

## ITER 사업과 우리나라 참여 현황

정 기 정 · 핵융합연구소 ITER사업단, 단장 \_e-mail : kjjung@ntrc.re.kr

이 글에서는 핵융합로의 과학적·기술적 타당성 확인을 통해 핵융합에너지의 실용화 가능성을 최종 확인하기 위해 진행되고 있는 국제핵융합실험로(ITER : International Thermonuclear Experimental Reactor) 공동개발사업과 우리나라의 참여 현황을 소개하고자 한다.

**국**제핵융합실험로(ITER)공동개발사업(이하 ITER사업이라 함)은 1988년 미국, EU, 구소련, 일본 등 4개국이 출범시켜, 현재는 한국, 중국, 인도가 추가로 참여함으로써 지구 인구의 절반 이상이 참여하는 명실상부한 지상 최대의 과학기술 국제협력 사업이다. ITER 장치는 D-T(중수소-삼중수소) 핵융합반응을 통해 열출력 500MW, 에너지 증폭률(Q) 10 이상, 플라스마 지속시간 400초를 유지할 수 있는 핵융합실험로이다. 핵융합에너지를 이용한 전기생산은 이미 과학적으로 입증된 상태로, 이제는 ITER 사업을 통해 기술적·공학

적으로도 실현 가능성이 있는지를 입증해 보고자 하는 것이다.

유럽연합, 미국, 일본 등 선진국들은 ITER 사업을 통해 핵융합 기술의 공학적 가능성을 확인하고, 2035년경 핵융합발전 실증로(DEMO : Demonstration Fusion Power Plant) 및 상용화를 동시에 이루겠다는 것이다. 이는 당초의 DEMO, 초기 상업용 발전소(PROTO) 및 상용화라는 3단계를 2단계로 축소하면서 그 기간도 약 50년에서 35년 정도로 단축하겠다는 야심찬 계획이며, 이미 이러한 계획들은 소위 Fast Track Approach(지름길 접근)이라는 이름으로 수립·추진

되고 있다. 우리나라도 ITER 사업 참여를 계기로 선진국들과 마찬가지로 2035년경 핵융합발전로 건설운영이라는 계획을 수립하고, 2005년 12월 『국가핵융합에너지개발 기본계획』 속에 담아서 국가과학기술위원회에 상정·의결 하였다.

### 핵융합에너지 실용화 가능성의 입증

핵융합 관련 연구는 1950년대 미국, 구소련 등이 수소폭탄 개발을 위해 비밀리에 시작하였으나, 1958년 '원자력의 평화적 이용'에 관한 국제적 합의에 따라 활발

약 10년 동안 ITER 사업에 투자될 건설비용은 3,577.7kIUA(약 50.8억 유로)로 이 중 78%(2,790kIUA)는 참여국들의 현물 분담이며, 나머지 22%(787.7kIUA)는 현금 분담으로 되어 있다.

한 국제 협력과 많은 연구투자에 의해 기술개발이 이루어져 왔다.

핵융합 관련 연구는 1950년대 초 미국, 구소련 등이 수소폭탄 개발을 위해 비밀리에 시작하였으나, 1958년 '원자력의 평화적 이용'에 관한 국제적 합의에 따라 활발한 국제 협력과 많은 연구투자에 의해 기술개발이 이루어져 왔다. 특히 '80년대 초반 세계 3대 장치로 일컫는 미국의 TFTR, 유럽연합의 JET, 일본의 JT-60U 등의 핵융합실험 장치들이 건설·운영되기 시작하면서 핵융합에너지의 실용화 가능성을 보여주는 결정적 계기가 되었다. 즉, 1991년 유럽은 세계 최대의 토카막장치인 JET에서 중수소(D):삼중수소(T)=9:1 혼합 연료를 사용하여 세계 최초의 D-T 핵융합 실험에 성공하였고, 약 1.5~2MW의 핵융합에너지를 방출하였다. 이어 1994년 미국 프린스턴 플라즈마 물리연구소(PPPL)의 TFTR 토카막장치에서는 D:T=5:5 혼합연료를 사용하여 약 10MW의 핵융합에너지를 방출하는 기록을 달성하였다. 3년 후인 1997년 JET에서 다시 D:T=5:5 혼합 연료를 사용하여

16.1MW의 핵융합에너지를 방출함에 따라 핵융합에너지 실용화 가능성을 입증하는 계기가 되었다.

## ITER 사업 추진 현황

미국, 유럽연합, 일본, 러시아 등 핵융합 연구 선진 4개국은 자국의 독자적인 핵융합 연구 프로젝트를 수행함과 동시에, 1988년 핵융합 발전소 건설에 필요한 모든 물리적·기술적 난관을 공동으로 극복하기 위해 ITER 공동건설에 합의하고 국제원자력기구(IAEA) 산하에 ITER Council을 구성·운영하게 되었다. 이후 1990년까지 개념설계단계, 2001

년까지 공학설계단계를 거쳐 총 건설비용 약 50.8억 유로가 소요되는 ITER 장치 설계가 완료되었다. 공학설계 이후에도 연구개발이 지속되어 1988년부터 2003년까지 투자된 총 연구개발 비용은 약 15억 달러에 이른다. 1998년 미국이 ITER를 탈퇴하여 3개국 참여로 진행되던 프로젝트는 중국이 2003년 1월 10일 ITER 가입을 표명하자, 이에 자극받은 미국도 동년 1월 30일 재가입하게 된다. 2003년 6월에는 한국이 가입하게 되었고, 2005년 12월 인도가 마지막으로 참여하면서 ITER 사업은 최종 7개국(한국, 유럽연합, 일본, 미국, 러시아, 중국, 인도)으로 확정되었다.

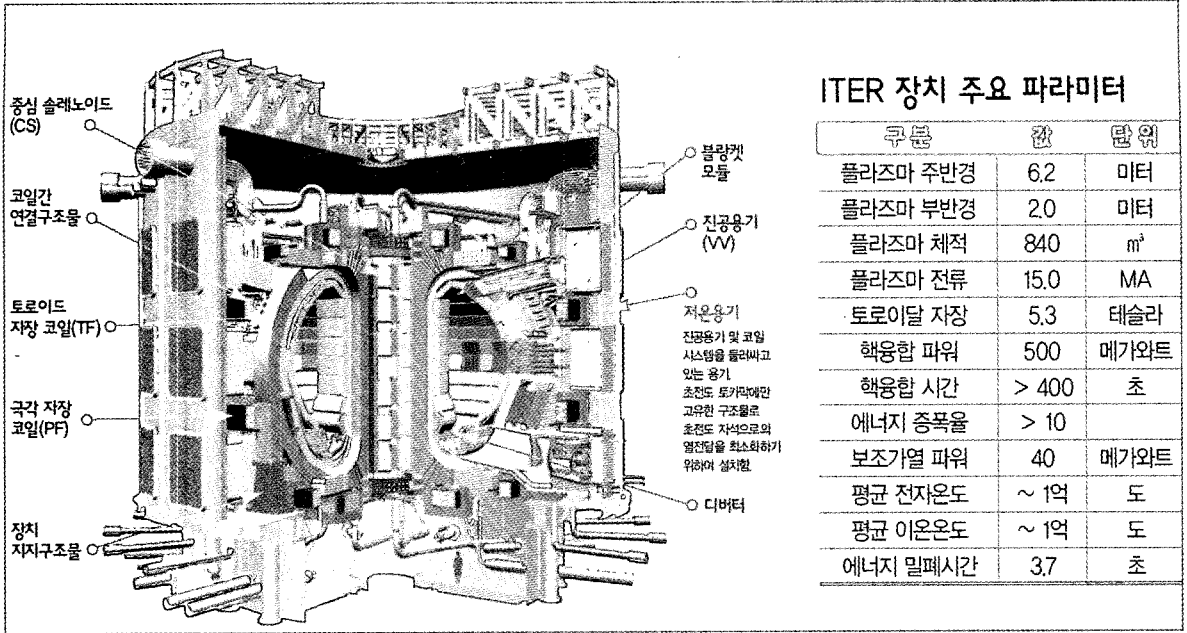
ITER 건설 부지는 유럽연합과 일본의 유치 경합 과정을 거쳐 프랑스 남부에 위치한 카다라쉬로 2005년 6월 최종 결정되었고, 현재 장치 건설 인허가를 위한 절차가 진행 중에 있다. 건설

표 1 ITER 건설비용 총괄표

구 분		소요 비용		구성비율 (%)
		(kIUA)	(백만유로)	
현물 조달분	조달품목 제작	2,655.0	3,770.10	74.2
현물 조달분	전문인력 파견	135.0	191.70	3.8
현금 조달분 (In-Cash)	건설 직접비	365.7	519.29	10.2
	R&D 수행	80.0	113.60	2.2
	전문인력활용	135.0	191.70	3.8
	지원인력활용	207.0	293.94	5.8
소 계		787.7	1,118.53	22.0
합 계		3,577.7	5,080.33	100.0

\* 1 kIUA = 100만 유로(1989년 말 기준) = 1.42백만 Euro(2005년 말 기준)

\* kIUA : 'kilo ITER Unit Account'로 ITER 사업 출범 당시 합의한 화폐가치



ITER 장치 주요 파라미터

구분	값	단위
플라즈마 주반경	6.2	미터
플라즈마 부반경	2.0	미터
플라즈마 체적	840	m <sup>3</sup>
플라즈마 전류	15.0	MA
토로이달 자장	5.3	테슬라
핵융합 파워	500	메가와트
핵융합 시간	> 400	초
에너지 증폭율	> 10	
보조가열 파워	40	메가와트
평균 전자온도	~ 1억	도
평균 이온온도	~ 1억	도
에너지 밀폐시간	3.7	초

그림 1 ITER 장치 및 주요 파라미터

부지 결정 후 각 참여국은 조달 품목 및 현금 분담에 대한 본격적인 협상을 진행하여, 2005년 12월 제주 협상회의에서 ITER 공동 이행 협정 (JIA : Joint Implementation Agreement) 문안이 최종 확정되었다.

표 1은 참여 7개국이 합의한 건설비용 총액과 그 명세 내용을 보여주고 있다.

ITER공동이행협정문은 2006년 5월 브뤼셀에서 가서명을 완료하였으며, 11월 21일 프랑스 파리에서 정식 서명이 끝나면 각국의 비준 절차를 거치게 되고, 2007년 중반경 ITER기구(ITER Organization)가 공식 출범하게 된다. 현재는 임시 ITER기구가



ITER 유치국인 유럽연합은 전체 건설비의 45.46%를 분담하고, 나머지 참여국들은 각각 9.09%씩 분담하는 것으로 합의하였으며, 86개 조달품목에 대한 참여국별 조달 할당량도 협의를 완료하였다.

운영되고 있으며, 이미 사무총장, 수석사무차장 및 사무차장 내정자들이 선정되어 조직 및 운영을 위한 업무를 손조롭게 진행하고 있다.

### ITER 장치 주요 파라미터

ITER 장치는 D-T 핵융합 반응을 통해 고에너지 알파입자와

중성자를 생성시키게 된다. 따라서 ITER 장치는 고에너지 알파입자가 플라즈마를 자체적으로 다시 가열하는 소위 '연소 플라즈마 (burning plasma)' 연구를 가능케 하고, 생성된 중성자가 시험용 블랭킷 모듈 (TBM : Test Blanket Module) 속에 들어있는 리튬을 핵변환 시켜 삼중수소를 증식하고 이를 회수, 저장하는 등

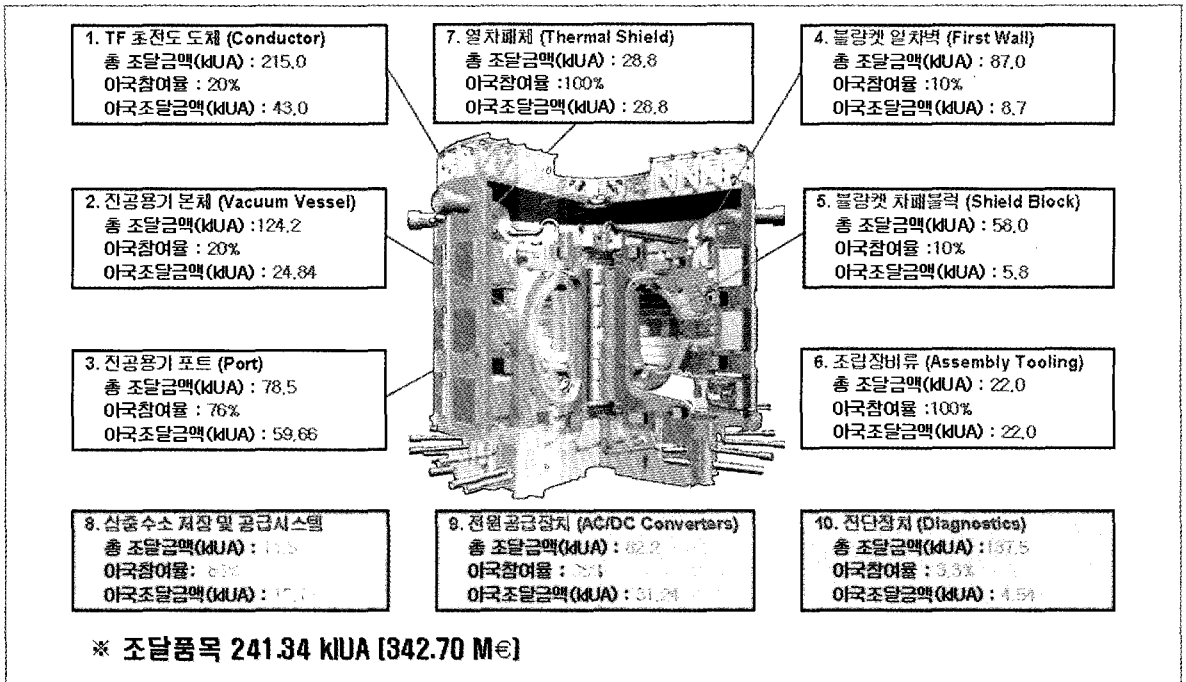


그림 2 우리나라 조달 품목

연료주기 기술 개발과, 이 과정에서 생성되는 열을 효율적으로 이용하는 연구도 가능케 할 것이다.

그리고 고에너지 중성자 환경에서의 재료의 성능평가에 필요한 실험 자료를 제공하는 등 추후 상용 핵융합발전소 건설에 직접 활용될 제반 과학기술 및 공학적 데이터들을 제공해 줄 것이다. 그림 1은 ITER 장치의 주요 구성요소와 파라미터를 정리한 것이다.

## ITER 사업의 우리나라 참여 현황

우리나라의 핵융합 관련 연구는 1970년대 말에 시작되었으나,

1995년까지 매우 미미한 수준이었다. 연구 인력도 매우 부족하였고 정부의 연구지원도 열악하였다. 당시 서울대학교는 1979년 SNUT-79라는 소형 토카막을 개발하였고, 한국원자력연구소는 1989년 KT-1 소형 토카막을 제작하여 플라즈마를 발생시켰지만, 규모 측면에서는 선진국 대학 실험실 수준에 불과하였다.

이러한 상황은 1995년 정부가 미래의 국가 에너지 자립을 위해 단기간에 핵융합기술 선진국으로 도약한다는 소위 '중간진입전략'을 수립하면서 호전되었다. 이의 일환으로 출범한 프로젝트가 바로 '차세대 초전도 핵융합연구장치(KSTAR)' 건설 사업이다. 정

부는 KSTAR 건설사업을 통해 관련 전문 인력을 조속히 양성하고, ITER 사업에도 동참함으로써 핵융합 기술 선진국 진입을 앞당긴다는 목표도 설정하였다.

정부는 2002년 12월 KSTAR 건설을 통한 기술력을 바탕으로 ITER 참여 의향서를 제출하였고, ITER 참여국들은 우리나라 핵융합 연구개발 능력과 산업능력에 대한 실사를 통해 2003년 6월 공식 참여국으로 승인하였다. KSTAR사업의 1차적 목표를 성공리에 달성한 셈이다.

ITER 참여 조건은 첫째, ITER 건설비의 10%(이후 인도의 참여로 9.09%로 조정) 분담, 둘째, 참여 이전에 진행되었던 공동이

행협정 및 ITER 설계 결과의 수용, 셋째, 참여 시 분담 지분에 따라 건설 및 운영 참여 등이다. 우리나라 10개 조달품목의 내역은 그림 2와 같다.

한편 ITER 사업의 공동참여국으로서의 역할 수행을 위해 '핵융합 연구센터' 내에 'ITER사업단'을 두고 본 사업을 전담케 하였다. ITER사업단의 주요 임무는 첫째, 우리나라 할당 조달품목을 품질 요건에 맞도록 제작하여 적기에 납품을 하여야 하고, 둘째, 우리나라 전문가들을 적기에 선발·ITER기구에 파견하여 건설 및 운영에 참여케 함으로써 기술 확보 및 고급 전문인력으로서의 양성을 동시에 하여야 하며, 셋째, 미래 DEMO 및 핵융합로 상용화에 대비한 핵심기술을 개발하고, 넷째, 본 ITER 국내 사업을 계기로 중합사업관리 시스템과 인허가 및 규제 시스템을 확립하며, 다섯째 ITER 및 국내에서 생산되는 제반 자료들을 효율적으로 관리하는 등이라 하겠다.

### 맺음말

우리나라가 ITER 사업에 참여하는 목적은 많으나, 그 중 융합 에너지개발 연구는 막대한 비용과 긴 시간, 분야별 숙련된 과학 기술인력의 활용이 필수적이며, 이 때문에 한 국가가 독자적으로 연구개발을 추진하기에는 큰 위험부담이 따르게 된다. 다행히 ITER 사업은 세계 선진국 모두(ITER 사업은 7개 참여국이라고 하지만 유럽연합 25개국을 고려할 때, 실질적으로는 31개국 참여)가 자국의 핵융합 관련 과학 기술인력을 총 동원함으로써 이러한 위험부담을 획기적으로 경감시킬 수 있다. ITER장치의 건설에 한국은 약 8,800억 원(추정)의 투자를 계획하고 있으며, 에너지 자원이 절대 빈곤하고 세계 10위권의 경제력을 확보하고 있는 우리나라로서는 국가의 존폐가 걸려있는 미래 에너지원 확보를 위한 최소한의 투자로 판단

된다. 더구나 이 비용의 대부분은 우리나라가 장치를 만들어 ITER에 현물로 조달하기 때문에 국내 산업체의 매출로 연결되어 국가 경제 발전과 고용창출의 효과가 증대되고, 우리나라의 전문인력 파견을 통한 고급 전문인력 양성, 핵융합 상용화를 위한 핵심기술 개발, 사업인프라 구축에 크게 이바지할 것으로 예상된다. 또한 우리나라가 ITER 사업에 참여함으로써 선진국들이 이미 15억 달러 이상을 투자하여 개발한 ITER 관련 핵심기술들의 공유가 보장되며, 향후 ITER 관련 참여국들의 지적소유권까지도 공유하게 됨으로써 핵융합 원천기술의 확보가 가능하게 되었다. 그리고 핵융합 발전로의 상용화 시기에는 우리나라의 앞선 원자력 기술, 중공업 기술 역량, IT 기술, 전문 고급인력을 기반으로 대외 경쟁력을 충분히 확보하고 미래 국가 성장 동력원으로서 중추적인 기능과 역할을 수행할 것으로 기대된다.

### 기계용어해설

다공성미세캐비티(Micro-porous Cavity)

수~수십 $\mu\text{m}$  크기의 입자(particles)들로 채워진 공동(cavity)으로 크기는 대략 수백  $\mu\text{m}$ 이다. 이러한 공동의 내부는 입자들의 집적으로 인해 다수의 미세공극이 존재한다.

회전 채널(Rotating Channel)

회전하는 환경하에 있는 덕트를 말한다. 즉, 가스터빈 블레이드 내부 유로를 모사한 덕트를 말한다.

후처리기술(Aftertreatment)

연소된 배기가스를 강화되는 배기규제에 맞추기 위하여 연소 이후에 적용되는 기술을 말한다.