

核融合爐研究開發의 現況

# 核融合開發의 概況과 將來

## 核融合爐의 實現

1955년부터 시작된 核融合 研究의 중심과제는 爐心이 되는 超高温度 플라즈마의 性質, 특히 이것을 壁에서 떨어지게 하여 磁界中에 安全하게 밀폐시키는 方法에 대해 基礎적으로 다루는 것이었다. 따라서 이와같은 高温의 플라즈마를 어떻게 發生·加熱시켜서 安全하게 밀폐시키는가에 대한 새로운 개념의 方式과 裝置가 여러 가지로 考案되어, 그 實現에 必要한 새롭고 또한 高度의 技術의 要求가 생겼다. 즉, 大型이며 精密한 強磁場磁石(超電導를 포함), 大型超高眞空, 大電力高速制御, 시뮬레이션, 解析用 大型高速電子計算機, 強力레이저·粒子線, 大電力高周波發振器, 各種 診斷機器 등이다.

長期間에 걸친 實驗·理論·技術의 協力으로 최근의 實驗計劃은 모두 豫想대로 매우 좋은

結果가 얻어지고 있으며 現在는 爐心の 最終目標인 自己點火條件 直前인 臨界플라즈마條件(入·出力의 均衡)의 實現이 確實視되는 단계에까지 도달하였다. 그림1은 爐心플라즈마의 性能을 나타내는 {(플라즈마密度) × (밀폐시간)}과 플라즈마 温度에 대한 各方式에서의 進展을 보여 주는데 Tokamak 방식이 가장 현저하게 進歩하였음을 알 수 있다.

또한 그림2는 長期間에 걸친 核融合豫算의 推移를 나타내고 있다. 1975년을 前後하여 日本과 美國에서 急増하고 있는 것은 전망이 밝아지고 研究가 活發化되었으며 裝置들이 大型化되었기 때문이다. 그림에는 나타나 있지 않으나 EC는 美國과 日本의 中間에 위치하며, 소련은 1960年代까지는 美國을 능가하는 추세였으나 지금은 상당히 低下되어 있다고 推定된다.

한편 研究投資는 大型이 되

고 있으나 各國은 모두 不況으로 건축재정하에 있으므로 인해 研究計劃의 중복을 피하고 國際協力에 의한 效率化를 추진하려는 경향이 강해지고 있다.

## 爐心研究方式

爐心에 대한 研究는 현재 몇 가지 방식이 동시에 추진되고 있다. 이것은 原子力(原爆) 開發에서의 맨하튼計劃이나 宇宙開發과 같이 처음에 몇가지의 案을 병행시켜 여러가지 知識의 複合化를 도모하면서 점차로 優劣을 판단하여 범위를 좁혀나가는 과정을 겪고 있는 것이다. 自主開發이므로 海外에서 確定된 하나의 方式을 導入하는 것과는 다르다.

그림3은 美國, 日本, EC, 소련 등 世界4그룹이 爐心の 方式에 대해 어떻게 노력하는가를 나타내고 있다. EC와 소련은 어느정도 범위를 좁혀 선

백하고 있음에 비해 美國과 日本은 폭 넓게 취급하는 경향이 다. 그러나 世界에서 공통적인 것은 Tokamak型에 注力하고 있으며 各國 모두가 여기에 研究總額의 2/3를 투입한다는 사실이다.

Tokamak에 의하면 現在의 技術을 使用하여 臨界條件의 炉心플라즈마 實證 (Scientific feasibility experiment)이 달성될 전망이 밝아 日本은 1985年 完成을 목표로 JT-60의 建設을 추진하고 있다.

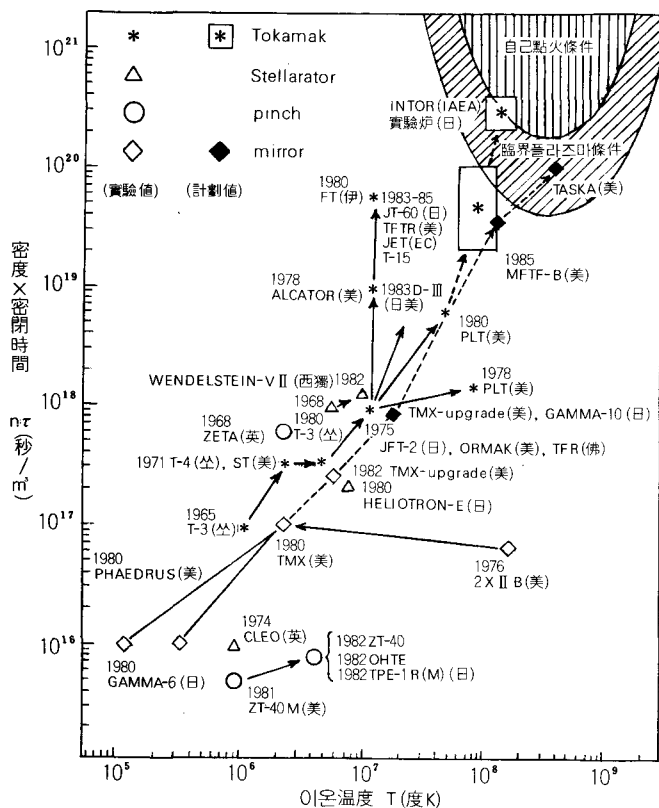
Tokamak方式의 문제점중 하나는 이것이 誘導電流를 加熱·밀폐하는 것을 기본으로 利用

하므로 pulse運轉을 本質로 한다는 점이다. 최근에 高周波에 의해 電流를 驅動하는 研究가 발전하여 165(短時間에는 420) KA가 얻어져서 定常炉에로의 해결 전망이 있다. 또 電流崩壞 (current disruption)防止도 그 對策이 고려되고 있다.

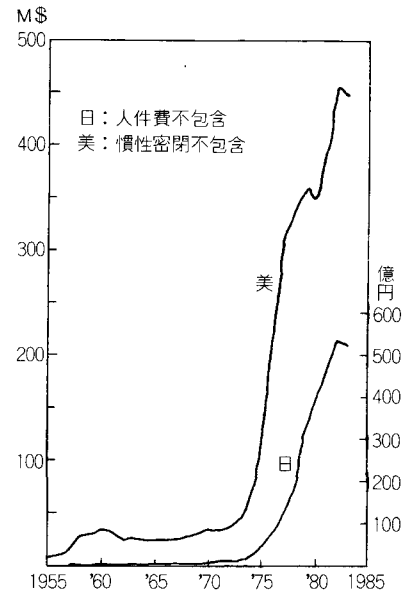
이 方式에 이어서 mirror型, 특히 兩端에서의 플라즈마流出을 輕減시키는 tandem mirror는 美國에서 꾸준히 研究가 추진되고 있어 1985年 完成豫定으로 建設中인 MFTF-B는 臨界裝置에 해당되는 것으로 보여진다. 그 외에 stellarator, 逆轉磁場pinch, bumpy torus

등의 裝置가 研究되고 있어, 이들에 의해서 새로운 原理의 發見, 새로운 方式의 模索, 새로운 臨界플라즈마裝置, 核融合炉에로의 發展 등 可能性이 높아져 가고 있다.

이상은 磁氣密閉方式에 관한 것인데 最近 強力한 레이저, 粒子線에 의한 慣性密閉方式이 發展되고 있다. 基礎的 現象의 解明이나 技術上 問題의 해결이 점차로 추진되어 왔으며, 한편 裝置를 大型化하여 break even實現 計劃이 進行中이다. 그러나 科學的 實證의 다음은 技術的 實證의 단계로서 炉心은 自己點火條件을 만족하며 또 發生되는 核融合에너지를 추출해낼 수 있음을 技術的으로 實證하는 것이 목표가 된다.



〈그림 1〉 T-nr diagram (日本原子力研究所作成)



〈그림 2〉 核融合豫算

IAEA 내에서 美·歐·日·소의 共同作業으로 概念設計가 이루어진 INTOR (International Tokamak Reactor)와 日本의 核融合實驗爐 (FER), 美國의 ETR (Engineering Test Reactor), EC의 NET (Next European Torus) 등은 이와같은 목표를 위한 계획이다. 이들은 모두 1990年代 後半에 運轉開始한다는 日정을 前提로 하고 있다.

表1은 INTOR와 현재 建設中인 JT-60 및 商業爐로 試設計된 Starfire의 各 파라미터를 보여준다. 臨界試驗裝置 JT-60과 電氣出力 120萬KW인 商業爐와의 規模差는 factor 2~3정도에 불과하다. 分裂爐경우의 臨界裝置와 實用爐 차이와는 상당히 다른 점에 유의하여야 한다. 또한 INTOR급은 實驗爐라고 하나 分裂爐의 原型爐에 가깝다고 말할 수 있다.

### 世界各國의 展望

앞으로의 전망으로는 日本의 경우 JT-60의 實驗結果와 여러 外國의 데이터, 爐工學 技術의 開發進展狀況을 參照하여 최종적인 決定을 할 예정이나 Tokamak를 中心으로 實驗爐를 고려하는 것이 타당성이 있다 고 한다. 또 美國의 DOE는 이미 實驗에 들어가 있는 TFTR의 結果와 현재 建設을 추진하

고 있는 MFTF-B 結果를 비교하여 1988년에 ETR로 電流 驅動이 붙은 Tokamak나 熱b-barrier가 붙은 tandem mirror 中 爐心을 선택할 계획이며 유럽核融合評價委員會報告는 次期에는 Tokamak 爐를 염두에 두고 있다.

技術的 實證 다음에는 經濟性의 實證, 實用爐의 運轉을 거쳐 普及時代로 들어가는데, 아직 半世紀정도 걸릴것으로 예측하고 있다. 次期 爐의 建設에 앞서 所要되는 大型의 技術開發을 추진할 必要가 있는 데 그 主要內容은 다음과 같다.

1. 加熱 및 Tokamak 爐의 電流驅動에 關하여 中性粒子入射, ion cyclotron共鳴, 電子 cyclotron共鳴, 低域混成波 등의 加熱效率이나 電流驅動效率.

2. 大型超電導마그네트와그 시스템에 對해 최근 試作된 最大級 LCT보다 貯蓄 에너지를

2자리 以上 大型化 할것.

3. 大量트리튬 취급기술은 취급量이 mg단위에서 kg단위로 飛躍하므로 各 프로세스技術을 단계적으로 추진한다.

4. 材料: 中性子照射에 의한 損傷이나 플라즈마 충격에 의한 表面spattering에 關하여 材料나 表面 coating의 改善策 等.

(資料: 原子力工業 8月號)

國名 密閉型式	日 本	美 國	EC	소 련
Tokamak	●	●	●	●
Stellarator	○	○	○	○
mirror	○	○	-	○
逆轉磁場 pinch	○	○	○	-
bumpy torus	○	○	-	-
慣性密閉	○	○	○	○

●○: 各國計劃에서의各型式의 相對的優先度를 表示

(그림 3)

各種爐心密閉 型式에 對한 各國의 對象

(表 1) Tokamak 型爐의 파라미터

名 稱	臨界플라즈마實驗裝置 JT-60(日) 建設中(1985年完)	實 驗 爐 INTOR (IAEA) 概 念 設 計	商 業 爐 STARFIRE (美) 試 設 計
熱出力 (MW)	~30	620	4,000
電氣出力 (MW)	—	—	1,200
플라즈마主半徑 R (m)	33.0	5.2	7.0
플라즈마副半徑 橫 a (m)	0.95	1.20	1.94
(非円形斷面) 縱 b (m)	0.95	1.92	3.10
플라즈마電流 I <sub>p</sub> (MA)	2.7	6.4	10.1
toroidal β (%)	4.0	5.6	6.7
加熱入力 (MW)	20 (NB1) + 10 (RF/2GHz)	75 (NB1)	90 (RF/1.7GHz)
toroidal 磁界 { 最高 (T) 軸上 (T)	9 (Cu) 4.5	11 (Nb <sub>3</sub> Sn) 5.5	11.1 (Nb <sub>3</sub> Sn) 5.8 (+NbTi)
플라즈마溫度 T (KeV)	5~10	10	24
플라즈마密度 n (m <sup>-3</sup> )	1×10 <sup>20</sup>	1.4×10 <sup>20</sup>	0.8×10 <sup>20</sup>
中性子壁負荷 (MW/m <sup>2</sup> )	—	1.3	3.6

(註) T: 1KeV = 1,000萬度

n: 常溫에서 100萬分의 1氣壓이 n~10<sup>20</sup>/m<sup>3</sup>에 相當한다.