

한·미 핵융합 공동연구를 통해 핵융합로 핵심 기술 확보

- 핵융합로 내벽 텅스텐 불순물 생성 억제 현상 세계 최초 관측
- 핵융합 국제 공동연구 주도 국가 입증

과학기술정보통신부(장관 배경훈, 이하 ‘과기정통부’)는 한국과 미국이 ‘한국의 인공 태양’으로 불리는 초전도핵융합연구장치(KSTAR)를 활용한 공동연구(한국핵융합에너지연구원 - 미국 프린스턴플라즈마물리연구소)를 통해, 핵융합 에너지 상용화의 핵심 과제인 플라즈마 운전 안정성을 높이기 위한 핵심 기술을 확보했다고 6일(수) 밝혔다.

붕소(Boron) 분말 주입을 통해 핵융합로 내벽으로부터 나오는 텅스텐 불순물의 생성량이 감소되는 현상을 세계 최초로 관측하였으며, 노심 플라즈마를 보다 안정적으로 제어할 수 있는 가능성을 확인하였다.

핵융합 장치의 내벽은 초고온 플라즈마에 직접 노출되기 때문에, 열에 강한 텅스텐이 차세대 내벽 소재로 주목받고 있다. 초전도핵융합연구장치(KSTAR)는 지난 2023년 내부의 핵심 부품인 ‘디버터’를 텅스텐 소재로 교체하였고, 국제핵융합실험로(ITER) 역시 텅스텐 내벽 적용을 추진 중이다.

다만 고온 플라즈마 운전 시 텅스텐 입자가 플라즈마에 유입될 경우, 장치의 운전 안정성과 플라즈마 성능에 영향을 줄 수 있어 이를 제어하는 기술은 국제적으로 중요한 연구 과제로 여겨왔다.

이번에 붕소 분말을 초고온 플라즈마에 실시간으로 주입해 운전 정지 없이 내벽 상태를 능동적으로 제어할 수 있어, 실시간 플라즈마-내벽 상호작용 제어 기술의 획기적인 진전을 보여주는 결과로 평가된다.

또한 이번 성과는 초전도핵융합연구장치(KSTAR)를 기반으로 한·미 연구진의 긴밀한 협력을 통한 국제 공동연구의 결실이다. 그동안 한·미 양국은 2010년 ‘한·미 핵융합 연구 협력 시행약정’을 체결한 이후, 토카막 물리, 플라즈마-내벽 상호작용 제어 연구 등 다양한 분야에서 공동연구를 이어오고 있다. 이번 연구의 성과를 통해 초전도핵융합연구장치(KSTAR)가 정밀한 운전 능력과 높은 신뢰도를 기반으로 국제 공동연구의 중심 체계(플랫폼)로 자리 잡고 있음을 입증하였다.

정택렬 과학기술정보통신부 공공융합연구정책관은 “이번 연구는 그간의 축적된 협력과 신뢰를 바탕으로 핵융합의 핵심기술을 도출한 사례로, 국제 공동연구를 통한 기술 강화의 중요성을 잘 보여준다” 고 밝혔다. 이어 “정부는 초전도핵융합연구장치(KSTAR)와 같은 국내 기반 시설(인프라)을 활용해 실험 성과를 지속적으로 확보하고, 이러한 성과들이 핵융합에너지 실현 가속화와 향후 핵융합 연구의 주도적 역할을 위한 핵심기술 확보로 이어질 수 있도록 적극 지원하겠다.” 고 덧붙였다.

한편, 이번 연구 결과는 국제 핵융합 분야의 권위 있는 학술지인 『Nuclear Fusion』 Vol.65(8월 발행)에 게재되어, 학계에서도 그 중요성과 우수성을 인정받았다.

*논문 제목: Wall conditioning effects of boron powder injection in KSTAR with a tungsten divertor

담당 부서	공공융합연구정책관 미래에너지환경기술과	책임자	과 장	김태영 (044-202-4670)
		담당자	서기관	이향수 (044-202-4671)
	한국핵융합에너지연구원 KSTAR 연구본부	책임자	본부장	남용운 (042-879-5147)
		담당자	연구원	이형호 (042-879-5156)

내일을 만드는 과학기술
내일을 채우는 디지털·AI

대한민국
지적브리핑



< 한미 핵융합 협력 경과 >

- ▶ 한미 핵융합 연구협력 이행약정(IA) 체결('10.6월)
- ▶ 한미 핵융합 IA 기반 공동연구 부속서(Project Annex) 체결('12.9월)

< 한미 핵융합 분야 연구협력 현황>

- ① 미국 전문가(UCLA, PPPL 등)들의 KSTAR 실험 참여를 통한 플라즈마 불안정성 예측 및 제어, 연속 운전 시나리오 개발 등 공동연구 진행('08~)
- ② KSTAR 원격 실험 참여를 위한 미국 프린스턴 플라즈마 물리 연구소(PPPL) 내 데이터 저장시설 구축 진행('21~)
- ③ 한국 KSTAR와 미국 General Atomics社의 DIII-D 장치(토카막 방식 핵융합 시설) 공동 실험, 데이터 유효성 검증 진행('23~)
- ④ ORNL(오크릿지 국립연구소)와 실증로 디버터 연구를 위한 플라즈마 해석연구('23~)
- ⑤ 미국 MIT와 핵융합로용 고온초전도 자석 설계 기술 공동연구('25~)

□ KSTAR 공동 연구 개요

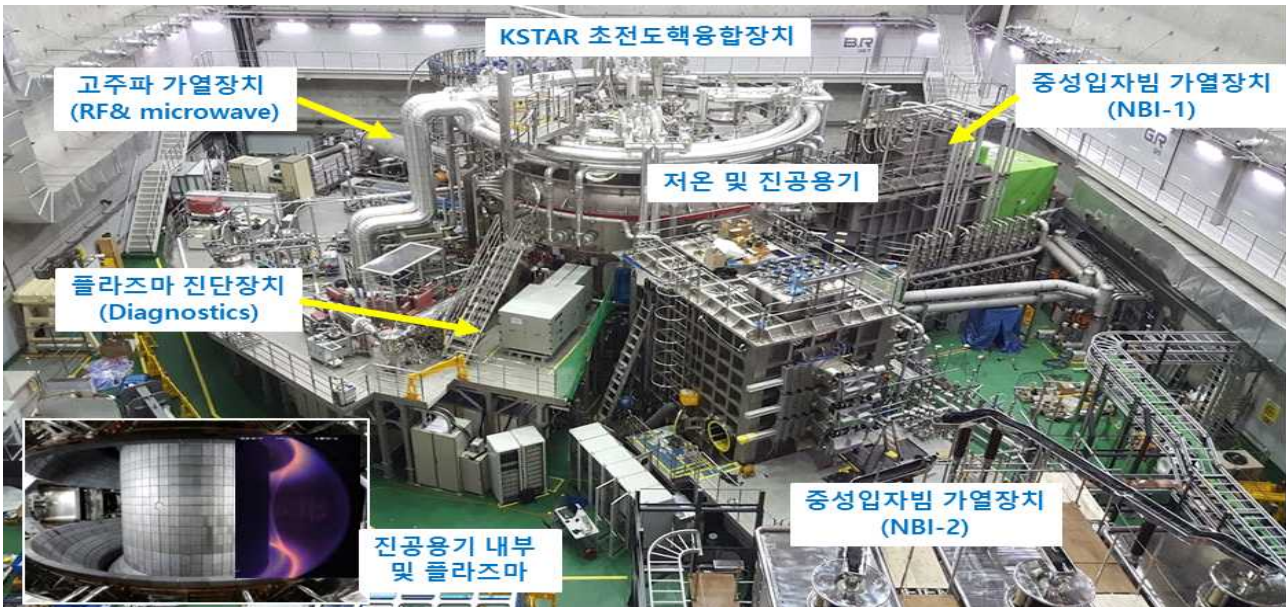
- **연구기관** : 한국핵융합에너지연구원 - 프린스턴플라즈마물리연구소(PPPL)
- **성과 논문 (발표 저널) 및 저자**
 - Wall conditioning effects of boron powder injection in KSTAR with a tungsten divertor (「Nuclear Fusion」)
 - 저자 : Hanna Schamis (PPPL), 이형호 (KFE) 등)
- **주요 성과**
 - 텅스텐 디버터를 적용한 KSTAR에서 플라즈마 실험 중에 붕소(Boron) 분말을 실시간 주입하는 실험 수행
 - 내벽으로부터 나오는 불순물 농도가 줄어드는 현상 세계 최초 관측 및 노심 플라즈마 안정성이 개선됨
 - 텅스텐 내벽을 사용한 ITER 및 기타 핵융합로에서 장시간 운전 중 내벽에서 발생하는 텅스텐 불순물을 억제하기 위해, 운전 정지 없이 붕소(Boron) 분말 주입 기술을 적용함으로써 불순물 제어 가능성을 실험적으로 입증

1. 핵융합에너지 : 태양에너지의 원리인 핵융합 반응 과정에서 나오는 에너지로, 지구에서 인공적으로 핵융합 반응을 만들어 미래 에너지원으로 활용할 수 있도록 개발하는 연구가 진행되고 있음
2. 플라즈마 : 원자핵과 전자가 떨어져 자유롭게 움직이는 물질의 4번째 상태로 우주의 99.9%를 차지하고 있으며, 초고온의 플라즈마 상태에서 원자핵이 반발력을 이기고 융합하는 핵융합 반응이 일어난다. 핵융합 장치 내에서 핵융합이 일어날 수 있도록 초고온의 플라즈마를 연속적으로 운전하는 것은 핵융합 기술개발의 핵심 과제임
3. KSTAR(Korea Superconducting Tokamak Advanced Research) : '95년부터 '07년까지 12년에 걸쳐 국내 기술로 개발된 우리나라의 초전도 핵융합 연구장치로 '08년 최초 플라즈마 발생에 성공하였음. 주요 선진국들이 공동으로 개발하고 있는 국제핵융합실험로(ITER) 장치와 동일한 초전도 재료로 제작된 세계 최초의 장치로 국제 핵융합 공동 연구장치의 핵심으로 주목받고 있으며, 매년 핵융합 기술개발을 위한 플라즈마 실험을 수행하고 있음
4. 국제핵융합실험로 (ITER : International Thermonuclear Experimental Reactor) : 핵융합 선진 7개국(한국, 미국, EU, 러시아, 인도, 중국, 일본)이 초대형 국제협력 R&D 프로젝트를 통하여 공동으로 개발·건설 중인 국제핵융합 실험로. 대용량 핵융합에너지 생산(핵융합 반응에 의한 500MW급의 열출력 발생)의 가능성을 실증하는 것을 목표로 함
5. 디버터(Divertor) : 핵융합로에서 초고온 플라즈마를 운전할 시에 발생하는 강한 열속으로부터 진공 용기를 보호하기 위해 장치 하단부에 설치된 핵심 장치. 핵융합로 내부에서 플라즈마와 유일하게 맞는 장치로 플라즈마의 형상 조절 및 플라즈마 연소로 발생한 내부 불순물을 외부로 배출시키는 통로 역할도 담당함

□ **KSTAR 장치 개요(Korea Superconducting Tokamak Advanced Research)**

- 건설기간 : '95.12~'07.8 (11년 8개월)
- 재 원 : 장치크기(높이10m, 직경10m), 초전도체 소재(Nb₃Sn, NbTi), 초전도자석 무게(약300톤)

< KSTAR 주장치 및 주요 부대장치 현황 >



□ **추진경과**

- '95.12.~'98.9. KSTAR 개념설계 및 기반 기술 R&D 수행
- '02. 7.~'07.8. KSTAR 장치 제작 및 설치 완료
- '08. 6. KSTAR 최초 플라즈마 발생 성공
 - * 토카막 장치 중 세계 최초로 단 1번에 시운전 완료(130kA, 0.865초)
- '12.10. KSTAR 실시간 플라즈마 형상 제어, 고성능 H-모드에서 플라즈마 12초간 운전 달성
 - * H-모드 : 토카막형 핵융합 장치 운전에서 특정 조건에서 플라즈마 밀폐 성능이 약 2배로 증가하는 현상으로 ITER 장치의 기본 운전 모드. 초전도 핵융합 장치로써 KSTAR가 세계 최초로 H모드 달성
- '14.12. H-모드 플라즈마 45초 안정적 운영(플라즈마 전류 0.6MA)
- '15.12. H-모드 플라즈마 55초 유지 및 비유도성 전류 구동 12초 달성
- '16.12. H-모드 플라즈마 70초 유지 및 비유도성 전류 구동 20초 달성
- '18. 7. H-모드 플라즈마 88초 유지 및 이온 중심 온도 1억도(1.5초) 달성
- '19.12. 1억도 플라즈마 8초 운전(0.8억도 10초 운전 완료)
- '20.10. 1억도 플라즈마 20초 운전(KFE, 서울대, 미콜롬비아대 공동연구)
- '21. 9. 1억도 플라즈마 30초 운전 달성
- '22. 7. 고성능 플라즈마 ($b_N \sim 3$) 12초 운전 달성
- '24. 2. 1억도 플라즈마 48초 운전 및 H-모드 플라즈마 102초 유지 달성
- '25. 2. 텅스텐 불순물 유입 억제 및 H-모드 성능 향상 운전 기법 개발