

出國報告（出國類別：實習）

脈衝渦電流技術應用於電廠管路 及壓力容器薄化檢測研習

服務機關：台灣電力(股)公司

姓名職稱：林宏儒 工業工程監

林士瑄 一般工程師

派赴國家/地區：美國、加拿大

出國期間：113 年 10 月 20 日 ~ 113 年 11 月 03 日

報告日期：113 年 12 月 23 日

行政院及所屬各機關出國報告提要

出國報告名稱：脈衝渦電流技術應用於電廠管路及壓力容器薄化檢測研習

頁數 25 含附件：是 否

出國計畫主辦機關/聯絡人/電話

台灣電力股份有限公司/人力資源處/翁玉靜/(02)2366-7685

出國人員姓名/服務機關/單位/職稱/電話

林宏儒/台灣電力(股)公司/電力修護處/非破壞檢測研測課長/(03)328-1713 #1405

林士瑄/台灣電力(股)公司/電力修護處/機械工程師/(03)328-1713 #1431

出國類別：1 考察 2 進修 3 研究 4 實習 5 開會 6 其他

出國期間：113 年 10 月 20 日 ~ 113 年 11 月 03 日

派赴國家/地區：美國、加拿大

報告日期：113 年 12 月 23 日

關鍵詞：非破壞檢測、自動化、超音波、渦電流、管路薄化

內容摘要：

傳統液滲和磁粒檢測方法僅能透過照相或手繪方式記錄瑕疵資訊，而新型檢測技術除了能將檢測結果數位化保存外，更結合人工智慧技術精確辨識瑕疵位置及型態。為提升管路整體性評估的可靠度，檢測模式已從逐點檢測進化至即時動態檢測，使瑕疵輪廓的判讀更為全面。為汲取國外先進檢測技術和設備實務經驗，本公司除參加美國非破壞檢測協會研討會外，亦實地參訪渦電流自動化檢測設備及脈衝渦電流儀器製造商，藉此精進整體檢測效能，強化機組維護品質。本文電子檔已傳至公務出國報告資訊網（<https://report.nat.gov.tw/reportwork>）

目 錄

壹、國外公務之目的與過程.....	1
一、出國緣起.....	1
二、出國目的.....	1
三、出國行程.....	1
貳、ASNT 研討會研習心得與感想.....	5
一、 非破壞檢測資格授證：確保人員專業能力和檢測品質.....	7
二、 AI 在工業檢測中的創新應用與挑戰.....	8
三、 傳統與新型超音波檢測技術的演進與比較.....	9
四、 超音波與渦電流在管路檢測之創新應用.....	12
五、 陣列渦電流檢測應用.....	14
六、 超音波技術在非破壞檢測領域之應用 (TFM 與 PCI).....	15
參、參訪 Zetec 檢測自動化技術.....	17
肆、研習 Eddyfi Technologies 脈衝渦電流檢測技術應用.....	20
伍、出國期間所遭遇之困難與特殊事項.....	23
陸、對本公司之具體建議.....	24

壹、國外公務之目的與過程

一、出國緣起

隨著電力需求持續攀升，確保電廠設施的安全性和可靠性變得愈發重要。電廠管路及壓力容器在長期運作下面臨薄化問題，不僅影響設備使用壽命，更可能危及整體運轉安全。

傳統超音波測厚檢測流程包含繪點、磨點、量測、補漆，不僅耗時冗長，更因單點檢測特性而難以獲得瑕疵全貌，嚴重影響檢測品質和效率。雖然線性相位陣列超音波技術可實現大面積檢測，但對管路表面平整度要求極高，在運轉期間之檢測情境下，仍頻繁出現訊號扭曲、丟失等問題。

近年來，脈衝渦電流檢測技術在這一領域展現出巨大潛力，可在粗糙、不平整之凹凸面上實現厚度量測，有望徹底改變現有碳鋼管路及壓力容器檢測模式，實現快速、精準的大範圍檢測。

二、出國目的

脈衝渦電流檢測技術於 1994 年首先被提出，直至 2019 年商品化，技術評估從最開始的振幅衰減曲線，發展至目前的 τ -scan 曲線判讀和 Perm Tool 研判軟體，檢測可靠度持續精進。目前，公司在脈衝渦電流檢測技術的經驗仍處於起步階段，有效掌握脈衝渦電流檢測技術和汲取非破壞檢測新知為本階段的重要工作，本次出國研習脈衝渦電流技術應用於電廠管路及壓力容器薄化檢測目標如下：

1. 研習脈衝渦電流檢測技術及運用限制
2. 參加 ASNT 研討會，獲取最新非破壞檢測技術
3. 導入自動化工具減少重複性工作，緩解現場人力需求

三、出國行程

本次出國共 15 個日曆天，分別先後前往美國、加拿大兩個國家，出國行程如表一所示。第一站位於美國拉斯維加斯，參與 ASNT 2024 年度研討會，於會議中蒐羅國外廠家最新研究成果，並掌握非破壞檢測研究發展趨勢及脈動，與會議程如表二。另根據電廠大修維護需求，在儀器商展示區篩選合適且經濟的檢測儀器，藉由現場實際操作和測試，即時進行儀器技術成熟度的評估分析。

接著參訪位於西雅圖的 Zetec 渦電流探頭研發製造中心，Zetec 以渦電流檢測領域的專業技術聞名，特別在核能產業的檢測設備方面具有重要地位。透過此次技術交流，探討陣列式渦電流在葉片檢測的應用、渦電流訊號自動判讀系統的發展，以及不同自動插管技術在發電廠檢測的優勢和限制。

出國行程末站抵達加拿大魁北克市的 Eddyfi Technologies 公司，該公司主要核心技術為遠場渦電流、脈衝渦電流和超音波檢測技術，特別在管件、儲槽等關鍵設備的檢測方面有很多的檢測實務經驗。本站研習重點在於探討現場脈衝渦電流檢測所面臨的限制，並優化檢測計劃的執行方案，以提升檢測品質與效率，進而提高發電設備的可靠度。

表一 出國行程及工作概要

日期	地點	工作內容
10/20	台北－舊金山－拉斯維加斯	往程
10/21 ~ 10/23	拉斯維加斯	參加 ASNT 2024 研討會
10/24	拉斯維加斯－西雅圖	往程
10/24 ~ 10/29	西雅圖	參訪 Zetec 公司 研習陣列式渦電流及自動插管技術
10/30	西雅圖－多倫多－魁北克	往程
10/31 ~ 11/1	魁北克	參訪 Eddyfi Technologies 公司 研習脈衝渦電流及自動評估系統
11/1	魁北克－多倫多	公畢前往機場搭機並宿轉機點
11/2 ~ 11/3	多倫多－舊金山－台北	返程



圖 1 ASNT 研討會



圖 2 Zetec 參訪

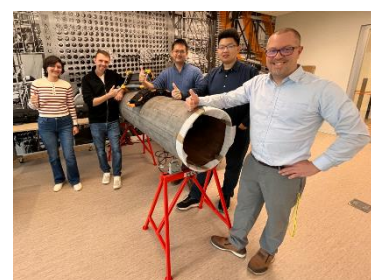


圖 3 Eddyfi 研習

表二 ASNT 重要議程參與

會議名稱	人員
10/21 (Monday)	
Opening Keynote	林宏儒、 林士瑄
儀器設備操作及簡易測試 (Exhibit Hall)	林宏儒、 林士瑄
10/22 (Tuesday)	
UT is UT: Understanding Advanced Ultrasonic Technologies and How They Compare to Each Others. (不同超音波技術之比較)	林宏儒
Robust Hardness Depth Estimation using custom Phase Coherence Imaging (PCI) based inspection system	林士瑄
General Session	林宏儒、 林士瑄
Advancing ASNT's Role in Encouraging Research on Ethics and Human Factors for AI/ML applications on NDE systems	林士瑄
參加超音波技能競賽	林宏儒
Intermodal Total Focusing Method (TFMi) and Multi-Technique Ultrasonic Sizing Analysis Study	林士瑄
Thickness Inspection of Coatings over Concrete: Exploring SSPC PA-9	林宏儒
Comparative study on over 150m of welded joints using established (PA/TOFD) and emerging (PCI/TFM) ultrasonic imaging methods. (PCI 和 TFM 技術比較)	林宏儒
Calibration Of NDT Equipment (目視檢測儀器校正)	林士瑄
NDE4.X - Next Level of NDT Automation in Aerospace (NDE 4.0 自動化檢測)	林宏儒
True Pulse-Echo Measurements with Single-Sided Air-Coupled Laser-Excited Ultrasound	林士瑄
Understanding the Variance in Ultrasonic Corrosion Readings (UT 腐蝕檢測限制)	林士瑄
Weld inspection using advanced TFM and PCI techniques (TFM/PCI 鐳道檢測應用)	林宏儒、 林士瑄
Comprehensive In-Service API 653 Inspections (壓力容器檢測需求)	林宏儒
Ultrasonic Total Focusing Method (TFM) for AIRBUS aerospace applications (航太領域 TFM 應用)	林士瑄
10/23 (Wednesday)	
儀器設備操作及簡易測試 (Exhibit Hall)	林宏儒、 林士瑄
Circumferential positioning and depth sizing of stress corrosion cracking in pipelines using eddy current array (渦電流應用於管路檢測)	林宏儒、 林士瑄
Eddy Current Array improving long products surface inspection capabilities. (陣列式渦電流檢測應用)	林宏儒、 林士瑄
Pulsed Eddy Current applications and challenges in oil and gas. (脈衝渦電流檢測應用，演講者缺席)	林宏儒、 林士瑄
Resonance Testing—A More In-Depth Look at This Technology (共振技術檢測應用)	林宏儒
Smart Rail Wheel Inspection by Innovative Matrix UT Technology	林士瑄
Fast 3D Surface Measurement Using Elastomeric Imaging. (表面 3D 建模檢測儀器應用)	林宏儒
Trustable AI-Assisted Analysis: Dataset Management and Reliable AI Flaw Detection.	林宏儒
10/24 (Thursday)	
Pitch-Catch Phased Array for Flange Face Corrosion Inspections	林宏儒
Improving efficiency and reliability of pipeline girth weld inspection with next-generation software tools	林士瑄

表三 美國 Zetec 參訪行程

10/25 (Friday)
Opening Keynote
自動插管設備 (SM-23G、ZR-100、VIPER) 介紹
渦電流探頭產線參觀
10/28 (Monday)
渦電流自動分析軟體 (Revospect ECT Pro) 介紹
各型渦電流檢測探頭 (Bobbin、Remote、磁飽和、AC3) 應用及討論
10/29 (Tuesday)
渦電流自動分析軟體 (Revospect ECT Pro) 練習
陣列式渦電流檢測實務 (MIZ-21C) 研習
Feedback and Closing

表四 加拿大 Eddyfi Technologies 參訪行程

10/31 (Thursday)
Opening Keynote
研發中心與生產線參觀
能源產業相關非破壞檢測解決方案介紹 (a. 陣列渦電流 b. 低頻渦電流 c. 脈衝渦電流)
超音波 TFM 技術介紹
低頻渦電流 (ACFM) 銲道檢測應用
11/01 (Friday)
脈衝渦電流 (PEC) 在發電應用領域的潛力和成功案例
脈衝渦電流分析軟體 (Lyft) 檢測應用研習
脈衝渦電流檢測限制討論及參數調校
Surface Pro 3D 介紹
Feedback and Closing

貳、ASNT 研討會研習心得與感想

美國非破壞檢測協會（ASNT）年度研討會是非破壞檢測領域的重要盛會，匯聚全球學者、產業專家及設備製造商，共同探討最新技術發展。研討主題涵蓋能源、運輸、航太及基礎建設等產業的檢測技術與應用。

本次會議包含 AI 輔助判讀、檢測資料數位化轉型、自動化檢測等新興技術的討論，並聚焦在先進超音波成像技術、渦電流檢測應用，主要議題如下：

1. 人工智慧與機器學習在 NDT 的應用
2. 先進超音波成像技術
3. 導波技術檢測應用
4. 陣列式渦電流應用發展 (取代傳統液滲、磁粒檢測技術)

歷屆研討皆採用多軌並行方式進行，本次共計發表 129 篇專業論文，其中約 30 篇聚焦於電廠管路銲道、儲槽等關鍵設備的檢測應用。與會者可依據個人專業及工作需求，選擇參與不同主題的技術研討，本次出國實際參與場次安排詳見表二。

ASNT 年度研討會除專家、學者、製造商針對專業技術演講外，在會場外另規劃儀器商展示區，本次共 227 家廠商策展，展覽與演講同步進行，因此行前須先規劃參與演講的主題，並空出足夠時間至展覽現場實際探索各家儀器。

值得一提的是，展場是第一線操作儀器和測試儀器的機會，藉由不斷的提問和查證，可以更快了解儀器的功能、性能和成熟度，其重要性不亞於專家演講。經過不斷摸索探究儀器的優劣和限制，能幫助我們避免購置成熟度不足的雛型機，儀器展場及會議現場如圖 4、圖 5 所示。



圖 4 ASNT 專家座談

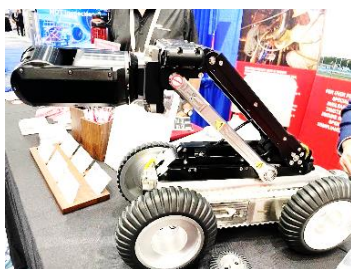
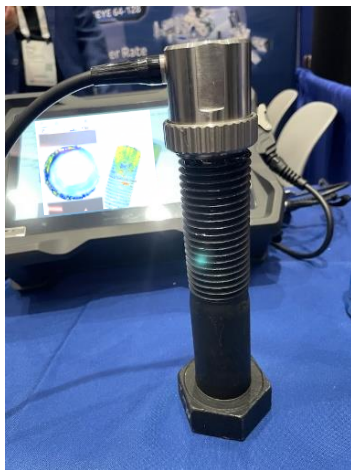
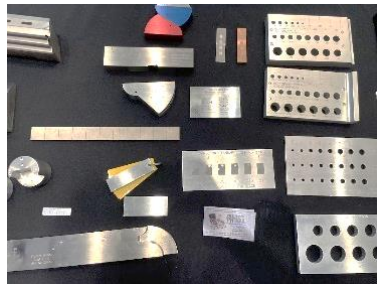
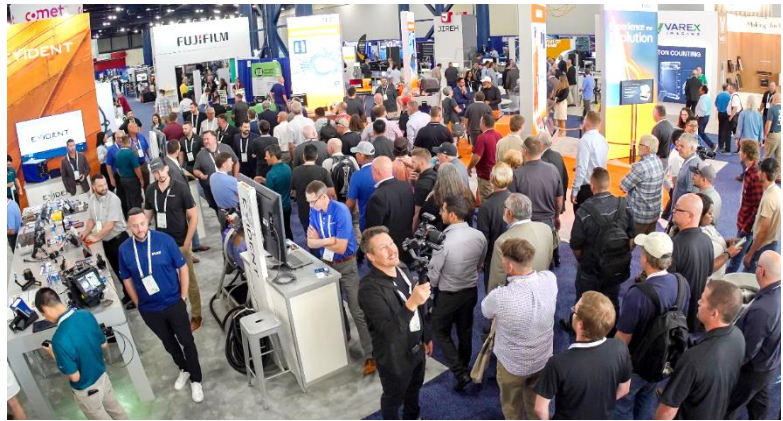


圖 5 ASNT 研討會展場

一、非破壞檢測資格授證：確保人員專業能力和檢測品質

近年來，風機產業的蓬勃發展和東南亞地區基礎設施建設的推進，使得非破壞檢測 (NDT) 認證領域面臨嚴重的資格濫用問題。許多機構聲稱擁有美國非破壞檢測協會 (ASNT) 的認證資格，但對認證要求的理解卻普遍不足。

多數認證機構和檢測公司係依據 SNT-TC-1A 和 ANSI/ASNT CP-189 建立非破壞檢測人員資格認證要求(如培訓、考試、工作經驗等)和授證體系。值得注意的是，根據 ANSI/ASNT CP-189，公司首次建立內部 NDT 人員授證體系時，必須由 ASNT 認證的高檢師執行授證。但當 ASNT 高檢師已授予公司內部其他人員高檢師證照後，公司可根據 SNT-TC-1A 的要求，自行評估和認可授予其他檢測人員證照，此時授證者和被授證者皆不在 ASNT 監督管理架構內。

另一方面，人力資源短缺已成為近年產業發展的一大瓶頸。在急於補充人力的壓力下，許多企業被迫降低培訓標準，導致檢測人員素質參差不齊。目前普遍採用的單向簡報式教學效果不佳，知識保留率也較低。更令人憂心的是，許多高級檢測師雖具備精湛的專業技能，卻缺乏有效的教學和評估能力。

為了應對上述問題，ASNT 即將推動制度改革：首先，強化高級檢測師的資格要求，包括提升其專業知識水準、教學能力和評估技巧。其次，借鑒核能產業的第三方監督模式，建立更有效的監管機制。最後，推動認證制度的改革，包括更新標準、建立專門的運轉期間檢測認證方案等。

簡言之，NDT 產業正處於關鍵的人員轉型期，人員的認證和質量要求至關重要。良好的培訓效果和實踐經驗的有效傳承，將對工業安全和維護品質產生積極的正面效應。本公司目前雖採用僱主授證體系，但修護處時常受外部委託檢測業務，相關實驗室主管另依據 ISO 9712 獲得高檢師資格，相較於 ANSI/ASNT CP-189 和 SNT-TC-1A，ISO 9712 在國際間的適用性和認可度更具公信力及競爭力。同時，本處檢測實驗室同為 TAF 認可實驗室，受第三方監督評鑑，檢測人員專業程度及服務品質皆已向國際接軌。



圖 6 檢測人員專業證照及 TAF 認可實驗室

二、AI 在工業檢測中的創新應用與挑戰

在傳統的工業檢測中，我們之所以信任檢測員，主要是因為他們具備幾個無可替代的優勢。人類檢測員對自己的決策負有責任，且能清楚解釋判斷的理由。更重要的是，人類能夠靈活應對各種意外狀況，根據實際情況調整檢測方法。當參數發生變化時，檢測員可以靈活調整檢測技術，在必要時進行額外檢查，這種適應性是 AI (人工智慧) 目前難以完全模仿地。

然而，在高風險的工業環境中運用 AI 系統時，最大的挑戰在於如何建立資料庫。雖然開發 AI 概念驗證相對容易，但要讓 AI 實際應用於產業並改善現有流程，則需要面對重重障礙。首先是人為因素的阻力，因為人們對自己熟悉的工作方式往往存在依附感，對新技術的導入容易產生抗拒。其次是 AI 系統的黑盒子問題，當系統產出異常結果時，檢測員很難追溯過程，這與人類檢測可以輕易回溯查看原始數據形成強烈對比。此外，AI 系統的訓練需要大量正確且互相獨立的資料，但實際生產環境中的資料標註往往不夠完整，這也為系統的可靠度帶來挑戰。

為解決這些問題，我們可以採取漸進式的整合方式，將 AI 作為輔助工具，為人類檢測員提供更豐富的資訊，協助他們做出最終決策。在技術層面，建立缺陷檢測和異常檢測兩種 AI 技術，不僅能找出已知類型的缺陷，還能識別異常情況。同時建立完整的資料管理流程，包括資料清理、擴增和品質評估，確保訓練資料的可靠性。

最後，AI 系統必須達成零漏檢的目標，且盡可能將誤報率降低到 10% 以下，才能為產業帶來實質效益，提升檢測效率和準確性，更為工業生產的品質提供更可靠的保障。

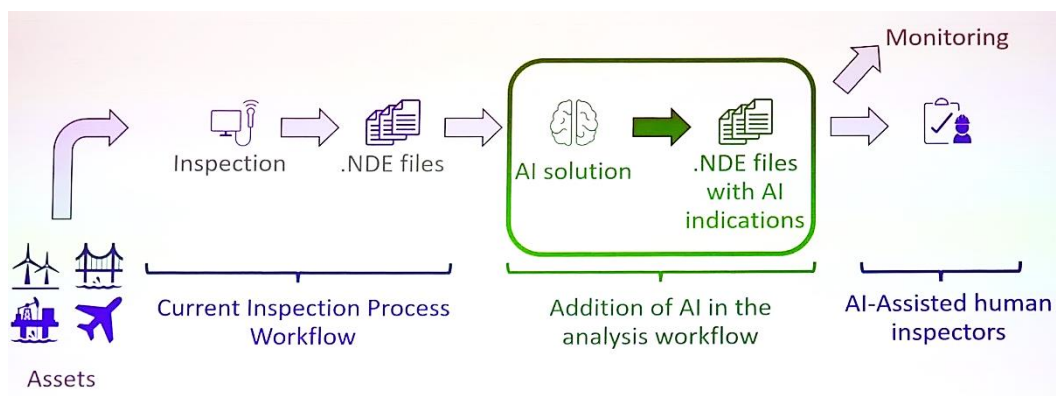


圖 7 運用人工智慧增進工作效能

三、傳統與新型超音波檢測技術的演進與比較

(一) 相關演講議題：

1. Comparative study on over 150m of welded joints using established (PA/TOFD) and emerging (PCI/TFM) ultrasonic imaging methods. (成熟與新興超音波成像技術在大範圍銲接檢測中的比較研究)
2. Intermodal Total Focusing Method (TFMi) and Multi-Technique Ultrasonic Sizing Analysis Study. (全聚焦超音波在缺陷尺寸的應用研究)
3. Weld inspection using advanced TFM and PCI techniques. (全聚焦超音波與相位相干成像技術之銲接檢測比較研究)
4. UT is UT: Understanding Advanced Ultrasonic Technologies and How They Compare to Each Others. (先進超音波檢測技術之互相比較)

(二) 會議心得：

隨著電腦運算能力的提升，各種先進的超音波技術相繼問世，如全矩陣捕捉 (Full Matrix Capture, FMC)、全矩陣聚焦 (Total Focusing Method, TFM)、平面波成像 (Plane Wave Imaging, PWI)、相位相干成像 (Phase Coherence Imaging, PCI)。這些技術雖然名稱不同，但都以相位陣列式 (Phase Array, PA) 超音波為基礎，延伸出不同的資料收集方式或演算法，來達到更精確的檢測效果。

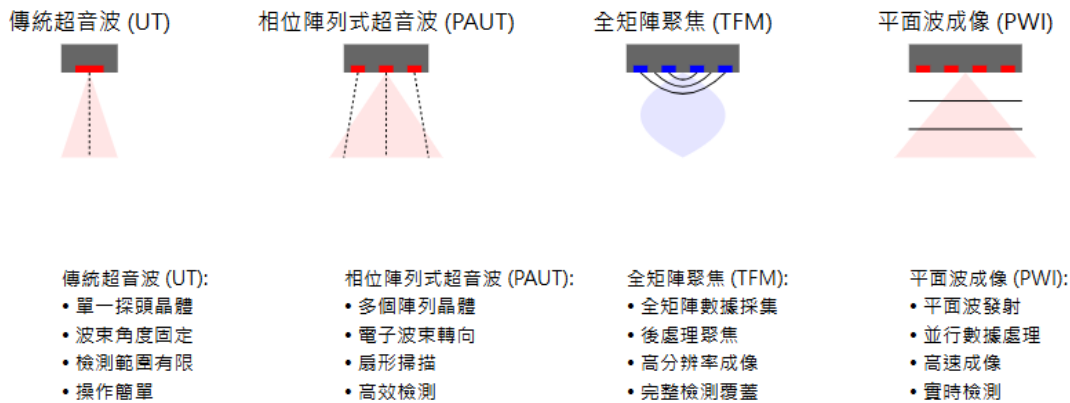


圖 8 超音波檢測技術演進

在傳統的超音波檢測中,我們通常使用單一探頭或單一組合來完成檢測。但隨著檢測需求的提升,單一探頭已無法滿足各種複雜的應用場景。第一個重要的技術突破是全矩陣捕捉 (FMC),藉由陣列探頭分時多工模式,每次激發一個探測晶體,並在下一個時間點接收所有探測晶體的回波訊號,依序執行直到每個探測晶體皆完成激發的動作。這種方式能提供最完整的檢測資訊,但因為資料量龐大且掃描速度較慢,對硬體的運算速度要求極高且不易保存檢測資料。

平面波成像 (PWI) 於本次研討會中首次發表，與 FMC 最大不同在於 PWI 將探頭晶體分組，每次激發一個群組的探頭晶體，並產生特定方向的波束。訊號接受則與 FMC 相同，如此一來可提高掃描速度，且維持一定的成像品質。簡言之，PWI 在保持檢測品質的前提下，有選擇地減少資料收集點數，在成像品質與檢測速度間取得一個平衡。

訊號處理方面，目前超音波高階機種皆使用全聚焦演算法 (TFM)，通過相位延時和疊加處理，計算超音波在材料中的傳播路徑，最終產生全域聚焦的影像。本屆研討會中另有廠商重拾過往 TOFD (Time of Flight. Diffraction，超音波飛行時間繞射) 檢測技術，改提取相位資訊來進行相位相干成像 (Phase Coherence Imaging, PCI)，PCI 技術與傳統的振幅基礎檢測方法有著本質的區別，傳統方法主要依賴振幅數據進行研判分析，而 PCI 檢測則著重於相位資訊。在 PCI 的工作過程中，系統會對多個 A 掃描訊號進行相位拆解比較。當檢測到相位具有一致性的區域時，這通常表示存在真實的材料缺陷或特徵；相反，當發現相位呈現隨機變化時，則意味該區域可能只是背景雜訊。

圖 9 波形為探頭所有晶體依序完成激發和接收後的 A 掃描訊號，通過統計學方法區分有效訊號和雜訊，其中綠線清晰地標示出了相干區域。通過精確區分真實缺陷訊號和背景雜訊，PCI 技術提高成像的清晰度，並降低不適切顯示。在實際測試中，PCI 技術特別適合檢測細微瑕疵缺陷，如瑕疵孵化階段的起始裂隙、氫引裂 (HIC)、SSCC (硫化物應力腐蝕裂縫)，能夠提供更清晰的繞射訊號。即使是近乎垂直的缺陷，也可以透過單邊檢測找到異常位置，如圖 10。

然而在尺寸測量方面，研究發現 PCI 與傳統振幅技術相比，會顯示較大的缺陷尺寸。主要源於兩種技術採用不同的評估標準：PCI 使用 50% 相干閾值，而振幅技術則採用 -6 dB 下降法，在實際應用中需要特別注意，避免過度解讀檢測結果。

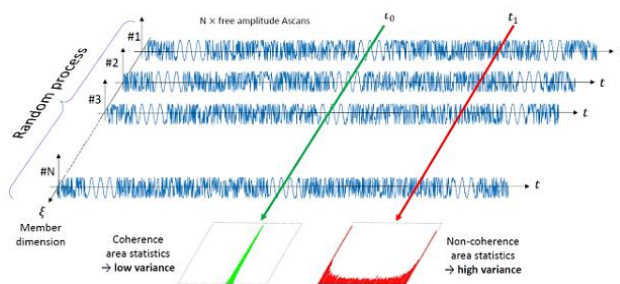


圖 9 PCI 工作原理

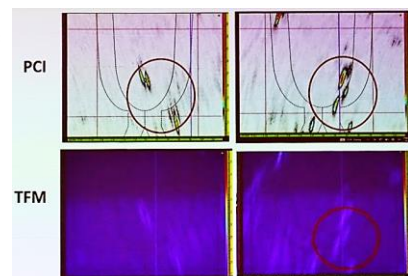


圖 10 氣孔瑕疵檢測比較

圖 11 顯示 PCI 技術擁有最高瑕疵辨識能力和雜訊抑制能力，但檢測速度最慢；PWI 檢測技術相較於 PCI，提升檢測速度近乎一倍，但有可能因為材質不勻稱、試件輪廓參數不精準，導致影像重建失真，造成檢測視窗內產生假的瑕疵顯示，如紅圈框選位置。因此在使用先進超音波檢測技術 (TFM、PWI、PCI) 時，應先了解各種檢測模式 (TT、LL、TTTT) 的能量分布情形，避免在超音波沒有能量場的部分，重新建構資訊，如圖 12。

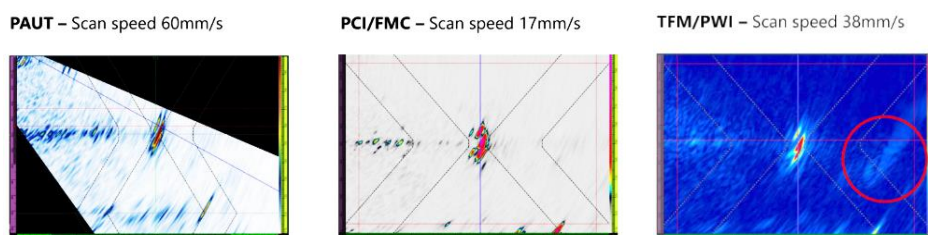


圖 11 不同檢測技術影像品質及掃描速率之比較

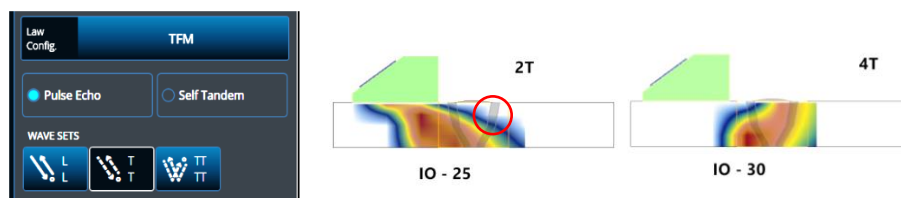


圖 12 超音波訊號影像處理計算模型

在實際應用中，不同檢測技術各有優勢。例如在鉚道檢測中，FMC 雖然速度較慢，但能提供更詳細的缺陷資訊；而在需要快速掃描的場合，PWI 可能是更好的選擇。隨著這些新技術的發展，超音波檢測的效率和精確度也持續提升，能夠顯示傳統超音波無法觀察到的細微結構，但在選擇檢測方法時，仍需要專業人員的經驗累積，根據具體應用場景、檢測要求和時間限制等因素，選擇最適合的技術組合。各項超音波檢測技術優勢及限制說明如表五。

表五 超音波檢測技術比較

比較項目	UT	PAUT	TFM	PWI	PCI
掃描速率	120 mm/s	60 mm/s	20 mm/s	40 mm/s	20 mm/s
影像解析度	一般	良好	最佳	優良	優良
訊噪比	一般	良好	優良	良好	最佳
檔案大小	小	中	最大	大	大
主要應用及優勢	一般檢查 鉚道檢查	鉚道檢查 多角度檢測 效率佳	高解析度 材料分析	快速成像 良好檢出	缺陷辨識度高
限制條件	檢測角度固定 檢測範圍小	檢測人員 經驗要求高	僅適合 逐點掃描	假訊號風險	需高頻率且 多晶體探頭

四、超音波與渦電流在管路檢測之創新應用

(一) 相關演講議題：

1. Circumferential positioning and depth sizing of stress corrosion cracking in pipelines using eddy current array (ECA). (陣列渦電流應用於管路檢測)
2. Eddy Current Array improving long products surface inspection capabilities. (陣列渦電流的改進與應用)
3. Comprehensive In-Service API 653 Inspections. (API 653 儲槽線上全面自動檢測方案)

(二) 會議心得：

傳統超音波技術在管路及壓力容器的薄化檢測領域已臻成熟，其常規檢測方法是在組件表面規劃適當間距的網格進行逐點厚度量測。然而，這種逐點檢測方式難以呈現瑕疵的整體分布狀況，且若檢測網格未能涵蓋薄化中心位置，將可能導致剩餘壽命評估產生偏差。為改善上述情形，在儲槽檢測案例中應用了機器人檢測技術，相關檢測經驗是可以同步複製到電廠壓力容器、蒸汽管路、地下埋管、壓力鋼管等組件。

首先，API 653 是針對儲槽完整性檢查的強制性要求，傳統檢測方法需將儲槽完全停止運轉。然而機器人檢測技術提供全面的線上檢測解決方案，爬行機器人配備超音波探頭和高解析度鏡頭，同時具備精密的爬行能力，如圖 13。透過機器人在儲槽內、外表面爬行，提供儲槽各個位置厚度資訊和表面狀況，如圖 14。主要優勢包括：檢測期間持續運轉、完整覆蓋儲槽表面、即時數據收集和分析、降低檢測人員安全風險。

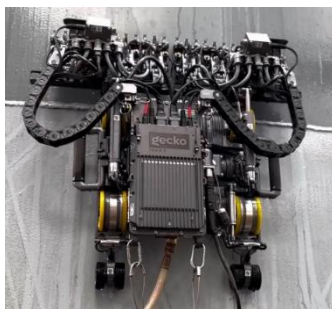


圖 13 爬行機器人於垂直面檢測



圖 14 儲槽檢測數據

導入機器人檢測技術為企業帶來顯著的經濟效益，成功減少 80% 非預期性停機，同時降低 30% 資本支出，不僅延長設備使用壽命，還大幅降低緊急維修需求。另一方面，視覺化的檢測數據可更直觀了解設備剩餘壽命，讓管理者能夠制定針對性的維修計劃，並優化維護排程，從而實現更科學、更經濟的設備管理方式。

在管路檢測領域中，傳統的檢測編碼器普遍採用硬體滾輪作為計步裝置。在實際應用中，檢測結果高度依賴操作人員是否能嚴格遵循標記線進行作業。當技術人員偏離標記線時，可能導致同一缺陷在掃描過程中被重複檢出。更嚴重的是，部分缺陷可能因掃描路徑偏移而完全未被檢出。即使經驗豐富的檢測人員，在執行長距離直線掃描時，也難以完全確保掃描路徑的準確度，如圖 15。



圖 15 掃描路徑偏離造成瑕疵位置誤判

研究人員使用三種感測器（加速度計、陀螺儀、磁力計）組成新的定位系統，加速度計提供三軸方向位移量，並避免陀螺儀訊號漂移。同時，可提升缺陷在軸向位置和角度上的定位精度。以 36 英寸直徑管路為例，系統的平均誤差僅約 ± 0.3 度，換算成周向位置誤差為 ± 2.3 mm。此檢測定位系統可實現管路表面 100% 的檢測覆蓋率，完全消除漏檢風險，並顯著提升檢測精度，改善工作效率，讓檢測人員無需在管路上標記參考線，如圖 16。

在 ASNT 展場中，另一項引人注目的檢測定位技術同樣展現出優異性能。該技術結合了機器視覺相機、QR 碼薄膜和數據擷取資料庫三大核心要素。具體而言，檢測裝置頂部配備機器視覺相機，配合試件表面鋪設的專用 QR 碼薄膜，系統能夠同步收集檢測資訊、編碼定位數據和時間資料（如圖 17 所示）。透過生成詳細的腐蝕地圖，管理人員得以全面掌握管道系統的健康狀況，進而制定更具針對性的維護計劃。

綜觀上述兩種檢測定位技術，皆特別適用於電廠壓力鋼管、蒸氣管路及壓力容器的腐蝕評估和厚度量測。由於這兩種技術各自搭配專屬的檢測軟體，若要整合至現有檢測設備中，需以中介資料庫進行橋接。

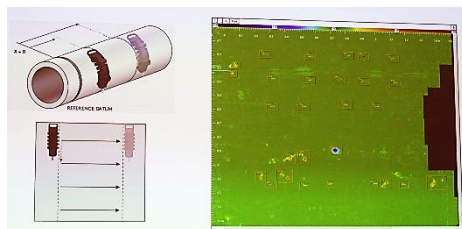


圖 16 新型編碼定位技術

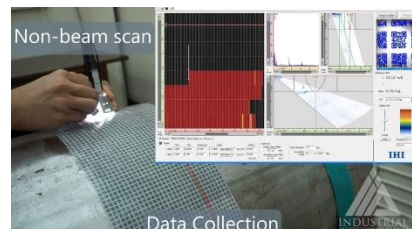


圖 17 QR 碼定位技術

本次 ASNT 會場中，JIREH 公司展示最新的自動爬行機器人，該裝置結合磁輪，可在管徑 76 公分以上管路周向掃描，重複多次掃描也未偏離原始路徑，同時內建電源並可荷重 2 KG，相當適合作為機械自動化檢測的第一步，

如圖 18；展場另一項亮點為校正規塊製造商 (PH Tool) 所設計的管路腐蝕模擬規塊，規塊背面以 CNC 車床製造腐蝕程度，規塊正面則為網格。檢測人員必須提供各網格位置的厚度資訊，同時找出規塊最薄位置，相當適合作為教學或檢測人員能力查證使用。



圖 18 爬行機器人

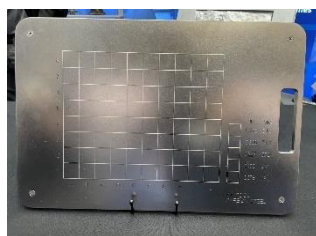


圖 19 管路腐蝕模擬規塊



五、陣列渦電流檢測應用

陣列式渦電流技術 (Eddy Current Array, ECA) 憑藉其優異性能，正逐步替代傳統液滲檢測 (PT) 和磁粒檢測 (MT) 方法，這項技術不僅提高檢測效率，還降低檢測成本。在航太產業中，PT 和 MT 長期以來都是檢測金屬表面缺陷的主要非破壞檢測方法。然而，這些傳統方法存在諸多限制，如需要去除表面塗層、使用化學溶劑需要較長的滲透和顯像時間，且可靠度也有待提升。

相較於傳統 PT 和 MT 方法，ECA 具有明顯優勢。首先是無需表面處理，可直接穿透非導電塗層進行檢測，省去漆層移除等繁瑣準備工作。其次，採用多線圈陣列設計，一次掃描即可完成檢測，且可同時檢測到大小不同的缺陷，大幅提升效率。最重要的是，ECA 檢測結果可數位化儲存，便於追蹤和比對歷史數據，在品質管理中極為重要。

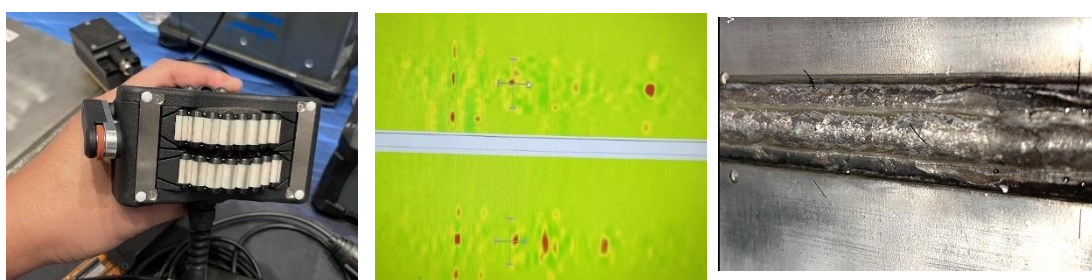


圖 20 銲道專用 ECA 探頭及檢測結果

當進行 TAM 靈敏度測試比較時，ECA 瑕疵分辨能力較螢光 PT 更靈敏，如圖 21。因此，具有表面開口的瑕疵，ECA 可完全替代傳統 PT 檢測，除了形狀較為複雜的組件，仍以傳統 PT 較具效益。ECA 也可用於檢測鐵磁性金屬次表面瑕疵，傳統 MT 需要複雜的磁化設備和多次不同方向的磁化，而採用 ECA 只需一次掃描即可完成全方位檢測，唯鐵磁性金屬受集膚效應限制，較仰賴檢測人員經驗。

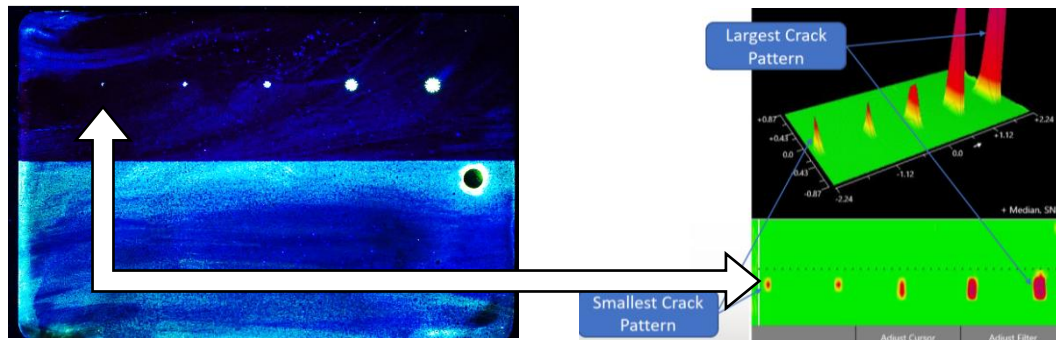


圖 21 TAM 規塊液滲及陣列式渦電流檢測比較

另以電廠發電機轉子鳩尾槽區域檢測為例，傳統 PT 檢測有機率造成溶劑進入精密設備內部。採用 ECA 檢測後，不僅無需使用溶劑，還能將檢測時間縮短 60%。更重要的是檢測結果以數位方式記錄，比過往照片或手繪方式更易於管理和分析。另針對燃氣機組之不銹鋼高壓氣體管路，ECA 技術能夠有效檢測應力腐蝕開裂此類型缺陷。可以預見，隨著技術的展和應用範圍的擴大，ECA 將推動非破壞檢測領域朝向數位化及自動化前進。

六、超音波技術在非破壞檢測領域之應用

(一) 相關演講議題：

1. Weld inspection using advanced TFM and PCI techniques.
(使用先進的 TFM 與 PCI 技術進行銲道檢測)
2. TFM for Airbus aerospace applications. (TFM 用於航太業應用)
3. Robust Hardness Depth Estimation using custom Phase Coherence Imaging (PCI) based inspection system. (使用 PCI 檢測系統進行硬度深度估算)

(二) 會議心得：

1. 超音波 WAND 演算法

隨著工業需求的不斷提升，超音波檢測技術朝向高解析度與高效率方向發展，特別是在銲道檢測、硬化層深度測量以及航太等領域的重要組件應用。相關的演算法也不斷推陳出新，現有 TFM 技術中，雖然能夠提供高解析度的影像，但在處理雜訊較大或訊號較弱的情況時，可能會產生幻影或影像失真的問題。而 PCI 技術雖然在抑制雜訊方面表現出色，但可能會失去一些重要的缺陷特徵資訊。

本次研討會提出新型演算法 WAND (Weighted Amplitude Normalized Distance)，這項技術通過計算正規化的振幅加權距離，有效地結合 TFM (Total Focusing Method) 和 PCI (Phase Coherence Imaging) 的優點，並通過特殊的權重計算方式來改善整體成像效果，提升超音波檢測影像品質和可靠性，如圖 22。

演算法核心概念是在計算過程中同時考慮訊號的相位一致性和振幅資訊。通過對不同角度的掃描資料進行加權處理，能夠更準確地識別和呈現缺陷特徵。特別是在處理斜角缺陷或較深層缺陷時，WAND 技術表現出明顯的優勢，能夠提供更清晰的缺陷輪廓和更準確的尺寸資訊。

在鐳道實際應用中，WAND 技術能夠有效減少背景雜訊，相比 TFM 技術可以提供更穩定的檢測結果，特別是在訊號品質較差的情況下。而與 PCI 相比，WAND 技術能夠更好地保留缺陷的細節特徵，如圖 23。需要注意的是，TFM 和 PCI 檢測技術因為需要即時處理大量檢測資料，對於儀器計算能力要求極高，同時也限制檢測人員掃描速率，無法像傳統相位超音波具有即時的訊號響應。可以預期的是，當 WAND 技術要投入工業現場使用時，必須先解決同步多工分析 TFM 和 PCI 檢測數據的運算速度，才能更適合應用於實際的工業檢測環境，此時提升圖像品質才更具實質效益。

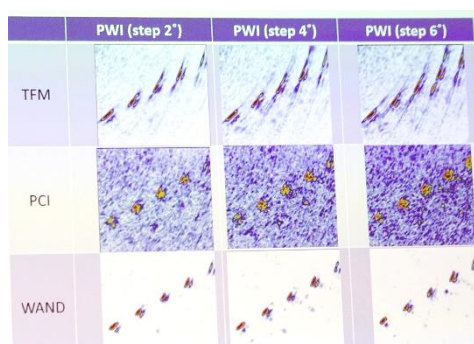


圖 22 不同演算法之雜訊抑制能力

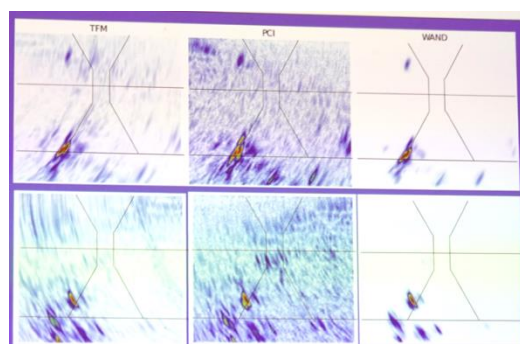


圖 23 鐳道趾裂瑕疵比較

2. 鉚釘結構之 TFM 檢測

TFM 在檢測鉚釘結構時，能準確定位鉚釘周圍因覆蓋結構而隱藏的裂紋，無需頻繁調整設置，顯著減少檢測的操作複雜性。圖 24 顯示鉚釘長軸的缺陷情況。起初推測缺陷為周向裂紋，但透過 TFM 技術進行檢測後，實際發現的缺陷如右圖所示。這表明 TFM 技術在檢測內部缺陷方面具有更高的準確性和檢測能力，有助於提供更可靠的檢測結果，如圖 25。

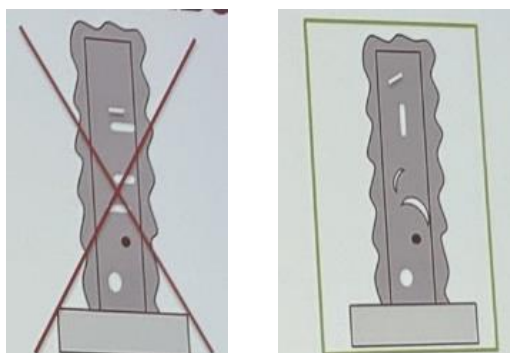


圖 24 鉚釘內部瑕疵結構



圖 25 TFM 螺栓檢測

參、參訪 Zetec 檢測自動化技術

面對少子化趨勢帶來的人力短缺挑戰，NDT 產業必須積極尋求創新解決方案。尤其在電廠機組大修期間，檢測人力需求往往出現嚴重缺口，這使得自動化檢測設備的導入顯得格外重要。Zetec 憑藉其在渦電流檢測領域的豐富經驗，已成功開發出多款自動化檢測設備，如應用於核電廠蒸汽產生器的 ZR-100 和 SM-23G 自動插管系統。這些成功案例為火力電廠冷凝器檢測自動化提供了寶貴的參考。透過引進類似的自動化解決方案，不僅能有效填補人力缺口，更能提升檢測效率和資料正確度，為電廠的安全運轉提供更可靠的保障。

Zetec 自動化插管系統，包括 ZR-100 與 SM-23G。ZR-100 檢測機器人是一款專為蒸汽產生器設計的自動化檢測設備，其重量僅 35 磅，能靈活地在管束間穿梭移動，收集渦電流數據，確保每一根管件都能被徹底檢查。透過 Eddynet/AQ 軟體，一個檢測員可同時控制兩個探頭推送器，提升檢測效率 200%，同時精簡檢測人力，由標準配置 5 人縮減至 1 人。針對同一熱交換器端面，ZR-100 自動化檢測設備配備了防碰撞系統，即使同一熱交換器端面多台機器人同時作業也能安全協調運行，避免互相干擾。ZR-100 利用攝影機辨識熱交換器管口資訊，並進行置中調整，減少探頭的磨損與設備故障率，進一步提高資料擷取的穩定性和可靠性。

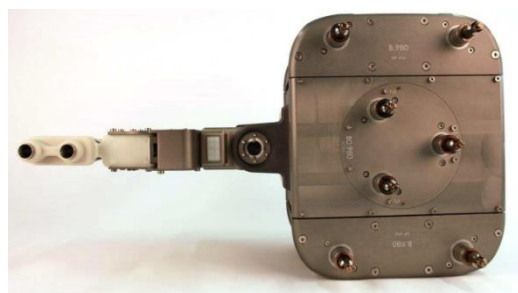


圖 26 ZR-100 爬管機器人

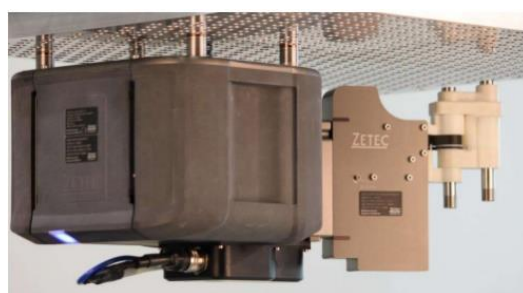


圖 27 ZR-100 吊頂工作情形

圖 26 顯示 ZR-100 爬管機器人共有 7 個爪型夾具，通過氣動方式夾緊管道，並以此為支點進行移動。每個抓持器都配備了探頭定位裝置，可以精確控制探頭的插入深度和角度。機器人的移動是通過協調前後抓持器的交替抓放和機械臂的位移來完成的，這種設計讓它能夠在管板表面自由移動，同時保持穩定的檢測質量，如圖 27。ZR-100 爪型夾具獨特的專利設計使內部卡榫凸出夾具撐於管板上，當氣壓消失時，ZR-100 受重力影響仍會懸吊於管板上而不會墜落。

此技術相當適合用於蒸汽產生器渦電流檢測使用，但仍有一些技術有待突破，才能搬移至火力電廠冷凝器檢測使用。首先，儀器本身設計成吊頂行走，當改成沿冷凝器端板檢測時，氣動式抓持器未必能達成原本抓力。同時，核電廠熱交換

器管內、外皆為純水，水質相當乾淨。反之，一般火力電廠冷卻水為海水，管口容易有浮游生物或不溶解鹽類沉積物，容易在 ZR-100 移位時造成氣動式抓持器磨損。

SM-23G 屬於固定式機械檢查手臂，檢測區域可以覆蓋整個管板區域 (ZR-100 則無法檢測管板外圍四周之熱交換器管)，主機需架設於人孔上，如圖 28。優點是減少設備的磨損與故障率，進一步提高了整體系統的穩定性和可靠度，缺點是體積大、重量重、移位速度不如 ZR-100 迅速。為了將此技術延伸至一般火力電廠使用，SM-23G 前端仍維持機械檢查手臂形式，但底座不再限制固定人孔上，而是透過載板架設於冷凝器管板，如圖 29。優點是不需頻繁更換機械手臂長度，執行同一排檢測時僅須調整水平軸方向位移量。較為可惜的是一套設備只能控制一台探頭推送器，相較於傳統人工檢測模式，檢測速度無明顯提升。



圖 28 SM-23G 架設於人孔

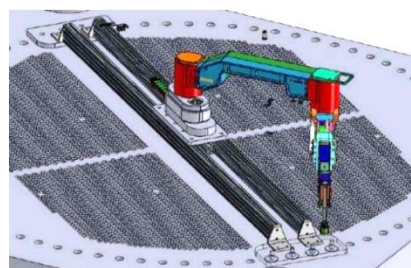


圖 29 SM-23G 架設於載板

相較於 SM-23G 固定式機械檢查手臂僅有 3 個旋轉自由度 (旋轉、升降、傾斜)，Zetec 擬於 2025 年發表的 Viper 則具有 7 個旋轉自由度，7 軸機械手臂具有運動冗餘度，這意味著即使保持終端執行器的位置和姿態不變，手臂本身仍可以改變構型。這種特性使 7 軸機械手臂在避開障礙物或在受限空間中作業時具有更大的靈活性，特別適合在狹小空間作業。

Viper 核心技術之一是雙重定位系統，透過編碼器與機器視覺進行定位確認。機器視覺不僅能測量檢測探頭與管板之間的距離，還能提供額外的三維位置校準功能，從而確保檢測探頭對準目標管孔。定位過程中，系統會依據管板地圖進行基準面校準，並確保檢測探頭運動範圍限制在該平面內。機器視覺系統進一步微調定位，提供比編碼器更高的精度，確保操作的準確性。

Viper 另一項核心技術是配備了真空泵與壓力監控系統，透過壓力吸附在檢測位置的殼體上，為了確保檢測過程中的穩定性，Viper 能自適應曲面或粗糙表面，並透過壓力吸附在檢測位置的殼體上，保持牢固固定。使得機器人在各種複雜表面條件下依然能夠穩定運行，提供精確的檢測結果。此外，Viper 與 ZR-100 一樣內建接近傳感器，配備防碰撞系統，可在同一熱交換器端面實現多台機械手臂操作。同時支援單探管與雙探管配置，從而靈活應對不同的檢測需求。整體而

言，Viper 同時具有 ZR-100 快速移位、雙探頭檢測的優勢，也優化 SM-23G 設計，解決 ZR-100 爪形夾具快速磨損的困擾，並可提供整個管板區域檢測的優點，相當適合作為一般火力電廠冷凝器自動化檢測方案，如圖 30。



圖 30 VIPER

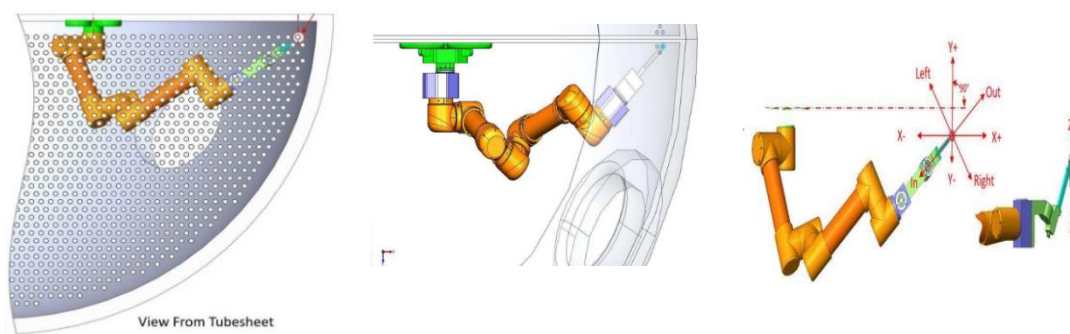


圖 31 VIPER 作動原理

表六、各類型自動化插管系統優缺點比較：

分類	ZR-100	SM-23G	VIPER	人工 檢測	補述
檢測速度	4,400 支/天	1,400 支/天	3,500 支/天	1,200 支/天	ZR-100 和 VIPER 具備多探頭操作和高速移動功能，SM-23G 因臂架運動速度較慢在此項表現稍弱。
安裝時間	中	慢	快	N/A	SM-23G 為模組化設計，安裝準備時間較長。
投資成本	高	中	中	低	
操作 靈活性	中	低	中	高	
檢測 正確性	優	優	優	差	人工插管有管排差錯風險。
人力運用	1 人	2 人	1 人	5 人	此項為兩組設備同時檢測所需人力
軟體 相容性	Eddynet	Eddynet	Velocity	Velocity	Velocity 為本處現行使用軟體

肆、研習 Eddyfi Technologies 脈衝渦電流檢測技術

脈衝渦電流是一種電磁檢測技術，可用於量測碳鋼管路內、外部材料減損。當檢測探頭內部激發線圈通以方向交替之電流，將伴生時變磁場並穿透管路。同楞次定律可知，試件內部亦會產生一反方向之時變磁場，並感應出渦電流訊號，如圖 32 所示。圖 33 中管路薄化區域，因管壁減薄使得磁場提前衰減，間接影響感應電壓，通過與已知厚度的衰減特性曲線作比較，即可計算管壁平均厚度資訊。

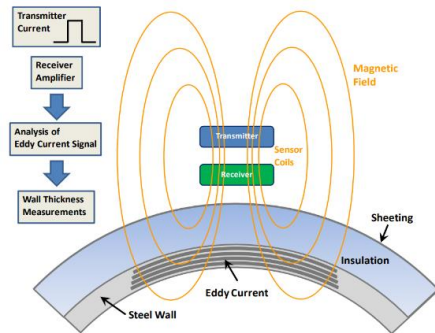


圖 32 脈衝渦電流檢測技術原理

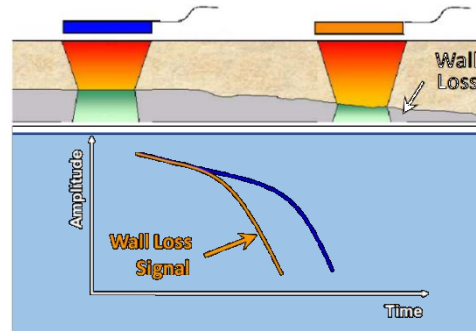


圖 33 時間-電壓衰減曲線

脈衝渦電流無需表面處理，即可用於評估腐蝕或氣孔下的最小剩餘厚度。然而此項技術在材料特性變化時，將影響時間-電壓衰減曲線，這種限制使得對更複雜的幾何形狀分析變得困難，並且在某些情況下可能導致管壁平均厚度誤判。以圖 34 說明，錯誤訊號通常會獲得較低的剩餘壁厚測量值，同時伴隨較強的信號振幅和較陡的斜率。在這種情況下，A-掃描會在開始時超過校準線，並在結束時出現顯著下降，最明顯特徵是 A-掃描會穿過校準曲線。

為了解決這個問題，Eddyfi 以訊號振幅和剩餘壁厚之間的對應關係，提供一個簡單且易於解讀的向量圖 (PermTool)。藉由訊號移動軌跡對應區域，協助研判人員確認檢測結果是真實的壁厚減損還是材料特性差異 (冷軋痕跡、熱影響區域、局部性質變化)，有助於研判人員提高檢測信心，如圖 35。

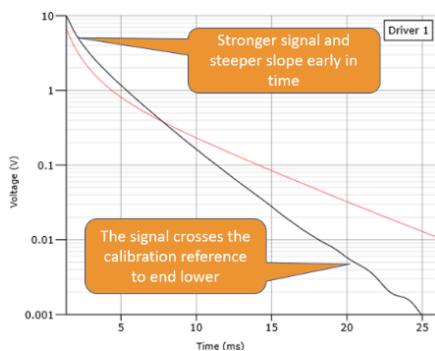


圖 34 材料特性變化對 A-掃描影響

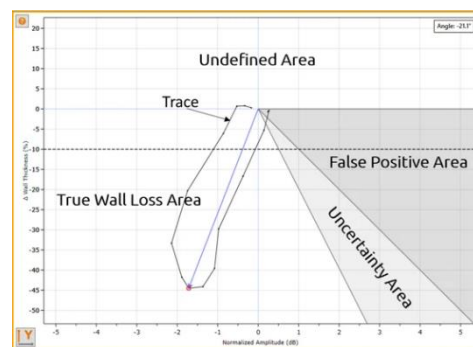


圖 35 PermTool 向量軌跡圖

以時間-電壓衰減曲線觀看圖 36、圖 37，可以發現 A-掃描訊號皆沒有超過校準線，而圖 37 紅框區域顯示剩餘壁厚 89%，但從 PermTool 向量視窗中可發現訊號軌跡多落在灰色誤判區塊，這個指示是由於冷軋冷卻過程中形成高硬度點。在 Tau-掃描中，可以觀察到信號在一開始就急劇上升，這與材料性質的顯著變化有關。

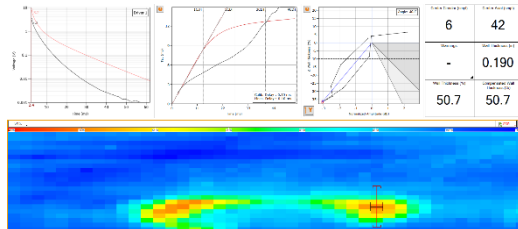


圖 36 管道上的真實壁損

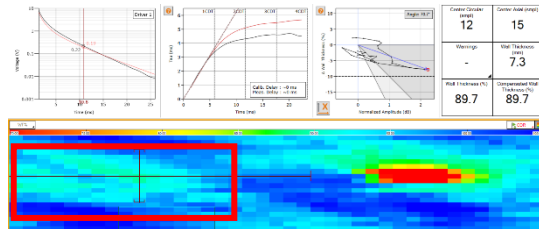


圖 37 冷軋加工痕跡

脈衝渦電流（PEC）的檢測原理是基於渦電流衰減曲線的分析，因此特徵衰減時間（CDT）與壁厚之間存在明顯的關聯性，如圖 38。壁厚每增加一倍，所需的檢測時間大約增加三倍。這是因為較厚的試件需要更長的時間來完成完整的渦電流衰減過程，從而影響整體的檢測效率。這種關係在實際應用中需要特別考慮，以便在保證檢測質量的同時，合理安排檢測計劃，尤其當檢測速度低至無法以人工執行檢測時，應重新考量更換穿透力更好的大型探頭或是減少檢測網格密度。

圖 39 壓力管路壁厚約 16 mm，參考圖 38 特徵衰減時間約 30 ms，則探頭每秒可前進之速度僅 16 mm/s，若以人工方式執行連續檢測將造成大量訊號丟失，只能改採逐點檢測。為此 Eddyfi 使用管內爬行裝置執行自動檢測，該爬行設備使用磁輪，且將探頭架設於前端避免受到磁輪磁力線干擾。此型設計較適合水平走向石化管路檢測，對於水力電廠具有高低差之壓力鋼管較不合用。

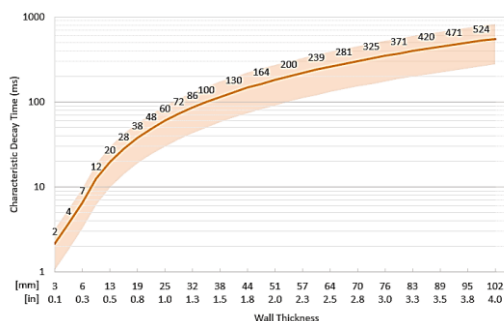


圖 38 特徵衰減時間與壁厚關聯性



圖 39 壓力管路檢測模式

脈衝渦電流檢測技術 (PEC) 對於電廠檢測有其特定優勢與限制。就優勢而言，PEC 能夠在不移除保溫層的情況下進行檢測，特別適合用於檢查流體加速腐蝕 (圖 40)、飼水加熱器的保溫層下腐蝕 (圖 41) 以及鍋爐水牆管壁厚 (圖 42)。對於複合材料包覆修補區 (圖 43) 和壓力容器設備也能有效檢測。然而，PEC 技術也存在一些限制：它僅能檢測碳鋼和鑄鐵材料、無法分辨腐蝕區域位在管內或管外、對小型點蝕和穿孔缺陷檢測不靈敏。

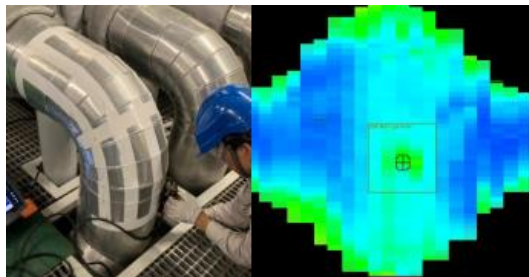


圖 40 流體加速腐蝕檢測應用

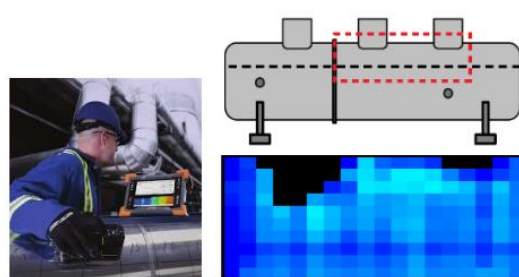


圖 41 保溫層下腐蝕檢測

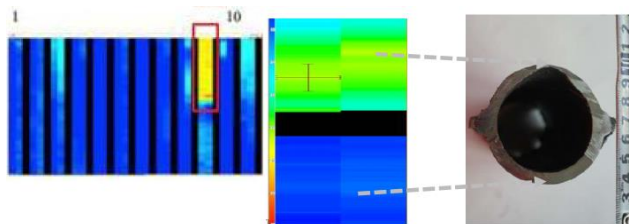


圖 42 水牆管剩餘壁厚

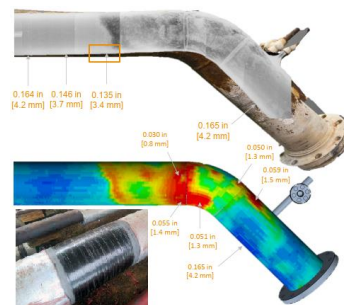


圖 43 複合材料包覆檢測

針對小型點蝕和穿孔缺陷瑕疵，因體積較小容易造成 PEC 檢測不靈敏，此時可使用壁厚補償技術 (Compensated Wall Thickness, CWT)，通過分析 PEC 訊號的衰減曲線並結合內建的演算法，協助瑕疵輪廓辨識，提高小型點蝕和穿孔缺陷檢出能力，修正壁厚檢測的精度，如圖 44 ~ 圖 47。



圖 44 測試樣管 (厚度 6 mm)

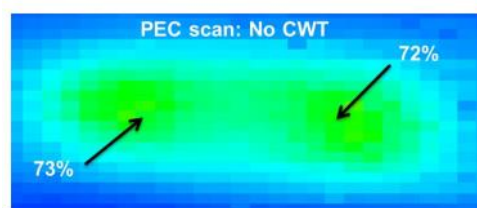


圖 45 脈衝渦電流原始檢測數據

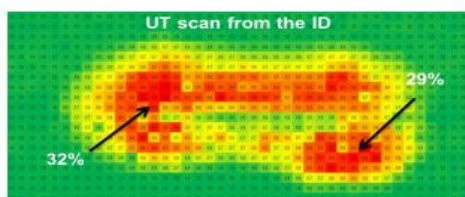


圖 46 傳統超音波測厚數值

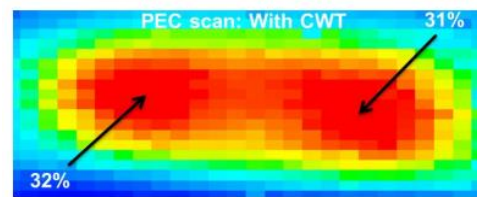


圖 47 脈衝渦電流檢測數值補償

陸、對本公司之具體建議

非破壞檢測在事故預防及安全運轉上扮演著關鍵角色。此次出國計畫除了獲取脈衝渦電流相關檢測資訊外，更透過參加 ASNT 年度研討會，深入了解國際間最新的檢測技術發展趨勢。就現況而言，本公司在非破壞檢測方面已建立相當的競爭優勢，包括技術能力、實務經驗及檢測儀器等層面皆達到國際水準。然而，隨著人工智慧技術快速發展，檢測產業面臨新的轉型契機。為及早因應此一趨勢所帶來的工作型態改變，建議如下：

一、導入運作技術成熟度評估：

透過本次 ASNT 展場和儀器商參訪的經驗，我們發現許多儀器製造商為了搶佔市場先機，急於將研發中的技術商品化。這些設備多處於技術成熟度（Technology Readiness Level, TRL）的 TRL 6 至 TRL 7 階段，本質上仍屬於研發原型機或概念驗證設備。表面上，這些儀器展現出令人驚豔的檢測能力，然而實際操作後卻發現諸多限制，例如檢測速度不符合人工作業需求，或僅能應用於特定形狀的構件等。更值得注意的是，這些關鍵限制往往未在產品規格書中明確揭示，部分廠商甚至在型錄中過度誇大設備性能。

因此，我們建議採用 NASA 所發展的技術成熟度衡量指標（圖 49），為不同技術建立統一的評估標準。技術成熟度較高的設備，通常可以在購入後直接應用於現場；相對地，成熟度較低的設備則需要投入大量人力和資源進行二次開發，才能實現實際應用。這種系統性的評估方法可以有效避免採購不適用的高價設備，確保投資效益。

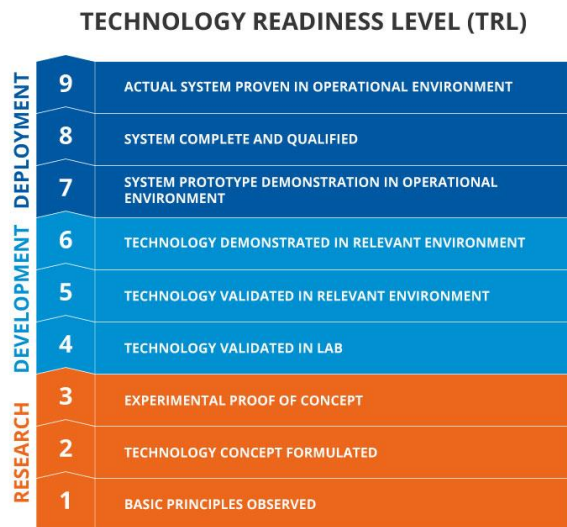


圖 49 技術成熟度衡量指標

二、導入機械化檢測設備取代工時長且單一性工作：

在非破壞檢測領域導入自動化控制技術，不僅能有效替代耗時且重複性高的工作，更可大幅提升檢測效率與準確性。以冷凝器管渦電流檢測為例，採用機械化自動資料擷取設備不但能降低人力需求、提高作業效率，更能有效避免人為操作失誤如管排插錯等問題。此外，考量渦電流訊號判讀耗時的特性，建議導入電腦輔助判讀系統進行初步篩選，將不符合程序書檢測標準的熱交換管標記出來，再由具備豐富經驗的檢測人員進行複判，藉此優化整體檢測流程的時效性與可靠度。

三、建置陣列式渦電流檢測技術替代 PT/MT：

陣列式渦電流檢測技術相較於傳統的滲透探傷和磁粒探傷具有多項明顯優勢。首先，這項技術無需使用化學藥劑和磁粉，不會產生環境污染，也不會在工作表面留下殘留物。其次，檢測效率顯著提升，透過多個探頭同時工作可以快速完成大面積掃描。更重要的是，這種技術不僅能檢測表面缺陷，還能發現近表面的內部缺陷，並且可以定量評估缺陷的尺寸和深度，提供更全面的檢測結果。

四、持續參與 ASNT 年度研討會：

非破壞檢測領域正快速演進，新技術、新方法不斷湧現。ASNT 年度研討會作為全球最具影響力的 NDT 專業平台，匯集了來自世界各地的專家學者和產業先驅。藉由與會，可以第一時間了解國際最新研究成果、創新檢測技術和設備發展趨勢。同時，研討會提供了難得的設備展示和實機操作機會。各大儀器製造廠商展示其最新產品並進行現場演示，與分散式拜訪各家廠商相比，這種集中展示方式不僅節省時間和成本，更能直接比較不同設備的性能特點，有助於做出更明智的採購規畫。