

核融合爐에의 길

生 田 一 成
(日本 名古屋大學 教授)

金 俊 鉉
(漢陽大 工大 教授)

■ 차

레 ■

- 1. 序 論
- 2. 核融合反應의 達成條件
- 3. 플라즈마의 閉込法
- 4. Torus爐

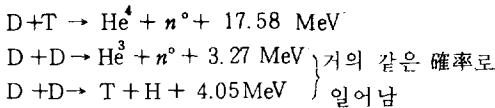
- 5. 慣性核融合爐
- 6. 衝擊核融合爐
- 7. 結 論
- 參考文獻

① 序 論

지금, 世界의 技術 先進國에서는 年間 總額 十억 달러 이상의 돈이 制御核融合의 研究을 위해서 쓰여 지려고 하고 있다. 이 研究은, 지금까지 30 年間に 걸쳐서 巨額의 資金投入과 科學者·技術者들의 國際的인 獻身의 努力에 의하여 지탱되어 왔으며, 그 結果 物理에 關한 知識은 이들의 努力에 의하여 매우 增大되어 왔다. 따라서 現在 科學上의 問題는 모두 解決되는 것 같이 보인다. 그리고 그것에 의하여 假相의으로는 制限되지 않으며 環境上 安全한 에너지라는 技術上의 꿈이 實現될 것이라고 樂觀하는 사람도 많이 있다.

그런데, 참으로 그렇게 될 수 있을까?

核融合 開發의 主要한 目的은, 水素의 同位元素로 1개 내지 2개의 餘分이 있는 中性子를 포함하는 重水素나 三重水素를 燃料로 하는 爐를 만드는데 있다. 즉, 核融合研究에 있어서 흥미 있는 反應은¹⁾



여기서, H, D, T는 각각 水素, 重水素, 三重水素이다.

이 燃料의 選擇은 뒤에 言及하는 바와 같이 에너지를 만들어내는 核融合爐의 物理的 要請條件을 매

우 容易하게 하여주지만, 同時에 이 選擇으로 말미암아 에너지源을 有用한 動力裝置로 할 때 困難한 障壁에 부딪히게 된다. 즉, DT 核融合 反應에서는 大部分의 發生에너지 (14.1MeV)가 中性子 n⁰의 運動에너지로서 存在한다. 中性子는 그 運動에너지를 熱에너지로서 주위에 供給함과 동시에, 그 이상으로 많은 核變換을 주위의 爐構成材에도 미치게 하고 있다. Li⁶와 反應해서 T를 만든다든가 하는 것은, 그 有利한 反應이지만 매우 多數의 物質의 原子核과 反應해서 誘導放射性物質을 만들고, r線, β線을 放出한다. 한편, 이와 같이 하여 잃어버린 中性子の 에너지는 우선 爐의 에너지所得에 損失을 줄뿐만 아니라 環境上의 安全度를 매우 악화시키며, 遠隔操作 및 廢業物處理 등의 困難한 問題를 유발시킨다. 따라서, 爐의 構成材가 멀지않아 巨大한 放射性 廢業物로 되는 것은 틀림없는 사실이다.

이와 같이 바람직스럽지 못한 一連의 結果로부터 DT 反應을 利用하는 爐는 그 反應이 에너지出力의 觀點으로부터 가장 有利함에도 불구하고 不適當한 爐形을 선택하면 그것이 크고 복잡하며, 高價일 뿐만 아니라 信賴性이 없는 에너지源으로 되어 버릴 염려가 있다. 따라서, 그 때에는 現在의 分裂爐나 實現되고 있는 改良型 分裂爐가 오히려 바람직스럽다고 할 수 있을 것이다.

우리들이 核融合 反應을 利用하여 에너지源으로 쓸모있는 核融合爐를 建設하려면, 中性子에 의하여 構造物이 放射化해도 매우 짧은 期間에 그것이 消滅할

必要가 있다. DT 反應과 같이 大部分의 發生에너지가 中性子の 運動에너지로 되는 燃料을 選擇하지 않는 것도 한 方法일 것이다. 가령, 中性子が 發生해도 1年間 放置하면 放射能이 없어지는 鉛이나 炭素만으로 構成할 수 있는 爐를 열심히 考察해 보아야만 되지않겠는가? 2)

이하, 지금까지의 研究過程을 反省하고 將來의 展望을 해보자

② 核融合反應의 達成條件

燃料로서 重水素와 三重水素를 選擇한 것은 核融合開發計劃의 發足에 있어서 매우 自然的인 展開였다. 重水素는 水素의 非放射性 同位元素이고, 이것은 原子核에 또다른 하나의 餘分의 中性子를 갖고 있다.

自然界에 重水素와 水素가 약 1 : 6500의 비율로 存在하고 있다. 따라서 重水素는 多量으로, 또는, 사실상 無制限으로 存在한다고 생각해도 되며, 通常의 水素로부터 質量分離方式에 의하여 간단히 얻어진다.

核融合 plant 를 위하여 最初로 考察된 反應은 單純한 重水素끼리 (즉 DD反應)에 의하는 것이었다. 前章에서도 言及한 바와 같이 重水素는 자기 스스로 反應해서 He³를 만들어 내는데, 이 He³는 安定하기는하나 매우 적은 헬륨의 同位元素이다. 또, 三重水素도 만들어내며, 이것은 水素의 原子核에 2개 餘分의 中性子が 부착되어 있다.

이들의 反應生成物은 또한 重水素와 反應해서 D-D 反應 그 自身보다도 많은 에너지를 放出한다. 따라서, 重水素를 燃料로하는 核融合爐는 거의 確實하게 소위 D-T, D-He³ 反應이 일어나 三重水素와 헬륨 3의 Recycle 과 燃燒를 한다. 이 複合的 反應過程으로부터 利用할 수 있는 에너지를 계산해 보면, 海水 1m³ 당에 있는 重水素로부터 原油 2,000배럴 (1배럴 ≒ 120ℓ)과 같은 에너지가 放出되는 것으로 된다. 그러므로, 海水 1km³ 으로는 現在 世界에서 알려져 있는 모든 石油保有高와 같은 정도의 에너지를 갖고있는 것과 같이 되는 것이다. 그리고, 모든 大洋中에는 10억km³ 를 넘는 海水가 있으므로, 이 計算 結果는 100억달라가 넘는 돈을 쓰이게하여 많은 科學者들에게 이것을 引出하게끔 全能力을 傾注시키고 있는 실정에 있다.

그러면, 좀 자세하지만 核融合 反應을 持續시켜 에너지를 만들어 내도록하는 플라즈마에 대한 條件이 어떻게 되어 있는가를 알아보자.

自己持續의 熱核融合爐가 運轉할 수 있는 最低의 温

— 度는 核融合 反應으로 發生한 에너지가 主要 制御輻射인 放射損失에 의하여 플라즈마에서 없어지는 損失과 같게 되는 條件으로 定해지며, 이 溫度는 理想 breakeven 溫度라 불리우고 있다. 그림 1은 發生하는 出力密度와 制御輻射를 10²¹ m⁻³의 이온密度에 關係 D-D와 D-T 反應에 대하여 나타낸 것이다.

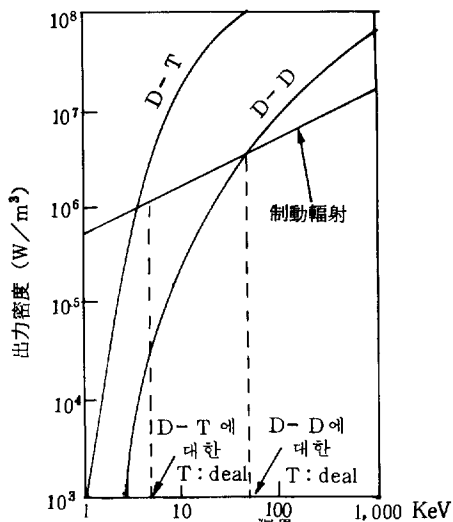


그림 1. D-D와 D-T의 核融合反應에 대한 理想的 breakeven의 條件

이 그림으로부터 D-T와 D-D反應에 대한 理想的인 breakeven 溫度는 각각 4KeV와 40KeV임을 알 수 있다. D-T 反應에서 理想 breakeven 溫度가 비교적 낮은 것은, 다음과 같은 이유가 타당하다고 하겠다. 첫째는 低溫에서 充分한 에너지가 發生되므로 D-T 플라즈마를 加熱하는 것이 容易하게 되며, 둘째는 低溫에서는 플라즈마의 運動에너지가 낮다. 즉, 플라즈마의 壓力이 낮으므로 플라즈마를 閉込하는 것이 容易하게 되기 때문이다.

核融合爐를 사용하여 電氣에너지를 만들어 내는 것을 數量的으로 처음으로 취급한 有名한 Lawson 條件은 다음과 같다.

間歇運轉爐에서 燃料는 高溫으로 急激히 加熱되며, 熱核融合이 일어나는 사이 閉込되어서 高溫으로 유지된다고 한다. 그리고, 플라즈마가 冷却되면 다음 始動하기 전에 燃料가 보급된다. 만약 燃料로서의 水素 原子의 氣體密度가 n 이면 완전히 電離된 水素의 아이소토프 플라즈마의 帶電粒子密度는 반이 電子, 나머지 반이 이온으로 되어, 合計 2n 으로 된다. 또한, 電子도 이온도 모두 같은 溫度 T 이면 一粒子에 대하여 平均에너지가 $\frac{3}{2}KT$ 가 된다 (K는 볼츠만定

數). 따라서, 密度 n 의 燃料를 加熱하는데 필요한 에너지密度는 $3nKT$ 이다. P_{th} 를 熱核融合의 出力密度, P_{br} 를 플라즈마中の 制動輻射密度라 할 때, 만약 이 制動輻射가 플라즈마의 外部에서 모아져 吸收되면, 體積 V 의 플라즈마中에서 核融合 反應이 일어난 후의 有效에너지 E_{out} 는 다음과 같이 된다.

$$E_{out} = (P_{th} + P_{br} + 3nKT)V(2-1)$$

여기서, 時間 τ 의 期間은 일정한 溫度를 假定하고 있다. 만약 이 에너지를 이용해서 플라즈마를 加熱하기 위한 全效率를 $\frac{1}{3}$ 이라하면, 爐를 持續시키는 最低條件은 플라즈마의 加熱에 필요한 에너지 즉 $E_{out}/3$ 가 入力에너지 ($3nKT + P_{br}$)보다 커야된다. 이것은 溫度 T 의 플라즈마를 만드는데 $(3nKT)V$ 의 에너지가 필요하며, 플라즈마를 τ 의 時間中 T 의 溫度로 유지하는 사이에 輻射로 잃어버리는 損失 $P_{br}V\tau$ 를 가해야만 되기 때문이다. 이렇게하여 爐를 運轉해서 消費되는 에너지이상의 에너지를 만들어 내려면 다음과 같은 條件이 成立된다.

$$\frac{V}{3} (P_{th} + P_{br} + 3nKT) > V (P_{br} + 2nKT) \quad (2-2)$$

따라서,

$$\frac{P_{th}/3n^2KT}{P_{br}/3n^2KT + \frac{1}{n\tau}} > 2 \quad (2-3)$$

와 같은 條件이 얻어지면, 이것을 Lawson의 條件이라고 부르고 있다. 그리고, 이 P_{br}, P_{th} 가 다같이 n^2 에 比例한다는 것이 알려져 있으므로, 식(2-3)의 좌변은 T 와 $n\tau$ 에만 의존한다고 말할 수 있다.

D-T反應에서는 $T \approx 13\text{KeV}$ 일 때 $n\tau$ 의 最少値가 $10^{20} \text{ m}^{-3} \cdot \text{sec}$ 로 된다. 식(2-3)의 不等式을 만족시키는 最少의 $n\tau$ 의 값은 $10\text{KeV} < T < 15\text{keV}$ 의 범위에서는 溫度에 그렇게 의존하지 않는다. D-D反應에서는, $T \approx 100\text{keV}$ 의 溫度에서 $n\tau$ 의 最少値는 $10^{22} \text{ m}^{-3} \cdot \text{sec}$ 로 된다. 이는 말할 필요도 없이 이들의 最少値는 可能한 에너지가 有用한 出力으로 바뀌어질 때의 效率에 의한 것이다. 만약 이 效率이 상술한바와 같이 $\frac{1}{3}$ 을 넘으면 $n\tau$ 의 最少値는 위에 주어진 값보다 어느 정도는 작게 된다. 그러나, 플라즈마의 空間的 不均一性까지 고려하여 더욱 복잡한 計算을 해보면, 실제로는 여기서 주어진 값보다 큰 $n\tau$ 의 값이 얻어지게 된다. 또한, D-D反應보다 D-T反應에 필요한 $n\tau$ 의 값이 本質적으로 2차릿수만큼 작다는 것이 현저한 特徵이라는 것을 알 수 있을 것이다. 플라즈마의 密度가 주어지면 에너지로 break-even에 달하기 위해서는, D-T反應은 D-D反應의 1

9%의 時間만 움직이면 된다. 長時間에서는 플라즈마는 衝突 또는 不安定 때문에 磁場을 횡단하여 움직여 消失하기 쉬우므로 短時間이면 되는 D-T反應이 이 점에서는 확실히 우수하다. 뿐만아니라 點火點이 낮은 것도 D-T反應의 또 하나의 魅力的인 特徵이다. 그러나, 다음과 같은 短點이 있다는 것을 잘 記憶해 두어야만 할 것이다. (1) 三重水素는 12.4年이라는 半減期를 갖고 있으며, 放射性이고, 自然界에는 存在하지 않으므로 人爲적으로 生成하지 않으면 안된다. (2) 이 反應에서는 出力에너지의 80%는 中性子로서 나온다. 最初에 言及한 바와 같이, 中性子の 運動에너지는 核融合爐의 工學的 見地에서 매우 困難한 것을 誘起한다.

지금까지의 議論에서는 間歇的인 爐만을 考察하였는데, 같은 結論이 定常爐에도 適用된다. 이 경우에는 τ 를 反應하는 核의 어떠한 의미에서의 平均的 에너지 閉込時間이라 생각하지 않으면 안된다.

③ 플라즈마의 閉込法

이 章부터는 특별한 言及이 없는 한 D-T反應만을 생각하기로 한다. 前章에서 記述한 바와 같이 核融合反應을 持續시킬 수 있을 정도의 플라즈마 溫度는 5 keV 정도로 높으므로, 物質의 壁을 이용해서 플라즈마를 閉込할 수는 없다. 왜냐하면, 壁을 만드는 物質이 熱에 견디도록 할 수 없을 뿐만 아니라, 壁이 플라즈마를 汚染해서 플라즈마의 溫度를 急速히 내리기 때문이다.

플라즈마를 充分히 긴 時間동안 壁으로부터 떨어지게 하는 方法으로는

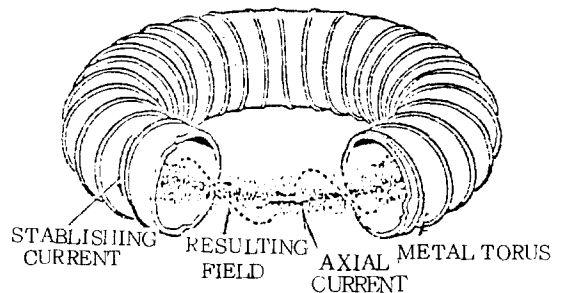
- i) 強한 磁場을 사용한다 (磁場閉込)
- ii) 이온의 慣性을 利用한다 (慣性閉込)

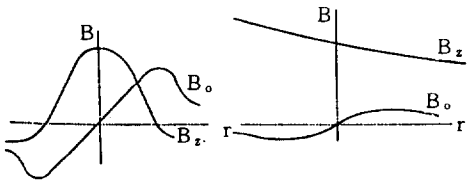
의 두가지 方法이 알려져 있으며, 여기서 磁場閉込에는 環狀磁場을 쓰는 案과 兩端에 粒子의 反射裝置 갖는 긴 直線狀磁場을 쓰는 案이 있다.

이하에 解説없이 代表的인 閉込法을 열거한다.

A. 環狀 磁場閉込

A-1. Toroidal pinch





(a) ZETA mode (b) TOKAMAK mode

그림 2. TOROIDAL PINCH

A-2. Astron

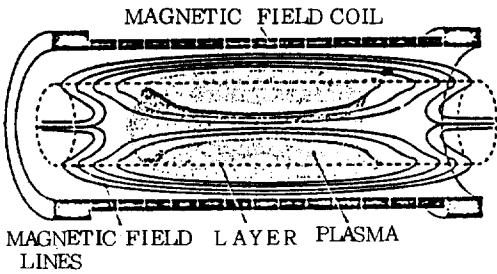


그림 3. ASTRON

A-3. Stellarator

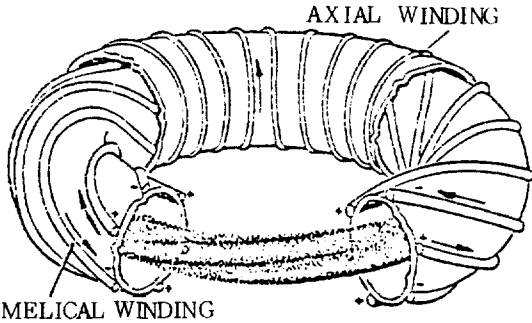


그림 4. STELLARATOR

A-4. Bumpy torus

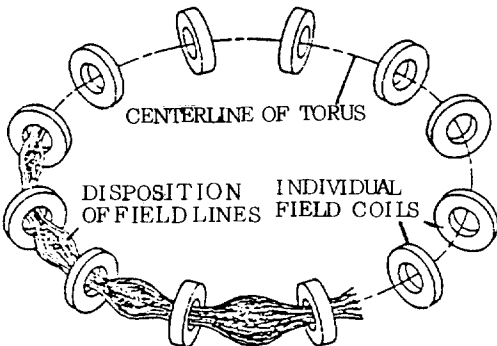


그림 5. BUMPY TORUS

B. 直線狀 磁場配位
B-1. 磁場鏡 (mirror)

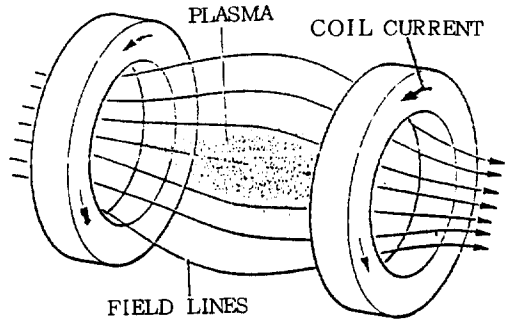


그림 6. 磁場鏡

B-2. 極小磁場

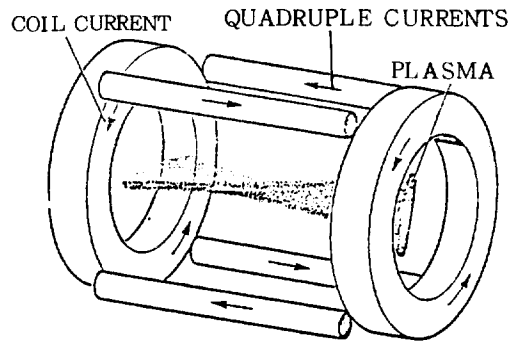


그림 7. 極小磁場

B-3. Tandem mirror

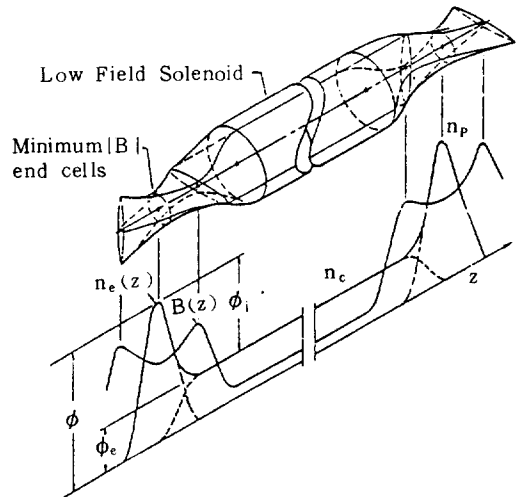


그림 8. TANDEM MIRROR

C. 慣性閉込

研究 初期에는 積層球殼狀의 pellet의 一點에 集中 하도록 에너지를 投入해서 爆縮시킨다는 比較的 단순한 構想이었다. (그림 9) 그러나, 研究가 進展됨에 따라 爆縮의 어려움에 대한 이해도 進전되어 新形의 pellet 構造가 생각되고 있다. 그림 10에 代表的인 6 種類를 나타낸다.

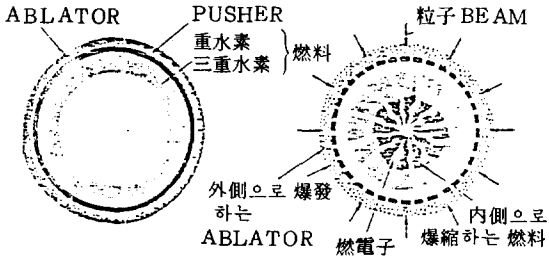


그림 9.

中性子의 r線 吸收에 대한 中性子吸收, 三重水素 齎生成 LiH와 PD 코일에 의한 차폐 및 熱傳播을 위한 初期 減衰器 生체에 대한 차폐

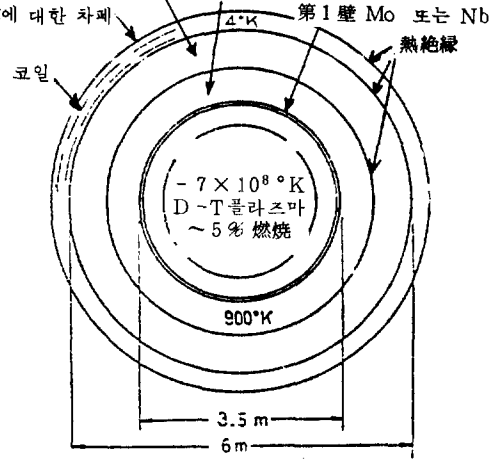


그림 11. D-T核融合爐의 斷面圖

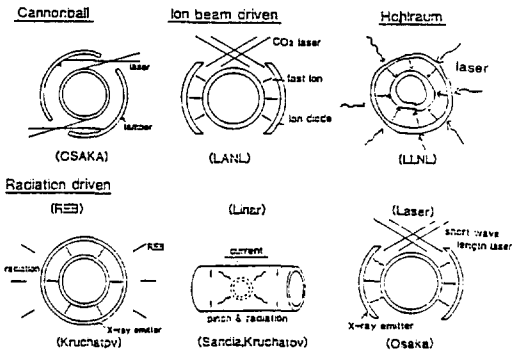


그림 10. 여러가지 PELLET

4 Torus爐

磁場의 性質上 核融合爐는 管狀이 아니면 안된다. 現在는 아직 Tokamak 와 같은 Torus 形이 좋은가, Tandem mirror 와 같은 直線形이 좋은가에 대해서 結論을 얻기까지에는 이르지 못하고 있다. 그러나, D-T 反應爐로서의 複雜性, 크기에 대한 結論은 裝置의 選擇에 는 의하지 않는것이다.

強한 環狀 (torus 形)磁場은, 超電導를 이용한 코일로 發生시키게 되는데, 이 超電導코일은 플라즈마에 의하여 만들어지는 熱과 中性子로부터 防護되지 않으면 안된다. 이와 같이 外側에 코일을 놓으면 磁場은 매우 큰 容積속에 維持되어 있는 것으로 된다. 大容積의 高磁場은 高價를 의미하는데, $T < 20^{\circ}K$ 의 超電

導코일을 $T > 10^8^{\circ}K$ 와 中性子束이 나오는 플라즈마 부근에 놓고자 해도 그것은 무리일 것이다.

中性子和 X線으로부터 超電導磁石을 보호하기 위한 遮蔽는 코일의 바로 内側에 놓여 있다. 또한, 遮蔽의 바로 内側에는 中性子を 減衰하고 吸收하여 그 運動에너지를 熱로 바꾸기 위한 第一次의 減衰器가 있고, 燃料로서 三中水素를 補給하며 熱을 어떤 作用流體로 變換시켜 熱사이클에 사용한다. 그리고, 熱은 作用流體 (물, Li, 溶融鹽 Li_2BeF_4 등)에 의하여 爐로부터 잡아내어져서, 中性子の 吸收體인 液體冷却劑를 中性子 遮蔽體 (blanket) 内에 순환시켜 熱交換器를 加熱한다. 三中水素의 補給은 Li와 低速中性子和의 反應에 의하여 행해진다.

液體吸收體와 플라즈마의 眞空容器를 隔離하기 위해서는 Niobium의 壁이 쓰여지는데, 이것을 第一壁이라 한다. Niobium이 쓰이는 이유는 高耐熱과 14 MeV의 中性子を 비교적 透過하기가 쉽고, 또 構造的 損傷을 받기 힘들 것이기 때문이다. 사실, Niobium 이라든가 또는 어떤 다른 材料에서도 高速의 14 MeV 中性子を 받았을 때 무엇이 일어나는가는 거의 알지 못하고 있다. 第一壁으로 사용할 수 있는 것으로는 molybdenum, ranium, stainless 鋼, graphit 등이 생각되고 있다. 第一壁으로서 材料를 선택할 때 構造的으로 損傷하기 힘든 것 이외에 (1) 그 原子가 壁으로부터 쉽게 剝離되지 않고 플라즈마中の 不純物로 되기 힘든 것, (2) 그것이 플라즈마中에 混入해도 輻射를 적게 하도록 原子番號 Z가 작은 것을 선택

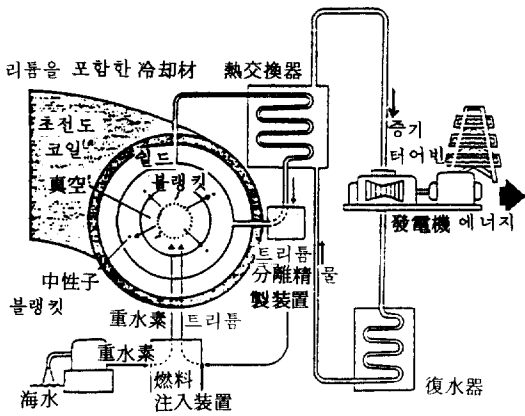


그림 12. 核融合의 構造

하는 것이 중요하다. 爐에서 잡아내서 熱사이클에 쓰이는 에너지가 모두 14MeV의 中성자로서 壁을 통과하지 않으면 안되는 것을 생각해야만 한다. 그 위에 第一壁을 플라즈마의 制動輻射와 synchrotron 輻射 및 blanket의 속에서, 構造材料의 Mo, Nb, V 등에서 中성子 入射에서 生成되는 r 線을 받는다.

다음에 D-T 爐의 物理的 크기를 評價해 보자. 중요한 것은 爐의 크기는 플라즈마의 特性보다는 오히려 第一壁이나 blanket의 材料特性으로 결정해야 한다는 것이다.

〈壁의 負荷〉

壁의 負荷 P_w 는 爐의 熱出力을 플라즈마에 마주하고 있는 第一壁의 壁面積으로 나눈것으로 定義된다. 最大의 壁의 負荷는 壁의 加熱, 다시 말해서 冷却法이 있는가 없는가로 制限된다. 이 加熱은 blanket 中에 三重水素를 供給하는 爐에서 發生하여 壁을 通過하는

14 MeV의 中성子나, 그것에 의하여 blanket의 材料가 活性化되어지기 때문에 생기는 r 線, 그리고 플라즈마에서의 制動軸射와 synchrotron 輻射의 吸收가 原因이다. 그 中에서도 r 線 吸收에 의한 加熱機構가 주된 것 이라는 것을 알고 있다. 이 加熱은 壁이 얇아질수록 減少하며, 한편, 壁이 너무 얇아지면 構造의 으로 약하게 된다. 壁의 두께를 0.25cm, 材料를 Niobium로 하면, Tokamak 運轉에 異常이 없는 경우에도 許容되는 壁의 最大 熱負荷는 대략 $0.1MW/m^2$ 로 된다고한다.

〈壁의 반지름〉

爐의 單位體積 當의 出力 P_D 는 爐의 出力 $4\pi r_w RP_w$ 를 爐의 全容積 $2\pi^2 (r_w + t + s)^2 R$ 로 나눈 것이다.

$$P_D = \frac{2\pi r_w}{\pi (r_w + t + s)} P_w \quad (4-1)$$

(t+s)의 값은 第一壁의 반지름 r_w 에 無關係로 된다. 그것은 blanket의 두께 t가 주로 모든 中성子를 吸收하는데 얼마만큼 필요한가라는 것에 결정되기 때문이다. 한편 磁場코일層의 두께 s는 주로 두꺼운 blanket에서 超傳導線으로 전달되는 線을 絶緣하는데 어느 정도의 두께가 필요한가에 따라 결정된다.

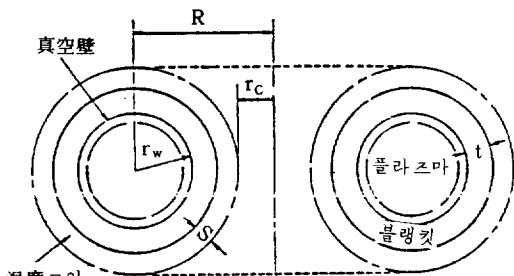
만약 (t+s)가 材料의 종류와 熱絶緣의 方法으로 정해진 값으로 된다고하면 P_D 라는 出力密度는 r_w 의 어떤 값에서 最大로 된다. P_w 가 주어진 값에서 P_D 가 最大로 되게 설계하면 매우 高價인 磁場容積을 줄여서 投資額을 줄일 수 있다. 따라서, 쉽게 풀리는 바와 같이 $r_w = t + s$ 에서 P_D 가 最大로 된다.

最近의 研究에 따르면, 플라즈마가 自己燃焼를 유지하기 위해서는 플라즈마의 반지름이 2~3m는 필요하다고 생각하고 있다. 가령 만약 物理學上보다 작은 플라즈마로 처리하지 못한다고 하더라도, 工學적으로는 第一壁의 반지름을 3m 이하로 하는 것은 困難하다고 한다. 三重水素를 效果의 爲로 Li로부터 만들어내기 위해서는 충분히 速度가 떨어진 中성子를 얻어야만 되는데, 그때의 t는 0.5~1m 정도이다. Blanket의 外側의 放射線 遮蔽 즉 熱絶緣은 超傳導코일을 보호하기 위하여 역시 0.5~1m는 필요하게 된다. 따라서 t+s는 대략 3m 정도이며, 대체로 $r_w \approx t + s$ 가 成立되어 있다고 생각할 수 있을 것이다.

〈出力密度〉

이상의 議論으로부터 核融合爐의 平均出力密度는

$$P_D \approx \frac{P_w}{6} \quad (4-2)$$



- R: 主반지름 r_w : 壁의 반지름
- t: 블랭킷의 반지름 방향의 두께
- r_c : 中心과 코일의 간격
- S: 磁場코일의 반지름 방향의 두께
- $R = r_w + s + t + r_c$

그림 13. TORUS 爐의 斷面

로 된다. 여기서, $P_w \approx 0.1 \text{ MW/m}^2$ 를代入해 보면 알 수 있는 바와 같이 $P_D \approx 0.02 \text{ MW/m}^3$ 이며, 이것은 分裂爐의 $\frac{1}{100}$ 에 가까운 값이 된다. 이상으로부터 torus 爐는 플라즈마를 싸고있는 容器의 반지름만도 3m 이상이나 되는 크기가 됨을 알 수 있을 것이다. Tokamak 核融合爐에서는 그 容器의 큰 반지름은 작아도 20m를 넘는 것으로 되는데, 이것은 現在의 核分裂爐보다도 어느정도 크게 되지만 實質의 으로는 보다 복잡하다. 또, 出力密度가 現有의 分裂爐보다 작으므로, 이 크기로 보다 복잡하고도 적은 電力밖에는 만들어 내지 못한다.

5 慣性核融合爐³⁾

慣性核融合爐에서는 torus 爐와는 달리 磁場의 壓力으로 플라즈마를 閉込하는 것은 아니고, 固體의 pellet 에서 生成된 플라즈마가 상당히 퍼지기 전에 多數의 原子核이 衝突, 融合해서 에너지를 發生하는 것을 目的으로 하고 있다. 이 때의 플라즈마의 閉込時間은 대략 粒子의 熱速度로 플라즈마의 지름을 通過하는 時間이라 생각된다. 이 경우 閉込時間은 상당히 짧게 되므로, 그것을 보충하는데 충분한 密度의 플라즈마를 얻지 않으면 안된다. 또한, τ 는 10^{-8} sec 정도로 생각되므로 10^{24} cm^{-3} 정도의 粒子密度가 필요하며, 적당한 構造의 球殼標的의 表面에 고르게 에너지를 投入하여 이것을 壓縮해서 所요의 密度를 얻는다.

慣性核融合爐의 研究에서는 燃料標的의 壓縮加熱過程의 研究와 에너지의 注入法(driver)의 研究가

두 支柱로 되어 있다. 일반적으로 慣性核融合爐는 Torus 爐에 비해서, i) Driver, 爐心 플라즈마, 爐系가 疎結合이고 設計에 柔軟性이 있다. ii) 高眞空이 不必要하고 不純物의 문제가 없으므로, 液體金屬壁의 採用을 할 수 있어 問題가 激減한다. iii) 強한 外部磁場을 필요로하지 않으므로 高價인 코일이 不必要하다는 것 등으로 D-T 反應을 せ도 許容할 수 있는 爐形이 있을 수 있다고 期待되고 있다. 그러나, 最大의 問題는 核融合爐로서 成立하는 Driver 가 存在하는가 하는 것이다.

잘 알려진 Driver의 候補로서

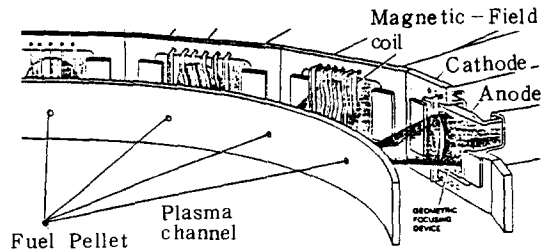


그림 15. 電子비임 爆縮裝置 概念圖

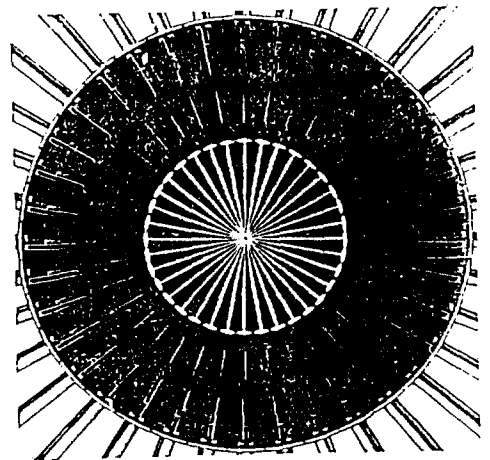


그림 16. 36本の 電子비임을 한 점에 모은 경우의 想像圖

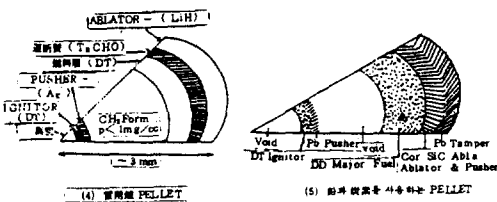
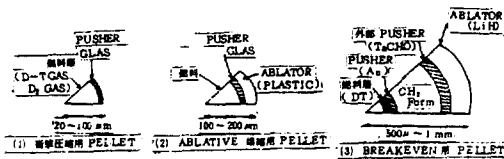


그림 14. PELLET의 여러가지 構造

- 1) 레이저
- 2) 電子비임
- 3) 이온비임

이 있다. 2), 3)에서는 비임을 標的表面에 유도하는 方法論에 未解決의 問題가 있어 研究는 아직 初期의 段階에 있다고 생각된다.⁴⁾ 1)의 경우는, 2), 3)과 같은 問題는 적으나 레이저비임의 發生效率의

낮은 것에 本質의 問題가 있는것 같다.

이하에 解説없이 여러가지 構造的 標的을 列舉한다 (그림 14). 또, 電子비임을 쓰는 爆縮用 Driver 의 概念圖도 나타낸다.(그림 15, 16)

⑥ 衝擊核融合爐 (Impact Fusion)⁹⁾

荷電粒子나 電磁波를 爆縮用的 에너지源으로 採用하면, 荷電粒子의 傳播法이나 電磁波의 發生效率이 낮은 것 등 곤란한 問題가 많다. 電氣的으로 中性인 플라스틱이나 金屬 등의 小塊를 高速으로 加速하는 기술은 近年 急速히 進歩하여, 이것을 爆縮用的 Driver 에 쓰면 前者의 곤란이 比較的 緩和된다. 따라서, 衝擊核融合은 一種의 慣性核融合이며, 그 概念은 다음과 같다.

「무게 0.5g 정도의 적당한 物質의 小塊를 秒速1,000 km 정도로 加速하여 重水素와 三重水素로 만들어진 永(永)에 衝突시켜 停止시킨다. 그러면 小塊의 運動에너지가 永에 衝擊的으로 전달되 熱化되어서, 대략 10 KeV 정도의 D-T 플라즈마를 發生함과 동시에, 衝擊波가 플라즈마를 高密度로 壓縮해서 核融合의 條件을 만족시킨다.

그러므로, 衝擊核融合 達成의 가장 重要한 課題는 적당한 物質의 小塊를 高効率로서 1,000 km/sec 로 加速하는 技術을 開發하는 일이다. 1,000 km/sec 가 達成되면 小塊로 永를 직접 衝擊하는것 만으로 核融合 反應을 일으킬 수 있지만, 100 km/sec 에서도 慣性核融合用的 pellet 를 壓縮하기 위한 Driver 로 사용하므로써 核融合 反應을 勵起시킬 수는 있다. 그림 17은 衝擊核融合爐의 概念圖를 나타낸 것이다.

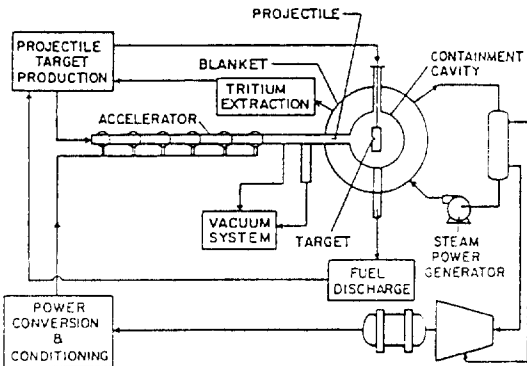


그림 17. 衝擊核融合爐의 概念圖

〈小塊加速器의 一般論〉

小塊를 일정한 加速度 α로 加速하는 경우를 생각한다. 加速器의 길이 X와 加速度 α 및 小塊의 最終

速 V 사이에는

$$X = \frac{V^2}{2\alpha} \tag{6-1}$$

의 관계가 있다.

加速되는 物質에는 限界應力 S가 존재하며, 만약 이 限界應力보다도 強한 힘이 加해지면, 그 物質은 形態를 유지 못하고 破壞된다. 따라서, 小塊를 加速할 때에는 그 加速度는 小塊의 材質 特有的 限界應力을 넘지않게 할 필요가 있다. 出力과 加速度의 사이에는 다음의 관계가 있다.

$$\rho L \alpha = S \tag{6-2}$$

여기서, ρ는 小塊 材質의 密度, L은 小塊의 길이이다.

이 두식을 사용하면 加速器의 길이를 應력과 결부시킬 수 있다.

$$X = \frac{\rho L V^2}{2S} \tag{6-3}$$

그런데, 核融合 反應 達成을 위해서는 ρL > 0.18 cm² 으로 주어져 있으므로, 最強의 限界應力을 갖는 철(피아노線)로 小塊를 만들었다고 하고, S ≈ 10¹⁰ dyn · cm⁻² 을 사용하면 V = 1,000 km/sec 에 대하여 X = 1 km로 된다. 加速器 建造의 입장에서 보면 좀더 짧은 것이 요망된다. 즉, 하나는 限界應력이 큰 物質을 발견하는 것이며, 他案으로는 加速된 小塊를 慣性核融合의 燃料壓縮用的 Driver 로서 사용하는 것이다. 이 경우에는 필요한 速度가 대략 100 km/sec 이기 때문에 加速器의 길이는 대략 10m이면 되며, 問題는 없다고 생각된다.

〈여러가지 小塊加速器〉

지금까지 比較的 少 研究되고 또한 유망한 小塊加速器는 4종류가 있으며, 그것은 1) Railgun 加速器,⁶⁾ 2) 進行磁場加速器(Travelling magnetic wave Ac.)⁷⁾, 3) 反動加速器(Ablative Ac.)⁸⁾ 4) 플라즈마衝動加速器(Plasma impulse Ac.)⁹⁾ 이다. 이들 加速器의 特性을 나타내면 표 6-1 과

표 6-1. 加速器의 特性

	效率(%)	길이(m)*	實驗濟의 能力
1) Railgun	20~50	140	6km/sec (3gm)
2) 進行磁場型加速器	10~75	5,000	低速 (10kg)
3) Laser 에 의한 反動型 加速器	5~10	140	理論 論
4) Plasma 衝動型 加速器	≤ 20	140	理論 論

* (小塊運動에너지) / (加速器에의 入力)

** 대략 100 km/sec 를 達成하기 위한 길이

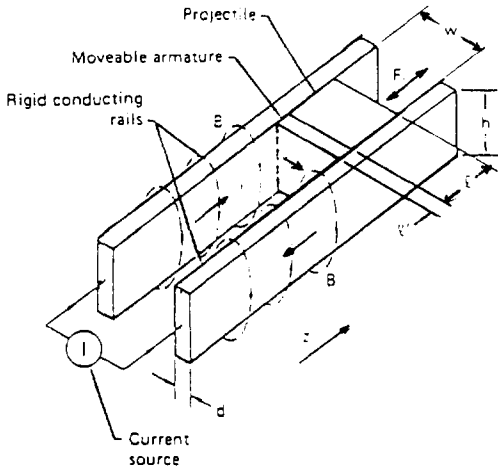


그림 18. RAILGUN의 構造

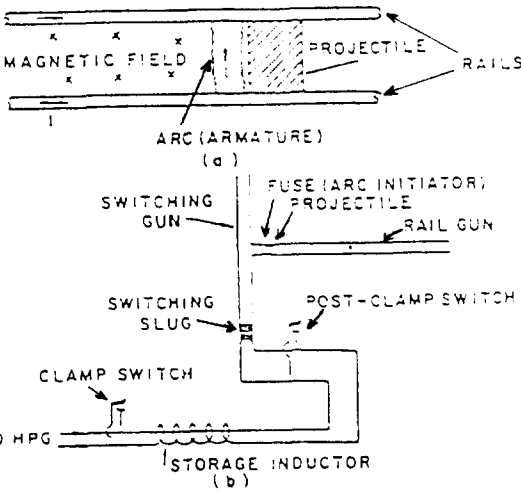


그림 19. CANBERRA 大學의 RAILGUN의 粗立圖

같다.

이들 種 方式의 加速器에는 각각의 長點과 欠點이 있으므로, 高效率의 加速器를 얻으려면 그 性質에 적합하도록 改良을 하지않으면 안된다. 이하에 Railgun과 플라즈마衝動型 加速器의 概略圖를 解説 없이 열거한다. (그림 18 ~ 22)

7 結 論

이상의 考察 結果로부터 다음과 같은 사항들이 확실하여졌다.

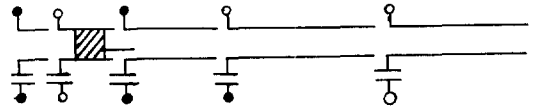


그림 20. 多段式 RAILGUN

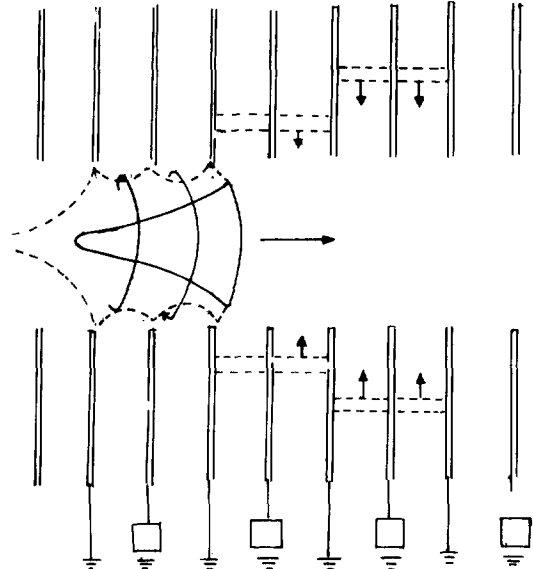


그림 21. 円板電極을 사용하는 플라즈마衝動型 加速器

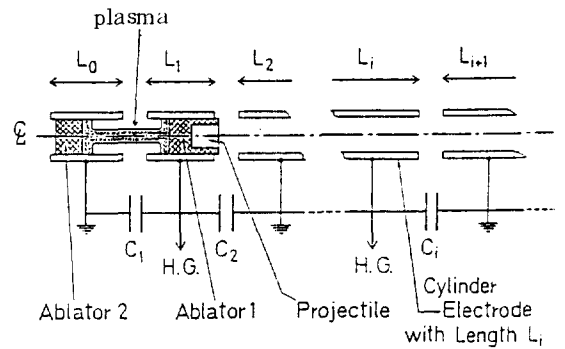


그림 22. 円筒電極을 사용하는 플라즈마衝動型 加速器

- i) 磁場閉込核融合爐는 巨大하다.
- ii) 慣性核融合에서는, 에너지注入源 (driver)의 選擇이 重要하며, 比較的 問題가 없는 Driver로서 高速의 小塊를 사용하는 案이 있다.
- iii) 小塊加速器 (Macroparticle Accelerator)의 開發目的은, 高效率로 100km/sec 이상을 達成하는 것이다.

참고문헌

1) F.L. Ribe: Reviews of Modern Physics, 47 (1975) 7.
 2) T. Tazima, S. Ido and Monsler: IPPJ-611, Institute of Plasma Physics, Nagoya University, P. 130.
 3) S. Ido and K. Miya: Kakuyugo-Kenkyu, Circular in Japanese, 50 (1983) 7.
 4) G. Yonas: Scientific American, 239 (1979) 50.
 5) E.R. Harrison: Phys. Rev. Letters 11 (1963) 535.
 6) S.C. Rashleigh and R.A. Marshall: J. Appl. Phys. 49

(1978) 2540.
 7) 예를 들면, G.K. O'Neil and H.H. Kolm: J. Astronaut. Sci. 25 (1977) 349.
 8) 예를 들면, M.D. J. Burgess, H. Motz, P.T. Rums by and M. Michaelis: Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research (IAEA, Vienna 1977) Vol. 3, p. 405.
 9) D.A. Tidman and S.A. Goldstein: Jaycor Tech. Note 350-79-004 (1979), 또는, K. Ikuta: IPPJ-696, Institute of Plasma Physics, Nagoya University.

◇ 알 림 ◇

회원 여러분의 건승하심을 양축합니다.
 당학회 이사회와 편수위원회에서는 논문투고 규정에 의거 다음과 같이 논문게재료를 개정하여 시행키로 하였으니 논문을 투고할 회원께서는 유념하시어 착오 없으시기 바랍니다.

— 다 음 —

현 행	개 정
[1] 1面~ 4面 : 당학회 부담	[1] 1面~ 4面 : 당학회 부담
[2] 5面~ 13,000원/面	[2] 5面~ 8面 : 13,000원/面
	[3] 9面~ : 30,000원/面 (가급적 8面 이내로 작성 요망)

※시행일시 : 1985년 10월 1일부터 접수되는 논문.