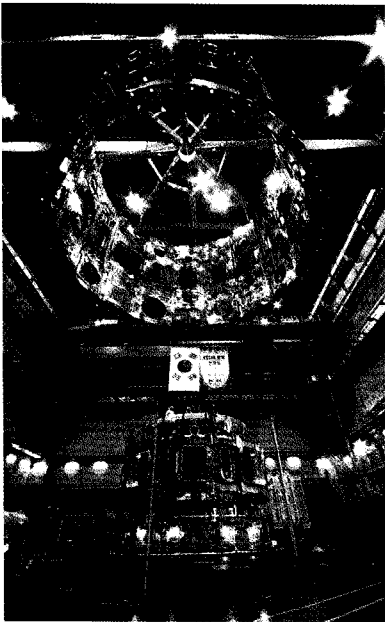


07 KSTAR 프로젝트

ITER 선행장치로서의
확실한 입지 구축한다

KSTAR
진공용기 조립 완료
초전도 자석 제작 완료
NFAC



▶ 저온용기 본체 현장조립 모습

1950년대 말부터 현재까지 인류는 천문학적인 예산과 인력을 투입하여 핵융합 에너지 연구에 매진해왔다. 그 이유는 핵융합에너지가 무한한 연료, 청정한 에너지원, 그리고 유사시 폭발할 위험이 없는 안전한 에너지원이라는 소위 '꿈의 에너지원'으로의 매력 때문일 것이다. 그러나 이런 핵융합에너지의 상용화는 예기치 못했던 많은 문제에 봉착하게 되면서 초창기의 예상과는 달리 그 연구에 상당한 기간이 소요되고 것이 사실이다.

초전도 전자석으로 자기핵융합 장치 약점 극복

핵융합 반응이란 수소나 수소의 동위원소, 또는 헬륨과 같은 가벼운 원자핵들이 서로 뭉쳐 더 무거운 핵종으로 바뀌는 반응을 말하며, 이때 반응 전·후의 질량결손이 에너지로 변환되어 나오는데 이를 이용해 전기를 발생시키는 것이 핵융합의 기본 원리이다. 핵융합 반응이 일어나기 위해선 두 개의 원자핵이 척력을 극복하고 핵력이 작용하는 거리까지 접근해야 하는데 이를 위해서는 원자핵이 충분히 높은 운동에너지를 가진 상태에서 일정시간 이상 구속이 되는 조건이 만족돼야 한다. 이와 같은 조건을 달성하기 위해 지금까지 여러 가지 방법들이 고안되어 왔는데 그 가운데 '자기핵융합' 방법에 대해서만 알아보자. 자기핵융합이란 플라즈마 내의 하전입자(이온과 전자)가 자기력선을 중심으로 회전하며 구속되는 특성을 이용하는 모든 형태의 가둠 방식을 통칭하며, 그 중 현재까지 연구의 주류를 이루어온 것이 토카막 방식이다.

토카막 방식은 도넛 모양의 진공용기 길이 방향과 평행하게 인가된 외부 자기장과 진공용기 내부에서 생성된 플라즈마 전류에 의해 용기 단면적의 둘레 방향으로 인가되는 자기장이 벡터합에 의하여 나선형으로 꼬인 형태로 나타나는 자기장을 이용하는 방식이다. 이러한 토카막 방식의 대표적인 장치가 미국의 TFTR, 유럽의 JET, 일본의 JT-60U 등이 있으며 이 장치들에 의해 핵융합 에너지 생산의 타당성이 과학적으로 입증된 바 있다. 특히, JT-60U의 경우 핵융합 반응을 일으키기 위해 투입된 전력 대비 추출 가능한 전력의 비율, 즉 에너지 증배계수가 1을 돌파한 적이 있다.

그동안의 비약적인 발전에도 불구하고 자기핵융합 장치들은 여러 가지 기술적 약점을 가지고 있는데, 그 가운데 심각한 문제 가운데 하나가 전자석의 동작시간 제한이다. 구리로 만들어진 전자석에 대전류를 인가할 경우 전자석의 발열로 인해 동작시간이 수 십초 이내로 제한되는데 연속적으로 가동해야 할 발전소 개념에서 이는 중대한 기술적 한계라 할 수 있다. 이 문제를 극복할 수 있는 방법이 전자석을 초전도 재료로 제작하는 것인데, 1980년대 중반 미국과 소련이 초전도 토카막 방식의 핵융합 실험로, 즉 ITER 장치의 공동 건설에 합의하고 이후 일본과 유럽 등이 회원국으로 참여하며 본격적 건설에 착수하게 되었다.

한편, 한국은 1990년대 중반 이전까지 대학이나 연구소 단위에서 소형 토카막 장치 또는 소규모 이론 중심의 연구를 수행하는 등 그 연구 환경과 결과가 핵융합 선진국에 비해 매우 열악한 상황이었다. 이런 상황을 타개하기 위해 중형 규모의 초전도 토카막 장치를 건설하고, 그 기술력을 바탕으로 ITER 회원국에 가입하는 'ITER 중간진입전략'의 일환으로 시작된 것이 KSTAR 건설 프로젝트이다.

한편, 한국은 1990년대 중반 이전까지 대학이나 연구소 단위에서 소형 토카막 장치 또는 소규모 이론 중심의 연구를 수행하는 등 그 연구 환경과 결과가 핵융합 선진국에 비해 매우 열악한 상황이었다. 이런 상황을 타개하기 위해 중형 규모의 초전도 토카막 장치를 건설하고, 그 기술력을 바탕으로 ITER 회원국에 가입하는 'ITER 중간진입전략'의 일환으로 시작된 것이 KSTAR 건설 프로젝트이다.

세계 유일의 초전도 토카막 장치 'KSTAR'

KSTAR는 상용핵융합로 건설을 위해 필수적으로 요구되는 정상상태 운전기술과 고성능·고효



글 양형렬 국가핵융합연구소
장치기술개발부장
hlyang@nfri.re.kr
글쓴이는 서울대학교 원자
핵공학과 졸업 후 동대학원
에서 석사·박사학위를 받
았다. 기초과학지원센터 외
부연구원, 한국기초과학지
원연구원 및 KSTAR 연구
센터 시스템통합팀장 등을
지냈다.



▶▶ 진공용기 내부(플라즈마 대향장치 및 디버터) 모습과 진공용기 조립

을 플라즈마 발생 및 제어기술을 개발하고 이에 필요한 하드웨어 기술을 확보하는 것을 주요 목표로 하고 있다. 1995년 12월 착수된 KSTAR 건설사업은 특수실험동 건설에 1천500 억 원, 장치 건설에 3천90억 원이 각각 소요되었으며, 설계에서부터 완공에 이르기까지 12년이 걸린 국내 과학기술 역사상 최대 규모의 사업이다.

KSTAR는 주반경 1.8m, 부반경 0.5m, 플라즈마 용적이 17.8m³인 중형 토카막 장치로 플라즈마 전류 2MA, 최대 중심 자기장 3.5테슬라, 최대 동작시간 300초의 준-정상상태 운전을 목표로 하고 있다. 또한 총 16개의 토로이달 코일과 10개의 폴로이달 코일이 니오븀-주석 합금(Nb₃Sn)의 초전도선재로 제작되고 4개의 대형 폴로이달 코일은 니오븀-티타늄 합금(NbTi)으로 제작되는 등 모든 코일이 초전도 자석으로 이루어져 장시간 운전이 가능하도록 설계되었다. 이에 따라 KSTAR는 ITER와 매우 유사한 플라즈마 형상을 갖고 동일한 초전도선재로 이루어진 세계 유일의 초전도 토카막 장치이기도 하다.

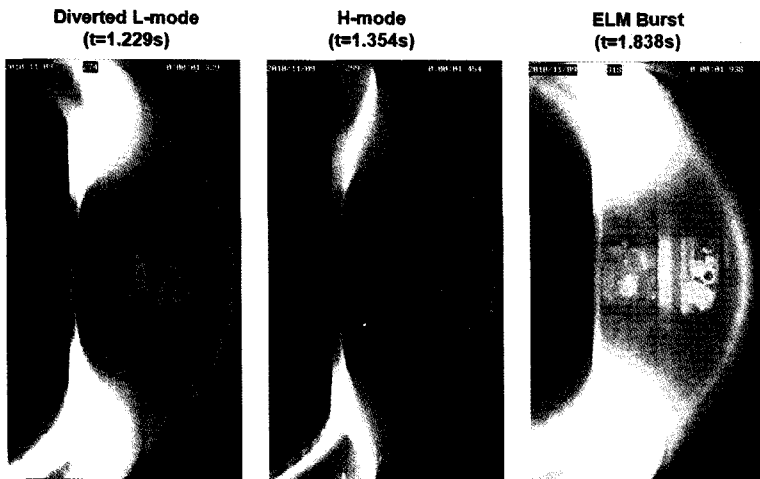
그리고 초전도자석을 극저온(4.5K 이하) 상태로 유지하기 위한 액체헬륨 공급장치의 용량이 9kW로 이는 현존하는 장치 중에서 CERN의 강입자충돌기를 제외하면 세계 최대 규모에 해당되는 양이다. 한편, KSTAR는 플라즈마 가열 및 전류구동을 위해 중성입자빔(NBI), RF 장치 등을 이용하여 총 26MW 규모의 가열파워를 입사할 예정으로 있다.

KSTAR와 ITER의 주요 제원

변수 (Parameters)	KSTAR	ITER
주반경 (Major radius), R0	1.8m	6.2m
부반경 (Minor radius), a	0.5m	2.0m
Elongation, κ	2.0	1.7
Triangularity, δ	0.8	0.48
플라즈마 용적(Volume)	17.8m ³	830m ³
플라즈마 단면적	1.6m ²	22m ²
플라즈마 형상	Single/Double Null	Single Null
플라즈마 전류, I _p	2MA	15(17)MA
폴로이달 자기장 세기, B0	3.5T	5.3T
펄스길이	300초	400초
플라즈마 연료	수소, 중수소	수소, 중수소, 삼중수소
초전도선재	Nb ₃ Sn, NbTi	Nb ₃ Sn, NbTi
가열 및 전류구동장치	약 26MW	73(110)MW

단 한번의 시운전으로 최초 플라즈마 달성 성공

KSTAR 건설 사업은 1995년 12월, 현 한국기초과학지원연구원 내 핵융합연구개발사업단 발족 으로부터 시작되었다. 1998년에 장치의 주요 제원이 확정되었으며, 2002년 6월에 KSTAR 특수실



▶▶ L,H 모드에서의 diverted 플라즈마 형상 및 ELM Burst 형상

협동이 완공되었다. 2000년 초부터는 KSTAR 장치의 주장치인 진공용기, 저온용기, 초전도 자석 및 자석구조물 등에 대한 제작에 착수, 2003년 3월 진공용기의 주요 구성 부품이 완성되었으며, 2004년 2월부터 TF 초전도자석 및 자석구조물이 제작이 본격적으로 진행되었다. 이에 따라 장치의 현장조립도 2003년 말부터 착수되었다.

2004년 2월 저온용기의 하부 베이스 조립을 시작으로 2004년 3월 초전도 자석시스템의 지지구조물, 그리고 2004년 6월 진공용기, 2005년 3월의 진공용기 열차폐체의 설치가 순차적으로 진행되었고, 2005년 3월부터 착수된 TF 초전도

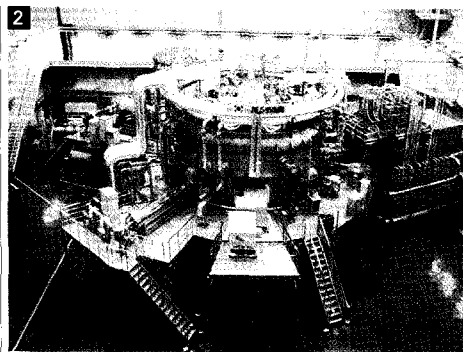
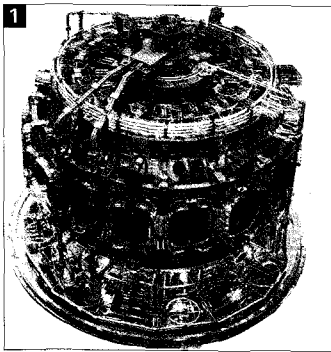
자석 설치에 1년여에 걸쳐 2006년 2월에 완성되었다. 이어서 폴리oidal 전자석들이 2006년 12월까지 모두 조립되었으며, 저온용기 본체가 2007년 초에 조립되었다.

그 후 2007년 1월 중심 솔레노이드 코일 장입, 저온용기 상부 덮개 및 진공용기 포트 조립이 순차적으로 진행되어 2007년 6월부터 총 4단계에 걸친 종합시운전에 착수하였다. 제 1단계 진공시운전은 이미 2007년까지 대부분의 성능시험이 완료된 상태이므로 특기할 사항 없이 순조롭게 진행되어 진공용기의 경우 도달 기저 진공도가 3×10^{-8} mbar에 이르렀다. 제2단계인 극저온 냉각 시운전의 가장 중요한 관점은 저온용기 내·외부 장치에서의 저온누설 부위 발생과 300여 톤에 달하는 저온장치의 냉각달성에 있었다. 장치의 극저온 냉각은 4주에 걸쳐 진행되었으며, TF 자석의 경우 20K, 그리고 PF 자석의 경우 10K에 도달했을 때 각각 초전도전이 현상이 관측되었다. 그리고 마침내 2008년 6월 13일, 최초 플라즈마 달성을 단 한번의 시운전 시도 만에 성공하였으며, ITER가 주로 사용할 Nb₃Sn을 초전도 선재를 사용한 장치로서는 세계 최초로 완공을 이룬 것으로서 전 세계 핵융합연구자들의 비상한 관심을 모은 바 있다.

고성능 핵융합 플라즈마 연구 기본 환경 구축

KSTAR의 성공적인 완공과 최초 플라즈마 달성 이후 부대장치와 진공용기 내부 부품의 지속적인 개량과 성능향상이 추진되어 왔으며, 이에 따라 장치의 성능 또한 크게 발전되어 왔다. 2009년의 2차 캠페인에는 초전도자석전원의 부분 성능향상, 전자공명가열(ECH) 전이온화 시스템의 입사시간 확대(2.5초 이상), 플라즈마 제어시스템(PCS)의 제어능력 향상, 그리고 진공용기 내부의 비대칭성 자기장 분포의 보정, 플라즈마 대향장치의 내벽면 세정 능력 개선 등을 토대로 플라즈마 전류 320kA, 플랫-탑 유지시간 1.4초, 그리고 플라즈마 유지시간 3.6초를 달성하였다.

2010년의 3차 운전 캠페인은 KSTAR 장치의 운전 성능이 비약적인 발전이 이루어졌다. 중심 자장값 3.5테슬라의 자기장을 8시간 연속운전을 이루어 초전도장치로서의 장점을 입증하였으며, 700kA 플라즈마 전류, 5초 이상의 플라즈마 유지시간과 1keV(온도환산 1천만 도)의 이온온도를 돌파하였다. 그러나 3차 운전에서 가장 특기할 사항은 플라즈마의 단면이 종전의 원형에서 강하게 늘어진, 삼각 단면 형상의 플라즈마 형상 제어에 성공함으로써 플라즈마 제어의 기술 습득은



▶▶ 1 저온용기내부 2 2011년 현재 KSTAR

물론 플라즈마 다이버팅을 통해 플라즈마 내 불순물 제어를 위한 핵심 관문을 돌파하였다는 점이다. 뿐만 아니라 이때 중성빔입사장치(NBI)가 처음으로 가동되어 총 2.4mw급의 가열장치 출력으로 H-모드(특정한 조건에서 플라즈마 가둠 효율이 2배 이상 갑자기 점프하는 운전모드)를 달성하였다. 이에 따라 장차 ITER의 주요 현안 중 하나인 ELM 제어 등과 같은 핵심 실험 이슈를 선점

할 수 있는 발판을 마련하였다. 참고로 ELM 불안정성은 H-모드 영역에서 나타난다.

한편, 2011년의 KSTAR 운전 결과 또한 전 세계 핵융합 연구자들의 큰 이목을 집중시킬 만큼 괄목할 만한 것이었다. 우선, KSTAR 장치가 운전을 착수한 지 3년 만에 플라즈마 전류가 1MA를 돌파하여 본격적인 고성능 핵융합 플라즈마 연구에 필요한 기본 환경을 구축하였을 뿐만 아니라 이미 기술한 바와 같이 2010년 달성한 H-모드 운전영역에서 진공용기 내부 제어코일을 이용하여 n=1 모드에서 ELM 현상을 완벽히 제어하는 데 성공하였다. ELM 제어는 현재 ITER 건설에 있어서 가장 중요한 핵심 이슈일 뿐만 아니라 장차 핵융합로 건설을 위해서는 반드시 극복해야 할 난제이기도 하다.

가열 · 전류구동 · 진단장치 대폭적인 확충 필요

지난 2008년 6월, 최초 플라즈마 발생에 성공한 KSTAR 장치는 수년간의 장치 고도화와 운영결과를 바탕으로 한국의 핵융합연구를 위한 핵심장치로 확고히 자리매김하였으며 나아가 전 세계적으로도 핵융합 연구관련 현안 이슈를 가장 잘 수행할 수 있는 유망한 장치로 현존하는 초전도 토카막 장치 중 KSTAR를 지목하고 있다. 이와 같이 국내 · 외적으로 큰 관심을 받고 있는 KSTAR 장치의 운영은 크게 4단계로 운영될 계획이다. 2012년까지의 1단계에서는 기본적인 토카막 운영 기술과 초전도장치 운전기술 습득에 초점이 맞추어졌으나 2013년부터 착수되는 2단계에서는 초전도토카막이라는 특징을 충분히 활용하여 300초 운전이 가능한 정상상태 운전과 이를 통한 ITER 선형장치로서의 확실한 입지 구축을 계획하고 있다.

그리고 2018년부터 착수될 제3단계와 그 이후의 제4단계에서는 ITER를 넘어선 실증로급의 고성능 · 고효율 플라즈마 생성에 필요한 '진보된 시나리오' 확립에 주력할 계획이며, 궁극적으로는 실증로 공학을 위한 테스트 장치로의 활용도 계획돼 있다. 그러나 이러한 계획이 원활히 수행되기 위해서는 부대장치, 특히 가열 및 전류구동장치와 진단장치의 대폭적인 확충이 전제되어야 한다. 현재 3.5mw급으로 제한돼 있는 가열장치를 단계적으로 24~26mw급으로 증설하여야 하며, 특히 정상상태 운전 모드 돌입을 위해서는 비유도성 플라즈마 전류 구동장치 확보가 무엇보다 시급하다.

한편, 기본 진단계와 일부 플라즈마 분포 측정장치 만이 최소한의 범위로 운용되고 있는 진단시스템의 성능고도화도 시급하다. 정상상태 운전과 고성능 플라즈마 발생 · 유지를 위해서는 플라즈마의 실시간 제어가 반드시 선행되어야 하는데, 이를 위해서는 각종 주요 변수들의 분포 측정 및 분포 제어가 핵심신결 과제이기 때문이다. 앞으로 각 단계별로 톱슨산란 장치, 모셔널 스타크 이펙트, ECE 영상장치, 반사계, CES 등의 핵심 진단장치의 성능고도화와 신규 증설의 순조로운 진행 여부는 KSTAR 장치 운영의 성패를 좌우할 수 있는 매우 중요한 요소라고 할 수 있다. (ST)