Development in Science and Technology)에 따라 수행되는 활동을 통해, 다양한 핵융합 시스템에 상업적으로 실행가능한 핵융합에너지를 제공하는 과학적, 기술적 과제 해결
▪ 핵융합 연구 및 개발에 필요한 시설의 공유 접근 및/또는 개발 기회 조정, 전략적인 접근 방식은 미국과 일본의 가치를 극대화할 방법 모색
▪ **미국 NRC(Nuclear Regulatory Commission)의 규제 제정(rule-making) 노력을 활용하고, IAEA(International Atomic Energy Agency) 및 Agile Nations 핵융합에너지 워킹그룹의 주도하에 진행 중인 논의를 포함하여, 규제 프레임워크, 코드, 표준(standards)의 국제적인 조화 촉진**
▪ 상업적 핵융합 배치를 촉진하는 탄력적인(resilient) 글로벌 공급망 개발을 발굴하고 지원하며, 각국의 핵융합 산업 그룹 간의 논의 고려
▪ 지역 사회와의 공공 참여를 지원하여, 핵융합에너지 배치에 대한 사회적 수용성(social license) 촉진 및 청정에너지 전환 지원
▪ 향후 10년 및 그 이후에 핵융합 부문에 필요한 강력하고(robust) 포괄적이며 다양한 인력과 인재 양성 보장을 위한 기술개발 촉진

※ 출처 : Joint Statement between DOE and the Japan Ministry of Education, Sports, Science and Technology Concerning a Strategic Partnership to Accelerate Fusion Energy Demonstration and Commercialization, 미국 DOE, '24.4월

○ (IAEA) 핵융합 안전성 표준(Safety Standard) 수립('26년경) 목표로, 안전성 및 규제 기술보고서를 토대로 안전성 보고서(Safety Report) 마련('26년) 준비 본격 돌입

– 안전성 및 규제 기술보고서(총 2종)* 최종 보고서 공개 예정('24년 초)

* 국제 전문가 그룹(영국, 미국, 한국, 일본 등) 참여 ①핵융합시설 설계 안전성 및 안전성 평가, ②글로벌 핵융합 규제 경험에 관한 기술보고서(TECDOC) 작성('23)

– 안전성 보고서 마련을 위한 국제 전문가 회의 개최('23.12)

② R&D 투자 및 산업동향

◆ 정부주도 핵심기술 개발을 위한 연구개발(시설구축) 투자가 지속되고 있으며, 최근 해외 민간 스타트업에 대규모 투자 진행

□ (정부 및 민간 투자 동향) 최근 미국, 영국을 중심으로 핵융합 투자 규모가 확대되고 있으며, 대규모 민간 투자도 확대 중

< 주요국 정부 및 민간 투자 규모 >

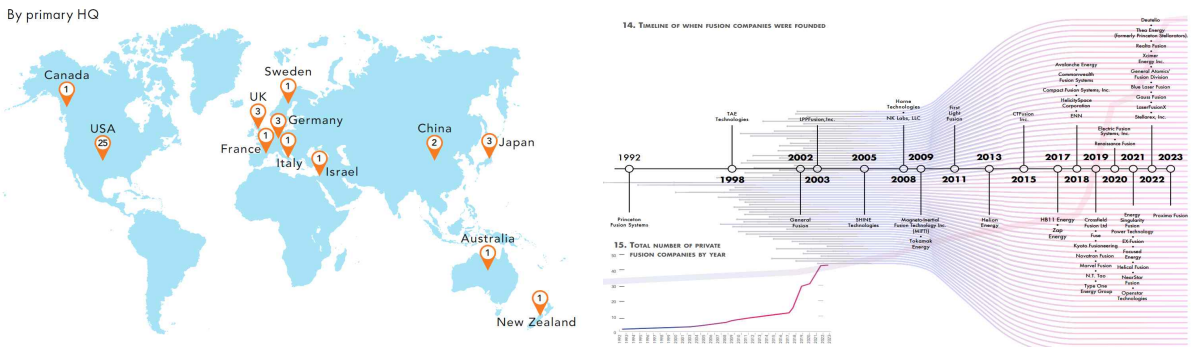
(미국)	• **(정부)** 토카막과 레이저 핵융합 분야에 약 13.93억 달러(약 1.8조원) 투자('23)	• **(민간)** 주요 3개 社(CFS, TAE Technologies, Helion Energy) 총 37.7억달러(약 4.7조원) 투자확보('23)
(영국)	• **(정부)** 핵융합 신규 R&D 투자 예산 총 약 6.5억 파운드(약 1조원)('23~'27년), STEP 개념설계 약 2.2억 파운드(약 3.3천억원) 투자 계획('20~'24)	• **(민간)** Tokamak Energy는 약 2.5억 달러(약 3.6천억원) 투자 확보
(일본)	• **(정부)** 핵융합 예산(ITER 사업 및 BA 활동) 총 약 212억엔(약 1,943억원)('23)	• **(민간)** 핵융합 스타트업 지원 신규사업 5년간('23.10~'28.10) 총 65억엔(약 585억원) 투자 계획
(중국)	• **(정부)** CRAFT 건설에 총 60억 위안(한화 약 1.1조원) 투자 계획	• **(민간)** 허페이시 민-관 협력 BEST 건설 승인('23)('26년 완공 목표, 총 약 85억 위안(약 1.5조원) 투자 추정
(EU)	• **(정부)** ITER 사업(BA 포함) 예산 약 8.39억 유로(약 1.2조원), EUROfusion 예산(컨소시엄 참여국 매칭펀드 포함) 약 1.99억 유로(약 2.86천억원)('23)	

□ (스타트업 경쟁심화) 미국, 영국 등 핵융합 스타트업이 최근 급증하고, 30년대 핵융합 전력생산 실증을 추진하며 개발 경쟁 심화

○ (일반현황) 미국, 영국 등 핵융합 스타트업이 최근 급증하고, 30년대 핵융합 전력생산 실증을 추진하며 약 8조원의 투자 유치

– (기업현황) 전세계적으로 핵융합 스타트업 40개 이상이 활동 중이며, 미국 기업 비중이 가장 높음('23년 FIA 설문조사)

– (국가별 분포) 미국(25개)과 영국(3개), 캐나다(1개)가 민간 이니셔티브를 주도하며, 최근 독일, 프랑스, 이탈리아 등 유럽 스타트업 등장



< 핵융합 스타트업 현황, (좌)국가별 본사현황, (우)연도별 설립현황 >

※ 출처 : The global fusion industry in 2023, Fusion Industry Association, '23.7월

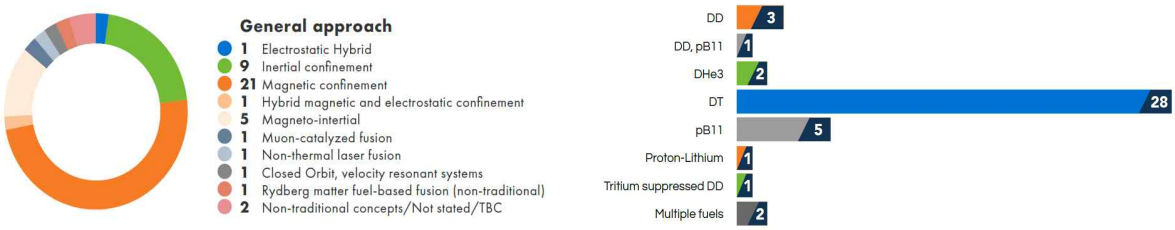
– (투자현황) '23년 기준, 스타트업 투자금액은 총 약 $62억 달러(약 8조원)

* Breakthrough Energy Venture(Bill Gates 투자설립), Bezos Expeditions (Jeff Bezos 투자설립), Eni, Google, WellcomeTrust, Toyota 등이 투자

○ (핵융합 방식) 소형 핵융합 발전 실현을 목표로, 기존 주장치인 토카막 형태에서 벗어난 혁신적 주장치 개발에 집중

– (방식별 분포) 자기 가둠(21개) 방식을 채택한 스타트업이 가장 많으며, 관성 가둠(9개), 자기-관성 융합(5개) 등 순으로 기술개발

– (사용연료 분포) 핵융합 전력생산을 위한 연료로서, DT(28개)를 가장 많은 산업체가 선택했으며, 다음으로 pB^{11}(5개)를 채택

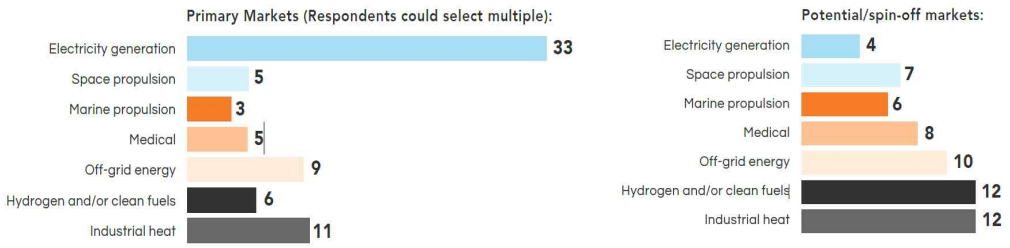


< 핵융합 방식 및 사용 연료 (좌)핵융합 방식, (우)핵융합 연료 >

※ 출처 : The global fusion industry in 2023, Fusion Industry Association, '23.7월

○ (타겟시장) 핵융합 스타트업의 주요 타겟 시장은 전기생산이 대부분이었고(33개 기업), 우주 및 잠수함 추진체, 의료 등으로 나타남

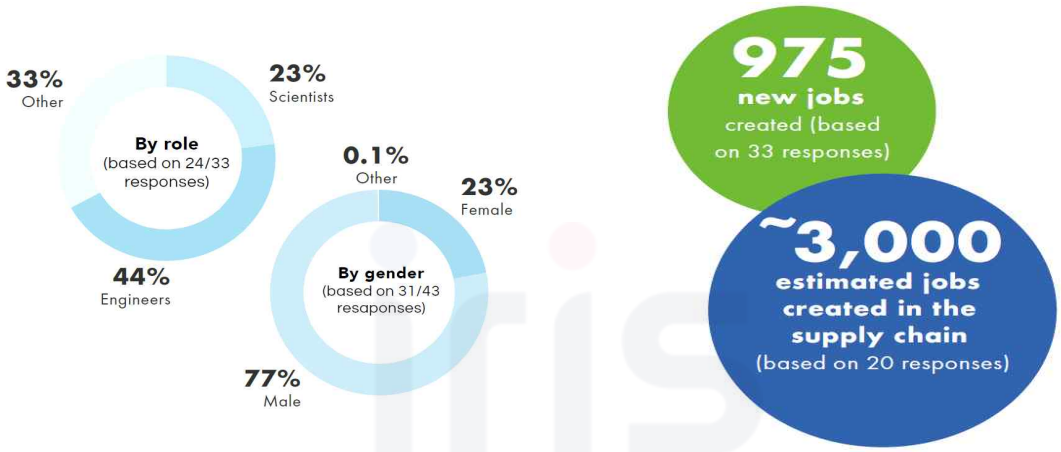
– (잠재시장) 미래 및 스핀오프 시장의 경우 전기생산 보다는 수소 및 클린에너지, 산업용 난방, 오프그리드 에너지, 의료용 등 높음



< 핵융합 타겟 시장 및 잠재시장, (좌)주요 타겟 시장, (우)잠재적/스핀오프 시장 >

※ 출처 : The global fusion industry in 2023, Fusion Industry Association, '23.7월

○ (일자리 창출) 핵융합 스타트업의 인력구성은 엔지니어 44%, 과학자 23% 순으로 나타났고, 직접적으로 975개의 일자리가 창출되었고, 공급업체에 3,000개의 일자리 창출 효과 발생



< 인력 구성 및 일자리 창출, (좌)인력 구성 현황, (우)일자리 창출 >

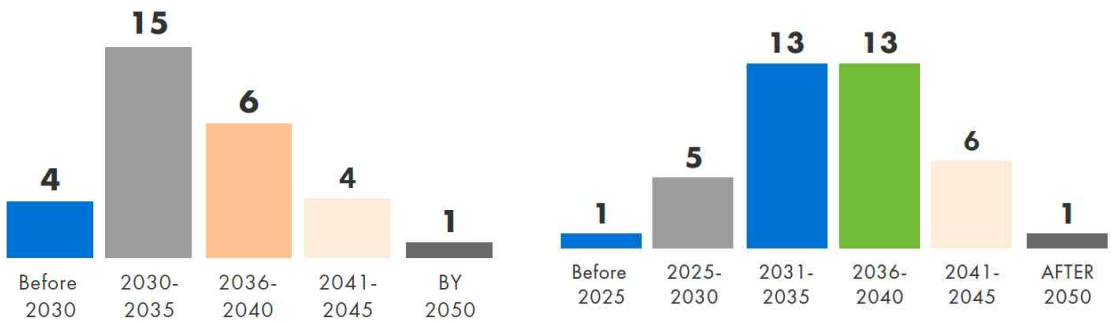
※ 출처 : The global fusion industry in 2023, Fusion Industry Association, '23.7월

○ (민관협력프로그램) 43개 스타트업 중 15개 기업이 민-관협력 프로그램에 참여 ('23년기준) 중, INFUSE, ARPA-E 등 다양한 프로그램 운영중

< 핵융합 민관 협력 프로그램 현황 >

※ 출처 : The global fusion industry in 2023, Fusion Industry Association, '23.7월

○ (실증계획) 핵융합 스타트업은 전력생산 실증시기를 2030년대로 계획하고 있으며, 상업로로서의 경제성 실증도 2030년대 가능 예상

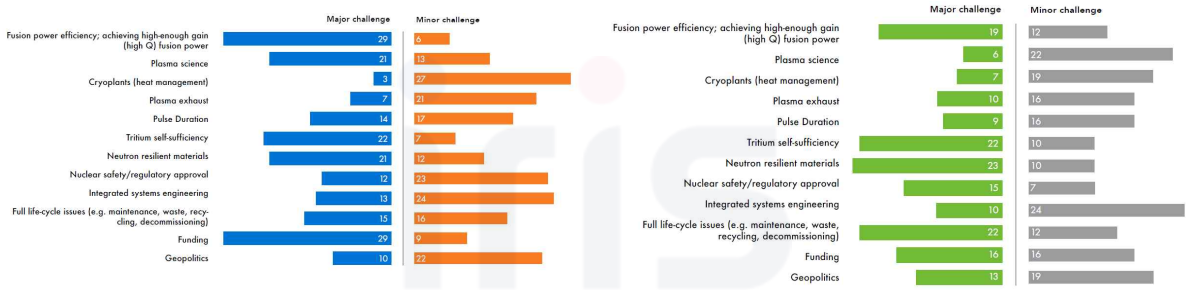


< 핵융합 스타트업 전력생산 실증 계획, (좌)전력생산 예상 시기, (우)발전소 목표 시기 >

※ 출처 : The global fusion industry in 2023, Fusion Industry Association, '23.7월

○ (도전과제) 2030년대까지 주요 도전과제로는 핵융합에너지의 효율성 및 높은 에너지 증폭률(Q), 자금 지원, 플라즈마 과학 등으로 나타남

– (잠재적 과제) 2030년대 이후에는 삼중수소 자급률 향상, 중성자 저항성 재료 개발, 원격 유지보수/폐기물 관리 등으로 나타남



< 핵융합 스타트업의 도전과제, (좌)30년대까지 도전과제, (우)30년 이후 도전과제 >

※ 출처 : The global fusion industry in 2023, Fusion Industry Association, '23.7월

< 민간 스타트업 설립 현황 >

번호	기업명	국가	설립 연도	방식	연료	투자 유치 규모	목표
1	AVALANCHE ENERGY	미국	2018	하이브리드 정전 가둠, 자기 정전 가둠	DT	53백만 달러 (약 717억 원)	· 프로토타입 건설(~'25)→궤도 실증 (~'28) · 전기출력목표 : 모듈 당 0.005MWe
2	BLUE LASER FUSION INC.	미국	2022	관성 가둠, 레이저 관성 가둠	pB11	0.5백만 달러 (약 7억 원)	· 발전소 건설('30)
3	COMMONWEALTH FUSION SYSTEMS	미국	2018	자기 가둠, 토카막	DT	2,000백만 달러 (약2조7,020억원)	· SPARC(Q~10, 실증로)건설 중 – SPARC(~'25, 실증로) → ARC(~'30년 초, 발전소) · 고온초전도자석 활용 · 전기출력목표 : 400MWe(ARC)
4	CROSSFIELD FUSION LTD	영국	2019	폐쇄 궤도, 속도공명	DD	0.5백만 달러 (약 7억 원)	· 핵융합 중성자 및 동위원소 생산

번호	기업명	국가	설립 연도	방식	연료	투자 유치 규모	목표
				시스템			
5	DEUTELIO	이탈리아	2022	자기 가둠, 수직 자기가둠	DD	0.5백만 달러 (약 7억 원)	· 발전소 건설(~'27, 10MW 열출력) →열공급·판매('28)→전기생산 업그레이드(~'32) · 전기출력목표 : 30MWe
6	ELECTRIC FUSION SYSTEMS INC.	미국	2020	Rydberg 물질 연료 기반 핵융합, 펄스 자기 플라즈마 가압 가둠	pLi-7	0.4백만 달러 (약 5억 원)	· 전기생산(~'23) · 전기출력목표 : 0.005MWe ~ 100MWe(모듈 개수에 따라 다름)
7	ENN SCIENCE AND TECHNOLOGY DEVELOPMENT CO., LTD.	중국	2006	자기 가둠, 구형 토카막	pB11	400백만 달러 (약 5,404억 원)	· EXL-50 업그레이드(~'23)→EHL-2 건설(~'26)→EHL-3A, EHL-3B 건설→ 상용로 건설 · 전기출력목표 : 200MWe
8	ENERGY SINGULARITY FUSION POWER TECHNOLOGY	중국	2021	자기 가둠, 토카막	DT	112백만 달러 (약 1,520억 원)	· 고온초전도자석 활용 · 전기출력목표 : 100MWe
9	EX-FUSION	일본	2021	관성 가둠, 레이저 관성 가둠	DT	1백만 달러 (약 14억 원)	· 레이저 실증로(~'25)→공학실증로 (~'29)→상용급 발전소(~'35)→ 상용로(~'45) · 전기출력목표 : 200MWe('35) → 1.4GWe('45)
10	FIRST LIGHT FUSION	영국	2011	관성 가둠, 충격기반 관성 가둠	DT	97백만 달러 (약 1,312억 원)	· 발전소 건설(~'32) · 전기출력 목표 : > 60MWe
11	FOCUSED ENERGY	미국, 독일	2021	관성 가둠, 레이저 관성 가둠	DT	82백만 달러 (약 1,108억 원)	· 발전소 건설(~'38) · 전기출력 목표 : 800MWe
12	FUSE	미국, 캐나다	2019	자기 관성 가둠, 자기 라이너 관성 핵융합	DT	18백만 달러 (약 243억 원)	· 발전소 건설(~'30년대) · 열출력목표 : 300MW
13	GAUSS FUSION	독일	2022	자기 가둠, 토카막, 스텔러레이터	DT	8.6백만 달러 (약 116억 원)	· 전기출력목표 : > 100MWe
14	GENERAL ATOMICS	미국	1955	자기 가둠, 고성능 토카막	DT	113백만 달러 (약 1,529억 원)	· 발전소 건설(~'30년대) · 전기출력목표 : 200MWe
15	GENERAL FUSION	캐나다, 영국, 미국	2002	자기 관성 가둠, 자기 타겟 핵융합	DT	> 300백만 달러 (약 4,057억 원)	· LM26 설계('25)→LM26데이터 수집→발전소 건설(~'30년대) · 전기출력목표 : 230MWe(2기 가동 시)
16	HB11 ENERGY HOLDINGS	호주	2017	비열 레이저 핵융합,	pB11	5백만 달러 (약 69억 원)	· 발전소 건설(~'30년대) · 전기출력목표 : 300MWe ~ 500MWe

번호	기업명	국가	설립 연도	방식	연료	투자 유치 규모	목표
				직접 레이저 기반 pB11			
17	HELICAL FUSION CO., LTD.	일본	2021	자기 가둠, 스텔라레이터	DT	6.5백만 달러 (약 88억 원)	· 발전소 건설(~'34) · 고온초전도자석 활용 · 전기출력목표 : 50MWe ~ 100MWe
18	HELICITYSPACE CORPORATION	미국	2018	자기 관성 가둠, Plectoneme	DD	2.4백만 달러 (약 32억 원)	· 우주선 추진체 개발
19	HELION	미국	2013	자기 관성 가둠, 역자장 핵융합	DHe3	577백만 달러 (약 7,805억 원)	· 현재 7번째 프로토타입(Polaris) 건설 중 · 발전소 건설(~'28) · 전기출력목표 : 50MWe
20	HORNE TECHNOLOGIES, INC.	미국	2008	하이브리드 자장 및 정전 가둠	DD, pB11	2백만 달러 (약 28억 원)	· 전기출력목표 : 1MWe
21	KYOTO FUSIONEERING	일본	2019	–	DT	91백만 달러 (약 1,231억 원)	· 핵융합 플라즈마 가열, 연료주기, 열변환 관련 시스템 개발
22	LASERFUSIONX INC.	미국	2022	관성 가둠, 레이저 기반 관성 가둠	DT	0.07백만 달러 (약 1억원)	· 열출력목표 : 400MW
23	LONGVIEW FUSION ENERGY SYSTEMS	미국	2021	관성 가둠, 간접 레이저 기반 핵융합	DT	–	· 발전소 건설(~'30년대 중반) · 전기출력목표 : 440MWe ~ 1,600MWe
24	LPPFUSION, INC	미국	2003	자기 가둠, 고밀도 플라즈마 포커스	pB11	10백만 달러 (약 135억 원)	· 발전소 건설(~'25) · 전기출력목표 : 5MWe
25	MAGNETO INERTIAL FUSION TECHNOLOGIES, INC.	미국	2009	자기 관성 가둠, Z-pinch	DT	12백만 달러 (약 162억 원)	· 발전소 건설(~'30) · 전기출력목표 : 50MWe
26	MARVEL FUSION	독일	2019	관성 가둠, 레이저 기반 직접 관성 가둠	pB11	112백만 달러 (약 1,518억 원)	· 발전소 개념 증명('27) · 전기출력목표 : 200MWe ~ 1,000MWe
27	NEARSTAR FUSIN INC.	미국	2021	자기 관성 가둠	DT, DD, pB11	0.5백만 달러 (약 7억 원)	· 전기출력목표 : 50MWe ~ 1GWe
28	NK LABS, LLC	미국	2008	뮤온 촉매 핵융합	DT	2.5백만 달러 (약 34억 원)	· 발전소 건설(~'32) · 전기출력목표 : 100MWe
29	NOVATRON FUSION	스웨덴	2019	자기 가둠, 미러타입	DT	3백만 달러 (약 43억 원)	· 발전소 건설('36~'39) · 전기출력목표 : 1MWe ~

번호	기업명	국가	설립 연도	방식	연료	투자 유치 규모	목표
	GROUP AB						1.5MWe
30	NT-TAO LTD	이스라엘	2019	자기 가둠, 스텔러레이터	DT	28백만 달러 (약 379억 원)	· 발전소 건설(~'30) · 전기출력목표 : 10MWe ~ 20MWe
31	OPENSTAR TECHNOLOGIES	뉴질랜드	2021	자기 가둠, Levitated Dipole	T, DD	6.8백만 달러 (약 91억 원)	· 발전소 건설(~'20년대 후반) · 고온초전도자석 활용 · 전기출력목표 : ~800MWe (D-D, D-He3 발전)
32	PRINCETON FUSION SYSTEMS	미국	1992	자기 가둠, 역자장 핵융합	DHe3	3.6백만 달러 (약 49억 원)	· 발전소 건설(~'30) · 전기출력목표 : 1MWe
33	PROXIMA FUSION	독일	2023	자기 가둠, 준등력 스텔러레이터	DT	8백만 달러 (약 111억 원)	· 발전소 건설(~'30년대) · 전기출력목표 : 750MWe
34	REALTA FUSION	미국	2022	자기 가둠, 자기 미러 타입	DT	12백만 달러 (약 162억 원)	· 전기생산 및 체적형 핵융합 중성자원 개발 · 전기출력목표 : 100MWe
35	RENAISSANCE FUSION	프랑스	2021	자기 가둠, 스텔러레이터	DT	17.6백만 달러 (약 238억 원)	· 발전소 건설(~'32) · 고온초전도자석 활용 · 전기출력목표 : 1,000MWe
36	SHINE TECHNOLOGIES	미국, 네덜란드	2005	하이브리드 정전 가둠, 자기 정전 가둠	DT	700백만 달러 (약 9,468억 원)	· 열출력목표 : 10~1000W (Phase1)→1MW(Phase2)→10MW(Phase3)→100MW (Phase4)
37	STELLAREX, INC.	미국	2022	자기 가둠, 스텔러레이터	DT	-	· SX1 운전('30년대) · 전기출력목표 : 250MWe
38	TAE TECHNOLOGIES	미국, 영국, 스위스	1998	자기 가둠, 역자장 핵융합	pB1, DT, D-He3, DD	>1,200백만 달러 (약1조6,236억 원)	· Da Vinchi 운전('30년대, pB11 활용 발전소) · 전기출력목표 : 350MWe ~ 500MWe
39	TEHA ENERGY	미국	2022	자기 가둠, 스텔라레이터	DT	23백만 달러 (약 311억 원)	· 발전소 건설(~'30년대) · 전기출력목표 : > 200MWe
40	TOKAMAK ENERGY	영국, 미국	2009	자기 가둠, 구형 토카막	DT	250백만 달러 (약 3,383억 원)	· 발전소 건설(~'33) · 고온초전도자석 활용 · 전기출력목표 : 500MWe
41	TYPE ONE ENERGY GROUP	미국	2019	자기 가둠, 스텔라레이터	DT	30백만 달러 (약 406억 원)	· 발전소 건설(~'33) · 고온초전도자석 활용 · 전기출력목표 : 500MWe
42	XCIMER ENERGY INC.	미국	2021	관성 가둠, 레이저 관성 가둠	DT	12백만 달러 (약 162억 원)	· 전기출력목표 : 400MWe
43	ZAP ENERGY	미국	2017	자기 가둠, Z-pinch	DT	208백만 달러 (약 2,814억 원)	· 발전소 부지 타당성 검토 중 · 전기출력목표 : 1GWe(모듈 당 50MWe)

※ 출처 : The global fusion industry in 2023, Fusion Industry Association, '23.7월

③ 기술 개발 동향

◆ 실험로 규모 핵융합 기술에서 실증로급 핵심기술 확보를 위한 R&D 및 신규 연구시설 구축 등 가용 자원의 대대적 투입

□ (노심 플라즈마 이해) 핵융합로의 연속적인 운전을 위해서는 초고성능 노심 플라즈마의 안정적·연속적 운전이 필수적이며, 이를 위한 R&D 지속 추진

○ (고성능 플라즈마 운전) 자국 실험장치((한)KSTAR, (중)EAST, (일)JT60-SA 등)를 토대로 고성능 플라즈마 유지운전 시나리오 개발에 집중

- 현재까지 초고온·고성능 플라즈마 유지운전 분야에서 한국(KSTAR), 중국(EAST)가 가장 앞서 있으며, 일(JT60-SA)는 ITER의 선행연구장치 역할로 가동 착수('23)

○ (연소플라즈마 확보 노력) 핵융합 반응의 에너지원 활용을 위해 연소플라즈마 데이터 획득 및 운전시나리오 개발 노력 지속

- (한, EU, 일) ITER 장치를 통해 연소플라즈마 데이터 획득, (중) ITER와 더불어 자국 실험장치(BEST) 건설을 통해 획득, (미, 영) ITER 이외의 소형 핵융합 장치 건설을 통해 연소 플라즈마 데이터 획득

□ (시뮬레이션 기술 강화) 핵융합 고성능 플라즈마 운전예측 및 실증로 시스템 전체의 통합모사를 위한 시뮬레이션 기술 개발 추진

○ (시뮬레이션 기술개발) 복잡성이 높은 고성능 플라즈마의 성능예측, 실증로 통합모사를 위해 시뮬레이션 역량 강화 프로그램 추진

- (EU, E-TASC) 슈퍼컴퓨터를 활용한 시뮬레이션 기술개발로, 핵융합 이론 및 시뮬레이션 검증 프로그램 운영, (미, ScIDAC) 고성능 슈퍼컴퓨터를 기반으로 다학제 연구를 통한 핵융합 시뮬레이션 기술 개발 추진

○ (가상핵융합로 개발) 한국은 실증로 전체 통합적 모사 및 운전 성능예측을 위해 단계적인 가상핵융합로 개발 추진 중

- 가상화(VR, AR) 및 인공지능(AI) 기술을 활용하여, 실증로 플랜트 전체의 통합적 모사를 위한 단계적 가상핵융합로 개발(V-KSTAR→V-ITER→V-DEMO) 추진 중

□ (실증로급 기술개발) 핵융합 실증로 개발 가속화와 더불어, 실증로에 적용 가능한 핵심기술 확보를 위해 연구개발 추진 중

○ (토카막 시스템) ITER 조달 품목의 개발을 통해 기술역량을 축적하고, 실증로급 기술개발을 위한 연구개발 추진 중

– (EU, 일본) 가열 장치, 초전도 자석 등 ITER 조달 품목 개발을 위한 연구시설을 구축하고, 이를 활용한 실증로급 기술 개발 추진 중

– (한국) KSTAR 운영을 위한 가열장치 운전 등 실험로급 기술개발 추진 중이며, ITER 비조달 품목에 대한 기술추적 미흡한 상황

○ (연료 시스템) ITER TBM 개발과 더불어, 실증로 활용 가능 소재 개발 등 실증로급 핵심기술 개발을 위한 다양한 연구 추진 중

– (EU, 일본, 중국) 핵융합 중성자원 건설을 통해 핵융합 소재 건전성 평가를 계획 중이며, 삼중수소 증식 시험을 위한 대면적 중성자원 요구도 증대되고 있는 상황

– (한국) 연료시스템을 경험할 수 있는 ITER TBM 사업에 집중되어 있으며, 실증로급 기술개발을 위해서는 핵융합 중성자원 등 연구시설 필요

□ (연구시설 구축) 국가별 핵심기술 확보를 위한 연구시설 건설 및 연구역량 집중을 위한 연구단지 조성 추진

○ (연구시설) 핵융합 실증로급 기술개발을 위한 국가별 다양한 유형의 신규 연구시설 구축이 추진 중

– (EU, 일본, 중국) 핵융합 중성자원(소재개발) 신규건설 중, (EU) 디버터 연구를 전용 토카막 건설(DTT) 등 신규 연구시설 구축 확대

○ (연구단지) 핵융합 핵심기술 개발 및 연구역량 집중을 위한 집적형 연구단지 조성 추진 중

– (중국, CRAFT) CFETR(공학실증) 건설 지원을 위해 초전도자석, 가열 및 전류구동, 디버터, 노심플라즈마 진단 등 기술확보를 위한 종합연구시설

– (일본, IFERC) 컴퓨터 시뮬레이션, ITER 원격실험, 디버터, 블랑켓 등 실증로 기술확보를 위한 실증 종합 연구시설

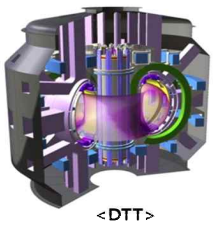
– (영국) 영국 컬햄 과학혁신센터 內 MRF(재료), FTF(재료), H3AT(삼중수소) 연구시설 구축을 통한 핵융합 연료시스템 핵심기술 확보 추진

《 참고. 주요국 핵융합 신규 연구시설 현황 》

국가	장치명	분야	목표 및 내용	기간 및 투자
EU	IFMIF-DONES	중성자원	• DEMO 재료의 방사화 데이터를 획득	(기간) 2030년 완료 (투자) 약 1조 원
	DTT	디버터	• 핵융합 플라즈마 부하제어가 가능한 디버터 시스템 연구	(기간) 2029년 완공 (투자) 6,000억 원
영국	MRF	재료연구	• 방사능 물질 분석을 위한 국가원자력사용자 시설	(기간) 2016년 완공 (예산) 연간 33억 원
	FTF	재료/블랑켓	• 핵융합 조건하에서 핵융합 장치 및 재료 전주기 테스트	(기간) 2023 완공 (투자) 651억 원
	H3AT	연료주기	• 삼중수소 관련 첨단기술 개발을 위한 삼중수소 처리 및 저장 등의 연구	(기간) 2024 완공 (투자) 669억 원
	LIBRTI	블랑켓	• 중성자원을 통해 대규모 증식재 목업 실험	(투자) 4,245억 원
미국	FPP	전력생산	• 증식블랑켓, 플라즈마, 디버터, 소재, 연료주기 등 핵심기술개발 개발	추진전략 마련 및 기본개념 수립
	MPEX	선형 플라즈마 장치	• 핵융합 플라즈마-1차벽 상호작용 연구	(기간) 2028 완공 (투자) 2,683억 원
일본	A-FNS	중성자원	• DEMO 재료의 방사화 데이터를 획득	(기간) 2031년 완공
	IFMIF-EVEDA	중성자원	• DEMO 재료의 방사화 데이터를 획득	(기간) 2020년 1단계 완료
	IFERC	실증종합 연구시설	• 디버터, 블랑켓, 시뮬레이션, 원격제어 등 DEMO 요소기술 개발	BA 프로그램으로 운영 중
중국	CFETR	공학실증 연구	• 2030년대 1단계 운전, 2040년대 2단계 (DEMO급) 가동	(기간) 2035년 완공 (투자) 1천억 위안
	CRAFT	실증종합 연구시설	• CFETR 건설지원을 위한 실증 종합연구시설로 초전도 자석기술과 핵심 토카막 시스템 구축	(기간) 2025년 완공예정 (투자) 1조 1천억 원
	BEST	노심플라즈마	• 핵융합 연소 플라즈마(D-T) 운전데이터 확보를 위한 토카막 구축	(기간) 2027 완공 (투자) 1조 5천억 원

주요 연구 시설

<IFMIF-DONES>



<DTT>

<CRAFT>

<IFERC>

④ 특허 현황

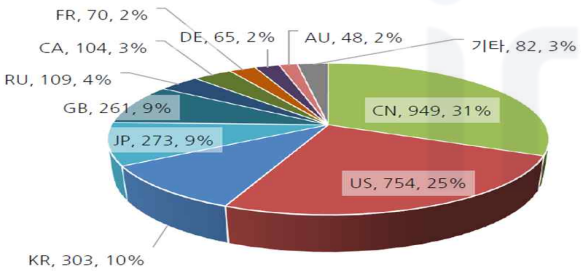
◆ 최근 중국의 특허출원 성장세가 지속되고 있는 상황이며, 한국, 중국, 일본은 핵심기술 특허 경쟁력이 낮은 것으로 파악

□ (국가별/연도별 특허출원) 중국이 가장 많은 949건(31%)을 특허를 출원하였으며, 미국 754건(25%), 한국 303건(10%), 일본 273건(9%) 순으로 분석

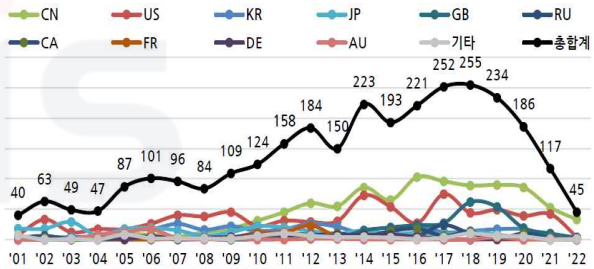
※ 과거 20년간('01~'22) 주요 국가별 특허청 키워드(8대 핵심기술별, 안전인허가 제외) 검색 결과 총 3,018건 검색

○ (국가별 비교) 과거 미국이 가장 많은 특허를 출원하였으나, 2010년을 기점으로 중국이 전 세계 가장 많은 특허를 출원 중

○ (핵심기술 비교) 한국은 주요 출원 10개국 중 노심플라즈마(3위), 핵융합 소재(3위)분야는 상위권이나, 증식블랑켓(6위), 디버터(6위)분야 출원 미진



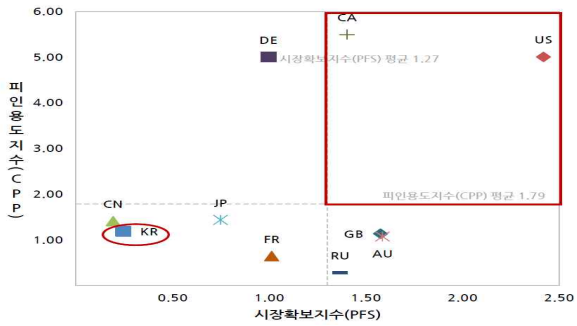
< 국가별 출원 건수 >



< 국가별/연도별 출원 건수 >

□ (핵심기술 경쟁력) 미국, 캐나다 특허의 시장확보지수* 및 피인용도 지수**가 전체 평균보다 높아 특허가 질적으로 우수하고 시장성이 높은 것으로 판단

○ 한국, 중국, 일본의 경우 피인용도지수 및 시장확보 지수가 전체 평균보다 낮은 것으로 분석



< 국가간 시장확보지수-피인용도 분석 >

* 시장확보 지수({PFS, Patent Family Size) : 특정 분야(국가) 등록특허 평균 패밀리 국가 수를 전체 평균 패밀리 국가 수로 나눈 값으로, 지수가 높을수록 시장 지배력이 높은 것을 의미

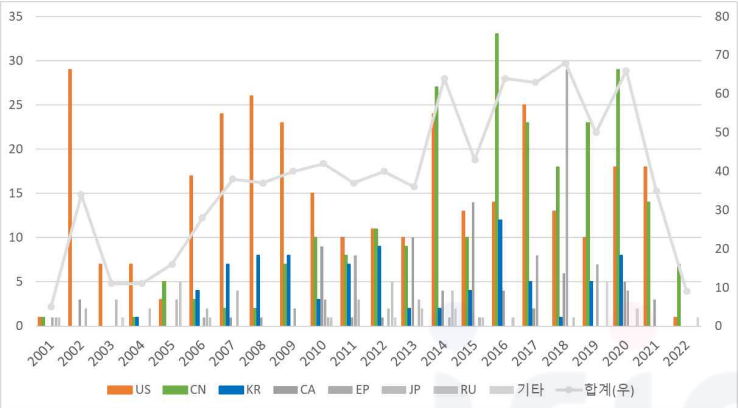
** 피인용도 지수(CPP, Cited Per Patent) : 특허 1건의 평균 피인용 횟수로, 지수가 높을수록 후속 특허 피인용이 많이 되고 있으며, 질적으로 우수한 것을 의미

□ 노심 플라즈마

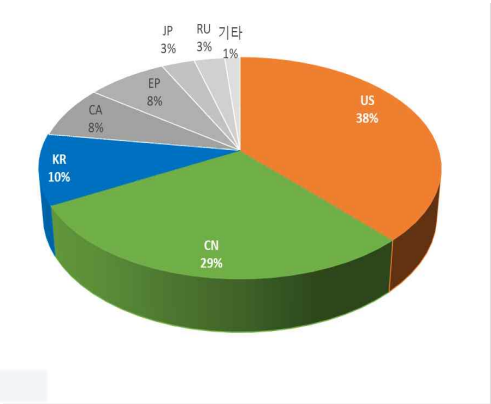
○ (연도별 출원 건수) 최근 20년간 8대 핵심기술분야 중 가장 많은 837건의 특허가 출원되었으며, 2000년대 이후 최근까지 꾸준한 특허출원 증가 추세 경향

○ (국가별 비중) 국가별로 미국이 가장 많은 319건(38%)의 특허를 출원하였으며, 그 뒤로 중국 243건(29%), 한국 86건(10%) 순으로 특허출원

– 2000년대 초반 미국을 중심으로 특허출원이 진행되었다면, 2014년 이후 중국의 특허출원이 크게 증가하는 경향을 보이고 있는 분야



< 연도별 출원 건수 >



< 국가별 비중 >

○ (국가별/특허청별 출원현황) 중국, 한국의 경우 자국 특허청 중심의 출원을 진행하고 있으며, 미국, 캐나다, 유럽,, 일본 등의 경우 세계 주요 국가 특허청에 동시 출원

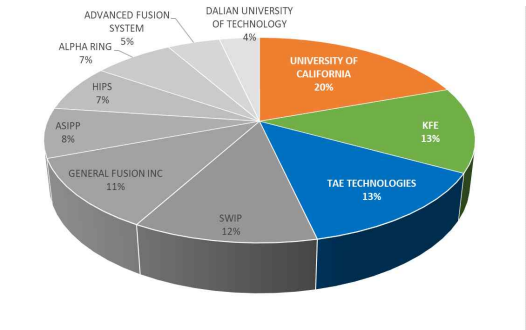
< 국가별-특허청별 출원 현황 >

구분	중국 특허청	유럽 특허청	일본 특허청	한국 특허청	러시아 특허청	미국 특허청	WIPO	기타	총합계
US	9%	13%	10%	13%	0%	42%	8%	5%	100%
CN	98%	0%	0%	0%	0%	0%	1%	0%	100%
KR	1%	2%	1%	86%	0%	6%	3%	0%	100%
CA	6%	11%	2%	11%	2%	34%	19%	16%	100%
EP	8%	14%	5%	6%	0%	38%	16%	13%	100%
JP	8%	8%	54%	8%	0%	15%	8%	0%	100%
RU	4%	4%	13%	4%	63%	8%	4%	0%	100%
기타	0%	8%	8%	17%	0%	8%	25%	33%	100%

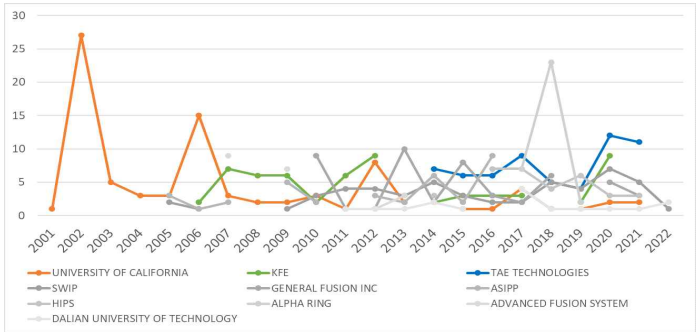
○ (주요 출원인 Top 10) Univ.of CALIFORNIA가 가장 많은 87건(20%)의 특허를 출원하였으며, 그 뒤로 KFE(핵융합(연)) 60건(13%), TAE Technology 60건(13%) 출원 진행

- 2000년대 초반 Univ.of CALIFORNIA가 역자장 방식 플라즈마 제어 관련 특허로 출원을 주도하였으며, TAE Tehcnology는 2010년대 후반 동일 방식 특허 출원을 집중하는 경향

- KFE는 2000년대 중후반 KSTAR 완공 및 실험에 따라 토카막 방식의 노심 플라즈마 진단 관련 특허 출원에 집중되어 있는 경향



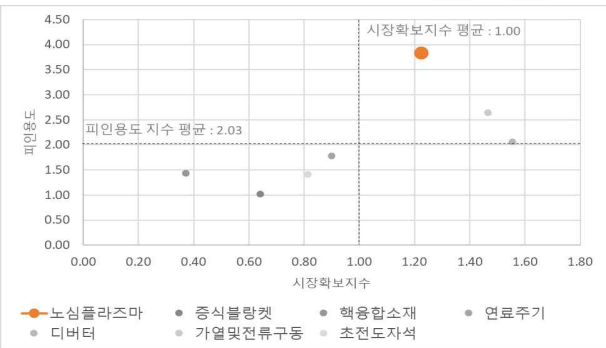
< 주요 출원인 Top 10 출원 비중 >



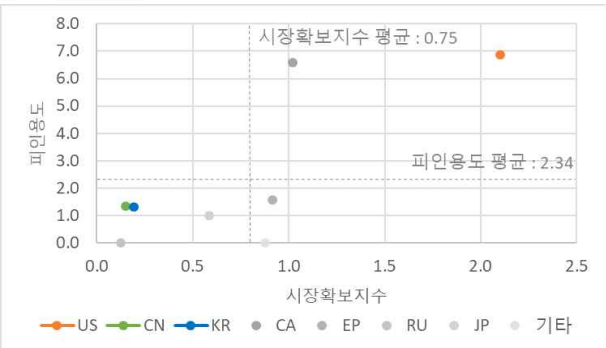
< 주요 출원인 Top 10 연도별 출원 건수 >

○ (특허경쟁력) 노심 플라즈마 분야는 핵심기술 분야 중 피인용도와 시장확보지수가 모두 높은 분야(1사분면)로 특허활동이 활발히 진행되고 있는 분야

- 국가별로 살펴보면 미국 출원특허가 우수한 경쟁력을 확보한 것으로 나타나며, 중국, 한국 특허의 경우 피인용도와 시장확보지수가 모두 낮은 3사분면에 위치

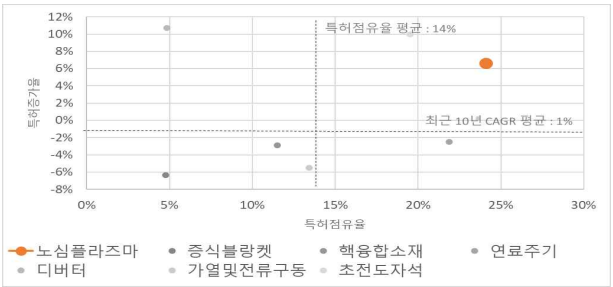


< 피인용도 - 시장확보지수(핵심기술) >



< 피인용도 - 시장확보지수(국가별) >

○ (특허유망성) 노심 플라즈마 분야는 특허 점유율(핵심기술중 1위)과 특허 증가율(핵심기술중 2위)이 모두 높은 분야로 꾸준한 연구개발을 통해, 타 기술분야 대비 특허 활동이 이미 활발한 분야로 분석

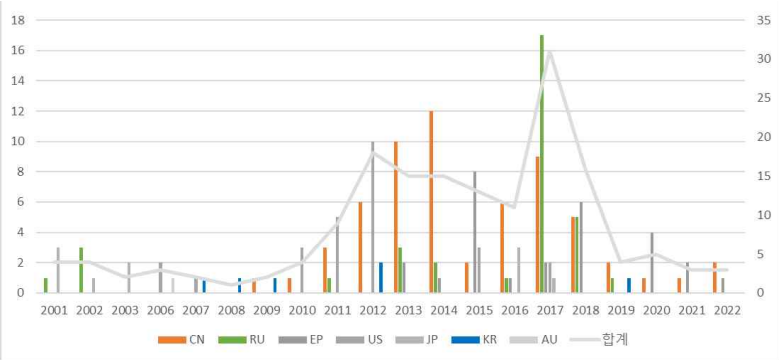


< 특허점유율 - 특허증가율 >

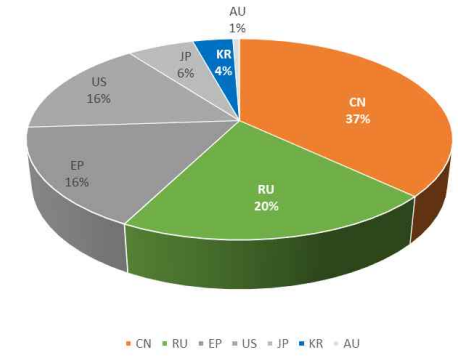
□ 증식블랑켓

○ (연도별 출원 건수) 최근 20년간 총 165건의 특허가 출원되었으며, 2010년 이후 중국을 중심으로 특허출원량 증가

○ (국가별 비중) 중국이 가장 많은 61건(37%)을 출원하였으며, 다음으로 러시아 34건(20%), 유럽 37건(16%), 미국 26건(16%) 순이며, 우리나라는 총 6건(4%) 출원



< 연도별 출원 건수 >



< 국가별 비중 >

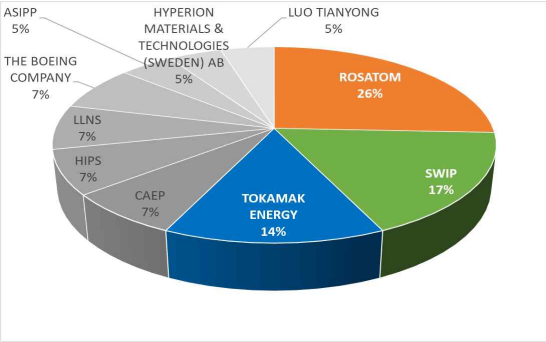
○ (국가별/특허청별 출원현황) 중국, 한국, 일본의 경우 자국 특허청 중심의 출원을 진행 중이며, 러시아, 유럽, 미국의 경우 세계 주요 국가 특허청에 동시 출원

< 국가별-특허청별 출원 현황 >

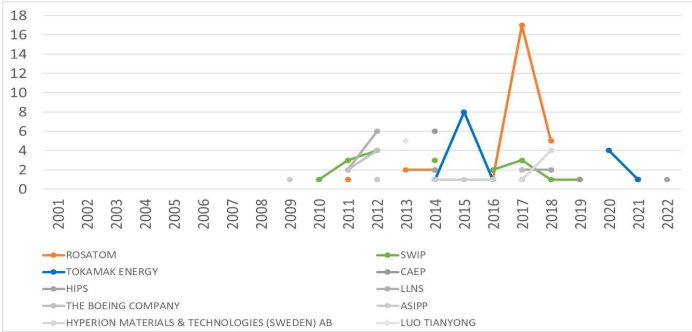
구분	중국 특허청	러시아 특허청	유럽 특허청	미국 특허청	일본 특허청	한국 특허청	WIPO	기타	총합계
CN	98%	2%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	100%
RU	12%	35%	12%	15%	6%	12%	9%	0%	100%
EP	11%	7%	15%	11%	4%	11%	19%	22%	100%
US	4%	4%	19%	46%	12%	4%	8%	4%	100%
JP	0%	0%	0%	0%	90%	10%	0%	0%	100%
KR	0%	0%	0%	17%	0%	83%	0%	0%	100%
AU	0%	0%	100%	0%	0%	0%	0%	0%	100%

○ (주요 출원인 Top 10) ROSATOM(러)이 가장 많은 28건(26%)의 특허를 출원하였으며, 다음으로 SWIP(중) 19건(17%), TOKAMAK ENERGY(영) 15건(14%) 출원 진행

- ROSATOM(러), SWIP(중)의 경우, ITER 블랑켓 일차벽 등 조달품목 개발에 따라 2015~2017년 특허 출원건 수가 크게 증가한 것을 확인



< 주요 출원인 Top 10 출원 비중 >

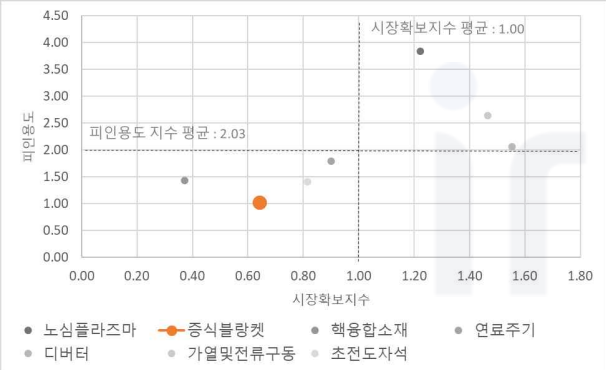


< 주요 출원인 Top 10 연도별 출원 건수 >

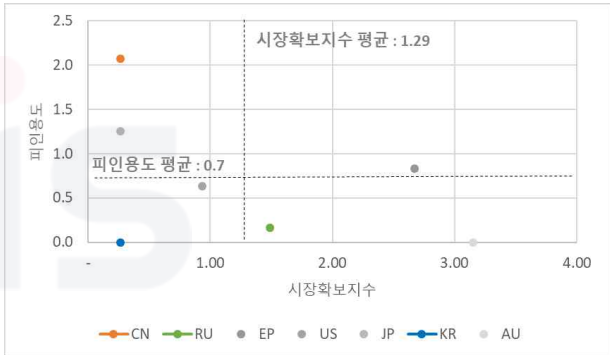
○ (특허경쟁력) 증식블랑켓 분야의 경우 핵심기술 분야 중 피인용도와 시장확보 지수가 낮은 분야로, 타 분야 대비 상대적으로 특허활동이 활발하지는 않은 분야

– 국가별로도 피인용도와 시장확보지수가 월등히 높은 국가(1사분면)는 없는 것으로 파악

※ 중국의 경우 자국 문헌의 인용을 통해 피인용도가 상대적으로 타 국가대비 높은 경향을 보임

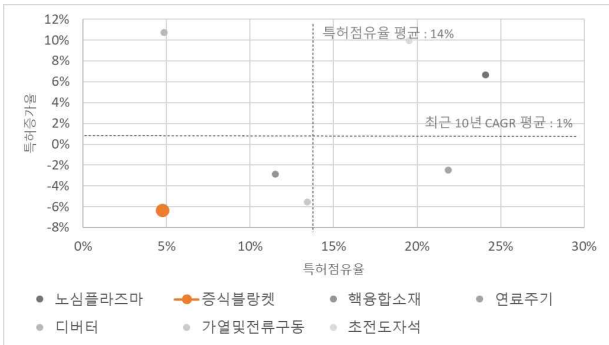


< 피인용도 – 시장확보지수(핵심기술) >



< 피인용도 – 시장확보지수(국가별) >

○ (특허유망성) 증식블랑켓 분야는 특허점유율(핵심기술중 7위)이 낮고, 최근 10년간 특허성장률이 낮은 분야(3사분면)에 위치하고 있으며, 타 기술분야 대비 특허활동이 활발하지 않은 분야로 판단

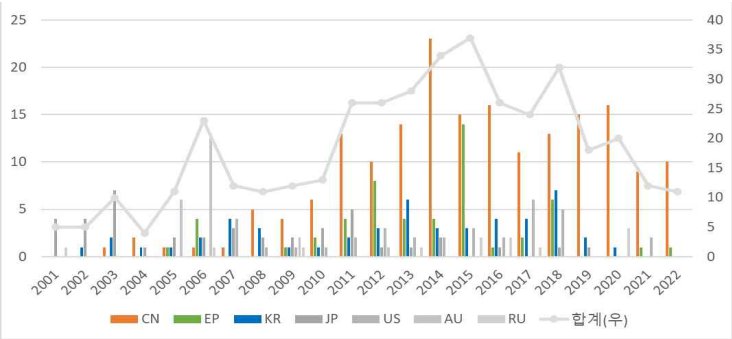


< 특허점유율 – 특허증가율 >

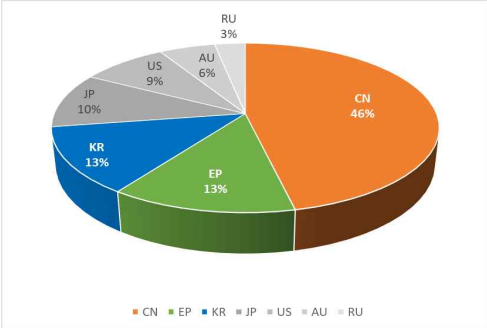
□ 핵융합 소재

○ (연도별 출원 건수) 최근 20년간 총 400건의 특허가 출원되었으며, 20010년 이후 중국을 중심으로 특허출원량이 크게 증가하는 경향을 보이나 최근 감소 추세

○ (국가별 비중) 중국이 가장 많은 186건(46%)의 특허를 출원하였으며, 그 뒤로 유럽 53건(13%), 한국 51건(13%), 일본 42건(10%) 순으로 특허 출원 진행



< 연도별 출원 건수 >



< 국가별 비중 >

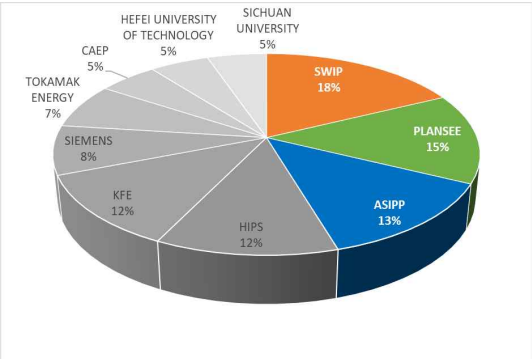
○ (국가별/특허청별 출원현황) 중국 한국, 러시아의 경우 거의 모든 특허를 자국 특허청에 출원하였으며, 유럽, 일본, 미국의 경우 세계 주요 국가 특허청에 동시 출원 진행 중

< 국가별-특허청별 출원 현황 >

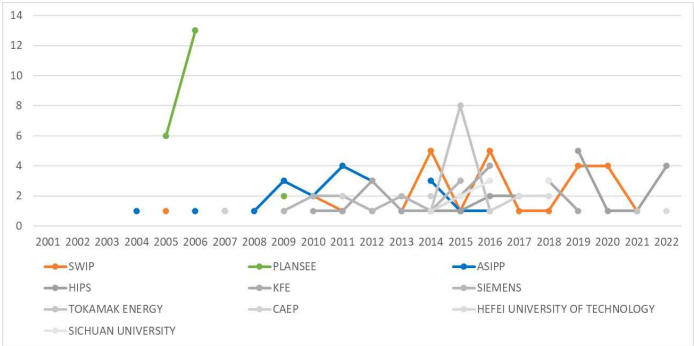
구분	중국 특허청	유럽 특허청	일본 특허청	한국 특허청	러시아 특허청	미국 특허청	WIPO	기타	총합계
CN	99%	0%	0%	0%	1%	0%	1%	0%	100%
EP	8%	19%	4%	4%	4%	11%	23%	28%	100%
KR	0%	2%	0%	90%	0%	8%	0%	0%	100%
JP	2%	12%	57%	5%	0%	14%	7%	2%	100%
US	15%	18%	3%	9%	0%	41%	15%	0%	100%
AU	18%	9%	9%	18%	0%	23%	5%	18%	100%
RU	0%	0%	0%	0%	100%	0%	0%	0%	100%

○ (주요 출원인 Top 10) 주요 출원인 중 SWIP, ASIPP, HIPS 등 중국의 연구기관이 특허 출원양이 많은 것으로 분석

– 2010년대 중반 이후 중국 연구기관의 특허출원량이 크게 증가하고 있음을 확인할 수 있으며, 핵융합(연)(KFE)은 18건(12%)을 출원하며 2010년대 이후 출원 진행 중



< 주요 출원인 Top 10 출원 비중 >

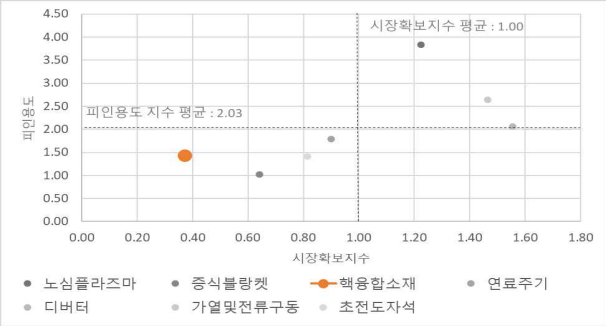


< 주요 출원인 Top 10 연도별 출원 건수 >

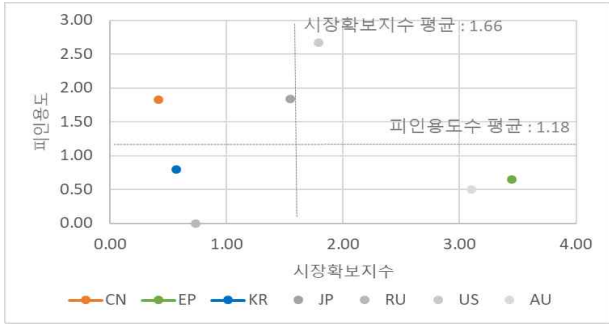
○ (특허경쟁력) 핵융합 소재 분야의 경우 핵심기술 중 피인용도와 시장확보지수가 낮은 분야로, 타 분야 대비 출원된 특허가 질적으로 낮은 수준으로 파악

– 국가별로 살펴보면 미국이 유일하게 피인용도와 시장확보지수가 높은 1사분면 위치

※ 중국의 경우 자국 문헌의 인용을 통해 피인용도가 상대적으로 타 국가대비 높은 경향을 보임

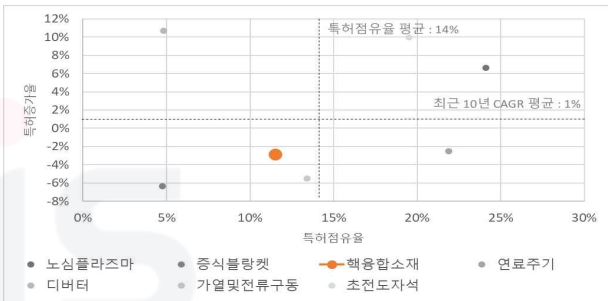


< 피인용도 – 시장확보지수(핵심기술) >



< 피인용도 – 시장확보지수(국가별) >

○ (특허유망성) 핵융합 소재 분야는 특허 점유율이 낮고(핵심기술중 5위), 최근 10년간 특허성장률도 평균 이하로, 특허 활동이 활발하지는 않은 분야(3사분면 위치)

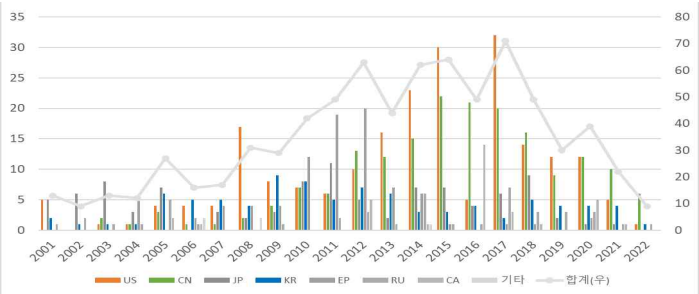


< 특허점유율 – 최근 10년 연평균 증가율 >

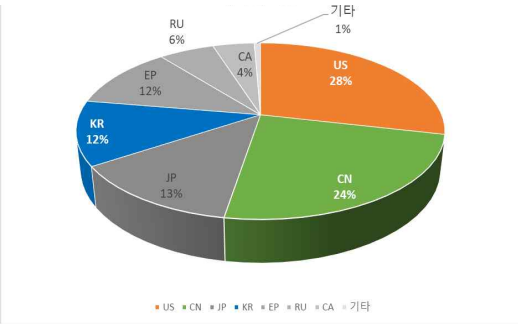
□ 연료주기

○ (연도별 출원 건수) 최근 20년간 총 760건의 특허가 출원된 분야로 2010년대 중반까지 꾸준한 증가추세를 유지하고 있었으나, 최근 감소 추세로 확인

○ (국가별 비중) 미국이 가장 많은 217건(28%)을 출원하였으며, 다음으로 중국 183건(24%), 일본 100건(13%) 순이며, 한국은 90건(12%) 특허 출원



< 연도별 출원 건수 >



< 국가별 비중 >

○ (국가별/특허청별 출원현황) 중국, 한국의 경우 거의 모든 특허를 자국 특허청에 출원하는 경향을 보이고 있으며, 미국, 일본, 유럽, 러시아의 경우 세계 주요 특허청에 동시 출원 진행

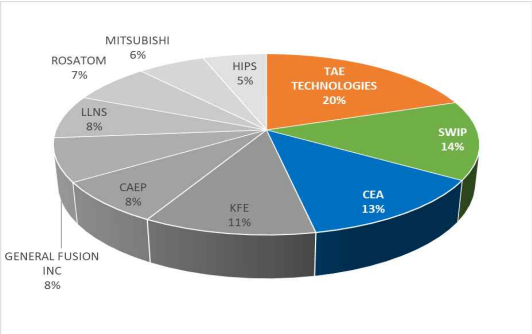
< 국가별-특허청별 출원 현황 >

구분	중국 특허청	유럽 특허청	일본 특허청	한국 특허청	러시아 특허청	미국 특허청	WIPO	기타	총합계
US	10%	14%	12%	8%	1%	41%	9%	5%	100%
CN	95%	1%	0%	0%	1%	2%	2%	0%	100%
JP	7%	6%	62%	7%	1%	16%	1%	0%	100%
KR	0%	1%	1%	96%	0%	0%	1%	1%	100%
EP	3%	19%	3%	17%	3%	17%	11%	25%	100%
RU	5%	5%	11%	5%	68%	7%	0%	0%	100%
CA	15%	12%	0%	15%	0%	24%	18%	15%	100%
기타	20%	0%	0%	0%	0%	40%	20%	20%	100%

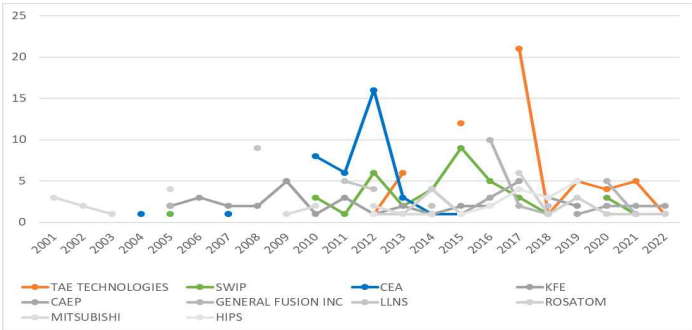
○ (주요 출원인 Top 10) TAE Technologies(미)가 가장 많은 56건의 특허를 출원하였으며, 다음으로 SWIP(중) 40건(14%), CEA(프) 37건(13%) 출원 진행

- TAE Technology(미)의 경우 역자장 방식 핵융합 시스템 특허(연료공급 포함)를 여러 국가에 출원함에 따라 가장 높은 순위로 분석

- CEA(프), 핵융합(연)(KFE)의 경우 원자력 분야에서 삼중수소 취급 관련 특허를 출원하면서 주요 출원인 중 상위권에 포함된 것으로 분석



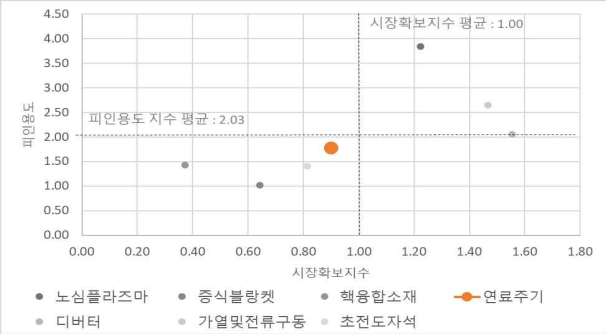
< 주요 출원인 Top 10 출원 비중 >



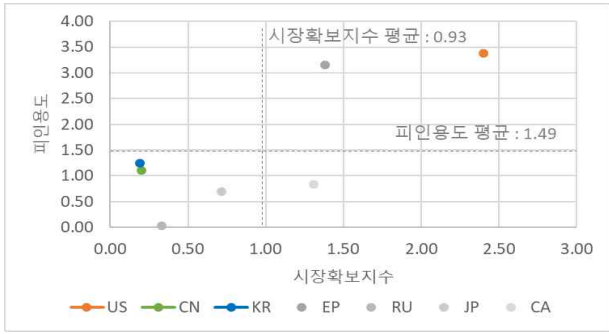
< 주요 출원인 Top 10 연도별 출원 건수 >

○ (특허경쟁력) 연료주기 분야 특허는 피인용도와 시장확보지수가 모두 낮은 분야로 출원된 특허의 질적 수준이 타 핵심기술대비 상대적으로 낮은 분야

- 국가별로 미국과 유럽이 피인용도와 시장확보지수가 모두 높은 1사분면 위치

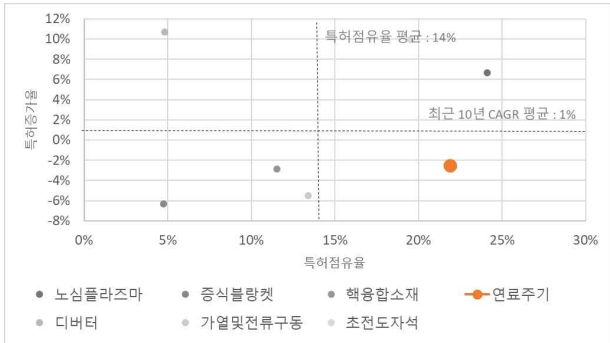


< 피인용도 – 시장확보지수(핵심기술) >



< 피인용도 – 시장확보지수(국가별) >

○ (특허유망성) 연료주기 분야는 특허 점유율이 높은 반면, 최근 10년간 특허 증가율은 낮은 분야(4사분면 위치)로, 과거 원자력 분야의 삼중수소 취급 관련 특허를 보유하고 있으나, 최근 핵융합 관련 연구가 활발하지는 않은 분야로 파악

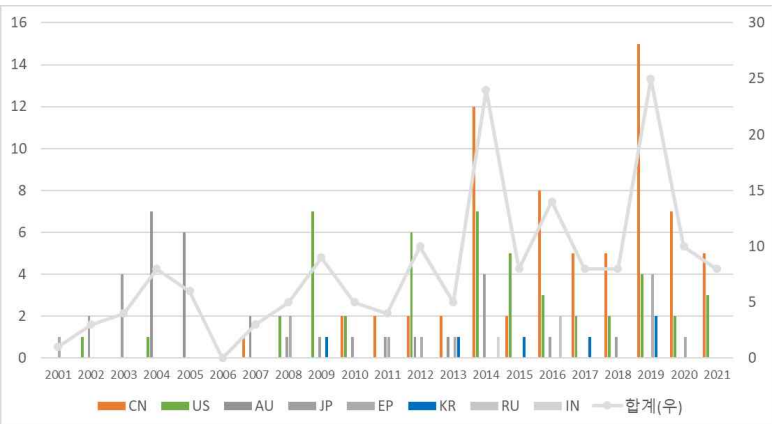


< 특허점유율 – 최근 10년 연평균 증가율 >

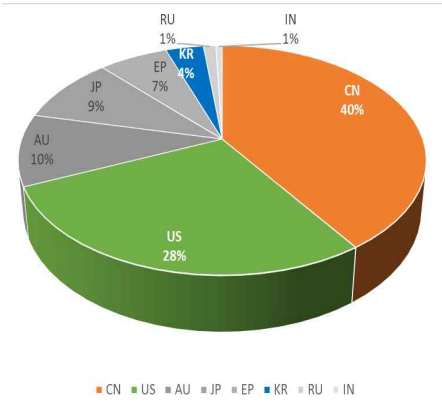
□ 디버터

○ (연도별 출원 건수) 최근 20년간 총 168건의 특허가 출원되었으며, 2010년대 이후 중국이 주도적으로 특허 출원을 크게 늘리고 있는 것으로 파악

○ (국가별 비중) 국가별로 중국이 가장 많은 68건(40%) 출원하였으며, 미국이 47건(28%)을 출원하였으며, 한국은 6건(4%) 출원 진행



< 연도별 출원 건수 >



< 국가별 비중 >

○ (국가별/특허청별 출원현황) 중국, 한국의 경우 모든 특허를 자국에 출원하고 있으며, 미국, 오스트리아, 일본, 유럽의 경우 세계 주요 특허청에 출원을 진행하고 있는 상황

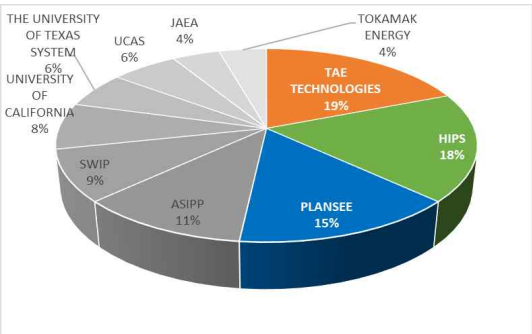
< 국가별-특허청별 출원 현황 >

구분	중국 특허청	유럽 특허청	일본 특허청	한국 특허청	러시아 특허청	미국 특허청	WIPO	기타	총합계
CN	100%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	100%
US	13%	15%	13%	13%	0%	38%	6%	2%	100%
AU	12%	12%	18%	12%	0%	12%	12%	18%	94%
JP	6%	13%	69%	6%	0%	6%	0%	0%	100%
EP	0%	27%	9%	9%	0%	27%	0%	27%	100%
KR	0%	0%	0%	100%	0%	0%	0%	0%	100%
기타	0%	0%	0%	0%	67%	0%	0%	33%	100%

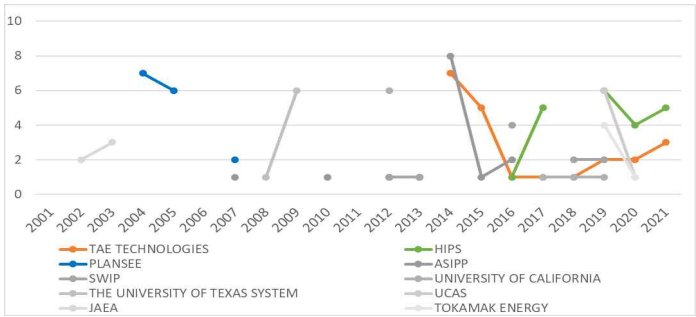
○ (주요 출원인 Top 10) TAE TECHNOLOGY가 가장 많은 22건(19%)의 특허를 출원하였으며, 그 뒤로 HIPS 21건(18%), PLANSEE 17건(15%)을 출원

- TAE TECHNOLOGY의 특허는 역자장 방식 핵융합 시스템 특허(디버터 포함)를 여러 국가에 출원함에 따라 디버터 분야 가장 높은 순위로 분석

- PLANSEE는 디버터 모노블럭 냉각, 제작 등 특허를 2000년대 초반 출원하였으며, HIPS의 경우 디버터 구조, 교체방법, 데이터 처리 등 특허를 2010년대 후반 출원



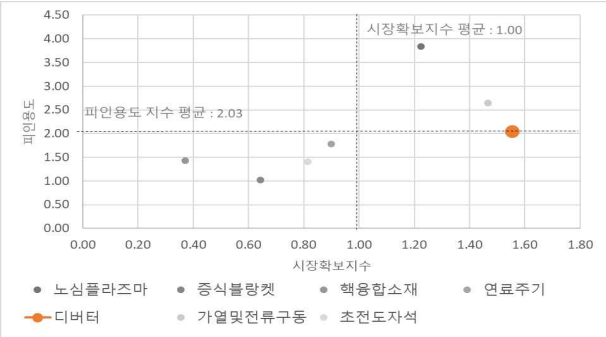
< 주요 출원인 Top 10 출원 비중 >



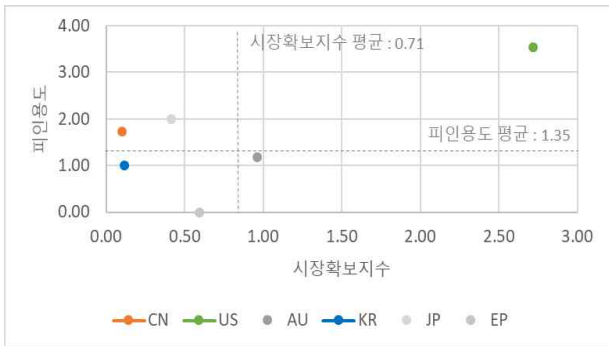
< 주요 출원인 Top 10 연도별 출원 건수 >

○ (특허경쟁력) 디버터 출원 특허는 피인용도와 시장확보지수가 모두 높은 분야(1사분면)으로 출원된 특허의 질적 수준과 시장성이 높은 것으로 확인

- 국가별로 살펴보면 미국이 가장 높은 피인용도와 시장확보지수를 보유하였으며, 기타 여러 국가의 특허의 질적수준 차이가 크지는 않은 상황

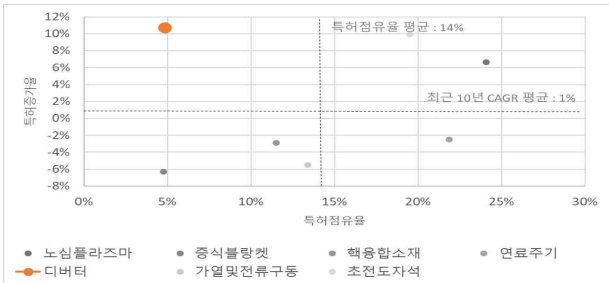


< 피인용도 - 시장확보지수(핵심기술) >



< 피인용도 - 시장확보지수(국가별) >

○ (특허유망성) 디버터 분야는 특허점유율이 낮은 분야(핵심기술 중 6위)이나, 특허증가율이 가장 높은 분야로, 최근에 가까워 질수록 특허활동이 활발해지고 있는 유망 분야로 분류 가능

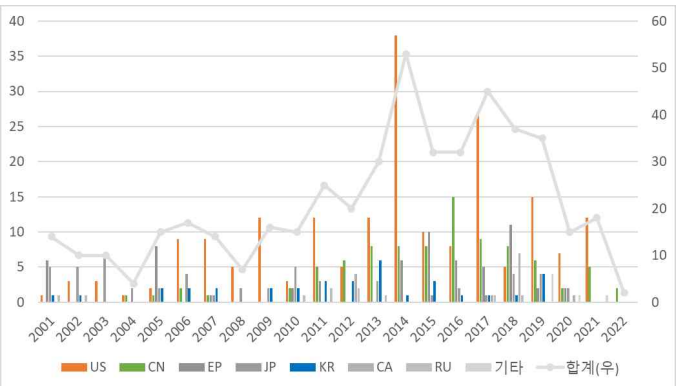


< 특허점유율 - 특허증가율 >

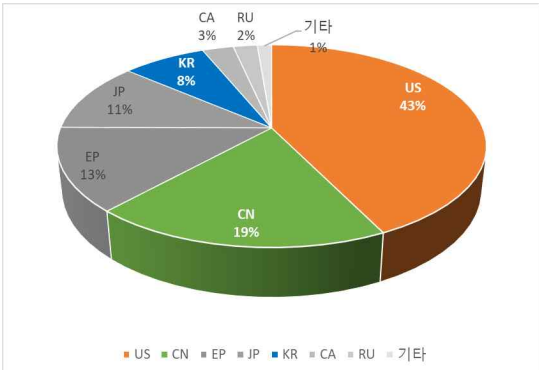
□ 가열 및 전류구동

○ (연도별 출원 건수) 최근 20년간 총 466건의 특허가 출원되었으며, 2010년대 중반 크게 증가하였으나, 이후 점차 감소추세에 있는 것으로 확인

○ (국가별 비중) 미국이 가장 많은 199건(43%)의 특허를 출원하였으며, 그 뒤로 중국 89건(19%), 유럽 62건(13%) 순이며, 한국은 35건(8%) 특허 출원 진행



< 연도별 출원 건수 >



< 국가별 비중 >

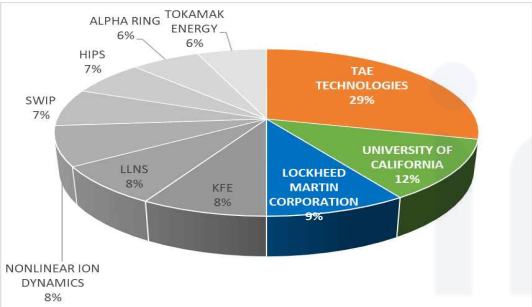
○ (국가별/특허청별 출원현황) 중국, 한국, 일본, 러시아는 자국 특허청 위주의 특허를 출원하고 있으며, 미국과 유럽은 세계 주요 특허청에 모두 출원을 진행 중

< 국가별-특허청별 출원 현황 >

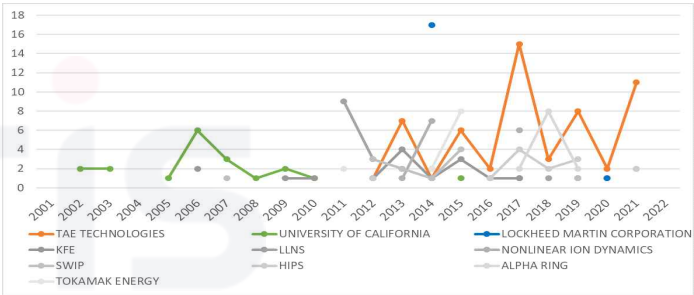
구분	중국 특허청	유럽 특허청	일본 특허청	한국 특허청	러시아 특허청	미국 특허청	WIPO	기타	총합계
US	6%	17%	12%	11%	1%	48%	5%	1%	100%
CN	90%	1%	0%	0%	2%	4%	1%	1%	100%
EP	10%	15%	10%	15%	3%	26%	11%	11%	100%
JP	2%	6%	73%	2%	2%	12%	4%	0%	100%
KR	0%	3%	3%	74%	0%	9%	9%	3%	100%
CA	15%	8%	0%	8%	8%	31%	15%	15%	100%
RU	0%	10%	0%	0%	80%	0%	10%	0%	100%
기타	0%	17%	17%	17%	0%	33%	17%	0%	100%

○ (주요 출원인 Top 10) TAE Technologies(미), University of California(미), Lochheed Martin(미) 등 미국 산업체 및 대학이 주요 출원인 상위로 분석

– 2000년대 University of California(미)가 특허출원을 주도하였으며, 2010년대 TAE Technologies(미)가 특허출원을 주도, 핵융합(연)(KFE)는 16건(8%)의 특허를 출원



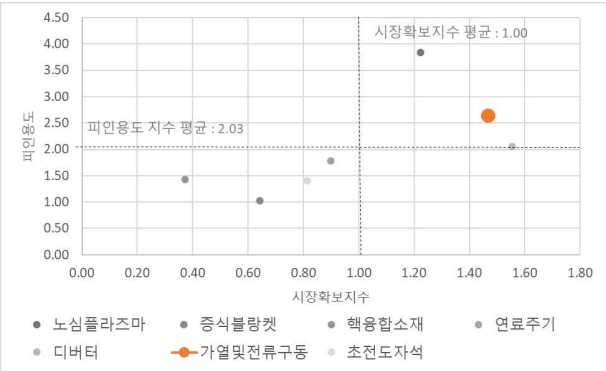
< 주요 출원인 Top 10 출원 비중 >



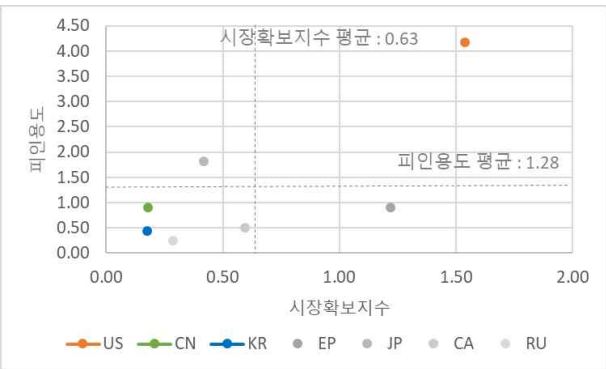
< 주요 출원인 Top 10 연도별 출원 건수 >

○ (특허경쟁력) 가열 및 전류구동 분야는 핵심기술 분야 중 피인용도와 시장확보지수가 모두 높은 분야(1사분면)으로 출원된 특허의 경쟁력이 상대적으로 높은 분야

– 국가별로는 미국이 유일하게 피인용도와 시장확보지수고 높은 1사분면에 위치하고 있으며, 한국과 중국의 특허는 경쟁력이 낮은 것으로 분석

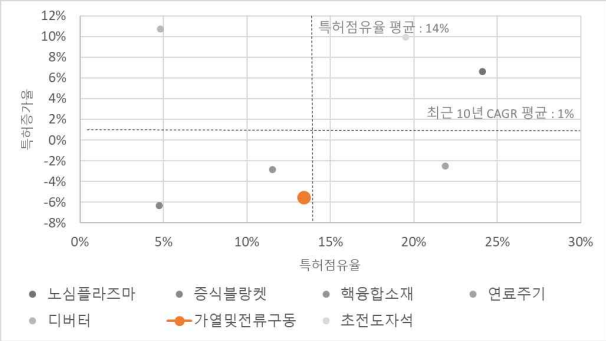


< 피인용도 - 시장확보지수(핵심기술) >



< 피인용도 - 시장확보지수(국가별) >

○ (특허유망성) 가열 및 전류구동 분야는 특허점유율이 중간 수준(핵심기술 중 3위)이나, 최근 10년간 특허 증가율이 낮은 분야로, 과거에 특허활동이 집중되어 있었던 것으로 파악

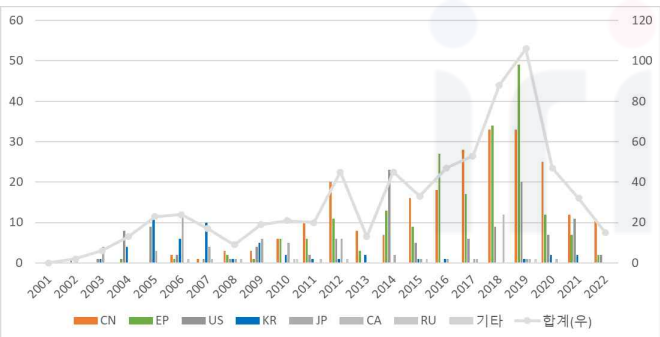


< 특허점유율 - 최근 10년 연평균 증가율 >

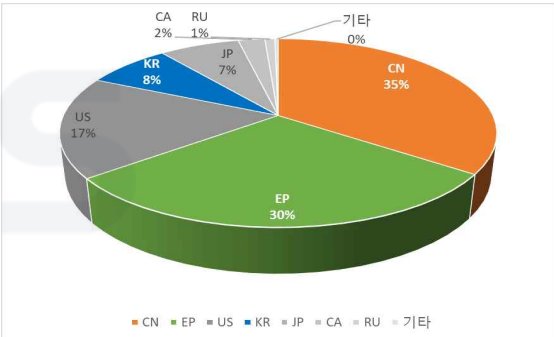
□ 초전도 자석

○ (연도별 출원 건수) 최근 20년간 총 678건의 특허가 출원되었으며, 중국, 유럽을 중심으로 최근까지 특허 출원이 꾸준히 증가하고 있는 분야

○ (국가별 비중) 중국이 가장 많은 236건(35%)의 특허를 출원하였으며, 유럽 201건(30%), 미국 118건(17%), 한국 51건(8%) 순으로 특허 출원 진행



< 연도별 출원 건수 >



< 국가별 비중 >

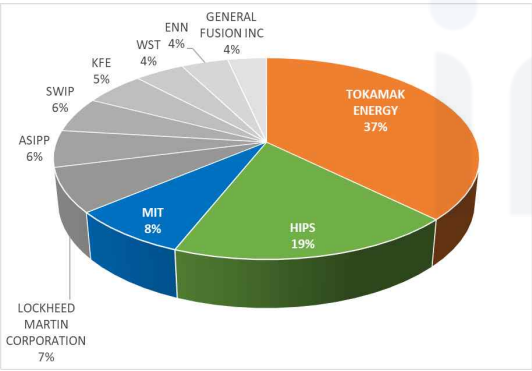
○ (국가별/특허청별 출원현황) 중국, 한국, 러시아의 경우 자국 특허청 위주의 특허 출원을 진행 중이며, 유럽, 미국. 일본의 경우 세계 주요 특허청에 출원 진행 중

< 국가별-특허청별 출원 현황 >

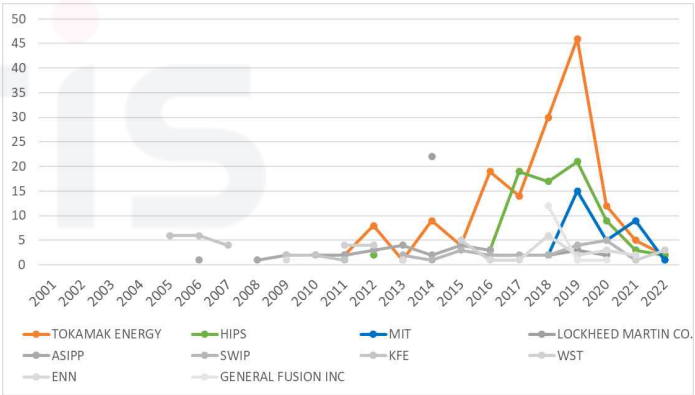
구분	중국 특허청	유럽 특허청	일본 특허청	한국 특허청	러시아 특허청	미국 특허청	WIPO	기타	총합계
CN	92%	0%	0%	0%	1%	3%	3%	0%	100%
EP	10%	16%	8%	10%	2%	18%	14%	21%	100%
US	7%	13%	8%	13%	1%	39%	16%	3%	100%
KR	2%	0%	2%	86%	0%	4%	6%	0%	100%
JP	10%	13%	29%	10%	0%	21%	15%	2%	100%
CA	13%	13%	0%	13%	13%	19%	13%	19%	100%
RU	0%	0%	0%	0%	100%	0%	0%	0%	100%
기타	0%	0%	0%	0%	50%	0%	0%	50%	100%

○ (주요 출원인 Top 10) Tokamak Energy(영)이 가장 많은 특허를 출원하였으며, 그 뒤로 HIPS(중), MIT(미) 순으로 특허를 출원하였으며, 공통적으로 최근 특허출원 집중

- Tokamak Energy(영)은 최근 고온 초전도 자석 관련 특허를 전 세계에 출원 중인 것으로 파악되고 있으며, HIPS(중)의 경우에도 최근 고온 초전도 자석 관련 특허 출원 진행 중



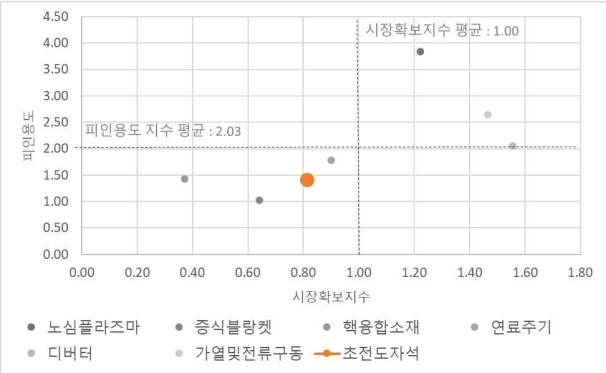
< 주요 출원인 Top 10 출원 비중 >



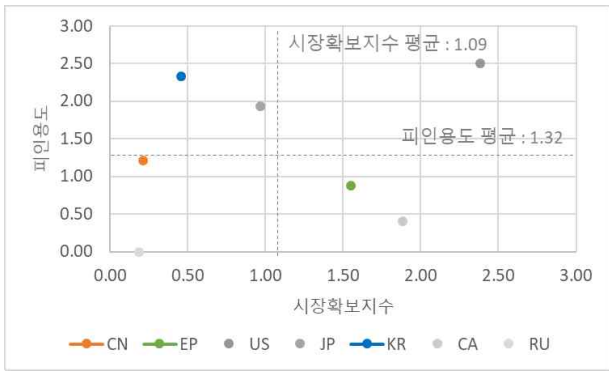
< 주요 출원인 Top 10 연도별 출원 건수 >

○ (특허경쟁력) 초전도 자석 분야는 피인용도와 시장확보지수가 모두 낮은 분야(3사분면)이나, 최근 특허가 집중되고 있는 만큼 향후 피인용도 증가 가능성도 존재

- 국가별로 미국의 출원 특허가 경쟁력인 높은 1사분면에 위치하고 있으며, 한국은 핵심기술 중 유일하게 초전도자석 특허의 피인용도 주요국 평균 이상인 것으로 분석

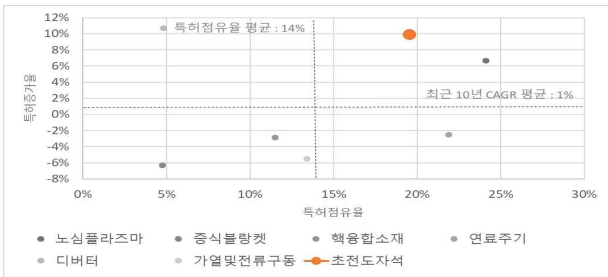


< 피인용도 - 시장확보지수(핵심기술) >



< 피인용도 - 시장확보지수(국가별) >

○ (특허유망성) 초전도 자석 분야는 특허 점유율과 최근 10년간 특허 성장률이 높은 분야(핵심기술 중 1위)로 1사분면에 위치하고 있으며, 최근 활발한 특허활동이 진행되고 있는 분야로 파악



< 특허점유율 - 최근 10년 연평균 증가율 >

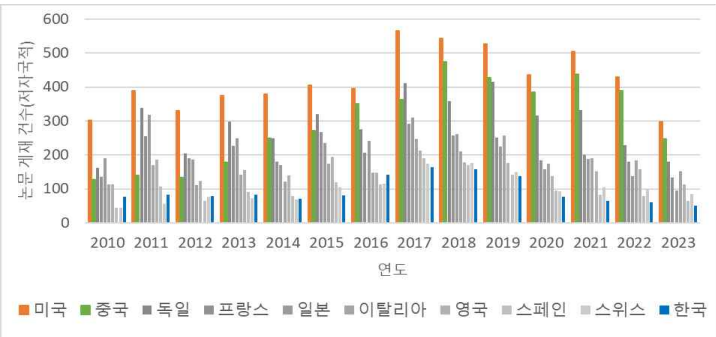
⑤ 논문게재 현황

◆ 미국이 가장 많은 논문을 게재하고 있으며, 특허 분석 결과와 동일하게 최근 중국이 큰 성장세 지속

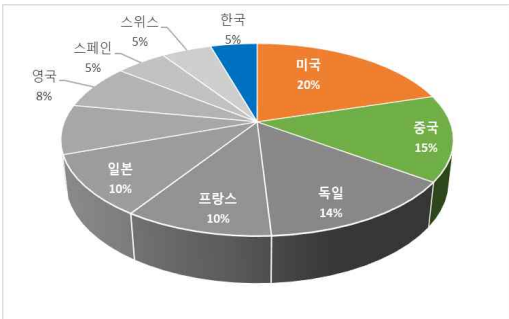
□ (연도별 게재 건수) 8대 핵심기술 분야는 지난 14년간 총 19,166건의 논문이 게재되었으며, 꾸준히 성장하고 있는 추세(연평균 성장률 2.1%)

※ 과거 14년간('10~'23) 논문 DB(Web of Science) 키워드(8대 핵심기술별) 검색 결과 총 19,166건 검색

□ (국가별 비중) 미국(5,875건)이 가장 많은 논문을 발표, 최근 중국의 성장률이 가장 높고(연평균 성장률 9.7%, 1위) 한국은 10위(1,322건) 수준



< 연도별/국가별 Top 10 게재 건수 >

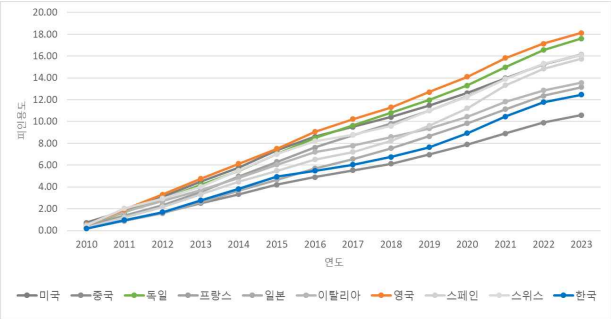


< 국가별 Top 10 게재 비중 >

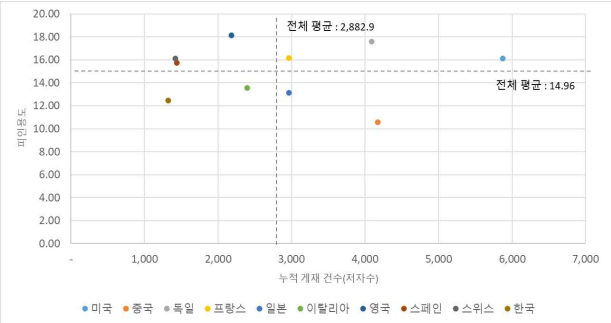
□ (핵심기술) 한국은 주요 논문게재 국가 중 초전도 자석 분야(6위)가 가장 높은 순위에 위치하고 있으며, 대부분 하위권에 분포

※ 게재건수 순위 : 노심플라즈마(11위), 가열 및 전류구동(13위), 초전도자석(6위), 증식블랑켓(8위), 핵융합소재(11위), 연료주기(8위), 디버터(13위), 안전·인허가(8위)

□ (피인용도) 피인용도가 가장 높은 국가는 영국이며, 미국, 독일, 프랑스가 질적 수준이 높은 1사분면에 위치, 한국은 낮은 3사분면 위치



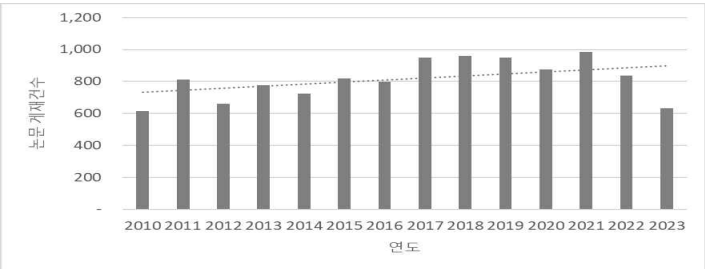
< 국가별 연도별 피인용도 분석 >



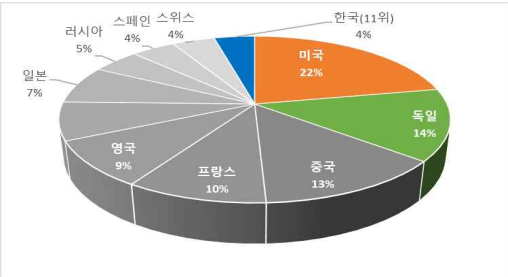
< 게재 건수/피인용도 분석 >

□ 노심 플라즈마

○ (연도별 게재 건수) 노심플라즈마 분야는 지난 14년간 총 11,398건의 논문이 게재되었으며, 꾸준히 관련 논문이 게재되고 있는 분야(연평균 성장률 2.6%)

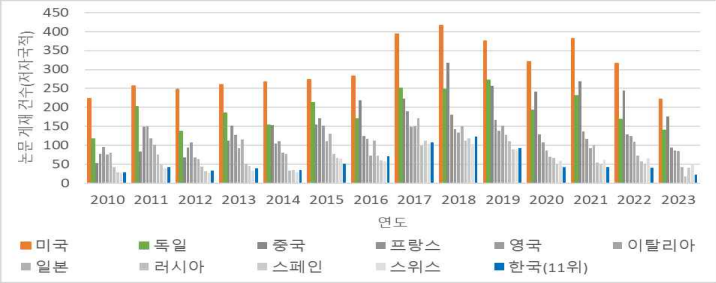


< 연도별 게재 건수 >

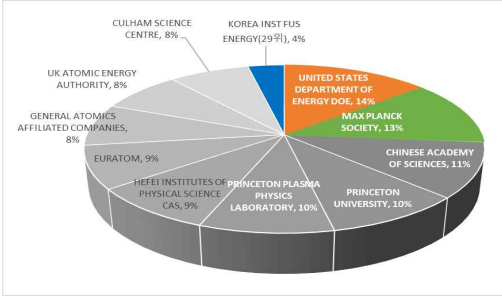


< 국가별 Top 10 게재 비중 >

○ (국가별 비중) 분석기간 동안 국가별로 미국(4,239건)이 가장 많은 논문을 발표하고 있으며, 연도별로 매년 미국에서 가장 많은 논문이 발표되었으나, 최근 중국(연평균 성장률 13.6%, 1위)에서 많은 논문이 발표되고 있는 형태. 한국은 게재 건수 11위(769건)



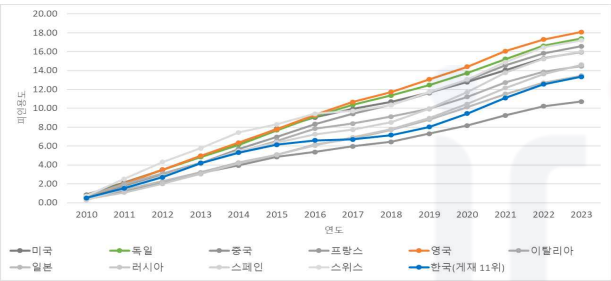
< 연도별/국가별 Top 10 게재 건수 >



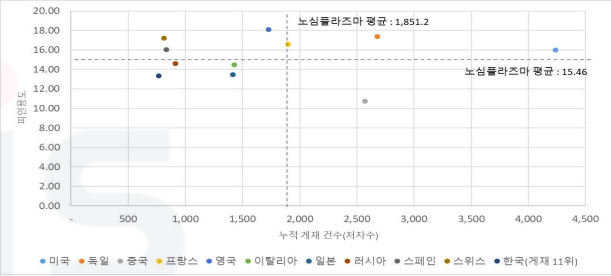
< 기관별 Top 10 게재 비중 >

○ (게재 기관) 분석기간 동안 DOE(미국)에서 가장 많은 2,289건의 논문이 발표되었으며, 그 뒤로 막스플랑크(독일, 2,059건), CAS(중국, 1,744건) 비중이 높고, 한국의 KFE는 29위(566건)

○ (피인용도) 논문 편당 피인용도가 가장 높은 국가는 영국이며, 미국, 독일, 프랑스가 논문의 질적수준과 게재건수가 모두 높은 1사분면에 위치하는 것으로 분석. 한국은 피인용도와 게재건수가 낮은 3사분면에 위치



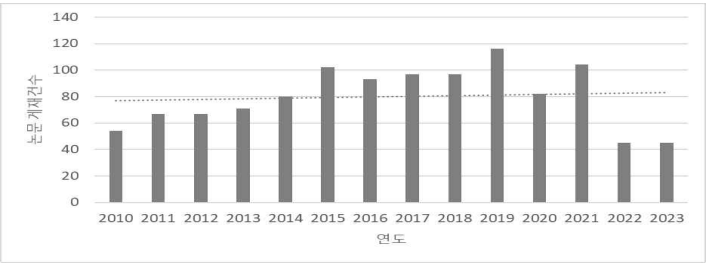
< 국가별 연도별 피인용도 분석 >



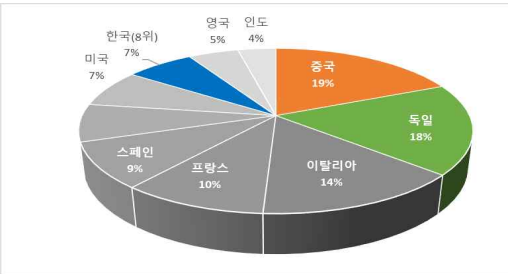
< 게재 건수/피인용도 분석 >

□ 증식블랑켓

○ (연도별 게재 건수) 증식블랑켓 분야는 지난 14년간 총 1,120건의 논문이 게재되었으며, 과거부터 꾸준하게 증가하다가 최근 감소추세(연평균 성장률 −2%)

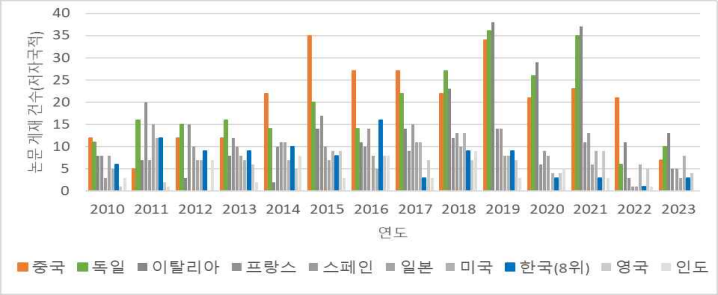


< 연도별 게재 건수 >

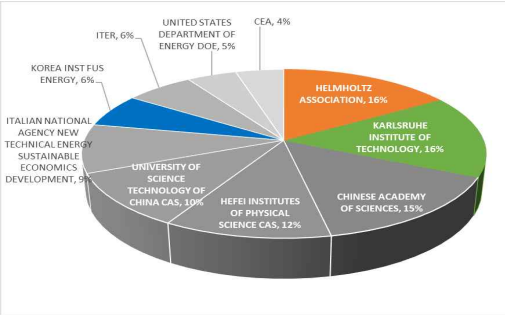


< 국가별 Top 10 게재 비중 >

○ (국가별 비중) 분석기간 동안 국가별로 중국(280건)이 가장 많은 논문을 발표하고 있으며, 연도별로 매년 중국에서 가장 많은 논문이 발표되었으나, 최근 2019년 이후 독일에서 많은 논문이 게제된 것을 확인. 한국은 게재 건수 8위(101건)



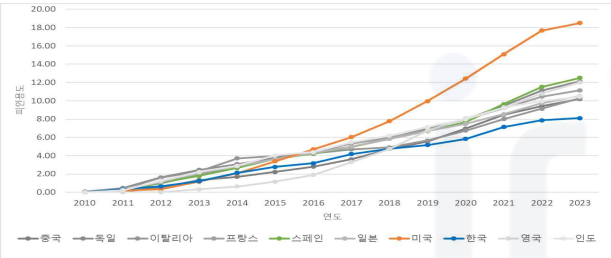
< 연도별/국가별 Top 10 게재 건수 >



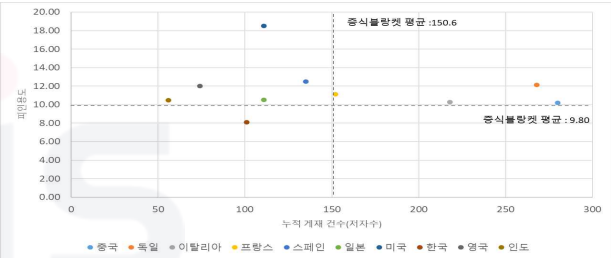
< 기관별 Top 10 게재 비중 >

○ (게재 기관) 분석기간 동안 HELMHOLZ(독일)에서 가장 많은 212건의 논문이 발표되었으며, 그 뒤로 KARLSRUHE(독일, 208건), CAS(중국, 196건) 비중이 높고, 한국의 KFE는 7위(84건)

○ (피인용도) 논문 편당 피인용도가 가장 높은 국가는 미국이며 타 국가대비 피인용도가 크게 높고, 독일, 중국, 이탈리아, 프랑스가 논문의 질적수준과 게재건수가 모두 높은 1사분면에 위치하는 것으로 분석. 한국은 피인용도와 게재건수가 낮은 3사분면에 위치(Top 10개국 중 피인용도 최하위)



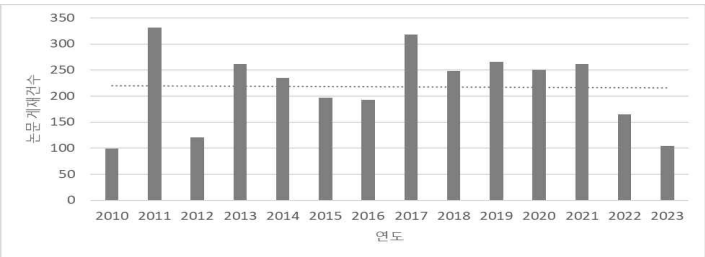
< 국가별 연도별 피인용도 분석 >



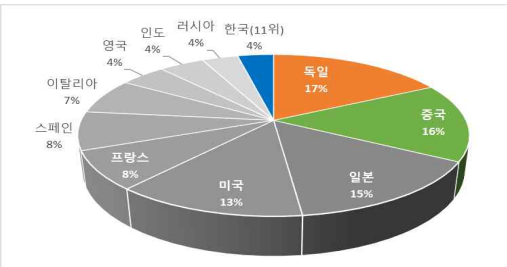
< 게재 건수/피인용도 분석 >

□ 핵융합 소재

○ (연도별 게재 건수) 핵융합 소재 분야는 지난 14년간 총 3,050건의 논문이 게재되었으며, 최근 게재 건수가 감소한 분야(연평균 성장률 4.3%)

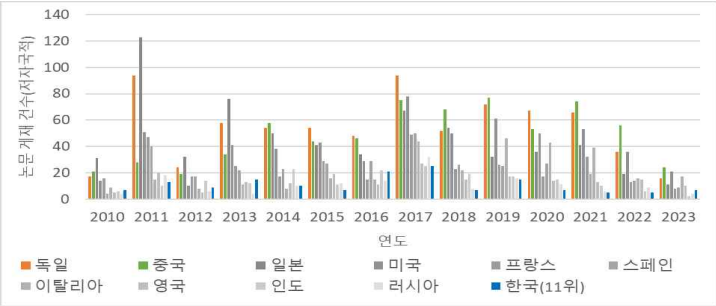


< 연도별 게재 건수 >

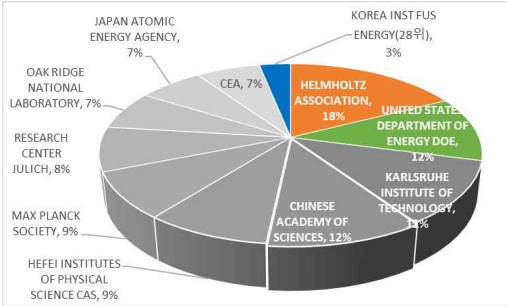


< 국가별 Top 10 게재 비중 >

○ (국가별 비중) 분석기간 동안 국가별로 독일(752건)이 가장 많은 논문을 발표하고 있으며, 2010년대 초 일본에서 많은 논문이 게제되었으나, 중반 이후 독일과 중국에서 많은 논문이 게재되고 있는 것으로 파악. 한국은 게재 건수 11위(153건)



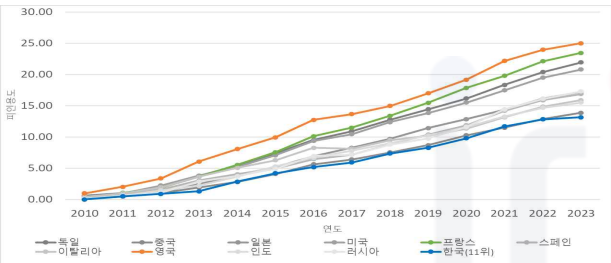
< 연도별/국가별 Top 10 게재 건수 >



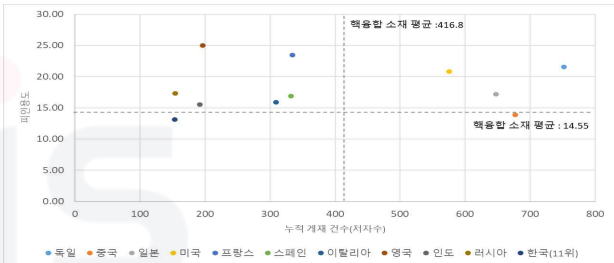
< 기관별 Top 10 게재 비중 >

○ (게재 기관) 분석기간 동안 HELMHOLTZ(독일)에서 가장 많은 563건의 논문이 발표되었으며, 그 뒤로 DOE(미국, 375건), KARLSRUHE(독일, 367건)의 비중이 높고, 한국의 KFE는 28위(101건)

○ (피인용도) 논문 편당 피인용도가 가장 높은 국가는 영국이며 분석기간 동안 1위. 독일, 일본, 미국이 논문의 질적수준과 게재건수가 모두 높은 1사분면에 위치하는 것으로 분석. 한국은 피인용도와 게재건수가 낮은 3사분면에 위치(Top 10개국 중 피인용도 최하위)



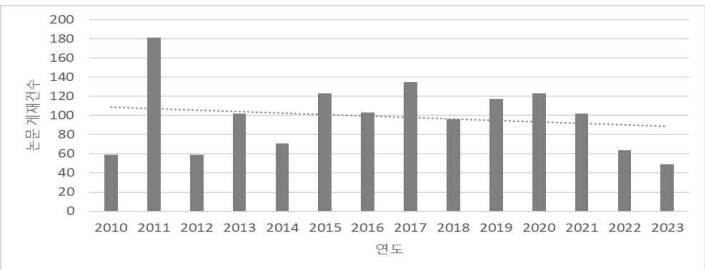
< 국가별 연도별 피인용도 분석 >



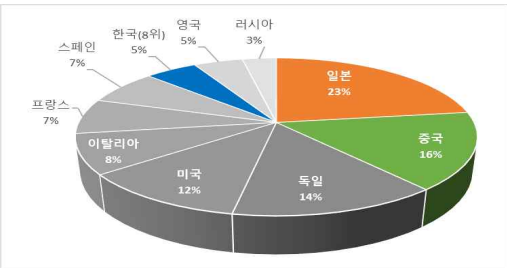
< 게재 건수/피인용도 분석 >

□ 연료주기

○ (연도별 게재 건수) 연료주기 분야는 지난 14년간 총 1,384건의 논문이 게재되었으며, 최근들어 게재 건수가 감소하고 있는 분야(연평균 성장률 0.7%)

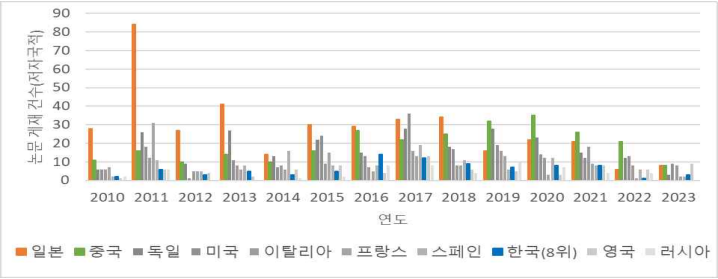


< 연도별 게재 건수 >

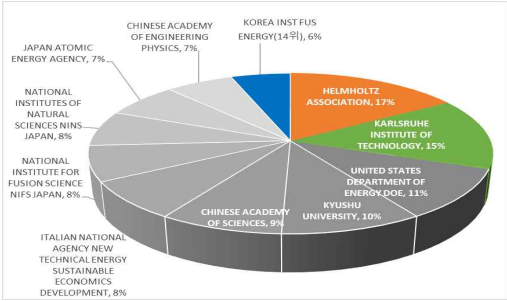


< 국가별 Top 10 게재 비중 >

○ (국가별 비중) 분석기간 동안 국가별로 일본(393건)이 가장 많은 논문을 발표하고 있으며, 2010년대 초반 일본을 주도로 논문이 게재되었으나, 최근 중국에서 가장 많은 논문이 게재되고 있는 상황. 한국은 게재 건수 8위(86건)



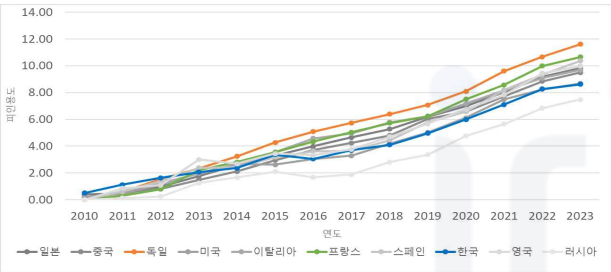
< 연도별/국가별 Top 10 게재 건수 >



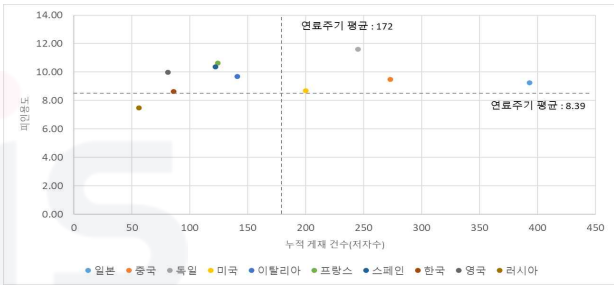
< 기관별 Top 10 게재 비중 >

○ (게재 기관) 분석기간 동안 HELMHOLTZ(독일)에서 가장 많은 204건의 논문이 발표되었으며, 그 뒤로 KARLSRUHE(독일, 182건), DOE(미국, 129건)의 비중이 높고, 한국의 KFE는 15위(70건)

○ (피인용도) 논문 편당 피인용도가 가장 높은 국가는 독일이며, 독일, 미국, 일본, 중국은 논문의 질적수준과 게재건수가 모두 높은 1사분면에 위치하는 것으로 분석. 한국은 피인용는 높으나 게재건수가 낮은 2사분면에 위치



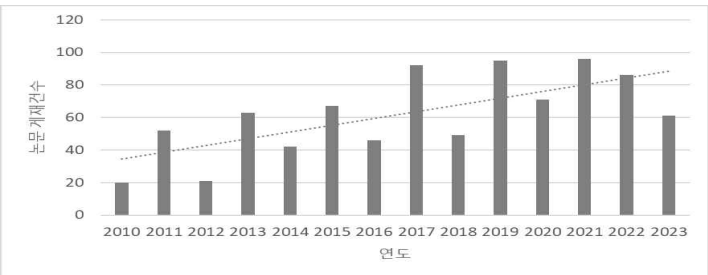
< 국가별 연도별 피인용도 분석 >



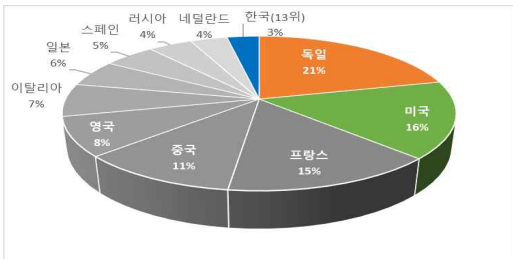
< 게재 건수/피인용도 분석 >

□ 디버터

○ (연도별 게재 건수) 디버터 분야는 지난 14년간 총 861건의 논문이 게재되었으며, 지속적으로 게재건수가 증가하고 있는 분야(연평균 성장률 9%)

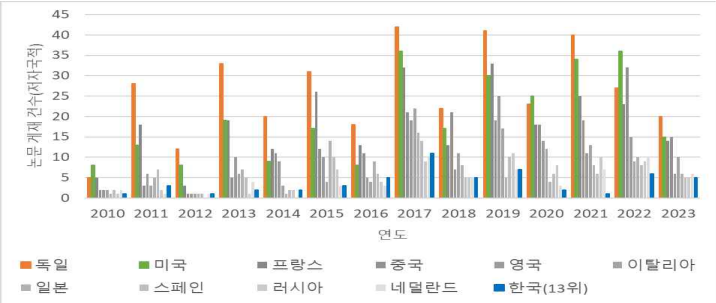


< 연도별 게재 건수 >

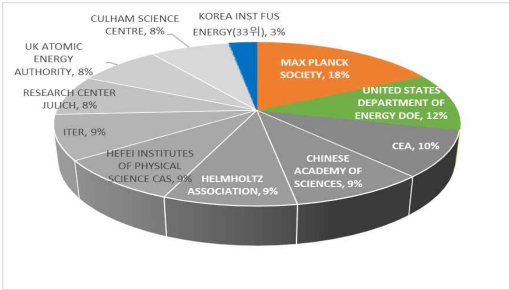


< 국가별 Top 10 게재 비중 >

○ (국가별 비중) 분석기간 동안 국가별로 독일(362건)이 가장 많은 논문을 발표하고 있으며, 연도별로 매년 독일에서 가장 많은 논문이 발표되었으나, 최근 중국(연평균 성장률 16.8%, 1위)에서 많은 논문이 발표되고 있는 형태. 한국은 게재 건수 13위(54건)



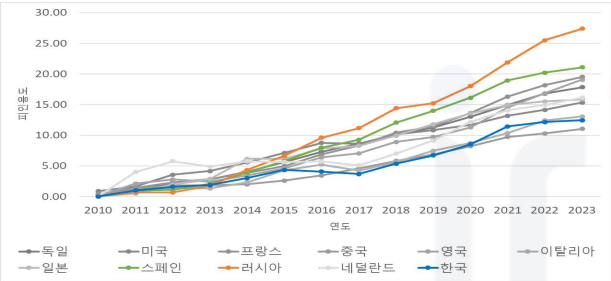
< 연도별/국가별 Top 10 게재 건수 >



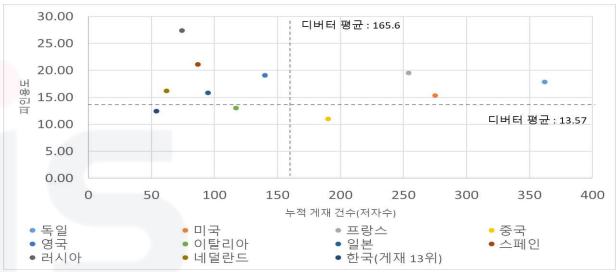
< 기관별 Top 10 게재 비중 >

○ (게재 기관) 분석기간 동안 MAX PLANCK(독일)에서 가장 많은 270건의 논문이 발표되었으며, 그 뒤로 DOE(미국, 177건), CEA(프랑스, 144건) 비중이 높고, 한국의 KFE는 33위(41건)

○ (피인용도) 논문 편당 피인용도가 가장 높은 국가는 러시아이며, 독일, 미국, 프랑스가 논문의 질적수준과 게재건수가 모두 높은 1사분면에 위치하는 것으로 분석. 한국은 피인용도와 게재건수가 낮은 3사분면에 위치



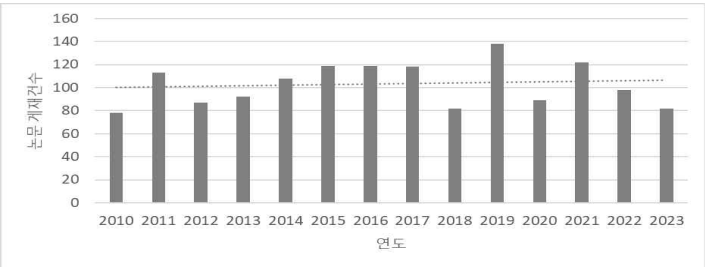
< 국가별 연도별 피인용도 분석 >



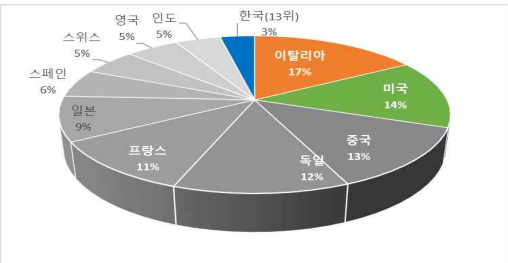
< 게재 건수/피인용도 분석 >

□ 가열 및 전류구동

○ (연도별 게재 건수) 가열 및 전류구동 분야는 지난 14년간 총 1,445건의 논문이 게재되었으며, 꾸준하게 관련 논문이 게재되고 있는 분야(연평균 성장률 1.9%)

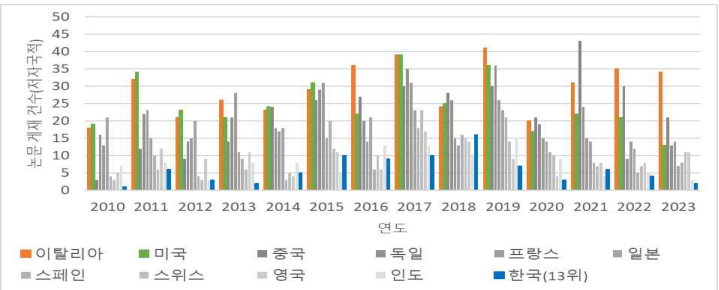


< 연도별 게재 건수 >

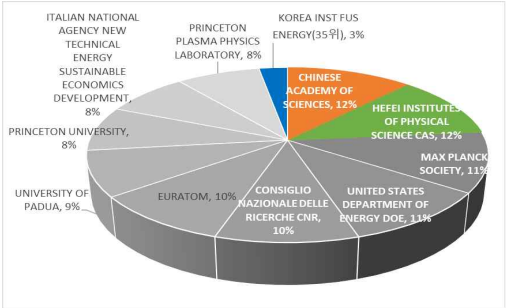


< 국가별 Top 10 게재 비중 >

○ (국가별 비중) 분석기간 동안 국가별로 이탈리아(409건)가 가장 많은 논문을 발표하였으며, 연도별로 매년 이탈리아, 미국에서 가장 많은 논문이 발표되었으나, 최근 중국(연평균 성장률 21%, 1위)에서 많은 논문이 발표되고 있는 형태. 한국은 게재 건수 13위(84건)



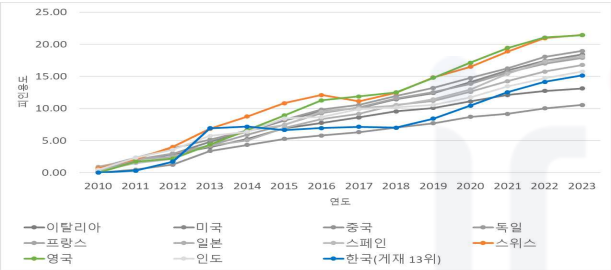
< 연도별/국가별 Top 10 게재 건수 >



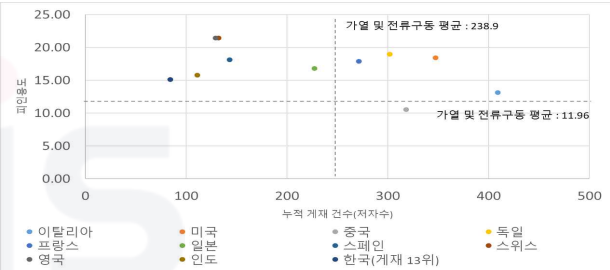
< 기관별 Top 10 게재 비중 >

○ (게재 기관) 분석기간 동안 CAS, HEFEI INST(중국)에서 가장 많은 논문이 발표되었으며, 그 뒤로 막스플랑크(독일, 234건), DOE(미국, 224건)가 비중이 높고, 한국의 KFE는 35위(57건)

○ (피인용도) 논문 편당 피인용도가 가장 높은 국가는 영국이며, 이탈리아, 독일, 미국, 프랑스가 논문의 질적수준과 게재건수가 모두 높은 1사분면에 위치하는 것으로 분석. 한국은 피인용도는 높으나 게재건수가 낮은 2사분면에 위치



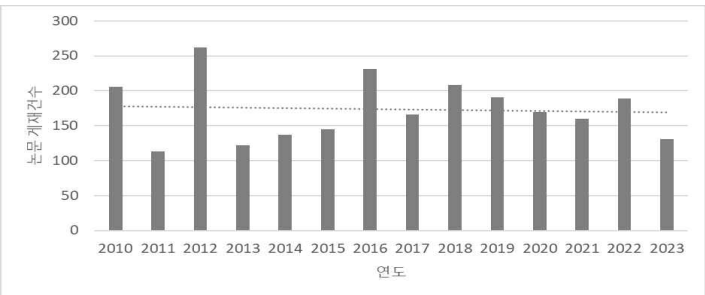
< 국가별 연도별 피인용도 분석 >



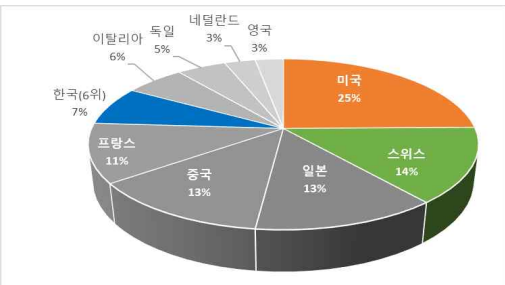
< 게재 건수/피인용도 분석 >

□ 초전도 자석

○ (연도별 게재 건수) 초전도자석 분야는 지난 14년간 총 2,431건의 논문이 게재되었으며, 논문게재가 감소하다가 최근 다시 상승하고 있는 분야(연평균 성장률 -0.7%)

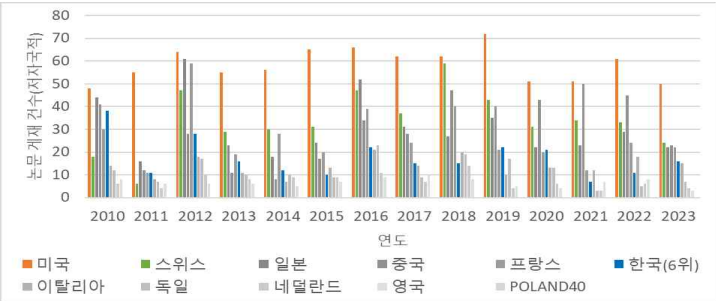


< 연도별 게재 건수 >

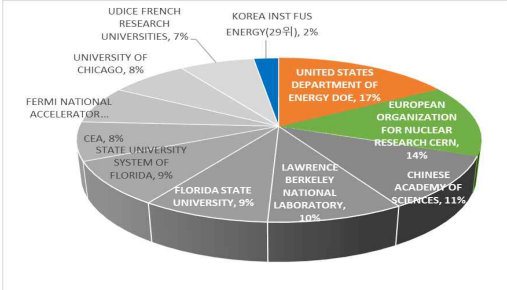


< 국가별 Top 10 게재 비중 >

○ (국가별 비중) 분석기간 동안 국가별로 미국(818건)이 가장 많은 논문을 발표하고 있으며, 연도별로 매년 미국이 가장 많은 논문이 발표되고 있으며, 한국은 게재 건수 6위(244건)



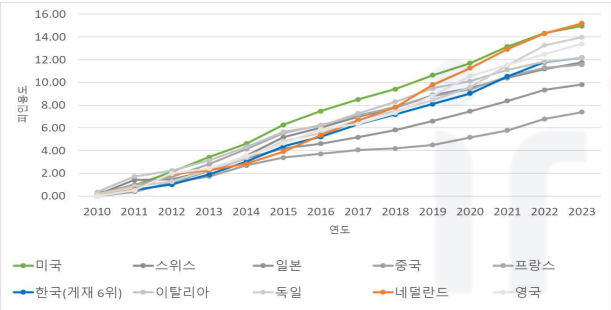
< 연도별/국가별 Top 10 게재 건수 >



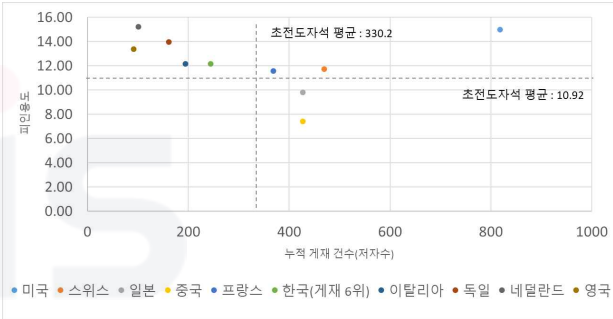
< 기관별 Top 10 게재 비중 >

○ (게재 기관) 분석기간 동안 DOE(미국)에서 가장 많은 417건의 논문이 발표되었으며, 그 뒤로 CERN(스위스, 355건), CAS(중국, 268건)의 비중이 높고, 한국의 KFE는 29위(59건)

○ (피인용도) 논문 편당 피인용도가 가장 높은 국가는 네덜란드이며, 미국, 프랑스, 스위스가 논문의 질적수준과 게재건수가 모두 높은 1사분면에 위치하는 것으로 분석. 한국은 피인용도는 높으나 게재건수가 낮은 2사분면에 위치



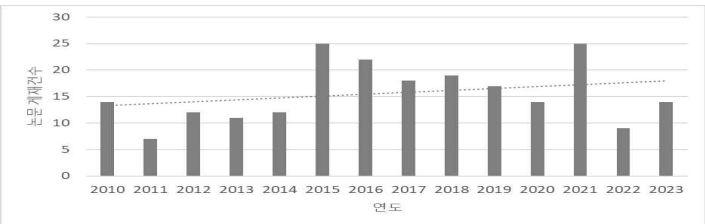
< 국가별 연도별 피인용도 분석 >



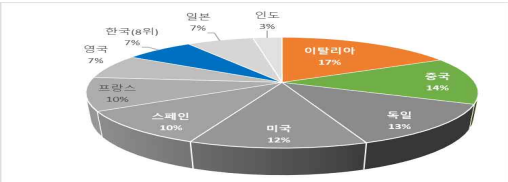
< 게재 건수/피인용도 분석 >

□ 안전 인허가

○ (연도별 게재 건수) 안전·인허가 분야는 지난 14년간 총 219건의 논문이 게재되었으며, 2010년대 중반이후 감소추세(연평균 성장률 -3.6%)

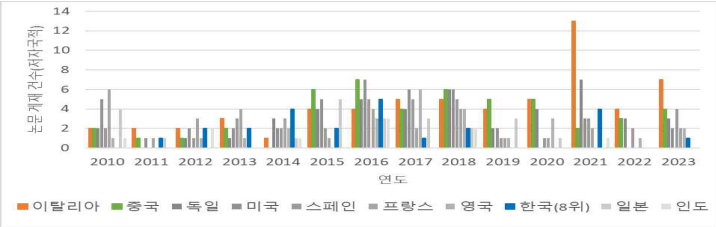


< 연도별 게재 건수 >

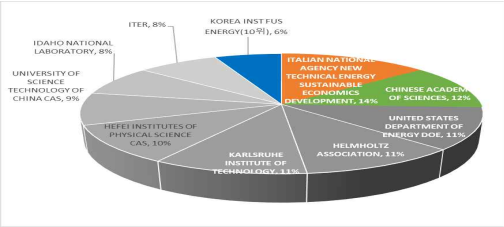


< 국가별 Top 10 게재 비중 >

○ (국가별 비중) 분석기간 동안 국가별로 이탈리아(61건)이 가장 많은 논문을 발표하고 있으며, 2021년 이탈리아에서 많은 논문이 게재된 것으로 파악. 한국은 게재 건수 8위(24건)



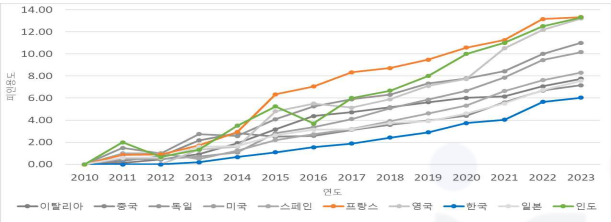
< 연도별/국가별 Top 10 게재 건수 >



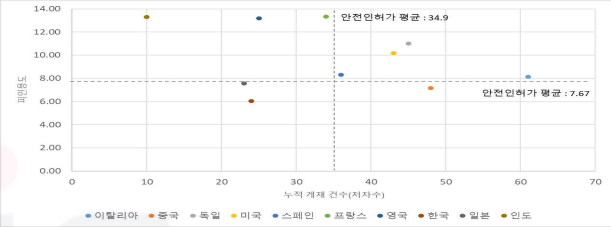
< 기관별 Top 10 게재 비중 >

○ (게재 기관) 분석기간 동안 ENEA(이탈리아)에서 가장 많은 40건의 논문이 발표되었으며, 그 뒤로 CAS(중국, 34건), DOE(미국, 33건)의 비중이 높고, 한국의 KFE는 10위(18건)

○ (피인용도) 논문 편당 피인용도가 가장 높은 국가는 프랑스이며, 독일, 미국, 이탈리아, 스페인이 논문의 질적수준과 게재건수가 모두 높은 1사분면에 위치하는 것으로 분석. 한국은 피인용도와 게재건수가 낮은 3사분면에 위치(Top 10개국 중 피인용도 최하위)



< 국가별 연도별 피인용도 분석 >



< 게재 건수/피인용도 분석 >

(2) 국내 핵융합에너지 개발 여건

① 기술수준 현황

◆ 한국은 최고기술국대비 65% 기술수준을 보유하고 있으며, 노심 플라즈마, 초전도 자석 분야가 가장 높은 기술수준 보유

□ (최고기술국대비 기술수준) 핵융합 분야 최고 기술국은 EU이며, 최고기술국(100%) 대비 한국의 기술수준은 65% 수준

※ 핵융합 전력생산 실증로 8대 핵심기술(안전·인허가 제외) 기술수준평가 결과(한국연구재단, '22)를 활용하였으며, 기술수준은 전문가 델파이(정성평가, 기술별 2명) 방법론을 활용하여 요소기술별 상대적 차이를 나타냄

○ 노심플라즈마, 초전도자석, 디버터 분야가 최고기술국 대비 가장 근접한 기술력을 보유, 연료주기 분야가 가장 큰 기술격차

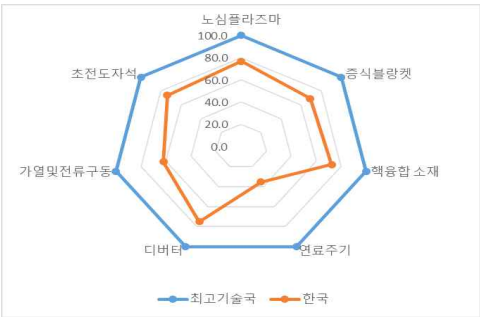
※ KSTAR 운영, ITER 조달을 중심으로 노심플라즈마, 초전도자석 분야가 최고기술국(EU, 미국)과 가장 근접하며, 최근 KSTAR 텅스텐 디버터 업그레이드를 통해 디버터 기술수준 향상

□ (최종목표대비 기술수준) 핵융합 실증로 구현을 위한 최종 목표대비 기술수준은 41.6% 수준

○ 최고 기술국은 노심 플라즈마, 핵융합 소재 분야가 최종목표대비 근접, 증식블랑켓·연료주기 분야의 경우 아직 기술수준이 낮음

○ 한국은 노심플라즈마 분야가 상대적으로 기술수준이 높은 분야이고, 연료주기는 최종목표와의 기술격차가 가장 큰 분야

※ 증식블랑켓, 연료주기 분야의 경우 우리나라의 기술수준이 낮은 반면, 최고기술국도 기술수준이 타 분야 대비 상대적으로 낮은 분야

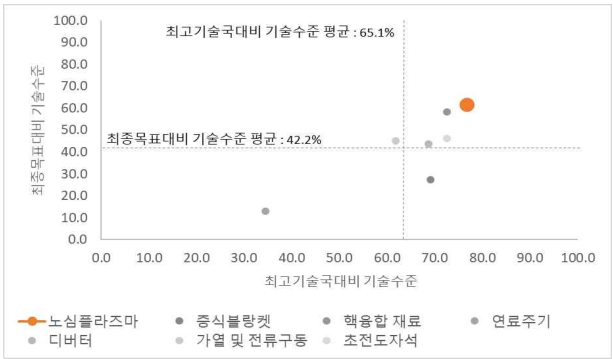


< 최고기술국(100%) 대비 한국 기술수준 >

< 최종목표대비 기술수준 >

□ 노심 플라즈마

○ (핵심기술 기술수준 비교) 핵심기술 분야 중 최고기술국(US) 대비 기술수준과 최종목표(실증로) 대비 기술수준이 가장 높은 분야



< 노심플라즈마 기술수준 현황 >

– 노심 플라즈마는 한국 핵융합 기술수준 향상에 가장 크게 기여한 분야로 최고기술국과의 격차가 가장 좁고, 현재 핵융합 기술개발을 견인하고 있는 분야

○ (세부기술 기술수준) 세부의 최종목표 대비 기술수준을 살펴보면 노심 플라즈마 진단(57.5%) 분야의 기술수준이 가장 낮은 상황

– 노심 플라즈마 제어 중 초고온 플라즈마에 대한 구현, 해석 기술은 세계 최고수준이나, 일부 플라즈마 제어 프로그램을 여전히 미국에 의존하고 있는 상황

– 노심 플라즈마 진단의 경우 일부 진단계 성능은 세계 최고수준이나, 향후 실증로의 가혹한 환경에 대응가능한 진단 장치의 개발이 진행되고 있지 못한 상황

– 노심 플라즈마 시뮬레이션은 다양한 모델링 연구와 최근 V-KSTAR 개발 등 기술수준을 향상시키고 있으나, 시뮬레이션 코드의 국산화 미진

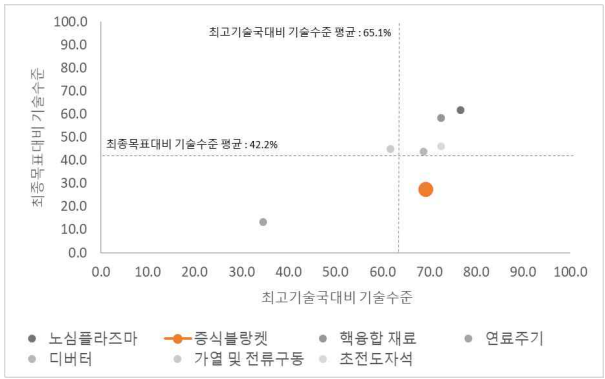
< 노심플라즈마 기술수준 분석결과 >

핵심기술	최고기술국	최종목표 대비 최고기술국 기술수준	최종목표 대비 한국 기술수준	최고기술국(100%) 대비 한국 기술수준
노심 플라즈마 제어	미국	79.4	67.5	85
노심 플라즈마 진단	미국	82.1	57.5	70
노심 플라즈마 시뮬레이션	미국	80.0	60	75
노심 플라즈마	미국	80.5	61.7	76.7

□ 증식블랑켓

○ (핵심기술 기술수준 비교) 최고기술국(EU) 대비 기술 수준은 높은 반면, 최종목표(실증로) 대비 기술수준은 낮은 상황

– 증식블랑켓 분야는 최종목표 대비 기술수준이 27.5%이나, 최고기술국(EU) 대비 기술수준은 69.2%



< 증식블랑켓 기술수준 현황 >

– 실증로 개발을 위해 기술수준 향상이 필요하며, 최고기술국 역시 실증로 대비 기술수준이 낮은 분야

○ (세부기술 기술수준) 최종목표 대비 기술수준을 살펴보면 설계·안전해석 기술 32.5%, 제작·검증 기술 30%, 계통기술 20% 수준

– 현재 ITER TBM을 중심으로 기술개발이 진행됨에 따라, 설계·안전해석 기술, 제작·검증 기술*을 추적하고 있으나, 계통기술은 다양한 후보공정 경험, 삼중수소 취급 경험이 타 국가 대비 상대적으로 취약한 분야

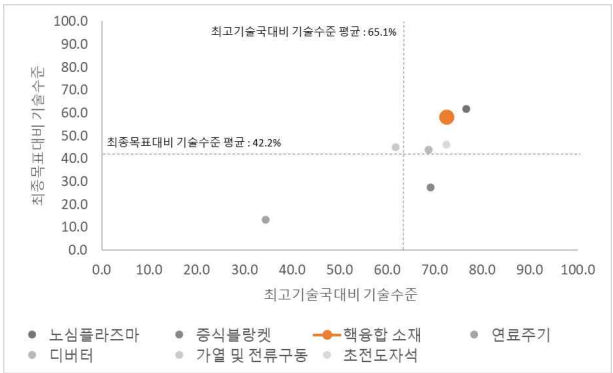
* ITER TBM 프로그램을 통해, TBM 개념설계 및 예비안전분석보고서 승인, TBM 목업 제작 등을 통해 최종목표대비, 최고기술국대비 격차를 줄여가고 있는 상황

< 증식블랑켓 기술수준 분석결과 >

핵심기술	최고기술국	최종목표 대비 최고기술국 기술수준	최종목표 대비 한국 기술수준	최고기술국(100%) 대비 한국 기술수준
설계·안전해석 기술	EU	40.6	32.5	80.0
제작·검증기술	EU	46.2	30.0	65.0
계통 기술	EU	32.0	20.0	62.5
증식블랑켓	EU	39.6	27.5	69.2

□ 핵융합 소재

○ (핵심기술 기술수준 비교) 핵심기술분야 중 최고기술국(EU) 대비 기술수준과 최종목표대비 기술수준이 평균 이상인 분야



< 핵융합 소재 기술수준 현황 >

– 핵심기술 중 노심 플라즈마 분야에 이어 최종목표 대비 한국의 기술수준이 가장 높은 분야(58.3%)이며, 최고기술국 대비 기술수준(72.5%)도 핵심기술 중 상위권

○ (세부기술 기술수준) 최종 목표 대비 기술수준을 살펴보면 구조재 분야가 가장 높은 기술수준을 보유하고 있으며, 대면재 분야가 낮은 것으로 분석

– 구조재는 ITER TBM 사업을 통해 한국형 저방사화 철강재(ARAA)일 물성데이터베이스를 구축하고, RCC-MRx 등재를 계획 중

– 대면재는 대학 실험실 규모의 연구개발을 통해 ITER 기술을 추적 중이며, 기능소재는 세계적 수준의 삼중수소 증식재 제조 원천기술을 확보하였나, 리튬동위원소 분리, 중성자 증배재 연구기 미진한 것으로 파악

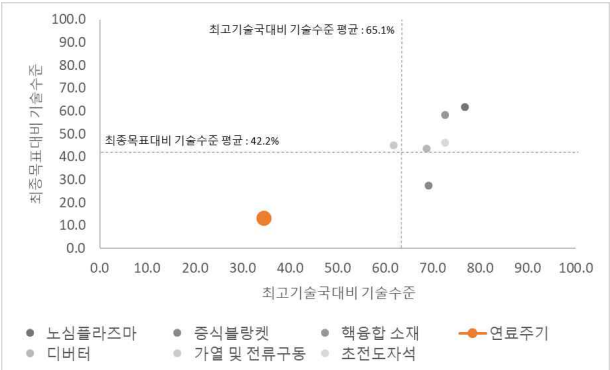
< 핵융합 소재 기술수준 분석결과 >

핵심기술	최고기술국	최종목표 대비 최고기술국 기술수준	최종목표 대비 한국 기술수준	최고기술국 대비 한국 기술수준
구조재	EU	83.9	65.0	77.5
대면재	EU	77.8	52.5	67.5
기능소재	EU	79.3	57.5	72.5
핵융합 소재	EU	80.3	58.3	72.5

□ 연료주기

○ (핵심기술 기술수준 비교) 핵심기술 분야 중 최고기술국(EU) 대비 기술수준과 최종목표(실증로) 대비 기술수준이 가장 낮은 분야

– 연료주기는 핵심기술 중 가장 기술수준이 낮은 분야로 분석되었으며, 핵융합 삼중수소 취급경험이 부족한 한국의 경우 가장 취약한 분야로 파악



< 연료주기 기술수준 현황 >

○ (세부기술 기술수준) 세부기술별 최종목표 대비 기술수준을 살펴보면, 삼중수소 안전 기술의 기술수준이 가장 낮은 것을 확인

– 핵융합 삼중수소의 취급 경험이 부재함에 따라 삼중수소 안전 기술수준이 가장 취약한 것으로 파악되었으며, 삼중수소 정제·분리·저장 기술의 경우 삼중수소 저장·공급 시스템 관련 기술은 높은 수준이나 정제·분리 기술 개발 시급

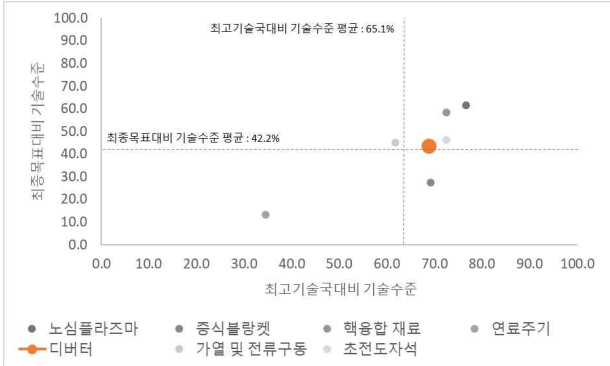
– 핵융합 연료공급은 기술의 경우 ITER 적용 기술을 검증하고 있는 수준이며, 실증로 삼중수소 취급 경험 부재에 따라 진공배기 시스템 기술수준도 취약한 것으로 분석

< 연료주기 기술수준 분석결과 >

핵심기술	최고기술국	최종목표 대비 최고기술국 기술수준	최종목표 대비 한국 기술수준	최고기술국 대비 한국 기술수준
삼중수소 안전	EU	55.0	4.4	8.0
삼중수소 정제분리저장	EU	38.6	21.6	56.0
핵융합 연료공급	EU	30.0	18.0	60.0
핵융합 진공배기	EU	62.9	8.8	14.0
연료주기	EU	46.6	13.2	34.5

□ 디버터

○ (핵심기술 기술수준 비교) 핵심기술 분야 중 최고기술국(EU) 대비 기술수준과 최종 목표(실증로) 대비 기술수준이 평균 이상



< 디버터 기술수준 현황 >

– 디버터는 ITER 비조달품목임에도 불구하고, 최고기술국 대비 기술수준과 최종목표 대비 기술수준이 상대적으로 높은 편에 속하는 분야

○ (세부기술 기술수준) 세부기술별 최종목표 대비 기술수준을 살펴보면, 디버터 설계 기술(40%), 디버터 제작·검증 기술(47.5%) 수준으로 분석

– 디버터 설계기술의 디버터의 공학적 관점에서 성능해석 및 설계 기술은 최고기술국에 근접한 역량을 보유하고 있으나, 디버터의 물리해석은 선진국의 기술을 추적(해외 설계코드를 활용한 기술추적 중)하고 있는 상황

– 디버터 제작·검증 기술은 KSTAR 텅스텐 디버터 개발을 통해 단기간에 크게 기술수준이 향상되었다고 볼 수 있으나, 기술수준 향상을 위해서는 디버터 성능을 실제 검증하기 위한 시설(고열부하시설 등)이 요구

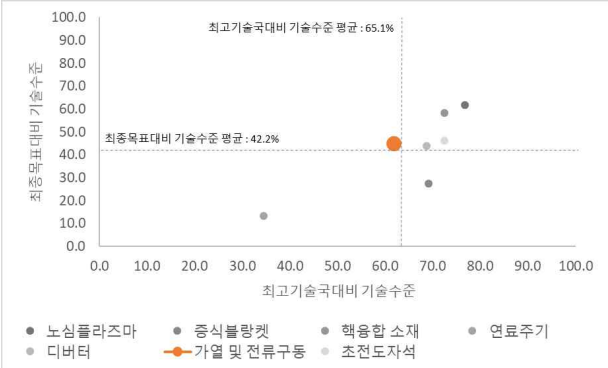
< 디버터 기술수준 분석결과 >

핵심기술	최고기술국	최종목표 대비 최고기술국 기술수준	최종목표 대비 한국 기술수준	최고기술국(100%) 대비 한국 기술수준
설계 기술	EU	64	40	62.5
제작·검증 기술	EU	63.3	47.5	75
디버터	EU	63.7	43.8	68.8

□ 가열 및 전류구동

○ (핵심기술 기술수준 비교) 최고 기술국(EU) 대비 기술수준은 핵심기술 평균 이하이나, 최종 목표(실증로) 대비 기술수준은 평균 이상인 분야

– 최종 목표 대비 기술수준은 45%이며, 최고 기술국대비 기술수준은 61.8% 수준으로 분석



< 가열 및 전류구동 기술수준 현황 >

○ (세부기술 기술수준) 세부기술별 최종목표대비 기술수준은 가열 및 전류구동 장치, 플라즈마 통합 모두 45% 정도 수준

– 가열 및 전류구동 장치는 KSTAR 장치 운전을 통해 중성입자빔 가열장치(NBI)의 장시간 운전기술 등에 강점을 가지고 있는 상황

– 가열 및 전류구동 플라즈마 통합기술 역시 KSTAR 장치 운전을 통해 가열 및 전류구동 시나리오를 개발하고 있으나 실증로급 운전을 위해서는 전산 모델링, 제어기술 등 추가적인 연구활동이 필요한 것으로 분석

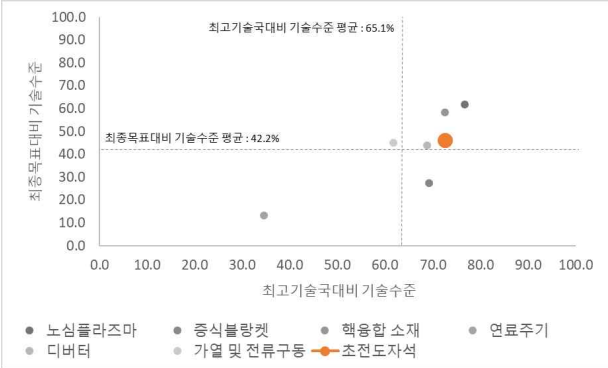
< 가열 및 전류구동 기술수준 분석결과 >

핵심기술	최고기술국	최종목표 대비 최고기술국 기술수준	최종목표 대비 한국 기술수준	최고기술국 대비 한국 기술수준
가열 및 전류구동 장치	EU	68.2	45.0	66.0
가열 및 전류구동 플라즈마 통합	EU	78.3	45.0	57.5
가열 및 전류구동	EU	73.2	45.0	61.8

□ 초전도 자석

○ (핵심기술 기술수준 비교) 핵심기술 중 최고기술국(EU), 대비 기술수준과 최종 목표(실증로) 대비 기술수준이 모두 높은 분야

– 초전도 자석 분야는 최고 기술국 대비 기술수준이 72.5%이며. 최종 목표대비 기술수준은 46.3%로 분석



< 초전도 자석 기술수준 현황 >

○ (세부기술 기술수준) 세부기술별 최종목표 대비 기술수준을 살펴보면, 초전도 선재가 기술수준이 가장 높은 것으로 파악되었으며, 초전도 자석 분야의 기술수준이 낮은 상황

– 초전도 선재는 해외 수출(DTT, 이탈리아) 등 세계 최고 수준의 특성에 근접하였으나, 초전도 도체의 경우 기존 산업체의 사업철수로 새로운 제작업체가 필요한 상황

– 초전도 자석, 초전도 자석 기반시스템 분야의 경우 실증로급 초전도 자석 연구가 미진함에 따라 점차 격차가 발생하고 있는 것으로 파악

< 초전도 자석 기술수준 분석결과 >

핵심기술	최고기술국	최종목표 대비 최고기술국 기술수준	최종목표 대비 한국 기술수준	최고기술국 대비 한국 기술수준
초전도 선재	EU	66.7	60.0	90.0
초전도 도체	EU	71.4	50.0	70.0
초전도 자석	EU	50.0	30.0	60.0
초전도 자석 기반시스템	EU	64.3	45.0	70.0
초전도 자석	EU	63.1	46.3	72.5

② 국내 연구개발 투자 동향

◆ 핵융합 장치 제작에 가장 많은 정부투자가 진행되었으며, 8대 핵심기술 분야 중 노심플라즈마, 초전도자석, 가열 및 전류구동에 집중

□ (R&D 투자규모) 핵융합 R&D 투자 규모는 지난 20년간 약 1.8조원이며, 현재 KSTAR, ITER, 실증로 R&D에 약 2천억원/연 규모 투자 진행 중

※ 국가과학기술지식정보서비스(NTIS) "핵융합" 키워드, 과거 20년('02~'22) 검색

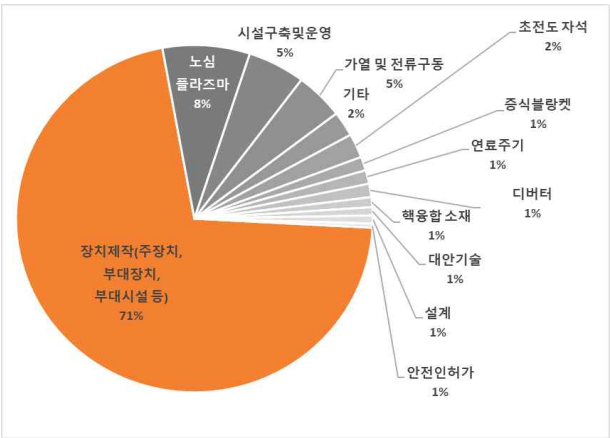
○ (정부투자 현황) 핵융합에너지 개발을 위해 장치제작(주장치, 부대장치, 부대시설 등)(71%)에 가장 많은 정부투자가 진행되었으며, 8대 핵심기술 R&D에 약 3,549억원 투입

– 지난 과거 20년간 핵융합에너지 개발을 위해 투입된 금액은 18,053억원이며, 이 중 가장 많은 금액이 KSTAR, ITER 장치 제작·조달에 활용(12,870억원, 71%)

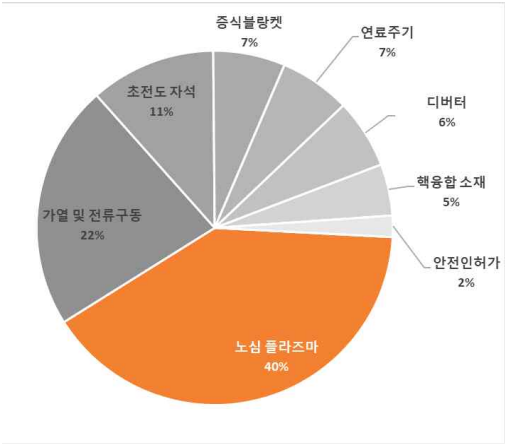
□ (8대 핵심기술 투자현황) 8대 핵심기술 기준 토카막 시스템(노심플라즈마, 가열 및 전류구동, 초전도자석) 분야에 대부분 투입

※ (토카막 시스템) 노심플라즈마 1,428억원, 가열 및 전류구동 794억원, 초전도자석 405억원 순으로 연구개발비 투입

※ (연료 시스템 및 안전·인허가) 증식블랑켓 232억원, 연료주기 228억원, 핵융합 소재 167억원, 디버터 225억원 연구개발비가 투입되었으며, 안전인허가 69억원 연구개발비 투입



< 분야별 핵융합에너지 정부투자 현황 >



< 8대 핵심기술별 정부투자 현황 >

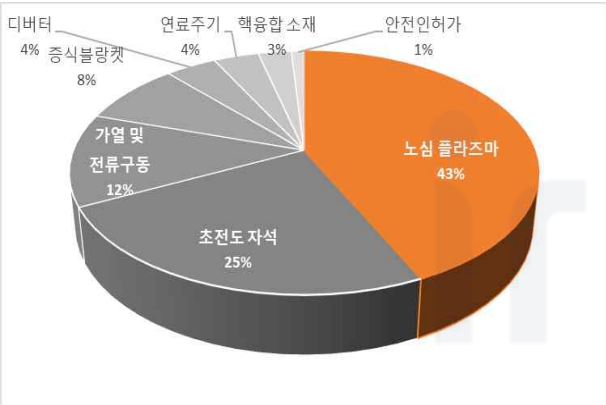
□ 노심 플라즈마

○ (핵심기술 비중) 8대 핵심기술 분야 연구개발에 최근 20년간 6,672억원이 투자되었으며, 노심플라즈마는 2,874억원(43%, 8대 핵심기술 중 1위)가 투자된 것으로 파악

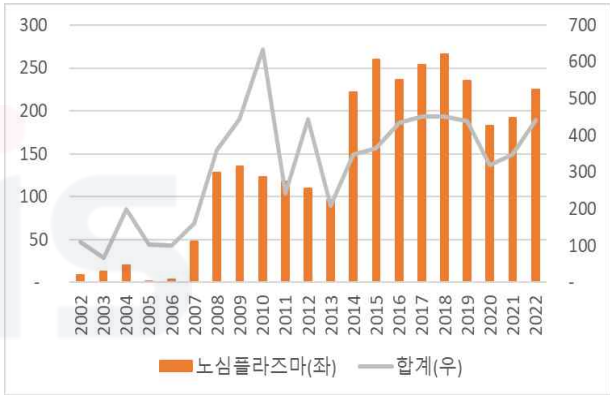
○ (연도별 투자현황) KSTAR 건설·운영을 통해 2000년대 중반이후 노심 플라즈마 연구비는 지속적으로 증가하는 추세

– 한국의 노심 플라즈마 연구는 KSTAR를 중심으로 기술개발을 진행중이며, 2014년 KSTAR 연구사업(핵융합(연) 기본사업) 개편을 통해, KSTAR 공동실험 및 플라즈마 연구사업 연구비가 큰 폭으로 확대

※ KSTAR 연구사업 개편을 통해 노심 플라즈마 연구를 위한 일부 장비 구입(가열 및 전류구동 장치 등) 연구비 포함



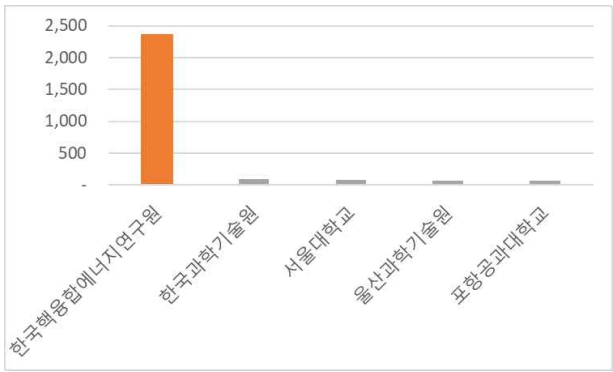
< 8대 핵심기술 비중 >



< 연도별 투자현황 >

○ (주요 연구기관) KSTAR를 운영하고 있는 한국핵융합에너지연구원이 기본사업으로 노심플라즈마 연구주도(전체 82%)

– 한국과학기술원, 서울대학교, 울산과학기술원, 포항공과대학교에서 핵융합 기초연구사업(종료)을 통해 노심 플라즈마의 다양한 물리현상 규명을 위한 연구개발 수행



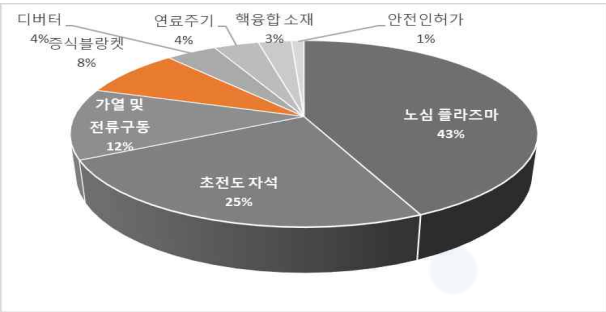
< 주요 연구기관 >

□ 증식블랑켓

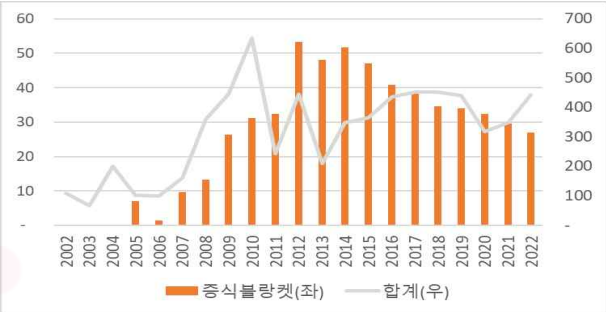
○ (핵심기술 비중) 8대 핵심기술 분야 연구개발에 최근 20년간 6,672억원이 투자되었으며, 증식블랑켓은 558억원(8%, 8대 핵심기술 중 4위)이 투자된 것으로 파악

○ (연도별 투자현황) ITER TBM 개발과 더불어 2010년대 중반까지 지속적으로 증가하였으나, 2014년 이후 점차 감소

– 국내 증식블랑켓 기술개발은 ITER TBM 사업을 중심으로, 일부 선도연구센터지원 및 기초연구사업으로 연구개발 추진 중이며, ITER TBM 사업비 감소로 인해 2010년대 중반 이후 감소



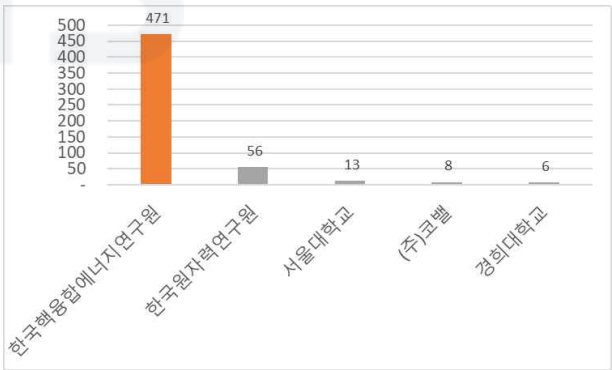
< 8대 핵심기술 비중 >



< 연도별 투자현황 >

○ (주요 연구기관) ITER TBM 사업을 주도하고 있는 핵융합(연)과 원자력(연)이 대부분의 연구비 사용(전체 94%)

– 이외 서울대, 경희대, 전북대에서 선도연구센터지원 사업을 통해 설계·안전해석기술 개발 중



< 주요 연구기관 >

– ㈜코벨은 유일한 산업체 주관기관으로, 2019년부터 ITER TBM 헬륨냉각 시스템 고온고압 벨브 개발(중소벤처기업부–중소기업 상용화 기술개발사업) 추진 중

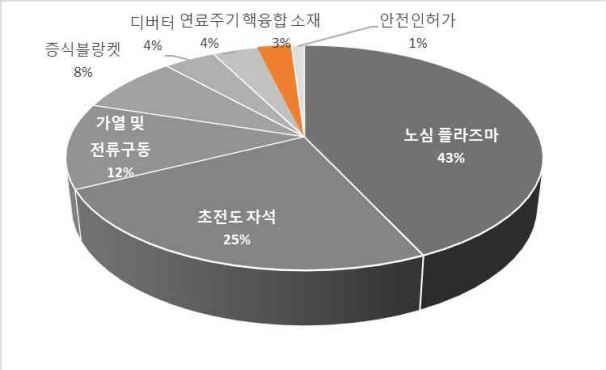
□ 핵융합 소재

○ (핵심기술 비중) 8대 핵심기술 분야 연구개발에 최근 20년간 6,672억원이 투자되었으며, 핵융합 소재 분야는 182억원(3%, 8대 핵심기술 중 7위)이 투자된 것으로 분석

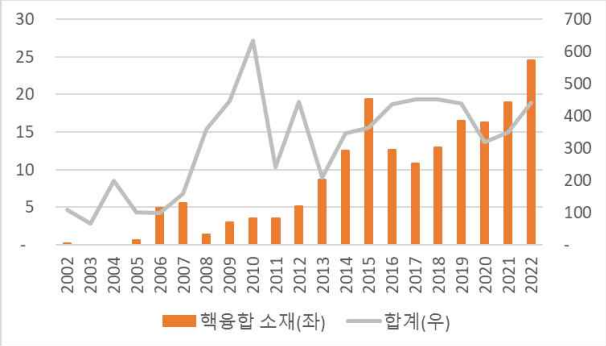
○ (연도별 투자현황) 핵융합 소재 분야는 과거부터 꾸준하게 연구개발 투자비가 증

가하고 있는 분야이나, 타 핵심기술 분야 대비 연구개발 규모가 작은 분야

– 핵융합 선도기술개발사업(前 기초연구사업)을 중심으로 대학에서 핵융합 구조재, 기능소재에 대한 연구개발을 진행 중이며, ITER 비조달 과제를 통해 디버터 대면재 기술추적을 위해 연구개발 투자 진행 중



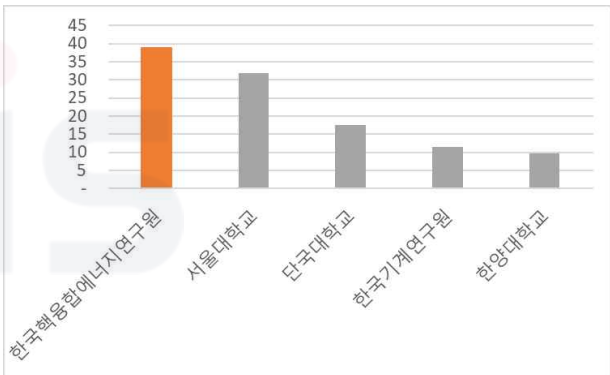
< 8대 핵심기술 비중 >



< 연도별 투자현황 >

○ (주요 연구기관) 핵융합 소재 분야는 대학과 연구기관의 연구비규모가 유사하며 소규모 과제 위주의 연구개발 진행 중

– 한국핵융합에너지연구원 ITER 비조달 사업을 중심으로 가장 많은 연구비가 투자되었으며, 서울대학교, 단국대학교, 기계(연) 산하 재료(연), 한양대학교는 선도기술개발사업을 통해 연구개발 추진 중



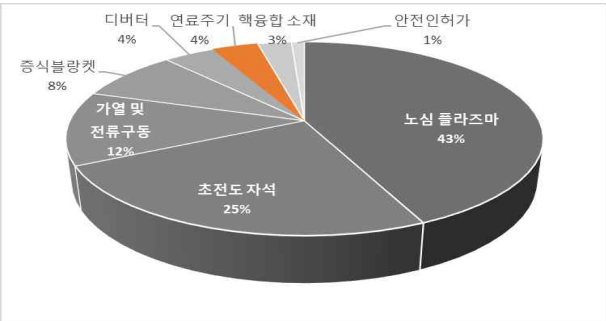
< 주요 연구기관 >

□ 연료주기

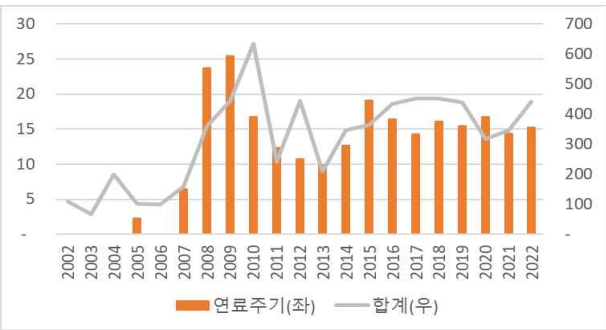
○ (핵심기술 비중) 8대 핵심기술 분야 연구개발에 최근 20년간 6,672억원이 투자되었으며, 연료주기는 248억원(4%, 8대 핵심기술 중 6위)이 투자된 것으로 파악

○ (연도별 투자현황) 연료주기분야는 ITER 삼중수소 저장·공급 시스템 개발을 중심으로 2008년부터 유사한 수준의 연구개발 투자가 진행되고 있는 상황

– ITER 조달 품목인 삼중수소 저장·공급 시스템 개발을 위해 국제핵융합실험로(ITER) 공동개발사업을 연구개발을 추진하고 있으며, ITER 비조달 과제로 ITER 연료주기 기술추적을 진행 중

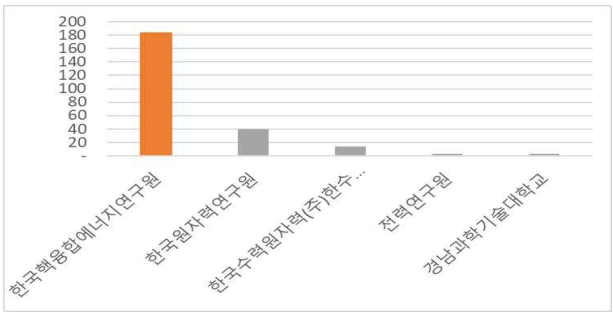


< 8대 핵심기술 비중 >



< 연도별 투자현황 >

○ (주요 연구기관) ITER 삼중수소 저장·공급 시스템 개발을 주관하고 있는 한국핵융합에너지연구원(74%)과 한국원자력연구원(16%), 한국수력원자력(주)(6%)가 연료주기 연구개발을 주도



< 주요 연구기관 >

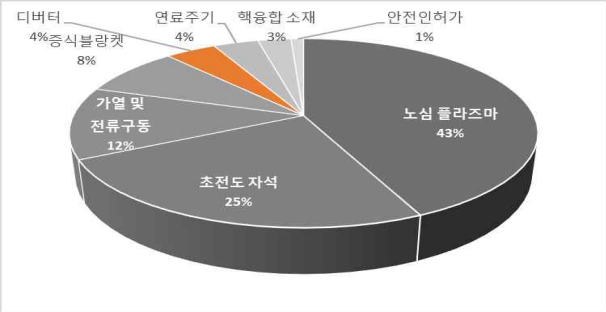
– 한국원자력연구원은 ITER 삼중수소 저장·공급 용기를 개발 중이며, 한국수력원자력(주)는 삼중수소 검증시험 기반구축 및 헬륨-3 회수기술 개발 중

□ 디버터

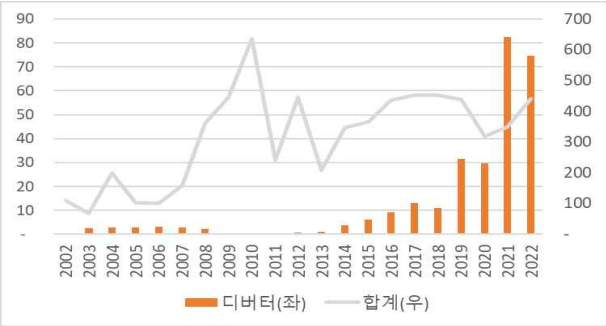
○ (핵심기술 비중) 8대 핵심기술 분야 연구개발에 최근 20년간 6,672억원이 투자되었으며, 디버터 분야는 280억원(4%, 8대 핵심기술 중 5위)가 투자된 것으로 파악

○ (연도별 투자현황) 디버터 분야는 과거부터 10억원 이하의 작은 수준에서 연구개발 투자가 진행되고 있었으나, 최근 2019년 이후 연구비가 성장하는 추세

– 디버터는 한국의 ITER 비조달품목으로 과거 핵융합 기초연구사업을 중심으로 소규모 연구개발을 진행하였으나, 2019년 KSTAR의 플라즈마 성능 향상을 위해 텅스텐 디버터 교체 사업(KSTAR PFC 성능향상 사업)이 착수됨에 따라 연구개발비가 증가

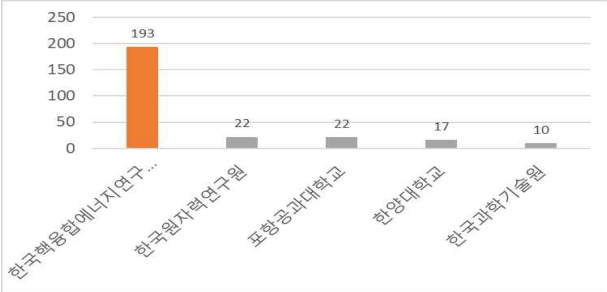


< 8대 핵심기술 비중 >



< 연도별 투자현황 >

○ (주요 연구기관) KSTAR PFC 성능향상 사업(핵융합(연) 기본사업)을 주관하고 있는 한국핵융합에너지연구원이 연구개발을 주도(전체 69%)



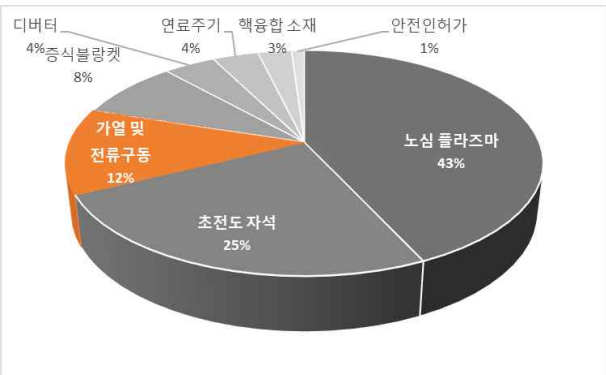
< 주요 연구기관 >

– 한국원자력연구원, 포항공과대학교, 한양대학교, 한국과학기술원에서 핵융합 기초연구사업 등을 통해 디버터 설계·해석, 진단, 열속처리, 고열부하 시험 등 다양한 연구개발을 진행

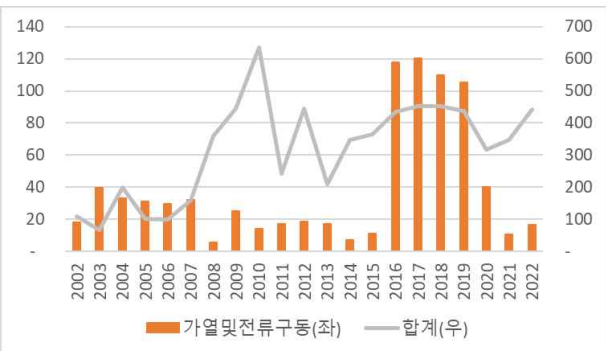
□ 가열 및 전류구동

○ (핵심기술 비중) 8대 핵심기술 분야 연구개발에 최근 20년간 6,672억원이 투자되었으며, 가열 및 전류구동 분야는 821억원(12%, 8대 핵심기술 중 3위)가 투자된 것으로 파악

○ (연도별 투자현황) 가열 및 전류구동 분야는 2000년대 꾸준한 연구개발 투자가 진행되었으며, 2016년 연구비가 크게 증가



< 8대 핵심기술 비중 >

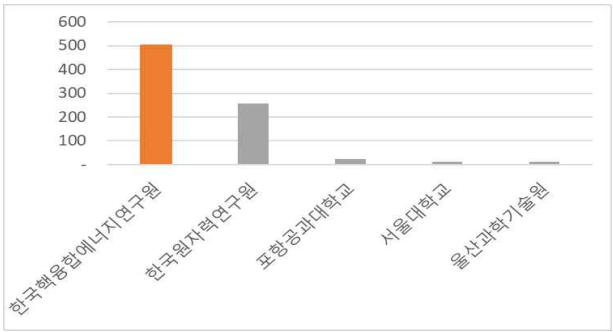


< 연도별 투자현황 >

– 가열 및 전류구동 분야는 KSTAR 가열장치 개발 등을 중심으로 연구개발이 진행되었으며, 2016년 KSTAR 중성입자빔 가열장치(NBI-2) 개발이 착수됨에 따

라 연구개발비 투자가 크게 증가한 것으로 확인

○ (주요 연구기관) KSTAR 중성입자빔 가열장치개발 사업(핵융합(연) 기본사업)을 주관하고 있는 한국핵융합에너지연구원이 가장 많은 연구개발비 활용(61%)



< 주요 연구기관 >

– 한국원자력연구원은 KSTAR 건설 당시 가열장치 개발을 주관하였으며, 최근 선도기술개발 사업을 통해 전류구동 기술개발 중

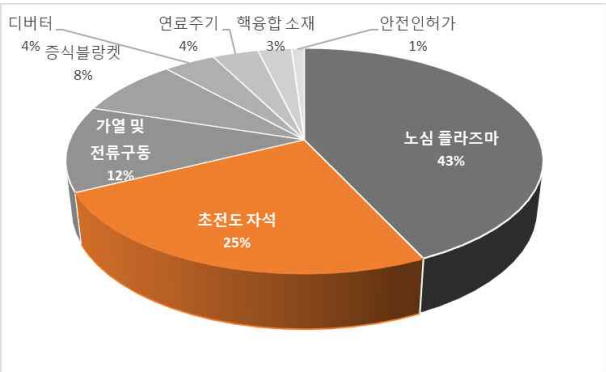
– 포항공과대학교, 서울대학교, 울산과학기술원은 대학기초연구사업을 통해 다양한 개념의 가열 및 전류구동 기술개발을 추진

□ 초전도 자석

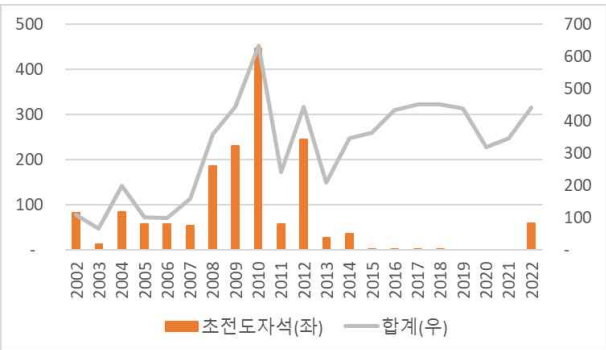
○ (핵심기술 비중) 8대 핵심기술 분야 연구개발에 최근 20년간 6,672억원이 투자되었으며, 초전도 자석분야는 1,669억원(25%, 8대 핵심기술 중 2위)가 투자된 것으로 파악

○ (연도별 투자현황) 2000년대를 중심으로 연구개발 투자가 진행되었으며, 2010년 ITER 초전도 도체 개발을 위해 크게 성장

– 2000년대 초반 KSTAR 초전도 자석 개발에 연구개발비가 투입되었으며, ITER 조달 품목인 초전도 도체 개발을 위해 2008년부터 큰 규모의 연구개발비가 투입. ITER 초전도 도체 조달 이후 연구개발비가 크게 감소



< 8대 핵심기술 비중 >

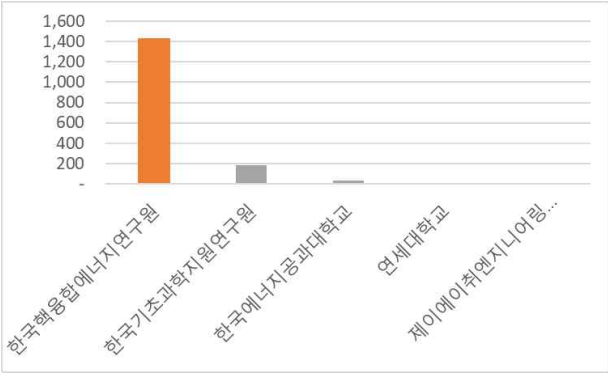


< 연도별 투자현황 >

○ (주요 연구기관) ITER 초전도 도체 조달을 주관하였던 핵융합에너지연구원이 초전

도자석 분야 연구개발을 주도(87%)

– 한국기초과학지원연구원이 2000년대 초반 KSTAR 초전도자석 개발을 주도하였으며, 한국에너지공과대학교는 최근 2022년 초전도 도체 시험설비 구축사업에 착수



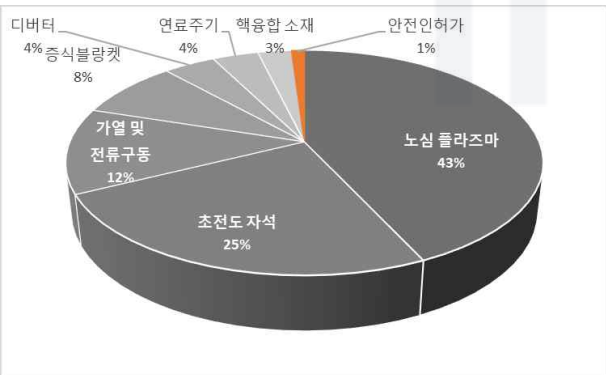
< 주요 연구기관 >

□ 안전·인허가

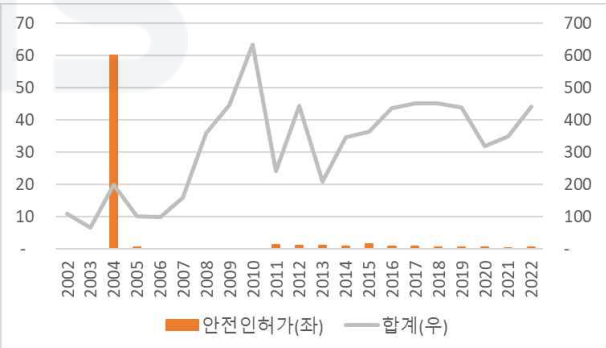
○ (핵심기술 비중) 8대 핵심기술 분야 연구개발에 최근 20년간 6,672억원이 투자되었으며, 안전·인허가 분야는 70억원(1%, 8대 핵심기술 중 8위)가 투자된 것으로 파악

○ (연도별 투자현황) 2004년을 제외하고 0.5억원 수준의 작은 규모과제로 연구개발 진행되었으며, 핵융합 안전·인허가에 관한 연구는 미미한 것으로 분석

– 2004년 KSTAR의 방사선발생장치 인허가 연구를 위해 60억원이 투입되었으며, 이외에는 핵융합기초연구 등을 통해 방사선 폐기물 처리 등에 관한 연구가 대학을 중심을 소규모 진행된 것으로 확인



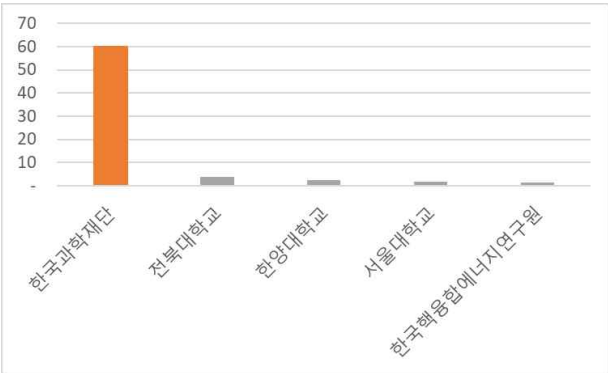
< 8대 핵심기술 비중 >



< 연도별 투자현황 >

○ (주요 연구기관) KSTAR 방사선 발생장치 인허가 연구를 주관한 한국과학재단이 가장 큰 규모의 연구비를 활용

– 전북대학교, 한양대학교, 서울대학교에서 핵융합 기초연구 등을 활용하여 방사성 폐기물 처리, 예측, 해석에 관한 기초연구를 진행



– 핵융합 안전·인허가의 연구는 타 핵심 기술 분야 대비 미미한 것으로 분석

< 주요 연구기관 >

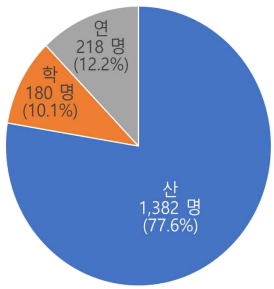
③ 핵융합 인력 현황

◆ 국내 핵융합 인력은 노심 플라즈마 분야(학계, 연구계) 및 토카막 주장치 제작(산업계)에 집중되어 있는 상황

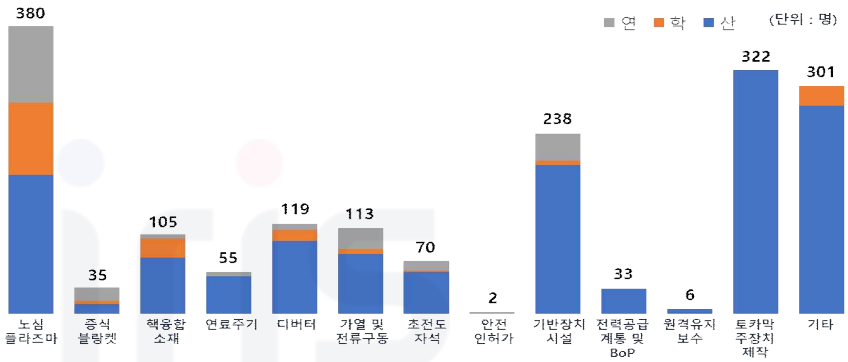
□ (인력현황) '22년 말 현재, 국내 핵융합 인력은 약 1,780명이며, 산업계가 1,382명(77.6%)으로 비중이 가장 높으며, 연구계와 학계 순으로 인력보유

○ (핵심기술별) 산업계 인력은 토카막주장치(KSTAR, ITER) 인력이 가장 많으며, 연구인력(학계, 연구계)는 노심플라즈마에 가장 많은 인력 투입

※ 산업계 인력의 경우 설문응답을 통한 추정치



< 산·학·연 인력 규모 >



* 핵융합(연) 인력은 8대 핵심기술 기준으로 구분

< 핵심기술별 인력현황 >

□ (대학 인력양성) 핵융합 전공 과정 대학(5개)에서 265명(최근 5년간, 연평균 53명)이 배출, 졸업생 중 핵융합 비관련 분야 취업은 60.4%로서, 외부 유출이 매우 높은 상황

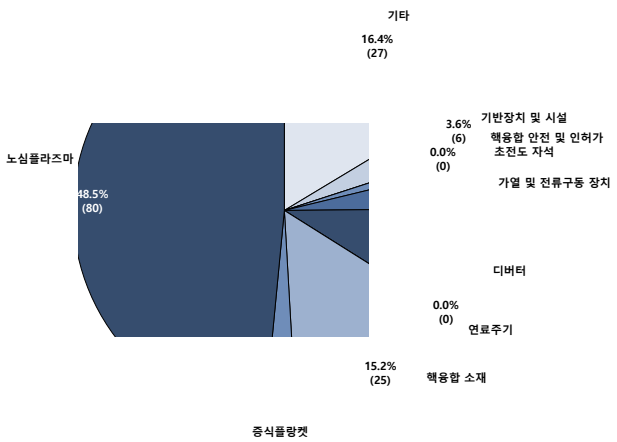
○ (8대 핵심기술 분포현황) 대학 인력의 8대 핵심기술별 분포는 노심플라즈마분야 인원이 과반수를 넘는 것으로 조사

– 대학 구성원 중 노심플라즈마 인원이 48.5%(80명)으로 가장 많은 것으로 응답하였으며, 가장 많은 인원이 있는 연구실은 서울대 고성능플라즈마연구실로 20명임(박사과정 19명, 석사과정 1명)

○ (학력별 대학 인력 분포 현황) 대학 인력의 학력별 구성은 박사 과정 연구원이 60.0%인 것으로 조사됨

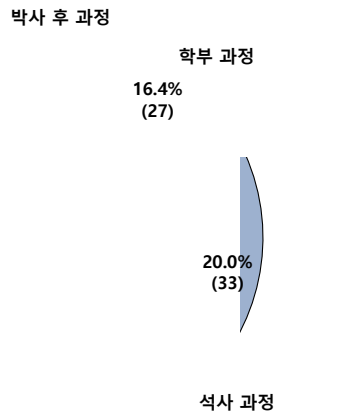
– 구성원 중 박사 과정 인원이 60.0(99명)으로 가장 많은 것으로 응답하였으며, 연구실 평균 인력은 박사 후 과정 0.2명, 박사 과정 3.4명, 석사 과정 1.1명, 학부 과정 0.9명

단위 : 명, %



< 8대 핵심기술 분야별 대학 인력 현황 >

단위 : 명, %

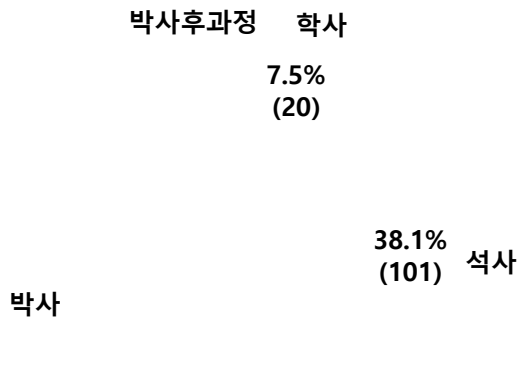


< 대학 학력별 인력 현황 >

○ (대학 졸업생 배출 현황) 최근 5년간 졸업생은 박사 과정이 51.3%로 가장 많으며, 비관련 전공으로 진출한 경우가 60.4%로 가장 많음

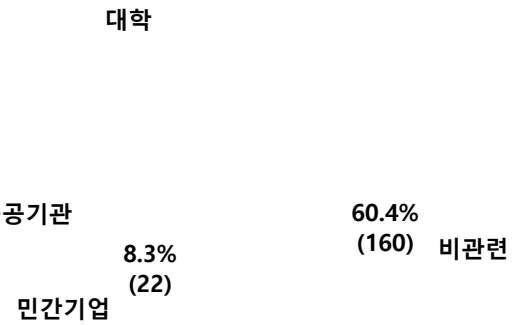
– (대학 졸업생 학력별 구분) 대학 연구실 졸업생은 총 265명으로 박사 졸업생이 가장 많은 51.3%(136명)를 차지하였으며, 석사(38.1%, 101명), 학사(7.5%, 20명), 박사후 과정(3.0%, 8명) 순

단위 : 명, %



< 대학 졸업생 배출 현황 >

단위 : 명, %



< 대학 졸업생 진로 현황 >

– (졸업생 진로 현황) 졸업생 진로는 비관련분야 취업이 60.4%로 가장 많은 것으로 확인되었으며, 대학 진로 23.0%, 정부/공공기관과 민간기업이 각각 8.3%로 확인

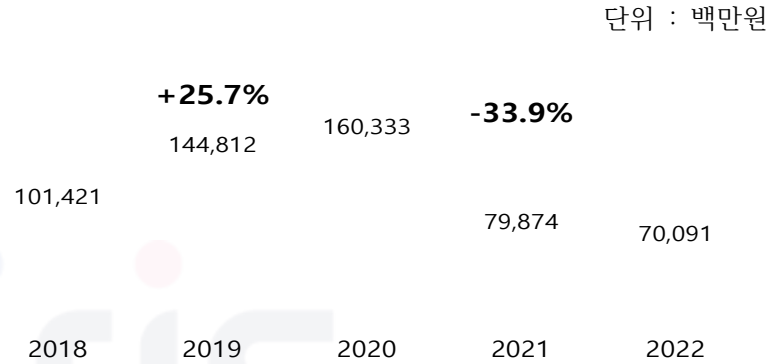
④ 국내 산업 현황

◆ 국내 산업체는 토카막 장치 제작을 위한 제조업이 대부분이며, 핵융합 분야 대부분의 매출액이 일부 기업에 집중되어 있는 상황

□ (산업구조) 핵융합 산업에 참여한 중소 제조업이 대부분이며, KSTAR 성능향상·유지보수 및 ITER 조달품목 제조에 의존적인 상황으로 최근 핵융합 관련 매출액 감소

○ 핵융합 매출이 확인된 117개 기업의 핵융합 분야 매출 합계는 701억 원임(2022년 기준), 2020년까지 연평균 25.7% 상승하였으나, 이후 하락하여 2022년까지 연 평균 33.9% 감소함

< 산업체 유형 분포 >



< 산업체 핵융합 관련 매출 현황 >

○ (일부기업 매출 집중) 핵융합 매출은 ITER 조달사업이 점차 축소되는 '20년 이후 지속적으로 감소 중이며, 대규모 제작용역을 수행하는 일부기업에 집중

– 2022년 핵융합 관련 매출액을 기준으로 상위 10개 기업들의 점유율은 82.6%, 기업별로는 에이치디현대중공업이 토카막 주장치 제작 분야에 참여하면서 150억원, 비츠로넥스텍이 4개 분야에 127.8억원 등으로 조사

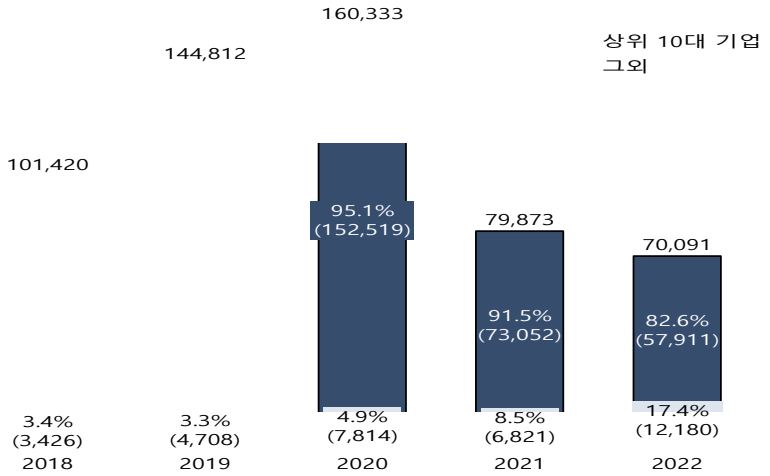
– 매출 상위 10개 기업의 점유율은 최근 5년간 감소 추세를 보이고 있는 상황으로, 2018년 96.6%, 2019년 96.8%, 2020년 95.1%, 2021년 91.6%, 2022년 82.6%로 감소 추세를 보임

□ (참여분야) 참여 산업체 특성 상 토카막 주장치 제작 분야에 매출비중이 가장 높으며, R&D 초기 단계(설계 등) 기술분야 참여업체 부족

○ (해외사업 참여) 토카막 주장치 제작 등을 통해 산업체의 대형구조물 정밀제작 역량을 축적하였지만, 해외 핵융합 사업 참여는 부족한 상황

– 5개 기업이 최근 5년내 핵융합 관련 수출 실적이 있다고 응답하였으며, 수출 국가는 프랑스가 가장 많은 것으로 나타남(2022년 실적 20,318 백만원)

단위 : 백만원

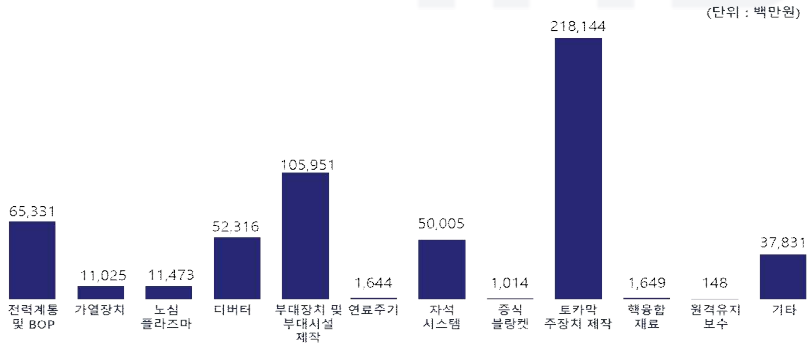


< 핵융합 분야 매출 상위 10대 기업 점유율 변화 >

○ (핵심기술별 매출) 핵융합 분야 매출은 토카막 장치 제작*에 집중

– 핵융합 분야별 매출은 토카막 주장치 제작 분야가 2,181억원으로 5년간 핵융합 분야 총 매출의 39.2%이며, 자석시스템(1,313억원, 23.6%), BoP동력변환 및 전력공급 계통(653억원, 11.7%) 순으로 조사

* 대부분의 매출액이 토카막 주장치 제작, 부대장치 제작, 전력계통(전원공급장치)분야에 집중되어 있으며, 핵심기술 개발 분야의 경우 매출이 미미한 수준



< 핵심기술별 매출현황('18~'22 누적) >

< 해외매출 여부 >

□ (생태계) 핵융합 분야 산업체 및 기술역량 유지를 위한 연계·관리체계 부족하나, 국내 1호 민간 스타트업 창업

○ (관리체계) 자생적인 생태계가 구축될 수 있도록, 유관 기관·분야의 연계·협력 구조 형성, 신규사업 추진 등 제반 관리를 위한 조직 부재

○ (민간 스타트업) 최근 국내 핵융합에너지 분야 1호 민간 스타트업(인에이블퓨전) 창업('24)이 되었으며, 핵융합 민간 산업 저변 확대를 위한 노력 중

(3) 핵융합 환경 변화 시사점

□ (일정 가속화) 환경 변화에 따른 국가별 핵융합 전력생산 실증 가속화 추진

○ (건설일정) 2050 탄소중립의 핵융합에너지 기여 및 핵심기술 확보경쟁 심화로 핵융합 전력생산 실증로 건설일정 가속화 목표 수립

※ (EU, 일본) ITER 건설일정 지연 영향 최소화를 위한 ITER와 실증로 연구의 병렬적 추진 (중국, 미국, 영국, 민간) ITER 실험결과 의존성 탈피를 위한 별도 장치 건설 추진

○ (민간스타트업) 특히, 소형장치 기반의 민간스타트업의 공격적인 목표설정과 핵심기술 확보를 위한 투자 확대

※ ITER와 별개로 실증장치 건설(소형토카막, 레이저 등) 추진으로 전력생산 일정 단축

□ (가속화 전략) 가속화된 전력생산 실증로 건설 일정을 만족하기 위해 장기적 관점의 미래 소요되는 핵심기술 확보 및 기반 조성을 위한 전략 추진 중

○ (연소플라즈마) 핵융합 실증로 운전에서 필수적으로 확보되어야 하는 연소플라즈마 운전데이터 확보를 위한 노력 지속

※ (중국, 미국, 영국, 민간) 별도 핵융합 장치 건설을 통해 연소플라즈마 검증 추진

○ (공학연구 준비) 핵융합 연소플라즈마 운전기술 확보 이후, 공학적 연구(증식블랑켓, 핵융합 소재, 연료주기 등)의 적기 투입을 위한 공격적인 투자

※ (EU) IFMIF-DONES(중성자원, 재료시험), DTT(디버터연구) 등 신규시설 구축, (일본) IFMIF-EVEDA, A-FNS(중성자원, 재료시험) 신규시설 구축 추진, (중국) BEST(토카막), CRAFT(공학시험시설), HINEG(중성자원, 재료시험) 등 다양한 시설 구축 (영국) STEP(토카막), MRF, FTF(재료), H3AT(연료주기) 등 공학연구 관련 시험시설 구축

○ (인허가 준비) 핵융합 실증로의 조기 건설을 위해 세계적으로 핵융합 고유 안전성을 반영한 공통된 선제적 규제·인허가 방향 마련 추진*

* (IAEA) 핵융합로 적용 국제 안전규제 개발을 위해 국제 전문가 회의 진행 중

○ (산업계 협력 강조) 핵융합 실증로 개발의 리스크를 저감과 향후 유연한 부품·장치 조달을 위해 산업계와의 연계·협력 강조

□ (한국의 여건) KSTAR·ITER 중심의 연구개발이 주도되고 있는 상황이며, 최근 실증로 개발을 위한 계획수립·이행 추진

○ (단계적 계획수립) 한국의 핵융합 전력생산 실증로 개발을 위한 단계적 계획 수립* 추진 및 실행

* (1단계) 장기일정 목표 수립(제4차 기본계획, '22.02) → (2단계) 핵융합 전력생산 실증로 목표설정(기본개념, '23.02) → (3단계) 핵융합 장기 연구개발 로드맵 수립('24.上)

○ (설계 TF 착수) 단계적 계획 수립과 더불어, 산·학·연 전문가로 구성된 설계 TF 구성·운영을 통해 실증로 예비개념설계 착수('23.06)

※ 로드맵 수립 민·관 합동 기획위원회(과기부·민간 공동위원장) 및 산하 분과위원회(산·학·연 전문가 70여명 참여) 구성·운영으로 관련 의견수렴 및 전문성 제고

○ (핵심기술 개발) KSTAR 실험·운영, ITER 건설 부문 세계적인 기술수준*을 보유하고 있으나, 증식블랑켓 등 연료시스템 분야 기술수준** 미흡

* KSTAR 활용 초고온 플라즈마 장시간 유지·운전(이온온도 1억도 30초 등) 세계적 선도, 초전도 도체, 진공용기 등 ITER 조달 품목 세계적 기술수준 보유

** ITER TBM을 제외한 기술 경험 부족으로, 증식블랑켓, 연료주기 등 실증로 기술 목표와의 큰 격차가 있는 분야 존재

○ (연구인프라) 국내 핵융합 연구개발은 KSTAR를 중심으로 추진되고 있으며, 현재 연구인프라로 확보할 수 있는 기술수준의 한계점 도달

※ 국내 핵융합 연구개발은 KSTAR를 활용하여 노심 플라즈마, 가열 및 전류구동 등 토카막 시스템에 집중되어 있으며, 연료시스템 인프라 부재로 기술개발 한계 도달

○ (산업 현황) 국내 핵융합 산업체는 장치제조 기업 중심이며, 핵융합매출도 일부 대기업에 집중되어 있는 상황

※ 해외 민간 스타트업과 달리, 국내 산업체는 제조업(전체 참여기업의 57.4%) 중심 구조로, KSTAR 건설, ITER 조달에 대부분 참여하고 있는 상황

○ (인력 현황) 국내 핵융합 연구개발 인력은 노심 플라즈마에 집중되어 있으며, 졸업 인력의 외부 유출(졸업생 중 60.4%)이 높은 상황

※ 산업계의 경우 토카막 주장치 제조에 가장 많은 인력이 참여하고 있으며, 연구개발 인력(학계, 연구계) 경우 노심 플라즈마에 가장 많은 인력이 참여 중

3. 핵융합 핵심기술 장기 연구개발 로드맵 수립

(1) 로드맵 기본 방향

□ 전략수립 기본원칙

① (기술자립 역량 구축) 8대 핵심기술 중심의 기술수준 향상을 통한 한국의 핵융합 전력생산 실증로의 건설능력 확보 및 기술자립 역량 구축

- 한국형 핵융합 전력생산 실증로의 건설을 위해서는 8대 핵심기술이 실증로 설계가 요구하는 수준 이상의 기술 목표 달성과 상용로 단계에서 기술자립이 가능하도록 최소한 기술수준 역량 구축

② (기술개발 가속화 대응) 자원의 효율적인 활용과 세계적 환경변화에 대한 유연한 대응으로 핵융합 전력생산 실증로 개발 최적화

- 한국의 확보된 기술 역량(KSTAR, ITER)을 최대한 활용하여, 8대 핵심기술확보를 위한 적극적인 국제협력 플랫폼과 산·학·연·정 협력 활용

- 세계적인 핵융합 전력생산 실증 가속화 흐름의 유연한 대응을 위한 핵심기술 개발 전략 수립과 제한된 자원 투입의 최적화 추진

③ (지속가능 연구기반 구축) 장기간의 연구개발 속성을 고려한 산업체, 인력 등 지속가능한 연구기반 구축

- 핵융합에너지 기술자립의 요건은 장기적인 관점(실증로 이후 상용로 개발까지)에서의 지속가능한 연구인력과 산업체 생태계 구축

- 핵융합 8대 핵심기술 개발을 연구인력양성·활용의 기회로 활용하고, 실증로 건설을 위한 기술적 노하우가 전수될 수 있도록 유도

- 또한, 현재 연구개발 단계에서 참여한 산업체가 상용로까지 생존할 수 있도록 여건 마련 및 지속투자를 유도할 수 있는 인센티브 지원

□ 비전체계도

비전	핵융합 에너지 상용화 실현 선도

목표	핵융합 전력생산 실증로 개발을 위한 핵심기술 확보 및 지속 가능 기반 마련		
성과 목표	8대 핵심기술 확보	제도적 기반 구축	산업 생태계 구축

8대 핵심기술 로드맵
[토카막 시스템] 1 노심 플라즈마, 6 가열 및 전류구동, 7 초전도자석, [연료 시스템] 2 증식블랑켓, 3 핵융합 소재, 4 연료주기, 5 디버터 [설계, 안전·인허가] 0 핵융합 실증로 설계 로드맵, 8 안전·인허가

전략 및 실천 과제	1 단계적 핵심기술 확보	2 선도적 제도 기반 구축	3 견실한 생태계 구축
	(1-1) 토카막기술 고도화 (1-2) 연료시스템기술개발 (1-3) 연구역량 집중	(2-1) 제도·지원 기반 구축 (2-2) 특허 권리 확보 기반 마련	(3-1) 전문인력 육성 강화 (3-2) 산업생태계 조성 및 활성화
	4 전략적 이행체계 강화		
	(4-1) 로드맵 이행체계 강화 (4-2) 사회적 이해증진 노력		

□ 핵심기술 로드맵 개요

○ (설계 및 안전·인허가) 핵융합 고유 안전성을 기반으로 실증로 규제·인허가 체계 수립 및 단계적 설계*로 핵융합 전력생산 실증로 건설 준비

* 예비 개념설계(~'26) → 개념설계(~'30) → 공학설계(~'35) → 설계최적화(~'38)

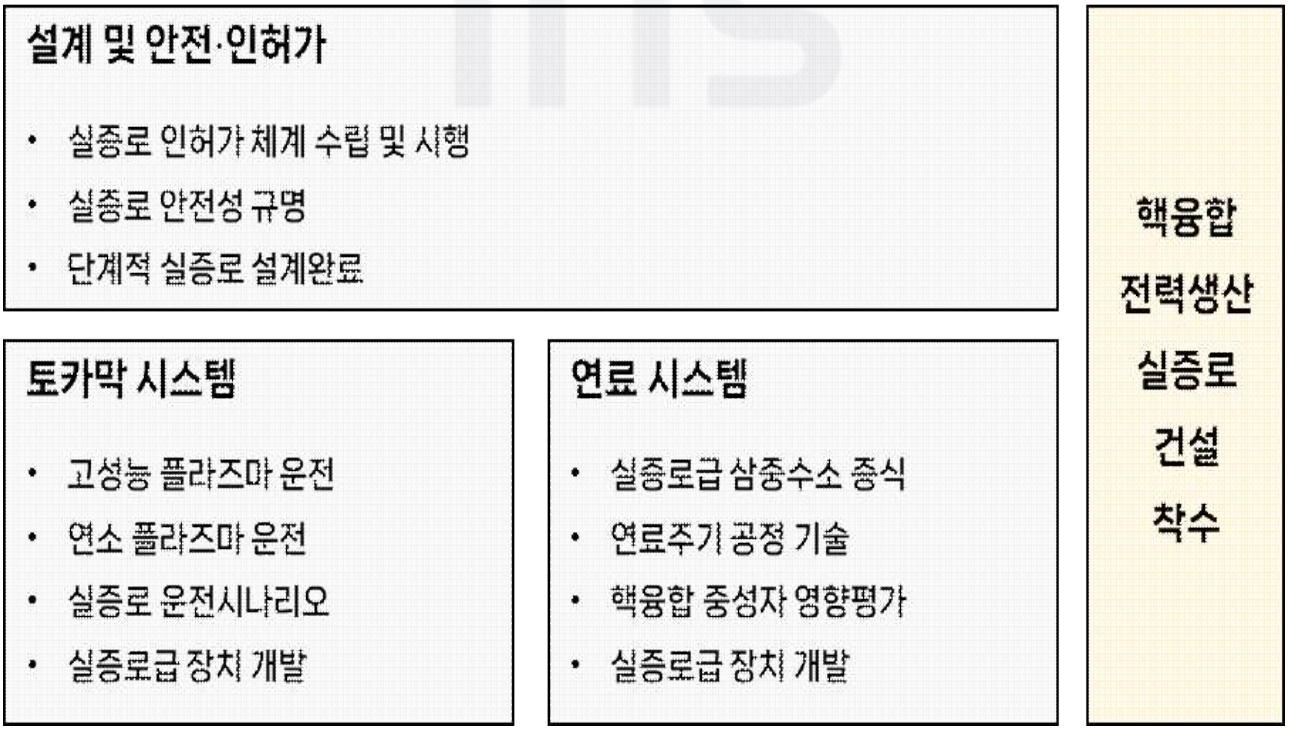
○ (토카막 시스템) 실증로 운전 시나리오 개발을 위한 고성능 플라즈마·연소 플라즈마 운전데이터 확보 및 가상핵융합로 개발

※ KSTAR를 활용한 고성능 플라즈마 운전 데이터 개발, ITER 및 민간 핵융합장치 활용 연소 플라즈마 운전데이터 확보, 실증로 운전 모사를 위한 가상핵융합로 개발

○ (연료 시스템) 핵융합 실증로 연료자급을 위한 실증로급 장치 개발 및 삼중수소 증식, 연료주기 공정 기술 확보

※ 핵융합 중성자원 활용 삼중수소 증식 시험 및 실증로급 증식블랑켓 개발, 연료주기 공정 기술 확보, 핵융합 소재 중성자 영향 평가

< 핵융합 핵심기술 확보 개념도 >



□ 핵심기술 로드맵 총괄표

범례: 산업체 / 대학 / 연구기관 — 설계·인허가 / 자체개발 / 국제협력

대분류	중분류	현재기술수준	2026	2030	2035	2038	최종목표
설계			예비개념설계	개념설계	공학설계	설계최적화	핵융합전력생산실증로설계완료
인허가			핵융합안전기반확립	안저인허가기준/표준수립	인허가기술정립 인허가문서개발	인허가수검	핵융합전력생산실증로건설운영인허가완료
노심 플라즈마	제어	TRL4(38%)	고성능 플라즈마 운전시나리오 개발		정상상태 연소 플라즈마 운전기술 개발	고성능 플라즈마 통합제어 기술개발	(TRL6, 100%)정상상태운전이가능한실증로급운전시나리오개발
	진단	TRL4(33%)	진단 센서·진단계 설계, 프로토타입 제작기술 개발		ITER 진단 결과 검증 및 성능 평가	실증로 센서, 진단계 제작기술 및 데이터 분석기술 개발	(TRL6, 100%)실증로용진단장치개발
	시뮬레이션	TRL4(33%)	KSTAR 디지털 트윈 및 연소 플라즈마 시뮬레이션 기술 개발		ITER 디지털 트윈 및 연소플라즈마 시뮬레이션 고도화	실증로 디지털 트윈 구현 및 실증로 시뮬레이션 기술 개발	(TRL6, 100%)시뮬레이션기술을활용한핵융합실증로운전최적화
	인프라		초고성능 슈퍼컴퓨터(30PF) 구축	초고성능 슈퍼컴퓨터 운영	초고성능 슈퍼컴퓨터(0.5EF) 구축	초고성능 슈퍼컴퓨터 운영 초고성능 슈퍼컴퓨터(5EF) 구축	시뮬레이션프로그램개발및성능검증용초고성능컴퓨터등의제반시설
증식블랑켓	설계·안전해석체계구축	TRL4(33%)	설계 및 안전해석 코드 개발(ITER비교)		설계 및 해석코드 통합체계 구축	설계 및 안전해석 코드 검증	(TRL6, 100%)설계·안전해석코드개발및검증완료
	제작·검증기술개발	TRL4(46%)	소형 목업제작 및 건전성·성능 평가		실증로급 대형 목업 제작 및 평가절차 마련, 유지보수 개발	실증로급 대형목업 건전성·성능 평가, 유지보수 기술 검증	(TRL6, 100%)실증로급블랑켓제작및유지보수기술
	계통기술개발	TRL4(37%)	증식블랑켓 운전 및 냉각계통 단위공정 개발		증식블랑켓 통합 공정 및 신뢰도·가동률 향상	증식블랑켓 통합공정 검증 및 운전 시나리오 도출	(TRL6, 100%)(준)연속운전연료추출·냉각시스템기술
	인프라			연료시스템 연구인프라구축	(준)연속운전 삼중수소생산, 추출, 회수공정검증, 증식유닛의 신뢰성평가, 공학데이터확보를 통한 기술개발 적용		증식블랑켓설계및제작기술공학데이터확보
핵융합 소재	구조재	TRL3(40%)	저방사화 철강재 제조 및 용접기술 개발		대량생산 및 접합 기술 개발	대량생산 표준절차 확립 및 물성DB 구축	(TRL6, 100%)대량제조기술개발및물성DB구축
	대면재	TRL3(35%)	고밀도·고순도 텅스텐 계열 소재개발		고인성 텅스텐 계열 소재개발	고성능 텅스텐 소재 제조기술 개발	(TRL6, 100%)고인성플라즈마대면재제조기술개발
	기능소재	TRL4(58%)	리튬-6 등 증식재 원료확보 및 화합물 제조기술 개발		해수리튬 추출기술 및 기능소재 제조기술 개발	고성능증식재대량합성및기능소재물성DB구축	(TRL6, 100%)고성능기능소재개발및물성DB구축
	인프라			연료시스템 연구인프라구축	중성자조사손상 등 영향평가 및 DB확보, 고에너지중성자조사시험 및 물성 평가, 베릴륨화합물 합성·제조·가공기술개발		핵융합소재개발을위한정확한물성평가및검증수행
연료주기	삼중수소안전	TRL2(23%)	대형장치내 미량 삼중수소 회수공정 개념 및 공정가스 분석방법 연구		미량 삼중수소 회수 및 공정가스 분석방법 검증	실증로급 삼중수소 회수시스템 및 공정가스 분석기술 개발	(TRL6, 100%)실증로급삼중수소회수시스템·공정가스분석기술개발
	삼중수소 정제분리저장	TRL2(35%)	시스템(기기) 개념도출 및 설계		시스템 성능평가 및 DB 축적	실증로급 시스템 개발	(TRL6, 100%)실증로급정제분리저장시스템개발
	핵융합연료공급	TRL3(35%)	시스템 주요 기기 모델링 및 검증장치 제작		주입공정 검증 및 Manifold 설계	실증로급 펠릿·가스 주입시스템 설계(안) 도출	(TRL6, 100%)실증로급연료주입시스템개발
	핵융합진공배기	TRL3(20%)	고진공/저진공 통합공정 평가모델 개발		펌프 성능평가 및 저진공배기후보기기 성능 평가	실증로급 고진공·저진공배기시스템 개발	(TRL6, 100%)실증로급고진공·저진공배기시스템개발
	인프라			삼중수소회수 플랜트 구축	연료주기 공정시험시설구축	연구 인프라 및 ITER 운전결과 기반 실증로 적용 가능 기술 확보	수소동위원소가스취급및분석수행
디버터	설계기술	TRL4(25%)	경계플라즈마 해석수행 및 통합공학해석환경 구축		입자·열속 최적화 개념 및 실증로 디버터 공학설계(안) 도출	입자·열속 최소화 시나리오 연구 및 공학설계(안) 고도화	(TRL6, 100%)디버터운전시나리오및공학설계(안)도출
	제작·검증기술	TRL4(33%)	타겟제작기술 개발 및 원격유지보수 개념 연구		실증로급 냉각기술 개발 및 로봇시스템 고도화	실증로급 디버터 제작기술 및 건전성평가기술개발	(TRL6, 100%)20MW/m²급냉각성능디버터제작
	인프라			연료시스템 연구인프라구축	초고열속 환경에 노출되는 디버터 열적성능평가, 헬륨/중수소/불순물 등 다양한 입자의 영향평가를 위한 환경모사		수소동위원소가스취급및분석수행
가열 및 전류구동	장치개발기술	TRL3(33%)	중성입자빔 고주파 전류구동장치 설계 및 요소기술개발		장치성능검증 및 실증로 적용기술확정	실증로 가열 및 전류구동장치 개발	(TRL6, 100%)1MW/40A운전기술확보, 고주파전류구동장치([illegible])개발및전송로안테나기술확보
	플라즈마통합기술	TRL4(33%)	KSTAR 고성능 전류구동 실증 및 가열전류구동 시뮬레이션 기술개발		ITER 운전기술확보 및 시뮬레이션 실험검증	운전성능향상 시뮬레이션 최적화	(TRL6, 100%)가열출력-플라즈마효율80%, 예측코드국산화100%
	인프라			가열 및 전류구동장치 시험설비 구축	가열 및 전류구동장치 시험설비 운영		중성입자빔및EC/RF통합장치안테나시험시설
초전도 자석	초전도선재	TRL4(50%)	실증로급 선재 및 성능평가기술개발		실증로급 선재 장선화 및 사양결정	선재 대량생산 및 품질보증체계 마련	(TRL6, 100%)실증로선재대량생산기술(총500톤, 연70톤생산)
	초전도도체	TRL4(34%)	초전도도체 설계최적화 및 전류인가, 내구성시험		초전도도체 특성평가 및 대량생산기술개발	실증로급 도체생산 및 품질보증체계 마련	(TRL6, 100%)실증로도체대량생산(총100km, 단위길이1km이상)
	초전도자석	TRL4(34%)	실증로 초전도자석 설계 및 특성평가, 해석방법론 개발		실증로 초전도자석 시제품 코일제작	실증로 초전도자석 최종설계, 품질보증체계 마련	(TRL6, 100%)실증로초전도자석제작기술확보
	초전도자석기반시스템	TRL4(34%)	초전도자석 운전해석기술개발		실증로용 퀜치보호기술개발	냉각, 전원시스템 사양설정	(TRL6, 100%)실증로용초전도자석기반기술확보
	인프라				초전도자석 시험시설구축	초전도자석 시험시설 운영	초전도자석시험시설구축
안전·인허가	안전성평가기술	TRL2(20%)	안전 요건 도출 및 안전성 평가기술 개발		시스템 안전성 평가	안전요구조건 검증 및 종합 안정성 평가체계 구축	(TRL7, 100%)실증로인허가획득안전성입증, 안전관리체계확립
	인허가기술	TRL2(20%)	안전기반 수립 및 방법론, 허용기준 개발		실증로 안전기준 및 표준 수립, 검증역량확보	실증로 인허가 심사 적용	(TRL7, 100%)규제체계확립및규제검증코드확보

(2) 설계·인허가 로드맵

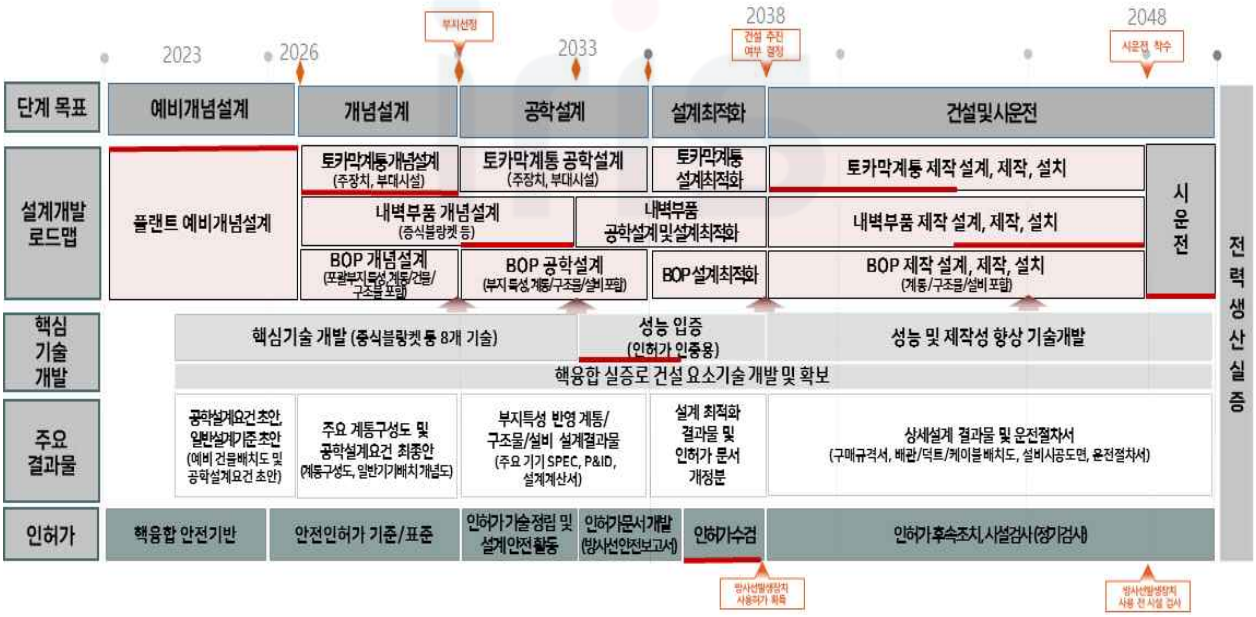
□ (설계 로드맵) 핵융합 실증로 건설여부 결정('38년)을 위한 단계별 설계 로드맵 수립

※ 원자력 사례(APR1400) 개발 단계를 고려하여 핵융합 전력생산 실증로 설계 로드앱 수립

구분	기간	목표	주요 결과물
예비개념설계	~'26	실증로 예비개념설계 및 시스템 통합	계통설계 요건, 기술기준 초안
개념설계	'27 ~ '30	실증로 시스템별 개념설계 및 설계요건 구체화	주요 계통구성 완료 및 안전규제 기술개발
공학설계	'31 ~ '35	실증로 건설 전제 상세 엔지니어링 완료	부지 특성을 반영한 계통, 구조물 설계 상세요건
설계 최적화	'36 ~ '38	인허가 수검에 따른 설계최적화	설계 최적화 및 설계 인허가 획득

□ (인허가 단계) 핵융합로의 방사선 발생장치로의 규제 가능성이 높아짐에 따라, 설계 로드맵에 맞추어 인허가 로드맵 수립

※ 방사선안전보고서 작성('33~'36) → 핵융합 실증로 인허가 수검(~'38)



< 핵융합 전력생산 실증로 설계 및 인허가 로드맵(안) >

□ 설계 단계별 주요 활동

① 예비개념설계 및 개념설계

○ (기본특징) 실증로 PBS(Plant Breakdown Structure)를 토대로 설계 활동 수행

– 각 PBS별로 각 장치에 대한 설계요건문서 및 장치설명문서 등을 마련

- CATIA CAD 프로그램과 연동되는 ENOVIA 시스템(CAD 관리 시스템)을 기반으로 각 장치의 3D 설계, 설계 통합 및 관리 수행

○ (공통점) 예비개념설계 및 개념설계 모두 시스템 개념설계 보고서 산출, 비용 분석 및 일정 도출 수행

- (주요결과물) 프로젝트 상위 수준(top level)의 기술문서인 설계요건(PR), 설계보고서(PD), 설계도면집(3D & 2D CAD 파일), 시스템요건서(SRD), 설계설명서(DDD) 등을 마련

< 예비개념설계 및 개념설계 단계 주요 결과물 >

주요 결과물	내용
설계 요건(Project Requirements)	건설 목표에 부합하는 설계 적합성(suitability) 확립에 필요한 요건 제공
설계 보고서(Plant description)	프로젝트 수준 요건이 구현된 개념설계 설명 제공
시스템 요건서(System Requirement Document)	PBS별로 시스템의 요건 및 명세 제공
설계설명서(Design Description Document)	PBS별로 설계요소의 상세 명세 제공

○ (차이점) 설계 수준 및 문서의 완성도 및 성숙도 차이

- (예비개념설계) 플랜트 및 토카막 주장치 배치도 개발 등

- (개념설계) 각 시스템 개념설계 및 설계요건 구체화 등

예비개념설계	개념설계
• 개요 • 프로젝트 설명 • 성능요건 • 레이아웃 요건	• 개요 • 프로젝트 설명 • 성능요건 • 레이아웃 요건 • 운전 요건 • 환경, 안전성, 인력 건강 요건 • 건설 요건 • 추가 요건 • 부록

예비개념설계 구체화

< 설계 요건 구성 및 수준 >

② 공학설계

○ (기본특징) 실증로 건설을 전제로 상세 엔지니어링 완료

○ (주요활동)

– 개념설계단계에서 확정된 PR 및 SRD, Codes & Standards을 기준으로 하중사양(LS)* 개발, 이를 토대로 각 시스템 상세 해석(구조, 열·유동, 전자기 등) 및 구조건전성보고서(SIR)** 작성, 구조안전성 검증

* LS(Load specification) 구조물의 크기 및 형태, 재료, 강도 결정 등을 위해 구조물이 견딜 수 있는 하중의 종류 및 크기 분석

** SIR(Structural Integrity Report) 구조물 안전성 평가·보장을 위해 수행되는 검사 및 평가, 실험, 모델링 결과 등에 관한 보고서

– 시스템 3D & 2D 상세설계도 완성

– 시스템 인터페이스, 조립/유지보수, 주요한 제작성 검증 완료

결과물		설 계 단 계		
적용 구분	보고서 이름 (ITER)	예비개념설계	개념설계	공학설계
플랜트 전체 (PBS Level 0)	· 설계요건(PR)	· 초안	· 완성	
	· 설계보고서(PD)	· 예비개념설계 반영	· 개념설계 반영	공학설계 반영
	· 설계도면집(2D & 3D CAD) · 형상모델(CM : Configuration Model) · 상세모델 (DM: Detailed Model) · 공정흐름도(PFD : Process Flow Diagram) · 공정배관계장도(P&ID : Pipe and Instrument Diagram) 등	· 플랜트 건물 배치도 초안 · 시스템 배치도 초안 · 토카막 Radial & Vertical build 등	· 플랜트 건물 배치도 완료 · 시스템 배치도 완료 · 시스템 개념설계도 완료 · 조립 및 유지보수 개념설계도 완료	· 플랜트 건물 설계도 완료 · 시스템 공학설계도 완료 · 조립 및 유지보수 공학설계도 완료
시스템 (PBS Level 2)	· 시스템요건서(SRD: System Requirement Doc.)	· 초안	· 최종본 완성	
	· 기준 및 표준 (C&S : Codes and Standards)	· 초안	· 최종본 완성	
	· 하중사양(LS : Load Specification)	· 초안	· 최종본 완성	
	· 설계설명서(DDD : Design Description Doc.)	· 예비개념설계 반영	· 개념설계 반영	· 공학설계 반영 · 제작기술 개발
	· 인터페이스제어문서(ICD : Interface Control Doc.)	· 초안	· 최종본 완성	
	· 구조건정성문서(SIR: Structural Integrity Report)		· 초안	· 최종본 완성 (구조안정성 검증)

< 설계 단계별 주요 결과물 >

(3) 핵융합 핵심기술 로드맵

1. 노심 플라즈마

□ 기술 정의

○ 핵융합 에너지 생산에 적합한 높은 온도(1억도 이상)와 밀도를 갖는 노심 연소 플라즈마*를 만들고, 이를 안정적으로 제어·유지하는 운전 시나리오를 정의 및 개발

* 핵융합 과정에서 스스로 가열이 일어나는 플라즈마 상태. 핵융합 반응이 지속 가능한 조건으로 노심의 연소 플라즈마를 발생·유지하는 기술

□ 기술개발 필요성

○ 노심 플라즈마 기술은 핵융합 반응 후 가열 에너지를 추가 투입하지 않고 연소상태를 지속시키는 기술로 핵융합 발전의 경제성 확보를 위해 반드시 필요한 조건임

- ITER 이후의 노심 운전 기술 확보는 핵융합에너지 기술이 본격적인 상업 기술 단계로 올라서기 위한 마지막 관문으로, 이를 선점하기 위한 주요 핵융합 선진국들의 기술 보안 강화와 내재화 경쟁이 치열해질 것으로 예상

○ 운전 시나리오*는 연소 플라즈마를 24시간 유지하기 위하여 플라즈마를 안정적으로 제어하는데 필수적인 요소로, 핵융합 실증로의 작동 절차와 운전 조건을 설계에 반영하여 실증로의 성공적인 건설 및 운전에 반드시 필요

* 핵융합 반응이 지속 가능한 조건 하에 연소 플라즈마를 발생 유지하고, 전원 가동부터 플라즈마의 생성, 가둠, 유지, 소멸에 이르는 모든 실험 절차와 운전 조건을 명시

- 낮은 TRL의 연구 개발 단계에서는 국제 공동 연구가 활발히 진행될 수 있지만, 상용화 단계에 돌입 시 개발국의 기술 보호 및 지재권 확보가 두드러져 본격적인 실증로 연구 단계에서의 국제협력은 제한적일 것으로 예상

□ 파급성

○ 산업 인공지능 분야, 특히 극한 환경에서의 차세대 원자력, 우주항공 등에 초정밀 실시간 제어기술 활용 가능

○ 실증로의 극한환경에서 운용 가능한 진단장치(소재) 개발기술은 심우주탐사에, 대용량 데이터 분석에 활용되는 인공지능 기술은 여러 산업에 범용 가능

○ 시뮬레이션 기술은 일부 기술 변형 및 확장을 통해 토카막 방식의 다양한 핵융합

연구 분야(예: 구형 토카막, 자기 거울, 핀치 방식)와 타분야 기술로 확장 가능

- 토카막 가상화 기술의 경우 첨단 제조 분야에 활용되는 Virtual Engineering 기술과 연관성이 있으며, 특히 인공지능 기술을 접목한 디지털 트윈 기술 개발과 밀접하게 연결

- 최첨단 연구설비와 연결되어 구축된 초고성능컴퓨팅 자원과 디지털 트윈 설비는 인공지능 연구를 위한 설비 고도화, 산업 활용 및 혁신을 위한 AI 기술, 가상제조 등의 연구에 활용 가능

□ 세부기술 분류 및 마일스톤

○ 실증로의 운전 시나리오 개발은 KSTAR, ITER, 슈퍼컴퓨팅 시뮬레이션 등을 통해 현존하는 물리학적 난제들*을 최종적으로 극복하고 검증

* 전력생산이 가능한 수준의 연소 플라즈마 발생과 소멸에 대한 통제 능력 기술 완성

< 노심 플라즈마 세부기술 분류 >

세부기술	세부내용
노심 플라즈마 제어기술	○ 실증로 운전 표준 시나리오 수립을 위한 첫 번째 조건(고출력 플라즈마,장시간 운전)을 구현하는 기술 - (고출력 플라즈마) KSTAR(D-D)를 활용 안정상태 β_N>3.5, 고효율 H_{89}>3.0, G>0.4, 전류구동 f_{NI}~1.0, f_{BS}>0.7, 이온온도>10 keV(1억도) 성능조건을 만족시키는 고출력 운전 시나리오 개발 및 구현 - (연소 플라즈마) ITER(D-T)를 활용 열효율 Q=2~10, ~3,000초 정상상태 연소 플라즈마 구현 및 제어 기술, 안정화 기술 개발 - (실증로 통합제어) 실증로 노심 플라즈마의 위치 및 모양 제어, ELM, NTM, 수송 및 난류 등 플라즈마 운전을 통합적으로 제어하는 기술
노심 플라즈마 진단기술	○ 연소 플라즈마의 극한 환경(고열속, 고자장, 고중성자속)에서 동작 가능한 진단 센서(자기장, 광량, 에너지, 출력 등), 재료, 설계 기술 - (측정 데이터 통합 분석) 각종 물리변수의 상관관계를 종합적으로 분석하여, 플라즈마 실시간 제어에 활용할 수 있는 진단 측정 데이터 통합 분석 기술 개발 - (센서/계통 제작) 실증로 진단 센서/구조물 설계 제작 기술 및 진단계통(차폐구조물, 케이블, 피드스루 등)에 필수적인 특수부품 제작 설치 기술 개발 - (실시간 분석시스템 개발) 연소 플라즈마 실시간 진단-제어 분석시스템 구축 및 작동 테스트
노심 플라즈마 시뮬레이션	○ 실증로의 운전 시나리오의 적용 가능성 등을 사전 검증할 수 있는 플라즈마 시뮬레이션 기술 - (정밀 시뮬레이션) 슈퍼컴퓨팅 기술활용 노심 플라즈마 정밀 시뮬레이션 기술 개발 - (대용량 데이터 처리/통합 분석) 빅데이터 기술을 접목한 대용량 데이터 효율적 처리 및 통합 분석 소프트웨어 개발을 통한 시뮬레이션-실험 결과 비교 검증 - (고속 시뮬레이션 모듈화) 기계학습으로 노심 플라즈마의 고속 시뮬레이션 모듈화 기술 개발 - (통합 시뮬레이션 코드 개발) 다양한 운전 시나리오에 대응 가능한 핵융합로 통합 시뮬레이션 코드 개발을 통한 발전소 통합 설계 및 노심 성능 예측 기술 확보

< 노심플라즈마 세부기술개발 마일스톤 >

범례 산업체 대학 연구기관 자체개발 국제협력

세부기술	현재기술 수준	2026	2030	2035	2038	최종목표
노심플라즈마제어	TRL4 (38%)	연 학 고성능 플라즈마 운전 시나리오 개발		연 학 정상상태 연소 플라즈마 운전기술 개발	연 학 고성능 플라즈마 통합제어 기술개발	(TRL6,100%)정상상태 운전이 가능한 실증로급 운전 시나리오 개발
노심플라즈마진단	TRL4 (33%)	연 학 진단 센서·진단계 설계, 프로토타입 제작기술 개발		연 학 ITER 진단 결과 검증 및 성능 평가	연 학 실증로 센서, 진단계 제작기술 및 데이터 분석기술 개발	(TRL6,100%)실증로용 진단장치 개발
노심플라즈마 시뮬레이션	TRL4 (33%)	연 학 KSTAR 디지털 트윈 및 연소 플라즈마 시뮬레이션 기술 개발		연 학 ITER 디지털 트윈 및 연소플라즈마 시뮬레이션 고도화	연 학 실증로 디지털 트윈 구현 및 실증로 플라즈마 시뮬레이션 기술 개발	(TRL6,100%)시뮬레이션 기술을 활용한 핵융합 실증로 운전 최적화
인프라		연 산 초고성능 슈퍼 컴퓨터(30PF) 및 제반 시스템 구축	초고성능 슈퍼컴퓨터 운영	연 산 초고성능 슈퍼 컴퓨터(0.5EF) 및 제반 시스템 구축	초고성능 슈퍼컴퓨터 운영 / 연 산 초고성능 슈퍼컴퓨터(5EF) 및 제반 시스템 구축	시뮬레이션 프로그램 개발 및 성능 검증용 초고성능 컴퓨터 등의 제반 시설

① 노심 플라즈마 제어

□ 정의

○ 실증로에 활용 가능한 노심 플라즈마 운전 성능을 효율적으로 달성하고 안정적으로 유지하는 기술

< 노심 플라즈마 제어 기술 개요 >

세세부기술	기술개요
차세대 고출력 플라즈마 운전 시나리오 개발	• 실증로 주요 성능 지표*에 기반한 β_N~3.5급 고성능 장시간 운전 시나리오 확보 * 고효율(H_{89}>3.0, G>0.4), 전류구동(f_{NI}~1.0, f_{BS}>0.7), 이온온도(>10 keV(1억도))
정상상태 연소 플라즈마 구현 및 제어	• 핵융합 반응 중 가장 많은 에너지를 얻을 수 있는 D-T 연소 플라즈마 구현 및 장시간 운전기술 개발/검증 * 에너지 증폭률 10배(Q=10), 400초 운전 달성 기술 확보 및 비유도 전류구동으로 정상상태 Q≤5, 3,000초 장시간 운전 기술 개발/검증
실증로 통합 제어	• 안정적인 D-T 핵융합 지속, 대면 물질 열부하 인가, 전기생산 효율 향상, 이상 상황 대처 등 실증로 운전의 주요 요건에 대응한 운전 기술 확립

□ 기술개발 필요성

○ (공학적 기술 한계 극복) 실증로 건설 단계에 진입하기 위해서는 다양한 노심 플라즈마 관련 공학적 기술의 한계를 해결하기 위한 연구가 반드시 필요

– 실증단계에서는 기존과 달리 고출력의 플라즈마가 필요하며, 이를 생성하고 불안정한 플라즈마를 제어하는 여러 기술적 난제 해결이 실증로 건설·운영 성공의 첫 관문

– 높은 열속을 견디며 삼중수소를 스스로 공급할 수 있는 D-T 연소 플라즈마 실험은 현존하는 토카막 연구장치들은 시도할 수 없었던 분야로 기술개발이 반드시 필요

○ (실증로 운전 기술 확보) 실증로는 상용로와 동일한 수준의 최소화된 외부개입만으로도 고성능 노심 플라즈마를 안정적으로 유지해야 하는 정밀한 운전기술이 필요

- ITER와 실증로 사이의 노심 성능 간극을 메우기 위한 노심 운전 기술 확보*는 핵융합에너지 기술이 본격적인 상업 기술 단계로 올라서기 위한 마지막 관문

* 핵융합 실증로는 기존 토카막과 달리 플라즈마 압력비(β_N)와 가둠성능을 정상상태로 유지하면서 플라즈마 내벽에 인가되는 열속 및 입자속을 적절히 통제할 수 있는 진보된 운전 시나리오가 필요

□ 차세대 고출력 플라즈마 운전 시나리오 개발 동향

○ (미국) 오랜 경험과 기술이 축적되었으나 상전도 토카막 기반으로 인하여, 플라즈마를 고성능 상태로 유지하는데 발생하는 문제를 연구하는 장시간 운전연구 분야에서는 제약이 있음

- 미국 GA의 DIII-D에서는 $\beta_N \geq 3.5$급의 고성능 플라즈마 연구가 성숙 단계 진입

○ (일본) DEMO 운전을 위한 high-β 플라즈마 유지운전 기술 수립을 핵심 이슈 중 하나로 선정

- JT-60SA를 활용한 시나리오 연구를 준비 중에 있으며, ITER의 DT 플라즈마 실험을 통한 시나리오 검증을 계획하고 있음.

○ (EU) 실증로 기술 연구를 위해 다수의 연구장치를 운영 및 건설 중

- 세계적으로 가장 앞선 연구성과를 창출하고 있는 장치로 평가받는 세계 최대 규모인 유럽연합의 JET(Joint European Torus)에서는 '22년 핵융합 반응을 통해 59MJ 정도의 에너지를 얻는 실험을 성공적으로 수행

○ (국내) 세계적 수준의 초전도 토카막 연구 장치인 KSTAR를 중심으로 서울대, 포항공대, KAIST, UNIST 등 거점 대학과 연계하여 핵융합 플라즈마 성능 향상 연구 수행

- 국내 거점 대학들의 교수진과 학생들은 KSTAR의 다양한 실험 워킹그룹 참여를 통해 매년 우수한 실험 제안과 분석 연구 등 수행

- KSTAR 연구진들과 함께 국내 핵융합 연구의 현재와 미래 구성원으로 활발한 연구 활동을 수행

- 최근 급격히 주목받고 있는 인공지능, 빅데이터, 머신러닝 등 최신 컴퓨팅 및 IT 기술의 접목을 산학연 공동연구로 추진 예정

□ 정상상태 연소 플라즈마 구현 및 제어 기술 동향

○ (미국) ITER의 연소 플라즈마에 활용할 제어 기술을 개발 중이며, 실제 실험 결과를 토대로 다양한 제어 요소를 사전 학습하여 DEMO 장치에 구현을 계획 중임

- 미국 General Atomics 社 DIII-D 장치의 TokSys 전산모사 시스템을 사용해 운전 시나리오에 대한 사전 검증 및 반응성 테스트 진행

- 미국 Columbia University에서 개발하고 있는 DECAF 시스템은 다양한 실시간 진단 신호를 바탕으로 운전 경계 계산 및 감지를 수행

- DIII-D는 이미 NBI 가열장치와 연동된 값 자동 제어를 통해 고성능 운전 경계를 따라 안정적인 운전에 대한 실증 실험을 수행

○ (일본) ITER 연구계획 일정을 반영하여 “JP 실증로 로드맵”을 개정('18)하고, EU와의 공동연구 프로그램을 통하여 진단 및 제어 등의 요소기술 연구 추진

- JT-60SA와 ITER의 플라즈마 제어 관련 데이터베이스 구축 계획

- 안정적인 플라즈마 장시간 운전 연구 결과에 기반한 DEMO 운전 시스템 조기 설계

○ (EU) 11대 요소기술 중 하나로 ‘진단 및 제어‘ 분야를 선정하였으며, 로드맵 및 세부 일정 수립

- ITER의 설계 요소 및 연구계획 일정을 로드맵에 반영

○ (국내) KSTAR를 대상으로 플라즈마 안정성을 강화할 수 있는 운전 방법을 연구 중이며, 이를 ITER장치에 응용하고 이에 대한 결과를 DEMO 장치에 도입하는 전략을 수립

- 현재 KSTAR를 대상으로 digital twin을 구현하는 작업이 진행 중이며, 이를 바탕으로 K-DEMO에 적용할 수 있도록 플랜트 시스템 전반을 아우르는 digital twin으로 확장하는 연구를 ‘25~'35년 사이 중장기 관점에서 진행 예정

- KSTAR의 IVC coil을 통해 관찰하고자 하는 불안정성과 일치하는 외부 자기장 섭동을 가할 수 있으며, 주파수 변조 등의 방법을 통하여 실시간 플라즈마 반응을 자기장 진단 도구(saddle loop, MD)를 통해 수집하는 연구 진행 (실시간 MHD spectroscopy)

- 현재 KSTAR에서 플라즈마 안정성에 대한 간접적 척도인 β값을 실시간으로 계산해 일정 수준 이상이 되는 경우 자동으로 가열 파워를 조절하는 연구 진행

- 운전 상황에 따라 플라즈마가 안정성 경계를 넘어 회복할 수 없다고 판단되는 경우 플라즈마 자체를 꺼버리는 forced landing 기법을 KSTAR에 적용해 특정 불안정성으로부터 KSTAR 장치 보호

□ 실증로 통합 제어 기술 동향

○ (미국) 전통적인 후행해석* 방식의 시나리오 연구를 꾸준히 수행하였고, ITER 및 실증로에 적용 가능한 수준의 실험 검증 추진 중

* 가정에 의해 시나리오를 설정하고 실험을 수행한 후 이 실험 데이터를 바탕으로 같은 결과가 나오도록 해석 코드로 분석하여 직접 측정하지 못하는 플라즈마 주요 변수들을 정량적으로 유추하는 방식

- 최근 높은 선행 예측성능을 갖는 통합운전시나리오 모델링에 많은 노력 중이며, 대표적으로 CESOL 패키지*가 최근 활발히 개발·개선 중

* CESOL : 통합운전 시나리오의 일종으로 Core-Edge Pedestal-Scrape off layer의 약어. 노심플라즈마의 중심, 언저리 및 내벽 근처의 플라즈마 전체 영역을 한번에 통합하여 시뮬레이션하는 방식.

- KSTAR와 같은 국외 연구기관과 긴밀한 공조와 연구협력을 통해 플라즈마 발생 및 실시간 피드백 제어 시스템 개발을 지속해서 노력

○ (일본) JA MODEL 2018 설계(안)을 도출하고, 과거 제안된 다양한 설계(안)을 비교분석하여 주어진 시간/조건 내에 최종 개념설계(안) 도출 예정

- ITER 및 JT-60SA에 기반한 통합 플라즈마 제어시스템 개발하고, 이를 토대로 DEMO 설계 파라미터 결정

- ITER 및 JT-60SA, 모델링/시뮬레이션, 로공학 등을 통해 다양한 운전시나리오 개발 및 고성능 통합운전 실증을 계획

○ (EU) DEMO 상황에 맞는 플라즈마 운전 시나리오의 기준을 정하였으며, 이에 관한 운전 시나리오 제시 및 검토 착수

- 플라즈마의 정상 상태 유지 및 이상 상태 회피를 위한 제어 장치의 필요 성능 연구등을 수행하고 제어 시스템의 개발을 계획 중

- 유럽 DEMO 설계를 위한 EUROfusion PPP&T 내부의 주요 업무

○ (국내) DEMO 선행기술 개발 중 하나로 통합 제어 시스템 개발 추진

- 실증적 플라즈마 운전시나리오 모델링 기술개발 및 선행예측 성능 고도화 추진

- 국내에는 중형 규모의 KSTAR 장치의 플라즈마 제어 기술이 미국과의 협력을 통하여 구축되어 있음. 대학의 경우는 소규모 토카막 장치를 이용해 이론 및 기초 연구 진행

- 국내 핵융합연구 거점 대학 중 하나인 서울대에서는 플라즈마 운전시나리오 개발 및 모델링과 관련하여 가장 활발한 연구를 수행하며 플라즈마 평형, 안정성, 수송, 가열 및 전류구동 현상 등에 대해 기존의 이론과 기계학습 기법 등을 이용한 모델을 구축해 TRIASSIC 통합시뮬레이터 개발

- 기계학습 기법을 활용해 선행예측 성능을 향상시켜 최적 운전시나리오를 도출하고 실증하는 연구 수행

< 주요국 DEMO Design Parameters >

장치	R/a	β_N	B_T	f_{GW}	I_P	f_{BS}	H_{98}	Q, P_{Aux}
ITER-SS(2011)	6.2/2.0m	2.75	5.4T	0.85	8 MA	62.5%	1.5	3.36, 73MW
EU-DEMO(2018)	9.0/2.9m	2.5	5.9T	1.2	18 MA	35%	1.1	40, 50MW
ARIES-ACT(2014)	6.25/1.56 m	4.75	6.0T	1.0	10.9 MA	91%	1.65	42, 42.5MW
CFETR-A4(2019)	7.2/22m	3.0	6.5T	0.96	13.78 MA	75%	1.42	28, 78MW
J-DEMO(2014)	8.5/2.42 m	3.4	5.94T	1.2	12.3MA	61%	1.3	17.5, 83.7MW
K-DEMO(2023)	6.8/2.2m	3.5	6.5~7.0 T	1.0	12~13MA	60%	1.5	25~30, 50~60MW

□ 기술확보 전략

○ (기술내용) 정상상태 운전이 가능한 실증로급 운전 시나리오 개발

- 실증로 성능의 고성능 플라즈마 운전 시나리오 개발 및 구현

- 정상상태 연소 플라즈마 구현 및 제어 기술, 안정화 기술 개발

- 실증로 노심 통합제어 기술 개발

○ (확보전략) 국내외 대학 및 연구소와의 협력 연구를 지속적으로 강화하며, 특히 현재와 미래 세대의 활발한 연구 협력을 통한 시너지 확보

- KSTAR를 활용* 주요 실증로 성능지표* 달성에 기반한 β_N~3.5급 고성능 장시

간 운전 시나리오 확보

* KSTAR는 텅스텐 금속내벽 환경에서 β_N>3의 장시간 핵융합 플라즈마 운전을 연구할 수 있는 세계적인 수준의 토카막 장치로 평가

** H89 > 3.0, G>0.4, fNI~1.0, fBS>0.7, 이온온도 >10 keV(1억도) 등 노심 플라즈마 모사에 필요한 고성능 플라즈마 발생 실험 연구를 위해 플라즈마 가열 장치의 용량을 단계적으로 추가 확보(>20 MW)

- 3차원 난류 측정 기술 등 최첨단 플라즈마 진단 기술과 최적화된 V-KSTAR 시뮬레이션 기술을 바탕으로 실증로 설계의 성능추정 불확실성을 최소화

- DIII-D 등 각기 다른 특성을 가진 해외 주요 토카막과의 교차실험을 적극 수행하고, 필요시 효율적인 연구목표를 달성하기 위한 규모의 장치 업그레이드를 고려

– ITER를 활용하여 비유도 정상상태 Q≤5, 3,000초 장시간 운전 기술 개발하고 D-T 연소 플라즈마 Q=10, 400초 운전 기술 확보

– 실증로는 안정성, 신뢰성, 유연성이 강조된 고성능 연소플라즈마 장치 제어기술 개발이 필요함에 따라, 안정적인 D-T 핵융합 지속, 대면 물질 열부하 인가, 전기생산 효율 향상, 이상 상황 대처 등 실증로 운전의 주요 요건에 대응한 운전 기술 확립

< 노심 플라즈마 제어 기술 확보전략 >

세세부기술	개발 내용	구분	개발 주체	주체별 역할
차세대 고출력 플라즈마 운전 시나리오 개발	• β_N~3.5급 고성능 운전 시나리오 확보	자체 개발	출연(연)	• Hi-li, Hybrid 등 주요 운전시나리오 개발 • KSTAR 운전을 통한 시나리오 구현 및 결과 해석
			대학	• 대안 시나리오 실험 · 분석, 통합 운전해석 패키지 개발 • KSTAR 운전을 통한 실험 수행 및 결과 해석
	• f_{NI}~1.0, f_{BS}>0.7급 비유도 운전 시나리오 확보	자체 개발	출연(연)	• Hi-βp 운전 시나리오등 개발 • KSTAR 운전을 통한 시나리오 구현 및 결과 해석
			대학	• 대안 시나리오 실험 · 분석, 통합 운전해석 패키지 개발 • KSTAR 운전을 통한 실험 수행 및 결과 해석
	• ITER-실증로 선행연구 및 간극 기술 확보	국제협력	한-미	• KSTAR-GA 시나리오 태스크포스 구성 및 운용 • Transients (Disruption & ELM) 모델링 및 제어 분야의 최신 기술 확보
정상상태 연소 플라즈마 구현 및 제어	• 비유도 정상상태 Q≤5, 3,000초 장시간 운전 기술 개발·검증	자체 개발	출연(연)	• KSTAR 플라즈마 운전시스템의 ITER 호환성 강화 • ITER 운전시스템 실험 · 검증
			대학	• 운전 성능 분석 평가
	• D-T 연소플라즈마 Q=10, 400초 운전 달성 기술 확보 • DEMO 선행 기술 확보	국제협력	한-미 ITER	• (DIII-D, NSTX) 실증적 플라즈마 운전시나리오 모델링 기술개발 및 선행예측성능 고도화
				• 연소 플라즈마 운전(제어) 데이터 수집

세세부기술	개발 내용	구분	개발 주체	주체별 역할
				• ITER 시스템 활용 차세대 제어 시스템 연구 • 연소 플라즈마 장시간 운전 기술 확보
실증로 통합 제어	• 실증로급 연소플라즈마 장치 제어기술 개발	자체 개발	출연(연)	• 제어 요소기술 안정성 및 신뢰성 확보 • 실증로급 통합 운전제어 기술 확보
			대학	• 차세대 실증로 제어 알고리즘 개발
		국제협력 (한-ITER)		• 고속이온 제어 및 대면제 열부하 제어 기술의 ITER 적용 • 실증로용 제어시스템 개발
	• 공학 목표 설계 수준 대면 물질 열부하 인가 운전 기술 개발	자체개발	출연(연)	• 3차원 자기장 및 divertor detachment를 이용한 열부하 분산기술 시나리오 개발 • 개발된 시나리오를 KSTAR에서 구현 • 실험 데이터 해석
			대학	• 대안 시나리오 개발 • 실험 데이터 해석
		국제협력		• (GA) 디버터 detachment 운전시나리오를 위한 실시간 불순물 주입 제어 시스템 개발 • (PPPL) IPD를 활용한 실시간 wall conditioning 시나리오 개발 • (PPPL) 3차원 자기장이용 통합운전 해석
	• 이상 상황 대처 시스템 기술 확보	자체개발	출연(연)	• 기계학습법을 이용한 플라즈마붕괴예측 기술 개발 및 실험 • 통합 인터록 제어 시스템 성능향상개발 및 운용
			대학	• 딥러닝을 이용한 플라즈마 예측기술 개발
		국제협력		• Columbia 대학. 물리적 원리에 기반한 플라즈마 붕괴 예측 및 회피기술 개발 공동연구

< 노심 플라즈마 제어 기술 개발 로드맵 >

<table>
<tr><th rowspan="2">세세부기술</th><th rowspan="2">현재 기술 수준</th><th colspan="4">로드맵</th><th rowspan="2">최종목표</th></tr>
<tr><th>2026</th><th>2030</th><th>2035</th><th>2038</th></tr>
<tr><td rowspan="2">차세대 고출력 플라즈마 운전 시나리오 개발</td><td rowspan="2">TRL 4
(50%)</td><td colspan="2">고성능 플라즈마
안정적 운전기술 개발</td><td colspan="2">고성능 플라즈마
시간 운전 시나리오 개발</td><td rowspan="2">• (TRL 6, 100%) 정상상태 운전이 가능한 β_N≥3.5 성능의 실증로급 운전 시나리오 확보</td></tr>
<tr><td colspan="2">– 고성능 운전 시나리오 확보(β_N~3.5급)
– 비유도 전류 운전 시나리오 확보(f_{BS} ≥0.7급)
– 코어-엣지 통합 제어 기술 확보</td><td>– f_{NI}=1에 기반한 β_N~3.5급 고성능 장시간 운전 시나리오 확보</td><td>– 정밀 진단, 제어 기술의 유연성 및 신뢰성 검증
– 주요 운전변수 최적화</td></tr>
<tr><td rowspan="2">정상상태 연소 플라즈마 구현 및 제어</td><td rowspan="2">TRL 3
(38%)</td><td rowspan="2"></td><td>정상상태 운전기술 개발</td><td colspan="2">정상상태 연소플라즈마 운전기술 개발</td><td rowspan="2">• (TRL 6, 100%) 비유도 정상상태 Q≤5, 3,000초 운전 및 D-T Q=10, 400초 운전 달성 기술 확보</td></tr>
<tr><td>– ITER 통합 시운전기술 확보
– 비유도 정상상태 Q≤5, 장시간 운전 기술 확보/검증</td><td>– D-T 연소플라즈마 실험 연구 착수</td><td>– D-T 연소플라즈마 Q=10, 400초 운전 달성 기술 확보</td></tr>
<tr><td rowspan="2">실증로 통합 제어</td><td rowspan="2">TRL 2
(25%)</td><td colspan="2" rowspan="2"></td><td>고성능 플라즈마 통합 제어 기술 개발</td><td>실시간 통합 제어 기술 개발</td><td rowspan="2">• (TRL 6,100%) 실증로 통합제어 기술 확보</td></tr>
<tr><td>– β_N~3.5 feedback을 위한 플라즈마 가열, 진단 통합 제어 기술 확보
– f_{BS} ≥0.7 feedbak 플라즈마 진단, 전류구동 통합 제어 기술 확보</td><td>– f_{NI}=1, β_N~3.5 유지를 위한 진단, 가열, 전류구동 실시간 통합 feedback 제어 기술 확보
– 실증로에 적용 가능한 진단 및 가열장치에 기반한 실시간 통합 feedback 제어기술 확보</td></tr>
</table>

□ 연도별 투자재원(안)

○ (인력소요 및 예산) 핵융합(연) KSTAR 연구사업 중심의 전문인력 운영을 위한 제반비용(인건비, 연구활동 관련 직접비, 간접비, 연구재료비 등 1MY/2억원)으로 1,366억원 도출

- 차세대 고출력 플라즈마 운전 시나리오 개발에 연평균 24.5MY 필요
- 정상상태 연소 플라즈마 운전 시나리오 개발에 연평균 2.5MY 필요
- 실증로 통합 제어에 연평균 21.8MY 필요

< 노심 플라즈마 제어 기술 연도별 예산(안) 및 인력(안) >

(억원/명)

세세부 기술	구분	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	합계
차세대 고출력 플라즈마 운전 시나리오 개발	예산	32	32	36	40	42	45	48	50	56	60	64	60	60	60	685
	인력	16	16	18	20	21	23	24	25	28	30	32	30	30	30	342
정상상태 연소 플라즈마 구현 및 제어	예산	4	4	4	4	4	4	4	6	6	6	6	6	6	6	70
	인력	2	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3	34
실증로 통합 제어	예산	28	28	32	36	38	40	44	44	48	54	56	54	54	54	611
	인력	14	14	16	18	19	21	22	22	24	27	28	27	27	27	307
합계	예산	64	64	72	80	84	90	96	100	110	120	126	120	120	120	1,366
	인력	32	32	36	40	42	45	48	50	55	60	63	60	60	60	683

□ 재원 및 연구인력 조달 방안

○ (재원) 핵융합(연) 기본사업을 통해 기초연구를 수행하며, 장치 업그레이드를 고려한 인프라 확보 재원은 신규사업을 통해 수행

* 핵융합(연) 기본사업 : KSTAR연구사업

○ (연구인력) 핵융합(연) KSTAR 연구본부 인력을 우선 활용하고, 국내 대학 거점센터와의 협력으로 전문인력 양성 및 조달 추진

* 핵융합 학계 및 핵융합(연)이 전문인력 양성을 위한 다년간의 노력에도 불구하고 핵융합 연구기술의 규모와 분야의 다양성을 충족하기에는 여전히 전문인력이 부족

② 노심 플라즈마 진단

□ 정의

○ 실증로의 극한 환경에서 동작 가능하며 평형 상태 플라즈마의 주요 물성 분포에 대한 정보를 실시간으로 제공하여, 장치 제어변수와 함께 노심의 핵융합 반응 및 안정성 제어를 가능하게 하는 기술

< 노심 플라즈마 진단 기술 개요 >

세세부기술	기술개요
연소 플라즈마 극한환경 진단 센서 설계 및 제작 기술	• 연소 플라즈마 환경(고열속, 고자장, 고중성자속)에서 동작 가능한 진단 센서(자기장, 광량, 입자속 등), 재료, 설계 기술 개발 • 노심 핵융합 반응 및 안정성 제어에 필수적인 신호를 직간접적으로 제공할 수 있는 진단 센서 요구사양 정립 및 평가 기술 개발
데이터 통합 분석 기술	• 측정 데이터 통합을 통한 각종 물리변수의 상관관계를 종합적으로 분석하여, 진단 데이터의 불확실성의 정도(불확도)를 추산하는 기술 개발 • 토카막 제어에 필요한 정보이나 직접 측정이 제한된 노심 플라즈마 물성 정보 추정 기술 개발 • 실시간 시뮬레이션 기반 합성진단 신호와 측정신호 비교 분석을 통한 토카막 제어성능 제고 기술 개발
실증로 진단 계통 제작, 설치, 운영 기술	• 실증로 진단계 구조물 및 필수 부품 (차폐구조물, 케이블, 피드스루 등) 설계,제작,설치 기술 개발 • 진단 계통 in-situ 보정 기술 (자가 보정, 이종 진단간 보정 등) 개발 • 연소 플라즈마 실시간 진단계 성능(신호품질, 신뢰도 등) 평가 기법 개발, 평가 환경 구축 및 성능 평가

□ 기술개발 필요성

○ (데이터 신뢰성 확보) 실증로 고성능 플라즈마의 가혹한 작동환경에서의 데이터 확보를 위해서는, 진단장치의 내구성 및 동작 안정성 확보가 필수

– 실증로 노심의 진단장치는 중성자 및 고열에 의한 물성 변화 및 오동작 등 진단신호 품질 및 진단장치 자체의 건전성에 악영향을 주는 위험 상황 대응기술이 필수

– 실증로는 연소상태가 연속적으로 유지되므로 노심 플라즈마에 대한 실시간 진단과 데이터를 통합 분석하는 기술이 필요

○ (효율성 제고) 실증로는 연구장치 대비 최소화된 진단장비로 핵융합 반응률 관련 노심 물성 제어에 필요한 정보를 통합적으로 제공할 수 있는 효율성이 중요

- 대부분의 핵융합 연구장치는 뷰포트(viewport)*를 필요로 하는 다양한 진단 장치를 운영 중이나, 이는 진공용기, 열차폐체, 저온 유지 장치(cryostat), 초전도체 등의 설계의 용이성 저하 및 제작·운용 비용 상승의 원인으로 작용

  * 플라즈마의 물성 프로파일, 거시적 상태 및 가둠 성능의 정량적 측정에 사용

- 실증로급의 극환 환경에서는 진단 계통 구성품의 물성 및 성능 변화를 완벽히 방지하기 어려워, 진단 시스템에 대한 현장 (in-situ) 보정 기술이 필수적으로 요구

  * ITER는 이론 및 전산모사 결과에 대한 통합적인 분석을 통해 플라즈마 물성을 정확히 예측하기 위한 통합 모델링 및 분석 체계(IMAS)를 구축 중

□ 연소 플라즈마 극한환경 진단 센서 설계 및 제작 기술 동향

○ (미국) DIII-D를 중심으로 광범위한 진단기술 개발을 선도하고 있으며, 이를 기반으로 ITER를 위한 mm-wave 기반의 진단장치 (ECE, 간섭편광계, fast wave 반사계), 노심 X-ray 분광기, 전류 프로파일 측정장치 등을 개발 중. 최근에는 연소 플라즈마 환경에도 적용 가능한 신개념(Febry-Perot 간섭계 원리) 광섬유 볼로미터를 성공적으로 개발

○ (일본) 다양한 중성자 측정 기술을 확보하고 있으며, 디버터 영역 진단 기술 개발을 선도. 일본에서 개발하고 검증한 냉각수 활성화를 이용한 중성자속 측정 방식은 ITER에서 가장 신뢰도 높은 핵융합 파워 측정기술로 채택

○ (EU) ITER 진단 장치들의 내구성, 보정 방법, 신호 품질을 개선하기 위한 국제적인 협력을 주도하고 있으며, 원자로, Spallation source, 입자빔 기반 중성자원 등 다양한 시설을 이용하여 다양한 소자 및 재료에 대해 방사 환경 테스트를 진행 중

- 광섬유 소재 물성 변화, Single Event Effect 등 방사선 영향에 대한 시험 데이터 축적 중

- 실시간 핵융합 파워 측정을 위해 D-T 부반응인 $d(t,\gamma)^{5}_{2}\mathrm{He}$ 에서 방출되는 17 MeV 감마선 측정 방법 개발 중

- 고성능 플라즈마 중심부에 존재하는 고에너지 이온에 대한 간접적인 측정 방법으로 Collective Thomson Scattering 진단기술을 확보. 이외에도 High Resolution Neutron Spectroscopy (HRNS), Gamma Ray Spectroscopy (GRS)을 활용한 고속 alpha 입자 분포 측정 방법 연구 중

○ (중국) 최근에 시작한 BEST 토카막 프로젝트를 통해 ITER와 거의 유사한 구성의 진단 시스템을 개발 중이며, 극한 환경에서 동작하는 electrical probe 기술 개발을 선도

○ (국내) ITER의 분광 진단 시스템을 개발하고 있으며, First mirror 재료에 대한 고열 수증기 영향 평가 연구를 수행 중임. 연소 플라즈마 적용 가능한 신개념의 RF 측정 기술을 개발 중이며, KSTAR 및 일본 LHD 장치에 시험적으로 적용 중

□ 데이터 통합 분석 기술 동향

○ (미국) 플라즈마 시뮬레이션 기술을 선도 중이며, 유체, Gyrokinetic, Particle-In-Cell 및 Electromagnetic 시뮬레이션 등 플라즈마 물리의 전 스케일에서 (MHD, 난류, 입자, 파동의 스케일) 다양한 시뮬레이션 연구를 주도

○ (일본) 데이터 통합 분석에 활용될 수 있는 다양한 종류의 플라즈마 시뮬레이션 코드들 자체적으로 확보

○ (EU) ITER 및 독일의 AUG를 중심으로 데이터 통합 분석 기술을 선도.

- ITER는 Integrated Modelling and Analysis Suite (IMAS) 시스템을 구축하여 운전 시나리오 개발 및 사전 검증, 진단 신호 통합 해석, 플라즈마 시뮬레이션 결과 검증 등에 활용

- ITER는 주요 진단 시스템에 대하여 합성(가상) 진단 코드를 개발하고 있으며, 이를 진단 시스템 계 및 성능 개선, 플라즈마 제어 기술 개발 등에 활용 중

○ (국내) ITER와의 협력을 통해 IMAS 시스템을 KSTAR 장치에 적합한 형태로 도입 중

□ 기술확보 전략

○ (기술내용) 실증로 환경에서 노심의 플라즈마 물성 정보를 안정적으로 실시간 제공할 수 있는 진단장치(센서, 진단계 등)와 데이터 통합 분석기술

- 실증용 센서를 제작 및 운영 기술

- 실증로 진단계 설계, 제작 및 성능평가 기술

- 실증용 진단계 구조물 및 필수부품 설계 및 제작 기술

○ (확보전략) 학연 중심으로 진단센서, 진단계 구조물 등의 필수부품 요구사양 도출 및 진단계통 방법론을 확립하고, 산업체 협력으로 중성자 영향평가 설비 및 제작

- 센서 요구사양을 정립하고, 관련 기술 확보 방안을 제시하여 프로토타입 제작 등의 경험을 바탕으로 실증용 센서 제작 및 운영 기술 확보

- 중성자 관련 기존 설비 및 ITER 활용 가능성을 검증하고, 필요시 진단계 검증용 중성자원을 건설하여 중성자 영향평가 예측모델 검증

- 제작된 센서들을 기반으로 불확도 예측 및 검증의 과정을 거치고, 간접데이터 기반의 실증로 운전 경험 축적

  * 간접데이터 기반 운전 성능(operation space 포함)의 한계를 확장하기 위하여 실증로에 활용될 수 있는 노심 물성 측정 진단계 고려

- 합성진단 기반으로 설계된 실증로 진단계 설계, 제작 및 성능평가 기술 확보

- 실증용 진단계 구조물 및 필수부품 설계 및 제작 기술 확보

- In-situ 보정의 제한성을 극복하기 위한 유사한 물리값을 측정할 수 있는 이종 진단계 적극 활용하여 실증로용 in-situ 진단계통 보정기술 확보

- 연소플라즈마 실시간 진단계 성능평가 추진

< 노심 플라즈마 진단 기술 확보전략 >

세세부기술	개발 내용	핵심주체		주체별 역할
연소 플라즈마 극한환경 진단 센서 설계 및 제작 기술	• 실증용 센서 제작, 성능평가 및 운영기술 확보 • 중성자 영향평가 예측 모델 개발 및 검증실험	자체 개발	출연(연)	• 핵심/기반 기술 개발 • 대형시설 기반 기술 개발
		자체 개발	대학	• 요소/핵심 기술 개발
데이터 통합 분석 기술	• 실증용 센서 종합 불확도 추산 기술 확보 • 간접 데이터 기반의 실증로 운전 방법론 제시 • 합성진단 기반으로 설계된 실증로 진단계 제작 및 성능평가	자체 개발	출연(연)	• 핵심/기반 기술 개발 • 대형시설 기반 기술 개발
			대학	• 요소/핵심 기술 개발
실증로 진단 계통 제작, 설치, 운영 기술	• 실증용 진단계 구조물 및 필수부품 제작 기술 확보 • 실증로용 진단 계통 in-situ 보정기술 확보 • 연소 플라즈마 실시간 진단계 성능평가		출연(연)	• 핵심/기반 기술 개발 • 대형시설 기반 기술 개발
			대학	• 요소/핵심 기술 개발

< 노심 플라즈마 진단 기술 개발 로드맵 >

세세부기술	현재 기술 수준	로드맵				최종목표
		2026	2030	2035	2038	
연소 플라즈마 극한환경 진단 센서 설계 및 제작 기술	TRL 2 (33%)	진단센서 프로토타입 개발		실증로 노심 진단 센서 개발		• (TRL6, 100%) – 연소플라즈마 환경에서 동작 가능한 진단 센서 재료, 설계 기술 확보 – 연소플라즈마 제어에 요구되는 센서 요구사양 정립 및 평가 기술 확보
		• 진단센서 요구사양 정립 • 중성자 영향평가 및 기존설비 활용 가능성 분석 완료	• 센서 프로토타입 제작 및 성능평가 • 중성자 영향평가 예측 모델 개발 및 검증 실험	• 실증용 센서 제작 및 성능평가 • ITER 진단계 종합 분석 • 중성자 영향평가 예측 모델 고도화 및 검증 실험	• 실증용 센서 제작 및 운영 기술 확보 • 실증로 관점에서의 ITER 진단계 종합평가 • ITER를 활용한 중성자 영향평가 예측 모델 확인	
데이터 통합 분석 기술	TRL 3 (50%)	종합 데이터 불확도 추산기술 개발		실증로 통합분석 개발		• (TRL6, 100%) – 진단데이터의 불확도 추산 기술 확보 – 제한된 측정치를 바탕으로 플라즈마 물성 정보 추정 기술 확보 – 합성진단 활용 기술확보
		• 종합 데이터 불확도 예측 방법론 개발 • KSTAR 노심 물성 직/간접 측정 데이터 간의 상관관계 분석 • IMAS 도입 및 활용 경험 축적	• 종합 데이터 불확도 예측성능 평가 및 불확도 개선 방안 제시 • 간접데이터 기반의 KSTAR 운전 시험 • 진단계별 합성진단 모듈 평가완료	• 실증용 센서 기반 종합데이터 불확도 예측 성능 평가 및 불확도 개선 수준 확인 • ITER 노심 물성 직/간접 측정 데이터 간의 상관관계 분석 • 합성진단을 활용한 진단계 설계 최적화 기술 개발	• 실증용 센서 종합 불확도 추산 기술 확보 • 간접 데이터 기반의 실증로 운전 방법론 마련 • 합성진단 기반으로 설계된 실증로 진단계 개발 및 성능평가	
실증로 진단계통 제작, 설치, 운영 기술	TRL 1 (20%)	실증로 진단계 프로토타입 개발		실증로 노심 실시간 진단계 개발		• (TRL5, 100%) – K-DEMO 진단계 구조물 및 필수부품 설계, 제작, 설치 기술 확보 – 진단계통 in-situ 보정 기술 확보 – 진단계 성능 평가 및 평가 환경 확보
		• 진단계 구조물 및 필수부품 요구사양 정립 및 기술확보 방안 제시 • KSTAR 진단계통 in-situ 보정 방법론 개발 • 실시간 진단계 성능평가 기법 개발 및 필요 환경 요구사양 제시	• 진단계 프로토타입 구조물 및 필수부품 설계, 개발 및 성능평가 • KSTAR 진단계통 in-situ 보정시험 및 실증로용 센서 in-situ 보정방법론 제시 • 실시간 진단계 성능평가 환경 구축	• 실증용 진단계 구조물 및 필수부품 설계, 제작 및 성능평가 • 실증로에 적용 가능한 ITER 진단계통 in-situ 보정시험 • ITER를 활용한 실시간 진단계 성능평가 기법 시험	• 실증용 진단계 구조물 및 필수부품 제작 기술 확보 • 실증로용 진단계통 in-situ 보정 기술 확보 • 연소플라즈마 실시간 진단계 성능평가	

□ 연도별 투자재원(안)

○ (인력소요 및 예산) 장치 개발 중심 사업으로, 성능 평가 및 검증 인력운영을 위한 제반비용(인건비, 연구활동 관련 직접비, 간접비 등 1MY/2억원)으로 총 1,274억원 도출

– 연소 플라즈마 극한환경 진단 센서 설계 및 제작 기술개발에 연평균 23MY 필요

– 데이터 통합 분석 기술개발에 연평균 5MY 필요

– 실증로 진단 계통 제작, 설치, 운영 기술 개발에 연평균 18MY 필요

< 노심 플라즈마 진단 기술개발 연도별 예산(안) 및 인력(안) >

(억원/명)

세세부 기술	구분	연도														합계
		25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	
연소 플라즈마 극한환경 진단 센서 설계 및 제작 기술	예산	30	30	33	36	38	44	46	49	50	52	54	58	58	58	636
	인력	15	15	17	18	19	22	23	24	25	26	27	29	29	29	318
데이터 통합 분석 기술	예산	6	6	7	7	8	9	9	10	10	10	11	12	12	12	127
	인력	3	3	3	4	4	4	5	5	5	5	5	6	6	6	64
실증로 진단 계통 제작, 설치, 운영 기술	예산	24	24	26	29	32	35	37	39	40	42	43	46	46	46	510
	인력	12	12	13	14	16	18	18	20	20	21	22	23	23	23	255
합계	예산	60	60	66	72	78	88	92	97	100	104	108	116	116	116	1,274
	인력	30	30	33	36	39	44	46	49	50	52	54	58	58	58	637

□ 재원 및 연구인력 조달 방안

○ (재원) 핵융합(연) 기본사업과 핵융합선도기술개발사업을 통해 기초연구를 수행하며, 실증로 노심 진단 센서 및 진단계 개발 재원은 신규사업을 통해 수행

* 핵융합(연) KSTAR 연구사업, 핵융합선도기술개발사업

○ (연구인력) 학연 중심의 전문가그룹을 구성·활용하고, 신진인력의 사업참여를 통한 교육 등 전문인력 양성 및 조달

③ 노심 플라즈마 시뮬레이션

□ 정의

○ 토카막 핵융합로에 감금된 초고온 플라즈마의 감금 성능, 안정성, 전류 구동 및 가열 효율 등을 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 예측하는 기술

○ 이를 바탕으로 실증로 운전 시나리오를 신뢰성 있게 예측하고 최적화하며, 더불어 상세 공학 설계에 필요한 열속, 중성자속, 전자기력 부하 등을 도출

< 노심 플라즈마 시뮬레이션 개요 >

세세부기술	기술개요
토카막 가상화 및 통합 시뮬레이션 기술	• 토카막 핵융합로 운전을 위한 플라즈마 동특성, 가열 및 전류 구동 통합 시뮬레이션 • 설계 데이터를 활용한 토카막 장치 가상화 및 시뮬레이션 기능 통합 구현 • 토카막 핵융합로 운전 시나리오 및 제어 시스템 개발에 필요한 플라즈마 성능 및 거동 예측
플라즈마 감금 성능 시뮬레이션 기술	• 토카막 핵융합로에 감금된 초고온 플라즈마의 미세 난류 및 수송 현상 시뮬레이션 • 초고온 플라즈마의 감금 성능을 결정하는 열 및 입자 수송 계수 예측 • 플라즈마를 둘러싼 토카막 핵융합로 1차 벽에 가해지는 열속 및 중성자속 예측
플라즈마 안정성 시뮬레이션 기술	• 토카막 핵융합로에 감금된 초고온 플라즈마의 자기유체역학적 안정성 시뮬레이션 • 토카막 핵융합로 안전 운전을 위한 플라즈마 압력 및 전류 한계 예측 • 초고온 플라즈마의 동적 특성 및 붕괴 예측과 이에 따라 토카막 핵융합로에 가해지는 전자기력 및 스트레스 예측

□ 기술개발 필요성

○ (신뢰성 제고) ITER 연소 플라즈마 데이터 확보와 더불어, 궁극적으론 ITER와 실증로 노심 플라즈마의 차이를 반영하여 실증로 성능을 신뢰성 있게 예측할 수 있는 시뮬레이션 기술 확장 필요

※ 현재 확보된 시뮬레이션 기술은 KSTAR, DIII-D, JET 규모의 중대형 토카막 실험 결과를 토대로 검증이 완료 혹은 진행 중인 상황으로, 실증로급의 기존과 다른 물성에 따른 추가 연구 필요

○ (기술적 한계 극복) 실증로급의 시뮬레이션 시공간적 규모 확대에 따라 발생할 수 있는 기술적 한계를 극복하기 위한 스케일 병렬 시뮬레이션 개발 필요

– 실증로 설계를 위해서는 독립된 형태로 개발 중인 여러 시뮬레이션 기술을 통합하여 활용해야 하며, 특히 상세 공학 설계를 위한 노심의 물리 조건 도출에 활용할 수 있는 통합 설계 체계 확보 필요

□ 토카막 가상화 및 통합 시뮬레이션 기술 동향

○ (미국) PPPL, GA 등의 기관을 중심으로 운전 시나리오 통합 모사에 필요한 플라즈마 수송, 안정성, 가열 시뮬레이션 모듈을 꾸준히 개발해오고 있으며, 최근에는 AI/ML 기술을 접목한 고속 시뮬레이션 모듈 개발을 추진 중

– 이들 시뮬레이션 모듈을 통합한 PTRANSP, FASTTRAN 등의 통합 시뮬레이션 코드 개발을 지속 추진 중

– DIII-D, KSTAR 등 다양한 핵융합 실험 장치 적용을 통해 시뮬레이션 정확성 및 유효성 검증을 추진하고 기술 신뢰도를 높여가는 중

- 최근 디지털 트윈 기술을 기반으로 장치 설계 데이터를 반영한 토카막 가상화, 시뮬레이션 통합을 위한 기술개발에 착수

○ (일본) QST, NIFS 양 기관을 중심으로 TASK 통합 시뮬레이션 프레임워크 개발, 수송 및 안정성, 가열 모듈 개발을 추진 중

- 통합 시뮬레이션을 구성하는 일부 모듈을 AI/ML 기술을 적용하고 고속, 효율화 하는 연구를 함께 추진 중

○ (EU) 독일, 프랑스, 영국 등 각국이 진행하던 통합 시뮬레이션 기술개발을 E-TASC 출범을 통해 조율 및 통합하는 작업에 착수

- ITER 운전 단계에 대비하여 ITER-IMAS 데이터 표준 기술을 개발하고 통합 시뮬레이션 및 해석 도구에 적용 노력 중

○ (국내) 우리나라는 과거 미국, 유럽 등에서 도입한 통합 시뮬레이션 기술을 KSTAR 연구에 적용해왔으나, 최근 TRIASSIC 통합 시뮬레이션 프레임워크 개발과 Total-PI와 같은 2차원 수송 모듈 개발에 착수하는 등 독자적 기술개발 노력을 병행 중

- 디지털 트윈 기술을 활용하여 설계 데이터 기반의 KSTAR 주장치 가상화를 완료하고 다양한 핵융합 시뮬레이션 기능을 통합한 Virtual KSTAR 개발을 진행 중

□ 플라즈마 감금 성능 시뮬레이션 기술 동향

○ (미국) 미국 정부가 주관하는 SciDAC 프로젝트를 통해 GA, PPPL 기관 및 학교를 중심으로 플라즈마 난류를 유체 혹은 동역학 방식으로 모사하는 시뮬레이션 기술 개발 중

- 플라즈마 난류 및 수송 현상이 갖는 광범위한 시공간적 동역학 특성을 포괄하기 위해 초병렬 슈퍼컴퓨터를 활용한 대규모 시뮬레이션 기술개발 추진 중

- GA를 중심으로 시뮬레이션의 기술 신뢰성 확보를 위해 난류 및 수송의 특징을 실험과 비교하는 검증 연구도 함께 추진 중

○ (일본) QST 및 교토대학을 중심으로 플라즈마 난류 및 수송을 동역학적 방법으로 모사하는 시뮬레이션 기술개발 추진 중

- QST, NIFS 및 RIKEN에 구축한 슈퍼컴퓨터 자원을 활용하여 동역학적 방식의 대규모 병렬 시뮬레이션 기술개발에 주력

○ (EU) 독일 막스 플랑크 연구소, 프랑스 CEA를 중심으로 동역학적 방식의 플라

즈마 난류 시뮬레이션 기술개발 중

- 최근에는 토카막 1차벽을 경계로 장치 전영역 난류 및 수송 모사를 위해 시뮬레이션 기술 확장 중

○ (국내) 우리나라는 과거 10여 년 기간에 걸쳐 동역학적 광역 난류 및 수송 시뮬레이션 코드를 개발하고 KSTAR 영상 난류 진단과 비교 검증하는 연구를 통해 개발 경험을 축적

- 최근 토카막 장치 전영역 난류 시뮬레이션 코드 개발에 착수하고 노심과 언저리를 포괄하는 신고전 수송 시뮬레이션 기능 완성하고 비 축대칭 난류 모사를 위한 기술 확장 추진 중

□ 플라즈마 안정성 시뮬레이션 기술 동향

○ (미국) 미국 정부가 주관하는 SciDAC 프로젝트를 통해 PPPL, Wisconsin 대학을 중심으로 자기 유체 방식의 플라즈마 안정성 및 동적 거동 시뮬레이션 기술개발 중

- 감금 성능 시뮬레이션 기술개발과 유사하게 다중 스케일을 포함한 모델 시뮬레이션을 위해 병렬 슈퍼컴퓨터를 활용한 대규모 코드 개발 추진 중

- 최근 플라즈마 붕괴 현상 및 폭주전자(runaway electron) 생성 과정 예측을 위해 고속입자를 포함한 유체 및 동역학 하이브리드 방식의 시뮬레이션 기술로 확장 추진 중

○ (EU) 프랑스를 중심으로 자기유체 방식의 시뮬레이션 코드 JOREK를 꾸준히 개발 중이며, 특히 영국, 독일, 미국, 한국 등 여러 나라 개발자가 참여하는 유체 시뮬레이션 프레임워크 방식의 개발 모델을 채택

- 최근 CAD 데이터를 바탕으로 토카막 장치 구조에 유도되는 와류전류, 후광 전류를 정교하게 모사할 수 있는 시뮬레이션 기술 확장 추친 중

○ (국내) 우리나라는 그동안 해외에서 도입한 M3D-C1, JOREK, BOUT++ 코드 활용에 주력하고 자체 개발 노력은 미비

- 그러나 최근 Virtual KSTAR 기술개발에 착수하면서 비구조 격자, 와류전류 모사를 위한 유한요소 풀이모듈 등을 개발 완료하고, 본격적인 자기유체 역학 시뮬레이션 코드 개발에 필요한 기반 기술을 확보한 상황

□ 기술확보 전략

○ (기술내용) 시뮬레이션 기술을 활용하여 실증로 운전 시나리오 최적화 및 설계 반영

- ITER 연소 조건 실험을 통한 시뮬레이션 검증 데이터 확보
- ITER와 실증로 간극을 메우기 위한 전략으로 핵융합 플라즈마의 감금 성능을 결정하는 근본 물리현상을 예측할 수 있는 시뮬레이션 기술 개발
- 핵융합 실증로 규모로 시뮬레이션 규모를 확장하기 위해 최신 슈퍼컴퓨팅 기술을 채용한 극한 스케일 병렬 시뮬레이션 기술 개발
- 시뮬레이션 규모 확장에 필요한 과도한 컴퓨팅 자원 증가를 완화하기 위해 GPU 기반의 신개념 병렬 시뮬레이션 기술개발과 AI/ML 기술 연계 추진
- 장치 설계 데이터를 노심 플라즈마 시뮬레이션에 직접 활용할 수 있는 격자 및 연계 기술개발 추진
- 디지털 트윈 기술을 활용하여 장치 설계와 시뮬레이션 연계 체계를 구현하고 실증로 설계에 활용

○ (확보전략) 연구원과 대학이 협력하여, 실증로급의 시뮬레이션 검증 한계를 극복하고, 규모를 확장하여 공학설계를 위한 연계 체계를 마련

- 전통적인 축약 모델 개발·활용에 병행하여 AI/ML 기술을 활용한 모듈 고속화 기술 개발 및 적용 확대
- 디지털 트윈 기술을 적용하여 설계 데이터의 가상화 및 시뮬레이션 활용 효율화와 체계화 고도화 추구
- ITER 연소 실험 결과 확보 및 활용
- 플라즈마 성능 및 안정성을 결정하는 핵심 물리현상 분석을 위해 최신 진단 개발과 KSTAR 적용, 관련 데이터 확보
- CPU/GPU 하이브리드 구조의 극한 병렬 컴퓨팅 자원 확보로 계산 규모 증가에 따른 자원 및 비용 증가 억제
- 정부가 추진하는 초고성능컴퓨팅 전문센터 정책과 연계하여 재원 및 인력 확보 추진

< 노심 플라즈마 시뮬레이션 기술 확보전략 >

세세부기술	개발 내용	핵심주체		주체별 역할
토카막 가상화 및 통합 시뮬레이션 기술	• 수송, 안정성, 가열 및 전류 구동 시뮬레이션 고속 모듈화 기술 • 통합 시뮬레이션을 위한 프레임워크 기술 • 실증로 설계, 시뮬레이션 연계 기술	자체 개발	출연(연)	• 설계-시뮬레이션 연계를 위한 기술개발 및 통합
			대학	• 시뮬레이션 고속 모듈화를 위한 이론 및 모델 연구, AI/ML 기술개발
플라즈마 감금 성능 시뮬레이션 기술	• 연소 조건 플라즈마 난류 및 수송 시뮬레이션 기술	자체 개발	출연(연)	• 시뮬레이션 코드 공동개발 • 시뮬레이션 결과 실험 비교 검증 • 초병렬 시뮬레이션 기술개발 및 코드 통합 구현
플라즈마 안정성 시뮬레이션 기술	• 연소 조건 플라즈마 자기 유체 안정성 및 붕괴 시뮬레이션 기술		대학	• 시뮬레이션 코드 공동개발 • 초병렬 시뮬레이션 기술 공동개발 • 이론 연구 및 모델 개발
플라즈마 가열 및 전류 구동 시뮬레이션 기술	• 연소 조건 플라즈마 NBI, ECH 가열 및 전류 구동 시뮬레이션 기술			

< 노심 플라즈마 시뮬레이션 기술 개발 로드맵 >

세세부기술	현재 기술 수준	로드맵				최종목표
		2026	2030	2035	2038	
토카막 가상화 및 통합 시뮬레이션 기술	TRL 4 (33%)	ITER 연소플라즈마 시뮬레이션 기술 개발		ITER 디지털 트윈 구현	실증로 디지털 트윈 구현	(TRL6, 100%) 실증로 디지털 트윈 구현 및 시뮬레이션 기술 개발
		• KSTAR 디지털 트윈 구현 및 시뮬레이션 기술 검증 • ITER 가상화 착수 및 연소 플라즈마 시뮬레이션 개발		• ITER 디지털 트윈 구현 및 시뮬레이션 기술 검증·고도화	• 실증로 디지털 트윈 구현 및 시뮬레이션 개발	
		인프라 구축				
		- 30PF 초고성능컴퓨터 구축('26) - 100PB 스토리지 시스템 구축('26) - Virtual KSTAR 시스템 구축('26)		- 0.5EF 초고성능 컴퓨터 구축('32) - 1EB 스토리지 시스템 구축('32) - Virtual ITER 시스템 구축('32)	- 5EF 초고성능 컴퓨터 구축('38) - 10EB 스토리지 시스템 구축('38) - Virtual DEMO 시스템 구축('38)	
플라즈마 감금 성능 시뮬레이션 기술	TRL 4 (33%)	연소 플라즈마 난류·수송 시뮬레이션 기술개발		연소 플라즈마 난류·수송 시뮬레이션 고도화	실증로 플라즈마 감금 성능 예측 시뮬레이션 기술 개발	(TRL7, 100%) 실증로 감금 성능 예측 시뮬레이션 기술 개발
		• 중형 토카막 동역학적 난류·수송 시뮬레이션 기술개발 및 KSTAR 실험 검증 • 연소 플라즈마 난류·수송 시뮬레이션 기술개발		• 연소 플라즈마 시뮬레이션 기술 확장 및 ITER 실험 검증	• 실증로 감금 성능 예측 시뮬레이션 및 설계 검증	
플라즈마 안정성 시뮬레이션 기술	TRL 4 (33%)	연소 플라즈마 안정성 및 붕괴 시뮬레이션 기술개발		연소 플라즈마 안정성 및 붕괴 시뮬레이션 고도화	실증로 노심 동특성 시뮬레이션 기술 개발	(TRL7, 100%) 실증로 안정성 및 노심 동특성 시뮬레이션기술 개발
		• 중형 토카막 노심 안정성 및 붕괴 기술개발 및 KSTAR 실험 검증 • 연소 플라즈마 안정성 및 붕괴 시뮬레이션 기술개발		• 연소 플라즈마 시뮬레이션 기술 확장 및 ITER 실험 검증	• 실증로 안정성 및 노심 동특성 시뮬레이션 및 설계 검증	

□ 연도별 투자재원(안)

○ (인력소요 및 예산) 전문인력을 활용한 시뮬레이션 개발 중심의 사업으로서, 인력운영을 위한 제반비용(인건비, 연구활동 관련 직접비, 간접비 등 1MY/2억원)으로 총 664억원 도출

- 토카막 가상화 및 통합 시뮬레이션 기술개발에 연평균 12MY 필요

- 플라즈마 감금 성능 시뮬레이션 기술개발에 연평균 7MY 필요

- 플라즈마 안정성 시뮬레이션 기술개발에 각 연평균 5MY 필요

< 노심 플라즈마 시뮬레이션 기술 개발 연도별 예산(안) 및 인력(안) >

(억원/명)

세세부 기술	구분	연도														합계
		25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	
토카막 가상화 및 통합 시뮬레이션 기술	예산	22	22	22	24	24	24	24	24	24	24	24	22	22	22	324
	인력	11	11	11	12	12	12	12	12	12	12	12	11	11	11	162
플라즈마 감금 성능 시뮬레이션 기술	예산	14	14	14	16	16	16	16	14	14	14	14	14	14	12	202
	인력	7	7	7	8	8	8	8	7	7	7	7	7	7	6	101
플라즈마 안정성 시뮬레이션 기술	예산	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	8	138
	인력	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	4	69
합계	예산	46	46	46	50	50	50	50	48	48	48	48	46	46	42	664
	인력	23	23	23	25	25	25	25	24	24	24	24	23	23	21	332

□ 재원 및 연구인력 조달 방안

○ (재원) 핵융합(연) 기본사업을 통해 시뮬레이션 고도화 및 검증을 수행하고, 핵융합 선도기술 개발 사업을 통해 초고온 핵융합 플라즈마 가열 및 전류구동을 위한 신개념 Fokker-Planck (FP) 코드 개발 추진

* 핵융합(연) 기본사업 : 고성능 핵융합 시뮬레이션 기술 개발 사업, 핵융합선도기술개발사업

○ (연구인력) 현재 KFE, 핵융합 연구 거점 대학을 중심으로 일부 인력이 확보된 상황이나 장기적인 원천 기술 개발·확보를 위해 꾸준한 인력양성 및 확보가 필요

④ 노심 플라즈마 기술개발 소요 연구시설

□ 정의

○ 실증로 사양의 노심 플라즈마 제어, 가열 및 전류구동 시뮬레이션 프로그램 개발과 성능을 검증하기 위한 초고성능 컴퓨터 등의 제반 시설

< 노심 플라즈마 기술개발 세부시설 개요 및 필요성 >

세부시설	시설 개요	필요성
초고성능컴퓨터	• 고성능 CPU/GPU를 탑재한 고성능 컴퓨팅 노드 다수 탑재 • 계산 노드를 초고속 네트워크 기술로 연결하여 수십~수백 페타플롭스 이상 병렬 계산 용량 제공	• KSTAR, ITER, 실증로 노심 시뮬레이션 기술개발과 코드 활용을 위해 초고성능컴퓨터 자원 필요 • 시뮬레이션 기술을 KSTAR, ITER, 블랑켓 설비에서 산출되는 데이터와 연계하여 실증로 설계에 활용하기 위해 대용량 스토리지 시스템 및 디지털 트윈 설비와 통합 활용 체계 구축 필요
대용량 스토리지 및 병렬 파일 시스템	• 수백 페타바이트에 이르는 시뮬레이션 및 실험 데이터를 저장할 수 있는 SDD/HDD 형태의 스토리지 시스템 • 고속 파일 입출력이 가능하도록 병렬 파일 시스템을 탑재하여 구동	• KSTAR, ITER, 블랑켓 설비에서 산출되는 데이터를 백업을 포함하여 안전하게 저장하고, 시뮬레이션, 설계 등의 연구에 활용하기 위해 대용량 스토리지 시스템 구축 필요 • 대규모 시뮬레이션에서 산출되는 데이터를 효율적으로 저장, 서비스하기 위해 대용량 스토리지 시스템 구축 필요, 특히 다양한 데이터 저장, 접근 방식에 효율적으로 대응하기 위해 병렬 파일시스템 도입 필요
디지털 트윈 가상화 설비	• 디지털 트윈 소프트웨어 구동을 위해 고성능 GPU를 탑재한 서버 계산 자원 • 대용량 스토리지 및 초고성능 컴퓨터와 자원을 공유하며 유기적으로 연결하는 100G 이상의 초고속 네트워크 설비	• 디지털 트윈 기술로 표현된 KSTAR, ITER, 즉 Virtual KSTAR, Virual ITER를 구동하고 원격 연구자에게 가상화된 환경에서 실험 모니터링, 시뮬레이션 분석, 예측 등의 서비스를 제공하기 위한 설비 필요 • 핵융합 실증로 설계 데이터를 활용하여 디지털 트윈 기술을 적용한 Virtual DEMO를 구현하고 실증로 설계 정합성 분석, 최적화 연구를 수행하기 위해 관련 설비 필요

□ 국내외 시설 구축 사례

○ (해외) 미국, 일본, EU 등은 자국의 초고성능 컴퓨터를 보유하고 있으며, 컴퓨터와 연계한 0.5 EB 이상 규모의 대용량 스토리지 시스템을 구축 및 활용 중

– 디지털 트윈 기술의 핵융합 적용은 도전적인 시도로 해외 구축 사례가 없음

< 노심 플라즈마 기술 관련 해외 시설 및 활용가능 여부 >

세부시설	국외	사양
초고성능 컴퓨터	• 미국, 일본, EU 등에서 핵융합 시뮬레이션 기술개발과 코드 활용을 위해 다양한 초고성능컴퓨터 구축 및 활용 중 • 평균 5년 가량의 수명 주기를 갖고 보다 대용량을 갖는 시스템 구축 중	• 미국은 2.0 엑사스케일 초고성능컴퓨팅 자원 구축 및 활용 중 • 일본은 초고성능컴퓨팅 자원 구축 로드맵을 수립하고 계획에 따라 자원 확장 추진 중 • EU는 E-TASK를 지원하기 위한 범 유럽 초고성능컴퓨팅 자원 구축 및 확대 추진 중
대용량 스토리지 및 병렬 파일 시스템	• 미국, 일본, EU 등에서 초고성능컴퓨터 자원과 연계하여 산출 데이터 저장, 서비스를 위해 대용량 스토리지 시스템 구축 및 활용 중 • ITER 설계, 실험 데이터 저장과 서비스를 위해 관련 자원 확대 추진 중	• 미국, 일본, EU는 초고성능컴퓨팅 자원과 연계하여 0.5 EB 이상 규모의 스토리지 자원 구축 및 활용 중
디지털 트윈 가상화 설비	• 디지털 트윈 기술의 핵융합 적용은 현재 매우 실험적이고 도전적 시도로 아직 해외 구축 사례 없음	

○ (국내) 핵융합(연)에 KAIROS 초고성능컴퓨터를 구축하여 보유하고 있으며, 컴퓨터와 연계한 대용량 스토리지 시스템도 운영 중

< 노심 플라즈마 기술 관련 국내 유관 시설 및 활용가능 여부 >

세부시설	국내	사양
초고성능 컴퓨터	• KAIROS 초고성능컴퓨터 • LOTAN 병렬클러스터 컴퓨터	• 1.56 페타플롭스 계산 성능 • 28 테라플롭스 계산 성능
대용량 스토리지 및 병렬 파일 시스템	• KAIROS 대용량 스토리지 시스템 • Islon 대용량 스토리지 시스템	• Luster 병렬 파일 시스템 기반 5.78 페타바이트 저장 용량 • GPFS 병렬 파일시스템 기반 6.7 페타바이트 저장 용량

○ 신규 구축 사유

– (연구 효율 증대) KSTAR, ITER, 블랑켓 실험 설비로 이어지는 실험 설비 가동 일정에 맞추어 산출 데이터 규모에 대응할 수 있는 적절한 규모의 장비 규모 확대 필요

– (서비스 안정성 강화) KSTAR, ITER 등 실험 설비와 보안 연결이 가능하고 동시에 핵융합 연구자들에게 컴퓨터, 스토리지, 가상화 통합 서비스를 일원화된 방식으로 제공하기 위해 핵융합 전용 자원 구축 및 자원 규모의 지속 확대 필요

□ 확보전략

○ (해외구매) 초고성능컴퓨터와 디지털 트윈 가상화 설비는 해외 유사시설 구축경험을 보유한 기관을 통해 도입

○ (자체개발) 대용량 스토리지 및 병렬 파일 시스템은 국내 산업체를 활용하여 산-연 공동연구를 통한 제작 및 설치

< 노심 플라즈마 기술 관련 인프라 사양 및 확보전략 >

세부시설	사양	확보전략
초고성능 컴퓨터	• 1단계('26) : CPU/GPU 하이브리드 30PF 계산 성능 확보 • 2단계('32) : CPU/GPU 하이브리드 0.5EF 계산 성능 확보 • 최종('38) : CPU/GPU 하이브리드 5.0 EF 계산 성능 확보	• 해외구매 - 국가 초고성능컴퓨팅 전문센터 정책과 연계하여 도입 기획, 예산 확보 추진 - 운영 예산 마련을 위해 초고성능컴퓨팅 전문센터 운영 사업 지원과 KFE 기관고유사업 연계 추진
대용량 스토리지 및 병렬 파일 시스템	• 1단계('26) : 100 PB 병렬 스토리지 시스템 • 2단계('32) : 1.0 EB 병렬 스토리지 시스템 • 최종('38) : 10 EB 병렬 스토리지 시스템	• 국내 산업체 활용 공동개발 및 제작 - 초고성능컴퓨터 자원 도입시 시뮬레이션과 실험 분석 수요를 고려하여 데이터 용량을 산정하고 스토리지 자원 설계 - 이와 별도로 ITER 사업과 연계하여 ITER 원격 실험 및 데이터 전송을 위한 대용량 스토리지 자원 구축 추진
디지털 트윈 가상화 설비	• 1단계('26) : V-KSTAR 구현을 위한 가상화 설비 • 2단계('32) : V-ITER 구현을 위한 가상화 설비 • 최종('38) : V-DEMO 구현을 위한 가상화 설비	• 해외구매 - KFE 기관고유 사업을 통해 초기 자원 도입 기획 및 구축 수행 - 향후 본격 사업 기획을 통해 자원 확대 추진

□ 확보일정

○ 중장기 연구개발일정을 고려, 세부시설별 3단계(단계별 3년 소요)에 걸친 성능 업그레이드로 '38년 최종 구축 완료

< 노심 플라즈마 기술 관련 인프라 확보 일정 >

세부시설	구축 계획
초고성능컴퓨터	- 2023년 ~ 2024년: 30PF 초고성능컴퓨터 도입기획 - 2025년 ~ 2026년: 30PF 초고성능컴퓨터 구축 - 2029년 ~ 2030년: 0.5EF 초고성능컴퓨터 도입기획 - 2031년 ~ 2032년: 0.5EF 초고성능컴퓨터 구축 - 3035년 ~ 2036년: 5EF 초고성능컴퓨터 도입기획 - 2037년 ~ 2038년: 5EF 초고성능컴퓨터 구축
대용량 스토리지 및 병렬 파일 시스템	- 2023년 ~ 2024년: 100PB 스토리지 시스템 도입기획 - 2025년 ~ 2026년: 100PB 스토리지 시스템 구축 - 2029년 ~ 2030년: 1EB 스토리지 시스템 도입기획 - 2031년 ~ 2032년: 1EB 스토리지 시스템 구축 - 3035년 ~ 2036년: 10EB 스토리지 시스템 도입기획 - 2037년 ~ 2038년: 10EB 스토리지 시스템 구축
디지털 트윈 가상화 설비	- 2023년 ~ 2024년: Virtual KSTAR 시스템 구축 기획 - 2025년 ~ 2026년: Virtual KSTAR 시스템 구축 - 2029년 ~ 2030년: Virtual ITER 시스템 구축 기획 - 2031년 ~ 2032년: Virtual ITER 시스템 구축 - 3035년 ~ 2036년: Virtual DEMO 시스템 구축 기획 - 2037년 ~ 2038년: Virtual DEMO 시스템 구축

□ 소요예산 및 인력

○ 소요예산

- 초고성능컴퓨터 구축을 위해 CPU/GPU 비율이 10:1 하이브리드 구조를 갖는 병렬 컴퓨터 및 인프라(전력설비, 수냉설비 등) 비용을 반영하여 단계별 총 840억 도출

- 스토리지 구축을 위해 1페타바이트 당 1억원 기준으로 비용을 반영하여 단계별 총 500억원 도출

- 디지털 트윈 설비 구축을 위해 100G 급 이상 네트워크 장비, 고속 렌더링을 위한 GPU 계산 자원, 대형 모니터 등의 가상화 설비 비용을 반영하여 단계별 총 260억 도출

○ (인력) 시설 구축을 위한 산업체 대응인력 및 운영, 유지보수를 위한 전문인력 등을 고려하여 총 76명 도출

< 노심 플라즈마 인프라 구축 연도별 예산(안) 및 인력(안) >

(억원/명)

세부기술	구분	연도														합계
		25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	
초고성능 컴퓨터	예산	100	100	–	–	–	–	150	150	–	–	–	–	170	170	840
	인력	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	8	8	76
스토리지	예산	50	50	–	–	–	–	100	100	–	–	–	–	100	100	500
	인력	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
디지털 트윈 설비	예산	30	30	–	–	–	–	50	50	–	–	–	–	50	50	260
	인력	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
합계	예산	180	180	–	–	–	–	300	300	–	–	–	–	320	320	1600
	인력	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	8	8	76

□ 재원 및 연구인력 조달 방안

○ 재원

- 초고성능컴퓨터 구축을 위한 비용과 인력은 국가 초고성능컴퓨팅 전문센터 사업과 연계하여 확보

- 대용량 스토리지 시스템 구축을 위한 비용은 ITER 사업 및 KFE 장비비를 활용하여 확보

- V-KSTAR, V-ITER, V-DEMO 구현을 위한 디지털 트윈 설비 구축 비용은 KFE 기관 고유사업을 통해 확보

○ (인력) 국가 초고성능컴퓨팅 전문센터 사업 참여 인력 활용

□ 활용방안

○ 노심 플라즈마 시뮬레이션 기술개발을 위해 구축한 컴퓨터, 스토리지 등 자원은 제어, 진단을 포함하여 실증로 설계를 위한 연구에 전반에 활용

2. 증식블랑켓

□ 기술정의

○ 증식블랑켓은 핵융합 연료인 삼중수소를 생산하는 핵융합로 핵심내벽 부품으로서, 핵융합에너지(중성자 운동에너지)를 열에너지로 변환하고, 진공용기와 초전도 자석의 보호를 위해 중성자를 차폐하는 역할 수행

□ 기술개발 필요성

○ 실증로의 (준)연속 운전을 위한 연료 생산·추출을 담당하는 핵심분야로서, 핵융합 주요국들이 핵융합 시장선점을 위해 전략기술로 추진하는 등 국산화 필요

– 증식블랑켓은 핵융합 연료자급 및 전기생산을 위한 핵심 품목으로, ITER 조달품목에서 의도적으로 제외되어 진행되고 있는 ITER TBM의 예에서 볼 수 있듯이 핵융합 선진국들이 타국과의 기술 협력에 폐쇄적인 입장

– 실증로급 증식블랑켓은 ITER에서 검증이 불가능한 분야*로 EU, 일본, 중국 등은 독자적인 증식블랑켓 개발을 위한 로드맵 도출 및 인프라 구축에 착수

* ITER 경우, 중성자속 0.78 MW/m^2, 열속 0.3 MW/m^2, 3 dpa 재료손상이 예측됨, 실증로는 중성자속 2.0~3.0 MW/m^2, 열속 0.5~0.7 MW/m^2, 80~150 dpa 재료손상 예상

– 핵융합 상용화의 핵심부가가치가 될 증식블랑켓 개발 과정에서 인프라 활용 등에 후발주자가 추격하지 못하도록 진입장벽을 설치할 것으로 예상

○ 대량 열에너지 발생, 대규모 삼중수소 증식, 고강도 중성자 조사 재료 손상 등 실증로 환경에 적합한 증식블랑켓 개발

□ 파급성

○ 증식블랑켓은 핵융합 연료 생산 및 열에너지 추출을 위한 품목으로 핵융합 주장치 방식(레이저, 소형/대형 토카막 등)에 공통 활용이 가능

○ 증식블랑켓의 증식재로 리튬세라믹을 활용할 예정으로 리튬 동위원소 분리기술, 리튬 분말 합성기술, 리튬 증식재 재활용 기술 등이 이차전지 기술에 활용 가능

– 특히 화학적 수명이 다해 폐기 처리할 이차전지의 리튬도 핵융합에서는 활용 가능해 서로 시너지 효과가 있을 것으로 기대

○ 증식블랑켓 재료 선택에 따라 실증로 이후 고온의 증식블랑켓 운전이 가능할 경우 핵융합 BoP와 연계해 수전해 생산에 적용 가능할 것으로 예상

□ 세부기술 분류 및 마일스톤

○ 증식블랑켓 기술개발 및 제작을 위해 관련 코드를 개발①하고, 개발된 코드를 활용한 설계 및 제작·검증 기술개발② 및 단위공정 적용을 위한 계통기술 개발③ 하는 단계로 기술 구분

< 증식블랑켓 세부기술 분류 >

세부기술	세부내용
설계/안전해석 체계 구축기술	○ 실증로 핵심부품인 증식블랑켓 설계와 안전해석을 위한 코드개발 및 검증, 효율적인 코드 간 연계 및 종합관리를 위한 통합체계 구축 – (설계코드 개발 및 통합체계 구축) 단일•복합하중 해석을 위한 설계코드 개발 및 인터페이스 관리를 위한 통합체계 구축 – (계통•안전 해석 코드 개발) 실증로 안전을 증명할 수 있는 고유의 모델링 및 코드 개발•검증
설계 및 제작•검증 기술	○ 실증로급 증식블랑켓 제작에서부터 성능평가, 교체•유지보수 등 제반 기술개발 – (제작기술 개발) 산업기술 기분에 부합하는 블랑켓 제작공정 도출 – (건전성•성능평가기술 개발) 소형•대형 목업 제작 및 건전성•성능 평가 – (유지보수 기술 개발) 대형•대량의 블랑켓 모듈의 정밀•신속한 원격교체를 위한 조립•해체•원격제어 기술 개발
계통기술	○ 증식블랑켓에서 생산된 대량의 연료추출 시스템 및 관련 핵심기기, 고열을 냉각해 전기로 변환하기 위한 냉각시스템 및 관련 핵심기기 개발 – (연료추출 기술개발) 블랑켓 연료추출 계통을 위한 공정관련 시스템 및 핵심기기 개발 – (블랑켓 냉각기술 개발) 블랑켓에서 변환된 열에너지를 추출하여 동력변환 계통까지 전달하고, 내부 운전온도를 냉각하기 위한 기술개발 – (계통운전기술 개발) 높은 가동률로 안전하기 운전하기 위한 기술개발

< 증식블랑켓 세부기술개발 마일스톤 >

① 설계/안전해석 체계 구축 기술

□ 정의

○ 증식블랑켓 설계와 안전해석을 위한 코드를 개발하고, 설계 업무의 효율적·체계적 수행을 위해 개발·검증된 코드 간 연계 및 종합관리체계 구축

< 설계/안전해석 체계 구축기술 개요 >

세세부기술	기술개요
설계코드 개발 및 통합체계 구축	• 증식블랑켓 설계를 위해서 모델링, 핵, 열수력, 구조, 전자기 등 단일·복합하중 해석을 위한 설계 코드 개발 및 검증 • 코드 관리, 코드 간 연계성 강화 및 입력/출력 인터페이스 확립 등 효율적이고 체계적인 설계 업무를 수행하기 위해 통합체계 구축
계통•안전 해석 코드개발	• 정상운전, 유지보수, 사고 시 다양한 안전/인허가 자료 생산을 위한 고유의 모델링 및 코드 개발·검증

□ 기술개발 필요성

○ (핵융합 전략기술) 핵융합 주요국들이 핵심원천기술 확보를 위해 전략기술로 추진하는 시장성 높은 분야로서, 핵심기술 국산화를 통한 경제성 확보 필요

* 설계코드는 제작까지 연계되는 핵심 고부가가치 분야로서, 시장확보 및 기술경쟁력 향상을 위한 핵심 기반 기술

ex) 한국 조선업계가 최근 주력하고 있는 액화천연가스(LNG) 운반선의 경우 선박을 건조할 때마다 화물창 관련 원천 설계기술을 보유한 GTT(프랑스)에 막대한 로열티('23년 1분기 900억원) 지급

○ (타분야 코드적용 한계) 타분야(원자력, 방사선 등) 해석체계 및 코드는 복합적인 형상을 가진 핵융합 분야 적용시 한계가 존재함에 따라, 추가적인 연구개발 필요

* 열수력·구조 등의 하중해석은 상업용 코드가 활용되고 있어 추가 개발없이 지속적인 활용 가능하지만, 일부 핵융합 하중 특성 및 고에너지(14Mev) 중성자 해석에 적합한 코드 개발 필요

○ (기존사업 한계) ITER TBM을 통해 연구개발 중인 계통·안전해석 코드는 ITER 운전조건 및 시설에 국한되어 개발됨에 따라, 실증로나 핵융합로 적용을 위한 기술 개발 필요

□ 설계코드 개발 및 통합체계 구축 동향

○ (국외) 설계 코드 및 통합설계 체계 기술자립화를 위한 모델링 및 코드 개발 중

– 미국 UCLA, 독일 KIT, 스페인 CIEMAT 등은 블랑켓 설계 시 다물리 특성이 반영된 통합설계체계 구축을 위한 모델링 및 코드 개발 진행 중

– 중국은 CAD 기반의 SuperMC 코드를 개발하여 자국의 핵융합 연구뿐만 아니라, 타국 코드 사용자의 적극적 확보를 위해 오픈소스 배포 중

• 모델링, 중성자수송해석, 방사화, 선량분포 평가 및 작업자 피폭선량 평가 상황 모사까지 대부분의 핵해석 항목을 통합한 코드체계를 개발하여 사용 중

* 모델링툴(MCAM)은 ITER Standard model 생산에 공식적으로 사용 중

○ (국내) 핵융합 분야 국내코드가 부재함에 따라, 원자력 분야 해석체계와 해석툴(전산코드) 활용 중

– 원자력 분야 해석 툴을 핵융합 분야 사용에 많은 제약사항이 존재함에 따라, 해외 코드를 제한적으로 사용 중

* 핵융합은 원자력 분야 대비 장치/시설의 넓은 영역까지 평가가 필요하고, 비대칭의 매우 복잡한 형상 보유

– 열수력·구조·전자기 등의 하중해석은 상업용 코드 활용 중

□ 계통·안전해석 코드 개발 동향

○ (국외) 미국·EU·중국은 ITER 기술 기반의 코드 개발 및 활용 중에 있으며, 일본은 원자력발전소용 코드의 ITER 활용 검증 진행 중

– 미국에서 개발된 MELCOR는 유일하게 ITER 안전해석을 위한 품질보증(QA)을 획득하는 등 핵융합 분야에서 가장 신뢰도 있는 코드로 자리매김(EU, 중국이 활용 중)

* MELCOR는 ITER 예비안전분석보고서 및 사고해석보고서에 활용

– 일본은 수냉방식의 블랑켓을 개발하고 있어 원자력발전소용 안전해석 코드인 TRAC-PF1를 사용하는 등 ITER 활용을 위한 검증 진행 중

– EU는 EcosimPro 기반의 연료이송 코드를 개발하고 있으며, TBM 및 EuroFusion 프로그램을 통해 검증할 계획

○ (국내) 원자력(연)에서 고온가스로용 안전해석 코드로 개발한 GAMMA+를 핵융합 환경에 사용할 수 있도록 GAMMA-FR 코드로 개량하여 활용 중

– 삼중수소 이송 코드로는 최근 핵융합(연)에서 동적 연료이송해석이 가능한 THETA-FR 코드 개발에 착수

□ 기술확보전략

○ (기술내용) 설계 및 안전해석 관련 핵심코드 개발 및 통합관리 체계 구축

– 고신뢰도 설계 코드 국산화를 위한 핵해석 관련 핵심 코드 개발

• 핵해석 관련 CAD-to-MCNP 모델링툴, 중성자수송해석, 방사화해석 및 감마선 수송해석 (D1S 및 격자기반 R2S 방법론 기반의 선량평가) 코드 개발

* MCNP나 국내 개발된 MCCARD 기반으로 CAD 변환툴과 방사화 계산툴 및 체계 개발

• 블랑켓에서 생산된 연료의 추출 및 회수 단계의 연료이송 코드 개발 및 검증

– 통합체계 구축을 통해 분야별로 개발된 설계코드 간 인터페이스를 고려한 검증·개선 등 완성도 제고

– 핵융합 실증로의 운전, 유지보수, 사고 시 열수력 거동 해석을 위한 안전해석 코드 개발 및 검증

○ (확보전략) 학·연 협력 및 한-EU 국제협력 등을 통해 코드를 개발하고, 인프라 구축 등을 통해 국산화를 위한 검증 수행

– 학·연 협력을 통해 코드개발·검증을 추진하고, 코드 간 통합관리를 위한 체계 구축

– 한-EU TBM 공동개발 파트너십을 통해 설계·안전해석, 계통·인허가 등 DB 확보

– 중성자원과 연계된 연료추출계통 인프라 확보를 통한 개발코드 검증 수행

< 설계/안전해석 체계 구축 기술 확보전략 >

<table>
<tr><th>세세부기술</th><th>개발 내용</th><th colspan="2">핵심주체</th><th>주체별 역할</th></tr>
<tr><td rowspan="3">설계코드 개발 및 통합체계 구축</td><td rowspan="2">• 설계 코드 개발 및 검증 (핵해석/삼중수소 등)</td><td rowspan="2">자체 개발</td><td>출연(연)</td><td rowspan="2">• 코드 개발 및 검증
• 인터페이스 관리 및 통합체계 구축</td></tr>
<tr><td>대학</td></tr>
<tr><td>• 인터페이스 관리 및 통합체계 구축</td><td colspan="2">국제협력 (한-EU)</td><td>• 설계해석 기술개발 및 이를 활용한 TBM 설계</td></tr>
<tr><td rowspan="3">계통•안전해석 코드 개발</td><td rowspan="2">• 고유 안전해석 모델 도출 및 개발</td><td rowspan="2">자체 개발</td><td>출연(연)</td><td rowspan="2">• 계통·안전해석코드 개발 및 검증</td></tr>
<tr><td>대학</td></tr>
<tr><td>• 안전해석코드 개선 및 검증</td><td colspan="2">국제협력 (한-EU)</td><td>• TBM 안전해석 기술개발 및 실증</td></tr>
</table>

< 설계/안전해석 체계 구축 기술 개발 로드맵 >

<table>
<tr><th rowspan="2">세세부기술</th><th rowspan="2">현재 기술 수준</th><th colspan="4">로드맵</th><th rowspan="2">최종목표</th></tr>
<tr><th>2026</th><th>2030</th><th>2035</th><th>2038</th></tr>
<tr><td rowspan="4">설계코드 개발 및 통합체계 구축</td><td rowspan="4">TRL 4
(33%)</td><td colspan="2">설계코드 개발</td><td>설계코드 간 인터페이스 관리</td><td>설계코드 간 연계 검증</td><td rowspan="4">• (TRL6, 100%) 실증로 환경에서 운용되는 블랑켓 설계기술 개발
* 14 MeV 중성자속 ~2.0MW/m^2, 재료손상 20~50 dpa 등</td></tr>
<tr><td colspan="2">– 모델링/툴 개발 및 검증
– 인터페이스 체계 구축
– TBM 설계 및 검증</td><td>– 설계해석 코드 검증
– 통합체계 구축
– TBM 코드 연계</td><td>– 설계코드 검증 완료
– ITER 환경에서 TBM 코드 검증</td></tr>
<tr><td colspan="2">인프라 구축</td><td colspan="2">인프라 활용 코드 검증</td></tr>
<tr><td colspan="2">– 중성자 생산시설
– 증식시험시설
– 증식블랑켓 안전성시험시설</td><td colspan="2">– 정상/사고 시나리오 설계 코드 검증
– 중성자 조사를 통한 설계 코드 검증
– 전략적 국제협력 인프라로 활용</td></tr>
<tr><td rowspan="4">계통•안전해석 코드 개발</td><td rowspan="4">TRL 4
(33%)</td><td colspan="2">국내 안전해석 코드 ITER급 비교 분석</td><td>해석코드 개발 및 갱신</td><td>안전해석코드 검증</td><td rowspan="4">• (TRL6, 100%) 실증로급 계통 안전해석코드 개발 완료</td></tr>
<tr><td colspan="2">– 사고해석코드 모델 도출
– 도출 모델 검증 및 개선</td><td>– 실증로용 안전해석 코드모델 통합</td><td>– 코드 개발 완료
– 코드 매뉴얼 통합</td></tr>
<tr><td colspan="2">인프라 구축</td><td colspan="2">인프라 활용 코드 검증</td></tr>
<tr><td colspan="2">– 중성자 생산시설
– 증식시험시설
– 증식블랑켓 안전성시험시설</td><td colspan="2">– 정상/사고 시나리오 안전해석코드 검증
– 중성자 조사를 통한 안전해석 코드 검증
– 전략적 국제협력 인프라로 활용</td></tr>
</table>

□ 연도별 투자재원(안)

○ (인력소요 및 예산) 전문인력을 활용한 코드개발 중심의 사업으로서, 인력운영을 위한 제반비용(인건비, 연구활동 관련 직접비, 간접비 등 1MY/2억원)으로 164억원 도출

– 설계코드 개발 및 통합체계 구축 분야는 4종 이상의 코드 개발이 필요하며, 연평균 총 3.1MY 필요

– 계통·안전해석 코드 개발 분야는 2종의 코드를 개발이 필요하며, 연평균 총 2.7MY 필요

○ (연구재료비) 연구재료비로서, 소규모 개별 서버 구축/운영, 서버 유지보수, 검증에 필요한 실험 수행 등이 필요함에 따라 관련 예산 193억원 산출

< 설계안전해석체계 구축 연도별 예산(안) 및 인력(안) >

(억원/명)

세세부기술	구분	'25	'26	'27	'28	'29	'30	'31	'32	'33	'34	'35	'36	'37	'38	합계
설계코드 개발 및 통합체계 구축	예산	8	10	10	10	12	13	13	21	21	21	18	14	12	10	193
	인력	1	1	1	1	2	2	2	6	6	6	5	4	4	3	44
계통•안전해석 코드 개발	예산	5	5	7	8	9	9	10	16	16	16	16	17	16	14	164
	인력	1	1	1	2	2	2	2	4	4	4	4	4	4	3	38
합계	예산	13	15	17	18	21	22	23	37	37	37	34	31	28	24	357
	인력	2	2	2	3	4	4	4	10	10	10	9	8	8	6	82

□ 재원 및 연구인력 조달 방안

○ (재원) 핵융합(연) 기본사업을 통해 기초연구를 수행하며, 코드개발 및 검증 등 본격적인 증식블랑켓 기술개발 재원은 신규사업을 통해 수행

* 핵융합(연) 기본사업 : ITER TBM 사업, 핵융합 실증로 핵심공학기술 개발 사업

○ (연구인력) 유관분야 전문가그룹을 우선활용하고, 신진인력의 사업참여를 통한 교육 등 전문인력 양성 및 조달

– 핵해석 분야의 개별툴은 원자력 분야 유사툴 기초 연구가 어느 정도 진행된 학연 전문그룹 활용

– 계통·안전해석 개별툴은 기존 과제를 통해 기초연구가 진행된 학연 전문그룹 활용

– 검증은 현재 설계·계통·안전해석툴을 주로 사용하는 TBM 과제 연구원 중심으로 개발에 참여한 전문그룹 지원을 통해 진행

* 안전해석코드는 기반코드 개발그룹과의 협력을 통해 모델 개선과 검증을 진행

② 제작·검증기술 개발

□ 정의

○ 실증로급 증식블랑켓 제작 기술개발 및 건전성·성능평가, 실증로 가동률 제고를 위한 로봇 기반의 교체·유지보수 등 제반 기술 개발

< 제작·검증기술 개요 >

세세부기술	기술개요
블랑켓 제작기술 개발	• 대형 모듈 혹은 섹터 규모의 실증로 블랑켓 제작을 위한 기술개발 및 산업기술 기준에 부합하는 블랑켓 제작공정 도출
블랑켓 건전성 및 성능 평가기술 개발	• 개발된 제작기술의 산업기술기준 부합여부 검증을 위한 소형•대형 목업 제작 및 건전성•성능 평가
블랑켓 유지보수 기술 개발	• 실증로 가동률을 높이기 위해 로봇을 이용하여 대형 블랑켓 세그먼트 또는 대량의 블랑켓 모듈을 정밀•신속하게 원격으로 교체하기 위한 조립•해체•원격제어 기술

□ 기술개발 필요성

○ (원가 절감) 대형모듈을 생산하는 공정기술 및 산업기술기준 등 국내 산업체 기반 제작기술개발을 통해 블랑켓 제조 원가절감 및 해외시장 확보

* 우리나라 산업체는 해외 선진국 수준의 제조역량과 선진국 대비 가격경쟁력을 활용하여, ITER 타국 조달품목 제작 용역 수주 (~'23.5 누적기준, 177건 6,979억원)

○ (산업경쟁력 확보) 실증로 관련 산업경쟁력 확보를 위해 KSTAR, ITER, 원자력 시설(원자로 및 대형가속기, 방사선발생장치) 등의 산업기술기준 벤치마킹을 통한 핵융합 산업기술기준 정립 필요

* 산업기술기준은 제작, 시험, 검사, 운전, 유지보수 등을 정립하는 것으로서, 기술자립과 국제경쟁력 확보에 필수

○ (경제성 제고) 주기적인 교체가 필요한 블랑켓 유지보수 분야는 가동률과 직결되는 부분으로서, 실증로 경제성 제고를 위해 신속·정확한 원격유지보수 기술 필요

* 과도한 고에너지 중성자가 조사됨에 따라, 재료물성이 저하되기 이전에 실증로 블랑켓 교체 필요

□ 블랑켓 제작기술 개발 동향

○ (국외) EU는 정밀 가공 공정을 확립하였으며, 독일은 다양한 방식의 제작 기술을 검토 중

- EU는 블랑켓 일차벽 제작과 관련하여 국내와 동일한 방식(레이저 용접 + HIP 접합)의 제작 기술을 검토 중

  • 또한, 블랑켓 냉각판의 유로 가공을 위해 방전 가공을 활용한 정밀 가공 공정을 확립하였으며, 실증로 적용 검토 중

- 독일 KIT는 실증로 블랑켓 제작을 위해 Metal Powder Application 및 Cold Spraying 방식과 Hot Isostatic Pressing 접합을 결합한 방식 등 다양한 방식의 제작기술 검토 중

○ (국내) 핵융합(연)과 원자력(연)을 통해 제작 및 영향평가 관련 기초연구 수행 중

- 핵융합(연)과 원자력(연)에서 ITER TBM Sub-module 규모의 블랑켓 일차벽 제작기술 개발 수행

- 핵융합(연)에서는 프랑스 산업기술기준인 RCC-MRx에 부합하기 위해 레이저 용접과 HIP 접합을 적용해 Backing Strip을 제거할 수 있는 소형 일차벽 제작 기술을 개발 중

  * 대형 블랑켓의 대량 생산을 위한 새로운 제작 기술과 연료 생산을 위한 증식유닛 제작기술 개발이 필요한 상황

- 핵융합(연)에서 제작한 TBM 일차벽 소형 목업에 대해 원자력(연)의 고열부하 시험장치(KoHLT-EB)를 이용한 고열부하 시험을 준비 중

□ 블랑켓 건전성 및 성능 평가기술 개발 동향

○ (국외) 일본과 영국에서 관련 시설 및 장비를 구축하여 운영 중

- 일본의 QST는 TBM의 건전성 평가를 위해 고열부하 시험, 열수력 구조안전성 평가, 중성자 증배재 반응성 시험, 냉각수에 의한 구조재 부식 시험을 수행할 수 있는 종합시험시설 구축

- 영국의 UKAEA는 고열부하와 전자기력을 동시에 모의부하 가능한 장비 개발(CHIMERA)

  * 시험 가능한 최대 컴포넌트 사이즈 : TBM ~1.7m x 0.6m x 1.0m 정도

  * 고열부하 시험의 경우 0.5~1.0 MW/m2, 정적 자기장 시험의 경우 4 Tesla (peak field)가 모의 가능하며 관련 평가 기술 개발 중

○ (국내) ITER 일차벽 조달시 성능평가 경험을 보유하고 있으며, KSTAR 성능향상을 통해 성능 및 수명 평가 기술 보유 중

- 원자력(연)의 고열부하 시험 장치(KoHLT-EB)를 이용해, ITER 일차벽 조달시의 부품 수명 및 성능평가 수행 경험 보유

- 최근 KSTAR 디버터 업그레이드를 위해 산업체 제작 부품의 접합부위 건전성, 성능평가를 진행하는 등 대면부품으로서의 성능 및 수명 평가 기술 보유 중

□ 블랑켓 유지보수 기술 개발 동향

○ (국외) 영국은 다양한 원격 유지보수 장치를 개발중이며, 중국은 프랑스와 국제공동과제를 통해 연구개발 중

- 영국의 UKAEA RACE팀은 JET, ITER, DEMO 등을 위한 다양한 원격 유지보수 장치를 개발 중

  * 특히 ITER 국제기구와 함께 ITER 내벽부품 교체 및 유지보수 관련 기술을 개발하고 있지만, 실증로를 위한 기술과는 큰 격차가 존재하는 것으로 평가

- 중국은 프랑스 WEST 팀과 국제공동연구를 통해 자국의 실증로 블랑켓 유지보수 개념도출 연구를 진행중이며, EAST 토카막 원격진단을 위한 로봇 암 도입

○ (국내) 핵융합(연)은 '22년부터 관련 기술개발 전략 수립을 위한 기획연구 진행 중

  * 실증로 개념 연구를 통해 블랑켓 세그먼트를 수직으로 교체하는 개념을 제안하였지만 관련된 구체적인 기술 개발 미수행

□ 기술확보전략

○ (기술내용) 대형·대량의 실증로급 블랑켓 제작 및 유지보수를 위한 제반기술 개발

– 실증로 섹터 규모의 블랑켓 제작을 위한 기술개발 및 산업기술기준에 부합하는 블랑켓 대량생산 제작공정 개발

– 제작기술을 적용한 소형·대형 블랑켓 목업의 건전성 및 성능평가 기술 개발

– 대형·대량 실증로급 대형모듈의 신속·정밀한 원격교체 기술 개발

– 블랑켓 교체 시 계통과 연결된 배관을 절단하고 재용접후 검사하기 위한 기술과 계통 가동중검사를 위한 유지보수 기술 개발

○ (확보전략) 한·EU 협력을 통해 제작 및 시험관련 핵심기능 평가 등 선진기술을 도입하고, 산학연 협력을 통해 제반기술 개발 및 확보

– 학·연 협력을 통해 블랑켓 제작절차 및 기술개발을 추진하고, 이를 기반으로 산업기술기준 및 목업, 기기개발은 산업체를 활용하여 추진

– 한–EU TBM 공동개발 파트너십을 통해 삼중수소 증식 및 열추출 핵심기능 평가, 제작기술 개발 수행

– 인프라 구축을 통해 목업의 건전성·평가 등 제작성 검증 수행

< 제작·검증 기술 확보전략 >

세세부기술	개발 내용	핵심주체		주체별 역할
블랑켓 제작기술 개발	• 실증로급 블랑켓 제작 공정•방법 개발 • 목업 제작 및 제작법 검증	자체 개발	출연(연)	• 제작절차 수립 및 제작방법 개발
			대학	• 개별 제작기술 개발 지원
			산업체	• 산업기준 개발(수립), 제작
		국제 협력(EU))		• ITER TBM 제작기술 개발
블랑켓 건전성 및 성능 평가기술 개발	• 중소형 목업 성능 및 건전성 평가 • 대형 건전성 평가장치 활용 방안 도출	자체 개발	출연(연)	• 건전성 평가 체계 수립/운영
			대학	• 개별 평가기술 개발 지원
			산업체	• 목업제작 및 공급, 장치구축 지원
		국제 협력(EU)		• ITER TBM 삼중수소 증식 및 열추출 핵심기능 평가
블랑켓 유지보수 기술 개발	• 블랑켓 교체 기술 개발 • 계통 가동중검사 및 배관 절단/용접/검사 기술개발	자체 개발	출연(연)	• 요건개발 및 시스템 종합평가
			대학	• 소형 유지보수 핵심기술 개발
			산업체	• 유지보수 기기 개발

< 제작·검증 기술 개발 로드맵 >

세세부기술	현재 기술 수준	로드맵				최종목표
		2026	2030	2035	2038	
블랑켓 제작기술 개발	TRL 3 (60%)	제작절차 및 방법 개발		제작기술 보완	실증로급 대형 제작 검증	• (TRL6, 100%) 실증로급 블랑켓 제작공정 개발 * 대면적(>~1 m^2) 접합 기술 및 고정밀도 용접 기술 개발,
		– 블랑켓 설계 및 제작절차 수립 – 소형목업 설계 및 제작		– 대형목업 설계 및 제작	– 제작기술검증 – 제작절차 확보	
블랑켓 건전성 및 성능평가기술 개발	TRL 3 (60%)	소형목업 건전성•성능 평가		대형장치용 평가체계 수립	대형목업 건전성•성능 평가	• (TRL6, 100%) 실증로급 블랑켓 건전성•성능 평가 기술 확보
		– 블랑켓 건전성 및 성능 평가 기술 기반 마련		– 대형장치용 평가절차서 마련	– 실증로급 성능•건전성 평가기술 확보	
		인프라 구축		인프라 활용 성능•건전성 평가		
		– 중성자 생산시설 – 증식시험시설 – 증식블랑켓 안전성시험시설		– 블랑켓 목업 성능•건전성 평가 – 전략적 국제협력 인프라로 활용		
블랑켓 유지보수 기술개발	TRL 2 (20%)	유지보수 개념연구		유지보수 핵심기술 연구	대형목업 활용 기술 검증	• (TRL6, 100%) 고중량 블랑켓 유지보수 기술 개발
		– 원격교체 및 유지보수 개념 확립		– 유지보수 및 핵심기술 개발	– 고중량 블랑켓 교체기술 확보	
		인프라 구축		인프라 활용 유지보수기술 검증		
		– 중성자 생산시설 – 증식시험시설		– 증식유닛 목업의 중성자 조사를 통한 유지보수 기술 검증		

□ 연도별 투자재원(안)

○ (인력소요 및 예산) 제작기술 및 성능평가, 유지보수 등 관련 전문인력 운영을 위한 제반비용(인건비, 연구활동 관련 직접비, 간접비 등 1MY/2억원)으로 200억원 도출

– 블랑켓 제작기술 개발과 관련하여 제작절차 개발, 용접·접합 기술개발, 비파괴 검사기술 개발, 소형·대형목업 제작 등의 R&D 수행을 위해 연평균 2.4MY 필요

– 블랑켓 건전성 및 성능평가기술 개발과 관련하여 평가장치 설계, 장치운영 및 평가수행, 절차개발 등의 R&D 수행을 위해 연평균 2.0MY 필요

– 블랑켓 유지보수 기술개발과 관련하여 블랑켓 교체기술 개발 및 검증, 계통 유지보수기술 개발 및 검증 등의 R&D 수행을 위해 연평균 2.8MY 필요

○ (연구재료비) 개발단계에서의 목업제작, 시험 지그 등 제반소모품, 교체·유지보수용 시스템·목업 제작 및 운영 등을 위한 예산 240억원 소요

< 제작·검증 기술개발 연도별 예산(안) 및 인력(안) >

(억원/명)

세부기술	구분	'25	'26	'27	'28	'29	'30	'31	'32	'33	'34	'35	'36	'37	'38	합계
블랑켓 제작기술 개발	예산	6	6	6	6	7	9	14	16	16	16	18	18	15	12	165
	인력	1	1	1	1	1	2	2	3	3	3	4	4	4	3	33
블랑켓 건전성 및 성능 평가기술 개발	예산	4	5	6	6	6	6	6	10	11	11	11	12	12	11	117
	인력	1	1	1	1	1	1	1	3	3	3	3	3	3	3	28
블랑켓 유지보수 기술 개발	예산	3	4	5	7	9	10	13	17	18	18	16	13	13	12	158
	인력	1	1	1	1	2	2	3	5	5	5	4	3	3	3	39
합계	예산	13	15	17	19	22	25	33	43	45	45	45	43	40	35	440
	인력	3	3	3	3	4	5	6	11	11	11	11	10	10	9	100

□ 재원 및 연구인력 조달 방안

○ (재원) 핵융합(연) 기본사업을 통해 제작관련 기초연구를 수행하며, 제작·검증 관련 핵심기술 개발 재원은 신규사업을 통해 수행

* 핵융합(연) 기본사업 : ITER TBM 사업, 핵융합 실증로 핵심공학기술 개발 사업

○ (연구인력) 제작법 개발은 현재 TBM 인력이 초기 절차/방법 개발에 참여 후 신규 인력 확보 및 훈련을 통해 장기 연구 수행 (제작관련 1MY 기존인력, 2MY 신규)

– 소형성능평가장치는 기 운영인력 활용, 대형장치 구축/운영에 기술 전수 및 교육, 운영에 참여

③ 계통기술 개발

□ 정의

○ 증식블랑켓에서 생산된 대량의 연료 추출 시스템 및 관련 핵심기기, 고열을 냉각해 전기로 변환하기 위한 냉각시스템 및 관련 핵심기기 개발

< 계통기술 개요 >

세세부기술	기술개요
연료추출 기술개발	• 블랑켓 연료추출 계통*을 위한 공정 관련 공정시스템 및 핵심기기 개발 * 증식재에서 생산된 연료를 추출하고, 삼중수소플랜트에서 요구하는 화학적 형태로 이송
블랑켓 냉각 기술 개발	• 블랑켓에서 변환된 열에너지를 추출하여 동력변환 계통까지 전달하고, 블랑켓 내부를 운전온도로 냉각하기 위한 공정 관련 공정시스템 및 핵심기기 개발
블랑켓 계통 운전기술 개발	• 블랑켓 운전 시 발생가능한 비정상 상황에서의 안전성 확보, 블랑켓 본체 및 계통 보호 기술 개발

□ 기술개발 필요성

○ ((준)연속운전 구현) 실증로의 (준)연속 운전을 위해 증식블랑켓에서 생산된 연료를 추출하여 재사용함으로써 안정적 연료 자급 실현

○ (기존사업 한계) ITER TBM 단위공정 수준 및 규모의 연구개발을 진행 중인 상황으로서, 실증로급 적용을 위한 연구개발 수행 필요

* ITER 수준(1kg/s급) 대비 실증로에서는 약 300℃ 의 고온 헬륨이 루프(약 10개) 당 100 kg/s으로 순환

* 실증로에서는 TBM 대비 루프 당 열출력 100배 이상 제거가 필요함에 따라, 실증로급 적용을 위한 냉각 공정관련 시스템 및 핵심기기 필요

○ (경제성 및 가동률 제고) 핵심부품의 사용기간 및 블랑켓 가동률 제고를 통한 비용 절감 등을 위해 블랑켓의 안전운전과 관련된 블랑켓 및 계통 보호기술 확보 필요

* 유지보수가 발생 건수가 증가할수록 가동률이 낮아짐에 따라, 안전성 확보 및 내벽부품 내구연한 제고는 경제성 등과 밀접하게 연계

□ 연료추출 기술개발 동향

○ (국외) 실증로 적용을 위한 단위공정을 개발 중이며, 연료추출계통 기기 시제품 제작 등 기술확보를 위한 연구개발 가속화 중

– EU 및 일본을 중심으로 Zeolite 멤브레인 방식의 확산기, 전기화학적 수소 펌프 등 실험실 규모의 연료추출계통 기기 시제품을 제작해 성능을 평가하고 있으며, 최근 중국 역시 관련 연구를 착수하여 빠르게 기술개발을 수행 중

– 미국, EU 및 일본의 연구소를 중심으로 '70년대부터 다양한 소재의 코팅기술 개발 및 이의 침투특성 평가를 수행한 바 있으며,

• 특히 일본에서는 Tokyo 대학교, Kyoto 대학교, QST 등에서 Er2O3, Y2O3 등의 코팅 개발 및 수소/삼중수소를 이용한 침투평가를 수행

○ (국내) ITER TBM 단위공정 수준의 연구개발을 진행 중

– 핵융합(연)에서 ITER 펄스 운전에 적합한 ITER TBM 삼중수소추출시스템 관련 단위공정 개발 진행

– 핵융합(연)에서 ITER TBM 적용 용량의 극저온분자체 제작 및 극저온흡착 성능 DB를 성공적으로 구축한 바 있으며, 현재는 소형 상온분자체 수분 흡탈착 실험 수행 중

– 핵융합(연) 및 단국대에서 침투실험을 위한 장비구축하여 구조재 실험경험을 보

유하고 있으며, 침투방지코팅을 위한 기술개발은 원자력(연), 홍익대 등에서 원형 디스크에 대한 Allumina 코팅 적용 등 기초적인 수준에서 수행

□ 블랑켓 냉각 기술 개발 동향

○ (국외) EU와 일본을 중심으로 냉각 성능 향상을 위한 연구개발이 진행 중

- EU는 최근 실증로를 위한 출력 6 MW 이하의 순환기를 적용한 냉각계통 루프를 제시하고 고압 헬륨루프를 이용한 냉각성능 향상기술 연구를 병행

- 일본은 수냉각 방식의 블랑켓 개발을 목표로 연구개발을 진행함에 따라, 경수로 기술을 적용할 예정

- EU의 Ateko사에서 소형, 중형급(10kg/s급, 15MW) 헬륨 순환기 개발에 성공

○ (국내) ITER TBM을 기반으로 헬륨냉각시스템 개발 중

- 핵융합(연) 및 원자력(연)이 ITER TBM 헬륨냉각시스템을 개발하고 있으며 TBM 규모의 냉각 공정에 대한 경험, 인프라 등 확보 중

- TBM 규모의 냉각재 정제를 위해 일부 단위 공정 기술 개발 착수

- 국내 산업체에서 1 kg/s 급 유량 순환이 가능한 상온 고압(8 MPa)용 헬륨 순환기 개발에 성공하여 ITER TBM에 적용 가능성을 평가 중

- 핵융합(연)에서 냉각제 정제를 위한 Q_2O 흡착베드 성능평가 수행 중

□ 블랑켓 계통 운전 기술 개발 동향

○ (국외) 신뢰도·가동률 평가를 위한 연구개발을 수행하였지만, 실증로급에서의 적용을 위한 연구개발 추진에 한계 봉착

- EU 등은 신뢰도·가동률 평가를 위해 지난 30여년 간 노력해 왔으나, 신기술* 적용 및 적절한 평가를 위한 환경확보 등의 어려움으로 데이터베이스 구축에 한계 봉착

  * 고온등방가압(Hot Isostatic Pressing) 접합, 확산 접합, 이중용기 접합 등 다양한 신기술이 적용 필요

- EU는 TBM 규모의 헬륨 격리밸브 기술을 확보하고 있는 것으로 평가되며 현재 시제품을 이용 다양한 내환경 시험을 수행 중

  * 실증로에서는 현재보다 대구경 배관에 대해 보다 고속으로 격리를 위한 밸브 개발 필요

○ (국내) ITER TBM에서 요구되는 수준에서 일부 분야에 대해서 연구개발 진행 중

- 가동률이나 안전성 평가를 위한 기기/계통별 데이터베이스가 필요하지만, ITER TBM에서 요구되는 수준의 가동률 및 안전성 평가가 수행 중

- ITER TBM 과제를 통해 ITER 시나리오에 따른 TBM 안전계통으로서 일부 격리밸브에 대한 연구만 진행 중

  * 실증로 설계 시 다양한 비정상(사고) 상황에 대비한 시나리오를 개발하고, 이를 통해 사고를 완화/방지할 수 있는 다양한 안전계통 및 핵심기기 개발이 필요

- 국내 산업체가 80DN급 헬륨 격리밸브 개발을 수행한 바 있으나 내방사성·내자기장·내진·삼중수소 환경 등 내환경 시험을 통한 기술 검증은 미수행

□ 기술확보 전략

○ (기술내용) 증식블랑켓에서 생성된 대량의 연료 및 열에너지를 추출하고, 전기로 변환하기 위한 (준)연속운전 관련 제반기술 개발

- 실증로급 연료추출계통에 적용 가능한 단위공정 기술 및 핵심기기 개발

- 연료추출계통과 관련된 다수의 단위공정이 연계되어 통합적으로 목표한 성능 구현이 가능한지 검증을 위한 단위공정 연계 성능평가 및 통합운전이 가능한 평가시스템 구축

- 복잡한 블랑켓 내부 유로 및 고온에서 장시간 운전되는 블랑켓의 특성에 부합하는 블랑켓 및 파이프 제작/설치 과정에 적용 가능한 침투방지코팅 등 다양한 기능향상 기술 도출 및 개발

- 실증로급 냉각계통에 적용 가능한 냉각 공정 기술 및 핵심기기 개발

- 냉각재에 침투하는 삼중수소 농도상승 방지 및 불순물 제거를 위한 실증로급 냉각계통에 적용 가능한 정제 공정 기술 및 핵심기기 개발

- 안전(Safety) 및 기기 보호(Interlock)를 위해 블랑켓의 비정상 상황 예방, 비정상 상황 발생 시 조기 탐지, 발생 후 영향 완화를 위한 안전계통 기술 및 핵심기기 개발

○ (확보전략) 한·EU 협력을 통해 선진 계통기술을 추적하고, 산학연 협력을 통해 제반기술 개발·확보

- 출연(연) 및 대학을 중심으로 장치 운영 및 공정기술을 개발하고, 산업체는 기기 제작 및 장치 조립 등을 지원하는 등 주체별 유기적 협력을 통해 추진

- 한-EU TBM 공동개발 파트너십을 통해 연료추출계통 연구성과 확보

- 인프라 구축을 통해 추출공정 검증 및 개발기술의 성능평가 수행

< 계통기술 확보전략 >

세세부기술	개발 내용	구분	개발 주체	주체별 역할
블랑켓 연료추출 기술개발	• (준)연속 운전용 연료추출 공정 개발	자체 개발	출연(연)	• 단위공정별 요소 기술 개발
			대학	
			산업체	• 기기 제작/장치 조립 지원
	• 연료추출 주요 단위공정 기기 개발	자체 개발	출연(연)	• 기기별 요건도출, 기기운영 및 검증, DB 확보
			대학	• 시제품 개발
			산업체	• 기기 개발/제작/공장시운전
	• 침투방지코팅 기술 등 요소기술 개발	자체 개발	출연(연)	• 요소 기술 개발
			대학	
			산업체	• 코팅, 시편 제작 등 지원
블랑켓 냉각기술 개발	• 대규모 냉각 및 정제 공정 개발	자체 개발	출연(연)	• 단위공정별 요소 기술 개발
			대학	
			산업체	• 기기 제작/장치 조립 지원
	• 대규모 냉각 및 정제 핵심기기 개발	자체 개발	출연(연)	• 기기별 요건 도출, 기기 운영 및 검증, DB 확보
			산업체	• 기기 개발/제작/공장시운전
블랑켓 계통 운전기술 개발	• 블랑켓 신뢰도 및 가동률 향상을 위한 기술 개발	자체 개발	출연(연)	• 국제협력 및 자체 데이터 확보/관리
			대학	
			산업체	• 기기별 RAMI 데이터 확보 지원
		국제협력(EU)		• 공동연구를 통한 DB 확보
	• 블랑켓 안전계통 및 핵심기기 개발	자체 개발	출연(연)	• 계통분석 및 안전계통 요건 도출
			대학	• 기기요건 도출, 기기 운영/DB확보
			산업체	• 기기 개발/제작

< 계통기술 개발 로드맵 >

세세부기술	현재 기술 수준	로드맵				최종목표
		2026	2030	2035	2038	
블랑켓 연료추출 기술개발	TRL 2 (30%)	대규모 (준)연속운전용 단위공정 개발		실증로 단일 섹터급 통합공정 개발	실증로 단일 섹터급 통합공정 검증•개선	• (TRL6, 100%) 10g-t/day급 연료추출을 위한 확산기, 분자체, 삼중수소 호환 퍼지가스 순환기 개발
		– (준)연속운전 및 1MW 규모 공정도출 및 시스템 개발		– 실증로급 시스템 통합공정 도출•평가	– 10g-T/day급 통합공정 개발	
		인프라 구축		인프라 활용 검증 및 시험평가		
		– 중성자 생산시설 – 증식시험시설 – 증식블랑켓 안전성시험시설		– 삼중수소를 이용한 공정 검증 – 연료추출계통 안전성시험평가		
블랑켓 냉각기술 개발	TRL 3 (60%)	냉각계통 핵심 기기 및 단위공정 개발		대규모 냉각공정 기술개발	100MW급 열추출 핵심기기 개발	• (TRL6, 100%) ~100MW급 열출력 제거를 위한 대규모 냉각 루프 공정 및 핵심기기 개발
		– 1kg/s 급 헬륨순환기 개발 * Low Voltage, >300℃ – 냉각계통 단위공정 평가		– 일차벽 냉각채널 열전달(~6kW/m^2/K 이상) 기술개발	– 50~100kg/s급 헬륨순환기 개발 * Mid Voltage, >300℃)	
		인프라 구축		인프라 활용 검증 및 시험평가		
		– 중성자 생산시설 – 증식시험시설 – 증식블랑켓 안전성시험시설		– 삼중수소를 이용한 공정 검증 – 냉각계통 정상•사고 시나리오 안전성시험평가		
블랑켓 계통 운전기술 개발	TRL 2 (20%)			신뢰도•가동률 향상기술 연구	실증로급 장기운전 시나리오 도출	• (TRL6, 100%) 실증로 가동률 60%이상 달성을 위한 블랑켓 계통기술 개발
				– 신뢰도•가동률 DB 구축	– 가동률 60%이상 달성기술 개발	
		인프라 구축		인프라 활용 성능평가 및 신뢰도 검증		
		– 중성자 생산시설 – 증식시험시설 – 증식블랑켓 안전성시험시설		– RAMI DB 및 안전•보호 기기 성능평가 및 내환경 신뢰도 검증		

□ 연도별 투자재원(안)

○ (인력소요 및 예산) 연료추출 공정기술, 냉각기술 및 핵심기기개발, 계통운전 기술 개발 등 관련 전문인력 운영을 위한 제반비용(인건비, 연구활동 관련 직접비, 간접비 등 1MY/2억원)으로 314억원 도출

– 블랑켓 연료추출 기술개발과 관련하여 (준)연속 연료추출공정, 연료추출 핵심기기 개발 등의 R&D 수행을 위해 연평균 5.2MY 필요

– 블랑켓 냉각기술 개발 관련하여 대규모 냉각공정, 정제공정, 냉각 및 정제핵심기기 개발 등의 R&D 수행을 위해 3.9MY 필요

– 블랑켓 계통 운전기술 개발과 관련하여 신뢰도/가동률 평가절차 확립 및 관련 DB 구축, 안전/보호 기기 개발 등의 R&D 수행을 위해 2.1MY인력 필요

○ (연구재료비) 실증로급 헬륨순환기 개발, 성능 및 안전성 검증, 냉각재 정제 핵심기기 약 3종, 신뢰도·가동률 평가시스템 구축 등을 위한 예산 422억원 소요

< 계통기술 개발 연도별 예산(안) 및 인력(안) >

(억원/명)

세세부기술	구분	'25	'26	'27	'28	'29	'30	'31	'32	'33	'34	'35	'36	'37	'38	합계
블랑켓 연료추출 기술개발	예산	6	6	11	13	16	17	21	31	32	34	36	32	23	19	297
	인력	1	1	2	2	3	3	4	9	9	9	10	9	6	5	73
블랑켓 냉각기술 개발	예산	6	7	14	18	23	31	34	40	42	30	29	26	14	10	324
	인력	1	1	2	2	2	3	3	6	7	7	7	6	5	3	55
블랑켓 계통 운전기술 개발	예산	–	–	–	–	–	5	7	16	18	16	14	14	14	11	115
	인력	–	–	–	–	–	1	1	4	4	4	4	4	4	3	29
합계	예산	12	13	25	31	39	53	62	87	92	80	79	72	51	40	736
	인력	2	2	4	4	5	7	8	19	20	20	21	19	15	11	157

□ 재원 및 연구인력 조달 방안

○ (재원) 핵융합(연) 기본사업을 통해 연료추출 및 냉각계통 단위공정 관련 기초연구를 수행하며, 실증로급 연구개발을 위한 재원은 신규사업을 통해 수행

* 핵융합(연) 기본사업 : ITER TBM 사업, 핵융합 실증로 핵심공학기술 개발 사업

○ (연구인력) TBM 인력은 초기 공정, 기기사양, 기 신뢰도 DB 확보 등에 참여하고, 장기연구분야(공정검증, 핵심기기개발, 신뢰도·가동률 평가 등)는 신규 충원 운영

* 소형 및 펄스 운전용 공정은 기 운영인력 활용, 통합검증 및 (준)연속/대용량 냉각 기술개발에 신규인력 활용

④ 증식블랑켓 개발 소요 연구시설

□ 정의

○ 증식블랑켓 설계 및 제작기술 확보에 필요한 공학데이터를 확보하고, 제품의 검증 및 테스트를 위한 제반 시설

< 증식블랑켓 세부시설 개요 및 필요성 >

세부시설	시설 개요	필요성
중성자 생산시설	• 증식블랑켓 목업(조사면적~20x20 cm^2)에 핵융합과 유사한 중성자 환경*을 제공하는 시설 * 중성자속 10^{12} $n/cm^2/s$ 이상, 에너지 10 MeV 이상을 24시간 이상 유지	• 삼중수소의 생산, 추출, 회수 공정의 연료시스템을 검증하고 증식유닛의 신뢰성 평가 및 공학데이터 확보에 활용
증식시험 시설	• 중성자생산시설로부터 생산된 고에너지 중성자와 증식블랑켓 목업(증식유닛)을 이용하여 삼중수소 생산, 추출, 회수 및 인벤토리를 검증하고 (준)연속 장기운전에 대한 증식블랑켓 공학데이터를 확보하기 위한 시설	• 증식블랑켓의 핵심기기인 증식유닛을 제작, 핵융합 유사 환경에서의 성능평가를 통해 연료자급이 가능한 증식블랑켓 시스템 구축에 필요한 요구사항 발굴 및 상세화
증식블랑켓 안전성시험 시설	• 증식블랑켓 시스템의 기능(대용량 공정 등) 및 안전성(사고대응 등)을 검증하고, 내환경 건전성 평가를 통한 신뢰도 데이터 확보를 위한 시설	• 소형 목업 뿐만 아니라 증식블랑켓 실사이즈로 제작된 대형 목업의 검증도 가능한 사양의 장비로서, 실증로 증식블랑켓 개발에 필요한 검증연구와 공장인수검사 장비로 활용

□ 국내외 시설구축 사례

○ (해외) EU, 일본, 중국 등이 자국 증식블랑켓 연구개발을 목적으로 시설 구축 중

– 중성자 생산시설은 대부분 구축하고 있지만, 증식시험시설은 아직 미구축

< 증식블랑켓 관련 해외 시설 및 활용가능 여부 >

세부시설	국외	활용가능 여부 및 사유
중성자 생산시설	• EU는 약 1조원을 투자하여 스페인 그라나다에 IFMIF-DONES 구축 중('30년 운영목표)	• **(불가)** 자국 소재에 대한 조사 물성 DB 구축을 위한 시험 우선 예상
	• 일본은 약 1조원을 투자하여 롯카쇼에 A-FNS 구축 중('31년 완공목표)	• **(불가)** 자국 소재에 대한 조사 물성 DB 구축을 위한 시험 우선 예상
	• 중국은 '15년 HINEG-I을 개발완료하고, 현재 HINEG-II 공학설계 진행중이며,, 2031년까지 10억달러 투자하여 HINEG-III를 단계적으로 완공예정	• **(불가)** HINEG-I의 경우 핵자료 측정, 핵해석 코드 검증, 동위원소 생산용으로 증식블랑켓 시험 불가능
	• 미국 DOE에서는 핵융합 재료 연구를 위한 중성자선원에 대한 RFI 공고 ('23.5)	• **(불가)** 개념 기획 단계로서, 현재시점에서 활용가능여부 판단 불가
증식 시험 시설	• 구축 사례 없음 * 미국·일본 등 시설구축 기획단계	–
증식블랑켓 안전성 시험시설	• 일본은 롯카쇼에 TBM 및 증식블랑켓의 안전 실증을 위한 장치를 구축 중	• **(불가)** 자국 시험 우선 예상되며, 특히 일본은 수냉각 방식의 TBM/증식블랑켓 개발에 집중하고 있어 시험에 제약 예상

○ (국내) ITER TBM 연구를 위해 원자력(연)의 하나로 시설을 활용하였지만, 빈번한 고장 및 시설의 낮은 사양으로 인해 추가 사용 한계

– 또한, 원자력(연)의 재료전용 이온조사시험시설과 구축 중인 중성자 발생장치는 일부 선행연구장치로서 활용이 가능하나, 중장기적 관점에서 활용 상 한계 존재

< 증식블랑켓 관련 국내 유관 시설 및 활용가능 여부 >

세부시설	국내	활용가능 여부 및 사유
중성자 생산시설	• 원자력(연) 하나로 연구로	• **(일부가능)** 증식블랑켓의 구조재료 조사 DB 구축에 일부 활용 가능 • **(한계)** 생산된 중성자 특성이 핵융합 증식블랑켓 시험에 부적합하며, 삼중수소 취급/증식블랑켓 목업 설치·교체 등을 위한 시설이 부재 * 고에너지중성자(14MeV)가 아닌 열중성자 영향과 잦은 정지로 인한 제약으로 추가 사용 제한
	• 원자력(연) 정읍 첨단방사선연구소 30MeV 싸이클로트론 기반 중성자 발생 장치 (4개의 포트 중 1개를 중성자발생용으로 개발 중, 23.12 완료)	• **(일부가능)** 중성자생산시설 개발 과정에 해당시설 구축 시의 표적, 차폐, 시험 기술 적용 가능 • **(한계)** 표적 근처 유효 조사위치에서 ~0.1 MW/m^2 NWL 수준으로 선행연구장비로는 사용가능하나, 대면적 조사가 불가능하여 실질적인 조사시험 불가 – 생산된 중성자 특성이 핵융합 증식블랑켓 시험에 부적합하며, 삼중수소 취급/증식블랑켓 목업 설치·교체 등을 위한 시설 부재
	• 경주양성자가속기(KOMAC)	• **(불가)** 생산된 중성자 특성이 핵융합 증식블랑켓 시험에 부적합하며, 삼중수소 취급/증식블랑켓 목업 설치·교체 등을 위한 시설이 부재 – 삼중수소/블랑켓 목업 설치·교체/조사후시험을 위한 시설 개선 불가능 * 연속운전 불가능에 따른 중성자 조사 시간 제약, 100 MeV 이상 양성자에 의해 생성되는 중성자 에너지 너무 높음
	• 중성자가속기(RAON)	• **(불가)** 생산된 중성자 특성이 핵융합 증식블랑켓 시험에 부적합하며, 삼중수소 취급/증식블랑켓 목업 설치·교체 등을 위한 시설 부재 – 핵융합 유사환경 제공 불가(연속운전, 대면적 조사, 중성자속, 삼중수소 설비, 조사후시험시설 등)
	• 원자력(연) 재료전용 이온조사시험시설(KAHIF)	• **(일부가능)** He/Fe 이온 등을 이용해 핵융합 환경에서의 중성자 조사손상 모의가 가능해 증식블랑켓의 구조재 거동연구에 일부 활용 가능 • **(한계)** 이온조사시설은 재료의 조사손상 거동을 미시적으로 평가할 수 있는 시설로서 구조재료 DB 구축에 직접적 활용 불가 – 구축될 시설과 연계해 조사거동과 조사손상량 연구 병행 필요
증식시험시설	• 구축 사례 없음	–
증식블랑켓 안전성 시험시설	• 종합시험시설은 부재하나, 개별 고열부하시험시설(KoHLT-EB), 고온고압헬륨시험장비(HeSS) 등 운영 중	• **(일부가능)** ITER TBM 및 소형 목업 시험 등 활용
핵반응/차폐 데이터 검증실험시설	• 미래원자력기술장비구축사업을 통해 DD 선원(필요시 30MeV 가속기 기반 중성자원)을 활용한 차폐설계검증실험 기초 연구가 진행 중	• **(일부가능)** 26년 구축 완료 및 그 과정에서의 차폐설계검증 절차 활용 가능

□ 확보전략

○ (해외구매) 중성자 생산시설은 해외유사시설 구축경험을 보유한 기관을 통해 설치

○ (자체개발) 증식시험시설 및 증식블랑켓 안전성 시험시설은 국내 산업체를 활용하여 공동연구를 통한 제작

< 증식블랑켓 인프라 사양 및 확보전략 >

세부시설	사양	확보전략
중성자 생산시설	• Neutron Yield ~$2x10^{15}$ n/s(forward), Neutron Flux ~$5x10^{12}$ n/cm^2/s • Neutron Energy > 10 MeV (~ 10 He-appm/dpa) • CW 운전 (연속운전 24 hrs 이상) • ECR ion source : 2.45 GHz, Over 10 mA CW D+, 20 keV/u • Low Energy Beam Transport : 1~2 m with 1~2 Solenoids, $\epsilon\_(N,rms,x)$ < 0.2 mm-mrad • Radio Frequency Quadrupole : 4 vane copper cavity, 162.5 or 176 MHz (TBD), ~4 m, >250 kW, 1.5 MeV/u • Medium Energy Beam Transport : ~3 m with 4 Quads + 2 Rebunchers, $\epsilon\_(N,rms,z)$ < 0.12 MeV-deg • High Energy Beam Transport • Superconducting RF Linac • 표적 및 부대설비 : 고체형 Beryllium 표적, Cooling system, Vacuum system 구성	해외구매
증식시험 시설	• Technical Data for Breeding Unit * Neutron irradiation area: 0.2 x 0.2 m^2 * Radial length: 0.6m * Coolant pressure and temperature: 8 MPa and Avg. 450℃ * Tritium production rate: 0.16 mg/d under d40 MeV_10 mA • Material *Structural material: Advanced reduced-activation alloy (ARAA) *Neutron multiplier: Be (or Berylides) *Tritium breeding material: Li2TiO3 • 기타 증식유닛의 냉각 시스템 설치 • 삼중수소 추출 및 생성된 삼중수소의 안전한 회수·저장 시스템 구성 * 저농도•고농도 삼중수소 취급 시스템 * 삼중수소 취급 지원 시스템 • 삼중수소 분석 : 라만 분광기, 가스 크로마토그래피 적용 • 삼중수소 모니터링, 삼중수소 운반용기 및 관련 취급설비	국내 산업체 활용 공동개발 및 제작
증식블랑켓 안전성 시험시설	• 열수력 구조안전성 평가장비 : Technical Data for Structural Integrity Test Facility * Diameter of Test Chamber: 5 m * Height of Test Chamber: 10 m * Coolant: Helium * Coolant pressure and max. temperature: ~10 MPa and ~550℃ • 냉각 계통 공정 및 안전성 평가 장비 * Technical Data for Helium Cooling * Technical Data for Water Cooling * 기타 히터, 순환기 등 냉각 및 가열 보조 장치 • 히터, 순환기, 안전 밸프, 산화기, 환원기 등 추출계통 실험 모듈 • 주사전자현미경, 레이저 플래시 장비, 만능재료시험기 등 물성평가 관련 상용 연구장비 등으로 구성	국내 산업체 활용 공동개발 및 제작

□ 확보일정

○ ('30년대 초 완료) 중장기 연구개발일정을 고려하여, '30년대 초까지 설치 및 시운전 완료

< 증식블랑켓 인프라 확보 일정 >

세부시설	구축 계획
중성자생산시설	•총 구축 일정 : 2026~2031년(총 6년) – 2026년 : 제작 설계 및 건설 인허가 완료 – 2027년 : 제작 착수 – 2028년 : 제작•설치 완료 – 2029년 : 시운전 및 최적화 – 2030년 : First Neutron 달성 – 2031년 : 최대 출력 운전
증식시험 시설	•총 구축 일정 : 2026~2031년(총 6년) – 2026년 : 상세 설계 진행 – 2027년 : 계통 및 증식유닛 설계 완료 – 2028년 : 더미 유닛 및 계통 제작 – 2029년 : 증식유닛 제작 착수, 계통 설치 완료 – 2030년 : 증식유닛 제작 완료, 계통 시운전 완료 – 2031년 : 증식유닛 설치, First Tritium 달성
증식블랑켓 안전성 시험시설	•총 구축 일정 : 2026~2031년(총 6년) – 2026년 : 상세 설계 착수 – 2027년 : 상세 설계 진행 – 2028년 : 상세 설계 완료 – 2029년 : 제작 착수 – 2030년 : 제작 완료 및 설치 – 2031년 : 시운전 및 최적화

□ 소요예산 및 인력

○ (소요예산) 유사시설의 구축예산 등을 기준으로, 구축하고자 하는 시설 스펙을 고려하여 세부예산 도출

○ (인력) 시설 구축을 위한 산업체 대응인력 및 운영, 유지보수를 위한 전문인력 등을 고려하여 도출

< 증식블랑켓 인프라 구축 연도별 예산(안) 및 인력(안) >

(억원/명)

세부기술	구분	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	합계
중성자 생산시설	예산	–	253	402	455	422	294	215	–	–	–	–	–	–	–	2,041
	인력	–	4	6	6	6	7	7	–	–	–	–	–	–	–	36
증식 시험 시설	예산	–	43	76	102	128	202	209	–	–	–	–	–	–	–	760
	인력		6	7	8	8	6	6	–	–	–	–	–	–	–	41
증식블랑켓 안전성시험시설	예산	–	83	145	128	152	135	111	–	–	–	–	–	–	–	754
	인력	–	4	6	6	7	8	8	–	–	–	–	–	–	–	39
합계	예산	–	379	623	685	702	631	535	–	–	–	–	–	–	–	3,555
	인력	–	14	19	20	21	21	21	–	–	–	–	–	–	–	116

□ 재원 및 인력 조달 방안

○ (재원) 신규사업을 통해 인프라 구축예산 확보

○ (인력) ITER TBM 사업 참여 인력 및 유관분야 엔지니어링 인력 등을 활용

3. 핵융합 소재

□ 기술정의

○ 핵융합발전소의 구조적 안전성과 에너지 생산의 효율성을 확보하기 위한 핵융합로용 구조재, 대면재, 기능소재 개발

□ 기술개발 필요성

○ 핵융합 플라즈마에서 발생되는 고에너지 중성자에 대한 조사 저항성 및 고온 안정성을 유지하며, 장주기 방사성 폐기물을 저감시키기 위한 저방사화 재료 개발 필요

○ 증식블랑켓 및 디버터 등의 사용수명 및 기능 제고를 위한 핵융합로용 내벽부품 제작에 활용될 소재 개발 필요

○ 핵융합 재료 분야는 ITER 프로그램과는 별개로 자국의 재료 확보를 위해 경쟁적으로 기술개발을 수행하고 있으며, 핵융합 재료에 필요한 핵심 원료는 전략물자로 분류하여 수출입을 통제함에 따라 기술 협력 및 자료 공유에 한계가 존재

– 개발된 재료를 실증로에 적용하기 위해서는 ITER보다 높은 중성자 조사량*이 요구되므로, 고에너지 중성자 조사시험 시설을 구축하고 있으며, 이를 활용하여 자국 소재 위주의 검증 수행 필요

* ITER 경우, 중성자속 0.78 MW/m2, 열속 0.3 MW/m2, 최대 3 dpa 조사량이 예측됨, 실증로는 중성자속 2.0–3.0 MW/m2, 열속 0.5–0.7 MW/m2, 20~100 dpa 조사량 예상

□ 파급성

○ 핵융합 재료 기술은 토카막 유형 뿐만 아니라 모든 핵융합 유형에서 필요한 기술

– 핵융합 소재는 핵융합 반응으로부터 생성되는 고에너지 중성자를 견디기 위해 필수적인 핵심기술이며, 핵융합 유형과 관련 없이 모든 장치에 활용 가능

○ 저방사화 철강재, 삼중수소 증식재, 중성자 증배재 등의 핵융합 재료 기술은 차세대 원자력, 이차전지, 우주항공 분야 등에도 활용 가능

– 핵융합 소재는 초고온, 초고밀도, 고중성자속의 극한 환경에서 견딜 수 있도록 높은 스펙이 요구되며, 원자력, 우주항공 등 타 분야의 극한 환경도 대응 가능

– 삼중수소 증식재인 리튬티타늄화합물의 경우 이차전지 소재의 핵심원료로 사용

되고 있으며, 개량 기술개발을 통해 이차전지 분야 적용 가능

□ 세부기술 분류 및 마일스톤

○ 핵융합 환경에서 고에너지 중성자에 의한 손상을 견디는 극한소재 개발

< 핵융합 소재 세부기술 분류 >

세부기술	세부내용
구조재	○ 핵융합로용 내벽부품의 구조재로 사용되는 저방사화 철강재료의 대량 제조기술 개발, 용접/접합기술 개발 및 물성 DB 구축을 통한 표준화 – (저방사화 구조재 제조기술 개발) 핵융합로용 증식블랑켓 디버터 등의 내벽부품 구조재로 사용될 저방사화 철강재 대량 제조기술 개발 – (저방사화 구조재 용접 및 접합 기술개발) 저방사화 철강재를 이용하여 핵융합로용 증식블랑켓 및 디버터 등과 같은 복잡한 형상의 부품 제작에 필요한 용접 및 접합기술 개발 – (저방사화 구조재 물성 DB 구축 및 표준화) 핵융합로용 증식블랑켓 및 디버터 설계 파라미터로 사용하기 위해 한국형 저방사화 철강재 ARAA의 각종 물성 DB를 구축하고, 국내외 산업기술기준 등재를 통한 표준화
대면재	○ 핵융합 증식블랑켓 및 디버터용 고인성 플라즈마 대면재 제조기술 개발 및 텅스텐 소재 DB 구축 – (고인성 대면재 제조기술 개발) 핵융합로 증식블랑켓 및 디버터용 고인성 플라즈마 대면재 제조기술 개발 – (대면재 물성 DB 구축) 텅스텐 소재의 고열부하 및 고입자속 환경 노출에 따른 특성변화 및 중성자 조사된 텅스텐 소재의 물성 변화 관련 데이터베이스 구축
기능소재	○ 삼중수소 증식재로 사용되는 리튬 세라믹스 및 중성자 증배재로 사용되는 베릴륨 화합물 개발 및 물성 DB 구축 – (기능소재 원료확보 기술개발) 핵융합 연료시스템의 기능소재(삼중수소 증식재 및 중성자 증배재 원료)로 사용될 리튬 화합물 및 베릴륨 화합물 등의 원료 합성 기술개발 – (기능소재 제조기술 개발) 삼중수소 증식재용 리튬 세라믹스 및 중성자 증배재용 베릴륨 화합물 제조 기술 개발 – (기능소재 물성 DB 구축 및 성능 검증) 증식블랑켓의 설계 및 안전성 검증을 위한 기능소재 물성 DB 구축 및 성능 평가

< 핵융합 소재 세부기술개발 마일스톤 >

범례 (산) 산업체 (학) 대학 (연) 연구기관 — 자체개발 / 국제협력

세부기술	현재기술 수준	2026	2030	2035	2038	최종목표
구조재	TRL3 (40%)	(연)(산) 저방사화 철강재 제조 및 용접기술 개발		(연)(산) 대량생산 및 접합 기술 개발	(연)(산) 대량생산 표준절차 확립 및 물성 DB 구축	(TRL6, 100%) 저방사화 철강재료 대량제조기술 개발 및 물성 DB 구축
대면재	TRL3 (35%)	(연)(학)(산) 고밀도·고순도 텅스텐 계열 소재 개발		(연)(산) 고인성 텅스텐 계열 소재 개발	(연)(산) 고성능 텅스텐 소재 제조기술 개발	(TRL6, 100%) 핵융합 증식블랑켓 및 디버터용 고인성 플라즈마 대면재 제조기술 개발
기능소재	TRL4 (58%)	(연)(산) 리튬-6 등 증식재 원료확보 및 화합물 제조기술 개발		(연)(산) 해수 리튬 동위원소 추출기술 및 기능소재 제조기술 개발	(연)(산) 고성능 증식재 분말 대량합성기술 개발 및 기능소재 물성 DB 구축	(TRL6, 100%) 리튬 세라믹스 및 베릴륨 화합물 개발 및 물성 DB 구축
인프라			(연)(산) 연료시스템 연구 인프라 구축	중성자 조사손상 등 영향평가 및 DB 확보, 고에너지 중성자 조사시험 및 물성 평가 베릴륨 화합물 합성·제조·가공 기술 개발		핵융합 소재개발을 위한 정확한 물성평가 및 검증 수행

① 구조재

□ 정의

○ 핵융합로용 내벽부품의 구조재로 사용되는 저방사화 철강재료의 대량 제조기술 개발, 용접/접합기술 개발 및 물성 DB 구축을 통한 표준화

< 구조재 기술 개요 >

세세부기술	기술개요
저방사화 구조재 제조기술 개발	• 핵융합로용 증식블랑켓 및 디버터 등의 내벽부품 구조재로 사용될 저방사화 철강재 대량 제조기술 개발
저방사화 구조재 용접 및 접합 기술개발	• 저방사화 철강재를 이용하여 핵융합로 증식블랑켓 및 디버터 등과 같은 복잡한 형상의 부품 제작에 필요한 용접 및 접합기술 개발
저방사화 구조재 물성 DB 구축 및 표준화	• 핵융합로용 증식블랑켓 및 디버터 설계 파라미터로 사용하기 위해 한국형 저방사화 철강재 ARAA의 각종 물성 DB를 구축하고, 국내외 산업기술기준 등재를 통한 표준화

□ 기술개발 필요성

○ (방사성폐기물 최소화) 핵융합 플라즈마에서 발생되는 고에너지 중성자에 대한 조사 저항성 및 고온 안정성을 유지하며, 장주기 방사성 폐기물을 저감시키기 위해 저방사화 철강재료 필요

○ (타분야와 연계) 저방사화 철강재는 증식블랑켓 및 디버터 등과 같은 핵융합로용 내벽부품 제작에 활용

○ (기존사업 한계) ITER TBM 과제를 통해 ARAA의 단기·장기 물성 일부가 평가되고 있으나, TBM에 운전되는 환경을 기준으로 평가가 진행되고 있으므로 실증로 기준으로는 일부분에 해당

○ (산업경쟁력 확보) 대량제조기술 개발 및 제조 공정을 확립하고, 이를 이용하여 산업기술기준 등재 등 표준화를 통해 산업경쟁력 강화 및 실증로 건설 대비

□ 저방사화 구조재 제조기술 개발 동향

○ (국외) 대부분의 핵융합 에너지 개발국은 저방사화 철강재를 개발하여 보유하고 있으나, 6톤급 이상의 대량 제조기술은 아직 많은 보고가 되고 있지는 않은 상황

○ (국내) 한국형 저방사화 철강재료인 ARAA(Advanced Reduced Activation Alloy)를 개발하였으며, 실험실 규모 이상인 6톤급 대량 제조를 시도하였으나, 품질 균일성에 있어서 해결해야 할 연구 주제 존재

□ 저방사화 구조재 용접 및 접합 기술개발 동향

○ (국외) 대부분의 핵융합 에너지 개발국은 저방사화 철강재를 보유하고 있으며, 최근에는 용접봉 개발도 진행 중

– 일본과 유럽 등에서 증식블랑켓의 사각형 냉각 채널을 확산접합을 이용해서 제작하는 방법 개발 중

– 유럽에서 삼중수소 투과 방지를 목적으로 스테인리스 파이프에 알루미나나 이트리아 코팅을 수행한 연구 수행

○ (국내) ITER TBM 과제를 통해 한국형 저방사화 철강재인 ARAA를 개발하였으며, ARAA 모재를 용접봉으로 활용하여 TBM 제작에 적용 고려

– 확산접합을 이용하여 저방사화 철강재를 접합하는 기술개발이 소형 샘플로 시도된 적은 있으나, 구체적인 접합 조건 설정 및 평가 연구는 부재

– 평면의 저방사화 철강재 샘플에 알루미나 코팅 가능성 여부를 검토한 내용의 연구가 수행되고 있으나, 파이프와 같은 형상에 알루미나 코팅 관련 연구 부재

□ 저방사화 구조재 물성 DB 구축 및 표준화 동향

○ (국외) 주요국은 장·단기 물성 DB를 구축 중이며, 일본은 중성자원 건설 착수

– 일본과 유럽에서는 자국에서 개발한 저방사화 철강재를 실증로에 적용하기 위한 단기·장기 물성 데이터베이스를 구축하고 있는 상황

– 유럽, 미국, 일본 등에서 운영되고 있는 고속로를 활용하여 최대 80 dpa 이상 조사된 조사재에 대한 물성 평가가 진행 중

– 이온 조사 시험법을 활용하여 고에너지 중성자 조사시험을 모사하고 있으며, 유럽과 일본은 핵융합 플라즈마에서 발생되는 중성자와 비슷한 에너지를 가지는 중성자원 설계를 마치고 건설에 착수

○ (국내) ITER TBM 과제를 통해 일부 연구개발 중이지만, 고에너지 중성자 시험을 위한 인프라 부재

- ITER TBM 과제를 통해 ARAA의 단기·장기 물성 일부가 평가되고 있으나, TBM에 운전되는 환경을 기준으로 평가가 진행

- ITER TBM 과제를 통해 TBM이 사용되는 환경인 최대 3 dpa까지의 중성자 조사시험이 연구용 원자로인 하나로를 활용하여 수행되고 있으나, 하나로의 불안정한 운영으로 인해 조사재 물성 확보가 어려운 상황

- 구조재에 중성자 조사를 실시하여 물성 평가를 수행할 수 있는 국내 시설이 연구용 원자로 이외에는 없는 상황이므로 고에너지 중성자 조사시험은 수행하지 못하는 상황

- 구조재의 중성자 조사손상을 모사하기 위한 대체 수단으로 이온 조사 시험이 있으며, 이는 원자력(연)에 구축된 중이온가속기 기반 재료이온조사시험시설을 활용 중이며, 장치 고도화와 시험체계 확보가 진행 중

□ 기술확보 전략

○ (기술내용) 저방사화 철강재료의 대량 제조기술, 용접·접합기술 개발 및 물성 DB구축

- 핵융합로용 내벽부품의 구조재로 사용하기 위한 저방사화 철강재 제조 기술 개발

- 6톤급 이상의 저방사화 철강재 대량 제조 공정 확립

- 파이프, 볼트 등과 같은 다양한 형상의 저방사화 철강재 제조기술 개발

- 저방사화 철강재 용접봉 및 균일한 용접특성을 보유한 자동용접기술 개발

- ARAA 판재 성능 검증 및 품질 검증을 위해 기준이 되는 ARAA 물성 DB 확보

○ (확보전략) 출연(연)과 대학은 조사시험, DB 구축 등 재료 관련 요소기술개발을 수행하고, 산업체는 개발된 요소기술들을 종합하여 제조기술 개발

- 산·연 협력 중심으로 제조기술 및 물성 DB 구축을 수행하고, 코팅 기술 및 용접봉 개발 등 요소기술은 대학에서 수행

- 구조재 개발 및 DB 구축 관련 인프라 확보를 통한 검증 및 평가 수행

< 구조재 기술 확보전략 >

세세부기술	개발 내용	핵심주체		주체별 역할
저방사화 구조재 제조기술 개발	• 저방사화 철강재 대량 제조 기술 개발	자체 개발	출연(연)	• 대량제조 전략 수립 및 관리 • 필요형상 정의 및 관리
			산업체	• 대량제조 기술 개발 • 형상제조 기술 개발
저방사화 구조재 용접 및 접합 기술개발	• 저방사화 철강재 용접기술 개발	자체 개발	출연(연)	• 용접방법 결정 및 조건 설정
			대학	• 용접봉 개발
			산업체	• 각종 용접기술 개발
	• 저방사화 철강재 접합기술 개발	자체 개발	출연(연)	• 접합방법 결정 및 조건 설정
			산업체	• 확산접합법 개발
	• 삼중수소 투과 방지 코팅기술 개발	자체 개발	출연(연)	• 삼중수소 투과 방지 조건 수립
			대학	• 코팅기술 개발 및 평가
저방사화 구조재 물성 DB 구축 및 표준화	• 비조사재 단기•장기 물성 평가	자체 개발	출연(연)	• 비조사재 물성 DB 구축
			산업체	• 공인인증기관을 통한 시험 수행
	• 원자로 및 이온조사시설 활용 조사재 물성 평가 • 중성자원 활용 조사재 물성 평가	자체 개발	출연(연)	• 중성자 조사시험 및 물성 DB 구축

< 구조재 기술 개발 로드맵 >

세세부기술	현재 기술 수준	로드맵				최종목표
		2026	2030	2035	2038	
저방사화 구조재 제조기술 개발	TRL 3 (40%)	소형 대량생산 및 각종형상 제조기술개발		대형 제조기술 개발	대형 대량제조기술 개발	• (TRL6, 100%) 균일한 물성을 지닌 20톤급 이상의 저방사화 철강재 제조 공정 확립
		– 6톤급 대량 제조기술 개발 – 파이프, 볼트 등 다양한 형상 제조기술 개발		– 20톤급 대량 제조 기술 검증 – 제조 재현성 평가	– 대량생산 및 형상 제조 절차 확립	
		인프라 구축		인프라 활용 검증•평가		
		– 조사후 시험시설 – 조사재 시험시설		– 저방사화 철강재 제조기술 검증•평가		
저방사화 구조재 용접 및 접합 기술개발	TRL 3 (50%)	전자빔 및 레이저 용접기술 개발		철강재 접합기술 개발		• (TRL6, 100%) TIG, Laser, EB 등 각종 용접 절차서 마련 및 접합 기술, 코팅기술 개발
		– 철강재 용접봉 후보재 개발 – 각종 용접•접합•코팅 기술 개발		– 용접•접합•코팅 절차서 마련		
		인프라 구축		인프라 활용 기술 개발		
		– 조사후 시험시설 – 조사재 시험시설		– 용접, 접합 및 투과방지 코팅기술 개발•검증		
저방사화 구조재 물성 DB 구축 및 표준화	TRL 3 (30%)	물성 DB 구축		중성자 조사시험	핵융합 환경에서 물성 DB 구축	• (TRL6, 100%) 1만시간 이상 크립, 14MeV 급 고에너지 중성자를 이용한 1 dpa 이상 조사재 물성 평가
		– 비조사 단기 물성 DB 구축 – 장기(1만시간) 물성 DB 구축		– 철강재 조사손상 평가 검증	– 저방사화 철강재 물성 DB 구축	
		인프라 구축		인프라 활용 시험 및 평가		
		– 중성자 생산시설 – 조사후 시험시설 – 조사재 시험시설		– 중성자 조사손상 모사 등 영향평가 – 중성자 조사시험 및 조사재 물성 평가 – 저방사화 철강재 장•단기 물성평가		

□ 연도별 투자재원(안)

○ (인력소요 및 예산) 저방사화 구조재 제조기술 및 용접·접합기술 개발, DB 구축 등 관련 전문인력 운영을 위한 제반비용(인건비, 연구활동 관련 직접비, 간접비 등 1MY/2억원)으로 100억원 도출

– 저방사화 구조재 제조기술 개발과 관련하여 대용량 철강재 제조기술 개발, 표준 제조 절차서 개발 등의 R&D 수행을 위해 연평균 1.0MY 필요

– 저방사화 구조재 용접 및 접합기술개발과 관련하여 저방사화 철강재 용접봉 개발, 각종 용접기술 개발, 확산접합 기술 개발 등의 R&D 수행을 위해 1.3MY 필요

– 저방사화 구조재 물성 DB 구축 및 표준화와 관련하여 각종 물성 평가 및 분석, 중성자 및 이온을 이용한 조사 특성 평가, 각종 물성 DB 구축 등의 R&D 수행을 위해 2.1MY 필요

○ (연구재료비) 개발 단계에서의 대용량 저방사화 철강재 제조, 저방사화 용접봉 개발, 각종 용접 및 접합, 장단기 물성 평가, 이온 및 중성자를 활용한 조사시험 등이 필요함에 따라 관련 예산 237억원 소요

< 구조재 개발 예산(안) 및 인력(안) >

(억원/명)

세세부기술	구분	'25	'26	'27	'28	'29	'30	'31	'32	'33	'34	'35	'36	'37	'38	합계
저방사화 구조재 제조기술 개발	예산	6	6	7	7	7	5	5	6	6	6	6	6	–	–	73
	인력	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	–	–	12
저방사화 구조재 용접 및 접합 기술개발	예산	8	8	8	10	10	12	12	–	–	–	–	–	–	–	68
	인력	1	1	1	1	1	2	2	–	–	–	–	–	–	–	9
저방사화 구조재 물성 DB 구축 및 표준화	예산	8	9	10	17	17	17	17	15	15	15	15	15	13	13	196
	인력	1	1	1	1	1	1	2	3	3	3	3	3	3	3	29
계	예산	22	23	25	34	34	34	34	21	21	21	21	21	13	13	337
	인력	3	3	3	3	3	4	5	4	4	4	4	4	3	3	50

□ 재원 및 연구인력 조달 방안

○ (재원) 핵융합(연) 기본사업을 통해 기초연구를 수행하며, 제조·검증 관련 핵심기술 개발 재원은 신규사업을 통해 수행

* 핵융합(연) 기본사업 : ITER TBM 사업, 핵융합 실증로 핵심공학기술 개발 사업

○ (연구인력) 핵융합(연), 원자력(연), 재료(연) 등에서 약 3명의 인력이 관련 연구개발을 수행 중

– 원자력 및 고온소재 분야의 전문가그룹 활용 및 장기연구개발을 위해 대학을 통한 신진인력 지속확보 예정

② 대면재 기술

□ 정의

○ 핵융합 증식블랑켓 및 디버터용 고인성 플라즈마 대면재 제조기술 개발 및 텅스텐 소재 DB 구축

< 대면재 기술 개요 >

세세부기술	기술개요
고인성 대면재 제조기술 개발	• 핵융합로 증식블랑켓 및 디버터용 고인성 플라즈마 대면재 제조기술 개발
대면재 물성 DB 구축	• 플라즈마 대면재로 사용되는 텅스텐 소재의 고열부하 및 고입자속 환경 노출에 따른 특성변화 및 중성자 조사된 텅스텐 소재의 물성 변화 관련 데이터베이스 구축

□ 기술개발 필요성

○ (타분야와 연계) 대면재는 증식블랑켓 및 디버터 등 고열·입자속을 견디는 부분에 활용되는 소재로서 안정석 확보를 위한 기술 확보 필요

* 핵융합로 증식블랑켓 및 디버터에 플라즈마 대면재인 텅스텐과 구조재인 저방사화 철강재와의 접합기술 필요

○ (경제성 제고) 대면재인 텅스텐의 손상 정도에 따라서 증식블랑켓과 디버터의 사용수명이 결정될 수 있는 중요한 요인

* 텅스텐은 반복적인 부하와 입자와의 충돌에 의해 피로균열 발생 및 침식·삭막 현상 발생

□ 고인성 대면재 제조기술 개발 동향

○ (국외) 실증로 적용을 위한 복합재료 개념연구 및 접합기술개발 진행 중

– ITER 디버터 적용을 위해 유럽, 호주, 중국 등에서 제조되고 있는 텅스텐 판재의 성능검증을 수행하고 있으며, 특히, 유럽에서는 실증로 적용을 위한 고인성 텅스텐 및 텅스텐 복합재료 개념에 대한 연구 수행 중

- ITER 디버터를 조달하는 유럽, 일본, 중국 등은 텅스텐과 CuCrZr에 대한 접합 기술 개발을 완료하고 ITER 디버터 조달을 준비 중

  * 실증로 적용 목적의 텅스텐과 저방사화 철강재 간 접합기술 개발 관련 기초연구 착수

○ (국내) ITER에서 검증하고 있는 텅스텐 소재들에 대한 분석을 자체적으로 수행하고, 대학에서 텅스텐 소결에 관해 기초연구를 수행 중

- ITER 디버터 개념인 텅스텐과 CuCrZr의 접합 관련 기초연구 수행 중

  * 텅스텐과 저방사화 철강재의 접합 연구 부재

□ 대면재 물성 DB 구축 동향

○ (국외) 유럽을 중심으로 대학 실험실 규모 뿐만 아니라 ITER 디버터 대형 목업에 대한 성능검증 일환으로 고열부하 및 고입자속에 대한 손상 평가 활발히 진행

- 텅스텐 대면재를 연구하는 모든 국가에서는 원자로를 활용하여 중성자 조사손상에 대한 평가를 진행하고 있으며, 텅스텐 조사재의 물성 데이터베이스 구축 중

○ (국내) 실험실규모에서의 손상평가 연구는 수행 중

- 대학 실험실 규모에서 텅스텐 시험편에 대한 고열부하 및 고입자속에 대한 손상 평가 기초연구를 수행하였으며, 최근에는 KSTAR 텅스텐 디버터 업그레이드 관련 고열부하 검증 실험을 원자력(연)의 KoHLT-EB 장비를 활용하여 진행 중

  * 텅스텐 대면재에 대한 중성자 조사재 물성 평가와 관련된 연구 부재

- 원자력(연)에 구축된 플라즈마 조사장비(PBIF)를 이용해 기초 수준의 텅스텐 입자속 평가 진행 중

□ 기술확보 전략

○ (기술내용) 대면재 제조기술 개발 및 특성·물성 평가 관련 제반기술 개발

- 반복되는 응력에 따른 균열 발생 최소화를 위한 고인성 텅스텐 제조 기술 개발

- 플라즈마 대면재(텅스텐)와 구조재(저방사화 철강재) 간 접합을 위한 최적화된 중간재 선택 및 접합기술 개발

- 증식블랑켓 및 디버터의 대면재로 사용되는 텅스텐의 운전환경인 고열속의 반복 부하에 따른 텅스텐 소재 건전성 평가 및 대면재 수명 예측 기술 개발

○ (확보전략) 산학연 협력을 통한 대면재 재료개발 및 물성 DB를 구축하고, 인프라를 활용한 검증 및 평가 수행

– 대면재 제조기술 확보를 위해 학·연을 중심으로 시험·평가 등을 수행하며, 산업체는 대형 소재 제조기술 개발

– 학·연 중심으로 대면재 부품 안전성 확보를 위한 물성평가 데이터 구축 수행

– 인프라 구축을 통해 고인성 텅스텐 특성 평가 및 고열부하·고입자속 시험 수행

< 대면재 기술 확보전략 >

세세부기술	개발 내용	핵심 주체		주체별 역할
고인성 대면재 제조기술 개발	• 고인성 텅스텐 제조기술 개발	자체 개발	출연(연)	고인성 텅스텐 기준 설정 및 개발 전략 수립
			대학	텅스텐 소결 기술 개발
			산업체	텅스텐 대형 소재 제조기술 개발
대면재 물성 DB 구축	• 대면재 내환경 특성평가	자체 개발	출연(연)	텅스텐 소재 고열부하 시험
			대학	텅스텐 소재 손상 평가
	• 대면재 조사재 물성 평가	자체 개발	출연(연)	텅스텐 소재 중성자 조사시험 및 물성 평가

< 대면재 기술 개발 로드맵 >

세세부기술	현재 기술 수준	로드맵				최종목표
		2026	2030	2035	2038	
고인성 대면재 제조기술 개발	TRL 3 (40%)	고밀도•고순도 텅스텐 계열 소재 개발		고인성 텅스텐 계열 소재 개발	고성능 텅스텐 소재 제조기술 개발	• (TRL6, 100%)) 순도>99.94%, 밀도>19g/cm^3, 경도(HV30)>410 이상의 고인성 텅스텐 계열 소재 개발
		– 고순도•고밀도 텅스텐 제조기술 개발		– 고인성 텅스텐 제조기술 개발	– 고성능 텅스텐 확보	
		인프라 구축		인프라 활용 제작 검증•평가		
		– 조사후 시험시설 – 조사재 시험시설		– 고인성 텅스텐 특성 평가 – 접합재 특성 평가		
대면재 물성 DB 구축	TRL 3 (30%)		고열속•고입자 특성평가	중성자 조사손상 평가	고인성 대면재 물성 평가	• (TRL6, 100%)) 고인성 텅스텐 소재의 각종 물성 DB 구축
			– 고열속•고입자 DB 축적	– 중성자 조사 특성 DB 구축	– 고인성 텅스텐 물성 DB 축적	
		인프라 구축		인프라 활용 시험 및 평가		
		– 중성자 생산시설 – 조사후 시험시설 – 조사재 시험시설		– 고에너지 중성자 조사시험 – 고에너지 중성자 조사재 물성평가 – 고열부하•고입자속 시험		

□ 연도별 투자재원(안)

○ (인력소요 및 예산) 대면재 제조기술 및 물성 DB 구축 등 관련 전문인력 운영을 위한 제반비용(인건비, 연구활동 관련 직접비, 간접비 등 1MY/2억원)으로 48억원 도출

- 고성능 대면재 제조기술 개발과 관련하여 고순도, 고밀도 텅스텐 소결 기술 개발, 고인성 텅스텐 소재 제조 기술 개발, 대면적 텅스텐 소재 제조 기술 개발 등의 R&D 수행을 위해 연평균 1.3MY 필요

- 대면재 물성 DB 구축과 관련하여 텅스텐 소재의 고열속/고입자속 평가, 중성자 조사 특성 평가 등의 R&D 수행을 위해 연평균 1.9MY 필요

○ (연구재료비) 개발 단계에서의 텅스텐 소재 제조 기술 개발, 대면적 텅스텐 제조 기술 개발, 텅스텐 소재의 중성자 조사 시험 등이 필요함에 따라 관련 예산 70억원 소요

< 대면재 개발 연도별 예산(안) 및 인력(안) >

(억원/명)

세세부기술	구분	'25	'26	'27	'28	'29	'30	'31	'32	'33	'34	'35	'36	'37	'38	합계
고인성 대면재 제조 기술 개발	예산	4	4	5	9	6	4	5	-	-	-	-	-	-	-	37
	인력	1	1	1	2	2	1	1	-	-	-	-	-	-	-	9
대면재 물성 DB 구축	예산	-	-	-	-	-	-	5	10	11	11	11	11	11	11	81
	인력	-	-	-	-	-	-	1	2	2	2	2	2	2	2	15
계	예산	4	4	5	9	6	4	10	10	11	11	11	11	11	11	118
	인력	1	1	1	2	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	24

□ 재원 및 연구인력 조달 방안

○ (재원) 핵융합(연) 기본사업을 통해 기초연구를 수행하며, 제조·평가 관련 핵심기술 개발 재원은 신규사업을 통해 수행

* 핵융합(연) 기본사업 : ITER TBM 사업, 핵융합 실증로 핵심공학기술 개발 사업

○ (연구인력) 핵융합(연), 국내 대학 등에서 약 2명의 인력이 관련 연구개발 수행 중

- 텅스텐 관련 산업체 활용 및 장기연구개발을 위해 대학을 통한 신진인력 지속확보

③ 기능소재

□ 정의

○ 삼중수소 증식재로 사용되는 리튬 세라믹스 및 중성자 증배재로 사용되는 베릴륨 화합물 개발 및 물성 DB 구축

< 기능소재 기술 개요 >

세세부기술	기술개요
기능소재 원료 확보 기술 개발	• 핵융합 연료시스템의 기능소재(삼중수소 증식재 및 중성자 증배재 원료)로 사용될 리튬 화합물 및 베릴륨 화합물 등의 원료 합성 기술 개발
기능소재 제조기술 개발	• 삼중수소 증식재용 리튬 세라믹스 및 중성자 증배재용 베릴륨 화합물 제조 기술 개발
기능소재 물성 DB 구축 및 성능 검증	• 증식블랑켓의 설계 및 안전성 검증을 위한 기능소재 물성 DB 구축 및 성능 평가

□ 기술개발 필요성

○ (핵융합 연료 핵심소재) 기능소재는 삼중수소 생산에 밀접한 관계가 있는 핵심소재로서, 핵융합 연료생산 극대화를 통해 (준)연속 운전 및 핵융합 경제성 확보에 필수적인 기술

– 증식재와 증배재는 우수한 삼중수소 증식 성능 및 중성자 증배 성능이 요구됨에 따라, 기능소재의 안정성을 위해 고결정성을 가진 리튬 및 베릴륨 화합물 합성기술 개발 필요

○ (타분야 연계) 증식블랑켓을 구성하는 주요 소재로서, 증식블랑켓의 설계 건전성 확보를 위한 필수 기술

– 기능소재는 증식블랑켓에서 구조재로 구성된 공간에 페블베드 형태로 사용되며, 핵융합 실증로 증식블랑켓에는 수십톤 규모의 리튬 세라믹스 페블이 사용될 예정

□ 기능소재 원료확보 기술개발 동향

○ (국외) EU, 일본, 인도 등 대부분의 핵융합에너지 개발국에서는 베릴륨 취급시설을 구축하여 활발한 연구활동 진행 중

– EU는 핵융합로용 삼중수소 증식재 원료 확보를 위해 동위원소 확보방안 마련 중

– 일본 QST에서는 분리막을 활용한 리튬 동위원소 분리 기술을 확보하고 성능향상 연구를 진행 중이며, 핵융합로용 원료 확보를 위해 해수로부터 리튬을 추출하는 기술개발 진행 중

– 인도는 일본과 동일하게 삼중수소 증식재로 Li2TiO3 분말 합성 연구 수행 중

○ (국내) 핵융합(연) 및 일부 대학에서 핵융합로용 삼중수소 증식재 원료로 Li2TiO3를 사용하기 위해 Li2TiO3 분말 합성 관련 원천기술 연구 수행

– 1990년대 후반 대학 실험실에서 리튬 동위원소 분리 가능성을 위한 기초연구가 진행되었으나, 후속 연구 부재

– 지질(연)에서 이차전지 원료를 확보하기 위해 해수로부터 리튬을 추출하는 기술을 개발하여 파일럿플랜트 건설 등 상용화 추진하였으나, 추출비용 및 효율 등과 같은 경제성 문제로 중단

□ 기능소재 제조기술 개발 동향

○ (국외) 리튬 세라믹스의 종류에 따라 페블 제조 방법이 다르지만, 핵융합에너지 개발국들은 독자적인 페블 제조 기술 보유

– 베릴륨 및 베릴륨 화합물 증배재 제조기술 개발을 위해 베릴륨 취급시설을 구축하고 꾸준히 연구를 수행해 오고 있으며, 최근 유럽에서는 육각 블록 형태의 베릴륨 화합물을 가공할 수 있는 시설 및 기술개발을 진행하고 있는 상황

– 또한, 최근에는 대량생산에 대한 중요성도 인식하고 있으므로 생산 수율 향상을 위한 개선도 진행하고 있는 상황

○ (국내) 삼중수소 증식재용 페블 제조 관련 원천기술을 개발하였지만, 핵융합로용 중성자 증배재와 관련된 연구는 부재

– 핵융합(연)에서 삼중수소 증식재용 페블 제조를 위한 슬러리 액적 습식법의 원천기술을 개발하였으며, 대량생산을 위한 슬러리 액적 토출 자동화 장치도 개발하였으나 생산량이 연간 50 kg 수준으로 성능향상이 필요한 상황

– 현재까지 국내에서는 핵융합로용 중성자 증배재와 관련된 연구는 수행되지 않고 있으며, 베릴륨을 취급할 수 있는 연구시설도 국내에 미구축된 상황

□ 기능소재 물성 DB 구축 및 성능 검증 동향

○ (국외) 삼중수소 증식재 및 중성자 증배재 페블을 제조하고 있는 모든 국가에서는 독자적으로 페블 및 페블베드의 화학적/열적 특성 평가를 위한 시스템을 구축하고 있으며, 물성 DB 확보 중

– 페블 및 페블베드에 대한 기계적 물성 평가 시스템을 독자적으로 구축하여 물성 DB 구축 진행 중

– 기능소재를 연구하고 있는 모든 국가에서는 연구용 원자로 또는 중성자원을 활용하여 각 국가에서 개발된 기능소재를 대상으로 중성자 조사시험을 수행하여 삼중수소 증식 성능 평가 및 페블의 조사 손상에 대한 평가 진행 중

○ (국내) ITER TBM 프로그램을 통해 페블 및 페블베드의 화학적/열적 특성을 평가할 수 있는 방법론에 대한 연구 진행 중

– 단일 페블에 대한 압축강도 평가 시스템은 ITER TBM 프로그램을 통해 구축하여 물성 DB를 구축해 나가고 있으나, 페블베드에 대한 기계적 물성 평가 시스템은 구축되어 있지 않은 상황

- 국내에서는 기능소재의 중성자 조사 시험을 수행할 수 있는 인프라가 구축되어 있지 않으므로 국제협력을 통한 실험계획만 수립하고 있는 상황

□ 기술확보 전략

○ (개발기술) 기능소재(삼중수소 증식재, 베릴륨 증배재) 확보 및 원료분리합성농축기술, 대량생산기술 개발

- 800℃ 고온 및 중성자 조사환경에서 안정성을 가진 리튬 세라믹스 형태의 삼중수소 증식재 개발
- 증식블랑켓의 삼중수소 증식 성능향상을 위한 베릴륨 증배재 개발
- 핵융합로용 삼중수소 증식재의 원료로 사용하기 위한 Li-6 분리·농축 기술개발

  * 자연계에 존재하는 리튬의 92.5%가 Li-7이며, Li-6는 약 7.5% 수준

- 해수로부터 리튬을 추출하여 증식재 원료로 활용할 수 있는 기술 개발

  * 효율적인 원료확보를 위해 해수 리튬 추출공정에서 리튬 동위원소 분리·농축 동시 수행기술 개발

- 핵융합 실증로에서 사용하기 위한 수십톤 규모 생산을 위한 대량생산 기술 개발
- 증식블랑켓의 삼중수소 증식성능 향상을 위해 고온(약 700℃)에서 산소와 화학적 반응성이 뛰어난 베릴륨 화합물 잉곳 제조 기술 및 증식블랑켓의 설계에 따라 베릴륨 화합물 원하는 형태로 가공할 수 있는 기술 개발
- 기능소재 페블과 구조재와의 접촉에 의해 발생될 수 있는 화학적 반응성에 대한 DB를 구축하여 구조재의 안전성 검증 기술
- 기능소재 페블 및 페블베드의 압축강도, 반복 하중에 의한 기계적 물성 변화, 크립 특성 등과 같은 기계적 물성 DB 구축 기술

○ (확보전략) 출연(연) 및 대학을 중심으로 사양설정 및 각종 특성평가를 실시하고, 산업체를 통한 대량합성 및 생산기술 개발 수행

- 산학연 협력을 통해 기능소재 원료 확보 기술을 개발하고, 핵심요소기술은 출연(연)을 통해 확보
- 기능소재 사양 및 가공기술은 출연(연)이 수행하고, 이를 기반으로 산업체를 통한 증식재 페블 대량생산 기술 확보
- 학연 중심의 기능소재 물성 DB 구축 및 성능 검증 수행

< 기능소재 기술 확보전략 >

세세부기술	개발 내용	핵심주체		주체별 역할
기능소재 원료 확보 기술 개발	• 리튬 세라믹스 합성기술	자체 개발	출연(연)	• 리튬 세라믹스 분말 사양 결정 및 전략 수립
			대학	• 고성능 리튬 세라믹스 분말 합성 기술 개발
			산업체	• 분말 대량합성 기술 개발
	• 베릴륨 화합물 합성기술 • 리튬 동위원소 분리•농축 기술 • 해수 리튬 동위원소 추출 기술	자체 개발	출연(연)	• 베릴륨 화합물 합성 기술 개발 • 리튬 동위원소 분리/농축 기술 개발 • 해수 리튬 동위원소 추출 기술 개발
기능소재 제조기술 개발	• 리튬 세라믹스 페블 제조 기술	자체 개발	출연(연)	• 증식재 페블 사양 설정
			산업체	• 증식재 페블 대량 생산 기술 개발
	• 베릴륨 화합물 잉곳 제조 기술	자체 개발	출연(연)	• 베릴륨 화합물 잉곳 제조 및 가공 기술 개발
기능소재 물성 DB 구축 및 성능 검증	• 페블 및 페블베드 화학적/열적 특성 평가	자체 개발	출연(연)	• 페블 및 페블베드 열적 특성 평가
			대학	• 페블 및 페블베드 화학적 특성 평가
	• 페블 및 페블베드 기계적 특성 평가 • 기능소재 중성자 조사 특성 평가	자체 개발	출연(연)	• 페블 및 페블베드 기계적 특성 평가 • 기능소재 중성자 조사특성 평가

< 기능소재 기술 개발 로드맵 >

세세부기술	현재 기술 수준	로드맵				최종목표
		2026	2030	2035	2038	
기능소재 원료확보 기술개발	TRL 3 (40%)	Li-6 농축 및 증식재 분말 합성공정 개발		해수 리튬 동위원소 추출기술 개발	고성능 증식재 분말 대량 합성기술 개발	• (TRL6, 100%) Li-6 30% 이상 농축된 고성능 기능소재 원료 합성 기술 개발
		- 고밀도 리튬 함유 화합물 및 베릴륨 화합물 합성 기술 개발 - 리튬 동위원소 분리기술 확보		- 리튬 동위원소 농축기술 확보	- 리튬 동위원소 농축 원료 및 베릴륨 화합물 원료 확보	
		인프라 구축		인프라 활용 합성기술 개발		
		- 베릴륨 취급시설		- 베릴륨 화합물 합성 기술 개발		
기능소재 제조기술 개발	TRL 3 (65%)	리튬 화합물 제조기술 및 베릴륨 제조/가공기술 개발		기능소재 제조기술 개발		• (TRL6, 100%)) 100kg/y 이상의 증식재 페블 대량 제조 및 베릴륨 화합물 제조/가공 기술 개발
		- 리튬 화합물 페블 제조 검증 - 베릴륨 화합물 잉곳 소결기술 개발		- 페블 대량생산 기술개발 - 블록형태 기능소재 가공기술 개발		
		인프라 구축		인프라 활용 제조•가공 기술 개발		
		- 베릴륨 취급시설		- 베릴륨 화합물 잉곳 제조기술 개발 - 베릴륨 화합물 블록 가공기술 개발		
기능소재 물성 DB 구축 및 성능검증	TRL 3 (70%)	기능소재 페블 및 페블베드 물성 DB 축적		중성자 조사시험 DB 축적	기능소재 물성 DB 확보	• (TRL6, 100%)) 상온 ~ 700℃까지의 기능소재 페블 및 페블베드 물성 DB 구축 및 증식/증배 성능 검증
		- 비농축 리튬 세라믹스 증식재 페블 및 페블베드 물성 평가		- 중성자원을 활용한 증식재 및 증배재 성능평가	- 증식재 및 증배재 물성 DB 확보 및 성능검증	
		인프라 구축		인프라 활용 시험 및 검증		
		- 중성자 생산시설 - 베릴륨 취급시설 - 조사후 시험시설 - 조사재 시험시설		- 증식재 페블 및 페블베드 화학적•열적•기계적 특성 평가 - 기능소재 중성자 조사시험 - 기능소재 삼중수소 증식 성능평가 등		

□ 연도별 투자재원(안)

○ (인력소요 및 예산) 기능소재 원료확보 및 제조기술 개발, 물성 DB 구축 등 관련 전문인력 운영을 위한 제반비용(인건비, 연구활동 관련 직접비, 간접비 등 1MY/2억원)으로 142억원 도출

- 기능소재 원료 확보기술 개발과 관련하여 리튬 및 베릴륨 화합물 합성, 리튬 동위원소 분리/농축, 해수 리튬 추출 등의 R&D 수행을 위해 연평균 1.6MY 필요

- 기능소재 제조기술 개발과 관련하여 리튬 화합물 페블 제조, 베릴륨 화합물 블록 및 페블 제조, 기능소재 대량생산 기술 개발 등의 R&D 수행을 위해 연평균 2.4MY 필요

- 기능소재 물성 DB 구축 및 성능 검증과 관련하여 기능소재 열적/기계적 물성 평가, 중성자원을 활용한 기능소재 성능 평가 등의 R&D 수행을 위해 연평균 2.7MY 필요

○ (연구재료비) 개발 단계에서의 리튬 동위원소 분리/농축/합성, 베릴륨 화합물 합성, 기능소재 페블 제조, 중성자 조사시험, 삼중수소 측정 및 분석 등이 필요함에 따라 관련 예산 216억원 소요

< 기능소재 개발 예산(안) 및 인력(안) >

(억원/명)

세세부기술	구분	'25	'26	'27	'28	'29	'30	'31	'32	'33	'34	'35	'36	'37	'38	합계
기능소재 원료 확보 기술 개발	예산	11	11	13	13	13	17	6	4	5	5	5	5	5	5	118
	인력	2	2	2	2	2	3	2	1	1	1	1	1	1	1	22
기능소재 제조기술 개발	예산	-	-	7	10	12	12	14	15	13	13	13	-	-	-	109
	인력	-	-	2	2	3	3	3	3	2	2	2	-	-	-	22
기능소재 물성 DB 구축 및 성능 검증	예산		-	-	-	10	10	11	13	13	14	15	15	15	15	131
	인력	-	-	-	-	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3	27
계	예산	11	11	20	23	35	39	31	32	31	32	33	20	20	20	358
	인력	2	2	4	4	7	8	7	7	6	6	6	4	4	4	71

□ 재원 및 연구인력 조달 방안

○ (재원) 핵융합(연) 기본사업 및 핵융합선도기술개발사업을 통해 기초연구를 수행하며, 제조·평가 관련 핵심기술 개발 재원은 신규사업을 통해 수행

* 핵융합(연) 기본사업 : ITER TBM 사업

○ (연구인력) 핵융합(연), 국내 대학 등에서 약 2명의 인력이 관련 연구개발 수행 중

- 이차전지 분야의 전문가그룹 활용 및 장기연구개발을 위해 대학을 통한 신진인력 지속확보

④ 핵융합 소재 개발 소요 연구시설

□ 정의

○ 핵융합 환경에서 사용되는 재료의 정확한 물성 평가 및 검증을 위한 제반시설

< 핵융합 소재 개발 세부시설 개요 및 필요성 >

세부 시설	시설 개요	필요성
중성자 생산시설	• 전자기력을 활용하여 중양자 운동에너지를 증가시킴으로서, 표적에 조사하는 형태의 핵융합 관련 시험에 필요한 중성자를 생산하는 시설	• 소재 신뢰성 평가 및 공학데이터 확보에 활용
조사후 시험시설	• 중성자에 의해 조사된 각종 시험유닛의 원격 조작을 통한 해체, 분석 및 평가를 수행하는 핫셀 시험시설	• 중성자에 조사된 시험유닛의 평가를 위한 방사능 차폐 연구시설 구축 • 고에너지 중성자에 의해 조사된 핵융합 재료의 정확한 물성 평가 및 데이터베이스 구축
조사재 시험시설	• 중성자 조사재 및 방사성 동위원소를 이용하여 시험하는 시험시설	• 핵융합 재료의 미세구조 관찰을 통해 소재 건전성 및 특성 평가 • 방사성 물질을 이용한 재료 연구 및 방사화된 핵융합 재료의 정확한 물성 평가 및 데이터베이스 구축
베릴륨 취급시설	• 중성자 증배재 개발 및 평가를 위한 베릴륨 취급 시험시설	• 중성자 증배재용 베릴륨 화합물을 합성 및 가공하는 기초 원천기술 확보

□ 국내외 시설구축 사례

○ (해외) EU, 일본, 중국 등이 자국 핵융합소재 연구개발을 목적으로 시설 운영·구축 중

< 핵융합 소재 관련 해외 시설 및 활용가능 여부 >

세부시설	국외	활용가능 여부 및 사유
중성자 생산시설	• (중국) HINEG : 운영 중 • (EU) IFMIF-DONES : 건설 중 • (일본) A-FNS : 건설 중	• **(불가)** 자국 핵융합 재료에 대한 고에너지 중성자 조사 물성 DB 구축을 위한 시험 우선 예상
조사후 시험시설	• EU, 일본, 미국, 중국, 인도, 러시아 등 연구용 원자로를 운영하고 있는 시설에서는 조사후 시험시설을 동시에 운영	
조사재 시험시설	• 많은 국가에서 시설 관리 및 운영의 편리성에 따라 조사후 시험시설과 함께 조사재 시험시설도 동시에 운영하고 있음	
베릴륨 취급시설	• 미국 : INL, Materion • 독일 : KBHF • 프랑스 : AREVA • 일본 : QST • 중국 : SWIP	• **(불가)** 베릴륨 및 베릴륨 화합물, 베릴륨 부품 등은 전략물자로 분류되어 수출입에 제한이 있으므로 한국형 중성자 증배재 개발을 위해서는 국내 인프라 구축 필요

○ (국내) 중성자를 이용한 재료 조사 및 평가 시설은 현재 한국원자력연구원에서 운영하고 있는 하나로 연구용 원자로가 유일

< 핵융합 소재 관련 국내 유관 시설 및 활용가능 여부 >

세부시설	국내	활용가능 여부 및 사유
조사후 시험시설	• 원자력(연) IMEF	• **(불가)** 핵융합 플라즈마에서 발생되는 중성자 에너지보다 낮은 에너지 중성자를 이용하는 시설로서, 실제 핵융합 환경에서 재료 검증을 하기에는 한계 존재

□ 확보전략

○ (공동연구) 핵융합 재료 연구를 위한 중성자 생산시설, 조사후 시험시설, 조사재 시험시설 및 베릴륨 취급시설 등은 국내에 기 구축되어 운영되고 있는 유사 시설 및 참고 시설이 없으므로 국제공동연구 및 협력을 통해 리스크 해결

< 핵융합 소재 인프라 사양 및 확보전략 >

세부시설	사양	확보전략
중성자 생산시설	• Neutron Yield ~2x10^{15} n/s(forward), Neutron Flux ~5x10^{12} n/cm^2/s • Neutron Energy > 10 MeV (~ 10 He-appm/dpa) • CW 운전 (연속운전 24 hrs 이상) • ECR ion source : 2.45 GHz, Over 10 mA CW D+, 20 keV/u • Low Energy Beam Transport : 1~2 m with 1~2 Solenoids, $\epsilon\_(N,rms,x)$ < 0.2 mm-mrad • Radio Frequency Quadrupole : 4 vane copper cavity, 162.5 or 176 MHz (TBD), ~4 m, >250 kW, 1.5 MeV/u • Medium Energy Beam Transport : ~3 m with 4 Quads + 2 Rebunchers, $\epsilon\_(N,rms,z)$ < 0.12 MeV-deg • High Energy Beam Transport • Superconducting RF Linac • 표적 및 부대설비 : 고체형 Beryllium 표적, Cooling system, Vacuum system 구성	증식블랑켓 구축 인프라 공동활용
조사후 시험시설	• 방사선 관리구역 내의 연구시설 구축을 위한 방사능 차폐 연구실 구축 - 전계방사형 주사전자현미경 : 주요 사양 해상도 - 15 kV에서 0.8 nm (no stage bias) - 1 kV에서 1.4 nm (no stage bias) - EDS 에너지 분해능 : 126 eV - Be부터 분석 가능 • 전계방사형 투과전자현미경 : 주요 사양 해상도 - Resolution Point to point : 0.19nm - TEM Lattice image : 0.10nm - STEM-HADDF image : 0.16nm • 레이저 플래시 장비 : 핵융합 소재의 열물성 측정 - Furnace : 25 °C to 1575 °C (SiC furnace) - Heating rates : 0.01 K/min to 50 K/min (furnace-dependent) - Isothermal stability : 0.02 K/min	국제공동연구 및 협력

세부시설	사양	확보전략
	• 만능재료시험기 : 핵융합 소재의 기계적 물성 측정 – Load Capacity : 50 kN ~ 300 kN – Speed : 0.0001 ~ 560 mm/min – Furnace : 25 °C to 1600 °C in Air – Position Control Resolution : 1.014 nm • 충격시험기 : 융합 소재의 충격 흡수에너지 및 연성-취성 천이온도 측정 – Impact Energy : 300 J - 900 J – Release Angle : 150 degree – Maximum Hammer Speed : 5.3 m/s • 나노인덴터 : 표면 및 국부 영역에 대한 경도, 탄성계수 등의 물성 측정 – 최대하중 : ~ 2 N – 힘 측정 분해능 : 0.02 uN 이하 – 최대 변위 : 200 um – 변위 측정 분해능 : 0.002 nm	
조사재 시험시설	• 전계방사형 주사전자현미경 : 주요 사양 해상도 – 15 kV에서 0.8 nm (no stage bias) – 1 kV에서 1.4 nm (no stage bias) – EDS 에너지 분해능 : 126 eV – Be부터 분석 가능 • 전계방사형 투과전자현미경 : 주요 사양 해상도 – Resolution Point to point : 0.19nm – TEM Lattice image : 0.10nm – STEM-HADDF image : 0.16nm • 고분해능 유도 결합 플라즈마 질량분석기 : 리튬 동위원소 비율 정량 측정 – High sensitivity: Get accurate and precise multi-element analysis down to pg·L-1 concentrations for all resolutions • 레이저 플래시 장비 : 핵융합 소재의 열물성 측정 – Furnace : 25 °C to 1575 °C (SiC furnace) – Heating rates : 0.01 K/min to 50 K/min (furnace-dependent) – Isothermal stability : 0.02 K/min • 만능재료시험기 : 핵융합 소재의 기계적 물성 측정 – Load Capacity : 50 kN ~ 300 kN – Speed : 0.0001 ~ 560 mm/min – Furnace : 25 °C to 1600 °C in Air – Position Control Resolution : 1.014nm • 충격시험기 : 융합 소재의 충격 흡수에너지 및 연성-취성 천이온도 측정 – Impact Energy : 300 J - 900 J – Release Angle : 150 degree – Maximum Hammer Speed : 5.3 m/s • 나노인덴터 : 표면 및 국부 영역에 대한 경도, 탄성계수 등의 물성 측정 – 최대하중 : ~ 2 N – 힘 측정 분해능 : 0.02 uN 이하 – 최대 변위 : 200 um – 변위 측정 분해능 : 0.002 nm	국제공동연구 및 협력
베릴륨 취급시설	• 방전 플라즈마 소결로 – Working Diameter : ~ 600 mm – Working Pressure : ~ 150 MPa – Max. Temperature : ~ 2300 °C – Heating Rate : ~ 1000 °C/min • 기타 주사전자현미경, 레이저 프래시 장비, 만능재료시험기 등 공용 장비 구축	국제공동연구 및 협력

□ 확보일정

○ ('30년대초 완료) 중장기 연구개발일정을 고려하여, '30년대 초까지 설치 및 시운전 완료

< 핵융합 소재 인프라 확보 일정 >

세부시설	구축 계획
조사후 시험시설	•총 구축 일정 : 2028~2031년(총 4년) – 2028년 : 기업 입찰 및 건축 설계 – 2029년 : 연구장비 구매 – 2030년 : 연구장비 시운전 – 2031년 : 시운전 및 최적화
조사재 시험시설	•총 구축 일정 : 2029~2031년(총 3년) – 2029년 : 기업 입찰 및 건축 설계 – 2030년 : 연구장비 구매 – 2031년 : 시운전 및 최적화
베릴륨 취급시설	•총 구축 일정 : 2028~2031년(총 4년) – 2028년 : 기업 입찰 및 건축 설계 – 2029년 : 연구장비 구매 – 2030년 : 연구장비 시운전 – 2031년 : 시운전 및 최적화

□ 소요예산 및 인력

○ (소요예산) 유사시설의 구축예산 등을 기준으로, 구축하고자 하는 세부시설스펙을 고려하여 세부예산 도출

○ (인력) 시설 구축을 위한 산업체 대응인력 및 운영, 유지보수를 위한 전문인력 등을 고려하여 도출

< 핵융합 소재 인프라 구축 연도별 예산(안) 및 인력(안) >

(억원/명)

세부기술	구분	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	합계
중성자 생산시설	예산	증식블랑켓 인프라 공동활용														
	인력															
조사후 시험 시설	예산	–	–	–	20	23	24	24	–	–	–	–	–	–	–	91
	인력	–	–	–	3	3	3	3	–	–	–	–	–	–	–	12
조사재 시험 시설	예산	–	–	–	–	24	39	35	–	–	–	–	–	–	–	98
	인력	–	–	–	–	3	3	3	–	–	–	–	–	–	–	9
베릴륨 취급시설	예산	–	–	–	13	15	16	14	–	–	–	–	–	–	–	58
	인력	–	–	–	2	2	2	2	–	–	–	–	–	–	–	8
합계	예산	–	–	–	33	62	79	73	–	–	–	–	–	–	–	247
	인력	–	–	–	5	8	8	8	–	–	–	–	–	–	–	29

□ 재원 및 연구인력 조달 방안

○ (재원) 신규사업을 통해 인프라 구축예산 확보

○ (인력) 원자력(연)에서 운영하고 있는 조사후 시험시설 및 국내 대학에서 운영하고 있는 재료 분석시설의 전문가그룹 활용 및 신진인력 지속 확보

□ 활용방안

○ 핵융합 재료의 정확한 이해를 바탕으로 안전성 향상에 기여하고, 자원 재활용 기술 개발을 수행하여 경제성 향상에 기여함

○ 해외의 중성자 생산시설에서 조사된 재료에 대해서도 조사후 시험이 충분히 가능하므로 여러 나라와의 국제공동연구 시설로 활용이 가능함

○ 향후 ITER에서 시험된 TBM의 조사후 시험에도 본 시설을 활용가능

4. 연료주기

□ 기술정의

○ 삼중수소의 안전한 취급과 핵융합 연속 반응 유지를 위해 연료를 공급·순환시키는 기술

□ 기술개발 필요성

○ (전략기술) 전략물자인 삼중수소를 직접 취급하는 공정의 특성으로 기술도입이 어렵고, 기술의 우위가 없을 경우 정보 교류 조차 제한되기 때문에 독자적 기술 역량 보유 필요

- ITER를 비롯한 핵융합 실증로는 DT 핵융합을 기본으로 열에너지 생산을 목표로 하며, 이는 대량 고농도 삼중수소 취급이 필요

- ITER 삼중수소 플랜트의 조달은 미국, 유럽, 일본, 한국에 국한되어 있으며 이는 대량 삼중수소 취급 기술에 대한 수출통제 문제에 따른 결과

- 핵융합 실증로 연료주기 기술개발에 착수함에 있어, 주요 요소기술로 판단되는 기술의 국산화는 실증로 이후 상용로 개발에 있어 기술 자립의 출발점이 될 것으로 판단

- ITER 연료주기 기술개발 상황은 삼중수소 취급 기술 측면에서 그 취급량과 프로세싱 속도에서 기존 삼중수소 취급 시설과 비교 불가능하게 높은 수준

○ (수용성 제고) 핵융합 연료로 사용하는 삼중수소의 외부 누출 방지기술 확보를 통해 작업자 및 환경 보호 실현

* 핵융합 실증로는 전기 생산뿐만 아니라 연료로 사용하는 삼중수소 자체 생산을 위해 대량의 삼중수소 취급해야 하며, 이를 위해 안전을 담보할 수 있는 취급기술 확보 필요

□ 파급성

○ (기타 핵융합 유형 활용) 핵융합 에너지 생산을 D-T 핵반응으로 제한할 경우, 삼중수소 취급 기술은 핵융합 연료주기의 필수적인 요소 기술

- 핵융합 유형에 따라 연료 소모 효율에 차이를 보이지만, 대부분의 삼중수소가 미연소 상태로 회수되고 다시 재사용되기 때문에, 진공배기 및 삼중수소 플랜트는 요건에 따라 시스템 구성의 변화가 있더라도 필수적으로 필요

○ (타 분야 기술 활용) 수소에너지 활용을 위한 요소기술은 수소동위원소로 삼중수소 취급 기술개발에 활용 가능하며, 다만 삼중수소의 방사성에 따른 취급에 안전을 확보하는 방향으로 기술의 선정 및 강화가 진행

– 삼중수소 안전한 저장과 안정적인 활용을 위한 금속수소화물 기술은 수소저장 기술의 하나로 개발되고 있으며, 삼중수소 누출을 최소화하기 위한 저장 금속 선정 및 시스템 구성 방식 제한적으로 활용 중

– 미량 삼중수소 회수를 위한 삼중수소수 생성 및 수전해를 통한 수소동위원소 생산은 환경으로 방출되는 삼중수소를 최소화 하고 회수 재사용하도록 활용되고 있는 상황

< 연료주기 세부기술 분류 >

세부기술	세부내용
삼중수소 안전	○ 대량 삼중수소 취급시 누출가능한 미량 삼중수소 회수를 통해 작업자를 보호하고 환경 배출을 최소화하기 위한 기술 – (대량 삼중수소 취급 안전기술) 물상태로 미량 포함된 삼중수소를 수소동위원소 상태로 변환하여 삼중수소 재사용 강화 및 삼중수소 환경 방출을 최소화하기 위한 시스템 개발 – (삼중수소 플랜트 공정가스 분석 및 환경시료 측정기술 개발) 삼중수소 플랜트 내 삼중수소를 포함한 공정가스 농도측정 분석기술 및 환경 영향평가를 위한 측정기술 개발
삼중수소 정제•분리•저장 기술	○ 핵융합 반응기 배기가스 연료 재사용을 위한 삼중수소•중수소 회수, 농축 및 저장 기술 – (수소동위원소 정제시스템 개발) 핵융합 반응기 배기가스 중 수소동위원소 재사용을 위한 정제 – (수소동위원소 분리시스템 개발) 수소동위원소 내 삼중수소 농축 및 분리 기술 개발 – (삼중수소 저장•공급 시스템 개발) 안전한 삼중수소 저장 및 취급 관련 공정기술 개발
핵융합 연료 공급	○ 핵융합 반응에 의한 높은 에너지의 발산 및 안정적인 핵융합 반응을 지속하기 위해 초저온 고체 상태의 중수소, 삼중수소를 만들어 고속으로 토카막 내부에 공급 – (핵융합 연료 펠릿주입 시스템) 다양한 크기 펠릿 생산 및 플라즈마 내 공급•리사이클 시스템 개발 – (핵융합 연료 가스주입 시스템) 다양한 공정 가스를 안정적으로 주입하기 위한 시스템 개발
핵융합 진공배기	○ 핵융합로 연속운전을 위한 내부 고진공 유지 및 미사용 삼중수소를 안정적으로 회수하기 위한 배기 시스템 – (핵융합 연료 고진공 배기기술 개발) 핵융합로 대규모 연속운전의 고진공상태 유지하고 미사용 연료 회수를 위한 고진공 배기장치 개발 – (핵융합 연료 저진공 배기기술 개발) 고진공 배기를 지원하고 안정적으로 삼중수소 플랜트와 연계하기 위한 저진공 배기 시스템 개발

< 연료주기 세부기술개발 마일스톤 >

범례: 산 산업체 학 대학 연 연구기관 | 자체개발 | 국제협력

세부기술	현재기술 수준	2026	2030	2035	2038	최종목표
삼중수소안전	TRL2 (23%)	연 학 산 대형장치내미량삼중수소회수공정개념 및 공정가스분석방법연구		연 학 산 미량삼중수소회수시나리오개발 및 공정가스분석방법검증	연 학 산 실증로급삼중수소회수시스템 및 공정가스분석기술개발	(TRL6,100%)실증로급 삼중수소회수시스템 및 공정가스분석기술 개발
삼중수소 정제분리저장	TRL2 (35%)	연 학 산 시스템(기기)개념도출 및 설계		연 학 산 시스템성능평가 및 DB 축적	연 학 산 실증로급시스템개발	(TRL6,100%)실증로급 정제분리저장시스템개발
핵융합 연료공급	TRL3 (35%)	연 학 산 시스템주요기기모델링 및 검증장치제작		연 학 산 주입공정검증 및 Manifold 설계	연 학 산 실증로급펠릿·가스주입시스템 설계(안)도출	(TRL6,100%)실증로급 연속펠릿제조 및 가스주입 시스템개발
핵융합 진공배기	TRL3 (20%)	연 학 산 고진공/저진공통합공정평가모델개발		연 학 산 저온·대안펌프성능평가 및 저진공배기후보기기성능평가	연 학 산 실증로급고진공·저진공 배기시스템개발	(TRL6,100%)실증로급 고진공·저진공배기시스템 개발
인프라			연 산 삼중수소회수플랜트 구축	연 산 연료주기공정시험시설구축	구축된연구인프라를기반으로 ITER윤전결과흡수 및 실증로적용가능기술확보	수소동위원소가스 취급 및 분석수행

① 삼중수소 안전

□ 정의

○ 대량 삼중수소 취급시 누출가능한 미량 삼중수소 회수를 통해 작업자를 보호하고 환경 배출을 최소화하기 위한 기술

< 삼중수소 안전 기술 개요 >

세세부기술	기술개요
대량 삼중수소 취급 안전기술 개발	• 대량 삼중수소를 취급함에 있어 환경 및 작업자의 안전 확보 등 법적 요건을 준수하기 위한 시스템 개발 • 물상태로 미량 포함된 삼중수소를 수소동위원소 상태로 변환하여 삼중수소 재사용 강화 및 삼중수소 환경 방출을 최소화하기 위한 시스템 개발
삼중수소 플랜트 공정가스 분석 및 환경시료 측정기술 개발	• 삼중수소 플랜트 내 삼중수소를 포함한 공정가스 농도 측정을 위한 분석기술 개발 및 다양한 삼중수소 농도를 포함한 공정가스 분석기술 검증 • 삼중수소 취급 시설 주변 액체 및 고체 상태로 존재하는 물체의 삼중수소 농도를 측정하여 대량 삼중수소 취급에 따른 환경 영향 평가 수행을 위한 측정기술 개발

□ 기술개발 필요성

○ (수용성 제고) 핵융합 연료로 사용하는 삼중수소의 외부 누출 방지기술 확보를 통해 작업자 및 환경 보호 실현

– 삼중수소 취급 시설에서 대량 삼중수소를 취급함에 있어 환경 방출을 모니터링하고 환경에 대한 영향 평가

* 핵융합 실증로는 전기 생산뿐만 아니라 연료로 사용하는 삼중수소 자체 생산을 위해 대량의 삼중수소 취급해야 하며, 이를 위해 안전을 담보할 수 있는 취급기술 확보 필요

○ (경제성 제고) 미량의 삼중수소 회수를 위해 ppm 수준의 물상태 삼중수소수가 발생하며, 이를 기체상태 삼중수소로 변환하여 재사용을 통한 활용 극대화

○ (안정적 연료공급) 핵융합 실증로의 안정적인 운전을 위해 계통 내 삼중수소 재고량 파악 등 (준)연속 운전 실현을 위한 안정적 연료공급 실현

□ 대량 삼중수소 취급 안전기술 개발 동향

○ (국외) 삼중수소의 안전한 취급을 위해 Enclosure 적용 중이며, ITER의 경우 수십 g 삼중수소를 한번에 취급하기 위한 공정 개발 중

- 삼중수소 취급 안전을 확보하기 위해 Enclosure 적용하고, 시설별 제한된 삼중수소 재고량을 취급하도록 운영 중

- 시설에서 삼중수소 취급 능력에 따라 적합한 시스템을 구축하여 활용 중이며, ITER 경우 수십 g 삼중수소를 한번에 취급하도록 공정 개발 중

  * 핵융합 적용을 위한 ITER WDS 공정개발이 진행되고 있으며, 회수된 삼중수소의 재사용 및 안전한 폐가스 환경 배출 목표

- 캐나다를 중심으로 중수로 원전에서 생성되는 삼중수소 회수를 위한 TRF를 개발하고 삼중수소를 포함한 대량 중수 처리 중

○ (국내) 월성 TRF에 수 g 삼중수소 회수를 위한 시스템 설치 및 운영 중

- 월성 TRF에 수 g 삼중수소 회수를 위해 캐나다 AECL에서 개발한 삼중수소 회수시스템 설치하였고, 한 번에 취급하는 삼중수소 양을 제한하여 삼중수소 누출의 최대양을 제한하여 운전

- 월성 TRF 건설을 위한 반응추출탑 적용 국산 촉매 개발 수행

□ 삼중수소 플랜트 공정가스 분석 및 환경시료 측정기술 개발 동향

○ (국외) 고농도 삼중수소 분석 방법은 개발되었지만, 저농도는 다양한 분석 방법 개발 중

- 고농도 삼중수소 분석 관련, Off-line 삼중수소 분석은 여러 가지 기기를 활용하여 방법이 개발되어 있으나, On-line 분석 방법은 Raman Spectrometry를 부분적으로 시험 중

- 저농도 삼중수소 분석 관련, 다양한 분석 방법이 개발되고 있으며, 공정가스 내 운전 조건 및 삼중수소 농도에 따른 적용 범위 검증 중

- 원자력발전소 및 폐기물관리시설에 대한 삼중수소 생성, 배출, 환경시료 내 삼중수소, 인근 주민 피폭 측정 등을 통해 환경평가 데이터 구축

○ (국내) 고농도 및 저농도 삼중수소 분석기술이 도입되었으며, 원자력시설에서 삼중수소 농도 측정결과 축적 중

- 고농도 삼중수소 분석기술은 월성 TRF 생성된 삼중수소 농도 측정을 위한 GC가 설치·운영하고 있으나, 시설 운전에 국한하여 적용

- 저농도 삼중수소 분석을 위해 Proportional Counter 및 Liquid Scintillation Counter 방법 등을 도입하여 시료 분석에 활용 중

- 국내 원자력 시설에서 삼중수소 발생량 및 환경 시료 내 삼중수소 농도 측정 결과 축적 중

□ 기술확보 전략

○ (기술내용) 대량 삼중수소 취급에 따라 누출 가능한 미량 삼중수소까지 회수를 위한 제반기술 개발

- ppm 수준의 삼중수소 오염 공정가스 내에서 HT를 HTO 형태로 변환하여 물상태로 삼중수소를 회수하는 기술

- Enclosure 또는 Room 내 방출된 삼중수소를 단시간 내 Enclosure 정제 공정을 통해 삼중수소 회수를 위한 기술

- ppm 수준의 물상태 삼중수소수를 기체상태 삼중수소로 변환하여 재사용하기 위한 공정 기술 개발

- 핵융합 반응기에 연료를 공급하기 위해 공급가스의 성분을 분석하는 기술 개발

- 삼중수소 침투량 정도를 표면 및 부피 기준 측정기술 개발

- 삼중수소가 각 시스템의 설계 및 운전 조건에 따라 작업자와 환경에 미치는 영향을 평가하는 기술개발

○ (확보전략) 삼중수소 취급 경험을 보유한 원자력 등 유관분야 산학연 전문기관 등과 협력을 통한 자체개발 추진

- 출연(연)은 기기 및 공정개발을 수행하고, 대학은 공정시스템 모사 평가를 수행, 산업체를 이를 기반으로 기기 제작 및 상세공정 개발 추진

< 연료주기 기술 확보전략 >

세세부기술	개발 내용	핵심주체		주체별 역할
대량 삼중수소 취급 안전기술 개발	• 탈삼중수소를 위한 미량 기체 상태 삼중수소 회수기술 개발	자체 개발	출연(연)	• 기기 및 공정 개발
			대학	• 공정 시스템 모사 평가
			산업체	• 기기 제작 및 상세공정 개발
	• 탈삼중수소를 위한 미량 물 상태 삼중수소 회수기술 개발	자체 개발	출연(연)	• 기기 및 공정 개발
			대학	• 공정 시스템 모사 평가
			산업체	• 기기 제작 및 상세공정 개발
삼중수소 플랜트 공정가스 분석 및 환경시료 측정기술 개발	• 삼중수소 플랜트 고농도 및 저농도 삼중수소 공정가스 분석 기술 개발	자체 개발	출연(연)	• 기기 및 공정 개발
			대학	• 공정 시스템 모사 평가
			산업체	• 기기 제작 및 상세공정 개발
	• 액체형 및 고체형 시료 미량 삼중수소 농도 분석 방법 개발	자체 개발	출연(연)	• 기기 및 공정 개발
			대학	• 공정 시스템 모사 평가
			산업체	• 기기 제작 및 상세공정 개발

< 연료주기 기술 개발 로드맵 >

세세부기술	현재 기술 수준	로드맵				최종목표
		2026	2030	2035	2038	
대량 삼중수소 취급 안전기술 개발	TRL 2 (25%)	대형 미량 삼중수소 회수공정 개념 연구		미량 삼중수소 회수시스템 운전시나리오 개발	실증로급 삼중수소 회수 시스템 개발	• (TRL6, 100%) 대형 미량 삼중수소 회수시스템 공정 도출
		– 미량 삼중수소 회수 검증 – 대형 미량 삼중수소 회수 공정개념 도출		– 미량 삼중수소 회수시스템 활용 실증로 적용 운전시나리오 도출	– 실증로 적용 미량 삼중수소 회수 시스템 후보(안) 도출	
		인프라 구축		인프라 활용 성능 검증		
		– 삼중수소 회수플랜트 구축 – 연료주기공정 시험시설 구축		– 미량 삼중수소 회수 성능 검증 – 미량 삼중수소 회수 및 처리		
삼중수소 플랜트 공정가스 분석 및 환경시료 측정기술 개발	TRL 2 (20%)	삼중수소 ppm 수준 공정가스 분석방법 연구		공정가스 분석방법 검증	실증로급 공정가스 분석방법 개발	• (TRL6, 100%) 다양한 삼중수소 포함 공정가스 분석방법 도출
		– 삼중수소 공정시료 분석 방법 도출 – 삼중수소 ppm 수준 공정가스 분석방법 도출		– 0.1 g-T 취급 공정가스 on/off line 분석방법 실험적 검증	– 고•저농도 삼중수소 공정가스 분석방법 개발	
		인프라 구축		인프라 활용 분석 및 측정		
		– 삼중수소 회수플랜트 구축 – 연료주기공정 시험시설 구축		– 미량 삼중수소 공정가스 분석 – 수소동위원소 취급 및 삼중수소 측정		

□ 연도별 투자재원(안)

○ (인력소요 및 예산) 전문인력을 활용한 회수기술 개발 및 공정가스 분석기술 개발 관련 인력운영을 위한 제반비용(인건비, 연구활동 관련 직접비, 간접비 등 1MY/2억원)으로 194억원 도출

– 대량 삼중수소 취급 안전기술 개발분야는 공정모사, 기초실험, 공정분석 등을 위해 연평균 총 3.7MY 필요

- 삼중수소 플랜트 공정가스 분석 개발분야는 다양한 삼중수소 농도별 on/off-line 측정 방법 도출을 위해 연평균 총 3.2MY 필요

○ (연구재료비) 연구재료비로서, 미량 삼중수소 회수장비, 삼중수소 취급설비, 검증시설 등이 필요함에 따라 관련 예산 225억원 산출

< 연료주기 기술 개발 예산(안) 및 인력(안) >

(억원/명)

세세부기술	구분	'25	'26	'27	'28	'29	'30	'31	'32	'33	'34	'35	'36	'37	'38	합계
대량 삼중수소 취급 안전기술 개발	예산	17	18	18	15	15	15	15	13	16	20	18	18	18	18	234
	인력	2	2	2	2	2	2	2	4	4	6	6	6	6	6	52
삼중수소 플랜트 공정가스 분석 및 환경시료 측정기술 개발	예산	12	13	14	12	13	9	10	11	12	17	16	16	15	15	185
	인력	2	2	2	2	2	2	2	3	3	5	5	5	5	5	45
합계	예산	29	31	32	27	28	24	25	24	28	37	34	34	33	33	419
	인력	4	4	4	4	4	4	4	7	7	11	11	11	11	11	97

□ 재원 및 연구인력 조달 방안

○ (재원) 핵융합(연) 기본사업을 통해 기초연구를 수행하며, 취급안전기술과 공정가스 분석 및 환경시료 측정기술 개발 재원은 신규사업을 통해 수행

* 핵융합(연) 기본사업 : 핵융합 실증로 핵심공학기술 개발 사업

○ (연구인력) 유관분야 전문가그룹을 우선활용하고, 신진인력의 사업참여를 통한 교육 등 전문인력 양성 및 조달

- 원자력 분야 삼중수소 취급경험을 보유한 전문가 그룹 활용

② 삼중수소 정제·분리·저장 기술

□ 정의

○ 핵융합 반응기 배기가스 연료 재사용을 위한 고농도 삼중수소 안전 취급 및 삼중수소·중수소 회수, 농축 및 저장 기술

< 삼중수소 정제·분리·저장 기술 개요 >

세세부기술	기술개요
수소동위원소 정제 시스템 개발	• 핵융합 반응기 배기가스 중 수소동위원소 재사용을 위한 정제
수소동위원소 분리 시스템 개발	• 삼중수소를 연료로 재사용하기 위한 수소동위원소 내 삼중수소 농축 및 분리 기술
삼중수소 저장•공급 시스템 개발	• 핵융합 연료공급을 위한 안전한 삼중수소 저장 및 취급 관련 공정기술 개발

□ 기술개발 필요성

○ (경제성 제고) 중수소·삼중수소 핵융합 반응 특성상 공급된 연료의 미량만이 반응하기 때문에 남은 연료를 회수하여 재사용을 통한 경제성 제고

○ (안전성 제고) 삼중수소는 화학적·물리적으로 수소와 매우 흡사하게 작용하며, 안정적으로 가두어 저장하는 것은 삼중수소 안전 취급에 있어 매우 중요

□ 수소동위원소 정제 시스템 개발 동향

○ (국외) 소량 삼중수소를 이용한 공정 적용 사례는 있지만, ITER 기준 대량 정제 목적의 공정은 없으며, 현재 ITER 적용을 목적으로 공학적 검증 수행 중

– 타분야에서 소량 삼중수소를 이용한 공정이 적용된 바는 있으나, ITER 기준 대량 수소동위원소 정제를 목적으로 삼중수소가 활용되지는 않았으며, ITER 경우 수소를 이용한 Lab Scale 범위에서 수행

– ITER 적용을 목적으로 Pt 촉매 및 Pd 분리막을 활용한 복합적인 반응기를 제작하여 수소를 이용한 공학적 검증 수행

○ (국내) ITER 조달을 기준으로 적용되는 Pd 분리막 및 Pt 촉매를 적용한 실험실 조건의 수소를 이용한 기초실험 수행

□ 수소동위원소 분리 시스템 개발 동향

○ (국외) H/D 초저온 증류가 중수소 생산을 위해 부분적으로 적용 중이며, 핵융합 연료주기 개발을 위해 평형반응기를 함께 적용 중

– 수소동위원소 분리 중 H/D 초저온 증류는 중수소 생산을 위해 부분적으로 적용되고 있으며, 핵융합 연료주기 분야에서 대량의 삼중수소를 안정적으로 다루기 위해 적용

- 핵융합 연료주기 개발을 위해 수소동위원소 분리 목적으로 초저온 증류와 함께 평형반응기 적용

○ (국내) 초저온 증류가 월성 TRF에서 적용되어 사용 중

- 수소동위원소 분리를 위한 초저온 증류가 월성 TRF에 적용

- 삼중수소 농축을 위해 캐나다 AECL에서 설계한 월성 TRF에 적용되어 사용 중

□ 삼중수소 저장·공급 시스템 개발 동향

○ (국외) 그램 단위의 저장용기는 상용화되었지만, 대량의 삼중수소 공정가스 취급 관련 연구는 부재

- 그램 단위의 삼중수소 저장용기의 경우 상업적으로 제작·판매되고 있으며, 미국 LANL에서는 200g 삼중수소 저장 가능한 용기의 평가를 수행

- 소량의 공정가스 취급 공정 및 실제 삼중수소를 이용한 실험적 평가가 진행되었으나, 대량의 삼중수소 공정가스 취급 연구 부재

- 삼중수소 운반용기 재고량 측정기기가 상용화되어 있으며, 각 시설에 요건에 적합 정도 확인이 필요한 상황

○ (국내) ITER 조달 사업을 통해 70g 수준의 저장용기를 개발중이며, 공급시스템 공정 개발 중

- ITER 조달을 위한 삼중수소 저장용기가 70g 저장 용량을 기준으로 개발 중

- ITER 조달 사업을 통해 ITER 연료공급을 위한 시스템 공정개발 개발 중

- ITER 적용 가능한 70g 삼중수소 용량의 공정 내 재고량 측정 기술 개발 중

□ 기술확보 전략

○ (기술내용) 고농도 삼중수소 안전 취급 및 삼중수소·중수소 회수, 농축 및 저장 관련 제반기술 개발

- 다양한 물질이 혼합되어 있는 배기가스 중 수소동위원소 만을 선택적으로 분리하여 이 중 핵융합 반응물로 사용되는 삼중수소 및 중수소를 재사용하기 위한 기술 개발

- 핵융합 배기가스 중 소량의 삼중수소를 회수하고, 배기가스 주 정제공정 이후 소량 잔류 삼중수소 추가회수를 위한 공정기술 개발

– 공정가스의 빠른 평형반응 유도를 위해 안정적인 Heat Exchange Network 구성 기술개발

– 대량의 삼중수소를 안전하게 저장하기 위한 전용 저장용기를 개발하고, 저장된 삼중수소의 재고량을 측정 및 분석하여 안정적인 실증로 연료 공급을 위한 기술

– 핵융합 실증로 내 삼중수소의 재고량 관리를 위한 재고량 측정 및 반출입 공정 구축을 위한 기술

○ (확보전략) 삼중수소 취급 경험을 보유한 원자력 등 유관분야 산학연 전문기관 등과 협력을 통한 자체개발 추진

– 출연(연)은 기기 및 공정개발을 수행하고, 대학은 공정시스템 모사 평가를 수행, 산업체를 이를 기반으로 기기 제작 및 상세공정 개발 추진

< 삼중수소 정제·분리·저장 기술 확보전략 >

세세부기술	개발 내용	핵심주체		주체별 역할
수소동위원소 정제 시스템 개발	• 수소동위원소 정제 공정 개발	자체 개발	출연(연)	• 기기 및 공정 개발
			대학	• 공정 시스템 모사 평가
			산업체	• 기기 제작 및 상세공정 개발
	• 소량 삼중수소 회수 공정 개발	자체 개발	출연(연)	• 기기 및 공정 개발
			대학	• 공정 시스템 모사 평가
			산업체	• 기기 제작 및 상세공정 개발
수소동위원소 분리 시스템 개발	• 수소동위원소 분리 초저온 증류공정 기술 개발	자체 개발	출연(연)	• 기기 및 공정 개발
			대학	• 공정 시스템 모사 평가
			산업체	• 기기 제작 및 상세공정 개발
	• 수소동위원소 평형반응기 기술 개발	자체 개발	출연(연)	• 기기 및 공정 개발
			대학	• 공정 시스템 모사 평가
			산업체	• 기기 제작 및 상세공정 개발
삼중수소 저장•공급 시스템 개발	• 삼중수소 저장용기 기술 개발	자체 개발	출연(연)	• 기기 및 공정 개발
			대학	• 공정 시스템 모사 평가
			산업체	• 기기 제작 및 상세공정 개발
	• 삼중수소 저장 및 공급 공정 기술 개발	자체 개발	출연(연)	• 기기 및 공정 개발
			대학	• 공정 시스템 모사 평가
			산업체	• 기기 제작 및 상세공정 개발
	• 삼중수소 재고량 측정기술 및 삼중수소 운반용기 개발	자체 개발	출연(연)	• 기기 및 공정 개발
			대학	• 공정 시스템 모사 평가
			산업체	• 기기 제작 및 상세공정 개발

< 삼중수소 정제·분리·저장 기술 개발 로드맵 >

세세부기술	현재 기술 수준	로드맵				최종목표
		2026	2030	2035	2038	
수소 동위원소 정제 시스템 개발	TRL 2 (25%)	정제 시스템 주요 기기모델 개발		정제 시스템 통합공정 실험적 검증	실증로급 정제시스템 개발	• (TRL6, 100%) 40Pa.m^3/s 수소동위원소 연속 정제공정 도출
		– 수소동위원소 생산 소형반응기 수치모델 개발 – 40Pa.m^3/s 수소동위원소 정제시스템 주요기기 모델 개발 및 공정모사 수행		– 40Pa.m^3/s 수소동위원소 정제시스템 성능평가 DB 축적	– 수소동위원소 정제 시스템 후보(안) 도출	
		인프라 구축		인프라 활용 원료 취급 및 공정개발		
		– 삼중수소 회수플랜트 구축 – 연료주기공정 시험시설 구축		– 수소동위원소 및 공정가스 취급 – 수소동위원소 연속공정 개발		
수소 동위원소 분리 시스템 개발	TRL 2 (30%)	대량 수소동위원소 분리 시스템 개념 도출		0.1g 삼중수소 기준 실증로 적용 운전시나리오 도출	실증로급 대량 수소동위원소 분리 시스템 개발	• (TRL6, 100%) 핵융합 연료공급 조건에 적합한 수소동위원소 농축 기술 개발(90%-T, 1%-T, 20ppm-T)
		– 삼중수소 공정시료 분석 방법도출 – 삼중수소 ppm 수준 공정가스 분석방법 도출		– 40 Pa.m3/s 수소동위원소 분리 시스템 성능평가	– 수소동위원소 분리시스템 후보(안) 도출	
		인프라 구축		인프라 활용 분석 및 측정		
		– 삼중수소 회수플랜트 구축 – 연료주기공정 시험시설 구축		– 미량 삼중수소 공정가스 분석 – 수소동위원소 취급 및 삼중수소 측정		
삼중수소 저장•공급 시스템 개발	TRL 2 (50%)	삼중수소 저장용기 설계		수소동위원소 저장공급 시스템 통합공정 검증	실증로급 대량 삼중수소 저장•공급 시스템 개발	• (TRL6, 100%) 40Pa.m^3/s 연료공급 및 100g 삼중수소 저장 시스템 개발
		– 삼중수소 저장시스템 주요기기 선정 및 공정 시스템 설계 – 100g 삼중수소 저장용기 설계 및 검증계획 수립		– 40Pa.m^3/s 삼중수소 저장•공급 시스템 성능평가 DB 축적	– 삼중수소 저장•공급 시스템 후보(안) 도출	
		인프라 구축		인프라 활용 분석 및 측정		
		– 삼중수소 회수플랜트 구축 – 연료주기공정 시험시설 구축		– 삼중수소 저장 및 공정가스 취급 – 40 Pa.m^3/s 수소동위원소 연속공정 실험		

□ 연도별 투자재원(안)

○ (인력소요 및 예산) 전문인력을 활용한 수소동위원소 정제·분리·저장·공급 시스템 개발 관련 인력운영을 위한 제반비용(인건비, 연구활동 관련 직접비, 간접비 등 1MY/2억원)으로 228억원 도출

– 수소동위원소 정제 시스템 개발분야는 공정모사, 기초실험, 공정분석 등을 위해 연평균 총 1.9MY 필요

– 초저온 증류를 활용한 수소동위원소 분리시스템 개발을 공정모사, 기초실험, 공정분석 등을 위해 연평균 총 2.6MY 필요

– 삼중수소 저장·공급 시스템 개발을 위한 공정모사, 기초실험, 소량 삼중수소 취급 등을 위해 연평균 총 3.7MY 필요

○ (연구재료비) 연구재료비로서, 검증 및 분리장비, 취급시설 등이 필요함에 따라 관련 예산 245억원 산출

< 삼중수소 정제·분리·저장 기술 개발 예산(안) 및 인력(안) >

(억원/명)

세세부기술	구분	'25	'26	'27	'28	'29	'30	'31	'32	'33	'34	'35	'36	'37	'38	합계
수소동위원소 정제 시스템 개발	예산	6	7	7	6	6	5	5	6	7	9	10	10	9	9	102
	인력	1	1	1	1	1	1	1	2	2	3	3	3	3	3	26
수소동위원소 분리 시스템 개발	예산	10	16	18	14	14	12	9	9	8	12	13	13	12	12	172
	인력	1	1	2	2	2	2	2	2	2	4	4	4	4	4	36
삼중수소 저장•공급 시스템 개발	예산	13	14	12	12	12	11	11	12	12	18	18	18	18	18	199
	인력	2	2	2	2	2	2	2	4	4	6	6	6	6	6	52
합계	예산	29	37	37	32	32	28	25	27	27	39	41	41	39	39	473
	인력	4	4	5	5	5	5	5	8	8	13	13	13	13	13	114

□ 재원 및 연구인력 조달 방안

○ (재원) 핵융합(연) 기본사업 및 ITER 사업을 통해 기초연구를 수행하며, 인프라 구축을 통한 기술개발 재원은 신규사업을 통해 수행

* 핵융합(연) 기본사업 : 핵융합 실증로 핵심공학기술 개발 사업 / ITER 사업 : 삼중수소 SDS 사업

○ (연구인력) 유관분야 전문가그룹을 우선활용하고, 신진인력의 사업참여를 통한 교육 등 전문인력 양성 및 조달

– 원자력 분야 삼중수소 취급경험을 보유한 전문가 그룹 활용

③ 핵융합 연료공급

□ 정의

○ 핵융합 반응에 의한 높은 에너지의 발산 및 안정적인 핵융합 반응을 지속하기 위해 초저온 고체 상태의 중수소, 삼중수소를 만들어 고속으로 토카막 내부에 공급

< 핵융합 연료공급 기술 개요 >

세세부기술	기술개요
핵융합 연료 펠릿주입 시스템	• 핵융합 플라즈마 내부 연료를 안정적으로 공급하기 위한 다양한 크기 펠릿 생산 및 플라즈마 내 공급•리사이클 시스템 개발
핵융합 연료 가스주입 시스템	• 핵융합 반응기 내 다양한 공정 가스를 안정적으로 주입하기 위한 시스템 개발

□ 기술개발 필요성

○ (안정적 연속운전) 핵융합 반응기 내 플라즈마 환경에서 소모·배출되는 연료의 안정적인 공급을 통한 DT 반응 속도의 안정적 유지 실현

* 원활한 핵융합 반응을 위해 연료로 사용되는 중수소 및 삼중수소뿐만 아니라, 반응 제어에 사용되는 여러 물질은 기체 형태로 초기 공급

○ (DT 밀도 유지) 핵반응이 일어나는 플라즈마 내부 DT 밀도를 유지하기 위해 고체 상태의 펠릿을 고속으로 주입하여 D/T 이온 공급 및 에너지 전달

□ 핵융합 연료 펠릿주입 시스템 기술 동향

○ (국외) 실험실 수준에서 핵융합 연료공급을 목적으로 다양한 방식의 실험을 수행 중

– 핵융합 연료공급을 목적으로 여러 종류의 가스를 다양한 크기 펠릿으로 제조하여 자기장 환경 플라즈마 내 공급하는 실험 수행 중

– 삼중수소를 적용한 펠릿 제조가 실험실 수준에서 진행되고 있으며, ITER 적용을 위한 펠릿 공급 시스템 개발 중

○ (국내) KSTAR 운전에 연료공급 펠릿을 활용중이지만, 삼중수소 기반의 플라즈마 시험 등의 추가적인 연구개발 필요

– 핵융합(연) KSTAR에 소형 Extruder를 활용한 추가 연료공급 펠릿 및 SPI 펠릿을 제조하여 반응기 내에 주입하고 있으나, 플라즈마 실험을 위한 주요 연료공급을 위한 검증 필요

– 중수소 펠릿을 제조 및 반응기 내 공급 라인은 구성되어 있으나, 손실 수소동위원소 재사용 시스템의 삼중수소 취급 가능한 개발 필요

□ 핵융합 연료 가스주입 시스템 기술 동향

○ (국외) ITER 설치 목적의 시스템 설계 및 제작 중

– ITER 설치를 목적으로 다양한 공정가스가 공급 가능하도록 MFC를 포함한 밸브박스를 적용하고 있으며, 성능평가 수행 중

– ITER에 공급하기 위해 삼중수소 취급 가능한 이중 파이프로 설계 및 제작 중

○ (국내) KSTAR 장치 운전을 위한 밸브시스템 설치 및 공정가스 공급 중

– 핵융합(연) KSTAR 장치에 독립된 밸브가 설치되며 이를 통해 공정가스 공급

– 삼중수소 취급 가능한 Manifold가 없으며, 개발이 필요한 상황

□ 기술확보 전략

○ (기술내용) 토카막 내부에 중수소 및 삼중수소를 고속으로 공급하는 제반기술 개발

– 플라즈마 HFS로 펠릿 공급에 적합한 펠릿 연속 제조 기술과 안정적인 플라즈마 운전을 위한 ELM 제어 및 DM을 수행과 관련된 펠릿 공급 기술

– 다양한 크기로 제조된 펠릿의 이송에 따른 손실 최소화를 위한 공정 기술

– 펠릿을 가속하기 위해 사용하는 추진가스(고압헬륨)의 직접 반응기 내 유지를 방지

– 안정적인 플라즈마 운전을 위해 각 목적에 적합한 운전조건에 따라 빠른 공급이 가능한 공정 개발

– 자기장 및 중성자 조사영향에 벗어난 삼중수소 플랜트에서 핵융합 반응기에 다양한 포트로 여러 종의 공정가스를 공급하는 기술

○ (확보전략) 연료주입 관련 경험을 보유한 유관분야 산학연 전문기관 등과 협력을 통한 자체개발 추진

– 출연(연)은 기기 및 공정개발을 수행하고, 대학은 공정시스템 모사 평가를 수행, 산업체를 이를 기반으로 기기 제작 및 상세공정 개발 추진

< 핵융합 연료공급 기술 확보전략 >

세세부기술	개발 내용	핵심주체		주체별 역할
핵융합 연료 펠릿주입 시스템	• 수소동위원소 펠릿제조를 위한 Extruder 기술 검증	자체 개발	출연(연)	• 기기 및 공정 개발
			대학	• 공정 시스템 모사 평가
			산업체	• 기기 제작 및 상세공정 개발
	• 핵융합 연료 펠릿주입 공정 개발	자체 개발	출연(연)	• 기기 및 공정 개발
			대학	• 공정 시스템 모사 평가
			산업체	• 기기 제작 및 상세공정 개발
핵융합 연료 가스주입 시스템	• 연료 가스 공급을 위한 공정 개발	자체 개발	출연(연)	• 기기 및 공정 개발
			대학	• 공정 시스템 모사 평가
			산업체	• 기기 제작 및 상세공정 개발
	• 삼중수소 가스공급 Manifold 개발	자체 개발	출연(연)	• 기기 및 공정 개발
			대학	• 공정 시스템 모사 평가
			산업체	• 기기 제작 및 상세공정 개발

< 핵융합 연료공급 기술 개발 로드맵 >

<table>
<tr><th rowspan="2">세세부기술</th><th rowspan="2">현재 기술 수준</th><th colspan="4">로드맵</th><th rowspan="2">최종목표</th></tr>
<tr><th>2026</th><th>2030</th><th>2035</th><th>2038</th></tr>
<tr><td rowspan="4">핵융합 연료 펠릿주입 시스템</td><td rowspan="4">TRL 3 (40%)</td><td>시스템 주요 기기 모델링</td><td colspan="2">ELM 제어 및 DM용 SPI 적용 펠릿 주입 공정 검증</td><td>실증로급 삼중수소 취급 연속 펠릿 제조 및 주입시스템 설계</td><td rowspan="4">• (TRL6, 100%) 실증로 연료공급대비 1/10(40Pa.m3/s) D/T를 펠릿으로 제작해 주입하는 공정 개발</td></tr>
<tr><td>– 펠릿 가속을 위한 추진가스 루프 및 연료 재사용 시스템 수치모델제시</td><td colspan="2">– 다양한 크기 펠릿 제조 및 연료 재사용 공정 실험적 검증 장치 제작
– 다양한 펠릿 공급 성능 평가</td><td>– 삼중수소 취급 연속 펠릿 제조 및 주입 시스템 후보(안) 도출</td></tr>
<tr><td colspan="2">인프라 구축</td><td colspan="2">인프라 활용 펠릿 제조기술</td></tr>
<tr><td colspan="2">– 연료주기공정 시험시설 구축</td><td colspan="2">– 다양한 크기 펠릿 제조 및 공급 기술</td></tr>
<tr><td rowspan="4">핵융합 연료 가스주입 시스템</td><td rowspan="4">TRL 2 (30%)</td><td colspan="2">핵융합 실증로 대량 가스공급 실험적 검증 장치 제작</td><td>Manifold 설계 개념 도출 및 파트 설계</td><td>실증로급 핵융합 가스주입 시스템 설계</td><td rowspan="4">• (TRL6, 100%) 삼중수소를 포함한 핵융합 공정 가스를 안전하게 공급할 수 있는 이중파이프 및 Manifold 설계, 제작 기술 개발</td></tr>
<tr><td colspan="2">– 삼중수소 취급 가능한 Manifold 기술(안) 도출
– 실험적 검증장치 설계 및 제작</td><td>– 삼중수소 취급 가능한 Manifold 설계(안) 제시</td><td>– 핵융합 가스주입 시스템 후보(안) 도출</td></tr>
<tr><td colspan="2">인프라 구축</td><td colspan="2">인프라 활용 대량 가스 공급</td></tr>
<tr><td colspan="2">– 연료주기공정 시험시설 구축</td><td colspan="2">– 다양한 가스 혼합 및 공급 기술</td></tr>
</table>

□ 연도별 투자재원(안)

○ (인력소요 및 예산) 전문인력을 활용한 펠릿주입시스템 및 가스주입시스템 개발 관련 인력운영을 위한 제반비용(인건비, 연구활동 관련 직접비, 간접비 등 1MY/2억원)으로 116억원 도출

– 핵융합 연료 펠릿 주입 시스템 개발을 위한 펠릿제조 Extruder 기술 검증 및 공정 개발 등을 위해 연평균 총 2.1MY 필요

– 핵융합 연료 가스 주입 시스템 개발을 위한 공정모델 개발, 대량 가스공급 제어 성능 검증 등을 위해 연평균 총 2.1MY 필요

○ (연구재료비) 연구재료비로서, 시스템 활용 R&D를 위한 시약 및 재료 구입 등이 필요함에 따라 관련 예산 95억원 산출

< 핵융합 연료공급 기술 개발 예산(안) 및 인력(안) >

(억원/명)

세세부기술	구분	'25	'26	'27	'28	'29	'30	'31	'32	'33	'34	'35	'36	'37	'38	합계
핵융합 연료 펠릿주입 시스템	예산	6	7	7	6	8	7	7	7	8	10	10	10	10	10	113
	인력	1	1	1	1	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	29
핵융합 연료 가스주입 시스템	예산	4	5	5	4	7	6	7	6	6	10	10	10	9	9	98
	인력	1	1	1	1	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	29
합계	예산	10	12	12	10	15	13	14	13	14	20	20	20	19	19	211
	인력	2	2	2	2	4	4	4	4	4	6	6	6	6	6	58

□ 재원 및 연구인력 조달 방안

○ (재원) 핵융합(연) 기본사업 및 ITER 사업을 통해 기초연구를 수행하며, 추가적인 인력 운영과 관련된 예산은 신규사업을 통해 수행

* 핵융합(연) 기본사업 : 핵융합 실증로 핵심공학기술 개발 사업 / ITER 사업 : 삼중수소 SDS 사업

○ (연구인력) 유관분야 전문가그룹을 우선활용하고, 신진인력의 사업참여를 통한 교육 등 전문인력 양성 및 조달

④ 핵융합 진공배기

□ 정의

○ 핵융합로 연속운전을 위한 내부 고진공 유지 및 미사용 삼중수소를 안정적으로 회수하기 위한 배기 시스템

< 핵융합 진공배기 기술 개요 >

세세부기술	기술개요
핵융합 연료 고진공 배기 기술 개발	•핵융합로 대규모 연속운전의 고진공상태 유지하고 미사용 연료 회수를 위한 고진공 배기장치 개발
핵융합 연료 저진공 배기 기술 개발	•고진공 배기를 지원하고 안정적으로 삼중수소 플랜트와 연계하기 위한 저진공 배기 시스템 개발

□ 기술개발 필요성

○ (장치 안전성 확보) 핵융합 실증로는 ITER 대비 삼중수소 취급량의 증가가 예상됨에 따라 전체 삼중수소 재고량 감축 및 안전한 취급 제고

□ 핵융합 연료 고진공 배기 기술 개발 동향

○ (국외) ITER 장치 기준의 삼중수소량을 기준으로 EU 등은 연구개발 중

- ITER는 여러 개의 Cyropump를 순차적으로 가동하여 진공, 승온, 배기, 냉각, 진공 순으로 순환하여 가동할 계획

- EU 실증로 연료주기는 ITER 대비 핵융합 에너지 생산 및 운영 시간의 증가에도 불구하고 취급 삼중수소량을 ITER 수준으로 설정하고 연구

- Direct Internal Recycling(DIR) 개념을 도입하고, DIR을 구현하기 위한 다양한 적용 가능한 요소기술 후보군의 도출 및 개발을 수행 중

○ (국내) KSTAR 진공용기 배기를 위해 Commercial 진공배기 장치를 조합하고 부분적으로 자체 제작 Cryopump를 적용하여 시스템을 통합적으로 운영 중

□ 핵융합 연료 저진공 배기 기술 개발 동향

○ (국외) ITER는 새로운 저진공 펌프를 개발 중이며, EU는 다양한 진공펌프 연구 중

- 삼중수소 취급이 가능한 Roughing 진공의 부재에 따라, ITER는 새로운 저진공 펌프를 개발하여 삼중수소 플랜트와 공정을 연계할 예정

- EU 실증로 연료주기는 삼중수소 취급이 가능한 다양한 진공펌프 연구개발을 수행하고 있으며, 이에 따른 연료주기 시스템의 조합을 다양하게 평가 중

○ (국내) ITER 비조달 항목에 대한 기술추적을 수행하였으며, 그 일환으로 연료주기 내 삼중수소 재고량 분석을 위한 수치적 모델을 개발하여 평가

□ 기술확보 전략

○ (기술내용) 내부 고진공 유지 및 미사용 삼중수소의 안정적 회수를 위한 배기 시스템 관련 제반기술 개발

- 핵융합 실증로 적용할 연속운전이 가능한 고진공 배기 장치 개발

- ITER 및 다양한 토카막 장치에 적용되는 Cyropump 기술 및 Roughing Pumping 기술을 연속운전이 가능하도록 안정적인 시스템 개발

- 고진공 배기를 지원하고 안정적으로 수소동위원소를 회수할 수 있는 Roughing Pumping 시스템 개발

- 고진공 배기와 저진공 배기를 연료 운전이 가능한 통합공정 개발

○ (확보전략) 진공배기 기술개발 경험을 보유한 유관분야 산학연 전문기관 등과 협력을 통한 자체개발 추진

- 출연(연)은 기기 및 공정개발을 수행하고, 대학은 공정시스템 모사 평가를 수행, 산업체를 이를 기반으로 기기 제작 및 상세공정 개발 추진

< 핵융합 진공배기 기술 확보전략 >

세세부기술	개발 내용	핵심주체		주체별 역할
핵융합 연료 고진공 배기 기술 개발	• 핵융합 실증로 고진공 배기 성능 검증	자체 개발	출연(연)	• 기기 및 공정 개발
			대학	• 공정 시스템 모사 평가
			산업체	• 기기 제작 및 상세공정 개발
	• 핵융합 실증로 연속운전이 가능한 제어 시스템 개발	자체 개발	출연(연)	• 기기 및 공정 개발
			대학	• 공정 시스템 모사 평가
			산업체	• 기기 제작 및 상세공정 개발
핵융합 연료 저진공 배기 기술 개발	• 핵융합 실증로 저진공 배기 성능 검증	자체 개발	출연(연)	• 기기 및 공정 개발
			대학	• 공정 시스템 모사 평가
			산업체	• 기기 제작 및 상세공정 개발
	• 핵융합 실증로 고진공/저진공 배기 연계 제어 시스템 개발	자체 개발	출연(연)	• 기기 및 공정 개발
			대학	• 공정 시스템 모사 평가
			산업체	• 기기 제작 및 상세공정 개발

< 핵융합 진공배기 기술 개발 로드맵 >

세세부기술	현재 기술 수준	로드맵				최종목표
		2026	2030	2035	2038	
핵융합 연료 고진공 배기기술 개발	TRL 2 (20%)	고진공 저온펌프 배기성능 수치적 검증 및 평가장치 구축		저온펌프 및 대안펌프 성능평가	실증로급 고진공 배기시스템 개발	• (TRL6, 100%) 실증로 진공배기대비 1/10(40 Pa.m^3/s) 고진공 연속운전 검증
		– 고진공 저온펌프 수치모델 제시 – 고진공 저온펌프 배기성능 평가 장치 설계 및 제작		– 다양한 조건에서의 성능 비교분석 DB 구축	– 고진공 배기시스템 후보(안) 도출	
		인프라 구축		인프라 활용 고진공 배기 검증		
		– 연료주기공정 시험시설 구축		– 고진공 유지 및 배기 성능 검증		
핵융합 연료 저진공 배기기술 개발	TRL 2 (20%)	고진공/저진공 통합공정 평가 모델 개발		저진공 배기후보 기기 성능 평가	실증로급 저진공 배기 시스템 개발	• (TRL6, 100%) 실증로 진공배기대비 1/10(40 Pa.m^3/s) 자진공 연속운전 검증
		– 핵융합 진공배기 시스템 개념 도출 – 고진공/저진공 통합공정 수치모델 제시		– 저진공 배기 후보 기기 실험적 성능평가	– 저진공 배기 시스템 후보(안) 도출	
		인프라 구축		인프라 활용 진공배기 통합공정 검증		
		– 연료주기공정 시험시설 구축		– 고진공/저진공 펌프 조합을 통한 안정적 통합공정 검증		

□ 연도별 투자재원(안)

○ (인력소요 및 예산) 전문인력을 활용한 고진공·저진공 배기기술 개발 관련 인력운영을 위한 제반비용(인건비, 연구활동 관련 직접비, 간접비 등 1MY/2억원)으로 110억원 도출

– 고진공 배기 시스템 개발을 위한 공정모사, 기초실험, 공정분석 등을 위해 연평균 총 2.2MY 필요

– 저진공 배기 시스템 개발을 위한 공정모사, 기초실험, 공정분석 등을 위해 연평균 총 1.7MY 필요

○ (연구재료비) 연구재료비로서, 관련 소형 시제품제작 및 장비설치를 위한 예산 105억원 산출

< 핵융합 진공배기 기술 개발 예산(안) 및 인력(안) >

(억원/명)

세세부기술	구분	'25	'26	'27	'28	'29	'30	'31	'32	'33	'34	'35	'36	'37	'38	합계
핵융합 연료 고진공 배기 기술 개발	예산	6	6	7	8	8	7	7	7	11	12	11	11	11	10	122
	인력	1	1	1	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	31
핵융합 연료 저진공 배기 기술 개발	예산	5	5	5	5	7	6	6	6	8	9	8	8	8	7	93
	인력	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	24
합계	예산	11	11	12	13	15	13	13	13	19	21	19	19	19	17	215
	인력	2	2	2	3	4	4	4	4	5	5	5	5	5	5	55

□ 재원 및 연구인력 조달 방안

○ (재원) 핵융합(연) 기본사업 및 ITER 사업을 통해 기초연구를 수행하며, 추가적인 인력 운영과 관련된 예산은 신규사업을 통해 수행

* 핵융합(연) 기본사업 : 핵융합 실증로 핵심공학기술 개발 사업 / ITER 사업 : 삼중수소 SDS 사업

○ (연구인력) 유관분야 전문가그룹을 우선활용하고, 신진인력의 사업참여를 통한 교육 등 전문인력 양성 및 조달

⑤ 연료주기 소요 연구시설

□ 정의

○ 삼중수소의 안전한 취급과 핵융합 연속 반응 유지를 위한 연료 공급·순환 기술 개발을 위한 제반 시설

< 연료주기 기술 개발 세부시설 개요 및 필요성 >

세부시설	시설 개요	필요성
삼중수소 회수플랜트	• 안전한 삼중수소 취급을 위한 삼중수소 누출 다단 방지막 설치 및 삼중수소 환경 배출을 최소화하기 위한 시스템	• 삼중수소 증식블랑켓 안정성 시험을 통해 생성되는 삼중수소를 안전하게 회수하기 위한 시스템
연료주기공정 시험시설	• 혼합물 형태의 배기가스 중 수소동위원소 만을 선택적으로 정제하여 이 중 핵융하 반응물로 사용되는 삼중수소 및 중수소 재사용을 위한 시스템	• 핵융합 실증로 연료주기 공정설계를 위해 실증로 1/10규모의 연료주기 파일럿을 통한 연속운전 성능 검증

□ 국내외 시설구축 사례

○ (해외) 원자력 기술을 보유한 주요국들은 삼중수소 취급관련 시설을 운영 중

< 연료주기 기술 관련 해외 시설 및 활용가능 여부 >

세부시설	국외 장치명	활용가능 여부 및 사유
삼중수소 취급시설	• ITER 삼중수소 플랜트 설계 및 제작 진행 중('30대 중반 삼중수소 취급 시운전 및 운영 착수 예정)	• **(일부가능)** ~kg 수준 삼중수소 취급을 목표로 시스템 설계 및 제작 중 • **(한계)** 핵융합 연속운전 및 1500 MW 열에너지 생산에 적합한 Scale-up 필요
	• 독일 TLK 수십 g 삼중수소 활용가능 EU 실증로 연료주기 파트 삼중수소 취급 요소기술 개발 수행 중	• **(일부가능)** EU 자체적으로 요소기술 개발을 선도하고 있음. 실증로 적용 가능성을 위한 기술평가가 필요 • **(한계)** 삼중수소 취급 기술 자립을 함께 고려해야 하며, 도입하더라도 기술의 성숙도가 실증로 적용을 판단하기 이름.
	• 미국 SRNL 수십 g 삼중수소 활용가능 US 실증로 연료주기 기술개발 로드맵을 개발하고 있음(10년 후 실증로 제작 착수)	• **(일부가능)** 삼중수소 취급 요소기술의 연구개발을 수행하고 있음. • **(한계)** 삼중수소 취급 정보 수출통제에 따른 기술교류 한계
	• 일본 TPL 수십 g 삼중수소 활용· 삼중수소 취급 요소기술 검증 수행함.	• **(불가)** 시설 해체 착수
	• 캐나다 AECL 삼중수소 제거 설비 설계, 제작 및 운영	• **(일부가능)** 저농도 삼중수소 취급 기술 일부 적용 가능 • **(한계)** 특정 운전 조건에서 운영되고 있으며, 다양한 삼중수소 취급 조건을 위한 기술개발이 필요함.
	• 루마니아 ICSI 삼중수소 취급 농축 시설 제작 및 운영	• **(일부가능)** 삼중수소 농축 기술을 중심으로 기술개발 수행 • **(한계)** 핵융합 연료주기 전반에 적용하기에 기술범위의 제한이 있음.
핵융합 연료공급 시설	• ITER 연료공급 시스템 DT 기준 최대 200 Pam^3/s 연료공급 예정	• **(일부가능)** Pellet Injection 중심으로 실증로 적용 가능할 것으로 보임. • **(한계)** 핵융합 연속운전 및 1500 MW 열에너지 생산에 적합한 Scale-up 필요
핵융합 진공배기 시설	• ITER 진공배기 시스템 DT 기준 최대 200 Pam^3/s 진공배기 예정	• **(일부가능)** DT 핵융합 실험 시작, 운영, 종료에 따른 토카막 내 적정 진공도 유지 • **(한계)** 핵융합 연속운전 및 1500 MW 열에너지 생산에 적합한 Scale-up 필요

○ (국내) 월성 TRF 등 원자력발전소에서 삼중수소 취급시설 운영 중

< 연료주기 기술 관련 국내 유관 시설 및 활용가능 여부 >

세부시설	장치명	활용가능 여부 및 사유
삼중수소 회수플랜트	• 한수원 중앙연구원, 삼중수소 계량분배 장치	• **(불가)** 연구수행이 아닌 삼중수소 ~g 소분 목적으로 사용
	• 한수원 월성, 삼중수소 제거설비	• **(불가)** 발전소 특정 조건에서 삼중수소 제거 목적으로 사용
연료주기공정 시험시설	유사시설 없음	-

□ 확보전략

○ (해외구매) 해외유사시설 구축경험을 보유한 기관을 통해 설치

○ (자체개발) 국내 산업체를 활용하여 공동연구를 통한 제작

< 연료주기 인프라 사양 및 확보전략 >

세부시설	사양	확보전략
연료주기 공정 시험시설	• 고농도 삼중수소 취급 시스템 - 삼중수소 처리: 연간 60 mg (0.1~1% 삼중수소 취급) - 삼중수소 회수율: 99.9% - 삼중수소 정제: 분리막, 분자체, 촉매반응 기술 적용 - 수소동위원소 분리: 액체 헬륨 냉각 극저온 증류 기술 적용 - 삼중수소 저장: 감손우라늄 기반 금속 수소화물 저장 기술 적용 • 저농도 삼중수소 취급 시스템 - 삼중수소 배출 농도: HTO 기준 3,000 Bq/m3 이하 - 삼중수소 회수율: 99.9% - 기체상태 탈삼중수소: 분자체, 촉매반응, 습식 흡수 기술 적용 - 물상태 탈삼중수소: 전기분해, 동위원소 반응·교환 기술 적용 • 삼중수소 취급 지원 시스템 - 삼중수소 분석: 라만 분광기, 가스 크로마토그래피 적용 - 삼중수소 모니터링 - 삼중수소 운반용기 및 관련 취급설비 • 수소동위원소 정제 시스템 : 핵융합 환경의 수소동위원소를 포함하여 CQ_4, Q_2O, NQ_3, He, Ne, Ar 등 다양한 종의 혼합가스 대상의 정제 시스템 관련 연구 - 40 Pa.m^3/s H_2/HD/D_2 취급 • 삼중수소 회수 공정 - 화학 반응을 통한 Q_2O/CQ_4 Cracking 반응기 - 소량 삼중수소 회수를 위한 Recombiner 촉매 반응기 : Ar/N_2/CO_2 등 다양한 조건에서 100ppm 수준 소량 삼중수소 회수 - He 분위기 % 수준 삼중수소 회수	국내산업체 활용 제작

세부시설	사양	확보전략
	• 수소동위원소 분리 시스템 – 다양한 수소동위원소 분리가 가능한 초저온 증류탑 – H_2, D_2 농축을 강화하기 위한 HD 상온 평형반응기 – 20K 초저온 증류 및 상온 반응 조건을 만족시키기 위한 공정가스 열교환망 – 20K 초저온 상태를 생성 및 유지하기 위한 헬륨 냉동기 • 연료 저장 및 공급 시스템 : ~kg Q_2 저장 가능하며, 40 Pa.m^3/s H_2/D_2 공급 – 100g 삼중수소 저장용량 금속 수소화물 용기 – 대량 수소동위원 저장용기 금속 수소화물 용기 등 • 미량 기체·물 상태 삼중수소 회수 시스템 • 삼중수소 분석 시스템(상용으로 판매되는 분석 측정장비로 구성) – 공정가스 On-line 분석을 위한 Raman Spectrometer – 공정가스 실시간 Sampling 및 μGC – 공정가스 종류 확인을 위한 QMS – 공정가스 Off-line 분석을 위한 GC – 삼중수소수 분석을 위한 Fourier Transform-Infrared Spectrometer (FT-IR) – 액체 및 고체 상태 환경 시료 측정을 위한 Liquid Scintillation Counter (LSC) – 삼중수소 누출 대기 감시를 위한 Propotional Counter – 고체 시료 추출을 통한 Thermal Desorption Spectrometer (TDS) – 삼중수소 측정을 위한 β-ray Induced X-ray Spectrometry (BIXS) • 플랜트 자동제어 시스템 및 시스템 간 통합 관리 장치 설치로 삼중수소 플랜트 파일럿 플랜트 연동·제어	

□ 확보일정

○ ('30년대 초 완료) 중장기 연구개발일정을 고려하여, '30년대 초까지 설치 및 시운전 완료

< 연료주기 인프라 확보 일정 >

세부시설	구축 계획
연료주기공정 시험시설	• 총 구축 일정 : 2026~2031년(총 6 년) – 2026년 : 시설 상세 설계 – 2027년 : 제작 기업 입찰 및 건축 설계 – 2028년 : 연구시설 건설 – 2029년 : 연구시설 건설 – 2030년 : 연구실 건설 완공 및 시운전 – 2031년 : 시운전 및 최적화

□ 소요예산 및 인력

○ (소요예산) 유사시설의 구축 예산 등을 기준으로, 구축하고자 하는 세부시설스펙을 고려하여 세부예산 도출

○ (인력) 시설 구축을 위한 산업체 대응인력 및 운영, 유지보수를 위한 전문인력 등을 고려하여 도출

< 연료주기 인프라 구축 연도별 예산(안) 및 인력(안) >

(억원/명)

세부기술	구분	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	합계
연료주기 공정시험시설	예산	–	47	69	115	140	111	64	–	–	–	–	–	–	–	546
	인력	–	8	8	8	8	8	8	–	–	–	–	–	–	–	48
합계	예산	–	47	69	115	140	111	64	–	–	–	–	–	–	–	546
	인력	–	8	8	8	8	8	8	–	–	–	–	–	–	–	48

□ 재원 및 인력 조달 방안

○ (재원) 신규사업을 통해 인프라 구축예산 확보

○ (인력) 핵융합 및 원자력 분야 삼중수소 취급 관련 전문인력 및 유관분야 엔지니어링 인력 등을 활용

5. 디버터

□ 기술 정의

○ 핵융합의 극한 환경에 직접적으로 노출되어 불순물과 헬륨 제어를 통해 노심 플라즈마를 고성능으로 유지하게 하는 장치

□ 기술개발 필요성

○ 실증로 내에 대량으로 설치되는 디버터는 대규모 부품으로, 국내 산업체 기반 제작기술 개발을 통해 제조 원가절감 및 해외시장 확보

○ 핵융합 환경에서 고성능 노심플라즈마 유지를 위해 디버터를 통한 불순물과 헬륨 배출 필요

○ 핵융합 반응 특성상 공급된 연료의 미량(1%)만이 반응하고, 미반응한(99%) 삼중수소는 재사용을 위해 디버터를 통해 회수됨에 따라, 운전비용 절감 극대화 실현을 위한 디버터 개발 필요

○ 한국은 ITER 디버터 비조달국으로 관련 설계, 제작 및 검사 기술 확보에 한계 존재

– 해외 기관의 연구 인프라를 이용한 시험 시 보유국 자체 시험 시간 외에 협의하여 사용할 수 있으므로 테스트 일정 및 횟수에 제한이 있고 이 경우 재료 및 설계 정보에 대한 공유를 요청하므로 독자 기술 유출에 대한 우려 존재

□ 파급성

○ 디버터 개발을 위한 플라즈마 입자발생 시험장치, 고열부하 시험평가 설비의 경우 우주·항공분야 소재개발을 위한 시험검증 설비로 활용 가능

– 플라즈마 입자 발생 시험장치와 고열부하 시험 장치는 항공우주 분야에서 발사체에 가해지는 고열속과 입자속에 대한 모사 시험을 해당 핵융합 연구 인프라로 공동 활용할 수 있을 것으로 기대

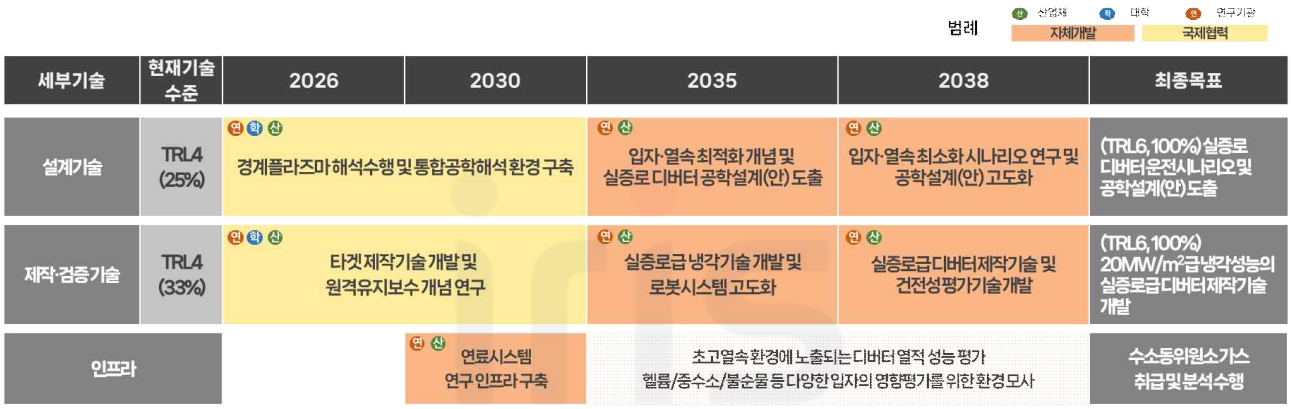
□ 세부기술 분류 및 마일스톤

○ 디버터 기술개발 및 제작을 위해 설계기술을 개발하고, 이를 활용한 디버터 제작 및 검증기술 확보

< 디버터 세부기술 분류 >

세부기술	세부내용
디버터 설계기술 개발	○ 핵융합 환경에서 고열속 장시간 운전이 가능한 고효율 디버터 장치개발을 위해 디버터 부근 물리현상분석 등의 결과를 활용한 공학설계 – (경계플라즈마해석 및 영향평가기술 개발) 플라즈마와 일차벽 상호작용 해석 및 실험을 통한 대면재 연료 잔류 특성 등 평가기술 개발 – (디버터 공학설계기술 개발) 디버터 구조물에 발생하는 응력평가, 냉각방식 도출, 시나리오 정립, 핵반응 열 및 폐기물 기준 수립
디버터 제작 및 검증 기술개발	○ 20 MW/m^{2}급 초고열속 냉각성능을 갖춘 실증로급 규모의 디버터 제작 및 평가기술을 개발하고, 실증로 디버터의 유지보수 개념 도출 – (제작기술 개발) 20 MW/m^{2}급 텅스텐 디버터 타겟 제작기술 개발 및 한계열속•수명평가기술 등 개발 – (평가기술 개발) 디버터 대면부품의 이종접합 계면의 평가기술 개발 및 기준 수립 – (유지보수기술 개발) 실증로급 디버터의 교체 시 방사화 영향 평가 로봇을 이용하여 원격으로 유지보수

< 디버터 세부기술개발 마일스톤 >



① 디버터 설계

□ 정의

○ 핵융합 환경에서 고열속 장시간 운전이 가능한 고효율 디버터 장치개발을 위해 디버터 부근 물리현상분석 결과를 바탕으로 한 공학설계

< 디버터 기술 개요 >

세세부기술	기술개요
경계플라즈마 해석 및 영향 평가기술 개발	• 경계 플라즈마 물리해석을 통한 디버터 형상 및 열•입자속 계산과 최적화 • 플라즈마와 일차벽 상호작용 해석 및 실험을 통한 대면재 연료 잔류 특성 및 수명 평가
디버터 공학설계 기술 개발	• 공학설계의 건전성 확보 및 사고 예방을 위해 디버터 구조물에 발생하는 응력 평가, 냉각방식 도출, 사고 시나리오 정립, 핵반응 열 및 폐기물 기준 수립

□ 기술개발 필요성

○ (고성능 핵융합로 구현) 디버터를 통해 토카막 내 헬륨 Ash와 불순물의 안정적인 배출 등 고성능 핵융합로 구현 및 안정적 운전을 위한 핵심설계기술 필요

– 실증로 노심 플라즈마의 고성능 유지 및 안정성 구현 관련 설계기술 확보를 위해 디버터 형상 및 열·입자속 등 디버터 부근 극한 환경에 대한 물리현상 해석 필요

* 디버터는 국부적으로 이온과 전자가 집중되는 영역이며, 경계플라즈마로부터 10~20MW/m2 수준의 초고열속이 지속적으로 가해짐

○ (성능고도화 기반기술 확보) 디버터는 고열속 장시간 운전에 핵심적인 요소로, 디버터 성능의 최적화를 위한 설계원천기술 필요

– EU는 디버터의 중요성을 인지하고, 다양한 방식의 디버터 전문연구를 위해 DTT(Divertor Tokamak Test) 장치 구축(이탈리아, '26년 완공예정) 중

* 디버터는 전체 핵융합 에너지의 약 20% 정도를 처리하는 토카막 내벽의 핵심부품

□ 경계플라즈마 해석 및 영향평가 기술개발 동향

○ (국외) EU·미국·일본은 선도적 입지 확보를 위해 자체개발한 경계 플라즈마 해석 코드의 지속적인 업데이트 및 인프라 구축 중

– 디버터 면적당 열부하 감소를 위해 디버터 형상 개선연구 진행 중

* 슬랜티드 디버터, 스노우 플레이크, X 혹은 super x 디버터 등 연구 진행

– 열속 완화 효과를 극대화시키는 SAS 디버터 등에 대한 연구가 활발히 진행 중

* SAS(small-angle-slot) : 중성입자를 포진시켜 플라즈마 입자와의 충돌에 의해 열속 완화

– 다양한 디버터 SOL 해석이 가능한 코드(SOLPS, UEDGE, SONIC 등)를 자체 개발하고 있으며, 이를 이용한 디버터 영역에서의 입자의 거동을 활발히 해석 중

* SOL(Scrape-off Layer) : 핵융합 플라즈마의 가장자리 부분으로 뜨거운 플라즈마와 차가운 중성 입자들이 혼재해 있는 영역

– 미국 DIII-D, 유럽 JET, 중국 EAST는 토카막 내 분광분석방법을 이용한 텅스텐 유입량을 정량 측정하는 기술을 도입하여 활용 중

– 유럽 JET, 중국 EAST, 미국 DIII-D에서 ERO 코드 등을 활용하여 L-mode 운전 조건, 탄소/텅스텐 내벽 물질, ELM과 같은 과도상태 등 여러 조건에서 시뮬레이션 결과 도출

- EU는 다양하고 혁신적인 디버터 연구를 위해 위해 DTT 장치 구축 중

  * Diverter Tokamak Test, 이탈리아, '26년 완공 예정

○ (국내) 국내 대학에서 학문적인 수준에서 경계 플라즈마 해석 수행 중

- KSTAR에서 실험을 통해 일부 진행되고 있으나, 경계 플라즈마 해석을 통한 체계적 연구 미진

- 기초적인 수준에서 문헌 조사 및 자장 변화에 대한 연구만 진행

- 디버터 SOL 영역에서의 해석은 SOLPS 및 UEDGE를 이용한 기초연구 진행

- 핵융합 대면재인 텅스텐 대상의 분광분석 연구와 관련하여, KSTAR에서 텅스텐을 소량의 불순물로 주입 후 극자외선영역의 분광기로 플라즈마 노심 부근의 W34+ ~ W43+ 높은 이온화 된 텅스텐 수송 관련 연구가 진행

- 대학 클러스터 연구 등에서 일부 코드 기술을 습득하고 있으나, 토카막 구조 등 적용에 한계 존재

□ 디버터 공학설계 기술 개발 동향

○ (국외) 통합 공학해석 환경이 체계적으로 구축되어 있고, 조달국 간 기술공유 중

- ITER의 경우, 사고 시나리오 체계적 정립, 관련 해석 및 평가가 이루어졌으며, 디버터 조달국(유럽·일본·러시아) 사이에서 높은 수준의 기술적 공유가 진행 중

- EAST, WEST 등의 토카막에서 ITER와 유사한 텅스텐 모노블록 타입의 디버터 연구를 수행 중이며, 냉각 효율을 높이기 위한 다양한 형태 연구 수행 중

  * 냉각 효율을 높이기 위한 다양한 형태의 냉각 유로 및 모노블록 구조에 대해서 제안하고 이에 대한 열 및 구조해석을 수행하여 안정성 평가 중

- 각국의 실증로급 장치에 대한 중성자 해석모델 개발 및 중성자속, 핵반응열 평가, 설계 변경에 따라 모델 및 평가 결과 업데이트

- 실증로급 장치 디버터 방사화 해석을 통한 폐기물 특성 평가 및 재사용과 같은 디버터 관리 기준 수립

○ (국내) 물리해석 및 플라즈마 붕괴 시나리오, 디버터 사고 시나리오 관련 기초연구 수행

- 열 및 구조해석을 할 수 있는 인력 및 기술은 높은 수준이지만, 전자기장 해석의 수준이 상대적으로 낮은 상황

- ITER와 유사한 방식의 냉각방식 연구 및 냉각유로에 대한 안정성 평가 수행 중
- ITER와 유사한 방식의 냉각방식을 기준으로 연구가 진행 중이며, 일부 학계에서는 hypervaportron을 적용한 연구 진행
- 핵융합 출력 2,200MW 실증로급 장치의 단순화된 중성자 해석 모델에서 중성자속 및 핵반응열 초기 해석 기술개발 진행

□ 기술확보 전략

○ (기술내용) 경계플라즈마 해석·평가기술 개발 등을 통한 최적화된 디버터 공학 설계기술 개발

- 경계 플라즈마 해석코드 개발 및 이를 활용한 실증로급 디버터 열·입자속 관련 평가 및 최적화 기술 개발
  - 열·입자속을 최소화하기 위한 디버터 형상도출 및 디버터 운전시나리오 개발
  - 플라즈마 일차벽 상호작용 메카니즘 분석을 통해 실증로급 디버터 수명 예측 기술개발
  - 진공배기 시스템 설계 적용을 위한 연료와 불순물의 입자 거동 분석·해석 기술개발
  - 미세구조 및 재료의 불순물 등 재료 차이에 의한 영향분석 관련 기술개발
  - 수소, 고유 및 외부 불순물, 헬륨재 혼합물의 영향으로 유도되는 텅스텐 정량화 및 분포 평가기술 개발
- 디버터 건전성 및 사고예방을 위한 공학설계 기술 개발
  - 통합공학해석 환경개발 및 물리해석 기반의 3D CAD 디자인 개발
  - 디버터 냉각방식 개념도출 및 실증로 디버터 사고시나리오 정립
  - 디버터 폐기물 특성 평가를 위한 방사화 해석을 수행하고, 방사화 해석 결과를 토대로 폐기물 평가 및 설계 기준 정립

○ (확보전략) KSTAR 및 ITER 사업을 기반으로 산학연 협력을 통한 제반 설계기술 확보

- 학·연 협력을 통해 해석 및 평가기술을 개발하고, 시험장비 및 시제품 제작은 산업체를 통해 수행
- 유럽, 미국 등 경계플라즈마 해석코드 보유 및 전문운용기관과 공동연구 진행

  * DTT와 연구분야 제안을 통한 공동연구 추진 노력 병행

< 디버터 설계 기술 확보전략 >

세세부기술	개발 내용	핵심 주체		주체별 역할
경계플라즈마 해석 및 영향 평가 기술 개발	• 경계플라즈마 해석기술 개발	자체 개발	출연(연)	• 실증로급 디버터 열•입자속 평가기술 개발 • 열•입자속 최적화 기술개발 • 플라즈마 및 불순물 입자거동해석 기술개발
			대학	
		국제협력		• 해석코드를 보유한 해외 유관기관과 기술협력을 통한 기술축적
	• 영향평가기술 개발	자체 개발	출연(연)	• 대면재 내 연료 잔류 특성 평가기술 개발 • 플라즈마 일차벽 상호작용 해석코드 개발 • 금속대면재 침식 및 재증착 평가기술 개발 • 중성종 영향평가 기술개발 및 절차 정립
			대학	
			산업체	• 플라즈마 발생 시험장치 설계 및 제작 • 평가기술 개발을 위한 시험장비 설계 및 개발
디버터 공학설계 기술개발	• 공학 해석기술 개발	자체 개발	출연(연)	• 실증로 디버터 3D CAD 디자인 개발 • 통합공학해석 환경 개발 • 실증로 디버터 사고시나리오 정립 및 해석 기술 개발 • 디버터 냉각방식 개념 도출
			대학	
			산업체	• 냉각방식에 대한 제작성 평가 및 시제품 제작
	• 평가기술 개발	자체 개발	출연(연)	• 중성자속 및 핵반응열 평가기술 개발 • 방사화 해석을 통한 폐기물 평가기술 개발 • 냉각성능 향상을 위한 개념 도출 • 냉각방식의 임계열유속 및 차압 평가
			대학	

< 디버터 설계 기술 개발 로드맵 >

세세부기술	현재 기술 수준	로드맵				최종목표
		2026	2030	2035	2038	
경계 플라즈마 해석 및 영향평가 기술개발	TRL 3 (20%)	경계플라즈마 해석수행		입자 및 열속 최적화 개념 연구	입자 및 열속 최소화 시나리오 연구	• (TRL6, 100%) 실증로 디버터 최대 열속 20MW/m^2 이하 운전 시나리오 개발
		– 실증로 디버터 개념설계(안) 도출 – 플라즈마 일차벽 상호작용 해석운용 기술 확보		– 입자 및 열속 최적화 개념 도출 – 디버터 수명예측	– 최대 열속 20MW/m^2 이하 운전 시나리오 개발	
디버터 공학설계 기술개발	TRL 3 (30%)	실증로급 디버터 디자인 및 통합해석 환경 구축		통합공학 및 중성자 해석 연구	공학설계(안) 고도화	• (TRL6, 100%) 20MW/m^2 열속 및 전자기력에 대한 열 및 구조건전성을 확보한 실증로 디버터 공학 설계(안) 도출
		– 3D CAD 디자인 개발 – 통합공학해석 플랫폼 개발		– 실증로 디버터 공학설계(안) 도출	– 열 및 구조건전성이 확보된 공학설계(안) 도출	

□ 연도별 투자재원(안)

○ (인력소요 및 예산) 전문인력을 활용한 해석 및 평가기술확보, 설계기술 개발과 관련된 사업으로서, 인력운영을 위한 제반비용(인건비, 연구활동 관련 직접비, 간접비 등 1MY/2억원)으로 232억원 도출

– 경계플라즈마 해석 및 영향평가 기술개발은 경계플라즈마 해석, 플라즈마–일차벽 실험 및 해석 등을 위해 연평균 4.1M/Y 필요

– 디버터 공학설계 기술개발은 3D CAD 개발, 열–구조해석, 사고해석, 냉각시스템 연구 등을 위해 연평균 4.2M/Y 필요

○ (연구재료비) 물리·공학 해석용 클러스터 구축, UV spectroscopy system, 디버터 열수력 평가 시험 장비 구축 등이 필요함에 따라 관련 예산 406억원 산출

< 디버터 설계기술 개발 예산(안) 및 인력(안) >

(억원/명)

세세부기술	구분	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	합계
경계플라즈마 해석 및 영향평가 기술 개발	예산	19	11	11	15	15	24	26	27	27	27	27	27	27	27	310
	인력	2	2	2	2	2	2	3	6	6	6	6	6	6	6	57
디버터 공학설계 기술개발	예산	16	11	11	15	15	29	41	43	37	22	22	22	22	22	328
	인력	2	2	2	2	2	2	5	6	6	6	6	6	6	6	59
계	예산	35	22	22	30	30	53	67	70	64	49	49	49	49	49	638
	인력	4	4	4	4	4	4	8	12	12	12	12	12	12	12	116

□ 재원 및 연구인력 조달 방안

○ (재원) 핵융합(연) 기본사업을 통해 기초연구를 수행하며, 경계 플라즈마 및 입자 영향 평가와 공학설계·해석 등의 재원은 신규사업을 통해 수행

* 핵융합(연) 기본사업 : 핵융합 실증로 핵심공학기술 개발 사업

○ (연구인력) 핵융합(연)의 경계플라즈마 해석 및 영향평가 기술개발 인력, 디버터 공학설계 기술개발 인력 활용

– 대학 중심의 핵융합선도기술개발사업에서 육성된 인력의 유입 활용

② 디버터 제작 및 검증

□ 정의

○ 20 MW/m^{2}급 초고열속 냉각성능을 갖춘 실증로급 규모의 디버터 제작 및 평가 기술을 개발하고, 실증로 디버터의 유지보수 기술 개발

< 디버터 제작 및 검증 기술 개요 >

세세부기술	기술개요
디버터 제작 기술 개발	• 20 MW/m^{2}급 텅스텐 디버터 타겟 및 카세트 바디 제작기술 개발, 텅스텐–저방사화구조강 모노블록형 대면부품 제작기술 개발과 한계 열속 및 수명 평가
디버터 평가기술 개발	• 핵융합 실증로급 장치에 사용되는 디버터 대면부품의 이종접합 계면의 평가기술 개발 및 기준 수립, 디버터 표면 열속 진단 기술
디버터 유지보수 기술개발	• 실증로급 디버터의 교체 시 방사화 및 자화 영향 평가를 기반으로 한 로봇을 이용하여 원격으로 유지보수를 할 수 있는 기술

□ 기술개발 필요성

○ (경제성 제고) 핵융합 반응 특성상 공급된 연료의 미량만이 반응하고, 미반응한 삼중수소 회수 및 재사용 극대화를 통한 운전비용 절감 실현

* 핵융합로 내 삼중수소 중 약 1%만 핵융합 반응을 하고, 99%는 디버터를 통해 회수

○ (원가 절감) 실증로 내에 대량으로 설치되는 디버터 규모는 대형규모로서, 국내 산업체 기반 제작기술 개발을 통해 제조 원가절감 및 해외시장 확보

* ITER의 경우, 약 9톤 규모(3.6m(가로) x 2.5m(세로) x 0.8m(깊이))의 디버터가 54개 설치

○ (기존연구 한계) KSTAR 장치를 통해 개발발 중인 텅스텐 디버터는 24cm 크기의 직선형 모듈이며, 실증로급 디버터는 플라즈마 붕괴로부터 장치보호를 위해 긴 곡선부를 포함

* 주반경이 6m 이상인 실증로의 경우, 텅스텐 디버터 모듈의 길이는 1m 이상의 곡선부위를 포함하여 약 1.8m 수준

□ 디버터 제작 기술개발 동향

○ (국외) 시험시설을 보유한 유럽과 일본, 러시아를 중심으로 연구개발 진행 중

– 유럽과 일본, 러시아는 ITER 디버터 조달국으로서, ITER에 적용되는 디버터 타겟 개발 및 성능시험을 수행하였으며 조달을 위한 제작단계 진행 중

– 유럽과 러시아는 20 MW/m^2급 열속시험을 수행할 수 있는 시험시설을 보유하고 연구개발과 성능평가(디버터 타겟 건전성 평가 등)에 활용 중

* 유럽은 GLADIS, JUDITH 시설, 러시아는 IDTF 시설 운영 중, 중국은 CRAFT에 신규 시설 설치

– 유럽을 중심으로 다양한 방식의 텅스텐-저방사화 구조강 대면부품 개발 연구 진행 중

• 접합방법에서는 텅스텐과 저방사화구조강의 직접 접합을 위한 확산접합과 SPS(Spark Plasma Sintering) 방법 적용

○ (국내) KSTAR 및 ITER를 통해 기초단계의 영향평가 및 요소기술 연구 수행 중

– ITER에 적용되는 모노블록형 PFC 제작 관련 요소기술 연구와 10 MW/m2 수준의 열속시험 및 열속시험 후 대면부품 영향 평가 연구 진행 중

• KSTAR 디버터 적용을 위한 모노블록형 텅스텐 타겟 개발이 착수되어 KSTAR 장치에서 텅스텐 디버터 설치 및 운전 예정

* 디버터 형상과 규모 및 특히 특히 열속 조건에서 실증로 디버터와 기술 간극이 존재

- 텅스텐-저방사화구조강 이종접합 공정개발을 위한 요소기술 연구가 진행되었고, 소규모의 평면형 시편 제작 진행

□ 디버터 평가 기술 개발 동향

○ (국외) ITER 디버터 조달을 담당하는 유럽, 일본, 러시아와 ITER 기구를 중심으로 ITER급 디버터 타겟 유닛 제작 후 시험평가 진행 중

- 프랑스의 WEST, 중국의 EAST, 독일의 ASDEX-U 등 텅스텐 디버터를 설치한 국가들은 디버터 대면부품 시험평가 관련 노하우 축적

○ (국내) ITER에 적용되는 구조의 소규모 직선형 텅스텐 모노블록 PFC 제작품에 대한 UT 검사 경험이 축적되고 있으며, 10 MW/m2 수준의 열속 시험 전후에서의 PFC 영향 평가 연구 진행 중

□ 디버터 유지보수 기술 개발 동향

○ (국외) ITER 기술 기반으로 실증로급 적용을 위한 연구개발을 활발히 진행 중

- ITER는 구체적인 원격유지보수 개념을 도출하고 제안 중이며, 실증로를 개발 중인 유럽, 일본, 중국의 경우 한국보다 구체적인 개념연구 진행 중

- 영국 및 유럽을 중심으로 ITER 및 실증로를 위한 원격제어장치 및 로봇암 기술 개발이 활발히 진행 중

- ITER는 방사화 및 자화에 대한 평가가 구체적으로 진행되고 있고, 유럽을 중심으로 방사화 및 자화특성에 대한 연구가 활발히 진행 중

- 유럽 및 일본 DEMO는 실증로급 장치 디버터 방사화 해석을 통한 폐기물 특성 평가 및 재사용과 같은 디버터 관리 기준 수립

○ (국내) 디버터 방사화 기초연구 진행되었고, 산업에서 활용 중인 기존 로봇기술의 실증로급 적용을 위한 연구개발 필요

- 기존 한국형 핵융합 실증로 개념 연구에서 디버터의 방사화 기초 연구는 진행되었으나 향후 깊이 있는 연구가 필요하고 자화 특성에 대한 연구부재

- 산업용 로봇은 많은 기술개발이 이루어졌지만 핵융합 실증로급 장치에 대한 로봇시스템 개발은 이제 시작 단계

□ 기술확보 전략

○ (기술내용) 실증로급 규모의 디버터 제작 및 평가기술을 개발하고, 교체 등 유지보수 관련 제반기술 개발

– 중성자 조사환경에서 20 MW/m^{2}급 열속 대응이 가능한 텅스텐 PFC 제작 기술 개발

– 텅스텐 모노블록 구조의 디버터 타겟(PFU)의 이종접합 계면에 대한 비파괴적 평가기술 및 시험절차 개발을 통한 구조 건전성 평가기준 수립

– 실증로급 디버터 원격유지보수를 위한 시스템 설계 및 로봇암·이송·자동용접 등 제반기술 개발

○ (확보전략) 출연(연)과 대학을 중심으로 공동연구를 진행하며, 산업체를 통해 제작기술을 구현하는 등 유기적 협력을 통해 기술개발 수행

– 학·연 협력을 통해 제작 관련 핵심요소기술 연구개발 수행 및 개념·기준 등을 수립하고, 산업체를 활용하여 제작기술 개발 수행

– UKAEA(영국), CEA(프랑스)와 공동연구를 통해 실증로 디버터 원격유지보수 로봇시스템 기술개발

– 진단 및 평가 장비 구축을 통해 제작된 디버터의 건전성 및 성능 평가 등 수행

< 디버터 제작 및 검증 기술 확보전략 >

세세부기술	개발 내용	핵심주체		주체별 역할
디버터 제작 기술개발	• 실증로급 텅스텐 디버터 제작기술 개발	자체개발	출연(연)	• 실증로급 대형 디버터 제작 핵심 기술 개발
			대학	• 실증로급 디버터 제작 요소 기술 연구
			산업체	• 실증로급(1.5m 급) 디버터 제작 기술 구현
	• 실증로용 대면부품 제작기술 개발	공동연구	출연(연)	• 실증로급 디버터 저방사화강 연구
			대학	• 저방사화강 재료 특성 평가 연구
			산업체	• 저방사화강 제작 • 실증로급 디버터 제작 기술 개발
디버터 평가기술 개발	• 이종접합 계면 비파괴 평가기술 개발	공동연구	출연(연)	• 디버터 제작 건전성 평가기술 연구 및 수락 기준 수립
			산업체	• 디버터 건전성 평가설비 제작 및 평가 수행
	• 디버터 표면 열속 진단 기술 개발	공동연구	출연(연)	• 디버터 표면 진단 기술개발
			대학	• 고열유속 진단 요소 기술 개발
			산업체	• 진단 기술 개발 소프트웨어 개발
디버터 유지보수 기술 개발	• 실증로급 디버터 원격유지보수 개념 개발	공동연구	출연(연)	• 원격유지보수를 위한 실증로급 디버터의 개념 개발 및 설계 • 방사화 해석을 통한 유지보수 설계기준 수립
			대학	• 개념연구 해외 기술추적
	• 실증로급 디버터 원격유지보수 시스템 개발	공동연구	출연(연)	• 원격유지보수 로봇 시스템 기술 개발
			대학	
			산업체	• 원격유지보수 로봇 시스템 제작
		국제협력		• 원격유지보수 로봇 시스템 기술 공동개발

< 디버터 제작 및 검증 기술 개발 로드맵 >

<table>
<tr><th rowspan="2">세세부기술</th><th rowspan="2">현재 기술 수준</th><th colspan="4">로드맵</th><th rowspan="2">최종목표</th></tr>
<tr><th>2026</th><th>2030</th><th>2035</th><th>2038</th></tr>
<tr><td rowspan="3">디버터 제작 기술개발</td><td rowspan="3">TRL 3 (35%)</td><td colspan="2">디버터 타겟 제작기술 개발</td><td>실증로급 냉각기술 개발</td><td>실증로급 디버터 제작기술 개발</td><td rowspan="3">• (TRL6, 100%) 20MW/m²급 냉각성능을 갖춘 실증로급 디버터(1.5m급) 제작 기술개발 및 설비 구축</td></tr>
<tr><td colspan="2">– 실증로급 규모의 디버터 타겟 시제품 제작
– 카세트 바디 제작기술 개발</td><td>– 20MW/m²급 냉각 성능 디버터 제작 기술 확보</td><td>– 디버터 모듈 및 지지구조물 제작기술 개발</td></tr>
<tr><td colspan="4"></td></tr>
<tr><td rowspan="6">디버터 평가 기술개발</td><td rowspan="6">TRL 3 (35%)</td><td colspan="2">건전성 평가 관련 기반 연구</td><td>디버터 고열부하 시험 및 기준마련</td><td>이종접합 계면 건전성 평가기술 개발</td><td rowspan="6">• (TRL6, 100%)) 비파괴 방법을 적용한 이종접합 계면의 건전성 평가기술 확보</td></tr>
<tr><td colspan="2">– 고열부하 시험을 위한 건전성 평가 기준 마련</td><td>– 디버터 표면 열속 진단 기술 개발</td><td>– 이종접합부 비파괴평가기술 및 절차 개발 완료</td></tr>
<tr><td colspan="4"></td></tr>
<tr><td colspan="2">인프라 구축</td><td colspan="2">인프라 활용 시험 및 검증</td></tr>
<tr><td colspan="2">– 고열부하 시험시설
– 플라즈마 입자발생 시험시설</td><td colspan="2">– 실증로급 디버터 고열부하 시험
– 이종접합 계면 건전성 평가</td></tr>
<tr><td colspan="4"></td></tr>
<tr><td rowspan="3">디버터 유지보수 기술개발</td><td rowspan="3">TRL 3 (30%)</td><td colspan="2">실증로 디버터 원격유지보수 개념 연구</td><td>로봇시스템 고도화</td><td>원격유지보수 공학설계 연구</td><td rowspan="3">• (TRL6, 100%) 실증로 디버터의 원격유지보수 공학설계 완료</td></tr>
<tr><td colspan="2">– 예비개념 설계 완료
– 로봇시스템 개념 도출</td><td>– 로봇시스템 목업 테스트 완료</td><td>– 공학설계 완료</td></tr>
<tr><td colspan="4"></td></tr>
</table>

□ 연도별 투자재원(안)

○ (인력소요 및 예산) 디버터 제작기술, 평가기술 개발, 유지보수 기술개발 등 관련 전문인력 운영을 위한 제반비용(인건비, 연구활동 관련 직접비, 간접비 등 1MY/2억원)으로 284억원 도출

– 디버터 제작 기술개발과 관련하여 대면재 재료, 타겟 접합공정 및 제작, 카세트 바디 및 지지구조물 제작 등 연평균 약 3.9MY 필요

– 디버터 평가 기술개발과 관련하여 디버터 표적 접합 건전성 연구, 디버터 제작 후 평가, 디버터 제작 품질 관리 등 연평균 약 3.3MY 필요

– 디버터 유지보수 기술개발과 관련하여 디버터 자화 및 방사화 해석, 디버터 원격 유지보수를 위한 로봇 암 연구, 원격유지보수 용접 로봇 연구 등 약 2.9MY 필요

○ (연구재료비) 디버터 제작, NDT 진단을 위한 UT 장비, 열화상 디버터 타겟 진단장치, 원격유지 보수 연구를 위한 로봇시스템 등이 필요함에 따라 관련 예산 459억원 산출

< 디버터 제작 및 검증 기술개발 예산(안) 및 인력(안) >

(억원/명)

세세부기술	구분	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	합계
디버터 제작 기술개발	예산	14	14	19	24	24	26	26	28	30	29	22	22	22	22	322
	인력	2	2	2	2	2	3	3	4	5	6	6	6	6	6	55
디버터 평가기술 개발	예산	5	12	14	16	16	23	23	23	23	18	18	13	13	13	230
	인력	1	1	2	3	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	46
디버터 유지보수 기술 개발	예산	7	7	9	9	14	18	18	23	23	16	16	11	11	11	193
	인력	2	2	2	2	2	4	4	4	4	3	3	3	3	3	41
계	예산	26	33	42	49	54	67	67	74	76	63	56	46	46	46	745
	인력	5	5	6	7	7	11	11	12	13	13	13	13	13	13	142

□ 재원 및 연구인력 조달 방안

○ (재원) 핵융합(연) 기본사업을 통해 기초연구를 수행하며, 디버터 제작 및 평가기술 개발, 원격유지 보수 기술개발 등의 재원은 신규사업을 통해 수행

* 핵융합(연) 기본사업 : 핵융합 실증로 핵심공학기술 개발 사업

○ (연구인력) 핵융합(연)의 대면재 제작 기술개발 및 평가인력 활용

– 대학 중심의 핵융합선도기술개발사업에서 육성된 인력의 유입 활용

③ 디버터 개발 소요 연구시설

□ 정의

○ 디버터 설계 및 제작기술 확보에 필요한 환경모사 및 제품 검증을 위한 필수 제반시설

< 핵융합 소재 개발 세부시설 개요 및 필요성 >

세부시설	시설개요	필요성
고열부하 시험시설	• 대면재의 고열속 저항성을 평가하기 위해 전자빔 등을 이용하여 열부하를 인가할 수 있는 시험시설	• 20MW/m^{2}급의 열속 발생과 냉각시설을 갖춘 시험 장비로서, 초고열속 환경에 노출되는 디버터 열적 성능을 평가
플라즈마입자발생시험시설	• 플라즈마와 일차벽 사이의 상호작용을 시험하기 위해 초고입자속의 플라즈마를 발생시키는 장비	• 헬륨, 중수소, 불순물 등 다양한 입자의 영향평가를 위한 환경을 모사

□ 국내외 시설구축 사례

○ (해외) 독일, 일본, 러시아, 중국 등이 자국 연구개발을 목적으로 활용 중

– 해외에서 구축된 시험시설은 동 연구에 활용가능한 사양이지만, 중장기 연구개발 관점에서 핵융합 연구개발 가속화를 위해 자체구축을 통한 활용 필요

< 디버터 관련 해외 시설 및 활용가능 여부 >

세부시설	국외 장치명	활용가능 여부 및 사유
고열부하 시험시설	• GLADIS (독일)	• **(일부가능)** 자체 사용 외에 사용 시간에 대해 협의 후 사용 가능 • **(한계)** 테스트 샘플 사이즈가 실증로 디버터 타겟 전체에 적용 불가
	• IDTF(ITER Divertor Test Facility) (러시아)	• **(불가)** ITER Test 전용 시설로 사용
	• JUDITH2 (독일)	• **(일부가능)** 국제 공동연구 활용을 위한 협의 필요 • **(한계)** 테스트 샘플 사이즈가 실증로 디버터 타겟 전체에 적용 불가
	• JEBIS (일본)	• **(일부가능)** 국제 공동연구 활용을 위한 협의 필요 • **(한계)** 테스트 샘플 사이즈가 실증로 디버터 타겟 전체에 적용 불가
플라즈마입자 발생시험시설	• MAGNUM-PSI (네덜란드)	• **(일부가능)** 국제 공동연구 활용을 위한 협의 필요 • **(한계)** 동시에 한 종류의 플라즈마 입자만 시험 가능
	• PSI-2 (독일)	• **(일부가능)** 국제 공동연구 활용을 위한 협의 필요 • **(한계)** 동시에 한 종류의 플라즈마 입자만 시험 가능

○ (국내) 원자력(연)에 시설이 구축되어 있지만, 동 연구를 위한 사양 부족으로 활용 불가

< 디버터 관련 국내 유관 시설 및 활용가능 여부 >

세부시설	국내	활용가능 여부 및 사유
고열부하 시험시설	• Korea Heat Load Test Facility (KoHLT- EB), 원자력(연)	• **(불가)** 테스트 가능한 최대 열속이 10 MW/m^{2}로 낮고, 시편의 크기도 7 cm x 3 cm 정도로 제한적임.
플라즈마 입자 발생 시험시설	• Applied-field magnet plasma dynamic thruster (AF-MPD), 원자력(연)	• **(불가)** 일정 협의 후 사용 가능. 입자속이 최대 8x10^{22}으로 낮고 시편의 크기가 40 mm^{2}로 제한적임. 샘플의 냉각 및 가열시스템 부재

□ 확보전략

○ (자체개발) 증식블랑켓 기술개발을 위해 구축예정인 증식블랑켓 안전성 시험시설 인프라를 활용

< 디버터 인프라 사양 및 확보전략 >

세부시설	사양	확보전략
고열부하 시험 시설	• Heat flux : 3 and 55 MW/m^2 (Max.) • Beam dia. : 70 mm (target position) • 최대샘플사이즈: 2000 mm (길이) , 15 MW/m^2 • 온도측정: 텅스텐 표면(IR, pyrometer, etc.)	국내외 산업체 활용 공동개발 및 제작

□ 확보일정

○ ('30년대 초 완료) 증식블랑켓 안전성시험시설 구축 인프라 일정('26~'31) 고려

< 디버터 인프라 확보 일정 >

세부시설	구축 계획
고열부하 시험 시설	•총 구축 일정 : 2026~2031년(총 6년) - 2026년 : 시설 상세 설계 - 2027년 : 제작 기업 입찰 및 건축 설계 - 2028년 : 연구시설 건설 - 2029년 : 연구시설 건설 - 2030년 : 연구시설 건설 완공 및 시운전 - 2031년 : 시운전 및 최적화

□ 소요예산 및 인력

○ (소요예산) 증식블랑켓 안전성시험시설 구축 인프라 구축 예산 활용

○ (인력) 증식블랑켓 안전성시험시설 구축 인프라 구축 인력 활용

□ 재원 및 연구인력 조달 방안

○ (재원) 증식블랑켓 인프라 구축예산 확보

○ (인력) 핵융합(연) 디버터 연구 인력 및 유관분야 엔지니어링 인력 등을 활용

□ 활용방안

○ 디버터 타겟의 설계 및 요구사양에 대한 근거 데이터를 제시하고 향후 실증로 디버터 양산 시 품질 검사를 위한 장비로 활용

○ 본 사업 종료 후 플라즈마 입자 발생 장비를 활용한 플라즈마 내 원자-분자 충돌 및 상호작용 연구 등 경계 플라즈마 물리에도 지속적으로 활용할 계획

6. 가열 및 전류구동

□ 기술정의

○ 플라즈마의 발생부터 유지에 필요한 온도와 압력을 공급·제어하는 기술로 실증로급의 고성능 플라즈마를 안정적으로 발생·제어하는 역할 수행

* 핵융합 반응을 위해 가열장치를 이용한 토카막 플라즈마 온도상승, 전류구동 장치를 이용한 플라즈마 전류의 지속적 유지, 국지적인 전류 구동 수행으로 안정적인 플라즈마 유지 가능

□ 기술개발 필요성

○ 토카막 핵융합 장치는 플라즈마의 발생·유지를 위해 가열 및 전류구동 장치가 반드시 필요하며, 장치의 성능이 플라즈마 온도·밀도에 직접적인 영향을 끼침

○ 전기생산이 가능한 실증로 운전 조건의 고성능 플라즈마 발생 및 연속 운전을 위해서는 기존장치의 낮은 효율과 좁은 운전영역을 극복한 차세대 대용량 가열 및 전류구동 장치 개발이 필수

– 헬리콘 전류구동 등 신개념 전류구동은 각국 실증로의 차별성을 주는 중요한 요소로, 국제적 경쟁관계에서 기술적 우위를 점할 가능성이 매우 높아 기술 선도가 필요

– 중성입자빔의 고전압 기술 등 일부 ITER 기술들은 국제 협력을 통해 확보 가능하나 장수명 음이온원 기술, 고효율 중성화 기술, 빔 형상 제어 기술 등의 주요 기술은 ITER 이후를 목표로 각국이 개발을 진행 중

– 실증로 기술사양은 총 80MW 이상 가열/전류구동 장치 중, 30MW 이상 EC 장치로 확보가 필수. ITER 실험 이후 각 국가별 EC 장치 기술개발을 통하여 확보하는 상황으로 실증로급 자이로트론 개발 수준은 우리나라와 실증로 건설을 계획하는 타국가(EU, 일본 등)와의 차이가 매우 커, 기술 협력 및 공유의 한계 존재

– 대부분의 가열 및 전류구동 예측 코드들은 ITER와 별도로 각국에서 개발된 것으로 현재도 지재권의 제한을 받고 있으며, 수월성에 견주어 볼 때 실증로 설계에 필요한 코드들을 협력으로 활용할 이유가 없음

○ ITER 가열 및 전류구동 장치는 삼중수소 증식률 영향을 충분히 고려하지 않았고, 발전효율(Q)과 전기출력을 제한하는 요인으로 작용되고 있어 실증로에 적합한 고성능 장치 기술개발이 필요한 실정

□ 파급성

○ 고온 또는 상온 초전도를 이용한 초고자기장 소형토카막과 토카막 이외에도 RFP, Stellarator 등 플라즈마 기반의 다양한 핵융합로형에 100% 활용 가능

○ 고에너지, 고효율 중성입자빔 기술은 12대 전략기술 분야 중 우주항공 분야의 추진기 개발에, 고출력 고주파 기술은 국방분야 등에 활용 가능

– 우주항공 분야의 '첨단 엔진·부품' 가공에 탄소 및 세라믹 계열의 부품 생산에 적용 가능

– 차세대원자력 '폐기물관리'에 활용되는 강력한 마이크로파 발생장치를 활용하는 방식으로 활용성이 높을 것으로 보임

– 12대 전략기술 분야 중 수소 '수소연료전지·발전'에 강력한 마이크로파를 이용한 플라즈마 토치 기법의 그린수소 생산에 활용 가능

○ 핵융합의 고주파발생장치(자이로트론 등) 및 전송로는 다양한 산업분야에 활용 가능

– 의료용 가속기 소형화(고주파 이용)에 활용될 수 있으며 첨단 가속기 기반 치료용 의료기로 향후 개발에 활용 가능성이 높음

– 마이크로파 이용 세라믹 초고속 소결 가공으로 적용 가능하고, 지열 발전을 위한 무선 고효율 암석 시추 장치로 개발 가능

– 우주 태양광 무선 전력전송 장치에 활용 가능

□ 세부기술 분류 및 마일스톤

○ 실증로급의 핵융합 플라즈마 발생 및 운전을 위해서, 높은 효율과 넓은 운전 영역의 대용량 가열 및 전류구동 장치와 통합 운전 기술을 개발

< 가열 및 전류구동 장치 세부기술 분류 >

세부기술	세부내용
가열 및 전류구동 장치 개발 기술	○ 실증로급 핵융합 플라즈마 가열 및 전류구동을 위한 장치 설계, 제작 및 시험 기술 개발 – (실증로급 중성입자빔 주입장치) 핵융합 플라즈마 정상상태(Steady-State) 도달과 온도 제어를 위한 MV급의 음이온원 기반 중성입자빔 주입 시스템 개발 – (연속운전 고주파 전류구동 장치) 실증로급의 고자기장에서 호환이 가능한 주파수 생성과 증식블랑켓과 간섭없는 고효율/고출력 고주파 발생 및 전송(입사) 장치 개발
가열 및 전류구동 플라즈마 통합 운전 기술	○ 고성능 핵융합 플라즈마 발생 및 제어를 위한 가열 및 전류구동 요구조건 개발과, 액추에이터로서의 가열 및 전류구동 통합 운전 최적화 기술 개발 – (고성능 플라즈마 형성 전류구동 기술) 고밀도 플라즈마에서 효과적인 전류구동 기술개발 – (통합 플라즈마 운전기술) 실증로에서의 가열 및 전류구동 운전의 성능 예측, 성능 최적화 기술 개발 및 운전 절차 개발

< 가열 및 전류구동 장치 세부기술개발 마일스톤 >

범례: 산 산업체 / 학 대학 / 연 연구기관 — 자체개발 / 국제협력

세부기술	현재기술 수준	2026	2030	2035	2038	최종목표
가열 전류구동 장치 기술	TRL3 (33%)	연 학 산 중성입자빔·고주파 전류구동 장치 설계 및 요소기술 개발		연 학 산 가열 및 전류구동 장치 성능 검증 및 실증로 적용 기술 확정	연 학 산 실증로 가열 및 전류구동 장치(중성입자빔, 고주파) 개발	(TRL6, 100%) • 1MV/40A운전기술 확보 • 고주파 전류구동 장치 (>200GHz,~1MW, >1000s) 개발 및 전송로 안테나 기술 확보
가열 전류구동 플라즈마 통합 기술	TRL4 (33%)	연 학 KSTAR 고성능 전류구동 실증 및 가열전류구동 시뮬레이션 기술 개발		연 학 ITER 운전기술 확보 및 가열전류구동 시뮬레이션 실험 검증	연 학 가열전류구동 운전성능 향상 및 시뮬레이션 최적화	(TRL6, 100%) • 가열 출력 – 플라즈마 효율 80% • 예측 코드 국산화 100%
인프라			연 학 산 가열 및 전류구동 장치 시험설비 구축	가열 및 전류구동 장치 시험설비 운영		중성입자빔 및 전류구동용 EC/RF 통합 장치, 안테나 시험 시설

① 가열 및 전류구동 장치 기술

□ 정의

○ 실증로급 플라즈마 가열 및 전류구동을 위한 장치 설계, 제작 및 시험 기술 개발

○ 핵융합로 발전효율(Q/COE) 향상을 위한 고효율화 및 삼중수소 증식율 확보를 위한 유연성 설계 중점

< 가열 및 전류구동 장치 기술 개요 >

세세부기술	기술개요
고효율 고에너지 중성입자빔 주입장치 개발	• 핵융합 플라즈마 정상상태(Steady-State) 도달과 온도 제어를 위한 MV급의 음이온원 기반 중성입자빔 주입 시스템 개발 • 레이저 및 플라즈마 중성화기 등을 포함한 고효율 이온빔 중성화 기술 개발 • 삼중수소 증식률 감소와 중성자 누설을 최소화하기 위한 빔 포트 형상과 빔 수송 방법 최적화 연구
연속운전 고주파 전류구동장치 개발	• 고자기장 호환 주파수의 고효율/고출력 고주파 발생장치 및 전송로 개발 • 증식블랑켓 호환 고출력밀도 고 전류구동효율의 고주파 입사장치 개발

□ 기술개발 필요성

○ (플라즈마 성능 핵심요소) 플라즈마의 온도와 압력을 결정하는 일차적인 요소로 핵융합 플라즈마 성능향상과 안정적 유지를 위한 필수 시설

○ (발전효율 중추역할) 핵융합로 발전효율(Q)과 전기출력 향상을 위해서는 공급 전력인 가열 및 전류구동 장치의 소요 최소화*와 효율 향상이 필수 요소임

* 전류구동을 포함한 플라즈마 가열은 핵융합로의 발전단가를 구성하는 직접적 요소로써, 실증로 개발의 현실화에 따라 발전단가를 낮추기 위한 높은 효율의 기술개발의 중요성 증가

○ (글로벌 기술 선도) 핵융합로에 필수적인 고자기장과 호환되는 고주파 발생장치 개발을 통해 전류구동 장치 세계적 기술 선도 가능

○ (삼중수소 증식) 삼중수소 증식의 관점에서 증식 블랑켓과 가열 및 전류구동 장치의 상호 배타성 극복을 지향한 중성입자빔 전송 기술 및 고주파 입사장치 개발 필요

* 실증로에서 가열 및 전류구동 장치는 발전효율(Q)을 결정짓는 주요 요소로, 가열 및 전류구동 장치의 효율 향상을 통하여 발전효율과 전기출력을 높일 수 있음

** 삼중수소 증식률 향상을 위해서는 플라즈마를 대면하는 증식 블랑킷의 면적을 최대화 하는 것이 필요하나, 가열장치의 안테나도 플라즈마를 대면해야 하므로 증식 블랑켓의 점유 면적을 제한하기 때문에 안테나를 얇게하여 블랑켓과 면적을 공유하는 방안 등의 기술 개발 필요

□ 고효율 고에너지 중성입자빔 주입장치 개발 동향

○ (국외) EU, 일본 등은 ITER 중성입자빔 장치 설계/제작을 통하여 기술축적 중

- EU는 영국의 JET, 독일의 ASDEX-U, W7-X와 같은 중대형 핵융합연구장치의 장기간 운영을 통하여 각종 가열 및 전류구동장치의 기술을 축적하고 있음

  • 건설 중인 ITER 가열 및 전류구동 장치 소요기술의 상당 부분은 이러한 EU의 축적된 기술을 활용하는 것으로, ITER NBI는 EU JET와 일본의 JT60-U의 NBI 기술을 기반

  • EU ITER NBI 시험 시설인 MITICA 장치는 데모급의 1MV NBI 시험을 목표로 장치 구성 중

  • 실증로를 지향할 때 NBI 분야에서는 에너지 변환 효율의 향상과 빔 경로 제어 기술 개발이 필요하고, EU는 MITICA와 ASDEX-U를 중심으로 이미 이에 대한 기술 개발에 착수

- 일본은 ITER 중성입자빔 주입장치 기술의 상당 부분은 일본의 JT60-U의 NBI 기술을 토대로 하고 있음. 일본의 JT60-SA도 주요 가열 및 전류구동 장치를 NBI 기술에 의존하고 있으며, ITER를 제외하고는 세계 최대의 빔 에너지를 이용할 계획

- 미국은 고에너지 영역의 중성입자빔 주입장치를 운영하고 있지 않으나, DIII-D 장치에서 일부 기술을 계속 발전시키고 있으며, 가속기 기술과 해석 코드 등의 기반 기술을 보유하고 있으므로 필요시 빠르게 기술을 발전시킬 수 있을 것으로 판단

○ (국내) KSTAR를 중심으로 중성입자빔 주입장치의 고성능 연속운전을 위한 추가적 안정화 및 고에너지 NBI빔의 실시간 연속운전 제어 기술 확보를 위한 연구 진행 중

- 가열장치의 개발/운영과 플라즈마 제어 기술을 통하여 2021년 이후 90초 이상의 H-mode 플라즈마와 1억도 이상의 장시간 플라즈마 달성

  * 빔에너지와 운전 시간의 관점에서 세계 최대의 성능으로 평가

- 한편 ITER 비조달 분야 연구 개발 사업을 통해 음이온원 기반 NBI 장치 개발 분야에서 가시적 성과*를 보이고 있음

  * (가시적 성과) 200kV 중성입자빔을 목표로 RF 30kW 세슘 기반 음이온원 개발 및 시험 진행중 (1~5 A/m^2 인출, 인출 전압 전류 상승 중)

□ 연속운전 고주파 전류구동장치 개발 동향

○ (국외) EU, 일본 등은 ITER ECH용 자이로트론 기술 개발을 통해 관련 기술 축적중

- EU는 ITER ECH용의 자이로트론 170GHz, 10ms, 2MW 급을 시험하는 등 자이로트론의 기술혁신에 꾸준히 투자 중

  • KIT(독)는 최근 Fusion Long Pulse Gyrotron Laboratory (FULGOR) 라는 시험시설을 완료하고 90kV/120A에서 10MW CW, 130kV/120A에서는 5msec 미만 장치 테스트시설 완비

  • ITER 주요 가열장치 중 하나인 ICRF의 핵심부품인 안테나 시스템은 EU의 JET, Tore-Supra, ASDEX-U, 그리고 벨기에의 안테나 설계/운영 기술을 기반으로 함

  • 실증로 건설을 위해서는 연속운전, 안정성, 효율 향상을 위한 가열장치의 추가 기술 개발이 필요하며, 높은 안정성을 갖는 실증로급 ICRF를 위해서 Tore-Supra(프), ASDEX-U(독), 벨기에를 중심으로 블랭킷 일체형 진행파 안테나 등을 개발 중

  • 디버터 연구용 토카막 장치로서 개발중인 DTT(이태리)는 500kV 급 NBI와 ICRF를 주 가열 및 전류구동으로 사용하는 설계를 진행 중이며, 특히 ICRF에서는 진공 전자관이 아닌 최신의 Solid-State 증폭기 사용을 결정

- 일본은 총 8대의 ECH/CD용 자이로트론 장치를 개발하여 ITER에 납품했으며, 170GHz, 1MW, 60% 효율을 800초 운전동안 달성함으로써 ITER 조건에 도달

  • 일본은 MW급 자이로트론 뿐만 아니라 collective Thomson scattering (CTS)을 위한 sub-THz 자이로트론을 Large helical device (LHD) 장치에 활용하기 위하여 개발하였으며 303GHz에서 최대출력 320kW 자이로트론을 100마이크로초 운전에 성공

• QST는 다중주파수 출력이 가능한 자이로트론을 개발(104GHz, 137GHz, 170GHz, 203GHz)을 하여 1MW 100초 이상 성능 시험에 성공

– 미국은 ITER 고주파(ECH)의 전송로 개발을 담당하여, 4km의 전송로 개념설계와 프로토타입 테스트를 수행하였고, 전송손실의 최소화, 전송 모드 순도 유지등의 부분에서 적합한 성능을 나타냄

– 러시아는 ITER 고주파 발생장치(자이로트론) 관련 최종 170GHz, 1MW, 1000초 운전에 성공하여, ECH/CD용 자이로트론 공급 국가 중 가장 먼저 공장시험을 효율 55%로 통과

• 러시아는 DEMO용 자이로트론 설계를 진행하였으며, 230GHz, 1MW 출력을 목표로 설계 결과를 발표

○ (국내) KSTAR는 현재 ECH (자이로트론 장치 5대) 운영 중이며 NBI와 함께 KSTAR 장시간 고성능 플라즈마 달성에 기여하고 있음

– ITER 비조달 품목 연구개발과 핵융합 선도기술 개발 사업을 통하여 자이로트론 장치 기술 확보 및 인력양성 중에 있으며, 자이로트론 장치기술 중에서 각 국가별로 공개하지 않는 기술인 설계기술을 국내 대학에서 기확보함

– 95GHz 수십 kW, short-pulse의 자이로트론 장치는 국내 개발 완료. KSTAR를 중심으로 105GHz, 0.5 MW 급의 자이로트론 제작 진행 중

– 200GHz 이상 주파수 DEMO 급의 자이로트론 장치 개념 설계 및 핵심 컴포넌트 개발은 현재 대학중심으로 진행 중

– KFE는 최종적으로 핵융합로 적용을 목표로 헬리콘 전류구동 연구를 선도 중. 2.4MW의 고주파 출력을 확보하여 KSTAR 플라즈마 전류구동을 계획하고 있으며, 고성능 플라즈마 개발에 필수적인 플라즈마 전류분포 제어 최적화 기술개발을 진행 중

□ 기술 확보 전략

○ (기술내용) 실증로급 핵융합 플라즈마 가열 및 전류구동 장치 개발

– 高에너지 안정화 기술 개발 및 고효율 빔중성화 기술 (레이저 및 플라즈마 빔중성화) 개발

※ 중성입자빔 주입 장치의 高에너지(1 MeV)에 대한 안정성 및 효율성 향상

– 긴 수명, 高에너지, 고출력밀도 음이온원 기술 개발

※ 중성입자빔 주입 장치 주요 부품의 중성자 피폭을 최소화하는 기술

– 높은 빔출력 밀도 빔전송 기술 개발(Blade 빔 형성 및 빔 조향)

※ 삼중수소 증식 관점 증식 블랑켓과 가열 및 전류구동 장치의 상호 배타성 극복 기술

– 블랭킷 호환 초박형 고출력밀도 고주파 안테나 기술 (진행파형 안테나, 도파관 슬릿 안테나)

※ 낮은 주파수 전류구동 안테나의 낮은 플라즈마-고주파 커플링 극복

– 200 GHz 이상 연속운전용 고출력 자이로트론 및 전송로 설계 및 제작 기술

※ 고자기장 호환 높은 주파수 >200GHz, >1MW, 연속운전 자이로트론 개발

○ (확보전략) 산학연 협력을 통해 중성입자빔 기술을 다변화하고, 전류구동 시험시설구축을 통해 장치 완성도 제고 추진

– 학연 협력을 통한 중성화 장치 개발 기술 다변화(레이저 중성화 장치, 플라즈마 중성화 장치)로 고효율 중성화 장치 기술 개발 가속화 추진

– 국제협력을 통한 중성빔 포트 위치, 빔 형상 다변화 연구 추진으로, 삼중수소 증식률 감소 해결

– 블랭킷 호환 안테나 (진행파형, 도파관 슬릿형) 안정성 검증방법 확보를 위한 고효율 밀리미터파 발생장치 및 시험시설, 블랭킷 호환 안테나 검증 시설 구축 추진

< 가열 및 전류구동 장치 기술 확보전략 >

세세부기술	구분	개발 내용	개발 주체	주체별 역할
고효율 고에너지 중성입자빔 주입장치 개발	산연 공동 연구	• 긴수명, 고에너지, 고출력밀도 음이온원 기술	• 출연(연)	• 고에너지 음이온원 기술개발 • 빔중성화 및 전송기술 개발
			• 산업체	• 이온원 고열속 빔인출 전극 제작 기술개발 • MV급 가속 전원 개발
	자체 개발	• 고 빔출력 밀도 빔전송 기술	• 출연(연)	• 빔전송 기술 개발
	국제협력		• 한 – EU	• 빔 형상제어기술 확보 협력
	학연 공동 연구	• 고효율 빔중성화 기술	• 출연(연)	• 빔중성화 기술 검증
			• 대학	• 빔중성화 기술 개발
연속운전 고주파 전류구동 장치 개발	산학연 공동 연구	• 고자기장 호환 고효율 및 고출력 고주파 발생장치 (자이로트론) 및 기술 전송로 설계 및 제작 기술	• 출연(연)	• 고출력 자이로트론 시스템 연속운전 시험 검증
			• 대학	• 고출력 자이로트론 개발 및 시험 • 고주파 전송로 개발 및 시험
			• 산업체	• 브레이징 기술 • 고정밀 기계 가공 기술

세세부기술	구분	개발 내용	개발 주체	주체별 역할
	자체 개발	• 블랭킷 호환 고출력밀도 초박형 고주파 안테나 기술	• 출연(연)	• 블랭킷 호환 안테나 설계 • 커플링 향상 연구 • 고주파–플라즈마 커플링 시험장치 설계

< 가열 및 전류구동 장치 기술 개발 로드맵 >

세세부기술	현재 기술 수준	로드맵				최종목표
		2026	2030	2035	2038	
고효율 고에너지중성입자빔 주입장치 개발	TRL 3 (33%)	**개념설계 완료** • 실증로 요구조건 분석 및 개념 설계	**제작 완료** • 100kW/1MHz RF plasma source 개발 • >300A/m^2 D-beam 인출	**실증로 적용 성능 검증** • >1MV/40A DC D- beam 인출 • 빔 중성화 효율 >80%	**실증로급 중성입자빔 주입기술 확보** • 1시간 이상의 1MV/40A 장시간 안정적 운전기술 확보	• (TRL6, 100%) 고 중성화효율의 1시간 이상 1MV/40A 중성입자빔 주입장치 설계 기술 및 안정적 운전기술 확보
		인프라 구축 • 실증로 중성입자빔 시험 시설		**인프라 활용 성능검증** • MeV급 NBI 가열 및 전류구동 장치 시험 • 음이온원 기술(1MeV 이상) 시험 • 차세대 고효율 중성화 장치 검증 • 빔전류 40 A 이상 연속 운전 수송 시험 • NBI 시험시설 단계별 고도화		
연속 운전 고주파 전류구동 장치 개발	TRL 3 (33%)	**개념설계 완료** • 전류구동용 고효율 밀리미터파 발생장치 프로토타입 설계 (>200GHz, ~1MW, >1000s) • 고열 고중성자 호환 밀리미터파 전송로 안테나 설계 • 실증로 전류구동 요구조건 분석 및 안테나 개념 설계	**제작 완료** • 전류구동용 고효율 밀리미터파 발생장치 프로토타입 제작 (>200GHz, ~1MW, >1000s) • 고열 고중성자 호환 밀리미터파 전송로 프로토타입 안테나 제작 • 초박형 안테나 개념 실증 • 초박형 블랭킷 호환 플라즈마 RF 커플링 진공 입사장치 제작	**실증로 적용 성능 검증** • 전류구동용 고효율 밀리미터파 발생장치 성능 검증 (>200GHz, ~1MW, >1000s) • 고열 고중성자 호환 밀리미터파 전송로 안테나 프로토타입 검증 • 플러그-출력 50% • 초박형 안테나 장시간 운전 성능	**핵융합로 호환 고주파 전류구동 기술 확보** • 전류구동용 고효율 장펄스 밀리미터파 발생장치 (>200GHz, ~1MW, >1000s) 기술 확보 • 고열 고중성자 호환 밀리미터파 전송로 안테나 기술 확보 • 1시간 이상의 고출력 운전 성능 • 초박형 블랭킷 호환 플라즈마 RF 커플링 진공 입사장치 기술 확보	• (TRL6, 100%) • 연속운전 성능을 갖는 고효율의 블랑켓 호환 전류구동 장치 개발 • 전류구동용 고효율 장펄스 밀리미터파 발생장치 (>200GHz, ~1MW, >1000s) 기술 확보 • 초박형 블랭킷 호환 플라즈마 RF 커플링 진공 입사장치 기술 확보
		인프라 구축 • 전류구동용 EC/RF 통합 장치 및 안테나 시험 시설		**인프라 활용 성능검증** • 실증로용 EC 용 자이로트론 부품 및 시스템 시험 • 실증로용 EC 고출력 전송로 및 런처 시험 • Helicon/LH 등 저주파 RF 대역 전류구동 안테나 시험		

□ 연도별 투자재원(안)

○ (인력소요 및 예산) 장치개발과 이를 위한 시험시설 구축이 필요한 사업으로, 장치개발을 위한 설계, 검증을 위한 제반비용(인건비, 연구활동 관련 직접비, 간접비 등 1MY/2억원)으로 876억원 도출

- 고효율 고에너지 중성입자빔 주입장치 개발에 연평균 총 13MY 필요

- 연속 운전 고주파 전류구동 장치 개발에 연평균 총 19MY 필요

< 가열 및 전류구동 장치 기술 개발 연도별 예산(안) 및 인력(안) >

(억원/명)

세세부 기술	구분	연도														합계
		25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	
고효율 고에너지 중성입자빔 주입 장치 개발	예산	20	20	20	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	350
	인력	10	10	10	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	175
연속운전 고주파 전류구동 장치 개발	예산	30	30	30	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	526
	인력	15	15	15	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	263
합계	예산	50	50	50	66	66	66	66	66	66	66	66	66	66	66	876
	인력	25	25	25	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	438

□ 재원 및 연구인력 조달 방안

○ (재원) 2023년 현재 과기부 핵융합선도기술개발사업과 핵융합(연) 기본사업을 통해 수행, 실증로 연구개발 사업 필요

※ 핵융합(연) 기본사업 : KSTAR 연구사업

- (핵융합선도기술개발사업) 200GHz 이상 주파수 DEMO 급의 자이로트론 장치 개념 설계 및 핵심 컴포넌트 개발은 대학중심으로 진행

- (KFE 기본사업) 105 GHz, 0.5 MW 급의 자이로트론 제작 진행, 헬리콘 전류구동 연구 진행

※ 핵융합(연)은 최종적으로 핵융합로 적용을 목표로 헬리콘 전류구동 연구를 선도 중이며, LHFW는 원자력연구원 중심으로 선도연구센터 과제에서 기초연구진행 중

○ (연구인력) 유관분야 전문가 그룹을 활용하고, 신진인력 사업참여를 통한 교육 등 인력 양성 및 조달

- 핵융합로 호환 고주파 장치 관련 연구인력은 출연(연)에 집중, 실증로급 고자장 >200GHz 밀리미터파 전류구동장치 및 전송로 개발인력은 대학 중심으로 운영

※ 핵융합 공학 기술은 대형장치를 요구하는 연구의 특성상 연구원 주도로 운영. 핵심 공학 설계 인력의 지속적인 배출을 위하여 대학의 설계 및 시험 인력 활용

- 핵융합로 호환 고주파 장치 개발은 학연 협력으로, 연구인력의 선순환을 통해 기술의 축적 및 발전 추구

② 가열 및 전류구동 플라즈마 통합 기술

□ 정의

○ 고성능 핵융합 플라즈마 발생 및 제어를 위한 가열 및 전류구동 요구조건 개발과, 플라즈마 연속운전을 보장하기 위한가열 및 전류구동 통합 운전 최적화 기술 개발

< 가열 및 전류구동 플라즈마 통합 기술 개요 >

세세부기술	기술개요
고효율 가열 및 전류구동 기술 개발	• 고밀도 플라즈마에서 효과적인 전류구동 기술 개발 • 가열 및 전류구동 운전 성능 최적화 기술 개발 및 운전 절차 개발
플라즈마 가열 및 전류 구동 시뮬레이션 기술	• 토카막 핵융합로에 감금된 플라즈마를 핵융합 반응이 가능한 초고온으로 가열하는 과정과 전류가 유도되는 과정 시뮬레이션 • 토카막 핵융합로 정상 상태 유지를 위해 필요한 외부 가열 및 전류 구동 요구사항 예측

□ 기술개발 필요성

○ (플라즈마 성능 핵심요소) 플라즈마의 온도와 압력을 결정하는 일차적인 요소로, 핵융합 플라즈마 성능향상과 안정적 유지를 위한 가열장치 최적화 연구 필요

○ (발전효율 중추역할) 핵융합로 발전효율(Q) 향상을 위해서는 공급 전력인 가열 민 전류구동 장치의 소요 최소화*와 효율 향상이 필수 요소임, 헬리콘 전류구동 등 신개념 전류구동 등의 실험 연구

* 소요 최소화는 '플라즈마 노심'과의 연계를 통해 연구

○ (노심 연계운전 기술) 플라즈마 노심과 가열 및 전류구동 장치간 연계운전 기술 개발, KSTAR와 ITER를 포함한 연구장치에서의 가열 및 전류구동 통합 실험 기술 확보

□ 고효율 가열 및 전류구동 기술 개발 동향

○ (국외) EU, 일본, 미국 등은 오랜 기간 자국의 주요 연구장치 운영을 통해 가열 및 전류구동 플라즈마 통합기술을 축적

- EU는 ITER 가열장치 조달 및 기존 연구장치(JET, ASDEX-U, WEST, W7-X) 운영을 통해 가장 앞선 가열장치 운용 국가로 평가받고 있으며, DEMO 개념설계를 시작으로 '27년까지 가열 및 전류구동 장치 옵션 결정 계획

- 일본은 JT60-U와 LHD를 중심으로 다양한 가열 및 전류구동 장치를 개발하고 운영하며 기술을 확보하였으나, 현재는 대규모 연구와 운영은 중성입자빔 주입 ECH에 국한되며, 제한된 가열장치 운영의 결과에 주목할 필요 있음

- 미국은 다양한 핵융합 연구 장치의 운영 경험과 각종 가열 및 전류구동 분야에 대한 체계적인 개발 지원을 통하여, 각 가열 및 전류구동 장치의 특성 파악 완료

  • DIII-D를 통하여 고효율의 전류구동 방법 개발을 체계적으로 진행하고 있으며 (헬리콘 전류구동, 고자기장 영역 LH 전류구동, 상부 EC 전류구동), 기술의 적용 가능성을 판단한 후 FNSF에 적용할 계획

  • 가열 및 전류구동의 성능을 예측하기 위한 다양한 코드를 개발하였으며, 현재는 코드들을 통합하여 운용하기 위한 기술 개발에 집중 (RF-SciDAC 등)

○ (국내) KSTAR에서의 고성능 플라즈마 발생과 해석을 위한 가열 및 전류구동 시뮬레이션 코드들을 운영 중이고, 독립적인 코드의 개발이 진행되었으나 매우 부족한 실정

- KSTAR는 중장기 계획으로 월등한 성능의 플라즈마 개발 목표를 제시하고 있으며, 이를 위해서 가열 및 전류구동 해석 능력 개발이 동반될 것으로 기대됨

- 개발이 추진되고 있는 Virtual-KSTAR는 통합 소프트웨어 체계로서, 이를 활용하여 가열 및 전류구동 통합 운영의 체계 확보에 도움을 받을 수 있을 것으로 기대

□ 플라즈마 가열 및 전류 구동 시뮬레이션 기술 동향

○ (미국) 미국은 정부 주도의 SciDAC 프로젝트를 통해 RF 시뮬레이션을 위한 TORIC, AORSA 등 시뮬레이션 코드를 지속적으로 개발 중임. 이온공명 (IC), Helicon 가열 계산에 주로 활용하고 있으며, 특히 병렬 슈퍼컴퓨팅 기술을 활용한 대규모 기술 개발을 추구

- RF 전자기파를 Ray로 모사하는 Ray-Tracing 코드 (GENRAY, TORAY)등을 개발하고 전자공명 (EC), LH 연구에 주로 활용함

- 가열 및 전류 구동에 의한 플라즈마 변화를 동역학적으로 모사하는 3-D Fokker-Planck 코드 (CQL3D)를 개발하고 RF 가열 시뮬레이션 코드와 결합하는 연구도 병행 중

- 중성입자 가열 및 전류 구동 모사를 위한 NUBEAM 코드를 30여년 넘게 지속 개발 중으로, 최근 고속이온의 비정상 수송 모사를 위한 kick-모델 등을 포함한 코드 개량과 AI/ML 기술을 적용한 고속 모듈화에 본격 착수

- 최근 5년의 미국 SciDAC 기술개발 동향은 Edge 효과 및 안테나 모델링을 포함하는 전영역 계산과, 고속 입자와의 시너지, 난류 등의 효과를 포함하는 다물리 계산을 지향함. 이를 위해서 거대과학계산 (ASCR) 프로젝트와 공동연구를 진행

○ (일본) 일본은 TASK 통합 시뮬레이션 프레임워크 안에 RF Ray-tracing 모듈 (TASK/WR), 3-D Full-wave 모듈 (TASK/WM), 3-D Fokker-Planck 모듈 (TASK/FP), 중성입자 가열 모듈 (TASK/FIT3D)이 유기적으로 결합되어 EC/LH/IC/NB 가열 및 전류 구동을 모사하는데 활용 중

- 전영역 동역학 가열 및 전류 구동 물리 연구를 위해서 입자 기반 5-D Fokker-Planck 코드인 GNET이 개발하였고, 이를 토카막 및 LHD 실험 연구에 활용 중

○ (EU) Full wave 코드로 TORIC, LION, PION 등이 개발되었으며, Fokker-Planck 코드로 RELAX 등이 개발되어 연구에 활용 중.

- 독일에서 EC의 회절효과를 포함하여 Ray-tracing의 성능을 개선한 TORBEAM 코드가 개발되어서 활용 중

- 최근 10여 년 동안 스위스 연구진을 중심으로 Fokker-Planck 충돌, 유한한 입자 궤적 두께, 토로이달 자장 구조 효과 등을 포함하는 Monte-Carlo 입자 방식의 SCENIC/HAGIS 프레임워크 코드가 개발되어서 사용 중

○ (국내) 우리나라는 선도기술개발 사업을 통해 2021년 RF 가열 시뮬레이션 기술 개발에 착수하고, 가열에 따른 다물리 플라즈마 모사를 위한 4-D Fokker-Planck 동역학 시뮬레이션 코드, IC나 LH를 위한 Full-wave 가열 시뮬레이션 코드 개발 추진 중

- 중성입자 가열 및 전류 구동 시뮬레이션의 경우 몬테카를로 방식의 동역학 시뮬레이션 기술개발을 통해 NuBDeC 코드 개발을 진행하고, 최근 Virtual KSTAR 플랫폼에 통합하는 연구를 추진 중

□ 기술확보 전략

○ (기술내용) 가열 및 전류구동 장치의 실증로 활용 운전 기술개발

- 고성능 플라즈마(β_N > 3.5) 구현을 위한 고주파 전류구동 운전 기술개발

- 플라즈마 불안정성 (NTM 불안정성) 능동 제어를 위한 전류구동 운전 기술개발

- MV 급 중성입자빔 운전 기술과 30MW 이상의 자이로트론 동시운전 기술, 고신뢰성의 노심-가열장치 연계제어 기술 등 ITER 가열 및 전류구동 기술 확보 (운전 참여 인력 확보, 비조달 분야 기술 확보)

- 실증로 가열 전류구동 예측 코드 확보 (가열 및 전류구동 장치의 성능은 플라즈마의특성에 의존하므로 실증로급에서의 성능을 실험적으로 평가하는 것은 불가능, 현존 코드들은 ITER와 별도로 각국에서 개발된 것으로서 실증로 설계를 위한 공동활용은 제한되므로 저작권 확보를 위해 개발 필요)

○ (확보전략) KSTAR를 활용 학연 중심으로 고성능 플라즈마 형성에 필요한 플라즈마 불안정성 제어 하드웨어 및 시나리오 개발 등 통합 가열 및 전류구동 운전 시나리오 개발

- KSTAR를 활용한 고성능 플라즈마 ($beta_N$ > 3.5) 에서의 전류구동 기술 실증

- DIIII-D(미), ASDEX-U(독) 등 해외 연구장치를 활용 플라즈마 불안정성 제어 기술 획득

- 학-연 연계 가열 전류구동 예측 코드 확보 및 기존 국산 코드 검증 추진

※ 핵융합(연)의 V-KSTAR를 활용 가열 및 전류구동 예측 코드 작성 및 시험 추진

* 동일한 주제에 대해 연구 그룹별로 상이한 접근법을 가지고 있으며, 진보 정도를 평가하기 어려움, 다중의 협력관계 형성이 필요함

** 일부 코드는 국산화되어 벤치마킹 진행중

< 가열 및 전류구동 플라즈마 통합 기술 확보전략 >

세세부기술	개발 내용	핵심주체		주체별 역할
고효율 가열 및 전류구동 기술 개발	고성능 플라즈마 형성을 위한 전류구동 및 플라즈마 불안정성 능동제어	자체 개발	출연(연)	• 불안정성 제어 하드웨어 개발, 실증 • 신개념 전류구동 연구, 실증
			대학	• 불안정성 제어 시나리오 개발
		국제 협력	한-미	• 불안전성 제어 협력 연구*
			한-EU	• 불안전성 제어 협력 연구*
	가열 전류구동 통합 플라즈마 운전 기술	자체개발	출연(연)	• 통합 운전 시나리오 검증
			대학	• 통합 운전 시나리오 개발
플라즈마 가열 및 전류 구동 시뮬레이션 기술	• 연소 조건 플라즈마 NBI, ECH 가열 및 전류 구동 시뮬레이션 기술	자체개발	출연(연)	• 시뮬레이션 코드 공동개발 • 시뮬레이션 결과 실험 비교 검증 • 초병렬 시뮬레이션 기술개발 및 코드 통합 구현
			대학	• 시뮬레이션 코드 공동개발 • 초병렬 시뮬레이션 기술 공동개발 • 이론 연구 및 모델 개발

< 가열 및 전류구동 플라즈마 통합 기술 개발 로드맵 >

<table>
<tr><th rowspan="2">세세부기술</th><th rowspan="2">현재 기술 수준</th><th colspan="4">로드맵</th><th rowspan="2">최종목표</th></tr>
<tr><th>2026</th><th>2030</th><th>2035</th><th>2038</th></tr>
<tr><td rowspan="2">고효율 가열 및 전류구동 기술 개발</td><td rowspan="2">TRL 3 (33%)</td><td></td><td>KSTAR 활용 고성능 전류구동 실증</td><td>ITER 가열 및 전류구동 기술 확보</td><td>전류구동 효율 향상 연구</td><td rowspan="2">•(TRL6, 100%)
고효율의 실증로 가열 및 전류구동 통합* 운전 기술 확보
– 가열출력플라즈마결합효율 80%</td></tr>
<tr><td></td><td>– 고효율 비중심부 전류구동 기술 확보</td><td>– 가열 및 전류구동 조합 선정 완료(중성입자빔주입, 고주파 가열, 신개념 전류구동에 대한 실증로 적용 적합성 평가 완료)
– 실증로 가열 및 전류구동 최적화</td><td>– 실증로 가열 출력 플라즈마 효율 80% 달성</td></tr>
<tr><td rowspan="3">플라즈마 가열 및 전류 구동 시뮬레이션 기술</td><td rowspan="3">TRL 4 (33%)</td><td colspan="4"></td><td rowspan="3">(TRL7, 100%)
실증로 가열 및 전류 구동 시뮬레이션 기술 개발</td></tr>
<tr><td colspan="2">연소 플라즈마 가열 및 전류 구동 시뮬레이션 기술개발</td><td>연소 플라즈마 가열 및 전류 구동 시뮬레이션 고도화</td><td>실증로 가열 및 전류 구동 시뮬레이션</td></tr>
<tr><td colspan="2">• 중형 토카막 가열 및 전류 구송 시뮬레이션 기술개발 및 KSTAR 실험 검증
• 연소 플라즈마 가열 및 전류 구동 시뮬레이션 기술개발</td><td>• 연소 플라즈마 시뮬레이션 기술 확장 및 ITER 실험 검증</td><td>• 실증로 가열 및 전류 구동 시뮬레이션과 설계 검증 및 최적화</td></tr>
</table>

* ‘가열 및 전류구동 장치’간 및 ‘노심’과 ‘플랜트’가 연계된 통합 운전

□ 연도별 투자재원(안)

○ (인력소요 및 예산) ITER 가열 및 전류구동 기술 확보 인력, 예측 코드 개발 등 전문인력 운영을 위한 제반비용(인건비, 연구활동 관련 직접비, 간접비 등 1MY/2억원)으로 306억원 도출

– ’36년 이후 ITER 삼중수소 운전에 따른 인력 증원 등을 포함 연평균 2MY 필요

– 플라즈마 가열 및 전류 구동 시뮬레이션 기술개발에 연평균 9MY 필요

< 가열 및 전류구동 플라즈마 통합 기술개발 연도별 예산(안) 및 인력(안) >

(억원/명)

세세부 기술	구분	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	합계
고효율 가열 및 전류구동 기술 개발	예산	4	4	4	4	5	5	5	4	4	4	4	4	4	4	61
	인력	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	31
플라즈마 가열 및 전류 구동 시뮬레이션 기술	예산	14	14	18	18	19	19	19	18	18	18	18	18	18	18	245
	인력	7	7	9	9	10	10	10	9	9	9	9	9	9	9	122
합계	예산	18	18	22	22	24	24	24	22	22	22	22	22	22	22	306
	인력	9	9	11	11	12	12	12	11	11	11	11	11	11	11	153

□ 재원 및 연구인력 조달 방안

○ (재원) 핵융합(연) 기본사업을 통해 ITER 기술 확보, 코드 개발 수행

* 핵융합(연) 기본사업 : KSTAR 연구사업, 핵융합 실증로 핵심공학기술 개발 사업

○ (연구인력) 초기에는 핵융합(연)의 KSTAR 연구센터와 ITER 연구 인력을 활용하고, 향후 과기부 핵융합선도기술개발사업의 대학을 통해 신규 인력 훈련 및 확보

③ 가열 및 전류구동 기술 개발 소요 연구시설

□ 정의

○ 실증로에 적용 가능한 고출력 고주파 가열 입사장치 및 전류구동용 안테나 시험 시설

< 가열 및 전류구동 기술 개발 세부시설 개요 및 필요성 >

세부 시설	시설 개요	필요성
실증로 중성입자빔 시험 시설	• 1MV HVDC 발생 및 송전 • 음이온원 1 MeV, 40 A • 20MW 연속운전 표적 • 방사선 발생 장치	• 50 MW 이상의 고효율 가열 및 전류구동 장치는 실증로의 필수 요소 • 가열 및 전류구동 장치는 블랭킷이 설치되는 플라즈마 일차벽에 설치되므로 삼중수소 증식률에 직접 영향을 줌 - 최적화 실험 연구 필요 • 실증로 사양의 가열 및 전류구동 장치 성능을 보여주는 기존 장치는 없음 (ITER의 중성입자빔 주입기는 실증로 기준의 효율과 삼중수소 증식률 감소율을 만족하지 않음) – 이에 따라 실증 시험 시설 필요
전류구동용 EC/RF 통합 장치 및 안테나 시험 시설	• 100kV / 80A 에서 8MW 급 CW 펄스전원 • 초전도자석 (bore size>20cm, B>8T) • 100kV / 50A 클라이스트론 전원부 • 2MW 급 클라이스트론 • 제어부 및 측정부 (측정 주파수 범위 : 1 GHz - 500 GHz, 주파수 정밀도 < 200 kHz) • 냉각부	• 핵융합로 플라즈마 전류구동을 통한 성능 향상 및 안정화를 위하여 EC 및 RF 기반 가열 및 전류구동은 반드시 수반 • 실증로 단계에서는 현재의 실험장치로서의 토카막보다 자기장이 높아지며, 이에 따라 요구되는 EC 주파수가 200GHz 이상으로 증가. 하지만 현재 전세계적으로 200GHz 이상 주파수의 고출력 (>=1MW), 연속운전이 가능한 밀리미터파 자이로트론은 개발되지 못한 상황 • 따라서, 실증로를 위한 전류구동을 위해서는 >200GHz 주파수, 고출력 연속운전이 가능한 수준의 장치 검증이 필요하며, 이를 위한 시험시설 구축이 필요 • 실증로의 효율적인 전류구동을 위하여 비교적 주파수가 낮은 추가적인 RF 출력의 활용이 필요함. 헬리콘 전류구동, 고자기장 영역 LH 전류구동 기술의 확보를 통하여 고밀도 플라즈마에서의 효과적인 전류구동 기술 확보가 필요 • 한편, 헬리콘 및 LH 는 안테나와 플라즈마와 대면하고 있는 구조로, 이킹에 취약하여 커플러 공학 설계 검증을 위한 고출력 시험이 가능한 시험시설 구축이 필요

□ 국내외 시설구축 사례

○ (해외) EU(이태리, 독일), 일본이 ITER 조달 등 연구개발을 목적으로 시험시설 운영 중

– 이탈리아의 ITER 중성입자빔 개발장치(MITICA)가 가장 유사하나, ITER NBI 개발 전용 사양으로 빔 중성화 장치, 빔 수송 장치가 실증로에 적용 가능성은 없음. 음이온원 공동 실험 등 부분적인 공동 이용 가능

– 초박형 안테나의 경우 세계적으로 다수의 독자적인 모델이 개발중이며, 배타적 기술 실시권을 행사할 가능성이 매우 큼 - 세계적 기술 선도 가능

– 초박형 안테나는 블랭킷이 설치되는 플라즈마 일차벽에 통합되어 설치되므로 일차벽의 구조와 형상에 종속됨 - 각각의 실증로 마다 상이하므로 자체적인 실증 절차가 필요

< 가열 및 전류구동 기술 개발 해외 시설 및 활용가능 여부 >

세부시설	사양	활용가능 여부 및 사유
실증로 중성입자빔 시험 시설	• EU MITICA (이태리) – 1MV, 40A, 중수소 음이온 기반 – ITER NBI 개발 전용	• **(일부가능)** 고전압 절연기술, 음이온원 공동 실험 등 부분적인 공동 이용 가능
	• 일본 JT60-SA – 0.5 MV, 22A, 중수소 음이온 기반, 100초 – JT60-SA NBI 개발 전용	• **(불가)** 공동활용의 선례가 없음
전류구동용 EC/RF 통합 장치 및 안테나 시험 시설	• 독일 : FULGOR (Fusion Long Pulse Gyrotron Laboratory) 시험시설 – 90kV/120A에서 10MW CW 장치 테스트 – 130kV/120A에서 5msec 숏펄스 장치 테스트 – 고주파 안테나의 경우 디자인 개념별, 단계별 상이한 다수의 시험 장치 운영 중 (독일, 프랑스, 벨기에)	• **(불가)** 공동활용의 선례가 없음. 자국 기업에서 생산된 자이로트론 테스트용 사이트는 외부 활용 불가

○ (국내) 핵융합(연) KSTAR에서 고주파 음이온원 개발장치와, 원자력(연)에서 수소 양이온빔 개발을 위한 중성입자빔 시험장치를 운영 중이나, 실증로 예상 성능(Q, 출력)의 정확도 향상을 위해서는 성능이 개선된 실증시설이 필요

– 실증로의 도전적인 플라즈마 파라미터 확보를 위하여 EC 및 RF 기반 전류구동 기술은 반드시 확보되어야 하며, 장펄스가 매우 중요한 시험 조건임을 감안하면 국내 시험시설 구축이 필요한 상황임

– 실증로 호환 고자기장 EC/RF 장치의 개발 및 테스트, 전송특성, 플라즈마 커플링 특성 등, 주파수가 다른 전류구동 장치의 통합 시험 시설 구축으로 효율적 개발과 시너지 확보 가능

< 가열 및 전류구동 기술 개발 관련 국내 유관 시설 및 활용 가능 여부 >

세부시설	사양	활용가능 여부 및 사유
실증로 중성입자빔 시험 시설	• KFE 음이온원 개발 장치 – <1A, < 200kV 고주파 음이온원 개발	• **(일부가능)** 음이온원 요소기술 개발 장치로 활용 가능* • **(한계)** 고주파 이온원의 고주파 출력과 가속 전압 한계 (최대 30kW, 200kV, 펄스 <1초). 빔수송 장치 미비(중성화 장치, 칼로리미터 등). 음이온원 개발장치를 확대하여 실증로 중성입자빔 시험 시설로 전환할 수 있음
	• KAERI NBI 시험 장치 – 0.1MV, 수소양이온빔 개발	• **(일부가능)** 대용량 진공 챔버, 가속 전원 일부 및 빔 진단장치 활용을 통한 빔수송 요소기술 개발 활용 • **(한계)** 고에너지 음이온 가속 전원 미비, 가스표적 중성화기 고정
	• 실증로급 시험시설 – 구축사례없음	
전류구동용 EC/RF 통합 장치 및 안테나 시험 시설	• 실증로급 EC/RF 시험시설 – 구축사례없음	• **(불가)** 헬리콘 전류구동을 포함한 신개념 전류구동 실증 시험 및 고밀도 플라즈마 전류구동 최적화 연구에 KSTAR가 활용되나, 자기장의 한계로 인하여 높은 주파수의 고주파원 및 안테나를 시험할 수 없고, 블랭킷이 없으므로 블랭킷 호환 안테나를 시험할 수 없으며, 시험 시설로서 가용성이 낮음

□ 확보전략

○ (자체개발) 실증로 중성입자빔 시험 시설, 전류구동용 EC/RF 통합 장치 및 안테나 시험 시설은 국내 산업체를 활용하여 공동연구를 통한 제작

< 가열 및 전류구동 기술 개발 인프라 확보 전략 >

세부시설	목표	구분	개발 주체	주체별 역할
실증로 중성입자빔 시험 시설	• MeV급 NBI 가열 및 전류구동 장치 시험 • 음이온원 기술(1MeV 이상) 시험 • 차세대 고효율 중성화 장치 검증 • 빔전류 40 A 이상 연속 운전 수송 시험 • NBI 시험시설 단계별 고도화	자체 개발	산업체	고전압 전원 개발
			출연(연)	시험 설비 구성 및 운영
전류구동용 EC/RF 통합 장치 및 안테나 시험 시설	• 실증로용 EC 용 자이로트론 부품 및 시스템 시험 • 실증로용 EC 고출력 전송로 및 런처 시험 • Helicon/LH 등 저주파 RF 대역 전류구동 안테나 시험	자체 개발	대학	• EC 장치 개발 및 장펄스 시험 • EC 안테나 개발 및 시험 • EC 고자기장 토카막 호환 런처 개발 및 시험
			산업체	고전력 전원 개발
			출연(연)	• 초박형 안테나 개발 및 시험 • EC 안테나 시스템 개발

□ 확보일정

○ ('30년대 초 완료) 중장기 연구개발일정을 고려하여, 총 6년('25~'30)에 걸쳐 '30년까지 시운전 및 최적화 완료

< 가열 및 전류구동 기술 개발 인프라 확보 일정 >

세부시설	구축 계획
실증로 중성입자빔 시험 시설	•총 구축 일정 : 2025~2028년(총 4년) – 2025년 : 설비 상세 설계 – 2026년 : 제작 기업 입찰 및 건축 설계 – 2027년 : 연구설비 건설 – 2028년 : 연구설비 건설 완공 및 시운전, 최적화
전류구동용 EC/RF 통합 장치 및 안테나 시험 시설	•총 구축 일정 : 2025~2030년(총 6년) – 2025년 : 설비 상세 설계 – 2026년 : 제작 기업 입찰 및 건축 설계 – 2027년 : 연구설비 건설 – 2028년 : 연구설비 건설 – 2029년 : 연구설비 건설 완공 및 시운전 – 2030년 : 시운전 및 최적화

□ 연도별 투자재원(안)

○ (시설구축비) 실증로 중성입자빔 시험시설, 전류구동용 EC/RF 통합 장치 및 안테나 시험시설 구축비용 223억 산출('26~'30년)

– 1MV HVDC 발생 및 송전(1,000억원), 100kV/80A에서8MW급 펄스 전원(1,000억원)

< 가열 및 전류구동 기술 인프라 구축 연도별 예산(안) 및 인력(안) >

(억원/명)

세부기술	구분	연도														합계
		25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	
실증로 중성입자빔 시험 시설	예산	4.5	33	33	33	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	103.5
	인력	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	55
전류구동용 EC/RF 통합 장치 및 안테나 시험 시설	예산	6	22.6	22.6	22.6	22.6	22.6	–	–	–	–	–	–	–	–	119
	인력	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	56
합계	예산	10.5	55.6	55.6	55.6	22.6	22.6	–	–	–	–	–	–	–	–	222.5
	인력	7	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	111

※ 전원공급장치 2,000억원은 별도

□ 재원 및 연구인력 조달 방안

○ (재원) 현재 실증로 성능에 부합한 중성입자빔 주입장치 및 밀리미터파/RF 기반의 전류구동 장치를 위한 별도의 시험시설 사업은 존재하지 않음

○ (인력) 시험시설 운영에 필요한 인력은 중성입자빔 연구원/기술원 각각 2MY, RF공학 관련 연구원/기술원 각각 2MY 규모가 필요하며, 시험시설 설계 시작 시기와 동시에 인력 확보 가능할 것으로 보임

□ 활용방안

○ 구축된 연구시설은 국내 실증로 가열 및 전류구동 장치 개발을 위한 핵심 장치로 활용될 것이며, 해외 실증로 개발을 위한 시험 시설로도 활용될 수 있음

– 실증로는 높은 효율과 전류밀도의 중성입자빔을 필요로 하므로, 구축된 연구시설에서 실험적으로 이를 검증하게 될 것임

– 현재 국내에서는 밀리미터파 기반의 EC와 RF 기반의 헬리콘/LHFW가 개별 그룹 단위에서 개념 설계 및 실증 연구를 진행하고 있음

– 추후 실증로의 핵심인 노심 플라즈마 전류구동 및 안정성을 위하여 밀리미터파(EC) 장치, 안테나 및 RF 안테나 등의 개발 능력이 국내에서 확보되어야 하며, EC와 RF가 통합된 시험시설 구축을 통하여 실증로의 핵심 요소 기술 확보를 가능하게 할 것임

– 해외 유일하게 존재하는 EC 용 자이로트론 장치 시험시설인 KIT의 FULGOR와 공동연구를 통한 해외 시설 활용 가능성은 없을 것으로 판단됨. 실증로급의 가열 및 전류구동 장치는 총 100 MW 급의 규모의 장치가 공급되어야 하여, 각 국가별 실증로 구축 단계에서는 자국의 장치 시험을 위하여 온전히 활용될 가능성이 매우 높음

– 국내에도 EC 및 RF 전류구동 장치 시험시설 구축을 통하여 향후 연속운전 기반의 실증로용 장치 시험과 고장 수리 등의 주요 역할을 전담하게 할 필요가 있음.

7. 초전도 자석

□ 기술정의

○ 실증로 플라즈마의 안정적 가둠을 위한 고자장 초전도 자석 기술

* 고온의 플라즈마를 가두는데 필요한 높은 중심 자기장(실증로급 6.5-7.0T)을 발생시키는 노심을 감싸는 거대한 초전도 자석 개발

□ 기술개발 필요성

○ 핵융합 플라즈마 반응 유지에 반드시 필요한 기술로, 플라즈마 제어를 위한 기본요건임

- 초전도 자석을 이용해 핵융합 반응(고성능 플라즈마) 이후 불안정한 플라즈마를 안정적으로 가두어야만 장시간 운전 조건이 형성되며, 토카막 내벽 장치 안전을 위해 필수

○ 초전도 자석은 실증로 주요 부품 중 제작 소요기간 및 비용이 가장 많이 필요한 기술로 제작 및 성능 효율화는 경제성 확보에 매우 중요

- 고성능 초전도 선재의 경우, 자체 개발이 아닌 경우에는 전체적인 비용 상승은 물론 제작 일정에도 중요변수로 작용할 가능성이 매우 높아, 완성품 구입에 상당한 비용이 발생

□ 파급성

○ 초전도 자석기술은 의료용 MRI 장치에 활용되며, 서울대병원, 세브란스병원 등 국내 병원에서 도입 중인 의료용중입자가속기 초전도 자석 등에도 활용 가능

○ 최근 많이 보고되고 있는 고온초전도 자석을 활용한 초고자장 토카막 등에 활용 가능

□ 세부기술 분류 및 마일스톤

○ 강력한 자기장 발생을 위해 저항이 없는 초전도 선재①로 50kA 이상의 높은 전류가 흐르는 초전도 도체를 제작②하고 도체를 활용하여 최종적으로 거대한 초전도 자석을 제작③하고 운전하는 시스템④ 개발

< 초전도 자석 세부기술 분류 >

세부기술	세부내용
초전도 선재	○ 실증로급 초전도 자석용 고자장 고성능 초전도 선재 개발 및 선재 개발 – 핵융합 실증로 초전도 자석 적용을 위한 ITER 2배 이상 성능의 고자장 특성 향상 초전도 선재 개발 – 도체 성능 검증 결과를 반영한 고성능 저온 초전도 선재 사양 정의 및 특성평가 기술 개발 (QA/QC 프로세스 확립) – 핵융합로에 적용 가능한 고온초전도 선재 사양 설정 및 특성 평가 기술
초전도 도체	○ 저온 및 고온초전도 도체 설계, 케이블링 조관 등 제작, 특성평가 기술 – 16T 급의 초전도자석용 50 kA 이상 저온초전도 도체 설계기술, 도체 케이블링, 조관 및 제작기술 개발 – 초전도 자석의 안정적 운전을 위한 도체 시험·검증 기술 개발 – 초전도 도체 성능 검증 결과를 반영한 실증로급 초전도 도체 설계 및 제작 (QA/QC 프로세스 확립) – 핵융합로에 적용 가능한 고온초전도 도체 설계, 제작기술 연구
초전도 자석	○ 실증로용 토로이달 필드 코일 등 초전도 자석 설계 및 제작 기술 – 16T 급 핵융합 실증로용 저온초전도 자석 설계, 고자장을 견딜 수 있는 구조 설계 및 절연, 접합 기술을 포함한 제작기술 확립 – 실증로 초전도 자석 시험용 코일 제작 및 평가 수행 – 시험용 코일 제작 시험 결과에 따른 실증로용 저온초전도 자석 설계 및 제작 기법, QA/QC 프로세스 확립 – 핵융합로에 적용 가능한 20T급 고온초전도 자석 설계, 제작 및 운전 기술개발, 시험용 코일 설계, 제작 및 평가 수행
초전도 자석기반 시스템	○ 초전도 자석 냉각, 전원 등 기반 시스템 및 자석 퀜치 보호, 운전 해석 기술 – 초전도 자석 냉각 및 전원 공급 등 제반 사항을 포함한 기반시스템 설계, 제작 및 운영 기술 확보 – 실증로용 초전도 자석 퀜치 보호 및 운전해석 기술 개발

< 초전도 자석 세부기술개발 마일스톤 >

범례: 산 산업체 학 대학 연 연구기관 | 자체개발 | 국제협력

세부기술	현재기술 수준	2026	2030	2035	2038	최종목표
초전도 선재	TRL4 (50%)	연 학 산 실증로급 선재 및 성능 평가 기술 개발		연 학 산 실증로급 선재 장선화 및 사양 결정	연 학 선재 대량생산 및 품질보증 체계 마련	(TRL6, 100%) 실증로 선재 대량생산 기술 (총 500톤, 연 70톤 생산)
초전도 도체	TRL4 (34%)	연 산 초전도 도체 설계 최적화 및 전류인가, 내구성 시험		연 산 초전도 도체 특성 평가 및 대량생산 기술 개발	연 학 실증로급 도체 생산 및 품질보증 체계 마련	(TRL6, 100%)실증로 도체 대량생산 (총 100km, 단위길이 1km 이상)
초전도 자석	TRL4 (34%)	연 산 실증로 초전도 자석 설계 및 특성평가, 해석 방법론 개발		연 산 실증로 초전도 자석 시제품 코일 제작	연 학 실증로 초전도자석 최종설계, 품질보증 체계 마련	(TRL6, 100%) 실증로 초전도자석 제작기술 확보
초전도 자석 기반 시스템	TRL4 (34%)	연 산 초전도자석 운전 해석기술 개발		연 산 실증로용 퀜치 보호기술 개발	연 산 냉각, 전원 시스템 사양 설정	(TRL6, 100%) 실증로용 초전도자석 기반기술 확보
인프라				연 산 초전도 자석 시험시설 구축	초전도 자석 시험시설 운영	초전도 자석 시험 시설 구축

① 초전도 선재

□ 정의

○ 실증로급 초전도 자석용 고자장 고성능 초전도 선재 개발 및 선재 사양 설정

< 초전도 선재 기술 개요 >

세부기술	기술개요
고성능 선재 개발 및 장선화	• 저온초전도 선재 내부의 수천가닥의 필라멘트의 크기를 더 작게 하거나 낱알경계면 등의 핀닝 특성 등을 향상하는 방법으로 고자장 임계전류밀도를 향상시키면서 동시에 수 km 장선 제작이 가능하고 교류손실 등 그 외 필요한 성능을 만족시키는 고성능 선재개발 기술
성능평가, QA/QC 기법, 사양 설정	• 실제와 유사한 고자장, 고변이 등의 상황에서 임계전류 밀도 저감 특성 등 분석기술 (이는 선재 개발 과정에 피드백을 제공함과 동시에 자석 설계 기본 변수로 활용) • 자석 혹은 도체의 설계에 따라 교류손실 등 필요한 사양을 정의하고 이에 따른 선재 제작 요건을 제시하는 기술 및 설계 수명을 견딜 수 있는 선재 QA/AC 프로세스 정립 기술 • 장선화, 선재 형상 최적화, 선재 절연 및 표면처리, 균일 임계전류, 임계전류 조절, 중성자 내구성 등 실증로급 고온초전도 자석에 필요한 선재 사양 설정 및 제작 공정 개발

□ 기술개발 필요성

○ (초전도 자석 개발의 핵심) 초전도 선재는 초전도 케이블의 핵심소재로, ITER 13T급 이상의 초전도 자석 제작에 가장 큰 난제로 꼽히며, 현재의 부분적인 실험실급 개발 수준이 아닌 장선화된 양산기술 개발이 필요

○ (글로벌 선도 기반 마련) 초전도 자석의 글로벌 시장 선점을 위해서는, 실증로용 선재 양산을 위한 품질 보증 및 통제(QA/AC)* 절차 정립이 필수

* 고자장 성능 외에 교류손실, 변이에 따른 임계전류 밀도 변화 등 주요 성능 특성 평가 등. ITER를 통해 일정 수준으로 평준화된 기술이나, 고자장 고성능 선재의 특수성을 고려한 기법 개발은 국가별로 추진할 전망

□ 고성능 선재개발 및 장선화 기술 동향

○ (국외) 미국과 일본은 민간기업 중심으로 저온 및 고온 초전도 분야 고성능 선재 개발을 진행 중

– 미국은 민간기업과 대학 중심으로 연구개발이 활발하게 진행 중

• ㈜Bruker를 중심으로 RRP (Rod-Restack Process) 방식의 독특한 고성능 Nb3Sn 저온초전도 선재 제조 기법이 개발되어 선도적인 연구가 수행되고 있으며 이미 여러 고자장 자석에 활용되기도 함

• ㈜Luvata의 경우도, 현재 16T급 Nb3Sn 선재를 개발 중에 있으며, 상용화를 위해 노력하고 있음

• ㈜SuperPower는 최근 고자장 성능이 획기적으로 개선된 REBCO 고온초전도 선재를 개발하였고 Houston 대학과 함께 관련 연구를 선도

• ㈜HyperTECH은 MgB2 소재를 기반으로 교류 손실이 적은 다심 고온초전도 선재를 개발 중

– 일본은 민간기업을 중심으로 저온 및 고온 초전도 선재 개발 추진 중

• ㈜JASTEC을 중심으로 DT (Distributed Tin) 방식의 고성능 Nb3Sn 저온초전도 선재 제조 기법이 개발되어 RRP 방식에 근접하는 성능의 선재 개발 연구 수행

• ㈜Faraday Factory는 신생 기업으로서, 민간에서 투자가 활발한 고온초전도 Tokamak 자석에 필요한 REBCO 고온초전도 선재의 물량에 대응하기 위한 최근 양산화 계획을 발표

○ (국내) KSTAR용 초전도 자석 개발 참여 산업체를 중심으로 지속적인 연구개발 추진 중

– KSTAR 및 ITER용 초전도 선재를 납품한 바 있는 ㈜KAT에서는 그 후에도 초전도 선재개발을 지속하여 ㈜JASTEC과는 다른 DT (Distributed Tin) 방식의 고성능 Nb3Sn 저온초전도 선재 제조 기법에 성공, 실증로급 사양에는 미치지 못하지만 ITER 사양을 능가하는 선재를 이태리의 DTT (Divertor Test Tokamak)에 납품한 바 있고 최근 중국 CFETR 시험용 코일제작용 선재 수주에 성공

– ㈜KAT에서는 향후 KENTECH에 건설되는 16T급 초전도 도체 시험설비에 필요한, 향후에 사용될 선재 개발을 목표로, 16T급 Nb3Sn 선재 개발에 성공하였고, 현재 양산 체제를 위한 시험단계를 진행 중으로, 가까운 시일 내에 상용화가 가능할 것으로 예상

– ㈜서남을 중심으로 REBCO 고온초전도 선재 및 ㈜삼동을 중심으로 MgB2 고온초전도 선재를 세계 시장에 공급하고 있음. 또한 2022년 시작된 고온초전도 자석 원천기술 개발사업의 일환으로 고온초전도 선재의 성능 개선 뿐만 아니라 양산화 및 표준화 등의 연구도 진행 중

□ 성능평가, QA/QC 기법, 사양 설정 기술 동향

○ (국외) 미국은 선재 파괴 분석기술에 대해 선도적이며, EU는 선재의 변이 의존성 성능 분석에서 선도 중임

– 미국은 성능평가 기술 중 선재 파괴 분석기술에 대하여 선도적으로 수행 중이며, 특히 사양 설정 기술은 최근 핵융합로용 고온초전도 자석 개발과 관련하여 고온초전도 선재 사양에 관한 여러 기술 분석이 수행 중

- EU는 선재의 변이 의존성 등에 관한 성능 분석 등 전통적인 평가기술을 주도적으로 수행하고 있으며, 최근 DTT(Divertor Test Tokamak) 등의 개발로 인해 새로운 선재 사양을 정의하고 이에 대한 QA/QC 기법을 도입하기로 결정

○ (국내) 기초적인 선재 성능평가 기법은 KSTAR 및 ITER 개발 과정에서 도입되었으나 고자장 고성능 초전도 선재 사양에 맞는 기법 개선이 시급한 상황. 최근 도체 시험시설 구축에 따라 이에 필요한 초전도 자석의 개발 과정에서 선재 사양 설정에 관한 연구가 병행되어 진행 중

□ 기술확보 전략

○ (기술내용) 실증로급 고성능 선재 개발 및 장선화·대량생산 기술개발

- 실증로급 자장 환경하에서 임계전류 밀도 특성이 나오는 고성능 선재개발 기술

- 선재의 성능 평가와 함께 중요한 물성인 교류손실 특성 및 변이에 의한 임계전류 밀도 변화 등의 특성을 평가하는 기술

  * 국내는 현재 16T급 Nb3Sn 선재개발에 성공하고, 양산 체제를 위한 시험단계를 진행 중이나, 실증로급 초전도 도체 내부에서 예상되는 강한 힘에 의한 변이 등에 대해 임계전류 밀도 특성 등이 유지되는지 등에 대한 우려가 있는 상황

- 선재 QA/QC 프로세스 정립 및 활용으로 선재의 장선화 및 대량생산 기술

  * 변이에 의한 임계전류 밀도 변화 등의 특성을 반영하여 운전 기간 동안 안정적으로 운용될 수 있는 선재의 사양을 확립하는 기술 정립

- 선재의 직경, 안정화 동의 비율 등 최종 선재 사양 결정

  * 고자장 하에서의 힘에 대해 그리고 중성자 조사에 대해 내구성이 강한 고온초전도 선재를 토로이달 필드 (TF) 자석의 안쪽에 활용하는 방법에 대한 연구 필요

  * 실증로의 경우, ITER의 3~4배의 중성자속이 논의되고 있으나 전체적인 운전 기간에 걸친 초전도 선재 손상에 대한 고려 필요 (부분적으로 이는 초전도 선재의 사양 설정에 반영되지만, 최대 중성자속에 대한 제한설정이 차폐체 설계에 반영될 필요 있음)

○ (확보전략) 국내 산업계의 선재개발 능력과 학연의 선재 평가 능력의 유기적인 협력을 통한 자체개발 추진

  * 일차적으로는 선재개발 자체에 협력이 이루어지나 중장기적으로 장선화, 대량생산 과정에서도 선재 개발 상의 문제점을 파악하고 이를 반영한 사양 설정 추진

- 특성평가/분석 결과 피드백을 통해 고성능 선재개발 리스크 해결

- 도체시험 시설을 활용한 실제 조건 시험으로 장선화/대량생산 리스크 해결

– 학연 협력으로 성능 선재 평가/분석 기법 개발

– 선재 파괴 검사 등 필요시 해외기관과 협력 추진을 통한 선재 특성에 따른 최종 사양 설정

< 초전도 선재 기술 확보 전략 >

세부기술	개발 내용	핵심주체		주체별 역할
고성능 선재개발 및 장선화	• 임계전류 밀도, 교류손실, 변이 특성 등의 조건에 부합하는 고성능 선재 개발 • 고성능 선재 장선화/대량생산 기술 개발	자체 개발	출연(연) 대학 산업체	• 선재개발 주도 • 평가/분석 결과를 반영한 개선안 도출
			출연(연)	• 선재 평가/분석 기법 개발 • 선재 특성 향상 방안 연구
성능평가, QA/QC 기법, 사양설정	• 선재 평가/분석 기법 개발 • 장선화/대량생산 선재 특성에 따른 최종 사양 설정 • 조달시 QA/QC 기법 확립	자체 개발	출연(연)	• 평가/분석 QA/QC 기법 개발 • 특성에 따른 최종 사양 설정
			대학	• 선재 특성 향상 방안 연구

< 초전도 선재 기술 개발 로드맵 >

세부기술	현재 기술* 수준	단계별 목표				최종목표
		2025	2030	2035	2038	
고성능 선재개발, 장선화	TRL 4 (50%)	실증로급 선재 개발		실증로급 선재 장선화	선재 대량생산	• (TRL6, 100%) 실증로 선재 대량생산 (총 500톤, 연 70톤 생산)
		– 15T 임계전류밀도 1500 A/㎟ 이상, ±3T 교류손실 5000mJ/cc 이하 실증로 선재 개발		– 실증로 선재 대량생산기술 확보 – 실증로급 초전도 선재 10 km 급 무단선 장선화기술 확보	– 실증로 선재 대량생산 기술 확보	
성능평가, QA/QC, 사양설정	TRL 4 (50%)	실증로급 선재 평가기술, 성능개선 기술 개발		실증로급 선재 사양 설정	선재 QA/QC 체계 마련	• (TRL6, 100%) 실증로급 초전도 선재 사양 확정 및 QA/QC process 확립
		– 18T 고성능 선재 분석기술 – 고성능 선재 스트레인 효과 분석기술 – Ta barrier 조절 등의 방법을 통한 스트레인 내구성 확보 기술 개발		– 실증로급 초전도선재 사양설정 기술개발	– 실증로급 초전도 선재 QC process 구축	

□ 연도별 투자재원(안)

○ (인력소요 및 예산) 산학연 전문인력을 활용한 제품개발 및 평가 중심의 사업으로 인력운영을 위한 제반비용(인건비, 연구활동 관련 직접비, 간접비 등 1MY/2억원)으로 90억원 도출

– 실증로 고성능 선재의 대량생산 기술 개발을 위해 연평균 총 1.8MY 필요

– 실증로급 초전도 선재 사양 확정 및 QA/QC 절차 확립을 위해 연평균 총 1.4MY 필요

< 초전도 선재 기술 개발 연도별 예산(안) 및 인력(안)

(억원/명)

세부기술	구분	연도														합계
		25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	
고성능 선재개발, 장선화	예산	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	2	2	2	50
	인력	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	25
성능평가, QA/QC, 사양설정	예산	2	2	2	2	2	4	4	4	4	4	4	2	2	2	40
	인력	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	1	1	1	20
합계	예산	6	6	6	6	6	8	8	8	8	8	8	4	4	4	90
	인력	3	3	3	3	3	4	4	4	4	4	4	2	2	2	45

□ 재원 및 연구인력 조달 방안

○ (재원) 핵융합(연) 기본사업*을 통해 기초연구를 수행하며, 선재 제작 등은 산업체와 공동 신규사업 추진

* 핵융합(연) 기본사업 : KSTAR 연구사업, 핵융합 실증로 핵심공학기술 개발 사업

○ (연구인력) KSTAR 및 ITER 선재 조달 과정 경험이 있는 유관분야 전문가그룹을 우선 활용하고, 신진인력은 국내 학계를 통한 양성 및 조달

② 초전도 도체

□ 정의

○ 저온 및 고온초전도 도체 설계, 케이블링 조관 등 제작, 특성평가 기술

< 초전도 도체 기술 개요 >

세부기술	기술개요
실증로 저온 초전도 도체 제작	• 케이블 패턴, 트위스트 피치 등에 따른 기계적 안정성, 공극률, 안정화동 비율 등에 따른 열적인 안정성, 퀜치 안정성 등을 고려한 도체 설계기술 및 설계에 따른 단계별 케이블링 기법, 고자장 하에서 강한 기계적인 힘을 견딜 수 있는 두께의 조관 기술 등 도체 제작기술 개발
초전도 도체 특성평가 QA/QC 개발	• 도체 시험시설 측정용 자석 혹은 시험용 코일의 자장 환경 하에서 도체의 임계전류, 혹은 외부 열원 인가에 따른 안정성 분석 등의 초전도 도체 특성 평가, 분석 기술 및 자석 권선을 위한 수 km 길이의 균일한 초전도 도체 제작을 위한 케이블링, 조관 품질 등 QA/QC 기법 개발
고온 초전도 도체 제작	• 고자장 임계전류 특성이 더 우수한 고온초전도 선재의 테이프 형태를 고려한 도체 형상, 교류 손실 및 자기장 특성을 고려한 도체 개발, 비교적 큰 온도마진을 고려한 냉각 방법, 스크리닝 전류를 포함하는 기계적 힘에 대한 고려 등을 반영한 설계 및 시험 평가, 제작 기술 개발

□ 기술개발 필요성

○ (우수한 산업기반 유지·발전) KSTAR 건설과정에 참여한 국내 기업들이 ITER 초전도 도체의 성공적 제작·조달 완료 등 국제적으로 인정받은 우수한 기술력의 지속적인 유지 발전 필요

– 실험로와 달리 실증로용 초거대 고성능 초전도 도체는 고차원의 기술력이 필요한 만큼 실증로급 저온초전도 도체 설계, 제작 기술 확보 필요

* ITER 도체 평가과정에서 제기된 케이블 모양에 따른 힘의 쏠림, 트위스트 피치에 따른 승온/냉각 과정의 안정성 등의 문제점 및 실증로용 도체 평가과정에서 발견될 문제점을 반영

○ (기술적 한계 극복) 고자장 저온초전도 선재를 사용함으로 발생할 수 있는 실제 운전 환경 하에서의 여러 문제에 대한 도체 평가 및 균일한 제작 기술개발 필요

* 고자장 저온초전도 선재는 선재 내의 수천 가닥의 필라멘트의 크기가 마이크로미터급으로 극단적으로 줄어든 형태로 기계적인 강도에 취약점이 우려됨. ITER의 경우 이를 극복하고자 케이블링 시 트위스트 피치등을 조절하여 이러한 취약점을 극복

○ (신기술 선도) 고온초전도 도체는 현재 전 세계적으로 개발이 진행되고 있는 상황으로 핵융합에 최적화된 설계 제작 방법이 아직 정립되지는 않았지만 급격한 발전이 기대되고 있으며 또한 동시에 기술적인 선점이 가능한 분야임

* 고온초전도 선재의 고자기장 특성을 잘 활용하면서 동시에 REBCO 선재를 활용한 도체의 교류손실 저감 기법 및 비교적 낮은 교류손실 특성을 보이는 BSCCO, MgB2 등 적용처에 따른 다양한 도체 연구 개발이 필요

□ 실증로 저온 초전도 도체 설계 및 제작 기술 동향

○ (국외) 미국은 저온 초전도 설계기술에서 선도적이며, EU는 저온 초전도 도체 설계 및 제작에 세계 최고 수준의 기술력 보유

– 미국은 ITER 이후에 대규모의 저온초전도 도체 관련 연구는 수행되고 있지 않은 상황이지만 특히 설계에 있어서는 선도적인 기술을 보유하고 있음

– EU는 ITER보다 큰 실증로 저온초전도 자석 개념을 발전시키고 있으며 이에 필요한 도체의 설계 및 제작은 프랑스의 CEA (The French Alternative Energies and Atomic Energy Commission), 스위스의 SPC (Swiss Plasma Center) 및 이탈리아의 ENEA (Energia Nucleare ed Energie Alternative) 등의 연구진이 경쟁적으로 연구를 수행하고 있음. 저온초전도 도체 설계 및 제작 기술 모두 세계 최고 수준으로 평가됨

○ (국내) 국내에서는 KSTAR 제작 및 ITER 참여, 그리고 실증로 CSR (Conceptual Study Report) 연구 등을 통해 기초 설계 능력 확보

- 제작 관련으로는 ITER 조달이 종료된 후 기존 국내 산업체가 초전도 도체 케이블링 사업을 종료하여 지속적인 연구에 어려움이 있으며 실증로급 도체 두께의 국내 조관이 가능하지 않은 등 여러 이슈가 있는 상황임

□ 초전도 도체 특성평가 및 QA/QC 기법 동향

○ (국외) 미국과 EU는 고온초전도 도체 평가도 가능한 15 T, 100 kA급 초전도 도체 시험시설을 공동 구축하여 운영 중

- 미국은 최근 페르미 랩 (Fermi Natinoal Accelerator Laboratory, FNAL) 및 로렌스 버클리 랩 (Lawrence Berkeley National Laboratory, LBNL)에서는 EU와의 협력으로 특히 고온초전도 도체 평가도 가능한 15 T, 100 kA급 시험시설, HFVMTF (High Field Vertical Magnet Test Facility)을 공동으로 구축하고 운영에 들어감

- EU는 이미 SPC의 SULTAN 시설 및 CERN (the European Organization for Nuclear Research)의 FRESCA 등의 시설을 운영 중이며 특히 SULTAN 시설의 EDIPO 시험시설 사고 이후에 미국 로렌스 버클리 랩과 공동연구로 HFVMTF와 같은 사양의 EDIPO2 시험시설 제작이 진행되고 있는 상황임

○ (국내) 국내는 2027년 완공을 목표로 HFVMTF 이상의 16 T, 100 kA급 도체 시험시설 구축이 진행 중

□ 고온 초전도 도체 제작 기술 동향

○ (국외) 미국은 실증로급 고온초전도 도체 기술을 선도 중이며, EU는 다양한 형태의 도체 개념을 연구하며 많은 평가를 수행 중

- 미국은 사실상 현재 실증로급 고온초전도 도체 기술을 선도하고 있다고 볼 수 있으며 특히 민간 기업인 CFS (Commonwealth Fusion Systems)가 주도하고 있음. 교류손실 효과를 비교적 덜 고려해도 되는 토로이달 필드 (TF) 자석의 경우에는 NINT (No-Insulation Non-Transposed) 케이블이 그리고 중앙 솔레노이드 (CS) 자석에 대해서는 VIPER (Vacuum pressure Impregnated, insulated, Partially transposed, Extruded, and Roll-formed) 케이블 형태가 주로 연구되고 있음

- 일본은 초기에는 STARS (Stacked Tapes Assembled in Rigid Structure) 케이블 등 연구가 수행되기도 했으나 최근에는 미국, EU에 비해 연구가 덜 활발한 편임

- EU는 독일의 칼스루에 공과대학 및 스위스의 SPC에서 최초로 주도적인 연구가 수행되었으나 현재는 ENEA에서 많은 연구가 진행 중임. 다양한 형태의 도체 개념이 연구되고 있으며 많은 평가가 수행되고 있음

○ (국내) 국내는 '고온초전도 마그넷기술 개발사업' 과제를 통해 막 연구가 시작된 상태로 일차적으로 12 T, 30 kA급 고온초전도 도체 개발을 목표로 함

□ 기술확보 전략

○ (기술내용) 실증로급 초전도 도체 개발 및 대량생산 기술개발

- 저온 초전도 도체 설계 최적화 및 최종 도체 사양 설정 등 설계 기술 확보

  * 트위스트 피치 조정 및 도체 단면비 조정에 대한 연구 등 ITER 초전도 도체 개발 시 발견된 예상하지 못한 문제점 해결을 위한 심층 연구 수행

- 초전도 도체의 내구성 및 운전 안전성을 평가하고 해석하는 기술 개발 추진

  * 대량생산 및 조달에 필요한 QA/QC 체계 구축

- 고온초전도 도체 설계 및 제작 기술 확립

  * 고온초전도 도체 개념은 아직은 세계적으로 태동기이지만 최근 급격한 기술적인 진보가 이루어지고 있는 상황으로 2022년부터 시작된 '고온초전도 마그넷기술 개발사업' 과제 등을 활용하여 기술적 진보에 대해 원활한 대응 전략 수립 필요

○ (확보전략) 산·연 협력으로 도체 제작 기술을 확보하고, EU와의 국제협력으로 특성평가 기술 확보

- KSTAR, ITER 초전도 도체 제작 기술을 확보하고 있는 국내 산업체와의 협력으로 도체 제작 기술 확보

  * 국내 산업계의 도체개발 능력 증진, 학연의 도체 평가 역량을 유기적으로 결합하고 피드백을 통한 효율적인 저온/고온 초전도 도체 설계 및 제작, 평가 기술 확보

- 시편 준비, 특성 측정 기법 등의 평가 전반에 관해 많은 경험이 있는 EU 등과의 국제협력 추진으로 특성평가 기술 등 확보

  * 필요시 도체 케이블, 조관 혹은 초전도 도체 평가기술, 고온초전도 도체 기술 개발 중 특정 사안에 대해 해외 공동개발을 통해 기술 개발 리스크를 줄이는 개발 방법 추진

< 초전도 도체 기술 확보전략 >

세부기술	개발 내용	핵심 주체		주체별 역할
실증로 저온 초전도 도체 제작	• 도체설계 최적화 기술 및 최종 도체 사양 설정 • 초전도선재 케이블링 및 초전도 케이블 조관기술 개발	자체 개발	출연(연)	• 도체 설계기법 확립 • 최종 도체 설계안 사양 확정
			산업체	• 케이블링 및 조관 기술 개발 ·제작
		국제협력 (한-EU)		• 도체설계 최적화 기술 확보
초전도 도체 특성평가 QA/QC 개발	• 내구성, 운전 안전성 평가 및 해석기법 개발 • 조달 시 QA/QC 기법 확립	자체 개발	출연(연)	• 내구성 및 운전 안전성 평가 • 해석기법 개발
			대학	• 도체 시험 해석기법 연구
		국제협력 (한-EU, 한-미)		• 도체 시험, 내구성 및 운전 안정성 평가
고온 초전도 도체 제작	• 고온초전도 도체 설계 기법 개발 및 사양 설정 • 고온초전도 도체 적층 및 조관 기술 개발	자체 개발	출연(연)	• 고온초전도 도체 설계기법
			대학	• 시험용 코일 도체 사양 설정
			산업체	• 고온초전도 도체 제작기법

< 초전도 도체 기술 개발 로드맵 >

세세부기술	현재 기술 수준	로드맵				최종목표
		2025	2030	2035	2038	
실증로 저온 초전도 도체 제작	TRL4 (50%)	고성능 도체 설계기법/제작기술 연구	설계 최적화/70kA급 도체 개발	사양설정/도체 대량 생산 기술	실증로급 도체 생산	• (TRL6, 100%) 실증로 도체 대량생산 (총 100km, 단위길이 1km 이상)
		– 온도마진 1 K 이상, hot spot 온도 150 K 이하, Stekly 조건을 만족하는 고성능 도체 설계 기법 확립 – (국내) 케이블링 및 조관 기법 연구	– 실증로 운전조건에 따른 공허율, Cu 비율 등 케이블링 최적화 기술 – 4.2K 내압강도 700MPa 이상 통전전류 70kA 이상 실증로 도체 개발	– 실증로 운전조건에 따른 최종 도체 사양 설정 – 실증로 도체 대량 생산기술 개발	– 실증로 도체 대량생산 (총 100km, 단위길이 1km 이상)	
초전도 도체 특성평가QA/QC 개발	TRL 4 (33%)	특성평가 및해석방법론 개발	전류인가, 승온/냉각 내구성 시험	열적요동 안정성 등 운전특성 평가	QA/QC process 시행	• (TRL6, 100%) 특성평가 결과에 따른 사양 설정, QA/QC Process 확립 및 시행
		– 초전도도체 평가 관련 자료조사, 도체 준비 방법 및 해석방법론 개발	– 전류인가 3000회 이상, 냉각/승온 10회 이상 내구성 시험 평가	– 열적요동에 대한 안정성 분석 등 다양한 운전 안정성 시험 평가	– QA/QC Process 확립	
고온 초전도 도체 제작	TRL4 (20%)	12T, 30kA급 설계 및 제작 기술	시험용 코일 도체 사양 설정	시험용 코일 도체 제작 완료	실증로급 도체 연구	• (TRL6, 100%) 실증로급 고온초전도 도체 설계/제작 기술 확립 및 시험용 coil 도체 제작
		– 12T, 30kA급 고온초전도 도체 설계 및 제작 기술 연구	– 시험용 고온초전도 mock-up coil용 도체 사양 설정 및 제작 기법 확립	– 시험용 고온초전도 mock-up coil용 도체 제작 완료	– 실증로급 고온초전도 도체 설계 및 제작 기술 연구	

□ 연도별 투자재원(안)

○ (인력소요 및 예산) 산학연 전문인력을 활용한 제작 및 평가 중심의 사업으로 인력운영을 위한 제반비용(인건비, 연구활동 관련 직접비, 간접비 등 1MY/2억원)으로 380억원 도출

– 실증로 저온 초전도 도체 대량생산을 위한 연구개발 인력 연평균 총 7MY 필요

– 초전도 도체 특성평가 결과에 따른 사양을 설정하고 QA/QC Process 확립 및 시행을 위한 연구개발 인력 연평균 총 4MY 필요

– 실증로급 고온초전도 도체 설계/제작 기술 확립 및 시험용 coil 도체 제작에 필요한 연구인력 연평균 총 4MY 필요

< 초전도 도체 기술개발 연도별 예산(안) 및 인력(안) > (억원/명)

세부기술	구분	연도														합계
		25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	
실증로 저온 초전도 도체 제작	예산	6	6	12	18	18	18	18	18	18	18	16	12	6	6	190
	인력	3	3	6	6	9	9	9	9	9	9	8	6	3	3	95
초전도 도체 특성평가QA /QC 개발	예산	4	4	6	6	8	10	10	10	10	10	6	6	4	4	95
	인력	2	2	3	3	4	5	5	5	5	5	3	3	2	2	48
고온 초전도 도체 제작	예산	4	4	6	6	8	10	10	10	10	10	6	6	4	4	95
	인력	2	2	3	3	4	5	5	5	5	5	3	3	2	2	48
합계	예산	14	14	24	24	34	38	38	38	38	38	28	24	14	14	380
	인력	7	7	12	12	17	19	19	19	19	19	14	12	7	7	190

□ 재원 및 연구인력 조달 방안

○ (재원) 핵융합(연) 기본사업*을 통해 기초연구를 수행하며, ‘초전도도체 시험설비 구축사업’**, ‘고온초전도 마그넷기술 개발사업(대전류 토로이드형 고온초전도 자석의 핵심기술 개발사업)’*** 등 신규사업을 통해 수행

* 핵융합(연) 기본사업 : KSTAR 연구사업, 핵융합 실증로 핵심공학기술 개발 사업

** 과기부, 한국에너지공과대학교, 한국핵융합에너지연구원 공동 추진 사업(’22~’27)

*** 한국핵융합에너지연구원/한국에너지공과대학교/㈜파워닉스/홍익대학교/부산대학교 공동 추진(’22~’26)

○ (연구인력) KSTAR 및 ITER 도체 조달 과정 경험이 있는 산업체, 유관분야 전문가 그룹을 활용하고, 신진인력은 국내 학계를 통한 양성 및 조달

③ 초전도 자석

□ 정의

○ 실증로용 토로이달 필드 코일 등 초전도 자석 설계 및 제작 기술

< 초전도 자석 기술 개요 >

세부기술	기술개요
실증로 저온 초전도 자석 설계 및 제작	• KSTAR 및 ITER의 저온 초전도 자석 설계 기술을 기반으로, 기계적인 강도 한계에 근접하리라 예상되는 토로이달 필드(TF) 코일, 교류손실에 의한 심한 열적요동을 견디어야 하는 중앙 솔레노이드(CS) 코일 등의 40여년 운전기간 안정성을 고려한 설계 및 권선, 진공함침, 접합 등 자석 제작, 자석 전체를 지지하는 구조물 설계/제작 기술 확립
시험용 코일 특성평가 및 QA/QC 기법	• 실증로용 초전도 자석 제작을 위한 저온 초전도체 기반의 초전도 자석의 열적 안정성 등에 대한 설계 검증 및 제작 기법 적절성 검증을 위한 시험용 토로이달 필드 (TF) 코일, 시험용 중앙 솔레노이드 (CS) 코일 제작, 성능 평가 및 일관된 권선 기법, 접합방법, 접합저항의 적절성, 특히 전류리드 부분의 내전압 특성 등 자석 전체의 QA/QC 기법 개발
고온 초전도 시험용 코일 개발	• 실증로용 고온초전도 자석은 도체를 활용한 혹은 활용하지 않는 혹은 핵융합로 내부 부품 교체를 위한 분리 가능한 형태 등 다양한 기술이 가능하기에 이중 적절한 시험용 코일에 대해 정의하고 이에 대한 설계, 제작 기법 적절성 검증을 위한 시험용 코일 개발 및 평가 수행

□ 기술개발 필요성

○ (기술 역량 제고) 기본적인 설계 및 제작 방법론 외에 실증로급 초전도 자석의 기계적인 내구성, 승온 냉각 등 열적 안정성 등 40여 년의 운전 기간 안정성에 대한 기술 정립 필요

* 특히 토로이달 필드 코일의 기계적인 강도에 관한 문제는 예비개념설계 연구 (CSR, Conceptual Study Report)에서도 논의된 바 있으며 탄성한계를 넘는 매우 강한 힘을 견디는 구조적인 방법에 대해 여러 논의가 진행되고 있는 상황

○ (신기술 검증) 고온초전도 자석은 기술적 가능성을 확인하고 핵융합 에너지 확보를 위한 고온초전도 원천기술 확보 차원에서 반드시 시험용 코일 설계, 제작, 평가를 통한 검증이 필요

* 저온초전도 자석 대비 높은 운전 안전성으로 인한 낮은 퀜치 가능성, 높은 고자기장 특성으로 인한 자석의 소형화, 무헬륨 운전에 기반한 낮은 운전 비용, 무절연 혹은 금속절연으로 인한 절연 내구도 개선 등의 장점이 있으나, 연구개발 단계임

□ 실증로 저온 초전도 자석 설계 및 제작 기술 동향

○ (국외) EU는 ITER 초전도 자석 설계 제작을 통해 기술확보 중이며, 일본은 JT-60SA 초전도 자석 개발 통해 관련 기술 확보 중

- 미국은 ITER CS 초전도자석 제작·조달 경험이 있으나, 이후에 대규모 저온초전도 자석 관련 연구는 수행되지 않고 있음. 설계에 있어서는 선도적인 기술을 보유

- 일본은 최근 EU와 협력으로 JT-60SA 초전도자석 개발을 통해 자석 설계 및 제작 기술이 진일보 단계임. JT-60SA 건설 과정에서 신진 연구인력이 설계 및 제작기술 경험을 바탕으로 연구를 주도

- EU는 ITER 초전도자석 설계 및 제작은 사실상 EU 주도로 진행되었으며, 제작은 Ansaldo 등 이태리 중공업 부분의 기여가 두드러짐. 설계부분은 기존에 프랑스의 CEA가 기술을 주도했다면 최근 ENEA를 필두로 하는 이태리 연구진의 연구가 두드러짐. DTT 초전도자석 설계 및 제작으로 연구가 지속적으로 수행되고 있음

○ (국내) KSTAR 초전도자석 설계 제작 경험을 바탕으로, 실증로 KDEMO CSR 연구를 통해 초전도자석 설계연구는 간헐적으로 지속되고 있으나 제작 부분은 기존 개발 경험이 전수되지 못하고 사장될 위기. 최근 '초전도도체 시험설비 구축사업'에 필요한 초전도 자석 제작이 추진

□ 시험용 코일 특성평가 및 QA/QC 기법 동향

○ (국외) EU와 일본은 각각 ITER TF 코일과 CS 코일 특성평가를 통해 경험 축적 중

- 일본은 EU와 협력을 통해 ITER CS 시험용 코일 특성평가 경험이 있으며, 특히 CS 시험용 코일은 insert 코일 평가에 활용되는 등 특성평가 연구수행 경험이 풍부

- EU는 ITER TF 시험용 코일의 특성평가가 독일에서 수행. ITER TF 시험용 코일의 특성평가를 통해 설계상의 문제점을 발견하게 된 중요한 계기였으며 이에 대해 수년에 걸쳐 문제가 된 부분의 파괴검사 등을 통해 정확하게 문제를 규명하고 이를 반영한 설계변경 경험을 축적

○ (국내) KSTAR 개발 시에 TF 및 CS 초전도자석 시험용 코일에 대한 특성평가가 수행되기도 하였으며, KSTAR는 시험용 코일이 본제품의 선행제품으로 제작되어 실제 자석의 기술검증이 동시에 수행된 사례가 있음

□ 고온 초전도 시험용 코일 개발 동향

○ (국외) 미국 CFS사의 20 T 초전도자석 시험 평가가 세계적으로 유일

- 미국은 현재 고온초전도 시험용 코일 개발 및 평가는 사실상 CFS의 20 T 초전도자석 시험 평가가 세계적으로 유일하며, EU의 Tokamak Energy 등도 조만

간 시험용 코일 제작 및 평가를 계획하고 있으나 경과를 지켜볼 상황

○ (국내) 최근 고온초전도 도체에 대한 연구가 시작되었으며, 고온초전도 시험용 코일에 관한 개념연구 완료

□ 기술확보 전략

○ (기술내용) 저온 초전도 자석 제작 기술개발 및 고온 초전도 자석 시험용 코일 개발

– 실증로 TF, CS, PF 초전도 자석 설계 및 제작 기술

• 장기간 운전을 고려한 탄성한계 내 구조물 설정을 위한 고온초전도 자석과의 하이브리드 하이브리드 개념을 포함한 다양한 설계 연구 수행

* 초전도 자석은 핵융합로 개념설계에 있어 radial build를 결정하는 중요한 요소로 구조적 안정성을 고려한 TF 구조물 및 CS 크기 등이 결정되고 내부 부품 교환을 고려한 PF 자석의 공간 배치 등 설계 추진

• 설계 및 제작에 난이도가 높은 TF 및 CS 초전도 자석의 경우에는 제작기법 및 설계 검증을 위한 시험용 코일을 통해 장기적 운전 성능 평가 수행

* 교류손실 영향이 적은 TF 자석 위주로 연구개발을 수행하며 고자장 가능성, 오버홀(overhaul) 기간 중 분리가 가능한 형태로 제작 가능한지에 관한 선도적인 연구 및 CS 자석 가능성 연구 등을 순차적으로 진행

– 시험용 저온 초전도 코일에 대한 내구성, 운전 안전성을 평가하고 해석하는 기술 개발 추진

* 대량생산 및 조달에 필요한 QA/QC 체계 구축

– 실증로급 고온초전도 자석 설계제작 기술확보

* 시험용 mock-up 코일 설계 및 제작 추진

○ (확보전략) 초전도 자석 구조설계 분야는 EU와의 국제협력으로 추진하고, 접합기술, 절연기술 등 제작 관련 사항은 ITER 제작 경험 있는 국가와의 협력 및 국내 산-연 협력으로 추진

– 초전도 자석 제작은 출연(연) 주도의 권선, 열처리 기술과 산업계의 거대 구조물 제작 기술의 협력으로 추진

* WP(Winding Pack)내의 상세 기계 해석 등 특수한 분야는 해외 연구기관과의 공동연구 추진 가능

– 상세 구조 해석 등 일부 초전도 자석 설계 관련 부분은 EU(CEA) 등 국제협력을 통해 리스크 감소 효과 기대

< 초전도 자석 기술 확보전략 >

세부기술	개발 내용	핵심 주체		주체별 역할
실증로 저온 초전도 자석 설계 및 제작	• 실증로용 TF, CS, 및 PF 초전도 자석 설계 및 제작기술 확보 • 시험용 코일 제작/평가	자체 개발	출연(연)	• 초전도 자석 설계/제작 기법 • 권선, 열처리 등 기술 개발
			산업체	• 초전도 자석 구조물 등 제작
		국제협력 (한-EU)		• 구조설계 기술 확보
시험용 코일 특성평가 및 QA/QC 기법	• 내구성 및 운전 안전성 평가 및 해석기법 개발 • 조달시 QA/QC 절차 구축	자체 개발	출연(연)	• 내구성 및 운전 안전성 평가 • 해석기법 개발
			대학	• 자석 평가 해석기법 연구
		국제협력 (한-ITER 등)		• 자석 시험, 내구성 및 운전 안정성 평가
고온초전도 시험용 코일 개발	• 고온초전도 자석 설계/제작 기법 확립 • 시험용 코일 제작/평가	자체 개발	출연(연)	• 고온초전도 자석설계/제작기법 • 시험용 코일 설계/평가
			대학	
			산업체	• 고온초전도 시험용 코일 제작

< 초전도 자석 기술 개발 로드맵 >

세세부기술	현재 기술 수준	로드맵				최종목표
		2025	2030	2035	2038	
실증로 초전도 자석 설계 및 제작	TRL4 (50%)	실증로 TF, CS, PF 1차 개념설계	실증로 TF, CS, PF 1차 공학 설계	TF 및 CS mock-up 코일 제작	최종설계, 제작기술 확보	• (TRL6, 100%)) 실증로 초전도자석 최종 설계, 제작기술 확보
		- 실증로 개념설계 연구에 따른 TF, CS 및 PF 초전도 자석 1차 개념설계	- TF, CS 및 PF 초전도 자석 1차 공학 설계 - TF 및 CS mock-up coil 설계	- TF, CS 및 PF 초전도 자석 2차 공학 설계 - TF 및 CS mock-up coil 제작	- 실증로용 TF, CS 및 PF 초전도 자석 최종 설계 - 실증로용 TF, CS 및 PF 초전도 자석 생산기술 확보	
시험용 코일 특성평가 QA/QC	TRL 4 (33%)		특성평가, 해석방법론 개발	코일 평가준비 완료	코일 평가 및 QA/QC 절차 확립	• (TRL6, 100%)) 시험용 코일 특성평가, QA/QC Process 확립
			- 초전도 자석 평가 관련 자료조사, 도체 준비 방법 및 해석방법론 개발	- 시험용 코일 평가 준비 완료	- 시험용 mock-up coil 평가 - QA/QC Process 확보	
고온 초전도 시험용 코일	TRL4 (20%)	고온초전도 자석설계, 제작 연구	시험용 mock-up 코일 설계	시험용 mock-up 코일 제작	실증로급 고온초전도 자석 연구	• (TRL6, 100%)) 실증로급 고온초전도 자석 설계 및 제작 기술확보
		- 고온초전도 자석설계 및 제작 기술 연구	- 시험용 고온초전도 mock-up coil 설계	- 시험용 고온초전도 mock-up coil 제작	- 실증로급 고온초전도 자석설계 및 제작 기술 연구	

□ 연도별 투자재원(안)

○ (인력소요 및 예산) 산학연 전문인력을 활용한 제작 및 평가 중심의 사업으로 인력운영을 위한 제반비용(인건비, 연구활동 관련 직접비, 간접비 등 1MY/2억원)으로 200억원 도출

– 실증로용 초전도자석 설계 및 제작을 위한 연구개발 인력 연평균 총 4MY 필요

– 초전도 시험용 코일 특성평가를 수행하고 QA/QC Process 확립을 위한 연구개발 인력 연평균 총 2MY 필요

– 실증로급 고온초전도 자석 설계 및 제작 기술확보에 필요한 연구인력 연평균 총 2MY 필요

< 초전도 자석 기술 개발 연도별 예산(안) 및 인력(안)

(억원/명)

세부기술	구분	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	합계
실증로 초전도 자석 설계 및 제작	예산	4	4	4	4	6	8	10	10	10	10	10	10	6	6	102
	인력	2	2	2	2	3	4	5	5	5	5	5	5	3	3	51
시험용 코일 특성평가 QA/QC	예산	–	2	2	2	2	2	4	4	4	6	6	6	4	4	48
	인력	–	1	1	1	1	1	2	2	2	3	3	3	2	2	24
고온 초전도 시험용 코일	예산	2	2	2	2	2	2	4	4	4	6	6	6	4	4	50
	인력	1	1	1	1	1	1	2	2	2	3	3	3	2	2	25
합계	예산	6	8	8	8	10	12	18	18	18	22	22	22	14	14	200
	인력	3	4	4	4	5	6	9	9	9	11	11	11	7	7	100

□ 재원 및 연구인력 조달 방안

○ (재원) 핵융합(연) 기본사업*을 통해 기초연구를 수행하며, '고온초전도 마그넷기술 개발사업(대전류 토로이드형 고온초전도 자석의 핵심기술 개발사업)**' 등 신규사업을 통해 수행

* 핵융합(연) 기본사업 : KSTAR 연구사업, 핵융합 실증로 핵심공학기술 개발 사업

** 한국핵융합에너지연구원/한국에너지공과대학교/㈜파워닉스/홍익대학교/부산대학교 공동 추진('22~'26)

○ (연구인력) KSTAR 초전도 자석 제작 경험이 있는 산업체, 유관분야 전문가 그룹을 활용하고, 신진인력은 국내 학계를 통한 양성 및 조달

④ 초전도 자석기반 시스템

□ 정의

○ 초전도 자석 냉각, 전원 등 기반 시스템 및 자석 퀜치 보호, 운전 해석 기술

< 초전도 자석기반 시스템 기술 개요 >

세부기술	기술개요
초전도자석 기반 시스템	• 실증로급 초전도 자석의 열부하, 40여 년의 운전수명 등을 고려한 냉각, 전원 등 기반 시스템 사양 설정 및 급작스러운 초전도-상전도 전이에 대한 퀜치 보호 기술, 자석 운전 시의 특성에 대한 운전해석 기술 등 자석의 안정적인 운영에 필수적인 제반 기술개발

□ 기술개발 필요성

○ (실증로 특수성 반영) 냉각 및 전원 시스템 등 기반 시스템은 ITER 등의 대형 장치의 건설로 많은 부분이 확보된 기술이지만 실증로급 초전도 자석의 특수성에 관한 연구필요

* 토로이달 필드 코일의 기계적 안정성을 위한 두 개의 병렬 전원 설비 혹은 고온초전도 자석의 상대적으로 높은 운전 온도를 고려한 냉각시스템 구성 등이 논의되고 있음

○ (장치 안정성 확보) 퀜치 보호 기술 및 운전해석 기술 역시 어느 정도의 기반 기술이 확보된 상태이지만 운전수명을 고려한 추가적인 연구가 필요한 상황

* 퀜치 해석 기술은 병렬 전원이 쓰이거나 할 경우에 혹은 고온초전도 자석에 관한 연구등이 필요하며 운전해석 기술은 특히 ITER 초전도 자석 운전을 통해 확립되어 나갈 것으로 기대되지만 KSTAR 초전도 자석의 실험 결과에 대한 분석도 매우 중요

○ (신기술 확보) 고온초전도 자석에서의 퀜치 특성은 저온 초전도와 상이하여 개별적인 퀜치 탐지기술 및 보호기술이 요구됨

* 최근 무절연 고온초전도 자석의 높은 운전 안전성이 다양한 응용 분야에서 보고 되고 있으나, 핵융합 수준의 크기 및 에너지 밀도를 갖는 규모에서 검증되지 못함. 특히, 퀜치 사고시 발생 가능한 다양한 전기적, 기계적, 열적 문제점에 대응하기 위한 퀜치 보호 기술 개발이 요구

□ 초전도 자석기반 시스템 기술 동향

○ (국외) EU는 ITER 초전도 자석 부대시스템 구축을 통해, 일본은 JT60SA운영을 통해 관련 기술 축적 중

- 미국은 최근 CFS 시험용 코일 시험 과정에서도 부대시설 시스템 구축은 중요한 문제의 하나였으며 기간을 최소화하기 위해 기존 시설을 활용하여 성공적으로 시험평가를 수행하는 등 기술력을 입증한 바 있음

- 일본은 최근 JT60SA 운영을 위해 관련 시스템을 전반적으로 재정비하는 등 관련 기술에 대한 연구가 진행 중

- EU는 현재 세계 최대규모의 초전도자석 부대 시스템이 ITER에 구축 중이며, 특히 저온 냉동기 제작이 가능한 Air Liquid, Linde 모두 EU에 있는 등 관련 산업계의 역량도 세계 최고 수준. 초전도자석 운전해석과 관련된 코드 개발 역시 세계적으로 가장 진보된 기술을 보유하고 있으며 현재도 다양한 연구 수행 중

○ (국내) KSTAR 초전도자석 건설 시에 부대시설 구축 경험이 있으며, 현재 진행되고 있는 '초전도도체 시험설비 구축사업'에 필요한 시설 구축에도 활용. 초전도자석 운전해석 부분은 KSTAR 운전해석으로 적용 가능하며, 추가적인 연구수행으로 기술 확립과 꾸준한 개발이 필요한 상황

□ 기술확보 전략

○ (기술내용) 실증로 초전도자석 운전해석 및 퀜치보호 기술 개발과 초전도자석 냉각·전원 장치 사양 설정

○ (확보전략) 운전해석은 KSTAR를 활용한 기술개발 후 일본 등과의 국제협력으로 기술 검증 수행

- 운전해석기술은 KSTAR 초전도자석 운전결과 분석을 통해 개발하고, JT60SA(일) 혹은 DTT(이) 등을 활용 초전도자석 운전해석 적용 가능성 및 기술 검증 추진

- 산-연 협력으로 퀜치 보호 회로 구성 및 냉각장치 개발 추진하고, 냉각시스템은 해외 도입 등 추진

* 초전도 자석이 다단 구조로 설계되거나 고온초전도 자석이 활용될 경우, 병렬구조의 전원, 20K 고온초전도자석 냉각(현재는 4K)에 적절한 사양 설정 등에 필요한 연구 수행.

< 초전도 자석기반 시스템 기술 확보 전략 >

세부기술	개발 내용	핵심 주체		주체별 역할
초전도자석 기반 시스템	• 초전도자석 운전해석, 퀜치보호 기술 개발 • 초전도자석 냉각, 전원 장치 사양 설정	자체 개발	출연(연)	• 운전해석, 퀜치보호기술 개발 • 냉각, 전원 시스템 사양 확정
			산업체	• 전원, 퀜치보호회로 구성 (냉각 시스템 개발 추진)
		국제협력 (한-일, 한-이태리)		• 운전해석 적용 가능성 및 기술 검증

< 초전도 자석기반 시스템 기술 개발 로드맵 >

세세부기술	현재 기술 수준	로드맵				최종목표
		2025	2030	2035	2038	
초전도 자석 기반 시스템	TRL 4 (50%)	초전도자석 해석기술 개발		실증로용 퀜치보호 기술 개발	냉각, 전원 시스템 사양 설정	• (TRL6, 100%)) 실증로용 초전도자석 기반기술 확보
		– 초전도자석 해석기술 1차('25), 2차('30) 개발		– 실증로용 퀜치 보호기술 개발	– 실증로용 냉각, 전원 시스템 사양 설정	

□ 연도별 투자재원(안)

○ (인력소요 및 예산) 전문인력을 활용한 해석기술 등 개발 중심의 사업으로, 인력운영을 위한 제반비용(인건비, 연구활동 관련 직접비, 간접비 등 1MY/2억원) 50억원 도출

– 실증로용 초전도자석 기반기술 확보를 위해 연평균 총 2MY 필요

< 초전도 자석기반 시스템 기술 개발 연도별 예산(안) 및 인력(안) >

(억원/명)

세세부기술	구분	'25	'26	'27	'28	'29	'30	'31	'32	'33	'34	'35	'36	'37	'38	합계
초전도자석 기반 시스템	예산	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	2	2	2	50
	인력	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	25

□ 재원 및 연구인력 조달 방안

○ (재원) 핵융합(연) 기본사업*을 통해 기초연구를 수행하며, '초전도도체 시험설비 구축사업' 등 신규사업을 통해 수행

* 핵융합(연) 기본사업 : KSTAR 연구사업, 핵융합 실증로 핵심공학기술 개발 사업

○ (연구인력) 핵융합(연) 및 학계 등 유관분야의 전문인력을 활용하고, 신진인력은 국내 학계를 통한 양성 및 조달

⑤ 초전도 자석 소요 연구시설

□ 정의

○ 실증로용 저온 초전도 자석의 안정성 및 적절성 등을 검증하고, 시험용 토로이달 필드(TF) 코일, 시험용 중앙 솔레노이드(CS) 코일 제작 및 성능 평가 시험 시설

< 초전도 자석 기술 개발 세부시설 개요 및 필요성 >

세부시설	시설 개요	필요성
초전도 자석 시험 시설	• 저온 및 고온 초전도 권선, 열처리, 진공함침 및 접합 등 제작에 필요한 일체의 설비 및 자석 냉각시험이 가능한 열차폐체가 포함된 Cryostat, 전원, 냉각, 측정계측 시스템 등의 평가를 위한 시설 – 저온초전도 KSTAR 크기 시험용 토로이달 필드 (TF) 코일 및 중앙 솔레노이드 (CS) 코일 제작 및 평가 가능 – 고온초전도 KSTAR 1/4크기 시험용 토로이달 필드 (TF) 코일 제작 및 평가 가능	• 초전도 자석의 설계 및 제작성 검증을 위한 인프라 필요 • 핵융합로용 고온초전도 자석 연구를 위한 기반 시설 확보

□ 국내외 시설구축 사례

○ (해외) 미국은 민간기업이 고온초전도자석 시험시설 구축 운영 중

< 초전도 자석 기술 관련 해외 시설 및 활용가능 여부 >

세부시설	국외	활용가능 여부 및 사유
초전도 자석 시험시설	• 미국 CFS(Commonwealth Fusion Systems)에서는 고온초전도 자석 시험시설을 구축하고 2021년 SPARC 사양의 20T급 시험용 코일의 제작 및 평가에 성공	• **(불가)** 초전도 자석 시험시설은 자석 제작과 관련되 여러 기밀 사항과 관련되어 있어 해당 기관에서 독점적으로 사용하기에 사용이 불가

○ (국내) 초전도 도체 시험시설이 건설 중으로 일부 활용 가능하나, 초전도 자석 시험시설은 없음

< 초전도 자석 기술 관련 국내 유관 시설 및 활용가능 여부 >

세부시설	국내	활용가능 여부 및 사유
초전도 자석 시험시설	• 초전도 도체 시험시설 건설 중 ('27년 완공 예정)	• **(일부가능)** 전원 및 냉각장치 등 일부 설비는 공동 활용이 가능할 것으로 판단하나, 초전도 자석 시험시설은 없음

□ 확보전략

○ (자체개발) 핵융합(연)을 주체로 국내 산업체와 공동연구를 통한 제작

< 초전도 자석 기술 개발 인프라 사양 및 확보전략 >

세부시설	사양	확보전략
초전도 자석 시험시설	• 저온초전도 KSTAR 크기 시험용 토로이달 필드 (TF) 코일 및 중앙 솔레노이드 (CS) 코일 제작 및 평가 가능 • 고온초전도 KSTAR 1/4크기 시험용 토로이달 필드 (TF) 코일 제작 및 평가 가능	국내 산업체 활용 공동개발 및 제작

□ 확보일정

○ ('30년대 초 완료) 중장기 연구개발일정을 고려하여, '30년대 초까지 설치 및 시운전 완료

< 초전도 자석 기술 개발 인프라 확보 일정 >

세부시설	구축 계획
초전도 자석 시험시설	•총 구축 일정 : 2028~2033년(총 6년) – 2028년 : 설비 상세 설계 – 2029년 : 제작 기업 입찰 및 건축 설계 – 2030~31년 : 연구설비 건설 – 2032년 : 연구설비 건설 완공 및 시운전 – 2033년 : 시험용 코일 제작 및 평가 시험

□ 소요예산 및 인력

○ (소요예산) 초전도 자석 시험시설의 상세설계부터 시운전까지 총 500억원 도출

○ (인력) 상세 설계가 시작되는 '28년부터 코일 제작 및 평가시험이 완료되는 '33년까지 6년 동안 연평균 총 8.3MY 필요

< 초전도 자석 기술 개발 인프라 구축 연도별 예산(안) 및 인력(안) >

(억원/명)

세부기술	구분	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	합계
초전도 자석 시험시설	예산	–	–	–	50	50	100	100	100	100	–	–	–	–	–	500
	인력	–	–	–	5	5	10	10	10	10	–	–	–	–	–	50

□ 재원 및 연구인력 조달 방안

○ (재원) 핵융합(연) 기본사업*을 통해 상세 설계를 위한 기초연구를 수행하고 시험시설 구축은 신규사업을 통해 수행

* 핵융합(연) 기본사업 : KSTAR 연구사업, 핵융합 실증로 핵심공학기술 개발 사업

○ (연구인력) 핵융합(연), 산업체 등 유관분야 전문가 그룹을 활용

□ 활용방안

○ 구축된 연구시설은 국내 실증로 연구개발에 필수적인 실증로금 초전도자석의 시험용코일 개발 및 평가에 활용을 목표로 함. 또한 해외 핵융합연구기관과의 공동연구 등에 활용도 가능할 것으로 기대됨

8. 안전·인허가

□ 기술정의

○ (안전성 평가기술) 실증로 안전기술 개발 및 확보를 목표로 주요 위험요소 규명 및 설계 안전성 평가를 위한 기반을 제공하는 기술

○ (인허가 기술) 실증로 건설·운영에 관한 관련 법령 승인에 필요한 규제 및 인허가 절차, 체계 등을 개발·구축하는 기술

□ 기술개발 필요성

○ 안전한 핵융합에너지 이용 및 글로벌 핵융합기술 시장 진출 등을 위해 핵융합의 고유 안전성과 국제 핵융합 규제체계 개발 현황 등을 종합 반영한 실증로를 위한 안전·인허가 기술 개발 필요

□ 세부기술 분류 및 마일스톤

○ 실증로의 안전성을 확보하는 기술과 실증로의 인허가 신청 및 승인받는 체계를 확보하는 기술

< 안전·인허가 세부기술 분류 >

세부기술	세부내용
안전성 평가기술	○ 실증로 안전기술 개발 및 확보를 위해 주요 위험요소 규명 및 설계 안전성 평가에 필요한 기반을 구축하여 안전성을 확보하는 기술 – (안전 요구조건 도출) 핵융합 안전철학 기본원칙을 수립하고 이를 토대로 안전기술 정의 및 안전기준 제정, 안전관리 현안을 개선 – (안전성 규명) 실증로 안전성 평가 전략·방법론을 수립하고, 안전 규명기술 개발, 이를 활용한 사고해석/방사선환경영향평가 등을 통해 안전성 규명 – (안전관리 체계 구축) 핵융합 안전관리 기본방향을 설정하고, 안전관리 전문인력 양성을 위한 기반 구축 및 안전관리 검증 관련 인프라 체계 확보
인허가 기술	○ 설계부터 건설, 운영, 폐기까지 실증로 전주기에 필요한 규제 및 인허가 절차를 정비하여 실증로의 인허가 체계 등을 개발·구축하는 기술 – (규제체계 확보) 안전규제 요건 도출 및 이에 다른 관계 법령 개정·보완 등으로 규제체계 확보 – (규제검증 기술 개발) 핵융합로 설계안전성에대한 인허가적 확인을 위한 안전성 검증기술 개발

< 안전·인허가 세부기술개발 마일스톤 >

범례 산 산업체 학 대학 연 연구기관 자체개발 국제협력

세부기술	현재기술 수준	2026	2030	2035	2038	최종목표
안전성평가기술	TRL2 (20%)	연 학 안전 요건 도출 및 안전성 평가기술 개발		연 학 시스템 안전성 평가	연 학 산 안전요구조건 검증 및 종합 안정성 평가체계 구축	(TRL7, 100%) 실증로 인허가 획득, 실증로 안전성 입증, 안전관리 체계 확립
인허가기술	TRL2 (20%)	연 학 안전 기반 수립 및 방법론, 허용기준 개발		연 학 산 실증로 안전 기준 및 표준 수립, 검증역량 확보	연 학 산 실증로 인허가 심사 적용	(TRL7, 100%) 규제체계 확립 및 규제 검증 코드 확보

① 안전성 평가기술

□ 정의

○ 실증로 안전기술 개발 및 확보를 목표로 주요 위험요소 규명 및 설계 안전성 평가를 위한 기반을 제공하는 기술

< 안전·인허가 기술 개요 >

세세부기술	기술개요
안전 요구조건 도출	• 실증로 안전기본원칙을 수립하고 이를 토대로 안전기술 정의 및 안전기준 제정, 실증로 건설 부지선정 요건 및 안전 요구조건 도출, 검증을 통해 인허가 획득
안전성 규명	• 실증로 안전성 평가 전략·방법론을 수립하고, 안전 규명기술 개발, 이를 활용한 사고해석/방사선환경영향평가 등을 통해 안전성 규명
안전관리 체계 구축	• 핵융합 안전관리 기본방향을 설정하고, 안전관리 전문인력 양성을 위한 기반 구축 및 안전관리 검증 관련 인프라 체계 마련

□ 기술개발 필요성

○ (안전성 확보) 국민 안전과 환경을 중시하는 안전하고 지속가능한 핵융합에너지 개발을 위해 핵융합 고유 안전성에 토대한 실증로 안전 원칙 및 기준 마련 필요

○ (시장 경쟁력 확보) 글로벌 수준에 부합하는 핵융합기술 안전성 확보를 위해 실증로 설계 추진 및 부지선정, 사고해석 등의 안전성 사전평가에 필요한 핵융합 안전성 평가 기술 개발 필요

○ (안전관리 신뢰성) 실증로의 건설 및 운영·관리의 신뢰성 제고를 위해 안전관리 기본방향 수립 및 안전관리 검증체계의 사전 구축이 중요

□ 안전 요구조건 도출 동향

○ (국외) ITER를 통해 기본적인 핵융합로에 대한 안전규명 및 인허가를 위한 기준이 확립되었으며, 최근 IAEA는 국제협력을 통해 국제기준 마련을 추진 중

– 프랑스의 ITER 인허가 절차 및 경험을 통해 핵융합 안전인허가 안전규명 기술 및 기준을 확립

– IAEA는 최신 동향 정리 및 국제기준 확립을 위해, 핵융합 주요국의 해당 분야 전문가 자문활동을 통해 핵융합 실증로 및 'FPP(Fusion Power Plant)' 관련 정보를 취합·정리한 기술문서 발간 작업 진행 중

* 주요국 핵융합시설의 설계 안전 및 안전성 평가에 대한 주요 경험, 실증로 및 상용화 추진 계획 등을 종합·정리

– 핵융합 안전인허가에 대한 국제적 관심 제고와 함께 안전 요구조건 도출을 위한 IAEA 등의 국제기구 활동 및 주요국 간 국제협력이 더욱 확대될 것으로 예상

– 영국은 STEP 건설부지 선정기준(총 5대 평가기준, 23가지 세부평가항목)을 개발하고, 이를 토대로 STEP 건설부지 공모를 거쳐 부지 최종 확정('22.10)

○ (국내) 핵융합(연)에서 위탁연구 및 개념연구보고서(CSR : Conceptual Study Report)를 통해 국내외 주요 핵융합로 안전인허가 연구를 추적하고 핵융합 안전목표 및 안전원칙 등을 분석

– KSTAR 인허가 사례, ITER 예비안전해석 보고서(RPrS; Preliminary Safety Report) 등을 토대로, 국내외 핵융합 안전 최상위 목표 및 핵융합 안전규칙, 인허가 체계, 안전성 평가기술, 방사선 영향평가 등을 분석

□ 안전성 규명 동향

○ (국외) 열유체 해석 코드를 활용한 사고해석, 머신러닝 활용 시스템 안전성 판독, 실증로 ALARA 기준 충족을 위한 방법론 개발 등 다양한 기술을 적용해 핵융합 안전기술 개발 추진

– 일본 스타트업 교토퓨저니어링(Kyoto Fusionieering)은 UNITY*를 구축하고 핵융합 사고해석에 필요한 주요 안전이슈 테스트 예정

* (UNITY : Unique Integrated Testing facilitY) '25년 완공 목표, 목업 블랑켓 열추출, 고열 전이 및 변환, 블랑켓 열을 통한 전력 생산, 삼중수소 추출 등을 실증 예정

– 프랑스 ITER 프로젝트를 통해 ITER 안전요건에 상응한 안전기본원칙 ALARA를 적용한 방법론을 ITER 설계에 적용 중

○ (국내) 국내 개발 중인 코드와 ITER를 해석한 열수력 해석 코드 기술을 확보하고, 다양한 시스템(블랑켓, BOPlant 계통해석) 설계에 대한 예비 해석을 수행 중

– ITER 인허가에 사용된 MELCOR를 이용한 핵융합로 사고해석기술 보유

– 핵융합 TBM 설계 연구를 통해 핵융합 열유체 해석코드인 GAMMA-FR 코드 개발 중(핵융합(연)·원자력(연))

– 삼중수소 관련 시스템 안전해석을 위한 삼중수소 투과 해석 모델을 개발하고, 이를 토대로 THETA 코드 개발 중(핵융합(연))

* 시스템 안전성 해석을 위해서는 2가지 이상의 독립된 방법론이 활용되어야 하며, 이를 위해 결과론적 사고해석(GAMMA-FR, MELCOR 해석 코드 등)과 함께 실증로 확률론적 사고해석 연구 등이 필요

□ 안전관리 체계 구축 동향

○ (국외) 핵융합로의 안전관리 체계에 대해 파악된 연구 사항이 크게 없음

– 미국은 민간기업의 탈탄소화를 위해 표준화 시스템, 자동화 안전관리 체계 등을 지원하는 다양한 자동화 핵융합에너지 제어 플랫폼 구축 프로젝트 진행 중

○ (국내) 현재까지 핵융합로 안전관리 체계에 대한 연구가 크게 진행된 바가 없음

□ 기술확보 전략

○ (기술내용) 안전 요구조건 도출 및 안전성 규명, 안전관리 체계 구축

– 실증로 고유 안전성 및 국제 수준에 부합하는 안전규명 및 기준확립

• 실증로 안전 철학·원칙 수립, 국제 수준에 부합하는 안전기술 정의 및 안전기준 제정, 건설부지 안전 요구사항 정의 마련

* Code & Standard 개발 (~'30년)

– 안전성 규명을 위한 기술 개발 및 종합 안전성 평가체계 구축

• 실증로 잠재적 위험 식별, 안전성 평가방법론 및 전략 개발, 신규 안전성 평가기술 개발 및 검증, 사고해석 및 방사선환경평가 관련 안전평가, 종합안전성 평가체계 구축

– 안전관리의 기본방향 수립 및 안전관리 검증체계 구축

• 중장기 안전관리 계획 수립, 안전관리 검증체계 확립 및 안전관리 검증 수행

○ (확보전략) 국제협력을 통한 안전기준 확립과 산·학·연 공동연구에 기반한 안전성 평가 기술 개발

– IAEA 등 국제조직 및 해외 주요기관과의 국제협력을 통해 국제적인 핵융합 안전 목표 및 기준 수립

– 핵융합 연구기관을 중심으로 학계 및 원자력발전소 설계 관련 산업체·제작업체와의 산·학·연 공동연구 추진

– 실증로 안전성 평가 및 주요 해석코드(향후 인허가 기관 활용코드 포함) 검증을 위한 실험시설 및 시뮬레이션 도구 개발, 안전 DB 구축

< 안전·인허가 기술 확보 전략 >

세세부기술	개발 내용	구분	개발 주체	주체별 역할
안전 요구조건 도출	• 안전기준 수립 및 요건 도출 • 안전요구조건 검증	자체 개발	• 출연(연)	• 실증로 안전목표, 원칙 설정 • 실증로 부지선정에 필요한 평가기준 개발 • 안전요구조건 도출 및 검증 • 인허가 현안 식별/대응, 상용로 기술기준 개발
			• 대학	
		국제 협력	• 한–IAEA	• 국제적 안전기술 정의, 기준 도출
안전성 규명	• 안전 프레임워크 개발 • 안전성 평가기술 개발 • 사고해석, 방사선환경평가 • 종합 안전성 평가체계 구축	자체 개발	• 출연(연)	• 안전성 평가방법 및 전략 개발 • 신규 안전성 평가기술 개발 및 검증 • 사고해석 및 방사선환경영향평가 수행 • 종합안전성 평가체계 수립 및 검증
			• 대학	
		국제 협력	• 한–IAEA	• 안전성 평가체계 표준화 마련 및 세부기술 검증절차 개발
안전관리 체계 구축	• 안전관리 기본방향 수립 • 안전관리 검증체계 확립 • 안전관리 검증 • 안전관리 체계 최적화	자체 개발	• 출연(연)	• 안전관리 체계 구축 중장기 계획 수립 • 단계별 안전관리 검증 및 규제체계 개발 지원 • 전문인력양성, 작업자훈련 교육프로그램 개발 • 안전관리 체계 최적화 및 정책 개선
			• 대학	
			• 산업체	• 검증체계 개선 • 검증 결과 기반 기술 업데이트
		국제 협력	• 한–IAEA	• 핵융합 안전관리체계 국제 표준화 도출
			• 한–영(UKAEA)	

< 안전·인허가 기술 개발 로드맵 >

세세부 기술	현재 기술* 수준	로드맵				최종목표
		2026	2030	2035	2038	2038
안전 요구조건 도출	TRL2	안전 프레임워크 개발	안전요건 도출	안전요구조건 검증		• (TRL 7, 100%) 실증로 안전 요구조건 검증을 통한 인허가 획득
		– 안전목표, 원칙정립 – 부지선정 기준 개발	– 안전요구조건 도출 – 부지특성 평가	– 안전요구조건 검증 – 실증로 인허가 현안 식별 및 대응 – 상용로 급 기술기준 도출 및 개발 착수		
안전성 규명	TRL2	안전 개념연구	안전성 평가기술 개발	시스템 안전성 평가	종합 안전성 평가체계 구축	• (TRL 7, 100%) 실증로 건설, 운영기술의 무결성 및 방사선 방출 통제 입증
		– 위험인자 식별 – 고유 안전성 평가 – 사고해석코드 개발	– 사고해석코드 검증 – 설계기준/초과 사고 정의 – 부지특성 반영 안전성 평가	– 플랜트단위사고해석평가 – 사고방지·완화, 관리전략 개발 – 방사선환경영향평가	– 종합 안전성 검증 – 평가체계 표준화	
안전관리 체계 구축	TRL3	안전관리 기본방향 수립	안전관리 검증체계 확립	안전관리 검증	안전관리체계 최적화	• (TRL 7, 100%) 실증로 건설, 운영을 위한 안전관리 체계 확립
		– 안전관리검증시설 확보 등에 관한 중장기 계획 수립 – 규제체계 개발 지원	– 안전관리 전문인력 라이센싱 체계 구축 – 작업자 교육프로그램 개발	– 규제 투명성 평가 – 안전 전문인력 양성 – 안전활동 관리 프로토콜 개발	– 안전관리 체계 최적화 및 정책 개선	

□ 연도별 투자재원(안)

○ (인력소요 및 예산) '38년까지 총 170 MY와 인력운영을 위한 제반비용(인건비, 연구활동 관련 직접비, 간접비 등 1 MY/1.5억원) 총 249억원 필요 (연구시설 구축 및 운영비 미반영)

< 안전·인허가 기술 개발 연도별 예산(안) 및 인력(안) >

(억원/명)

세세부기술	구분	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	합계
안전규명 및 기준 확립	예산	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	28
	인력	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	14
안전기술 개발	예산	4	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	10	10	10	234
	인력	2	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	5	5	5	117
안전관리 체계 구축	예산	2	4	4	4	4	4	6	6	6	6	6	6	6	6	70
	인력	1	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3	3	35
계	예산	8	26	26	26	26	26	28	28	28	28	28	18	18	18	332
	인력	4	13	13	13	13	13	14	14	14	14	14	9	9	9	166

□ 재원 및 연구인력 조달 방안

○ (재원) 핵융합(연) 기본사업을 통해 안전 규명 및 기준을 확립하고, 신규사업을 통해 안전기술 개발 및 안전관리체계 구축 추진

○ (연구인력) 핵융합(연) 및 유관분야(원자력 등)의 연구인력을 우선 활용하고, 신진 인력 사업참여를 통해 전문인력 양성 및 확보

② 인허가 기술

□ 정의

○ 실증로 건설·운영에 관한 관련 법령 승인에 필요한 규제 및 인허가 절차, 체계 등을 개발·구축하는 기술

< 인허가 기술 개요 >

세세부기술	기술개요
규제체계 확보	• 안전규제요건 개발, 규제지침 및 심사지침 개발
규제검증 기술 개발	• 설계 안전성 확인을 위한 안전성 검증기술 개발

□ 기술개발 필요성

○ (인허가 체계 구축) 국내 실증로 인허가 체계 부재에 따른 인허가 규제체계 불확실성 해소 및 기술개발 가속화를 위해 실증로 고유 안전성에 부합하는 실증로 인허가 체계 구축 필요

○ (설계 안전성 확보) 실증로 설계 안전성 확인 및 실증로 인허가 추진 위해, 안전해석 검증코드 등 실증로 설계특성을 반영한 안전성 검증기술 개발 필요

□ 인허가 기술 동향

○ (국외) 미국, 영국은 원전과 구별되는 핵융합 고유 안전성을 토대로 규제체계 기본방향 수립을 통해, 핵융합 개발 가속화 및 민간 스타트업 부상 선제적 대응 기반 마련

– 미국은 원자력규제위원회(NRC)에서 부산물인허가규칙(10 CFR 30)을 핵융합 규제체계 기본방향으로 결정('23.04), 인허가 규칙 및 세부 가이드라인 마련 본격 착수

• 원자력혁신·현대화법('19년 수립)을 근거로, NRC는 '27.12월까지 핵융합 규제체계 마련을 위해 산·학·연 전문가 공청회 등을 통해 총 3가지 규제체계 옵션을 검토

• NRC는 단기(near term) 핵융합 규제체계(안)으로 10 CFR 30 적용을 최종 결정하고, 인허가 규칙 및 세부 가이드라인 마련 작업에 돌입

– 영국은 전세계 최초로 핵융합 규제체계 기본방향을 제시('22)하고, 에너지안보법(법안 심의중)을 통해 원자력시설 규제에서 핵융합 완전 분리 예정

• 핵융합 안전성 분석('21.09)* 등을 토대로 핵융합 규제체계 제안서를 공개, 핵융합실험시설 규제관할기관인 환경청(EA) 및 보건안전청(HES)를 중심으로 한 현행 핵융합 규제체계 유지(안)을 제시('21.10)

* 영국원자력청(UKAEA) 핵융합 플랜트 안전성 및 폐기물에 관한 기술보고서 작성('21.09)

• 대국민 의견수렴 과정('21.10~12)을 거쳐, 현행 핵융합 규제체계 유지 최종 확정('22.06)하고, 에너지안보법에 핵융합 규제 조항을 담아 규제체계 불확실성 해소 추진

• 글로벌 핵융합 개발 가속화 및 핵융합 시장 활성화에 따른 영국의 핵융합기술 수출 및 글로벌 핵융합 규제조화(regulatory harmonization)를 위해, IAEA 등 국제기구 관련 활동에 주도적 참여 중

– 일본은 해외시장 진출 기회 확보 및 핵융합 민간기업 참여 활성화 등을 위해, 규제 기본방향 조기 검토와 함께 국제협력을 통한 안전 규제 수립 및 표준화 추진

• '애자일 국가(Agile Nations)'에서 추진하는 '국제핵융합에너지규제접근법' 워킹그룹에 참여 중이며, 향후 워킹그룹이 제시하는 국제 규제 기본틀을 토대로 일본 입지조건 등을 반영한 규제 세부사항 수립 예정

* '국제핵융합에너지규제접근법' 워킹그룹에는 일본, 영국, 캐나다 등 총 7개국이 참여 중이며, 영국 규제 기본방향을 토대로 국제 핵융합 규제 기본틀 제시 예정('23.11월경)

• 내각부를 중심으로 엔지니어 및 규제전문가 등이 참여하는 TF를 구성, 안전규제 기본방향 수립 예정

○ (국내) '제4차 핵융합에너지 개발 진흥기본계획('22~'26)'을 통해 핵융합 규제 체계 구축 추진의 근거 마련

– 미래 핵융합 안전 이슈 대응을 위해 핵융합 규제 체계 기본방향을 마련(~'24)하고, 관계기관 등의 소통 진행 예정('24~)

– 원자력안전기술원(KINS)는 원자력안전법 시행령에 명시된 방사선발생장치 정의에 핵융합시설 등이 포함되도록 정의를 개정하는 안을 추진 중

– 그러나 현행 원자력안전법은 중수소-삼중수소 핵융합에너지를 활용한 실증로 관련 규제체계가 부재하며, 실증로 설계 본격 착수 및 해외 주요국 규제체계 기본방향 등을 종합 고려한 규제 체계 마련 시급

□ 기술확보 전략

○ (기술내용) 실증로 규제체계를 확보하고 실증로 인허가에 필요한 안전성 검증코드 개발

– 실증로 고유 안전성 반영 및 적기 건설을 위한 인허가 규제체계 확보

• 조기 인허가참여제도 수립, 안전규제요건 개발 및 법령(고시) 반영, 인허가 심사지침 및 규제지침 개발

– 인허가 추진 및 설계 안전성 확인을 위한 규제검증기술 개발

• 인허가 기준사건 선정 및 평가*, 인허가 검증용 해석코드 검토/검증, 코드 요구사항에 대한 규제지침 제공, 인허가 검증용 해석코드 개발

* 핵융합로 인허가 기준사건 선정, 사고유형 및 등급 분류, TI-RIPB(기술포용적 위험도 정보 및 성능기반 방법론) 적용 가능성 평가, 안전해석방법론 개발

○ (확보전략) 인허가 규제기관과의 조기 소통을 통해 실증로에 적합한 인허가 규제체계 수립 및 인허가 규제체계 선제적 대응 방안 마련

– 인허가진행계획서 조기 작성 및 실증로 법령체계 조속한 추진을 통해 설계 과정에서의 시행착오 및 비용 최소화

– 국가간 협약 및 다자간 협의, 국제연구 프로그램 활용

– 원자로 검증코드 개발 사례 및 국내외 유관실험현황 검토를 통해 인허가 검증코드 개발 추진

< 인허가 기술 확보 전략 >

세세부기술	개발 내용	구분	개발 주체	주체별 역할
규제체계 확보	• 조기 인허가 참여제도 연구	자체 개발	• 규제기관	• 조기 인허가 참여제도 활성화 방안 수립·운영
	• 안전규제요건 개발	자체 개발	• 규제기관	• 핵융합로 특성 반영 안전규제요건 개발 • 안전규제요건 반영 법령(고시) 개정
		국제 협력	• 한-IAEA	• 실증로 Code & Standard 공동연구
	• 규제지침/심사지침/시설검사지침 개발	자체 개발	• 규제기관	• 기술분야별 규제지침 개발 • 핵융합로 심사지침 개발 • 시설검사/정기검사 지침 개발
규제검증 기술 개발	• 인허가기준사건 선정 및 평가	자체 개발	• 출연(연)	• 인허가 기준사건 식별, 사고유형 분류 및 등급 분류
			• 대학	
			• 산업체	• TI-RIPB 방법론 적용성 평가
			• 규제기관	• 산학연 연구개발 총괄
		국제 협력	• IAEA	• 인허가기준사건 선정 및 평가 공동 연구
			• ITER	• 인허가기준사건 선정 및 평가결과 자문
	• 안전해석방법론 및 허용기준 연구	자체 개발	• 출연(연)	• 안전해석방법론 및 허용기준 개발
			• 대학	
			• 산업체	
			• 규제기관	• 산학연 연구개발 총괄 • 안전해석방법론 및 허용 기준 수립
		국제 협력	• IAEA	• 안전해석방법론 및 허용기준 공동 연구
			• ITER	• 블랑켓/삼중수소 생산 운전자료 공유

세세부기술	개발 내용	구분	개발 주체	주체별 역할
	• 검증용 해석코드 개발	자체 개발	• 출연(연) • 대학 • 산업체	• 검증용 해석코드 개발 (기능요구사항 정의, 코드 설계 및 구현)
			• 규제기관	• 산학연 연구개발 총괄 • 개발코드 검증
		국제 협력	• 한-ITER	• 검증코드 교차 검토

< 인허가 기술 개발 로드맵 >

세세부기술	현재 기술* 수준	로드맵				최종목표
		2026	2030	2035	2038	2038
규제체계 확보	규제 미흡	안전기반 수립		기준 및 표준 수립	심사 적용	• (100%) 규제체계 확립
		– 조기 인허가 참여절차 수립	– 안전규제요건 개발	– 규제/심사/시설검사 지침 개발	– 시설사용허가 적합성 심사	
규제검증 기술 개발	검증 기술 부재	방법론 및 허용기준 개발		검증역량 확보	심사 적용	• (100%) 규제검증 코드 확보
		– 안전규제요건 도출	– 인허가 기준사건 선정 – 안전해석방법론 개발	– 인허가 검증용 해석코드 개발	– 안전해석 결과 검증	

□ 연도별 투자재원(안)

○ (인력소요 및 예산) '38년까지 총 102 MY와 인력운영을 위한 제반비용(인건비, 연구활동 관련 직접비, 간접비 등 1 MY/1.5억원) 총 153억원 필요 (연구시설 구축 및 운영비 미반영)

< 인허가 기술 개발 연도별 예산(안) 및 인력(안) >

(억원/명)

세세부기술	구분	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	합계
규제체계개발 지원	예산	2	2	4	4	4	4	4	14	14	14	14	14	14	14	122
	인력	1	1	2	2	2	2	7	7	7	7	7	7	1	1	54
규제체계 및 인허가 검증코드 개발	예산	2	2	10	10	10	10	6	6	6	6	6	6	6	6	92
	인력	1	1	5	5	5	5	3	3	3	3	3	3	3	3	46
계	예산	4	4	14	14	14	14	10	20	20	20	20	20	20	20	214
	인력	2	2	7	7	7	7	10	10	10	10	10	10	4	4	100

□ 재원 및 연구인력 조달 방안

○ (재원) 핵융합(연) 기본사업 및 신규사업을 통해 투자재원 확보

○ (연구인력) 핵융합(연) 연구인력 및 산·학 공동연구를 통한 연구인력 활용

4. 로드맵 이행 장·단기 추진전략

(1) 핵심기술 확보 전략수립 기본 방향

□ 전략수립 기본방향

○ 8대 핵심기술의 현재 기술수준 분석 후 필요성, 시급성, 기술확보 가능성, 국제협력 가능성 등을 고려하여 실증로 건설에 필요한 핵심기술의 전략적 우선순위 평가를 수행하고, 핵심기술 확보 전략 및 국내 핵융합 발전 기반 확보 전략 제시

□ 전략적 우선순위 분석 결과

○ 총론

– 8대 핵심기술에 대한 기술 보고서를 기반으로 전략적 우선순위를 분석한 결과 전략적 우선순위가 높은 연료주기 분야, 증식블랑켓 및 디버터 분야, 핵융합 기능소재 분야, 가열 및 전류구동 분야 등의 핵심기술에 대한 국내 확보기술 수준이 인프라 없이는 확보할 수 있는 한계수준에 도달했다고 판단

– 따라서 전략적 우선순위가 높은 기술의 확보를 위해서는 인프라 구축을 서둘러 추진해서 목표대비 기술격차를 줄여야 할 것으로 판단

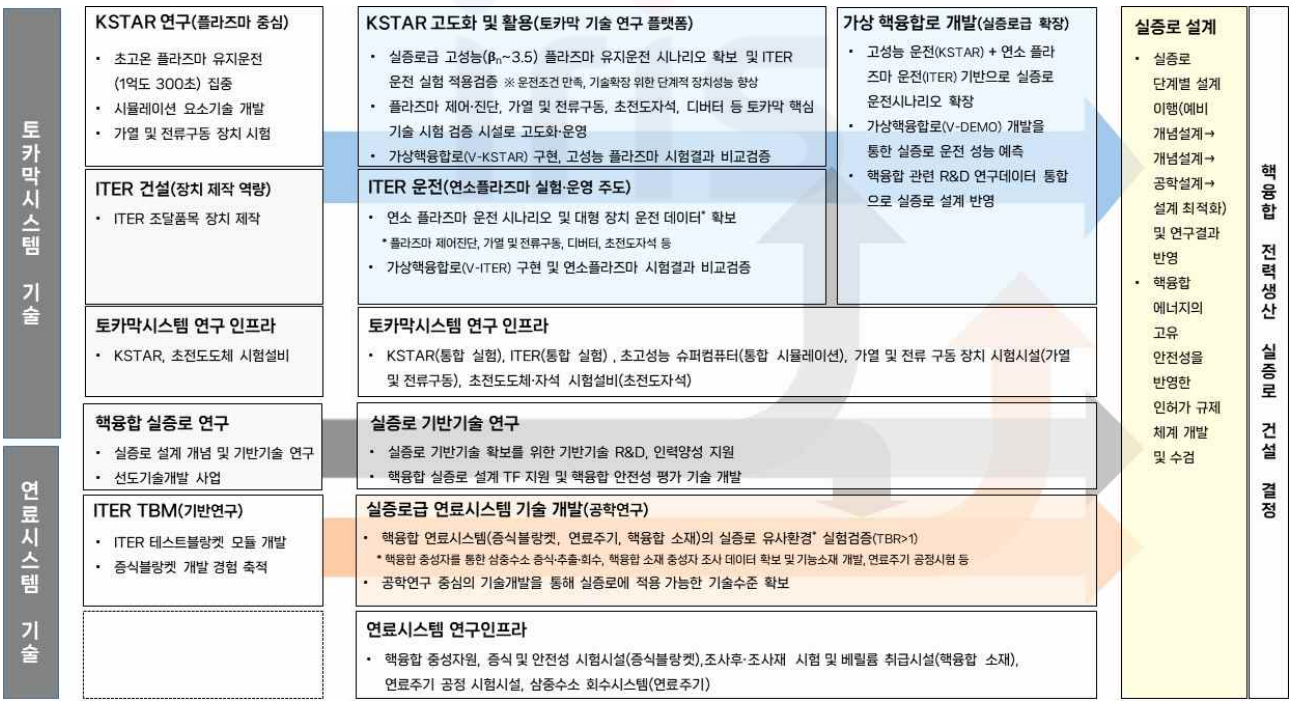
– 더불어 인프라 구축을 위해서는 구축 부지가 필요하고 부지선정에 필요한 소요시간을 감안할 때 2035년까지 공백기술 확보를 위해서는 인프라 구축을 위한 부지선정 작업이 최우선 전략으로 추진되어야 할 것으로 판단

<전략적 우선순위 평가 기준>

구분	주요내용	평가척도
① 중요성	• (중요도) **부재시 실증로 구축 불가여부(대체기술 유무),** 국제협력 제한 여부 등을 고려한 자체기술 개발의 필요성 또는 기술 확보 중요성(ITER 사업을 통해 확보 가능 여부를 고려)	상,중,하
	• (파급효과) 타 기술개발에 미치는 영향, 기술의 범용성(타 유형, 타 분야 활용가능성 등), 상업성(시장확보 등) 등 기술개발 **파급효과**	상,중,하
	• (IPR확보 필요성) 향후 미래 기술경쟁력 확보의 관점에서 해당기술의 IPR확보의 필요성 여부	상,중,하
② 시급성	• (기술격차 대비 소요기간) 기술개발 목표수준 대비 **소요기간**을 고려한 기술개발 시급성	상,중,하

	• (추진시기) **세세부기술간 선행/후행 관계**와 실증로 단계적 **설계일정**을 고려한 기술개발 및 시설 구축 일정	초기,중기,후기
	• (신규 인프라 필요성) 기술개발을 위한 **신규 연구 인프라 소요 및 구축 필요성** (인프라 구축 필요시 인프라 구축을 선행해야 하므로 시급성이 높아짐).	유,무
③ 효율성	• (국내개발 가능성) 국내 기술개발 수준, 개발 내용, 연구인력 규모, 국내 인프라 등을 고려한 **자체개발 가능성**	상,중,하
	• (국제협력 가능성) 해외 기술개발 수준, 개발 내용, 공동 연구, 해외 인프라 활용 등을 고려한 **국제협력 및 해외구매 가능성**	상,중,하
	• (도입 가능성) 시급성 대비 가능성을 고려해서 국내 자체개발하지 않고 **해외 도입이 더 효율적인지 여부**	상,중,하

< 핵융합 장기 연구개발 로드맵 전략방향(안) >



① 노심 플라즈마 기술 분야

○ 노심 플라즈마 분야는 실증로를 위한 고성능 플라즈마 시나리오 확보를 목표로, 이를 구현하기 위한 ①노심 플라즈마 제어, ②노심 플라즈마 진단, ③노심 플라즈마 시뮬레이션 세 가지 요소기술로 구성

○ 각 요소기술 개발과 더불어 KSTAR, ITER에서 이들의 통합 기술 검증이 필요하며, 특히 ITER와 실증로 간 노심 플라즈마 환경 차이를 극복할 수 있는 전략 마련이 중요

○ KSTAR, ITER 사업을 통한 기술 개발과 연소 플라즈마 환경으로의 기술 확장을 지속 추진하며, 단계적 KSTAR 성능향상을 통한 실증로 노심 조건 모사와 통합 기술 검증, 가상핵융합로 기술 개발을 통한 실증로 성능 예측을 병행할 필요가 있음

○ 노심 플라즈마 제어·진단 각각의 요소기술에 해당하는 장치 설계 및 제작 기술 개발을 추진하고, 실증로 노심 상태를 KSTAR에서 모사하기 위한 단계적 추가 시설·장비 설치와 업그레이드 필요. 이와 함께 가상핵융합로 개발을 위한 초고성능컴퓨팅 인프라 구축을 병행 추진

구분	추진 방향
단기 (~30)	· 고성능 플라즈마 운전을 위한 제어 알고리즘 및 소프트웨어 개발 · 실증로 진단 장치 설계 및 제작 기술 개발 · KSTAR를 활용한 고성능 실증로 운전 시나리오($\beta_N \geq 3.5$, $f_{BS} \geq 0.7$) 개발과 제어 및 진단 기술 통합 검증 · 국제 협력을 통한 기술 개발 가속화 및 데이터 확보 범위 확대 · 가상핵융합로 개발을 위한 초고성능컴퓨팅 인프라 구축과 KSTAR 등 확보된 실험 데이터를 활용한 시뮬레이션 기술 검증
중장기 (~38)	· ITER 실험의 주도적인 참여를 통해 연소 플라즈마 환경(D-T Q=10)에서 제어, 진단, 시뮬레이션 요소기술 확장 및 통합 기술 검증 · KSTAR 업그레이드를 통한 고성능 실증로 운전 조건($H_{89} \geq 3.0$, $f_{NI}=1$, $G \geq 0.4$) 추가 구현 및 기술 확장 · 실증로 성능 예측을 위한 초고성능컴퓨팅 인프라 확장 · KSTAR, ITER, 가상핵융합로 기술을 종합하여 고성능 실증로 운전 시나리오 확보

② 증식블랑켓 기술 분야

○ 증식블랑켓 기술 분야는 기 투자 연구비 4위에 해당되는 분야로서 ①설계/안전해석 체계 구축, ②제작 및 건전성 평가, ③계통기술 등으로 구분 가능

○ 핵융합연료생산 및 전력생산을 위한 핵심부품에 해당되므로 제작 및 건전성 평가, 계통기술은 전략적 우선순위가 높다고 판단되며, 기술 개발과 검증을 위해 인프라 시설이 필요

○ 설계/안전해석 분야는 코드 개발 및 이용이 주요 내용이므로 국제협력과 계산과학 인프라를 이용해서 추진 가능

○ 제작기술은 재료 기술 분야(대면재 제조 및 물성 DB 구축)와 연계하여 추진

구분	추진 방향
단기 (~30)	· ITER TBM을 활용하여 증식블랑켓의 설계·안전해석, 제작·검증 기반기술을 개발 ※ 한–EU TBM 공동개발 파트너십을 통해 설계안전해석, 계통·인허가 등 핵심 DB를 확보 · 국제협력과 계산과학 인프라를 활용한 설계·안전해석 코드 개발 · 핵융합 중성자원을 포함한 연구 인프라(증식시험시설 등) 구축에 집중
중장기 (~38)	· 인프라 구축 이후 증식블랑켓 삼중수소 증식 시험 등 핵융합 실증로 유사 환경에서의 설계·안전해석, 제작성 검증 추진 · 구축된 인프라를 활용한 검증 결과와 ITER TBM 실험결과를 반영하여 실증로급 증식블랑켓 개발 주력 ※ 핵융합 중성자원을 포함한 증식블랑켓 연구 인프라 구축을 통해 증식블랑켓 설계 및 제작기술 확보에 필요한 공학 데이터 확보 및 제품 검증·테스트 수행

③ 핵융합 재료 기술 분야

○ 핵융합 재료 기술 분야는 ①구조재, ②대면재, ③기능소재 등으로 나눌 수 있으며, 기투자 연구비가 7위로서 R&D를 적극적으로 추진하지 않은 분야로서 대면재와 기능소재 분야는 기술수준이 매우 낮은 것으로 판단

○ 구조재 기술은 상당 수준에 도달하였으므로 생산기술 개발을 위해 산업체 주도의 기술개발을 추진전략이 필요

○ 특히, 기능소재 분야는 국내 경험이 거의 전무하고, 삼중수소 관련 기술협력 가능성이 매우 낮고, 증식블랑켓의 기능을 위한 선행기술인 점 등을 고려할 때 전략적 우선순위가 매우 높으므로 시급히 추진되어야 할 것으로 판단

○ 기능소재 분야 기술 개발을 위해서는 중성자 선원과 Li, Be, 삼중수소 취급을 위한 인프라 시설을 구축하여 연료시스템 기술 개발에 공동으로 활용해야 할 것으로 판단

구분	추진 방향
단기 (~30)	· ITER TBM 사업을 통해 구조재 및 기능소재의 요소기술 개발에 집중 ※ 산업체 중심의 구조재 생산기술 개발 협력 필요 · 하나로 등 기존 연구시설을 활용한 물성 DB 구축 지속 ※ 유관분야(재료, 원자력 등)와 협력을 통해 소재개발 및 물성DB 구축, 대형 소재 제조기술개발 등 수행 · 핵융합 중성자원을 포함한 연구 인프라(기능소재 개발을 위한 리튬, 베릴륨 취급시설 등) 구축에 집중
중장기 (~38)	· 핵융합 연구 인프라 구축 이후, 장기적인 관점에서 한국형 저방사화 철강재 등 물성 DB 구축을 통해 실증로 및 상용로에 적용가능한 한국형 고유소재 개발 ※ 핵융합 소재 분야의 경우 향후 핵융합 발전소의 경제성에 직결되며, 국가간 기술공유가 어려울 것으로 예상되는 분야로, 장기적인 관점에서 한국 고유소재 개발이 필수적인 분야

① 연료주기 기술 분야

○ 연료주기 기술 분야는 기 투자 연구비 6위 분야로 핵융합 연료공급 기술을 제외하면 국내 R&D가 거의 이루어지지 않은 분야

○ 핵융합 연료는 삼중수소로서 삼중수소 안전, 정제/분리/저장 등은 실증로 목표 수준 대비 기술수준이 매우 낮은 것으로 판단

○ ①삼중수소 안전, ②삼중수소 정제/분리/저장, ③핵융합 연료공급, ④핵융합 진공배기 중 삼중수소 안전, 정제/분리/저장 기술 개발은 전략적 우선순위가 매우 높으므로 시급히 삼중수소 취급이 가능한 인프라 시설을 구축하여 추진해야 할 것으로 판단

○ 핵융합 연료공급 기술 개발은 KSTAR 활용연구 사업에서 추진하고, 진공배기 기술 확보는 국제협력 및 ITER 성과활용으로 확보하는 전략 추진이 타당

구분	추진 방향
단기 (~30)	· 핵융합 연료주기 전체 공정 개발을 위해 ITER 조달품목(삼중수소 저장 시스템) 및 조달품목외 요소기술 개발에 집중 ※ 핵융합 중성자원 구축 전까지는 ITER 조달품목 개발과 더불어 삼중수소 취급 경험을 보유한 원자력 등 유관분야 산·학·연 전문기관 등과 협력 기반의 조달품목외 요소기술 개발에 집중 · KSTAR를 활용한 연료공급(SPI) 기술 개발 및 검증 · 증식블랑켓 인프라와 연계하여 인프라(삼중수소 회수 플랜트) 구축에 집중

구분	추진 방향
중장기 (~38)	· 중성자원을 포함한 인프라 구축 이후, 개발된 요소기술을 기반으로 연료주기 공정 시험시설 구축 및 실증로 유사 연료주기 전체 공정 시험 운영. · 구축된 연구 인프라를 기반으로 ITER 운전결과(진공배기 기술 등) 흡수 및 실증로 적용 가능 기술 확보 추진

① 디버터 기술 분야

○ 디버터 기술 분야는 ①디버터 설계, ②디버터 제작/검증 등으로 구분 가능

○ 디버터가 차지하는 기능적, 비용적 측면을 고려할 때 전략적 우선순위는 높으나 디버터 제작 기술의 내용이 상당부분 핵융합 재료(대면제)와 증식블랑켓(제작 및 건전성 평가) 기술과 중복되며, 생산기술 성격이 강하므로 산업체 주관의 기술확보 전략이 필요

○ 디버터 기술 개발과 검증을 위해 KSTAR활용과 더불어, 열부하 실험과 플라즈마 입자영향 실험을 위해서 인프라 시설이 필요한 것으로 판단

○ 디버터 인프라는 증식블랑켓 시험시설과 공유 가능할 것으로 판단

○ 디버터 설계를 위한 경계플라즈마 해석 및 영향 평가를 위한 해석코드의 적용과 개발을 위한 계산과학 인프라가 필요하며, 이와 더불어 설계 코드 운용인력 부족이 핵심 이슈로 판단

구분	추진 방향
단기 (~30)	· KSTAR 텅스텐 디버터 실험을 통한 제작성 검증 및 운전기술 개발 · 핵융합 실증로 디버터 설계를 위한 설계·해석 코드 운용 인력의 집중적인 양성 ※ 가장 우선적으로 실증로급 디버터의 설계와 ITER 운전결과 흡수를 위해서는 디버터 설계코드 운용인력의 양성이 선행될 필요성이 높은 상황이며, 설계코드를 직접 개발하기보다 국제협력을 통한 빠른 운용역량 확보 필요 · 산업체와 연계한 실증로급 디버터 제작기술 개발
중장기 (~38)	· 증식블랑켓 시험시설과 연계하여 실증로급 디버터 제작 및 검증 · ITER 텅스텐 디버터 운전결과를 반영하여, 실증로급 디버터 제작기술 확보

① 가열 및 전류구동 기술 분야

○ 가열 및 전류구동 기술 분야는 핵융합 반응을 안정적으로 달성하기 위한 고출력 가열 및 전류구동장치의 핵심기술 확보를 목표로, ① 가열 및 전류구동 장치 개발 기술, ② 가열 및 전류구동 플라즈마 통합운전 기술로 구성

○ 실증로는 KSTAR 등의 연구용 핵융합장치에 비해 플라즈마 단면 크기 및 자기장 세기

가 커짐에 따라, 실증로 운전을 위해 고에너지 중성입자빔, 고주파 ECH 시스템과 증식블랑켓을 고려한 새로운 개념의 가열 및 전류구동 장치 개발이 필요하며, 이러한 핵심 요소기술의 적기 확보를 위한 시험시설 인프라 구축이 반드시 필요

○ 가열 및 전류구동 플라즈마 통합운전 기술은 V-KSTAR 인프라를 활용하여 가열 및 전류구동 기술을 통합 조정하는 실증로 운영체계 확보를 추진

구분	추진 방향
단기 (~30)	· 실증로급 가열 및 전류구동 핵심 요소기술 (고에너지/고효율 중성입자빔 및 고주파 EC 자이로트론 시스템, 블랭킷 호환 안테나 등 장주기 연구개발 아이템) 개발 · 실증로급 가열 및 전류구동 핵심 기술 확보를 위한 중성입자빔 및 EC/RF 시험시설 인프라 구축에 집중 · 학·연 연계를 통해 이외 가열 및 전류구동 장치 기술 추적 ※ 실증로에 적용 가능한 가열 및 전류구동 장치가 확정되지 않은 시점에서 가장 유력한 중성입자빔(1MV/40A 이상), ECH 자이로트론 장치(170GHz 이상)의 핵심 요소기술을 개발하고 특정 시점에서 가장 효율적인 가열 및 전류구동 장치의 조합 결정 ※ 중간 파생 기술의 KSTAR 적용을 통한 운전기술 개발과 더불어 고효율 전류구동을 위한 다양한 개념의 기반기술을 추적
중장기 (~38)	· 가열 및 전류구동 인프라 구축 이후, 개발된 요소기술 통합 검증 및 시연, 실증로 호환용 장치 기술 확보 · 구축된 연구 인프라를 활용하여 ITER 가열 및 전류구동 장치 기술, 운전 기술 결과 흡수

① 초전도 자석 기술 분야

○ 초전도 자석 기술 분야는 ① 초전도 선재, ② 초전도 도체, ③ 초전도 자석, ④ 초전도 자석기반 시스템으로 구성되며, 기 투자 연구비가 8대 핵심기술 분야 중 2위인 기술분야임

○ 저온초전도 선재 분야는 국내기업의 기술 수준이 세계적 수준이지만 장선화 및 대량생산을 위한 연구가 필요한 상황이며, 도체의 경우 조관 기술 보유 국내 기업이 사업을 종료하여 제작 업체가 부재한 상황

○ 저온초전도 자석 및 시스템 분야는 KSTAR 자석 설계/제작/운전 경험 및 '초전도 도체 시험설비 구축사업'을 활용하여 실증로에 필요한 핵심기술을 개발하는 전략이 필요

○ 최근 등장한 고온초전도 기술은 '고온초전도 원천기술 사업'과 연계하여 TF 자석 타당성 연구를 시작으로 단계적 추진 필요. 또한 세계 최고 수준의 국내 기술력을 활용한 국제 공동연구 추진을 통해 향후 고온초전도 기술을 선도해 나가는 전략이 필요

○ 초전도 자석은 실증로 주요 부품 중 비용 및 개발 소요기간 비중이 높아 기술개발과 더불어 제작을 담당할 국내 산업체 발굴/육성/지원 전략 수립이 시급하며, 산학연 연계의 기술개발 완성도 제고를 위해 별도 사업으로 추진하는 전략이 필요

구분	추진 방향
단기 (~30)	▪ '초전도 도체 시험시설 구축' 사업과 연계한 저온초전도 자석(선재/도체/자석) 요소기술의 완성도 제고 및 관련 산업체 발굴/육성/지원 추진 ▪ '고온초전도 원천기술개발' 사업과 연계한 고온초전도 TF 자석 타당성 연구 추진 및 국제 공동연구 주도
중장기 (~38)	▪ '초전도 자석 시험시설' 구축을 통해 실증로급 초전도 선재/도체/자석/시스템의 통합 기술 개발 및 검증 추진

① 안전 인허가 기술

○ 안전평가 및 인허가를 위해 필요한 각종 해석 code 등은 ITER 사업을 활용하고 국제협력을 통한 규제기준 확립이 필요

○ 실증로 인허가 및 규제기준이 실증로 구축 착수 이전에 마련되어야 하므로 전략적 우선순위는 높으나 소요 예산규모가 타 기술 확보를 위한 예산보다 크지 않으므로 별도 R&D 과제로 추진하는 것이 타당하다고 판단

구분	추진 방향
단기 (~30)	▪ 해외 인허가 규제체계 추적 등 글로벌 수준에 부합하는 인허가 규제체계 수립 및 인허가 기관과의 사전 이슈 공유, 공감대 형성 ▪ 핵융합기술 안전성 확보를 위해 실증로 설계 추진 및 부지선정, 사고해석 등의 안전성 사전평가에 필요한 핵융합 안전성 평가 기술 개발
중장기 (~38)	▪ 핵융합 전력생산 실증로 설계와 연계하여 의사결정 시점('38년) 이후 건설 착수가 가능하도록, 핵융합 전력생산 실증로 인허가 획득 추진

(2) 단계적 핵심기술 확보

[전략 목표]
o 핵융합 전력생산 실증로 8대 핵심기술의 체계적·효율적 확보

현황		실천과제
• 세계적인 KSTAR 운영 성과 – KSTAR를 활용 초고온 플라즈마 유지운전 분야 세계적 선도 중 • 실증로 운전시나리오 개발을 위한 플라즈마 데이터 확보 노력 • ITER 이후 기술성능 향상 요구 – ITER↔실증로의 기술적 간극 존재	⇨	• **KSTAR 활용 극대화** ⇛ KSTAR 역량을 바탕으로 국제협력 및 고성능 플라즈마 운전 시나리오 확보 • **연소플라즈마 데이터 확보** ⇛ ITER 및 민간핵융합 장치를 통해 연소 플라즈마 데이터 확보 • **핵융합 시뮬레이션 연구 강화 및 실증로급 기술개발** ⇛ 시뮬레이션 연구 강화를 통한 ITER ↔실증로 기술적 간극 해소
• 한-EU ITER TBM 공동개발 진행 • 연료시스템 과거 연구개발투자 및 현재 기술수준 저조 • ITER↔실증로의 기술적 간극 존재 • 효율적 개발을 위한 국제협력 활용 요구	⇨	• **ITER TBM의 주도적 개발** ⇛ ITER TBM 개발을 최대한 활용하여 증식블랑켓 기반기술 개발 • **연료시스템 기술 개발** ⇛ 선제적인 연료시스템 기술개발로 ITER ↔실증로 기술적 간극 해소 • **전략적 국제협력 추진** ⇛ 국제협력 활용 기술개발 역량 축적, 연료시스템 기술 레버리지 활용
• 핵융합(연) 중심의 핵융합 설계 TF(예비개념설계) 출범 • 기술개발 역량 집중 요구 – 실증로급 기술개발을 위한 국가적 역량 집중 요구 • 민간 스타트업 중심 차세대 기술(고온초전도 등) 적용 가능성 고조	⇨	• **핵융합 전력생산 실증로 설계** ⇛ 예비개념설계('26) 이후 안정적인 설계 단계(개념설계→공학설계) 이행 • **집적형 핵융합 연구단지 조성** ⇛ 핵융합 연구단지 조성을 통해 핵심기술 개발 역량 집중 • **차세대 기술 확보 노력 지속** ⇛ 고온초전도 등 원천기술 확보 및 민간 스타트업 기술수준 지속 추적

1-1. 핵융합 토카막 기술 고도화

□ (KSTAR 활용 극대화) 국내 유일의 초전도 핵융합 실험장치(KSTAR)의 활용 극대화를 통해 국내 핵심기술 개발 거점 역할 수행

○ ([단기] 고성능 시나리오 개발) KSTAR 중심의 국제협력 활성화(美 GA, PPPL 등)를 통한 실증로 고성능 플라즈마 운전시나리오 확보

○ ([중장기] 시험·검증 시설활용) KSTAR를 핵심기술 개발의 시험·검증 시설*로 활용을 통해 실증로급 핵심기술 개발 기반 마련 및 인력양성

* 고성능 플라즈마 진단·제어장치, 텅스텐 디버터, SPI 연료주입시스템 등 핵심기술 시험·검증 활용

○ ([중장기] KSTAR 장치성능 향상) 고성능 실증로 운전 조건($H_{89}\geq3.0$, $f_{NI}=1$, $G\geq0.4$) 구현 및 기술 확장을 위한 단계적 장치성능 향상 추진

□ ([중장기] 연소플라즈마 데이터 확보) 핵융합에너지 활용의 필수조건인 연소플라즈마 데이터 확보를 위한 ITER, 민간 핵융합로 국제협력

※ 노심 플라즈마 운전역량(KSTAR), 가상핵융합로를 기반으로 ITER 운전실험 및 민간 핵융합로 국제협력을 통한 연소 플라즈마 운전데이터 확보

□ (핵융합 시뮬레이션) 가상핵융합로 및 시뮬레이션 기술개발을 통해 KSTAR·ITER ↔ 실증로의 기술적 간극 해소

○ ([단기] 가상핵융합로 개발) V-KSTAR, V-ITER 구현 및 데이터 검증을 통한 시뮬레이션 기술확보, 핵융합 실증로 성능예측 및 운전기술 개발

※ [단기] 시뮬레이션 기술 개발을 위한 단계적인 슈퍼컴퓨팅 시스템 구축 및 업그레이드 예비타당성조사 기획연구 착수. [중장기] 핵심기술 설계코드 개발 등 공동 활용

□ ([단기, 중장기] 실증로급 기술개발) 실증 연구에 기반한 핵심기술 확보를 위한 시험시설 구축 추진

※ [단기] 가열 및 전류구동 시험시설 구축, [중장기] 초전도자석 시험시설 구축

1-2. 핵융합 연료시스템 기술 개발

□ ([단기, 중장기] ITER TBM) ITER TBM의 주도적인 개발· 기술경험 축적을 통해 실증로급 연료시스템 개발의 기반으로 활용

※ [단기] ITER TBM 장치 설계·제작·검증·인허가 경험 축적, [중장기] ITER TBM 운전결과 데이터 확보 및 실증로급 개발 활용

□ (연료시스템 기술개발) 핵융합 연료시스템 기술개발을 통해 ITER↔ 실증로의 기술적 간극 해소

○ ([단기] 연료시스템 기획연구) 핵융합 연료시스템 기술개발을 위한 신규 연구개발 사업* 기획연구(예비타당성조사) 착수

* 연료시스템 기술개발 및 시험시설(핵융합 중성자원 등) 포함

※ 연료시스템 기술은 국제협력(전략물자 제한 등)이 제한적인 분야로, 국내 연료시스템 관련 핵심기술은 시험시설 없이 확보할 수 있는 한계수준 도달

○ ([중장기] 실증로급 기술개발) 실증로급 핵융합 연료시스템 기술 개발

※ 핵융합 중성자원 등 시험시설 구축이후 실증로에서 활용가능한 증식블랑켓, 핵융합 소재, 디버터 장치개발 및 실증로급 연료주기 공정·시스템 개발 추진

□ (전략적 국제협력) 단기적 기술역량 축적을 위한 국제협력 활용과 더불어 세계적인 핵융합 실증로 일정 가속화 흐름 대응

○ ([단기] 기술역량 개발) 단기적 기술역량 개발을 위한 국제협력 적극 활용

※ 설계코드, 원격유지보수 요소기술 개발 협력 등 단기적 기술역량 제고를 위한 국제협력 활용 추진

○ ([중장기] 국제협력 확대) 실증로급 연료시스템 기술확보를 통한 국제협력 확대(레버리지 활용)

※ 연료시스템 기술개발(증식블랑켓 삼중수소 증식시험 등) 결과는 실증로 개발을 위해 핵융합 주요국에서도 필수적으로 확보해야하는 기술로, 선제적인 개발 및 확보를 통해 장기적인 국제협력 확대의 기회로 활용

1-3. 핵융합 실증로 개발 역량 집중

□ (실증로 설계) 핵융합 전력생산 실증로 건설결정('38)을 위해 핵심기술 역량을 종합한 단계별 실증로 설계 및 인허가·규제 체계 준비

○ ([단기] 실증로 설계사업 기획연구) 예비개념설계 완료('26) 이후 실증로 설계의 본격적인 추진을 위한 설계사업 기획연구* 착수

* 실증로 설계 단계별(개념설계→공학설계→설계최적화) 소요예산, 일정, 범위를 포함한 프로젝트 관점의 실증로 설계사업 기획연구(~'25)

○ ([단기, 중장기] 안전·인허가 기술) 핵융합로의 고유 안전성을 반영한 평가기술 및 인허가·규제 체계 개발 추진

※ [단기] 핵융합 안전성 평가기술, 국제 안전·규제체계 기본방향 추적 등 국제협력 활용, [중장기] 한국의 핵융합 실증로 규제체계 마련 및 인허가 수검 획득

□ ([단기] 핵융합 연구단지 조성) 국내 핵융합 실증로 핵심기술 개발 및 연구역량 집중을 위한 집적형 연구단지* 조성 추진

* 핵융합 전략생산 실증로 설계, 핵심기술 개발, 연구시설 활용, 산·학·연 협력 등 국가 역량 결집을 위한 집적형 단지 형태

※ 해외 사례 : 일본 롯카쇼무라(QST), 영국 컬햄(CCFE), 중국 허페이(ASIPP) 등

○ ([단기] 부지 선정 공모) 부지선정은 공정성·투명성 확보를 위해 별도의 독립된 부지선정위원회를 통해 결정*

* 구체적인 부지선정 원칙 및 추진방안 마련(~'24)

□ (차세대기술 추적) 미래 핵융합로에 적용가능한 핵융합 차세대기술 개발 노력 및 다양한 핵융합로 개념의 기술 개발 동향 지속 추적

○ (차세대기술) 학·연 협력을 통한 고온초전도자석 등의 원천기술 확보 및 향후 국제 공동 연구개발 확대 추진

○ (다양한 핵융합로 개념) 다양한 개념의 민간 주도 핵융합 장치, 레이저 등 기술개발 동향 추적을 통해 기술개발 수준 지속 검토

(3) 선도적 제도기반 구축

[전략 목표]
o 핵융합 전력생산 실증로 개발 촉진을 위한 선도적 제도·지원 기반 구축
o 핵융합 미래 시장선점 및 수출을 위한 우수특허권리 확보 기반 마련

현황		실천과제
• 핵융합 실증로 개발 지원 근거 미비 – 실증로 개발 촉진을 위한 핵융합진흥법의 제한적 범위 • 핵융합 실증로 인허가 체계 미비 – 핵융합의 인허가규제 체계 불확실 – 국제적으로 핵융합 고유 인허가·규제방향 마련을 위한 논의 확대 • 국가적 정책수립·지원 조직 미비 – 핵융합에너지 개발의 국가적 정책수립 지원을 위한 조직 미비	⇨	• **핵융합 전력생산 실증로 개발 촉진을 위한 미래 법령 제·개정 소요 검토** ⇛ 법·제도 정비로 실증로 개발 촉진 • **한국 핵융합 실증로 안전·규제 기본방향 마련 및 단계별 인허가 수검** ⇛ 실증로 고유 특성 반영 인허가 획득 • **핵융합 전략지원센터 설립·운영** ⇛ 국가적인 정책수립·지원
• 특허출원 양적·질적 분석지표 저조 – (양적) 중국·미국 특허 우수 ※ 한국은 전체 3위이나 최근 특허출원 감소 – (질적) 미국·캐나다 피인용도·시장확보지수 우수 ※ 한국은 초전도자석 기술 제외 모든 핵심기술 분야 피인용도·시장확보지수 하위권) • 최근 특허권리 확보를 위한 주요국·기관 특허출원 두각 ※ 중국의 빠른 성장세, 민간 스타트업의 특허출원 증가 추세 확인	⇨	• **핵융합 분야 우수특허 창출** ※ 양적·질적 성장을 토대로 핵융합 분야 우수 특허권리 확보 기반 마련 ⇛ 우수한 핵융합 특허권리 확보 • **핵융합 지재권 관리체계 강화, 국내외 특허동향 분석 정례화** ⇛ 국내외 권리확보 동향 추적검토

2-1. 핵융합 실증로 개발 촉진 제반 제도적 기반 구축

□ (법령·제도 제·개정 소요) 핵융합 전력생산 실증로 개발 촉진을 위한 법령·제도의 제·개정 소요 검토('24~)

○ (법령) 핵융합에너지 개발 촉진과 실증로 개발 지원을 위한 법령체계 정비 등 제·개정 소요* 검토('24~)

* ex) 핵융합에너지개발진흥법의 핵융합 전력생산 실증로 개발 범위, 재정 지원, 행정 절차 간소화 등 제개정 소요 검토

○ (규제·제도) 핵융합 실증로 핵심기술 개발 및 국내 산업체 참여 유도를 위한 제도 개선 소요* 검토('25~)

* ex) 핵융합 실증로 핵심기술 개발을 위한 시험시설 구축 관련 규제지원, 핵융합 산업체 기술 인증 시험 평가체계·절차, 국제 표준화 등

□ (인허가·규제) 핵융합 전력생산 실증로 개발의 안정적 추진과 고유 안전성을 반영한 국내 인허가·규제체계 마련 및 이행

○ (인허가·규제 체계) 플랜트 전주기(건설→운영→폐기) 상 핵융합 고유 안전성을 반영한 국내 실증로 인허가·규제체계 방향 마련(~'24) 및 관계기관 소통('24~)

※ 인허가 규제기관과의 조기 소통을 통해 실증로에 적합한 인허가 규제체계 수립 및 인허가 규제체계 선제적 대응 방안 마련

○ (단계적 인허가 이행) 인허가·규제 체계 수립에 따라 단계적인 인허가·규제 이행으로 핵융합 실증로 건설 결정 지원('26~)

※ (1단계) 핵융합 안전/인허가 기준정립 → (2단계) 핵융합 전력생산 실증로 부지 선정 → (3단계) 핵융합 실증로 인허가문서(ex, 방사선안전보고서 등) 개발·수검

□ (전략지원센터) 미래 핵융합에너지 실현 기반 강화를 위해 종합적인 정책 및 전략 수립을 위한 핵융합 전략지원센터 설립·운영('24~)

○ 핵융합에너지 연구개발 및 이용에 대한 전략 수립을 체계적이고 전문적으로 지원하는 전담기관 지정·운영('24~)

※ 관련 법적 근거, 인력, 예산, 조직설치 등은 관계기관 협의를 통해 추진

2-2. 우수 특허 권리 확보기반 마련

□ (핵융합 우수특허 창출) 장기적으로 핵융합 핵심기술의 기술권리 확보를 위해 핵융합 우수특허 창출 지원('24~)

○ (양적 성장) 핵융합 8대 핵심기술 분야 중심 특허출원 장려

* ex) 핵심기술 분류에 따라 핵융합 장치, 부품 개발 관련 국가연구개발 사업의 경우 특허출원 목표 수립 (비세목 특허출원 비용 반영) 의무화 등

○ (질적 성장) 핵심기술의 우수한 권리 확보를 위한 특허 품질* 제고

* 핵융합 관련 국가연구개발 사업의 특허 출원 시 권리확보 검토 의무화, 개별 특허 출원을 지양하고 장치, 부품 단위 패키징 특허 출원 장려, 해외출원 확대 추진

※ 핵융합 핵심기술의 해외진출 고려 및 미래 시장권리 확보를 위해 주요국(미국, EU, 일본 등) 대상 해외 특허 출원 확대 추진('24~)

□ (지식재산권 지원체계 강화) 핵융합 우수권리 확보를 위한 지식재산권 지원체계 강화(특허창출→관리→모니터링)를 통해 핵융합 원천특허 창출('24~)

○ (지원조직 강화) 지식재산권 지원조직 관리 전문성 제고(핵융합(연))

* 지식재산권 전문인력(변리사 등) 채용 혹은 전문가 활용

○ (특허 방어전략) 핵심기술별 특성에 따른 특허권리 방어전략 검토

※ 핵융합 8대 핵심기술 개발결과 검토를 통해, 필요시 방어전략(회피, 노하우 보유 등) 검토

○ (특허 교육 훈련 확대) 핵융합 핵심기술의 권리확보 중요성 인식 함양을 위해 핵융합 연구개발 참여 대상자 교육훈련 추진('24~)

□ (특허동향 분석 정례화) 핵융합 연구개발에 따른 안정적 권리확보를 위해 국가별 특허출원 현황에 대한 정기적 분석 시행('24~)

○ (국내외 동향분석) 핵융합에너지 핵심기술의 국내외 권리확보 현황 추적·검토를 위한 특허 동향 분석 정례화(2년)

※ 해외 국가별(주요출원인별) 권리확보 현황과 국내 특허의 등록현황, 시장확보, 피인용도 변화 등 특허 권리확보 경쟁력 비교분석, 주요 국가/경쟁사에 대한 특허출원 상시 모니터링(신규 특허공보)

(4) 견실한 생태계 구축

[전략 목표]
o 핵융합 전문인력 양성 및 유지를 통한 장기적인 연구개발 지속기반 확보
o 핵융합 실증로 및 상용로 건설 준비를 위한 견실한 산업생태계 구축

현황		실천과제
• 국내 핵융합 연구개발 전문인력 부족 및 산업계↔대학 수급 불일치 – 산업계 전문인력 부족, 대학 졸업인력 타분야 유출 – 대학 석박사급 전문인력의 공급과 산업계의 전문인력 수요 불일치 • 핵융합 연구개발에 다양한 전공분야 인력 소요 – 현재 인력구성 핵융합 전공외 기타 공학 분야 인력 多 • 핵융합 인력 관리체계 부실 – 핵융합 인력수요·공급의 체계적 관리체계 및 관련 정책 부실	⇨	• **핵융합 인력 양성 및 전문성 강화** ⇛ 핵융합 전문인력 양성 강화 및 양성 인력의 산업계 유입 유도 • **핵융합 인력 유입 확대** ⇛ 다양한 전공분야의 핵융합 인력유입 확대를 통한 인력수급 안정화 • **핵융합 인력관리체계 마련** ⇛ 정기적인 인력 수요공급 관리를 통한 안정적 인력확보
• 핵융합 매출 감소 및 일부 기업 집중 – 산업계 매출이 일부기업에 집중 – ITER 조달에 의존적인 상황 ※ ITER 사업 조달완료에 따른 매출감소 • 핵융합 산업체 역할 부족 – 설계 초기 단계, R&D 초기단계 임에 따라 산업계 역할 부족 • 핵융합 산업생태계 관리체계 부실 – 핵융합 산업생태계 유지관리 및 의견수렴을 위한 관리체계 부실	⇨	• **핵융합 실증로 개발 산업체 역할 강화** ⇛ 핵융합 R&D 사업, 설계 TF 산업체 유입 유도를 위한 역할 확대 • **핵융합 산업체 해외진출 지원** ⇛ 핵융합 산업체의 매출 확대를 위한 해외진출 지원 • **핵융합 산업생태계 관리체계 마련** ⇛ 장기적인 관점의 핵융합 산업생태계 관리체계 마련

3-1. 핵융합 전문인력 육성 강화

□ (전문인력 양성 강화) 핵융합 핵심기술 확보를 위한 인력 양성 강화 및 양성 인력의 전문성 제고 기회 마련

○ (인력 양성) 핵융합 장기 연구개발 로드맵(핵심기술 개발)에 따른 대학, 산업체 연구개발 참여 확대*를 통해 전문인력 양성 기회 마련

* 핵심기술별 개발 유형(학·연, 산·연, 산·학·연 등)에 따라 핵융합 연구개발 사업의 대학, 산업체 참여 확대를 통해 전문인력 양성 및 양성 인력의 핵융합 관련 산업체 진출 유도

※ 핵융합 산업체 채용의 경우 학사급 인력이 대다수인 반면, 대학의 핵융합 분야는 석·박사급 전문인력 배출로 양성인력의 핵융합 산업계 진출이 미흡

○ (핵융합 전문성 강화) 양성된 전문인력의 ITER 국제기구 등 해외 선진 기관의 경험 축적을 통한 전문성 강화 추진

- (Korea-ITER 박사후연구원) Korea-ITER 박사후연구원 연수지원 확대를 통해 양성 인력의 핵융합 전문성 강화

※ 박사후연구원 및 신진연구자 연수지원 등 기존 ITER 기구 이외의 국제협력 대상국 선진기관 연수 지원 확대 검토

○ (타 분야 인력유입) 다학제적 성격의 핵융합에너지 개발 특성을 반영한 타 전공 분야와의 융합연구 확대를 통해 인력 유입 유도

※ 선도기술개발 사업-융합연구과제 확대를 통해 8대 핵심기술 개발을 위한 타 전공 분야 인력 참여 유도 및 핵융합 분야 연구 인력 확대

□ (인력 관리체계 마련) 장기적 관점에서의 핵융합 인력수급 안정화를 위한 정기적 실태조사 및 관리 추진

○ (인력 실태조사) 정기적인(2년단위) 핵융합 인력현황 실태조사를 통해 장기적 관점에서 핵융합 연구개발 인력 관련 정책수립의 기반 마련

※ 핵융합 산업현황 실태조사와 연계하여 핵융합 인력 현황 실태조사 정기 추진

○ (핵심인재 관리) 핵융합 양성 인력 및 연구개발 사업 참여 인력 DB 관리를 통해 지속적 활용을 위한 전문인력의 보호·관리

3-2. 산업생태계 조성 및 활성화

□ (핵융합 산업체 역할 강화) 핵융합 실증로 개발의 산업계 역량 강화를 통해 핵융합 산업생태계 활성화 추진

○ (연구개발 참여) 핵융합 핵심기술 연구개발 참여를 통해 핵융합 산업체 역할 확대 [(기존)조달 중심→(향후)핵심기술 개발 중심]

※ 핵심기술별 유형에 따른 핵융합 핵심기술 개발 산업체 참여 확대로 인력양성과 연계

○ (설계 TF) 핵융합 전력생산 실증로 설계의 핵융합 산업체 역량 활용*

* 설계 TF 워킹그룹별 산업체 참여·확대를 통해 산업계가 보유한 엔지니어링 역량 활용

□ (해외 진출 지원) 기술역량을 보유한 핵융합 산업체의 해외진출 지원

○ (정보플랫폼 구축) 해외 핵융합 건설 및 제작 발주·입찰 등의 사업정보 및 시장정보, 국가별 현황 정보 등을 통합·제공하는 플랫폼 구축

* ex) (가칭) OFIS : Overseas Fusion Information Service

○ (기업 홍보) 핵융합 참여 우수기업의 협력 우수사례(기술·제품 개발 등)를 기반으로 국내외 유관기관 연계를 위한 마케팅 지원

* 핵융합 유관분야 기업의 해외시장 참여를 위한 국제 비즈니스 포럼 참여, 전시관 지원, 입찰 참여 지원 등 해외 마케팅 밀착지원

□ (산업생태계 지원·관리) 핵융합 산업생태계 유지·확장을 위한 지원·관리

○ (산업 실태조사) 정기적(2년 단위) 핵융합 산업체의 실태조사를 통해 핵융합 산업생태계 활성화 전략 수립을 위한 기반 마련

* 핵융합 참여 산업체의 매출, 인력 등 산업생태계 활성화 정책 수립을 위한 기초자료 조사로 인력 실태조사와 연계 추진

※ 필요시, 국가 통계 등록·승인 절차 추진

○ (기술 얼라이언스) 핵융합 관련 산업체의 협의회(기술얼라이언스) 활성화를 통해 산업계 지원정책 관련 의견수렴 및 소통창구 마련

※ 핵융합·가속기 기술진흥협회(KAFAT)에서 핵융합 산업협의회(기술얼라이언스) 운영·지원

(5) 전략적 이행체계 강화

[전략 목표]
o 핵융합 실증로 핵심기술 개발 촉진과 로드맵 이행의 지속적인 추진력 확보
o 핵융합에너지 개발에 대한 사회적 수용성 및 국민인식 제고

현황		실천과제
• 핵융합 장기 연구개발 로드맵 이행 실태 추적·관리하는 점검 체계 부재 • 양자간 국제협력과는 별도의 개별 기술 소요에 따른 국제협력 추진 – 개별 핵심기술의 국제협력 소요에 따른 산발적인 국제협력 추진 – 미래 신규 국제협력 가능성 존재	⇨	**• 핵융합 장기 연구개발 로드맵 관리 체계 마련** ⇛ 기본계획, 실증로 기본개념 이행점검과 연계한 로드맵 관리 추진 **• 핵융합에너지 국제협력 체계 강화** ⇛ 양자간 국제협력 체계 강화 및 신규 국제협력 소요 지속 발굴
• 장기간의 연구개발 투자 소요 – 핵융합에너지 개발 피로도 증가 • 장기적 관점의 핵융합에너지 사회적 수용성 부족 – 균등화 발전비용, 에너지 시장전망 등 핵융합에너지 경제성 분석 연구 미흡 – 다양한 관점의 핵융합 사회적 수용성 확보를 위한 소통 부족	⇨	**• 핵융합 연구개발 투자 당위성 확보** ⇛ 핵융합 연구개발 투자의 성과현황 분석으로 투자 당위성 확보 **• 핵융합 사회적 수용성 확보** ⇛ 핵융합 전력생산 실증로의 경제성과 상용로 시장진입 가능성 연구 ⇛ 핵융합 지지기반 확보를 위한 이해관계자 소통 강화

4-1. 로드맵 이행체계 강화

□ (로드맵 이행체계 마련) 핵융합 장기 연구개발 로드맵의 이행체계 마련

○ (이행점검 체계) 핵융합 기본계획 및 실증로 기본개념 이행점검과 연계하여, 핵융합 장기 연구개발 로드맵 추진 점검

* 핵융합에너지개발진흥기본계획 이행점검(5년주기)과 연계, 산·학·연 전문가로 구성된 이행점검단을 활용하여 로드맵 추진실적을 점검하고, 국가핵융합위 보고

○ (환경변화 대응) 급격한 환경변화에 따라 핵융합 장기 연구개발 로드맵 변경 필요시, 국가핵융합위 심의를 거쳐 변경

* 급격한 환경변화로 핵융합 장기 연구개발 로드맵 변경 필요시, 핵융합 실증로 설계와의 정합성을 검토하고, 변경(안)의 국가핵융합위 심의 추진

※ 국가핵융합위 폐지 확정시, 과기자문회의 또는 별도 회의체에서 검토·승인

□ (국제협력 체계 강화) 핵융합 핵심기술 확보를 위한 국제협력 확대 기반 마련

○ (양자간 협력체계 강화) 핵융합에너지 개발 국가간 양자협력 체계* 강화를 통해 핵심기술 확보의 국제협력 추진기반 마련

* 현재 진행 중인 한-EU, 한-미, 한-일, 한-중 양자 협력을 확대하고, 필요시. 신규 양자협력 대상국 및 협력체계 발굴

○ (국제협력 소요 발굴) 핵융합 8대 핵심기술 확보를 위한 국제협력 소요의 지속적인 발굴·관리 추진

* 8대 핵심기술 중심 연구개발 진행에 따른 국제협력 소요를 지속 발굴하고, 국가간 양자협력 체계 下 국제공동연구, 인력교류 등 국제협력 추진

○ (네트워크 강화) 핵융합 연구 저변확대를 위한 유관학회 협력체계 구축* 및 해외 거점 활용방안** 마련

* 타 분야와의 융합연구 및 유망기술 개발 협력, 핵융합 공동연구 및 인력양성 등을 추진

** 국제 기술교류 및 파트너쉽 구축, 국제협력 해외정보 수집 등의 지원을 통해 글로벌 핵융합 네트워크 확대·강화를 위한 핵융합 주요국 재외공관의 핵융합 거점공관 지정

4-2. 사회적 이해 증진 노력

□ (핵융합 투자 당위성 확보) 핵융합에너지 연구개발 투자의 파급효과 분석을 통해 투자 당위성 확보

○ (경제·사회적 효과분석) 장기간 대규모 정부예산이 투입되는 사업으로서, 대정부 투자의 정당성 확보를 위한 직·간접 파급효과 분석

※ 핵융합에너지를 통해 양성된 인력, 선진국 대비 기술 수준 향상, 핵융합 기술의 타 분야 확산, 핵융합 글로벌 리더십 등 사회적·과학기술적 파급효과 분석

○ (핵융합 편익제공) 핵융합 분야 역할의 다양화·극대화 실현을 위해 다양한 부분에서 적용가능한 DB 개방 등 국가 차원의 편익 제공

※ 과학기술 대형연구인프라 운영을 통해 '과학문화 확산' 이라는 사회적 가치 증진 및 핵융합 관련 연구데이터의 체계적 확보·활용을 통해 대형연구시설에서 발생되는 연구데이터의 활용사례로 '부가가치' 창출

□ (사회적 수용성 제고) 지속적인 핵융합 사회적 수용성 제고 노력을 통해 핵융합에너지 개발의 지지기반 마련

○ (실증로 경제성 확보) 핵융합 실증로 설계활동과 연계하여 실증로 비용절감 및 상용로의 경제성 확보를 위한 연구* 지속

* 핵융합 균등화발전비용(LCOE) 분석을 통한 핵융합에너지의 경제성 향상 방안 연구 및 미래 단계별 전력기장 진입 시나리오 분석을 통한 시장전망 연구 지속

○ (고유안전성 확립) 핵융합의 고유안전성 확립(삼중수소, 저준위 방사성 폐기물 등) 및 객관적 분석자료 지속적 발간·배포

※ ex) 핵융합 상용로 운영 시 발생할 수 있는 리스크 및 폐기물 등에 대한 분석 추진

○ (소통강화) 핵융합에너지 안전성, 필요성 및 국민 체감형 성과(고용창출, 산업파급효과 등)를 중심으로 온·오프라인 소통* 및 미래세대 교육** 확대

* 파급력 있는 다양한 매체(채널) 등을 통한 타겟형 기획 홍보 추진 등 안전성 인식 제고

** 핵융합에너지에 대한 일반국민 및 미래세대 관심도 제고를 위한 교육프로그램 개발 및 확대 운영

5. 결론

(1) 기대효과 및 활용 방안

□ 핵융합에너지 전력생산 실증로 핵심기술 확보를 통한 미래 핵융합 시장의 선도

○ 핵융합 장기 연구개발 로드맵 수립을 통해 핵심기술의 효율적 확보경로를 설정하고, 점검 기준 마련으로 향후 기술확보 경과의 체계적인 점검 가능

○ 핵융합 전력생산 실증로 핵심기술 확보 및 연구개발 인프라 확충을 통해 미래 글로벌 핵융합에너지 시장의 기술선도 역량 확보 가능

○ 장기적 관점의 핵융합에너지 개발을 지원할 수 있는 연구·산업·제도 등 기반 조성을 통해 글로벌 핵융합 개발 경쟁의 원천으로 활용

□ 국가 계획인 「제4차 핵융합에너지개발진흥기본계획('22~'26)」 체계적인 이행

○ 핵융합 장기 연구개발 로드맵 수립을 통해 제4차 핵융합에너지개발진흥기본계획의 전략목표의 체계적인 이행 추진

– (전략목표1) 과제1-1 「장기 연구개발 로드맵 구체화 및 체계적 이행」 "핵융합 전력생산 실증로 개념을 바탕으로 장기 연구개발 로드맵 구체화(국가핵융합위 보고)" 달성 기여

□ 국내외 급격한 환경변화와 산학연 핵융합계 전문가 참여형 기획연구를 통해 정책 추진의 효율성 극대화

○ 최근 급변하고 있는 글로벌 동향과 국내 역량 분석을 통해 시대적 흐름을 반영한 계획 수립 및 미래 환경 변화의 반영이 가능한 점검체계 마련

○ 핵융합 산학연 전문가로 구성된 핵융합 로드맵 수립 위원회 운영을 통해 국내 핵융합계의 역량 결집과 공감대를 형성

○ 또한, 전문가 위원회 운영 및 분야별 전문가 개별 자문을 통해 기획연구 분석결과의 객관성과 향후 정책 추진의 효율성 제고

□ 핵융합에너지 개발의 궁극적인 목표인 차세대 에너지원 실현 기여

○ 핵융합 장기 연구개발 로드맵 수립을 통해 전력생산 실증로 개발까지의 구체적인 계획을 수립하고, 궁극적 목표인 핵융합 에너지원 상용화에 기여

(2) 한계점 및 후속연구 방향

□ 핵융합 장기 연구개발 로드맵의 지속적인 관리와 업데이트 필요

○ 핵융합에너지의 효율적인 개발을 위해 수립된 장기 연구개발 로드맵의 정기적인 실적점검과 현황 파악으로 체계적 관리 필요

○ 전 세계적으로 급격하게 변화하고 있는 핵융합 환경의 지속적인 추적을 통해 로드맵의 정합성을 검토하고, 업데이트 소요 발생시 적시 변경요청 필요

○ 핵융합 전력생산 실증로 설계 TF 결과, 국가 계획의 수립경과, 환경변화 소요 등 롤링웨이브 플랜으로써 핵융합 장기 연구개발 로드맵 체계적 변경관리 필요

□ 핵융합 장기 연구개발 로드맵 이행을 위한 과감한 연구개발 투자 및 지원 필요

○ 핵심기술별 로드맵과 전략·실천과제의 이행을 위한 후속 연구사업(기술개발 R&D, 인프라 구축, 연구기반 조성 등)의 기획연구착수가 필요

※ 향후 세부 사업별 기획연구시, 로드맵의 범위 및 소요 연구시설·장비 등 인프라의 적정성, 세부 구축일정, 비용, 범위, 국내외 여건의 고려 필요함

○ 핵융합 장기 연구개발 로드맵에 따른 핵심기술 확보를 위해 과감한 연구개발 및 시험·실증 인프라의 국가적인 과감한 투자 필요

※ 현재의 국내 기술개발은 KSTAR에대한 의존성이 높은 상황이며, 시험실증 인프라 확충 없이 확보할 수 있는 기술수준의 한계점에 도달한 상태로 판단되며, 핵심기술 확보를 위한 과감한 투자 필요

○ 미래 핵융합에너지 개발의 선도를 가능케 하는 기반 조성(산업, 인력 등)이 중요하며, 핵융합 장기 연구개발 로드맵의 전략 및 실천과제 이행을 위한 투자 필요

○ 특히, 핵융합의 고유 안전성을 반영한 규제·인허가 체계의 개발과 국제적 조화는 핵융합 산업체의 진출 및 성장에 큰 영향을 미치는 요인으로 선제적인 방향마련 필요

□ 핵융합에너지의 실현을 위한 국민적 공감대 형성 지속 노력 필요

○ 대규모·장기적으로 추진되는 핵융합이 미래 에너지원으로 실현되기 위해서는 사회적 수용성과 국민의 지속적인 관심과 지지가 필수적임에 따라, 이를 위한 산·학·연 핵융합계 구성원의 노력 필요

[참고자료]

Cabinet Office, JP.('24.3), 핵융합 혁신 전략(국가 전략에 입각한 대처 방안)

European Commission('23.10), Analysis on a strategic public-private partnership approach to foster innovation in fusion energy

Fusion Industry Association('23.7), The global fusion industry in 2023

Department for Business, Energy&Industrial Strategy, U.K.(`21.10), Towards Fusion Energy : The UK Government's Fusion Strategy

Department of Energy, U.S.('24.06), Fusion Energy Strategy 2024

Department of Energyy, U.S.('24.4), Joint Statement between DOE and the Japan Ministry of Education, Sports, Science and Technology Concerning a Strategic Partnership to Accelerate Fusion Energy Demonstration and Commercialization

I. Chapman('22.12), An update on the UK fusion programme

United States Senate, U.S.('24.04), The Fusion Energy Act of 2024

Office of Science and Technology Policy, The White House, U.S.('23.12), International Partnerships in a New Era of Fusion Energy Development

Web of Science(WOS), 핵심기술 키워드, 과거 14년간('10~'23) 19,166건

과학기술정보통신부('23.08) 핵융합에너지 핵심기술 개발을 위한 기술분류체계 수립 기획연구

국가과학기술지식정보서비스(NTIS), "핵융합" 키워드, 과거 20년간('02~'22) 1,483개 과제

국가핵융합위원회('21.12), 제4차 핵융합에너지개발진흥기본계획('22~'26)

국가핵융합위원회('23.02), 핵융합에너지 실현을 위한 핵융합 전력생산 실증로 기본개념(안)

특허청(국가별), 핵심기술 키워드, 과거 21년간('01~'22), 특허 출원 3,018건

한-EU 양자협력 회의자료('24.01) The European path towards fusion electricity

한국연구재단('22.01) 핵융합에너지 전력생산 실증연구 촉진을 위한 미래 법제 발전방안 연구

한국연구재단('22.11), 핵융합 전력생산 실증로 8대 핵심기술(안전·인허가 제외) 기술수준평가 결과

[약어 설명]

A-FNS	Advanced Fusion Neutron Source
ASDEX-U	Axially Symmetric Divertor Experiment-Upgrade
BEST	Burning plasma Experimental Superconducting Tokamak
CFETR	the China Fusion Engineering Test Reactor
CFS	Commonwealth Fusion Systmens
CIEMAT	Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas
CRAFT	Comprehensive Research Facility for Fusion Technology
CS	Central Solenoid
DEMO	DEMOnstration reactor
DTT	Divertor Test Tokamak
EAST	the Experimental Advanced Superconducting Tokamak
ECH	Electron Cyclotron Heating
E-TASC	Eurofusion-Theory and Advanced Simulation Coordination
FES	Fusion Energy Science
FESAC	Fusion Energy Sciences Advisory Committee
FIA	Fusion Industry Association
FPP	Fusion Pilot Plant
FTF	the Fusion Technology Facility
FULGOR	FUsion Long pulse GyrOtRon laboratory
GA	Gneral Atomics
H3AT	the new Hydrogen-3 Advanced Tehcnology
HINEG	High Intensity D-T fusion NEutron Generator
JET	the Joint European Torus
JT-60SA	Japan Torus-60 Super Advanced
IAEA	International Atomic Energy Agency

ICRF	Ion Cyclotron Range of Frequencies
IFERC	International Fusion Energy Research Centre
ITER	International Thermoneuclear Experimental Reactor
KIT	Karlsruhe Institute of Technology
KSTAR	Korea Superconducting Tokamak Advanced Research
LIBRTI	LIthium BReeding Tritium Innovation
LHD	Large Helical Device
MITICA	Megavolt ITer Injector and Concept Advancement
MRF	Materials Research Facility
MPEX	the Material Plasma Exposure eXperiment
NBI	Neutral Beam Injection
NIFS	National Institute for Fusion Science
NRC	Nuclear Regulatory Commission
PF	Poloidal Field coil
PPPL	Prinston Plasma Physics Laboratory
QST	national institute for Quantum Science and Technology
RF	Radio Frequency
SciDAC	Scientific Discovery through Advanced Computing
STEP	Spherical Tokamak for Energy Production
SULTAN	SUpraLeiter Test ANlage
TAE	Tri Alpha Energy
TF	Toroidal Field coil
TBM	Test Blanket Module
UKAEA	UK Atomic Energy Authority
WEST	Tungsten(W) Environment in Steady-state Tokamak

첨부 수정 · 보완의견 반영내역 대비표

수정 및 보완의견	수정 및 보완의견 반영내용	해당 페이지	비고
○ 연구동향 섹션에서 중국의 핵융합 투자가 7페이지에 간소화되어서 소개되어 있음. CRAFT, BEST와 여러 핵융합로 건설 및 핵융합연구소, 학교 설립, 인력양성 등 다양하고 과감한 투자가 이루어지고 있는 것으로 알려져 있으므로 중국의 핵융합투자의 방향성과 계획을 더 면밀히 분석할 필요가 있음	○ 중국 핵융합 동향(CRAFT, BEST 건설 등) 업데이트 수정 반영 ○ 다만, 중국 관련 동향의 경우 보고서 外 제한적인 자료의 형식(발표자료, 신문기사 등)으로 관련내용의 확인이 어려운 경우가 많음	9, 10, 25, 34 페이지	
○ 국내 연구동향에 24년도 초에 시작한 한국의 스타트업 Enable Fusion 내용 추가 필요	○ 국내 연구동향에 국내 1호 핵융합 스타트업 창업 내용 추가	77 페이지	
○ 56페이지 한국의 기술수준 현황의 정량적 수준 지표는 '22년 전문가 설문조사에서 비롯된 것으로 보임. 신뢰도를 위해 이 설문조사의 조사 샘플 수 및 표준편차 등을 통계적으로 표시할 필요가 있음. 실제 평가보다는 주관적인 표본에서 나온 수치라는 것을 표시할 필요가 있음	○ 기술수준의 도출 방법 및 정량적 수치의 의미를 추가적으로 기술	58 페이지	
○ 3장, 4장 로드맵 수립과 전략에 대한 방대한 조사에 비해 5장 결론이 다소 짧게 기술되어 있음. 3장 및 4장을 기반으로 하여, 각 기술에 대한 총평을 5장 내 한계점 및 후속 연구 방향에 잘 녹여내면 좋을 것 같음	○ 3장 기술로드맵 수립에 따라, 핵심기술별 추진전략 기본방향을 정리 ○ 세부 기획연구 등 한계점 및 후속연구 방향 수정·보완	265 페이지	
○ 핵융합 플라즈마 연구에서 핵융합 발전로(에너지) 연구로 나아가기 위해서는 8대 핵심기술 개발을 위한 연구시설 구축이 필수적인 것으로 파악하고 있지만, 연구시설을 구축하기 위한 구체적인 전략(안)이 부족해 보임	○ 8대 핵심기술별로 기술목표 및 소요 연구시설장비를 기술하였으나, 실제 사업을 추진하기 위해서는 대내외 환경 및 구축범위 등 다양한 요소를 고려하여 구체화 필요 ○ 세부 기획연구 등 한계점 및 후속연구 방향 수정·보완	265 페이지	
○ 노심플라즈마 연구시설의 경우 구체적인 사업이나 재원조달 방안이 명확한 편	○ 8대 핵심기술별로 기술목표 및 소요 연구시설장비를 기술하였으나, 실제 사업을	265 페이지	

수정 및 보완의견	수정 및 보완의견 반영내용	해당 페이지	비고
이나 전략적 우선순위 분석결과 우선순위가 높은 증식블랑켓, 연료주기, 가열 및 전류구동 핵심기술 확보를 위한 연구시설 구축 전략(안)이 부족함	추진하기 위해서는 대내외 환경 및 구축 범위 등 다양한 요소를 고려하여 구체화 필요 ○ 세부 기획연구 등 한계점 및 후속연구 방향 수정·보완		
○ 장기 연구개발 전략 및 방향은 잘 정리되고 제시되었으며, 상기 연구시설 구축 전략(안)과 연계된 전체적인 핵융합에너지 장기 연구개발 로드맵(그림)을 제시하면 더욱 좋겠음	○ 핵융합 8대 핵심기술 로드맵(중분류) 및 인프라 소요 총괄표 작성을 통한 기술간 연계도 수정·보완 ○ 8대 핵심기술별로 기술목표 및 소요 연구시설장비를 기술하였으나, 실제 사업을 추진하기 위해서는 대내외 환경 및 구축 범위 등 다양한 요소를 고려하여 구체화 필요 ○ 세부 기획연구 등 한계점 및 후속연구 방향 수정·보완	83, 244, 265 페이지	
○ 보고서의 핵융합 연구 개발 분석 및 향후 방향에 따르면, 기존의 KSTAR - ITER - DEMO의 3단계 전략에 따라 ITER 이후에 바로 DEMO로 진행하는 것은 매우 힘들 것으로 파악됨. 따라서, 핵융합 발전로 개발을 위해 필수적인 연구시설(Facilty) 구축을 포함하는 KSTAR - ITER/Facilty - DEMO 또는 KSTAR - ITER/Facitilty - Prototype - DEMO 등과 같은 큰 그림의 로드맵(안)을 제시하여 장기 연구개발 전략(방향)을 구체화할 수 있으면 좋겠음	○ 핵융합 8대 핵심기술 로드맵(중분류) 및 인프라 소요 총괄표 작성을 통한 기술간 연계도 수정·보완 ○ 8대 핵심기술별로 기술목표 및 소요 연구시설장비를 기술하였으나, 실제 사업을 추진하기 위해서는 대내외 환경 및 구축 범위 등 다양한 요소를 고려하여 구체화 필요 ○ 세부 기획연구 등 한계점 및 후속연구 방향 수정·보완	83, 244, 265 페이지	
○ 8대 핵심기술별 재원 및 연구인력조달 방안에서 제시하는 신규사업에 대한 명칭이 통일되지 않음. 신규사업을 기획하는 경우 핵심기술별로 독립적으로 진행되기 보다는 핵융합 연구시설 직접단지를 제시하고 있으므로 이에 맞는 통일된 사업명을 제시하는 것이 좋을 것 같음	○ 향후 기술개발 R&D 및 인프라 구축을 위한 세부사업기획을 통해 개발·구축 범위를 설정하는 구체화 필요 ○ 세부 기획연구 등 한계점 및 후속연구 방향 수정·보완	265 페이지	
○ 추진체계에서 위원회의 전문성, 합리성을 확인하기 어려움. 이에 보다 구체적인 내용을 제시할 필요가 있음	○ 기획위원회 참여 전문가 리스트(소속 및 직책 등) 수정·보완	5, 6 페이지	
○ 가시적인 확인이 가능하도록 핵융합에너지	○ 핵융합 8대 핵심기술 로드맵(중분류) 및 인	83 페이지	

수정 및 보완의견	수정 및 보완의견 반영내용	해당 페이지	비고
장기 R&D 로드맵에 대한 시각 자료를 제시하는 등 보완 필요	프라 소요 총괄표 작성을 통한 기술간 연계도 수정·보완		
○ 표지 목차와 본문 일치하도록 수정 필요하며, 영어로 표기 시 원칙을 정하여 적용할 필요가 있음	○ 목차 수정·보완	목차 페이지 수정	
○ 추진경과에서 각각 추진경과 관련 내용을 간단히 정리하여 제시할 필요가 있음. 다양한 분야에서의 활용 가능성이 있으므로 독자 친화성이 요구됨 (예시) 적당한 위치에 전문용어에 대한 정리표 제시(TBM, QST, 페타 등)	○ 추진경과 주요내용 수정·보완 ○ 주요 약어 정리 수정·보완	7, 8, 267 페이지	