

※ 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.

# 디버터 기술 설명자료

2024. 02.

# 목 차

I . 개요 .....	1
II . 국내외 현황 .....	3
III . 세부기술 현황 .....	12
가. 디버터 설계 .....	12
나. 디버터 제작 및 검증 .....	15
다. 소요 연구시설 .....	18

## □ 기술 정의

- 핵융합의 극한 환경에 직접적으로 노출되어 불순물과 헬륨 제어를 통해 노심 플라즈마를 고성능으로 유지하게 하는 장치

## □ 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
  - 특히, 제작 및 검사 기술은 논문이나 기술문서에서 언급하기 어려운 기술적인 이슈나 노하우가 많아 조달국이 아니면 공유되기 어려우며 조달을 맡은 기업이 특허를 보유한 경우 해당 기술의 사용이 어려움
  - 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

- 디버터 기술개발 및 제작을 위해 설계기술을 개발<sup>①</sup>하고, 이를 활용한 디버터 제작 및 검증기술<sup>②</sup> 확보

### < 세부기술 분류 >

---

#### ① 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, 핵 반응 열 및 폐기물 기준 수립

---

#### ② 디버터 제작 및 검증 기술개발

- 20 MW/m<sup>2</sup>급 초고열속 냉각성능을 갖춘 실증로급 규모의 디버터 제작 및 평가기술을 개발하고, 실증로 디버터의 유지보수 개념 도출
    - (제작기술 개발) 20 MW/m<sup>2</sup>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
-

## II

## 국내외 현황

### 가

### 기술 동향

- ▶ ITER 디버터 조달국(EU, 일본, 러시아)를 중심으로 연구개발이 진행 중이며, 실증로 적용을 위한 다양한 디버터의 개념을 제시하고 기술개발 추진 중

#### □ 국외

- (조달국) ITER 조달국을 중심으로 ITER급 기술개발을 진행 중이며, 실증로에 적용 가능한 다양한 디버터의 연구를 위해 신규시설 구축 등 인프라 확보 노력 지속

<표. 국외 디버터 연구개발 동향 >

세부기술	주요내용
설계 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ 디버터 경계플라즈마 해석 및 영향평가 분야의 선도적인 입지 확보를 위해 자체 개발한 해석코드의 지속적 업데이트 및 인프라 구축 중(US, EU, JP)</li> <li>▶ 디버터 열부하 감소를 위한 다양한 디버터의 개념을 제시하고 연구개발 추진 중(EU)</li> <li>▶ 디버터 경계플라즈마 해석이 가능한 코드를 자체개발하고, 이를 활용하여 디버터 영역에서의 입자 거동 해석 중(EU)</li> <li>▶ 디버터 공학설계를 위해 통합적인 공학해석 기술을 개발 중이며, 조달국간 높은 수준의 기술공유 진행 중(EU, JP, RU)</li> </ul> <p>⇒ (주요이슈) ITER급 기술의 조달국 간 공유로 기술개발을 추진 중</p>
제작검증 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ ITER 조달국을 중심으로 ITER급 디버터의 실제 제작단계를 진행 중이며, 열속 성능 (<math>20\text{MW/m}^2</math> 급)을 평가할 수 있는 시험시설을 보유(EU, JP, RU)</li> <li>▶ 자국 실험장치에 텅스텐 디버터 대면부품을 설치하고 시험평가관련 노하우 축적(EU, CN)</li> <li>▶ ITER 기술을 기반으로 원격유지보수 개념을 개발하고 원격제어장치, 로봇암 기술개발이 활발하게 진행 중(UK, EU)</li> </ul> <p>⇒ (주요이슈) ITER급 기술개발을 추진 중 이나, 향후 실증로급 디버터 기술개발을 위한 연구 데이터 요구(이를 위한 장치 구축 진행 중)</p>

- **(ITER)** ITER 조달국을 중심으로는 디버터 설계, 제작 및 검사, 기술 획득이 가능할 것으로 보여지며, ITER 운영단계에서 디버터 운전시나리오가 개발될 것으로 기대
  - ITER 운영단계에서는 디버터 운전 시나리오에 대한 물리적 검증이 가능할 것으로 예상되며 이를 통해 실증로 규모의 토카막에서 디버터 부근의 경계플라즈마 현상에 대한 예측이 가능할 것으로 기대
  - 디버터에 가해지는 열 및 입자속을 최적화할 수 있는 운전시나리오 도출을 기대
- **(인프라 현황)** ITER 디버터의 열속 성능 평가를 위한 시험시설(EU, 러시아)을 보유하고 있으며, 핵융합 다양한 디버터 개념의 연구를 위해 신규연구시설 구축 중(EU)

< 국외 인프라 구축 현황 >

세부시설	국외 장치명	활용가능 여부 및 사유
고열부하 시험시설	• GLADIS (독일)	• <b>(일부가능)</b> 자체 사용 외에 사용 시간에 대해 협의 후 사용 가능 • <b>(한계)</b> 테스트 샘플 사이즈가 실증로 디버터 타겟 전체에 적용 불가
	• IDTF(ITER Divertor Test Facility) (러시아)	• <b>(불가)</b> ITER Test 전용 시설로 사용
	• JUDITH2 (독일)	• <b>(일부가능)</b> 국제 공동연구 활용을 위한 협의 필요 • <b>(한계)</b> 테스트 샘플 사이즈가 실증로 디버터 타겟 전체에 적용 불가
	• JEBIS (일본)	• <b>(일부가능)</b> 국제 공동연구 활용을 위한 협의 필요 • <b>(한계)</b> 테스트 샘플 사이즈가 실증로 디버터 타겟 전체에 적용 불가
플라즈마입자 발생시험시설	• MAGNUM-PSI (네덜란드)	• <b>(일부가능)</b> 국제 공동연구 활용을 위한 협의 필요 • <b>(한계)</b> 동시에 한 종류의 플라즈마 입자만 시험 가능
	• PSI-2 (독일)	• <b>(일부가능)</b> 국제 공동연구 활용을 위한 협의 필요 • <b>(한계)</b> 동시에 한 종류의 플라즈마 입자만 시험 가능

## □ 국내

- **(주요성과)** 한국은 ITER 디버터 비조달국으로 KSTAR 디버터 업그레이드와 ITER 비조달 사업을 통해 기술 축적 중
  - 핵융합(연)에서 KSTAR PFC 업그레이드를 위한 자체 디버터 설계, 해석 및 제작 기술을 개발하였으며, 실증로급 디버터 예비개념 설계에 준하는 초기 물리·공학 해석을 통한 설계 프로세스 정립
  - 원자력(연)에서 소형 플라즈마 입자 발생 시험장비(Applied-field magnet plasma dynamic thruster, AF-MPD) 구축을 통한 PSI 연구 진행.
  - 한국과학기술원(학)에서 경계플라즈마 해석 코드 (SOLPS-ITER)를 이용하여 KSTAR 운전에 대한 디버터 물리 연구 수행.

- 포항공과대학(학)에서 디버터 냉각 방식에 대한 차압 및 임계열유속에 대한 열수력 해석 및 시험 수행과 디버터 냉각 계통 연구 수행
- (주)비츠로테크(산)에서 KSTAR PFC 업드레이드를 위한 자체 카세트 디버터 제작 기술 개발

< 표. 국내 디버터 연구개발 동향 >

세부기술	주요내용
설계 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ 디버터 경계 플라즈마는 기초연구사업 등을 통한 대학 연구실 단위 수준(기초 단계)의 해석 기술개발 진행 중</li> <li>⇒ <b>(주요이슈) 디버터의 경계 플라즈마 해석 기술격차 및 자국 코드 부재</b></li> <li>▶ ITER 디버터 기술추적을 위해 공학적 해석기술을 개발 중이나, 열 및 구조해석의 기술수준은 높으나 전자기장 해석의 수준이 상대적으로 낮은 상황</li> <li>⇒ <b>(주요이슈) 핵융합 실증로급 환경(열속, 전자기력 등)에 대한 종합적인 해석 기술 요구</b></li> </ul>
제작검증 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ KSTAR 텅스텐 디버터 개발을 통해 10MW/m<sup>2</sup> 수준 열속 시험 및 영향평가 예정</li> <li>⇒ <b>(주요이슈) 핵융합 실증로 환경에서의 성능을 검증할 수 있는 시험시설 요구</b></li> <li>▶ 한국의 산업용 로봇의 기술수준은 높으나, 디버터 원격유지보수를 위한 로봇시스템 개발은 기초연구 수준</li> <li>⇒ <b>(주요이슈) 산업용 로봇 기술수준을 바탕으로 핵융합 환경을 고려한 원격유지보수 시스템 개발 필요</b></li> </ul>

< 국내 증식블라켓 연구개발 인력 현황 >

기관 분류	주요 연구내용(성과)	연구인력 ('23.7 기준)
연구원	<b>핵융합(연)</b> • KSTAR 디버터 설계, 해석 및 제작 기술 개발 • 실증로급 디버터 초기 물리·공학해석을 통한 설계 프로세스 정립	5명
	<b>원자력(연)</b> • 소형 플라즈마 입자 발생시험장비(Applied-field magnet plasma dynamic thruster, AF-MPD) 구축을 통한 PSI 연구	1명
대학	<b>KAIST</b> • 경계플라즈마 해석 코드(SOLPS-ITER)를 활용한 KSTAR 운전에 대한 디버터 물리 해석 연구	5명
	<b>포항공대</b> • 디버터 냉각 방식에 열수력 해석 및 시험과 계통 연구	3명
산업체	<b>(주)비츠로테크</b> • KSTAR용 카세트 디버터 자체 제작 기술 개발	

○ **(인프라 현황)** 원자력(연) 시설을 활용하여 디버터 시험 검증 추진

- 원자력(연)에서 보유한 고열부하 시험시설(KoHLT-EB)를 이용하여 소형 디버터 샘플 제작 후 10 MW/m<sup>2</sup>의 고열부하 시험을 통해서 제작 건전성을 평가
- 원자력(연)에서 보유한 플라즈마 입자 발생 시험시설(AF-MPD)를 이용하여 플라즈마에 의한 텅스텐 소재의 표면 손상 및 연료 입자의 retention 연구를 수행

< 국내 디버터 연구개발 인력 현황 >

세부시설	국내 보유 장치명
고열부하 시험시설	• Korea Heat Load Test Facility (KoHLT- EB), 원자력(연)
플라즈마 입자 발생 시험시설	• Applied-field magnet plasma dynamic thruster (AF-MPD), 원자력(연)



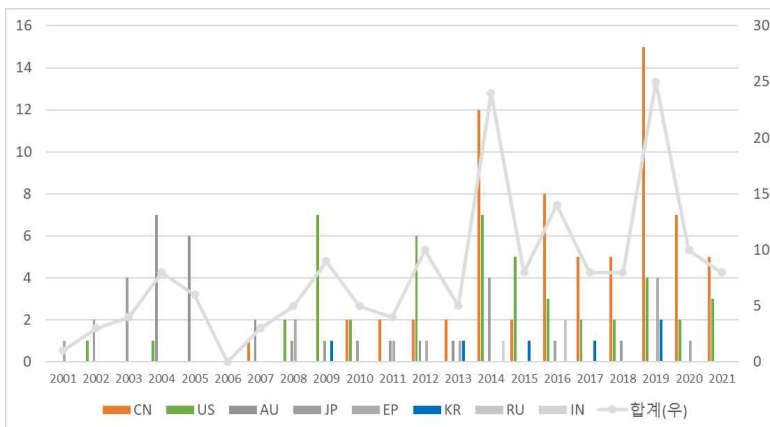
## 나

## 특허 · 논문 분석

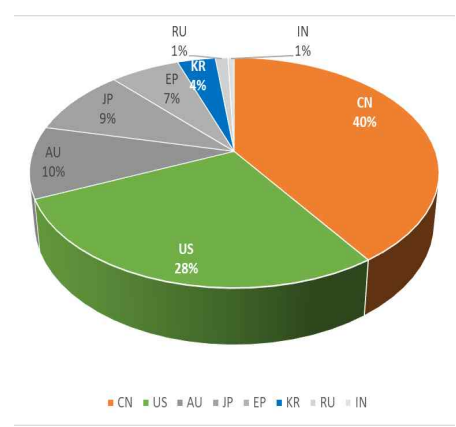
- ▶ (특허분석) 디버터 분야는 최근 중국을 중심으로 특허 출원이 증가하는 경향을 보이고 있으며, 출원 특허의 수가 하위권이나 최근 증가율이 높은 유망 분야
- ▶ (논문분석) 디버터 분야는 최근 지속적으로 논문게재가 증가하고 있는 분야로, 독일이 가장 많은 논문을 게재하고 있으며, 질적 수준도 우수한 것으로 분석

### □ 특허 출원 현황

- (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



< 그림. 연도별 출원 건수 >



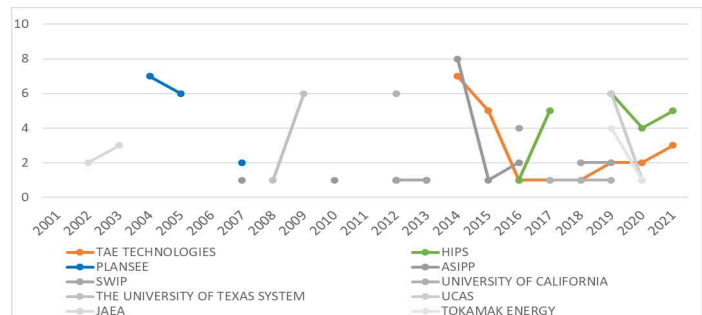
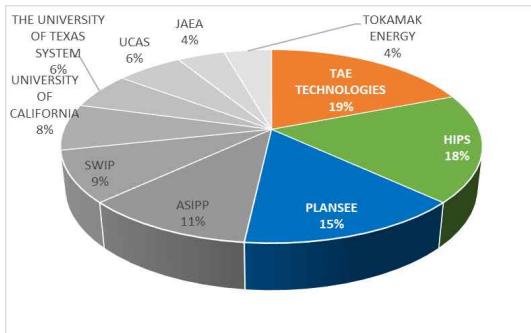
< 그림. 국가별 비중 >

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

< 표. 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%

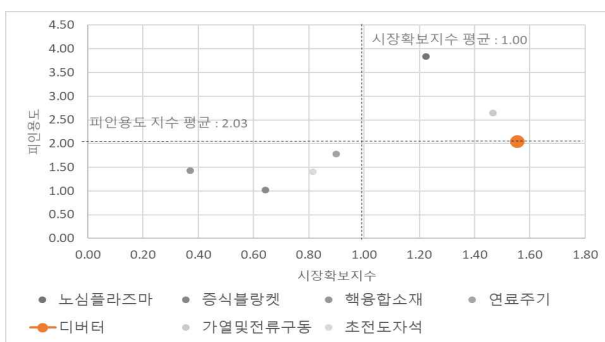
- (주요 출원인 Top 10) TAE TECHNOLOGY가 가장 많은 22건(19%)의 특허를 출원하였으며, 그 뒤로 HIPS 21건(18%), PLANSEE 17건(15%)을 출원
- TAE TECHNOLOGY의 특허는 역자장 방식 핵융합 시스템 특허(디버터 포함)를 여러 국가에 출원함에 따라 디버터 분야 가장 높은 순위로 분석
- PLANSEE는 디버터 모노블럭 냉각, 제작 등 특허를 2000년대 초반 출원하였으며, HIPS의 경우 디버터 구조, 교체방법, 데이터 처리 등 특허를 2010년대 후반 출원



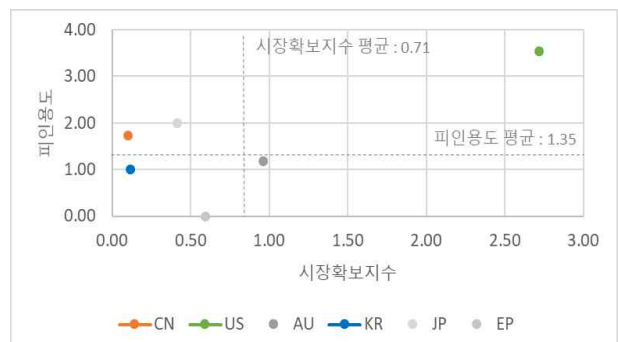
< 그림. 주요 출원인 Top 10 출원 비중 >

< 그림. 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 보유하고 있으며, 기타 여러 국가의 특허의 질적수준 차이가 크지는 않은 상황

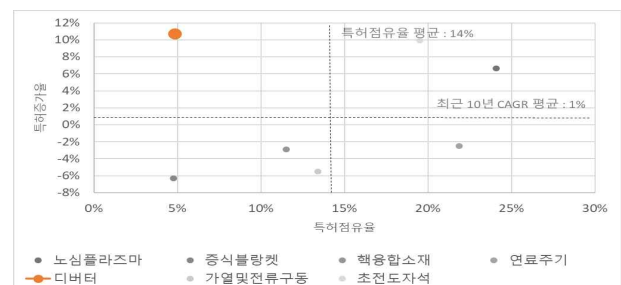


< 그림. 피인용도 - 시장확보지수(핵심기술) >



< 그림. 피인용도 - 시장확보지수(국가별) >

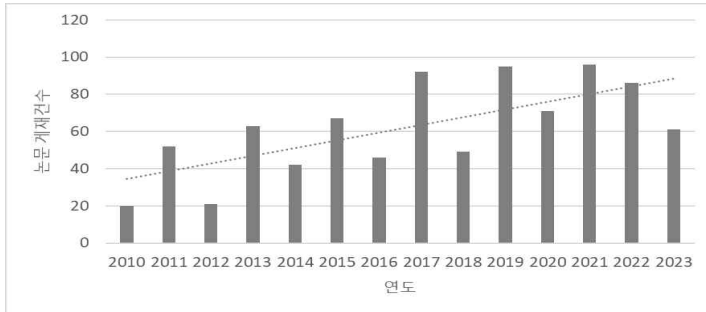
- (특허유망성) 디버터 분야는 특허점유율이 낮은 분야(핵심기술 중 6위)이나, 특허증가율이 가장 높은 분야로, 최근에 가까워 질수록 특허활동이 활발해지고 있는 유망 분야로 분류 가능



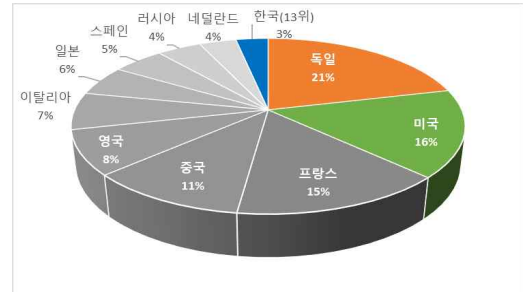
< 그림. 특허점유율 - 특허증가율 >

## □ 논문게재 현황

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

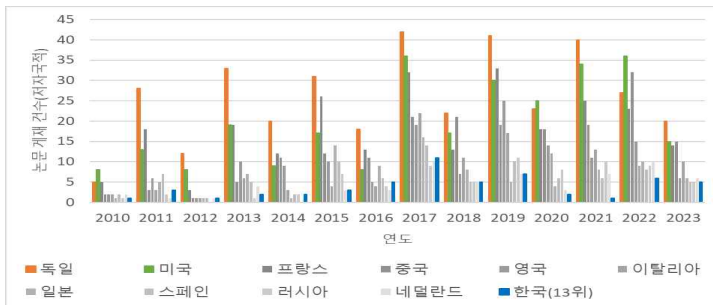


< 그림. 연도별 게재 건수 >

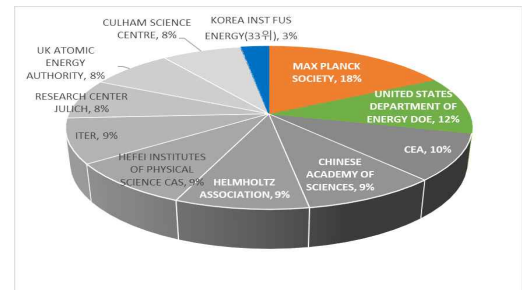


< 그림. 국가별 Top 10 게재 비중 >

- (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)

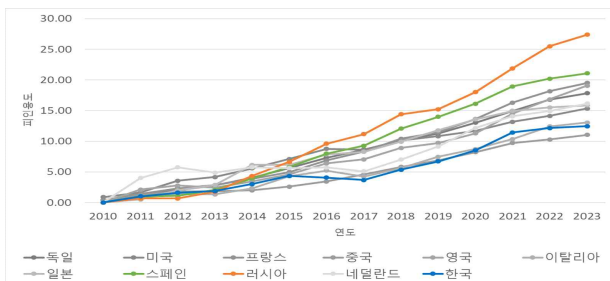


< 그림. 연도별/국가별 Top 10 게재 건수 >

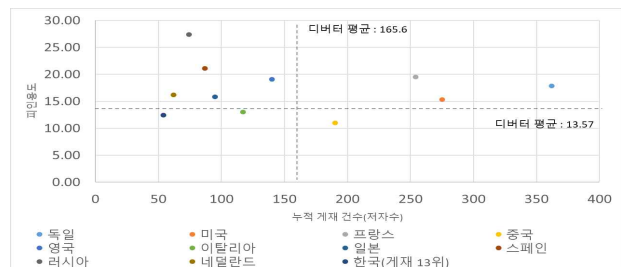


< 그림. 기관별 Top 10 게재 비중 >

- (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



< 그림. 국가별 연도별 피인용도 분석 >

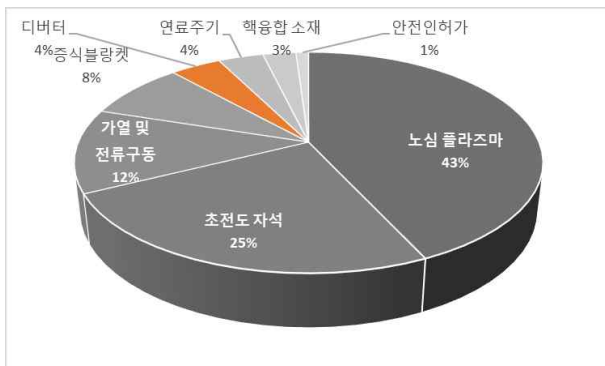


< 그림. 게재 건수/피인용도 분석 >

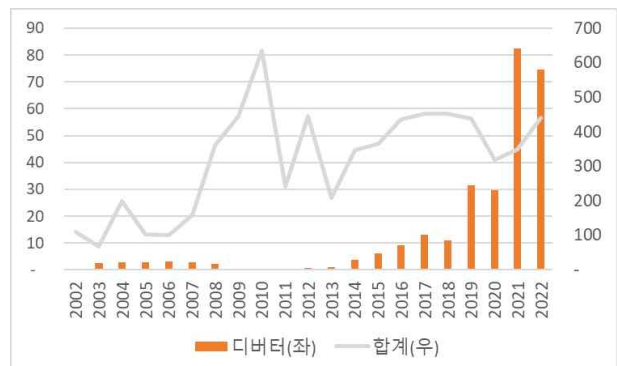
- ▶ 디버터 연구는 280억원이 투입(8대 핵심기술 전체 금액 중 4%, 5위)되었으며, KSTAR PFC 성능향상 사업을 통해 2019년 이후 연구개발 투자비 증가

## □ 연구개발 투자현황

- (핵심기술 비중) 8대 핵심기술 분야 연구개발에 최근 20년간 6,672억원이 투자되었으며, 디버터 분야는 280억원(4%, 8대 핵심기술 중 5위)이 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

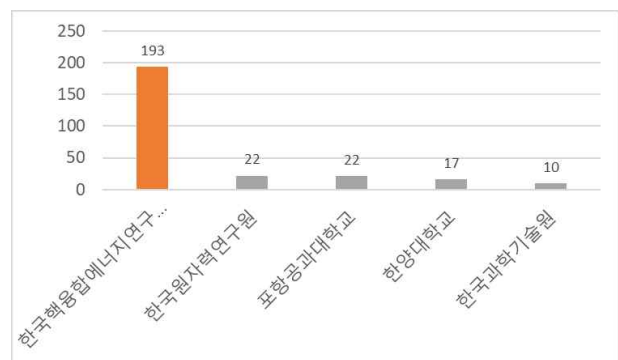


< 그림. 8대 핵심기술 비중 >



< 그림. 연도별 투자현황 >

- (주요 연구기관) KSTAR PFC 성능향상 사업(핵융합(연) 기본사업)을 주관하고 있는 한국핵융합에너지연구원이 연구개발을 주도(전체 69%)
- 한국원자력연구원, 포항공과대학교, 한양대학교, 한국과학기술원에서 핵융합 기초연구사업 등을 통해 디버터 설계·해석, 진단, 열속처리, 고열부하 시험 등 다양한 연구개발을 진행

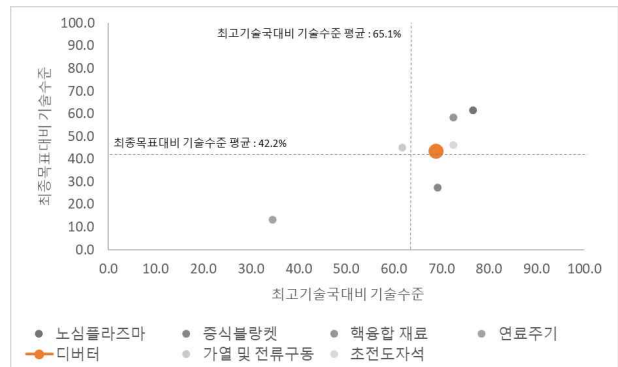


< 그림. 주요 연구기관 >

- ▶ 디버터 분야는 KSTAR 텅스텐 디버터 제작을 통해 기술수준이 향상되었으나, 경계 플라즈마 물리해석(설계기술), 성능검증(제작검증기술) 기술수준이 최고기술국 대비 열위

## □ 기술수준 현황

- (핵심기술 기술수준 비교) 핵심기술 분야 중 최고기술국(EU) 대비 기술수준과 최종 목표(실증로) 대비 기술수준이 평균 이상
- 디버터는 ITER 비조달품목임에도 불구하고, 최고기술국 대비 기술수준과 최종 목표 대비 기술수준이 상대적으로 높은 편에 속하는 분야



< 그림. 8대 핵심기술 기술수준 현황 >

- (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 설계 코드를 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

< 표 증식블랑켓 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

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

## □ ITER를 통한 확보 기술수준 및 한계점

- (ITER를 통한 기술확보) ITER 운영단계에서는 디버터 운전 시나리오에 대한 물리적 검증이 가능할 것으로 예상되며 이를 통해 실증로 규모의 토카막에서 디버터 부근의 경계플라즈마 현상에 대한 예측이 가능할 것으로 기대
- (실증로 기술대비 한계점) ITER 장치는 전력생산 실증에 목적을 두지 않음에 따라, 디버터의 상세 요구조건에 차이가 있는 상황
  - ITER의 디버터는 기존의 다른 핵융합 실험 장치와 같이 전기 생산 실증에 목표를 두지 않는 장치이고 따라서 디버터에 가해지는 열하중을 전기생산에 활용하지 않음
  - 따라서 디버터 재료도 W-Cu-CuCrZr의 조합과 저압의 냉각수 (4 MPa, 70 °C)으로 전기생산에 적합하지 않음. 반면 실증로의 경우 디버터 열하중을 전기생산을 할 수 있도록 재료 및 냉각수의 조건 변경이 불가피하고 따라서 새로운 디버터 설계 및 운전에 관한 연구가 필수적임.

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

ITER 통해서 확보 가능한 기술	실증로 기술대비 한계점
<ul style="list-style-type: none"> <li>• ITER 운영을 통해서 실증로급 규모의 토카막에서 디버터 부근의 경계 플라즈마의 현상 규명</li> <li>• 디버터 부근의 열 및 입자속을 최적화할 수 있는 운전 시나리오 도출</li> <li>• 대형 디버터의 제작 및 검사방법에 대한 정보습득</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ITER의 경우 전기생산에 목적이 없는 실험 장치이므로 디버터 설계 시 사용하는 재료 및 냉각수 조건이 실증로와 다름. 이러한 차이로 인해 실증로와 설계 철학이 매우 다르며 실증로 디버터는 새로운 재료와 설계에 대한 접근이 반드시 필요함.</li> <li>• ITER 비조달국으로 제작 및 검사에 대한 구체적인 기술 및 노하우 습득이 어렵고 실증로에 적용이 제한적</li> <li>• ITER에서 사용하는 디버터의 재료 및 냉각수 조건이 실증로와 상이하므로 새로운 조합의 재료에 대한 제작 기술 개발이 필수적</li> </ul>

### Ⅲ

## 세부기술 현황

### 가

## 디버터 설계

### □ 정의

- 핵융합 환경에서 고열속 장시간 운전이 가능한 고효율 디버터 장치개발을 위해 디버터 부근 물리현상분석 결과를 바탕으로 한 공학설계

세세부기술	기술개요
경계플라즈마 해석 및 영향 평가기술 개발	<ul style="list-style-type: none"><li>• 경계 플라즈마 물리해석을 통한 디버터 형상 및 열·입자속 계산과 최적화</li><li>• 플라즈마와 일차벽 상호작용 해석 및 실험을 통한 대면재 연료 잔류 특성 및 수명 평가</li></ul>
디버터 공학설계 기술 개발	<ul style="list-style-type: none"><li>• 공학설계의 건전성 확보 및 사고 예방을 위해 디버터 구조물에 발생하는 응력 평가, 냉각방식 도출, 사고 시나리오 정립, 핵반응 열 및 폐기물 기준 수립</li></ul>

### □ 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/m<sup>2</sup> 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

## □ 국내외 동향

### ① 경계플라즈마 해석 및 영향평가 기술개발

- (국외) EU·미국·일본은 선도적 입지 확보를 위해 자체개발한 경계 플라즈마 해석코드의 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 중성입자들이 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 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  $W^{34+} \sim W^{43+}$  높은 이온화 된 텅스텐 수송 관련 연구가 진행
  - 대학 클러스터 연구 등에서 일부 코드 기술을 습득하고 있으나, 토카막 구조 등



적용에 한계 존재

## ② 디버터 공학설계 기술 개발

- (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

## 나

## 디버터 제작 및 검증

### □ 정의

- 20 MW/m<sup>2</sup>급 초고열속 냉각성능을 갖춘 실증로급 규모의 디버터 제작 및 평가기술을 개발하고, 실증로 디버터의 유지보수 기술 개발

세세부기술	기술개요
디버터 제작 기술 개발	• 20 MW/m <sup>2</sup> 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 개발된 중인 텅스텐 디버터는 24cm 크기의 직선형 모듈이며, 실증로급 디버터는 플라즈마 붕괴로부터 장치보호를 위해 긴 곡선부를 포함
  - \* 주변경이 6m 이상인 실증로의 경우, 텅스텐 디버터 모듈의 길이는 1m 이상의 곡선부위를 포함하여 약 1.8m 수준

## □ 국내외 동향

### ① 디버터 제작 기술개발

- (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<sup>2</sup>급 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/m<sup>2</sup> 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

### ② 디버터 평가 기술 개발

- (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/m<sup>2</sup> 수준의 열속 시험 전후에서의 PFC 영향 평가 연구 진행 중

### ③ 디버터 유지보수 기술 개발

- (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 기술개발이 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 특성평가 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

## 다

## 디버터 관련 연구시설

### □ 정의

- 디버터 설계 및 제작기술 확보에 필요한 환경모사 및 제품 검증을 위한 필수 제반 시설

세부시설	시설개요	필요성
고열부하 시험시설	• 대면재의 고열속 저항성을 평가하기 위해 전자빔 등을 이용하여 열부하를 인가할 수 있는 시험시설	• 20MW/m <sup>2</sup> 급의 열속 발생과 냉각시설을 갖춘 시험 장비로서, 초고열속 환경에 노출되는 디버터 열적 성능을 평가
플라즈마 입자발생 시험시설	• 플라즈마와 일차벽 사이의 상호작용을 시험하기 위해 초고입자속의 플라즈마를 발생시키는 장비	• 헬륨, 중수소, 불순물 등 다양한 입자의 영향 평가를 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

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

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 <sup>2</sup> 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 <sup>22</sup> 으로 낮고 시편의 크기가 40 mm <sup>2</sup> 로 제한적임. 샘플의 냉각 및 가열시스템 부재