

核融合 發電

韓 弼 淳
(韓國에너지 研究所長)

■ 차 례 ■

- 1. 序 論
- 2. 核融合反應
 - 2.1 核融合의 原理
 - 2.2 核融合反應의 實際
 - 2.3 熱核融合의 達成條件
- 3. 核融合爐開發의 現況과 展望
- 4. 核融合爐의 構成
- 5. 核融合發電의 意義
- 6. 結 論
 參考文獻

1 序 論

文明이 發達하고 人口가 늘어남에 따라 에너지 消費量은 1850年 以後 一世紀當 10倍 以上の 增加率을 보이고 있으며 20世紀에 들어 서면서 그 增加率은 더욱 急激함을 보이고 있다. 이미 잘 알려져 있는 바와 같이 人類가 使用해 왔던 石油, 石炭등의 化石燃料은 埋藏量이 거의 枯渴狀態에 있으며 今世紀 中반부터 實用化된 核分裂爐는 自然우라늄의 0.7%밖에 存在하지 않는 U-235 代身에 現在 대부분을 버리고 있는 U-238을 燃料로 하는 高速增殖爐의 開發을 前提로할때 燃料의 埋藏量은 數世紀를 쓸 수 있는 量이 된다고 보겠다. 따라서 化石燃料과 核分裂爐는 限定된 燃料埋藏量과 環境汚染의 憂慮때문에 今世紀末부터 다음世紀까지의 에너지空白期에 主에너지源으로서의 口實을 다한 후에는 새로운에너지源에 그 자리를 넘겨줘야 할 것으로 생각되고 있다. 다음世代之 새로운 에너지源으로서 가장 큰 期待를 모으고 있는 것 중의 하나가 바로 核融合이다. 核融合은 環境汚染物質의 排出이 적고 燃料確保가 比較的 쉬우며 埋藏量이 거의 無限하고 單位質量當 放出에너지가 매우 높은 것이 特徵이다.

核融合發電의 實用化는 빠르면 2010년경에, 늦어도 2020年代에는 可能해질 것으로 展望되고있다. 본

稿에서는 核融合의 原理, 核融合爐가 滿足해야할 條件, 核融合爐의 構造, 核融合爐의 開發現況과 展望 및 核融合發電의 意義等에 關해서 簡略하게 살펴보기로한다.

2 核融合反應

2.1 核融合의 原理

化石燃料를 태울때의 化學反應에너지는 電子의 結合에너지가 放出되는 反面 核分裂이나 核融合의 경우는 核子들 즉 中性子와 陽性子들 사이의 核力이 反應生成物의 運動에너지로 放出된다. 核分裂은 우라늄과 같은 質量이 큰 原子核이 보다 가벼운 原子核들로 갈라지는 것이며 核融合은 水素나 氦과 같은 가벼운 原子核들이 보다 무거운 原子核으로 되는 現象이다. 核分裂은 무거운 原子核과 實溫의 中性子が 만나는 것 만으로도 일어 날 수도 있지만 核融合의 경우는 陽電荷를 띄고있는 두 原子核을 結合시키기 위해서 Coulomb 斥力을 이길만한 充分한 運動에너지를 人爲的으로 供給해 주어야한다. 바로 이것이 核分裂爐의 順調로운 實用化와는 달리 核融合商用爐의 建設時期를 21世紀중반까지 遲延시키는 根本的인 理由가 되고있다.

核融合反應의 種類는 여러가지가 있겠으나 이중 現實的으로 중요한 몇가지 反應의 特性은 表1에서

표 1. Various fusion reactions

<u>Classical Fusion Fuel</u>	
$D + T \rightarrow n$ (14.1 MeV) + ${}^4\text{He}$ (3.52 MeV)	
<u>Conventional Advanced Fusion Fuels</u>	
$D + D \rightarrow p$ (3 MeV) + T (1 MeV)	
$D + D \rightarrow n$ (2.4 MeV) + ${}^3\text{He}$ (0.8 MeV)	
$D + {}^6\text{Li} \rightarrow 2 {}^4\text{He}$ (22.4 MeV)	
$D + {}^3\text{He} \rightarrow p$ (14.6 MeV) + ${}^4\text{He}$ (3.7 MeV)	
<u>Exotic Advanced Fusion Fuels</u>	
$P + {}^6\text{Li} \rightarrow {}^3\text{He}$ (2.3 MeV) + ${}^4\text{He}$ (1.7 MeV)	
$P + {}^{11}\text{B} \rightarrow 3 {}^4\text{He}$ (8.7 MeV)	

보는 바와 같다. 表에서 알 수 있듯이 一般적으로 單位質量當 反應에너지가 매우 높다. 一例로 $D-D$ 反應의 경우 重水素 1Kg 이 完全히 核融合反應을 일으킬때 放出되는 에너지는 $8.6 \times 10^{13} \text{J}$ 에 달한다. 이는 10 만 MW 發電소가 10 日에 걸쳐서 發電한 電力量이 該當한다. 여러가지 核融合反應의 種類 중 어떤 것을 選擇할 것인가는 燃料確保의 容易性, 核融合反應의 點火溫度, 單位質量當의 放出에너지, 反應生成物の 種類등에 의해 決定된다. $D-T$ (重水素-三重水素) 燃料는 點火溫度가 4 KeV 程度로서 가장 낮고 같은 溫度에서 出力密度가 가장 높아 自然的으로 存在하지 않는 三重水素를 人工的으로 生産할 必要性과 高速中性子の 發生이라는 脆弱點에도 불구하고 第一世代 核融合爐의 基本的인 燃料로서는 $D-T$ 를 使用하게 될 것이 거의 確實시 된다.¹⁾

2.2 核融合反應의 實際

太陽은 核融合에 의해 每秒 約 4×20^{20} MW 의 熱을 放出하고있다. 太陽의 中心部는 99%의 水素와 약간의 헬륨으로 構成되어있고 中心溫度는 약 2000 만도, 密度는 약 150g/cm^3 , 壓力은 약 4×10^{11} 氣壓으로 이러한 條件에서는 水素核끼리 100 億년에 1 회정도의 確率로 核融合을 緩慢히 일으켜 에너지를 계속 放出하는 것으로 생각하고있다. 한편 太陽보다 더 큰 天體에서는 炭素 및 窒素에 의한 核融合反應이 主에너지源이 되는 것으로 推定하고 있다. 이들의 경우 核融合反應이 일어 날 수 있는 條件은 매우 큰 重力에 의해서 可能하다.²⁾ 이때 反應에너지와 放出에너지는 平衡을 이루고 있으며 外部로 부터 에너지 供給없이 自體的으로 持續





的인 核融合條件의 維持가 可能한 것이다. 이와같은 경우를 熱核融合이라 한다. 地球上에서도 熱核融合을 일으킬 수 있을 것이라는 생각은 天體物理學의 副産物로 始作된 것인데 실제로는 狀況이 전혀 틀려서 모든 核融合條件을 人工적으로 만들어 주지 않으면 成된다. 人工的인 熱核融合의 實現은 1952 年 美國의 水素爆彈實驗의 成功에 의해 이루어졌다. 水素爆彈은 重水素와 三重水素를 原爆주위에 設置하여 原爆의 爆發에너지에 의해 순간적으로 加熱되도록 만든 것으로 이때 核融合燃料는 核分裂燃料와는 달리 連鎖反應이 일어나지 않으므로 臨界質量이라는 概念이 없으며 단지 充分한 溫度까지 加熱해 주는 것만이 必要하다. 核融合에너지를 實用化하기 위해서는 核融合反應이 우리가 원하는 量만큼 일어나게 하는 制御核融合이 實現되어야 하므로 現在 많은 나라에서 이러한 研究를 활발히 遂行하고 있다. 表 2에서는 核融合에 의해 에너지가 發生되는 太陽, 水素爆彈, 核融合爐의 3 가지 경우에 대해 簡略하게 比較하였다.

2.3 熱核融合의 達成條件

熱核融合을 人工的으로 達成하기 위해서는 核融合反應核들의 溫度를 充分히 높여서 ($D-T$ 의 경우 約 1억도) 核融合反應率을 크게하며, 粒子密度 (n)와 全體系의 에너지 密閉時間 (τ)을 늘려서 核融合反應出力을 높이는 반면 에너지 損失率을 낮추어야된다. 核融合反應이 自發的으로 持續되기 위해서는 에너지入力과 核融合反應出力의 合이 에너지 損失率보다 작아져서는 안된다. 이러한 條件들을 數值化한 것이 Lawson 條件으로서 $D-T$ 의 경우 적어도 $n\tau > 10^{14} \text{s/cm}^3$ 을 만족해야된다.

重水素나 三重水素는 常溫에서는 2 原子分子의 氣體狀態이지만 溫度가 數萬度以上이 되면 分子의 結

표 2. Production of fusion energy

	Fusion Fuel	Temp. (°C)	Density (cm ⁻³)	Reaction Time
Sun	 H	2×10^7	150 g	∞
H-bomb	 D	1×10^7	2 g	10^{-9} s
Fusion Reactor	 D  T	2×10^8	2×10^{-7} g	> 1 s

합이 끊어지는 것은 물론 殼電子들이 모두 떨어져 나가 陽電荷를 갖는 核들과 電子들이 숫적으로 平衡을 이루는 플라즈마가 형성된다. 常溫에서 1 氣壓의 氣體를 一定容器에서 1 억도로 加熱하면 壓力은 약 35 萬氣壓이 되므로 어떤 物質로 만든 容器도 이런 高溫, 高壓의 플라즈마를 담고 있을 수 없게 된다. 또한 核融合反應率이 너무 커서 이를 制御하는데 큰 어려움이 있으며 根本的으로는 이와 같은 플라즈마를 發生시킨다는 것 자체가 不可能하다. 따라서 核融合反應物質을 보통 10^{-6} 氣壓 程度로 稀薄하게 만들고 이를 電氣放電등에 의해 플라즈마로 만든 후 磁力線內에 密閉시키는 方法을 使用하든가 反應物質을 固體化하여 Laser 나 電子빔등으로 強力한 에너지를 投入, 순간적으로 加熱하여 核融合反應을 일으키는 方式을 使用한다. 前者를 磁場密閉方式 (Magnet Confinement), 後者를 慣性密閉方式 (Inertial Confinement) 라고 한다.

플라즈마粒子들은 不斷한 衝突에 의해 孤立系 밖으로 빠르게 擴散되어 나가는 性質을 가지고 있다. 粒子들의 擴散速度는 系의 크기에 反比例하므로 에너지

密閉時間을 길게해서 Lawson 條件을 만족시키도록 하려면 플라즈마의 크기가 어느 基準以上이 되어야 하며 따라서 核融合爐의 規模도 어떤 制限值以上이 되어야함을 쉽게 알 수 있다.

Lawson 條件은 다른 말로 臨界플라즈마 條件이라고도 하는데 이는 단지 核融合爐의 物理的인 可能性을 가늠하는 最少基準에 불과하다. Lawson 條件을 겨우 만족하는 核融合爐는 自己自身の 熱出力을 電力으로 바꾼후 이를 모두 플라즈마에 入力시켜야 하므로 外部로 내보내는 純出力은 전혀없게 된다. 核融合爐가 商業的으로 稼動되기 위해서는 核融合爐의 熱出力을 外部로 供給하더라도 플라즈마의 溫度는 核融合反應生成物중 荷電粒子들 (D-T의 경우를 包含하여 대부분이 α -粒子들임)의 에너지에 의해 維持되어야 한다. 이 條件을 自己點火條件이라 부르며 이는 核融合爐의 竊極的인 動作領域이 된다.

③ 核融合爐開發의 現況과 展望

水素彈實驗이 成功한 같은해 美國 Princeton 大

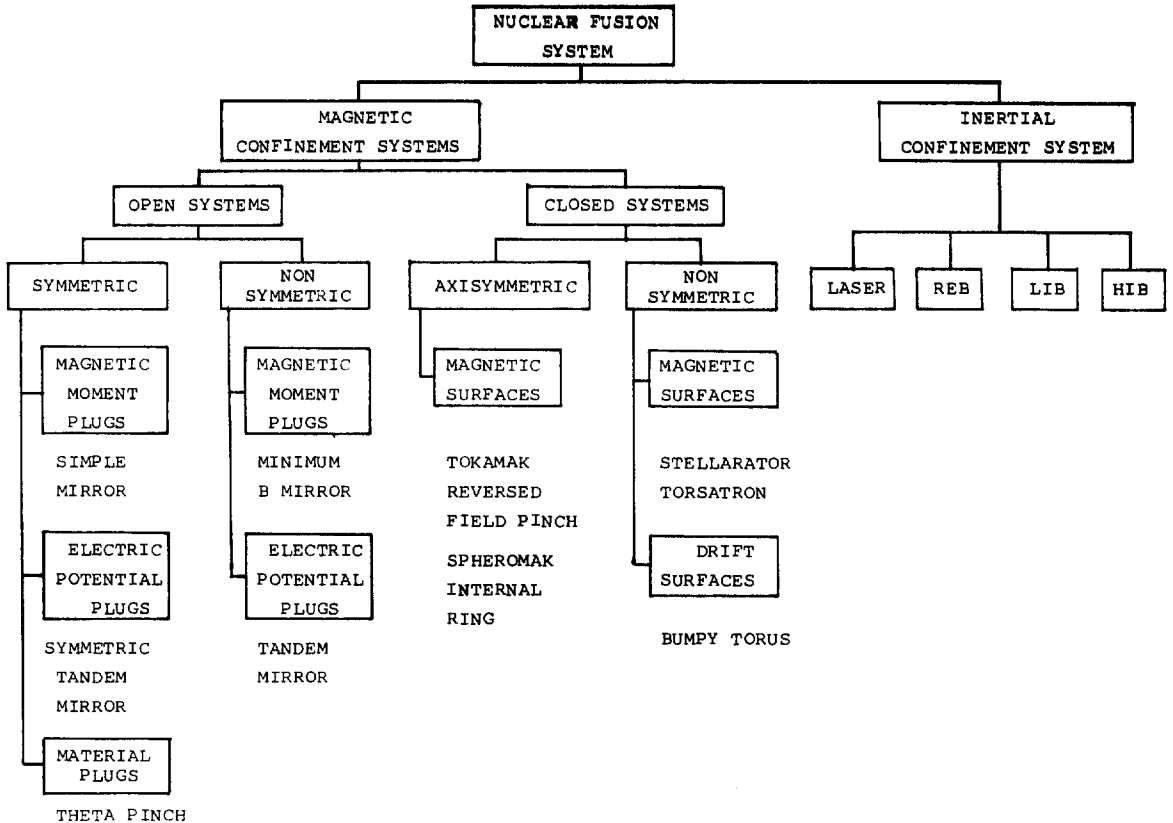


그림 1. The Taxonomy of fusion confinement systems

學의 Spitzer 에 의해 8 字型의 Stellarator B-1 實驗이 制御核融合研究의 始作이라고 할 수 있다. 그以後 美國, 소련, 유럽 및 日本등에서 여러가지 形態의 核融合裝置들이 研究되어왔다. 現在 研究되고 있는 核融合裝置들을 플라즈마의 密閉方式에 따라 分類하면 그림 1에서 보는 바와 같다.

核融合裝置들의 實驗目的은 核融合爐開發에 必要한 物理的, 工學的 基礎資料를 얻고 또 核融合爐條件에 接近할 수 있도록 裝置들을 改善해 나가는데 있다. 그림 2는 主要核融合裝置들의 成果 및 豫想되는 進展度를 Lawson 條件 ($Gain = 1$) 과 對比하여 나타낸 것이다. 裝置名중 Helios, Shiva, Nova 등은 Laser 에 의한 慣性密閉方式의 核融合實驗裝置이고 2X-11B는 Mirror 裝置의 한 種類이며, 나머지 裝置들은 Tokamak 裝置들이다.

한편 核融合裝置들의 理論 및 實驗의 研究와 並行

하여 科學的 實證爐에서 商用爐에 이르는 여러 段階의 核融合爐에 대한 概念設計, 詳細設計 및 建設이 推進되어왔다. 製作이 이미 完成되어 實驗중에 있는 美國의 TFTR 을 비롯해서 유럽 共同體의 JET, 日本의 JT-60 및 소련의 T-15 등은 85~6 년경에 Lawson 條件의 達成을 目標로 하고 있는 大型 Tokamak 裝置들이다.³⁾ 科學的 實證爐 다음 段階인 工學的 實證爐로서는 IAEA 主管下에 위의 4個 研究그룹이 共同으로 INTOR 를 詳細設計중에있다. 한편 經濟的 및 環境에 대한 妥當性을 立證하기 위한 原型爐 및 商用爐의 概念設計도 많이 遂行되고있다.

核融合爐 水準에서 플라즈마條件에 도달하려는 成果度 側面에서 볼때 Tokamak 방식이 現在까지는 가장 앞서 있으며 그 다음이 Tandem Mirror 방식이라 하겠다. 이외에도 Stellarator, RFP, Spheromak ELMO Bumpy Torus 등이 그뒤를 따르

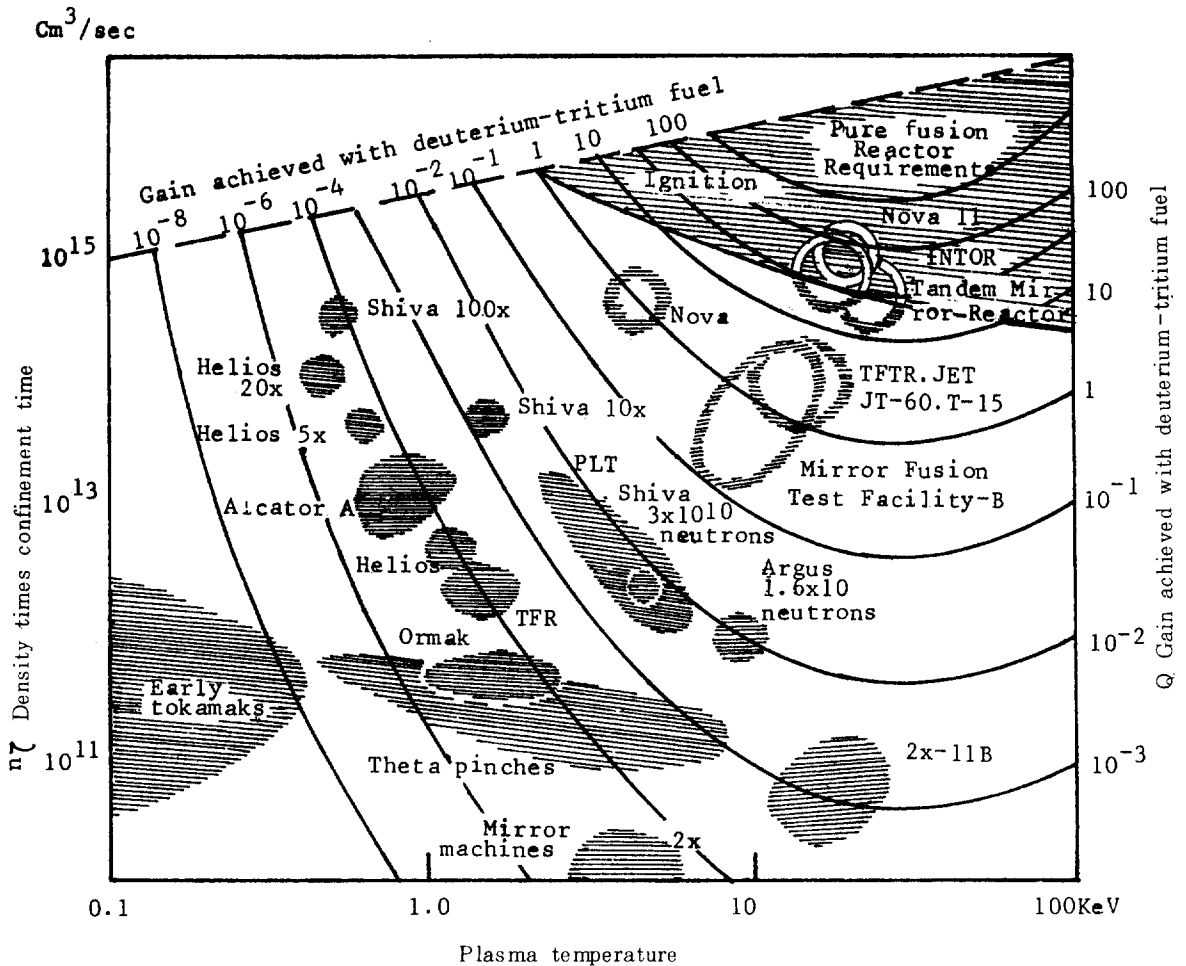


그림 2. Progress of various fusion devices

고 있다.⁴⁾

慣性密閉方式의 核融合研究은 아직까지는 軍事的인 目的과 關聯해서 Laser 나 Ion 빔등 주로 Driver의 性能向上에 主力해 왔으므로 核融合爐開發과 關聯된 成果는 磁場密閉方式에 비해 처져있다.

Tokamak 은 그림 3과 같이 도너스型の 密閉容器 속에서 플라즈마를 發生시켜 容器의 縱軸에 平行한 磁場과 플라즈마電流에 의해 發生되는 磁場의 合成에 의해 密閉하도록 되어있다. Tokamak의 特徵은 플라즈마의 높은 安定性과 平衡維持機能에 의해 플라즈마의 에너지密閉時間이 긴 것이라 하겠다. 반면에 플라즈마發生 및 加熱을 주로 磁場變化에 의존하기 때문에 連續運轉이 어렵다는 短點이있다.

Tandem Mirror는 그림 4와 같이 중앙의 Solenoid 양끝에 Yin - Yang 코일을 각각 設置한 것이다. 플라즈마는 양끝의 強한 磁場과 電位差에 의해 密閉된다. 이 방식은 密度가 높은 플라즈마를 連

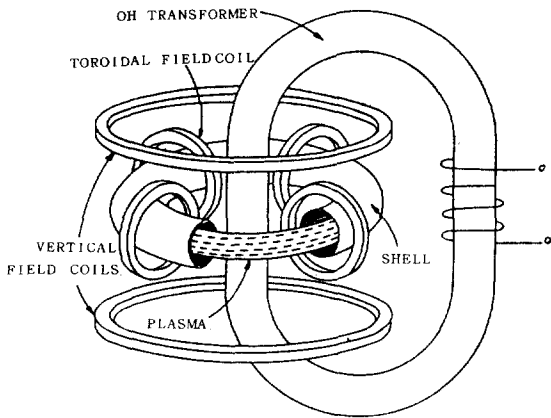


그림 3. Basic components of a Tokamak

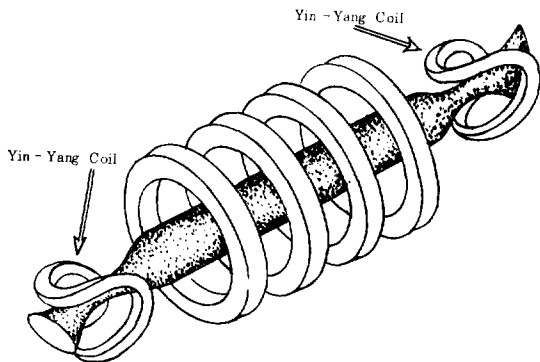


그림 4. Tandem mirror

續的으로 維持할 수 있는 반면 主軸을 따라에너지가 큰 粒子들이 잘 빠져나간다는 短點이 있다.

비록 現在까지 Tokamak 이 가장 좋은 實驗結果를 얻고 있고, Tokamak 에 의한 核融合爐의 科學的 實證이 거의 확실시되며 또한 核融合商用爐의 概念設計도 거의가 Tokamak 型으로 이루어지고 있으나 아직까지는 Tokamak 의 實用化를 장담할 수는 없다. 이는 工學水準面에서 核融合商用爐의 그것과는 큰 隔差가 있기 때문이다.

核融合爐開發과 關聯하여 密閉方式에 關係없이 계속적인 研究開發이 必要한 基本的인 分野는 磁場코일技術, 플라즈마加熱技術, 材料工學, 三重水素關聯技術, 電氣 및 構造力學등이다.^{5), 6)}

磁場코일技術開發은 주로 強磁場 및 變化率이 큰 磁場에 견딜 수 있는 超電導體를 開發하는 것에 집중되어 있으며, 플라즈마 加熱技術開發에는 수십 MHz 에서 數백 MHz에 이르는 넓은 領域에 걸친 電磁氣波의 電源, 導波管 및 發射體등에 關한 技術開發과 數拾MW, 수백 KeV 에 달하는 中性粒子加熱裝置開發이 包含되어있다.

核融合爐의 材料로는 第一壁의 構造材, 冷却材, 三重水素增殖材등의 力學的, 熱的 및 核的 特性들의 糾明이 課題로 남아있다.

1 GW 級 核融合爐의 경우 三重水素의 流量은 時間當 수백g 정도가 된다. 이와關聯해서 多量의 三重水素를 生産, 回收, 精製 및 貯藏施設이 要求되며 또한 核融合爐의 運轉을 위해 必要한 수백 MW 의 電力設備 및 貯藏施設의 開發과 아울러 10^{10} N · m 에 달하는 토크를 견딜 수 있는 構造物에 대한 技術開發도 계속되어야 할 것이다.

한편 우리나라에서의 核融合研究은 이제 막 胎動 하려는 狀態에 있다. 各種 密閉方式에 대한 理論的인 研究와 一部 核融合實驗裝置의 製作 및 基礎實驗이 遂行되고 있다. 特히 Tokamak 裝置는 韓國에너지研究所와 서울大學校에서 研究用으로 製作되고 있으며 先進國의 核融合研究實績의 綜合的인 分析을 目的으로 核融合爐의 概念設計作業도 進行되고 있다.

4 核融合爐의 構成

核融合爐의 基本的인 構成은 爐心の 核融合플라즈마, 燃料의 溫度를 核融合點火溫度까지 높여주는 加熱系, 核融合플라즈마를 주위로부터 隔離시켜 주는 密閉容器, 不純物制御系, 核融合反應에너지를 回

収하기 위한 冷却系 및 熱交換系, 이를 電氣로 變換시키는 電力系, 燃料生産 및 回收系, 真空排氣系, 플라즈마計測 및 運轉制御系 등으로 이루어져 있다.

磁場密閉方式의 경우에는 磁場系가 包含되는데 이는 가장 복잡한 構造를 가지고 있는 部分으로서 核融合爐의 組立, 補修 및 交替를 어렵게 만들고 建設費를 높이는 결정적인 要因이 된다. 그러나 앞에서 언급했듯이 Tokamak 나 Tandem Mirror 등 磁場密閉方式의 核融合裝置들이 物理的인 成果面에서 앞서있고 核融合爐의 概念設計作業도 활발히 進行되고있어 第一世代 核融合爐는 磁場密閉方式으로 建設될것이 確實하다. 그림 5는 D-T를 燃料로 使用하는 磁場密閉方式에 의한 核融合爐의 構造를 보이고있다.

核融合플라즈마를 加熱하는 方法에는 放電을 통한 Joule 加熱, 高速中性粒子 (NBI) 加熱 및 各種 電磁氣波 (RF) 加熱이 있다. Joule 加熱은 基本的인 加熱方法으로서 플라즈마를 發生시켜 溫度를 수 KeV 까지 높이는데 使用되고 이를 더 높은 溫度로 加熱하는데는 NBI 나 RF 를 사용하게 된다.

플라즈마粒子들이 擴散되어 容器的 壁에 부딪히면 壁材料가 損傷을 입어 壽命이 短縮될 뿐만아니라 壁

에서 放出된 不純物에 의해 플라즈마溫度가 낮아지게 된다. 반면에 플라즈마가 保有하고 있는 核融合反應에너지를 外部로 뽑아내기 위해서는 反應生性物과 容器壁의 接觸은 不可避하다고 하겠다. 따라서 容器壁의 表面層은 높은 에너지를 가진 各種粒子들의 衝突에 따른 Sputtering 效果가 적고 機械的強度, 熱的特性 및 放射線에 대한 抵抗성이 좋은 材料로 만들어져야한다. 플라즈마와 直接接觸 하는 表面層을 第一壁 이라 부르며 이는 核融合爐의 壽命을 결정하는 중요한 要因이기도하다. 容器壁의 바깥쪽은 核融合反應生成物들의 運動을 阻止시켜 그 運動에너지를 熱에너지로 바꾸어 蓄積해 두는 Blanket 이라고 하는 層으로 이루어져있다. Blanket 에서는 中性子增倍 및 三重水素增殖도 이루어진다. Blanket 内部를 지나는 管을 통해 冷却材를 循環시킴으로서 熱에너지를 核融合爐 爐心外部로 輸送하게 된다. 이 以後의 熱交換 및 發電過程은 既存의 發電所와 大同小異하다.

플라즈마의 密閉磁場을 生成시키는 磁場코일은 爐心에서 제일 바깥쪽에 密閉容器를 감싸는 方向으로 設置되며 磁場코일과 密閉容器사이에는 放射線 및 熱遮蔽物이 設置되어 超電導體로 만들어진 磁場코

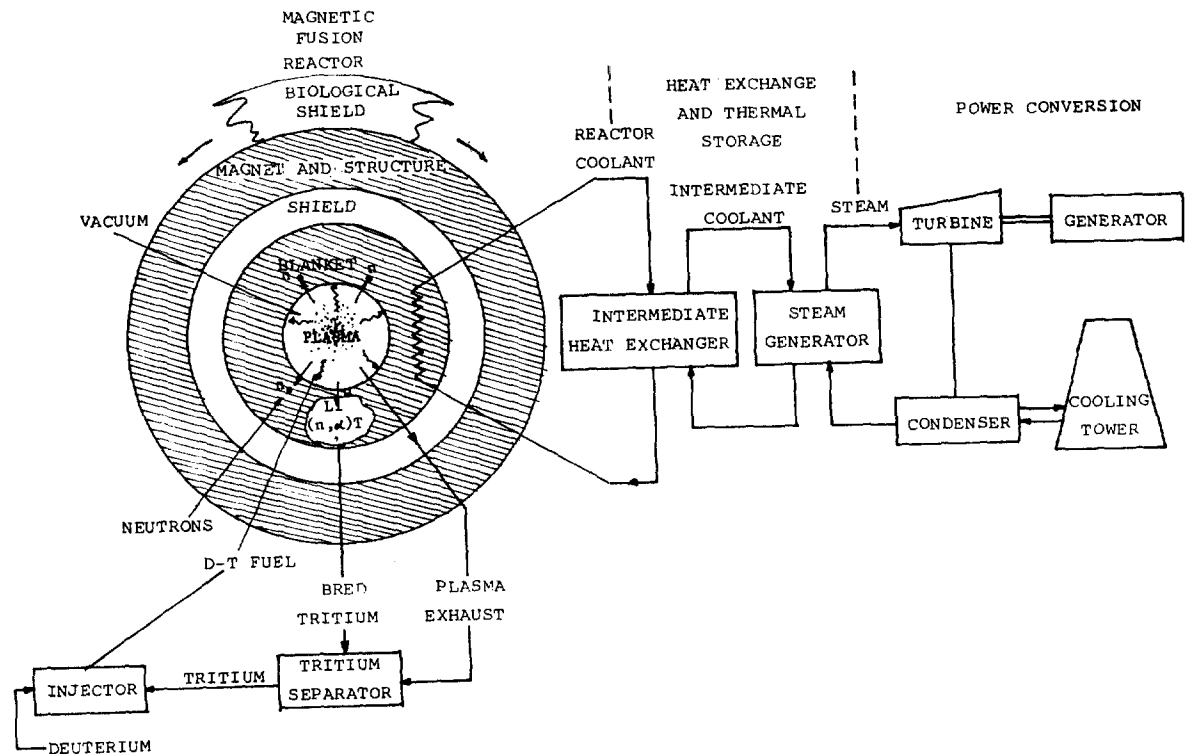


그림 5. Schematic diagram of a fusion power plant

일을 放射線傷害 및 常導體로의 遷移를 막아주게 된다.

核融合反應生成物, 未燃燒重水素 및 三重水素와 壁에서 放出된 不純物들을 爐心밖으로 排出시키기 위해 Divertor 나 Pumped Limiter 를 使用하게 된다. Divertor 는 磁力線을 爐心밖으로 휘어지도록 만든 것이며 Pumped Limiter 는 粒子들의 自然的인 擴散을 利用하는 것이다.

燃料로 使用되는 三重水素는 自然的으로는 存在하지 않으며 또한 放射性物質이므로 真空排氣系로 부터 다시 回收하여 再使用하게 된다. 또 Blanket 에서 中性子와 Lithium-6 와의 反應에 의해 生成된 三重水素도 分離回收하게 된다.

그림 6 은 美國 Argonne 國立研究所에서 設計한 Tokamak 型 核融合商用爐인 STARFIRE 의 裝置構成圖이다. STARFIRE 는 플라즈마理論 및 實驗들의 主要結果들과 앞으로 開發될 可能性이 있는 거의 모든 概念과 技術들을 總網羅하고 있어서 現在까지의 核融合研究水準을 가장 잘 把握할 수 있다.

表 3 은 STARFIRE 의 設計에 使用된 主要概念들을 간추린 것이며, 表 4 는 STARFIRE 및 다른 Tokamak 型 核融合爐들의 主要特性을 比較하고있다. STARFIRE 의 發電單價는 1980 年基準으로 35 ~ 40 mils / Kwh 로 추정된다.⁷⁾

核融合爐가 實用化될 때까지 實際로 解決해야 할 技術的 課題가 山積해 있지만 現在생각되고 있는 核融合爐의 基本的인 構成이나 主要제원 및 動作原理는 앞으로 完成될 核融合商用爐의 그것과 큰 差異가 없을 것으로 보인다.

5 核融合發電의 意義

인간이 삶을 榮位하고 社會가 發展되기 위해서는 한 瞬間도 에너지가 必要치 않는 경우란 없을 것이다. 에너지의 必要量은 그 時代, 그 社會의 人口 및 生活水準등에 의해 決定된다. 現在 全世界의 에너지 消費量은 年間 0.3 ~ 0.4 Q (= 1.055 × 10²¹ J)

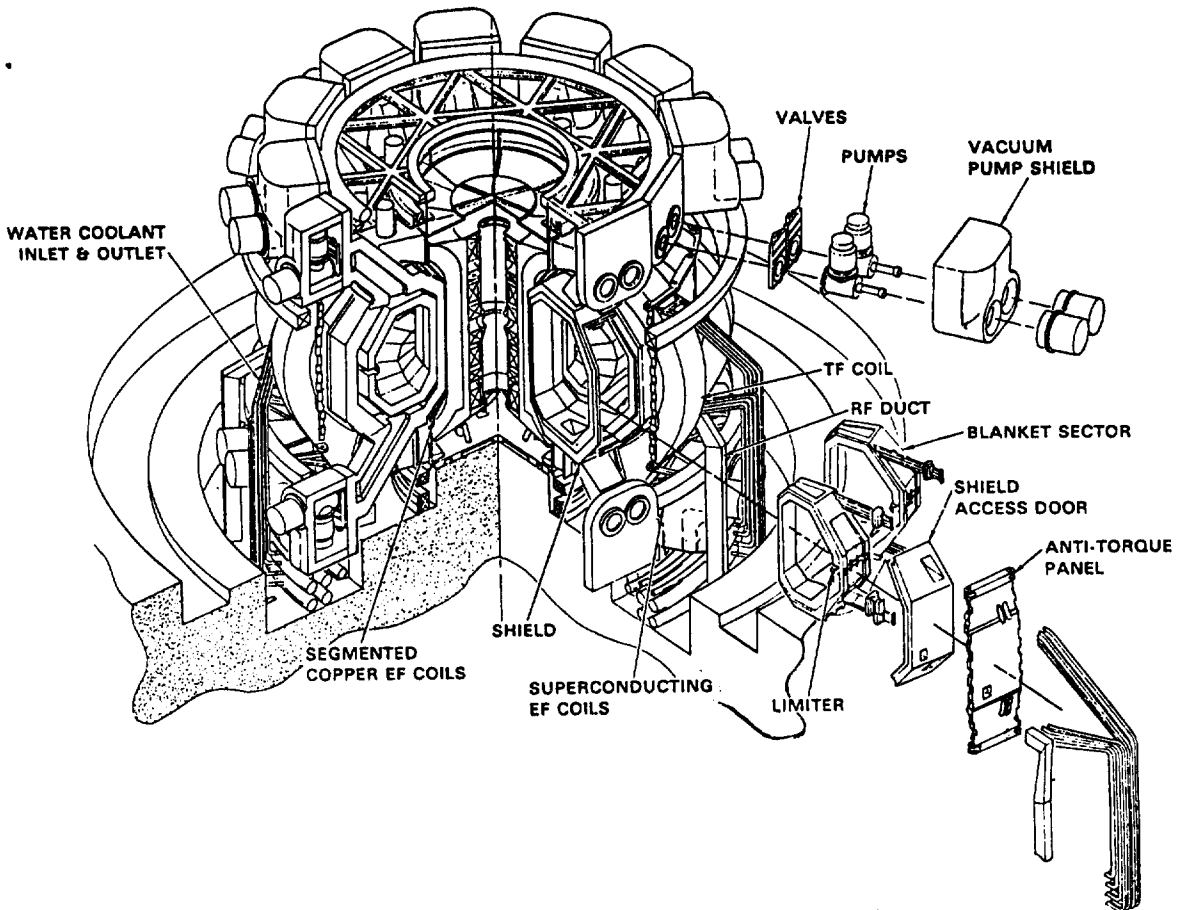


그림 6. STARFIRE reference design

表 3. Design characteristics of STARFIRE

DESIGN FEATURES	IMPACTS
Reduce physical size and reactor output	Most compatible with current plant sizes and lower unit costs
Steady -state operation	More reliable operation, lower energy costs Higher wall loadings - smaller reactor, lower capital costs No energy storage - lower capital costs Simplified energy conversion system - lower capital costs Reduce size of , or eliminate , OH coil
Nondiverter concepts for impurity control and ash removal	Lower capital costs Less complexity - more reliability Improved access for maintenance Higher tritium burnup , lower tritium inventories Reduced neutron streaming
Plasma heating technology	
Reduce neutral beam energy	Use existing positive ion beam technology
RF heating	Reduce neutron streaming Easier interface with blanket/shield Better access for maintenance Reduced shielding costs
Startup and shutdown	
RF assisted startup	Reduced OH voltage requirements Reduce dB/dt for OH coil Reduce volt - second requirement Permits long startup times with very small or no electrical energy storage
Steady -state operation	Permits long startup times with very small or no electrical energy storage
Longer startup times (~10s) for pulsed operation	Can use conventional power supply and energy storage technology
Maintenance	
Modularized first - wall/blanket concept	Simplified maintenance operations with minimum in-reactor operations
EF coils outside TF coils	Better access without moving or disconnecting coils
Reduce number of TF coils	Better access
Location of vacuum boundary at shield	Reduced requirements on first wall Simpler mechanical vacuum seals Easier access
Energy conversion	
Solid tritium and liquid lead/lithium breeders	Improved safety
H ₂ O coolants and PWR and BWR power conversion	Simplified BOP systems Reduce BOP costs

표 4. Design parameters of the commercial Tokamak reactors

Design Parameter	NUMAK United States 1979	Culham IIC United kingdom 1979	STARFIRE United States 1980	SPTR-P Japan 1981
Major Plasma Radius (m)	5.1	7.8	7.0	6.8
Minor Plasma Radius (m)	1.13	2.0	1.94	2.0
Plasma Elongation	1.64	1.68	1.6	1.6
Gross Thermal Power (Mw)	2100	1825	4000	3700
Neutron Wall Loading(Mw/ m ²)	4.0	1.5	3.6	3.3
Plasma Current (MA)	7.2	11.0	10.1	16.4
Average Toroidal Beta (%)	6.5	7.7	6.7	7.0
Burn Pulse Length (s)	225	27	Continuous	Continuous
Plasma Current Drive	None	None	rf 90 MW 1.7 GHz	rf 80 MW
Plasma Heating	rf 80 MW, 92 MHz	NBI 86 MW	rf 90 MW 1.7 GHz	rf
Toroidal Field (T)	12	>8	11	12
Impurity Control Method	Gas Blanket	None	Pumped Limiter	Pumped Limiter
Structural Material /Coolant	Ti - Al -V/H ₂ O	Stainless Steel / Helium	Stainless Steel/H ₂ O	Stainless - Steel/H ₂ O
Blanket Breeding Material	Li ₆₂ Pb ₃₈	Lithium Compound	LiAlO ₂	Li ₂ O

에 달하는 것으로 推定된다. 이 값은 19世紀 초반에 비해 約 100배가 늘어난 것이다. 21世紀 초반에는 年間に너지 消費量이 약 0.7Q에 달하며 平均的으로 50 TW (10¹² W)의 動力이 必要할 것으로 豫想된다.⁸¹⁾

地球上에서 앞으로 利用可能한 모든 에너지源들의 出力 및 埋藏量을 表 5에서 볼 수 있다. 이 表에 의하면 太陽熱, 核分裂爐 및 核融合爐등이 未來의 動力源으로 계속 活用될 可能性이 가장 높은 것들이라 하겠다. 이중 太陽熱은 單位發電所當 出力을 높이는

표 5. Limits of various energy sources

Renewable Energy Sources	POWER LIMITS, TW	
	by 2030	Ultimately
Solar Electric, Heating & Cooling	~ 3	~ 100 ?
Biomass	3	10
Wind Power	1	3
Wave Power & Tidal Power	0.1	1
Hydroelectric Power	1.5	2.9
Geothermal Power	0.2	0.4
Organic Wastes	0.1	0.1
Practically Recoverable	ENERGY LIMITS	
<u>Fossil Fuels</u>	<u>Joules</u>	<u>TW - years</u>
Coal & Lignite (2.35 × 10 tons)	53.2 × 10 ²¹	1690
Crude Oil (2.1 × 10 ²¹ barrels)	12.4 × 10 ²¹	390

Natural Gas (3.4×10^{14} m ³)	13.1×10^{21}	415
Tar-sand Oil (3×10^{11} barrels)	1.8×10^{21}	57
Shale Oil (1.9×10^{11} barrels)	1.1×10^{21}	35
Total	81.6×10^{21}	2590
<u>Nuclear Fission Fuels</u>	<u>Joules</u>	<u>TW - years</u>
U - 235	10^{22}	300
U - 238, Th - 232	$>10^{25}$	$>3 \times 10^6$
<u>Nuclear Fusion Fuels</u>	<u>Joules</u>	<u>TW - years</u>
Lithium for DT Reactors on land	2×10^{24}	6×10^4
in Oceans, Containing 0.17 ppm Li	2×10^{28}	6×10^8
Deuterium in Oceans	8×10^{30}	2×10^{11}

表 6. Estimated environmental impacts of 1 GWe power plants

UNIT ENVIRONMENTAL IMPACT						
(Per GW yr or GWe)	FOSSIL	SOLAR	LWR	LMFBR	HTGR	FUSION
<u>Releases in 2040</u>						
Heat (10^{12} Btu)	58.0	44.0	66.8	44.0	51.2	44.0
<u>Radionuclides</u>						
Tritium (curies)	0	0	33,300	1,400	36,800	1,400
Krypton (curies)	0	0	3,480	2,080	4,370	0
Xenon (curies)	0	0	48.5	0	0	0
Plutonium (curies)	0	0	0.20	0.16	0.08	0
Transuranics (milli-curies)	0	0	1.06	0.16	0.01	0
Other (curies)	0	0	0.168	0.004	0.020	0
<u>Nonradioactive Materials</u>						
SO ₂ (10^3 tons)	15.7	0	0.034	0.034	0.034	0.034
NO _x (10^3 tons)	36.0	0	0.076	0.076	0.076	0.076
Chlorine (tons)	27.0	20.0	47.1	23.4	32.9	23.4
<u>Radioactive Waste Burials</u>						
High-Level (Ft ³)	0	0	69	69	63	0
Other (Ft ³)	0	0	42,000	42,000	7,500	20,000
<u>Radiation Doses (man-rem)</u>						
General Public	0	0	32.5	5.2	32.0	3.2
Employees	0	0	600	440	490	600
<u>Plutonium Discharged</u>						
(metric tons)	0	0	0.53	2.4	0.00004	0
Truck Shipments	0	0	191	111	62	56
Railroad Shipments	33.750	0	30	75	27	0
Land Use (sq. mi.)	3.0	10.0	1.30	0.67	1.0	0.63
<u>Material Use</u>						
U ₃ O ₈ and ThO ₂ (10^3 metric tons)	0	0	0.230	0.030	0.163	0
Coal (10^6 tons)	4.0	0	0	0	0	0
D ₂ O (metric tons)	0	0	0	0	0	0.066

데 限界가 있으며 地形, 날씨등의 外部要因에 큰 影響을 받게 되므로 이를 主에너지源으로 挾하기에는 어려움이 많이 따른다고 할 수 있겠다. 核融合의 경우 核融合反應 및 2次核反應에 의해 核分裂爐에서와 마찬가지로 放射性物質이 生性되나 低準位이거나 그 生成量이 核分裂爐에 비해 그 生成量이 매우 적어 環境汚染의 問題가 거의 없다.

한편 核融合爐에서는 核暴走가 發生하지 않는다. 이는 核融合플라즈마溫度가 낮아지거나 어느 程度以上 上昇하면 核融合 反應率이 急激히 減少해 버릴뿐 만 아니라 爐心에 들어있는 燃料의 量도 항상 1g 미만으로 維持되기 때문이다.⁹⁾

여러가지 動力爐들이 環境에 미치는 效果를 表6에서 比較하였다. 各各의 要素들을 全般的으로 比

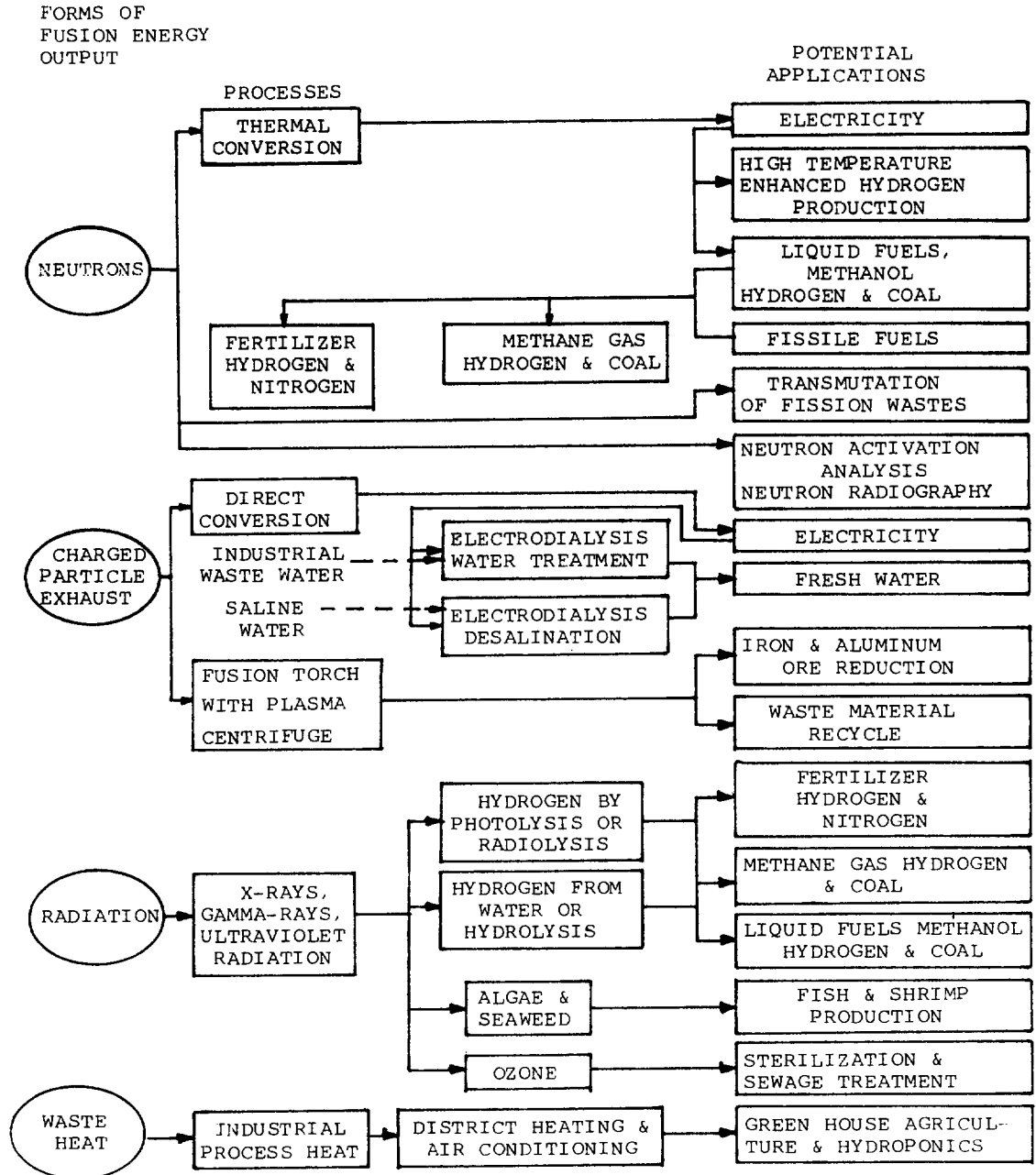


그림 7. Potential applications of fusion power

較할때 核融合은 太陽熱을 直接利用하는 것 다음으로 環境에 미치는 영향이 적음을 알 수 있다. 核融合에 너지가 相對的으로 깨끗한만큼 核分裂爐에 比해서 人口密集地域 가카이에 核融合爐를 建設할 수 있으므로 發電에 의한 動力 이외에도 放射線을 直接利用하거나 廢熱을 利用해서 工場製品生産이나 地域暖房등을 시도 할 수 있다. 그림 7은 核融合에너지의 多様な 利用可能性을 잘 보여주고 있다.

⑥ 結 論

核融合에너지는 環境汚染面에서의 깨끗함, 資源의 無限性, 用途의 多樣性등에 의해 가장 큰 期待를 모으고 있다. 그러나 核融合商用爐의 建設은 21世紀에 들어 가거나 可能해 질 것으로 展望될 만큼 核融合爐開發에는 많은 技術的인 難題들이 놓여 있다. 反面 이를 克服하기 위한 研究努力도 그만큼 加重되고 있으며 일단 科學的 實證이 86年頃에 實現된 후에는 그 開發速度가 加速化될 可能性도 없지 않다. 一般적으로 核融合爐가 實用化되기까지 投入되어야 할 研究費는 300억불 程度가 되리라고 豫想하고 있으며 現在 世界的으로 核融合研究에 使用되는 研究費는 年間 約 10억불 정도에 달하고 있다. 다른 燃料資源의 經濟性이 減少하면 核融合研究는 더욱 活潑

해 질 것이나 經濟性이 계속 維持된다면 核融合研究는 當분간 踏歩狀態에 있게 될 可能性도 있다. 核融合爐의 實用化時期는 技術開發能力 以外에 에너지 政策에 의해 오히려 더 크게 左右될 수도 있는 것이다.

참 고 문 헌

- 1) J. R. McNally, Nucl. Tech. / Fusion, 2, (1982) 9
- 2) H. R. Hurlme, Nuclear Fusion, WYKEHAM Publ. (1969)
- 3) S. L. Kahalas, et al., Nucl. Tech. / Fusion, 4 (1983), 3
- 4) W. M. Stacey, Nucl. / Fusion, 5 (1984) 266
- 5) R. J. Dowling, Nucl. Eng. & Design / Fusion, 80 (1984) 269
- 6) A. Malein, Nucl. Eng. & Design / Fusion, 1 (1984) 3
- 7) ANL, STARFIRE, ANL / FPD 80-1 (1980)
- 8) T. J. Dolan, Fusion Research, Pergamon (1982)
- 9) F. E. Coffman, et al., Fusion Power (Q & A), ERDA 77-63 (1977)