

MHD 直接發電의 概觀

鄭 萬 永*

1. 直接發電의 實用的 意義*(1)

人類 energy 需要의 急激한 增大에 따라서 原子力 平和 利用의 開發이 各國에서 이루어지고 있는 것은 周知의 事實이나, 한편에서는 最近의 物理探鑛法의 進歩에 따라 石炭, 石油, 天然가스 등의 所謂 말하는 化石燃料의 埋藏量도 豫測 以上으로 많다는 것을 알게 되었다. 여기서 前者와 後者를 利用하는데 있어서 가장 高級인 energy 形態가 電力의 形으로 從來와는 全然 다른 새로운 方法에 依하여 더 높은 效率로 變換할 수 있는 所謂 “直接發電方式”이 最近 各 方面에서 注目되게 되었다. 이때의 直接 發電이란 在來의 火力發電 또는 現行의 原子力發電에 있어서 turbine 方式에 依해서 熱 energy를 一但 機械的 energy로 變換해서 얻는 電力이 아니고 熱 energy를 “直接” 電力으로 바꿀 수 있는 것을 말하며 特히 이 가운데서도 높은 效率로 電力을 얻는 手段을 말한다. 여기에는 MHD 發電 以外에 熱電子發電 熱電氣發電, 熱磁氣發電, 熱誘電發電, 超電導發電 등이 있으나, 後記 三者는 아직 着想 또는 科學的 基礎研究의 範圍를 넘어서지 못하고 다만 前記 三者가 工學的인 實用試驗 또는 一部 實用段階에 있다. 이 가운데서도 熱電子, 熱電氣 등에 依한 發電은 低電位의 小電力用으로 特殊한 方面에만 使用되나 MHD (Magneto-Hydro-Dynamics)에 依한 새로운 發電方式는 가장 總合 熱變換 效率가 좋고, 特히 將來의 大出力 集中發電에 適合하여서 2~3年前부터 注目되기 始作하여 世界 各國으로부터 實用開發의 段階에 들어섰다.

2. MHD 發電과 總合熱效率

電磁流體力學에 基礎를 둔 MHD 發電은 特히 (가) 動作溫度領域 (1,400~3,500°C) 이 다른 方式에 比하여 매우 높고, 따라서 보다 낮은 動作溫度領域을 가진 從來의 turbine 方式 또는 다른 直接發電方式과의 併用으로써 發電 plant의 總合熱效率를 飛躍의으로 從來의 40% 前後에서 60% 前後까지 올릴 수 있다. 이것은 熱力學的 考察에서 理論의으로 얻을 수 있는 最高의 熱效率로서는

$$\xi = 1 - \left(\frac{T_L}{T_H} \right) = 1 - \frac{500^\circ\text{K}}{3,500^\circ\text{K}} = 85.7\%$$

로 되나, 實際에 있어서는 MHD 方式의 3500°K 로 부터 現在의 turbine 方式의 500°K 까지의 全 溫度領域을 全히 熱損失없이 發電하기는 不可能하므로 MHD+蒸氣 turbine 方式에 對한 實用設計 및 實驗值로부터 55~60% 가 試算되고 있다. (나) 大出力發電 plant (500~1,000 MW)에 가장 適合하다는 特徵을 갖고 있다. 그것은 發電 duct의 壁에 依한 熱損失이 出力의 平方根에 比例하며, 運轉費用도 出力의 6/10 乘에 比例하기 때문이다. 따라서 蒸氣 turbine을 採用하는 現行의 火力發電 및 原子力發電에 將次 이것이 “Topper”로서 附加되던 今後의 火力 및 原子力發電界에는 革新的인 發展을 가져올 것이다. 이것이 實現되면 國家豫算의 莫大한 節約이 될 뿐만 아니라 같은 電力을 얻는데도 20%의 燃料의 節約을 할 수 있으므로써 化石燃料뿐만 아니라 原子燃料의 經濟面에서도 새로운 意義를 가져 올 것이다.

3. 基本的 考察*(2)

가 一次元的 發電理論

MHD 發電은 原理的인 면에서는 이미 1840 年에 Farady가 電磁誘導法則을 考察했을 때 부터 있었던 것으로 그때는 潮流流 (海水를 導電性流體로 생각해서) 地磁氣에 鎖交시켜 發電을 하려 했으며 今後 海水代身에 水銀을 使用하려고 (現在의 電磁流量計의 原理, 電磁 pump의 反對) 했다. 그러나, 今後 이것이 回轉發電機型에만 應用되고 MHD 自體로서는 實踐을 못 본체 오늘 날에 이르렀다가 工學的으로 새로이 再檢討된 理由로서는

(1) Plasma Physics, MHD 및 Rocket 推進工學 등에 關한 學術的 進歩 및 거기에 關聯한 各種 工學技術의 發展에 依하여 高溫 gas의 取扱에 熟達되었다.

(2) Rocket 技術의 進歩에 따라 特殊 高溫材料가 急速히 開發되었다는 點이다.

여기서 그 基本原理를 一次元的으로 考察해 보기로 한다. 거기에는 定速度型과 定溫度型이 있으나, 比較的 解析이 簡便한 前者에 對한 理論 考察의 結果는 直觀的인 考察結果와 잘 合致된다. 卽 그림 1과 같이 磁界 B에 垂直으로 高溫 高速의 導電性 gas 流가 速度 u로 지나

*原子力研究所 電子工學研究室

면 Faraday 의 電磁誘導法則에 依하여 起電力 $V_0 = u \times B$ 가 생긴다. 이것이 그림 2 와 같은 外部負荷에 負荷電流 I_L 을 흘리게 되면

$$I_L = \sigma(\mu B - V) = \frac{uB}{R_i + R_L}$$

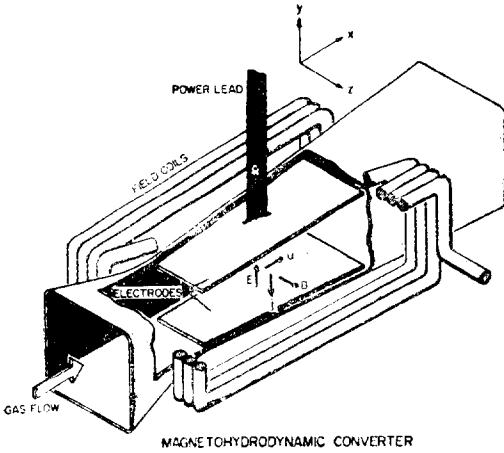
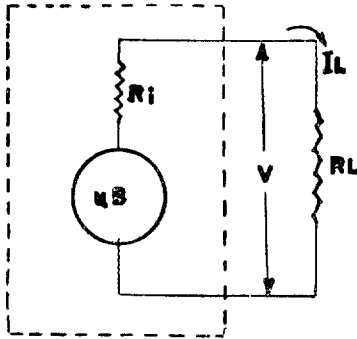


그림 1. MHD 發電原理圖



MHD GEN.

그림 2. 定速度型의 等價回路

負荷率 η 는

$$\eta = \frac{R_i}{R_L + R_i} = \frac{V}{\mu B}$$

따라서 負荷로부터 얻어지는 電力密度 P 는

$$P = \sigma u^2 B^2 (1 - \eta) \eta \dots \dots \dots (1)$$

最大出力을 얻기 위해서는 $\eta = \frac{1}{2}$ 에서 整合條件이 되어서

$$P_{max} = \frac{1}{4} \sigma u^2 B^2$$

지금 $\sigma = 50 \text{ } \Omega^{-1} \text{m}^{-1}$, $u = 10^3 \text{ m/sec}$, $B = 20,000 \text{ gauss}$
 $= 2 \text{ Wb/m}^2$ 라 하면

$P = 50 \text{ MW}$ 가 된다.

또 duct 部의 入出力端間의 gas 壓力差 Δp 는 運動方程式 $\rho_m \left(\frac{Du}{Dt} \right) = -\rho_m \nabla \phi - \nabla p + \rho_e E + I_L \cdot B$ 에서 理想氣體이면 重力項 $\nabla \phi$ 및 靜電力項 $\rho_e E$ 는 無視되고, 定

速型 定常流에서는 $dp/dx = I_L \cdot B$ 가 되어서

$$\therefore \Delta p = \int_0^L dp/dx \cdot dx = \sigma u B^2 L (1 - \eta) \dots \dots (2)$$

가 된다. 여기서 所要의 出力值을 얻는데 必要한 duct 長 L 을 求할 수 있다.

나. 分 類

큰 分類로서 熱 energy 源에 依한 것과, 變換方式에 依한 것의 두가지가 생각된다. 前者에 依한 分類로서는 (1) 化石燃料(石炭, 石油, 天然 gas 등)의 燃燒에 依한 것과

(2) 原子爐(現在の 核分裂과 將來의 核融合爐)를 對象으로 하는 것이 있다.

이 가운데서 前者에서는 排氣 gas 의 發生 때문에 必然的으로 開放型(open-cycle)이고, 在來의 火力發電部門의 改良이 機械的인 움직임에 依한 現在の 限度를 飛躍的으로 革新시키기 爲한 基礎研究의 領域을 脫皮해서 技術開發의 段階에 突入하고 있다. 여기에 比하여 後者에서는 排氣 gas 가 나오지 않으므로 作動 gas 를 循環시키는 閉路型(closed-cycle)으로 할 수가 있어서 He 나 Ar 같은 作動 gas 는 化學反應性이 없으므로 導電度上 并用(seed)物質(Cs K 등을) 任意로 選擇할 수 있는 것과 同時에 $2,000^\circ \text{K}$ 以下에서도 非平衡 電離法에 依하여 쉽게 必要한 導電率을 얻을 수 있다. 따라서 $1,900^\circ \text{K}$ 程度의 超高温 原子爐(UHTREX)가 完成되면 이들의 併用은 必然的으로 優秀한 展望을 가졌을 뿐만 아니라 將次 核融合이 實現되면 總合效率이 70% 以上이 될 것이다.

다음에 第2의 變換方式에 依한 分類에서는 (1) 既述한 바와 같은 直線狀 定常 gas 流에 依한 直流發電과 (2) 間歇 gas 流 其他에 依한 交流發電方式 등이 있으나 後者는 前者에 比하여 作動流體의 導電度와 10~100 倍以上 높아지지 않으면 實用 不可能한 狀態이므로 아직 여러가지 提議으로 基礎研究만 行해지고 있을 段階이다. 그러나, 前者에서는 大電力用 設計試作이 活潑히 行해지고 있으며 그중 化石燃料에 對한 直流發電方式에서는 燃料를 完全燃燒시켜서 高温을 얻기 위한 空氣豫熱法과 排氣 gas 의 energy 回收方法 및 高温 耐熱材料에 對한 對策이 가장 有利한 方法으로 推進되고 있다.

다. 高温氣體의 導電度

(1)式에서 出力密度 P 를 크게 하려면 먼저 作動 gas 의 流速 u 와 磁界 B 를 크게 하여야 하는데 前者는 高温 高速의 限度로서 數千 m 後者는 超傳導磁石을 使用해서 數萬 gauss 에서 將次 數 10만 gauss 까지를 얻을 수 있다. 이와같이 強한 磁場이 必要하게 되는 것은 從來의 發電機에서는 銅線과 같은 金屬導體가 磁場內를 回轉運動하므로써 發電될때 銅의 導電度는 MHD 發電

의 作動 gas 流의 그것보다 約 萬倍 以上 높았기 때문에 그다지 큰 磁界를 必要로 하지 않았으나 MHD 發電器에 서는 磁場이나 流速에서 高溫 高壓을 얻는데 材料面에서 그 限度까지 이르렀으므로 나머지 是 作動 gas 의 導電度 σ 를 될수록 크게 할 수 밖에는 없다. 그러나 實際에서 는 3,000°K 前後의 溫度에서 普通 氣體分子의 熱電離는 充分하지 않고 不良導體라고 하여도 좋다. 여기서 既述한 바와같이 Cs, Na, K 등의 電離電壓이 아주 낮은 alkali metal 分子를 作動 gas 中에 微量混入하여주는 seeding 法이 行해지고 있다. 이때 熱 平衡狀態에 있는 氣體의 電離度 α 는 有名한 Saha 의 式에서*³⁾ p 를 gas 壓力 (mm Hg.), V_i 를 氣體의 電離電壓, T 를 氣體의 絕對 溫度하고 하면

$$\frac{\alpha}{\sqrt{1-\alpha^2}} \cdot \sqrt{p} = 0.0159 T^{3/4} \exp(-5820 V_i/T) \dots (3)$$

로 表示된다. 이것을 圖示한 것이 그림 3 으로서 $P=1$ mm Hg 때의 α 와 V_i 및 T 와의 關係를 圖示한 것이

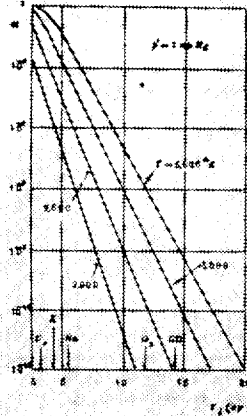


그림 3. 電離度(α)와 電離電壓(V_i)과의 關係

다. 여기서 V_i 의 增大 또는 T 의 低下에 依하여 電離度 α 는 急激히 減少하는 것을 알 수 있다. 또 $V_i > 10$ eV 의 普通 gas 分子에서는 $T \approx 3,500^\circ\text{K}$ 라도 電離度 α 는 10^{-5} 以下가 돼서 事實上 거의 電離하지 않는다고 봐도 좋다. 한편 alkali metal 分子에서는 $\alpha \approx 1\%$ 를 얻는데 Cs 면 2,000 K 程度, K 면 3,000°K 程度의 熱 平衡溫度가 必要한 것을 알 수 있으며 이러한 分子를 高溫作動 gas에 seeding 했을 때의 導電度 $\sigma^{(1)}$ 는

$$\sigma \propto \frac{\sqrt{\epsilon_s}}{\epsilon_s Q_s + (1-\epsilon_s)Q_1 + gV\epsilon_s \cdot Q_{ei}} \dots (4)$$

但 $\epsilon_s = n_s/n_i$: seed 分子와 gas 分子와의 分子密度 比

Q_s : Electron 과 seed 分子와 衝突斷面積

Q_{ei} : Electron 과 positive ion 間의 衝突斷面積

Q : 첫번째의 中性分子와 彈性 衝突斷面積

g : 定數

여기서 導電度를 最大로 하기 위한 最適의 seed 量은

$$(\epsilon_s)_{max} = \frac{Q_1}{Q_s - Q_1} \approx \frac{Q_1}{Q_s} \dots (5)$$

따라서 具體的으로는

i). (Ar+Cs)에 대해서 約 0.18%

ii). (Ar+K)에 대해서는 約 0.14%

iii). (He+Cs)에 대해서는 約 2.9%

iv). (CO+O₂+K)에 대해서는 約 3.6%

과 같이 된다. 이와같이 하여서 各種作動 Gas 와 Seed 物質의 組合에 對한 導電度의 값을 計算한 것이 그림 4 이다.

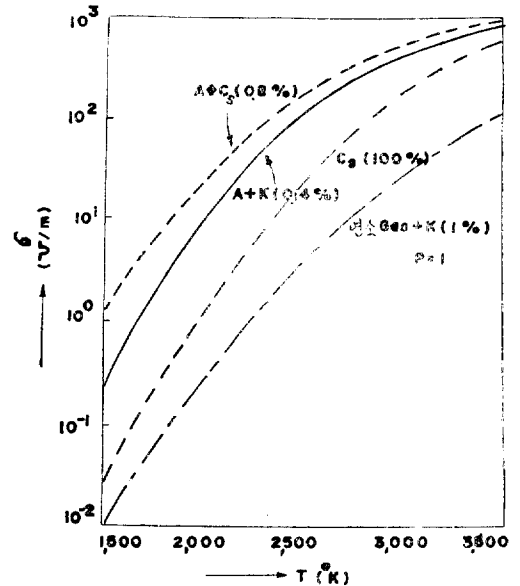


그림 4. 各種 Gas 와 Seed 物質(%)의 組合에 對한 Gas 導電度의 溫度特性

여기서는 100% Cs 의 境遇도 圖示해 두었으나 이것이 (Ar+Cs) 및 (Ar+K) 보다 작은 σ 를 주는것은 Cs 의 Q_s 가 매우 크기 때문이며 σ 를 크게 하기 위해서는 理論的으로 작은 Q_j 值을 가진 作動 gas(例로서 Ar)에 微量의 alkali metal 分子를 seed 物質로 添加하는 것이 單只 電離電壓이 낮다는 理由로서 100%의 alkali metal 를 作動 gas 로 選擇하는 것 보다 훨씬 有利하다는 것을 알 수 있다. 또 $\sigma=100$ V/m 에 가까운 導電度를 얻을려면 3,000°K 以上의 高溫이 必要하다는 것도 알 수 있다.

라. Hall 效果와 Hall 發電器

a) Hall 效果와 分割電極方式

磁界 B 中에서 質量 m , 荷電 e 의 荷電粒子는 $\omega b = eB/m$ 라는 cyclotron 角周波數로 B 에 垂直인 平面內에서 回轉運動을 한다. 이때 이 面內에 電界 E 가 加해 지면 $E \times B$ 의 方向에 drift 運動이 일어난다. MHD 發電器에서도 duct 內의 磁界와 電界의 雙方에 垂直인 即

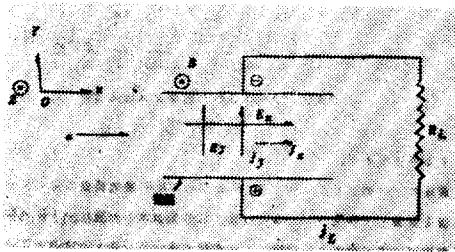


그림 5. Hall 효과의 考察圖

plasma 流方向으로도 그림 5와 같이 電界 E_x 및 電流 I_x 가 誘起된다. 이 現象을 MHD 發電에 있어서의 Hall 효과라고 부르며 ωb 와 電子의 實効 衝突時間 τ_e 와의 積 $\omega b \tau_e$ 라는 因子로 左右된다. 이때 흐름方向으로 引 電極을 使用하면 E_x 는 이 電極에 의하여 短絡된 結果가 되어서 흐름方向으로도 Hall 電流 I_x 가 생긴다. 이 結果 電極間에 흐르는 外部負荷에 供給되는 電力密度 P 는

$$P = \frac{\sigma}{1 + (\omega b \tau_e)^2} u^2 B^2 \eta (1 - \eta) \dots \dots \dots (6)$$

와 같게 되어서 Hall 효과가 없다고 假定했을 때의 $\frac{1}{1 + (\omega b \tau_e)^2}$ 로 減少된다. 換言하면 電磁 作動流體의 導電度 σ 가 이만큼 減少한 것과 等價로 되어서 實用目的에는 매우 惡影響을 준다. 이를 防止하기 위하여 $\omega b \tau_e \ll 1$ 로 하면 되나, 實際上 다른制限에서 반드시 그렇게도 안되기 때문에 電極을 흐름方向으로 多數 分割한 것을 서로 絶緣한 狀態에서 併置하면 Hall 電界는 생기나 電流는 흐름 수가 없어져서 電氣出力은 Hall 효과가 없을 境遇와 같게 할 수 있다.

여기서 τ_e 가 큰 作動 gas인 He나 Ar같은 稀有 gas를 使用하는 原子爐用 MHD 發電에서는 $\omega b \tau_e > 3$ 가 되어서 分割電極때와는 反對로 Hall 電界와 電流를 積極的으로 發電出力으로서 利用하는 方法이 Hall 發電器이다.

따라서 $\omega b \tau_e \leq 3$ 일 때는 普通 分割電極方式이 有利하나 $\omega b \tau_e \geq 3$ 일 때는 兩者의 差는 거의 없어져서 全 出力을 一括해서 duct 兩端의 電極에서 뽑아낼 수 있는 Hall 型이 實際上 便利하다.

4. 原子力發電에의 應用*

지금까지는 石炭이나 石油를 燃燒시키는 MHD 發電에 關해서 論하였다. 그러나 이런 發電器가 되어도 이것은 原子力發電에는 應用 안 된다. 그 理由는 火力用의 MHD 發電은 적어도 $3,000^\circ\text{K}$ 以上の 高溫 gas가 아니면 안되지만 原子爐에 있어서 이런 高溫 gas를 發生시키는 것은 現在 매우 困難하다. 그러므로 原子力發電에 使用되는 MHD 發電器는 $1,000 \sim 2,000^\circ\text{K}$ 에서 作動되고 또 gas는 稀有 gas를 使用해야만 한다. 이와같이 條件이 다르기 때문에 電離의 方法도 다르고 火力方式에서는 熱平衡電離가 使用되는 反面 原子力發電에서는 非平衡電

離가 使用되지 않으면 안된다. 또 發電器도 主로 Hall 型 發電器로 된다. 그러므로 지금까지 說明한 것과는 全然 다른 發電器를 開發하지 않으면 안된다는 結論이 나온다. Hall 發電器에서는 다음 2個의 特徵을 가진다.

- (1) 出力電壓은 상당히 高電壓이 된다는 것.
- (2) 상당히 높은 $\omega b \tau_e$ 의 값을 使用하게 된다는 것.

이상 두가지 理由때문에 單位體積 當 出力을 普通의 化石式 MHD 發電에 比해서 10倍 以上 增大시킬 수 있고 compact 한 發電器를 만들 수 있게 된다.

또한 發電器의 出力密度가 커지면 電離를 凍結한 狀態에서 發電할 可能性이 있다. 예를 들면 처음에 電離시켜 놓고 再結合이 일어나기 前에 出力을 뽑아내는 것도 可能하다. 이와같은 可能性은 상당히 魅力이 있다. 단지 이때 導電率의 不均一性이 되지 않도록 注意해야 한다. 原子爐熱源에 의한 MHD 發電의 應用에 있어서 有利한 點은 燃燒 gas式에 比해 MHD를 위해서 상당히 좋은 gas를 使用할 수 있다는 것이다. (原子力方式에서는 He나 Ar 등을 使用한다)

前述한 바와 같이 電子에 對한 稀有 gas의 衝突 斷面積이 작으것은 gas의 導電性을 높혀 出力密度를 增加시키는데 대단히 必要하다. 稀有 gas中에서 Ar은 Lau sauer 효과가 있기때문에 $2,000^\circ\text{K}$ 以下の 領域에서 다른 gas에 比較해서 매우작은 斷面積을 가지는 gas이다. 또 He도 상당히 작은 斷面積을 가지며 原子量이 작기때문에 高流速의 흐름을 얻는데 適合하다. 그리고 原子爐熱源의 경우에 seed로 K보다 훨씬 電離가 쉬운 Cs를 使用하기 때문에 燃燒 gas에 K를 使用한 경우와 比較해서 電離도가 커지고 이런 利點이 加重되어 $2,000^\circ\text{K}$ 程度에서도 높은 導電率이 얻어진다. 이런것은 Gas의 化學反應性이 없다는 것을 말해주며 MHD 發電에 있어서 대단히 有利한 點이다.

原子爐用 MHD 發電器에서는 gas의 性質로 부터 $\omega b \tau_e$ 의 값이 상당히 크게 잡히므로 電子溫度가 gas溫度보다 높게 된다. gas의 電離度는 電子의 溫度와 平衡이 되고 gas의 溫度와는 平衡이 無된다고 生覺되므로 導電率을 높일 수 있다. 即 燃燒 gas를 使用하는 경우에는 電子溫度의 上昇이 gas溫度의 上昇과 거의 같아 질려면 대략 $100,000$ gauss 以上の 磁場이 必要하지만 한편 Ar을 使用한 경우는 辟 낮은 磁場으로도 容易하게 非平衡의 큰 導電率을 얻을 수 있다. 이 경우에도 均一한 電離를 만들어야 한다는 注意는 必要하다.

또 다른 有價한 方法으로 粒子 또는 輻射를 使用해서 처음에 gas를 電離시켜 놓고 이것을 強한 磁場에 通過시키는 方法이다. 이때는 電離를 均一하게 維持하기 爲한 注意는 그리 必要치 않다.

이와같이 原子爐에 依한 MHD 發電의 應用 研究는 火

力式の MHD 發電의 研究와는 큰 差가 있고 또 興味가 있다. 그러므로 今後 研究方向은 非平衡에 關해 研究될 것이며 2,000°K 보다 數百度 程度 더 낮은 溫度에서 使用할 수 있는 MHD 를 研究해야 한다. 그렇게 된다면 2~3 年 程度 後에는 原子爐에서 發生되는 最高溫度의 gas 와 MHD 發電과는 거의 一致하게 될 것이다.

5. 實用開發의 現狀과 實用計劃*

MHD 發電을 實證하는 最初의 實驗은 1958 年에 美國 AVCO 研究所에서 10 kW 의 電力發生에 歷史的인 成功을 거두었다. 그後 이곳에서 繼續해서 1959 年 8 月에 11.3 kW, 1960 年 12 月에 Mark I 을 100 kW, 1961 年 10 月에 Mark II 를 600 kW, 이것을 더 改良해서 1963 年에는 1,500 kW, 그리고 昨年末에는 Mark V 를 40,000

kW (自動電力 20,000 kW) 까지 發生하는데 成功했다.

이 以外로도 美國의 W.H.가 1960 年 10 月에 10 kW, G.E. 가 1.6 kW, MHD Res. 가 1.0 kW 를 各各 發電했다. 이들은 모두 化石燃料에 依해서 實現되었나, 原子爐에 依한 것을 더 낮은 溫度 (1,400~1,800°C) 에서 實現코져 WH, NASA, Martin (以上 美國), IRDC (英國), JAPR (日本) 등에서 하고 있으나, 이것은 1970 年代에 超高溫原子爐 UHTREX (1,900°K) 의 實現에서 可能性이 크게 되었고 또 이러한 溫度에서도 非平衡 電離方式을 利用해서 電子自身만 50 ㉮/m 까지 얻을 수 있는 高溫으로 할 수 있게 되었기 때문이다. 前記 化石燃料에 依한 것은 1970 年에 100,000 kW 台가, 1975 年에 500,000 kW 台가 1980 年에는 7,500,000 kW 台가 各各 實用化될 것이라는 展望을 美國에서는 새우고 있으며, 美國뿐만 아니라

表 1. 實驗開發의 經過와 現況

| Time (type) | AVCO | | | W.H. | G.F. | MHD.Res. |
|--------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|--|-----------------------------------|--------------------------------------|---|
| | 1959. 8 | Mark I 1960. 12 | Mark II 1961. 10 | 1960. 10 | 1960 | 1960 |
| Gas | Ar(He) (Plasma Jet) (Rosa) | JP4+O ₂ (4 lb/sec) | Kelolin+O ₂ (6.5 lb/sec) | Diesci+O ₂ +K (way) | Carbon Powder+Air (1.1 lb/sec) | Kelolin+ Alcohol +O ₂ , N ₂ |
| Seeding | K ₂ CO ₃ (1%) | K ₂ CO ₃ , KOH | K 鹽 | K (2% mol) | K (1%) | KOH (2%) |
| Gas temp.(ok) | 2,800 | — | 2,900 | 2,800 | 5,000 | 2,600 |
| Gas press.(atm) | 1.0 | — | 數 | ~1.0 | 5.5 | 3 |
| Gas speed (mach) | 690 (0.7) | —(1.0) | (1.0) | 820 (0.8) | 1,350 | 1,000 |
| Duct dim | 1×3×20" | 3×9×60" | 3.5×10.6×66" | 1.6×4.9×16" | 0.38×2×2" | 0.5×2×2.4" |
| Electrode | | Carbon×45 | Graphite | Graphite | Graphite | |
| Wall good | | wood | Peg wall×53 | Zr, Mgnesia | Silica | Zro ₂ , Brass (2. 設) |
| Feld (K.G.) | 14 | 32 | 33 | 14 | 8.6 | 20 |
| V ₀ (V) | 55 | 550 | 1,500 | 100 | 31 | 100 |
| I ₀ (A) | 800 | — | 3,000 | 370 | 150 | — |
| Power out (kW) | 11.3 | 100 | 1 stage 250 2 stage 600 | 10.4 | 1.6 | 1.0 |
| Output density (MW/m) | 20 | — | ~40 | 3 | 63 | — |
| Working time | 5 sec | — | 10sec | 4 min~6 min | 9 sec | — |
| Conductivity (Ω/m) | 65 | — | 37 | 43 | 350 | — |

라, 英國, 德國, 蘇聯, 日本 등에서도 最近 活潑한 開發研究가 展開되고 있다. 이들 가운데서 美國에서 開發된 것들의 性能을 表示하면 表 1과 같다.

여기서 現在 實用될 MHD 發電의 發電 cost 를 比較할 것이 American Electric Power Co.에서 表 2와 같고, 또 operating cost 를 比較한 것이 各各 表 3, 表 4와 같다.

表 2.

| | |
|--------------|-------------------------------------|
| MHD 發電器만의 出力 | 338 MW |
| 在來의 併用發電器出力 | 152 MW |
| 全 出力 | 490 MW |
| 總合熱效率 | 53.5 % |
| 燃氣濃縮比 | N ₂ /O ₂ =2/1 |

表 3. Operating Cost 의 比較

| MHD | | Conventional | |
|------------|-------|--------------------------------|--------------------------|
| Efficiency | 53.5 | 40 | % |
| Heat rates | 6,380 | 8,535 | Btu/kWh |
| Output | 490 | 490 | MW |
| Fuel | 1.47 | 1.96\$ | 0.23/10 ⁶ Btu |
| Seed | 0.09 | K ₂ CO ₃ | 80% recovery |
| Electrode | 0.07 | | |
| Cost | 1.63 | 1.96 | mils/k Wh |

表 4. Capital Cost 의 比較

| MHD | | Conventional Steam | |
|-------------------------------|-----------|--------------------|----------|
| FPC 312 & 314 | | 36 | \$ 92/kW |
| MHD and Magnet | | 10 | |
| Compressor | | 5 | |
| High press. burner | | 1 | |
| Inversion and reactive supply | | 21 | |
| Regenerator | | 2 | |
| Refrigerator | | 1 | |
| Oxygen plant | Low 20 | High 30 | |
| Total | 96 | 106 | \$ 92/kW |

6. MHD 直接發電에 있어서의 科學 및 技術的 問題點

MHD 發電에서 實際에 問題가 되고 있는 科學 및 技術的 問題點을 要約하면 다음과 같다

가. 各種 energy 損失의 輕減

發電 duct 長을 縮短하여서 電極의 末端損失, 渦電流 損을 작게 하고 電磁石의 勵磁損失을 작게 하기 위하여 電磁石을 改善하여 超傳導 強磁場 coil 을 空心 magnet 에 使用한 實用的인 것을 開發해야 한다.

나. 化石燃料 MHD 發電에 있어서 燃流溫度를 上昇化 하기 위해서 空氣豫熱法을 더 開發한다.

다. 低溫에서 作動 gas 의 導電度를 높일 수 있는 非平衡熱電離法을 開發하기 위해서 高 energy electron beam, 強力한 光, maser 또는 紫外線을 利用하여

plasma 中の electron 의 溫度를 올려서 σ 를 增大하는 方法이 開發되어야 한다.

라. 高溫耐熱材料 및 冷却法의 開發, MHD 發電用의 絶緣物로서는 融點, 機械, 熱 및 化學的 安定度 등 以外에 高溫에 있어서의 電氣抵抗이 問題된다. 現在 上述한 物質들은 常溫에서는 좋은 絶緣物이라도 高溫에서 電氣抵抗이 低下하여 絶緣物으로서의 機能을 喪失하는 傾向이 있다. 一例로서 BeO 는 0°C 에서 10⁻¹²Ω/m 가 2,000°C 에서 10⁻²Ω/m 程度로 劣化된다.

한편 電極材料로서는 黑鉛, W, Mo, Ta 및 合金, carbide, ceramics 등이 使用되나, 이들 가운데서 金屬은 融點 以下에서 組織이 變化하여 機械적으로 脆化하여 또 化石燃料을 對象으로하는 境遇에는 燃流 gas 中에 P, S, Cl 등의 化學적으로 活性인 gas 를 包含하는 境遇가 많아서 그것에 依한 電極 消耗도 考慮할 必要가 있다.

마. 特히 原子力 MHD 發電用으로서는 超高溫原子爐의 燃料要素가 UO₂ in BeO, UC₂ in graphite 로 開發되어야 한다.

바. Seed 注入, 回收方法 特히 原子爐方式에서는 安全性이 檢討되어야 한다.

사. 非平衡 發電器의 開發에 依하여 作動溫度를 低下시킬 수 있고 MHD 壓縮器가 開發되어야 한다.

7. 參考文獻

- (1) "MHD 發電의 展望": 1964年度 日本 電氣 4學會連合大會 Symposium 豫稿
- (2) 關口忠: "エネルギー變換論" 第6章 1964 5 라타이스社
- (3) S.Way et al.: Jounl of Eng for Power. (Oct. 1951)
- (4) R.J. Rosa: "Physics of Fluids", 4, 182, Feb. 1961
- (5) B.C. Lindley: "6th World Petroleum Conf." (Frankfurt June, 1963) Paper VI-29.
- (6) A.R. Kantowitz: "Fundamental Advantages of MHD Power Generation" 1962.5 JAERI Report. (1964年 6月 8日 接受)