

□ 技術 解 說 □

# 플라즈마 핵융합發電

朴 德 圭\*

■ 차      례 ■

- |                   |                  |
|-------------------|------------------|
| 1. 머릿말            | 5. 핵융합發電의 實際와 問題 |
| 2. 핵융합에너지-제 4의 불  | 6. 핵융합發電의 現狀과 展望 |
| 3. 플라즈마-제 4의 物質狀態 | 7. 맺는말           |
| 4. 플라즈마 핵융합裝置     | 參考文獻             |

## 1. 머릿말

우리 人類는 有史以來로 “불”을 잘 다룰 줄 아는 슬기를 가지고 있어서 오늘날과 같은 發展된 文明生活을 하기에 까지 이르고 있다. 原始人들이 나무를 마찰하여서 얻은 불을 始發로 하여 여러가지 물질이 산화반응할 때 발생하는 化學的 에너지를 “제 1의 불”이라고 한다면, 産業革命以後에 등장한 電氣 에너지를 “제 2의 불”이라고 하겠고, 原子核分裂反應에 의한 에너지를 “제 3의 불”이라고 하겠다. 지금까지는 이 세가지 에너지를 利用하면서 찬란한 文明을 成長시켜올 수 있었으나, 20세기에 들어서면서 加速的인 인구증가, 근대 文明化에 따르는 1人當 에너지소비량의 급속한 증가 및 低開發國들의 國家開發에 消要되는 에너지 수요의 幾何級數的인 증가등을 감당해 내기에는 이러한 에너지들로는 불가능하기에 이르고 있다.

1973年 가을에 일어난 오일•속크이후에 國際的으로 조사한 에너지의 需給展望을 참고로 해보

면, 앞으로 70년도 채 못되는 서기 2050년이 되면 現在 1次에너지의 主役인 石油, 石炭, 天然가스는 地球上에서 醬그리 枯渴되어 버린다는 結果가 나와 있다.<sup>1)2)</sup> 또 現在 實用化되고 있는 핵分裂連鎖反應에 의한 熱中性子爐는 우라늄 235 同位元素를 可用燃料로 하고 있기 때문에 에너지資源 자체의 양도 적을 뿐 아니라 우라늄의 地域的인 偏在性, 爐의 安全對策 핵分裂生成物의 處理등과 같이 해결해야할 심각한 문제들이 많아서 점점 기피하는 경향이다.

最近에는 世界各國에서 代替에너지의 開發을 서두르면서 太陽에너지, 波力, 風力, 海洋熱, 潮汐, 地熱, 光合成등의 새로운 에너지源을 찾고 있으나, 이런 種類의 에너지들 역시 그 絶對量이 부족하기 때문에 急速한 에너지需要增加에 대하여는 補助에너지의 役割밖에 할 수 없다. 또 이들은 모두가 太陽으로 부터 地球上에 내려주는 에너지의 간접적인 이용수단을 試圖해 볼려는데 불과하다.

여기에서 우리 人類는 에너지에 대한 發想의 大轉換을 가져와야 할 時期가 到來했다고 보고, 이 發想이야말로 太陽에서 일어나고 있는 反應, 그 자체를 地球上에서 직접 일으켜서 그 에너지

\*正會員 : 慶北大 師大 物理學科 助教授

를 利用함으로써 에너지문제를 근본적으로 해결해 불러는 “제 4의 불” 核融合發電”으로 判斷하고 目下 그 開發에 渾身の 努力을 傾注하고 있는 중이다.

本稿에서는 人類窮極의 에너지源이 될 이 核融合反應의 原理와 燃料需給關係를 밝히고 이 反應이 일어날 조건과 이 反應을 일으키기 위하여 사용될 플라즈마란 무엇이며, 어떤 役割을 하는지를 略述하겠다. 또 현재까지 先進諸國에서 開發해 온 裝置들을 中心으로하여 플라즈마 核融合反應爐의 原理와 실제구조들을 간단하게 紹介하겠으며, 끝으로 核融合發電開發의 現況과 展望 등에 대하여 살펴보기로 하겠다.

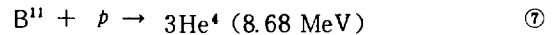
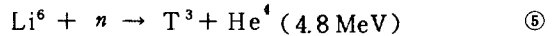
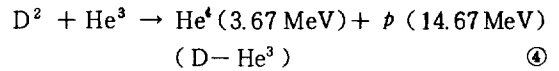
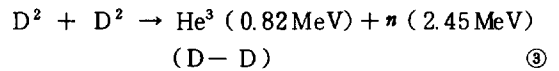
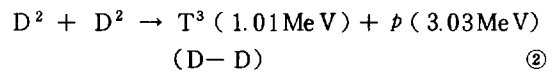
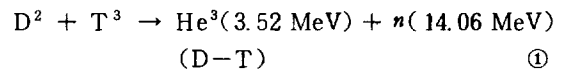
### 2. 核融合에너지 —— 제 4의 불

核反應을 일으킬 때 생기는 質量缺損이 膜大한 에너지로 變換되어 放出되는 것이 核에너지임은 周知의 사실이다. 그런데 質量數가 60부근인 元素들의 原子核이 核子(陽性子, 中性子)間的 結合력이 가장 강하여서 가장 安定한 狀態를 유지한다. 이들로부터 멀리 떨어진 質量수를 가진 元素들, 즉 아주 무거운 元素인 우라늄이나 重水素(D) 三重水素(T)와 같이 가벼운 元素들은 그 原子核이 不安定하게 結合되어 있어서 비교적 쉽게 分裂되거나 融合하면서 核에너지를 放出한다. 가벼운 元素의 原子核들이 融合할때 放出하는 에너지를 核融合에너지라 하고 이 에너지를 利用하려는 裝置가 核融合發電이다.

따라서 核融合發電에 利用되는 燃料은 重水素(D<sup>2</sup>), 三重水素(T<sup>3</sup>), 헬륨-3(He<sup>3</sup>) 및 리튬(Li<sup>6</sup>)들이 된다. 重水素는 地球上에 아주 풍부하게 存在하고 있다. 海水 1m<sup>3</sup> 속에 33g의 D<sup>2</sup>가 存在하며, D<sup>2</sup> 1g으로 石油 50드럼통분인 1만ℓ와 맞먹는 에너지를 얻을 수 있다. 즉 海水中에 平均 158ppm, 그 외의 물속에 140ppm의 비율로 포함되어 있고 分離回收도 비교적 容易하여서 現在에도 河川의 河口부근의 淡水로부터 重水を 抽出하는 플랜트가 稼動되고 있기도 하다<sup>31</sup>. 만일 重水素만에 의한 核融合爐(D-D爐)가 實現된다면 그 에너지源은 무려 3.8×10<sup>9</sup>Q\*나 얻을 수 있

어서, 現在 主宗이 되고있는 에너지源인 化石燃料의 總埋藏量 90Q에 비한다면 가히 永久的인 에너지源이 될 것이다. 또 核融合爐는 核分裂爐에서 發生될 放射性核分裂生成物の 처리나 資源의 地域的인 偏在性등을 고려할 필요가 없으니까 깨끗한 에너지를 세계의 어느 곳에서나 쉽게 거의 無限定 얻을 수 있어서 현재 우리가 直面하고 있는 에너지危機의 공포로부터 解放이 되고도 남을 것이다.

核融合反應中에서 利用可能한 反應을 나타내면 다음과 같다.



여기서 D<sup>2</sup>, T<sup>3</sup>은 重水素, 三重水素이고 p, n은 各各 陽性子和 中性子이며 He, Li, B는 헬륨, 리튬, 보론을 나타낸다. 이 反應에서 放出되는 에너지는 한 개씩의 원자핵들이 融合했을 때의 값이며, MeV는 10<sup>6</sup>electron volt 인데 에너지단위의 일종으로 1MeV=1.6×10<sup>-13</sup> 줄울 ≈ 1.6×10<sup>-16</sup> BTU이다. 이 각 反應의 反應斷面積을 조사해보면 ①反應이 다른 反應에 비하여 크기 때문에(②③反應의 약 100배)에너지發生量도 크다.<sup>4)</sup> 따라서 이 D-T 反應에 의한 核融合爐를 達成시키기가 가장 容易함으로 이것을 “第1世代核融合爐”라고 부른다. 그러나 核融合發電에 가장 풍부한 燃料이 D<sup>2</sup>라는 것을 전제로 했고 自然에는 T<sup>3</sup>가 存在하지 않기 때문에 結局은 ②③과 같은 反應에 의한 發電이 成功되었을 때 비로소 實用的인 發電이 이루어질 수 있다. 그러므로 D-D反應에 의한 이러한 爐를 “第2世代核融合爐”라고 하며 그 나머지를 “第3世代核融合爐”라고 부르고 있다.

이들 核融合反應을 着火시킬 조건에 로-손(Lawson)조건이라는 것이 있는데, 가벼운 두核이 서로 融合을 이루기 위하여는 核들이 가진 電荷로 形成되는 쿨롱장벽을 뛰어넘어서 核力の 영역속으로

\* 1Q = 10<sup>18</sup> BTU (British Thermal Unit)  
= 1.05×10<sup>21</sup> 줄울

들어가도록 충분한 에너지를 주어야한다. 이 조건을 만족시키기 위하여 다음節에서 설명할 플라즈마를 高温 高密度로 하여서 一定한 容器속에 一定時間이상 가두어 (confine) 두어야 하는데, 로-손에 의하여 얻어진 이 着火조건은 다음과 같다<sup>5)</sup>.

$$n\tau = \frac{3T}{\frac{\eta}{1-\eta} \frac{Q_T/e}{4} \langle \sigma v \rangle - \alpha T^{1/2}} \quad (1)$$

여기서  $n$ ,  $T$ 는 플라즈마의 밀도 및 온도,  $\tau$ 는 플라즈마가 가두어지는 시간 (confinement time 이라함)을 말한다.  $\sigma$ 는 反應斷面積,  $v$ 는 各元素이온의 속도,  $\langle \sigma v \rangle$ 는 그 平均值,  $Q_T$ 는 反應後 生成된 에너지,  $\eta$ 는 發電效率,  $\alpha$ 는 이온電荷( $Z$ )의 자승에 비례하는 양으로  $\alpha = 9.4 \times 10^{-20} Z^2 [W/m(eV)^{1/2}]$ 이다.  $\langle \sigma v \rangle$ 는 온도  $T$ 만의 함수임으로 (1)식은  $n\tau - T$ 관계의 다이어그램으로 그릴 수 있다. (그림 5 참고)  $\eta = 1/3$ 로 했을 때 着火조건을 만족할 플라즈마狀態를 이 다이어그램으로부터 算出해보면 대략  $T \approx 10\text{KeV}$  (약 1억도)에서  $n\tau > 10^{14} \text{cm}^{-3} \cdot \text{sec}$ 가 되어야한다는 것을 알 수가 있다. 地球上에서 이와같은 조건을 만족하면서 그 狀態를 유지시킬 가능성이 있는 唯一한 物質은 바로 플라즈마 뿐이다.

### 3. 플라즈마(Plasma) - 제 4의 物質狀態

플라즈마는 物質중에서 가장 高温을 나타낸다. 物質을 熱的狀態에 따라서 固體, 液體, 氣體의 三態로 나누고 있으나 氣體를 다시 높은 溫度로 加熱시키면 電離되면서 獨特한 物理的性質을 나타내는 “第 4의 物質狀態”가 얻어진다. 이것이 플라즈마인데 높은 에너지狀態를 유지하고 있으므로 地球上에서는 좀처럼 이런 物質을 대면하기가 쉽지 않다. 固體를 液體로 혹은 液體를 氣體로 變換시키기 위하여는 1分子當 불과 0.01eV 정도의 에너지만으로는 充分하나 中性氣體原子를 電子와 이온으로 電離시켜서 플라즈마로 만드는데에는 1原子當 적어도 수십 eV나 되는 에너지가 필요하다. 그러므로 밀도가 크고 低温狀態인 地球 가까이에서는 플라즈마를 보기가 어렵지만 地球大氣圈을 벗어나서 宇宙空間이나 恒星光지도 모두가 플라즈마狀態

로 되어있어서 宇宙의 99%가 플라즈마이며 地球에게 모든 에너지를 供給해주는 太陽도 플라즈마가 密集된 狀態로 이루어져 있다. 따라서 地球는 플라즈마로 된 거대한 바닷물 속에 생긴 한 개의 작은 氣泡과 같이 생각할 수도 있겠다.

플라즈마란 말은 희랍어에서 그 語源을 찾을 수 있는데, 造物主에 의하여만 만들어질 수 있는 神秘스러운 半流動性物質을 의미한다. 近代科學에서는 物理學에서보다 生物學이나 醫學에서 原形質이나 血漿이라는 뜻으로 먼저 사용되어 왔다. 物理學이나 電氣工學에서는 1929년에 Langmuir 에 의하여 이 말이 처음 사용되었는데, 그는 氣體放電 現象에서 높고도 特有的 振動이 일어나는 것을 發見한 후에 이 現象의 多樣性和 神秘性에 魅了되어서 이것을 플라즈마狀態라고 처음으로 命名하게 되었다. 결국 플라즈마를 定義하면서 “正電氣를 띤 粒子(이온)와 負電氣를 띤 電子가 거의 같은 密度로 섞여져 分布되어 있어서 全體적으로는 電氣의 中性을 維持하면서 一樣하게 分布되어있는 粒子集團”이라고 말할 수 있다. 一種의 電離氣體를 말하나 電離氣體라고 해서 모두가 플라즈마일 수는 없으며 충분히 큰 밀도이면서 충분한 에너지를 가지고 運動하는 荷電粒子群을 말한다. 그 基準은 巨視的觀點과 微視的觀點에서 조사할 수 있지만 더 자세한 설명은 省略하겠다. <sup>6)</sup> 따라서 核融合發電은 地球上에서 가장 高温인 이 플라즈마를 發生시켜서 一定한 空間안에서 一定時間동안 큰 밀도로 가두어 넣고 太陽에서 일어나는 反應과 같은 反應을 연속적으로 일으켜서 龐대한 에너지를 얻어내려는 試圖인 것이다.

### 4. 플라즈마 核融合裝置

이와같이 플라즈마를 一定한 容器속에 가두어넣고 核融合反應持續에 필요한 狀態로 유지시키는 것을 가둠 (confinement) 이라고 하는데 가둠方式은 慣性가둠과 磁界가둠으로 大別할 수 있고, 核融合裝置도 이러한 가둠方式이나 磁界容器的 構造에 따라서 여러가지로 細分할 수 있다. 여기서는 現在 核融合爐의 實現에 展望이 좋은 몇가지 裝置를 中心으로하여 그 原理와 構造를 간단히 소개하기로 하겠다.

4.1 慣性가둠(Inertial Confinement)方式

이 方式은 플라즈마를 가둔다기보다는 작은 固體燃料 (pellet) 에 強力한 빔 (laser beam, ion beam, 相對論的 電子 beam) 을 四面八力에서 同時에 入射시켜서 그 燃料을 爆縮시킴으로서 그 속 에 충분한 溫度와 密度의 플라즈마를 얻어서 核融合反應을 成就시킬려는 原理이다. 標的燃料로 여러가지 構造가 高안되어 있으나 현재 一般화된 最適의 構造는 그림 1과 같이 半徑 100 $\mu\text{m}$  程度의 속 이 빈 유리球이다.

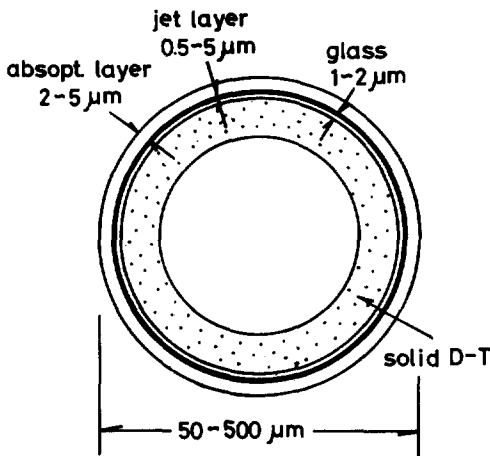


그림 1. 慣性核融合反應을 위한 固體燃料의 一般 構造

표 1. laser 核融合爐의 設計例 ?

項 目	값
熱 出 力	1,200 MW
電 氣 出 力	460 MW
內 部 循 環 電 力	80 MW
純 電 氣 出 力	380 MW
綜 合 効 率	32 %
laser energy	1 MJ
laser 効 率	2 %
laser beam 數	4개
펄 스 반 복 율	1.5 Hz
Pellet 利 得	700
放 出 energy *	700 MJ
T 增 殖 材	Li

\* 1 回의 小爆發에서 放出되는 核融合에너지

數年前 LLL (Lawrence Livermore Lab.)의 研究팀이 computer simulation 에 의하여 固體燃料의 構造와 照射 laser 사이의 相互作用을 研究하여 이 結果를 背景으로 하여서 爐의 設計를 完成했다. 이와같이 얻은 laser 核融合爐의 代表的인 設計例는 표 1과 같다.

이와같이 強力한 빔에 의한 플라즈마 爆縮實驗이 開始된 것은 오래되지 않았지만 로-손조건에 도달할 有望한 裝置로 보고 그 研究開發이 활발하게 進行되고 있다. 그러나 이 裝置에 의한 核融合開發에도 몇 가지 難點을 가지고 있는데 그 중에서도 超高出力 laser 나 粒子 beam의 開發, 連續加熱方式의 效率的 改善, 高利得燃料 pellet 의 設計開發 등이 解決해야 할 큰 課題로 남아 있다.

4.2 磁界가둠(Magnetic Confinement)方式

이 方式은 다시 磁界構成의 形狀에 따라서 열린계 (open system), 닫힌계 (closed system), 그리고 핀치 및 포커스 (pinch & focus)로 나눌 수 있는데 이들 각계를 다시 細分하면 수십종류의 核融合裝置가 현재까지 研究考案되어 있다. 紙面關係上 本稿에서는 각 계중에서 가장 有望視되고 있는데 裝置를 한 가지씩 들어서 그 原理 및 構造를 간단히 說明하겠다.

① 닫힌계 (closed system)

이 系는 磁力線이 한 圓環을 中心으로 그 주위에 螺線을 그리하면서 휘감겨 도너츠와 같은 環形을 이루면서 닫혀져 있다. 이 磁界系를 다시 나누면 Tokamak, Stellarator, Heliotron, Levitron, Multipoles, Bumpy Torus, Compact Torus, Spherator 등이 있고, 약간씩의 構造變化에 따라서 다시 더욱 細分될 수도 있어서 20여종이나 된다. 이 중에서 현재 가장 좋은 成果를 얻고있는 裝置는 Tokamak 와 Stellarator 인데 여기서는 Tokamak 만을 살펴보겠다.

전형적인 Tokamak의 原理 및 構造는 그림 2와 같다. 이 그림에서 토러스狀으로 된 円의 中心을 통하고 토러스에 수직한 軸인 가장 中央의 큰 軸을 主軸 (principal axis)이라 하고 플라즈마가 있는 圓環部分의 中心軸을 副軸 (subaxis)이라고 한다. 그림의 1 次코일에 電流를 펄스적으로 흘리면 變流器의 鐵心요크의 磁束이 變化하여서 2次卷線에 해당되는 副軸方向으로 플라즈마를 發生시키면서 電流를

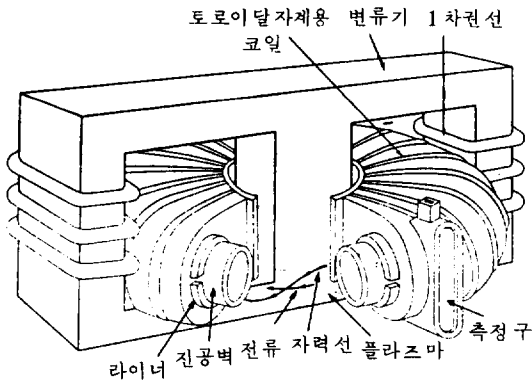


그림 2. Tokamak 裝置

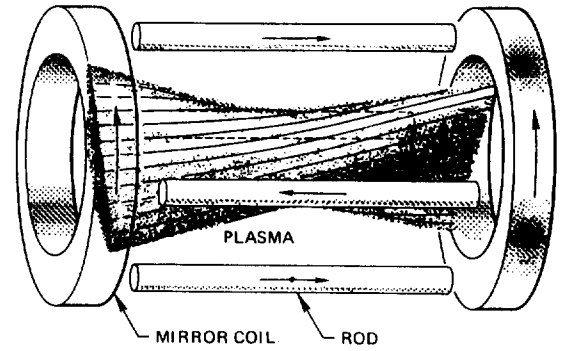


그림 3. Ioffe미러 磁界의 原理

誘起시킨다. 이 電流에 의하여서 플라즈마기둥 주위에 磁界  $B_\theta$  가 생기면서 플라즈마를 조여준다. 이  $B_\theta$  를 폴로이달 (poloidal) 磁界라고 한다. 또 그림 2에서 보는 바와 같이 토러스코일들에 電流를 흘림으로써 主軸주위의 大圓方向으로 磁界  $B_R$  을 形成시키는데 이것을 토로이달 (toroidal) 磁界라고 한다. 이 토로이달 磁界 ( $B_R$ ) 와 폴로이달 磁界 ( $B_\theta$ ) 가 結合되면서 磁力線이 副軸주위에 螺線을 그리면서 主軸주위를 감는 磁界를 구성하게 되는데 이것이 Tokamak 를 비롯한 닫힌계 磁界의 基本構成이다. 실제 장치에서는 플라즈마에서 생길 수 있는 몇가지 不安定性을 방지하기 위하여 主軸과 平行한 上下方向으로 垂直磁界도 걸어준다.

이 장치는 1969년경에 소련에서 처음 開發한 장치로서<sup>8)</sup> 플라즈마 자체가 가진 임피던스에 의하여 플라즈마를 주열가열시키는 효과도 있기 때문에 磁界가둠方式核融合장치중에서 가장 有望視되고 있는 것이며 현재 先進각국에서는 大型 Tokamak 장치를 건설하여 完成단계에 있는데 자세한 설명은 6節로 미루겠다.

② 열린계 (open system)

이 계에서는 플라즈마를 통과한 磁力線이 장치의 밖에까지 연장된다. 이 계의 대표적인 것으로는 미러 (magnetic mirror)가 있고 그 외에도 커스프 (cusp), 미러의 變形인 baseball seam 磁界, ying-yang (陰陽) 磁界, 등이 있는데 최근에는 탠덤 (tandem)미러도 개발되어 있어서 脚光을 받고 있다.

그림 3에 대표적인 미러 磁界의 構成原理를 나타낸다. 그림과 같이 두 개의 同軸圓코일에 같은 方

向으로 電流를 흘리면 두 코일사이에서 실배 (bobbin)모양의 磁界가 形成되는데 이 경우를 단순미러 (simple mirror)라고 한다. 여기에 그림과 같이 두 코일사이를 가로 지르면서 직선전류를 같은 간격이면서 서로 이웃하는 電流가 反對方向이 되도록 흘려주면 두 원코일의 同軸위 中心부근에서는 極小磁場 (minimum B) 즉 磁氣우물 (magnetic well)이 形成되면서 플라즈마粒子들을 捕獲함은 물론이고 몇가지 不安定性까지 防止할 수 있도록 만든 裝置이다. 이전 방식은 소련의 Ioffe라는 사람이 처음 考案했기 때문에 Ioffe磁場이라고도 한다.<sup>9)</sup> 최근에는 이러한 미러를 直列로 하여 플라즈마損失을 더욱 줄이고 加熱方法도 改善시킨 各種 탠덤미러도 先進國들에서 開發中에 있다.

③ 핀치 및 포커스 (pinch & focus)

圓筒形板코일에  $\theta$  方向이나 Z 方向으로 강력한 펄스電流를 흘려 줌으로서 圓筒속에서 壓縮되는 安定한 플라즈마를 얻을려는 장치가 핀치이다. 電流의 方向에 따라서  $\theta$ -핀치와 Z-핀치로 나눌 수가 있다. 이 장치의 특징은 플라즈마가 압축됨으로 磁氣壓에 대한 플라즈마壓의 比인  $\beta$  比가 아주 높기 때문에 高溫 高密度이면서 상당히 安定한 플라즈마狀態를 얻을 수 있는 反面에 가둠시간이 짧은 것 (수  $\mu$ s)이 결점이다. 이러한 線形핀치장치는 兩端에 開放端을 갖고 있어서 심한 플라즈마端損失 (end loss)을 가져오기 쉽기 때문에 이러한 缺點을 補完하기 위하여 토카마크형핀치, 나사식 (screw)핀치, 擴散핀치, 高  $\beta$ -stellarator 등과 같이 토러스化한 핀치장치들도 開發되어 있다.

포커스장치는 同軸인 두 圓筒을 電極으로 하여 역시 강력한 펄스電流를 흘려주면 두 電極사이

放電이 形成되면서 이 放電電流과 그 주위에서 생기는 磁場 사이에  $\vec{j} \times \vec{B}$ 인 힘을 作用시키면서 플라즈마를 모두 한 곳에 집중시키는 장치이다. 따라서 高温, 高密度의 플라즈마를 얻을 수 있으나 가동시간이 짧은 것이 또 한 缺點이다. 最近에는 포커스의 효과를 더욱 높이도록 하기 위하여 두 포커스가 마주보는 양쪽에서 물려와서 한 곳에 集中되도록 한 hypocycloidal pinch(HCP)장치와 같은 것도 개발되어 있다.<sup>10)</sup> 이 장치를 여러겹 포개어서 사용할 경우에 특수한 파장의 Laser를 강력하게 펌핑시킬 수 있는 가능성을 보여 준 研究도 있다.<sup>11)</sup>

### 5. 核融合發電의 實際와 問題

앞 節에서는 各種 플라즈마 가동方式에 대하여 論議해 왔으나 이러한 方式에 의하여 核融合反應을 일으켰을 때 그 에너지는 어떤 系統의 과정을 거쳐서 실제로 發展에 이용할 수 있을까? 본 節에서는 이 核融合爐의 構成에 대하여 지금까지 檢討된 概念設計를 中心으로 살펴보겠다. 물론 이 概念設計가 나오기까지는 核融合爐에 필요한 技術을 精確히 판단하여서 현재의 기술수준과의 差를 검토하고 技術開發項目을 算出하는 등 세밀한 분석과 검토를 거쳐왔다.

플라즈마 가동方式에 따라서 爐의 構成의 약간씩 달라질 수도 있겠으나, 基本的構成은 거의 같다. 불필요한 혼란을 피하기 위하여서 本節에서는 그림 4와 같이 磁界가동方式에 따른 爐의 一般的構成을 살펴보겠다.

D-T爐를 例로 든다면 爐心에는 D와 T를 각각 50%씩 포함하는 超高温플라즈마가 있다. 이 超高温플라즈마는 不純物이 混入되는 것이 절대 금물이므로, 플라즈마는 眞空系에 의한 高眞空의 容器속에 들어 있어야만 된다. 플라즈마 및 眞空을 維持시킬 容器壁을 제 1벽(first wall)이라고 하는데 超高温플라즈마의 일부가 擴散하여서 이 벽에 충돌하면 벽에 손상을 가져와서 벽의 수명을 짧게 함은 물론 플라즈마 속으로 不純物이 混入되어 들어가기 때문에 divertor 나 gas blanket와 같은 장치가 설치되어야 한다. 이 blanket는 核反應中에서 生成되는 高에너지의 中性子를 흡수하여 熱에너지로 變換시키는 部分인 동시에, 날라온 中

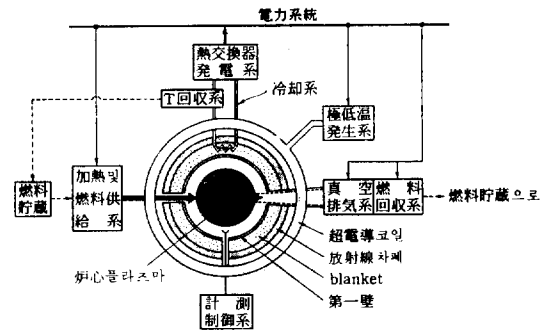


그림 4. 核融合爐의 概念設計構成

性子和 리튬(공급됨)의 反應에 의하여 天然에 存在하지 않은 T<sup>3</sup>를 生産하여서 D-T爐의 燃料로도 사용한다.

blanket 밖에는 高速中性子나  $\gamma$ 선을 차폐하는 차폐층(shield)을 두고, 그 밖에 플라즈마 가동용의 磁界를 발생시킬 超電導코일(superconducting coil)이 설치된다. 이와 같은 장치에서 blanket로부터 發生한 熱을 熱交換器와 發電機를 利用하여서 電力으로 變換시킬 수 있다. 그 밖에도 冷却系, blanket에서 生産된 T의 回收系, 超電導코일을 冷却시킬 極低温發生系, 燃料供給系, 計測·制御系 그리고 超高温플라즈마狀態를 持續시키기 위한 加熱裝置 등도 爐의 構成에 포함된다.

以上에서는 爐시스템의 構成을 알아보았는데 아직은 概念設計에 지나지 않기 때문에 해결해야 할 技術의 問題가 많이 남아 있다. 이들을 爐시스템을 構成하고 있는 要素에 따라서 爐心플라즈마, 제 1벽 및 構造材, blanket 및 차폐층 그리고 超電導코일 등 4部分으로 大別하여서 各各의 問題點들을 略述하겠다.

核融合爐의 爐心은 超高温플라즈마이기 때문에 이 플라즈마를 만드는 個個의 粒子는 平均적으로 가동시간에 相當하는 時間만 爐心에 남아있고 擴散에 의하여 爐心으로부터 달아난다. 定常 및 準定常 形爐에서는 잃어버리는 量에 相當하는 새 燃料을 補給하여 주어야만 플라즈마 밀도를 一定하게 유지시킨다. 그러므로 爐心플라즈마에 있어서는 燃料의 보다 有效한 供給, 供給된 燃料이 冷却되지 않게 플라즈마를 加熱시키는 方法의 開發, 그리고 爐心으로부터 달아나는 플라즈마의 處理 등이 問題가 된다.

제 1벽 및 構造材는 高温플라즈마와 가장 가깝

게 있고 核融合反應에서 發生하는 生成物( $\alpha$ 입자, 중성자, X선,  $\gamma$ 선)과 가장 접촉이 심한 곳이므로 超高温에서 잘 견딜은 물론 腐蝕性에 강한 材料를 開發해야 하는 것이 가장 큰 과제이다. 다시 말하자면 제 1벽재료를 선택함에 있어서는 기계적, 화학적, 열적 및 원자핵적인 諸特性을 충분히 고려해 넣어야만 하겠다.

blanket와 차폐판은 高速中성자를 받아서 熱로 變換시키는 機能, 燃料인 T를 增殖시키는 기능, 超電導코일에 中성자나  $\gamma$ 선의 照射를 받지 않도록 차폐하는 기능 등 3가지의 기능이 있다. 이 세 가지 기능을 가장 잘 만족시킬 材料개발 및 그 特性에 관한 研究가 이루어져야 할 것이다. 현재까지 研究된 결과에 의하면 리튬(Li)이 가장 有望한 것으로 되어 있다.

爐의 最外部에 플라즈마 가둠용 磁界를 發生시킬 超電導코일이 설치된다. 電氣出力 2000 MW급의 實用爐에서 銅코일을 사용하여 磁界를 發生시킨다고 할 때, 코일 勵磁電力은 2400 MW가 된다는 계산이 나올 정도이기 때문에 核融合爐에서는 超電導코일의 사용이 불가피하다고 하겠다. 이 경우에 冷凍機의 운전電力이 필요하지만 爐出力의 數%정도라도 충분하기 때문에 全體 電力균형을 크게 해치지 않는다. 따라서 超電導코일의 개발 및 極低溫物性材料에 관한 技術研究가 필수적으로 따라야 할 것이며 이 문제를 解決하기 위하여는 다른 分野의 學問과도 밀접한 協助가 이루어져야 할 것이다.

慢性가둠方式에 의한 核融合爐開發에 있어서 問

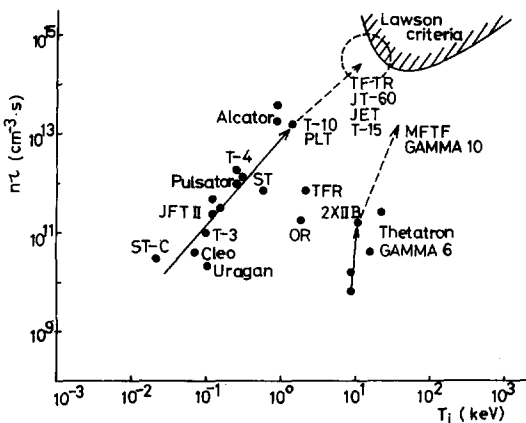
題點들은 4節 4.1의 마지막 부분에서 간단히 기술한 바 있어서 여기서는 더 자세하게 설명하지 않겠다.

### 6. 核融合發電의 現狀과 展望

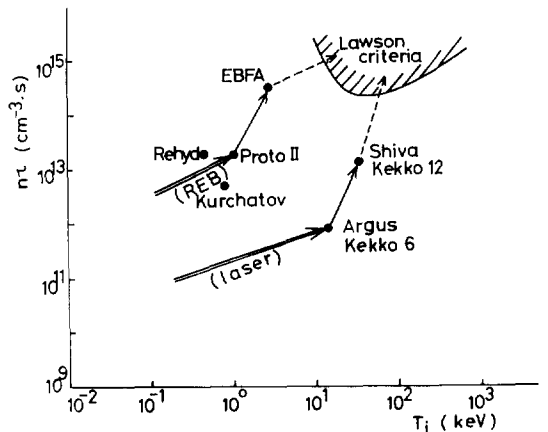
이와같은 必然性을 가진 核融合爐開發은 어떤 과정을 거쳐서 현재 어디쯤 와 있으며, 앞으로는 어떤 方向으로 어떻게 進行해 갈 것인가를 先進國들의 計劃을 참고로하여 살펴보겠다.

核融合研究가 비밀의 베일로부터 벗겨져서 國際的인 研究情報의 交換이나 協力が 이루어지기 시작한 것은 1958년에 열린 第2回 原子力平和利用 國際會議의 核融合分科會에서 부터였다. 이 때를 기점으로 하여서 核融合研究에 관한 國際協力과 競爭이 시작되었고, 核融合에너지를 制御시켜서 平和的으로 利用하려는 努力의 댓가로 많은 發展을 해왔다. 그 이후에 每4年 내지 2年마다 定期的으로 “플라즈마物理學 및 制御核融合研究”라는 제목의 國際會議가 IAEA의 主體로 열리고 있는데, 昨年(1982年) 9月 1日~8日에는 第9回 會議가 美國의 Baltimore市에서 열려서 많은 研究成果가 發表되었다. 筆者도 이 學術會議에 參席한 바 있는데 자세한 內容은 다른 文獻을 참고하면 되겠다.<sup>12),13)</sup>

현재까지 各種 核融合研究의 進展을  $n\tau - T_i$  다이어그램위에 나타내어보면 그림 5와 같다. (a)는 磁界가둠方式에 의한 裝置들의 發展과정인데, 낮은 溫度이면서  $n\tau$ 가 큰 쪽의 시리즈가 닫힌系



(a)



(b)

그림 5. 核融合研究의 發展과정

들이고 높은 溫度이면서  $n\tau$ 가 낮은 쪽의 시리즈가 열린系들이다. 닫힌系의 아랫쪽의 장치들은 初期에 개발되어 온 stellarator 들이고 윗 쪽의 것들이 주로 Tokamak 들이다. (b)는 慣性가둠方式에 의한 장치들의 發展과정이다. 實線이 지금까지 달성된 결과이고 點線은 앞으로 곧 이루어질 目標를 나타낸다.

결국 磁界가둠方式中에서 지금까지 가장 좋은 결과를 얻어낸 장치는 Tokamak 인데, 미국의 PLT, ORMAK, Alcator, Doublet III (美日合同研究)들과 소련의 T-4, T-10, 日本의 JFT IIa, 서독의 pulsator, 프랑스의 TFR 들이 개발되었다. 이들중에서 PLT와 T-10들은 Lawson 조건의 바로 일보 직전 상태에 까지 와 있음을 알 수 있다.

따라서 이 Tokamak 장치가 임계플라즈마 核融合을 성공시킬 가장 유망한 장치로 보고 1970年代 후반에 들어서서 先進國 4그룹이 大型 Tokamak 試驗爐를 設計하여 현재 그 건설이 거의 完成단계에 있다. 미국의 TFTR, 일본의 JT-60, 유럽 공동체(EC)의 JET, 그리고 소련의 T-15가 그것들인데, 이들은 모두 Lawson조건을 만족시켜서 地上에서 처음으로 核融合爐를 點火시켜보자는 것들이다. 이 중에서도 일본의 JT-60과 미국의 TFTR이 건설진도가 가장 빠른 것으로 알려져 있어서 아마 금명간에 반가운 소식이 있을 것으로 기대된다. 그림 6은 일본의 JT-60의 조감도인데, 1977년부터 본격적인 제작에 착수하여서 현재 건설이 거의 完成단계에 있으며 그에 산은 韓貨로 換算하여서 무려 1兆원이나 되는 거대한 장치이다.

미러장치도 Tokamak 못지않게 좋은 成果를 얻고 있으며 특히 미국 LLL의 ZX IIB나 일본의 GAMMA 6들은 1970년대 중반에  $T_e \approx 10 \text{ KeV}$ ,  $n \approx 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ ,  $\tau \approx 1 \text{ ms}$ 를 얻고 있어서 이것을 근거로 하여서 MFTF나 GAMMA 10 개발에 더욱 많은 投資와 努力을 기우릴 計劃에 있다. 이 새로운 장치들은 미러장치에 있어서 가장 큰 결점인 플라즈마損失을 줄이고 加熱方法도 改善시킨 tandem mirror (tandem mirror)장치로서 종래의 미러장치에 비하여 그 성능이 월등히 우수한 것이다.

慣性가둠方式은 가둠용 磁界가 필요하지 않은 특징이 있지만 爆縮의 物理 및 에너지收支가 좋은 強力에너지 드라이버 (超高出力레이저나 荷電粒子

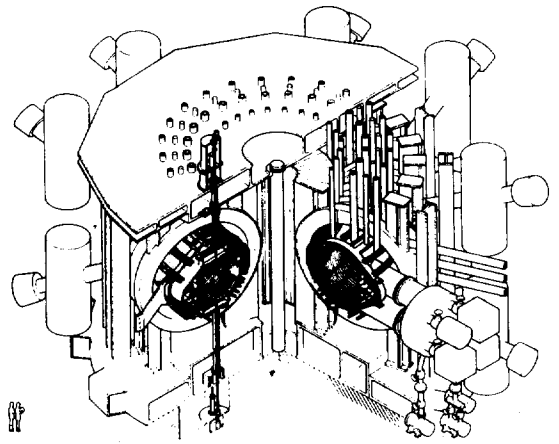


그림 6. 일본의 大型核融合爐 JT-60

빔 發生裝置)의 開發등이 가장 중요한 문제로 남아있다. 현재, 보다 高出力の 레이저를 開發하면서 좋은 成果를 얻고 있는 곳은 미국의 LLL과 일본의 大阪大學들로서 각각 Shiva計劃과 Kekko (激光)計劃에 따라서 착실히 研究를 進行하고 있다. 強力한 荷電粒子빔을 이용한 核融合研究는 지금까지 주로 相對論的電子빔(REB)을 이용하여 왔으나 이온빔源의 개발도 급피로 이루어지고 있다. 지금까지는 Sandia Lab에서 Proto II로써 얻은 결과가 가장 좋고, 앞으로도 계속하여 EBFA計劃을 추진하고 있다.

이상을 綜合하여 보면 核融合研究의 世界的인 動向이 大型 Tokamak 에 의한 科學的實證의 實現을 우선의 最大과제로 삼고 있으며, 현재 4大그룹에 의하여 이 과제를 해결하기 위한 研究開發이 活潑히 進行되고 있음을 알 수 있다.

1979년에는 IAEA에서 주관하여서 이 4그룹이 전문가를 각각 4명씩 참석시켜 10주에 걸쳐서 4번이나 회합을 가진 후 위의 4大 Tokamak 보다 더 큰 實驗爐를 설계제작하기로 합의하고 각 그룹별로 현재 설계중에 있다. 그것은 INTOR라는 장치로서 가히 全世界가 共同참여하고 있다고 봐도 될 계획이다. 이 워크·샵은 페이스·제로 I부터 출발하여서 II-A단계에까지 와 있는데 이 과정에서는 각 그룹이 홈·워크 형식으로 가져가서 各己의 案을 設計해보는 기간이었다. 금년 중반부터는 페이스 II-B로 들어가서 實驗전문가를 포함한 새 조직 (디자인 센터)의 設置가 계획되고 있다. 그렇



게 되던 지금까지의 構想이 綜合되면서 爐工學의 인 여러가지 문제를 포함한 技術的인 제반 문제까지 포괄되어야 할 것이다. 이러한 技術的 實證實驗을 위한 裝置의 構想에 대하여 위의 4 그룹은 1980년부터 1981년에 걸쳐서 차례로 장래계획을 발표한 바 있다. 미국의 FED, 일본의 FER, EC의 NET, 소련의 T-20 (이 장치는 핵융합로 자체개발과 겸용임)들이 그것들인데 각기 1990年代中에 實驗開始할 것을 目標로 하고 있다.

이와같이 全世界가 참여하여서 核融合發電을 위한 基本原理를 비롯하여 高温플라즈마를 거두거나 加熱시키는 物理的인 문제, 技術的인 제반문제들을 포함한 多角度的 研究가 進行되고 있으며, 많은 人的·物的資源이 投入되어서 꾸준히 努力하고 있는 限 멀지않은 장래에 우리 人類은 地球上에 小太陽을 여러개나 所有하여 에너지문제로부터 완전히 해방된 地上樂園을 이룰수 있으리라고 믿는 바이다.

## 7. 맺는말

지구상에서 멀지않아 在來式 에너지資源이 枯竭될 경우를 생각한다면 누가 먼저 새로운 世代에 대응할 수 있는 에너지源을 개발하느냐에 따라서 世界의 版圖가 左右될 것이다.

그래서 先進諸國은 면밀한 검토를 거친 후에 다가올 世代의 에너지主役은 플라즈마核融合 反應에 의한 에너지가 된다고 판단하여 이의 개발연구에 온갖 심혈을 기울이고 있다. 이런 反應은 自然에 實存(太陽에서와 같이)하고 있는 現象인 만큼 지금과 같이 人間이 強力하게 도전한다면 地上의 太陽이 기필코 달성될 수 있을 것이다.

第4의 物質狀態로 第4의 불을 밝힐날이 반드시 올 것으로 확신한다.

이 核融合反應에 의한 에너지開發에 있어서 해결해야 할 과제도 많고 많은 財源과 두뇌를 필요로 하기 때문에 우리나라에서 研究한다는 것은 時期尙早라고 할지 모르겠으나, 이미 다른나라에서 成功한 후에 우리가 出發한다는 것은 너무 늦을 것이며, 다시 에너지문제로 더욱 큰 衝擊과 試練을 받게 될 것이다.

따라서 늦긴하지만 지금부터라도 이 分野의 研究가 始作이 되어서 先進國과의 격차를 한치라도 좁혀가는 것이 다행인 世代에 또 다시 에너지문제로 混亂을 겪는 일을 防止할 捷徑임을 밝혀 두는 바이다.

## 參考文獻

- 1) C. L. Wilson; Energy, Global Prospects 1985—2000, Report of the Workshop on Alternative Energy Strategies, WAES by Massachusetts Institute of Technology, McGraw-Hill, New York, 1977.
- 2) D. M. Considine(ed.); Energy Technology Handbook, McGraw-Hill, New York, 1977.
- 3) 島貫 良一; Energy, 59 (7) 1974.
- 4) H. R. Hulme; Nuclear Fusion, Wykeham Publications(London) Ltd., 1969.
- 5) J. D. Lawson; Proc. Phys. Soc. (London), 6 (B70) 1957.
- 6) F. F. Chen; Introduction to Plasma Physics, Plenum Press, New York, 1974.
- 7) J. A. Maniscalco, et al; Technical digest at the topical meeting on inertial confinement Fusion, paper WC3, (San Diego), 1978.
- 8) Int. Conf. Proc. of Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research, Madison, June 17—23 in 1971, IAEA, Vienna 1971.
- 9) Yu. B. Gott, M. S. Ioffe and V. G. Telkovsky; Nuclear Fusion Suppl. 1045(3) 1962.
- 10) Ja H. Lee, D. R. McFarland and F. Hohl; Phys. Fluids, 313 (20) 1977.
- 11) 박덕규, 한광수, 이자현 : 새 물리(한국물리학회지), No. 1 (23) 1983.
- 12) 박덕규 : 새 물리(한국물리학회지), (23) 1983 (계재예정)
- 13) Int. Conf. Proc. of Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research, Baltimore, Sept. 1—8 in 1982.