

# 우리나라의 핵융합 연구계획

최 덕 인  
(기초과학지원연구소 소장)

## 1. 서 론

세계적으로 인구의 급격한 증가와 함께 에너지의 수요가 증가하고 있으며 현재 중요한 에너지원의 하나인 화석에너지는 현재와 같은 추세라면 1세기를 넘지 못할 것이라는 예상은 주지의 사실이다. 우리나라를 비롯한 일본, 인도와 같이 인구에 비하여 국토가 좁은 국가에서 지속적인 성장을 위해서는 고밀도 대용량의 에너지 자원 개발이 필수적이다. 핵융합에너지는 수소의 동위원소인 중수소와 삼중수소를 이용함으로써 꿈의 에너지로 불리는 미래 에너지 해결을 위한 중요한 원천 기술로 화석에너지 고갈 문제와 폐기물 문제, 지구 온난화 등 환경문제를 유발하지 않는 깨끗하고 안전하면서도 고밀도 대용량 발전이 가능한 무한한 에너지 자원으로 우리나라와 일본과 같은 자원 빈국의 근본적인 미래 에너지 원이다.

최근 핵융합 연구가 2000년대 과학 선진국을 목표로 국가가 추진하고 있는 선도기술개발사업(G7)의 신규과제중 하나로 선정되면서 국내의 각 실험실에서 소규모로 진행이 되던 연구가 통합이 된 국가 핵융합 계획이 수립되었다. 이 과정에서 국내 전문가가 총 망라된 공청회가 수차례 있었으며 이를 수렴하여 학, 연, 산이 통합된 연구체계를 갖게 되었다. 핵융합 연구는 선진국에서 수십 년간 연구를 집중해 오고 있는 분야인 관계로 현재의 국내 기술력으로 해결하기 어려운 부분이 많으므로 선진국과의 공동 연구를 통해 기술을 이전 받으면서 이를 소화하고 국내 기술력을 향상 시킨 후 창조적 연구의 단계를 밟아야 한다. 본 논고에서는 국가 핵융합 계획이 수립된 배경, 목적 및 필요성과 이를 성공적으로 완수하기 위한 연구체계 등에 관하여 논의하고자 한다.

## 2. 국가 핵융합 계획의 목표 및 필요성

국가 핵융합 계획의 목표는 21세기초까지 세계 수준의

차세대 초전도 핵융합 연구장치를 국제 공동 협력을 통해 국내 기술로 건설하고 이 연구장치의 운영을 통해 선진국 수준의 핵융합 연구 능력을 확보하고 이를 통하여 국제 열핵융합로 실험로(ITER) 장치 가동 시까지 세계 수준의 핵융합 기술을 확보하여, 핵융합 에너지 개발을 위한 대형 국제 공동 연구에 동등한 자격으로 참여할 수 있는 연구 기반을 확보하는 것이다.

이러한 목표 설정은 세계 핵융합 연구의 여건에 배경을 두고 있다. 그림 1에 나타나 있는 것과 같이 1980년대 초반에 가동에 들어간 대형 핵융합 장치들이 21세기초에는 수명이 끝나고 초전도 자석을 사용한 국제 열핵융합로(ITER) 장치도 2010년경에 본격 가동에 들어가도록 되어 있다. 이러한 국제 여건으로 비추어 볼 때, 2001-2010년 사이에 우리가 핵융합 연구의 본류에 진입할 수 있는 절대적 기회인 “시간 창(time window)”을 갖게 되었다. 세계 핵융합 연구장치 신규건설의 일시 공백으로 인해 생긴 기회를 중간진입 전략을 활용하여 최첨단 핵융합 장치를 선진 연구 기관과의 국제 협력으로 국내에서 개발하여 세계 최고 수준의 연구 시설로 확립하고, 나아가 ITER 가동 시까지 선진 과학기술국 연구진과 국내 연구진들이 공동 연구를 수행케하여 핵융합 기술 전반에 있어 연구 수준 세계화 달성이 가능케 하는 기회가 생겼다. 그림 2에 이를 개략화 하여 나타내었다.

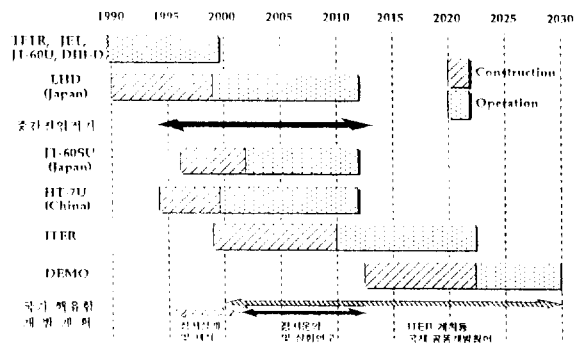


그림 1. 국제 핵융합 에너지 개발 년표



등으로 기관별로 산발적으로 진행이 되었다. 국내 핵융합 연구를 위한 최초의 장치는 서울대학교 원자력공학과에 1979년 개발 설치가 시작이 되어 1989년 제 1 단계 건설이 완료된 SNUT-79 토카막(주반경: 65 cm, 부반경: 15 cm, 자장강도: 3 tesla, 플라즈마 전류: 120 kA) 이다. 그후 원자력 연구소 핵융합실에 KT-1 토카막(주반경: 27 cm, 부반경: 5 cm, 자장강도: 3 tesla, 플라즈마 전류 : 100 kA)이 1992년 설치 완료되었다. 또한, 1990년 국제 공동 연구로 미국 텍사스 주립 대학 내의 핵융합 연구소에서 운영하고 있던 PRETEXT를 이전 받아 한국과학기술원 물리학과 내에 1993년 KAIST-TOKAMAK(주반경: 53 cm, 부반경: 15 cm, 자장강도: 1 tesla, 플라즈마 전류: 60 kA)을 완공하였다. 이러한 장비들은 본격적인 핵융합 연구를 하기에는 연구규모면에서 한계를 지니고 있지만 많은 플라즈마 관련 연구자들을 양성하여 국내 연구의 저변을 확대하는데 큰 역할을 하였다. 이러한 연구 결과를 바탕으로 국내 플라즈마 연구자들이 공동으로 이용할 수 있는 장치의 필요성이 대두되게 되었고 기초과학연구원연구소의 설립과 함께 대형공동연구시설로 한빛 장치가 1992년부터 설치를 시작하여 1995년 설치를 완료하였다. 한빛 장치는 9 MVA 대용량 전원 장치, 저전도 냉각수 설비, 액화가스 제조, 공급 설비 등이 갖추어진 대형공동연구시설이다. 한편으로는 국내 여러 대학의 핵융합 관련 연구 그룹에서 이론적인 연구를 어려운 환경에도 불구하고 꾸준히 진행을 하였다. 또한 포항공대에서 방사광 가속기의 국내 개발을 통해 제반기술 및 전문 인력을 확보하는 성과를 이루었다.

이러한 지속적인 연구에도 불구하고 현재까지의 연구는 선진국에 비해서는 상당히 뒤떨어져 있었다. 21세기 꿈의 에너지를 불리는 미래 에너지 개발을 위한 중요한 원천 기술인 핵융합 기술개발에 본격적으로 착수하여 21세기 초 ITER 장치 가동 시까지 국제 공동 연구에 동등한 자격으로 참여할 수 있는 기반을 확보하기 위해서는 현재의 연구 수준을 단시간 내에 선진국 수준에 접근할 수 있는 범 국가적 연구 개발 추진 체계를 확립하고 수행할 필요성이 대두되었다.

### 3. 국가 핵융합 연구 계획

#### 3.1 장치 규격 및 범위

국가 핵융합 연구 계획으로 추진하고 있는 토카막은 초전도 토카막을 사용하여 정상 상태(Steady-State) 동작이 가능한 토카막 장치로 하며 enhanced physics를 연구할 수 있도록 플라즈마 전류와 압력분포의 국부적인 변형이 용이하고 전류와 압력의 분포를 정확하게 국부적으로 진단할 수 있는 능력을 갖춘 장치이면서 여러 가지 형태의 자기 평형구조 및 플라즈마 물리 변수가 가능한 장치가 기본 조건이다. 이러한 연구를 위해서 필요한 대략적인 필요조건은 표와 같다.

상기 표 1은 대략적인 사항이며 앞으로의 개념 설계를 위

한 연구를 통해 여러 가지 자세한 사항들이 결정될 것이다. 참고로 차세대 초전도 토카막의 개념도를 그림 3에 제시

표 1. 국가 핵융합 초전도 토카막 장치 기본사항

항 목	사 양
주 반 경	1.8 미터
부 반 경	0.5 미터
중 심 자 장	4 tesla
플라즈마 전류	2 MA

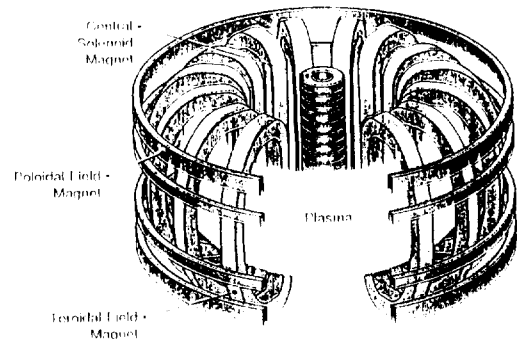


그림 3. 차세대 초전도 핵융합 장치 개념도

하였다. 그림에서 볼 수 있듯이 토카막은 토로이달, 폴로이달 및 중심 솔레노이드의 세 가지 자석으로 구성된 장치에 플라즈마를 가두어 가열하는 용기로 플라즈마 내부의 자체 전류와 외부로부터의 부가적인 장치에 의해 가열된다. 이러한 고온 플라즈마가 충분히 긴 시간 동안 밀폐되면 핵융합 반응이 일어나게 된다. 그림에서 플라즈마를 나타내기 위해 진공용기는 생략되어 있다. 여기서 주반경은 장치의 중심으로부터 플라즈마 단면적의 중심까지를 말하며 부반경은 플라즈마의 반경을 말한다. 그림의 초전도 자석들은 액체 헬륨을 사용하여 냉각하므로 장치 전체가 대형 Cryostat 내에 들어가야 한다. 표 1로는 장치규모를 이해하기 힘들지만 토카막을 설치하기 위하여 계획하고 있는 실험동이 지상 40미터, 지하 14 m 에 넓이가 3,500 평인 규모를 생각하면 이해가 빠르리라고 생각된다.

#### 3.2 연구 개발 내용

초전도 토카막은 크게 주장치와 부대 장치로 나누어 연구를 진행하도록 되어 있다. 주장치는 토카막 본체를 말하며 부대 장치는 플라즈마 가열장치 및 진단장치로 이루어져 있다. 초전도 토카막 개발과 관련된 연구 과제를 표 2에 개략적으로 기술하였다. 토카막 건립을 위해서는 그림 4와 같이 극한 기술이 총 망라된 열거하기 힘들 정도의 기술적 난이도를 필요로 한다. 그러나 바꾸어 말하면 국가 핵융합

표 2. 초전도 핵융합 계획 세부 연구과제

대분류	중분류	세부 연구내용
차세대 초전도 토카막 장치설계 및 설치에 관한 연구	토카막 개념설계 및 공학적 설계	- 토카막 기본 실험 목표 설정에 따른 설계 특성 - 토카막 시스템 코드 운영 - 주장치 및 부대장치의 공학적 설계
	토카막 장치 모델링 및 최적운전기술개발	- MID, 수송현상, 가열관련 코드 운영 및 개발 - 진공자장 모델링
	토카막 시스템 통합 및 검증	- 거대 시스템 통합을 위한 체계 확립 - 정밀 측정기술 - 대형 구조물의 이동방법 및 하중분산
토카막 주장치 개발	토카막 구조 및 진공계통 개발	- 진공용기 형태 구조 - 토카막 지지구조물 - 진공용기 내벽재료 - Divertor 열소산 방식 및 Particle Exhaust 계통 - 대용량 극저온 진공 배기계 - 대형 Cryostat 설계 및 제작
	초전도 자석계통 개발	- 초전도 자석 선제의 특성분석 - 초전도 자석 제작 기술 - 초전도 자석 시스템의 구조 및 열적 안정성 - Quenching 특성분석 및 보호회로
	전원제어 계통개발	- 대전력 모터 발전기 개발 및 운영 - 대용량 전력변환 - 대용량 AC, DC 초전도 자석용 전원 - 초전도 전자석 Quenching Protection
토카막 부대장치 개발	중성입자빔 가열 및 전류구동계통 개발	- 대용량 이온빔개발 - 고전압 대용량 전원개발 - 중성입자빔 입사기술 - 중성입자빔 수송관련 진단기술
	RF 과 가열 및 전류구동 계통개발	- 고출력 전송선로 및 임피던스정합 - 고출력 RF 안테나 해석 및 제작 - RF 파의 플라즈마 전파 및 가열 특성 - RF 과 발생장치 및 주변장치
	마이크로파 가열 및 전류구동 계통 개발	- ECRH 및 LHCD 전송계 개발 - ECRH 및 LHCD 안테나 개발 - 마이크로파 발생장치 및 주변장치 운영기술
	플라즈마 진단 및 제어계통 개발	- 전자기적 진단 - 레이저 및 초고주파 진단 - 가시광 및 자외선 진단 - X선 및 복사 진단

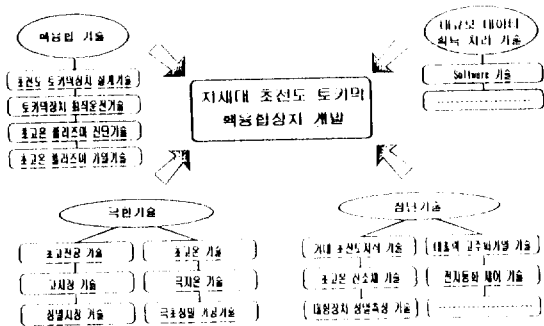


그림 4. 차세대 토카막과 관련된 기술표

계획이 성공적으로 완수되면 많은 분야에 파급효과가 크다는 것을 의미한다. 토카막을 건립한 후 장기적으로 중요한 실험을 하기 위해서는 건설 전에 개념 정의를 제대로 하여야 하며 이에 따라 실험 목표 및 운용 계획을 수립하고 장치 규모, 범위 및 설계 방향을 설정하여야 한다. 시스템 코

드 운영을 통하여 플라즈마 물리상수, 장치 파라미터, 필요한 가열에너지 및 진단장비 등이 정하여 질 것이다. 장치 규모, 시스템 구조 및 제원결정은 장치기대성능 및 개발비, 일정 등 필요한 구속조건과 비교하여 적정화한다. 동시에 이에 필요한 연구기반설계 및 설치에 착수한다. 이상과 같은 연구 단계를 개념 정의 단계로 부른다. 개념 정의가 완료되면 토카막 규격 및 성능 목표, 자장계 및 자장구조, 장치 구조, 진공계, 극저온 및 설비계통, 초전도 자석 및 전원계통, 제어 및 데이터 처리 계통, 가열계 및 진단계 등에 필요한 개념 설계를 토카막 물리코드, 장치 시스템 코드 등을 사용하여 완수한 후 개념 정의안을 확정한다. 이러한 연구 결과를 바탕으로 주장치 및 부대장치의 공학적 설계에 착수한다. 공학적 설계는 시스템 통합 가능성을 염두에 두고 진행이 되어야 한다. 이를 바탕으로 장치 제작 및 조립 과정을 거쳐 토카막을 완성하게 된다.

이러한 과정 중에서 장치 제작을 위한 많은 R&D 가 선행이 되어야 하며 많은 부분 국내에서는 생소한 기술이

로 선진국에서의 기술 도입이 필요한 부분이다.

### 3.3 연구 체계 및 방법

국가 핵융합 연구 개발 사업의 성공적인 달성을 위해서는 아주 많은 방면의 첨단 기술이 요구되고, 이에 따른 전문 인력의 참여가 절대적으로 요구된다. 그러나, 국내 여건으로 보면 전문 연구 인력의 다수가 대학교에 소속되어 있어, 이들을 조직화하여 목표 중심적인 연구개발팀 형태로 체계화하고 시스템화할 필요성이 있다. 이는 일본의 문부성에서 1989년 『LHD』 핵융합 연구 장치 건설을 위해 법대학 공동 연구 기구로 발족시킨 『국립 핵융합 과학 연구소』의 체제를 국내 실정에 맞추어 반영한 것이다. 이러한 대학 연구 개발 전문 인력의 참여뿐만 아니라 국가 연구 기관으로써 목표 중심적 연구 수행의 경험이 축적된 관련 출연 연구 기관들의 적극적인 참여가 필수적이고, 실제 장치 제작과 건설에는 국내 중공업 회사와 진공 관련 첨단 산업체들의 적극적 참여가 절대적이다. 이는 선진국 수준

달성을 공동 추구하는 형태가 될 것이다. 구체적으로는 범 국가적인 차원에서 정책을 수립하고 추진할 『국가 핵융합 연구 개발 위원회』를 설치하고 또한 전문적 자문과 검증을 수행할 국내외 전문가로 구성된 『자문위원회』를 두며 총괄 기관 내에 『사업단』을 설치하여 연구 수행 주체인 공동 연구 기관 및 위탁 연구 기관 사이의 연구 진행 사항 조정과 행정 지원을 담당할 것이다. 주장치, 부대장치 및 요소기술 연구는 전문 인력이 모여 있는 전국의 각 대학과 연구소에서 수행되며 그 추진 체계는 그림 5와 같다.

제한된 세계 수준 규모의 첨단 핵융합 연구 장치의 성공적 개발을 위해서는 범 국가적 연구 개발 체제에 의한 사업 추진이 필수적인 만큼, 40 여 년간의 연구 개발 경험과 기술이 축적된 선진 과학기술 국의 대학들과 국립 연구 기관과의 실질적인 국제 공동 협력 과제로의 추진이 사업 목표 달성에 결정적인 역할을 할뿐만 아니라, 개발 축적된 기술의 국내 정착 측면에 있어서도 필수적이다. 국제 공동 협력 대상 기관은 미국의 프린스턴 플라즈마 물리연구소(PPPL), MIT 대학의 플라즈마 연구소, 텍사스 주립 대학 플라즈마연구소, 오크리지 국립 연구소, General Atomics 등이 있고, 일본의 국립 핵융합 연구소(NIFS), 일본 원자력 연구소의 Naka 핵융합 연구소, 유럽연합의 JET, 영국의 Culham 연구소, 독일의 Max-Plank 연구소, 프랑스의 Tore Supra 등이 있고, 러시아의 Kurchatov 연구소, 중국의 중국 과학원 플라즈마 물리연구소(ASIPP) 등이 있다. 이 중에서 연구 초기 단계에서 가장 중요한 연구 협력 기관은 PPPL이 될 것이다. PPPL은 수년간 『TPX(Tokamak Physics Experiment)』 건립을 위해 많은 초전도 토카막 관련 R&D를 하였으며 이에 대한 많은 경험과 자료를 국가 핵융합 연구 계획에 제공하기 위한 구체적인 협약이 진행 중이다.

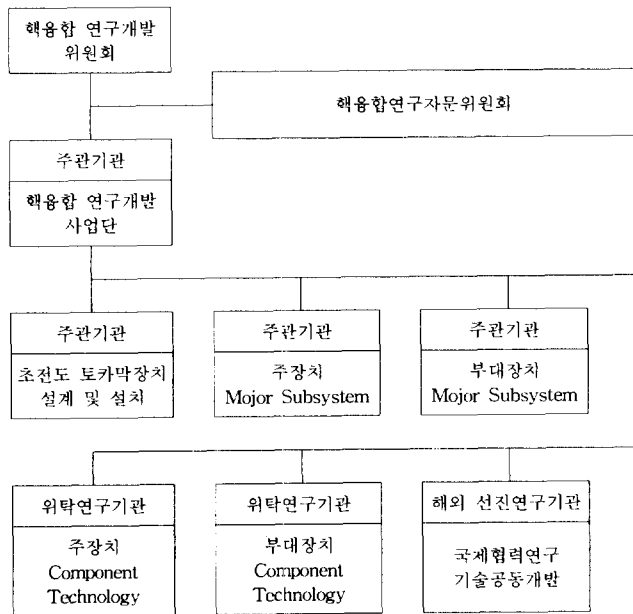


그림 5. 연구개발 추진체계

### 3.4 연구 일정

국가 핵융합 연구는 그림 6과 같은 단계를 거칠 것이며 일차적으로 차세대 핵융합 장치 건설까지는 2 단계에 걸쳐서 이루어 질 것이다. 1 단계는 1996년-1998년에 3개년간이며 이 기간에는 초전도 핵융합로 연구 수행의 과학적 임무 및 역할 정의, 토카막 주요장치 및 부대장치에 관한 물리적 설계 구속요건의 정량적 분석, 토카막 운전 모드 결정, 주장치 및 부대장치의 공학적 설계 등이 이루어 질 것이다. 2단계 연구 기간은 1999년 - 2002년 동안의 4개년이며 이 기간동안 1단계 개념설계 및 공학적 설계를 바탕으로 주장치 및 부대장치를 개발 설치한 후 전체 system을 integration 하고 장치를 운전하기 위한 기술개발을 병행할 것이다. 장치 건설이 끝나고 정상 가동이 이루어지면 실험 결과를 토대로 세계 핵융합 연구의 중심지로 도약을 할 것이며 필요에 따라 추가적인 가열장치 등이 실험 목적에 의해 계속적으로 upgrade 되어 나아갈 계획이다.

도달이 가능한 첨단 핵융합 연구 장치의 국내 개발을 위해서는 범 국가적인 『Project Management Team』의 구성과 이에 참여하는 학·연·산 연구 개발 주체들의 실질적인 공동 연구 개발 체계의 정립이 사업 목표의 달성 가능성을 결정할 것이다. 뿐만 아니라, 국가적 연구 개발 과제의 효율적 수행을 위해서는 각 연구 개발 참여 주체별로 전문성과 확보된 연구 개발 인력 등을 바탕으로 연구 개발의 주요 부분을 분담하여, 각 기관이 『Project Management Team』과 설정된 추진 계획에 보조를 맞추어, 직접적인 책임을 가지고 개발 및 제작을 하여 최종 시스템 통합 목표

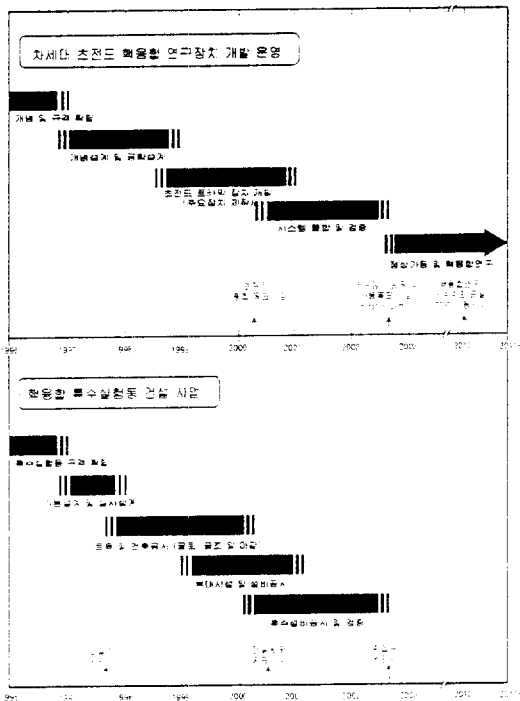


그림 6. 국가 핵융합 연구개발사업 추진 일정표

#### 4. 결 론

지금까지 국가 핵융합 계획의 필요성, 연구 개발 내용, 연구체계 및 방법 연구 일정 등에 관하여 논의하였다. 이러한 연구 계획을 성공적으로 달성하기 위해서는 극도의 극한 기술이 필요한 만큼 많은 분야의 전문가가 동원이 되어야 한다. 현재는 개념 정의 단계이기 때문에 아직까지는 본격적인 R&D가 이루어지지 않고 있지만 조만간 강도 높은 연구가 시작될 것이다. 연구 중 많은 부분이 국제공동협력 연구를 통해 진행될 것이며 이 과정 중에서 국내로 이전이 되는 기술들은 산업체 사이에서는 절대로 기술이전이 안되는 항목들이 많으므로 핵융합 국제 협력의 이점을 최대한 이용하여 산업체로 많은 기술을 이전하려는 노력이 필요하다. 일본의 경우 핵융합과 관련된 플라즈마 연구 자체는 학계와 연구계가 주도하고 있지만 제작과 관련된 핵융합 연구의 주도적 추진력은 일본의 재벌급 산업체이다. 학, 연, 산이 통합된 연구 체계를 통해 21세기 시작과 함께 할 "First Discharge"는 핵융합 선진국으로의 첫발이 될 것으로 확신하며 이를 위해서 전기학회의 많은 전문가가 본 사업에 관심을 갖고 참여하기를 기대하며 글을 맺는다.

#### 참 고 문 헌

[1] J. Geoffery Cordey, Robert J. Goldstone and Ronald R. Parker, "Progress Toward a Tokamak Fusion

Reactor," Physics Today, January, pp 22-30, 1992.  
 [2] 이광형, 정기형, 최덕인, 이경수, 홍상희, "꿈의 에너지 핵융합 발전 가능한가," 과학과 기술, 28권 11호, pp 48-66, 1995.  
 [3] 최덕인, "핵융합 에너지를 위한 연구개발," 에너지협회 회보, 통권 35호, pp 16-21, 1995.  
 [4] 정기형, "핵융합로 개발 현황과 전망," 물리학과 첨단 기술, 6월호, pp 17-20, 1993.  
 [5] John Sheffield, "The Physics of Magnetic Fusion Reactors," Review of Modern Physics, Vol. 66, pp 1015-1116, 1994.  
 [6] TPX Team, "TPX Physics Descriptions: Conceptual Design Review," 93-930325/GNeilson-01, 1993.  
 [7] 중국과학원 플라즈마 물리연구소, "대형과학공정중대항 목건의서," 1994.10.  
 [8] SST1 Team, "Conceptual Design of SST1 Tokamak"  
 [9] Panel on Opportunities in Plasma Science & Technology, "Plasma Science: From Fundamental Research to Technological Applications," National Academy Press, 1995.  
 [10] PPPL, "TPX WBS Descriptions"

#### 저 자 소 개



최덕인(崔德隣)

1936년 4월 30일생. 1955년-59년 서울대 문리대학 물리학과 졸업. 1963-68년 미국 Colorado 대학교 이학박사. 1968년-70년 벨기에 Brussel대학교 연구원. 1970년-81년 미국 Texas대학교 연구교수. 1977년 한국과학원 방문교수. 1979년-80년 서울대학교 AID 초빙교수. 1981년-현재 한국과학기술원 교수. 1985년-86년 미국 Texas대학교 방문교수. 1986년-88년 한국과학기술원 물리학과 주임교수. 1987년-89년 한국물리학회 편집간사. 1989년 93년 한국물리학회 총무간사. 1990년 영국 Cullham 플라즈마연구소 방문연구원. 1991년-92년 한국과학기술원 자연과학부 학부장, 자연과학연구원소장. 1993년 한국과학기술원 부원장. 1991년-93년 대학교육협의회 전국물학과 평가위원회 위원장. 1995년 한국물리학회 무회장 겸 간사장. 1995년-현재 기초과학지원연구소 소장.