



核融合反應 制御技術의 確立

工學博士 鄭 基 亨

서울대학교 原子核工學科 教授

1. 최초로 열출력 2,000 kW 추출

1991년 11월 9일 오후 7시 44분에 영국에 있는 핵융합장치 Joint European Torus(JET)로부터 2,000 kW의 열출력을 추출하였음을 발표하였다.

1940년대로부터 연구개발을 시작한 핵융합장치의 실험이 1980년대 후반에 들어오면서 과학적 실증단계를 넘어 공학적 실증단계로 들어갔음이 선언되었고 드디어 세계 최초로 중수소와 삼중수소를 연료로 하여 예측했던 성과에 도달하였음을 알리는 소식이었다.

현재 100만 kW 열출력 규모의 핵융합로인 국제 열핵융합 실험로(International Thermonuclear Experimental Reactor ; ITER)가 개념설계를 끝내고 금년부터 공학적 설계에 돌입하고 있으며 2002년부터 가동을 목표로 하고 있다. 따라서 2015년경에는 공학적 실증이 끝나고 경제적 실증을 목표로 한 3단계 핵융합로가 계획될 것이다. 연구의 대상은 열출력의 효율적인 추출과 연료인 삼중수소 생산을 위한 노의 구조, 그리고 고온에 견디는 재료개발 등을 들 수 있다.

핵융합로의 제작은 극한기술의 총합체로 이

루어지기 때문에 막대한 개발비가 소요되어 부국들만의 연구과제로 되어있어 유럽연합과 미국, 일본 및 소련의 독무대이며 그 외 후발국들인 제 3 세계는 관람자에 불과하다고 밖에 볼 수 없는 실정이다. 그러나 제 3 세계 그룹도 우열이 있어서 중국의 실력은 요즈음 발표로는 선진국 수준에 도달했다고 하여 제 3 세계에서의 줄임을 선언하고 있다.

2. 핵융합의 R & D 문제

핵융합 연구의 최종 목표는 상업용 원자로를 탄생시키는 것이다. 새로운 전력원(Electric Power Sources)은 다른 전력원들보다 전력단가가 싸고, Clean하여 환경저해요인이 적을 뿐만 아니라 안전성, 연료 확보성 등에서 Merit가 많을수록 바람직하다고 하겠으며 핵융합형 원자로는 이 여건을 모두 갖추었다고 할 수 있다.

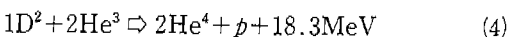
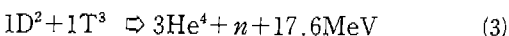
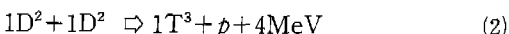
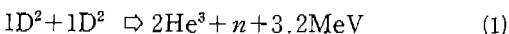
현재 단일 발전시설물로 100만 kW 이상을 발전하는 것은 원자로밖에 없으며 계획되고 있는 핵융합로 역시 2~300만 kW 급이 될 것으로 보고 있어서 대체 에너지원으로서 이렇게 대용량의 발전소는 없다고 하겠다.

1940년대와 1950년대를 거치면서 수소폭탄이 개발되어 시험되면서 핵융합 반응이 태양에서 일어나고 있는 것과 같이 지상에서도 일으킬 수 있음이 확인되었다. 그러나 펄스형으로 막대하게 쏟아지는 에너지는 이용과 저장이 불가능하므로 시간의 함수로 원하는 만큼만 얻을 수 있도록 제어하는 것이 필요하다. 따라서 핵융합 발전로의 연구는 원자로내에서의 융합반응물을 인위적으로 조절할 수 있게끔 하자는 것이 본래 연구개발의 취지라 할 수 있다.

우선 연료로는 중수소와 삼중수소를 대상으로 하고 있는데, 그 이유로서는 핵융합 반응이 다른 핵종들보다 낮은 온도(1억°C)에서 일어나며 질량결손에 의한 에너지 방출량이 크다는 장점이 있기 때문이다. 원래 핵융합 반응은 주기율표에서 보면 원자번호 1번부터 30번까지의 원자들 간에는 발열반응이 일어나나 그 이상의 것들은 흡열반응으로 어느 것이든 원리상으로는 융합반응을 일으킬 수가 있는 것이다.

중수소는 지구상에 존재하는 물분자 중에 6500분의 1에 해당하는 정도로 풍부하나 삼중수소는 자연계에는 없으므로 인위적으로 생산해야 한다. 가장 쉽게 얻는 방법이 Li원자에 중성자를 흡수시키면 발생하는 삼중수소를 가스 형태로 포집하는 방법이다. 이렇게 하여 얻어진 중수소와 삼중수소를 융합시키면 발열반응을 하여 열을 얻을 수 있는데 동시에 중성자가 발생하여 약하나마 유도방사능을 유발하므로 완전히 Clean하다고 할 수는 없다.

이와 같은 핵융합반응을 식으로 표시하면



와 같다.

여기서 1D²를 예를 들면 1은 원자번호, 2는 질량수, D는 중수소를 표시하는 것이고 T는 3

중수소로서 D와 T는 수소H의 동위원소이다. 그리고 n은 중성자, p는 양성자를 표기한 것이다. 이들 식중 (1)과 (2)는 D와 D를 융합시키는 경우로서 각각이 일어날 확률은 50% 정도이다. 또 (1)과 (2)식을 (3)식과 비교하면 플라즈마 온도가 1억°C에서 핵융합 반응률이 (3)의 경우가 100배만큼 크고 또 (1)과 (2)의 경우에서는 반응 시작 온도가 7억°C 이상이라서 제작상 훨씬 어렵다. 유도방사능 문제만 따진다면 (4)식이 가장 바람직하여 완전히 Clean한 반응을 일으키고 자기유체 동력학(Magneto Hydro Dynamics : MHD)적인 방법으로 발전하면 발전효율이 95%까지 되어 이상적이다. 그러나 질량 3의 He는 지상에는 없고 달표면 광석에 다량 존재하므로 달에서 추출하여 운반하는 것을 생각하고 있으며 현재의 로켓 기술로도 경제성이 있다고 한다. 그러나 반응개시 온도가 3억°C 이상이 되어 노재 개발을 더욱 어렵게 하고 있다.

핵융합 반응장치로는 50년대이래 자기거울형(Magnetic Mirror Type), Stellarator형, 토러스(소련어로 TOKAMAK)형, 및 레이저나 입자빔에 의한 관성형이 연구되어 왔으나 지금은 핵융합로 조건에 가장 접근하고 있는 토카막형에 집중하고 있는 상태이다. 그러므로 유럽연합국들의 JET, 미국의 TFTR(Tokamak-15)가 현재로서는 가장 큰 장치들이다. 차세대 것으로 ITER가 개념설계를 끝내고 공학설계 단계에 돌입하고 있다.

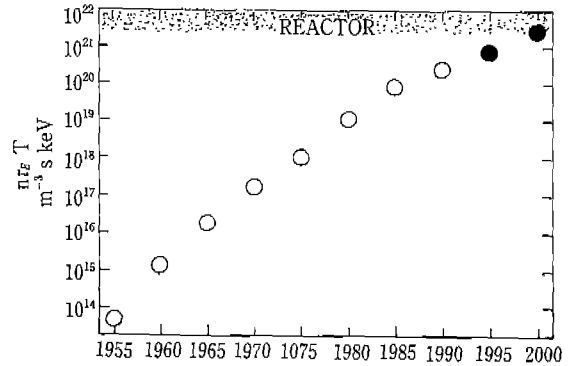
ITER의 주된 목표는 무엇을 실험해 보자는 것일까? 핵융합로에서 가장 중요한 물리변수는 플라즈마 밀도 n_p , 플라즈마 온도 T 및 n_p 를 새나가지 않게 가둔 시간 τ_E 등의 3가지이다. 핵융합 원자료가 성립되려면 1억°C(10KeV와 같다) 이상인 상태에서 세계의 물리변수들 모두 곱한 $n_p \tau_E T$ 의 값이 $5 \times 10^{21} m^{-3} s KeV$ 이상이 되어야 하는데 JET에서 도달한 것이 2×10^{20} 으로 한 단계를 높여야 한다. 그런데 JET

실험으로부터 얻은 경험법칙에 따르면

$$n_{pT_E} T \propto I_p^2 B_t R^2 \quad (5)$$

로 되고, 여기서 I_p 는 플라즈마 전류, B_t 는 토로이달자장, R 는 토카막의 주반경이다. 그런데 JET에서 한계인 플라즈마 전류 $I_p=4$ 백만 암페어를 2천~3천만 암페어까지 높여도 (5)식의 법칙이 맞는지를 실증하자는 것이며 이 법칙이 잘 맞는다면 공학적 실증단계는 끝나는 것이고 ITER의 주어진 사명이 이것이다. 그렇게만 된다면 핵융합 원자로의 성립조건에 만족하게 되는 것이며 그외는 노의 수명을 키우고 값싸고 안전한 장치가 되도록 연구개발만 하면 되는 것이다.

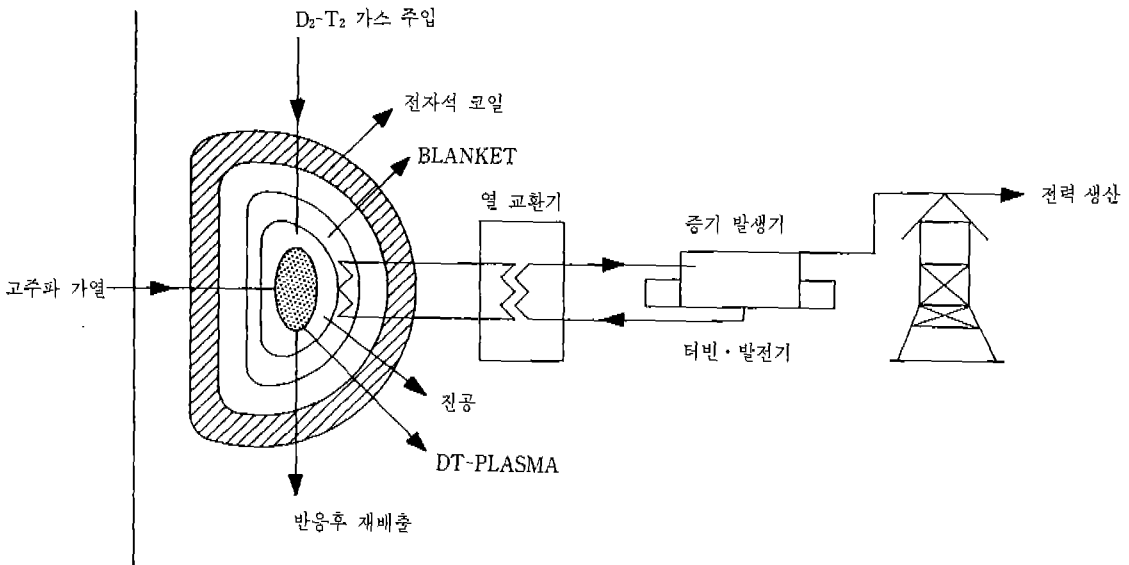
이제까지 R & D 결과가 원자로 성립조건에 얼마나 접근하고 있는가를 연도별로 보면 그림 1과 같으며 예산만 확보되면 2000년도 초반에는 도달할 수 있을 것으로 예상된다. 그러나 부국들의 입장도 일본과 유럽은 대체 에너지 개발을 서두르는 반면 미국과 소련은 아직도 화석연료가 풍부하여 다른 나라가 개발해 놓은 것을 쓰려는 경향이다.



<그림 1> 해가 거듭됨에 따라 핵융합로 성립 조건에 가까워지고 있는 P & D 발전추세

3. 핵융합 발전의 개념

D-T 플라즈마 융합시에는 온도가 1억°C 이상이기 때문에 공중에 띄워 놓은 상태에서 반응을 시켜야 하고 또 플라즈마를 발생시키기 위하여 진공이 유지되어야 하므로 벽이 있다. 그런데 뜨거운 플라즈마가 접근하여 벽에 닿으면 녹아버리므로 자기장을 사용하여 입자들의 접근을 차단한다. 이런 원리를 핵융합로 성립조건에



<그림 2> 핵융합로 발전 개념도

가장 근접한 것이 토카막형인데 이 개념을 그림으로 설명하면 그림 2와 같다.

여기서 전자석 코일의 모양은 D형이고 고온 플라즈마가 있는 부분에서 강한 자장을 유지하도록 되어 있다. 블랭킷(Blanket)은 진공, 중성자 증식에 의한 Li 으로부터의 T 생산, 열유출을 위한 냉각, 및 방사선 차폐 등의 역할을 담당하도록 되어 있다. 여기서 추출된 열은 열교환기로 가서 고압수증기를 발생하며 이 증기는 터빈을 회전시키고 따라서 발전기로부터 전기를 뽑아내어 송전하게 된다. 블랭킷 내부의 플라즈마는 외부에서 D₂와 T₂ 가스를 50 : 50으로 섞어 주입하고 이를 고주파(마이크로파)나 입자 빔으로 가열하여 고온 플라즈마를 만들며 (3)식과 같이 반응 후 재로서 남는 2He⁴를 자장을 이용하여 빼낸다. 물론 전반적인 에너지의 흐름은 발전된 전기량이 발전소를 가동하는데 쓰인 것보다 훨씬 많이 나오도록 설계된 것이다.

4. 핵융합로 구성기술

토카막형 핵융합로를 중심으로 볼 때 구성기술종목을 대별하면 표 1과 같다.

이들 기술들을 간단히 설명하면 다음과 같다.

<표 1> 핵 융합로 구성기술

기술 종류	역 할
종합 설계기술	원자로에서 핵융합 반응, 연료생산, 열추출 차폐 및 시스템의 자동제어, 부품 적정화 등
초고진공 기술	대형 플라즈마 챔버의 진공
초전도 자석기술	플라즈마 확산 방지
입자빔기술	고온 플라즈마 제조
초고주파기술	플라즈마 가열, 진단
계측제어기술	거대장치 운전 자동화
공학재료 개발	장치 단순화, 내구성(초고온 재료)
보수유지기술	장비관리, 원의성

4·1 종합설계기술

거대한 장치가 주어진 목표를 가지고 연속으로 30여년간 가동되려면 에너지 및 출력균형이 이루어지도록 설계되어야 하고 이 모든 작동이 자동화되어야 한다. 따라서 부품들의 적정화, 최대효율, 내구성, 저가 등의 공학적 조건을 맞추려면 방대한 설계가 되어 이를 통제하고 조직화하는 것을 전산화해야만 한다. 그러므로 뒷장에서 ITER 연표에서 볼 수 있듯이 시간적으로도 장구하고 분량도 방대한 설계능력의 확보가 필요하다.

4·2 초고진공기술

중심부가 1억°C 이고 5T의 강력한 자장이 존재하는 중학교 교실만한 공간(ITER 경우 프리즈마 체적이 약 600 m³)을 -10⁻⁹Torr 정도의 진공으로 만든다는 것은 이제까지의 산업형태상 상상을 초월하는 것이며 진공압력이 이 정도로 유지되지 않으면 플라즈마중의 불순물 농도가 높아 융합을 이룰 수가 없다. 따라서 구성 재료도 Sputtering rate가 적고 고온에 잘 견디며 방사선에도 내성이 좋아야 함은 물론 증기압이 낮아야 하고 기체의 누출이 없어야 한다. 이와 같은 조건에 맞는 재료의 개발여부가 상업용 발전로를 만들 수 있는가 없는가의 관건이 되는데 이는 이제까지 경험하지 못한 새로운 R & D 분야이다. 현재 플라즈마 체적의 크기로는 일본의 JT-60U가 가장 큰데 이것도 ITER의 6분의 1밖에 되지 않는다.

4·3 초전도 자석기술

극저온(액체 헬륨온도 약 -269°C)에서 초전도선으로 산업에 많이 쓰이는 것은 NbTi으로 이것은 가공성이 좋아(구리선과 비슷) 제작하기도 쉽기 때문에 8T 이하의 자장은 이것으로 만든다. 더 높은 자장은 Nb₃S_n으로 하나 가공성이 나쁜 편이며 12T이하에 쓴다. 초전도체

는 선의 직경이 수십 mm 이하이고 임계자장, 임계온도 및 임계전류밀도 이하의 조건을 만족해야 초전도체로 쓸 수 있다. 요즈음 개발되고 있는 고온 초전도체(액체질소 내지는 Dry ice 온도)는 임계전류밀도와 임계자장이 낮아 아직까지는 핵융합로에 쓸 수가 없다. 최고 자장이 1T이하이므로 5T까지 가기에는 무리일 것이다. 그림 3에서 알 수 있듯이 NbTi 경우는 1982년도에 단축과 장축이 $3.5 \times 4.5 \text{ m}^2$ 이고 자장이 8T가 제작되어 시험되었으며, Nb_3Sn 경우는 직경 1.1m에 12T까지 제작 및 시험하였다.

그런데 ITER의 목표가 단축과 장축이 $7.1 \times 14.76 \text{ m}^2$ 이고 자장이 4.85T이므로 규모를 짐작할 수 있을 것이다. 이것 역시 미증유의 R & D 이긴 하지만 가능성은 보이는 것이고 미국이 초전도 초대형 가속기를 제작하면서 초전도 자석 코일도 17m 길이의 타원형 자석을 성공적으

로 제작한 것으로 보아 자금만 투입하면 될 것이다.

4.4 입자빔 기술

플라즈마를 높은 온도로 가열하기 위하여 중수소를 이온화하고 가속한 후 수백 KeV의 에너지를 가지면 플라즈마 속으로 쏘아 넣을 때 자장의 영향을 피하기 위하여 다시 전기적 중성으로 만들어 플라즈마와 충돌시켜 에너지를 전달하므로 대전류에 낮은 에너지의 가속기가 필요하다.

4.5 초고주파 기술

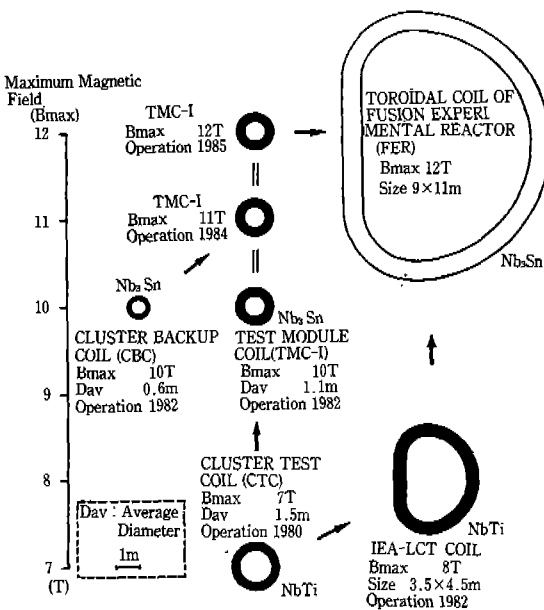
플라즈마를 만들고 가열하는데 입자빔보다 염가로 할 수 있으며 가열방법으로는 이온자기회전공명가열(Ion Cyclotron Resonance Heating), 낮은 복합가열(Lower Hybrid Heating) 및 전자자기회전공명가열(Electron Cyclotron Resonance Heating) 등이 있고 수 MW 출력에 주파수가 수십 MHz부터 수백 GHz 영역에 걸쳐 있다.

대부분의 고주파원이 주파수가 높아지면 출력이 낮아지므로 이것을 극복하는 기술이 개발되고 있으며 이는 핵융합 플라즈마 가열에는 대단히 중요한 것이다.

현재 Gyrotron Source의 경우 펄스로 100GHz에 1MW급이 있고 S밴드의 경우 Klystron 증폭기는 30GW까지 개발되고 있으며 미국의 스탠포드대학과 일본의 토시바가 기록을 갖고 있다.

4.6 계측제어 기술

핵융합로처럼 성립조건이 까다롭고 거대한 장치를 운전하려면 역시 전산기에 의존해야 하며 원자로의 Dynamic Behavior 고장정보 자동 유지 등을 예정된 프로그램에 따라 제어할 수 있는 기술이 필요하다.



<그림 3> 일본 원자핵 연구소의 토카막 코일 실험계획

4·7 공학재료 개발(Engineering Material Development)

핵융합로의 각 부분에서의 역할에 적합한 자격을 갖춘 재료가 개발되어야 효율성과 내구성이 보장되며 특히 블랭킷의 내부 재료로는 기능경사성특성(Functional Gradient Characteristics)을 갖는 것들이 개발되어 시험되고 있다.

4·8 보수유지 기술

장치가 최상의 상태를 유지하도록 하는 것과 고장시 보수를 간편하게 하는 것 등의 편의성이 좋고 비용이 적게 드는 기계를 만들려면 R & D를 많이 해야 한다.

이와 같은 기술들을 확립하기 위해서는 장기 에너지 수급대책계획을 마련하여 지속적으로 추진하지 않으면 안된다. 이렇게 함으로써 대체 에너지원이 확보됨은 물론 부가하여 국제적으로 경쟁력 있는 고급 인력양성, 국제적인 위상 정립 그리고 그에 따른 기술과급의 효과도 막대한 것이다. 실용성이 있어 보이는 기술 개발은 국제 공동연구에서도 배제되고 있는 현실이어서 우리 자신이 능력을 확보하여야만 공동연구팀에도 끼어 있을 수 있고 경쟁 사회에서도 이기는 길이라 하겠다.

5. 우리나라의 핵융합 연구현황

토카막형 핵융합장치로는 서울대와 과학기술원에 교육용이 있고 원자력연구소에도 한 대가 있다. 1993년경부터는 미국의 MIT로부터 장기 임대되는 자기 반사형의 플라즈마 연구 장치가 기초과학지원센터에 설치될 예정이어서 플라즈마 관련 연구에 도움을 줄 것으로 본다.

인력은 전국적으로 50여명 정도 있으며 재외 과학자가 20여명 정도 있다.

현재의 장치로는 1965년도 선진국들의 연구 결과와 비슷하며 격차는 점점 더 벌어지고 있는 실정이다.

6. 핵융합로 기술확립에의 길

우리나라의 경우 고리원자력발전소를 세우기 15년쯤전에 국내 대학에 원자력공학과들이 탄생되어 원자로에 관한 전문인력을 양성하기 시작하였다.

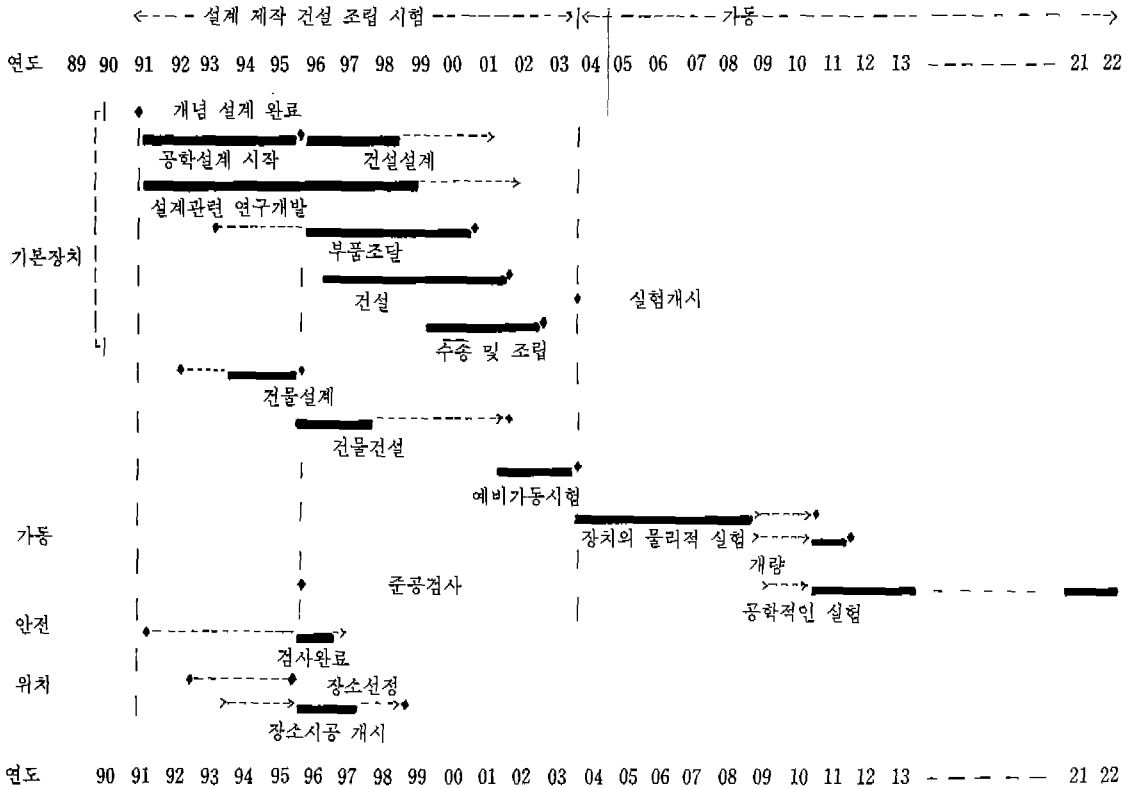
대학연구실은 연구계, 고등교육계 및 산업계에 인력보급의 원천으로서 대학의 질을 향상시키지 않고는 수원기관외의 향상을 도모할 수 없으며 국가 전체로서의 국위 선양을 할 수도 없다고 본다. 선진국끼리의 개발기술보호를 위한 연대와 장벽의 심화를 보고만 있을 것이 아니라 과감하게 도전하고 투자하는 실천의지가 필요한 때라고 본다. 따라서 우리나라도 장기 핵융합 에너지 개발정책을 수립하여 매년 연간 50억~100억원 정도를 투입하여 중간 단계의 핵융합로를 제작하고 능력을 기르면서 선진국이 이룩한 결과에 도달해 비로소 국제협력에도 동참할 수 있는 자격이 주어진다. 작년말 일본원자력연구소 이사장이 기자와의 대담에서 세계에서 최고 수준에 있는 원자력연구소(일본)는 앞으로 외국에 대하여 선도자적 역할을 해야 할 시기에 왔음을 강조하고 미국이 건설하고 있는 초전도형 초대형 가속기 사업의 참여보다는 국제적인 핵융합 연구사업에 전념 할 것을 천명하는 것을 보고 얼마나 실리적인 발상인가 하는 것을 알 수 있었다.

일본은 JT-60 핵융합로를 Up-grade하여 JT-60U로 명명하고 요즘은 속속 JET장치가 내놓은 결과에 육박하고 있음을 발표하고 있다. 또 연구소 예산의 5분의 3정도를 핵융합연구에 투입하고 있다.

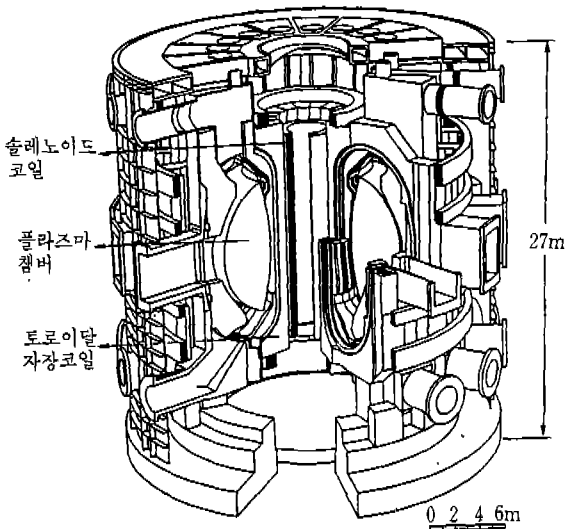
7. ITER를 향하여

이 장치는 앞서 말한대로 4국(유럽, 미국, 일본, 러시아)의 합동작품으로 만들어지고 있다. 그림 4는 ITER의 본체이다.

특징을 보면 재래의 JET나 JT-60U 처럼 짧



<그림 5> ITER 설계 건설, 가동 연표(ITER 개념 설계 보고서 NO. 18)



<그림 4> ITER 원자로 모형

은 펄스형(수초)이 아니고 수십분을 가동할 수 있고 입력 에너지의 6배 이상을 발생하도록 하고 있다.

또한 핵융합 플라즈마 가열도 펄스형의 저항 가열 방법을 지양하고 직류형 강력마이크로파에 의한 플라즈마전류 구동방식을 채용하고 있어서 상업용에 성큼 다가서고 있다. 이 장치로 공학적 실증이 끝나는 날에 전력에너지 확보를 위한 걱정거리도 깨끗이 사라질 것임은 두말할 나위가 없을 것이다.

그림 5는 ITER 건설 연표로서 향후 10여년간 설계, 건설을 하면서 2000년대초부터는 물리적인 실험을 거쳐 공학적 실증실험을 계획하고 있음을 보여주는 것이며, 건설비용만도 50억\$, 기타설계, R & D비 등 20억\$ 정도가 소요될 것으로 추산하고 있다.