

行政院及所屬各機關出國報告

(出國類別：實習)

大潭複循環機組氣渦輪機規劃  
設計技術訓練實習報告書

服務機關：台灣電力公司核能火力發電工程處  
出國人職稱：主辦高壓管路設計員  
姓名：蔡勝文  
出國地區：日本  
出國日期：91年9月4日至91年9月18日  
報告日期：91年11月17日

G3/  
CO9104705

## 行政院及所屬各機關出國報告提要

出國報告名稱：大潭複循環機組氣渦輪機規劃設計技術訓練實習報告書

頁數 20 含附件：是否

出國計畫主辦機關/聯絡人/電話：

台灣電力公司核能火力發電工程處/王大琪/(02)23229609

出國人員姓名/服務機關/單位/職稱/電話：

蔡勝文/台灣電力公司核能火力發電工程處/汽機課/主辦高壓管路設計員/  
(02)23229562

出國類別：1 考察2 進修3 研究4 實習5 其他

出國期間：91年9月4日至91年9月18日

出國地區：日本

報告日期：91年11月17日

分類號/目：G3/ 電力工程

關鍵詞：氣渦輪機、等效運轉時數、可靠性

內容摘要：(二百至三百字)

501F及M501G氣渦輪機是基以高容量、高效率及高可靠性的基本架構下來發展，單軸結構、二只軸承、冷端驅動發電機及軸向排氣，體積小而且結構堅實，其配備規劃主要分為三個部份：

1. 單軸式氣渦輪機：軸流式壓縮機、罐式環狀燃燒室、軸流式氣輪機、壓縮機突流(surge)保護系統、氣輪機熱元件冷卻系統、燃氣系統。
2. 附屬設備系統：潤滑油系統、起動裝置、控制油系統。
3. 其他輔助系統：燃油供給系統、空氣進氣系統、排氣系統、de-NOx噴水系統、壓縮機清洗系統。

M501F及M501G氣渦輪機以達到藝術化境界為規劃設計目標，無論在本體構造、燃燒室冷卻技術、氣輪機葉片的冷卻技術及塗層技術，以及維護檢查週期等方面均有精良進步的設計，以能在運轉上提供最大的可靠性、彈性及簡單性。

## 報 告 內 容

### 一、國外公務之內容與過程：

(一)公務任務

(二)內容與過程

### 二、國外公務之心得與感想：

(一)前言

(二) M501F 及 M501G 氣渦輪機之配備規劃

(三) M501F 氣渦輪機之設計

(四) M501G 氣渦輪機異於 M501F 之設計

(四) 熱燃氣道組件的維護檢查週期及設計壽命

### 三、出國期間所遭遇之困難與特殊事項

### 四、對本公司之具體建議

一、國外公務之內容與過程：

(一)公務任務：

大潭複循環機組氣渦輪機規劃設計技術訓練

(二)內容與過程：

日本三菱重工到目前為止總共大約已製造 28,000MW 氣渦輪機，140,000MW 汽輪機、550,000 噸/小時的鍋爐（包含廢熱鍋爐），由此可見，三菱重工在發電工業領域中的製造經驗和工程能力已頗有實績。在氣渦輪機實績方面，自 1963 年以來，已經交運或銷售 350 台氣渦輪機，容量從 6MW 至 334MW，應用於工業用和發電用。

三菱重工對大潭複循環發電計畫一直有濃厚的興趣，未來將在第一階段發電中可能提報兩部三台 M501F 氣渦輪機配一台汽輪機的複循環機組，燃氣、燃油淨出力分別大約 740MW 與 700MW（廠址條件 32°C，1atm，RH90%）；將在第二階段發電中可能提報四部三台 M501F 氣渦輪機配一台汽輪機的複循環機組，燃氣淨出力大約 740MW（廠址條件 32°C，1atm，RH90%），或者可能提報四部二台 M501G 氣渦輪機配一台汽輪機的複循環機組，燃氣淨出力大約 680MW（廠址條件 32°C，1atm，RH90%）。

M501F 及 M501G 氣渦輪機為目前世界先進發電機型之一，且為本公司將來可能引進的發電機組之一，其規劃設計技術方面有必要派員前往原廠家日本三菱重工接受專業技術訓練實習，吸取專業技術，俾使對日後在大潭複循環發電設備採購上有所助益，並期能有助於適時加入本公司電力

系統之營運。

本次實習之起訖日期及前往機構如下：

起 訖 日	機 構 名 稱
91 年 9 月 4 日	赴日本橫濱
91 年 9 月 5 日至 91 年 9 月 17 日	在日本橫濱三菱技術中心接受 M501F 及 M501G 氣渦輪機規劃設計技術訓練
91 年 9 月 18 日	返回台灣台北

## 二、國外公務之心得與感想：

### (一) 前言

M501F 是由 M501D 進步而來，M501G 是由 M501F 進步而來（如圖 1 所示）。M501D、M501F 與 M501G 的氣輪機進氣溫度由 1150°C、進而 1350°C，提高到 1500°C；出力由 114MW、進而 185MW，增加到 264MW（燃氣、ISO 條件），熱效率由 33%、進而 37%，增加到 39%（燃氣、ISO、LHV 條件）。

M501F 在 1989 年完成第一次滿載廠試，1992 年商業運轉，到 2002 年 7 月為止已有 24 台在運轉，共有約 930,000 運轉小時，可靠性 (reliability) 達 99.6%。M501G 在 1997 年完成商業運轉，到 2002 年 7 月為止已有 6 台在運轉，共有約 20,500 運轉小時，可靠性達 99.8%。

## MITSUBISHI GAS TURBINE: DEVELOPMENT

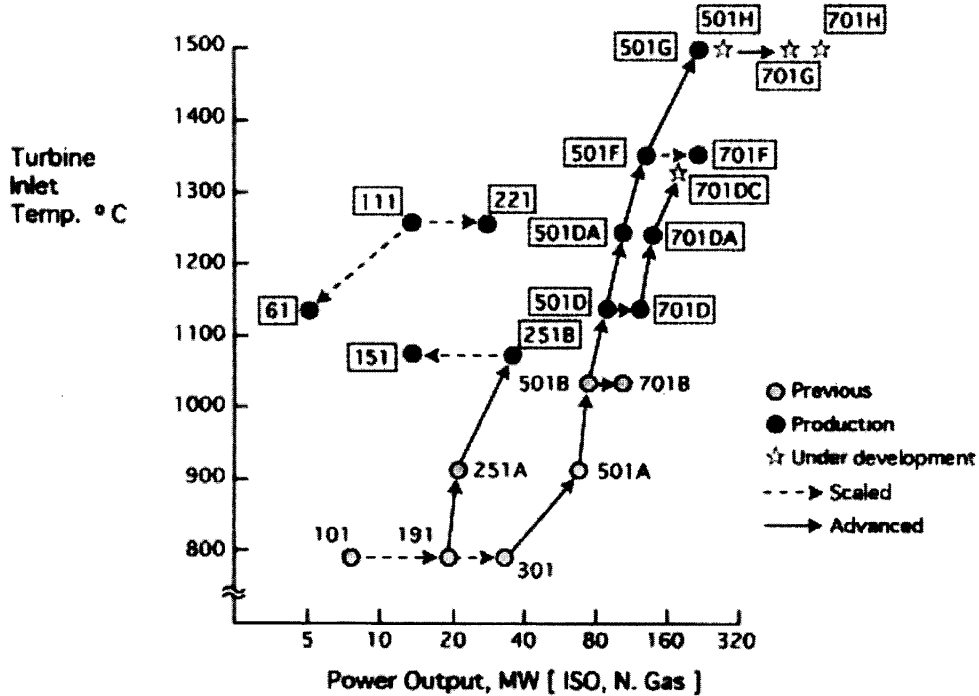


圖 1：三菱氣渦輪機發展過程

### (二) M501F 及 M501G 氣渦輪機之配備規劃

M501F 及 M501G 氣渦輪機基本上仍運用很多長期已建立的設計概念和原則，例如單軸結構、二只軸承、冷端驅動發電機、軸向排氣（如圖 2 所示）。這些基本的設計理念，三菱重工已使用超過 30 年，現在已成為其工業標準。

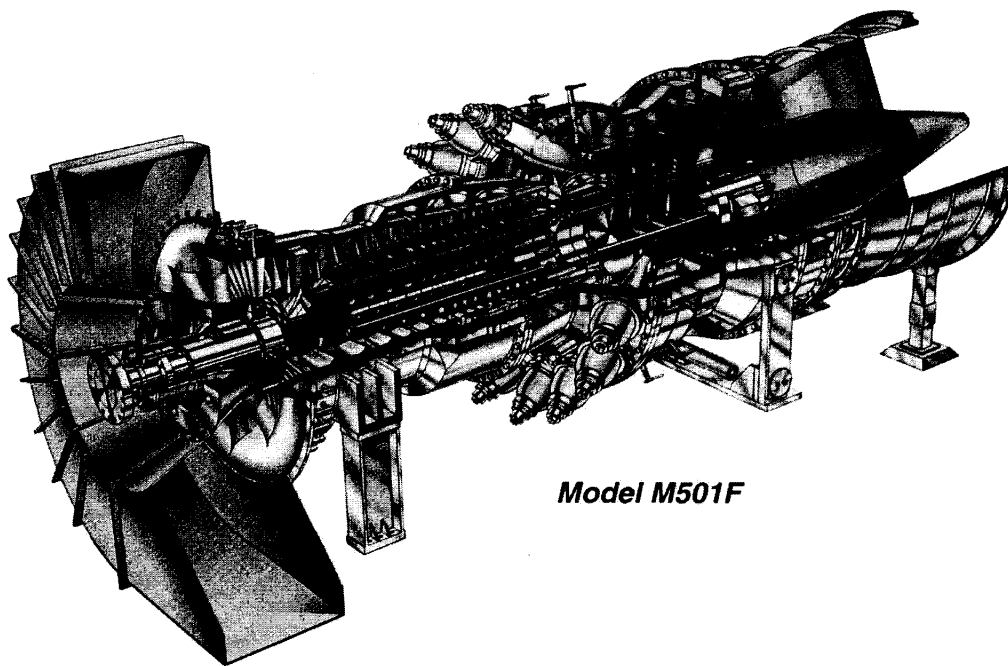


圖 2：三菱氣渦輪機 30 年一貫的設計理念—  
單軸結構、二只軸承、冷端驅動及軸向排氣

M501F 及 M501G 氣渦輪機之配備規劃如下：

(1) 單軸式氣渦輪機

- a. 軸流式壓縮機
- b. 罐式環狀燃燒室
- c. 軸流式氣輪機
- d. 點火及火焰監視系統
- e. 雙燃料（燃油及燃氣）噴嘴
- f. 壓縮機突流（surge）保護系統
- g. 氣輪機熱元件冷卻系統
- h. 燃氣系統（孔口流量計和控制閥等）

(2) 附屬設備系統

- a. 氣輪機與發電機共用的潤滑油系統（包括油槽、雙只式過濾器、油冷卻器、軸驅動油泵、AC 馬達驅動油泵、DC 馬達緊急驅動油泵、軸承油壓調節器、軸承油溫控制器及其他儀器等）
- b. 起動裝置（包括電力起動馬達、液壓扭力轉換器及輔助齒輪等）
- c. 控制油系統

(3) 其他輔助系統

- a. 燃油供給系統（包括主油泵、控制閥及流量計等）
- b. 空氣進氣系統（包括三級的板式空氣過濾網、消音器、進氣導道及膨脹接頭等）
- c. 排氣系統（包括氣輪機排氣端與排氣導道的膨脹接頭等）
- d. de-NOx 噴水系統（包括主噴水泵、控制閥及流量計等）
- e. 壓縮機清洗系統（包括水槽、AC 馬達驅動水泵、過濾器及管路等）



### (三) M501F 氣渦輪機之設計

M501F 氣渦輪機主要包含 16 級高效率軸流式壓縮機，16 個罐式環狀排列的燃燒室，以及 4 級反動式氣輪機。發電機連接在壓縮機端，屬於冷端驅動式（如圖 3 所示）。

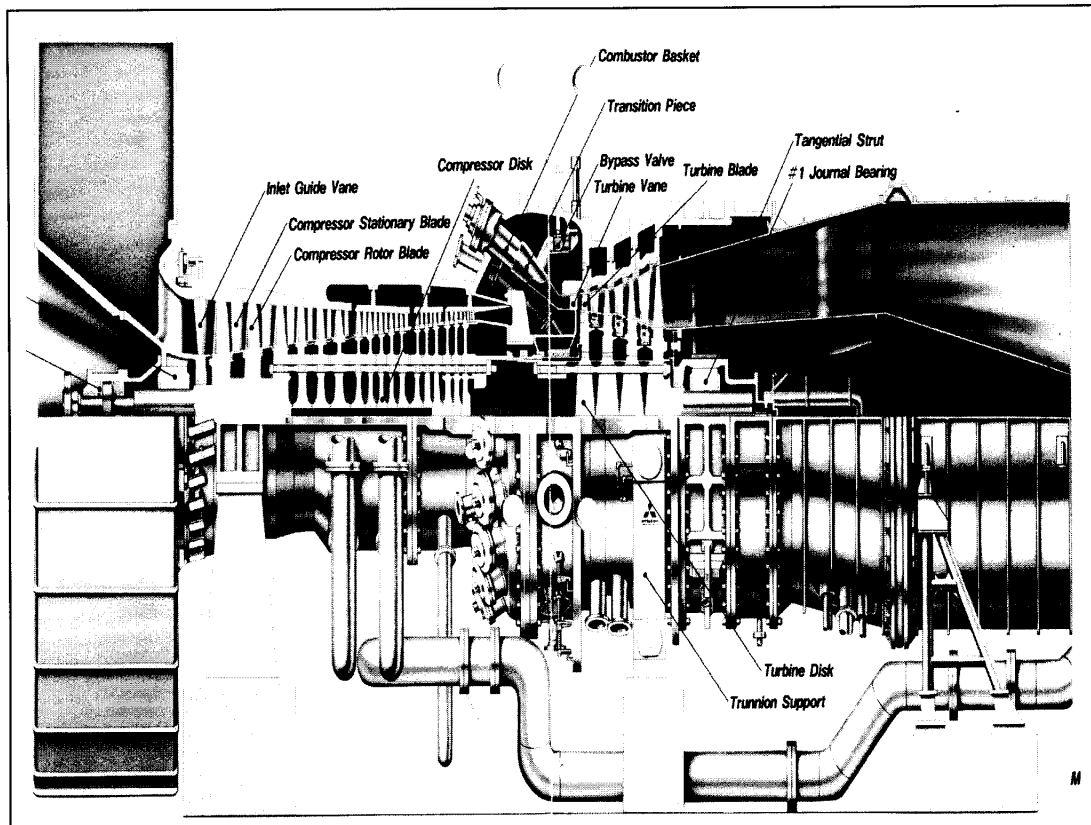


圖 3：M501F 氣渦輪機設計構造圖

### (1) 外缸 (CASING)

氣渦輪機外缸是上下水平分開的，以利於轉子在現場的維護（如圖 4 所示）。在進氣及壓縮機部份的外缸分別由球狀鑄鐵與鑄鐵鑄造而成，而在燃燒室、氣輪機和排氣部份的外缸材料則採用合金鋼。在進氣端軸承處有八支徑向支柱支撐，而在排氣端軸承處有六支切向支柱支撐。7 至 16 級壓縮機靜葉片及氣輪機的靜葉片分別固定在個別的靜葉環（blade ring）上。靜葉環受熱的反應係獨立於外缸的，而且保持與轉子同心，以免葉片受到擦傷，並能維持在最小間隙及確保最大性能。

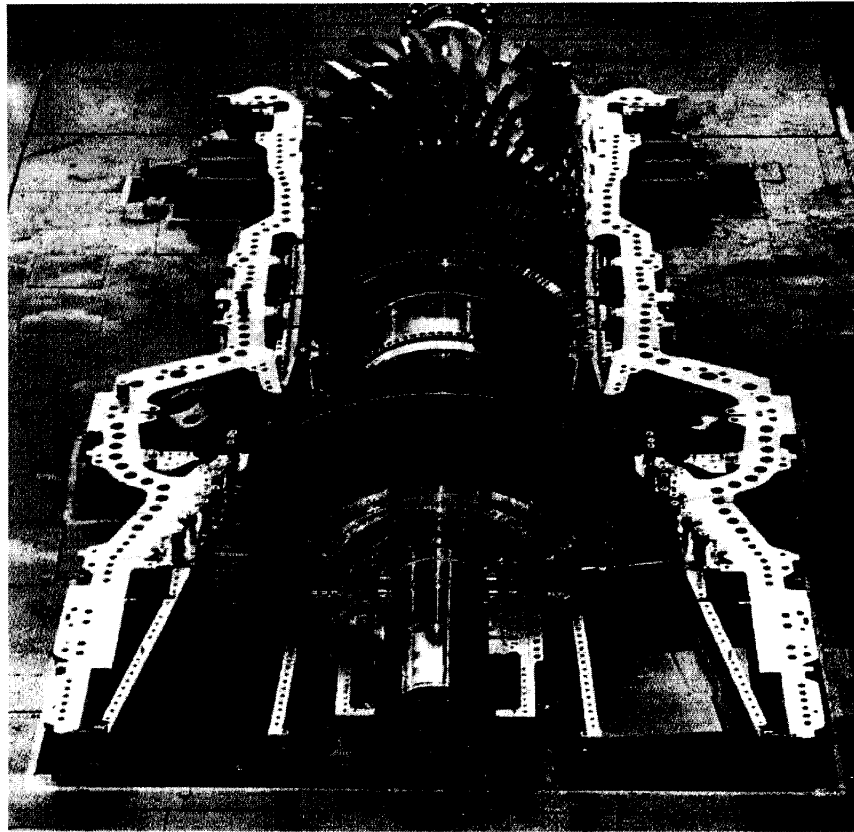


圖 4：M501F 氣渦輪機轉子及下半外缸

## (2) 轉子 (ROTOR)

單軸轉子包括壓縮機段及氣輪機段，由兩只軸承（傾斜襯墊式）支撐，而止推軸承屬於雙邊作用多襯墊式。壓縮機轉子係由許多具有插孔（spigot）的輪盤（disc）組成，每一個插孔裝入一根扭力銷（torque pin），然後由貫穿螺栓鎖在一起。氣輪機轉子係有類似曲面離合器（curvic clutch）鑿合的輪盤組成，然後由貫穿螺栓鎖在一起（如圖 5 所示）。這樣具有提供精確對心及有效傳遞動力的優點。

壓縮機靜葉片及氣輪機前兩級動靜葉片都有表面塗層來增加防腐蝕性。所有的壓縮機及氣輪機葉片都是側入式安裝、並有類似樅木根部，因此都可單片更換而不會影響其他葉片或需要吊出轉子。

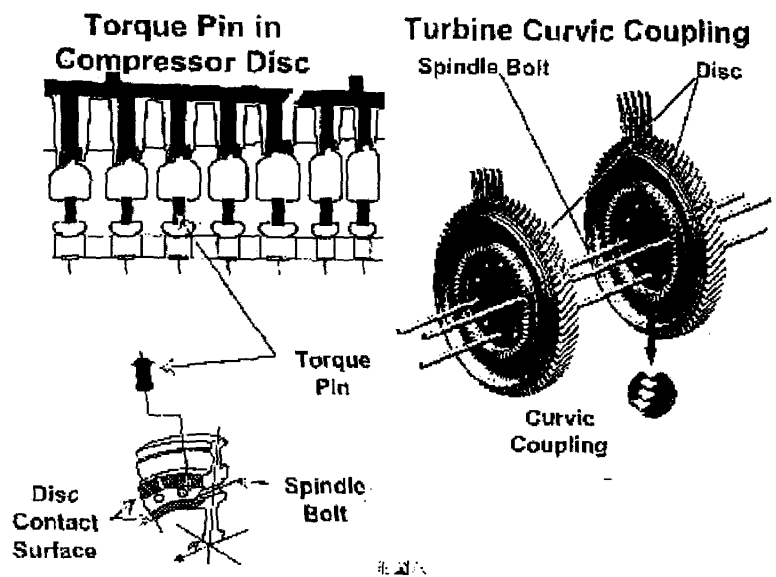


圖 5：M501F 壓縮機及氣輪機轉子設計圖

### (3) 壓縮機

空氣經過空氣進氣系統後，進入 16 級軸流式壓縮機，壓縮比為 16。在第 6、10 及 13 級靜葉片處設置抽氣系統，做為起動時及提供氣輪機葉片冷卻空氣之用（如圖 6 所示）。具有可調式進氣導葉（variable inlet guide vane），以改善壓縮機在低轉速時易發生突流（surge）的特性，並改善複循環部分負載（part load）運轉時的性能；同時亦具有兩級的排氣導葉（exit guide vane），引導氣流順暢離開壓縮機。前幾級動葉片的材料是 17-4PH 不銹鋼，其他動葉片及靜葉片的材料是鉻鋼。每級上下兩半靜葉片各裝入易於拆卸的 180 片隔板（diaphragms），以維持高效率的葉片覆緣氣封效果。

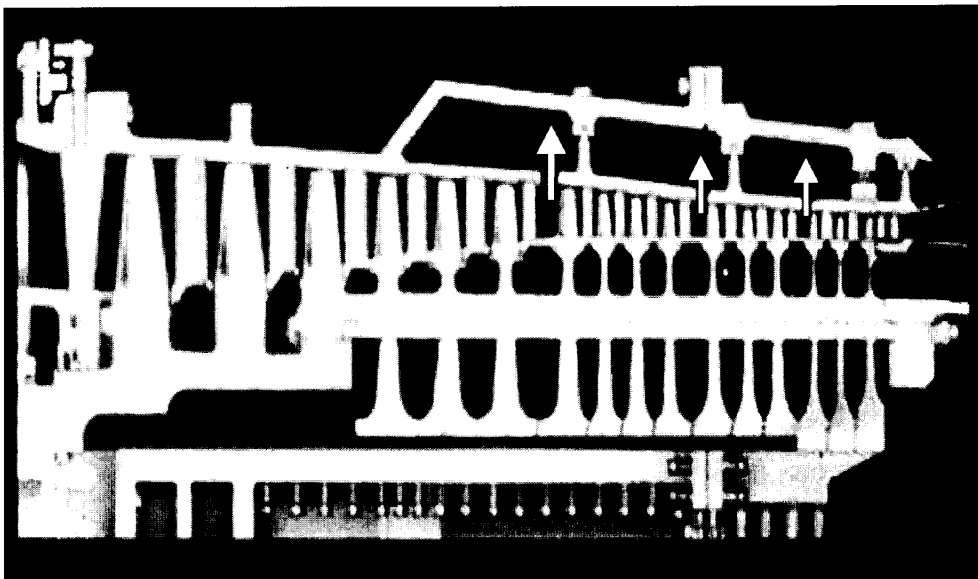


圖 6：M501F 壓縮機第 6、10 及 13 級靜葉片處設置抽氣系統

#### (4) 燃燒系統

本系統包含 16 個燃燒室、燃燒器、點火系統及火焰偵測系統等。每個燃燒室主要分為兩部分：一為燃燒筒 (combustor basket)，另一為燃氣導筒 (combustor transition piece)。如圖 7 所示。

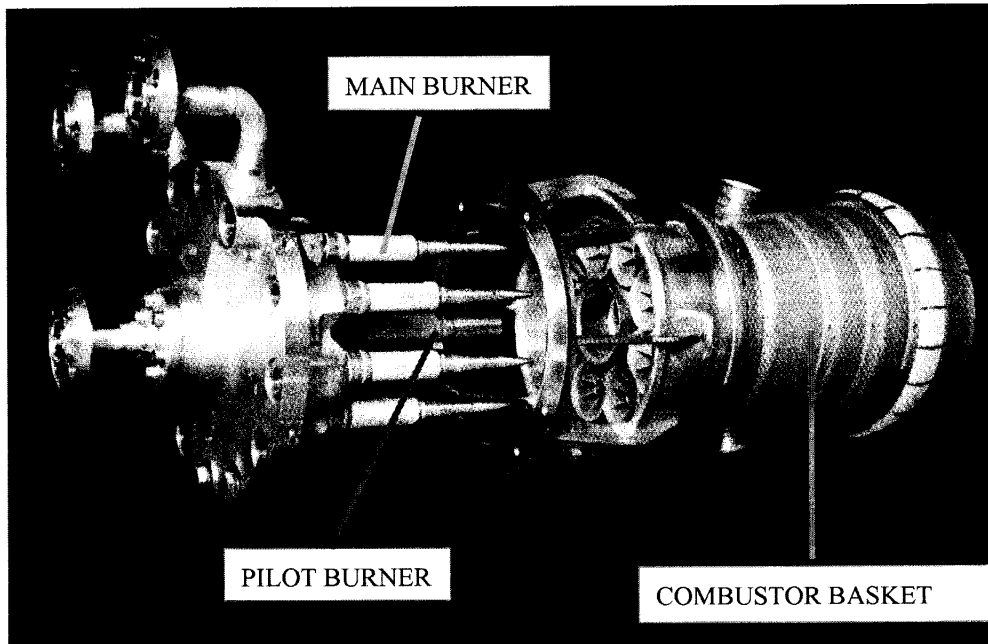


圖 7：M501F 燃燒器及燃燒筒

乾式低氮氧化物燃燒室內包含一旁通閥 (bypass valve)，它能在起動階段引進部分的壓縮空氣進入燃氣導筒內，來提高火焰的穩定性及升載時的空氣燃料比。當達到滿載時，此閥即關閉 (如圖 8 所示)。

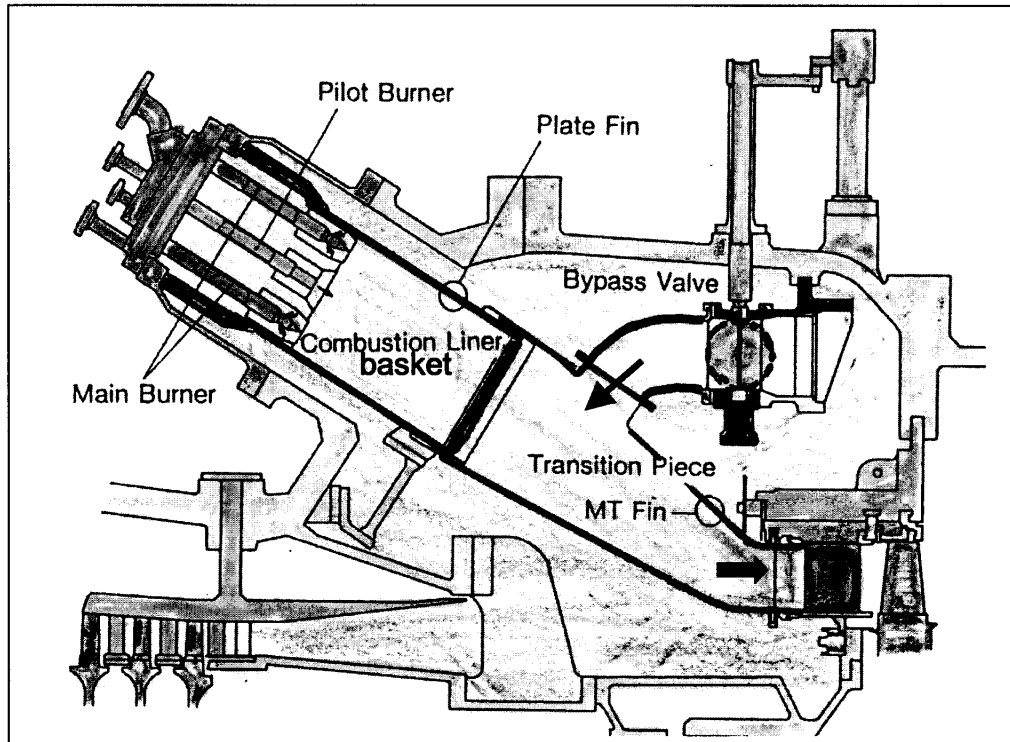


圖 8：MI501F 燃燒室構造圖

燃料在燃燒過程中會產生高溫氮氧化物 (thermal NO<sub>x</sub>)，為抑制氮氧化物的產生必須降低火焰溫度來減少氮與氧的反應。傳統的擴散式燃燒，用噴水或蒸汽進入火焰來降低火焰溫度，此方式有消耗大量除礦水或蒸汽及降低氣渦輪機效率的缺點，而 M501F 在燃油情況則採用噴水方式來抑制氮氧化物的產生。另一種方式是乾式預先混合燃燒，藉由預混燃燒來達到均勻的低火焰溫度，因此不需要消耗大量除礦水或蒸汽來降低氮氧化物。目前燃氣的氣渦輪機均採用此方式。

燃燒室的材料是鎳基超合金，具備潛變強度高和可板狀加工的特性。關於燃燒室的冷卻方式，燃燒筒是使用板式散熱片冷卻 (plate-fin

cooling)，而燃燒導筒是使用多散熱片式冷卻 (MTFIN cooling)，包括對流冷卻 (convection cooling) 及薄膜冷卻 (film cooling)，如圖 9 及 10 所示。燃燒溫度在 1350°C 情況下，也能將氮氧化物降低至 25ppm (15 % O<sub>2</sub>)。

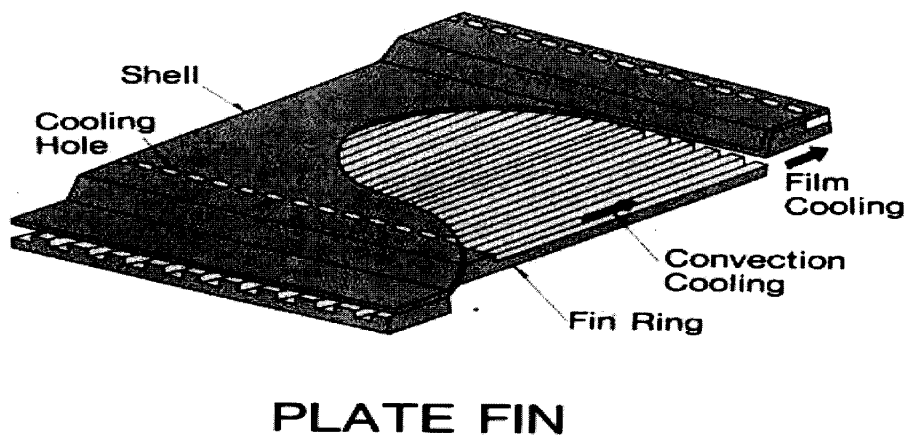


圖 9：燃燒筒冷卻方式設計—PLATE FIN

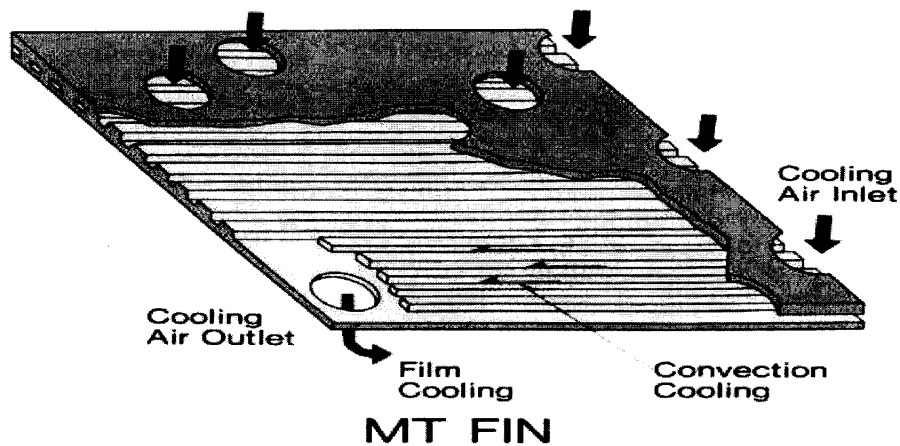


圖 10：燃燒導筒冷卻方式設計—MTFIN

## (5) 氣輪機 (turbine)

為四級軸流式氣輪機。第一、二級動葉片是獨立葉片 (free-standing type)，第三、四級是整體覆緣葉片 (integral Z-tip shroud type)。第一級靜葉片為可單片移除葉片，第二級靜葉片為兩瓣一組可移除葉片，第三級靜葉片為三瓣一組可移除葉片，而第四級靜葉片為四瓣一組可移除葉片。各級靜葉片均分別被固定在個別的靜葉環上。

氣輪機動葉片材料係為精密鑄造鎳基超合金，主要的設計要求為潛變強度高、週期性疲勞低及抗氧化。靜葉片材料係為精密鑄造鈷基超合金，主要的設計要求為熔接性能佳、抗腐蝕及抗氧化。而輪盤 (disc) 材料主要成分為鎳鉻鈿鈳，其溫度必須透過冷卻系統維持在潛變範圍之內。

葉片的冷卻技術，是促使氣渦輪機提高效率的關鍵技術之一。為了提高氣輪機進口溫度，更先進的冷卻技術是需要的。M501F 的氣輪機葉片冷卻方式採用整合薄膜冷卻孔與桿銷散熱系統的壓縮空氣衝射進入葉片的方法。空氣壓縮機的末級排氣提供氣輪機第一級靜葉片及第一、二、三級動葉片內部的冷卻空氣；第 13 級抽氣 (或稱高壓抽氣) 提供氣輪機第二級靜葉片內部的冷卻空氣；第 10 級抽氣 (或稱中壓抽氣) 提供氣輪機第三級靜葉片內部的冷卻空氣；第 6 級抽氣 (或稱低壓抽氣) 提供氣輪機第四級靜葉片內部的冷卻空氣 (如圖 11 所示)。對於 M501F 而言，熱燃氣溫度從氣輪機進口溫度 1350°C，到氣輪機出口溫度為 650°C；而葉片本身的溫度，透過先進的葉片冷卻技術，第一級靜葉片的溫度僅為為 800°C (與



1350°C相差 550°C)，第四級動葉片溫度為 550°C。

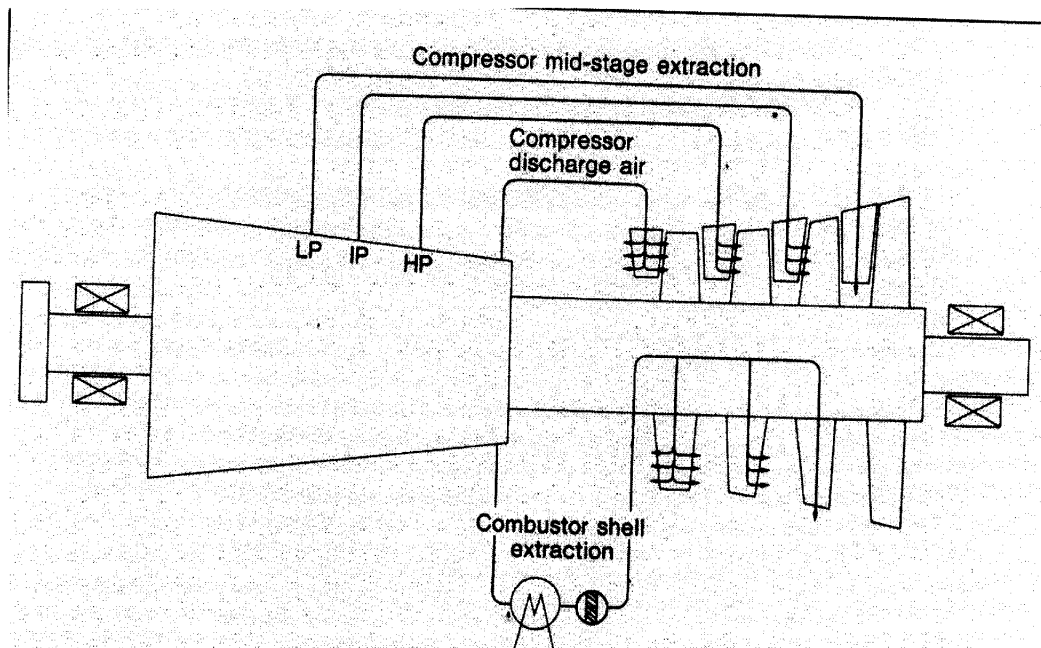


圖 11：M501F 壓縮機抽氣供給氣輪葉片冷卻的設計

#### (四) M501G 氣渦輪機異於 M501F 之設計

M501G 的熱效率較 M501F 為高，主要係因為提高氣輪機進氣溫度的技術精進。M501G 的氣輪機進氣溫度達 1500°C，較 M501F 高出 150°C。主要係從兩方面來著手：

##### (1) 採用蒸汽冷卻燃燒室

為了維持在較低的火焰溫度下獲得較高的氣輪機進氣溫度，並改善因為缺乏燃燒空氣及壓力波動而導致不穩定的燃燒，M501G 燃燒室採用蒸汽冷卻。此為世界上第一個使用的技術，而且已於 1997 年商業運轉。

(2) 葉片塗層採用 TBC (thermal barrier coating) 技術：

M501F 的氣輪機第一級葉片的塗層 (coating) 方法係運用低壓電漿噴敷 (LPPS, low pressure plasma spray) 的過程，在無氧化的環境將粉末 (CoNiCrAlY) 在約 300~400mm 長的電漿火焰中溶解後噴敷在葉片基材上。

M501G 的氣輪機第一級葉片塗層是耐熱陶瓷塗層 (TBC, thermal barrier coating) — 運用電漿噴敷 (plasma spray) 的過程，將低熱傳導性的陶瓷噴敷在葉片基材上，上層為  $ZrO_2$  成分，下層為 MCrAlY。

M501G 與 M501F 設計之主要差異列表如表 1 所示。

表 1：M501G 與 M501F 設計之主要差異表

機型 項目	M501F	M501G
尺寸 (長× 寬× 高)	13.9 米× 4.6 米× 4.6 米	15.2 米× 4.6 米× 5.0 米
重量	195 噸	250 噸
淨出力 (ISO)	185,400 KW	264,000 KW
熱效率 (LHV)	35%	39%
壓縮機	16 級	17 級
氣輪機	4 級	4 級
罐式環狀燃燒室	16 罐	16 罐

燃燒室冷卻方式	空氣冷卻	蒸汽冷卻
壓縮比	16	20
氣輪機進氣溫度	1350°C	1500°C
氣輪機排氣溫度	607°C	596°C
第一級動葉片結構	Serpentine (葉片內部空氣通路設計 類似蛇曲狀盤旋)	Serpentine+TBC (葉片內部設計同左，葉片外部則 加耐熱陶瓷塗層)
第一台商轉時間	1989 年	1997 年
已運轉機組 (到 2002 年 7 月為止)	24 台	6 台
總共運轉時數 (到 2002 年 7 月為止)	930,369 小時	20,514 小時
可靠性 (到 2002 年 7 月為止)	99.6%	99.8%

#### (五) 熱燃氣道組件的維護檢查週期及設計壽命

氣渦輪機的熱燃氣道組件 (hot gas path parts) 係指燃燒筒、燃氣導筒、氣輪機動靜葉片等等熱燃氣通過的組件。這些在高溫下使用的組件，其維護檢查之良窳關係著機組能否安全正常運轉。熱燃氣道組件的維護檢查週期是根據等效運轉時數 (EOH, equivalent operating hours)。等效運轉時數的計算是從機組從第一次點火開始起算，除了包含實際運轉時數外，還受到機組運轉燃料與起動停機次數、卸載次數、跳機次數及負載快速變動速率等之影響。

氣渦輪機組在燃氣情況的 EOH 計算方式如表 2 所列，若在燃油情況，

表 2 所列數據須再校正 1.25 倍。

表 2：氣渦輪機組等效運轉時數 (EOH) 的計算方式

影響因素 熱組件	實際 運轉時數	每次 起動停機	每次 機組卸載	每次 跳機	負載快速 變動速率
氣輪機 第二、三、四級 動葉片	1 EOH	10 EOH	60 EOH	200 EOH	0~40 EOH
其他熱燃氣道組 件	1 EOH	20 EOH	120 EOH	400 EOH	0~80 EOH

熱燃氣道組件的定期檢查週期如下：

- (1) 燃燒室 (combustor)：每 8,000 EOH 檢查一次，所需天數約 10 天。所需程序是拆解燃燒筒。
- (2) 氣輪機 (turbine)：每 16,000 EOH 檢查一次，所需天數約 16 天。所需程序是吊起上蓋。
- (3) 大修 (major overhaul)：每 48,000 EOH 檢查一次，所需天數約 35 天。所需程序是吊起上蓋，並吊出轉子。

基於所設計的強度及過去的運轉經驗，熱燃氣道組件的期望壽命設計如表 3 所示。

表 3：熱燃氣道組件的期望壽命設計表

熱燃氣道組件		EOH
燃燒室	燃燒筒、燃燒導筒	24,000
	燃料噴嘴	50,000
氣輪機靜葉片	第一、二級	50,000
	第三級	80,000
	第四級	100,000
氣輪機動葉片	第一、二、三級	50,000
	第四級	100,000

### 三、出國期間所遭遇之困難與特殊事項

很榮幸我有此機會被派赴日本三菱技術中心接受 M501F 及 M501G 氣渦輪機規劃技術訓練，實在不可多得，非常感謝上級主管給我這個學習成長的機會。

由於本人曾參與南部電廠擴建第四號複循環機組發電計畫的採購審標作業，三菱重工提報一台 M501F 氣渦輪機配一台汽輪機的複循環機組參標並由其得標。目前我仍參與履約工作，所以對於 M501F 氣渦輪機並不陌生，猶如此次訓練前的預習，使我學習事半功倍，心得更加深入，成果豐碩，有助於

未來工作能力之提昇。而且非常感謝三菱技術中心在實習訓練期間的熱心協助，對於日文資料也傾力充分解說翻譯，使我實習訓練上大致順利，出國期間並無遭遇困難或特殊事項。

#### 四、對本公司之具體建議

(一) 至 2002 年 7 月為止，M501F 氣渦輪機已有 24 台在運轉，共有約 930,000 運轉小時，可靠性 (reliability) 達 99.6%；而 M501G 氣渦輪機已有 6 台在運轉，共有約 20,500 運轉小時，可靠性達 99.8%，符合本公司自八十九年以來對未來氣渦輪機須具有銷售及運轉實績的採購原則。另外，M501F 及 M501G 氣渦輪機為目前世界先進發電機型之一，均以朝兼顧高可靠性與高效率的方向來發展，例如三台 M501F 氣渦輪機配一台汽輪機的複循環機組的淨熱效率約為 56.4% (燃氣,ISO, LHV)，而兩台 M501G 氣渦輪機配一台汽輪機的複循環機組的淨熱效率約為 58.4% (燃氣,ISO, LHV)，均頗具市場競爭力。

(二) M501G 氣渦輪機的燃燒室冷卻方式係採用蒸汽冷卻。對於兩台 M501G 氣渦輪機配一台汽輪機的複循環機組熱機起動而言，三菱重工的原始設計是以輔助鍋爐能提供約 65 噸/小時輔助蒸汽為規劃容量，則起動時間約需 90 分鐘；即兩台 M501G 氣渦輪機同時起動時，前 40 分鐘由輔助鍋爐提供輔助蒸汽冷卻燃燒室，直到兩台 M501G 氣渦輪機負載達到 50%，後 50 分鐘則由 HRSG 已能提供中壓蒸汽來替代輔助蒸汽。最小供給起動的輔助蒸汽量約需 35 噸/小時，則兩台 M501G 氣渦輪機須相隔 60 分鐘起動，所需複循環機組的起動時間約需 150

分鐘。

目前本公司對大潭複循環機組的熱機起動時間要求是 70 分鐘，因此三菱若為符合 70 分鐘的要求，則必須加大輔助鍋爐的容量，或者本公司視需要放寬起動時間要求，因為輔助鍋爐容量較小，投資成本較小，佔地空間較小，維護成本較小，但起動時間較長。