

出國報告（出國類別：實習）

## 奇異汽機及氣渦輪機組振動研測技術研習

服務機關：台電電力修護處南部分處

姓名職稱：楊榮勛 / 工業工程師

派赴國家/地區：美國

出國期間：112年5月21日 ~ 112年6月3日

報告日期：112年7月31日

## 出國報告審核表

出國報告名稱：奇異汽機及氣渦輪機組振動研測技術研習

<b>出國人姓名</b> <small>(2人以上，以1人為代表)</small>	<b>職稱</b>	<b>服務單位</b>
楊榮勛	工業工程師	台電電力修護處南部分處
<b>出國類別</b>	<input type="checkbox"/> 考察 <input type="checkbox"/> 進修 <input type="checkbox"/> 研究 <input checked="" type="checkbox"/> 實習 <input type="checkbox"/> 視察 <input type="checkbox"/> 訪問 <input type="checkbox"/> 開會 <input type="checkbox"/> 談判 <input type="checkbox"/> 其他_____ (出國類別請依預算書之計畫預算類別填列)	

出國期間：112年5月21日至112年6月3日 報告繳交日期：112年7月31日

出國人員	計畫主辦	審核項目
自我檢核	機關審核	
<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	1.依限繳交出國報告
<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	2.格式完整(本文必須具備「目地」、「過程」、「心得及建議事項」)
<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	3.無抄襲相關資料
<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	4.內容充實完備
<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	5.建議具參考價值
<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	6.送本機關參考或研辦
<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	7.送上級機關參考
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	8.退回補正，原因：
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	(1) 不符原核定出國計畫
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	(2) 以外文撰寫或僅以所蒐集外文資料為內容
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	(3) 內容空洞簡略或未涵蓋規定要項
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	(4) 抄襲相關資料之全部或部分內容
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	(5) 引用相關資料未註明資料來源
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	(6) 電子檔案未依格式辦理
<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	9.本報告除上傳至公務出國報告資訊網外，將採行之公開發表：
<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	(1) 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"/>	<input type="checkbox"/>	(2) 於本機關業務會報提出報告
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	(3) 其他_____
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	10.其他處理意見及方式：

報告人：

(2人以上，  
得以1人代表)



單位

主管：



主管處

主管：



總經理

副總經理：



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「公務出國報告資訊網」為原則。

# 行政院及所屬各機關出國報告提要

出國報告名稱：奇異汽機及氣渦輪機組振動研測技術研習

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/人資處 / (02)23667685

出國人員姓名/服務機關/單位/職稱/電話

楊榮勛 / 台電電力修護處南部分處 / 品質組 / 工業工程師 / (07)2510195 ext.273

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：112年5月21日 ~ 112年6月3日

派赴國家/地區：美國

報告日期：112年7月31日

關鍵詞：振動、氣渦輪機組(Gas Turbine)、汽機機組

內容摘要：(二百至三百字)

奇異公司(GE)汽機及氣渦輪機組為台電發電設備主力之一，其機組設計先進，構件精密，對振動研測技術之要求甚高，為因應機組運轉振動調校的需求，赴原廠對機組與其附屬設備之設計、製造原理、維護技術與振動研測技術實習。

本次實習美國奇異(GE)公司安排至亞特蘭大(Atlanta)監視與診斷中心(Monitoring & Diagnostics Center, 簡稱 M & D Center)介紹 Smart Signal 軟體功能及運行方式，格林威爾(Greenville)氣渦輪機製造測試工廠(Gas turbine Manufacture & Test Factory)介紹氣渦輪機製造及測試技術，休士頓(Houston)航改型氣渦輪機工廠(Aero Alliance)介紹 LM2500 機組。參加實習對於線上即時監控軟體系統、氣渦輪機的設計、測試與維修技能有更深入的了解。

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

封面

出國報告審核表

行政院及所屬各機關出國報告提要

目次

本文

壹、 出國緣由 .....	1
貳、 出國任務與行程 .....	2
參、 實習內容 .....	3
一、 亞特蘭大(Atlanta)監視診斷中心(Monitoring & Diagnostics Center) ..	3
二、 格林威爾(Greenville)氣渦輪機製造測試工廠(Gas Turbine Manufacture & Test Factory) .....	17
三、 休士頓(Houston) / 航改型氣渦輪機工廠(Aero Alliance).....	26
肆、 心得與建議 .....	30
一、 心得 .....	30
二、 建議 .....	31
伍、 參考文獻 .....	33

## 壹、 出國緣由

政府積極推動能源轉型，以增氣減煤的方式兼顧空污減排與供電穩定，興達電廠預計增添 3 部奇異天然氣機組，台中電廠預計增添 2 部，且通霄電廠亦有 6 組 LM2500 系列機組，因此奇異公司扮演重要的角色。本計畫赴美國奇異公司汽機與氣渦輪機部門進行實習，透過與原廠的交流，增加對奇異汽機與氣渦輪機組之認識，學習機組精密結構，了解機組曾經引起高振動的原因，應用在未來奇異新機組之振動研測分析。

奇異公司汽機及氣渦輪機組為本公司發電設備主力之一，其機組設計先進，構件精密且複雜，對振動研測技術之要求高，為因應機組運轉振動調校的需求，赴原廠對機組與其附屬設備之設計、製造原理、維護技術與振動研測技術實習。若發生重大故障與高振動跳機往往造成機組異常停機，影響供電穩定，為了預防機組的事故發生，或是發生高振動能確實且迅速針對高振動產生原因解決。透過與原廠相關部門的解說、實習與交流座談會等方式，增加對新式機組的認識，學習振動研測技術。

本次至美國奇異公司(GE)實習，奇異公司安排至亞特蘭大(Atlanta)監視診斷中心(Monitoring & Diagnostics Center，簡稱 M & D Center)介紹 APM 系統、Smart Signal 軟體功能及運行方式，格林威爾(Greenville)氣渦輪機製造測試工廠( Gas turbine Manufacture & Test Factory)介紹氣渦輪機製造及測試技術，休士頓(Houston)航改機組工廠(Aero Alliance)介紹 LM2500 機組。參加實習對於線上即時監控軟體系統、氣渦輪機的設計、測試與維修、異常振動之發生原因與調校技術有更深入的瞭解。

## 貳、出國任務與行程

本出國計畫實際出國日期為 112 年 5 月 21 日至 112 年 6 月 3 日，共計 14 天，過程如表 2-1 所示。

表 2-1

起訖日期	參訪地點 / 機構名稱	工作概要
112.05.21(日) ~ 112.05.22(一)		往程：台灣→美國亞特蘭大
112.05.22(一) ~ 112.05.23(二)	亞特蘭大(Atlanta) / 監視與診斷中心 (Monitoring & Diagnostics Center)	1. APM 系統、Smart Digital 軟體分析及振動議題探討。 2. GE 監診中心實習。
112.05.24(三) ~ 112.05.26(五)	格林威爾(Greenville) / 氣渦輪機製造 測試工廠(Gas turbine Manufacture & Test Factory)	1. 氣渦輪機設計及振動議題討論。 2. 參訪工廠。
112.05.27(六) ~ 112.05.29(一)		例假日，112.05.29 為美國陣亡將士紀念日 (Memorial Day)
112.05.30(二) ~ 112.06.02(五)	休士頓(Houston) / 航改型氣渦輪機工 廠(Aero Alliance)	1. LM2500 機組介紹。 2. 參訪工廠。
112.06.03(六)		返程：美國休士頓→台灣

## 參、實習內容

### 一、亞特蘭大(Atlanta)監視與診斷中心(Monitoring & Diagnostics Center)

計畫參訪的第一站為美國奇異公司(GE)在亞特蘭大的監視診斷中心(如圖 3-1)，奇異公司的監診系統不間斷地記錄所有發電設備的運轉資料，也可以與客戶遠端連線使用軟體遠端分析診斷解決問題；疫情期間，奇異公司於亞特蘭大的監視診斷中心一樣正常運作，專業工程師團隊改以居家辦公，軟體遠端分析為主，省下員工勞碌奔波的時間，此方式可供電廠與修護處參考，尤其是南部的電廠數量多，振測人員有限，同時期有多個電廠設備有振動問題，人力會有短缺問題，藉由使用遠端分析的方式，可以即時分析解決電廠機組的振動問題。

奇異公司的監視診斷中心辦公室，除了前方有大螢幕能隨時監控全球 GE 有上線的機組狀況，工程師亦可在個人位置上以曲面大螢幕同時多開不同監控視窗診斷；辦公室端另外有放置 Steam Turbine、Gas Turbine、燃燒筒等模型，如圖 3-2 至圖 3-5 所示，供隨時能引導思考機組問題可能所在，若能在電廠與修護處同時置放各機型的模型，在教導新人或是思考問題時，能更清楚的了解問題所在。

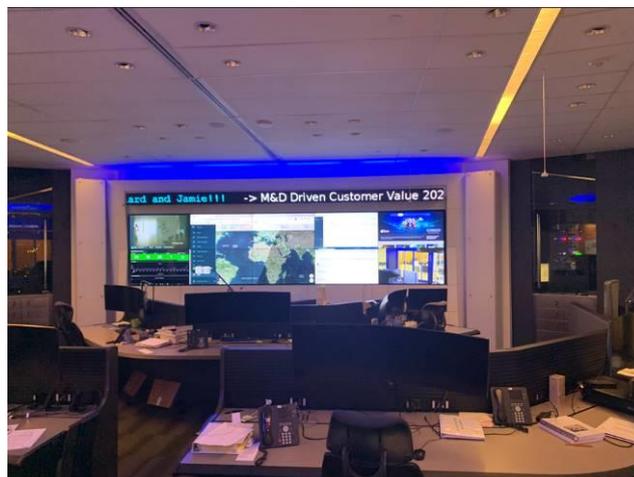


圖 3-1、亞特蘭大監視診斷中心辦公室



圖 3-2、D-17 Steam Turbine 模型



圖 3-3、Gas Turbine 模型



圖 3-4、燃燒筒模型

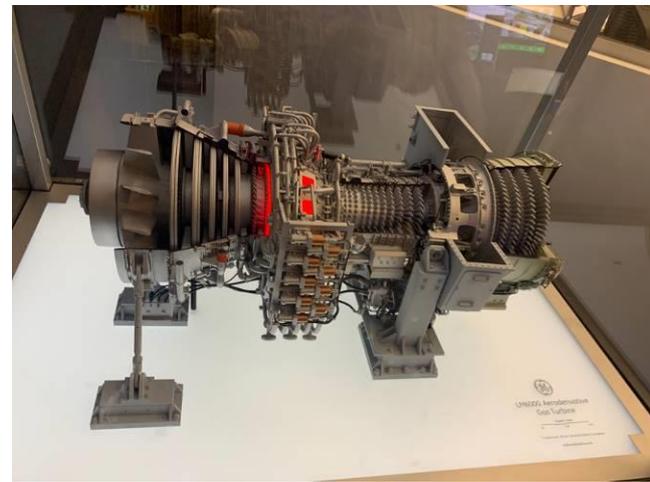


圖 3-5、LM6000 Gas Turbine 模型

本次參訪重點為了解奇異公司如何使用監視診斷軟體，進行監視診斷的工作，由奇異公司的副總 **Rahul Chadha**(圖 3-6 右三)與相關技術人員的解說，其監測的機組狀況包括軸承的溫度、燃燒排氣的溫度與壓力、機組的熱效率與熱性能、空壓機的人出口溫度，及汽機或氣輪機組之轉子振動情形，為客戶即時提供線上的機組診斷分析，提升機組運轉的穩定度與可靠度。

奇異監診中心參訪後，與全球建置系統化的 **Liena** 請教有關於線上診斷系統的建置(圖 3-7)，奇異公司可根據客戶需求在不同廠家的設備上面裝置感應器，像是三菱、西門子等發電設備，提供同步線上可以監測包含設備的溫度、壓力、振



動值等，以便全面性監測設備機組狀態；同時，奇異公司也已經投入至混氫發電的研究開發上，相信未來有一天能提供台電不同的發電選擇。



圖 3-6、與亞特蘭大監診中心人員合影  
(本人左二)



圖 3-7、與系統化建置人員合影  
(本人左一)

奇異公司的資產效能管理系統(Asset Performance Management，簡稱 APM)，這套軟體可以提供機組運轉的預測能力，在問題發生之前以舊有資料建立之模型，可以提早發出警訊，讓奇異公司的工程師與客戶端提早知道機組潛在的問題，進行預防的維修或是運轉對策。

APM 系統是由 GE Digital 的團隊，以工業互聯網平台深入分析機組可能出現的問題數據資料庫及運轉趨勢，可提高機組可靠性及可用性，降低機組故障發生率及停機維修的次數，同時降低維護成本及運轉風險。這套系統目前監視診斷超過全球 75 個國家，超過 950 個發電廠，超過 5000 部的 Turbine、發電機及其他附屬設備之運轉狀態，每天可從百萬個 sensor 蒐集資料傳送至雲端資料庫運算，24 小時不間斷的監視診斷機組的運轉狀態，如圖 3-8 所示。



圖 3-8、The engineering frontline for the Gas Power fleet

APM 系統中可利用 Smart Signal 以雲端操作的方式，如圖 3-9 所示，預測演算法整合包括汽機、氣渦輪機及其他設備之振動、溫度、壓力與相關運轉資訊等，依據最少過去三個月的運轉資訊去建立該機組的模型，利用大數據庫資料分析及 AI 人工智慧，預測未來可能發生的問題，提供最佳的維修時機及提早讓客戶準備相對應的對策，預先診斷出機組潛在的運轉風險，提升機組的可靠度與可用性，如圖 3-10 所示。

由於台灣資安的控管，目前這套系統有機會未來獨立在興達電廠、大潭電廠與台中電廠各自設置，可以由電廠人員自行建置該廠的各設備運轉模型，隨時監控各設備運轉數據是否正常，但若由台電進行監診中心的維護，可能會遇到需要額外編列人力去進行監控的問題，此部分還尚需與奇異公司做更深的討論，能否提出解決的方式，例如由奇異公司在台灣成立監診中心的原廠專業工程師團隊。

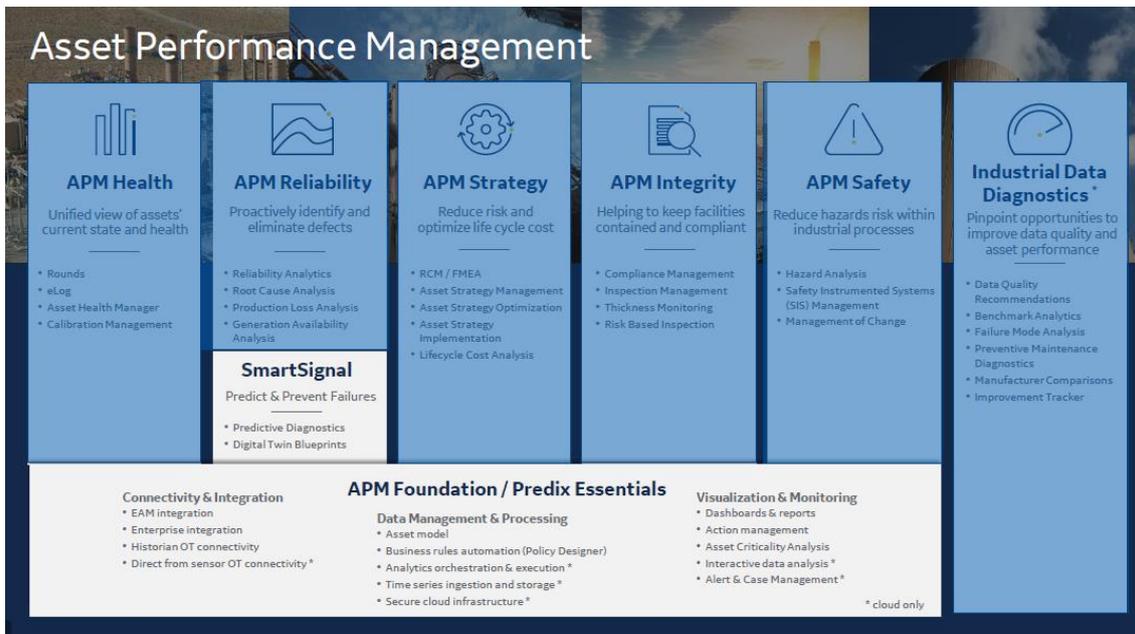


圖 3-9、APM 系統架構

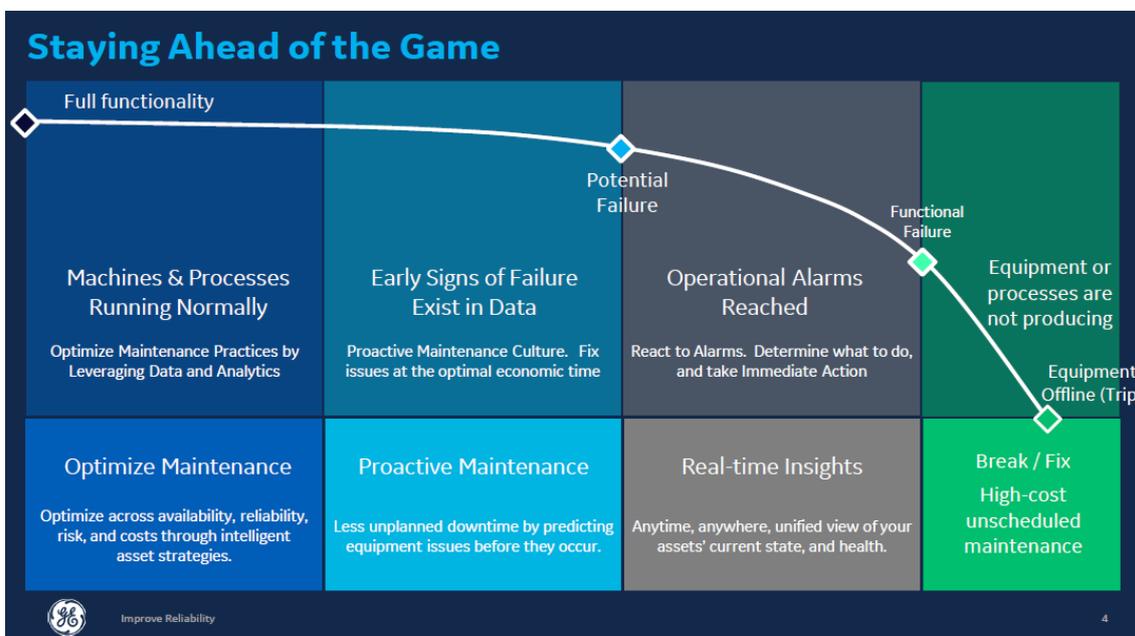


圖 3-10、預測診斷曲線

APM 系統內會有內建奇異機組的資料庫，也可以自己訓練新的模型去建立資料庫，建立像是汽機、氣渦輪機、輔機及其他設備機組，設備運行資料收集分析會回饋問題所在，但回饋的問題為系統綜觀面呈現所有問題，最後還是需要有相關經驗的工程師去進行判斷，例如發生機組有高振動的問題，系統裡面會提供緊急程度排列的可能原因，需要振測人員去進行各種振動原因的排除，或現場機組

維護的專業工程師經驗協助才能真正的解決根本振動原因，如圖 3-11、3-12。

APM 系統建立模型，至少需要三個月的運轉資料，根據訓練的模型會得到動態的正常運轉區間(Dynamic Band)，動態的正常運轉區間判斷會以各種像是壓力、流速、溫度與振動值等資訊作為基準，如圖 3-13、3-14。APM 系統能以現有數據預測機組多久可能會有損壞的問題產生，如圖 3-15 所示，但此預測數學模型目前是以線性的數學方式去計算，後續奇異公司會依照客戶需求，才有可能會新增非線性的方式去進行計算比較。

APM 系統的分析資料除了可以同時比較各個機組的問題嚴重程度，以圖表的方式呈現，就會知道目前最需要關注的機組問題在哪裡，能有效地投入維修的人力解決。APM 系統地分析資料同步也可分享給振研課的振動分析設備(ADRE 軟體)作為分析使用，如圖 3-16，現有振研課的機組分析檔案也可以 TXT 檔案形式匯入至 APM 系統參閱。

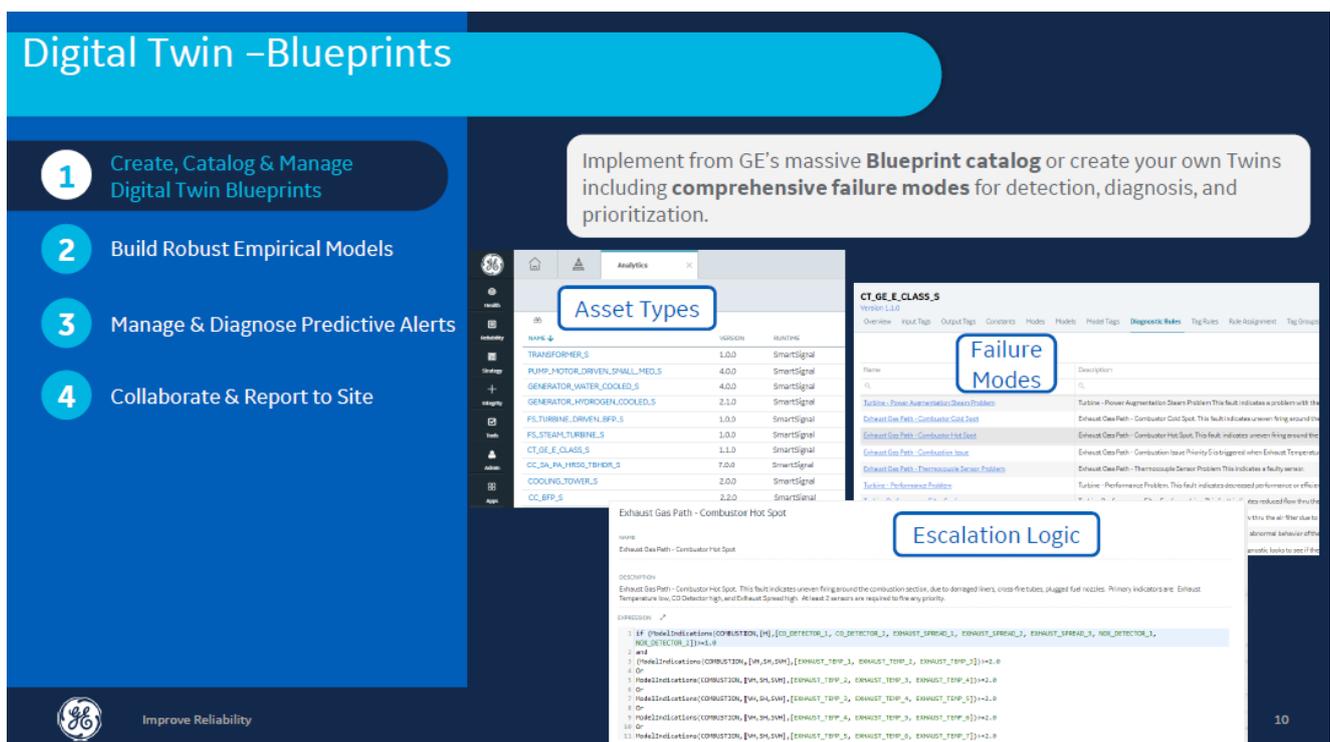


圖 3-11、APM 系統軟體介面(失效模式)



# Empirical Similarity Based Models

- 1 Create, Catalog & Manage Digital Twin Blueprints
- 2 Build Robust Empirical Models
- 3 Manage & Diagnose Predictive Alerts
- 4 Collaborate & Report to Site

Machine Learning **clustering algorithm** to select healthy operating data **automating** asset modeling process

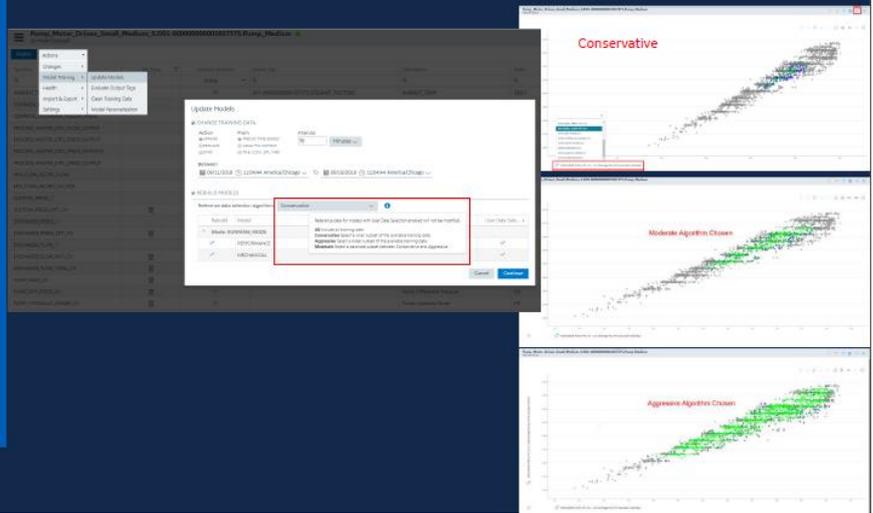


圖 3-14、APM 系統軟體介面(訓練模型)

# Case Collaboration & Reporting

- 1 Create, Catalog & Manage Digital Twin Blueprints
- 2 Build Robust Empirical Models
- 3 Manage & Diagnose Predictive Alerts
- 4 Collaborate & Report to Site

**Case Management** enables efficient collaboration on asset events, allowing analysts, engineers and maintenance teams to strategize on resolution, capture event evidence and distribute results via specific site reporting.

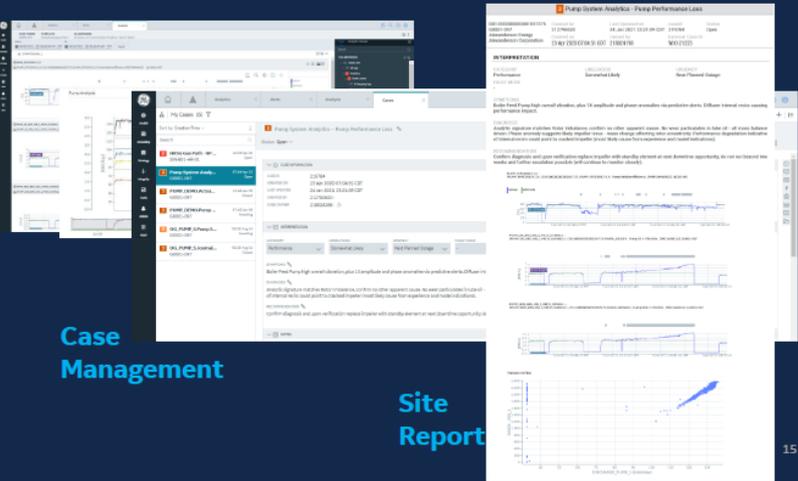


圖 3-15、APM 系統軟體介面(案件管理)

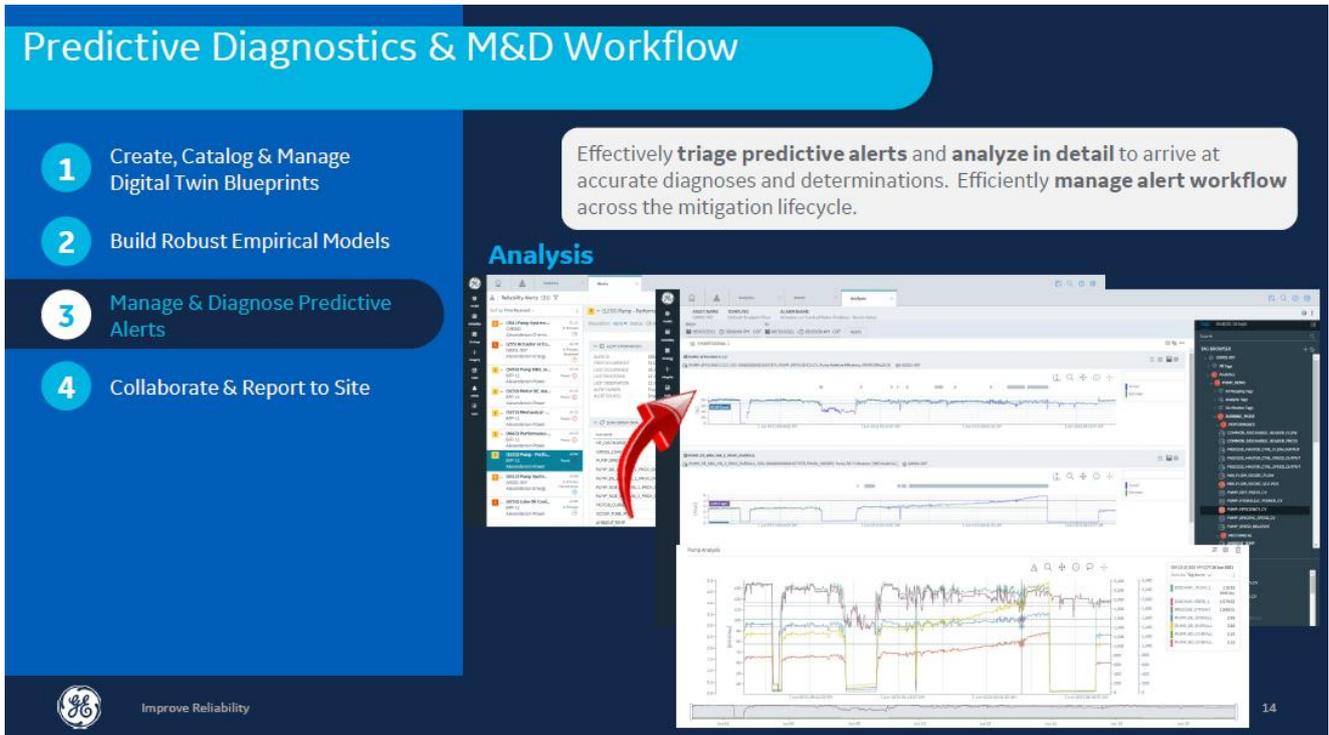


圖 3-16、APM 系統軟體介面(分析模型)

圖 3-17 為奇異公司 M&D 系統架構，其目的在於強化操作的穩定及可靠性，增進系統性表現及提供運轉維護最佳化策略的解決方案，以雲端的伺服器蒐集監視的設備運轉資料，傳送到亞特蘭大的監診中心。透過雲端資料分析，可提供預先診斷維護(Pre-ACT)、效能指標(KPI)及問題發生後的維護策略(Post-ACT)，其中效能指標在軟體裡面能夠設定，像是投資金額對應機組提早啟動所帶來的效益，能將各機組的效能指標進行比較列出，來表示出該次的配重處理、更換設備零件或是提早大修完成所產生的效能指標進行比較，亦可根據各個不同的案子計算出總節省成本，如圖 3-18。

# M&D Infrastructure

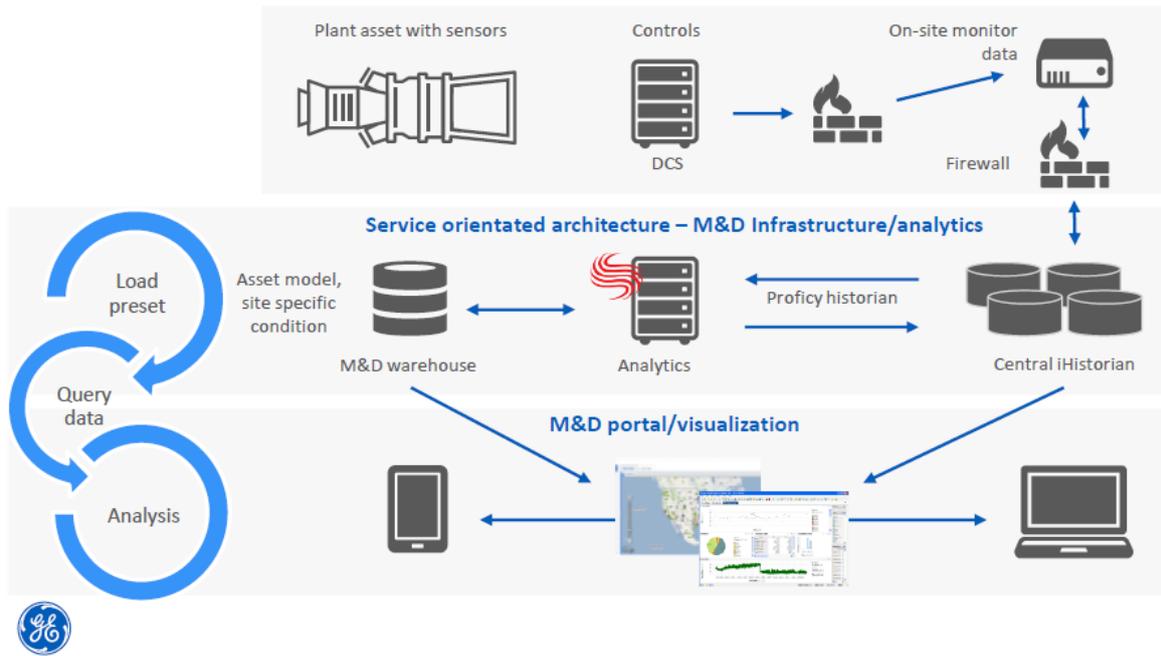


圖 3-17、M&D 系統架構



圖 3-18、效益計算統計系統

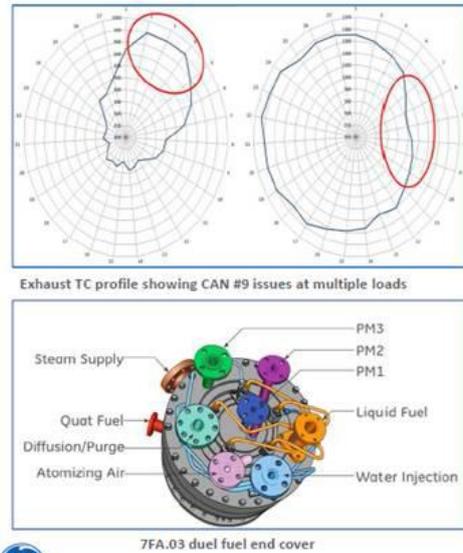
在此次參訪實習中，奇異公司監診中心有分享以下案例一起討論：

1. 如圖 3-19，奇異公司分享的第一個案例為客戶端的氣渦輪機於大修後啟動，機組排氣溫度過高而造成跳機，經過系統分析後發現在燃燒室的燃燒數據異常，經過現場檢查設備，發現燃燒器管路接錯，經過檢修後恢復正



常，可避免後續機組啟動的 NOx 排氣值過高及機組跳機的情況。

## Trip Troubleshooting - High Exhaust Temp. Spread



### Analysis/recommendation

- Unit tripped on high exhaust spreads following an outage.
- Combustion profile was abnormal during the restart.
- M&D determined the PM1 and PM2 gas fuel pigtaills were swapped on can #9.

### Findings:

- Site confirmed the PM1 and PM2 gas fuel pigtaills were swapped on can #9.

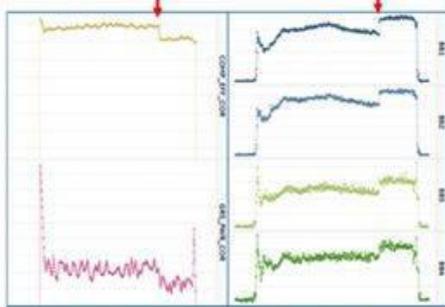
### Benefit:

- M&D precisely identified the installation issue on can #9.
- Avoided elevated NOx and additional trips

圖 3-19、案例一

2. 如圖 3-20，案例二為客戶端的氣渦輪機於運轉中忽然負載降低，且空壓機 (Compressor) 出口溫度及振動值升高，利用系統的振動分析診斷，以及現場機組的拆解檢查，找出空壓機葉片斷裂，避免機組更嚴重的損壞。系統無法精準的指出是空壓機的葉片斷裂，還是需要振動人員的判斷經驗——排除系統提供的可能高振動原因，才能正確的檢查出來。

## Compressor Mass Loss Detection



Compressor stator vane liberation.

### Analysis/recommendation

- Compressor analytic and vibrations analytic both triggered for a 7FA.03.
- Unit experienced a drop in corrected output and compressor efficiency and a simultaneous increase in vibrations. Compressor discharge temperature profile also changed at the same time.
- Vibrations during the subsequent shutdown were abnormal compared to previous coast downs.
- Recommended borescoping the compressor prior to restart.

### Findings:

- The borescope inspection revealed liberation of a stator vane, along with downstream damage

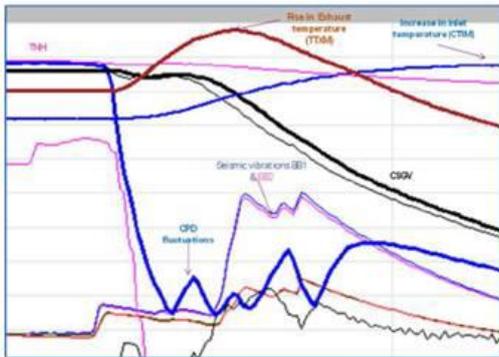
### Benefit:

- Minimized additional damage to the unit.

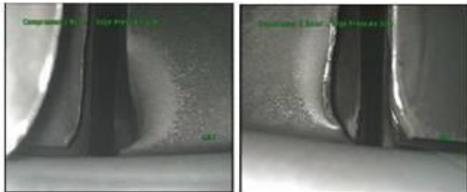
圖 3-20、案例二

3. 如圖 3-21，案例三藉由系統分析診斷，空壓機出口壓力與進口端壓力落差的擾動，以及氣渦輪機排氣溫度，找出空壓機氣室現象(Surge)，避免後續設備更大的損壞。

### Compressor Surge Detection



Compressor Surge Signatures during a trip



Blade Clash due to surge on compressor blades.

#### Analysis/recommendation

- Compressor surge analytic detected a rapid drop in compressor discharge pressure (CPD), fluctuations in inlet DP, and a rise in exhaust temperature (TTXM) during a trip on a 6FA unit.
- Recommended unit shutdown and BI compressor for signs of blade clashing.

#### Findings:

- The borescope inspection revealed blade clashing on compressor stage# 3 due to the surge event.

#### Benefit:

- Surge event detected.
- Blade damage identified, which if gone undetected could have caused large scale liberation and down-stream damages.

圖 3-21、案例三

4. 如圖 3-22，案例四為系統監視數據顯示於排氣溫度溫差大，分析出燃燒筒內有異物入侵的情形，異物排除後避免機組跳機及設備損壞問題。

### Combustion Profile Monitoring



Exhaust profile at baseload showing a cold spot on TCs 15 and 16.



Foreign debris in the PM4 annulus of can #6.

#### Analysis/recommendation

- Exhaust profile deviation alarm received
- Cold spot of approximately 40 deg F seen at multiple loads swirling to CAN 6
- M&D recommended conducting a borescope inspection of CAN 6 including end cover passages

#### Findings:

- Site found foreign material in PM 1 & 4 annulus of CAN 6

#### Benefit:

- Because of M&D understanding of the issue the site was able to wait to address during a planned outage
- Possible LBO trip prevention

圖 3-22、案例四

5. 如圖 3-23，案例五系統檢查排氣溫度的歷史資料趨勢，分析出燃燒器有破裂現象，可避免設備進一步的損壞及跳機。

## Combustion Liner Damage Detected

### Analysis/recommendation

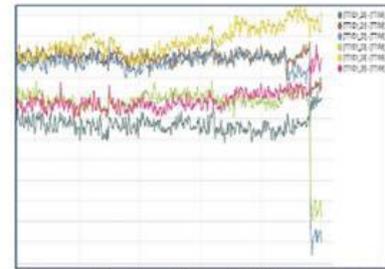
- Exhaust TC trend alarm received
- Cold shift seen at multiple loads swirling to CAN 10
- M&D recommended conducting a borescope inspection of CAN 10

### Findings:

- Site found damage to the CAN 10 liner. No downstream damage noted to the HGP.

### Benefit:

- M&D expertise accurately identified CAN 10 as the affected component.
- Site was able to quickly implement recommendations, thereby avoiding potential downstream damage and trips.



48 hour trend showing sudden cold shift in exhaust TCs 22 and 23 during baseload operation.



Can#10 liner damage.

圖 3-23、案例五

6. 如圖 3-24，案例六為系統藉由燃燒火焰的波動，分析出燃燒不穩定，建議重新調整，避免因為燃燒不穩而跳機。

## Lean Blow Out (LBO) Detection Analytic

### Benefit:

Trip avoidance - Analytic detects conditions in combustion dynamics that indicate a likelihood of a LBO. Units can be retuned to correct the condition.

### Technical Explanation:

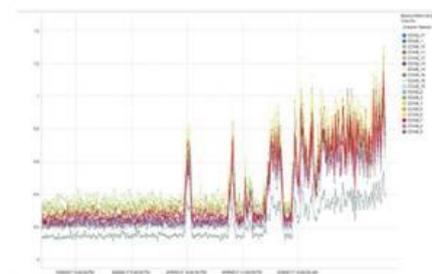
Analytic looks for changes in Pk0 dynamics indicative of flame instability that could lead to a LBO.

### Lead time of detection:

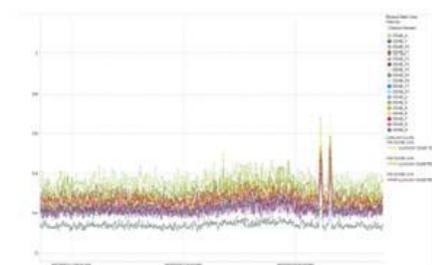
Weeks to Months

### Real Example:

During part load operation Pk0 dynamics began to elevate. GE recommended the customer retune the unit to reduce LBO risk. The customer retuned the unit, reducing dynamics and an eventual trip.



Pk0 dynamics before tuning was performed



Pk0 dynamics after remote tuning

圖 3-24、案例六

7. 如圖 3-25，案例七為系統顯示空壓機出口壓力的計算值與實際量測值差異過大，分析出自動燃調模型需要重新調整，避免 NO<sub>x</sub> 排放超標、跳機風險與設備損壞等情況發生。

### Autotune Model vs Measured Analytic

**Benefit:**

Prevents running out of emissions compliance, prevents LBO trips, and mitigates high cycle hardware damage.

**Technical Explanation:**

This analytic looks at the difference between calculated and measured dynamics looking for unacceptable deviations indicating the Autotune model is in need of adjustments.

**Lead time of detection:**

Weeks to Months

**Real Example:**

Unit running in cyclical operation, during lower part load, the calculated and measured Pk2 dynamics show a large deviation meaning the Autotune model needs adjusted. After Autotune model is modified the calculated dynamics match the measured.

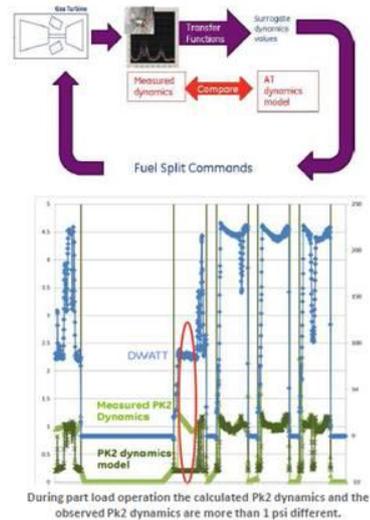
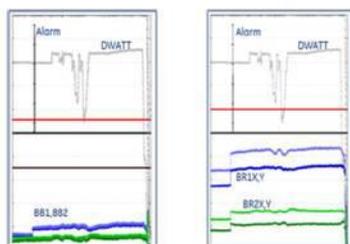


圖 3-25、案例七

8. 如圖 3-26，案例八為系統觀測長達 6 個月的氣渦輪機振動趨勢，分析包含機組起停的振動分析，判斷出熱元件(hot gas part，簡寫 HGP)有損傷的現象，藉由專家診斷協助判斷損壞程度的發展趨勢，研判機組可持續運轉數月，亦可依照系統判斷提早安排檢修排程，提升運轉穩定度。

### Gas Turbine Vibration Monitoring



Vibration step change in seismics (left) and proximity probes (right).



Two stage 1 buckets found damaged

**Analysis:**

- Vibration step change detected.
- 6 months of data, including start-up and shutdown vibrations, was analyzed.
- Mass loss in the HGP suspected.

**Actions and Findings:**

- M&D continued to monitor closely.
- Vibrations eventually increased above the steady state threshold and M&D recommended a borescope of the HGP.
- Two damaged stage 1 buckets were found.
- A periodic inspection plan was developed to allow unit to continue operation until the buckets could be replaced.

**Benefit:**

- M&D monitored the progression of the issue, allowing the unit to operation for several months after initial anomaly detection.

圖 3-26、案例八

9. 如圖 3-27，案例九為氣渦輪機熱效率分析發現空壓機性能衰退，系統分析後發現空壓機葉片嚴重髒汙，建議需要水洗清潔，水洗後空壓機性能恢復，機組熱效率正常。

## Rapid Fouling

### Analysis/recommendation

- Thermal performance analytic detected a decrease in corrected output and compressor efficiency
- M&D determined the unit was experiencing rapid compressor fouling and recommended an offline water wash and a visual inspection of the inlet

### Findings:

- Inspection revealed mineral deposits throughout compressor which were a combination of pot ash particles, air moisture, and oil mists. The oil mist originated from a lube oil drain fitting.
- The site cleaned the compressor and addressed the oil mist from the lube oil drain fitting.

### Benefit:

- Restoration of output, heat rate, and compressor efficiency after the unit resumed operation.

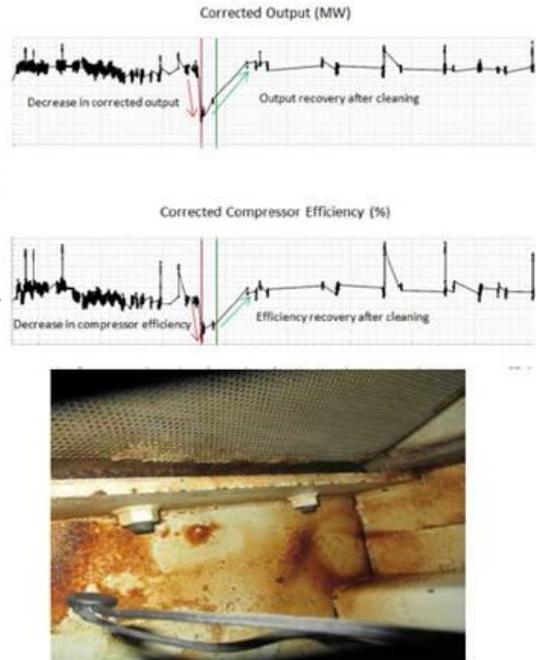


圖 3-27、案例九

## 二、 格林威爾(Greenville)氣渦輪機製造測試工廠(Gas Turbine Manufacture & Test Factory)

結束亞特蘭大監診中心的實習後，前往南卡羅納州格林威爾市 (Greenville, South Carolina)的氣渦輪機工廠，如圖 3-28 所示，距離亞特蘭大約兩小時車程。該廠區主要從事工作包含了氣渦輪機的組裝、原型機的測試、各部件的生產製造或維修、整機安裝服務，以及氣渦輪機相關的研究與測試。佔地面積約 575,000 平方英尺，包含 5 個可獨立測試的設施、可容納 10 個完整的單只燃燒器測試台，包括控制室、數據中心與排放量測中心。

此次在格林威爾氣渦輪機製造測試工廠主要實習的單位為奇異訓練中

心、燃燒器測試中心、離網燃氣輪機測試台，及氣渦輪機組裝與維修工廠。

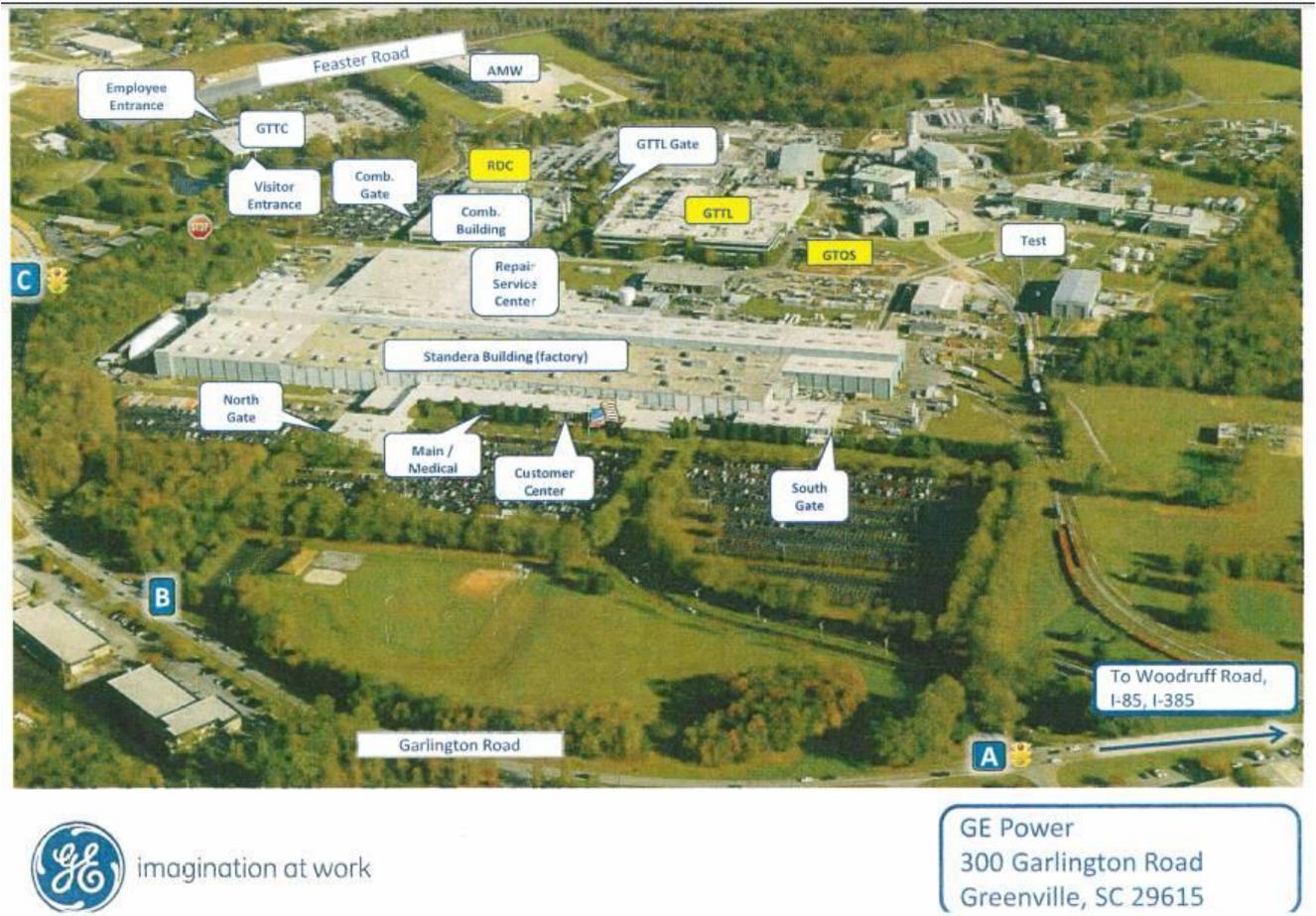


圖 3-28、奇異公司格林威爾氣渦輪機製造測試工廠

### (一)奇異訓練中心

奇異訓練中心(如圖 3-29、3-30)裡面有不同種類的 3D 列印，3D 列印的材料可以依照所需要的壓力、溫度、強度去進行金屬或是碳纖維的混料製作，像是安裝在燃燒器裡監測的攝影機基座，就是需要用耐高溫的材料去進行製作，才不會造成攝影機的損壞，除了上述舉例提到的基座需要用 3D 列印以外，葉片、噴嘴等不規則的形狀部件亦可使用 3D 列印的方式製作。

除了金屬的 3D 列印以外，奇異公司也有設置塑料的 3D 列印，主要是提供工程師對於機組設計的發想，有一些對於氣渦輪機的設計，或是機組組裝設計的想法，立刻以塑料 3D 列印成型，能夠有效幫助工程師研發設計，此方

式亦可提供修護處在訓練新人，或是需要變更修護的流程會有一定的幫助。



圖 3-29、奇異訓練中心



圖 3-30、奇異訓練中心

## (二)燃燒器測試中心

奇異氣渦輪機 H 系列機型設計於 1992 年，至 1998 年完成第一部 9H 機組(50Hz)組裝及廠內測試，並於 2003 年商轉。此外奇異公司於 2000 年完成第一部 7H 機組(60Hz)組裝及廠內測試，並於 2008 年商轉。H 系列機型規格如圖 3-31 所示。

### COMPARISON



### 7F/HA GAS TURBINE PORTFOLIO

	7F.04	7F.05	7HA.01	7HA.02	7HA.03
GT OUTPUT	198	243	290	382	430
NOX/CO EMISSIONS (PPMVD)	GT 9/9 CC 2/2	GT 12/9 CC 2/2	GT 25/9 CC 2/2	GT 25/9 CC 2/2	GT 25/9 CC 2/2
GT MIN LOAD (EMISSIONS COMPLIANCE)	49% 97MW	43% 105 MW	25% 73MW	30% 115 MW	30% 129 MW
COMPRESSOR	18 Stage	14 Stage	14 Stage	14 Stage	14 Stage
COMBUSTOR	DLN 2.6	DLN 2.6+	DLN 2.6+AFS	DLN 2.6+AFS	DLN 2.6+AFS
POWER TURBINE	3 Stage	3 Stage	4 Stage	4 Stage	4 Stage
SIMPLE CYCLE START-UP (MINUTES)	11	11	10	10	10
2X1 NET PLANT OUTPUT (MW)	615	756	880	1148	>1200
2X1 NET PLANT EFFICIENCY (%)	60.1%	60.4%	62.6%	>64%	>64%
2X1 PLANT START-UP (MINUTES)**	<30	<30	<30	<30	<30
2X1 PLANT RAMP RATE (MW/MINUTE)	60	80	110	120	150

圖 3-31、7HA 機型規格表

H 系列的特色為燃燒筒冷卻形式是以蒸汽冷卻，奇異公司於 2014 年推出氣冷式冷卻的 HA 系列，全部使用空氣冷卻，不用額外使用蒸汽冷卻，可使氣渦輪機

啟動更快，現階段主要為 7HA.01 與 7HA.02(如圖 3-32)，未來台中及興達的新機組 7HA.03(如圖 3-33)，其氣機葉片比 7HA.02 長，可增加空氣流量，提升推力 380MW 至 430MW。7HA.03 操作靈活性佳，可以從其 430 MW 的負載下降到約 130 MW，介於兩者之間運轉，並保持排放值符合法規，如果需求增加，風電及太陽能停止發電，單機 430 MW 的電力也可以快速靈活地併入系統，增加供電可靠性。

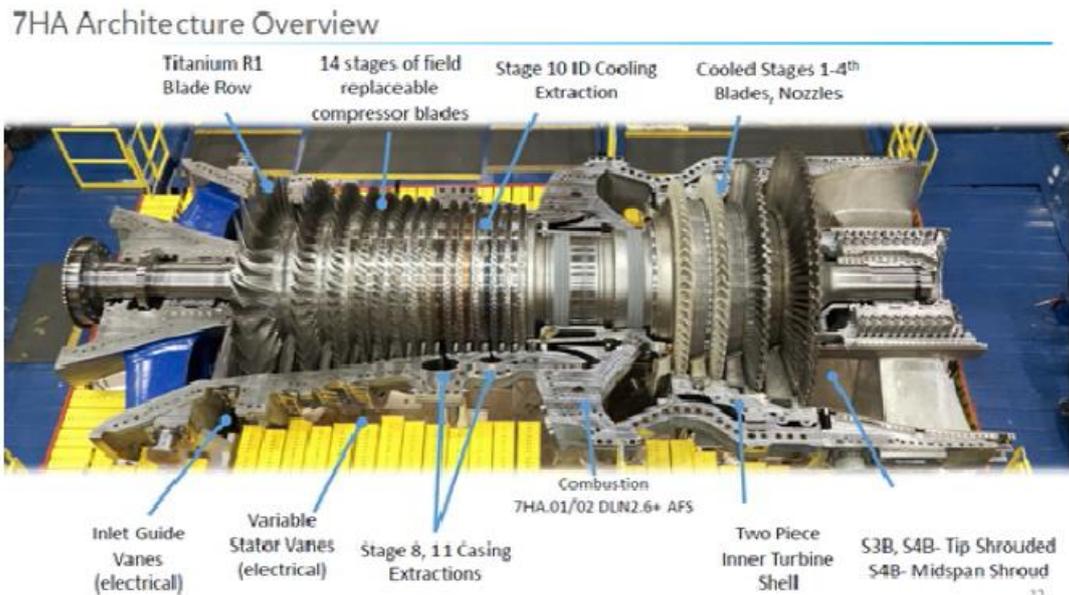


圖 3-32、7HA 內部構造圖

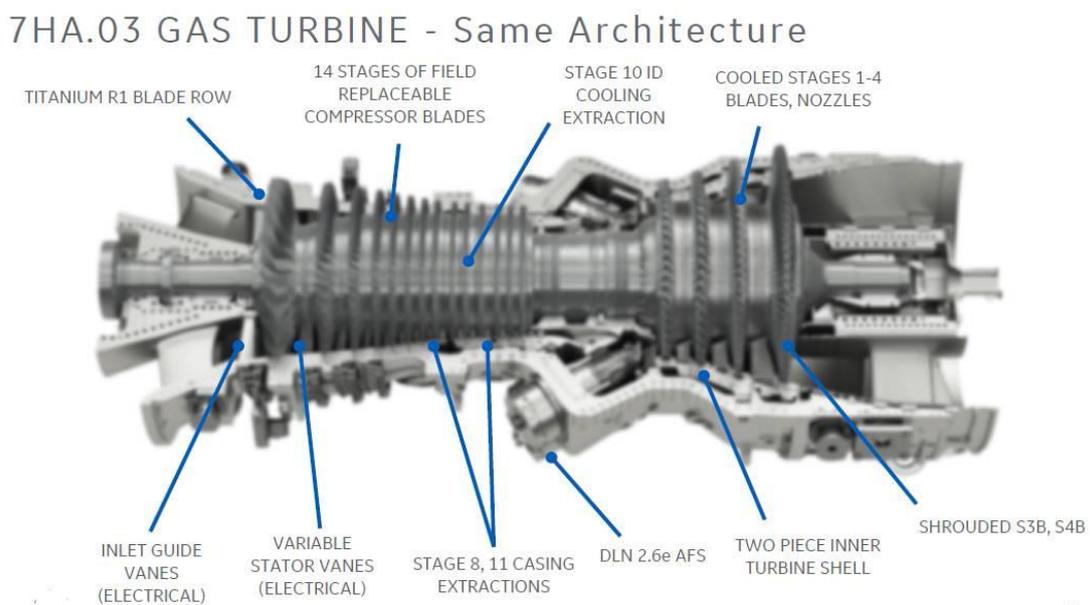


圖 3-33、7HA.03 內部構造圖

格林威爾氣渦輪機工廠建置有燃燒器測試中心，由燃燒器測試中心主管介紹



(如圖 3-34)，可容納 10 個完整的單只燃燒器測試台，包含控制室、數據監測中心與排放物測量中心，如圖 3-35。氣渦輪機工廠亦設有單獨燃燒筒測試台，測試台可選用多種燃料燃燒狀況，測試台於燃燒筒內部亦有裝置攝影機，可於控制室螢幕上觀察燃燒筒內火焰狀況，並顯示燃燒狀況、溫度及 NO<sub>x</sub> 等數據，在燃燒的過程中，可同步監測燃燒筒的振動狀況。

奇異公司研發的 DLN-2.6 燃燒筒 (Dry Low NO<sub>x</sub> Combustor) (如圖 3-36)，採用多噴嘴(Multi-nozzle)、徑向燃料分段(Radial Fuel Staged)、旋流器(Swirler)、5 個燃料噴嘴(Fuel Nozzle)，以及 1 個導管噴嘴(Pilot Nozzle)設計。目前大潭電廠 7HA.02 機組使用 DLN-2.6 燃燒筒，並搭配 AFS 系統(Axial Fuel Staged)，可於軸向分階段提供燃料，可有效控制火燄溫度，減少 NO<sub>x</sub> 生成。

另外，7HA 系列燃燒筒冷卻使用空氣冷卻，空氣流動於燃燒室外的襯套，這種襯套是奇異公司特有的雙層複合牆設計，可使空氣產生渦流達到冷卻效果後引入燃燒室裡，可進一步控制 NO<sub>x</sub> 的排氣生成。



圖 3-34、與燃燒器測試中心主管合影



圖 3-35、奇異公司燃燒器測試中心

# HA Low NOx Combustion Technology

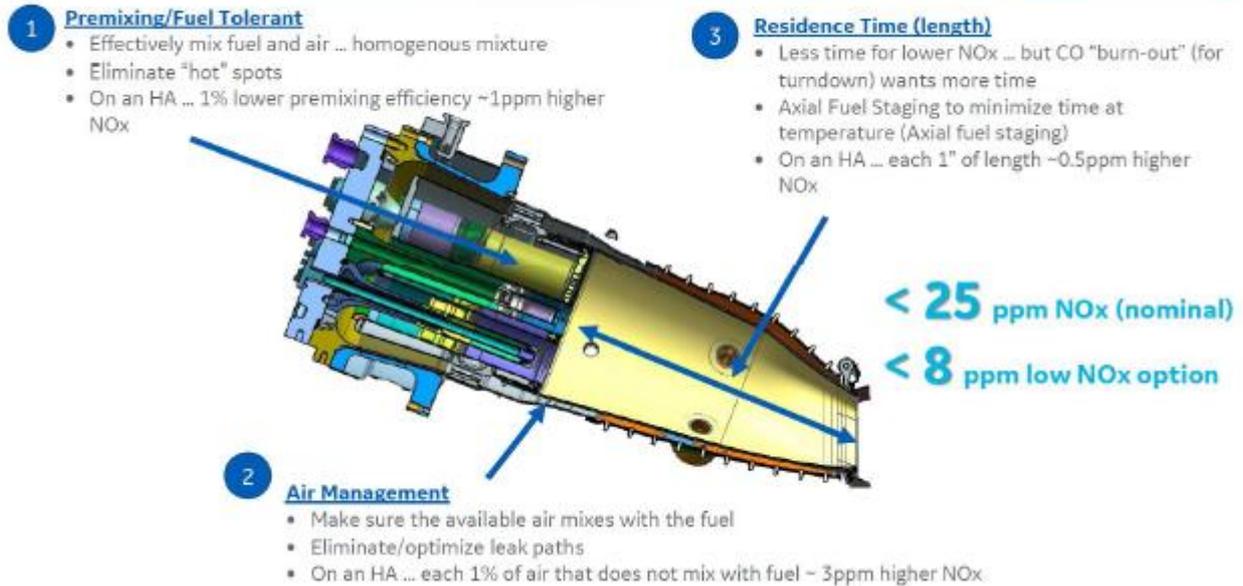


圖 3-36、奇異公司 DLN-2.6 燃燒筒構造圖

奇異公司最新機型 7HA.03 氣渦輪機採用更進階的燃燒器 DLN2.6e+AFS(如圖 3-37)，除了保有 7HA.02 所使用的 DLN-2.6+AFS 燃燒筒功能外，採用微混合器噴嘴增進燃料與空氣混合度，能在低負載時保持良好的 NOx 量，而且燃氣變動範圍增大為+/-15%(如圖 3-38)，對於機組燃料選用上更具彈性。

## DLN2.6e Combustion technology overview

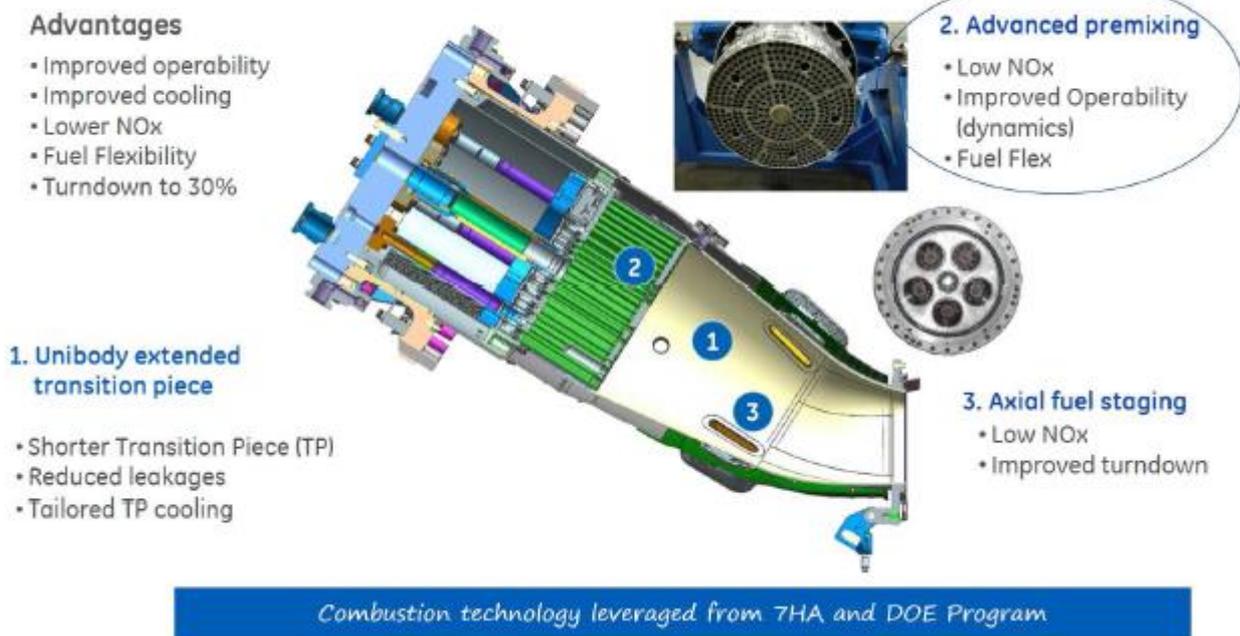


圖 3-37、奇異公司 DLN-2.6e 燃燒筒構造圖

# DLN2.6e is more capable than 7HA DLN2.6+ combustor

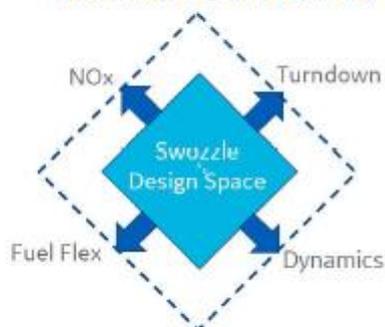
7HA.02 DLN 2.6+ Swozzle



Micromixer



Micromixer Expands Capability



Parameter	DLN2.6+	DLN2.6e
Tfire @ 25 ppm NOx capability*		++
Pressure Drop (%)	6.5%	5.9%
GT Turndown (% load)	30%	30%
Ethane+ fuel capability	25%	~100%**
H2 fuel capability	18%	>50%**
Modified Wobbe Range	+/- 7.5%	+/- 15%

\* p99 NOx guarantee  
 \*\* Tested in GTTL, further development needed (accessories & combustion NPI)

*DLN2.6e provides better performance and greater fuel flexibility*

圖 3-38、奇異公司 DLN2.6 與 DLN2.6e 燃燒筒性能比較圖

## (三)離網燃氣輪機測試台

奇異公司在格林維爾氣渦輪機製造工廠與測試中心擁有可變速、可變負載的離網燃氣輪機測試台(如圖 3-39 所示)，在新研發機型或改善之機組都會先安裝於實際可達額定轉速與滿載之離網燃氣輪機測試台測試，測試台可選用多種燃料，測試台上安裝各種監測 sensor，測試點多達 3600 個以上，包括氣渦輪機各段溫度、壓力、燃燒室溫度、排氣溫度、NOx 排氣與振動值等數據。

離網燃氣輪機測試台上可以直接以額定轉速 3600 RPM 去進行高速運轉，其中若氣渦輪機在測試階段有質量不平衡造成的振動問題，可以直接在機組上進行配重，測試流程如圖 3-40 所示。



圖 3-39、氣渦輪機測試設施(本人於中間位置)



圖 3-40、氣渦輪機測試設施流程

#### (四)氣渦輪機組裝與維修工廠

氣渦輪機組裝與維修工廠可以看到他們現場拆裝的區域分明且燈光明亮，工廠配置圖如 3-41 所示，各式元件的維修也會依照維修的程度以不同顏色的標籤做記號，不同區域也會維持一定的動線讓人員與機具安全的移動。

工廠裡的組裝分門別類依序的完成，且會置於低速動平衡機約 360 RPM 的低速動平衡，若有葉片造成的質量不平衡，則馬上進行調整或是配重處理。圖 3-42、3-43 為氣渦輪機組裝工廠現場圖。

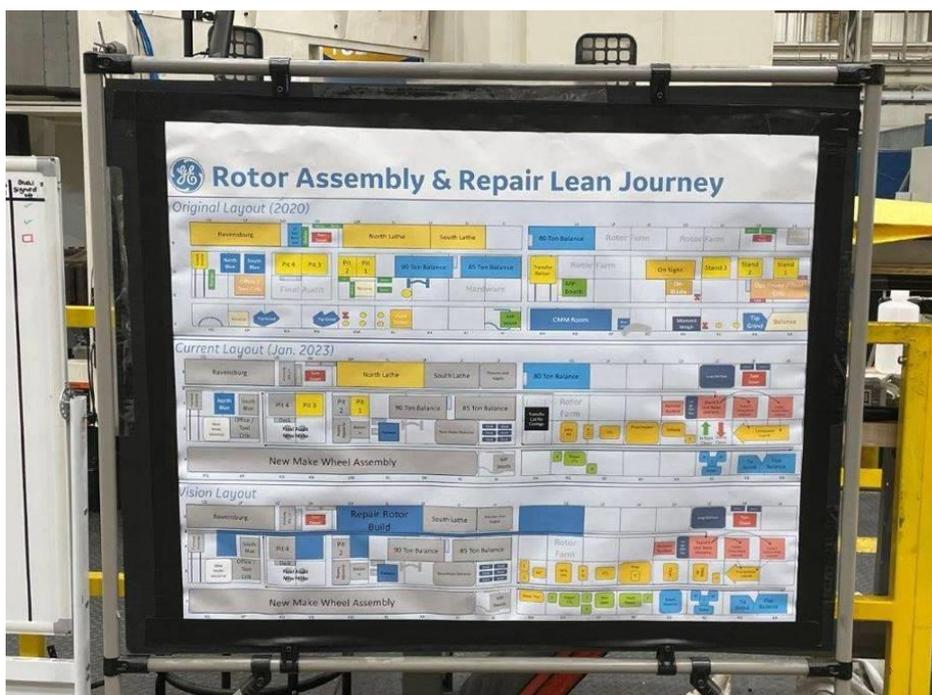


圖 3-41、氣渦輪機組裝與維修區域示意圖



圖 3-42、氣渦輪機組裝與維修工廠

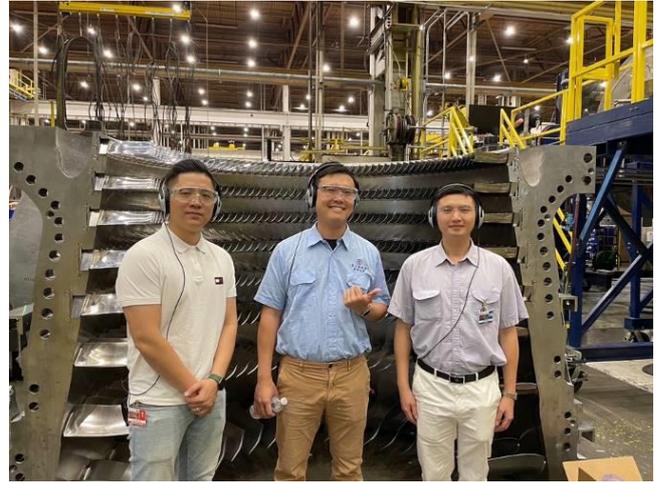


圖 3-43、氣渦輪機組裝與維修工廠

在格林威爾氣渦輪機工廠會看到廠區內很像販賣機的機台，此為各種手工  
具、手套、擦拭紙、耳塞、綁繩、雙面膠、各式線材等，以員工證感應後取用，  
讓廠商定期補貨，此方式能方便管理與追蹤各式材料的領取使用狀況，且不會造  
成浪費及美觀，並減少工程師的採購負擔，也不會遇到臨時缺少工具的問題，如  
圖 3-44、3-45。



圖 3-44、工具管理機台



圖 3-45、工具管理機台

### 三、 休士頓(Houston) / 航改型氣渦輪機工廠(Aero Alliance)

由亞特蘭大搭乘國內達美航空移動至休士頓，實習的最後一站為奇異公司的航改型氣渦輪機工廠 Aero Alliance(圖 3-46)，實習中有跟奇異公司航改中心員工互相簡介彼此在工作上面的內容(如圖 3-47、圖 3-48)，航改型氣渦輪機工廠主要的項目在於 LM2500 系列機組的開發、製造與維修。

台電在 17.5 萬瓩的通霄發電廠能源轉型專案中，採購 6 組奇異進階 LM2500XPRESS 發電機(LM2500 +G4，剖面圖如圖 3-49、3-50)，每組皆具備 1 個 LM2500 航空衍生型燃氣渦輪機模組套裝與排放控制系統，此原為航空業設計的裝置，能在不影響維護週期、成本的情況下執行日常啟動和停機，可於 5 分鐘或甚至更短的時間內啟動，是在急迫需求下為電網快速供電的理想選擇，有利於協助台電更有效地整合並輔助再生能源。

台電專案的精巧型 LM2500XPRESS 裝置設備可用於 50 赫茲與 60 赫茲供電系統的單循環及複循環配置，單循環配置中，提供電力達 34MW，機組效率 39.5%；複循環配置中，提供電力達 47MW，機組效率 54.4%，在 20 年的運行期間，LM2500 的裝置設備平均可靠率超過 99%，可用率則超過 98%。

LM2500 燃氣渦輪發電機可以提供推力至 23 MW，熱效率 35%；1990 年開發出 LM2500+ 為 LM2500 第三代，可以提供推力至 31.4 MW，熱效率 37%，2005 年開發出 LM2500+G4 為 LM2500 系列的第四代，可以提供推力至 37.3MW，熱效率 38%，目前最新的為 2021 年開發出的 LM2500+G5，可以提供推力至 38 MW，熱效率 39%。

航改型氣渦輪機工廠裡組裝完機組後，會以低速動平衡機進行約 700 PRM 的

低速動平衡，進行低速動平衡時，平衡機台還額外有保護外罩可以罩住低速動平衡機，以免測試中有零件噴飛的工安風險；廠區內亦有可以以額定高速運轉的測試台，並進行各項參數的量測，包含振動值量測與調整配重。



圖 3-46、航改型氣渦輪機工廠(Aero Alliance)



圖 3-47、與奇異公司開會狀況



圖 3-48、航改型氣機工廠合影

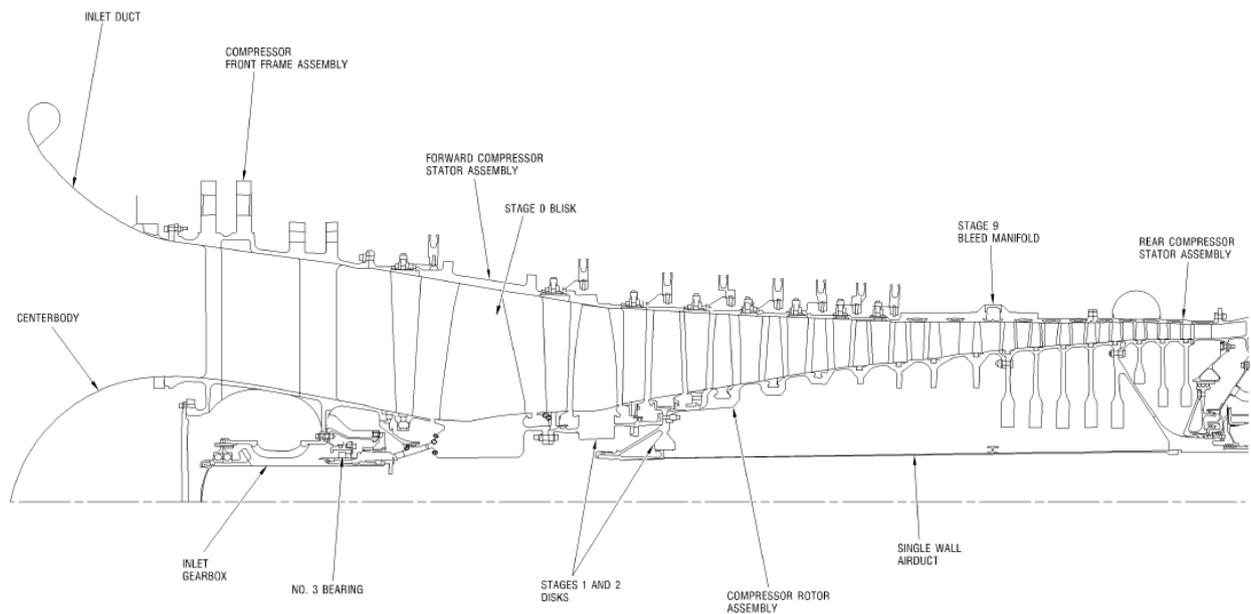


圖 3-49、LM2500+ DLE Gas Turbine Cross Section- Six Stage Power Turbine

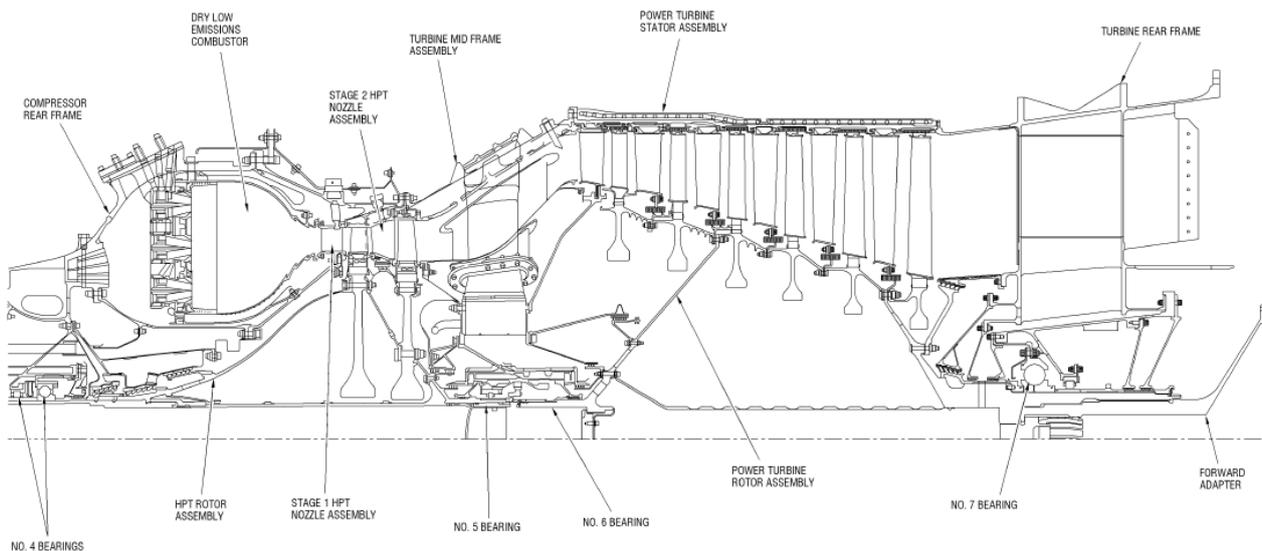


圖 3-50、LM2500+ DLE Gas Turbine Cross Section- Six Stage Power Turbine(延續圖 3-50)

以下為整理整理整趟實習過程中的多項討論主題，挑選幾項出來探討：

### 1. 機組運轉達臨界轉速時的高振動問題探討

問題：若機組運轉在臨界轉速下產生高振動問題(如圖 3-51)，台電無高速動平衡機，只有機械工廠有低速動平衡機，如何以低速動平衡作為替代解決方案？

回答：針對此問題奇異公司回覆，第一臨界振動問題可以透過低速動平衡機降低，雖然低速動平衡能解決第一臨界問題，但有可能需要針對額定轉速或滿載振動問



題，去進行現場的高速動平衡。

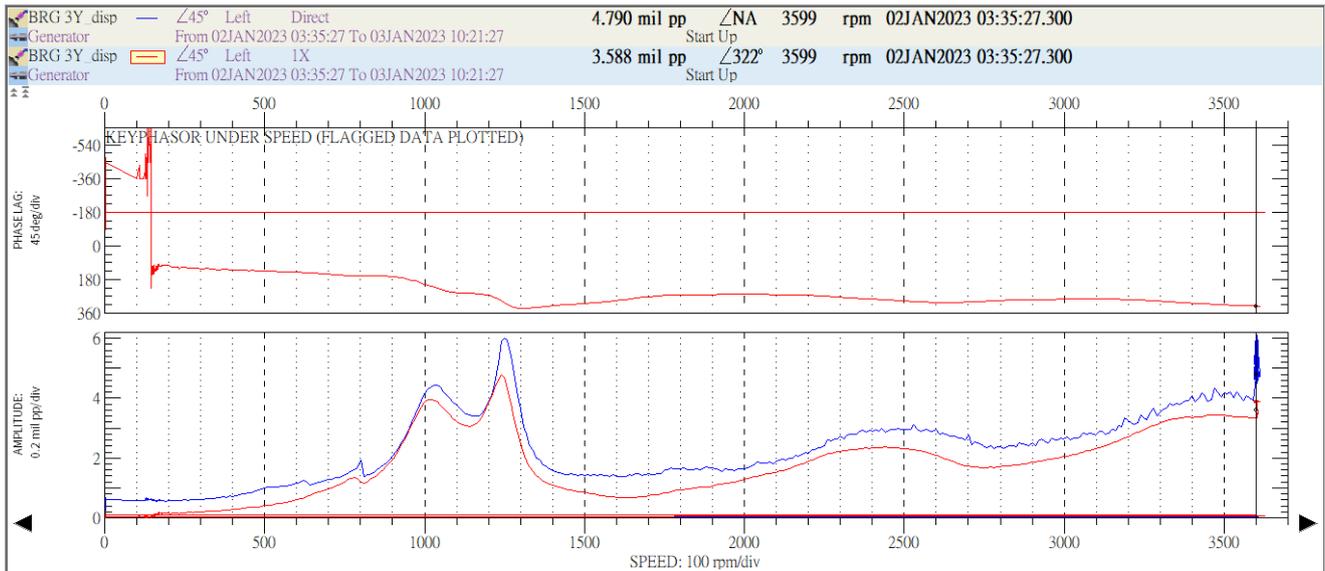


圖 3-51、興達電廠 GT43 臨界高振動

## 2. 電廠控制室振動安裝訊號盤面問題探討

問題：通霄電廠購置的 LM2500 機組，以及未來台中電廠與興達電廠建置之 7HA.03 機組，控制室有盤面可以安裝 Bently ADRE408 嗎？

回答：均有設置盤面可以外接 Bently ADRE408 可以使用的訊號，且 Bently ADRE408 所抓取的機組振動值資訊可以轉檔成 TXT 檔或其他特定的檔案格式，可以給未來台中與興達電廠可能設置的效能管理系統(Asset Performance Management，簡稱 APM)，讓 Smart Signal 可以去做額外的振動分析。

## 3. 興達電廠 Gas Turbine 發電機高振動問題探討

問題：興達電廠 Gas Turbine 機組發電機轉子更新後，大修後啟動升速至額定轉速振動尚在可接受範圍內，但負載至滿載後發電機軸承產生高振動，此問題的原因以及解決方式？

回答：以下為討論的概述，針對此問題認為可能發電機轉子在負載狀態下受熱因素影響，造成轉子質量中心改變，引起轉軸不平衡，若頻譜分析為一倍頻不平衡

(1X)，一般可藉由配重平衡方式解決。

#### 4. 奇異公司監診中心的 Smart Signal 預估機組壽命的方式

問題：APM 系統內的 Smart Signal 預估機組損壞的時間是如何預估？

回答：以下為討論的概述，Smart Signal 建置模型的方式至少要有機組運轉約 3 個月的資料，以此為基礎下，若有機組振動變高的跡象，會以線性的數學方式去評估出可能會損壞的時間點，尚無非線性的模型方式，若客戶端有需求，後續軟體的維護可能會更新進去做為評估的依據。

#### 5. 奇異公司監診中心的 Smart Signal 軟體判斷機組振動問題的準確性

問題：若機組發生問題，Smart Signal 軟體會給出什麼樣的建議？

回答：以下為討論的概述，機組發生振動問題時，Smart Signal 會依照目前監測機組的所有偵測訊號，去給出不同嚴重的、需要優先處理的解決方式，尚需振測人員依照經驗去一一排除，只能給訊號初步發生的異常給予方向，還是需要振測人員，或機組專業工程師現場機組拆解檢查才能知道細部真正的問題。

## 肆、心得與建議

### 一、心得

政府預計在 2025 年讓台灣成為非核家園，在廢核與減碳的政策下，國內燃氣發電可能提升至 50%，這種能源組合的迅速改變，對於台電是一大挑戰。國內燃氣複循環機組建置已如火如荼的進行中，奇異公司在大潭電廠 7 號機已裝機運轉，2019 年台電選擇奇異公司的 HA 機型安裝在大潭電廠的 8、9 號機，這些都是單機約 382 MW 容量的氣渦輪機組，而正在興建的興達電廠 3 部燃氣與台中電

廠 2 部燃氣複循環機組預估容量會更大，此次格林威爾氣渦輪機工廠實習參訪的 7HA.03 機型可達 430MW，且燃氣技術相較於傳統大型的汽輪發電機組更為快速、靈活和更高效率。因此，台電對於將來這些大容量氣渦輪機組的運轉維護工作需投入更多心力，而實際派員至原廠實習的方式是最為快速且有效的。

歷年來台灣的複循環機組一直增加，機型不斷更新升級，且環保意識抬頭，對於排氣 NO<sub>x</sub> 的燃燒器技術也不斷要求更嚴格。未來在大潭電廠、台中電廠與興達電廠，奇異公司的複循環機組越趨重要，台電也還在跟奇異公司商討，可能會在這三個地方各成立專屬台電獨立的監診中心，藉由這次的實習參訪才能清楚了解到從製造、組裝、維修到後端的監視問題處理的不易，以及可變速、變載的離網燃氣渦輪機測試台，可單體測試的燃燒器測試台等，可以讓人覺得收穫頗豐。建議未來可以趁購置新機組的機會，派員在奇異公司各單位深入的學習參與各項製造、組裝、維修與配重的工作，了解機組如何運轉維護、新機組設計理念、維修與各種燃燒、振動分析等，相信一定能提升台電未來的運轉維護能力。

## 二、建議

1. 原廠對於各種新開發之工具、設備與軟體，以及應用與遇到的各種實例，常因為機密性之資訊而造成台電無法得到所需的協助與詳細資訊，甚至問題的回覆常需等待許久才能得到答案，故派員至國外先進廠商進行深入的受訓有其必要性；新購置新機組的專案時，建議能讓修護處加入建廠的外派受訓，相信對於修護處團隊的專業能力能有所增加。
2. 修護處有其專業的檢驗與振測團隊，較常專注於電廠的問題預防，台電綜研所有較多的研究與開發能力，建議能進行像原廠一樣的整合，開發、設計到運轉

與維護能互相合作，增強修護處研發的能力；在訓練部分，定期聘用國外專業訓練講師至台電實際教授遇到同樣的問題，原廠會是以怎樣的方式解決問題，提升修護處多元的專業技術能力。

3. 奇異公司擁有自己的訓練中心，能讓新人或是客戶接受完整的教育訓練，建議修護處能同樣建置屬於修護處的訓練中心，讓新人能完整的接受的各種機組安裝、維修、檢測與振動分析等相關訓練，完整的知道各個流程的方式，能幫助自己了解工作的本質。
4. 未來若能在大潭電廠、台中電廠與興達電廠設置台電的監診中心，希望原廠與電廠能協助在同時兼顧台電資安的要求下，如何能讓修護處同步線上診斷與處理相關的振動問題，以利隨時有突發狀況的時候，能即時在線上提出應急的對策，減少人員的奔波與工安風險。
5. 因應台灣的能源政策，未來燃氣機組的數量勢必會增加，因此建議台電能請奇異公司在台灣同步設置維修與監診中心，與台電修護處能互相合作，減少機組有問題的時候送至國外的來回運送時間，及時在台灣能進行維修，增加維持運轉穩定發電的可靠度。
6. 建議不僅是奇異公司的燃氣機組設置線上監控系統，能平行展開至其他廠家的燃氣機組，甚至是燃煤機組等，能讓未來台電的監診中心同時監控所有機組，知道修護人力如何妥善調度安排，甚至是預防性的檢修都能知道其重要性的優先順序。

## 伍、 參考文獻

1. Christian Vandervort, David Leach and Marcus Scholz, “ADVANCEMENTS IN H CLASS GAS TURBINES FOR COMBINED CYCLE POWER PLANTS FOR HIGH EFFICIENCY, ENHANCED OPERATIONAL CAPABILITY AND BROAD FUEL FLEXIBILITY” , GE Power, 12-13 October 2016, Brussels, Belgium
2. 奇異公司監診中心資料
3. 奇異公司格林威爾氣渦輪機工廠資料
4. 奇異公司休士頓航改型氣機工廠資料