

④ KSTAR 활용과 핵융합 연구에 미치는 영향

경제적 핵융합로 건설기반 확보한다

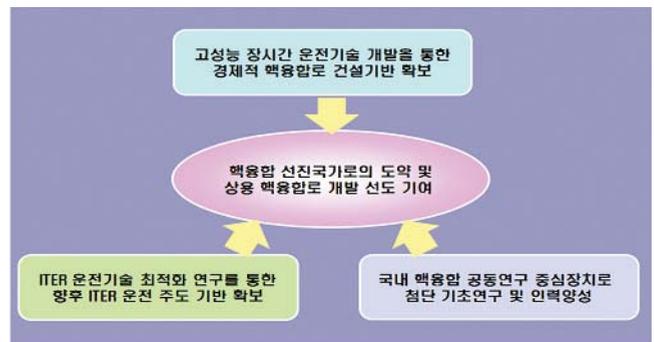
글 | 김진용 _ 국가핵융합연구소 책임연구원 jykim@nfri.re.kr

1995년 말 건설에 착수하여 약 12년 만에 완공된 후 최근 종합시운전 및 최초 플라즈마 발생 실험을 성공적으로 완료한 KSTAR는 사실상 건설 초기 단계부터 명확한 연구개발 목표를 가지고 설계·제작된 세계적 최첨단 초전도 토카막 장치이다. KSTAR 초기 개념설계 관련 보고서나 논문 등에 따르면 KSTAR의 최종 연구개발 목표는 고성능의 플라즈마 상태를 달성하고 장시간 운전을 실증하는 것으로 명확히 정의되어 있다.

AT 운전모드 구현 위해 세계 최초로 설계·제작

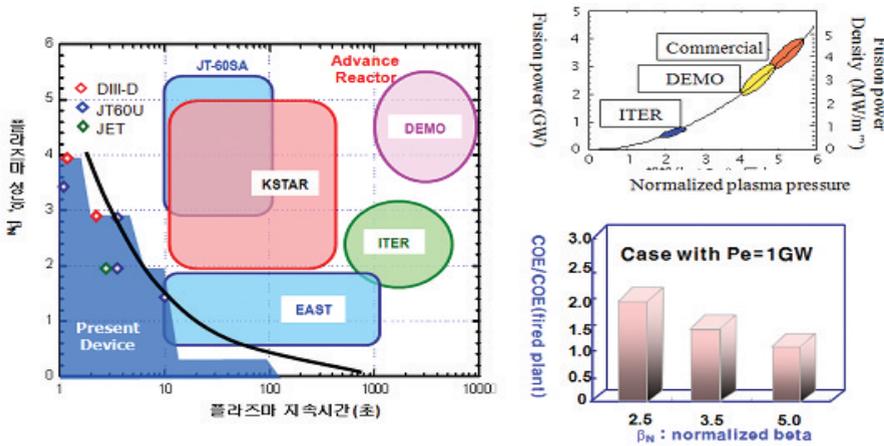
이러한 KSTAR의 연구개발 목표는 1990년대 초에 대두되기 시작한 고성능 차세대 토카막(AT) 운전모드 개념을 기반으로 한 것으로 사실상 KSTAR는 AT 운전모드 구현을 위해 세계 최초로 설계·제작된 토카막 장치라 할 수 있다. 그리고 이러한 KSTAR의 연구개발 목표는 당시 어느 정도 개념설계가 완성되어 공학설계가 진행 중이었던 ITER보다는 그 다음 단계의 장치로 고려되고 있던 핵융합발전실증로(DEMO)를 주요 대상으로 한 것으로 경제적 DEMO 건설에 필수적인 보다 진보된 형태의 운전모드를 확보하는데 그 주요 목적이 있었다고 할 수 있다. 이렇게 KSTAR 장치가 건설 초기에 설정한 연구개발 목표는 DEMO와 밀접히 연관된 것으로 약 10년이 지난 지금도 매우 유효하며 오히려 ITER 건설과 함께 DEMO에 대한 세계 각국의 관심과 연구가 증대되는 상황을 고려하면 점점 더 그 중요성이 강조될 것으로 예상되고 있다.

한편 한국, 미국, 일본, 유럽, 러시아, 중국, 인도 등 주요 핵융합



KSTAR장치의 주요 연구개발 목표 및 활용방안

선진 7개국들이 참여한 ITER 건설 프로젝트가 최근 본격 착수됨에 따라 KSTAR를 당분간 ITER 운전기술 최적화를 위한 선행기술 시험장치로 활용하기 위한 방안이 현재 활발히 논의되고 있다. 이것은 KSTAR가 ITER와 동일한 초전도 자석으로 제작된 세계 유일의 초전도 토카막 장치라는 점과 KSTAR가 2010년대 후반으로 예상되는 ITER 운전 개시 전까지 ITER 운전 기술 최적화를 위해 매우 적절한 '시간창'을 갖고 있다는 점 등에 기인한다. KSTAR는 이러한 ITER 관련 국제공동연구 장치로서 뿐만 아니라 국내 핵융합 공동연구 중심장치로서의 역할 또한 크다고 할 수 있는데, 이것은 KSTAR가 국내 유일의 토카막 장치로 아직은 매우 부족한 국내 핵융합 기초연구 역량을 증대하고 신진 인력을 양성하는데 크게 기여할 수 있을 것으로 기대되기 때문이다. 여기서는 KSTAR 장치에



다른 토카막장치와 KSTAR의 플라즈마 목표 성능비교 및 핵융합로 출력과 플라즈마 성능과의 관계

대해 기대되고 있는 이러한 주요 목표 및 활용방안에 대해 보다 상세히 알아보고, 아울러 이를 실현하기 위해 지금까지 수립된 KSTAR 장치의 중장기 운영 및 연구 계획을 간단히 살펴본다.

고성능 장시간 운전기술 개발이 주요 목표

일반적으로 핵융합로에서 핵융합 반응을 통해 발생하는 핵융합 출력에너지는 플라즈마 성능을 나타내는 플라즈마 압력 또는 $\beta_{\text{값}}$ (토카막 자기장의 압력에 대한 플라즈마 압력의 비)의 공급에 비례하여 증가한다. 따라서 동일한 장치 크기에서 보다 많은 핵융합 출력에너지를 생산하기 위해서는 플라즈마 압력 또는 $\beta_{\text{값}}$ 을 향상시키는 것이 무엇보다 중요하다 할 수 있다. 그 한 예로 만일 ITER 장치의 플라즈마 압력 또는 $\beta_{\text{값}}$ 을 현재 목표로 하고 있는 것보다 2배 정도만 증가시킬 수 있어도 ITER로부터 나오는 핵융합 출력에너지는 현재의 목표치인 약 500mw를 훨씬 상회하여 사실상 DEMO의 목표치에 근접한 약 2GW의 생산이 가능하게 된다. 이것은 막대한 건설비용 증대를 수반하는 추가적인 장치의 크기 증가 없이 현재의 ITER 정도 크기에서 약 1GW 정도의 전기를 만들어내는 핵융합로 건설이 가능하다는 것을 의미한다. 물론 이러한 고출력 핵융합로를 통해 지속적으로 전기를 생산하기 위해서는 고성능 플라즈마 상태 구현 외에 이를 장시간 안정적으로 유지하기 위한 기술이 또한 개발되어야 한다. 그 밖에도 고출력 장시간 운전조건에서 견딜 수 있는 초고온 저방사화 구조재 등의 첨단 재료기술 개발이 필요하다. 따라서 고성능 플라즈마 구현 및 장시간 운전기술 개발은 지속적인 전기 생산이 가능한 고출력의 경제적 핵융합로 건설을 위해 반드시 확보해야 할 주요 핵심기술 가운데 하나라 할 수 있다.

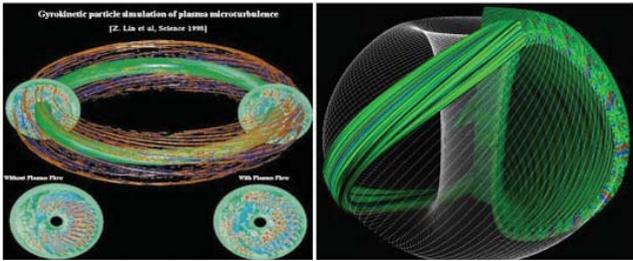
이러한 고성능 장시간 운전기술을 개발하기 위한 연구는 AT 운전모드 개념이 처음으로 발견된 1990년대 초반부터 기존 장치들 중심으로 시작되었다. 하지만 기존 장치들은 당초 AT 운전모드 개념을 기초로 설계된 장치도 아니고 또한 상전도 자석으로 이루어졌기 때문에 장시간 운전 가능한 고성능 플라즈마 운전기술 개발에 근본적인 한계를 가지는 것으로 나타났다. 이에 비해 1990년대 중반부터 설계 및 건설이 시작된 KSTAR 장치는 처음부터 AT 토카막 개념을 도입하여 장치를 설계

하였는데, 이에 따라 모든 코일을 초전도 자석으로 제작하였고, 가열 및 전류구동 장치와 PFC(플라즈마 페이싱 컴포넌트)를 장시간 운전이 가능하도록 설계하였으며, 고성능 플라즈마 조건 구현을 위해 D-형의 플라즈마 형상과 수동판, 인 베슬 코일 같은 최첨단 플라즈마 제어장치를 기본 구성 요소로 채택하였다. 그 결과 KSTAR 장치를 통해 달성 가능한 플라즈마 압력, 운전시간 등의 주요 성능 목표는 타 핵융합 장치와 비교할 때 현재 경제적 DEMO 장치의 건설을 위해 필요한 조건에 가장 근접한 것으로 평가되고 있다.

ITER 운전주도 기반 확보, 첨단 기초연구 및 인력양성

KSTAR는 ITER와 같은 종류의 초전도 선재(Nb₃Sn)로 제작된 세계 유일의 초전도 토카막 장치로 2010년대 후반으로 예정된 ITER 운전개시 전까지 ITER 관련 운전모드 실험을 통해 장치의 운전성능을 테스트하고 플라즈마 운전기술을 최적화하는데 매우 유용하게 활용될 수 있다. 이렇게 KSTAR를 ITER의 시험장치와 같은 장치로 활용함으로써 ITER 운전성공 가능성을 높이고, 이를 통해 ITER 후발 참여국으로서의 우리나라의 과학적 위상을 제고시키며, 나아가 향후 ITER 운전연구 단계에서 우리나라가 주도적 역할을 수행하기 위한 연구 역량 및 기반을 확보하는데 크게 도움이 될 것으로 예상된다.

미국, 유럽 등 핵융합 선진국들을 중심으로 한 지난 반세기에 걸친 집중적인 연구에도 불구하고 핵융합 플라즈마 물리에 대한 과학적 이해는 아직 충분치 않은 상황이다. 특히 플라즈마 난류수송, MHD 불안정성, 고에너지 입자 영향, 경계영역 현상 등의 분야에서 해결해야 할 난제들이 남아 있는데 고성능 장시간 운전기술 등



초고속 슈퍼컴퓨팅 기술을 이용한 3차원 핵융합 플라즈마 난류수송 전산모사



KSTAR 총괄운영 및 연구계획

경제적 핵융합로 핵심기술 개발을 위해서는 이들에 대한 보다 완벽한 이해 및 이에 기초한 정밀 제어기술 확보가 필수적이다. 따라서 KSTAR를 국내 공동연구 중심장치로 활용하며 첨단 진단기술과 슈퍼컴퓨팅 기술의 융합을 통해 이러한 핵융합 난제들에 대한 기초 연구를 수행하는 것은 부족한 국내 핵융합 연구역량을 조기에 선진국 수준으로 높이고 우수 신진 인력을 양성하는데 크게 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

ITER 운전기술 최적화를 위한 KSTAR 활용가능 분야 및 내용

활용 분야	주요 활용 내용
ITER	ITER 기본 운전시나리오 모사 실험 및 운전기술 최적화
플라즈마	In-vessel 코일을 이용한 플라즈마 위치 및 ELM 제어기술 연구
운전기술	플라즈마 붕괴 영향 분석 및 완화 기술 최적화
최적화	장시간 운전조건에서 디버터 운전기술 최적화
ITER 장치	ITER와 동일한 초전도 선재의 운전특성 시험
선행기술	ITER와 동일한 사양의 ECH 및 LHCD 가열장치 특성 시험
시험	ITER용 플라즈마 대면재료 특성 시험 연구
	그리드 기반의 원격 실험 및 데이터 분석 기술 시험

18년 간 4단계로 운영, DEMO 시험장치로 활용

KSTAR의 주요 연구개발 목표 및 활용 방안의 실현을 위해 KSTAR는 현재 2008년부터 2025년까지 약 18년간 4단계에 걸쳐 운영될 계획이다. 각 단계별 주요 연구 목표와 계획을 간략히 소개하면 운영 1단계(2008~2012)의 주요 연구 목표는 토카막 주요 운전모드의 재현 및 검증 실험을 통해 초전도 토카막에 대한 기본 운전기술을 확보하고 아울러 부족한 국내의 핵융합 연구역량을 조속히 선진국 수준으로 끌어올리는 것이다. 이를 위해 가열, 진단 등 주요 부대장치 성능향상과 함께 오믹, L, H모드 등 토카막 기본 운전모드들에 대한 실험을 수행해 나갈 계획이며, 특히 2012년까지 ITER 기본 모드인 D형상 H 모드를 구현하고 이의 20초 운전을 달성함으로써 2단계 장시간 운전 연구를 위한 기반을 확보할 예정이다.

운영 2단계(2013~2017)의 주요 목표는 ITER 기본 운전모드인 H모드와 하이브리드 모드를 중심으로 장시간 운전기술을 개발하고 아울러 ITER 운전기술 최적화 연구를 수행하는 것이다. 이를 위해 비유도성 전류구동 기술, MHD 불안정성 실시간 제어기술, 디버터 장시간 운전기술 등의 연구를 통해 H모드의 운전 시간을 점진적으로 증가시켜 나갈 계획이며 아울러 ITER 사양의 초전도 자석, ECH, LHCD 등에 대한 선행기술 시험도 병행할 계획이다. 그리고 2단계 중반부터 고성능 AT 운전모드 개발을 위한 연구에 본격 착수할 예정이다.

운영 3단계(2018~2022) 및 4단계(2023~2025)의 주요 목표는 경제적 핵융합로 건설을 위한 핵심기술인 고성능 AT 운전모드 구현 및 이의 장시간 운전기술을 확보하는 것이다. 이를 위해 먼저 3단계에서 상대적으로 낮은 가열파워(약 16MW)와 자기장(B=1.5~2T) 조건에서 고성능 AT 모드 및 이의 장시간 운전을 일차적으로 구현하고 4단계에서 보다 높은 가열파워(약 28MW)와 고자기장(B=3.0~3.5T) 조건에서 고성능 AT 모드의 장시간(300초 이상) 운전기술을 완성할 계획이다. 아울러 4단계에서는 KSTAR를 DEMO의 선행기술 시험 장치로 활용하며 고출력 핵융합실증로 조건에서의 디버터 등의 운전특성 시험 연구도 같이 수행할 예정이다. ㉔



글쓴이는 서울대학교 원자핵공학과 졸업 후 한국과학기술원 물리학과에서 박사학위를 받았으며, 일본 교토대학 부설 핵융합연구소 초빙연구원, 일본 원자력연구소 특별연구원, 한국기초과학지원연구원 책임연구원 등을 지냈다.