

出國報告（出國類別：實習）

先進燃氣渦輪發電機運維技術
及電力組件備品再生測試技術研習

服務機關：台灣電力公司

姓名職稱：鐘震洲；機械資深研究專員

派赴國家：美國

出國期間：112 年 11 月 12 日至 11 月 20 日

報告日期：113 年 1 月 11 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運維技術及電力組件備品再生測試技術研習

頁數 27 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：

鐘震洲/台灣電力公司/綜合研究所/機械資深研究專員/(02)8078-2219

出國類別：1 考察 2 進修 3 研究 4 實習 5 其他

出國期間：112.11.12~112.11.20 出國地區：美國

報告日期：113 年 1 月 11 日

分類號/目

關鍵詞：先進燃氣渦輪發電、鴨子曲線、峽谷曲線、催化排放、轉子壽命管理、推力軸承、OPTIM、熱元件維修

內容摘要：(二百至三百字)

本次出國研習，至位於北卡羅來納州的夏洛特地區，前兩天參加 EPRI 舉辦之先進燃氣渦輪發電機用戶運維技術研討交流，後兩天分別參訪 Duke Energy 公司位於夏洛克的備品及測試中心，以及 Liburdi 公司位於夏洛克的電力組件備品維修工廠。

在 EPRI 的兩天研討交流，共進行了大約 13 場的不同主題的研討交流，包含發電領域碳減排對美國淨零排放的探討、電力機組的知識及運轉歷程資訊平台、不同減排催化劑(Catalyst)的操作特性、先進重型氣渦輪機的新設計功能、電廠機組事故之原因及處理過程分享等議題。

結束先進燃氣渦輪機組運維技術的實習研討後，之後兩天觀摩兩家電力組件備品、測試與再生維修工廠之營運策略，作為本公司燃氣渦輪發電機維護、運轉及熱元件再生研究之精進參考。

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、 先進燃氣渦輪發電機用戶運維技術研討.....	2
三、 參訪 Duke Energy.....	19
四、 參訪 Liburdi Repair Center	22
五、 心得與建議.....	26

一、 出國緣由、行程及主要任務

燃氣渦輪發電為目前台灣發展綠電之重要橋接電力來源，藉由參與先進燃氣渦輪機組之用戶群年會並實際走訪備品、測試與再生維修工廠，以務實了解世界各地在先進燃氣渦輪機組之操作知識、大修、新品與再生品之品管資訊，以提供建立本所核心技術之需要。

本次出國期間自 112 年 11 月 12 日至 11 月 20 日，扣除去回程之搭機與轉機時間，實際於美國北卡羅來納夏洛特之研習天數為 4 日。美東時間 11 月 14 日~11 月 15 日為參加 EPRI 舉辦之先進燃氣渦輪發電機用戶運維技術研討交流，11 月 16 日參訪 Duke Energy 公司位於夏洛克的備品及測試中心，11 月 17 日參訪 Liburdi 公司位於夏洛克的電力組件備品維修工廠。

此次出國研習的主要任務為透過實習研討先進燃氣渦輪發電機運維技術並蒐集相關技術資訊，並觀摩兩家電力組件備品、測試與再生維修工廠之營運策略，作為本公司燃氣渦輪發電機維護、運轉及熱元件再生研究之精進參考。

本次出國案件係應用 112 年度出國計畫第 72 號，出國核定書為 1120721 號，人字第 1128140638 號函。

二、先進燃氣渦輪發電機用戶運維技術研討

此次兩天的技術研討由美國的EPRI (Electric Power Research Institute)舉辦，議程包含有：(1) Leading Economy Wide Carbon Reduction：The Practical Potential of Energy Supply Resources；(2) Aging Workforce & Business operations；(3) Catalytic Emissions Technology；(4) Rotor Life and Risk Assessment；(5) Life Management of Advanced Class GT Rotors；(6) Initial Experiences and Inspection Technology；(7) Outage Oversight；(8) 3rd Party Outage Support；(9) Loss Prevention Voice of the Insurer Panel Discussion and Roundtable；(10) First Stage Turbine Stationary Parts；(11) Hot Section Fall-out and Heavy Cyclic Operation Challenges；(12) U21 Thrust Bearing Failure Outage；(13) Resource and Parts Availability Challenges；(14) H-Class Risks Consolidation Discussion；(15) Vacuum Pump and Cycle Chemistry Issues Overview。

由於此技術研討大部分為EPRI會員(電廠或電力相關顧問)之分享，部分內容多屬會員間之交流而不宜公開之資訊，故以下僅就部分主題進行整理。

(一)引領整個經濟體的減碳：能源供應資源的實際潛力[1]

自從1893年在世界博覽會第一次將”電力”曝光後，社會對電力的依賴不斷地增加。直到如今，電力占美國最終能源(最終使用時消

耗的能源)約20%以上。在2005年至2022年之間，美國的電力產業領先其他產業，將CO₂的排放量減少了35%，使整個經濟體的年度能源相關排放量在此期間減少了18%。主要是原因轉向碳強度較低的發電方式(風能、太陽能、天然氣)以及提高能源轉換效率。此外，運輸工具和供暖電氣化程度的提高亦使社會對電力的依賴日益增加，同時進一步減少CO₂的排放量。

研討會中有以一張曲線圖來說明過去這十年來再生能源(風能+太陽能)對整體電力供需的影響。如圖1[1]，是美國的加州獨立系統營運商(CAISO)某服務地區，於2013年、2018年及2023年春季時每日扣除再生能源(風能+太陽能)後的供電負載曲線，可解讀為：

- (1) 在2013年，太陽能和風力的發電量佔比還很小，所以傳統發電機組(燃煤、燃氣、核能、水力)幾乎都可以穩定在整個春季的日夜運行。另外，有少數機組(通常是為高峰設計的)要滿足晚間高峰需求而運轉。
- (2) 到了2018年，太陽能+風能的使用量於春日中午時達到整體需求量的一半，而形成了所謂的鴨子曲線(Duck Curve)。系統商必須靈活調度傳統機組以滿足此需求模式。
- (3) 時間推移到今年2023年春季，由於更多的再生能源投入，原本的鴨子曲線於中午時段繼續往下壓縮至趨近於零，該曲線可稱為峽谷曲線(Canyon Curve)。此意謂著系統商的傳統發電機組

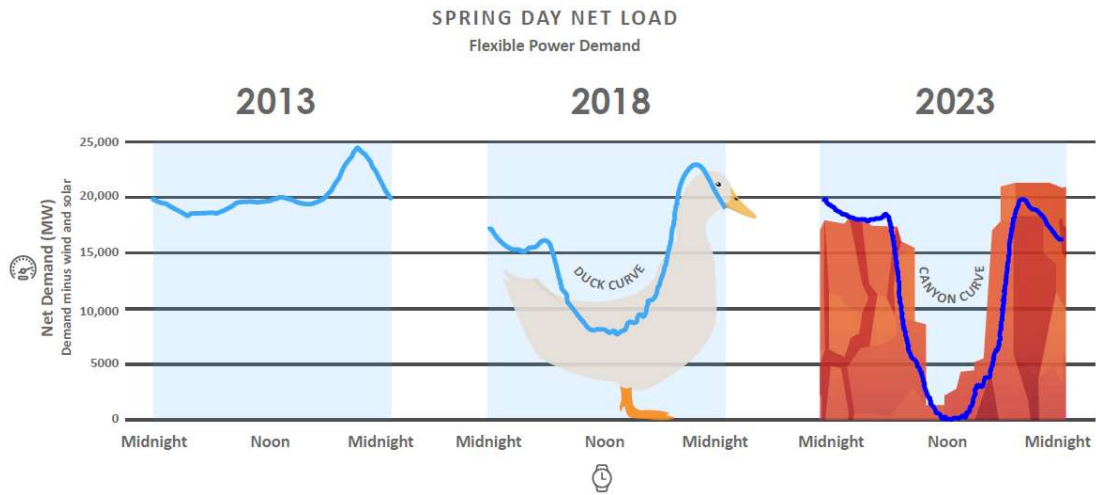


圖 1 美國的加州獨立系統營運商(CAISO)於 2013~2023 年春季之平均每日供電負載曲線(扣除風能、太陽能發電)[1]。

必須與時俱進升級為起停迅速、高發電量、高穩定性的特性，這也可以解釋在未來全球2050淨零排放實現前，先進燃氣渦輪發電機組仍扮演重要的穩定供電角色。

在美國，伴隨著一些人呼籲更快的潔淨能源轉型，早期在可靠性和彈性挑戰顯而易見。整個美國能源系統所面臨的系統可靠性挑戰，相關事件或因應作為舉例來說[2]：

- (1) 美國聯邦電力法案緊急授權—暫時取消營運限制以確保可靠性。此作為在過去兩年中頒布的次數與二十年前一樣多[3]。
- (2) 北美電力可靠性公司(NERC)最近的季節性評估，評估了滿足預估季節性高峰需求所需的發電資源和輸電系統的充足性，並確定了可靠性風險不斷增加的區域[4]。
- (3) 2022年Elliott冬季風暴在美國東部造成了廣泛影響。美國電網營運商PJM 發生了近47GW的強制停電。田納西州、北卡羅來納州和肯塔基州都因發電量不足而經歷了首次輪流停電。每次停電事件都造成大約1~2GW的電力需求在 12 小時內被減載。2021年Uri冬季風暴襲擊德克薩斯州時，其極端氣候導致三天內降載20GW（連續停電 70 多個小時）。這兩場風暴對電力系統之外造成了毀滅性影響，總共造成近 300 人死亡，並造成數十億美元的維修費用。在Uri冬季風暴的案例中，電網在 4 分鐘內就完全崩潰，但需要數週時間才能恢復。

討論到美國現有與新興能源技術，未來兩者都需要低碳支持。現有能源技術只能推動產業在經濟淨零排放的道路上前進，儘管新興低碳能源技術的開發加速，但許多未來可能的能源解決方案仍處於全面開發的早期階段。從再生能源到先進的模組化核能、混氫技術到碳捕捉封存（CCS），需要一整套現有和新興的能源供應技術來使淨零的未來成為可能。從過去的歷史可看出，實施新能源供應技術需要採取深思熟慮、分階段的方法來大規模驗證和部局。而目前實現淨零排放的新興技術尚還無法達到廣泛推廣所需的規模或成本。

有數種能源供應技術正在開發中，是有可能幫助實現本世紀中期(2050年)的淨零排放目標。其核心挑戰是縮小技術成熟度差距（圖2[1]同列圖塊區間的空白區域），即新興低碳技術與當今電力系統上的現有技術之間的差距。無論未來技術涉及碳捕捉、先進核能、氫能或任何一系列新興資源，都需要更多的工作和投資來聚焦這個未來願景。

(二) 催化排放技術

此議題由Environex公司的代表進行簡報及引領大家討論，主要討論以CO與SCR為催化劑的各種實驗數據分享。包含NO₂/NO_x的比例升高時對NO_x的轉換效率影響，結論是當NO₂/NO_x的比例超過50%時SCR催化劑的性能會顯著下降。也有實驗數據來說明CO催化劑阻

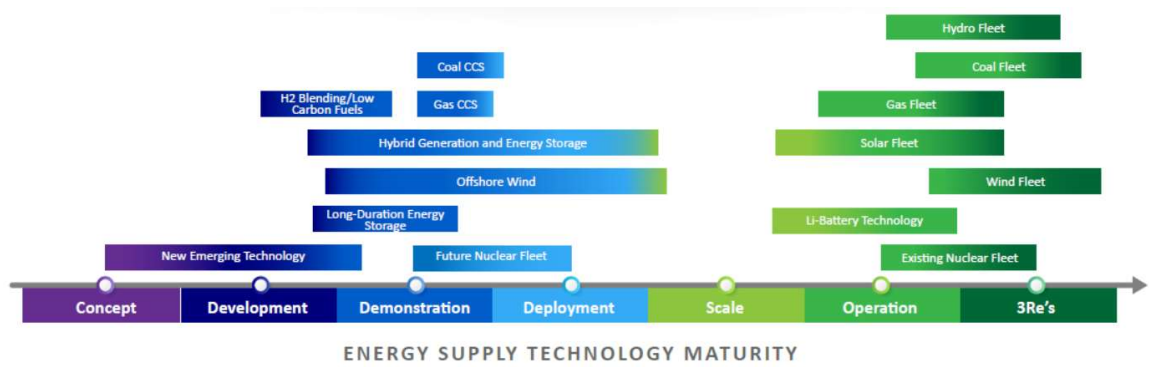


圖 2 各種現有與新興能源技術的成熟度及差距[1]。

塞時對SCR性能的影響，以及證明AIG清潔後可提升SCR性能。

最後有提到未來以氫或氨來作為替代燃料時的各項優缺點，將資訊整理為表1，其中對Environex公司較需要關注的是當以氨作為替代燃料時，NO_x的生成濃度將會超高而需要對SCR系統進行大改造。

(三)轉子壽命和風險評估

燃氣渦輪轉子的壽命是由根據許多參數進行定義的，其中包含材料特性、幾何設計以及設備操作模式。本次的發表主要是介紹當代GE最新的H級以及MHPS最新的J級渦輪機，通稱為「先進重型燃氣渦輪機(The advanced heavy duty gas turbines.)」，也會相互比較它們的新設計特徵以及相對於前一代F級有如何的改變。最後也提到目前EPRI對轉子壽命的評估方法以及正在進行的轉子材料試驗計畫。

先進重型燃氣渦輪機的性能數據可以概括為：(1)氣流量 \geq 2000lbs/sec (907kg/sec)；(2)總發電功率 \geq 500Mw (複循環機組)；(3)渦輪段的入口溫度接近3092°F (1700°C)；(4)空氣壓縮比約在20：1到25：1之間；(5)單循環機組效率 \geq 42%。此類先進渦輪機也會針對複循環的應用進行優化，因此通常結合複循環的總效率可以達62%以上。

對於機組的進步演化，不同的原廠通常會有不同的前後代設計思維，以EPRI的觀點，MHPS會保持連貫較一致，GE會有較多跳脫變化，Siemens則是偏向連貫和跳脫兼具。以GE來看，從MS5001開

表 1 以氫氣或氨氣為替代燃料的各項比較。

比較項目	替代燃料的選擇	
	氫氣	氨氣
運輸	<p>1、H₂ 的洩漏率比天然氣高 3 倍。</p> <p>2、高壓氫氣對現有管路的安全性。</p>	<p>相較沒有問題。</p>
儲存	<p>1、世界上最大的液態氣罐：1,250,000 加侖。</p> <p>2、可存於地下鹽穴。</p>	<p>相較沒有問題。</p>
NO _x 的生成	<p>H₂ 和天然氣混合比 1:1 時，NO_x 含量增加達 30%。</p>	<p>NO_x 含量高達 10,000ppm，需要對 SCR 系統進行重大改造。</p>

始的轉子設計轉變最快，譬如：(1)開始採用螺栓將動葉輪圈(Wheel)鎖固；(2)較高運轉溫度輪圈的材質選用；(3)在空壓段開始使用可更換葉片的組裝方式；(4)渦輪機級數的重新優化。以Siemens的HL等級和MHPS的J或JAC等級來看，相對的兩家廠商的轉子設計較趨一致，譬如：(1)有類似的組合方式；(2)可現場更換空壓段葉片；(3)渦輪機級數都是為4級。

在整體渦輪段Wheel和空壓段Disc的組裝(Assembly)設計，不同廠商採用的不同設計思維，常見的方式有：(1)單一貫穿螺栓(Single through-bolt)；(2)環形陣列貫穿螺栓(Array of circumferential through-bolt)；(3)拉緊螺栓搭配間隔輪(Tie bolts & spacer wheels)；(4)曲線或賀氏聯軸器(Curvic or Hirth couplings)；(5)槽口與干涉配合(Rabbit and interference fit)。

GE在上述輪盤的組合設計歷史，可觀察到原本在7F系列是採多螺栓連結策略，在升級到7EA後是採用槽口干涉+螺栓的方式，但因葉片輪盤(Stage wheel)的槽口在螺栓孔下方，易造成槽口圓角因應力引起的裂縫生成，圖3(a)為示意圖。於是在升級到7HA之後，將間隔輪盤(Spacer wheel)的槽口重新設計在螺栓孔上方如圖3(b)，可以降低槽口圓角的應力，然而相對於FA的設計，可能會降低HA轉子的剛度。

有關輪盤的材料及冷卻方式也進行了分析比較，GE的機組從B和E系列開始就透過空壓段內部抽氣來進行冷卻，近期演進到需要更

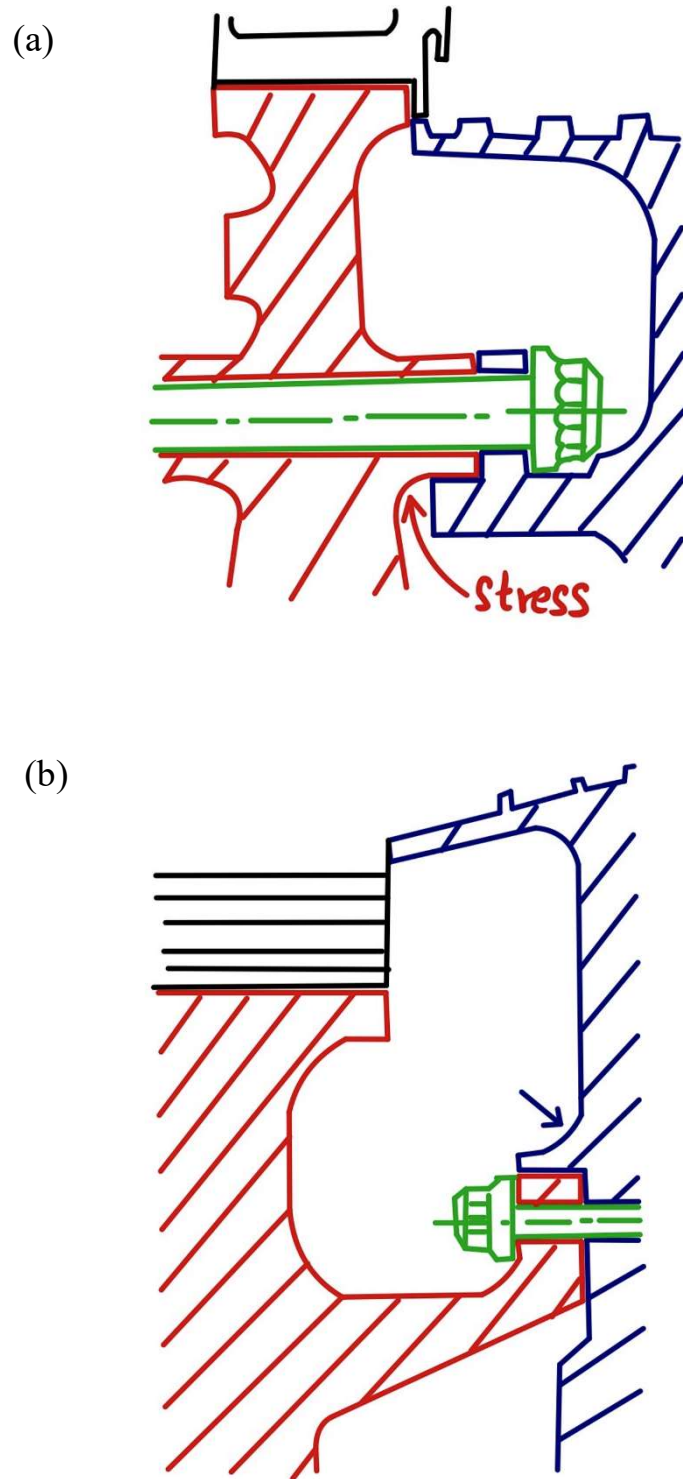


圖 3 GE 不同機型的葉片輪盤與間隔輪盤組裝示意圖：(a) FA 系列；(b) HA 系列。

高工作溫度的新機組時，就會把輪盤的材料由CrMoV鋼升級為IN706，原本的方向性凝固動葉也會升級為單晶動葉。至於Siemens和MHPS，對於需要更高工作溫度的新機組，所採用的技術策略是將抽至外部的大量壓縮空氣進行強制冷卻至400~500°F (204~260°C)，再輸送至渦輪段進行葉片內部冷卻，也因此允許在先進機組繼續沿用舊設計的輪盤與葉片材料，此意謂先進機組更需依賴冷卻方案來保護高溫級數的靜葉和動葉。

在空壓段葉片的組裝方式演進歷程，Siemens和MHPS早期就開始採用了在現場(on-site)可更換葉片的設計；GE在7F.03機型之前是整支轉子要運回工廠進行拆解與檢查、更換葉片，後期在H及HA機型也開始應用在現場可更換葉片的設計。

各廠家於渦輪段的級數及設計想法也是有差異。從F級機型以來，Siemens和MHPS都倚賴4級數的動靜葉設計，也採用更大且堅固的輪盤(相較於Spacer的設計)來支撐每一級葉片；而GE先前都是以3級數的設計為主，在H及HA機型開始採用4級的動靜葉設計，相鄰動葉級數之間的Spacer輪盤的設計則是在E-B級機型開始導入，沿用至目前最先進的H及HA機型。

統整以上資訊，可以發現各廠家一些明顯的設計理念，包含最大限度的利用新技術、盡量沿用先前機型的成功設計經驗、提供靈活的檢查與維修方式等，將彙整的資訊內容分類整理為表2說明。

表 2 各廠家不同設計理念之分類說明。

廠家	設計理念		
	最大限度的利用新技術	沿用先前機型的成功設計經驗	提供靈活的檢查與維修方式
GE	<p>1.有系統性的將轉子的材料由 CrMoV 鋼提升至 IN706。</p> <p>2.葉片使用單晶材料。</p> <p>3.空壓段往渦輪段的內部冷卻流道強化設計(較少依靠外部冷卻)。</p> <p>4.最後採用 4 級渦輪段設計來提升發電量。</p>	<p>導入 Spacer 輪盤，使得對拉緊螺栓的依賴更多。</p>	<p>在最新的機型，明顯的減少空壓段的級數，以確保在現場(on-site)拆卸更換動葉片的空間。</p>
Siemens	<p>最先採用 4 級渦輪段設計來提升發電量。</p>	<p>1.歷代機型的轉子材料幾乎相同，以保留過往設計及運轉實務經驗。</p> <p>2.貫穿螺栓搭配曲線或賀氏聯軸器(Curvic or Hirth couplings)的使用來緊密連接相鄰的輪盤。</p> <p>3.空壓段往渦輪段較倚賴外部冷卻來提供較低溫度的冷卻空氣。</p>	<p>較早提供空壓段與渦輪段可在現場拆卸更換動葉片的設計。</p>
MHPS			

有關Siemens和MHPS不同機型的轉子重量、長度也有提出比較說明。圖4為以公制單位重新整理過之比較圖，可以淺顯看出Siemens和MHPS轉子的長度和重量會隨著機組的演進而增加。值得注意的是，MHPS轉子的長度增長為近1.5倍，而重量增加為近3倍；Siemens轉子的長度增長為近1.3倍，而重量增加為近2.2倍，用以提供接近500MW的發電量(SGT 8000HL及M701J/JAC)。

(四)先進渦輪氣機轉子的壽命管理

重型燃氣渦輪機的歷史可以追溯到1930~1950年代，是由航空用渦輪機改製而成，只有前後兩個軸承，輸出功率約僅4MW，壓縮比6:1，單機效率約17%，CDT(Compressor Discharge Temperature; 空壓段末級出口溫度)約只有171°C。表3為重型燃氣渦輪機的性能發展歷史，由於運轉溫度提升以及轉子大型化的需求，不同年代有影響轉子壽命的主流因素生成，譬如在1960~1970年代主要是鍛造的品質，1980~1990年代為材料磨耗問題，1990~2000年代左右為高週疲勞及低週疲勞(或Hold Time Fatigue)，2000年之後再加入材料高溫潛變等問題，這使得先進渦輪氣機轉子的壽命管理越來越重要。

(五)某電廠分享先進燃氣渦輪機推力軸承事故處理過程

美國賓州一個私人企業的發電站，在2022年春末夏初某日發生GT某個推力軸承異常跳機的事故。他們立即調閱triplog、DDR和OSM

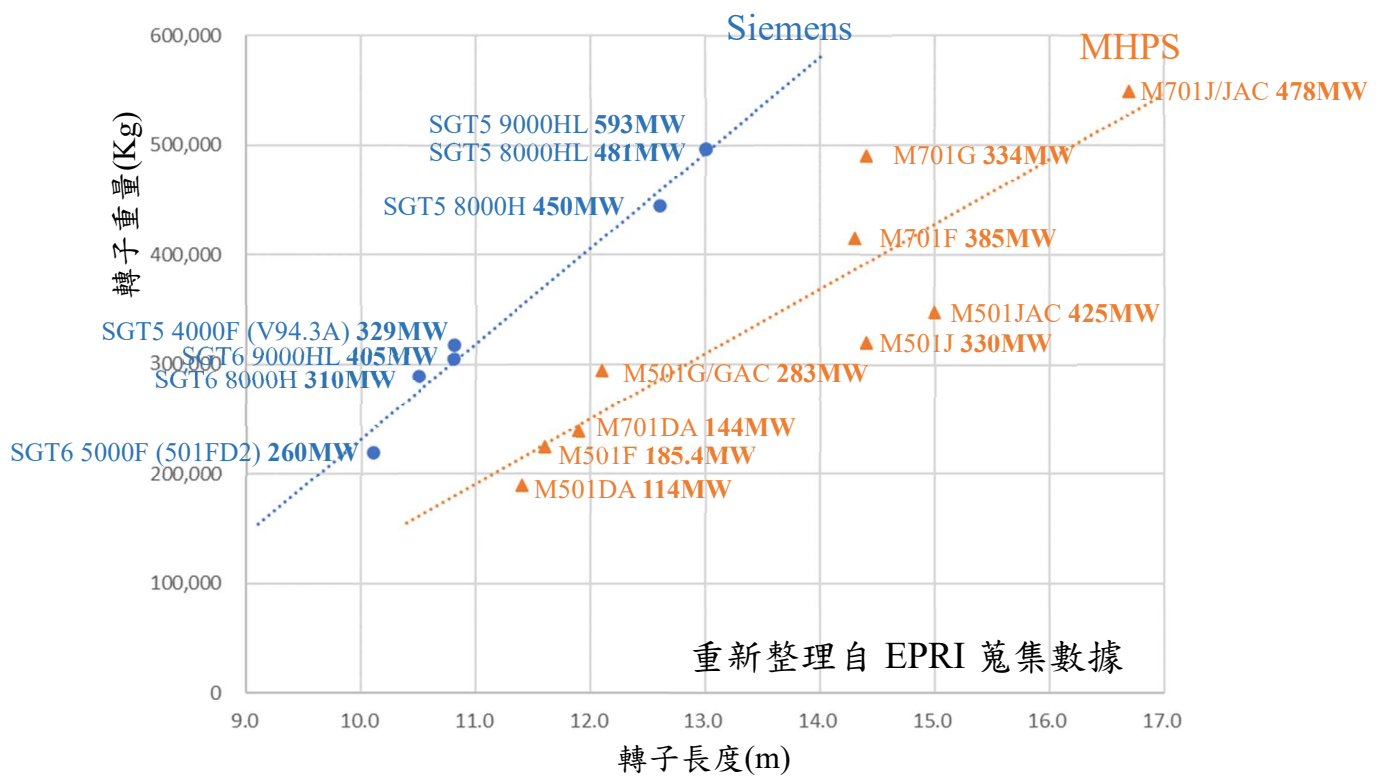


圖 4 Siemens 與 MHPS 不同機型的轉子長度與重量分佈圖。

表 3 重型燃氣渦輪機性能發展歷史。

年代	輸出功率(MW)	壓縮比	單機效率(%)	CDT(°C)
1930~1950	4	6:1	17	171
1960	35	10:1	28	249
1970~1980	80 (60Hz) 120 (50Hz)	13:1	33	302
1990	170 (60Hz) 260 (50Hz)	17:1	36	371
2000	180 (60Hz) 290 (50Hz)	18:1	38	399
2000 中期	240 (60Hz)	19:1	39	413
2010	350 (60Hz) 450 (50Hz)	22:1	42	454
2020	440 (60Hz) 550 (50Hz)	24:1	44	466

的合併曲線圖，發現GT轉軸在跳機前半分鐘左右有瞬間軸向位移超過推力軸承的最大間隙47mil(約1.2mm)。後來再調閱推力軸承的溫度曲線，發現推力軸承金屬溫度在跳機前曾異常升溫到約370°C，跳機發生時溫度升至約1600°C，幾乎已達金屬熔點溫度。空壓段末級出口溫度也升高至接近650°C，以內視鏡檢查也發現空壓段末級葉片受損的非常嚴重，但渦輪段的第一級靜動葉都無受損情形，僅於葉片表面有發現大量富含燃料混合物的煙灰。

這起事故發生後4天內完成內視鏡檢查，原廠協助於第14天完成上半內缸開蓋，仔細檢查損傷情形。由於轉子向尾流方向位移，造成末級動葉葉根尾流側被Inner Barrel嚴重磨損，產生大量金屬碎屑而擠壓、破壞末級靜葉與EGV葉片；其餘損傷部位包含止推軸承、止推環、Inner Barrel以及相關Brush Seal。

電廠與原廠討論後，確認大部分損壞的部件有新備品可以更換，唯獨新Inner Barrel需要半年的製造時間。為了盡早恢復供電，原廠提出了一個舊品維修的解決方案，即將受損區域車除並車製鳩尾槽，再客製新的Brush Seal以配合前述鳩尾槽安裝。於是電廠選擇此舊品維修方案，在11月初順利恢復供電。

由於此次事故的主因是推力軸承異常時機組未及時停機，因此此次維修後，原廠針對推力軸承的監測保護進行提升，包含位移偵測加強、增加溫度偵測點及在每一個pad增加load cell以隨時收集運轉的

軸向推力數據。在跳機邏輯也進行改善，當兩個位移感測器同時超標或是其中一個位移感測器+兩個溫度感測器超標時，機組即立即跳脫停止運轉，以避免更大損傷發生。

三、 參訪 Duke Energy

杜克能源(Duke Energy)為美國前幾大電力公司之一，其總部位於北卡羅來納州夏洛特，在美國擁有超過58GW的基載和尖峰發電量，供給電力給美國東南部與中西部地區6個州，總員工人數約二萬九千名，用戶數達七百萬戶以上。

本次參訪地點為位於夏洛特的Duke Energy Lark Warehouse，此倉庫所在地區的前身為燃煤發電廠，在電廠除役後將空出之建築物改為現役燃氣渦輪機的備品中心。根據公司的簡介，目前Duke Energy擁有超過190部燃氣渦輪機組，包含GE、Siemens/Westinghouse、Mitsubishi、Pratt & Whitney等廠牌，機型彙整如表4。

根據討論中的介紹，杜克能源利用內部開發的排程軟體OPTIM (Optimized Planning & Tracking of Interval-Based Maintenance)來進行主要運轉維護活動(CIS、HGPI、MI)的安排以及內視鏡定檢等工作。在內視鏡定檢的過程，電廠端品檢工程師會即時將每一支葉片的照片傳到系統，如果有品質疑慮的葉片，則會請備品中心的資深技術長進行影像再確認，視嚴重程度安排立即或調整下次開蓋大修週期進行更換。

根據表4可見杜克能源有為數不少歷史較久的E型或F型燃氣渦輪機組，因此大修所需更換葉片的來源除了原廠以外，亦積極朝第三方供應商的開發與管理進行。相同的熱元件至少會培養2~3家的第三

表4 Duke Energy所擁有的燃氣渦輪機規模。

廠牌	機型	機組數
GE	6FA.01	3
	7B/EA	61
	7FA.01/02	3
	7FA.03	12
	7FA.04	8
	GT11N	6
	LM6000PC	8
Siemens/Westinghouse	501AA	11
	501D5A	6
	501F/2/3	15
	501F4/5EE	7
	V84.2/3	2
Mitsubishi	501GAC	4
Pratt & Whitney		47

方供應商(美國各地都有成熟的第三方供應商)，主要是以對特定型號的熱元件維修熟練度以及過往品質經驗來做為委託的依據，也因此未必價格低的方案就有優勢。在第三方供應商進行葉片再生的過程中，杜克能源亦會有定期至第三方進行現場品管紀錄確認的行程，視品質狀況來增加或減少抽樣數量。再生後的葉片回到Duke Energy Lark Warehouse後，會以自動化設備再次進行每一支葉片的外形掃描比對工作，最後再進行庫存管理，個別葉片的紀錄也可以在OPTIM系統查詢及進行靈活調撥應用。

四、 參訪 Liburdi Repair Center

Liburdi 公司創立於 1979 年，初期(1980 年代)是以工業用重型燃氣渦輪機的工程服務和零件維修為主，渦輪葉片的再生服務也是在這個時期推出。1990 年代也跨足到了航改型與輕型燃氣渦輪機的先進維修。以上初期 20 年間均在加拿大安大略省發展茁壯。到了 2000 年代，在美國北卡羅萊納州夏洛特成立 Liburdi Turbine Services LLC (即本次參訪地點 Liburdi Repair Center)，擴大燃氣渦輪機維修的服務據點。

在參訪 Liburdi Repair Center 一天的行程中，資深經理介紹目前 Liburdi 在葉片再生領域，服務範圍從材料冶金或破損分析到新技術開發，例如先進銲接和接合方法、再生熱處理和各種保護塗層製程。以下整理 Liburdi 於材料專業與葉片再生相關的技術資訊：

(一) 渦輪機組件壽命評估分析

資深經理提及 Liburdi 曾將相關組件壽命評估的資訊提供 EPRI 編寫並出版”Gas Turbine Blade Life Assessment and Repair Guide”，為業界提供一個可參考的標準。此分析主要將熱氣道組件進行材料金相檢查，包含損傷類型和材料退化程度，以評估其殘餘使用壽命並做出明智且具成本效益的再生維修或更新決定。詳細的檢查項目一般包含有：

1. 氧化或腐蝕的程度鑑別。

2. 塗層的完整度和殘餘壽命。
3. 微觀組織的退化程度。(譬如 γ' 的大小與形貌)
4. 外型尺寸確認。
5. 潛變強度確認。

(二)動葉輪盤(Disc / Wheel)壽命評估分析

裝載動葉片的動葉輪盤不像動葉或靜葉等熱元件須在高溫環境中使用，而是在相對低溫的運轉條件中高速運轉，因此需要關注的問題主要是微小缺陷及應力負荷的影響。類似本所的方法之一，Liburdi 透過發展 3D 建模，並利用有限元素分析技術來預估動葉輪盤的殘餘壽命。

(三)銲接與接合的應用分析

Liburdi 有培養專業人才在從事銲接流程與顯微結構的分析，並且將其應用於客戶所需的航空、航太或先進製造應用。這樣的專業知識有助於快速了解材料冶金的要求，並有能力修改製程參數以在短期內獲得最佳的產品品質。應用範圍包含超合金、鋼材等銲接或披覆等工業應用。

(四)熱元件維修製程規範

制定了提供 EPRI 電力用戶組織使用的詳細維修規範，以確保可接受的品質和耐用度。此類規範除了給燃氣渦輪機用戶參考使用外，亦是 Liburdi 於進行熱元件維修時重要的依據。

(五) 渦輪升級與改造

類似 PSM 公司，Liburdi 也有提供機械與材料團隊從事渦輪重新設計的服務並於其工廠進行修改。通常是透過先進的設計方法與模擬驗證、導入高性能的密封機構、冷卻氣流分配優化、高強度母材與絕熱塗層來達到渦輪機零件壽命延長的主要目的。

(六) 噴塗系統

在 Liburdi Repair Center 有參觀到包含先進漿料噴塗、高速火焰噴鋸、電漿噴鋸等系統。另根據 Liburdi 官網較新的資訊，這裡的漿料噴塗是指漿料擴散鋁化物塗層，在此類漿料加入一些額外的改質元素，噴覆後的葉片再透過熱處理調整高溫擴散的溫度和持溫時間，來達到不同性能的需求。

(七) 去除塗層系統

同樣在參觀 Liburdi Repair Center 也有看到酸洗去塗層系統，根據產線經理的解說，此套設備的每一槽溶液是專門為去除不同 650MCrAlY 或鋁化物塗層所設定的特定配方。

(八) 單晶葉片維修技術

Liburdi 有發展一套全固溶的再生熱處理流程(FSR；Full Solution Rejuvenation)，詢問專案經理以及從官網與文獻[5]得到的資訊，針對單晶葉片的母材使用壽命強化，通常會利用熱均壓製程先將微細缺陷或潛變孔洞消弭，並於熱處理時將溫度會提升至全固溶溫度(γ' 完

全溶入基相的溫度)以上，再進行各種溫度與時間的 γ' 析出控制。文獻中有提及單晶葉片如果表面有殘留應力，可能導致於進行全固溶的再生熱處理時形成再結晶晶粒，這些再結晶晶粒或是雜散晶粒會導致高溫疲勞壽命和應力破斷強度降低，在 OEM 廠家是無法通過合格允收的標準[6-8]。有些研究也有指出若再結晶區域的在運轉溫度 $\leq 650^{\circ}\text{C}$ 的根部表面時，對先以珠擊處理的單晶葉片進行全固溶的再生熱處理流程是可行的，因為該區域的主要損傷機制不是潛變，而是高週波疲勞[9]。

綜合以上資訊，單晶葉片的再生處理是可行的，但是需要有相對高階的處理對策及非破壞檢測方法並行應用。

五、心得與建議

本次出國研習，透過與 EPRI 及 GE、Siemens、MHPS 用戶之間的交流，學習吸收許多有關先進燃氣渦輪機組運維知識。在第 2 天研討會結束前，我們也參觀了 EPRI 的實驗室，包含金相、機械性質、高溫氧化循環、高溫潛變等試驗機台。印象深刻的是光高溫潛變設備就有四五十台以上，用以加速完成冗長的潛變試驗。

另外，EPRI 的公開資訊有與外界合作開發金屬 3D 列印的靜葉片，據了解由於金屬 3D 列印的材料強度、殘留應力情形與傳統鑄件仍有不同，所以金屬 3D 列印靜葉的中空部位設計、內膽設計、組裝方式會與傳統鑄件不一樣，本所未來開發類似產品時亦可參考類似之思路。

在第 4 天參觀 Liburdi Repair Center 的工廠時，有注意到他們針對鐸線的分類管理非常確實，為避免員工拿錯鐸線造成維修品品質不良，每卷不同材質的鐸線都個別安放於清楚標示的捲軸，旁邊也有掃描器掃描工單的 QR code 以雙重確認取料正確，餘料回收桶也都清楚標示材質名稱，以避免混料污染。以上的雙重確認方式都可以做為本所相關研試工作的參考作法。

六、 參考文獻

1. EPRI White Paper, September 2023.
2. NYISO (2023). What's an Installed Reserve Margin & How Does it Support Reliability?
3. DOE's Use of Federal Power Act Emergency Authority.
4. North American Electric Reliability Corporation. Reliability Assessments
5. Justin Kuipers, "Practical experience with full solution rejuvenation of single crystal gas turbine blades", IAGT, 2017.
6. Goldschmidt, D., Paul, U., and Sahm, P.R. Porosity Clusters and Recrystallization in Single-Crystal Components. Proceeding of Superalloys 1992 Conference, Warrendale, PA, USA, TMS, pages 155-164.
7. Burgel, R., Portella, P.D., and Preuhs, J. Recrystallization in single crystals of nickel base superalloys. Proceedings of Superalloys 2000 Conference, Seven Springs, PA, USA, TMS, pages 229-238.
8. Zhang, B., Liu, B., Lu, X., and Jiang, T. Effect of Surface Recrystallization on the Creep Rupture Property of a Single Crystal Superalloy. Rare Metals. Vol. 29, No. 4, Aug 2010, pgs. 413-416.
9. Kuipers, J., Wiens, K., and Ruggiero, B. Rejuvenation Heat Treatment of Single Crystal Gas Turbine Blades. Proceedings of ASME Turbo Expo 2017. Charlotte, NC, USA, June 26-30, 2017, paper no. GT2017-63698.