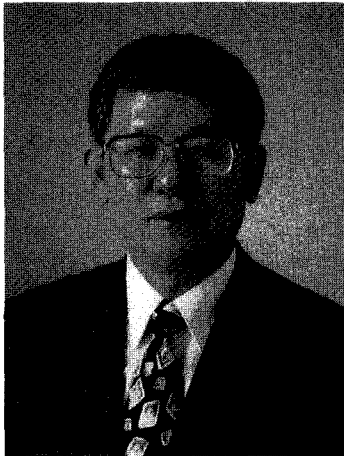


핵융합 에너지를 위한 연구개발



기초과학지원 연구소 소장 최 덕 인 박사

1. 서 론

최근 도하의 뉴스매체를 통하여 핵융합 관련내용이 자주 등장하여 그 분야 전문가의 한사람으로서 가슴 뿌듯함을 느낀다.

1980년대 초반에는 “불우, 부진”분야로 분류되어 국내 연구의 진작을 위하여 대우총서의 의뢰로 “플라즈마 물리학과 핵융합”저술을 했던 때를 상기할 때 사뭇 달라진 모습을 발견한다.

이러한 변화의 기폭제 중 하나는 김영삼 대통령의 1995년 7월23일 미국상항에서 재미동포 과학기술자 리셉션 격려사에서 “핵융합개발 착수에정”언급에 기인한 바 크다고 생각된다.

이러한 말씀은 2010년까지 선진 7개국 수준의 과학기술 발전목표중 기초과학진흥과 첨단기술확

보 등을 위한 일련의 방법 중 하나로 제시된 것이었다.

핵융합연구와 관련하여 1995년 8월1일자 일본의 일간지들은 7월 31일 경단련(우리나라 전경련에 해당)에서 결의한 내용을 전하면서 “열핵융합 실험로 일본에”라는 제목하에 국제열핵융합 실험로(International Thermonuclear Experimental Reactor : 약자로 ITER라고 부름)일본유치를 정식으로 결정하였다고 한다.

그리고 이의 실현을 위한 관련 국가들 설득작업 등 필요한 사업착수를 정부에 공식 요청하고 이에 경단련이 적극협조 할것이며 또한 小川原 등 3개 후보지를 구체적으로 추천하였다는 기사가 있었다.

또 미국 대통령 과학기술자문회의 보고서에서 중국, 인도와 함께 한국을 ITER계획에 정식 참여시키는 방안 강구가 제의됐다는 내용도 알려졌다.

이러한 일들은 그동안 음지에서 꾸준히 연구에만 전념하던 전문가들에게는 큰 힘이 된 것이 사실이지만, 이 기회가 일반국민과 국내 과학기술계의 이해와 협조의 전기가 되었으면 하는 것이 바람이다.

본론에서 상술하겠으나 국내 연구계를 개괄하면 개별적이거나 또는 그룹, 연구소, 대학 단위로 구심점없이 개별연구형태가 그동안 연구의 대중을 이루고 있었다.

따라서 종합 과학 기술인 핵융합연구의 특성상 플라즈마 이외 분야와의 적극협력이 요구됨에도 불구하고 그러한 노력이 활발치 못하였으며 핵융합 연구는 플라즈마 전공자의 전유물로 오해되어 과학기술계 전반과의 유대가 미흡했다.

그동안 플라즈마 전문분과를 설치한 국내학회도

“원자력발전소의 발전원리가 원자탄을 천천히 반응하도록 제어하여 얻는 에너지의 이용이라고 하면 핵융합의 원리는 수소탄의 반응을 제어하여 에너지를 얻는 것이다”

3개로 증가하는 등 꾸준한 전문 인력의 확장도 이루어지고 이러한 활동의 지표가 되는 전문분야 국제학회의 국내유치도 속속 이루어지고 있다.

특히 1995년 6월에는 핵융합 학계의 세계적 석학들이 모여 내 실있는 의견제진과 토론이 이루어졌으며, 이에 대하여 높은 평가를 얻기도 하였다.

이 학회에 참여한 주요 학자들 면면을 보면 ITER이사장 Velikov 박사, MIT Coppi교수, 일본 핵융합 연구소 소장 Iiyoshi교수, Princeton 대학 부소장 Meade박사, 독일 막스프랑크 국립핵융합 연구소 부소장 Wagner교수등이다.

본인의 희망은 이 줄고가 핵융합개발동향에 대한 소식을 전하는 것과 더불어 가까운 곳에서 에너지 연구분야에 함께 종사하면서도 그동안 상호연계에 소원했던 에너지협의회 회원 여러분과 서로의 이해에 도움이 되었으면 한다.

2. 핵융합의 원리와 토카막

원자력 발전소의 발전원리가 원자탄을 천천히 반응하도록 제어하여 얻는 에너지의 이용이라고 하면 핵융합의 원리는 수소탄의 반응을 제어하여 에너지를 얻는 것이 그 원리이다.

핵융합에너지의 첫번째 특징은 무공해의 깨끗한 에너지라는 데 있다. 석탄과 석유등 화석연료로부터의 이산화탄소와 또 그로 인한 환경 공해는 큰 환경문제를 유발하고 있다.

원자력 발전은 이러한 공해는 없으나 오랜기간 잔류되는 고준위 방사능 폐기물과 또한 뜻하지 않은 사고에 의한 대형 방사능 유출 가능성 등의 문제점들이 있는데 반하여 핵융합 발전에는 이러한 문제점들이 수반되지 않는다.

또 핵융합 에너지 원료는 중수소로서 바닷물 1,000ℓ(ℓ=1000cc)에 30그램의 중수소가 들어있으며 1그램의 중수소가 석유 50드럼에 해당하는 에너지를 발생시킨다.

따라서 지구상의 바닷물의 총량은 전인류가 수십억년에 이르도록 사용할 수 있는 무궁무진한 원료가 된다.

그러나 핵융합로의 개발은 지구상에 인공태양을 만드는 일에 비유되리 만치 쉽지만은 않은 과제이다.

실제로 태양과 항성의 에너지는 핵융합으로부터 얻고 있으며 이러한 원리는 1930년대부터 알려져 있는 사실이다.

그러나 초고온의 물질상태인 플라즈마를 10여초동안 가두어

두어야 핵융합에 성공할 수 있는 어려움이 있다.

핵융합은 원자력 발전의 원리가 우라늄과 플루토늄등 무거운 핵이 분열하여 가벼운 여러개의 핵으로 변화할 때 발생하는 질량결손의 에너지 변환인데 반하여 가벼운 핵인 수소 등이 결합할 때 발생하는 질량결손에 의한 에너지 변환이 그 원리이다.

따라서 원자력 발전의 모태는 중성자를 이용한 핵분열 연쇄반응에 있다.

그러나 핵융합 발전의 기본인 융합반응은 양전기를 띤 핵자들 사이에 전기적 밀어내기 힘을 극복하고 융합반응이 가능케 가까이 접근하도록 하는것이 필요하다.

가벼운 핵자들 사이에 핵력이 작용하여 융합할 수 있도록 하는 데는 온도를 높게 올림으로써 가능하다.

따라서 높은 온도의 가열은 핵융합의 필수조건이다.

물질은 고체, 액체, 기체를 거쳐 점차 더 가열하면 핵과 주위 전자가 분리된 고온의 이온화 기체상태가 되며 이것이 제 4의 물질상태인 플라즈마 상태이다.

이 플라즈마를 필요한 기간 유지하며 한 곳에 모아 두는 것이 핵융합 발전의 요체이다.

태양과 같이 거대한 양의 플라

즈마인 경우는 그 무게로 인하여 내부에서 핵융합이 가능하지만 고온의 플라즈마 상태에서는 생명체는 유지될 수 없으며 따라서 지구상에서는 인공적으로 만든 플라즈마 발생장치가 필요한 것이다.

작은 양의 플라즈마는 형광등 내부나 특수 용접기 등에 존재하지만 핵융합의 본격적 결실을 위하여서는 플라즈마를 밀폐하는 특수시설이 필요하다.

플라즈마는 고온임으로 보통 물질로는 담아둘 그릇을 만들 수 없으나 플라즈마가 전기를 갖고 있어서 자장의 영향을 받는다.

특히 플라즈마 구성 입자들이 자력선을 따라 움직이는 성질을 이용하면 “자장으로 된 용기 (magnetic bottle)”를 제작할 수 있으며 이렇게 개발된 것이 핵융합로의 시초이다.

핵융합 연구는 1950년대 선진국인 미국과 소련 등에서 비밀리에 시작되었다.

1958년 제네바에서 개최된 제 2회 세계 원자력 평화 이용회의에서 처음으로 핵융합 연구내용이 공개되었다.

그후 가장 모범적 국제협력 연구가 수행되고 있는 분야로서 오랜 냉전기 중에도 꾸준히 계속된 협력사업이다.

그동안 핵융합도 다양한 장비가 제안되어 연구되어 왔다. 자기거울, 스텔레 레이더, 핀치, 스

페로막 등이 그들이며 이들 중에서도 가장 성공적인 장비가 토카막(Tokamak)이다.

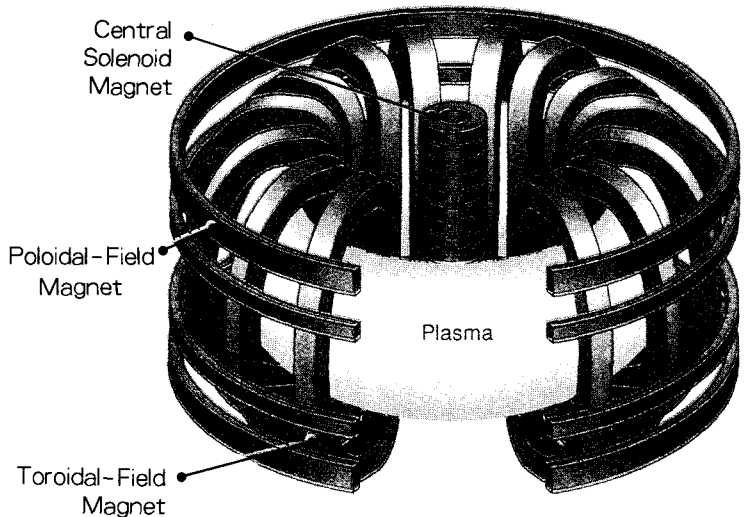
이 토카막은 1960년대에 소련에서 개발된 것으로 “도나스 모양의 자장을 갖는 용기”라는 소련에서 기원한 단어이다.

토카막의 기본적인 원리는 용기 밖 자석에 전류로 용기 내부에 강한 자장을 축(토로이달)방향으로 일으키고 같은 축 방향으로 용기내부에 담긴 플라즈마에 전류를 발생시킴으로써 단면적 주위(폴로이달)방향으로 2차적 자장을 일으켜 전체적으로는 도나스 용기내에 나선 자력선 모양의 자장을 발생시킨다.

“핵융합반응은 양전기를 띤 핵자들 사이에 전기적 밀어내기 힘을 극복하고 융합반응이 가능케 가까이 접근하도록 하는 것이 필요하다”

이러한 토카막내의 자장은 용기내 뜨거운 플라즈마를 벽으로부터 분리시키고 또한 전류로 인하여 스스로 가열함으로써 고온을 유지한다.

이와 같이 토카막에서는 플라즈마 유지와 가열의 두가지 기능이 함께 수행됨으로써 핵융합로 중 가장 좋은 용기로 알려져 왔다.(그림1)



(그림1)차세대 초전도 토카막 핵융합 실험장치

3. ITER와 국제협력

핵융합연구는 앞서 거론한대로 Matterhorn 프로젝트로 미국 프린스턴대학에서 비밀리에 시작되었고 거의 같은 시기에 소련에서도 독자적으로 연구가 시작되었다.

1958년 제네바 회의를 계기로 핵융합 연구가 국제화되고 또한 국제협력과제로 지금까지 추진되어 왔으며 상호 호혜주의 원칙에 입각한 모델로 인정될 정도로 잘 운영되고 있다.

그동안 여러가지 다른 모양의 핵융합장치에 대한 연구가 계속되었다.

1960년에는 용기내의 플라즈마 불안정성이 많이 논의되어 대체로 핵융합 연구분야에서는 어려운 시기였으며 1960년대 후반 토카막의 대두는 연구 활성화에 크게 기여하였다.

특히 1973년 OPEC 국가들의 석유가격 인상등의 오일 충격이 전세계적으로 전파되면서 에너지 문제의 심각성이 크게 부각되었다.

이에 대응하는 세계적인 노력의 하나로 핵융합 연구가 기대를 모으게 되었다.

1970년대는 미국을 비롯한 선진국에서는 일반적으로 연구와 개발에 많은 노력을 경주한 시기

로서 핵융합 연구도 이것에 예외가 아니었다.

국제협력은 국제원자력기구(IAEA) 또는 국제에너지기구(IEA) 주관하에서 이루어지는 다국가간 또는 양국가간 협정하에서 이루어지고 있다.

전자의 경우는 Euratom-EC의 JET(Joint European Torus)토카막 협력 연구 및 IAEA 주관하에 미국, EC, 일본, 러시아 4개국의 ITER 계획을 들 수 있으며, 후자로는 미국-EC, 미국-일본, EC-일본간의 협력사업을 들 수 있다.

이중 JET는 1977년 EC장관회의에서 통과된 안이 기본이 되어 건설되었으며, 미국-일본간의 협력은 같은 해 일본 후쿠다 수상외의 “10년간 20억달러”의 핵융합 공동개발 제안이 그 시초이다.

일본으로서는 계획 수행에 따른 국가적 이익 확보를 겨냥한 획기적 정책 발상이었다.

이 제안 중에서 대형 레이저를 사용하는 핵융합연구는 군사기밀인 핵무기와 밀접한 연관성 때문에 제외되고 자장 폐쇄 핵융합 협력만 추진되어 1978년 카터와 후쿠다 정상회담에서 협의, 이듬해인 1979년 양국의 외무장관간에 “미·일 에너지 연구개발 협정”조인으로 결실을 맺었다.

초년도 140명 교류가 10년후인 1989년 350명 교류로 확대되어 활발한 실질적 협력이 이루어졌다.

특히 미국 GA의 Doublet III 토

“플라즈마 구성입자들이 자력선을 따라 움직이는 성질을 이용하면 자장으로 된 용기를 제작할 수 있으며 이렇게 개발된 것이 핵융합로의 시초이다.”

카막이 많이 이용되었는데 그것은 GA Ohkawa부사장이 일본 사람인 것과 California라는 지역 특성도 작용하였으나 Doublet III 장비가 훈련에 적합하다는 것이 주된 이유이다.

실험비용의 상당 부분을 일본측이 부담하였으나 결과적으로는 일본측이 큰 이득을 보았다는 평을 받았다.

특히 이 실험을 통하여 일본은 실험 연구원을 대량 훈련시켰으며, 현재 운영중인 토카막 중 가장 앞선 실험 결과를 내고 있는 JT-60U(Japan Torus-60 Upgrade)와 그 전신인 JT-60운영의 핵심요원을 양성한 것이다.

이 협력사업으로 인하여 일본은 핵융합 연구에 있어서 많이 뒤진 후발 주자로부터 일약 핵융합 선진국으로 발돋움하는 계기가 되었던 것이다.

이는 우리나라의 현황에서 시사하는 바 크다고 생각되며 이와 같이 단기간내에 일본 핵융합연구가 세계적 선두주자로 도약한 것은 최근 논의되고 있는 “중간진입 전략”의 성공한 하나의 사례로 꼽히기도 한다.

“중동 석유파동 이후 에너지 대책의 일환으로 1970년대 후반 선진국에서는 핵융합 에너지개발 대형프로젝트를 시작하였다.”

1960~70년대에 걸쳐 선진국을 비롯 상당수의 소형 및 중형 토카막이 건조되고 연구가 활발히 진행되었다.

중동 석유파동 이후 에너지 대책의 일환으로 1970년대 후반 선진국에서는 핵융합 에너지 개발 대형 프로젝트를 시작하였다.

이 결과 미국의 TFTR(Tokamak Fusion Test Reactor), 유럽의 JET 및 일본의 JT-60 등이 1980년대 초반에 모두 가동에 들어가고 핵융합 에너지 개발에 획기적인 발전을 가져오게 되었다.

(그림2)에서 연도별 핵융합 개발의 진전과 핵융합에너지 증가

량을 축도로 표시하였다.

이를 보면 1975년부터 1995년까지 10⁷배수의 진척도를 보이고 있으며 프린스턴대학 플라즈마 물리연구소(PPPL)의 TFTR에서는 최근 3억도 플라즈마에서 10,000킬로와트(10메가 와트)핵융합 에너지 창출에 성공하였다.

또한 1980년대 후반 미국, EC, 일본, 러시아 4개국이 ITER 건설에 합의하여 ①1988년-1990년까지 개념설계 완료 ②1992-1998년까지 공학설계 ③1998년-2005년 건설 ④2005년-2025년 운영 등의 4단계 계획을 추진 중이다.

①단계는 완료 ②단계는 진행 중이며 ③과④단계는 계획확정을 앞두고 있다.

그 재원은 주반경 R=6m, 부반경 a=2.15m, 전류 I=22MA, 자장 B_T=4.85T, 가동시간이 16

분이 넘는 1000초 예정으로 대형 초전도 자석이 이용된다.

또 핵융합 에너지 출력이 100만 킬로와트로 예상되고 있다.

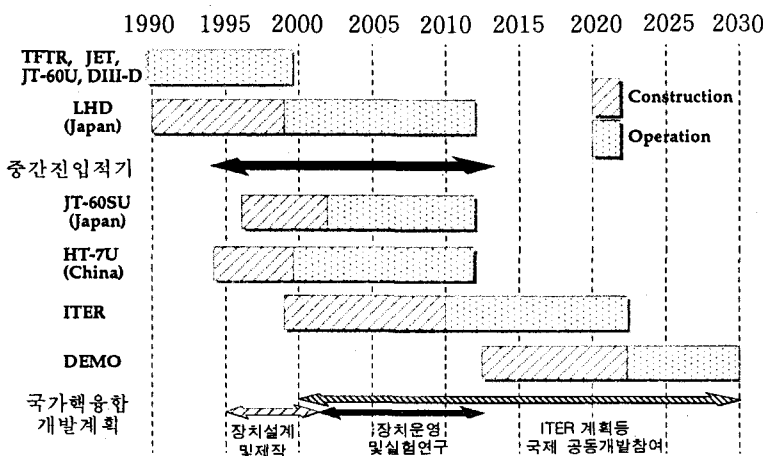
ITER를 이어서 2030년경 가동 목표로 DEMO(Demonstration Power Plant)가 계획되고 있으며 이 DEMO는 상업적 핵융합 발전소의 효시가 될 것으로 기대하고 있다.

그러나 그 이전 ITER에서 해결될 기술적 문제들을 열거해 보면 ①정상운전(초전도자석, 전류구동) ②최적조건 확립(플라즈마 효율향상) ③고온 특수재료개발 등과 상용원자료(PWP)크기와 비교될 수 있는 콤팩트형이 되어야 하는 경제성 문제등이 과제로 남아 있다.

4. 우리나라의 핵융합 연구 개발계획

핵융합 에너지는 우리나라와 같은 자원빈국의 근본적인 미래 에너지 대책이며 환경문제를 유발치 않는 깨끗하고 안전하면서도 고밀도, 대용량인 무한한 에너지원이다.

또 이 연구는 미래 에너지원의 투자일 뿐 아니라 우리나라 첨단 과학과 기초연구수준을 세계화하고, 연구수행 과정에서 선진국의 거대 초전도 자석기술, 대형 초고진공 기술, 초고온 특수 소



(그림2) Timescales for Fusion Energy Development

재기술, 대출력 고주파 가열기술 등 첨단 극한 기술을 산업화 할 수 있는 기회로 활용할 수 있다.

우리나라의 핵융합 연구는 현재까지 투자재원 및 기술 인력 확보등의 어려움으로 초보적 단계였으나, 학계의 지속적인 노력의 결과 연구기반을 확보한 상태이다.

1980년초 서울대의 SNUT-79 토카막, 1980년대 중반 한국원자력연구소의 KT-1 토카막, 1990년도초 한국과학기술원의 KAIST 토카막 등 소형 토카막 개발과 1993~1995년도에 걸쳐 이루어진 기초과학지원연구소의 "한빛"대형 플라즈마 연구장치의 건설, 운영등은 핵융합 기초연구와 인력양성에 기여하고 있다.

또한 우리나라 기초과학 프로젝트로는 최대인 포항 방사광 가속기 건설과정에서 핵융합 연구장치 개발에 필요한 첨단 극한 기술들이 국내 산업계에 전수되

기도 하였다.

이러한 배경하에서 일본의 경험을 살려 범국가적 연구개발 체제로 총력을 기울일 경우 최단기간내 선진국 수준에 이를 수 있다는 것이 우리 연구계에 대한 국내외의 판단이다.

그리고 세계적 핵융합 연구개발 여건으로 볼 때, 2001~2010년 사이가 핵융합 연구 본류진입의 절대적 기회인 "Time Window"이다. (그림3)

이것은 1980년대 중반에 개발된 TFTR, JET, JT-60U, DIII-D 등 전자석을 이용한 세계 4대 토카막이 21세기초에 그 수명이 끝나고 초전도자석의 ITER가 2008~2010년경에 본격 가동에 들어가기 때문이다.

이 기간중에는 일본의 LHD (Large Helical Device), JT-60SU, 독일의 Wendelstein-7X와 중국의 HT-7U 등만이 운영될 것으로 예상되고, 이들은 모두 초전

“핵융합에너지는 우리나라와 같은 자원 빈국의 미래 에너지 대책이며 환경문제를 유발치 않는 깨끗하고 안전한 무한한 에너지원이다.”

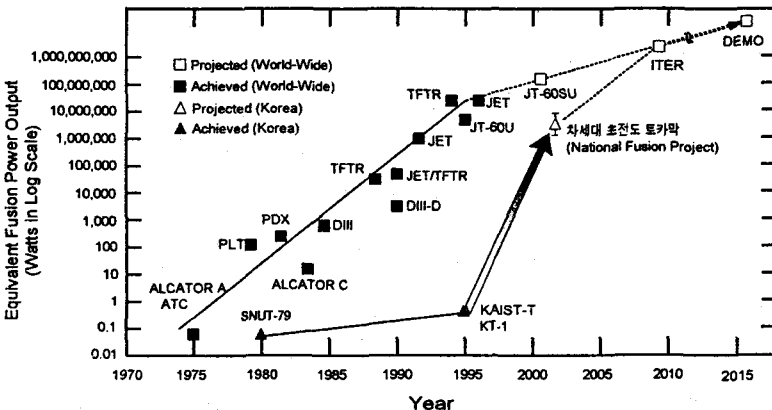
도 자석형 핵융합 연구장치로써 초전도 자석형으로 개발되는 것은 정상상태 유지와 고자장 발생에 필요한 전력규모가 전자석으로는 불가능하기 때문이다.

따라서 국내 핵융합계에서는 "차세대 컴팩트형 초전도 토카막"을 국가 핵융합 계획장치로 정하고 21세기초까지 국제협력을 통하여 중간진입전략을 활용, 국내에서 개발, 건설할 예정이다. (그림2)

이와 같은 계획에 차질이 생겨 국제수준 진입이 어려워질 경우에는 핵융합에너지 기술에서 기술 종속국으로 전락될 것이 우려된다.

ITER계획에서 보듯이 개발된 기술은 테두리안에 속하는 회원 국가들 간에만 소유되며 이에 따른 비회원국가들과의 관계는 OECD의 배타적 조직보다 더욱 강해질 전망이다.

따라서 우리는 이 기회를 충분히 활용해야 될 것으로 믿어지고 이에 대한 우리 학계와 범국가적 노력이 결집될 것을 기대해 본다. ㉞



(그림3) 핵융합기술 중간진입 개념도