제 5 차 ISKSE 발표문

核 融合研究의 現況과 展望

李 自 鉉

Status and Prospect of Nuclear Fusion Research.* Ja H. Lee, Vanderbilt University, Nashville, TN 37235 USA.··· The current status of four different approaches in plasma confinement and heating for nuclear fusion reactor development, namely, the tokamak, and magnetic mirror, the pinches and the laser-pellet systems is reviewed. The recent progress toward the scientific break-even conditions is assessed following the description of basic principles involved. For tokamak D-T fusion reactors the plasma densities of 10^{20} m^{-3}, the beta values (ratio of plasma pressure to confining magnetic pressure) of over 5 percent and plasma burning times of the order of 100-1000sec are aimed. Large super-conducting magnets which furnish the toroidal magnetic field are under development. The mirror reactors may use both thermal conversion of neutron energy and, direct MHD power generation by the end-loss plasma. The average ion energy of 600 keV and the beta value of 85 percent should be obtained before a usable power output can be expected from the mirror reactor. The reactors based on pinches and laser-pellet schemes are pulsed and repitition rate of the order of 10 Hz must be achieved. Attention is also called to emerging concepts in hybrid fussion-fission breeder reactors and worldwide cooperation in fusion research. *Supported by NASA Grant NSG 1235.

1973年의 油類波動을 겪은 世界各國은 油類以外의 에너지源에 對하여 格別한 關心을 보이지 않을수 없게 되었다. 短期的 解決策으로서 原子爐發電, 太陽에너지利用 石炭增産 風力潮力 및 地熱利用등이 脚光을 보이고 있으나 現代의 大産業을 繼續 稼動케 하는데는 그以上 大出力에너지源이 存續하지 않으면 안된다. 原子爐에 쓰이는 核燃料는 약 300年間에 消盡되고 말 것이라는 豫想이며 따라서 核燃料를 增殖하는 硏究가 進行되고 있다. 그러나 世界各國이 無限定하고 原子爐를 設置하게 되면 强力한 放射能을 가진 廢棄物의 大量蓄積을 가져올 것이고 그것의 公害없는 貯藏이 어렵게 될 것이다. 原子爐나 增殖爐 設置를 反對하는 輿論이 일고 있음은 이 때문이다.

核融合爐는 여기에 對한 唯一하고 長期的인 解決策을 마련한다.

核融合의 原理는 이미 太陽內部에서 自然的으로 作用하고 있고 또 人工的으로는 水素爆彈에서 잘 示範되고 있다.

現在 發電에 쓰이고 있는 原子爐는 무거운 元素인 U^{235}와 같은 原子보다 가벼운 原子들로 分裂될때 나타나는 質量缺損에서 에너지를 얻는데 反하여 硏究開發中인 核融合爐는 가벼운 元素인 重水素나 三重水素와 같은 原子의 核들을 融合시킬때 나타나는 質量缺損에 따른 에너지를 利用하고저 한다(그림 1).

重水素는 海水나 江물에 包含되어 있는 重水를 分離해내면 얻을수 있고 물 1ℓ에 들어 있는 重水를 融合시켜 얻을수 있는 에너지는 휘발유

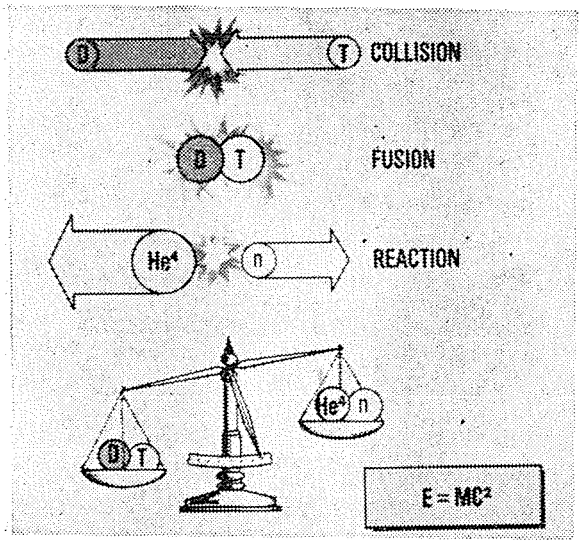

그림 1. 核融合爐의 原理, 重水素와 三重水素의 融合으로 생긴 質量缺損은 Einstein의 原理 $E=mC^2$에 따라 에너지로서 나타난다. 이와같은 核融合 하나에서 2.8pJ의 에너지를 얻는다.

300*l*를 태울때 얻는 에너지와 같은量이 된다. 따라서 核融合爐가 成功했을 때는 全世界人類가 60億年동안 쓸 燃料를 海水에서 얻게되고 世界의 一部地域에만 埋藏되어 있는 油類와 우라늄에 反하여 모든 國家가 그 資源을 自由取擇할 수 있는 利點이 있다.

油類나 우라늄으로 燃料波動을 이르킬수 없는 世界가 올것이다.

核融合爐 開發에 있어서 現在 가장 有望視되고 있는 네가지의 플라즈마幽閉 및 加熱의 方式에 對한 研究現況을 살펴보기로 한다.

이 네方式이란 Tokamak 磁氣거울 (Magnetic mirror) PINCH 및 레이저 小球의 融合 方法들을 말한다(그림 2).

最近에 얻어진 研究 成果들은 이런 方式들이 모두 所謂 科學的收支均衡點(Break-even point)을 向하여 눈부신 發展을 하고 있음을 말하고 있다.

이들의 原理를 簡略히 紹介하고 그研究의 現況과 남아있는 問題點들을 들어보면 다음과 같다.

核融合의 原理와 研究現況의 보다 詳細한 解說은 李東寧 著 "플라즈마熱 核融合 反應"을 參考하기 바란다.

Tokamak에 依한 融合은 그 研究가 가장 앞서 있는 것으로 西歐의 各國과 日本에서 이 方式에

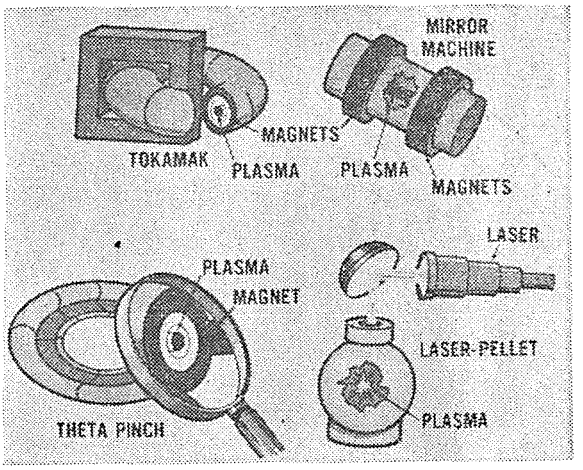

그림 2. 4가지 核融合方式의 原理
(a) Tokamak, (b) 磁氣거울,
(c) Pinch, (d) 레이저-小球融合

重點 投資를 해 오고 있다. 美國은 1978年에 Princeton Large Torus(P.L.T)에만도 1,400萬弗을 投入했고 다음 段階로서 設置中에 있는 Tokamak Fusion Test Reactor(TFTR)는 2億3千9百萬弗을 豫算하고 있다.

TFTR은 1982年에 稼動을 開始할 豫定이다 (그림 3).

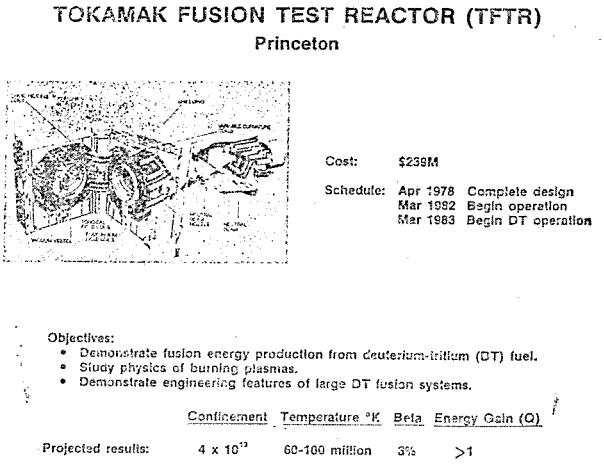

그림 3. Tokamak의 하나인 TFTR. 美國 Princeton 大學校 플라즈마物理 研究所에 設置中에 있다.

Tokamak는 原來 蘇聯에서 開發해오던 方式으로 變電器의 原理를 利用하는 것이다. 即 變電器의 二次線이 이온化한 氣體 即 플라즈마로 되게하고 一次線에 强한 脈動 電流를 加하는 것

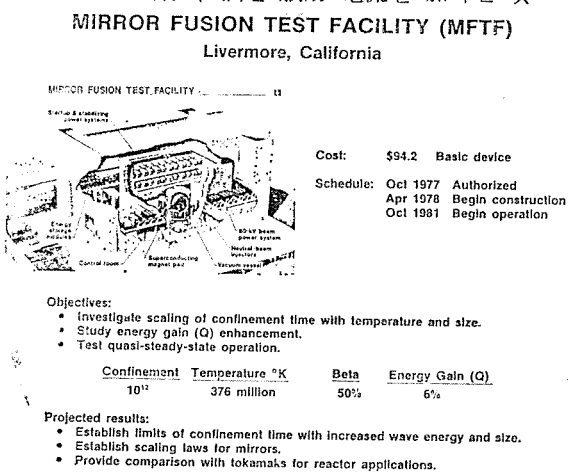

그림 4. Tandem Mirror Machine, 美캘리포니어洲 Lawrence Livermare연구소서 設計中인 磁氣거울.

이다(그림 2).

電磁誘導의 原理에 따라 二次線인 環狀(Toroidal) 플라즈마에 起電力이 誘導되고 따라서 强한 電流가 일어나 플라즈마內에 Joule熱을 가지게 한다. 加熱된 플라즈마의 擴散을 막기 爲해 事前에 環狀磁力線束이 플라즈마를 둘러싸도록 外部에 電磁石 Coil을 두고 있다. 따라서 Tokamak 속의 플라즈마는 그 內部를 흐르는 電流에 依한 磁力線束(poloidal flux)와 外部에 놓인 Coil에 依해 印加되는 環狀磁力線束(Toroidal flux)의 두 磁力線束이 合成하는 螺線狀(Helical) 磁力線束에 依해 幽閉되고 있는 것이다. PLT가 얻은 플라즈마의 溫度는 2,500萬度이고 그 密度는 $10^{13}/cm^3$에 이른다. TFTR이 目標하는 溫度는 6,000萬度를 넘고 密度는 $4\times10^{13}/cm^3$으로 플라즈마 속에서 發生될 重水素와 三重水素의 核融合 에너지가 플라즈마에서 發散하는 에너지와 同量이 될 豫測이다. 이런 狀態가 이루어지면 "科學的 收支均衡點"에 到達했다고 하는데 플라즈마裝置들이 이루어야 할 첫 目標이고 融合爐가 實用化될때까지는 "工學的 收支均衡點과 經濟的 收支均衡點"이란 보다 더 어려운 目標들을 지나야 한다.

Tokamak의 究極의 目標는 溫度, 1億度 密度 $10^{14}/cm^3$ 幽閉持續 時間 100秒 以上으로 2005年 以後에 商用化 될것으로 내다보고 있다.

前述한 Joule 熱에 依한 플라즈마의 加熱은 溫度가 높아짐에 따라 그 效率이 적어지므로 附加的인 加熱方法이 必要하다. 中性粒子射入 RF 加熱 斷熱壓縮加熱等이 實驗되어 왔으나 中性子射入이 가장 效率的임이 밝혀졌다. 高效率 中性子束 發生器의 開發이 急進展되고 있고 이미 PLT에 1MW以上의 中性子束을 射入하는데 成功하고 있다.

플라즈마를 磁力線束으로 長時間 幽閉하는 일은 不安定性 問題때문에 容易하지 않다. 이問題는 마치 密度가 낮은 기름속에 密度가 높은 물을 一定한 形狀으로 오래 떠있게 할려는 것과 類似한 物理學的 關係를 가지고 있다.

플라즈마의 密度와 溫度가 높아짐에 따라 不安全性에 依한 困難度가 더 커짐으로 現在 이룩한 20ms의 幽閉時間을 100s 以上으로 늘리는 일이 容易한 것이 아님을 알 수 있다.

長時間 幽閉가 成功할지라도 플라즈마의 不純化가 또 問題로 남는다. 磁力幽閉는 결코 完全할수 없기 때문에 플라즈마에서 高速粒子(電子 또는 이온)들의 一部가 새어나오기 마련이고 이들이 容器의 壁에 衝突하여 壁을 만들고 있는 物質의 粒子들은 蒸發시켜 幽閉된 플라즈마에 突入케 한다. 이들 不純粒子들은 대체로 金屬原子 임으로 原子番號가 높아서 플라즈마를 急速度로 冷却시켜서 核融合을 停止시킨다. 이와같은 不純物의 混入을 制禦하기 爲하여 Diverter를 두게 된다.

Diverter는 不純物이 包含된 플라즈마의 表層을 뜯어내어 眞空裝置로 吸出하는 機能을 가지고 있다. 이 機能의 效率向上이 當面하고 있는 重要한 課題들의 하나이다.

以上의 基本的인 問題가 解決된다 할 지라도 最少出力이 200萬kw가 넘을 核融合爐의 開發에는 많은 工學的 問題가 따른다. 先進各國에서는 이미 이 方面에 플라즈마物理研究에 못지 않은 研究費를 投入하여 爐工學 發電工學에 屬하는

問題들을 다루기 始作했다.

두번째로 든 核融合爐方式은 磁氣거울(Mirror)인데(그림 4) 이方式에서 近間 좋은 進展이 있었다. 그것은 이方式에서 不可避한 플라즈마 損失口로 알려져온 裝置의 兩端에 中性粒子束을 射入한 結果 플라즈마의 密度가 한 數位를 뛰어 오른 값이 된것이였다.

이 方式에서는 融合에 나오는 中性子를 抱着하여 熱을 얻는것과 損失口에서 흘러나오는 플라즈마를 直接 電磁流體力學的(MHD) 發電機에 利用하는 두가지 發電方式을 考慮하고 있다. 이 方式의 窮極的 目標는 이온의 平均溫度 60萬度 베타(β)값 85%이다. 베타값은 플라즈마가 가지는 에너지(nkT)와 그 플라즈마를 幽閉하는 磁場이 가지는 에너지($\beta^2/8\pi$)의 比를 말한다.

이 方式에는 TANDEM Mirror와 Mirror Fusion Test Facility(MFTF)가 1978年 및 1981年에 各各 稼動할 豫定으로 있다.

Pinch와 레이저-小球의 融合方式은 慣性融合法이라고 불려진다. 이方式에서는 別途로 外部에서 印加하는 磁場을 쓰지 않고 플라즈마의 慣性만을 利用하여 짧은 時間內에(數 ps 나 ns)에 高溫·高密度를 얻어 融合을 일으키자는 것이다. Pinch에서는 密度가 $10^{20}/cm^3$ 레이저-N 球壓縮에서는 $10^{22}/cm^3$에 이르고 있다.

Pinch方式에서는 E-pinch와 Q-pinch의 두가지가 있다. 前者는 電流가 E-軸에 따라 흐르고 後者는 Q方向 即 圓筒狀電流를 가진다. Q-pinch 方式으로 Syllac이라는 큰 裝置가 Los Alamos에 設置되어 實驗을 했으나 不安定性을 克服할 수 없어 中斷되고 말았다.

E-pinch는 가장 簡單한 裝置로서 蓄電器群(Capacitor Bank)에 電氣에너지를 모은後 兩電極사이에 있는 氣體를 通하여 瞬間的으로 放電시키는 것이다. 電流의 起動時間(Rise time)이 짧으면 加熱된 氣體表面에 흐르는 電流와 自體의 磁力線과의 相互作用에 依해 所謂 Pinch 効果가 나타나서 氣體가 衝擊波의 速度로 壓縮되고 高溫高壓의 플라즈마를 裝置의 軸上에 生成한다. 이 E-pinch에 屬하는 것으로서 플라즈마焦點(Plasma Focus) 裝置가 있는데 25kJ의 적은 入力으로 $10^{19}/s$의 融合率을 내는 좋은 成果를 보이고 있다(Tokamak는 1,000kw의 中性粒子射入을 함에도 不拘하고 $10^{13}/s$의 融合率을 達成했을 뿐이다). 그러나 플라즈마 焦點의 缺陷은 너무나 적은 體積($0.01cm^3$)과 짧은 持續時間($10^{-7}/s$)에 있어 大出力 融合爐를 構想하기에는 適合치 않다. 筆者가 發明特許를 가지고 있는 Hypocycloidal Pinch는 이 難點을 解消하기 위해 幾何學的 變形을 주되 pinch의 物理的 機能을 保存시키는 裝置로서 앞으로의 開發이 바래지고 있다. 이 裝置에 對해서는 別途로 紹介할 機會가 있을것으로 믿는다(參文 3)

레이저 小球의 融合方式은 가장 最近에 始作되었으나 研究活動의 成長이 눈부실 程度이다. 强力한 레이저光線을 모든 方向에서 均等한 强度로 小球表面에 照射하면 表面物質이 레이저 에너지를 吸收하여 蒸發 플라즈마 Jet를 만들게 된다. 小球內部의 物質은 이 플라즈마 Jet를 만들게 된다. 小球內部의 物質은 이 플라즈마 Jet의 反動을 받아 壓縮된 로켓으로 人工衛星을 發射하는 것과 같은 原理이다. 强度 100TW以上의 레이저를 써서 小球內部에 넣은 重水素와 三重水素의 混合氣體가 液體密度의 一萬倍가 되도록 壓縮한다는 目標아래 研究가 進行中에 있다. 今年에 使用하기 始作한 Shiva는 10kJ의 에너지를 900ps에 放射하는 出力 10TW가 넘는 Nd-doped-glass레이저이고 그 波長은 1.06μm이다. 이 레이저를 20개의 光束으로 나누어 標的인 小球(直徑數 μm)를 照射하게 한다. 小球內에 數百氣壓으로 들어있는 重水素 三重水素混合氣體가 數百分의 一의 부피로 壓縮加熱되어 核融合을 일으키는 것이 이미 實證되고 있다. 그러나 레이저一小球의 方法으로 核融合爐를 開發할 수 있다는 可能性을 完全히 立證하자면 一百萬 Joule 以上의 强度를 가진 짧은波長(L2μm)의 레이저가 開發되어야 할 뿐 아니라 이 레이저는 그 反復度가 1秒에 10싸이클 이상으로 되어야 한다. 현재 쓰여지고 있는 Nd-doped-glass 레이저는 느린 冷却速度 때문에 하루에 數回밖에 反復할 수 없는 固體레이저 이므로 核融合의 可能性을 科學的으로 보여주는것 以上의 것이 될 수 없

고 發電을 目標로 하는 融合爐의 開發은 所謂 말하는 "X-레이저"가 나타나야만 本格的인 進展을 바랄수 있을 것이다. 그러나 大出力의 레이저는 防御技術面에서도 重要視하고 있기 때문에 美國을 비롯 先進國에서 莫大한 投資를 하고 있다. 1979年의 美國 豫算書에서는 約 9,300萬弗이 레이저融合을 包含하는 慣性融合研究에 投入되도록 要請되고 있다(表 2).

慣性融合方式에는 레이저 代身으로 電子線束이나 이온線束을 쓰는 것도 實驗中에 있다. 이온線束을 쓰는 方法은 가장 最近에 提案된 것으로 高에너지物理研究에서 使用하는 加速器와 같은 裝置로 重元素의 이온을 10GeV 以上으로 加速시켜 重水素 三重水素의 混合體가 들어있는 小球를 照射하자는 것이다. Brookhaven과 Argonne의 美國立研究所에서 벌써 實驗裝置研究와 設計가 進行中에 있다. 以上으로서 核融合의 4方式을 簡略히 紹介했다. 어떤方式이 決勝線에서 勝利를 할것인지는 時間을 두고 보아야 하겠으나 現時點에서 各方式의 進步度를 알아보기 위해서는 各 方式이 取하고 있는 目標點과 現 研究裝置의 成果를 比較해 봄이 좋을 것이다. 表3은 그 結果를 보여준 것이다. 특히 마지막 3欄은 核融合의 反應率을 잡아 그 比를 보여주고 있다. Tokamak는 現在 單位體積當 10^8의 融合反應率을 보이고 있으나 目標點인 "科學的 收支均衡點"에 이르렀을 때에 나타날 反應率 3.6×10^{13}에 到達할려면 아직도 3.6×10^5倍의 能率向上(Scaling)을 해야 된다는 것으로 보여지고 있다. 磁氣거울(Mirrors)은 10^6의 能率向上이 있어야 하고 Theta Pinch는 10^9의 向上이

Magnetic Fusion Energy Program
Funding Request-FY 1979
(Dollars in Millions)

	FY1978 B/A	FY1979 B/A	Change Dollar	Change %
Confinement Systems	120.4	152.9	+32.5	+27
Develop. & Technology	54.1	61.5	+ 7.4	+14
Applied Plasma Physics	50.9	57.5	+ 6.6	+13
Reactor Projects	100.0	62.1	−37.9	−38
Total Program	325.4	334.0	+ 8.6	+ 3

表 1. 美國에너지省이 申請한 1979年度의 磁力 核融合 豫算,

Core Program	FY78	FY79	Percent of FY79 Budget
Livermore			
Drivers	$8.3	$5.3	
Pellet Design and Fabrication	11.6	14.2	40
Experiments	16.1	17.7	
Los Alamos			
Drives	18.2	8.0	
Pellet Design and Fabrication	4.1	4.1	21
Experiments	8.4	7.2	
Sandia			
Drivers	4.2	2.7	
Pellet Design and Fabrication	1.2	1.2	8
Experiments	2.9	3.8	
KMSF, NRL, Other	13.0	12.5	14
Advanced Lasers	9.5	9.1	10
Systems Studies	3.6	2.6	3
Heavy Ion Development	2.9	3.5	4
Long Lead Technology	0.3	0.4	(<1)
	$98.3	$92.8	100%

表 2. 美國 에너지省이 申請한 1979年度 慣性核融合 豫算.

必要하다. 레이저-小球의 融合方式은 10^8의 向上이 要求되며 電子線束融合은 4×10^{10}의 Scaling이 必要하다. 注目할 일은 플라즈마焦點(Plasma Focus)의 경우이다. 이 적은 裝置는 이미 10^{14}의 融合率을 보이고 있어 收支均衡點에서의 融合率 3×10^{17}에 到達하는데 不過3×10^3의 Scaling 밖에 남아있지 않다는 것이다.

前述한바와 같이 플라즈마 焦點은 너무 적은 量의 플라즈마를 만들기 때문에 大出力을 目標로 하는 融合爐로 發展시킬 수 없다고 보고 있어 美國에서는 이 方式을 重視하지 않고 있다. 이 裝置는 값싼 中性子 發生器로서 또는 이온源으로 開發될것 같고 또 다음에 指摘할 融合·分裂複合爐 開發에 功獻할 것이 내다 보인다. 融合研究가 最近에 急進展하여 公害적고 無限한 에너지源이 나타날 것으로 樂觀됨에도 不拘하고 이 表에서 보는바와 같이 아직도 至大한 努力으로 莫大한 能率向上을 圖謀하지 않으면 안된다.

따라서 核融合을 보다 짧은 時日內에 利用할 수 있는 方法을 찾는 것은 當然하다 하겠다. 이중 한方式이 核融合·核分裂複合爐(Fusion-Fission Hybrid Reactor)이고 最近에 많은 關心을 모으고 있다.

核融合의 所産인 中性子를 U^{238}이나 Th^{242}와 같은 元素에 照射시켜 Pu^{239}나 U^{233}과 같은 原子

燃料를 生産하자는 複合爐의 槪念은 1960年以前 核融合 硏究가 始作되었을 때부터 있었고 이와 같은 可能性이 大量의 核武器生産에 利用될것을 憂慮하여 核融合硏究를 極秘에 부친적이 있다. 그러나 1960年에 이르러 Plasma를 쓰는 核融合이 매우 어려운 일임을 깨닫고 그 硏究를 開放하게 되었던 것이다. 그 間의 融合爐硏究가 進展되어 相當한 强度의 融合率을 보게 되었으므로 複合爐의 槪念이 復活하게 되었다.

더욱이 核分裂을 利用한 原子爐가 世界各國에 急速히 普及되고 있어 原子燃料의 供給이 아랍의 油類供給에 못지않은 重要性을 갖게끔 되어 가고 있다. 複合爐는 이와 같은 時期에 알맞는 硏究課題가 되었다. H·A·Bethe와 같은 Nobel 受賞者도 이 方面에 큰 關心을 보이고 에너지源 開發에 새로운 希望을 發見한다고 말하고 있다(Nuclear News, May 1978). Bethe가 調査한바에 依하면 融合爐 1基에서 生産되는 核燃料로 中出力 原子爐 6基를 稼動시킬수 있다고 한다(그림 7). 融合爐에 依한 核燃料 增殖은 實로 核分裂만을 쓰는 高速原子增殖爐(Fast Breeder Reactor)의 5倍以上의 性能을 가지고 있어 核融合爐의 開發이 進展됨에 따라 이 複合爐의 實用이 急速度로 이루어질 展望이 보인다.

前述한 바와같이 플라즈마焦點裝置는 이미 그 融合率로 보아 複合爐에 應用하기에 가장 接近해 있다(그림 8). 또 이裝置의 所用硏究費가 Tokamak에 쓰이는 費用의 50乃至 100分의 1이라는 利點이 있어, 中進國들의 이에 關心이 높아져 있다.

이스라엘과 아르헨티나 특히 中共과 폴란드 等 各國들의 活動은 注目될만하다. 그 까닭은 韓國의 經濟成長이 이들 國家들과 比等한데도 不拘하고 國內에 이렇다할 硏究活動이 이 分野에 全혀 없음이 對照되기 때문이다. Tokamak와 같은 큰 裝置에 投資할 수 있는 國力을 갖지 못할지라도 플라즈마焦點裝置가 提供하는 값싼 融合플라즈마의 硏究를 通하여 不遠닥아올 原子力의 第2期에 對備하는 것은 中進國들이 取할 當然한 政策이라고 생각된다. 特히 先進國들도 人類全體에 福祉를 가져올 核融合爐의 硏究에 全世界的인 協助를 要求하고 있다. 美·蘇의 核融合 硏究協助가 눈에 뜨이게 活潑하고 歐洲各國이 核融合硏究를 共同 管理하고 있으며 日本의 學者들이 極東 및 東南亞諸國의 硏究協助를 提案하고 있음은 報道網을 通하여 周知되고 있는 事實이다. 筆者는 韓國의 核融合硏究의 起點이 時期的으로나 國家經濟的으로나 今明間에 곧 마련되어야 할 것으로 믿고 있다.

끝으로 强調하고 싶은것은 核融合硏究를 通해 얻어질 高度의 科學技術力은 國家防衛産業에 直接 功獻할뿐 아니라 大學硏究室에 深度있는 基礎科學硏究의 必要性을 切感케할 수 있

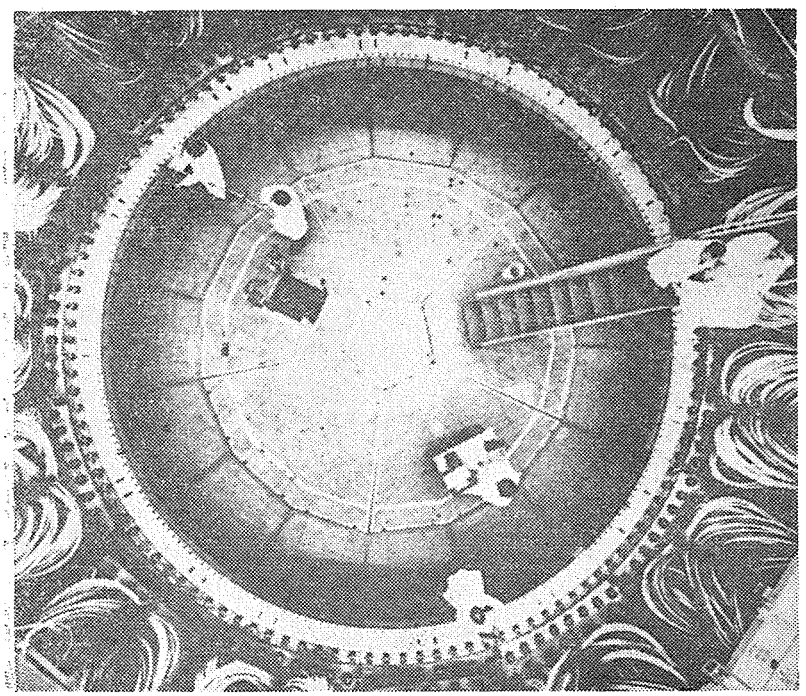

그림 5. θ Pinch裝置의 하나인 Syllac. Los Alamos硏究所에서 實驗中斷되었다.

는 點들이다.

이미 말한 바와같이 레이저 一小球의 核融合方式은 그 基礎인 物理學的 原理가 水素爆彈製造의 方法과 다를것이 없을뿐 아니라 그 小球의 製造方法은 바로 水爆에 쓰이는 Computer program을 그대로 쓰기 때문에 極秘에 屬하고 있음은 識者間의 常識이 되고 있다. 또한 複合爐가 實用化되면 核燃料를 U^{235}와 같이 高價의 同位元素分離를 거치지 않고도 融合爐에서 生産할 수 있는 새로운 方法을 갖게 한다. 韓國과 같이 우라늄의 埋藏量이 보잘것 없으나 토륨이 豊富한 곳에서 U^{233}과 같은 核燃料를 精製한 U^{235}없이도 自給生産할 수 있게 함을 가볍게 看過해서는 안될것이다. 核融合을 일으킬수 있는 플라즈마는 이미 말한바와 같이 60億度를 넘는 溫度를 지니고 그 密度가 $10^{14}/cm^3$ 以上이라고 超高壓의 狀態를 말하고 있으므로 이와 같은 超高溫超高壓 狀態를 超短時間內에 觀測하고 또 調整하여 所期의 狀態를 維持토록 한다는 核融合爐 開發의 要求度는 基礎科學의 뒷받침없이는 一步도 前進할 수 없는 科學과 技術의 切實한 聯關을 보여주는 示範的인 課題라 볼수 있다. 科學技術의 뒷받침이 工業成長과 輸出振興에 不可避한 要件으로 되어가고 있는 現時點에서 볼때 뒤떨어진 國內 科學技術 自體에 量子的 飛躍을 보게할 契機의 하나가 核融合研究의 開始로 나타날 수 있기를 冀望하면서 이글을 맺는다.

在美韓人 플라즈마學者들의 많은聲援이 筆者로 하여금 이 論文發表를 하게 하였음을 感謝해 마지 않음을 附言한다.

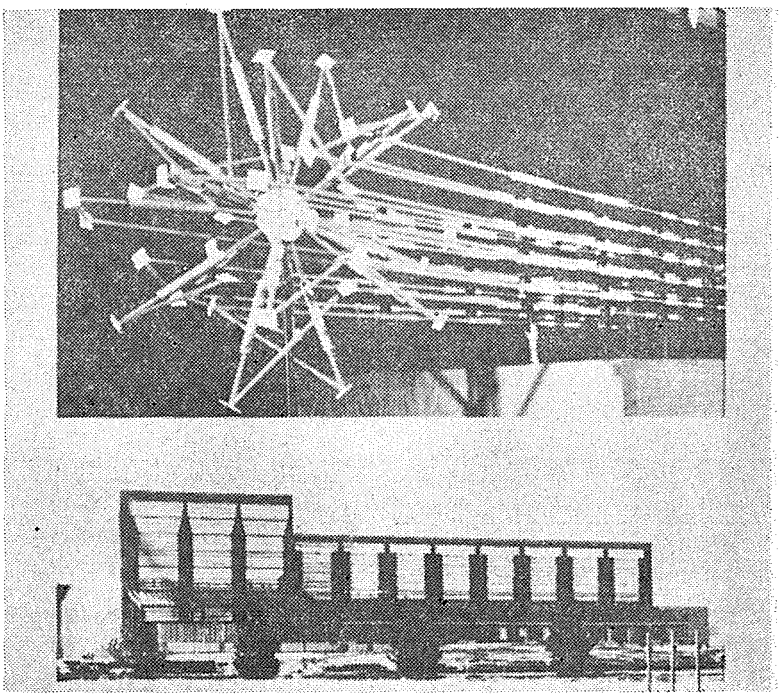

그림 6. **Shiva: 레이저 小球融合方式에 쓰이는 最高出力의 레이저. Lawrence Livermore 研究所에서 1978年初에 融合實驗에 使用하기 始作했다.**

參考文獻

1. 李東寧 "플라즈마 열핵융합반응" KSEA LETTERS Vol. 6, No.12, p.21(1978)
2. E.E Kintner Energy"Statemen on the Magnetic Fusion Energy Program. FY 1979 Authorization." Office of Fusion Energy, U.S.D.O.E.
3. Ja H. Lee (李自鉉)etal., "Production of Dense Plasma in a Hypocycloidal Pinch"Physics of Fluids 20, 313(1977).
4. L.S. Levine "An Overoiew of the U.S. Inertial Confinement Fusion Effort" Office of Laser Fusion, U.S.D.O.E.
5. H.A. Bethe "Fusion Hybrid", Nuclear News May 1978. p.41.

November 1977

表 3. **Performances of Nuclear Fusion Research Devices** Break-even

Devices	Density	Confine-ment	Temper-ature	Volume	D-D Fusion	D-D Reac-tion Rate	D-T Reac-tion Ratet	Reaction Rate	Necessar-y Scaling
	n, cm^{-3}	τ, sec	T, KeV	V, cm^3	per pulse	R^D, cm^{-3} sec^{-1}	R^T, cm^{-3} sec^{-1}	R^E, cm^{-2} sec^{-1}	
Tokamak PLT (30M $)	5×10^{13}	95×10^{-3}	1	10^6	10^{13} 1pulse/10s	10^6	10^8	3.6×10^{13}	3.6×10^5
Mirrors DCXIIB (10M $)	10^{12}	10×10^{-3}	10	10^4	3×10^9 1pulse/s	3×10^5	3×10^7	3.6×10^{13}	10^6
Theta Pinch Scyllac (30M $)	10^{14}	10×10^{-6}	1	10^4	10^8 1pulse/s		10^{10} per pulse	10^{19} per pulse	10^9
Plasma Focus DFP (1M $)	10^{18}	0.1×10^{-6}	8	1	10^{12} 10pulse/s		10^{14} per/pnlse	3×10^7 per pulse	3×10^3
Laser-Pellet (20M $)		10^{-9}	5	($10\mu m\phi$)			3×10^8 1pulse /day	4×10^{16} per pellet	10^8
Electron Beam Pellet (5M $)		2.0×10^{-9}	0.7	($10\mu m\phi$)			10^6 10pulse/s	4×10^{16} per pellet	4×10^{16}
Ion Beam Pellet (>30M $)		(10×10^{-9})		($1mm\phi$)					

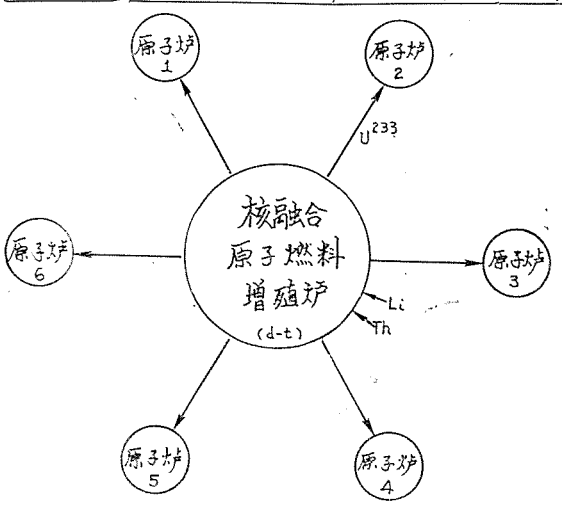

그림 7. 核融合을 原子燃料增殖爐로 利用하면 6基의 原子爐에 쓰일 原子燃料가 生産될 수 있다는 **H. Bethe**의 推定을 圖示하고 있다.

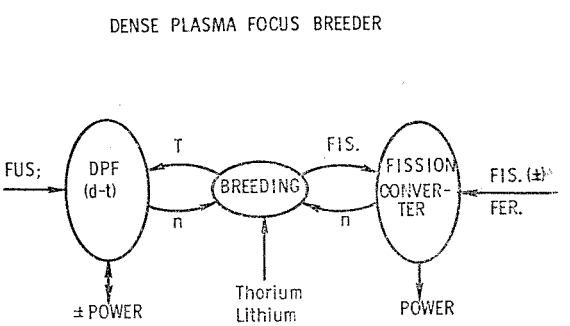

그림 8. 플라즈마 焦點에서 放射되는 中性子를 利用하는 原子燃料增殖爐의 原理를 圖示하고 있다. **Thorium**을 **Uranium**^{233}으로 轉換하여 原子爐의 燃料로 쓸수 있음을 보이고 있다.