

# 일본의 핵융합 에너지 개발현황

岸本 浩

일본원자력연구소 나카핵융합연구시설  
핵융합플라즈마연구부 부장

## 핵

융합 에너지는 그 연료의 공급이 거의 무한정하며 손쉽게 획득할 수 있고 환경친화적이어서, 경제성 있는 에너지원으로서의 충분한 잠재력을 갖고 있다.

세계 인구의 증가, 산업화의 진전, 그에 따른 환경 파괴 및 현재 사용중인 재래식 연료의 이용 가능성 및 안정적 확보 등에 대한 우려로 인하여 핵융합 에너지의 개발 필요성이 대두되어 왔다.

그러나 핵융합 에너지가 실현 가능한 에너지원이 되기 위해서는 이에 대한 일반 대중의 지지가 확보되어야 하며, 장기적인 개발 노력이 요구된다.

일본에서의 핵융합 연구는 50년대에 시작되었다.

그후 제1단계 핵융합 연구 개발 기본 프로그램이 76년도에 수립되었으며, 연구의 중점은 toroidal confine-

ment system에 주어졌다.

일본원자력연구소(JAERI)는 JFT-2와 JFT-2a 토카막을 건설하였으며, 이 설비를 이용하여 기본 프로그램 단계의 토카막 연구를 수행하였다.

이 두 토카막에서의 성공적인 연구가 수행된 후, 원자력위원회는 75년에 핵융합 에너지 개발을 국책 과제로 정하는 제2단계 핵융합 기초 프로그램을 수립하였다.

JT-60은 제2단계 기초 프로그램의 핵심 프로젝트로 개발되었다.

JT-60의 건설·운영 및 연구를 통해서 JAERI와 원자력 산업계는 많은 경험을 축적할 수 있었다.

제3단계 기초 프로그램은 이러한 성과의 토대에서 92년도부터 추진되고 있다.

이 프로그램의 주목적은 시범 원자로 개발에 필요한 원자로 기술 기반의 구축과 장기 연소(long burn)의

실현 및 자체 점화 조건(self-ignition condition)을 달성하는 데 있다.

ITER(International Thermonuclear Experimental Reactor)의 개발을 위해 일본·유럽연합·미국 및 러시아 등에 의한 국제적인 노력이 진행중에 있다.

## 토카막 핵융합 실험로의 개발

일본은 핵융합 에너지의 개발을 위해 단계적인 노력을 경주하고 있다.

단계의 수와 각 단계별 임무는 과학 기술적 타당성과 연속되는 단계를 위한 토대의 형성 및 상용화에 대한 경제적 타당성의 관점에서 정해진다.

현재까지 미래의 핵융합 개발을 위한 3단계의 접근 방법이 적절한 것으로 평가되고 있다.

〈표 1〉 핵융합 개발을 위한 제3단계 기초 프로그램(92. 6. 9. 원자력위원회)

1. 실험 토카막 원자로	· 자체 점화(Q~20) · 장기 연소(T≥1,000S)
2. 핵융합 플라즈마 연구	· 실험 토카막 · 비 토카막(Helical, Inertia)
3. 원자로 기술	· 실험로 연구 개발(SC Magnet 등) · 장기 연구 개발(Material 등)
4. 안전	
5. 동력회 개념 개발	

각 단계는 다음과 같다.

① 1단계 : 점화 조건 및 장기 연소의 달성, 그리고 시범 원자로 개발에 필요한 원자로 기술 기반의 구축

② 2단계 : 정상 상태(steady state)의 핵융합로 플라즈마의 실현 및 발전소 수준에서의 전력 생산 시연

③ 3단계 : 발전소로서의 경제성 타당성 시연

일본은 현재 제3단계 기초 핵융합 프로그램을 추진중에 있다.

이 단계의 주목표는 Q-20의 자체 점화 조건의 달성과 1,000초 이상의 연소 시간을 갖는 장기 연소의 실현에 있다.

제3단계 기초 프로그램의 목표를 달성하는 데 있어서 토카막 핵융합 실험로가 중심적인 역할을 수행할 것으로 기대되고 있다.

현재 ITER이 제3단계 핵융합 프로그램에서 구상되고 있는 실험로의 임무를 만족시킬 수 있을 것으로 평가하고 있다.

92년에 시작된 ITER에 대한 공학적 설계 활동이 진행중에 있으며, 98년경에는 완료될 것이다.

설계 작업은 샌디에이고(미국)·나가(일본) 및 가르칭(유럽연합) 등 3개의 장소에서 Joint Central Team

에 의해서 수행되고 있으며, 4개 참여팀의 Home Team이 지원하고 있다.

공학적 연구 개발은 각각의 Home Team에 의해서 수행되어 왔다.

물리 연구 개발은 4개 참여팀의 자발적인 노력에 의해서 추구되어 왔다.

ITER의 건설·운영·이용 및 폐

로 등에 대한 연구는 최근에 시작되었다.

**핵융합 플라즈마 연구**

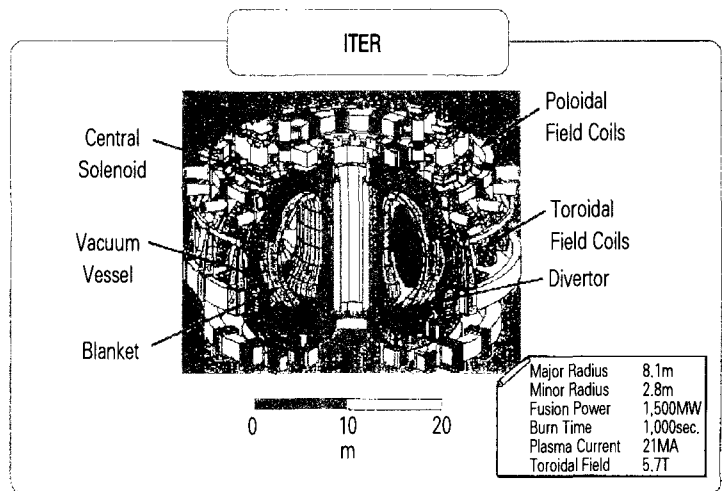
JT-60은 제2단계 기초 핵융합 프로그램의 핵심 프로젝트였다.

이 프로젝트의 초기 목표는 87년에 달성되었다.

현재의 JT-60 프로그램의 주요 목표는 ITER의 물리 연구 개발에 기여하는 것이고, SSTTR과 같은 정상 상태 동력로의 개발을 위한 과학적 기반을 다지는 것이다.

JT-60의 플라즈마 활동은 high-β<sub>p</sub> H-mode 및 reversed magnetic shear mode 등을 개발함으로써 현저하게 증진되었다.

High-β<sub>p</sub> H-mode discharges에서 이온 온도는 45keV에 도달하였으며,



〈그림 1〉 ITER 구조

triple fusion product가  $1.53 \times 10E21keV \cdot s \cdot m^{-3}$ 까지 상승하였다.

그리고 reversed shear discharges에서 confinement time은  $Q_{dt} \sim 0.83$ 의 1초 이상을 달성하였다.

실험로 개발에 추가하여, 제3단계 기초 프로그램에서는 개량형 토카막과 helical devices, reversed field pinch, mirror, compact torus, inertia confinement 등과 같은 비토카막 devices에 대한 핵융합 플라즈마의 개발에도 많은 노력이 집중되었다.

JAERI는 개량형 토카막의 한 형태가 될 것으로 생각하고 있는 JT-60의 super upgrade에 관한 설계 연구를 수행하고 있다.

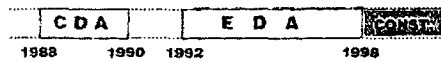
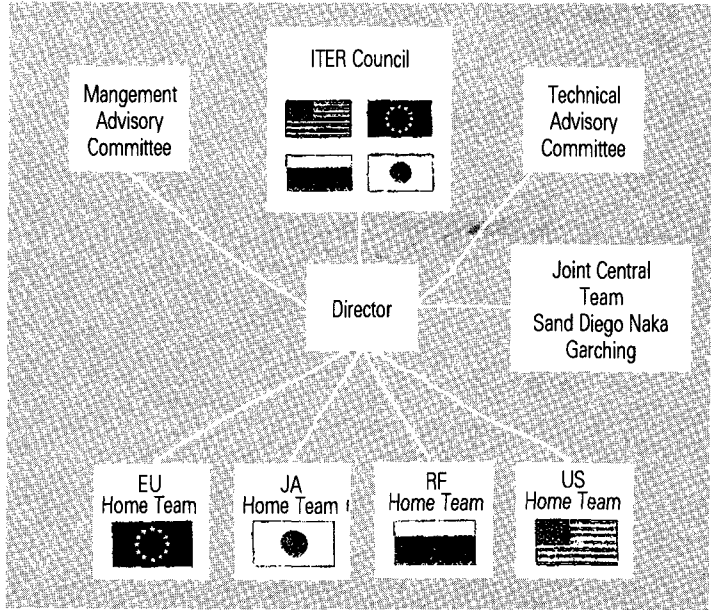
또한 large helical device가 국립 핵융합연구원(NIFS National Institute of Fusion Science)에 건설중에 있다.

오사카 대학은 GEKKO-Ⅱ에 대한 레이저 핵융합 연구를 수행중에 있다.

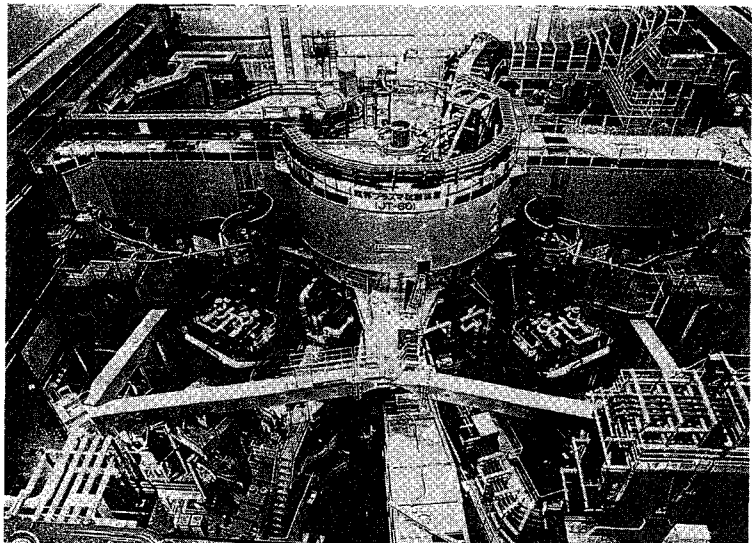
### 원자로 기술 개발

ITER과 같은 핵융합 실험로를 위해서는 주요 구성품의 광범위한 개발과 개선된 성능이 요구되어진다.

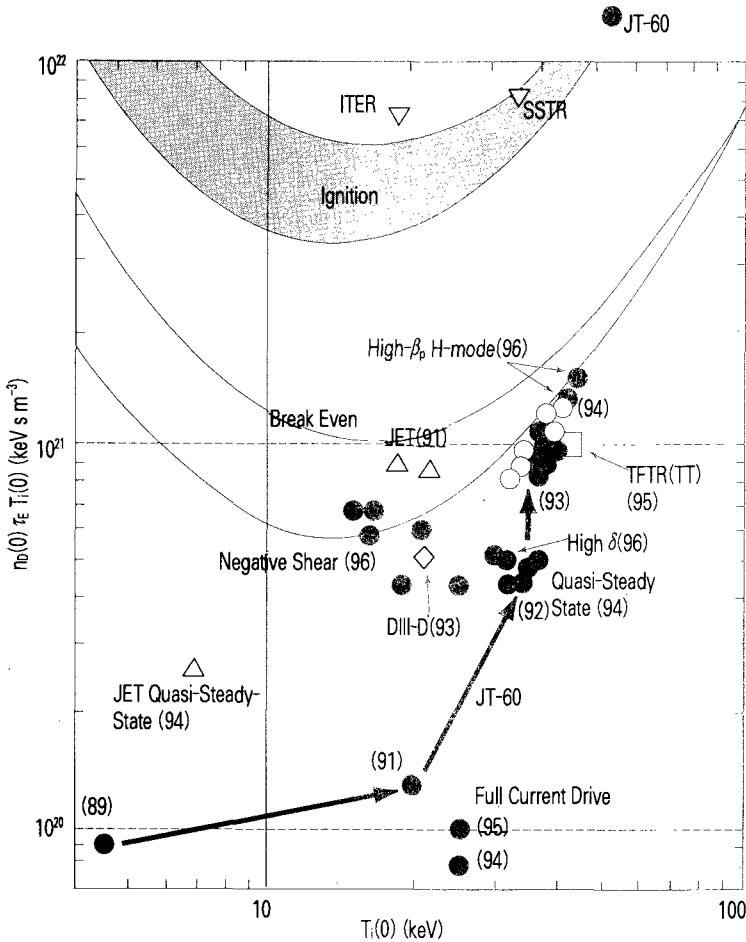
현재 심도있는 연구 개발이 진행중인 기술적 문제는 다음과 같다.



(그림 2) ITER EDA를 위한 조직



(그림 3) JAERI의 JT-60 토카막



〈그림 6〉 토카막 플라즈마 활동의 진행

- ① 대규모의 고자기장 초전도 코일
- ② 원격 정비 기술 및 원격 조작을 위한 원자로 구조
- ③ 높은 열부하에 견딜 수 있고 열 제거 능력이 우수한 플라즈마 관련 구성품
- ④ 고출력 및 장파(long pulse) 가열 및 전류 구동 기기(NB, RF)

- ⑤ 3중수소 증식 및 취급 기술
  - ⑥ 블랭킷 기술 등
- 그외에도 핵융합 에너지의 활용에 필수적인 원자로 기술에 대한 장기적인 연구 개발이 수행되어야 한다.
- 가장 대표적인 연구 주제 중의 하나는 소재의 개발이다.

핵융합 에너지가 안전하고 환경적으로 매력적이고 경제성 있는 에너지원이 되기 위해서는, 방사선 조사에 견딜 수 있는 소재의 개발이 필수적이다.

그 소재는 고중성자속, 높은 온도, 높은 1차 및 2차 응력, 과도 전자기 부하 및 플라즈마에 관련된 수소 환경(hydrogen environment)에 견딜 수 있어야 한다.

핵융합 소재 개발에 대한 일본의 기본 전략은 페라이트강 개발을 출발점으로 하고, 마나뎀 합금을 제1세대 개량형 소재로 하며, 세라믹 합성물(SiC)과 중간 금속 혼합물(TiAl)을 제2세대 개량형 소재로 하는 3개의 범주로 구분된 기초 연구를 장려하는 것이다.

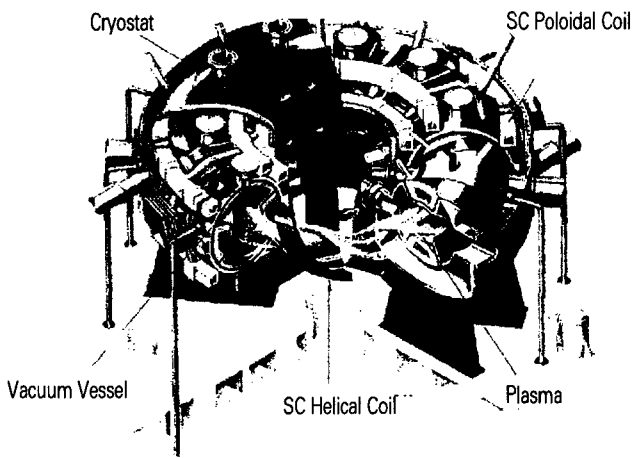
이러한 핵융합 소재에 대한 국가적인 차원에서의 평가는 2000년경에 수행될 것으로 기대되고 있다.

JAERI는 실제 규모의 페라이트강 블랭킷을 갖춘 플라즈마 소재 시험을 위해서 가까운 시일내에 JFT-2M을 개조할 계획을 갖고 있다.

고중성자 조사 시험은 핵융합 소재를 선정하고 평가하는 데 반드시 필요하다.

IEA는 IFMIF(International Fusion Material Irradiation Facilities)를 위한 국제적인 설계팀을 조직하였다.

IFMIF 프로젝트는 현재 개념 설계 단계에 있는데, 일본·미국·유럽



〈그림 5〉 국립핵융합연구원의 Large Helical Device

마 정상 상태 연소가 필수적으로 요구된다.

왜냐하면 핵융합 에너지에 의한 전력은 기저 부하로 활용되어야 하기 때문이다.

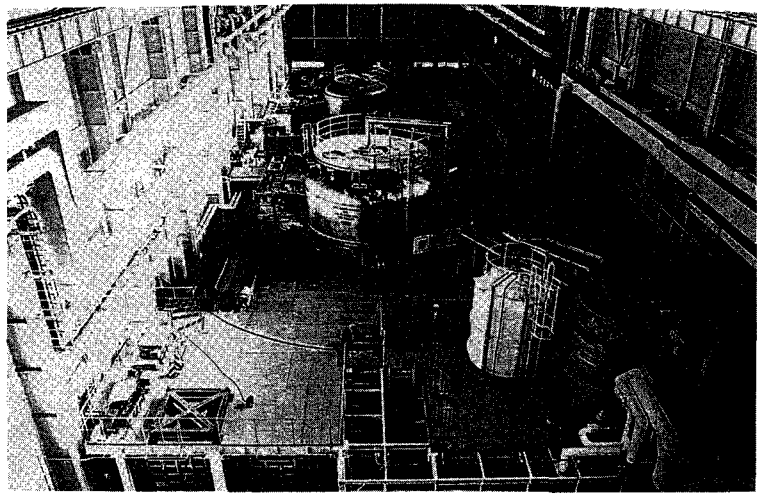
핵융합 발전소가 타당성을 갖기 위해서는 발전소 효율을 높이기 위한 계통의 재순환 전력의 감축이 필수적으로 요구된다.

토카막 원자로의 high bootstrap current operation은 발전소 효율을 개선하고 전류 구동을 위한 전력을 감소시키는 데 실질적인 이득을 갖고 있다.

JT-60에서 80%의 플라즈마 전류를 초과하는 high bootstrap 전류 분율을 갖는 방출이 실현되었다.

이 실험에 기초하여 일본에서는 89년에 정상 상태 토카막 핵융합 원자로 SSRT의 새롭고 실질적인 개념이 개발되었다.

SSRT의 추가적인 개선이 플라즈마 물리 및 공학 측면, 특히 비용 효과를 개선하기 위한 블랭킷 소재 선정 및 성능 증진 분야에서 이루어졌다.



〈그림 6〉 ITER 모델 코일 시험 설비

등이 참여하고 있다.

**핵융합 발전소 개념 개발**

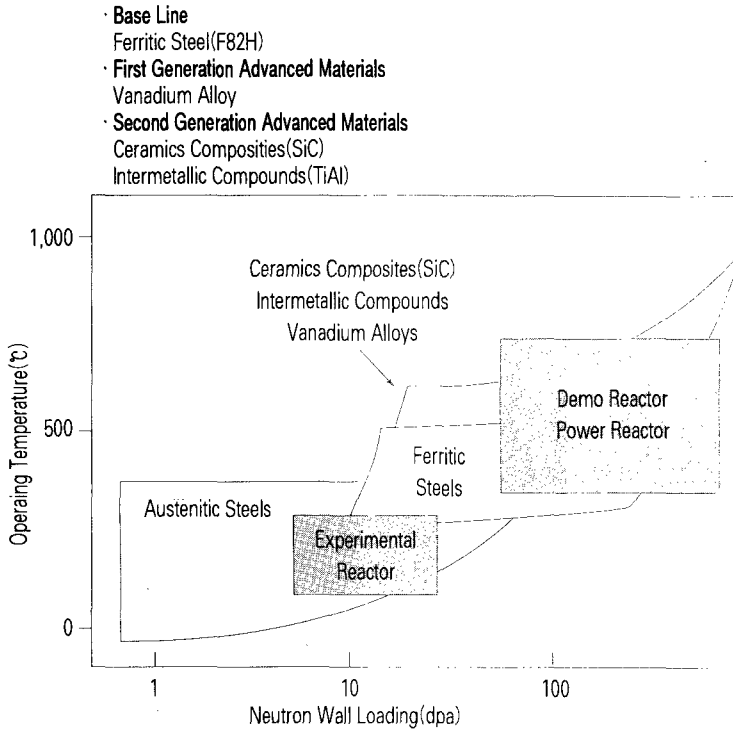
핵융합 발전소 계통의 개념 개발과

설계 연구는 제3단계 핵융합 프로그램을 실질적으로 구현하는 데 있어서 필수적인 중요성을 갖는다.

핵융합 발전소를 건설할 수 있기 위해서는 토카막 핵융합로의 플라즈

**산업계의 참여**

제1단계 기초 핵융합 프로그램이 시작된 이후, 핵융합 분야에 대한 산업계의 참여가 권장되었으며, 이들 산업계의 참여로 연구계와 산업계 공히 많은 이득을 볼 수 있었다.



왜냐하면 일본의 높은 산업 기술이 핵융합 개발에 집중될 수 있었으며, 핵융합 연구를 통한 새로운 기술이 민간 산업계에 효과적으로 전수되었기 때문이다.

예를 들면, JT-60을 위해서 개발된 고정밀 변류기, 고전압 SCR 계통, 고전류 단속기 등과 같은 전력 제어 기기가 일반 전력 계통에 광범위하게 활용되었다.

또한 빔 주입 및 표면 처리 기술은 반도체 산업에 많은 영향을 미쳤다.

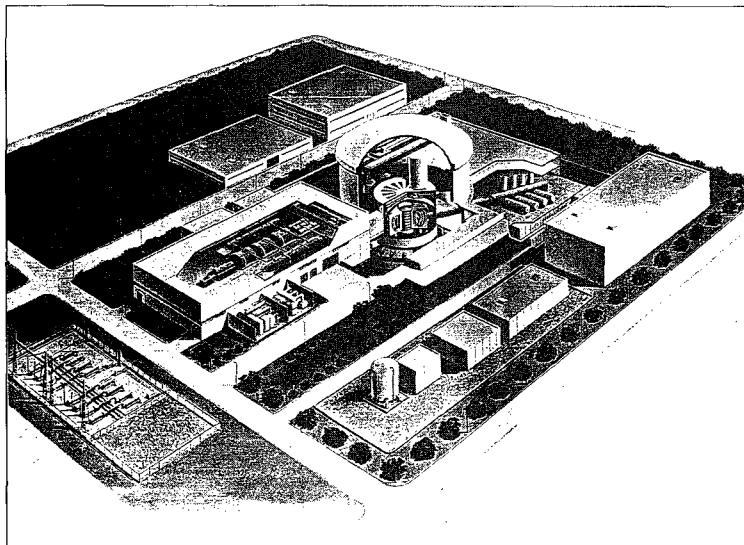
건설 당시 JT-60은 패키지 형태의 많은 subsystem으로 각기 다른 산업계에 분할 발주되었다.

각각의 산업계는 JAERI와의 계약에 명시된 대로 subsystem의 건설 공기, 품질 보증 및 성능에 대해 책임을 졌다.

JAERI는 이들 산업계를 감독하였으며, 건설 공정의 조정을 맡은 회사가 JAERI를 지원하였다.

JAERI와 산업계와의 이러한 협력 관계는 JT-60의 시운전 단계 및 건설에서 운영·정비로의 전환 단계에서 많은 도움이 되었다.

이러한 성공적인 경험에 입각하여 제3단계 기초 핵융합 프로그램에서도 산업계 참여를 국가 정책으로 명시하고 있다. ❀



(그림 10) 핵융합 발전소 SSTR