

出國報告（出國類別：實習）

先進燃氣渦輪發電機維護  
及監診技術研習

服務機關：台灣電力公司

姓名職稱：黃泰源；機械工程專員

派赴國家：美國

出國期間：112年5月17日至5月28日

報告日期：112年7月25日

## 行政院及所屬各機關出國報告提要

出國報告名稱：先進燃氣渦輪發電機維護及監診技術研習

頁數 25 含附件：是 否

出國計畫主辦機關/聯絡人/電話：台電 人資處/翁玉靜/02-23667685

出國人員姓名/服務機關/單位/職稱/電話：

黃泰源/台灣電力公司/綜合研究所/機械工程專員/(02)8078-2273

出國類別：1 考察 2 進修 3 研究 4 實習 5 其他

出國期間：112.5.17~112.5.28 出國地區：美國

報告日期：112 年 07 月 25 日

分類號/目

關鍵詞：絕熱塗層、PCRT、燃氣渦輪機

內容摘要：(二百至三百字)

燃氣渦輪機組做為目前供電主力，在台灣有相當之數量，提高氣渦輪機機組的妥善率，可以提升供電之穩定性，透過與國外電力研究機構交流及前往了解原廠先進燃氣渦輪發電機製造維護方法、學習經驗廠家複循環機組監診系統，可提升本公司先進燃氣渦輪機組運轉維護技術。

本次出國進行美國 EPRI 夏洛特之辦公室及實驗室參訪、奇異公司格林維爾氣渦輪機中心見證工作及亞特蘭大監測及診斷中心參訪，作為本公司提升氣渦輪機維護等相關技術的參考。

本文電子檔已傳至出國報告資訊網

# 目 錄

出國報告提要.....	I
目錄.....	II
一、 出國緣由、行程及主要任務.....	1
二、 美國電力研究院(EPRI)研習.....	3
三、 美國 GE 公司參訪見證 .....	15
四、 心得與建議.....	24
五、 參考資料.....	25

## 一、 出國緣由、主要任務及行程

燃氣渦輪機組做為目前供電主力，在台灣有相當之數量，提高氣渦輪機機組的妥善率，可以提升供電之穩定性，透過與國外電力研究機構交流及前往了解原廠先進燃氣渦輪發電機維護方法、學習經驗廠家複循環機組監診系統，可提升本公司先進燃氣渦輪機組運轉維護技術。

隨著發電效率之提高，運轉溫度隨之提升，熱段組件運作溫度趨向嚴苛，單價也隨之增加，了解其材料、維修甚至新品製造之相關技術，實屬必要，研習先進之檢測技術，更可提升機組運轉之可靠度。本公司為 EPRI 會員，今年有參加其 P217 計畫，該計畫主要從事燃氣渦輪機先進研究，本次有幸可參訪其材料實驗室並進行技術研討及交流。

本公司未來新型燃氣渦輪發電機約 14 部為 GE 公司 7HA 型號，大潭發電廠 111 年底檢修 7 號機時發現其轉子 Spacer Zero 有龜裂之情況，GE 公司隨即安排轉子及破斷面相關試塊寄回格林維爾進行維護及分析，本次出國主要任務進行大潭#7 氣渦輪機轉子 Spacer Zero 龜裂破斷面見證，取得相關資訊找出分析破損肇因以便擬定對策，另向原廠了解其最新之生產方向及維修技術，提升本公司使用其產品之信心，並作為本所未來 7HA 機組再生技術研發之參考。

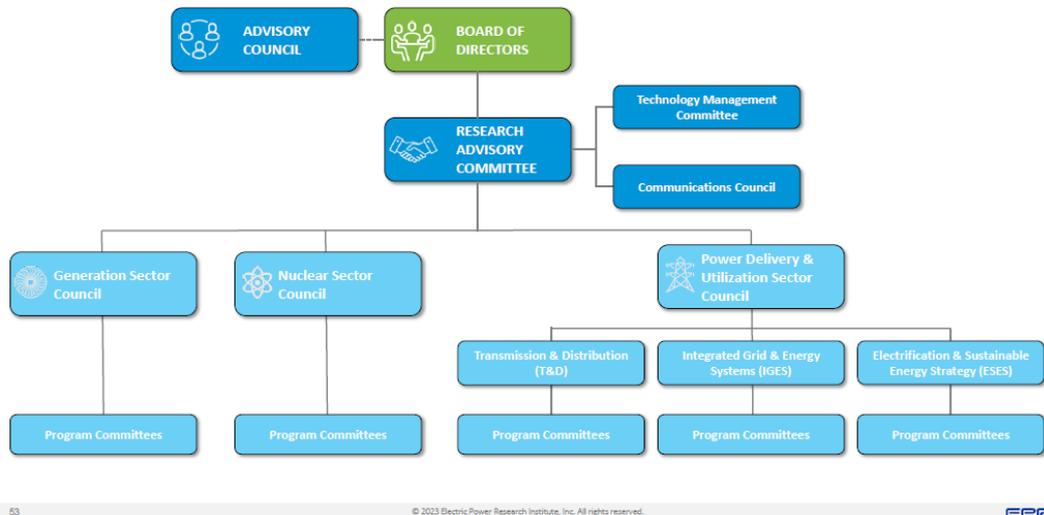
本次出國期間為 112.05.17~112.05.28，共計 12 天。5 月 17 搭乘飛機，於 5 月 18 日抵達美國夏洛特，19 日參訪 EPRI 位於夏洛特的辦公室及實驗室，研習有關氣渦輪發電機單晶葉片、絕熱塗層及 PCRT(Process Compensated Resonance Testing)等相關技術，並參訪 EPRI 位於夏洛特之材料實驗室；5 月 20 日搭車自夏洛特前往格林維爾並於 5 月 21 日與大潭電廠詹文燾經理會合；5 月 22 日至 5 月 25 日分別參訪奇異公司格林維爾氣渦輪機葉片製造與再生製程、轉子組件製造加工及修理、熱元件新制與再生、氣渦輪機燃燒組件實驗室、先進製造工廠及大潭 GT#7 轉子 Spacer Zero 龜裂破斷面觀察見證；5 月 25 日下午搭車自格林維爾前往亞特蘭大，5 月 26 日參訪奇異公司位於亞特蘭大全球遠端監測及診斷中心，了解及全球遠端運轉監測服務之作法。5 月 26 日至 28 日為返程，自美國亞特蘭大機場搭乘飛機返抵台北，詳細行程如下：

5/17~18	往程(台北→洛杉磯→夏洛特)
5/19	EPRI(夏洛特) 研習氣渦輪發電機相關技術
5/20	往程(夏洛特→格林維爾)
5/22~25	奇異公司(格林維爾) 參訪氣渦輪發電機製造工廠 及大潭 GT#7 轉子 Spacer Zero 龜裂破斷面觀察見證
5/25	往程(格林維爾→亞特蘭大)
5/26	奇異公司遠程監測與診斷中心(亞特蘭大)
5/26~28	返程(亞特蘭大→洛杉磯→台北)

## 二、 電力研究院(EPRI)研習

電力研究院(Electric Power Research Institute, EPRI)是美國一個獨立的非營利組織，也是世界知名的電力研究機構，其主要研究領域分為發電(Generation)、核能(Nuclear)、電力輸送與使用(Power Delivery and Utilizaotion)，在每個研究領域下均有許多的研究主題，圖 1 為 EPRI 組織架構，圖 2 為 2023 年發電領域下之各個研究主題。

### EPRI's Governance and Advisory Structure



53 © 2023 Electric Power Research Institute, Inc. All rights reserved. EPRI

圖 1 EPRI 組織架構

### 2023 Generation Portfolio



2 © 2022 Electric Power Research Institute, Inc. All rights reserved. EPRI

圖 2 2023 年發電領域下之各個研究主題

本公司今年有參加其 P217 之研究計畫，該計畫主要從事燃氣渦輪機先進研究，研究項目大致為低碳燃料之燃燒器研究、氣渦輪機壓縮機耐用及創新、先進熱元件的冷卻、塗層、合金及相關檢驗技術、先進燃氣渦輪機組織經驗，透過評估燃氣渦輪機組件及其材料以維持燃氣渦輪機的安全性、提升可靠度、降低運轉風險。

本次參訪美國電力研究院位於北卡羅萊納州夏洛特 (Charlotte, North Carolina) 的辦公室及實驗室，研習有關氣渦輪發電機單晶葉片、絕熱塗層及 PCRT (Process Compensated Resonance Testing) 等技術，並進行材料實驗室參觀，圖 3 為 EPRI 位於夏洛特辦公室及實驗室之外觀照片。



圖 3 EPRI 位於夏洛特辦公室及實驗室之外觀照片

隨著燃氣渦輪機發電效率提高，燃氣溫度也隨之提高，燃氣渦輪機第一級動葉通常為燃氣渦輪機運轉中最嚴苛的元件，它需耐高溫的同時，承受高溫燃氣的壓力並隨著轉軸進行轉動，其改善方式通常從材料、絕熱塗層及冷卻方面著手。

材料方面，隨著本公司燃氣渦輪機組的更新換代，未來 GE 公司 HA 系列之燃氣渦輪機第一級動葉採用單晶葉片，單晶不具有晶界，相較於多晶及方向性凝固的葉片可能在晶界的位置發生失效的情況，不具晶界的單晶在高溫有更好的性能、更高的抗潛變能力及更優異的可靠性，本次拜訪 EPRI 提供了全球各廠家燃氣渦輪機組第一級動葉採用單晶的情況及其使用材料，如圖 4 所示，三菱公司的 M501F/G/J 採用方向性凝固的 MGA1400、GE 公司 F 級.04、.05 及 HA 系列採用單晶的 Rene N4、N5、N500、西門子公司的 VX4.3A 採用單晶的 PW1483、阿爾斯通公司的 GT24/26 採用單晶的 CMSX-4。

EPRI 提供的資料(圖 5)顯示，GE 公司 7HA 第一級動葉採用 Rene N500 之單晶、有複雜的內部冷卻構造、設計可運轉時間為 32,000EOH 且無法再生，也就是該葉片在運轉完後無法修復重新使用，此外還列出第二代相較於第一代葉片改善內部塗層並更改熱處理製程。

## Single Crystal Design Decision

- To use direct compressor discharge air or off board cool?
  - MHPS M501F/G/J                      DS    MGA1400
  - GE 7F.03                                DS    GTD-111
  - GE 7F.04, ,05, FB, HA              SX    Rene N4, N5, N500
  - Siemens VX4.3A                      SX    PW1483
  - Siemens H, HL                        DS    CM247
  - Alstom GT24/26                        SX    CMSX-4

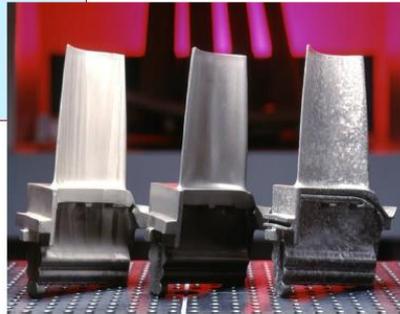


圖 4 全球各廠家燃氣渦輪機組採用單晶的情況及其使用材料

### GE 7HA S1B



- Single Crystal Rene N500
- Complex internal cooling geometry
- Original design interval 32K
- Current maximum interval achieved 25K
- Currently single use (no refurbishment)

#### Gen1 vs. Gen2

- Gen2 improved internal coating
- Change in heat treatment for Gen2
- Fully automated post TBC cooling hole profiling

圖 5 GE 公司 7HA 第一級動葉相關資訊

絕熱塗層在高溫環境下，具有良好的保護效果，能確保要保護之元件在高溫嚴苛的環境下運轉，本次拜訪 EPRI 介紹其研究 low K 塗層之實驗方法及相關成果，所謂的 low K 塗層就是低熱傳導率(thermal conductivity)塗層，相較常用之絕熱塗層(TBC)熱傳導率更低、塗層耐

久性提升，具有相同厚度及溫度下保護之元件溫度較低及壽命較長等優點<sup>[2]</sup>。

EPRI 介紹 low K 塗層實驗總共製備 6 種不同參數的試片，分為三種不同厚度的絕熱塗層(TBC)試片及三種同樣厚度但使用不同 low K 粉末供應商試片，針對這 6 種試片進行塗層微觀結構觀察實驗、塗層結合強度實驗(圖 6)、氣流沖蝕實驗(圖 7)、熱傳導率相關實驗(圖 8)及熱循環實驗(圖 9)，此次介紹讓我更了解塗層的實驗方法及標準。

## Tensile Bond Strength Testing in Conformance with ASTM C633



圖 6 塗層結合強度實驗 ASTM C633

## Room Temperature Erosion Testing in Conformance with ASTM G76

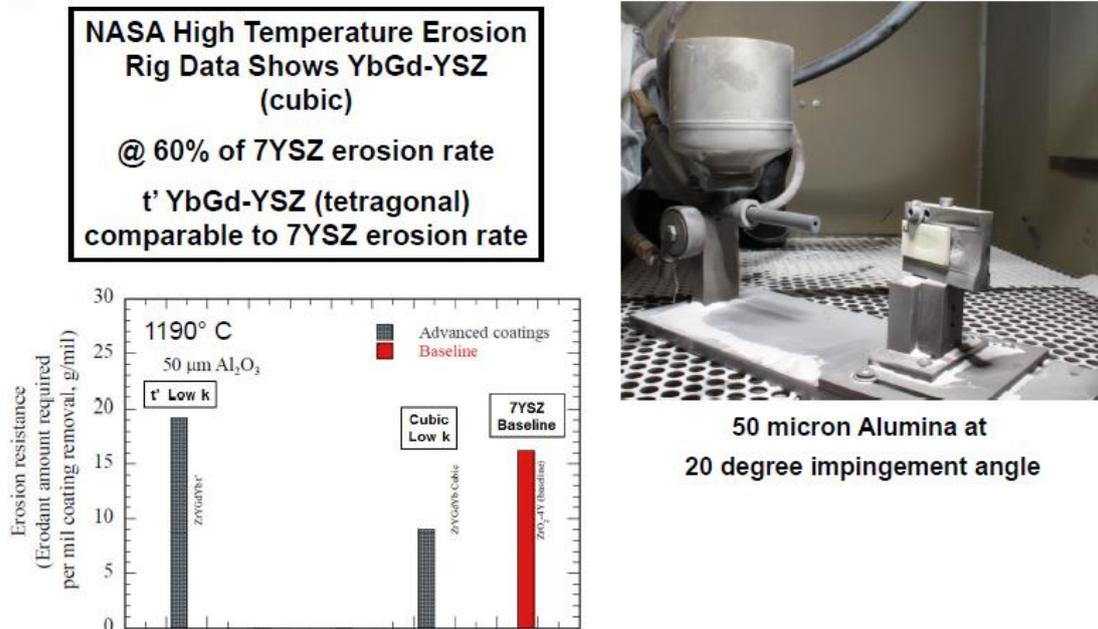


圖 7 氣流沖蝕實驗 ASTM G76

## Thermal Conductivity Measurement Technique

- Thermal diffusivity of the as sprayed and 1400°C / 100hr sintered coupons was determined by the laser flash method in accordance with ASTM E1461
- Specific heat was measured using a Differential Scanning Calorimeter with sapphire as the reference material per ASTM E1269
- Density was determined gravimetrically.

$$k = \alpha \cdot \rho \cdot C_p$$

Where

$k$  – thermal conductivity

$\alpha$  - thermal diffusivity

$\rho$  - density

$C_p$  - specific heat

圖 8 熱傳導率相關實驗 ASTM E1461 及 E1269

## CTS Furnace Cycle Test for Assessing TBC Performance



圖 9 熱循環實驗

PCRT 全稱(Process Compensated Resonance Testing)，又稱製程補償共振測試，是一種非破壞檢測方法，其原理是透過量測待測物體的共振頻率，來確認物體是否有缺陷。影響待測物共振頻率的因素分為三大項：幾何、材料、損壞缺陷，幾何為待測物的尺寸、直徑、形狀、質量分布等；材料為待測物剛性、彈性常數、密度、成分、晶粒尺寸、相分布等；損壞與缺陷為待測物之龜裂、疲勞、孔洞、老化、應力狀態等。

非破壞檢測為不破壞待測物進行檢測的方法，常見的非破壞檢測方式有目視(VT)、超音波(UT)、渦電流(ET)、磁粒(MT)、液滲(PT)、射線(RT)等檢測方式，各檢測方式均有優缺點，每個工件都有適合之

檢測方式，本次參訪學習之 PCRT 技術主要為渦輪機動葉片非破壞檢測應用，圖 10 為 EPRI 整理之各非破壞檢測比較表，可以看到 PCRT 相對於其他非破壞性檢測最大的特色是可以檢測材料之性質，一般來說要確認材料之性質需要將待測物破壞取相關試片進行檢測，待測物破壞之修復或報廢，進行相關處理及實驗，所費不貲且相當耗時，使用 PCRT 蒐集足夠數據後針對材料性質檢測可以有一定之準確度。

1 – Low applicability/capability  
2 – Fair applicability/capability  
3 – High applicability/capability

	UT	ET	MT/PT	RT	PCRT
<b>Defect Types</b>					
Material Property	1	1	1	1	3
Process Variation	2	2	1	2	3
Structural Defect	3	3	3	3	3
Crack Indications	3	3	3	2	2
Porosity/Voids	2	3	3	2	2
<b>Defect Location</b>					
External	3	3	3	1	3
Internal	3	1	1	3	3
Locating Defect	3	3	3	2	1
<b>Economics</b>					
Speed	3	2	2	1	3
Cost	1	2	2	1	3
Training	2	1	1	1	2

圖 10 各非破壞檢測比較表

PCRT 設備照片如圖 11 及 12，主要由 1 個振動產生器及 2 個振動接收器組成，接收器的訊號經轉換後須連接電腦進行比對計算，

PCRT 最重要的是建立待測物之資料庫，透過量測大量新品或良品之自然頻率，找出其關鍵參數，經過統計和機器學習，可以做到評估渦輪機動葉之內部及外部之損壞及缺陷、使用壽命、鑄造缺陷及熱處理變化等。

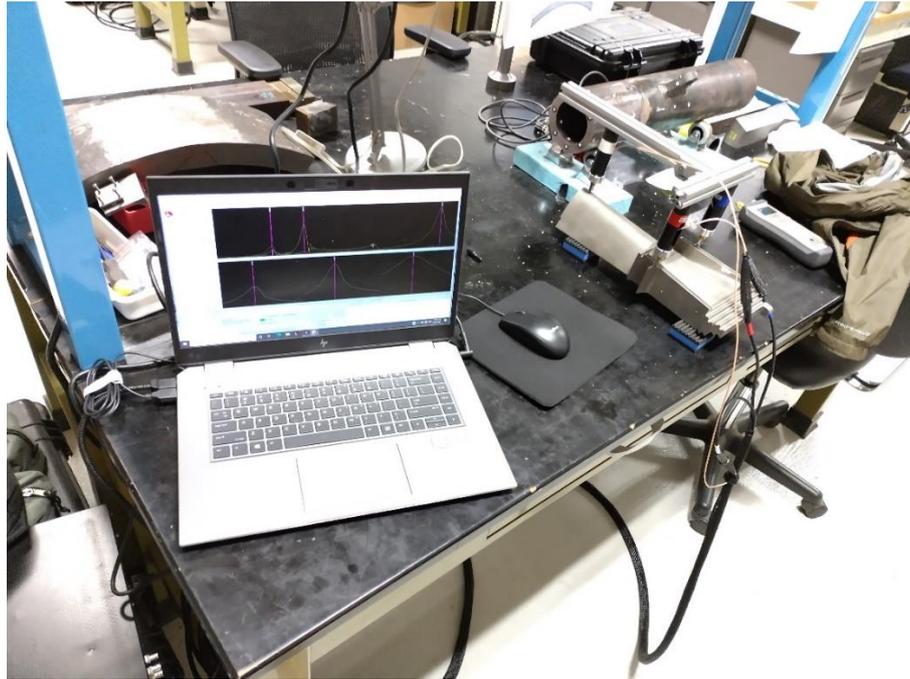


圖 11 學習 PCRT 設備原理

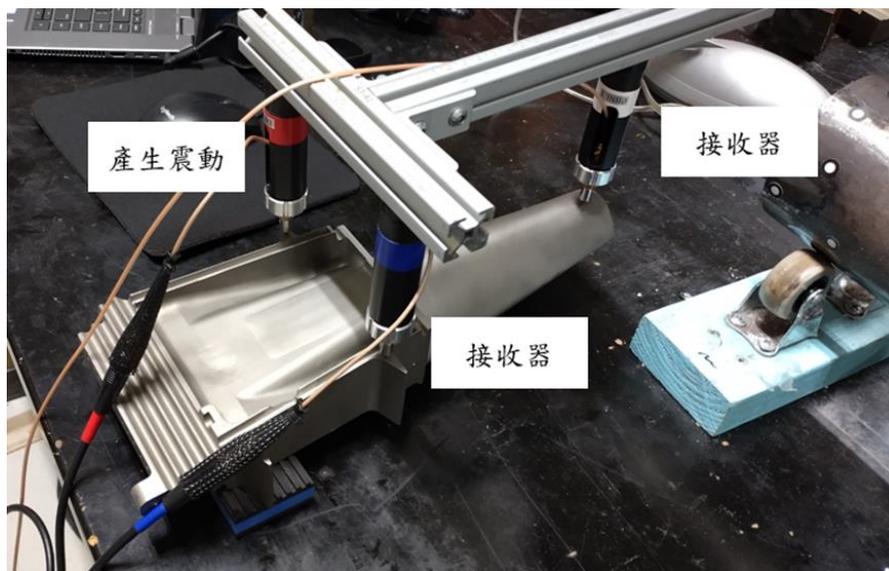


圖 12 PCRT 檢測氣渦輪機動葉照片

本次參訪 EPRI 有提供 PCRT 相關應用之範例，圖 13 為使用 PCRT 檢測動葉，發現其自然頻率與正常葉片不相符，透過內視鏡檢視發現其內冷卻孔流道有堵塞的情形；圖 14 為使用 PCRT 量測新品之葉片、使用後及經維修後之結果，可以觀察到新品葉片經過運轉後其自然頻率發生偏移，但經過維修後其自然頻率與新品相似。

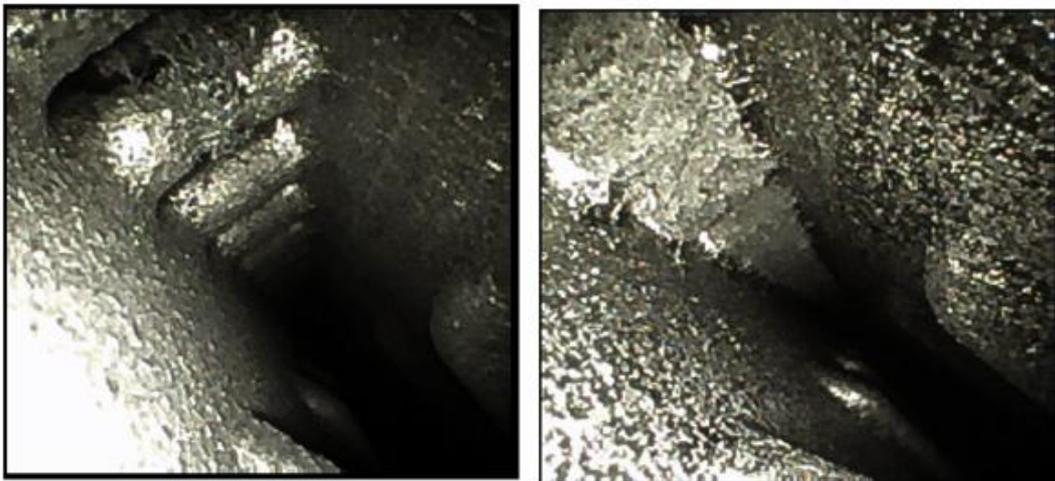


圖 13 左為正常冷卻流道，右為堵塞之冷卻流道

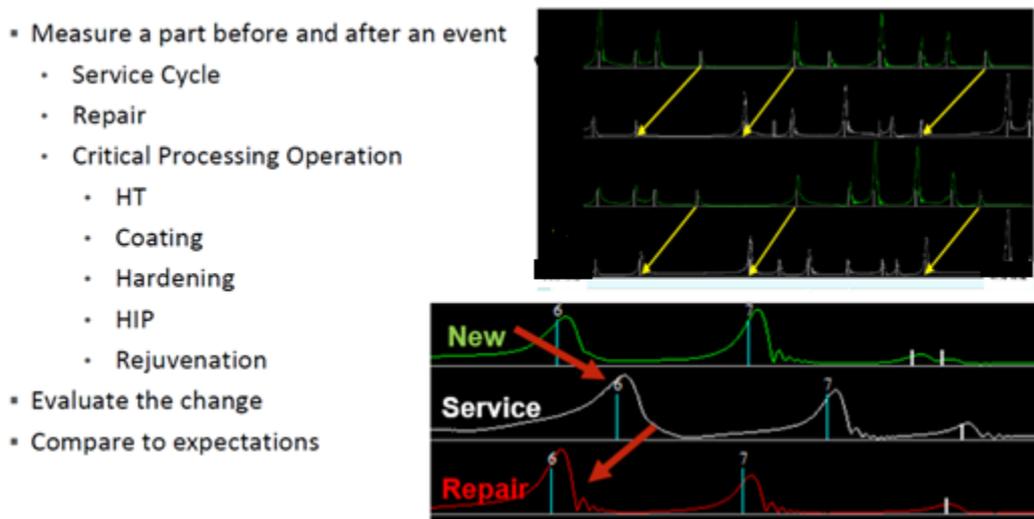


圖 14 動葉運轉前、後及維修後之 PCRT 量測結果

EPRI 夏洛特材料實驗室參觀過程可以看到許多研究實驗設備及正在研究之工件，如潛變試驗機(圖 15)、風洞(圖 16)、萬能試驗設備(圖 17 左)及高溫萬能試驗設備(圖 17 右)，萬能試驗設備可進行抗拉、抗壓、彎曲、疲勞等等實驗；除了研究實驗設備外還有其電廠客戶經壽命評估換下來的氣渦輪機轉子轉盤及使用雷射鐳補配合機械手臂進行 3D 列印的管件等等，從上述設備及相關工件可以看到 EPRI 實驗室研究實驗設備齊全及專業，研究領域先進及廣泛。



圖 15 多台潛變試驗設備

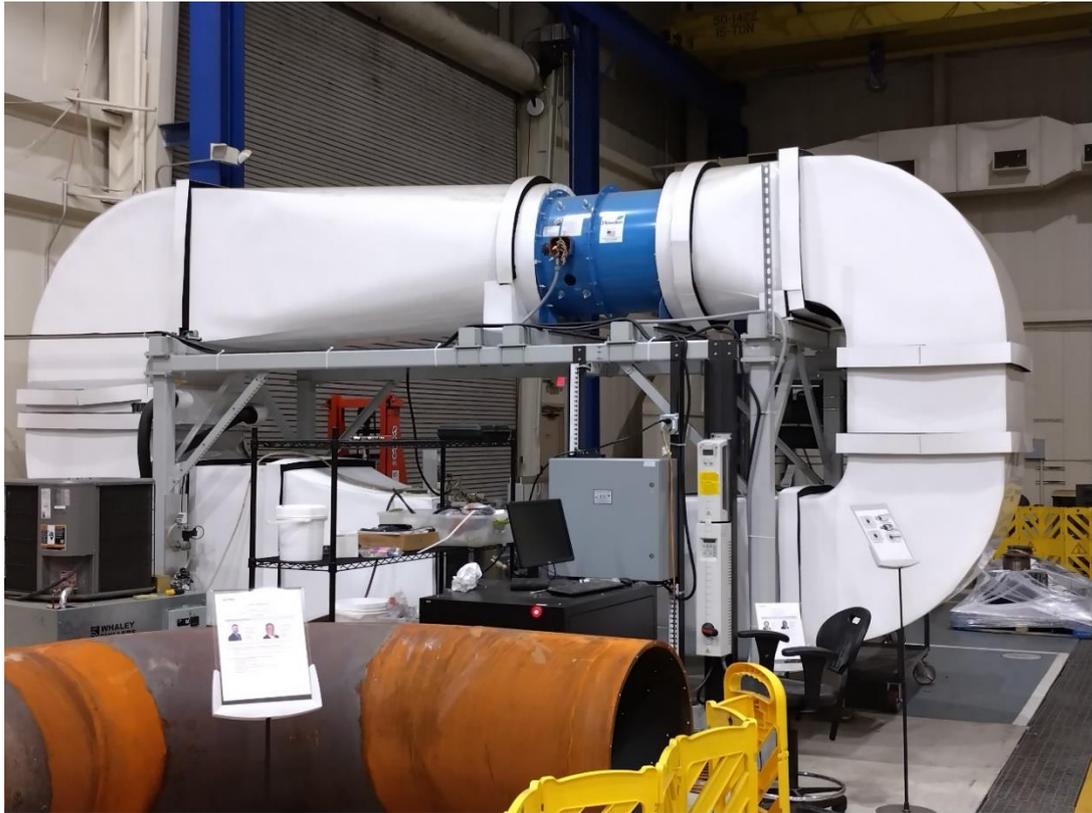


圖 16 風洞



圖 17 萬能試驗設備(圖左)及高溫萬能試驗設備(圖右)

### 三、 美國 GE 公司參訪見證

美國 GE 公司是氣渦輪機製造大廠，機組不斷發展進步，其 HA 級氣渦輪發電機為 GE 公司的主力，圖 18 為 HA 級氣渦輪發電機於全世界運轉及正在安裝數量。本公司未來新型燃氣渦輪發電機約 14 部為 GE 公司 7HA 型號，大潭發電廠#7 的 2 部機為 GE 7HA.02 FL-16、#8、#9 的 4 部機為 GE 7HA.02 FL-18，台中及興達發電廠總共 8 部 GE 7HA.03 型號。GE 公司 HA 級氣渦輪發電機型號相同可升級(如 7HA.02 FL-16 可升為 FL-18)，無法跨型號升級(如 7HA.02 不可升為 7HA.03)，要注意部分氣渦輪機元件升級完成後無法使用升級前之氣渦輪機元件(如 7HA.02 FL-16 升為 FL-18，部分 FL-16 的氣渦輪機元件將無法使用)。

HA GT Installed Base

Updated 28 Apr 2023

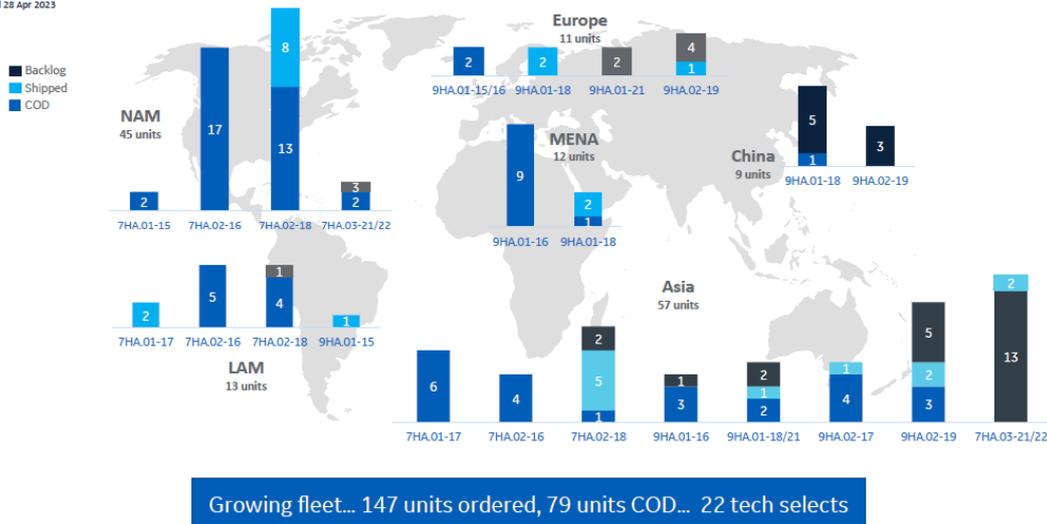


圖 18 HA 級氣渦輪發電機於全世界運轉及正在安裝數量

本次參訪 GE 公司有提供 7HA.02 FL-18 相對於 FL-16 的差異，其中 FL-18 提升了燃氣溫度、改良絕熱塗層(TBC,Thermal Barreir Coating)及加強冷卻、燃氣渦輪段第 4 級動葉增加冷卻並擴大轉軸軸頸直徑，燃燒組件部分更新軸向燃料分級系統(Axial Fuel Staged)，可更好控制軸向火焰，減少 NOx 生成、增強燃燒器冷卻使其更耐用、增加紊流器(turbulators)以提高熱傳、改善絕熱塗層；燃氣渦輪段各級動葉及靜葉部分大部分會改善絕熱塗層及冷卻相關的改善，其中第 3 級動葉使用 low K 塗層改善頂端冷卻、第 4 級動葉因燃氣溫度提高，增加冷卻；燃氣渦輪段各級葉片覆環(shroud)改善冷卻及間隙(clearances)。

### 3.1 GE 公司格林維爾氣渦輪機研發中心及製造工廠

本次參訪美國 GE 公司的第一站為位於南卡羅萊納州格林維爾 (Greenville, South Carolina) 的研發中心及製造工廠，主要任務為大潭發電廠#7 氣渦輪機轉子 Spacer Zero 龜裂破斷面見證，另外參觀氣渦輪機製造工廠、氣渦輪機燃燒組件實驗室、先進製造中心。

氣渦輪機製造主工廠主要從事新品氣渦輪機動葉、靜葉、燃燒噴嘴等相關組件的製造與組裝、大尺寸元件(轉子、外缸等)的加工、修復、除新品製造外 GE 公司於維修服務中心提供有需求的客戶進行葉片再生，動葉及靜葉的再生分別在不同區域，此外，燃燒組件主要於燃燒組件工廠製造與維修。

主工廠規模龐大，各產線動線規劃合理，帶領我們參觀的產線管理幹部對產線上所能見到的元件能詳述其特色，其介紹氣渦輪機改善為動葉旁加工能與 Spacer 配合的凹槽，可將高溫燃氣阻隔在外，除了可以提升燃氣渦輪機的效率以外，還可以減少葉根部分的冷卻處理；在葉片新製的部分，發現其冷卻流道使用深孔放電進行加工，加工完成後會依據需要進行水氣流試驗，確認葉片冷卻流道無阻塞問題。

後續跟著解說員參觀氣渦輪機轉子部件的製造及維護，在參觀的過程中，了解 GE 公司的氣渦輪機轉子是由多個轉盤(disk)以螺栓固定鎖在一起，各種大部件在工廠中等待加工及組裝，並可發現正在加

工的轉子部件、等待安裝的空壓段轉子轉盤、HA 系列 Spacer Zero 新品、已經安裝葉片的 7HA.03 空壓段轉盤以及正在進行安裝測試的台中電廠 7HA.03 燃氣渦輪機(圖 19)；在主工廠內，除了 HA 級的燃氣渦輪機工件外，還有許多不同裝置容量的燃氣渦輪機工件，工廠能依訂單時程進行製造排程，可見管理非常有效率及有條理，為智慧工廠之重機加工應用。



圖 19 正在進行安裝測試的台中電廠 7HA.03 燃氣渦輪機

GE 公司維修服務中心主要參觀氣渦輪機動葉及靜葉的維修與再生，動葉與靜葉分別在不同區域，參觀時主要維修再生的葉片以 FA 級為主，現場產線規劃完整流暢，各製程工作區域相鄰，一個製程完成後旁邊就是下個製程，對於客戶委託再生葉片保護完善，可見其細心及用心。

燃燒組件工廠主要是新製與維修燃燒組件，本次參觀主要以燃燒組件的 Unibody 為主，參觀過程中，發現 7HA.02 及 7HA.03 的燃燒組

件最大的不同是其燃料噴嘴，7HA.02 使用的是 DLN-2.6 燃燒筒，採用六個噴嘴設計配合旋流器，7HA.03 使用的是 DLN-2.6e 燃燒器，採用 Micromixer 噴嘴，該噴嘴部分元件採用 3D 列印製造，此噴嘴使燃料與空氣具有優良的混合，相較於使用旋流器，Micromixer 噴嘴出口速度較高有助於減少火焰回火的風險。

GE 氣渦輪機燃燒組件實驗室主要進行燃燒組件的測試，將一組燃燒器放入設計好的設備內，並於燃燒器各個位置安裝好所需的感測器，在參觀的時候可以看到控制室的監視器有觀察燃燒試驗時燃燒器內部火焰情況的實時影像；先進製造中心主要介紹葉片內流道的設計與創新、絕熱塗層、冷卻孔加工及燃氣渦輪機組件的 3D 列印，先進製造中心內部許多金屬 3D 列印設備及用於切割列印完成工件的 CNC 線切割設備，從參訪過程中可知 GE 公司投入大量資源於金屬 3D 列印上並應用在燃氣渦輪機先進組件製造之趨勢。

### 3.2 大潭發電廠#7 氣渦輪機轉子 Spacer Zero 龜裂破斷面見證

大潭發電廠 GT#7 於 111 年進行轉子停機檢修時，發現其中一部機氣渦輪機轉子 Spacer Zero 有徑向轉周向之龜裂、112 年發現另一部機其 Spacer Zero 邊緣有徑向龜裂，兩者龜裂樣態相似。

氣機轉子隨即安排運回 GE 公司美國南卡羅萊納州格林維爾氣渦輪機研發中心及製造工廠進行 Spacer Zero 的更換；另一部氣機轉子將包含龜裂部分之 Spacer Zero 塊材切下來寄回格林維爾氣渦輪機研發中心進行分析；本次出國主要任務為大潭發電廠#7 氣渦輪機轉子 Spacer Zero 龜裂破斷面見證，取得大潭氣機轉子 Spacer Zero 破斷面相關資訊，分析破損肇因以便擬定防範與改善對策。

本次見證在格林維爾的氣渦輪機技術中心(GTTC)材料實驗室，使用高倍率立體顯微鏡及掃描式電子顯微鏡(SEM)搭配能量散佈光譜儀(EDS)進行觀察分析，分析見證項目為大潭 GT#7 氣機 Spacer Zero 破斷面；除了使用顯微設備進行破斷面的觀察外，GE 公司提供 Spacer Zero 硬度測試結果、殘留應力試驗結果、Spacer Zero 材料出廠報告等資料供本公司參考。

### 3.3 奇異公司遠程監測與診斷中心

本次參訪美國 GE 公司的第二站為位於喬治亞州亞特蘭大 (Atlanta, Georgia) 的監控與診斷中心 (Monitoring & Diagnostics Center)，監診中心主要工作配合世界各地有需求的發電廠，提供 24 小時全年無休的運轉連線數據監控，使用機器學習等數位工具分析機組的運轉資訊，根據監診系統警告提供可能造成的原因及其解決方式，如有任何問題，可致電至監診中心，圖 20 為世界各地的 GE 監診中心，位於不同時區，工程團隊隨時可以協助客戶解決問題。

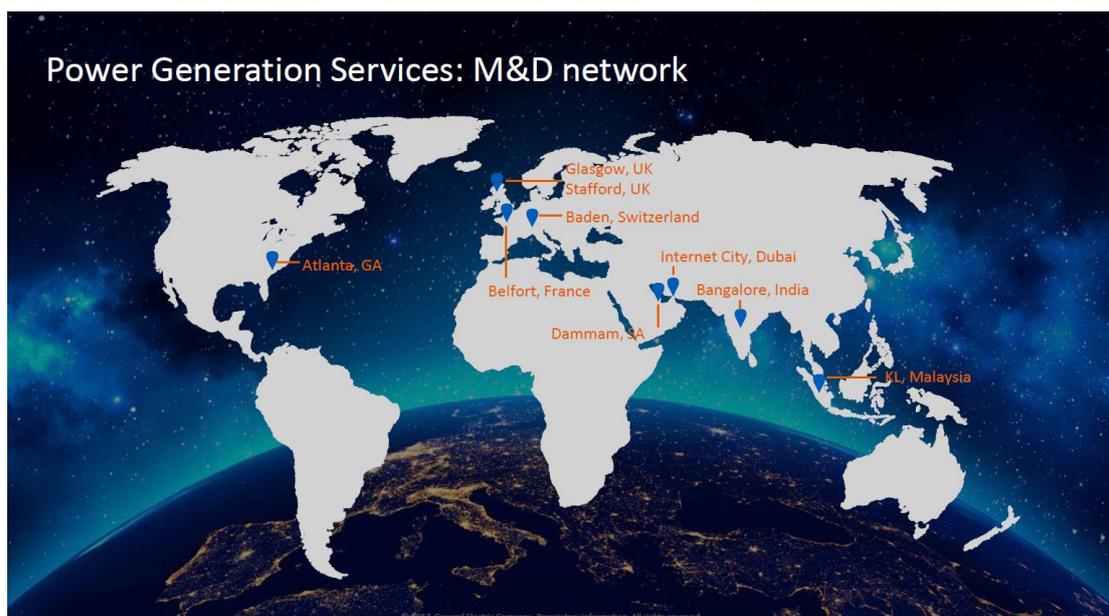


圖 20 世界各地的 GE 監診中心

GE 公司監診中心結合電廠設備監診服務推出資產績效管理系統 Asset Performance Management (APM)，相較於監診服務依設計及經驗進行分析，APM 系統則是以監診服務之設備運轉資料投入機器學習，預警事故發生前可能的潛在問題，可以依需求構建更好的監診方案。

監診中心以設計值資料加上運轉警報值作為監控邊界，其將各運轉資料傳回後經轉化成動態曲線，軟體自動監控運轉數據是否接近邊界，若由正常軌跡偏離，若有則出示警報，監診中心人員則接手判別及必要時洽設計部門澄清是否停機檢修，其優點是將大數據轉成圖表，且又建立動態曲線(依時間、或運轉變量)追蹤，以設計值作邊界可縮短判定的時間，提升反應精確度。

### M&D Infrastructure



圖 21 監診之架構

GE 公司針對燃氣渦輪機、蒸氣渦輪機、發電機安裝感測器進行監測，APM 系統整合設備各位置之振動、壓力、溫度等相關運轉資訊，警示設備可能的故障及未來可能發生的故障，可達到增加電廠機組效率及可靠度、降低發電成本之功效。

在本次拜訪中，GE 監診中心有提供監診發現的相關案例，案例一為客戶氣渦輪機壓縮機軸承於冷啟動時振動增加，GE 監診中心發現

後建議監測振動變化，如果振動幅度超警戒值，建議關閉機組進行檢查，本次監診發現之處置防止氣渦輪機壓縮機可能造成機組損傷的影響；另一案例為監測發現客戶壓縮機壓力比低於下限，GE 監診中心電廠建議監測壓力比變化，如果數值保持穩定，降低之壓力比可能是積垢影響，建議清洗壓縮機，本次及早發現壓縮機性能下降並給予客戶相關建議。

#### 四、心得與建議

本次出國研習先進燃氣渦輪機之維護及監診技術研習讓我獲益良多，隨著燃氣渦輪機效率提升，運轉溫度隨之提升，為使葉片在高溫嚴苛環境下運轉，需要從材料、絕熱塗層、冷卻設計各方面進行提升，隨著各廠家逐漸將單晶葉片使用於燃氣渦輪機組中，詳細了解單晶葉片之特性，評估其維修後再使用之可能性，可節省公司大量購置新品之費用；先進絕熱塗層亦為需要提升之一環，了解其測試方法並找出最適合的塗層，依機組運轉設計條件選用，除了延長熱元件壽命外，還可增加機組運轉之效率及可靠度；PCRT 讓人驚豔的是其透過量測動葉之自然頻率，即可確認葉片內外側是否有損傷及缺陷，此外經過運轉及熱處理之自然頻率改變都可以量測出來，應用前需要大量之新品或良品之葉片建立相關資料庫，為非常先進及可靠之非破壞檢測技術。

GE 公司為世界知名燃氣渦輪機製造商，本公司未來至少有 14 部 HA 級先進燃氣機組運轉，本次研習參訪其氣渦輪機工廠，了解氣渦輪機從零開始加工組裝測試直至完成出貨，就像製造陸上大型飛機引擎相同，讓人興奮不已，工廠產線規劃完整流暢，接待解說專業專責，並逐漸將 3D 列印應用燃氣渦輪機之相關組件，可以想像未來只要有 3D 列印及後續製程相關設備，傳送圖紙後即可製造所需元件，不需

等待加工製造及運送時間，節省大量相關成本；在監診中心部分，GE 公司詳細的介紹其電廠線上監診及資產績效管理系統，了解監診系統之大致架構，監診系統對機組事故肇因調查、機組維護早期預警、機組性能評估等都有所助益，可降低機組事故率、提升可靠度並於問題出現時第一時間提供相關處置建議供電廠運維人員及時解決問題之參考，為預防事故發生之機制。

## 五、參考資料

- [1] EPRI P217 團隊提供參訪相關資料簡報。
- [2] 張智信撰，三菱機組 F3 UPGRADE 及 FMK8 燃燒器等維護實習
- [3] GE 公司提供參訪相關簡報。
- [4] 張穎潮撰，氣渦輪機組運轉維護研討會。