

# 우리나라 핵융합기술개발의 전망

최 덕 인

기초과학지원연구소 소장



과학기술처는 꿈의 에너지라 불리는 핵융합기술을 오는 21세기 초까지 개발하기 위해 범국가적인 연구개발체제를 구축키로 하였다.

이에 따라 과학기술처 장관 자문기구인 중간진입전략자문위원회 핵융합소위(위원장 崔德隣 기초과학지원연구소 소장)는 「국가핵융합연구개발추진계획(안)」을 만들어 최근 마무리지었다.

과학기술처는 관계부처와 협의한 후 종합과학기술심의회 심의를 거쳐 금년중 이를 최종 확정·시행할 계획이다.

## 핵

융합이란 '21세기 꿈의 에너지'로 불리는 미래에너지의 중요한 원천기술로서, 수소의 동위원소로 만들어진 초고온 플라즈마의 핵융합반응을 이용하여 에너지를 창출하는 게 그 기본원리이다(태양에너지·수소폭탄의 원리 ⇒ 제어 핵융합에너지)(표 1)(그림 1).

핵융합에너지는 우리나라와 같은 자원빈국의 근본적인 미래에너지 대책으로서, 화석에너지 고갈문제와 폐기물·지구온난화 등 환경문제를 유발치 않는 깨끗하고 안전하면서도 고밀도·대용량인 무한한 에너지원이라

고 할 수 있다(표 2).

핵융합연구는 21세기 국가 과학기술 세계화 달성을 위한 선도과제로서, 미래 에너지자원의 개발을 위한 투자일 뿐만 아니라, 우리나라의 첨단과학과 기초연구 수준을 세계화하고, 그 수행과정에서 극한기술과 첨단 신기술의 선진화와 이를 통한 국내 생산기술의 혁신을 달성하기 위해 국가적 추진이 필요한 주요연구개발 과제이다.

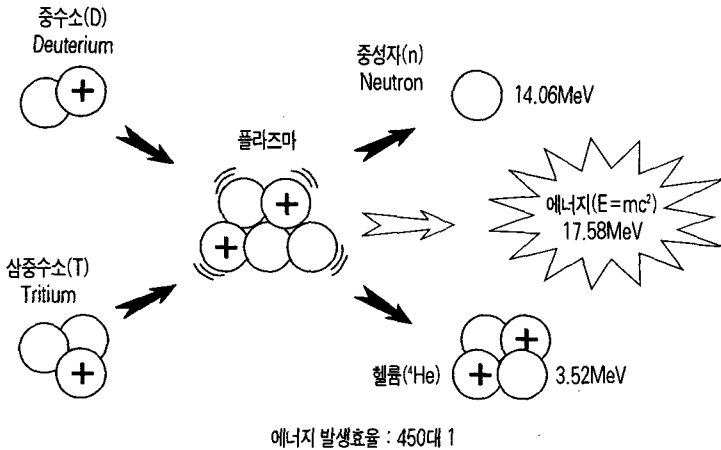
이를테면 핵융합 연구과정에서 선진국의 거대 초전도자석 기술, 대형 초고진공 기술, 초고온 특수소재 기

술, 대출력 고주파 가열 기술 등 첨단 극한기술을 산업기술화 할 수 있는 기회로 활용할 수 있는 것이다(그림 2).

우리가 추진할 핵융합연구는 현재 가장 세계화된 대형 국제공동연구과제인 「국제열핵융합실험로(ITER)」 계획에 주도적 동반자로서 참여가 가능한, 국가적 Star Project로 추진될 수 있는 연구개발과제이다.

### 핵융합연구개발사업의 목표

선진국은 장기간에 걸친 집중적 연구결과, 현재 과학적 타당성 입증 및



(그림 1) 핵융합반응

(표 1) 핵융합반응 경로

$D(\text{중수소}) + T(\text{삼중수소}) \Rightarrow {}^4\text{He}(\text{헬륨4}) + n(\text{중성자}) + \text{에너지}(17.6\text{MeV})$ 4천5백만도
$D(\text{중수소}) + {}^3\text{He}(\text{헬륨3}) \Rightarrow {}^4\text{He}(\text{헬륨4}) + p(\text{양성자}) + \text{에너지}(18.3\text{MeV})$ 2억2천만도

(표 2) 핵융합에너지 자원

DT 핵융합 연료 1그램 $\approx$ 6,000리터 석유 $\approx$ 300그램 우라늄(U)
바닷물 1,000리터에는 중수소 30그램이 함유되어 있어 무한정한 에너지 부존자원이 존재함
핵융합반응중 방사능발생은 핵분열의 0.04% 수준

실용화를 위한 실험로 건설단계에도 달해 있다.

미국 프린스턴대학 플라즈마물리연구소(PPPL)의 「토카막 실험로(TFTR)」 장치는 3억도 초고온 플라즈마에서 10메가와트 핵융합에너지 창출에 성공한 바 있으며, 일본 및 유럽연합에서는 초전도기술을 이용, 차세대 핵융합장치 개발에 적극 투자를

시작하였다(일본 국립핵융합과학연구소의 「LHD」 장치개발사업 등).

또한 중국도 제 9차 5개년 계획중 중요 과학기술 프로젝트로 초전도 토카막 핵융합장치인 「HT-7U」 건설을 2001년 완공 목표로 추진하고

있다. 현재 국제원자력기구(IAEA) 주관 하에 「국제열핵융합실험로(ITER)」 건설계획이 2010년 완공을 목표로 추진중인데, 미국·일본·유럽연합·러시아 등 선진 4개국 공동으로 개념설계를 완료하고 공학적 설계단계(EDA)에 돌입하여, 금년중 중간보고서가 발간될 예정이다(운영시 정상상

태로 100만킬로와트 핵융합에너지 창출을 목표로 하고 있음).

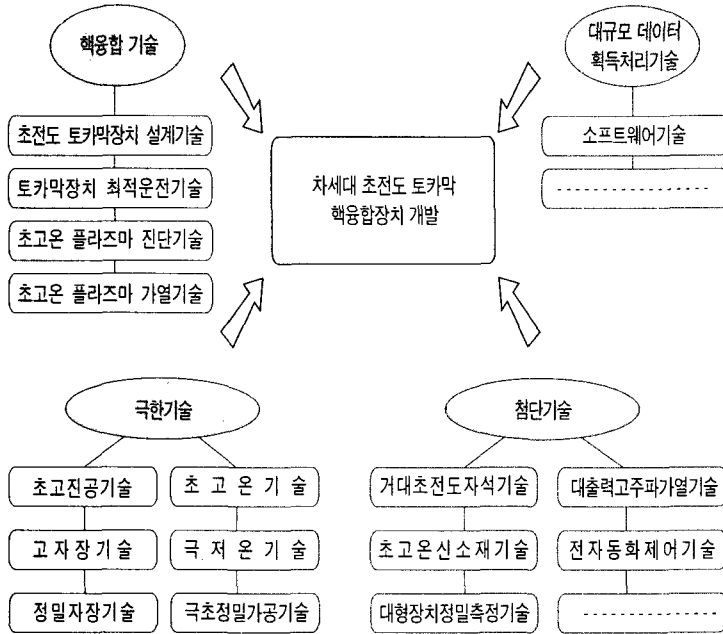
그 동안 우리의 핵융합기술 수준은 투자재원 및 기술인력 확보 등의 어려움으로 초보적 단계였으나, 학계의 지속적인 노력의 결과로 연구기반을 확보하여 세계수준으로 진입할 기회를 맞이하고 있다.

세계적 핵융합연구개발 여건으로 비추어 볼 때, 2001~2010년 사이에 세계수준의 「차세대 초전도 토카막 핵융합장치」를 개발하여 운영한다면, 세계 핵융합연구의 본류에 직접 진입할 수 있는 절대적인 기회를 잡을 수 있다(그림 3).

80년대 중반에 개발된 세계 4대 토카막형 핵융합장치(TFTR, JET, JT-60U, DIII-D)들이 21세기 초에는 장치의 수명이 끝나고, 국제협력에 의하여 건설이 추진중인 「ITER」 장치의 가동이 2010년으로 순연됨에 따라, 우리나라가 중간집입전략을 활용하여 세계 핵융합연구개발계획의 본류에 직접 진입할 수 있는 기회가 생긴 것이다.

따라서 세계 핵융합 연구개발에 주도적으로 참여하기 위해서는 「ITER」 장치 가동시까지 세계 4대 장치 운영수준의 국내 연구능력 보유가 필수적이다(일본의 JT-60 개발예와 같은 Quantum Jump 필요).

이에 우리는 핵융합연구개발에 본격적으로 착수, 최단기간내에 세계수준에 도달하여, 21세기초 「국제열핵



(그림 2) 핵융합연구 수행과 파생효과

융합실험로(ITER) 장치 가동시까지 대형 국제공동연구에 동등한 자격으로 참여할 수 있는 연구기반을 확보하여야 한다.

「ITER」 장치의 운영시까지 국제수준의 기술기반을 확보하지 못할 경우, 국제적 핵융합협력 개발기반이 상실될 뿐만 아니라 기술중속의 우려가 크다.

95년 6월 15일자로 미국 백악관 Gibbons 과학고문이 클린턴 대통령에게 보고한 「대통령과학기술자문위원회(PCAST)」의 미국 핵융합연구개발정책 보고서 「Executive Summary」에 따르면, 「ITER」 계획의 성

공적 추진을 위해서 현재 참여중인 4대 선진국 외에도 한국·중국·인도 등을 포함하는 참여국의 확대추진을 추천하고 있다.

### 범국가적 핵융합 연구개발 추진전략

핵융합연구는 과학기술 선진국에서도 범국가적 연구개발체제를 구축하여 추진하고 있다.

필요한 연구분야의 다양함과 소요 연구개발 투자 및 필요 연구인력 규모 등으로 인하여, 미국도 「토카막 핵융합실험로(TPX) 국가개발위원회(National Council)」를 구성하고 추

진하고 있으며, 일본은 범국가적 대학 공동 연구기구인 「국립핵융합과학연구소(NIFS)」를 발족하여 핵융합연구 개발사업을 추진중이다.

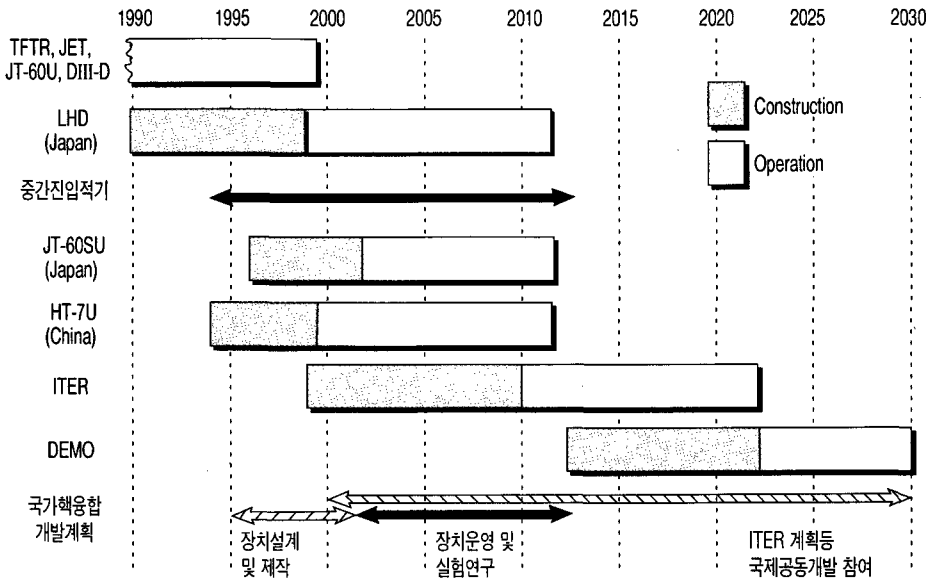
우리도 연구개발인력의 다수가 소속된 대학, 국가연구개발사업의 주체인 출연연구기관, 장치의 제작·건설을 실질적으로 담당할 산업체들로 범국가적 핵융합연구개발체제로 구축하여, 실질적인 학·연·산 공동연구 형태로 각 참가주체별 역할분담방안을 도출하여 추진하여야 할 것이다.

국가핵융합연구개발사업은 중간진입전략을 활용하여, 21세기 초까지 세계 4대 선진국 기술수준에 직접 진입함을 목표로 추진한다.

핵융합에너지 개발은 기초연구단계를 거쳐 실용화단계에 이르기까지 장기간의 연구개발투자가 지속되어야 한다.

실용화단계에 이르러서는 각 국가단위의 연구개발사업과 함께 다수의 국가들이 참여하는 국제공동협력에 의해 추진되어야 할 과제임을 인식하고, 현재 국내에서 수행중인 핵융합연구의 목표를 상향조정하여 국가핵융합연구개발사업의 중장기계획을 확립하여 추진하여야 한다.

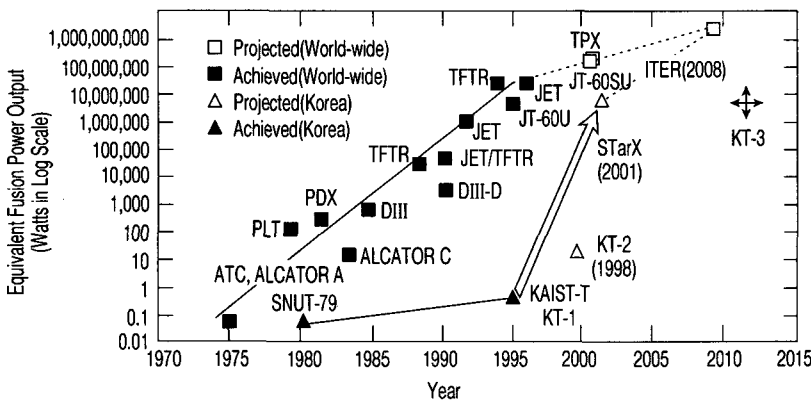
국가핵융합연구개발의 추진은 「ITER」 장치 운영시까지 현재 운영 중인 세계의 4대 핵융합 연구장치(TFTR, JET, JT-60U, DIII-D) 수준도달과, 또한 정상상태(Steady-state) 운전이 가능한 「차세대 초전도



〈그림 3〉 국제 핵융합에너지개발계획 연표

행중이거나 추진 중인 국내 핵융합 연구개발 관련과제를 전반적으로 조정하여, 상향조정된 국가핵융합 연구개발목표에 부합되도록 추진해야 할 것이다.

국내 핵융합연구개발에 투자되는 재원은 국가핵융합 연구개발계획에 따라 관리되는 일원화하고, 도출된 계획의 목적에 맞추어 추진



주 : 제인된 STaR-X와 KT-3 장치는 동급의 차세대 초전도 토카막 핵융합장치

〈그림 4〉 핵융합기술 중간진입 개념도

및 집행한다.

이러한 전략에 따라 국내 핵융합 기술수준의 21세기초 세계 선진수준 진입이라는 국가적 목표달성을 위해, 현재 확보된 학계 및 연구계의 기반기술과 국내 산업계의 중공업기술을 바탕으로 범국가적 추진체제를 확립, 중형 토카막 개념설계 등 국내에서 수행된 연구결과를 발전·적용하여 상향 조정된 국가핵융합연구개발목표에 맞추어 KT-2 장치 건설단계를 거치지 않고, 세계 수준의 「차세대 초전도 토카막 핵융합장치」 개발사업에 직접 진입을 추진토록 하여야 한다(그림 5).

토카막 핵융합장치」의 국내개발을 목표로 한다.

핵융합연구개발의 효율적 추진을

위해 구성될 국가핵융합연구개발 추진체제의 역할은, 새로이 추진될 핵융합연구개발사업 뿐만 아니라 현재 수

### 2. 연구개발 추진체제

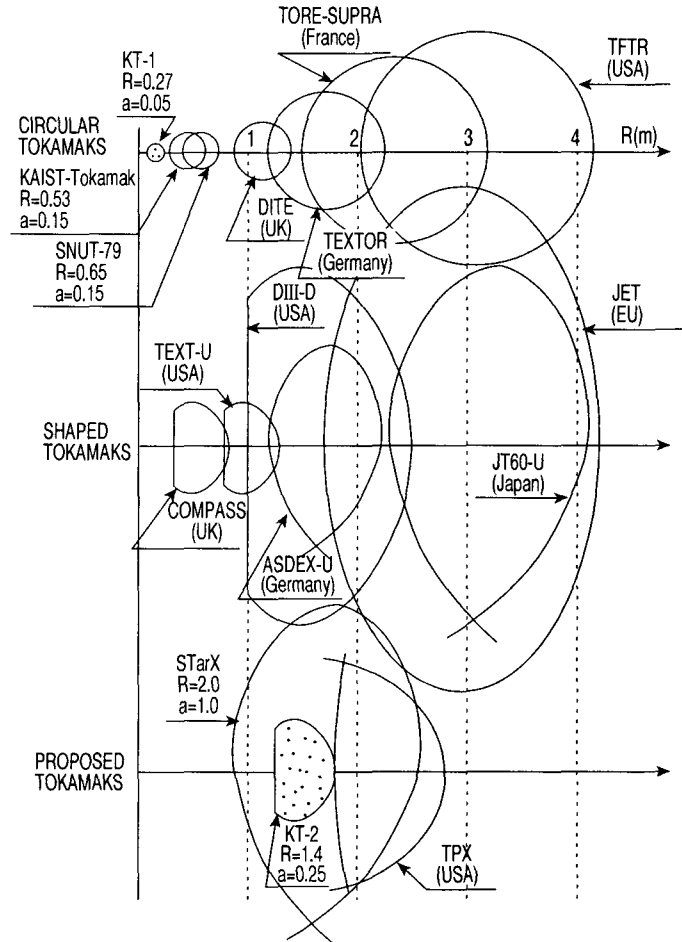
핵융합연구개발 추진체제는, 본 계획의 수립 이전부터 관련기관별로 수행되어 오던 핵융합 관련 연구개발 실적과 경험을 범국가적 차원에서 결집하여 확립된 국가연구개발목표를 공동목표로 설정하여 체계적으로 추진하여야 할 것이다.

추진체제는 범국가적 연구개발사업의 기획·관리 역할을 담당할 「핵융합연구개발위원회(가칭)」, 국내의 전문가로 구성된 연구개발사업의 주요 추진사항을 자문·검증하는 「핵융합연구자문위원회(가칭)」, 연구개발사업의 주계약자로 선정될 주관기관내에 연구개발사업의 추진체 역할을 담당할 「핵융합연구개발사업단(가칭)」을 설치하여 구성하며, 이하 학·연·산 각 기관별로 체제를 구성한다.

전체 추진체제는 <그림 6>과 같다.

### 3. 참여기관별 역할분담

국내 핵융합연구가 실질적으로 시작된 70년대말부터 서울대학교·한국과학기술원 등 관련대학들과 한국원자력연구소·기초과학지원연구소 등 정부출연 연구기관들에서 수행되어온 연구성과 및 축적된 경험과 기 확보된 시설들을 토대로 하고, 국가핵융합연구개발 목표를 가장 효율적으로 달성하기 위한 각 관련기관별 역할분담방안을 수립하여, 범국가적인 연구개발사업을 체계적으로 추진한다(그림 6).

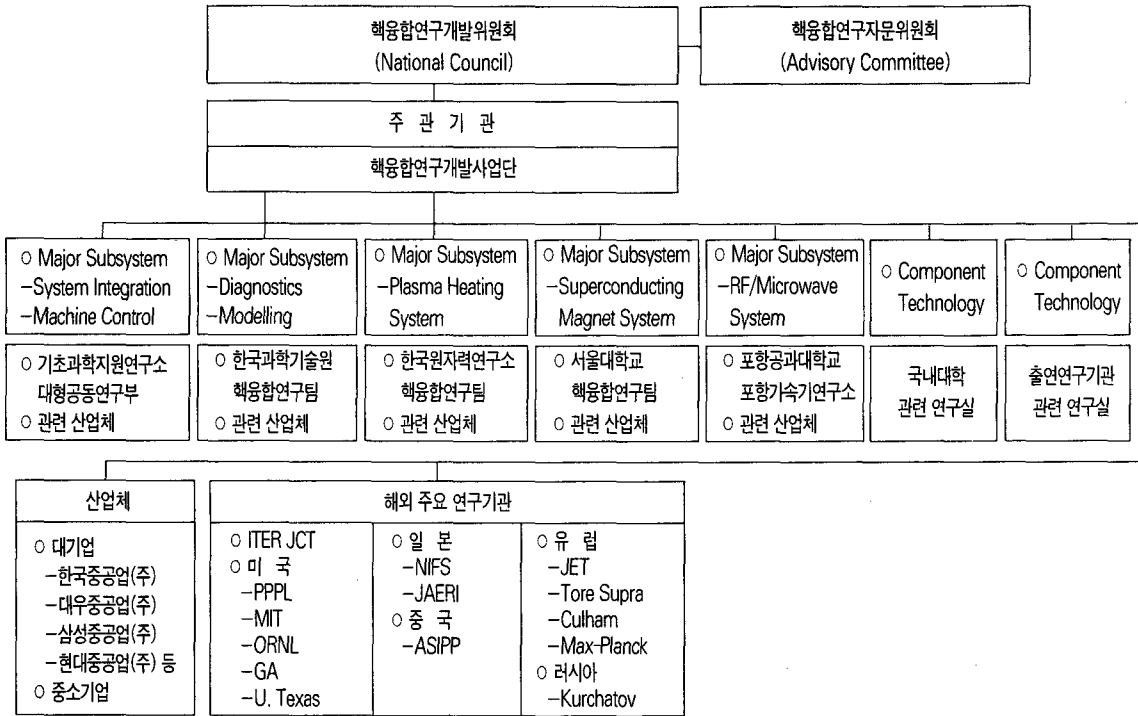


(그림 5) 국내외 토카막 핵융합연구장치 규모비교

가. 기초과학지원연구소에서 수행해 온 「한빛」 대형 플라즈마 연구시설을 통한 플라즈마 진단 및 고주파 가열 등 핵융합 기초연구의 결과와 Star Project로 추진하여 개념설계단계에 진입한 「STarX」 장치 관련 연구경험을 발전적으로 적용하고, 대형장치 운영을 위해 기획보된 연구기반 특수설비

와 관련시설을 STarX급인 「차세대 초전도 토카막 핵융합장치」의 범국가적 공동개발사업에 활용토록 추진한다.

나. 한국원자력연구소에서 수행해 온 「KT-2」 중형 토카막 장치 개념설계 경험과 진단기술 개발 등 연구결과를 발전·적용시켜, 상호조정된 국가핵융합연구 목표에 맞추어 중형 토카



주 : 구체적인 역할분담은 기술검토를 거쳐 추후 핵융합연구개발위원회에서 확정

(그림 6) 핵융합연구개발 추진 체제 및 역할분담(안)

막인 KT-2 건설단계를 거치지 않고, 다음 단계로 추진예정이던 KT-3급인 「차세대 초전도 토카막 핵융합장치」의 범국가적 공동개발사업에 활용토록 추진한다.

다. 서울대학교와 한국과학기술원을 위시한 국내대학에서 장기간 수행해 온 토카막장치 운영경험과 축적된 기초기술을 활용하여 국가핵융합연구개발사업 추진에 필수적인 연구인력 양성에 기여토록 추진한다.

라. 한국과학기술연구원·한국표준과학연구원과 한국기계연구원을 위시한 정부출연 연구기관에 축적된 소재·재료기술, 극한기술, 장치기술 등 기반기술들을 국가핵융합연구개발사업의 성공적 목표달성에 활용토록 추진한다.

마. 개발대상 주요부분(Major Subsystem)의 R&D는 주요관련 연구기관과 본 장치의 제작·건설을 실질적으로 담당할 국내 산업체가 개발

팀을 구성하여 핵융합연구개발사업단의 관리하에 수행한다.

#### 4. 대외협력

핵융합연구개발의 경험과 기술이 축적된 선진연구기관과의 실질적인 국제공동협력을 위해, 기관별 협력대상기술을 선정하여 중간진입전략에 의한 효율적인 사업수행이 필요하다.

가. 선진연구기관과 공동연구추진

- 미국 「프린스턴 플라즈마물리연구소(PPPL)」, MIT 대학 플라즈마연구소와 기초과학지원연구소 간의 공동연구협정 기체결
- 일본 「국립핵융합과학연구소」, 독일 「막스-플랑크연구소」 등과의 공동연구협력협정 체결추진
- 「국제열핵융합실험로(ITER)」 중앙연구소(JCT)와의 공동협력 추진

나. 핵융합학회 개최와 전문가 자문 핵융합 연구분야의 세계적인 석학과 저명과학자 다수가 참여하는 핵융합학회의 국내개최 및 국내의 전문가들에 의한 기술적 국제자문·검증을 진행한다.

우리나라는 금년 6월 대덕에서 개최된 「국제첨단핵융합학회」에 참석하였고, 추후 자문위원회에 참여의사를 밝힌 세계적 석학들을 확보하였다.

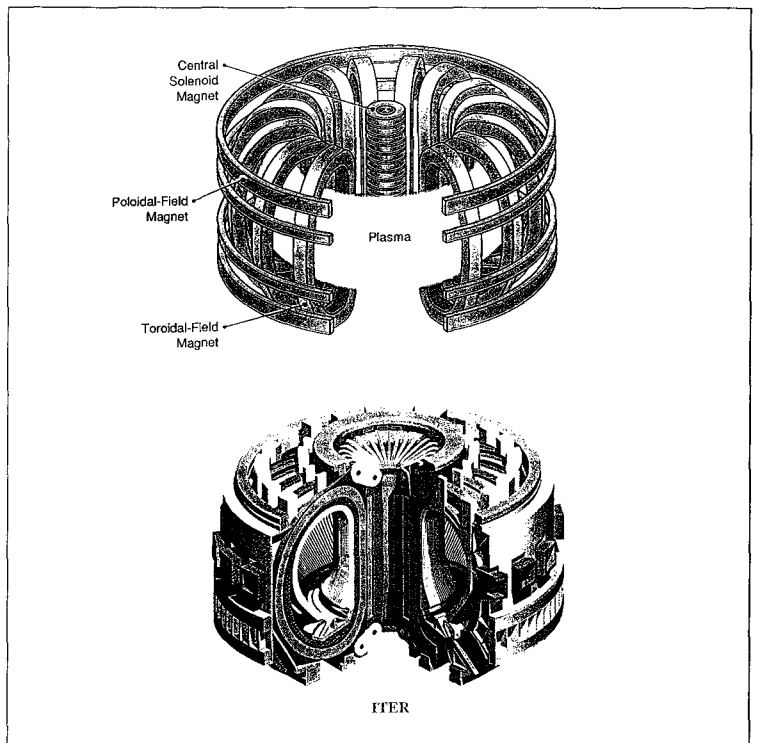
다음은 그들의 인적사항이다.

- E. Velikov 원사(ITER 평의회 의장, 쿠르차토프연구소 소장 겸 러시아과학아카데미 부총재, 고르바초프 옛소련 대통령의 과학고문)
- B. Coppi 교수(미국 MIT 대학 교수, 핵융합연구분야의 최정상급 석학)
- A. Iiyoshi 교수(일본 국립핵융합과학연구소 소장)
- Y. Huo 교수(중국 과학원 플라즈마물리연구소 소장)
- D. Meade 박사(미국 프린스턴 플라즈마물리연구소 부소장)

〈표 3〉 토카막장치 설계·건설 소요 사업비

(단위 : 백만원)

사 업 내 용	95년도	96년도	97년도	98년도	99년도	2000년도	2001년도
국가 핵융합 연구개발사업 (차세대 초전도 토카막장치개발)	2,500	5,500	16,000	20,000	24,000	26,000	26,000



〈그림 7〉 차세대 초전도 토카막 핵융합장치

- F. Wagner 교수(독일 막스-플라크연구소 플라즈마물리연구소 부소장) 등이다.
- 차세대 컴팩트형 초전도 토카막 핵융합연구장치(주반경 R=1.6~2미터, 부반경 a=0.7~1미터, 자장강도 B=3~5테슬라, 전류 I=2~5MA 급) 〈그림 7〉.

**국가 핵융합연구개발사업의 범위**

1. 연구개발 대상장치

2. 연구개발 사업기간

- 제1단계(1995~1997년) : 장치 설계 및 기반기술 R&D
- 제2단계(1997~2001년) : 장치 건설(세계 3대 침단장치 수준)
- 장치운영단계(2002~2010년) : 토카막 핵융합장치 최적운전 기술, 전류구동 및 가열기술과 진단·제어기술의 세계수준 달성

### 3. 연구개발 투자규모

- 제1·2단계 연구개발비 : 총 1,200억원(총 7개년간, 95년 불변가격 기준)
- 장치 설계·건설단계 연도별 소요 사업비<표 3>

장치 총 연구개발비와 연도별 소요 연구개발사업비는 개념설계과정에서 확정할 예정이며, 장치운영단계에서 소요될 연구개발비 규모는 대형장치 운영경험으로 비추어 보아 장치건설비의 연 10% 수준으로 예상된다.

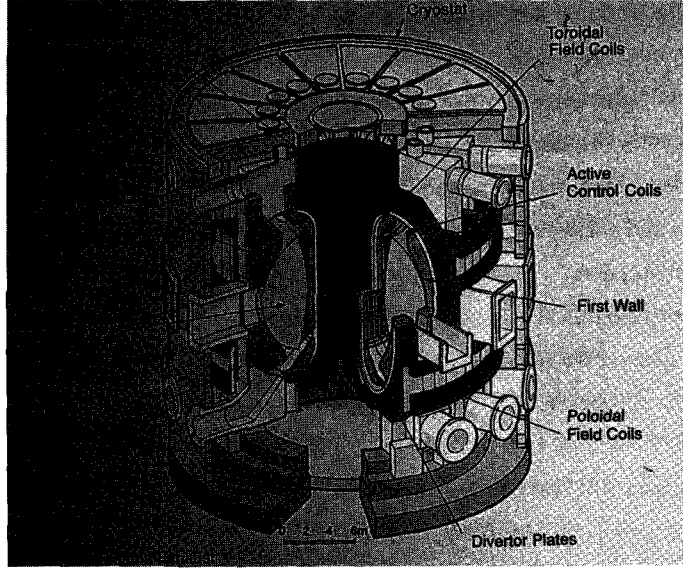
### 중간진입전략에 의한 기술개발

#### 1. 차세대 초전도 토카막장치

가. 차세대 초전도 토카막장치 설계 기술

- 대상기관 : 미국 프린스턴플라즈마물리연구소(PPPL), MIT 대학 플라즈마연구소(PFC), 중국 과학원 플라즈마물리연구소(ASIPP), ITER 중앙연구소(JCT) 등

나. 토카막 핵융합장치 최적운전기



ITER 구조도

술 및 진단·제어기술

- 대상기관 : 미국 프린스턴 플라즈마물리연구소(PPPL), General Atomics사, 텍사스주립대학, 유럽연합의 JET 연구소, 러시아 Kurchatov 연구소

다. 대출력 고주파 응용 플라즈마 가열기술

- 대상기관 : 미국 오크리지국립연구소(ORNL), 유럽연합의 JET 연구소, 일본 국립핵융합과학연구소(NIFS) 등

#### 2. 침단 극한기술 산업화

가. 거대 초전도 자석기술

- 국내 관련 연구기관 및 산업체
  - 한국전기연구소, 한국기계연구원, 한전 전력연구원 등
  - 한국중공업(주), 대우중공업

(주), 현대중공업(주), 현대정공(주), 삼성중공업(주) 등

○ 해외협력 대상기관 및 산업체

- 미국 MIT대학 고자장연구소, Argonne 국립연구소, Oak Ridge 국립연구소, General Dynamics사, Westinghouse사 등

- 일본 국립핵융합과학연구소(NIFS), 일본원자력연구소(JAERI), Hitachi사, Toshiba사, Mitsubishi사, Sumitomo사 등

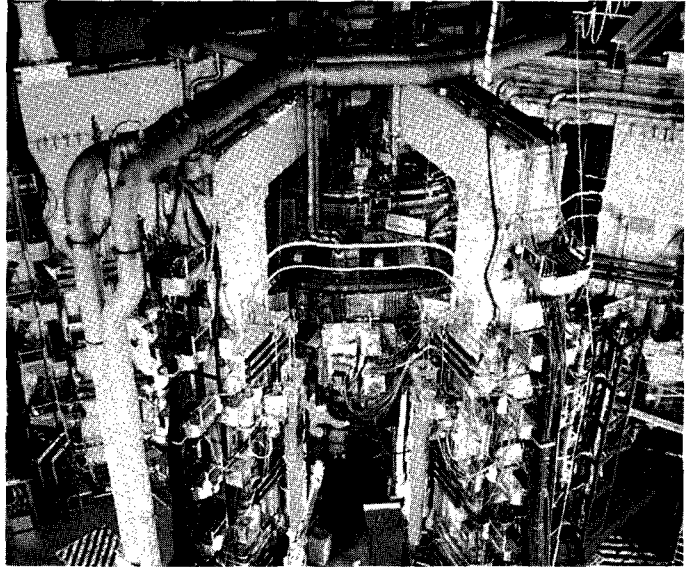
- 유럽연합 Max-Planck 소속 IPP, ABB사, Oxford사 등

- ITER 중앙연구소(일본 Naka 소재)

○ 혜택대상분야



- 초전도 자기부상열차, 초전도 에너지 저장장치(SMES), 초전도 발전기, MHD 발전기술, 초전도 추진선박 등
- 나. 대형 초고진공 기술 및 초고온 특수소재 기술
  - 국내 관련 연구기관 및 산업체
    - 한국표준과학연구원, 한국과학기술원, 한국기계연구원 등
    - 포스콘(주), 삼성전자(주), 수산중공업(주) 등
  - 해외협력 대상기관 및 산업체
    - 미국 프린스턴 플라즈마물리연구소(PPPL)
    - 일본의 국립핵융합과학연구소(NIFS), Hitachi사, Mitsubishi사, Toshiba사 등
    - 유럽연합 Plansee사, VG사, Balzers사, Oxford사 등
    - ITER 중앙연구소(Garching 소재)
  - 혜택대상분야
    - 반도체 제조장비 생산분야, 진공 재료분야, 초고온 극한 재료분야
  - 관련 연구개발과제
    - 차세대 반도체 개발과제, 차세대 평판 표시기 개발과제 등
- 다. 대출력 고주파 발전기술
  - 국내 관련 연구기관 및 산업체
    - 포항가속기연구소, 한국방송공사 등
  - 해외협력 대상기관 및 산업체
    - 미국 Varian사, Continental



EU에서 운영중인 JET(Joint European Torus) 토카막

- 사 등
- 일본 Mitsubishi사, Toshiba사 등
- 유럽연합 Thomson사, ABB사 등
- 혜택대상분야
  - 방송·통신기술, 고주파 응용가열·건조기술, 레이더 등 방위산업기술
- 라. 진단기술·계측제어 및 대규모 데이터 처리기술
  - 국내 관련 연구기관 및 산업체
    - 시스템공학연구소, 한국전자통신연구소 등
    - 삼성전자(주), 현대전자(주), LG전자(주), 한국통신, 데이콤(주), 포스콘(주)
  - 해외협력 대상기관 및 산업체

- 미국 로렌스리버모어국립연구소, 슈퍼컴퓨터연구소, MIT대
- ITER 중앙연구소(미국 San Diego 소재)

### 3. 국내 관련학계와의 연계확대

- 한국물리학회(플라즈마물리학분과)
- 한국가속기 및 플라즈마연구협회
- 한국진공학회(플라즈마응용분과)
- 한국원자력학회
- 한국전기학회(고전압·방전분야)
- 한국금속공학회
- 한국전자공학회 등

이 글은 12월 8일 열린 제74차 원자력계 월례기술회의에서 발표한 것이다.