

# 核融合爐 開發 어디까지 왔나? (1)

本稿는 서울대학교 공과대학에서 산업계와 관련 된 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 앞으로 3회에 걸쳐 연재로 살펴본다.



홍 상 희

서울대학교 원자핵공학과 교수

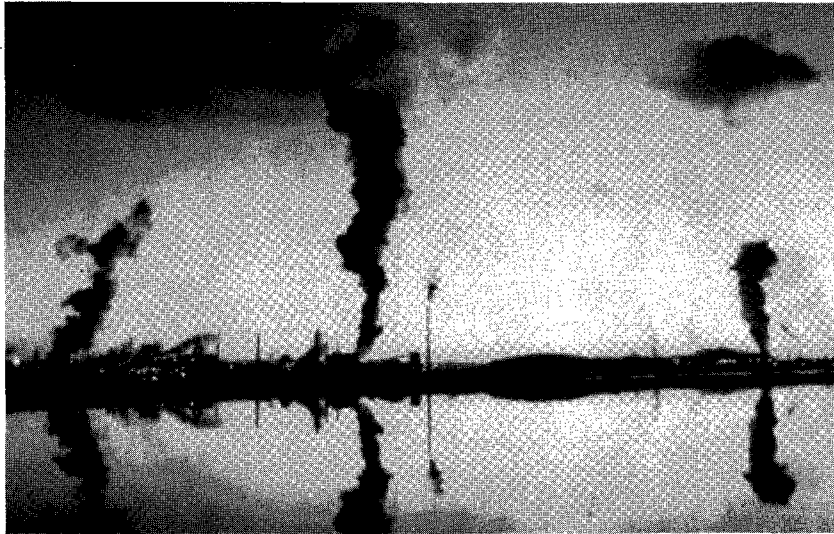
## 머리말

### 1. 물질의 제4의 상태는 플라즈마

옛날 그리스 사람들은 우주가 흙, 물, 공기, 불의 네가지 원소로 이루어졌다고 생각하고, 간편하고 정연한 체계로 우주의 구성을 설명하려고 애썼다. 일상생활과 주변에서 보고 느끼는 감각적인 상식으로 가장 무겁고 움직이기 힘든 흙을 밑바닥에 놓고 그 위에 유동성의 물, 그리고 다시 그 위에 보이지는 않으나 가벼운 실체인 공기를 놓았다. 마지막으로 제일 위에 불을 올려놓아 하늘로부터 번쩍이는 번개와 작렬하는 태양, 명멸하는 수많은 별들을 대표하였다. 그들은 현대과학에서처럼 체계있는 지식을 가지고 논리를 편 것은 아니지만 오늘

날 모든 과학기술의 대상이 되는 물질의 네가지 상태 즉 고체, 액체, 기체, 플라즈마를 에너지 포함순서에 따라 정연하게 배치하였다는데 놀라지 않을 수 없다.

얼음에다 열을 가하면 물이 되고 다음에 다시 수증기로 변하는 과정을 볼 수 있듯이 같은 물질이라도 에너지를 포함하고 있는 정도에 따라 물질을 구성하는 입자들 사이의 결합력이 느슨해지면서 고체, 액체, 기체의 세가지 상태로 존재한다는 것을 쉽게 알 수 있다. 그렇다면 수증기에 더 많은 열을 가한다면 어떻게 될까? 기체상태에 에너지를 더욱 가하면 기체구성의 최소단위인 전기적 중성의 분자와, 원자로부터 전자가 떨어져 나와 양전기를 띤 이온과 음전기를 띤 전자로 갈라진다. 이와 같이 가장 많은



에너지를 가지고 있는 전리된 상태의 기체를 현대과학에서는 플라즈마(Plasma)라고 부른다. 번개, 태양, 별들이 바로 플라즈마로 되어 있는 우리 주변에서 볼 수 있는 대표적인 것이다. 플라즈마를 물질의 제4의 상태로 인식하기 시작한 것은 1879년 영국 과학자 W. Crookes 경의 번개발생 원리를 이용한 방전실험을 통해서였다. 실로 옛 그리스인들이 불을 우주구성의 맨 위에 놓고 설명하려고 애쓴지 2,300여년이 지나서야 과학적인 개념과 학문적인 접근으로 불의 정체를 규명한 셈이다.

## 2. 불의 역사는 기술문명 발달사

불의 발견만큼 인류역사상 중대한 사건은 없었을 것이다. 지구상의 거의 모든 종족이 불에 대한 신화를 가지고 있는 것만 보아도 불의 발견과 사용은 인류문명의 시작과 다른 동물들 위에 인류가 군림할 수 있었던 획기적인 전기였음을 짐작할 수 있다. 불을 얻기전에는 인간은 나약하고 춥고 배고픈 한 가없는 들판의 동물에 지나지 않았다. 그리스 신화에서는 불의 신 프로메테우스가, 아메리칸 인디언 전설에서는 코요테가 하늘로부터 불을 훔쳐 인간에게 주었다고 전한다. 이러한 이야기가 사실이든 아니든 불은 하늘로부터 내려온 선물이다. 하늘에서 번개가 때려 나무와 덩불에 불이 붙고 특별히 호기심 많은 인간은 타고르는 불길과 내뿜는 열기에 본능적인 공포를 느끼면서도 용기를 가지고 접근하였을 것이다. 얼마나 여러

번 우리 조상들이 손과 발을 데이면서 마침내는 불을 안전하게 다룰 줄 알게 되고 이용하게 되었을 지 상상할 수 있을 것이다.

불과 함께 인간의 기술은 탄생하였고 인류문명의 발달은 곧 에너지의 발달로 이어졌다. 기술문명 발달의 각 단계마다 새롭고 더욱 강력하며 편리한 불이 나타났다. 마른 나무가지를 비벼 불을 만들어 썼던 원시시대로부터 나무는 오랫동안 인류에게 절대적인 에너지원이었으나, 쇠를 마음대로 녹일 수 있게 해주는 석탄에게 자리를 양보하였으며, 18세기말 산업혁명에 이르러서는 증기기관이 가축과 사람의 힘을 대신하였다. 얼마 안가서 석탄은 전력생산과 내연기관에서 더욱 효과적으로 사용되는 석유의 위력에 눌러 뒷전에 나 앉았으며 이들 화석연료는 현재 세계적으로 에너지사용에 있어서 주종을 이루고 있다. 그러나 화석연료는 매장량에 한계가 있어 머지않아 바닥이 드러날 위기에 처해 있고, 지구의 온실효과와 대기오염의 주범이라는 비난을 받으면서 차차 그 위치를 원자력에게 내주고 있다.

## 3. 「제3의 불」 원자력이 처한 궁지

원자핵에너지의 이용은 핵연료를 원자로 안에서 핵분열 또는 핵융합반응으로 태워서 막대한 열에너지를 얻어 이를 직접 또는 전기에너지형태로 바꾸어 사용하고 있거나 개발도중에 있다. 한때 「제3의 불」로 부르면서 큰 기대를 걸었던 핵분열에 의한 원자력도 현재 세계각국

발전량의 상당한 비중을 차지하며 이용되고 있기는 하지만 궁극적인 에너지문제 해결에 있어 결코 밝은 전망만을 주고 있지 않다는 것을 우리나라 국민들도 차츰 느끼기 시작하는 것 같다.

핵연료로 쓰이는 우라늄, 토륨 등도 한계가 있는 자원이라는 면에서 뿐만 아니라 그것이 안고 있는 위험부담이 크기 때문이다. 아무리 원자력발전의 안전성을 강조해도 사고나 재해에 의해 발전소로부터 넓은 지역에 걸쳐 흩어질 방사능물질에 의한 피해의 공포와 심리적 불안은 가시지 않고 있다. 원자력발전소에서 어쩔 수 없이 쏟아져 나오는 방사성폐기물의 저장과 처분에 세계각국은 머리를 앓고 있으며 일반대중들의 거센 저항에 부딪치고 있다. 30여년전 핵분열반응에 의한 발전이 처음 시작된 시점에서 이미 이러한 문제를 예견하였고, 우라늄을 연료로 한 원자로를 과도기적인 것으로 생각하지 않을 수 없었다. 따라서 우리 인류가 에너지 걱정으로부터 영원히 해방될 수 있는 새로운 에너지 생산방법에 대한 연구를 그 당시 이미 시작하였으며 가장 이상적이고 유망하다고 생각한 것이 핵분열과 반대되는 반응을 하는 핵융합을 이용하자는 것이었다.

#### 4. 플라즈마는 핵융합의 불

핵융합은 태양뿐 아니라 모든 별에서 나오는 에너지의 근원으로 우주에너지 생성의 근본이다. 하늘에서 밝고 눈부시게 불타고 있는 태양의 에너지는 플라즈마상태에서 수소끼리 결합하여 헬륨으로 변하는 핵융합반응의 결과라는 것이 확인되었을 때 인류는 또다시 옛 조상들이 불을 발견하였을 때와 같은 순간을 맞은 것이다. 불이 원시인들로부터 시작하여 잘 길들여지고 다듬어져서 현대 기술문명의 꽃을 피게 한 것과 같이 핵융합반응을 마음대로 조절할 수만 있다면 인공태양을 지구상에 건조하여 인류의 영원한 에너지원으로 활용할 수 있을 것이다. 세계 도처에 풍부하게 널려있는 물로부터 핵융합의 연료인 수소를 얼마든지 얻을 수 있기 때문이다.

지상에서의 핵융합실험은 1952년 11월1일에 수소폭탄실험으로 이미 인류에게 선을 보였다. 제어되지 않은 핵융합반응으로 얻은 거대한 에너지를 순간적으로 방출시켜 가공할만한 파괴력을 가진 핵무기로 등장한 것이었다. 하지만 핵융합의 불인 플라즈마를 잘만 다루면 미래의 에너지원으로서 기술개발 가능성이 뚜렷해지고 불멸의 에너지를 가질 수 있다는 기대로 부풀었다. 핵분열에 의한 원자력을 1945년 8월 원자폭탄 형태로 히로시마에 투하하여 선보인 지 7년이 흐른 그 당시에 원자력발전이 쓰일 동력로개발이 순조로이 진행되고 있었기 때문에 핵융합기술개발을 매우 낙관적으로 전망하였다.

그러나 그후 40년이 지난 오늘날 핵분열로에 의한 원자력발전은 인류 에너지공급에 중요한 위치를 차지하며 실용화된지 오래인데 비해 핵융합로 개발은 도대체 어떻게 되어가고 있는 것일까? 이따금 TV와 신문들이 선진국의 핵융합실험을 보도할 때마다 획기적인 결과라고 하는데 과연 실용화는 멀지않은 것일까? 이러한 궁금증을 다소나마 풀어보고 핵융합기술 개발의 어려움과 문제점이 어디에 있으며 그동안의 개발노력과 실험성공에 대한 의미와 실용화 가능성을 점검하기 위하여 다음과 같은 내용을 여기서 살펴보고자 한다.

먼저 핵융합에서 기대되는 이점과 다른 에너지원과 비교된 장점을 살펴보고 핵융합에너지를 얻는 원리와 이를 실현시킬 수 있는 조건을 알아본후 실제로 현재 연구개발되고 있는 핵융합장치들을 살펴본다. 이어 핵융합발전을 하기 위한 핵융합로 개발에 관련된 공학적인 문제와 핵융합기술의 특성과 다른 산업에 미치는 파급효과를 제시한다. 마지막으로 국내외 핵융합연구개발의 현황과 차기개발계획을 살펴 핵융합기술의 미래를 진단한다.

## 핵융합 기술개발에 거는 기대

### 1. 에너지자원 고갈과 환경오염문제

현재 인류가 주에너지원으로서 석탄과 석유 같은 화석연료에다 목줄을 대고 직면해 있는

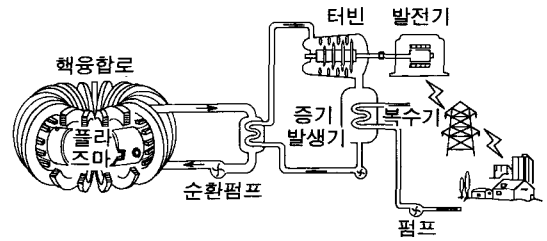
위기는 크게 두가지 문제로 요약될 수 있다. 연료자원의 고갈과 환경오염문제이다. 대체에너지 역할의 큰 몫을 담당하고 있는 핵분열에 의한 원자력도 이 두가지 위기에서 예외일 수는 없다. 매장량이 확인된 화석연료는 현재의 소비추세로 보아 석유와 천연가스가 50여년 밖에 쓸 수 없고 비교적 풍부한 매장량을 가지고 있다는 석탄도 100여년을 넘기기가 힘들다는 추산이다. 새로운 원자료가 개발되지 않고는 현재의 원자력발전소에 공급되는 우라늄연료도 50년 이내에 바닥이 날 것이라는 전망이다. 세계의 인구는 다음 세기 중반에 현재의 두배로 늘어 100억에 이르며 생산경제 활동의 증가와 생활수준의 향상으로 더 많은 에너지가 필요하여 현재보다 약 5배로 에너지수요가 팽창하여 에너지고갈의 위기를 더욱 가속화하리라는 계산이다.

지구의 환경은 특히 산업혁명 이후 끊임없이 태워온 화석연료에 의해 두드러지게 위협받아 왔다. 태워진 화석연료로부터 매년 약 35억톤의 탄산가스가 대기중에 내뿜어져 왔고 지난 30년동안 만도 대기의 탄산가스 농도가 10% 증가했다는 보고서가 있다. 지금도 매년 1~2% 비율로 탄산가스방출이 증가하고 있어 앞으로 30~60년내에 대기중의 농도가 두배로 늘어나라는 예측이다. 이 대기오염의 결과로 나타나는 지구온실효과는 2050년경에는 대기온도가 3~4도가 올라가 극심한 기후의 변화, 해수면의 상승, 생태계의 파괴 등으로 나타나 인류의 생존마저 위협할 상태에 이를 것이다. 공해없는 에너지로 주장되는 핵분열 원자력발전도 사고시 주변환경에 유출되는 방사성물질로 가공할 만한 방사능 오염에서 완전히 자유로울 수는 없다.

## 2. 핵융합로는 작은 인공태양

깨끗하고 무진장한 에너지를 약속하는 새로운 에너지원을 찾아온 인류가 태양에서 일어나는 수소의 핵융합현상을 지구상에서 실현하려는데 눈을 돌린 것은 필연적인 귀결인지도 모른다. 수소는 지구상에서 가장 널리 또 많이 얻

을 수 있는 연료이며 핵융합반응 결과로 깨끗하고 무진장한 에너지를 얻을 수 있기 때문이다. 발생하는 에너지량을 마음먹은 대로 조절할 수 있는 작은 인공태양을 만들어 편리한 전력형태로 변화시켜 사용하자는 계획이 바로 제어핵융합(Controlled Nuclear Fusion)발전이다. <그림 1>은 핵융합발전의 개략도이다.



<그림 1> 핵융합발전의 개략도

핵융합발전은 화력이나 원자력발전처럼 증기의 힘으로 터빈을 돌려서 여기에 연결된 발전기로 전기를 생산하는 과정은 같다. 다른 점은 석탄, 석유 또는 천연가스를 연료로 하는 화력발전의 보일러나 우라늄을 연료로 사용하는 원자로 대신 수소동위원소를 연료로 쓰는 새로운 원자로인 핵융합로로 대체하였다는 점이다.

## 3. 핵융합이 주는 매력

지구상에서 가장 이상적인 에너지원으로 기대되는 이 핵융합로가 우리에게 주는 매력이 어디에 있는지 구체적으로 그 장점을 살펴보자.

(1) 가장 큰 매력은 값싼 무한정의 연료를 어디서나 쉽게 얻을 수 있다는 점이다. 연료가 되는 중수소는 바닷물의 0.015%를 차지하고 있어 무진장으로 세계 어디서나 구할 수 있기 때문에 화석연료와 우라늄 같이 한정되고 편중된 지하자원의 매장에 따른 국제간의 불화와 불안은 자연 해소가 될 것이다. 바닷물 1리터에서 얻을 수 있는 핵융합에너지가 휘발유 300리터에서 내는 열에너지와 맞먹으므로 계속적인 에너지소비 증가추세를 감안하더라도 앞으로 수백만년 동안은 바닷물만으로 지구상에서



필요한 에너지를 공급할 수 있다는 계산이다.

(2) 환경오염 없는 깨끗한 에너지라는 점이다. 화력발전에서처럼 탄산가스에 의한 대기오염은 전혀 없고 핵분열발전과 비교해 위험한 방사능을 띤 방사성폐기물이 나오지 않는다. 핵융합로 개발초기에 삼중수소를 연료로 사용하는 경우에는 연료 자체가 짧은 반감기를 가진 저준위의 방사성물질이긴 하나 핵분열발전소의 방사성폐기물에 비하면 전혀 걱정할 수준은 아니며 궁극적으로 중수소만을 연료로 하는 핵융합로가 개발되면 완전히 깨끗한 에너지를 얻을 수 있다.

(3) 핵분열로에서처럼 돌발적인 사고나 실수로 원자로 자체가 녹아나는 노심용융사고의 위험성이 없다는 점이다. 핵분열로에서처럼 한꺼번에 수십톤의 핵연료를 장전하여 운전을 하지 않고 조금씩 필요한 양만큼만 연속적으로 주입하여 운전을 하는 것이 핵융합로의 특징이다. 따라서 드리마일 아일랜드나 체르노빌에서 처럼 원자로의 제어기능이 마비되어 일시에 방출되는 에너지 때문에 원자로가 녹아나는 사고가 핵융합발전에서는 일어날 수가 없는 고유한 안전성을 지니고 있다.

(4) 핵무기를 제조할 수 있는 부산물이 없어 핵분쟁의 위험성이 없다는 점이다. 최근 북한의 핵시설에 대한 핵사찰문제에서와 같이, 핵분열 원자로에서 언제나 국제적으로 문제가 되는 것은 핵연료 농축과정과 사용후연료의 재처리과정에서 핵폭탄을 제조할 수 있는 원료를 얻어낼 수 있기 때문에 국제적인 규제와 감시가 심한 것이다. 그러나 핵융합로에서는 핵무

기 제조에 사용되는 물질은 전혀 관여되지 않기 때문에 핵사찰과 같은 국제적인 분쟁은 일어나지 않는다.

(5) 핵융합로는 기술적으로 보아 열효율이 더 높은 발전소로 개량할 수 있고 고온의 열원이나 고속의 중성자원으로 사용하여 수소연료나 핵분열발전의 연료 등을 생산해 낼 수 있는 다양한 산업적 응용이 가능하다는 점이다. 핵융합로 내에서 나오는 물질은 전기를 띤 입자인 플라즈마이기 때문에 여기에 자기장을 걸어주면 직접 전기를 얻을 수 있어 터빈-발전기의 과정을 거치지 않고 높은 효율로 직접 발전을 할 수 있다. 또한 핵융합로에서 나오는 고열로 물을 전기분해하여 합성연료를 만들어 낼 수 있는 가능성도 있으며 고에너지의 중성자를 천연우라늄에 때려 핵분열발전에서 쓰이는 핵연료로 변환시켜 자원의 이용률을 증진시킬 수 있는 핵융합-핵분열 복합로의 개발도 가능하다.

## 핵융합의 이론적 배경

### 1. 핵에너지의 근원은 질량결손

우주를 구성하고 있는 모든 물질은 에너지 덩어리이다. 이것은 1905년에 아인슈타인이 발표한 유명한 특수상대성 이론에 근거를 두고 있다. 이 이론에 의하면 신비스럽게도 어떤 물질이든 그 질량 자체를 에너지로 변환시킬 수 있으며 이 과정에서 줄어든 질량(m)에 의해 생성된 에너지(E)는 너무나 유명한 아인슈타인공식,  $E=mc^2$ (c는 빛의 속도)으로 나타낼 수 있다는 것이다. 그렇다면 어떤 방법으로 질량을 에너지로 변환시켜 이용하느냐는 것이다. 가능한 방법은 자연적 또는 인공적으로 핵반응이 일어나게 해서 반응 전과 후에 나타나는 질량차에 의한 질량결손에너지를 얻으면 될 것이다. 우리는 이것을 핵에너지라고 부른다.

세상 만물은 한가지 또는 몇가지의 원소들로 구성되어 있고 원소는 다시 중심에 양성자를 띤 원자핵이 있고 그 둘레에 음전기를 띤 전자들이 결합되어 있다. 이러한 원자의 결합력을

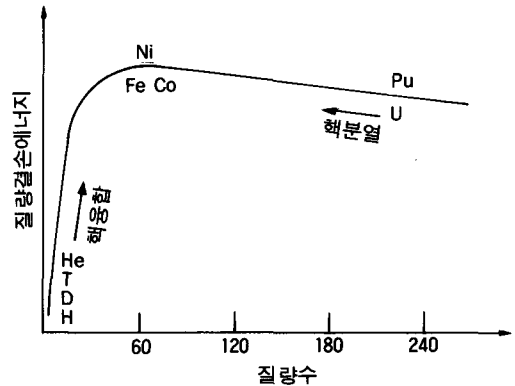
끓고 다른 종류의 원자들 사이에 전자들의 재배치가 일어나는 것이 화학반응이다. 이 때에도 질량결손에 의한 화학반응에너지가 관계된다. 예를 들면 화력발전소에서 석탄이 연소할 때 석탄의 주성분인 탄소가 공기중의 산소와 화학반응을 하여 탄산가스로 변하면서 반응에너지인 열을 발생하여 보일러의 물을 끓인다.

원자핵은 다시 핵자라고 불리우는 양성자들과 중성자들로 구성되어 있고 양성자를 띤 양성자들과 사이의 전기적 반발력보다 훨씬 강력한 인력을 가지고 있는 핵력에 의해서 뭉쳐져 있다. 만물을 구성하고 있는 모든 원소는 원자핵 속의 양성자수인 원자번호에 따라 그 이름이 붙여져 있다. 원자핵 속의 양성자수와 중성자수의 합을 우리는 질량수라 부르고 같은 원자번호를 가지고 있으면서 서로 다른 질량수를 가진 원소들을 동위원소라고 부른다. 예를 들면 원자번호가 1인 수소(H)의 동위원소에는 질량수가 2인 중수소(D), 3인 삼중수소(T)가 있으며, 원자번호 92인 천연우라늄(U)에는 질량수가 각각 234, 235, 238인 세가지 우라늄 동위원소가 있다.

질량결손에 의한 핵에너지 방출은 원자핵을 구성하는 핵자들의 재배치에 의해서 일어난다. 즉 자연적이든 또는 인공적이든 핵자들의 구성을 변화시키는 핵반응을 일으켜서 반응 전후에 나타나는 질량차에 해당하는 핵에너지를 얻을 수 있다. 핵자의 질량이 전자의 질량보다 약 1,840배 크므로 전자의 재배치에 의한 화학반응 에너지보다 핵자의 재구성으로 일어나는 핵에너지가 훨씬 크리라는 것을 짐작할 수 있다.

## 2. 핵분열과 핵융합 에너지의 차이

원자핵의 질량은 그 원자핵을 구성하고 있는 핵자들이 각자 떨어져 있을 때 질량들을 모두 합한 것보다 작다. 즉 핵자들이 떨어진 채 흩어져 있다가 이들이 모두 결합되어 하나의 원자핵으로 변하면 더 가벼워진다. 이 핵자들의 결합에너지인 질량결손에너지는 원소의 종류에 따라 그 크기가 다르다. <그림 2>에서 질량수에 따라 핵자당 질량결손에너지의 크기가 어떻

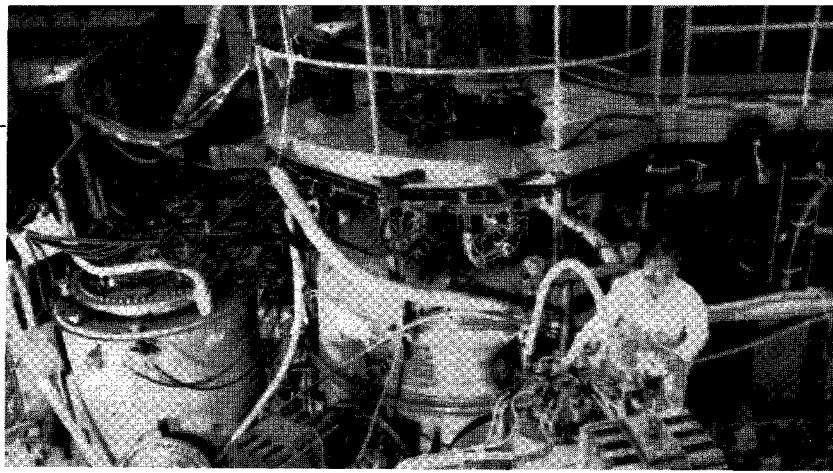


<그림 2> 원소의 질량수에 따른 질량결손에너지 변화

게 변하는가를 볼 수 있다. 질량수 60 근처의 철, 코발트, 니켈과 같은 금속을 경계로 가벼운 원소들과 무거운 원소들이 서로 다른 추세의 질량결손에너지 변화를 보여주고 있다. 우리는 이 그림에서 다음과 같은 두가지 방법으로 질량결손에 의한 핵에너지를 얻을 수 있음을 알 수 있다.

(1) 무거운 원소를 쪼개어 가벼운 원소로 분열시키면 질량결손이 나타나고 이 결과로 핵분열에너지를 얻을 수 있다. 현재 사용하고 있는 원자력발전소는 이 핵분열반응을 이용한 것으로 우라늄에 중성자를 충돌시키면 두개의 핵분열생성물로 쪼개지고 몇개의 중성자들이 튀어나오면서 핵분열에너지가 방출된다. 1g의 우라늄 235를 핵연료로 사용하였을 때 결과적으로 얻을 수 있는 질량결손에너지는 석유 약 2톤에서 얻을 수 있는 에너지와 맞먹으며 23,000 kWh의 전력을 생산할 수 있는 양이다.

(2) 가벼운 원소들을 합쳐서 그보다 상대적으로 무거운 원소로 융합시키면 질량결손에 의한 핵융합에너지를 얻을 수 있다. 태양에서의 에너지생성은 바로 이러한 핵융합반응의 결과로 수소가 합쳐져 헬륨(He)으로 변하면서 나타나는 질량결손에너지이다. 1g의 수소가 헬륨으로 변할 때 0.7%(0.007g)의 질량이 에너지로 변환된다. 이것을 아인슈타인공식에 넣어 에너지로 환산하면 석유 약 15톤의 에너지에 해당



하며 16만kWh의 전력생산이 가능하다. 태양은 지금까지 50억년간 매초 4백만톤에 이르는 물질을 소모하여 핵융합에너지를 생산하고 있으며 앞으로는 100억년은 더 계속되리라는 계산이다.

### 3. 실용가능한 핵융합반응

태양이나 별에서는 수소끼리 일어나는 자연적인 핵융합반응이지만 지구상에서 인공적으로 일으키려고 하는 핵융합반응의 대상은 수소의 동위원소인 중수소와 삼중수소를 이용하려는 것이다. 대표적인 핵융합반응은 <표 1>과 같다.

<표 1> 대표적인 핵융합반응

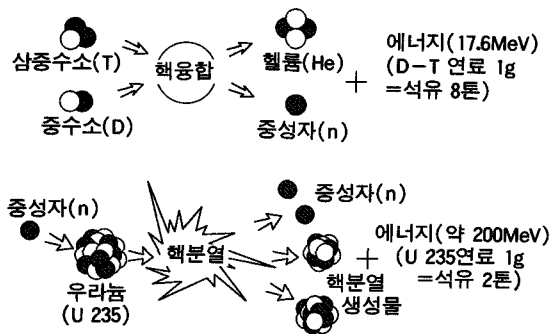
(1) 중수소 - 삼중수소(D-T) 반응
$D + T \rightarrow {}^4\text{He} + n + 17.6 \text{ MeV}$
(2) 중수소 - 중수소(D-D) 반응
$D + D \rightarrow {}^3\text{He} + n + 3.2 \text{ MeV}$
$D + D \rightarrow T + H + 4.0 \text{ MeV}$

여기서 MeV는 백만 전자볼트(eV)로 에너지단위이다. 1eV는 1볼트(V)의 전위차 속에서 전자를 가속시켜 얻는 에너지로 약  $4.5 \times 10^{-26}$ kWh의 전기에너지에 해당하며 섭씨 약 1만1천도의 온도로 유지되는 그릇속에서 움직이는 입자의 열운동에너지와 같다.

D-T반응은 D-D반응에 비해 방출에너지도 많을 뿐만 아니라 무엇보다도 인위적으로 핵융합반응을 일으키기가 훨씬 쉽다. 핵융합로를 개발하는 초기단계에서는 우선 D-T반응의 실현을 목표로 중수소와 삼중수소를 연료로 사용할 계획이다. 앞서 언급한 바와 같이 중수

소는 바닷물로부터 무진장 끌어낼 수 있으나 불행히도 삼중수소는 약간의 방사능을 띠고 있고 자연적으로는 존재하지 않아 역시 지하자원인 리튬(Li)에다 중성자를 때려 인공적으로 생산해내야 하는 제약이 있다. 그러나 리튬은 지하중에 풍부히 매장되어 있어 적어도 1,000년은 걱정없이 쓸 수 있는 양이 있으므로 이 안에 중수소만을 연료로 쓰는 D-D반응의 핵융합로를 개발할 계획이다.

한번의 D-T 핵융합반응에서 얻는 17.6MeV 에너지는 우라늄 235를 사용한 핵분열반응시의 약 200MeV보다 작은 듯이 보인다. 그러나 수소동위원소와 우라늄의 큰 질량차 때문에 한번의 핵반응에서 소모되는 핵연료의 양은 약 47배의 차이가 나므로 결과적으로 같은 질량의 핵연료를 사용했을 때 얻을 수 있는 에너지량은 D-T 핵융합이 U 핵분열보다 약 4배가 많게 된다. 예를 들면 중수소-삼중수소 혼합연료 1g을 사용하여 핵융합반응을 시키면 석유 약 8톤, 전력으로는 약 10만kWh에 해당하는 에너지를 얻을 수 있다. <그림 3>에 핵융합과 핵분열을 도식화하여 비교하여 놓았다.



<그림 3> 핵융합과 핵분열의 비교

## 핵융합의 실현조건

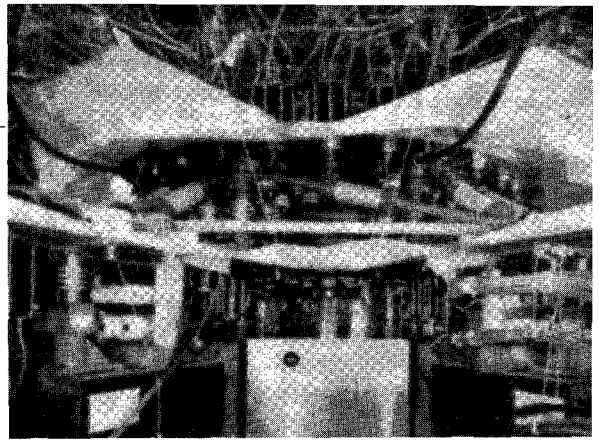
### 1. 열핵융합 방법에 의한 융합반응

핵융합에너지를 실용화하는데 있어서 가장 어려운 점은 핵융합반응을 일어나게 하는 조건이 너무나 까다롭고 설사 그 조건을 다 맞추어 주었다 할지라도 현재의 기술수준으로는 이때 나오는 에너지를 잘 조절해서 발전할 수 있는 장치개발이 매우 복잡하고 어렵다는 것이다. 핵융합반응이 일어나게 하려면 원자핵들을 핵력이 미치는 거리까지 접근시켜서 강력한 인력이 작용하여 융합이 일어날 수 있는 조건을 만들어 주어야 한다. 그러나 양전기를 띤 원자핵 사이에는 강한 전기적인 반발력이 작용하고 있어서 이 장벽을 이겨내지 않고는 핵력이 미치는 거리까지 접근할 수가 없다. 이 반발력을 이기고 융합을 시키기 위한 최선의 방법은 온도를 올려 원자핵들이 활발한 열운동을 하게 해서 큰 운동에너지를 가지고 서로 충돌하여 융합이 일어나게 해야한다. 이것이 열핵융합(Thermonuclear Fusion)의 기본원리이다.

태양의 중심부를 살펴보면 약 2,000만도의 온도와 4,500억기압의 압력속에서 수소이온들이 핵융합을 한다. 이러한 초고온, 초고압속에서는 이온과 전자가 분리되어 플라즈마상태로 되며 원자핵인 수소이온들이 시속 100만km 이상의 속도로 서로 충돌하여 열핵융합반응을 한다. 그러나 지구상에서는 태양 중심부에서와 같은 조건을 만들 수는 없다. 수소 아닌 다른 물질을 사용하여 다른 온도와 압력조건 아래에서 핵융합을 실현하여야 한다. 지상에서는 태양에서보다 온도는 더 높이고 그 대신 압력을 낮춰서 열핵융합을 시도하고 있다.

### 2. 핵융합로의 임계조건

핵융합연료를 핵융합로 속에서 초고온으로 유지하면 플라즈마상태가 되고 이온들은 맹렬한 속도로 움직이면서 서로 충돌을 반복하는 사이에 핵융합이 일어난다. 그러나 플라즈마입자들은 활발한 열운동으로 핵융합을 일으키기도 전에 자체 내부압력으로 사방으로 흩어져



달아나 버리려고 하기 때문에 충분한 시간 동안 상당한 밀도를 유지하면서 플라즈마상태의 입자들을 공간중에 가두어 두어야 한다. 입자들의 충돌횟수는 그 밀도에 비례하므로 밀도가 높으면 잦은 충돌로 충돌간의 시간이 단축되고 그만큼 가두어 둘 수 있는 시간이 짧아진다. 그러나 핵융합발전으로 얻을 수 있는 출력은 연료밀도에 비례하여 커지므로 플라즈마밀도를 어느 정도 이상으로 유지하여야 한다.

이상을 정리해보면 열핵융합을 시키고자 할 때 고려해야 할 점은 초고온상태를 유지하면서 핵융합반응을 일으킬 수 있는 충분한 시간 동안 충분한 양의 밀도를 가진 플라즈마를 공간중에 가두어 두어야 한다는 것을 알 수 있다. 중수소-삼중수소를 핵연료로 사용하여 핵융합발전을 하려고 할 때 핵융합을 일어나게 하는데 소모된 외부입력전력과 결과적으로 반응에 의해서 얻는 핵융합출력이 맞아 떨어지는 임계(Break-even)조건은 <표 2>와 같다.

<표 2> D-T핵융합로의 임계조건

플라즈마온도	$T \approx 10^8 \text{ K (10 keV)}$
플라즈마밀도×가둠시간	$n\tau \approx 10^{20} \text{ m}^{-3} \cdot \text{sec}$

<표 2>의 값들은 기억의 편리상 정밀한 값은 빼어버리고 거칠게 잡은 어렵값이다. 플라즈마온도 약 1억도는 핵융합을 시킬 수 있는 점화온도조건에 해당한다. 플라즈마입자밀도와 가둠시간의 곱인  $n\tau$  값은 플라즈마의 가둠(Confinement)조건으로 입방미터당 입자갯수와 가둠시간을 동시에 고려하여 이 곱이  $10^{20}$  이상 유지되어야 하는 것으로 Lawson 조건이라고도 부른다. 임계상태에 이르기 위해서는 이 두 조건을 동시에 만족시켜야 한다.