

# 인공태양 KSTAR가 뜬다

글 | 박주식 \_ 국가핵융합연구소 KSTAR사업단 단장 jsbark@nfrcl.re.kr

지구상 모든 생명체의 근원인 태양, 그 태양이 스스로 에너지를 발하는 메커니즘은 핵융합 반응이다. 따라서 지금 전 세계적으로 연구와 개발이 한창인 핵융합 관련 장치를 '인공태양'이라고 부르는 것도 이러한 이유 때문이다. 핵융합 에너지는 연료의 무한성, 청정성, 그리고 안전성 등의 우수한 장점 때문에 소위 '꿈의 에너지'라고 인식돼 왔다. 인류는 그 가능성을 주목해 이미 1950년대부터 핵융합연구를 시작하였으며, 연구 방향은 크게 자기 핵융합 방식과 레이저 빔 등을 이용한 관성 핵융합 방식의 두 갈래로 진행돼 왔다. 그리고 자기 핵융합 방식은 다시 자기 거울 방식, 스텔러레이터 방식, 그리고 토카막(러시아어로 도넛 모양의 자기핵융합 장치) 방식 등으로 나눌 수 있다.

## 21세기 중반 상용 핵융합발전소 건설

이러한 모든 핵융합 연구장치 중 현재까지 가장 우수한 성능을 획득하여 장차 건설될 핵융합로의 기본 골격으로 여겨지고 있는 것이 바로 토카막형 핵융합장치다. 1968년, 쿠르차토프연구소(구 소련)의 T3 토카막이 주목할 만한 실험결과를 나타낸 이래 1970년대와 80년대에 걸쳐 30개국에서 100여 개의 토카막 실험장치가 건설·운영되어 왔다. 특히 유럽연합의 JET, 미국의 TFTR, 일본의 JT-60U 등과 같은 대형 핵융합연구 장치들은 비약적인 기술성과를 이뤄낸 결과, 지난 1990년대에는 투입 에너지 대비 출력에너지가 같은 에너지 분기점(Q=1)에 근접하거나 달성하는 수준까지 이르게 되었다.

이제 세계는 현재까지의 연구 결과를 토대로 상용 핵융합로 건설을 위한 다음 단계의 연구에 박차를 가하고 있다. 그 중 가장 주목할 만한 변화가 정상상태 운전이 가능한 핵융합 장치건설로의 방향 전환이다. 다시 말해, 과거의 대표적인 핵융합 연구장치들이 기

존의 전자석을 이용하여 플라즈마 유지시간이 10초 내외의 펄스형 운전 장치인 것에 반해, 초전도 자석을 이용하여 수백초에서부터 궁극적으로는 연속 운전이 가능한 장치를 건설하겠다는 것이다. 그 결과 탄생한 대형 프로젝트가 국제열핵융합실험로(ITER)이며, 세계는 이 프로젝트에 모든 역량을 집중하고 있다.

ITER는 핵융합 상용화를 위해 유럽연합, 미국, 일본, 러시아, 중국, 한국, 그리고 인도 등 7개국이 국제공동으로 추진하고 있는 최종 실증로로서 중수소-삼중수소 반응에 의한 핵융합 출력 약 500 MW, 에너지 증폭률(Q) 10 이상, 그리고 플라즈마 펄스 유지시간 400초 이상 달성을 목표로 하고 있다. 그러나 ITER 장치의 건설완공이 2010년대 중·후반으로 예정되어 있어 초전도 핵융합장치 건설과 연구에 대한 공백이 불가피하다. 이러한 공백을 메우고 ITER의 선행장치, 또는 독자적인 초전도 핵융합장치의 건설 및 운영 등을 목적으로 건설되었거나 예정인 장치들이 바로 EAST(중국), KSTAR(한국), 그리고 JT-60SA 등이다.

EAST는 KSTAR와 유사한 형상인 초전도핵융합장치로 전체 크기가 KSTAR의 85% 수준이며 초전도자석의 재료와 성능, 그리고 각종 사양에 이르기까지 KSTAR장치와 비교하면 한 단계 낮은 수준의 초전도핵융합연구장치로 인식되고 있다. 그러나 EAST는 이미 장치건설과 시운전을 모두 성공적으로 완료하고 본격적인 운영단계에 접어들어 세계의 주목을 받고 있다. 한편 JT-60SA는 현재까지 운전중인 JT-60U와 유사한 크기의 초전도핵융합장치로서 2013년경에 건설을 완료할 예정이다. 이 장치가 성공적으로 건설된다면 ITER를 제외한 가장 대형의 초전도 핵융합 연구장치로서 ITER 장치의 주요 성능에 대한 유사실험을 수행할 수 있을 전망이다.

이와 같이 지금 전세계는 핵융합 연구를 위해 경쟁적으로 투자

와 연구에 박차를 가하고 있으며, EAST, KSTAR, JT-60SA 등과 같은 초전도 핵융합연구장치의 건설과 운영 단계를 거치고 향후 ITER에 의해 과학적·공학적인 타당성이 최종적으로 검증되면 그 다음 단계로 전기 생산을 목표로 하는 DEMO라는 새로운 장치를 건설할 계획이다. DEMO에서는 전기에너지를 생산하는 공학적 타당성을 마지막으로 점검하게 되며, 나아가 핵융합 에너지의 상용화를 위한 상업성의 검증도 함께 이루어질 것이다. 따라서 DEMO장치에 의한 상업적 타당성이 최종 검증되면 금세기 중반에는 최초의 상용 핵융합 발전소가 건설될 것으로 예상된다.

### KSTAR 태동에서 완공까지 11년 8개월 소요

KSTAR 프로젝트는 1995년, '국가 핵융합 연구개발 기본계획'의 일환으로 태동하게 되었으며 그해 12월, 이 사업을 총괄적으로 수행하게 될 핵융합연구개발사업단이 출범하였다. 그 당시는 국내 핵융합연구가 1970년대말부터 핵융합 기초기술 기반구축과 인력배양 등을 목적으로 소규모로 진행되어 온 서울대학교의 'SNUT-79', 한국과학기술원의 'KAIST-토카막', 한국원자력연구소의 'KT-1', 그리고 기초과학지원연구원의 '한빛' 등이 전부였던 시기였다. 그러므로 이와 같이 산발적으로 수행되는 소규모 연구로는 세계적인 기술 수준과 경쟁하는 것은 거의 불가능한 것으로 인식되었다. 이러한 기술 격차를 단숨에 극복하고 국내 핵융합 연구 수준을 비약적으로 도약시키기 위하여 정부는 '중간진입' 전략이라는 과감한 선택을 하게 되었고, 그 결과 모든 전자석이 초전도자석으로 설계된 중형 토카막, 즉 KSTAR(차세대초전도핵융합 연구장치)가 탄생하게 되었다.

1995년말에 착수된 KSTAR 사업은 1998년에 그 개념설계와 분야별 기본설계를 완료하여 TSER과 ASER 등의 토카막 장치 및 부대 장치들의 설계검증을 완성한 후 2000년경까지 기반기술 연구개발 단계를 거쳐 왔다. 그 이후 본격적으로 장치의 공학설계와 제작이 착수되었으며 특히 2002년 9월, KSTAR 특수실험동 준공을 기점으로 장치의 핵심 부분과 부대설비 등이 차례로 모습을 드러내기 시작하였다. 이어서 2004년 1월부터 저온용기 베이스의 정위치 안착을 시작으로 본격적인 장치조립이 시작되었다. 2004



사진1 진공용기와 열차폐체의 현장 설치 모습

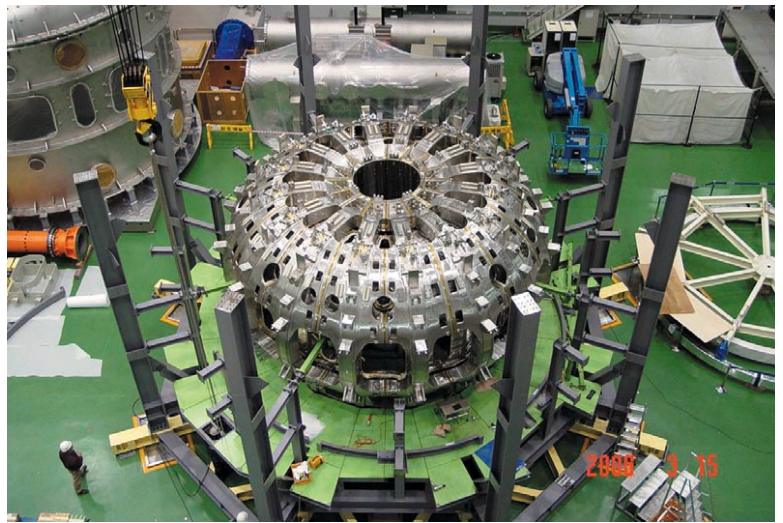


사진2 조립 완성된 토로이달 초전도자석

년 7월에는 KSTAR 장치의 핵심 주장치 중 하나인 진공용기 제작이 완성되었으며 2005년 3월에 진공용기와 진공용기 열차폐체가 조립되었다.

그리고 2006년 3월에는 역시 핵심 주장치인 토로이달 초전도자석 16개가 모두 조립됨으로써 KSTAR 장치가 본격적으로 골격을 드러내게 되었다. 2006년 10월은 총 30개의 초전도자석이 모두 조립이 완료되어 장치건설이 막바지에 이르렀으며 2007년 1월, 드디어 저온용기 본체가 조립되었다. 그 이후 약 4개월에 걸쳐 72개의 진공용기 포트 및 진공배기계, 그리고 저온용기 리드가 조립되어 장치조립이 완성되었다. 이어서 장치건설 과정의 마지막 단계이자



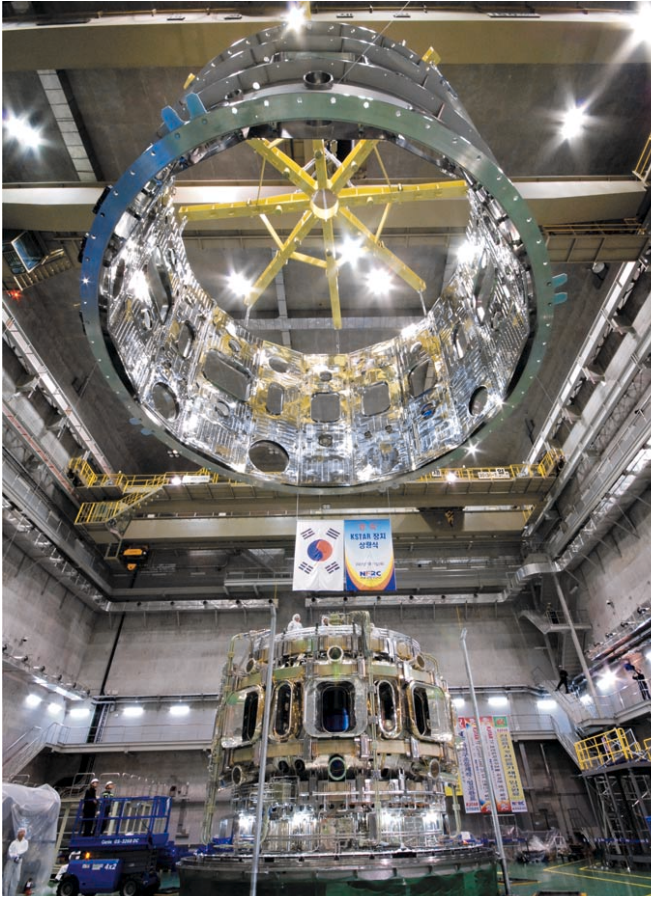


사진3 저온용기 본체 조립 모습

중합시운전의 첫단계인 진공시운전을 2007년 6월말에 성공적으로 완료함에 따라 1995년말에 착수된 KSTAR 사업은 그 동안 기초설계, 공학설계, 장치제작, 장치조립, 그리고 최종적으로 진공시운전 등의 일련의 건설과정을 모두 완료함으로써 총 11년 8개월의 대장정을 마무리하였다.

KSTAR 사업은 단일 프로젝트로는 국내 최대의 대형·장기 국책 프로젝트였으며, 대덕연구단지 소재 국가핵융합연구소(NFRDI)가 주관기관, 원자력연구소, 포항공대가 세부과제 수행기관으로 역할을 분담하였다. 그리고 현대중공업, 두산중공업, 포스콘, SFA 등 30여개의 국내기업이 참여하는 산·학·연 협력체제로 과제를 수행하였다. 이와 같은 대형 국책 프로젝트를 수행하는 동안 3천 90억 원의 예산과 1천400여 명의 인력이 투입되었으며, 전체 투입 예산의 약 1/3에 해당하는, 기초 연구개발과 초기 인프라 구축에 투입된 비용을 제외한 실제 순수 장치 건설비용은 약 2천억 원이 소요되었다. 특히, 건설비용의 절반에 달하는 비용이 초전도 선재 구

입과 초전도자석 제작 분야에 투입 되었다.

KSTAR 장치 및 설비의 구성은 크게 1)진공용기, 저온용기, 열차폐체 및 지지구조물을 포함하는 상온구조체, 2)초전도자석 30개와 전류전송계를 포함하는 초전도자석계통, 3)전원공급장치, 제어계, 진단계 및 보조가열장치를 포함하는 부대장치계통, 4)초전도자석의 냉각을 위한 헬륨냉각장치, 냉각수장치 및 154kV 전력설비, 그리고 5)실험동 및 시험시설 등으로 분류해 볼 수 있다. 각종 첨단과학과 극한 기술분야가 총망라된 종합공학의 결정체라 할 수 있는 KSTAR 토카막 본체의 전체 중량은 장치의 구성품이 모두 완성되었을 때 약 1천톤 정도로 예상되며, 특히 동작온도 영하 269도를 유지해 주어야 하는 저온체 부분은 약 270톤 규모로 Nb<sub>3</sub>Sn 초전도체를 채택한 연구용 토카막 중에는 세계 제일의 규모를 갖추고 있다.

### KSTAR 건설로 선진국과 격차 일시에 해소

KSTAR 프로젝트는 그 건설과정에서 확보한 중요한 기술성과들이 다양하다. 이 중 대표적인 기술분야들은 극저온 기술분야의 대형 초전도 자석, 초고진공 기술분야의 거대 진공용기, 초고온 기술분야의 플라즈마 인접벽 등 극한 기술분야에서의 설계능력 확보 및 제작기술 축적, 그리고 복잡한 거대 구조물을 정밀하게 설치하는 기술 확보 등을 들 수 있다. 특히, 현재까지 개발된 초전도 선재 중 최고 수준의 Nb<sub>3</sub>Sn 선재 개발, 최장 1천700m의 초전도 관내연선도체의 연속조관방식 개발, 세계 최초로 중간 이음매가 없는 연속 권선방식에 의한 초전도자석 제작 등은 프로젝트를 수행하는 과정에서 습득한 대표적인 기술 사례이며, 장차 대형 초전도자석 제작에 관한 기술 표준이 되고 있다. 그 외에도 3차원 곡면형상의 초고진공용 토카막 진공용기 제작 기술, 대형 초전도토카막 장치의 정밀 조립기술, 과부하형 전류인입선개발, 초전도 송전선의 절연기술 및 접합기술 등 KSTAR 건설 과정에서 습득한 핵심 기술 사례는 일일이 열거하기 힘들 정도다.

이미 앞서 언급한 바와 같이 KSTAR 장치건설은 이 프로젝트 탄생의 원래 목적대로 선진국과의 기술수준 격차를 일거에 해소하고 한국이 핵융합 연구분야의 기술 선진국으로 당당히 발돋움하는 계기가 되었으며, 이에 따라 국제열핵융합로 회원국 가입에 결정적인 역할을 했음에 틀림없다. 이처럼 우리 나라가 단기간내에 핵융합 선진국으로의 중간진입에 성공하여 ITER 사업에 참여할 수 있었던 데는 국가 차원의 적극적인 지원체제, 세계 초일류의 국내 중공



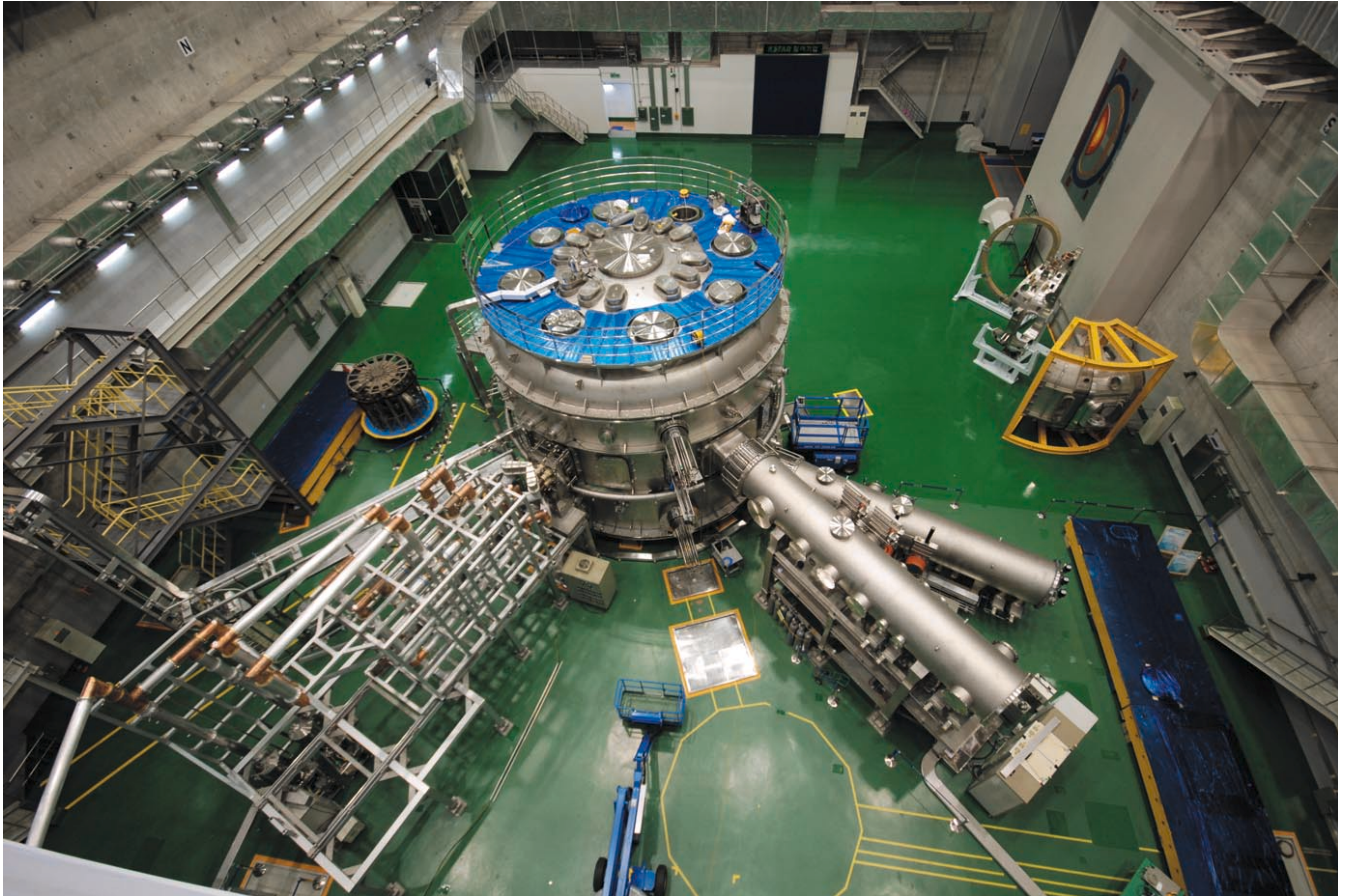



사진4 건설 완료된 KSTAR 장치 전경

업 인프라 및 IT 산업기술, ITER 설계사양의 면밀한 벤치마킹, 세계 6대 원자력 국가로서의 기술력, 그리고 역할 안배가 적절히 이루어진 데 따른 상승효과 또한 크게 작용했다.

#### ITER 파일럿 장치로서 역할 수행 기대

2008년 후반기부터 시작될 KSTAR의 운영은 크게 초전도 토카막 운전 기반기술 확립단계, 장시간 운전기술 개발단계, 고성능 AT 운전기술 개발단계, 그리고 핵융합실증로 기술 개발단계 등의 단계별 특성화 전략에 맞추어 추진할 계획이다. KSTAR 장치는 설계 특성, 구조, 재료 등의 거의 모든 분야에서 ITER 장치와 가장 흡사한 초전도 핵융합 연구장치다. 따라서 KSTAR 장치의 건설과 운영을 통해서 습득한 지식과 경험, 그리고 각종 이력들은 ITER 공학설계 및 장치제작 등에 매우 중요한 기술적 근거를 제공할 것으로 기대되고 있다. 특히 장치 운전을 ITER 운영과 연계하여 적극적으로 활용한다면 KSTAR는 현존하는 토카막 중에서 가장 유력

한 ITER 파일럿 장치로서 그 역할을 수행하게 될 것이다. 즉, KSTAR는 ITER 건설이 완료되는 2010년대 중·후반까지 ITER 건설 및 운전에 필요한 여러 가지 물리적 및 공학적 변수의 검증 역할을 성공적으로 담당해 나갈 것이다.

향후 KSTAR는 운영단계에서 ITER 참여국인 미국, 일본, EU 등 핵융합선진국과의 공동연구개발을 수행하여 명실 공히 국제공동 연구장치로서 면모를 갖추어 나갈 계획이다. 또한 ITER 비참여 국과도 국제협력네트워크를 구성하여 상호 협력해 나갈 것이다. 더불어 현재 예비 개념설계가 진행되고 있는 DEMO 장치 개발에 필요한 물리적, 기술적 데이터베이스 구축에도 KSTAR를 적극적으로 활용할 계획이다. 



글쓴이는 서울대학교 원자핵공학과 졸업 후 동대학원에서 석사 및 박사학위를 받았다. 한국원자력연구소 원자력병원 사이클로트론실 실장, 포항가속기 연구소 수석연구원 등을 지냈다.