

行政院及所屬各機關出國報告

(出國類別：實習)

(裝訂線)

## 熱交換器檢測維修技術

服務機關：台電電力修護處南部分處

出國人職 稱：十等工業工程監

姓 名：鍾 明 雄

出國地區：美 國

出國日期：93.06.17~93.06.28

報告日期：93.08.16

## 行政院及所屬各機關出國報告提要

出國報告名稱：熱交換器檢測維修技術

頁數 21 含附件：是否

出國計畫主辦機關/聯絡人/電話：台灣電力公司/人事處陳德隆/02-23667678

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/工業工程監

/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：93/06/17~93/06/28 出國地區：美國

報告日期：93/08/16

分類號/目

關鍵詞：

內容摘要：（二百至三百字）

此次出國任務為研習熱交換器之檢測技術，主要係赴 Corestar International Corp.及 NDE Associates Inc.研習檢測技術，並順道參加美國電力研究所（EPRI）一項有關熱交換器檢測與維修之會議(8th EPRI Balance-of-Plant Heat Exchanger NDE Symposium)。熱交換器係發電設備運轉上，系統平衡及提高運轉效率之重要設備，本部門職司熱交換器之非破壞檢測多年，雖然著有成效，但檢測技術日新月異，且發電部門對檢測與維護之要求日益增加，包括檢測速度、評估技術、如何謀求檢測數量與週期之最佳化等，都是我們改進的目標，也是客戶的需求。鐵磁性管主要用於冷凝器、部份飼水加熱器以及鍋爐爐管、過熱器、再熱器等設備，這類管子檢測較為困難，係目前技術發展之瓶頸，經由此次赴美研習，獲得許多新發展與新理念，期能對公司熱交換器維護與業務發展有所助益。此報告包括研習過程與內容，檢測與維護之新發展，最後並就此次研習任務提出心得報告與實行建議。

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

# 目 錄

	<u>頁數</u>
一、 出國事由-----	4
二、 出國行程-----	4
三、 任務執行過程與內容-----	5
1. Corestar Corp. 研習內容介紹-----	5
(1) 渦電流探頭製造-----	5
(2) 檢測經驗-----	6
2. EPRI 8th EPRI Balance-of-Plant Heat Exchanger NDE Symposium	
a. Plenary Session-----	9
b. Vendors Session-----	9
c. NDE Session-----	9
d. HX assessment & Repair Session-----	10
e. Utility Experiences Session-----	14
3. NDE Associates Inc-----	15
四、 心得與建議-----	17
五、 返國座談會簡報資料-----	20

## 一、 出國事由

熱交換器係發電系統之重要組件，本部門負責相關設備之檢測工作，希望對檢測及分析技術有所突破，故擬訂計劃參訪檢測發展較有聲譽之公司，包括 Corestar International Corp.以及 NDE Associates Inc.,以吸收其對於鐵磁性及非磁性管之檢測分析技術，並參加 8th EPRI Balance-of-Plant Heat Exchanger NDE Symposium，以吸收美國各公司對於熱交換器之檢測及維修相關技術，如磁飽和法、遠場渦電流檢測法、管內超音波法，另外對於鍋爐過熱器管、再熱器管、水牆管等較易破損導至停機之爐管檢測法亦為參訪重點，可對未來之檢測維護有所助益。

## 二、 出國行程

93 年 06 月 17 日～18 日 往程（高雄→台北→西雅圖→紐約→匹茲堡  
→愛爾文）

92 年 06 月 18 日～19 日 在愛爾文 Corestar International Corp.研習熱交換器檢測技術

92 年 06 月 20 日轉往 Key West

92 年 06 月 21 日～23 日參加 8th EPRI Balance-of-Plant Heat Exchanger NDE Symposium.

92 年 06 月 24 日轉往 Houston

92 年 08 月 24 日～26 日 在 NDE Associates Inc.

92 年 08 月 26 日～28 日 返程(Houston→Los Angeles→台北→高雄)

### 三、 任務執行過程與內容

#### 1、Corestar Corp. 研習內容介紹

參訪原因為 Corestar 除了製造各種渦電流探頭，如傳統渦電流探頭、遠場渦電流探頭、表面應用之渦電流探頭外，本身亦從事檢測服務工作，服務範圍含括核能、火力發電系統以及石化系統熱交換之渦電流檢測，服務性質與本處類似。因此參訪重點在(1)觀摩其渦電流探頭製造技術與過程；(2)檢測技術之研討。茲分別介紹於後：

##### (1) 渦電流探頭製造：

渦電流探頭係檢測技術中最重要的設備，直接影響檢測結果的靈敏度，另外一個重點是其耐用程度，因會影響檢測成本。國內曾經有人購入大陸製造之探頭，雖然很便宜，只有一般美製探頭約 1/2 價格，但品質不穩定，不良率高，且材質不佳，耐用性差，對檢測人員反而造成負擔，影響進度，本公司亦曾有同仁嘗試製作探頭，外型上困難度不高，癥結在於信號穩定性，包括重複性、可靠度，以及耐用性。

觀察該公司製造技術之特點為：

##### A. 線圈品質之選擇及繞線品質之控制

a. 各種線材依特性分類，使用圈數計數器及放大繞，使繞線品質穩定，使產品頻率、阻抗具一致性。

b. 每只線圈作電性量測，使訊號輸出穩定。

##### B. 工作環境之控制，包括：

a. 溫度及濕度之控制

b.作業現場環境之整頓

c.動線之規劃

d.原材料及半成品、成品、不良品之存放規劃

除了作業人員之技術及素質外，良好的規劃及控制係確保品質的重要因素。

(2)檢測經驗：

A. 遠場渦電流檢測：

對於熱交換器之遠場渦電流檢測，週向陣列式探頭之開發與應用係未來發展的驅勢。因磁場會受到支撐板之干擾，因此支撐板及附近缺陷之檢出能力較差，最近幾年，各公司皆致力於混波技術之發展，期能改善檢測函蓋面不佳的問題，但成效不佳，有的公司號稱有混波技術，也只是聊備一格而已。週向陣列式探頭係以六只線圈作週向排列，儀器必須具備六個通道，經現場以 Proto type 探頭，並用 Seacure tube 之 Mock-up 測試，確能改善支撐板處之缺陷檢出能力。因台電公司部份電廠如大林，有些以更換為 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住管壁，易磨損，且無法使用探頭推送器(Pusher-puller)，檢測速度慢，如改用陣列式遠場渦電流探頭(RFECT Array Probe)當能改善檢測品質。

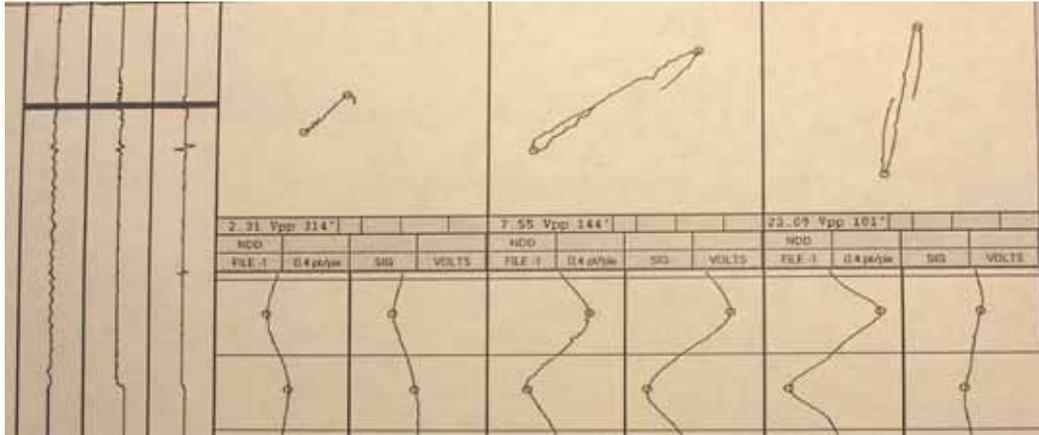


圖 1. 使用 RFECT Array 檢測 Seacure Tube, ASME 標準管，OD 20% 不同頻道之訊號顯示，此缺陷位於支撐板邊緣。

### B. 爐管檢測：

鍋爐管亦為研習要點之一，因鍋爐管仍屬於熱交換設備的一環，目前針對爐管的檢測技術包括超音波、磁漏檢測、遠場渦電流等，近年來遠場渦電流發展較為快速，本處亦已應用多年。爐管有時會因超音波不易檢出內壁小缺陷或外壁腐蝕，而由內部以 RFECT 探頭檢測，但有時也會因集管箱太小，探頭不易由內部伸入，故須設計外壁之 RFECT Array 探頭，此技術已漸漸成熟，未來我們將俟機引用在水牆管、過熱器、再熱器及省煤器管甚或 HRSG 之檢測上。



圖 2. Seacure Tube Bundle Mock-up



圖 3. Carbon Steel Tube Bundle Mock-up

爐管檢測訊號之優劣或訊噪比主要由頻率響應決定，不適當的設定無法得到最佳靈敏度。

## 2. EPRI 8th EPRI Balance-of-Plant Heat Exchanger NDE Symposium

此項會議每兩年舉辦一次，由美國各電力公司、維修技術服務、研究單位、材料供應及檢測服務等相關單位參加，另外加拿大、英國、南非、日本、韓國也有少數代表參加。台電公司人員雖非 EPRI 會員，但 EPRI 歡迎我們參加，這是一個技術交流的極佳場所。

此項會議正式會期為二天半，另外半天為會前額外之短期訓練課程，課程內容包括：

- a). Remote-field Eddy Current for Power & Petro-Chemical Industries
- b). Heat Exchanger Tube Materials Failure Mechanisms and Tools for Selection
- c). Financial Risk Based Analysis for Heat Exchanger Refurbishment/  
Replacement

此項課程主要著重在技術討論，包括遠場渦電流、破損機制、風險分析等。

正式會議：主要包含以下分項會議，由於本次大會並未發行論文集，因此必須在過程中勤做筆記，否則還真不知怎麼寫報告。

### a. Plenary Session：內容包含

- Utility Keynote: Personnel Certification-What's Really important?
- NRC Perspective

- Utility perspective on HX Inspection Data Management
- Study of Future NDE Workforce Availability
- Production and Testing of Welded tubing: Quality is your choice.
- Eddy Current Central Certification Programs(ET-CCP)

此議題主要由 EPRI 以電力公司報告檢測人員資格、認證問題，過去及未來人力結構趨勢，檢測品質問題等。從各檢測問題驗證資格認證之重要性。

b. Vendors Session :

- Evolution of Array Technology for Tubular Inspection
- Powerfect Consulting Product and Field Service
- Recent Advancements in BOP HX Inspection methods
- EC Inspection on Heavy Wall 316SS Piping from OD
- Matrix Probe for Heat Exchanger Application

此為特殊議題，聽說前幾屆並無類似安排，主要由參與廠家介紹其研究發展成果，應用情形以及未來展望，各家之實力及展望呈現在所有潛在客戶面前。

c. NDE Session :

- Mutual Inductance Bridge Application and technology Advancements
- Thin Wall Ferritic Tubing Inspection Using RFT

- Application of Vic-3D Model to Braidwood Unit 2 HX Tubes
- RFT Data Analysis : Tips and Tricks
- Eddy Current Inspection of Welds

此項議題大部份在討論 RFT 技術，自 1990 年發展起，RFT 技術有長足的進步，但最近幾年已漸漸走入瓶頸，各研究單位及儀器開發業者之技術有趨向週向陣列的發展，尤其是針對較小管件。

#### d. HX assessment & Repair Session

- Plugging System Improves Reliability and Assists in NOX Reduction Requirements
- Catawba-2 Comtainment Spray HX Repair
- Use of Innovative PM-Cap Repair for Feedwater Heater Shells at Wolf Creek
- Basics for Externally Referenced RFT Testing(XRFT) in Utility,Petro-chemical,and Industrial Applications
- BWR BOP Heat Exchanger Tube Plugging at Susquehanna
- The Tennessee Valley Authority In-house Heat-Exchanger Condition Assessment/Eddy Current Program
- Challenges in the Detection,Sizing and Characterization of Small Volumetric Defects in Cooling Water Service Water Heat Exchanger Tubing

此議題主要研討熱交換器之檢測、評估及維修經驗，如減少停機，即可減少 NOx 排放量，方能符合環保法規的見解非常獨道。另外藉由歷史檢測資料，判定某些檢測區域之穩定性即可減少 ECT 檢測頻率，避免盲目的檢測，否則會浪費很多無謂的成本，至於檢測數量的拿捏則需進一步評估，畢竟每個廠，每座熱交換器的狀況不會一樣。Catawba-2 核電廠的熱交換器狀況與台電很類似，其 2B HX 已有 16% 塞管，破損肇因類似，也是藉由非破壞檢測發現問題所在後，使用 Sleeving Repair(內套管)方式修護，台電則以換管方式修護，Sleeving Repair 係最近開發的技術，國內很少引用，但此法值得推廣，因其可以解決燃眉之急，且不需花很多成本。

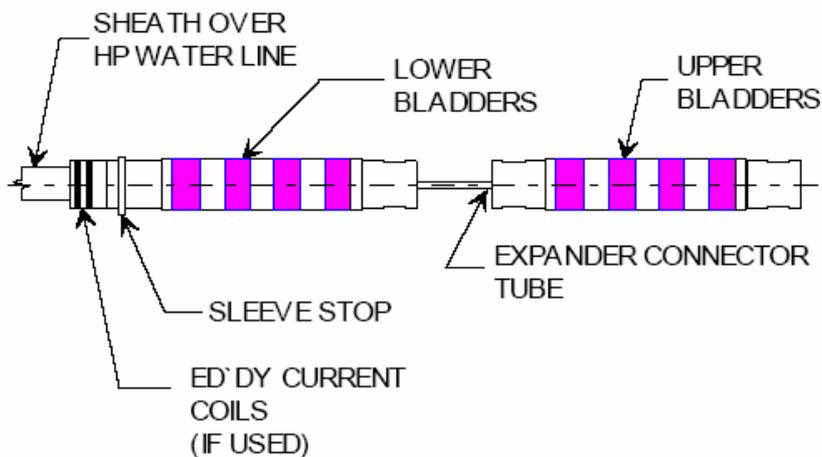


圖 4. Tube Hydraulic Expander

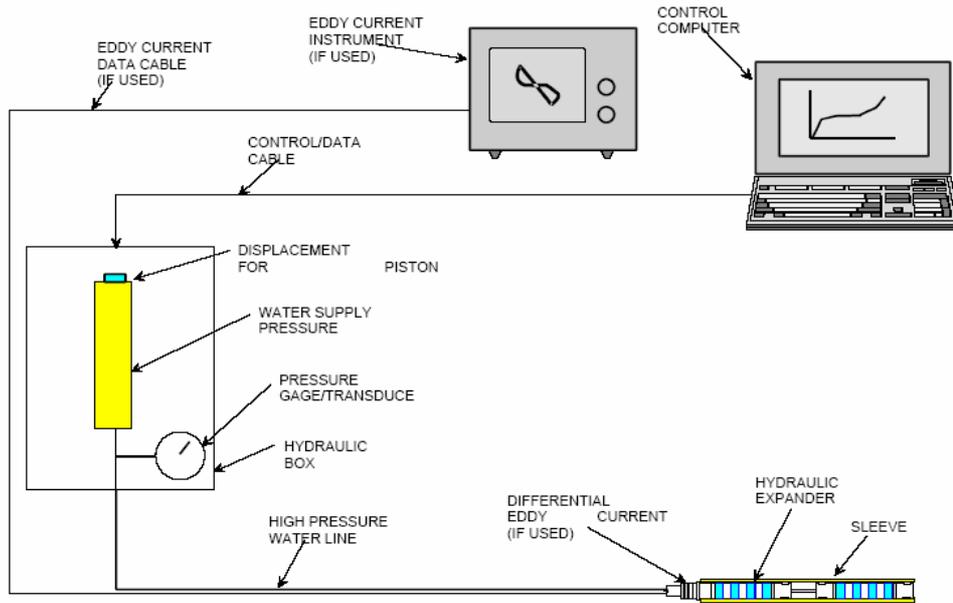


圖 5. 液壓擴管系統配置圖

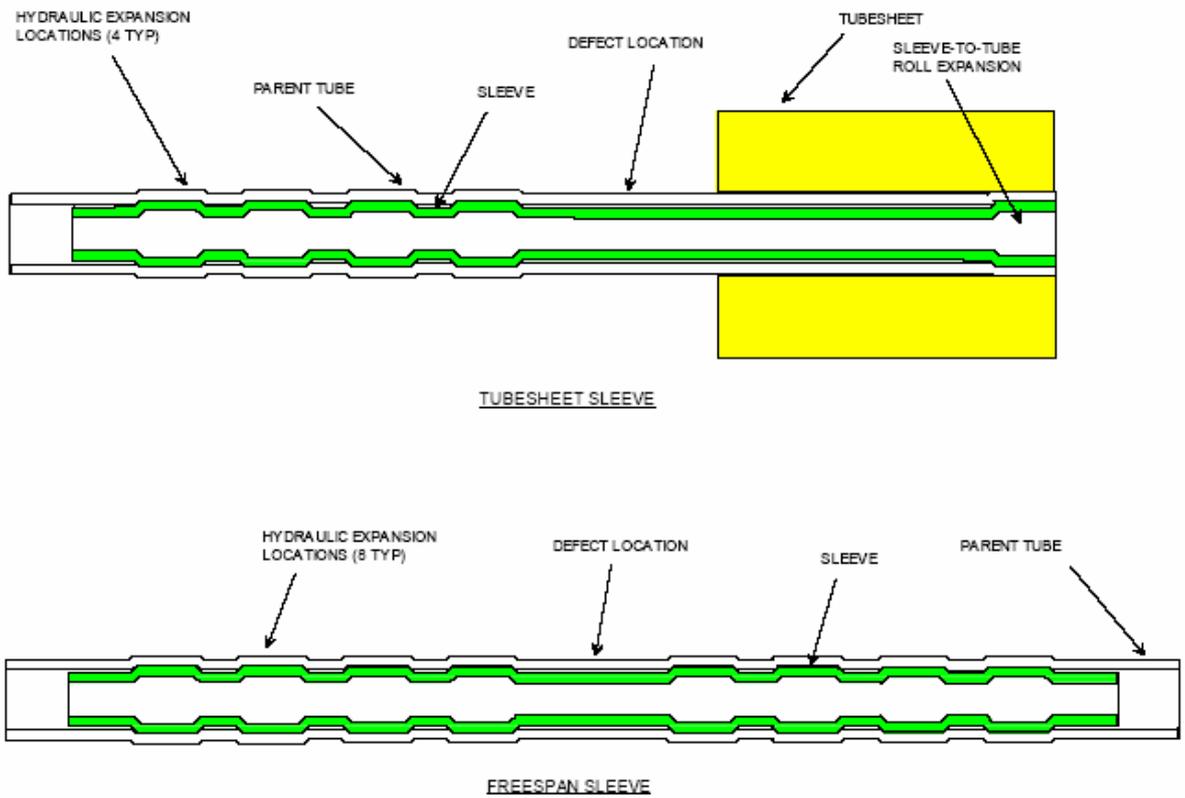


圖 6. Sleeve 擴管後形狀



圖7. 缺陷管局部Sleeve



圖8. Tubeshet Sleeve

表1. 目前常用Sleeve型式

	Type 1	Type 2	Type 3
Tube Sizes (inches)	5/8 x 0.035	5/8 x 0.056 5/8 x 0.065	3/4 x 0.043 7/8 x 0.050
Tube Materials	• 304 SST	• Monel • Carbon Steel • Ad. Brass	• Alloy 600
Sleeve Types	• Freespan	• Tubeshet • Freespan	• Tubeshet • Freespan
Sleeve Thickness	Thin	Thick	Thick
Sleeve Surface	Smooth	Smooth	Ribbed
Allowable Leakage (GPM/sleeve)	0.002	0.002	$6.94 \times 10^{-6}$

註：目前 Sleeve 技術開發者已有好幾家，施工方式相似，有的使用渦電流線圈偵測其尺寸變化，控制較精準。

另外，Wolf Creek Nuclear Operating Co.與 PMC Engineering Solution,Inc 共同發表低壓飼水加熱器薄化維修經驗，表示目前工安定檢之不嚴緊，無法防止殼壁受 FAC(Flow Accelerated Corrosion 造成的薄化，必須依照 EPRI 的建議實施定期測厚評估，這點我們核能廠都已有薄化先例，也都做過評估，火力廠則只有少部份做過，未來應在火力廠加強推

廣。

維修方面，有一些問題常被忽略，例如：

- 使用錯誤的塞子材料，造成電位腐蝕。
- 錯誤的塞子形式，造成洩漏。
- 塞子的設計，包括壓力、溫度、材料等。
- 塞子未完全插入，導至管子變形、密封不良、造成裂痕起始點。

對於微生物引起之腐蝕，附著物下之腐蝕、孔蝕、SSC、IGSCC、MIC 等，往往造成損失，其檢測設定應注意其靈敏度。

#### e. Utility Experiences Session

- Eddy Current Testing of Emergency Diesel Generator HX's
- ID pitting in Stainless Steel Condenser Tubes
- Characterizing Baffle Hole Enlargements in Seacure Tubing using Magnetic Saturation Eddy Current Techniques
- Performance of 6% MO SS Tubing after 12 years of service in BOP HX's at PPL Susquehanna
- Autopsy Results on Removed Feedwater Heater

本議題主要為發電設備檢測實務經驗之探討，發表者多為核能、火力電廠或相關廠商，報告內容主要有：

- Emergency Diesel Generator 熱交換器：塞管建議值(50%)之商確，建議事項，清潔與缺陷關係，覆蓋物下之缺陷成長。

--不銹鋼熱交換管 ID Pitting：不銹鋼管較少產生嚴重 Pitting 問題，但 Omaha Public Power District Fort Calhoun Nuclear Station 之經驗，由於溫度過熱問題會導至 Pitting，且因缺陷振幅較小，檢測 150 支管子中，有 50 支管子漏水(螢光浸泡洩漏試驗發現)，其中有 20 支管經 ET 檢測無缺陷，顯示檢測靈敏度無法檢出較微小之缺陷。

我的感想是，這在例行檢測過程中有時很難避免，尤其是對經驗較不豐富的檢測人員，主要癥結是寫程序書並未針對小缺陷來驗證，而是依據 ASME 標準管之貫穿孔來設定檢測靈敏度，然而，25mm $\phi$  OD 之標準管其貫穿孔直徑為 1.7mm  $\phi$ ，所以設定之振幅如果過小，極有可能漏掉小 Pitting,這對我們也是一個警惕，期望下次編寫檢測計劃時，應兼顧大小缺陷，尤其針對不銹鋼管之檢測。

小 Pitting 的成因除了上述之溫度外，也有

ID initial←Chloride Induced & Under deposition corrosion

--LaSalle Unit-1 Main Condenser Assessment：發表針對其冷凝器作一系列之追蹤分析，並於完全化學清管後，以渦電流檢測評估其檢出率，經過清管後，經兩年比較其檢測結果，發現其%TW 無增加，但 Signal/Amplitude 有些微增加，顯示管壁的清潔對管子的壽命有正面的意義。經過數年之檢測，發現台電現有舊機組之清潔度並不佳，有些包商清管較馬虎，或較少清管，因此會增加缺陷的成長率。

### 3. NDE Associates Inc.

EPRI 會議結束後已是日落時分，第二天隨即感赴休士頓，休士頓為工業大城，有許多大型石化、製造業，如殼牌石油，這些大公司很多只有設備檢查負責人，本身並無培養 NDT 人員，因此造就了數家檢

測服務公司，NDE Associates 即為此中之佼佼者，許多電力及石油公司為其固定客戶，對發電及石化工業之檢測著有專長，且圖中之負責人早期曾在 EPRI 當研究人員，著作及論文頗多，畢生從事 NDT 工作，專注精神令人佩服。

在 NDE Associates 主要研討熱交換器之檢測技術，包括：

- 磁性管之磁飽和檢測：含 Monel 管及不銹鋼管，可選擇完全磁飽和及部份磁飽和。
- 遠場渦電流之訊號評估：不同訊號評估法。
- 缺陷訊號與導電率變化或導磁率變化（統稱雜訊）間之判別：不同頻率之應用。
- 熱交換器及鍋爐各區間之問題點等
- 同材質之混波技術：模擬試驗求證。

此次研討，收穫頗多，對檢測評估工作之推展有很大助益。



NDE Associates 試驗室



熱交換器檢測、評估之研討

#### 四、心得與建議

1. 誠如此次會議中 EPRI 一份報告指出，五年來，美國就業市場中，NDT 從業人員因調職、升遷、去職等因素而離開 NDT 工作者接近三成，估計至 2010 年，加上新進人員，也會有 50% 離開 NDT 工作，屆時將呈人力不足，很多工作必須外包。台電何嘗不是如此，斷層非常嚴重，所謂的前輩與新進人員年齡相差超過 20 歲，這還好，畢竟人材是可以培養的，但是問題在於新進人員不足，且技術人員之養成期間較長，無法以速成方式培植人力。除了台塑六輕因係新建，招考的人員較為年輕外，國內其他大型企業如中油、中鋼情況與台電相同，面臨的問題與美國相似。因此，台電應善用此時之技術優勢，積極培育人員，不然未來只能仰賴包商提供人力及技術，檢測品質也就無法掌握了。
2. 對於熱交換器的維修技術，台電機組都只停留在破管就塞管，有空再換管的階段，對於效率影響較大，國外發展之 Sleeve 內套管技術，以及使用盤元式管子做快速換管的技術可以避免降低運轉效率，延長熱交換器壽命。去年我們曾經幫國內一家石化公司檢測熱交換器，檢查結果已破管及瀕臨破管者達 800 支，因熱交換器造價上億，且需費時半年，廠方只以較小管材塞入，避免大量洩漏，如能使用 Sleeve 擴管技術，暫時可以不用更換新的熱交換

器。

3. 爐管檢測技術方面，管壁腐蝕造成的破管佔有極高的比例，由管內壁或管外壁，以遠場渦電流或電磁法檢測缺陷，當可減少破管事故，如何快速準確的找出潛在的問題是我們一直努力的目標，期望新技術早日成熟，為台電機組提供進一步的服務。
4. 熱交換器之風險管理：由於台電之熱交換器頗多，各廠之檢測頻率及百分比皆不同，沒有準則，如能運用風險管理的理念與工具，以歷年檢測之歷史資料為依據，評估其檢測頻率及重點區域，才不至於作虛功。

## 五、返國座談會簡報資料

返國座談會因配合管理審查委員會辦理，於7月30日上午舉辦，各技術部門主管及分隊長、工程師熱烈參與、提問。

### 返國座談會

#### 熱交換器之檢測與維修

報告人：品質課 鍾明雄

### 出國緣由

- 學習檢測與維修新技術
- 檢測經驗交流
- 參加 8th EPRI Balance-of-plant Heat Exchanger NDE Symposium

### EPRI NDE Symposium

- Pre-Symposium Short Course
- Plenary Session
- Vendors Session
- NDE
- HX assessment & Repair
- Utility Experiences

### Corestar

Seacure Mockup 測試

Flaw near Support

### Corestar International Corp.

- 參觀探頭製造過程
- 討論磁性管檢測靈敏度之提升方案
- Seacure管(肥粒鐵系不銹鋼)以RFT檢測之可行性評估
- 新發展之週向陣列式探頭之靈敏度評估
- ET Mockup 製作

### Pre-Symposium Short Course

- Remote-Field Eddy Current for Power&Petro-Chemical Industries
- Heat Exchanger Tube Materials Failure Mechanisms and Tools(含HRSG)
- Financial Risk Based Analysis for Heat Exchanger Refurbishment/Replacement (RBI)設備風險評估之應用趨勢

## Vendors Session

### 發展趨勢

- Matrix 或 Array Probe 之發展
- 快速檢測
- 資料傳輸

9

## NDE

- 薄壁管以RFT取代磁飽和法
- 鍋爐管以RFT及電磁法作快速篩選  
改善測厚法的涵概率

10

## HX assessment & Repair

- Plugging 技術—快速、可靠性的發展
- 抽、換管，技術之成長  
有限空間下之維修技術
- TVA(Tennessee Valley Authority)  
HX設備ET檢測、狀況評估，資料管理經驗

11

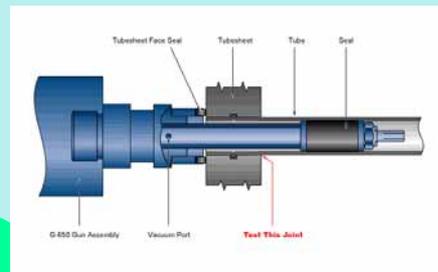


12



13

## Test & Repair



G-650 & G-650A Vacuum Joint Tester

14