

行政院及所屬各機關出國報告提要

出國報告名稱：研習氣渦輪機組風險評估與延長壽命研究

頁數 46 含附件：是 否

出國計畫主辦機關/聯絡人/電話：臺灣電力公司/人資處 /(02)23667685

出國人員姓名/服務機關/單位/職稱/電話：魏健能/電力修護處/ 品檢工場/非破壞試驗課長/(02)27853199 ext.153

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7月29日~97年8月15日 出國地區：義大利、德國、英國

報告日期：97年9月22日

分類號/目

關鍵詞：非破壞檢測、氣渦輪機

內容摘要：（二百至三百字）

本次出國研習重點為國外氣渦輪機組件完整性非破壞檢測及風險評估壽命技術，來提昇現有檢測服務的可靠度及完整性，藉助風險評估壽命延長技術，在有限的歲修時間內達成最有效的檢測管理，建立一套適用於本公司的氣渦輪機組件評估架構，訂定合理的檢測週期，使維修資源作較妥適的安排與投入。赴義大利 CESI 電力研究所、德國 SIEMENS 氣渦輪機製造原廠、英國 TWI 研究機構及英國 GE Inspection Technologies 研習氣渦輪機組件完整性非破壞檢測及風險評估延長壽命技術，其先進之技術值得本公司適時引進，做為公司今後技術生根努力之目標與借鏡，研習心得概述於後。

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

出國報告（出國類別：實習）

研習氣渦輪機組風險評估與延長壽命研究

服務機關：台灣電力公司

姓名職稱：魏 健 能 非破壞試驗課長

派赴國家：義大利、德國、英國

出國期間：97年7月29日 ~ 8月15日

報告日期：97年9月22日

QP - 08 - 00 F04

研習氣渦輪機組風險評估與延長壽命研究

內 容	頁 次
壹、國外公務之內容與過程-----	P2
貳、國外公務之心得與感想-----	P3
一、序言-----	P3
二、氣渦輪機組件完整性檢測壽命評估技術(CESI 電力研究所)-----	P3
2.1多頻掃描渦電流檢測技術-----	P4
2.2 氣渦輪機組鍋爐爐管電磁超音波檢測(EMAT)技術-----	P9
2.3 汽機轉軸軸孔檢測-----	P12
三、氣渦輪機組件非破壞檢測及延長壽命評估技術 (SIEMENS Power Generation)-----	P14
3.1 氣渦輪機葉片再生製程檢測技術-----	P14
3.2 氣渦輪機延長壽命檢測 (NDT)技術-----	P22
3.3 其他連絡事項-----	P33
四、氣渦輪機風險評估壽命技術(TWI 研究機構)----	P33
4.1 氣渦輪機組件風險評估壽命-----	P33
4.2 TWI 實驗室觀摩-----	P38
4.3 新非破壞檢測技術-----	P39
五、氣渦輪機組件渦電流檢測技術(GE Inspection	

Technologies)-----	P41
5.1 非/低導電率塗層厚度渦電流量測應用-----	P41
5.2 氣機葉片 Leading / Trailing Edge 渦電流檢測-----	P43
5.3 渦電流檢測其他應用-----	P43
參、出國期間所遭遇之困難與特殊事項-----	P45
肆、對本公司之具體建議-----	P45

壹、國外公務之內容與過程

日期	天數	到達地點與公務內容
97.7.29~30	2	往程(台北→法蘭克福→米蘭)
97.7.31~8.3	4	義大利 Milan, CESI 電力研究所 研習氣渦輪機組件完整性檢測壽命評估技術
97.8.4~8.9	6	德國 Berlin, SIEMENS Power Generation 研習氣渦輪機組件非破壞檢測及延長壽命評估技術
97.8.10~8.11	2	英國 Cambridge, TWI 研究機構 研習氣渦輪機風險評估壽命技術
97.8.12~8.13	2	英國 St Albans, GE Inspection Technologies 研習氣渦輪機組件渦電流檢測技術
97.8.14~8.15	2	返程(ST ALBANS→倫敦→台北)
合計	18	

貳、國外公務之心得與感想

一、序言

本公司氣渦輪機組日漸增多，裝機迄今陸續運轉多年，葉片再生需求也逐年增加，因此提高機組的可用率便成為現今首要的工作。氣渦輪機組件繁多，規劃的非破壞檢測方式、檢測項目與數量，常因主觀認定有所不同；瑕疵對組件可能造成的損害，也沒有利用風險評估機制來分析作有效的管理。因此上列項目檢測之適用性與其必要性及檢測週期都值得探討與研究。

本次出國研習重點為國外氣渦輪機組件完整性非破壞檢測及風險評估壽命技術，用來提昇現有檢測服務的可靠度及完整性，藉助風險評估壽命延長技術，在有限的歲修時間內達成有效的檢測管理，建立一套適用於本公司的氣渦輪機組件評估架構，訂定合理的檢測週期，使維修資源作較妥適的安排與投入。

赴義大利 CESI 電力研究所、德國 SIEMENS 氣渦輪機製造原廠、英國 TWI 研究機構及英國 GE Inspection Technologies 研習氣渦輪機組件完整性非破壞檢測及風險評估延長壽命技術，其先進之技術值得本公司適時引進，做為公司今後技術生根努力之目標與借鏡，茲將研習心得概述於後：

二、氣渦輪機組件完整性檢測壽命評估技術

氣渦輪機熱段組件塗層因機組運轉而劣化的程度，是決定氣渦輪機維護時機以及整個運轉期間成本的重要關鍵，當塗層損壞至一定程度後，便無法有效保護基材，類似基材氧化、腐蝕或暴露於過高的溫度下損壞，導致更高的維護費用。因此適當且即時的維護是很重要的。而熱段組件的更換、修復、再生及噴塗等維護時機通常是根據既定的時程(Time base)進行，需要可觀的潛在成本。因此如果能在機組運轉一段週期後，可以準確地檢測組件塗層及其基材的狀況，藉此判定組件可延後再生或更換的時機，必能為公司節省鉅額的維護費用。

在氣渦輪機的動、靜葉片上較常使用的耐高溫塗層均是以 MCrAlY 為主；其主要的成分 M 是鈷(Co)、鎳(Ni)或鈷鎳的合成物，其他元素為鉻(Cr)、鋁(Al)以及鈮(Y)。部份處於較高溫度的前幾級葉片則可能在 MCrAlY 塗層的外側再塗上一層絕熱保護塗層(TBC)以符合實際的運轉需要。在顯微鏡下，MCrAlY 噴塗層與基材的擴散區域很小，因此塗層與基材有一明顯的界面，其化學成分與導電特性都可以明確地被區分出來，塗層/基材的組合可定義為兩層系統。但由於此類塗料與基材的導電特性極為相近，傳統渦電流檢測無法有效地鑑別出基材與塗層間的差異，因此無法應用於此 MCrAlY 塗層厚度量測。

塗層中的鉻、鋁等成份於機組運轉中與空氣反應而形成之氧化層，可保護葉片基材免於高溫腐蝕及氧化，隨之 MCrAlY 塗層隨著葉片運轉時間的增加而逐漸耗損。在微觀結構下，含鋁或含鉻的相會分解而成為游離狀態，形成氧化膜。然而週期性的熱循環會使得鉻／鋁氧化層剝離，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，必須將葉片予以再生，來確保塗層的厚度以及葉片基材結構的完整性。

除了前述噴塗耗損的機制外，隨著運轉時數的增加，單純的兩層系統也會因為化學作用而演變為一多層系統；包括最外層的氧化穿透層以及絕熱保護塗層(TBC)裂縫的出現、最外層以及塗層間耗損區域的形成、塗層以及基材間耗損區域的形成等(如圖 2-2 右側所示)。在此情況下，每層的電磁特性都將反應出系統的結構以及層內的化學組成。傳統渦電流檢測方式是無法有效地鑑別出此一多層系統間的差異，因此有待更先進技術的開發，以便能檢測出塗層的耗損，必要時也能在葉片不拆卸狀況下，直接在機組上直接檢測。

2.1 多頻掃描渦電流檢測技術：

義大利電力研究所（CESI）發展了一套氣渦輪機葉片多頻掃描渦電流檢測技術（F-SECT, Frequency Scanning Eddy Current Technology），主要利用多頻渦電流在多層導體中進行各層間分析，包括評估新葉片塗層強度與品質，以及界定運轉後塗層劣化程度。將渦電流探頭放置在葉片表面即會產生一連串不同頻率的電磁波，頻率範圍由 0.2MHz 遞增至 8 MHz，量測渦電流探頭阻抗相對頻率變化，對導電多層不同材料反射的能量與頻率訊號整合，配合適當的數學模型程式，即可轉換成為不同厚度材料的量化分析。此多頻率掃描的量測技術可在 3 秒內測定 24 種不同的頻率，檢測系統如圖 2-1。



圖2-1 氣渦輪機葉片多頻掃描渦電流檢測系統

圖2-2為第一級動葉歸一化阻抗與頻率曲線圖，為一典型之歸一化阻抗與頻率曲線圖，圖中並將各曲線所反映的塗層狀態做對應如圖右所示。每條曲線均代表不同的量測位置，反映出不同位置在運轉時承受不同溫度及應力條件下所呈現的結果。縱座標“歸一化阻抗”可視為材料的導電率，橫座標為不同之檢測頻率大小。Downward 的曲線顯示塗層的耗損越嚴重，即噴塗層中的含鋁量降低，而導致導電率的降低。實驗顯示不同種類的 MCrAlY噴塗層具有非常相似的曲線特性，因此初步觀察歸一化阻抗與頻率曲線圖即可了解塗層的狀態。

F-SECT 系統中所使用的定量分析方式，目的在探討電磁波與多層導體間的交互作用，每層導體的特性都可用導電率以及阻抗來表示，並且定義出各層的厚度與位置。目前的技術最多可量測四層的導體。利用適當的數學演算可以將量測值與歸一化阻抗值間的誤差函數降到最小，以獲得最準確的相關參數。在進行塗層殘餘壽命評估時，如果能準確的計算出各層的厚度，將有助於後續的狀態診斷分析；另外塗層的耗損率也可以由導電率、阻抗之行變轉化來執行品質分析。圖 2-2 即為塗層使用過之 β 相耗損與導電特性間的關係。

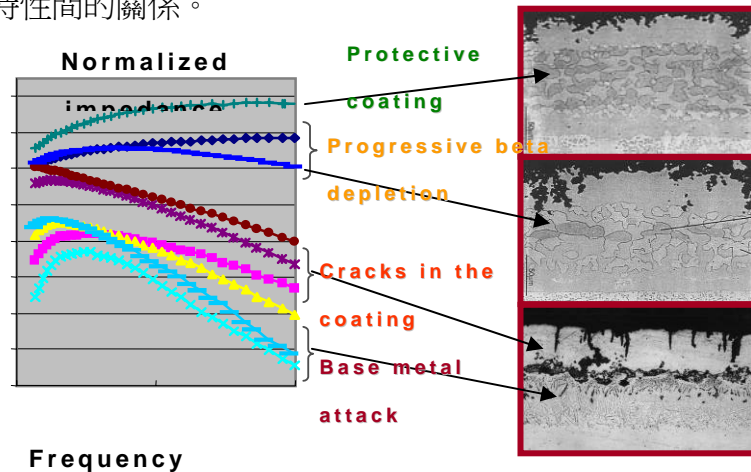


圖 2-2 一級動葉歸一化阻抗與頻率曲線圖

可撓式渦電流探頭可以檢測絕熱層之結合層(Bond coat)，同時可以量測最外層之絕熱保護塗層(TBC)厚度，如圖2-3。

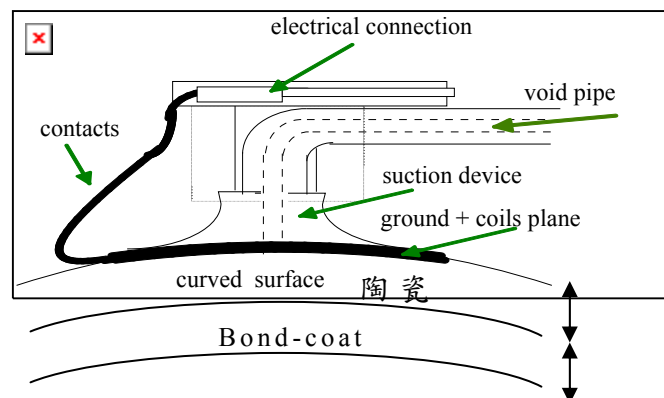


圖 2-3 可撓式渦電流探頭總成

它的量測原理是輸入歸一化之阻抗量測值，再依 Maxwell 方程式為基礎進行模式分析，估算膜厚層間之模式參數與導電率之相依性，推算正確塗層厚度(如圖 2-4)。準確度取決於塗層與基材導電率的差異而定。

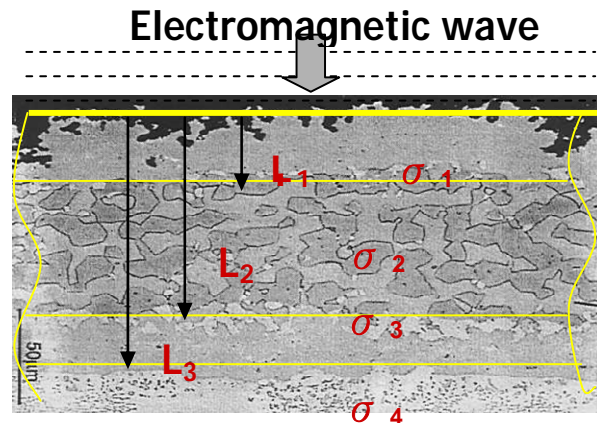


圖 2-4

導電率差異 $\Delta\sigma > 25\%$ (Ni-Cr-Si 塗層)量測最大誤差約 12%

導電率差異 $\Delta\sigma > 5\sim 15\%$ (MCrAlY 塗層)量測最大誤差約 20%

檢測實例 (壓力側與吸入側塗層測定) 如下圖 2-5 :

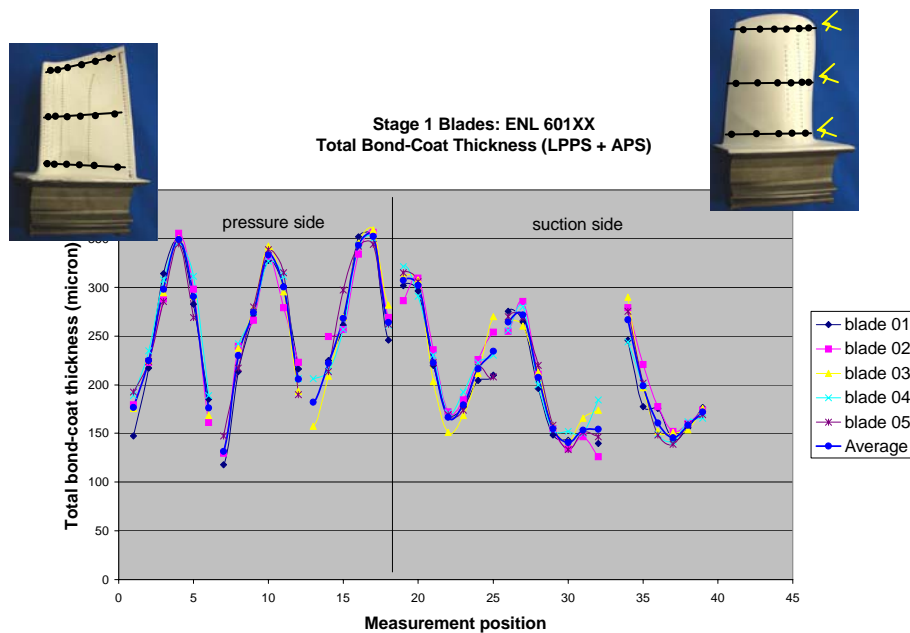


圖 2-5

2.1.1 頭探總成：



圖 2-6

2.1.2 校正

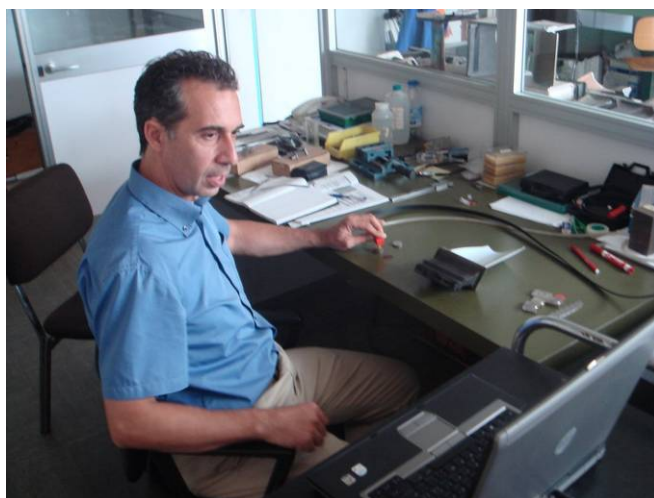


圖 2-7

2.1.3 量測

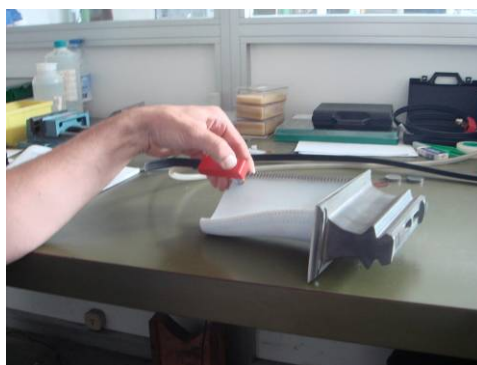


圖 2-8

2.1.4 量測及分析結果：塗層厚度 0.196 mm；葉片基材厚度 1.948mm

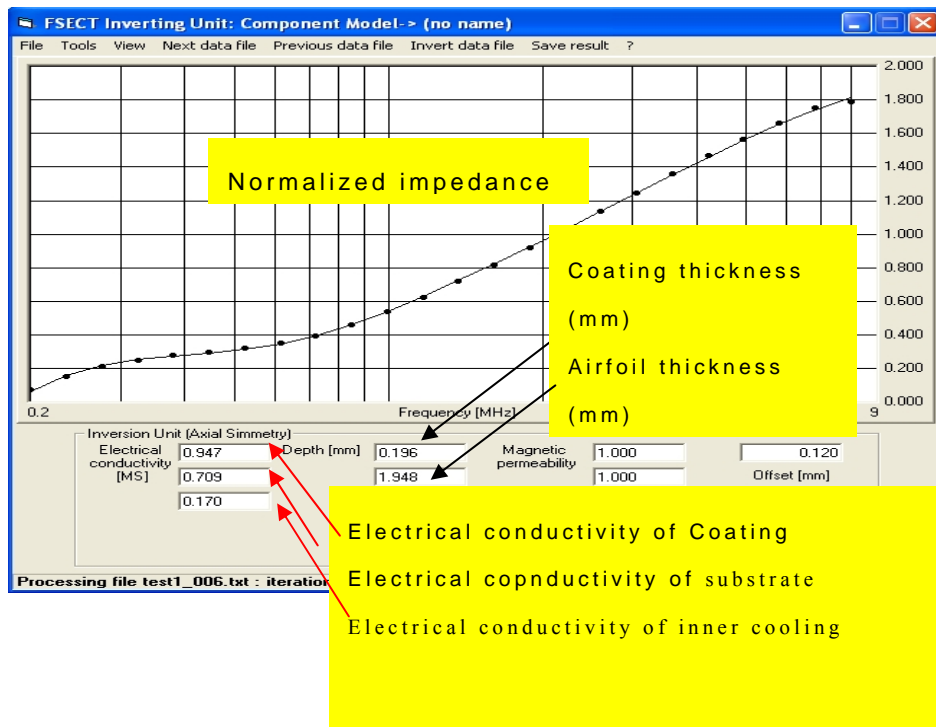


圖 2-9

2.1.5 系統驗證：第一級動葉片接近頂端橫向量測 β 相相當厚度，Equivalent Beta Thickness (EBT)

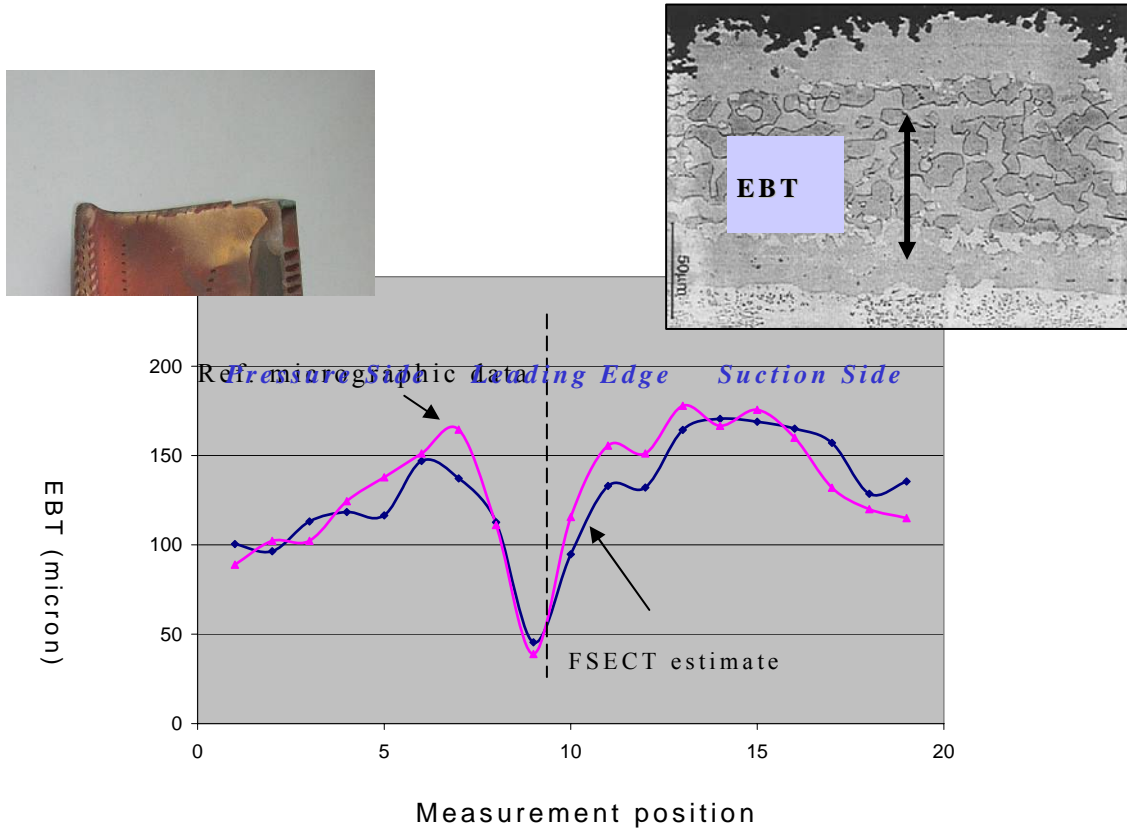


圖 2-10

CESI 電力研究所 FSECT 屬於 Condition Base 檢測分析系統，能提供即時檢測分析結果

(如圖 2-11)，不需進行葉片切片金相組織分析而能提供葉片品質依據。除了對塗層檢測分析外，葉片金屬厚度也己能同時進行測量，不僅適用於製造廠家、電廠、葉片再生維修或研究單位的檢驗利器，已使用之單位如表 2-1。

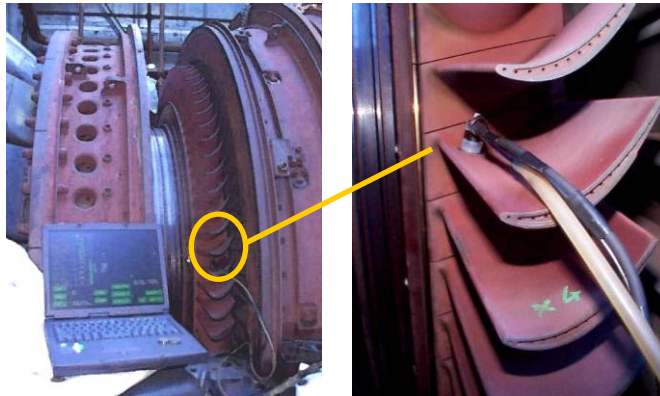


圖 2-11

Client	合作研究	設備供應	檢測服務
ALSTOM Power	X	X (2 systems)	
MITSUBISHI – MHI		X	
ANSALDO ENERGIA			X
SIEMENS (US & Sweden)	X	X (2 systems)	
SNECMA (France)	X	X	X
ELECTRICITE DE		X	
ENEL Generation (Italy)	X	X	X
LABORELEC (Blegium)		X	
EPRI (United States)	X	X	
KEMA (The Netherland)		X	

表 2-1

2.2 氣渦輪機組鍋爐爐管電磁超音波檢測(EMAT)技術

EMAT(Electromagnetic Acoustic Transducer) 是一種非直接觸式的檢測方法，不需使用接觸媒質，而能在被檢物中產生超音波的一種檢測方式，以交流電在導電或鐵金屬表面激發形成一強且均勻的電磁場，表面則誘導出渦電流，電磁場在 Lorentz 力作用下產生振盪應力波（脈衝超音波，如圖 2-12），因爐管（包含 SA213T22）是電磁的良導體，所以可茲應用檢測。雖然早期就已被討論，最近

幾年才成功地被引導至電力工業維護之實際應用上。在不須將檢測面之鐵磁性垢層磨除，而能成功地應用在爐管檢測(如圖 2-13)，量取厚度、點蝕(pitting)，對氣渦輪複循環機組鍋爐檢測助益大。

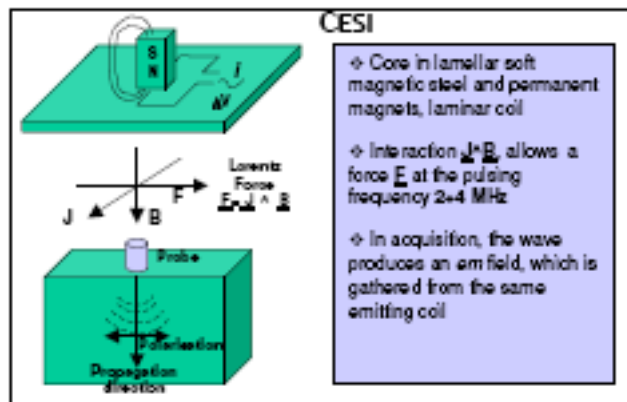


圖 2-12 EMAT 檢測原理

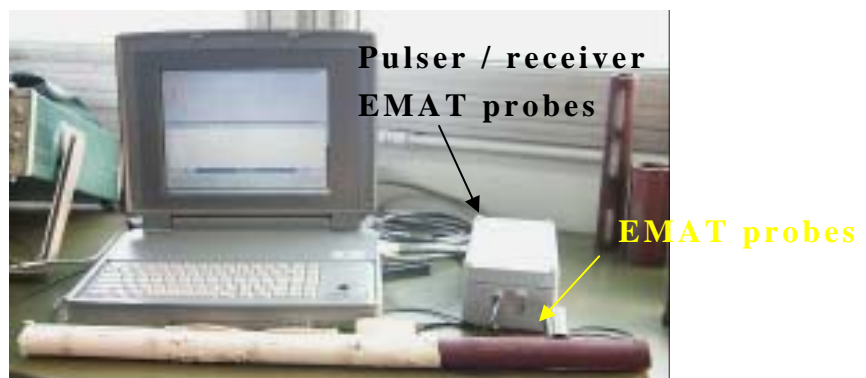


圖 2-13 CESI ECOMAT 檢測系統

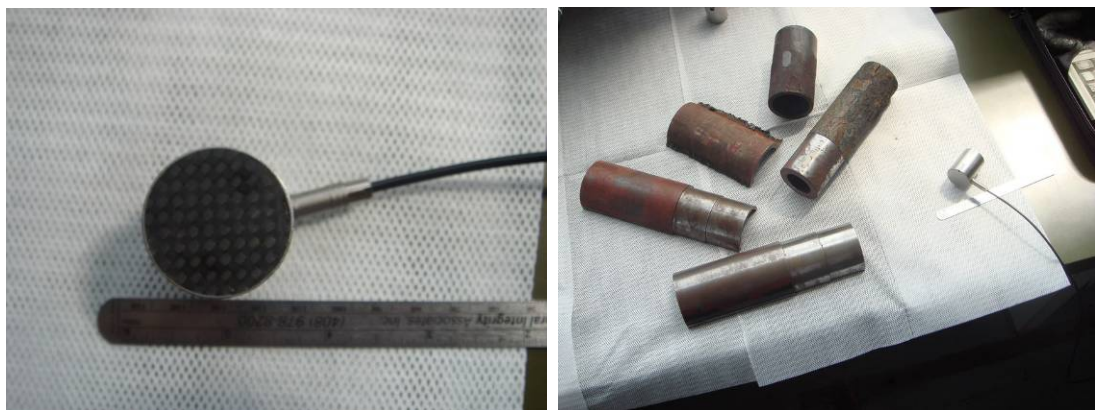


圖 2-14 sensor with cross-like active surface $12 \times 6 \text{ mm}^2$

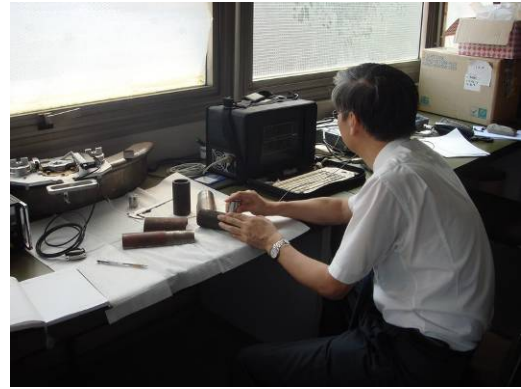
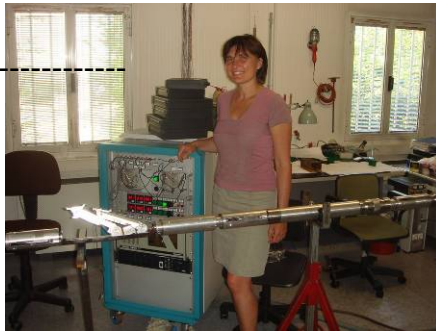


圖 2-15 校正後檢測



圖 2-16 檢測爐管厚度讀值

2.3 汽機轉軸軸孔檢測



EXAMPLES OF DETECTION SENSITIVITY

SURFACE - 0.4 & 0.6 mm notches in a cylindrical reference block detected with EC probe

SUBSURFACE - Group of defects detected with a creeping wave UT probe near the bore surface in a turbine rotor.

FAR DEPTH - reflector detected close to the bottom of the winding slot in a generator rotor, at a depth of about 320 mm

TRANSDUCERS

UT + Housing 20 x 20 x 20 mm + Curved wedge fitting bore radius

ET + Housing 20 x 20 x 20 mm + Detection of surface-breaking long cracks

beam angle (°)	0	45	60	74
Crystal size(mm)	10 circular	9x8 rectangular	9x8 rectangular	2 (7x10)
Wave type	Longitudinal	Longitudinal	Shear	Creep
Frequency (MHz)	2, 2.5	2, 2.5	2, 2.25	2-4
Focus distance (mm)				10
Beam orientation		Axial-radial planes	Circumferential planes	Circumferential planes
Inspected region	Whole volume	Next to outer surface	10-130 mm from inner bore surface	0-15 mm mm from inner bore surface

Transducer type	Differential shielded
Active area diameter (mm)	8.5
Frequency (MHz)	1-300

SIBAR PERFORMANCES	
Rotor length	Up to 22 m (cable length limit)
Bore diameters range	63.5-330 mm
Scanning control	Man / auto
Handled diametral excursion (chamberings)	Max. 150 mm (self-adjusting)
Coarse axial movement	Pneumatic (140 mm/min)
Standard inspection speed (axial step 3 mm; angular speed 25°/s)	8.5 mm/min
Minimum detectable EFBH	<=1 mm (z<= 40 mm)
RF acquisition	Yes (digital reconstruction)
Visualisation of UT signals	A/B/C/D-Scan
Focalisation of UT signals	SAFT-3D
Probe head	$\phi < 125 \text{ mm} \rightarrow 4 \text{ probes}$ $\phi > 125 \text{ mm} \rightarrow 8 \text{ probes}$

Axial acquisition step (typical)	3 mm
Angular acquisition step (typical)	1°
Recorded echo signals (8 m length)	5.760.000
Acquisition time (8 m length)	16 h
Data processing time	1-4 days (depending on defect number / density)

圖 2-17 汽機轉軸 ET、UT 軸孔檢測

(SIBAR)

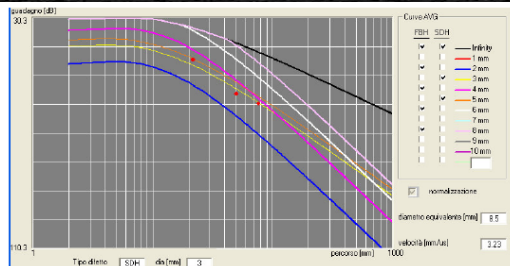
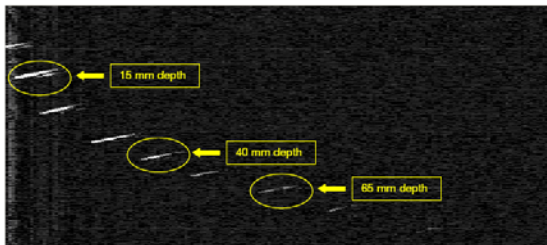
UT CALIBRATION

UT probe:
Shear waves 60° in circumferential planes - frequency=2.25 MHz - 8mm x 9mm crystal - curvature radius=67 mm

Calibration block:
Disk - Inner diameter=100 mm - outer diameter=200 mm

Calibration holes in block:
SDH 3 mm - Holes depth: 5mm - 10 mm - 15 mm - 20 mm - 30 mm - 40mm - 50 mm - 65 mm - 80 mm - 100 mm

Automatic acquisition - fixed gain



ET CALIBRATION

ET probe: Shielded differential probe - Active area 8.5 mm - frequency: 1-300 kHz

Calibration block:
Square block - Inner radius=140 mm

Calibration notches in block:
0.2mm x 16 mm longitudinal square notches - SDH 3 mm - Notches depth: 0.2mm - 0.4 mm - 0.8 mm

Automatic acquisition - freq. 250 kHz

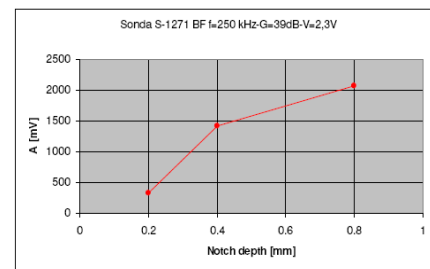
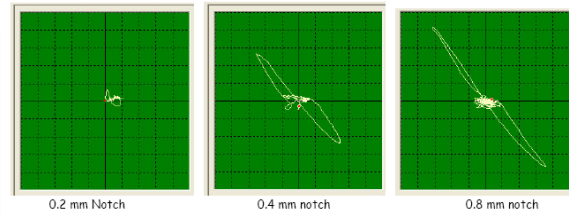


圖 2-18 汽機轉軸 ET、UT 軸孔檢測前校正

SIBAR 汽機轉軸軸孔檢測為 ET、UT 並行應用技術，有別於本處既有檢測系統之掃描機構，採自動爬行不須接延長檢測掃描軌道，得以讓公司參酌應用與比較。

三、氣渦輪機組件非破壞檢測及延長壽命評估技術

3.1 氣渦輪機葉片再生製程檢測技術

SIEMENS 葉片再生基本製程(如圖 3-1)，進廠時先依評估標準檢測是否可再生，認定可再生之葉片再去塗層，去塗層後進行檢驗(NDT)，針對各瑕疵進行修理，磨修後再進行絕熱保護塗層(TBC)噴塗再生，其葉片再生詳細製程流程如圖 3-2 所示。

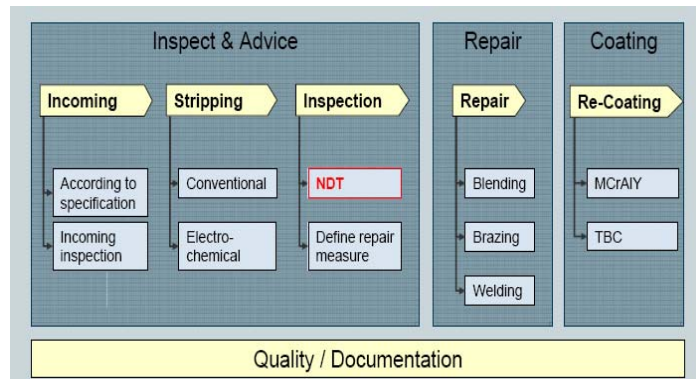


圖 3-1 葉片再生基本製程

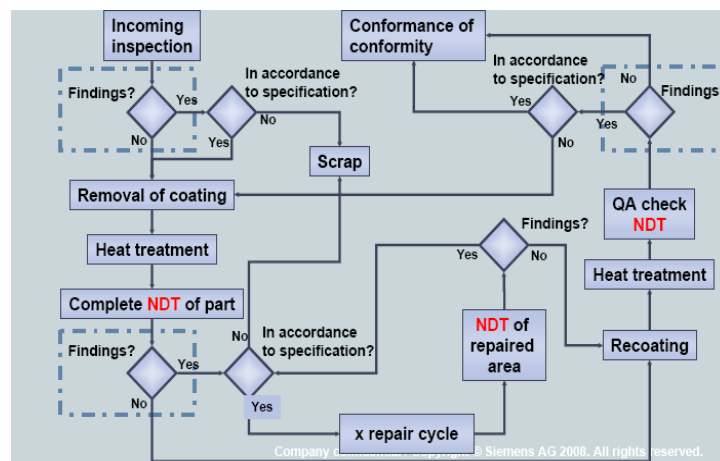


圖 3-2 葉片再生製程流程

3.1.1 工廠參訪：

廠房外觀如下圖，舊葉片再生、新葉片製作流程：



(Turbine Airfoil Coating and Repair GmbH)



圖3-3 舊葉片進料存放標示



圖3-4 進料檢驗(VT+PT)



進料VT



進料coating後PT



葉片外型尺寸比對
check



氣流測試



Striping後 PT

圖 3-5 舊葉片再生檢驗站

3.1.2 值得借鏡之工廠佈置與配備、方法：



圖 3-6 人工研磨視窗，貼附可更換保護膜，防止磨損



圖 3-7 六人集組磨修站，善用空間，集中氣源配備

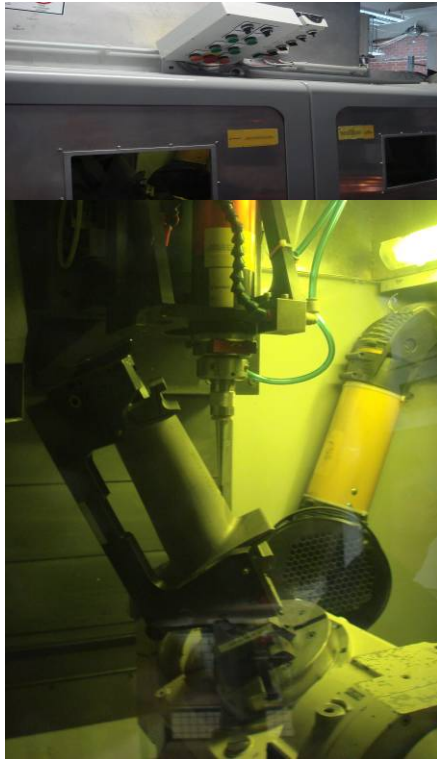


圖 3-8 冷卻孔雷射鑽孔



Cut wire Shot Penning 較亮
葉根緣 Overspray 要磨除



圖3-9 EDM Cut for tip weld



圖3-10 雷射 Tip weld



圖3-11 LVPS : 33mbar
Preheat 700°C

■ 塗層噴塗方式：

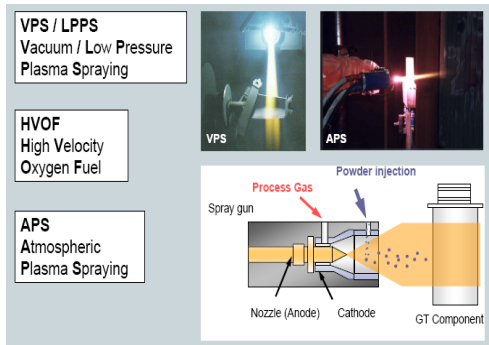


圖 3-12 傳統 VPS,HVOF,APS 塗層噴塗

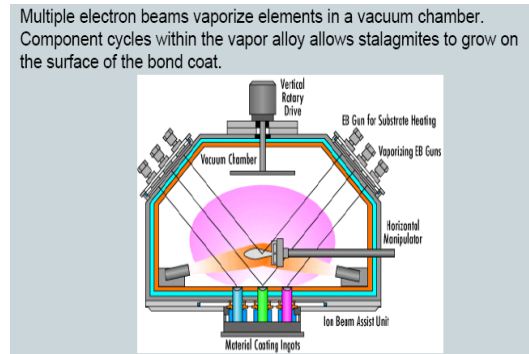


圖 3-13 EB-PVD 電子束蒸鍍

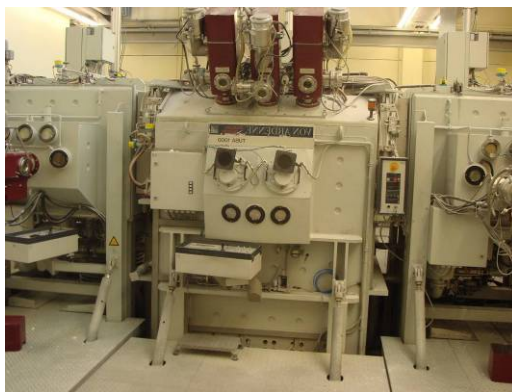


圖3-14 EB-PVD U\$10 Million (Preheat 1000°C兩側 , 3000°C凝結)

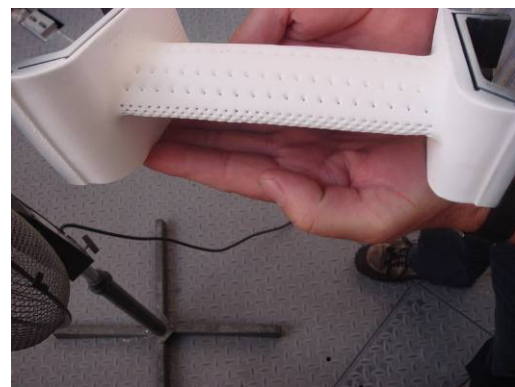
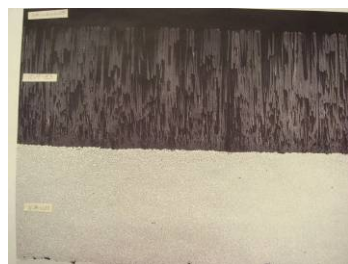


圖3-15 EB-PVD 葉片 TBC 塗層成品及金相組織



■ 金相

分析實驗室：

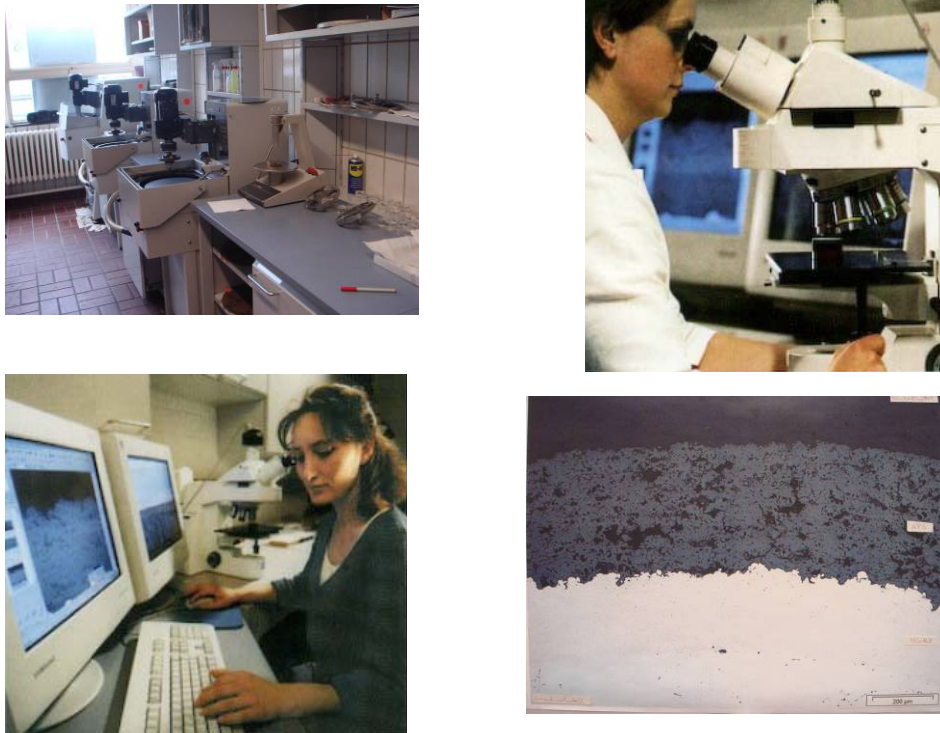


圖 3-16 金相分析實驗室

- 廠辦結合空間利用舒適化：
亮麗的廠房彩繪，利用空橋走道隔間，提供舒適之工作環境，如 3-17 圖示。



圖 3-17

3.1.3 新開發應用之製程技術與非破壞檢測方法：

a. 冷卻孔尺寸精密測量及噴塗前密膠孔洞設備

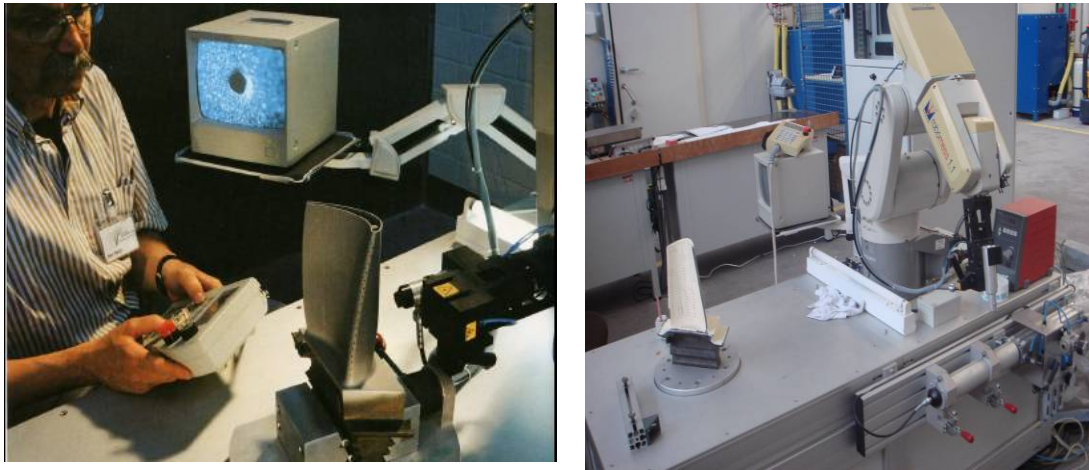


圖 3-18

b. 塗層結合狀況紅外線檢測

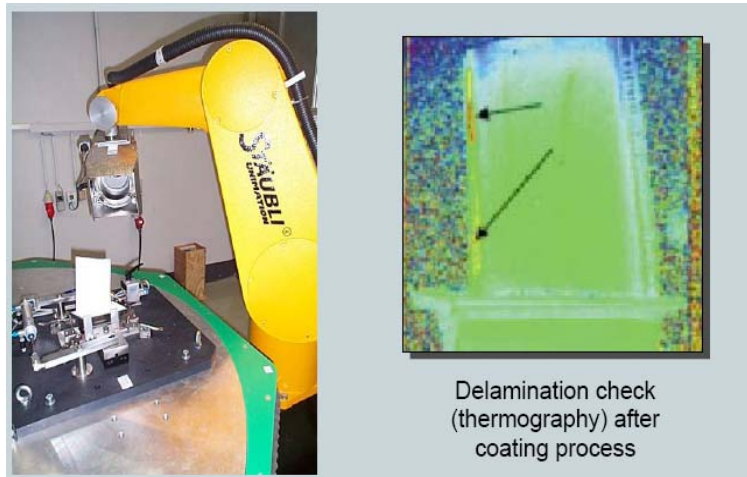


圖 3-19

c. 自然頻率量測



圖 3-20

d. Computed Tomography R&D(X光3D CT,)兩年後可應用

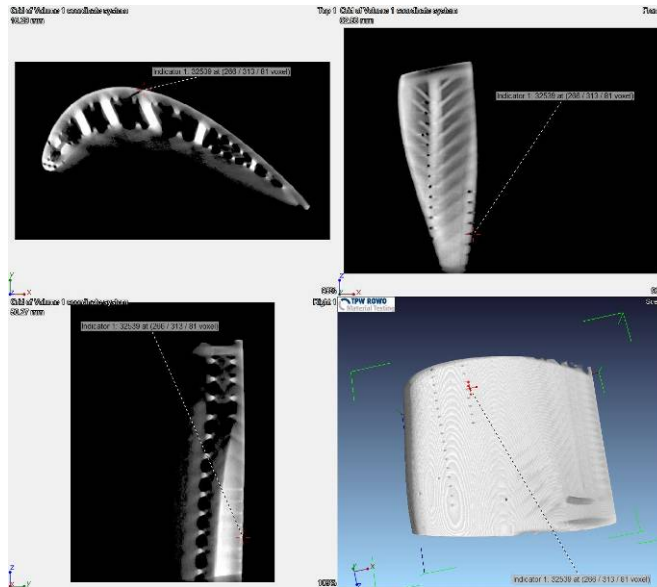


圖 3-21

e. 開發 Pre-Sintered Preforms (PSP , R&D) 焊補方法

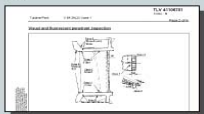
3.1.4 葉片再生檢測評估接受基準(Component Assessment Criteria)

不同組件不同評估標準：圖 3-22

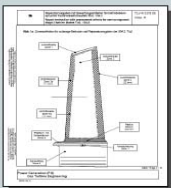
SIEMENS

Inspect & Advice
Component Assessment Criteria (CAC)

- Refurbishment specified by TLV (German: „Technische Liefervorschrift“)
- Different components ► different CAC
- Describes applicable I&A and repair processes incl. acceptance criteria



TLV for V94.3A(2) TLe1
(Stationary vane row 1)



TLV for V94.2 TLa2
(rotating blade row 2)

圖 3-22

NDT 人員與作業程序依據標準：

- Process certificates as per DIN EN 1204
- Inspection requirements as per DIN EN 473
(„Non-destructive testing – qualification & certification of NDT personnel“)

■ 葉片再生Scrap Criteria(參數)：

機型(modern, Advance)、動-/靜葉片-級別、運轉模式、設計壽命、再生次數、燃料：油/氣、可達成之修理措施、
 維修理念：25/33/41 k EOH

■ 葉片再生 Scrap 原因：

裂縫總數、裂縫深度、裂縫長度、裂縫座向、裂縫位置、
 總和各種瑕疵

- 裂縫
- 磨蝕
- 基材損傷(氧化腐蝕)
- 變形
- 材料疲勞(斷裂)



圖 3-23

■ 葉片再生Scrap Criteria (Finding) 圖3-24



圖 3-24

■ 葉片再生Scrap Criteria (Finding)

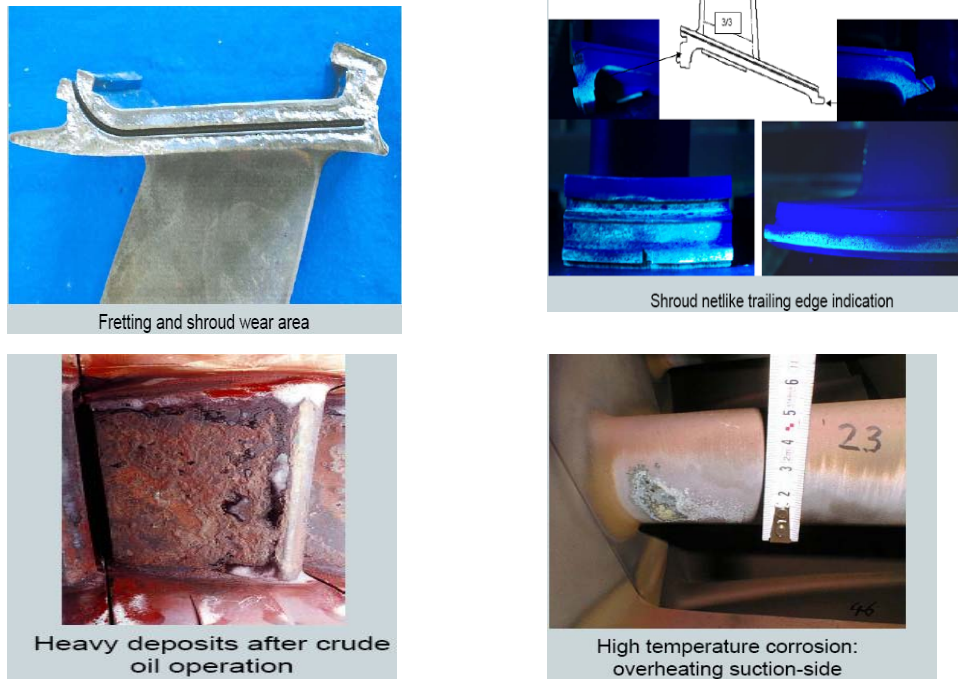


圖 3-25

3.2 氣渦輪機延長壽命檢測 (LTE NDT)技術

SIEMENS 設計氣渦輪機壽命為 100 EPOCH 或 3,000 次起停次數，但若機組在既定之大修中提早更換組件則不在此限。25 K EPOCH 維修概念如圖 3-26。如期執行 LTE 機組運轉風險便可降低，如圖 3-27。

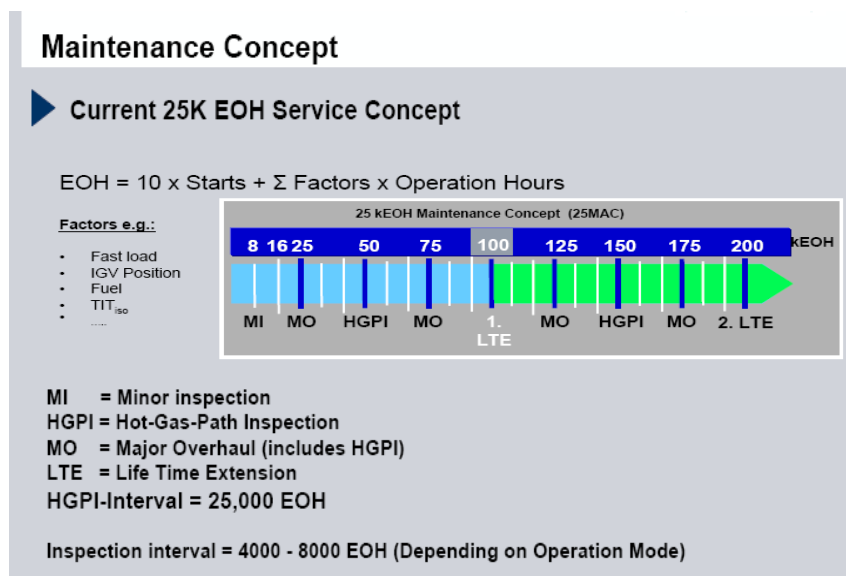


圖 3-26 延長壽命檢測維修機制

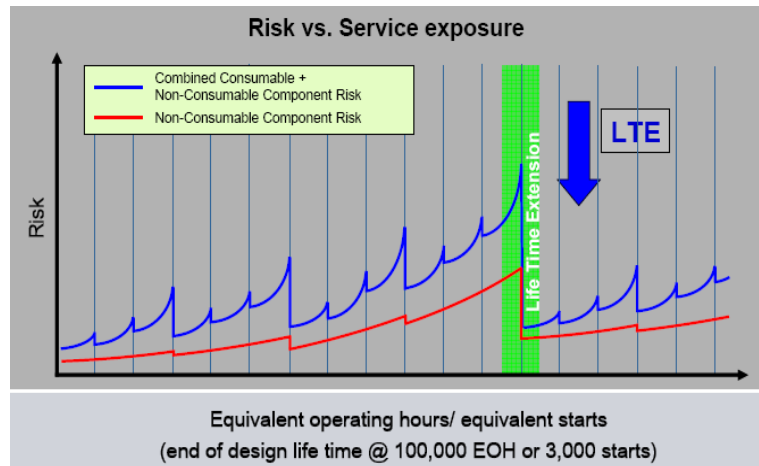


圖 3-27 LTE 機組運轉風險降低

組件壽期之決定，需考慮負荷下之潛變(creep)、低週疲勞(LCF)或沖蝕、腐蝕等因素。為延長機組(組件)之壽期，降低運轉風險，所以要進行壽命延長檢測分析計劃。壽期之所以會有限制，乃由於可能招致之破壞機構效應下而導致壽命消耗(圖 3-29)。包括低週疲勞、潛變、脆化及材料表面承載高溫等所造成的劣化，如下圖 3-28 示。

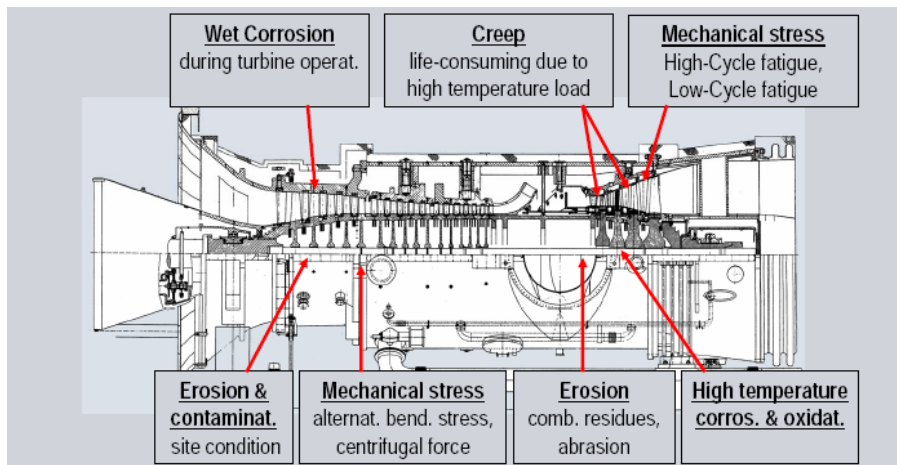


圖 3-28 破壞機構分析

Aging Mechanism and Design Criteria

Components	Design criteria and life expenditure effects						
	Yield strength, stiffness	Time dependent life expenditure			Cyclic life expenditure		
		Oxidation, corrosion, erosion	Wet Corrosion, erosion	Creep	Low-cycle fatigue (LCF)	High-cycle fatigue (HCF)	Crack propagation
Turbine blading	-	■	-	■	■	■	-
Compressor blading	■	-	■	-	■	■	-
Inner casing, mixing chamber, exhaust liner	-	■	-	■	■	□	-
Rotor parts (excl. blading)	■	-	-	-	■	-	■
Pressure-tight casings	■	-	-	-	■	-	-
Piping	■	-	□	-	■	■	-

■ Significant contribution
 □ Affects only locally, if at all
 - Irrelevant
 ■ 顯明, □ 局部, - 不相關

圖 3-29 設計接受標準與壽命消耗效應

3.2.1 破壞機構分析

- LCF，低週疲勞---由於機組運轉起停之大應力/應變作用下，容易產生龜裂(crack) 加上組件表面由於氧化及粗糙之影響，加速產生的破損。

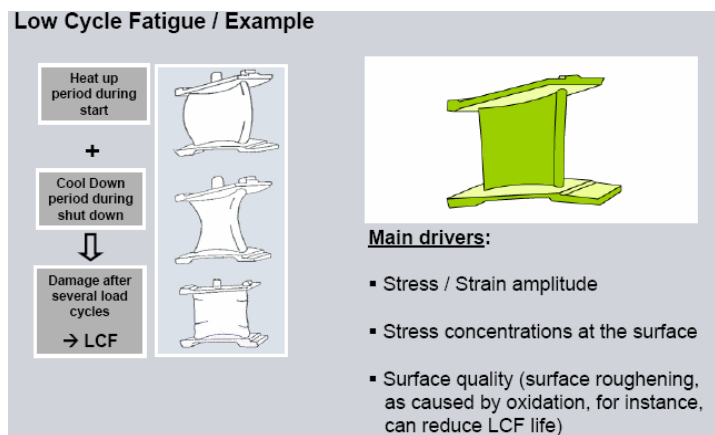


圖 3-30

- 潛變(creep)
由於溫度、應力長期的存在，使組件產生變形由微裂縫成長至大裂縫。
- 高週疲勞(HCF)
由於小應力/應變在急劇變化之運轉循環負載及振動雙衝擊下，產生裂縫，裂縫再成長，最後造成組件破損。葉片根部龜裂就是一例 (如圖 3-31)。

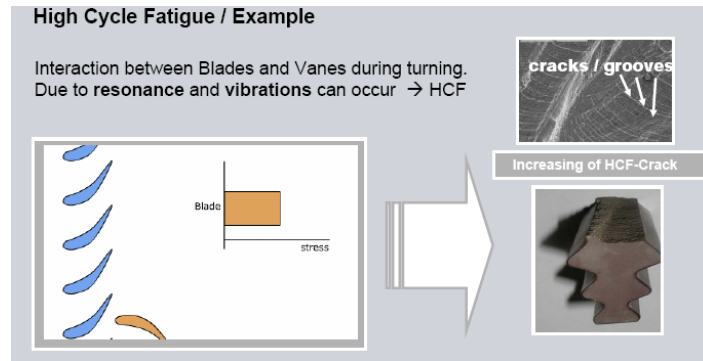


圖 3-31

- 脆化(Embrittlement)

來自環境的影響，包括氫氣、水、異物等的污染，以及來自工作硬化所產生的應力、溫度造成相變化的影響，都是可能的因素。

- 材料表面劣化：

磨耗、沖蝕、氧化腐蝕、組件受損傷、表面粗糙、應力集中等都可能引起疲勞裂縫的起始，也會造成截面積縮小而需承載更大之應力，進而使組件之壽期縮短，提早破損。葉片點蝕即是一例(如圖 3-32)

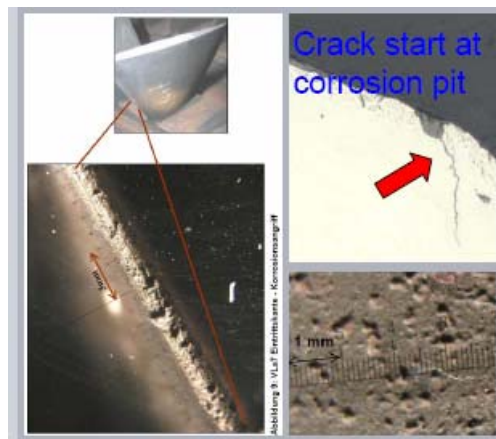


圖 3-32

3.2.2 壽命延長檢測分析計劃

為防止產生 3.2.1 所述之破壞機構而不知，因此需擬定壽命延長檢測分析計劃 (LTE)，包括各項組件的非破壞檢測，以及現場取樣金相分析與機械性能測試。非破壞檢測計劃如下表 3-1 表所述：

Design group	Component	Advice	Check for
Rotor Section			
	Intermediate shaft, entire testable surface	magnetic leakage flux method ultrasonic testing	Cracks (v, MP, UT)
Page 29	Rotor, all rotor components	Visual inspection (v) eddy current testing magnetic leakage flux method Ultrasonic testing mechanized UT bore inspection	Re-qualification
Page 30	Compressor discs	magnetic leakage flux method Ultrasonic testing mechanized UT bore inspection	Cracks (v, MP, UT)
Page 31	Tie rod, entire testable surface	magnetic leakage flux method Ultra sonic testing	Cracks (v, MP, UT)
Page 31	Damping Cones	All damping cones needs to be replaced at 100,000 EOH	
Page 32	Middle Hollow Shaft	magnetic leakage flux method Ultra sonic testing Geometric measurement at last major overhaul prior to LTE and at LTE	Cracks (v, MP, UT) Damage / deformation (v)
Page 32	Turbine rings I, L, X	magnetic leakage flux method Ultra sonic testing Geometric measurement at last major overhaul prior to LTE and at LTE	Cracks (v, MP, UT) Damage / deformation (v)
Page 33	Tie rod nut, entire testable surface	magnetic leakage flux method Ultra sonic testing	Cracks (v, MP, UT)
Page 33	Front hollow shaft	magnetic leakage flux method Ultra sonic testing	Cracks (v, MP, UT)
Page 33	Rear hollow shaft, entire testable surface	magnetic leakage flux method Ultra sonic testing	Cracks (v, MP)
Page 34	Turbine disc 1-4	Ultra sonic testing magnetic leakage flux method mechanized UT bore inspection	Cracks (v, MP, UT)
Compressor Section			
Page 35	Compressor blades	Replacement recommended for efficiency recovery and low risk operation.	Damage (v) Cracks (v) Deposits (v) Material loss (v) Corrosion (v) FOD's (v)
Page 35	Compressor vanes	Replacement recommended for efficiency recovery and low risk operation.	Damage (v) Cracks (v) Deposits (v) Material loss (v) Corrosion (v) FOD's (v)
Page 37	Compressor vane carrier I, transition to extraction, half joint area and guideways	magnetic leakage flux method	Cracks (v, MP)
Page 37	Compressor vane carrier II, transition to extraction, half joint area and guideways	magnetic leakage flux method	Cracks (v, MP)
Page 37	Compressor vane carrier III, transition to extraction, half joint area and guideways	magnetic leakage flux method	Cracks (v, MP)
Page 37	Compressor outlet diffuser	magnetic leakage flux method	Cracks (v, MP)
Turbine Section			
Page 38	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
Page 38	TLe4, entire vane	Replacement of TLe4 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
Page 38	TLa3, entire blade	Replacement of TLa3 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 blades at beginning of refurbishment, closest possible to 100,000EOH
Page 38	TLa4, entire blade	Replacement of TLa4 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 blades at beginning of refurbishment, closest possible to 100,000EOH
Page 39	Turbine vane carrier	penetrant testing	Cracks in the area of the cooling air holes (v, PT)
Page 39	Seal ring segments	Replacement dependent on findings according to major overhaul checklist or when vanes will be replaced (sequential replacement possible)	Damage / deformation (v)
Burner Section			

Design group	Component	Advice	Check for
Page 41	Bumer inserts	Replacement recommended In dependence on findings operation for further major overhaul interval (max. 133 kEOH) possible.	
Page 41	Flame tube bottom segments	Replacement recommended In dependence on findings operation for further major overhaul interval (max. 133 kEOH) possible.	
Page 41	Flame tube	NDE in case of findings	
Page 41	Mixing casing	Replacement recommended Further operation for additional Interval (max. 133 kEOH) after metallographic investigation. (sample taking at last minor inspection prior to LTE)	Metallographic investigation
Page 42	Inner casing	Replacement recommended Further operation for additional Interval (max. 133 kEOH) after metallographic investigation. (sample taking at last minor inspection prior to LTE)	Metallographic investigation
Page 42	Outer jacket	magnetic leakage flux method Wall thickness measurement at last major overhaul prior to LTE and at LTE.	Wall thickness measurement Cracks (v, MP)
Page 42	Combustion chamber dome	magnetic leakage flux method Wall thickness measurement at last major overhaul prior to LTE and at LTE.	Wall thickness measurement Cracks (v, MP)
Page 42	Ceramic heat shields	Replacement in dependence on findings	
(Page 42)	Bolts and tile holders	Replacement recommended	
Page 44	Gas distribution (Spider)	Replacement recommended	
Page 44	Bumer, complete	Replacement after 100.000 EOH the latest recommended.	
Page 46	Casing, complete (critical areas like flange connections)	penetrant testing	Cracks (v, PT)
Page 47	Outer Casing	penetrant testing	Cracks (v, PT)
Page 47	Exhaust liner	penetrant testing	Cracks (v, PT)
Page 47	Blow off Pipes, Air Pipes	Fact finding	Cracks Deformation (v)
Page 47	Insulation	Replacement recommended	
Page 47	Turmine, Compressor Support	penetrant testing	Cracks (v, PT)
Page 47	Exhaust compensators	penetrant testing at last minor inspection prior to LTE	Cracks (v, PT, borescope inspection)
Auxiliaries Section			
Page 48	Auxiliaries, general	Recommendation to customer: Overhaul of auxiliaries acc. to manufacturer instructions	Functionality (v)
Page 48	Fuel oil piping on combustion chamber	Measures in dependence on the configuration (contact engineering for clarification) NDE + Wallthickness	Cracks, Deformation Wear (v, PT)
Page 48	Fuel gas piping cc, pilot gas piping	Measures in dependence on the configuration (contact engineering for clarification) NDE + Wallthickness	Cracks, Deformation Wear (v, PT)
Page 48	Ignition gas piping cc	Measures in dependence on the configuration (contact engineering for clarification)	
Page 48	Fuel Gas valves (emergency stop valves and control valves) electro hydraulic converters (including spare parts stored for longer than 3-5 years)	Major overhaul in Berlin shop or Replacement recommended	
Page 48	Fuel Oil valves (emergency stop valves and control valves) electro hydraulic converters (including spare parts stored for longer than 3-5 years)	Replacement recommended	
Page 48	Cooling air and blow-off pipes, pipes, mounting and compensators	Visual inspection for damage and deformation	Damage / deformation (v)
Page 48	Cooling air and blow-off pipes, weld beads	penetrant testing	Cracks (v, PT)
Page 48	Cooling air and blow-off pipes, compensators	Replacement of compensators in dependence on manufacturer and amount of starts	Identification of design of compensators
Page 48	NOx steam cc	penetrant testing	Cracks (v, PT)
Page 48	NOx water cc	penetrant testing wall thickness measurement	Wall thickness measurement
Page 48	Fuel oil valves cc	Major overhaul (in the Berlin shop or the supplier shop) or replacement	
Page 48	Fuel gas valves cc	Major overhaul (in the Berlin shop or the supplier shop) or replacement	
Page 48	Blow off valves	Major overhaul (in the Berlin shop or the supplier shop) or replacement	
Page 48	Revolution controller	When mechanical revolution controller is used, calibration at test stand in Muelheim	

表 3-1 非破壞檢測計劃

針對轉子相關組件以及燃燒系統均依圖 3-33 & 3-35 訂出建議更換組件及維修、檢測位置。

1.轉子相關組件

Rotor related LTE measurements

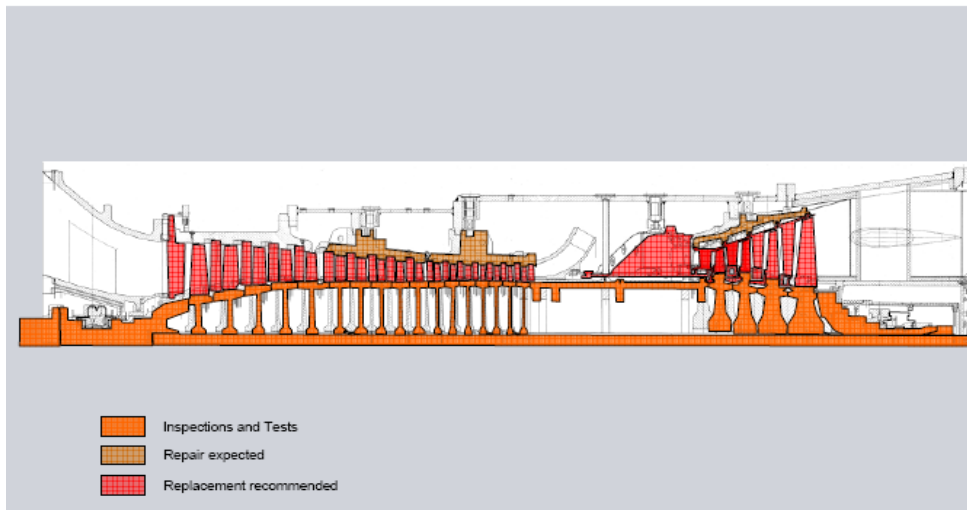


圖3-33

氣機段 葉片(更換)

壓縮段 葉片(更換)

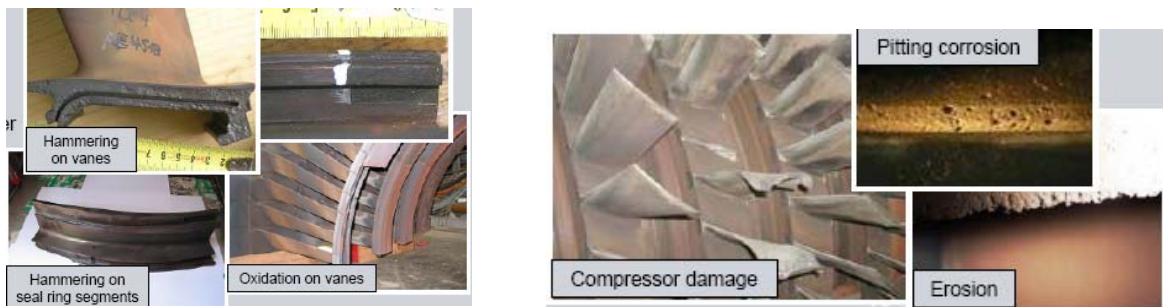


圖3-34

2. 燃燒系統組件

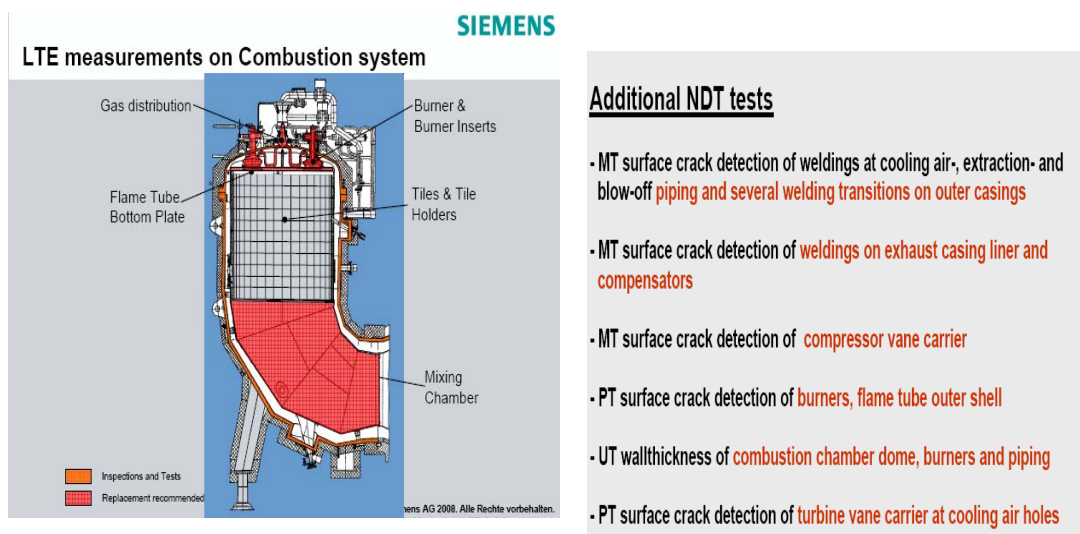


圖3-35

3.氣渦輪機組轉子拆解

所有鍛製轉子組件需執行 MT,UT :

- a.MT 表面瑕疵檢測壓縮/氣機 Disks、
前中後中空軸、中間軸、Tie rod with nut
Turbine rings ，如圖 3-36

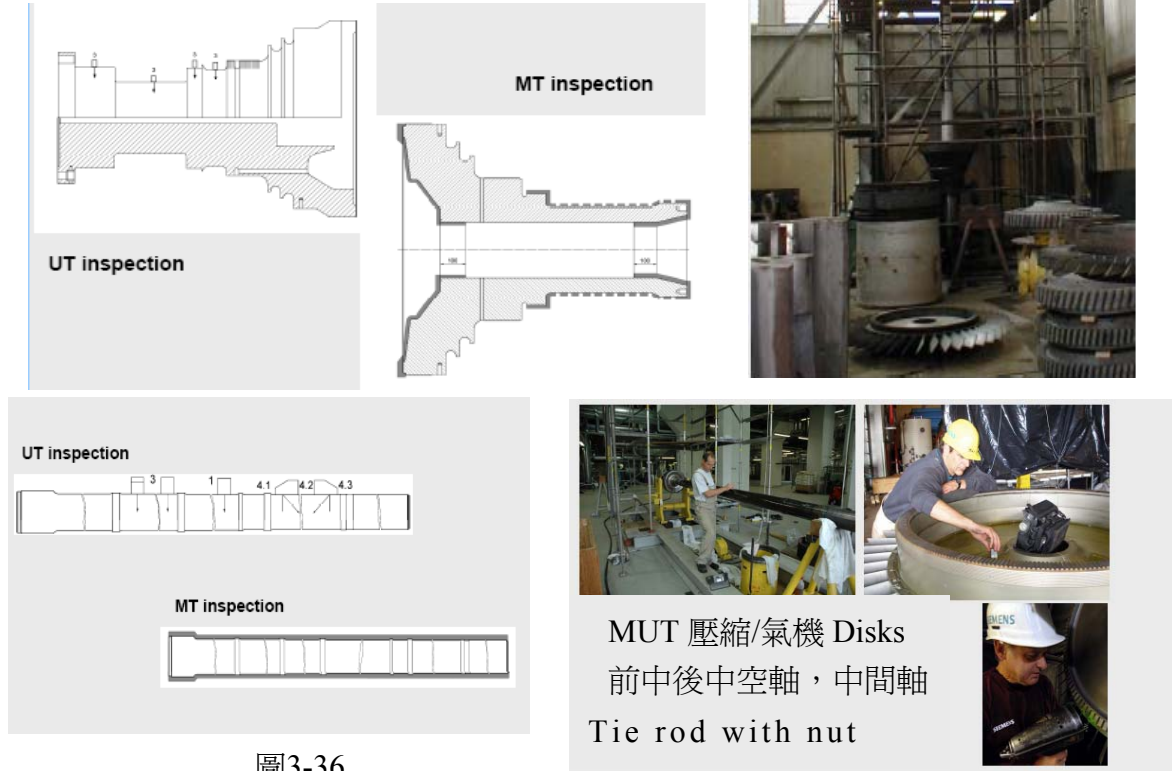


圖3-36

- b. 檢測壓縮/氣機 Disks UT 檢測規劃：

Disks 高應力區 UT，如圖 3-37~圖 3-40。

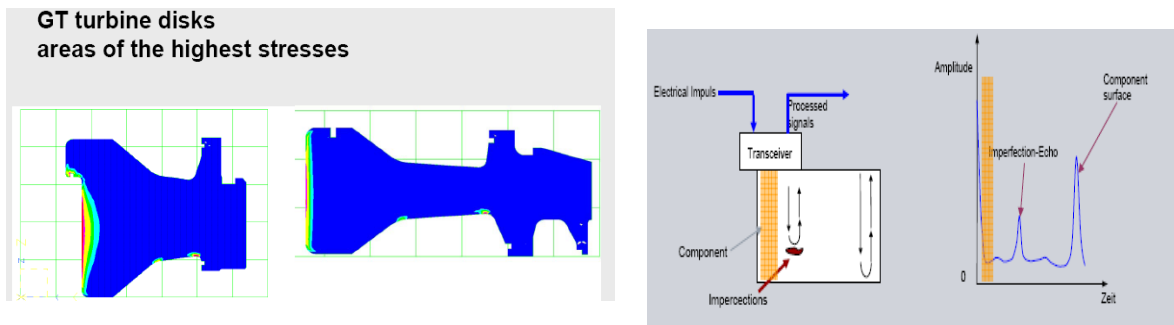


圖3-37 Disks UT 高應力區

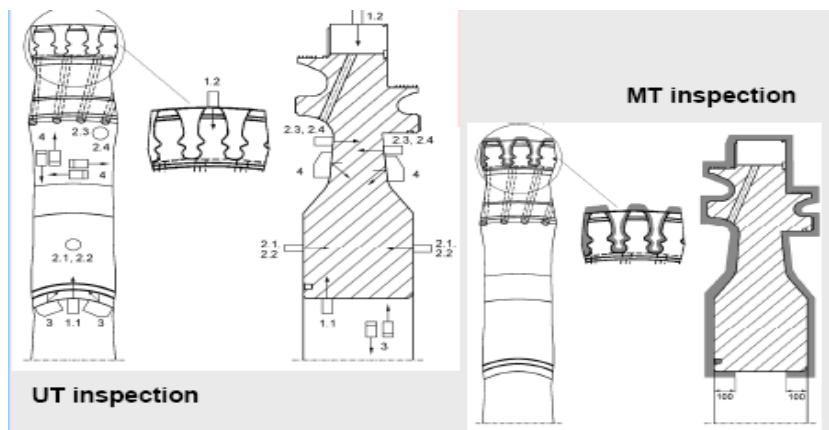


圖 3-38 Disks 高應力區 UT 掃描

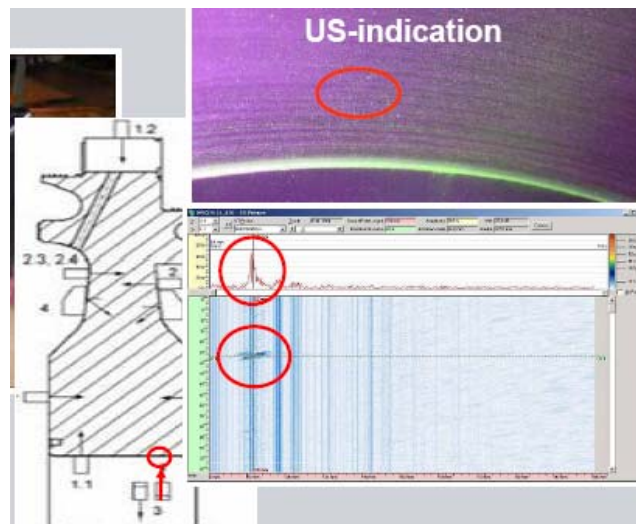


圖 3-39 Disks 瑕疵 UT 訊號

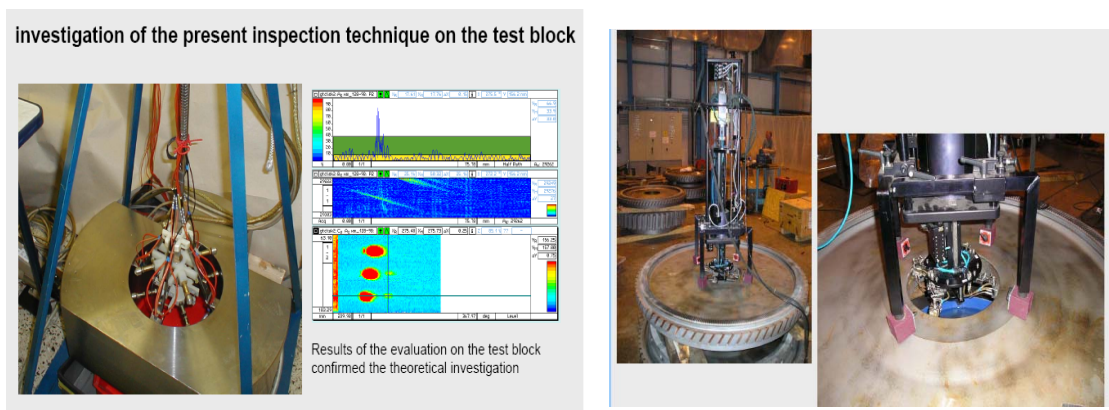


圖 3-40 Disks Disc Hub AUT 超音波檢測前校正與掃描

3.2.3 壽命延長金相分析樣本取樣

a.葉片切片取樣三處：分別在 25%，50%，75%葉片高度，圖 3-41 葉片根部金相觀察與原始金相結構比對分析，機械性能測試與原始設計值進行評估，如圖 3-42。

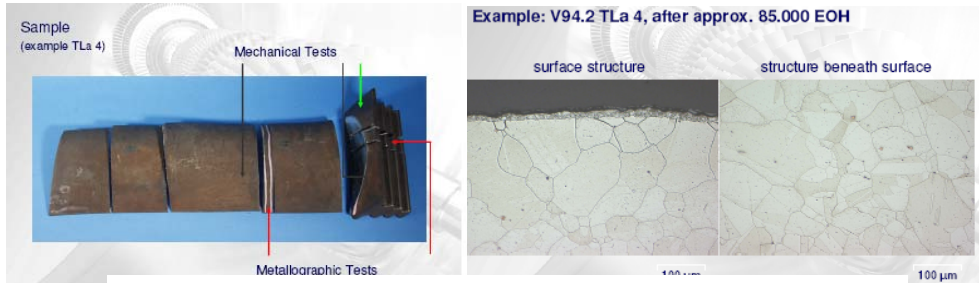
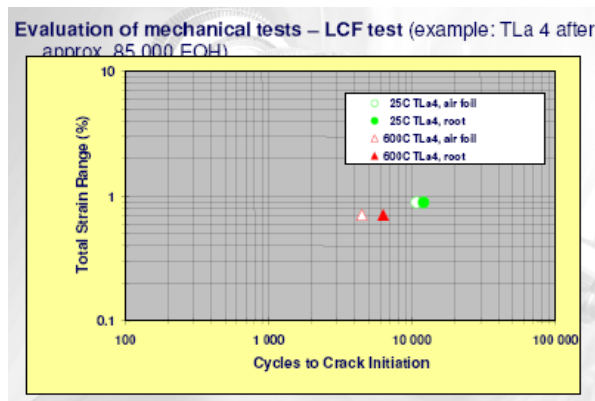
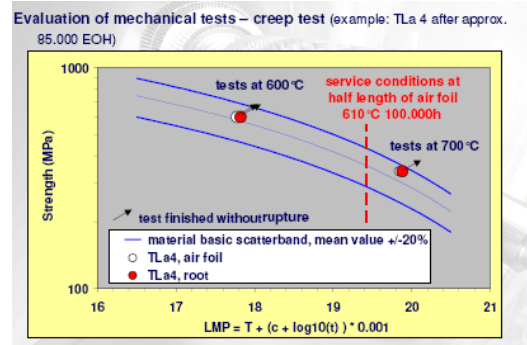
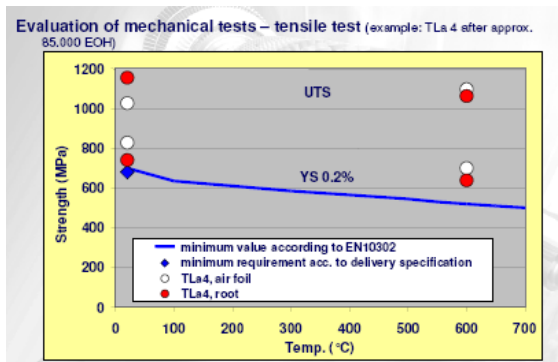


圖 3-41 葉片根部金相觀察與原始金相結構比對分析



圖 3-42 葉片根部抽樣片：
機械拉力測試
潛變測試、低週疲勞測試



b. Inner Casing & Combustion Chamber 現場圓形樣本壽評(圖 3-43)：

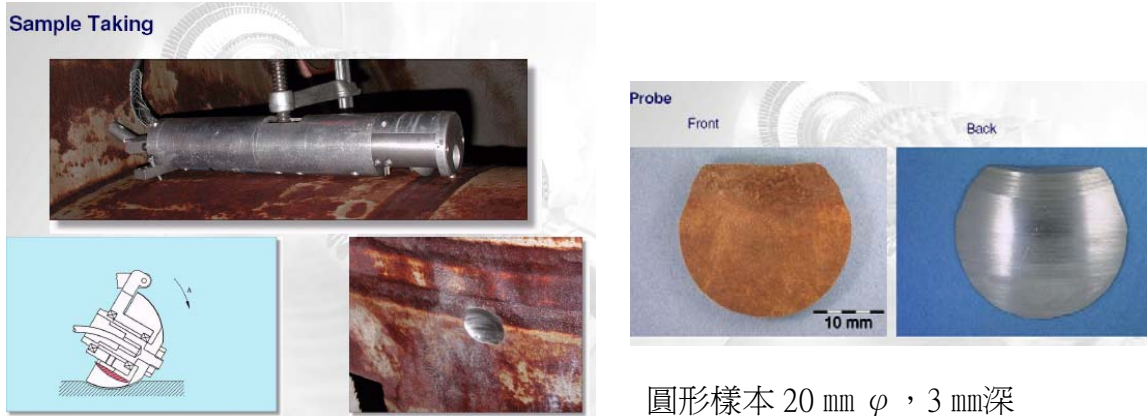
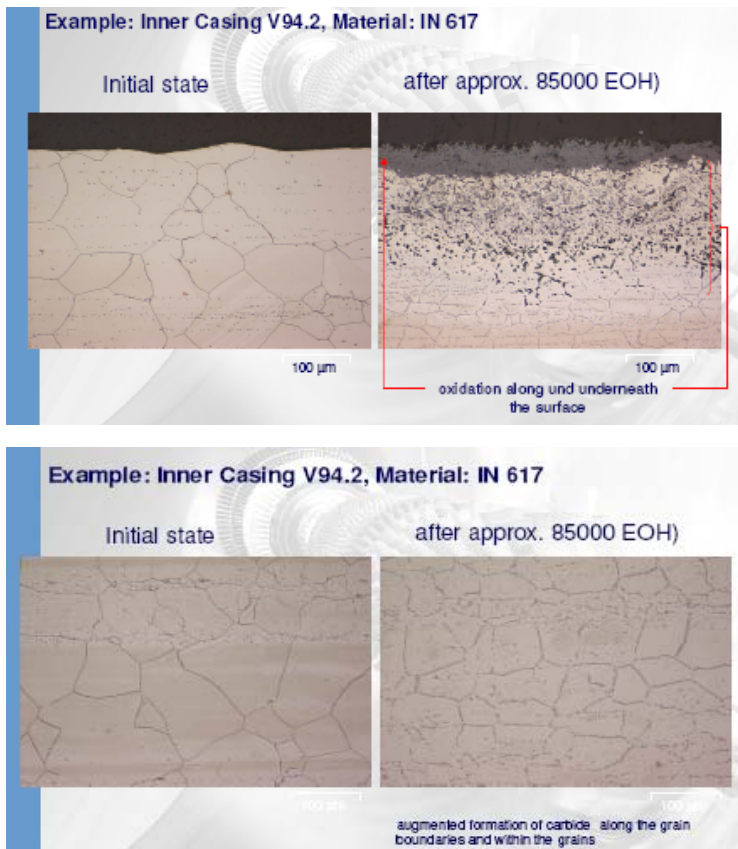


圖 3-43 Inner Casing & Combustion Chamber 現場取樣

分析項目包括晶粒結構，氧化/腐蝕、硬度測量(微硬度與巨觀硬度)。現場圓形樣本壽評，廠家需時 8 週執行金相分析評估，而機械性能測試週期則至少需 2,000 hrs，葉片取樣後分析需耗時 15 週。



氧化
(Inner Casing)

碳化物析出

圖3-44 金相分析評估

3.3 其他連絡事項

3.3.1. SIEMENS OEM 再生檢測報告研討(9608 交貨興達一靜葉片)：

SIEMENS OEM 再生檢測報告研討，研討中提出檢測報告樣本說明(如圖 3-45)，針對本公司委託再生之 9608 交貨興達一靜葉片所提疑議處，結論交由 SIEMENS 內部研討，待廠家內部與 Subcontract 工廠研討後，再一併書面答覆。

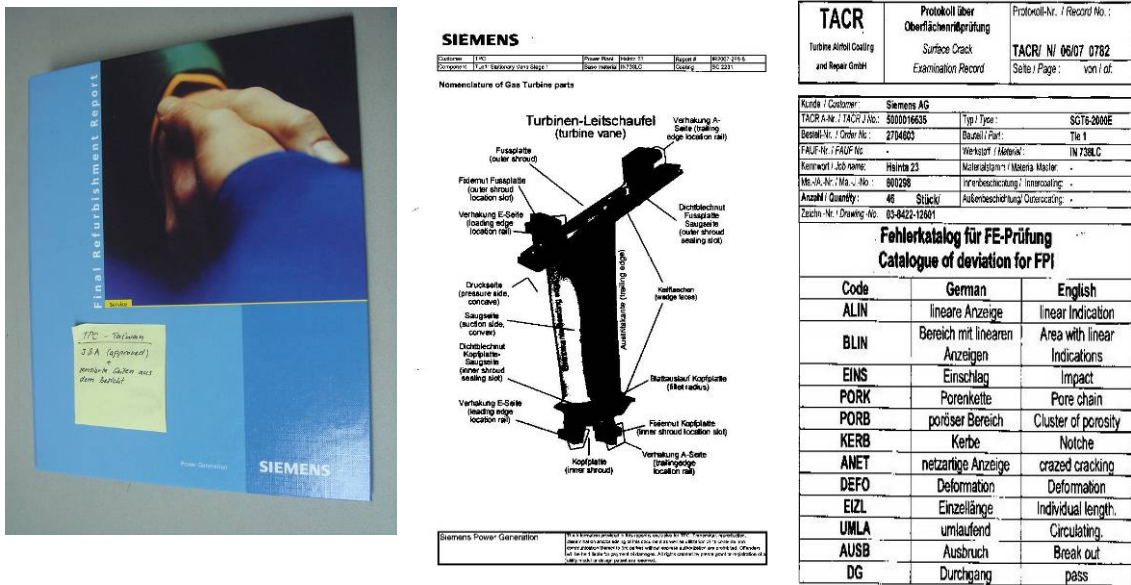


圖 3-45 檢測報告樣本說明

3.3.2.V84.2 第一級動葉片再生合適性探討

SIEMENS 廠家答覆有能力再生，惟早期是因為再生成本相較購置新品費用高，才不建議再生；現今由於商機大，經 SIEMENS 葉片再生 LEADER 向其高層反應後，已願意加入承作第一級動葉片再生工作。

四、氣渦輪機風險評估壽命技術

4.1 氣渦輪機組件風險評估壽命

TWI Risk Wise for Gas Turbine 是針對氣渦輪機熱段組件而開發之風險評估軟體，使用者可自軟體定義出各個熱段組件可能之破壞機構相對應之之風險評估矩陣，據以訂定減緩風險之措施或檢測計劃，評估之熱段組件包括 Nozzle /vane, shroud blocks, blade/buckets(如圖 4-1)。

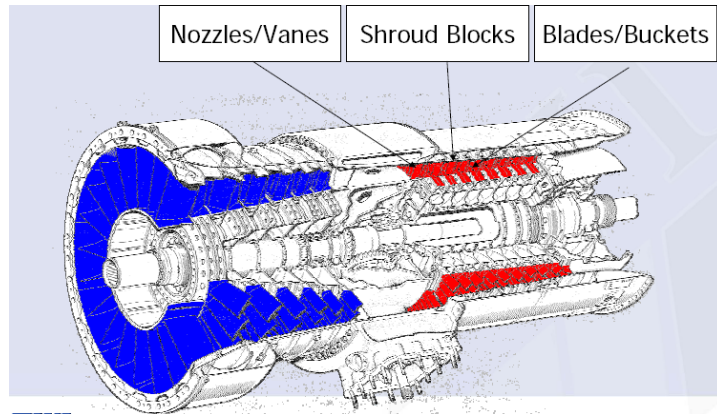


圖 4-1

4.1.1 風險評估需輸入組件之基本特性資訊及其背景：

- * 廠家設計建議
- * 設計和運轉參數
- * 材料
- * 運轉操作計劃
- * 維修檢測歷史
- * 破壞機構
- * 風險分析

4.1.2 風險評估輸出(如圖 4-2)

- * 廠家檢測間期
- * 風險指標展現與剩餘壽命估算

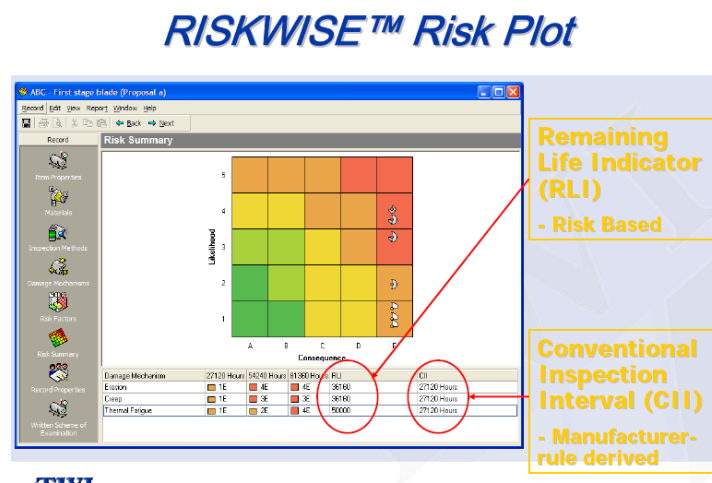


圖 4-2

4.1.3 風險評估程序

1. 選定評估組件，輸入規格特性及運轉操作狀況。
2. 從組件之破壞機構選單中，選定可能之破壞機構原因。
3. 針對組件之破壞機構，由選單選定相對應之檢測方法。
4. 回應 7 個問題---有效的檢測方法和任何嚴酷之操作狀況、決定
likelihood of failure 。
5. 另再回應 5 個問題---演生性之破損可能、人員威脅、決定延續效應
(consequence of failure)

風險評估程序如圖 4-3 ~圖 4-8 。

Build the Gas Turbine Data base

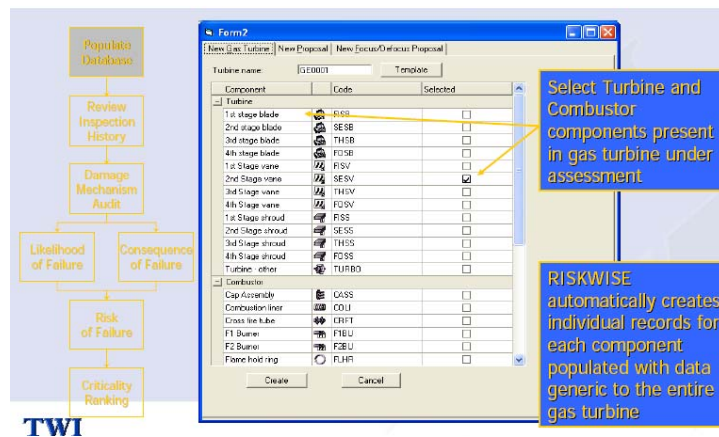


圖 4-3

Enter Basic Information Relating to Item Properties

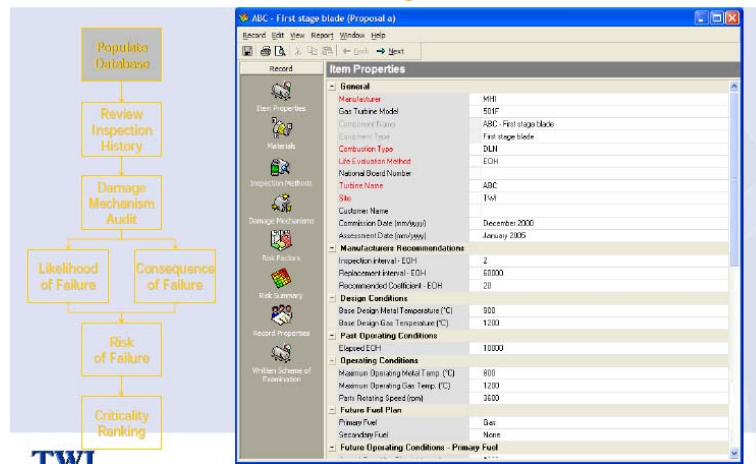


圖 4-4

Enter Inspection History in the Inspection Methods Screen

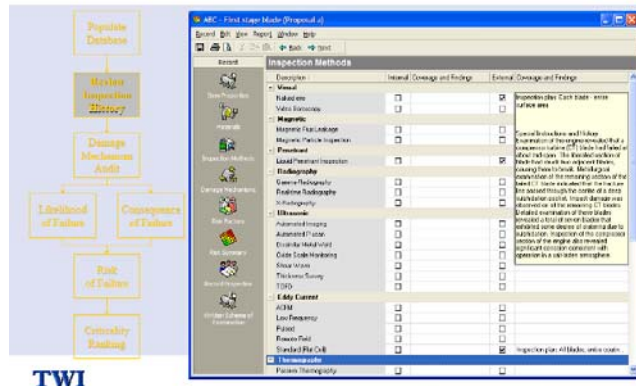


圖 4-5

Damage Mechanisms

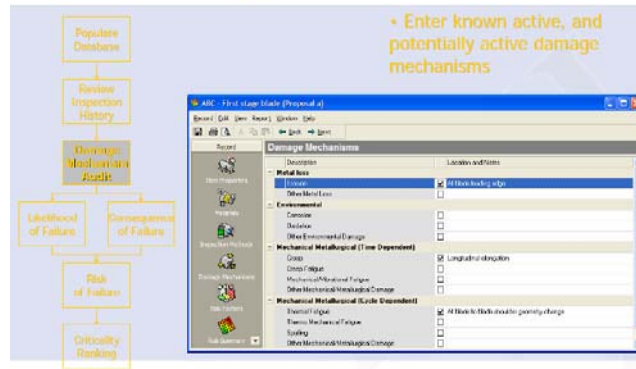


圖 4-6

Risk Analysis

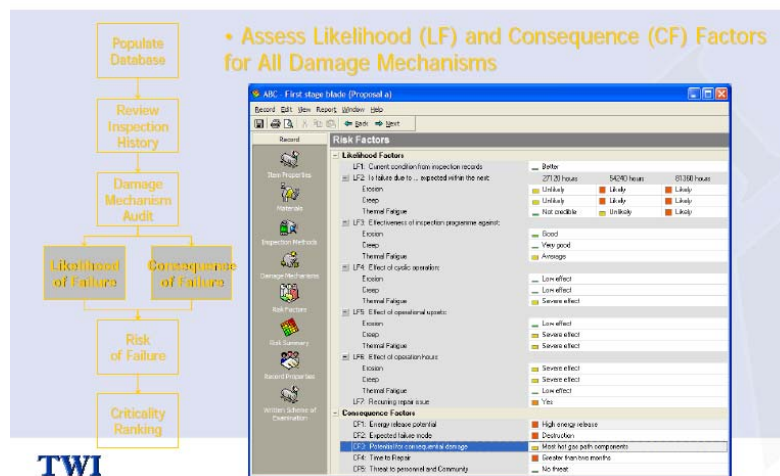


圖 4-7

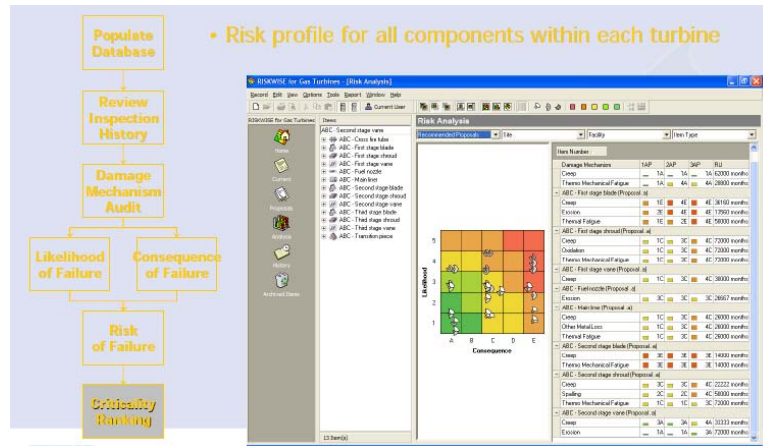


圖 4-8 各組件風險矩陣(RISK Profile)

Focus/Defocus Effect

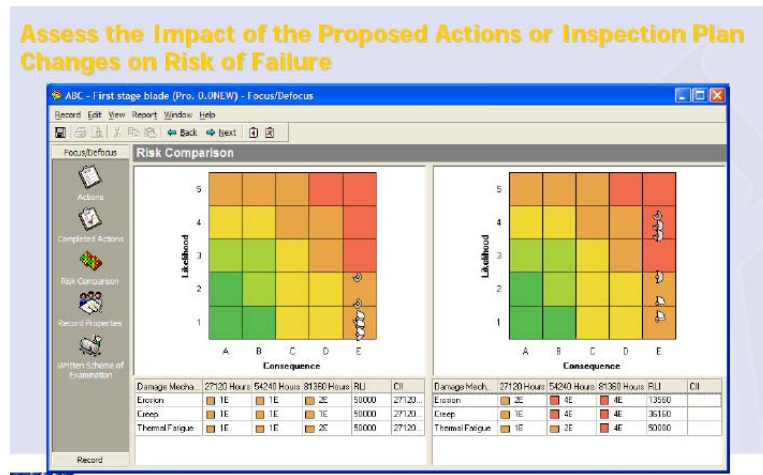


圖 4-9 修正維修計畫評估比較

4.1.4 風險評估軟體應用(獲致成果) RSKIWISE RLI(剩餘壽命指標)：

最適性處置計畫

- * 減少低風險組件之檢測頻率
- * 減緩關鍵組件運轉風險
- * 修正維修計畫

風險評估機制是由破損可能等級(likelihood of failure)和破損延緩效應(consequence of failure)來決定組件之風險等級，它是屬於半定量的分析，對於不同檢測週期之組件也可以分別進行個別風險評估。能針對所評估之破壞機構估算其剩餘壽命，利用實用且可靠循環(route)推導出剩餘壽命指標，可依 EOH 或起停次數，計算慣用檢測週期(CII)，也可讓使用者驗證 CII 或修改 CII。

4.2 TWI 實驗室觀摩



圖 4-9 機械性能測試

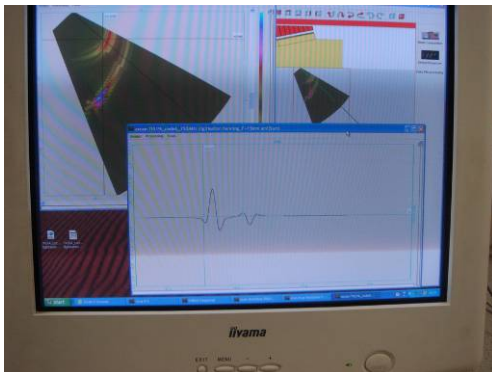


圖 4-10 NDT 實驗室

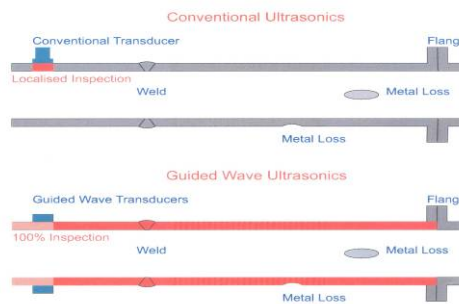


圖 4-11 空間展示與休息區

4.3 新非破壞檢測技術：

4.3.1 Long Range UT: 如圖 4-11

1M 空間架設檢測系統，最多 24 頻道，可檢測 30M 雙向，具備 3% 厚度減薄，5% 厚度減薄之瑕疵檢測能力。



36" dia x 44mm thick gas compression station header inspected using Teletest® to detect corrosion at concrete supports

圖 4-11

4.3.2 ACFM：最大 25mm 裂縫深度量測能力。

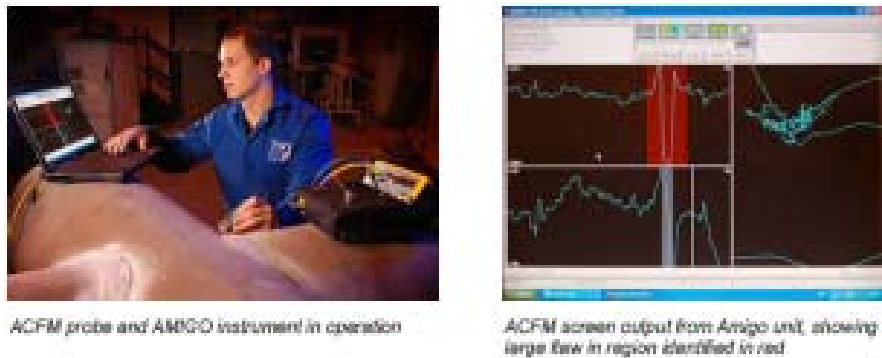


圖 4-12

4.3.3 Computed Tomography (3D CT)



圖 4-13

TWI 研究機構創立於 1946 年，技術工程師約 500 人，有六大部門其中有電力環境部門與本公司性質相關，工作範圍包括水力、火力、核能、替代能源等技術支援，含蓋設計、製造解決(manufacture solution)材料與塗層(material & coating)各種銲接技術(All welding processes)結構可靠度分析(integrity & reliability) 非破壞檢測技術(NDT & Monitoring)、銲修及再生(Repair & refurbishment)。

TWI 能提供會員顧問諮詢、專業服務、合作研發，技術轉移與軟體供應。在參觀 TWI 實驗室時，發現其金相及機械性能測試設備完整，非破壞實驗室之擺設與工場佈置都值得將來本處林口新廠房的參考。由於部分技術僅對會員服務，加入會員分享各項技術成果，也是可考慮的方向，會員費用約 NT\$ 76 萬/年(£12,376/Yr)。

五、氣渦輪機組件渦電流檢測技術

5.1 非/低導電率塗層厚度渦電流量測應用：

由於氣機葉片基材為 IN-783 或 IN-939 與塗層 MCrAlY 之導電率差距不大，傳統渦電流膜厚計無法有效地鑑別出基材與塗層間的差異，因此無法應用於此 MCrAlY 塗層厚度量測。自 GETI 之技術文件中得知若能以導電率測量儀直接測量後，可以自繪製之曲線直接對照得到塗層厚度。經在 GETI 實驗室實作研討，說明如下：

5.1.1 檢測原理：

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 5-1：

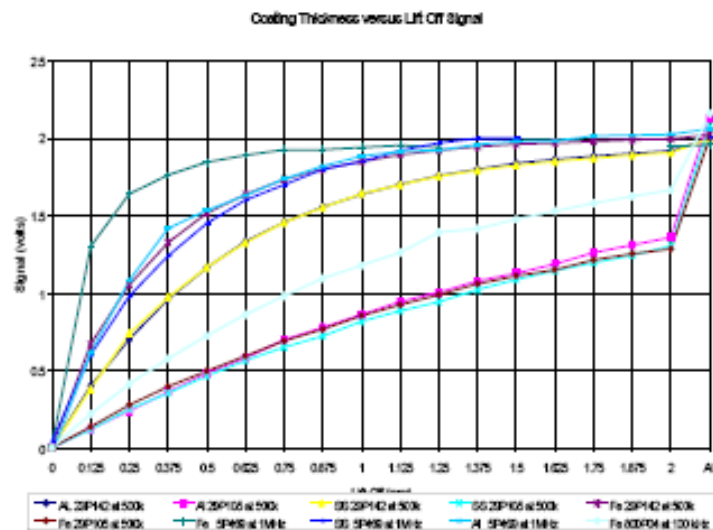
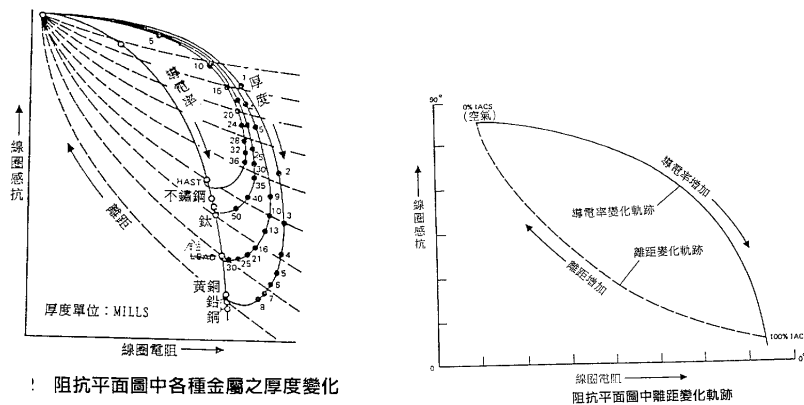


圖 5-1



！ 阻抗平面圖中各種金屬之厚度變化

阻抗平面圖中離距變化軌跡

圖 5-2

離距變動時之阻抗變化軌跡，在離距=0 時，落在該被檢物之導電率點上，如圖 5-2。若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 (0%IACS)。

對高導電率材料(如銅、鋁)言，高頻時--導電率變化的效應不靈敏；在低頻時--導電率變化的效應較靈敏。對低導電率材料而言，在高頻時--導電率變化的效應較靈敏，低頻時--導電率變化的效應不靈敏，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，並增減其可量測之厚度範圍。

5.1.2 結論：

1. 裸露(un-shield)探頭所量測得之塗層厚度絕對值，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. 裸露探頭對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. 裸露探頭不受材料改變的影響。
5. 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。
6. 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與塗層導電率差差距不大，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，得到相當之塗層厚度，如圖 5-3。

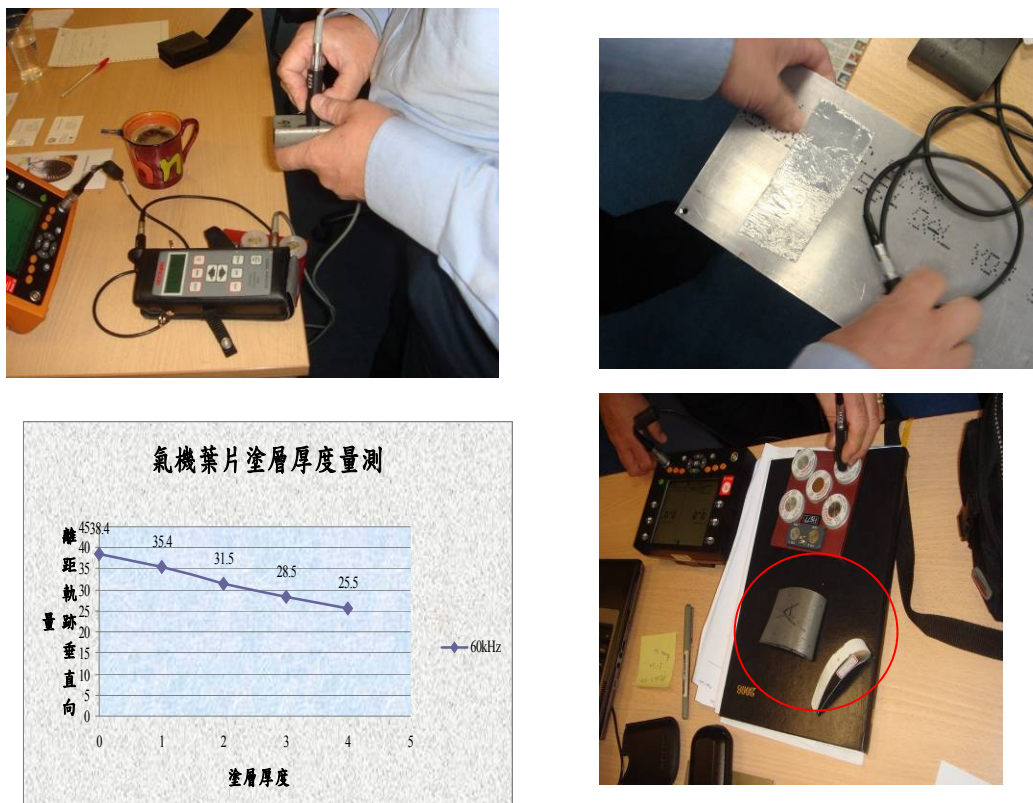


圖 5-3

5.2 氣機葉片 Leading / Trailing Edge 渦電流檢測：

“C”形探頭頻率：2 MHz，檢測應用如圖5-4。

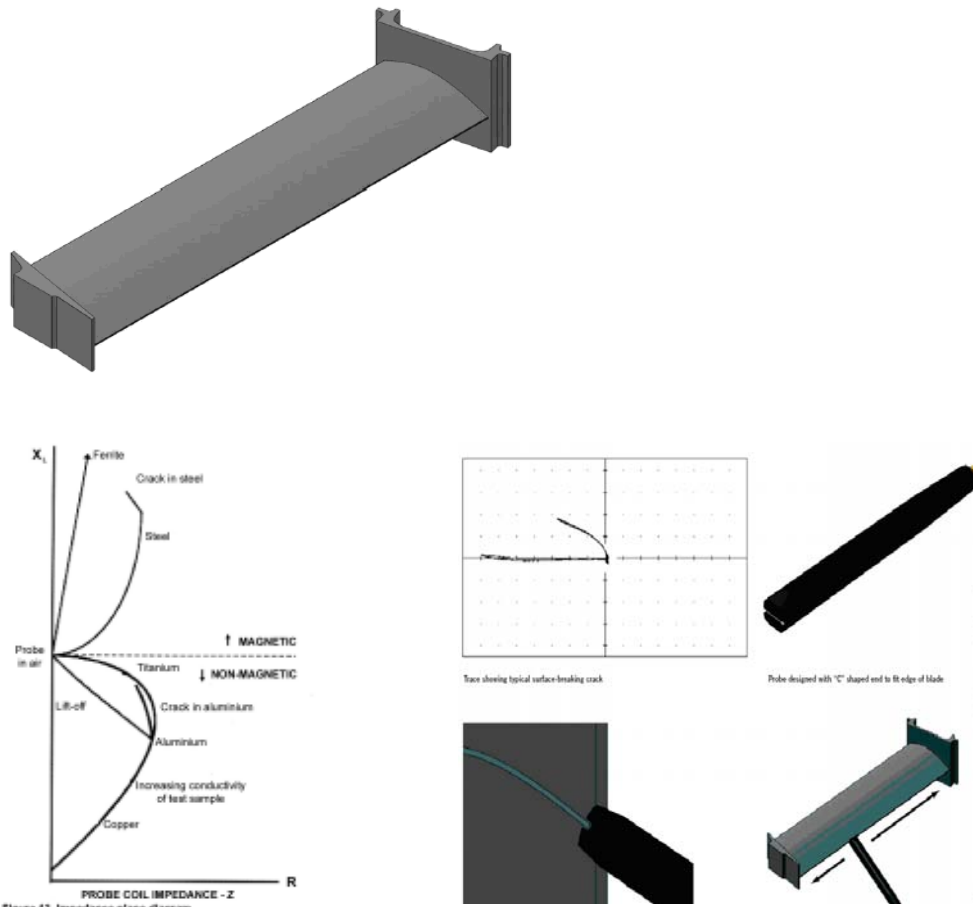


圖 5-4

5.3 渦電流檢測其他應用：

5.3.1 冷凝器端板管口渦電流檢測

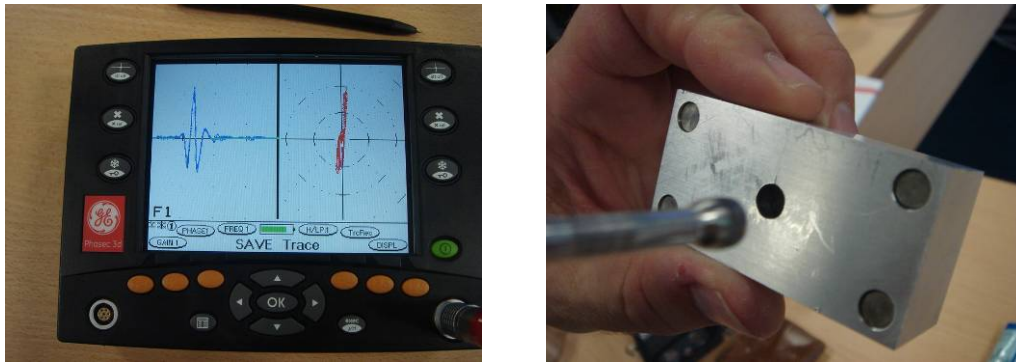


圖 5-6 冷凝器端板管口

5.3.2 鐵軌表面裂縫渦電流檢測

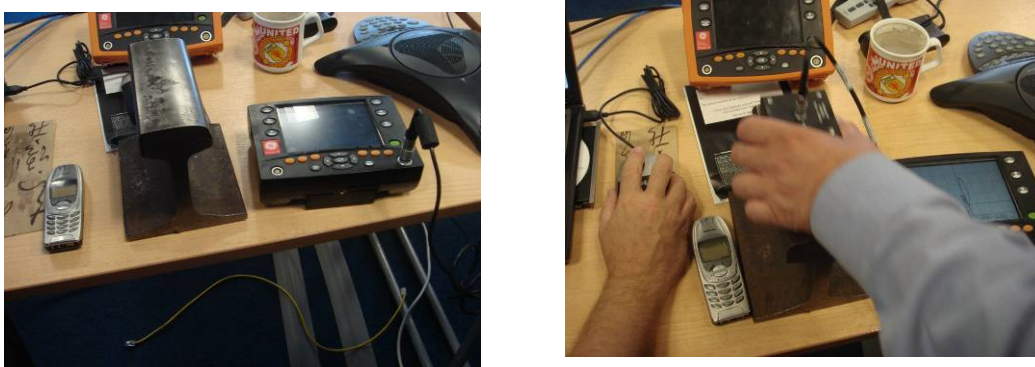


圖 5-7 鐵軌表面裂縫檢測

5.3.3 底板內面腐蝕檢測(Pulsed eddy current to measure wall loss in aluminum alloy plate)：檢測應用如下圖 5-8。

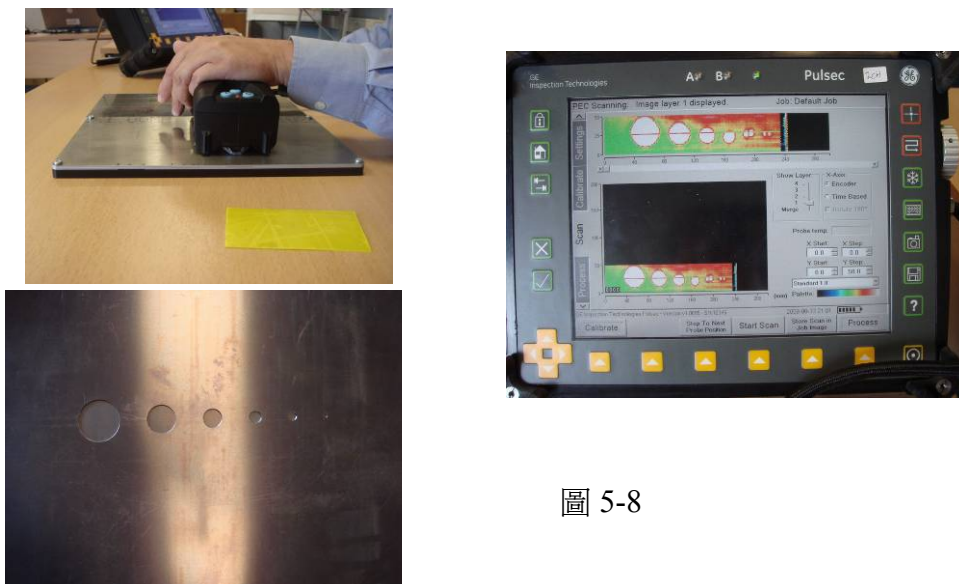


圖 5-8

參、出國期間所遭遇之困難與特殊事項

- 1.出國前，研習的項目都有事先與欲前往公司(機構)充分溝通，研習機構也能妥善準備與安排各專業人員共同研討交流。針對本公司的需求，也提供了詳盡的建議與說明，可謂收穫豐富。
- 2.研習過程中，資料不齊全或錯誤時，在向其詢問後，研習之公司(機構)都能快速備妥相關資料，送達討論，其敬業之精神及效率，值得讚佩；未盡周詳之資料，對於職所提出之需求，也能於事後用郵寄或電子郵件方式順利寄達本處，可見商機競爭之重要性。
- 3.公務出國 18 天(本公司規定超過 15 天日用費減半)，日用費減半自第 1 天就起算，極不合理。相當只領得 9 天日用費。又因為研習公司機構屬歐系國家，拜訪期間其住宿、生活費等開銷都相當昂貴，造成個人出國預算不夠支應，嚴重透支。

肆、對本公司之具體建議

- 1.義大利 CECI 氣渦輪機葉片多頻掃描式渦電流檢測評估系統 (FSECT)，除了能檢測塗層進行劣化程度分析外，葉片金屬厚度也己能同時進行測量，不僅適用於製造廠家、電廠外，也能作為葉片再生維修或研究單位的檢驗利器，國外已有據此延後定期維修的案例，節省了可觀的維修費。
因此適時引進此檢測評估系統，先建立葉片等熱段組件塗層劣化資訊，再配合氣渦輪機機組定檢或大修檢測，可提供檢測結果展延運轉間期與否之依據，由 Time base 改為 Condition base 維修概念，同時也是進行壽命延長檢測及評估最佳選擇的參考。
- 2.SIEMENS 氣渦輪機原製造廠葉片再生製程檢測技術值得借鏡，適時沿用延長壽命 (LTE) NDT 及現場取樣金相分析與機械性能測試技術，將可促成公司機組運轉之安全。葉片再生製程廠房之廠辦合一，空間利用概念，也值得將來本處林口新廠房佈置之參考。
- 3.TWI 氣渦輪機風險壽命評估軟體，可降低運轉風險。針對各項破壞機構修正措施，運算剩餘壽命指標，提供風險估算，值得引進。TWI 新開發之非破壞檢測技術 LRUT、ACFT 也都值得導入應用。
- 4.建議加入 TWI 會員(Membership)，才能分享其既有技術及未來各種技術諮詢，對

於本公司正研究之各項研發工作助益極大，特別是在氣渦輪機葉片再生雷射焊接技術上。

- 5.非/低導電率塗層厚度應用，能以導電率(渦電流)量測儀直接測量，可以獲致之數值為絕對數字，自繪製之曲線直接對照得到塗層厚度。在FSECT未引進前，可應用於氣機葉片基材為 IN-783 或 IN-939 與塗層 MCrAlY 之導電率差距不大之塗層厚度測量上。
- 6.GTI 氣機葉片渦電流檢測(Leading / Trailing Edge)，專用探頭可直接應用至現場檢測上，以滿足本公司及類似國光電廠工作委託之需求。