

出國報告（出國類別：實習）

研習氣渦輪機葉片再生的相關技術

服務機關：台灣電力公司 電力修護處

姓名職稱：謝式儒 資深工程師

林士閔 機械工程師

派赴國家：德國、加拿大

出國期間：97.10.28~97.11.10

報告日期：98.1.7

摘 要

本公司火力發電廠氣渦輪機組日漸增多，氣機組件如葉片、燃燒筒與魚尾管等長期在高溫環境運轉下，產生熱腐蝕與高溫氧化損壞，須進行維修或更換。由於新組件價格昂貴，為降低新組件購置成本，節省營運費用，須將運轉後之熱元件再生處理，延長使用壽命。近年來葉片等熱元件再生需求逐年增加，提昇葉片再生處理技術及再生可用率為當務之急的工作。

隨著本公司大潭電廠氣渦輪機陸續併聯，未來氣機熱元件再生需求也將日益增高，為避免電廠用料短缺，本處除積極建立葉片再生處理技術外，並尋求國外適當廠商技術合作，引進技術及設備，建立完整葉片再生處理能力，並能與國際接軌，以滿足電廠大修用料所需，有效降低新葉片購置數量與成本。

本處（電力修護處）負責本公司氣渦輪機組葉片再生產製，氣機熱元件再生技術有其專業及獨特性，國際上各知名氣機製造廠及組件維修公司，都有其特殊的專利與製程，經由本次赴德國 SIEMENS 氣渦輪機製造原廠及加拿大 LIBURDI 氣渦輪機葉片再生廠家研習氣渦輪機葉片再生處理能力，了解國外氣機熱元件再生技術的優點，引進相關技術運用於生產製程上，提昇本公司葉片再生處理能力。

目 次

一、 目的.....	1
二、 過程.....	2
三、 德國 SIEMENS 公司研習.....	3
四、 加拿大 LIBURDI 公司研習.....	15
五、 心得與建議.....	23

一、 目 的

氣渦輪機熱段組件使用時數到達時，均需更換新品，但是新品價格昂貴，對電廠營運是一大負擔；近十年來由於材料科學的研發成果及再生技術的進步，將此成果應用於氣渦輪機熱段組件再生工程，已成為全球趨勢，實際應用成果也相當穩定且成效良好。

本公司現有單循環或複循環 機組之電廠計有林口、通霄、台中、興達、南部、大林及大潭等電廠。這些機組型式有 Siemens V84.2、V84.3、ALSTOM 11D5、11N、11NM、11N2、GE 7E、7EA、Mitsubishi 501F、501G 等。預估未來氣渦輪機熱段組件的需求將日益增加，電廠為了確保機組運轉的安全性與可靠度，擬定長期維護計劃以做為大修備品採購計劃之依循，但這些消耗性之熱段組皆為高單價之組件，如葉片每級常在數千萬元以上，若對損壞之組件皆以換新處理，則機組維護費用及發電成本將會大幅增加，為節省營運費用，必須將運轉後之組件進行再生處理，包括銲修(Repair)及重新噴銲(Recoating)，以提高其經濟效益與運轉可靠度。

本處（電力修護處）負責本公司氣渦輪機組葉片再生處理工作，葉片再生為高科技之技術，世界上各氣渦輪機製造廠家及葉片維修公司都有其獨特的維修技術，葉片再生處理製程包含相當多的 Know-How，本公司電廠機組種類繁多，熱元件構造及形狀不同，本公司除自行研發建立葉片再生處理技術外，必要時赴國外研習，引進先進技術及設備，提昇本公司葉片再生處理技術與品質。

此次奉派出國研習主要目的為了解國外氣機熱元件再生處理先進技術，提升本公司葉片再生技術能力及品質，行程包括 SIEMENS 氣渦輪機製造原廠及 LIBURDI 氣渦輪機葉片再生廠家，SIEMENS 及 LIBURDI 公司在氣渦輪機葉片再生技術皆有其特殊技術，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
97.10.28~10.29	台北→德國柏林	往程
97.10.30~11.02	德國柏林	1. Siemens 公司柏林廠研習氣機熱元件製造與組裝製程。 2. TACR 公司研習葉片再生技術。
97.11.03~11.08	加拿大 Dundas	1. LIBURDI 葉片維修公司研習葉片再生技術。 2. LIBURDI 公司了解熱元件銲接設備功能與應用測試。
97.11.09~11.10	加拿大 Dundas→台北	回程

三、 德國 SIEMENS 公司研習

本公司火力發電廠氣渦輪機組目前共有 60 餘部如表一，其中德國 SIEMENS 氣渦輪機組的電廠計有興達電廠、南部電廠和林口電廠，機型則有 V84.2 和 V84.3 二種，機組數量合計為 23 部，佔本公司火力發電廠氣渦輪機組總數的三分之一。因此有效的提升 SIEMENS 熱段組件的再生使用率為目前葉片再生處理工作的一大課題。

表一 本公司氣渦輪機組數量

製造商	電廠名稱	數量	機型
SIEMENS (23)	南部電廠	6	V84.2
	興達電廠	15	
	林口電廠	2	V84.3
ALSTOM (11)	通霄電廠	11	11D5、11NM、11N2
GE (14)	台中電廠	4	7001E
	通霄電廠	6	7001E
	大林電廠	4	7001B/A
FIAT (4)	通霄電廠	4	
MHI (1)	南部電廠	1	501F
MHI (14)	大潭電廠	14	501F /501G
小計		67	

此次在德國 SIEMENS Power Generation 公司研習的主要內容包括：

1. 赴 SIEMENS 子公司 TACR 了解葉片再生製程及相關技術討論
2. 參觀西門子公司氣渦輪機製造、加工與組裝工廠
3. SIEMENS SGT6-2000E / V84.2 – Si3D 動/靜葉片性能提昇討論
4. 氣渦輪機組運轉 100,000 EOH 延長壽命(LTE)的時程規劃與準備事項討論

3.1 赴 TACR 公司了解葉片再生製程及相關技術討論

TACR (Turbine Airfoil Coating Repair) 公司為 Siemens 和 Chromalloy 的合作廠商 (Joint-venture) ，每年再生處理的葉片約為 45,000 片，新舊葉片各佔一半，新葉片主要作表面噴鋅，包括航太工業及陸上氣渦輪機葉片，目前員工約 160 人。TACR 公司葉片再生有些製程與本公司略為不同，異同點如表二所示，SIEMENS 公司在非破壞檢測只使用目視及螢光液滲檢測，僅能檢查葉片表面的缺陷，對於鋸修過程所產生的葉片母材缺陷就無法得知，在參觀製程設備時，發現 SIEMENS 公司正在安裝 HF 清洗設備，未來可能在葉片的鋸修製程上會應用硬鋸處理。

表二 SIEMENS 與本公司葉片再生流程比較

主要工作流程	德國 SIEMENS	台灣電力公司	備註
1. 目視檢測 (VT)	✓	✓	
2. 去塗層 (Stripping)	✓ 化學去塗層 (酸洗)	✓ 機械打磨	
3. 固溶熱處理	✓	✓	
4. 螢光液滲檢測 (FPI)	✓	✓	
5. X-ray 檢測 (RT)	✗	✓	
6. 鋸修 (Repair)	✓	✓	
7. 硬鋸 (Brazing)	✗ (正在安裝 HF 設備)	✓	
8. 真空噴鋸	✓	✓	
9. 大氣噴鋸 (TBC)	✓	✓	
10. 固溶析出熱處理	✓	✓	
11. 動葉片根部珠擊	✓	✗	
12. 冷卻裝置回裝	✓	✓	
13. 最後檢查	✓	✓	

此外在葉片前處理去塗層，TACR 公司使用的葉片化學去塗層酸洗(Si-CLEAN) 為其特殊技術，與一般傳統葉片化學酸洗不同，處理時先使葉片表面的舊塗層經化學反應形成氧化鋁，再將氧化鋁層去除，即可完成前處理工作。傳統葉片化學酸洗去塗層作業如圖一所示，酸洗時 MCrAlY 塗層被強酸溶解，但氧化物界層無法完全去除，必須配合人工研磨才可將塗層氧化物去除乾淨。

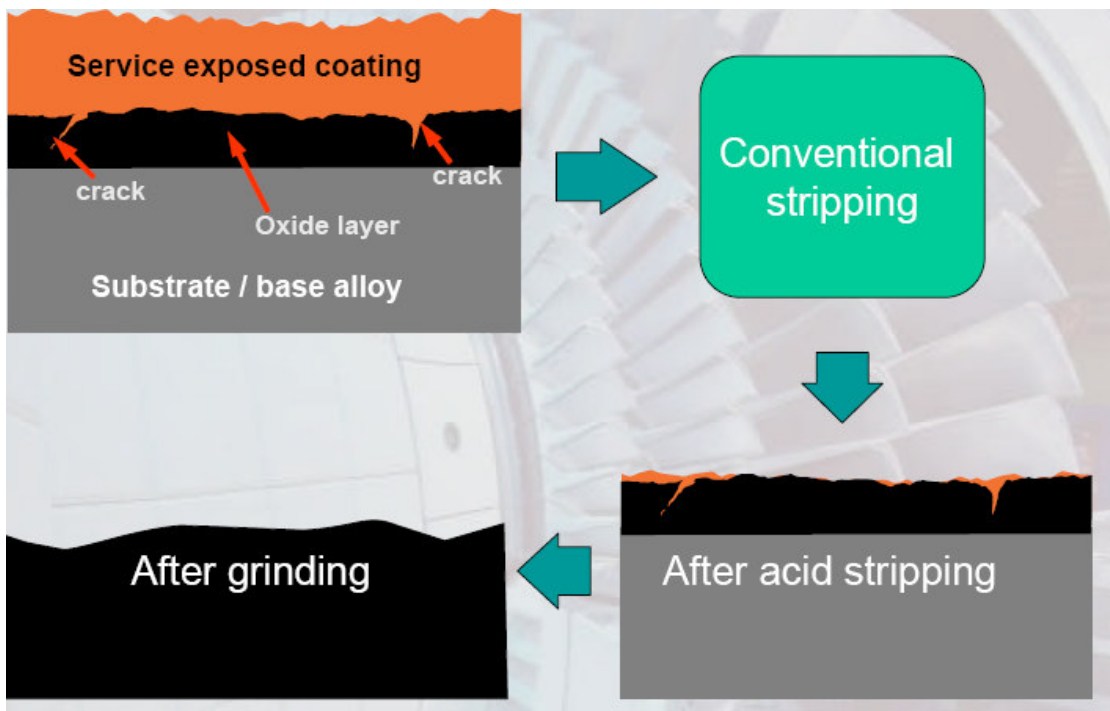


圖 1 傳統葉片化學酸洗去塗層作業流程

兩者的差異在於 TACR 公司使用的 SICLEAN 技術比較不會傷害母材，且表面比較平順，傳統化學去塗層在化學作業後，還需要機械研磨作業方式將舊塗層及擴散層磨除，其母材比較會損傷且表面會有崎嶇不平的形狀。

3.1.1 TACR 葉片鐳修方法

葉片鐳修方法也是本次研習重點，TACR 葉片鐳修方法主要有雷射及氬鐳鐳補二種，雷射鐳補 (Laser welding) 主要應用在動葉片頂端 1/3 處的鐳補處理如圖 2，通

常在葉片缺角或長度不足時以雷射覆鋁處理，覆鋁後用放電加工將鋁道切至所需長度，再用研磨或鑽孔加工至葉片原外觀。氬鋁(TIG) 主要以鋁修靜葉片為主，靜葉片經過長時間高溫運轉後通常在尾翼靠近覆環處會產生龜裂，TACR 公司完全以氬鋁鋁補如圖 3-4。



圖 2 動葉片頂端雷射鋁補

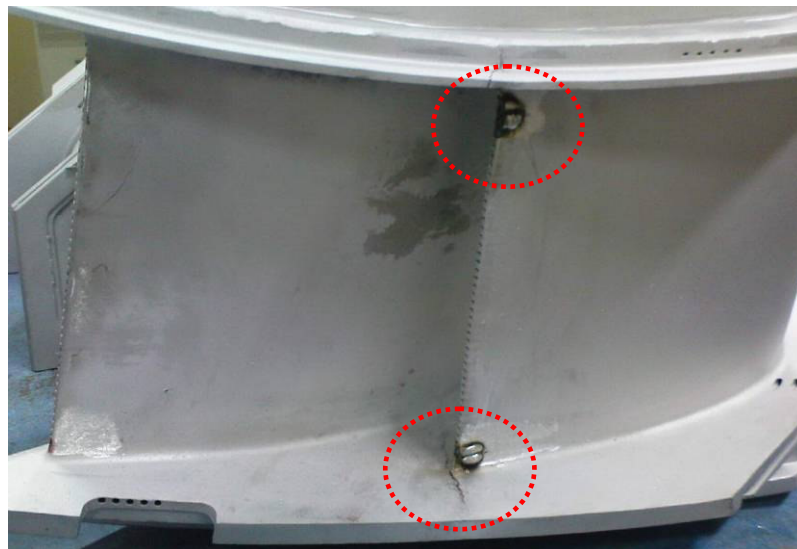


圖 3 靜葉片氬鋁鋁補



圖 4 靜葉片氬銲銲補

3.1.2 噴銲製程

TACR 公司噴銲製程使用多相型覆層之噴覆方式有:

1. 大氣電漿噴銲 (Atmospheric Plasma Spray)
2. 真空電漿噴銲 (Low Pressure Plasma Spray)
3. 高速火焰噴銲 (High Velocity Oxygen Fuel)
4. 電子束物理蒸鍍 (Electron Beam Physical Vapor Deposition)

大氣電漿噴銲主要應用在大氣環境下噴銲，通常針對大型工件，真空電漿噴銲應用在低壓環境下噴銲，具有高緻密性與低氧化物的噴銲塗層，通常應用在葉片噴銲處理。大氣電漿噴銲具有價格較真空及高速火焰噴銲便宜且應用範圍廣泛之優點，但其覆層與母材結合強度低，空孔率較高之缺點，大氣與真空電漿噴銲設備如圖 5-6。

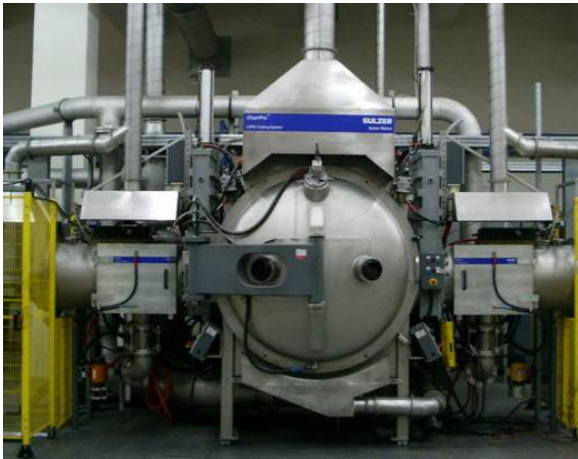


圖 5 真空噴鋅設備



圖 6 大氣噴鋅設備

高速火焰噴鋅設備如圖 7，其為利用氣槍噴出氣體火燄(由氧氣與燃料混合)，將覆層粉末噴鋅於組件表面，費用介於真空與大氣噴鋅間，其優點為適用於幾合尺寸多變化組件的覆層噴覆、覆層結合強度大等，但其覆層氧含量較真空噴鋅高。



圖 7 高速火焰噴鋅設備

由於氣渦輪機入口燃氣溫度甚高，如三菱 M501G 入口燃氣設計溫度高達 1500 °C，為降低葉片基材金屬溫度，提昇組件壽命及機組熱效率，並降低熱疲勞應力，基材表面噴鍍一層 TBC(Thermal Barrier Coating) 絕熱塗層。TBC 是由兩層覆層構成，一為介層(bond coat)，另一為表層(top coat)，介層材料為 NiCrAlY 合金，具有緩和表層與基材之熱膨脹差異。表層材料為 ZrO₂-8Y₂O₃ 此材料有熱傳導係數低、熱膨脹係數高及耐熱震應力等特性。對一些熱燃氣直接衝擊之組件，如導火筒(transition piece)、內殼(inner casing)等，熱扭曲常會發生，因此噴敷其上之 TBC 厚度是否均勻相當重要，若 TBC 厚度變化太大則於熱循環過程中常易發生 TBC 剝落，為避免這種情形發生，一般需以機械手臂噴塗並經電腦計算控制以達噴塗厚度均勻之要求，TBC 噴鍍厚度一般約在 250-300 μm，約可降低母材溫度 50-75 °C。

3.1.3 TACR 特殊設備及製程

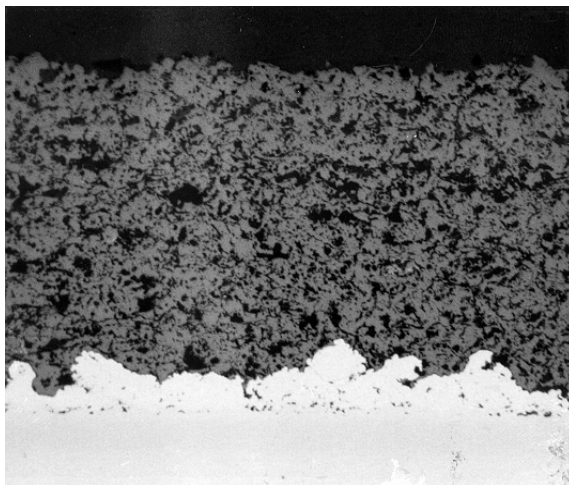
TACR 特殊設備及製程有：

1. 化學蒸鍍法 (CVD) 內孔鍍層
2. 電子束物理蒸鍍法 (EBPVD)
3. 雷射鑽孔

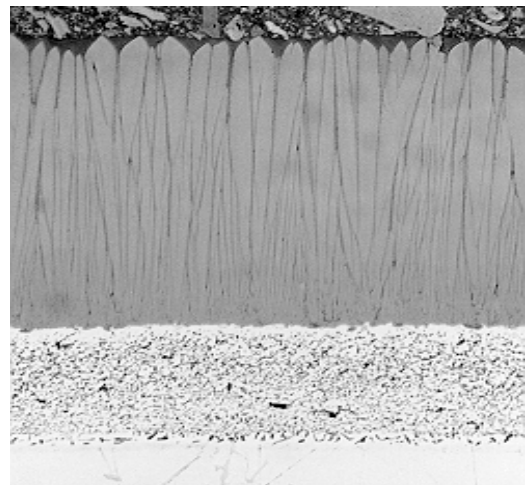
內孔鍍層主要針對新葉片內部冷卻通道，以化學蒸鍍一層保護性塗層，TACR 公司對於舊葉片則無蒸鍍處理。TBC 塗層除傳統的大氣噴鍍外，近年來有更先進的電子束物理蒸鍍法如圖 8。電子束物理蒸鍍法所噴覆之 TBC 塗層為柱狀，與傳統的堆疊狀不同如圖 9 所示，具有較佳的應變容忍性及抗沖蝕性，惟電子束物理蒸鍍設備造價相當昂貴，每部約 2,500 萬美金，目前大部份應用在航太工業的葉片維修上。



圖 8 電子束物理蒸鍍設備



APS



EBPVD

圖 9 APS 與 EBPVD 塗層之比較

3.2 SIEMENS SGT6-2000E / V84.2 – Si3D 動/靜葉片性能提昇討論

Si3D 葉片為 Siemens 這幾年新推出之新型葉片如圖 10-13，可以取代目前使用之葉片，以提昇機組效率， Si3D 葉片的優點有

1. 擁有最完美地葉片氣流設計
2. 葉片材質和塗層的改良昇級
3. 改善冷卻通道的效益，提昇性能，包括效率增加和輸出功率增加

Siemens 公司表示目前全世界已有 17 部機組使用 Si3D 昇級葉片，尚有 8 部機組正在昇級安裝中，未來 Siemens 會把 Si3D 葉片列為新機組的標準配件，本公司南部電廠也正評估 Si3D 葉片的性能提昇方案。



圖 10 SIEMENS V84.2 – Si3D 組裝葉片外觀

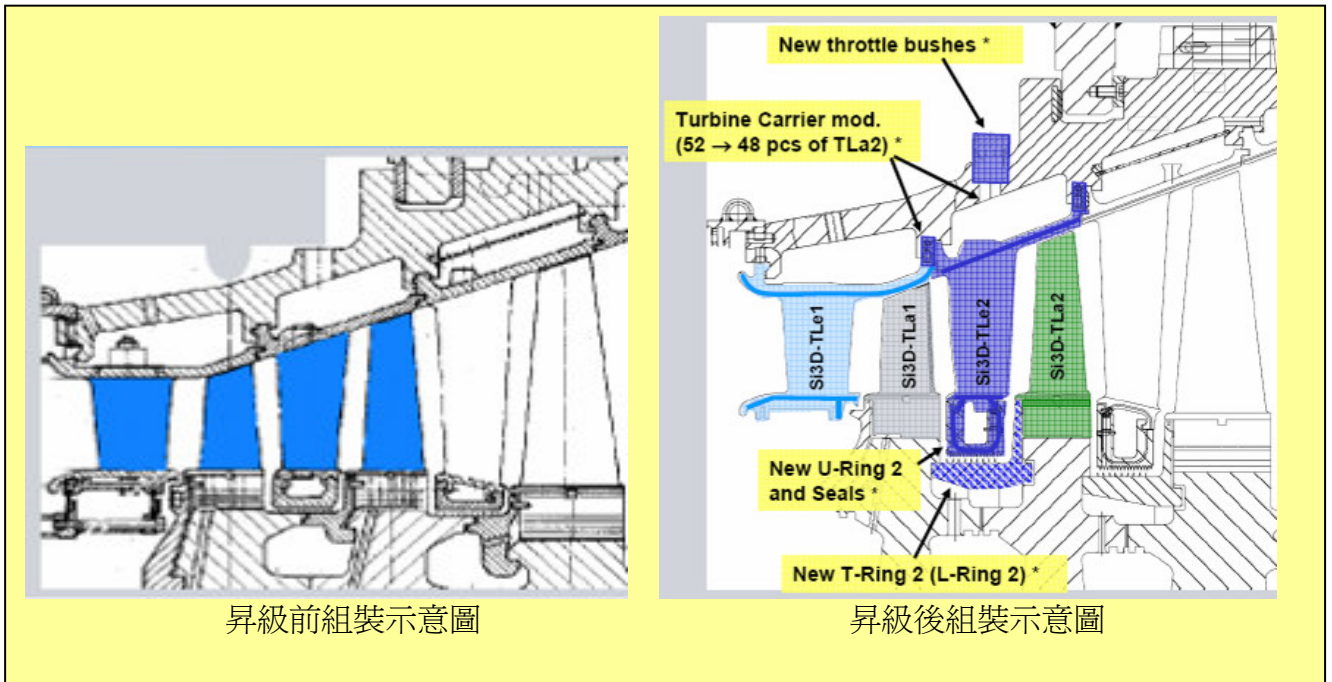


圖 11 SIEMENS SGT6-2000E / V84.2 – Si3D 昇級後組裝差異比較

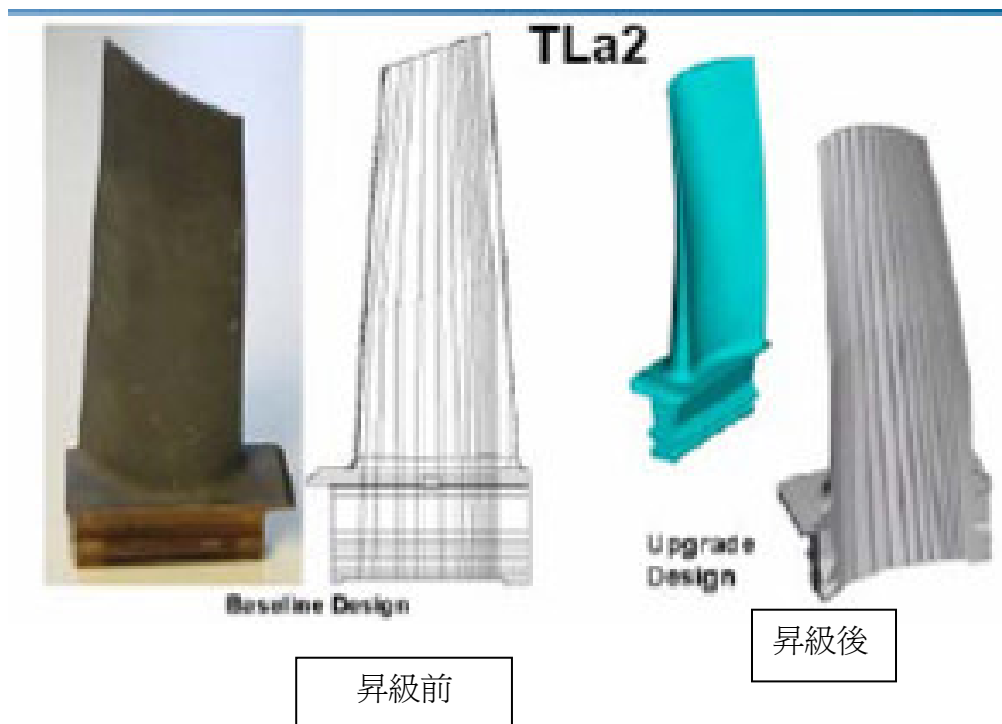


圖 12 第二級動葉片內部冷卻通道的改善



圖 13 第二級靜葉片內部冷卻通道的改善

3.3 氣渦輪機組運轉 100,000 EOH 延長壽命(LTE)的時程規劃

與準備事項討論

本公司 V84.2 部份機組運轉時數已接近 100,000EOH，依原廠的設計和維修經驗，機組運轉 100,000EOH 或 3000 次起停，機組部份組件必須進行延長壽命(LTE)計劃，一般而言，導致機組零件壽命終結的原因有：

- a. 負載 (loadings) 潛變 (Creep), 低頻疲勞 (Low Cycle Fatigue (LCF))
- b. 因素 (Factors) 腐蝕 (Erosion), 沖蝕 (Corrosion)

圖 14 為 Siemens 氣渦輪機組維護時程規劃，氣渦輪機組延長壽命(LTE)效益為

1. 避免機組零件損壞導致運轉損害。
2. 機組延長壽命是象徵高效率、可靠地及安全地。

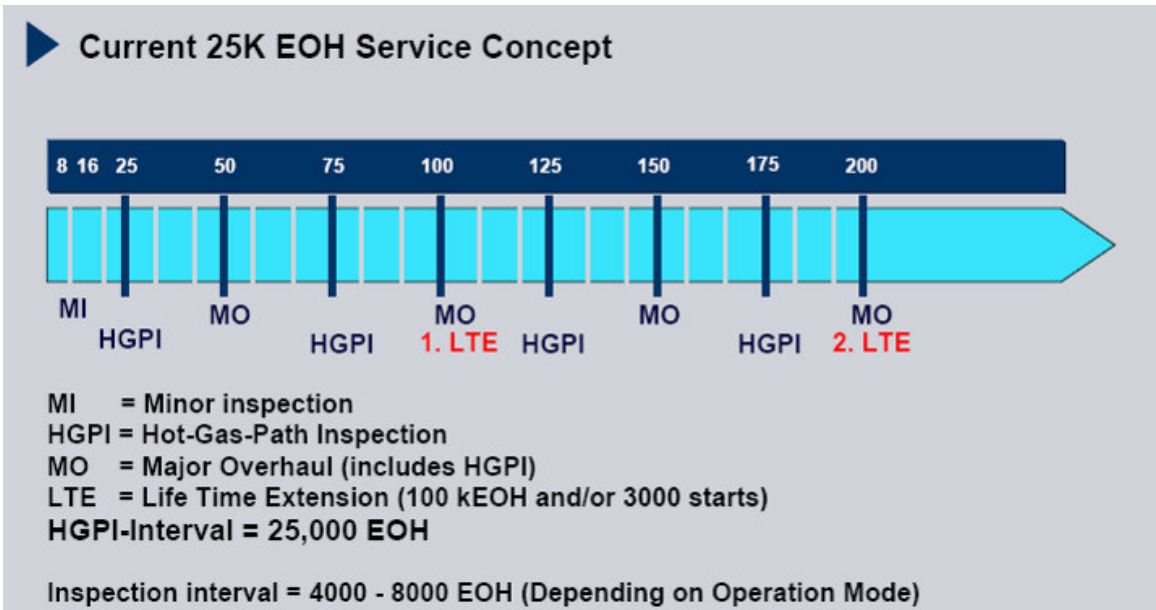


圖 14 Siemens 氣渦輪機組維護時程規劃

四、加拿大 LIBURDI 公司研習

加拿大 LIBURDI 公司的主要業務除氣機熱元件的維修外，也生產工業上特殊的銲接設備如低能量氬銲、超胡銲接與雷射銲接等，研習內容包括：

1. 葉片再生製程及相關技術討論
2. 氣機葉片銲修設備功能討論及工廠參觀

4.1 葉片再生製程及相關技術討論

LIBURDI 葉片再生除了有一些自行研發的特殊製程外，基本上與本公司製程類似，其葉片再生流程如下表：

表三 LIBURDI 葉片再生流程

- | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <ol style="list-style-type: none">1. 接收，檢視葉片狀況，記錄葉片編號，登錄系統2. 材質確認3. 冷卻裝置移除4. 化學去除舊塗層5. 清潔葉片內外表面6. 螢光檢測及尺寸檢查7. 輕微瑕疵損傷銲補8. 熱均壓熱處理9. 中度損傷銲修-必要時10. 螢光檢測-銲補範圍11. 嚴重損傷銲修12. 葉片外形修復13. 表面塗層噴覆14. TBC 塗層噴覆15. 噴銲後熱處理16. 螢光檢測及尺寸檢查17. 包裝及運輸 |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

4.1.1 熱均壓處理 (Hot Isostatic Pressing)

葉片經過長時間運轉其材質會產生劣化，降低其強度及延性，LIBURDI 葉片再生製程中對於劣化之葉片會進行熱均壓處理，熱均壓處理 (HIP) 目的有

- (1) 去除葉片內部缺陷如空孔，提升葉片疲勞壽命
- (2) 增加運轉後葉片應力破斷壽命及延性
- (3) 降低葉片殘留應力

圖 15 為葉片材料熱均壓處理前、後之微結構比較，處理前析出物顆粒圓化，並夾雜微細二次析出物顆粒，熱均壓處理後 γ' 重新析出，如圖 15 所示。

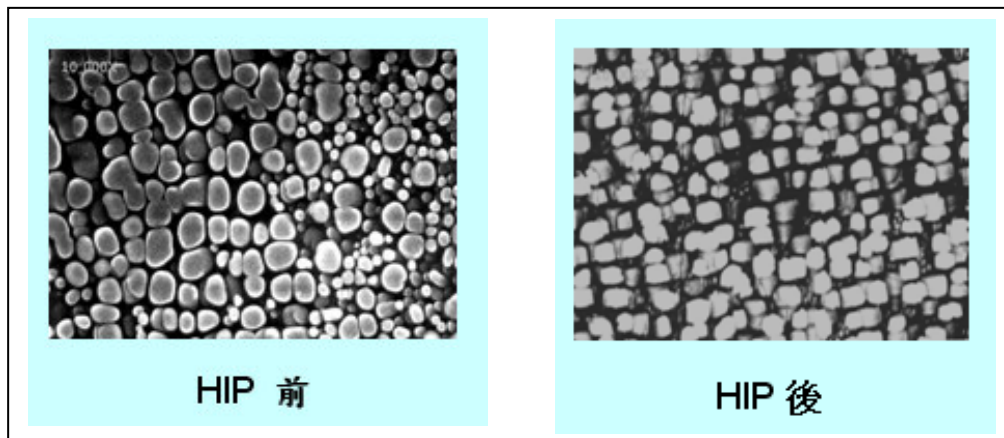


圖 15 葉片材料熱均壓處理微結構比較

4.1.2 LIBURDI 粉末冶金修補葉片

LIBURDI 粉末冶金修補技術為 LIBURDI 公司的專利，主要針對破損嚴重的葉片進行修護，修補前需將裂縫缺陷磨除，再將修補材料填滿裂縫進行真空高溫粉末冶金處理，最後將葉片表面研磨拋光如圖 16-18 所示。

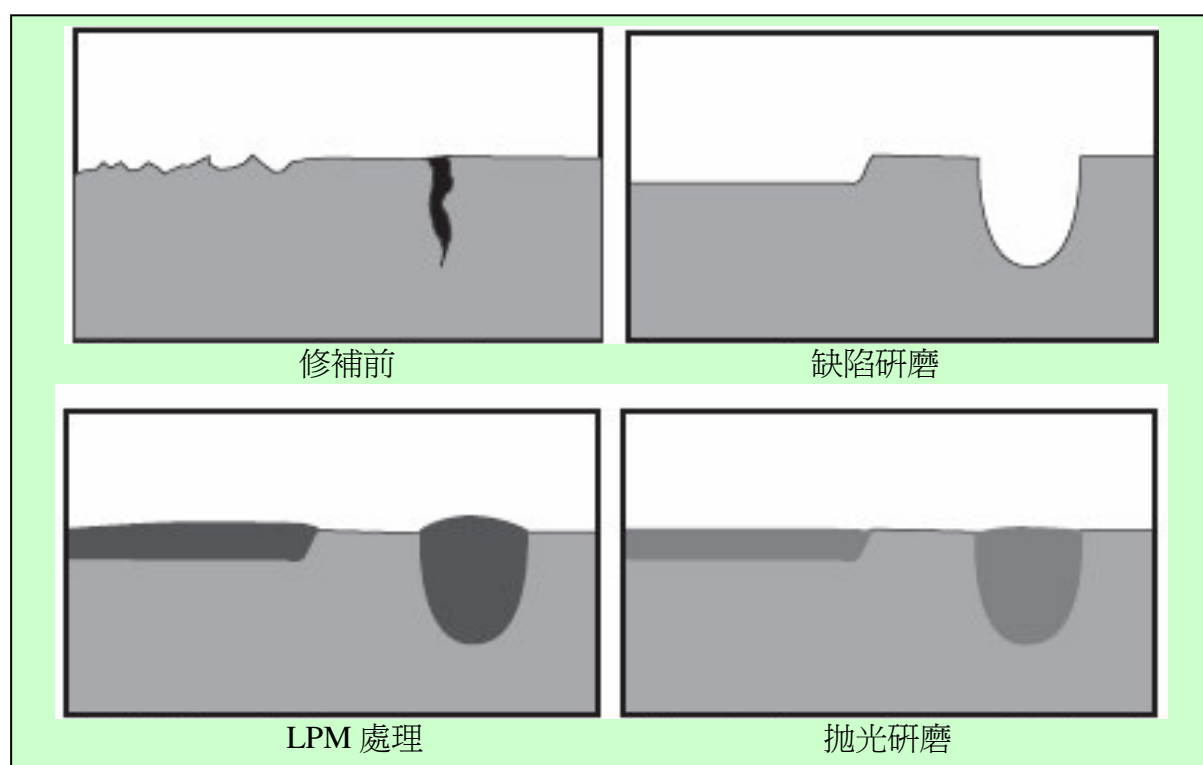


圖 16 LIBURDI 粉末冶金修補

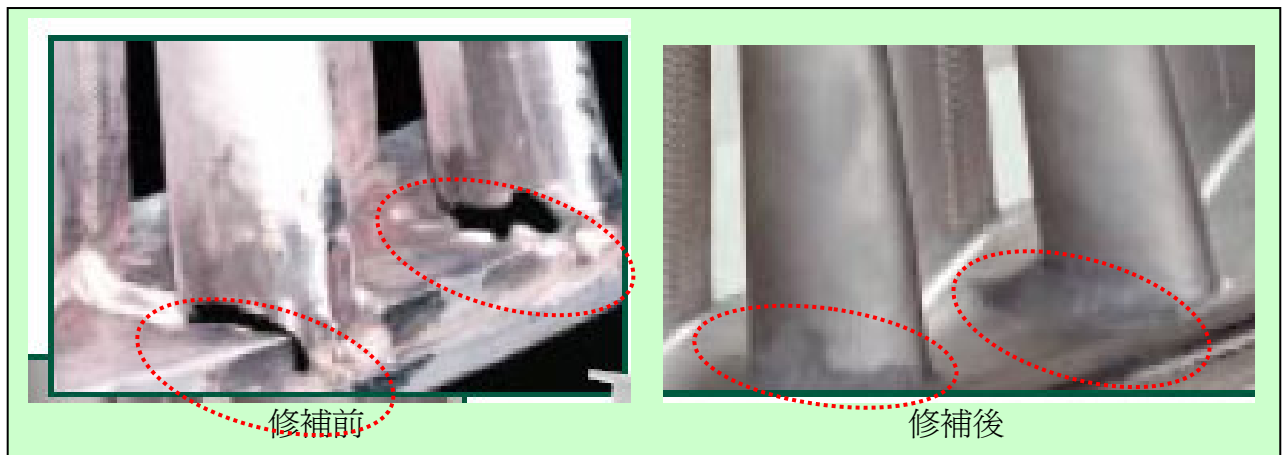


圖 17 葉片使用 LPM 修補情形



圖 18 LPM 修補完成後葉片外觀

4.1.3 燃燒筒與魚尾管的再生處理

(一) 燃燒筒再生處理

- (1) 瑕疵缺陷修補-銲修和粉末冶金 LPM
- (2) 重新噴塗內部 TBC 塗層
- (3) 增加含矽鋁氧化塗層來保護燃燒筒



圖 19 燃燒筒外觀



圖 20 魚尾管外觀

(二) 魚尾管再生處理

- (1) 瑕疵缺陷修補-銲修和粉末冶金 LPM
- (2) 恢復魚尾管原有尺寸
- (3) TBC 塗層厚度控制在最小的公差內

4.2 氣機葉片銲修設備功能討論

4.2.1 攜帶式雷射銲接設備

Liburdi 公司自行研發產製的設備種類很多，也很有特殊性，主要應用在電廠組件的銲修，圖 21 為可攜式雷射銲接設備，光纖雷射功率 500W，可攜帶至現場施工，非常方便，圖 22 為可攜式雷射銲接設備應用於葉片的修補，動葉片經過雷射銲修後，在做檢測時時常出現瑕疵指示，應用可攜式雷射銲接設備可將細小的瑕疵指示修復而不會導致變形如圖 23。



圖 21 Liburdi 可攜式雷射銲接設備

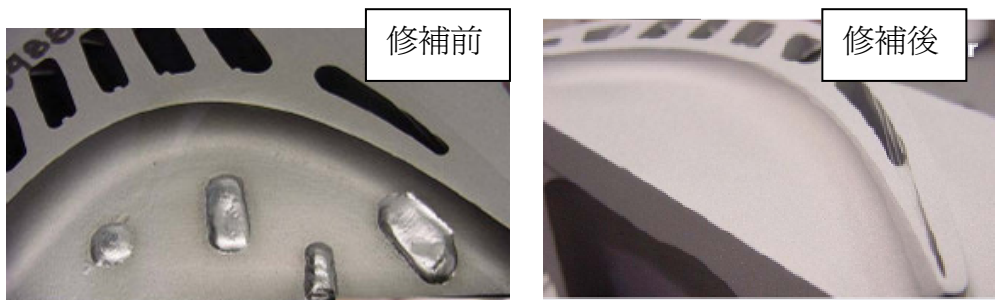


圖 22 可攜式雷射銲接應用於葉片修補

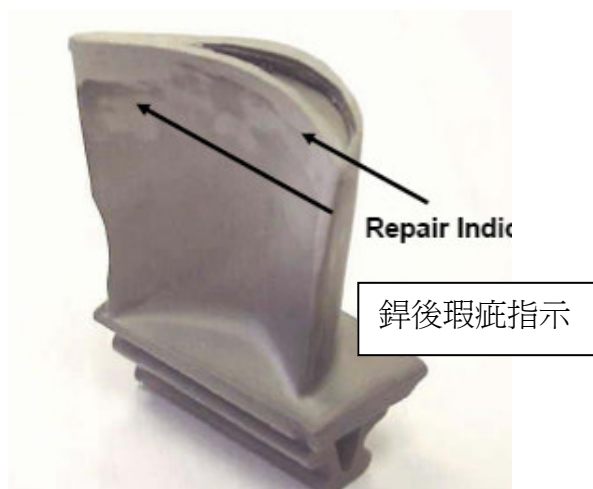


圖 23 動葉片在修補後出現瑕疵指示

4.2.2 Liburdi 雷射銲接設備

Liburdi 的雷射銲接設備主要是針對葉片的銲修設計，圖 24-25 為雷射銲接設備外觀及實際銲修葉片頂端之情形，動葉片頂部經過雷射銲修後，可恢復原有的外形及性能。

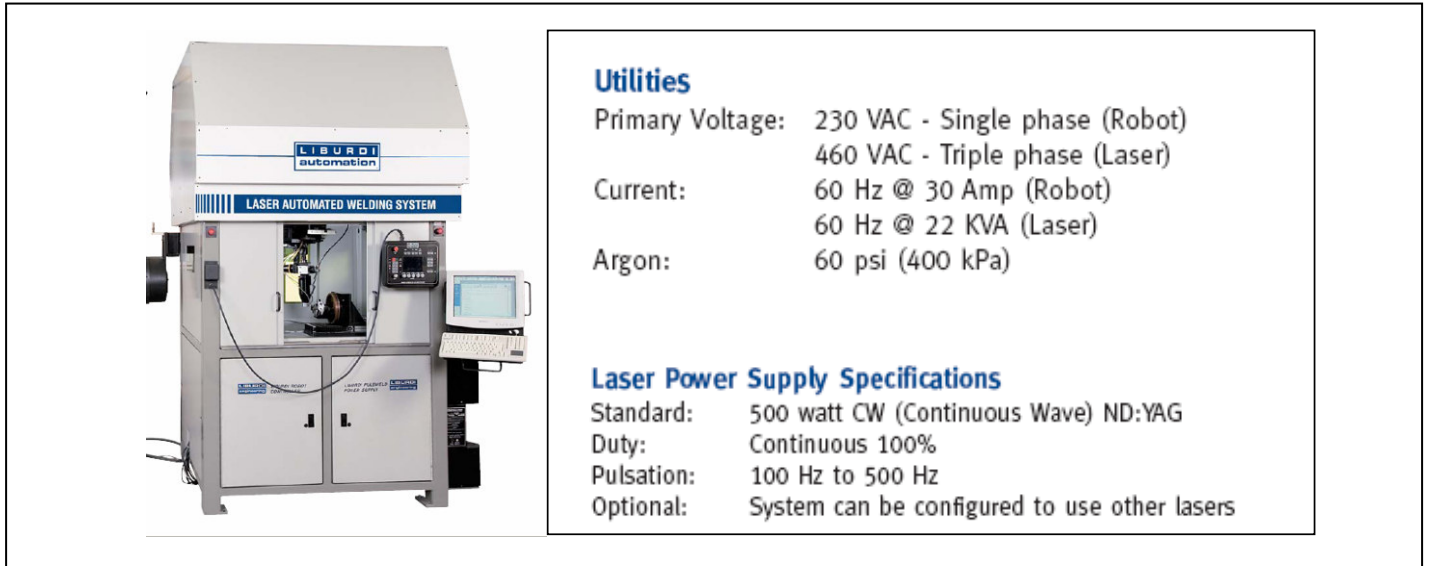


圖 24 Liburdi 雷射銲接設備與功能

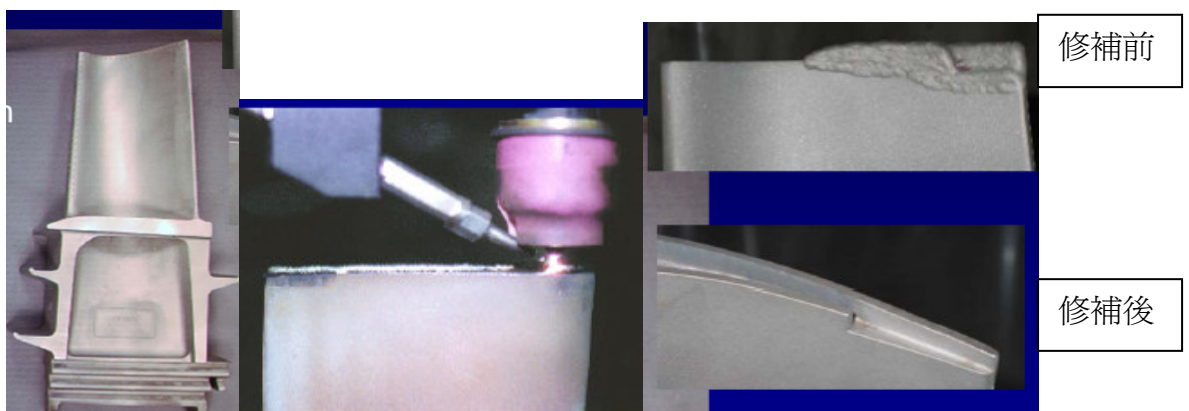


圖 25 Liburdi 雷射銲修葉片頂端之情形

五、心得與建議

氣渦輪機葉片再生工程，經參訪國外原製造廠及專業維修公司，均以工廠維修生產線型態營運，配合各種不同廠牌的葉片，由專門研發團隊，分別建立品質管控標準及研發製程中所需治具，再交由工廠施工。

氣渦輪機葉片為必須定期更換組件，數量大價格昂貴，再生技術層次高，且原廠家再生葉片保固期一般為 8,000EOH 或一年，惟本公司之氣渦輪機組大修週期一般為 25,000EOH(Siemens V84.2)或 16,000EOH(Mitsubishi 501F)。因此建立穩定可靠的再生能量為當前重要課題，此外經由不斷的研發提昇品質，將再生葉片保固期延長至與機組大修週期相同，對電廠運轉維護將有正面效益。

德國 Siemens 與加拿大 Liburdi 公司是世界上知名之氣機製造與葉片維修公司，此次研習主要目的為實際了解二大公司的葉片再生製程，引進國外先進技術，提昇本公司葉片再生之品質，在研習期間也能與原廠技術人員針對葉片再生製程深入的討論，對以後葉片再生工作甚有幫助。

國外葉片維修公司通常皆有一些自行研發的技術或專利，製程上可能有些不同，本公司可嘗試引進一些先進技術或設備，建立多元化鐸修技術，提昇本公司之技術水準。