

出國報告（出國類別：實習）

氣渦輪機熱元件非 OEM 公司 再生技術研習

服務機關：台灣電力公司 電力修護處

姓名職稱：林士閔 生產技術課課長

徐承範 機械工程師

派赴國家：南韓、美國

出國期間：105 年 10 月 6 日～105 年 10 月 19 日

報告日期：105 年 12 月 16 日

摘要

按照既定政策，在第一核能發電廠兩部機組的服役年限，將於三年內（註：107年12月5日、108年7月15日）陸續屆滿；屆時由擴建完成，採用天然氣發電的大潭發電廠及其他擴建計畫，彌補減少之供電量（參考自「維基百科」）。第二及第三核能發電廠若同樣不延役，最遲將於114年5月17日達到停止運轉年限（參考自原能會網頁）。太陽能及風力發電等再生能源之開發，在台灣仍有難以克服的客觀條件限制（季節及穩定性等等）。因此，本公司火力發電廠，未來十年內，在供電的角色日益吃重！

而在行政手段上的冒險躁進，今（105）年核一廠與核二廠各有一部機組無限期停機中；其結果為，備轉容量率（Percent Operating Reserve）多次探底，最低紀錄為5月31日的1.64%；低於3%如此緊急狀態的天數也達到10次之多！而今年之所以未發生限電，有賴近年緊鑼密鼓進行的機組汰舊更新計畫中，林口燃煤機組在正式商轉前即予以全載發電；在用電尖峰時段，部份電廠，包含前途未卜的龍門電廠，其「全黑啟動」所用之緊急氣渦輪機，也投入支應，方得以勉強度過難關。在通盤的供電規劃上，更新計畫也是在「新型機組有明顯優於已往的發電容量」此前提，才使得系統裝置容量不致於倒退、未在「供電穩定」上篤定失敗。

因此，佔地較小、建廠所需時程較短且負載可迅速調節之高溫複循環氣渦輪機組，未來勢必日益增多；甚至針對容量較小的舊機組提前進行新陳代謝，亦是合乎邏輯的思維。而已裝機機組迄今運轉多年，機組長期在高溫環境運轉下，產生高溫腐蝕與高溫氧化損壞，須進行維修或更換。由於新品葉片價格昂貴（以M501F機組為例，全新氣機第一第二級動靜葉片，一套共218片，即達2億6000萬元），故須以原葉片重新噴鍍再生使用，以降低新葉片購置成本，始符合運轉經濟效益。

本處（電力修護處）負責本公司氣渦輪機組葉片再生產製，為因應各製造廠家機組不斷更新，須積極引進國際新興技術，在最短時間於國內建立更完整葉片再生處理能力；另外，尋求國外適當廠商進行技術方面之交流，預做技術及設備導入之

規劃，未來在本處廠區遷移至林口新址時，使產線配置與設備建構達到最佳化，以滿足日後電廠大修用料需求，並有效降低新葉片購置數量。

氣機葉片再生技術有其專業及獨特性，不論是國際上各知名氣機製造原廠 (OEM) 及非原廠 (non-OEM) 之組件維修或製造公司，都有其特殊的專利與製程。經由本次赴南韓成一渦輪 (Sung-II Turbine) 公司、美國通用電氣 (GE) 公司與位於美國佛州的義大利商 PSM 公司等氣機熱段組件製造及再生廠商、或氣渦輪機設計製造原廠，研習氣渦輪機熱元件非 OEM 公司再生技術，並觀摩設備建構功能最佳化等，引進相關技術運用於生產製程上，將會提昇本公司熱元件再生處理能力。

目 次

一、 目的	1
二、 過程	3
三、 南韓 Sung-Il Turbine 公司研習	4
四、 美國 GE 公司研習	18
五、 美國義大利商 PSM 公司研習	31
六、 心得與建議	41
七、 參考資料	43

一、 目 的

本處（電力修護處）投入氣渦輪機組熱元件（包含「葉片」等熱段組件，Hot Gas Path Parts, 'HGPP'）再生工作；若以綜合研究所研發試產時期（民國 95 年）起算，此業務推展已滿十年，對電廠之營運成本之降低，做出不可輕忽之貢獻。

新世代氣渦輪機的效能與容量，數十年來持續進步。各原廠致力於研發與設計，推陳出新，總發電效率之提高，往往歸因於運轉溫度的推升；而此一條件，對於熱段零組件所須具備之耐用度、複雜度，近幾年來，可謂登峰造極。各原廠間的零組件不相通用，全新備品與維修服務長年的專有獨佔，同樣提供該原廠議價方面之優勢，從而形成公司成本負擔之壓力。

單價高昂之新型號熱段組件，其維修再生、乃至新品製造等關鍵技術，各原廠持續發展精進，自不待言；而涉足於氣渦輪機中低階零組件加工製造的實業，在具備一定基礎與規模後，產業升級的目標，即是投入在關鍵技術的研究開發，以維修乃至製造出高複雜度、高價值的零組件，做為重要的里程碑；並以朝向氣渦輪機技術獨立、完全自製此目標邁進，打破原廠專有獨佔的局面。

重工業技術等級之精進，絕非一蹴可幾。本公司在抑低成本、擷節支出等思維上，對於自行投入氣渦輪機熱段零組件之修理再生的期盼，或許未達「產業升級」此高度；然而天下沒有白吃的午餐，當性能更優異、容量足以彌補發電版圖缺口的機組，所使用的是更複雜更巧妙的新設計，它們高價值的核心零組件，高複雜度、特殊材料，在修補與再生製程之中，限制更多，明顯的需要新技術新製程才能處理。

本公司在修護技術上，面對時代的洪流，宜抱持著自立自強之態度，尋求不斷的精進；同時積極延伸觸角，增加學習仿效的機會，盡量掌握產業現況及趨勢。除了本公司的綜合研究所，持續投入精力挑戰與鑽研之外；參與公司外研究機構的發展計畫、必要時赴國外研習、引進先進技術及設備等，皆是提升本公司氣渦輪機熱元件再生處理技術、與強化再生成品品質，所須著手努力之途徑。

此次奉派出國研習，主要目的為了解國外氣渦輪機熱元件再生處理與新品製造等先進技術，提升本公司葉片再生技術能力及品質。行程包括南韓成一渦輪（Sung-II Turbine）公司、美國通用電氣（General Electric Company, 'GE'，簡稱「奇異」）公司、

及位於美國佛羅里達州的 PSM 公司（全名 Power Systems Manufacturing, LLC，暫無中文譯名；係西元 2015 年世界電力產業大事「美商奇異併購法商阿爾斯通（Alstom）發電事業部門」時，由阿爾斯通分離、改併入義大利商安薩爾多能源（Ansaldo Energia）公司旗下的子公司）。她們分別是氣機熱段組件製造及再生廠商、或氣渦輪機設計製造原廠，分別在氣渦輪機葉片再生、新品製造及元件設計，各有其專精或獨有技術，透過本次研習了解其葉片再生技術及相關資訊，未來可應用在本公司葉片再生製程，提升本公司葉片再生技術能力及產線製程上之品質。

二、 過 程

時間	地點	工作內容
105.10.06. ~ 10.06.	台北 →南韓釜山市	往程
105.10.07. ~ 10.10.	南韓釜山市	<ol style="list-style-type: none"> 1. Sung-II Turbine 公司研習氣機葉片製造與再生製程。 2. 觀摩 Sung-II Turbine 公司葉片再生生產線配置與設備。
105.10.11. ~ 10.12.	南韓釜山市→美國亞特蘭大市	搭機
105.10.13. ~ 10.15.	美國亞特蘭大市	<ol style="list-style-type: none"> 1. GE 公司格林維爾廠研習氣機葉片製造與再生製程。 2. 參觀 GE 公司格林維爾氣機葉片再生、大型組件製造加工及修理等生產線設備。
105.10.16. ~ 10.16.	美國亞特蘭大市 →西棕櫚灘市	搭機
105.10.17. ~ 10.17.	美國西棕櫚灘市	<ol style="list-style-type: none"> 1. PSM 公司研習氣機葉片製造與再生製程。 2. 觀摩 PSM 公司葉片再生生產線配置與設備。
105.10.18. ~ 10.19.	美國西棕櫚灘市 →台北	回程

三、 南韓 Sung-II Turbine 公司研習

Sung-II Turbine (中文譯名：成一渦輪) 公司，於 2012 年 7 月成立，係位於南韓釜山市的一家 non-OEM 工業氣渦輪機組件製造與維修公司，員工人數約一百一十人。原母公司 Sung-II Machinery (中文譯名：成一機械) 公司，於 1978 年成立，1997 年開始進入氣渦輪機熱段組件業務；並於 1999 年，首度在南韓將氣渦輪機燃燒器的高溫組件，進行商業化供應。

Sung-II Turbine 主要業務內容有：氣渦輪機熱段組件製造及修理再生、以及氣渦輪機電廠的維護服務。其主要客戶，是南韓的五個地區電力公司（她們係西元 2002 年韓國電力公社 (Korea Electricity Power Company, 'KEPCO') 進行電力自由化政策時，發電部門所拆分為六家發電子公司的其中五個火力發電公司；而水力原子力發電公司 (KHNP) 所需服務則與氣渦輪機較無關聯），及其國內的 GS Power 公司。在海外業務方面，尚在起步階段，曾提供過元件修理服務，給菲律賓的巴丹複循環電廠。

該公司有兩個廠區，皆位於釜山市內，圖 1 為廠區外觀照片。



圖 1 Sung-II 公司 NokSan Factory (上圖) 及 HwaJeon Factory (下圖)

在氣渦輪機葉片等熱段組件產品上，Sung-II Turbine 公司除了較早投入的修理再生業務之外，現已進一步建置新品葉片之新製產線；使南韓國內的電廠有更多選擇，對氣渦輪機原廠的依賴程度，也將更為降低。

由於氣渦輪機葉片運轉時所處溫度甚高，目前使用鎳基合金 (Nickel based alloy) 材質為主流；而工作溫度最高的第一、第二級動、靜葉片，在氣機進氣溫度 (Turbine Inlet Temperature, 'TIT') 達到 1,300°C 以上的機組，皆設計為中空並灌以冷卻氣體，以防止葉片過熱燒損。由此可知，在形狀上具有高複雜度的氣機葉片，製造時的工序，必定相當繁複嚴謹。

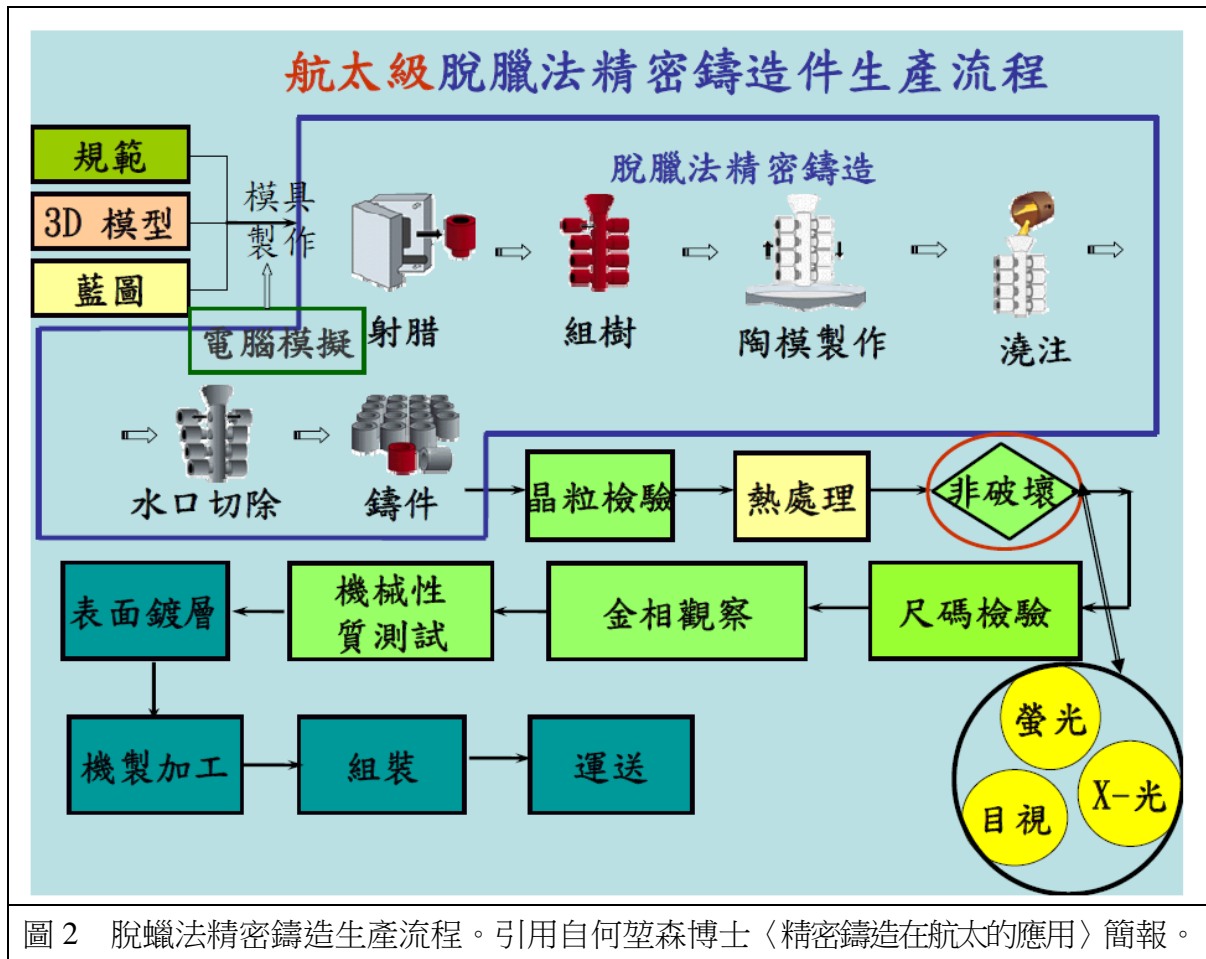
首先簡略介紹氣機熱段組件中，高溫部件製造時所適用之航太級精密鑄造製程。

3.1 航太級精密鑄造製程 (Precision Casting Process) 簡介

精密鑄造技術是集合機械、化學及冶金、材料的一門科學；而航太級精密鑄造，是以脫臘法 (Lost Wax Casting Method) 為主。其優點有：

1. 適用之金屬材質幾乎不限制。
2. 尺寸精度：1/2" (英吋, inch) 內可達 $\pm 0.003''$ ，1" 為 $\pm 0.005''$ ，往後每增加 1" 為 $\pm 0.003''$ ，10" 以上為 $\pm 0.005''$ 。
3. 表面光度 (roughness) 比一般鑄件好：32~125 RMS (Root Mean Square)。
4. 可製作形狀複雜及一致性之零件。
5. 可鑄造之最小壁厚：0.015 英吋。
6. 可鑄造之最大重量及尺寸：無限。
7. 鑄造後之形狀即為產品形狀，加工量少。
8. 可大量生產。
9. 低成本工具費。
10. 設計彈性空間大。

下頁圖 2 為其生產流程圖。



脫臘精密鑄造主要涵蓋五個步驟：(1) 蠟經過射出成型成蠟模；(2) 蠟模組合成蠟樹；(3) 形成殼模（陶模），接著脫臘；(4) 將金屬液注入殼模後凝固；(5) 敲破殼模，並切除銜接處及水口等多餘材料，得到鑄件毛胚。以下摘要進行概述——

（一）蠟模製作階段。臘的種類，即有如下之區分：

型蠟、澆道臘、黏臘、修補臘、浸臘、澆口杯臘、水溶性臘。

其他模型種類，包含：

聚苯乙烯 (polystyrene, 'PS')、發泡聚苯乙烯 (expanded polystyrene, 'EPS', 俗稱保麗龍)、尿素 (urea，一種有機化合物，化學式 $\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$)、樹脂 (resin) 等。

而蠟型組合方式，大致有：

型蠟－型蠟；型蠟－塑膠；型蠟－陶心；型蠟－水溶性臘；型蠟－樹脂模型。

因為蠟具有較大的體積收縮率，蠟模容易發生收縮問題，這也是脫蠟過程中最頭痛的問題之一。蠟同時也是熱的不良導體，因此蠟模容易發生固化不足以及產生表面凹痕缺陷。除了根據欲鑄造出的工件形狀，在模型設計時必須考慮預留收縮量等條件外，澆道系統的設計與計算及方案模擬，也非常重要，因素有：

■ 模流 (Mold flow / filling)

- Fluid Flow :Bernoulli's theorem
 $wZ + wPV + wv^2/2g + wF = C$
- Fluidity
- Type of gating system
- Effect Inclusion& Gas Hole

■ 凝固 (Solidification)

- Heat Transfer
- Solidification Rate
- Solidification Time
- Solidification /Order
- Casting Modulus

圖 3 為澆道方案設計及蠟樹各部位名稱。

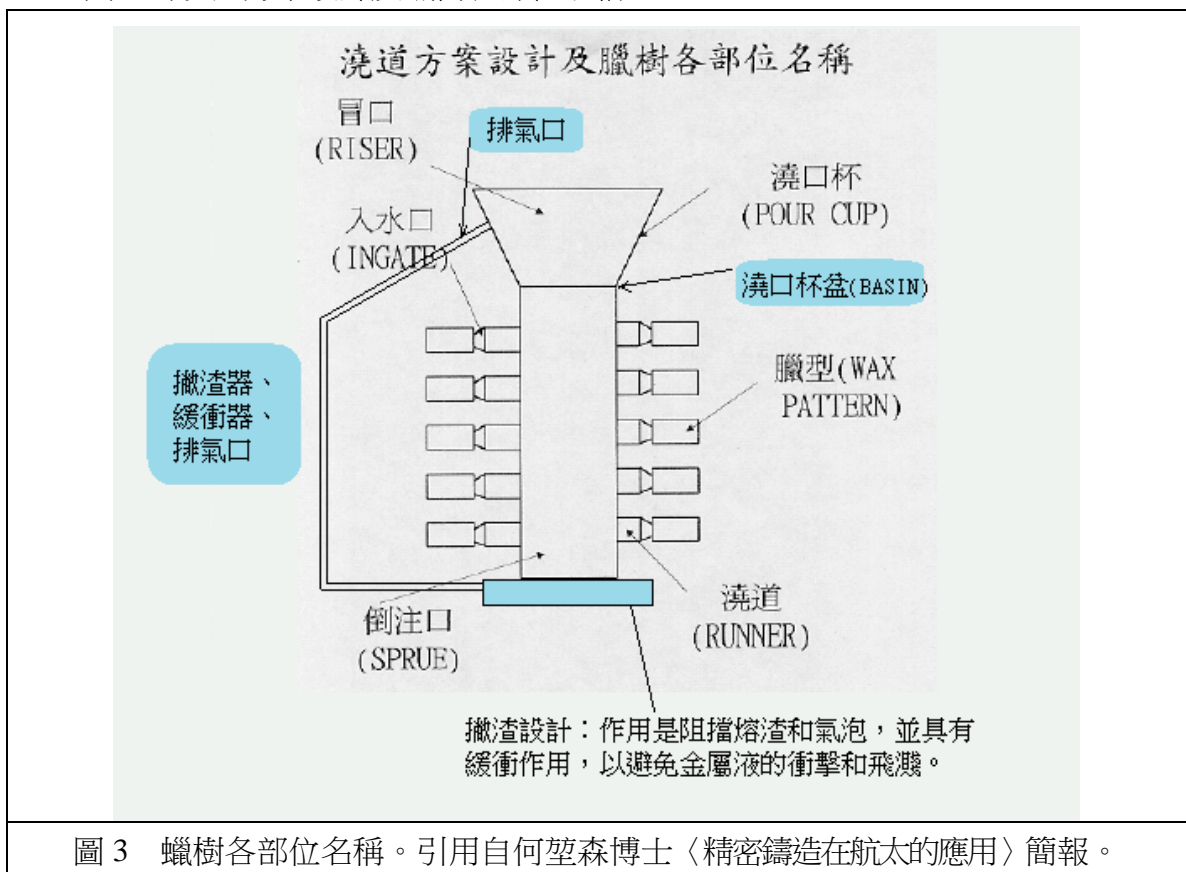


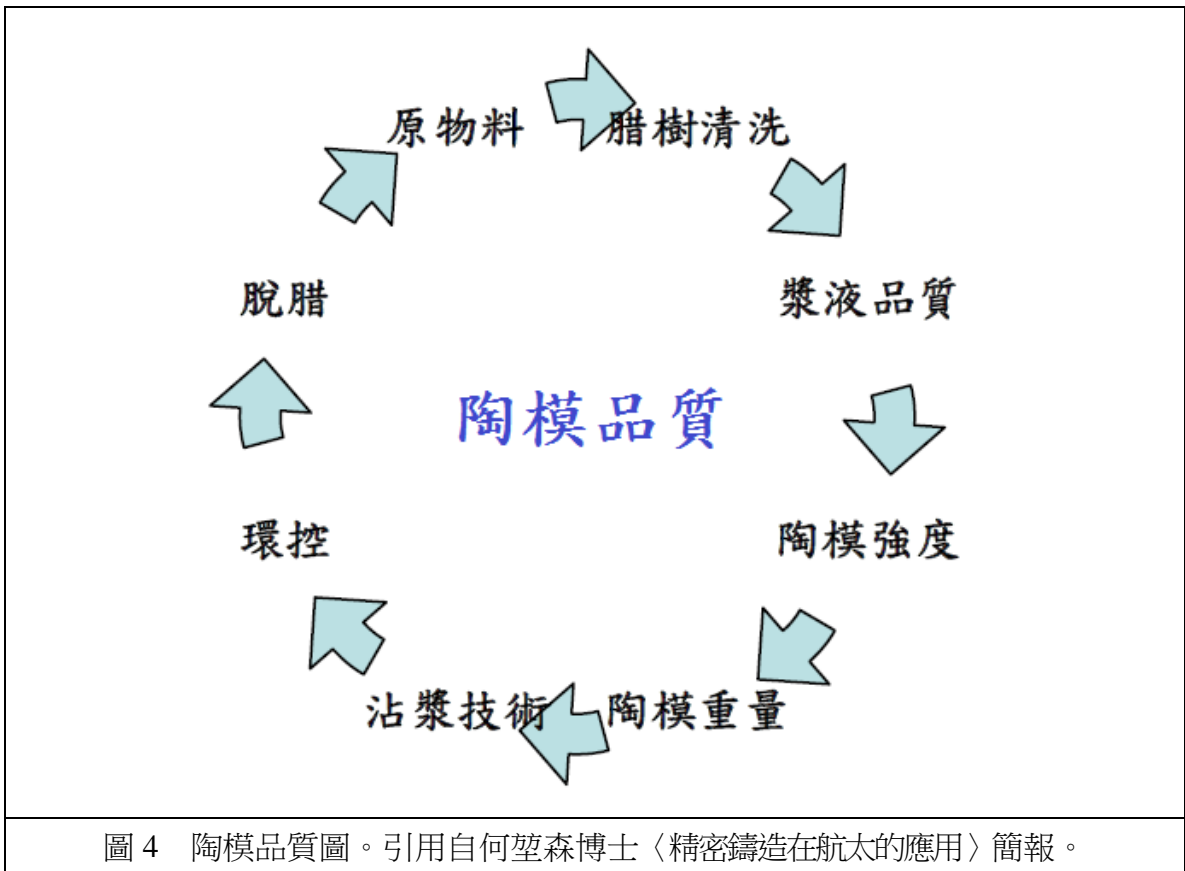
圖 3 蠟樹各部位名稱。引用自何堃森博士〈精密鑄造在航太的應用〉簡報。

(二) 陶模成型製作階段。陶漿配製，其重要成分及對應原料種類有：

- 黏結劑 (Binder)：分成水性及酒精系列。
- 耐火材：包括鋯，氧化鋁，碳化矽，熔融石英，氧化鋯，莫來石等不同粒度之砂粉。
- 去離子水。
- 介面活性劑。
- 晶粒細化劑。
- 強化劑。

上列六項的後四項，屬於添加物；佔比雖輕；但須視製程需求而調配。

陶模的品質，與製程中多個特性環環相扣，如圖 4 所示。



陶模有引入 MOR (Module of Rupture, 破斷模數) 、MOE (Module of Elasticity,

彈性模數) 、FI (Fracture Index, 破裂指數) 等等機械指標數值，進行分析與評估；而陶漿、黏結劑、陶模等物的品質，亦須嚴謹控制，確保每次製造的條件有高度一致性。圖 5 為一檢測要求的範例。

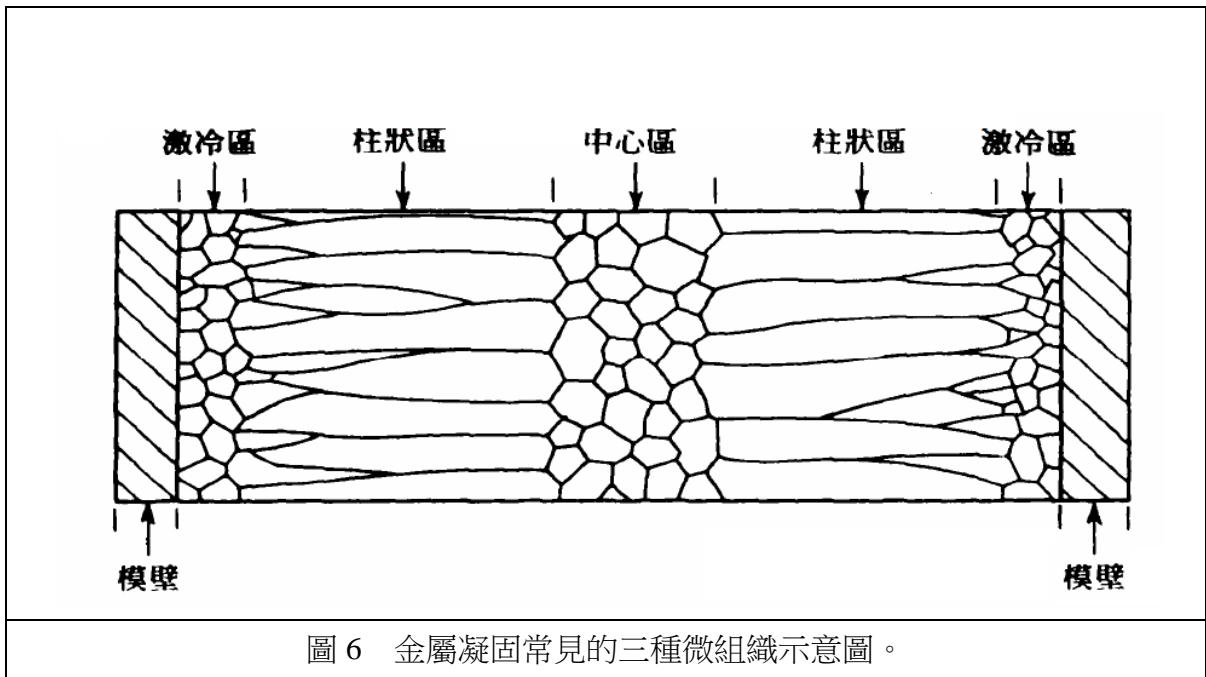
陶漿、黏結劑、陶模測試週期頻率	
1.黏結劑固體量	進料檢驗
2.黏度	一天2~3次
3.SiO ₂ 含量	每週一次
4.PH值	面漿每週一次
5.膠化實驗	每週一次
6.含菌量	每月一次
7.平板重	背漿每週一次
	面漿每班或天一次
8.強度測試	每週一次
9.溫度	每天一次
10.泥漿密度	每週一次

圖 5 陶漿陶模相關品質控制之範例：多項特性檢測及其頻率之要求。

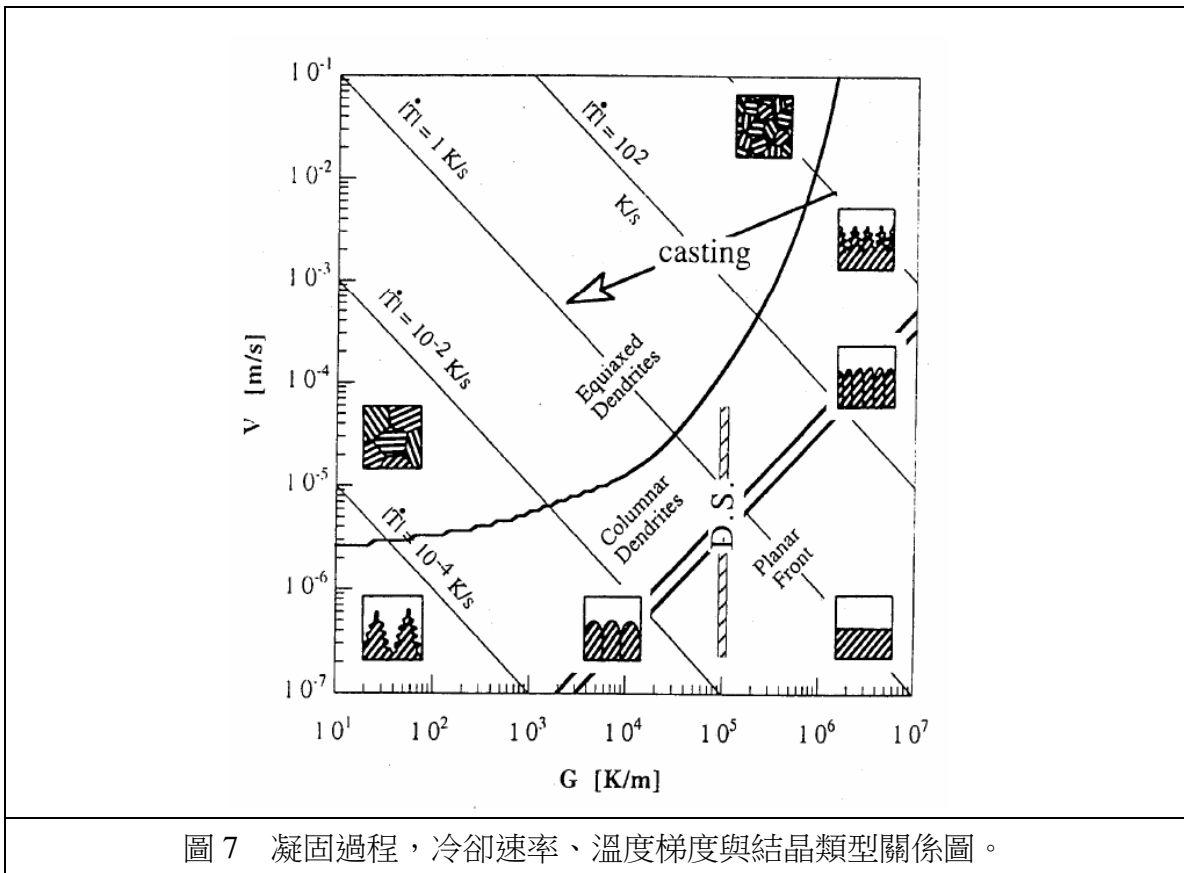
(三) 熔煉、澆鑄與凝固等工作階段。以下為工法區分，或階段內細部過程：

- 熔煉：大氣熔煉 (air melting) 或真空熔煉 (vacuum melting) 。
- 澆鑄：直接澆鑄法 (direct) ；盛桶澆鑄法 (ladle) ；翻轉法 (rollover) ；無桶澆鑄法 (CLA process) ；真空澆鑄法 (vacuum) ；壓差鑄造法 (counter pressure) ；離心鑄造法 (centrifugal) ；延伸槽鑄造法 (extended launder process) ；底澆熔解鑄造法 (bottom pouring)
- 凝固：成核與成長

金屬凝固常見的三種微組織分別為：靠近模壁的激冷區 (chill zone) 、稍微遠離的柱狀區 (columnar zone) 、以及凝固較緩慢、較無方向的中心區 (equiaxed zone) ；示意圖如下頁圖 6 所示。



鑄件微組織，已知深受鑄造凝固過程之影響，凝固速率(或界面成長速率) V 和溫度梯度 G 決定了上述之晶粒組織，其中 $G \cdot V$ (相當於冷卻速率 $|\dot{T}|$) 控制微組織形成之尺寸 (scale)，而 G/V 則決定晶粒成長之型態。關係圖如圖 7 所示。



3.2 Sung-II Turbine 公司精密鑄造製程簡介

Sung-II Turbine 公司大約於西元 2010 年，開始研發氣渦輪機動靜葉片之新品製造；並由冷卻流道配置相對較單純的 Siemens-Westinghouse（西門子-西屋） W501F 型第三級靜葉片著手。運轉條件更嚴苛、內部冷卻流道複雜的第一、第二級動葉片，目前該公司接受委託而投入若干年的，是 Alstom 11NM 型的零件。上述的組件，皆有試產產品，予以實際裝機在提出委託之客戶機組裡，接受運轉驗證中；等它們完成一個完整運轉週期，即通過實際測試，進入正式商業化供應。

其新品製造流程，屬於真空精密鑄造 (vacuum precision casting)，並大致區分為 11 個製程段落：陶瓷砂心 (ceramic core, 陶心) 製作、射蠟 (wax injection)、組樹 (wax tree assembly)、形成殼模 (mould making, 包含沾漿 fluid dipping 及淋砂 stucco)、除蠟 (dewaxing)、殼模熱處理 (heat treatment)、真空澆鑄 (vacuum casting)、去殼 (shell removing)、切斷 (cutting)、浸濾除模 (leaching, 目的為使砂心較易於從鑄件內裂解取出)、後處理。圖 8~圖 17 為其生產製程照片。

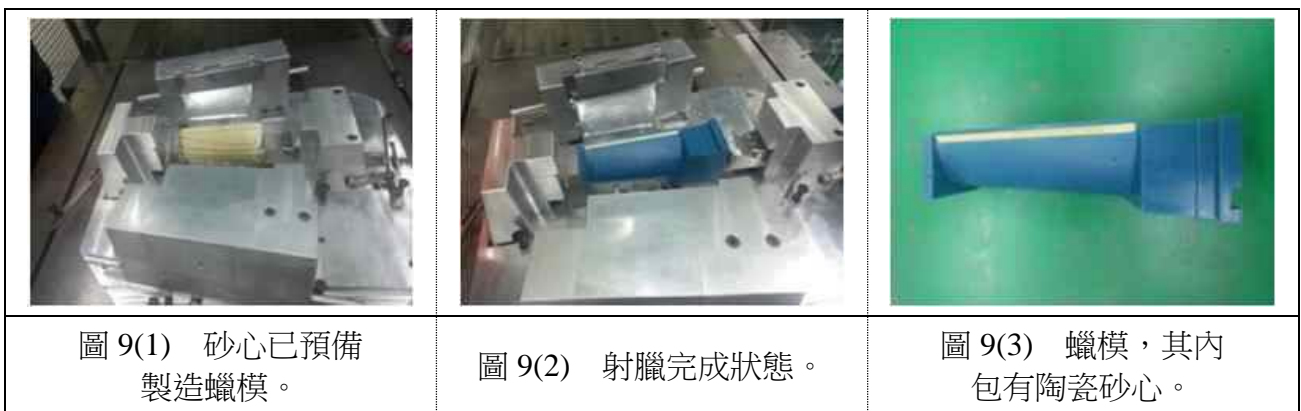
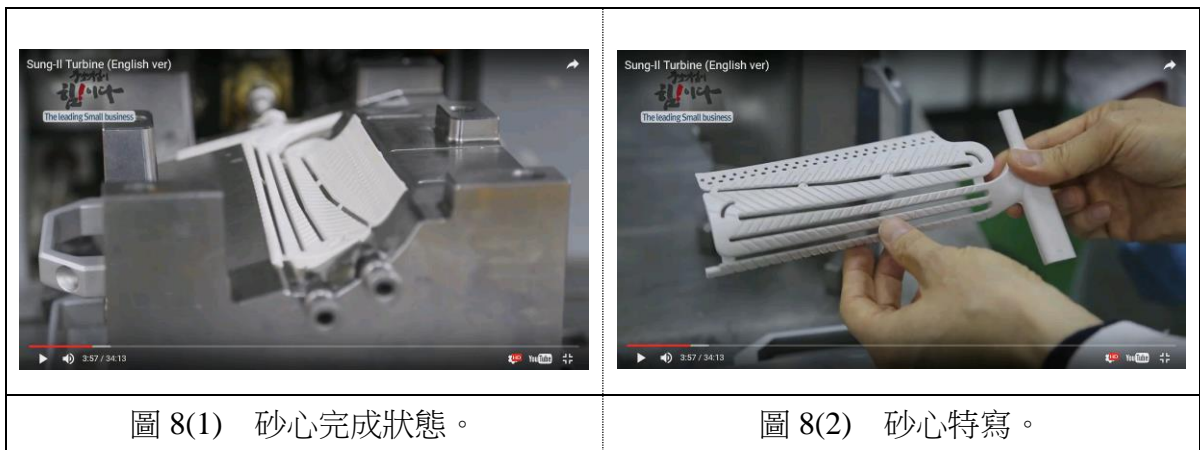




圖 10(1) 蠟模組樹，一次製出多個鑄件；然須優先考慮每一件的澆鑄品質。



圖 10(2) 蠟模組樹，黑色管子用以建立澆道 (runner)，亦為低熔點材質。



圖 11(1) 沾漿淋砂以形成殼模。



圖 11(2) 達到足夠厚度，殼模形成。



圖 12 除臘用高溫爐。



圖 13 陶製殼模澆鑄前熱處理。



圖 14(1) 真空澆鑄高溫爐。

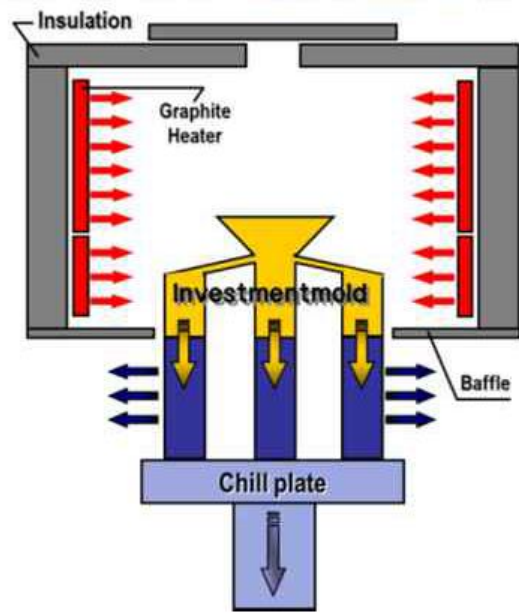


圖 14(2) 澆鑄示意圖。



圖 15(1) 澆鑄後、去除殼模前。

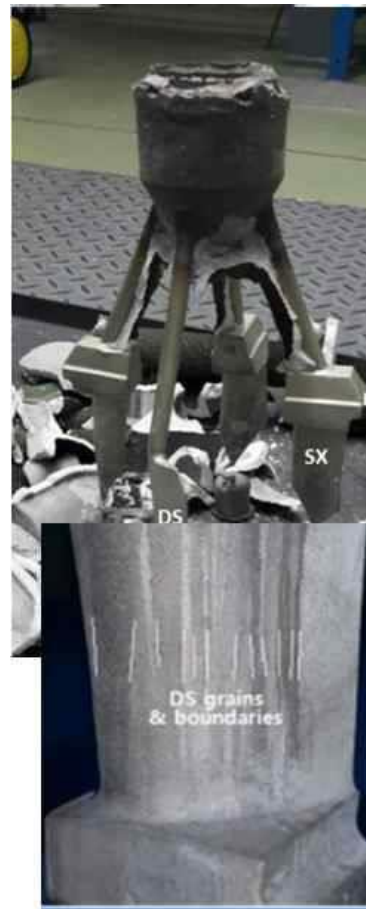
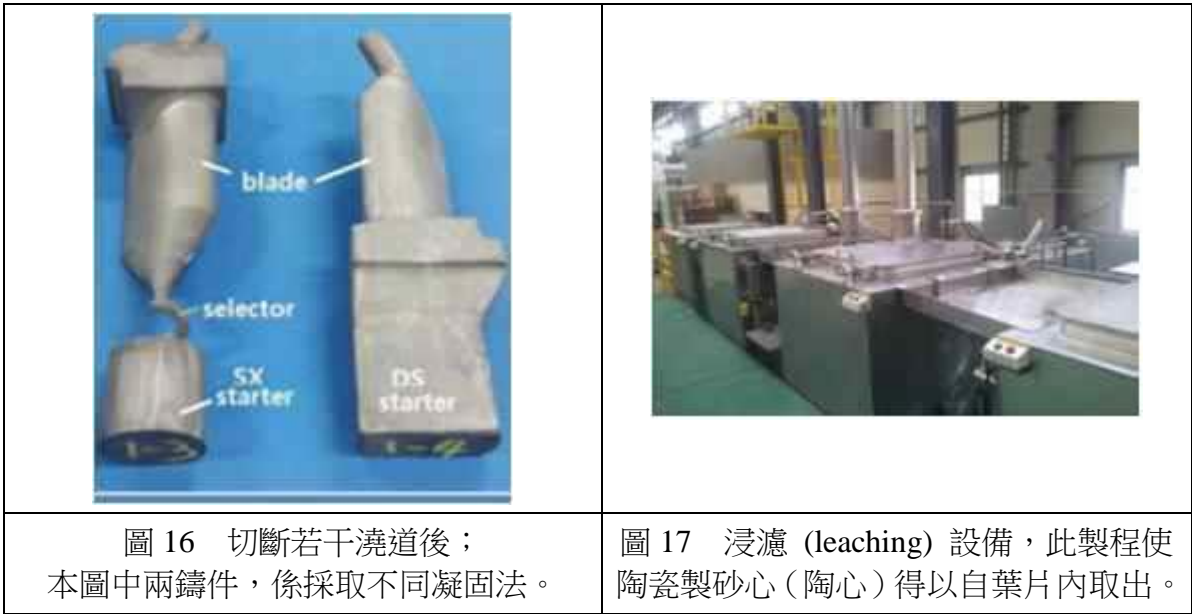


圖 15(2) 澆鑄完，並去除殼模後。

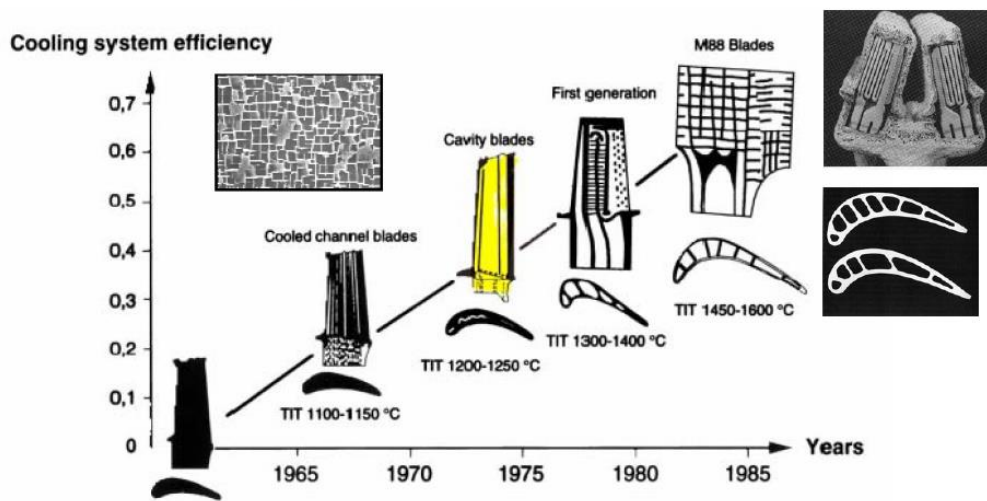


其中最根本的挑戰，即在砂心之設計與製作；由第 11 頁的圖 8(2)可約略看出，砂心既單薄而又複雜，它就是實體葉片內部空心的形狀（參考圖 18）；但又須考慮生產製程中的收縮、變形量等因素。這也是氣渦輪機高溫段葉片單價居高不下的原因。

渦輪空心葉片鑄件發展趨勢

改變流路設計：複雜之流路設計。陶瓷心之製作

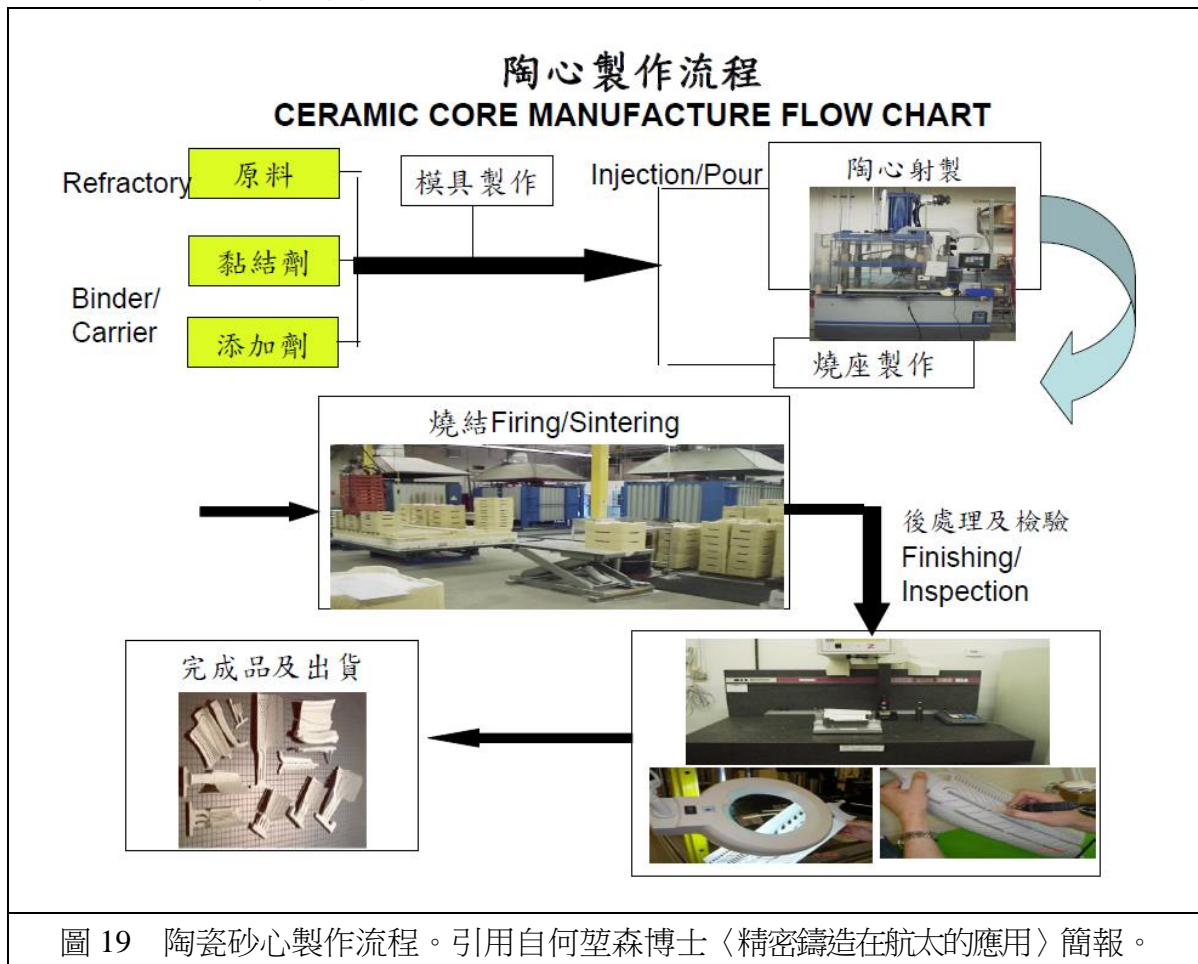
Air Cooled Passage: Soluble Wax Cores, Quartz Cores, Ceramic Cores



具冷卻通道設計的超合金渦輪空心葉片與剖面圖

圖 18 渦輪空心葉片發展趨勢。引用自何堃森博士〈精密鑄造在航太的應用〉簡報。

陶瓷砂心的製程，為航太級精密鑄造的第一部重頭戲，圖 19 為其大略的流程。找到強度足夠、耐高溫而能在澆鑄時維持形狀完整，且後續有方法予以破壞、自鑄件內取出不殘留，整個鑄造流程才不會白忙一場。而對設計的掌握、尺寸的修正調整、表面處理、品質掌控等等，皆須深入與嚴謹，萬萬馬虎不得！



3.3 南韓 Sung-II Turbine 公司廠區參訪

本次研習，前往其釜山市 NokSan Factory 及 HwaJeon Factory 兩個工廠。廠房雖是在母公司支持之下，由其他公司劃歸其用、逐步擴增面積，但有良好規劃，整齊而且動線暢通，研發相關工作，也佔有不小的面積；較重的工件，其作業區週邊也配置了起重或省力裝置。Sung-II Turbine 公司，在國家政策的支持下，具備長遠佈局的眼光，以及挑戰產業升級的野心，其未來發展，相信頗具潛力。

現場照片，如圖 20~23 所示。



圖 20 Sung-II Turbine 工廠鑄造用陶瓷砂心加工區。



圖 21 Sung-II Turbine 工廠蠟模組樹作業區。



圖 22 Sung-II Turbine 工廠陶模成型製程，自動化沾漿淋砂設備。



圖 23 Sung-II Turbine 公司的 NokSan Factory 。

四、 美國 GE 公司研習

美國通用電氣公司，簡稱「奇異」，是美國一家提供綜合技術與服務的跨國公司，經營產業包括電子工業、能源、運輸工業、航空太空、醫療與金融服務，業務遍及世界一百多個國家，擁有員工約 30 萬 5 千人（西元 2015 年資料）。根據財星五百大 (Fortune 500) 統計，其 2014 年營業額為 1,462 億美元，是美國第 9 大、世界第 27 大企業，也是道瓊工業平均指數 (Dow Jones Industry Average) 於 1896 年創始以來唯一目前仍列名其上（但 1900 年前後有近 10 年時間曾被移出指數外）的公司。

旗下的奇異動力 (GE Power) 公司，總部設在紐約 Schenectady，是 GE 最大的工業企業，營運範圍主要涵蓋動力，尤其是電力方面的事業。西元 2014 年員工有近 3 萬 8 千人，在全球超過 125 個國家為客戶提供服務；該年年營業額約 270 億美元。提供布局廣闊的發電、能源輸送和水處理技術，能在客戶當地解決這方面的挑戰。在能源工業方面，領域包含了再生能源，例如風力和太陽能、沼氣和替代燃料，還有燃煤、燃油，天然氣和核能。

GE 與近年來積極進行組織調整，為整個集團的發展，做長遠佈局，而變革統合的步調，也相當迅速。例如，幾年前才將水資源相關事業，與動力事業統歸為 GE Power & Water 公司；而在 2015 年與成功與法商阿爾斯通 (Alstom) 集團進行併購案、取得其極具競爭力的蒸汽渦輪機事業後，發電事業版圖獲得大規模補強，GE 就很快的將該旗下企業名稱，改成了 GE Power。雖然水資源相關業務仍屬其管轄，但可看出，發電事業在一口氣百餘億美金挹注，所積極促成的整合與壯大，GE Power 絕對是 GE 母公司長期發展的重要核心。

4.1 美國 GE 公司氣渦輪機非 OEM 修護服務研習

我們參訪所關注的議題，首要是「非原廠服務 (non OEM services)」，而該公司提出之簡報也開宗明義，列出做為全球工業巨擘，在火力發電產業裡，跨足至其他設計原廠的產品時，照樣有著引以為傲的全面服務，如下頁圖 24 所示。

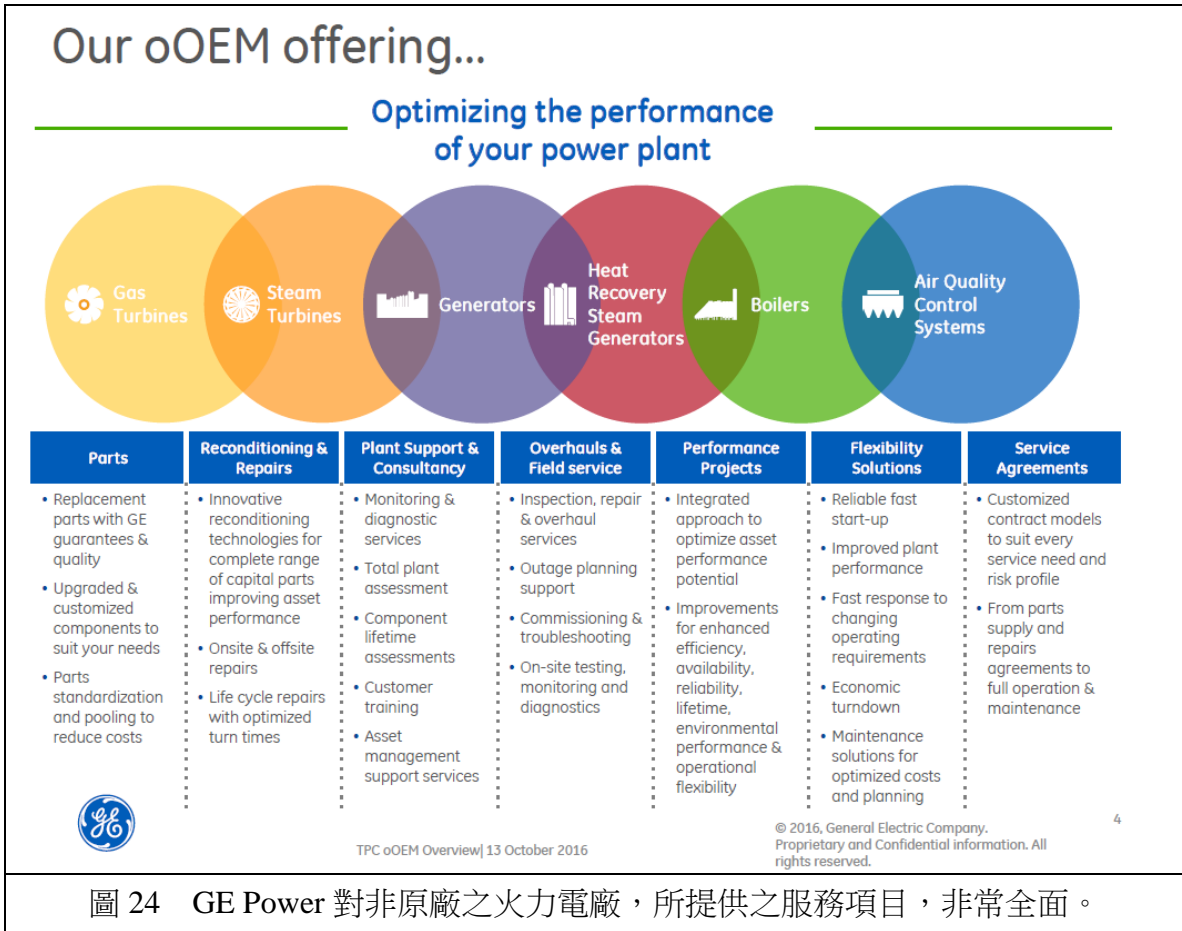


圖 24 GE Power 對非原廠之火電廠，所提供之服務項目，非常全面。

GE Power 發展的技术，使他們對部份非 GE 機組使用端，有自信提供「在不改動廠房內配置下，達到運轉週期延長 (interval extension)、氮化物 (NOx) 排放降低」等目標；給電廠在營運績效、環保議題等挑戰上，除了原廠 (OEM) 的升級方案外，有另一個選擇。所憑藉的，有進階燃氣道 (advanced gas path, 'AGP') 元件鑄造技術、冷卻 (cooling) 與氣封 (sealing) 的改良、更佳的絕熱塗層 (thermal barrier coating, 'TBC')、以及燃燒可調控性 (combustion operability) 的強化。

在 GE 人員提供的資料中，針對 GE 7F 系列，提供若干氣機葉片的檢查照片。該系列，與日商 MHPS (Mitsubishi Hitachi Power System Ltd., 三菱日立電力系統公司，係三菱重工 Mitsubishi Heavy Industries, 'MHI' 與日立製作所 Hitachi, Ltd. 於 2014 年 2 月合資成立) 的 M501F 型，一般視為 F 等級 (F class)，在設計年代、燃燒溫度、熱效率、發電容量等表現，皆相近似。MHPS 對於其 M501F 型的氣機第一第二級動、靜葉片，在運轉規範上，每次使用的週期限制甚高，原設計僅 16,000 EOH (equivalent operating hours, 等效運轉時數，係將機組的啟動次數，按壽命概略換算

值，併入實際運轉時數計算而得)；實務上基載機組 (base load unit) 使用大約 22 個月，即須對這些葉片全面檢查再生。而 GE Power 在 7F 系列的同類別零件，因採用 AGP 相關技術，運轉時數可以達到 32,000 小時 (起停次數則獨立計算，先達到先結束週期)，高達兩倍的時數！差距如此明顯，不得不讓人刮目相看！部份照片如圖 25 ~26 所示。



圖 25 GE 7F 系列氣機第一級靜葉片運轉後照片。在 F 等級裡，運轉週期優異。

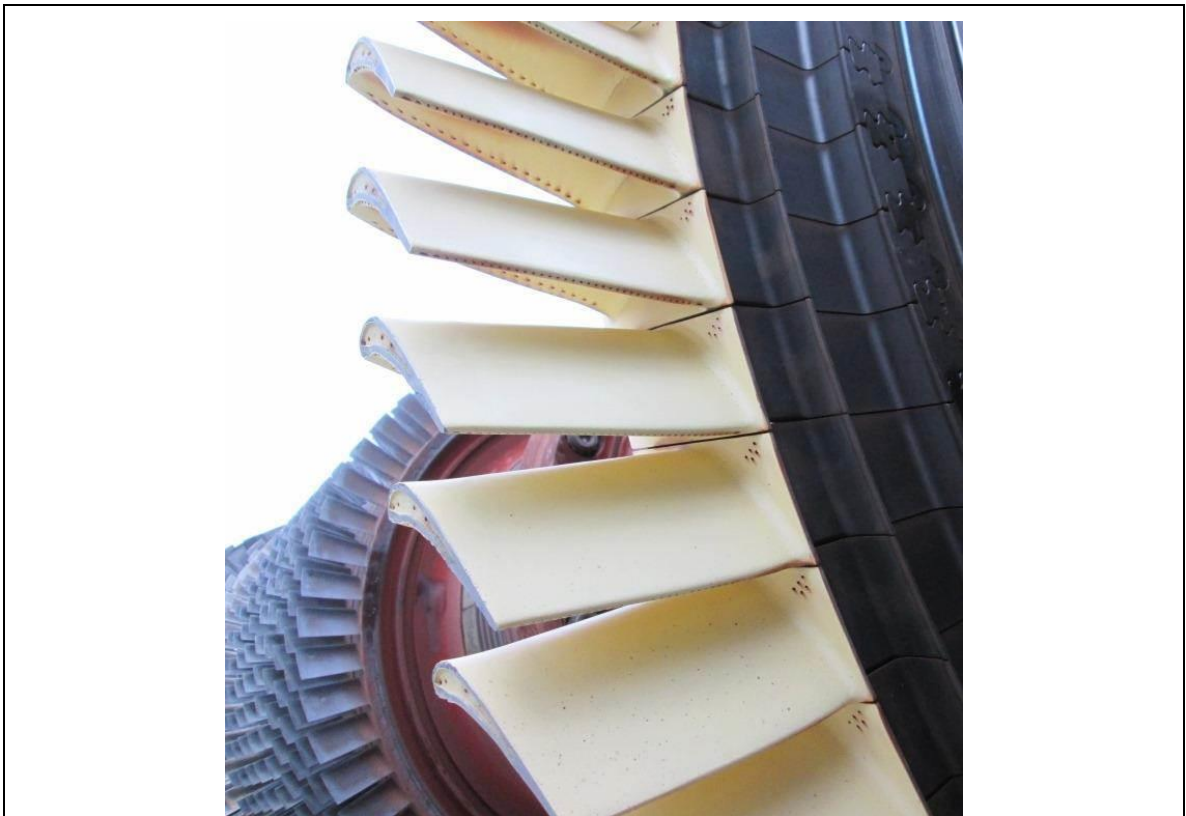
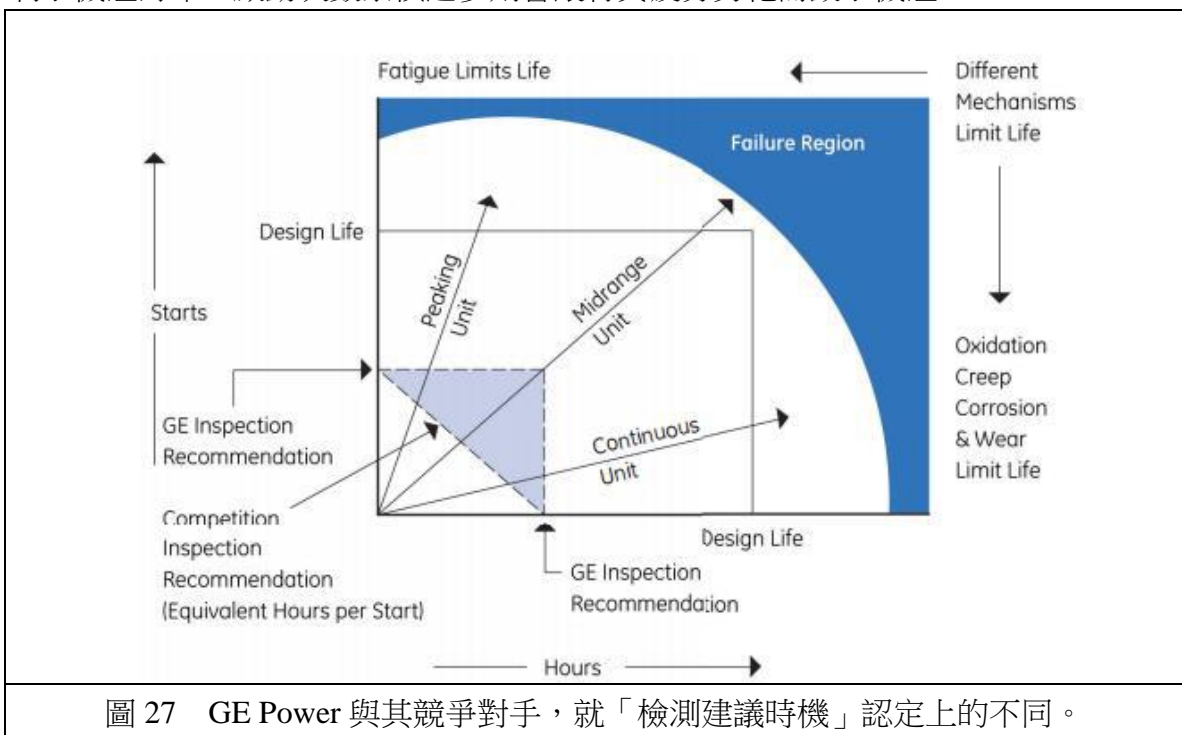


圖 26 GE 7F 系列氣機第一級動葉片運轉後照片。在 F 等級裡，運轉週期優異。

GE Power 對於其產品優勢深具信心，認為可有效降低成本，及提升效能（包含輸出提高與熱傳率降低）。目前雖尚未正式生產他廠組件，但已加速開發、成竹在胸，可能在未來數年內即推出商業化供應方案，與其他氣渦輪機設計製造原廠，競逐非原廠耗品部件的市場。屆時美商 GE Power、德商西門子 (Siemens)、日商三菱日立 (MHPS) 等三雄鼎立的局面，戰場更加遼闊，爭的不僅限於整機建置時的生意。GE Power 能有如此開疆拓土的雄心，也是其長年累積的技術能力、與豐沛的研發能量，所造就的實力。

4.2 研習時 GE 人員談及的幾個創新或研發主題

在運轉週期的認定上，GE Power 的見解，也與競爭對手不同，請參考圖 27。圖中以橫軸為運轉時數 (hours)，縱軸為啟動次數 (starts)；座標內，三條斜率為正值的直線，是三種不同角色的機組：斜率由小至大，分別為基載、中載、尖載機組。塗滿深藍色的區域代表機組毀損，是較為概念性的、但有共識的推測。多年來，專業研發人員已讓業界廣為明白，時數累積過高會使得氧化、潛變、腐蝕及磨損等作用限制了機組壽命；啟動次數累積過多則會讓材質疲勞劣化而毀了機組。



GE Power 的研發人員認為，它們既然是不同的機制 (mechanism)，本質不同，應該分開訂定建議的停機檢測時機 (inspection recommendation)，在對應的設計壽命未達一半時進行 (先達到先停機)，如圖中水平虛線與垂直虛線。附帶一提，不使機組一口氣逼近元件的設計壽命 (圖中水平實線與垂直實線) 才停機，此種降低風險的考量，也是各大原廠的共識。檢查時，元件特性如尚屬良好，再次裝機運轉即可，卻不必一次用到枯竭。

而另一種看法，EOH，將每一次機組啟動，按照原廠規定的倍率，換算成時數，予以併計，只用一個數值去衡量機組停機檢測的時機，在上頁圖 27 裡，會形成一條斜率為負值的虛線。

GE 的人員強調：如果以單一機組來觀察，與電網併聯後，不管負載角色為何，隨著日子的前進，在該圖上一定是先遇到斜率為負值的虛線，才會碰觸到 GE 所建議的檢測時機；而跨過淺藍色區域內的這段時間，其實都是理想可用的，提早停機 (不讓運轉進到淺藍色塊)，屬於浪費。單一機組損失的是一個時間段；若以發電公司的立場來看，眾多機組皆採行 EOH 的思維，那麼整塊淺藍色都是放棄利用，誠屬可惜。此番解說，除了顯示出他們對學理掌握及實務經驗並重的態度，更展現他們在問題論述與視覺呈現的功力。

在 non-OEM 零組件投入的評估上，如《孫子兵法》所云：「知己知彼，百戰不殆」，GE Power 對他廠產品，在性能或表現上不盡理想的問題，如圖 28~29 所示，先進行研究；並以短期的研發案，找到予以改良的方式。可能透過選用更佳材質、提升配方、構造變更或引入自有專利設計等等。



圖 28 GE Power 研究他廠產品 (501F) 的問題，此為第一級靜葉。

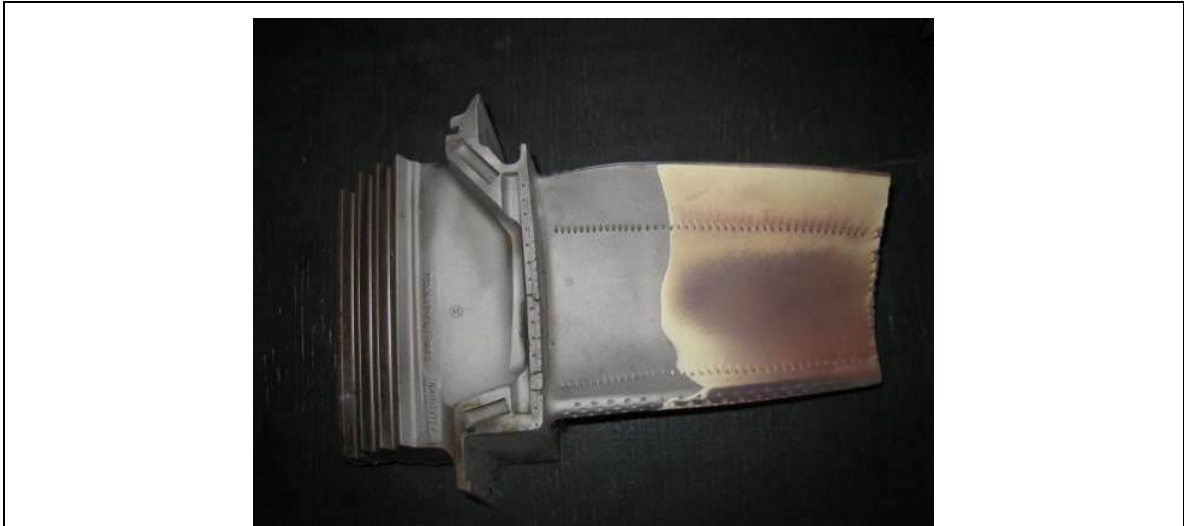


圖 29 GE Power 研究他廠產品 (501F) 的問題，此為第一級動葉。

經過分析並發展出改善方案後，予以實際製作、測試、驗證，如圖 30 所示。這也是 GE Power 重視研發、且生產能量龐大，所帶來的優勢。

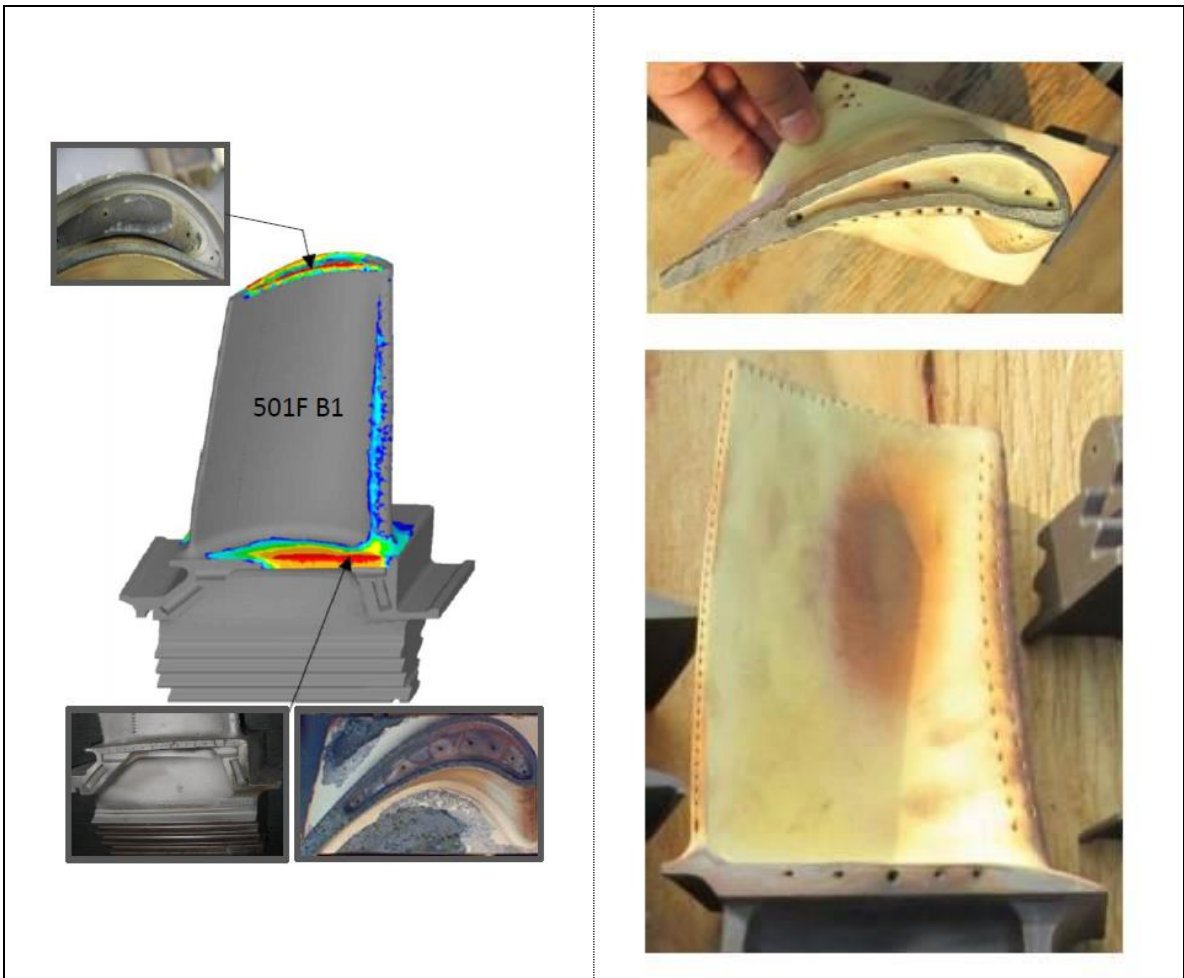


圖 30 GE Power 研究他廠產品問題，予以改良。

作為氣渦輪機設計與製造龍頭，GE Power 在創新方面，更是有不少讓人眼睛一亮的開發成果。本次參訪即接觸到跳脫既有思維的新應用，其一是「可磨損塗層 (abradable coating)」，最早出現在航空發動機的熱氣道。在工業氣渦輪機裡的應用，針對「葉片覆環 (shroud)」此位置上，噴塗比一般設計值更厚的塗層。

已往所面臨的一個技術問題為：由於氣機內缸 (inner casing) 運轉時長期受熱膨脹，難免有些微變形；停機冷卻、檢修後、並且回裝完，無法保證與其組配的葉片覆環，與動葉片相對的整圈內徑仍維持真圓。該圈只要略呈橢圓，長軸附近即出現偏大的間隙 (clearance)，而短軸則可能與動葉片干涉 (interference)。

動葉片在開始運轉後，隨著轉子旋轉，其頂端即不停掃過葉片覆環整圈的內徑；因為裝機時是在室溫裡作業，運轉時高溫燃氣會使動葉片因熱膨脹、長度變長，加上離心力 (centrifugal force) 作用，也使動葉片長度再稍微變長，因此葉片頂部間隙會更小，甚至磨到葉片覆環。圖 31 中黃色區所示，是航空發動機 abradable coating 所在的位置；下頁圖 32 則是工業氣渦輪機裡，abradable coating 塗佈位置示意圖。

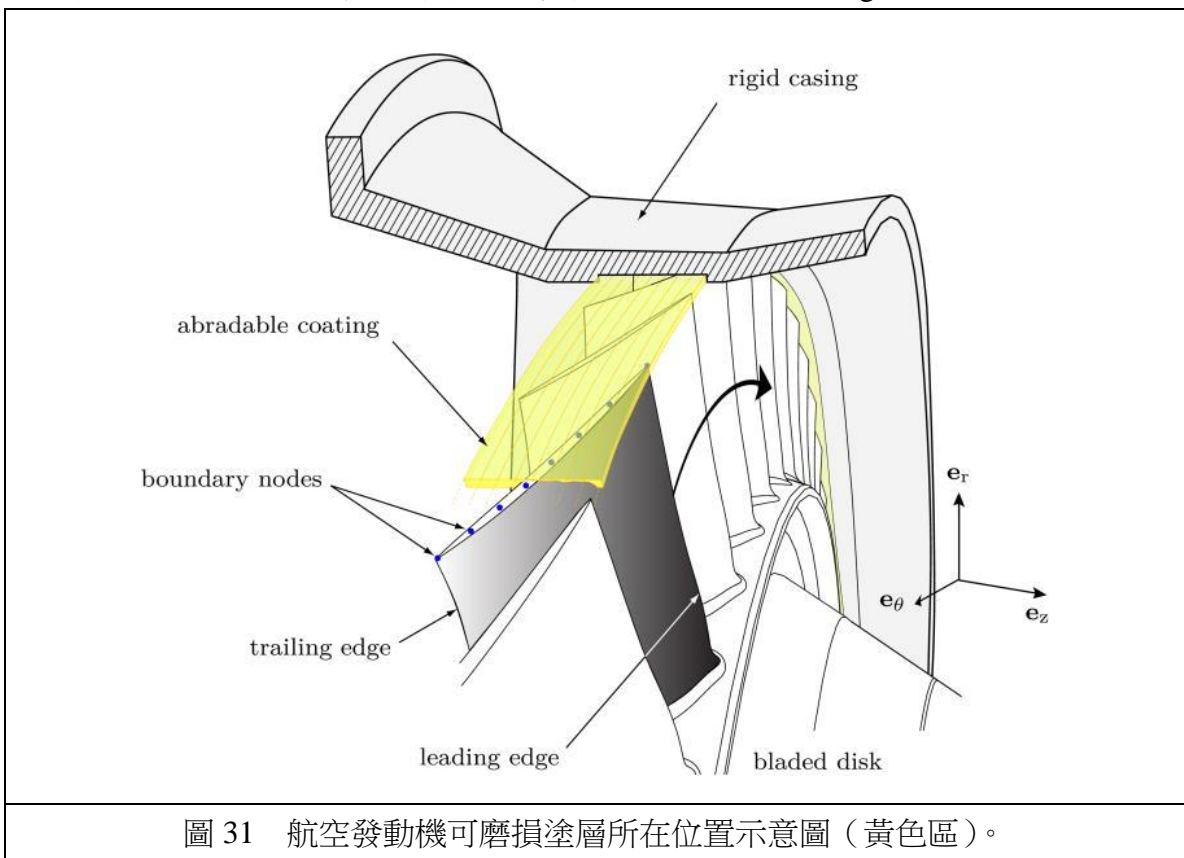


圖 31 航空發動機可磨損塗層所在位置示意圖 (黃色區)。

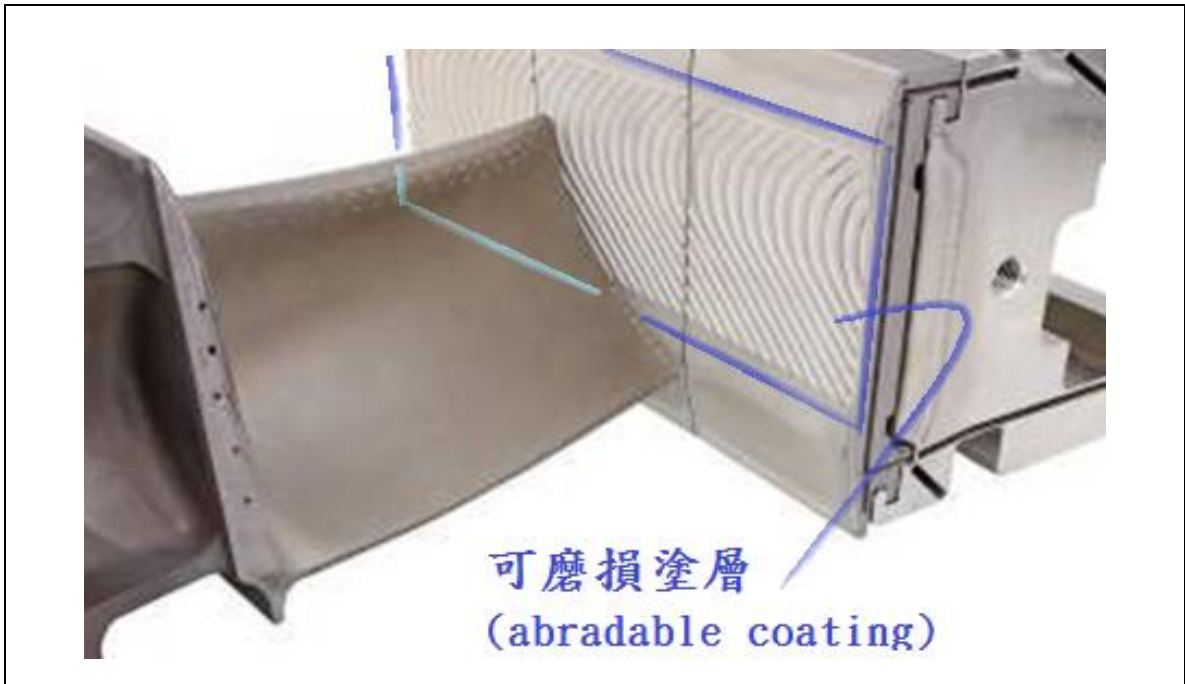


圖 32 工業氣渦輪機可磨損塗層所在位置示意圖
(藍色框，shroud 所裝的 ring segment 上)。

讓葉片覆環金屬的剛性邊界更向外缸後退，而將可以磨耗的塗層噴得更厚、並加上分析設計後的紋路。如此可令機械干涉不會損傷到組件本身，而又能充分將間隙消除、使燃氣的動能盡量施加在動葉片上作功、發電；圖 33 是此技術已實際應用之組件，運轉後的照片。



圖 33 ring segment 上的 abradable coating 並未出現整片剝落，其技術可見一斑。

也許運轉後的照片看來並不起眼；但非常值得注意的，是它們並未出現整片從組件上剝落的塗層。也就是，噴塗超過 1mm 的 TBC，被厚重金屬磨耗拉扯，而未在塗層交界面撕裂脫離，實務上的難度不低！此結果顯示出，GE Power 噴塗技術相當優異；訣竅可能在特殊的塗層配方，或其專利的塗層組織上。

另一個讓人大開眼界的研發項目，則是近期已由 GE 註冊了商標的 ‘LifeSight’ 感測器。其開發觀念是，以「應變規 (strain gauge)」安裝在元件關鍵的或具代表性的位置，探測該處細微的變形情況；若運轉中的葉片，在某個位置發生過量的變形，被這樣的感測器記錄了，研發人員在後續資料收集、匯入資料庫後，即可予以分析；並在日後改善，或修正檢測時機。

目前較為利用的應變規，是需要接通電源才能獲取數據的；而 GE Power 研發人員，則是跳脫該框架，不尋求即時資料，而是讓微小變化的「應變」，在每次停機時，可以整批收集到資料庫裡，突破主流非破壞檢測 (non-destructive testing, ‘NDT’) 的極限，在元件基材尚未產生裂隙之前，僅局部出現潛變 (creep) 時，即被掌握。

補充說明：潛變，為材料在高溫 ($T/T_m > 0.5$ ，其中 T_m 為該材料的熔點) 恆荷載作用下，緩慢地產生塑性變形的現象，為材料高溫破壞的主要原因。潛變仍屬永久形變，然成長速度並不甚快；掌握其最早發生位置、追蹤成長速度，對察覺弱點很有價值。

另外，以機械領域固體力學的眼光，元件整體的巨觀形變量難以觀察，且能夠發現往往為時已晚（已有破斷或瑕疵，後續成長快速）；但更重要的是受力集中處、或破壞機制發生位置的察覺，以及分析。透過巧思，將檢測工作深入到肉眼看不到的徵兆，在實際運轉的組件上廣泛佈置、收集大量資料，長期分析以從事根本問題的發掘及改善，GE Power 的研究與發展，不論是技術的層次還是思維的高度，都令人嘆為觀止！

4.3 美國 GE 公司格林維爾工廠參觀

本次研習，前往位於南卡羅萊納州格林維爾市 (Greenville, South Carolina) 的 GE Gas Turbine 工廠；距離美國南方大城亞特蘭大 (Atlanta) 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、原型機測試、各部零組件的生產製造或修理、整機安裝服務、以及與氣渦輪機有關的研究與發展。在主工廠裡，以機械製造或加工的型態，所佔的面積最大。

廠房規模宏偉，大尺寸機件的加工或裝配作業，比比皆是。渦輪機轉子、葉片轉盤、氣缸壁、托架、軸承等需要起重設備的工件，以及高單價的氣機燃燒室組件、熱段葉片、空壓機進氣導翼等處理程序繁多的零件，都在其中依照各自的製程步調，被師傅及工程人員們推動著、朝「成品」邁進。

即使因為作業種類繁多，各工作區並不像輸送帶那般前後工序相鄰；但是在數款機種、多個升級子世代並存，零件型別令人眼花撩亂之下，GE Gas Turbine 工廠裡的工程師及管理幹部，仍然很有效的掌握著生產的脈動。帶領我們參觀的資深工程師，對產線上所能見到的實物，舉凡特色、最新改善、製程細節、檢查重點……，皆如數家珍，令人十分佩服！

現場照片，如圖 34~36 所示。



圖 34 GE Gas Turbine 工廠內的氣機空壓段轉子。



圖 35 GE Gas Turbine 工廠內的定子外殼 (stator casing)。



圖 36 GE Gas Turbine 工廠內即將出貨的氣渦輪機。

五、 美國義大利商 PSM 公司研習

義大利商 PSM 公司 (Power Systems Manufacturing, LLC) ，是提供氣渦輪機自有組件及修護服務（非 OEM）的廠家，位於美國佛羅里達州丘比特市 (Jupiter, Florida) ，是度假勝地棕櫚灘郡 (Palm Beach County) 東北端的城鎮。從西元 1999 年開始，由專門提供維修用技術面高階組件的主要供應商，逐漸發展成全方位的全球氣渦輪機修護服務公司。因為擁有優異的技術水準，PSM 成為發電產業裡大型跨國集團間炙手可熱的目標，近年已數次出現在併購案。其商標變動，如圖 37。

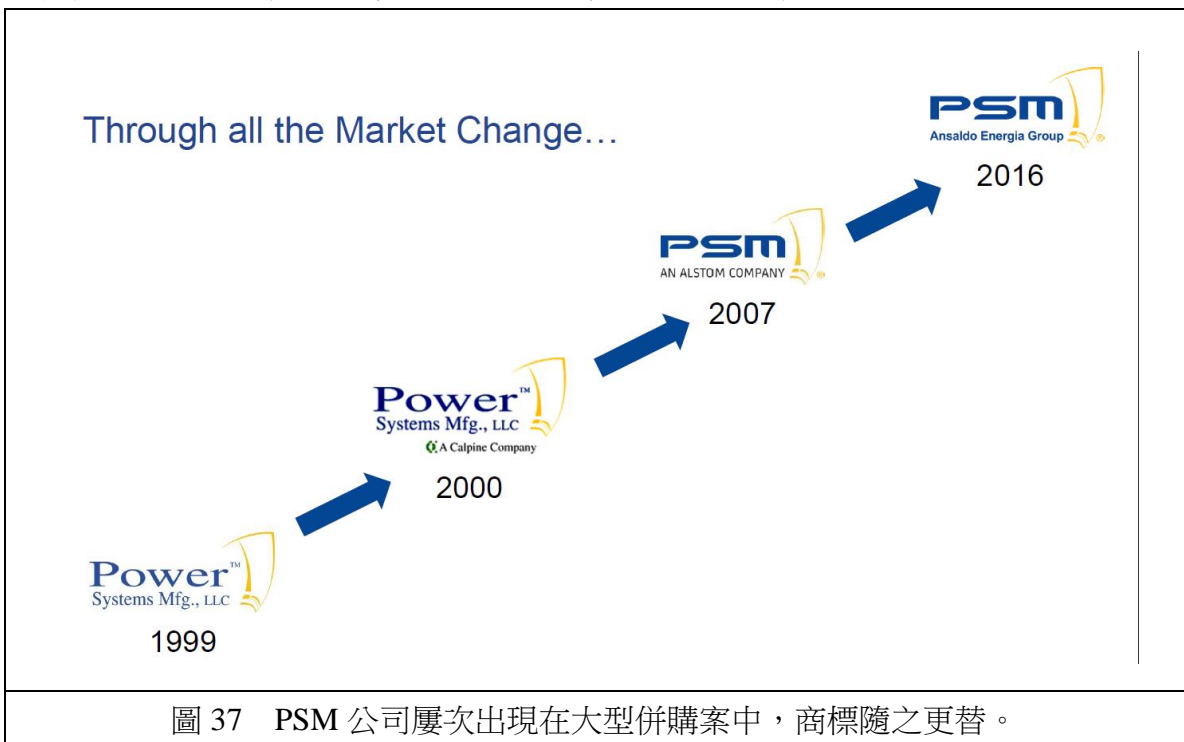


圖 37 PSM 公司屢次出現在大型併購案中，商標隨之更替。

PSM 公司在最近一次的大型併購案中，最令人矚目的消息，即是美國司法部以及歐盟進行反壟斷審查時，對法商阿爾斯通 (Alstom) 集團將 PSM 列入給 GE 的出售清單有所疑慮。理由是，之前 PSM 在市場上的存在，明顯抑低了 GE 公司在高階氣渦輪機零件及技術服務的成交價格；若 GE 合併了 PSM ，很可能會形成技術獨有、市場壟斷，而不利競爭。

後續的發展結果，在 GE 靈活的談判策略與積極態度之下，德國西門子的競逐落空，最後長期苦於資金短缺的 Alstom ，順利將發電事業（其汽機與再生能源領域皆有很強競爭力）與電網事業，脫手給 GE ，取得 GE 的交通事業以及 34 億美金

的資金；而 PSM 則改為售予義大利商安薩爾多能源公司 (Ansaldo Energia) ，目前是發電產業界世界第四大公司，規模在美商 GE 、德商 Siemens 、日商 MHPS 之後。這正可說明， GE 對於 PSM 公司技術能力之高度評價、不願她落入主要競爭對象的手中。

義大利商安薩爾多能源公司將 PSM 公司劃歸其 OSP (Original Service Provider, 自有維護服務) 事業群下，如圖 38 所示。

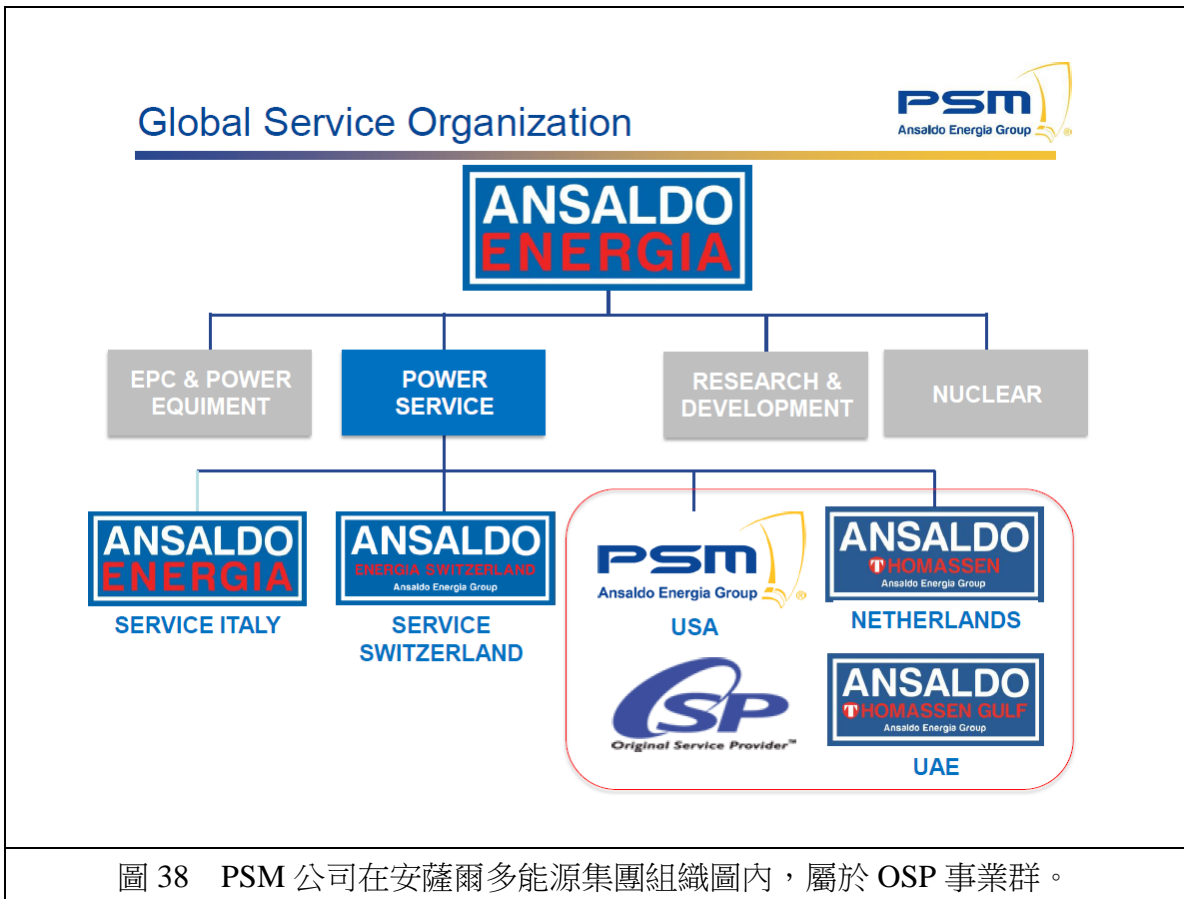


圖 38 PSM 公司在安薩爾多能源集團組織圖內，屬於 OSP 事業群。

5.1 義大利商 PSM 公司業務簡介

PSM 在十餘年來，累積多家氣渦輪機原廠的機組修理維護經驗，加上母公司的事業群支援，橫跨 B/E 級、F 級、與先進架構的機種；轉子、氣缸等修製、熱氣道 (hot gas path) 組件修理與再生 (reconditioning) 、空壓葉片、燃燒室組件修理與製造等等，皆有處理能力。並有現場技術服務 (field service) ，此外還設有監控及診斷中心 (Monitoring and Diagnostic center) 。如下頁圖 39 所示。

Expertise in Multiple OEM Products Enables Platform Approach



Platform Approach to Design Enabled by Broad Experience Base

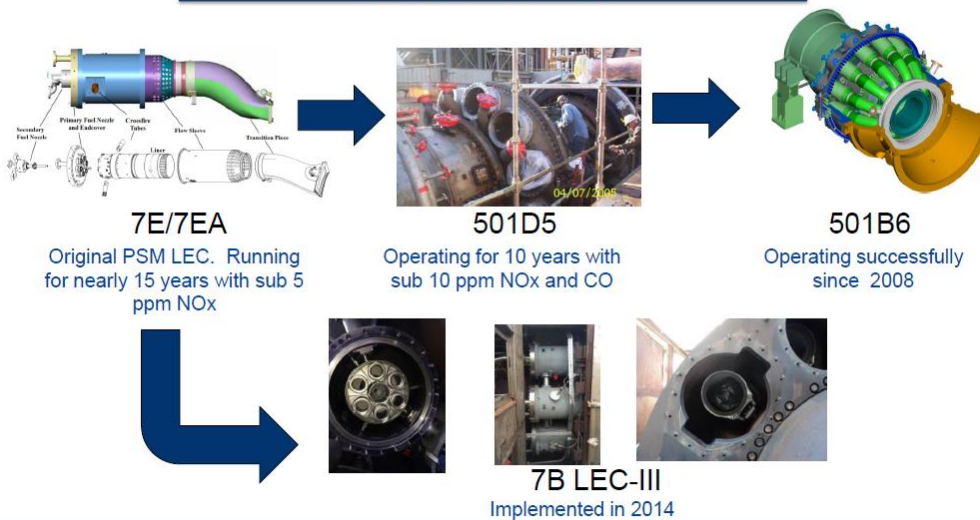
圖 39 PSM 提供之服務範圍業務，雖非 OEM，而機組實務經驗甚廣泛。

PSM 也強調其多年來「平台化設計方法 (platform design approach)」。

Platform Approach



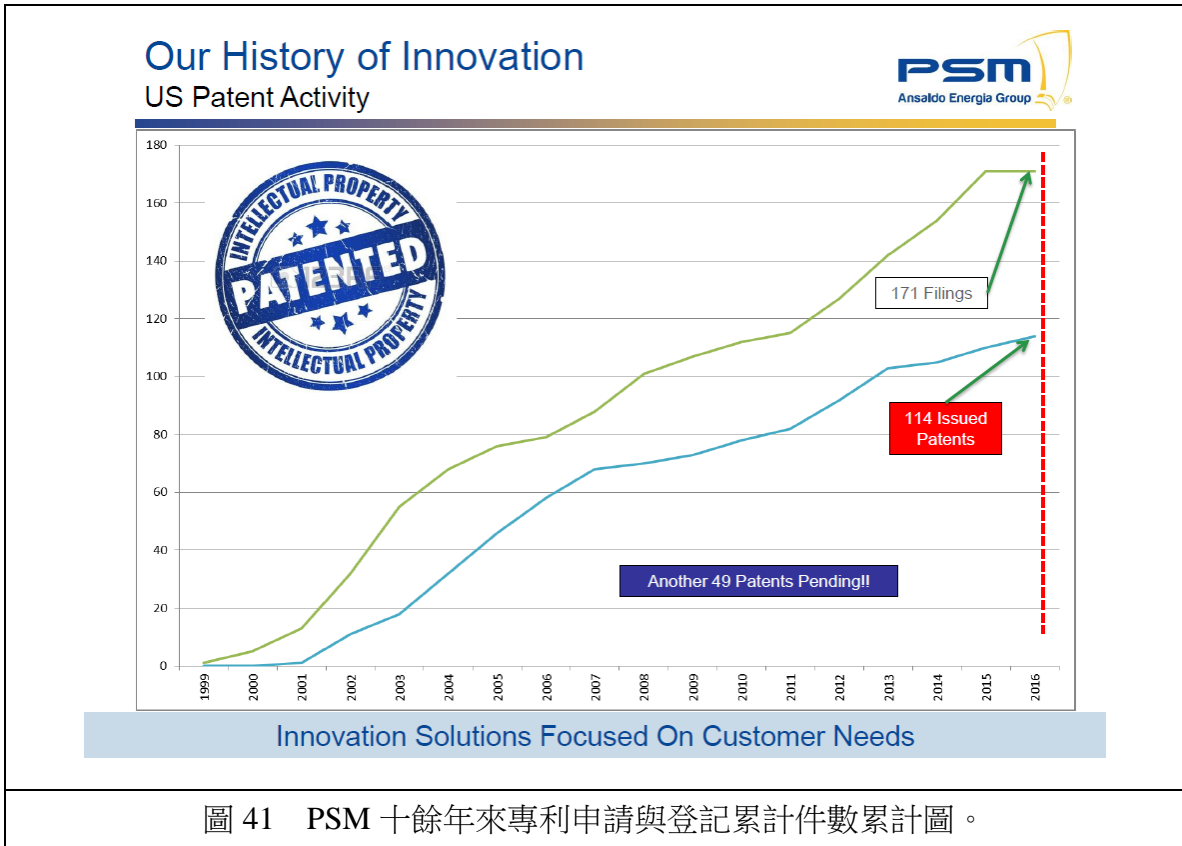
Low Emissions Combustor



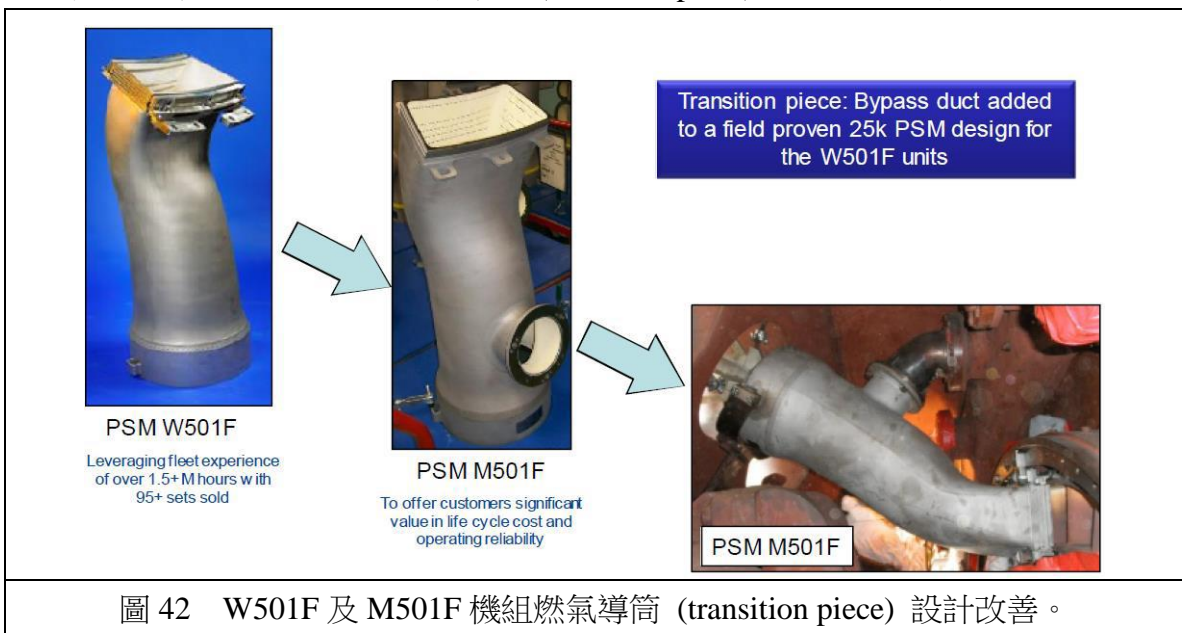
15 Years of Successfully Utilizing Platform Design Approach

圖 40 PSM 成功運用平台化設計方法，低排放量之燃燒器組件接觸得相當透徹。

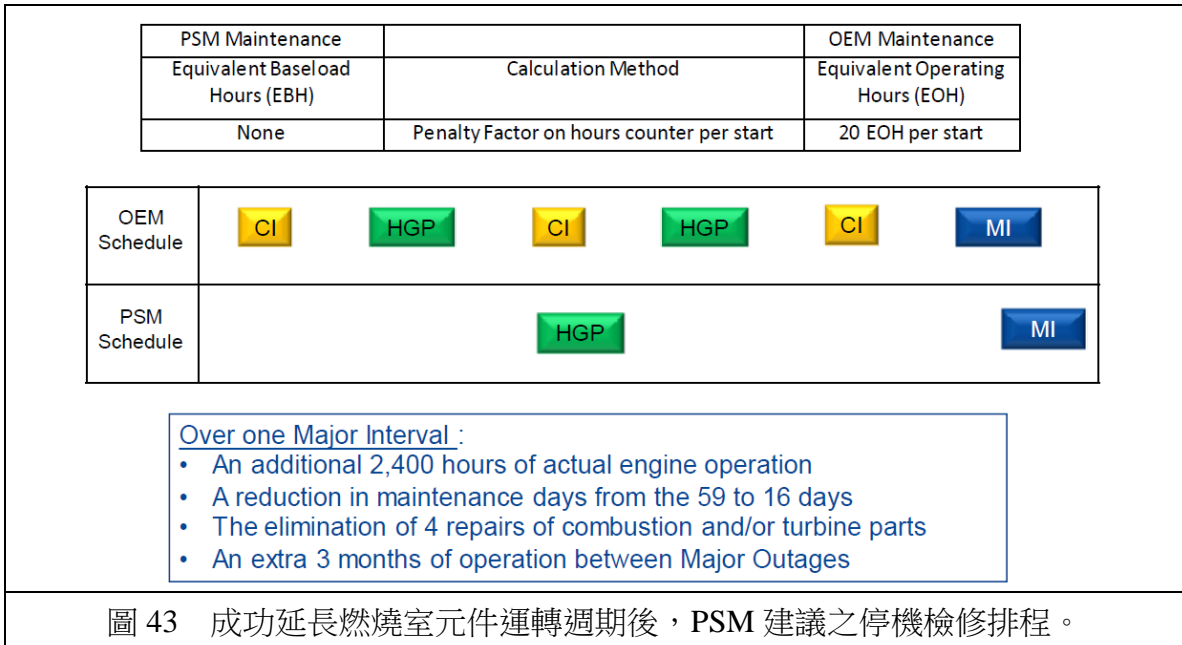
PSM 重視經驗累積及創新，以一家非 OEM 公司來說，其專利的申請與登記件數，表現相當優異。歷年件數累積圖，如圖 41 所示。



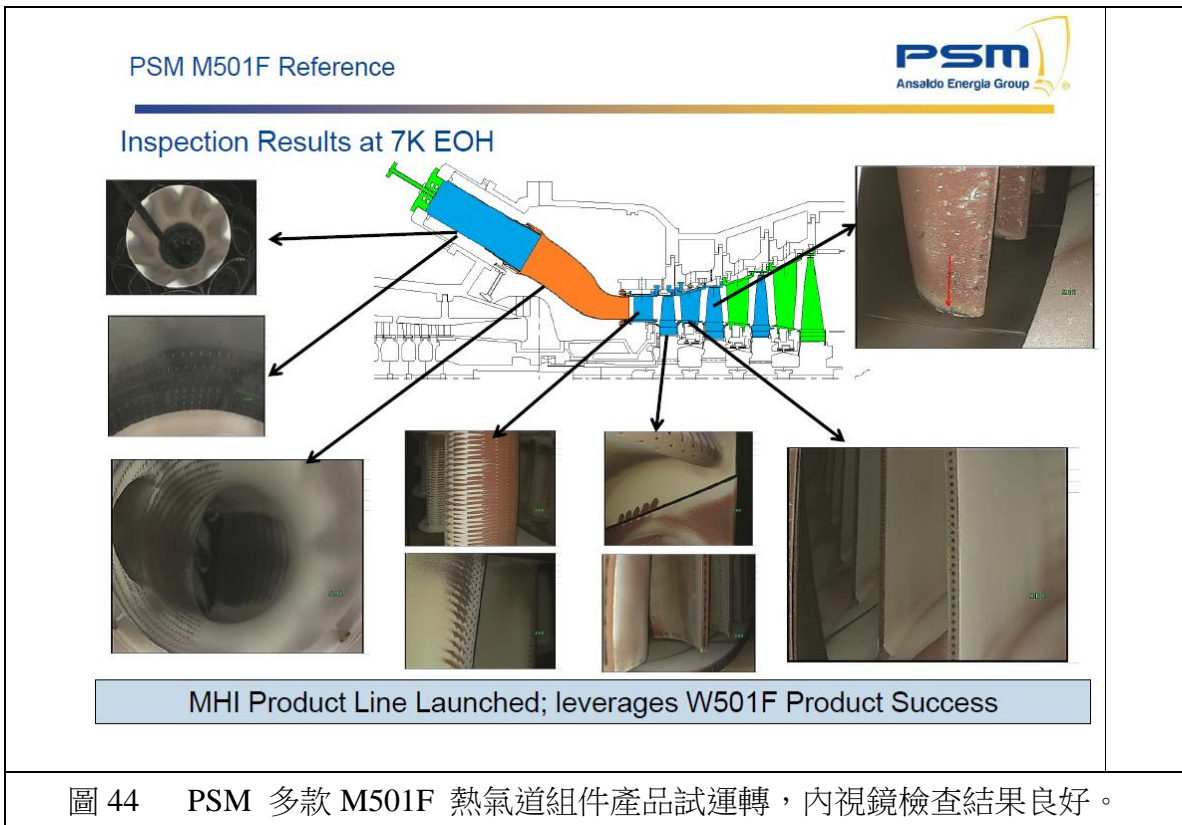
PSM 公司對 501F 機組的研究相當精到，並在幾項重要元件的設計改善，取得巨大的成功，最有名的產品為燃氣導筒 (transition piece)，如圖 42 所示。



PSM 將重要元件之壽命問題，透過設計，予以克服，大大的延長燃燒室元件運轉週期，停機檢修之排程可以不再如此密集，令人耳目一新，如圖 43 所示。

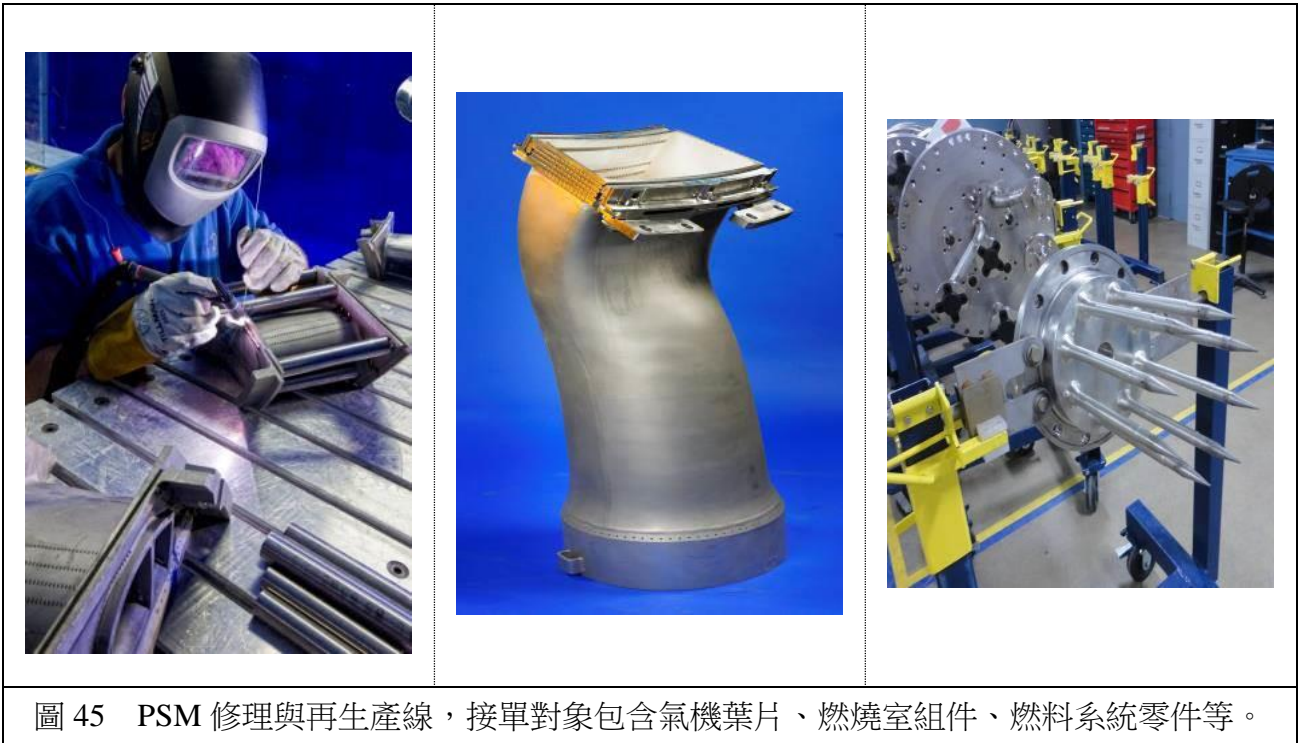


在 M501F 型的熱氣道組件，PSM 多款產品已裝機試轉，在運轉達到 7,000EOH 停機、內視鏡檢查時的狀態良好，照片如圖 44 所示。



5.2 義大利商 PSM 公司再生技術修護研習

PSM 工場服務，區分為四個產線，其照片如圖 45~48 所示：



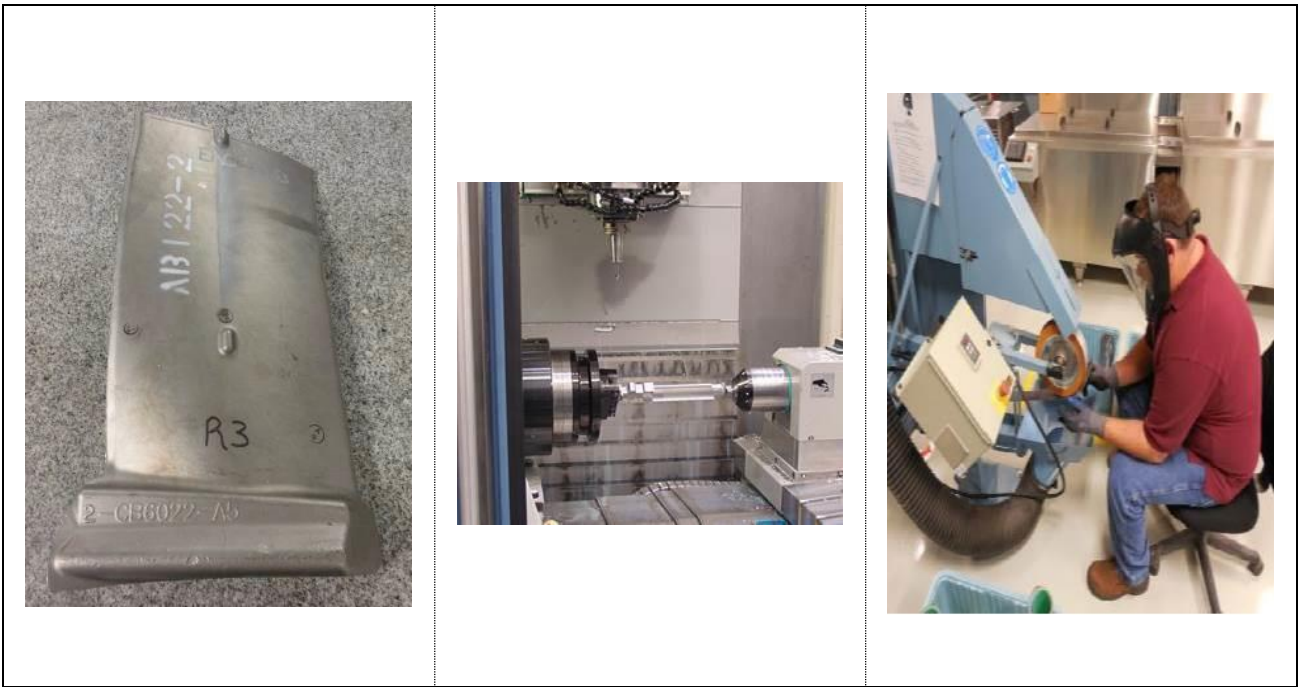


圖 47 PSM 空壓段與汽機葉片製造產線，其鑄件毛胚、加工機、鉗工及表面處理作業。

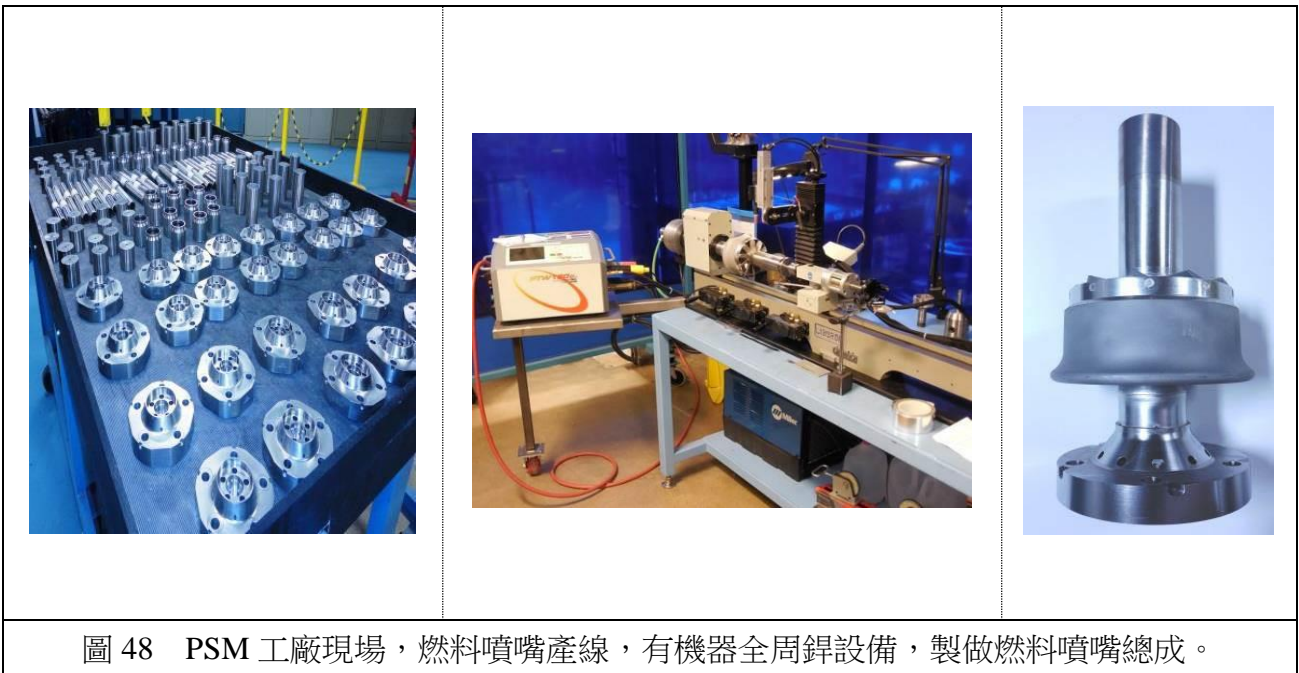


圖 48 PSM 工廠現場，燃料噴嘴產線，有機器全周銲設備，製做燃料噴嘴總成。

PSM 工場重要的工法與設備，如圖 49~54 所示。



圖 49 化學去塗層設備。



圖 50 手工氬銲修補，使用了尺寸精準的夾治具。



圖 51 雷射覆銲設備。

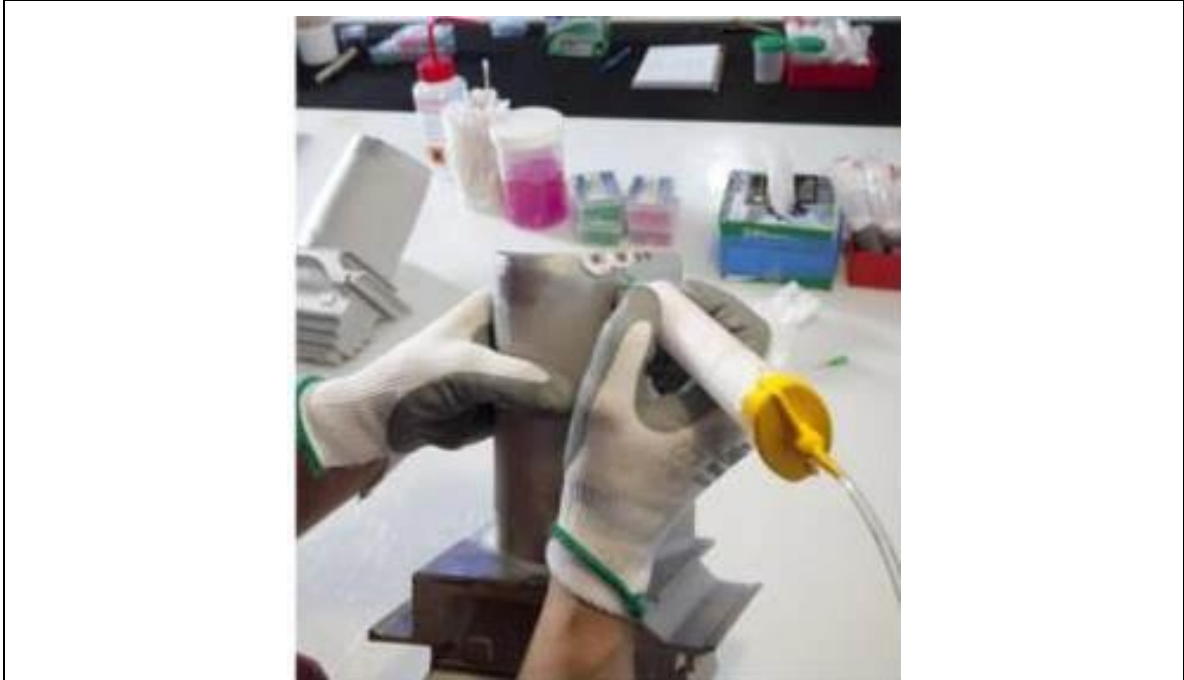


圖 52 硬銲修補裂隙工法；有利用氟化氫設備進行前置表面處理。



圖 53 放電加工機；尚有其他 CNC 加工機。



圖 54 噴鍍設備，使用 HVOF 及 APS 兩種製程。

六、心得與建議

南韓 SUNG-IL 公司是單純的非 OEM 公司，因其國家政策，所以與他們的客戶韓國南方電力公司等，有開發配合的聯盟。對於未曾修理過或製作過的組件及配件，SUNG-IL 公司負責研發、並做局部改良，再送至電廠運轉一週期，得到驗證。除了再生維修，亦具有新品製作的能力（從氣機葉片到燃燒器部份）。有設置專門的研發部門 (R&D)，提供製作與維修的後盾；製程設備集中在同一個廠房內，生產動線規劃良好。

GE 公司為世界知名氣渦輪機製造商龍頭，他們對自己設計的產品非常的有信心；而開始跨足製作其他 OEM 的組件，更會局部套用其自身擁有的專利設計，使性能更佳，且引以為傲。研發能量豐沛，對於一些開發難題，不會一味的改用新材料及粉末；反而利用製程上的新突破，來達到一樣的效益。實際參觀廠區時，由於廠區範圍太大，內容從新品製造到機組測試，已佔掉極高的參觀比例，而在維修施作區塊，鮮少看到。製程設備皆屬較舊款的機型，但作業成效不輸給新款機型。

PSM 公司則是有經驗的非 OEM 公司；對於 W501F 或 M501F 氣機的組件供應，已達 15 年以上。其提供組件的運轉週期及壽命，大幅超越目前 MHPS 的原廠組件，並能與客戶簽訂長期維護合約 (Long Term Service Agreement, 'LTSA')，令人印象深刻。PSM 的接待人員，為了展現其公司的能力，製程設備幾乎全面參觀，且有問題發問亦能當下解答。

此行參訪的各廠家，討論議題分別偏重在組件新製、燃燒器改良與升級等等；熱段組件維修及塗層噴塗則較少涵蓋；加上一些再生製程提問係屬技術訣竅 (know-how)，對方僅大略回應而已。值得一提的，與發電單位的長官一同參訪，可以看到很多原本廠商不提供參觀的設備和區域；而美中不足的是，討論的議題與時間，亦被切割。整體來說，收穫仍較修護單位單獨參訪，來得更多。

這些廠家，對於研發 (R & D) 皆非常重視。不論在待修舊品的缺陷成因探究、修理製程改良、塗層品質強化；組件新製時，局部設計的改動、整體造型的變更；乃至於燃燒系統的升級、氮化物排放值抑低等等，絕對需要堅強的研發陣容、紮實地長期投入。在問題理解、系統特性掌握、細部設計概念、最新科技應用、設備及原料與儀器等之取得、改善方案成效之試驗途徑……等等層面，沒有專門人才組成團隊持續鑽研、緊密支

援生產前線，面對世代更迭不停的新型氣渦輪機，所需要的修護技術，勢必無法銜接，而終將面臨著被淘汰的生死邊緣。

另外，此三家廠家，不論 OEM 或 non-OEM，皆有其配合的衛星工廠，協助局部的製程作業；向電廠接單的主修製廠家，只要做好檢驗的部份即可。在技術上取捨，保留關鍵的製程進行強化精進，將低階而易於掌握品質的加工作業，委外處理，亦是此產業在尋求資源有效投注的思維下，逐漸普遍的趨勢。

在實地參訪國外葉片製造與維修作業產線後，對於產線設備建置及廠區規劃，深深感到：集中以及連貫的動線，是提升管理效率所必備的布局思維；而足夠的空間，才能夠運轉靈便、活用省力的裝置及工作用車輛。如此一來，讓人員發揮最大的功效，減少不必要的搬運、停頓與滯留，而又能依製程特性、在適合之處採取批次處理，使效率更佳。這些，是在受限的廠區及數個分離工作站的產線裡，俯仰其間的同仁，所未曾想像到的清爽、俐落及明快。希望未來敝部門的廠區，也是如此宏大的格局。

七、 參考資料

1. “Sung-il Presentation Materials - Major Business Lines Products” , Sung-Il 公司資料 , October, 2016 。
2. 何堃森博士 “精密鑄造在航太的應用” 簡報資料。下載自國立高雄應用科技大學 模具工程系網域，檔名【精密鑄造在航太的應用 2009-4.pdf】
3. “Major Facilities and Equipments for Manufacture and Repair” , Sung-il 公司資料, July, 2016
4. “Taiwan Power Company Customer Visit” , GE Power 公司簡報資料 , October, 2016.
5. M. Legrand, A. Batailly and C. Pierre, “Numerical Investigation of Abradable Coating Removal in Aircraft Engines Through Plastic Constitutive Law” . Journal of Computational and Nonlinear Dynamics | Volume 7 | Issue 1 | Research Paper, 來自網路搜尋，The American Society of Mechanical Engineers (ASME) 網站。
6. “PSM Update” , PSM 公司簡報資料, July. 2016.
7. Brian Micklos, “PSM M501F product line Overview” , PSM 公司簡報資料 , October, 2016.