

# KSTAR 핵융합 연구 장치의 개발 현황

이 경 수

기초과학지원연구소 핵융합연구개발사업단장



은 30년대에 이르러 알려지기 시작하였다.

이러한 과학적 사실에 대한 이해는 과학자들로 하여금 인공적인 핵융합 반응의 실현을 추구하게 되었으며, 50년대 초반에 이르러 미국의 핵물리학자인 텔러 박사, 옛 소련의 핵물리학자인 사하로프 박사의 주도하에 두 나라는 비밀리에 핵융합 반응을 응용한 수소 폭탄 개발 계획을 진행하였다.

이와 함께 핵융합에 의해 발생되는 막대한 에너지 자원의 평화적인 이용 계획도 진행되어 인공 태양 계획이라 불리는 제어 핵융합 에너지 개발도 같은 시기에 시작되었다.

이러한 핵융합 에너지 개발은 화석 에너지의 고갈 문제 해결과 폐기물 등 환경 문제를 유발치 않으면서 다른 대체 에너지원과는 달리 고밀도·대용량의 무한한 에너지 개발 가능성을 가지고 있어, '꿈의 에너지' 라고

까지 불리는 인류 역사상 최대의 과학적 도전이 되었다.

이러한 핵융합 에너지 발생의 원리를 간단히 요약하면, 수소의 동위 원소들과 같은 가벼운 원소들의 핵이 초고온 상태에서 서로 결합하여 헬륨과 같은 좀 더 무거운 원소의 핵을 형성하는 반응 과정에서 질량 결손에 의해 생겨나는 에너지는 방출되는 입자들의 운동 에너지로 나타나게 되는데, 이를 제어된 방법에 의해 에너지 화하려는 것이 핵융합 에너지 개발의 목표이다.

### 핵융합 연구의 성과와 전망

핵융합 연구는 초기의 예상과는 달리 자기장 속에 가둔 초고온 플라즈마의 불안정성에 의해 많은 어려움을 겪었고, 이를 극복하기 위해 요구되는 높은 기술 수준으로 인해 지속적인 연구에 비해 발전의 속도가 느렸다.

**지** 구상 모든 생명체의 에너지 공급원인 태양은 매초 4조 W의 1백조배 ( $4 \times 10^{26} \text{W}$ ) 에 이르는 에너지를 핵융합 반응에 의해 방출하고 있다.

이 에너지량은 현재 지구상에서 생산되고 있는 총전력량의 1조배 이상이나 되는 막대한 양의 에너지이다.

이와 같이 모든 우주 만물의 에너지원인 항성들 내부에서 가벼운 원소들의 핵융합 반응에 의해 막대한 에너지가 발생되고 있다는 과학적 사실

그러나 68년 옛 소련 과학자들에 의해 발표된 토카막 장치를 이용하여 1천만도 고온의 안정된 플라즈마 밀폐 결과는 핵융합 연구 활성화에 크게 기여하였다.

이에 따라 70년대에 들어와서는 토카막 장치에 의한 핵융합 결과들이 괄목할 만큼 발전하기 시작하였고, 70년대 중반에 있었던 아랍권 국가들의 석유 수출 금지 조치의 결과로 석유 가격 인상 등이 전세계적으로 전파되면서, 이에 대응하는 세계적 노력의 한 방법으로 선진국들에 의해 본격적인 핵융합 에너지 개발이 시작되었다.

이에 따라 현재 세계 3대 핵융합 실험 장치로 불리는 미국의 「토카막 핵융합 실험로(TFTR)」, 유럽연합의 「유럽 공동 연구 토러스(JET)」와 일본의 「JT-60 토카막」 장치 등과 같은 대형 토카막형 핵융합 실험 시설이 건설되고 80년대 초반에 실험이 시작되어 핵융합 연구의 획기적인 발전을 가져오게 되었다.

또 70년대 후반부터 본격적으로 진행된 핵융합 연구의 괄목할 만한 발전과 최근의 연구 성과들은 정량적 수치로 비교해 보면 빠른 성장을 보여주고 있으나, 세계 3대 토카막 건설 이후 세계적인 석유 가격의 안정과 선진국의 연구 재정 형편으로 근 20년간 다음 단계의 핵융합 장치 개발에 대한 투자가 이루어지지 못하여, 당초 핵융합 에너지 개발 목표 달

성이 지연되었다.

이로 인해 핵융합 연구의 발전이 느리다는 비판도 있으나, 이는 연구 결과들을 자세히 알고 보면 사실이 아님을 알 수 있다.

그러나 핵융합 에너지의 상용화를 위해서는 지금까지의 연구 결과를 바탕으로 하여 넘어야만 할 과제들이 아직도 남아 있다.

그 중에서도 가장 중요한 것은 핵융합 에너지 개발의 과학적 최종 목표인 점화 상태(ignition)의 달성인데, 이 상태에서는 핵융합 반응으로 방출되는 에너지가 충분하여 외부에서 추가되는 가열 없이도 핵융합 반응이 지속되는 상태에 도달하는 것이다.

이러한 과학적 목표 달성과 함께 상용로서 필수 조건인 플라즈마의 안정성과 정상 상태하의 지속적인 핵융합 반응 목표의 달성, 그리고 지금 보다 출력 밀도를 높여 핵융합로의 경제성을 확보하는 것이 앞으로 풀

야할 과제들이다.

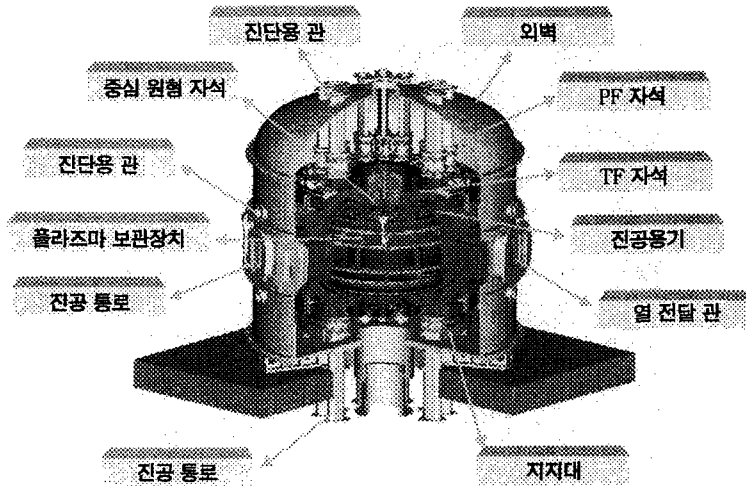
이를 위해서는 대형 초전도 자석의 개발과 무유도 방식에 의한 전류 구동 기술의 개발이 필요하고, 발생되는 높은 고열을 견디기 위한 초고온 재료와 발생하는 중성자들에 의한 방사화를 최소화하기 위한 금속 재료의 개발이 요구되고 있어, 이에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

지금까지의 핵융합 연구 결과와 다양한 관련 기술 개발을 바탕으로 하여, 핵융합 기술의 종합적인 실증을 목표로 한 「국제 열 핵융합 실험로(ITER, International Thermonuclear Experimental Reactor)」장치가 국제원자력기구(IAEA)의 지원하에 미국·유럽연합·일본·러시아(옛 소련)의 공동 협력 과제로 건설되기 시작하였다.

88년 개념 설계를 시작으로 하여 98년 7월 상세 설계를 완성하고 2010년경에는 150만kW 이상의 핵

(표 1) KSTAR 차세대 초전도 토카막 장치 주요 제원

		Parameters	Remarks
Major Radius,	$R_0$	1.8meter	• Nb <sub>3</sub> Sn, NbTi
Minor Radius,	$a$	0.5meter	
Toroidal Field,	$B_{T0}$	3.5Tesla	
Plasma Current,	$I_p$	2.0MA	
Elongation,	$\kappa$	2.0	
Triangularity,	$\delta$	0.8	• Double-null
Pulse Length		$20\text{sec} \leq \tau_{\text{pulse}} \leq 300\text{sec}$	• Current Drive
Heating & Current Drive		NBI ICRH/FWCD, LHCD, ECRH	
Plasma Species		H/D	



(그림 1) KSTAR 장치 개념 설계도

융합 에너지가 1천초 이상 지속되는 핵융합 연구의 최종 실험 장치의 건설을 추진하고 있는 것이다.

이제까지의 핵융합 연구의 주축을 이루어온 토카막형 장치 개발과는 별도로, 유도 기전력에 의한 플라즈마 전류 구동이 필요하지 않아서 정상 상태 운전이 용이한 밀폐 형식의 헬리컬형 장치의 개발도 적극적으로 추진되고 있다.

일본에서는 89년 문부성 산하에 국립핵융합과학연구소를 설립하고 초전도 자석을 채택한 대형 헬리컬 장치인 Large Helical Device 개발에 착수하여 98년 3월에 정상 가동을 성공적으로 달성하였다.

독일의 Max-Planck 플라즈마 물리연구소에서도 초전도 자석형의 스텔레이터인 Wendelstein-7-X 장치

의 개발에 착수하여 옛 동독 지역인 Greifswald에 2005년 완공을 목표로 건설을 추진중에 있다.

### KSTAR 프로젝트 현황

#### 1. 연구 개발 사업의 개요

우리 나라의 본격적인 핵융합 연구 개발 사업은 95년말 국가핵융합연구 개발위원회에서 성안되어 정부의 승인을 거쳐 확정·시행된 「국가 핵융합 연구 개발 기본 계획」의 첫 단계로 선도 기술 개발 사업(G7 사업)으로 착수된 차세대 초전도 핵융합 연구 장치 개발 사업에서 시작되었다고 할 수 있다.

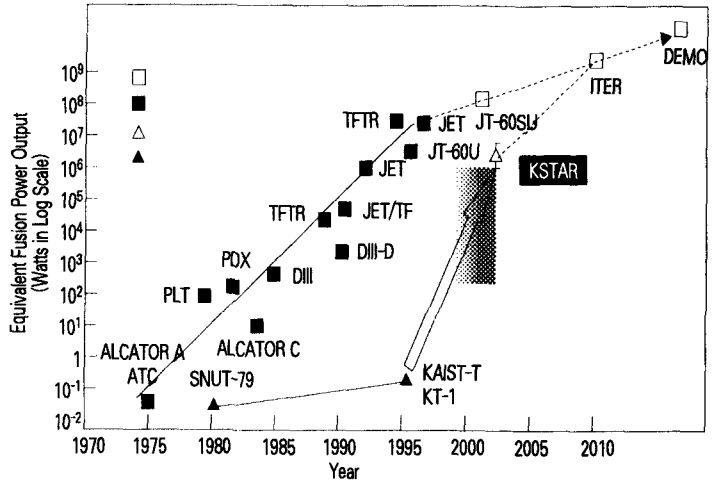
국가 핵융합 연구 개발 사업은 「국가 핵융합 연구 개발 기본 계획」에 정의된 대로 KSTAR(Korea Supercon-

ducting Tokamak Advanced Research) 장치로 이름 지어진 차세대 초전도 토카막 장치의 개발·설치와 이 연구 장치의 운영을 통한 핵융합 연구와 기술의 확보, 나아가 세계적인 핵융합로 개발에 동등한 자격으로의 참여 등을 중간 목표로 하는 3단계 계획으로 수립되어 있으며, 핵융합 발전 기술의 상용화 시기까지 이 분야의 기술 선진국으로서의 위치를 확립하는 것을 최종 목표로 하고 있다.

이러한 중장기적인 목표의 달성을 위한 첫 단계로 21세기 초까지 정상 상태 운전이 가능한 세계 수준의 차세대 초전도 토카막 장치를 국제 공동 협력을 적극적으로 활용하여 국내 기술로 건설하는 국가적 사업으로 KSTAR 프로젝트가 수행되고 있다 (표 1), (그림 1).

KSTAR 장치 개발 사업은 핵융합로 개발에 필요한 국내 연구 개발 역량을 집중시킨 범국가적 사업으로 추진되어, 96년 초 총괄 주관 기관인 기초과학지원연구소에 「핵융합 연구 개발 사업단」을 개설하고, 각 분야별 전문성과 연구 개발 실적을 바탕으로 한국원자력연구소·한국과학기술원·포항공과대학교·삼성종합기술원 등이 주관 연구 기관으로 선정되었고, 한국표준과학연구원·한국전기연구소 등 출연 연구 기관과 서울대학교·연세대학교·성균관대학교 등 대학, 삼성전자(주)·한국중공업(주)·(주)포스콘 등 산업체를 포함하는 총 25개 기관 300여명의 연구 기술 인력이 참여하는 사업으로 98년 8월에 3개년간의 제1단계 사업이 성공적으로 완료되었다.

이러한 KSTAR 프로젝트의 단계별 추진 일정은, 2002년까지 핵융합 연구 장치를 개발하고, 미국·일본·유럽연합·러시아의 주도로 2010년경 장치 건설을 목표로 추진중인 「국제 열 핵융합 실험로(ITER)」 장치의 본격 가동시까지 장치 운영을 통합, 본격적인 핵융합 연구 수행을 하는 것으로, 여기서 핵심이 되는 KSTAR 차세대 초전도 토카막 연구 장치의 개발은 약 7년간(95. 12~2002. 9)에 걸쳐 총 1,500억원의 연구 개발 투자가 계획되어 있으며, 국가 핵융합 연구개발위원회를 중심으로 하는 추진체에 의해 수행되고 있다(그림 2).



(그림 2) 핵융합 에너지 개발 연표와 KSTAR 장치 성능 목표

제1단계 기간 중 수행된 연구 개발 사업의 주요 실적은, KSTAR 장치의 주요 제원을 구체화하는 개념 정의를 확립하였고, 이 설계 기준에 따라 장치의 개념 설계와 기본 설계 작업을 수행하여 장치 설계의 주요 단계인 장치 개념 설계 검증·평가와 KSTAR 주장치 기본 설계 및 부대 장치 기본 설계 검증·평가를 각 분야별로 세계적인 전문가들이 참여한 국제 검증·평가위원회를 3차에 걸쳐 개최하여 목표한 설계 마일스톤 모두를 성공리에 완료한 것이다.

이러한 장치의 개념 설계 및 기본 설계와 병행하여 제1단계 기간중에는 초전도 자석 계통과 이들 초전도 자석들에 전원을 공급하는 전원 제어 계통으로 구성되는 KSTAR 주장치 개발 R&D가 수행되었으며, 플라스

마 가열 장치들과 진단 장치들로 구성되는 KSTAR 부대 장치 개발 R&D도 수행되었다.

## 2. KSTAR 주장치 개발 현황

KSTAR 토카막 주장치는 대형 초고진공 용기, Cryostat 극저온 용기, 초고온 플라스마 대형 장치와 진공 배기계 및 연료 주입계로 구성되는 진공 계통, 대형의 D-형상을 가지는 DC형 초전도 자석인 Toroidal 자석과 AC형 초전도 자석인 Poloidal 자석 등으로 구성되는 초전도 자석 계통, 이들 초전도 자석들에 전원을 공급하며 초전도 자석의 Quench로부터 자석을 보호하는 전원 제어 계통으로 구성되어 개발·제작된다.

먼저 KSTAR 진공 계통의 개발을 위해 진공 용기와 Cryostat 등의 기

본 설계가 완료되었다.

이와 함께 상세한 응력 해석과 전 자기적 해석이 수행되었고, 장치 제작 기술 확보와 검증을 위한 시작품으로 진공 용기의 90° Sector를 장치 개발에 참여한 한국중공업(주)에서 제작을 완료하여 시험에 착수하였다.

KSTAR 토카막 장치 개발에 있어 가장 핵심이 되는 분야이며, 이제까지 토카막에서 달성하지 못하였던 Steady-state 운전 상태인 300초 이상의 펄스 지속을 위해 필수적인 초전도 자석의 개발에는, ITER 개발 계획을 위시해서 이제까지 세계 핵융합 장치 개발의 가장 중요한 연구 개발 결과들을 반영하여, 현재 최고 성능의 ITER High Performance 사양을 만족하는 Nb<sub>3</sub>Sn 계열의 초전도 선재를 바탕으로 한 Incoloy 908 사각관 형태의 초전도 관내 연선도체(CICC : Cable-in Conduit Cable)를 개발하였다.

KSTAR 장치를 위해 개발된 Nb<sub>3</sub>Sn 초전도 소선의 성능 특성은, ITER 장치 개발에서 정의된 고전류 밀도를 가지는 DC용 초전도 선재 규격인 HP-2 사양을 동시에 만족시키는 것으로 선재의 개발과 특성 평가를 성공적으로 달성하였다.

또한 KSTAR 초전도 자석 시스템 중 장치 제작에 있어 기술적으로 가장 난이도가 높은 부분인 AC형 초전도 자석인 Central Solenoid 자석의 제작 기술 확보를 위하여, Nb<sub>3</sub>Sn 선

재의 기반을 둔 CIC 도체로 본 장치와 동일 반경을 가지는 모델 코일의 제작을 완료하여 현재 저온 테스트를 수행중이고, 대대에 위치한 삼성중합기술원 내에 건설된 세계 수준의 초전도 종합 시험 시설에서 곧 초전도 성능 검증을 수행할 예정으로 있다.

이러한 초전도 자석 개발의 주요 R&D와 함께 초임계 헬륨(Supercritical Helium)을 이용한 CIC 도체의 강제 유동 방식의 냉각 연구와 초전도 접합부(Joint)와 단말부(Termination)의 시작품을 제작하여 실제 토카막 운전 상황하에서의 손실 특성에 대한 검증 평가도 수행중에 있다.

이와 함께 초전도 자석의 운전 특성에 맞춘 전원 공급 장치의 제작도 KSTAR 주장치 개발 과제의 중요 분야이다.

이 분야의 개발은 포항 방사광 가속기 전원 공급 장치 개발 경험을 바탕으로 하여, 빠른 시간 응답 특성이 필요한 AC형 초전도 자석의 전원 공급 시스템과 초전도 자석의 Quench 발생시 초전도 자석을 보호하기 위한 회로를 채택한 10kA급의 모델 전원 공급 장치가 포항공과대학교와 (주)포스콘의 공동 연구로 개발·제작되어 Central Solenoid 모델 코일의 테스트에 적용하여 운영되고 있다.

### 3. KSTAR 부대 장치 개발 현황

KSTAR 장치는 토카막 주장치 이

외에도 플라즈마를 가열하기 위한 가열 장치들과 핵융합 플라즈마의 온도·밀도·전류 분포 등을 측정하고 플라즈마를 제어하기 위한 진단 장치들로 구성되는 부대 장치들이 개발·제작된다.

먼저 플라즈마 가열과 비유도성 전류 구동을 담당하게 될 시스템들은 중성 입자빔 입사형 가열 장치(Neutral Beam Injection:NBI), RF파를 이용하는 ICRH(Ion Cyclotron Resonance Heating)과 마이크로파를 이용하는 LHCD(Lower Hybrid Current Drive)로 구분할 수 있다.

이 중에서 이온 가열과 플라즈마 연료 공급을 담당하여 토카막 플라즈마의 주가열원으로 활용될 중성 입자빔 가열 장치 개발을 위한 설계와 이 장치의 주요 부분인 120kV, 65A급의 이온원 개발이 주관 연구 기관인 한국원자력연구소에서 수행되고 있다.

현재 3개의 빔라인으로 구성되는 8MW급 NBI 가열 장치의 설계가 진행되었으며, 이온원 시작품의 제작이 완료되어 시험에 착수하였다.

또 RF파 가열 장치인 ICRH 시스템은 이온 가열과 플라즈마 중심부 전류 구동을 위해 25~60MHz 주파수 대역에서 6MW급 가열 장치가 설계되고 있으며, 이 장치의 주요 부분인 안테나, 공명 루프 및 정합 회로 등의 개발이 수행되고 있다.

이와 함께 마이크로파 가열 장치인 LHCD 시스템은 플라즈마 외곽부 전

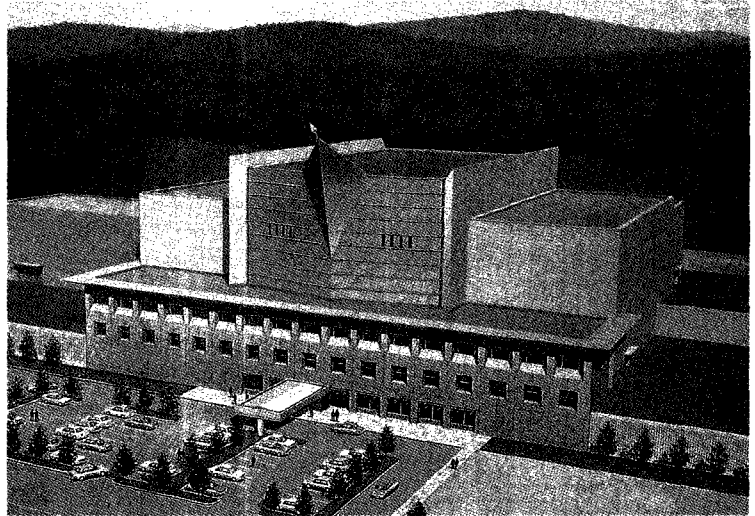
류 구동을 위해 3.7GHz 주파수 대역에서 1.5MW급 가열 장치가 설계중에 있으며, 이 장치 제작을 위해 필요한 부품의 개발에 착수하였다.

이러한 가열 장치와 함께 KSTAR 부대 장치를 구성하는 주요 시스템으로 진단 장치들이 있다.

여기에서는 전자기, 진공, 분광, 레이저 산란, 입자 산란 등 다양한 물리학 분야와 첨단 계측 기술들을 동원하는 다수의 장치를 개발·제작하여야 한다.

이러한 장치들은 KSTAR 토카막 장치의 운전과 제어 등 가장 기본적인 임무의 수행뿐만 아니라 장치의 성능을 평가하고 최적화하며 초고온 핵융합 플라즈마에서 일어나는 중요한 물리적 현상의 자료를 연구자에게 제공하는 수단으로써, 장치 제작 단계 이후 운영 단계에서도 단계별 실험 목표와 성능 향상 계획에 따라 지속적으로 개발과 제작이 진행되어야 할 시스템들이다.

KSTAR 진단 계통의 설계와 개발은 처음 운전에 착수할 때 필요한 기초 진단계, 본격적인 초고온 핵융합 플라즈마 실험에 사용될 기본 진단계, 정상 상태 운전 및 플라즈마 형상 제어에 필요한 고급 진단계로 분류하여 필요 우선 순위에 따라 설계가 단계적으로 진행되고 있으며, 이 장치 개발과 제작에 필요한 R&D도 병행하여 수행되고 있다.



(그림 3) 핵융합 특수 실험동 조감도

#### 4. 핵융합 특수 실험동 건설

선도 기술 개발 사업으로 수행되고 있는 KSTAR 핵융합 연구 장치 개발 사업과 함께 KSTAR 장치가 설치되고 장치 운영에 필요한 헬륨 액화 시설, 저전도 냉각수 시설 및 대용량 전원 공급 시설 등 특수 설비를 건설하는 것을 목적으로 하는 핵융합 특수 실험동 건설이 97년도에 착수되어 2001년까지 5개년간 총 695억원이 투입될 계획으로 수행중에 있다.

이 건설 사업은 핵융합 연구 개발 사업의 총괄 주관 기관인 기초과학연구원 연구소 부지 내에 30m 층고를 가지며 초고온 플라즈마 실험시 발생하는 고에너지 X-선 등 방사선 차폐를 위한 1.5m 두께의 콘크리트 외벽 구조의 핵융합 특수 실험동과 특수 설비동 및 전원동 등 3개 동으로 구성

되어 총6,860평 규모로 설계되었다.

향후 KSTAR 장치 가동시 세계적인 핵융합 연구의 중심지로서, 학계·연구계·산업계 연구진들이 공동 연구를 수행할 장소로 운영될 것이다.

이 핵융합 특수 실험동의 설계는 삼성물산(주)와 머릿돌 에이스 건축이 맡아 우리나라 전통 과학 기술의 상징인 거북선을 현대 감각에 맞춘 형상화로 21세기 한국의 과학 기술 능력을 상징하도록 구성되었다(그림 3).

핵융합 특수 실험동은 98년 8월 완성된 상세 설계를 기준으로 하여 국내 원자력 시설 건설의 경험이 있는 건설 업체들의 경쟁 입찰을 통하여 삼성물산(주)가 시공사로 선정되어, 98년 12월 23일 과학기술부 차



관과 과학기술계 인사 100여명이 참석한 가운데 기공식을 가지고 본격적인 건설에 착수하였다.

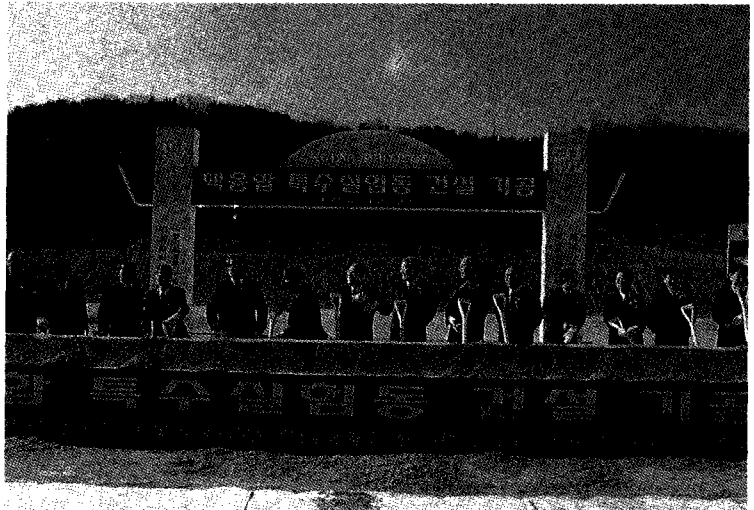
맺는말

KSTAR 프로젝트는 3년여에 걸친 제1단계 사업을 통하여 95년말 사업 착수 당시 계획되었던 목표들인 KSTAR 개념 설계, 주장치 기본 설계와 부대 장치 기본 설계 등의 프로젝트 주요 마일스톤들을 핵융합 연구와 장치 개발의 세계적 전문가단으로 구성된 검증평가위원회를 개최하여 성공리에 달성하였으며, 장치 제작을 위해 필수적으로 확보해야만 할 기술들의 확보를 위한 기반 기술 R&D를 차질 없이 수행하였다.

이 연구 개발의 결과들을 바탕으로 KSTAR 프로젝트는 실질적인 장치 제작과 최종 조립과 통합을 목표로 하는 제2단계 사업을 98년 9월에 착수하였다.

2002년 후반까지 지속될 사업 기간중 KSTAR 장치의 국내 개발과 제작을 위한 연구 개발 전략의 최적화와 국내 연구 개발 투자와 역량을 총집결하여 KSTAR 차세대 초전도 핵융합 연구 장치를 우리의 손으로 성공리에 건설하고자 한다.

뿐만 아니라, KSTAR 장치의 성공적인 건설과 정상 가동을 달성한 이후에도 당초 계획되고 설계된 장치 성능 목표를 달성하여 이 장치의 운



핵융합 특수 실험동 건설 기공(98. 12. 23). 국가 핵융합 연구 개발 사업은 KSTAR 장치로 명명된 차세대 토카막 장치의 개발·설치와 이 연구 장치의 운영을 통한 핵융합 연구와 기술의 확보, 나아가 세계적인 핵융합로 개발에 동등한 자격으로 참여 등을 중간 목표로 하는 3단계 계획으로 수립되어 있으며, 핵융합 발전기술의 상용화 시기까지 이 분야의 기술 선진국으로서의 위치 확립을 최종 목표로 하고 있다.

영을 통해 우리 나라도 세계 수준의 핵융합 연구를 수행할 수 있는 능력을 확보하고, 나아가 미국·일본·유럽연합·러시아 등 세계 핵융합 선진국과 동등한 수준의 연구 결과를 창출할 것으로 기대하고 있다.

또한 21세기 중반으로 예상되는 핵융합 발전의 상용화 시기가 도달하기 전에 우리 나라 독자의 기술로 핵융합로 건설을 달성할 수 있는 기술을 확보할 수 있으리라 본다.

이와 함께 KSTAR 장치의 개발과 장치 건설의 초기부터 국내 산업체의 참여가 활성화되어, 이 프로젝트를 통하여 대형 초전도 자석 기술, 초고진공 기술, 초고온 특수 소재 기술, 극저온 기술, 고전류 이온원 기술, 대출력 고주파 기술 등 21세기를 주도할 첨단 극한 기술들을 국내 산업체

에 체화하여 산업화 할 수 있는 기회가 마련될 것이다.

또한 이 프로젝트에 참여한 대학·연구소와 산업체 연구 개발 인력에 의해 우리 나라 기초 과학 연구의 발전에 필수적으로 요구되는 첨단 연구 장치들의 국내 개발·제작의 기반을 만드는 데도 크게 기여할 것으로 기대하고 있다.

이 글을 통하여 국가 핵융합 연구 개발 사업으로 추진되고 있는 KSTAR 장치 개발 사업의 배경과 현황이 얼마간 전달되었기를 바라며, 이 프로젝트에 참여하여 최선의 노력을 기울이고 있는 프로젝트 팀을 대신하여 KSTAR 프로젝트의 성공적인 목표 달성을 위하여 성원과 관심을 가져주시기를 부탁드립니다. 