

※ 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.

# 가열 및 전류구동 기술 설명자료

2024. 02.

# 목 차

I . 개요 .....	1
II . 국내외 현황 .....	3
III . 세부기술 현황 .....	15
가. 가열 및 전류구동 장치 기술 .....	15
나. 가열 및 전류구동 플라즈마 통합 기술 .....	19
다. 가열 및 전류구동 기술 관련 연구시설 .....	22

## □ 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 수행**으로 안정적인 플라즈마 유지 가능

## □ 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

- 실증로급의 핵융합 플라즈마 발생 및 운전을 위해서, 높은 효율과 넓은 운전 영역의 대용량 가열 및 전류구동 장치와 통합 운전 기술을 개발

### < 가열 및 전류구동 세부기술 분류 >

---

#### ① 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 증식 블랑켓과 간섭없는 고효율/고출력 고주파 발생 및 전송(입사) 장치 개발

---

#### ② 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
-

## II

## 국내외 현황

### 가

### 기술 동향

- ▶ 해외 주요 국가는 ITER의 가열 및 전류구동 장치 설계, 제작을 통한 기술 확보 중이며, 우리나라는 KSTAR를 활용한 ECH, NBI 등 기술 확보 중

#### □ 국외

- (주요국) EU, 일본 등 주요국가들은 ITER 가열·전류구동 장치 설계 및 제작을 통한 실증로급 가열·전류구동 기술 연구개발 중

< 표. 국외 가열 및 전류구동 연구개발 동향 >

세부기술	주요내용
가열 및 전류구동 장치	<p>▶ JET, ASDEX-U, W7-X 등 중대형 핵융합연구장치의 장기간 운영을 통해 각종 가열 및 전류구동 장치의 기술 축적(EU)</p> <p>▶ ITER 자이로트론 장치를 공급하고, 가장 먼저 공장시험 효율 통과(RU)</p> <p>▶ 8대의 ECH/CD용 자이로트론 장치를 개발하여 ITER에 납품 완료(JP)하였으며, ITER ECH 자이로트론을 시험하는 등 기술혁신에 꾸준한 투자 중(EU)</p> <p>⇒ (주요이슈) 국가별 핵융합 장치를 운영하면서 가열 및 전류구동 분야의 기술력 축적</p>
가열 및 전류구동 플라스마 통합	<p>▶ DIII-D를 활용하여 고효율 가열 및 전류구동 방법을 진행 중이며, 가열 및 전류구동 장치 성능 예측을 위한 시뮬레이션 코드 개발 추진 중(US)</p> <p>▶ JT60-U, LHD를 중심으로 다양한 가열 및 전류구동장치 개발·운영 기술을 확보 하였으나, 현재 대규모 연구는 중상업자빔 주입, ECH에 국한(JP)</p> <p>▶ ITER 가열장치 조달 및 기존 연구장치 운영을 통해 장치운영 기술에 가장 앞서 있는 국가로 평가, '27년까지 가열 및 전류구동 장치 옵션 결정계획(EU)</p> <p>⇒ (주요이슈) 장기간의 가열 및 전류구동 장치 경험으로 기술력 축적</p>

- **(ITER)** 중성입자빔의 가속 전원 기술과 가열장치 통합운전 기술의 일부를 확보 가능할 것으로 기대
  - ITER 운영 단계에서 170 GHz 효율 50% 이상 자이로트론 장치 기술 및 전송로 기술 확보 가능
  - ※ ITER 단계에서 확보되는 기술은 밀리미터파 고출력 고주파발생장치(자이로트론) 설계 및 성능 검증 기법이 확보되는 것으로 실증로 단계에서도 동일 설계 코드를 이용하여 실증로급 고주파발생장치를 설계할 수 있음
- **(인프라 현황)** EU의 경우 이탈리아에 'MITICA'라는 ITER NBI 개발 전용 연구 시설을 보유하고 있으며, 독일에 'FULGOR' 시설을 통해 고주파 전류구동 장치 개발 및 테스트 추진 중

세부시설	국외 장치명	활용가능 여부 및 사유
실증로 중성입자빔 시험 시설	• MITICA - ITER NBI 시험 시설 (이탈리)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>(일부가능)</b> 고전압 절연기술, 음이온원 공동 실험 등 부분적인 공동 이용 가능</li> <li>• <b>(한계)</b> ITER NBI 개발 전용 사양으로 빔 중성화 장치, 수송 장치가 실증로에 적용 가능성은 없음</li> </ul>
	• 일본 QST N-NBI 시험 시설	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>(불가)</b> 공동 연구를 수행하는 경우에도 자국의 시설 사용을 허용한 사례 없음</li> </ul>
전류구동용 EC/RF 통합 장치 및 안테나 시험 시설	• 러시아는 Gycom 회사에서 ITER 용 자이로트론 개발 진행중임	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>(불가)</b> 자국 기업에서 생산된 자이로트론 테스트용 사이트는 외부 활용 불가</li> <li>• <b>(일부가능)</b> Gycom에서 실증로급 자이로트론 직접 구매</li> <li>• <b>(한계)</b> 자이로트론 직접 구매를 전적으로 해외 의존할 시, 향후 수리 및 가격 협상에 매우 불리함</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• EU는 FULGOR 시험시설을 완료하여 90kV/120A에서 10MW CW, 130kV/120A 5ms 미만 자이로트론 테스트 가능</li> <li>• EU는 Thales에서 ITER용 자이로트론 개발 진행중임</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>(불가)</b> 자국 기업에서 생산된 자이로트론 테스트용 사이트는 외부 활용 불가</li> <li>• <b>(일부가능)</b> Thales에서 실증로급 자이로트론 직접 구매</li> <li>• <b>(한계)</b> 자이로트론 직접 구매를 전적으로 해외 의존할 시, 향후 수리 및 가격 협상에 매우 불리함</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 일본은 QST를 통하여 ITER 용 자이로트론 개발 진행하였음</li> <li>• 일본은 최근 그동안 ITER 용 자이로트론 개발에 참여하였던 자국 연구소, 대학 및 산업체 (QST, Univ. Tsukuba, Canon Electron Tubes&amp;Devices, Kyocera, JASTEC 등)과의 협력을 통하여 Kyoto Fusionering (KF) 기업 론칭하여, 향후 실증로급 자이로트론 개발 계획 중</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>(불가)</b> 자국 기업에서 생산된 자이로트론 테스트용 사이트는 외부 활용 불가</li> <li>• <b>(일부가능)</b> KF에서 실증로급 자이로트로 직접 구매</li> <li>• <b>(한계)</b> 자이로트론 직접 구매를 전적으로 해외 의존할 시, 향후 수리 및 가격 협상에 매우 불리함</li> </ul>

세부시설	국외 장치명	활용가능 여부 및 사유
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 각 국 주요 토카막의 고주파 가열 및 전류구동 장치 시험 시설 (미국 DIII-D, 독일 ASDEX-U, 영국 JET, 중국 EAST, 일본 JT60-SA 등)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• (불가) 현 시설은 해당 토카막 장치에 특화되어 있어 실증로급의 사양을 시험할 수 없음</li> <li>- 각 국은 해당국가의 실증로 사양에 맞는 시험 시설을 구축할 것으로 예측</li> </ul>

## □ 국내

- (주요성과) KSTAR 가열장치 개발/운영으로 가열 및 전류구동 기술 확보
  - KSTAR 가열장치 개발/운영을 통한 ~100초/~1억도 플라즈마 기여 (중성입자빔 12MW, 고주파 6MW 설치)
  - 헬리콘 전류구동 장치 1MW급 개발 및 시험중 (300kW 전자가열 실증)
  - 200kV 중성입자빔을 위한 RF 30kW 세슘 기반 음이온원 개발 및 시험 진행 중

### < 국내 가열 및 전류구동 연구개발 동향 >

세부기술	주요내용
가열 및 전류구동 장치	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ KSTAR를 중심으로 중성입자빔 주입장치의 고성능 연속운전 및 NBI 빔의 실시간 연속운전 제어기술 확보 추진 중</li> <li>▶ KSTAR는 ECH(자이로트론 5기) 운영 중이며, NBI와 함께 KSTAR 장시간 고성능 플라즈마 운전에 기여 중</li> </ul> <p>⇒ (주요이슈) KSTAR를 통해 일부 기술(NBI 운전시간, 빔에너지)등은 세계적 성능이나, 실증로 장시간 운전을 위한 장치개발 필요</p>
가열 및 전류구동 플라즈마 통합	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ KSTAR 고성능 플라즈마 발생과 해석을 위한 가열 및 전류구동 시뮬레이션 코드를 운영 중이나 매우 부족한 상황</li> </ul> <p>⇒ (주요이슈) KSTAR-ITER 실험결과를 활용하여 실증로 가열 및 전류구동 운전 기술 개발 요구</p>

기관 분류		주요 연구내용(성과)	연구인력 ('23.7 기준)
연구기관	핵융합(연)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• KSTAR 가열장치 개발/운영을 통한 ~100초/~1억도 플라즈마 기여 (중성입자빔 12MW, 고주파 6MW 설치)</li> <li>• 헬리콘 전류구동 장치 1MW급 개발 및 시험중 (300kW 전자가열 실증)</li> <li>• 200kV 중성입자빔을 위한 RF 30kW 세슘 기반 음이온원 개발 및 시험 진행중</li> </ul>	9명
	원자력(연)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 대전력 이온원 운전 기술 (300초, 수 MW 급)</li> <li>• 음이온원 기초기술</li> <li>• 고주파 가열 전류구동 해석 및 안테나 설계 기술 (해석 예측 코드, 안테나 설계코드)</li> </ul>	7명
	전기(연)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 의료·산업용 MW급 마그네트론 국산화에 성공 ('21)</li> </ul>	3명
대학	UNIST	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 수십 kW 급 ~100GHz 자이로트론 장치 개발 성공 ('16)</li> <li>• 자이로트론 핵심 설계 코드 개발 성공 ('18)</li> <li>• 실증로급 200GHz 이상 이중 주파수 자이로트론 장치 개념 설계 및 핵심 컴포넌트 개발 진행 ('23)</li> </ul>	4명
	서울대	<ul style="list-style-type: none"> <li>• VEST 토카막 활용 신개념 전류구동 LHFW 실증 시험 진행</li> </ul>	

- (인프라 현황) KSTAR를 중심으로 중성입자빔(NBI) 장치의 실시간 연속운전 제어기술 확보 중이며, KSTAR 고성능 플라즈마 발생과 해석을 위한 가열 및 전류구동 시뮬레이션 코드를 운영 중

세부시설	국내 보유 장치명	활용가능 여부 및 사유
실증로 중성입자빔 시험 시설	<ul style="list-style-type: none"> <li>• KFE 음이온원 개발 장치</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• (일부가능) 음이온원 요소기술 개발 장치로 활용 가능*</li> <li>• (한계) 고주파 이온원의 고주파 출력과 가속 전압 한계 (최대 30kW, 200kV, 펄스 &lt;1초). 빔수송 장치 미비(중성화 장치, 칼로리미터 등). 음이온원 개발장치를 확대하여 실증로 중성입자빔 시험 시설로 전환할 수 있음</li> </ul>



세부시설	국내 보유 장치명	활용가능 여부 및 사유
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• KAERI NBI 시험 장치</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>(일부가능)</b> 대용량 진공 챔버, 가속 전원 일부 및 빔 진단장치 활용을 통한 빔수송 요소 기술 개발 활용</li> <li>• <b>(한계)</b> 고에너지 음이온 가속 전원 미비, 가스표적 중성화기 고정</li> </ul>
전류구동용 EC/RF 통합 장치 및 안테나 시험 시설	<ul style="list-style-type: none"> <li>• KSTAR</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>(일부가능)</b> 헬리콘 전류구동을 포함한 신 개념 전류구동 실증 시험 및 고밀도 플라즈마 전류구동 최적화 연구 실험 장치로 반드시 필요함</li> <li>• <b>(한계)</b> 자기장의 한계로 인하여 높은 주파수의 고주파원 및 안테나를 시험할 수 없음. 블랭킷이 없으므로 블랭킷 호환 안테나를 시험할 수 없음. 시험 시설로서의 KSTAR는 가용성이 낮음</li> </ul>

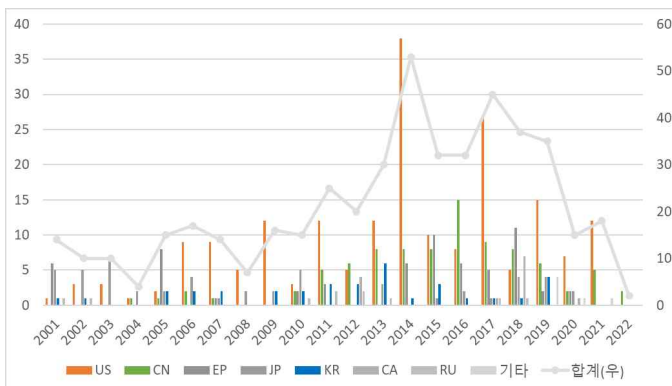
## 나

## 특허 · 논문 분석

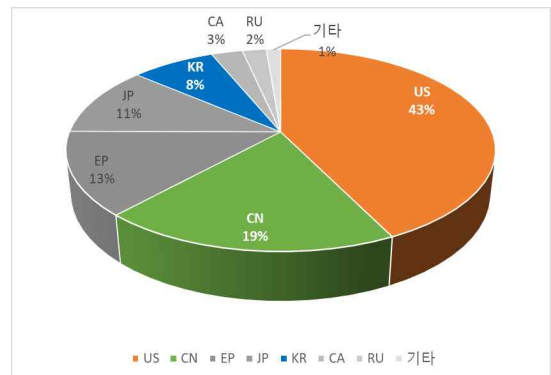
- ▶ (특허분석) 과거부터 미국을 중심으로 특허출원 활동이 이어진 분야로, 핵심기술 분야 중 출원된 특허의 경쟁력이 높은 분야이나, 최근 특허활동이 감소 추세
- ▶ (논문분석) 이탈리아를 중심으로 논문이 게재되고 있으며, 한국의 논문은 피인용도는 평균 이상이나 논문 게재건수가 낮은 상황

### □ 특허 출원 현황

- (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



< 그림. 연도별 출원 건수 >



< 그림. 국가별 비중 >

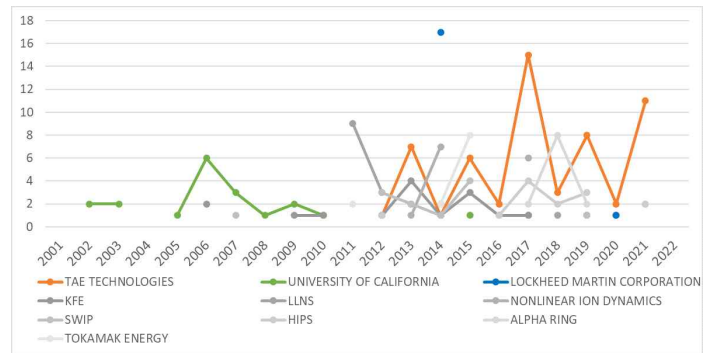
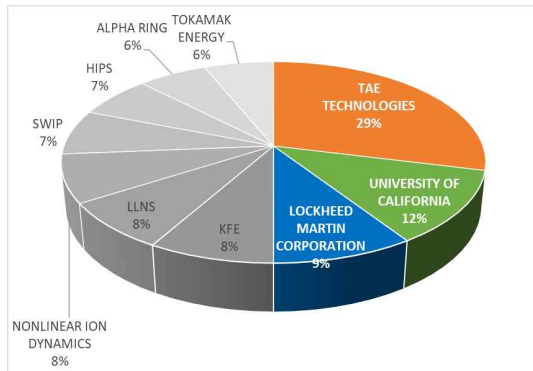
- (국가별/특허청별 출원현황) 중국, 한국, 일본, 러시아는 자국 특허청 위주의 특허를 출원하고 있으며, 미국과 유럽은 세계 주요 특허청에 모두 출원을 진행 중

< 표. 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), Lockheed 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

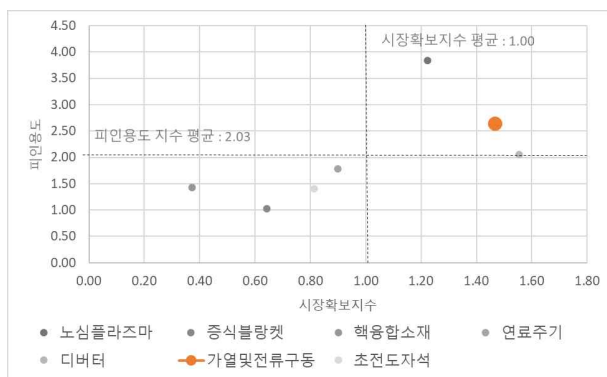


< 그림. 주요 출원인 Top 10 출원 비중 >

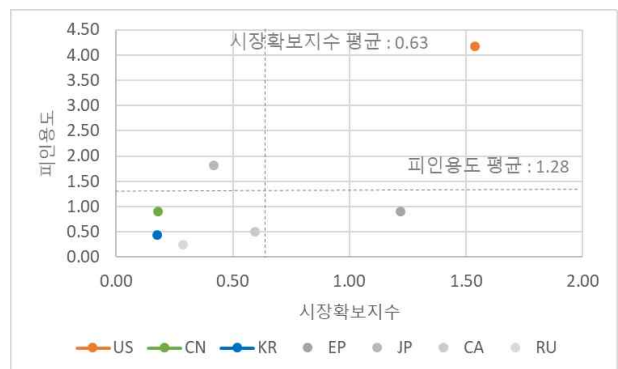
< 그림. 주요 출원인 Top 10 연도별 출원 건수 >

○ (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 시장확보지수가 높은 1사분면에 위치하고 있으며, 한국과 중국의 특허는 경쟁력이 낮은 것으로 분석

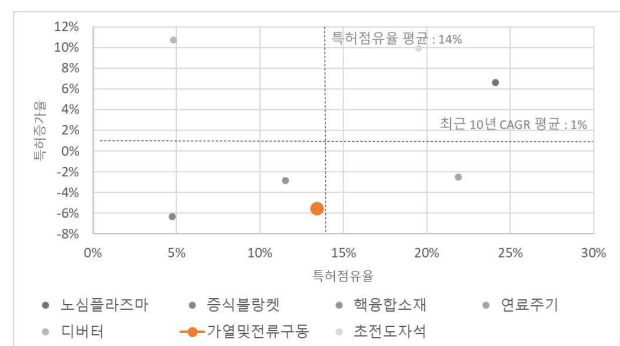


< 그림. 피인용도 - 시장확보지수(핵심기술) >



< 그림. 피인용도 - 시장확보지수(국가별) >

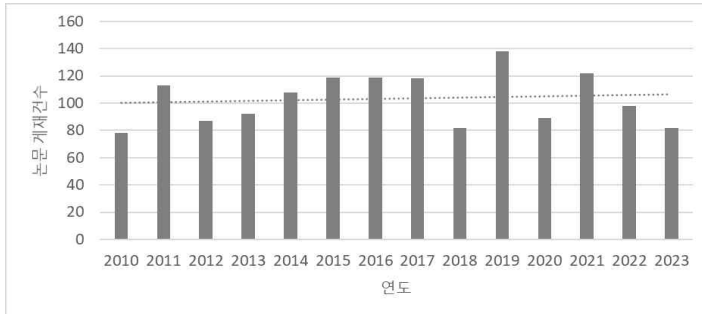
○ (특허유망성) 가열 및 전류구동 분야는 특허점유율이 중간 수준(핵심기술 중 3위)이나, 최근 10년간 특허 증가율이 낮은 분야로, 과거에 특허활동이 집중되어 있었던 것으로 파악



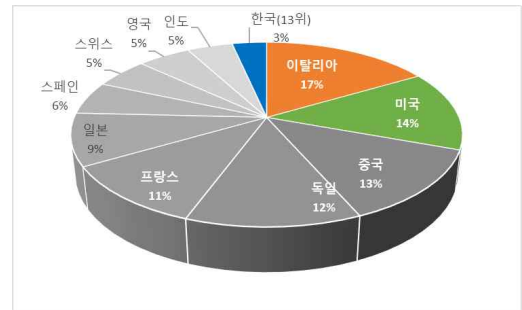
< 그림. 특허점유율 - 최근 10년 연평균 증가율 >

## □ 논문게재 현황

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

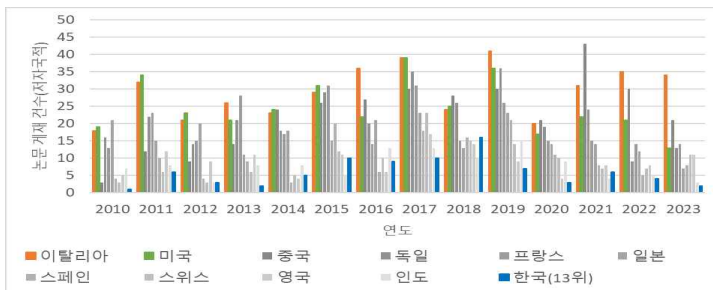


< 그림. 연도별 게재 건수 >

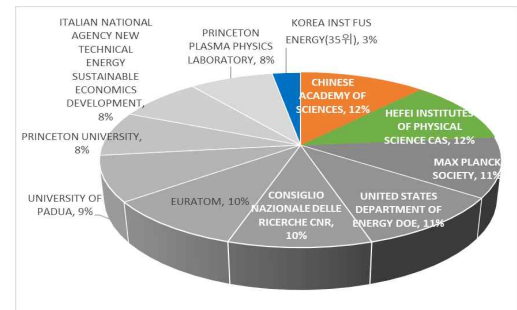


< 그림. 국가별 Top 10 게재 비중 >

- (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)

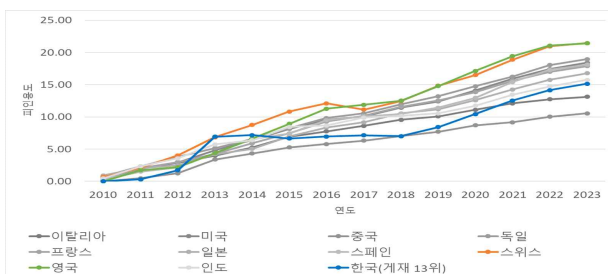


< 그림. 연도별/국가별 Top 10 게재 건수 >

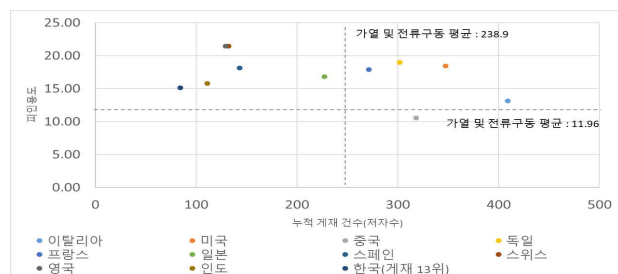


< 그림. 기관별 Top 10 게재 비중 >

- (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



< 그림. 국가별 연도별 피인용도 분석 >



< 그림. 게재 건수/피인용도 분석 >

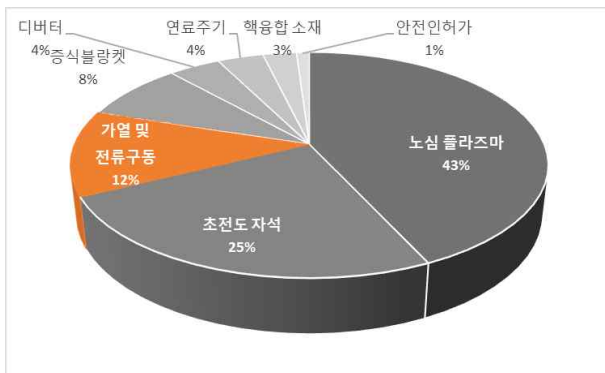
## 다

## R&D 투자 현황

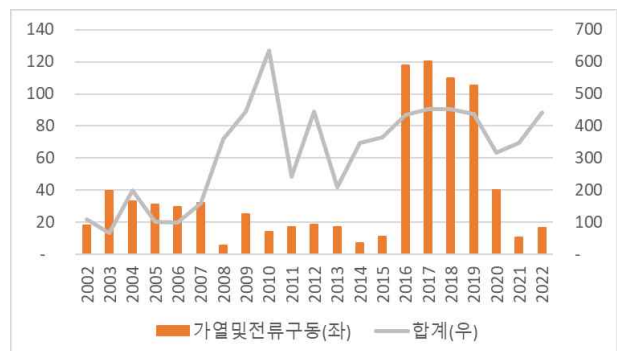
- ▶ 가열 및 전류구동 분야는 821억원이 투입(8대 핵심기술 전체 금액 중 12%, 3위) 되었으며, KSTAR 가열장치 개발을 중심으로 연구개발 투자 진행

### □ 연구개발 투자현황

- (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 진행 되었으며, 2016년 연구비가 크게 증가
  - 가열 및 전류구동 분야는 KSTAR 가열장치 개발 등을 중심으로 연구개발이 진행 되었으며, 2016년 KSTAR 중성입자빔 가열장치(NBI-2) 개발이 착수됨에 따라 연구 개발비 투자가 크게 증가한 것으로 확인

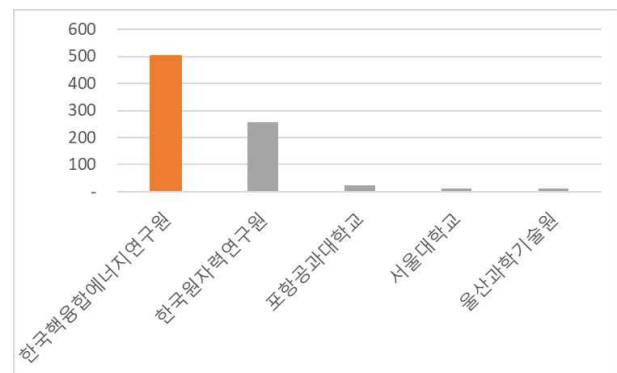


< 그림. 8대 핵심기술 비중 >



< 그림. 연도별 투자현황 >

- (주요 연구기관) KSTAR 중성입자빔 가열장치개발 사업(핵융합(연) 기본사업)을 주관하고 있는 한국핵융합에너지연구원이 가장 많은 연구개발비 활용(61%)
  - 한국원자력연구원은 KSTAR 건설 당시 가열장치 개발을 주관하였으며, 최근 선도 기술개발 사업을 통해 전류구동 기술개발 중
  - 포항공과대학교, 서울대학교, 울산과학기술원은 대학기초연구사업을 통해 다양한 개념의 가열 및 전류구동 기술개발을 추진

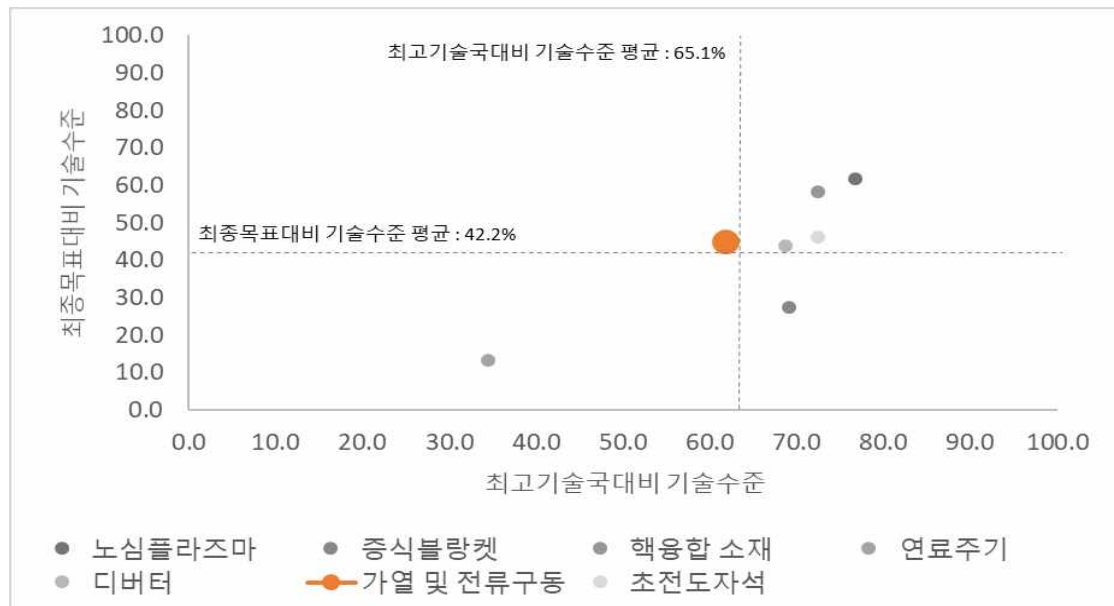


< 그림. 주요 연구기관 >

- ▶ 가열 및 전류구동 기술은 KSTAR 장치 운전을 통해 장시간 유지기술에 강점이 있으나, 실증로급 운전을 위해서는 추가적인 기술수준 향상 요구

## □ 실증로 대비 기술수준

- 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



< 그림. 8대 핵심기술 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

< 표 가열 및 전류구동 기술수준 분석결과 >

핵심기술	최고기술품	최종목표 대비 최고기술품 기술수준	최종목표 대비 한국 기술수준	최고기술품 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

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

## □ ITER를 통한 확보 기술수준 및 한계점

- (ITER를 통한 기술확보) 중성입자빔의 가속 전원 기술과 가열장치 통합운전 기술 일부 및 170 GHz 효율 50% 이상 자이로트론 장치 기술 및 전송로 기술 확보 가능
- (실증로 기술대비 한계점) 실증로의 플라즈마 크기와 높은 자기장으로 인해 KSTAR에 최적화된 가열 및 전류구동 장치의 직접 사용 불가능
  - 실증로는 KSTAR 대비 플라즈마 크기가 매우 크므로 고에너지(1MeV) 중성입자빔 개발 필요
  - KSTAR에서 활용한 RF 장치 테스트는 200 GHz 미만, 펄스형 장치 테스트를 위한 시설이며, 실증로에서 필요로 하는 고자기장 및 연속운전 가능한 RF 장치 테스트를 위한 국내 시설은 없음

< 표. ITER 사업을 통해 확보되는 기술 및 한계점 >

기술명 (중분류)	ITER 통해서 확보 가능한 기술수준	실증로 기술대비 한계점
가열 전류구동 장치 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 1MV 중성입자빔 가속 전원 설계 및 운영 기술</li> <li>• 고주파 음이온원 진단 기술</li> <li>• 고주파발생장치(자이로트론) 170GHz, 1MW, 1000초 운전 기술</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 실증로는 삼중수소 증식률이 반드시 1 이상이어야 하고, 이를 위해서는 토카막 내벽의 블랭킷 면적이 일정 수준 이상이어야만 하나 ITER는 이 기준이 없으므로 중성입자빔 포트와 고주파 안테나의 크기에 대한 제한요소가 작음</li> <li>• 이에 따라 최소한의 내벽 점유 면적을 갖는 중성입자빔과 안테나 개발이 필요함</li> <li>• 실증로의 전기출력과 효율은 매우 중요한 요소이므로 가장 많은 순환 전력을(&gt;100MW) 필요로 하는 가열장치의</li> </ul>

		<p>효율 증가 연구는 반드시 필요함</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 실증로급은 전류구동용 고효율 장펄스 밀리미터파 발생장치 사양이 &gt;200GHz, ~1MW, &gt;1000s 필요한 상황</li> </ul>
가열 전류구동 플라즈마 통합 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 가열장치 통합 운전 기술</li> <li>• 실증로 가열 예측 코드 비교 검증 기술</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ITER에 활용되는 가열장치 주요 예측 코드들은 ITER 연구와 별도로 각국에서 개발된 코드로서 활용에 제한 요소를 가짐</li> <li>• 실증로는 ITER에 비하여 고성능의 플라즈마이고, 가열장치의 플라즈마 결합 효율도 고성능을 상정하고 있으므로, ITER 통합 운전 기술을 바탕으로 실증로에 고유한 통합 운전 기술을 개발하여야 함</li> </ul>



### Ⅲ

## 세부기술 현황

### 가

## 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 증식을 확보를 위한 유연성 설계 중점

세세부기술	기술개요
고효율 고에너지 중성입자빔 주입장치 개발	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 핵융합 플라즈마 정상상태(Steady-State) 도달과 온도 제어를 위한 MV급의 음이온원 기반 중성입자빔 주입 시스템 개발</li> <li>• 레이저 및 플라즈마 중성화기 등을 포함한 고효율 이온빔 중성화 기술 개발</li> <li>• 삼중수소 증식을 감소와 중성자 누설을 최소화하기 위한 빔 포트 형상과 빔 수송 방법 최적화 연구</li> </ul>
연속운전 고주파 전류구동장치 개발	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 고자기장 호환 주파수의 고효율/고출력 고주파 발생장치 및 전송로 개발</li> <li>• 증식블랑켓 호환 고출력밀도 고 전류구동효율의 고주파 입사장치 개발</li> </ul>

### □ 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 블랑킷의 점유 면적을 제한하기 때문에 안테나를 얇게하여 블랑킷과 면적을 공유하는 방안 등의 기술 개발 필요

## □ 국내외 동향

### ① 고효율 고에너지 중성입자빔 주입장치 개발

#### ○ (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
- 건설중인 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 개발분야에서 가시적 성과를 보이고 있음

※ (가시적 성과) 200kV 중성입자빔을 목표로 RF 30kW 세슘 기반 음이온원 개발 및 시험 진행중 (1~5 A/m<sup>2</sup> 인출, 인출 전압 전류 상승 중)

## ② 연속운전 고주파 전류구동장치 개발

- (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

## 나

## 가열 및 전류구동 플라즈마 통합 기술

### □ 정의

- 고성능 핵융합 플라즈마 발생 및 제어를 위한 가열 및 전류구동 요구조건 개발과, 플라즈마 연속운전을 보장하기 위한 가열 및 전류구동 통합 운전 최적화 기술 개발

세세부기술	기술개요
고효율 가열 및 전류구동 기술 개발	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 고밀도 플라즈마에서 효과적인 전류구동 기술 개발</li> <li>• 가열 및 전류구동 운전 성능 최적화 기술 개발 및 운전 절차 개발</li> </ul>
플라즈마 가열 및 전류 구동 시뮬레이션 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 토카막 핵융합로에 감금된 플라즈마를 핵융합 반응이 가능한 초고온으로 가열하는 과정과 전류가 유도되는 과정 시뮬레이션</li> <li>• 토카막 핵융합로 정상 상태 유지를 위해 필요한 외부 가열 및 전류 구동 요구사항 예측</li> </ul>

### □ 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 및 전류구동 장치의 소요 최소화\*와 효율 향상이 필수 요소임, 헬리콘 전류구동 등 신 개념 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

### □ 국내외 동향

#### ① 고효율 가열 및 전류구동 기술 개발

- (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

## ② 플라즈마 가열 및 전류 구동 시뮬레이션 기술

- (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 기술개발에 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

## 다

## 가열 및 전류구동 기술 관련 연구시설

### □ 정의

- 실증로에 적용 가능한 고출력 고주파 가열 입사장치 및 전류구동용 안테나 시험 시설

세부 시설	시설 개요	필요성
실증로 중성입자빔 시험 시설	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 1MV HVDC 발생 및 송전</li> <li>• 음이온원 1 MeV, 40 A</li> <li>• 20MW 연속운전 표적</li> <li>• 방사선 발생 장치</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 50 MW 이상의 고효율 가열 및 전류구동 장치는 실증로의 필수 요소</li> <li>• 가열 및 전류구동 장치는 블랭킷이 설치되는 플라즈마 일차벽에 설치되므로 삼중수소 증식률에 직접 영향을 줌 - 최적화 실험 연구 필요</li> <li>• 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</li> </ul>
전류구동용 EC/RF 통합 장치 및 안테나 시험 시설	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 100kV / 80A 에서 8MW 급 CW 펄스전원</li> <li>• 초전도자석 (bore size&gt;20cm, B&gt;8T)</li> <li>• 100kV / 50A 클라이스트론 전원부</li> <li>• 2MW 급 클라이스트론</li> <li>• 제어부 및 측정부 (측정 주파수 범위 : 1 GHz - 500 GHz, 주파수 정밀도 &lt; 200 kHz)</li> <li>• 냉각부</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 핵융합로 플라즈마 전류구동을 통한 성능 향상 및 안정화를 위하여 EC 및 RF 기반 가열 및 전류구동은 반드시 수반</li> <li>• 실증로 단계에서는 현재의 실험장치로서의 토크막보다 자기장이 높아지며, 이에 따라 요구되는 EC 주파수가 200GHz 이상으로 증가. 하지만 현재 전세계적으로 200GHz 이상 주파수의 고출력 (<math>\geq 1\text{MW}</math>), 연속운전이 가능한 밀리미터파 자이로트론은 개발되지 못한 상황</li> <li>• 따라서, 실증로를 위한 전류구동을 위해서는 &gt;200GHz 주파수, 고출력 연속운전이 가능한 수준의 장치 검증이 필요하며, 이를 위한 시험시설 구축이 필요</li> <li>• 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</li> <li>• 한편, 헬리콘 및 LH 는 안테나와 플라즈마와 대면하고 있는 구조로, 아킹에 취약하여 커플러 공학 설계 검증을 위한 고출력 시험이 가능한 시험시설 구축이 필요</li> </ul>



## □ 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

세부시설	사양	활용가능 여부 및 사유
실증로 중성입자빔 시험 시설	<ul style="list-style-type: none"> <li>• EU MITICA (이태리)</li> <li>- 1MV, 40A, 중수소 음이온 기반</li> <li>- ITER NBI 개발 전용</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• (일부가능) 고전압 절연기술, 음이온원 공동 실험 등 부분적인 공동 이용 가능</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 일본 JT60-SA</li> <li>- 0.5 MV, 22A, 중수소 음이온 기반, 100초</li> <li>- JT60-SA NBI 개발 전용</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• (불가) 공동활용의 선례가 없음</li> </ul>
전류구동용 EC/RF 통합 장치 및 안테나 시험 시설	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 독일 : FULGOR (Fusion Long Pulse Gyrotron Laboratory) 시험시설</li> <li>- 90kV/120A에서 10MW CW 장치 테스트</li> <li>- 130kV/120A에서 5msec 숏펄스 장치 테스트</li> <li>- 고주파 안테나의 경우 디자인 개념별, 단계별 상이한 다수의 시험 장치 운영 중 (독일, 프랑스, 벨기에)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• (불가) 공동활용의 선례가 없음. 자국 기업에서 생산된 자이로트론 테스트용 사이트는 외부 활용 불가</li> </ul>

- (국내) 핵융합(연) KSTAR에서 고주파 음이온원 개발장치와, 원자력(연)에서 수소양이온빔 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

세부시설	사양	활용가능 여부 및 사유
실증로 중성입자빔 시험 시설	<ul style="list-style-type: none"> <li>• KFE 음이온원 개발 장치</li> <li>- &lt;1A, &lt; 200kV 고주파 음이온원 개발</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>(일부가능)</b> 음이온원 요소기술 개발 장치로 활용 가능*</li> <li>• <b>(한계)</b> 고주파 이온원의 고주파 출력과 가속 전압 한계 (최대 30kW, 200kV, 펄스 &lt;1초). 빔수송 장치 미비(중성화 장치, 칼로리미터 등). 음이온원 개발장치를 확대하여 실증로 중성입자빔 시험 시설로 전환할 수 있음</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• KAERI NBI 시험 장치</li> <li>- 0.1MV, 수소양이온빔 개발</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>(일부가능)</b> 대용량 진공 챔버, 가속 전원 일부 및 빔 진단장치 활용을 통한 빔수송 요소 기술 개발 활용</li> <li>• <b>(한계)</b> 고에너지 음이온 가속 전원 미비, 가스표적 중성화기 고정</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 실증로급 시험시설 - 구축사례없음</li> </ul>	
전류구동용 EC/RF 통합 장치 및 안테나 시험 시설	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 실증로급 EC/RF 시험시설 - 구축사례없음</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>(불가)</b> 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</li> </ul>