

## 出國報告（出國類別：實習）

# 地下管線非破壞檢測技術研習

服務機關：台灣電力公司

姓名職稱：林 炳 宏 機械工程師

派赴國家/地區：美國、日本

出國期間：107 年 10 月 27 日 ~ 11 月 08 日

報告日期：108 年 01 月 04 日

### 出國報告審核表

出國報告名稱：地下管線非破壞檢測技術研習		
出國人姓名 <small>(2人以上，以1人為代表)</small>	職稱	服務單位
林炳宏	機械工程師	台灣電力公司 / 電力修護處
出國類別	<input type="checkbox"/> 考察 <input type="checkbox"/> 進修 <input type="checkbox"/> 研究 <input checked="" type="checkbox"/> 實習 <input type="checkbox"/> 開會 <input type="checkbox"/> 其他 _____ (請依申領任務填列，例如業務接洽、海外承攬、駐外等)	
出國期間：107年10月27日 至 107年11月08日		報告繳交日期：108年01月04日
出國人員 自我檢核	計畫主辦 機關審核	審核項目
<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	1. 依限繳交出國報告
<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	2. 格式完整 (本文必須具備「目地」、「過程」、「心得及建議事項」)
<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	3. 無抄襲相關資料
<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	4. 內容充實完備
<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	5. 建議具參考價值
<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	6. 送本機關參考或研辦
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	7. 送上級機關參考
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	8. 退回補正，原因：
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	(1) 不符原核定出國計畫
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	(2) 以外文撰寫或僅以所蒐集外文資料為內容
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	(3) 內容空洞簡略或未涵蓋規定要項
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	(4) 抄襲相關資料之全部或部分內容
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	(5) 引用相關資料未註明資料來源
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	(6) 電子檔案未依格式辦理
<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	9. 本報告除上傳至公務出國報告資訊網外，將採行之公開發表：
<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	(1) 辦理本機關出國報告座談會 (說明會)，與同仁進行知識分享
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	(2) 於本機關業務會報提出報告
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	(3) 其他 _____
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	10. 其他處理意見及方式：

報告人

單位

主管處

總經理

林炳宏

主管

主 管

副總經理

說明：

- 一、各機關可依需要自行增列審核項目內容，出國報告審核完畢本表請自行保存。
- 二、審核作業應儘量完成，以不影響出國人員上傳出國報告至「公務出國報告資訊網」為原則。

## 行政院及所屬各機關出國報告提要

出國報告名稱：地下管線非破壞檢測技術研習

頁數 28 含附件： 是 否

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

出國人員姓名/服務機關/單位/職稱/電話：林炳宏 / 電力修護處 / 品檢工場 /  
機械工程師/ (02) 27853199 ext. 152

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：107 年 10 月 27 日 至 107 年 11 月 08 日

派赴國家/地區：美國、日本

報告日期：108 年 01 月 04 日

關鍵詞：非破壞檢測、地下管線、NDT、超超臨界機組、陣列式渦電流

內容摘要：(二百至三百字)

本次出國研習，對地下管線非破壞檢測技術進行調查研究，並參加美國非破壞檢測協會 (ASNT) 舉辦之年度研討會，瞭解相關地下管線檢測案例及各種非破壞檢測應用方案及發展趨勢，引進技術及檢測系統，提升現有檢測服務的可靠度及完整性，維修資源能獲致最佳分配，減少事故停機。並利用此次出國與美國 Zetec 公司、日本日立三菱電力系統 (MHPS) 充分研討與見習，其國外先進檢測技術及電廠機組供應商的角度對地下管線檢測及超超臨界機組歲修檢測之建議值得本公司適時引進及參考，做為本公司今後技術生根努力之目標與借鏡。

本文電子檔已傳至公務出國報告資訊網 (<https://report.nat.gov.tw/reportwork>)

# 地下管線非破壞檢測技術研習

## 內 容

## 頁 次

壹：國外公務之內容與過程-----	P1
貳：國外公務之心得與感想-----	P2
一、 序言-----	P2
二、 地下管線非破壞檢測技術及設備 (ASNT、Zetec) -----	P3
(一) 全聚焦法 (Total Focusing Method ,TFM) -----	P3
(二) 陣列式渦電流 (Eddy Current Array , ECA) -----	P11
(三) 導波檢測 (Guided Wave Test , GWT) -----	P14
(四) 陣列式脈衝渦電流 (Pulsed Eddy Currents Array , PECA) -----	P16
(五) 電磁超音波檢測 (Electromagnetic Acoustic Transducer , EMAT) -----	P18
(六) 地下管線非破壞檢測設備 -----	P19
(七) 案例分享 -----	P21
三、 超超臨界機組歲修非破壞檢測技術 (日立三菱電力系統) -----	P22
參：對本公司之建議 -----	P28

## 壹、國外公務之內容與過程

表 1

日期	天數	到達地點與公務內容
1071027	1	往程 (台北 ? 休士頓)
1071028 ~ 1071031	4	美國 休士頓, 美國非破壞檢測協會 (ASNT) 參加年度研討會
1071101 ~ 1071102	2	美國 休士頓, ZETEC 研習地下管線非破壞檢測技術
1071103 ~ 1071104	2	行程 (休士頓 ? 台北 ? 福岡 ? 長崎)
1071105 ~ 1071107	3	日本 長崎, 日立三菱電力系統 (MHPS) 研習電廠地下管線及超超臨界機組歲修非破壞檢測技術
1071108	1	返程 (長崎 ? 福岡 ? 台北)
合計	13	

## 貳、國外公務之心得與感想

### 一、序言

2014年7月31日23時55分至8月1日凌晨間，高雄市前鎮區與苓雅區發生多起丙烯管線漏氣爆炸，造成嚴重人員傷亡及重大經濟損失。事後經調查認定為4吋丙烯管線遭不當包覆於排水箱涵內，致管壁由外向內腐蝕並日漸減薄，而無法負荷輸送管內之壓力而破損，致輸送中之液態丙烯外洩，引起本件爆炸事故。

加拿大能源管道協會成員管線事故原因統計-2011-2015

### Causes of pipeline incidents – CEPA members – 2011-2015

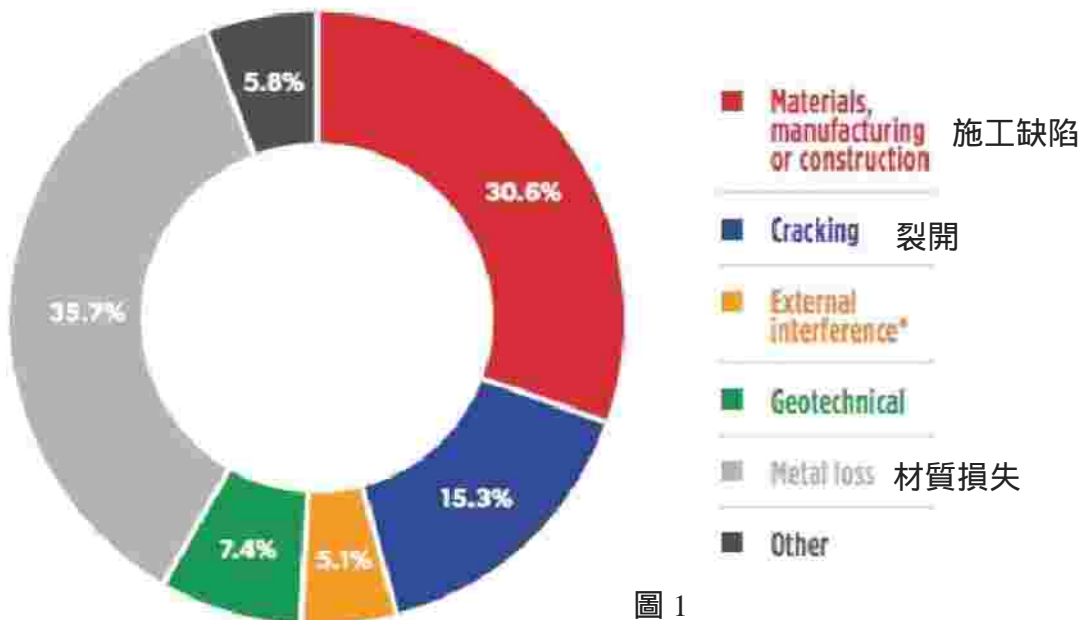


圖 1

根據加拿大能源管道協會 (Canadian Energy Pipeline Association, CEPA) 的統計報告，材質損失 (腐蝕)，施工缺陷和裂開是管線事故的主要原因 (圖 1)，本公司氣渦輪機組使用天然氣為燃料，天然氣輸送用管線 (地面或地下)，一般皆暴露於大自然環境或容易受外力衝擊，尤其地下管線在充滿腐蝕機制的環境，使得管線容易產生局部腐蝕，降低管線之強度，甚至造成洩漏，引發工安、環保上的問題，雖然天然氣管道上的內壁材質損失並不常見，但仍需選擇適當的非破壞檢測技術進行檢測，偵測發現管線中發生腐蝕的位置，量測其程度範圍等資訊，依嚴重程度進行立即或排程處理，避免氣爆停機事故發生，凸顯地下管線檢測及維護的重要性。



圖 2

因此本次參加美國非破壞檢測協會 (American Society for Nondestructive Testing, ASNT) 所舉辦之年度研討會藉予了解相關檢測技術之底層現況 (圖 2)，會中針對各種檢測情況的技術應

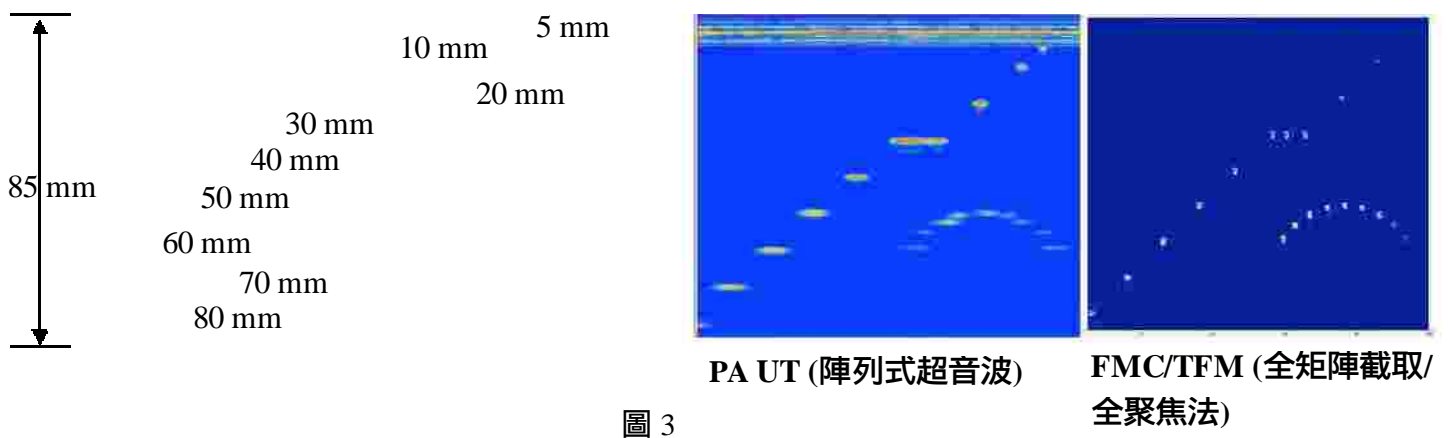
用之議題共約 106 篇，其中如“在高性能和小尺寸開放式電子設備上開發進階 PAUT 和 TFM”、“gPIMS 用於海底管道的厚度測量和導波篩選”、“脈衝渦電流陣列：提高絕緣 (CUI) 檢測下的腐蝕生產率”、“應用無損檢測：塑料管道系統質量管理的實踐案例研究”等議題，解決了更多地下管線及其他相關的檢測問題。

美國 Zetec、日本日立三菱電力系統所具有先進檢測技術及電廠機組供應商的角度對地下管線檢測及超超臨界機組歲修檢測之建議，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，以下是各研習地點相關主題之研習心得，經整理合併於後之檢測技術及設備如下：

## 二、地下管線非破壞檢測技術及設備 (ASNT、 Zetec)

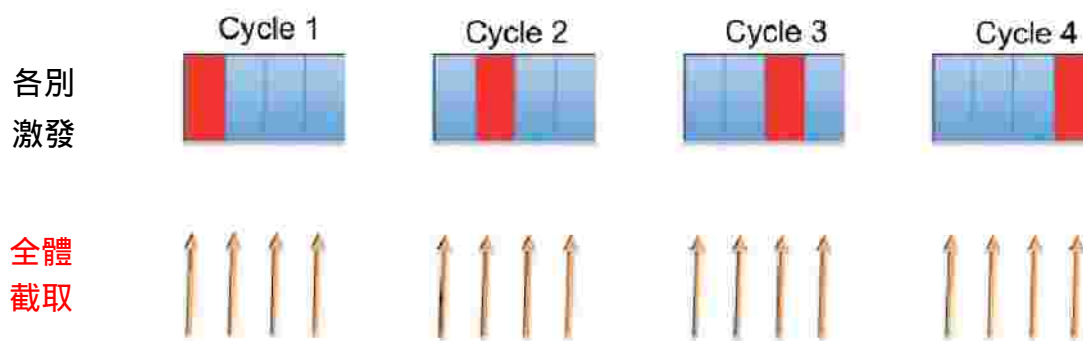
### (一) 全聚焦法 (Total Focusing Method , TFM)

試塊：85 mm 厚，鋁材， $\phi$  1 mm SDH (側鑽孔)



傳統陣列式超音波檢測 (Phased Array Ultrasonic Testing , PAUT) 對於非垂直於波束的瑕疵檢測能力有限，對於不均勻的腐蝕、複雜結構、不平整表面的檢測效果不佳，如圖 3 所示。

全聚焦法是基於全矩陣截取 (Full Matrix Capture , FMC) 下的一種數據重建演算法，使矩陣內各元件聲的束在檢測範圍內的每一個位置上聚焦，具有很高的檢測精度。它解決陣列式超音波都不容易解決的小於半波長之微小缺陷檢測，及複雜結構試件的缺陷精密檢測。



# Matrix of Transmit/Receive Raw A-scans

原始激發/截取 A 掃描信號矩陣

		Receive elements							
		1	2	3	4	5	6	7	...
Transmit elements	1								
	2								
	3								
	4								
	5								
	6								
	7								
	⋮								

圖 4 (b)

FMC (全矩陣截取) 是利用陣列式超音波探頭的一個特定的數據截取過程。對於一 N 個晶片的陣列探頭，每個晶片依次激發，同時所有的晶片接收信號。這些數據被組織在一個包含所有原始激發/截取 A 掃描信號的矩陣 (Matrix of Transmit / Receive Raw A-scans) 中 (圖 4a, b)。全矩陣數據需要進行後處理後來顯示檢測結果，全聚焦方法就是一種用來處理 FMC 數據集合的重建演算法。

計算的點  $(x,z) \Rightarrow$  相同速度的飛行時間

聚焦於網格的每個點  $(x,z)$  進行重建

靈活的重建網格

圖 5

全聚焦方法 (TFM) 首先確定一個合理的檢測區域用於數據重建。然後將檢測區域進行空間離散化成為一個網格 (grid)，對於這個網格區域中的每一點，依陣列式探頭的晶片位置進行計算。所有記錄的信號都是時移量 (Time Shifting)，並且與每一個點相對與探頭髮射和接收晶片的距離和相對應。當檢測區域內的所有點重建完成時整個循環結束 (圖 5)。

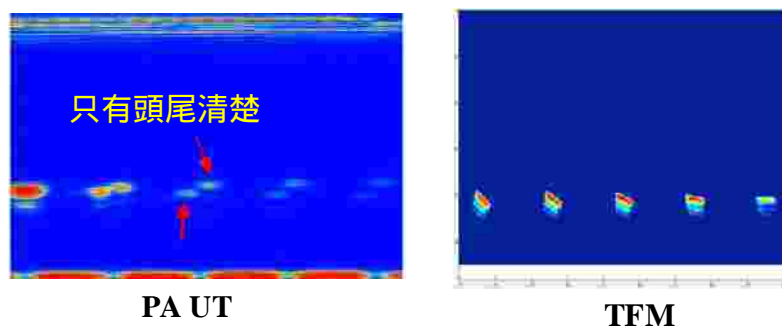


圖 6

圖 6 為 0? ~ 45? 的 EDM (放電加工) 試塊以 PAUT 及 TFM 之比較，可以發現 PAUT 之訊號只有頭尾清楚，在實際檢測中，易將一個長瑕疵誤認為兩個較小的瑕疵。



以下是一系列根據不同需求而研發的專有影像重建演算法,接著對這些演算法進行介紹及比較:  
TFM, AFM, DWI, CWI, Adaptive TFM, Adaptive AFM, SAFT, Migration,TFMp

ÿ AFM (Advanced Focusing Method)

ÿ 同時優化 FMC 的截取及 TFM 影像後處理

ÿ 比傳統 TFM 快速 10 – 40 倍 ,

ÿ 較小尺寸檔案

ÿ 提供更好的靈敏度 (比傳統 TFM 高 20 - 30 dB), 代價只是略微降低的影像品質 ,

ÿ 對於衰減性材料 (Ti, Inconel 等) 有非常好的訊雜比 (SNR , Signal to Noise Ratio)

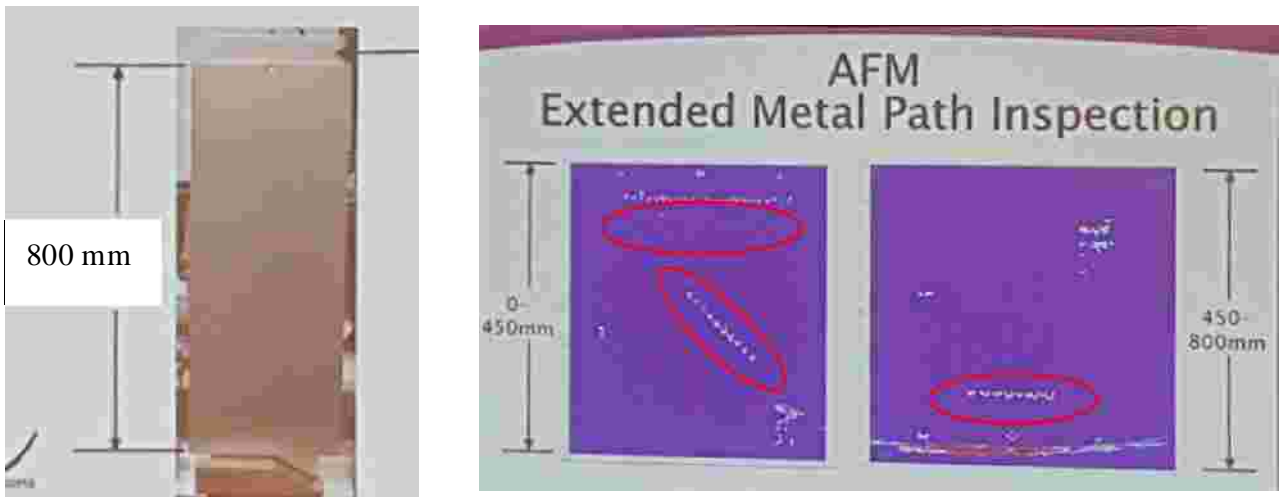


圖 7

圖 7 為以 800 mm 長的規塊驗證 AFM , 可發現仍保持良好的影像品質。

ÿ DWI, CWI

w DWI 允許更大的檢測區域及更好的靈敏度

w CWI 使聲波沿檢測區域聚焦以獲得更好的檢測靈敏度

圖 8a, b 為一 300 mm 的規塊以 FMC 取得之資料後,分別以 DWI 與 AFM 及 TFM 進行成像之比對。以 TFM 進行成像之結果經過增益的調整後,位於接近 300 mm 底部的瑕疵訊號仍無法清楚呈現,靈敏度較 DWI 及 AFM 低很多;另外可觀察到 DWI 之檢測區域為三者之最大。

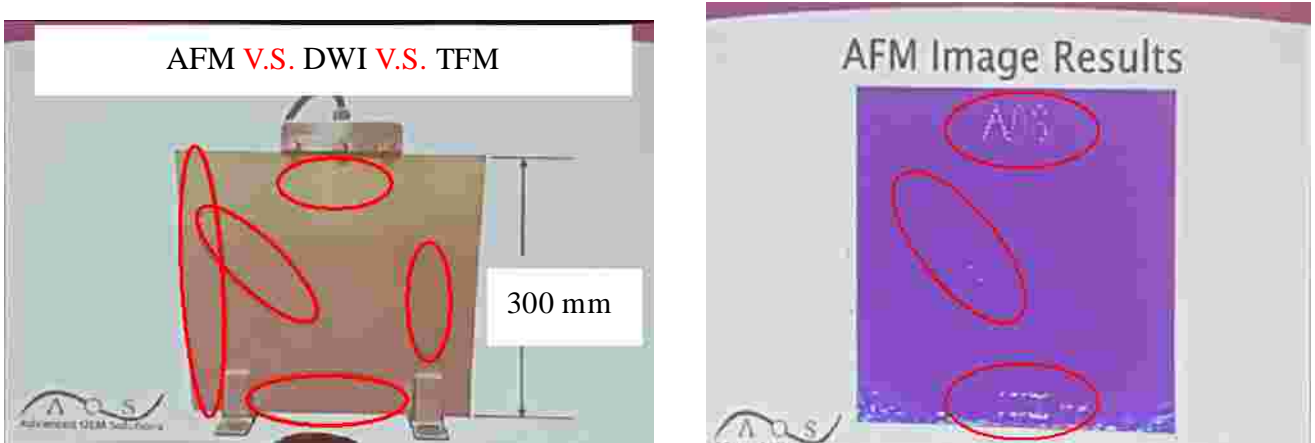


圖 8 (a)

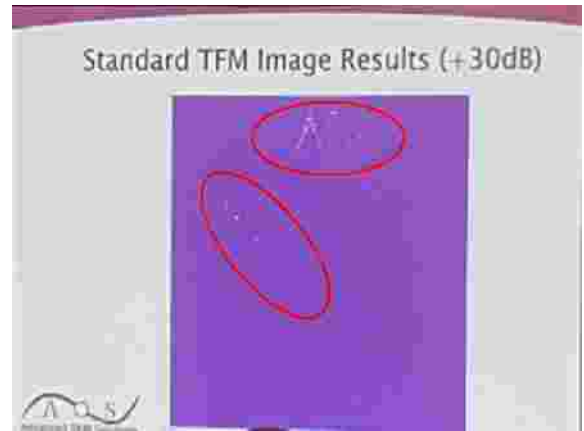
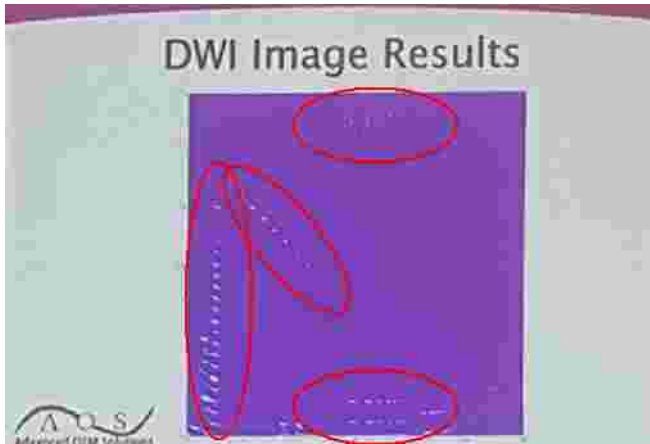


圖 8 (b)

### Adaptive TFM, Adaptive AFM

w 可使 TFM 或 AFM 在不知道表面或內壁的輪廓的情況下校正幾何不規則性

w 由 FMC 所得數據提供 Adaptive 方法及時校正 TFM 或 AFM 處理的所有必要信息

由於實際被測物的表面如管件的彎曲或鐸道的表面不平整等，故以 Adaptive 方法及時取得其輪廓並對瑕疵訊號的相對位置進行修正，如圖 9 可見其及時修正之輪廓線。



有瑕疵的彎曲的鋼管截面  
以彈性楔塊進行檢測

及時取得輪廓線

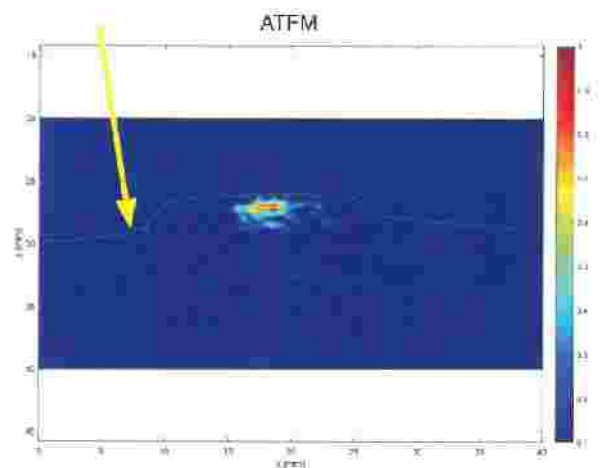


圖 9

### TFMp

w TFM 基於堆疊 (Iteration) 時一起進行逆向 (Inverse) 的方式

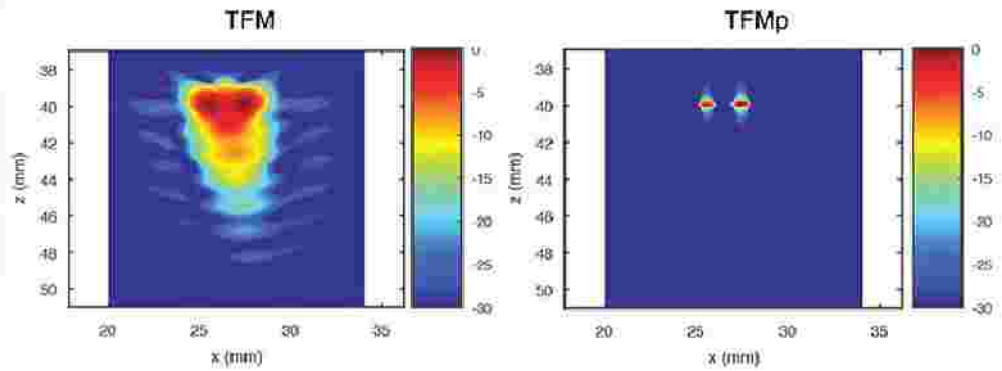
w 提供從波長的 1/10 到 1/20 的分辨率的改進

w 幾秒鐘即可處理圖像

圖 10 為相距 2 mm 的兩個 1 mm SDH 以 TFM 及 TFMp 之比較, TFMp 的分辨率明顯良好。前述之 Adaptive 方法亦可應用於 TFMp。

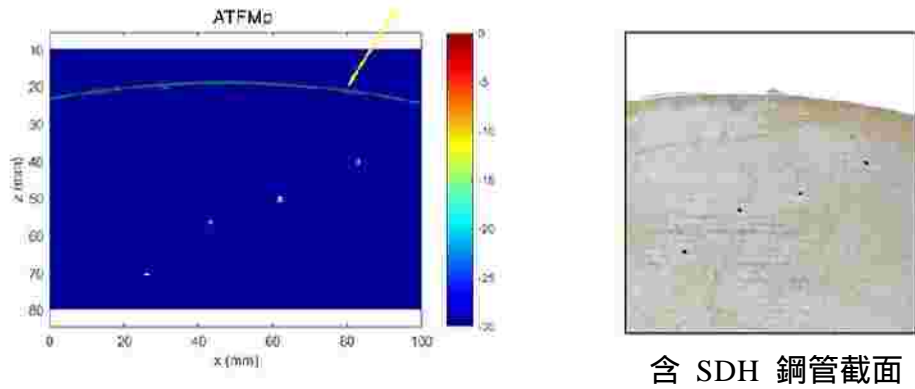


Aluminum Block with Close SDH  
Wavelength :  $\lambda = 2.2\text{mm}$   
Depth = 40 mm



以相同的 FMC 資料進行 TFM 及 TFMp 之後處理影像比較

及時取得輪廓線



含 SDH 鋼管截面

圖 10

Migration TFM :

- w 可應用於探頭接觸面平坦且與表面平行的任何 FMC 數據
- w 提供比 TFM 更好的對比度和分辨率

SAFT (Synthetic Aperture Focusing Technique) :

- w 這是早於 TFM 之前發展的技術
- w 速度快，分辨率非常好
- w 但 SNR 非常差。通常每秒超過 20 frames

圖 11a, b 為 Migration TFM、SAFT、AFM、TFM 四者的比較，SAFT 因其 SNR 值低的關係，近年來為 TFM 系列之演算法取代。

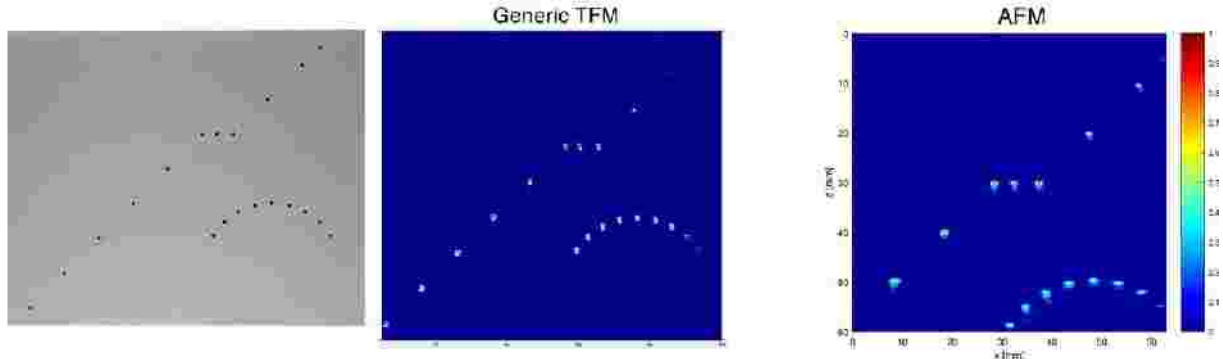


圖 11 (a)

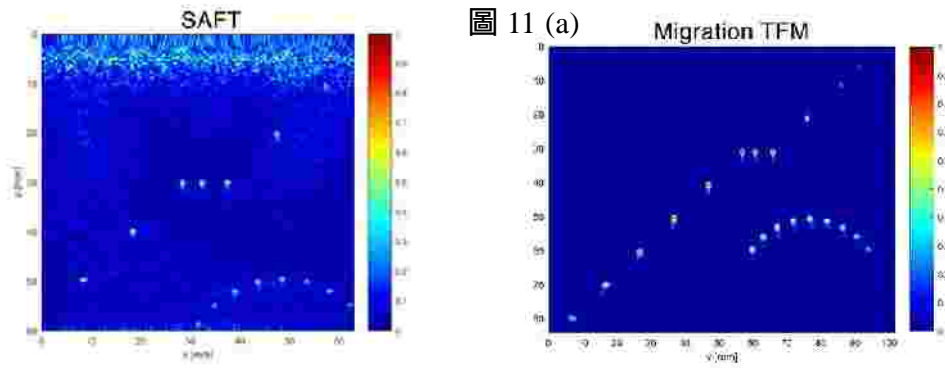


圖 11 (b)

基於 PAUT 的扇型掃描已經有現成的標準，Zetec 公司對 FMC 及其後處理演算法提供了另一種聚焦的技術 (圖 12)：

Y 扇型全聚焦 Sectorial Total Focusing (STF)

- w 生成 A-Scans 的扇形掃描 (對於每個角度)，
- w 同時聚焦在沿音波路徑的每個點上

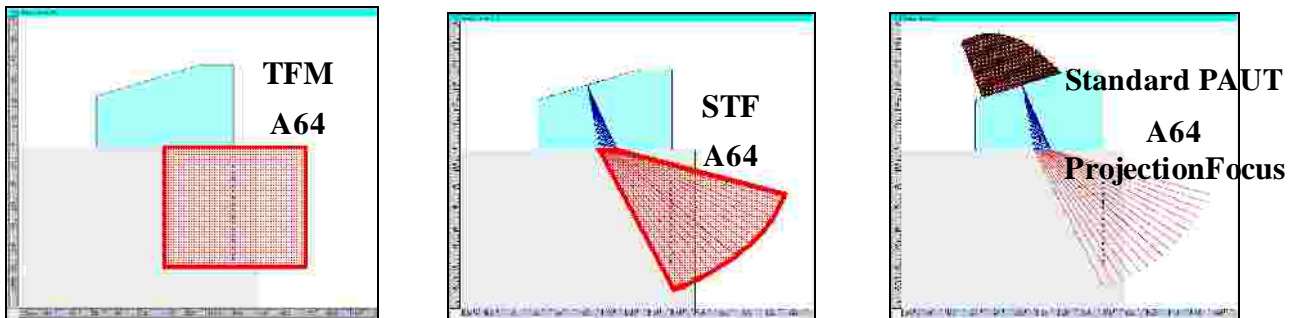


圖 12

以 ASTM E2491 PAUT 參考規塊及其不同的側鑽孔組說明 STF、TFM 的好處，以及允許發揮這項新技術潛力的關鍵參數。以一 64 個元件的 5 MHz 線性陣列探頭，在 LW wedge (縱楔型塊) 上。首先，一組直徑為 1 mm 的 SDH，位於垂直線上。由於目前在 PAUT 聚焦區段，目前的影像三者都很清楚 (圖 13)。

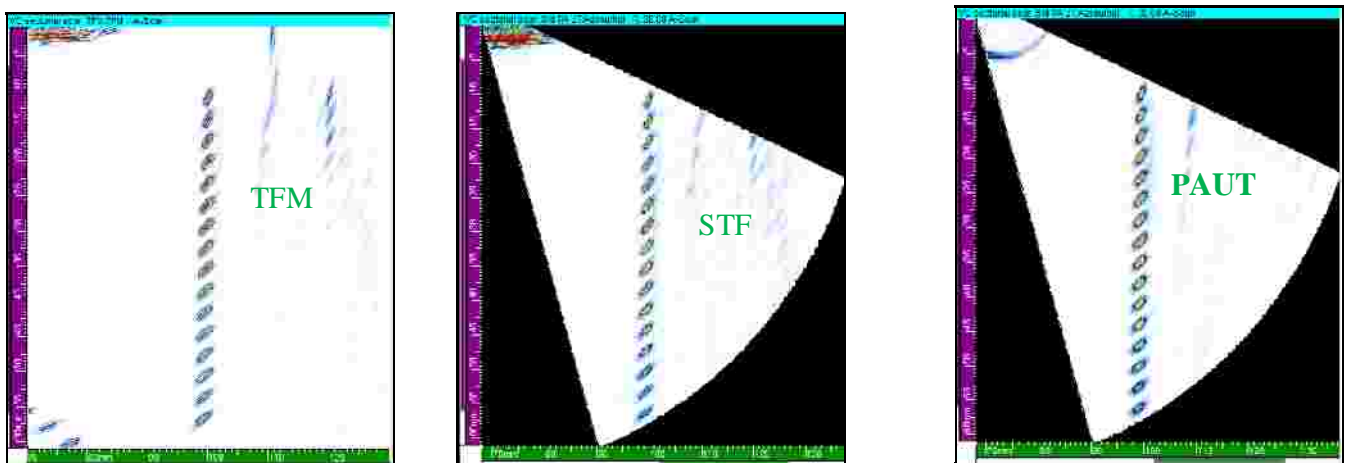


圖 13

接著將探頭向邊緣移動 1/2 英吋，PAUT 離開了其聚焦區段，影像開始變形失真，而 STF 及 TFM 仍保持良好的成像（圖 14）：

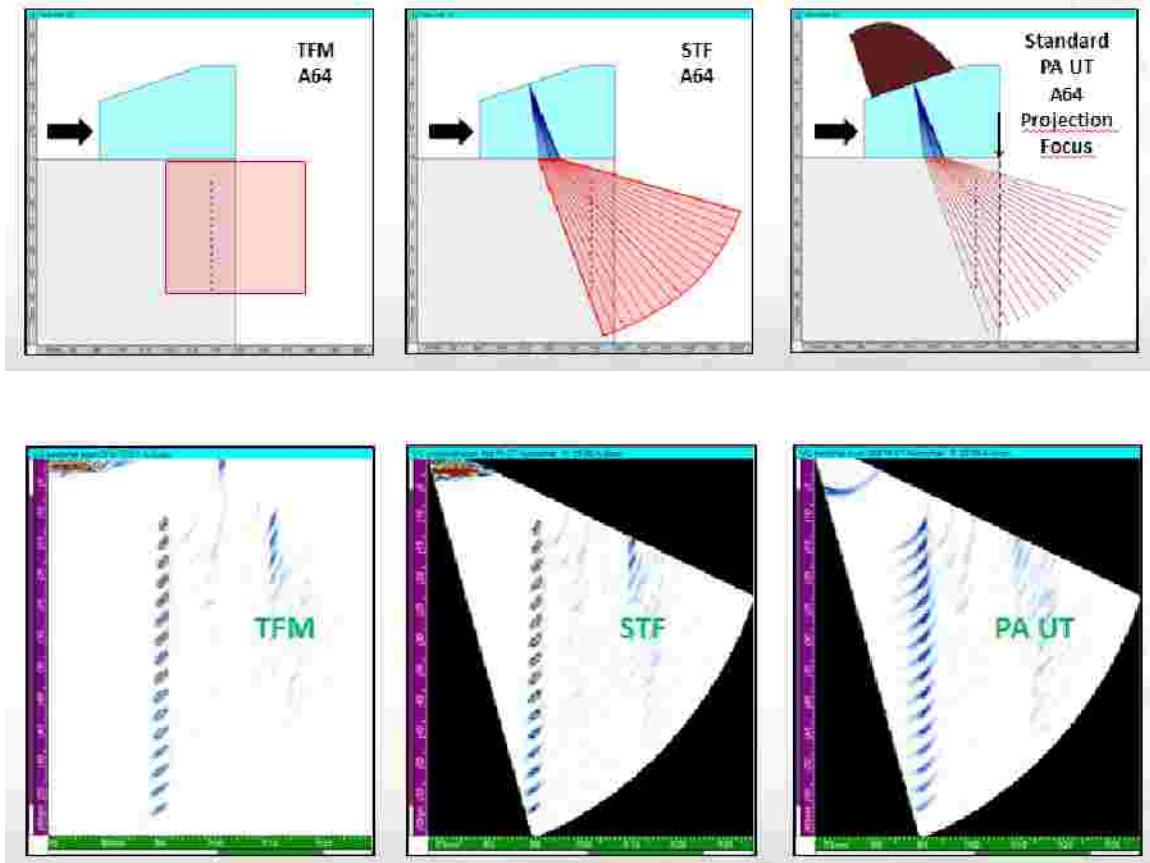


圖 14

第一個關鍵參數有效孔徑 (Active aperture) 的選擇：有效孔徑為有效元件組的大小，圖 15 由左至右是 64、32、16 個元件以 TFM 成相，對影響品質的比較，可發現有效孔徑 (有效元件組尺寸) 越大，成相品質越好，但實際運用上元件越多，整個探頭尺寸就越長，可應用於檢測的空間就越易受限，STF 也是一樣的情形。

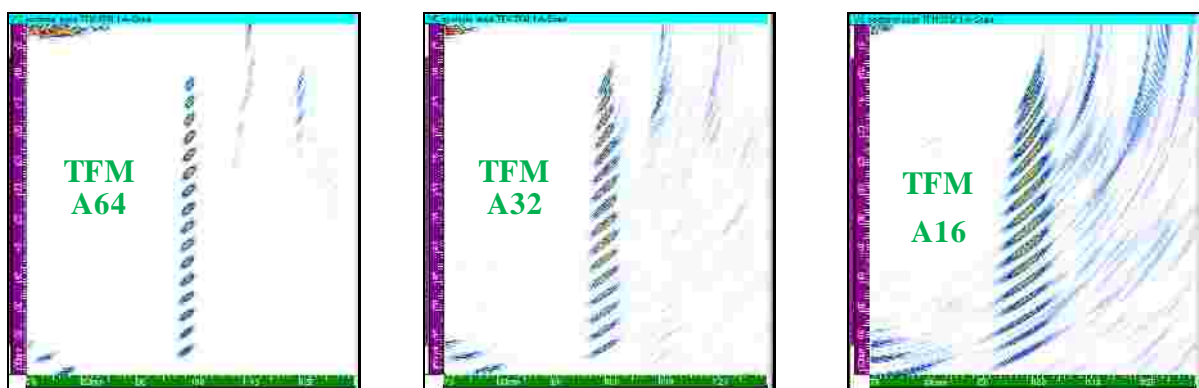
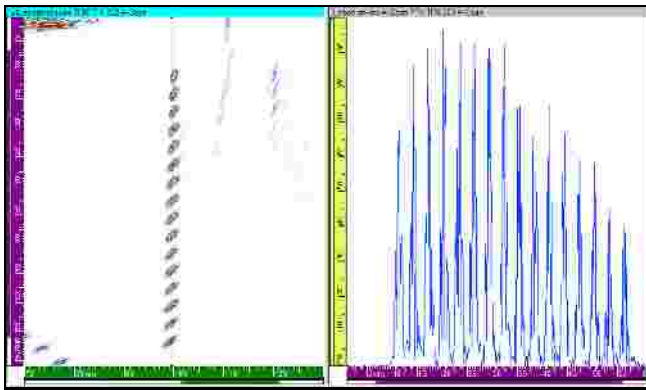


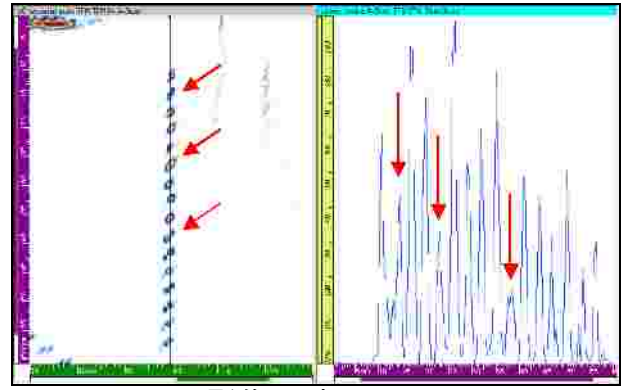
圖 15

最後的關鍵參數是 TFM 影像分辨率 (frame resolution) 對檢測能力的影響 (振幅保真度 amplitude fidelity)。圖 16 為相同的探頭位置，但有兩種不同的影像尺寸 (frame sizes)：512 × 512，128 × 128。這導致兩種像素大小 (pixel size)：波長的十分之一，波長的一半。像素尺寸為十分

之一波長的圖像質量優異，相對的半波長就明顯劣化，從定量上看，某些反射波，振幅減小了 6 dB (減小一半) 以上，嚴重影響實際檢查的可靠度。建議使用不大於波長的五分之一的像素尺寸，可以保證 2 dB 的幅度保真度。



影像尺寸: 512 × 512  
像素尺寸: 1/10 波長



影像尺寸: 128 × 128  
像素尺寸: 1/2 波長

圖 16

Y 小結 :

SAFT 雖然速度快，檔案尺寸小，但因其 SNR 值低，在近年來，TFM 系列即時運算的硬體需求被克服後，為其所取代。AFM 提高了速度及縮小檔案尺寸有不錯的結果。TFMp 在靈敏度部份有著出色的表現，可依各不同需求近行選擇。

表 2

TFM Type	Speed	*	Data Size	**	SNR	Sensitivity ***	Resolution ****
SAFT	High	>20Hz	Small	610	Poor	0dB	Very Good ~0.5
TFM	Average	~5Hz	Very Large	39,063	Good	-6dB	Very Good ~0.5
AFM	High	~20Hz	Small	1,831	Good	+20dB	Very Good ~0.5
ATFM	Below Average	2Hz	N/A	N/A	Good	N/A	Very Good na
AAFMT	Above Average	10Hz	N/A	N/A	Good	N/A	Very Good na
TFMp	Below Average	0.5Hz	N/A	N/A	Excellent	N/A	Excellent <0.1

- \*: 128 ch, 512x512 grid
- \*\* 128ch, 50μs, 5MHz, 2m with 2mm step
- \*\*\* Comparative sensitivity (+ is better than -)
- \*\*\*\* In wavelength

(二) 陣列式渦電流檢測 (Eddy Current Array Testing, ECA)

相較於傳統渦電流檢測探頭適用範圍延其中心頻率展開，陣列式渦電流之適用曲線更廣 (圖 17)，故不論應用在地下管線檢測時所搭載的感測器改採用陣列式渦電流探頭外，最新的可撓式陣列式渦電流探頭其應用範圍更廣泛，如轉子槽齒、葉根溝槽等。

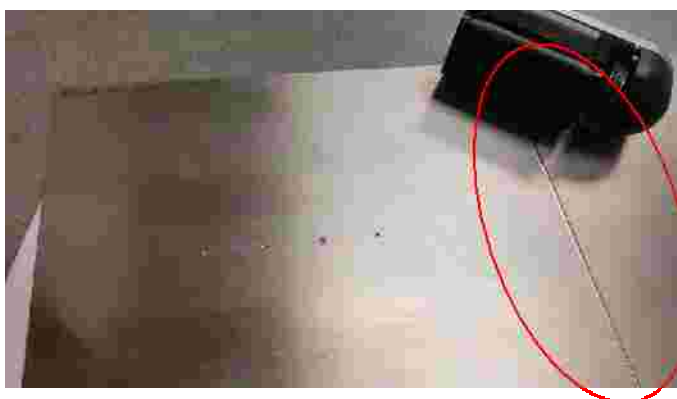


在對各類瑕疵的檢測能力上，傳統渦電流檢測探頭可檢測軸向裂痕但無法檢測周向裂痕，對於管外 (OD) 腐蝕的檢測能力優於管內 (ID) 腐蝕。陣列式渦電流無論是軸向或周向裂痕、管內或管外腐蝕，均有良好的檢測能力 (表 3)。

表 3

	EC		ECA
軸向裂痕	○	V.S.	○
周向裂痕	×		○
ID 腐蝕	尚可		良好
OD 腐蝕	良好		良好

Zetec 公司除了可對其本處目前所使用的 MIZ 200 進行模組升級為陣列式渦電流檢測外，更提供了輕便攜帶的手持式檢測設備 MIZ-21C (圖 18)：



使所有探頭通過人工瑕疵進行校正

手持式檢測設備 MIZ-21C：

ÿ 含電池 1.22 kg

ÿ 一顆電池可使用 8Hr 的時間

ÿ 頻率範圍 5 Hz ~ 10 MHz

圖 18

幾十年來，液滲檢測 (PT) 一直是檢測不銹鋼合金表面的首選方法。然而，PT 無法直接在塗漆表面上進行，增加了比檢測本身更昂貴的成本。陣列式渦電流檢測 (ECA) 可在不除去油漆和塗層對不銹鋼合金管進行檢測，使用 ECA 檢測是節省時間和降低成本的有效方法，圖 19 為 Zetec 公司以 ECA 對其規塊進行正反兩面掃描的結果，相較於 PT 所花費的成本及其局限性，而與渦電流表面探頭相比，陣列式渦電流檢測可將檢測時間縮短 95 %，所以 ECA 是檢測不銹鋼合金及次表面新選擇。

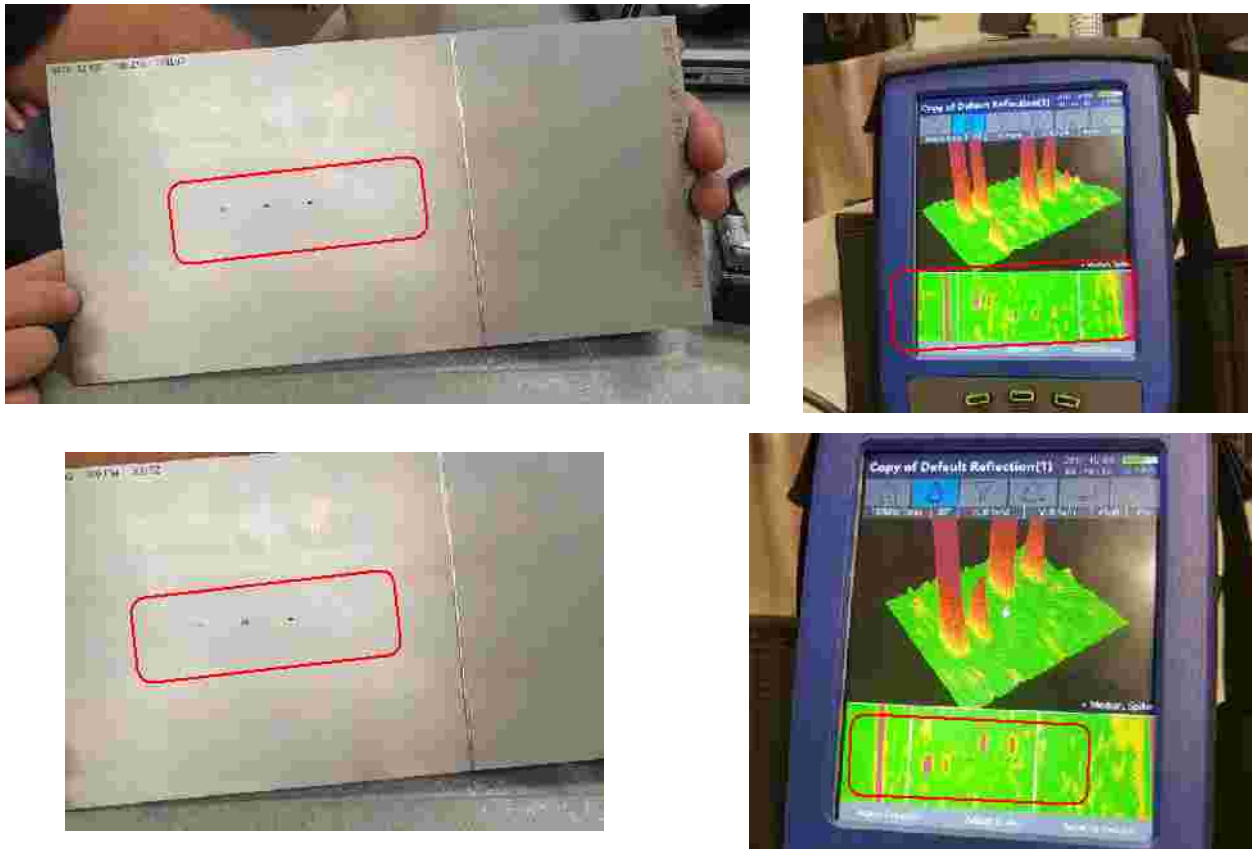
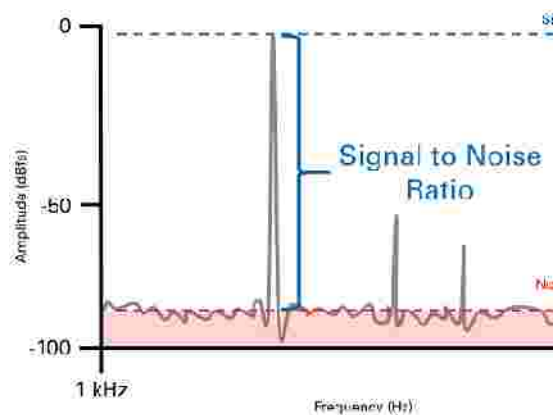
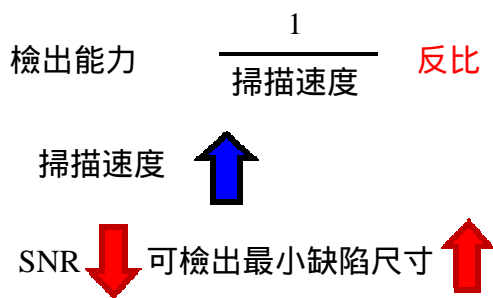


圖 19

### Y 挑戰

由於 ECA 可檢測性與掃描速度成反比，因此 ECA 技術的信雜比 (SNR) 限制了它們檢測許多可能出現的非常小的缺陷和材料損失的能力，例如腐蝕和疲勞裂痕。當使用陣列渦電流時，最小缺陷尺寸和所需數據密度是影響掃描速度的主要因素。隨著速度增加，SNR 降低，因此能檢測的最小缺陷尺寸變大。





對於不平整曲面檢測用的 Adaptive 探頭在表面高低差過大時，因無法確定內部各位元的線圈實際方向，會大幅降低其準確性，例如目前 Zetec 公司的 Flex 探頭適用 0.197 英寸高的鐳道，如圖 20 所示。



適用 0.197 英寸高的鐳道

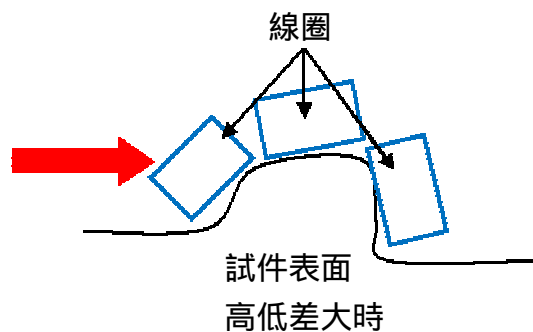


圖 20

對此 Zetec 公司表示曲面變化較大的試件如葉片溝槽等，可採用將可撓式探頭黏貼固定在不同的模具以確保每個線圈都良好的接觸於試件表面，如圖 21 所示。

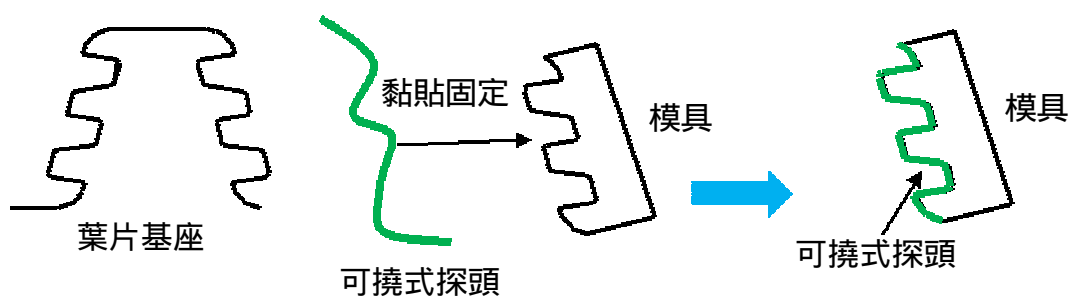


圖 21

### (三) 導波檢測 (Guided Wave Test, GWT)

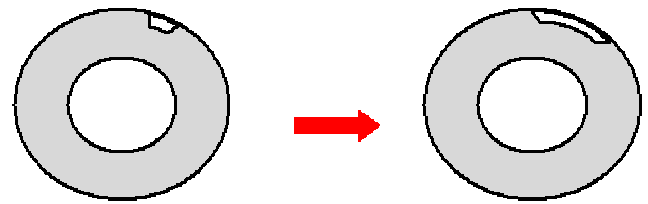
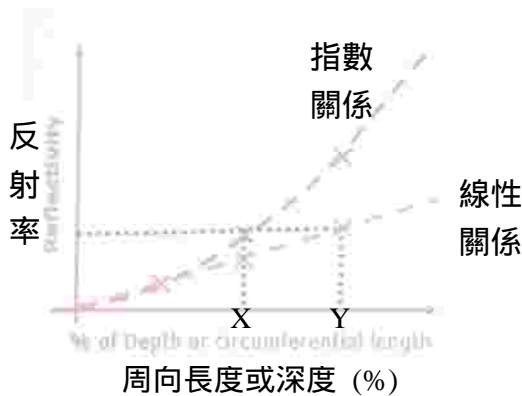
對於一些管線中檢測人員難以接近的位置，如地下管線、保溫層下的管線、海面下的管線區域等，導波是不錯的選擇，可了解整體檢測區段管壁厚度的變化、不需要進入管道內部或清潔內部管線，可進行在線檢測 (圖 22)。



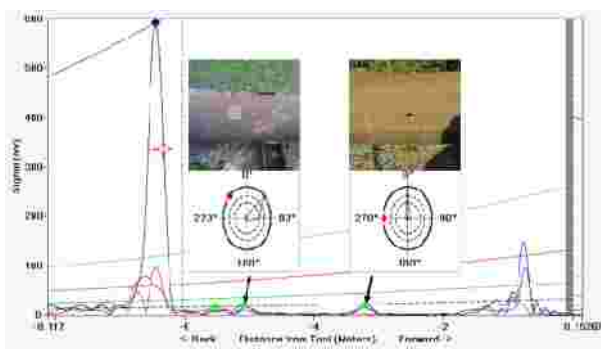
圖 22

#### Y 局限性

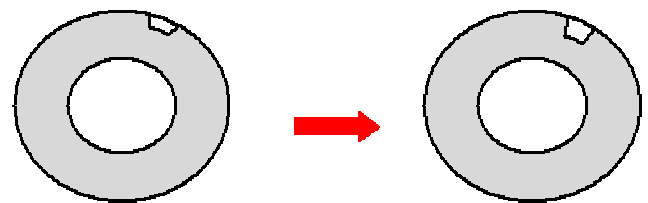
導波的反射率 (Reflectivity)，由觀察瑕疵造成的反射振幅 (Amplitude)，瑕疵在周向長度與反射率的關係成線性，在軸向的深度與反射率的關係成指數。然實際瑕疵為兩者之混合，所以其位置落在圖中 X-Y 區間，因此導波對於瑕疵在管線的那一截面上整體發生厚度變化易判斷，但在該截面的那一區塊及其變化方向則需以其他方式確認 (圖 23)。



周向長度與反射率關係成線性



實際瑕疵



軸向的深度與反射率關係成指數

圖 23

Guided Ultrasonics Ltd 公司發現對於需反覆檢測地下管線，大量的檢測成本耗費在每次安裝上，如採用其 gPIMs 感測器永久安裝於需反覆檢測管線上，對管線進行長期監測，與之前的檢測結果比對，從而監測管道狀況的微小變化，除可減少每次檢測成本，其靈敏度可由原始的 3% 提高至 0.3% (圖 24)。導波監測的優點整體如下：

- Y 使用已安裝的探頭可快速獲取新數據
- Y 從相同位置獲取數據，通過比較和定期監測數據，可以容易地檢測到條件的微小變化
- Y 較能發現缺陷於初始發生和幾何特徵的增長，如銲接，支撐，附件等。

Y 為維護工作提供充足的時間並減少總停機時間

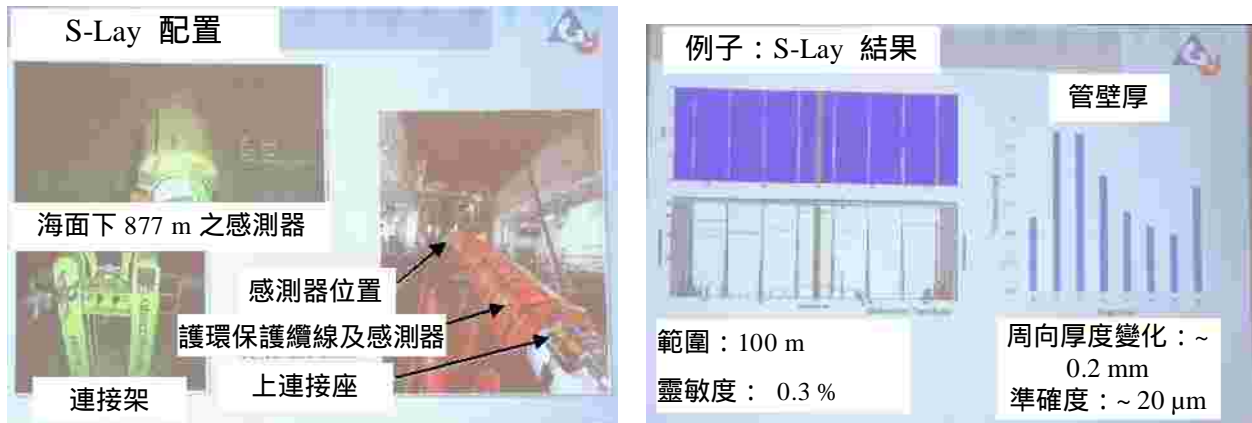


圖 24：Guided Ultrasonics Ltd 公司在埃及近海地中海地區海底的天然氣管道以 S-Lay 方式安裝 gPIMs 感測器，最終測試結果表明，範圍和靈敏度都非常出色，允許超過 100 m 的管道進行篩選，並且對橫截面損失的靈敏度達 0.3 %

導波檢測中最重要的是使用多個中心頻率來檢查不同大小的管道缺陷。Guided Ultrasonics Ltd 公司的 MsS 導波系統允許在每次測試中使用多個中心頻率探頭地點。最常用的中心頻率為 32、45、64、90、128、180 和 250 kHz。因為導波檢測的波長與不同尺寸的缺陷相匹配。這是與用於 UT 使用 1、2.55、5 和 10 MHz 探頭的進行檢測一樣。

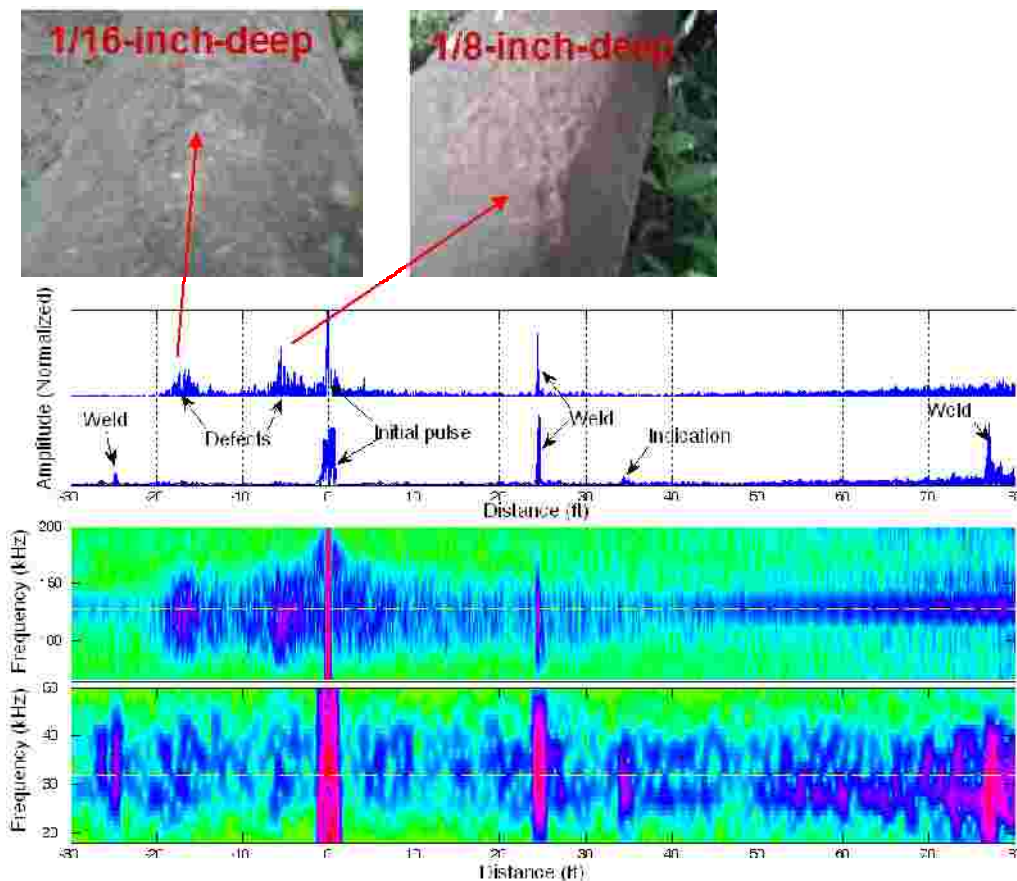


圖 25

圖 25 顯示了在 128 和 32 kHz 中心頻率下的檢測數據，128 kHz 數據顯示在到 4 到 6.5 呎處有 1/8 吋深的腐蝕缺陷，但 32 kHz 數據在這些位置沒有顯示任何指示，這說證明了多中心導波檢測尋找合適頻率是必要的。

#### (四) 陣列式脈衝渦電流 (Pulsed Eddy Currents Array, PECA)

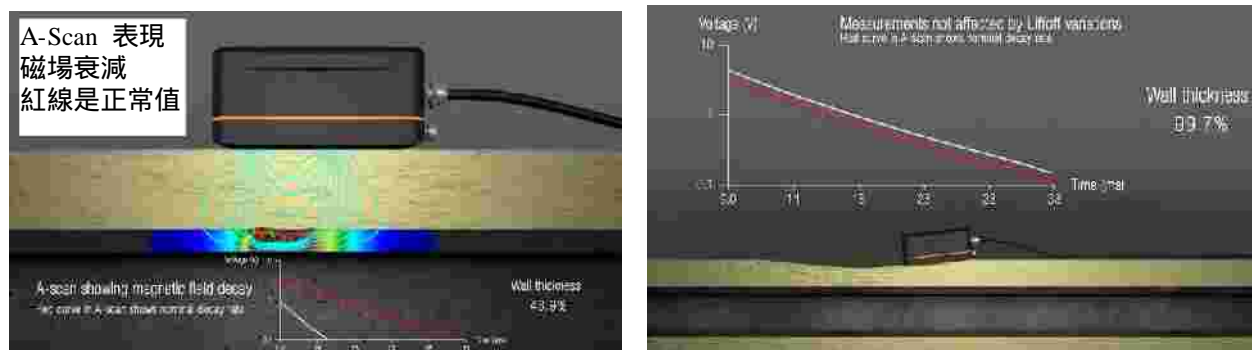


圖 26

脈衝渦電流 (PEC) 因其能夠在不去除絕緣層的情況下檢測絕緣腐蝕 (Corrosion Under Insulation, CUI) 而聞名，在過去幾十年中已成功應用於各種腐蝕相關應用，除絕緣腐蝕，其他如防火腐蝕 (Corrosion Under Fireproofing, CUF) 和流加速腐蝕 (Flow Accelerated Corrosion, FAC)。自 2017 年 ISO 20669 發布以來，脈衝渦電流的使用受到了強烈的關注，被證明是一種有效的篩選工具，可以檢測內外壁腐蝕 (圖 26)，而無需將管線、儲罐和容器上的塗層或絕緣材料去除。PEC 之主要優點表現為：

- ✓ 快速檢測
- ✓ 穿透能力更強
- ✓ 無需打開保溫層即可實現對管道、容器內外壁腐蝕的檢測
- ✓ 複雜工件可檢測
- ✓ 可通過編碼器對缺陷進行定位和測量

PEC 系統的缺點是可達成的生產力 (Productivity) 相對較低「以 1 pulse/秒的脈衝速率進行網格模式 (grid mode) 掃描，生產力：25 m/天」，特別在厚壁上以及需要高空間分辨率 (high spatial resolution) 的檢測時。



圖 27

Eddyfi 公司開發的陣列式脈衝渦電流 (Pulsed Eddy Current Array, PECA)，大大提高了該技術的生產力 (生產力：155 m/天)。其探頭單次掃描中可達 46 cm 的覆蓋範圍，與非陣列相比，將脈衝渦電流檢測的生產力提高了 4~10 倍 (採用 Grid-As-U-Go™ 輔具進行動態模式可再次提升生產力)。探頭可用於直徑小於 15 cm 的平面和曲面。可通過探頭的非剛性機械設計，使得其主軸可以纏繞在管道周圍或以其他方式彎曲以跟隨被檢查表面的曲率 (圖 27)。

缺陷比探頭的平均區域小時，它們的腐蝕深度被低估（量測出之尺寸過小）

圖 28

當探頭越過小於其平均區域的缺陷時，檢查信號變為被測部件的標稱厚度和缺陷的組合。在這種情況下，最薄的區域（缺陷）被圍繞它的較厚的壁平均，導致尺寸過小（圖 28）。

Eddyfi 公司對此開發的 Lyft 軟體採用補償壁厚（compensated wall thickness, CWT）的工具來修正量測值。該工具分析由檢查產生的 C 掃描的子區域，然後將缺陷的訊號與周圍的標稱壁厚隔離，使經過補償壁厚值為在所選子區域中的最小平均壁厚，而不是從探頭的整個平均區域進行組合。

(五) 電磁超音波檢測 (Electromagnetic Acoustic Transducer, EMAT)

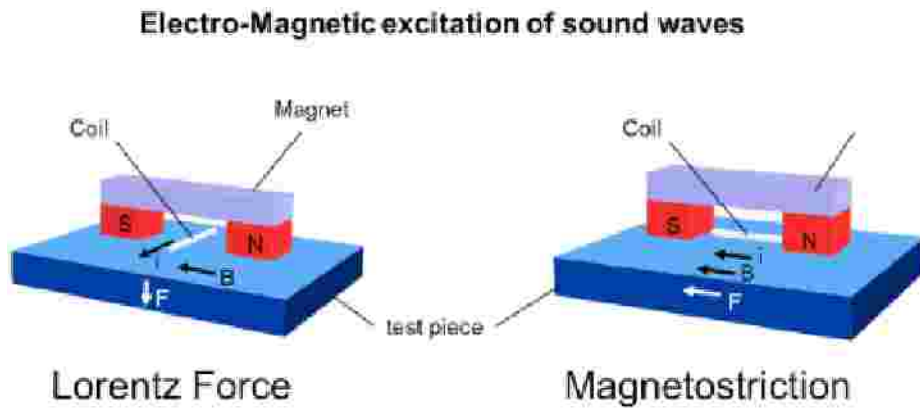


圖 29

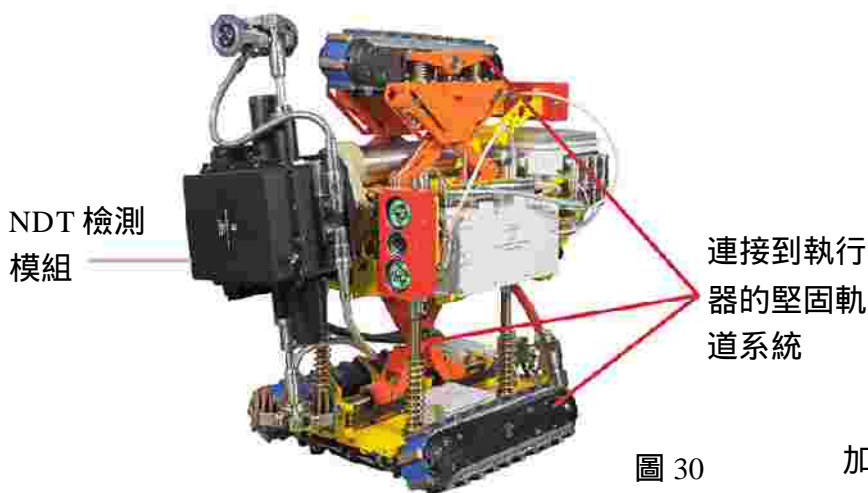
傳統的超音波檢測是藉由壓電材料所產生，經由媒介材料將音波傳遞至待測物，傳送超音波信號。電磁超音波檢測 (Electromagnetic Acoustic Transducer, EMAT) 採電磁場作為發送與接收超音波的介質，以線圈利用電磁力渦電流 (Eddy Current) 後，依磁場的設定方法、材料特性之不同，如產生材料為導電性材料時，產生洛倫茲力 (Lorentz Force)，和材料為鐵磁材料 (Ferromagnetic) 時產生的磁滯伸縮 (Magnetostriction) 等組合，產生不同模式的超音波 (圖 29)，所以不需要油、水作為耦合劑，對於需要在線檢測或掃描等需要連續量測者，是非常有利的檢測法，又因為不使用媒介物質，所以超音波發送也很安定，隨著高解析度感測器 (Sensor) 的實務化，於地下管線檢測中，配載 EMAT 感測器，檢測管壁狀況和腐蝕的數據，是非常好的選擇。只可檢測導電性、鐵磁材料是其缺點。

## (六) 地下管線非破壞檢測設備

地下管線的檢測，由於各種因素檢測人員不易全程靠近檢測部位，部份檢測技術的感測器需依靠各式設備傳送至適當位置進行檢測，常見的方式如下：

- Y 以爬行機器人攜帶 (Robotic Crawlers)
- Y 隨著管內流體帶動 (Flow through)
- Y 直接以纜線推送 (Pull through)
- Y 以無人飛行載具配帶 (Unmanned Aerial Vehicle, UAV)

Diakont公司的爬行機器人可根據管壁的內徑 (ID) 調整其形狀，以保持正向牽引力，同時通過幾乎所有可能的幾何形狀，包括背靠背彎曲，1.5 D 彎曲等，其採用的雙向履帶：兩個履帶位於底部用於主推進，第三個上部履帶根據需要伸出，以便在彎曲和傾斜管道等難以控制的幾何形狀中穩定爬行。並通過電纜連接到移動檢查位置，電纜除了進行供電，並將完整性數據實時傳回，在可能發生故障的情況下，電纜也可用作緊急檢索的手段 (圖30)。



Incommand公司對於各種狀態的管線檢測，採用了模組化的方式 (Multi-Mission Modular, IM3™)，對於實際需求進行組配，圖 31 是其Versatrax 150™的標準配備模式為設計用於長管道 (一次 500 m / 1,650 呎)，隧道，涵洞等狹窄區域，且檢查用的接入點的數量有限之地下管線，不論水下和乾燥皆可應用。

圖 31

INETEC 公司採用獨特的定制導螺桿，可實現強力通過  $< 1.5 D$  彎管等管線之檢測，如圖 32 所示。



圖 32

Flyability 公司的可碰撞無人飛行載具 (Unmanned Aerial Vehicle, UAV) Elios，其靈感源於昆蟲在碰撞後仍保持穩定的能力，是數億年自然演化的結果。採用獨特而實用的保護籠，克服了室內及管線內無人機在複雜密閉空間內或與人接觸的最大困難：碰撞和受傷的風險，由覆蓋有軟塗層的碳纖維組成，利用萬向節系統對三軸與內框進行分離。這種巧妙的機構使 Elios 在可以以高達 4 m/秒的速度與周邊產生碰撞，然後繼續維持平穩的飛行。直徑剛好在 400 mm 以下，比最小標準的人洞還小 (圖 33)。



圖 33



## (七) 案例分享

在 Georg Fischer Co. Ltd. 公司分享實際管線檢測的案例中提到，檢測人員應用目視檢測對檢測周圍環境變化的觀查 (相對應管線地面之路樹異常)，大幅縮短工時，將 5 km 長的管線中找尋洩漏的任務縮短至 2 天完成任務 (圖 34)。

案例研究：歐洲化學工廠

### 檢測背景狀況：

- Y 管線材質：聚乙烯
- Y 於 1995 年安裝，5 km 長
- Y 化學洩水用
- Y 管徑：110 – 315 mm

### 檢測原因：

- Y 不明確，但懷疑是洩漏
- Y 未知的銲接品質

### 挑戰：

- Y 地下管線
- Y 在 5 km 的管線中找尋洩漏

### 經驗分享：

- Y 對周遭環境的變化要敏銳
- Y 考慮所有可取得的資訊

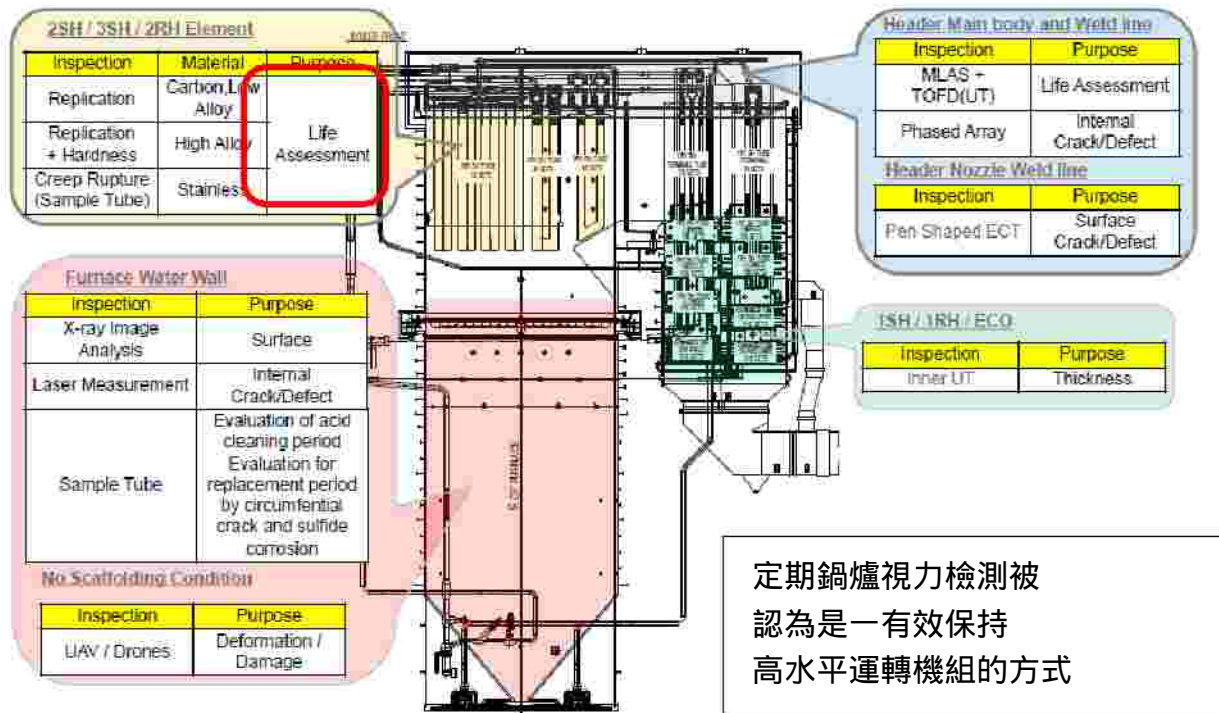


圖 34

### 三、超超臨界機組歲修非破壞檢測技術(日立三菱電力系統)

對於超超臨界機組鍋爐本體部份的歲修，日立三菱電力系統提供了各部位建議檢測方式及目的 (圖 35)，其中定期鍋爐視力檢測被認為是一有效保持高水平運轉機組的方式，與前述地下管線補充之案例相呼應。

對於承受高溫部份的二次、三次過熱及二次再熱管，日立三菱電力系統依材質分別以複製膜 (Replication)、硬度及截取樣管檢查潛變破裂 (Creep Rupture) 對其進行壽命評估。

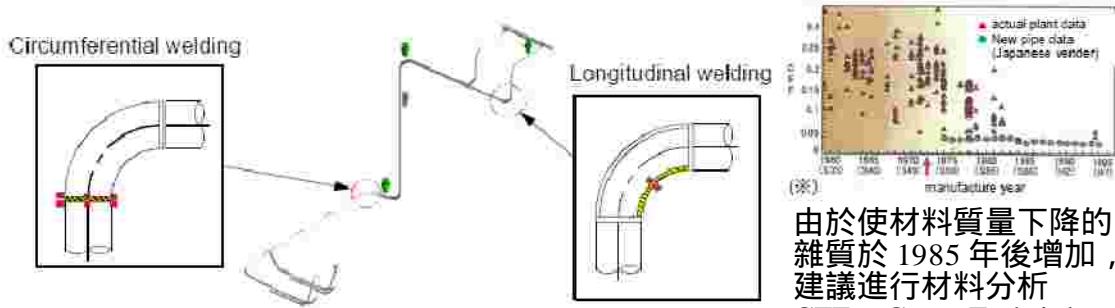


No.	Items	Inspection Item					Inspection Location					
		Thickness	Crack/Defect		Life Assessment	Others	Furnace Wall Tube	Furnace Burner Nozzle	2SH/3SH/2RH Element	1SH/1RH Element	ECO Element	Header
			Surface	Internal								
1	Inner UT	☆							●	●		
2	Replication				☆			●				
3	Hardness				☆			●				
4	MLAS				☆						●	
5	TOFD				☆						●	
6	Phased Array UT			☆							●	
7	Pen Shaped ECT		☆								●	
8	X-ray Image Analysis		☆			●						
9	Laser Measurement	☆				●						
10	UAV/Drones				☆	●	●	●				
11	Creep Rupture				☆			●				
12	Sample Tube				☆	●						

圖 35

超超臨界機組或氣渦輪機機組之燃料管線，屬台電管轄範圍均為地上管線，可依其提供各高溫管線之方式檢測，如主蒸汽管及飼水管等，對其軸向或周向銲道及母材各部位的檢測方式及其常見破損案例等資訊如圖 36, 37。另由於使材料質量下降的雜質於 1985 年後增加，日立三菱電力系統建議進行對管路之材料分析 (圖 36)。

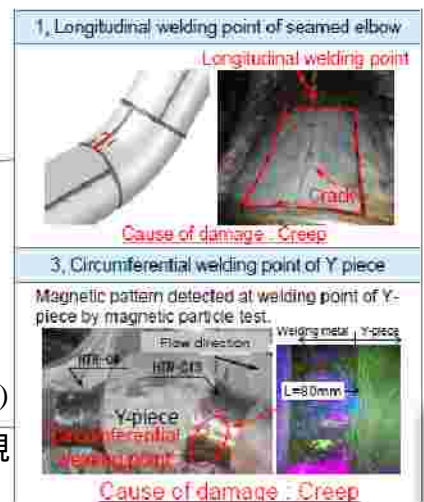
Line	Material	Point	Method					
			MT	TOFD	Replication	PAUT	Hardness	Material Analysis(*)
主蒸汽管 Main Steam pipe Other pipe	SA335P91 SA335P22 etc.	Base metal	-	-	○	-	○	○
		Circumferential welding	○	○	○	○	○	-
		Longitudinal welding	○	○	○	○	○	-
飼水管線 Feed water pipe Other pipe	SA106Gr.B SA106Gr.C etc.	Base metal	-	-	○	-	○	○
		Circumferential welding	○	○	○	○	○	-
		Longitudinal welding	○	○	○	○	○	-



軸向銲道



軸向銲道(彎頭)



周向銲道(Y型3通)  
磁粒檢測 (MT) 發現

圖 36

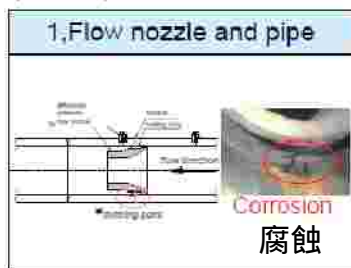
噴嘴



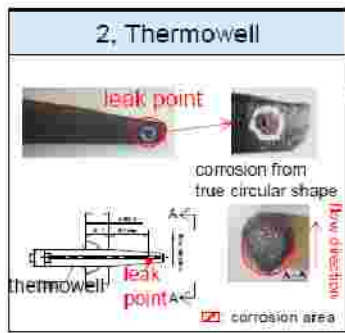
破損原因：疲勞/潛變裂痕



破損原因：熱攻擊

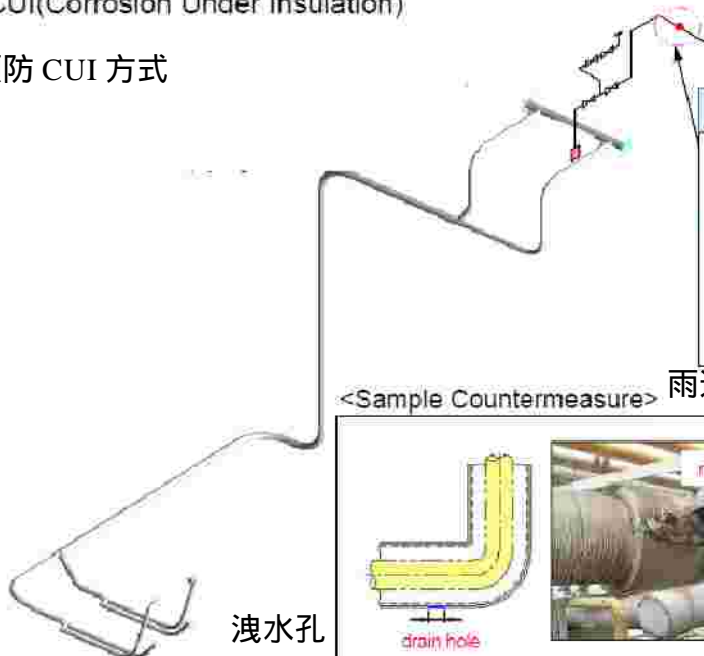


流體加速腐蝕 FAC (Flow Accelerated Corrosion)



d) CUI(Corrosion Under Insulation)

預防 CUI 方式



<Sample Countermeasure> 雨遮



圖 37

## Y 檢測方法

對於超超臨界機組歲修，日立三菱電力系統所建議的檢測方法共計 10 種：

1. 管內超音波檢測 Inner UT
2. 複製膜 Replication
3. 硬度試驗 Hardness
4. 三菱材料分析系統 MLAS (Mitsubishi Metallurgical Assessment system)
5. 飛行時間繞射法 TOFD (Time of flight diffraction)
6. 陣列式超音波檢測 Phased Array UT
7. 筆型渦電流檢測 Pen Shaped ECT
8. 數位 X 光檢測 Digital X-ray
9. 雷射量測 Laser Measurements
10. 無人飛行載具 UAV/Drones

其中與一般機組不同或較具參考的新資訊如下述：

管內超音波檢測，對於省煤器管等部位的檢測，建議於運轉 5 年後開始對厚度進行量測追蹤，以便提早發現潛變裂痕，其示意圖如圖 38 所示，最新的無管線式管內超音波，整組的重量減輕至原來的 1/10，使的檢測的進行更為便利 (圖 39)，檢測結果如圖 40, 41。

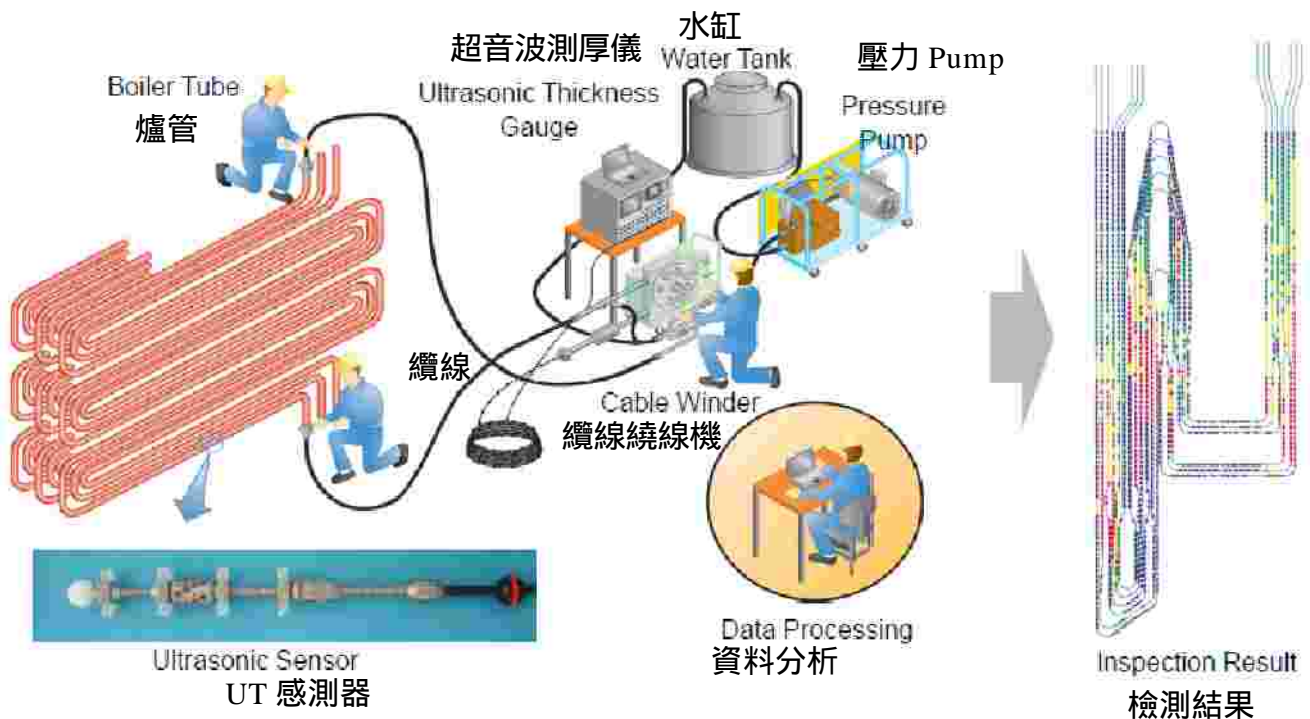
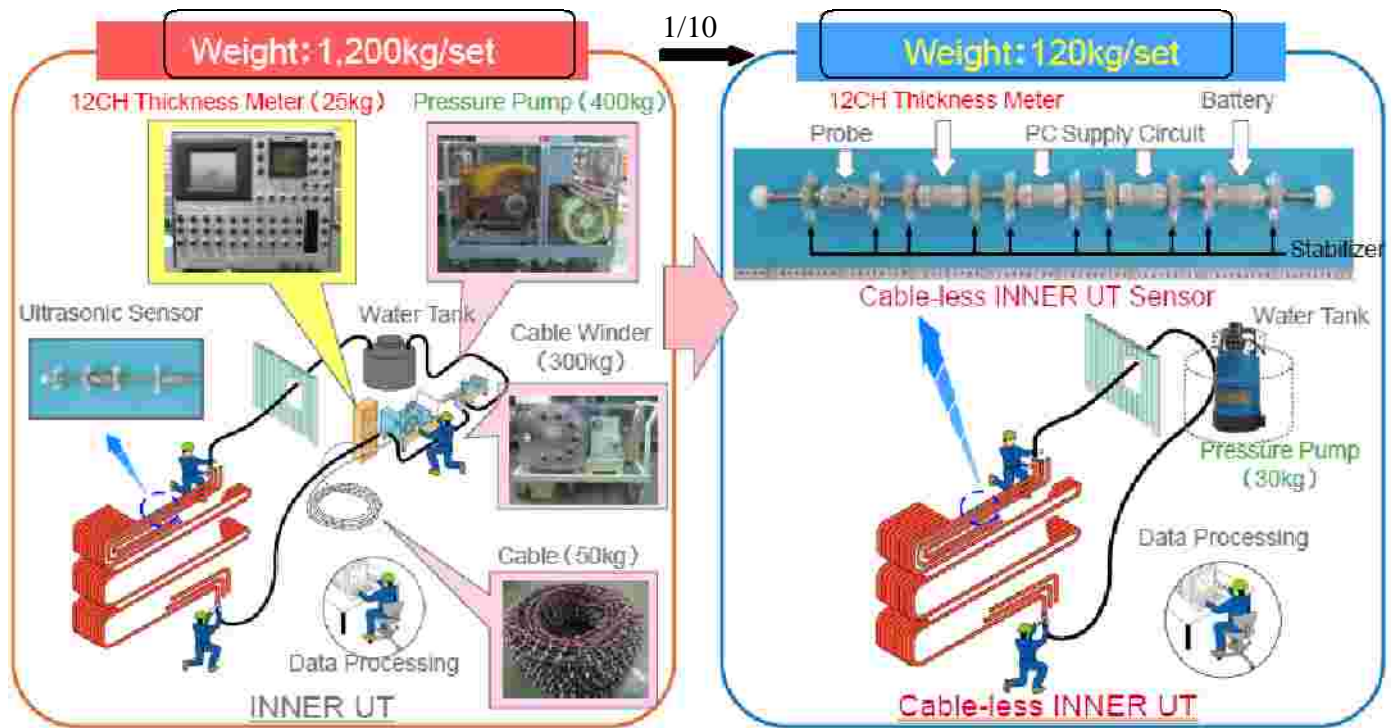


圖 38



管內 UT

無纜線管內 UT

圖 39

檢測水平省煤器管路結果

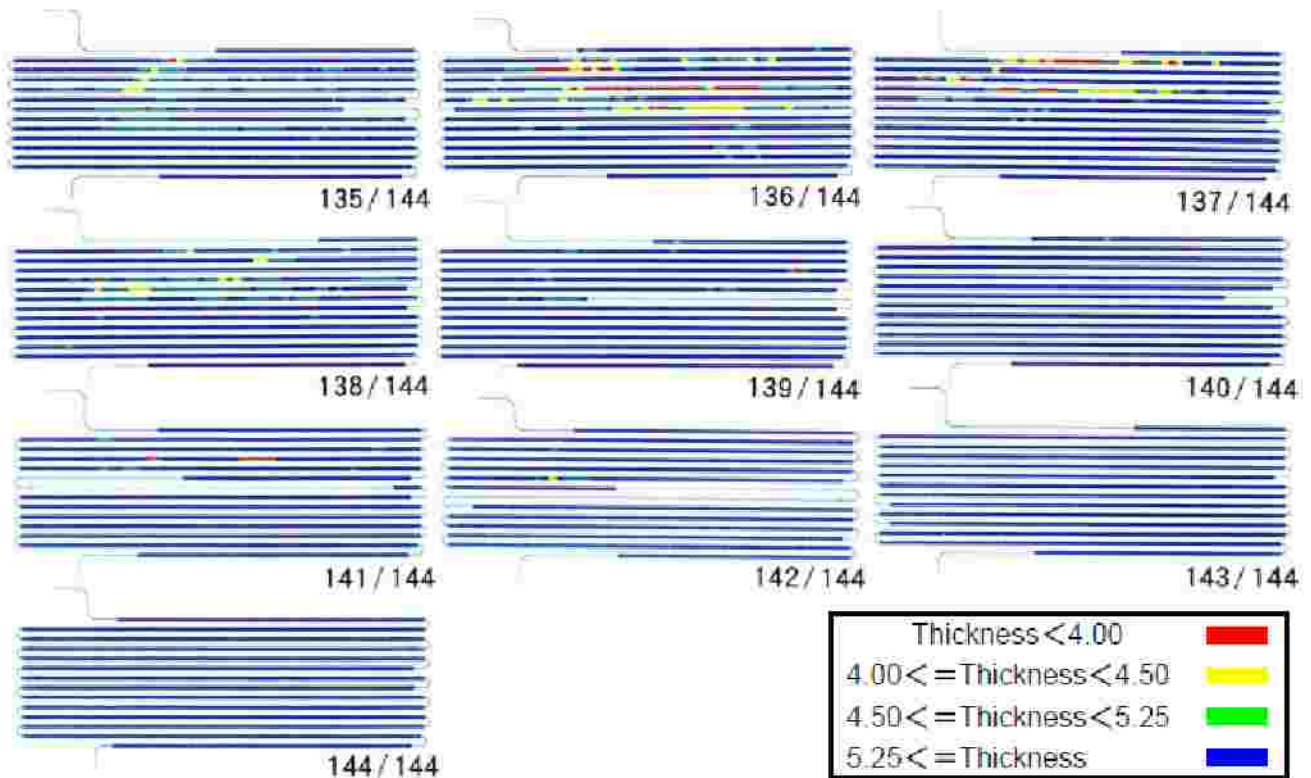


圖 40

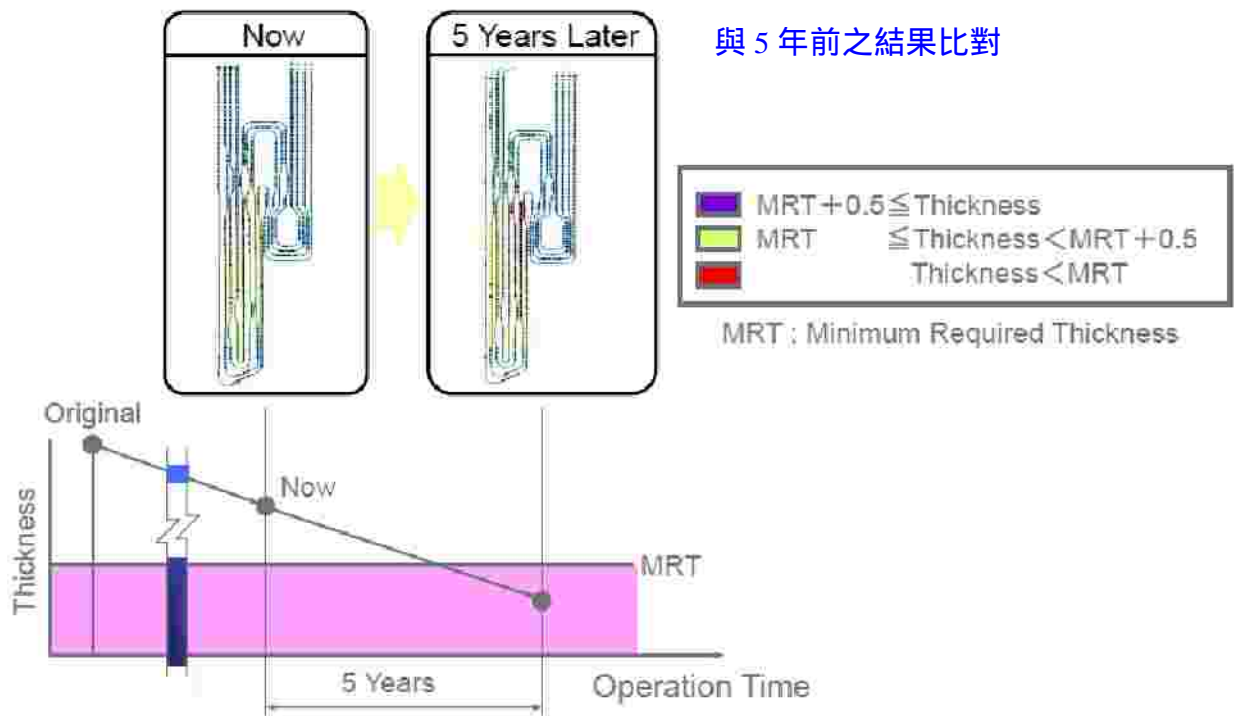


圖 41

日立三菱電力系統也利用遙控無人飛行載具 (Unmanned aerial vehicle / Drone) 檢查管線，燃燒器，以免去搭施工架進入平時難以觀測的部份，對於利用無人飛行載具進行檢測，需由有經驗或經訓練之人員操控，載具本身依需求應有防碰撞 定位等機構以適應檢測需求 (圖 42)

UAV : Unmanned aerial vehicle

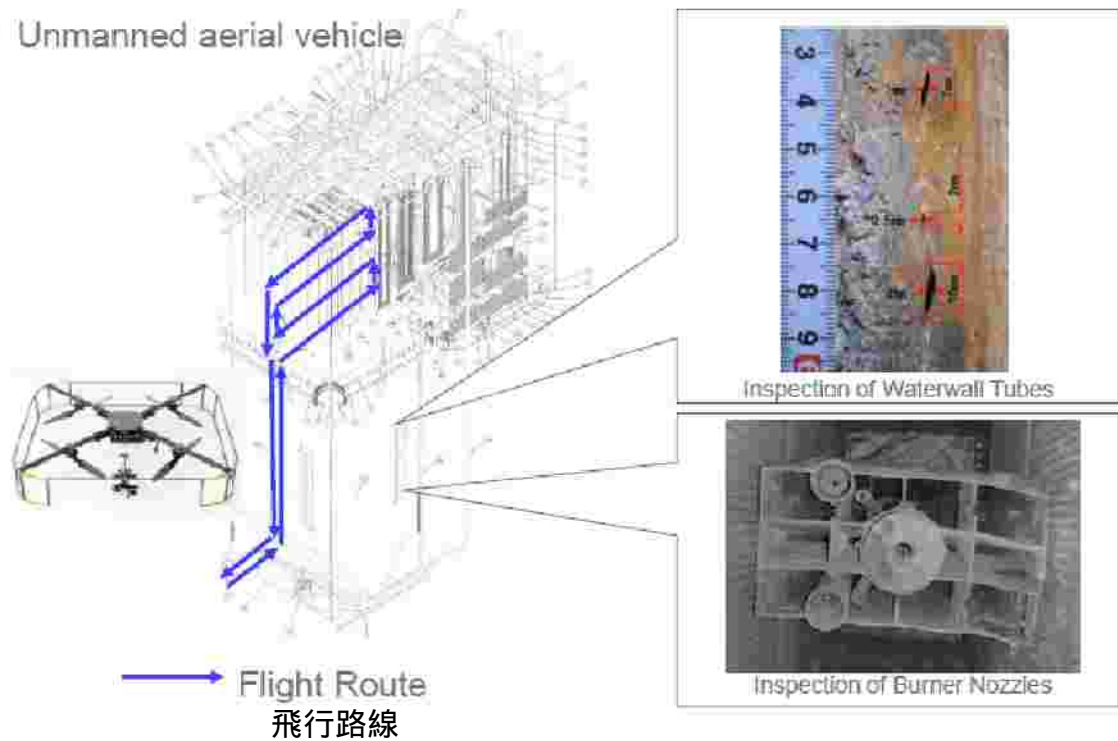


圖 42

## 參.對本公司之具體建議

- 一、ASNT 年度研討會所得資料極為豐富，會中共約 106 篇之議題，除應用於地下管線檢測技術外，應用於機組檢測的技術及經驗分享，也讓本人獲益良多，然部份議題因時間衝突，單人參加分身乏術，未能聆聽，實為可惜，值得本公司再派兩人參加類似之研討會。
- 二、Zetec 公司最新發展之 Total Focus Method (TFM) 及 Eddy Current Array (ECA) 之技術，除可應用於地下管線檢測，亦可應用至其他電廠機組組件檢測項目，屬最新且最具發展性之熱門技術，值得本公司引進之先進技術，提升檢測技術品質及效能。
- 三、日立三菱電力系統 (MHPS) 表示超超臨界機組或氣渦輪機機組之燃料管線，屬台電管轄範圍均為地上管線，可依其提供之方式檢測，另超超臨界機組之鍋爐歲修檢測與一般機組相比，須更重視高溫區域之材質檢測及分析。