

■ 核融合爐研究開發의 現況 ■

# 核融合爐의 原理

## 1. 核融合爐의 燃料

核融合은 가벼운 核들이 서로 충돌하여 무거운 核이 되는 과정이다. 예를들면 重水素核( ${}^2_1\text{D}$ )과 重水素核이 충돌하면 헬륨核( ${}^4_2\text{He}$ )이 생성되는데 이 헬륨核은 不安定하여 곧 두개의 核으로 나누어 진다.

이 不安定한 헬륨核이 分解되는 방법에는 트리튬( ${}^3_1\text{T}$ )과 中性子( ${}^1_0\text{n}$ )로 나누어지는 경우와 質量數가 3인 헬륨( ${}^3_2\text{He}$ )과 陽子( ${}^1_1\text{P}$ )로 나누어지는 경우 두가지가 있다. 이들 두가지의 反應過程을 DD反應이라고 하며, DD反應에서 發生한 T와  ${}^3\text{He}$ 은 모두 D와 核融合反應을 일으켜서 各各  ${}^4\text{He}$ 과 n,  ${}^4\text{He}$ 과 P가 된다. 결국 6개의 重水素가 연소하면  ${}^4\text{He}$ 과 n 및 P가 각각 두 개씩 남는 計算이 된다.

이와 같이 核融合反應에는 여러가지의 種類가 있어서 宇宙에서는 이러한 반응에 의해 무거운 元素가 만들어지고 있다. 그러나 지상의 核融合爐에 利用할 수 있는 反應은 이중 특히 一部로서 燃料核으로 필요한 것은 發熱反應일 것, 지상에 넓게 존재할 것, 資源이 풍부해서 長期間 使用할 수 있을 것, 위험성이 적을 것, 연소하기 쉬운 것 등이다.

이와 같은 條件을 만족시킬 수 있는 反應은 매우 적으며 앞에서의 DD反應은 그중 하나의

候補이다. 重水素는 水素에 대해 6500 : 1의 비율로 自然水中에 포함되어 있다. 이 數字만을 보면 重水素가 많지 않은 것으로 보이나 核融合反應에서 發生하는 에너지는 化學反應에 비해 자리수가 크게 다르기 때문에 重水素로 發生시킬 수 있는 에너지는 막대하다.

예를 들면 1l의 海水中에 포함되어 있는 重水素의 核融合反應으로 發生되는 에너지는 石油 300l에 상당한다. 즉, 重水素를 燃料로 使用하는 核融合爐의 實現은 무한정의 에너지源을 확보하는 것이다.

이 核融合爐가 아직까지 實現되지 못하고 있는 이유는 核融合反應이 일어나기 어렵기 때문이다. 核分裂反應은 電荷를 갖고 있지 않은 中性子が 反應을 일으키나 核融合反應은 모두 陽(플러스)의 電氣를 띠고 있는 두개의 原子核이 反應하므로 두 核이 서로 反發하여 反應이 일어나기 어렵다. 核融合反應이 일어나기 쉽게 하려면 核을 靜電反發力에 이겨낼 만큼의 速度까지 加速하여 상대의 核에 충돌시킬 必要가 있다. 核을 加速시키는 데에는 電氣에너지를 使用하는데, 必要한 電氣量이 많을수록 爐로서 成立되기 어려워진다.

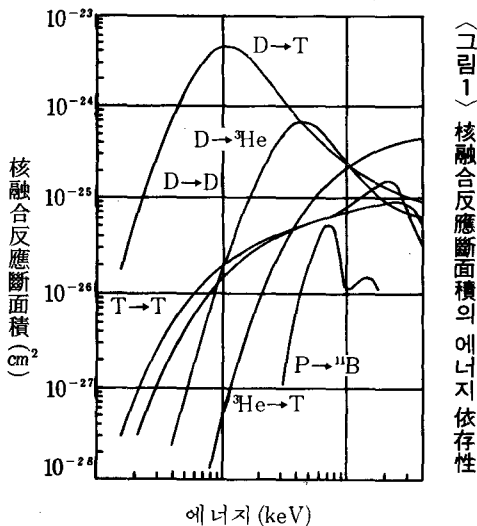
核融合反應에서는 DT反應이 일어나기 제일 쉬운데 DD反應보다 약 100배 정도 反應確률이 높을 뿐만 아니라 충돌에너지가 적어도 된다(그

림 1 참조). 따라서 최초로 實現시키려는 것은 DT核融合爐이다.

트리튬은 약 12년의 半減期로 自然崩壞하므로 天然에는 거의 존재하지 않는다. 그러나 D-T反應에서 생긴 中性子를 리튬核( ${}^6_3\text{Li}$ )에 충돌시키면 核反應에 의해 트리튬이 生成된다. 또한 이 反應은 發熱反應이기 때문에 더욱 효과적이다. 그러므로 DT核融合爐에서는 燃料인 트리튬을 自己增殖시킬 計劃이다. 리튬은 美國, 캐나다, 아프리카 등에서 많이 産出되는데 海水中에도 많이 포함되어 있으며 그 量은 우라늄보다 많다.

## 2. 核融合燃料을 燃燒시키는 方法

일정한 電氣에너지를 使用하여 되도록 有效하게 核融合反應을 일으키려면 燃料을 高溫 플라즈마의 狀態로 하여 일정한 空間에 必要한 시간동안 密閉해 두어야 한다. 플라즈마는 物質의 原子와 分子가 分解되어 흩어져서 이온과 電子로 나누어져 있는 狀態로서 固體, 液體, 氣體에 이은 物質의 第4의 狀態이다.



플라즈마의 屬性은 보통의 氣體와 같으며 壓力, 溫度, 密度(1cm當 이온이나 電子의 個數) 또는 對流나 擴散의 빠르기, 熱傳導率 등의 物理的 파라미터로 나타낼 수 있다. 그러나 보통의 氣體와는 달리 金屬과 같이 電氣를 通하므로 抵抗이나 inductance가 問題될 때도 있다.

地上에서 플라즈마를 發生시키려면 一定量의 物質에 原子나 分子를 파괴시키는데 충분한 큰 에너지를 加해주어야 한다. 그러나 加해진 에너지가 放散되면 플라즈마는 곧바로 원래의 氣體 등으로 되돌아 간다. 이와같은 것은 번개 등에서 볼 수가 있다.

그러면 이처럼 취급하기 어려운 플라즈마를 核融合爐의 爐心으로 하는 이유를 DT反應을 例로 알아 보자. 만약 플라즈마를 使用하지 않고 反應을 일으키려면 重水素이온을 加速시켜서 固體 또는 液體, 氣體狀態의 트리튬에 照射시키면 된다. 그러나 이 方法의 경우 重水素이온의 에너지 대부분이 트리튬의 原子나 分子의 分解에 소비되어 核反應에는 有效하게 使用되지 못한다.

DT反應이 가장 일어나기 쉬운 核融合反應이기는 하지만 原子나 分子의 分解는 그보다 1억배 이상의 確率로 일어나기 쉽다. 이 難點은 target를 트리튬의 플라즈마로 함으로서 어느 정도 해결할 수 있다. target로 플라즈마가 아니라 트리튬이온의 集團으로도 해결될 수 있을 것 같으나 이 경우는 이온사이의 靜電反發력이 너무 강해서 密度를 높일 수가 없다.

그러나 電子를 포함하고 있는 플라즈마라면 電氣的으로 中性이므로 높은 密度를 얻을 수 있다. 또한 target가 플라즈마이면 原子, 分子의 分解에 加速이온의 에너지가 소비되지 않으므로 이와같은 系라면 경우에 따라서는 核融合爐로 成立될 수도 있으나 에너지가 核反應에 有效하게 使用되는 것만으로 成立되지는 않는다.

入射重水素이온이 target 플라즈마와 충돌하

여도 항상 DT反應만이 일어나는 것은 아니며 오히려 彈性散亂의 경우가 DT反應보다 1억배 이상 일어나기 쉽다. 즉, 彈性散亂에 의해 에너지가 곧바로 DT反應이 일어나지 않는 레벨까지 내려가 버린다. 彈性散亂은 트리튬이온뿐만 아니라 電子에 의해서도 일어난다.

이 難點은 入射이온과 target 플라즈마 사이의 核反應이 아니고 플라즈마中の 燃料이온사이의 충돌시에 일어나는 核反應을 利用함으로써 해결될 수 있다. 플라즈마中の 이온이나 電子는 보통의 氣體分子와 마찬가지로 서로 부딪치면서 모든 方向으로 여러가지의 速度로 무질서하게 運動을 하고 있다. 플라즈마의 溫度가 높아지면 무질서한 運動의 速度는 全體적으로 커지며 충돌은 그 만큼 격심하여 진다. 溫度가 충분히 높아지면 核融合反應이 일어나게 된다.

플라즈마中の 高速粒子和 低速粒子和는 충돌하여 에너지를 잃는다. 逆으로 低速粒子和는 에너지를 받아서 그 速度가 증가한다. 그러므로 플라즈마全體의 에너지가 변하지 않으면 粒子사이의 彈性散亂에 의해서 核反應을 일으키는 高速粒子和의 數가 변하지 않는다. 따라서 충분히 溫度가 높은 플라즈마中에서는 核融合反應이 일정한 비율로 일어난다. 이렇게 되면 彈性散亂은 核反應의 競争過程은 아니다.

이상과 같은 核反應을 熱核反應이라고 하는데 太陽 등의 恒星은 이 原理로 타고 있는 것이다. 核融合燃料을 燃燒시키려면 熱核反應을

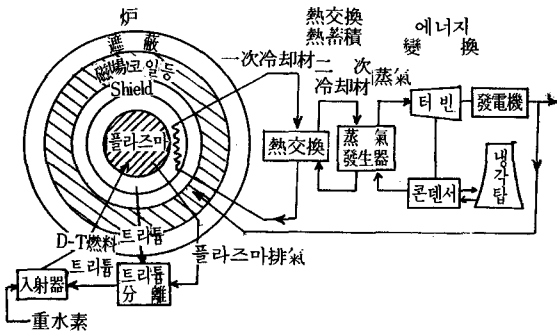
利用하는 方法이 에너지效率이 가장 높다.

### 3. 核融合爐의 構成

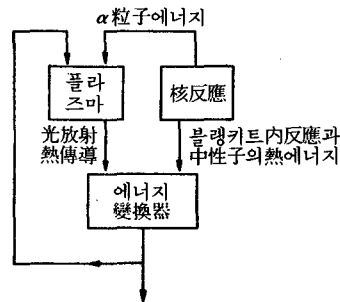
플라즈마의 發生, 加熱에는 電氣에너지를 使用한다. 核融合爐는 電氣를 使用하여 電氣를 發生시키는 시스템이다. DT爐를 例로 電氣에너지 發生까지의 進行과정을 알아 보기로 한다

核反應에서 생기는 에너지는 生成核의 運動에너지로 나타난다. DT反應에서는 中性子和 헬륨核의 運動에너지이다. 中性子は 壁을 透過하여 爐心을 둘러싸고 있는 리튬과 反應해서 트리튬이 생기게 하여 다시 에너지를 발생시킨다. 둘레의 리튬層을 블랭킷이라고 한다. 헬륨은 電荷를 갖고 있으므로 그대로 플라즈마中에 남으며, 그 운동에너지는 다른 이온이나 電子에 충돌을 통하여 나누어 주어진다. 즉, 核反應의 에너지 일부는 플라즈마의 加熱에 使用되는 것이다.

처음에 플라즈마에 投入시킨 電氣에너지와 DT反應에서 發生된 에너지 모두 最後에는 熱에너지가 되어 爐心의 壁이나 블랭킷을 叩인다. 이 熱에너지는 물 등의 冷却材에 의해 밖으로 추출된 후에 發電機에 의해 더욱 質이 높은 電氣에너지로 變換된다. 그리고 電氣에너지의 일부는 플라즈마의 生成, 加熱을 위해 되돌아가고 그 나머지가 核融合爐에서 生産한 實質的인 電氣出力이 되는 것이다.



(그림 2) 核融合爐시스템 構成圖



(그림 3) 核融合爐에서의 에너지 흐름

이상의 프로세스에서 核融合爐 시스템의 構成은 그림2와 같으며, 이것을 에너지의 흐름으로 나타내면 그림3이 된다.

#### 4. 核融合爐의 成立

核融合爐의 電氣出力이 電氣入力보다 커지는 條件은 爐心플라즈마의 파라미터와 熱부터 電氣까지의 에너지變換效率에 依存한다. 出力이 入力보다 크지 않으면 爐로서의 역할을 할 수 없다. 그러기 위해서는 충분한 數의 核反應이 일어날 것과 에너지變換效率이 높을 것이 必要하다.

核反應이 충분히 일어나려면 먼저 플라즈마의 溫度가 適度로 높을 것이 요구된다. 溫度가 너무 높으면 그림1에서 알 수 있듯이 오히려 核反應의 效率이 낮아지며 플라즈마의 密閉도 어려워진다. 다음에 核反應을 일으킬 燃料이온의 濃度, 즉 數密度가 충분히 높을 것이 필요하다. 그리고 플라즈마의 密度와 溫度가 爐心に 滯溜하는 時間, 즉 密閉時間이 충분히 길어야 한다. 多數의 反應이 일어나는 데는 時間이 걸리므로 溫度와 密度의 低下가 너무 빠르면 爐의 成立은 不可能하다.

爐의 成立條件을 고려할 때 플라즈마의 密度와 密閉時間의 관계는 相補的인 것으로서 密閉時間이 짧으면 그동안에 많은 核反應이 일어나도록 하기 위해서 燃料의 密度를 높게 할 必要가 있으며 또한 逆으로 密閉時間이 길면 조금씩 核反應이 일어나면 되므로 燃料의 密度는 낮아도 무방하다. 따라서 爐의 成立條件을 判定할 때에 플라즈마의 密度와 溫度에 대해서는 兩者의 곱(積)의 형태로 취급하면 좋다.

플라즈마로부터 에너지가 달아나는 原因은 擴散, 熱傳導, 對流 및 플라즈마로부터의 빛 에너지 放射이다. 高溫의 플라즈마는 電波에서 X線까지의 넓은 波長範圍의 빛을 낸다. 태

양이나 별들의 반짝임은 모두 플라즈마의 빛이다. 빛의 放射는 爐心플라즈마의 溫度低下를 가져오게 하는 큰 要困이다. 플라즈마로부터 나오는 빛은 壁에 흡수되어 熱로 變한다.

빛의 放射強度는 電荷數가 큰 이온이 플라즈마에 혼입되면 급격하게 增大한다. 重水素이온과 트리튬의 電荷數는 1이나 여기에 약간 量의 산소나 重金屬이온이 混入되면 플라즈마의 온도는 내려간다. 爐心플라즈마는 高純度라야한다.

高度의 플라즈마가 金屬壁과 접촉하면 壁面이 蒸發하여 플라즈마中에 들어가 不純物이 된다. 그러므로 爐心플라즈마의 主要部를 壁에서 떨어지게 하여 유지시킬 必要가 있다. 또한 大氣中의 산소나 질소가 燃料에 混入되는 것을 막기 위해서는 처음에 爐心을 超高眞空으로 하고 여기에 純度가 높은 燃料을 導入하여 플라즈마를 生成시키는 것이 必要하다. 不純物을 모두 제거시켰다 하더라도 빛의 放射는 플라즈마로부터의 에너지 損失에 있어 큰 부분을 차지한다.

플라즈마中에서의 擴散이나 熱傳導 또는 對流는 密度와 溫度가 空間적으로 같지 못하기 때문에 일어난다. 플라즈마를 壁에서 떨어지게 하여 유지시키므로 密度와 溫度는 中心部에서 높고 周辺部에서는 낮아져서 斷熱容器中의 보통 氣體처럼 空間적으로 같기를 기대할 수가 없다. 이로 인해 擴散이나 熱傳導 또는 對流에 의한 에너지損失도 光放射에 의한 에너지損失과 마찬가지로 피할 수 없는 것이다. 그러나 이것들은 光放射損失과는 달리 기술노력에 의해 極小化시키는 것이 可能하다.

플라즈마로부터의 에너지損失量을 알면 에너지의 密閉時間을 算定할 수 있다. 粒子의 密閉時間은 이보다 길므로 爐心플라즈마密閉裝置의 性能評價에는 에너지密閉時間이 使用된다.

그림4는 DT核融合爐의 成立範圍를 나타내고 있다. 成立條件을 정하는 파라미터는 플라즈마의 溫度, 密度와 密閉時間의 곱 및 에너지變換

효율이다. 각각의 곡선에 일정한 변환효율이對應하고 있다. 곡선의 상側에서는 核融合爐 시스템에서의 電氣出力이 電氣入力을 상회한다. 곡線上에서는 兩者가 균형을 이루는데 이 균형이 이루어진 條件을 zero power 條件이라고 하며 變換效率이 1/2일때의 zero power 條件을 Lawson 條件이라고 한다.

右上的 파라미터領域에 가까운 裝置일수록 플라즈마密閉裝置로서 性能이 좋으며 核融合爐로서 有望하다. 그림4에서 爐心플라즈마의 파라미터가 入出力에너지의 균형조건을 약간 넘는 곳에 있을 때는 電氣入力을 계속하지 않는 한 爐은 정지해 버린다. 즉, 플라즈마로부터 에너지가 달아나면 溫度가 내려가므로 이것을 일정하게 유지시켜주기 위해서는 지속적인 加熱用 電氣入力이 必要하다.

만약 DT反應에서 생기는 헬륨의 에너지로 爐心플라즈마의 온도가 일정하게 유지된다면 加熱入力이 없더라도 燃料는 持續적으로 燃燒한다. 즉, 이 상태에 도달하기까지 처음에만 加熱入力을 爐心에 넣어주면 된다. 이와 같이 하여 核融合爐로 自動적으로 燃燒하기 시작하는 것을 自己點火라고 한다.

核融合爐의 實現을 向하는 過程에서 Lawson 條件의 달성이 하나의 관건이 된다. Lawson

條件의 달성은 核融合爐의 科學的 實証이라고 할 수 있다. Lawson條件부터 自己點火의 달성을 거쳐 實用發電爐에 이르기 까지는 數많은 工學技術的 問題를 解決하여야 한다.

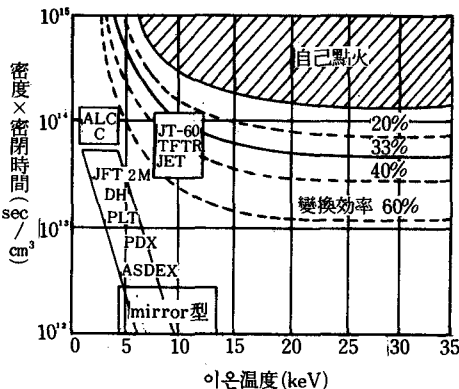
Lawson條件을 代表하는 數値를 그림 4에서 알아보면 溫度가 1억도, 密度와 密閉時間의 곱이  $10^{14} \text{cm}^{-3} \text{sec}$ 가 된다. 密度가  $10^{14} \text{cm}^{-3}$ , 즉  $1 \text{cm}^3$  당 100兆個의 粒子가 포함된 플라즈마라면 1초 동안 密閉하여야 한다. 密度가 높아지면 必要한 密閉時間은 그만큼 짧아도 된다.

## 5. 爐心플라즈마의 密閉方式

1氣壓인 氣體의 密度는 약  $10^{19} \text{cm}^{-3}$ 이므로 密度가  $10^{14} \text{cm}^{-3}$ 인 플라즈마는 보통 空氣보다 10萬배나 密度가 낮다. 密度가 낮은 플라즈마에서는 플라즈마에로의 不純物 混入을 피하기 위해 처음에 超高眞空을 準備하고 壁에서 떨어지게 하여 密閉할 必要가 있다. 플라즈마의 密度가 높아질수록 外部로부터의 不純物 混入에 대한 염려가 적어지며 密度가 固體의 密度인  $10^{23} \text{cm}^{-3}$ 에 가까워지거나 또는 이것을 넘는 플라즈마에서는 이에대한 걱정이 없어진다.

플라즈마를 密閉하는 方法을 大別하면 두가지가 있다. 하나는 磁場을 使用하는 方法이고 다른 하나는 慣性을 使用하는 方法이다. 前者는 密度가  $10^{12} \sim 10^{16} \text{cm}^{-3}$ 인 플라즈마를, 後者는 密度가  $10^{22} \sim 10^{26} \text{cm}^{-3}$ 인 플라즈마를 密閉의 對象으로 하고 있다. 密度가  $10^{19} \text{cm}^{-3}$  정도인 中間領域의 플라즈마 密閉方式도 있다.

眞空中의 플라즈마는 自身の 壓力에 의해 팽창한다. 이 壓力을 磁氣應力에 의해서 되돌려주는 것이 磁場密閉이다. 巨視적으로 보면 플라즈마는 水銀과 유사하여 電流를 通하는 流體, 즉 電磁流體이다. 磁場中의 電磁流體에 電流를 흐르게 하면 流體는 磁場과 電流 雙方에 直交하는 方向으로 힘을 받는다. 모우터가 回轉하



(그림 4) DT 核融合爐의 成立範圍와 여러가지 裝置의 파라미터領域

는 것도 이 힘에 의한 것이며 眞空中에서 플라즈마를 空間에 뜨게 하는 것에도 이 힘이 利用되고 있다.

또 하나의 爐心方式은 高溫, 高密度의 플라즈마를 極히 짧은 時間에 만들고 이것이 흩어지기 前의 極히 짧은 時間동안에 충분한 量의 核反應에너지를 추출해 내려는 것이다. 高溫플라즈마를 한꺼번에 發生시키더라도 플라즈마를 構成하는 粒子的 質量이 zero가 아니므로 慣性力이 作用하여 흩어지기까지에는 약간의 時間이 걸린다. 이 效果를 利用하므로 이 方式을 慣性密閉方式이라고 한다.

實은 水爆도 일종의 慣性密閉方式이다. 그러나 水爆은 일시에 큰 核融合에너지를 發生시키므로 爐로 應用할 수 없다. 核融合爐는 發電동

의 目的에 利用하기 위해서 發生量을 制御할 수 있어야 한다.

慣性核融合爐에서는 pellet라고 하는 固體 또는 液體狀態의 燃料小片을 爐心에서 하나씩 爆發시킨다. pellet는 0.1mm에서 數mm 까지의 크기이다. 작은 pellet에 짧은 時間동안에 큰 에너지를 注入시키려면 高密度이며 power가 큰 에너지源이 必要하다.

이와 같은 目的으로는 레이저光線이나 이온 또는 電子 등의 粒子비임이 應用될 수 있다. 이들의 에너지源은 현재의 性能으로는 核融合爐의 目的으로 불충분하며 核融合爐와 함께 開發研究가 추진되고 있다. 또한 燃燒效率을 높이기 위해서 pellet의 構造에 대해서도 研究가 行해지고 있다.

### 第5回 韓日原子力産業세미나 案内

韓日 兩國의 기술협력증진을 위하여 韓國原子力産業會議과 日本原子力産業會議가 共同主 催하는 제5회한일원자력산업세미나가 10月 18· 19日 이틀 동안 「原子力發電의 技術蓄積」이라는 基調테마로 서울 롯데호텔에서 開催되는바 관계人士여러분의 많은 참가를 바라는 바입니다.

#### 〈프로그램〉

10月18日(火)

Session 1-A : 輕水炉의 運轉經驗(核燃料)

○古里1號機 核燃料性能分析  
(韓國電力公社 原子力發電部長 鄭甫憲)

○日本에서의 核燃料性能分析  
(四國電力(株) 核燃料次長 中西 健)

Session 1-B : 輕水炉의 運轉經驗(S/G)

○日本에서의 蒸氣發生器 運轉經驗  
(九州電力(株) 原子力計劃課長 北村博人)

○古里1號機의 蒸氣發生器 運轉經驗  
(韓國電力公社 月城原子力發電所長 朴祥基)

Session 2 : 原電檢査技術向上

○韓國의 稼動前 / 稼動中 檢査

(韓國에 너지研究所 非破壞試驗研究室長 朴大英)

○日本의 稼動前 / 稼動中 檢査

(日立製作所 原子力事業部長 是井良朗)  
10月19日(水)

Session3 : A / E 技術自立

○엔지니어링 및 建設經驗蓄積과 技術自立  
(東芝電氣(株) BWR技師長 吉島重和)

○A / E能力 自立을 爲한 技術移轉  
(韓國電力技術(株) 技術本部長 朴貴容)

Session 4 : 放射性廢棄物管理

○放射性廢棄物管理에 對한 研究  
(韓國에 너지研究所 化學工程研究室長 金容翊)

○放射性廢棄物管理 및 安全研究  
(日本原子力發電(株) 原子炉課長 目黑芳紀)

社團 韓國原子力産業會議  
法人