

出國報告（出國類別：實習）

發電機組振動分析診斷技術研習

服務機關：台電電力修護處中部分處

姓名職稱：林芸如 / 工業工程師

派赴國家/地區：日本

出國期間：108年6月3日至108年6月12日

報告日期：108年7月22日

行政院及所屬各機關出國報告提要

出國報告名稱：發電機組振動分析診斷技術研習

頁數 25 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/(02)23667685

出國人員姓名/服務機關/單位/職稱/電話：

林芸如/台灣電力公司/電力修護處中部分處/工業工程師/(04)7363666 轉 327

出國類別：1 考察 2 進修 3 研究 4 實習 5 開會 6 其他

出國期間：108 年 6 月 3 日至 108 年 6 月 12 日

派赴國家/地區：日本

報告日期：108 年 7 月 22 日

關鍵詞：振動測試、氣渦輪機、汽輪機

內容摘要：(二百至三百字)

通霄電廠更新擴建計畫新建三部高效率的複循環機組，一號機將於 108 年 8 月進行第一次大修，通霄新機組的大修後運轉振動測試及診斷分析由本課負責。振動的診斷並不只侷限於信號的處理分析，必須對發電機組的構造設計以及運轉模式對振動的表現都要有所了解，因此本次實習前往氣渦輪機組與汽輪機組相關製造商三菱日立(MHPS)及東芝(Toshiba)，與振動設備製造商新川(Shinkawa)學習新型式發電機組的設備構造及振動故障診斷技術，以期達到正確掌握診斷分析方法，縮短振動故障的檢修時間，提升供電的穩定度。

本文電子檔已傳至公務出國報告資訊網 (<https://report.nat.gov.tw/reportwork>)

目 錄

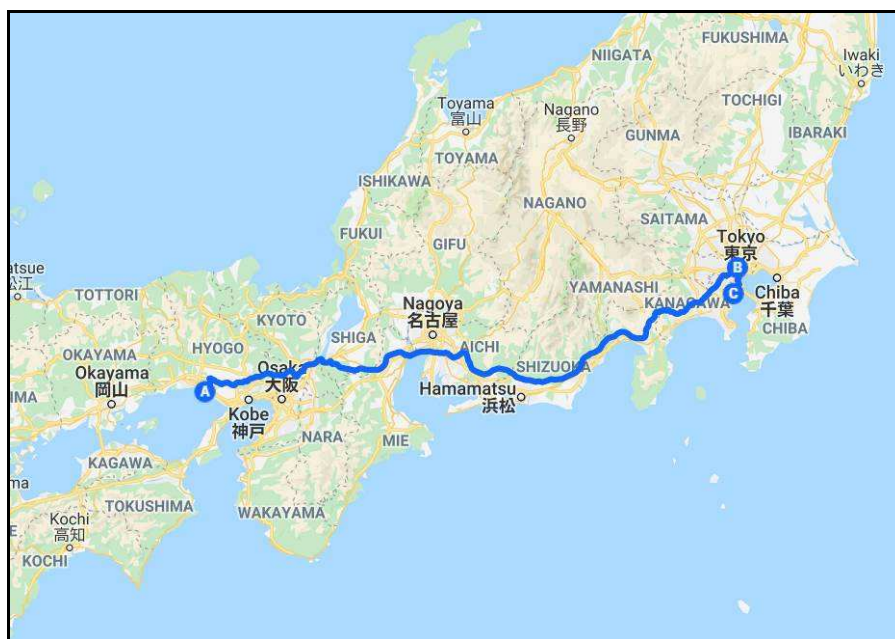
一、研習目的.....	1
二、研習過程.....	1
三、研習內容.....	2
(一)MHPS 高砂製作所研習	2
(二)Shinkawa 東京總部研習	15
(三)Toshiba 橫濱京浜事業所研習	20
四、心得與建議.....	24
五、參考文獻.....	25

一、研習目的

通霄電廠更新擴建計畫新建三部高效率的複循環機組，一號機將於108年8月進行第一次大修，通霄新機組的大修後運轉振動測試及診斷分析由本課負責。

本課負責中部地區各水火機組的振動測試及診斷分析，大型發電機組的設計構造相當複雜，要掌握機組故障的振動特徵，必須從機組的構造到運轉模式都要有所了解，因此本次實習前往氣渦輪機組與汽輪機組相關製造商三菱日立(MHPS)及東芝(Toshiba)，與振動設備製造商新川(Shinkawa)學習新形式發電機組的振動故障診斷技術，以期達到正確掌握診斷分析方法，縮短振動故障的檢修時間。

二、研習過程



108.06.03	往程(桃園機場→日本高砂)
108.06.04~108.06.05	MHPS 高砂製作所研習
108.06.06~108.06.08	Shinkawa 東京總部研習
108.06.09~108.06.11	Toshiba 橫濱京浜事業所研習
108.06.12	返程(日本東京→桃園機場)

三、 研習內容

本次研習內容分為三個部分，第一是前往通霄新機組製造商 MHPS 的高砂製作所，內容包含機組的設計構造及製造工廠實習，第二是前往振動訊號處理設備的製造商 Shinkawa 研習振動診斷的相關議題，第三則是到汽輪機製造商 Toshiba 研習汽輪機相關的振動議題。

(一) MHPS 高砂製作所研習

本次到三菱日立電力系統公司(MHPS)的高砂製作所研習，高砂製作所是製造大容量發電設備為主的專業迴轉機械工廠，產品包含發電用的氣渦輪機和汽輪機等，特別是用於發電的氣渦輪機領域，生產出具有世界上最高熱效率的高性能氣渦輪機，降低燃料發電成本，其主要產品如圖 1。

高砂製作所最早成立於 1962 年，早期為神戶造船廠及機械製作所，製造大容量電廠的輪機產品，1964 年從神戶造船廠及機械製作所獨立，設立高砂機械製作所，1986 年開發出進氣溫度 1250°C 的氣渦輪機組，並且是當時世界上進氣溫度最高的氣渦輪機，1997 年開始試運轉進氣溫度 1500°C 的氣渦輪機組，2009 年發展出進氣溫度 1600°C 的 J 系列氣渦輪機組，2014 年由三菱重工與日立整合火力發電與其他相關事業成立 MHPS，並更名為高砂製作所。



圖 1：高砂製作所的主要產品

高砂製作所占地 879,480 平方公尺，有 27 個廠區(如圖 2)，本次工廠實習包含 Research & Innovation Center、Blade Shop、Blade Repair Shop、Machining Shop、Assembly Shop、T point、Remote Monitoring Center，內容包含機組的設計理念、轉子及葉片的製造、組裝、測試驗證。其中試驗用電廠 T-point(如圖 3)，可以針對複循環機組作長期的驗證，目前在原有驗證電廠旁邊正興建新的驗證電廠，供以後新型機組使

用。遠端監測中心可以連線取得世界各地機組的運轉數據，以 GT 為例包含軸振動、軸承金屬溫度、潤滑油壓力及溫度、空壓機出口壓力及溫度、燃料流量…等，分析機組的運轉參數達到預知保養的目的。



圖 2：高砂製作所

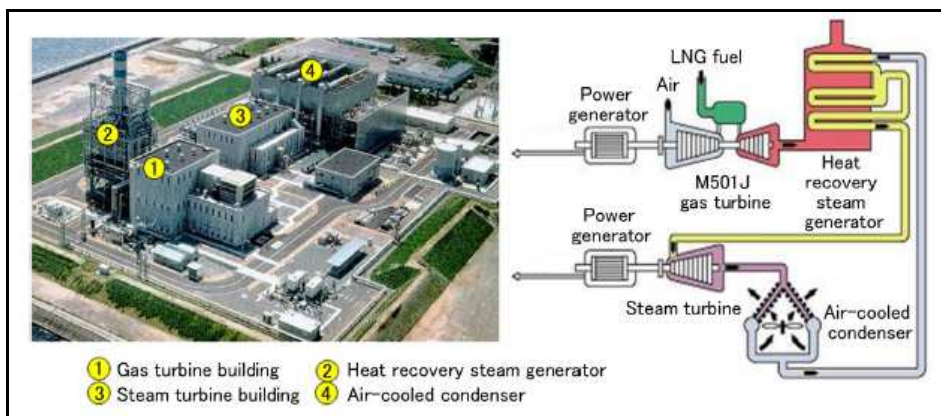


圖 3：T-Point 驗證電廠

氣渦輪機組的主要構造(如圖 4)，可分為六個外殼與六大部分，外殼部分可分為進氣殼、空壓機殼、空壓機及燃燒室殼、渦輪機殼、排氣殼及排氣歧管。六大部分則是進氣段、空壓機、燃燒室、氣機、排氣段

以及轉子。

空氣由進氣段進入空壓機加壓成高壓氣體，再到燃燒室與燃料混和燃燒生成高溫高壓氣體，氣體進入氣機轉動轉子並帶動與之相連的發電機轉子進行發電。

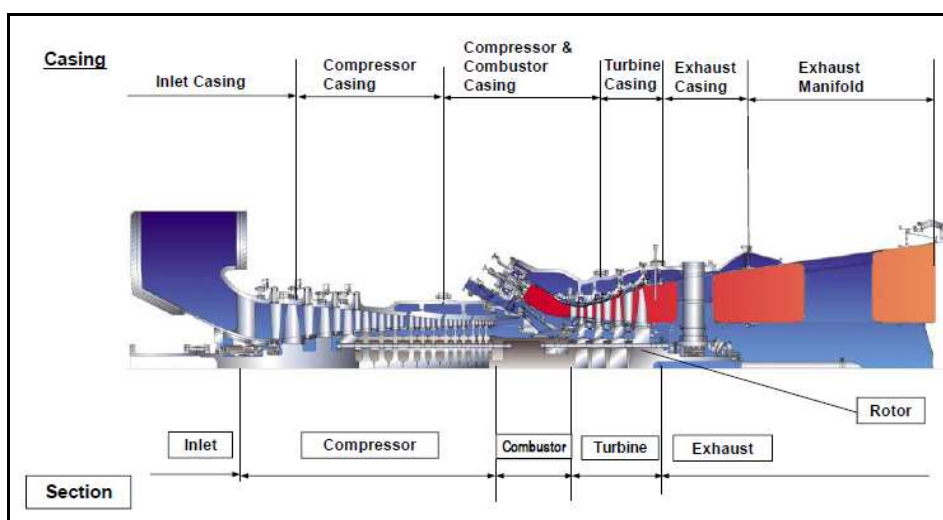


圖 4：氣渦輪機主要構造

為了提升氣渦輪機的效率，更高的進氣溫度是重要的一環，三菱重工在 1980 年代發展出進氣溫度 1150°C 的 M701D 型機組，隨後於 1989 年發展出進氣溫度 1350°C 的 M501F 型機組，1997 年發展出進氣溫度 1500°C 的 M501G 型機組。為了開發出更高效率的氣渦輪機，2004 年三菱重工參加「1700°C 超高進氣溫度之氣渦輪機開發」的國家級計畫，因此開發出進氣溫度達 1600°C 的 M501J 型機組，複循環效率可達 61.5%，發電量達 327MW。通霄電廠新一、二、三號採用的即是 M501J 型的機組。圖 5 為各型氣渦輪機的效率比較。

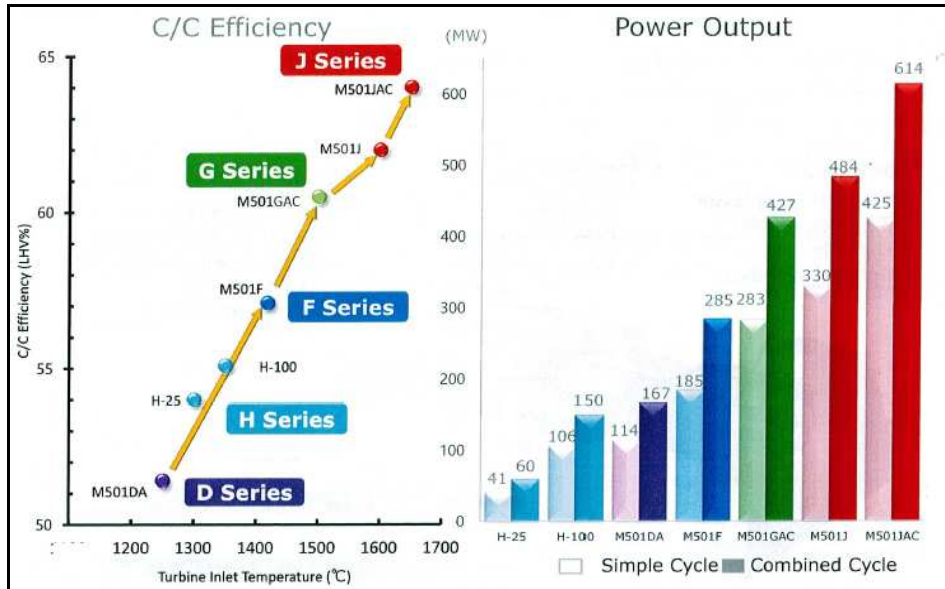


圖 5：各型氣渦輪機的效率比較

J 型氣渦輪機的設計理念(如圖 6)可分為三部分，源自過去 H 型、G 型機組及國家級計畫的技術。空壓機部分源自 H 型的高壓縮比技術，燃燒室的冷卻方式源自 G 型的蒸氣冷卻技術，氣渦輪機部分源自前述參與的氣渦輪機開發國家級計畫，包括先進的耐熱塗層材料、冷卻技術及空氣動力學等技術。

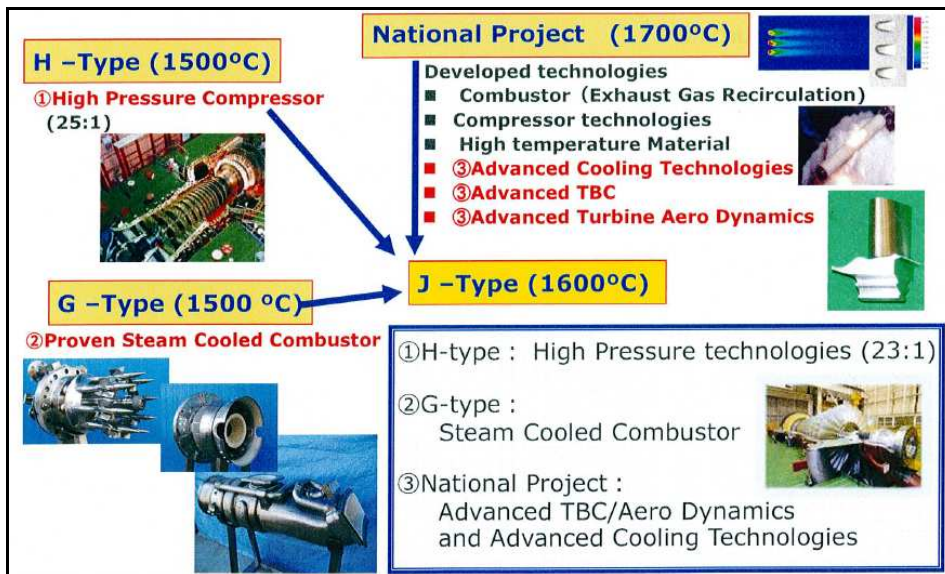


圖 6：J 型氣渦輪機的主要設計概念

J 型氣渦輪機的基本結構(如圖 7)，主要包括以下幾項：

1. 發電機位於空壓機的冷端，軸向排氣的設計方便與鍋爐連接，以及不須使用柔性聯軸器等優點。
2. 雙軸頸軸承的支撐結構，並使用傾斜墊頸軸承。
3. 氣機使用四級動靜葉片，以及氣冷式的葉片。
4. 燃燒室為環狀排列的獨立罐式燃燒室。
5. 水平對分式缸體，節省檢修拆解時間。

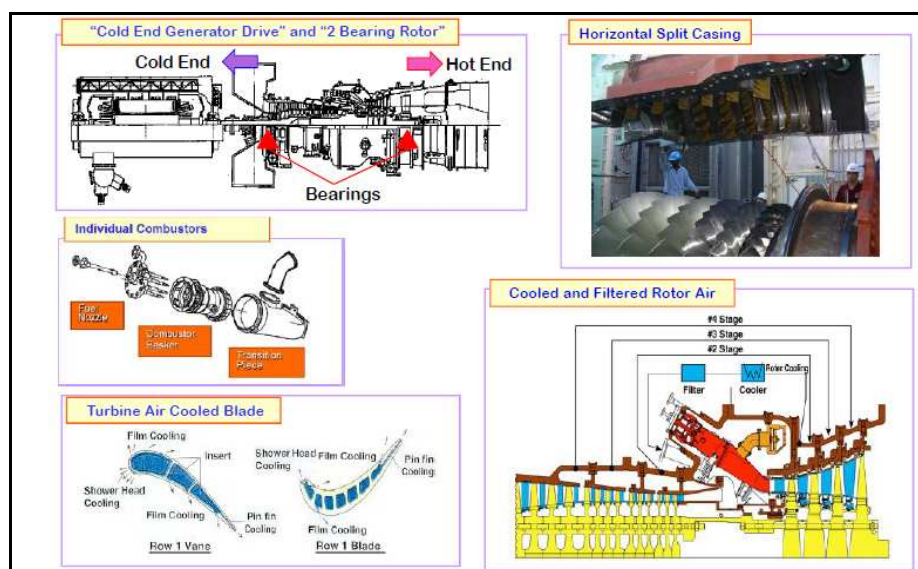


圖 7：J 型氣渦輪機的結構

氣渦輪機的設計必須考量運轉後對轉子的振動狀態以及可能產生的振動問題。例如空壓機的失速(stall)及喘振(surge)故障，空壓機若發生喘振會對機組造成嚴重的損害。當機組的操作條件偏離原來的設計點過多時，氣流流入葉片的角度增加，在葉片背面產生邊界層分離，氣流反向流動形成渦漩，此種現象稱為失速。葉片失速時，氣流受到部份阻塞，並且沿圓周方向做失速傳播(如圖 8)，當這種失速現象範圍擴及所

有的葉片時，空壓機的氣流會突然沿著軸向出現劇烈震盪，這種現象就稱為喘振，此時伴隨氣流波動、高壓波動及異常振動。

喘振的振動特徵頻率一般是低於轉速頻率的低頻。為了避免空壓機喘振及失速，機組具有抗喘振系統如圖 9 所示，在運轉時進氣導葉開度 (IGV)、可控式葉片開度(VV)及高壓、中壓、低壓排氣閥都會受到控制。

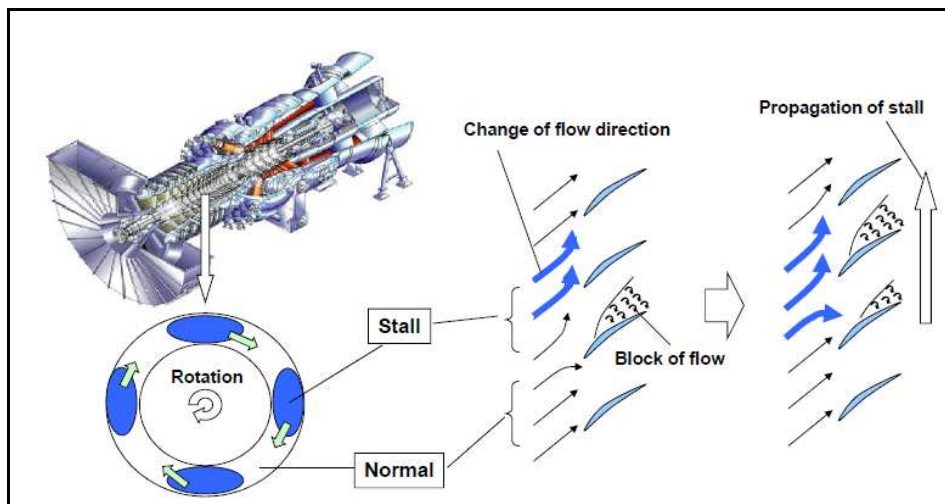


圖 8：旋轉失速與失速傳播

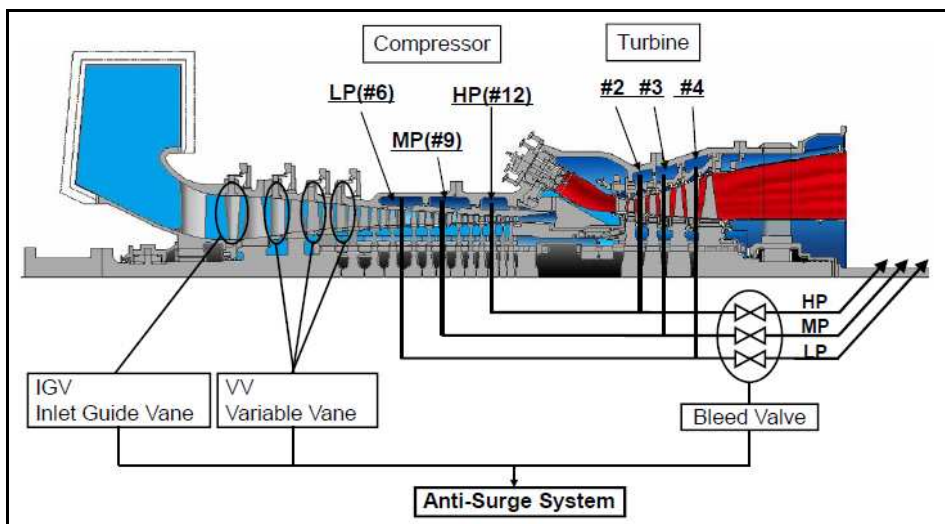


圖 9：抗喘振系統

J 型氣渦輪機使用複合燃燒室，共 16 個獨立罐式燃燒室做環狀排列，經由空壓機加壓的空氣與燃料噴嘴(Fuel Nozzle)噴出的天然氣混和後，於內燃燒筒(Combustion Liner)燃燒再供應至氣機段(如圖 10、11)，由於大多數的氮氧化物排放來自於氧和空氣中的氮所組成的熱式氮氧化物，降低火焰溫度是降低氮氧化物排放量的關鍵，因此採用預混燃燒可使火焰達到一致低溫。另外罐式燃燒室因體積小且分散燃燒可降低燃燒擾動造成的燃燒振動。

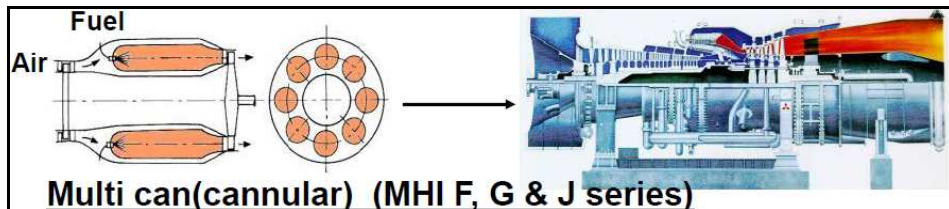


圖 10：複合燃燒室

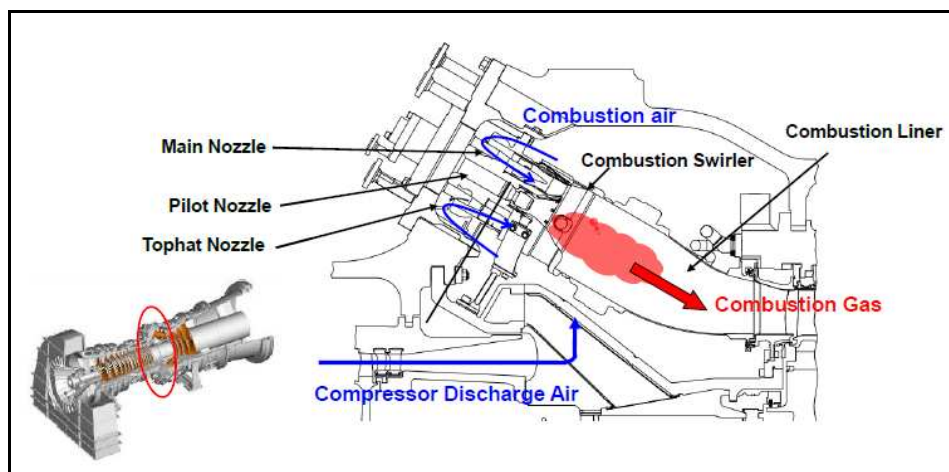


圖 11：燃燒室示意圖

氣機有四級動靜葉片，氣渦輪機的效率透過進氣溫度的提高及優良的冷卻技術獲得改善，如圖 12 顯示各型氣渦輪機效率與進氣溫度的關係。要能在如此高溫的環境下運作而不熔毀，需要靠葉片材料的改良、

先進的耐熱塗層和冷卻技術的改進。

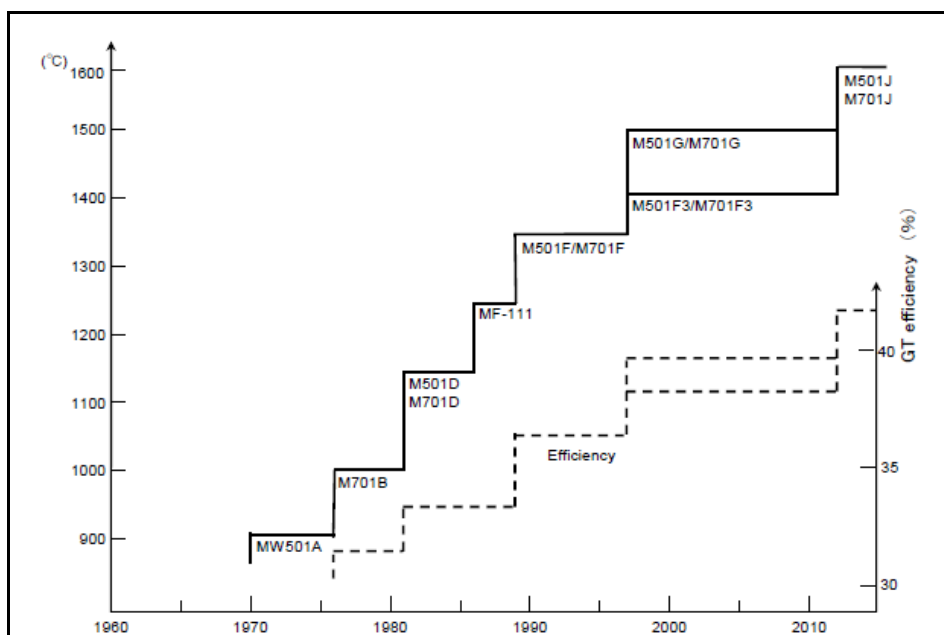


圖 12：各型氣渦輪機效率與進氣溫度

耐熱塗層一般使用陶瓷材料，使葉片的金屬溫度維持低溫(如圖 13)。圖 14 顯示 J 型氣渦輪機的進氣溫度比 G 型提升 100 度達 1600°C，其中大約 50°C 仰賴冷卻技術的提升，另外 50°C 來自強化耐熱塗層 (Advanced Thermal Barrier Coating)的使用。

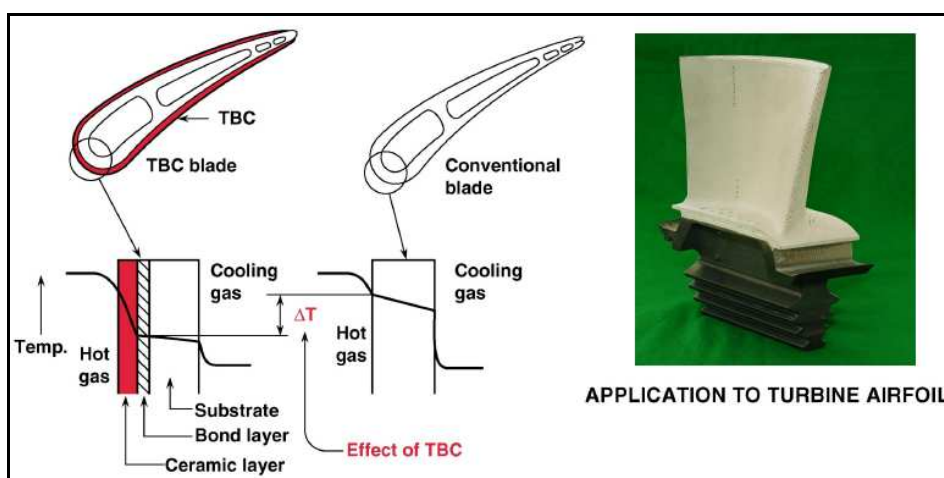


圖 13：葉片的耐熱塗層

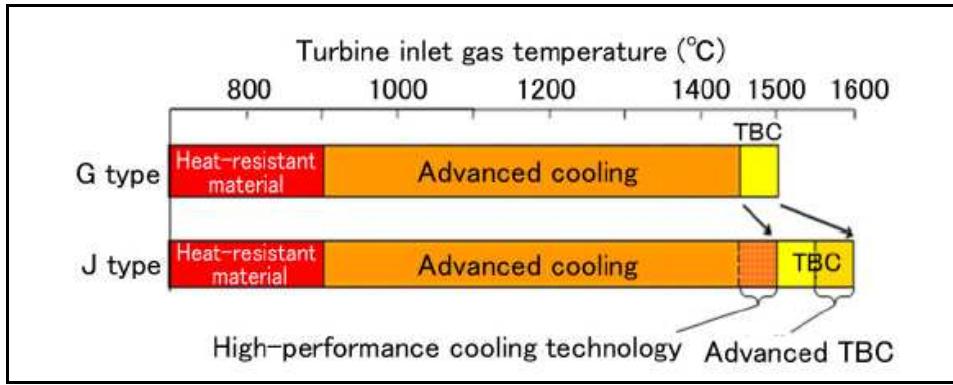


圖 14：G 型與 J 型的進氣溫度與葉片塗層技術

除了上述兩種方式，藉由葉片內部結構的冷卻設計也能達到降溫效果，葉片的空氣冷卻有幾種形式：對流冷卻、衝擊冷卻、薄膜冷卻及全面式薄膜冷卻(如圖 15)，每一種冷卻方式的效能及冷卻空氣的消耗量都不同，根據葉片的結構設計搭配不同組合做使用，以達到最佳的冷卻效果，如圖 16 顯示各型氣機第一級靜葉片冷卻技術的比較。

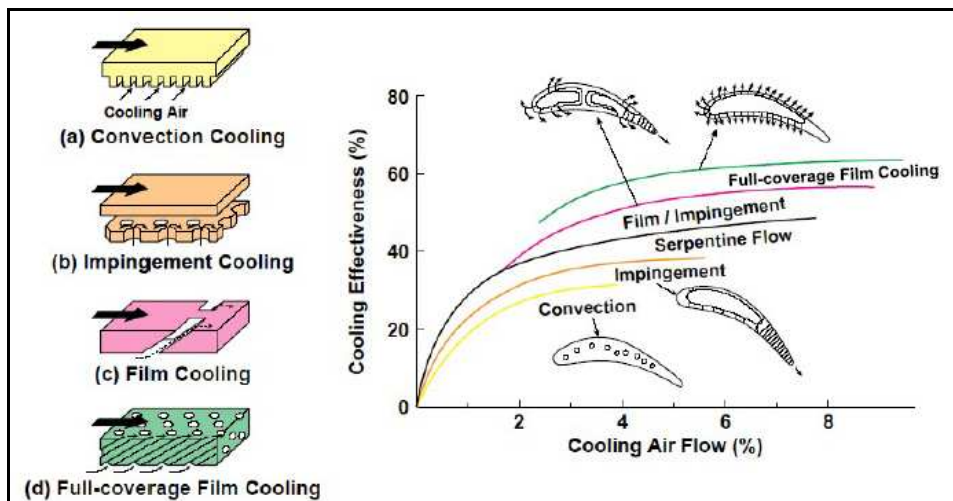


圖 15：各種冷卻方式及冷卻效率

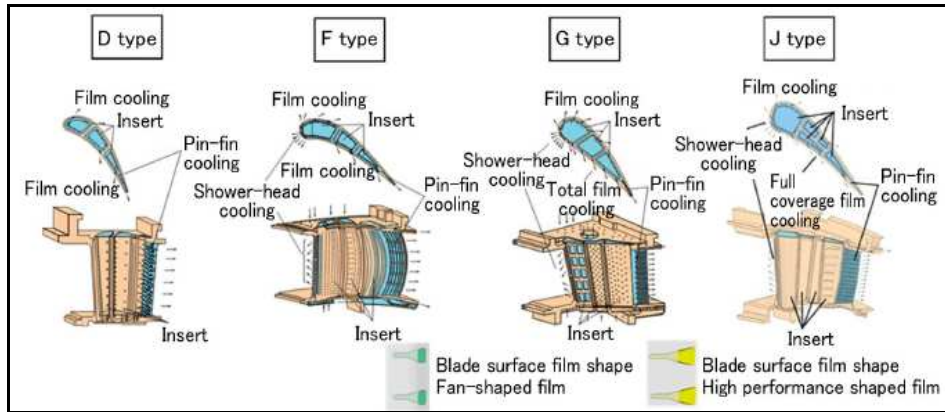


圖 16：第一級靜葉片冷卻技術的比較

商用的氣渦輪機為了達到更高的熱效率，氣機段的進口溫度也不斷提升，氣機第一級動葉片在如此高溫高壓的環境容易導致熱應力，並且降低葉片的疲勞強度，從而產生振動並引起疲勞破壞及腐蝕疲勞，因此氣機轉子的葉片不僅要求高性能也必須有足夠的抗振強度，在設計時準確預測振動特性是相當重要的。為了得到實際運轉條件下的葉片振動響應及葉片振動特性數據作為設計的反饋，三菱公司採用兩種方式取得數據，一、在真空狀態下的振動測試，二、在高砂製作所內的試驗電廠 (T-point) 做現場試驗。

一般的振動測試方法是將振動傳感器安裝在軸承進行量測，此種方法在分析葉片顫振、疲勞、應力等故障會受到限制，因此發展出針對葉片振動的監測技術。傳統上，測量氣機轉子的葉片振動要直接將應變規加在葉片上，再利用遙測系統取得數據，雖然這種方法的精確度高，但僅能獲得有裝置應變規的葉片振動數據，若要測量許多葉片需要耗費相當的時間及成本。新的量測型式則可以不使用應變規而是使用非接觸的方式量測葉片振動，此方法已用於氣渦輪機的空壓機轉子葉片及汽輪機

末級葉片。三菱公司改良了傳統的非接觸式葉片振動量測方法，並開發出一種能夠在高溫環境下量測氣機轉子葉片的技術，圖 17 顯示三菱公司針對非接觸式量測方法的改良歷史。

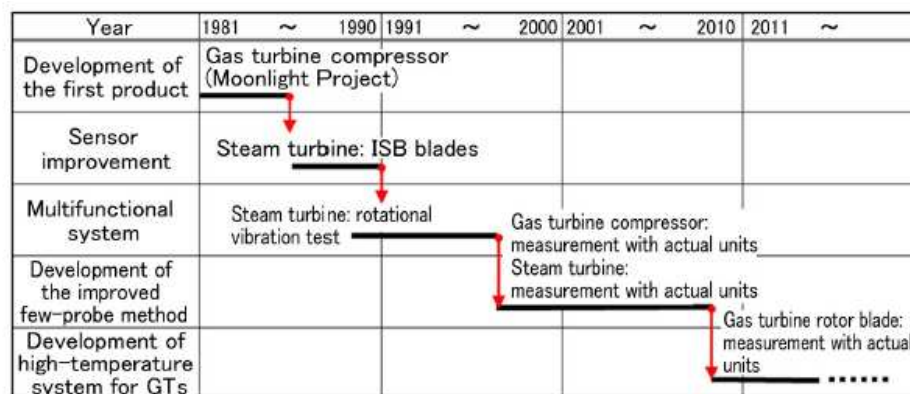


圖 17：三菱公司針對非接觸式量測方法的改良歷史

非接觸式葉片振動量測方法的原理是將傳感器裝置於氣缸，當葉片通過傳感器時產生脈衝信號，再根據脈衝信號間的時間差評估葉片振動。非接觸式葉片振動量測方法可根據使用的感測器數量分為少探頭法 (few-probe method) 及多探頭法 (multi-probe method)，如圖 18、19 所示。

三菱公司針對 M501J 型氣渦輪機在 T-point 做現場試驗，由於氣渦輪機測試環境溫度極高，三菱使用改良的耐高溫光學傳感器及最佳的傳感器空氣冷卻方法，其測試結果表明此種量測方法具有準確性。圖 20 是利用 multi-probe method 所得到的結果範例，圖 21 是在實際運轉條件下利用非接觸式葉片量測方法對 M501J 型氣機第一級動葉片的測試結果範例。

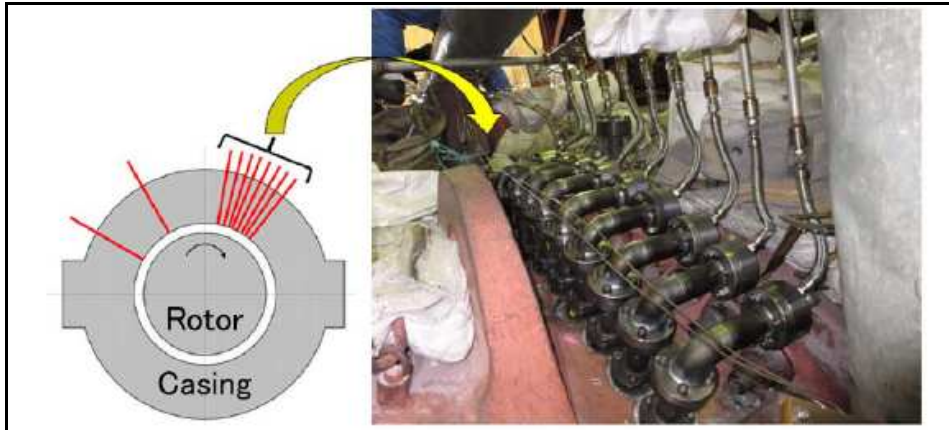


圖 18：傳感器裝置於氣缸

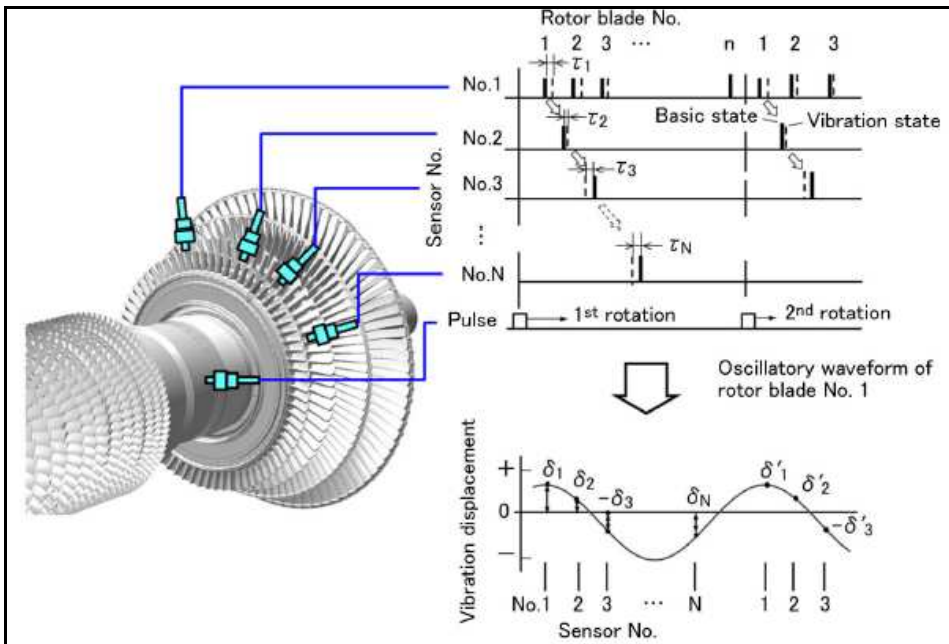


圖 19：非接觸式的葉片振動量測(multi-probe method)

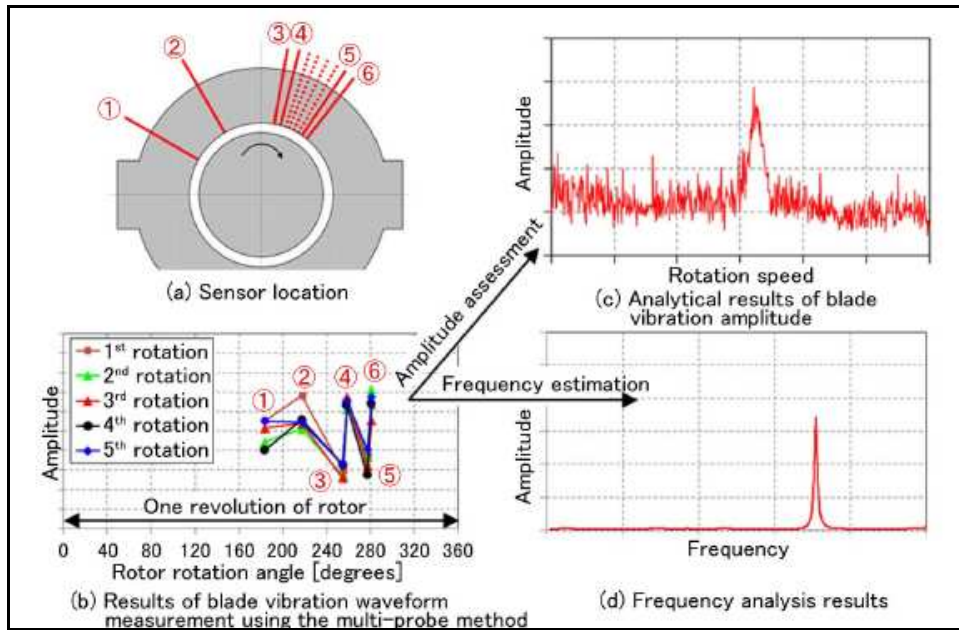


圖 20：使用 multi-probe method 量測氣機第一級葉片

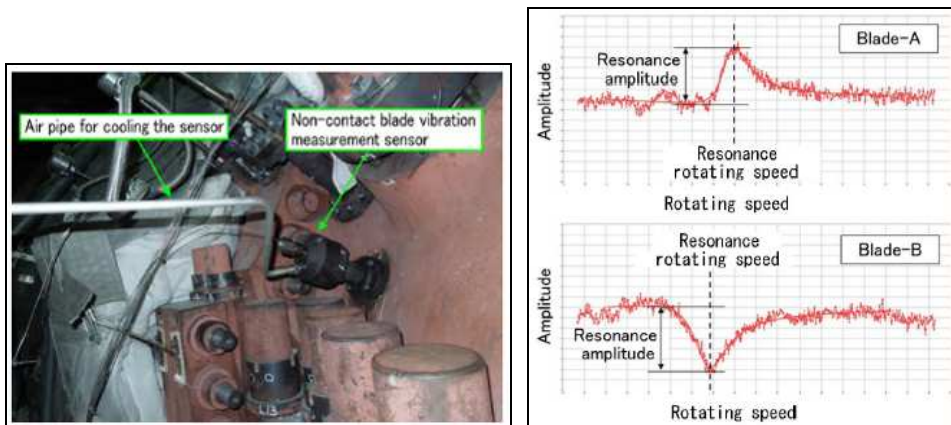


圖 21：使用非接觸式方法量測 M501J 型氣渦輪機葉片

(二) Shinkawa 東京總部研習

Shinkawa Electric 公司創立於 1927 年，擁有全資子公司 Shinkawa Sensor Technology, Inc.，位於廣島的工廠負責振動傳感器的研究發展與製造，涵蓋機組狀態監視的各個部分，製造的產品有針對各式迴轉機械所需的振動傳感器、振動監視設備及信號分析處理系統。

由於現場機組的振動問題複雜，振動工程師必須熟悉檢測設備的應

用及擁有精準的診斷技術，目前國際標準化組織(ISO)針對振動分析人員的培訓制定有 ISO18436-2，Shinkawa Sensor Technology 是日本唯一一間提供所有級數(I 級到 IV 級)培訓的認證組織，加上多年振動監視設備及傳感器製造技術的經驗，對振動測試領域有更深入的了解。

通霄電廠新機組使用的振動信號處理系統有 VM-5 振動監控面盤及 infiSYS RV200 振動監測與分析系統(如圖 22)，VM-5 振動監控面盤接收來自傳感器的電壓和電流信號，轉換或處理這些數據成為振動波形或轉速等信號，以便對軸承振動或轉軸位置進行監測，圖 23 為 VM-5 監控面盤與機組傳感器的應用。infiSYS RV200 振動監測與分析系統(如圖 24)從數據獲取單元接收振動波形信號後，於分析電腦繪製分析數據圖並保存這些數據，可顯示各種振動分析所需圖形，使用的操作介面人性化且容易操作，例如可顯示機組的 3D 圖像、圖形顯示切換選項卡、各種圖形拖放功能等。

本次研習地點位於 Shinkawa 的東京總部，研習過程中 Shinkawa 人員展示攜帶式振動分析器 Kenjin，可提供各種振動分析所需的圖形，軟體的操作介面類似 infiSYS RV200 系統，硬體部分體積小、重量輕，對於有需要機動到各廠量測機組振動的人員而言，設備的攜帶能夠更加輕便。

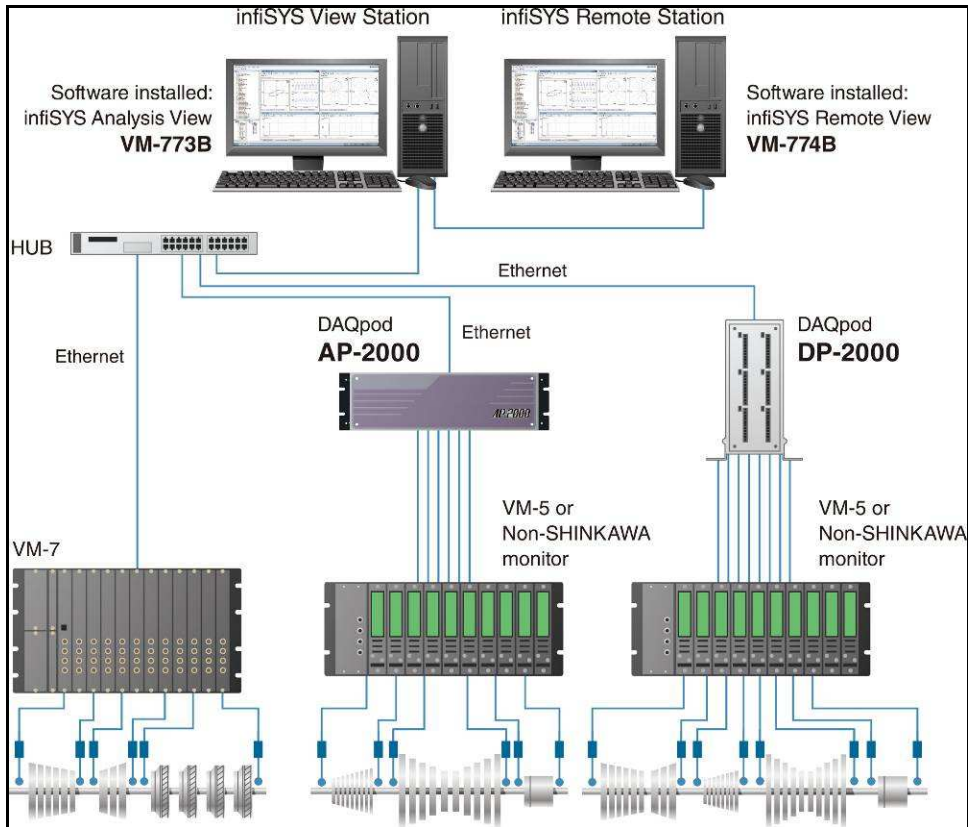


圖 22 : VM-5 與 infiSYS RV200 振動監測與分析系統配置

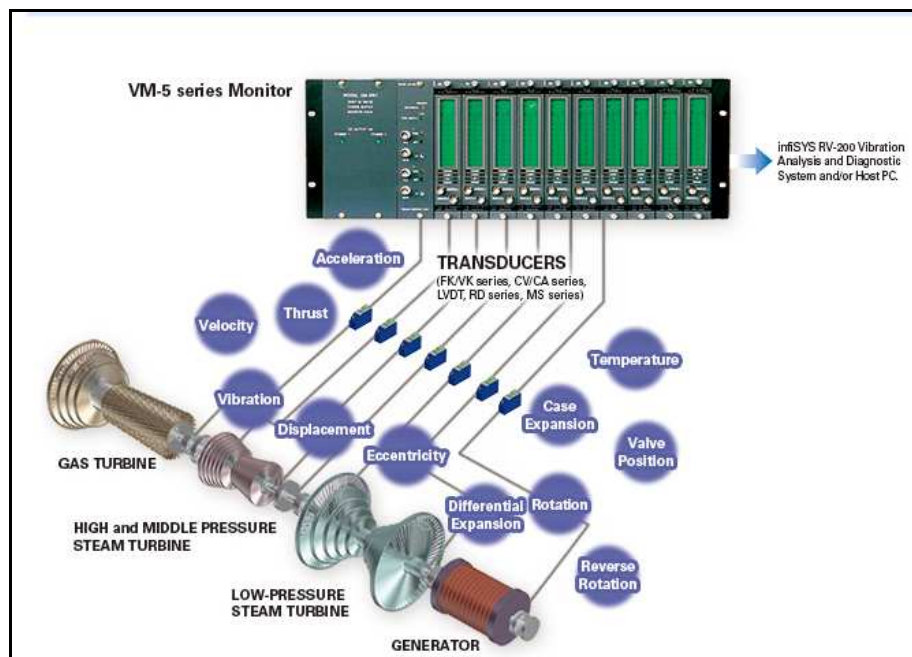


圖 23 : VM-5 監控盤面與現場機組傳感器應用

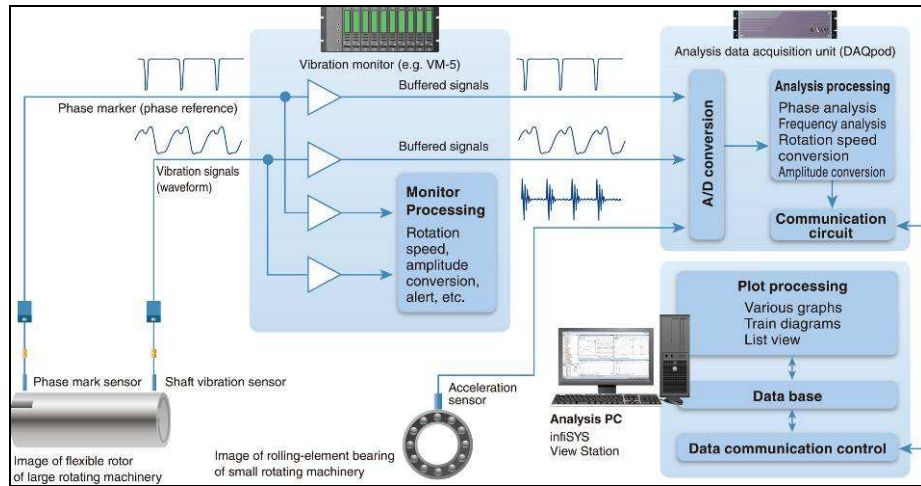


圖 24: infiSYS RV200 振動監測與分析系統

本次研習過程講解多種振動問題的特徵表現，包含以下幾種：Oil whirl、Partial rub、Misalignment、Loss of rotor component，並且使用模擬機 Rotor Kit 模擬振動問題，如圖 25、26 所示，同時利用振動分析器 Kenjin 抓取信號，並利用分析軟體繪製各式圖形，依據圖形進行診斷分析，使用的分析圖形如圖 27 所示。

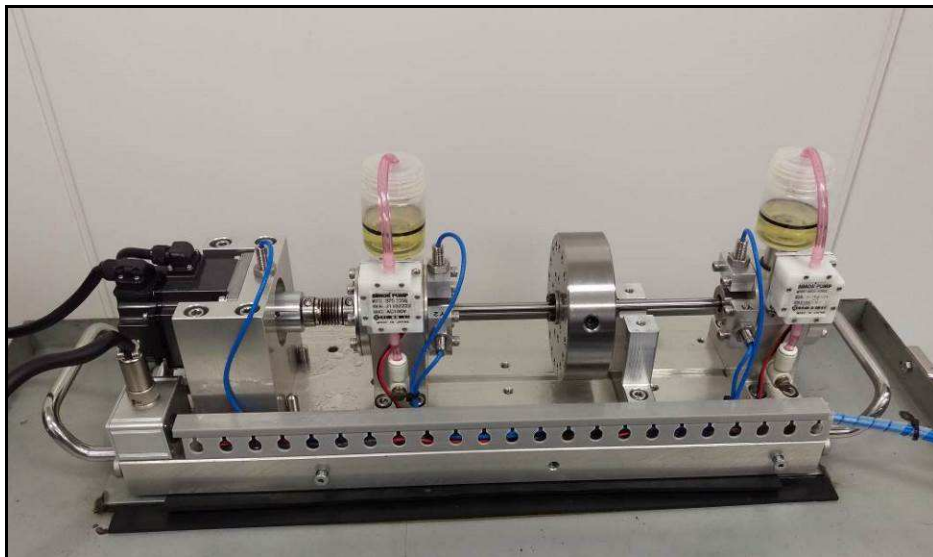


圖 25：本次使用的模擬機 Rotor Kit

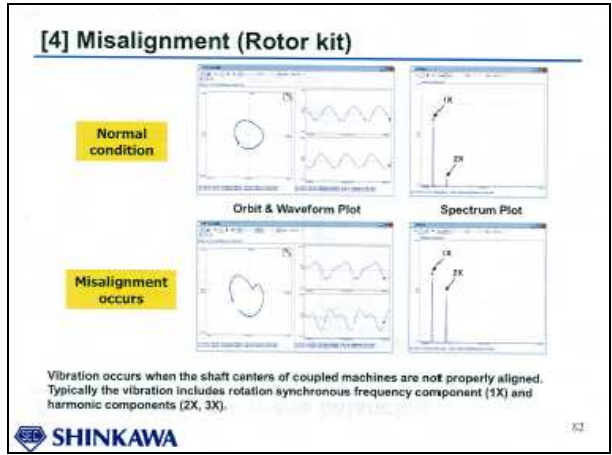
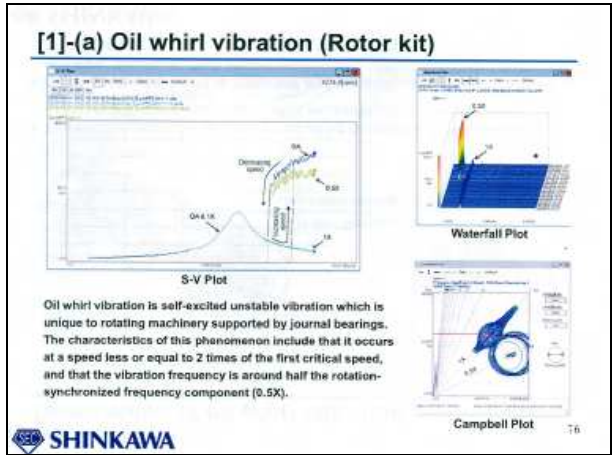
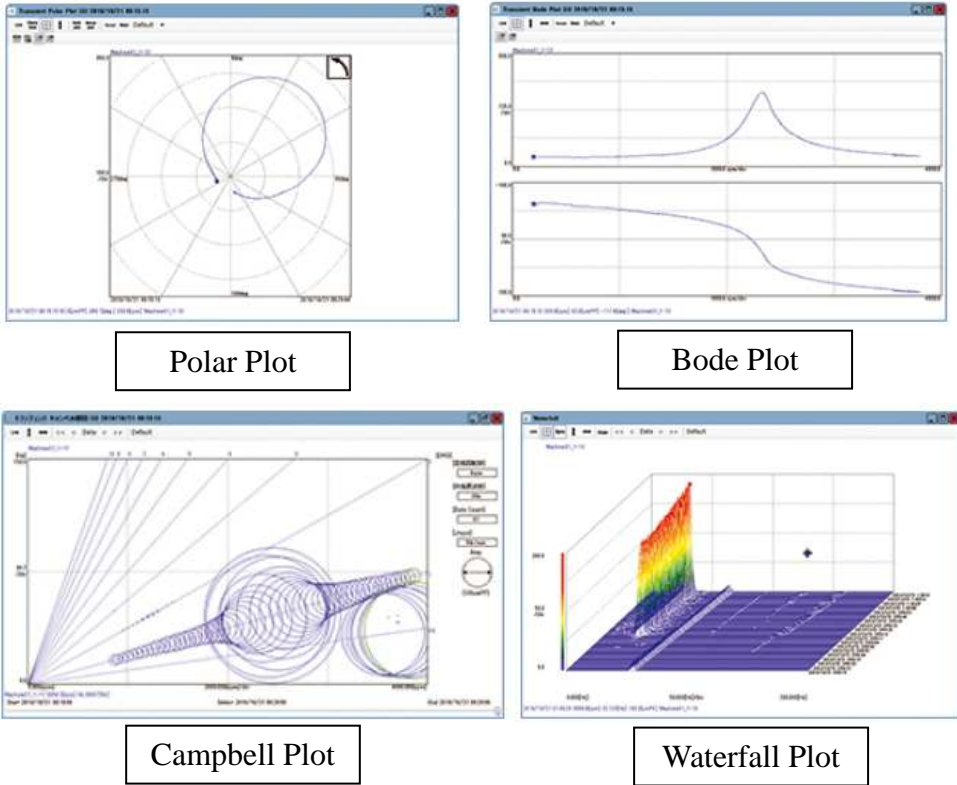


圖 26：模擬振動問題



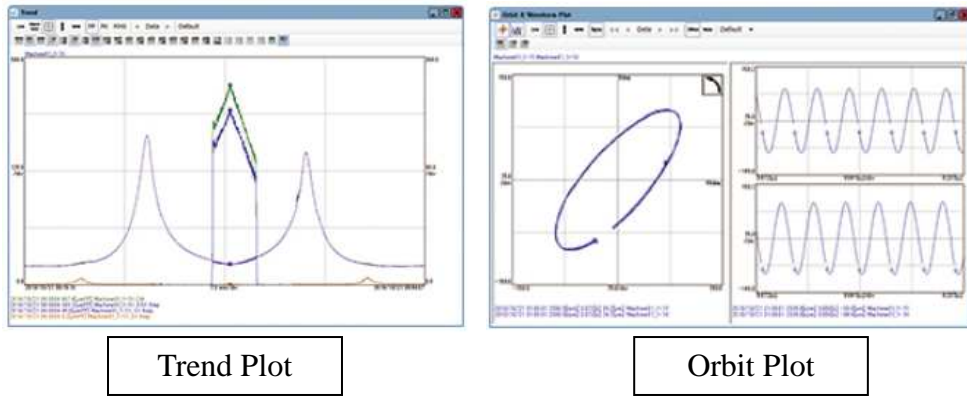


圖 27：各式分析圖形

(三) Toshiba 橫濱京浜事業所研習

東芝公司成立於 1875 年，本次研習前往位於橫濱市鶴見區的京浜事業所，如圖 28 所示共有三個廠區，廠內生產設備有火力發電機組、水力發電機組、核能發電機組及再生能源發電機組等。產品從設計開發、機械加工製造、部件組裝、測試、載運到港口出貨都能在京浜事業所完成。



圖 28：京浜事業所

本次研習到本工場(Keihin Product Operations Main Works)及汽輪機製造工場(Turbine Works)(如圖 29)，內容包含汽輪機的維修、振動診斷分析技術、製造工場實習、高速及低速動平衡機實習。



圖 29：本工場(左圖)及汽輪機製造工場(右圖)

這次研習過程，講師特別針對 ST 可能出現的振動故障做講解，以最常見的轉子不平衡為例，一支具有雙軸承支撐的轉子，當不平衡量出現在轉子中間截面、單側、偶合不平衡或在聯軸器的截面，對轉子的振動表現會有影響。升速過程中轉子經過不同的臨界轉速時的振型變化(如圖 30)，以及不同振動模態與配重位置的關係(如圖 31)這些都是進行配重平衡分析時必須考慮的。而實際汽輪發電機組由高中壓、低壓、發電機、勵磁機轉子組成，多轉子的系統會使振動分析更加複雜。

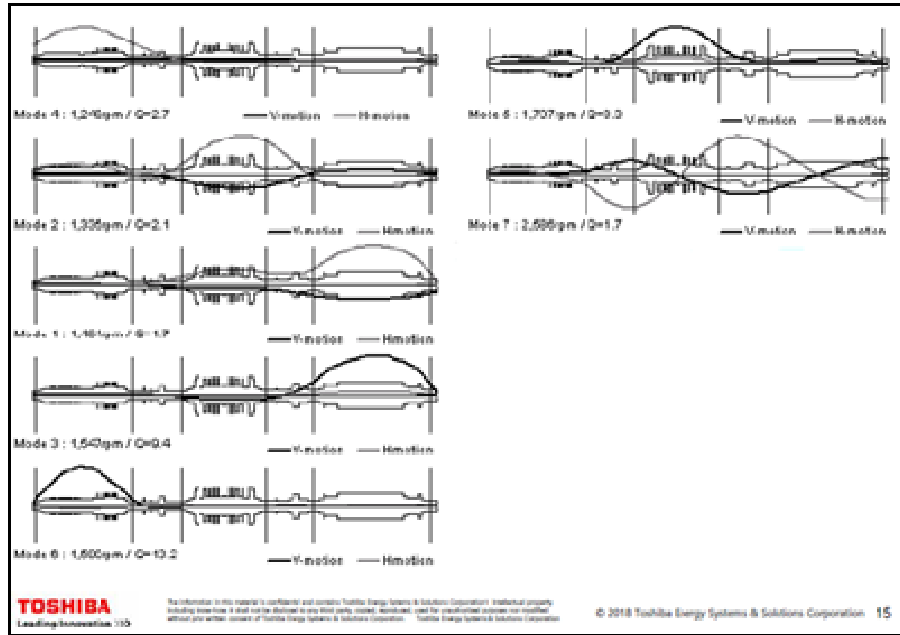


圖 30：不同轉速下的轉子振型示意圖

Theory (Modal Balance Method)			
Balance Weight against Vibration Mode	Effect		
	1st mode	2nd mode	3rd mode
 For 1st Mode	Effective	Ineffective	Effective
 For 2nd Mode	Ineffective	Effective	Ineffective
 For 3rd Mode	Ineffective	Ineffective	Effective

圖 31：不同振動模態與配重位置的影響

此外講師還針對幾個振動故障講解以及給予故障處理的建議，例如轉軸的摩擦現象(如圖 32)，摩擦現象為機組運轉時汽輪機的轉動部位與

靜止部位產生不正常的接觸，若轉軸表面與靜止部位的接觸範圍大或是接觸的時間較長，此時轉軸會因為受到撞擊力及摩擦力而產生局部的熱量集中，轉子局部受熱膨脹而產生彎曲現象，這種狀況會持續到動靜件不再接觸的時候。若摩擦的情況嚴重，可能導致永久性軸彎與零件損壞，並且軸承振動值快速達到警報值必須立即停機。

摩擦產生的原因可能是設計上或組裝不良，另一個可能原因則是設計上為了提升汽輪機組的發電效率，汽輪機的汽封間隙設計較以往嚴格，增加機組起動升速過程摩擦的發生機率。

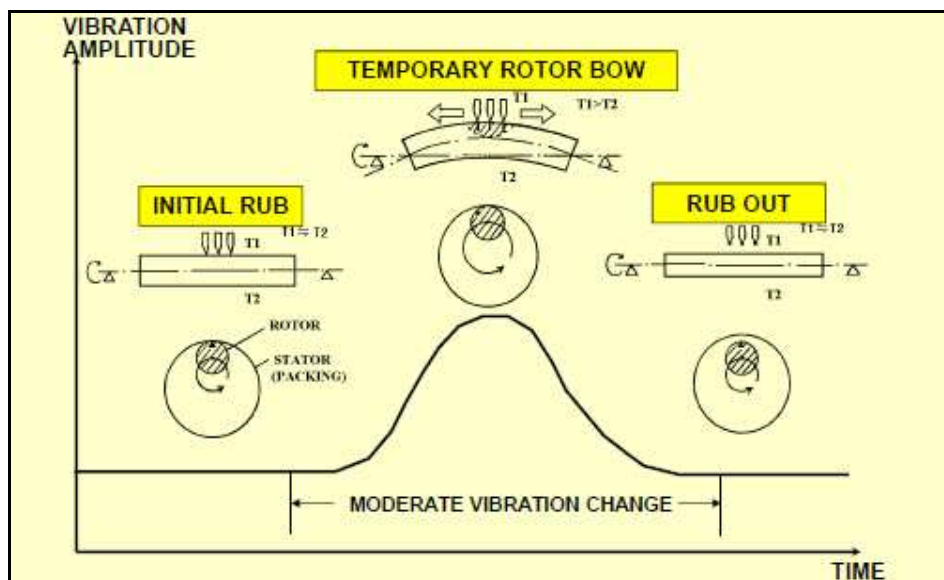


圖 32：轉子摩擦導致軸彎

四、心得與建議

非常感謝各級長官給予這個機會到日本研習，也很感謝吳建興經理及陳明傳課長提供許多辦理出國研習相關的建議、人資同仁的協助，這次的任務才能順利完成。

這次研習過程學習到許多方面，不論是振動相關的技術、知識或議題討論，以及工廠實習的過程都收穫頗多，以下提出幾點心得和建議

1. 在修護處的振動測試工作多為針對故障進行排除，以確保機組能穩定發電運轉，這次經過廠家的講解，某些故障是從設計製造時就能預先避免，此外也針對故障排除方法提供設計者角度的建議。
2. 透過原廠家對機組詳細的講解及工廠實習的過程，在機組的設計製造、組裝及測試方式更加了解，對以後的振動診斷有相當的助益。
3. 工廠實習過程，都可以發現廠內的動線標示清楚、環境整潔、機具及工具擺放位置清楚又整齊，並且注重人員工安。
4. 機組的振動分析除了振動數據取得，應配合機組相關的運轉及檢修參數，提升診斷的準確性。
5. MHPS 極力發展大數據並透過遠端監測的技術分析機組狀態，以振動領域而言，目前通霄新機組的振動資料庫因資安政策及人力的問題尚未做到即時採集信號進行分析，如何更有效處理振動資料庫以因應大數據應用的趨勢，值得我們思考。

五、 參考文獻

1. “Development of 1600°C-Class High-efficiency Gas Turbine for Power Generation Applying J-Type Technology” , Mitsubishi Heavy Industries Technical Review Vol.50 No.3 (September 2013)
2. “Non-contact Vibration Measurement of the Rotor Blades that Play a Pivotal Role in the Reliability of Gas Turbines” , Mitsubishi Heavy Industries Technical Review Vol.51 No.1 (March 2014).
3. “High-efficiency Gas Turbine Development applying 1600°C class "J" Technology” , Mitsubishi Heavy Industries Technical Review Vol.52 No.2 (June 2015)
4. “Development of Reliability Verification Technology for Gas Turbine Rotor Blades Using an Actual Unit (High-temperature Non-contact Blade Vibration Measurement Technology)” ,Mitsubishi Heavy Industries Technical Review Vol.52 No.4 (December 2015).
5. “MHPS Large Frame Gas Turbine and J series Technology” , MHPS簡報資料,2019.
6. “Vibration monitoring and analysis” , SHINKAWA Electric Co., Ltd. 簡報資料,2019.
7. “Turbine Rotor Vibration” , Toshiba 簡報資料,2019.
8. 通霄電廠機組訓練教材。