

# 行政院及所屬各機關出國報告

(出國類別：實習)

## 氣渦輪機葉片應力破損研究

服務機關：台灣電力公司

姓名職稱：陳瑞麒/機械研究專員

派赴國家：日本

出國期間：100年8月11日至8月24日

報告日期：100年10月14日

## 出國報告審核表

出國報告名稱：氣渦輪機葉片應力破損研究		
出國人姓名 (2人以上，以1人為代表)	職稱	服務單位
陳瑞麒	機械工程師	台灣電力公司
出國類別	<input type="checkbox"/> 考察 <input type="checkbox"/> 進修 <input type="checkbox"/> 研究 <input checked="" type="checkbox"/> 實習 <input type="checkbox"/> 其他_____ (例如國際會議、國際比賽、業務接洽等)	
出國期間：100年8月11日至100年8月24日		報告繳交日期：100年10月14日
出國計畫主辦機關審核意見	<input type="checkbox"/> 1.依限繳交出國報告 <input type="checkbox"/> 2.格式完整(本文必須具備「目地」、「過程」、「心得」、「建議事項」) <input type="checkbox"/> 3.無抄襲相關出國報告 <input type="checkbox"/> 4.內容充實完備。 <input type="checkbox"/> 5.建議具參考價值 <input type="checkbox"/> 6.送本機關參考或研辦 <input type="checkbox"/> 7.送上級機關參考 <input type="checkbox"/> 8.退回補正，原因： <input type="checkbox"/> 不符原核定出國計畫 <input type="checkbox"/> 以外文撰寫或僅以所蒐集外文資料為內容 <input type="checkbox"/> 內容空洞簡略未涵蓋規定要項 <input type="checkbox"/> 抄襲相關出國報告之全部或部分內容 <input type="checkbox"/> 電子檔案未依格式辦理 <input type="checkbox"/> 未於資訊網登錄提要資料及傳送出國報告電子檔 <input type="checkbox"/> 9..本報告除上傳至出國報告資訊網外，將採行之公開發表： <input type="checkbox"/> 辦理本機關出國報告座談會(說明會) 與同仁進行知識分享。 <input type="checkbox"/> 於本機關業務會報提出報告 <input type="checkbox"/> 其他_____ <input type="checkbox"/> 10.其他處理意見及方式：	

說明：

- 一、各機關可依需要自行增列審核項目內容，出國報告審核完畢本表請自行保存。
- 二、審核作業應儘速完成，以不影響出國人員上傳出國報告至「政府出版資料回應網公務出國報告專區」為原則。

報告人		審核人			
			單位 主管	主管處 主 管	總 經 理 副總經理

## 行政院及所屬各機關出國報告提要

出國報告名稱：氣渦輪機葉片應力破損研究

頁數 40 含附件：是否

出國計畫主辦機關/聯絡人/電話：台灣電力公司/陳德隆/2366-7685

出國人員姓名/服務機關/單位/職稱/電話：

陳瑞麒/台灣電力公司/綜合研究所/機械工程師/（02）80782277

出國類別：1 考察2 進修3 研究4 實習5 其他

出國期間：100年8月11日至8月24日 出國地區：日本

報告日期：100年10月14日

分類號/目

關鍵詞：熱應力分析（thermal stress analysis）、氣機葉片（gas turbine blade）、遠端監控（remote control）

內容摘要：（二百至三百字）

綜合研究所刻正從事電廠氣渦輪機葉片應力分析及破損案件肇因評估之工作，經常必須從事氣渦輪機葉片的各類力學問題模擬分析。以往都是固力人員分析固力問題，熱流人員分析熱流問題，但氣渦輪機葉片問題是熱、流、固混合的問題，其困難度較高，為精進技術及突破瓶頸，因此擬定此實習計畫，以便吸取國外廠家之經驗。

氣渦輪機葉片之功能對其可用率有深切影響，不當的設計及運用將造成破損事件，迫使機組停機。本計畫之目的在學習三菱重工對葉片分析之技術與經驗，藉以提供本所在從事相關問題模擬分析時之參考，以便能精準預測葉片的力學行為，提高葉片的可靠度與使用率。本報告內容將包括在三菱公司實習氣渦輪機葉片分析的相關資料，最後並提出心得與建議事項。

本文電子檔已傳至出國報告資訊網（<http://open.nat.gov.tw/reportwork>）

# 目 錄

出國報告書審核表	
出國報告書提要	
目錄.....	I
第壹章、前言.....	1
1-1、出國緣由.....	1
1-2、出國目的.....	1
1-3、出國行程.....	1
第貳章、實習內容.....	2
2-1、氣機複循環發電系統.....	2
2-2、利用設計驗證提高氣渦輪機的可靠度.....	7
2-3、縮短大修時程.....	27
2-4、利用遠端監控系統避免潛藏的問題.....	28
2-5、氣渦輪機各部元件的改良.....	35
第參章、心得與建議事項.....	40

# 一、前言

## 1-1、出國緣由

綜合研究所刻正從事電廠氣渦輪機葉片應力分析及破損案件肇因評估之工作，經常必須從事氣渦輪機葉片的各類力學問題模擬分析。以往都是固力人員分析固力問題，熱流人員分析熱流問題，但氣渦輪機葉片問題是熱、流、固混合的問題，其困難度較高，為精進技術及突破瓶頸，因此擬定此實習計畫，以便吸取國外廠家之經驗。

## 1-2、出國目的

氣渦輪機葉片之功能對機組之可用率有深切影響，不當的設計及運用將造成破損事件，迫使機組停機。本計畫之目的在學習三菱重工對氣渦輪機葉片分析之技術與經驗，藉以提供本所在從事相關問題模擬分析時之參考，以便能精準預測葉片的力學行為，提高葉片的可靠度與使用率。

## 1-3、出國行程

8/11	台北→橫濱
8/12~23	於三菱公司橫濱及高砂廠實習「氣渦輪機葉片應力破損研究」
8/24	橫濱→台北

## 二、 實習內容

### 2-1 氣機複循環發電系統

一般發電用氣渦輪機大都運用於複循環發電系統，如圖一所示，由氣渦輪機中的壓縮機將空氣壓縮成高壓空氣，然後與燃料混合燃燒而產生高溫高壓的氣體，然後推動氣渦輪機旋轉，因而使發電機旋轉發電。氣渦輪機所排出的廢熱利用熱交換器予以回收，利用其產生蒸氣，進而帶動汽機發電機發電。

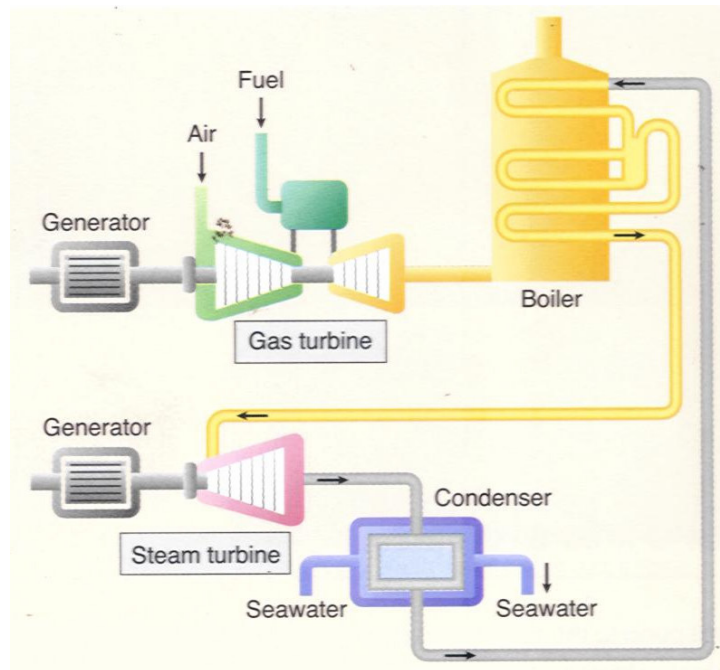


圖 1、氣機複循環發電系統

複循環發電系統的優點是：設備成本較低、建造時程較短、效率較高、對環境的衝擊較低，以上是跟傳統的汽機發電機系統作比較。由圖 2 可看出傳統火力發電廠的發電效率約四十幾，而氣機複循環發電系統的效率可以到達五十幾。由圖 3 可看出氣機複循環發電系統的 CO<sub>2</sub> 排放量較傳統火力發電廠為低，而且差距正逐漸拉大中。

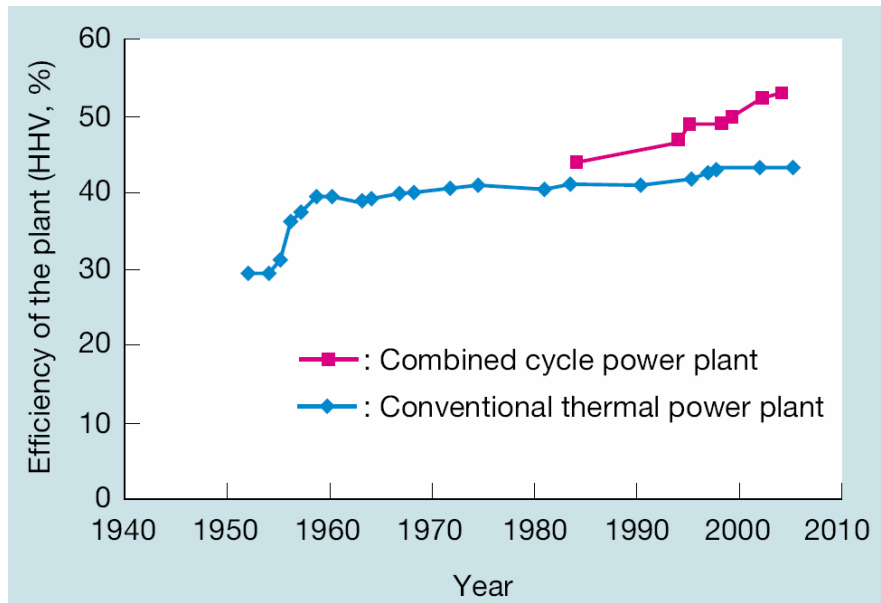


圖 2、氣機複循環發電系統的效率較高

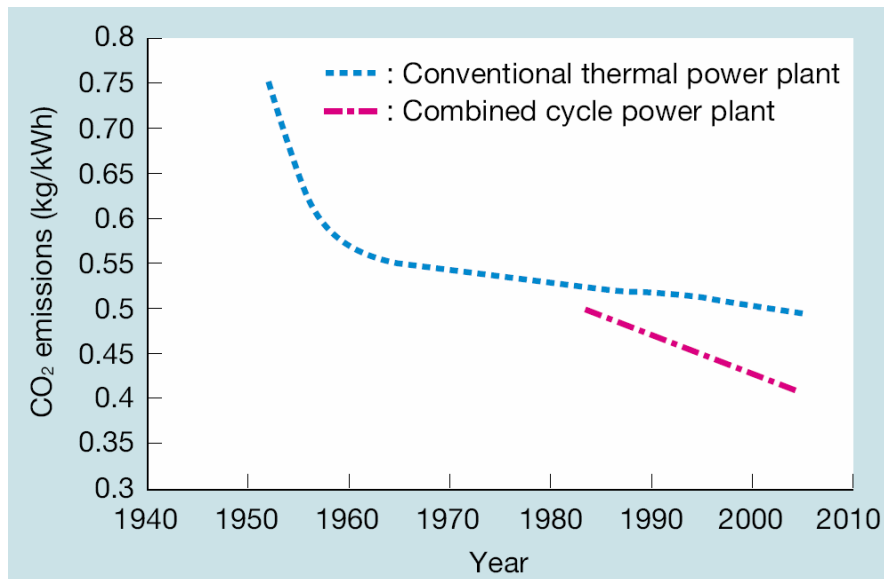


圖 3、氣機複循環發電系統的 CO<sub>2</sub> 排放量較低

氣渦輪機的構造大致可分成三大部分：壓縮機、燃燒器及渦輪機，如圖 4 左半邊所示，如果要提高氣渦輪機的出力，就必須針對這 3 部分進行改進。圖 4 右半邊顯示出三菱公司發展氣渦輪機的歷程，他們不斷的在提高氣渦輪機的出力，想要提高出力則燃氣溫度勢必跟著提高，相對的渦輪機的各部元件必須承受更高的熱應力，因此其難度越來越高。

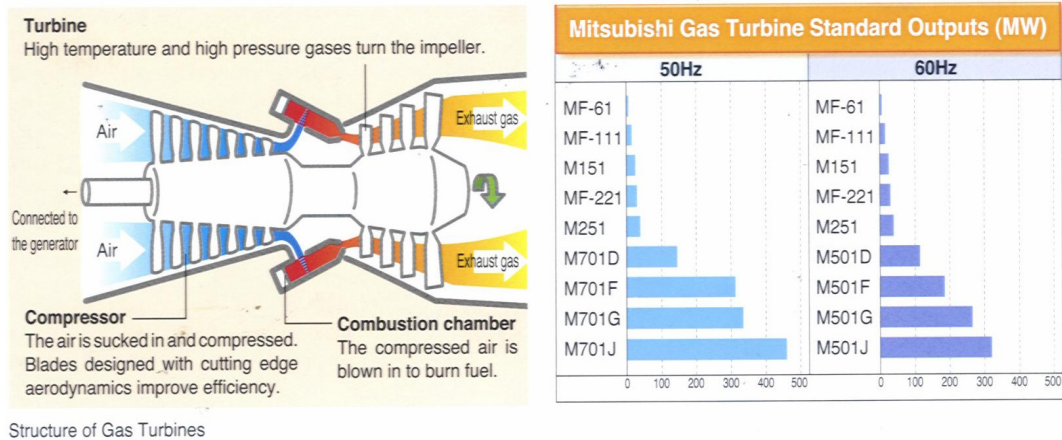


圖 4、三菱氣渦輪機的構造及型式

目前三菱公司已發展到 J 型氣渦輪機，圖 5 是其渦輪機轉子外觀。J 型氣渦輪機的特性如圖 6 所示，在壓縮機部份：其壓縮比為 23：1，葉片採用 3D 的外形設計，改良式的入流通道；在燃燒器部份：採用 ULN 型的燃燒器，燃燒筒的襯壁（liner）使用蒸氣冷卻；在渦輪機部份：先進的高溫障壁塗層（thermal barrier coating）及冷卻技術，高效率的氣動分析技術，將第 4 級葉片加以冷卻。綜合以上的技術，其效率將可達 61 % 以上，而其燃氣溫度將高達 1700°C，如圖 7 所示。



# Next Generation, "J" Class Gas Turbine

- Market Leading Capacity & Efficiency -

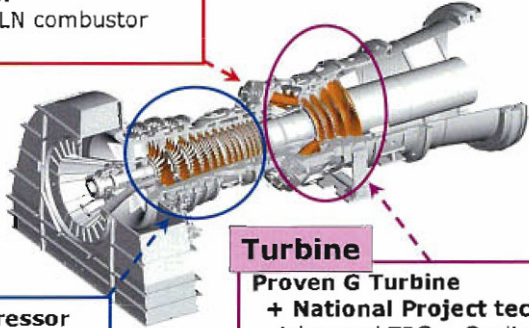
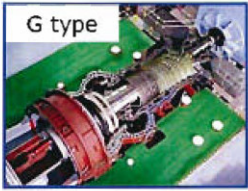


圖 5、三菱公司 J 型氣渦輪機

- "J" Target : C/C efficiency : > 61% (M501J:460MW)
- High Pressure Ratio Compressor Experience from G Engine (23:1)
  - Steam Cooled Combustor Experience from G Engine
  - Turbine Technologies from National Project

### Combustor

- Proven G Combustor**
- Well experienced ULN combustor
  - Steam cooled liner



### Compressor

- Validated G Compressor**
- 23:1 pressure ratio
  - 3D profile
  - Improved inlet duct

### Turbine

- Proven G Turbine + National Project technologies**
- Advanced TBC + Cooling
  - High efficient aerodynamic technology
  - Cooled row4 blade

圖 6、三菱公司 J 型氣渦輪機的特性

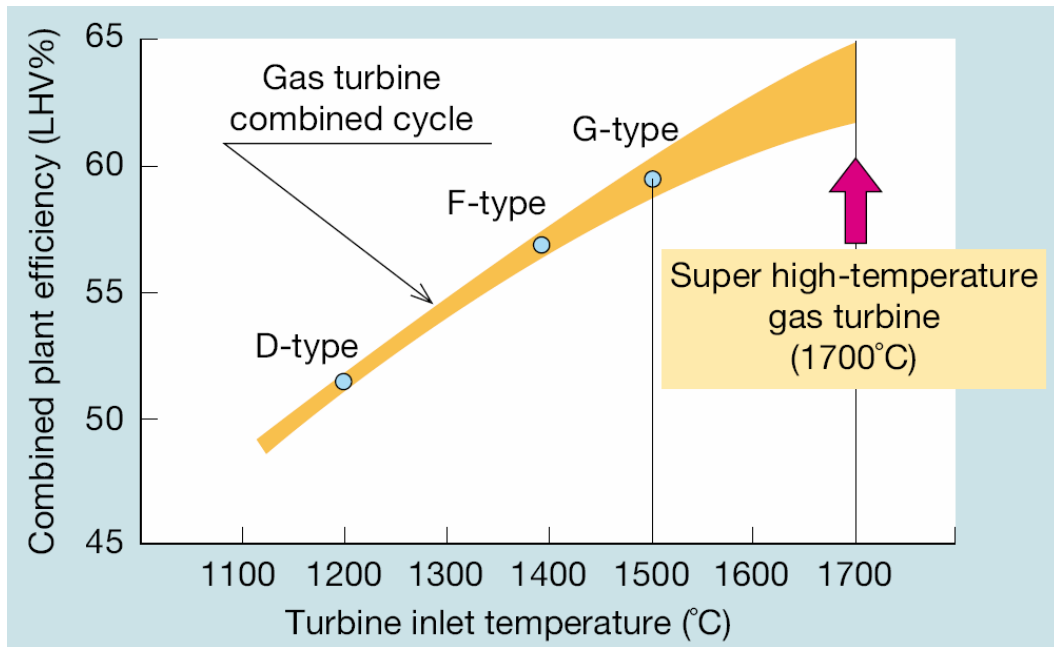


圖 7、三菱公司的高溫型氣渦輪機

由於氣渦輪機不段往高溫高出力的方向發展，機組各部元件必須承受更高的負荷，因此其設計難度越來越高，所遭遇到的問題也越來越多，大致可分類敘述如下：

**機械問題：**由於不斷的提升機組出力及效率，各部元件必須承受更高的應力，導致龜裂、變形、摩擦等問題產生。

**高溫問題：**由於燃燒溫度不斷的提升，材料抗溫能力、溫度屏壁、冷卻技術等必須不斷提升。

**燃燒器噪音問題：**爲了降低廢氣排放量，燃燒器均朝向乾式低 NO<sub>x</sub>、低廢氣排放型態發展，導致火焰燃燒不穩定，燃燒室因而產生振動，並發出嗡嗡的噪音。長期下來，將會導致燃燒器產生破損。

**燃燒回火問題：**導致某些元件所承受的溫度超出原先的設計，因而

產生溶化，危及下游的渦輪機。

品質保證問題：由於氣機處於高溫、高壓、旋轉的環境，如果零件及材質的品質稍差，有可能導致嚴重後果。

運轉問題：氣機的內部是相當的脆弱，如果運轉程序、閥門位置、潤滑、油質、燃料品質、空氣清潔度等任何一個環節出了問題，都有可能導致嚴重後果。

維護問題：任何機組維護上的小疏漏都有可能導致嚴重後果，例如螺栓沒鎖緊、維修時殘留的異物、更換不當零件、沒按照原廠維修手冊等。

三菱公司為了解決上述諸多問題，以提高氣渦輪機的可用率，因此採用科技的方法，從四個層面下手，分述如下 4 小節。

## 2-2 利用設計驗證提高氣渦輪機的可靠度

三菱公司利用設計驗證來提高氣渦輪機可靠度，大致分成設計發展、製造、實驗驗證、商轉驗證 4 個階段，如圖 8 所示。在設計發展階段必須進行氣動力分析、冷卻分析、金屬冶金分析、應力分析、強度分析等，在製造階段必須考慮製造品質、易於製造及維修，在實驗驗證階段必須考慮維護性、運轉性及耐久性，在商轉驗證階段必須考慮運轉資訊、維護性、運轉性及耐久性。

前一個階段完成之後即可往下一個階段進行，下一個階段的經驗必須回饋給前一個階段，而最後的商轉驗證階段之經驗也必須回饋給設計發展階段，以便進行產品的改良，三菱公司利用此一循環機制來提高氣渦輪機各部元件的可靠度。

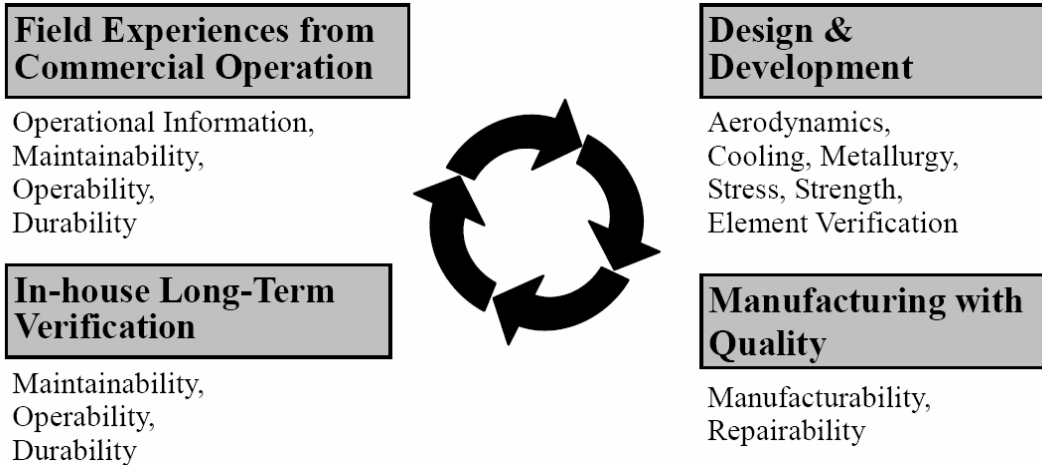


圖 8、利用設計驗證提高氣渦輪機可靠度的 4 個階段

氣渦輪機在設計發展階段時，一開始必須先訂定其系統性能，包括溫度、壓力、流量及轉速等，然後進行一連串的流體動力分析、熱流分析、應力分析及壽評分析等，整個設計流程不斷的重複，直至其設計的產品能符合原先訂定的系統性能，整個流程如圖 9 所示。

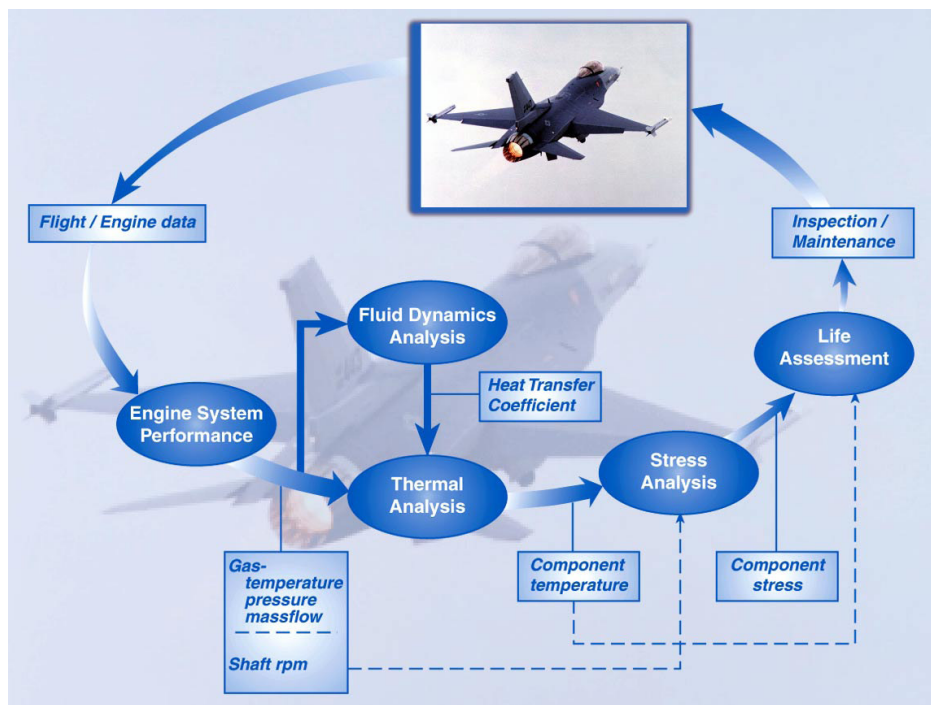


圖 9、設計發展階段的流程



由於氣機葉片長期在高溫、離心力的環境下運轉，潛變現象主導其使用壽命，因此在金屬材料方面，可以利用冶金技術提高氣機葉片抗高溫潛變的能力。如圖 10 所示，一開始氣機葉片所使用的材料為多晶材料，其抗高溫潛變的能力較差，後來發展出單方向固化材料，以提高其抗潛變強度，目前最新的技術是單晶材料，其抗潛變強度最高，因此在高溫、離心力環境下的運轉壽命最長。



圖 10、利用冶金技術提高氣機葉片抗高溫的能力

除了利用冶金技術提高金屬材料抗高溫的能力外，還可以利用各種冷卻技術讓氣機葉片可以在高溫的環境下存活。圖 11 列出了各種目前發展出來氣機葉片的冷卻機制，包括噴流冷卻（impingement cooling）、薄膜冷卻（film cooling）、對流冷卻（convection cooling）、滲流冷卻（effusion cooling）等。圖 12 則列出了目前發展出來氣機葉片內各種形式之冷卻流道，包括單進口、多進口、單流道、多流道等技術。

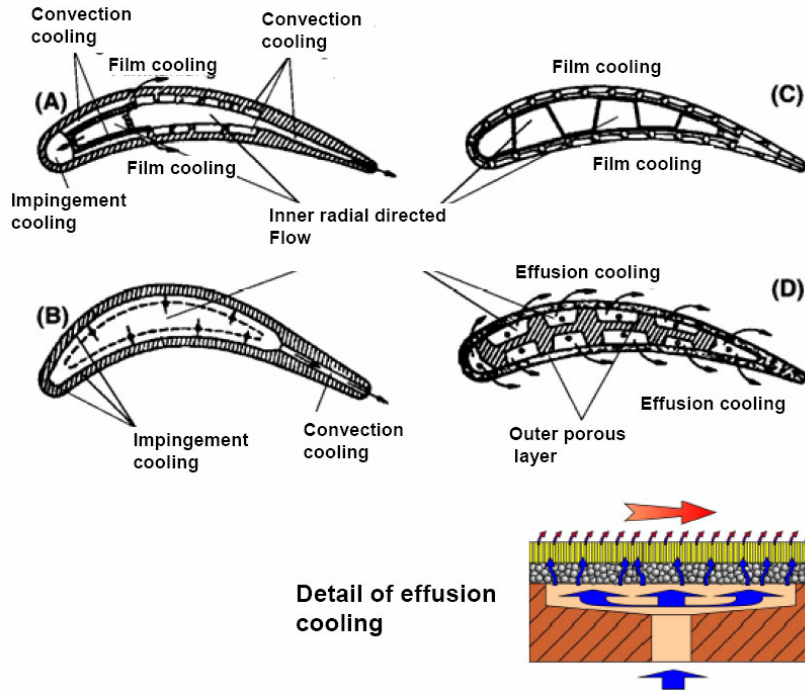


圖 11、各種氣機葉片冷卻的機制

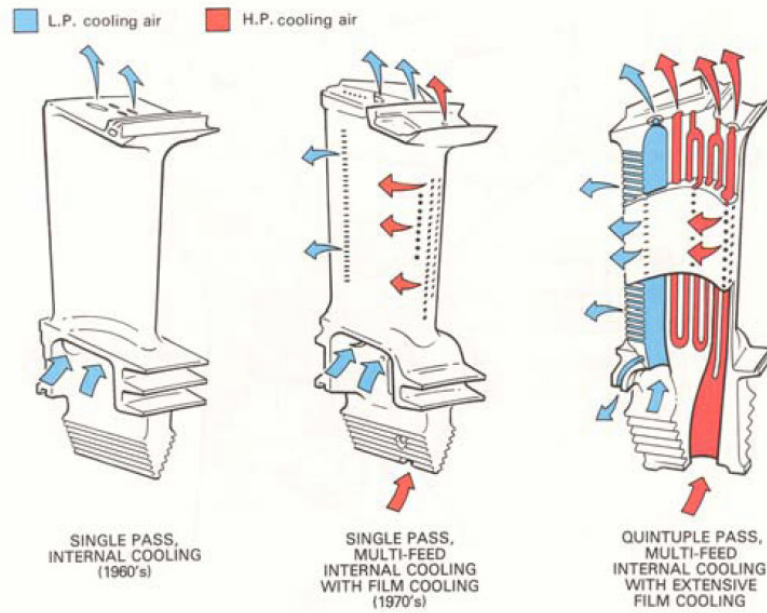


圖 12、氣機葉片內各種形式的冷卻流道

氣機葉片除了內流道的冷卻技術外，外流道的流場分析也相當複雜。如圖 13 所示，除了葉片與葉片間流道的流場分析，上下游葉片間流場的互相影響也很重要，而葉片頂端的流場也相當複雜。至於葉片的根部，由於受根部平台的影響，在各個局部都會產生渦流，如圖 14 所示，因此其流場益形複雜。

由於氣機葉片的熱流場分析如此之複雜，因此一般都是用流場量測的實驗方式來進行研究，但流場量測也不是一件容易的事，尤其是旋轉動葉片的量測。近年來由於電腦軟硬體技術的提升，氣機葉片熱流場的模擬分析變得日趨進步，從以前的二維分析進步到目前的三維分析，但由於氣機葉片的熱流場實在是非常的複雜，因此模擬分析的結果在定性上具合理性，但在定量上還是要靠實驗量測數據來修正。

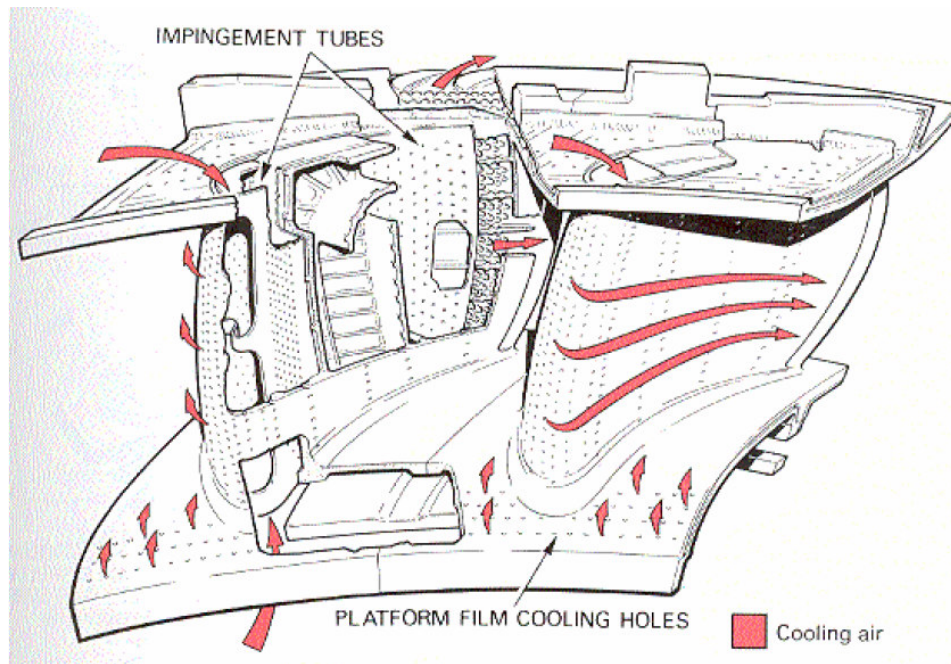


圖 13、氣機葉片的外流場分析

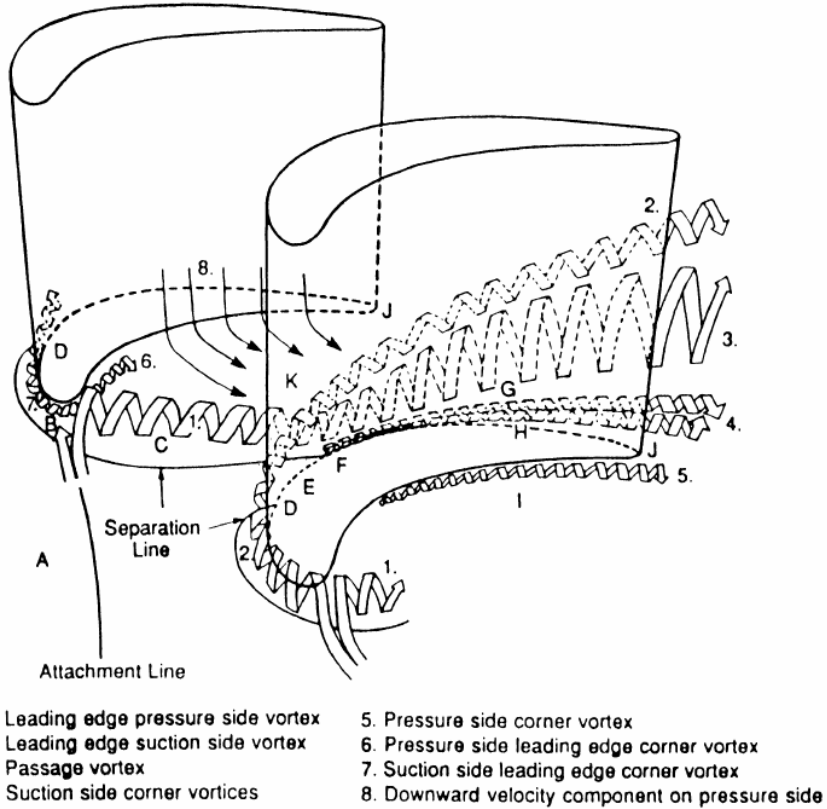


圖 14、氣機葉片根部的渦流現象

氣機葉片熱流場模擬分析的結果如圖 15 所示為溫度場分布，圖 16 為壓力場分布，圖 17 為速度流線分布。另外，由於氣機葉片的熱流場模擬分析包括內流場與外流場，而內流場的流道又比外流場的流道細很多，如果將內流場與外流場放在同一個模型中進行分析，將會增加其困難度。因此，比較經濟與簡單的方式是將內流場與外流場分開進行模擬分析，然後進行迭代，直至其邊界得結果彼此吻合，再進行下一步的應力分析，如圖 18 所示。



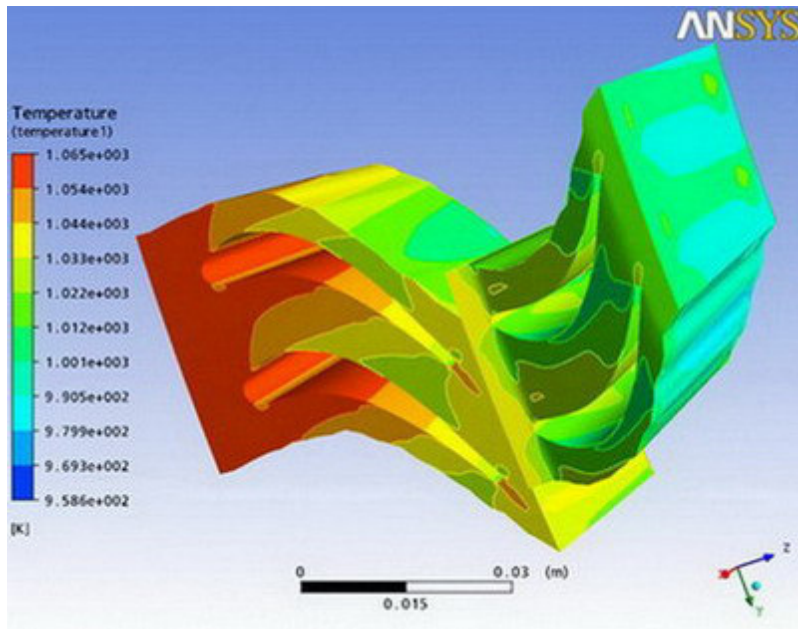


圖 15、氣機葉片的溫度場分布

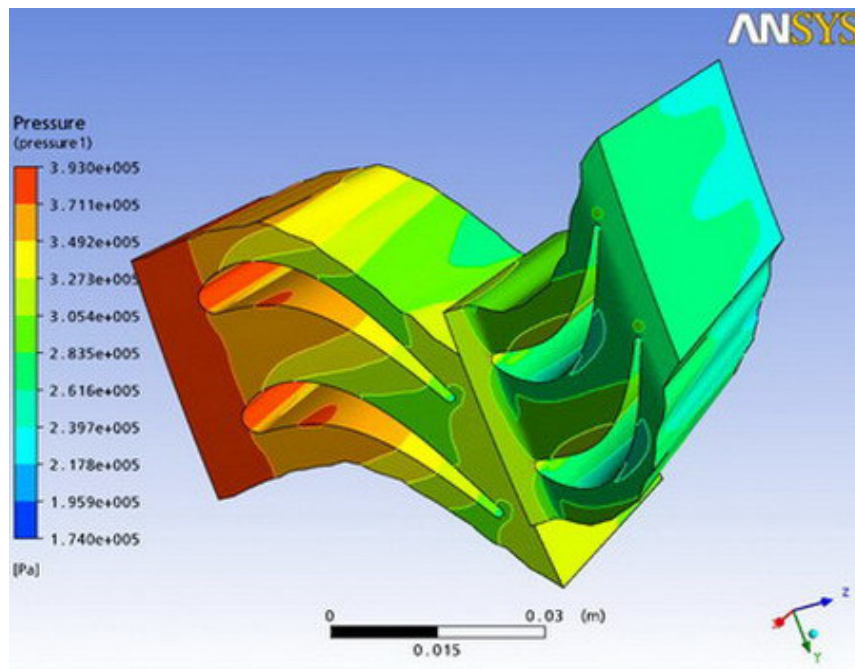


圖 16、氣機葉片的壓力場分布

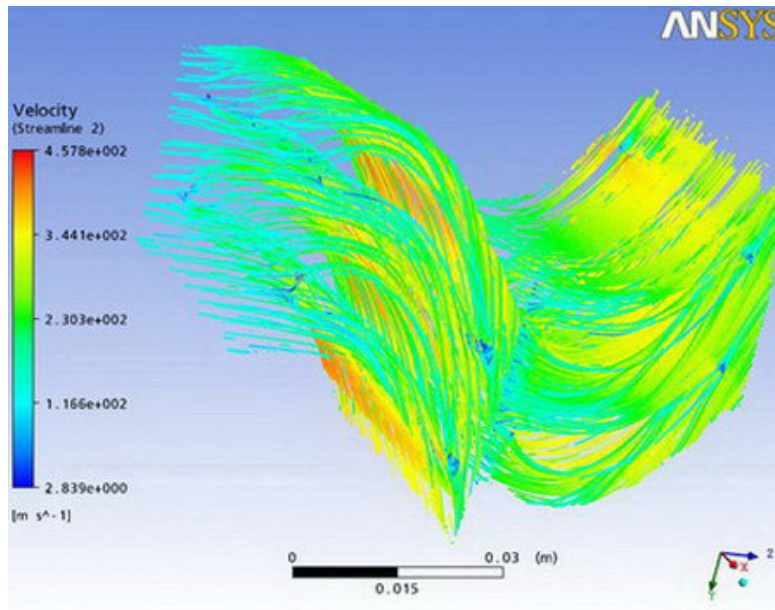


圖 17、氣機葉片的速度流線分布

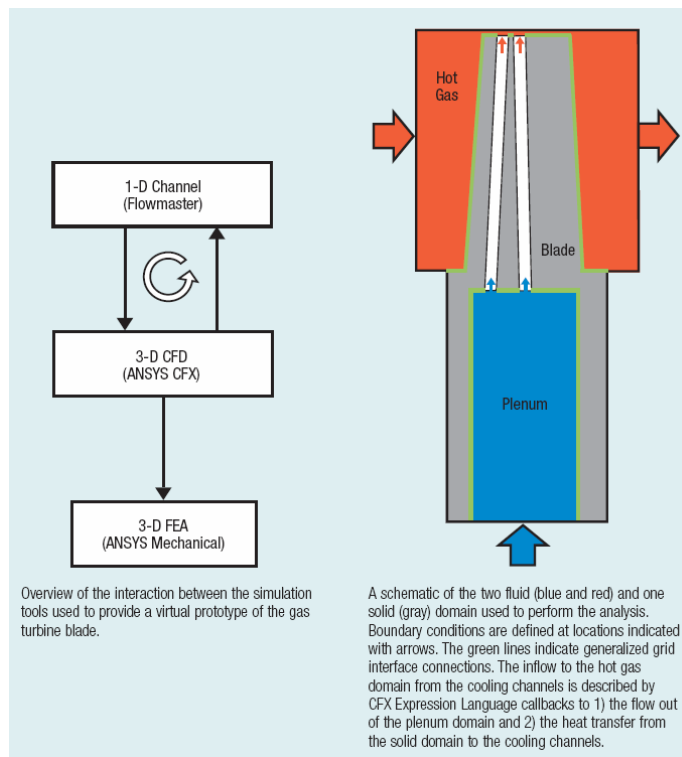


圖 18、氣機葉片內、外流場的模擬分析技術

氣機葉片的熱流場分析完畢後即可獲得葉片的溫度場及葉片表面的壓力分布等負載條件，隨即便可進行葉片的應力分析，圖 19 是氣機葉片的應力分布，圖 20 是氣機葉片的變形量，而應力最大的位置通常就是葉片破壞的位置。

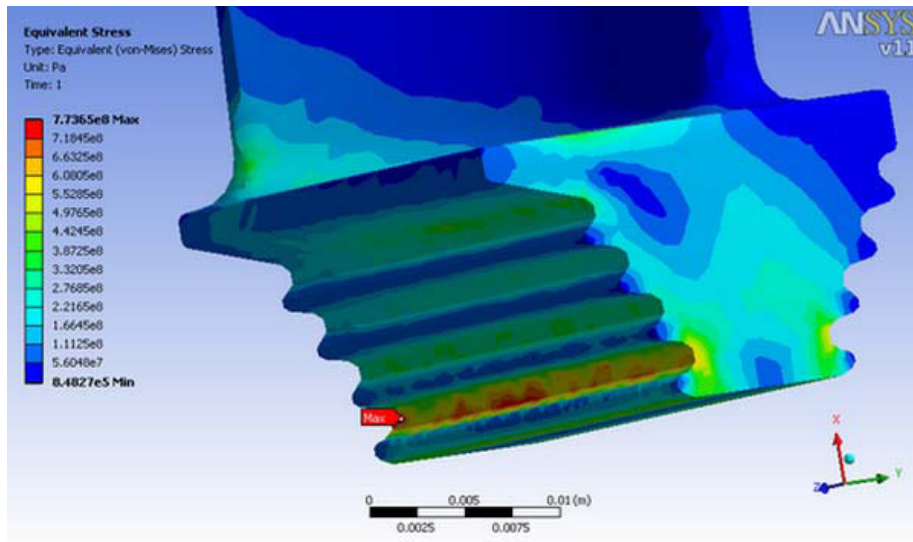


圖 19、氣機葉片的應力分布

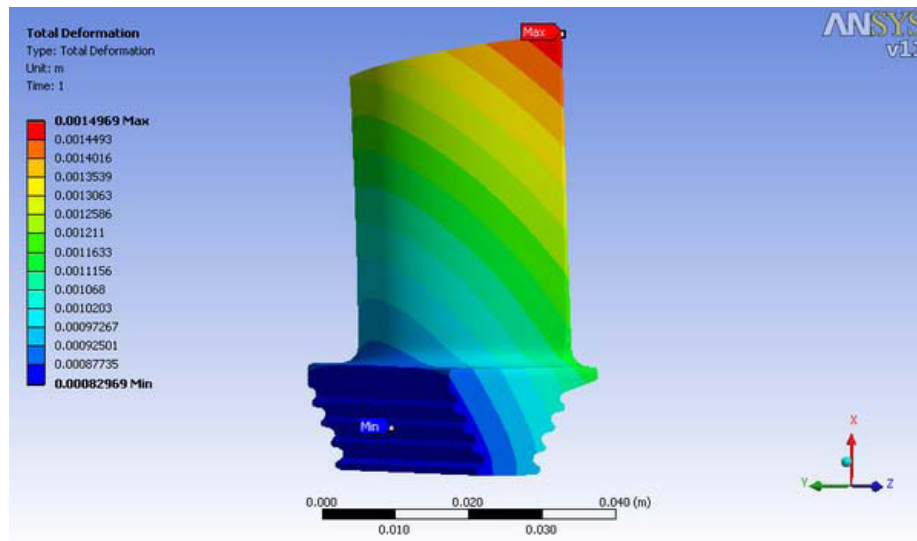


圖 20、氣機葉片的變形量

求出葉片的應力歷程之後即可進行運轉消耗壽命的估算，由於氣機葉片是處在高溫的環境下工作，因此壽命的估算包括高週次疲勞破損/低週次疲勞破損、潛變破損和氧化破損三類。

對於高週次疲勞破損/低週次疲勞破損，其消耗壽命的估算如下式

$$D_f = \sum \frac{n_i}{N_i}, i = 1, \dots, m$$

對於潛變破損，其消耗壽命的估算如下式

$$D_c = \sum \frac{t_i}{t_{ri}}, i = 1, \dots, m$$

對於氧化破損，其消耗壽命的估算如下式

$$D_o = \sum D_o^l, l = 1, 2, 3$$

$$D_o^l = \sum \frac{t_i}{t_{oi}}, i = 1, \dots, m$$

以上三式，分母表運轉至破損時之次數，分子表實際運轉之次數。至於總壽命之計算法則各家不一，有的是以 3 個消耗壽命中最大的為準，有的是將 3 個消耗壽命加在一起，有的是將 3 個消耗壽命分別乘以權重後加在一起，這完全是依各家的經驗法則自訂。由於依據試片進行破損試驗所得的數據有其離散分布的範圍，且機組實際運轉狀況與實驗環境也有差異，因此所估算出來的消耗壽命有一定程度的不準度，但還是具有某種程度上的參考價值。

目前有一種線上壽命診斷系統如圖 21 所示，它採用 2 種壽命評估方式：安全壽命法和破損裕度法。安全壽命法完全依據試片進行破損試驗所得的數據，再根據機組運轉歷程及上面 3 式去估算壽命，而不考慮每個機組實際的差異性，因此有可能評估壽命已耗盡，但機組元件尚堪使用，卻必須將其予以更換。破損裕度法則是監測是否有裂紋發生，如果沒有，則採用安全壽命法進行壽命評估；如果有裂紋發生，則監控其成

長的程度，如果即將到達最大裂紋容許長度，則必須計畫在下次大修時予以更換，因此能達到最經濟的效果，但此法端賴其評估模型的準確度。

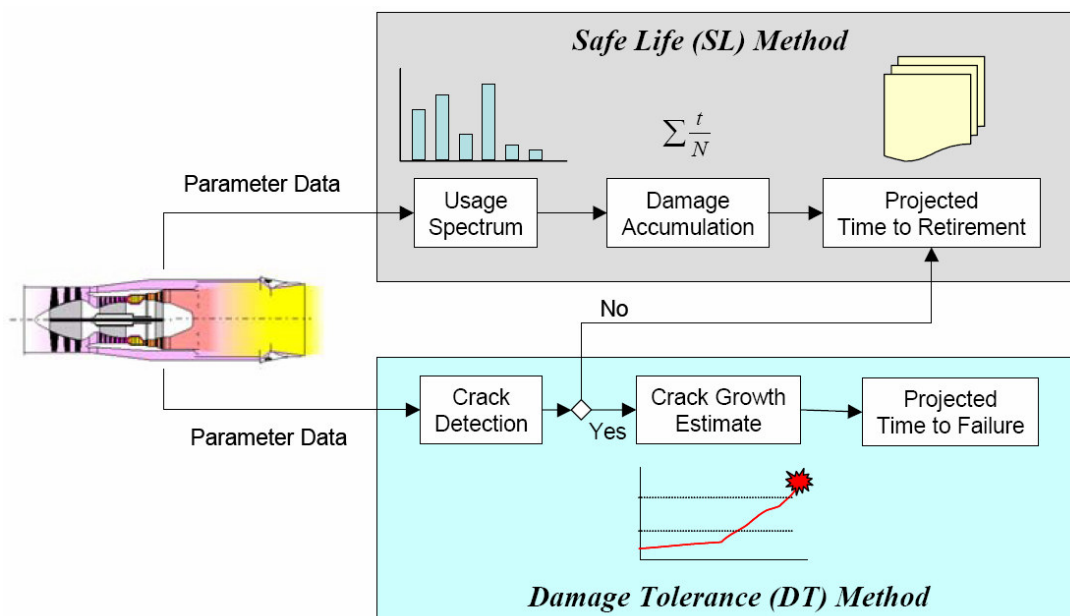


圖 21、線上壽命診斷系統

三菱公司提高機組可靠度的第二個階段是提高製造品質，在整個元件的製造加工過程中，唯有將每一個加工步驟維持高度的製作品質，才能達到整體機組可靠度的提升。圖 22 是三菱公司氣機動葉片的加工程序，整支動葉片先經由鑄造成型，再經由葉根的研磨加工、氣封溝槽加工、冷卻孔加工、表面塗層，最後完成成品。整個過程都是採用工具機程式化自動加工，以確保加工品質的一致性。

圖 23 是三菱公司氣機靜葉片的加工程序，整支靜葉片先經由鑄造成型，再經由護環的加工及車修、氣封溝槽加工、冷卻孔加工、表面塗層，最後完成成品。圖 24 是三菱公司氣機導火筒的加工程序，一開始是 MT (Mitsubishi Takasago) 鰭片的製造，接著是各片導火筒的壓鑄成型、雷射焊接，附屬件的製造及組裝，表面塗層，最後完成成品。圖 25 是三菱公司氣機燃燒筒的加工程序，一開始是骨架元件的製作加工及組裝，接著是入口元件的製作加工及組裝，然後將兩者組合，表面塗層，最後



完成成品。

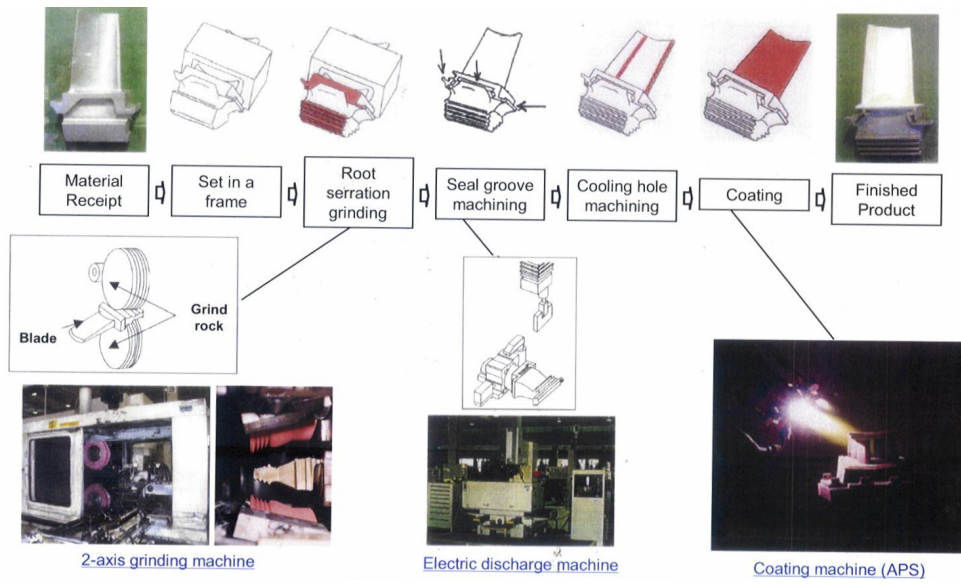


圖 22、三菱公司氣機動葉片加工程序

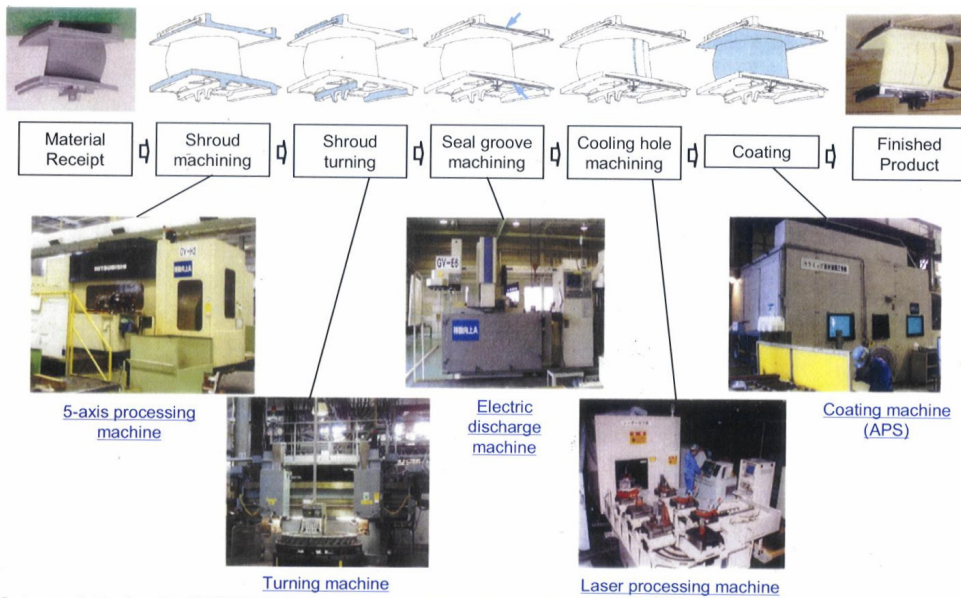


圖 23、三菱公司氣機靜葉片加工程序

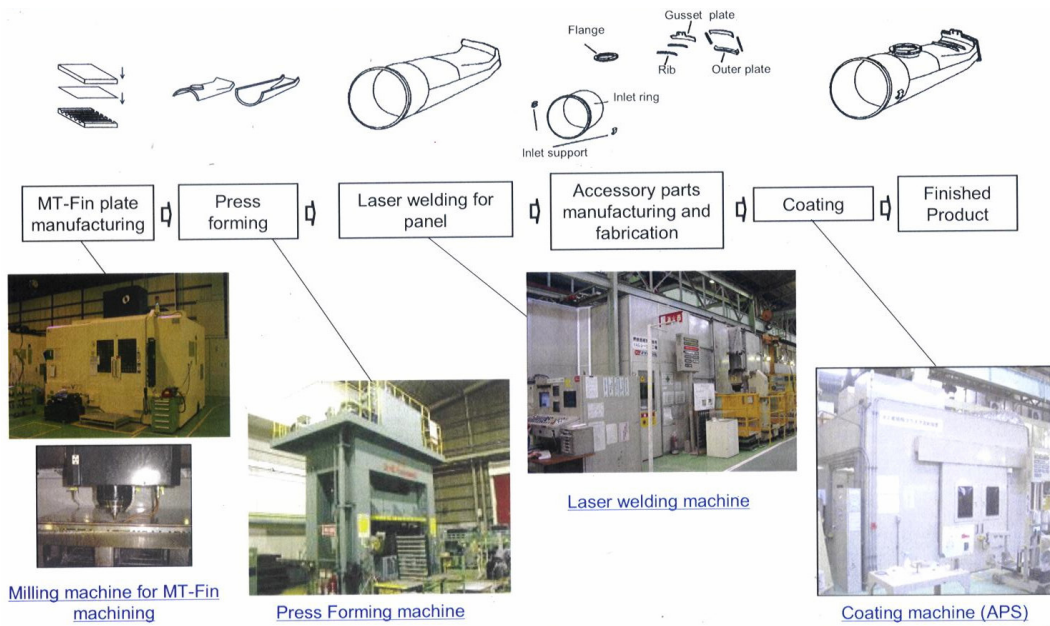


圖 24、三菱公司氣機導火筒加工程序

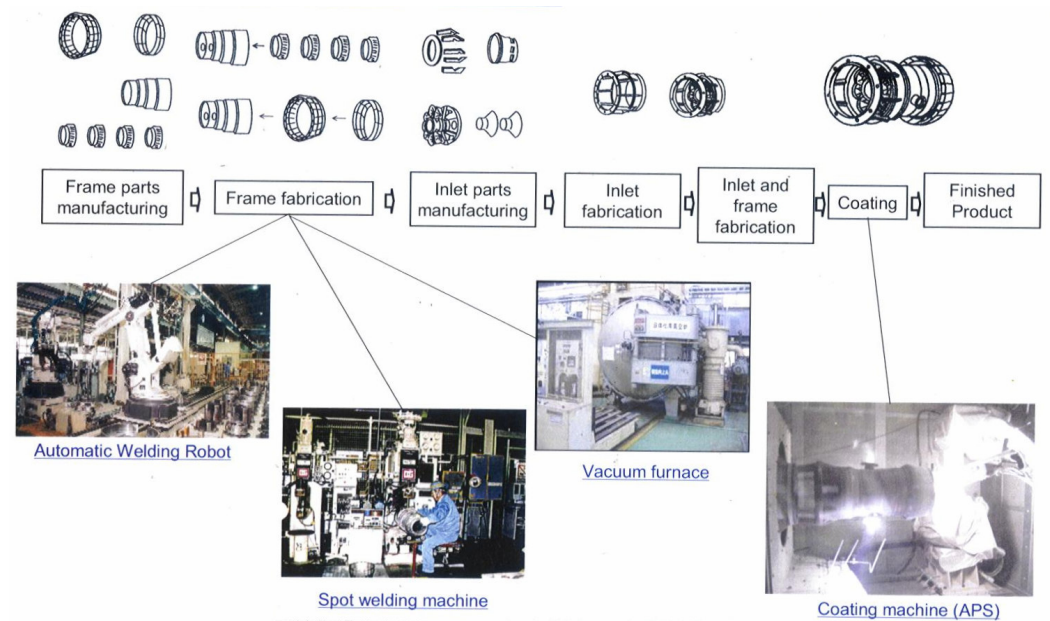


圖 25、三菱公司氣機燃燒筒加工程序

由於氣機的葉片、導火筒、燃燒筒等元件都是處在高溫的環境下工作，因此都會在其表面加上一層抗熱塗層，以保護各個工作元件能正常

運作，因此塗層噴塗的優劣便決定工件的使用壽命。圖 26 是三菱公司利用機械手臂以 Atmospheric Plasma Spray(APS)的方式進行葉片的塗層噴塗工作，噴塗完畢之後還必須以渦電流檢測儀進行塗層的厚度檢測，以確保厚度必須保持均勻，如圖 27 所示。

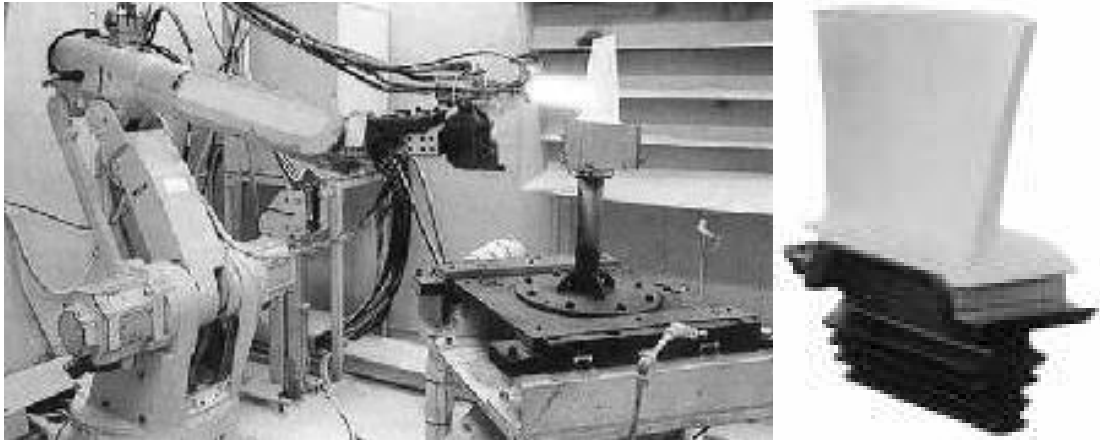


圖 26、Atmospheric Plasma Spray(APS)

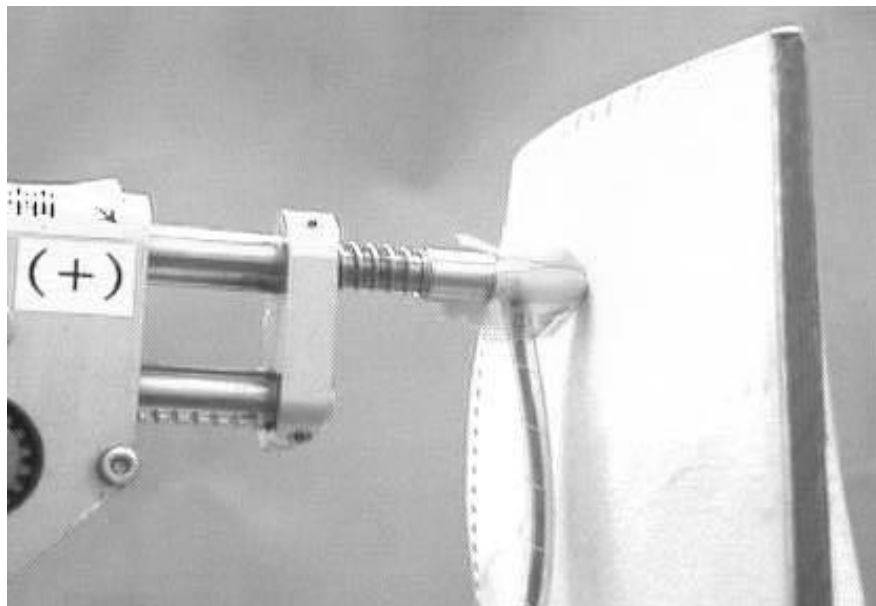


圖 27、塗層厚度檢測



三菱公司提高機組可靠度的第三個階段是長期實驗驗證，他們在高砂建立了一座 T-point 示範電廠，如圖 28 所示，T 代表高砂 (Takasago) 的意思。所有三菱公司新設計的氣輪發電機都在此 示範電廠中經過長期的運轉測試，以確保其可靠度，同時進行運轉資料的量測，以便提供給模擬分析結果的驗證之用。



圖 28、三菱公司在高砂的 T-point 示範電廠

圖 29 顯示 T-point 示範電廠的架構，它是一座複循環電廠，採用 501G 型的氣渦輪機，工作溫度為  $1500^{\circ}\text{C}$ ，工作燃料是天然氣，出力為 225MW；汽機發電機部份的出力為 105MW，其冷凝氣採氣冷式。圖 30 是 T-point 示範電廠的發電機和冷凝器，圖 31 是廢熱回收蒸氣產生器和除氮器，圖 32 是氣渦輪機，圖 33 是汽輪機。圖 34 顯示氣渦輪機運轉資料的監測點，包括溫度、壓力、振動、間隙、力、排廢氣量等，這些運轉資料經過長期紀錄後成為寶貴的資料庫，可提供給模擬分析結果的驗證之用，以提升其設計分析的技術能力。圖 35 是 T-point 示範電廠的基本資料。

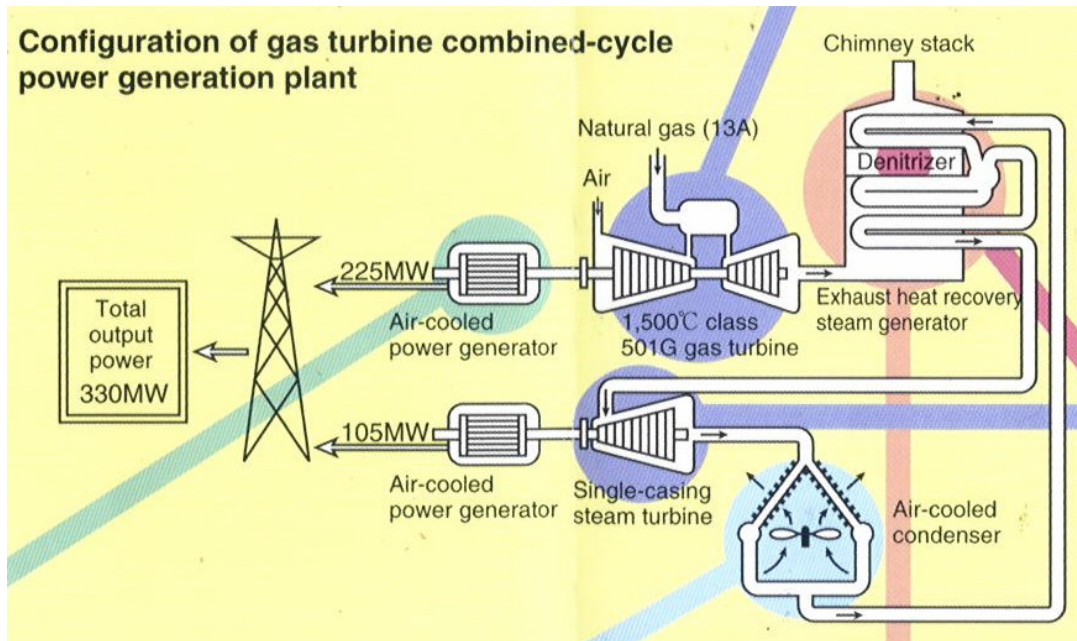


圖 29、T-point 示範電廠架構

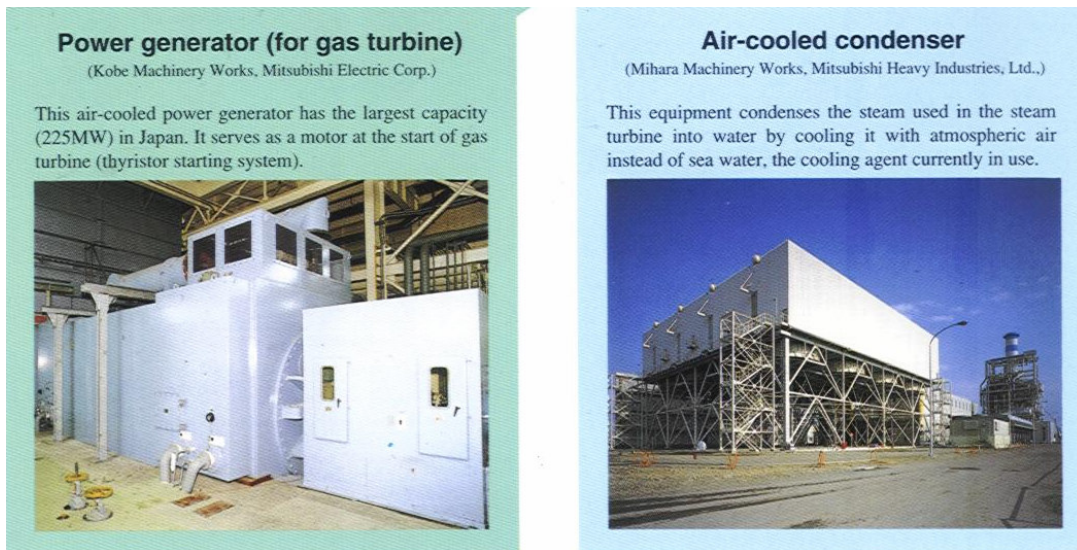


圖 30、T-point 示範電廠的發電機和冷凝器



### Exhaust heat recovery steam generator

(Kobe Shipyard & Machinery Works, Mitsubishi Heavy Industries, Ltd.)

This is a vertical gas flow steam generator which is the triple-steam-pressure and natural circulation. The height of the topmost chimney stack is 59 meters.



### Exhaust gas denitrizer

(Nagasaki Shipyard & Machinery Works, Mitsubishi Heavy Industries, Ltd.)

This equipment effectively treats nitrogen oxides in the intermediate layer of the exhaust heat recovery steam generator.



圖 31、T-point 示範電廠的廢熱回收蒸氣產生器和除氮器

### Gas turbine

(Takasago Machinery Works, Mitsubishi Heavy Industries, Ltd.)

This is the 501G, a large-capacity high-efficiency gas turbine with a turbine inlet gas temperature of 1,500°C class – the highest in the world.

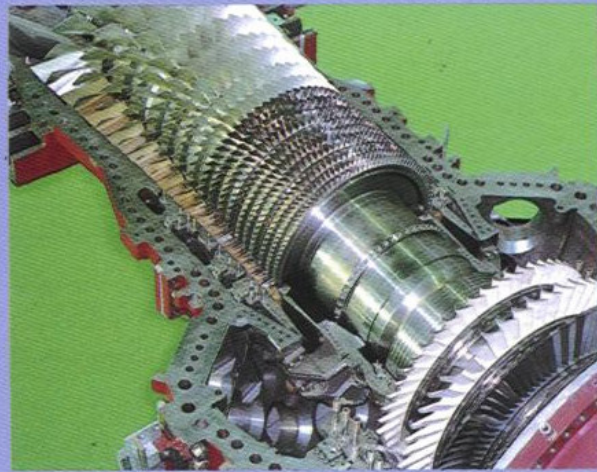


圖 32、T-point 示範電廠的氣渦輪機



圖 33、T-point 示範電廠的汽輪機

The special measurement (more than 2,300) was conducted at T Point as a final verification From Feb.2011

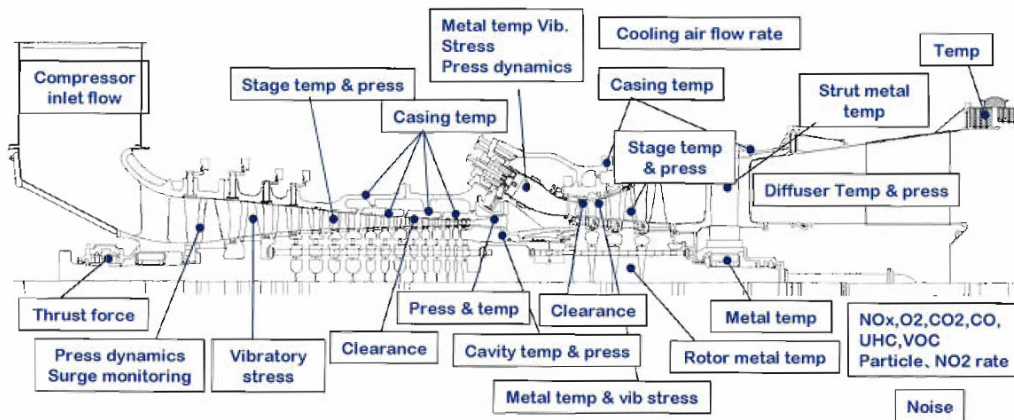


圖 34、T-point 示範電廠氣渦輪機運轉資料的監測點



- Location : 2-1-1 Shinhama, Arai-cho, Takasago, Hyogo, 676-8686 Japan
- Site area : Approximately 60,000 square meters
- Output power : Gas turbine (1 unit) : 225MW  
Steam turbine (1 unit) : 105MW  
Total : 330MW
- History of facility construction :  
November 1995 : Start of civil engineering and construction work at site  
June 1996 : Start of equipment installation  
January 1997 : Start of commissioning  
June 1997 : Start of demonstration
- Fuel : Natural gas (13A)
- Chimney stack height : 59 meters

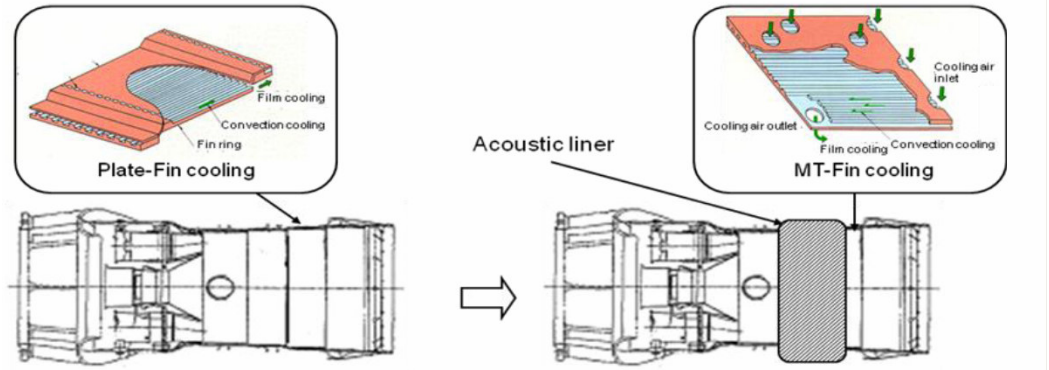
● Main equipment :

Items	
Gas turbine	
Type	Open cycle
Output power (MW)	225
Exhaust heat recovery steam generator	
Type	Vertical exhaust and natural circulation
Amount of evaporation (t/h)	315 / 70 / 8
Steam turbine	
Type	Single-casing / single-flow pressure mixed
Output power (MW)	105
Power generator	
Type	Air-cooled horizontal-shaft cylindrical revolving-field system
Capacity (MVA)	250 / 117
Main transformer	
Type	Forced-oil forced-air-cooled type
Capacity (MVA)	360
Transmission voltage (kV)	275
Exhaust gas denitrizer	
Throughput	Full flow

圖 35、T-point 示範電廠的基本資料

三菱公司提高機組可靠度的第四個階段是商轉驗證，當機組開始進行商轉時，即開始擷取記錄所有的運轉數據，並進行相關的測試及非破壞性檢驗，將這些數據與當初設計階段的預測值進行比對，以提升其模擬分析的能力，從而可以設計出更可靠的機組。

舉例而言，如圖 36 所示，某型氣渦輪機燃燒筒的冷卻鰭片經常發生過度氧化的破損問題，三菱公司經過設計改良之後發展出新型的 MT 冷卻鰭片，修正了此一問題。如圖 37 所示，此氣渦輪機燃燒筒同時有燃氣壓力波共振問題，三菱公司經由加裝了環型消音器 (acoustic liner) 之後，即將此燃氣壓力共振波消去。另一個例子是氣渦輪機第 3 級靜葉片在長期運轉後發生軸向潛變變形的問題，三菱公司於是將其合金材料加以改良，同時設計了一套軸向潛變變形量測系統，如圖 38 所示，改良後的靜葉片之軸向潛變變形量減少了 70%。

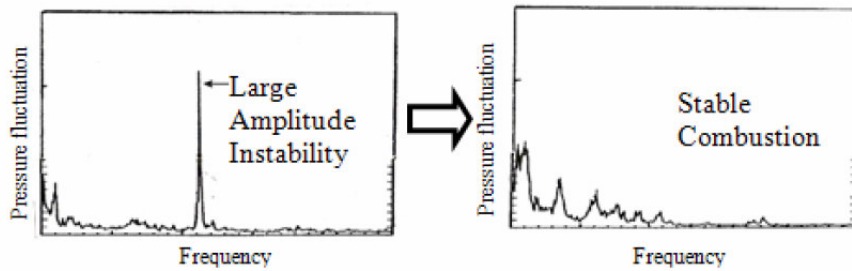


(a) Original (Old style)

(b) Improved (Current style)

Figure : Combustor basket with (a) Plate Fin Cooling & (b) MT-Fin Cooling

圖 36、燃燒筒冷卻鱗片的改良

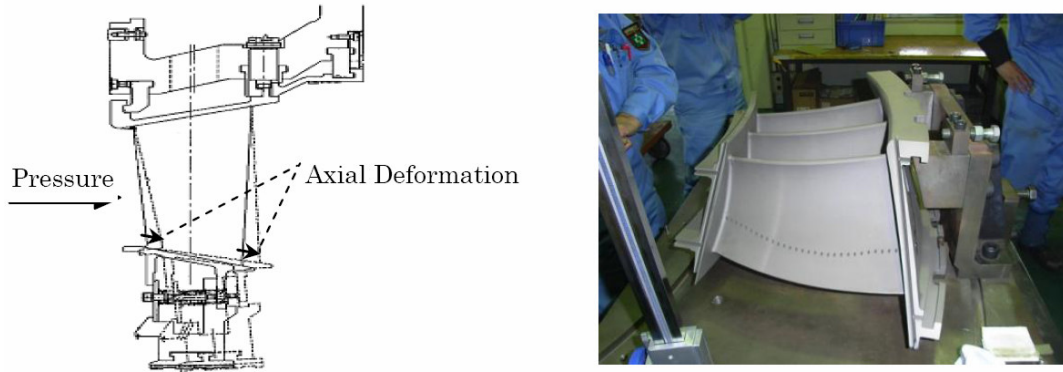


(a) Original without acoustic liner

(b) Improved with acoustic liner

Figure : Comparison of Combustion Pressure Fluctuation level measured in actual engine

圖 37、燃氣壓力共振波的改善



(a) Axial deformation                      (b) Axial creep deformation measurement  
 Figure 38: Row 3 Vane design improvement based on field experience

圖 38、第 3 級靜葉片潛變問題的改善

### 2-3 縮短大修時程

提高電廠可用率的方法除了避免非預期的停機之外，縮短大修時程及延長機組連續運轉時間也是可行之道。延長機組連續運轉時間除了依賴強健的設計之外，各部機組元件也必須能承受機組連續運轉時間的延長。

而要縮短大修時程，首先必須注意大修品質及流程的控管。大修品質的控管包括技術文件、現場品質稽核、明確的目標及期望、教育訓練等。而對於如何增進某一特定工作項目，則必須做例行性的技術複習。三菱公司同時引進了一個現場經驗學習的機制，任何一個由現場問題所獲得的經驗，將寫成一個經驗學習通報，不但可以通知其他電廠，也可將此經驗累積下來。

大修時程可經由有效的計畫管理來加以控管，在計畫前的階段，必須先準備好大修程序，所有過去的檢查記錄及品質紀錄也必須先行審閱。必須與電廠人員共同舉辦大修前會議，以便討論大修的範圍及電廠人員所關切的事項。必須先評估備品清單及工具清單，以避免大修時程因而受到延誤。大修流程的甘梯圖必須以可視化的格式呈現，並且要清

楚列出每天所要做的工作項目及關鍵點。

## 2-4 利用遠端監控系統避免潛藏的問題

提高電廠可用率的另一個方法是利用遠端監控系統來監控電廠的運轉狀態，並利用各種分析、診斷軟體來評估其狀態是否正常，在問題發生的初期即可發現，並在下一次大修時進行維修，以避免潛藏問題的持續擴大，最後造成非預期的停機事故。

三菱公司設置了 2 個遠端監控中心（RMC，remote monitoring center），用以監控散佈在各地的三菱機組，一個在高砂，另一個在奧蘭多，如圖 39 所示。監控的數據包括機組所有的運轉參數，舉例而言，氣渦輪機的監控的數據包括機組周圍大氣狀態、熱燃氣通道的狀態、燃燒動態、控制系統特徵、振動指示、閥們的指令、位置及回授信號、輔助系統參數、警示燈號及設定值等，圖 40 是遠端監控中心內的情形。



圖 39、三菱公司的遠端監控中心



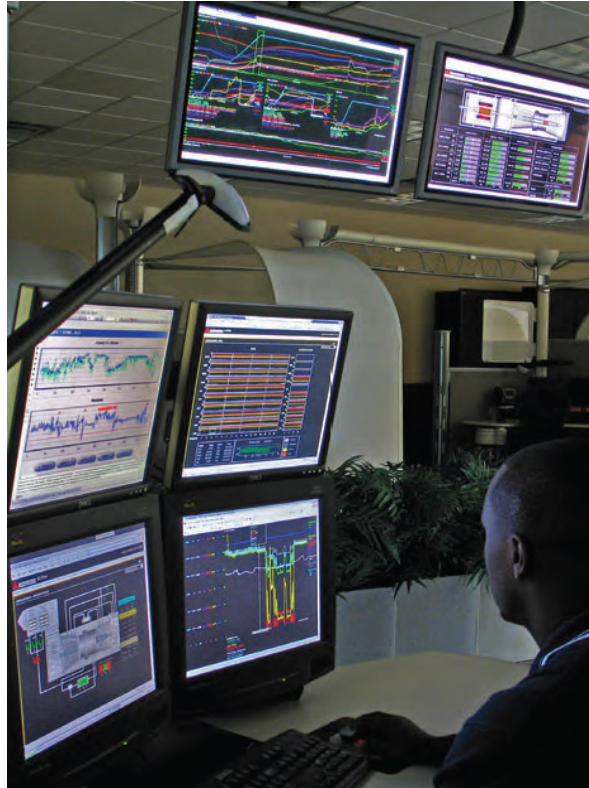


圖 40、三菱公司的遠端監控中心

遠端監控中心的任務主要如圖 41 所示，除了全天候監控、記錄各電廠的運轉數據之外，還必須作為電廠的技術支援，協助電廠解決各種疑難雜症、調整運轉參數、解答電廠的問題等，最重要的是電廠運轉狀態的異常診斷。而遠端監控中心背後還有設計、服務、銷售等部門彼此互相支援，以便能提供電廠最佳的服務。

這些監控的數據除了可以用來診斷電廠的運轉狀態外，也可以提供給設計分析部門作為原先設計值的驗證之用，藉以提升其技術能力，發展出更可靠的機組。

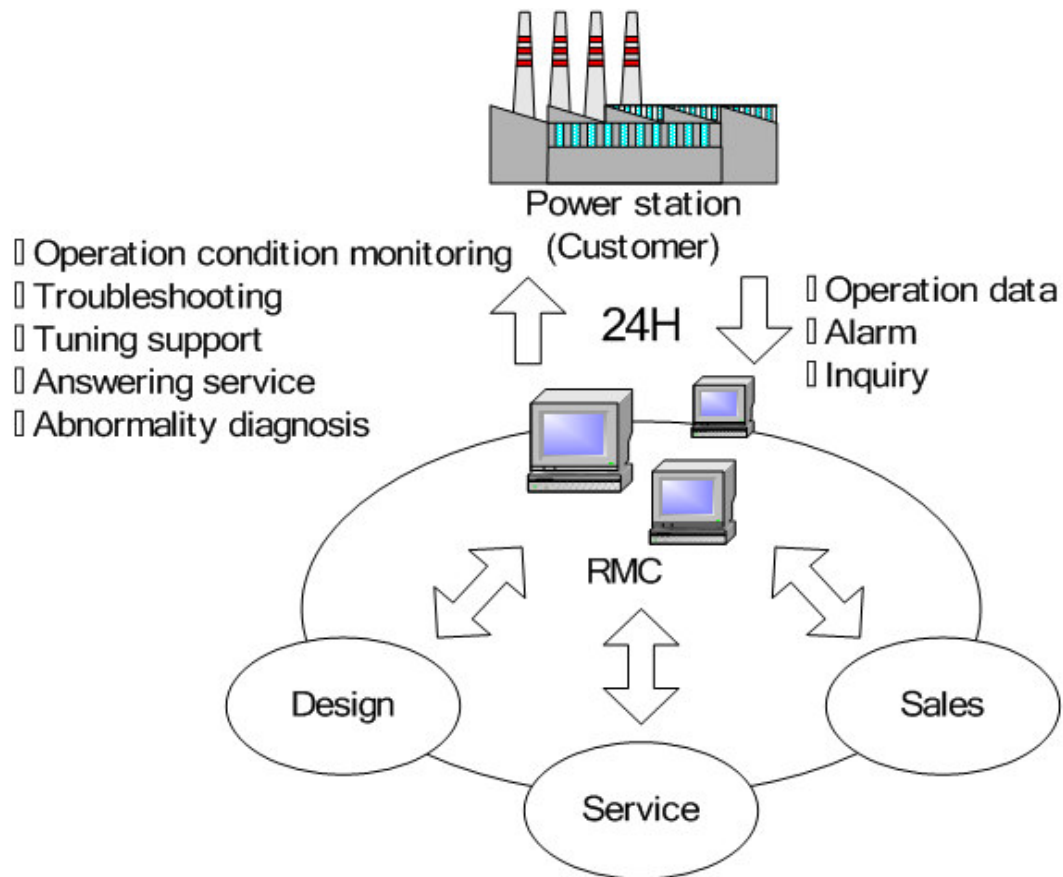


圖 41、遠端監控中心的任務

遠端監控中心的一個重要功能就是電廠運轉狀態的異常診斷，而這就有賴越來越進步的診斷技術。如圖 42 所示，在正常狀態下運轉訊號應該維持在一定值而做些許的上下震盪，當訊號有小幅變化時即表示有某種狀況開始發生了，要持續觀察留意。圖 43 是說當運轉參數處於警戒值以下的橢圓形範圍內時為正常狀態，若運轉參數發生變化而跑到左邊的圓形範圍內時，代表這是某種破壞開始發生的徵兆，若運轉參數跑到超出警戒值以上的圓形範圍內時，表示設備要報銷了。因此，在破壞徵兆開始發生的時候，就要規劃在下次大修時進行檢修，以免造成重大事故而影響機組的安全運轉。

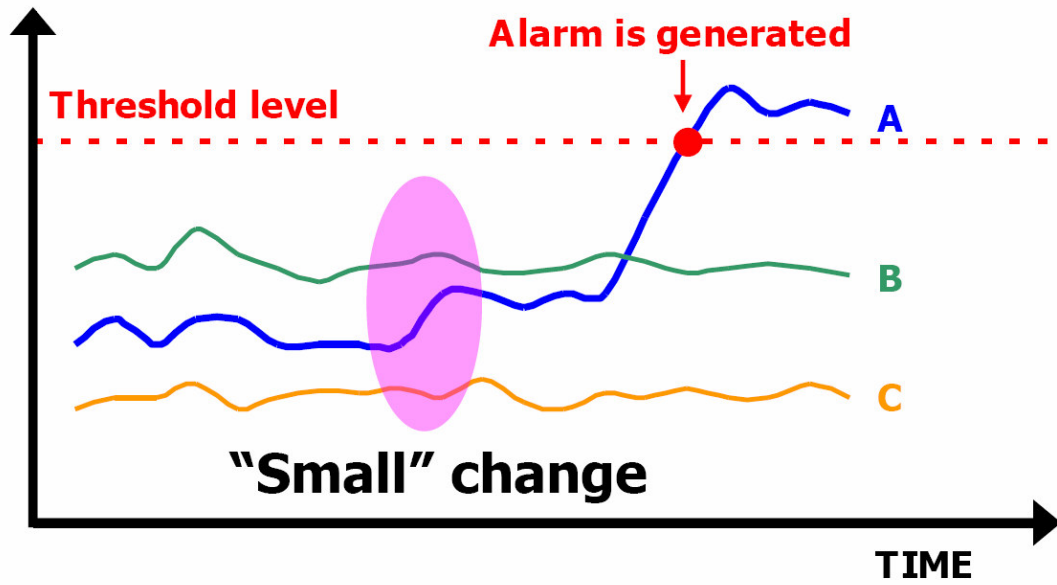


圖 42、潛在問題的顯現

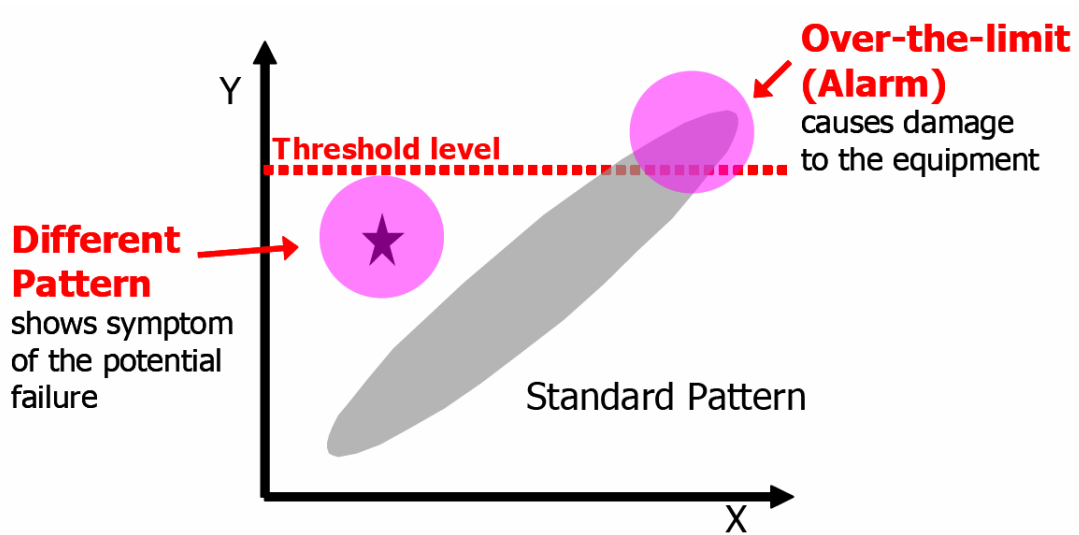


圖 43、兩種異常狀況

圖 44 表示同型機組其警戒值一般都作相同的設定，但雖然是同型機組，其運轉參數還是會隨不同機組而有些許出入，因此三菱公司特別引進預警值的概念，可以隨不同機組而作設定，以符合每個機組自己的特性。

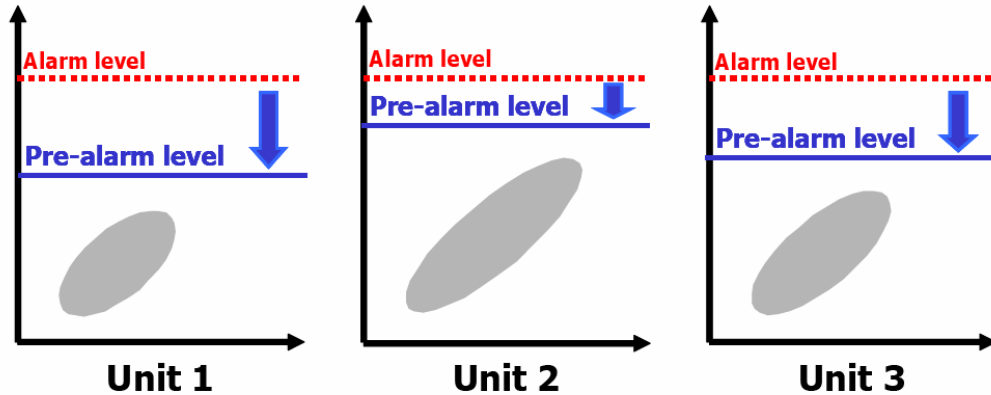


圖 44、預警值可以隨不同機組而作設定

三菱公司還發展出另一套診斷方法，叫作 Mahalanobis Taguchi Method，其公式如下所列。式中 MD 表目前的運轉參數和正常狀態的運轉參數間之距離，其中  $m$  是指平均值， $\sigma$  是標準差。

$$MD^2 = \frac{1}{k} \sum \alpha_{ij} \left( \frac{x_i - m_j}{\sigma_i} \right) \left( \frac{x_j - m_i}{\sigma_j} \right)$$

當 MD 距離還小時表示運轉狀態有些許變化，必須持續觀察，當 MD 距離逐漸變大時，如圖 45 所示，則必須進行肇因分析，以確定問題所在。一般在計算目前的運轉點和正常狀態的運轉點間的差距時是用幾何距離（euclidean distance）來計算，也就是每個運轉參數的權重都一樣，如圖 46 中 A、B、C 三點距圓心的距離都一樣，換句話說 A、B、C 三點發生問題的嚴重程度都一樣。但實際的情況是每個運轉參數的權重都不一樣，因此正常運轉狀態的範圍是橢圓形，而不是圓形，因此距離必須用橢圓形的差距來計算，也就是 MD 距離。如此一來，B 點的 MD 距離變得比

較短，而 C 點的 MD 距離變得比較長，也就是說 C 點的惡化情況最嚴重。

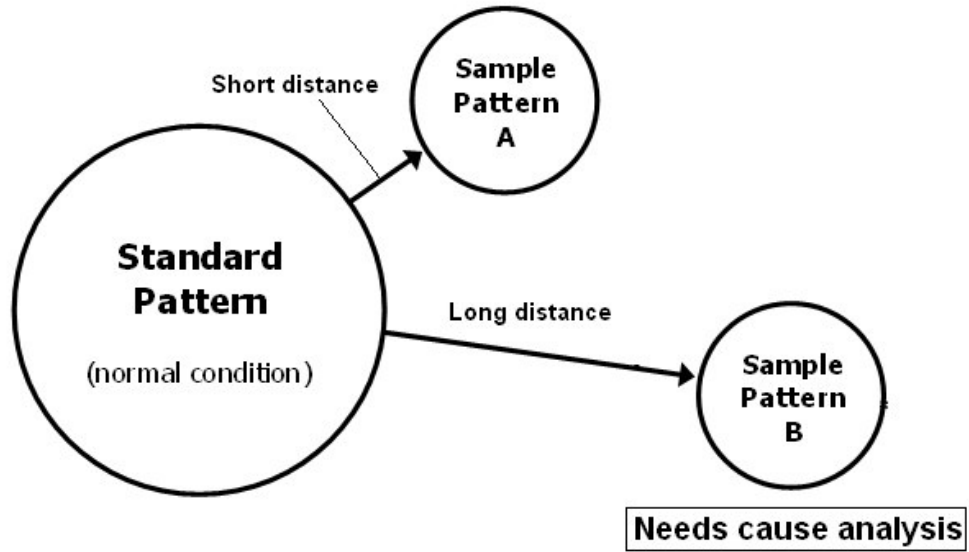


圖 45、Mahalanobis Taguchi Method

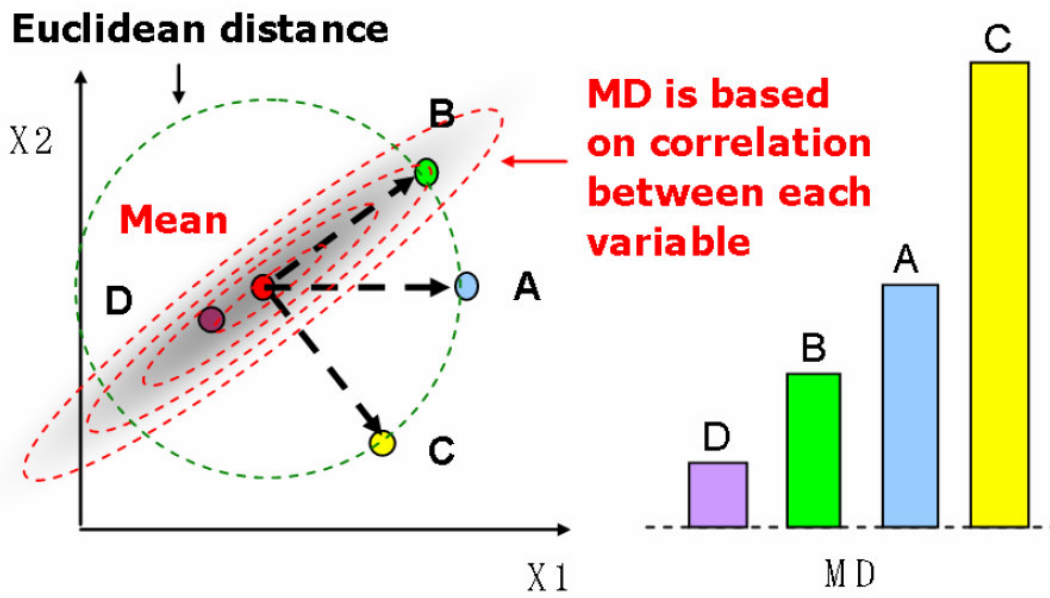


圖 46、Mahalanobis Taguchi Method

另一種診斷方法是統計法，如圖 47 所示，某一電廠進行造成跳機原因的統計，發現燃料系統造成跳機的次數最多，更進一步的對燃料系統進行統計分析發現，如圖 48 所示，伺服閥更換的頻率最高，因此電廠決定縮短伺服閥的使用時間，因而降低了跳機的次數。

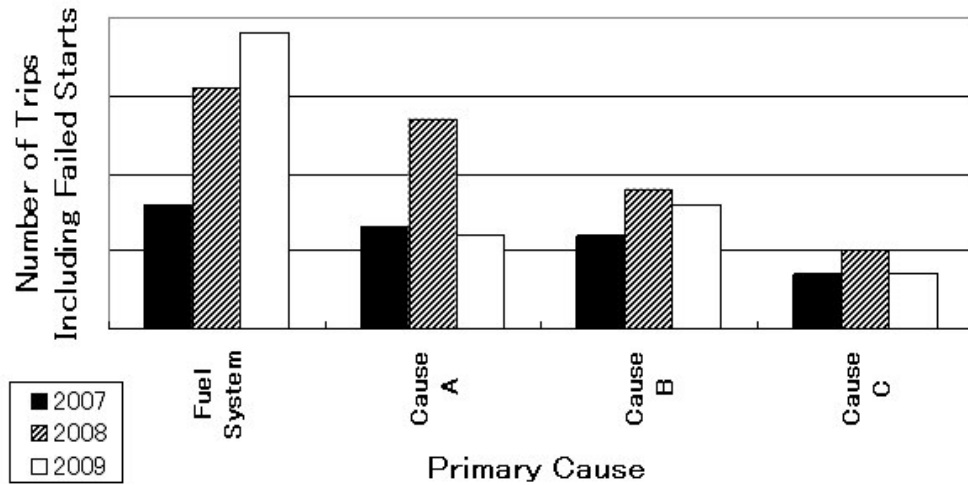


圖 47、造成跳機原因的統計

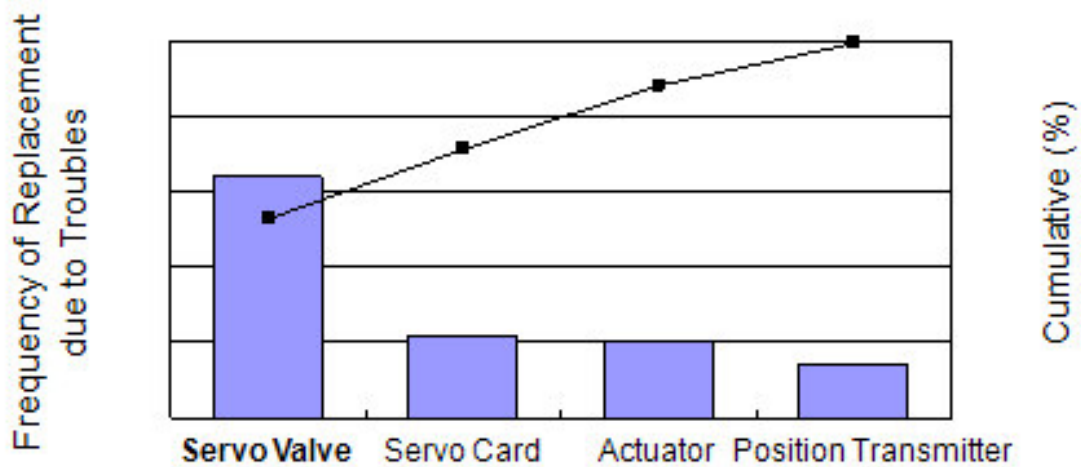


圖 48、燃料系統中各個元件的更換頻率

## 2-5 氣渦輪機各部元件的改良

對氣渦輪機的問題元件進行改良設計，也可以增加機組的使用率。延長機組連續運轉時間除了依賴強健的設計之外，各部機組元件也必須能承受機組連續運轉時間的延長，這就有賴各部機組元件的不斷改良。三菱公司經常根據商轉機組的實際經驗來進行機組元件的改良，以改善其使用壽命。

三菱公司氣渦輪機第一級動葉片曾發生冷卻孔龜裂的問題，經過分析之後發現是由於葉片溫度分布不均，導致熱應力過大而產生低週次疲勞，於是他們便將葉片的冷卻通道加以改良，如圖 49 所示，使得葉片的溫度分布較均勻，如圖 50 所示，因而降低了熱應力，也改善了低週次疲勞的問題。

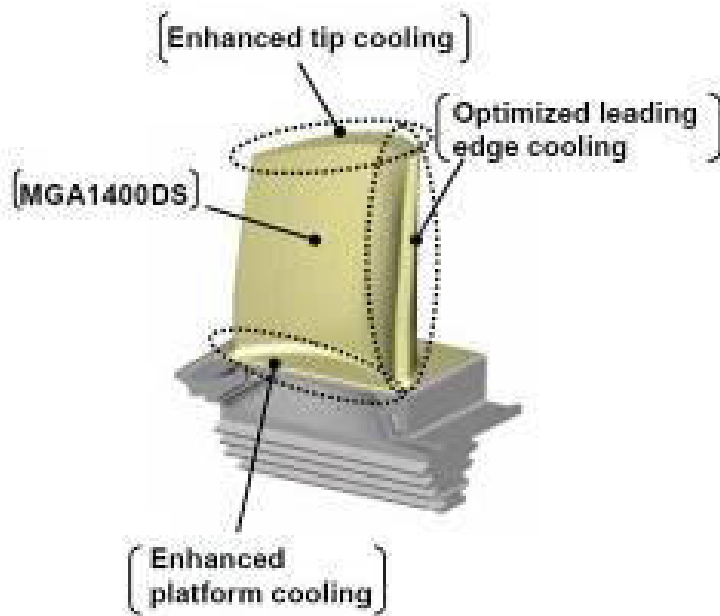
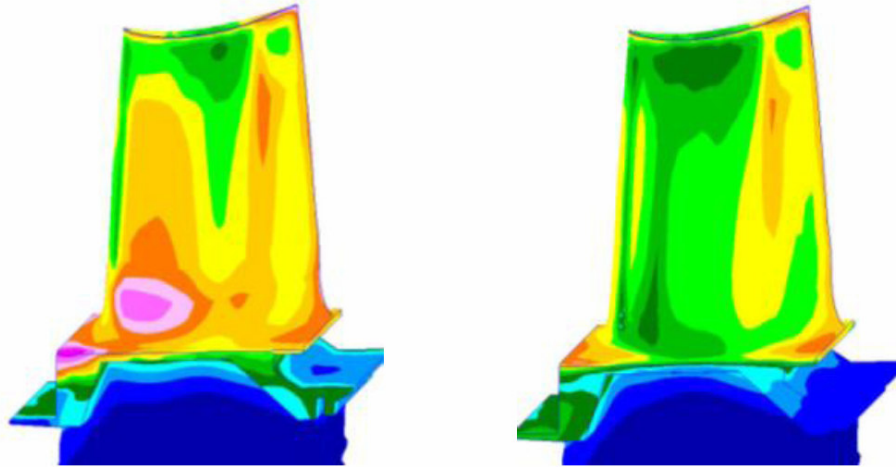


圖 49、氣渦輪機第一級動葉片冷卻通道的改良





(a) Original (Old style)      (b) Upgraded (Current style)

圖 50、改良後的葉片其溫度分布較均勻

三菱公司 T-point 示範電廠使用的是 G 等級的氣渦輪機，而其 15 ppm 乾式低 NO<sub>x</sub> 的燃燒氣曾經作過多次的設計改良，如圖 51 所示，包括 NO<sub>x</sub> 排放量小於 15 ppm、CO 排放量小於 10 ppm、穩定的燃燒動態（如圖 52 所示）、高起停機可靠度、適合每天起停運轉、高溫元件的可靠度高且使用壽命長等。圖 53 是 DLN 燃燒氣的噴嘴 (nozzle) 和渦旋器 (swirler)，在經過 3190 小時、201 次起停之後，狀況依然良好。



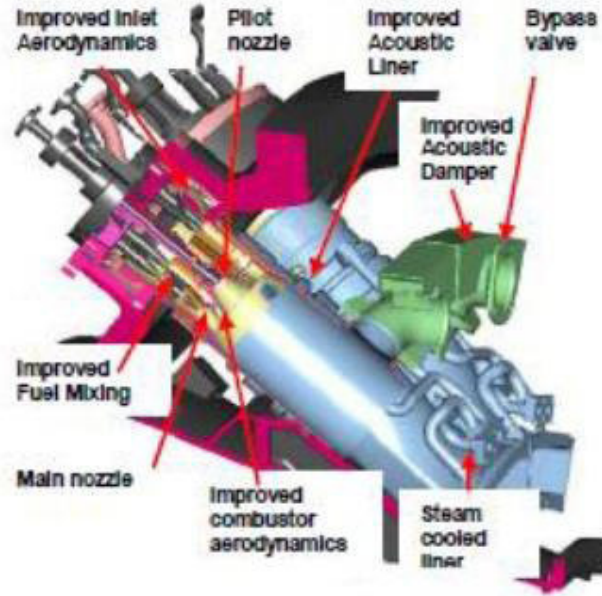
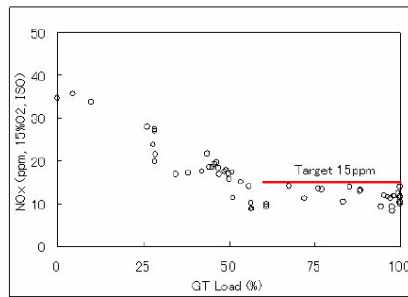
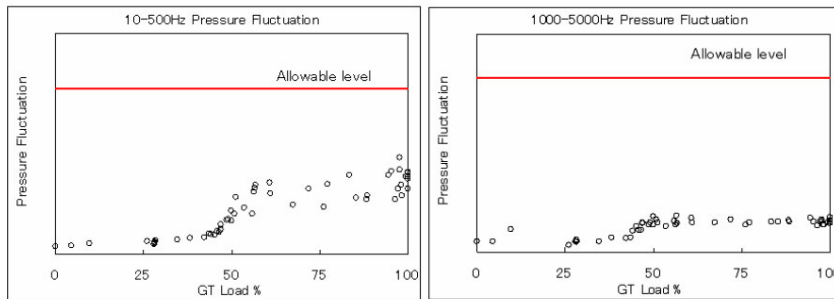


圖 51、DLN 燃燒氣的改良



NOx throughout all Power Output Levels



Pressure Fluctuation Levels

圖 52、DLN 燃燒氣的改良



圖 53、DLN 燃燒氣的噴嘴和渦旋器

燃燒器內的燃氣壓力經常受到燃氣熱值的影響，如圖 54 所示，燃氣熱值的改變可達 3.3%。因此其燃氣壓力會產生震盪的情形，造成燃燒的不穩定，因而造成跳機。嚴重的甚至會跟燃燒筒的結構產生共振，因而使得燃燒器提早損壞。為了解決此一問題，三菱公司研發了一套進步型燃燒器壓力震盪監測器，如圖 55 所示，它能根據燃氣的熱值而自動調整燃燒器的閥門，使得燃氣壓力能穩定下來，如圖 56 所示。

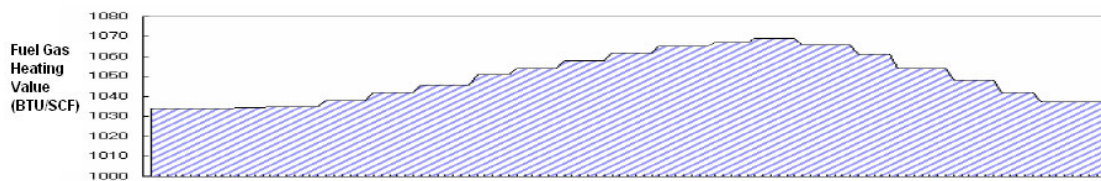


圖 54、燃氣熱值的改變可達 3.3%

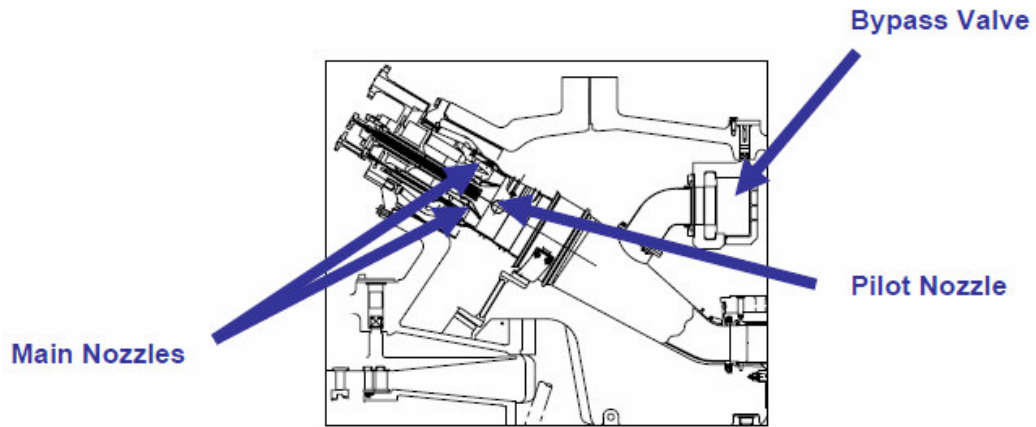


圖 55、Advanced Combustor Pressure Fluctuation Monitoring (A-CPFM)

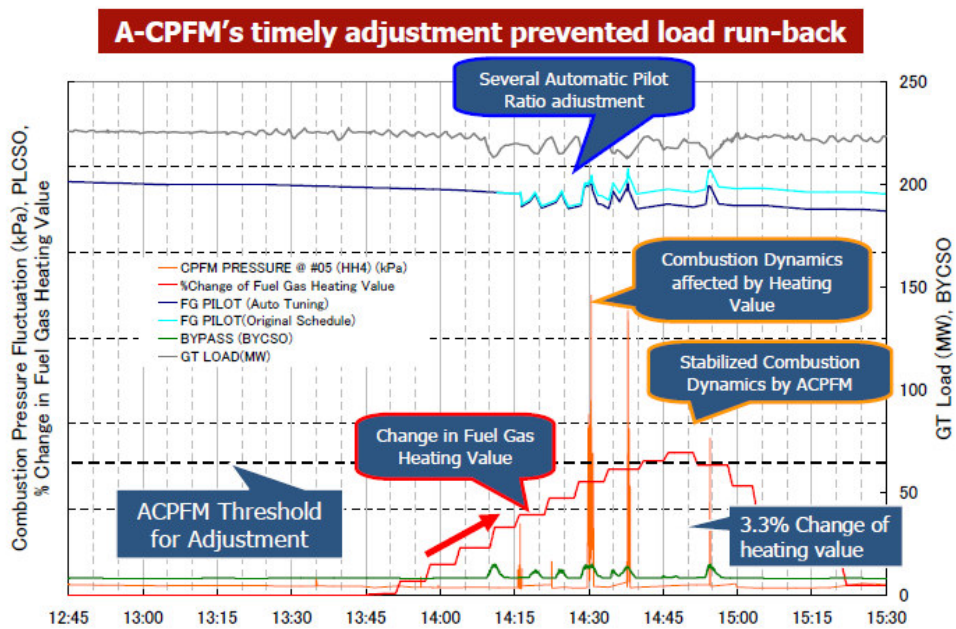


圖 56、A-CPFM 自動調整的情形

### 三、心得與建議事項

- 1、氣機複循環發電較傳統的火力發電具有成本低、建造時間短、效率高、排放廢氣低等優點，為目前發電之主流機種，綜研所應對這方面多投注一些心力。
- 2、三菱公司從利用設計驗證提高氣渦輪機的可靠度、縮短大修時程、利用遠端監控系統避免潛藏的問題、氣渦輪機各部元件的改良等四個層面下手，以提高氣渦輪機的使用率。
- 3、在氣機的研發技術中，各部元件的冷卻技術佔有相當重要的地位，不管是實驗量測技術或模擬分析技術均值得發展。
- 4、在氣機葉片的應力分析、疲勞分析及破損分析方面，由於比一般汽機葉片多了內冷卻流道，因此增加其分析的複雜度，再加上必須由熱流分析獲得溫度場及壓力場的負載，因此必須考慮熱、流、固耦合的技術，這是一項偉大的工程。
- 5、遠端監控中心的設立是一個相當好的概念，從這當中可以建立相當寶貴的資料庫，並延伸出許多有價值的分析技術，值得綜研所借鏡。
- 6、三菱公司是一家非常務實的公司，從設計、分析、實驗、實機測試一直到現場經驗回饋，這整套機制值得台電公司學習。