

## ⑦ ITER 프로젝트의 현황과 전망

# 반세기에 걸친 인류 최대의 초대형 프로젝트

# '인류의 미래 에너지 개발로 나아갈 길' 찾는다

글 | 이경수 \_ 국가핵융합연구소 ITER 한국사업단장 gslee@nfri.re.kr

**국**제핵융합실험로(ITER) 프로젝트는 반세기에 걸친 핵융합 연구를 바탕으로 '지구상에서 핵융합에너지의 생산'에 대한 공학적 타당성을 최종 실증하는 것이 목표이다. 태양에너지와 같은 핵융합에너지를 지구상에서 만들겠다는 것은 21세기 인류에게 주어진 가장 도전적인 과학기술 과제임에 틀림없다. 뿐만 아니라 이러한 과제를 국제공동으로 추진하는 ITER 사업은 앞으로 추진될 범지구적 과학기술 공동연구의 시금석이 될 것이다. 'ITER'는 International Thermonuclear Experimental Reactor의 약자로, 라틴어로는 '길'이라는 의미로서 '인류의 미래 에너지 개발로 나아가는 길'이라는 뜻을 담고 있다.

### KSTAR 직경 3배, 부피 25배 달하는 초대형장치

ITER 장치는 토카막형 핵융합장치로서 중수소(D)-삼중수소(T)를 연료로 사용하여 초고온의 플라즈마를 만들고 자체 연소에 의하여 장시간 핵융합 반응이 유지되도록 설계·제작되는 최초의 핵융합로이다. D-T 핵융합 반응은 고에너지의 알파입자(3.5MeV)와 중성자(14.1MeV)를 생성시키게 된다. ITER 장치는 핵융합으로 열출력 500mw, 에너지 증폭률(Q) 10 이상, 핵융합 연소 400초 이상 지속하는 것을 목표로 설계되었다. ITER 장치의 주반경은 6.2m, 부반경은 2.0m이며, 플라즈마 전류는 15MA가 설계치이다. 초전도 자석은 중심솔레노이드(CS) 및 토로이달자석(TF)이 Nb<sub>3</sub>Sn, 폴로이달자석(PF)이 NbTi 기술이 적용되어, KSTAR 장치와 같은 기술 사양을 가진다. 장치의 규모면에서 비교해 보면, ITER 장치는

KSTAR보다 직경과 높이에서 각각 약 3배씩으로, 부피로는 약 25배 정도가 큰 초대형장치이다. 따라서 ITER는 기존의 토카막 장치에서 수행되는 것과 다른 핵융합로의 공학적 검증과 핵융합 발전을 위한 핵심기술 개발을 목표로 하고 있다.

ITER에서는 고에너지의 알파입자(H<sup>+</sup>)가 플라즈마를 자체적으로 다시 가열하는 소위 '연소 플라즈마'에 대한 연구를 본격적으로 수행하게 된다. ITER 장치는 유도가열에 의한 Q $\geq$ 10 이상 장시간 연소 플라즈마의 달성과 비유도가열에 의한 Q $\geq$ 5 이상의 정상상태 운전시범을 목표로 하고 있다. 또한 ITER 프로젝트를 통하여 고에너지 중성자 및 고열 유속 환경에서의 블랭킷, 다이버터 등 핵융합로 재료에 대한 연구도 수행될 것이다. ITER는 또한 핵융합 연료인 삼중수소의 자급을 위하여 삼중수소를 생산·회수·저장·공급하는 연료주기 기술 개발을 가능케 할 것이다. 이를 위해 테스트 블랭킷 모듈 프로그램을 추진하고 있는데, 이는 핵융합 반응에서 생성된 고에너지 중성자를 이용하여 블랭킷 내부에 있는 리튬을 핵변환시켜 삼중수소를 증식하는 기법을 이용하는 것이다. ITER 프로젝트의 기술적 성과는 추후 상용 핵융합발전소의 설계 및 건설에 직접 반영될 것이다.

### 사상 최대의 과학기술 국제협력 프로젝트

ITER 사업의 출범은 1985년 미·소 정상 회담에서 채택된 '핵융합연구개발 추진에 관한 공동 성명'이 계기가 되었다. 당시 미국, 유럽연합(EU), 러시아(구소련), 일본 등 핵융합 연구개발 선진



ITER 건설부지 조감도

4개국들은 자국의 핵융합 연구 프로젝트를 독자적으로 수행하고 있었으나, 핵융합에너지 실용화를 앞당기기 위해서는 모든 물리적·기술적 난관을 공동으로 극복할 필요가 있다는데 인식을 같이 하고, 4개국은 1988년 ITER 공동건설을 위해 국제원자력기구 (IAEA) 산하에 ITER 이사회를 구성하고 사업을 출범시켰다. 현재는 한국, 중국, 인도가 추가로 참여함으로써 7개 회원국 및 지구 인구의 절반 이상이 참여하는 명실상부한 사상 최대의 과학기술 국제 협력 사업이 되었다.

ITER 프로젝트는 1988년부터 3년 동안 개념설계, 1992년부터 약 10년 동안 공학설계를 마치고, 2001년 ITER 기준설계인 최종설계 보고서가 작성되었다. 이후 ITER 건설부지 선정을 위한 EU와 일본 간 유치 경합이 치열하게 전개되었다. 이러한 경합 과정에서 양측 및 다자간의 공식·비공식 협상을 거쳐, 2005년 6월 프랑스 남부 카다라쉬로 최종 결정되었다. 건설부지가 선정된 후, 각 참여국은 조달품목 및 현금 분담에 대한 본격적인 협상을 재개하여, 2005년 12월 제2차 협상회의를 끝으로 ITER 공동이행협정(JIA) 문안이 최종 확정되었다. 그리고 2006년 11월 21일 프랑스 파리의 대통령 집무실인 엘리제궁에서 시라크 대통령의 초청으로 ITER 공동이행협정에 대한 서명식이 거행됨으로써, 역사적인 ITER 프로젝트가 공식 출범하게 되었다. ITER 협정 서명으로 ITER 잠정 기구가 운영되었고, 참여국의 국내 비준 절차를 거친 다음, 2007년 10월 24일 ITER 기구(IO)가 공식적으로 발족되어 현재에 이르고 있다.

우리 나라는 2002년 12월 KSTAR 건설을 통한 기술력을 바탕으로



ITER 건설부지 토목공사 현장

로 ITER 사업 참여 의향서를 제출하였고, ITER 기구 평가단의 실사를 거쳐 2003년 5월 제12회 국가과학기술위원회에서 ITER 참여 방침을 확정한 후 동년 6월 정식으로 가입하였다. ITER 프로젝트 참여 조건은 첫째, ITER 건설비의 10%(이후 인도의 참여로 9.09%로 조정) 분담, 둘째, 참여 이전에 진행되었던 ITER 공동이행협정 및 기 설계 결과의 수용, 셋째, 참여 시 분담 지분에 따른 건설 및 운영 참여 등이었다. 다른 한편으로는 1988년부터 2003년까지 개념설계 및 공학설계 과정에서 미국, 유럽, 일본과 러시아에 의해 이미 투자된 약 15억 달러 가치의 연구개발 결과를 우리 나라가 공유할 수 있는 권리를 갖게 되었다. ITER 사업에 가입한 후 우리나라는 ITER 장치 건설부지 확정 및 현물조달 할당 등 각종 협상에서 주도적 역할을 수행함으로써, ITER 프로젝트가 현재와 같이 구체화되는데 결정적 역할을 담당해 왔다.

### 장치건설 10년, 운영 20년, 방사능 감쇄 5년 후 해체

ITER 공동이행협정(JIA)에 따르면, ITER 장치 건설비용은 3천 577.7kIU(2005년 말 기준 약 50억8천만 유로)로 산정되어 있다. 이 중 78%(2천790 kIU)는 참여국들의 현물조달 형태로 분담되고, 나머지 22%(787.7 kIU)는 ITER 기구의 운영을 위한 인건비, 운영비, 직접비 등으로 참여국들이 현금으로 분담하게 되어 있다. 10년 동안의 장치 건설 후, 약 20년 동안의 장치 운영과 5년 동안의 방사능 감쇄기간을 거친 후 해체하는 단계로 추진될 것이다. 그리고 장치건설 완료 후 연구 개발을 위한 장치 운영 및 방사능 감쇄·해체 등에 약 61억5천만 유로가 추가로 투자될 예정이다. 건설단계에서는 유치 당사자인 EU가 45.46%를, 나머지 6개국이 9.09%씩을 부담하며, 운영, 감쇄, 폐로단계에서는 EU가 34%, 미국 및 일본이 각각 13%씩을, 나머지 4개국이 각각 10%씩을 분담토록 합의되었다. 또한 분담 비율에 따라 참여국은 ITER 기구 운영인력을 파견하여야 하는데, 인력 선발은 ITER 기구의 채용 공고와 동시에

국내에서 공개 모집을 하고, 선발된 후보자들은 다른 참여국 후보자들과 함께 ITER 기구에서 다시 인터뷰 등을 통해 경쟁 방식으로 최종 확정되게 된다.

ITER 기구 사무국은 사무총장(이케다), 수석사무차장(홀트캠프) 및 기술 분야별 6명의 사무차장들이 참여국을 대표하여 고위직으로 근무하고 있는데, 우리 나라를 대표한 김용환 사무차장은 중앙 엔지니어링시스템부를 총괄하고 있다. 참여국 대표(수석대표 : 차관급)로 구성된 이사회는 산하에 경영자문위원회(MAC), 과학기술자문위원회(STAC)를 두고 주요 의사결정을 위한 자문과 사무국의 집행을 감독하게 된다. 2008년 8월 현재 ITER 기구의 직원은 우리나라의 파견인력 15명을 포함하여 300여 명의 전문 및 지원 인력이 근무하고 있다.

ITER 기구는 기술 인력들을 중심으로 건설을 위한 설계 마무리 작업을 진행하고, 장치 건설 인허가를 받기 위해 프랑스 원자력 규제 당국에 예비안정성 보고서(PSR)를 제출하였으며, 카다라쉬 현지에는 건설부지 토목 공사가 한창 진행중이다. ITER 장치 건설은 ITER 협정에서 합의된 일정에 따라 약 10년 동안 추진되어 2016년 12월 완공될 예정이었으나, ITER 설계변경 및 참여국 비준 완료 지연으로 인해 사업 착수가 늦어져 ITER 기구가 건설 일정의 변경을 요청하여, 이사회는 2018년 7월 최초 플라즈마의 달성이라는 잠정계획을 승인하였다.

ITER 기구는 2001년 최종 설계 이후 협상과정 중 6년여 기간 동안 나왔던 설계 개선안들을 확정하기 위하여 2006년 11월부터 2007년 말까지 약 1년 동안 종합적인 ITER 설계 검증 작업을 수행하였다. 이를 위하여 ITER 기구는 우리 나라를 비롯한 참여국의 전문가로 구성된 8개 기술 분야별 설계검토 실무그룹을 조직·운영하였고, 그 결과 2008년 8월까지 총 170여 개의 설계변경요구가 제안되었다. 이러한 설계변경요구에 대하여 대부분의 요구안이 받아들여져 설계변경이 추진되었고, 그 중 건설비용 상승과 일정지연을 초래하는 핵심 쟁점사항에 대해서는 최종 결정을 위한 논의가 진행되고 있다.

그 중 대표적인 것이 초전도자석의 극저온시험 필요성으로 회원국들 간의 다양한 의견들이 논의되고 있다. 우리나라는 Nb<sub>3</sub>Sn 초전도 기술을 활용한 KSTAR 개발·건설 경험을 가진 유일한 참여국으로서 초전도자석의 성능확인을 위한 최적의 극저온시험 방안을 제시하여 반영토록 추진하고 있다. 다른 하나는 블랑켓·다이버터 등 내벽에 대한 열부하의 과도한 작용을 완화하기 위하여 진공

용기 내부에 제어코일의 설치 여부이다. 이 전자석은 진공용기 내부에 고전류를 투입하여야 하는 이유로 강한 지지구조물을 설치해야 하는 등 공학적 난제를 포함하고 있어, 비용상승 및 일정지연이 예상되는 만큼 기술적 핵심 쟁점사항으로 논의가 진행되고 있다.

이러한 핵심 쟁점사항들을 제외한 대부분의 ITER 설계변경 안건은 지난 6월 제2차 ITER 이사회에서 승인됨에 따라, 그 내용을 기준설계 수정안으로 확정하게 되었다. 한편, ITER 기구는 지난해 11월 말부터 TF 도체에 대한 조달약정을 참여국들과 차례로 체결하는 등 본격적인 장치의 개발·제작 단계에 들어갔다.

### 우리나라, 총 86개 조달품목 중 10개 할당받아

2005년 12월 우리 나라 제주도에서 열린 ITER 협상회의에서 현물 조달품목에 대한 할당이 최종 확정되었는데, 우리 나라는 총 86개 조달품목 중 초전도 자석, 진공용기 본체·포트, 블랑켓 일차벽·차폐블록, 열차폐체, 조립장비류, 삼중수소 저장·공급 시스템, 전원공급장치, 진단장치 등 10개의 품목을 할당받았다. 여기에는 우리 나라가 KSTAR를 통해 확보한 기술력을 바탕으로 조달에 참여하는 부분(초전도 도체, 진공용기, 열차폐체, 조립장비류)과 ITER를 통해 확보하고자 하는 핵심기술 부분(블랑켓 일차벽 및 차폐블록, 삼중수소 저장·공급시스템) 등으로 구분할 수 있는데, 사업성공에 기술적 기여와 핵융합 핵심기술의 확보라는 목표가 동시에 함축되어 있다.

우리 나라가 ITER 사업에 부담하여야 할 총비용은 건설단계인 2015년까지 약 8천800억 원이며 운영, 감쇄, 해체 기간인 2040년까지 약 7천600억 원 정도가 소요될 것으로 추정하고 있다. 이러한 막대한 연구개발 투자를 통하여 우리 나라가 ITER 사업에서 확보해야 할 핵융합 핵심기술로는 10개 조달품목 납품을 통한 기술뿐만 아니라 증식용 블랑켓 기술, 삼중수소 연료주기 기술, 핵융합로 시스템기술, 원격 로봇 조작 기술, 열·중성자 차폐용 초고온·저방사화 재료기술, 연소 플라즈마 가열·전류구동·진단 기술, 핵융합로 통합제어운전 기술 등을 들 수 있는데, 이 기술들은 미래 핵융합로 건설을 위하여 반드시 확보하여야 할 기술들이다.

ITER 한국사업은 국가 조약사업으로서 참여국의 의무 이행을 다하고, 핵융합 상용화를 위한 핵심기술을 확보하기 위하여 다음과 같은 사업 목표를 설정하였다. 첫째, 우리 나라 할당 조달품목을 품질보증(QA) 요건에 맞도록 제작하여 적기에 납품을 하여야 하고, 둘째, 우리 나라 전문가들을 적기에 선발·ITER기구에 파견하여

건설 및 운영에 참여케 함으로써 기술 확보와 전문인력 양성을 동시에 추진하며, 셋째, DEMO 및 핵융합로 상용화에 대비한 핵심기술을 개발하고, 넷째, ITER 국내 사업을 계기로 종합사업관리 시스템을 확립하고, 인허가 시스템에 대하여 프랑스 규제기관이 ITER에 적용한 기술을 축적하며, 다섯째 ITER 및 국내에서 생산되는 제반 지식재산 및 자료들을 효율적으로 관리하여 미래의 활용에 대비하는 것이다.

2007년에는 ITER 한국사업의 본격 추진을 위한 법적·제도적 기반이 구축되었다. 4월 국회에서는 'ITER 공동이행협정', '특권·면제협정'의 국회 비준동의가 완료되었고, 10월 24일에는 ITER 공동이행협정이 발효되었다. 한편, 9월에는 ITER 한국사업을 전담·추진해 나갈 국내전담기관인 'ITER 한국사업단'이 설립되었고, 12월에는 'ITER 사업 처리운영규정'이 제정되어 사업 추진 과정에서의 투명성 및 책임성이 확보되었다. 이러한 법적·제도적 기반 위에 2008년도 ITER 한국사업은 조달을 위한 본격적인 개발·제작 단계로 진입하였다.

ITER 한국사업의 건설단계 최종목표는 DA의 기본 임무인 현물 조달 품목을 IO의 품질보증요건에 따라 적기 납품하고, 협정에 정의된 우리 나라 할당 몫의 조달가치를 획득하는 것이다. 이를 위하여 ITER 한국사업은 크게 3가지로 분류·추진되고 있다. 먼저 토카막 주장치·부대장치 분야 등 총 10개 조달품목에 대한 개발·제작 과제가 수행되고 있다. 다음은 핵융합 핵심기술 확보를 위하여, 테스트 블랑켓 모듈(TBM), 통합제어 및 비조달품목 원천기술 등 핵심기술개발 과제가 수행되고 있다. 그리고 세 번째는 효율적 사업 관리·운영에 관한 과제인데, 핵융합 원천기술 습득을 위한 지식재산권의 체계적인 확보·관리, 핵융합 핵심기술의 효율적 확보를 위한 전문인력 양성, ITER 프로젝트 품질보증 등의 업무가 포함된다.

2008년 5월 초전도 ITER 기구 사무총장과 ITER 한국사업단장은 TF 도체 조달을 위한 최초의 조달약정을 체결하였다. 이는 ITER 한국사업단의 본격적인 조달 업무를 시작하는 중요한 마일스톤이 되었으며, 올해 중으로 진공용기 및 포트의 조달약정도 체결할 예정이다.

#### 핵융합로의 공학적 기술검증이 ITER 프로젝트 목표

ITER 프로젝트는 장치건설을 통하여 핵융합로를 최대한 간결하고 튼튼하게 건설할 수 있는 핵융합장치의 공학설계·제작 기술을

확보하여 핵융합로의 공학적 기술검증을 완성하는 것을 목표로 한다. ITER 장치가 2018년경 완공되면, 상용 핵융합로 설계에 필요한 다음과 같은 핵심기술 개발이 20년 동안 진행될 것이다.

첫째, 가장 효율적인 토카막 핵융합로를 설계하기 위해 플라즈마 압력(온도와 밀도)을 최대한 높게 만드는 방안의 연구가 추진될 것이다. 여기에는 고온 플라즈마의 형상 제어 및 MHD 불안정성 제어에 대한 깊이 있는 연구가 수반될 것이다. 둘째, 에너지 감금시간을 최대한 높게 하는 방안을 찾기 위하여 에너지 및 입자 수송에 대한 자기장 감금의 기본 주제들이 연구될 것이다. 셋째, 연소 플라즈마 유지에 필요한 가열과 전류구동의 용량을 최소화하는 Q값 증가 방안의 연구가 진행될 것이다. 즉 핵융합 반응에서 고에너지를 갖고 나오는 알파입자에 의한 자체 가열 등이 연구될 것이다. ITER에서의 기술개발은 결국 핵융합로를 어떻게 만들 것인가, 즉 가장 경제적인 토카막 핵융합로를 어떻게 설계·제작할 것인가라는 목표를 두고 수행될 것이다.

국제핵융합실험로(ITER) 공동개발사업은 21세기 인류의 문제인 지구 온난화를 대비하고, 석유 고갈 등 에너지 위기를 극복할 궁극적인 방안으로 고밀도 대용량 청정에너지의 생산 가능성을 실증하기 위한 사상 최대 규모의 국제공동 연구개발 사업으로서, 한국도 ITER 프로젝트를 통해서 인류가 핵융합에너지의 자원화를 앞당기는데 기여하도록 최선의 노력을 다할 것이다.

세계 핵융합 연구의 중심이라고 할 수 있는 ITER 프로젝트에 과학기술 선진국과 대등하게 참여국의 지위를 확보한 우리나라는 세계적인 과학기술 강국으로서의 위상을 제고할 수 있는 기회를 맞고 있다. 이러한 위상제고는 핵융합 기술의 확보를 위하여 정부가 장기적인 관점에서 지속적으로 투자를 확대해 나가야만 더욱 공고해질 수 있다.

ITER 사업을 통해 획득한 지식 재산은 참여국 간에 공유하도록 되어 있어, 핵융합발전 상용화를 위한 원천기술 보유국의 지위 확보가 가능하다. 이를 잘 활용하면, 핵융합 발전로 건설이라는 마스터플랜 하에서 21세기 중반 무한·청정 핵융합 에너지의 대량 생산 기술을 확보할 수 있을 것이며, 그 결과 에너지 수입국에서 수출국으로 도약할 수 있는 계기가 마련될 것으로 기대된다. ㉞



글쓰이는 KSTAR 프로젝트 사업단 단장, 국가핵융합연구소 선임부장 등을 지냈으며, 현재 ITER 이사회 이사 및 경영자문위원회(MAC) 부의장, 국제핵융합평의회(IAEA IFRC) 의장 등을 겸임하고 있다.