

出國報告（出國類別：進修）

英國利物浦大學進修報告

服務機關：台灣電力公司

姓名職稱：花敬翰 一般工程專員

派赴國家：英國

出國期間：96.12.29 ~ 98.09.17

報告日期：98.11.06

出國報告審核表

出國報告名稱：英國利物浦大學進修報告		
出國人姓名(2人以上，以1人為代表)	職稱	服務單位
花敬翰	一般工程專員	台灣電力公司
出國期間：96年12月29日至98年9月17日		報告繳交日期：98年11月6日
出國計畫主辦機關審核意見	<input checked="" type="checkbox"/> 1.依限繳交出國報告 <input checked="" type="checkbox"/> 2.格式完整(本文必須具備「目地」、「過程」、「心得與建議事項」) <input checked="" type="checkbox"/> 3.內容充實完備 <input type="checkbox"/> 4.建議具參考價值 <input type="checkbox"/> 5.送本機關參考或研辦 <input type="checkbox"/> 6.送上級機關參考 <input type="checkbox"/> 7.退回補正，原因： <input type="checkbox"/> 不符原核定出國計畫 <input type="checkbox"/> 以外文撰寫或僅以所蒐集外文資料為內容 <input type="checkbox"/> 內容空洞簡略未涵蓋規定要項 <input type="checkbox"/> 電子檔案未依格式辦理 <input type="checkbox"/> 未於資訊網登錄提要資料及傳送出國報告電子檔 <input type="checkbox"/> 8.本報告除上傳至出國報告資訊網外，將採行之公開發表： <input type="checkbox"/> 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"/> 於本機關業務會報提出報告 <input type="checkbox"/> 9.其他處理意見及方式：	
層轉機關審核意見	<input type="checkbox"/> 1.同意主辦機關審核意見 <input type="checkbox"/> 全部 <input type="checkbox"/> 部分_____ (填寫審核意見編號) <input type="checkbox"/> 2.退回補正，原因：_____ <input type="checkbox"/> 3.其他處理意見：	

說明：

- 一、出國計畫主辦機關即層轉機關時，不需填寫「層轉機關審核意見」。
- 二、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。
- 三、審核作業應於報告提出後二個月內完成。

報告人：	單位 主管：	主管處 主管：	總經理 副總經理：
	 		

行政院及所屬各機關出國報告提要

出國報告名稱：英國利物浦大學進修報告

頁數 32 含附件：是否

出國計畫主辦機關/聯絡人/電話

台灣電力公司人力資源處/陳德隆/(02)23667685

出國人員姓名/服務機關/單位/職稱/電話

花敬翰/台灣電力公司/核能火力發電工程處/一般工程專員/(02)23229426

出國類別：1 考察 2 進修 3 研究 4 實習 5 其他

出國期間：96年12月29日至98年9月17日 出國地區：英國

報告日期：98年11月6日

分類號/目

關鍵詞：氣渦輪機、超合金

內容摘要：（二百至三百字）

本次研習之主要任務為「赴英國利物浦大學進修碩士學位」，報告內容主要包括：

壹、國外公務之目的與過程

貳、出國期間所遭遇之困難與特殊事項

參、國外進修之心得與感想：

一、英國利物浦大學簡介

二、鎳基超合金之原理及應用

三、氣渦輪機熱元件塗層研發技術之探討

肆、對本公司之具體建議

本文電子檔已傳至出國報告資訊網（<http://report.gsn.gov.tw>）

目 錄

	頁次
壹、國外公務之目的與過程	1
一、緣起及目的	1
二、出國行程及進修課程簡介	2
貳、出國期間所遭遇之困難與特殊事項	6
一、英國老舊燃煤機組改造實例	6
二、全英國的電費係採用「差別取價」制度	7
三、英國大型超市假日營業時間短且仍受法律約束	9
四、大眾運輸業的價格種類多且差異大	10
參、國外進修之心得與感想	12
一、英國利物浦大學簡介	12
二、鎳基超合金之原理及應用	15
三、氣渦輪機熱元件塗層研發技術之探討	26
肆、對本公司之具體建議	30

壹、國外公務之目的與過程

一、緣起及目的

由於材料科技的發展，使得火力發電機組的運轉壓力及溫度可以大幅地提高，藉以用來提高燃料的使用效率並同時降低溫室氣體的排放量，新型氣渦輪機及研發中的超臨界機組由於採用耐高溫超合金，加上先進的冷卻及絕熱塗層技術，使得燃氣複循環機組的熱效率高達60%，為當今最容易達成減碳且符合環保要求的火力發電設備。

新型氣渦輪機之熱元件由於長期運轉於熱作加工溫度(0.7熔點溫度)以上之高溫，加上中、尖載調度起停機頻繁，使得用來強化超合金的金屬微觀結構於如此高溫的運轉條件中極易發生變化，機組於大修檢查中所發現的熱元件損壞現象，常需藉由材料冶金科學之基礎知識來瞭解裂縫的形成原因及其後續演變模式；近年來由於航太材料的應用及精密加工技術的演進，將新研發成果使用於大型氣渦輪機熱元件之製程技術已成為全球大廠所努力追求的目標。

與關鍵零組件壽命相關的因素很多，常見損壞的原因有高溫潛變、裂縫產生、高溫氧化腐蝕毀損、塗層磨損脫落等，新機組於長達25年的經濟壽年期間，除了需要定期再生或更換零組件，將機組運轉於最佳設計點，提昇燃料使用效率以降低燃料成本之外，透過建立自行維修再生的產能將可有效地延長重要零組件使用壽命，大幅降低例行歲修及設備汰舊換新所需之工期及費用，並使機組在經濟年限內能可靠地運轉。

長期以來，英國在解決工業發展及生產中所需的先進材料方面有著極為成功的記錄，各知名大學均長期參與研究，故前往研習與耐高溫金屬相關之先進材料技術，期能吸收學術界之理論及經驗，以解決未來裝機試運轉所可能遭遇的問題及確保新建發電機組之工程品質。

二、出國行程及進修課程

時間	地點	工作概要
96年12月29日至96年12月30日		往程(台北-利物浦)
96年12月31日至98年9月15日	英國利物浦大學	進修先進工程材料碩士學位
98年 9月16 日至98年9月17日		返程(利物浦-台北)

在利物浦大學研修材料工程的主要核心技術是透過實驗分析微觀結構來瞭解各種先進功能性材料之特性。必修的課程除了基礎的材料科學、材料機械性能實驗、加工製造程序、材料工程實習與分析，也需研修與實務設計相關的有限元素分析、雷射處理技術等。平常除了需要在世界各國同學們的面前以英文進行簡報及回答問題，還要學習透過網路平台共享資料、線上討論及整合意見的技巧。系上並安排有SuperSTEM electron microscopy research and development facility及Fiddler's Ferry火力發電廠的參訪行程，實地了解英國最先進實驗室對於奈米原子級(atomic scale)科技研發及傳統燃煤火力電廠運轉及改造情況，在專業與密集的訓練下，會有很多的機會認識來自不同領域及不同國家的學生，尤其是近年來美國因國防問題等策略因素，幾乎關閉中東地區留學生的大門後，大量來自產黑金國的年輕學子開始湧入英國。雖然偶爾會遇到想法不同、溝通不良及宗教節慶時間不一等問題，但在每個人充分的努力配合下還是能順利完成任務，也藉此學到很多跨國界合作的經驗。僅將本次赴英進修研習的主要課程內容概略說明如下：

材料製程(Processing of Materials)闡述用於製造工業的材料製程技術，包括鑄造、成型、粉末加工、接合和表面處理。內容有實體空壓機之鋁合金壓鑄件之製造程序設計、工時及成本預估分析，從中可了解理論與實務之間的關聯及差異。

有限元素方法(Finite Element Method)為工程力學設計分析時不可或缺的工具，可讓學生們學習如何進行有限元素分析，並發展編寫程序的能力，培養商業軟體的設計工作經驗和解釋的方法。

材料實驗(Materials Laboratory Work)為基礎實驗技術，需要實際到實驗室去做觀察，亦有部份電腦化教學，內容包含晶體學，X射線方法，金相試片製作，電子材料，和光學及電子顯微鏡分析技術。

材料結構特性與選擇(Materials Structure Properties and Selection)藉由了解金屬、聚合物和複合材料的微觀結構，由晶體結構、差排理論，到晶界、空孔等各種材料典型現象加以剖析，解釋合金相圖和熱處理對微觀結構的影響，並著重析出及強化機構的探討，以深入了解材料可能達成的各種性能提升效果。

快速原型法(Rapid prototyping; RP)適用於複製線形複雜的3D氣機葉片，快速原型與逆向工程(Reverse Engineering)的整合可以加速新型精密氣機葉片設計及製模之流程，逆向工程是以三維雷射掃描儀複製出葉片翼形之輪廓，量測的結果可依不同的 RP 機種轉換成所需的檔案格式，一般常用的檔案格式為STL(Stereo Lithography File)檔，將此檔案經過切片(Slicing)軟體計算後，即可將STL 檔轉產生 2D 加工路徑資料，最後再將此資料傳入快速原型機，以一層一層的加工方式製造出葉片的原型，其中最廣為使用的光硬化成型加工法(SLA) 所製造之原型模具可直接供鑄造精密葉片使用。

表面工程(Surface Engineering)介紹了近年來薄膜及表面工程研究領域的最新技術，抗氧化腐蝕塗層的應用，個案分析如何改善材料表面之特性，如電子束物理蒸鍍氣相沉積(EB-PVD)、鑽石及類鑽石薄膜(Diamond and diamond-like film)覆膜，使材料具有壽命長、耐磨耗、耐熱及抗疲勞破壞的能力。

陶瓷材料(Ceramic)著重於基礎陶瓷材料的強化機構及特性介紹，其中含渦輪增壓器、超導體及壓電陶瓷的設計應用技術，並剖析高溫及應用電子材料的抗熱震應力(Thermal Shock Resistance)、高溫潛變(Herring-Nabarro Creep)及韋伯可靠度預估 (Weibull's Reliability Analysis)。此外，高溫超導體材料亦為陶瓷材料之一，所謂超導即某些材料在特定溫度時具有零電阻的特性。其應用的範圍非常廣泛，例如高速磁浮火車、超大型電力地下輸送、積體電路等，目前的研發主要以得到

穩定性好之高溫(通常指可使用液態氫做為冷媒之溫度)超導材料。

熱力及動力學(Thermodynamics & Kinetics)課程主要藉由瞭解與材料相關的基礎熱力學及化學熱處理知識，計算固、氣或液相化學反應的速率和平衡條件，使學生在實際應用公式中瞭解金屬合金(如鎳、鈷或鋁)反應自由能(Gibbs Free energy)及熵變熱力函數於特定壓力溫度下之活化能變化。

製品反向工程(Manufactured Article and Reverse Engineering)利用反向工程方法先於實驗室拆解日常生活中會使用到的製品，觀察其外觀結構及零組件之間的關係，透過試片製作及電子顯微鏡技術來分析其材質和使用的製程，以理解原設計技巧或思維的一種技術。

研究技巧及論文規劃(Research Skills and Project Planning)探討學術論文寫作的內容結構與文獻格式，教授如何運用科學的方法規劃及撰寫畢業論文，並以實地分組研習的方式來做觀察及撰寫不同領域的研究論文。

半導體元件製程(Semiconductor Device Fabrication)探討先進半導體材料選用及製程技術，並介紹最新大型積體電路及光電元件如雷射二極體(Laser Diode)的製程及當前IC半導體產業所面臨待解決的問題。

智能材料(Smart Materials)介紹本身具有偵測、控制及輸出能力的特殊新材料，透過個案分析來瞭解智能材料如微機電系統(Micro Electro Mechanical Systems)、形狀記憶合金、去氧核糖核酸(Deoxyribonucleic Acid)於生物醫療及航太工程的應用技術。

此外，如何在最短的時間內完成既定的工作計畫，就是每個人做學問的效率展現。因為短短的兩個授課學期間，除了對自己的專業本位要能夠充分掌握外，還要搜集及閱讀大量的原文書籍，以提升自己對材料科學工程的認知，壓力可說不輕。因此學習如何「善用每一秒鐘」的訣竅，已成為英國碩士研究生另一門必備的技能。整體來說，材料科學與工程是研究材料結構、製程及性能表現等相互間的關係，屬於兼顧理論和創新應用的科學，亦是航太及光電電子產業高科技產品之基礎。本校開設之材料專業課程主要以金屬加工、複合及陶瓷材料課程為主，半導體及生技產業為輔，個人認為，英國大學蠻注重報告撰寫、問題發掘與

分析處理的能力，在很短的時間內引領學生深入材料科學之核心，使其擁有專案執行及獨立思考之能力，可說是一種獨特的創新及思變的學習，頗能適合現代快速改變的社會型態。

貳、出國期間所遭遇之困難與特殊事項

一、英國老舊燃煤機組改造實例

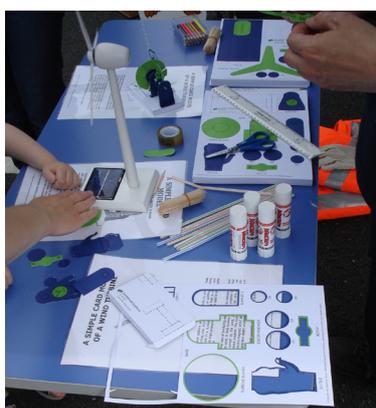
英國大學相當注重學生實務應用的能力，依照慣例每年系上都會安排離利物浦約半小時車程的Fiddler's Ferry燃煤火力發電廠的參訪行程，讓同學們實地了解英國傳統燃煤火力電廠運轉情況，位於沃靈頓(Warrington)的Fiddler's Ferry發電廠設置有四部傳統次臨界燃煤機組，裝置容量共1,989MW，可用率約89%，其產生的高壓電力經二回路加入系統，一路朝北送往利物浦及另一路向南送往威爾斯的觀光古城徹斯特(Chester)地區，第一部機始於1971年商轉，由於機組老舊效率低，在未安裝任何環保設施前全年度只允許運轉2,000小時，根本無法同新設燃煤及複循環機組競爭，亦無法通過2015年起趨嚴的環保標準，目前僅能燃燒由俄羅斯、南非及印尼進口的低硫煤，大部份運轉在冬季英國系統負載需求較高的時段，夏季則因國內用電需求及電價低較無法創造利潤亦改為二值制運轉以節省運維成本。



Fiddler's Ferry電廠新設置的排煙脫硫設備及生質燃料輸送帶

與台電不同的是此廠之大修模式為四部機組輪流於夏天安排停機檢修(每年各停機一部)，改裝的二部機可混燒(co-fire)生質燃料(Biomass，如wood, straw, energy crops)，此部份之發電容量為 200MW，約佔全廠四部機組裝置容量的10%。由於就近取材的緣故，可達成降低生質燃料運輸過程中能源的使用，雖然剩餘壽命不足十年，為降低空氣污染物中硫份的排放量及增廣煤原，於2006~2008年間加裝除硫94%的排煙脫硫設備(FGD)，並改造成可以混燒再生燃料的機組，藉以取得 ROCs(Renewable Obligation Certificates) 再生能源證明 (Output Qualifying)。此證明主要是英國對電力生產商或電力供應商規定在其電力生產中

或電力供應中必須有一定比例的電量是來自可再生能源，混燒生質能可利用現役電廠而無需再投入大量資金，是一種實用、低風險的可再生能源發電技術，雖然收購生質能的市價有時較煤高，然因生質燃料含硫份與含氮量低於煤，可降低SO_x與NO_x排放，加上具有碳平衡特性可抑制二氧化碳之排放，被公認為現役燃煤電廠降低CO₂排放的最有效及低投資成本措施。



電廠為宣導環保觀念展示DIY製作的風力機及汽輪機立體紙模型

二、全英國的電費係採用「差別取價」制度

在英國「夏季電費」並沒有比較貴，這是因為英國電力系統的供電尖峰期是發生在冬季，故機組大修多安排在電力需求較低的夏季，因為英國夏天一點也不熱，雖然偶爾會有幾波最高氣溫達30度的熱浪警訊，但總體來說，中午最高溫度25度C，晚上又會降到15度C左右，所以這裡甚少有人家裡裝冷氣空調，體質較虛的人晚上睡覺還是得蓋厚被子。

英國的電費計價方式簡單來說，是採取依「地區別(Supply Area)」及所選擇之「計價方式(Meter)」來計算用電費用。所謂「地區別」係指用電地區之不同而有所不同的單位用電價格，大不列顛島上(含英格蘭、蘇格蘭及威爾斯三國)可分為14個區域。電價還會依繳費方式如週繳/月繳/季繳及預繳'Pay as you use'有不同的訂價。以供應英格蘭的馬其賽特郡(Merseyside)、北威爾斯(North Wales)及部份Cheshire地區，屬於MANWEB (Merseyside And North Wales Electricity Board)的ScottishPower零售電力供應商為例，其「計價方式」可選擇單一費率(Single Rate 或Domestic 'S')或兩段式計價(Two Rate 或Economy 7)。單一費率是用電量不分日夜均以單一價格計算，另外再加上以每季225度(No Standing Charge)或按日計費

的固定費用(Standing Charge)二選一；而兩段式計價是將用電單價再區分為日間及夜間。以下就將我所居住的利物浦(Liverpool)地區及英國首都倫敦(London)地區的電價做一比較：

單位：penny (便士)

地區 (Supply Area)	Meter Type	二選一		日間 All/Day kWh	夜間 Night kWh
		Standing Charge (每日)	255kWh/季		
倫敦 (London)	Single Rate	14.7p (9.3元)	17.346p (11元)	11.384p (7.2元)	n/a
	Two Rate	18.51p (11.8元)	18.770p (11.9元)	11.262p (7.2元)	4.818p (3.1元)
利物浦 (Manweb)	Domestic 'S'	18.15p (11.5元)	19.451p (12.4元)	12.089p (7.7元)	n/a
	Economy 7	23.11p (14.7元)	22.466p (14.3元)	13.094p (8.3元)	4.956p (3.1元)

註：1英磅(GBP) = 100便士(Penny) = 新台幣 63.5 元 (97年2月1日匯率)

資料來源：Scottish Power 2008年2月電費資料(含稅)

由表中可清楚地發現，以不同地區別所制定的電價係採「差別取價」，在用戶多的主要城市其用電單價較一般區域來的低；而由時間別來制定電價費用，白天的用電單價也相對的比夜晚來的高。思考其訂價的邏輯亦非常地合理，在固定的發電成本下，使用戶數較密集的倫敦其所分攤的固定成本較用戶數較少的利物浦地區來的低，故其電價較低。反觀台灣的用電計算方式，是以「季節別」及「累積用電度數」作為計算基礎。所謂「季節別」是以夏月(6月1日至9月30日)及非夏月作為計算用電單價之區分。以下為台電自97年10月起實施之非時間電價之每度單價表：

單位：元

分 類		夏 月	非 夏 月
非營業用	110 度以下部分	2.10	2.10
	111~330 度部分	3.02	2.68
	331~500 度部分	4.05	3.27
	501~700 度部分	4.51	3.55
	701 度以上部分	5.10	3.97

台灣訂定電價是根據「以價制量」、「使用者付費」觀念作基礎。在台灣，每年6至9月的夏月為用電高峰期，但為倡導節約能源、保護地球之觀念，夏月之用電單價較非夏月為高，且用電高者依其用電量採累計單價計算之，但是夏月最貴的電價僅5.1元(701 度以上部分)，仍然較倫敦日間電費(7.2元)來得便宜許多。

三、大型超市營業時間短而且仍受法律限制

初到英國時看到它們主要的超市如TESCO及ASDA均以超大招牌紅色標示24小時，但仔細一看其招牌下方以較不顯眼的字體註明星期一至星期六在晚上10點就關門，星期天則是下午4點。令人納悶的是沒有任何一天的營業時間是24小時的，當我詢問超市之管理人員有關該招牌之標示是否有欺騙的行為，該管理人員竟然是答覆說很多商店也是在相同的時間打洋，如此的標示並無不妥之處，這個答案真令我懷疑在高度注重消費者權益及法治的英國竟然可以公然地以不實的廣告欺騙消費者。

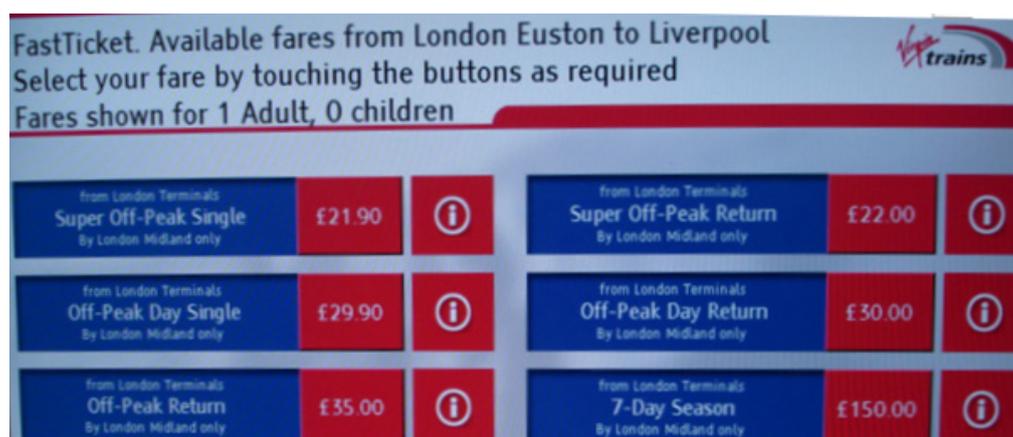


而後得知這營業時間與英國的傳統及宗教有關，依英國法令規定英格蘭與威爾斯的大型商店，星期日僅能在上午九時到下午六時的期間內連續營業六小時，雖然部分大型零售業者曾試圖規避週日買賣法，惟部份宗教領袖與傳統主義者對此感到難過，但大型零售業者堅稱，他們只是服務顧客，才會想要逃避買賣法。可是「週日買賣法」並不適用於有獨立法律系統的蘇格蘭。

此外，相較於台灣的高人口密度，英國可以說是地廣人稀，因此銀行的自動櫃員機可以說不是很多，因此在英國的超市便衍生出一項很特殊的服務，那就是當你在櫃台結帳時，櫃員會詢問你是否需要”Cash Back?”，起初認為他們是在詢問我是否需要現金回饋，後來才知道原來超市的櫃台有類似自動提款機的功能，因為英國的提款機普及率不像在台灣那麼高，而且提款一次需要1.5鎊（折合台幣約90元），所以超市為服務顧客免費地提供提款服務，也就是說當你所購買的東西是10鎊，而你所需要的’Cash Back’金額為20鎊時，超市櫃員會同時從你的帳戶扣除30鎊並給你20鎊現金。

四、大眾運輸業的價格種類多且差異大

利物浦位於英格蘭西北部，是一座歷史悠久的港口城市，乘坐高速直達火車大約兩個小時可以抵達倫敦。在英國常聽老師及同學們說提早購買火車或飛機票可以非常便宜，運氣好能會低於五鎊或甚至一鎊，令人不可思議，但是英國人也稱這套訂價的系統有如票價叢林，一不小心你就會花很多冤枉錢。



以搭乘Virgin的高速火車往返利物浦及倫敦為例，除了分成頭等車廂(深紅色選項)及普通車廂(藍色選項)兩大類之外，再分為尖峰、離峰、超級離峰及7日季節的單程及來回票，所以總共會有16種選擇，普通車廂之單程票價從21.9~115.5

英鎊，相差約5倍，來回普通車廂票價則從22~251英鎊，差異更高達11倍，最特殊的是離峰時段(Off-Peak指早上9:30以後)來回票與單程票的票價只差0.1英鎊，不知道是單程票賣貴了還是回程票大優待。

更另人佩服的是在火車上也可以發現英國人優良的守法行為，因為利物浦地區多數車站的出入口沒有驗票人員及出入閘門，尤其是在週末例假日，火車或地鐵上的驗票人員很少會對乘客執行驗票的動作，但乘客仍然循規蹈矩自動地買票及在驗票機扣款，絲毫沒有貪小便宜的心態，這些行為大大地顯示出英國人高度的自治與守法，還有教育的成功。台灣人在這方面雖然已經有非常得體的表現，但我相信國人還有學習的空間來表現出央央大國之國民應有的風範。或許你會覺得守法及排隊本來就是理所當然的行為，但英國人的守法行為是那麼地自然，不須要任何警察或督導人員特別的排解與輸導。從日常生活中的百貨公司及超市結帳、速食店買餐點均可見英國人很悠閒地排隊並且和前後的人閒話家常，很少有所謂的不耐煩情緒反應。

此外，利物浦最為人所知的大概就是”披頭四”樂團以及英超(Premier league)常勝軍利物浦足球隊(LFC)。我曾經到利物浦最著名的足球場-安菲爾德(Anfield)去看足球賽，儘管是賽前幾分鐘，熱情的觀眾們不論是穿著西裝筆挺的紳士還是穿著球迷制服的大老粗都還是會在速食店依序地買啤酒或英國的傳統美食料理-炸魚薯條(Fish & Chips)，然後有條理地排隊依序入場，而他們在足球場看台上發狂地嘶吼，十足地享受支持球隊的表現，當球被踢進球門得分時的瘋狂歡呼、球員表現失誤時的抱頭嘆息，其內心情緒的起伏完完全全地真情流露出來。

當今英國的房子內部的建材大量使用易燃的木材及地毯，因此對消防的安全相當注重，門多半是設計成自動關上的藉以阻隔火勢快速的漫延，但是門在慢慢關閉的過程中有可能會打到後面要進門的人，而且每次都要使盡全力才能推得開門，所以英國人在推開門之後都會習慣性地看一下身後是否有人，即使是相差了好幾公尺，他們還是會很自然地擋住門等到下一個人扶到門之後才轉身離開，這時候你就會聽到一句很有禮貌的“Cheers”(謝謝)，如果門沒有全關時你就再推開，一聲“Sorry”(對不起) 就會馬上就會脫口而出，絕大多數的英國人都會表現出以禮待人的紳士/淑女氣質，不會因為遇到陌生人或膚色不同而有差別待遇，這是跟台灣最不一樣的地方。

參、國外進修之心得與感想

一、英國利物浦大學簡介

利物浦大學以研究教學見長，本校工程系(Department of Engineering)材料學程於甫公佈的英國2008 RAE大學評鑑第29項目：冶金及材料 (Unit of Assessment: 29 Metallurgy and Materials)排名為全英國第二，僅次於劍橋大學。英國高等教育研究評鑑 (Research Assessment Exercise, 簡稱RAE) 為全世界規模最大的高等教育評鑑體制，始於1986年，是由英國政府組織英格蘭、蘇格蘭、北愛爾蘭和威爾士高等教育基金委員會 (HEFCE)，旨在了解並確保英國高等教育機構的品質，以作為政府分配教育及研究經費之參考依據。



英國利物浦大學校園一隅 (攝於工程系前)

本系先進工程材料 (Advanced Engineering Materials; AEM) 碩士班是一個整合自然科學與工程學科、具跨領域特性的課程，碩士班分為授課式(taught)及研究式(research)兩種，授課式學生需修滿180個學分、參加兩個學期各含12週教學研習的修課課程，並通過一月份及五月份舉行的期末考試後始得開始進入專案 (Project)研究階段，最後還要通過九月份舉行的口試及提出完整的論文報告，內容過程相當緊湊，與台灣兩年的碩士班時程架構完全不同。其最大優點是可集中於一年內完成合計24週的課程，論文提交後仍需口試答辯，碩士生總平均分數達50%時始有機會參加於每年十二月份舉行的畢業典禮。

此外，值得一提的是本系指導教授的分配係依學生選填的志願及修課成績高低來決定，而且論文的成績需由學校另行指派的審查教授(Assessor)來評分及審核，考試與論文的及格成績均為50%，期末考試卷採取彌封閱卷，各授課教師評

完成績後還需要再經由考試委員會審查始可上網公佈，滿分雖然亦為100%，但是鮮少有老師願意給予70%以上的分數，據英國高等教育統計局(HESA)今年(2009)最新發表的數據顯示僅有13%的碩士畢業生拿到一等成績(First class - 70%以上的成績)，其評分過程可說相當嚴謹及公正。

位於市區的利物浦大學成立於 1881年，是英國最古老的城市大學及紅磚大學之一。在平安抵達利物浦大學之後，便得開始適應當地特有的鄉土民情、口音及英國多種族文化，由於英國高等教育在世界上的評價頗高，校園內不難看到各種文化、膚色及髮色的學生及教職員。求學中遇到較為麻煩的問題是日常生活消費的價格比台北貴了很多，這對平常習慣省吃簡用的台電員工來說會是一大挑戰，一份麥當勞速食套餐將近4鎊，在英鎊匯率達1:66時折合約新台幣250元。中國餐館的”外賣”便當餐盒(take away)亦是相同價格。在英國進修研習的期間裡，少了親切的台灣家鄉語言及熟悉的環境，還得適應各種族不同的思考邏輯及作事風格。比如一到英國就需要在當地的銀行開戶，通常英國各大主要銀行都需要按月支付5鎊以上的”帳戶管理費”或以存款達一定的金額來豁免之(2008年金融危機發生後也取消此項優惠)，也沒有印章及存款簿這種東西，取而代之的是定期寄來的銀行存提款記錄(Bank Statement)，不要小看這一張紙，申辦圖書館證、手機門號及租車、租屋等都需要查閱這張銀行所提供的記錄及上面所記載的地址，其效力竟然可等同於台灣的身分證。換言之，前述各種證件及服務都要等到銀行寄來第一份的Bank statement後才能開始申辦，當然，在處理這些事務的過程裡，會得到很多國際友人所提供的寶貴意見及熱情的協助，也才能順利的完成。因此，我也再次深深體會到，「外出靠朋友」的人生哲學。此時的外國友人已成為在遇到問題時的好幫手，也是重要的訊息來源。由於本人可以算是核火工處第一個派往英國進修的員工，雖然處內有許多先進也曾長期派駐海外，但多半是以美國及中東地區為主，幾乎英國留學資訊都必須靠自己多方打聽，或從網路上得知最新消息，對於相隔半個地球的英國氣候或生活環境等，也僅能靠自己來親身體悟。

英國為歐盟27個成員國及G8成員國之一，是世界第五大經濟體，國民平均所得高達45,300美元(2007年)，近年來英國以發展空中巴士客機成功地將學術資源整合及取得高科技研發技術持續領先的地位。英國航太及國防工業在全球扮演

舉足輕重的角色，也具備生產各項產品的技術及產能，著名的航太及國防業巨擘包括Airbus、BAE Systems、EDAS、GKN、Rolls-Royce、Thales Group、Smiths Group。惟英國重研發及轉移製造基地的導向，其工業生產重要性已隨著新興工業國家的崛起而逐年下降中。由於工資成本高，日常生活用品幾乎都是由其他鄰近國家進口。若參考《經濟學人》的「大麥克指數」(Big Mac index)，今年在台灣一個大麥克漢堡賣75元，大約是2.27美元，若英鎊以66:1計，大約是1.13英鎊，而在英國一個相同的大麥克賣£2.29。這是因為歐洲國家所得及物價水準較高，因此當地民生用品的價格普遍會高於台灣2倍以上。使得出國預算不夠支付在英國的住宿、生活費等開銷，造成嚴重透支，雖然歐洲地區生活補助費已較其他國家為高，但是在英國住宿費甚高，一間最便宜的單人房含水電費用每個月需300鎊，學校宿舍的價格更高達400鎊以上，而一般英國人所居住的2樓透天厝價碼則從900鎊起跳，其他交通費用及食物亦相當昂貴，因此每個月約1150美元(約570鎊)的生活補助實質上稍顯不足，建議公司能適度調整生活補助費，或以實報實銷方式來反映實際物價。

經歷了兩個英國嚴酷的寒冬及繁重課業的磨練，在這一年多的大學生活裡學到很多有用的東西，不僅僅是在學術寫作方面，英文聽力也增進不少，已經可以跟在地英國人交談的很愉快。最重要的是，能夠親身體會及融入當地人的生活真的是一種很特殊的經歷，尤其是能見識到利物浦人特有的足球文化，相信將會是一段很值得令人回味的時光。

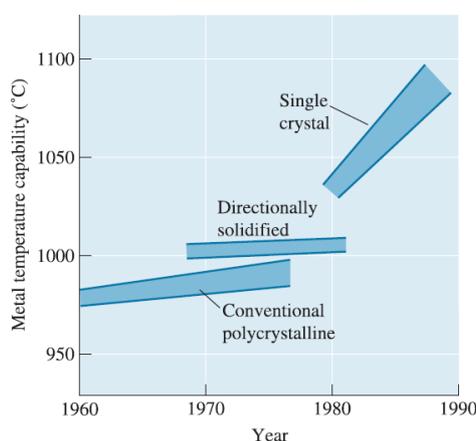
二、鎳基超合金之原理及應用

複循環及超臨界火力發電機組常以提高燃氣進口溫度(TIT)或主蒸汽溫度來達成提升機組效率及出力的目標，世界各大知名氣渦輪機(GT)製造廠商均不斷地提高燃氣進口溫度來提升其機組競爭力及技術領先的地位，近十年來，已由D系列GT的1,100°C演進到G/H系列的1,500°C。由於燃氣進口溫度的提高需考量GT相關熱元件(Hot Gas Path Component，如燃燒室、內殼、導火筒、氣機動、靜葉片等)是否會產生高溫氧化、熱腐蝕、異物撞擊(FOD; Foreign Object Damage)、疲勞、潛變等問題，因此，目前新型機組的設計已朝向研發使用新的鑄造技術，如西門子及奇異公司使用於第一級葉片的單晶(Single Crystal)或方向性凝固(Directional Solidification)之耐高超溫合金、改良冷卻方式(如葉片內部冷卻通道改善、蒸汽冷卻及噴覆絕熱塗層來降低熱元件基材之溫度、並加噴塗MCrAlY塗層來提高抗氧化、腐蝕及與基材結合之能力，以因應熱燃氣進口溫度的提高所可能引發材質劣化等問題。

本公司於大潭發電廠設置共14台容量為150MW(M501F)及230MW(M501G)之新型高效率氣渦輪機，另規劃彰工、林口、深澳及大林更新擴建計畫共11部800MW主蒸汽溫度高達566°C及壓力超過24Mpa的超臨界機組，材料長期在高溫環境下運轉極易出現劣化的問題，以大潭發電廠之三菱重工M501F氣渦輪機為例，其燃氣進口溫度約1,400°C，另M501G氣渦輪機燃氣進口溫度更高達1,500°C，相對於舊機組，如西門子V84.2的1,100°C，提升了將近400°C，此高溫已超過精密鑄造用鎳基超合金熔點溫度1,200~1,300°C，雖然超合金可短時間內於80%熔點溫度運轉，正常一般情況下其設計工作溫度為850~950°C，如此的高溫易使葉片氧化及其表面噴塗層劣化。一般所謂在高溫下運轉是指金屬溫度大於400°C，為了要讓葉片在要求的高溫條件下操作，其材料選擇需要考量可鑄造性(合金凝固特性、製造方法)、機械性質(UTS、Elongation)及應用環境(耐高溫性、抗腐蝕性)。

在超合金葉片的製程發展方面，各國廠商於近三十年來均朝方向性凝固(DS)及單晶(SC)鑄造技術發展，主要是為了提高渦輪葉片的工作溫度及強度，進而增加氣渦輪機的工作效率，通常在無其他主導的強化機構時，晶粒大小和強度之間的關係是遵循Hall-Petch方程式 $\sigma_y = \sigma_0 + k_y d^{-1/2}$ 。其中 σ_y 為降伏強度， σ_0 和 k_y

為特定材料的常數， d 為晶粒大小，故隨著晶粒細化，降伏強度會變大。而單晶因為沒有存在於晶粒與晶粒之間的「晶界」，也就會大大地減少發生於晶界結構的缺陷，也能將超合金特有的整合析出強化完全地發揮出來，為提昇超合金的性能，各種添加元素可以形成特定的相，如加入少量的Al、Ti、Nb 等元素以產生整合性(Coherent)的 γ' / γ'' 強化相，提昇超合金之抗潛變性能。



和其他材料相比，超合金的工作溫度可更接近其熔點溫度，由於高溫時仍能保有許多優良的強化機構，如固溶強化(γ 相)及析出強化 γ' 相($(\text{Ni},\text{Co})_3(\text{Al},\text{Ti})$)及 γ'' 相(Ni_3Nb)，超合金鑄件中最重要之析出強化機制是 γ' 相 ($(\text{Ni},\text{Co})_3(\text{Al},\text{Ti})$)，當合金受到外力時， γ' 相可阻擋差排(Dislocation)的移動，因而增加材料強度，此外 γ' 相的穩定度(Phase Stability)極佳，在高溫($<760^\circ\text{C}$)較不易粗化(Coarsening)。此外，顆粒狀碳化物常析出於晶界來阻止高溫時發生於晶界之滑移作用。另含有鉻元素可提高超合金之抗氧化及耐腐蝕性，而鋁原子則可擴散至金屬表面形成保護性氧化物。

本公司火力發電廠近十餘年新設置之大型氣渦輪機組如Siemens V84.2(21台)及V84.3(2台)，Alstom 11N2(2台)，MHI M501F(7台)及M501G(8台)，目前累計已有40台，雖然燃料成本已高於平均售電成本，這16部總裝置容量約8 GW的複循環機組具有快速起停及升降載的特性，恰與電力系統的日夜負載變化量相當，可使得發電成本較低的燃煤及核能基載機組維持在滿載及最佳效率點運轉為公司創造更多的利潤。大潭燃氣火力發電計畫於民國92年6月18日決標，本計畫6部機組完成商轉發電後最大總裝置容量達4384MW，為全台最具規模之天然氣發電廠。

Inconel超合金由於具有高溫強度及優異的抗腐蝕性，已被廣泛應用於航空

及核能的領域，是氣渦輪機葉片常用的鎳基合金，本公司各發電廠如林口、興達、南部電廠西門子機組氣渦輪機組動葉片材質均採用Inconel 738LC，三菱重工則採用與Inconel 7xx系列相近的MGA 1400DS。耐高溫超合金除了要有優良的高溫機械性質之外還要具備抗氧化和抗腐蝕的能力。大多數金屬氧化的結果都是在其表面上形成一層固相氧化膜，金屬表面上的氧化薄膜可阻隔金屬與其介質之間的原子傳遞，也會減緩金屬繼續氧化的速度。金屬氧化薄膜要具備良好的保護作用，還必須同時滿足以下條件：首先，生成的金屬薄膜必須是緻密及完整的，才能把金屬表面全部包圍起來，其本身需是穩定的狀態，不易與介質作用而被破壞。其次，氧化膜與基材的結合性也要良好，最好能有相同的熱脹係數以減少熱應力的生成，才不會輕易受外界影響而剝離脫落。此外，氧化膜需有足夠的強度、塑性，足以承受一定的應力、應變的作用。

從學理上的分析，亮澄澄的黃金因為化學性質不活潑，不容易與空氣中其他物質反應形成氧化物，所以不易生銹及喪失金屬光澤，可是當溫度逐漸升高時，黃金的強度卻會迅速地減弱。其他的合金例如高電阻率的鎳鉻合金(Nichrome; 80%Ni, 20%Cr)以及Fecralloy鐵鉻合金(Fe-22Cr-5Al-0.3Y)在高溫下仍擁有極高的抗腐蝕和氧化的能力。這些合金與黃金的不同點在於他們易氧化但氧化物的厚度很薄而且成長極為緩慢。當Nichrome鎳鉻合金覆蓋上一層致密的氧化鉻(chromia)後，在表面會形成一個介於合金和大氣環境之間的薄膜，能夠降低更進一步的氧化或者腐蝕。

另一種Fecralloy鐵鉻合金具有與Nichrome鎳鉻合金相似的行為，但是氧化物的薄膜是氧化鋁(Al_2O_3)。早期的合金，用來防止氧化和腐蝕的機制為在合金表面上形成的一層氧化鉻。在低溫($<950^{\circ}C$)環境運轉時，這個過程進行的很緩慢，因為緻密的氧化鉻(Cr_2O_3)薄層形成的速度很慢，但是當合金裡的鉻含量消耗殆盡時，抗氧化的能力將變低。如果氧化鉻開始不形成時，其他合金元素的氧化物將取而代之，然而其抗氧化能力及緻密度不高，會造成金屬快速的氧化及劣化。當超過 $950^{\circ}C$ 時，氧化鋁的薄層將開始主導及控制氧化速度，因此我們可以從葉片化學成份分析(如鉻/鋁比值是否大於4)來瞭解其設計原理。一般來說，各級靜葉片鉻/鋁比值均大於10，因為金屬溫度較動葉片高，需要有較高的含鉻量來提供較高的抗氧化能力。

MHI M501G第一~三級靜葉片化學成份分析表 (MGA 2400)

元素	C	Si	Mn	S	Cu	Ni	Cr	Nb	Co
含量wt%*									
熔點°C	3,530	1,430	1,230	115	1,080	1,440	1,830	2,460	1,480
價格GBP/kg	12	10.6	1.979	-	2.45	25.9	6.05	189	24.4
元素	W	Ti	Al	Zr	B	Fe	Ta	Ag	Bi
含量wt%*									
熔點°C	3,410	1,660	645	1,840	2,200	1,530	2,990	957	267
價格GBP/kg	26.9	44.7	1.15	19.3	466	0.491	394	285	7.66

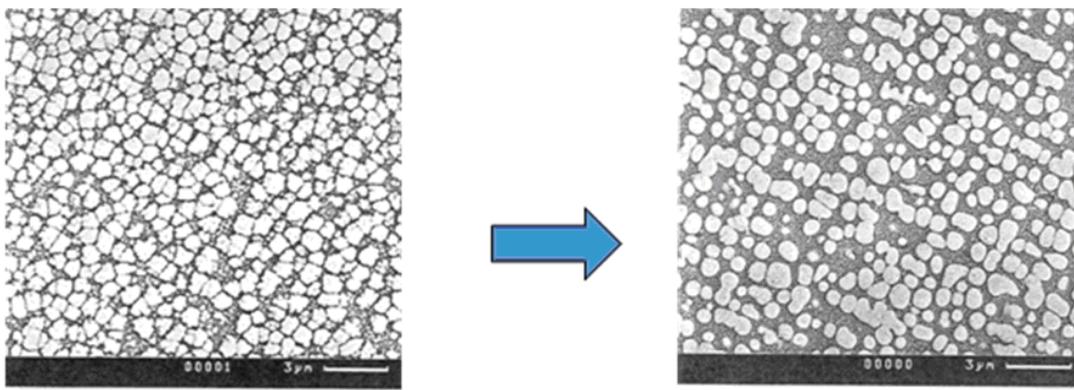
*.廠商商業機密

MHI M501G第一~四級動葉片化學成份分析規格表 (MGA 1400DS)

元素	C	Si	Mn	Cu	Ni	Cr	Mo	Co
含量wt%*								
熔點°C	3,530	1,430	1,230	1,080	1,440	1,830	2,610	1,480
價格GBP/kg	12	10.6	1.979	2.45	25.9	6.05	28	24.4
元素	W	Ti	Al	B	Fe	Ta	Ag	Bi
含量wt%*								
熔點°C	3,410	1,660	645	2,200	1,530	2,990	957	267
價格GBP/kg	26.9	44.7	1.15	466	0.491	394	285	7.66

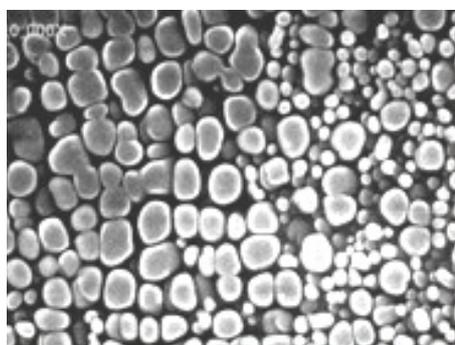
*.廠商商業機密

超合金的性質受合金成份、析出相、加工過程及熱處理的影響很大，其主要的強化機構是靠整合析出及強化相，與添加之合金成份之元素固溶至沃斯田鐵基地之固溶強化。經過時效處理後的鎳基超合金會於其FCC的基地(γ 相)整合析出圓盤狀的 γ'' 相(Ni_3Nb)，也會析出 γ' 相 $[\text{Ni}_3(\text{Ti},\text{Al})]$ ，其析出相呈現細微球狀，合金機械性質的強度與硬度隨著 γ'' 顆粒大小增加而增加， γ' 所析出生成的量會影響耐高溫性質，含量越高高溫強度越佳。因此溶入鎳基地的(Al 、 Ti 、 Nb 、 Ta)都有助於形成 γ' 相，當 γ'' 和 γ' 相析出量很多時(約 760°C)，合金可達最高的強度。此外合金中的碳元素對Inconel超合金的一些機械性質也有相當地影響，因為碳本身不會與鎳形成碳化物，而是和其他的合金元素結合，Inconel超合金析出的四種主要碳化物(MC 、 M_6C 、 M_{23}C_6 、少量的 M_7C_3)可阻止晶界滑動而產生強化效果， M 是指 Ti 、 Zr 、 Hf 、 Nb 、 W 、 Mo 、 Cr 等合金元素，高溫碳化鎢相(MC)會以塊狀的型式析出， M_6C 常呈塊狀析出於晶界中， M_7C_3 主要成分為 Cr_7C_3 ，Inconel超合金主要的強化機構為沃斯田鐵基地的固溶強化及整合應變，因為合金成分當中含有鉻和鉬的原子都比鎳為大，所以在固溶時屬於置換型固溶體(Substitutional Solid Solution)，會使基地之晶格扭曲，產生應變來達到強化的效果。另由於 γ'' 及 γ' 均為規律且具整合性之析出物，當析出物夠大時差排將需要產生攀登(Climb)或繞過(Bypassing)析出物的能量，故可阻止差排過析出物，但是若長期地在高溫($>760^\circ\text{C}$)的環境下運轉，合金元素的原子容易擴散至表面及整合應變之強化效果會因析出物粗化而逐漸地消失，運轉溫度愈高，其強度降低愈快，這就是為什麼熱元件只能再生數次後就不能再重覆使用的主要原因。

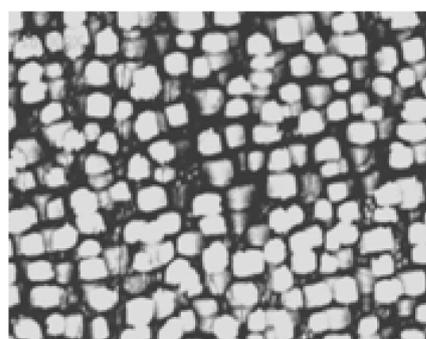


運轉溫度過高開始產生析出物粗化的現象

目前新研發之葉片多具3D曲面外形，在葉片以精密鑄造成型時，利用熱均壓(HIP; Hot Isostatic Press) 可加快凝固速率及得到細晶之鑄件，因為澆鑄時熔融金屬液靠近陶磁模邊界的部份會先冷卻固化，此時外殼之形狀已固定，而在陶磁模中心的金屬液冷卻較慢，由於金屬熔液之固化會產生體積之收縮，因此會有微縮孔的出現，而這些微小氣孔往往造成鑄件機械性能降低，而無法符合設計規範之要求。為了消除應力，可藉由熱均壓的過程中高溫及高壓氣體均勻的作用，讓大部份的微縮孔產生閉合效應，目前歐洲廠商IN738LC材質合金葉片於出廠前，熱均壓溫度為2,200°F (1,200°C)、壓力15Ksi(104MPa)，維持時間為4小時，另MHI各級動葉片在出廠前也都採用4小時1,200°C，147MPa的熱均壓處理。



HIP前(左)



HIP後(右)

氣渦輪機熱元件在高溫及高應力之環境下運轉一段時間後，容易產生微觀組織結構劣化(如 γ' 強化析出相粗化、碳化物於晶界形成與 σ 相產生)並於晶界形成空孔，這些空孔不斷地累積到最後會形成一臨界裂縫，進而會產生沿晶破壞及導致整個零組件失效。一般潛變劣化的因應方法是在運轉一段時數後以熱處理過程來去除空孔並使析出物重新分佈。熱均壓法亦可達同樣之效果，因為在熱均壓的過程會使鑄件內部空孔缺陷密合、降低殘留應力、改善潛變壽命及增加破斷應力，本公司目前雖然尚未有葉片製造之設備；惟由於熱均壓處理會影響葉片等熱元件是否能再重覆再生的能力，若其效益高於成本時，值得本公司考慮引進。

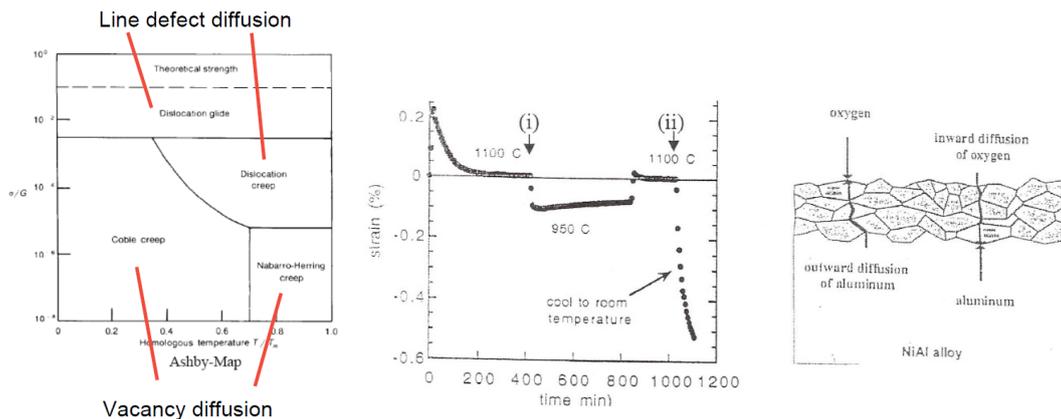
早期氣渦輪機零組件運轉溫度、材質及常見問題

零組件	溫度°C	材質	常見問題
空壓機葉片	600	Ti / Al	高頻疲勞(HCF)
燃燒室	1,100	Ni / Co	氧化、母材熔化
空氣氣封	1,250	ZrO ₂	沖蝕、母材熔化
氣機靜葉片	1,200	Co / Ni	氧化、母材熔化
氣機動葉片	1,100	Ni	潛變、熱疲勞、高/低頻疲勞、 氧化、高溫腐蝕
氣機輪盤	600	Ni	低頻疲勞(LCF)
氣機轉軸	250	Fe	剛性(Stiffness)

葉片金屬溫度與其剩餘壽命有相當大的關聯，由於超合金葉片運轉溫度在其熔點溫度50%以上，其機械強度會因為高溫潛變而有所影響，因為鎳基超合金具有高強度係因析出於奧斯田鐵 γ 基地之 γ' (由介金屬化合物Ni₃(Al,Ti) 所組成)，而 γ' 在高溫下會逐漸地粗大化。因此我們需要記載葉片運轉的時間(秒)，再觀察葉片 γ' 原來的半徑 r_0 及粗化之後的半徑 r_t ，便可依經驗公式推算出其運轉溫度T(凱氏溫度)，接著再利用Larson-Miller Parament [$\text{Log } \sigma = T(C + \text{Log } t_r)$]來考慮高溫環境使用下葉片的壽命，常數C是在不同的溫度下進行實驗後所求得之平均值，三菱重工用來估計潛變應變與時間之設計規範關係時所使用的常數C為20，總應力 σ 通常包括熱應力、離心力與燃氣作用應力，依此可做為殘餘壽命評估參考。理論上，熱元件承受的應力若小於設計值即可永久使用，然而在高溫環境下，材料會隨著時間的增加發生潛變(creep)變形最後將導致破斷，因此，材料若在再結晶溫度以上的高溫環境操作時，必須注意材料在高溫潛變的壽命問題。

由於熱元件長期運轉於高溫時所造成的劣化，會使其壽命有一定的限制，業界一般的設計考慮是伸長量於100,000小時(或3,000次起停)內不得超過2%，為延長機組熱元件的壽命及降低運轉風險，由於氣渦輪機組熱元件之損壞機制可能會因其主燃料、最高燃氣入口溫度、燃氣均勻程度、注水抑制氮氧化物及其升降載速度之變化而有異，其可能之損壞模式有熱疲勞(Thermal Mechanical Fatigue)、潛變(Creep)、高頻疲勞(High-Cycle Fatigue)、低頻疲勞(Low-Cycle Fatigue)、氧化(Oxidation)、腐蝕(Corrosion)、磨損(Rub/Wear)、沖蝕(Erosion)，及前段零件鬆脫所造成的異物衝擊損壞(Foreign Object Damage)等。

這些損壞機制大體上可歸納為兩類，一為與機械性質有關(如潛變、疲勞、沖蝕及磨損等)；另一為與腐蝕、氧化有關。若機組採用LNG天然氣做為主燃料及吸入之空氣很乾淨則受腐蝕影響之機會較小，受運轉之週期應力(Cyclic Stress)影響較大，機組的操作運轉模式亦有影響，基載機組(Based-loaded)第一級動葉片以受到潛變影響為主，中尖載機組則主要為受到熱疲勞影響。氣渦輪機熱元件最常見之破壞常發生在第一級靜葉片(燃氣溫度最高)，主因為熱疲勞先產生龜裂，然後因高溫氧化、熱腐蝕及機組之升降載運轉而使裂縫加速成長，最後導致損壞不能再使用。此外，燃氣混合溫度不均勻也會導致組件局部過熱而加速材質潛變裂化。潛變(Creep)的發生是由於溫度及應力長期的存在，使金屬隨時間而開始緩慢的產生變形，一般潛變變形的機構可分為4大類，如Coble Creep、Nabarro - Herring Creep、Dislocation Creep、Dislocation glide，高溫及高壓下運轉的熱元件是屬於Nabarro - Herring潛變模式。



以鎳鋁合金為例子分析於不同升降溫速度的應力值及潛變速率，當機組運轉溫度大於950°C時，氧化鋁薄膜的生成速率開始主導此超合金的氧化速度，假設氧原子空孔的數量為 $30 \times 10^{-30} \text{m}^3$ 且其在氧化鋁的擴散速度約 $10^{-24} \text{m}^2/\text{s}$ 。因為鎳鋁合金與氧化物薄膜的膨脹係數不同，故氧化物的薄膜於時間點(i)因溫度變化快所引發的熱震壓應力為 $\sigma_{400\text{min}} = E_{\text{NiAl}} \times (\alpha_{\text{NiAl}} - \alpha_{\text{Al}_2\text{O}_3}) \times \Delta T = 370 \text{ GPa} \times (12 \times 10^{-6} - 8 \times 10^{-6}) \times 150 = 222 \text{ MPa}$ 。另於時間點(ii)因溫度變化較小，所引發的熱震壓應力則為 $\sigma_{1,020\text{min}} = E_{\text{NiAl}} \times (\alpha_{\text{NiAl}} - \alpha_{\text{Al}_2\text{O}_3}) \times \Delta T = 370 \text{ GPa} \times (12 \times 10^{-6} - 8 \times 10^{-6}) \times 50 = 74 \text{ MPa}$ 。

當氧分子與金屬元素反應即會於表面生成金屬氧化層，此氧化過程會隨著溫度的提高而加速反應，為降低高溫氧化影響，在基材金屬表面的氧化鋁薄層可防止氧氣擴散進入基材表面，對超合金基材，因考量其高強度及金相穩定要求，鋁成份常不多，故以塗敷覆層中的鋁元素來提供此成份，將可保護基材鋁元素的流失及提升抗腐蝕之能力。由於 Al_2O_3 的熔點溫度(T_m)是 $2,015^\circ\text{C}$ ，此時溫度已高於 $0.4T_m$ 為 806°C ，因此我們可以假設此材料的潛變變形是依Herring-Nabarro潛變模式，其晶粒尺寸約為 $1\mu\text{m}$ 。

故於時間點(i) $t=400\text{min}$ ，潛變速率 $\dot{\epsilon} = 14\Omega D_v \sigma / kTd^2 = 14 \times 30 \times 10^{-30} \text{m}^3 \times 10^{-24} \text{m}^2/\text{s} \times 222 \text{MPa} / [1.3807 \times 10^{-23} \text{J.K}^{-1} \times 1373\text{K} \times (10^{-6} \text{m})^2] = 4.918 \times 10^{-12} (\text{s}^{-1})$ 於時間點(ii) $t=1,020\text{min}$ ， $\dot{\epsilon} = 14 \times 30 \times 10^{-30} \text{m}^3 \times 10^{-24} \text{m}^2/\text{s} \times 74\text{MPa} / [1.3807 \times 10^{-23} \text{J.K}^{-1} \times 1373\text{K} \times (10^{-6} \text{m})^2] = 1.639 \times 10^{-12} (\text{s}^{-1})$ ，其中 Ω 為vacancy size; Oxygen vacancy volume $\sim 30 \times 10^{-30} \text{m}^3$ ， D_v : volume diffusion coefficient. Oxygen diffusion rate in $\text{Al}_2\text{O}_3 \sim 10^{-24} \text{m}^2/\text{s}$ ， k : Boltzman constant= $1.3807 \times 10^{-23} \text{J.K}^{-1}$ 。

目前本公司超臨界燃煤機組新建計劃採用之主蒸汽溫度為 566°C ，再熱蒸汽溫度為 593°C ，已與過去台中次臨界機組($538^\circ\text{C} / 538^\circ\text{C}$)所使用之材料(如P22)大不相同，通常鉻含量較高者具有較大之容許應力值。就技術性及經濟性評估，由於鉻含量不同時其造價同主蒸汽管路厚度及單位重量比值亦有所變化，當蒸汽溫度大於 566°C 以上時，廠商若使用高鉻合金鋼能使厚壁減薄，將熱應力減至最小，同時可改善啟動時間，提高整個電廠的利用效率，因為這些材料的低熱傳導性和大的熱膨脹係數將會限制啟動的速度，因此於採購規範書中適當地規範啟動速率似乎有其必要性。

理論上使用具有足夠潛變強度能承受高壓和高溫的材料，才能同時達到效率的增加及運維成本的降低，當機組在 16.8MPa 的蒸汽壓力和 538°C 的蒸汽條件下運轉，使用x22即可滿足設計規範要求，如果應力或溫度再增加，就需要採用高潛變破裂強度的材料，由ASME及Sumitomo Metals - Tubular Division所提供的規格書中可以發現，隨著鉻含量的增加，爐管的強度會逐漸地增加，鉻的最小含量

端視燃氣中所含腐蝕物及蒸汽氧化的程度，潛變則與固溶強化元素(鉬、鎢、鈷)及第二相強化元素(鈦鋁鈮)有關，而鈦鋁鈮又與熱循環有關，上述所有的元素含量又影響製造及焊接性。除了技術問題尚待研發解決之外，值得注意的是鐵元素的減少使用將會大幅影響成本。

材料等級x22、x91、x92及x122之成分比較表

Material	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Others
A213-T22	0.15	0.50	0.30~	0.030	0.030	1.90~	0.87~	-
A335-P22	max.	max.	0.60	max.	max.	2.60	1.13	
A213-T91	0.08~	0.20~	0.30~	0.010	0.010	8.00~	0.85~	0.18~0.25V, Nb,N,Ni,Al
A335-P91	0.12	0.50	0.60	max.	max.	9.50	1.05	
A213-T92	0.07~	0.50	0.30~	0.020	0.010	8.50~	0.30~	1.5~2W,V, Nb,B,N,Ni,Al
A335-P92	0.13	max.	0.60	max.	max.	9.50	0.60	
A213-T122	0.07~	0.50	0.70	0.020	0.010	10.00~	0.25~	2W,Ni,Cu,V, Nb,Al,B,N
A335-P122	0.14	max.	max.	max.	max.	12.50	0.60	

規範	2%Cr Steel	9%Cr-12%Cr Ferritic Steel		
	T22, P22	T91, P91	T92, P92	x122 (HCM12)
標準	SA213 T22, SA335 P22	SA213 T91, SA335 P91	SA213 T92, SA335 P92	12Cr-1Mo-1W- V-Nb
YS min. (MPa)	205	415	440	390
TS min. (MPa)	415	585	620	590-740

*.資料來源: ASME及Sumitomo Metals

依超臨界壓力機組設備提供廠家之使用經驗，目前規範書所選用之材質係採用x91或x92或含鉻量較高之x122系列鉻鉬合金鋼管材用於主蒸汽管路及再熱蒸汽。雖然x92與x122兩者強度相近，但x122因有較高之鉻含量，其價格及抗氧化性較x92高；但x122施工困難度及焊接要求也相對較高。過熱蒸汽管由於溫度壓力最高，加上直接與鍋爐熱燃氣接觸，日本中國電力公司三隅電廠24.5MPa，600°C /600°C原設計採用 9%Cr鉻鉬合金鋼，亦因有破管問題而改用含鉻量更高的SUS (18Cr SUS304J1HT 25Cr SUS310J1TB)。若就經濟性上的觀點，這些高鉻

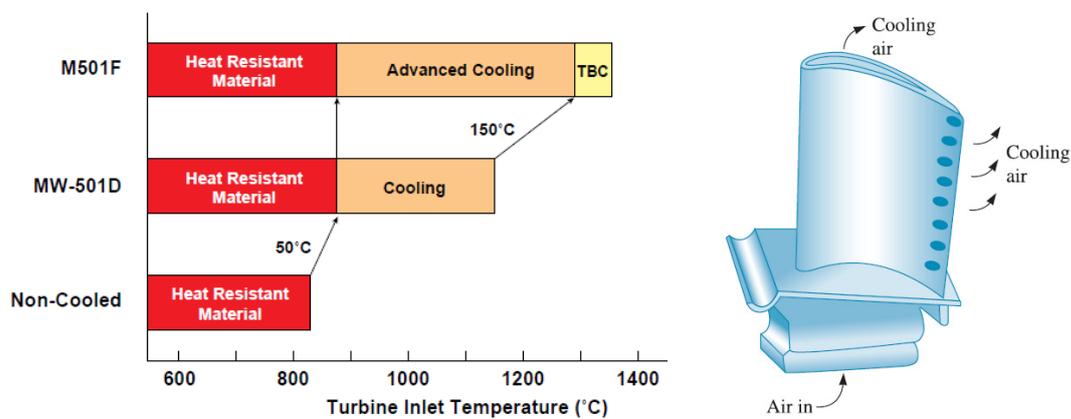
合金只能適用在30MPa，主蒸汽溫度為600°C，再熱蒸汽溫度為620°C以下的範圍內，溫度壓力再提升上去的話就得考慮引進耐高溫鎳基超合金。

* 註：台中次臨界機組蒸汽條件16.5MPa，538°C /538°C，效率(HHV) 40.3%(Gross)
大林超臨界機組蒸汽條件24.1 MPa，566°C /593°C，效率(HHV) 42.3%(Gross)

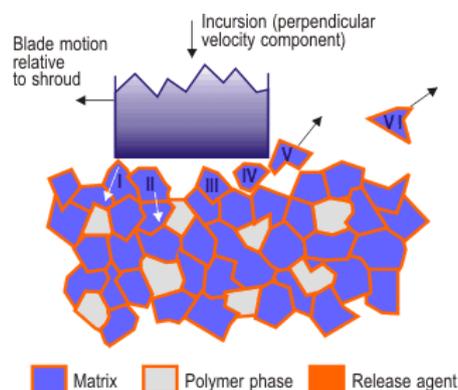
目前歐盟已有計畫性的召集各大設計及製造廠家，如Alstom、Mitsui Babcock及Siemens等，共同研究開發THERMIE計畫，預計在西元2015年前完成一座主蒸汽壓力為35MPaG，主蒸汽/再熱蒸汽溫度為700°C/ 720°C，效率可達50%以上之超臨界壓力燃煤火力機組。可見超臨界壓力機組在技術上未來仍具有相當大發展的空間。

三、氣渦輪機熱元件塗層研發技術之探討

新型高效率氣渦輪機(G/H系列)的主火焔燃燒溫度可高達 $2,200^{\circ}\text{C}$ 以上，壓縮比則為 $20\sim 23:1$ ，進入空壓機的空氣在逐漸遞升加壓的壓縮過程中被加熱至 400°C ，根據下圖，現階段氣渦輪機進氣溫度能大幅增加的主要方法是利用抽引自空壓機的壓縮空氣來冷卻熱元件，此高壓冷卻空氣能使葉片的溫度下降約 400°C 。其次則是噴塗絕熱保護塗層，此塗層能使葉片的溫度再下降近 100°C ，由於未來機組燃氣溫度將再提高，相信對葉片塗層的技術將會有更高的要求。



依廠商的設計規範，當熱元件噴塗層損壞至某一定程度後(約 $20\%\sim 30\%$)，將使得超合金基材長期暴露於過高的溫度下，除了破壞材料微觀結構外，也會加速表面的氧化或腐蝕，目前應用於氣渦輪機組的塗層可大致分為絕熱保護塗層(TBC; Thermal Barrier Coating)、鍵結塗層(Bond Coating)及可磨損塗層(Abradable Coating)三種，其中可磨損塗層是用來降低動與靜元件之間隙，當可磨損塗層與動葉片接觸受力後，會以細小顆粒型態脫離噴塗層，GT運轉溫度大於 900°C 時便需用陶瓷基複合材料(ceramic-based)製作的可磨損塗層。

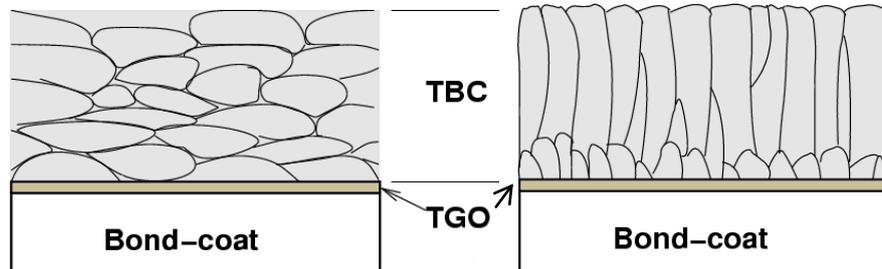


在氣渦輪機的動、靜葉片上最廣為使用的鍵結塗層具有防止元素擴散的功能，目前以MCrAlY塗層為主流，在基材與絕熱保護塗層間產生一層擴散障蔽層以有效阻隔金屬原子於高溫時的擴散，其另一功用為提供粗糙的接合面以增加表層之附著性及降低表層與基材之熱膨脹差異梯度。主要的成分M是指鎳、鈷或鎳鈷之組合，其他元素為抗熱腐蝕之重要元素鉻、鋁以及鈮(Y)。塗層中的鉻、鋁等成份於機組運轉中與空氣中的氧反應而形成之氧化薄層，可用來保護葉片基材免於高溫腐蝕及氧化，但MCrAlY塗層元素會隨著葉片運轉時間的增加而逐漸耗損。週期性的熱循環會使得鉻及鋁氧化薄層剝離，因為氧化作用又會再次形成新的氧化層，塗層厚度就在不斷成長及剝離的過程中逐漸變薄，當這些含鋁及鉻的相都消耗殆盡時，塗層便不能再繼續使用，必須將葉片再生來確保塗層的厚度以及葉片基材結構的完整性。

因氣渦輪機燃氣入口溫度高達1,500°C，為避免熱燃氣與熱元件金屬直接接觸及降低基材金屬溫度，處於較高溫度的前幾級葉片會在鍵結塗層的外側再塗上一層絕熱保護塗層以增加零組件之壽命。影響塗層性能的主要因素除了燃氣壓力及溫度、燃氣的組合成份、金屬溫差及變化速率之外，還有噴塗方法的選用，現已商業化大量使用的噴塗技術有大氣電漿噴鋸(APS; Atmospheric Plasma Spray)、真空電漿噴鋸(LPPS; Low Pressure Plasma Spray)、高速火焰噴鋸(HVOF; High Velocity Oxygen Fuel)及最新的電子束物理蒸鍍(EBPVD; Electron Beam Physical Vapor Deposition)等。

大氣電漿噴鋸與真空電漿噴鋸的主要差別是前者可於一般大氣環境下噴焊；後者則需在抽真空的負壓環境下操作，因噴料的速度比較快，有較高的動能以得到附著強度較佳的噴塗層，由於使用鈍性氣體形成遮蔽環境，故塗層較緻密且含氧量較低，在噴塗時會將工件預熱至700-800°C，亦可降低葉片內部的熱應力及增加鍵結強度，避免塗層的剝落。新一代的電子束物理蒸度法是屬於較佳的塗層技術，適合應用在輪廓變化較小的葉片上，優點為可抵抗較高溫的氧化與葉片局部過熱，尤其電子束物理蒸度法是相當高級的塗層技術，目前大部分使用在航太葉片上，只有少數應用在燃氣很高的氣渦輪機葉片(如H型第一級葉片)上，大氣電漿噴鋸與電子束物理蒸度法在陶瓷塗層之比較，兩者塗層的微觀結構完全不同，大氣電漿噴鋸陶瓷塗層為堆疊狀，電子束物理蒸度法陶瓷塗層則為柱狀結構，當裂

縫於柱子間形成時，仍然保有良好的絕熱能力，使得塗層會有較高的應力應變及耐沖蝕性，經實驗證明，二者之間壽命相差一倍以上。本公司目前已有大氣及真空電漿噴塗設備，至於電子束物理蒸度法，因設備造價高昂尚待評估中。



傳統大氣電漿噴鋅塗層(左)與電子束蒸鍍(右)結構之比較

資料來源：英國劍橋大學超合金塗層之講義

大氣電漿噴塗具有價格較真空電漿噴塗、高速火焰噴鋅便宜及應用範圍廣泛之優點，但會有結合強度低及孔隙率較高之缺點。而真空電漿噴塗具有覆層緻密、覆層與基材結合強度強且結合面無氧化情形(因低真空環境下噴焊)之優點，但費用較高。高速火焰噴鋅利用氣槍噴出氣體火燄(由氧氣與燃料混合)，將覆層粉末噴焊於組件表面，費用介於真空電漿噴塗與大氣電漿噴塗間，其優點為適用於幾何尺寸變化多的噴塗、覆層結合強度較大等，但其覆層氧含量較真空電漿噴塗高。

目前MHI於大潭氣渦輪機組熱元件所使用的TBC塗層為 $ZrO_2-8Y_2O_3$ 均使用大氣電漿噴塗方法，另MCrAlY鍵結塗層的厚度約 $300\mu m$ ，於燃燒室及導火筒部份亦採用大氣電漿噴塗，氣機第一、二級葉片採用真空電漿噴塗，氣機第三、四級及空壓機葉片採高速火焰噴銲。常見的問題有塗層脫落Coating spallation，塗層產生裂痕Coating cracks，動靜元件之間隙過小所引發的磨傷(Rubbing)，機殼橢圓地變形所造成的葉片尖端塗層磨損(Loss of coating on the blade tip)等。

肆、對本公司之具體建議

一、說明：

通常原廠對熱元件使用壽命之評估常依其基材特性、燃料及運轉情形而訂，基本上熱元件由特殊合金或超合金所製作而成，一般設計壽命為100,000EOH，長期暴露在高溫環境中會產生高溫氧化、疲勞老化及龜裂等損壞之零組件。必須仰賴定期之再生(Refurbishment)來達成其預期壽命，倘不進行適當之再生則熱元件壽命將因而縮短，造成新品採購數量增加，使得機組發電成本將隨之升高，對機組運轉之可靠度及中、長期設備維護計劃之擬定都會有不利及無法掌控之因素存在。

目前本公司複循環機組(如大潭#1~#6機)之合約保固期及範圍可分冷端及熱端元件兩大類，其中保固最長的是氣渦輪機組之熱燃氣道零組件(Hot Gas Path)，如氣渦輪機葉片(Turbine Blade)、燃燒室內襯(Combustion Liner)、燃氣導筒(Transition Piece)及內殼(Inner Casing)等，保固期為氣渦輪機組商業運轉起三年或啟動達750次或運轉達12,000小時，視何條件先達成者為準。保固期間內，所有熱燃氣道組件之表面塗層、再生或其已達使用壽命須重新更換(Coating, Refurbishment and end-of-life replacement)須由承包商負責。

因熱元件的更換及再生等維護準則需依循原廠商既定的運轉及維修手冊來進行，但新品價格昂貴，已經成為一可觀的潛在運轉維護成本。由於各廠商不停地研發及應用新技術，更佳的冷卻或保護塗層技術可能在機組商轉數年後因大量使用而降低成本，若能因此而延長組件再生或更換的時機，必能為公司節省可觀的維護費用。雖然氣渦輪機廠家已就各種可能發生的熱元件損壞，如潛變、疲勞、熱腐蝕、高溫氧化等問題提出因應方法，如新型耐高溫超合金材料使用、改善冷卻方式及噴塗覆層等，機組仍需要在運轉一定期間後停機開蓋檢查，俾益評估熱元件是否需進行再生噴塗(Recoating)、焊補(Repair)或換新。

由各廠商提出之熱元件維修週期標準可以發現，各個元件的壽命均不一致，長則達一般業界標準100,000EOH，然而因燃氣溫度愈來愈高，幾乎各廠家前幾級葉片之壽命及再生週期已變得較短，亦有部份熱元件壽命僅24,000EOH者(如環罐式燃燒室及導火筒)，且各個廠商計算EOH的方法並不相同，造成採購時無

法據以於保固期內(可以供電廠驗證及廠商需負責合約期間之履行義務)確認是否符合其設計壽命，另為鼓勵廠商提報較可靠耐用之零組件(成本通常會較高)且整體維護成本較低之機組，故建議於建廠初期所採購之強制備品待熱元件保固期屆滿後才交貨。另於採購規範中明確規定氣渦輪機組大修將採roll-in/out原則進行，所有熱元件之「更換」及「再生」均由廠商負責，本公司所購備品係於保固期滿(現為商轉後三年)後交貨，大修時若需送回原廠檢驗而非需再生之熱元件及發現有破損需送回國外原廠修理的零件，均需由廠商負責提供。可以鼓勵國外廠商扶植本公司修護處或國內廠商之檢驗產能，而非全數送回國外檢測，造成本公司需依機組數增購多餘之備品來減少機組停機待料之期間。

*. 葉片再生及汰換時程: MHI熱燃氣道組件壽命、更換週期

	GT11-N2 EV (通六機)		V84.2 (興達、南一~三機)		M501F/G (大潭)	
(單位:EOH)	設計壽命	再生週期	設計壽命	再生週期	設計壽命	再生週期
第一~二級動葉	*	*	*	*	*	*
第三/四級動葉	*	*	*	*	*	*
第一~二級靜葉	*	*	*	*	*	*
第三/四級靜葉	*	*	*	*	*	*

*. 廠商商業機密

以 Roll-in / Roll-out 方式大修係考慮節省定檢工期及提高系統備載容量，另發電單位及修護處有長達3年的期間來觀察機組大修情形及建立產能，以機組實際的保養記錄來評估最適備品購備計劃，同時使後續備品的採購可有較長的時間來做緩衝及議價作業。

二、具體建議：

未來公司在增建複循環機組時除追求高熱效率外，建議考慮將保固期內機組大修時所需補充的熱元件備品(含所有更新及再生維修成本，如內檢即需強制更新或送國外檢驗者)列入招標評比內容(需可供驗證)，以期降低建廠後續之維修成本。

三、效益評估

1.有形效益

由於規範中明確規定氣渦輪機機組採roll-in 及roll-out方式進行，所有熱元件之更新及再生均由廠商負責，本公司所購備品係於保固三年後交貨，大修定檢時若需送回原廠檢驗而不再生之熱元件及發現有破損需送回國外原廠修理的零件，則均需由廠商提供，本公司保留於保固期滿前以不高於原報價來增購未來所需備品之權利，故若以平均每次需修理及再生10%之零組件計，則於第10次定檢(三配一複循環機組最快於保固三年後)始用完一套備品。減少每台氣渦輪機目前於第一年定檢即採購一套全新備品的現象。

2.無形效益

火力發電機組之運轉年限長達25至40年之久，故若能在設計規劃及規範開立之階段即能將未來運轉維護必須使用之需求納入考量，將可提高本處建廠工程計畫之順利執行度及機組運轉可靠度，同時減少日後機組維修成本及專用配件庫存數量，鼓勵廠商提供較耐用的零組件及成本高的新技術(因廠商可減少保固期內再生所需之費用及國際長途運輸往返的費用)。另外為達成合約兩造雙贏的目標，另可在建廠統包合約內規定此備品有物調之機制，以利合約能順利的履行，避免廠商有因國際原物料上漲吃悶虧或物價下跌而獲利的情形發生。