

核融合爐 開發 어디까지 왔나?(2)

本稿는 서울대학교 공과대학에서 산업계와 관련된 정부, 공·사기업체 최고경영자들에게 현재와 미래의 기술개발, 국가경제, 기업경영에 대한 식견을 제공하고자 하는 「最高産業戰略課程」의 核融合技術의 未來에 대한 강좌를 정리한 것이다. 핵융합 기술의 배경과 기본적 원리, 기술개발의 내용과 파급효과, 국내외 개발동향과 전망으로 나누어 3회에 걸쳐 연재로 살펴본다.



홍 상 희

서울대학교 원자핵공학과 교수

개발중인 핵융합장치

1. 핵융합로 개발의 두 갈래

제어핵융합 기술의 핵심은 핵융합반응이 지속될 수 있는 높은 온도와 충분한 밀도를 유지하면서 플라즈마를 오랫동안 가두는 기술이다. 초고온상태의 플라즈마는 활발한 열운동으로 눈깜짝할 사이에 흩어져 버리려고 하기 때문에 붙잡아서 일정한 영역 안에 묶어두지 않으면 안된다. 1억도 정도의 고온이 되면 밀도가 낮더라도 유리나 금속같은 물질로 벽을 만들어 가두어 둘 수는 없다. 밀도가 낮아서 적은 열용량 때문에 직접 벽을 녹일 수는 없을 지 모르나 큰 에너지를 가진 입자들이 벽에 부딪쳐 심

한 손상을 주면서 불순물들을 튀어 나오게 하여 핵융합연료에 섞이게 한다. 그러나 더 큰 이유는 플라즈마가 핵융합로 벽에 접촉하면 곧 식어버려 핵융합을 지속할 수 있는 온도 이하로 급속히 냉각되기 때문이다.

태양과 별에서는 자체의 거대한 질량에 의한 인력 때문에 플라즈마입자들이 달아나지 못하고 모여있는 중력가둠(Gravitational Confinement)에 의해서 핵융합이 지속된다. 지상에서는 이와 같은 거대한 질량을 얻을 수 없기 때문에 앞서 본 <표 2>의 임계상태에서 요구하는 점화온도와 가둠조건을 얻기 위한 핵융합로 기술개발은 현재 다음과 같이 자기가둠(Magnetic Confinement)과 관성가둠(Inertial Confinement)으

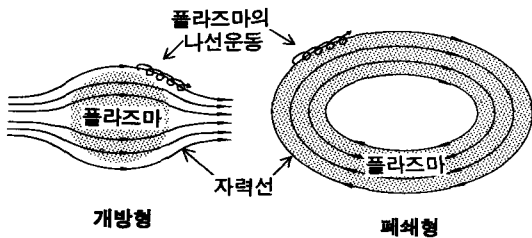
로 크게 두 갈래로 나뉘어 진행되고 있다.

2. 자력선 이용의 자기가둠 핵융합

磁氣가둠방식은 강력한 자기장으로 전기를 띤 플라즈마입자들의 운동영역을 제한시켜서 공간적으로 일정한 범위 내에 가두어 두는 방법이다. 이때 플라즈마밀도는 입방미터당 약 10^{20} 개 정도로 대기압에서의 밀도보다 약 10만분의 1 정도로 희박하지만 가둠시간을 대략 1초 정도로 유지하면 Lawson 조건을 만족시킬 수 있다. 그러나 온도는 1억도 정도이므로 플라즈마압력은 대기압보다 훨씬 높은 상태에서 자력선그릇에 갇혀 있는 셈이다.

플라즈마입자들은 전하를 가지고 있기 때문에 강한 자기장을 걸어주면 전자기적인 힘의 법칙에 따라 움직인다. 즉 플라즈마입자들은 자력선과 수직방향으로 운동의 제한을 받아 자력선을 중심으로 회전운동을 하게 되고 결과적으로 자력선을 따라 나선운동을 그리는 운동을 하게 된다. 플라즈마입자들의 이 운동특성을 이용하면 외부에서 걸어준 강한 자기장으로 자력선의 모양을 적절히 조절하여 磁氣그릇으로 만들어서 플라즈마운동을 그 속에 국한시킬 수 있는 핵융합실험을 할 수가 있다. 대표적인 자기그릇의 기본모형이 <그림 4>에 나타나 있다.

개방형(Open System)은 양쪽끝이 좁고 가운데가 볼록한 원통모양으로 자력선그릇을 만들어 그 안에 플라즈마를 가두는 장치이다. 자력선의 양끝이 열려 있어서 이곳을 통해서 일부 입자들이 새어나가는 단점이 있다. 그래서 자력선들을 연결시켜 고리모양의 자기그릇을 만들면 플라즈마입자들이 둥근 자력선을 따라 계속해서 나선운동을 하므로 새어나가는 입자 없

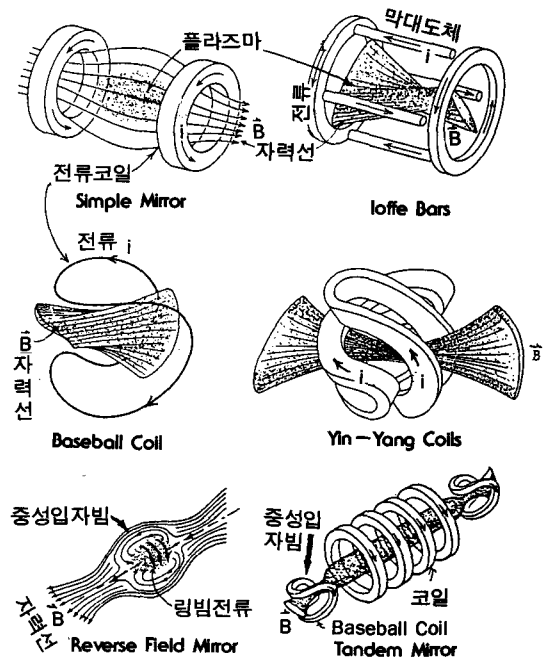


<그림 4> 磁氣가둠 장치의 기본모형

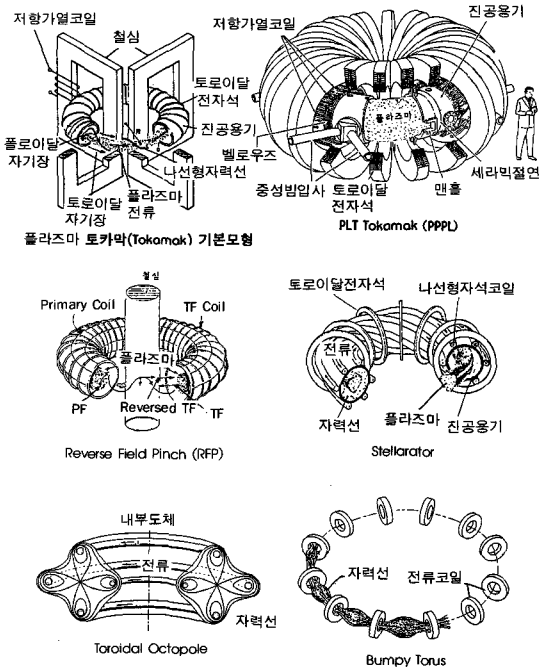
이 이 고리그릇(Torus라고 부른다) 속에 가둘 수 있다는 개념이 폐쇄형(Closed System)이다. 이 두 개념을 바탕으로 지금까지 40년 가까이 여러가지 자기가둠 핵융합장치가 연구되어 왔다.

<그림 5>에서 개방형의 대표적인 핵융합장치인 각종 磁氣거울(Mirror)장치들을 볼 수 있다. 단순 자기거울(Simple Mirror)은 양끝에 놓인 코일에 강한 전류를 흘려 자기장을 걸어준다. 그러나 플라즈마를 모으려고 하는 축에서의 자기장이 축 바깥쪽보다 약해 플라즈마가 흘러져 버리는 불안정성이 나타나기 때문에 핵융합장치로는 적합치 않다고 밝혀졌다. 이것을 개선하여 여러가지 다른 모양으로 전류코일을 만들어 중심부에서 최소자기장을 갖도록 하여 안정되게 플라즈마를 가두려고 고안한 장치들이 <그림 5>의 나머지 자기거울들이다.

<그림 6>에서 여러가지 폐쇄형 자기가둠 핵융합장치들을 볼 수 있다. 자기장을 발생시키는 방법과 자석코일의 배치에 따라 자기 다른 명칭의 장치들이 있으나 가장 대표적인 것이



<그림 5> 여러가지 개방형 자기가둠 핵융합장치



〈그림 6〉 여러가지 폐쇄형 자기장 핵융합장치

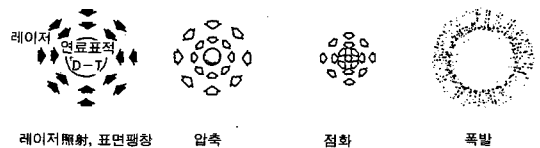
토카막(Tokamak)장치이다. 1950년대초 소련에서 제일 먼저 개발을 시작한 이 토카막은 도넛모양의 자기그릇이라는 러시아어를 줄인 것이다. 복잡한 자기장 발생과정을 통해서 도넛형태로 된 나선형 자력선으로 플라즈마를 토러스 진공용기 안에 가두고, 플라즈마 자체에 전류를 흘려서 얻은 저항가열과 여러가지 보조가열 방법으로 점화온도를 얻어 핵융합을 일어나게 하는 방식이다. 토카막방식은 도넛형의 진공용기 안의 플라즈마에 외부의 토로이달 전자석으로 큰 원주방향의 강한 자기장(Toroidal 자기장)을 만들고, 변압기원리를 이용하여 역시 큰 원주방향으로 플라즈마 내부에 전류를 흐르게 하여 이 때문에 발생된 도넛단면을 둘러싸는 작은 원주방향의 자기장(Poloidal 자기장)과 함께 합성한다. 그러면 마치 도넛을 봉대로 둘둘 감은 것과 같은 자기장을 얻을 수 있어서 이 안에 플라즈마를 가둔다. 플라즈마는 일종의 전기저항체이므로 전류가 흐르면 온도가 상승하는데 약 2,000만도까지 이 방법으로 가열할 수 있다. 미국에서 처음 시도한 방식은 스텔라

레이터(Stellarator)로 꾸불꾸불한 전선모양을 한 전자석 만으로 토카막에서와 같은 자기장을 얻을 수 있는 장치이다. 이외에 〈그림 6〉에서 볼 수 있는 바와 같이 다양한 폐쇄형이 있으나 아직까지는 토카막의 가둠실험 결과가 가장 우수한 것으로 밝혀졌다. 따라서 1970년대 이후 미국을 비롯한 전세계에서 토카막이 현재 가장 많이 연구되고 있는 핵융합로 개발의 중심장치가 되었다.

3. 레이저나 가속기 이용의 관성가둠 핵융합

핵융합 실험의 또 다른 방식은 관성가둠으로, 강력한 출력의 레이저나 가속입자빔을 微粒의 핵연료표적에 때려서 고체밀도의 100배가 넘는 초고밀도($n \approx 10^{30}$ 개 / m^3)로 100억분의 1초($\tau \approx 10^{-10}$ sec)보다 짧은 시간 동안에 압축시킨다. 이때 얻은 높은 온도와 압력으로 핵융합 반응을 시키자는 것이다. 지구상에서 최초의 핵융합반응 자체 실험은 1952년 이미 수소폭탄 실험에 의하여 입증되었다. 원자폭탄을 먼저 터뜨려 여기서 얻은 고온과 고압을 이용한 관성가둠 방식에 의한 핵융합 실험이었으나, 우리가 원하는 것은 핵폭탄처럼 일시에 나오는 에너지가 아니라 필요한 일정량을 지속적으로 얻을 수 있는 제어된 형태의 에너지이다.

수소폭탄의 원리와 같은 관성가둠에서 핵융합을 일으키는 과정은 〈그림 7〉과 같다. 중수소와 삼중수소를 열려서 작은 구슬 모양의 표적인 펠릿(Pellet) 속에 넣고 고출력의 레이저나 입자빔으로 사방에서 대칭되게 때린다. 이때 공의 표면은 순간적으로 가열되면서 폭발적인 표면증발이 일어나고 그 반작용으로 핵연료는 내부로 압축되면서 고압을 얻을 수 있다. 즉 팽창의 반동 때문에 나타나는 순간적인 내부압축



〈그림 7〉 관성가둠 핵융합과정

으로 고밀도의 플라즈마를 얻음과 동시에 점화 온도에 이르는 고온을 간접적으로 얻는다. 바로 핵융합 임계조건을 만족시키는 상태가 되면서 핵융합반응이 일어나 일시적인 에너지 방출로 마치 초소형의 수소폭탄 폭발과 같은 상황을 연출한다. 이 과정은 내연기관에서 연료 흡입, 압축, 점화, 폭발의 4과정으로 동력을 얻는 것과 흡사하다.

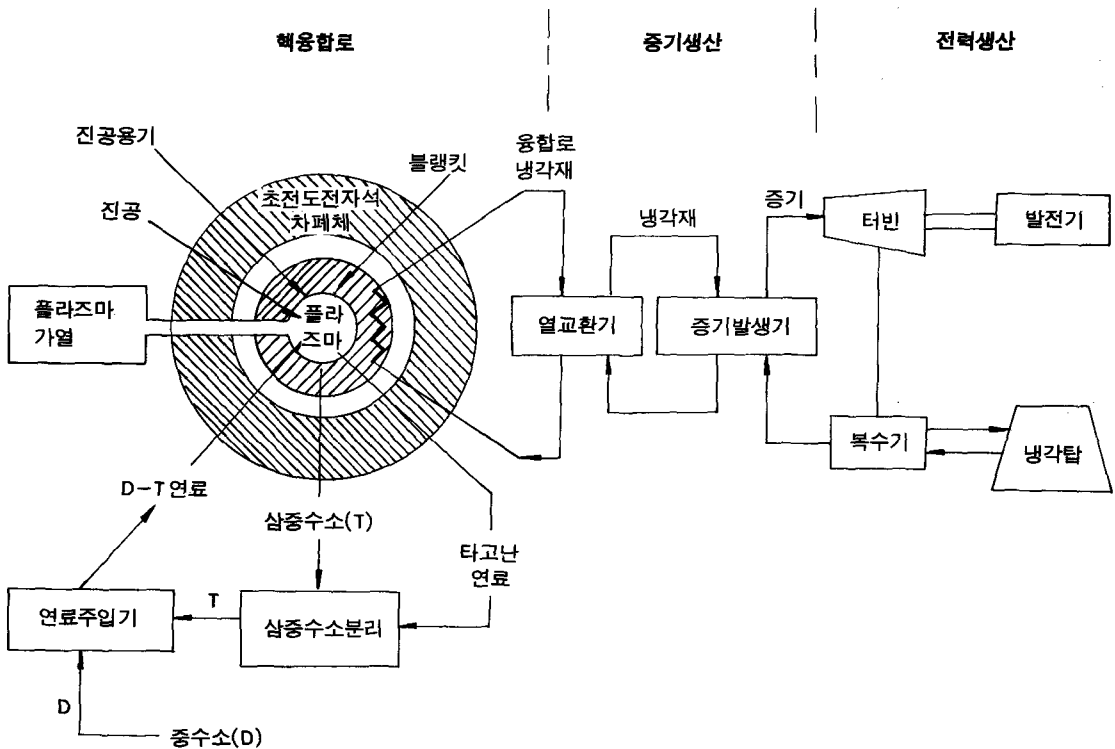
관성가둠방식에 의한 핵융합로 개발은 직경 1mm 정도로 작은 구슬모양의 연료표적 제조가 기술상 어려움이 많고, 효율이 좋고 안정성이 높은 초강력의 출력을 내는 펄스 레이저나 입자가속기의 개발이 지연되고 있으며, 연속적으로 표적에 정확히 빔을 명중시키는 문제 등이 남아 있어 자기가둠에 의한 방법보다 그 개발이 뒤떨어져 있는 실정이다.

핵융합로 개발 관련기술

1. 초고온과 극저온의 공존장치

핵융합 실용화연구를 시작한 후 근 40년이 넘는 동안 플라즈마물리를 비롯한 이론적인 연구와 실험에 많은 진전과 경험을 축적하였으나 아직도 해결하여야 할 기초적인 연구와 특히 공학적인 난제가 많이 남아 있다. 핵융합에너지의 실용이 이처럼 늦어지는 것은 핵융합반응 자체 실현보다 그 제어에 어려움이 있기 때문에 장치 개발에 따르는 여러가지 과학적, 기술적, 경제적 문제점이 아직 해결되지 않고 있는 실정이다. 실용적인 핵융합로로 우선 유력시되고 있는 중수소-삼중수소를 연료로 쓰고 있는 자기가둠 핵융합발전로를 살펴보자 <그림 8>.

핵융합로 중심부인 爐心에는 중수소와 삼중

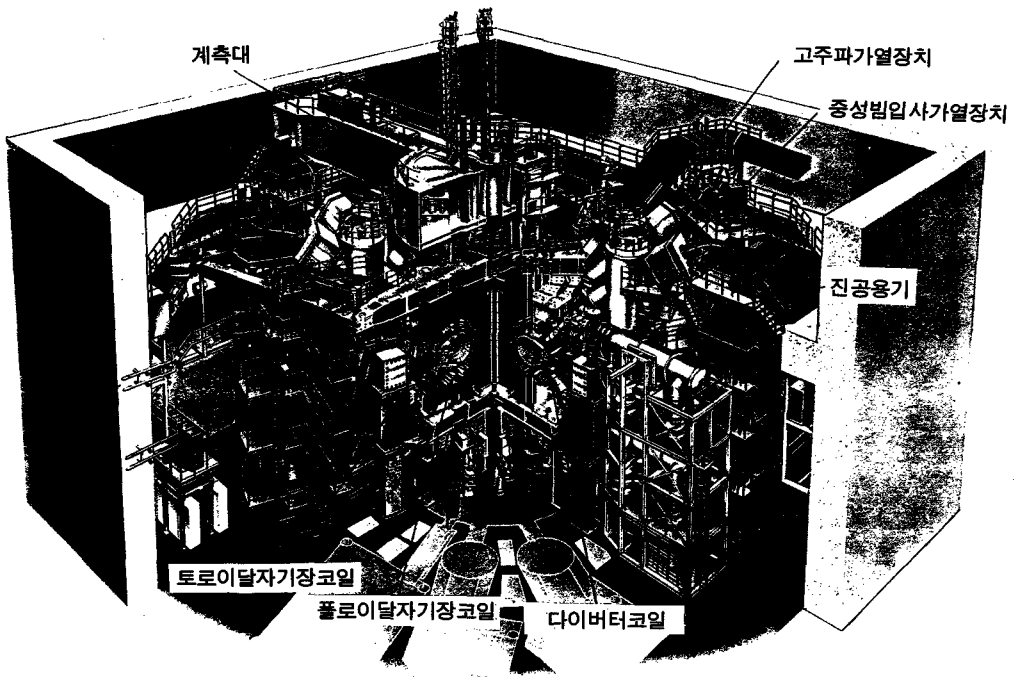


<그림 8> 磁氣가둠 D-T 핵융합발전로 개념도

수소로 혼합되어 자기장으로 갇힌 약 1억도의 연료플라즈마가 있고, 진공용기와 직접 접촉하지 않도록 벽과의 사이에 좁은 진공경계층을 만들어 준다. D-T 핵융합반응의 산물로 튀어나온 고속중성자는 자기장의 영향을 받지 않으므로 노심에 갇히지 않고 진공용기벽(제1벽이라고 부른다)을 뚫고 나와 다음에 있는 블랭킷(Blanket) 층으로 들어가 그 속에 포함되어 있는 리튬과 반응하여 핵연료가 될 삼중수소를 생산한다. 동시에 자신이 가지고 있던 운동에너지가 줄어들면서 냉각재에 열을 전하고 열교환기를 통해 생산한 증기로 터빈을 돌려서 발전하게 된다. 타고난 연료를 뽑아내어 덜탄 연료를 분리 회수하고, 블랭킷에서 생산한 삼중수소와 바닷물로부터 제조한 중수소를 함께 연료주입기를 통해 노심에 주입하여 핵융합반응을 반복시킨다. 핵융합로의 제일 외곽에는 플라즈마를 가두기 위한 강력한 자기장을 발생시키는 전자석이 있다. 만약 자석을 극저온(4K)으로 유지되는 초

전도전자석을 쓴다면 극저온시설이 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. 접화온도까지 플라즈마를 가열시키기 위한 장치가 추가되는데 두 가지의 주요한 가열방법이 있다. 그 하나는 강력한 고주파(RF)를 플라즈마 내에 발사하여 고주파에너지를 입자들의 운동에너지로 변환시켜 플라즈마온도를 높이는 고주파가열방법이다. 다른 하나는 중성빔입사(NBI)가열로 외부에서 입사된 고속원자빔이 플라즈마입자와 충돌하여 자신이 가지고 있던 에너지를 상대에게 넘겨주어 가열하는 방법이다. 자기가둠 핵융합로로서 가장 강력한 후보로 여겨지는 토카막의 실험장치로 일본원자력연구소에 있었던 JT-60의 복잡한 구조 일부를 <그림 9>에서 볼



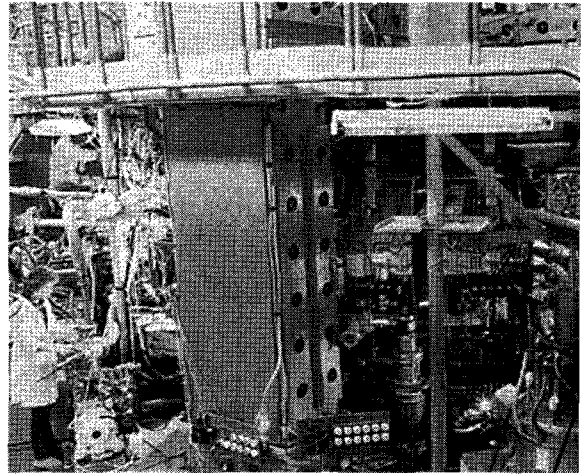
<그림 9> 일본원자력연구소의 JT-60 토카막장치 구조

수 있다.

2. 과학적 실증단계 연구과제

자기가둠 핵융합로 연구는 과학적 실증을 보여줄 임계상태에서 필요한 플라즈마온도와 가둠 조건을 달성하려는 기술개발에 우선적으로 집중되고 있다. 여러 자기가둠방법의 핵융합장치 고안이나 실제 실험장치 설계와 측정해석에 결정적인 연구자료들을 분석 제공하고, 이를 토대로 한 핵융합장치의 건조와 실험은 다양하고 첨단적인 기술과 플라즈마 진단기법을 동원하여 진행해야 한다. 자기가둠 핵융합 플라즈마에서는 여러가지 유형의 입자 및 에너지 유실 현상이 나타나고 있다. 공간적으로 모아두기 때문에 일어나는 입자들 사이의 충돌로 자력선을 벗어나는 확산유실은 필연적인 것으로, 이러한 수송현상은 플라즈마를 한 곳에 모아두는 것을 방해하는 내부적인 작용 중의 하나이다. 또 하나는 복사로 인해서 잃은 에너지 손실로, 핵연료 플라즈마에 섞여 들어간 벽물질 등의 불순물 때문에 나타나는 에너지 유실은 플라즈마온도가 급격히 냉각되는 요인이 되고 있다.

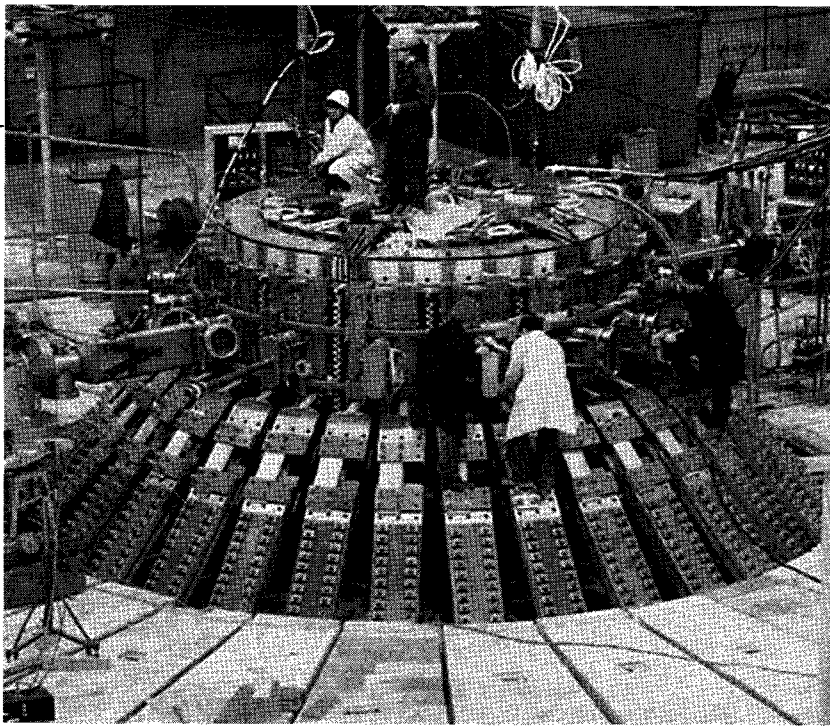
지금까지 핵융합 실용화를 지연시켜오고 있고 아직도 괴롭히고 있는 것이 각종 불안정성 문제이다. 플라즈마의 여러 수송현상들이 비정상적으로 활발해져서 입자나 에너지의 손실이 급격히 증가하는 미시적 불안정성과 플라즈마 내부의 전류흐름이나 압력차이가 자유에너지원이 되어서 플라즈마 형태구조상의 외형적 변형을 일으키며 가둠을 깨뜨려 버리는 각종 거시적 불안정성이 그것이다. 불안정한 전자파들이 서로 얽혀 작용하여 난무하며 플라즈마를 큰 폭으로 무질서하게 흔드는 난류현상이 나타나기도 한다. 이러한 불안정성들은 수십년에 걸친 연구결과로 그 원인을 규명하여 제거하거나 억제하는 방법을 찾아서 많은 개선을 하였으나 더욱 완벽하고 근본적인 이해가 아직도 요구되고 있어 가장 힘들고 도전적인 과제로 남아있다. 따라서 핵융합 플라즈마 물리연구의 중심 과제는 핵융합로 내에서의 안정된 플라즈마 가둠, 불안정성 억제 및 제거, 수송현상, 불순물



제어, 플라즈마와 물질 간의 상호작용, 플라즈마 가열 등에 대한 이론적인 규명과 해석이며 아울러 실험과 관련된 플라즈마 측정기술의 확립이다.

3. 공학적 및 상업적 실증단계 개발기술

임계로에서 과학적 실증이 끝나고 나면 다음 단계로 외부에서 가열하지 않아도 스스로 계속해서 타는 공학적 실증의 점화조건을 목표로 한 공학시험로 개발로 이어져야 한다. 다음 최종적으로 경제적 실증을 보여줄 상업로로 개발해 나가는 마지막 단계에서는 공학적이고 기술적인 문제점을 완전히 해결해야 한다. 플라즈마 보조가열 기술개발, 연소상태 플라즈마 물리해석, 노재료 개발, 블랭킷 구조 및 재료 개발, 핵연료 주입 및 제거기술, 초전도전자석 개발, 극저온시설 개발, 삼중수소 처리기술, 고출력의 입자가속기 및 고주파원 개발, 핵융합-핵분열 혼성로 개발, 고속중성자에 방사화된 물질 처리기술, 원격조정 및 정비기술 개발, 핵융합로 안전성과 환경에 미치는 영향평가, 경제성 비교검토 등에 역점을 두고 있다. 상업적인 실용성을 지닌 핵융합로의 최종적 형태와 성공여부는 플라즈마물리에서 요구하는 조건과 특성을 현재의 기술수준과 제약조건에 어떻게 조합해서 실현시켜 나가며 새로운 첨단적인 기술을 개발하느냐에 달려 있다.



4. 거대첨단극한기술과 파급효과

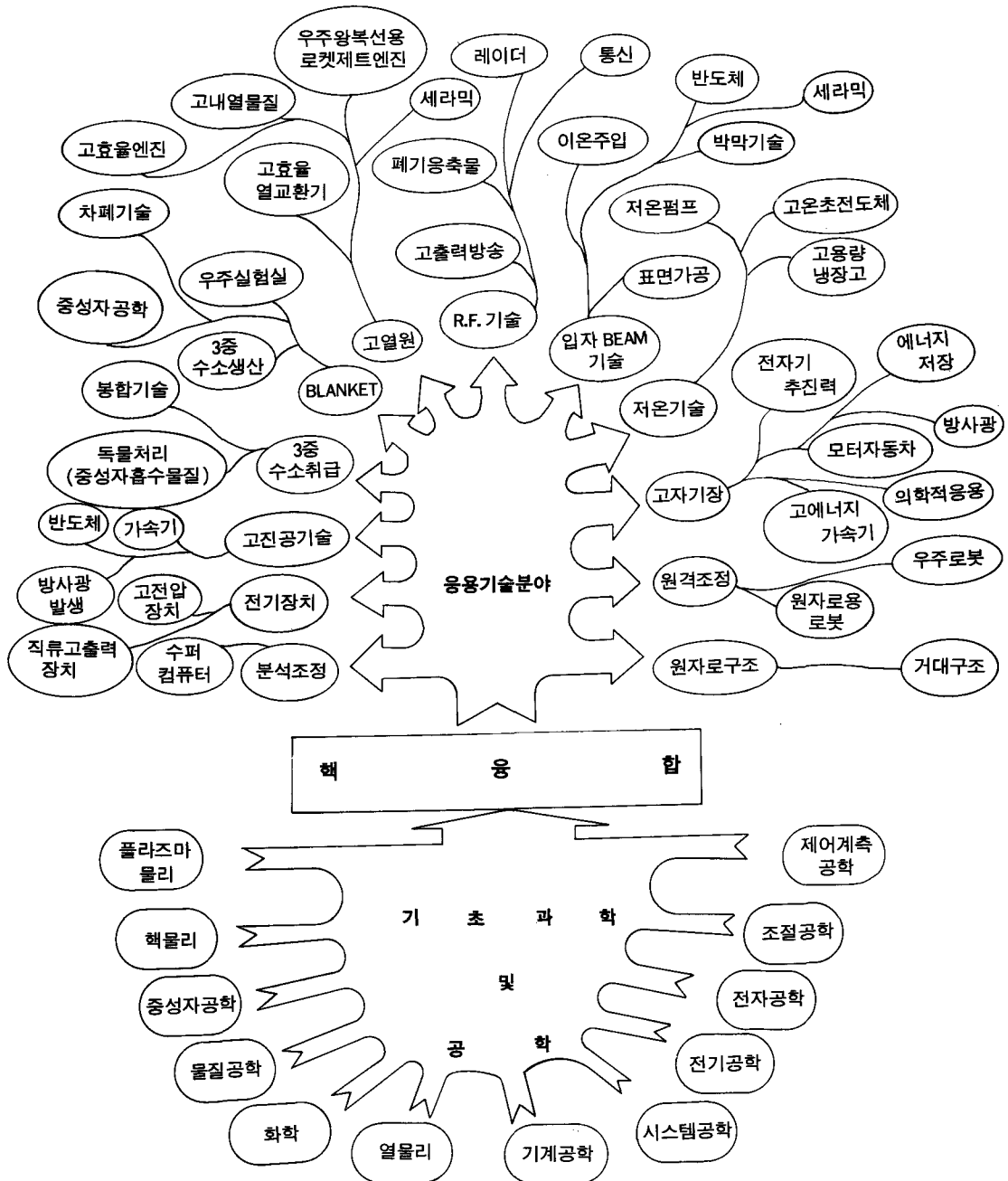
핵융합 연구개발은 현재 임계조건을 달성하기 직전의 과학적 실증이 끝나가고, 다음 단계로 自己點火에 의해서 장기간 연소를 할 수 있는 공학시험로 건설로 곧 들어가 기술실증을 보일 준비를 하고 있다. 핵융합기술의 특징은 초고온, 초고진공, 극저온, 초강자장, 초강도, 초대형 등 수없는 극한기술이 관여되어 있어서 기존의 여러 분야 과학기술이 뒷받침하여야 비로소 성공할 수 있는 거대첨단기술과제라는 것이다. <표 3>은 핵융합 개발과 직접 관련된 극한기술을 보여주고 있다.

핵융합 기술개발이 시작된 1950년대 초기에는 그 당시까지 주로 연구되었던 우주 및 천체 플라즈마, 대기플라즈마, 전기방전을 이용한 실험실적인 저온플라즈마를 기반으로 해서 고온의 핵융합플라즈마 물리연구가 주축이 될 수밖에 없었다. 시일이 경과함에 따라 여러 핵융합장치들이 개발되고 더불어 전기공학, 전자공학, 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 넓은 범위에 걸쳐 각종 신기술 개발에 이바지

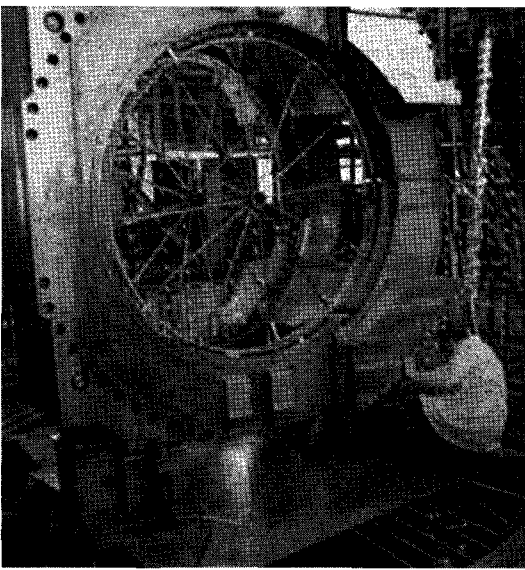
<표 3> 핵융합과 관련된 극한기술

극한기술	핵 융 합 관 련 기 술 내 용
초 고 진 공	융합로진공용기, 초고진공펌프, 진공부품 및 계기
초 전 도	전자석용초전도체, 강자성초전도전자석
극 저 온	대용량냉동계, 초전도자석냉각장치, Cryo 펌프
초강도신소재	고온재, 비자성구조재, 절연재, 방사성차폐재
초대형대용량	진공용기, 대전류 및 고전압기기, 거대코일, 전원
초 고 주 파	대출력고주파가열장치
초 정 밀	플라즈마계측, 가열장치부품, 대형정밀가공
초고열부하	증성입자빔 dump, TiC 등 세라믹코팅
초 고 속	펠릿 입사, 수퍼컴퓨터, 데이터기록
계 측 제 어	고속연산처리장치, 광통신, 원격운전제어, 플라즈마진단

하고 있다. <그림 10>에 핵융합기술이 기초과학 및 공학과 다른 응용기술분야에 미치는 파급효과를 도시하였다. 또한 1987년도에 일본 원자력산업회의에서 조사한 핵융합기술분야가 다른 산업분야에 미치는 파급효과의 정도를 <표 4>에 나타내었다.



〈그림 10〉 핵융합기술의 파급효과



〈표 4〉 핵융합기술이 다른 분야에 미치는 파급효과 정도 (☆ : 파급효과가 큼, ○ : 파급효과가 있음)

분야	에너지	정자	고에너지가속기	해양우주	생명과학	교통신용	일반산업	기타공통
	지	자	보	주	학	통	업	통
핵융합기술								
중성자공학·핵융합로공학	☆		○					
고진공기술		○	☆	○			☆	
초전도자석기술	☆		○	○		○		○
극저온기술	○	○	○		○			
고에너지빔기술		☆		☆			☆	
고주파에너지기술			☆	○			○	
Power Electronics 기술	☆							○
계측제어기술	○	☆	○		○			☆
Computation 통신기술		☆	○	○	○			
재료	☆		○	○	○	☆	○	
생산자공학기술	☆						☆	
System Engineering	☆		○					○
보수점검기술	☆		○	○				○
기타	○	○						○

5. 저온플라즈마의 산업적 응용

초고온플라즈마를 대상으로 하는 핵융합 기술개발은 그 투자규모가 국가나 국제단위의 방대한 개발자금이 장기간 필요하고, 각 분야의 수많은 첨단과학기술 두뇌를 요구하기 때문에 몇몇 선진국과 이들 사이의 국제협력에 의해서 추진되고 있는 실정이다. 따라서 일개 대학, 연구소 또는 기업의 규모로 이에 참여하여 국제적인 기여를 하기는 어렵고, 또한 예상보다 핵융합의 실용화가 지연되고 있어서 성급한 기대

〈표 5〉 저온플라즈마의 산업응용기술

분야	응용 기술
원자핵공학	방사선계측기, 동위원소분리, 원자로 해체, 방사성 폐기물처리, 플라즈마 계측, 핵융합로벽 코팅, 핵연료피복재 코팅
전기·전자공학	고주파발전관, 태양전지, 대전류스위치류, 방전관, 전자유체펌프 및 발전기, IC 제조, 정전도장, 초미세가공, 초전도후막
열공학	용접, 절단, 피막제조, 산화물용해, 결정성장, 정제, 환원, 금속세련, 고온기체 제조, 열차단장벽, 표면강화
기계공학	방전기공, 로켓추진, 입자빔, 가속기, 이온주입기, 각종 기계 및 공구코팅
재료 및 화학공학	고분자 중합, 신소재 합성, 표면개질, 표면코팅, 표면청정, 화학분석, 폐기물분해
광공학	방전조명, 기체레이저, 살균, 식각광원, 분광기술, 광학기기 초자류 표면 코팅

를 유보한 채, 최근에는 1억도 정도의 초고온 핵융합 플라즈마 대신 수만 내지 수십만도 정도의 저온플라즈마를 대상으로 한 응용기술 개발에 많은 관심과 노력을 기울이고 있다. 저온플라즈마는 전극 사이에 고전압을 걸어주거나 코일에 고주파를 흘려 전기방전을 일으켜서 글로우(Glow)나 아크(Arc)형태로 쉽게 얻을 수 있다. 이미 우리 생활주변에서 사용하고 있는 형광등, 네온사인, 전자관, 레이저, 용접기, 코팅장치 등이 바로 이러한 글로우와 아크방전을 이용한 저온플라즈마 응용장치들이다. 요새는 플라즈마를 이용한 각종 신소재 제조기술에 응용이 집중되어 각종 소재의 표면 개질, 반도체재료의 식각, 고순도 세라믹 미세분말 제조, 초전도체 및 다이아몬드 등 신물질 합성, 철광석 용해, 각종 기계부품 및 공구의 표면 코팅, 레이저 발전 및 증폭 등 여러 분야로 확산되어 가고 있다. 저온플라즈마의 대표적인 응용사례를 〈표 5〉에 예시하여 놓았다(계속).