

核融合爐 開發 어디까지 왔나? (3)

本稿는 서울대학교 공과대학에서 산업계와 관련 된 정부, 공·사기업체 최고경영자들에게 현재와 미래의 기술개발, 국가경제, 기업경영에 대한 식견을 제공하고자 하는 「最高産業戰略課程」의 核融合技術의 未來에 대한 강좌를 정리한 것이다. 핵융합 기술의 배경과 기본적 원리, 기술개발의 내용과 파급효과, 국내외 개발동향과 전망으로 나누어 3회에 걸쳐 연재로 살펴본다.



홍 상 회

서울대학교 원자핵공학과 교수

핵융합로 기술개발 추세와 전망

1. 핵융합로 개발역사

제2차 세계대전이 시작될 1930년대말 무렵에 태양과 별들이 거대한 핵융합로라는 사실이 밝혀지자 이를 지상에서 실현해 보려는 시도가 핀치플라즈마 실험과 중수소-중수소 핵융합반응 기초실험부터 시작되었다. 또 다른 핵반응인 핵분열에 의한 원자폭탄의 투하로 2차대전이 막을 내리자 평화대신 냉전의 막이 오르면서 미국, 영국, 소련은 보다 더 강력한 폭탄을 제조할 목적으로 수소폭탄 연구를 1940년대에 비밀리에 진행하였다.

1952년에 가공할 파괴력을 지닌 수폭실험의 성공으로 지상의 최초 핵융합 실현이 제어되지

않은 핵무기 형태로 등장하였고, 다음 단계 제어된 핵융합 실현 전망에 자신이 생기자 평화적 이용의 핵융합로 연구개발은 이때부터 본격화되었다. 미, 영, 소를 중심으로 한 핵융합 연구가 그 당시 20년 가까이 정치, 군사적인 이유로 비밀리에 진행되어 왔었으나, 핵융합로 개발이 예상보다 무척 어려운 과제임이 점차 밝혀지자 핵융합 개발계획의 비밀화는 곧 무너지게 되었다.

1958년 제네바에서 열린 UN주최 제2회 「원자력의 평화적 이용에 관한 국제회의」에서 핵융합연구를 공개하고 국제적 상호협력의 필요하다는 제안이 나오자 각국은 사실상 경쟁관계에 들어섰다. 실용적인 대형 핵융합로 개발까지는 그 이전에 많은 기초연구가 필요하다는

인식이 보편화되어, 플라즈마 가둠과 가열의 기본적인 이해에 관한 연구와 여러 자기가둠장치의 기초적 실험을 주로 수행하였다. 또한 실험에서 나타나는 여러 불안정성 문제의 해결이 실용화의 관건이 된다는 사실을 파악하였다.

1960년대말까지 자기가둠 플라즈마에 관한 이론은 급진적인 성과가 있었으며 불안정성을 억제시키는 핵융합장치 개발에 주력하였다. 핵융합연구의 극적인 전환은 1968년에 소련 Kurchatov 연구소의 토카막이 얻은 획기적인 가둠실험 결과로 일어났다. 이에 따라 서방의 연구가 토카막장치 개발로 전환하는 계기가 되었으며 그 외에 개방형인 자기거울장치와 새로운 개념의 폐쇄형 자기가둠장치의 기초연구에 꾸준한 진전이 있었다. 또한 레이저를 이용한 관성가둠 핵융합연구도 이 시기에 시작되었다.

1970년대에도 토카막은 중형 장치에서 좋은 가둠과 가열실험 결과가 나타났다. 미국, 유럽 공동체(EC), 일본, 소련의 선진 4개 그룹에서는 각각 임계조건 실현을 목표로 한 대형 토카막 건설에 착수하였다. 또한 토카막에 이어 Tandem Mirror와 레이저 핵융합 장치도 대형화하여 건조하기 시작하였다.

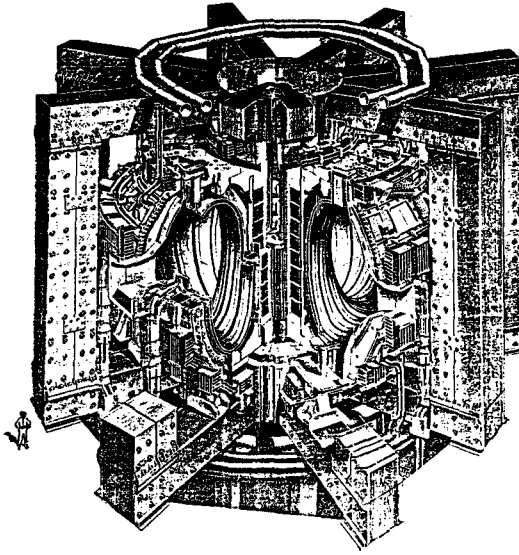
1980년대에 들어서 선진 4국은 세계 4대 대형 토카막 건설을 완료하고 임계조건 달성을 목표로 한 여러가지 실험을 본격적으로 수행하였다. 80년대말에는 이들 장치에서 이미 목표치를 각각 초과하는 점화온도와 가둠조건의 개별적인 실험결과들을 얻기 시작하였다. 따라서 토카막방식이 플라즈마온도와 Lawson조건의 실험성공면에서 다른 방식의 가둠장치보다 훨씬 좋은 기록들을 보여 주고 있어 미래의 핵융합로 후보로 가장 유망시된다. 1990년대에 들어와서는 이 4대 대형 토카막으로 점화온도와 가둠조건을 동시에 만족시키는 임계조건을 수년 내 달성할 실험을 준비중에 있으며, 차기의 공학시험로도 모두 토카막방식으로 건조하려고 선진 4국은 계획중에 있다. 상대적으로 다른 가둠방식들은 개발이 중단되거나 투자가 축소되는 경향이 있으나 기초적인 연구는 계속되고 있다.

2. 기술개발 성과와 동향

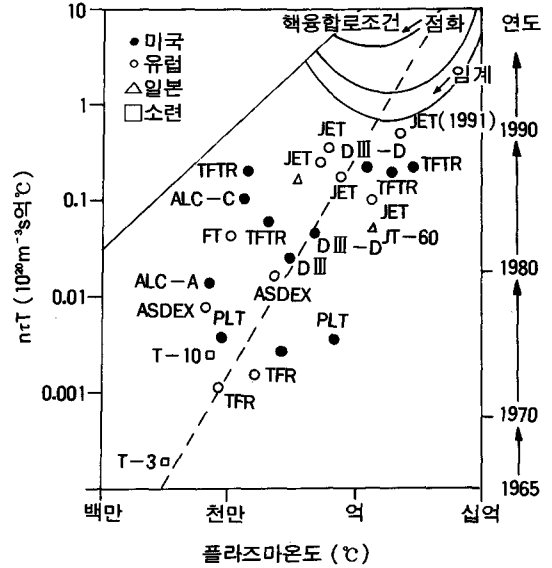
임계조건 달성을 목표로 한 세계 4대 대형 토카막을 <표 6>에 요약해서 비교하여 놓았다. 미국의 TFTR(Tokamak Fusion Test Reactor), 유럽 공동체의 JET(Joint European Torus), 일본의 JT-60U(Japanese Tokamak-Upgrade), 舊소련의 T-15는 이미 완성되어 각기 개별적으로 좋은 가둠과 가열의 실험결과를 내고 있어 앞으로 2~3년 내에 이들 중에서 핵융합의 과학적 실증이 보여질 것으로 예측된다. 지금까지는 1991년말에 <그림 11>의 JET가 얻은 실험결과가 가장 기록적인 것으로 <표 7>에 나와 있다. 여기서 JET가 얻은 T, n, τ 는 한 실험상태에서 동시에 얻은 성과가 아니고 각기 다른 상태의 여러 실험 중에서 각각 얻은 최대의 값인데 반하여, 외부로부터 에너지 공급이 없어도 핵융합로 내부 자체반응으로 계속 운전하여 점화상태에 있을 핵융합로에서의 목표값은 한번의 운전에서 동시에 얻어야 하는 값이다. 따라서 한 운전상태의 성과를 파악하고 목표치와 비교해 보기 위해서는 실험에서 각각 얻은 n, τ , T 값을 곱하여 살펴보는 것이 편리하다. JET의 실험값은 개별적으로 보면 이미 목표치를 넘어서서 가열문제와 가둠문제가 독립적으로는 해결

<표 6> 세계 4대 대형 토카막

장 치 명	JET	JT-60U	TFTR	T-15
국 가	유럽공동체	일 본	미 국	舊소련
주반경 R(m)	2.96	3.4	2.48	2.43
부반경 a/ b(m)	1.25/2.1	1/1.5	0.85	0.75
자기장세기(T)	3.5	4.2	5.2	3.5
플라즈마 전류(MA)	7	6	2.5	1.4
소재지	영국 Culham 연구소	일본 원자력 연구소	Princeton 대학	Kurchatov 연구소
본체완성시기	1983.6	1985.4	1982.12	1988
플라즈마 크기 비교				



〈그림 11〉 유럽공동체(EC)의 토카막인 JET장치



〈그림 12〉 토카막의 실험성과 추세

〈표 7〉 토카막 실험결과와 점화로 목표

	JET 실험	점화핵융합로목표
플라즈마 온도 T(억도C)	2.8	1~2
플라즈마 밀도 n (m ³ 당 입자수)	4×10 ²⁰	1~2×10 ²⁰
가둠시간 τ (초)	1.4	1~2
nτT (m ⁻³ s 억도C)	9×10 ¹⁹	5×10 ²⁰

이 된 상태이나, 동시에 복합적으로 해결하여 임계나 점화조건에 이르는 아직도 약간의 시간이 필요하다는 것을 알 수 있다. 그러나 〈그림 12〉에서 볼 수 있는 바와 같이 그동안 연구하여 온 수많은 토카막에서 얻은 $n\tau T$ 값이 핵융합 개발초기부터 매년 빠른 증가추세로 개선되고 있는 것으로 미루어 임계상태는 앞으로 수년 내에 달성될 것으로 예측된다.

임계상태에 도달하기 위해서 각 운전값을 증가시키는 방법을 지금까지의 토카막 실험을 통해서 얻은 결과를 토대로 살펴보면

(1) 플라즈마온도 T는 연료 플라즈마 안에 불순물이 섞여 들어오는 것을 최대한으로 막고, 고주파나 중성빔입사의 방법으로 가열하면서 동시에 연속적인 플라즈마전류 발생으로 전

류분포를 조절하여 높일 수 있다.

(2) 플라즈마 밀도 n의 증가는 핵연료를 작은 덩어리(Pellet)형태로 주입하고 벽과의 경계면에 플라즈마 접촉을 막는 리미터(Limiter)를 설치하여 운전하면 큰 효과가 있고 강자기장 소형 토카막이 유리하다.

(3) 가둠시간 τ 는 플라즈마 전류를 증가시키거나, 용합로벽 사이에 진공층을 만들고 불순물을 제거해 주는 자기장장치인 다이버터(Divertor) 등을 사용하면서 중성빔입사 또는 고주파 가열 운전으로 증가시킬 수 있다.

위에 열거한 방법들을 실현시키기 위한 기술개발이 동시에 진행되고 있다. 플라즈마 가열에 필요한 고출력 고주파 발생장치 및 전송기술, 중성빔입사장치 개발, 플라즈마전류 연속 발생기술, Pellet 연료 주입기술, 리미터와 다이버터 기술, 강자기장 기술개발, 진공기술과 용기벽재료 기술개발은 물론 토카막의 운전제어, 원격조정과 계측자료 자동습득 및 처리기술에 이르기까지 광범위한 연구개발이 이루어지고 있다. 또한 중수소와 삼중수소를 연료로 하여 핵융합반응 연소를 하였을 때 산물인 헬륨이온에 의한 자체가열과 복사손실로 나타나

는 점화상태에서의 연소특성도 연구하여 차기 장치 설계에 대비하고 있다.

3. 차기장치 개발계획

세계의 4대 대형 토카막에 의해서 과학적 실증의 최종단계로 들어감에 따라 차기장치인 점화목표의 핵융합공학시험로(FER) 건설도 토카막 방식으로 채택하여 추진되고 있다. 이들의 개념설계를 선진 각국이 독자적으로 또는 국제원자력기구(IAEA)가 주선한 국제협력으로 공동진행중에 있으며 90년대 중반에 건설을 목표로 하고 있다. 앞으로 2000년도에 이르기까지 개발이 계속될 공학적 실증을 위한 이들 차기장치들을 <표 8>에서 보여주고 있다. 이들에 대한 부가적인 설명은 다음의 각국 개발현황 및 계획에서 다시 다루겠다.

<표 8> 차기 토카막 핵융합로

융합로명	(BPX)	NET	FER	OTR	ITER
국가	미국	EC	일본	舊소련	IAEA
주반경 R(m)	2.6	6.3	5.2	6.2	6.0
부반경 a(m)	0.8	2.05	1.1	1.5	2.15
자기장세기(T)	9	6.0	5.3	5.6	4.85
플라즈마 전류(MA)	12.0	25.0	5.9	8.2	22.0
출력(MW)	500	1,100	300	520	1,015

이들 차기 핵융합로 다음에 원형로(Prototype)와 실증로(DEMO)를 거쳐서 최종적으로 경제성, 신뢰성, 환경 및 안전성이 보장되고 연속발전이 가능한 상업로(CPR)를 개발하여 핵융합발전이 들어갈 수 있을 것이다. 그러나 이러한 단계에는 각각 10년 정도 시일이 걸릴 것으로 예상되므로 개발이 순조롭게 진행될 경우에는 2025년까지 실증로에 의한 공학적 개발단계가 끝나고 2040년경에는 실용화될 전망이다<표 9>.

4. 각국의 개발현황 및 계획

(1) 미국

1950년도 초반부터 주로 PPPL(Princeton Plasma Physics Laboratory)을 중심으로 한 스텔라레이터와 LLNL(Lawrence Livermore

<표 9> 핵융합 선진 4국의 핵융합로 개발계획

국가	개발 단계	1970	80	90	2000	10	20	30	40	
		과학적실증			공학적실증			상업적실증		
E C	JET NET	원형로			실증로			상업로		
		TFTR (BPX)			실증로			상업로		
미	국	JT-60			FER			원형로 실증로		
		T-15			OTR					
舊 소련	IAEA	INTOR			ITER					

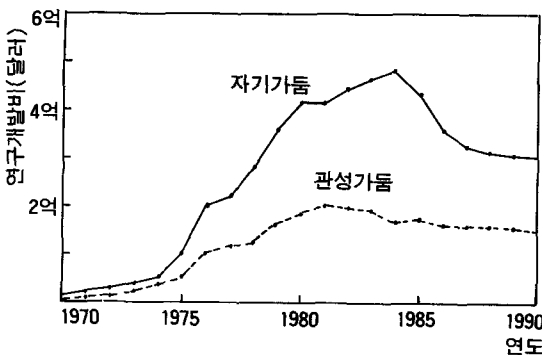
National Laboratory)에서의 자기거울 실험으로 핵융합연구에 착수하였으나, 60년대말 토카막의 우수성이 인정되자 70년대 들어서서 PPPL, MIT, GA(General Atomic Technology Inc.), ORNL(Oak Ridge National Laboratory)가 중심이 되어 토카막 연구개발에 주력하여 왔다. 여러 소형 및 중형의 토카막 실험을 통하여 착실하게 좋은 결과를 얻어 장치를 개선시켜 오면서, 임계실험용 대형장치로 TFTR을 PPPL에 건조하여 세계 4대 토카막 중 최초로 1982년 12월에 플라즈마 발생실험에 성공하고 현재 이미 점화온도를 훨씬 초과한 3억9천만의 플라즈마온도 기록을 가지고 있다. MIT의 Alcator C라는 소형 강자장 토카막은 nr 값면에 있어서는 역시 세계 최초로 임계값인 $10^{20} \text{ m}^{-3}\text{s}$ 를 돌파하였다.

개방형 자기가둠방식인 Tandem Mirror 장치는 임계조건 달성을 목표로 하는 MFTF-B (Magnetic Fusion Test Facility)가 거의 완성단계에 있었으나, 미국의 핵융합로 개발전력 변경과 예산상의 문제로 폐쇄되어 중단된 채 일부 대학에서 기초연구로 명맥을 유지하고 있다. 일부 스텔라레이터나 RFP 장치가 건조 또는 실험단계에 있었으나, 1991년부터 정부의 개발 지원대상에서 제외됨으로써 역시 중단될 위기에 처해 있다. 1970년대부터 핵융합 개발대열

에 참여한 관성가둠방식에 따른 레이저핵융합과 입자빔핵융합은 우선 고출력의 레이저와 가속기의 개발에 주력하면서 연료표적인 Pellet의 설계와 제조를 추진하고 있다. LLNL의 NOVA같은 레이저와 SNL(Sandia National Laboratory)의 PBFA-II(Particle Beam Fusion Accelerator)와 같은 가속기가 임계조건 달성을 목표로 건조되고 있으나 자기가둠 방식보다 훨씬 지연될 것으로 예상되며 무기개발과 같은 군사적 목적의 연구와 병행되고 있다.

〈그림 13〉에서 볼 수 있는 바와 같이 핵융합 개발 초기부터 1980년까지 약 20억달러를 자기가둠 핵융합개발에 투자하였으며, 그후 매년 평균 4억달러 이상을 투자하였으나 86년 이후 매년 감소추세를 보여 작년 1991년에는 2억7,500만달러까지 삭감되었다가 올해 1992년에 다시 3억달러 이상으로 올라섰다. 관성가둠 핵융합 개발투자는 자기가둠의 경우와 같은 투자경향을 보였으나 그 규모는 반 이하를 밑돌고 있다.

TFTR 다음의 공학적 실증에 들어갈 차기장치로 CIT(Compact Ignition Tokamak)의 개념 설계와 개발을 한때 결정하였으나, 최근에 이를 BPX(Burning Plasma Experiment) 계획으로 수정한 상태이나 건설로 이어질 전망은 예산상의 문제로 어두어진 상황이다. CIT는 중수소-삼중수소 운전에 의한 TFTR의 성과와 앞으로 계획된 공학시험로의 점화상태요건을 연결하는 강자기장 소형 점화로로서 1987년말부터 세부설계에 들어가 약 9억달러의 예산을 투입할 예



〈그림 13〉 미국의 핵융합 연구개발 예산

정이었다. CIT 계획에는 미국의 모든 핵융합 개발기관(PPPL, MIT, LANL, LLNL, ORNL)과 산업체(GA, TRW 등)가 참여하기로 되어 있었다.

(2) 유럽공동체(EC)

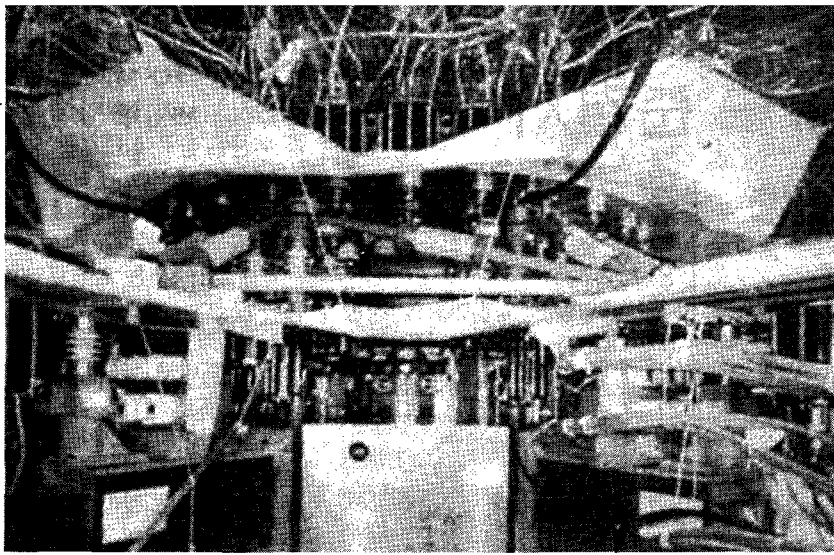
EC는 1957년에 설립한 유럽원자력공동체(EURATOM)를 중심으로 잘 조정된 핵융합 개발 계획에 따라 EC 12개 회원국과 스웨덴, 스위스의 2개 중립국가가 참여하여 연구개발을 진행하고 있다. EC는 각국 핵융합 연구소에 평균 1/3 정도 보조금을 핵융합개발에 지원하고 있다. 토카막 개발을 집중적으로 지원하여 영국, 독일, 프랑스, 이탈리아 등에 중소형 토카막장치들이 산재해 있다. 1983년 6월 첫 가동에 들어간 JET는 임계실험용 대형 토카막으로 연평균 1억3천만달러 정도의 예산 중 80%를 EURATOM에서, 10%는 장치가 있는 영국에서, 나머지 10%는 회원국에서 분담하고 있다. 지금까지 온도 및 가둠조건의 개별적 기록 뿐만 아니라 종합적으로 nT의 기록면에서도 세계 4대 토카막 중 가장 앞서 있는 실험성과를 보여 임계조건에 육박하는 기록을 보인 바 있다.

이러한 기록은 중수소만을 사용한 실험이었으나 1991년 11월9일 JET는 중수소-삼중수소(D-T) 핵융합반응에 의해 세계 최초로 1.8 MW의 열출력을 내는 실험에 성공하였다. 이 실험 성공으로 대체 에너지원으로서 핵융합 개발은 새로운 전기를 마련하였으며 핵융합연구에 있어서 EC의 주도적 위치를 확고히 하였다. 이번 실험에서는 삼중수소를 두 개의 중성입자빔(NBI)으로 중수소 플라즈마에 입사시켜 삼중수소와 중수소의 비가 약 13%에 그쳤으나 단계적으로 그 비율을 높여 1996년까지는 50%-50%의 비율로 최대 출력을 얻을 예정이다.

EC에서는 JET에 이어 유럽 독자의 차기장치인 NET(Next European Torus)의 개발을 추진하여 JET와 실증로를 잇는 역할을 하도록 하였다. 현재 예비설계 단계이며 곧 세부설계에 들어가 1993년에 건조를 시작할 예정이다.

(3) 일 본

일본은 핵융합개발을 몇 갈래로 나누어 진행

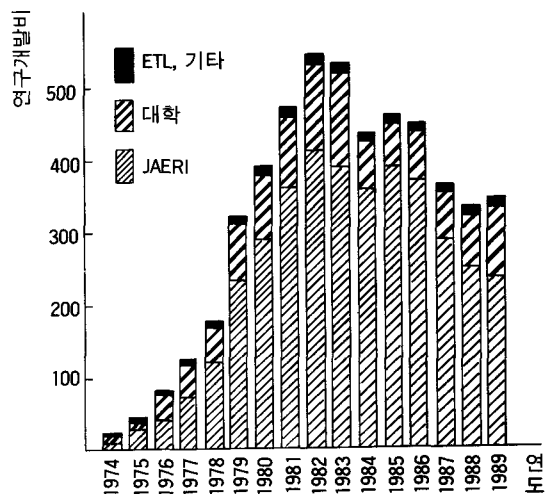


하고 있다. 과학기술청 산하의 일본원자력연구소(JAERI)와 국립금속연구소(NRIM) 등이 있고, 통산성의 관장아래 전기기술연구소(ETL) 등이 주축이 되고 있다. 또한 문부성의 지원을 받는 각 대학연구소들로 나고야대학의 국립핵융합과학연구소(NIFS), 교토대학의 Heliotron 연구센터, 히로시마대학의 핵융합이론연구소 등이 다른 한 갈래이다. 나머지 한 갈래는 일반 기업체로 토시바, 히타치, 미쓰비시중공업,가와사키중공업, 스미토모중공업 등이 블랙텟 개발, 삼중수소 처리기술, 원격조정 기술, 저온기술 개발, 노재료 개발 등에 이미 부분적으로 참여하고 있다. 대부분의 가둠장치에 관심을 갖고 있어서 토카막은 일본원자력연구소와 나고야대학, 스텔라레이터는 교토대학, 자기거울은 쓰꾸바대학, 레이저핵융합은 오사카대학에서 중심이 되어 연구가 진행중이다.

세계 4대 임계실험용 대형 토카막 중의 하나인 JT-60은 일본원자력연구소에서 1985년 4월에 가동을 시작하였으며 2천억엔 이상을 이 장치에 투자한 것으로 알려져 있다. 그러나 중수소 이용과 대전류화를 목적으로 1989년 10월 이후 시설개조공사를 진행하여 1991년 3월에 Upgrade를 마치고 JT-60U라는 새 이름의 장치를 완성하였다. 이 개조로 진공용기는 계란형 단면에서 다이버터가 있는 D형 단면으로 하여 구조강도를 늘리고 플라즈마체적을 종래의 60m³에서 약 100m³로 증가시켰다. 이와 아울러 Poloidal 자기장코일을 교환하여 플라즈마전류를 기존의 약 2배인 6MA로 증가시켜 중

수소 플라즈마 가둠성능을 높이려 하고 있다. 이번 개조에 사용된 공사비는 중수소화 공사에 약 200억엔, 대전류화 공사에 약 150억엔으로 알려졌다.

일본에서 주요연구기관 별로 핵융합 연구개발에 매년 들어간 예산은 <그림 14>에서 볼 수 있는 바와 같이 미국에 못지 않는 투자를 하고 있는 것을 알 수 있다. JT-60U 이후의 차기 장치는 잠정적으로 FER(Fusion Experimental Reactor)로 결정하고, 일본원자력연구소를 중심으로 개념설계에 들어가 점화조건과 장시간 연소 1985년 제네바 정상회담에서 고르바초프 서기장이 레이건 대통령에게 국제협력을 통한 토카막 건설을 제안하여, INTOR의 후속 확장사업으로 1987년에 역시 IAEA 주관으로 이들 4대



<그림 14> 일본의 핵융합 연구개발 예산

의 D-T 운전을 목표로 앞으로의 연구개발 추진방법에 대한 검토가 행해지고 있다.

(4) 舊소련

전통적으로 토카막개발에 치중하여 왔으며 스텔라레이터와 자기거울장치들이 일부 알려져 있다. 1960년도초부터 Kurchatov 원자력연구소에서 시작된 일련의 T계열 토카막은 1968년 T-3의 가동실험 성과로 서방에 알려지면서 중형의 T-10에 이르는 1970년대까지 토카막 연구의 선두를 달렸다. 동급의 세계 4대 토카막 중 T-15는 초전도자석을 설치한 특징을 가지고 있으나 현재 가장 저조한 실험결과를 보이고 있으며, 최근 국내정치 불안과 경제사정 악화로 사실상 본계획의 핵융합 개발 투자는 중단된 상태이다. 서방 3국이 독자적으로 차기장치를 추진하고 있는 것에 대응하여 한때 토카막실험로인 OTR(Opytnyj Tokamak Reaktor)의 차기장치 개념을 설정하고 3단계로 나누어 개발하려는 계획을 발표한 적이 있었다.

(5) 국제원자력기구(IAEA)와 국제열핵융합 실험로(ITER)

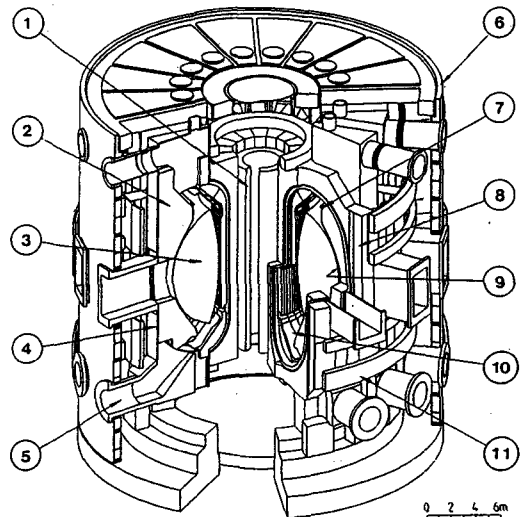
세계의 4대 대형 토카막그룹은 연구성과를 올리는 면에서는 서로 경쟁적인 관계에 있는 반면, 고도의 기술개발에 따른 문제점 해결과 최신 연구결과에 대한 정보교환면에서는 공동협력의 필요성을 절실히 느끼고 있다. 따라서 개발초기 1961년부터 시작하여 국제회의를 국제원자력기구 주관으로 지금까지 13회에 걸쳐 주기적으로 개최하면서 최신 결과의 발표와 정보교환, 공동연구 과제개발 등을 통해 국제협력을 시도하여 왔다. 국제에너지기구(IEA) 아래 JET, TFTR, JT-60 3자간의 국제협력 계획이 수립되었으며, 그동안 초전도 코일 공동개발 계획, 플라즈마-벽 상호작용 공동연구, 재료손상에 관한 공동연구 등을 주선하여 왔다.

특히 1979년에 시작하여 1987년에 끝난 IAEA 주관의 INTOR(International Tokamak Reactor) 워크숍은 유럽, 미, 일, 소의 4대 그룹 전문가들이 모여 4대 대형 토카막과 실증로 사이를 연결하는 차기장치 개념설계를 마쳤다.

선진그룹이 참여하는 ITER(International Thermo-nuclear Experimental Reactor) 계획을 확정하였다. 건조까지 약 60억달러의 투자가 예상되는 이 차기 토카막 핵융합로는 1988년부터 1990년까지 이미 개념설계활동(CDA)을 마치고 <그림 15>의 개념도와 같은 ITER 건설에 필요한 자료와 기술적 변수를 결정하고 소요경비와 기간을 결정하였다. 이어 1991년부터 6년간 제2단계인 공학설계활동(EDA)에 들어가 세부설계와 공학관계 연구개발을 수행하며, 8년간의 건설공사를 거쳐 10여년간 운전시험을 계획하고 있다. 이러한 국제협력에 대해서는 차기장치에 대한 공동투자 가능성이 검토되고 있으나, 각국의 개발전략의 차이와 자국 계획과의 조정 등으로 인해서 구체화 단계에서는 해결해야 할 문제가 많이 남아 있다. 각국의 수뇌들간의 회

5. 국내 연구동향

핵융합로 개발이 아직 초기단계에 있고 막대한 투자경비가 필요하기 때문에 우리나라가 핵융합 연구개발을 본격적으로 착수하기에는 아



- ① 중심 솔레노이드 ② 차폐체/블랭킷 ③ 플라즈마
- ④ 진공용기-차폐 ⑤ 플라즈마배기 ⑥ 저온설비
- ⑦ 제어코일 ⑧ 토로이달자장코일 ⑨ 융합로벽
- ⑩ 다이버터판 ⑪ 폴로이달자장코일

<그림 15> 국제열핵융합실험로(ITER)의 개념도

담을 통해서 국가간 연구협력 합의가 최근 빈번히 발표되고 있는 것도 이러한 문제해결 노력의 일환이다.

(6) 개발도상국

1991년 IAEA가 조사한 자료에 의하면 핵융합 관련연구에 참여하고 있는 국가는 세계적으로 50개국 321개 기관에서 8,600여명의 연구자가 참여하고 있는 것으로 나타나 있다. 이 중 특히 우리나라와 비슷한 여건에 놓여 있는 개발도상국이나 제3세계 국가들의 동향은 앞으로 국내 핵융합로 개발계획에 좋은 참고가 될 것이다. <표 10>은 핵융합 관련연구를 하고 있는 대표적인 개발도상국으로 이들 국가에서는 이미 보유하고 있는 기기를 이용한 비용이 적게 드는 저온플라즈마 실험과 기초 원자물리에 대한 연구가 주류이나, 점차로 핵융합 직접 관련 연구로 전환하고 있다. 특히 중국의 핵융합에 대한 열의와 관심은 대단하여 9개의 토카막과 6개의 미러가 여러 대학과 연구소에서 실험중이다. 인도는 역사적으로 튼튼한 핵물리를 배경으로 기초 플라즈마는 개도국 중 가장 앞서 있는 편이며 중형의 토카막 장치 하나는 국가적인 재정의 뒷받침으로 연구되고 있다. 남미의 브라질과 아르헨티나 등의 핵융합 플라즈마 연구 노력은 정기적인 지역 국제회의를 통해서 나타나고 있고 정부로부터 장기간에 걸친 핵융합기술 개발투자에 대한 예산승인을 받아놓고 있다.

<표 10> 개발도상국의 핵융합연구 동향

국 가	연구기관수	핵융합장치수	참여자수
중 국	8	22	270
브 라 질	6	3	45
아르헨티나	4	5	54
인 도	4	3	30
한 국	6	7	30
폴 란 드	4	13	105
체코슬로바키아	2	3	40
이 스 라 엘	5	3	130
스 페 인	4	3	60
멕 시 코	2	2	24

직 시기상조라는 인식이 정책 당국자를 비롯한 과학기술자와 기업인들에게 지배적이다. 따라서 이러한 인식이 핵융합 기술연구에 필요한 지원과 장기적인 안목의 시설 및 재정적인 투자를 오히려 방해하고 있는 실정이다. 우리나라 유일의 핵융합 관련연구소인 한국원자력연구소도 선진국의 기술개발 문헌추적과 소형 토카막의 기초실험 정도에 머물러 있다. 현재 실험중인 국내 토카막장치는 <표 11>에 보인 서울대학교의 SNUT-79와 한국원자력연구소의 KAERIT인데, 장치 본체는 완성이 되어 있는 상태이고 전자석의 전원공급계통이 준비되면 저항가열 실험단계에 들어갈 수 있을 것이다. 최근 한국과학기술원에서는 미국 텍사스대학으로부터 기증받은 PRETEXT라는 소형 토카막의 조립을 마치고 실험을 준비중에 있다. 또한 한국표준과학연구원 부설 기초과학지원센터에서는 국내 플라즈마 공동연구시설로 미국 MIT에서 TARA라는 Tandem Mirror의 기증을 약속받아 설치를 준비중에 있다. 이외에 경북대에서 소형 미러장치를 제작하여 기초적인 실험을 하고 있다.

최근에 급격하게 플라즈마나 핵융합 관련 연구자들이 해외에서 귀국하거나 국내에서 학위를 마치고 배출되어 우리나라도 핵융합연구를 시작할 수 있는 고급인력이 충분하게 확보되어 있다. 이들이 현재 대학과 연구소에서 산발적으로 기초 플라즈마 이론이나 핵융합장치 관련 이론연구를 수행하고 있으며, 최근에는 핵융합 관련 연구비 지원의 절대부족으로 대신 저온플라즈마 응용분야의 연구가 활발히 진행되고 있다. 주로 신소재 개발과 관련된 글로우, 아크, 고주파방전 플라즈마장치의 개발과 기초 플라즈마 계측기술 연구가 활발한 편이다.

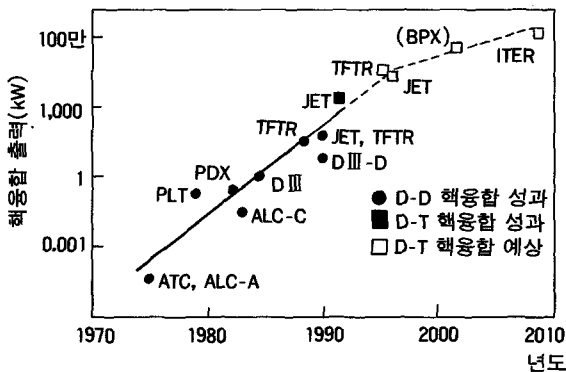
<표 11> 한국의 토카막 장치

장 치 명	SNUT-79	KAERIT
연 구 기 관	서 울 대	한국원자력연구소
주 반 경 R(m)	0.65	0.27
부 반 경 a(m)	0.15	0.05
자 기 장 세 기(T)	3	4

맺는말

어떤 기술개념이 도입되어 실용화되기까지는 먼저 기초과학적 실증단계, 공학적 개발단계, 경제적 및 환경적 타당성단계를 거쳐야 비로소 상업용으로 빛을 보게 된다. 핵융합개발의 실용화에 있어서도 이에 따라 실험로, 공학시험로 및 실증로, 상업로의 단계로 개발의 길을 밟아야 한다. 우리가 지금까지 살펴본 바로는 핵융합로 기술개발이 인류가 지금까지 도전한 과학기술 중 최대 난관의 거대첨단과제이며, 막대한 투자비를 요구하는 초대규모 개발사업이며, 수십년간 걸리는 초장기 연구로 특징지을 수 있음을 알았다. 그러나 꾸준한 개발 노력으로 핵융합기술의 과학적 실증이 선진 여러 나라의 토카막에서 곧 실현될 것으로 예상되고, 공학적 개발을 본격적으로 시작하기 위한 공학시험로 건설을 준비하고 있는 이행단계에 있다.

〈그림 16〉에서 우리는 지난 20년동안 토카막 실험에서 얻은 핵융합 출력과 앞으로 과학적실증 마무리단계와 공학적실증 초기단계에서 예상되는 토카막 핵융합 출력의 변화과정을 볼 수 있다. 1970년대에 중소형 토카막에서 이온온도 약 600만도, 가동시간 0.007초, 핵융합 출력 50mW 근처에서 출발하여, 1980년대에는 대형 토카막에서 수 kW의 출력을 얻을 수 있었다. 1991년 현재까지 최고 이온온도는 TFTR에서 약 3억9천만도, 최장 가동시간은 JET에



〈그림 16〉 토카막 실험에 의한 핵융합출력 성과와 예상

서 1.4초, D-T 핵융합반응에 의한 최대출력은 JET에서 1,800kW를 기록하고 있어, 1995년 이전에 JET와 TFTR에서 1만kW의 출력을 얻음과 동시에 임계조건을 달성하는 과학적실증을 보일 것으로 예상된다. 이어 국제협력에 의한 ITER의 건설이 순조롭게 진행된다면 2010년 이전에 100만kW 열출력 실험을 성공 시킬 것으로 내다보고 있다.

지상에서 핵융합반응을 일으켜 인공태양을 만들어 낸다는 이 기술개발은 현재로서 그것이 언제 열매를 맺어 우리 안방까지 전력이 공급되는 시기가 올 지 아무도 속단할 수는 없다. 그러나 이러한 연구성과와 개발추세로 보아 2025년까지 실증로에 의한 공학적 개발단계가 끝나고 2040년 경에는 상업발전소가 등장하리라는 전망이다.

핵융합발전의 성공적인 실현에 대비해 우리도 국내 인력에 의한 핵융합 연구체제를 확립하여 선진기술의 소화추진과 자력에 의한 기술개발의 능력을 배양하여야 한다. 이렇게 하여 핵융합과 관련된 여러 분야와 산업에 있어서 기술의 조직화와 효율적인 관리능력을 쌓아야 상용화될 핵융합 발전소의 자력운전과 발전소 건설의 국산화에 미리 대응할 수 있을 것이다. 이 과정에서 핵융합 기술개발이 다른 분야 학문과 산업에 주는 파급효과는 광범위하며 부수적인 수없는 극한첨단기술 발달에도 기여할 것이다.

우리 인류가 하늘의 번개로부터 불을 얻어 사용하기 시작한 이래, 태양과 별에 품어온 꿈은 플라즈마 발견으로 이어져 지상에서 영원히 에너지문제를 해결하려는 끊임없는 핵융합연구자들의 노고 끝에 인공태양의 실현을 눈앞에 두고 있다. 핵융합기술 개발에 참여는 인류 공동의 숙원을 푸는데 동참한다는 동시대인으로서의 책무일 뿐만 아니라, 인류 최첨단과제에 과감하게 도전해보는 학문적인 우월성과 기술선도를 지향하는 자존심의 발로이기도 하다. 우리 후손들에게 값싸고 깨끗한 에너지를 대대로 물려줄 수 있는 문을 향해 핵융합로기술개발은 오늘도 지속되고 있다.