

出國報告（出國類別：實習）

研習氣渦輪機組葉片再生空壓機葉片 噴塗再生技術

服務機關：台灣電力公司 電力修護處

姓名職稱：呂元中 課長

李茂科 機械工程師

派赴國家：新加坡、美國

出國期間：98.11.10~98.11.23

報告日期：99.01.13

摘 要

本公司火力發電廠氣渦輪機組日益增多，氣機組件如葉片、燃燒筒與魚尾管等長期在高溫環境下運轉，產生熱腐蝕與高溫氧化損壞，須定期進行維修或更換。由於新組件價格昂貴，即使送至國外進行原組件再生，費用昂貴。隨著本公司大潭電廠氣渦輪機組陸續併聯發電，未來氣機熱元件的再生需求也將日益增高，為了避免電廠用料短缺及降低本公司熱段組件的維修費用，本處(電力修護處)自民國 94 年起開始進行氣渦輪機組葉片的再生工作；另為因應大潭電廠的再生需求，於民國 97 年開始研究三菱機組熱段元件的相關再生技術。為了使本處的再生能力能與國外原廠相匹配，本處除了積極建立自主的葉片再生處理技術外，也期望能藉由國外相關廠商的技術合作，引進先進的技術及設備，以建立完善且完整的葉片再生能力，為本次出國研習的主要目的。

依預訂之出國計畫，先赴新加坡的 T. O. S. (Turbine Overhaul Service) 公司研習氣渦輪機葉片的再生處理製程。該公司擁有葉片製造廠商-普惠公司的技術支援，並從事葉片再生多年，在國際間擁有高度的口碑，藉由本次的研習，得以比較本處與該公司製程上的異同處，以期能吸取該公司豐富的製程經驗，做為本處持續努力改進之參考。之後到美國的 Huffman 公司實習了解 利用水刀機去除舊塗層的效果及到 TL 精密公司參觀 Laserdyne 公司生產的雷射鑽孔機在實品上打孔的實績，藉由參觀二間國際上應用於葉片再生設備之原廠，使本處能夠了解目前最新設備的開發進展情況，期能於適當的時機引進適當的設備，使本處的葉片再生工作能更趨完善，更進一步提昇本公司葉片再生處理的能力及能量。

目 次

一. 目的.....	3
二. 行程.....	5
三. 新加坡 T.O.S 公司葉片再生技術研習.....	6
四. 美國 Huffman 公司水刀去塗層研習.....	10
五. 美國 TL 精密銲接公司雷射鑽孔機研習.....	16
六. 心得與建議.....	19

一. 目的

氣渦輪機熱段組件屆滿相當運轉時數壽命，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果良好。

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件皆為高單價之組件，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，包括鐸修(Repair)及重新噴鐸(Recoating)，以提高其經濟效益與運轉可靠度。

本處(電力修護處)與綜合研究所合作研產本公司氣渦輪機組葉片再生處理工作，其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，葉片再生製程包含相當多的的 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，提昇本公司葉片再生技術能力及品質。行程包括 Turbo Overall Service (T.O.S.) 氣渦輪機再生公司、Huffman 水刀去塗層機公司及 Laserdyne 雷射鑽孔機公司，透過本次的研習，一方面可以學習其他再生公司最新的再生技術及相關資訊；另外一方面則可以了解最新的葉片再生設備發展情形，以期將來可以應用在本公司再生製程上，提昇本公司的再生能量及技術。

二、行程

表一、研習行程表

時間	地點/ 實習公司	工作內容
11/10	台北→新加坡	往程
11/11	新加坡/ T.O.S 公司	研習氣機元件再生技術與製程。
11/12~11/13	新加坡→美國 Clover(南卡州)	路程
11/14~11/17	美國 Clover/ Huffman 公司	研習水刀去除舊塗層技術與相關設備參觀。
11/18	美國 Clover→ 美國休士頓	路程
11/19~11/20	美國休士頓/ Laserdyne	研習雷射鑽孔技術與相關設備參觀。
11/21~11/23	美國休士頓→ 台北	回程

三. 新加坡 T.O.S 公司葉片再生研習

T.O.S (Turbine Overhaul Service) 公司為美國普惠(Pratt & Whitney) 公司在新加坡轉投資的一家氣機葉片再生公司。普惠為世界上三大航空發動機廠商之一(另二家為奇異及勞斯萊斯)，其持有 T.O.S 約 51% 的股份，並且支援相關的再生技術。

因為有普惠的技術背景，因此 T.O.S 每年再生的葉片以航空用的空壓段及低級數葉片為主，每年的再生產能為 10 萬片。其中陸地用的葉片再生(IGT, Industrial Gas Turbine) 只約佔 20% 的總再生產能。

T.O.S 公司在再生製程方面，有些部份與本公司略有不同，經整理後，異同點如表二所示。

表二、T.O.S 與本公司再生流程比較

	T.O.S	台灣電力公司	備註
1. 毀損評估	N/ A	V	T.O.S 未告知
2. 去塗層	V(酸洗)	V(研磨)	括號表使用方法
3. 固溶熱處理	V	V	
4. 螢光液滲(FPI)	V	V	
5. X 光檢測 (RT)	V	V	
6. 雷射鐳修	V(只鐳 Tip 端)	V(各位置皆可)	
7. 氬鐳	V	V	

	T. O. S	台灣電力公司	備註
8. 硬鍍	V	V	
9. 底層噴鍍	LVPS/ CVD	LVPS	
10. 面層噴鍍	APS/ EB-PVD	APS	
11. 清潔	氫氣/ 氫氟酸	藥劑+超音波	
12. 渦電流檢測缺陷	V	X	
13. 超音波量測厚度	V	X	
14. 夾具設計及校正	V	X	定期校正治具
15. 鑽孔	V(雷射鑽孔)	X	括號表使用方法

從表二中可以了解在前處理的去塗層方面，TOS 公司選擇採用酸洗做為去塗層的方式。這種方法可以大量的批次處理葉片，大幅加快葉片去塗層的速度；但是因為考量環保等因素，本公司尚未將酸洗製程納入標準生產製程的一環，而是以機械式人工研磨來代替。在組織析出物回復及消除應力方面，TOS 公司和本公司相同，也是採用高溫固溶的方式來處理。

修補後的檢測方面，TOS 選擇以渦電流檢測(ET)、螢光液滲檢測(FPI)及射線檢測(RT)來檢測缺陷，其中渦電流用在葉片檢測方面，經查相關文獻比較適用於航空用葉片，對於陸地用葉片再生並不適合，TOS 以航空用的葉片再生為主，因此採用渦電流來檢測瑕疵，是很合理的選擇；在射線檢測方面，最特別的是，TOS 雖然也是採用即時射線檢測系統 (RRT,

Real-time RT)，但是其採用類似機場檢測行李用的輸送帶方式進行，判斷應該是因為該公司再生的葉片都屬於空壓段及低級數的葉片為主，葉片體積較小，因此射線的腔體不需太大，即可短時間內取得數個角度的判圖，供作業人員判片，加快葉片判讀速度。不需旋轉及移動葉片至某個角度及位置，才能取得圖像。

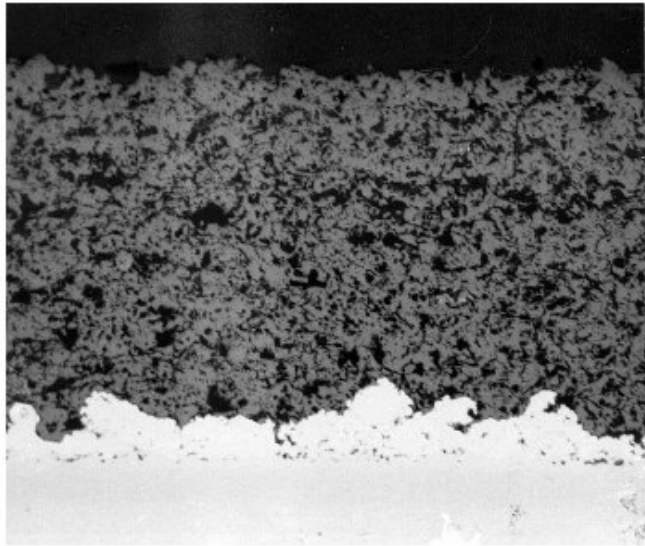
在鐳補方面，TOS 也是以氬鐳及雷射鐳接作為修補的主力，只是雷射鐳補只用來修補葉片的頂端(tip)，而不鐳補其他位置的缺陷。主要的目的，應該是為了省下路徑教導的時間，可以大幅的加快修補的速度。

TOS 公司噴鐳製程使用多相型覆層之噴覆方式有：

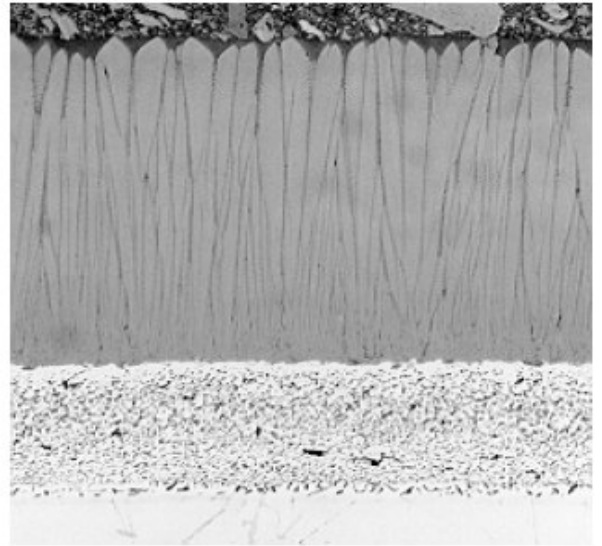
1. 真空電漿噴鐳(LVPS, Low Pressure Plasma Spray)
2. 化學氣相沉積(CVD, Chemical Vapor Deposition)
3. 大氣電漿噴鐳(APS, Atmospheric Plasma Spray)
4. 電子束物理氣相沉積(EB-PVD, E-beam Physical Vapor Deposition)

大氣電漿噴鐳主要應用在一般大氣環境下的噴鐳，通常針對大型工件。真空電漿噴鐳則應用在低壓環境下噴鐳，會產生具有高緻密性與低氧化物的噴鐳塗層，通常應用在葉片的噴鐳處理。大氣電漿噴鐳具有價格較真空及高速火焰噴鐳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。化學氣相沉積常用在內孔的鍍層上，主要針對葉片內部冷通道，以化學蒸鍍一層保護性塗層。電子束物理沉積法所噴覆之 TBC 塗

層為柱狀，與傳統 APS 噴覆的堆疊狀不同，如圖 1 所示，具有較佳的應變容忍性及抗沖蝕性，惟電子束物理沉積設備造價相當昂貴，每部約 2,500 萬美金，目前大部份都只局限應用在航太工業的葉片維修上而已。



APS



EBPVD

圖 1. APS 與 EB-PVD 塗層之比較

四. 美國 Huffman 公司水刀去塗層研習

本次出國實習的重點除了參觀新加坡 TOS 的再生製程外，就是著重在了解使用水刀去除葉片舊塗層的實績及目前開發的狀況。

4-1. 葉片去塗層方式比較：

目前不管是航空用或陸上型(IGT)葉片，主要可分為下列三種去塗層方式：

1. 酸洗(Acid Stripping)
2. 噴砂研磨(Grit Blasting)
3. 水刀(WaterJet)

酸洗製程最大的優點，就是它可以一次去除數十至數百支的葉片舊塗層，並可以批次的方式來進行大規模的再生生產，為最早採用的方式。但是因為酸洗液中的鹽酸(HCl)、硝酸(HNO₃)、硫酸(H₂SO₄)等混合物會造成環境污染的問題，在今日環保意識抬頭的情況下，需要建置更多設備在水質處理上。除此之外，酸洗製程的另外一個問題是酸洗液會造成葉片沿晶腐蝕(IGA, Inter-granular attack)的後果，如圖 2 所示，導致許多無謂的修補工作，花費時間及材料在修補上。

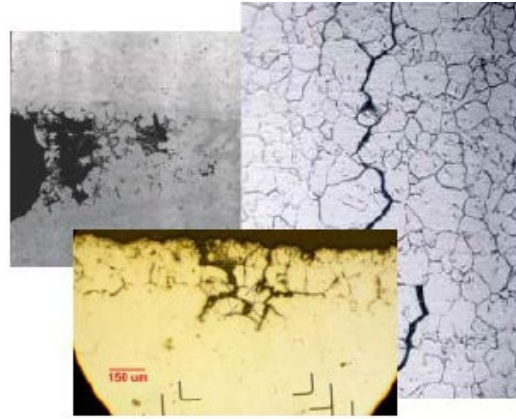


圖 2. 酸洗液造成 IGA 的後果

另外，酸洗去塗層作業如圖 3. 所示，酸洗時 MCrAlY 塗層雖然會被強酸溶解，但氧化物界層無法完全去除乾淨，必須配合人工研磨才可將塗層氧化物去除乾淨，但是葉面經人工研磨後，常會產生表面不平的結果。

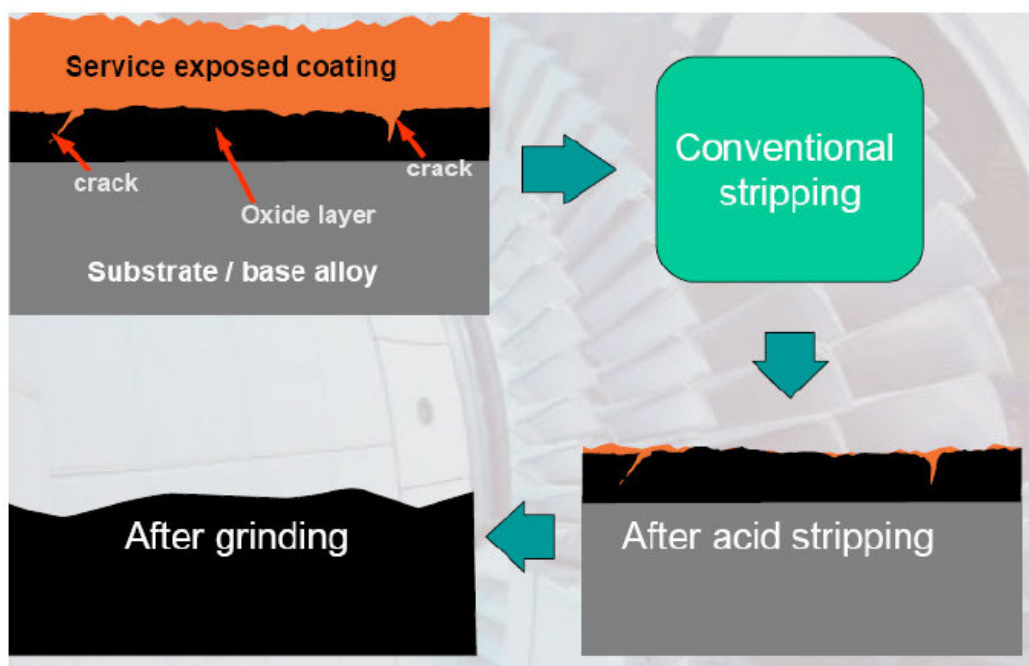


圖 3. 酸洗製程流程圖

因為酸洗有上述的缺點，因此接著開發出噴砂研磨的方式。它主要的優點除了無上述酸洗的缺點外，還有設備及耗材成本低的優點。但是因為葉片的葉面上有一定的曲度，需要對人員作較長時間的訓練，才能在葉片

去塗層作業時，儘可能的不造成基材的損傷。

水刀去塗層機(以下簡稱水刀機)最大的優點就是可以配合 CNC 程式控制水流的方向及大小，可以在不損傷母材的前提下做去塗層的工作。另外因為使用水為媒介，在去完塗層後，不需要如酸洗或噴砂一樣要先做清洗才能繼續下個製程，可以節省清洗的材料及時間成本。圖 4 為使用水刀機去塗層前後的結果，左邊為去完塗層，右邊為未去塗層。

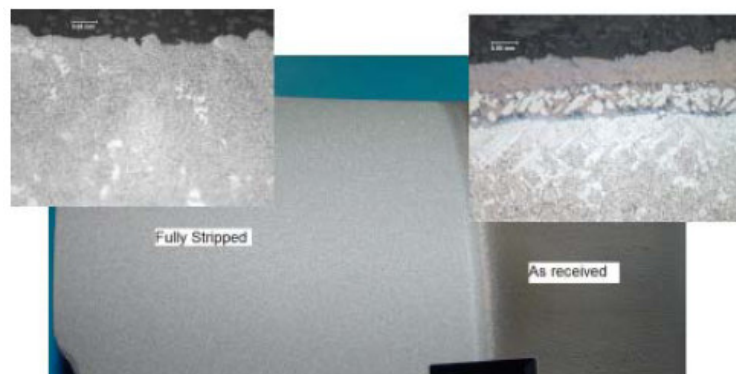


圖 4. 右圖為未去塗層、左圖為使用水刀機去塗層後結果

圖 5 則是使用噴砂研磨及使用水刀機去塗層二種方式去塗層，對表面造成的潔淨度影響。從圖 5. 中可以確實理解水刀機去塗層的表面比噴砂研磨後的葉片乾淨許多。

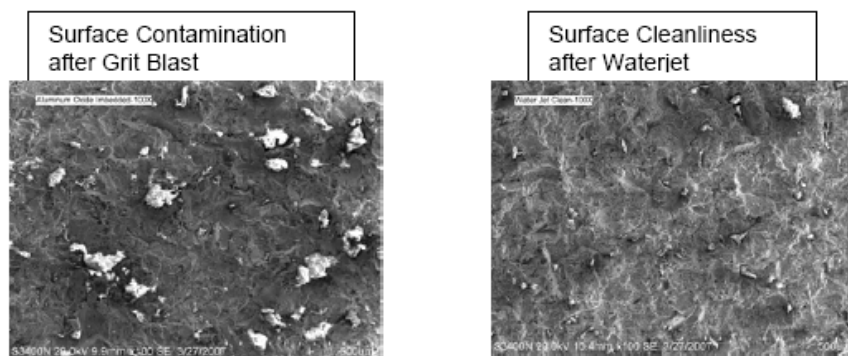


圖 5. 左圖為噴砂研磨法、右圖為水刀機去塗層後的表面潔淨度

4-2. Huffman 公司介紹：

美國 Huffman 公司自西元 1961 年成立後，即開始研究使用水刀機作為加工的方法，早期主要功能是作為清潔及切割用。自從西元 1990 年開發出第一台去塗層設備後，即將其功能擴充至去塗層服務。目前該公司擁有 US 6,905,396 B1 及 US 7,544,112 B1 二篇美國水刀去塗層專利。後來 Huffman 公司被房地產起家的 Springs 集團併購後，便在德州另外成立一家 Springfield 公司專職以水刀機為其客戶代工去塗層，以和專職水刀機設備製造的 Huffman 公司作為區別。

4-3. 水刀機各主要組件介紹：

水刀機的外型如圖 6. 所示。主要可以分為 4 個組件，首先為圖 7. 左上圖中所看到，可裝置及夾持加工件的腔體，軸上還有一個水刀噴嘴的機構件；右上圖為 CNC 控制面板，可以接受 Fanuc 或 Huffman 公司開發的加工機軟體及語法。左下的設備主要的功能是将水加壓至適當的壓力後，再送至噴嘴口進行二次加壓，達到加工壓力，緊接著才能對加工件進行去塗層工作；除此之外，對於水中的雜質，還有過濾的功能。當進行擴散層的去塗層時，需要在水中加入合適的氧化鋁砂，方可將擴散層去除乾淨，此時圖 7. 右下圖的氧化鋁砂過濾及注入設備即有其作用。



圖 6. 水刀機外型圖

➤ 水刀機腔體



➤ CNC控制面板



➤ 水質處理及加壓



➤ 氧化鋁砂注入



圖 7. 水刀機 4 個主要組件

4-4. 水刀機功能：

水刀機除了可以進行葉片的去塗層作用外，還可以對於葉片或熱段元件進行鑽孔及表面或孔洞清洗的功能，是一部具有多功能的設備。鑽孔的

公差可達到 $\pm 0.076\text{mm}$ 以內。這部份的功能和雷射鑽孔機相同，惟目前尚未有客戶採用在葉片再生的製程上，是否有其他疑慮，尚待了解。

五. 美國 TL 精密銲接公司雷射鑽孔機研習

美國 Laserdyne 公司隸屬於美國 Prima North America 集團之一員，集團旗下除了 Laserdyne 公司負責多軸向雷射加工機設計製造外，另有一家負責開發二氧化碳及 YAG 雷射發光源的公司-Convergent Laser 公司及一家專職販賣集團內產品及做售後服務的 Prima Systems 公司。Prima North America 集團為一相當專業的雷射相關領域研究及開發公司。

5.1 各型雷射鑽孔機比較

為了配合被加工件的複雜形狀，目前雷射鑽孔機主要的設計基礎都是以五軸加工為主。除了 X、Y 軸分別為水平左右、前後移動，Z 軸為垂直上下運動以外；又另外增加了一個 C 軸的軸向旋轉軸及可擺動的旋轉 D 軸，如圖 8. 所示。



圖 8. 雷射鑽孔機 C、D 軸向

在該公司生產的設備中，主要能配合本處葉片及熱段元件再生使用的設

備有二台，型號分別是 795XS 及 795XL，其各軸的極限能力如附表三，主要的差別在 X 軸的行程距離，795XS 可達到 1,000mm 的行程、795XL 則可加倍到 2000mm。至於 Y 及 Z 軸方面，二台都是 1000mm 的行程；C 軸則是軸向可左右各旋轉 450 度以應付各種複雜的曲面，D 軸則都可左右各抬昇 135 度。

表三、二種機型的五軸極限能力

LASERDYNE 795 XS	LASERDYNE 795 XL
X = 1000 mm	X = 2000 mm
Y = 1000 mm	Y = 1000 mm
Z = 1000 mm	Z = 1000 mm
C (Rotary) = $\pm 450^\circ$	C (Rotary) = $\pm 450^\circ$
D (Tilt) = $\pm 135^\circ$	D (Tilt) = $\pm 135^\circ$

5.2 雷射鑽孔機的優異性能

在雷射光對焦方面，Laserdyne 公司開發出最新的 ” 光學對焦控制 ” (Optical Focus Control) 取代傳統的自動對焦控制 (Auto Focus Control) 來量測目前的雷射噴嘴與物件間的距離，並且調整至固定的距離。當雷射光行經加工件時，如果雷射光當時並不在焦距上，會使加工件的鑽孔面積變大，並且能量會大幅減弱，容易造成加工面的瑕疵。光學對焦控制法在距離的量測準確度上較自動對焦控制法準確許多。

該雷射鑽孔機在設計時，為了避免一般雷射加工機常見的碰撞影響噴嘴

功能的問題。在設計機台時，在 C 軸的機構內多設計了一個具彎曲功能的機構，當噴嘴在行進過程有碰撞到物件時，會藉彎曲吸收碰撞的能量，如圖 9. 所示；避免噴嘴內的精密光學元件產生相對偏移，因為這些光學元件是光學精密的，一旦有稍微的偏移，雷射光將會有很大的偏移量，將會與原加工位置產生很大的差異，而更換雷射噴嘴不管在時間或金錢上都會造成很大的成本。

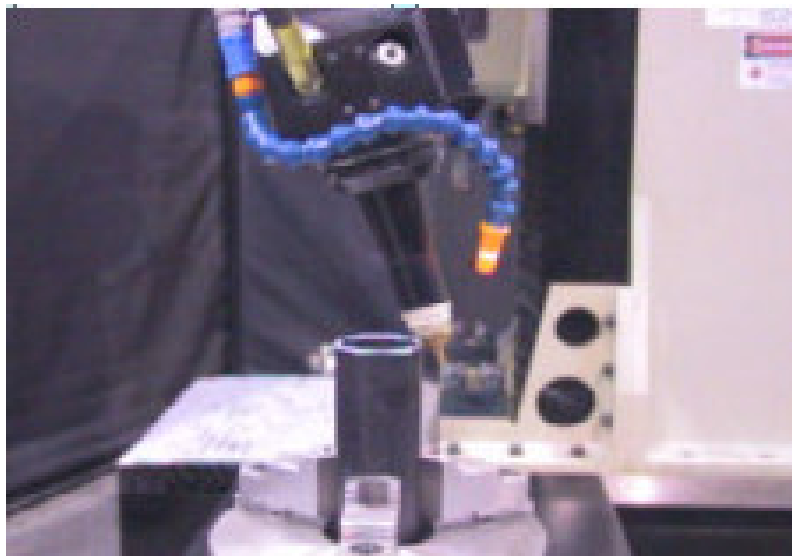


圖 9. 雷射鑽孔機可承受碰撞

六. 心得與建議

6-1. 心得：

氣渦輪機葉片再生製程，經參訪國外專業維修公司，多以工廠維修生產線型態營運，僅針對幾種特定廠牌型式的葉片建立品質管控標準及研發製程中所需的治具，再交由工廠施工。因此加工、檢測用之夾治具即顯得格外重要，而須定期實施治具校準調測。反觀本處(電力修護處)葉片再生型式多樣，包括 Siemens V84.2、V84.3、Alstom 11D5、11N、11NM、11N2、GE 7E、7EA、Mitsubishi 501F、501G 等，即無原廠技術支援，亦無相關葉片尺寸供作參考，幸賴綜合研究所技術技轉修護處及鼎力協助，始能於 95~98 年底生產近 6,000 片再生葉片的實績。

氣渦機葉片為必須定期更換的組件，數量且價格昂貴，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，對電廠運轉維護將具正面效益。

新加坡的 T.O.S. 公司是世界上知名之航空機與氣機葉片維修公司，此次研習主要的目的是為實際了解該公司葉片再生製程，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。

美國的 Huffman 公司在水刀加工領域鑽研許久，其技術執世界之牛耳，特別是在水刀去塗層方面，更是具有相關領先的專利保護。因為水刀去塗層法和傳統的酸洗或機械研磨法相比，有其不可取代的優點。因此藉本次的實習計劃，能實地了解目前設備的開發進度，並且與原廠技術人員進行技術方面的討論，期能在適當的時機引進適當的設備。而美國 Laserdyne 公司的雷射鑽孔機亦是為了相關評估的考量，至原廠進行實地考量，畢竟一台設備所費不貲，引進適合的設備一方面可以增加生產效能及品質，另一方面也不會造成公司資源的浪費。

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，建立多元化鉸修技術，以提昇本公司之技術水準。

6-2. 建議：

本處目前葉片去塗層的工作，是採用機械研磨的方式來完成，如前所述，會有花費較多人力、時間成本及容易造成母材損傷的缺點。因此為了增加本處的產能，建議本處可以考慮改採用酸洗的方式來做去塗層的工作，將會使本處前處理的速度大幅加快。至於人員安全及廢水排放等環保法規部份，本次實習的 T.O.S 公司位於新加坡，新加坡本身也是一個先進的國家，它的工安及環保法規應該也是相當的先進，因此只要採購適當的處理設備，相信在工安及環保方面應該不會構成阻礙。

另外本處目前也有開發熱元件的再生工作，經本次赴美國參觀設備，發現他們在再生熱元件時，都是先對熱元件進行鐸補及噴鐸完成後，接著才進行散熱孔的打孔工作；和本處先進行散熱孔阻鐸後再進行噴鐸工作的流程在製程順序上剛好相反。比較二者的優缺後可以發現，美國廠商的做法有二個主要可以加快流程速度的理由，其一是他們不需要每做一道噴鐸前便需要進行一次 UV 膠阻鐸的工作，只需要最後用雷射光一次打穿即可；其二是雷射打孔的速度比人工 UV 膠阻鐸的速度加快太多，以一件大潭的燃燒導筒為例，雷射打孔只要寫完程式後，只需數分鐘即可完成全部的雷射穿孔作業，但是人工 UV 膠阻鐸卻需數小時才可完成。即便如此，雷射打孔也不是沒有缺點，因為雷射光由程式自動執行，因此執行前需要提供它一個正確的位置及打穿深度，這部份因為本處沒有原始的設計資料，因此需要對新品先作逆向工程的前置作業，找出正確的孔洞位置及深度提供給程式使用。但鑑於以後熱元件的工作日益增加，建議本處還是可以往這方向來考慮。

此外，新加坡 T.O.S 公司對於治具方面極度重視，不但有專業的部門、人員，負責設計產線上可能需要的治具，對於人員的進出也實施嚴格的門禁管制，對於治具的重視，由此可見一斑；除此之外，該公司定期也會對產線使用中的治具進行校正。因此建議本處對於治具的開發及管理也能加強，才能使產線上的葉片再生產能增加並增加準確性。

在管理面方面，T.O.S 公司對於整個廠房的產線佈置，相當的流暢，

一站接著下一站，不會造成花費無謂時間讓葉片可以在站與站間移動，。並且，對於站別、葉片暫存區、治具暫存區等等的標示相當的清楚，除了使線上人員存、取使用方便外，也方便管理者進行盤點及管理，環境整理、整頓方面也做得很好。除此此外，對於外賓的參觀路徑也有清楚的標示、規劃，對於比較關鍵或比較重要的站別，則用標示禁止進入或放在遠離參觀路線上的位置。本處因為當初葉片工場是很後來才成立的部門，無完整的空間可以規劃，使得工作站間不符合最方便、最節省時間的方式來作空間配置，建議日後本處遷移時能夠學習 T.O.S 公司這些好的優點。