

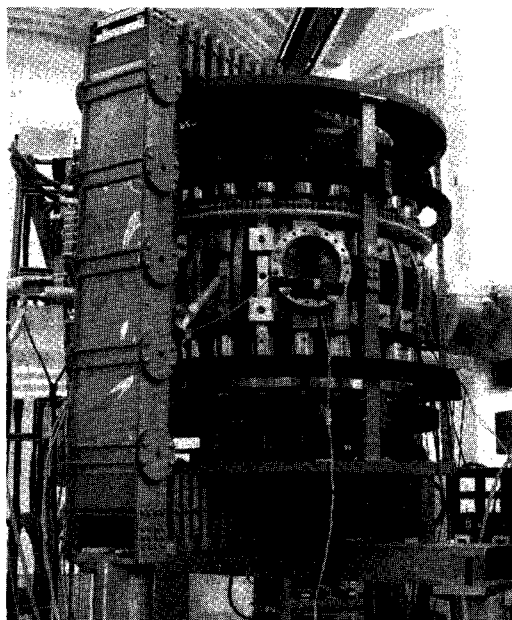
핵융합 연구현황, 原研 KT-2中型토키막계획

KT-2토키막, 次世代中型급 先驅者格될 듯

선진국 1인평생소요에너지 D 10그램, T 15그램 정도
(海水500 l) (리튬30그램)

金 聖 奎

한국원자력연구소 핵융합개발대과제 책임연구원



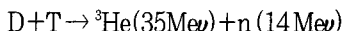
한국原子力연구소가 보유하고 있는 Tokamak. 우리나라는 98년에 中型토키막 KT-2가 완성되고 이어서 초전도 Tokamak 건설에 들어간다.

토키막核融合연구, 과학연구에서 공학적실용성 입증단계로 핵융합과정에서 中性子에너지熱化抽出, 電氣로 변환

I. 핵융합, 플라즈마, 그리고 열핵융합

핵융합(nuclear fusion)반응은 원자력 발전의 원리인 핵분열(nuclear fission)과는 반대로, 수소나 중수소(D), 혹은 삼중수소(T) 등 가벼운 원자핵이 큰 에너지(10 kev이상)로 충돌

하였다할 때 때때로 이들이 서로 융합하여 헬륨 등 무거운 원자핵으로 변하게 되는데, 이러한 "핵융합"반응과정에서 발생하는 질량결손에너지를 이용하는 것이다.



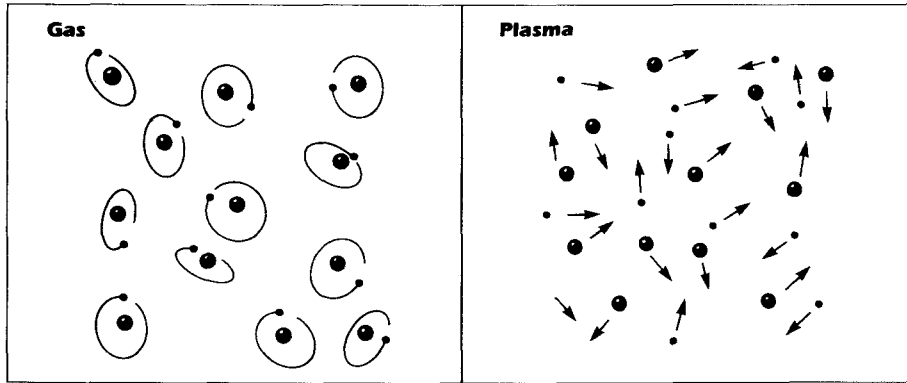
이 에너지는 반응부산물인 헬륨이

온(혹은 알파입자) 등 무거운(?) 핵과 중성자의 운동에너지(각각 3.5 MeV 및 14 MeV)로 나타나는데, 핵융합발전에서는 이 중에서 중성자의 운동에너지를 열화(熱化)하여 추출, 전기로 변환하게 된다.

알파입자의 운동에너지는 앞으로 설명하겠지만 이 핵융합반응이 지속 되게끔 고에너지상태를 유지하는데

핵융합연구현황, 原研KT-2중형토카막계획

그림 1 : 보통기체와 plasma상태의 비교



사용된다.

이 핵융합반응은 부산물이 방사성을 띠지 않으며, 연료인 중수소는 바닷물속에 충분히 존재한다.

삼중수소는 핵융합로의 구성요소인 블랭킷(blanket)에서 14Mev 중성자와 리튬과의 핵반응에 의하여 만들어지므로, 실제로 소모되는 자원은 중수소와 리튬이라 할 수 있다.

리튬은 가장 가벼운 금속원소로서 지표층에서 흔하게 발견되며, 현재의 전세계 전기수요 총량을 핵융합으로 충당한다고 할 경우에도 지금 알려진 리튬매장량 만으로도 최소한 1000년 이상 공급이 가능하다.

평가에 의하면 현재 선진국의 1인이 평생 필요한 전기에너지 수요는 바닷물 500리터(중수 10그램)과 리튬 30그램(삼중수소 15그램)이면 충분하다고 한다.

이러한 핵융합을 이용한 발전기술 개발이 핵분열의 경우처럼 빠른 시간 내에 해결할 수 있으리라는 기대하에 미국과 소련에 의해 비밀리에 조직적인 연구를 시작한지 근 반세기, 60년대 이후 공개적으로 추진된지는 30년이라는 세월이 흘렀다. 그럼에도 핵융합발전의 상업화를 포함한 완전한 실용화를 위해서는 비교적 낙관적인 전망하에서도 20~30년 가량이 아직 더 필요한 상태이다.

이렇게 핵융합이 핵분열보다 실용화에 늦어지는 이유는 무엇보다도 열중성자에 의해 반응이 매개되는 핵분열과는 달리 핵융합은 고에너지 하전입자 혹은 초고온(1억도 이상) 플라즈마상태하에서 반응이 일어난다는 사실이다. 따라서 핵융합연구는 플라즈마라는 물질상태에 대한 연구와 밀접하게 관련된다.

플라즈마란 기체의 온도가 매우 높아져서 입자간의 충돌로 기체원자가

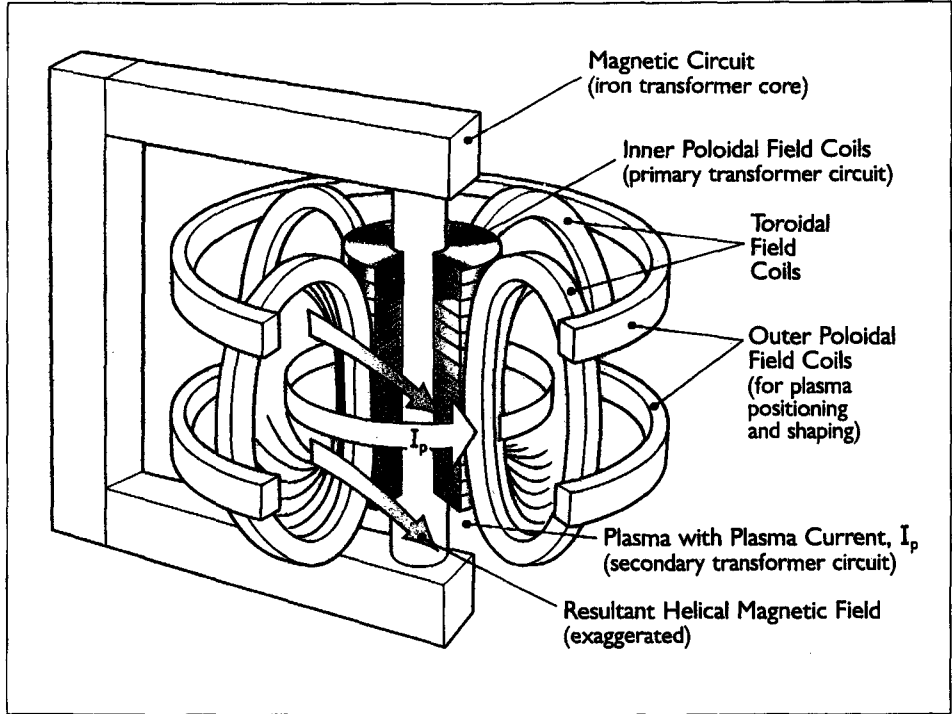
완전히 이온화되어 전자가 떨어져나오고 원자핵이 노출되어 이온과 전자로 이루어져 있으며 1만~10만도 이상의 온도를 나타내는 초고온기체를 말한다.

따라서 구성입자가 전하를 띠기 때문에 외부/내부의 미약한 전자장에도 민감하게 집단적으로 반응하여 때로는 스스로 불안정해져서 난류 등의 양태를 나타내는 까다로운 물성을 갖는다(그림 1 참조).

핵융합이 이러한 까다로운 플라즈마상태를 다루어야만 하는 이유는 다음과 같다.

가령 핵융합반응이 발견되었던 방식을 그대로 적용, 가속기를 사용하여 10keV의 고에너지 입자를 비싸게 얻은뒤 이들을 표적에 대고 쏘아서 한번의 충돌과정에 사용하고 버리게 되는 것은 너무 비효율적임이 자명하다. 더군다나 핵융합은 반응단면적이 작아, 충돌반응마다 핵융합이 일어날 확률

그림 2 : 「토카막」플라즈마 가동장치 개요도



도 적다.

따라서, 가속기를 사용하지 않고도 입자를 이러한 고에너지에 해당하는 초고온상태 (10keV=1억도)를 만들어서 이 열운동에너지에 의한 구성입자들간의 충돌을 통해 자발적-무작위적으로 일어나는 핵융합반응을 이용하는, 다시 말하면 가속기에서와 같은 방향성(directional) 운동에너지에 의한 핵융합이 아닌 무방향성 열운동에너지를 이용한 소위 熱핵융합 반응(thermonuclear reaction)과 같은 일종의 “고에너지입자의 재활용전력”을 활용하면, 에너지 사용효율이 훨씬 높을 것이다.

즉 플라즈마상태에서는 열운동에 의한 충돌에서 핵융합반응을 일으키지 못한 고에너지 입자는 없어지는 것이 아니라 열운동을 계속하며 플라즈마 내에 남아있으므로, 이번에 (핵융합이 일어나는) 충돌을 못했으면 다음에 다른 이온과의 충돌과정을 기대할 수 있으며, 다음 충돌에도 안되면 그 다음에, 이러한 방식으로 이온이 플라즈마내에 남아있는 한 계속 활용될 수 있는 것이다.

따라서, 핵융합과 초고온 플라즈마는 서로 떼어서 생각할 수 없는 밀접한 관계를 갖게되며, 에너지연구와 관련해서는 핵융합과 열핵융합은 통상

적으로 동의어이다.

이러한 플라즈마에서는 입자운동이 장거리 전자기력(electromagnetic force)에 의해 총체적으로 아주 민감하고도 복잡하게 얽혀 있어서, 플라즈마의 집단적인 불안정화-난류화(亂流化) 및 이에 의한 빠른 확산을 통해 입자들의 열에너지가 손실된다.

즉 핵분열반응과는 달리 핵융합에서는 플라즈마를 발생시켜 고온상태로 가열한 뒤 충분한 핵융합이 일어날 때 까지 필요한 시간동안 암전히 가두어서 필요한 밀도를 유지하는 것이 매우 어려워지는데, 핵융합연구의 초기

에는 이 어려움을 과소평가 하였던 것이다.

바로 이것이 핵융합이 핵분열과 달리 시간이 오래 걸리게 된 이유라 할 수 있다. 최근 진단기술의 발달로 "토카막"이라는 핵융합장치내의 플라즈마의 수송을 측정 한 결과, 전자-이온 등 플라즈마입자들의 열에너지 손실률은 이론치¹⁾보다 10~100배 더 큰 것으로 나타나고 있다.

핵융합용 토카막 플라즈마에서의 이러한 이상수송(異常輸送, anomalous transport) 현상은 지금도 완전히 이해되고 입증된 해결책이 존재하는 상태는 아니다²⁾.

II. 토카막의 개념 및 동작원리.

위험을 무릅쓰고 아주 간단히 요약하자면, 토카막은 일종의 변압기(transformer)이다.

보통의 변압기와 다른점은 2차회로가 철심을 둘러싼 도우넛형 용기내에 일주전압(loop voltage)이라 불리는 2차전압에 의해 발생-유지되는 플라

즈마속을 흐르는 플라즈마 전류로 이루어진다는 것이다(그림 2).

여기서 도우넛의 반경을 주반경(major radius, R_0), 도우넛단면의 반경을 부반경(minor radius, a)이라 부른다.

이제 1차회로에 직류 펄스전원을 사용하여 전류를 흘리면, 2차회로인 플라즈마 내부 및 주위에는 플라즈마 전류와 동시에 「폴로이달」자장(B_p)이 발생하여 핀치(pinch)현상이 생긴다.

이는 기본적으로 자장의 압력으로 플라즈마 압력을 눌러서 플라즈마의 확산손실을 막는 것이다. 토카막에서의 플라즈마 전류는 핀치작용에 의한 이러한 가둠(confinement)효과 외에도, 플라즈마 저항에 의해 전기에너지가 플라즈마 열에너지로 전환되는, 즉 오옴가열(ohmic heating, OH) 효과도 아울러 거둔다.

그러나 이러한 핀치형태의 장치는 킵크, 소시지 등의 이름을 가진 여러 가지 MHD불안정성에 지극히 취약하여 이들에 의해 플라즈마와 그 열에너지가 급격히 손실됨이 일찍부터 문제가 되어왔다.

그림 3 : Tokamak核融合발전소 개요도(54면에 게재)

이제 이러한 기본열개에 더하여 「토리스」형 진공 용기내에 강력한 「토로이달」자장(B_t)을 외부적으로 미리 만들어 준 상태에서 플라즈마 전류를 발생시키면, 이것이 바로 "토카막"이다.

토카막 플라즈마는 이러한 외부 토로이달 자장과 자체발생된 폴로이달 자장의 합인 특유의 나선형(helical)의 자장하에 있게 된다. 이 나선형자장은 킵크 등 불안정성을 위상혼합(phase mixing)과 흡사한 효과로 감쇄-소멸시킴으로써 획기적으로 MHD안정성을 개선한다. 따라서 안정한 상태에서 플라즈마 전류를 증강시키어 가둠효과(밀도, 온도)와 가열효과(온도)를 획기적으로 향상시킬 수 있게 되는 것이다.

60년대 후반 각국이 다양한 플라즈마장치를 시험하고 있을 때, 소련의 T-3토카막에서 그 당시로는 획기적인 300만도(300eV)의 플라즈마 전자온도를 달성하여 IAEA에 보고하

1) 이온은 소위 신고전수송이론(neoclassical transport theory)에 의한 계산치와 비슷하지만, 전자의 경우는 100배 가량 이론치보다 크다. 난류(turbulence)에 의한 수송효과를 포함한 최근의 이상수송이론(anomalous transport theory)은 측정치와 비슷한 수치를 주지만, 난류의 원인이 되는 플라즈마 불안정성의 종류에 따라 그 양상이 다르다. 대개 정전적(electrostatic)불안정성이 주원인이 되는 것으로 의견이 모아지고 있다.

2) J. Hugill, "Transport in tokamaks—a review of experiments", *Nuclear Fusion* 23, p. 311(1983), B. B. Kadomtsev, : "Status of Fusion 1990:Tokamaks", *Nuclear Fusion* 30, 1675(1990)(review article)

핵융합연구현황, 原研KT-2중형토카막계획

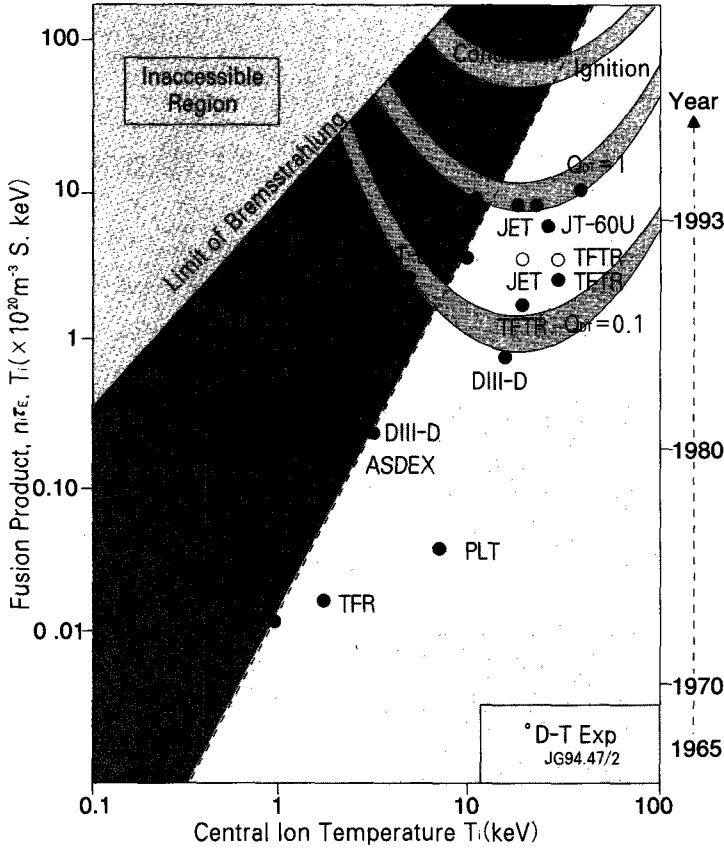


그림 4 : 핵융합 3중계수의 발달사. 1964~1993(JET자료)

였고, 이를 믿을 수 없었던 서방에서는 그당시 첨단인 「토크스」산란장치를 T-3에 이전설치하여 직접 확인하여 본 바 실지로 이보다 오히려 훨씬 더 높은 1000만도(1 keV)를 달성하고 있음에 경악, 우여곡절 끝에 70년도 가 시작되면서는 모든 선진 핵융합연구국가들이 주력장치를 토카막으로 바꾸게 된다.

이때 미국에서는 운영중이던 스텔라레이터(stellarator)를 바로 STO

카막으로 개조하였으며, 이를 계승발전시킨 PLT토카막은 뛰어난 업적으로 70년대 중반이후 그 당대 토카막들의 典範이 된 바 있다.

이후 핵융합연구의 모든 이정표적(里程碑的) 성과가 모두 T-3, PLT, JET등 토카막에서 달성되었으며 꾸준한 발전이 있어왔음은 앞서 약속한 바와 같다.

이와는 상대적으로 자기거울(magnetic mirror)방식은 80년대 중반

미국 국립 Lawrence Livermore 연구소의 초대형 MFTF-B장치를 완공후 시운전조차 취소된 이래 핵융합 장치로서는 포기되었으며, 기타 stellarator, RFP 등의 방식도 보조적 연구장치로만 소규모로 운영되고 있다.

이외에도 고에너지의 레이저나 입자빔을 이용한 소위 관성핵융합(inertial fusion)도 중요한데, 주로 핵실험금지예 따라 초고압상태에서의 핵반응 연구를 위한 장치로 쓰여오다가, 최근에 와서는 비밀공개가 이루어지고, 민간용 핵융합발전을 위한 연구를 시작하는 등 중요한 변화를 보이고 있다.

이 관성핵융합에서는 D-T연료 미립자에 입사하여 플라즈마를 발생시키고 가열-압축하는 소위 내폭(implosion)의 구동장치(driver)인 레이저, 중이온빔 등의 기술개발이 관건이며, 최근에는 레이저나 입자빔을 이용한 홀라움방식의 간접구동방식이 유리한 것으로 논의되고 있다.

Ⅲ. 토카막 핵융합연구의 발전 및 현황.

이제 플라즈마를 이용한 이러한 열핵융합반응을 위해서는 한마디로 우선 고에너지(즉 높은온도) 입자가 충분히 많아야 하며(높은밀도) 이들이

표 1 : 핵융합 발전과정의 정량적 표현

$\text{핵융합지표 } Q = \frac{\text{방출되는 핵 융합 에너지}}{\text{플라즈마의 가열 및 유지를 위해 투입되는 에너지}}$
= 1 : 과학적 분기점 (scientific breakeven) 10 : 공학적 분기점 (engineering breakeven) ∞ : 가열에너지 필요없음 (분모=0) 점화 (ignition)

오랫동안 망실되지않고 오래 돌아다녀(긴 가둠시간) 서로 반응할 기회를 자주 가져야 할 것임을 쉽게 짐작할 수 있다.

핵융합의 발전과정을 정량적으로 표현하기 위한 지표로 Q라는 양(표1)과 "핵융합 3중계수(fusion triple product)" (=플라즈마의 밀도×온도×가둠시간)라 불리는 수치를 정의하여 쓰고 있다.

핵융합로의 종국적인 목표는 한번 가동시키면 연료만 주입하면 별도의 에너지 투입없이도 핵융합에너지를 지속적으로 창출하는 (즉 표1의 Q의 정의식에서 분모가 0이 되는) "점화로(ignition reactor)"라 할것인데(그림 3 참조), 이는 Q가 무한대(∞)인 상태를 말한다.

핵융합에서 이러한 점화상태가 가

능한 것이, 핵융합반응에서 생겨나는 3.5 Mev 알파입자를 온도가 10 keV 인 플라즈마내에 잘 잡아두고 감속시켜 그 운동에너지를 플라즈마 전체의 열에너지화하면, 이에 의한 가열효과(소위 말하는 알파가열 효과)만으로도 충분하므로 추가적인 외부가열이 필요없게 되기 때문이다.

이제 핵융합연구란 한마디로 Q식의 분모(투입에너지)를 줄여나가고 분자(방출되는 핵융합에너지)를 키워가는 일일것이다.

"점화(ignition)" 상태를 향한 첫 관문이 되는 과학적 임계점(Q=1)을 위해서는 앞서 설명한 핵융합 3중계수가 $10^{21} \text{m}^3 \cdot \text{sec} \cdot \text{kev}$ 이상이어야 한다.

둘째관문이라 할 $Q > 10$ 인 공학적 임계점(engineering breakeven)은 비록 플라즈마 가열을 위해 가동에너지가 어느정도 투입은 되지만, 핵융합에너지를 이보다 충분히 더 많이 창출하므로 이를 감안하고도 송전이 가능한 전기를 생산할 수 있는 상태를 지칭하며, 과학적 분기점보다 10배 정도 더 큰 $10^{22} \text{m}^3 \cdot \text{sec} \cdot \text{kev}$ 가량이 필요하다.

종국적으로 점화를 위해서는 $6 \times 10^{22} \text{m}^3 \cdot \text{sec} \cdot \text{kev}$ 가량이 필요하다.

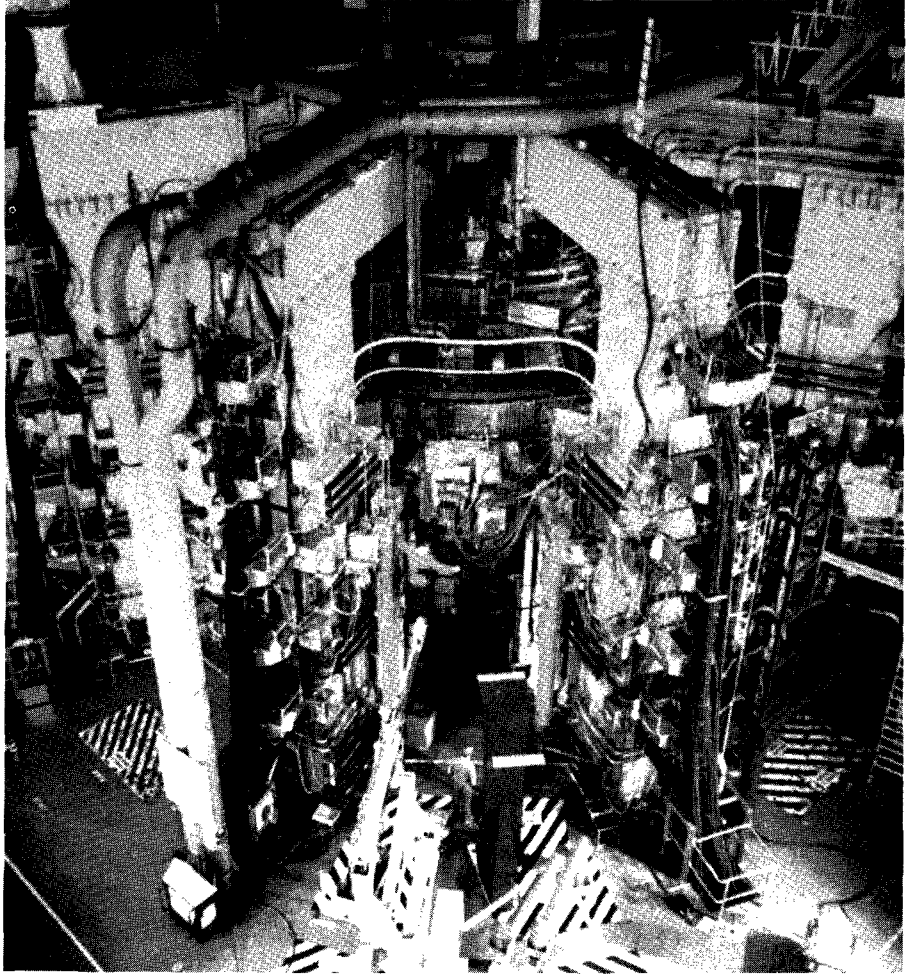
앞서 설명한 대로 핵융합은 이제 아마도 인류가 도전한 과학기술 프로젝트 중 가장 어렵지만 동시에 가장 중요하고 현실적인 파급효과가 큰 프로젝트중의 대표적인 예로 인식되고 있으며, 이러한 점에서 볼 때 지난 40년간의 성과는 비록 완전한 상용화에는 아직 못미치고 있지만, 가히 괄목할만한 것이다.

특히 앞절에서 설명한 대로 70년대 토카막으로의 연구력 집중은 핵융합 기술개발에 한 전기를 마련하여, 이후 핵융합연구는 비약적으로 발전하였다.

「그림4」에는 핵융합 3중계수로 볼 때 토카막 핵융합연구가 60년대 이후 어떻게 급속히 발전해 왔는지 Q에 따른 여러 임계조건들과 비교하여 도시하였다. 현존하는 토카막 중 EU에서 운영하는 핵융합연구로인 JET(Joint European Torus) 토카막(사진 1)은 가장 많은 업적을 올리고 있으며, 1993년 현재 투입된 에너지만큼의 핵융합에너지를 창출해 냄으로써 핵융합의 실용성을 과학적으로 입증하는 과학적임계점(scientific breakeven)에 도달했음을 선언한 바 있는데³⁾, 현재 $Q=1.1$ 을 달성한 것으로 공식적으로 보고하고 있다⁴⁾.

3) JET기자회견(1991. 11. 11) : "이 실험결과들은 (핵융합연구의) 중대한 이정표이며 핵융합연구에서의 유럽의 선도적 위치를 명백히 확인하는 것이다. 또한 이 결과는 1993년까지 JET에서 수행될 연구결과를 이용하여 1 Gigawatt 이상의 열출력을 갖는 ITER의 설계가 가능해 졌다는 것이 완전히 확인되었음(fully confirmed)을 뜻한다."

유럽공동체
에서 운영중인
Joint European
Torus(JET)
토카막.
(JET자료)



비슷한 규모(規模)인 일본의 JT-60U 토카막⁴⁾이나 미국의 TFTR 토카막에서도 이에 비견할 만한 기록을 내고 있다.

이러한 성과에 힘입어 다음단계 점화상태의 공학실증로로서 미-유럽연

합-일본-러시아 공동연구로 2005년 가동을 목표로 현재 공학설계중인 ITER(International Thermonuclear Experimental Reactor)에서는 열출력 1.5 GW가량이 예상되고 있다(그림5, 표2 참조).

한마디로, 핵융합발전연구는 이제 과학위주의 타당성연구단계를 넘어서서, ITER로 상징되는 공학연구위주의 실용화단계로 들어선 것이다.

여기에서 주목해야 할 것은, ITER

4) JET Progress Report 1993, JET Joint Undertaking, Abbingdon, UK, 1994.

5) 일본 原子力工業新聞, 1993. 3. 25

핵융합연구현황, 原研KT-2중형토카막계획

표 2 : 핵융합실증로 ITER의 주요 사양(1994. 공학설계 지침)

핵융합출력	1.5	GW
Q	6~	15 to
	ignition	
연소시간	1000	second
토로이달 자장	5.7	Tesla
플라즈마 전류	24	MA
주반경	8.1	m
부반경	3.0	m

나 혹은 EU에서 독자적으로 추진중인 NET(Next European Torus)와 같은 이들 첫세대 실증로는 성공적인 점화상태의 달성이 최우선적인 목표로 하기 때문에 불가피하게 이상수송을 포함한 매우 비관적인 수송론⁶⁾을 기준으로 하여 가장 보수적으로 (conservatively) 설계되었을 뿐 아니라, 발전로로는 필수적이라 할 "연속운전" 방식이 아닌 전통적인 유도기 전력에 의한 변압기원리의 "펄스운전" 방식에 기반을 둔 것이므로, 앞으로 성능이나 경제성이 많이 개선될 여지를 가지고 있다는 점이다.

즉 H-mode, CH-mode, 제2안정역(Second stability) 등 뛰어난 수송특성을 갖는 토카막 방전방식이나, 고주파 혹은 중성입자빔을 이용한 비유도성(non-inductive)의 전류구동 기술, 초고온의 토카막 플라즈마 자체가 자발적으로 생성-유지하는 전류인

붓스트랩(bootstrap)전류를 활용한 연속운전 기술연구 등 최근의 매우 중요한 연구 및 기술개발 성과가 설계에 적극적으로 반영되어 있지 않다는 것이다.

이러한 최근의 연구성과가 그 실험적-이론적 기반을 갖추어 감에 따라, 이들을 반영한 소위 "차세대 토카막(advanced tokamak)"과 관련된 연구가 최근 미국에서 2002년 가동을 목표로 TFTR의 다음장치로 추진중인 TPX토카막, 일본에서 비슷한 일정으로 추진중인 JT-60SU토카막을 중심으로 활발히 논의되고 있으며, 이 방향의 연구가 더욱 진행됨에 따라 핵융합로의 실용화를 앞당기거나 그 경제성을 증대시킬 수 있으리라 기대되고 있다.

이와함께, ITER와 같은 첫세대 실증로(實證爐)의 경제성을 개선하기 위한 "차세대 토카막" 개념의 점화로(點火爐) 설계연구⁷⁾도 80년대 중반이후 시작되고 있다.

이들 차세대개념의 핵융합로는 가압경수로의 150~200% 수준의 전력단가(COE)를 가질 것으로 평가되고 있으며, 연구의 진전에 따라서는 실증로인 ITER 다음단계의 첫 상업발전로인 DEMO에서부터 이 "차세대" 개념이 바로 채택될 수도 있을 것으로

기대되고 있다.

IV. 원자력연구소의 핵융합연구전략

이렇게 과학적실증을 끝내고 공학적 실용화 연구단계에 진입하고 있는 오늘날의 핵융합연구는 상대적으로 단순한 다른 과학산업분야와는 달리 다양한 과학기술분야가 종합되는 복합과제의 대표적인 예라 할 수 있다.

그러므로 본격적인 핵융합연구를 국가단위로 배타적으로 수행하는 것은 강대국 외에는 불가능할 뿐 아니라, 가능하다 하더라도 연구의 경제성을 확보하기 어렵다.

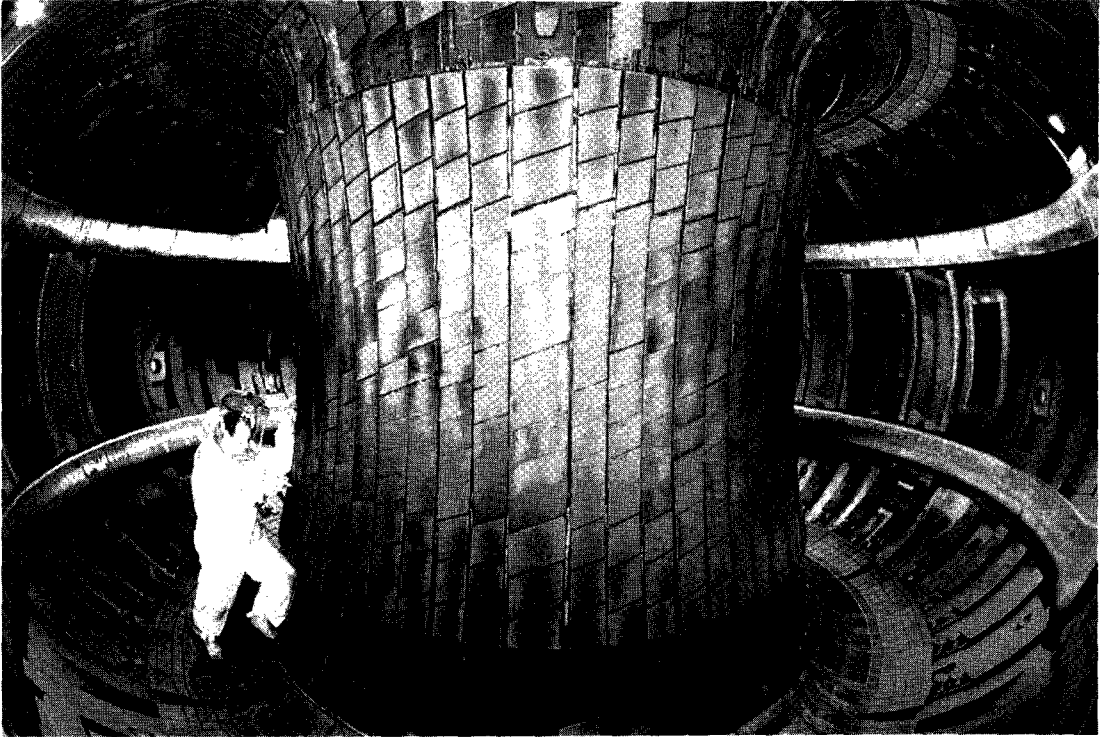
그리하여 오늘날의 핵융합연구는 미-일-EC-러시아 주도하의 국제공동연구(공학실증로 ITER), 지역블록별 협력연구(JET등)의 블록화(블록化)의 경향성을 강하게 띠고 있다.

60년대 국가별 비밀연구를 포기하고 공개적 국제연구로 추진된 이래 다시 점증하는 이러한 지역화-블록화의 특성은, 핵융합연구가 이제는 순수한 과학적연구단계를 넘어 ITER로 상징되는 실용화연구에 접어들어 따라 그 자체 기술자산(technical assets)화하는 단계에 진입했음을 뜻한다고 볼 수 있다.

6) 소위 말하는 Rebut-Lallia-Watkins수송법칙에 의거하고 있음. *Physics of Fluids*

7) 미국의 ARIES계열의 핵융합로 설계안(1991~3)이나, 일본의 SSTR핵융합로 설계안(1991)은 이러한 차세대개념의 핵융합 점화로이다.

핵융합연구현황, 原研KT-2중형토카막계획



JET토카막의 진공용기 내부(JET자료)

이 추세는 냉전이 종식되고 새로운 국제무역질서가 성립되는 등 오늘날의 전환기에도 계속되어, 앞으로 국가간의 핵융합연구능력 차이를 회복할 가능하게 별려놓을 것임이 자명하다.

그러므로, ITER에서 실용화 가능성의 증명이 임박하게되는 2000년대 까지, 이러한 기술블록에 참여할 수

있는 최소한의 기술수준을 확보하지 못하는 국가는 가까운 미래에 핵융합 에너지의 單純한 消費者로 轉落하게 된다.

다시 말하면, 핵융합발전의 실용화로 에너지문제가 근원적으로 해결되어 있는 상태에서도 에너지 및 관련 국가정책이 自立的일 수 없게 되는 불리함을 감수해야만 한다는 것이다.

따라서 우리나라와 같이 자원빈국이기에 때문에 원자력에너지가 총 발전량의 50%선을 육박하는 입장에서는, 핵융합연구를 거시적-장기적인 에너지확보 및 개발을 위한 국가전략이라는 틀 안에서 접근하는 것이 필요한 것으로 판단된다.

이러한 전략은 프랑스, 캐나다⁸⁾등 세계의 주요 원자력기술 보유국 뿐 아

8) 가령 캐나다의 CCFM의 설립목적을 살펴보면, "캐나다로 하여금 핵융합에너지를 미래에 대규모 발전기술을 위해 채택하여 사용할 수 있는 대안으로서 견지(...maintain Canada the future option of using fusion energy for generating bulk electric power.)" 한다는 개념이 있다(CCFM 연차보고서, 1992).

행융합연구현황, 原研KT-2중형토카막계획

나라, 네덜란드, 이탈리아 등 우리와 비슷한 처지의 선진국에서도 찾아볼 수 있다.

이러한 거시적인 필요성 이외에도, 지난 십수년간 원자력기술 국산화노력의 결과로 높은 수준의 핵공학 기술 기반이 원자력연구소 등의 기관에 광범하게 형성되어 있는 우리나라로서는, 적절한 규모의 토카막을 제작·운영하여 이렇게 이미 확보된 핵공학기반기술과 접목함으로써 선진국 수준의 일관적이고 종합적인 핵융합공학(fusion engineering)기술기반을 최대한시간에 갖추 수 있는 기회를 눈앞에 두고 있다고 여겨진다.⁹⁾

뿐만 아니라 산업과급효과 측면에서도, 아직 우리나라에서 선진국에서와 같은 종합적인 장치 Vender로서의 산업체는 없지만 부분적으로 관련 경험을 가진 국내산업체를 이 과제의 中型토카막 건설과정에 적극적으로 참여케 하여 고급과학기술을 축적함으로써 이러한 수준의 첨단산업체¹⁰⁾로 발전 할 수 있는 좋은 기회로 만들어야 한다.

이제 원자력연구소에서의 바람직한 핵융합연구 추진방향에 대해 생각해

보자.

우선 우리의 기술여건상, 또 연구투자 능력상, 미·일본 등 강대국처럼 핵융합계수 Q 혹은 핵융합3중계수 $nT_e T_i$ 를 높이기 위하여 플라즈마 파라미터를 증강시키는(parameter-pushing) 방향의 본격적인 대규모 핵융합연구는 불가능할 뿐 아니라 회피하여야 함이 자명하다.

이보다는 최신연구성과나 기술개발을 추적하고 나아가 지분을 확보하기 위한 전략차원에서 中間규모 연구활동이 장기적으로 일관성있게 지속되게 한다는 것이 현실적으로 더욱 실현성이 있을 뿐 아니라 유효하리라 여겨진다.

이렇게 국제연구 혹은 지역적 연구에의 기여를 통하여 연구능력을 확립하고 나머지 기술부분의 지분을 확보한다는 상호적 관점의 전략은 캐나다, 네덜란드, 중국 등 후발 핵융합연구그룹의 전략으로 이미 채택되고 있으며, 어떤 의미에서는 프랑스나 독일같은 域內강대국을 제외한 유럽공동체 전체가 이런 전략하에 분업적인 상호협력연구를 수행하는것으로 이해할 수 있다.

이 전략은 대략 다음과 같이 요약할

수 있다.

즉 ① 연구추세의 파악 및 추적, 또 필요한 수준의 연구능력의 유지를 위한 중형장치의 독자적 운영; ② 특화된 전문분야를 양성 한 뒤 이를 통하여 국제/지역 공동연구에 참여함으로써 최신의 연구성과의 지분을 확보하는 것이다.

이 과제에서도 이러한 전략을 채택하여 ① 연구추세 및 기술동향의 추적이 충분히 가능한 규모이면서도 실현 가능한 中型토카막을 건설·운영하고,

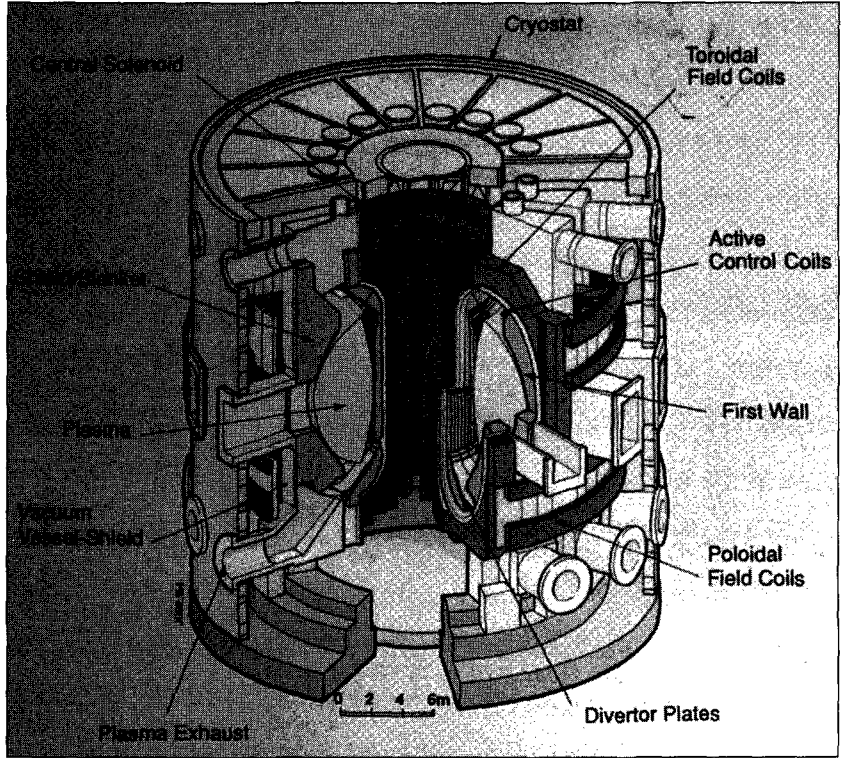
② 국제적관심의 획득과 실질적 기술협력이 가능한 특징적인 토카막형태를 선택하고 ITER등 국제연구에 기여가능한 연구방향을 선정한 뒤 국내외 전문가의 기술타당성 검증 및 자금과정을 거쳐 추진하며, ③ 소내·외의 국내 연구그룹을 조직화하여 참여케 함으로써 전반적인 기술수준 향상을 도모한다는 원칙을 설정하였다.

이러한 판단하에, 원자력연구소에서는 “원자력개발 중장기계획”으로 중형토카막 KT-2를 건설하여 핵융합노심기술을 확보, 핵융합기술기반을 가장 효율적인 방법으로 구축할 수 있는 가능성을 추구하게 된 것이다.

9) 사실 이러한 훌륭한 여건을 갖추고 있는 나라는 선진국/강대국을 제외하고는 전 세계적으로 우리나라와 브라질 정도밖에 없다.

10) 일본의 Hitachi나 Mitsubishi중공업, 프랑스의 Thomson-CSF, 스위스의 Balzers, 미국-스웨덴의 ABB, 미국의 General Atomics, Martin-Marietta, Westinghouse, United Technologies 등의 산업체가 자국내 혹은 역내 핵융합장치 건설에 적극 참여함으로써 이제는 이 분야에서 최고의 상업적 납품기관이 되었을 뿐 아니라 General Atomics의 경우는 세계최고의 연구기관중의 하나이기도 하다는 사실을 상기할 필요가 있다.

그림5 : ITER
(International
Thermonuclear
Experimental
Reactor) 핵융합로의
구조도
(JET자료)



V. 원자력연구소의 특성화 중형토카막 KT-2 계획 (1992~2001).

앞절에서 약술한 배경 및 원칙하에 건설을 추진하고 있는 KT-2 중형 토카막의 목적은 다음의 두가지로 요약할 수 있다.

첫째로, 국제적으로 핵융합로의 공학연구단계로의 진입이라는 중요한 시점에서, KT-2의 성공적인 운영을

통하여 거시적인 관점에서 국가로 하여금 미래에 필요시 현실적으로 채용 가능한 에너지정책 대안으로서 핵융합에너지를 확보-유지하는데 필요한 기술기반을 제공하게 한다.

즉 국내에도 핵융합 기술기반 확보의 중요성이 높아지고 있는 적절한 시기에 적절한 연구목표를 갖는 KT-2의 건설 및 운영을 통하여 원자력연구소를 중심으로 국내의 전문인력을 효과적으로 육성하고 조직화함으로써 현재의 지나치게 낙후된 상태에서 벗어나 종합과학으로서 핵융합 연구능력을 높이는 것이다.

이러한 전망의 근거는 무엇보다도 원자력연구소에서만도 원자력발전과 관련하여 광범하고도 전문적인 핵공학기술세대 및 레이저, 초전도체 등 핵융합 관련 기초과학의 기술세대가 마련되어 있다는 점이며, 이를 기반으로 하면 KT-2를 통한 토카막노심기술의 확보가 이루어지면 핵융합로기술 전반에 걸친 비약적 발전을 효율적으로 이룩할 수 있다.

둘째로, 특징적이면서도 실현가능한 토카막을 건설, 이를 통하여 ITER 등 핵융합 국제연구에 필요하고 또 기여할 수 있는 연구를 수행함으로써,

핵융합연구현황, 原研KT-2중형토카막계획

핵융합 기술선진국과의 실질적으로 호혜적인 협력연구를 가능케하여 가능한 빠른 시간내에 기술격차를 최대한 좁혀감으로써 첫번째 목적 달성을 확실하게 하는 것이다.

이러한 목표를 달성하기 위한 구체적인 방안으로서, 우리는 “고주파(Fast Wave)로 전류구동되는 대형상비(LAR) 중형토카막”으로 KT-2 토카막의 개념을 정의하고 현재 95년 착공, 98년중 가동을 목표로 설계작업을 진행중이다¹¹⁾.

다음에는 이러한 KT-2토카막의 개념 및 배경을 설명하겠다.

1. 중형토카막

KT-2 토카막은 현재 통상 中型으로 분류되고 있는 장치다.

이와 비슷한 규모로 현존하는 장치는 미국 프린스턴대학의 PBX-M, 텍사스 대학의 TEXT, 일본 원자력연구소의 JFT-2M, 네덜란드의 Euratom-FOM 핵융합연구소의 RTP, 캐나다 자기핵융합연구센터(CCFM)의 Tokamak de Varenne (TdeV) 등의 장치를 들 수 있다.

이에 비해 널리 알려진 JET(EU), JT-60(일본), TFTR(미국), Tore-

Su-pra(프랑스) 등은 대형장치로, DIII-D(미국), T-10(러시아), ASDEX(독일), TEXTOR-U(독일) 등은 이보다 다소 작은 “중대형” 장치로 분류할 수 있다.

「표 3」에는 대략 토카막의 장치규모를 총괄적으로 표현하는 양으로서 에너지가둠시간(confinement time, T_E)을 기준으로 위의 장치들 및 여타 가동중인 각국의 토카막을 규모별로 분류하여 보았다.

대개 대형-중대형으로 분류되는 토카막들은 가둠시간이 100 msec 이상임을 알 수 있다.

그리고 가둠시간이 수십 msec대이면 중형토카막으로 분류될 수 있는데, 측정정밀도를 고려할 때 중형장치의 규모는 가둠시간에 의한 단선적인 비교보다는 전류, 자장, 가둠시간, 장치의 복잡도 등 전반적인 파악이 필요할 것이다.

이들 중형장치는 통상 대형장치에 서처럼 직접 핵융합 에너지를 발생하고 증강하기 위한 본격적인 핵융합연구에는 부족하지만, 핵융합로에 필요한 운전-가열-진단기술 등 핵심기술의 연구개발에는 매우 유용한 소위 핵융합연구용(fusion-relevant) 고온-고밀도 플라즈마는 충분히 발

생-유지할 수 있다.

다시 말하면 JET, TFTR, JT-60 등 오늘날의 본격적인 핵융합연구용 대형토카막이 $Q=1$ 에 육박하고 있는데 반해 이들 중형급 토카막은 Q 값이 0.01~0.05에 머무르지만, 플라즈마 온도 및 밀도는 이들 대형장비와 크게 차이가 나지 않는 1~5 keV, 10^{19} ~ $10^{20}m^{-3}$ 정도의 영역에 있다.

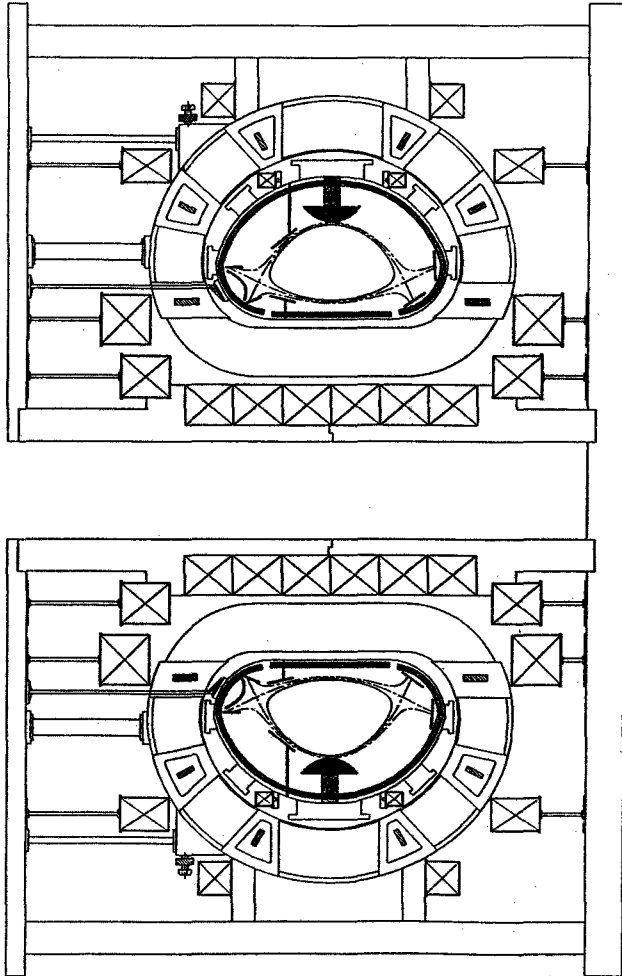
이러한 중형장치와 대형장치와의 Q 값의 차이는 주로 소위 L(ow)-mode 수송비례칙에 따른 장치크기(size)효과 및 그에 따른 가열출력의 규모차이에 기인하는 것이다. 그러므로, 오늘날에도 이러한 중형 토카막은 핵융합에 필요한 여러가지 이론적-

표 4 : KT-2 토카막의 주요 제원

주반경 (major radius)	R	1.4m,
부반경 (minor radius)	a	0.25m,
형상비 (aspect ratio)	$A=R/a$	5.6
타원율 (elongation)	k	1.8
삼각율 (triangularity)	δ	0.2
트로이달 자장	B_t	3 Tesla,
플라즈마 전류	I_p	500 kA
플라즈마 밀도	n _e	$4.7 \times 10^{19}m^{-3}$
전자(이온)온도	$T_e(T_i)$	1 keV

11) 한국원자력연구소 보고서 “핵융합로개발 : 토카막 장치기술 개발”(KAERI-RR/1364~93, 1994, 7.) 및 영문판 “Concept Definition of KT-2 : a Large-aspect-ratio Bootstrap Tokamak at KAERI”(1994, 10.) 참조.

행융합연구현황, 原研KT-2중형토카막계획



기술적 관점을 전문적으로 연구하는 연구용 전문토카막으로서 활발히 건설-이용되고 있는 것이다. 위의 그림에 KT-2의 구조를, 앞

면의 「표 4」에는 주요 제원을 정리하였다. 이 기본사양은 최근 통합된 L-mode 비례적인 ITER-89P 비례치에 의하면 30~50 msec 가량의 에너지

가둠시간(T_E)을 가질 것으로 예측되는, 전형적인 중형토카막으로서의 KT-2를 보여준다.

이는 규모로 볼때 현재 가동중인 토카막중의 20번째 가량이며, 국가별로 보면 네덜란드, 캐나다, 이태리 등과 비슷한 수준에 있게 되어 10대 핵융합연구국가 그룹에 속할수 있게 된다.

이러한 중형토카막을 자체적으로 제작하는데 필요한 요소기술이 국내에 전부 확보된 것은 아니다.

그러나 설계단계의 국제협력과 선진기술도입으로 충분히 국내에서 제작될 수 있으며, 또 이렇게 효율적인 국제협력과 기술도입을 통하여 현재 결여된 중형토카막 제작상의 요소기술을 확보하는것이 KT-2를 중심으로 국내 관련 산업의 기술수준 향상 및 전문연구인력의 육성-조직화와 함께 앞서 약속한 대로 본 연구의 주요한 목적중의 하나이다.

2. 대형상비(LAR) 토카막

형태상으로 KT-2는 형상비, 즉 주반경(R)과 부반경(a)의 비 R/a가 5.6 으로서 큰 형상비(large aspect ratio, LAR)에 속한다. 대-소 형상비와 관련된 장-단점 비교가 「표 5」에 요약되어 있다¹²⁾.

12) 일본원자력연구소, "Concept Design of Steady-State Tokamak Reactor(SSTR)", JAERI-M-91-081(1991).

13) R. W. Conn, 1994 IAEA Conference on Plasma Physics and Controlled Fusion, Seville, Spain, 1994. 9.

표 3 : 가동중인 中형이상 Tokamak의 장단점비교 (55면 게재)

최근의 핵융합로 설계에 대한 비교 연구결과가 뒷받침 하듯이¹³⁾, 발전로로 가는데에는 대형상비가 유리한 것으로 알려져 있으며, 이미 여러가지의 발전로 설계안이 대형상비(A > 4) 영역에서 개발되어 있다.

그럼에도, 「표 3」에 나타나 있듯이, 현재 토카막 데이터베이스로 볼 때 대부분의 토카막이 형상비가 3.0±0.5인 영역에 집중되어 있으며, A < 2인 소형상비 토카막은 몇몇 있으나 A > 5인 대형상비 영역에서는 일본의 TRIAM-1M과 미국의 PBX-M 뿐이므로 데이터가 매우 부족하여, 따라서 이점에서 KT-2와 같은 LAR토카막 데이터는 핵융합연구에 우선 그 희소성으로 인하여 매우 소중하게 받아들여지고 있는 실정이다.

그러므로 Q를 높이는것이 목적이 아닌 전문연구를 위한 중형토카막에서의 대형상비 실현은 그 자체로 국제적인 관심을 확보할 수 있을 뿐 아니라, 대형상비를 이용하여 앞으로 핵융합로 개발에 있어 중요한 핵심 신기술 부문에 주력하면, 이를 통한 효율적인 국제협력연구와 관련기술의 실질적인 이전을 기대할 수 있다.

이 대형상비를 이용한 핵심신기술이란 ITER 2 단계(2010-) 연구주제

표 5 : 大·小型상비 토카막의 장단점비교

항 목	대형상비		소형상비	
		장단점		
1. 가동특성데이터의 신뢰도	낮음(부족)	×	○	높음(풍부)
2. 자속Swing을 위한 공간확보	용이함	○	×	어려움
3. Bootstrap전류 비율 (>75%)	아주 کم (>75%)	○	×	작음
4. 플라즈마전류	상대적으로 적음	○	×	더 커야 함
5. 디버터 熱流	온도낮음	○	×	온도 높음
6. 트로이달 자장	강자장 필요	×	○	저자장
7. 폴로이달 자장	저장에너지 클 필요없음	○	×	저장에너지 커야 함

및 그다음 상용핵융합로 “DEMO” (2025) 개발연구와 관련하여 현재 초미의 관심사가 되고있는 “bootstrap 전류이용의 극대화를 통한 토카막 핵융합로 연속운전” 기술로서, 통상적으로 “차세대 토카막 (advanced tokamak)”이라는 개념으로 활발히 논의되고 있다.

여기서 Bootstrap전류란 이론적으로 그 존재가 70년대 초반 예언된 바 있으나, 90년대에 와서야 실험기술의 발달로 TFTR, JT-60등 대형토카막에서 확인된 현상으로서, 초고온의 토카막 플라즈마가 스스로 전류를 만들어내고 유지하는 현상을 말한다.

총 토카막 전류중에서 이러한 bootstrap전류로서 토카막 스스로가 충당하는 비율은 “충분히” 가열된 토

카막의 경우 형상비의 제곱근에 비례하며, 따라서 대형상비토카막이 소형상비보다 높은 bootstrap전류효과를 나타낸다.

예컨데 같은 안전인자 q_0 로 작동하는 경우 형상비가 두배이면 bootstrap전류는 40%가량 대형상비 토카막이 더 크게 나타난다. 따라서 핵융합로에서처럼 연속운전을 위하여 외부에서 전류구동(current drive)를 통하여 필요한 토카막전류를 공급하여 줄 경우, bootstrap전류로 충당되지 않는 부분은 외부에서 전류구동으로 공급하게 되므로, 전류구동을 위하여 사용해야하는 에너지부담이 대형상비의 경우 많이 줄어들게 되고, 이러한 경제성으로 인해 핵융합발전에는 대형상비가 유리한 노형으로 생

각되고 있다.

또한 “충분한” 가열에 있어서도 대형상비는 베타한계가 낮으므로 적은 가열출력으로도 쉽게 한계치영역에 도달할 수 있어서, 높은 Bootstrap 전류비율에 도달하기 위해 필요한 가열출력만 고려한다면 대형상비 토카막은 이종으로 유리한 셈이다.

이렇게 bootstrap 전류를 이용한 전류구동 가능성은 JET, TFTR, Tore Supra, JT-60U 등의 대형 토카막에서도 90년대에 와서야 관측되어 현재 매우 활발하고 진지하게 토의되고 있으며, 최근에 “차세대토카막” 개념으로 정리되어 JET, DIII-D 등 대표적 토카막에서 집중적으로 연구할 예정으로 있다.

특히 미국 UC-San Diego 대학 공대학장이며 저명한 핵융합로 설계전문가인 R.W. Conn 박사는 일찌기 이러한 bootstrap 전류의 실현가능성에 착안, 80년대중반부터 제1안정역 및 제2안정역에서 가동되는 토카막 핵융합로 설계연구를 ARIES 계획하에서 순차적으로 수행하여 왔다.

한편 일본은 최근의 JT-60U에서의 성과에 힘입어 독자적인 발전로 모델로 아에 “차세대” 개념의 대형상비 토카막 ($A=4$)으로 계획, SSTR(Steady-State Tokamak Reactor)로 구체화하여 개념설계 작업을 완료하였다.

뿐만아니라 TFTR 이후 미국의 차

기 주력토카막으로 계획되고 있는 TPX(Tokamak Physics eXperiment)도 형상비가 4.6으로 JT-60SU와 거의 동일한 연구목표를 갖고 있다. 또 두 장치 모두 대형상비의 토카막융합로에서 충분한 핵융합반응을 일으키는데 필요한 강자장발생을 위해 초전도체 전자석을 채용함으로써 경제성을 유지하고 있기도 하다.

이러한 연구추세는 이 bootstrap 전류구동을 통한 연속운전 연구가 과학적으로도 중요할 뿐 아니라 플라즈마가열을 위한 에너지투입량을 극소화시킴으로써 같은 핵융합에너지 방출량에서 핵융합의 경제성을 개선하는데도 직결되는 중요한 이슈임과 아울러, 현실적인 핵융합로의 설계연구에는 대형상비 토카막이 유리함을 웅변하고 있다.

KT-2에서는 대형상비 토카막형태가 이러한 핵심현안 연구분야에 대해 가지는 잇점을 최대한 활용하자는 것이며, 이점은 약술한대로 이제 핵융합선진국에서도 막 시작되고 있는 미래지향적, 경제성 지향의 연구에 일차적으로 유리하다는 시의적절함과 아울러, 특징 있는 토카막으로서의 KT-2를 통하여 기술협력을 유도하고 ITER에 기여한다는 장치목표의 달성가능성을 크게 높여주고 있다.

그뿐 아니라 이미 진행되어온 연구방향보다는 연구투자의 효율이나 경쟁력확보의 가능성도 훨씬 높다.

표 6 : FWCD와 NBCD의 특성비교(56면계재)

그러나 초전도체 전자석의 채용은, 그 필요성에도 불구하고, 우리의 여건과 이에 따른 기술개발상의 나아가 건설상의 부담을 토카막 건설과 동시에 지게 되므로 이번 KT-2에는 채용을 하지 않았다. 그 대안으로 우선 상전도 전자석을 최대한 효과적으로 활용하여, 비록 완전한 연속가동은 아니지만 중형토카막으로는 연속가동이나 다름없는 25초 가량의 매우 긴 방전 시간을 유지케 하였다.

이렇게 보수적으로 중형 토카막을 건설-운영하면서 필요한 초전도체 기술역량을 단계적으로 국내에 축적한 뒤, 2005년경 초전도 전자석으로 대체한 KT-2U로 「업그레이트」하거나 KT-2연구성과나 국제연구의 추이를 감안하여 필요한 경우 새로운 초전도체 compact 핵융합로 KT-3을 건설할 계획으로 있다.

3. 고주파 전류구동 토카막

전류구동(current drive, CD) 시스템은 기본적으로는 토카막이 연속가동될 수 있도록 토카막내에 비유도성(non-inductive) 플라즈마 전류를 발생시키고 유지하는 장치이지만, 토카막 운영설비라는 측면에서 보면 가열시스템과 거의 중첩되며, 플라즈마

핵융합연구현황, 原研KT-2중형토카막계획

표 7 : KT-2 토카막 건설계획

1994. 9.	KT-2개념정의(Concept definition) 완료
1995. 7.	개념설계(conceptual design) 및 기술타당성 검토 완료 -국내지도위원회, 국제자문위원회 -해외전문연구기관
1995. 7~1997. 12	공학설계(engineering design) 완료 및 부품 제작
1998. 7.	KT-2 토카막 조립 완료
1998. 8~1999. 7	KT-2 토카막 완공-시운전-정상운전
1999. 12	ICRF/ECRH 시스템 설치완료(1MW)
2000. 12	FWCD 전류구동 시운전
2001. 12	초전도 토카막 KT-3 개념설계 시작 RF출력 5MW로 증강완료. 100% 非유도성 전류구동 및 연속운전 기술개발.
2005	KT-3 착공
2007/8	KT-3 가동, 100% 연속 가동 핵융합로 연구.

FWCD를 주구동으로 선정된 이유는 무엇보다도 다른 전류구동기술에 비하여 필요한 장치기술이 이미 완전히 상업화되어 있으므로 필요한 대출력장치를 제작하는데에 기술적인 장애요소는 거의 없고, 안테나설계 및 실험계획-운영상의 경험이 중요해지는 예술(art)적인 성격이 강하므로 우리가 참여하기에 상대적으로 가장 유리하다는 점이다.

FWCD의 경우 낮은 흡수효율로 인해 여태껏 연구가 많이 행해지지 않았지만, 노심중앙의 전류구동에 절대 유리하고 공간적인 설치상의 문제가 없다는 특성때문에 최근 다시 주목받기 시작하고있는 신기술이며, 따라서 핵융합선진국에 대하여 우리와 같은 후발국이 가지는 핸디캡이 상대적으로 훨씬 적다.

특히 1993년 미국 General Atomics사의 DIII-D토카막에서 수행된 연구결과는 FWCD역시 예비가열 등을 통하여 노심플라즈마 온도를 높여놓을 경우, NBI와 같은 높은 전류구동의 효율에 도달할 수 있음을 보여주고 있다. 다시말하면 고온의 핵융합로에서는 FWCD는 NBI와 같이 높은 효율을 가질 수 있으므로, 핵융합로의 개발과 관련하여 장기적인 연구투자의 효율도 매우 높은 분야라고 할 수 있다. 「표 6」에는 AREIS핵융합로의 전류구동계통 설계연구에서 수행된 NBI와 FWCD의 상세한 비교연구결과가 정리되어 있다. ARIES는 주

의 발생, 전류증강(ramp-up)과정의 보조, 전류구동(current drive), 분포 제어(profile control), 플라즈마 가열(heating), 연소제어(burn-control) 등의 역할을 하게 되는 다목적시스템이다.

이에는 고에너지 입자빔을 이용하는 중성입자빔주입(Neutral Beam Injection, NBI), 저역혼성(lower-hybrid, LH)영역이나 전자싸이클로트론(electron-cyclotron, EC)영역의 마이크로파를 이용하는법(LHCD, ECCD), 그리고 플라즈마내의 고주파 존재양식 중 “빠른 전자파(fast wave, FW)”라 불리는 전자파를 이용하는 법(FWCD)등이 있다.

전통적으로 전류구동방식으로는

NBI나 LHCD가 주로 연구되어 왔으나, 핵융합로와 같은 높은 플라즈마밀도에서의 전자파차단(cutoff)때문에 노심중앙의 전류구동이 불가능한 LHCD는 가장자리 전류분포제어에 이용될것으로 예측되고 있다.

따라서 노심중앙의 전류구동 방법으로는 입자주입(NBI)과 함께 FWCD가 선택될 전망이다. 예컨대 ITER와 TPX에서는 중앙전류구동으로 NBI를 주(主)구동으로, FWCD를 부(副)구동으로 채택될 전망이다.

그러나 KT-2에서는 총 5 MW급의 출력을 갖는 FWCD를 주구동으로, 0.5~1MW급의 NBI를 부구동으로 채택하려고 한다. 여기에 0.5-1 MW정도의 ECCD가 전류분포의 제어를 위해 추가될 것이다.

구동으로 FWCD를 채택하고 있다.

VI. KT-2 추진방향 및 일정

KT-2와 같은 대형의 복합연구장치의 건설을 추진함에 있어 그 효율을 극대화 하기 위하여, 서론에서 약속한 대로 다음과 같은 점을 중점적으로 반영할 예정이다.

① 핵융합기반기술의 실용화-조직화 측면에서 가능하면 국내산업체가 참여하여 수행하도록 적극 권장할 예정이다.

국내산업체의 참여가 기대되는 제작분야는 몇몇 특수한 진공내 部品를 제외한 전 부문인데, 특히 모터-제네레이터 전원 및 그 제어회로, TF/PF 전자석 및 귀환제어회로, 그리고 장치 구조물 부문이 좋은 산-연 협력분야가 될것으로 기대된다.

진공장치부문도 선진국의 설계 및 감리기술의 적절한 지원이 이루어질 경우 국내제작이 가능할 것이다. 이러한 선진기술도입을 효과적으로 추진하기 위하여, 장치정의안(裝置定義案) 및 개념설계안을 해외전문연구소 및 산업체에 배포하여 기술적 타당성 검토와 함께 국내기업과의 공동개발 혹은 제작납품에 대한 제안서를 2차에 걸쳐서 접수, 검토한 뒤 최적안을 선정, 시행할 계획으로 있다.

② 국내 관련 전문연구인력의 조직화를 위해 가능한 한 많은 부분을 국내 대학이나 연구소에서의 위탁연구로 수행한다.

이에는 진단장치개발의 대다수가 포함되며, 가열장치및 운영기술개발, 이론연구분야의 상당부분이 해당되며, 2005년경 차세대형 KT-3 토카막건설을 위한 초전도전자석 기술기반의 개발을 적극적으로 지원하는 것이 포함되어야 할 것이다.

1994년 현재 서울대, 과기원, 포항공대 등 대학에서의 8개 위탁과제를 수행중이며, 년차적으로 적극 확대해 나갈 예정이다.

③ 핵융합공학 기술기반의 확립 차원에서 볼 때 원자력(연)내의 핵공학 기술의 효율적인 활용은 핵심적인 의미를 가지며, 이를 위하여 우선 관련 전문인력을 참여연구원으로 위촉하거나 위탁연구로 수행한다.

또한 기초연구 수준의 핵융합로 시스템연구를 시작하여 꾸준히 수행함으로써, 향후 본격적인 핵융합 연구로(研究爐)인 KT-3의 건설에 차질이 없도록 한다.

이에는 핵융합발전로 계통의 설계연구, 초전도전자석 개발, 저방사화 합금이나 세라믹 등 재료개발연구, 안정성공학, 방사화분석 연구 등이 포함될 것이다.

④ 이러한 추진전략의 원활하고 효

율적인 집행을 위하여 장치정의 및 개념설계의 단계에서부터 소내-외를 망라한 국내 및 재외한인 관련 전문가들을 활용하여 “KT-2 지도위원회(Steering Committee)”를 구성-운영하고 있으며, 또 산하에 실무조정반(Coordination workgroup)을 운영하여 제반 실무적인 연구사항, 특히 위탁연구의 운용에 대한 협의 및 자문을 구한다.

또한 해외 석학들로 “국제자문위원회(International Advisory Committee)”를 구성, 운영중이며 이를 통하여 기술타당성의 검증자문 뿐 아니라 ITER 참여에 필요한 장기적 연구방향 정립의 자문과 국제협력에 관한 권고 및 홍보활동 등에 활용할 계획이다.

KT-2를 건설하는데 소요되는 총 직접비용은 1995~1998의 건설기간 동안 직접비용으로 10%의 예비비를 포함하여 약 325억원 가량이 소요되리라 예측되고 있다.

1995년 중에 KT-2 건설에 착수하여 1998년 중에 시운전을 개시하여 첫 플라즈마를 발생한 뒤 1999년 중 1 MW의 고주파를 투입, 가열 및 전류구동을 실시하고, 2001년부터는 총 5 MW의 고주파를 투입, 높은 bootstrap전류비를 달성과 함께 연속 운전기술개발 및 제2안정역 연구를 수행하며, 이 성과를 기반으로 ITER에 참여계획을 확정하는 것을 목표로

하고있다.

완공후 1999~2005 기간동안은 장치운영과 함께, 고주파 가열계통을 1 MW에서 5 MW로 보강하여 본격적인 전류구동 실험을 실시하는 것과, 2005년으로 계획된 초전도 토카막 KT-3으로의 Upgrade를 위한 초전도전자석 기술개발 및 개념설계 등의 연구등을 수행할 계획이다.

특히 앞서 설명한 대로, “차세대(次世代) 토카막” 개념의 연구를 위해 건설되는 본격적 Prototype 토카막들인 JT-60SU(일본)나 TPX(미국)등이 2002~3년경에 가동을 시작한다는 점을 상기해볼 필요가 있다.

우리의 KT-2가 가동시작하는 1998년 부터 이 시기까지 5년여의 짧은 기간동안은 KT-2가 전세계적으로 “차세대 토카막”연구를 수행하는 몇 안되는 중형급 이상의 대형상비 「토카막」이 될 것이다.

따라서 이 시간을 계획대로 잘 활용하는데 따라서는 중형 토카막이라는 규모상의 한계를 벗어나, KT-2를 통하여 미래지향의 국제 핵융합연구에 본격적으로 기여하고 참여할 수 있는 획기적인 전기를 마련할 수 있으리라 기대하고 있다.

IV. 결 론

이제까지의 논의는 다음과 같이 요약할 수 있을 것이다.

토카막 핵융합연구는 이제 과학연구 위주의 타당성 입증 단계를 지나서 ITER의 건설로 상징되는 공학연구 위주의 실용성 입증단계로 넘어가고 있다. 따라서 原子力에너지에 크게 의존하는 우리나라도 이제 더이상 핵융합연구를 미룰 수 없는 단계에 와 있다고 할 수 있을 것이다.

이러한 핵융합의 연구전환기에 대응하여, 원자력연구소에서는 기존의 핵공학 기반기술을 효율적으로 활용하고 소형토카막의 자체건설을 통해 이미 어느정도 확보된 토카막 노심기술을 보완함으로써 선진국수준의 전반적인 핵융합기술기반을 확립하려는 전략을 채택하고 있다.

이러한 전략의 궁극적 목적은 핵융합을 “필요시에 현실적으로 채택가능한 에너지대안”으로 육성-확보하여 견지하고자 하는 것이다.

이 전략의 핵심은 1992년부터 원자력개발 중장기계획으로 추진중인 특성화 중형토카막 KT-2의 1998년 가동이다.

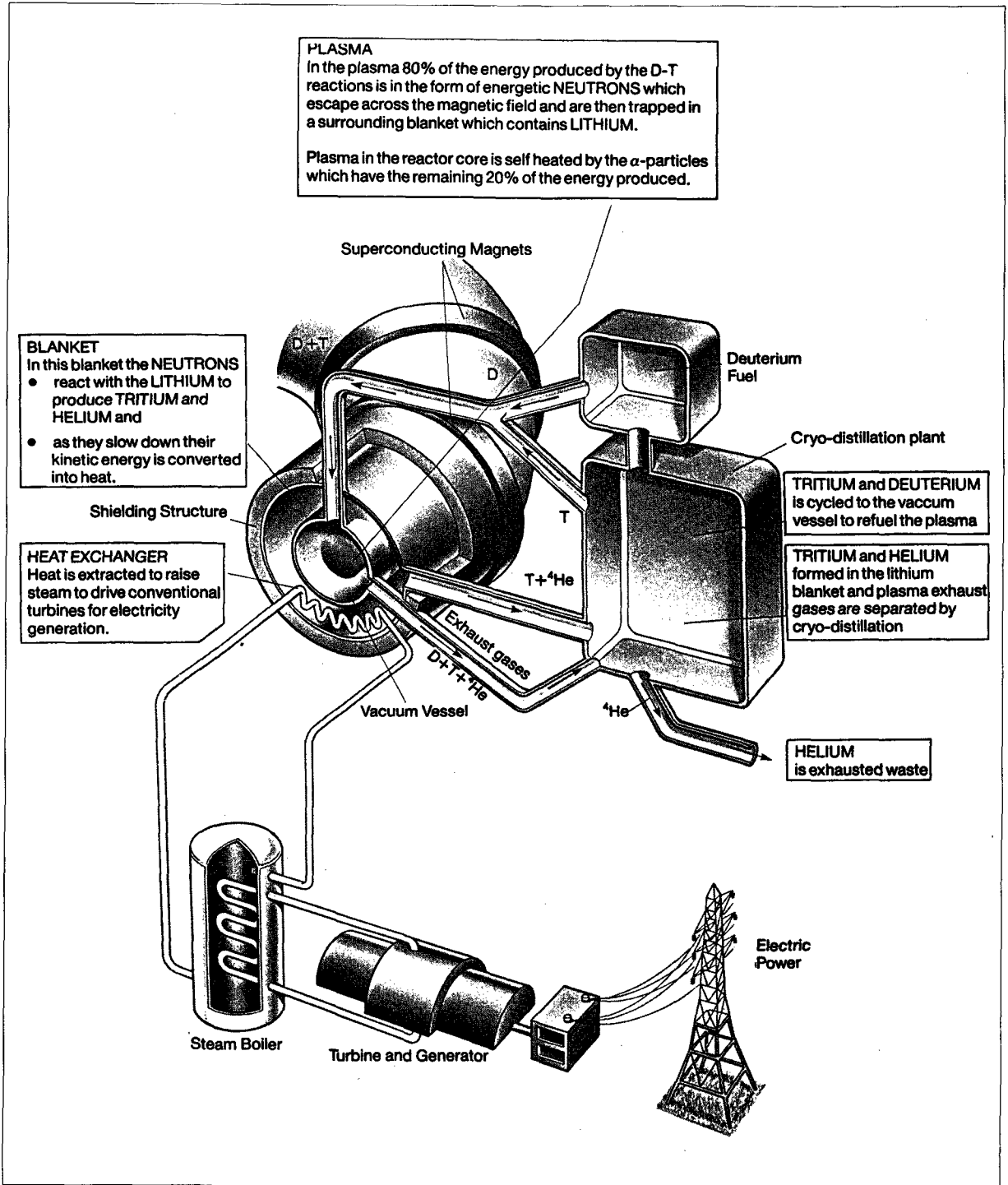
KT-2계획은 최근의 연구성과를 바탕으로 핵융합로의 경제성제고에 중점을 두는 “차세대 토카막” 개념을 추구하며, 기존의 과학적 성과를 최대한 활용하고 앞으로의 국제연구에 경쟁적으로 기여할 수 있기 위한 특성화(特性化)된 로형 및 연구 프로그램을 채택하였다.

현재의 계획대로라면 1998~2003년까지 6년 동안 특별한 가능성으로 우리에게 열려있는 KT-2의 가동기간을 시의(時宜)적절하게 성공적으로 활용할 때, 국내 핵융합 연구는 단시간에 국제연구에 경쟁적으로 참여할 수 있게되는 획기적인 전기를 맞이할 수 있을 것이다.

나아가 그 다음단계에서 초전도 토카막 KT-3의 성공적인 건설과 핵융합기술기반의 확립으로 이어질 수 있을 것이다.

행융합연구현황, 原研KT-2중형토카막계획

그림 3 : 「토카막」核融合 發電설비의 개요도 (JET자료)



행융합연구현황, 原研KT-2중형토카막계획

표 3 : 전세계에서 가동하고 있는 中형이상 Tokamak일람(1994)

*) Superconductor TF magnet를 사용하는 토카막임.

장치명	국가	연구기관	가동 시간 (ms)	자장 (T)	전류 (KA)	온도 (Kev)	주-부반경 (미터)		형 상 비	준 공
* ITER	-	국제공동	3000	4.8	20000	20	6.00	2.15	2.8	04
JET	EC	JET Joint Undertaking	1200	3.5	7000	15	2.96	1.25	2.4	83
* T-15	러시아	Kurchatov	900	3.5	2000	10	2.43	0.70	3.5	88
JT-60U	일본	JAERI	800	4.8	3500	10	3.00	0.95	3.3	93
TFTR	미국	PPPL	500	5.2	2500	8.5	2.48	0.85	3.0	82
* Tore Supra	프랑스	CEA-카다라슈	400	4.5	1700	5.0	2.36	0.8	3.0	88
DIII-D	미국	GA	220	2.2	3500	5.0	1.36	0.67	2.0	87
ASDEX-U	독일	IPP-Garching	200	4.0	2000	3.0	1.65	0.5	3.1	92
* FT-U	이태리	ENEA	200	8.0	1600	6.0	0.93	0.31	3.0	91
TEXTOR-U	독일	KfK-Julich	150	3.0	800	2.5	1.75	0.5	3.5	93
T-10	러시아	Kurchatov	100	5.0	650	10	1.5	0.4	3.8	75
TCV	스위스	CRPP-로잔느	60?	1.5	1000	10	0.83	0.24	3.4	94
JET-2M	일본	JAERI	60	1.4	550	2.5	1.31	0.35	4.2	85
* MTX	미국	LLL	50	1.40	800	3.5	0.64	0.17	3.8	88
PBX-M	미국	PPPL	50	2.2	500	2.0	1.65	0.3	5.3	87
COMPASS	영국	AEA-Culham	10	2.1	400	5.0	0.56	0.22	2.6	89
* TRIAM-1M	일본	U. Kyushu	50	8.0	180	1.8	0.8	0.12	6.5	86
TSP	러시아	KIAE-Troitsk	40	12.8	1350	10	1.2	0.41	3.0	87
HL-1M	중국	SWIP, 낙산	40	5.0	400	1.6	1.02	0.26	4.0	91
KT-2	한국	KAERI	50	3.0	500	1.0	1.40	0.25	5.6	98
TdeV	캐나다	C.C.F.M.	30	1.5	285	1.0	0.86	0.26	3.3	87
TEXT	미국	U. Texas	22	3.0	400	0.8	1.0	0.27	3.8	83
JIPP T-IIU	일본	U. Nagoya	20	3.0	300	1.6	0.91	0.23	4.0	83
HL-2	중국	SWIP, 낙산	20?	?	700?	-	1.5	0.3	5.0	94
RTP	화란	Euratom-FOM	20	2.5	250	1.0	0.72	0.18	4.0	89
ADITYA	인도	IPR, Bhat	6	1.5	250	0.5	0.75	0.6	1.3	89
BT	브라질	U. Sao Paulo	5?	2.5?	250?	-	0.8?	0.4?	2.0	97?
TUMAN-3	러시아	Ioffe	20	2.5	200	0.6	0.55	0.24	2.3	79
T-11M	러시아	KIAE-Troitsk	15	1.5	140	0.5	0.7	0.2	3.5	86
HT-6M	중국	AS-IP, 합비	10	1.5	120	0.6	0.65	0.2	3.3	84
START	영국	AEA-Culham	5	0.7	200	1.0	0.2	0.18	1.1	90
Phaedrus-T	미국	U. Wisconsin	20	1.2	130	1.0	0.92	0.26	3.8	89
CCT	미국	UCLA	10	0.7	1	0.3	1.5	0.4	3.8	85
WT-III	일본	U. Kyoto	20	1.5	50	0.2	0.44	0.12	3.6	80
TCA	스위스	CRPP-로잔느	10	0.4	25	0.15	0.5	0.2	2.5	83

행융합연구현황, 原研KT-2중형토카막계획

표 6 : FWCD와 NBCD의 특성비교

항 목	중성입자빔 전류구동(NBCD)	고주파 전류구동(FWCD)
전류구동효율(η)	0.5~0.6($E_{beam} > 2 \text{ MeV}$)	0.3~0.4(개선가능함)
장치효율(η)	0.68(RF Quadrupole) 0.75(정전 Q)	0.7(100~200MHz)
비 용	\$ 3 / watt	\$ 1 / watt
물리적 이해 수준	Very Good • 과정 단순함	Very Good • 과정 복잡함
실험 데이터베이스 • CD • 그외 사항	Good • DITE, DIII-D, TFTR, JT-60 • H-mode, Enhanced L-mode, bootstrap전류	Fair • JIPPII-U, JFT-2M, DIII-D, JET • H-mode 전자가열효과(FWEH).
보조가열로서는 ?	Good • shine-through효과	Very Good • 가변주파수 송출계가 필요
전류상승(ramp-up) 특성	Fair - shine-through효과	Fair • 다중반사-흡수과정
전류분포제어 특성	Fair • 점 선 방 향 / beamlet column	Good • 적도면에서 비껴서 발진 • 스펙트럼 제어
노심침투 특성	좋음 • 큰 E_{beam} 이 필요	매우 좋음 • 자연적으로 노심에 집중
불순물	문제되지 않음	Be표면처리, spectrum 집중, SiC코팅 등으로 최소화
필요기술의 추가개발	상당히 많이(substantial) 필요 • 음이온원 • 초전도RFQ • laser neutralizer • RF power supply	적정히(modest) 필요 • RF 전원 • RF antenna기술 • 위상조정회로
핵융합로 적용성	Fair • Tritium침투 • 중성자역류 • 장치크기/빔라인 길이	Good • 안테나가 블랭킷 안쪽에 설치 • 송출계의 유연성 • 주요부품의 차폐문제
보수-유지	Fair	Good
일차벽 검거문제	acceptable • 에너지 RFQ 채용	acceptable • folded waveguide 채용