

出國報告（出國類別：實習）

氣渦輪機設計安裝運轉維護訓練研習

服務機關：台灣電力公司

姓名職稱：邱俊賢 核火工處 汽機組 主冷凝器審核專員

派赴國家：美國

出國期間：113年9月22日至113年10月20日

報告日期：113年11月29日

行政院及所屬各機關出國報告提要

出國報告名稱： 氣渦輪機設計安裝運轉維護訓練研習

頁數 23 含附件：☐是☒否

出國計畫主辦機關/聯絡人/電話

台灣電力公司/翁玉靜/02-23667685

出國人員姓名/服務機關/單位/職稱/電話

邱俊賢/台灣電力公司/核能火力發電工程處/汽機組主冷凝器審核專員/02-23229566

出國類別：☐1 考察☐2 進修☐3 研究☒4 實習☐5 其他

出國期間：113.9.22~113.10.20 出國地區：美國

報告日期：113 年 11 月 29 日

分類號/目：能源/國家發展及科技

關鍵字：複循環機組 (Combined Cycle Unit)、氣渦輪機 (GT, Gas Turbine)、乾式低氮燃燒 (Dry Low NOx Combustor)、冷卻及氣封系統(Cooling and Sealing Air)、可變進氣導向葉片 (VIGV, Variable Inlet Guide Vanes)、潤滑油系統(Lube Oil System)、空壓機水洗系統 (Compressor Water Wash System)

內容摘要：(二百至三百字)

2025國家能源政策以展綠、增氣及減煤為主軸，複循環燃氣機組被視為推動能源轉型的重要工具，因其燃燒天然氣產生的二氧化碳排放量低，且具快速啟機和停機特性，能有效提供電網調度能力，並維持電網穩定，故複循環機組將能有效支持國家長期經濟發展之重任。

本次實習課程地點位於奇異公司在美國休士頓的訓練中心，為期1個月的基礎訓練，內容涵蓋氣渦輪機的運轉和維護，包括氣渦輪機及附屬設備，以及日常維護、大修週期概述等；除課堂講授外，由講師帶領參觀該中心之訓練工廠。

本實習報告期望能讓參與設計審查、施工、運轉及維護人員瞭解廠家設備之設計理念及機組特性，並提供操作運轉、安裝維修等之參考。

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

目次

壹、	實習目的.....	4
貳、	實習行程資訊.....	4
一、	實習行程.....	4
二、	實習地點.....	4
三、	實習講師.....	4
參、	實習內容.....	5
一、	氣渦輪機.....	5
二、	潤滑油系統.....	15
三、	空壓機清洗系統.....	17
四、	空壓機結垢檢測方式.....	20
肆、	心得及建議.....	22
伍、	參考文獻.....	23

壹、實習目的

為因應未來台灣電力系統整體需求，配合政府計畫擴大使用天然氣發電之政策，及提升大潭電廠營運績效及競爭力，大潭電廠增建燃氣複循環發電計畫擬於大潭發電廠內增建總裝置容量288~316.8萬瓩之複循環燃氣機組，提供北台灣地區穩定充裕電力，並配合國家長期經濟發展之重任。

本次出國實習赴美國奇異(GE VERNOVA)公司研習新建複循環機組(Combined Cycle Unit)之氣渦輪機(GT, Gas Turbine)運轉及維護相關基礎知識及實施方式，更希望透過本次實習了解氣渦輪機之新技術，藉由課程中與講師交流理解原廠設計理念。期能將原廠講師教授有關運轉及維護相關知識彙整提供參與設計審查、施工、運轉及維護人員參考，以利合約及建廠工程順利執行。

貳、實習行程資訊

一、實習行程

起始日	迄止日	地點	工作內容
113/9/22	113/9/22		往程（台北－休士頓）
113/9/23	113/10/9	GE VERNOVA Houston Learning Center	7HA.02 Gas Turbine Operation
113/10/10	113/10/18	GE VERNOVA Houston Learning Center	7HA.02 Gas Turbine Maintenance
113/10/19	113/10/20		返程（休士頓-台北）

二、實習地點

本次實習地點位於美國德州休士頓市之 GE VERNOVA 公司訓練中心(HLC, Houston Learning Center)，8800 Wallisville Rd, Houston, TX 77029)，HLC 為 GE VERNOVA 公司進行員工及客戶訓練之主要機構。

三、實習講師

課程	期間	講師
Gas Turbine Operation	113/9/23~113/10/9	Stephen Brasseaux
Gas Turbine Maintenance	113/10/10~113/10/18	Stephen Brasseaux

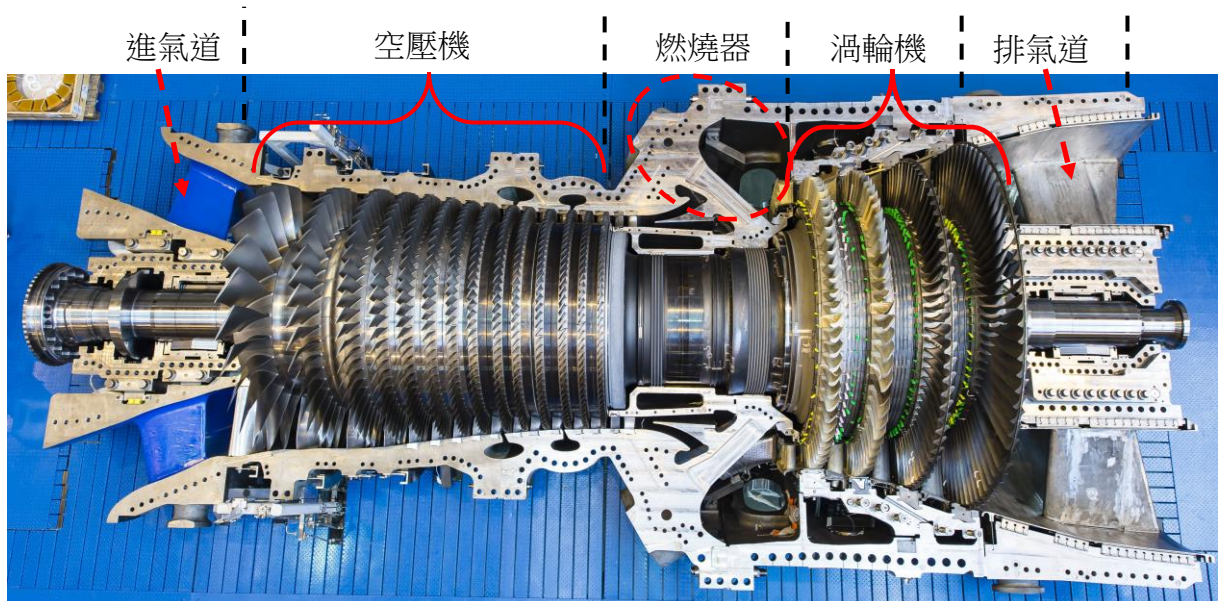
參、實習內容

大潭電廠增建然氣複循環發電計畫之#8及#9號機兩部複循環機組，於108年2月12日由美商奇異公司及日商丸紅公司組成之統包聯盟得標，每部機組裝有兩台7HA.02型氣渦輪輪機和一台汽輪機，2對1複循環單機裝置容量約1,100MW，淨熱效率高於61%。本文將針對奇異公司所設計、生產之7HA.02型氣渦輪輪機及部分輔助設備進行介紹。

一、氣渦輪機

氣渦輪機的組成主要包含以下六個系統，如圖一所示：

1. 進氣道(Air inlet)
2. 空壓機(Compressor)
3. 燃燒器系統(Combustion System)
4. 渦輪機(Turbine)
5. 排氣道(Exhaust)
6. 支撐系統(Support System)



圖一、氣渦輪機主要組成系統

方向定義：本文所述之氣渦輪機的前端、後端、右側和左側皆根據以下之定義；氣渦輪機的空氣進口是前端，而排氣是後端，右側和左側是根據站在前端，向後看的方向去定義。

(一) 進氣道

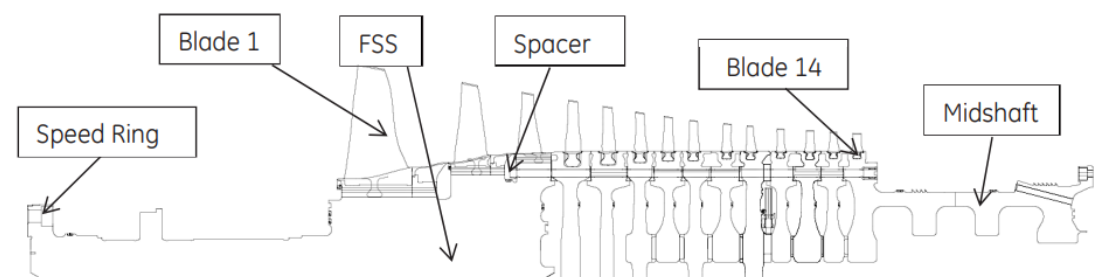
空氣由進氣道吸入，通過空壓機、燃燒器和氣渦輪機的路徑，將空氣壓縮、燃燒及推動氣渦輪機轉動，燃氣最終經由排氣道排出。

(二) 空壓機

7HA.02之空壓機為軸流式空壓機(axial flow compressor)，此空壓機由14級之動、靜葉片組成，壓縮比為 21：1。空壓機主要由轉子和機殼組成。在空壓機機殼內有1級可變進氣導向葉片 (VIGVs, Variable Inlet Guide Vanes)、3級可變靜葉片 (VSVs, Variable Stator Vanes)、各級動葉片(Rotor Blade)和靜葉片(Stator Blade)、出口導向葉片和空壓機出口擴散器等。在空壓機內，空氣經由14級葉片逐級壓縮；動葉片提供壓縮每級空氣所需的力，靜葉片引導氣流以適當角度進入下一級動葉片。壓縮後的空氣通過空壓機擴散機殼 (compressor diffuser casing)排入燃燒室。空壓機內之壓縮空氣亦用於渦輪機冷卻。

1.空壓機轉子

空壓機轉子是由葉輪(wheels)、速度偵測環(speed ring)、前短軸(FSS, forward stub shaft)、拉緊螺栓(tie bolts)、空壓機轉子葉片(compressor rotor blades)和中軸(MidShaft)等組成，如0二所示。



圖二、空壓機轉子組成

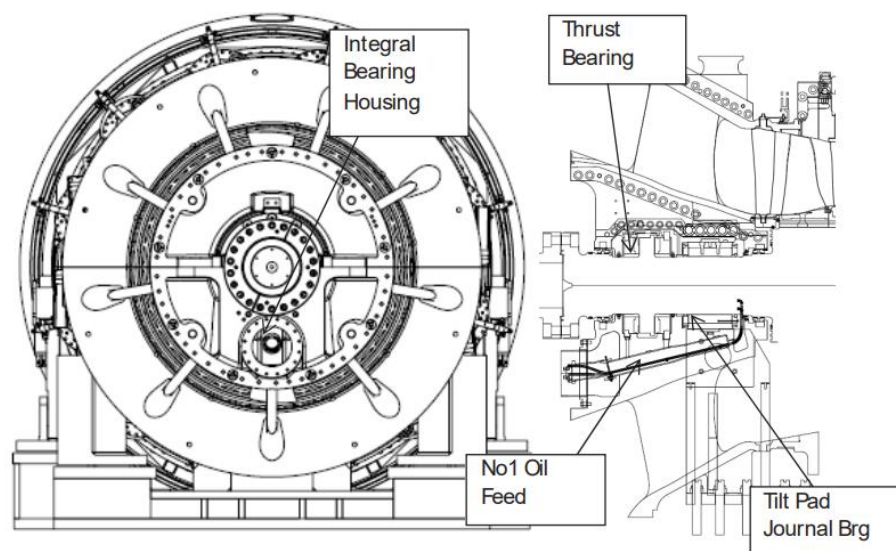
2.空壓機機殼

空壓機機殼構成燃氣渦輪機的主要結構，提供轉子支撐於軸承點上，並構成空氣流道的外壁，該機殼可以水平分解為上蓋及下蓋，以便於維修。空壓機機殼由三個主要部分組成：

- (1) 進氣段機殼 (Inlet Casing)
- (2) 壓縮段機殼 (Compressor Casing)
- (3) 排氣段機殼 (CDC, Compressor Discharge Casing)

(1) 進氣段機殼

進氣段機殼位於燃氣渦輪機的前端，其主要功能是將空氣均勻地引入空壓機並提供1號軸承支撐，如圖三所示。上半部之機殼通過法蘭和螺栓連接到下半部之機殼。由九個翼型的徑向支柱將內部喇叭口(inner bellmouth)定位及支撐於外部喇叭口(outer bellmouth)上。可變進氣導向葉片(VIGVs)位於進氣段機殼的後端，通過驅動器和連桿組件的控制環和葉片臂機構進行定位，這些葉片的位置(指 VIGVs 可動葉片之移動角度)會影響空壓機進氣量，進而影響燃燒室之空燃比。



圖三、空壓機進氣段機殼及1號軸承

(2) 壓縮段機殼

壓縮段機殼包含第1級至第3級的 VSVs 和第4級至第8級的靜葉片。每級 VSVs 通過連接到驅動器的扭矩管和連桿組件的控制環和葉片臂機構進行定位。這些葉片相對於 VIGVs 的位置會影響空壓機氣流的流量和效率。壓縮段機殼的後端有抽氣口，用於將第8級空壓機空氣抽出，用於渦輪機機殼及第3級靜葉片的冷卻，並用於機組啟動和停機過程中之脈動控制 (pulsation control, 亦稱作突波(surge)控制)。

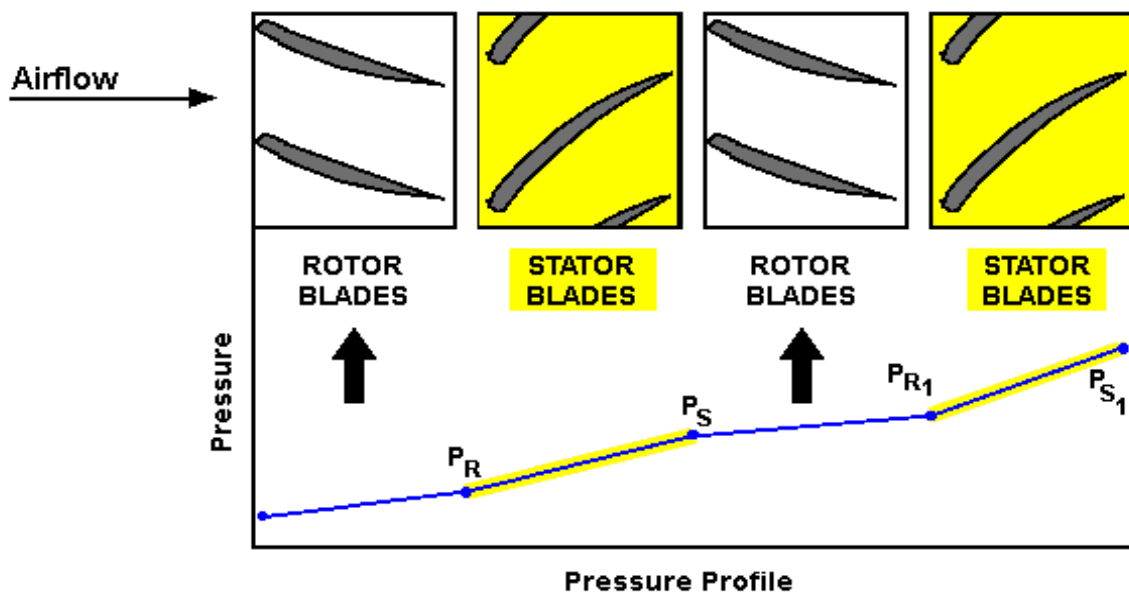
(3) 排氣段機殼

排氣段機殼(CDC)是空壓機的最後一部分，位於整個燃氣渦輪機的中間位置。CDC 包含最後的第9級至第14級空壓機及抽氣口，由第11級空壓機抽出的壓縮空氣，用於渦輪機第2級靜葉片的冷卻。CDC 及其組件形成空壓機擴散部分的流道，並連接空壓機和渦輪機殼體。CDC 也為燃燒器機殼、燃燒筒支架和渦輪機第1級靜葉片(GE 公司習慣將渦輪機靜葉片稱作噴嘴(nozzle))提供支撐。

3.空壓機葉片

空壓機轉子葉片(動葉片)採翼型設計，此種設計可有效地於高速旋轉運動下壓縮空氣。葉片以燕尾樺(dovetail)結構固定在空壓機機輪上。空壓機靜葉片同樣採翼型設計，並通過類似的燕尾樺固定在靜態環段中，用於第4級至第14級以及出口導向葉片 (Exit Guide Vane, EGV)。靜葉片經由靜態環段插入機殼的圓周槽中，並通過機殼水平接縫處的鎖鍵防止其在圓周方向上移動。位於空壓機最前端的 VIGVs 和第1級至第3級 VSVs 通過機殼壁上的耳軸孔(trunnion holes)安裝，使用葉片臂(vane arm)和螺母等組件固定。

空壓機之動葉片提供壓縮每級空氣所需的力，空氣流經動葉片時的壓力增加不多；當空氣經過靜葉片時壓力增加，故各級靜葉片是使壓力提升之主要區域，並引導空氣以適當的角度進入下一級動葉片與靜葉片，圖四為空壓機之壓力變化示意圖。

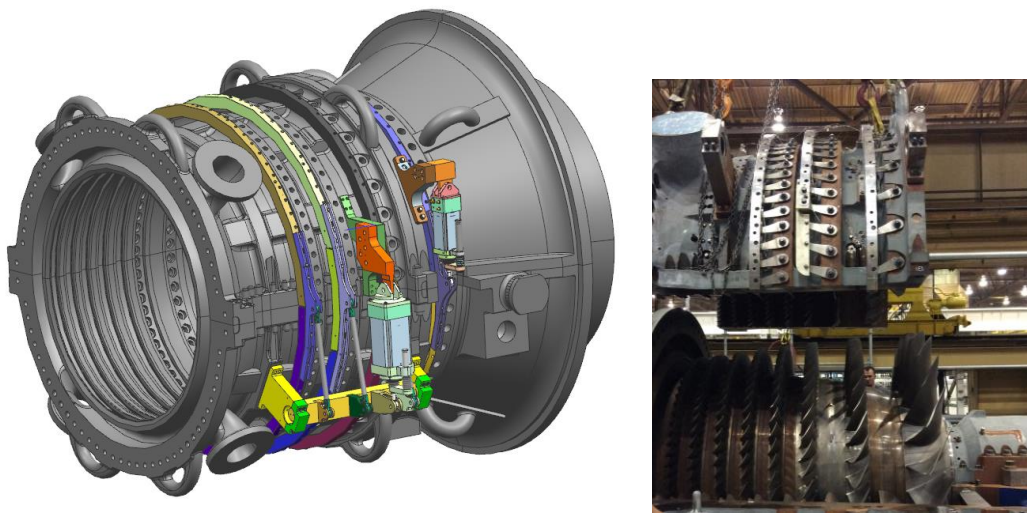


圖四、氣流流經空壓機之動葉片及靜葉片壓力變化示意圖

4.可變進氣導向葉片(VIGVs)和可變靜葉片(VSVs)

VIGVs 為1級可變進氣導向葉片，由兩個電子式驅動器驅動進氣導向葉片轉動，以改變葉片角度。VSVs 亦由兩個電子式驅動器驅動，有3級可變靜葉片，如圖五所示。HA 機組之 VIGVs 及 VSVs 具有以下之功能：

- 調節空氣流量(Regulate air flow)
- 機組啟動和停機過程中之脈動保護 (Pulsation protection during startup and shutdown)
- 非滿載時之排氣溫度控制(Exhaust temperature control at part load conditions)
- 調節空氣流量以增加負荷比(Extended turndown air flow management)



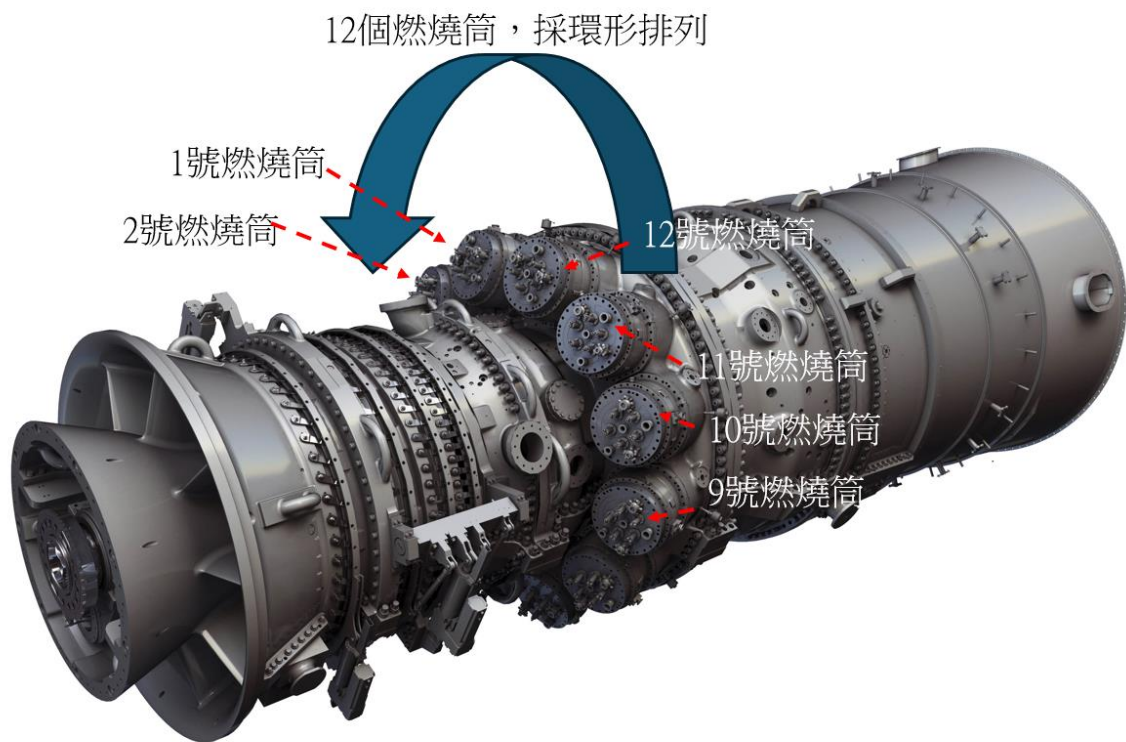
圖五、可變進氣導向葉片(VIGV)和可變靜葉片(VSV)

(三)、燃燒系統

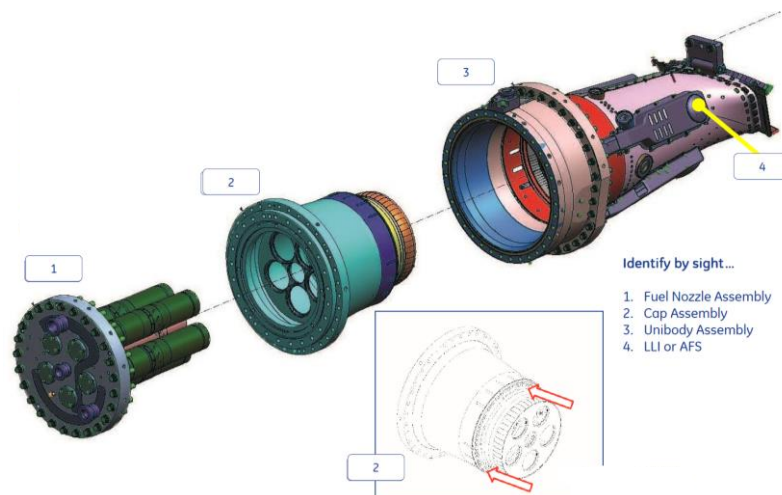
7HA.02之燃燒系統名稱為 DLN2.6+ AFS (Dry Low NO_x Combustor with Axial Fuel Staging，乾式低氮燃燒及軸向燃料分級噴嘴)，為具預混設計之多噴嘴系統，搭配 AFS，可於軸向分階段提供燃料，達到有效控制燃燒溫度，減少 NO_x 生成。此燃燒系統具有十二個燃燒筒，採環形排列。燃燒筒之編號由環形頂部正中偏左開始，以逆時針方向，分別為1號燃燒筒、2號燃燒筒、3號燃燒筒..12號燃燒筒，如圖六。十二個燃燒筒以穿火管 (crossfire tube) 連接，點火器位於2號及3號燃燒筒；另有四個火焰偵測器，分別位於10號、11號、12號及1號燃燒筒。

每個燃燒筒有四個主要組成，分別為燃料噴嘴組成(Fuel Nozzle Assembly)、噴嘴蓋組成(Cap Assembly)、一體化燃燒筒模組(Unibody Module)和軸向燃料分級噴嘴(AFS，Axial

Fuel Staging)，如圖七。



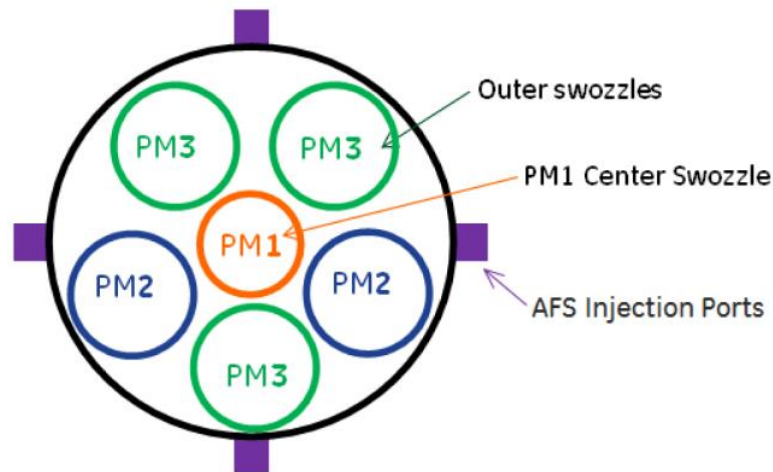
圖六、7HA.02之燃燒系統及燃燒筒排列



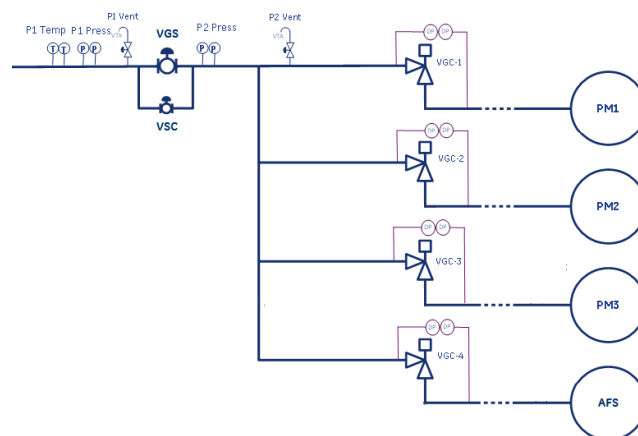
圖七、DLN2.6+ AFS 之燃燒筒組成

每一燃燒筒共有十個燃料噴嘴，如圖八，可分為四個群組，分別為 PM1 (Pre Mix 1)、PM2 (Pre Mix 2)、PM3 (Pre Mix 3)及 AFS，各自皆有獨立之燃料供應系統(進料歧管與控

制閥)，如圖九。DLN2.6+ AFS 燃燒筒之組成排列為一中央噴嘴 PM1，五個噴嘴於外圍環繞中央噴嘴，分別為兩個 PM2噴嘴(鄰近 crossfire tube)及三個 PM3噴嘴，以上每一噴嘴皆具完整之預混功能。預混噴嘴的設計為增進高壓空氣與燃料之混和性與分布均勻性，降低燃燒室內各處之燃燒溫度差異，達到沒有局部特高溫之現象，故有效降低 Nox 排放。AFS 位於 PM1、PM2、PM3之火焰下游，以四個噴嘴分布於一體化燃燒筒之圓周。



圖八、DLN2.6+ AFS 燃料噴嘴組成及排列



圖九、DLN2.6+ AFS 之燃料供應系統圖

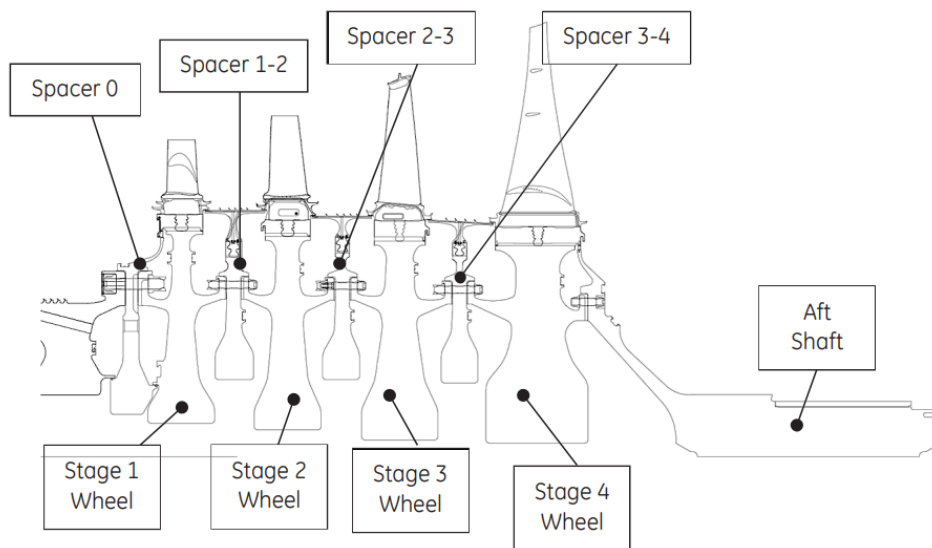
一體化燃燒筒模組(Unibody Module)的設計為以通過外部單套筒引導的空氣進行此腔體的冷卻。該模組的內表面有熱遮塗層，以降低腔體金屬溫度。高壓空氣與經由 AFS 噴嘴預混之燃料燃燒後產生的熱氣通過此模組進入第1級渦輪機靜葉片。

軸向燃料分級噴嘴(AFS)為安裝在一體化燃燒筒身後端的四個噴嘴，目的是實現均勻且可控的熱釋放，於燃燒室下游引入額外的燃料，於達到燃燒溫度的同時，將反應區溫度降到最低，並縮短燃氣滯留時間，從而將 NO_x 的生成量降到最低。

(四) 渦輪機

7HA.02之渦輪機為四級軸流渦輪機，其主要組件有轉子(rotor)、機殼(casing)、排氣框架(exhaust frames)、排氣擴散器(exhaust diffuser)、動葉片(blades)、靜葉片(nozzles)及氣封(shrouds)等。

渦輪機轉子組成包括有渦輪軸、第1級至第4級渦輪葉輪(wheel)組件、間隔器(spacers)、第1級至第4級渦輪葉片及渦輪轉子後軸(AFT Shaft)，如圖十。由於每級燃氣的能量轉換為動能，推動渦輪葉片高速轉動，導致燃氣壓力下降，所以需要增加葉片環形區域的空間以應燃氣膨脹流動，因此從第1級到第4級葉片的尺寸逐漸增加。

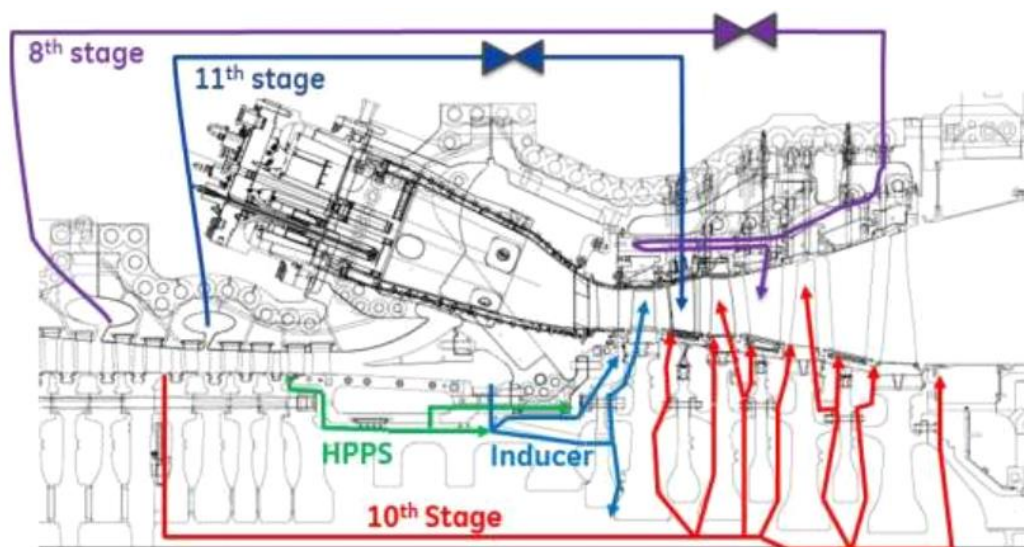


圖十、渦輪機轉子組成

7HA.02渦輪機之冷卻及氣封系統(Cooling and Sealing Air)為透過從空壓機抽取的壓縮空氣進行冷卻及氣封，以延長渦輪機及其葉片的使用壽命。壓縮空氣從渦輪葉輪和定子之間的空間(輪空間，**wheel space**)徑向向外流出，並進入渦輪機之主氣流道。圖十一為渦輪機冷卻及氣封系統空氣流道示意圖。

渦輪機的每個葉輪(**wheel**)上下游都有個空間，壓縮空氣進入此空間以防止熱燃氣逆流進入這些空間。第1級前輪空間由空壓機壓縮空氣空氣冷卻，內部流道以引導器

(inducer)導引壓縮空氣通過中軸和0級間隔器上的孔進入第1級前輪空間，並通過第1級動葉片冷卻空氣孔進入第1級噴嘴後的燃氣流道。其他輪空間都以第10級空壓機經內徑流路抽取之壓縮空氣進行吹驅(purge)，這些空氣流體經轉子上的流道，穿過渦輪葉輪上的空氣通道，進入渦輪機流道。



圖十一、7HA.02渦輪機之冷卻及氣封系統

空氣透過葉片燕尾槽底部的靜壓室引入每個第1級和第2級葉片，如圖十一。它流經精密鑄造的蛇形通道，並透過翼型表面、尖端和後緣上的一系列冷卻孔引入流道。

第3級葉片透過機械加工的內部空氣流道進行冷卻，該流道穿過翼型的整個長度，此冷卻空氣在進入主氣流道之前，進入尖端護罩中的空腔，此空氣同樣透過葉片燕尾槽底部的靜壓室引入。

第1級、第2級和第3級葉片中的冷卻孔尺寸及孔的間隙經設計，以獲得最佳之葉片冷卻效果，同時最大限度地減少由空壓機抽取之冷卻氣體量。

第4級葉片不是內部空氣冷卻的。這些葉片的尖端與第3級葉片一樣，由尖端護罩透過互鎖封閉，設計這些尖端護罩的目的在最大限度地減少尖端洩漏並抑制這些長翼型葉片的機械振動。還有一個額外的中跨護罩，也有助於減少大型葉片的機械振動。

渦輪機4級靜葉片之作用為將膨脹做功的燃氣導向渦輪機葉片使轉子旋轉。由於這在靜葉片上燃氣的壓降很大，因此在靜葉片內外都有氣封，以防止因燃氣洩漏而損失能量。由於這些靜葉片在高溫的燃氣中運作，它們除了需承受燃氣壓降造成的應力外，還得承受熱應力對葉片的影響。第1級靜葉片位於燃燒系統之後直接接收高溫之熱燃氣，

採用薄膜冷卻、撞擊冷卻和對流冷卻技術相結合在葉片和側壁區域。在運轉過程中抽取自空壓機第8級和第11級的壓縮空氣進行內渦輪機殼冷卻；冷卻渦輪機殼後之第8和第11級的壓縮空氣分別再被引導至渦輪機第3和第2級的靜葉片進行冷卻，如圖十一，以保護葉片，延長葉片壽命。高溫之燃氣通過各級葉片之後，其壓力及溫度降低，因此第4級靜葉片無進行冷卻。

(五) 排氣道

排氣框架側面的可拆卸吊耳與進氣機殼上的吊耳類似，吊耳在渦輪機與其基座分離時使用。安裝在渦輪機後端的排氣擴散器固定在排氣框架上。在擴散器出口處，氣體被引導進煙道而排出。

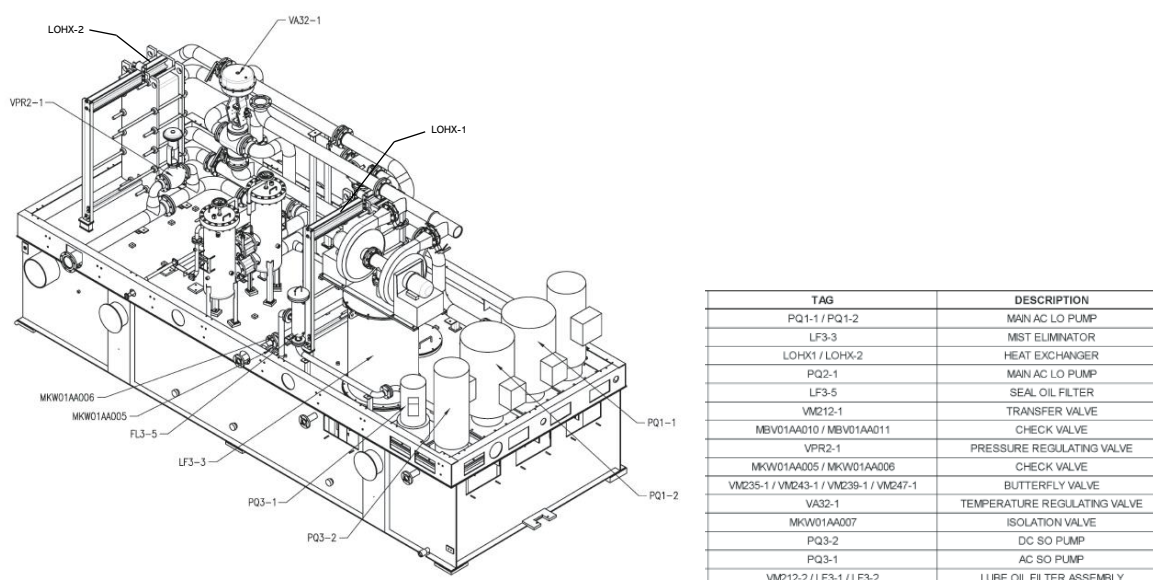
(六) 基座及支撐

支撐燃氣渦輪機的基座是由焊接鋼樑和鋼板製成的結構鋼。其主要功能是提供燃氣渦輪機的支撐。在空壓機端具有剛性腿式支撐，在渦輪機端具有頂部和底部樞軸支撐。

二、潤滑油系統(Lube Oil System)

潤滑油系統是一封閉循環且獨立的系統，由一組具雙重容量設計之交流泵浦，並配置直流泵浦，以便在現場交流電源中斷時，機組及設備可以安全地執行停機程序。主潤滑油泵是機組啟動過程中第一個通電的輔助設備。機組停機後，這些幫泵浦在整個機組冷卻過程中繼續運轉，並且是最後停止運轉的輔助設備。

7HA.02 之潤滑油系統主要用於氣渦輪機軸承、發電機軸承之潤滑及冷卻，亦供應頂升油泵及作為發電機冷卻氣體—氫氣之隔絕/防洩漏(sealing oil)之用。本潤滑油系統如圖十二，主要由潤滑油箱、泵浦、冷卻器、過濾器、控制閥以及控制系統及保護裝置等組成，以確保每個潤滑部件保持足夠的油壓和溫度。



圖十二、潤滑油系統

潤滑油箱作為潤滑油系統之油儲存槽並以該模組之基礎與潤滑油模組結合在一起，如圖十二所示。該模組之主油泵為兩台離心泵浦，各由一台交流馬達(AC Motor)驅動，每個交流馬達均配有馬達空間加熱器，以防止馬達內出現冷凝。機組正常運轉時，使用交流馬達驅動之潤滑油泵，採一台運轉(lead pump)，一台備用(lag pump)方式運作；兩部 AC 油泵可搭配維修保養時程交互運轉使用。兩部 AC 主油泵出口皆配置逆止閥，當機組停機時防止潤滑油逆流回到潤滑油箱；壓力傳感器安裝於潤滑油管路之集管處，用以監測整個潤滑油系統以適當的油壓運轉，當壓力傳感測器偵測到低油壓時，控制系統會發出警告聲並啟動備用油泵，當此情況發生時，操作員必需手動關閉主油泵，並注意以備用油泵運轉之潤滑油系統是否維持穩定之正常油壓。

另配置一台直流馬達(DC Motor)驅動之緊急潤滑油泵，用於當機組跳機或緊急停機時，為機組平穩且安全地停止下來提供充足的潤滑油循環。一旦機組停機後，潤滑油直流泵仍會持續運轉，直到氣渦輪機及發電機軸承金屬溫度降至 120°C (250°F)以下。之後，它每小時運行幾分鐘，以消除熱量並延長電池壽命。

設置 DC 緊急潤滑油泵之唯一目的是當機組在失去外部 AC 電源供應下，提供充足的潤滑油循環，使機組安全地停機。由表一可知 DC 緊急油泵與 AC 主油泵在輸出壓力與流量上有著明顯的差異，故 GE 講師特別強調 DC 緊急油泵不可用於機組正常運轉時之潤滑油供應泵之用。

表一、AC 與 DC 潤滑油泵規格比較表(每部 GT)

潤滑油泵規格	數量	額定轉速 (rpm)	額定輸出壓力 (kPa-g)	額定流量 (l/min)
AC 主油泵	2	3600	862	3330
DC 緊急油泵	1	1750	276	1380

潤滑油冷卻器(Oil Cooler)

潤滑油首先從主潤滑油泵泵入潤滑油冷卻器，流向冷卻器的潤滑油由閥門控制，該閥門經過調節以將潤滑油保持在適當的軸承頭溫度。冷卻器採用板式熱交換器形式，且配備兩個 100%的冷卻器，並以並聯方式連接。提供了手動操作的三通閥，以便在切換到第二個冷卻器時將第一個冷卻器隔離，而不會中斷流向主潤滑油集管的油流。當潤滑油充滿冷卻器時，在目視鏡中可以看到油，目視鏡位於冷卻器的排氣管路中。

輔助密封油泵 (Auxiliary Seal Oil Pump)

發電機的密封油通常由潤滑油系統透過單獨的管路直接供應到發電機密封系統。如果潤滑油系統壓力過低或潤滑油系統停機維修，兩個輔助密封油泵之一會提供密封發電機氫氣所需的密封油，輔助密封油泵由交流馬達驅動，並配置馬達空間加熱器以防止冷凝。如果交流密封油泵發生故障或交流電源中斷，則緊急直流密封油泵將啟動。直流泵浦排放壓力傳感器可對緊急直流密封油泵浦的運作狀況進行預先啟動和定期確認。密封油泵通過密封油過濾器過濾循環之密封油，具有現場顯示的差壓傳感器，在現場提供差壓並向控制系統提供密封油差壓；如果壓差接近或達到警報設定點，則應在下次有機會時更換過濾元件。

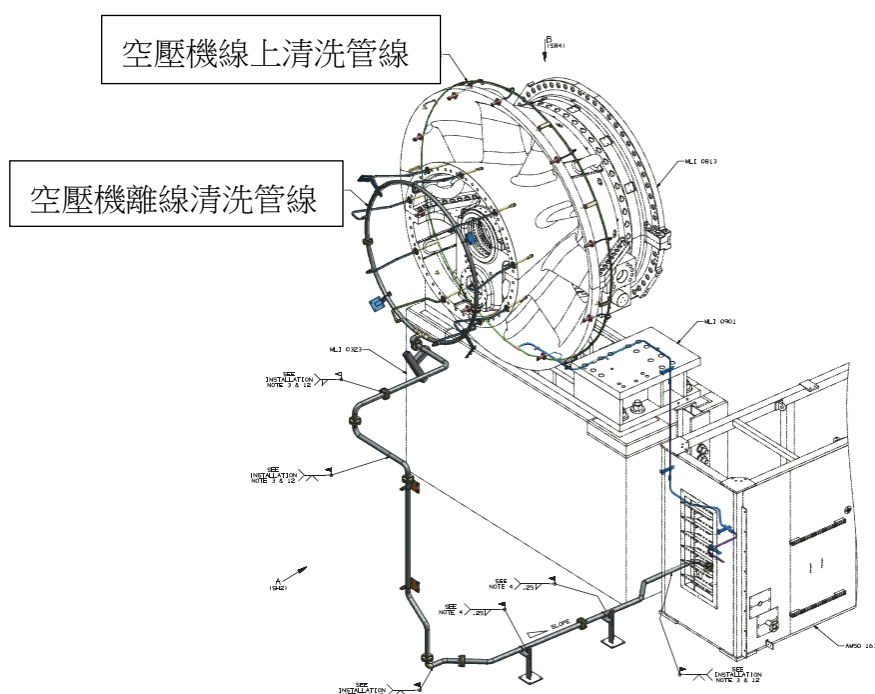
三、空壓機清洗系統(Compressor Water Wash System)

空壓機內部部件結垢會導致吸入的空氣流量減少、空壓機效率降低、空壓機壓縮比降低等問題，將直接造成燃氣渦輪機性能損失。空壓機結垢可以透過氣渦輪機功率輸出降低以及熱耗率和燃料消耗的增加來檢測。

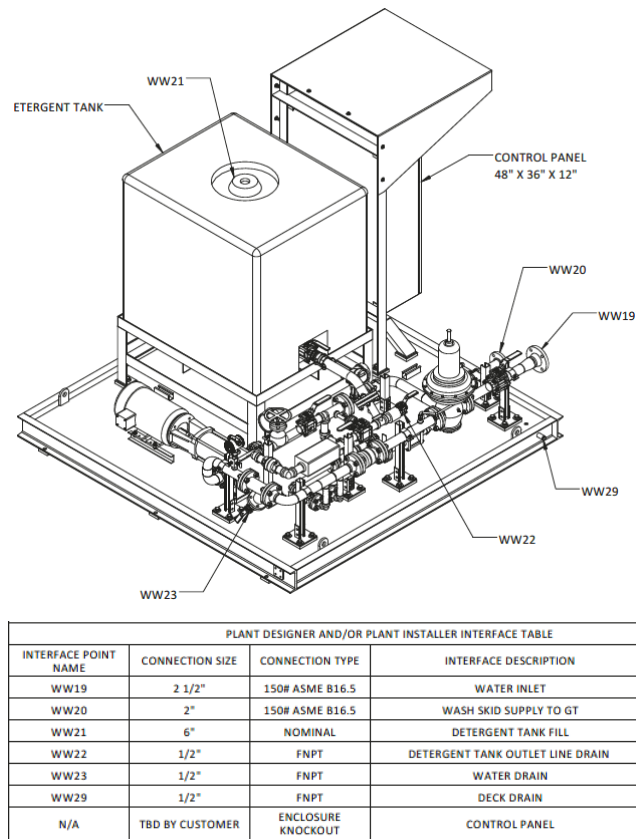
進行空壓機清洗將有助於清除污垢沉積物並恢復氣渦輪機的性能；故清洗後，機組效率應該會有明顯的提升。應該注意的是，如果發生嚴重結垢，可能不容易恢復全部功率。定期清洗空壓機將有助於保持機組性能，並使每次清洗更加有效。具體間隔時間依該渦輪機之性能及現場狀況而定。空壓機清洗還可以減緩葉片腐蝕的進程，從而延長葉片壽命並減少腐蝕產物對結垢沉積物形成的影響。

7HA.02 氣渦輪機有線上清洗(Online Water Washing Method)和離線清洗(Offline Water Washing Method)兩種模式，如圖十三。線上清洗是機組運轉時向空壓機注水清洗的過程。離線清洗是在機組停機後，空壓機及氣渦輪機轉子以 Crank 轉速旋轉(通常為 18~20% 之額定轉速)時將含清潔劑之清洗液以脈衝方式注入空壓機的過程。

線上清洗的優點是無需停機即可完成。但線上清洗效果不如離線清洗，因此只能作為機組不能停機下之應變措施，而不是取代離線清洗。圖十四為 7HA.02 空壓機清洗系統，其主要組成設備包含水槽、清潔劑槽、管路、控制閥、壓力計等。



圖十三、空壓機清洗系統—線上清洗管線和離線清洗管線



圖十四、7HA.02 空壓機清洗系統組成

(一)、空壓機線上清洗

線上清洗的目的是透過短時間的頻繁清洗來延長離線清洗之間的時間間隔。當懷疑空壓機有嚴重污垢時，應採用離線清洗。線上清洗須注意，IGVs 及 VAVs 須處於完全打開之位置。

根據 GE 公司的經驗，不建議在線上清洗時使用清潔劑，因為擔心在空壓機的后幾級葉片會有清潔劑的殘留。GE 公司亦表示線上清洗過程中使用清潔劑效果有限，因為沒有如離線清洗那樣有浸泡的程序。GE 公司的經驗也發現每天進行線上清洗最為有效，因此線上清洗的液體規格必須比離線清洗更加嚴格，線上清洗用水必須符合表二的水質標準。

執行線上清洗有以下限制：

1. 線上清洗一次執行 15 分鐘，24 小時內只能執行 2 次共 30 分鐘。依 GE 公司之性能數據表示，在保持空壓機性能方面，15 分鐘的清洗與 30 分鐘的清洗一樣有效。第二次的線上清洗週期可以在 24 小時許可範圍內的任何時間進行。講師表示依 GE 公司之經驗，執行兩次線上清洗之後，效果如果不佳，再多執行線上清洗亦不會有明顯進展，應

考慮執行離線清洗。

2. 當空壓機入口溫度低於 10°C (50°F)時，不允許執行線上清洗，以防止壓縮機入口、渦輪機及排氣和排水系統結冰。

表二、線上清洗及離線清洗用水水質標準表

QUALITY SPECIFICATION	
OFFLINE WASHING (for water only, or detergent and water applications)	
TOTAL SOLIDS (dissolved and undissolved)	100 ppm
TOTAL ALKALI METAL	25 ppm
OTHER METALS WHICH MAY PROMOTE HOT CORROSION (e.g., lead, vanadium)	1.0 ppm
pH (determined by glass electrode)	6.5 to 7.5
ONLINE WASHING (for water only applications)	
TOTAL SOLIDS (dissolved and undissolved)	5 ppm
TOTAL ALKALI & OTHER METALS WHICH MAY PROMOTE HOT CORROSION	0.5 ppm
pH (determined by glass electrode)	6.5 to 7.5

(二)、空壓機離線清洗

當懷疑空壓機有嚴重的污垢時，應進行離線清洗；有關監測空壓機性能請參閱下節——空壓機結垢檢測。

離線清洗的清洗效果比線上清洗佳，主要是因為離線清洗使用含有清潔劑之水溶液在清洗週期期間注入空壓機，並在清洗週期進行適當時間的浸泡程序。GT 將在第 7 次和第 8 次清洗脈衝期間停止。一旦 GT 達到低於 0.5% 的速度，浸泡(soak)計時器開始計時，浸泡時間約 20 分鐘。

浸泡期結束後，進入以清水進行沖洗循環，沖洗循環的目的是去除壓縮機葉片表面區域的清潔劑並沖洗設備的其餘部分。量測沖洗循環清洗之排放水導電度以判斷沖洗循環是否完成。待沖洗循環完成後啟動乾燥程序並使設備達到乾燥循環的啟動速度。乾燥週期持續時間為 20 分鐘。乾燥循環旨在去除裝置中殘留尚未排出的殘留水。

GE 公司建議並鼓勵在離線清洗時添加清潔劑，講師表示清潔劑在溫水的環境下可以發揮較佳之清潔能力。離線清洗時所使用的水質應符合表二的品質規格。清潔劑的選擇除了考量有效的清潔力外，亦應考量最大程度地減少清洗時產生的泡沫；GE 公司推薦以下幾款清潔劑：Turbotect 2020、Ardrox 6367、Fyrewash F2、Fyrewash F4。

四、空壓機結垢檢測

空壓機結垢導致的性能損失率因地點和季節不同而有很大差異，具體取決於大氣條件、工廠與空氣污染源的距離、燃氣渦輪機使用情況、線上清洗頻率和持續時間，以及機組整體維護情況。結垢率與一年中的季節之間存在很強的相關性，GE 公司的經驗為冬季幾乎沒有損失，而春季和夏季的結垢率很高。經常下雨的時期污垢往往較少。但上述的狀況會隨著每個廠區的實境情況而有差異，所以 GE 公司建議應重視機組輸出能力是否下降和熱效率之變化，故操作者應定期監測其燃氣渦輪機性能。

從熱性能角度來看，當自上次離線清洗以來空壓機導致燃氣渦輪機性能下降 2-3% 時，GE 公司即建議客戶執行離線水洗。空壓機引起的性能損失可以透過定期測量和監控空壓機流量和空壓機效率來確定。特別注意將數據標準化為常見的運行條件；一般來說，流量或效率每損失 1% 就相當於渦輪機功率損失約 1%。

從空壓機長期耐用性和可操作性的角度來看，GE 公司建議隨著時間的推移監控空壓機流量並對空壓機進行離線清洗，以防止流量相對於清潔狀態(基準數據，通常為上一次離線清洗後之量測數據)下降超過 5%。判斷空壓機的清潔度有兩種基本方法：目視檢查和性能監測。

(一) 目視檢查：

包括關閉機組、拆除進氣室檢查艙口以及目視檢查空壓機入口、喇叭口、入口導葉和前幾級葉片。初步檢查還可以識別沉積物是油性的還是乾性的。對於油性沉積物，需要用洗滌劑清洗。清洗前應確定油源位置並進行清潔，以防止污垢再次出現。如果只發現乾燥之沉積物，僅用水就足夠了。講師建議亦可以使用膠帶反覆於髒污處進行黏貼，便可將污垢、塵埃等清除。如果可以從這些區域擦掉或刮掉任何沉積物，包括灰塵或薄膜沉積物，則表示空壓機已嚴重結垢，進而將影響機組性能。

(二)、性能監測：

性能監測涉及定期獲取燃氣渦輪機數據，然後將其與基準數據進行比較，以監測燃氣渦輪機性能的趨勢，旨在評估設備的整體性能，即功率輸出和熱耗率。

性能數據是透過在穩態額定負載下運行設備並記錄來獲得的，應在設備已預熱並在正常穩態操作條件下運作時仔細取得數據，包括：機組出力、油耗、排氣溫度、進氣溫度、進氣濕度、環境氣壓、入口系統壓降、喇叭口壓力、空壓機排氣壓力及溫度等。可

以使用渦輪機性能曲線將功率輸出和熱耗率校正為標準條件，並且可以對空壓機流量、壓力比和效率進行分析。目前的性能等級可以與基準數據進行比較，有助於確定空壓機結垢的程度。

如果性能分析顯示空壓機有結垢現象，則應以目視檢查進行驗證，並透過清洗後恢復的性能數據與清洗前的性能等級進行比較來確認清洗後的效果。

肆、心得及建議

7HA 為 GE 公司以其 F-Class 機組為基礎所進一步發展的 60 Hz 重型發電用氣渦輪機，大潭計畫 2 部 2 對 1 複循環機組總裝置容量可達 2,200MW 以上，淨效率高於 61%，為目前能源轉型下之電力需求提供強而有力之新生力軍；且新機組具快速啟動及升降載功能，能有效提供電網調度能力，並維持電網穩定，再加上先進的低氮燃燒技術，兼顧降低空污，使機組能在符合環保要求下確保電力供應穩定。

GE 公司所提供之 HA 系列設備教學資料中，文件名稱：GE Equipment List (GE 文件編號 133T0928_D)及文件名稱：GE Load List (GE 文件編號 133T0927_D)等文件建議相關人員及學員可善加利用。Equipment List 內容包含之 KKS 設備編號(欄位為 Item Tag)，GE 設備編號(欄位為 Legacy Tag)，該設備之管儀圖編號，該設備之簡易描述與規格等資訊。Load List 描述設備之用電規格表，包含額定使用電壓、相位、消耗功率等資訊。上述資料可使學習者快速進入狀況，以及提供快速查詢主要設備規格之用。善用上述資料，將可作為欲了解 GE 設備之入門、初次接觸 GE 設備之運轉操作人員、設備維護人員快速查詢相關設備規格及制定機組操作、維護計畫等之最佳參考資料；亦可作為未來將參與相關課程學員之事前準備的參考資料。

講師 Brasseaux 先生為 GE HLC 資深講師，具有豐富且完整的相關設備運維經驗及電廠實務經歷；於教學上亦展現出專業及熱忱。Brasseaux 先生也是今年底即將舉辦的台中計畫氣渦輪機課程之訓練講師，但此課程為線上課程，講師依據其經驗指出線上課程之效果並不好，且無法真實看到及觀察學員上課狀況、難與學員互動等，不利即時評估上課成效，以進行教學上的調整，所以建議以後計畫能盡量少安排線上課程。講師還告訴筆者如果可以到現場上課，除了課堂上課之外，他還會帶領學員到現場，直接針對工地現況進行講解，並且還能依現場狀況增加上課資料，以利現場人員及學員學習及了解。

國外受訓第16天開始之日支費只剩原額度之21%~22%，建議應檢討。因為在國外的住宿費並沒有因為住超過15天而有任何折扣或優惠，餐費及交通費亦同。如果是因為經費不足，建議將此課程合併至國內訓練，在現場/工地上課，讓更多將執行該機組運轉及維護工作之同仁能共同參與，也較符合此運轉維護課程之屬性。

最後感謝此出國計畫及處內長官給予機會得以出國增長見聞。出國受訓期間除進一步提升專業知識和有機會與美國講師交流外，並親身體驗德州之風土人文、歷史、建築及交通等，這一切為此次旅程提供了寶貴及美好的經驗。

伍、 參考文獻

- (一)、 GE Gas Power “Gas Turbine 7HA.02 Operations” , 2021.
- (二)、 GE Power “Gas Turbine Functional Description 7HA.02” , 2016.
- (三)、 GE Gas Power “Gas Turbine 7HA.02 Maintenance” , 2021.
- (四)、 出國報告，” 氣渦輪機組運轉維護研討會” ，台灣電力股份有限公司，張穎潮，2019。
- (五)、 出國報告，” 大潭電廠增建計畫-8 號機氣渦輪機設計安裝運轉維護訓練研習” ，台灣電力股份有限公司，林耕葆(北部施工處)，2024。
- (六)、 出國報告，” 氣渦輪機設計安裝運轉維護訓練研習” ，台灣電力股份有限公司，廖紹宇、陳冠文，2024。