

電力研究簡訊

Power Research Newsletter

100年第1季 (100.01 No.79)

台電綜合研究所 **TPRI**

地址：(10091)台北市羅斯福路4段198號 電話：(02)2360-1084 傳真：(02)2364-9611

台灣電力公司

使命：滿足用戶多元化的電力需求、促進國家競爭力的提升、維護股東及員工的合理權益。
願景：成為具有卓越聲望的世界級電力事業集團。
經營理念：誠信、關懷、創新、服務。

研究計畫成果

西門子 V84.2 氣渦輪機第 1 級動葉片二次再生之可行性研究 (能源研究室:吳憲政)

(一) 研究動機：

本公司西門子 V84.2 氣渦輪機機組共 21 部，自裝機運轉至今機組之第 1 級動靜葉片經一次再生後，目前已運轉 5 萬多小時。由於氣機葉片於高溫與高壓的環境下運轉，其具有一定之運轉壽命（西門子之原始設計壽命為 10 萬小時，一般經 25000 小時運轉再生後，即不再進行再生），故對於已運轉 5 萬多小時之第 1 級動葉片進行研究分析，以決定該動靜葉片是否可繼續進行再生，並估算其再生率，相關研究結果作為電廠備品規劃之參考。

(二) 研究結果及結論：

針對實際運轉 5 萬小時葉片分析檢驗發現其損傷程度包括葉片導引端過熱（圖 1 葉片外觀與 SEM 金相照片）及葉片內部肋骨附近龜裂與尾流端高應力區冷卻孔龜裂（圖 2）。經由嚴重損傷葉片取樣進行潛變及高溫拉伸測試結果顯示西門子第一級動葉經 HIP+HT 處理或經高溫固溶+HT 處理後，其高溫抗拉強度由高溫降伏強度未達葉片之降伏強度或遠低於葉片之降伏強度要求（圖 3），而獲提升高於 IN-738LC 之高溫降伏強度要求（圖 4），並增加其潛變破斷壽命及高溫強度，且經處理後相關潛變性質趨近 IN-738 之上限強度值（圖 5）；其金相組織

變化由 IN738 葉片材料（圖 6(a)）晶界形成 γ' 相包覆碳化物之連續析出相與基材成長粗大之 γ' 相，經高溫固溶+HT 處理後晶界連續析出之 γ' 相大部份皆消失，初析之 γ' 相呈現方形組織形態，並於基地中析出細小之球狀 γ' 相（圖 6(b)）；或經 HIP+HT 處理後，晶界之連續 γ' 相皆消失，僅殘留 MC 碳化物及少部份 γ' 相（圖 6(c)），且基地中析出之初析 γ' 相及二次析出之球狀 γ' 相與上述第 1 級動葉僅經固溶處理者之組織形態相同。

運轉 5 萬小時西門子第 1 級動葉片經 HIP+HT 處理或高溫固溶+HT 處理後，可完全或大部份消除晶界之連續 γ' 相，並使動葉材料組織結構回復至原 IN-738LC 材料組織形態，高溫機械性質及潛變破斷壽命亦可達到原 IN-738LC 材料之要求。因此，第 1 級動葉進行二次再生為可行。

由相關鉚補測試顯示進行西門子第 1 級動葉之二次再生須嚴格管控 RT、FPT 及 VT 等 NDT 檢測品質，對於葉面根部 TE 出口龜裂、過熱及內部龜裂等缺陷須特別注意，部份再生製程須作調整後進行二次再生。二次葉片再生製程除葉片經 HIP 製程處理及葉損傷嚴重區須經雷射高溫鉚修外，其餘相關製程可使用原葉片再生處理製程進行再生處理。

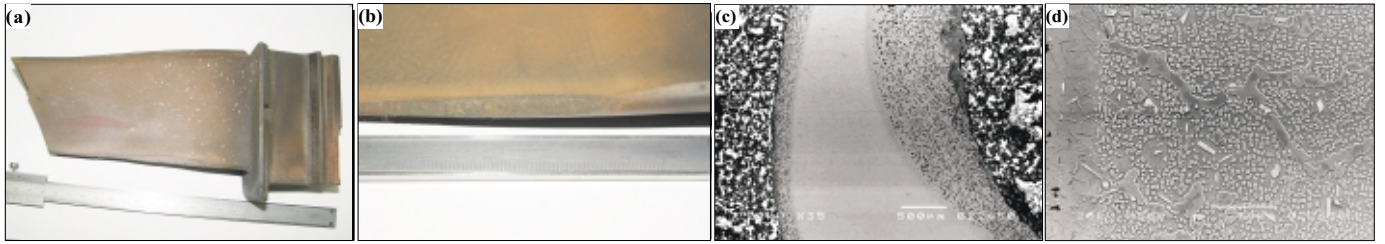


圖 1 西門子 V84.2 第 1 級動葉片經 5 萬小時運轉後葉片導引端過熱區之外觀及 SEM 金相照片：
(a)、(b) 外觀照片；及 (c) 與 (d) 導引端冷卻孔 及母材與塗層界面。

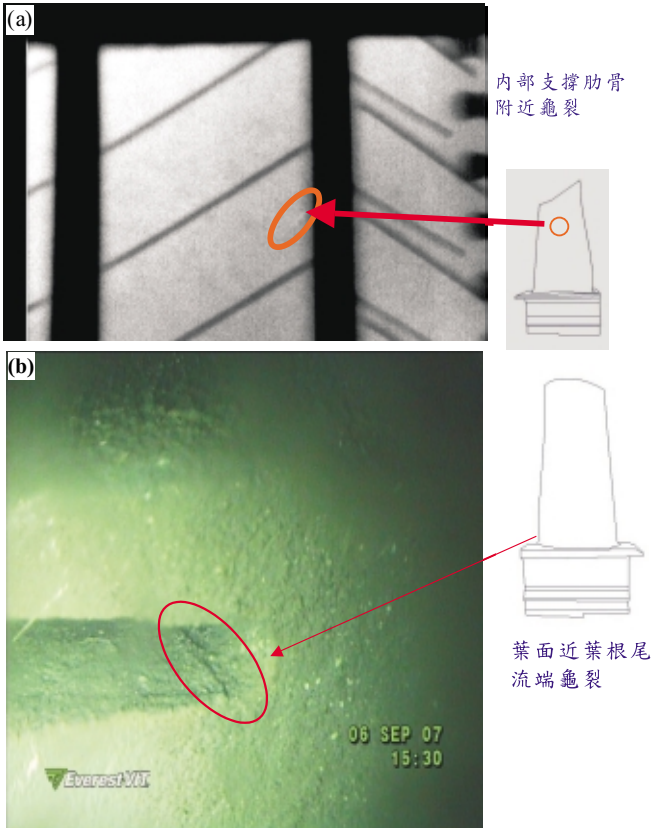


圖 2 西門子第 1 級動葉經運轉 5 萬小時後葉片：(a) 內部肋骨附近龜裂縫即時 RT 照片；與 (b) 尾流端高應力區冷卻孔龜裂之 VT 外觀照片。

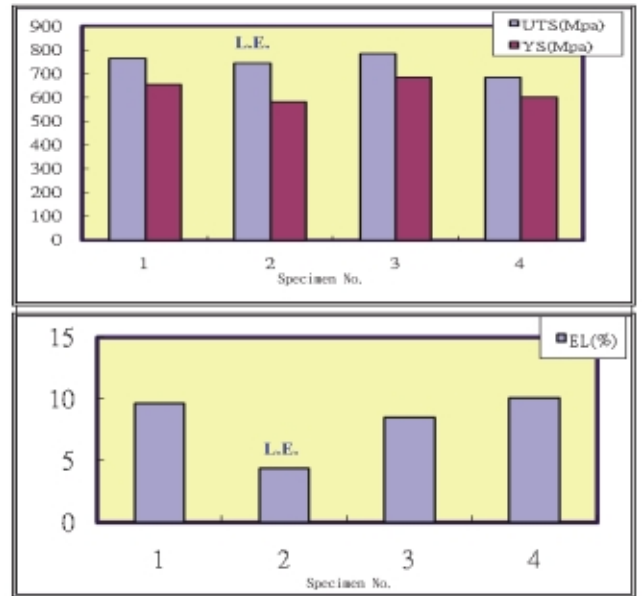


圖 4 西門子氣渦輪機第 1 級動葉 (IN738 合金) 經 5 萬小時運轉+HIP+HT 之 850°C 高溫拉伸強度及伸長率。

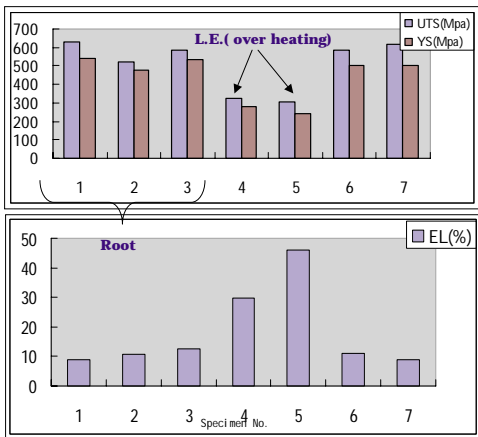


圖 3 西門子氣渦輪機第 1 級動葉 (IN738 合金) 經 5 萬小時運轉之 850°C 高溫拉伸強度及伸長率。

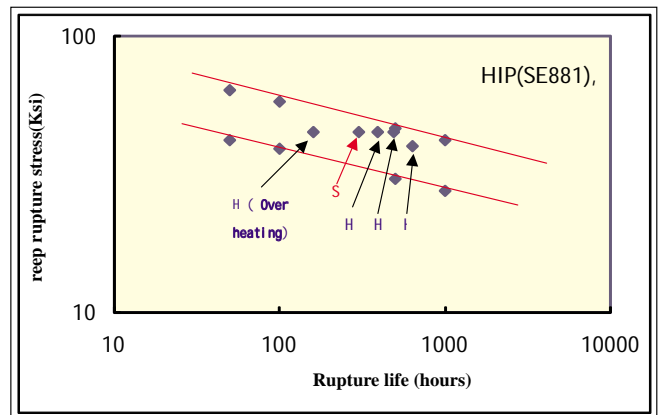


圖 5 西門子氣渦輪機第 1 級動葉 (IN738 合金) 經 5 萬小時運轉+HIP+HT 之 850°C 潛變破斷壽命。

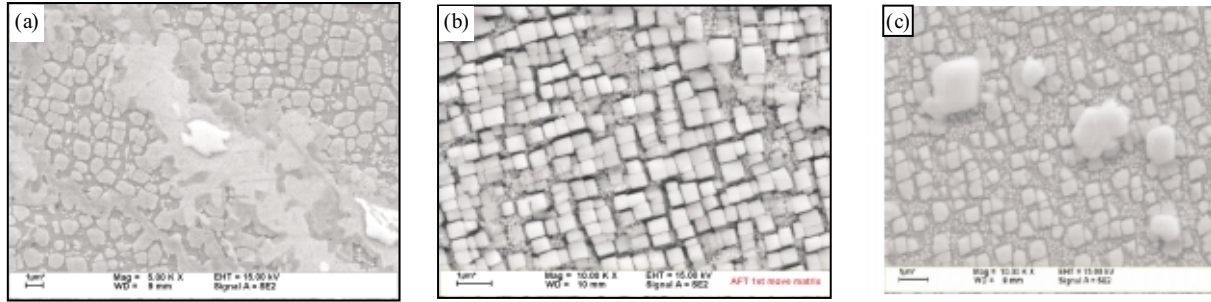


圖 6 西門子氣渦輪機第 1 級動葉 (IN738 合金) 經 5 萬小時運轉、固溶處理+HT 處理及經 HIP+HT 處理後之 SEM 金相顯微組織照片：(a) 經 5 萬小時運轉； (b) 固溶+HT 處理；與(c) HIP+HT 處理。

新技術新設備介紹

重度硼摻雜之氫化多晶鍺薄膜在串疊型太陽電池之應用

(電力研究室：曹昭陽)

(一) 研究背景：

串疊型 (tandem) 太陽電池由兩個或多個以不同材料製作的子太陽電池堆疊而成，利用不同材料吸收不同波段陽光的特性，擴充太陽電池所能吸收陽光的波長範圍，因而達到提升光電轉換效率的目的。鍺 (Ge) 的能隙為 0.67 eV，可以吸收長波光。因此，氫化多晶鍺 (poly-Ge:H) 薄膜可以製備於玻璃上，做為低成本大片串疊太陽電池的底層子電池。底層子太陽電池的性能與摻雜的優劣息息相關，必須具有陡峭濃度分佈的淺接面 (shallow junction)。硼 (B) 是製作這種淺接面的常用元素，因為硼在鍺材料中不容易擴散。早期的文獻已經指出高性能的 p^+n 接面可以藉由離子佈植硼來實現，近幾年來研發人員已經可以利用離子佈植的技術將硼摻雜在鍺晶圓中，而達到高度活化 (high activation level) 的 p 型摻雜。然而，離子佈植技術因為其成本相對較高而不適用於大面積薄膜製程。此外，離子佈植通常會產生摻雜濃度呈夾帶擴散尾巴的高斯分佈狀，這是一般不樂見的。其他移地 (*ex situ*) 的摻雜技術，諸如爐熱擴散 (furnace thermal diffusion) 和旋轉式摻雜 (spin-on-dopant) 在這個應用上近乎不可能，這是因為在溫度低於 800°C 時，硼原子在鍺材料中很難擴散。這種特性導致以下困難：如此高溫的長時間熱製程無法與廉價的低軟化點玻璃基板相容；高溫會導致鍺材料漏失；高溫擴散引起的低濃度梯度分佈。因此，研發符合以玻璃為基板的大面積薄膜太陽電池需求的在地 (*in situ*) 硼摻雜技術是十分重要的課題。

(二) 實驗方法：

本研究採用以氬氣 (Ar) 與氫氣做為工作氣體的濺鍍系統 (sputter system)，藉由共濺鍍鍺與硼的

技術，在地 (*in situ*) 製備 p 型摻雜的氫化鍺薄膜。典型的工作底壓 (base pressure) 低於 6.5×10^{-7} Torr，沉積壓力則是維持在 1.5 mTorr。300 奈米厚的 p 型摻雜氫化鍺薄膜被濺鍍沉積在鍍有氮化矽 (SiN_x) 薄層的玻璃基板上，沉積時基板的溫度控制在 500°C，採用的鍺與硼靶材純度為 99.999%。硼的共濺鍍量是藉由控制施加於硼靶材上的功率密度來改變，施加的功率分別是 0, 15, 23, 和 55 W。為了探索熱退火製程 (thermal annealing) 對前述薄膜電氣特性之影響，除了剛沉積 (as deposited) 的薄膜外，從相同樣品切下的薄膜分別予以快速熱退火 (Rapid Thermal Annealing, RTA)，處理的條件為 550°C 120 秒以及 600°C 60 秒。

(三) 結果與討論：

在所製備的氫化鍺薄膜中，X 光光電子能譜分析並未測出含氧量，也就是含氧量已經低於儀器所能偵測的準位，所以氧對薄膜特性的影響在此予以忽略。拉曼和 X 射線繞射量測的結果均顯示硼含量越高，氫化鍺薄膜的結晶品質越差，與文獻所報告的一致。在電氣特性方面，霍爾效應量測鑑別出所有的氫化鍺薄膜呈 p 型導電特性。但是光憑此結果尚不足以證明 p 型摻雜成功，因為未摻雜的多晶鍺薄膜本身就是 p 型。圖 1 剛沉積和經過 550°C 以及 600°C 快速熱退火處理的氫化鍺薄膜的電阻率。圖中顯示，3 個系列的樣品均呈現電阻率隨著硼濺鍍功率 (P_B) 增加而遞減的趨勢。這與拉曼和 X 射線繞射量測的結果並不矛盾，而是摻雜成功的證據。與剛沉積的樣品比較，550°C 快速熱退火處理過的樣品，其電阻率改變不大，主要是因為其移動率 (見圖 2) 提高而載子濃度 (見圖 3) 下降的緣故。圖 2 顯示 3 個系列的樣品均呈現移動率隨著硼濺鍍功率

(P_B) 增加而遞減的趨勢。圖 3 則顯示 3 個系列的樣品均呈現載子濃度隨著硼濺鍍功率 (P_B) 增加而遞增的趨勢。值得注意的是 $P_B=55W$ 且經過 $600^\circ C$ 快速熱退火處理的氫化鍺薄膜，其載子濃度高達 $1.21 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ ，這個濃度遠高於文獻上所指出的，在 $875^\circ C$ 下以及在鍺的熔點下 ($937^\circ C$)，硼在鍺中的最大固態溶解度 (maximum solid solubility) 分別為 $\sim 2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 以及 $3 \pm 0.5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 。由於本研究中所採用的製程溫度遠低於 $800^\circ C$ ，所以在沉積過程中同時摻雜的硼雜質不易向外擴散，因此可以得到很陡峭的界面。此結果意味著採用濺鍍技術，一種低成本 (工作底壓要求不嚴格、不需要昂貴且具毒的 germane 氣體) 且適用於大面積生產的技術，可以在製程溫度不高於 $600^\circ C$ 的條件下，成功製備出重度摻雜的 p 型多晶鍺薄膜。這個新技術對鍺薄膜底太陽電池的製作十分重要。本研究之結果已經發表於國際知名期刊 *Electrochemical and Solid-state Letters*，更詳細的內容請見該論文。

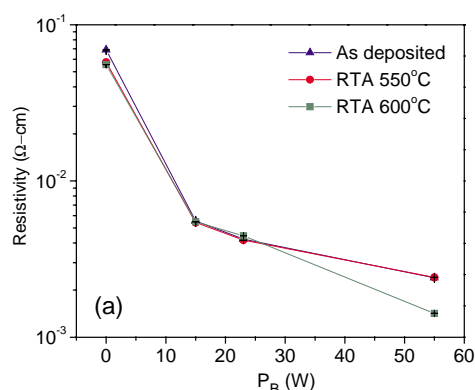


圖 1 剛沉積和經過 $550^\circ C$ 以及 $600^\circ C$ 快速熱退火處理的氫化鍺薄膜的電阻率。圖中顯示，3 個系列的樣品均呈現電阻率隨著硼濺鍍功率 (P_B) 增加而遞減的趨勢。

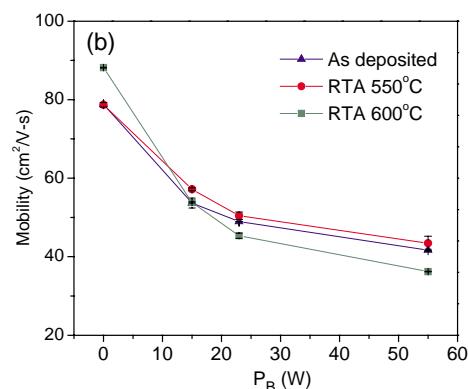


圖 2 剛沉積和經過 $550^\circ C$ 以及 $600^\circ C$ 快速熱退火處理的氫化鍺薄膜的移動率。圖中顯示，3 個系列的樣品均呈現移動率隨著硼濺鍍功率 (P_B) 增加而遞減的趨勢。這是由於活化硼的數量越多，離子化雜質散射效應 (ionized impurity scattering effect) 越明顯。

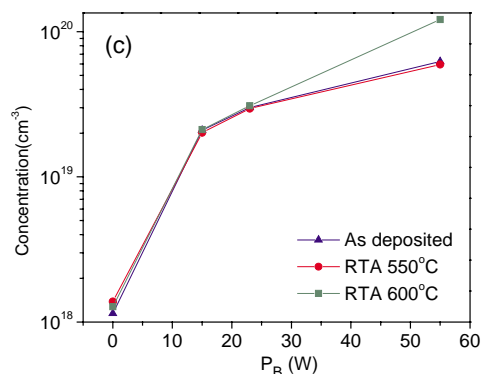


圖 3 剛沉積和經過 $550^\circ C$ 以及 $600^\circ C$ 快速熱退火處理的氫化鍺薄膜的載子濃度。圖中顯示，3 個系列的樣品均呈現載子濃度隨著硼濺鍍功率 (P_B) 增加而遞增的趨勢。

技術服務

一、火力電廠機組廠用冷卻水系統油污腐蝕案例分析與研究

(化學與環境研究室：田安庭)

(一) 研究背景

本公司一火力電廠 A、B 號機冷卻水循環水泵，因遭受電廠機油污染，使得管路材料之環境因子改變，對於管路材料腐蝕狀況的影響不明。因此電廠於今年 3 月委託本所進行模擬試驗，並尋求對策。在 99 年 03 月~99 年 05 月期間，本所藉由自行發展之全自動腐蝕速度計，在試槽中量測管路材料 (碳鋼) 之 3 種電化學訊號，分別為腐蝕電位 (E_c)、極化阻抗 (R_p) 與零電阻電流 (ZRA)，進

行模擬試驗，如圖 1 所示。

本所根據當時所得數據推斷，現場油污已加劇管路材料腐蝕，為了保護當時已經遭受油污腐蝕之管路材料，建議先清除 A 號機及 B 號機水中之油污，並且額外再添加 50ppm 之鉬酸根離子抑制劑，使得 A 號機含 230ppm 之鉬酸根離子抑制劑，B 號機含 193ppm 之鉬酸根離子抑制劑，補充抑制劑之目的在於修補局部電池效應所產生之鈍化膜損傷部位，以保護碳鋼免受油膜污染造成之腐蝕。

本研究係電廠於 99 年 8 月再度商請本所協助『火力電廠機組廠用冷卻水系統油污腐蝕後續追蹤分析』,其目的在於確認電廠在採取本所建議清除 A 號機及 B 號機水中之油污,並且額外再添加 50ppm 之鉬酸根離子抑制劑之後,廠用冷卻水是否達到保護碳鋼免受油膜污染造成腐蝕之預期成效。

(二) 試驗方法與結果：

在本試驗中,將水樣分為下列五組。第一組水樣：A 號機水樣,內含有輕微油污及 180ppm 之鉬酸根離子。第二組水樣：C 號機水樣,無任何油污,腐蝕抑制劑正常發揮作用,現場無腐蝕現象,本組作為參考對照組。第三組水樣：B 號機水樣,內含嚴重之油污及 143ppm 之鉬酸根離子。第四組水樣：A 號機水樣,已清除輕微油污,並額外添加 50ppm 之鉬酸根離子,使廠用冷卻水中總計 230ppm 之鉬酸根離子。第五組水樣：B 號機水樣,已清除嚴重油污,並額外添加 50ppm 之鉬酸根離子,使廠用冷卻水中總計 193ppm 之鉬酸根離子。

在經過 336 小時之腐蝕電位 (Ec) 量測試驗結果,其腐蝕電位 (相對於飽和甘汞參考電極) 之高低分別為：第四組~第五組 (-100mV) > 第二組 (-181mV) > 第一組水樣 (-300mV)。A 號機及 B 號機再額外添加 50ppm 之鉬酸根離子後,其腐蝕電位都比參考對照組高,表示已達防蝕之效果,如圖 2 所示。

在經過 336 小時之極化阻抗 (Rp) 量測試驗結果,其極化阻抗之高低分別為：第四組~第五組~第二組 ($6.01 \times 10^3 \text{ ohm}$) > 第一組水樣 ($4.35 \times 10^2 \text{ ohm}$)。A 號機及 B 號機再額外添加 50ppm 之鉬酸根離子後,其極化阻抗近似於參考對照組,表示已達防蝕之效果,如圖 3 所示。

在經過 336 小時之零電阻電流 (ZRA) 量測試驗結果,其零電阻電流之高低分別為：第一組水樣之零電阻電流 ($1.6 \times 10^{-4} \text{ A}$) > 第四組 ($2.33 \times 10^{-6} \text{ A}$) ~ 第五組~第二組之零電阻電流 ($1.09 \times 10^{-6} \text{ A}$)。A 號機及 B 號機再額外添加 50ppm 之鉬酸根離子後,其零電阻電流近似於參考對照組,表示已達防蝕之效果,如圖 4 所示。

由外觀觀察發現 A 號機及 B 號機再額外添加 50ppm 之鉬酸根離子後,碳鋼試片除了接合部位外,表面幾無腐蝕情形產生。此結果與 Ec、Rp、ZRA 之測量結果具一致性,如圖 5 所示。

(三) 結論：

1. 根據實驗結果確認腐蝕電位 -181mV 以上、極化阻抗 $6.01 \times 10^3 \text{ ohm}$ 以上、零電阻電流 $1.09 \times 10^{-6} \text{ A}$ 以下為安全工作區間,此時廠用冷卻水管路處於安全的環境中,腐蝕不會發生。
2. 根據實驗結果可確認『清除油污,並額外添加 50ppm 之鉬酸根離子於污染水樣中』後,

確實發揮保護碳鋼免受油膜污染造成腐蝕之成效。

3. 由本所開發的系統,可提供電廠作為腐蝕監測之儀器,所得數據可用以判斷廠用冷卻水管路腐蝕抑制劑是否發揮應有功效,是確保電廠運轉維護之新技術。



圖 1 腐蝕速度計外觀

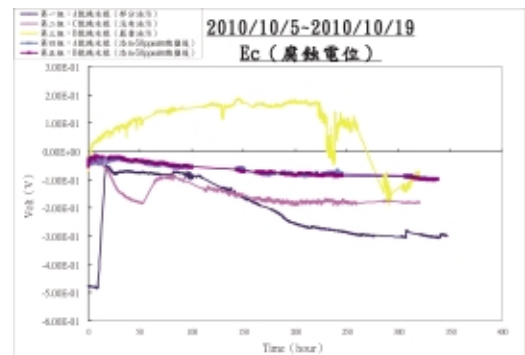


圖 2 腐蝕電位 (Ec) 量測結果

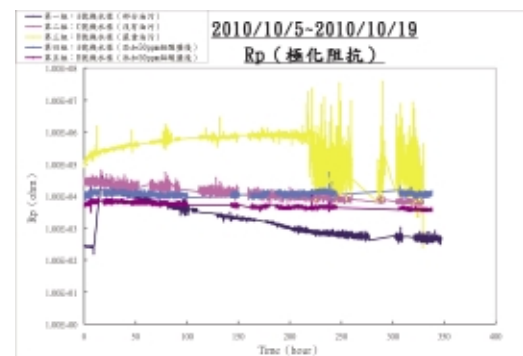


圖 3 極化阻抗 (Rp) 量測結果

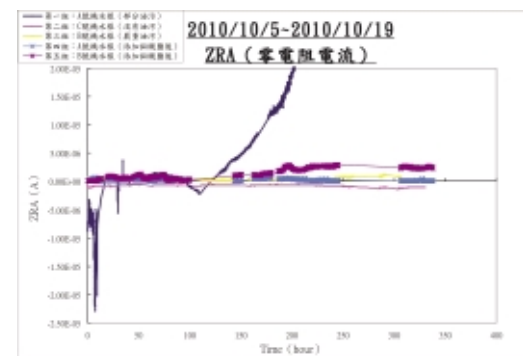


圖 4 零電阻電流 (ZRA) 量測結果

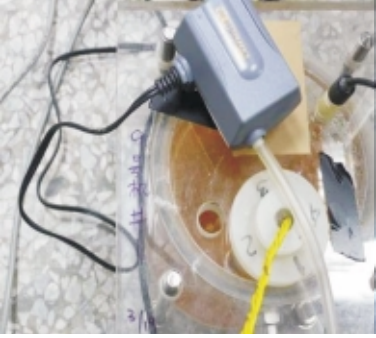

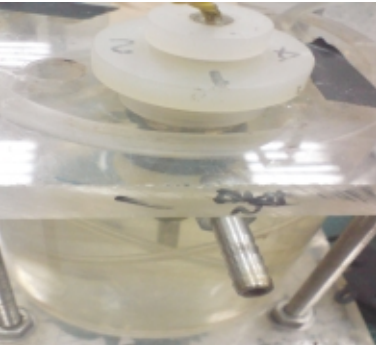
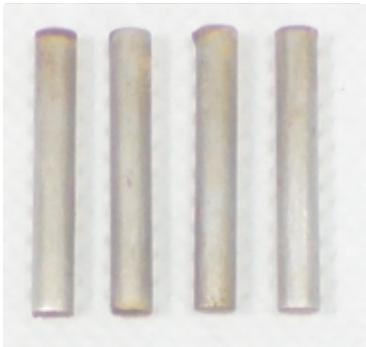
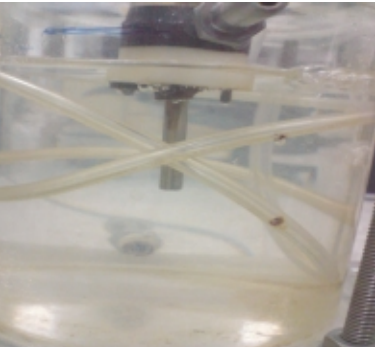

	
A 號機水樣 (內含有輕微油污)	A 號機水樣 (內含有輕微油污) 試片外觀
	
A 號機水樣 (已清除輕微油污, 並額外添加 50ppm 之鉬酸根離子)	A 號機水樣 (已清除輕微油污, 並額外添加 50ppm 之鉬酸根離子) 試片外觀
	
B 號機水樣 (已清除嚴重油污, 並額外添加 50ppm 之鉬酸根離子)	B 號機水樣 (已清除嚴重油污, 並額外添加 50ppm 之鉬酸根離子) 試片外觀

圖 5 試槽及試片外觀

二、鍋爐軸流式引風機葉片主軸螺栓破損肇因分析

(綜合研究所能源研究室：謝運華、高全盛；電力修護處：魏健能)

(一) 前言：

國內某電廠燃煤鍋爐軸流式引風機 (Induced Draft Fan, ID Fan) 之轉速為 896rpm, 經引風後鍋爐內部壓力為 -100Pa。某日機組運轉中因振動過大, 造成機組跳機, 廠方人員檢查跳機原因, 發現 30 支葉片主軸螺栓中斷了 1 支, 圖 1 為此斷裂 ID Fan 主軸外觀, 圖 2 為 ID Fan 主軸、導翼與葉殼等之總成示意圖, 電廠為深入瞭解肇因為何, 委託綜合研究所與電力修護處進行破損分析。

(二) 研究方法：

本研究以磁粒檢測法 (MT) 與超音波檢測法 (UT) 檢測餘 29 支主軸是否已受損傷, 再針對已斷裂主軸與受損主軸進行成分分析、拉伸試驗、衝擊試驗、破斷面外觀分析與金相組織觀察, 探討主軸斷裂之肇因。

(三) 成果與結論：

1. 透過磁粒檢測法檢測 29 支主軸, 均在後端 2~3 螺牙位置發現瑕疵 (裂痕) 顯示, 其瑕疵 (裂痕) 長度 5 mm~100 mm, 再以超音波檢測法執行複檢, 檢測出 5 支有較深之瑕疵訊

號反射，顯示主軸之裂痕瑕疵發生在單邊或對稱邊，為承受最大應力所在。

2. 金相分析（如圖 3）顯示，裂縫發生於主軸靠法蘭端起算第 4 牙位置，為 45°斜向主軸內部成長，該位置與承受最大彎曲應力相符，與磁粒檢測結果一致。
3. 主軸材質成分分析結果如表 1，顯示其中碳（C）含量 0.301% 比製造廠家規範之 0.38% 下限低，造成材料之強度較低。
4. 拉伸試驗結果（表 2）顯示，主軸之降伏強度與最大抗拉強度分別為 54/55kgf/mm²，72.3/73.3 kgf/mm²，兩者均比製造廠家標準值之 66.3 kgf/mm²，91.8~112.2kgf/mm² 低。
5. 衝擊試驗結果（表 2）顯示主軸衝擊值（-20℃）高達 147.7 與 148.8 Joules 為製造廠家標準值 35 Joules 之 4.2 倍，顯示材料之延性過高現象。
6. 觀察圖 4 破斷面表面形貌，裂縫之起始點位於 A 區，在此位置產生平整劈裂面，隨後在左右兩側出現數處階梯式破裂紋路，即為應力在較不穩定下產生之疲勞破壞現象；隨者裂縫逐漸擴張成長，呈現 C 區明顯海灘紋路之疲勞破裂特徵；當裂縫成長至 D 區時，產生劇烈起伏之破斷面（強制破壞區）。
7. 綜合前述之分析結果，主軸之破斷係因材料含碳量不足與機械強度不符合製造廠家規範，因此在離心與疲勞彎曲應力疊加作用下而產生高週疲勞斷裂。

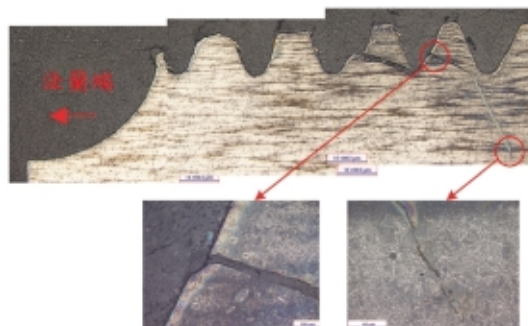


圖 3 主軸裂縫金相

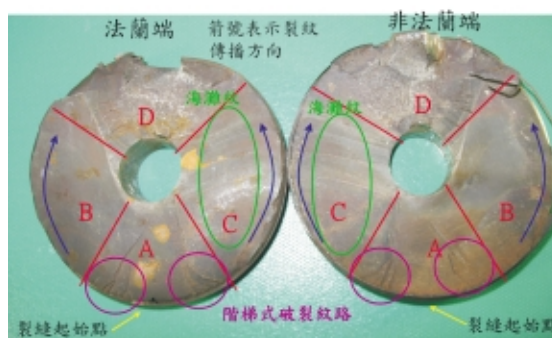


圖 4 破斷面巨觀

表 1 42CrMo4 主軸成分分析

元素 (wt%)	42CrMo4	
	標準值	實測值
C	0.38~0.45	0.301
Si	0.40max	0.283
Mn	0.7~0.9	0.874
P	0.035max	0.014
S	0.035max	0.007
Cr	0.9~1.2	1.213
Mo	0.15~0.30	0.272

表 2 主軸機械性質

機械性質	標準值	實測值
降伏強度 (kgf/mm ²)	66.3	54、55
抗拉強度 (kgf/mm ²)	91.8~ 112.2	72.3、73.3
伸長率 (%)	12	25.7、26.3
衝擊值 (Joules /-20℃)	35	147.7、148.8



圖 1 斷裂之 ID Fan 主軸

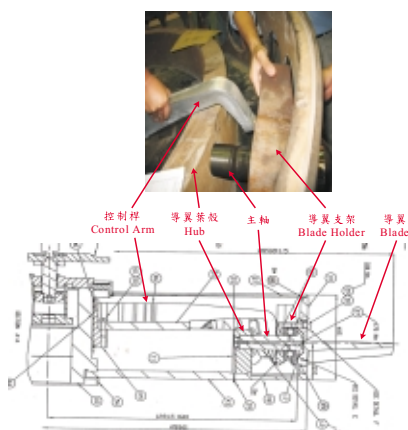


圖 2 ID Fan 總成與主軸安裝位置

研發與試驗活動

第 23 屆近代工程技術討論會

(研究發展企劃室：崔文經)

「近代工程技術討論會」(Modern Engineering and Technology Seminar, 簡稱 METS) 係由李前資政國鼎、孫前資政運璿於民國 55 年所創, 每 2 年舉辦 1 次, 邀請國內外專家、學者及官方、產業界, 共同討論當前國內外先進技術之發展趨勢, 提供政府擬定相關政策參考。

今(99)年第 23 屆近代工程技術討論會業於 11 月 8、9 兩日假台大醫院國際會議中心圓滿結束, 會中除邀請台達電鄭董事長崇華進行專題演講外, 另就「智慧新台灣」為主題, 研討政府在新世紀建設扮演之角色, 將之規劃出現代化都市更新、數位化教育學習、潔能化都會交通、永續化醫療照護、雲端運算及應用、新世代綠能科技等 6 項議題, 最後進行綜合討論。其中「新世代綠能科技」部分歸屬第 6 議題組, 爰例由本公司與工業技術研究院共同負責辦理, 本組共邀請國內外專家 12 位, 另與會者 100 餘人, 分別就再生能源、智慧電網及智慧型電表基礎建設三項主題互相切磋研議。



圖 1 鄭董事長崇華專題演講



圖 2 新世代綠能科技分組討論情形



圖 3 近代工程技術討論會報到情形



圖 4 費副總經理昌仁致詞 (分組召集人)



圖 5 綜合討論會主持人等合影