

出國報告（出國類別：實習）

陣列式即時超音波技術應用於 鍋爐管路銲道檢測

服務機關：台灣電力公司

姓名職稱：魏健能 品檢工場 經理

派赴國家：美國

出國期間：104年06月05日~06月14日

報告日期：104年08月06日

行政院及所屬各機關出國報告提要

出國報告名稱：研習陣列式即時超音波技術應用於
鍋爐管路銲道檢測

頁數 43 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/經理
/(02)27853199 ext.150

出國類別：1 考察2 進修3 研究4 實習5 其他

出國期間：104年06月05日~104年06月14日 出國地區：美國

報告日期：104年08月06日

分類號/目

關鍵詞：非破壞檢測、鍋爐、超音波、NDT、爐管

內容摘要：（二百至三百字）

本次出國研習，針對非破壞檢測技術與設備進行調查，參加美國電力研究院舉辦之國際鍋爐破損檢測評估研討會，瞭解相關破管案例及非破壞檢測應用方案，引進適用本公司應用之檢測系統及技術，達成研習陣列式即時超音波技術應用於鍋爐管路銲道檢測之研究目標，進而可加強鍋爐檢測維護，降低破管事故，減少機組停機損失，提高機組的可用率。又考量本公司在汽機、發電機、鍋爐等特定性檢測技術有待精進或部分仍受制於原製造廠家檢測技術。利用此次出國與美國 ISwT 公司充分研討與見習，其國外先進非破壞檢測技術值得本公司適時引進，包括氮氣噴射應用於氣渦輪機葉片再生表面塗層去除處理技術，都可做為本公司今後技術生根努力之目標與借鏡。

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

研習陣列式即時超音波技術應用於鍋爐管路銲道檢測

內 容	頁 次
壹：國外公務之內容與過程-----	4
貳：國外公務之心得與感想-----	4
一、序言-----	4
二、參加美國電力研究院（EPRI）國際鍋爐破損檢測 評估研討會-----	5
2.1 鍋爐爐管破損肇因分析-----	7
2.1.1 鍋爐破損肇因統計-----	8
2.1.2 鍋爐水牆管之腐蝕疲勞裂痕（CF，Corrosion Fatigue） 防制及經驗-----	11
2.1.3 防制火力電廠鍋爐破管事故（Seven Steps to Heaven）-	12
2.1.4 EPRI'S 降低鍋爐破損計劃（Boiler Tube Failure Reduction Program，BTFR）-----	13
2.2 鍋爐爐管銲道超音波檢測技術-----	17
2.2.1 PAUT陣列式超音波檢測與RT射線檢測比較-----	17
2.2.2 鍋爐水牆管腐蝕疲勞-----	18
2.2.3 鍋爐爐管異材金屬銲道超音波檢測-----	19
2.3 汽力鍋爐 & HRSG 檢測工具-----	21
2.3.1 HRSG 管路減薄 LFET 應用-----	21
2.3.2 LFET 鍋爐爐管自外表面檢測汽側氧化垢層堆積-----	23
2.3.3 LFET 自鰭片管（FIN）外表面檢測管路減薄 Low Frequency Electromagnetic Technique（LFET）-----	25

2.3.4 BFET “Claw” 檢測集管箱管路銲道 Balanced Field Electromagnetic Technique (BFET)-----	28
2.3.5 RFET 自管內檢測集管箱管路 Remote Field Electromagnetic Technique (RFET)-----	30
2.3.6 遙控飛行器燃燒器檢視 (Burner Testing and Inspection) -----	30
三、電廠組件非破壞檢測技術：從探討破損壞機構決定 適當之 NDT 檢測方法應用-----	32
四、NitroJet® Technology 氮氣噴射系統：氣渦輪機葉 片再生表面塗層去除-----	37
參：出國期間所遭遇之困難與特殊事項-----	42
肆：對本公司之具體建議-----	42

壹：國外公務之內容與過程

日期	天數	到達地點與公務內容
1040605~0606	2	往程(台北→洛杉磯→Annapolis)
1040607~0610	4	美國 Annapolis, EPRI 美國電力研究院 參加國際鍋爐破損檢測評估研討會
1040611~0612	2	美國 San Antonio, ISwT.公司 研習電廠組件非破壞檢測評估
1040613~0614	2	返程(San Antonio→洛杉磯→台北)
合計	10	

貳：國外公務之心得與感想

一、序言

台電公司火力機組之鍋爐運轉至今，設備已逐漸高齡化，又有超超臨界機組鍋爐的建置加入，如何加強鍋爐檢測維護，降低破管事故減低機組停機損失，提高機組的可用率，為現今公司重要之課題。近年來，在國外被廣為應用之“陣列式即時超音波技術”對於各項關鍵組件的壽命延長評估檢測，均扮演非常重要的技術應用，本項出國計畫為綜研所研發預算簽准變更參加 EPRI 鍋爐爐管破損與檢測技術研討會與 ISwT (IHI Southwest Technologies, Inc.) 研習。瞭解相關破管案例及非破壞檢測應用解決方案，引進新技術及應用檢測系統，達成陣列式即時超音波技術應用於鍋爐管路銲道檢測研究目標，進而強化鍋爐檢測維護，降低破管事故，減少機組停機損失，提高機組的可用率。又考量公司在汽機、發電機等特定性之檢測技術有待改進

或更新，職利用此次出國也與美國 ISwT 充分研討與見習。由於陣列式即時超音波技術應用於鍋爐管路銲道檢測尚不普及，有賴出國研習，對檢測技術與設備進行調查研究，並擬藉由本計畫結合國外使用經驗及技術，引進陣列式檢測技術應用於發電機組組件，提升現有檢測服務的可靠度及完整性，掌握檢測時機，順而縮短維修時程，維修資源能獲致較佳分配。其國外先進檢測技術值得本公司適時引進，做為本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、參加美國電力研究院(EPRI)國際鍋爐破損檢測評估研討會

美國電力研究院(EPRI)所舉辦之鍋爐爐管破損與檢測技術研討會，研討會中匯集電廠、鍋爐製造廠家(OEM)、工程顧問與檢測機構及學校研究機構，分享鍋爐破損檢測評估經驗與新技術 R&D。是提供業界瞭解相關破管案例及非破壞檢測應用解決方案的國際會議，本項鍋爐破損檢測評估研討會自 1987 年起，在 28 年間已舉辦了 8 次。上次是在 5 年前舉行的，主要是針對鍋爐可靠性之技術能轉移給各相關電力維護從業人員，藉由會議中各個演講者的報告來傳遞訊息以期讓參加者了解在工業界發生了什麼演變與進展，會議內容豐富，極具參考性。以下就研討會與本公司檢測技術相關之內容摘錄於後：比較重要的議題有腐蝕疲勞及氫脆應對的準則、鍋爐爐管延壽的非破壞檢測技術、營運管理的支持、鍋爐破管資訊導引至設計上等等。

本次會議共有美、英、法、中、日、韓約 150 人參加，共 35 篇論文發表，包括發電機組鍋爐水牆管腐蝕疲勞防制及經驗、鍋爐組件製造關鍵問題、鍋爐組件非破壞檢測/評估、鍋爐爐管破損/肇因分析、鍋爐爐管使用材料、使用壽命管理/評估等 6 項議題，會議採大會議室不分組，議題輪流報告及研討，會議室前也有邀請廠家(9 家)展示及現場解說，如圖 2.1~ 圖 2.6。

會議中談及之破管統計分析、新技術及工程應用，可協助本處盡早建立陣列式即時超音波技術應用於鍋爐管路銲道檢測研究目標，進而強化鍋爐檢測維護，降低破管事故，減少機組停機損失，提高機組的可用率。會議排程：

Boiler Tube and HRSG Tube Failures and Inspections International Conference

(Jun 08~10, 2015 Annapolis, Maryland)

Session 1: Lay-up EPRI 發電機組鍋爐水牆管腐蝕疲勞防制及經驗

Session 2: Fabrication 鍋爐組件製造關鍵問題

Session 3: Non-Destructive Evaluation (NDE) 鍋爐組件非破壞檢測

Session 4: Failure/Root Cause 鍋爐爐管破損/肇因分析

Session 5: Materials 鍋爐爐管材料

Session 6: Life Management/Assessment 使用壽命管理/評估



圖 2.1 EPRI Meeting 報到處



圖 2.2 EPRI Meeting 會場



圖 2.3 Meeting 檢測實務展示



圖 2.5 Meeting 檢測實務展示

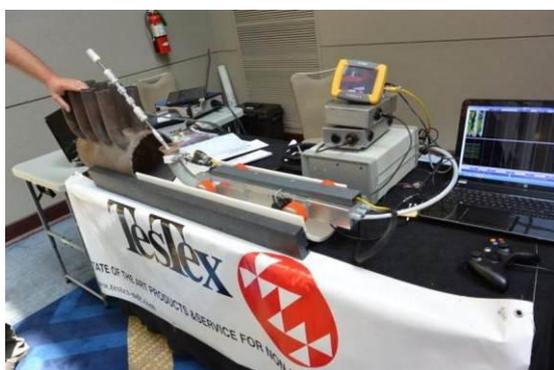


圖 2.4 Meeting 檢測實務展示

2.1 鍋爐爐管破損肇因分析

回顧過去 30 年，在 1980 年影響火力電廠可靠運轉之重要議題首推「鍋爐爐管破管」，主要在在於它沒有相對應之因應計劃，破管之破壞機構肇因分析也難取得一致性的看法，加上極少人會去關注水質化學循環之問題。它不似電廠須面對之其他汽機葉片和其輪盤破損之肇因破壞機構已被研究予以證實，屬於 SCC 應力腐蝕裂痕及腐蝕疲勞所造成，但其運轉之環境狀況還沒充分被掌控。其他類如冷凝器管、飼水加熱汽管之破漏屬沖蝕/流體加速腐蝕 (FAC)，在 1986 年也陸續被各國研究團隊 (英、法、德、蘇聯) 證實其破壞機構，而能予以改善。

鍋爐爐管破管案件 (BTF) 之演進，自 1980 年初期鍋爐爐管破損之主要問題分析如下：

1. 水牆管 (Waterwall)：破損/沖蝕、固定塊、鉚道、熱疲勞、氫脆
2. 過熱器 (SH)：潛變、長期過熱、異材金屬鉚接、汽側氧化垢層之成長與剝離
3. 再熱器 (RH)：外側腐蝕/沖蝕、潛變、異材金屬鉚接、點蝕
4. 省煤器 (Economizer)：飛灰和短管之沖蝕

針對上述之問題，1983 年 BTF 會議中有相對應之專題報告提出，在檢測方法之應用有目視及超音波檢測技術，在過熱器/再熱器管方面，則採用多支採樣切管，進行金相微結構分析，衍生殘餘壽命評估的技術。

1990 年後期，也有起草了很多研發計劃，研究找出了腐蝕疲勞的肇因，也利用 CAVT 解決飛灰，沖蝕的困擾，但仍有超臨界鍋爐水牆管熱疲勞之問題，其不確定因素還未掌握。

然而為何鍋爐爐管破管議題，仍一直是全世界各火力電廠影響運轉可靠所面對問題中，屬於最重大的呢？

主要是由於重複性的破管高達 70%，有時候高達 90%，大部分之組織機構也都有定義初期破壞機構為何，但也不是都會判斷正確。再者，肇因分析在時間/金錢花費的壓力下，往往只做緊急處理的措施，因為若要處理得當，必須考慮的因素繁多，例如：溫度、應變、燃氣速度、化學循環等等。又破損管件周邊範圍也得適當釐清，未更換可能將破損之管支，再加上管理

者對降低破管計劃不能堅定的支持，都是不爭的事實。

但近期自成立降低爐管破管計劃的廠家機構擴增至約 100 家後的經營下，不僅提高了電廠的可靠度，也對破管之破壞機構更清楚，肇因判定更正確，也針對肇因理出相對應的檢測計劃或改正措施，確實降低了破管的頻率。

機組逐漸已趨高齡化，破壞機構分析的議題就更形重要，它與機組運轉的時間和新機組設備新上線時，都需特別加以關注。其中內部氧化垢層的生成與剝離，都將造成長期過熱/潛變和短期過熱，還有析出硬化應變等不良的結果，對於不適切爐管原材的製造或結渣清除所造成的爐管損傷也都曾被發現過。

2.1.1 鍋爐破損肇因統計

鍋爐破管不管是在汽力鍋爐和複循環熱回收鍋爐(HRSG)上都是造成電力損失的最大原因。由於工業發展趨勢的改變，操作條件狀況亦隨之異動，其中的因素包括：

- 1.全球暖化，控制 CO₂ 排放量。
- 2.天然氣價格的降低。
- 3.一些大型慣常火力停建或暫緩，機組的運轉也改為二值運轉負載調動，甚至採複循環 HRSG 運作。
- 4.機組老了，維護費用減少，出差預算減少，大修工期縮短、後延或取消，電廠希望多運轉供電，快速調升負載等需求因此相關之鍋爐爐管破壞機構就偏向於疲勞、腐蝕疲勞、點蝕、FAC 等。

本項會議自 1987 年開始就著重於改進措施及破管肇因分析和加強非破壞檢測的應用以便降低破管的發生，綜觀近年的破管原因分析統計，如表 2.1~表 2.3

表2.1 慣常式鍋爐爐管破壞機構
(Historical Boiler Tube Failure Mechanisms)

爐管破壞機構 BTF Mechanism	年份 YEAR					
	2015	2010	2007	2004	2001	1997
飛灰沖蝕 Fly Ash Erosion	1	1	1	3	3	3
長期過熱/潛變	2	4	4	2	1	1
吹灰器沖蝕 Sootblower Erosion	3	5	3	4	5	4
腐蝕疲勞 Corrosion Fatigue	4	2	2	1	2	2
火側腐蝕 Fireside Corrosion	5					
熱、機械疲勞 Thermal/ Mechanical Fatigue		3				
銲接問題 Welding Issues		6				
氫損傷(氫起泡,氫脆 化等)/沉積物 Hydrogen Damage/Under Deposit		8	5	5	4	5

- 飛灰沖蝕：10年來數量最多的破壞機構！
- 吹灰器(Sootblower)沖蝕：量一直還是多
- 水質的化學處理議題已掌控

表 2.2 慣常式化學循環 (CC, cycle chemistry) 導致之破壞機構
Historical Cycle Chemistry BTF

CC BTF Mechanism	年份 YEAR				
	2015	2010	2007	2004	2001
腐蝕疲勞		1	1	3	2
氫損傷(氫起泡, 氫脆化等)		2	3	1	1
應力腐蝕裂痕 SCC		3	4	5	4
點蝕 Pitting		4	2	4	3
腐蝕 Caustic Gouging		5	5	6	6
硫酸腐蝕 Acid Phosphate Corrosion		6	6	2	5

保留至 7 月 14 日在聖路易(St. Louis)化學研討會提出報告

表 2.3 慣常式 HRSG 熱回收鍋爐爐管破壞機構
(Historical HRSG Tube Failures)

HRSG-TF Mechanism	年份 YEAR					
	2015	2010	2007	2006	2004	2001
熱疲勞	1	1	2	2	2	2
氫損傷(氫起泡, 氫脆化等)	2	4	5		5	
流體加速腐蝕 FAC	3	2	1	1	1	3
腐蝕 Caustic Gouging	4					
點蝕 Pitting	5		3		4	
腐蝕疲勞		3	4	3	3	1
長期過熱(潛變)		5				

熱疲勞：近 10 年來數量最多的破壞機構！

2.1.2 鍋爐水牆管之腐蝕疲勞裂痕(CF, Corrosion Fatigue) 防制及經驗

水牆管腐蝕疲勞裂痕起始於爐管水側，一般裂痕平行於鍋爐爐管軸向，也可能周向或任何與乘載主應力之垂直座向，產生類似窗口“window type”型態之厚唇(thick-edged)破損，如圖 2.6；會誤判成氫脆(hydrogen damage)，最後的破損經常是針孔破漏(pinhole leak)，常誤判為管外起始之機械疲勞(OD-initiating mechanical fatigue)。



圖 2.6 爐管水側腐蝕疲勞

而發生腐蝕疲勞破壞機構典型的位置，如下圖 2.7 所示：

Typical Locations Where CF May Occur

Tangentially-fired boilers

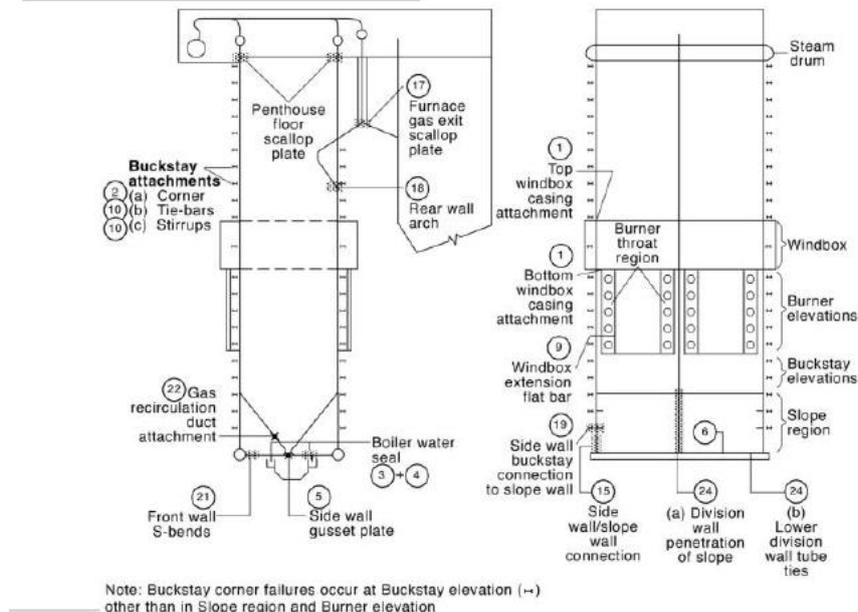


圖 2.7.1 發生腐蝕疲勞破壞機構典型的位置

Typical Locations Where CF May Occur

Front/rear-fired radiant boilers

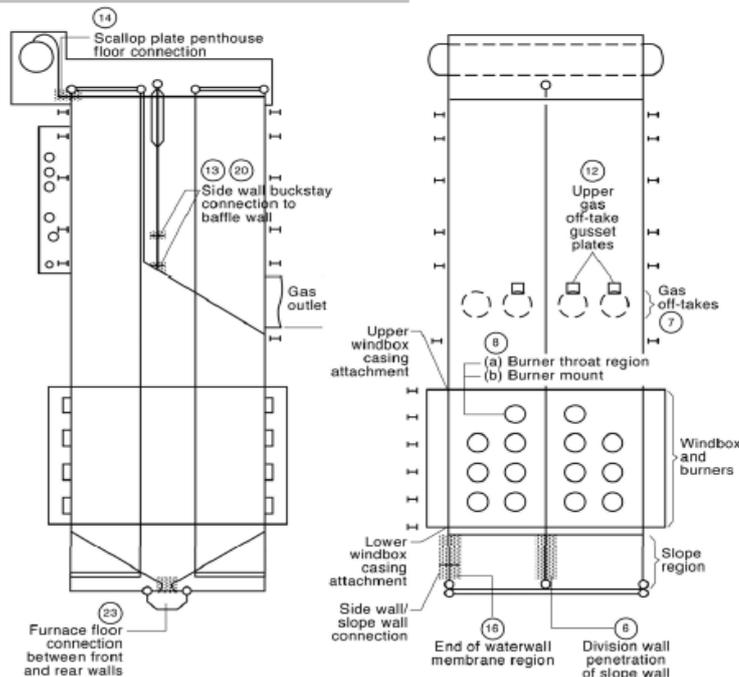


圖 2.7.2 發生腐蝕疲勞破壞機構典型的位置

2.1.3 防制火力電廠鍋爐破管事故 (Seven Steps to Heaven)

電廠在面臨計劃性大修所花費上百萬美元之同時，又得滿足在尖鋒負載電力的需求，如何透過 NDT 檢測技術來增進鍋爐運轉之可靠性，就變成非常重要的課題，如果能研究過去鍋爐運轉之歷史，便能聚焦問題，解決維護上的困難，進而掌握檢測的重點。因此研擬達成之目標，就是要如何適切地辨識可能即將破損之鍋爐爐管，再利用在大修期間予以更換。另外也要進行破管案例的事故肇因分析，讓電廠能進行各項矯正預防措施，避免破管再次發生。

1. 確定破壞機構：善用資料庫平台，累積經驗。
2. 破損機構肇因分析：結合非破壞檢測與破壞金相實驗分析
3. 破壞機構肇因再確定：慎重分析研判，以利後續防制措施
4. 戳查損傷涵蓋範圍：滴水不漏。
5. 短期矯正修復行動：恢復機組運轉。
6. 長期防制策略：改變維護運轉模式或變更設計，預防再破管。
7. 戳查可能影響其他組件之相關問題。

2.1.4 EPRI'S 降低鍋爐破損計劃 (Boiler Tube Failure Reduction Program , BTFR)

近 28 年來 EPRI 降低鍋爐破損計劃，對火力電廠在降低破管貢獻頗大，它可以提高機組運轉的可靠度，是參照以下 5 項文件為基礎而產出：

EPRI's Pocket Handbooks and Boiler Tube Failure Reduction Best Practices

- *Boiler and Heat Recovery Steam Generator Tube Failures: Theory and Practice. EPRI, Palo Alto, CA: 2007. 1012757*
- *Field Guide: Boiler Tube Failure. EPRI, Palo Alto CA: 2009 1017471*
- *Field Guide: Outage Inspection Pocket Manual. EPRI, Palo Alto CA: 2009. 1018996*
- *EPRI Boiler Reliability Optimization Program – Case Studies from 1998-2001. EPRI, Palo Alto CA: 2001 1006537*
- *Boiler Tube Failure Reduction Program. EPRI, Palo Alto CA: 1991. GS-7454*

需多方面專長領域的付出與結合才可奏功(如圖 2.8)，其中影響鍋爐破管六大專長領域關連(如圖 2.10)，包括：

1. 管理：
 - 資源的管理，屬長期合作指導方針。
2. 工程：
 - 剩餘壽命評估(RLA)、非破壞檢測(NDE)、力學分析、金相分析、設計(材料幾何形狀、塗層、設計改變等)。
3. 化學：化學清洗。
4. 維護保養：
 - 換管焊接，工程中心並聯結運轉操作。
5. 運轉操作：
 - 聯結燃料、值班、溫控、燃燒溫度等相關。
6. 燃燒(燃料)：
 - 微調溫度、試驗含氧溫度控制...等

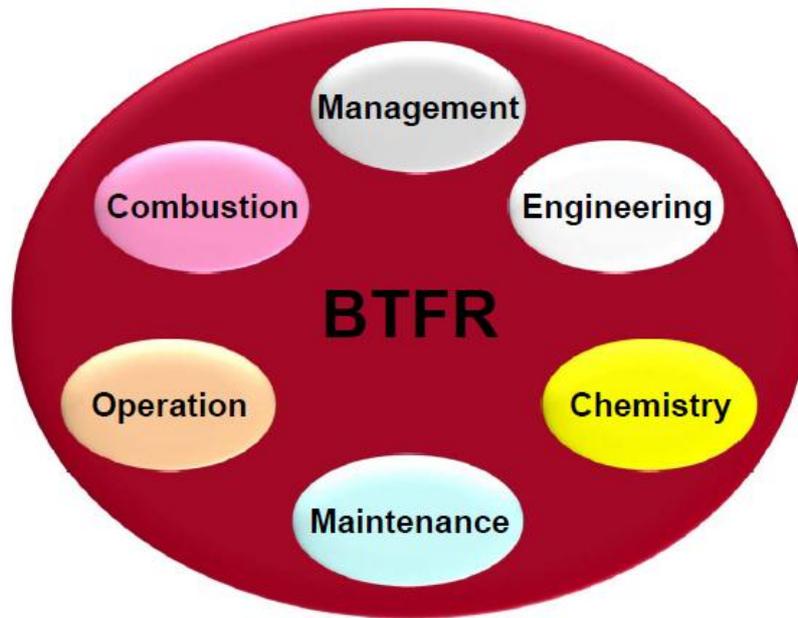


圖 2.8 防止 BTFR 六大專長領域



圖 2.9 破管實況

- 石墨化 (Graphitization)
- 爐管汽側氧化垢層剝離 NDE 檢測技術的開發，數位 RT，UT 代替 RT 等特定技術。



Possible Issues- Grade 91 Attachments

不良設計，固定塊破裂來自於：

- 銲接品質不佳。
- 異材(Grade 91 tube,nickel based weld, stainless clip)不同膨脹係數造成高應力。
- 鄰管或爆射清潔造成高應力。
- 高溫運轉。
- 氧化(Oxidation)。
- 爐管金屬受熱溫度過高。
- 爐管 HAZ 熱影響區延伸之主應力



圖 2.11 固定塊破裂

Thermal Analysis FEA (有限元素分析)



爐管溫升 5 to 20°C
壽評計算與破損吻合。

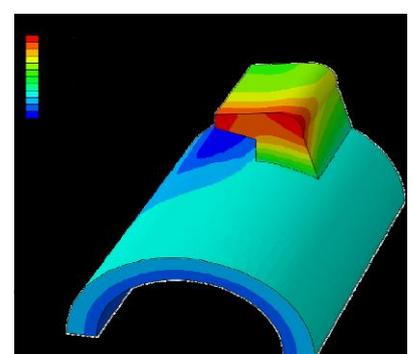
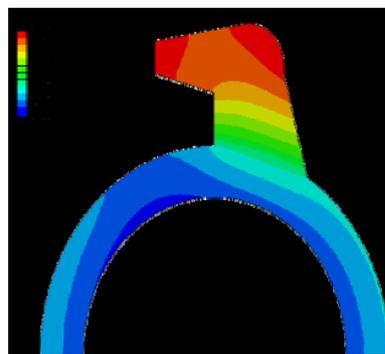


圖 2.12 固定塊有限元素分析

壽評後續處置 Life Failures of Grade 91 tubing

- Heat treatment 熱處理
- Hardness testing 硬度測試
- Specifications 規範比對：機械性能、成分
- Life assessment 壽評
- Microstructural degradation 微結構之劣化
- Microstructural database 微結構之資料庫
- Parent metal and welds 銲道及母材
- Small sample testing 微小取樣測試
- Improved repair procedures including temper bead 精進維修程序

2.2 鍋爐爐管銲道超音波檢測技術

2.2.1 PAUT 超音波檢測與 RT 射線檢測比較(圖 2.13 ~ 圖 2.15)

2006 年起 PAUT 超音波檢測開始應用在鍋爐爐管銲道上，它可全面檢出任何座向平面型缺陷，檢測速度較 RT 快；RT 射線檢測則可檢出圓球型缺陷，同時報告較 PAUT 易懂。



圖 2.13 夾渣(Slag) RT，UT 皆可檢出

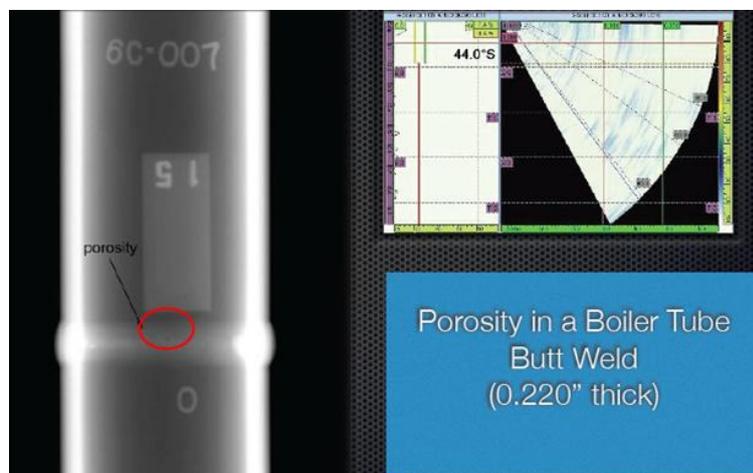


圖 2.14 氣孔(P) RT，UT 皆可檢出

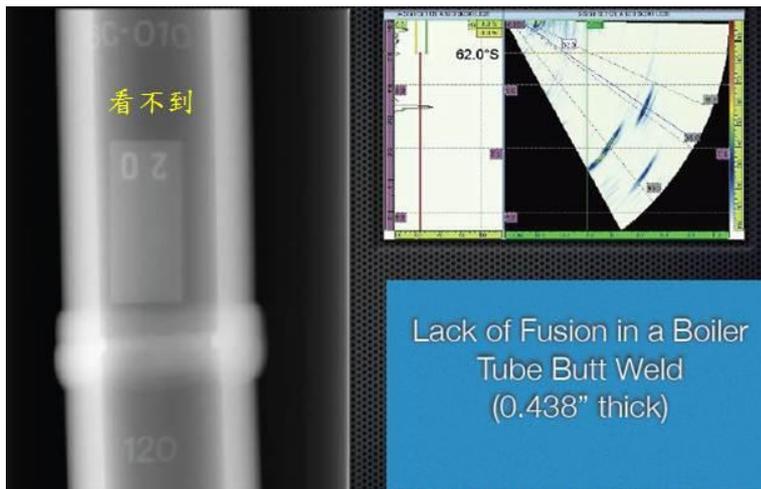


圖 2.15 不完全熔合(LF) RT 無法檢出，UT 可檢出

- 可檢測小管徑銲道外徑 21 mm ~ 114 mm (0.84 in. ~ 4.5 in.) 範圍內的管件。對於 7 mm 以上厚度爐管銲道檢測，PAUT 可取代 RT，且檢測效率高。對於平面狀之缺陷 PAUT 優於 RT (如 圖 2.15)，但技術層次較高，瑕疵長度研判相較 RT 而言，雖稍缺準度，但仍值得推廣應用。
- 對於 7 mm 以下厚度的爐管銲道，PAUT 針對體積型瑕疵的檢測，需要注意表面狀況、Wedge、頻率的選用。

2.2.2 鍋爐水牆管腐蝕疲勞

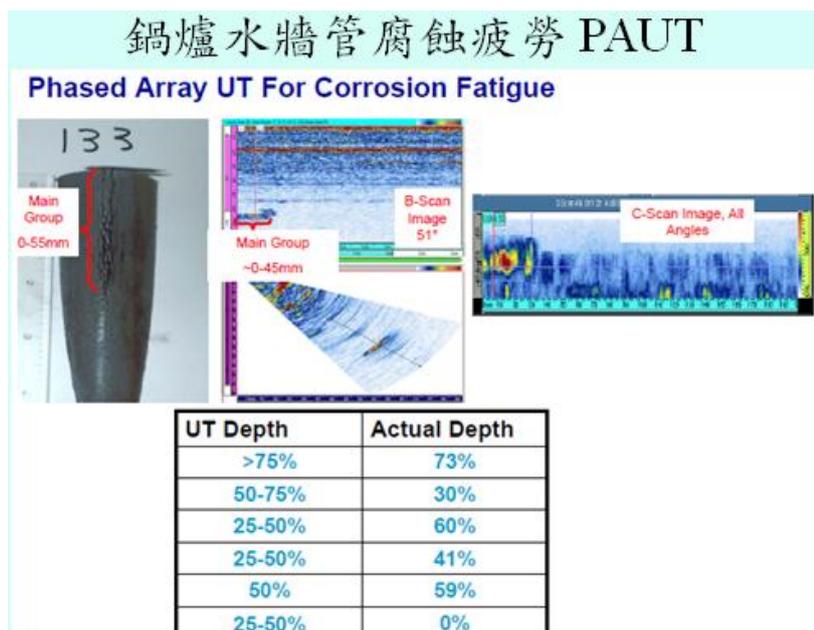


圖 2.16 鍋爐水牆管腐蝕疲勞 PAUT

2.2.3 鍋爐爐管異材金屬銲道超音波檢測：

3 種異材金屬銲道(DMW)銲接方式：

- Fusion welds with austenitic filler metal
- Induction pressure welds with no filler metal
- Fusion welds with Nickel-based filler metal

特別是過熱器、再熱器鍋爐爐管之低肥粒合金 ferritic (low alloy steel) 碳鋼與奧斯田鐵系不銹鋼 (austenitic stainless steel) 異材金屬銲道，內外之氧化溝槽(Oxide Notching) 局部應力腐蝕效應，如圖 2.14 可自爐管外側以 VT，PT 檢測；爐管內側缺陷則必須以 UT，RT 檢測。

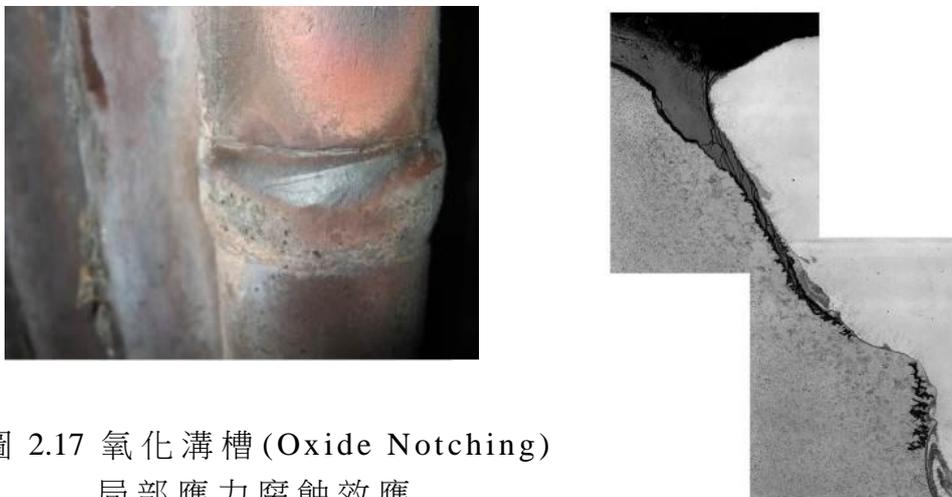


圖 2.17 氧化溝槽 (Oxide Notching)
局部應力腐蝕效應

Nickel-based filler metal DMWs(碳化物析出)

- Damage mechanism is NOT creep-fatigue
- The Ni alloy change improves the creep-fatigue strength of the weldment
- Common failure mechanism is *formation and growth of interfacial carbides*

異材金屬銲道之破壞機構，經查證屬 **碳化物析出**，非潛變疲勞所造成。

異材金屬銲道超音波檢測：

聚焦式 PAUT 檢出解析度與度量尺寸能力佳，音束越小檢出度量越小瑕疵能力越佳，研究簡報顯示 UT 靈敏度設定 0.060 inch (1.5 mm)，大於 1.5 mm UT 尺寸度量正確，小於 1.5 mm UT 度量失準，會稍大實際尺寸。

Ultrasonic Examination Techniques

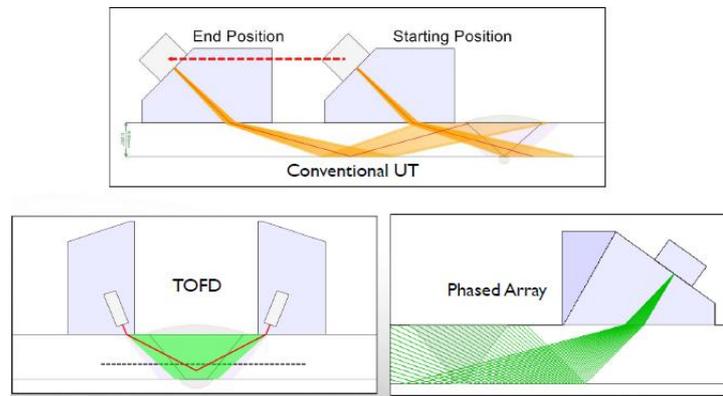


圖 2.18 異材金屬銲道超音波檢測



圖 2.19 異材金屬銲道 PAUT

Technique	Incident Beam Size (mm)	Incident Beam Size (inch)
LPA 7.5 MHz, Passive Focus	1.7	0.067
LPA 5 MHz	1.8	0.071
2-D Pitch-Catch	1.8	0.071
2-D Pulse-Echo	1.8	0.070
Focus-UT	2.5	0.100
Conventional P/E	5.0	0.200

圖 2.20 異材金屬銲道超音波檢測音束比較

2.3 汽力鍋爐 & HRSG 檢測工具

TesTex 創立已 30 年，在 NDT 檢測領域以發展 LFET、RFET、ECT、UT、BFET 為重點項目。TesTex 靈巧設計之汽力鍋爐(Steam Boiler) 與熱回收鍋爐 (HRSG) 獨特非破壞檢測工具，是配合美國電力研究院 (EPRI) 研究計劃創新之電磁檢測技術應用。它包括：

- 1) LFET 自鰭片 (FIN) 爐管外表面檢測-汽力鍋爐爐管汽測氧化垢層堆積，管路減薄。
- 2) BFET 電磁平衡場 ”Claw” 檢測集管箱管路銲道。
- 3) RFET 遠場渦電流自集管箱內側檢測集管瑕疵。

2.3.1 HRSG 管路減薄 Low Frequency Electromagnetic Technique (LFET)應用

TesTex Inc 應用多頻非接觸式低頻電磁檢測技術 (LFET , Low Frequency Electromagnetic Technique) 發展出 TS 2000 TUBE SCAN，用來檢測鍋爐管件(Tube/Pipe)。

原理

LFET 發射出一個電磁訊號進入被檢件，任何電磁訊號之改變或扭曲 (如圖 2.21) 。

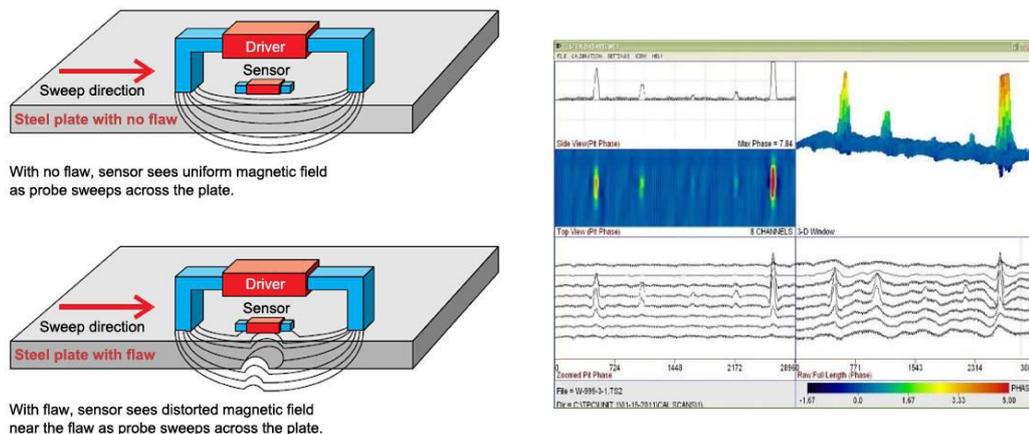


圖 2.21

經與校正訊號比對，將可獲致管材厚度之減薄量或汽側氧化垢層堆積。它可自管外檢出鐵磁性管件之管內與管外缺陷或非鐵磁性管件之管內鐵磁性氧化垢層堆積，並予量化。

與被檢測物件不需完全接觸，也就是說在均勻的垢層下，可不需移除表面垢層，直接掃描檢測 (燃氣，燃油機組鍋爐)。若是燃煤機組較不均勻之表面垢

層，可採用噴砂或高壓噴水 (3,000 psi，低流量) 等方式，進行爐管表面局部清理後再行檢測。可檢出管內酸性或鹼性腐蝕、氫脆、氧化點蝕、沖蝕和製造時殘留之瑕疵，在可允許接近之位置上，再輔以超音波檢測執行複檢。

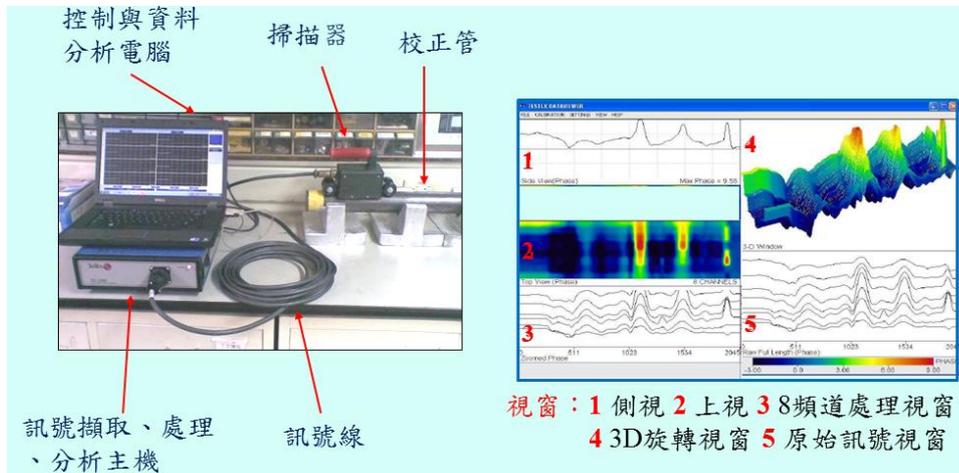


圖 2.22 多頻非接觸式低頻電磁檢測系統

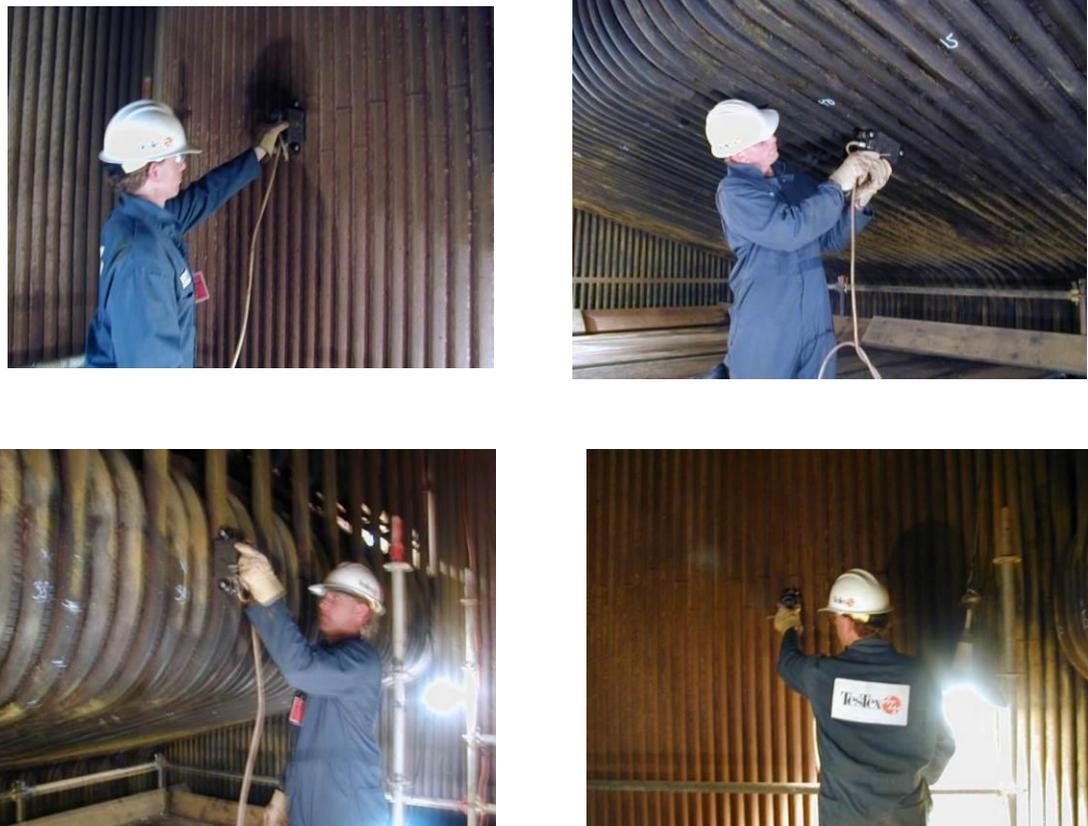


圖 2.23 管路減薄 LFET 應用

2.3.2 LFET 鍋爐爐管自外表面檢測汽側氧化垢層堆積

汽力鍋爐 T91 爐管汽側氧化垢層成長，一旦遇到機組負載變動或起停瞬間之震動，將會造成汽側管垢剝落，匯集在下部鍋爐爐管彎管處。若氧化垢層囤積量多至管路阻塞，阻止蒸汽之循環，無法進行熱交換，而產生爐管局部溫昇過遽而破管。以往是以射線檢測(RT)爐管彎管處，來辨識有無氧化垢層堵塞。

TesTex 在 EPRI 研究計劃下，已開發可以以 LFET 檢出過熱器不銹鋼管內(T91)磁性氧化垢層沉積之量化鑑別 LFET 應用，特別是超臨界鍋爐在過熱器與再熱器爐管常有不銹鋼爐管使用之場合，更是效益顯著。

(1) T91 材質爐管汽測氧化垢層成長與剝離

T91 材質爐管由於富鉻垢層在氧化垢層表面晶界上產生不連續，再加上垢層裂痕與空氣接觸導致新垢層空隙而剝離，圖 2.24。

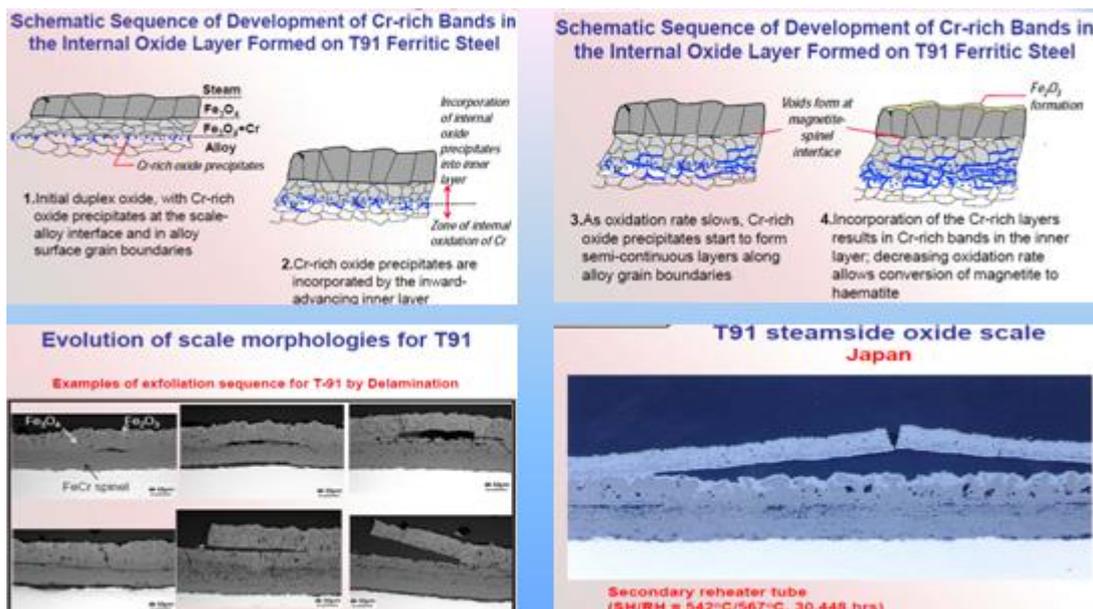


Figure 2-22 Schematic Representation of the Oxide Structures Formed on 300-Series Austenitic Steels in Steam [2-8]

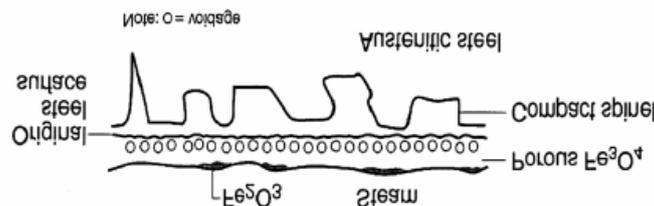


圖 2.24 T91 氧化垢層成長與剝離

(2) LFET 鍋爐爐管自外表面掃描，檢測汽側氧化垢層堆積



圖 2.25 LFET TUBE SCAN 系統組立



圖 2.26 自爐管外表面 LFET 掃描汽側氧化垢層堆積量

(3) LFET 檢測汽側氧化垢層堆積，信號分析

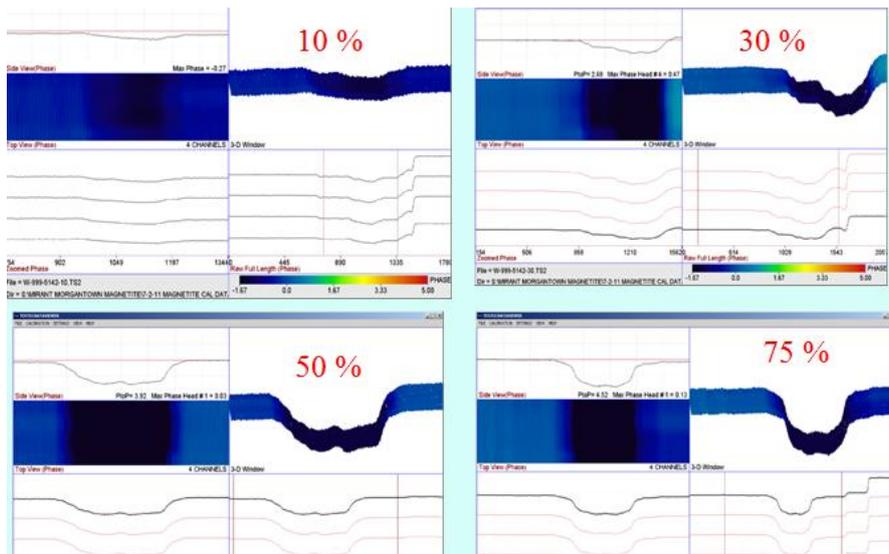


圖 2.27 10%, 30%, 50%, 75% 剝離氧化垢層堆積信號

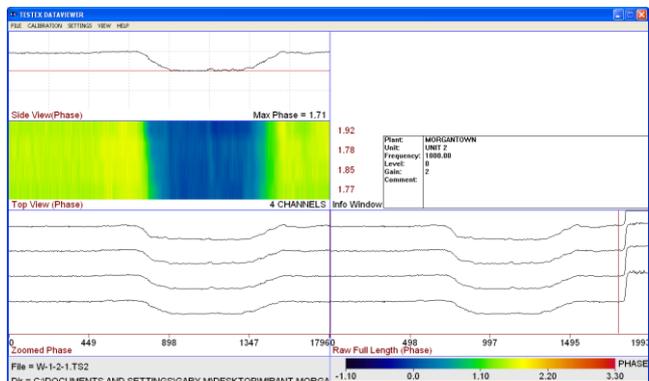


圖 2.28 dry magnetite

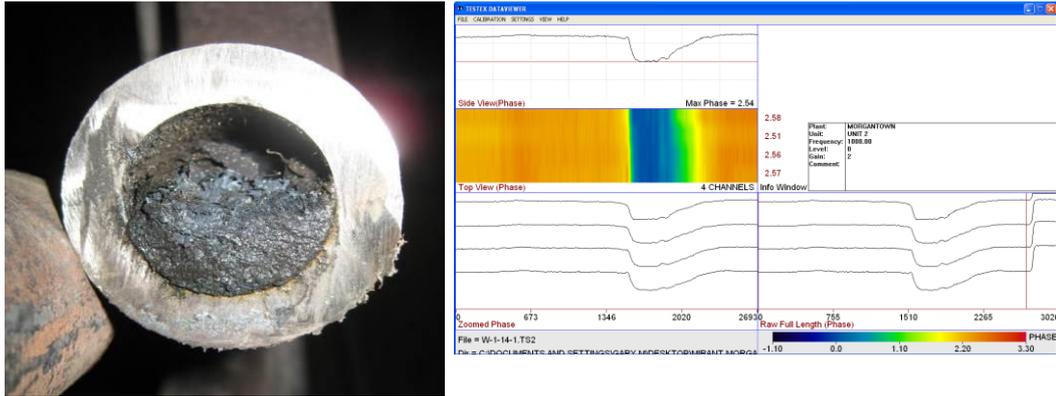


圖 2.29 wet magnetite

2.3.3 LFET 自鱗片管(FIN)外表面檢測管路減薄 Low Frequency Electromagnetic Technique (LFET)

此項檢測技術的應用，是經由 LFET 掃描器自鱗片爐管外表面掃描，由激發線圈回饋訊號的強度，可以查知 HRSG 爐管薄化的量，它可檢出局部管厚減損以及均勻之減薄。例如點蝕 (pitting) 和流體加速腐蝕 (FAC) 的均勻性薄化等，掃描速度約在 3 英寸/秒。

檢測說明

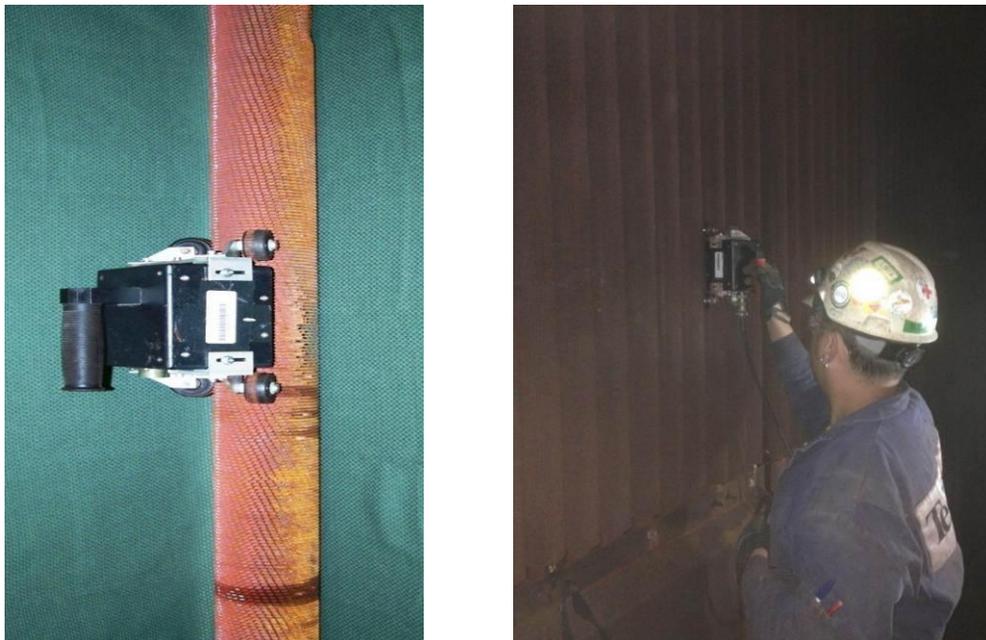


圖 2.30 LFET 自鱗片管 (FIN) 外表面檢測—管路

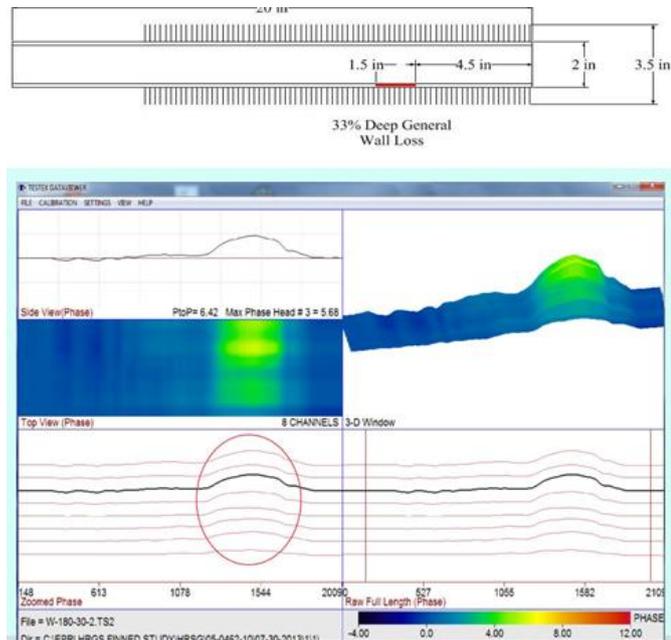


圖 2.31 30 % 深度減薄之 LFET 訊號

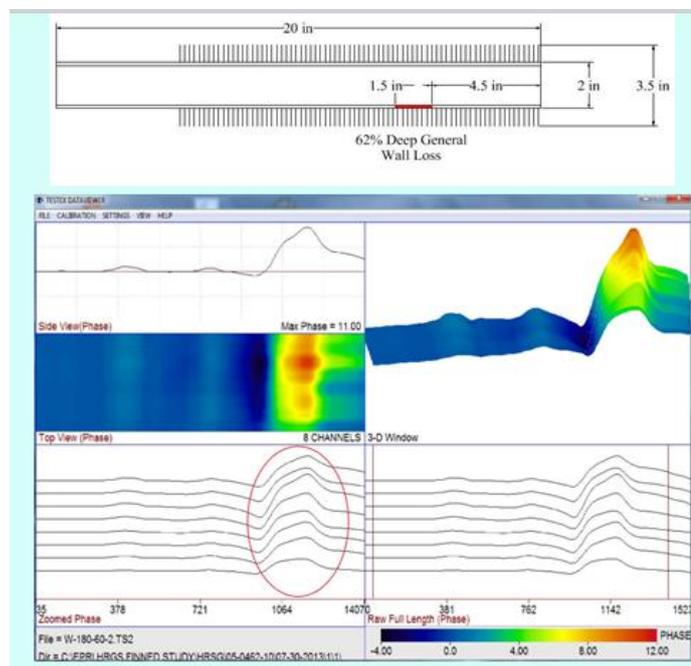


圖 2.32 60 % 深度減薄之 LFET 訊號

- 取 2” 外徑，0.15” 厚度具有 0.75” 長鰭片之碳鋼 HRSG 爐管，爐管內車製模擬管內減薄之校正管件。從標準管掃描後回饋之訊號側視相圖中，觀察第 1 個升起訊號為 60 % 深度減薄之點蝕訊號，第 2 個則為 30 % 深度減薄之訊號。

- 上視同步之彩色 B-Scan 視相圖，60 % 深度減薄之蝕坑是由黃到紅影像；以及 30 % 深度減薄之蝕坑，展視成綠色中間有黃色影像之示意。
- 3D 視窗可以看出 60 % 深度減薄與 30 % 深度減薄蝕坑相對應之側視呈像。

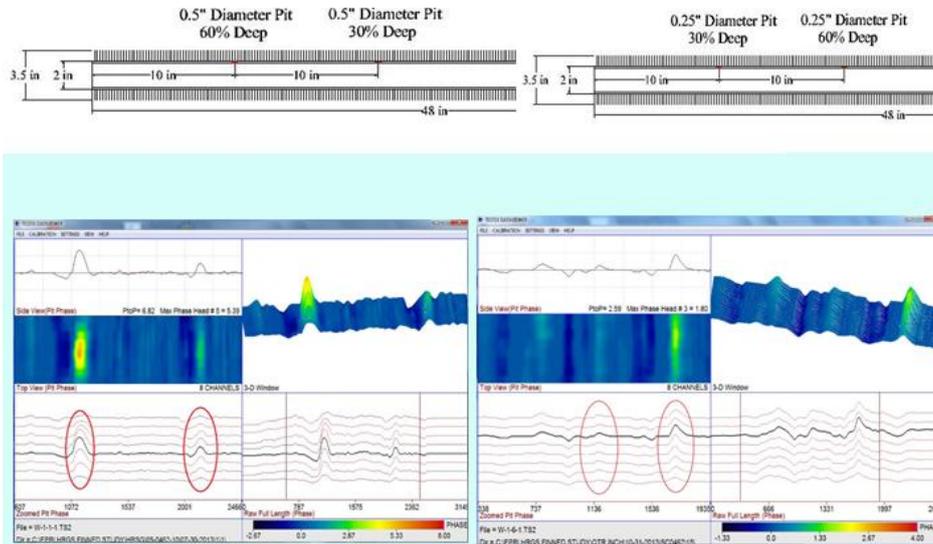


圖 2.33 60 % 深度減薄之 LFET 訊號

- 對於破裂鱗片，在清除前後，LFET 訊號對瑕疵的反應都可以明確地分辨，因此只要透過校正管校正後之檢測，是可以進行鱗片爐管薄化的定量檢測。

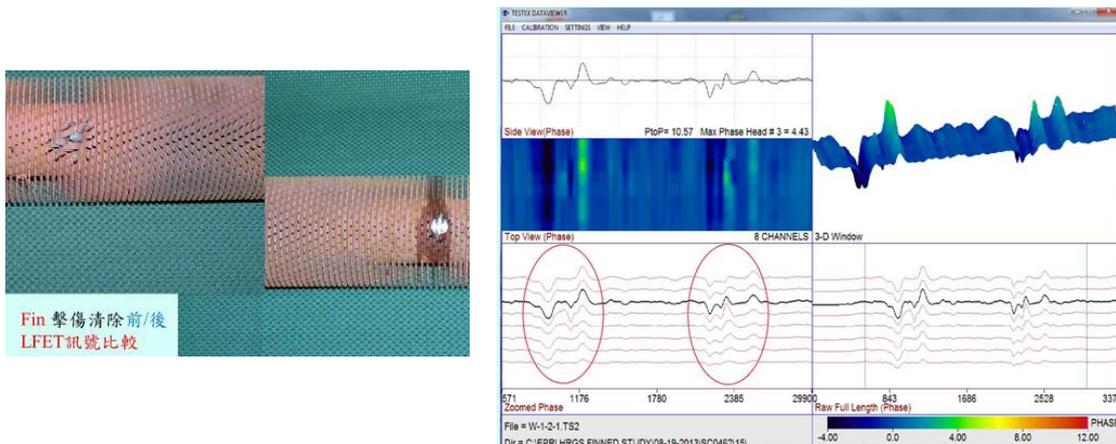


圖 2.34 60 % 深度減薄之 LFET 訊號

未來發展的方向是設計可自動掃描之 LFET 掃描器，以及能採用雙頻混波檢出爐管裂痕的探討並開發一套可進行 UT 查證之選擇性移除鱗片區段之檢測程序。

2.3.4 BFET“Claw”檢測集管箱管路銲道 Balanced Field Electromagnetic Technique (BFET)”

傳統上管路或壓力容器之銲道都是採行磁粒檢測 (MT)、液滲檢測來確定銲道品質之良窳，但大部份之檢測方法在檢測前都需要進行檢測面之表面清理，RT 則需要有人員淨空的限制。

BFET 是近年新開發之技術，銲道檢測表面不必經精細的研磨即可達到檢測的需求，可檢出銲道表面及表面下深度之瑕疵。

(1)原理：

電磁線圈被擺置於平衡狀態，驅動線圈置於“X”幾何座向，偵測線圈置於“Z”幾何座向，當掃描到缺陷時，這樣的幾何將會產生不平衡狀態（如圖 3-10 與圖 3-11），並將小瑕疵之訊號予以強化，透過人工瑕疵（EDM）規塊取得之訊號比對，核算出實際量測之瑕疵深度。很重要的一點，是 BFET 它可免除渦電流離距、雜訊對實際訊號之影響，主要是依據特定的邏輯將不必要之微件(element)訊號自主要訊號中旋動轉出，予以排除。

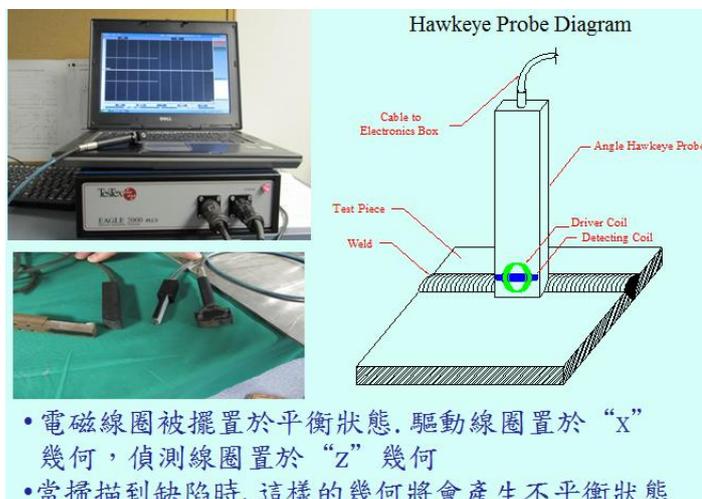
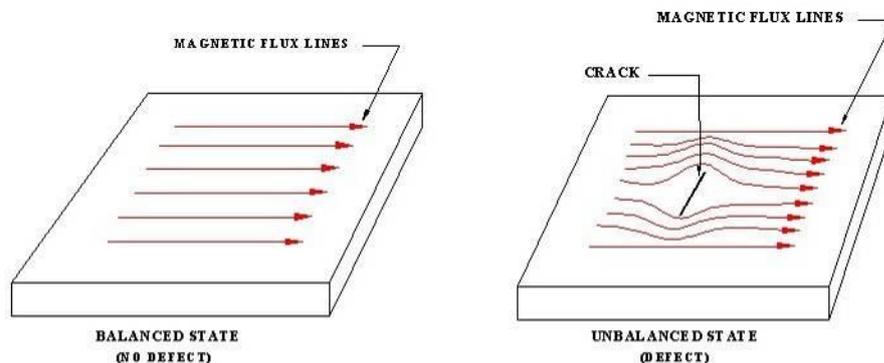


圖 2.35 BFET 檢測系統

(2)BFET 掃描檢測集管箱鍋爐爐管銲道

Claw 本身整併 2 個 BFET 探頭和兩具影像錄影器，訊號反應會受龜裂深度、寬度、探頭移動速度所影響；所以在增加信號收集速率，可降低探頭移動速度的變動；最佳測試頻率 100 Hz to 2,000 Hz.；以 C 型之外套夾式掃描器攀附在爐管 (Claw) 銲道上，進行周向旋轉掃描銲道，以利檢出銲道裂痕 (Crack)，熔合不良 (Lack of Fusion)，氣孔 (Porosity) 和其他銲道缺陷。Claw 的尺寸須配合不同爐管尺寸而設計製造，它可以進行 360° 全周掃描，而且只要以手旋轉即可。適合於尺寸 2" (51mm) 及 2.25" (57mm) 直徑之爐管銲接於 8" (203mm) 直徑以上之集管箱銲道。

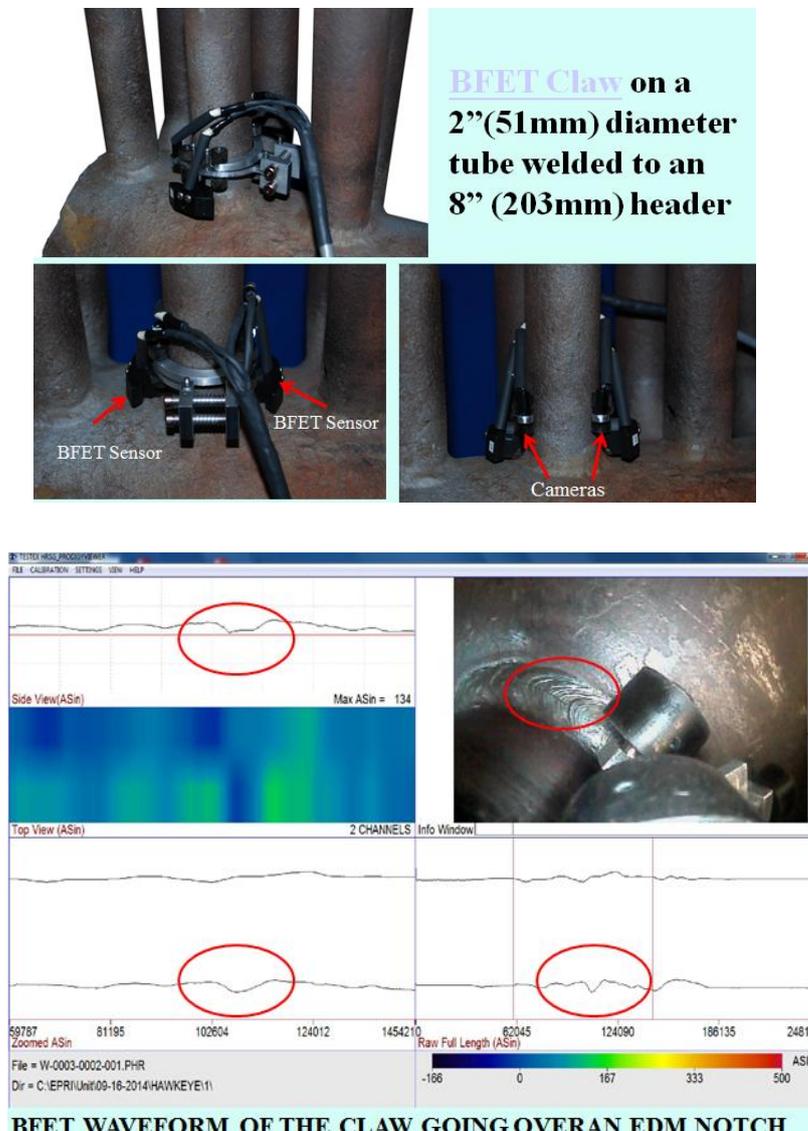


圖 2.36 集管箱銲道上有 0.05" (1.27mm) 深之電化刻槽 (EDM NOTCH) 之 BFET 信號

(3)BFET 掃描檢測信號分析

在電化加工 EDM 校正規塊校正後，可比對校正規塊人工 EDM 信號，獲知實際熱疲勞龜裂尺寸。

未來發展方向，配合遙視裝置檢測，設計可檢測第 2、第 3 排之集管箱岐管管支。

2.3.5 RFET 遠場渦電流自集管箱內側檢測集管瑕疵

RFET 自管內檢測集管箱岐管，它必需自集管箱切出開口，以期能讓遠場渦電流探頭與控制檢視用之內視鏡同時進入集管箱，以內視鏡觀察，再遙控 RFET 探頭自岐管內側，利用 RFET 遠場渦電流探頭檢出瑕疵。

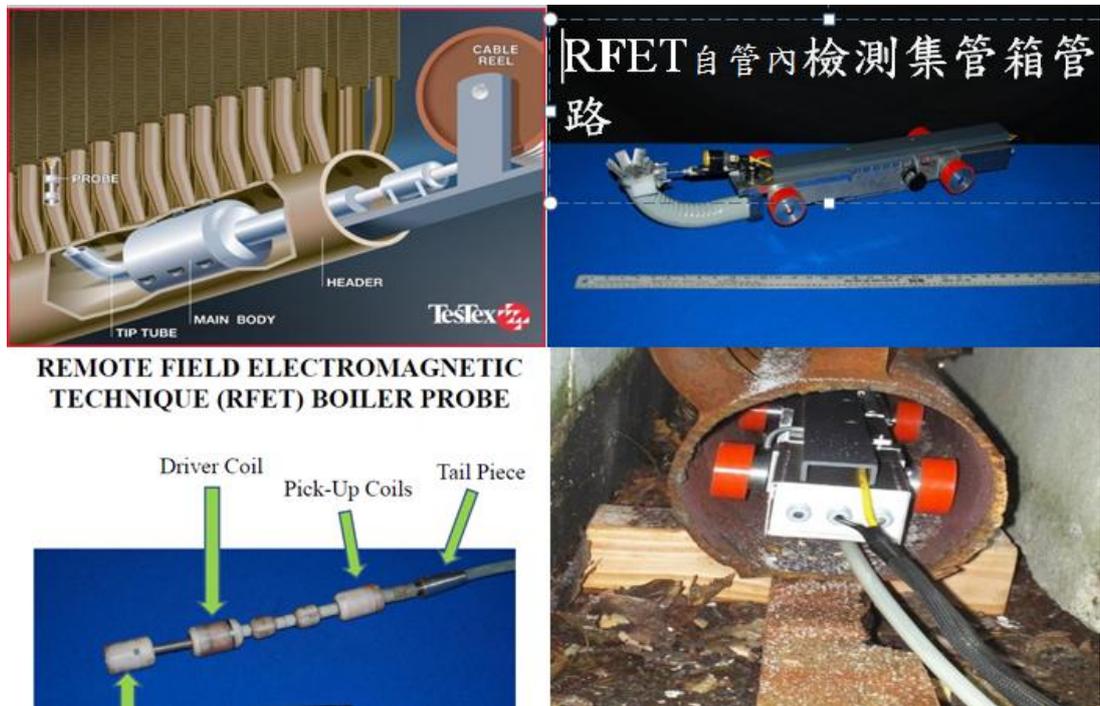


圖 2.37 RFET 遠場渦電流自集管箱內側檢測集管瑕疵

2.3.6 遙控飛行器燃燒器檢視 (圖 2.38) (Burner Testing and Inspection)

- 免去搭架花費
- 免去空爬發費
- 縮短檢測時間
- 大修前可先進行檢測
- 免去在高空作業人員的危險

Aerial Drone Inspection

[Roxboro Aerobotics Public Video.mp4](#)





圖 2.39 燃燒器檢視遙控飛行器檢視中



圖 2.40 燃燒器檢視遙控飛行器檢視錄影



圖 2.41 燃燒器檢視遙控飛行器檢視影像

三、電廠組件非破壞檢測技術： 從探討破損壞機構決定適當之 NDT 檢測方法應用

ISwT 從探討破損壞機構決定適當之 NDT 檢測方法應用，是要做妥電廠組件非破壞檢測規劃。不變的法則就是要從眾多組件中，尋找出關鍵組件可能產生破損的位置，進一步了解它可能造成破損的原因(破壞機構)，包括它的材質、製造程序以及應力承載狀況，從中了解如何針對這種狀況及其破損位置，以何種檢測方法的投入運用最為適合，進而及早查知起始的瑕疵，進行適當的處置方案或改善措施，防杜它不會在非預期的狀況下產生事故。

因此典型會造成破損的關鍵問題如下述：

- a. 高溫應力破壞(Hight temperature tensile failures)
- b. 潛變及破裂破壞(Creep and rupture failures)
- c. 高溫低週次疲勞(Low cycle fatigue at elevated temperatures)
- d. 氫脆化(Hydrogen embrittlement)
- e. 熱腐蝕或沖蝕破壞(Hot corrosion / Erosion failures)

各種組件之破壞機構詳如 表 3.1 ~ 表 3.2。並與 ISwT 人員研討及實驗室現場參觀研習，如圖 3.4 ~ 圖 3.9。

表 3.1 鍋爐組件破壞機構(Damage Mechanism)

組件名稱 Component	潛變 Creep	疲勞 Fatigue	沖蝕 Erosion	腐蝕 Corrosion	高溫應力破壞 HTT(Hight temperature tensile failures)
鍋爐及其附屬設備 Boiler&Auxiliaries					
汽鼓 Drums		X		X	
蒸汽集管箱 Steam Headers	X	X		X	
集水箱 Water Headers		X		X	
蒸汽管路 Steam Piping	X	X		X	
過熱器及再熱器管 Superheater & Reheater Tubes	X	X	X	X	
水牆管 Waterwall tubes		X	X	X	
煙道 Ductings			X	X	
集塵器 Precipitator			X	X	
結構物 Structures			X	X	

表 3.2 汽機、發電機組件破壞機構(Damage Mechanism)

組件名稱 Component	潛變 Creep	疲勞 Fatigue	沖蝕 Erosion	腐蝕 Corrosion	高溫應力破壞 HTT
汽機 Turbine					
轉子 Rotor	X	X			
汽輪機外缸壁 Shell	X	X			
汽櫃 Steam Chest	X	X	X		
汽輪機外蓋 Casing	X	X			
汽機葉片 Blades		X	X	X	
承載高溫螺栓 HT Bolts		X		X	X
發電機 Generator					
轉子 Rotor		X			
發電機轉子扣環 Retaining Rings		X		X	
冷凝器及熱交換器 Condenser & Heat Exchanger		X	X	X	

美國 ISwT 公司使用 Zetec's 設計 Turbine Blade scanners 結合 IHI's 本身工程檢測應用 3-D 程式模擬，決定 wedges 和音束路程，提供客製式汽機葉片 PAUT 超音波檢測服務，如圖 3.1

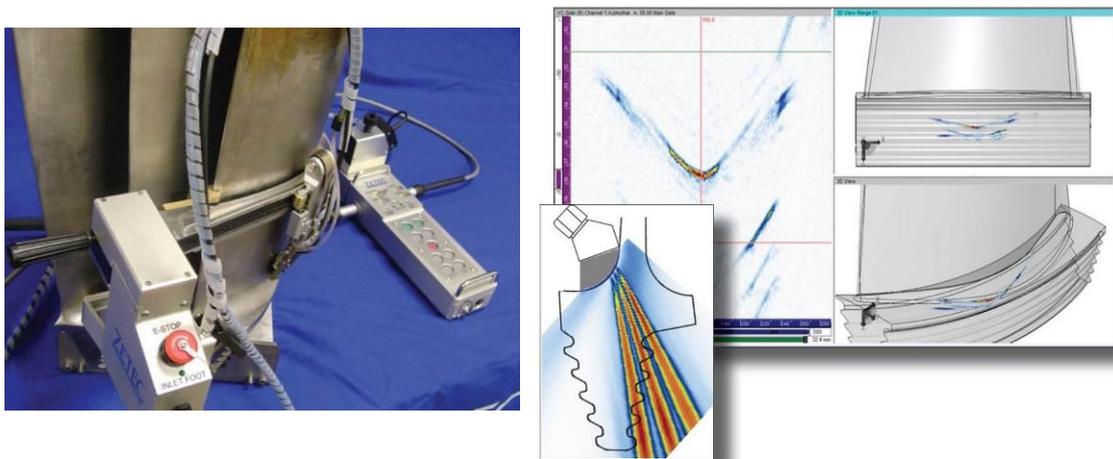


圖 3.1 汽機葉片 PAUT

PAUT – Small Bore Exams – Socket Welds

如圖 3.2

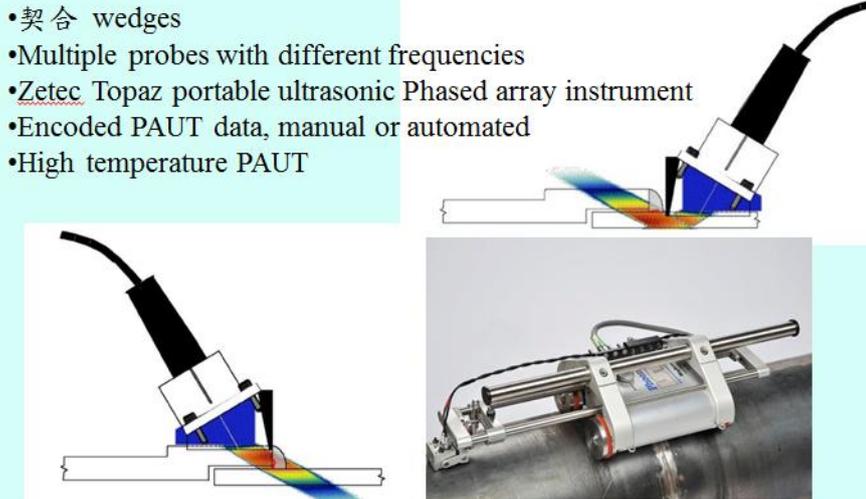
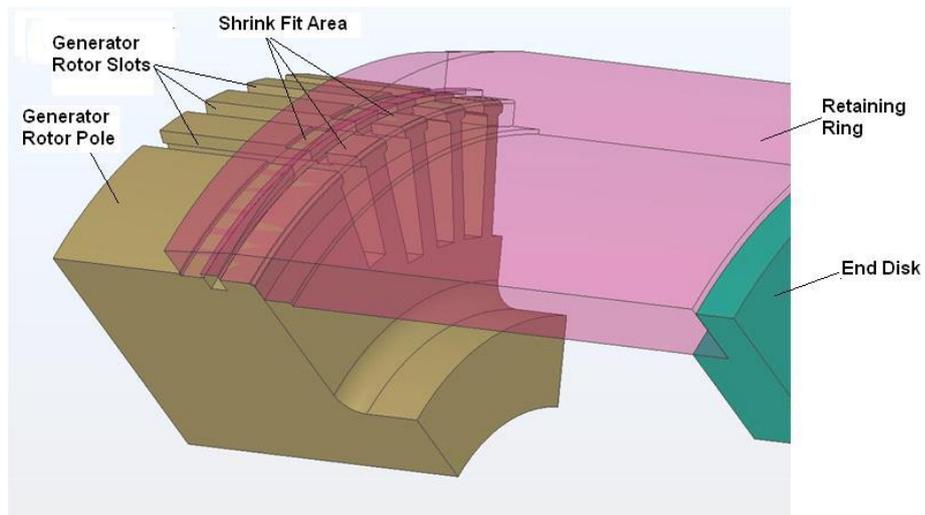


圖 3.2 管路銲道套銲 PAUT

發電機扣環 Generator Retaining Rings

檢測方法應用包括 UT、PT、ET (UT 接觸媒質，PT 檢測材料硫、氮含量必須控管)，如圖 3.3



Copper coils under the retaining ring and in the coil slots are not shown
Wedges on the top of the copper coils at the rotor slots are also not shown

圖 3.3 發電機扣環檢測計畫



圖 3.4 NDT 檢測計畫研討



圖 3.5 閥件組合狀態 UT 偵測



圖 3.6 NDT 研究實驗室參觀(1)



圖 3.7 NDT 研究實驗室參觀(2)



圖 3.8 NDT 研究實驗室參觀(3)：機械修製工廠



圖 3.9 氮氣噴射(NitroJet® Technology 塗層去除系統

四、氮氣噴射(NitroJet® Technology)應用於氣渦輪機葉片再生表面塗層去除

Nitrojet® 是一套超高壓低溫的清潔、輻射表層除汙及切割多功能系統；本項專利技術是利用其具低溫和高壓之液態氮，產生類似水流之高密度超高壓噴射。藉由調整液態氮噴射之溫度和速度而能達成清潔工件表面，去塗層或輻射汙染表層，以及進行各種材料的切割。液態氮能夠予以加壓至 5,000 ~ 55,000 psi，溫度也可以設定在最低 -260°F (-126°C) 以 3 倍於飛機飛行速度 (MACH3, 332 m/s × 3) 之噴射流進行各種材質表面清潔、去塗層、切割工作。NitroCision 2001 它源自 US Department of Energy (DOE) Idaho National Laboratory (INL) 獨家取得專利。

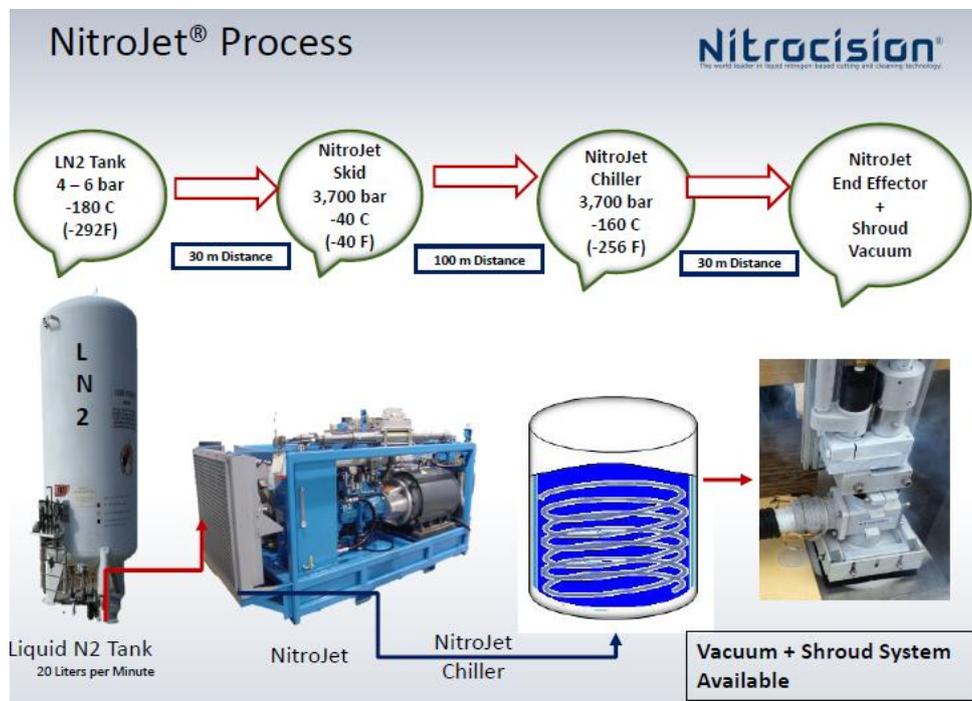


圖 4.1 Nitrojet® 超高壓低溫清潔除汙及切割多功能系統



圖 4.2 塗層之移除清潔

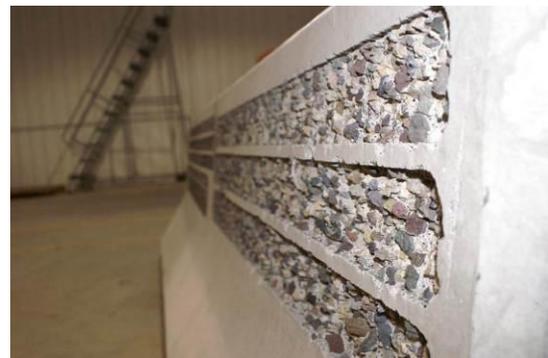


圖 4.3 混凝土切塊



圖 4.4 精確管棒件切割



圖 4.5 精確平整板件之切割

精進的 Nitrojet[®] 2011 年延續設計技術在美國、歐洲、中國大陸取得專利。本項技術可運用至各項工業領域上，例如核能及化學工業之去輻射汙染，航太及工業設備之塗層移除，工業製程及生化實驗室之沉積物清潔。Nitrojet[®] 氮氣噴射處理系統其離工件 18 英吋 (45 cm) 距離範圍內，Nitrojet 都是有效的，由於液態氮可以很快速地轉換成氣體。在超困難的情況下，液態氮能釋放出三種整合效應：

- 溫度：減少物件的表面張力，使其可以很容易地移除易碎表面的材料。
- 低溫流體的噴射效應：液態氮在氣化過程中容積會膨脹至 650 倍以上，因此可以強化其移除速率。
- 具噴射速度的流體：它儲放了動能，可以移除在基材上的塗層材料。

動能來自惰性之化學液態氮， Nitrojet 可以減去交叉（輻射）汙染和產生二次的廢水流，由於它只有 18 英吋之可視噴射應用，相較水和研磨性噴射，其傷害機件可以降至最低，它可以手持操作或設計成自動化處理系統，不似爆炸般危險，卻可廣泛應用至各式材料上，移除其工業污染垢層、塗層、水泥磨除與各式軟硬材料精確平整之切割。

由於 Nitrojet 的溫度和壓力是可以調整的，因此在進行軟或硬材料的切割時，都可以控制得宜且準確，不會產生割離脫層或造成損傷。

Nitrojet 氮氣噴射加工技術的優點：

- ◆ 不會產生二次廢棄物，需待處理
- ◆ 是一種乾且惰性、非污染性之製程
- ◆ 不會產生放電
- ◆ 不需經化學溶劑或水再洗滌
- ◆ 可控且準確地處理正確位置
- ◆ 不會損及基材
- ◆ 不會有熱/溫度集中效應
- ◆ 可以拉長維護保養間期
- ◆ 可變動性佳的一種加工工具
- ◆ 清理加工設備不需被拆解
- ◆ 屬工業安全等級
- ◆ 可以組設真空吸附設備，避免移料粉塵飛揚

應用

- ◆ 核能輻射污染去汙
- ◆ 混凝土切塊
- ◆ 工業製品塗層之移除或剝除
- ◆ 石棉或工業的去汙
- ◆ 去金屬（氧化垢、陶瓷）
- ◆ 選擇性破壞混凝土
- ◆ 熱交換器、管路、槽體和容器之清潔
- ◆ 複合材料、金屬、橡膠等材料之切割

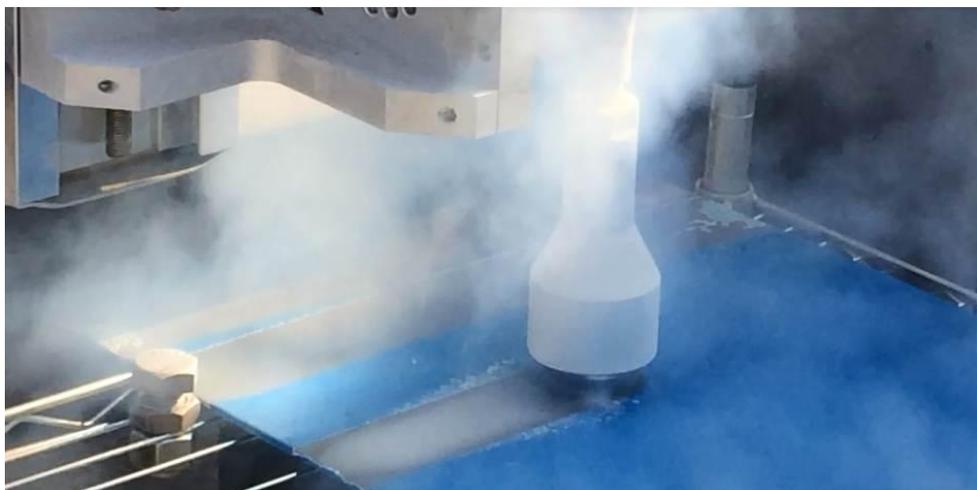


圖 4.6 精確表面塗層去除

Nitrojet 處理系統相較於噴砂在氣渦輪機葉片再生表面塗層去除之優點：

- (一)當液化氮在氣化過程中能產生 650 倍以上容積膨脹之動能，相較於噴砂更具有可觀的強力。液態氮類似水可以滲入塗層材料分子中，然後自塗層內部氣化至大氣中；而噴砂則是藉著壓力使塗層被摩擦而能自物件表面移除。
- (二)Nitrojet 在塗層之清除過程中，只有移除塗層本身，不會造成氣渦輪機葉片刮傷和機械損傷。
- (三)根據塗層材料的種類與規格，Nitrojet 不是以研磨方式在移除塗層的，因此不會造成氣渦輪葉片受損廢棄的損失，而增加營運成本。是一種完全乾燥之表面處理製程，不會產生廢棄物，若有需要切割 Inconel 葉片進行分析時，Nitrojet 也是一種很好的切割工具。
- (四)它可以設計成自動化處理製程 (圖 4.8)，或水底下進行作業(圖 4.10)。

ISWT 也建議本公司可以準備氣渦輪機葉片，安排在 ISWT 工廠進行現場實際葉片去除塗層試驗，它是有效率的。



圖 4.7 手動

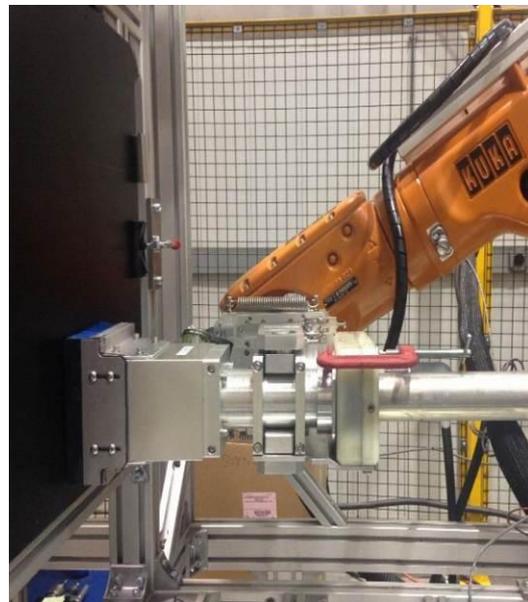


圖 4.8 自動

Nitrojet 系統處理效率

去除塗層 (Ex. Epoxy 塗層最薄可至 300 μ) 5 m²/hr

混凝土刮除 (核能運用) 切割

刮除速度 (cm/min)	深度 (mm)
315	2
5	42

切割速度	5mm/min	50mm/min
材質	厚度 (mm)	
碳鋼板	100	14
不銹鋼板	110	16
英高鎳板	112	18



圖 4.9 Nitrojet 系統處理效率

Nitrojet 系統可水底施工

Underwater Operation

With some operational adjustments, the NitroJet® System is operational under water just as in a dry environment

Nitrocision
The world's first in liquid nitrogen based cutting and coating technology.

圖 4.10 Nitrojet 處理系統水底施工

參、出國期間所遭遇之困難與特殊事項

- (一) 出國前，研習項目事先與欲前往機構/公司充分溝通，研習機構將會妥善準備與安排各專業人員共同研討交流，可謂收穫豐富。
- (二) 參加會議，資料不齊全，未盡周詳之資料，對於職所提出之需求，研習機構也能於事後用電子郵件方式順利寄達本處；Utility (EPRI 會議) Share 經驗 by E-mail，延續檢測經驗交流。
- (三) 拜訪研習機構/公司服裝正式、見面禮不可少，針對本公司的需求，提供詳盡的說明與建議，收穫多。
- (四) 公務出國機場行李檢查，無大眾運輸車資貴，國外消費高，還是透支。
- (五) EPRI 鍋爐破損檢測評估研討會會議進程只發給 Agenda，沒有書面及任何電子檔，只提到會議後 1 個月後，與發表者談好同意權後，再開放網站密碼下載。職考量資料取得的不確定性，1 人忙於拍攝演講者之每一張投影片，又遇相機電池耗盡窘境，不似日本三菱公司兩人 1 組，可從容全程錄影音。

肆、對本公司之具體建議

- (一) EPRI 鍋爐破損檢測評估研討會中，匯集電廠、OEM、工程顧問與檢測服務機構及學校研究機構，分享鍋爐破損檢測評估經驗與新技術 R&D，值得參加，他山之石可以攻錯。
- (二) TesTex 鍋爐 (LFET & BFET) 技術成功案例，值得本公司技術引進，建置更完整之鍋爐檢測技術應用，新系統有 3 次檢測實績經驗，值得本公司引進此項檢測更新技術。
- (三) 鍋爐爐管銲道超音波檢測，採 PAUT 陣列式超音波檢測取代 RT 射線檢測，也是本公司 R&D 可進行之方向。

- (四) 建議參加 EPRI 研討會，能比照 MHI 2 人 1 組全程錄影音，返國可分享公司各相關單位，效益大。
- (五) 建議引進 ISwT 新開發之 NitroJet® Technology 氮氣噴射系統，用於氣渦輪機葉片再生前處理或其他機械切削製程，可進行精準有效率之加工。
- (六) 善用 NitroJet® Technology 氮氣噴射系統，處理核能表層輻射污染組件廢料，在 scabbling、Cutting 後，也可以將核能廢料適當減容。
- (七) 已自 EPRI 網站密碼下載取得之鍋爐破損檢測評估研討會簡報資料，將轉送發電處參閱，以期發電處所屬各電廠能分享研討會中寶貴之鍋爐維護保養檢測經驗資訊。