

핵융합 발전로 개발 현황과 21C의 이정표

정 기 형

서울대학교 원자핵공학과 교수

1. 머리말

1960년대 이후 전세계를 통틀어 약 80여대의 대·중·소 토카막형 핵융합 장치가 설계·제작·실험되었으며, 종사했던 연구자들의 생각이 쌓이고 쌓여 핵융합로는 과학적 실증 단계를 마무리지어 가고 있고, 공학적 실증 단계로 접어들고 있다.

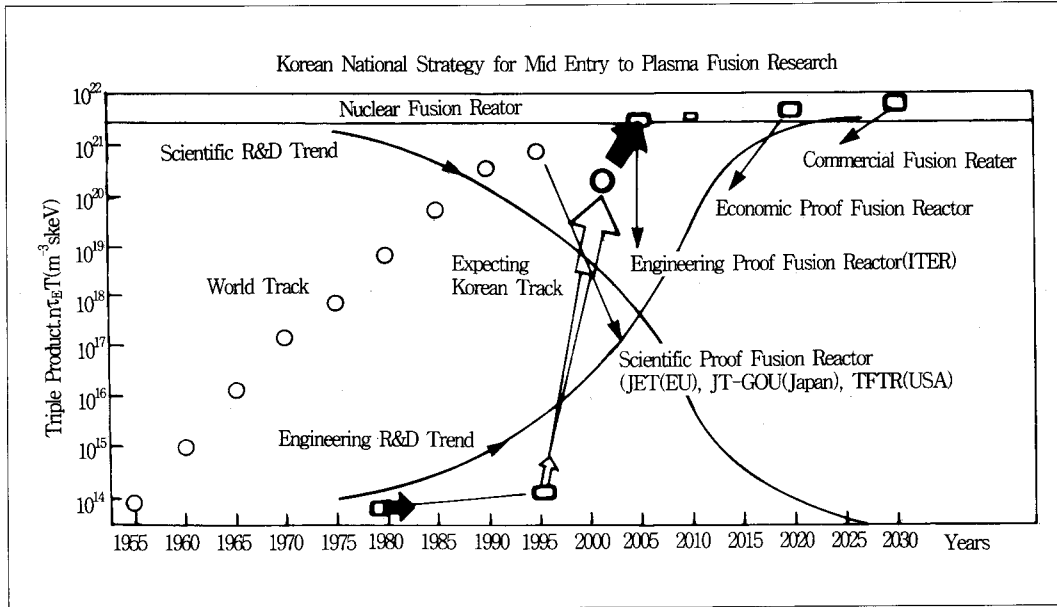
핵융합로 개발 연구가 국제적인 과제로 등장하게 된 배경을 보면 1985년 11월 스위스의 제네바에서 미국의 레이건 대통령과 소련의 고르바초프 서기장과의 정상회담시 고르바초프는 핵융합로 개발 추진을 미·소 양국이 공동으로 하자는 제안을 하였으나 미국의 거부로 합의를 보지 못하고, 다음 해 10월 아이슬랜드의 레이개비크에서 정상회담시 레이건의 제의로 공동개발에 합의를 보았다. 그후 3년여에 걸친 실무회담 끝에 나온 결과는 국제원자력기구(IAEA)의 주관 하에 미·소·일본·유럽이 평등하게 사업을 추진하는 것으로 되었으며 기타 참여를 희망하는 국가들은 위의 4개 나라 중 적합한 나라에 합류하여 참여하는 것으로 되었다.

핵융합로의 명칭을 국제열핵융합실험로(International Thermonuclear Experimental Reactor : ITER)라 하고 공동연구 끝에 1991년에 개념설계보고서(ITER Conceptual

Design Report)가 나왔고 1992년 12월에 약 11,000쪽에 달하는 ITER 공학설계 기술서(ITER Engineering Description Documents)가 발간되었으며 보다 더 상세한 보고서의 작성은 향후 3년간 더 지속될 것이다. 따라서 ITER 건설부지 요건도 상세하게 나와서 ITER을 가동하는데 필요한 전력원으로서 63만kW 정도의 전력을 전용으로 사용할 수 있고, 180만kW의 열을 냉각할 수 있는 냉각수원과 70Ha의 건설면적 확보 및 수만ton의 중기수송이 가능한 위치 등이 우선 조건으로 내세워지고 있다. 일본의 경우는 1991년도부터 ITER을 유치하겠다는 지방 현이 3곳이 나서고 있고 7000억~8000억¥ 모금(ITER 및 편의시설비)운동을 펴고 있으며, 최근에는 중앙정부에 지원요청서를 제출하였다. 그 외 캐나다와 유럽의 프랑스 및 독일이 유치경쟁에 나서고 있다.

2. 이제까지의 성과

1950년대 초부터 시작된 핵융합 발전로 개발을 향한 인간의 열정은 해를 거듭하면서 목표에 다가가고 있다.



〈그림 1〉 In a reactor the Product $n_e T_e$ of the Ion Density and the Energy Confinement Time must be around $1.5-3 \times 10^{20} m^{-3} s$ and the Temperature, T , around $10-20 keV$. The Required Value of the Product $n_e T_e$ is Approximately $3 \times 10^{21} m^{-3} s keV$.

그림 1을 보면 플라즈마 온도 $T(keV)$ 와 플라즈마 수밀도 $n(m^{-3})$ 및 플라즈마 에너지 유지시간 $\tau_E(sec)$ 를 모두 곱한 $n_e T_e T$ 를 Triple Product라고 하는데 이 값이 5×10^{21} 만 넘을 수 있다면 핵융합로로서의 성립 조건에 도달하는 것이다.

이 그림을 보면 1995년부터 매 5년마다 Triple Product Parameter가 한 Order씩 향상되어 현재 Triple

〈표 1〉 JET의 실험 결과(D-T Pulse #26148)

변 수	결 과
플라즈마 전류 : I_p	3.1MA
토러스 자장 : B_T	2.8T
입력 전력 : P_{inj}	15.3MW
전자밀도 : $n_e(o)$	$3.6 \times 10^{19} m^{-3}$
중수소 밀도+삼중수소 밀도: $n_D(o) + n_T(o)$	$2.4 \times 10^{19} m^{-3}$
플라즈마 중심에서의 Ion 온도 : $T_i(o)$	18keV
플라즈마 중심에서의 Electron 온도: $T_e(o)$	10keV
플라즈마 구속 시간 : τ_E	1s

Product가 $\sim 10^{21}$ 을 턱걸이하고 있다. 유럽연합이 공동으로 개발한 Joint European Tokamak(JET)이 1991년 11월에 표1과 같은 성과를 이룩함으로써 제어할 수 있는 핵융합이 가능함을 실증하였다.

이 실험에서는 중수소와 3중수소가 연료로 쓰여졌고 3중수소가 13%의 농도를 차지하였으며, 핵융합 반응후 벽재료의 불순물과 함께 나오는 He 플라즈마가 출구측 벽(Diverter)을 쳐서 녹여 버리는 바람에 실험이 중단되었다. 그 후 1년 반 동안 수리를 하면서 배출구에서 열부하의 집중 현상으로 인한 벽재료의 손상을 막는 방법이 고안되어 실험중이다. 따라서 핵융합로 재료 연구는 고온에서 플라즈마 입사 입자에 대한 Low Sputtering Rate를 갖는 벽 재료에 관한 연구가 주종을 이루고 있다.

이 JET는 발생된 고온·고압·플라즈마를 밀폐시키는 토로이달자장코일의 재료가 구리이기 때문에 가동 전력의 대부분이 열로 나가고 토러스의 중심부에서 4.5Tesla 자장

기술동향

을 수 초 정도밖에 유지할 수 없으며 따라서 이 장치는 핵융합실험시간도 2초 정도였다. 이후 장치들은 초전도선재를 쓰는 장치로 설계·제작되고 있다.

일본의 핵융합장치 Japanese Tokamak 60(JT-60) 도 1992년 6월에 JET가 이룩한 실적보다 1.6배를 초과함으로써 이제까지의 기록을 경신하였고, 특히 중수소-삼중수소 플라즈마의 온도가 3억 7천만도K에 도달함으로써 플라즈마가 기술은 실증되어 확립단계로 들어섰다.

한편 JT-60은 Up-grade되어 JT-60U로 개칭되었으며 원래 60이란 Tokamak내의 플라즈마 부피가 60m³란 뜻이었으나 JT-60U에서는 100m³로 늘었다. 또한 Triple Product Parameter들이 핵융합로 조건에 다가가면서 이제까지 펄스(수초 정도)로 운전하던 것을 연속운전 형태로 바꾸려는 시도들이 초대형 초전도 자석 개발의 형태로 나타나고 있다. 1994년 3월에는 미국 프린스턴 대학의 토카막 핵융합시험로(Tokamak Fusion Test Reactor : TFTR)가 1만kW를 핵융합 반응에 의하여 발생함으로써 제어 핵융합로의 실증을 재확인하는 결과를 얻었다. 따라서 이제까지의 연구경험과 결과를 토대로 미래 핵융합로 설계에 대한 Confinement Scaling Law를 얻었다.

Confinement Scaling Law of JET
in 1989 by Rebut

$$\tau_E \propto I_p a R^{1/2}$$

$$nT\tau_E \propto \epsilon I_p^2 B_T R^{1/2}$$

여기서 τ_E 는 Tokamak 핵융합로 플라즈마 에너지 구속 시간이고, I_p 는 플라즈마 전류, a 는 플라즈마 반경, R 은 플라즈마의 주반경, n 은 플라즈마 밀도, T 는 온도, ϵ 는 플라즈마 단면의 Elongability, B_T 는 토러스자장 밀도이다.

여기서 τ_E 는 수초, I_p 는 최대 500만Ampere, a 는 1.25m, R 은 2.96m, n 은 $\sim 10^{19}/m^3$, B_T 는 3.5T 정도로 실험되었는데, τ_E 를 늘리기 위하여 ITER에서는 I_p 를 2400

만Ampere까지 높이는 것을 목표로 하고 있다.

3. ITER을 향하여

국제원자력기구(International Atomic Energy Agency: IAEA)의 주관 하에 미국, 유럽, 일본, 러시아 등 4개국이 공동개발하고 있는 ITER은 이제까지의 대형 핵융합장치와 비교하여 월등히 크며, 공학적 실증과 차세대의 경제성 실증로를 설계하기 위한 기초기술자료를 얻는 것이 목표이다. 따라서 JET 와 ITER을 비교하면 표 2와 같다.

이와 같은 ITER 사업을 추진함에 있어 우선 문제가 되는 것은 거대초전도자석 개발과 핵융합로 내부벽재료이다.

초전도전자석은 선재로서 Nb₃Sn과 Nb₃Al을 선택하는 문제이며 이제까지 직경 1mφ 정도의 Solenoid를 제작한 경험을 가지고 있고 NbTi로서는 역시 국제적 연구사업으로서 4.5mφ 직경을 갖는 Solenoid를 제작하여 실험해 본 경험이 있다. 그런데 ITER로서는 평균 직경이 16mφ 정도의 것을 설계·제작 및 시험하는 것으로서 중심자장밀도가 5T이며 선체부분이 12T 정도이다. Nb₃Sn 선재(Cable in

〈표 2〉 JET 와 ITER 의 규모 비교

변수	장치	JET 실험 결과치	ITER 기 대 치	증 감 른
핵융합 열출력 (kW)		1,000	1,500,000	1,500 배 증가
에너지 밀폐 시간 (sec)		2	200 ~ 1,000	100-500 배 증가. 거의 정상상태 가동
주 가열 방식	Ohmic Heating (Pulse)	EC:120GHz, 1MW LH:5GHz, 1MW (100Txs)		OH Coil 의 기능을 줄이고 RF 에 의한 연속전류구동으로 한다.
Merit Factor, Q		0.4	6	15 ~ 20 배
토로이달 코일 재료	Cu		Nb ₃ Sn, NbTi 초전도 Coil	Cu→SC 로 바뀔 경우 : 거대 MG Set 불필요. 그러나 LHe 필요
Tritium 생산		없 음	생 산	
발전력		없 음	생 산	
α 입자 가열		적 음	우 세 함	

Conduct)는 이탈리아의 Europa-Metali Co.에서 1km 정도의 것을 제작하여 시험하는 상태이다. 그러나 NbTi 선재의 경우는 10m 이상 길이의 4극 자석들이 20여년 전부터 제작되어 가속기의 빔 초점화에 쓰이고 있고, MRI나 SMES 등에도 널리 이용되고 있다.

핵융합로 내부 벽재는 고진도성 탄소섬유합성제품(Carbon Fiber Composite : CFC)이 타일 형태로 제조되어 쓰이고 있으나 $\sim 10^{-9}$ Torr의 고진공과 고온 플라즈마와의 상호작용, 융합원료인 수소와의 유기화합물 형성 등으로 수십 년을 사용할 정도의 내구성 있는 재료의 개발이 요망된다.

일억도 이상의 플라즈마 융합시에 CFC 타일 표면에 Boron Coating과 Be Coating으로 수 개월 정도 가동하는 데는 성공하였으나 보다 우수한 재료가 개발되어야 한다.

이와 같은 목적으로 ITER 내부와 같은 환경을 만들고 그 분위기 내에서 실험을 하면서 재료를 개발하는 팀이 형성되고 있다. 즉, International Fusion Material Irradiation Facility를 만들고 역시 일본, 미국, 유럽, 러시아가 주동이 되어 운영하는 것을 원칙으로 하고 조직중이다.

4. 우리나라의 핵융합개발 프로그램

1995년도 이전의 핵융합 연구는 개인적인 흥미에서 시작되어 교육목적으로서의 역할이 고작이었다. 그러다가 기초과학연구원연구소의 이경수박사가 주동이 되어 국가 핵융합 개발사업의 추진을 역설했고, 정부의 호응을 얻음과 동시에 김영삼대통령께서도 연구사업의 추진을 강조하셨다.

그에 따라 1995년 12월부터 연구팀이 조직되고 사업비가 지원되면서 본격적인 개발 연구 단계에 돌입되고 있다. 그림 1을 보면 횡축은 연도를 나타내고 종축은 핵융합로 개발 성과를 표시하는 Triple Product를 나타내는데 \circ 표는 선진국들의 개발기록인데 비하여 우리는 1985년도에 선진국의

1955년도에 해당되는 능력을 가지고 2001년도까지 총력을 기울여 선진국 수준에 도달하도록 계획표가 짜여져 있다(\Rightarrow 표 참조).

따라서 2000년대 초반에는 ITER 건설에 참여할 수 있을 정도로 능력배양은 물론 실력이 인정되어야 하고 연구인력도 늘려야 한다.

따라서 선진국과의 연구협력협정, 선진국 연구자료를 수집, 인력양성 등 해야할 일들이 산적해 있다.

더욱이 이 연구사업은 산·학·연 협동으로 진행되고 있어 핵융합기술과급에 의한 민수용 산업기술개발에도 역점을 두고 해야 하기 때문에 설상가상이란 말이 적절할 것 같다.

5. 맺음 말

- (1) 핵융합로 개발 단계는 과학적 실증 단계를 벗어나 공학적 실증 단계로 접어들었다.
- (2) ITER에서도 Confinement Scaling Law의 예상이 만족된다면 핵융합로 내부 재료의 내구성 향상이 산업로의 존립 여부를 결정하는 최대 관건이 되므로 이 제부터라도 국제적인 재료개발팀에 합류해야 한다.
- (3) 핵융합 연구 개발은 많은 첨단 과학기술을 수반하므로 산업으로의 파급을 활성화해야 한다.

◀ 참고 ▶

핵융합로 개발에 관한 참고 도서, 논문 및 소식은 대덕연구단지에서 있는 기초과학연구원연구소가 수집하고 있고, 홍보팀도 활동하고 있으니 자료를 필요로 하시는 분은 연락하시기 바랍니다.

담당 : 핵융합 홍보위원회 조연수
Tel : 042-865-3545,
FAX : 042-865-3547