

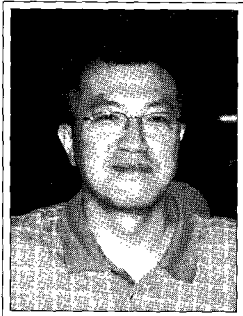


핵융합 - 미래의 원자력 에너지

-ITER 프로젝트와 KSTAR 프로젝트-

한 정 훈

한국기초과학지원연구원 핵융합개발사업단
국제협력팀장



핵융합 에너지

1. 개요

핵융합(Nuclear Fusion) 연구의 궁극적인 목적은 전기 생산이다. 즉 핵융합 발전에 의한 전기 생산이다. 핵융합 발전소는 지금의 원자력 발전소나 화력 발전소들에서 열을 생산하는 부분(heat generating core)을 'fusion engine'으로 바꾸는 것이다.

핵융합에 요즘 듣기 낯설고 어려운 '핵(nuclear)'이라는 접두어를 붙이는 것은 핵융합 과정에서 원자력 발전소처럼 중성자가 그것도 더 큰 에너지의 중성자(Neutron)가 끊임없이 나오기 때문이다. 그러므로 핵융합 에너지는 원자력 에너지인 것이다.

핵융합 발전이 원자력 발전과 다른 점은 연료에 있다. 핵분열에 의한 원자력 발전은 연료가 원자번호가 큰 방사능 물질인 핵연료(Nuclear fuel)이지만, 핵융합 발전의 1차 연료(primary fuel)는 비핵연료(Non-nuclear fuel)인 중수소와 리튬인 것이다.

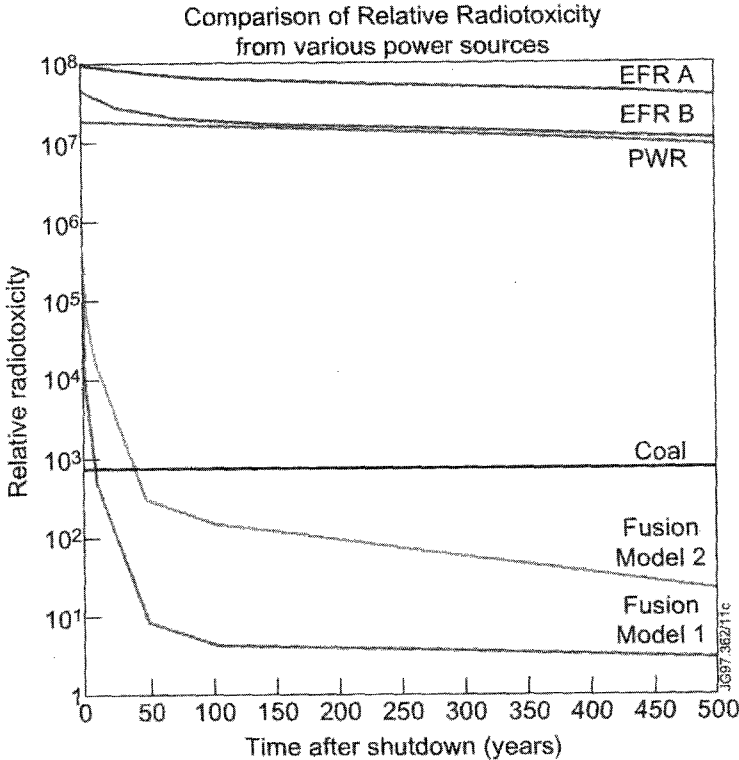
수소의 동위원소인 중수소(Deuterium)는 중-고등학교 화학 실험실에도 있다. 리튬은 휴대 전화나 각종 전자 제품의 배터리로 사용되는 물질로 지구상의 지표면에 널려있다.

향후 핵융합 상용화가 더욱 발전된 이후에는 헬륨3 계열의 핵융합 연료가 사용될 것이다. 이럴 경우에는 리튬마저도 필요가 없게 된다.

핵융합 발전은 기본 연료인 중수소와 리튬을 중성자로 처리하여 만든 삼중수소(Tritium)가, 초고온(약 1억도에서 3억도)의 플라즈마 상태에서 융합(fuse)되어 원자번호 1번인 중수소와 삼중수소가 원자번호 2번인 헬륨의 동위원소인 알파 입자(Alpha particle)와 전하가 없는 중성자로 변환될 때 나오는 알파 입자의 운동 에너지(3.5MeV)와 중성자의 운동 에너지(14.1MeV)를 열 에너지로 변환하여 전기를 생산하는 발전 방식인 것이다.

1. 핵융합 에너지의 특징 및 개발 과정

핵융합 발전소를 원자력 발전소 범주(Category)에 집어넣는 이유



〈그림 1〉 핵융합 발전소 폐쇄 후의 radiotoxicity level

는 3가지이다.

첫 째는 2차 연료인 삼중수소가 비록 15.4년 밖에 안 되지만 방사능 물질이고, 둘째는 핵융합 반응에서 중성자가 나오기 때문이고, 셋째는 이 중성자가 핵융합 발전 중심부를 싸고 있는 차폐막(Blanket)과 지지 구조물들을 방사화(activation) 시키기 때문이다.

하지만 핵융합 발전소의 방사능 독성도(radiotoxicity) 수준은 핵

융합 발전소를 폐쇄(shutdown)한 후 약 50여년이 지난 후, 석탄 화력 발전소의 방사능 독성도보다 낮은 수준으로 떨어진다.

즉 핵융합 발전소의 모든 부품들은 50~100년 후 재활용될 수 있다는 것이다. 기존의 원자력 발전소의 수명을 50년으로 잡을 때 이는 충분히 경제적 가치가 있다고 본다.

일차 연료가 비방사능 물질이므로 연료의 운송·보관이 용이하며

저렴하고 또한 방사능 폐기물의 양도 같은 에너지를 생산하는 원자력 발전에 비해 0.04%에 불과한 핵융합 발전이 지금까지 실용화가 되지 못한 주요 원인은, 핵융합 발전의 중심에 있는 수 억도의 플라즈마를 어떻게 제어 가능한(controlled) 열핵융합 반응 상태(thermonuclear fusion)로 만드는 것과 핵융합 반응에서 나오는 중성자를 효율적으로 차단, 전기 생산의 효율과 안정성을 높이는 것과 핵융합 반응에서 나오는 중성자에 잘 견디는 발전소 구조물들을 만드는 데 따르는 문제들이 아직 실용화 단계에 있지 못하기 때문이다.

핵융합 연구의 역사를 뒤돌아보면, 2차 세계 대전 후 핵융합 연구가 수소폭탄을 만드는 비밀 연구에서 분리되어, 미국·구소련·유럽을 중심으로 연구가 시작, 확산되어 1960년대에 기초적인 플라즈마 및 핵융합 이론 연구들이 진행되었고, 1970년대에 이를 바탕으로 대학교와 연구소들을 중심으로 소규모 핵융합 장치들을 건설, 그 동안의 이론들을 검증한 후, 1980년대부터 대규모의 핵융합 장치들을 미국·유럽·일본이 건설 핵융합 연구의 핵융합 발전소로의 가능성 여부를 위한 대규모의 실험들을 진행하였다.

1990년대 들어서는, 1991년 유럽연합의 대형 토카막 JET(Joint

Europen Torus)에서 세계 최초로 중수소와 삼중수소를 사용한 1MW 열 에너지 방출의 핵융합 실험의 성공 후, 미국의 프린스턴 플라즈마 연구소의 TFTR(Tokamak Fusion Test Reactor)에서 10MW의 에너지 방출이 성공하였고, 이를 다시 JET에서 17MW로 기록을 경신하였다.

일본도 역시 대형 토카막 JT(Japan Tokamak)-60에서 중수소와 삼중수소의 핵융합 실험에서 비슷한 규모의 핵융합 에너지 방출에 성공하였다.

1990년대에 진행된 일련의 실험들의 성공으로 1980년대 핵융합 연구자들을 괴롭혔던 질문, “핵융합 실험을 위해 들어간 에너지에 비해 방출된 에너지가 더 크게 나올 수 있는냐?”에서 핵융합 연구자들은 풀려날 수 있게 되었다. 즉 $Q=1$ (방출된 에너지/들어간 에너지)이 달성되었기 때문이다.

핵융합 연구자들에게 종종 던져지는 두 가지 질문이 있다. 하나는 “핵융합 발전소가 안전한가?”이고 다른 하나는 “수 억도의 핵융합 반응을 어떻게 달성하느냐”는 것이다.

핵융합 반응이 핵융합 연료를 수 억도에서 가열하여 핵융합을 일으킨다고 하는데 그러면 상식적으로 뭔가를 데우려면 용기에 집어넣고 끓여야 하는데 “세상에 어떤 그릇

이 수 억도를 견디어 낼 수 있는냐?” 하는 질문이다

태양에서 일어나는 핵융합 반응의 온도는 1,500만도이다. 태양에서의 핵융합 반응이 유지되는 것은 태양의 질량에서 발생하는 중력이 핵융합 반응이 일어나는 플라즈마를 가두어 지속적인 핵융합 반응이 일어날 수 있기 때문이다.

하지만 지구상에는 태양만한 중력이 없다. 대신 핵융합 반응이 일어나게 하기 위해서 온도를 10배 이상 올려야 한다. 한데 1억도는 고사하고 1,500만도의 핵융합 반응이 일어나는 연료를 통해 직접 담을 수 있는 그릇은 지구상에, 아니 우주에도 존재하지 않는다.

하지만 핵융합 연료가 수 억도로 가열될 때, 연료는 플라즈마 상태, 즉 연료가 이온화된 상태가 되어서 ‘+’ 전하를 가진 삼중수소 이온과 중수소 이온 그리고 ‘-’ 전자들로 구성된 고온의 전자들로 구성된 기체, 즉 플라즈마 상태가 된다는 점을 상기한다면, 초고온 플라즈마를 용기에 담을 수 있는 방법을 생각해 낼 수 있다.

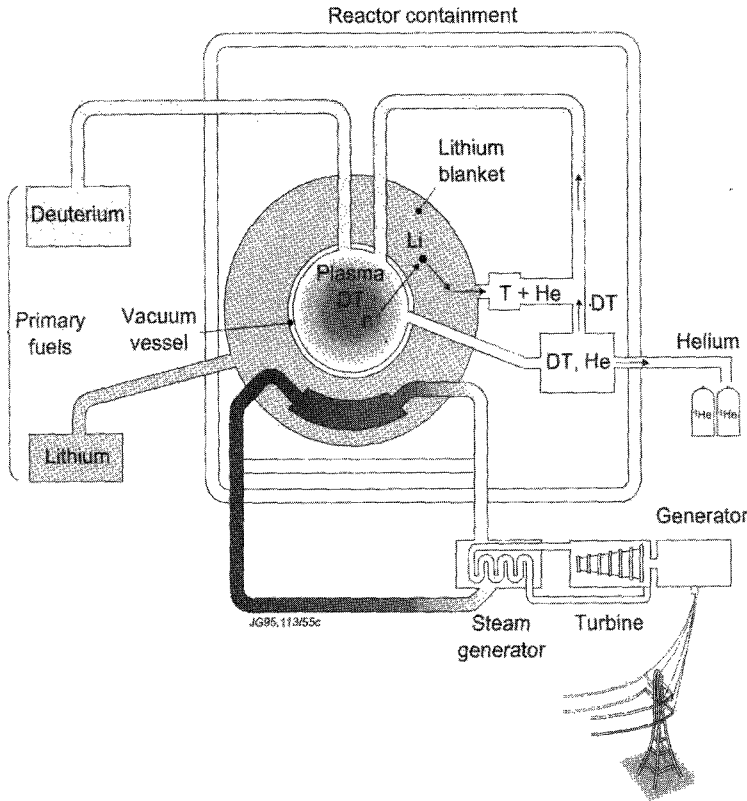
물리학의 법칙에 의하면 ‘+’, ‘-’ 전하에 자기장이 걸리면 전하들은 자기장(magnetic field line)을 중심으로 원 운동을 한다. 자기장의 세기가 세어질수록 전하는 자기장을 중심으로 반경이 점점 줄어들며 원 운동을 한다. 지구 자기장의 약

10만 배 정도의 자기장을 걸어주면 고온의 플라즈마를 이루는 전하들은 아예 자기장을 따라서만 움직이게 된다. 즉 자기장이라는 눈에 안 보이는 파이프 라인을 따라서만 고온의 플라즈마는 이동이 가능하다.

이러한 원리에 착안해서 대형 진공 용기 안에, 자기장을 도너츠(Donut) 모양으로 자기장의 ‘끝’과 ‘끝’을 연결하는 형태로 만들어 놓은 다음, 미량(1 gram)의 중수소-삼중수소 기체를 집어 넣고 방전시켜 플라즈마를 만든 후, 플라즈마가 자기장을 따라 원형 경기장을 질주하는 말처럼 끝없이 빙빙 돌게 만들고, 이러한 플라즈마를 지속적으로 마이크로웨이브 같은 보조 가열 장치로 수 억도로 가열한다.

플라즈마를 눈에 안 보이는 자기 용기(magnetic bottle)에 가두어 핵융합 반응을 일으켜 14.1 MeV의 운동 에너지를 가진 중성자가 방출되고 전하가 없는 중성자는 자기장에 상관없이 튀어나와 핵융합 반응을 둘러싸고 있는 차폐막과 충돌, 중성자의 운동 에너지가 열 에너지로 변환, 차폐막 뒤를 흐르는 냉각수를 가열, 이 열로 증기 발전기를 돌려 전기를 생산하는 것이다.

한편 핵융합 반응의 다른 부산물이 ‘+’ 입자를 가진 알파 입자의 양이 충분히 많다면, 3.5 MeV의 운동 에너지를 가지고 자기장을 돌면서 핵융합 연료를 가열, 별도의



〈그림 2〉 핵융합 발전소 개념도

와 주기적으로 교환되는 리튬으로 구성되는 차폐막인 셈이다.

따라서 핵융합 발전소는 일반 산업체에 준수하는 안전 규정을 만족하는 정도에서 안전한 발전 시설물이라고 볼 수 있다.

운영 측면에서의 핵융합 발전소의 안전성에 대해서 말한다면, 핵융합 발전소는 물리학 법칙에 의하여 근원적(intrinsically)으로 안전하다.

설령, 플라즈마의 제어가 용이치 않아 플라즈마가 수 천도의 열을 견딜 수 있는 카본(Carbon) 혹은 텅스텐 타일로 보호되고 있는 비자화성(non-magnetic) 철구조물로 된 핵융합 로의 내벽과 접촉할 경우가 발생하더라도, 플라즈마는 전하를 가진 도체(conductor)이므로 즉시 폭삭 꺼지게(short) 된다.

물론 내부 구조물의 일부 타일들이 초고온 플라즈마로 손상을 입는 정도이지만 이는 손쉽게 수리가 가능하다.

따라서 핵융합 발전소에서 사고가 났다면 일반 산업체 공장에서의 사고 수준이 될 것이며, 주민 대피 같은 사고는 원천적으로 일어날 수가 없다.

3. 핵융합 에너지 개발의 발전 경로

앞서 설명한 핵융합 에너지를 상용화 하는 데는 아직도 시간을 필요로 한다. 장점이 클수록 그만큼의 시간과 연구 개발 투자를 요구한다.

보조 가열 장치를 작동할 필요가 없이 핵융합 연료가 중수소와 삼중수소만 공급하면 핵융합 반응은 스스로 지속(self-sustained)된다.

이 때를 핵융합 반응이 점화(ignited) 되었다고 한다. 즉 더 이상 보조 가열 장치라는 불쏘시개 없이 매번 1 그램의 중수소-삼중수소라는 장작만 던져 넣으면 되는 것이다.

두 번째 질문인 핵융합 발전소의 안전성에 대한 대답으로 두 가지를

들 수 있다. 연료의 안전성과 운영의 안전성이다.

핵융합 발전소는 연료 공급 면에서, 궁극적으로는 중수소만을 공급하면 된다. 삼중수소는 핵융합을 감싸고 있는 리튬과 중성자 차폐막인 납 등으로 구성된 차폐막(Blanket)에서 중성자를 맞은 리튬이 삼중수소로 변환 추출되어 핵융합 연료로 사용되므로 핵융합 발전소로 연료로 가져가는 것은 중수소

성급한 사람들은 핵융합 에너지 상용화에 fast-track(지름길)이라는 청사진을 제시하고, 좀 보수적인 시각을 가진 사람들은 약 50년을 잡고 있다.

세계 핵융합 선진국들인 미국·구소련·유럽연합·일본이 지난 1987년부터 추진해온 ITER 프로젝트는 지난 40년간의 핵융합 연구들을 총결산하고 핵융합 에너지 상용화의 다음번 행보(Next Step)로 핵융합 상업화의 길(The Way, 라틴어로 ITER)로 인식되고 있다.

지난 40년간 만들어진 핵융합 실험 장치에 비해 ITER는 핵융합 실험로(Experimental Reactor)로 최초이자 마지막 실험로가 될 것이다.

이후에 건설될 장치는 핵융합 로를 실제적으로 구현하는 DEMO (Demonstration Power Reactor)이고 향후 50년 개발의 마지막 path로 최초의 상업용 핵융합 발전소인 PROTO(Prototype Power Plant)가 있다.

1980년대에 가동을 시작, 지난 20년간 운영을 해 온 대형 핵융합 실험 장치들을 대표하는 JET 이후, ITER·DEMO·PROTO에 이르는 핵융합 상용화의 개발 경로에서 DEMO와 PROTO를 함께 묶어 개발하려는 시도가 fast track 접근 방법으로 ITER 건설 시점을 기준으로 50년의 개발 과정을 35년으

로 단축시키려는 노력이다. 좀 성급한 감이 있다고 평하는 사람들도 있지만 가능성이 없는 것도 아니다.

생명과학 분야에서 요원하다고 생각했던 GENOME 분석에 대한 연구도 현대 컴퓨터의 발달로 이미 그 목표를 달성한 것을 보면, 그리고 현재 핵융합 상용화에 필요한 물질 재료 연구 등을 비롯한 관련 원천 기술의 개발 속도가 지속적으로 상승하고 있는 점을 감안한다면, 그리고 지속적이고 충분한 연구 개발이 진행된다면, 35년 후의 핵융합 발전소의 실현은 가능성이 있다고 볼 수 있다.

ITER 프로젝트

1. 개요

핵융합 에너지의 상용화의 출발점에 놓여 있는 ITER 프로젝트는 지난 15년간의 설계 과정을 마감하고 2001년 7월 공학적 설계의 최종 설계보고서(Final Design Report)를 마무리 지었다.

구소련의 재정 상태 붕괴, 미국의 탈퇴, 일본의 1990년대의 불경기 등 정치-경제적 상황의 어려움을 극복하고 유럽·러시아·일본의 지속적인 참여로 500MW급의 에너지 방출이 가능한 핵융합 실험로의 설계를 마친 것이다.

이런 긍정적이고 지속적인 노력의 덕분으로 2003년 1월 중국과 미

국이 ITER 프로젝트의 실현을 위한 협상에 참여하였고, 세계 5위 원자력 에너지 발전 국가인 우리나라도 이에 합류, 2003년 6월부터 ITER 프로젝트의 수행을 담당하는 ITER 국제 기구의 설립을 위한 협상에 유럽연합·일본·러시아·중국·미국과 함께 참여하고 있다.

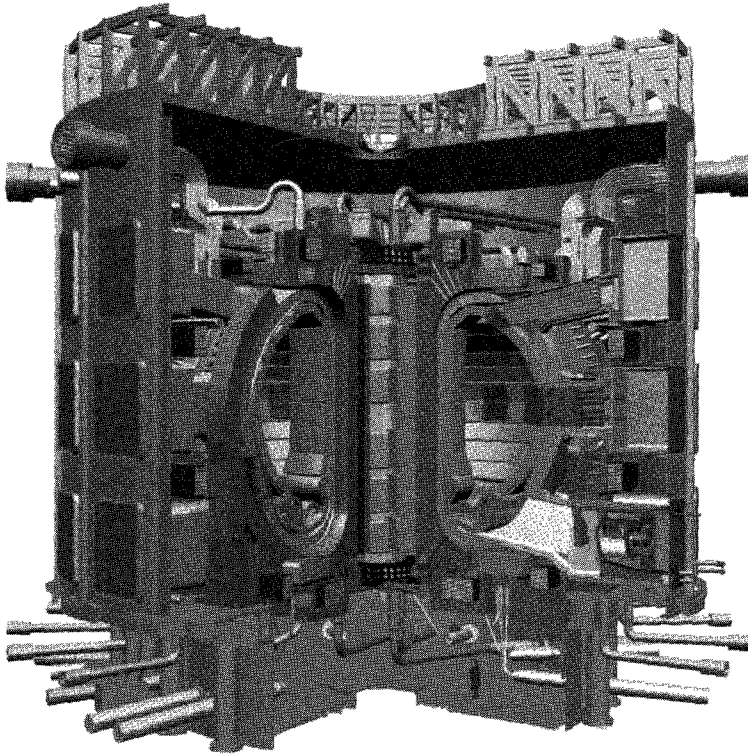
현재 ITER 부지 선정에 관한 마지막 협상이 참여 국가들 사이에서 연내에 타결이 된다면 올해 안에 각국별 ITER 국제 기구 설립을 위한 비준 절차를 거쳐 연말이나 내년 초 ITER 국제 기구 설립 및 프로젝트 추진을 위한 국제 조약이 체결 및 발효되어 총건설 기간 약 10년, 운영 기간 20년, 폐쇄 기간 약 5년의 총 35년의 대장정이 시작되는 것이다.

사업비는 건설 기간 약 50억불, 운영 기간 약 60억불로 예상되고 있다. ITER 건설 이후 30년 후부터 시작되는 폐로 기간에 대한 비용은 앞으로 계속 논의될 것이다.

ITER 협상 참여국들은 총건설 비용의 최소 10%를 현물로 분담하는 것에 동의해야만 협상에 참할 수 있는 것과 동시에 ITER 조달 품목 중 최소 10%를 배정 받을 수 있는 권리도 갖게 된다.

2. ITER 참여에 따른 사회-경제적 파급 효과

가. 거시적 참여 의의



〈그림 3〉 ITER Tokamak(폭 약 28m, 높이 약 28m)

앞서 언급했듯이 ITER는 지난 50년간의 세계 자기 핵융합(Magnetic Fusion) 연구의 총결산인 동시에 핵융합 발전소 개발 path에 놓인 마지막 실험로(Experimental Reactor)이다.

따라서 우리 나라의 ITER 참여는 유럽 연합(25개국 + EU associated partner(스위스·캐나다)·일본·러시아·중국·미국과 함께 세계 핵융합 발전소 개발 프로

그램에 본격적으로 참여한다는 것을 의미한다.

나. 핵융합 발전소가 가지는 경제적 장점

핵융합 발전의 대표적인 장점은 처리 시설·운반·보관·인허가 과정 등 연료 가격 이외에 추가로 발생하는 부대 비용이 일반 화학 물질의 취급에 준하는 수준이므로 연료의 관리 비용이 대단히 저렴하며 이는 핵융합 발전소의 장기적인 운영

특성상 대단한 장점이라고 볼 수 있다.

핵융합 플라즈마 특성에서 비롯되는 핵융합 발전소 운영의 근본적인 안전성은 핵융합 발전소의 건설 부지 유치 및 건설 과정에 따르는 인허가 및 거주 지역 주민 관계 및 홍보 비용 등 사회적 간접 비용을 대단히 절감할 수 있다고 본다.

핵융합 발전소에서 배출되는 방사능 폐기물은 핵융합 반응에서 나오는 중성자가 핵융합로 구조물과 충돌하여 방사화되는 인공적 방사능 폐기물이다.

핵융합 발전소 해체 후 약 50~100년이 지나면 인공적 방사능 폐기물의 방사능은 석탄 발전소에서 나오는 방사능 수준 보다 낮은 수준이 되어 100년 안에 모든 구조물들을 재활용할 수 있게 되므로 환경 부담 비용이 적절한 수준으로 유지될 수 있다.

따라서 발전소 건설 및 해체에 관한 중장기 계획을 보다 용이하게 세울 수 있게 되며, 이는 핵융합 발전 단가를 더욱 낮추게 할 수 있다.

다. 기술적 기대 효과

핵융합 발전소는 1억도 이상의 초고온 플라즈마를 극저온 냉매를 사용하는 초전도 자석에서 나오는 수 테슬라 급의 고자기장(high magnetic field)에 의하여 초고진공(ultra high vacuum) 상태에서 유지, 핵융합 반응에서 나오는 중성자의 운동 에너지를 열 에너지로 변

환, 발생하는 열로 증기 발전기를 돌려 전기를 생산하는 것이다.

즉 핵융합 발전소의 전기 발생 시스템은 기존의 원자력 발전소의 열 발생원을 핵분열 엔진에서 핵융합 엔진으로 교체하는 것 이외에는 원자력 발전소와 동일하다.

하지만 열 발생원인 핵융합 반응이 일어나는 중심 부분은 다음과 같은 고난도의 극한 기술(Extreme Technology)들을 요구하고 있다.

- 초전도 자석 설계 및 제작 기술
- 극저온 냉동기 · 설계 · 제작 및 설치 기술
- 고자기장하에서의 거대 초고온 진공용기 설계 · 제작 및 설치 기술
- 초정밀 기계 가공 기술
- 대용량 정밀 전원 공급 시스템 설계, 제작 및 설치 기술
- 초고온 단열 소재 설계 · 제작 및 설치 기술
- 중성자 및 방사능 환경하에서의 신호 전달 및 data 저장 기술
- 대용량 초고속 데이터 전송 및 저장 기술
- 초고속 실시간 제어 운전 기술
- 거대 구조물의 초정밀 조립 및 설치 기술
- 전자 빔 · 레이저 빔을 사용한 초정밀 용접 가공 기술
- 극저온 · 고전자기장 환경에서의 거대 구조물 설계 및 제작 기술
- 초고온 플라즈마 진단 기술
- 대용량 초고주파(RF, MW) 가

열 기술

- 고전압 이온 가속장치 설계 · 제작 및 설치 기술
- 삼중수소 생성 · 저장 및 복원 기술
- 중성자 차폐 기술
- 극저온 · 고전자기장 · 초고압하에서의 각종 밸브 · 센서 · 배관 설계 · 가공 및 설치 기술

원천 기술 개발 수준이 산업화가 선진화된 나라들에 비해 상대적으로 미흡한 우리 나라에서 상기 언급한 기술들은 현재 유럽 · 일본 · 러시아 · 미국 등 기술 선진국들의 몇몇 기업만이 세계 시장을 독점하고 있는 첨단 산업 분야이며, 이 분야에서 파생되는 첨단 극한 기술 제품들을 국내 반도체 · 기계 가공 · 의료기 제작 · 방송 및 통신 기기 · 전력 송출 · 에너지 산업들이 전량 수입하고 있는 상황이다.

상기 언급한 극한 기술들은 국내 중공업 기술의 기술 첨단화와 고부가 장치 극한 기술 제품을 생산하는 원동력이 되며, 우리 나라 기계 및 정밀 기계 가공 산업 구조를 고부가 가치 산업으로 전환하는 계기가 될 것으로 생각한다.

또한 ITER를 통해 국내 첨단 극한 기술 시제품들을 ITER에서 채택하는 품질 관리 기준 및 절차(QA, QC)에 benchmarking하여 완성도를 국제 수준으로 향상, 고 완성도의 부가 가치 높은 극한 기술 제품들을 양산하는 시스템을 구축

하게 될 것이다.

이상의 과정을 거쳐 국내 제조 및 가공 기술을 고부가 가치 극한-첨단-초정밀 기술로 집중적으로 전환하는 주요 계기가 될 수 있으며, 이는 제조 가공 기술의 친환경적 기술을 요구하는 세계 산업계의 환경 친화적 기술 요구에 대처하는 또 하나의 적극적인 행보라고 볼 수 있다.

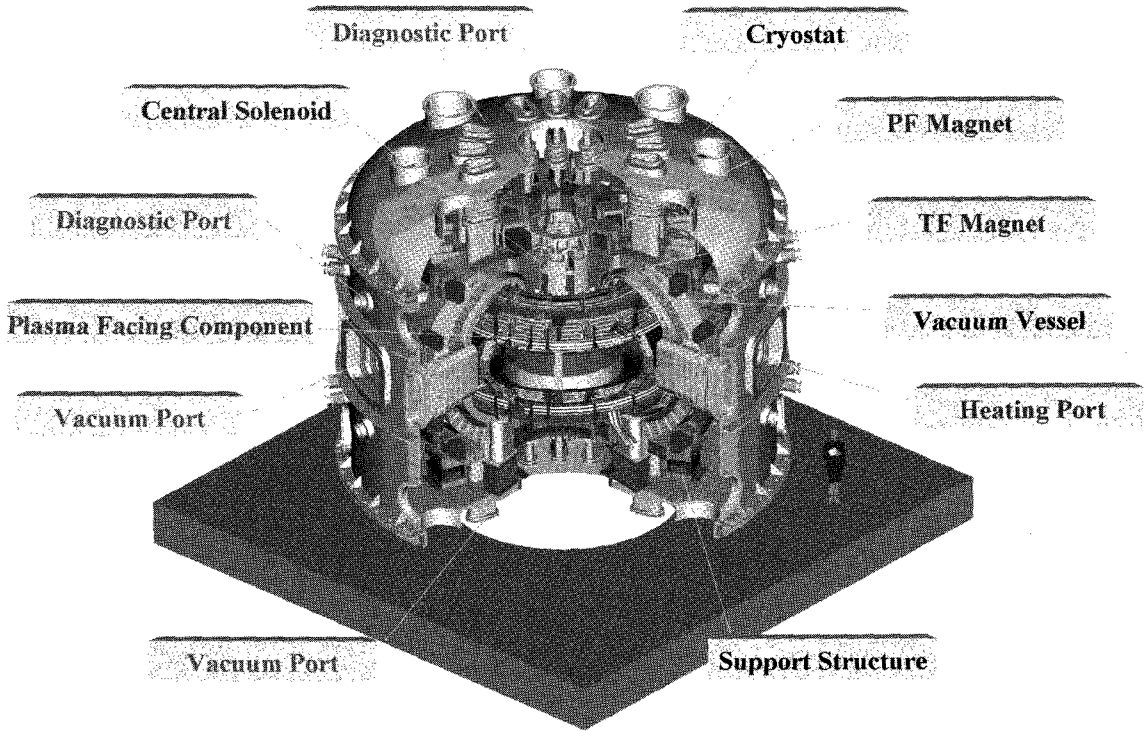
라. 경제적 파급 효과

ITER의 한국의 참여에 따른 경제적 파급 효과는 단기적 효과와 중장기적 효과 그리고 궁극적 참여 효과로 구분하여 볼 수 있다.

단기적으로는 한국의 ITER에의 10% 현물 투자분에 대한 조달 품목을 한국 기업들이 ITER에서 제시하는 technical specification을 만족하여 ITER의 QA 및 QC 과정을 거쳐 ITER에 조달하게 된다.

또한 한국 기업들이 현재 보유하고 있는 세계 정상급 대형 구조물 제작 능력 및 설비를 이용 다른 ITER 참여국의 조달 품목을 공동으로 수주할 가능성이 있다고 생각한다.

중장기적으로는 우리 나라의 중공업 기업들이 ITER 제작 과정에 참여, 첨단 대형 구조물 제작 능력을 배양하고 전문 인력을 양성하는 계기가 되어 한국에 고부가 가치의 핵융합 관련 산업이 육성되는 계기가 되며, 이는 역으로 우리 나라의 고급 과학기술 교육 기관에 직접적



〈그림 4〉 KSTAR Tokamak(폭 약 9m, 높이 약 9m)

인 영향을 주어 현재 전무하다고 할 수 있는 핵융합 공학에 대한 교육 과정을 설치 관련 고부가 가치 엔지니어링 인력을 배출하는 계기가 될 것이라고 생각한다.

궁극적으로는 ITER를 통해 시작된 한국 핵융합 엔지니어링과 관련 산업의 육성으로 한국은 미래 핵융합 발전소 설계·건설 기술 보유국이 되어 향후 50년 후의 핵융합 발전소 건설 시장에 주요 파트너가 되

어 세계 핵융합 건설소 건설의 주역으로 참여할 수 있게 된다고 생각한다.

향후 50년 후의 세계 핵융합 발전소 시장 규모는 지금의 1GWe 급의 원자력 발전소 평균 건설 비용을 20억불로 산정하고, ITER의 현재 건설 비용 약 50억불을 감안, 50년 후의 상업적으로 최적화된 1.5GWe의 건설 비용을 약 40억불로 선정하고 극동 지역에서의 상업

용 핵융합 발전소의 수요를 중국·일본·한국·극동 러시아를 합쳐 약 200기로 산정할 경우 최소 8,000억불의 시장이 형성된다고 볼 수 있다.

건설 비용에 추가하여 설계 및 엔지니어링 비용과 유지 비용, 부품 조달 등 관련 산업 규모를 포함시켰을 경우 최소 시장 규모는 극동 지역에서만 최소 2조억불 규모의 시장이 조성되는 것이라고 추정 된다.

이 시장을 현재 핵융합 강국인 EU·일본·러시아·미국과 미래의 중국 등과 균등 분할(equally share)할 경우에도 한국은 최소 3,000억불의 상업용 핵융합 발전소 건설 관련 시장을 보장 받게 된다고 생각할 수 있다.

마. 과학-외교적 파급 효과

ITER는 NPT 가입에 불참한 나라를 제외한 북반구 대부분의 산업 국가들이 참여하는 국제 공동 연구 개발 프로젝트이며, 35년간의 프로젝트 수행을 위한 ITER 국제 기구가 UN에 등록되어 운영될 예정이다.

이러한 국제 규모의 장기 프로젝트에 대한 한국의 ITER의 참여는 한국 과학의 위치를 유럽연합·일본·러시아·중국·미국 등과 대등한 관계로 설정하고 국제 과학 외교에서 한국의 위치를 공고히 하게 된다.

이는 타과학 분야에서도 한국이 'substantial' 한 파트너로 인정되어 다른 국제 프로젝트에도 주파트너로 인정되는 계기가 된다.

또한 ITER는 35년간 한국이 full partnership로 참여하게 되는 프로젝트이다. 따라서 한국은 ITER 프로젝트에 적극적으로 참여하여 35년이라는 장기 국제 프로젝트의 운영에 참여, 장기 프로젝트 운영의 know-how 및 국제 프로젝트 운영 기법의 know-how를

배울 수 있게 된다.

이는 차후 한국의 국제 과학 프로젝트의 유치 및 운영 능력을 직접적으로 배양하게 되는 데 크게 기여할 것으로 사료된다.

ITER는 현재 세계적으로 인지도는 지구 온난화 문제에 대한 적극적인 해결 방법이다. 교토 프로토콜 등 지구 온난화 문제에 대한 대처 방안의 하나로 인식되고 있으므로 국제 사회에서의 지구 온난화와 관련된 모든 환경 관련 협상에서 한국의 이미지를 공고하게 할 수 있으며 다른 환경 분야에서도 파급 효과가 있을 것으로 사료된다.

3. ITER의 국내외 추진 현황 및 향후 일정

가. 국내외 추진 현황

2001년 11월 토론토에서의 제 1차 협상 회의를 시작으로, 2003년 11월 5~11일 까지 개최된 북경에서의 제 11차 실무 협상 회의와 제9차 협상 회의를 마쳤다.

현재까지 10번의 실무 협상 회의와 9번의 협상 회의, 그리고 5번의 고위급 협상 회의를 통하여 ITER 공동 연구 시행 협정 초안 작성을 위한 대부분의 실무 작업들은 거의 마쳐진 상태이다.

또한 2003년 9월 제10차 ITER 실무 협상 회의에서 참여국들간의 조달 품목에 대한 분배도 완성되어 있고, ITER 건설 분담금에 대한 유

치국과 비유치국 사이의 비용 분담 안도 2003년 11월 비엔나 국제원자력기구 본부에서 열린 ITER 고위급 회담에서 확정되어 있는 상태이다.

현재 남아 있는 사안은 유럽과 일본에서 제시한 부지 중 하나를 선정하는 일이다.

2003년 12월 미국 워싱턴 미국 무성에서 열린 ITER 장관급 회의에서 부지 선정을 위한 6개 ITER 참여국들 간의 합의(consensus)를 이루기 위한 노력이 시도되었으나 ITER 참여 국가 6개국의 ITER 부지 선정에 대한 입장이 일본의 ITER 유치와 유럽의 ITER 유치에 대해 3:3으로 양분되어 이에 대한 타협점을 찾지 못하고 있는 상황이다.

나. 향후 추진 일정

일단 부지 선정이 2004년 상반기 안에 EU와 일본 사이 혹은 ITER 참여국 사이들 간의 양자간 및 다자간 협상을 통하여 양보와 타협을 이루어 결정되면, ITER 국제 기구 조직을 위한 ITER 유치 국가의 법률기들이 참여한 ITER 실무급 협상 회의와 이 실무 협상 회의에서 만들어진 「ITER 공동 연구 시행 협정」 초안이, ITER 마지막 협상 회의에서 각 ITER 협상국들의 만장 일치의 동의에 의해 완성된다.

각국 협상 참여국 실무 전문가들에 의해 완성된 협정안에 대한 가



명(Initialing) 후, ITER의 공식 언어로 채택된 영어로 작성된 공동 연구 시행 협정은 일차적으로 국내 관련 전문가들에 의해 한글로 번역된 후 법률가들의 검증 절차를 거쳐 한글 법률 조항으로 다듬어진 후, 국내법과의 상충 여부를 법률가들로부터 검증을 받는다.

상충되는 부분들은 국제법의 국내법 우위 여부를 법률가들의 검증을 거쳐 이를 특별법화 하는 법안을 추진하게 된다.

ITER 공동 연구 시행 협정은 특별법으로 국회 비준 절차를 거쳐, 비준안이 통과되면, 제반 행정 절차를 거쳐 발효가 되고 이에 필요한 예산을 정부로부터 배정 받게 된다.

발효된 특별법의 시행령으로 ITER 추진을 위한 ITER 국내 전담 기구(Domestic Agency)가 정식으로 결성되고, ITER 공동 연구 시행 협정에 명시된 ITER 건설에 필요한 대한민국의 예산 분담금을 정부로부터 지급 받는다.

이 국내 전담 기구는 국내 유관 기관들의 협력하에 분담금을 국내 기업들에게 배분하여, ITER 건설에 필요한 조달 품목들을 ITER 국제 기구와 함께 ITER 공동 연구 시행 협정에 명시된 국제법 절차에 따라, 설계·제작·품질·인증 및 납품하는 역할을 담당하게 된다.

또한 각국별로 조인된 ITER 공동 연구 시행 협정에 따라 각국별

ITER 재정 분담 금액에 비례하여 ITER 국제 기구에서 각국의 국가별 ITER 전담 기구들과 일하게 될 상주 직원들을 선발하고 국가별 전담 기구에서는 추가로 ITER 국제 기구에서 ITER 국제 기구 직원들과 함께 업무를 수행할 각 참여국별 파견 직원(seconded)들이 선발 및 파견된다.

국가별 전담 기구가 담당하게 되는 업무는 크게 기술 업무와 행정 업무로 구분 된다.

하나는, 조달 품목에 대한 기술 조사 및 국내 조달 품목 제작 가능 기업의 제작 능력 검증 및 선발을 위한 기술 조사와 ITER International Team이 요구하는 조달 품목 제작을 위한 기술 회의 및 workshop에 참석, 조달 품목 제작을 위한 관련 기술 정보의 습득과 이를 국내 제작 기업에 전수, 조달 품목 제작을 위한 기술 준비, 제작 과정 최적화를 위한 R&D 등을 기획·지시·감독하는 기술 업무이다.

다른 하나는, 조달 품목 관련, ITER 국제 기구와의 연락 업무를 담당, 조달 품목 납품을 위해, ITER 국제 기구와 보조를 맞추어, 자재·회계·예산·감사 기능 등을 담당하며, 기술 인력의 파견 및 지원에 대한 행정 업무이다.

**국가 핵융합 연구 개발 사업
'KSTAR(Korea Superconducting Tokamak Advance Research)' 프로젝트**

1995년 12월 국가 핵융합 연구개발 사업으로 출범한 KSTAR 프로젝트는, 초전도 전자석에서 만들어지는 평균 3만 Gauss(지구 자장의 약 10만 배)의 자기장으로 1억도 이상의 핵융합 플라즈마를 밀폐·가열하여 수 백 초 동안 유지하는, 세계 최초로 모든 전자석들을 ITER와 같은 초전도 선재(전자석을 구성하는 전선 재료)를 사용하는 초전도 토카막을 건설 및 운영하는 프로젝트로 약 20여 년간 지속될 프로젝트이다.

ITER가 DEMO를 위한 세계 최초의 모든 전자석이 초전도 전자석인 실험용 토카막 핵융합로(Fusion Reactor) 인데 반하여 KSTAR는 ITER 건설 전에 가동 예정인 세계 유일의 중형급 초전도 토카막 핵융합 장치(Fusion Device)이며, KSTAR 장치가 성공적으로 건설 및 운영될 때 KSTAR 초전도 핵융합 토카막 장치는 linear dimension이 ITER의 1/3 크기인 ITER의 축소판이라고 볼 수 있다.

KSTAR 장치를 건설 및 운영함으로써, ITER의 건설시 예상되는 위험 요소를 사전에 점검해 볼 수

있고, ITER의 운영 단계에서도 사전 예비 실험을 감당, ITER 운영시 발생할 수 있는 위험 요소를 점검하며, 따라서 ITER의 운영 경비를 최소화할 수 있는 역량을 가진 장치로서의 임무를 담당하는 장치가 될 것이다.

이러한 ITER와의 공조 관계에서 한국은 약 40년간 뒤쳐진 핵융합 연구의 국내 수준을 약 20여 년 안에 세계 정상급 수준으로 끌어올릴 수 있게 되며, 한국은 ITER가 종료되는 시점에는 상업용 발전소의 건설·운영·해체까지의 전 과정에 대한 자체 기술력을 보유한 상업용 핵융합 발전소 핵심 기술 보유국으로 자리매김을 할 수 있게 된다.

이와 같은 청사진을 실현시키기 위해서는 3가지의 선행 조건을 만족해야 한다.

첫 째는 KSTAR 초전도 토카막의 성공적인 건설, 두 번째는 운영에 필요한 실질적 핵융합 인적 자원의 확보이며 세 번째는 ITER와의 유기적인 공조 체계 구축이다.

국가 핵융합 연구 개발 사업의 근본 목적인 핵융합 발전소 핵심 기술 확보를 위한 두 번째 선행 조건이며 가장 중요한 핵융합 인적 자원의 확보는, 한국의 본격적 핵융합 연구 개발의 출발점이 선진국의 1960년대 초에 비해 1990년대 중반인 점을 고려한다면, 또한 이제까지 국내 핵융합 연구 투자 규모를 선진 핵융

합 개발국과 비교해 볼 때, 국내에서 가동중인 토카막이 전무한 국내 현실에서 가장 시급하게 다루어야 할 사안이다.

더구나 요즈음의 이공계 지원 기피 현상과 맞물린 대학의 학부제 시행 등으로 대부분 이공계 연구소 및 산업 분야 현장에서 우수 인력 확보에 어려움을 겪고 있는 국내 현실에서 기계·재료·전자·저온공학·플라즈마 물리학 등 첨단 극한 기술 분야에서의 우수 연구·기술 인력 확보를 위해 신진 핵융합 연구 개발 인력들에게 확실한 동기 부여와 함께 선진 핵융합 국가들과의 국제 협력을 통한 조직적인 인력 양성 프로그램을 조속한 시일 내에 가동해야 한다.

ITER를 세계 핵융합계의 상업용 발전소 건설이라는 정상 정복을 위한 베이스 캠프라고 본다면, KSTAR는 한국의 ITER 건설 참여 및 운영 참여를 위한 베이스 캠프로서 대한민국의 세계 핵융합 R&D 대열에 성공적으로 참여를 하기 위해, 반드시 성공적으로 그 목표를 달성해야만 하는 시금석이 되어야만 한다.

맺음말

핵융합 연구는 1920년대의 원자핵의 구조와 별의 에너지원에 대한 기초적 의문에서 시작하여,

1950~1960년대 수립된 핵융합 물리 이론 체계와 1970년대 수립된 이론을 바탕으로 다양한 실험 과정들을 거쳐, 1980년대와 1990년대 대규모의 시설을 투자했고, 이에 대한 보상으로 상업용 핵융합 발전의 실현성을 20세기 말에 검증했다.

21세기 초 지난 50여 년의 핵융합 연구의 집대성인 ITER 프로젝트를 통한 약 30여 년에 걸친 마지막 실험을 마무리하면, 1백년에 걸친 핵융합 연구는 그 대단원을 마치고 실용화의 시대로 접어들 것이다.

이는 20세기 초 닐스 보어의 고전 양자론을 시작으로 해 거의 90년에 걸쳐 오늘날의 인터넷 세계를 이룩한 전자 산업 기술의 발전에 버금가는, 인류의 다가올 우주 시대에 에너지원을 확보하기 위한 인류 공동의 노력이라고 볼 수 있다.

핵융합 에너지는 20세기 동안 인류의 무분별한 화석 연료의 남용으로 파괴된 지구 생명 생태계를 다시 복원시키는 필요한 대용량 에너지원으로서, 또한 앞으로의 인류의 지속 가능한 개발(Sustainable Development)을 가능하게 하는 주에너지원으로 사용될 것이다. ☉