

出國報告（出國類別：實習）

# 研習相位陣列超音波及遠場渦電流檢測及參加 10th EPRI Balance-of-Plant Heat Exchanger NDE Symposium 研討會

服務機關：台電電力修護處南部分處

姓名職稱：鍾明雄/檢驗課長

派赴國家：美國、加拿大

出國期間：97年06月15日~97年06月29日

報告日期：97年08月25日

QP-08-00 F04

行政院及所屬各機關出國報告提要

出國報告名稱： 研習相位陣列超音波及遠場渦電流檢測及參加 10th EPRI  
Balance-of-Plant Heat Exchanger NDE Symposium 研討會

頁數 26 含附件：是 否

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

出國人員姓名/服務機關/單位/職稱/電話：鍾明雄/電力修護處南部分處/品質組  
/檢驗課長/(07)2510195 ext.254

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6月15日~97年6月29日 出國地區：美國、加拿大

報告日期：97年8月25日

分類號/目

關鍵詞：非破壞檢測、相位陣列超音波、遠場渦電流、EPRI

內容摘要：（二百至三百字）

汽機、氣渦輪機以及鍋爐、熱交換器係發電系統之重要組件，為維護機組運轉安全，常需藉助於非破壞檢測，尤其相位陣列超音波及遠場渦電流檢測係未來發展重點項目，檢測需求日益增加，爾來機組延壽或大修，對於汽機葉根槽相位陣列超音波檢測以及鍋爐管潛在問題檢測的需求與日俱增，相關設備如能自行檢測，可節省巨額費用。為對該二項技術有所突破，遂赴美國及加拿大相關單位研習相關技術。本報告敘述出國行程、各工作地點之見聞、相位陣列超音波及遠場渦電流檢測之新發展技術、對解決本公司相關設備之應用探討，以及實習心得等。

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

# 目 錄

	<u>頁數</u>
一、 出國事由-----	4
二、 出國行程-----	4
三、 任務執行過程	
四、 研習過程及內容-----	7
1. NDE Associates-----	7
2. Corestar corp-----	8
3. Zetec Inc.-----	10
4. Russell Inc.-----	14
5. 參加 EPRI 10th EPRI Balance-of-Plant Heat Exchanger NDE Symposium 及 Corestar Group Meeting -----	16
五、 研習過程及內容 -----	20
六、 實習心得-----	20
七、 建議事項-----	26
八、 返國座談會簡報資料 -----	26

## 一、 出國事由

汽機、氣渦輪機以及鍋爐、熱交換器係發電系統之重要組件，本部門負責電廠汽機、氣渦輪機以及鍋爐等熱交換設備之非破壞檢測工作，希望對檢測及分析技術有所突破，尤其相位陣列超音波及遠場渦電流檢測係未來發展重點項目，檢測需求日益增加，爾來機組延壽或大修，對於汽機葉根槽相位陣列超音波檢測以及鍋爐管潛在問題檢測的需求與日俱增，相關設備如能自行檢測，可節省巨額費用。為對該二項技術有所突破，擬赴美國及加拿大研習相關技術。相位陣列超音波方面擬赴 NDE Associates Inc.,及 Zetec 公司魁北克超音波總部研習，遠場渦電流則赴 Corestar 及 Russell 公司研習，另順道參加 10th EPRI Balance-of-Plant Heat Exchanger NDE Symposium 研討會，研習及蒐集相位陣列超音波及遠場渦電流檢測之相關應用技術。

## 二、 出國行程

97 年 06 月 15 日	往程 (高雄→Hong kong→Los Angeles→San Antonio)
97 年 06 月 16 日~18 日	在 San Antonio 參加 10th EPRI Balance-of-Plant Heat Exchanger NDE Symposium
97 年 06 月 19 日	在 San Antonio 參加 Corestar Group Meeting 傍晚轉往 Houston
97 年 06 月 20 日~21 日	在 Houston NDE Associate 研習
97 年 06 月 22 日	轉往賓州 Irwin
97 年 06 月 23 日~24 日	在 Corestar Corp.研習
97 年 06 月 24 日	轉往加拿大 Quebec
97 年 06 月 25 日	在 Quebec Zetec Inc.研習 傍晚轉往 Edmonton
97 年 06 月 26 日~27 日	在 Russell Inc.研習
97 年 06 月 28 日~29 日	返程(Edmonton→Vancouver→Hong kong→高雄)

## 二、 任務執行過程

此次之任務分為二大主題，相位陣列超音波檢測以及遠場渦電流檢測：

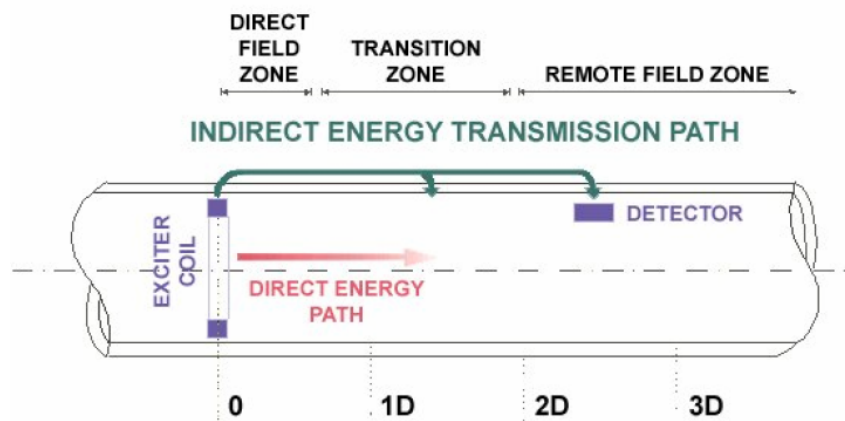
(一)相位陣列超音波檢測：在 NDE Associates Inc.及 Zetec 公司 加拿大魁北克總部研習，另在 10th EPRI Balance-of-Plant Heat Exchanger NDE Symposium 研討會蒐集相關之技術資料。

(二)遠場渦電流檢測：在 Corestar Corp.及 Russell Inc. 研習，另在 10th EPRI Balance-of-Plant Heat Exchanger NDE Symposium 研討會蒐集相關之技術資料。

為便於閱讀此份報告，茲先將相位陣列超音波檢測以及遠場渦電流檢測之檢測法簡介如下：

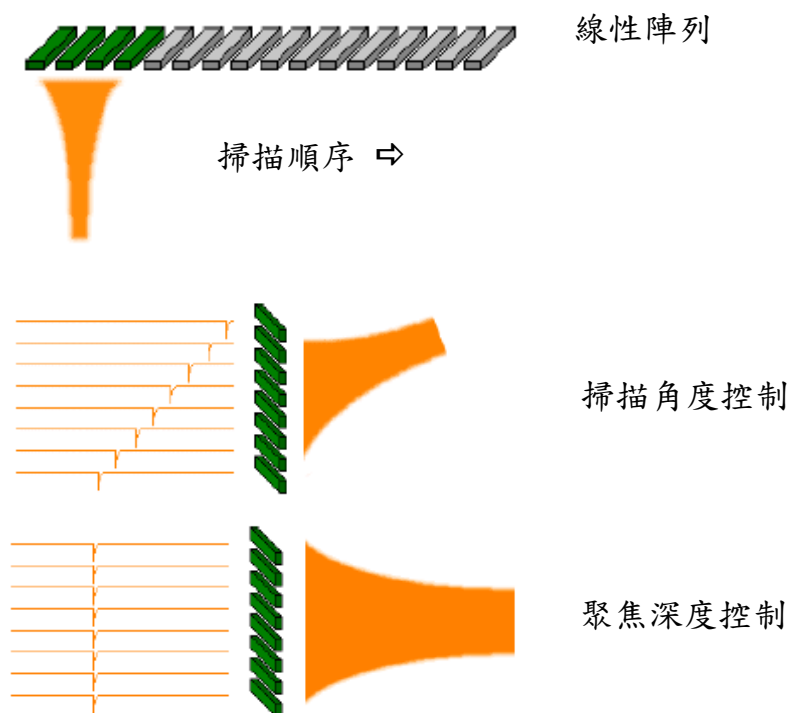
遠場渦電流 (Remote Field Eddy Current Testing, 簡稱 RFT)：

- 使用電磁檢測法之激發/接收法，接收線圈置於遠場區(Remote Field Zone)外，激發及接收線圈相距約 2~3 倍之管徑。  
註：傳統渦電流使用直接耦合區(Direct Field Zone)，另有一種技術使用近場區，如部份磁飽和法。
- 低頻技術，一般使用頻率約 40Hz~20KHz.
- 探頭有單激發/單接收、雙激發/單接收、單激發/雙接收等型式。
- 有內繞及外表面探頭，內繞多用於一般鐵磁性之熱交換器管及鍋爐管，外繞則用於 2 吋以上之管件，如鍋爐管及一般管線。
- 使用電壓平面圖(Voltage Plane)及 X-Y 相位解析法。



相位陣列超音波 (Phased Array, 各種電流技術使用之場域)

- 含數個超音波元件
- 每個元件連接不同的電子通道
- 對每個電子通道施加電子延遲，可控制波束可同時得到不同的掃描角度，並控制聚焦深度，此有別於傳統超音波之單一角度及固定的聚焦深度。
- 對於超音波元件的配置有多種陣列法，如線性陣列、周向陣列、圓型陣列、矩型陣列…等，其中最常用的是線性陣列，如下圖。



因此，相位陣列超音波可以在小範圍內不需移動探頭就可掃描大角度的範圍，而且可避免經常更換不同角度的探頭。

#### 四. 研習過程及內容：分述如下

##### 1. NDE Associates

該公司位於休士頓西南方，靠近 NASA，主要業務為非破壞檢測，另附設一個 NDE 訓練中心。非破壞檢測之主要客戶為工業區之石化及發電廠，主要業務為超音波及渦電流檢測。一般美國之發電及石化業者很少自行執行非破壞檢測工作，大多委託專門機構或檢測公司辦理。雖然我們也是從事檢測工作，但是因為地緣上的關係，業務不會互相影響，因此該公司並不吝於將檢測經驗與台電人員分享。

在 NDE Associates 研習汽機葉片之相位陣列超音波訊號之判讀，分別使用 Omniscan MX 及 GE 之 Phasor 超音波來測試，二種設備皆能有效檢出葉根槽上的人工模擬裂痕。研習之動葉片與本公司週向排列（Typical Wheel Rim Shape）之 HP 轉子以及一般 IPP 或汽電廠之葉片相似，值得參考借鏡。



圖 2. 在 Houston NDE Associates 研習 Phased Array 訊號判讀



圖 3. Disk (葉根槽位之 PA 測試)

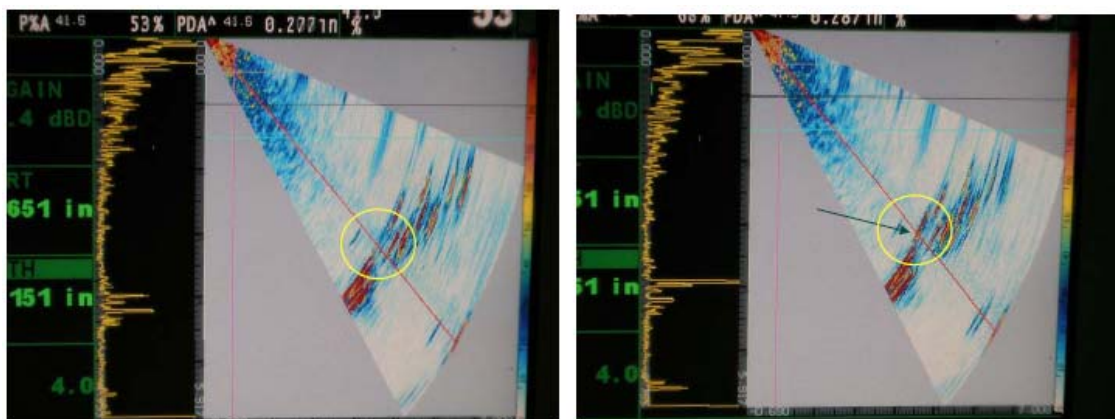


圖 4. 葉根槽位之裂痕顯示，左圖無缺陷，右圖有 1.0 mm 深之裂紋

## 2. Corestar Corp

該公司主要生產渦電流及遠場渦電流檢測設備及探頭，附設有機械廠製作週邊設備及標準管，同時設立一檢測服務部門，因此檢測經驗甚為豐富。在該公司二天的研習中，討論磁性管檢測之技術、Seacure 管(肥粒鐵系不銹鋼)以 RFT 檢測之靈敏度提升、旋轉式探頭之應用、研習 ET 及 RFT 探頭製程、以及討論 RFT 在熱交換器及鍋爐相關的應用經驗、訊號評估等。

台電公司部份電廠如大林、協和、台中等，有些設備已陸續換更為 Seacure 管，Seacure 管屬於肥粒鐵係不銹鋼，具有較高的導磁率，以往必須使



用渦電流磁飽和技術檢測，但因探頭上之磁鐵會吸附管壁，除易磨損外，而且無法使用探頭推送器(Pusher-puller)，因此檢測速度慢，使用遠場渦電流或部份磁飽和法係目前解決此檢測問題的較佳方案。



圖 5. Corestar 研習 RFT 技術

對於 RFT 技術，國內幾乎只用於一般熱交換器的檢測，但 RFT 用於檢測爐管之潛在問題，如氫脆、熱疲勞、腐蝕及潛變等效果很好，而且檢測速度比一般檢測法如超音波測厚及材質衰減法等快了很多，這是我們亟欲發展的檢測法，因為畢竟鍋爐面積大，管排多，局部性的檢測法無法滿足快速檢測的需求。國外因為人工昂貴，且相關之 NDT 人員不多，他們多以快速性及自動化的檢測為主。該公司目前只發展管內 RFT 檢測法，尚未開發管外檢測法。

另外該公司之探頭生產多專注於可拆式探頭，探頭之頭部及纜線部份可分別更換，如此可減少攜帶的數量及備品量，同時此類探頭之耐磨性較高，壽命較長。



圖 6. 可拆式探頭-可減少探頭之消耗及備品

### 3. Zetec Inc.

所參訪的是 Zetec 公司在加拿大魁北克的超音波總部，參訪重點是相位陣列式超音波的應用，包括焊道及發電設備之葉根及根槽之超音波檢測，同是就我們擬用於氣渦輪機轉子之 Disk 檢測方案，以及用於手指型之葉片及根槽之檢測等方案與 Zetec 公司之超音波經理 Laprise 研討，Laprise 亦提供一些改進之建議。討論後的結論是，現在很多工作都可藉助相位陣列式超音波來取代以前認為較為繁複的檢測設備，包括各型式的汽機及氣渦輪機檢測工作。

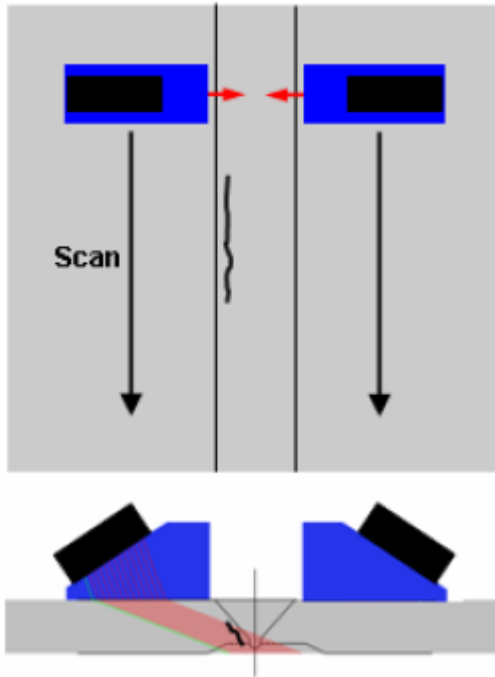
參訪主題為研習相位陣列超音波之應用：

- 焊道
- 汽機
- 氣渦輪機
- 台電現有機組轉子之檢測方案研討

一般 UT & Phased Array 可解決之問題：

- 異材焊道檢測 (Dissimilar Metal (DM) Weld)
- 鍋爐管焊道檢測
- 供料管檢測 (Feeder Tube)
- 現場扣環檢測 (In-Situ Retaining Ring)
- 汽機葉片檢測(Axial Entry)

- 汽機葉片檢測 (Pinned-Root)
- 轉子軸孔檢測 (Rotor Bore)



檢測特色：

- 線性陣列從二側檢測：7.5 MHz, 32 elements
- 線性掃描45, 55 and 65 SW, 扇型掃描
- TOFD (需要時)
- 作用晶片 (aperture)：典型 5 x 5 mm
- 單行圓週掃描, 解析度 1 mm, 速度可達 10 mm/s

圖 7. 爐管焊道檢測示意圖

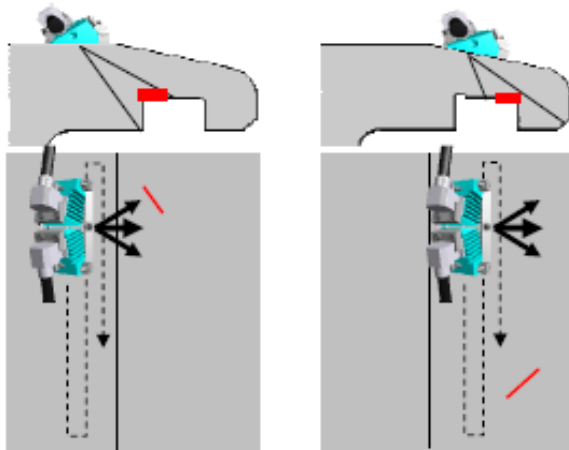
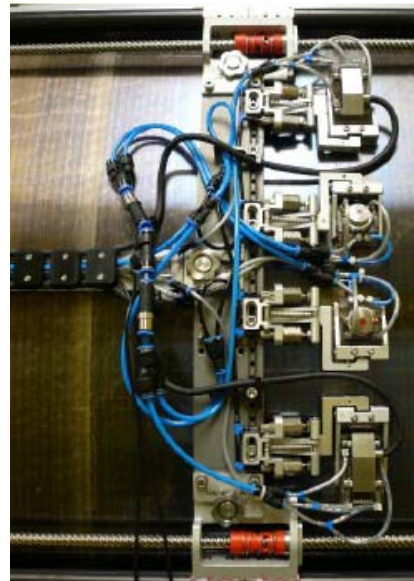


圖 8. 現場 Retaining Ring UT 檢測



### 現場 Retaining Ring 檢測特色：

- 2D 陣列：6 x 5 elements
- 結合週向及軸向掃描
- 結合 PE 及 TR 操作
- 低頻 TOFD LW 用於缺陷高度定尺寸 (傳統 UT)
- 可快速掃描 (35 mm/s)

### 使用 Phased array 檢測葉片：

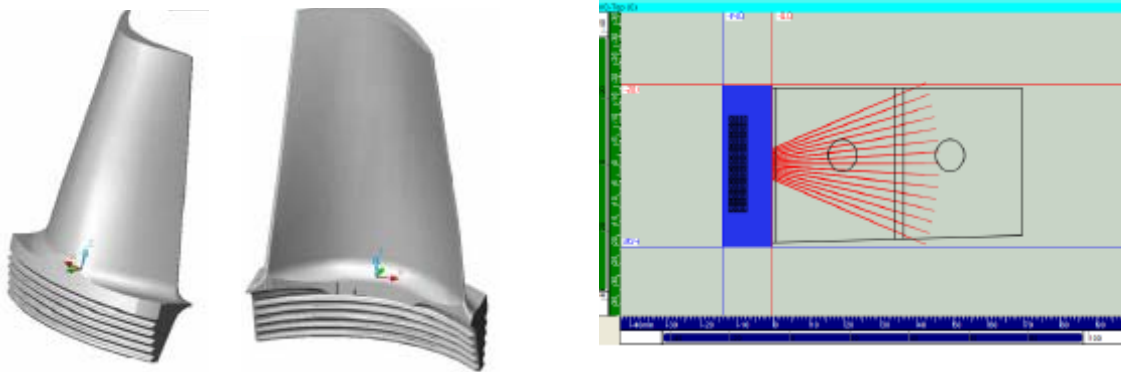


圖 9. 軸向插入型葉根槽 (Axial entry blade root) 之 Phased array 檢測



圖 10. 掃描裝置及使用薄型探頭

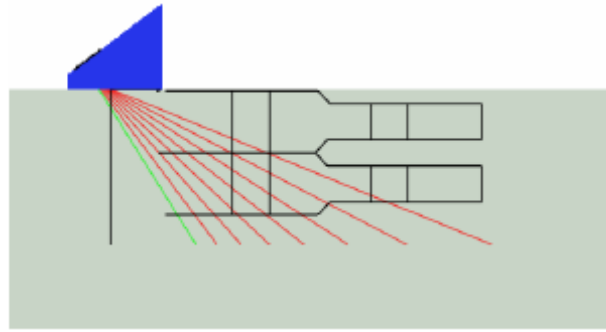


圖11. 打梢型葉根槽（Pinned blade root或手指型）之**Phased array**檢測

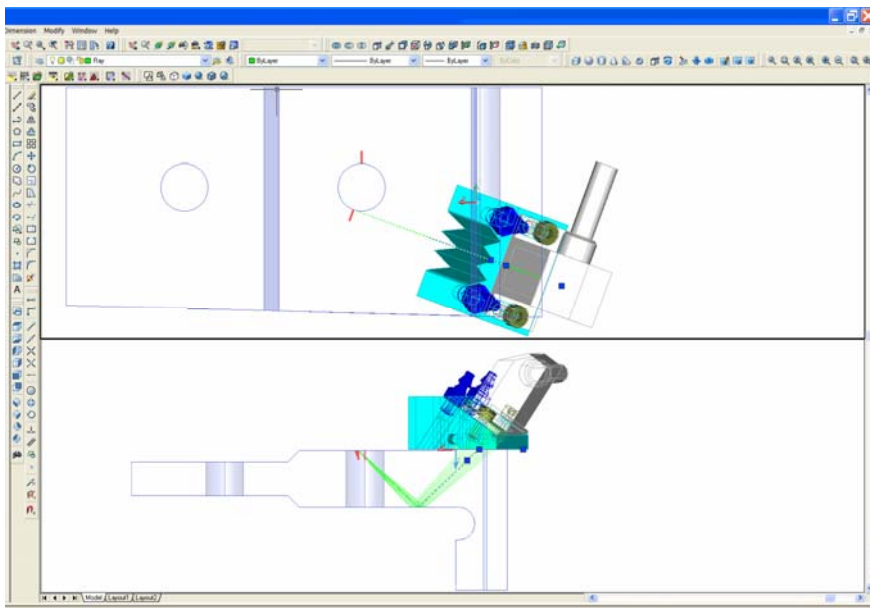


圖12. Turbine Blades - Pinned Root 檢測

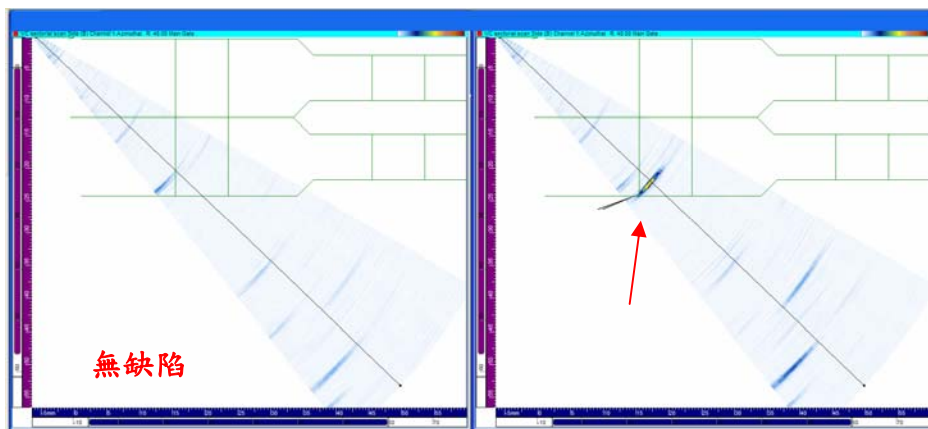


圖 13. Pinned Root 檢測

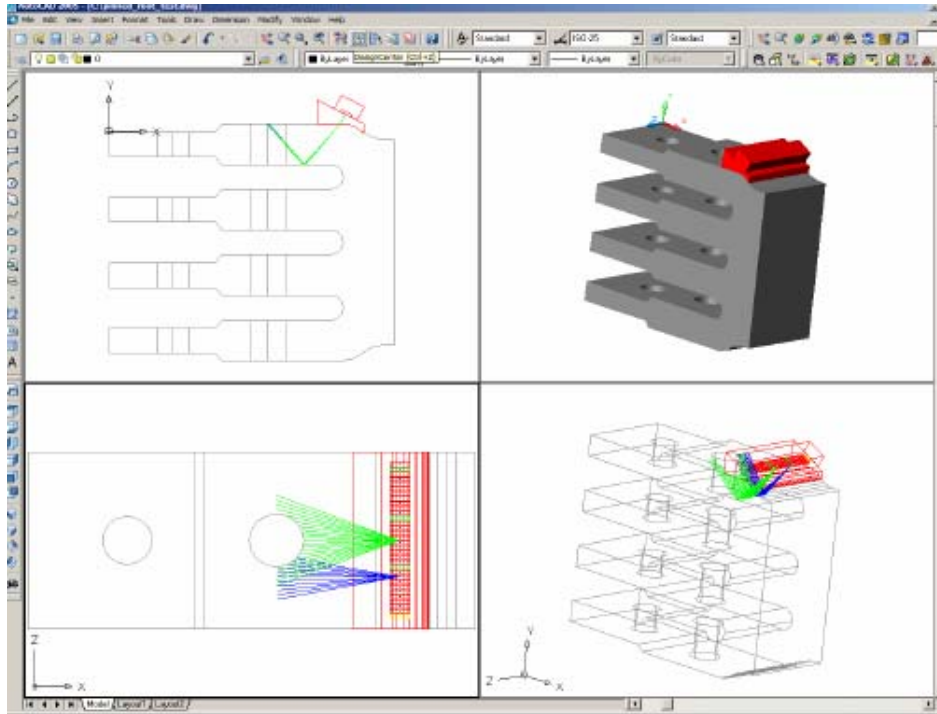


圖 14. 掃描配置圖

#### 4. Russell Inc.

Russell 公司係全世界第一家將遠場渦電流設備商業化的公司，自 1988 年以來，其產品已更替至第三代，除了用於鍋爐管外，亦廣泛用於油管、水管、廢水管以及供水管的檢測，從 5 公分到 300 公分直徑之預力鋼線水泥管件都可檢測，此行主要著眼於鍋爐管的檢測，該公司係目前唯一開發遠場外壁檢測技術的廠家，可檢測氫脆化、熱疲勞龜裂、潛變老化、吹蝕等常見之爐管缺陷。所開發之半圓形外壁掃描探頭可以直接檢測，而不需使用內繞探頭從水鼓或集管器插入；平板型探頭更一次可檢測 5 支水牆管，可有效降低檢測工時，搭配自動爬升掃描系統更可大量減少檢測人力。

在 Russell 公司二天的時間，研習了遠場渦電流訊號分析、設定最佳化以及不同厚度之補償設定方法(Compensating for Changing Material Properties in RFT Testing)，一種材質只需一個管徑即可透過頻率補償得到設定參數，而不需大量準備標準管，這在遠場渦電流檢測技術係一個很大的突破，可大大減低設置成本，並減少因應時間。

另外對於某些型式之鍋爐，例如大林三、四號機，其爐底管常會因腐蝕而爆管，因該處爐管有耐火泥包覆，無法從外部檢測，因此需從管內檢測，但因泥鼓之孔口比管內壁小很多，以至探頭無法插入，選擇過小的探頭又因離距過大而使靈敏度不佳，如使用 Russell 公司之可縮式(Swage)探頭可解決此檢測問題。



圖 15. 自動爐管掃描設備：一次可掃描 5 支管子



圖 16. 爐管過熱之表面缺陷，可不搭架執行檢測

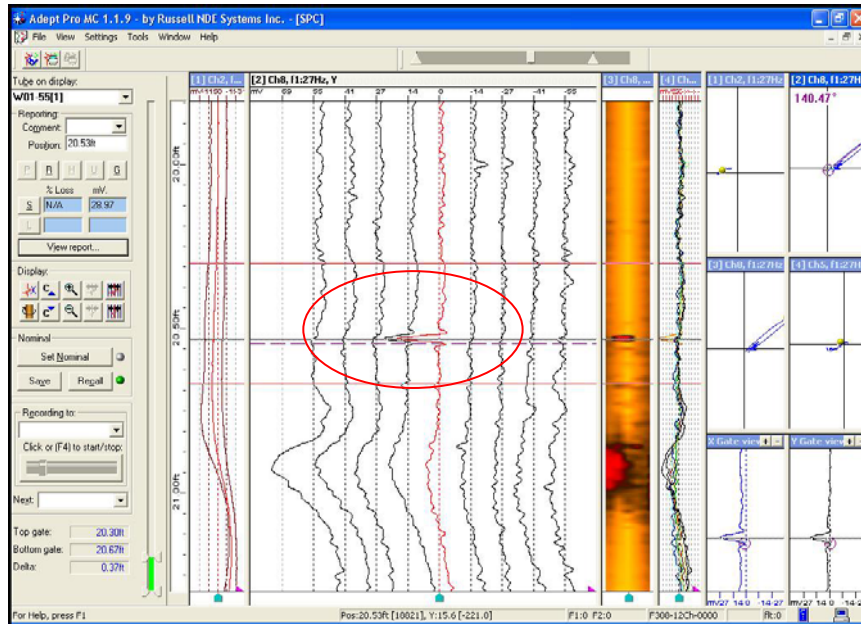


圖 17. 爐管過熱之缺陷訊號例

## 5. 參加 EPRI 10th EPRI Balance-of-Plant Heat Exchanger NDE Symposium 及 Corestar Group Meeting

該會議由 EPRI 主辦，此次會議地點在盛安東尼，Corestar Group Meeting 則係受邀參加。會議地點環繞著一條人工河，並不很乾淨，跟愛河不相上下，寬度則不到愛河的三分之一，沿岸餐廳林立，遊人如織，該市市政府能把一條臭水溝經營的有聲有色，成為名勝，實令人佩服。

此次參加的目的係蒐集相位陣列超音波以及遠場渦電流檢測相關技術資料，該研討會除論文發表外，也提供展示與技術交流平台，可自由討論。



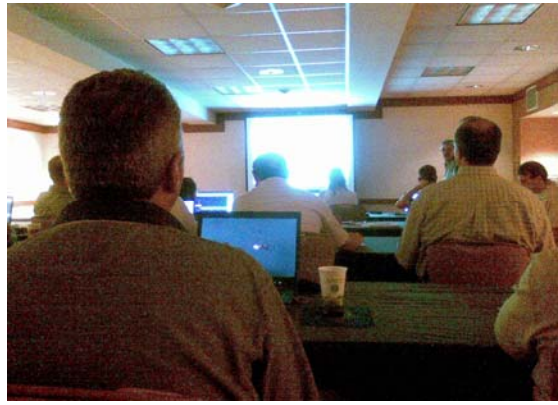


圖 18. EPRI NDE Symposium 及 Corestar Group Meeting

**主要相關之討論議題：**

- BOP NDE Issues
- EPRI Eddy Current Central Qualification Program
- Use of Low Frequency Electromagnetic Technique Inspection to Provide Service Water Piping Assessment
- New Technology for BOP Eddy Current
- Compensating for Changing Material Properties in RFT testing
- Development of the Concept of Screening of SeaCure
- Tubing Using Guided Waves Improved Flaw Quantification Adjacent to and Under External Structures Using a Simple RFT Mix Routine

(1) Reinhart & Associates



圖 19. NDT of Steam Turbine  
鳩尾槽及Disks之相位  
陣列超音波檢測。

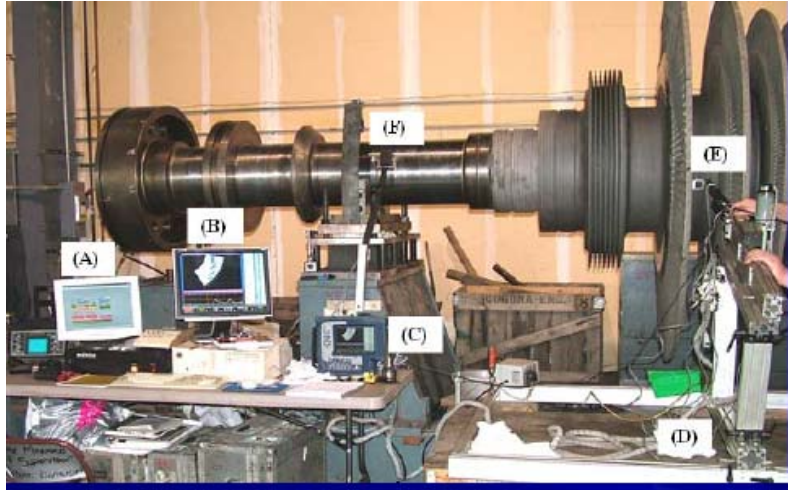


圖 20. UT of Dovetails

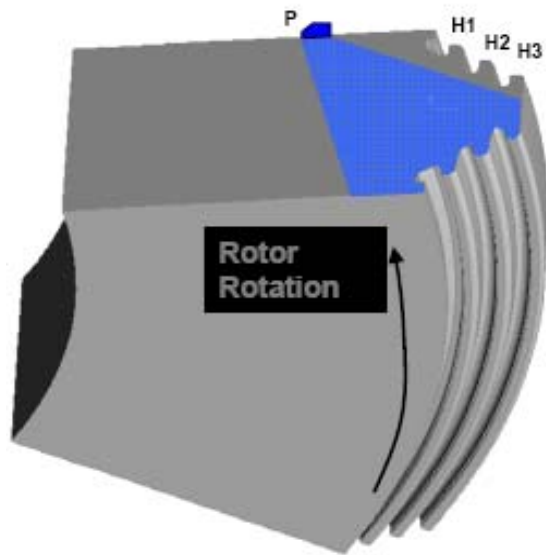


圖 21. 鳩尾槽之 Solid model 及 PA 探頭 (P)顯示掃描區域



圖 22. PA 檢測 HP-IP 轉子鳩尾槽

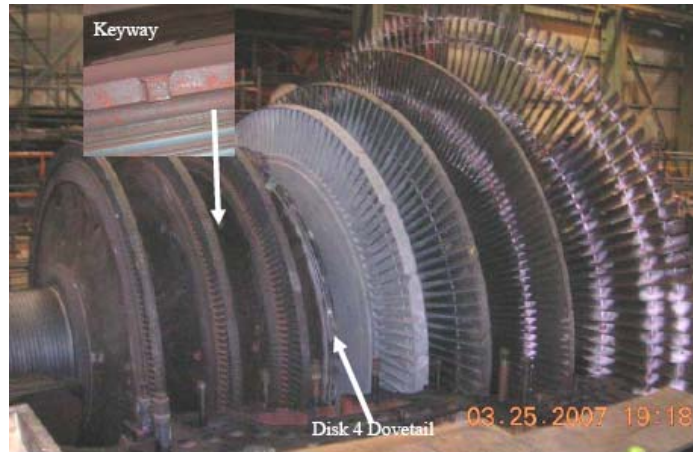


圖 23. 國外事故例子，第四級葉片與本公司一般高壓轉子插入方式相類似



圖 24. 從鳩尾槽處剝離

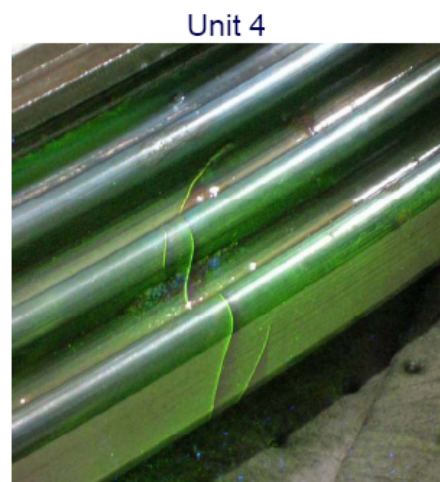
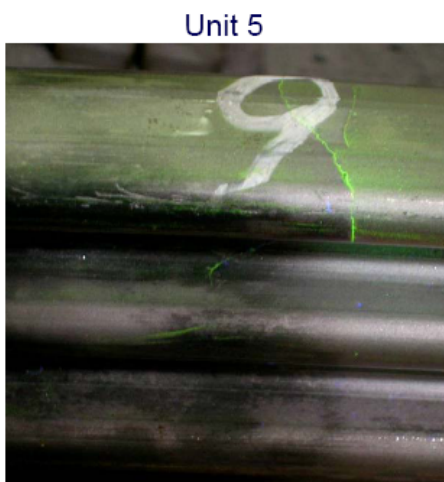


圖 25. Reinhart & Associates 以 PA 發現缺陷後之螢光 MT 顯示龜裂  
由這些檢測實務經驗可證明相位陣列超音波之檢測能力。

## 五. 實習心得：

### 1. 相位陣列超音波 (PAUT)

- Phased Array Ultrasonic Testing (PAUT) 可有效檢測各型汽機轉子之根槽裂痕
- 成功的檢測仍需藉助各種 Mockup，並作為儀器設定最佳化，及人員訓練、檢定的工具。

### 2. 遠場渦電流 (RFT)

- RFT 係鍋爐檢測上目前已嘗試或探詢之最快速、靈敏地檢測法，可提供機組更周延的評估。
- 檢測技術的養成有賴平時的訓練與模擬操作。

## 六. 對未來檢測業務需求的因應：

### 1 汽（氣）輪機葉片根槽檢測方面：

- (1). 台電之西門子 GT 機組傳統檢測法之替代方案：西門子 GT 機組包括南部電廠 3×2 部機以及興達 5×3 部機，共 21 部機，目前除南部 GT31 曾經由原廠家西門子執行壽命評估外，其餘都將陸續執行。西門子係使用傳統超音波之 C-Scan 檢測來檢測 Disc 之 Hub 部位，設備較複雜（如下圖），且投入成本較高，研習期間經與 Zetec 討論，採用相位陣列超音波確實可行，投入成本較低，這個方案跟我們技術發展的方向相符。這些機組爾後計劃由台電自己執行，將可節省約 6,000 萬元以上之費用。



圖 26. 傳統 UT 之 C-Scan 檢測掃描架

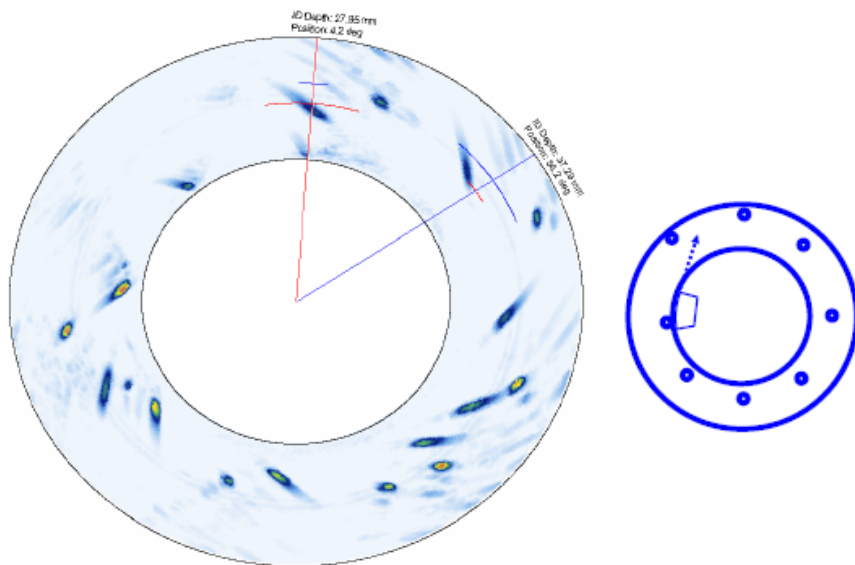


圖 27. Turbine Disc Hub Phased Array 檢測示意圖

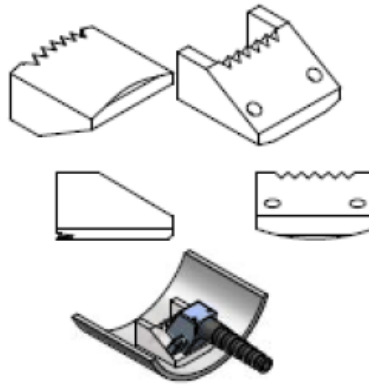
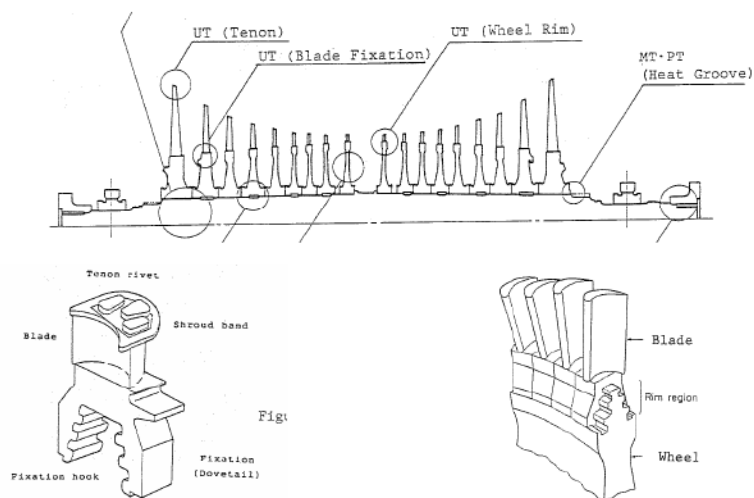


圖 28. 檢測用楔形塊

(2) 對於典型之 HP 葉片、一般之鳩尾狀葉根槽以及 T-Slot、發電機轉子楔形條(Tooth and Wedge Bars)等，此類型根槽台電 ST 及 GT 機組以及 IPP 汽電廠有很多，適合使用相位陣列超音波檢測。



Typical HP Turbine Blade

Typical Wheel Rim Shape

圖29. 鳩尾狀葉根槽

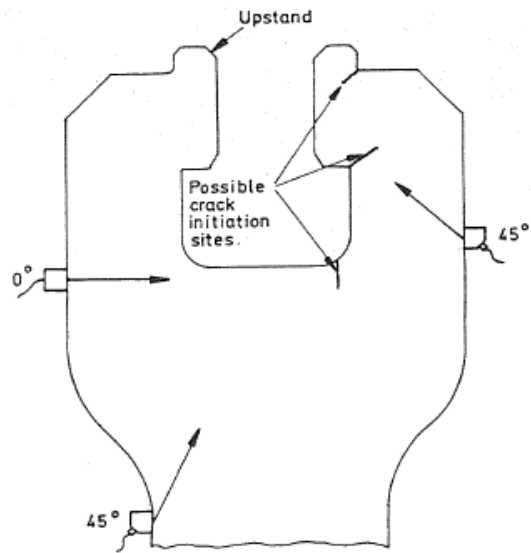


圖 30. T-Slot 根槽及傳統檢測方法

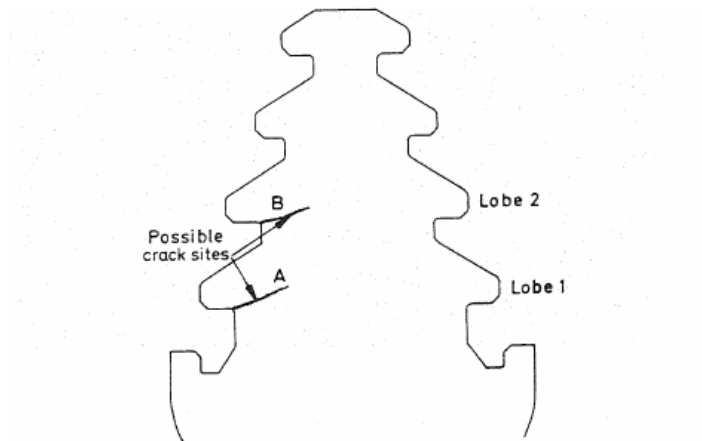


圖 31. 典型週向松樹式(Fir-Tree)葉根及可能出現之裂痕位置

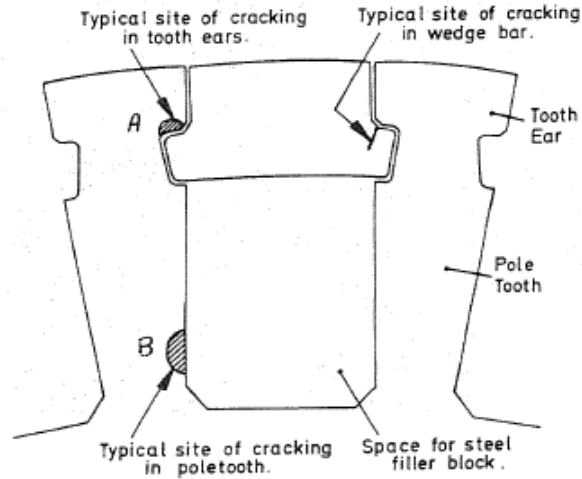


圖 楔形條(Tooths and Wedge Bars)裂痕位置

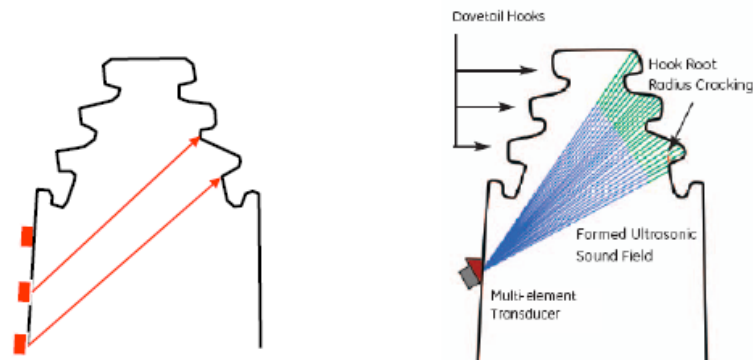


圖 32. 鳩尾狀葉根槽檢測，左為傳統 UT,右為 PA

(3) 軸向插入之Blade Steeple及Disk Groove：複循環ST及部份汽力機組之低壓轉子使用此類型葉根，複循環ST曾經以PA測試，可有效檢出。汽力機組則需使用T/R的探頭檢測，困難度較高。

下圖為複循環機組之低壓轉子末級動葉片之3D圖，係委請綜研所現場掃描製作，運用此圖可製作Mock up供檢測評估。



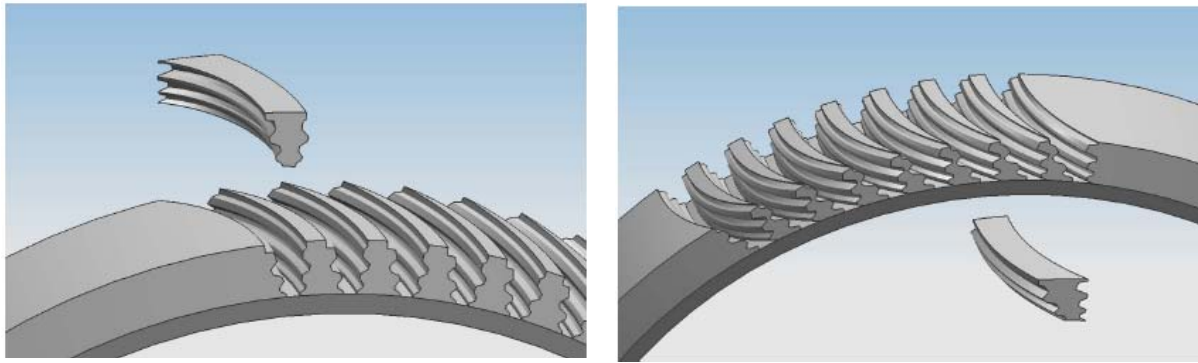


圖33. 軸向插入之Blade Steeple及Disk Groove 3D圖

(4) 手指型(Finger)或Pinned Root 式葉片之插梢孔之檢測：

此類型葉片之轉子與達有2x2支，台中有10x2支，最佳的檢測方法是從固定梢之Pin Hole以圓周式之相位陣列超音波檢測，原廠即使用此方式，但此法需把Pin取出約1/3，有其困難度。未拆Pin的檢測法只能檢測最外面及最粗的Pin Hole。

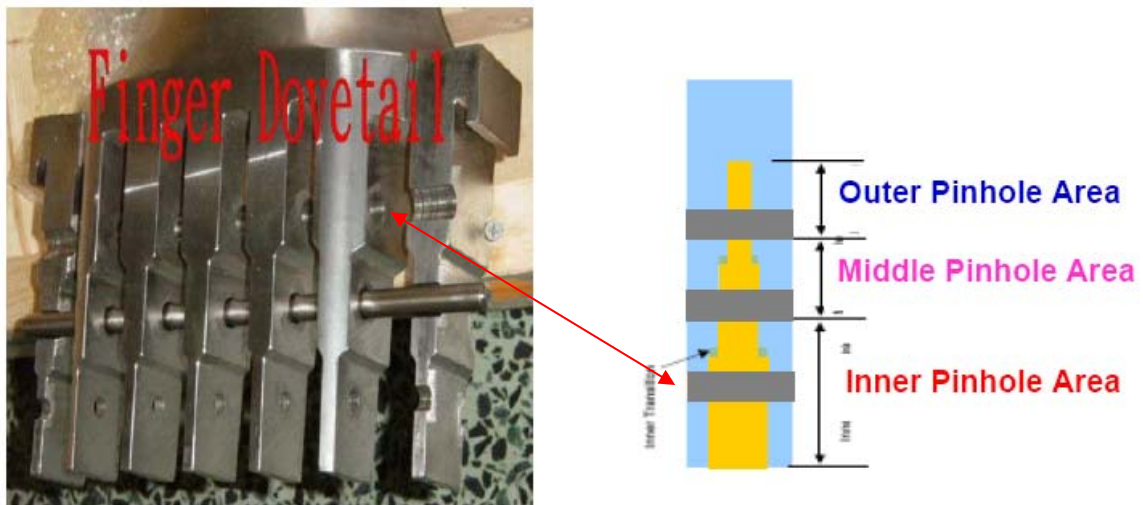


圖34. Finger Type 之Pin Hole檢測位置

## 2. 遠場渦電流之應用方面

- (1). 運用快速掃描系統對鍋爐作全方位的檢測：因外壁掃描探頭可以直接檢測，而不需使用內繞探頭從水鼓或集管器插入；平板型探頭更一次可檢測5支水牆管，可有效降低檢測工時，搭配自動爬升掃描系統更可大量減少檢測人力。另一個有利因素是，使用此技術不需精細的磨管拋光，只需適

度的除去爐渣或爐垢。

- (2). 無法從外部檢測之爐管，可嘗試從管內檢測，下側可經由泥鼓，雖然孔口比管子內壁小，可使用可縮式(Swage)探頭以解決此檢測問題，大林爐底管有腐蝕問題，且已提出檢測需求，擬於98年度#3機大修時應用此檢測技術。

## 七、建議事項

1. 各項壽命評估作業自辦可節省巨額金費，但因涉業務導向及設備投資，宜儘早準備。
2. 有價值的參訪公司其邀請書往往不易取得，故應即早作業。

## 八、返國座談會簡報資料

返國座談會由主任召集及主持，人資課主辦，於7月21日下午1點30分舉辦，各技術部門主管及分隊長、工程師熱烈參與、交流，座談會於3點左右結束。