

※ 본 자료는 「(가칭)핵융합에너지 가속화 핵심기술 개발 및 인프라 구축사업」 기획연구
기술수요조사의 세부기술에 대한 이해도 제고를 위해 제공하는 과거 기획연구
참고자료로, 현재 기술 현황과 다소 차이가 있으며, 아래 작성된 사항은 확정된
내용이 아님을 양지 부탁드립니다.

핵융합 소재 기술 설명자료

2024. 02.

목 차

I . 개요	1
II . 국내외 현황	3
III . 세부기술 현황	12
가. 구조재	12
나. 대면재	15
다. 기능소재	17
라. 핵융합 소재 관련 연구시설	20

□ 기술정의

- 핵융합발전소의 구조적 안전성과 에너지 생산의 효율성을 확보하기 위한 핵융합로용 구조재, 대면재, 기능소재 개발

□ 필요성

- 핵융합 플라즈마에서 발생하는 고에너지 중성자에 대한 조사 저항성 및 고온 안정성을 유지하며, 장주기 방사성 폐기물을 저감시키기 위한 저방사화 재료 개발 필요
- 증식블랭킷 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/m^2 , 열속 0.3 MW/m^2 , 최대 3 dpa 조사량이 예측됨, 실증로는 중성자속 $2.0\text{-}3.0 \text{ MW/m}^2$, 열속 $0.5\text{-}0.7 \text{ MW/m}^2$, 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 사용되고 있으며, 개량 기술개발을 통해 이차전지 분야 적용 가능

□ 세부기술

- 핵융합 환경에서 고에너지 중성자에 의한 손상을 견디는 극한소재 개발

< 세부기술 분류 >

① 구조재

- 핵융합로용 내벽부품의 구조재로 사용되는 저방사화 철강재료의 대량 제조기술 개발, 용접/접합기술 개발 및 물성 DB 구축을 통한 표준화
 - (저방사화 구조재 제조기술 개발) 핵융합로용 증식블랭킷 디버터 등의 내벽부품 구조재로 사용될 저방사화 철강재 대량 제조기술 개발
 - (저방사화 구조재 용접 및 접합 기술개발) 저방사화 철강재를 이용하여 핵융합로용 증식블랭킷 및 디버터 등과 같은 복잡한 형상의 부품 제작에 필요한 용접 및 접합기술 개발
 - (저방사화 구조재 물성 DB 구축 및 표준화) 핵융합로용 증식블랭킷 및 디버터 설계 파라미터로 사용하기 위해 한국형 저방사화 철강재 ARAA의 각종 물성 DB를 구축하고, 국내외 산업기술기준 등재를 통한 표준화

② 대면재

- 핵융합 증식블랭킷 및 디버터용 고인성 플라즈마 대면재 제조기술 개발 및 텅스텐 소재 DB 구축
 - (고인성 대면재 제조기술 개발) 핵융합로 증식블랭킷 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

③ 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) 증식블랭킷의 설계 및 안전성 검증을 위한 기능소재 물성 DB 구축 및 성능 평가
-

II

국내외 현황

가

기술 동향

- ▶ 핵융합 주요 개발국은 소재의 중요성을 인식하고, 실증로에서 활용가능한 국가별 자국 소재 확보와 물성 평가를 위한 신규 연구시설 구축을 추진 중

□ 국외

- (주요국) 핵융합 전력생산 실증로에서 활용 가능한 핵융합 소재 개발과 더불어, 개발된 소재의 물성평가·DB 구축을 위한 시설구축 추진 중

<표. 국외 핵융합 소재 연구개발 동향 >

세부기술	주요내용
구조재	<p>▶ 국가별 저방사화 철강재를 개발하고 보유하고 있는 상황이나, 6톤급 이상 대량 제조기술에 대한 연구개발이 진행 중</p> <p>⇒ (주요이슈) 국가별 실증로 적용을 위한 저방사화 철강재를 개발하고, 제조기술 개발 중</p> <p>▶ 국가별 자국 저방사화 철강재의 실증로 적용을 위해 장·단기 물성 DB 구축을 추진 중이며, 핵융합 중성자 조사 평가를 위한 중성자원 건설 착수(EU, JP)</p> <p>⇒ (주요이슈) 핵융합의 고에너지 중성자 조사시험을 위한 중성자원 구축 중</p>
대면재	<p>▶ ITER 디버터를 중심으로 텅스텐 판재 검증 및 실증로 적용을 위한 복합재료 연구개발을 진행중이며, 텅스텐-CuCrZr 접합 기술개발 완료(EU, JP, CN)</p> <p>▶ ITER 디버터 대형 목업에 대한 성능 검증을 위해 고열부하 및 고입자속 손상 평가 진행, 텅스텐 조사재 물성 데이터베이스 구축 중(EU)</p> <p>⇒ (주요이슈) ITER 디버터 개발을 통해 텅스텐 소재 개발 및 물성 DB 구축 중</p>
기능소재	<p>▶ 국가별 독자적인 삼중수소 증식재 및 중성자 증배재 개발을 위한 베릴륨 취급 시설 구축(EU, JP, CN, IN)</p> <p>▶ 핵융합 원료 확보를 위한 리튬동위원소 분리기술 및 해수 리튬 추출 기술개발 진행 중(JP)</p> <p>⇒ (주요이슈) 국가별 핵융합 증식재 개발 및 원료 확보를 위한 요소기술 개발 추진 중</p> <p>▶ 독자적인 기능소재의 화학적/열적 특성 평가를 위한 시스템을 구축하고 물성 DB 확보 중(EU, JP, CN, IN)</p> <p>⇒ (주요이슈) 국가별 핵융합 기능소재 개발을 위한 시설구축 및 물성 DB 확보 노력</p>

- **(ITER)** ITER 운영단계에서는 한국형 저방사화 철강재, 삼중수소 증식재 및 중성자 증배재를 사용한 ITER TBM을 제작, 설치 및 시험을 통해 실제 핵융합 환경에서의 핵융합 재료 검증이 수행될 예정
- **(인프라 현황)** 핵융합 소재의 물성평가 및 DB 구축을 위해 핵융합 중성자원 중심 신규 연구시설 구축 추진 중

< 국외 인프라 구축 현황 >

세부시설	국외 장치명
중성자 생산시설 및 조사후/조사재 시험시설	• EU는 약 1조원을 투자하여 스페인 그라나다에 IFMIF-DONES 구축 중('30년 운영목표)
	• 일본은 약 1조원을 투자하여 룩카쇼에 A-FNS 구축 중('31년 완공목표)
	• 중국은 '15년 HINEG-I을 개발완료하고, 현재 HINEG-II 공학설계 진행중이며,, 2031년까지 10억달러 투자하여 HINEG-III를 단계적으로 완공예정
	• 미국 DOE에서는 핵융합 재료 연구를 위한 중성자선원에 대한 RFI 공고('23.5)
베릴륨 취급시설	• (미국) INL, Materion, (독일) KBHF, (프랑스) AREVA, (일본) QST, (중국) SWIP

□ 국내

- **(주요성과)** 저방사화 철강재(ARAA) 및 삼중수소 증식재 페블 대량 제조 기술 개발
 - 핵융합(연)과 원자력(연)에서 공동으로 ITER TBM 프로그램을 통해 한국형 저방사화 철강재(ARAA) 개발 및 기초 물성 DB 구축 진행 중('12~)
 - 핵융합(연)에서 삼중수소 증식재 페블 대량 제조 원천기술 개발('16)
 - 핵융합(연)과 가천대학교에서 고성능 삼중수소 증식재 원천기술 개발 진행 중('21~)

< 표. 국내 핵융합 소재 연구개발 동향 >

세부기술	주요내용
구조재	<p>▶ 한국형 저방사화 철강재(ARAA)를 개발하고, 6톤급 대량 제조를 시도하였으나, 품질 균일성에 있어 해결해야할 연구주제 존재</p> <p>▶ ITER TBM 사업을 통해 ARAA의 장·단기 물성평가(연구용 원자로 활용)를 진행 중이나, 실증로 적용을 위해서는 핵융합의 고에너지 중성자 조사시험 필요</p> <p>⇒ (주요이슈) 한국형 저방사화 철강재의 실증로 활용을 위한 핵융합 중성자 조사 시험을 통한 장·단기 물성평가 필요</p>
대면재	<p>▶ 텅스텐 소재 개발 및 상용화 관련 연구가 진행되지 않은 상황, ITER 텅스텐 소재들에 대한 분석 수행 중, 텅스텐-CuCrZr 접합관련 기초연구 수행 중</p> <p>⇒ (주요이슈) 핵융합 실증로급 텅스텐 소재 및 접합기술 개발 요구</p> <p>▶ KSTAR 텅스텐 디버터 업그레이드를 위해 원자력(연) 장비 활용 고열부하 시험 검증 진행 중</p> <p>⇒ (주요이슈) 실증로급 대면재 물성 DB 구축을 위한 시험시설 구축 필요</p>

세부기술	주요내용
기능소재	<p>▶ 핵융합로용 삼중수소 증식재 원료로 사용하기 위한 Li_2TiO_3 분말 합성 및 페블 제조 원천기술 개발</p> <p>⇒ (주요이슈) 핵융합 중성자 증배재 개발을 위한 베릴륨 연구 및 관련 시설 부재</p> <p>⇒ (주요이슈) 핵융합 원료 확보를 위한 리튬동위원소 분리, 해수 리튬 연구 요구</p> <p>▶ ITER TBM을 통해 기능소재의 화학적/열적 특성 평가를 위한 방법론 연구 진행 중</p> <p>⇒ (주요이슈) 페블베드에 대한 기계적 물성 평가 및 중성자 조사 시험 요구</p>

< 국내 증식블랭킷 연구개발 인력 현황 >

기관 분류		주요 연구내용(성과)	연구인력 ('23.7 기준)
연구원	핵융합(연)	<ul style="list-style-type: none"> 한국형 저방사화 철강재 개발 및 기초 물성 DB 구축 진행 중('12~) 삼중수소 증식재 페블 대량 제조 원천기술 개발('16) 고성능 삼중수소 증식재 원천기술 개발 진행 중('21~) 	3명
	원자력(연)	<ul style="list-style-type: none"> 한국형 저방사화 철강재 공동 개발('12~) 	1명
	재료(연)	<ul style="list-style-type: none"> 저방사화 철강재 성능 향상을 위한 기초연구 진행 중 	1명
대학	가천대	<ul style="list-style-type: none"> 고성능 삼중수소 증식재 원천기술 공동 개발 진행 중('21~) 	1명
	창원대	<ul style="list-style-type: none"> 저방사화 철강재용 용접봉 개발 진행 중('22~) 	1명

- (인프라 현황) 국내 유일의 연구용 원자로인 하나로 및 조사후 시험시설을 활용해 한국형 저방사화 철강재(ARAA)에 대한 중성자 조사 특성 평가 진행 중 ('15~)

< 국내 핵융합소재 연구개발 관련 인프라 현황 >

세부시설	국내 보유 장치명
중성자 생산시설 및 조사후/조사재 시험시설	<ul style="list-style-type: none"> 원자력(연) 하나로 연구용 원자로 및 조사후/조사재 시험시설
	<ul style="list-style-type: none"> 원자력(연) 재료 전용 이온조사시험시설 (KAHIF)
베릴륨 취급시설	<ul style="list-style-type: none"> 구축된 인프라 부재

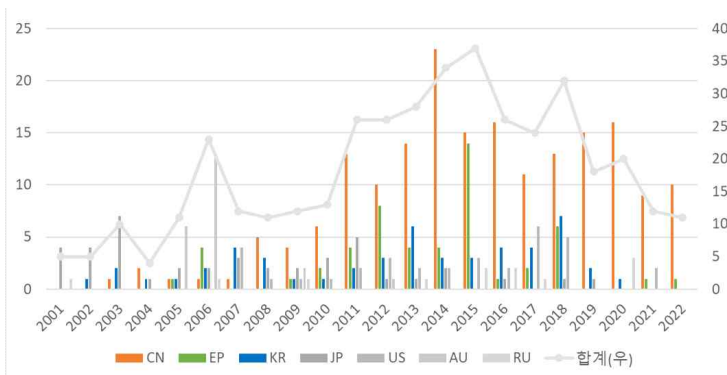
나

특허 · 논문 분석

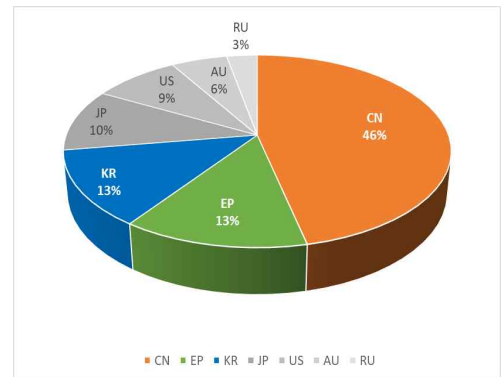
- ▶ (특허분석) 최근 중국 연구기관을 중심으로 특허출원량이 증가하고 있으나, 핵심 기술 중 특허의 질적 수준이 상대적으로 낮고, 특허활동이 활발하지는 않은 분야
- ▶ (논문분석) 독일과 중국을 중심으로 논문이 게재되고 있으며, 한국은 피인용도와 게재건수가 모두 낮은 상황

□ 특허 출원 현황

- (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



< 그림. 연도별 출원 건수 >



< 그림. 국가별 비중 >

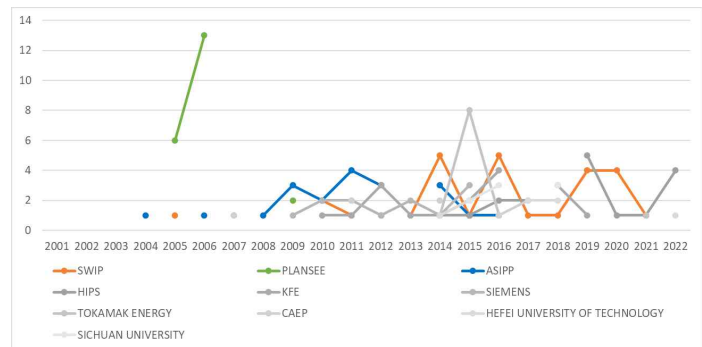
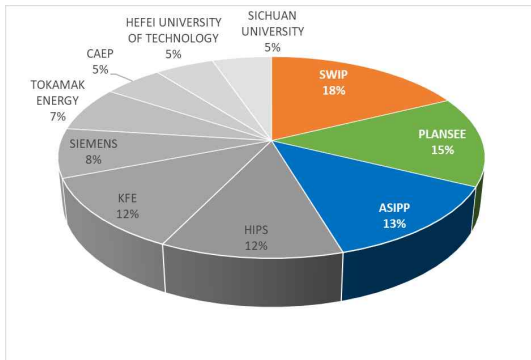
- (국가별/특허청별 출원현황) 중국 한국, 러시아의 경우 거의 모든 특허를 자국 특허청에 출원하였으며, 유럽, 일본, 미국의 경우 세계 주요 국가 특허청에 동시 출원 진행 중

< 표. 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 출원량이 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



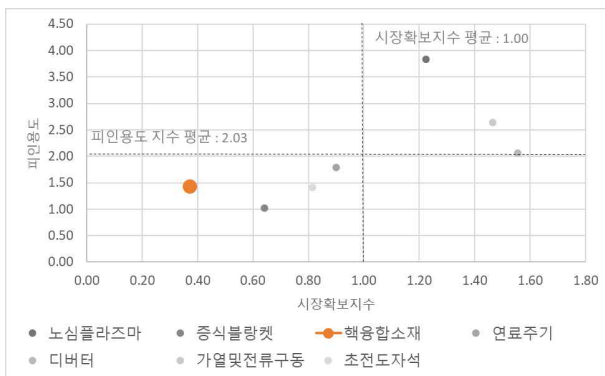
< 그림. 주요 출원인 Top 10 출원 비중 >

< 그림. 주요 출원인 Top 10 연도별 출원 건수 >

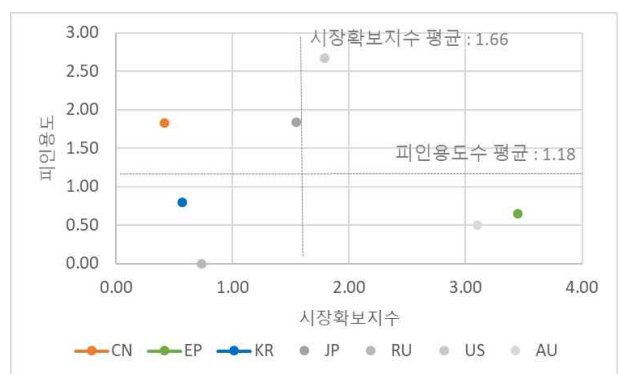
○ (특허경쟁력) 핵융합 소재 분야의 경우 핵심기술 중 피인용도와 시장확보지수가 낮은 분야로, 타 분야 대비 출원된 특허가 질적으로 낮은 수준으로 파악

- 국가별로 살펴보면 미국이 유일하게 피인용도와 시장확보지수가 높은 1사분면 위치

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

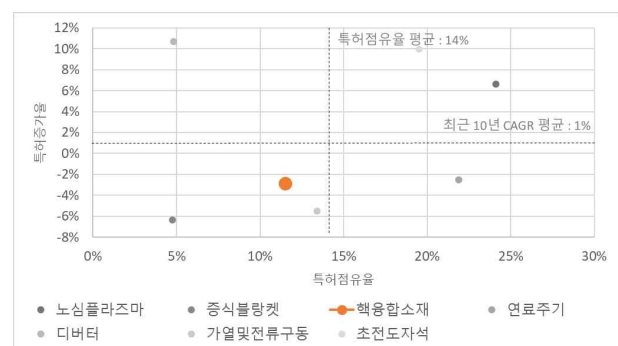


< 그림. 피인용도 - 시장확보지수(핵심기술) >



< 그림. 피인용도 - 시장확보지수(국가별) >

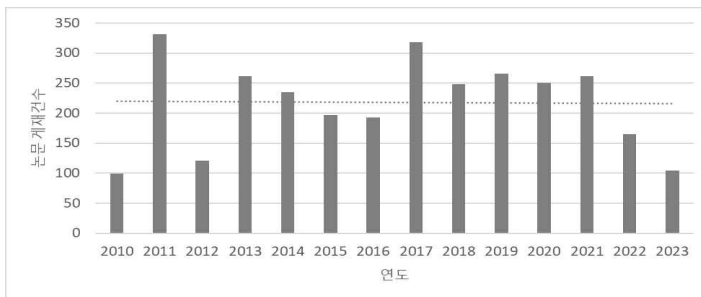
○ (특허유망성) 핵융합 소재 분야는 특허 점유율이 낮고(핵심기술중 5위), 최근 10년간 특허성장률도 평균 이하로, 특허 활동이 활발하지는 않은 분야(3사분면 위치)



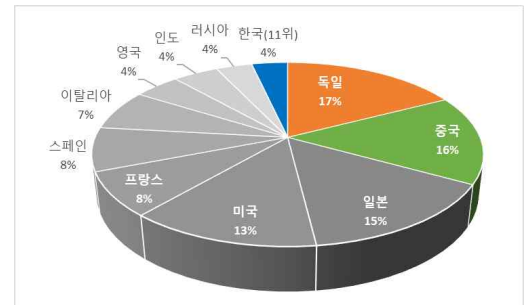
< 그림. 특허점유율 - 최근 10년 연평균 증가율 >

□ 논문게재 현황

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

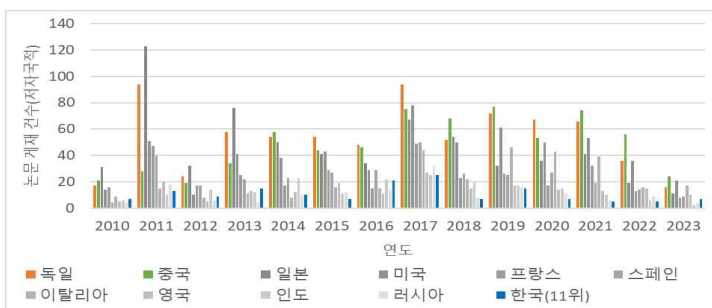


< 그림. 연도별 게재 건수 >

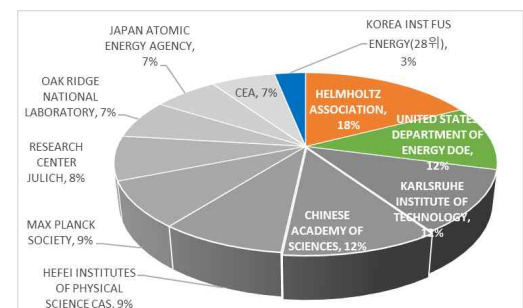


< 그림. 국가별 Top 10 게재 비중 >

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

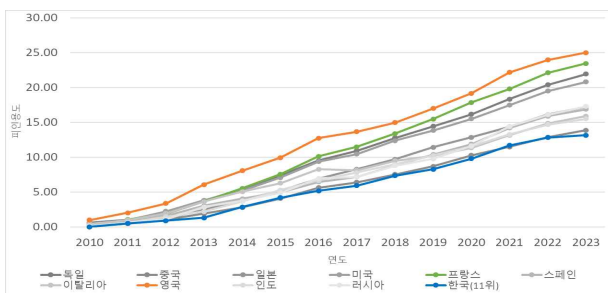


< 그림. 연도별/국가별 Top 10 게재 건수 >

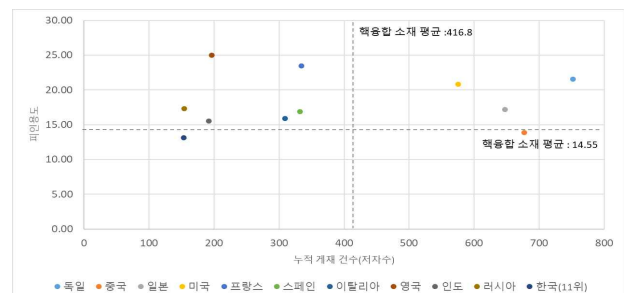


< 그림. 기관별 Top 10 게재 비중 >

- (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)



< 그림. 국가별 연도별 피인용도 분석 >

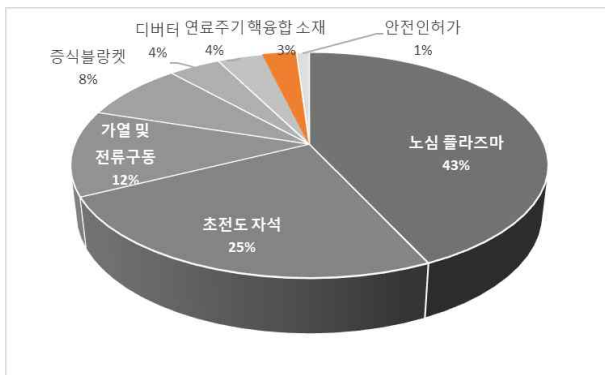


< 그림. 게재 건수/피인용도 분석 >

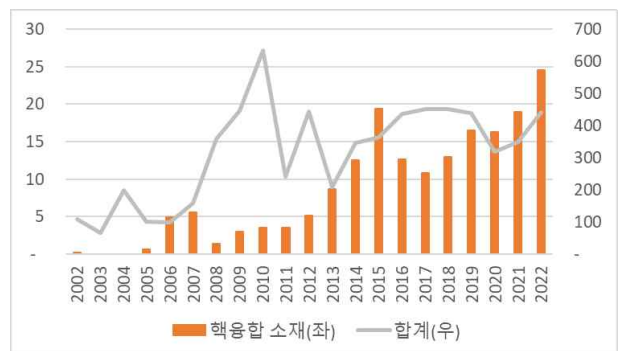
- ▶ 핵융합 소재 연구개발은 182억원이 투입(8대 핵심기술 전체 금액 중 3%, 7위)되었으며, 핵융합 선도기술개발사업 등 소규모 과제 위주의 연구개발 진행

□ 연구개발 투자현황

- (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 꾸준히 연구개발 투자비가 증가하고 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

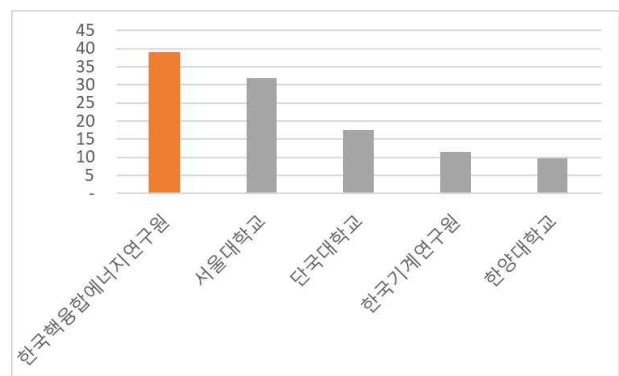


< 그림. 8대 핵심기술 비중 >



< 그림. 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

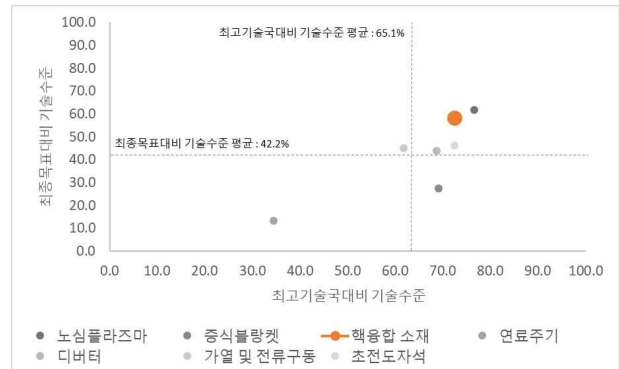


< 그림. 주요 연구기관 >

- ▶ 핵심기술 중 최종목표 대비 한국 기술수준(58.3%)와 최고 기술국 대비 기술수준(72.5%)가 모두 높은 분야이며, 세부기술 중 구조재의 기술수준이 높은 것으로 파악

□ 기술수준 현황

- (핵심기술 기술수준 비교) 핵심기술분야 중 최고기술국(EU) 대비 기술수준과 최종목표 대비 기술수준이 평균 이상인 분야
 - 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



< 그림. 8대 핵심기술 기술수준 현황 >

- (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) 및 물성데이터 베이스를 구축하고, RCC-MRx 등재를 계획 중
 - 대면재는 대학 실험실 규모의 연구개발을 통해 ITER 기술을 추적 중이며, 기능소재는 세계적 수준의 삼중수소 증식재 제조 원천기술을 확보하였으나, 리튬 동위원소 분리, 중성자 증배재 연구가 미진한 것으로 파악

< 표 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

※ 핵융합 전력생산 실증로 핵심기술 기술수준평가(한국연구재단, '22)

□ ITER를 통한 확보 기술수준 및 한계점

- (ITER를 통한 기술확보) ITER 운영단계에서는 한국형 저방사화 철강재, 삼중수소 증식재 및 중성자 증배재를 사용한 ITER TBM을 제작, 설치 및 시험을 통해 실제 핵융합 환경에서의 핵융합 재료 검증이 수행될 예정
- (실증로 기술대비 한계점) 실증로의 토카막 내벽부품이 받게 되는 핵융합 중성자 조사량은 20 dpa에서 많게는 100 dap에 달할 것으로 예상되고 있으나, ITER TBM이 받는 조사량은 1 ~ 3 dpa 수준에 그칠 것으로 예상되므로, 실증로에 적용하기 위한 핵융합 재료를 시험 및 검증하기 위해서는 고에너지 중성자 조사시설 구축이 필요

< 표. ITER 사업을 통해 확보되는 핵융합소재 기술 및 한계점 >

ITER 통해서 확보 가능한 기술	실증로 기술대비 한계점
<ul style="list-style-type: none"> • ITER 운영단계에서 한국형 핵융합 재료로 제작된 저방사화 철강재의 TBM 시험 통해 ITER급 핵융합 환경에서의 재료 시험 및 검증 수행 예정 • ITER 환경에서의 디버터 시험 성능검증 수행 예정 • ITER 운영단계에서 TBM의 시험을 통해 ITER급 핵융합 환경에서의 삼중수소 증식 실험 수행 예정 	<ul style="list-style-type: none"> • 실증로의 내벽부품은 20 ~ 100 dpa 정도의 고에너지 중성자 조사를 받을 것으로 예상되지만, ITER TBM이 받는 조사량은 1 ~ 3 dpa 수준

Ⅲ

세부기술 현황

가

구조재

□ 정의

- 핵융합로용 내벽부품의 구조재로 사용되는 저방사화 철강재료의 대량 제조기술 개발, 용접/접합기술 개발 및 물성 DB 구축을 통한 표준화

세세부기술	기술개요
저방사화 구조재 제조기술 개발	•핵융합로용 증식블랭킷 및 디버터 등의 내벽부품 구조재로 사용될 저방사화 철강재 대량 제조기술 개발
저방사화 구조재 용접 및 접합 기술개발	•저방사화 철강재를 이용하여 핵융합로 증식블랭킷 및 디버터 등과 같은 복잡한 형상의 부품 제작에 필요한 용접 및 접합기술 개발
저방사화 구조재 물성 DB 구축 및 표준화	•핵융합로용 증식블랭킷 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 발생하는 고에너지 중성자에 대한 조사 저항성 및 고온 안정성을 유지하며, 장주기 방사성 폐기물을 저감시키기 위해 저방사화 철강재료 필요
- (타분야와 연계) 저방사화 철강재는 증식블랭킷 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

□ 국내외 동향

① 저방사화 구조재 제조기술 개발

- (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

② 저방사화 구조재 용접 및 접합 기술개발

- (국외) 대부분의 핵융합 에너지 개발국은 저방사화 철강재를 보유하고 있으며, 최근에는 용접봉 개발도 진행 중
 - 일본과 유럽 등에서 증식블랭킷의 사각형 냉각 채널을 확산접합을 이용해서 제작하는 방법 개발 중
 - 유럽에서 삼중수소 투과 방지를 목적으로 스테인리스 파이프에 알루미늄이나 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 알루미늄 코팅 가능성 여부를 검토한 내용의 연구가 수행되고 있으나, 파이프와 같은 형상에 알루미늄 코팅 관련 연구 부재

③ 저방사화 구조재 물성 DB 구축 및 표준화

- (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 발생하는 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

□ 정의

- 핵융합 증식블랑켓 및 디버터용 고인성 플라즈마 대면재 제조기술 개발 및 텅스텐 소재 DB 구축

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 안정성 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 사용 수명이 결정될 수 있는 중요한 요인
 - * 텅스텐은 반복적인 부하와 입자와의 충돌에 의해 피로균열 발생 및 침식·삭막 현상 발생

□ 국내외 동향

① 고인성 대면재 제조기술 개발

- (국외) 실증로 적용을 위한 복합재료 개념연구 및 접합기술개발 진행 중
 - ITER 디버터 적용을 위해 유럽, 호주, 중국 등에서 제조되고 있는 텅스텐 판재의 성능 검증을 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 접합기술 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

② 대면재 물성 DB 구축

- (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 원자료를 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

□ 정의

- 삼중수소 증식재로 사용되는 리튬 세라믹스 및 중성자 증배재로 사용되는 베릴륨 화합물 개발 및 물성 DB 구축

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

□ 국내외 동향

① 기능소재 원료확보 기술 개발

- **(국외)** EU, 일본, 인도 등 대부분의 핵융합에너지 개발국에서는 베릴륨 취급 시설을 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 Li_2TiO_3 분말 합성 연구 수행 중
- (국내) 핵융합(연) 및 일부 대학에서 핵융합로용 삼중수소 증식재 원료로 Li_2TiO_3 를 사용하기 위해 Li_2TiO_3 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

② 기능소재 제조기술 개발

- (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

③ 기능소재 물성 DB 구축 및 성능 검증

- (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

라

핵융합 소재 관련 연구시설

□ 정의

- 핵융합 환경에서 사용되는 재료의 정확한 물성 평가 및 검증을 위한 제반시설

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 원격조작을 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

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 한국원자력연구원
에서 운영하고 있는 하나로 연구용 원자로가 유일

세부시설	국내	활용가능 여부 및 사유
조사후 시험시설	• 원자력(연) IMEF	• (불가) 핵융합 플라즈마에서 발생하는 중성자 에너지보다 낮은 에너지 중성자를 이용하는 시설로서, 실제 핵융합 환경에서 재료 검증을 하기에는 한계 존재