

핵반응 자체보다 제어에 큰 어려움 연속성있는 국가예산 뒷받침 필요

깨끗하고 무한한 꿈의 에너지

꿈의 에너지로 불리우고 있는 핵융합 기술개발이 우리나라에서도 곧 착수될 계획이라는 대통령의 발표가 들리는 사람 입장에 따라 각기 다른 꿈같은 이야기처럼 받아들여지고 있는 것 같다.

우리나라에서 핵융합 개발을 시작하기에는 현재의 기술개발 정도나 투자규모에 비추어 시기상조라는 일반적인 인식 때문에 과학기술정책 결정에 있어서 지원의 대상에서 제외되어 소외를 받아오던 플라즈마와 핵융합 관련 연구자들은 정말 꿈같은 반가운 소식으로 환영하고 있다.

한편, 핵융합 개발이 이론적, 기술적, 경제적 측면에서 아직도 불투명하고 해결해야 할 문제점이 많다는 이유로 반대 입장을 취하면서 장기간 거액의 투자때문에 상대적으로 위축당하지 않을까 우려하고 있는 다른 연구분야 관련자들은 무슨 되지도 않을 꿈같은 소리를 하느냐는 반응이 많은 것 같다.

일반인들은 기술개발 내용이 무엇인지 모르지만 공해없고 바닷물로부터 무진장한 에너지를 얻을 수 있다



洪相熹
(서울대 원자핵공학과 교수)

는 인공태양 개발을 우리나라에서도 한다는 기대에 부푼 환상적인 꿈으로 그리는 것 같다.

그동안 핵융합 기술개발과 산업체와의 연결이 선진국에서도 극히 제한적인 것으로 막연히 알려져 기술개발 참여와 투자에 전혀 신경을 쓰지 않았던 기업들도 장차 새로운 노다지로서의 가능성을 찾는 꿈으로 탐색하고 있다는 소문도 있다.

그렇다면, 지금까지 40년 이상 끌어온 핵융합 연구개발과 관련된 어려움과 기술과제의 문제점이 무엇이며, 이 과정에서 부수적으로 인접 과학기술 분야와 산업에 미친 파급효과는 어떤 것인가를 살펴봄으로써 서로 다른 시각에서 바라보고 있는 꿈에 대한 허와 실의 궁금증을 다소 풀어보

려고 한다.

지상에서 핵융합 반응 자체의 실현은 1952년 수소탄 실험에 의하여 이미 입증되었다. 핵융합은 태양뿐만 아니라 모든 별에서 나오는 우주에너지의 근원으로 알려진지 얼마되지 않아, 제어되지 않은 핵융합 반응에 의한 일시적 에너지 방출로 가공할 파괴력을 가진 핵무기로 처음 등장한 것이다.

하지만 핵융합 반응을 마음대로 조절하여 에너지를 조금씩 지속적으로 얻을 수 있는 제어핵융합로 개발의 가능성을 확인한 셈이었다.

1945년 핵분열 원자탄을 히로시마에 투하하여 선보인지 7년이 흐른 그 당시에 현 원자력 발전의 모체가 되는 동력로 개발이 순조로이 진행되고 있었기 때문에 핵융합 발전 기술개발도 매우 낙관적으로 전망되었다.

핵반응 전후의 질량결손에 의한 핵에너지 방출이라는 아인슈타인 이론에 근본을 같이 하면서도, 핵연료 종류와 반응을 실현시키는 방법에 따라 핵분열과 핵융합 발전은 처음부터 기술개발이 갈라졌다.

핵분열 쪽이 5년 남짓 일찍 시작하여 10여년만에 핵발전 상용화에 성공

하였으나, 반면 핵융합 발전은 개발 시작후 40여년이 지난 이제야 과학적 실증을 마무리 지으면서 공학적 실증을 준비하는 단계로 뒤쳐져 있는 상황이다.

핵융합 실용화를 위한 연구개발에 있어서 가장 어려운 점은 핵융합 반응을 일어나게 하는 조건이 너무나 까다롭고, 현재의 기술 수준으로는 이때 나오는 에너지를 잘 조절하여 발전할 수 있는 장치개발이 매우 복잡하고 어렵다는 것이다.

원자핵 사이의 강한 전기적 반발력을 이겨내고 핵력이 미치는 거리까지 접근시켜 융합을 일으켜야 한다. 이를 실현시키는 현재까지 알려져 있는 가장 좋은 방법은 높은 온도로 핵융합 연료를 가열하여 플라스마 상태에서 원자핵들이 활발한 열운동을 하게 해서 큰 운동에너지를 가지고 서로 충돌을 하여 융합을 일어나게 하는 열핵융합 방법이다.

초기 핵융합로의 연료인 중수소-삼중수소를 사용한 경우, 우선 온도를 1억도 정도까지 가열시켜야 하고, 핵

연료 플라스마를 상당 시간동안 충분한 입자밀도로 공간중에 가두어 두어야 한다.

핵융합을 일으키는데 필요한 입력 전력과 결과적으로 반응에 의해서 나오는 출력전력이 균형을 이루는 임계 조건을 실현할 수 있는 핵융합장치 개발은 현재 크게 두 갈래로 나뉘어져 있다. 점화온도인 약 1억도를 유지하면서 최소한의 가둠조건을 실현시키는 방법에 따라 자기가둠과 관성가둠 방식이 있다. 자기가둠방식은 대기 밀도의 약 10만분의 1에 해당하는 희박한 플라스마 입자들의 운동영역을 강력한 자장에 의해 제한시켜 공간적으로 수초동안 가두는 방법이고, 관성가둠방식은 고출력 레이저빔이나 입자빔으로 구슬 모양의 연료표적을 때려 물 밀도의 수천배에 달하는 초고밀도로 10억분의 1초 내 순간적으로 압축시켜 가두어 핵융합을 일으키는 방법이다. 수소탄은 원자탄을 먼저 터뜨려 얻은 고온과 고압을 이용한 관성가둠에 의한 제어되지 않은 핵융합의 실현이었다.

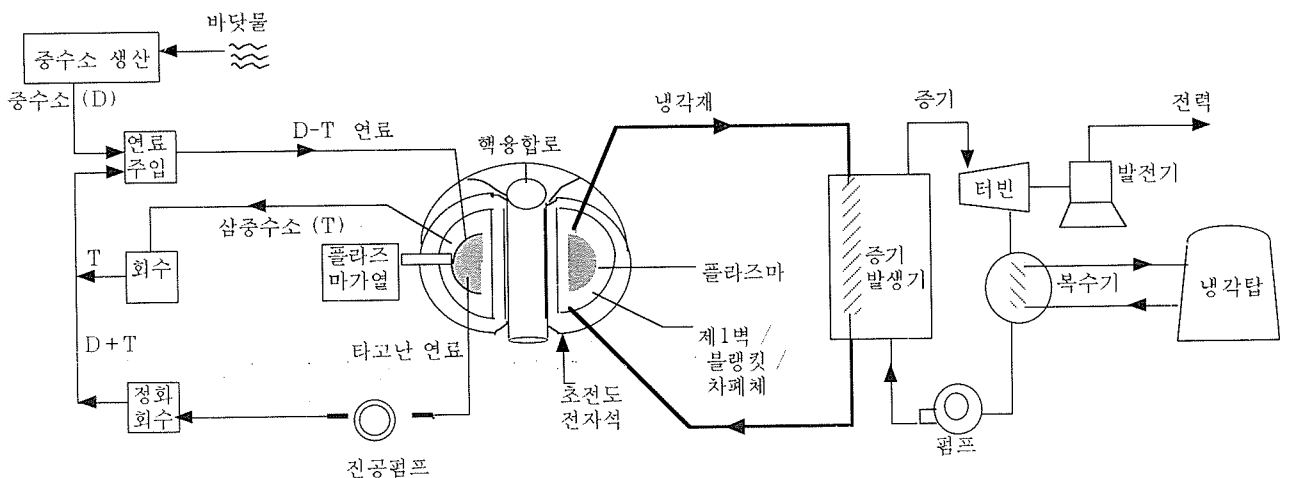
초고온·극저온 共存장치 필요

핵융합 실용개발이 늦어지는 것은 핵반응 자체 실현보다 그 제어의 어려움으로 인하여 장치개발에 따르는 여러가지 과학적, 기술적, 경제적 문제점이 아직 해결되지 않고 있기 때문이다. 지금까지 연구되어 온 여러가지 가둠장치중 토카막(Tokamak)장치가 플라스마 온도와 가둠조건을 실현성파면에서 가장 앞서는 기록들을 가지고 있다.

도우넛 모양의 자기그릇이라는 뜻을 가진 자기가둠 핵융합장치인 토카막은 장치 핵융합발전로 후보로 가장 유망시되어 세계적으로 기술개발 노력이 이 장치에 집중되어 있으며, 우리나라 국가핵융합 기술개발의 대상 장치로도 토카막을 채택하고 있다. 중수소-삼중수소 토카막 핵융합발전소를 <그림1>에서 살펴보자.

핵융합로 중심부에는 자장으로 갇힌 1억도의 초고온 중수소-삼중수소 연료플라스마가 있고, 진공용기와 직접 접촉하지 않도록 벽과의 사이에

<그림1>토카막 핵융합발전소 개념도



좁은 진공경계층을 만들어 준다. 핵융합반응의 산물로 튀어나온 고속중성자는 자장의 영향을 받지 않으므로 갇히지 않고 제1벽을 뚫고 나와, 다음에 있는 블랭킷(Blanket)층으로 들어가 리튬과 반응하여 핵연료가 될 삼중수소를 생산한다.

동시에 자신의 에너지를 냉각재에 열로 전하면 열교환기에서 생산된 증기로 터빈이 발전기를 함께 돌려서 발전하게 된다. 타고난 연료를 뽑아내어 덜탄 연료를 분리 회수하고, 블랭킷에서 생산한 삼중수소와 바닷물로부터 제조한 중수소를 함께 노심에 주입하여 핵융합 반응을 반복시킨다.

제일 외곽에는 플라스마를 가두기 위한 강력한 자장을 발생시키는 전자석이 있다. 만약 자석을 극저온(4 K)으로 유지되는 초전도전자석을 쓴다면 극저온 시설이 함께 놓이게 되어, 핵융합로는 중심부와 외곽에서 각각 지구상에서 얻을 수 있는 초고온과 극저온이 공존하는 장치가 된다.

이외에 핵융합로 안쪽에서 방출되는 열과 방사선으로부터 자석을 보호하기 위해서 차폐체가 블랭킷과의 사이에 놓인다. 점화온도까지 플라스마를 가열하거나 연속운전을 위해 전류구동을 하기 위한 부대장치가 추가되는데 강력한 고주파(RF)나 중성빔입사(NBI)를 이용하는 방법이 개발되고 있다.

핵융합로 연구개발의 제1단계 목표는 과학적 실증을 보여줄 임계상태에서 요구되는 플라스마 온도와 가둠조건을 달성하려는 대형 토카막 실험에 우선 집중되어 왔다. 핵융합장치와 부대장치의 설계와 모형해석을 토대로 한 핵융합장치의 건조와 실험은 다양하고 첨단적인 기술과 플라스마

진단기법을 동원한다.

가두어진 입자들 사이의 충돌로 자력선을 벗어나는 확산유실은 필연적인 것으로, 이러한 수송현상은 플라스마를 한 곳에 모아두는 것을 방해하는 내부적인 작용중의 하나이다. 핵연료 플라스마에 섞여 들어간 벽물질 등의 불순물때문에 복사로 인해서 나타나는 에너지 유실은 플라스마 온도가 급격히 냉각되는 요인이 되고 있다.

핵융합 실용화를 지연시켜 오고있는 주범이며 아직도 괴롭히고 있는 것이 각종 불안정성 문제이다. 플라스마 수송현상을 비정상적으로 활발하게 하여 입자나 에너지 손실을 급격히 증가시키는 미시적 불안정성과, 플라스마 내부의 전류 흐름이나 압력 차이가 자유에너지원이 되어서 플라스마 구조상의 외형적 변형을 일으키며 가둠을 깨뜨려 버리는 각종 거시적 불안정성이 그것이다.

불안정한 전자파들이 서로 얽혀 작용하여 난무하며 플라스마를 큰 폭으로 무질서하게 흔드는 난류현상이 나타나기도 한다. 이런 불안정성들은 그 원인을 규명하여 제거하거나 억제하는 방법을 찾아서 그동안 많은 개선을 하였으나, 더욱 완벽하고 근본적인 이해가 아직도 요구되고 있는 가장 힘들고 도전적인 과제로 남아있다.

따라서 핵융합 플라스마 물리연구의 중심과제는 핵융합로 내에서 안정된 플라스마가둠, 불안정성 억제 및 제거, 수송현상, 불순물제어, 플라스마와 물질간의 상호작용, 플라스마 가열 및 연속 전류구동 등에 대한 이론적인 규명과 해석이며, 아울러 실험과 관련된 플라스마 계측기술의 확립이다.

임계로에서 과학적 실증이 끝나고

나면, 다음 단계로 외부에서 가열하지 않아도 스스로 계속해서 타는 공학적 실증의 점화조건을 목표로 한 공학시험로 개발로 이어져야 한다.

현재 국제공동으로 개발중인 국제열핵융합실험로(ITER)가 이중의 하나이다. 다음 최종적으로 경제성 실증을 보여줄 상업로 개발의 마지막 단계에서는 기술적이고 경제적인 문제점을 완전히 해결해야 한다.

플라스마 보조가열, 연속 전류구동, 연소상태 플라스마 물리해석, 저방사화 노재료, 블랭킷 구조 및 재료, 핵연료 주입 및 제거, 초전도전자석, 극저온 설비, 삼중수소 처리, 고출력의 입자가속기 및 고주파원, 방사화 폐기물 처리, 원격조정 및 정비 등의 기술개발과, 안전성 및 환경영향 평가, 경제성 비교검토 등이 이루어져야 한다.

상업적인 실용성을 지닌 핵융합로의 최종적 형태와 성공 여부는 플라스마 물리에서 요구하는 조건과 특성을 현재의 기술수준과 제약조건에 어떻게 조합해서 실현시켜 나가며 새로운 첨단적인 기술을 개발하느냐에 달려있다.

공학적 실험로 개발 이행단계

최근에 이르러 선진국의 대형 토카막장치에서 임계조건에 접근하는 실험성과들을 얻고 있어 과학적 실증을 끝내가고 있다. 곧 공학실험로 개발로 넘어가 기술 실증을 보일 준비를 하고 있는 이행단계에 와 있다.

핵융합로 개발과 직접 관련된 기술의 특징은 초고온, 초고진공, 극저온, 초강자장, 초강도, 초대형, 초고속 등 수없는 극한기술이 얽혀 여러분야 과학기술과 산업의 뒷받침 없이는 해낼

수 없는 거대첨단기술로 종합공학의 극치임을 <표1>에서 볼 수 있다.

핵융합 기술개발이 시작된 1950년대 이전에 주로 연구되었던 천체 플라즈마, 대기 플라즈마, 전기방전을 이용한 실험실적인 저온 플라즈마를 기반으로 해서 고온의 핵융합 플라즈마 물리연구가 주축이 될 수 밖에 없었다. 그 후 여러 핵융합장치들의 개발과, 더불어 전기전자공학, 기계공학, 재료공학, 시스템공학, 화학 등 기존의 다른 학문분야와 공학이 종합적으로 참여하게 되었다.

핵융합로 연구개발이 본격적인 단계로 접어들자 핵융합이 미치는 파급효과는 단순히 기초과학과 공학의 범위를 넘어 다른 응용기술분야와 산업에까지 급속하게 확산되어서 각종 신기술 개발에 이바지하고 있다.

전력생산 이외에 핵융합로에서 방출되는 중성자와 열과 플라즈마 입자들을 다른 방면으로 유효하게 활용할 수 있다면 핵융합개발의 부가 가치를 더욱 높일 수 있을 것이다. 현재 연구되고 있는 응용 가능한 분야를 <표 2>에 수록하였다.

또한 일본 원자력산업회의에서 조사한 핵융합 기술분야가 다른 산업분야에 미치는 파급효과의 정도를 <표 3>에 나타내었다.

핵융합 개발사업은 기술의 특성상 초기에는 대학을 중심으로 한 기초연구가 선행되면서 그중 가능성 있는 기술을 대상으로 공공 연구기관에서 집중적인 심화 연구개발이 진행된다. 산업체와 기업은 대형 토카막 임계로 실험동안에 대학과 전문 핵융합연구소에서 설계한 각종 핵융합장치의 설비들을 수주받아 제작하고 장비와 기

<표 1> 핵융합기술과 관련산업기술

핵융합기술분야	핵융합관련기술	산업기술
중성자 및 핵융합로 공학	핵융합 중성자학 핵융합 실험로	핵 데이터 중성자원 방사선상해 해석
고진공	핵융합로 진공용기 초고진공 배기장치 누설탐지 기술	대형 진공용기 초고진공용 펌프 자동 진공누설 검출기
초전도 전자석	초전도 토로이달 전자석 초전도 플로이달 전자석	대전류 초전도 코일 대형코일 정밀성형 초전도 재료
극저온	헬륨 액화 냉동계 초전도 코일 냉각장치 중성빔 가열장치 진공계	터보압축기, 터빈팽창기, 극저온 감압펌프 단열기술, Cryostat
고에너지 빔	중성빔입사(NBI) 가열장치	대전류 이온원 3차원 이온빔 인출코드
고주파에너지	고주파 가열장치	대전력 고주파증폭 Klystron, Gyrotron
전력전자	융합로 접지계 전자석코일 전원, 변압기, Flywheel 발전기	접지설계, 직류차단기, 전력용 반도체 소자 초대형 Flywheel
계측제어	플라즈마 진단, 극저온 온도계측, 불순물 제어, 운전 제어, Digital 제어, 운전계통 제어계산 시스템	분광분석, 레이저 탐침 계측, 극저온 온도계, 광섬유 및 통신, 고속 연산처리 장치
Computation 통신	Data 처리장치 초고속 데이터 기록계 초고속 연산 처리장치 Computer Software Data 통신 시스템	CAMAC 시스템 Supercom 이용기술 유체해석 Simulation Computer간 통신 광통신 시스템
재료 및 신소재	본체지지 비자성 구조재 제1벽, Blanket, Limiter, Divertor 판, 초전도 전자석 거대코일	비자성 구조용재 저 방사화 재료 W-Cu 접합재, 내방사성 복합재, 극저온 고강도 구조재, 고온 절연재
생산기공	핵융합로 접합 기술 대형 정밀 가공 기술 제1벽 재료 및 검사 기술	전자빔, 레이저 용접, 세라믹 코팅, X-선 CT scanning
시스템 공학	전원 시스템 해석 전자장 해석	과도현상 해석 Program 과전류 해석, 3차원 자장 해석
보수점검	In-situ coating 장치 융합로 내 보수점검계통 원격 측정장치 분해 수리 이동 시스템	진공용기내 Manipulator 중량물 원격 이동장치 Interfaces, Robot, 원격 절단장치
기타	삼중수소 안전계 연료정제, 펠렛입사장치	삼중수소 모터, Pd 합금 고속 연료 가속기술

기를 납품하는 소극적이며 자체 개발 능력이 없는 상태로 참여하여 왔다. 진공용기를 비롯한 전자석, 연료주입, 보조가열 등과 관련된 장치 제작과 아울러 이런 장치 운전과 가동에 필요한 전원, 진공계통, 고주파시설, 제어장치의 제공과 플라즈마 진단에 필요한 계측장비와 기기의 판매가 주류를 이루었다.

90년대에 들어서서 공학적 실증 목적의 공학실험로 개발계획과 더불어 기업들의 참여 형태에도 변화가 일어났다. 공학로에서 더욱 까다로워질 노제료에 대한 소재개발, 초전도전자석 개발, 블랭킷 개발, 삼중수소 취급기술, 공학로 설계활동 등에 적극적으로 참여를 시작하고 있다.

기업이 핵융합 기술개발에 참여하여 그 역할을 계속적으로 안정되게 수행하기 위해서는 자체의 기술개발 능력을 배양해야 할 뿐만아니라 참여 과정에서 얻어진 첨단기술 개발성과를 다른 분야에 활용하여 부수적인 파급 이득을 확대해야 한다.

장치의 설계, 제작, 실험, 신기술 도입 등의 협력은 물론, 이에 필요한 기술자 확보와 인력양성을 기업의 역할로 일본 원자력산업회의 92년 보고서는 지적하고 있다.

또한 이 보고서는 국가 핵융합 개발 계획에서 산업계가 담당할 부분을 명확히 하여 대학, 연구기관, 기업의 역할 분담하에 국제협력과 국내추진을 구분할 것을 요구하고, 기술자 보호육성과 소요설비의 효율적 투입을 위해 장기적이고 연속성있는 계획과 안정적으로 확보된 국가 예산으로 추진되어야 한다고 요망하고 있다.

우리나라가 국책사업으로 핵융합

개발정책을 수립하고 있는 시점에서 위 보고서의 지적은 정부, 연구계 및 산업계 모두에게 시사하는 바가 크다. 일본처럼 지하자원과 에너지자원이 절대 부족한 우리나라에서 장기 에너지 전략과 환경보전을 위해 핵융합개발이 필수적이라는 한 목소리는 아직 들리지 않는다. 일반 국민은 물론 과학기술계와 기업에서도 핵융합은 우리에게서 아득한 꿈을 쫓는 극한기술이며 당장 현실적인 에너지문

〈표2〉 핵융합의 과학기술 응용

이용대상	응용 분야
중성자	핵융합-핵분열 혼성로 (핵연료/전력 생산형) 방사성 동위원소 생산 핵폐기물 소멸처리 신소재개발 / 표면처리
열	합성연료 생산 공업용 열생산
플라즈마	우주선 추진 직접 에너지 변환 저온 플라즈마공정의 산업적 응용

〈표3〉 핵융합기술이 타분야에 미치는 파급효과

(☆ : 파급효과 큼, ○ : 파급효과 있음)

분야	에너지	전자	정보	고에너지 가속기	해양 우주	생명 과학	교통	일반 산업	기타 공통
핵융합로공학	☆			○					
고진공		○		☆	○			☆	
초전도 자석	☆			○			○		○
극저온	○	○		○		○			
고에너지 빔		☆			☆			☆	
고주파 에너지			☆	○				○	
전력전자	☆								○
계측제어	○	☆		○		○			☆
Computation 통신		☆	○	○	○				
재료	☆			○	○	○	☆	○	
생산가공	☆							☆	
시스템공학	☆			○					○
보수점검	☆			○	○				○
기타	○	○							○

제 해결책은 아니라는 인식이 보편적인 것 같다.

그러나 현재의 우리나라 경제적인 여력과 산업의 잠재력은 핵융합 기술 개발을 단계적으로 시작할 수 있는 충분한 여건과 능력을 갖추고 있다. 핵융합과 같은 인류 최첨단과제를 과연 우리가 성공적으로 해낼 수 있을 까하는 회의적인 생각을 말끔히 떨쳐 버리고 과감하게 도전해 봄으로써,

학문적 우월성의 추구하고 기술 선진을 지향하여 핵융합 기술개발 과정에서 국내 과학기술계와 산업체의 활력과 발전에 기여함은 물론, 인류 공동의 숙원을 푸는데 동참한다는 자부심을 가지고 우리 후손들에게 깨끗하고 무궁한 에너지를 물려주는 꿈을 실현시키는 첫발을 내딛는데 모든 사람들의 격려와 아낌없는 지원이 필요한 시점이다. ⑤7