

核融合 發電의 展望

黃 琪 雄
(서울大 工大 助敎授)

■ 차 례 ■

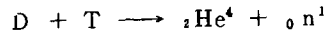
- 1. 核融合 發電이란 무엇인가?
- 2. 核融合 發電의 必要性
- 3. 研究 現況

- 4. 展望
- 참고문헌

① 核融合 發電이란 무엇인가?

原素들의 核反應은 크게 核分裂反應과 核融合反應의 두가지로 나눌 수 있다. 核分裂反應은 우라늄, 플루토늄과 같이 무거운 원소가 여러개의 더욱 가벼운 원소로 나뉘어지는 것이고, 核融合反應은 이와 반대로 重水素, 三重水素 등과 같은 가벼운 원소가 融合이 되어서 헬륨과 같은 더욱 무거운 원소로 변하는 반응을 말하는데, 일반적으로 核分裂이나 融合반응이 일어나면 여기서 큰 에너지가 방출이 되는데, 이것은 그림 1을 보면 쉽게 이해할 수 있다. 여기서 도시된 것은 원자핵을 구성하는 nucleon 당 평균질량은 원자질량번호에 따라 표시한 것인데, 그림에서 보는 바와같이 nucleon의 평균질량은 철을 중심으로 극소가 되며 원자 질량번호가 이보다 크거나 적어지면 평균질량은 증가한다. 따라서 철보다 무거운 원소가 더욱 가벼운 원소로 나누어지면 반응전의 원소의 질량이 반응후의 원소들의 질량의 총합보다 크고, 따라서 여기서 생기는 질량차에 해당하는 에너지 $E = mc^2$ 가 방출되며, 이 에너지를 서서히 제어된 형태로 나오게 해서 平和的으로 이용하는게 현재의 原子力發電이고, 만일 이 에너지를 급격히 방출하게 되면 시설물 파괴 및 인류 殺傷의 목적으로 쓸 수 있는 原子爆彈이 되는 것이다. 이와는 반대로 철보다 가벼운 원소가 融合反應을 통하여 더욱 무거운 원소로 바뀌게되면 여기서도 그 質量差에 해당하는 에너지가 방출된다. 예를 들면 D(重

水素)와 T(三重水素)는 다음과 같은 반응을 일으킨다.



여기서 반응전후의 質量差는 3.14×10^{-29} kg이며 이것은 2.82×10^{-12} J에 해당하고, α -입자가 이것의 20%의 에너지를 갖고, 나머지는 중성자가 갖고 방출된다. 만일 이 반응이 급격히 일어나면 水素爆彈이 되고, 서서히 일어나게 되면 멀리서는 태양과 같이 오래동안 거의 無限에 가까운 에너지를 방출할 수 있고, 만일 우리가 地球上에서 이 반응을 제어할 수 있어서 여기서 나오는 에너지를 우리가 평

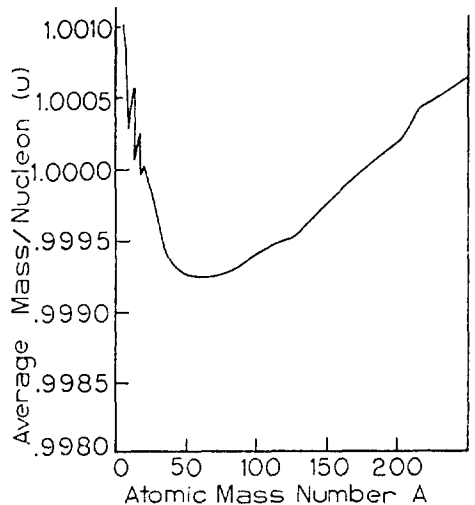


그림 1. 원자 질량번호에 따른 nucleon의 평균 질량의 변화

和의으로 이용할 수 있으면 이것에 의한 核融合發電所를 생각할 수 있다.

原子核의 融合反應이 일어나기 위해서는 核사이의 coulomb 靜電反撥力을 이겨야하며, 그러기 위해서는 反應을 일으킬 核들이 높은 운동에너지를 갖고서 충돌을 해야하며, 통상 重水素나 三重水素의 기체의 온도는 수억도가 되어야 한다. 기체가 이렇게 高溫이 되면 기체의 分子結合이 떨어지고, 핵과 케도전자가 유리되고 이온화된 기체 즉 plasma 상태가 되며, 이것은 저온의 보통 中性기체와는 전혀 다른 여러가지 성질을 갖게 된다. 地球上에서는 螢광등, 네온사인, 번개, 極地方의 Aurora 등에서 plasma를 발견할 수 있고, 地球 大氣圈 上層部의 Van Allen Belt나 Solar Wind는 地球에 많은 영향을 미치는 plasma들이고 많은 별들의 내부와 대기, 그리고 星門水素의 대부분이 plasma 상태에 있어서 우주物質의 99% 이상의 plasma 상태에 있다고 믿어진다. 이들의 大部分은 低溫 plasma들이고, 경제적으로 融合反應에서 에너지를 추출해서 쓸 수 있기 위해서는 Plasma의 온도가 높아야 할 뿐 아니라 密度도 높아야 하고, 溫度가 낮은 주위환경과 空間的으로 격리된 상태에서 어느 時間이상 유지되어야 하는데, 이 세계의 變數들 즉 plasma의 溫度 (T), 密度 (n) 및 拘束時間 (Confinement Time ; τ)은 plasma의 성질을 결정하는 중요한 변수들로서, 대부분의 核融合實驗은 이 세계의 변수값의 향상을 위해 노력해 왔다고 할 수 있는데, 그 이유로서는 만일 생성된 plasma가 傳導 및 輻射에 의해서 잃어버리는 에너지가 融合反應에 의해서 생기는 에너지로써 충당이 되면 처음 생성된 plasma는 外部에서 새로운 에너지의 공급이 없이 高溫의 plasma가 現상태로 유지될 수 있을 것이다. 이것을 나무에 불이 붙는 것과 같은 概念으로 이야기 하면 plasma에 불이 붙는다는 概念으로 融合爐의 發火條件 (Ignition 혹은 Lawson Condition)¹¹ 이라고 이야기 하는데, 重水素-三重水素 Plasma에서의 發火條件은 溫度가 1억도K 이어야하며, 密度와 拘束時間의 積 즉 $n\tau \geq 10^{14} \text{ sec/cm}^3$ 이어야 하며, 現在로서는 $n \approx 10^{14} \text{ cm}^{-3}$, $\tau \approx 1 \text{ sec}$ 가 最適의 값이라 믿고 大部分의 融合實驗은 이 값들을 目標로 하고 있고, 여기서 보는 바와 같이 發火條件이 가장 쉬운 DT plasma의 경우도 超高溫, 高密度의 plasma를 1초 이상 유지 해야되는 어려움이 있기 때문이다.

核融合爐의 燃料로써 사용할 수 있는 元素로서는 H, D, T, He, Li, B 등을 생각할 수 있으며,

이중에서 DT 및 DD 반응들이 비교적 낮은 온도에서 일어나므로 이것들이 最初의 核融合爐에서 사용될 것이다.

2 核融合 發電의 必要性

人類의 에너지 原으로는, 初期에는 自然연료인 나무, 풀등이 사용되다가, 産業革命과 더불어 이것이 化石연료인 석탄, 기름으로 바뀌었고, 그 후 人類의 에너지 소비는 급속적으로 증가하기 시작했다. 全世界의 에너지 소비량 살펴보면 다음과 같다.²⁾

1850	0.3 - 0.5 Q / century
1851 - 1950	4 Q / century
1951 - 2000	~ 15 Q / half-century (1Q ~ 10 ²¹ J)

소비량은 19C 부터 급속히 증가하기 시작했으며 1968년에 0.1 Q / 년 이던 것이 1975년에는 0.25 Q / 년 이었고, 두차례의 油類波動이후 둔화되긴 했지만 이런 추세로 소비하면 2050년 경에 가서는 地球上의 사용가능한 化石연료는 바닥이 날 전망이다.

20C 중반에 E. Fermi가 Chicago大學에서 최초의 核分裂爐를 만드는데 성공함으로써 核연료가 종래의 自然 및 化石연료를 대체할 수 있는 계기를 만들었고, 原子力을 제 3의 불이라고 부르면서 여기에 거는 기대가 무척 컸었다. 그러나 이 原子力의 安定性이 문제가 되면서부터, 특히 우리가 核分裂爐의 제어기능을 상실했을때 일어날 수 있는 결과라든지, 廢水처리, 爐의 殘廢物처리 또는 核燃料의 入手에 따르는 어려움 등을 생각하면서 부터, 이런 결점을 갖지않는 代替 에너지 原을 찾게되었고, 또한 두차례의 油類波動이후 보다 安全하고 싼 價格으로 安定된 공급이 보장될 수 있는 에너지를 찾게 되었다.

여기서 우리가 생각할 수 있는 것이 곧 核融合에 의한 發電이며 이것의 長點으로는 첫째, 爐의 燃料인 重水素는 自然水素에 0.0153%나 포함되어 있으므로 만일 바닷물 속에 포함된 重水素를 核融合爐를 이용해서 에너지화 한다면 거의 無限에 가까운 양이 되고, 둘째, 融合反應은 연쇄반응이 아니기 때문에 分裂爐에서와 같이 우리가 爐의 제어기능을 잃어버렸을 때와 같은 파괴적인 결과가 일어나지 않고, 셋째, 分裂爐에서와 같은 방사능 쓰레기의 문제가 없고, 따라서 방사능 물질에 따르는 殘熱處理問題 및 生態界에 미치는 영향이 문제가 되지않고, 넷째, 燃料의 武器로의 轉用이 不可能한 점등이 있어서 여러가

지로 봐서 꿈의 에너지라고 할 수 있으며, 특히 韓國과 같이 에너지의 大部分을 수입해야하는 나라에 궁극적으로 필요한 에너지라고 생각된다.

3 研究 現況

核融合에너지의 平和的 利用을 위한 研究는 1950 年代 初부터 歐美 各國에서 수행되어 왔으며, 太陽 에너지가 核融合 反應에 의한 것이라는게 究明되어 지고, 또 地球上에서도 水素爆彈의 실험이 성공하자 核融合에 의한 發電이 상당히 쉬우리라 기대했으나 큰 高溫 plasma 의 여러 성질들 특히 MHD 不安定性 때문에 쉽지 않다는게 발견되었고, 처음에는 몇 개의 연구소에서 비밀리에 진행되어오던 연구를 공개해서 各大學 및 一般 研究所에서도 할 수 있도록 허용함으로써 많은 사람이 참여 할 수 있게 되면서부터 차차 核融合에 필요한 超高溫 plasma 의 성질을 이해할 수 있게 되었고, 70년대에 理論과 技術의 큰 진전이 있었다.

發火가 일어나기 위해서 plasma 가 超高溫이 되면 보통의 物質로서는 담아 놓을 수 없고, 磁場을 이용하거나 Laser 나 粒子 Beam의 慣性을 이용한 方法을 쓰는데, 현재로서는 磁場을 利用한 方法에 대한 연구가 主가 되어 있다. 磁場을 이용한 方法의 原理는 帶電된 粒子는 磁場內에서 螺旋運動을 하는 성질을 이용한 것이며, 이 방법은 또한 크게 磁場이 열려있는 open system과 닫혀있는 closed system으로 나누어 질 수 있고, open system의 代表的인 器機로서는 Magnetic Bottle 혹은 Mirror 라고 불리어지는 것이 있으며 (그림 2 참조), 이것은 美國의 Livermore 研究所에서 중점적으로 연구되고 있으며, 건설비가 적게 들고, 製作 및 維持가 쉬운 장점이 있으나, 열려진 양끝으로 plasma 가 쉽게 빠져나

가는 결점이 있어서 이것을 補正하기 위해서 근래에는 Tandem Mirror 라는 것이 등장했다. closed system은 일반적으로 torus 모양을 하고 있으며, 代表的인 器機로서 tokamak 이 있다.(그림 3 참조) 이것은 소련의 Kurchatov 研究所에서 L. Artsimovich 의 主導하에 50년대 중반부터 개발되어온 기계로서 강력한 磁場을 만드는 coil 과 toroidal 모양의 眞空容器로 되어있다. 1968년에 소련의 Novosibirsk 에서 열린 IAEA 주최 제 3차 plasma 및 핵융합연구 국제 학술회에서 그때까지 별로 알려지지 않았던 소련의 T-3 tokamak 에서 당시로서는 믿기 어려웠던 천만도K의 온도를 갖는 plasma 를 수 milsec 유지했다는 發表가 있고, 그후 英國의 科學者들에 의해서 이것이 확인이 되자 세계적으로 주목을 받기 시작했고, 이때까지 서로다른 原理에 입각한 器機를 갖고서 發化條件을 얻으려고 노력하던 各國의 研究所들이 앞을 다투어 機種을 tokamak 으로 바꾸기 시작했고, 50대에 이르기까지 이 器機에서 계속적으로 新記錄이 얻어지고, 앞으로 核融合 plasma 의 發火는 이 tokamak 에서 이루어 질 것이라는 견해가 지배적이다. 이것의 장점은 실험결과가 代辯하고 있듯이 核融合 發電에 필요한 發火條件 모두를 만족하는 탁월한 plasma 의 生成能力에 있으나, 단점으로는 torus 모양으로 되어 있음으로 인해서 製作 및 維持에 어려움이 많이있고, 또 이 器機에서는 plasma 內에 큰 전류를 흘려야하는데 이렇게 하기 위해서 plasma 가 변압기의 2차 捲線에 해당하는 구조를 갖고 있으므로 爐가 연속적으로 운영되지 못하고 단락적으로 운영되어야 하는 점들이 있으나, 最近에는 plasma 內의 電流를 변압기를 사용해서 유도하지 않고 RF를 사용해서도 가능하다는 것이 밝혀져서³⁾ tokamak 의 지속적인 운영의 가능성을 보여 준 후로 더한층 이 器機에 거는 期待가 커지고 있는 實情이다.

이외에 磁場에 의한 plasma confinement device 로서는 stellarator, spheromak, bumpy torus 등이 있으며 각각의 특색으로써는, stellarator 는 tokamak 과 같이 closed system으로써 torus모양이나, plasma 內에 큰 전류를 흘릴 필요가 없기 때문에 爐의 연속적인 운영이 가능하다는 장점이 있고, spheromak 도 closed system의 하나이나 이것은 爐의 眞空容器가 球形이고 또 큰 磁場을 만들기 위한 coil 을 필요로 하지 않기 때문에 건설비가 낮고, 製作 및 維持에 용이하다는 장점이 있으며, bumpy torus 는 여러개의 Mirror 器機를 torus 모양으로

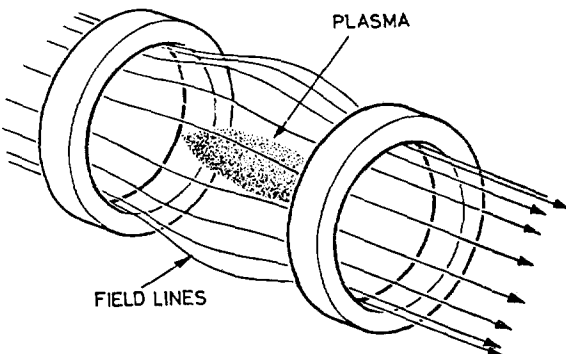


그림 2. Mirror 器機의 概略圖

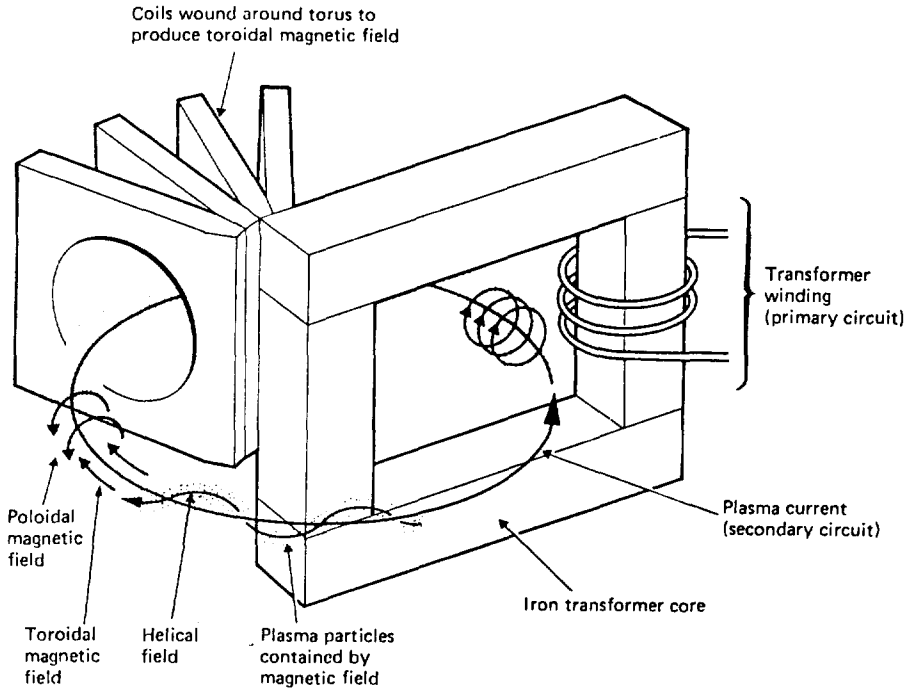


그림 3. tokamak 概略圖

연결된 것이라고 볼 수 있는 등 既存의 器機들의 장점을 따서 만든 것들로서, 이들을 총칭해서 代替器機 (Alternative Concepts) 라고 부른다.

現在 核融合 發電의 具現을 위하여 많은 노력을 하고 있는 나라들을 美國, 蘇聯, 日本 그리고 英國, 獨逸을 위시한 유럽의 수개국 들이다. 美國에서는 大學校와 國立研究所에서 주로 연구가 수행되고 있으며, PPPL (Princeton Plasma Physics Laboratory), LLL (Lawrence Livermore Laboratory), LASL (Los Alamos Scientific Laboratory), ORNL (Oak Ridge National Laboratory) 등은 그중 대표적인 연구소 들이고 最近에는 核融合에너지의 商業化에 對備하여 個人會社들이 많이 참여하기 시작하고 있다.

이들 各國은 1950 年代 初盤부터 核融合 研究를 시작한 이래 아직까지 發火條件을 갖는 plasma 를 만들지는 못했지만 꾸준한 향상을 해왔으며 특히 70 年代 초반부터 세계 各國들이 tokamak 연구에 주력하고서 부터 큰 진보가 있었고, 70 年代 中반에 이르러 各國의 結果는 그때까지 축적된 기술과 지식 만으로도 發火條件을 만족하는 plasma 를 만들 수 있다는 것이었고, 核融合 에너지의 平和的 利用이 地球에서 가능하다는 것을 보여주기 위해서 5~10

年 계획으로 超大型 tokamak 의 제작에 착수하기 시작했다. 美, 蘇, 日은 각기 독자적으로 제작하고 유럽의 Euratom의 各國은 共同으로 제작하기로 합의를 봐서 英國의 Culham 研究所에 설치중에 있다. 이들 各國이 제작했지만, 제작중인 기기들의 이름 및 중요한 제원들이 표 1에 나타나 있으며, 각각 특색을 갖고 있는데, 이미 완성이 되어서 83년 말에 試運轉을 한 바있는 美國의 TFTR은 plasma 의 主加熱方法이 Neutral Beam에 의한 것이어서 5 KeV 의 主 plasma 와 120 KeV 의 Neutral Beam의 두 에너지 成分의 plasma 가 직접 일으키는 融合반응이 지배적이라는 점이 되겠고, 蘇聯의 T-20은 超電導 coil 을 쓴다는 것과 融合반응에서 나오는 중성자를 分離 반응에 사용하려는 融合-分裂 複合爐이고, 유럽의 JET는 plasma 가 非圓形 斷面을 갖는 점과 融合반응에서 생겨나는 α 입자에 대한 연구에 특히 관심이 많이 있고, 日本의 JT-60은 Magnetic Divertor 를 쓴다는 점이 되겠다. JT-60을 제외한 TFTR, T-20 및 JET는 DT를 쓰고, JT-60에서는 Hydrogen 을 쓸 예정으로 있다. 이것은 日本이 世界에서 唯一하게 原爆의 피해를 본 나라이고, 따라서 아직 核反應에 대한 거부반응이 있기 때문으로 생각된다. 이 중 TFTR은 곧 본격적인 실험

표 1. 主要 tokamak 의 제원

(JET의 短半徑의 두 숫자중 앞의 것은 수평 短半徑이고, 뒤의 것은 수직 短半徑이다.)

器 機	国 籍	長半徑 (m)	短半徑 (m)	磁 場 (T)
TFTR	USA	2.48	0.85	5.2
JET	EURATOM	2.96	1.25, 2.1	2.77
JT-60	JAPAN	3.0	1.0	5.0
J-20	USSR	5.0	2.0	3.5

에 들어가서 1985년 후반이나 1986년 초반에 發火條件에 아주 가까운 plasma의 生成에 도전할 것으로 기대되고 있고, JET는 1985년, JT-60는 1987년에 器機의 완성예정이고, T-20는 아직 미정이다.

open system으로서는 LLL에 MFTF라고 이름 지어진 tandem mirror 가 건설 중에 있으며 이 器機 또한 發火條件에 가까운 plasma의 生成에 目標을 두고 있다.

지금 가동중인 器機나 TFTR, JT-60, JET, T-20 및 MFTF 등의 기기에서 목표로 하는 plasma의 온도와 nr의 값들이 그림 4에 표시되어 있다. 2MB, T-10, PLT, Alcator 등은 현재 가

동중인 器機들의 이름이며, 여기서 보는 바와 같이 Plasma의 nr 및 T의 값들이 꾸준히 향상되어 왔으며, 不遠間에 發火條件을 만족하는 plasma의 生成이 가능하리라고 믿어진다.

여기서 한가지 첨부할 것은 Plasma를 記述하는 大部分의 式들이 非線型이고, 또 實驗이 어렵고 돈이 많이들기 때문에 Computer를 이용한 數值解析이나 Simulation을 많이 이용하게 되고, 따라서 Computer의 효율적인 이용을 위하여 특히 美國에서는 LLL에 超大型 Super Computer를 비치하고서 美國의 전역 어디에서나 核融合 研究에 종사하는 사람이면 무료로 연결해서 쓸 수 있도록 해 놓았다. 美國이 만일 核融合發電에 제일 먼저 성공한다면, Apollo 계획으로 달의 정복에서 蘇聯에 이길 수 있었던 것과 마찬가지로 Computer의 도움이 있었기 때문이라고도 할 수 있을만큼 核融合의 研究에 크게 도움을 주고 있다.

Laser나 Relativistic Charged Particle Beam을 이용하는 Inertial Confinement는 大部分의 研究가 비밀리에 수행되고 있어서 일반인은 상세한 연구의 내용과 결과를 얻기 힘들지만은 概括적으로 이야기하면 現在의 技術에서 큰 進前이 있어야 可能할 것으로 생각된다.

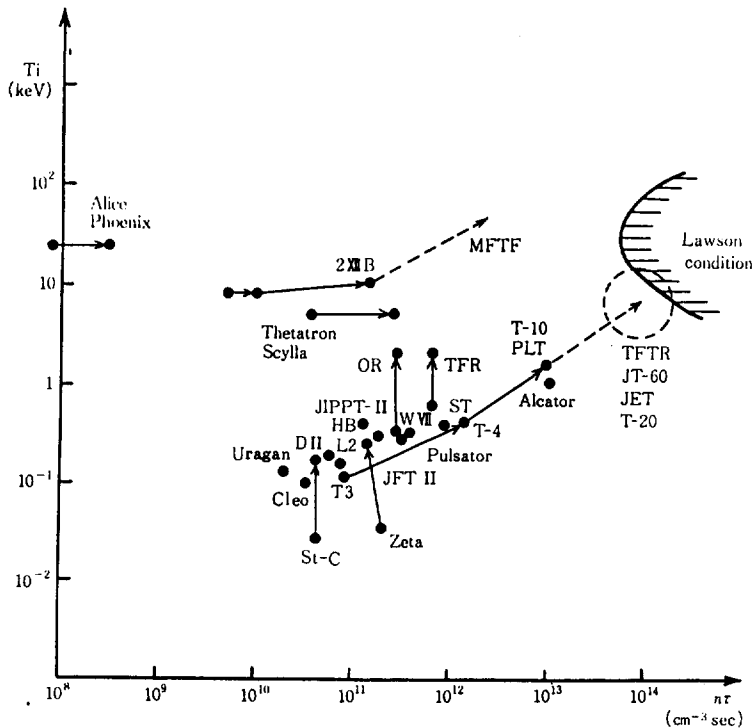


그림 4. 主要器機의 Plasma 變數值

4 展 望

前節에서 살펴본 世界各國의 主要 tokamak 들이 定常적으로 가동이 되기 시작하면 빠르면 85年 後半에 地球上에서 初最로 自續적으로 核融合 反應을 하는 發火條件에 가까운 plasma 가 얻어질 전망이다. 이것은 소위 "Proof of Principle" 을 보이는 것으로서, 우리는 여기에서 얻어지는 결과에 따라 核融合 에너지를 제어해서 쓸 수 있다는게 원칙적으로 實證이 되면 그 뒤에는 實用化에 따르는 문제만 해결이 되면 商業用 核融合爐가 세워질 것이고, 여기서 나오는 電力을 일반 가정에서도 쓸 수 있게 될 것이다. 물론 發火條件에 가까운 plasma 가 얻어지더라도 效果적인 加熱方法, 不純物 제어, plasma와 容器 內壁과의 반응, Scaling 법칙등 원칙적으로 알려져야 될 문제들이 있지만 이들은 上記된 器機들을 통하여 알려질 것이다.

實用化에 따르는 問題들을 나열해 보면 첫째, 核融合爐는 3~5 tesla 의 큰 磁場이 필요한데 電力消耗을 줄이기 위해서는 超電導 coil 을 써야되며, 둘째, plasma 의 純度유지와 不純物 제어, Plasma 內의 電流誘導, 燃料의 再供給에 관련된 문제, 셋째, 高真空의 生成 및 유지 문제, 넷째, plasma 와 직접 접촉을 하는 真空容器的 內壁은 이온, 중성자 및 X선의 照射를 받을 뿐 아니라, 電磁氣的, 熱的 힘들을 견디어 내야 하므로 이런 환경에 견딜수 있는 材料의 개발문제, 다섯째, DT 爐의 경우 中性子の 흡수와 三重水素의 생산을 위한 blanket 과 磁場 coil 을 보호하기 위한 遮蔽物의 설치 그외에 經濟性問題 등이 있다. 이중超電導 coil 사용 및 高真空 技術등은 이미 開發되어 있으나 그외의 문제들은 앞으로 해결되어야 할 문제들이고, 우리가 認知할 수 있듯이 核融合 發電에 필요한 技術은 工學의 모든 분야를 망라하는 最新의 技術을 필요로 하고 있고, 많은 사람들이 核融合 發電은 人類가 부딪친 工學問題 중 가장 어려운 문제라고 생각하고 있다. 그러나 現在 世界의 에너지 소비의 증가추세와 사용가능한 석탄, 석유 및 천연가스의 양을 고려해보면 이미 판명된 양으로는 30년을 지탱하기가 어렵고, 석유 및 천연가스의 가격은 在庫가 줄어들면 줄 수록 상상하기 어려울 정도로 높아지리라 생각되고, 그외의 에너지로써 태양열, 바람, 潮力, 合成燃料등이 있지만은 어느 하나도 根源

적인 解決方法이 될 것 같지는 않고, 따라서 저렴한 가격으로 누구에게나 안정된 공급을 할 수 있는 에너지의 개발이 이루어지지 않으면 全世界의 産業構造의 變換은 물론 當장 필요한 에너지원이 있는 나라와 없는 나라의 분쟁은 불가피하게 될 것이고, 나아가서는 人類의 存亡이 달려있는 중요한 문제이다. 産業構造의 變換은 이미 油類波動 이후 美國, 日本 및 유럽 各국에서 일어나고 있는 바와 같이 종래의 에너지 소비형 산업인 重工業, 鐵鋼産業 등이 쇠퇴의 길을 걷기 시작 했고, 에너지 절약형 산업인 電子工業, 通信産業 등이 미래의 산업으로 일어서고 있는 중이다.

이런 여러 문제들을 생각해 보면 비록 어려움이 많이 있지만은 核融合 에너지는 언젠가 實用化 되어야 할 것이고, 다만 그 시기가 언제냐 하는 문제가 남아 있는데 이것은 석유나 천연가스의 가격이 상대적으로 얼마나 높아지고 따라서 核融合 에너지의 필요성에 대한 요구가 얼마나 절실해지느냐에 달려 있는데, 現今의 추세로 봐서는 늦어도 2010년 까지는 實用化가 가능해질 수 있는 것으로 믿어지고, 그것은 tokamak 에서 이루어질 전망이다.

현재 제한된 나라에서 核融合 研究가 수행되는 이유로서는 研究用 器機 제작에만도 막대한 돈이 들기 때문인데, 日本이 독자적으로 國家的인 계획의 하나로써 大規模의 核融合 研究를 수행하고 있는 점은 주목할 만하다. 日本도 우리와 같이 資源이 없는 나라로써 일찍부터 核融合에 관심을 기울여서 많은 연구 경험과 人力을 축적했다고 보는데, 우리도 시간적 여유가 있으므로 소규모의 실험부터 시작해서 필요한 경험을 가진 人力의 배양을 시작할 때라고 판단되며, 그런 기술과 인력의 축적이 있을 때 다른 나라에서 人造太陽으로부터 얻어진 融合에너지를 사용하기 시작할 때 우리도 外製 太陽이 아닌 國產 太陽을 만들 수 있을 수 있을 것이다.

" It is never going to be too late. "

참 고 문 헌

- 1) J. D. Lawson ; Proc. Phys. Soc. (London) B 70, 6 (1957)
- 2) A. Parker ; Energy Policy 3, 58 (1975)
- 3) N. J. Fisch ; Nuclear Fusion 21, 15 (1981)