

핵융합 플라즈마 장시간 운전 기술 확보 청신호

- 텅스텐 디버터 환경에서 장시간 플라즈마 운전 성공
- 이온온도 1 억도 플라즈마 48 초, 고성능 플라즈마 운전 100 초 달성

한국의 인공태양 KSTAR 가 내벽 부품을 교체한 후 진행한 첫 번째 플라즈마 실험에서 기존 기록을 경신하는 성과를 달성하며, 세계 최고 수준의 플라즈마 운전 역량을 다시 한번 증명하였다.

한국핵융합에너지연구원(이하 핵융합(연), 원장 유석재) KSTAR 연구본부는 지난 '23 년 12 월부터 '24 년 2 월까지 진행한 2023 년 KSTAR 플라즈마 실험을 통해 핵융합 핵심 조건인 이온온도 1 억도 초고온 플라즈마 48 초 운전 및 고성능 플라즈마 운전모드(H-mode) 102 초 운전 기록을 달성하였다고 20 일(수) 밝혔다.

핵융합에너지의 실현을 위해서는 핵융합 반응이 활발히 일어나는 초고온·고밀도 플라즈마를 장시간 유지할 수 있는 기술을 확보해야 한다. 이를 위해 핵융합 연구자들은 KSTAR 와 같은 핵융합 장치를 이용해 다양한 플라즈마 운전 연구를 수행하고 있다.

국내 기술로 개발된 초전도핵융합장치인 KSTAR 는 그간 핵융합 플라즈마 장시간 운전 기술 분야에서 선도적인 연구 성과를 달성해 왔다. 특히 KSTAR 는 지난 '18 년 최초로 이온온도 1 억도 플라즈마 달성 이후 '21 년 1 억도 플라즈마를 30 초 유지하며 세계 기록을 달성한 바 있다.

KSTAR 연구진은 이번 실험에서 기존 확보한 초고온 플라즈마 운전 기술 및 가열장치 성능 향상 등을 기반으로 이온온도 1 억도 초고온 플라즈마 운전을 48 초까지 연장하는 데 성공하였다.

더불어, 고온·고밀도 플라즈마 상태를 유지하는 가장 대표적인 핵융합 운전모드인 고성능 플라즈마 운전모드(High Confinement mode, H-mode)를 102 초간 연속 운전하는 데에도 성공하였다.

이는 지난 '23 년 KSTAR 내부의 플라즈마 대면 장치 중 하나인 디버터를 텅스텐 소재로 교체하여, 장시간 플라즈마 운전에 따른 성능 감소 현상을 완화해 플라즈마 성능을 유지할 수 있게 된 덕분이다. 텅스텐 디버터는 기존의 탄소 디버터와 비교하여 동일 열부하에 대해 표면 온도 증가가 약 1/4 수준에 불과해, 초고온 플라즈마의 장시간 운전에 유리하다. 하지만, 플라즈마 접촉 시 생성되는 불순물에 의한 에너지 손실의 어려움도 있어, 이를 극복하기 위한 운전 기술이 요구된다.

핵융합(연) 윤시우 KSTAR 연구본부장은 “텅스텐 디버터 환경에서 진행된 첫 실험임에도 불구하고, 철저한 실험 준비를 통해 기존 KSTAR 의 성과를 뛰어넘는 결과를 단시간 내에 달성할 수 있었다.”며, “KSTAR 최종 운전 목표 달성을 위해 가열 및 전류구동 장치의 성능 향상을 순차적으로 진행하고, 장시간 플라즈마 운전에 요구되는 핵심기술을 확보할 계획이다.”라고 전했다.

KSTAR 연구진은 이번 실험을 통해 텅스텐 디버터의 성공적인 교체와 성능을 검증하고, 가열·진단·제어 장치 등 KSTAR 주요 구성 요소들이 장시간 플라즈마 운전에 필요한 시스템 안정성을 확보했음을 확인할 수 있었다.

KSTAR의 최종 목표는 2026년까지 1억도 초고온 플라즈마 운전 300초를 달성하는 것이다. KSTAR 연구진은 이를 위해 KSTAR 내벽 부품 전체를 텅스텐으로 교체하고, 인공지능 기반의 실시간 피드백 제어 기술을 확보하는 등 관련 연구 및 장치 성능 개선에 집중할 계획이다.

핵융합(연) 유석재 원장은 “이번 성과로 핵융합 실증로 운전에 필요한 핵심기술 확보에도 청신호가 켜졌다.”며, “KSTAR 장치의 안정적 운영을 바탕으로 국제핵융합실험로 ITER 실험 주도 및 핵융합 실증로 건설 및 운전을 위한 핵심기술 확보를 위하여 최선을 다하겠다.”고 밝혔다.

한편, KSTAR 연구진은 이번 플라즈마 실험 성과 외에도 최근 미국 프린스턴 플라즈마 물리연구소(PPPL)와 공동연구를 통해 KSTAR의 외부 자기장을 이용한 오차 자기장 최적화 모델을 개발하고, 플라즈마 가장자리와 중심 부분의 불안정성을 동시에 안정화시킬 수 있는 방안을 실험으로 입증하는데 성공한 바 있다. 관련 논문은 국제 학술지인 네이처 커뮤니케이션즈('24. 02)에 게재되었다.

*논문명: Tailoring tokamak error fields to control plasma instabilities and transport