

出國報告（出國類別：考察）

氣渦輪機熱段組件 壽命評估技術研究

服務機關：台灣電力公司

姓名職稱：李日輝 機械工程師

派赴國家：德國、英國

出國日期：97 年 8 月 2 日至 8 月 15 日

報告日期：97 年 10 月 8 日

出國報告審核表

出國報告名稱：氣渦輪機熱段組件壽命評估技術研究		
出國人姓名（2人以上，以1人為代表）	職稱	服務單位
李 日 輝	機械研究專員	台 灣 電 力 公 司
出國期間：97年 8月2日至97年 8月15日		報告繳交日期：97年10月8日
出國計畫主辦機關審核意見	☐ 1.依限繳交出國報告 ☐ 2.格式完整（本文必須具備「目的」、「過程」、「心得」、「建議事項」） ☐ 3.內容充實完備 ☐ 4.建議具參考價值 ☐ 5.送本機關參考或研辦 ☐ 6.送上級機關參考 ☐ 7.退回補正，原因： ☐ 不符原核定出國計畫 ☐ 以外文撰寫或僅以所蒐集外文資料為內容 ☐ 內容空洞簡略 ☐ 電子檔案未依格式辦理 ☐ 未於資訊網登錄提要資料及傳送出國報告電子檔 ☐ 8.本報告除上傳至出國報告資訊網外，將採行之公開發表： ☐ 辦理本機關出國報告座談會（說明會），與同仁進行知識分享。 ☐ 於本機關業務會報提出報告 ☐ 9.其他處理意見及方式：	
層轉機關審核意見	☐ 1.同意主辦機關審核意見 ☐ 全部 ☐ 部分_____（填寫審核意見編號） ☐ 2.退回補正，原因：_____ ☐ 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、審核作業應儘速完成，以不影響出國人員上傳出國報告至「出國報告資訊網」為原則。

報告人	單 位	主管處	總 經 理
	主 管	主 管	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：氣渦輪機熱段組件壽命評估技術研究

頁數 59 含附件：☐是☒否

出國計畫主辦機關/聯絡人/電話：

出國人員姓名/服務機關/單位/職稱/電話：

李日輝/台灣電力公司/綜合研究所/機械工程師/（02）8078-2217

出國類別：☐1 考察☐2 進修☐3 研究☒4 實習☐5 其他

出國期間：97 年 8 月 02 日至 8 月 15 日 出國地區：德國、英國

報告日期：97 年 10 月 08 日

分類號/目

關鍵詞：氣渦輪機，葉片再生，熱段組件，壽命延長，風險評估

內容摘要：（二百至三百字）

汽機及氣渦輪機材料長期處於高溫、高應力下運轉，易導致潛變、疲勞、脆化及腐蝕破裂，影響機組的穩定及安全，因此機組的壽命評估及管理，隨機組日漸老舊時更顯重要。本公司汽輪機機組材料壽命評估技術及經驗豐富；然複循環機組之氣渦輪機設計及選材與汽輪機有些差異，故汽輪機材料壽命評估的經驗，無法解決所有氣渦輪機組壽命評估的需求。

按原廠保養規範氣渦輪機於累計運轉10萬小時需進行期中更新及大修工作。為建立自主技術，綜何研究所與修護處應發電處要求，於2月南部電廠三號機大修期間，對機組進行非破壞檢測及壽命評估取樣，為提高壽命評估之可靠度，有必要藉研習以吸收國外之技術及經驗。

本研習參訪德國 Siemens 公司、英國TWI公司及GEI公司，對於氣渦輪機材料壽命延長、葉片再生、電廠組件風險評估、組件破裂分析及葉片噴塗層非破壞檢測技術，有一定程度的了解，可引用於電廠材料相關之分析與評估；另外，南部電廠三號機輪盤與Siemens 公司討論後可以繼續使用100,000小時，加入TWI公司會員相對效益頗高，也是可以繼續追蹤及推動的事務。

本文電子檔已傳至出國報告資訊網

（<http://open.nat.gov.tw/OpenFront/RobtaFront/index.jsp>）

目 錄

出國報告審核表	I
出國報告書提要	II
目 錄	III
表 目 錄	IV
圖 目 錄	IV
一、前 言	1
1、1 出 國 目 的	1
1、2 出 國 行 程	2
二、西門子公司研習內容.....	3
2、1 氣渦輪機葉片再生製程.....	3
2、2 氣渦輪機機組製造.....	12
2、3 氣渦輪機熱段組件壽命評估.....	16
三、TWI 公司研習內容.....	27
3、1 TWI 公司研究成果.....	27
3、2 TWI 公司會員服務.....	39
3、3 氣渦輪機組件損傷之危害評估.....	41
四、GEI 公司研習內容.....	52
五、心 得	56
六、建 議 事 項	57
七、參 考 文 獻	58

表 目 錄

表 1 西門子 V84.2 型氣渦輪機重要組件檢查項目	23
表 2 TWI 2001 年起參與之合作專案或自力進行之研究案	35

圖 目 錄

圖 1 西門子 V94.3A 機型一級動葉再生前、後之照片	4
圖 2 葉片再生流程圖	6
圖 3 再生葉片進料檢查	7
圖 4 再生葉片龜裂情形檢視	8
圖 5 葉片再生後之尺寸檢查	9
圖 6 葉片再生後塗層及冷卻流道檢查	10
圖 7 西門子公司 3A 氣渦輪機生產線	13
圖 8 V94.3A 型氣渦輪機生產線	14
圖 9 電子束物理氣相沉積原理及鍍層與溫降情形	15
圖 10 西門子公司氣渦輪機之壽命延長概念	22
圖 11 西門子 V84.2 轉軸及中心鎖桿檢查情形	25
圖 12 西門子 V84.2 輪盤應力分佈及檢查情形	26
圖 13 遠距離超音波技術原理	33

圖 14 各種成像技術原理	34
圖 15 Risekwise 軟體概念.....	44
圖 16 Risk Wise for Boiler 軟體基本操作程序	46
圖 17 Crack Wise 軟體基本程序及原理	49
圖 18 CESI 葉片噴塗層厚度驗證	54
圖 19 葉片塗層厚度與不同底材及不同探頭頻率之相對應曲線	55

一、前言

1、1 出國目的

氣渦輪機材料長期處於高溫、高應力及迴轉情形下，容易導致潛變、疲勞、回火脆化及腐蝕破裂等問題，這些現象使得機組運轉的穩定及安全受威脅，因此機組的壽命評估及管理，在機組日漸老舊時更顯重要。本公司自力進行汽輪機機組材料壽命評估已十餘年⁽¹⁾，技術及經驗成熟，可引用至複循環機組之汽輪機材料評估。公司有超過 60 部之氣渦輪機組，其機組設計及所選用之材料與汽輪機有一些差異，因此汽輪機材料壽命評估的經驗，並無法解決所有氣渦輪機組壽命評估的需求。

氣渦輪機熱段組件在遠較汽輪機高壓段更高溫環境下運轉，按原廠保養規範須於機組累計運轉達 10 萬小時時進行期中更新及大修工作⁽²⁾。為建立自有技術以擴大自力進行機組評估之範圍，本所與修護處應發電處要求，於 2 月南部電廠三號機大修期間，對機組進行非破壞檢測及壽命評估取樣，分析工作進行中，為提高壽命評估之可靠度以達成更有效之壽命管理及降低成本，有必要藉由研習以吸收國外之技術及經驗。

本研習首先參訪德國西門子公司，以研習氣渦輪機組件壽命評估技術並了解氣機葉片再生製程及氣渦輪機機組製造過程，同時對於西門子公司及三菱公司之葉片再生及南部發電廠三號機之壽命評估結果與西門子人員交換意見，以便吸收西門子公司之長處並有助於相關技術之建立；英國 TWI LTD 公司之參訪，研習氣渦輪機組件損傷之危害評估技術，並了解 TWI 公司各領域之研究成果及其對於會員的服務，期望評估並引用 TWI 公司開發之損傷危害評估軟體及各領域豐碩之研

究成果，以便評估氣渦輪機組件及其他類型機組組件殘餘壽命，以進一步提供有效規劃檢查周期及壽命管理，英國 GE Industrial Sensing & Inspection Technologies 公司之參訪，研習氣渦輪機組件非破壞檢驗技術，期望了解葉片塗層及絕熱層厚度評估技術，以便應用於葉片再生製程管制。

1、2 出國行程

本次出國實習期間為97.8.2~97.8.15，共計14天。8月2日搭乘華航班機，於3日抵達德國法蘭克福機場旋即搭火車前往柏林，4日至9日參訪西門子公司在柏林市的氣渦輪機組製造廠，研習氣渦輪機熱段組件壽命評估技術並了解氣機葉片再生製程及氣渦輪機組製造過程；8月10日自柏林搭乘華航聯營之英航班機前往倫敦旋即搭乘火車至劍橋，11日及12日於劍橋參訪TWI公司，研習氣渦輪機組件損傷之危害評估技術，12日搭乘火車自劍橋至聖阿爾本斯，13日參訪GEI公司，研習氣渦輪機組件非破壞檢驗技術，8月14日及15日為返程，返程自倫敦希斯洛機場搭乘華航聯營之英航班機於阿姆斯特丹機場轉華航班機返抵台北，詳細行程如下：

8/2~3	台北→法蘭克福→柏林
8/4~9	參訪西門子公司，研習氣渦輪機熱段組件壽命評估技術
8/10	柏林→倫敦→劍橋
8/11~12	參訪TWI公司，研習氣渦輪機組件損傷之危害評估技術
8/12	劍橋→倫敦→聖阿爾本斯
8/13	參訪GEI公司研習氣渦輪機組件非破壞檢驗技術，聖阿爾本斯→倫敦
8/14~15	倫敦→阿姆斯特丹→台北

二、西門子公司研習內容

本公司有西門子V84.2型氣渦輪機機組二十餘部，其中以南部發電廠的機組最早運轉，其等效運轉時數（Effect Operation Hours, EOH）已達80000小時，依照原廠保養規範機組於累計EOH 達10萬小時時需進行期中更新以及壽命評估檢查工作⁽²⁾，南部發電廠三號機此時正需規劃保養及檢查工作；也需要決定需更換的組件並開始進行採購作業。本公司雖然有豐富的汽輪機機組材料壽命評估經驗，也進行了南部電廠三號機氣渦輪機機組非破壞檢測及壽命評估取樣，然複循環機組之氣渦輪機運轉溫度甚高^(3,4)，因此設計及選材上與汽輪機有些差異，故汽輪機材料壽命評估的經驗，無法解決所有氣渦輪機組壽命評估的需求。故本研習參訪西門子公司的主要目的，係向西門子公司觀摩並研習其氣渦輪機熱段組件壽命評估的作法和技術，並且對於南部發電廠三號機之壽命評估之初步結果與西門子公司人員交換意見，以作為公司自主保養及檢查的借鏡。

本次經西門子公司同意並邀請，拜訪其位於柏林市區之氣渦輪機製造廠及葉片再生工廠，除了了解其氣渦輪機組件壽命評估的作法和技術之外，承蒙其詳細介紹及解說氣渦輪機葉片再生製程並表達有能力也願意協助進行三菱公司葉片之再生工作，西門子公司人員也詳細介紹及解說氣渦輪機機組製造過程及研發進展。以下就氣渦輪機葉片再生製程、氣渦輪機機組製造及氣渦輪機熱段組件壽命評估介紹。

2、1 氣渦輪機葉片再生製程

葉片再生製程基本上有去除塗層、葉片檢查、鉚補、塗層噴鉚及後處理等製程，本文將就西門子公司之製程及其與本公司之製程相較較不同之處介紹。

圖1為西門子V94.3A 機型第一級動葉葉片再生前、後之照片，圖1（a）為動葉經25000小時運轉後再生前之葉片，圖中根部呈現淡藍色，為底材被高溫氧化之顏色，葉面大部份的區域呈現淡棕色，為塗層長時間在高溫下運轉後之顏色，部份葉面區域呈現白色或淡藍色，導因於塗層損耗所致，圖1（a）顯示冷卻流道對葉面塗層有冷卻及保護作用使其塗層較完好；而遠離冷卻孔之區域則塗層損耗較嚴重。圖1（b）則為再生後之葉片，其葉面呈現塗層材料之顏色⁽⁵⁾。

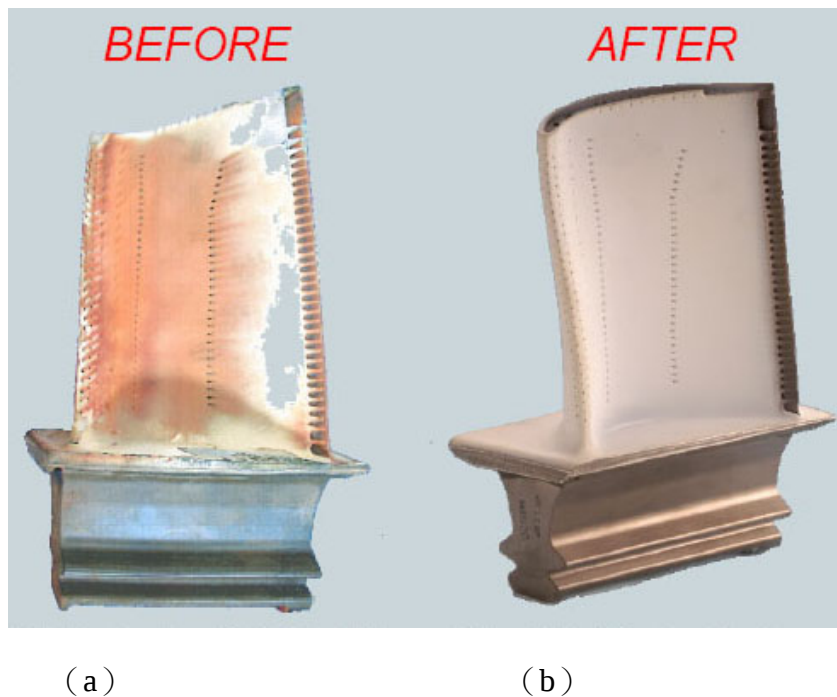


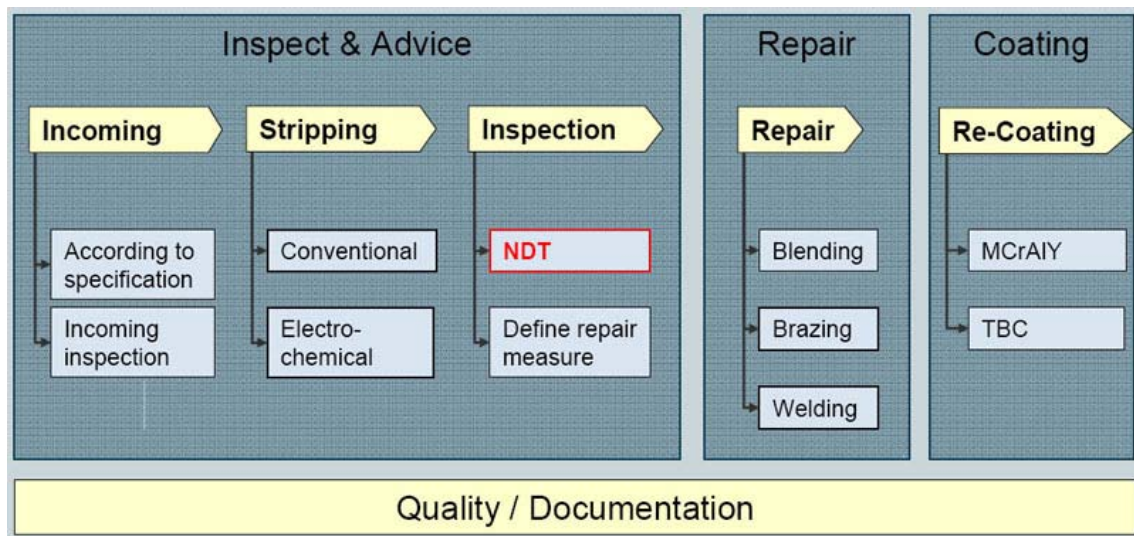
圖1 西門子V94.3A 機型一級動葉再生前、後之照片⁽⁵⁾（a）經過25000小時運轉後未再生前照片（b）再生後照片

圖2為葉片再生流程。圖2（a）顯示再生葉片進料檢查、去除噴塗層、非破壞檢查、鉚補材料及噴塗鍍層等基本製程，包括了依規範及進料檢查篩選葉片，以電化學方法去除原噴塗層再以人力做局部的打磨，以非破壞檢查決定需鉚補之區域，以硬鉚及鉚接鉚補葉片之裂縫、缺角或局部腐蝕，最後噴鉚鎳基超合金塗層及陶瓷絕熱層⁽⁵⁾。

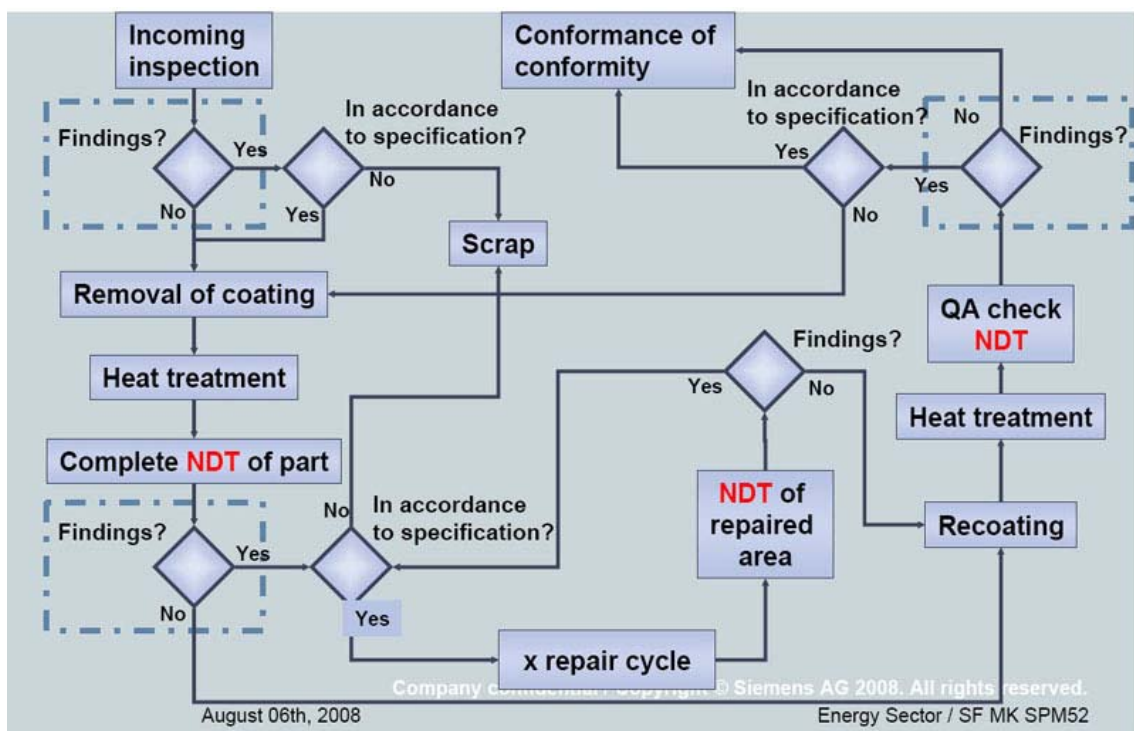
圖2（b）則顯示了更為詳細的製程，包括各階段的不合格品之再檢查或補救措施或者拋棄不用。舉例而言進料檢查及後續之非破壞檢查均未發現缺陷者，會依序進到去除噴塗層、非破壞檢查、噴塗鍍層、固溶及析出硬化熱處理、品管檢驗合格成為完成品。至於進料檢查及去除噴塗層後之非破壞檢查，如果發現依規範嚴重不合格則直接拋棄不用，若尚可補救則進到鉚補製程，檢驗合格後再進到噴塗鍍層後續製程。同樣地，再生後品質不良也可能重新去除噴塗層等等程序，若發現已不適合鉚補，則亦可能拋棄不用⁽⁵⁾。另外，值得一提的是西門子公司在去除舊噴塗層之後，以真空熱處理配合急速冷卻使裂縫打開，以便在之後的非破壞檢查能較容易發現既存的裂紋。

圖3顯示了幾種再生葉片進料檢查方法。圖3（a）顯示西門子公司以內視鏡檢查葉片內部冷卻流道是否有缺陷，圖3（b）為以螢光檢查缺陷的情形，圖3（c）則為以高壓空氣及流量計檢查葉片內部冷卻流道是否阻塞。

圖4為靜葉片龜裂情形檢視。以圖4（a）為例，壓力側之葉面龜裂均屬可鉚補缺陷，而跨越葉面及與靜葉環固定之平台（Platform）的裂縫則屬嚴重不合格需拋棄不用⁽⁵⁾，同樣地，圖4（b）之交錯裂紋屬於可鉚補缺陷，圖中葉面上端及下端跨越葉面及平台之裂縫則屬嚴重不合格⁽⁵⁾，以上如圖中紅色箭號所指。



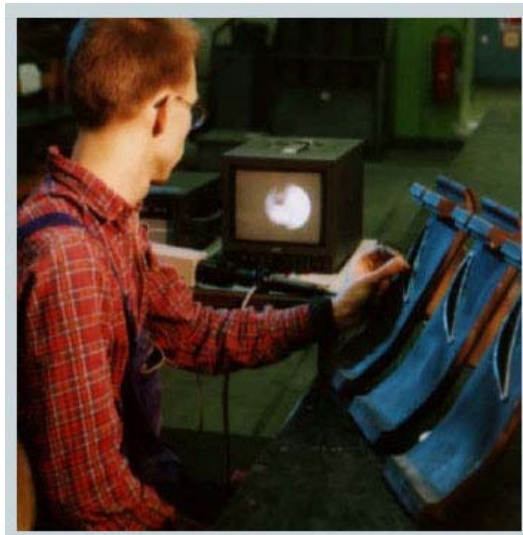
(a)



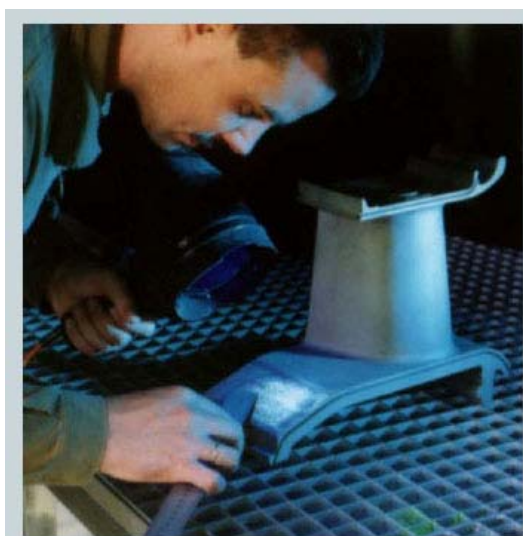
(b)

圖 2 葉片再生流程圖⁽⁵⁾ (a) 簡易流程圖 (b) 詳細流程圖

(a)



(b)



(c)

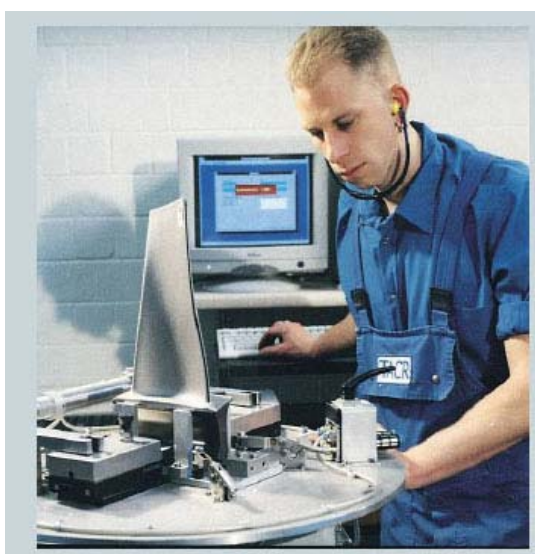
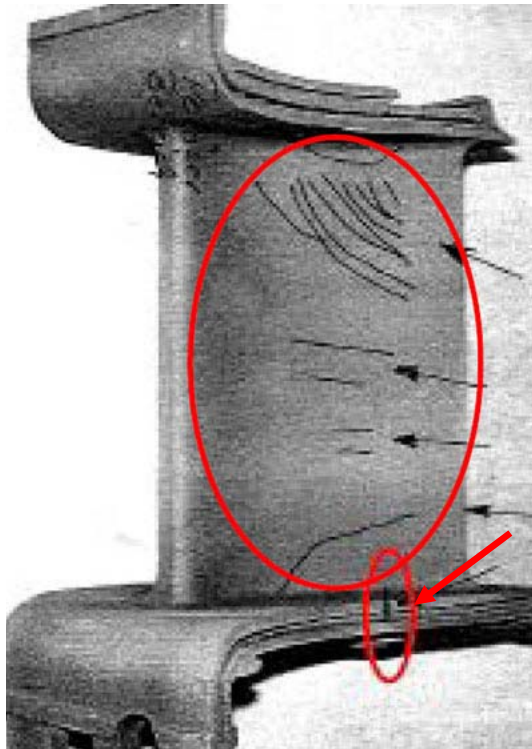


圖3 再生葉片進料檢查⁽⁵⁾ (a) 內視鏡檢查 (b) 螢光檢查 (c) 冷卻流道阻塞檢查

(a)



(b)

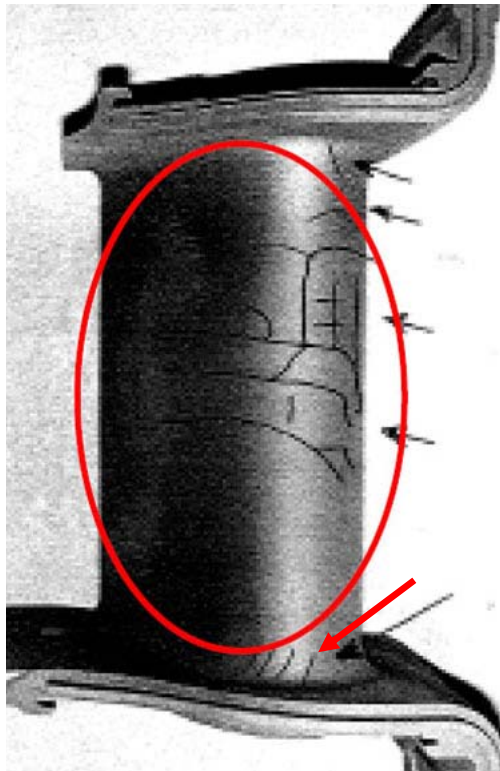
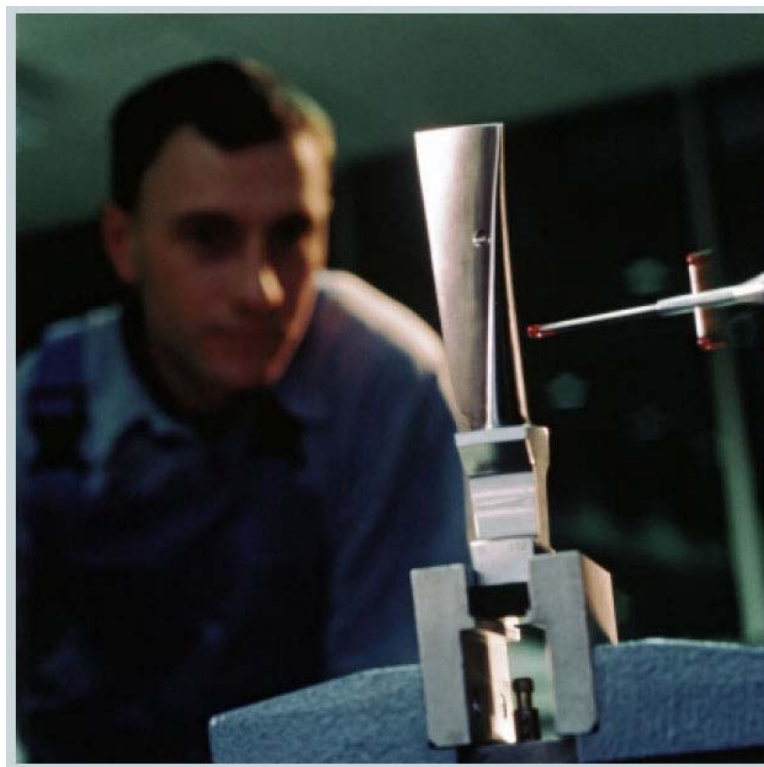


圖4 靜葉片龜裂情形檢視⁽⁵⁾ (a) 壓力側 (b) 背壓測

圖5為葉片再生後之尺寸驗證。圖5（a）顯示以接觸式三次元量測設備檢驗葉片尺寸的情形，圖5（b）則為葉面尺寸容許裕度，顯示一般區域有一定的容許裕度，至於導翼（Leading Edge）及尾翼（Trailing Edge）部份由於對葉片自然頻率有較大的影響，因此也有特別的規定⁽⁵⁾。

圖6為葉片再生後噴塗層及冷卻流道檢查。圖6（a）為以渦電流設備檢查葉片噴塗層厚度，圖6（b）為以機械手臂配合細小金屬探針自葉片冷卻流道出口檢查其是否有阻塞的情形，圖6（c）為以熱影像檢查設備檢查噴塗層與葉片底材的結合情形，圖中黑色箭號所指兩個顏色偏紅及黃的區域，表示噴塗層與葉片底材結合不良，因此散熱不佳導致熱影像顯現其溫度較其他區域為高⁽⁵⁾。

(a)



(b)

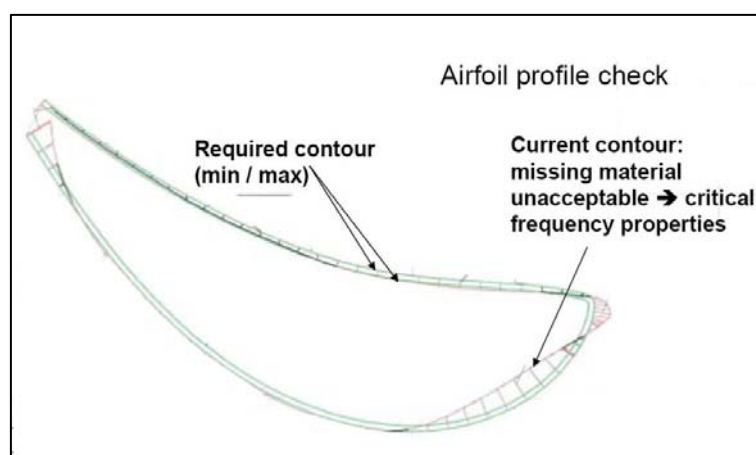


圖5 葉片再生後之尺寸檢查⁽⁵⁾ (a) 接觸式三次元量測情形
(b) 葉面尺寸容許值

(a)



(b)



(c)

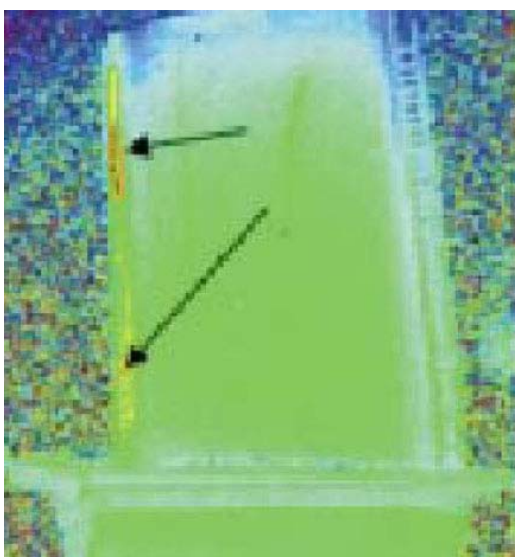


圖6 葉片再生後塗層及冷卻流道檢查⁽⁵⁾ (a) 渦電流塗層厚度檢查 (b) 冷卻流道暢通檢查 (c) 熱影像檢查

2、2 氣渦輪機機組製造

西門子公司位於柏林市的廠區，除負責氣渦輪機葉片再生及氣渦輪機機組壽命延長之業務外，尚負責生產及製造氣渦輪機機組，包括V94.3A型氣渦輪機及尚未正式商業化的機型。根據了解該尚未正式商業化的機型正於郊區的城鎮試運轉之中⁽⁶⁾。

圖7 為三種西門子公司3A系列的氣渦輪機機組生產線，分別為：V64.3A、50/60Hz、出力67MW，V84.3A、60Hz、出力181MW，V94.3A、50Hz、出力266MW，於柏林近郊西門子之子公司刻正進行的葉片再生工作，便是以V94.3A為最大宗，供應給南美洲的客戶。

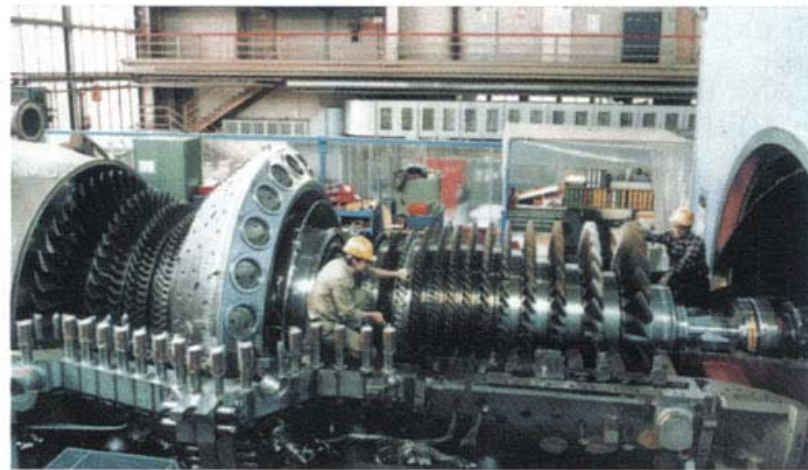
圖8 為西門子V94.3A型氣渦輪機加工的照片，圖8（a）為動葉片葉輪加工情形，製程自車出V型凹槽至車出聖誕樹型葉根槽，圖8（b）為中段中空軸加工完成後最後檢查的情形，工作人員正在檢視其與動葉片葉輪齒型契合處施工後情況，圖8（c）為轉軸最後檢視及動平衡測試的情形，圖中右側為鍍陶瓷絕熱層的熱套（Heat Cell）及已鍍陶瓷絕熱層的第一及第二級兩級氣機段動葉片。

圖9 為電子束物理氣相沉積原理及鍍層與溫降情形，圖9（a）為電子束物理氣相沉積原理，實際噴塗時設備有左右兩個轉換艙及一個主艙，葉片在轉換艙抽真空並加熱至1000℃左右，再打開主艙與轉換艙間之閥門，使工件處於約3000℃之主艙中，由於被電子束氣化的鍍層材料較易沉積於相對較低溫的工件，因此工件便被鍍層材料沉積，加上3000℃以上之溫度足以氣化陶瓷材料，因此可以鍍陶瓷絕熱層。圖9（b）顯示成份為氧化釔安定化之氧化鋯鍍層與界層之間有一層界層氧化後的氧化鋁層，該氧化鋁層有助其結合。圖9（c）顯示葉片鍍界層及陶瓷絕熱層於運轉時溫降情況之示意圖，文獻顯示由於界層及陶瓷絕熱層之保護，底材於運轉時溫度可望降至800℃左右⁽³⁾。

(a)



(b)



(c)

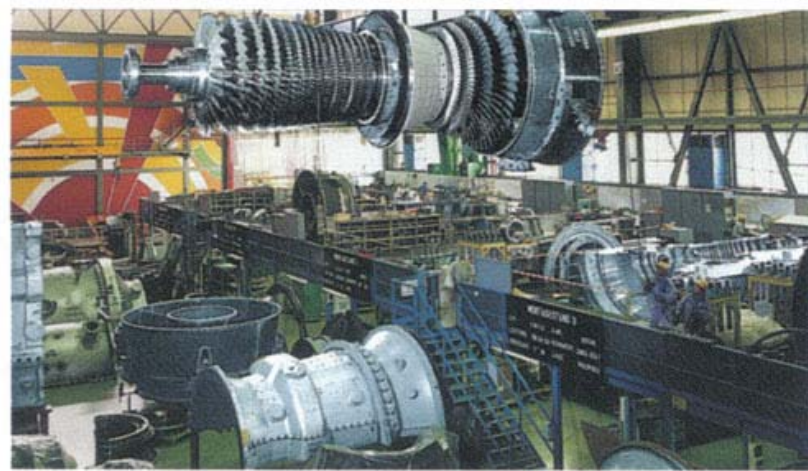


圖7 西門子公司3A氣渦輪機生產線⁽⁶⁾ (a) V64.3A
(b) V84.3A (c) V94.3A

(a)



(b)

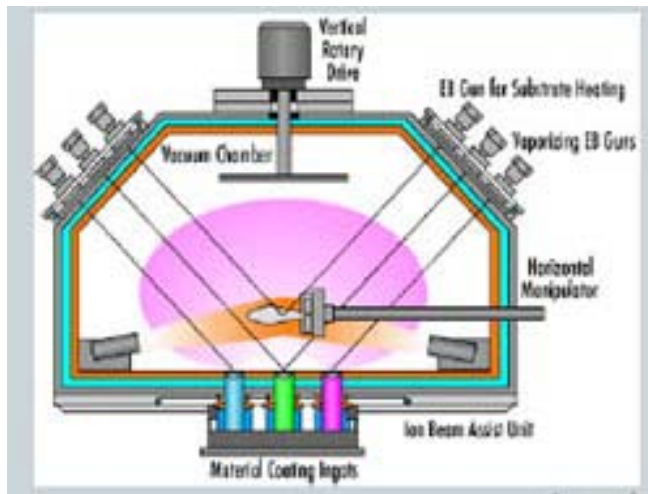


(c)

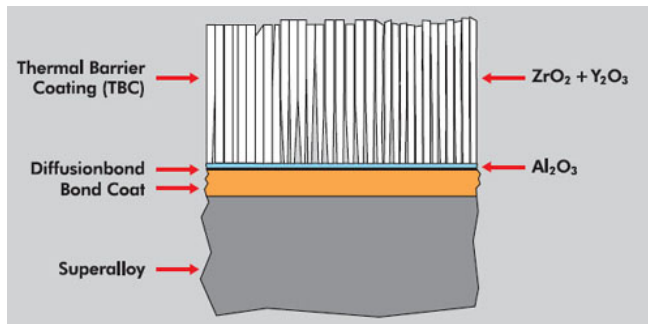


圖8 V94.3A型氣渦輪機生產線 (a) 動葉片葉輪加工情形
(b) 中段中空軸加工情形 (c) 轉軸檢視及測試

(a)



(b)



(c)

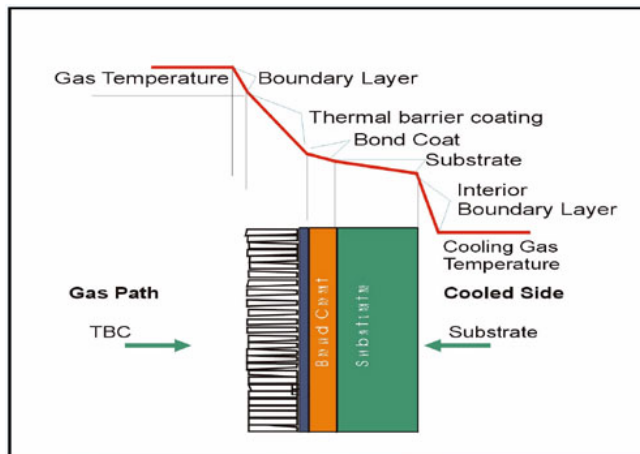


圖9 電子束物理氣相沉積原理及鍍層與溫降情形^(5,7) (a) 電子束物理氣相沉積原理 (b) 氧化鈮安定化氧化鋯鍍層 (c) 運轉時溫降情形示意圖

2、3 氣渦輪機熱段組件壽命評估

氣渦輪機機組按照原廠的設計要求，機組運轉至等效運轉時數（Effect Operation Hours, EOH）達100,000小時時，必需進行一系列的檢查工作以作為壽命延長的依據⁽⁸⁾。圖10為西門子公司進行機組壽命延長的概念⁽⁸⁾。圖10（a）顯示西門子公司認為組件的壽命有一定的年限，所以問題不是該組件會不會損壞；而是該組件何時會損壞，因此壽命延長的目的在於防止重大事故並提高壽命評估之可靠度及安全性⁽⁸⁾，足見西門子公司是以壽命管理的角度進行壽命延長的工作。

圖10（b）為西門子公司建議的各項檢查的時間點⁽⁸⁾，顯示其設定的各項檢查，基本上較小規模之檢查遇較大規模檢查時則併入該檢查，茲介紹如下：

- 1、小型檢查（Minor Inspection）：每運轉8,000小時進行一次。
- 2、熱段組件檢查（Hat-Gas-Path Inspection）：每運轉25,000小時進行一次（第三次的小型檢查併入本次檢查）。
- 3、主要的全面檢查（Major Overhaul）：每運轉50,000小時進行一次（第二次的熱段組件檢查併入本次檢查）。
- 4、壽命延長（Life Time Extension）：每運轉100,000小時進行一次（第二次的主要的全面檢查併入本次檢查）。

圖10（c）為壽命延長之前置作業，圖中可見在第一次全面檢查至壽命延長實施之前的各項準備工作及適合的時間點⁽⁸⁾。基本上於第50,000小時之全面檢查後4週內即應開會討論第100,000小時之壽命延長工作；最好在壽命延長實施三年之前著手購買長交貨期之組件；最好在壽命延長實施兩年之前著手合約之商討與訂定及實施之範圍與細節；在壽命延長實施15個月之前開會詳細討論壽命延長實施之

細節；壽命延長實施12個月之前實施一次預先之檢查；於壽命延長實施之前4週訂定壽命延長工作之排程。

圖10(d)為設計資料、運轉經驗資料及各項檢查與壽命延長檢查之關聯⁽⁸⁾，圖中可見運轉經驗加上設計及研發所帶來的修正，可作為組件的檢視、分析及壽命極限的參考，以上的整體結果影響到對於壽命延長的要求及檢查的決定；此外，上述整體結果加上運轉條件及壽命延長的問題點，可據以修正小型檢查、熱段組件檢查及全面檢查等各項檢查的細節，各項檢查的結果再回饋到對於壽命延長的要求及檢查的決定，最後據此執行壽命延長及各項檢查。

圖10(e)為氣渦輪機轉軸之壽命延長概念⁽⁸⁾，基本上西門子公司認為標示為紅色之組件為一定壽命期間必須更換者，例如空壓段與氣機段各級葉片即是，圖中標示為菊紅色之組件為經過檢查及測試，憑該結果決定者，例如中心鎖桿(Tie Rod)、各段中空軸(Hollow Shaft)及空壓段與氣機段各級動葉片輪盤即是，圖中標示為土黃色的組件為可以鉚補者，例如空壓段與氣機段各級靜葉環(Carrier)即是。

圖10(f)為燃燒器之壽命延長概念⁽⁸⁾，基本上西門子公司認為標示為紅色之燃燒筒及混合室為一定壽命期間必須更換者，標示為菊紅色之外殼為經過檢查及測試，憑該結果決定者。

表1 列舉了西門子公司 V84.2型氣渦輪機部份重要組件檢查的項目⁽⁹⁾。表中1.3~1.5為壓縮段動葉片輪盤(Disc)的檢查項目，顯示輪盤之葉片溝槽及葉片之根槽須進行磁粉探傷檢查(MT)，以確認是否發生裂紋；另外，輪盤的肋骨結構、肋骨結構與輪盤的部位、輪盤中心孔及齒狀接觸面等等均須進行磁粉探傷檢查(MT)及超音波檢測(UT)，以確認是否發生裂紋⁽⁹⁾。表中1.7~1.8為中心鎖桿(Tie

Rod) 的檢查項目，顯示針對中心鎖桿之全部表面包括其螺帽部份及其表面均須進行磁粉探傷檢查 (MT) 及超音波檢測 (UT)，以確認是否發生裂紋⁽⁹⁾。

表中1.16~1.17為氣機段動葉片輪盤的檢查項目，顯示在輪盤的肋骨結構、肋骨結構與輪盤的部位、輪盤中心孔及齒狀接觸面等等均須進行磁粉探傷檢查 (MT) 及超音波檢測 (UT)，以確認是否發生裂紋⁽⁹⁾。表中4.1~4.2為壓縮段所有動、靜葉片的檢查項目，顯示針對上述葉片必須以目視檢查裂紋、沉積、材料損失、腐蝕及破裂等缺陷，表中亦標示西門子公司認為其壽命極限為133,000小時⁽⁹⁾。表中4.3為氣機段第三級靜葉片的檢查項目，顯示針對該級葉片必須以檢查金相組織的變化及腐蝕情形，檢查時機儘量接近於100,000小時，表中亦標示西門子公司認為其壽命極限為133,000小時；事實上，根據西門子公司的資料⁽⁹⁾，第三級動葉片及第四級動、靜葉片的檢查項目及其壽命極限也和第三級靜葉片一樣⁽⁹⁾。

進一步將各級壓縮段、氣機段動葉片輪盤及各段中空軸與中心鎖桿組合後之轉軸圖形示於圖11 (a)，圖中可見中心鎖桿上有 4只阻尼環及 3只O型環，4只阻尼環3只於壓縮段第1、3、11級動葉片輪盤之後，1只於氣機段第 4級動葉片輪盤之後，3只O型環則均於壓縮段，於第6、8、10級動葉片輪盤與中心鎖桿接觸面上，壓縮機第一抽氣約100°C 自壓縮段第12級動葉片輪盤之後導入；壓縮機出口冷卻空氣約400°C 自中空軸冷卻孔導入，由於燃氣溫度在1000°C 以上，加上冷卻空氣溫度之差異，可見接近氣機段之中心鎖桿較易有潛變及脆化的情形；而整支中心鎖桿均可能有熱疲勞的問題。圖11 (b) 為中心鎖桿執行磁粉探傷檢查 (MT) 及超音波檢測 (UT) 的詳細情形，圖中顯示介於氣機段阻尼環與中空軸附近阻尼環之間，其超音波檢測以垂直角及斜角波檢查，其餘位置均以垂直角波檢查⁽¹⁰⁾。圖12 為輪盤應力分佈及檢查情形，圖12 (a) 顯示輪盤之最大應力主要在輪盤中心孔及

輪盤與肋骨結構銜接的部位，圖12（b）進一步顯示了檢查的細節，於上述高應力位置使用斜角波進行檢查⁽¹⁰⁾。

根據西門子公司的氣渦輪機壽命延長檢查評估標準，本年度月執行的南部電廠號機壓縮段及氣機段動葉片各級輪盤（Disc）磁粉探傷檢查及超音波檢測檢查，由於未發現任何缺陷，因此可以再運轉100,000 EOH後再執行檢查。至於中心鎖桿（Tie Rod）西門子公司除了執行磁粉探傷檢查及超音波檢測之外，通常以長度及直徑量測來了解其是否變形，基本上該公司不對其執行金相檢查或硬度測試。

Life Time Extension

The life of a component is limited!

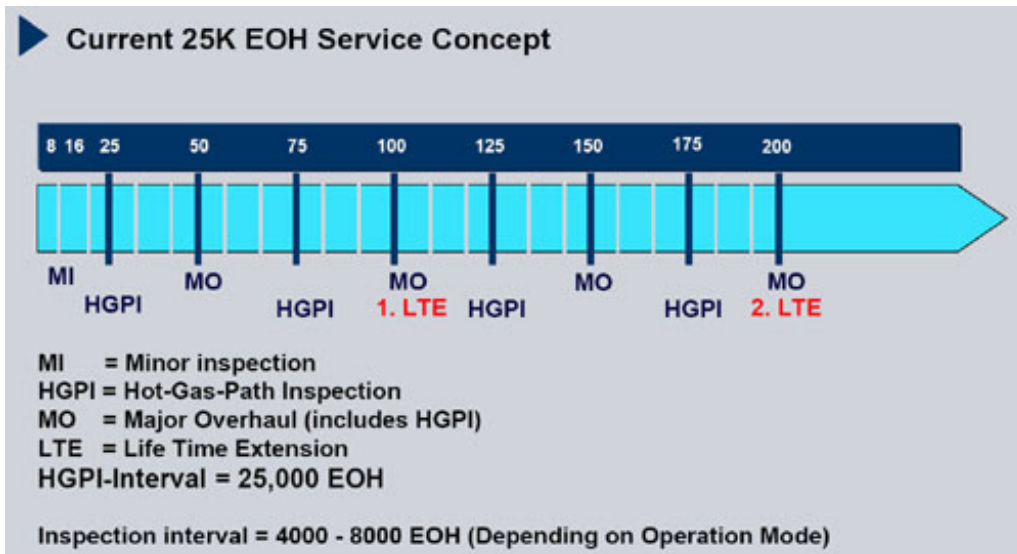
therefore → it is not a question if it fails, but when it fails.

therefore → LTE prevents a component to cause a catastrophe

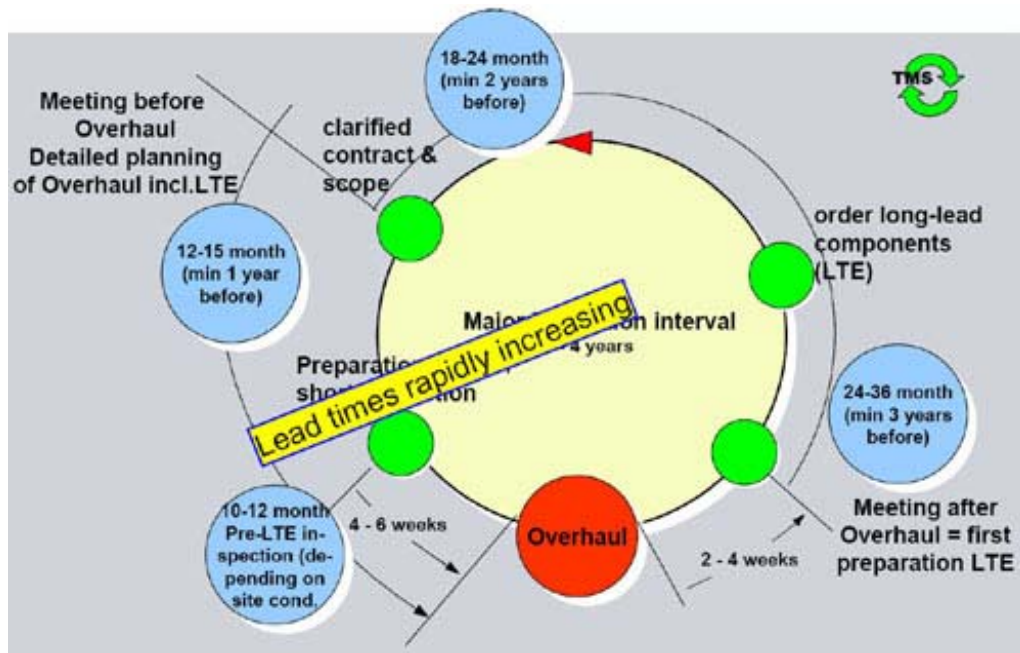
therefore → LTE stands for high availability, reliability and safety

LTE suspends high investment in new power generation equipment for years!

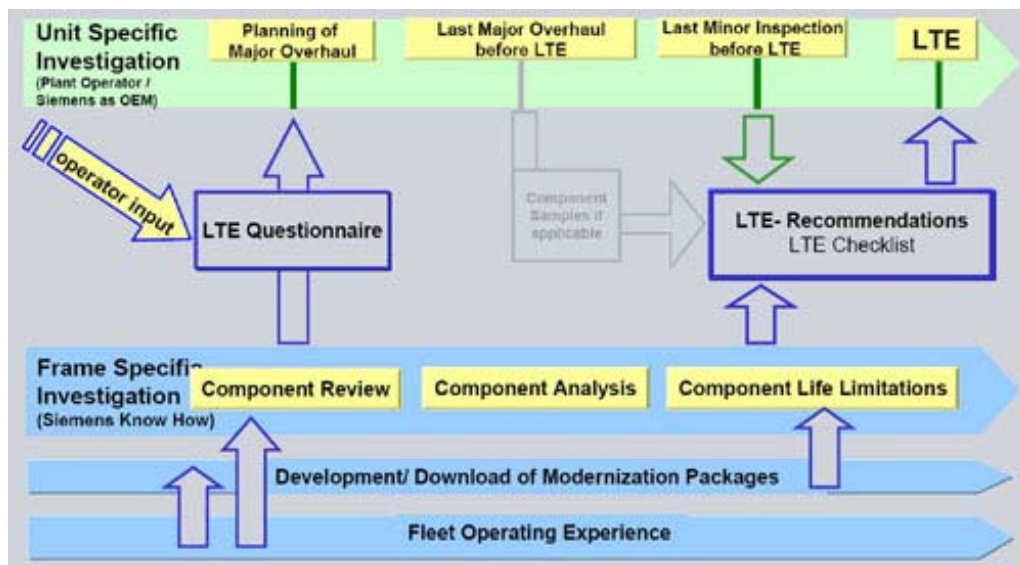
(a)



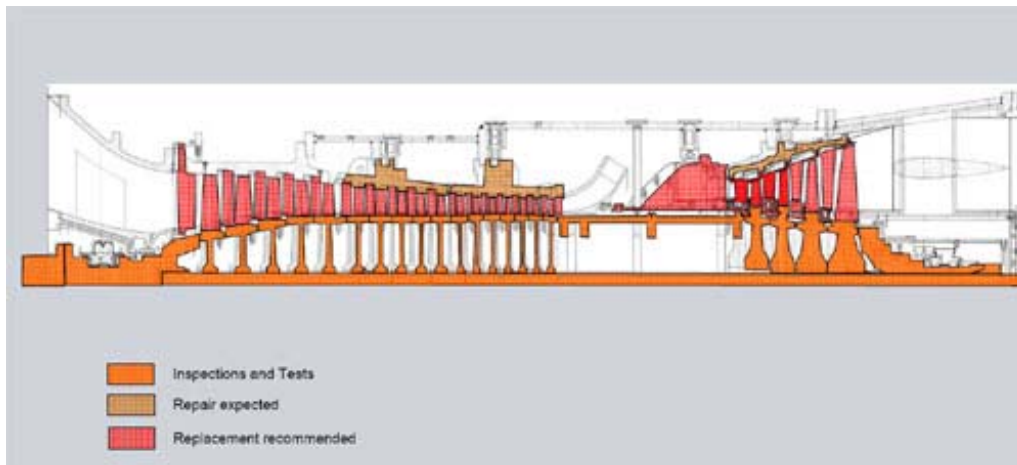
(b)



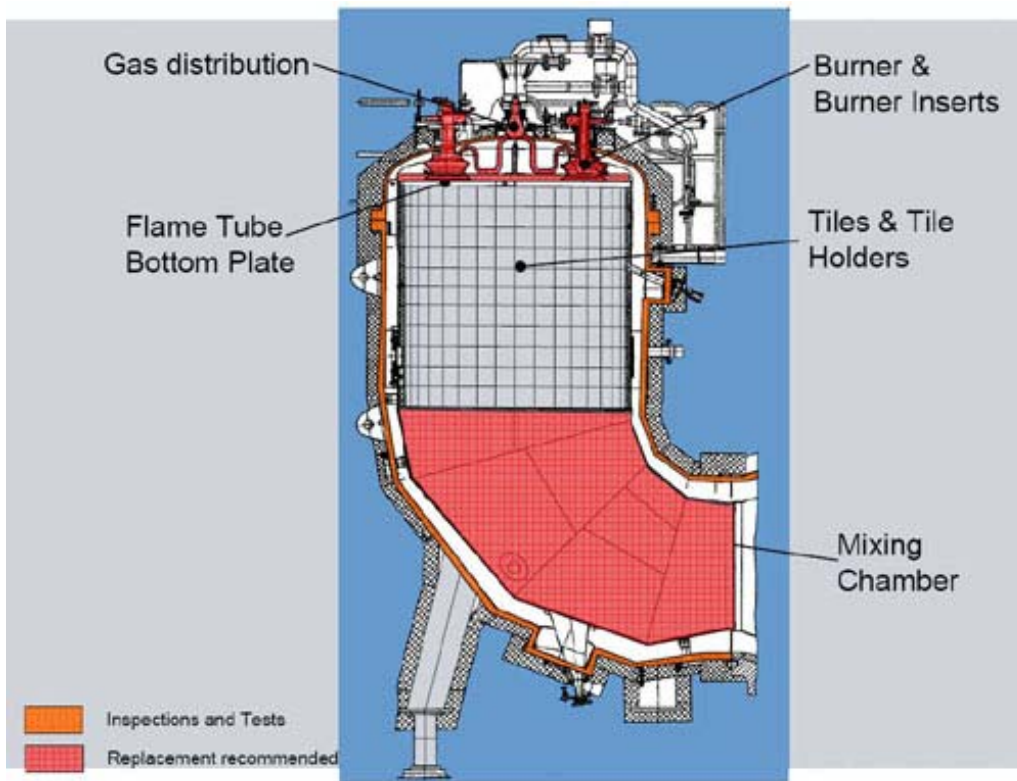
(c)



(d)



(e)



(f)

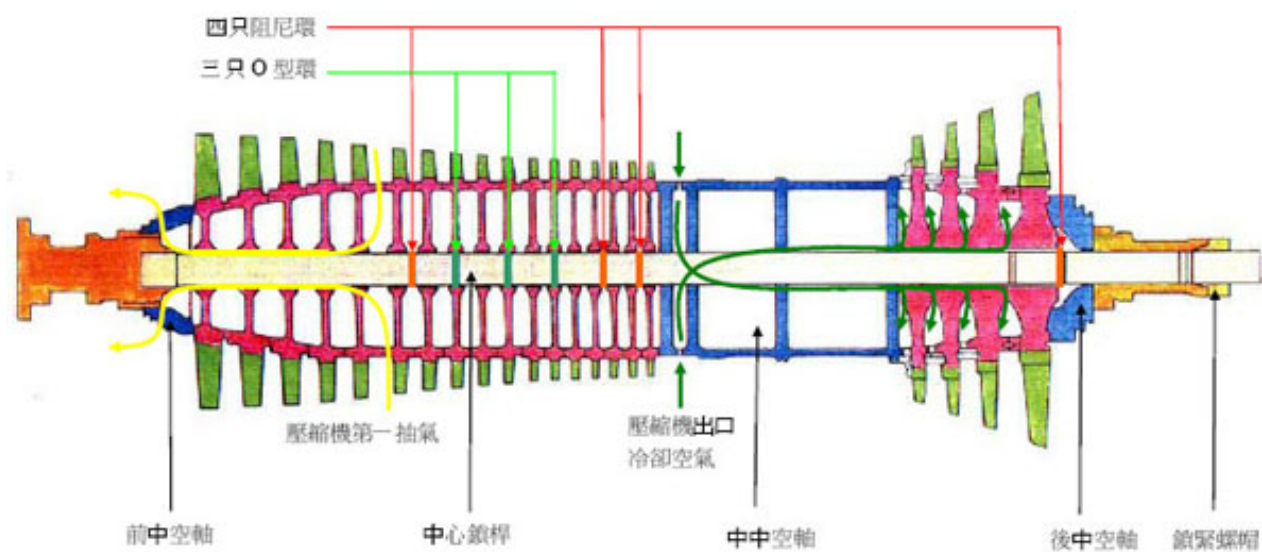
圖10 西門子公司氣渦輪機之壽命延長概念⁽⁸⁾ (a) 壽命延長之意義
(b) 各項檢查之週期 (c) 壽命延長之前置作業 (d) 設計、
運轉及檢查對壽命延長檢查之修正 (e) 轉軸之壽命延長概
念 (f) 燃燒器之壽命延長概念

表1 西門子V84.2型氣渦輪機重要組件檢查項目⁽⁹⁾

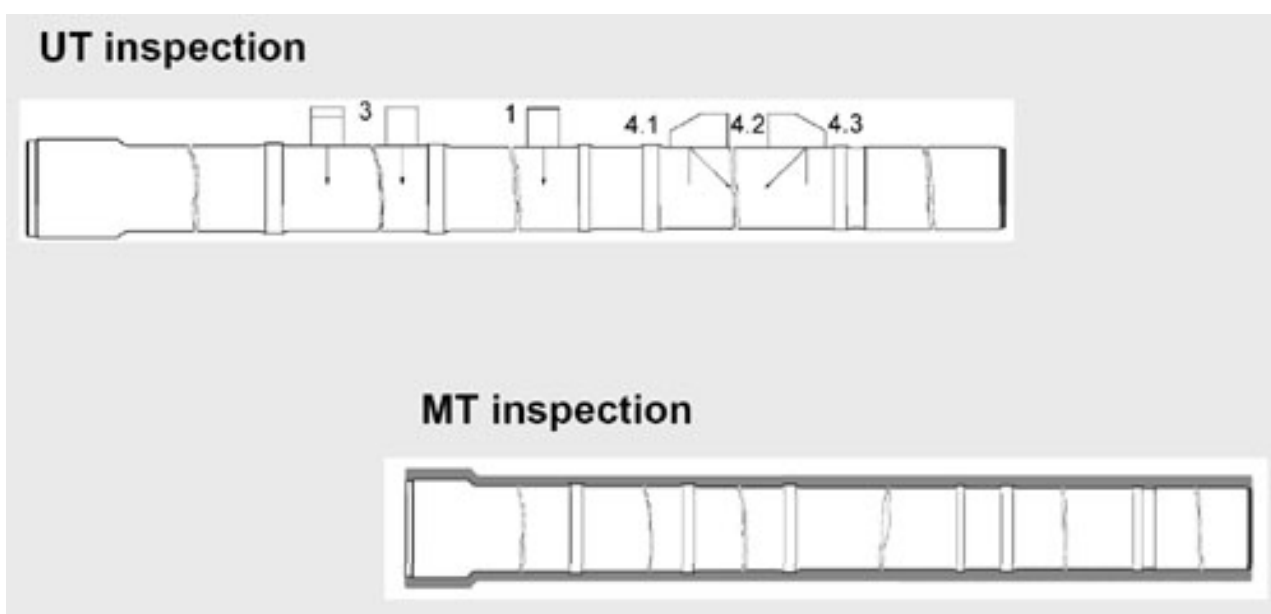
Item No.	Design group	Component	Advice	Check for
1.3	44201 - 44216	Compressor disc 1-16, blade groove, blade roots	NDT for cracks with magnetic leakage flux method acc. to TWP 1157 (MP) and TWP 1162 (MP) (only when blades are disassembled)	Cracks (v, MP)
1.4	44201 - 44216	Compressor disc 1-16, hirth serration, transitions between rib and disc head, bores for balancing and mounting	NDT for cracks with magnetic leakage flux method acc. to TWP 1181 (MP) Ultrasonic testing acc. to TWP 1182 (UT)	Cracks (v, MP, UT)
1.5	44201 - 44216	Compressor disc 1-16, areas with coplanar limiting surfaces, disc rib, hub bore hole	NDT for cracks with magnetic leakage flux method acc. to TWP 1181 (MP) Ultrasonic testing acc. to TWP 1182 (UT) and mechanized UT bore inspection acc. TWP 1188 (UT).	Cracks (v, MP, UT)
1.7	44223	Tie rod, entire testable surface	NDT for cracks with magnetic leakage flux method acc. to TWP 1181 (MP) Ultra sonic testing acc. to. TWP 1182 (UT)	Cracks (v, MP, UT)
1.8	14224	Tie rod nut, entire testable surface	NDT for cracks with magnetic leakage flux method acc. to TWP 1181 (MP) Ultra sonic testing acc. to. TWP 1182 (UT)	Cracks (v, MP, UT)
1.16	14201 - 14204	Turbine disc 1-4, hirth serration, transitions between rib and disc head, bores for balancing and mounting bores	NDT for cracks with magnetic leakage flux method acc. to TWP 1181 (MP) Ultra sonic testing acc. to. TWP 1182 (UT)	Cracks (v, MP, UT)
1.17	14201 - 14204	Turbine disc 1-4, areas with coplanar limiting surfaces and disc rib, hub bore	NDT for cracks with magnetic leakage flux method acc. to TWP 1181 (MP) Ultrasonic testing acc. to TWP 1182 (UT) and mechanized UT bore inspection acc. to TWP 1188 (UT).	Cracks (v, MP, UT)

續表1

Item No.	Design group	Component	Advice	Check for
4	Blades and vanes			
4.2	44600	Compressor blades	Replacement recommended for efficiency recovery and low risk operation. On dependence to findings one further interval (max. 133 kEOH) possible.	Cracks (v) Deposits (v) Material loss (v) Corrosion (v) FOD's (v) Damage (v)
4.1	42600	Compressor vanes	Replacement recommended for efficiency recovery and low risk operation. On dependence to findings one further interval (max. 133 kEOH) possible.	Cracks (v) Deposits (v) Material loss (v) Corrosion (v) FOD's (v) Damage (v)
4.3	12643	TLe3, entire vane	Replacement of TLe3 recommended. After metallographic investigation further operation for another MO interval (max. 133 kEOH) possible.	Metallographic investigation for changes in microstructure and corrosion of 1-2 vanes at beginning of refurbishment, closest possible to 100.000EOH



(a)

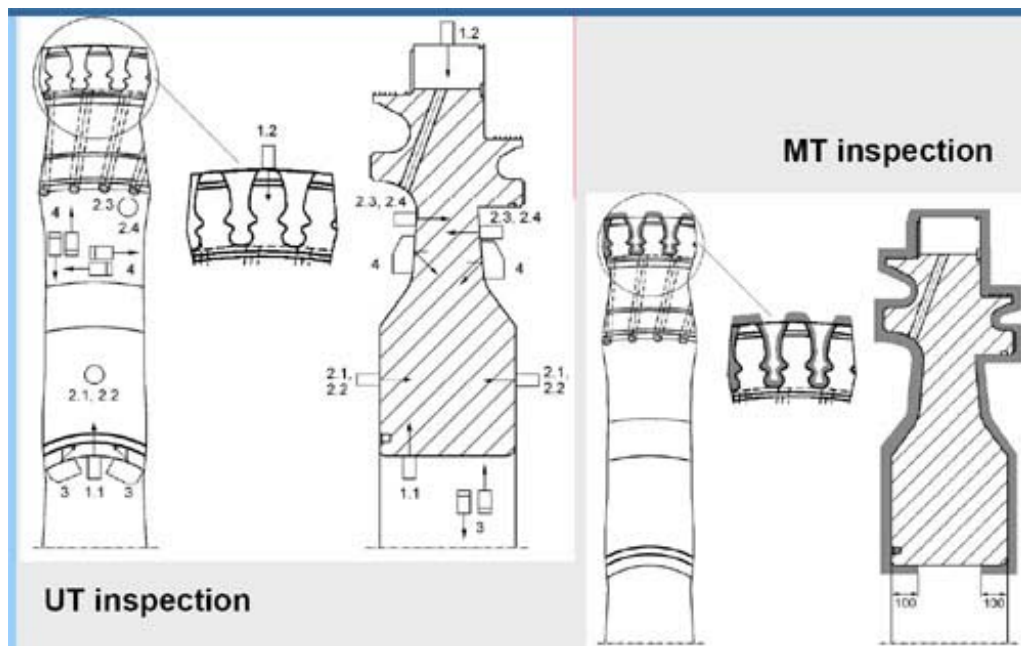


(b)

圖11 西門子V84.2轉軸及中心鎖桿檢查情形⁽¹⁰⁾ (a)組合之轉軸 (b) 中心鎖桿檢查細節



(a)



(b)

圖12 西門子V84.2輪盤應力分佈及檢查情形⁽¹⁰⁾ (a) 輪盤應力分佈 (b) 輪盤檢查細節

三、TWI 公司研習內容

TWI 公司以會員制方式將其先進材料以及加工，電子光束、摩擦以及鍛造處理，雷射銲以及薄層處理，製造支援以及弧銲，冶金、腐蝕以及表面處理，非破壞檢測，結構整合等技術的研究成果與會員分享，適用之領域涵括：航太，汽車，建造及工程，電子、光學、感測器以及醫療，設備、耗材以及材料，群體方案以及公開方案，行銷及推廣，油、瓦斯以及化學及電力等，有別於美國 EPRI 的是：TWI 公司在自有的實驗室建立了許多先進的設備，除了進行實際尺寸工件的機械測試以分析其破損原因之外，TWI 公司也開發了許多先進的銲接技術以及非破壞檢測技術，TWI 公司亦開發了一些軟體如銲接軟體、風險評估軟體及破裂力學分析軟體，其中以風險評估軟體“Risk wise”系列軟體及“Crack wise”軟體較可能應用於本公司之設備及組件的分析。本次的 TWI 公司研習，除了了解其各領域的研究成果及會員制的運作方式之外，主要的目的乃是進一步了解“Risk wise”系列軟體及“Crack wise”軟體，並評估其是否適用於公司機組的風險評估及破裂分析。

3、1 TWI 公司研究成果

TWI 公司持續於各領域如先進材料與加工，電子光束、摩擦、及鍛造，雷射及薄板加工，製造支援及弧焊加工，冶金、腐蝕及表面處理，非破壞檢測測試，結構的整合等進行研究⁽¹¹⁾。其中以銲接方面成果最豐，舉例來說其 2005 年的 10 個顯著的技術成就包括：銲材的疲勞性能改善，銲材沿晶應力腐蝕龜裂，陣列導

波檢測，雷射銲接，電子束熔接，雷射金屬鍍膜，冷銲偵測，摩擦銲接，陰極保護塗層等⁽¹¹⁾。茲摘要說明上述研發成果：

- 1、不銹鋼銲接的疲勞性能改善技術 (Fatigue improvement techniques for stainless steel welds)：TWI 以及數個 TWI 歐洲的夥伴成功的完成改善銲接不銹鋼疲勞性能檢測方法之重要合作計畫。這個工作評定了現有的方法，例如：製程選擇或後銲改良技術，改良不銹鋼角銲的疲勞性能以及驗證了四種檢測技術-研磨、惰性鎢極電弧銲法、滲碳修整以及超音波衝擊方法，都能顯著的改良角銲的疲勞性能。
- 2、防止超級麻田散鐵不銹鋼銲接沿晶應力腐蝕龜裂的短時間熱處理 (Short heat treatment to avoid intergranular stress corrosion cracking of supermartensitic stainless steel welds)：超級麻田散鐵不銹鋼環縫銲接熱影響區域的沿晶應力腐蝕龜裂對廣泛用在管路的材料而言是相當大的障礙。5 分鐘攝氏 650 度感應焊後熱處理並且證實了能夠防止超級麻田散鐵不銹鋼環縫銲接的腐蝕敏感性。利用包含 12%的鉻，非常低度的碳以及各種比例的鎳以及鉬，使用各種銲接製程及填充金屬來銲接一系列超級麻田散鐵管路。每個案子在熱處理之後都沒有發現沿晶應力腐蝕龜裂。
- 3、聚焦於天線陣列導波檢測 (Focused phased array guided wave inspection)：TWI 已經與美國的賓州州立大學以及 FBS Inc. 在接合發展工作上，發展了可用在現場對管道的目標檢測執行聚焦導波測試的方法。比較新穎的方面是焦點參數的計算的方法，可以算出導管直徑、厚度及軟體的生產力，所以作業員可以在現場得到這些參數。要達到這些，在管子周圍的變壓器必須分成幾個部份，提供不同的時間延遲才能夠在特定的周圍位置產生焦點，這樣便能夠掃描到定義的區域。

- 4、在 Nd-YAG 雷射與光纖雷射組成的鈦中做高品質的焊接 (High quality welds in titanium made with Nd:YAG and fibre lasers)：首先，發展了以光纖傳遞雷射光束的製程，提升了鈦合金方面的焊接品質，符合航太產業的需要。材料厚度介於 2 公釐到 6 公釐的全熔滲銲接，經由控制鎖眼的穩定性來產生多孔性低且可再生的程度。多孔性的程度及其他的銲接品質標準，例如：清潔、外觀、凹槽以及剖面已經順利的被評定為三個分別的航太熔解銲接最嚴厲的標準。
- 5、龜裂敏感合金的電子束熔接 (Electron beam welding of crack-sensitive alloys)：為提升航太引擎的效率需要使用高溫合金，但是在銲接的時候，很多高溫合金都會產生龜裂。因此設計時在高溫下只容許很少的龜裂，但是在銲接溫度達到時這些材料常常顯現脆性。電子光束的高速繞射技術能將應力作最佳化的配置，並且消除龜裂。在做銲接的時候，光束繞射可以在銲線邊緣形成熱補銲，將應力重新分配。這個技術已經證實非常有效，能夠銲接原本不能夠銲接的材料。
- 6、使用雷射直接金屬鍍膜來維修零件 (Component repair using laser direct metal deposition)：雷射直接做金屬鍍膜製程已經成功的用在 Rolls-Royce plc 航太引擎零件複雜的維修上。直接金屬鍍膜被用在加工能力的認證上。複雜精細的鎳基超合金粉末沉積成壁厚四公釐高，0.3 公釐厚的細晶格結構。製程的適應控制被用在保持壁網格交叉點沉積的高度常數。這個壁厚能力是獨家的。沉積的品質對實體應用來說非常的關鍵。實際的引擎測試已經證實了雷射直接金屬鍍膜維修加工能夠符合使用上的品質需求。這個維修技術是專利製程，已經成為 Rolls-Royce 的專利。
- 7、在電熔接合中偵測冷銲 (Detection of cold welds in electrofusion joints)：在聚乙烯管電熔接中最難偵測到的裂縫是經由焊接中加熱不足產生冷銲所造

成的裂縫，這點仍能通過系統壓力測試，但是會減少強度且將在脆化的方式下故障導致洩漏。TWI 已經發展了做這種檢測的天線陣列超音波系統及偵測冷鐸的方法，這個方法是基於使用天線陣列超音波可以偵測到影響區邊緣的論據，因此可以將影響區的寬度與優良品質接合的值相比較。

- 8、高強度鋼鐵的摩擦鐸接 (Friction stir spot welding of high strength steels)：一系列汽車、其他運輸工業及一般鋼鐵結構設施的高強度鋼摩擦鐸接的可行性已經得到證實。使用多晶體氮化硼、耐火金屬及一系列低成本的陶瓷工具材料完成鐸接測試，在產生高強度的鐸接方面已經有很顯著的成功。評估工具的壽命，甚至一些便宜的工具材料也都能夠超出 500 處鐸接點，僅僅只是該工具材料特性略為下降。
- 9、用在鎢極惰性氣體保護鐸的低成本活性鐸劑 (Low-cost activating flux for TIG welding)：TWI 已經發展了一種活性鐸劑，該鐸劑能使用刷子或是噴塗藥水基黏貼，黏貼方式簡單並且能夠立即流動，鐸接成本估計每公尺少於台幣 6 元，這個組成沒有毒性、不含鹵化物及氟化物。其流動的特性、包含鐸接穿透的深度，與代用的商業流體很類似。不銹鋼管道鐸接證實了可以鐸到 4 公釐壁厚，使用活性鐸劑鐸管最主要的利益在於需要的鐸接電流很低，可以減少鐸頭的作業時間及增加生產力。
- 10、改善雙相不銹鋼在海水環境中陰極防護的複合塗層 (Composite coatings for improved cathodic protection of duplex stainless steels in seawater environments)：複合塗層已經成功的發展，有潛力能夠提供雙相不銹鋼陰極保護來防止在升高溫度的海水中造成腐蝕，並減少氫脆及氫導致應力龜裂的危險。腐蝕測試顯示的可以訂作塗層來防止腐蝕的發生，足夠防止雙相不銹鋼接觸到氫氣。相對之下，傳統的熱噴塗塗層造成更負面的腐蝕可能性，會在鋼的

表面產生氫並且造成氫脆化。

除了上述的研究領域之外，TWI 在非破壞檢測方面的成果也非常豐碩⁽¹¹⁾，茲列舉遠距離超音波、熱影像及雷射光成像等列舉其原理及成果：

1、長距離超音波監測 (Long Range Ultrasonic Condition Monitoring)：如圖 14 (a) 所示的一段管線，於左側管材上方為方便探頭檢查之處，右側遠端有一個法蘭，介於探頭檢查處與法蘭之間，此段管材有整圈的銲道，另外在管下方較遠離探頭處則有材料減損 (Metal Loss) 的局部薄化現象。一般的超音波探頭及技術只能檢測該探頭附近的區域，如圖 14 (a) 上方之圖例所示之紅色區域，對於圖中銲道、法蘭及材料減損等處皆無法檢測；如果應用 TWI 公司開發之 “Guided Wave Transducers”，則圖 14 (a) 下方之圖例所示紅色區域內的缺陷都可由原先方便探頭檢查之處檢測之。根據 TWI 公司之經驗：遠距離超音波檢測的有效距離至少達 30 公尺以上，甚至可達 100 公尺，如圖 14 (b) 等長距離的鐵軌、石油管線、石油鑽探平台及橋樑均可應用此遠距離超音波檢測技術以提高時效⁽¹¹⁾。

2、熱影像 (Thermography)：如圖 15 (a) 所示應用兩個光源使內含一定大小缺陷的材料發出紅外光，藉由紅外光照相機及成像技術，則可以顯示出材料內部的缺陷大小⁽¹¹⁾。

3、雷射光剪應力圖像 (Laser Shearography)：如圖 15 (b) 所示應用兩個雷射激發光源，使受一定大小應力及應變的材料發光，然後藉由成像技術，顯示材料所受的應力及應變的參次元分佈圖形⁽¹¹⁾。

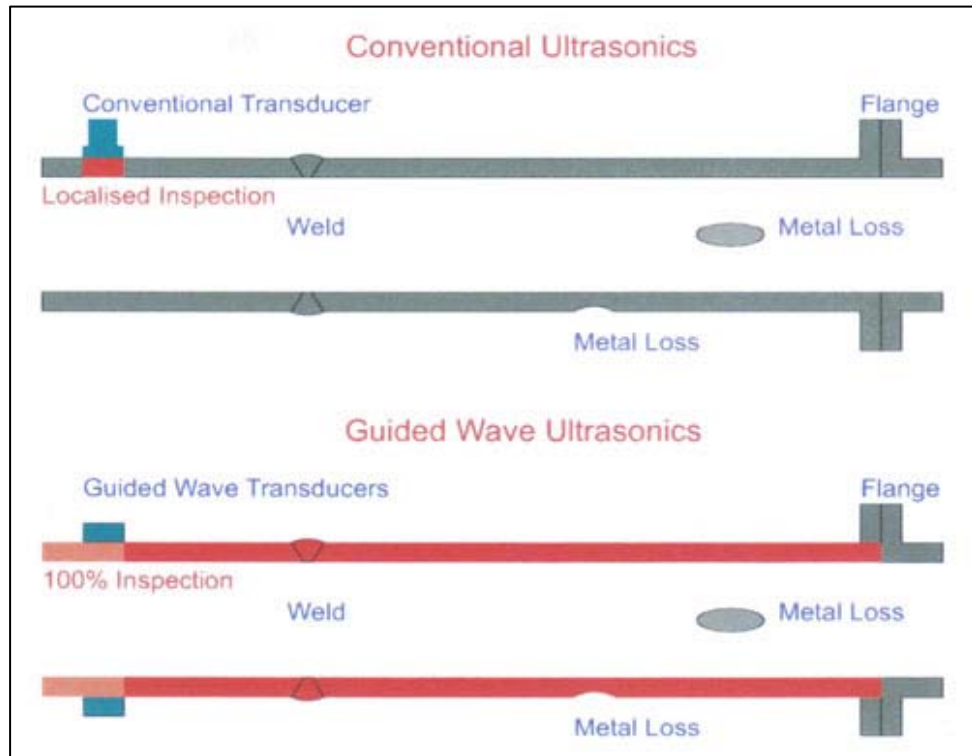
另外，TWI 也嘗試用許多種非破壞檢測技術，包含相位陣列式等各種形式超音波、等各種形式陣列式等各種形式渦電流法、洩聲射音等以及前述的熱影像及

雷射光剪應力圖像等，最後成功以相位陣列式超音波及陣列式渦電流法將一段產生了樹根狀應力腐蝕裂縫的不銹剛板材的裂紋成像⁽¹¹⁾，其裝置情形及裂縫金相組織照片示於圖 15 (c)。

TWI 公司自 2001 年起共計贊助或參與共 33 個大型的非破壞檢測研究，其總金額超過 30 億台幣，其中 TWI 出資達 8 億台幣⁽¹¹⁾。表 2 為 TWI 2001 年起參與的合作專案或自力進行的研究案之研究題目及其總金額與 TWI 出資額度，TWI 與其他共同研究者可以享有這些成果，並且 TWI 可以其會員分享這些研究成果。

TWI 公司亦開發了一些軟體如銲接軟體、風險評估軟體及破裂力學分析軟體，其中以風險評估軟體“Risk wise”系列軟體及“Crack wise”軟體較可能應用於本公司之設備及組件的分析，“Risk wise”系列發行了“Risk wise for Boiler” “Risk wise for Pipe” “Risk wise for Gas Turbine”，可分別應用於公司之鍋爐、管件及氣渦輪機機組⁽¹¹⁾；至於“Crack wise”軟體則可廣泛應用於各種型式的銲接件的破裂力學的量化方面的分析⁽¹¹⁾。上述各軟體的功能也在本次的研習範圍內。

(a)



(b)

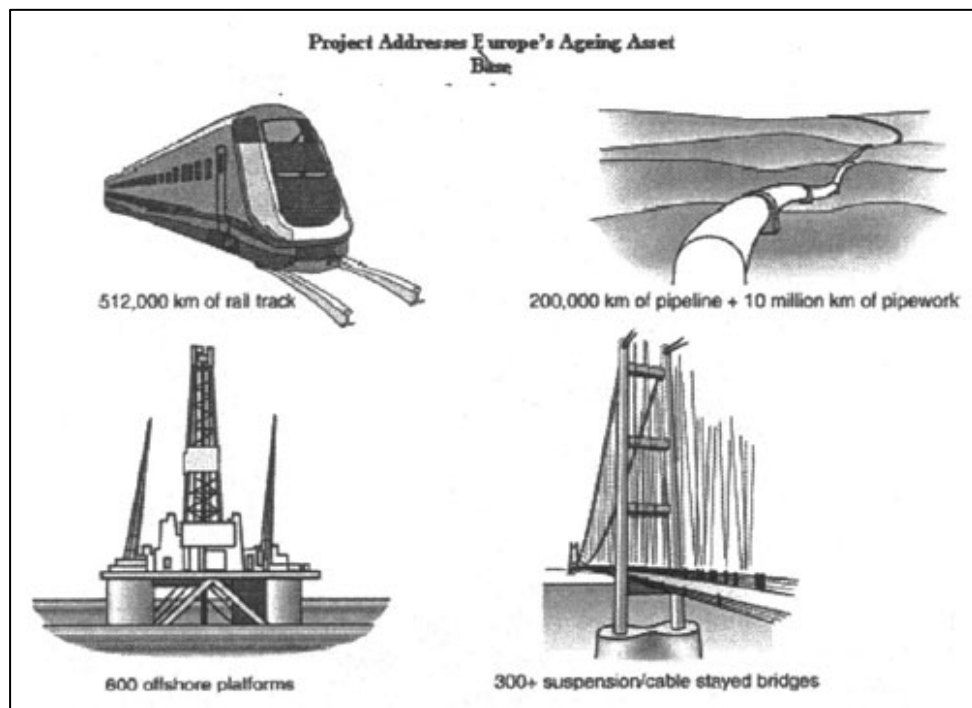


圖13 遠距離超音波技術原理⁽¹¹⁾ (a) 基本原理
(b) 實際應用案例

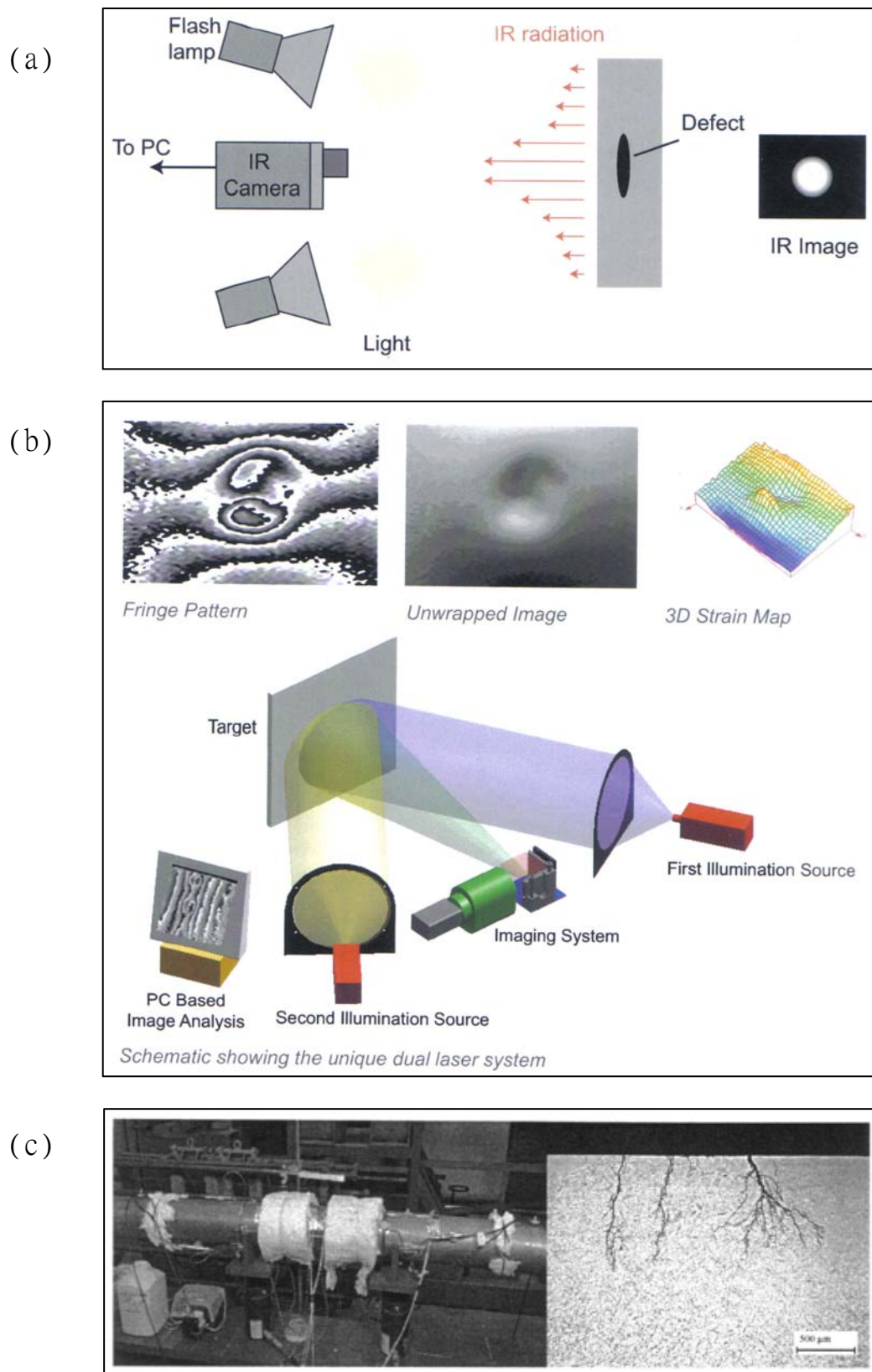


圖14 各種技術成像原理⁽¹¹⁾ (a) 熱影像 (b) 雷射光成像
(c) 應力腐蝕裂紋偵測

表 2 TWI 2001 年起參與之合作專案或自力進行之研究案⁽¹¹⁾

Title	Status	Type of project	Total value of project	TwI's share
Section 1 Autonomous robotic system for the inspection of mooring chains that tether offshore oil and gas structures to the ocean floor <i>Acronym: Chain test</i>	Started in September 2005	2 year EC sponsored CRAFT project	£1.2M	£315k
Section 2 Corrosion reliability inspection scheduling <i>Acronym: CRIS</i>	Completed in 2003	3 year Industrial Group Sponsored Project	£361k	£113k
Section 3 The use of finite element analysis as a tool to guide the development of state of the art guided wave inspection technology <i>Acronym: FEA modelling</i>	Started in January 2001	Group Sponsored Project	£242k	£242k
Section 4 Development of novel digital radiography technology. To facilitate the traditionally less research intensive inspection industry sector change from manual film radiography to automated digital radiography <i>Acronym: Film Free</i>	Started in October 2005	4 year EC sponsored integrated project	£5.8M	£1.04M
Section 5 Non-Intrusive In-service Inspection Robotic System for Condition Monitoring of Welds inside Floating Production Storage and Off-loading (FPSO) Vessels <i>Acronym: FPSO-Inspect</i>	Started in December 2004	2 year EC sponsored CRAFT project	£1.3M	£409k
Section 6 Development Of Computed Radiographic Procedures To Replace Film Based Radiography For Defect Detection In Welds And Castings <i>Acronym: GSP-DR</i>	Completed in January 2006	Group Sponsored Project	£210k	£210k

續表 2

Section 7 Inspection of Stainless Steels for Stress Corrosion Cracking <i>Acronym: GSP-SCC</i>	Completed in April 2006	Group Sponsored Project	£275k	£275k
Section 8 Intimate detail – the detection of 'kissing bonds' in FSW <i>Acronym: GSP-FSW</i>	Started in July 2003	Group Sponsored Project	£240k	£240k
Section 9 In-Situ Inspection of Ships' Hulls <i>Acronym: Hull Inspector</i>	Started in November 2004	2 year EC sponsored CRAFT project	£1.3M	£373k
Section 10 Long Range Ultrasonic Condition Monitoring of Engineering Assets <i>Acronym: LRUCM</i>	Started in October 2005	3 year EC sponsored CRAFT project	£2.8M	£674k
Section 11 Radiography of Magnesium Castings <i>Acronym: MAGCAST</i>	Completed in April 2004	2 year EC sponsored CRAFT project	£1.	£351k
Section 12 Development of Comprehensive In-line Quality Control System for Printed Circuit Board Assemblies <i>Acronym: MICROSCAN</i>	Completed in November 2006	2 year EC Sponsored CRAFT project	£1.2M	£457k
Section 13 A good look around – ultrasonic and eddy current NDT in welded aero parts <i>Acronym: MMFC</i>	Completed in 2005	4 year EC sponsored CSG project	£6.6M	£251k
Section 14 Defects in composites – Nanoscan gets under the skin <i>Acronym: NanoScan</i>	Completed in January 2005	2 year EC sponsored CRAFT project	£1.4M	£451k
Section 15 In-situ Inspection for offshore structures <i>Acronym: OPCOM</i>	Started in June 2008	3 year EC sponsored STREPS project	£1.8M	£750k
Section 16 In-situ Condition Monitoring of ASTs Without emptying <i>Acronym: Piezodiagnostics</i>	Completed in February 2005	3 year EC sponsored CSG project	£2.1M	£175k
Section 17 Inspection for Corrosion in Inaccessible Areas <i>Acronym: Pipescan</i>	Started in March 2004	2 year EC sponsored CRAFT project	£1.4M	£453k

續表 2

Section 18 Inspection and Acceptance Criteria for Electrofusion Joints in Polyethylene pipe <i>Acronym: Polytec</i>	Completed in May 2006	2 year EC sponsored CRAFT project	£1.3M	£406k
Section 19 the novel way to monitor robotic and flexible FSW systems <i>Acronym: Qualistir</i>	Completed in November 2003	2 year EC sponsored CRAFT project	£1.4M	£369k
Section 20 Inspection of Wind Turbine Blades <i>Acronym: RENEWIT</i>	Started in September 2005	2 year EC sponsored CRAFT project	£1.3M	£426k
Section 21 Development of new and novel low cost Robot Inspection Methods for in-service Inspection of Nuclear Installation. <i>Acronym: Rimini</i>	Started in January 2005	2 year EC sponsored CRAFT project	£1.3M	£269k
Section 22 Development of an Ultrasonic Guided Wave Testing System for the Critical Examination of Sub-sea Risers, including Steel Catenary Risers (SCRs) and Flow Lines <i>Acronym: RiserTest</i>	Started in November 2005	2 year EC sponsored CRAFT project	£1.3M	£331k
Section 23 Robotic Inspection of aircraft structures <i>Acronym: Robair</i>	Completed in October 2003	2½ year EC sponsored CRAFT project	£1.3M	£302k
Section 24 In-Situ Inspection of Above-ground Storage Tanks <i>Acronym: Robot Inspector</i>	Completed in July 2004	2 year EC sponsored CRAFT project	£1.3M	£373k
Section 25 Optimisation of Digital Radiography <i>Acronym: Saferay</i>	Started in January 2005	2 year EC sponsored CRAFT project	£1.3M	£373k
Section 26 Quality Assurance and Structural Evaluation of GRP Pipes <i>Acronym: Sure2GriP</i>	Started in February 2005	2 year EC sponsored CRAFT project	£1.28M	£363k
Section 27 Condition Monitoring of Large Oil and Chemical Storage Tanks using Ultrasonic Guided Wave Tomography without the Need to Empty and Clean the Tanks <i>Acronym: TankInspect</i>	Completed in September 2005	2 year EC sponsored CRAFT project	£1.3M	£468k

續表 2

Section 28 NDT during manufacture – Time of flight diffraction shows the way <i>Acronym:</i> <i>TOFDPROOF</i>	Completed in April 2005	3 year EC sponsored CSG project	£1.22M	£103k
Section 29 WIDEM-Wheelset Integrated Design and Maintenance <i>Acronym: WIDEM</i>	Started in January 2005	2 year EC sponsored CRAFT project	£1.84M	£236k
Section 30 The Development of Next Generation Long Range Ultrasonic Guided Wave. Testing Systems	Started in 2001	3 year project sponsored from internal and external sources	£380k	£380k
Section 31 Development of Computed Radiographic Procedures to Replace Film Based Radiography for Defect Detection in Welds and Castings	Started in July 2003	2 year Group Sponsored Project	£240k	£240k
Section 32 Inspection of Single- sided Girth Welds	Completed 2002	2 Year group sponsored project	£165k	£165k
Section 33 TWI Development Centre for Advanced NDT	Started in January 2004	3 Year project sponsored by European Regional Development fund and Welsh Development Agency	£5.5M	£2.75M
TOTAL VALUE OF PROJECTS			£53.08M	£14.773M

3、2 TWI 公司會員服務

TWI公司在全球50個國家有超過3000個組織加入其會員組織⁽¹¹⁾。經詢問，以50人以內之組織為例，欲加入其會員組織約需年繳台幣70餘萬元（其中的20%會分配到預付諮詢費和圖書館服務。）。TWI的會員可以得到下列的免費服務：獲得技術上的建議，使用專業圖書館、搜尋和資訊服務，收到TWI專門技術名錄，收到機密研究專案最新報告，線上進入TWI知識資料庫，收到包括Bulletin、Connect和Contact等TWI刊物⁽¹¹⁾。此外，會員可以以極少的費用參加業界部門會議、專題研討會、會議和研討班，購買TWI開發之軟體或參加其訓練課程亦有折扣。再者會員可以透過參加其單一贊助專案、團體贊助專案或合作專案，依出資及參與原則獨享或分享研發成果⁽¹¹⁾。以下列舉其中幾項進一步說明：

- 1、技術調查服務：調查可以藉由電話、信、傳真或電子郵件，我們的工作人員將會立即給您回覆。根據我們現有知識而可以快速回覆的技術調查是免費的。較複雜的調查可由貴公司的預付諮詢費支付。
- 2、TWI專門技術名錄，即Who Knows名錄：“Who Knows”是一本列有各個技術領域專家的名錄，提供了印刷版本和網路下載，TWI有400個技術人員、昂貴的設施及豐富的研發經驗為後盾。
- 3、圖書館和資訊服務：會員享有無限次使用TWI資訊服務的權利。除了影印和文獻搜尋之外，其餘是免費的。設備包括借出服務、影印服務和使用包含銲接檢索的專業資料庫。另外提供了各式各樣的參考文獻，例如公司資訊、銲接消耗品和設備的貿易文獻、國民和國際水準資訊及技術文獻。
- 4、搜尋和資訊服務：JoinIT是TWI在材料接合技術方面，以網路為基地所做的資訊和建議服務。會員可免費無限使用。在網路上註冊可得到密碼以獲取TWI進

一步的資訊。JoinIT被設計為藉由立即取得大範圍的技術資訊，例如：經常問題、知識摘要、最佳練習指南和toolkits來提高效率。

- 5、機密研究報告：會員可免費使用千萬英鎊核心研究專案產生的TWI機密研究報告。印刷影本可以由圖書館或線上取得，許多正本已提供。
- 6、拜訪TWI：會員可無限次拜訪TWI和附屬公司實驗室。技術設備可以帶進TWI和相關專家團隊面對面討論。會員公司也可以安排公司日參觀TWI現場並查看其大規模的設備。如果需要亦可結合技術會議，進一步資訊需連絡會員服務部。
- 7、TWI技術刊物：Bulletin是只提供給會員的技術雙月刊。內含TWI核心研究專案的報告摘要。Connect是提供TWI資訊、即將到來事件的消息、最佳練習和新發展結果的雙月業務通訊。每種刊物會員皆可免費擁有無限量的影本。Bulletin和Connect可在網路上取得。Contact影本和TWI VCD免費送至官方代表。
- 8、現場諮詢及專案支援：TWI可以安排專家到您的現場做諮詢。TWI會提供涵蓋成本的書面報價單。依會員喜好預付諮詢費可以用來抵消成本。諮詢視察結果對贊助公司而言屬機密性。支援的內容涵括：在材料和過程選擇方面提供建議，在設計和組裝方面提供建議，建議所有非破壞檢測方面的優點，包含有中斷和缺陷的工程關鍵評估，維修和矯正量測的技術能力，現場調查及故障分析。

TWI的“Who Knows”，即專門技術名錄，有先進材料以及加工，電子光束、摩擦以及鍛造處理，會員服務，雷射銲以及薄層處理，製造支援以及弧銲，冶金、腐蝕以及表面處理，非破壞檢測，結構整合等八大類技術群及經理人服務，其領域涵括：航太，汽車，建造及工程，電子、光學、感測器以及醫療，設備、耗材以及材料，群體方案以及公開方案，行銷及推廣，油、瓦斯以及化學及電力等領域至少400位專業工程師協助技術調查服務、現場諮詢及專案支援⁽¹¹⁾。

3、3 氣渦輪機組件損傷之危害評估

為確保電廠機組安全且可靠地運轉，必須依賴一定週期下大小規模的檢查，再配合壽命評估延長的工作，以便及時準備並更換組件或備品。西門子公司的作法是：除了可鉚補或依據檢查結果決定更換時機的組件外，有部份組件在一定的時間內即需更換。本所目前的研發方向是希望除了可鉚補的組件以外，對其餘組件發展更具可靠度的評估方式，可以更先期發現缺陷；同時也不受限於原廠所定的更換時機而可以繼續使用。TWI公司所發展的Risk Wise系列軟體及Crack Wise軟體在某方面而言正符合綜合研究所的研發概念，前者旨在將較安全或不緊要的組件檢查週期延長，並且提升對安全有關或重要組件的殘餘壽命的可靠度，並進一步提出更有效的檢查週期；後者則對於已發生裂紋之各種接合型式的組件作更精確量化的安全評估。以下介紹此二系列軟體之概念及分析步驟。

風險評估軟體（Risk Wise）的基本概念就是期望透過適當的軟體進行分析及計算，將設備或組件的檢查週期拉長或維修時間縮短以降低維修耗費，並且提高機組或組件的可靠度，如圖15（a）所示。程序上必須先由使用者輸入機組基本性質資料或檢查結果、損壞機制、損壞可能性及其損傷程度等，以期得到組件風險、殘餘壽命、最佳化檢查方式及最佳化檢查週期等，如圖15（b）所示。然後根據發生損壞的可能性及其損傷程度得到風險評估矩陣，如圖15（c）所示，進一步得到殘餘壽命及檢查週期等訊息⁽¹²⁾，如圖15（d）。

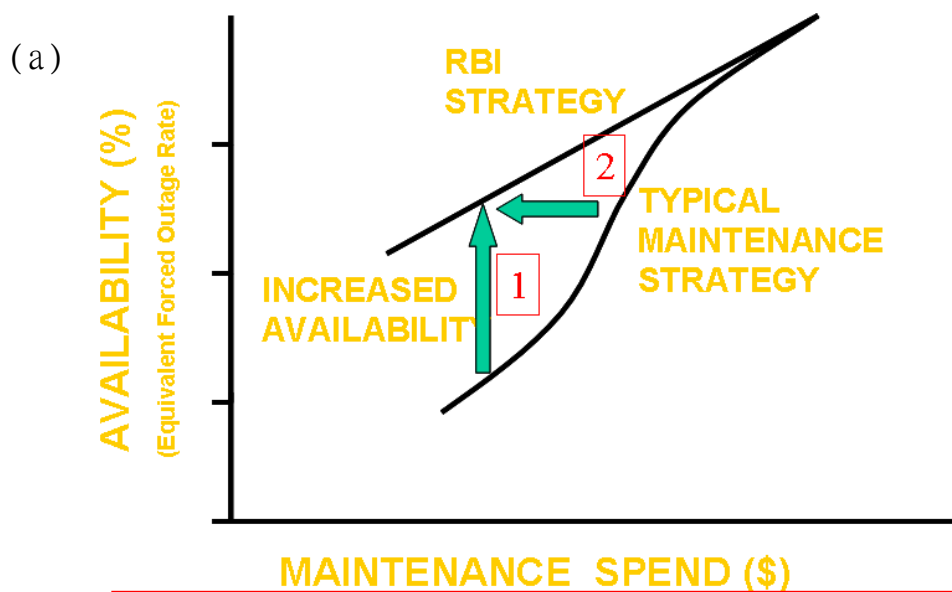
以Risk Wise for Boiler為例，圖16（a）為基本性質輸入畫面，包括材質資料、設計條件及操作條件等，圖16（b）為檢查方式的輸入畫面，有目視檢查、液滲檢查、超音波檢查及渦電流檢查等可以點選，圖16（c）為損壞機制的輸入畫面，有材料損耗（Metal Loss）、氧化（Oxidation）、環境損傷（Environment Damage）

及機械 (Mechanical) 因素等等可以點選，圖 16 (d) 為可能的危害之嚴重程度，有非常好，很穩定，正如預期或接近設計限制等損傷程度可以點選，並且有低能量釋放，單獨效應，混合效應及數個主要設備等危害程度可以點選。圖 16 (e) 則得到機組或組件的風險評估矩陣及個別組件的殘餘壽命值，例如飼水系統因氫脆化損傷所致已無殘餘壽命；而汽鼓則只受一般及局部的腐蝕，而仍有 48 個月的殘餘壽命，最後，該軟體會給出檢查週期之建議，並特別點出殘餘壽命較正常檢查週期為低者，如圖 16 (f) 所示⁽¹²⁾。基本上 Risk Wise for Gas Turbine 的程序及原理也和 Risk Wise for Boiler 類似，只是組件不同，基本性質與損傷機制有所不同而已。

Crack Wise 軟體主要是針對各種形式的銲接件的破壞進行量化的分析，如圖 17 (a) 所示之銲道，除根據破裂力學考慮其裂縫型狀、裂縫尖端塑形區、破裂模式等，軟體並且考慮材料銲接的品質所導致的局部應力形式，例如圖中左右兩片板材是否同一平面或形成夾角、兩片厚度一致的板材是否是在同一平面或者產生高度差，均會導致板材不同側之拉應力或壓應力，這些均於分析軟體中加以考慮。圖 17 (b) 顯示 Crack Wise 軟體主要依循 BS7910 規範，根據材料性質、組件形狀因素及應力三大因素，針對材料疲勞及破裂進行分析。圖 17 (c) 顯示材料破裂的分析，於左半示意圖，乃是先進行已知變因的分析，再進行臨界變因的分析，再進行敏感性變因（例如裂縫長度、形狀等）的分析，最後將臨界變因及敏感性變因的影響合為一條曲線，例如材料所受應力大小與裂縫張開位移的關係，至於材料疲勞則以受疲勞應力作用下，隨時間之增長裂縫長度的增長。圖 17 (d) 為前述將材料破裂的臨界變因及敏感性變因合併的曲線，顯示一定的材料裂縫尖端張開位移下，材料所能承受的最大應力值。圖 17 (e) 為前述材料疲勞的曲線，顯示特

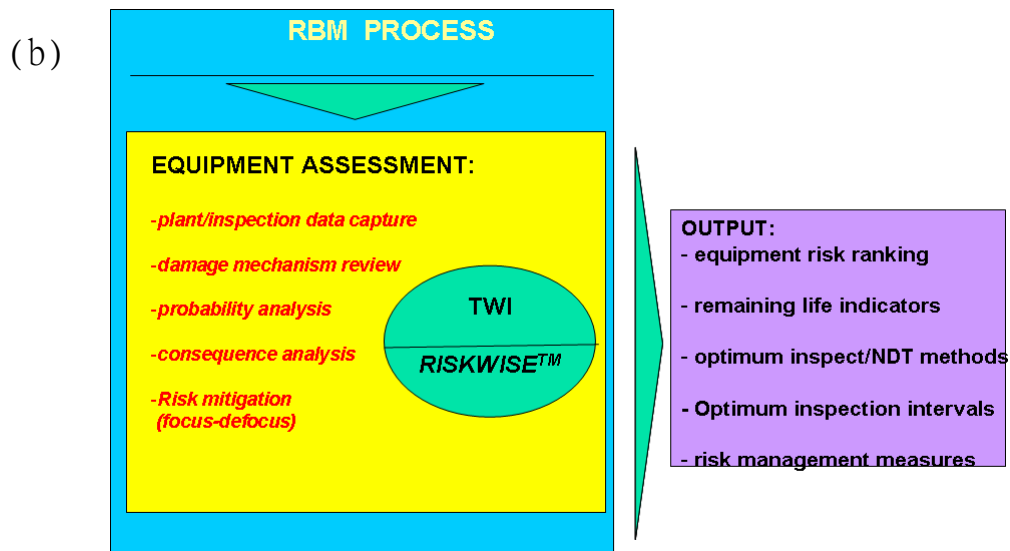
定受力的情形下，材料裂縫長度隨時間增長而增加的情形，由圖中可見當一有效臨界裂縫長度（以本圖例約為 0.27mm）發生時，隨時間增長材料裂縫長度於初期增長較緩；然而隨時間增長材料裂縫長度於末期增長非常快速，終致破裂。圖 17（f）顯示此一軟體可分析各種規格的材料，如實心圓棒、管材、棒材及材料的各種銲接形狀，裂縫的型態則有由圓棒外部單側發展、由棒材外部單側或內部發展，另外各種銲接形狀之各種方向產生的裂縫亦可分析。

基本上 Risk Wise 系列軟體之評估較初略，但方便於工作人員快速得到概略的機組及組件風險評估及殘餘壽命，可以修正檢查計劃並節省不必要並提高可靠度，可以幫助本所同仁給電廠及修護部門整體延長壽命的方案。至於 Crack Wise 軟體則更適合於更專業人員使用，可以進一步評估各組件於發生裂縫後之較精確殘餘壽命計算及提出因應對策。



1. Availability increases for same maintenance spend.

2. Reduced maintenance spend for same availability.



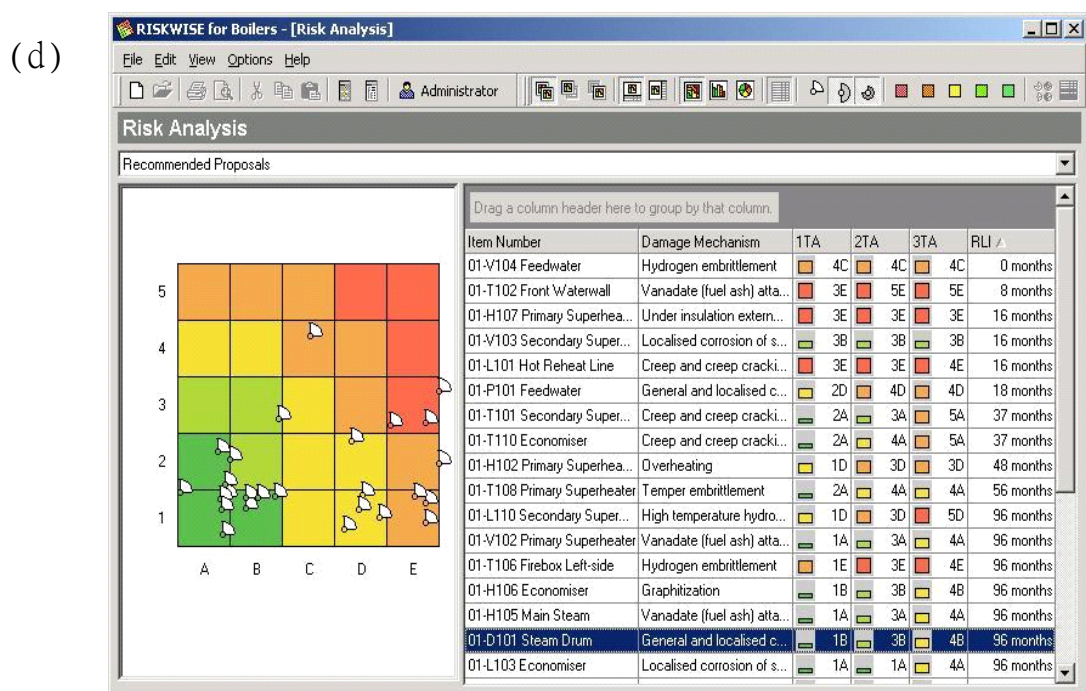
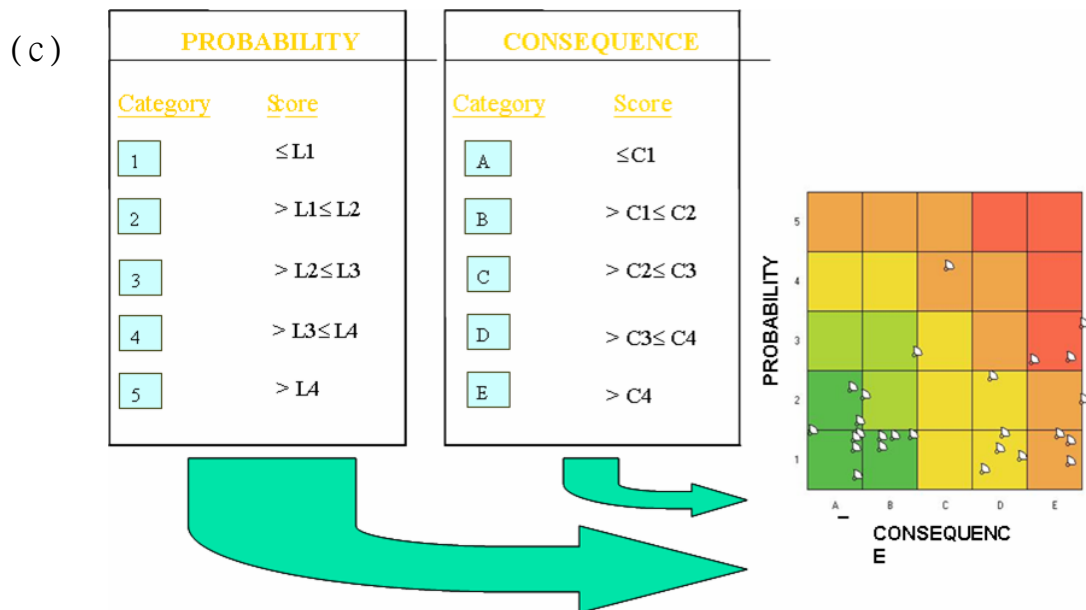


圖15 Risk Wise軟體概念⁽¹²⁾ (a) 提升檢查完成之速度及減少檢查週期
 (b) 基本資料輸入及風險程度與維護建議輸出 (c) 危害可能性
 及危害程度 (d) 風險程度、殘餘壽命輸出

(a)

The screenshot shows two overlapping windows of the 01-D101 (Revision 0.0) [Read Only] software. The top window displays the 'Materials' tab, which contains a table with columns: Description, Generic Material, Heat Treatment, Comments, Nominal OD (in), Thickness (in), and Repairs. The bottom window displays the 'Item Properties' tab, which contains a 'General' section with various fields and three expandable sections: 'Drawings', 'Design Conditions', and 'Process Operating Conditions'.

Description	Generic Material	Heat Treatment	Comments	Nominal OD (in)	Thickness (in)	Repairs
Shell	Carbon Steel	Stress Relieved	None	78.75	5.25	No

Item Properties - General

Component Name	01-D101
System Type	Drum
System	Economiser
Contract Number	67-226151-7
Unit Number	Unit 2
Plant Name	Malmiba Power Station
Manufacturer	John Thompson
Customer Name	Eskom Energy
Design Code	ASME I
Commission Date (mm/yyyy)	July 1983
Current Assessment Period (Months)	48

Drawings

Assembly	J-67-226151-7-Rev.7
----------	---------------------

Design Conditions

Maximum Design Metal Temperature (°F)	625
Design Pressure (psi)	1800

Process Operating Conditions

Maximum Operating Temperature (°F)	600
Maximum Operating Pressure (psi)	1750
Primary Constituent	Water & Saturated Steam

(b)

The screenshot shows the 'Inspection Methods' tab in the 01-D101 (Revision 0.0) [Read Only] software. It contains a table with columns: Description, Internal, Coverage and Findings, External, and Coverage and Findings. The table is organized into sections: Visual, Magnetic, Penetrant, Radiography, Ultrasonic, and Eddy Current.

Description	Internal	Coverage and Findings	External	Coverage and Findings
Visual				
Naked Eye	☒	Coverage: Jul-83: Commissioning inspection; Jul-87: Internals removed; Jul-91: Internals removed; Jul-95: Inspection after summer lay-up; internals removed; and Jul-99: Internals removed.	☒	Coverage: Jul-83: ...
Endoscopy	☐		☐	
Magnetic				
Magnetic Particle Inspection	☐		☐	
Magnetic Flux Leakage	☐		☐	
Magnetic Fluorescent Inspection	☐		☐	
Penetrant				
Liquid Penetrant Inspection	☐		☐	
Penetrant Leak Detection	☐	Findings: Jul-83: Acceptable; Jul-87: Condition 'as new'; Jul-91: Condition 'as new'; Jul-95: Scattered pitting, 1mil max. depth; and Jul-99: Condition unchanged.	☐	
Radiography				
X-Radiography	☐		☐	
Gamma-Radiography	☐		☐	
Compton Scatter	☐		☐	
Real-Time Radiography	☐		☐	
Ultrasonic				
A-Scan Thickness Survey	☒	Coverage: Jul-83: F...	☐	
Angled Shear Wave	☐		☐	
TOFD	☐		☐	
Surface Waves	☐		☐	
Digital Ultrasonic Thickness Gauge	☐		☐	
Eddy Current				
Standard (flat coil)	☐		☐	
ACFM	☐		☐	

(c)

01-D101 (Revision 0.0) [Read Only]

File Edit View Help

Back Next

Record

Item Properties

Materials

Inspection Methods

Damage Mechanisms

Risk Factors

Risk Summary

Damage Mechanisms

Description	Location and Notes
Metal loss	
+ General and localised corrosion	☒ Oxygen
Electrochemical (Galvanic) corrosion	☐
Erosion, abrasion and cavitation	☐
Localised corrosion of stainless steel	☐
Oxidation	☐
Under insulation external corrosion	☐
Vanadate (fuel ash) attack	☐
Environmental Damage	
+ Stress corrosion cracking	☐
High temperature hydrogen attack	☐
Hydrogen embrittlement	☐
Mechanical	
Creep and creep cracking	☐
Embrittlement of stainless steels	☐
Fatigue	☐
Graphitization	☐
Overheating	☐
Temper embrittlement	☐

(d)

01-D101 (Revision 0.0) [Read Only]

File Edit View Help

Back Next

Record

Item Properties

Materials

Inspection Methods

Damage Mechanisms

Risk Factors

Risk Summary

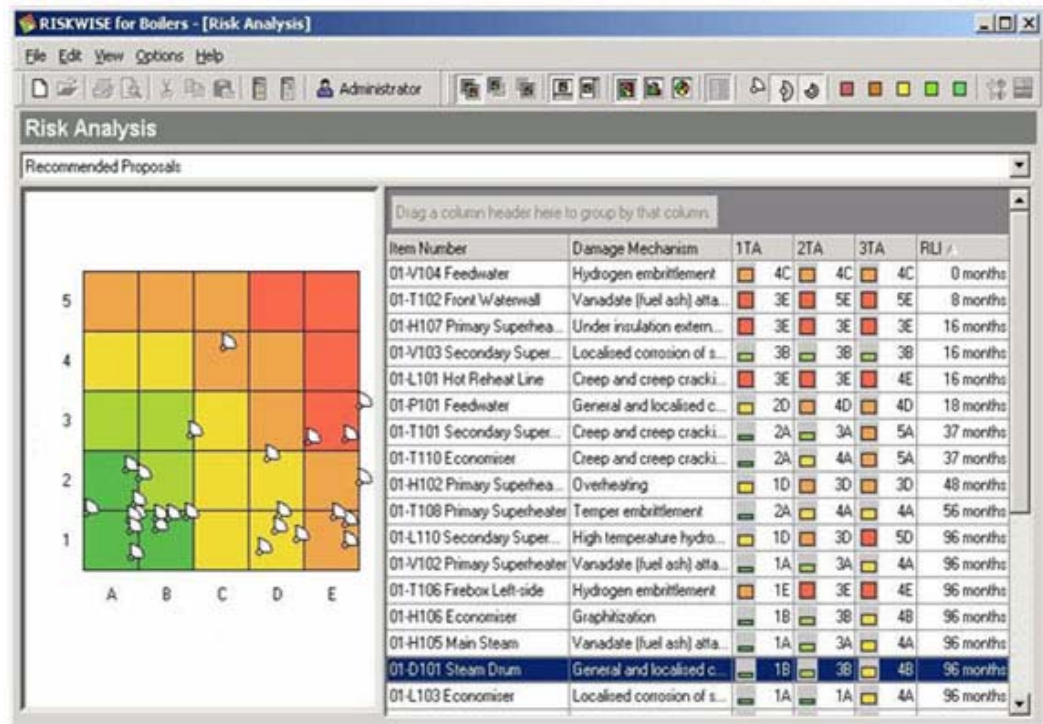
Record Properties

Written Scheme of Examination

Risk Factors

Likelihood Factors	
LF1: Current condition from inspection records	☐ As expected
LF2: Likelihood of failure due to ... within the next:	48 months 96 months 144 months
General and localised corrosion	☐ Not credible ☐ Not credible ☐ Not credible
LF3: Effectiveness of inspection programme against:	
General and localised corrosion	☐ Very good
LF4: Impact of cycling	☐ No expected effect
LF5: Stability of operation	☐ Very stable
LF6: Severity of operation	☐ Close to design limits
LF7: Recurring repair issue	☐ No
Consequence Factors	
CF1: Energy release potential	☐ Low energy release
CF2: Expected failure mode	☐ Mixed-mode
CF3: Potential for consequential damage	☐ Several major components
CF4: Effect on availability	☐ Greater than one month
CF5: Threat to personnel and community	☐ Threat to personnel or community

(e)



(f)

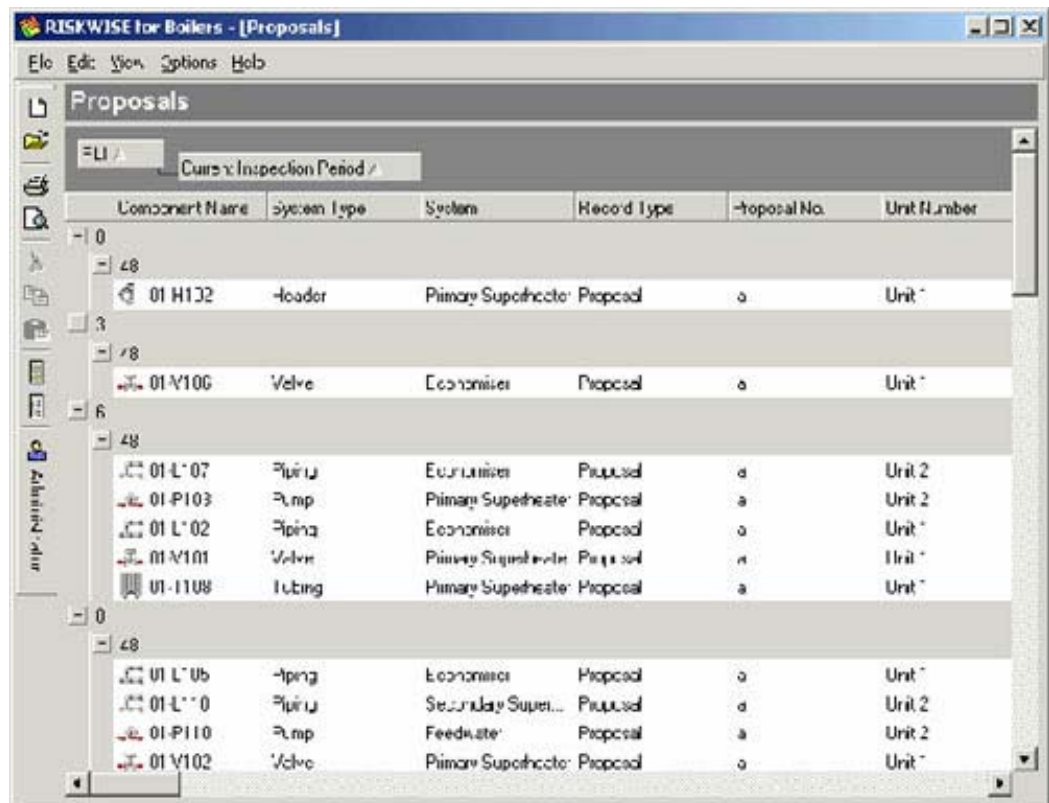
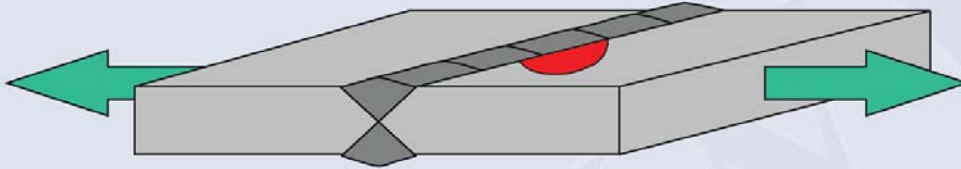


圖16 Risk Wise for Boiler軟體基本操作程序⁽¹²⁾ (a) 輸入基本性質 (b) 輸入檢查方法 (c) 輸入損壞機制 (d) 輸入風險因素危害程度 (e) 殘餘壽命輸出 (f) 維護建議輸出

(a)

BS 7910:2005

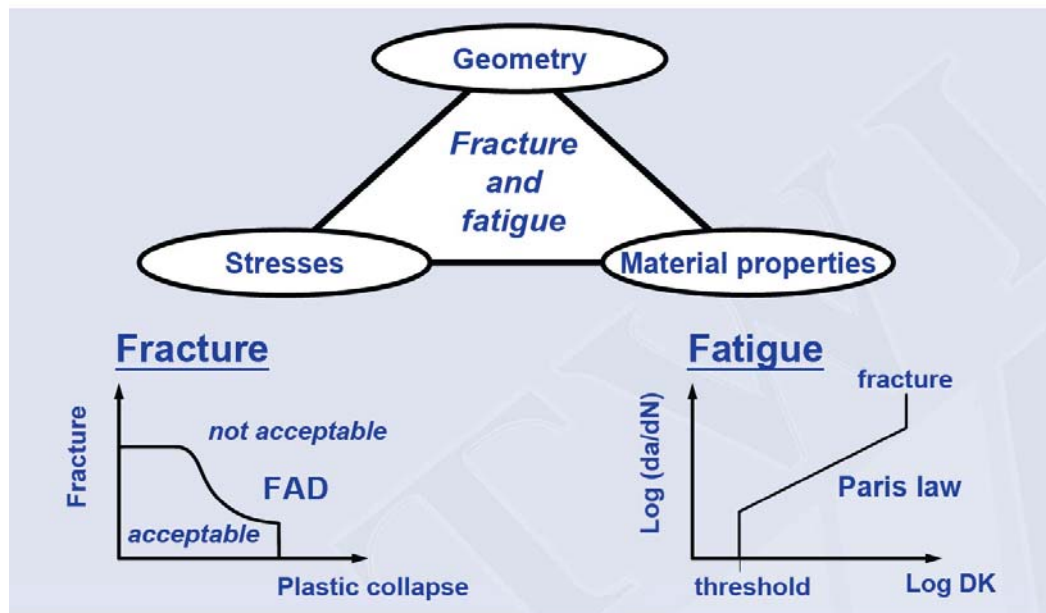
“Guidance to methods for assessing the acceptability of flaws in metallic structures”



- Fitness-for-purpose approach vs. flaw tolerance levels in fabrication codes
- History: BSI PD 6493: 1980 $\Rightarrow$ BSI PD 6493: 1991 $\Rightarrow$ BS 7910: 1999 $\Rightarrow$ BS 7910: 2005
- Crackwise automates fracture and fatigue assessment methods in BS 7910

Crackwise: BS 7910

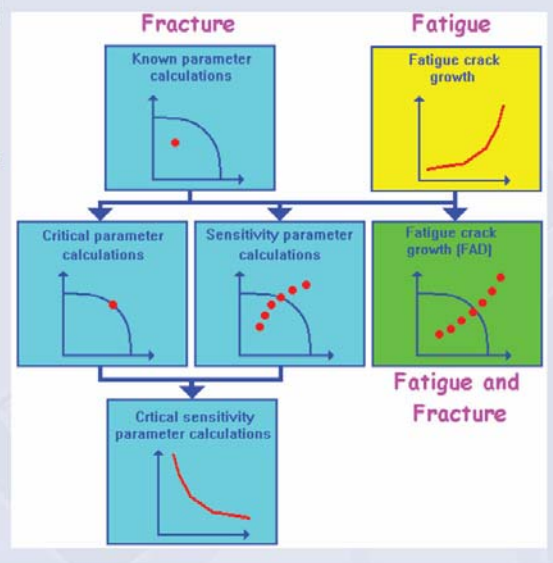
(b)



(c)

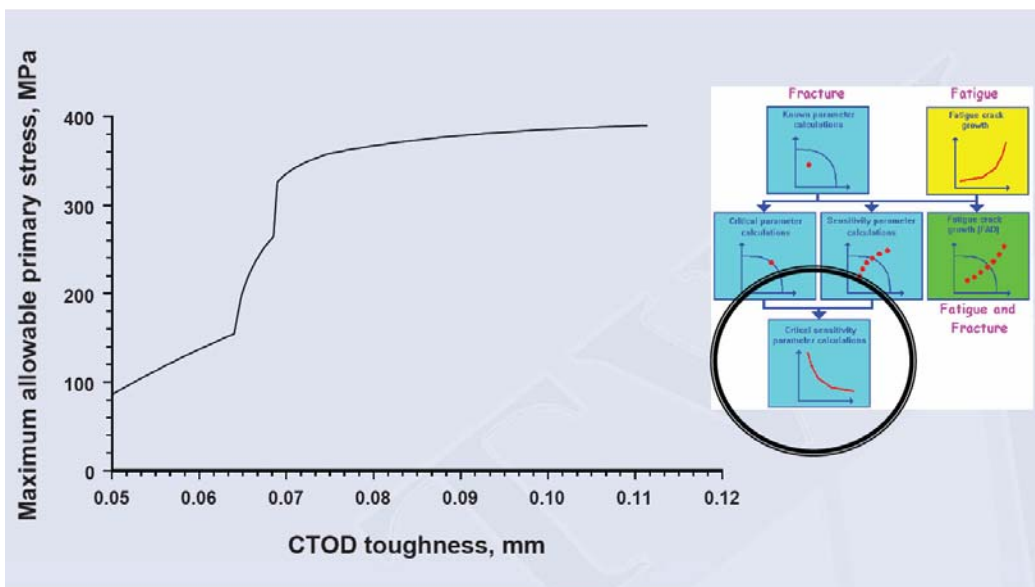
Crackwise: Features #1

- Rigorous application of BS 7910:
- Levels 1, 2 & 3 fracture assessment procedures including tearing
- Fatigue crack growth and fatigue life analysis
- Calculation of critical flaw dimensions, stresses and material properties
- Automatic sensitivity analysis for fracture assessments

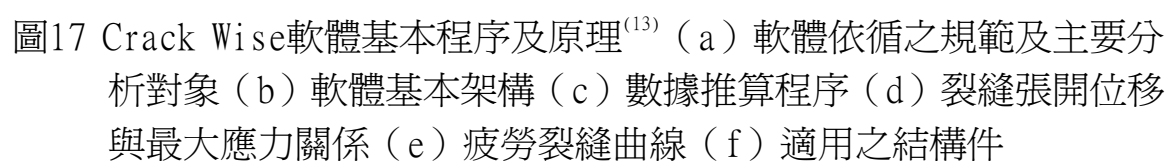


(d)

Critical-sensitivity parameter analysis



(e)



四、GEI 公司研習內容

GEI 公司之研習主要期望了解葉片塗層及絕熱層厚度非破壞檢測評估技術，以便應用於葉片再生製程管制。國外雖有研究機構應用掃描式渦電流檢測設備，可以準確地量測葉片噴塗層厚度並評估其劣化的情形，也據此延長葉片連續運轉並延後定期維修。唯目前公司的需求只在製程品管且修護處亦有一定的技術及經驗，因此本次研習旨在了解在設備簡易增添下，達到製程品管的目的。

義大利國家電力綜合研究院（CESI）所發展的頻率掃描式渦電流檢測技術（F-SECT, Frequency Scanning Eddy Current Technology），主要利用多頻率電磁技術在多層導體中進行各層的層間分析⁽¹⁴⁾。將渦電流探測頭放置在靠近待測物表面的位置即會產生一連串不同頻率的電磁波，頻率範圍由 0.5MHz 遞增至 10MHz，量測不同材料反射波的電壓與頻率訊號並配合適當的數學模型，即可轉換成爲不同深度材料的特性。因此可計算得葉片噴塗層厚度。

圖 18 爲一截葉片經 CESI 測試所得之葉片噴塗層厚度，圖 18（a）、（b）爲壓力側及背壓側的取樣位置，圖 18（c）顯示其噴塗層厚度在導翼部份剩約 200 μm ；在尾翼部份則只剩約 50 μm ⁽¹⁴⁾。

GEI 公司以其檢測設備亦可達到製程品管的目的，其原理爲將電壓計與渦電流檢測儀之類比輸出銜接，並接上渦電流檢測探頭，探頭在被檢物上進行平衡歸零後，再將探頭移至空氣中使其離距軌跡振幅達 2 伏特，選取中碳鋼、不銹鋼、鋁等三種材料進行測試，實驗獲致之塗層厚度與不同材料及不同探頭頻率之相對應曲線如圖 19⁽¹⁵⁾。當變動探頭與被測物離距時，其線圈阻抗與線圈感抗有一定的變

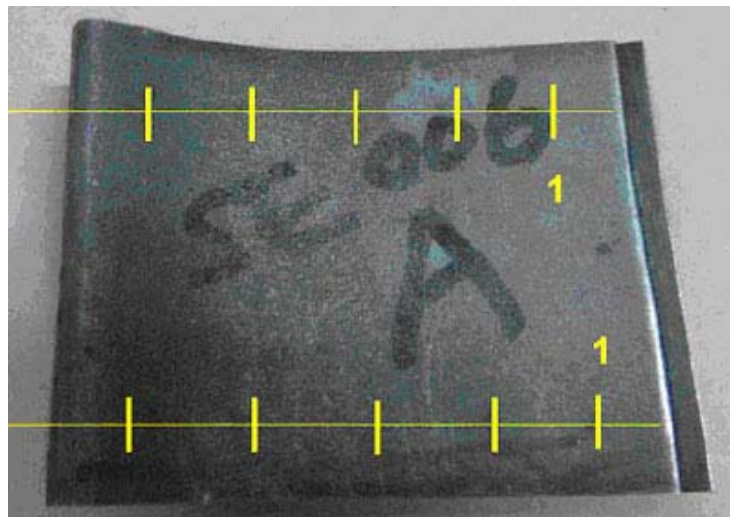
化軌跡，當離距為 0 時，數值落在該被檢物之導電率點上。當線圈之移動已不再影響阻抗變化時，即相當於將線圈置於空氣中。對於高導電率材料(如銅、鋁)，在高頻時其導電率變化的效應不靈敏，在低頻時其導電率變化的效應較靈敏；對於低導電率材料其在高頻或低頻時，這些現象恰恰相反。因此適當的選擇頻率，也可使離距與導電率兩者之夾角足夠大⁽¹⁵⁾。所以 GEI 公司得到的結論是：

- 1、裸露 (un-shield) 探頭量測之噴塗層厚度絕對值準確度較隔層保護 (shield) 探頭佳；若以準確百分率推算，則隔層保護探頭量測之塗層厚度又較裸露探頭檢測好。
- 2、裸露探頭不受材料改變的影響，其對噴塗層厚度之檢測範圍較隔層保護探頭來得大。
- 3、在量測的影響上，鐵磁性材料之被檢物較非金屬材料來得大。
- 4、使用之渦電流檢測探頭型式將會直接影響渦電流離距訊號的特性。
- 5、對於金屬基材之非導電和導電塗層厚度量測，是可以推論獲得。

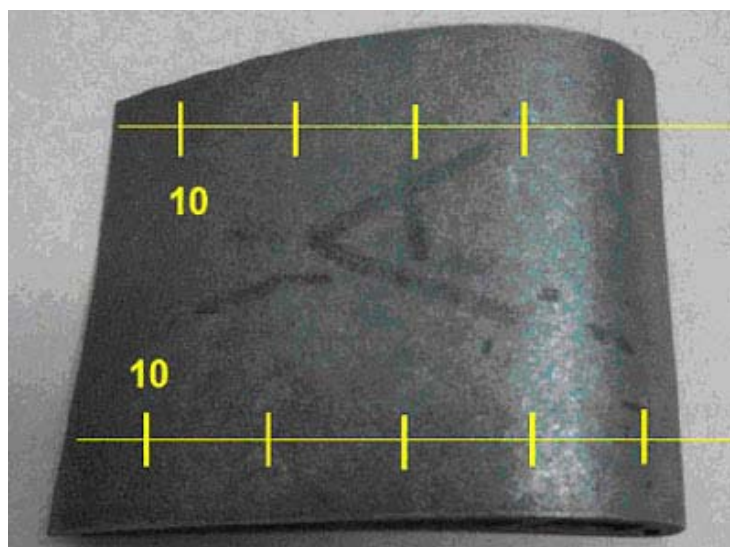
由於氣機葉片基材為 IN-783 或 IN-939 與塗層 MCrAlY 導電率差差距不大，若能以導電率測量儀直接測量，可以獲致之數值為絕對數字，相較於上項電壓輸出 CRT 伏特尺度更精確，因此可以自繪製之曲線直接對照得到噴塗層厚度。

。

(a)



(b)



(c)

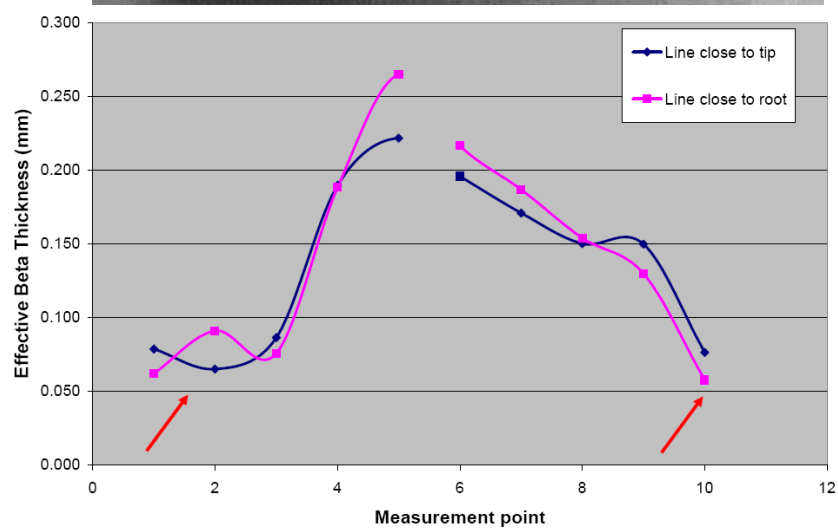


圖18 葉片噴塗層厚度頻率掃瞄式渦電流檢測⁽¹⁴⁾ (a) 壓力側取樣點 (b) 背壓側取樣點 (c) 噴塗層厚度測試值

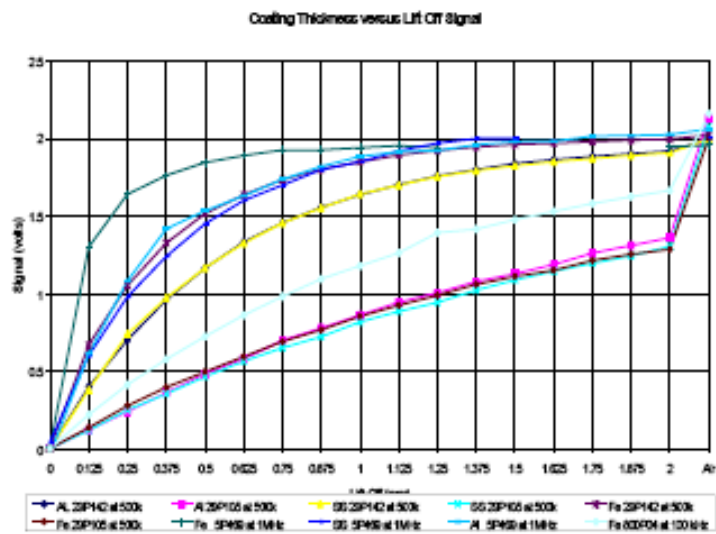


圖 19 葉片塗層厚度與不同底材及不同探頭頻率之相對應曲線⁽¹⁵⁾

五、心得

- 1、南部電廠 3 號機原廠抽檢之壓縮段及氣機段動葉輪盤均未發現裂紋，可再運轉 100000 小時再檢查。
- 2、南部電廠 3 號機 Tie Rod 除以超音波及渦電流檢查裂紋外，主要是量測長度及周長，以追蹤是否有潛變導致變形。
- 3、雖然西門子公司認為第一級動葉片可以再生但成本不符經濟效益，但本所自力進行其再生之成本遠較西門子公司為低，且再生製程及技術不輸西門子公司，因此值得繼續投入並研究其二次再生。
- 4、50 人以內之組織參加 TWI 之會員每年約需柒拾餘萬元，相較於其豐富的研究、開發及實務經驗，其可以分享之研發成果及提供的諮詢服務，實可以考慮以一、兩個研究室參加其會員。
- 5、TWI 公司之 Risk wise 系列之軟體可以提供組件檢查週期及殘餘壽命之估計值，可以協助本所提供電廠整體方案。
- 6、TWI 公司之 Crackwise 軟體可以提供組件殘餘壽命更量化之估計值，力學相關同仁可以多加了解並考慮是否適用。

六、建議事項

- 1、氣渦輪機動葉輪盤之超音波及渦電流檢測，需於機組每運轉 100,000 小時時進行檢查，有了向西門子公司觀摩研習的機會，本公司修護處應可建立此技術並自行檢測。
- 2、葉片冷卻流道可以評估是否開發化學沉積法鍍鋁層以保護內部冷卻流道。
- 3、以一、兩個研究室參加其會員，以藉助 TWI 公司之研發成果及所提供的諮詢服務。

七、參 考 資 料

- 1、李日輝、吳憲政、謝式儒、李桂賓，“興達四號機汽機-發電機材料壽命評估研究”，2005年台電公司研究專題報告。
- 2、Björn Burbach, “Life Time Extension Process and Measures” , Siemens Company Presentation Materials, May 2008
- 3、R. Viswanathan, K. Krzywosz, S. Cheruvu, E. Wan, “Combustion Turbine (CT) Hot Section Coating Life Management” , Semi-Annual Technical Progress Report, Submitted by R. Viswanathan (EPRI).
- 4、Hiroshi Harada, “High Temperature Materials for Gas Turbines : The Present and Future ” , Proceedings of The International Gas Turbine Congress 2003 Tokyo November 2-7, 2003.
- 5、“Gas Turbine Blades/Vanes Refurbishment” Siemens Sector SF MK SPM52, August 2008
- 6、“Power from Berlin” Siemens Company Reference
- 7、Jürgen Lemke “Thermal Barrier Coating for Aero- and Gas Turbine Engine Parts” ALD Vacuum Technologies AG Technology Report, November 2003
- 8、A. Dibbert, “TPC customized Concept” Siemens Energy

Marketing LTE & CC solutions, ES SF MK GTI3 (OP73), August 2008

- 9、 “Inspection for Lifetime Extension ; Checklist for Gas turbine Type V84.2” , Reference Provided by Siemens Company.
- 10、 “Additional NDT scope at LTE of Gas Turbines” Siemens Energy Service ES SF RW FS 53, July 2008
- 11、 Technology Welding Institute Company Reference
- 12、 “Risk Wise for Boilers- A User Oriented Management Tool for Risk-Based Inspection & Maintenance” , TWI Company presentation Reference.
- 13、 “Crack Wise” , Reference Provided by TWI Company.
- 14、 CESI 台灣代理商提供資料
- 15、 GE Industrial Sensing & Inspection Technologies Reference.