

技術動向

火力, 原子力 發電의 最近技術動向

車 英 點*

世界 最初의 500KW 商業用 蒸氣 Turbine 發電機가 美國 Rhode Island 의 Newport 發電所에서 運轉을 始作한지 79년이 되는 現在 蒸氣 Turbine 및 發電機는 單機 容量面에서 2,000倍 以上의 큰 進歩를 했다. 1973 年 中東戰爭에 따른 石油供給 減少와 燃料費의 急騰은 Energy 의 將來를 再考해야 할 契機가 되어 先進諸國에서는 石油中心의 Energy 需給構造로부터 Energy 源의 多邊化로 政策을 바꾸게 되었다. 原子力은 Oil Shock 以後 다음 時代를 擔當 할 Energy 의 主體로서 注目되고 있지만 社會情勢의 制約에 依한 電源立地의 問題때문에 期待하던 程度의 開發은 되지않고 있다.

原子力發電所의 現狀은 火力發電所와 마찬가지로 單機容量의 大容量化가 急速히 進行中에 있고 Unit 容量面으로도 火力發電所와 거의 비슷한 程度이다. 가까운 將來를 豫測한 境遇 電氣 Energy 의 主體는 化石燃料을 主로한 火力發電과 今後 增強이 期待되는 原子力發電이라 생각된다.

本稿에서는 火力, 原子力의 全般的인 技術推移와 特別 最近 外國文獻에서 話題가 되고 있는 課題中 몇가지를 紹介코자하며 아울러 國內의 實情에 對해서도 簡單히 言及코자 한다.

1. 火力發電의 最近 技術動向

最近의 火力發電 設備는 蒸氣條件의 高溫 高壓化, 機器의 大容量化, 熱效率의 向上 等의 面에서 현저한 發展을 이룩했다. 火力主體의 電源構成 傾向은 高性能 大容量機가 望 성하게 製作되어 왔는데 이러한 背景에는 大容量化의 첫 번째 要因이 되는 Turbine 最終段翼의 開發에 依한 技術革新이 急速히 進歩하여 Unit 容量의 擴大가 이루어진 것과 耐熱材料의 開發에 依한 蒸氣條件의 大幅의 向上 및 發電機 導體의 冷却技術의 發達 等을 들 수 있다. 美國에 있어서의 大容量化의 趨勢는 1975年 以前에 運轉을 開始한 1,300MW 級으로 TVA 社의 Cumberland 1,2號機, Ohio Power

社의 Amos 2,3號機 및 Gavin 1,2號機 等의 大容量機가 있지만 將次 이 以上의 大容量化 展望이 보이지 않으며 原子力發電의 臺頭와 더불어 Base Load 大容量 火力의 開發은 限界에 達한 感이 있다(Fig 1 參照).

蒸氣壓力에 있어서 超臨界壓力은 1969年을 Peak로 점점 下降하고 있으며 亞臨界壓力을 採用하는 Unit가 增加하고 있다(Fig 2). 이러한 理由는

- ① 低廉한 燃料을 比較的 쉽게 얻을 수 있고
- ② 系統運用이 쉽고 信賴性이 우수하다는 點
- ③ 建設費가 싸다.

等의 理由때문이라 생각된다. 한편 現在 製作中의 大容量 發電機는 水冷却 固定子 Coil과 水素 Gas 直接冷却 回轉子 Coil을 組合시키는 것이며, 一般의 製作 可能한 最大容量은 二極機가 1,500MW 四極機가 2,000MW 程度이다. 그러나 Europe Maker를 中心

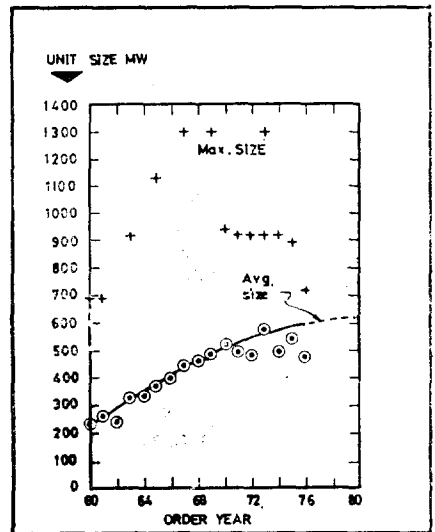


Fig. 1 Trends in average and maximum sizes of fossil-fired boilers ordered by U.S. utilities. no interest currently seen in units over 1300MW. in size B & W chart.

*正會員: 現代洋行 專務理事

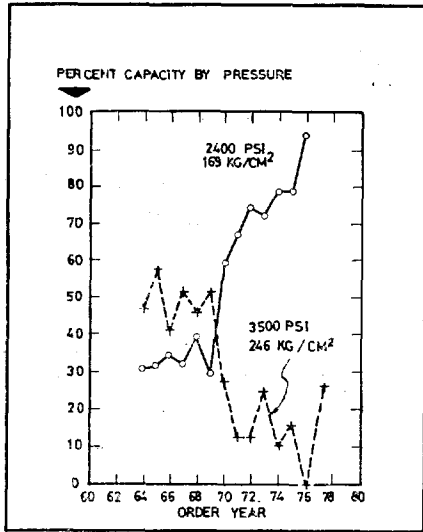


Fig. 2 Trend in boiler pressure. the market share for 3500 PSI units fell from 50% in late in 1960S to zero in 1975 but rose again in 1977 via two large units. B & W Chart.

으로 이들 容量範圍에서 回轉子 Coil도 水冷却으로 한 全水冷却 Turbine 發電機의 開發이 進行되어 四極機에서는 이미 實用段階에 들어갔고 二極機에서는 2,000 MW까지 製作可能하다고 한다. Turbine 發電 Plant의 効率向上은 燃料費의 昂騰 때문에 今後에도 繼續되어야 할 重要 課題로 蒸氣 Turbine의 流體設計 構造設計의 改善에 依한 効率向上과 變壓運轉의 採用等 實際 Plant의 運用面에서의 改良에 依한 總合效率의

向上이 研究開發되고 있다.

가. 流動層 燃燒에 依한 石炭發電 System.

現在 發電用 石炭燃燒의 主가되고 있는 微粉炭 Bvuner 燃燒法의 여러가지 缺點을 大幅的으로 改善한 것으로 流動層燃燒(Fluidized Bed Coal Combustion)가 最近 注目되고 있다. 이 燃燒法의 研究開發은 10餘年前부터 始作된 것으로 Boiler에의 應用으로는 常壓式 流動層燃燒 Boiler부터 着手되어 다음 段階인 加壓式 流動層燃燒 Boiler의 開發로 進行하고 있으며 美國에서는 이미 30MW의 發電實驗에 成功하고 있다. 이 方法의 特徵들을 要約하면 다음과 같다.

(a) 從來의 微粉炭 燃燒 Boiler에 比해 建設費가 約 20% 싸게되며 Boiler Tube가 石炭流動層에 埋設되어 있기 때문에 熱傳達效率이 좋게되어 Boiler의 小型化가 可能하게 된다. 또 加壓式의 境遇에는 매우 Compact한 設計도 된다.

(b) 燃燒溫度가 900°C以下로 維持되기 때문에 微粉炭 Boiler에서와 같은 Alkali金屬鹽에 依한 傳熱面의 汚損이 없고 運轉 信賴度가 높다. 또 燃燒排氣 Gas도 깨끗하기 때문에 이것을 Gas Turbine에 導入하여 複合 Cycle로 하는 것도 可能하다.

(c) 매우 低品位의 石炭, 例를 들면 水分 50% 灰分 25% 可燃分 25%까지 使用할 수 있다.

(d) 石灰石 또는 Dolomite를 石炭에 混入함으로 容易하게 充分한 脫黃이 可能하다.

(e) Boiler Turbine의 負荷變動時에도 流動層의 높이를 制御하여 蒸氣溫度를 一定히 維持하여 效率低下를 防止할 수 있다.

(f) 發電原價가 原子力 發電보다 낮다.

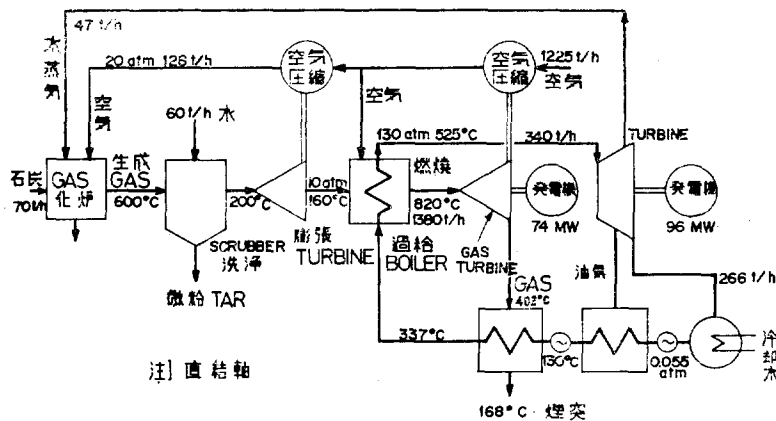


Fig. 3 GAS 化 複合 發電의 例(Lünen 發電所 170MW)

나. 石炭 Gas化 複合發電

油價上昇에 따라 發電效率 向上은 經濟的인 面에서 merit가 크기 때문에 Gas Turbine 發電과 通常의 火力發電을 組合한 Combined Cycle 發電이 具體化되고 있다. 이 中에서도 特別히 石炭을 燃料로 하는 混合 Cycle의 開發에 關心이 集中되고 있다. Fig 3은 西獨이 研究開發하여 運轉中에 있는 Lünen 發電所(170 MW)의 加壓式 固定床 Gas 爐를 利用한 複合 Cycle의 例이다. 이 方式의 石炭 Gas化 複合 Cycle은 Gas化 爐內에서 石炭을 空氣 및 蒸氣와 反應시켜 低 Calorie의 燃料 Gas를 生成시켜 이 Gas를 Gas Turbine에 넣어 第一段의 發電을 行한 다음 이 排氣 Gas를 蒸氣 Turbine Boiler에 導入하여 第二段의 發電을 行하는 것으로 設備 Cost는 增加하지만 綜合熱效率이 45~50%로 在來形 蒸氣 Cycle plant의 40% 程度에 比해 큰 革新이라 할 수 있다. 複合 Cycle用 Gas化 爐의 型式에는 固定床, 流動床 및 噴流床 등이 있는데 前例의 固定床 Gas化 爐는 Gas化 Process 中에 乾溜 Gas化의 占有比率이 크기 때문에 Tar 含有가 많고 炭種이 非粘結炭으로 限定되며 一基當 지나친 大型化가 어렵다는 缺點이 있어 美國 및 日本에서는 大型化의 可能性이 있는 流動床 Gas化 爐의 研究 開發에 重點을 두고 있다. 그리고 噴流床 Gas化 爐는 美國 CE社가 既設 Gas Boiler의 燃料를 石炭으로 代替해 보려는 意圖로 Pilot Plant를 完成을 위해 實驗中에 있다.

다. 空氣 貯藏 發電所

現在 電力의 大規模의인 貯藏은 Dam의 貯水로 行하고 있지만 Gas-Turbine 發電을 利用한 空氣 貯藏方式이 開發되어 BBC社에 依해 西獨에서 實用化되고 있다(Fig 4).

여기서는 夜間 Off peak 時에 電動發電機로 2段式 空氣壓縮機를 驅動하여 地下에 있는 直徑 30m 길이

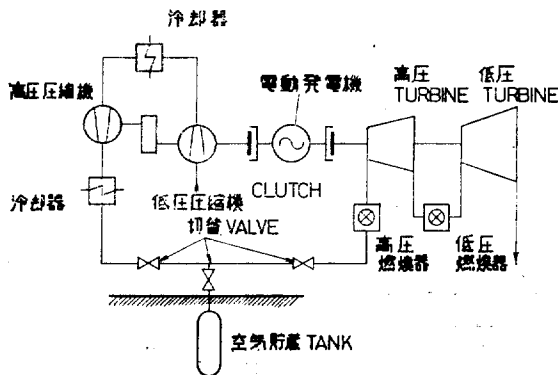


Fig. 4 空氣貯藏發電所

200m 程度의 岩鹽 洞穴 2個에 60氣壓을 넘는 壓力의 壓縮空氣를 貯藏한다. 壓縮動力은 60MW이다. 晝間 peak 時에는 壓縮機를 分離하고 2段式 Gas Turbine에 壓縮空氣를 導入하여 電動發電機를 驅動 發電한다.

最大出力은 約 300MW이다. 壓縮空氣는 調整辦으로 46.6氣壓으로하여 高壓 Turbine 燃燒室로 들어가 550°C로 加熱되며 高壓 Turbine을 거쳐 11氣壓으로된 排氣는 低壓 Turbine 燃燒室에서 다시 825°C로 加熱되어 低壓 Turbine에 들어간다. 燃料는 天然 Gas이다. 夜間의 空氣貯藏에는 晝間發電時間의 4배가 걸리며 全出力 運轉의 發電時間은 2時間으로 設計되어 있다. 壓縮時 發生하는 熱은 熱交換器에서 吸收하여 洞穴溫度는 最大 50°C로 하고 있다.

라. 中間 負荷 火力

最近 電力需要의 Pattern은 晝夜間의 需要量의 差가 크고 今後에도 이 peak 分의 需要는 더욱 늘어날 것으로 豫想된다. 이러한 背景으로 볼때 將來의 電源 構成 가운데 큰 比率을 차지하는 原子力 發電은 Energy Cost 面에서 Base 負荷로 運用되고 揚水發電은 Peak 負荷를 擔當하며 나머지 中間負荷를 火力이 맡게 된다. 中間負荷火力로서는 起動停止가 容易하고 低負荷時의 效率低下가 적은 發電設備가 要求되며 이런 것에는 變壓運轉을 採用하는 것이 바람직하다고 생각된다. 이 變壓運轉方式은 負荷에 따른 主蒸氣壓力을 變化시키는 方法이고 그 主된 特徵은 다음과 같다.

- (a) 高效率(部分負荷時의 熱效率 向上 및 最低負荷의 低減)
- (b) 負荷追從性의 向上(負荷變化率의 增大, 負荷變動

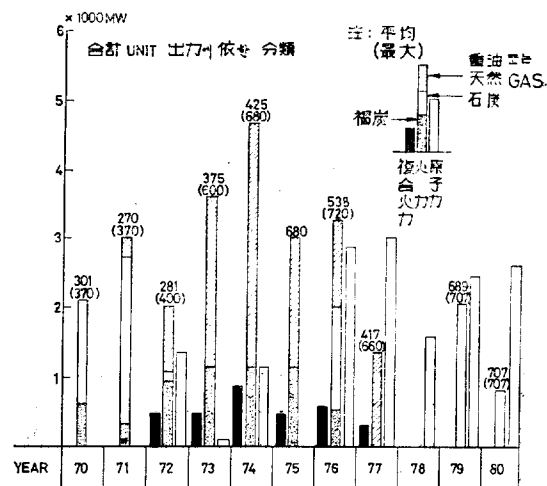


Fig. 5 西獨에 있어서 電源機種의 動向

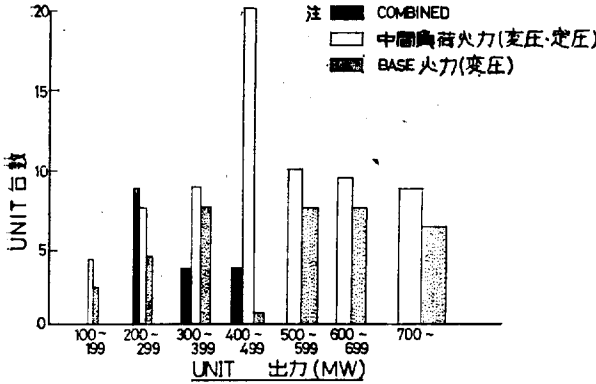


Fig. 6 美國에서의 中間負荷火力

幅의 增大 및 負荷變動에 따른 高溫部 熱疲勞의 低減)
 (c) 起動 停止特性的 向上(起動時間의 短縮, 起動損失의 低減, 運轉監視의 容易化, 自動化 範圍의 擴大) 等이다.

특히 變壓運轉에 依한 利得을 最大로 發揮하기 爲해서 Boiler는 큰 壓力 및 溫度變化에 對해 敏感하지 않는 構造로 할것이 必要하다. 美國이나 Europe에서는 Cyclic Operation 또는 Two Shift Plant로해서 이 變壓運轉에 依한 火力 Plant가 多數 運用되고 있다. Fig 5는 西獨에서의 電源機種의 動向을 나타낸 것으로 이 境遇 火力依存度가 높은 것부터 中間負荷運用이 一般的으로 되어있고 그것의 餘의가 變壓運轉方式을 採用하고 있다.

Fig 6은 美國에서 1970~1976年 사이의 中間負荷火力에 關한 調查結果를 나타낸 것으로 Combined Plant도 包含하던 臺數에서 31% 容量으로는 26%를 차지하고 있다. 또 變壓運轉을 採用한 plant는 臺數로는 25% 容量面에서는 21%로 되어 있다. 蒸氣條件은 超臨界壓力을 採用한 것은 적고 亞臨界壓力이 壓到의 由로 많다. Unit 容量에 關해서 보면 450MW 級이 中間負荷火力 650MW 級이 Base 負荷變壓火力으로 되어 있다.

2. 原子力の 最近 技術動向

核發電技術은 1940年 以來 30餘年間 많은 發電을 거듭했다. 世界到處에서 核發電에 對한 是非論과 함께 核發電所 建設이 急増했고 오늘날엔 製作供給業者間 市場競爭이 매우 激烈하다. 油價上昇으로 核發電이 經濟性을 보이면서 高價의 建設費와 長期間의 工期를 甘受하여 各地에서 建設에 熱을 올릴 수 있었던 것은 重

水型 CANDU를 비롯 널리 普及 運轉되고 있는 輕水爐型의 PWR과 BWR의 運轉實績 및 製作業體의 技術向上 等이 進歩되었기 때문인데 即 運轉經驗에 依한 爐心設計 改善으로 出力密度 增加 그리고 壓力容器 等大形構造物 製作技術向上, 放射線 安全管理 및 規制指針의 合理化 等의 問題點 解決方案이 改善되었기 때문이다. 大容量化는 既存 原子爐의 運轉狀況을 조심스럽게 살펴보고 進行되고 있지만 現在는 1,100MW Unit를 標準化하는 方向으로 關心을 모우고 있다. 輕水爐가 主流를 이루고 있는 지금 U_3O_8 에서 얻어지는 U_{235} 의 賦存量을 考慮, 核燃料의 效果的 利用을 들어, 初期 高濃縮 U를 使用 Reprocessing을 하고자 하는 努力도 있지만 研究檢討에 多少 問題點을 남긴채 오히려 지금은 核燃料 增殖을 實現해 보자는 意欲으로 美國 소련에 이어 佛, 日本에서도 서둘러 高速增殖爐에 熱을 올리고 있다. 또한 一部에선 核燃料 增殖을 爲한 增殖爐 自體의 成功도도 있겠지만 Energy의 窮極의 對策마련을 爲해선 核分裂이 아닌 核融合의 早期達成이 더욱 바람직함을 내세워 研究와 努力을 다하고 있다. 이와같이 核發電의 效果的 運用과 新規 核發電計劃에 여러 角度에서 研究가 繼續 進行되고 있지만 政治 經濟的인 諸問題點과 더불어 工學的인 側面에서도 많은 難點에 逢着되고 있는 듯하다. 널리 普及된 加壓水型 原子爐와 沸騰水型 原子爐 그리고 CANADA에서 開發하여 지금은 인도에서도 自給力이 생긴 重水爐型, 이 모두가 燃料의 運用面이나 設備 自體의 特性 그리고 原子力으로 因한 規制特性 等이 汽力 發電과는 달리 發展에 沮害要素가 되고 있다. 最近 日本에선 多目的 高溫 Gas爐를 計劃 發電用은 勿論 發電外로 使用할 수 있도록 開發한다고 한다. 核燃料 Recycle을 考慮, U과 함께 Th를 充分 活用한 高溫 Gas 冷却爐가 이미 商業化 段階에 왔지만 初期裝填燃料의 高濃縮問題(90% 以上)와 燃料製作設備 等의 問題點이 있어 最近 크게 改善한 흔적을 찾을 수가 없다. 다만 輕水爐에서 腐心하고 있는 熱效率面에서 飽和蒸氣使用으로 熱效率 減少를 10% 以上 補完시킨 點은 高溫運轉과 He Gas 冷却材 特性으로 높은 熱利得을 얻을 수 있다는 것이다. 한편 核發電所 容量과 工期面에서 살펴보면 美國의 B&W社에서 輕水爐 建設工期를 大幅 短縮하고 建設費를 節減할 수 있는 新型의 原子爐 概念設計를 完了했다는 發表가 있었다. 이 概念의 設備容量은 400MW의 加壓水型이며 出力 700~800MW 級과 經濟的으로 競爭할 수 있는 것으로 樂觀하고 있다. 現在의 平均 建設期間을 10年에서 6~7년으로 短縮한다고 하여 開發途上國家에서는 大型보다 더 有利한 立場

이 될 수 있다고 내다본다.

가. 高溫 Gas 冷却爐(HTGR)

輕水型 原子爐는 火力發電所에 비해 蒸氣條件이 나쁘지만 高溫 Gas 冷却爐는 이러한 缺點을 解消하여 火力發電所程度의 538°C 169kg/cm²의 蒸氣가 얻어지고 있다. 高溫 Gas 爐는 黑鉛減速材와 Gas 冷却形의 原子爐로서 改良形 原子爐와 비슷하지만 큰 特徵은 減速材로 黑鉛을 利用하며 冷却材로는 高溫에서도 酸化하기 어려운 He Gas 를 使用하는 點과 燃料로서 被覆粒子 燃料를 使用하는 것이다. 被覆粒子 燃料라는 것은 酸化物 또는 炭化物燃料에 얇은 炭素의 被膜을 입힌 것으로 直徑 數百 Micron 의 微粒子이다. 이 被膜은 酸化를 防止함과 아울러 核分裂生成物의 漏出을 막는 役割을 하며 耐熱 耐壓성이 우수하다.

나. 高速增殖爐(FBR)

增殖爐에는 여러가지 種類가 있지만 現在 世界各國에서 建設 運轉 중인 增殖爐의 大部分이 Na 冷却形 高速增殖爐이므로 이것에 對해 살펴보기로 한다. 輕水爐 등의 熱中性子爐에서는 充分히 減速된 中性子에 依해 連鎖反應이 維持되는 것에 反해 高速增殖爐에서는 核分裂時에 生成되는 高速中性子が 直接 連鎖反應의 主役이 된다. 高速增殖爐의 長點은 核分裂物質에 吸收될 때 中性子 Energy가 높을수록 核分裂에 依해 發生하는 中性子の 數가 많게되는 반면에 燃料 以外的 物質에 吸收되는 比率이 낮기 때문이다. 高速增殖爐는 減速材가 없고 主要한 構成材料는 冷却材와 制御棒이다. 冷却材로서 必要한 性質은

- (a) 中性子を 減速시키지 않는 原子番號가 높은 物質일 것.
- (b) 中性子を 吸收하기 어려운 것일 것.
- (c) 効率が 좋은 熱輸送材일 것.

등이다. 이것에 가장 適合한 것으로 液體 Na 이 選擇되고 있다. 燃料로는 通常 15~25%의 Pu와 U₂₃₈과의 混合物을 酸化物 Pellet으로 하여 鋼製의 被覆管에 封入한 것이 使用된다. 增殖爐의 燃料에 Pu₂₃₉가 使用되는 것은 U₂₃₅에 비해 核分裂에 依해 發生하는 中性子數가 많기 때문이다.

다. 核融合 發電

核分裂反應에 使用되는 U이나 Th의 核燃料는 埋藏量이 풍부하다고는 하지만 限定되어 있고 U₂₃₅의 濃縮에는 高價인 大規模 工場 建設과 大量的 電力이 所要되며 放射能의 發生이 問題가 된다. 한편 核融合은 海水中에 包含되어 있는 重水素를 燃料로서 使用하기 때문에 地球上에 어느 한곳으로 偏在하지 않은 무진장의 Energy 資源으로 安全性이나 環境保全性 等に 있어서

도 理想的인 것으로 核融合反應爐가 實現된 境遇의 利點을 列擧하면

- (a) 放射性 核分裂生成物이 거의 없다.
- (b) 直接發電이 可能하다.
- (c) 燃料의 裝荷量이 매우 적다.

등이다. 核融合이 脚光을 받기 始作한 것은 比較的 最近의 일이지만 核融合의 研究가 開始된 것은 1950년경으로 이미 30年 가까운 期間이 經過하였다. 이것은 核融合爐의 爐心이 되는 Plasma의 閉鎖가 困難하였기 때문에 核融合의 實現에 對해 悲觀的인 見解가 支配하던 時代가 오래 繼續되었기 때문이었다. 그間에 近年 30년에서 良好한 Plasma 閉鎖性能을 얻을 수 있게 되어 今後 研究는 急速한 進歩를 하게 되었다. 우선 核融合發電爐를 概略적으로 살펴보면(Fig.7 참조) 爐內의 除熱 Loop에는 Blanket 材料인 Li 自身이 循環하는 境遇와 He Gas가 Blanket 內를 循環하는 境遇가 있다.

準定常爐나 Pulse 爐에서는 熱出力을 平坦化하기 위해 中間에 蓄熱器가 設置된다. 1次 Loop의 熱은 熱交換器에 依해 2次 Loop에 傳達되고 2次 Loop는 在來의 發電 Plant와 같은 Steam을 利用한 蒸氣 Turbine 發電 方式이다. 大形 實驗裝置의 成功은 核融合 實現의 將來를 밝게 한것은 사실이지만 核融合發電爐의 實用化에는 爐心 Plasma의 達成外에도 많은 技術的 問題가 있어 現在의 豫想으로는 實用化 時期는 21世紀 初頃이라 생각된다.

3. 火力 및 原子力의 國產化動向

重化學工業이 날로 發展을 거듭하는 오늘날 이 分野에서 活潑히 前進해가는 現代洋行이 國內 처음으로 發電設備 國內主導形式으로 Turnkey 契約이 締結되었다. 火力의 境遇 Boiler를 비롯 Gas Turbine과 發電用 Turbine의 國產化 및 送, 受電設備, 發電所 補助機器 全般에 걸쳐 國內 供給業體들의 國產化計劃은 매우 希

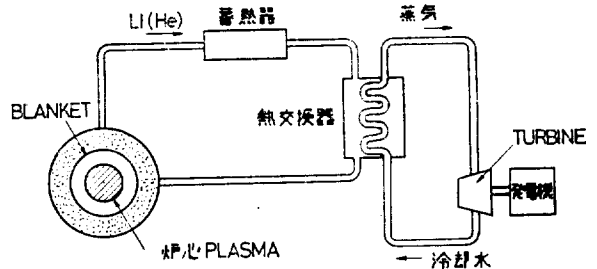


Fig. 7 核融合發電爐의 概念圖

<p.28에 계속>