



環境部環境管理署
112 年度土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗專案

儲槽管線污染滲漏與加油站測漏管
智慧監測技術(第二年)

期末報告（定稿）

主辦單位： 環境部環境管理署
專案執行單位：國立陽明交通大學／防災與水環境研究中心
專案主持人：林志平 教授
專案執行期間：112 年 12 月 18 日起至
113 年 11 月 29 日止

中華民國 113 年 11 月 印製



環境部環境管理署「土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗專案」

☐構想書

☐申請計畫書

☐期中報告

☐修正計畫書

☒成果報告

審查意見回覆對照表

計畫年度	112 年度		計畫類型	☐ 先導型 ☐ 研究型 ☒ 模場型	
計畫類別	☒ 調查 ☐ 整治 ☐ 其他			主持人：林志平 NO：B6	
計畫名稱	儲槽管線污染滲漏與加油站測漏管智慧監測技術				
審查意見			執行單位回覆		
委員一			1. 謝謝委員提醒，先前表格內容為誤植，已進行修正。		
1. 專案成果績效預估數（含學術面與產頁面）的期末達成率均為 0，請確認資訊是否正確。			2. 謝謝委員建議，定稿本中已對於相關內容於結論部分進行更新。		
2. 期末報告「研究成果對本署政策推動之助益」的說明內容應以實際執行成果進行更新。			3. 謝謝委員提醒，已對內容進行修正。		
3. 報告內容誤植處請修正：（1）p.3「能源局」已組改為「能源署」；（2）p.3&p.21「環保署」已改為「環境部」；（3）p.19 錯字：原			4. 謝謝委員建議，已於 4.2.2 節中進行降雨情境之補充。		
污染物苯「以」降低至管制標準以下；（4）p.52 參照錯誤。			5. 本節中所提到之定量分析僅適用於較厚浮油層的情境中；對於薄油層的偵測，由本節中提到的正規化互相關方法，利用有無浮油層所收錄之 TDR 波形進行相似度判斷，此方法可有效地使感測器偵測更薄油層厚度，以進行前期預警，但並無法對於油層厚度進行定量。		
4. 除了開發技術的優點與應用性，建議補充技術在實務應用上的適用性與限制性（例如當現地受雨水影響而造成土壤含水率大幅變化下，TDR 滲漏監測技術面臨之不確定性評估、及如何判斷監測系統周邊環境水已排除到可提供靈敏且準確的監測數據？）			6. 謝謝委員建議。對於 TDR 管線儲槽滲漏監測方法可以透過資料預處理及門檻值建立達到自動化分析的效果；但 TDR 測漏管浮油偵測方法所要求之時間域分析方法較不容易實現自動化，因此本團隊提出頻率域全波形分析方法以簡化分析所需之輸入參數並降低資料中之雜訊影響，以實現自動化分析及增加分析之可靠度。		
5. 4.3.2 節以定量增加浮油厚度模擬現地因持續滲漏造成浮油累積，唯實際情況因感應元件埋設填料為高孔隙率，漏油可能直接下滲而感應器旁僅有極薄的油層，應說明此情境下的技術實際應用性。					
6. 對連續回傳的自動化收錄的監測資訊，應建立自動分析與判別的系統與預警方式，以達到計畫希望「透過即時監測資料及時、儘早發現污染物以縮短油品滲漏預警時間」的目的。					



委員二 1. 本研發計畫「儲槽管線污染滲漏與加油站測漏管智慧監測技術」為模場型第二年度研發專案，成果報告顯示本研發計畫已完成 TDR 儲槽管線污染滲漏之標準建置與分析方法，並於南投昱佑加油站及陸昌化工幼獅廠等二處模場試驗場址、建置 TDR 即時監測系統自動偵測測漏管浮油等多項工作，相關細節已於成果報告中詳述。 2. 依據成果報告所示之執行內容與期程，整體進度符合原計畫之規劃進度。 3. 本計畫第二年的模場試驗場址為昱佑加油站，透過高解析度三維透地雷達與三維地電阻影像剖面法進行期中場址探勘，瞭解本場址地底下電性地層之電阻率與透地雷達異常訊號分布，提供安裝智慧型監測系統位置之參考，此一措施促使現地 TDR 即時監測系統測試結果更有效率並具有代表性。 4. 本研發計畫於場址建置之 TDR 即時監測系統經實際測試，確實可即時測得監測井中之浮油，有助於漏油偵測時效之提升與污染風險之預防。 5. 本計畫研發團隊於「儲槽管線污染滲漏與加油站測漏管智慧監測技術」已取得良好成果與基礎，唯仍有多項環境干擾因子(如土壤水分含量、土壤孔隙度)及 TDR 即時監測系統應用限制因子(浮油厚度、定量監測數據精確度)需待進一步提升，建議研發團隊進一步探討。	謝謝委員肯定。 5. 環境干擾因子已於前期研究中於實驗室進行探討，對於油品滲漏監測的情境，孔隙率愈高靈敏度愈高，且較不受含水率影響，本團隊亦將持續精進監測技術之資料處理技術，以提高監測靈敏度與可靠度。
委員三 1. 本年度成果符合計畫書執行內容與進度。 2. 成果績效自評表申請預估項目與數量，截至目前都尚未達成(或是未填)，請補充，至今未達成也請填結案後半年是否會投稿或說明原因。 3. TDR 技術在此研究已經展現其有效性與運用於儲槽及管線洩漏的偵測效益。 4. 本案為模場型兩年期計畫，本計畫分成兩個	1. 謝謝委員肯定 2. 謝謝委員提醒，先前表格內容為誤植，已進行修正。 3. 謝謝委員肯定 4. 謝謝委員建議，已於 4.4.2 節中對後續第二年監測成果進行更新，本團隊亦將持續測試浮油監測技術於長期監測中之適用性與穩定性。



部分，第一部分於陸昌化工幼獅廠第一年設置 TDR 儲槽管線污染滲預警偵測系統，第二年持續精進關鍵技術。第二部分測漏管浮油智慧型監測系統，第一年實驗室測試，第二年在南投昱佑加油站模場測試。今年為第二年之執行成果報告。但是在報告中多為第一年的成果，建議對第二年成果多加敘述。例如 TDR 儲槽管線污染滲預警偵測系統第 48 頁 4.2.3 執行階段遭遇之困難與解決方法僅陳述第一年因為感測元件接觸到上方施作中水泥向下滲流的水份進了影響監測品質。但第二年的持續精進的成果僅列出訊號趨勢(圖 35-39)。測漏管浮油智慧型監測系統只要是第一年實驗室成果，本年度報告有相當的篇幅在場址透地雷達勘查結果，僅有圖 75 以 1 次貝勒管中浮油厚度對應訊號值呈現技術可行性。長期之準確性與有效性仍有待驗證。	
委員四 1. 本研究為多年期研究的第二年成果報告，建議第三章應具體說明各年研究設計，並以流程圖呈現，階段性研究內容與目的，有利於了解成果與未來的應用內容整體性。 2. 第二年模場選擇與第一年不同，二者間應用性的比較與差異？成果的一致性或連貫性？ 3. 建議在第七章結論中說明 TDR 技術的應用一場址特性需調整的方案。 4. 請提出具體後續應用建議。	1. 謝謝委員建議，3.3 節中已呈現對於各年研究及工作項目內容流程圖。 2. 第一年模場所應用之情境為新設設施之滲漏監測案例，於此環境下可於儲槽與管線下方預埋設感應纜線進行監測，而第二年模場為既有設施之監測，無法進行預埋感應纜線，因此利用現有監測井進行由滲漏油品所形成之浮油層監測。 3. 謝謝委員建議，已於結論中新增對於不同場址中所需採取之調整方案。 4. 謝謝委員建議與指教，同樣於結論中提出對於此技術的未來發展及精進方向。
委員五 1. 本計畫發展之滲漏監測技術具有發展性，未來可再評估發展針對氣體中油氣濃度進行偵測，將更具應用性。	謝謝委員建議，油氣濃度的即時監測技術有其挑戰性，本團隊亦有在思考這個問題，未來會持續尋找構思相關應用的可行性。

環境部環境管理署「土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗專案」

☐構想書

☐申請計畫書

☒期中報告

☐修正計畫書

☐成果報告

審查意見回覆對照表

計畫年度	112 年度	計畫類型	☐ 先導型 ☐ 研究型 ☒ 模場型
計畫類別	☒ 調查 ☐ 整治 ☐ 其他		主持人：林志平 NO：B6
計畫名稱	儲槽管線污染滲漏與加油站測漏管智慧監測技術		
審查意見		執行單位回覆	
委員一		謝謝委員建議與指教。在模場水溝底部的監測，應置於水泥(管道)下方，第一組裝設在水泥打底之後，沒有接觸水溝底部的地層，在灌注水溝時的水在監測纜線處無法向下排除造成影響，已修正設置的 SOP，後續的設置便無這個問題。本技術主要是用在地下水位面以上的監測，纜線鋪設於濾料中，若戶外監測區降雨入滲，濾料不會保水，僅有短暫時間受降雨影響，待降雨往下入滲後即可再正常監測。	
委員二		謝謝委員肯定與支持。	
1. 本研發計畫「儲槽管線污染滲漏與加油站測漏管智慧監測技術」為模場型第二年度研發專案，期中報告已完成:建立 TDR 儲槽管線污染滲漏之標準建置與分析方法、擇定(南投昱佑加油站及陸昌化工幼獅廠)二處模場試驗場址、建置 TDR 即時監測系統及建置 TDR 測漏管浮油自動偵測與量測方法等多項工作，相關細節已於期中報告詳述。			
2. 研究團隊於技術開發測試過程雖遭遇各式工程、環境、地質等因素干擾，研究團隊皆已持續分析問題根源並提出因應對策，使得本項智慧監測技術得以提升其準確度；相關成果有利於後續技術開發與應用之潛力。			
3. 依據期中報告所示之執行內容與期程，整體			



進度符合原計畫之規劃進度。 4. 本計畫「儲槽管線污染滲漏與加油站測漏管智慧監測技術」完成後應可有效提升油庫及加油站儲槽管線系統之防漏管理成效、降低設施洩漏及污染風險。	
委員三 1. 本計畫開發本土化 TDR 滲漏智慧監測技術，且兩年執行期間分別於陸昌化工及昱佑加油站測試，此項技術研究具有前瞻性與實務應用性。 2. 今年度為第二年執行，目前成果有依據兩年度計畫書規畫及進度執行，但本報告為第二年度期中成果，陸昌化工計畫第一年完成滲漏測試，第二年(本期)持續測試精進，建議分列本年度成果，以利查核。再於成果報告綜整。 3. 本年度建置 TDR 測漏管浮油自動偵測與量測方法，實驗室部分以沙拉油代表浮油，訊號與水相有微幅差異，實驗初步驗證浮油量測方法之可行性。但不知真正油品是否如同沙拉油效果？ 4. 建議評估本套設備之裝置、操作維護成本。自動監測所費不貲，所以若能在滲漏早期，測漏管中微量浮油(油花)時即可偵測，就可提早因應，降低自由相擴散幅度，節省後續整治成本，這樣本套設備之經濟效益會更高。	1. 謝謝委員肯定。 2. 謝謝委員建議與指教，後續會於期末報告中進行彙整。 3. TDR 技術主要量測之標的為材料的介電性質，沙拉油與汽油、柴油...等油品的介電性質雖不完全相同但非常相近，透過實驗中可以瞭解浮油所造成的影響趨勢，並對現地油品所得之量測值有進一步的理解。 4. 謝謝委員建議與指教，後續會於期末報告中進行評估。
委員四 1. 本計畫為第二年期計畫，理論上應該應用第一年提出的 TDR 測漏管浮油自動偵測量測技術，進一步開發第二年自動化分析方法，第三章撰寫「語法」及「內容」未能反映第二年度計畫的研究設計，建議修正。 2. P.42-45 測試成果圖文說明未確實搭配，且同時建議第四章能提供更流暢的撰寫說明，以顯示初步成果，及規劃後續工作內容。	謝謝委員建議與指教，後續將根據委員提出的建議進行修正。

**委員五**

1. 本計畫研發技術運用於現場儲槽及管線測漏具有實求，建議未來可持續研究土壤氣體監測井中油氣濃度即時監測技術。

謝謝委員建議與指教，油氣濃度的即時監測技術有其挑戰性，本團隊亦有在思考這個問題，未來會持續尋找構思相關應用的可行性。



環境部環境管理署「土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗專案」

☐構想書 ☐申請計畫書 ☐期中報告
☒修正計畫書 ☐期末報告

審查意見回覆對照表

計畫年度	112 年度	計畫類型	☐ 先導型 ☐ 研究型 ☒ 模場型
計畫類別	☒ 調查 ☐ 整治 ☐ 其他		主持人：林志平 NO：S4
計畫名稱	儲槽管線污染滲漏與加油站測漏管智慧監測技術(第 2 年)		
審查意見		執行單位回覆	
委員一			
1. P.11-13 使用 TDR 滲漏監測技術只要係利用滲水造成感應纜線對應位置電學性質的改變，請問是否需視滲漏標的為油品或重金屬廢液而改變相關參數？抑或僅能用於監測特定液體？另有關其限制因子？(包含深度、水質、感知範圍為點/線/面…等等)		1. TDR 滲漏監測技術利用差異分析定位因滲漏而造成的電學性質變化，在監測不同滲漏標的時可根據液體特性採取適當的環境建置，並不需調整資料分析時使用的參數；此為一維傳輸線雷達，偵測沿感應纜線周遭的電學性質變化，並根據需監測範圍不同進行監測系統設置調整。不同液體會影響其感測敏感度，水的介電度最高，其感測敏感度也最高，非水性液體之介電度低，敏感度較低，但前期研究已驗證其可行性。	
2. 承上，使用滲漏智慧監測技術，除可供業者進行自我管理外，亦可提供予主管機關進行整治或稽查管制，對於人力成本有所助益，此項技術研究具有前瞻性。		2. 謝謝委員肯定。	
3. 請問本技術後續之應用，如考量成本效益評估等，較傾向於長期監測(用於預防)或是短期抓漏(用於整治)？		3. 本技術以自行開發之程式實現自動化收錄資料，相較於人工定期檢測時，提高監測頻率期望在少量滲漏時即早發現並進行預防。若無自動化建置的預算或需求，亦可僅定期檢測，透過預埋之感應纜線可準確偵測是否有滲漏以及滲漏位置。	
4. P11-37 期中報告及期末報告進度應納入甘特圖。		4. 謝謝委員提醒，已修正。	
委員二			
1. 本新穎監測技術第一年於現場實際即時測得上方管線滴水事件，本期應實際偵測或模擬污染場址常見的有機物洩漏，以確認本技術的實場可用性。		1. 謝謝委員建議與指教。	
2. 建議量化說明本技術在現場受含水率、回填土壤孔隙等現地條件對監測靈敏度的影響及技術可行的上、下限值範圍。		2. 謝謝委員建議。前期於實驗室之基礎研究有針對這些因子探討，為了較不受含水率的影響，且孔隙率越高其感應靈敏度越高，因此感應纜線以粗顆粒濾料回填。將在後續報告中之標準作業準則，說明其標準作法與相關限制。	



3. 室內物理實驗(圖 22)中較薄(<1cm)浮油厚度對 TDR 波形變化的靈敏度(圖 21)不甚明顯，訊號是否會被現地其他因素干擾而遮蔽，應為本期計畫的確認重點。	3. 謝謝委員指教，後續計畫中會再針對較薄浮油層厚度的量測方法進行精進，目前已有改進方向。
委員三 1. 本計畫第一年建立應用 TDR 對儲槽與管線之監測技術，並找出明管及地下管線之監測建置方法與分析流程。 2. 目前測試之場址只有一個，且相當單純、及小型，在不同大小及土壤類型場址，適用性為何？建議能適度評估。 3. 本年度擬測試測漏管，相較於傳統方法，例如影像法、或是其他物理方法，其優勢為何？建議分析說明。 4. TDR 方法，受污染物濃度、場址地質影響性為何？建議能探討。	1. 謝謝委員肯定。 2. 本計畫第二年將導入另一場址，並架設此監測技術系統進行測試。 3. 目前測漏管檢測方法有油氣體離子偵測器(PID、FID)、油水界面計，這些方法都須人工現場進行檢測；而 TDR 監測技術可以自動化收錄資料，提高監測頻率以達到及早預防的效果。 4. 謝謝委員建議，監測系統於架設過程中利用回填材填補感應纜線周遭，使監測系統不受場址地質影響。系統主要偵測是否有液體滲漏，以及滲漏位置的定位，不直接量測污染物濃度。
委員四 1. 本計畫採用電磁導波時域反射法監測加油站等油品儲槽及管線洩漏，研究項目即時監測可避免滲漏事件污染擴散發生，有效減少我國土壤及地下水污染及整治相關所需之物耗及能耗。 2. 附件 11-15，有關本計畫開發之監測技術，目前評估該系統量測距離限制顯示距離 100 公尺仍能檢測並分析滲漏位置，然考量加油站設施多建於市區內部恐有多項因子可能對於監測設備產生雜訊影響，建議設備設置仍宜考量建於目標槽體周圍，以提升成果之有效性。 3. 附件 11-37，有關本年度之計畫研究進度及預期完成項目（甘特圖），建議應依說明標記各項查核點及期中、末報告書預定提交之時間，以利相關單位查核。 4. 預期效益除了工作目標及學術發表建議強化技術成本效益評估。 5. 計畫書封面之年度應為 112 年度，主辦單位建議應更正環境部環境管理署。	1. 謝謝委員肯定。 2. 謝謝委員建議與指教，監測系統設置將根據現場環境進行調整，以降低不必要的雜訊與干擾。 3. 謝謝委員提醒，已修正。 4. 謝謝委員建議，初步完成模場系統建置後，會彙整成本評估。 5. 謝謝委員提醒，已修正。 6. 謝謝委員肯定。



6. 本計畫採用電磁波反射技術監測地下油品儲存槽及管線是否滲漏，該技術可於源頭降低嚴重土壤及地下水污染事件發生並提供即時預警，可減少後續整治工作實施，屬一項綠色技術。	
委員五 1. 研究主題符合土壤及地下水污染整治基金補助精神、探討課題新穎、整體研究架構明確方法可行、技術未來應用及推廣性應加強特別針對台灣目前的場址需求。	謝謝委員肯定，。
委員六 1. 南投加油站試驗結果，其驗證方式是否與後續整治或調查要能一併規劃，如何確認其結果。 2. 租賃費((4)其他研究費用)表中雜費 25 日、住宿 2 天 1 夜共 $5*2=10$ 日合計 35 日與 9 人座 15 日+租車加油費不對等。	1. 目前加油站暫停營業中，尚未進行整治與下階段調查，本研究工作主要是監測可能是否還有污染源之生成，本成果可以提供未來調查與整治工作的污染資訊。 2. 現場施作需較多人力支援，會有多人同日出差的情況，因此天數不會相等。
委員七 1. 早期偵測滲漏之概念及系統已於第一年實驗室及實地場址測試成果，第二年擴展至加油站測漏管浮油，將可讓潛在污染場址盡早發現洩漏。 2. 加油站比較受限於成本，建議可增加成本評估。	1. 謝謝委員肯定。 2. 謝謝委員建議與指教，初步完成模場系統建置後，會彙整成本評估。
委員八 1. 主持人已有相關研究經驗與績效，對土水污染整治技術發展能力佳，足以勝任本專案計畫。 2. 本專案計畫著重於：管線滲漏的調查與防治。本計畫的執行對國內未來土壤及地下水污染調查工作推動有貢獻。 3. 計畫書撰寫具體，所提出的研究方法可行。 4. 本計畫具有潛在的實務應用潛力。 5. 主持人已有相關研究經驗，本計畫書中對文獻的蒐集整理頗完整。計畫書中對國內外本研究領域現況有所了解。 6. 本計畫屬於延續性的第二年度計畫，計畫執	謝謝委員肯定。



行期限的規劃合理。 7. 監測結果的驗證相對關鍵。 8. 專案經費編列的合理性:本計畫為延續性計畫，大部分現場設備已購置(本年度增加人事費)。	
--	--



行政院環境保護署「土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗專案」

■構想書 □申請計畫書 □期中報告
□修正計畫書 □期末報告

審查意見回覆對照表

計畫年度	111 年度	計畫類型	☐ 先導型 ☐ 研究型 ☒ 模場型
計畫類別	☒ 調查 ☐ 整治 ☐ 其他		主持人：林志平 NO：A7
計畫名稱	儲槽管線污染滲漏與加油站測漏管智慧監測技術		
審查意見		執行單位回覆	
委員一 1. 研究主題具實用性。 2. 有關滲漏因素、型態之變異甚大，研究方法未提到土壤特性、洩漏特徵之影響，變數甚多。		1. 謝謝委員的肯定。 2. 謝謝委員指教，本技術主要在偵測是否有”滲漏”發生以及其發生大概位置與沿線滲漏的範圍，滲漏液性質為事前資訊，滲漏型態則需事後調查方能得知。至於其影響因子，前期研究已經有初步探討，將於詳細的計畫書中補充。本計畫將進一步提出設置方法的 SOP，包括回填土壤的最佳特性，使得所建置的系統不受降雨等因素的影響，將於計畫成果中展現。	
委員二 1. 建議提供一份標準場址監測的成本分析，可供未來做不同監測方式的成本比較。		1. 謝謝委員的建議，此資訊可做為後續推廣應用的重要參考資料。本計畫將先完備建置的 SOP，包括硬體系統配置與現地佈設方式，初步完成模場實際系統建置後，會彙整成本分析，若成效評估有改進與 cost down 的更動再修正相關資訊，	
委員三 1. 本計畫擬以電磁波法監測儲槽管線洩漏，計畫在本土化應用部分，有新穎性、及應用可行性。 2. 建議比較本技術與國際常用電磁波法監測、以及其他地球物理方法，在應用上		1. 謝謝委員的肯定。 2. 謝謝委員指教。 地球物理方法有非破壞性與移動性的優勢，但有其準確度的瓶頸以及較無法自動化監測；本計畫的電磁波監測技術首先在國外發展應用於自來水滲漏以及提出工	



的優勢。	業用的專利監測纜線，本計畫之研發成果，將應用成果延伸到有機污染的滲漏監測，並避開高單價專利纜線的需求，所提的方案甚至優於高單價的專利纜線。相關資訊在計畫書之文獻回顧與前期研究成果說明中補充。
委員四 1. 本計畫透過研發加油站測漏管全自動化即時監測，建置儲存槽管線滲漏與測漏管之整合式自動化智慧監測系統，透過即時監測資料以警示是否有無污染物滲漏，以降低危害發生之風險及提升緊急應變處理之效率。	1. 謝謝委員的肯定與指教。
委員五 1. 研究主題符合土壤及地下水污染整治基金補助精神、探討課題新穎、整體研究架構明確方法可行、技術未來應用及推廣性應加強特別針對台灣目前的場址需求。	1. 謝謝委員的肯定與指教。
委員六 1. 可向經濟部能源局申請更大型的驗證計畫。 2. 與國外既有專利是否有衝突，先申請專利再論文發表。	1. 謝謝委員指教，預計先進行模場計畫，再進行後續的推廣。 2. 目前的研究成果的主要考量之一即在避開既有專利技術，還好並沒有因為這樣而降低技術成效，相反的，目前的研究成果效果更甚於使用專利監測纜線。本計畫將案智財法的相關規定，適時提出專利申請與論文發表。



委員七

1. 請補充說明本計畫智慧監測技術之應用限制條件為何？
2. 請補充說明本計畫之驗證機制及品質管制(如代表性及靈敏度等)之要求為何？

1. 儲槽與管線的滲漏監測技術方面，主要限制為適用於新設置或儲槽管線更新，且設置位置需確認滲漏發生時會通過設置區域；監測井的自動化監測技術可隨時設置在既有監測井，但其解析度與效果將於本期計畫中評估。
2. 本計畫之模場試驗主要是在現場環境建置實測系統，首先可以先評估系統穩定性，不會有誤報的情況發生；監測期間若無適合的預警事件，將規劃在模場設置一個比研究型計畫可行性評估期間更具規模的模型槽，取得驗證資料。跟可行性評估期間不同處在於規模不同、環境不同、系統是實際運作。監測效果的評估將用訊雜比（滲漏產生的訊號改變量比背景雜訊大小）的量化方式來評估監測的靈敏度與準確度，浮油厚度的監測效果將以空間解析度來表示，研究過程將透過軟硬體（訊號分析程序與感測纜線設計）來優化監測解析度。



112 年度土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗申請計畫書

一、專案基本資料表

申請編號： (由本署填寫)

專案性質	☒ 實驗性質 ☐ 非實驗性質		專案技術編碼	LAB - S - I - C2 - P (如非實驗性質含氣溶劑之生物整治模場為 NLAB-S-R-C1-B，填寫請參考附件 1-4)	
專案類別(單選)	☐ 先導型 ☐ 研究型 ☒ 模場型		研究主題	☐ 整治 ☒ 調查 ☐ 政策類或其他	
申請機構系所	國立陽明交通大學防災與水環境研究中心				
機構地址	新竹市大學路 1001 號				
專案主持人	林志平	職等/職稱	特聘教授兼工學院院長		
協同主持人	周奮興	職等/職稱	董事長/環工技師		
協同主持人	董天行	職等/職稱	經理		
協同主持人	劉興昌	職等/職稱	副研究員		
專案名稱	中文	儲槽管線污染滲漏與加油站測漏管智慧監測技術(第二年)			
	英文	Intelligent leak detection monitoring technique for storage tank, pipeline, and leak detection pipe of petrol station			
	關鍵字	儲槽管線洩漏、智慧監測技術、電磁波時域反射法			
執行期程	自民國 112 年 12 月 18 日起至民國 113 年 11 月 29 日止				
專案主持人	姓名：林志平 E-mail：cplin.ce@nycu.edu.tw		專線：03-5131574 手機：0922-747731		
專/兼任人員	姓名：陳軍韜 E-mail:ctcmm001@gmail.com		專線：03-5712121 手機：0936354976		
經費分析總表 (僅模場試驗專案需填寫兩年度金額)	專案預估總經費		第一年申請經費	第二年申請經費	編列說明
	1.	人事費用	800,432	884,796	(1~5 項相加之 50%為限)
	2.	設備使用含維護費	0	0	(與計畫實驗相關)
	3.	耗材與主要費用	662,590	595,204	(與計畫主體相關)
	4.	其它研究相關費用	79,828	50,000	(含差旅與租賃費用)
	5.	行政管理費	177,150	270,000	(1~5 項相加之 5%為限)
	6.	自籌款	0	0	(申請單位自行籌備款項)
	申請補助經費(1~5 項)		1,720,000	1,800,000	總金額：3,520,000
計畫總經費(1~6 項)		1,720,000	1,800,000	總金額：3,520,000	

說明：

1. 本署以部份補助為原則，得指定不補助項目，不補助項目應為自籌款項，應自行核銷不得申請。
2. 非實驗性質之專案，若第一項費用編列金額超出比率，須於申請公文內向本署說明，俾利審查。
3. 補助專案經費編列自申請起經專案核准後，經費編列中各項費用單價與需求只可減少與下修。

專案主持人：  (簽名或蓋章)

日期：113.02.16

校長林奇宏

(請蓋上申請單位大小章)

專案成果績效自評表

(一) 學術面

項目 \ 目標達成程度			申請 預估數	期中 達成數	期末 達成數	結案後半年 達成率	備註 (說明未達成 原因或學術產 出發表名稱)
A 學術產 出及活 動	1. 國內投稿 (篇數)	(1)論文	0	0	0		
		(2)研討會論文	0	0	0		
	2. 國外投稿 (篇數)	(1)期刊論文	1	0	1		
		(2)國際研討會 論文發表	1	0	1		
	3. 報告 (篇數)	(1)技術報告	0	0	0		
		(2)研究報告	1	0	1		
	4. 專著 (本數)		0	0	0		
	5. 辦理學術 會議(場數)	(1)研討/說明 會	0	0	0		
		(2)成果發表會	0	0	0		
		(3)論壇	0	0	0		
	6. 研發改良 技術(項 數)	(1)已開發技術	0	0	0		
		(2)技術平台	0	0	0		
B 人才 培育	7. 研發人員 (人數)	(1)碩士	1	0	1		
		(2)博士	1	0	1		
	8. 研究團隊 (個數)	(1)跨領域團隊	0	0	0		
		(2)跨機構團隊	2	0	2		
		(3)形成研究中 心	0	0	0		
		(4)形成實驗室	0	0	0		
9. 其他指標 (請自行命名)		(請自填)					



(二) 產業面

項目 \ 目標達成程度			申請 預估數	期中 達成數	期末 達成數	結案後半年 達成率	備註 (說明未達成原因或專利、技術轉移相關詳細資料)
A 智慧財產權	1. 專利 (件數)	已核准	發明	0	0	0	
			新型/設計	0	0	0	
			合計	0	0	0	
		申請中	發明	0	0	0	
			新型/設計	1	0	0	正在申請中
			合計	0	0	0	
B 研發技術轉移	2. 先期技術 成果移轉	件數	0	0	0		
		授權金(仟元)	0	0	0		
		衍生利益金(仟元)	0	0	0		
	3. 技術移轉 (專利)	件數	0	0	0		
		授權金(仟元)	0	0	0		
		衍生利益金(仟元)	0	0	0		
	4. 技術移轉 (應用技術)	件數	0	0	0		
		授權金(仟元)	0	0	0		
		衍生利益金(仟元)	0	0	0		
	5. 可移轉 產業技術	(1) 技術(件數)	0	0	0		
		(2) 品種/系(件數)	0	0	0		
C 產學研合作	6. 促成合作研究	件數	0	0	0		
		金額(仟元)	0	0	0		
	7. 促成投資	件數	0	0	0		
		投資金額(仟元)	0	0	0		
	8. 促成取得 業界科專	件數	0	0	0		
		業界投資金額(仟元)	0	0	0		
9. 其他指標 (請自行命名)		(請自填)					

(三) 政策面

目標達成程度			申請預 估數	期中 達成數	期末 達成數	結案後半年 達成率	備註 (說明未達成原因 或其他詳細資料)
項目							
A 服務 便民	1. 技術服務	次數	0	0	0		
		收入(仟元)	0	0	0		
	2. 諮詢服務	次數	0	0	0		
		收入(仟元)	0	0	0		
B 政策 推動	3. 協助政府推動 (件數)	(1)政策	0	0	0		
		(2)法規	0	0	0		
C 技術 效益	4. 整治技術提升(%)		0	0	0		
	5. 整治成本降低(%)		0	0	0		
	6. 提升能源效率(%)		0	0	0		
7. 其他指標 (請自行命名)		(請自填)					



中文摘要

國內加油站數量快速成長，然而隨環保意識高漲，對於加油站地下儲油槽及管線滲漏所造成地下環境污染問題愈受重視。除了油品空氣逸散與洗車廢水排放外，加油站地下儲油槽及管線等設施可能因施工品質不佳、防蝕設計不良、或管理不當而發生破損銹蝕，使其中油品滲漏而污染地下環境。目前的儲槽滲漏監測主要仍以儲槽周圍監測井的測漏管定期監測，若能發展槽間或槽外表面的自動化監測系統，有助預防及儘早發現滲漏。因此，本次計畫旨在建立數位智慧數據決策系統與自行研發電磁波感測器，並實際應用於模場試驗，其中包括加油站與地下儲槽區。

本研究於兩年度內分階段研發建置基於時域反射 (time-domain reflectometry, TDR) 技術的儲槽管線污染滲漏與測漏管浮油技術。於第一年度完成儲槽管線滲漏之標準建置與分析方法以及自動化監測系統之架設，並持續運行監測系統至今超過一年且收錄到現地事件發生之異常資料，進一步驗證監測系統的穩定性及適用性；第一年度亦進行浮油監測技術之數值模擬及室內實驗，初步探討量測分析方法之可行性，再於第二年發展合適之監測策略：監測前期使用正規化局部互相關分析方法作為即早預警，當浮油層厚度增加時，使用浮油層厚度校正之走時分析方法進行定量量測。最後提出創新之頻率域全波形分析藉以精進量測之穩定性及準確性。透過自動化監測技術在儲槽與管線洩漏監測管理中協助儘早發現及定位污染物滲漏，藉由源頭污染防治，降低整體整治成本與提升整治成效，達到土壤與地下水污染預防的效果。



英文摘要

Petrol stations have grown rapidly in Taiwan, the issue of underground environmental pollution caused by the leakage from underground oil storage tanks and pipelines has attracted attentions from the rising awareness of environmental protection. Apart from the air escape of oil products and the discharge of wastewater, the underground oil storage tanks and pipelines of petrol stations may be damaged or rusted due to poor construction quality, poor anti-corrosion design, or improper management. All of these may lead to oil leakage into soil and groundwater environment. Current leakage monitoring of storage tanks is still based on regular monitoring of leak detection pipes in monitoring wells around the storage tanks. If an automatic monitoring system between tanks or on the outer surface of the tanks is developed, leak detection can be prevented as early detection is made possible. This project has established and applied a leak detection monitoring technique for storage tank, pipeline, and leak detection pipe of petrol station, which is based on the time-domain reflectometry (TDR) technique and self-developed electromagnetic wave sensors in a two-year phase. The automatic monitoring system and the standard application of storage tank and pipeline leak detection monitoring are built up in the model field in the first year. In the same year, numerical simulation and laboratory-scale experiments of floating oil monitoring in leak detection pipe progressed to evaluate feasibility and possibility. The monitoring strategy of partial normalized cross-correlation analysis and travel time calibration analysis was developed in the second year. For enhancement, the innovative full waveform frequency domain analysis is proposed to improve stability and accuracy. Through this real-time leakage monitoring technology, early detection of pollution leakage in storage tank, pipeline, and leak detection pipe is highly advantageous towards petrol station management. By counteracting from source pollution prevention and control, overall remediation cost can be reduced while enhancing its effectiveness, which ultimately achieving efficient soil and



groundwater pollution prevention.



目錄

目錄.....	1
第一章 研究動機與目的	4
第二章 計畫背景探討	6
2.1 國內外相關執行情形與法令規範	6
2.1.1 國外相關執行情形與法令規範	6
2.1.2 國內相關執行情形與法令規範	8
2.1.3 既有浮油量測設備.....	10
2.2 前期相關研究成果與延伸應用	11
2.2.1 電磁導波時域反射法(TDR)監測技術之前瞻性.....	11
2.2.2 儲槽管線之污染滲漏監測.....	13
2.3 模場試驗背景說明	18
第三章 研究方法與過程	24
3.1 研究方法.....	24
3.1.1 TDR 儲槽管線污染滲漏之標準建置與分析方法 .	25
3.1.2 TDR 測漏管浮油自動偵測與量測方法	25
3.2 模場試驗預期成效評估	30
3.3 研究流程.....	31



第四章 結果與討論	32
4.1 TDR 儲槽管線污染滲漏之標準建置與分析方法	32
4.1.1 環境建置	32
4.1.2 軟硬體建置	34
4.1.3 分析方法	36
4.2 滲漏模場試驗	39
4.2.1 第一年模場試驗	42
4.2.2 測試成果	43
4.2.3 執行階段遭遇之困難與解決方法	50
4.3 浮油監測技術分析方法	51
4.3.1 室內物理實驗	51
4.3.2 室內試驗成果	54
4.4 第二年模場試驗	70
4.4.1 模場場址勘查	70
4.4.2 浮油監測模場試驗	82
4.4.3 執行階段遭遇之困難與解決方法	85
第五章 結論	86
參考文獻	90



附件一 研究進度及預期完成之工作項目(甘特圖)	93
-------------------------------	----



第一章 研究動機與目的

自從經濟部能源委員會(現能源署)於民國 76 年頒訂「加油站設置管理規則」，並開放民營加油站後，國內加油站數量即快速成長，依據能源署資料顯示，至民國 111 年 05 月核發經營許可執照之加油站已達 2,483 站。一般在加油站內可能產生對環境之污染，除了油品空氣逸散(如加油槍)與洗車廢水排放外，加油站地下儲油槽及管線等設施，可能因為施工品質不佳、防蝕設計不良、未設置防蝕設施及加油站管理不當等因素而發生破損銹蝕，使得其貯放於其中的油品滲漏，而造成地下環境的污染，直至長時間污染的累積，最後造成更嚴重工安意外。

自民國 76 至 77 年間政府開放民營加油站，國內加油站數量快速成長，但隨著國內環保意識逐漸高漲，對於加油站地下儲油槽及管線等滲所造成地下環境污染問題愈受重視，有鑑於此，行政院環境部(以下簡稱環境部)於 86 年起陸續公告加油站污染防治相關法規，主要目的為落實加油站防漏及監測設備之設置，與建立監測申報與管理系統，期能防範於未然。至今環境部幾乎已完成所有加站調查之污染潛勢調查，超過 250 座以上加油站超過土壤及地下水污染管制標準，環境部亦已請地方主管機關命加油站業者限期採取適當措施以改善污染情形，並依其改善工作執行狀況。大約 1 成左右加油站有污染事實，而且加油站遍布全台，農地與食品安全有連帶關係，這些與民眾息息相關的地點。

自「土壤及地下水污染整治基金管理委員會」成立以來，積極推動污染源稽查管制，污染區改善整治，並建立相關之監測制度。相較於工業儲槽與管線滲漏後之調查、土壤與地下水監測、整治改善，若能更積極推動儲槽與管線之防漏與滲漏監測技術，應可將防治工作更往源頭推動，達到土壤與地下水污染預防的效果。如何透過智慧即時監測技術監測儲槽與管



線洩漏刻不容緩。

而國內目前僅針對新設之地下儲槽系統，若採用鋼材建造則須包覆不導電物及陰極防蝕，但卻未規範監測方式之適用性分級，監測方式都採被動方式而非即時監測。目前的儲槽滲漏監測方法主要包括夾層監測(e.g.槽間監測)、儲槽內部檢測(e.g.密閉測試)與儲槽外部監測(e.g.土壤氣體監測、地下水監測)(EPA, 2020)。儲槽外部的土壤氣體或地下水監測較不容易有全面性的覆蓋，且偵測到的時機通常已經造成土壤或地下水一定程度的污染；若能定期進行儲槽內部檢測或進行夾層監測，可以達到更早期的預警效果。

台灣目前的儲槽滲漏監測主要仍以儲槽周圍的測漏管(監測井)定期監測，若能發展槽間或槽外表面的自動化監測系統，將有助於預防滲漏對於環境的影響；另一方面，相較於集中的儲槽，網絡分布管線的滲漏監測，其難度更高。因此，發展可因地制宜、經濟有效的儲槽與管線滲漏監測技術，雖然極具挑戰性，對於土壤與地下水污染的防治有很大的意義。

為了克服滲漏監測的問題，110 年本團隊研究成果來提出了基於電磁波時域反射法(Time Domain Reflectometry, 簡稱 TDR)的新滲漏監測方法，完成 TDR 技術的適用性獲得實驗室與一系列現地測試實驗之驗證。然而，工業液體如油品或其他非水相液體，其介電度甚低，工業廢水的電學性質也比較複雜，110 年研究成果已於實驗室克服相關問題，因此本次計畫將 TDR 滲漏監測技術根據不同的監測環境需求，於兩個試驗模場進行研究與調適。



第二章 計畫背景探討

2.1 國內外相關執行情形與法令規範

2.1.1 國外相關執行情形與法令規範

根據美國國家環境保護局(EPA, 2020)，現有地下儲槽 (Underground Storage Tanks, UST)滲漏監測方式包括：

(一)二次阻隔層和間隙偵測(Secondary containment and interstitial monitoring)

在儲槽和周遭環境間設置阻絕層:混凝土窖、襯砌或是雙層儲槽的外層，自儲槽滲漏出的污染物被引至位於儲槽和外層障壁間之監測設施。由測桿 (Dip Stick) 至複雜的自動氣液體感測器形成監測裝置。

(二) 儲槽自動計測系統 (Automatic tank gauging, ATG)

利用固定裝置於槽中的感測裝置，此裝置連接至電子控制設備，可量測槽中之液面高和溫度。在槽體密閉測試時，在幾小時中油品會注入或移出儲槽，此裝置可自動計算槽中物之體積變化，從而得知是否有滲漏。

(三) 土壤氣體監測 (Vapor monitoring)

土壤氣體監測可以量測在儲槽與管線周遭土壤孔隙中物體蒸氣的濃度，以監測是否有滲漏。此法需設置監測井。蒸氣監測可用人工取樣設備定期採樣或用自動監測裝置連續量測。其中土壤氣體監測須滿足以下條件：

1. 回填材料孔隙大，足以讓氣體由滲漏處擴散至開挖區域
2. 儲存物質之揮發濃度需足以產生致使監測儀器可量測之氣體濃度
3. 監測儀器不致陰雨或溼度大而失效



4. 開挖區域的污染背景濃度需不致於影響測漏方法的進行
5. 監測系統需足以監測任何顯著增加的濃度
6. 有足夠測點以確定滲漏來自何座儲槽和運輸管

(四) 地下水監測井 (Groundwater monitoring)

地下水監測設備感測浮在地下水位上的游離物品存在。此法必須要靠設置在儲槽或沿管線鄰近適當位置的監測井。定期人工取樣或用自動感測裝置確認是否有滲漏物品到達地下水位。只在地下水位深度在 20 英尺內有效，否則無法及時偵測到滲漏。

(五) 儲槽槽體密閉測試和存量控制

這個方式由兩種方法組成。儲槽槽體密閉性測試需由測試業者定期在儲槽中暫時裝設特殊的設備以測試槽體之密閉性。槽體密閉性測試必須伴隨存量控制。存量控制式即時的統計系統，用以偵測滲漏。存量控制必須靠每日精確量測槽內物品體積和每月的計算以證明儲槽沒有滲漏。

國外環保先進國家均規範貯存設施需設置計量設施，朝向「源頭監控」管制；貯存設施及管線有適當之防腐蝕措施；防溢堤建造形式、材質、高度、容量、警報、排水等規範國內外法規大致原則相同，主要著重防腐蝕、防溢功能。加拿大針對地下儲槽系統之監測規範方面，新設之地下儲槽系統均為雙層槽得採用槽間監測，地下管線依設置形式應進行安裝後、運作期間之滲漏檢測，以及定期性設漏檢查。澳洲政府規章要求，地下儲槽周邊必須設置儲槽坑監測井 (Tank pit observation wells)，且設置時需符合 1 個儲槽至少應單獨設置 1 個儲槽坑，有 2 個(含)以上地下儲槽則應至少設置 2 口儲槽坑監測井。此外，儲槽坑監測井設計



及安裝應能夠確認儲槽坑內油氣及油品自由相，且至少應低於儲槽底部 15 公分等規定，也針對吸取式或壓力式管線均有設置規範。澳洲政府針對各項防污設施規範有定期檢查之頻率，包括壓力管線洩漏檢測、陰極防蝕系統檢查，以及儲槽及管線設備的完整性測試等要求。英國洩漏監測系統在前端洩漏監測採用雙層體設備壓力(真空)洩漏監測、各式感知器洩漏監測而後端洩漏監測則採用在儲槽外採取土壤氣體及地下水油品的監測與壓力管線洩漏監測及機械式管線測漏器，僅限於設置加油機系統的雙層管中來量測壓力是否洩漏。

2.1.2 國內相關執行情形與法令規範

目前國內最新法令規定(環境部，2022)，新設之地下儲槽系統應設置下列防止污染地下水體之設施:儲槽加註口處裝設具有防止濺溢功能之設施。而地下儲槽系統依下列方法之一，採取防止腐蝕或物質滲漏之材質或措施:

(一) 使用非腐蝕材料建造

(二) 使用下列方法之一保護鋼材:

1. 包覆以適當之不導電物質
2. 裝設陰極保護系統
3. 裝設加壓電流系統

(三) 使用二次阻隔層 (Secondary containment) 保護

在監測系統方面，依據地下儲槽防污設施及監測設備的法規要求新設之地下儲槽系統必須設置符合下列規範之 監測設備及監測措施:

1. 儲槽每三年一次及壓力式或吸取式輸送設備每年一次之密閉測試 (Tank tightness test)



2. 每月一次之自動儲槽量計及下列監測方式之一：土壤氣體監測、地下水監測、槽間監測或其他經中央主管機關認可之測漏方式

目前國內環保主管機關並未頒布對監測方式的詳細規範，也未針對設備的適用性分級。監測方式都採被動方式而非即時監測。國內目前僅針對新設之地下儲槽系統，若採用鋼材建造則須包覆不導電物及陰極防蝕，但卻未規範監測方式之適用性分級。監測方式都採被動方式而非即時監測。目前的儲槽滲漏監測方法主要包括夾層監測(e.g.,槽間監測)、儲槽內部檢測(e.g.,密閉測試)與儲槽外部監測(e.g.,土壤氣體監測、地下水監測)(EPA, 2020)。儲槽外部的土壤氣體或地下水監測較不容易有全面性的覆蓋，且偵測到的時機通常已經造成土壤或地下水一定程度的污染；若能定期進行儲槽內部檢測或進行夾層監測，可以達到更早期的預警效果。

由於全球資源有限，地下儲槽系統之營運將直接影響人類生活所需土壤與地下水環，如何讓地下儲槽系統之經營與管理到依互存，降低對生存環境之風險，係為各國管理與污染預防之最高理念。探究各國地下儲槽系統之污染預防機制，管理對策係採用污染前端之阻絕、污染後端之監控等方案，如何監控便是核心技術。彙整各國污染預防與監測制度資訊，顯示先進國家在地下儲槽系統之監測管理方面強調在「污染前端阻絕」之管理政策。此外，各國研訂地下儲槽系統之監測規定方面，均考量國情，並以逐步淘汰不適用之監測設施與監測方式，酌以法令規範地下儲槽系統相關設施之更新時限，或以地下儲槽設置之站齡為基礎，逐漸將監測效果不彰之監測設予以淘汰，並朝向新穎之地下儲槽系統建造技術，以及「污染前端阻絕」概念之監測法，提供民眾擁有最高之土水生活品質。所以發展適合台灣之儲槽管線滲漏監測技術是非常重要的。



台灣目前的儲槽滲漏監測主要仍以儲槽周圍的測漏管(監測井)定期監測，若能發展槽間或槽外表面的自動化監測系統，將有助於預防滲漏對於環境的影響；另一方面，相較於集中的儲槽，網絡分布管線的滲漏監測，其難度更高。因此，發展可因地制宜、經濟有效的儲槽與管線滲漏監測技術，雖然極具挑戰性，對於土壤與地下水污染的防治有很大的意義。

2.1.3 既有浮油量測設備

目前市面上既有的浮油量測設備有以下幾種：



圖 1 (左) 水面浮油偵測器(取自:聯宙科技股份有限公司)、(中) 靈敏行石化油洩漏警報器(取自:台禹監測科技股份有限公司)、(右) Solinst 122 油水介面計(取自:慧技科學有限公司)

(一) 水面浮油偵測器

利用紫外線螢光法量測水面浮油揮發氣體，用以偵測水面是否有浮油存在；靈敏度最高可偵測到大於 $1 \mu\text{m}$ 的浮油存在，但無法量測浮油層厚度，且儀器距離水面不可超過十公尺以上。

(二) 靈敏型石化油洩漏警報器

利用特殊的感應元件在接觸到石化油品後電阻值增加，在增加至一定程度之後形成開路以觸發警報；敏感度最高可偵測到 0.1mm



的浮油，但無法量測浮油層厚度，且在接觸到石化油品觸發警報後須將感應元件拿出放置一至三天才能回復初始狀態繼續監測。

(三) Solinst 122 油/水介面計

利用紅外光線折射量測空氣-油介面，爾後使用水的導電性量測油-水介面，工作原理類似尺式水位計，當探頭抵達介面時觸發蜂鳴器，將兩介面深度相減得到浮油層厚度，精度可達 1mm。

上述幾項設備利用不同性質量測浮油，雖然已經具有相當高的靈敏度及精度，但仍無法利用自動化持續監測浮油層的變化。若可以達到持續監測浮油層變化的效果，不僅能夠用於油品滲漏的污染防治，更可以觀察以污染場址之環境污染改善情形。TDR 具有監測訊號收錄從控制端到監測端的傳輸線特性，若中間有任何問題，皆可從纜線雷達訊號偵測研判，因此，具有耐久性與自我診斷功能，且能兼具管線與儲槽滲漏監測功能，達到一機多功(multi-function)與多工(multi-channel)的效益。

2.2 前期相關研究成果與延伸應用

2.2.1 電磁導波時域反射法(TDR)監測技術之前瞻性

時域反射儀(time-domain reflectometry, TDR)一般由階躍脈衝電壓產生器(step generator)、訊號採樣器(sampler)與示波器(oscilloscope)組成，TDR之基本原理與雷達相同，由階躍脈衝電壓產生器發射一電磁脈衝進入同軸電纜(coaxial cable)及感測導波器(sensing waveguide)，並由示波器記錄由於感測導波器內阻抗不連續所造成之反射，如圖 2 所示。電磁波之傳輸系統包括延長線(同軸纜線)與感測導波器，導波器可視為同軸纜線之延伸，同時做為訊號傳輸與感測元件，導波器之設計主要在將所需監測之環境變化轉換為感測導波器之傳輸阻抗變化，如此可藉由反射



訊號得知環境變化參數。

計畫團隊過去二十年在TDR量測技術有深入的研究與應用發展，除了TDR量測技術的基礎學理發展(Lin et al., 2007, 2015; Lin and Tang, 2007)，基於TDR技術成功發展了許多應用於土木、水利與環境的感應導波器與監測方法。林志平等(2020)利用原為延長線之同軸纜線，將其當成一整段連續型感測器進行全分布式感應監測，可應用於地滑、水位與沖淤之高時空解析度監測。此類全分布式TDR監測技術，藉由傳輸線的幾何斷面變化，或沿傳輸線將電磁波外洩感應外界介電度的變化，在全段傳輸線觀測因前述二種原因造成的反射訊號。全分布式TDR感應於地滑監測應用示意圖如圖 3 (a)所示，將同軸纜線埋設於有滑動現象的岩土邊坡中作為地體變形感測器，當地層相對錯動而改變同軸纜線幾何形狀時，TDR儀器所發出脈衝電磁波將在同軸纜線變形處發生訊號反射尖峰 (reflection spike)，並透過走時分析技術來定位阻抗不連續的位置，即滑動面深度。Wang et al. (2019) 基於此法研發了沖刷監測纜，其應用情景如圖 3 (b)所示，透過特殊鋼鍵股與PVC絕緣材結合為一創新沖刷監測纜，利用絕緣鋼鍵股與非絕緣鋼鍵股形成導波器的兩極，再以TDR儀器定時量測其波形，判識土水界面變化來推估沖刷深度。

計畫團隊前期110年計畫『電磁波時域反射法之儲槽管線滲漏監測技術評估與發展』，其中提出之TDR滲漏監測技術滲漏監測技術透過一系列室內實驗與研發之量測模擬模式，驗證分布式TDR監測技術於滲漏監測之可行性及其便利性。此類應用相較於其他既有監測技術而言，具高時空解析度且空間連續分佈之優勢，亦易於自動化量測與分析，為一高經濟效益之監測技術。

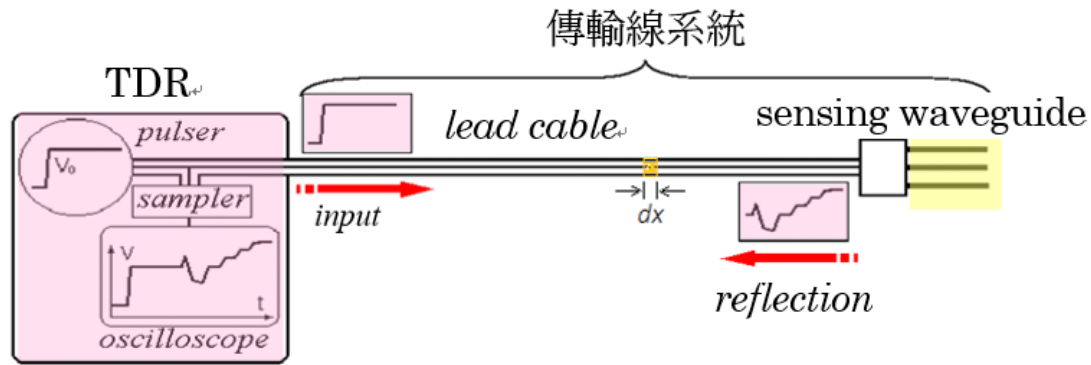


圖 2 TDR 量測設備的組成與量測架構

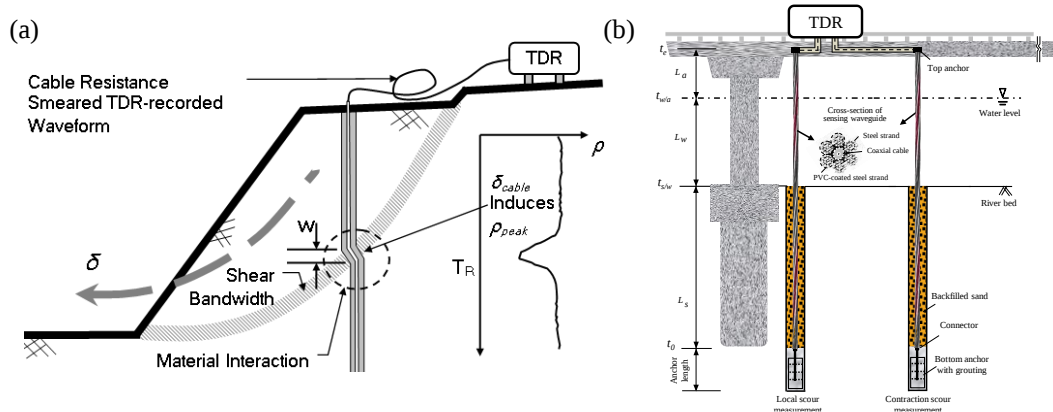


圖 3 (a) TDR 地滑監測示意圖; (b) TDR 沖刷監測纜設置示意圖

2.2.2 儲槽管線之污染滲漏監測

計畫團隊於前期計畫中蒐集了近年來基於電磁波時域反射法(TDR)的新型滲漏監測方法(Aghda et al., 2018; Cataldo et al., 2012a, 2012b, 2014, 2015, 2017; Woo et al., 2018)，TDR技術的適用性已獲得實驗室與一系列現地測試實驗之驗證。根據 Cataldo et al. (2015)的報告，此類技術已經被歐洲最大的水操作公司 Acquedotto Pugliese S.p.A. 實際安裝於10 km 的地下供水管線上。TDR 滲漏監測技術的基本原理主要是利用漏水造成感應纜線對應位置電學性質的改變(主要是介電度，dielectric constant)，造成傳輸線在漏水處因電學阻抗改變而產生反射訊號，如同沿著感應纜線的漏水雷達，其原理示意圖如圖 4 所示。目前TDR滲漏監測技術的發展目的主要在於供水管線的滲漏監測，水有最高的介電度80，因此在



漏水處造成土壤的濕潤與整體介電度的明顯改變。然而，工業液體如油品或其他非水相液體，其介電度甚低，工業廢水的電學性質也比較複雜，因此前期計畫進一步探討TDR 滲漏監測技術是否可適用在不同的監測環境。

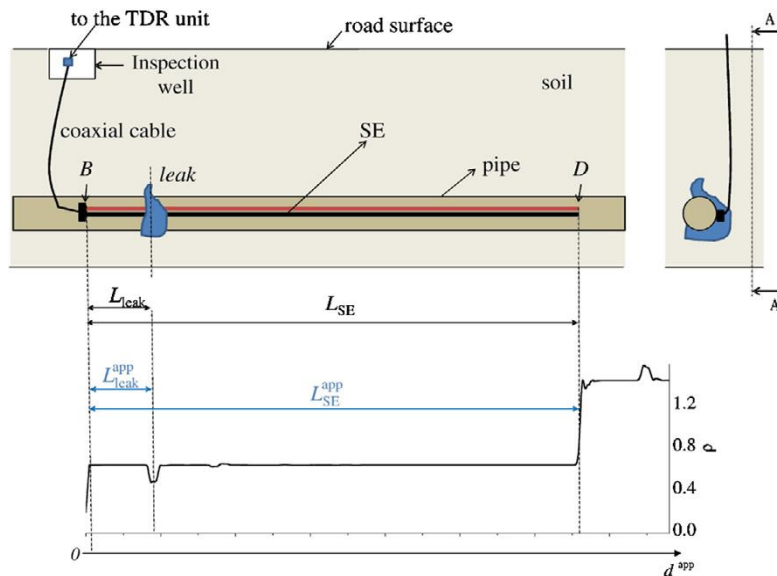


圖 4 TDR 管線滲漏監測原理與其對應之量測波形示意，因滲漏造成左側一下凹的反射訊號，其中 L_{leak} 為滲漏位置距離， L_{SE} 為感應纜線的總長；下圖橫坐標為時間，亦可換算為視傳輸距離 L_{app}
(取自 Cataldo et al., 2014)

計畫團隊於 110 年『電磁波時域反射法之儲槽管線滲漏監測技術評估與發展』前期計畫中，應用 TDR 技術於儲槽與管線之污染滲漏監測中，探討了感應纜線型態、介質差異(水 vs. 有機污染物)、環境變化、量測距離限制等，冀以優化 TDR 污染滲漏監測方法並驗證其實務可行性。

前期計畫中探討感應纜線型態時，傳輸線依其兩極導體的配置可以有不同的形態，例如同軸纜線、平行雙導體、平行三導體等，感應纜線的型態不同，其量測敏感度與受環境電磁雜訊的影響不同。當導波器之



導體直徑與間距越大，絕緣材厚度越小，感應纜線監測品質愈佳，監測效果亦佳，其中以附有吊線之 P3-500 纜線為最佳之感應纜線。

至於目標洩漏物之介電性質差異，前期計畫探討 TDR 儲槽管線滲漏監測對於水和汽油二類洩漏物質的敏感度。因水具較高介電度(80)，在漏水處造成土壤環境的濕潤與整體介電度的明顯改變。然對於有機污染物（如汽油），其介電度甚低（約略 2-3），當其滲漏發生時與周圍土壤環境介電度相近，利用附有吊線之 P3-500 纜線作為感測纜線，在搭配優化 TDR 污染滲漏監測方法，仍能有效監測汽油類污染物滲漏之發生。

前期計畫亦針對現地回填環境差異探討該系統之敏感度，埋設地下之感應纜線可能受到受到回填土體之孔隙率不同，而形成監測滲漏效果之差異。油品一般具特殊介面，當滲入七厘石環境中，部分沿孔隙滲漏，部分會殘留於七厘石表面較長時間，如同手觸碰到油品時清除不易，當殘留於七厘石之汽油量較細砂環境中之殘留量多時，導致在七厘石環境中監測汽油滲漏效果較佳，如圖 5 所示。由此可見，因滲漏物可蓄積或滯留於孔隙中，在相同滲漏量下，孔隙率大之土壤環境，可讓感應纜線測得較多滲漏物，能更有效監測滲漏之發生。

在評估該系統量測距離限制時，前期計畫藉由數值模擬，輔以室內試驗標定纜線阻抗參數，在有限空間中嘗試評估現地實際狀況。圖 6 為細砂環境中汽油滲漏監測之數值模擬結果，當距離 100 公尺時，利用數值模擬尚能分析滲漏位置，但在實際情況下，波形可能會受電磁波雜訊影響，因此當反射係數差值($\Delta\rho$)變化太小，即無法有效判斷滲漏實際位置，又因感應元件會隨距離增加造成空間解析度與感應強度降低，前期



計畫根據此數值模擬結果，建議用以監測汽油滲漏之距離限制約略為 50 公尺，實際數字仍需以現地狀況為準。

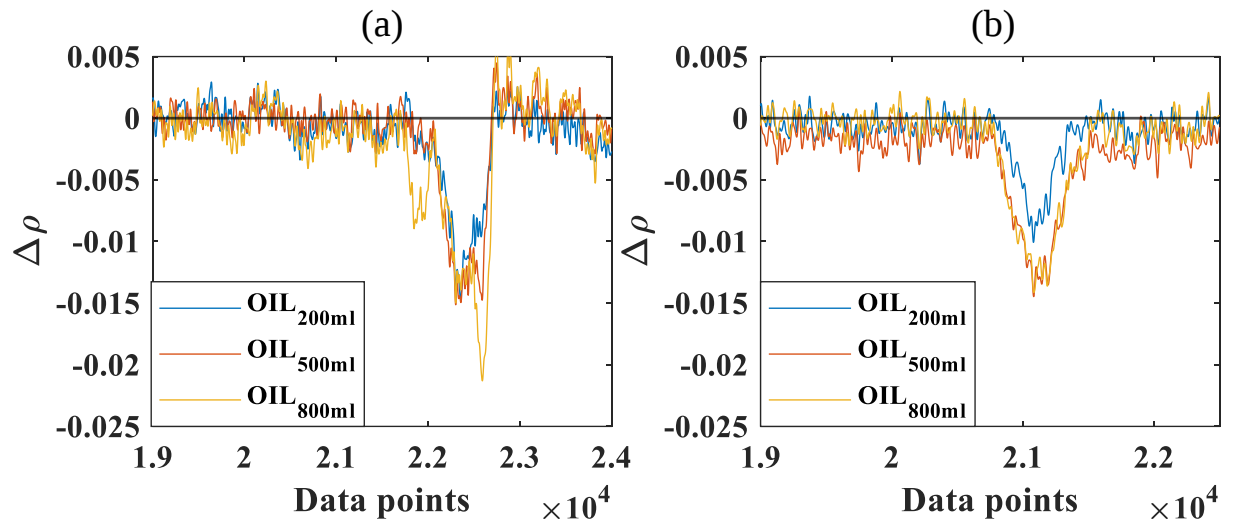


圖 5 附有吊線之 P3-500 纜線不同環境中汽油滲漏波形差異分析

(a) 七厘石環境；(b) 細砂環境

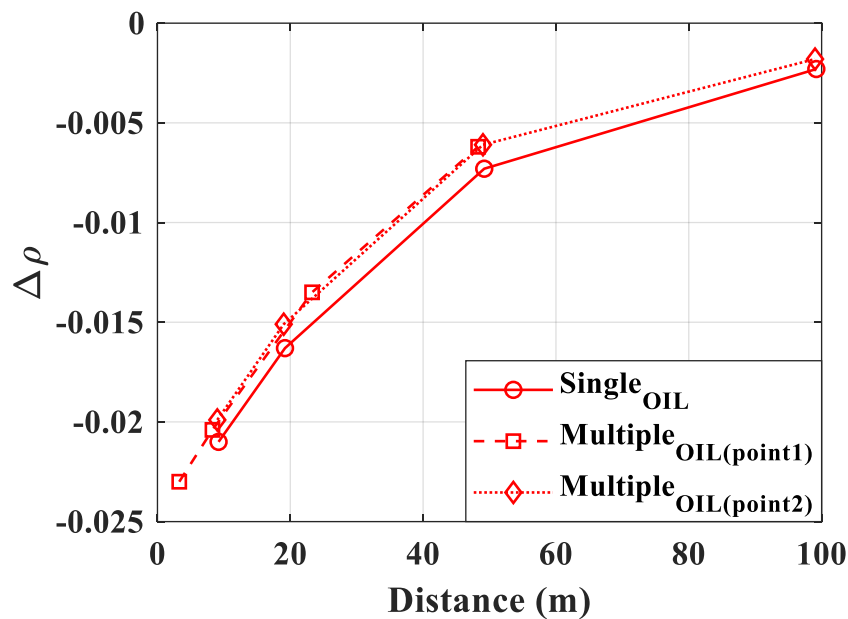


圖 6 模擬汽油在細砂中單點與多點滲漏比較



綜合以上說明，前期計畫驗證 TDR 技術應用於儲槽與管線之污染滲漏監測之可行性，透過一系列室內實驗評估既有儀器與感應元件的適用性與限制，針對適用現地監測之最佳配置與影響因子，可歸納成以下幾點：

1. TDR 波傳模擬初步以室內實驗標定纜線參數，模擬更長距離之滲漏情景，發現附有吊線之 P3-500 纜線對於自來水和汽油滲漏監測距離，初步發現分別為 100 米以上和 50 米以內。
2. TDR 訊號分析中，差異分析法 (Difference analysis method) 可有效監測汽油滲漏發生之位置，而走時分析法 (Travel time analysis method) 可評估感應元件之靈敏度。
3. 室內試驗探討感應元件靈敏度與纜線阻抗影響時，因靈敏度與纜線阻抗有關，亦受感應元件品質影響，當導波器之電極直徑越大，絕緣材厚度越小，導波器間距越大，感應元件品質越好，則監測效果越佳，其中最佳之感應元件為附有吊線之 P3-500 纜線。
4. 在含水率約 10 %之環境下，汽油滲漏監測效果相較於無含水率環境時不易監測，因水的介電度大影響甚鉅，當現地受雨水影響而造成土壤含水率變化下，TDR 滲漏監測技術面臨之不確定性仍待評估。
5. 當回填之土壤孔隙越大，滲漏監測效果越佳。因滲漏物可蓄積停留於孔隙中，較多滲漏物使得大幅影響背景有效介電性質，感應纜線更容易測得其變化。
6. 多點滲漏監測可行性評估中，發現當滲漏點距離監測位置越



遠，其效果將遞減，訊號強度與空間解析度隨距離增加而降低。其中若自來水導電度高，則滲漏點受距離之影響較大，然汽油相對不導電，滲漏位置距離之遠近對其影響不大。

綜合上述研究進展，計畫團隊在污染物滲漏監測技術發展較為成熟，可就前期計畫結果之基礎上，擴大監測應用尺度並進一步進行模場應用研究，延伸探討孔隙率影響、TDR訊號對油品滲漏飽和度、利用理論公式搭配實驗數據標定感應纜線之敏感度與電學參數等。

2.3 模場試驗背景說明

為了完整執行本次模場計畫，本團隊主持人與相關協同主持人根據產學合作精神與智慧監測設備的適用性、可發展性、真實可以描繪出洩漏場景性，選擇了兩個試驗模場：一為南投昱佑加油站，原因是目前為暫停使用場址，方便進行相關研究設施的搭建與建置且推測仍有汙染潛勢；二為陸昌化工幼獅廠，原因是目前進行管線與地下槽體整建工程，於核心製程區域進行溝渠、管線與地下槽體更新，而且現場廢液濃度高且有腐蝕性，本計畫用來模擬新設溝渠與槽體，智慧型洩漏系統的建置，進行長時間的監測，目的是進行洩漏預警系統建置，是非常難能可貴的經驗與廠址。

一、昱佑加油站背景說明

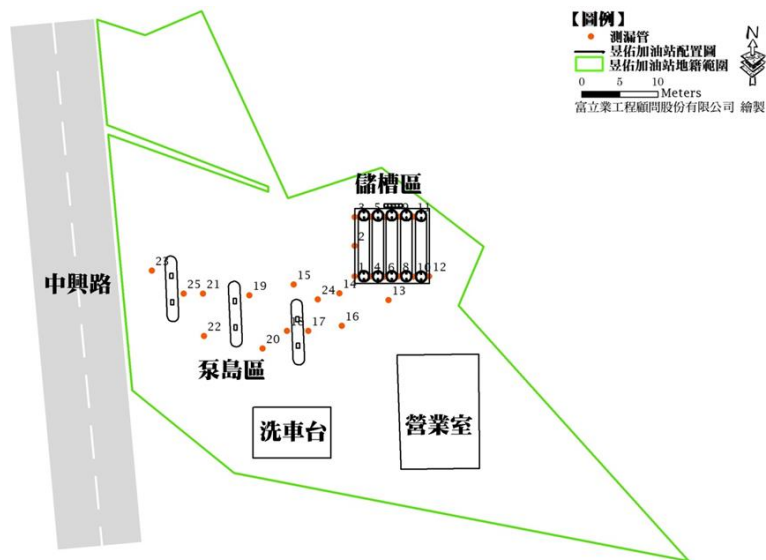
本場址初始之土地所有人為內興加油站股份有限公司，該公司設立於民國77年，民國78年更名為內轆加油站，直至民國93年由盛豐加油站法拍取得該筆土地，同年盛豐加油站變更為「鑫豐加油站股份有限公司」，因此，土地所有人即轉移至鑫豐加油站股份有限公司，營運期間於民國97年變更名稱為「昱佑加油站股份有限公司」，直至101年因天災導



致站內加油站機組嚴重受損，昱佑加油站申請停止營運，目前昱佑加油站土地於102年6月經法拍由方姓及蔡姓人士取得為土地所有人。相關位置如圖 7與圖 8所示。



圖 7 昱佑加油站位置圖



資料來源:106 年南投縣土壤及地下水汙染調查及查證工作計畫

圖 8 昱佑加油站平面配置圖



本場址於民國 101 年 11 月 29 日公告列管後至今未有執行污染改善作業，雖然歷年區域周邊民井未發現有相關污染項目，但由 108 年度場址監測井及簡易井檢測結果確認場址內地下水仍具有污染潛勢；簡易井監測結果顯示可能局限於場址內未有擴散至區外疑慮。監測井監測結果顯示原污染物苯已降低至管制標準以下；但總石油碳氫化合物上升至管制標準之上情形。

場址雖無改善作業執行，但環保局積極要求地主進行應變必要措施；針對污染物阻絕進行相關工作；在 109 年 6 月地主已抽除油槽內之殘油，阻絕避免油槽內之殘油可能持續洩漏情形。為瞭解油槽抽除後對於地下水污染是否有影響故規劃針對場址既有一口標準監測井及兩口簡易井進行地下水採樣檢測作業，地下水檢測項目為一般項目、BTEX、MTBE 及總石油碳氫化合物等項目。



依據檢測結果公告污染物總石油化合物及苯雖有檢出但均低於污染管制標準以下，另由監測井定期巡查結果，過去監測井抽取貝勒管中約有1~2 cm浮油情形，在109年巡查期間以貝勒管拉取井中水樣雖仍有些許油味但浮油情形以降低許多。由檢測結果顯示場址地下水污染情形可能侷限於場址內未擴散至區外。

場址土壤檢測結果如表 1所示，檢測結果顯示在油槽區附近S01、S02及監測井附近S03分別檢出總石油碳氫化合物6620mg/kg、2550 mg/kg及7430mg/kg超過土壤污染管制標準(1000 mg/kg)情形與過去調查結果相似；顯示土壤污染範圍侷限在油槽區東南側及靠近監測井之加油泵島處附近。整體污染深度約在地表下2~4m處位置，依據監測井M00108



巡查紀錄；該處地下水位置約於2~4m左右相符，由檢測出高濃度位置介於油槽區及泵島區中間，其污染形式可能為油槽連接加油泵島管線洩漏導致場址受油污污染。

表 1 土壤檢測結果

分析項目	土壤污染管制標準	單位	S01		S02		S03		S04		S05	
			2.0~2.5 m		3.5~4.0 m		3.5~4.0 m		2.0~2.5 m		3.5~4.0 m	
			X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y
			218683	2646796	218709	2646797	218701	2646802	218683	2646796	218692	2646792
氯乙烯	10	mg/kg	<2.50		<0.50		<0.50		ND		ND	
反-1,2-二氯乙烯	50	mg/kg	<2.50		<0.50		<0.50		ND		ND	
順-1,2-二氯乙烯	7	mg/kg	<2.50		<0.50		<0.50		ND		ND	
氯仿(三氯甲烷)	100	mg/kg	<2.50		<0.50		<0.50		ND		ND	
四氯化碳(四氯甲烷)	5	mg/kg	<2.50		<0.50		<0.50		ND		ND	
1,2-二氯乙烷	8	mg/kg	<2.50		<0.50		<0.50		ND		ND	
苯	5	mg/kg	12.7		<0.50		<0.50		ND		ND	
三氯乙烯	60	mg/kg	<2.50		<0.50		<0.50		ND		ND	
1,2-二氯丙烷	0.5	mg/kg	<2.50		<0.50		<0.50		ND		ND	
甲苯	500	mg/kg	151		<0.50(0.49)		0.66		ND		ND	
四氯乙烯	10	mg/kg	<2.50		<0.50		<0.50		ND		ND	
乙苯	250	mg/kg	260		<0.50(0.36)		<0.50		ND		ND	
二甲苯	500	mg/kg	1070		<1.50		<1.50(0.98)		ND		ND	
1,3-二氯苯	100	mg/kg	<2.50		<0.50		<0.50		ND		ND	
1,2-二氯苯	100	mg/kg	<2.50		<0.50		<0.50		ND		ND	
總石油碳氫化合物(C10~C40)	—	mg/kg	589		2220		7110		▲21.8		77.1	
總石油碳氫化合物(C6~C9)	—	mg/kg	6030		327		317		ND		▲2.2	
總石油碳氫化合物(C6~C40)	1000	mg/kg	6620		2550		7430		▲23.7		79.3	

由場址土壤及地下水檢測結果顯示，場址土壤污染範圍仍侷限在油槽與加油泵島之間並無在擴大之情形，地下水檢測結果也顯示無擴散至區外情形，未來場址污染改善可能僅需針對油槽與監測井附近加油泵島範圍約510 m²來進行相關改善作業。

二、陸昌化工背景說明

為了增加本模場試驗之適用性與實用性，規劃了第二個模場試驗場，第二個試驗場為陸昌化工幼獅廠。本場址規劃導入滲漏情境以完整描繪出本智慧型監測系統之完整監測模式。本場址因行政院環境部執行「高污染潛勢事業土壤及地下水調查與預防管理計畫」，辦理土壤及地下水採樣檢測作業，發現本場址土壤及地下水遭受污染，土壤重金屬污染

污染來源研判

優先執行阻絕

土壤 (0~0.5m)

地表蓄積製程原料粉塵，容易因地表逕流而入滲至地表下

最高超管項目：銅 (33倍)
最高超管項目：鉍 (46倍)

地下水

受地下潛水收集滯留所影響

804 B00550

初反應區

原料貯存區

物料倉庫

錳 (9.1倍)
污泥區

804

土壤 (0.5~1m)

受地表污泥影響，恐有地表裂縫滲入

原料區

地下水

此區域監測背景點位，重金屬超過管制標準研判與SS是否過高有關，可再行試驗確認。

廢料污泥區

製法PG廢料

805 B00655

廢水處理區

土壤 (0~0.5m)

屬場址背景點位，但土壤仍有受管線及陰井影響

最高超管項目：鉍 (58倍)

土壤 (0~0.7m)

研判為鄰近排溝影響，建議進行細密調查

805

硫酸鉍精製區

805 B00655

最高超管項目：鉍 (7.5倍)

808

最高超管項目：鉍 (1.6倍)

工務室

1號CS製造區

圖例

● 廢棄化工(工十)廢料，土壤調查(PF)

● 廢棄化工(工十)廢料，土壤調查(PF)

● 廢棄物堆積

● 地下水潛水貯存區

● 地表中水貯存區

0275.5 11 16.5 Meters

臺中區工程顧問股份有限公司 繪圖

■ 場內既設井分別為上下地下水污染濃度較高為游井，已接近場址邊界

■ 土壤污染物以銅、鉍倍數較高，因潛勢進行補充調查，污染範圍及深

■ 優先針對地下廢水污染阻絕，將進行並設置抽水井，避免

圖 10 陸昌化工現場汙染訊息示意圖



第三章 研究方法與過程

3.1 研究方法

本研究期望透過模場試驗，藉參考前期室內試驗成果，針對『TDR 儲槽管線污染滲漏監測技術』，於第一年擇定模場場址進行初步模場現地應用與評估。本研究亦於第一年度同步發展『TDR 測漏管浮油自動偵測與量測技術』，透過室內試驗評估其實際可行性，並於第二年度研發其自動化分析方法，於擇定場址後延伸探討其現地適用性。相關研究方法進一步說明如下：



3.1.1 TDR 儲槽管線污染滲漏之標準建置與分析方法

計畫團隊應用 TDR 技術在儲槽與管線之污染滲漏監測前期研究中，主要發現感應纜線型態與周圍土壤環境種類對滲漏監測具有一定影響。前者在監測介電度甚低之污染物(汽油)或其他介電度較複雜之工業廢水，應選用實心品質良好之導體且導體間距與絕緣材厚度適中；後者利用孔隙較大之土壤材料，當污染物滲漏發生，能藉由蓄積於孔隙中之污染物，有效監測滲漏之發生。

根據前期研究之結果，發展適合布設感應纜線的標準程序，纜線距離滲漏源的深度需考慮纜線與滲漏源的水平偏距(offset)，如果潛在滲漏源水平範圍太廣，下方需要不只一條感應纜線，因此需評估儲槽下纜線鋪設的深度與間距。

本研究於第一年度研擬適用於現地環境之 TDR 儲槽管線污染滲漏的智慧化自動偵測方法與自動化分析法，並以室內試驗持續探討孔隙率影響、TDR 訊號對油品滲漏飽和度、利用理論公式搭配實驗數據標定感應纜線之敏感度與電學參數等。第一年即先擇一模場初步應用，第二年再於另一模場中測試 TDR 測漏管浮油偵測，輔以常時自動化監測系統收錄電磁波波形，透過第一年所建立之自動化分析方法，達到 TDR 儲槽管線污染滲漏自動化監測技術。

3.1.2 TDR 測漏管浮油自動偵測與量測方法

目前國內較常使用的儲槽外部監測方式包括土壤氣體監測及地下水監測，其中土壤氣體監測採用總揮發性有機化合物(Volatile Organic Compound, VOC)監測方式，如光離子偵測器/火焰離子偵測器(Photoionization Detector, PID/Flame Ionization Detector, FID)，但若是在



高地下水位面的情況下，水氣會影響總揮發性有機化合物之量測值，並可能進一步產生誤判；地下水位面較高時，則需使用油水介面計或試油膏進行浮油層厚度量測，如圖 12 高地下水位監測方法示意圖所示；而上述方法皆需要依靠人工現場操作，且監測頻率約為每個月一次。為了將污染防治像源頭推進，發展穩健、準確及自動化的監測方法是非常重要的。

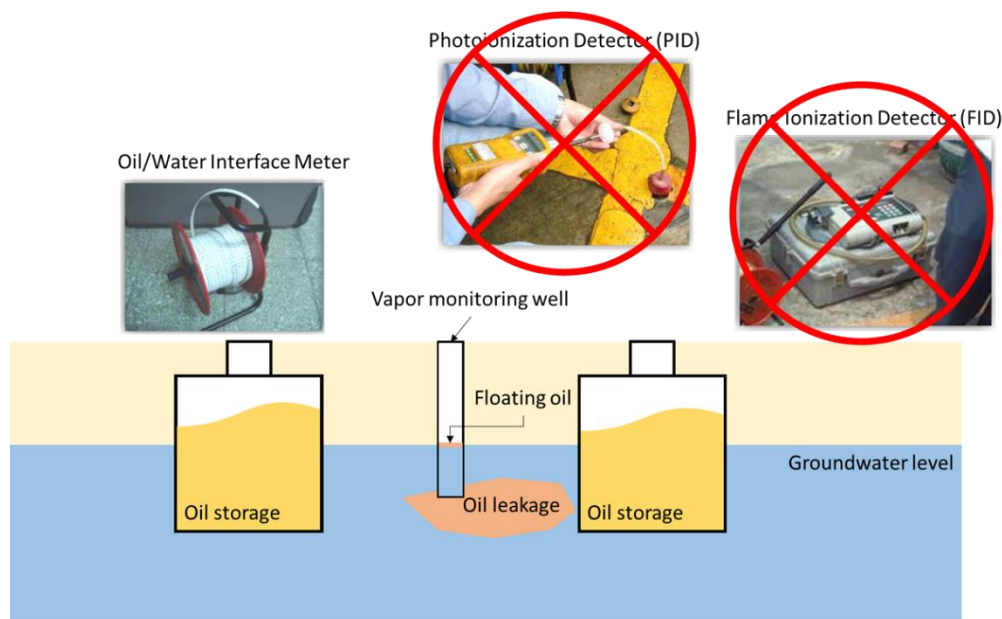


圖 12 高地下水位監測方法示意圖 (環境部，2022)

計畫團隊前期發展 TDR 技術應用於水位量測中，提出同軸型與平行導線型水位監測導波器，可在惡劣環境中以堅固之導波器有效、快速進行水位貫徹監測(Chung et al., 2013)。透過 TDR 水位監測技術結合前期計畫提出之滲漏監測技術，本計畫提出一加裝於加油站測漏管中之即時浮油監測技術，在不影響貝勒管定期取樣的安裝方式下，利用界面型 TDR 監測方法，因浮油滲漏至測漏管中造成介質性質改變，在地下水-浮油界面處產生一顯著反射訊號，再藉由浮油-空氣界面判識其浮油厚度。其類似氣液界面 TDR 監測方法如由圖 13(a)中 O'Connor (2001) 和



圖 13 (b)的 Bruvik et al. (2012)所示，前者利用 TDR 反射訊號觀測一鑽孔中液態油與空氣之界面變化，後者亦在室內環境中充分混合油水混合物後透過 TDR 技術觀測其油水分離時之界面變化，此二研究亦顯示 TDR 加裝於加油站測漏管進行即時浮油監測技術之可行性。

圖 14 (Lin et al., 2017) 係本計畫團隊前期利用 TDR 監測技術來監測橋墩冲刷之初步試驗結果，右側 TDR 反射訊號圖可明確識別冲刷事件前後由於介質改變對於訊號之影響，而此類利用 TDR 監測水土界面變化的方法與本計畫提出的即時浮油監測技術有異曲同工之妙，結合前述文獻更凸顯本方法之可行性與實用性。

判斷不同介質當中的界面方法是相當重要的關鍵，圖 15 中 Cataldo et al. (2007)和圖 16 中 Giaquinto et al. (2015)所示，前者使用特別自製的同軸感應纜線以反射係數圖一階微分的最大值作為界面可能所在位置；後者使用既有的同軸纜線及平行纜線以一階微分的最大值和最後零點加上線性擬合，藉此找出界面可能所在位置，此二文獻亦顯示出將資料分析標準化與自動化的可行性。

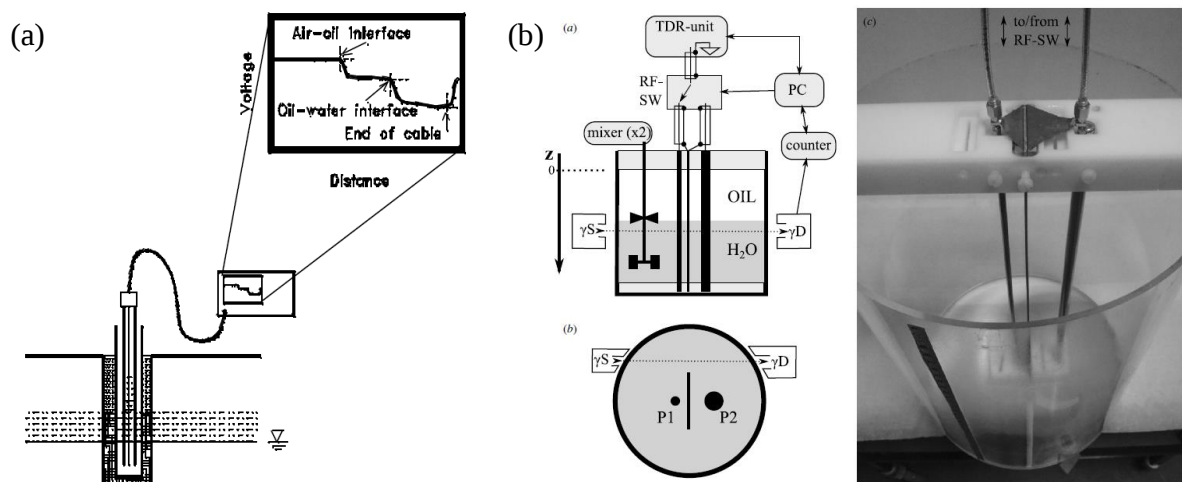


圖 13 (a) 鑽孔中油-氣界面測得之典型 TDR 反射訊號示意圖



(O'Connor, 2001)；(b) 混合油水分離過程以 TDR 技術觀測油水界面變化之配置示意圖 (Bruvik et al., 2012)

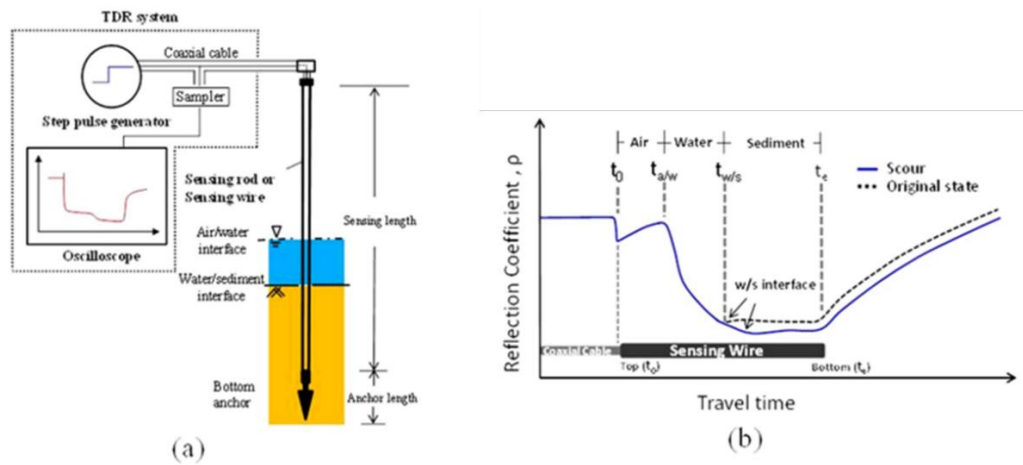


圖 14 (a)TDR 橋墩冲刷監測系統示意圖 (b)冲刷發生前後波形差異 (Lin et al., 2017)

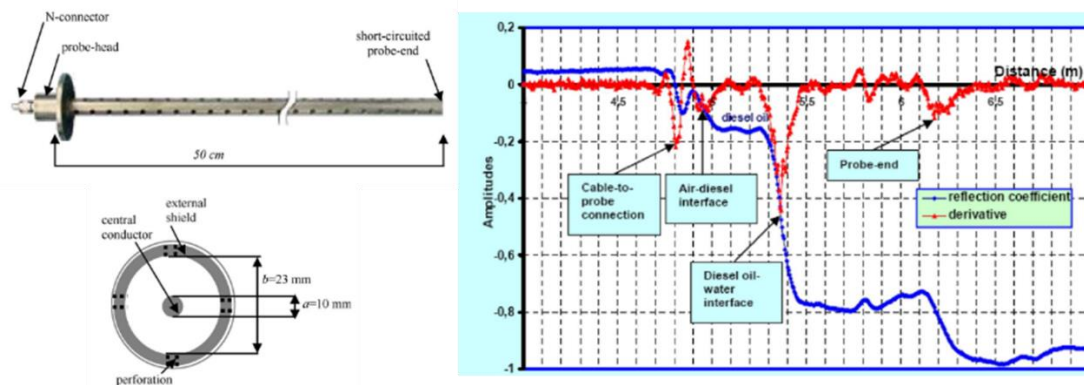


圖 15 利用一階微分的最大值判斷在同軸纜線中介質產生變化的界面位置 (Cataldo et al., 2007)

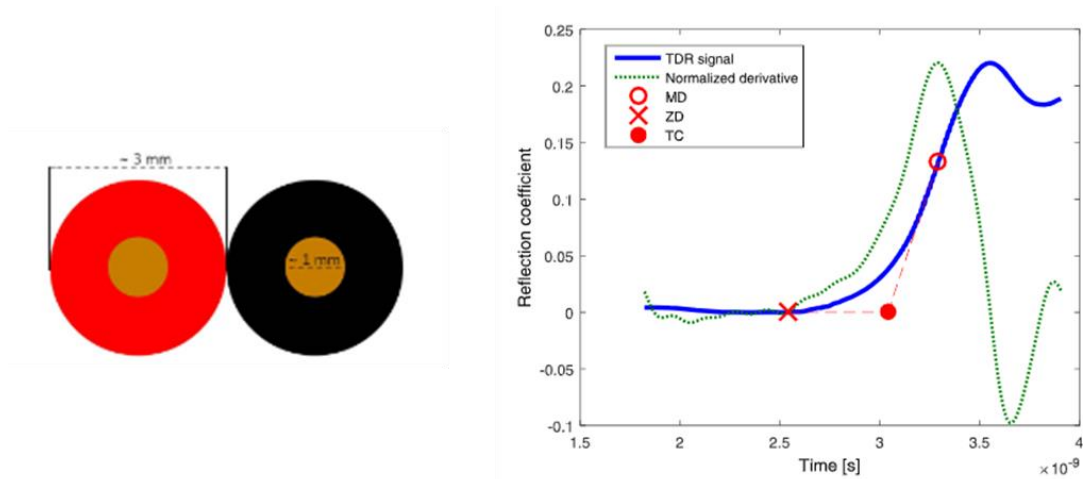


圖 16 利用一階微分以及線性擬合判斷在同軸纜線以及平行纜線中介質產生變化的界面位置(Giaquinto et al., 2015)

本計畫於第一年在室內驗證所提出之 TDR 測漏管浮油自動偵測與量測技術，利用一系列室內試驗驗證其可行性並藉以建置其自動偵測技術，因感應段涉及水段、浮油段、以及空氣段，在設計智慧化自動偵測方法時需進一步探討如何進行全自動化的浮油偵測，更甚者達到浮油厚度量測。

於第二年在模場中設置測漏管的全自動化即時監測，亦可建置儲槽管線滲漏與測漏管的整合式自動化智慧監測系統。其中因測漏管一般在泵島之間設置監測井中，據此需評估適用於測漏管監測的感應元件、其配置與安裝方法、如何在不影響既有定期監測作業下設置該監測系統等因素。本計畫在監測井內裝設本團隊自主研發之智慧型電磁波監測測漏系統。透過每日定期 TDR 自動化監測測漏管狀況，再輔以既有貝勒管採樣式監測法交叉比對，有望透過即時監測資料及時、儘早發現污染物以縮短油品滲漏預警時間。



3.2 模場試驗預期成效評估

模場試驗設置 TDR 儲槽管線污染滲漏與 TDR 測漏管浮油自動偵測系統後，因實際現場不一定會發生滲漏，其成效評估可在模場試驗後期規劃導入一些滲漏情景，近似實際滲漏狀況以便進行實況推演，以人為控制引入微量滲漏，抑或利用額外槽體或立管配置來模擬滲漏，藉以驗證其於模場之靈敏度與適用性。

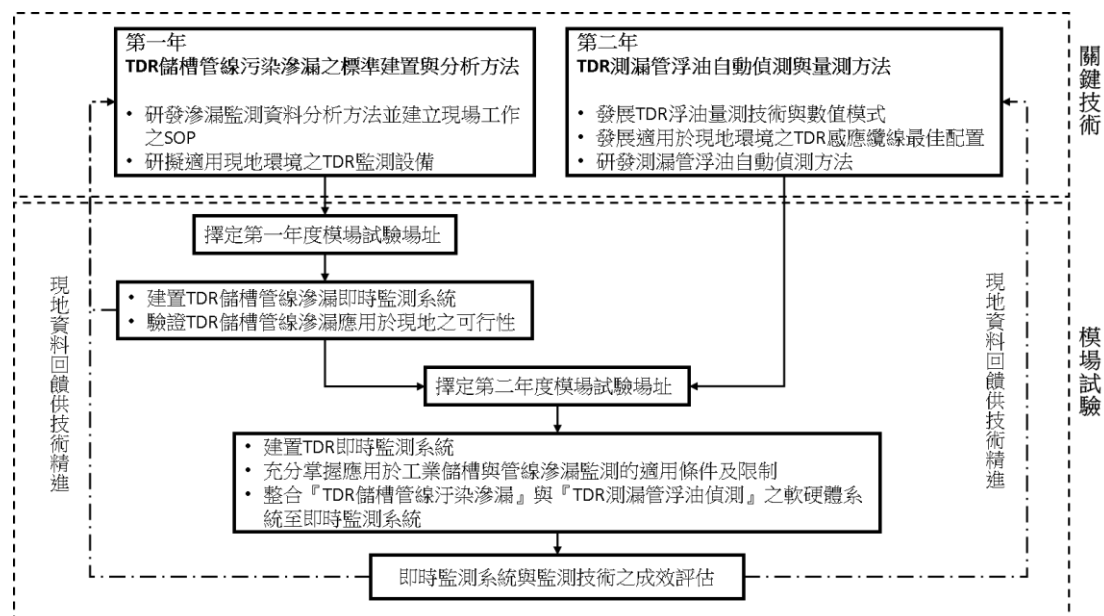
在實際發生滲漏之模場試驗中，對於 TDR 儲槽管線滲漏監測可依據反射訊號判斷滲漏位置，並找尋該滲漏點以利及時修補；而 TDR 即時浮油監測技術測得浮油後可利用貝勒管採樣式監測法，交叉比對實際浮油厚度，即可評估其準確性與敏感度。



3.3 研究流程

本計畫主要針對『TDR 儲槽管線污染滲漏之標準建置與分析方法』與『TDR 測漏管浮油自動偵測與量測方法』二種關鍵技術，於第一年度透過室內試驗，研發適用現地模場環境之監測技術、感應元件與其最佳配置。計畫團隊亦於第一年優先擇一模場進行『TDR 儲槽管線污染滲漏』的模場試驗，建置即時滲漏監測系統應用於現地的可行性。第二年度於另一模場進行『TDR 測漏管浮油偵測』之模場試驗，透過兩年計畫研究成果建置國內最新儲槽、管線即時監測整合系統。

本計畫透過前述評估結果、文獻回顧、現地考察來掌握應用於工業儲槽與管線滲漏監測的適用條件與限制，於第一年完成建置的即時監測系統與研發之『TDR 儲槽管線污染滲漏之標準建置與分析方法』，第二年完成『TDR 測漏管浮油自動偵測與量測方法』，並評估二種監測技術之成效，兩年透過不同模場現地觀測資料來持續精進關鍵技術。本計畫之研究流程如圖 17 所示。





第四章 結果與討論

4.1 TDR 儲槽管線污染滲漏之標準建置與分析方法

本研究根據室內試驗之成果，為因應現場不同的監測環境而建立其標準建置與分析方法，並實際應用於現地模場中。茲說明如下：

4.1.1 環境建置

利用室內試驗找出監測不同管道及滲漏物時所使用的環境建置。

(一) 環境建置

當量測水相液體滲漏，應採用保水效果佳的細砂作為細顆粒回填材；

當量測油相液體滲漏，應採用比表面積小的七厘石作為粗顆粒回填材。

1. 明管線

可將感應元件以吊掛的方式固定在明管下方如圖 18，使明管線內的液體滲漏時，液體能順著管壁流至管線下方接觸到感應元件，使感應元件可以偵測到滲漏發生；感應元件與管線中間也可以放置海綿、布...等吸水材料，作為類似回填材的效用，以增加滲漏量以及滲漏液體停留時間範圍，進而提高準確度。

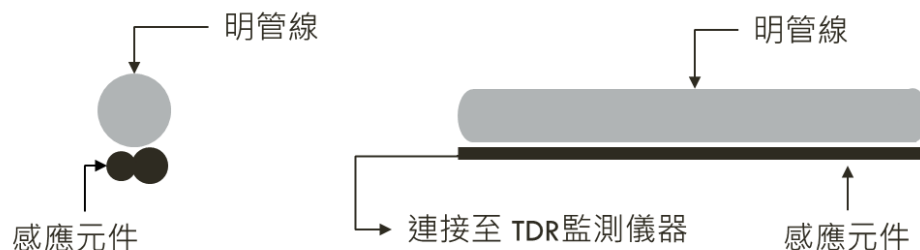


圖 18 PVC 明管線安裝感應元件示意圖

2. 地下管線

監測圓形管線時，可將纜線置於管線下方，但須注意管線可能造成的滲流範圍，在對管線的尺寸進行評估之後決定感應元



件擺放的深度，使管線的任何地方發生滲漏時都能被感應元件接收到，並於感應元件與管線中間根據所需進行監測的液體填入適當之回填材。

監測矩形管線時，可在矩形渠道下方挖掘一個 U 型溝槽並且填上回填材如圖 19，將感應元件放置於 U 型溝槽底部，利用液體的優勢路徑引導滲漏液體匯集至感應元件周圍；若無法利用優勢路徑引導滲漏液體則需考慮感應元件擺放在管道下的深度、數量以及間距，以涵蓋管道滲漏可能的滲流範圍。

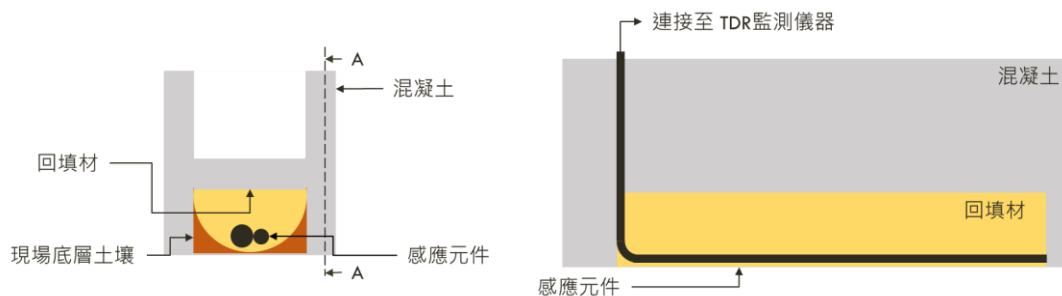


圖 19 地下管線安裝感應纜線示意圖(以現地混凝土水溝滲漏監測設置為例)

再者感應元件受水的影響甚鉅，如有地表水向下滲漏或地下水位面上升的可能性，則須對感應元件擺放位置或周遭環境進行調整使其不受地表水滲漏、雨水或地下水的干擾，進而造成感應元件的敏感度降低或資料判讀錯誤。

(二) 現地安裝標準流程建立

現地安裝標準流程如圖 18 所示，包括下列步驟：

1. 尋找適合感應元件(P3-500 纜線)以及監測儀器之擺放位置。
2. 將感應元件放入欲進行監測位置並量測感應元件之實際長度。
3. 將感應元件固定，使其於不致產生大幅度的移動並利用保護管(蛇管、AB 管)使同軸纜線出露於地表面的部分不因外力因素造成纜線之幾何



斷面變形或接頭進水造成接觸不良，進一步導致訊號品質下降。

4. 感應元件周遭應覆蓋一定厚度之回填材，將填入之回填材壓實以降低感應元件受到周遭環境之影響，並降低感應元件發生大幅度位移的機會。
5. 將感應元件以同軸纜線連接 TDR 監測儀器以及資料擷取器進行測試，確定收錄資料之訊號是否發生異常。
6. 完成現地監測元件建置。

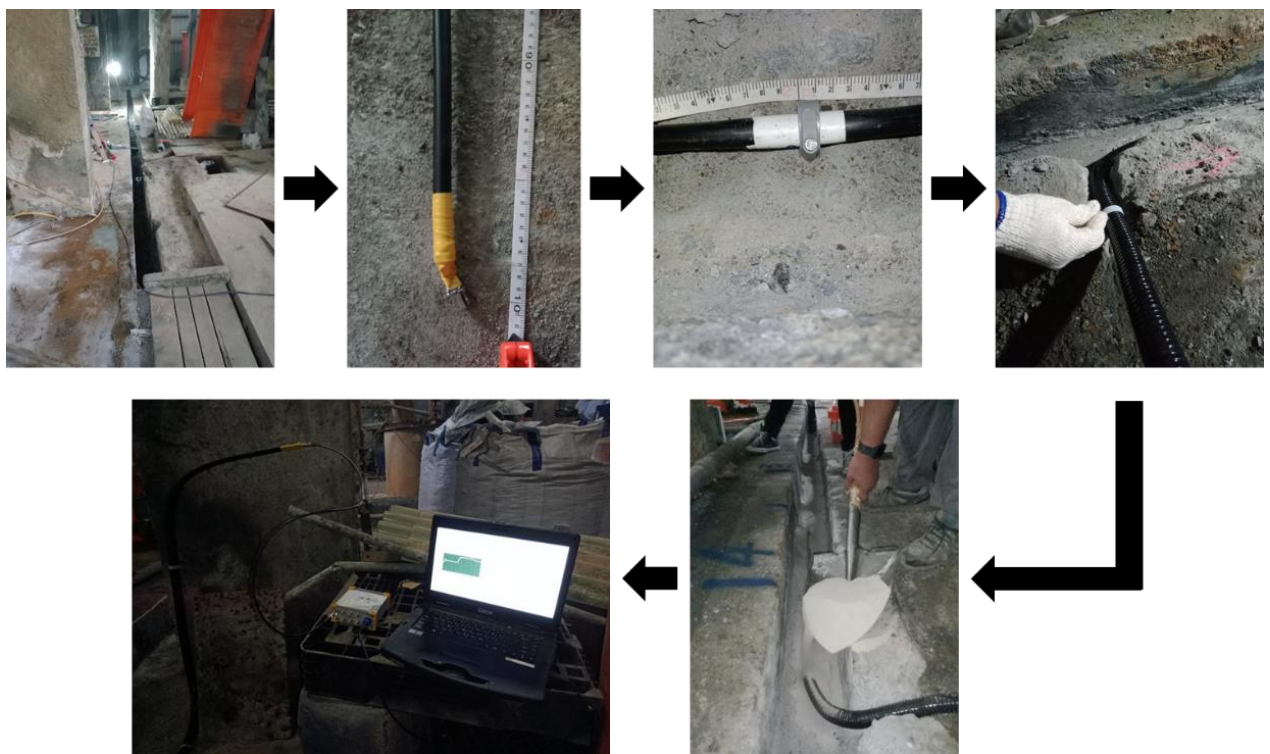


圖 20 現場安裝流程圖

4.1.2 軟硬體建置

本計畫為能夠利用更加經濟的方式及早發現滲漏事件發生以預防環境汙染的發生，在現地使用 Raspberry Pi (樹梅派) 微型單板電腦代替過往經常使用且較為昂貴的嵌入式系統做為資料擷取器連接 TDR 監測儀器如圖 21，且透過自行開發之 Python 程式建立簡單易懂的使用者介面



如圖 22，方便使用者透過遠端連線測試現地感應元件是否異常以及更改設定資料收錄頻率，達到自動化收錄資料的效果；將監測系統進一步利用物聯網的概念將自動化收錄的資料透過網路傳輸以及雲端即時由現地監測系統端傳送至使用者端進行資料後處理，以達成即時監測的效果。



圖 21 監測系統硬體建置

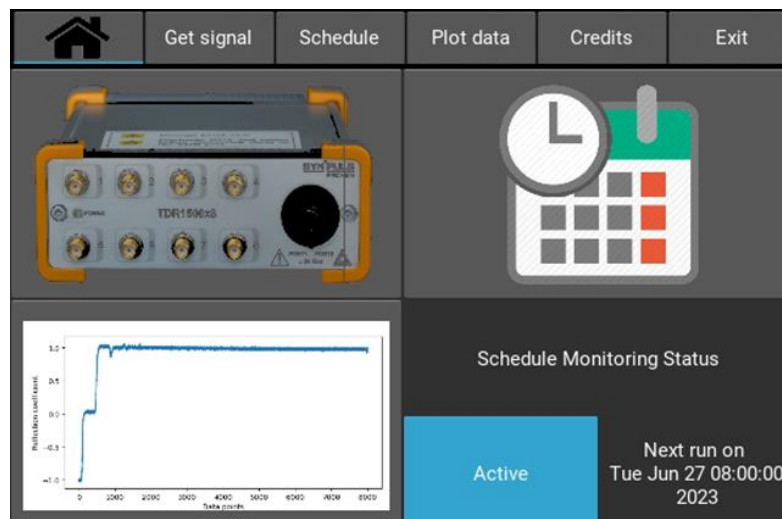


圖 22 Python 使用者介面



4.1.3 分析方法

(一) 差異分析法

差異分析法是對於資料之間的差異或某部分之間的差異進行分析的方法。本方法利用電磁波在不同介質當中介電常數的改變，以獲得波形在不同介面所產生的反射訊號。在滲漏監測的應用上，利用在尚未發生滲漏事件時量測到的回填材環境與滲漏事件發生後環境之間產生介電度的不同，來分析欲監測之滲漏物的滲漏情形以及利用走時計算出滲漏發生位置。分析方法為先將回填材之環境收錄資料，作為原始波形，再於滲漏事件發生之後，收錄滲漏發生時之資料，將兩資料進行相減以後，得出分析結果。資料分析過程可分為三步驟，利用附有吊線之 P3-500 纜線在自來水滲漏情況下之 TDR 波形進行詳細說明：

- 一、 圖 23:對原始資料做濾波，使波形平滑(lowpass frequency=1.5GHz)；並做 x-shift 將資料量測起點對齊。
- 二、 圖 24:將在回填材環境下之資料當作原始波形，再將不同滲漏量之波形與原始波形相減，得出反射係數差值($\Delta\rho$)。
- 三、 圖 25:利用 $L_L = \frac{L_L^{app}}{(L_{SE}^{app}/L_{SE})}$ 計算出滲漏事件發生位置； L_L 為滲漏位置實際長度， L_L^{app} 為滲漏位置走時長度， L_{SE}^{app} 為感應元件走時長度， L_{SE} 為感應元件實際長度。

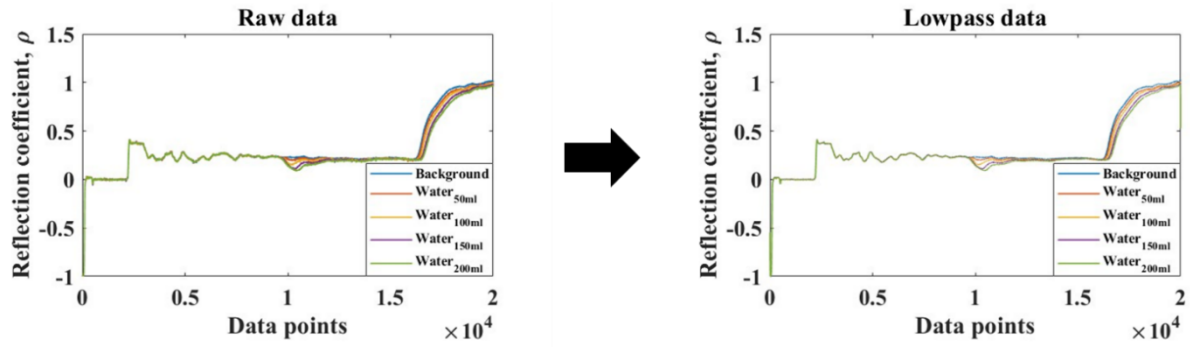


圖 23 差異分析法步驟一

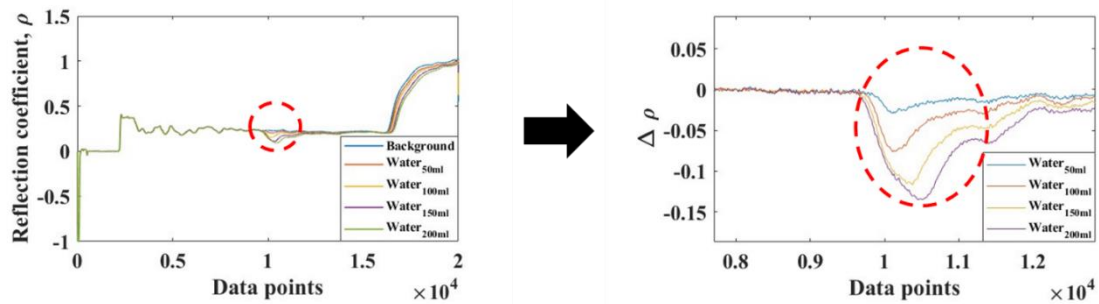


圖 24 差異分析法步驟二

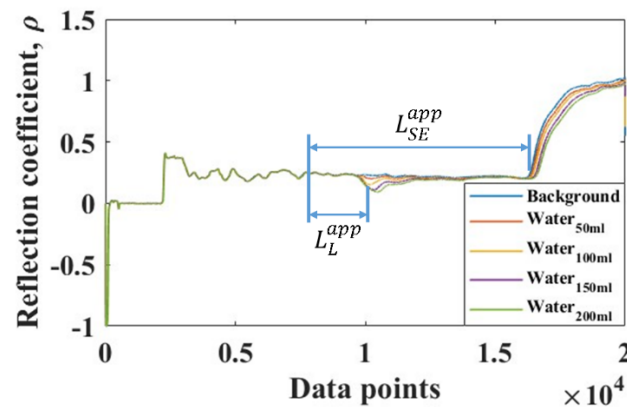


圖 25 差異分析法步驟三

(二) 3σ 滲漏偵測準則

收錄訊號中的雜訊為影響分析結果的一大因素。在 TDR 滲漏監測系統當中也存在著一定的雜訊，雜訊在每一次的量測結果當中都不盡相同，因此需要設立一個閾值用以判斷現場波形的差異是由於雜訊



的影響或是滲漏事件所造成的結果。由於訊號雜訊屬於常態分布，因此本團隊利用收錄訊號雜訊的三倍標準差做為滲漏事件發生閾值，以確保在收錄訊號 99.7% 的信賴區間之內，雜訊所造成的波形差異不會被誤判為滲漏事件的發生。

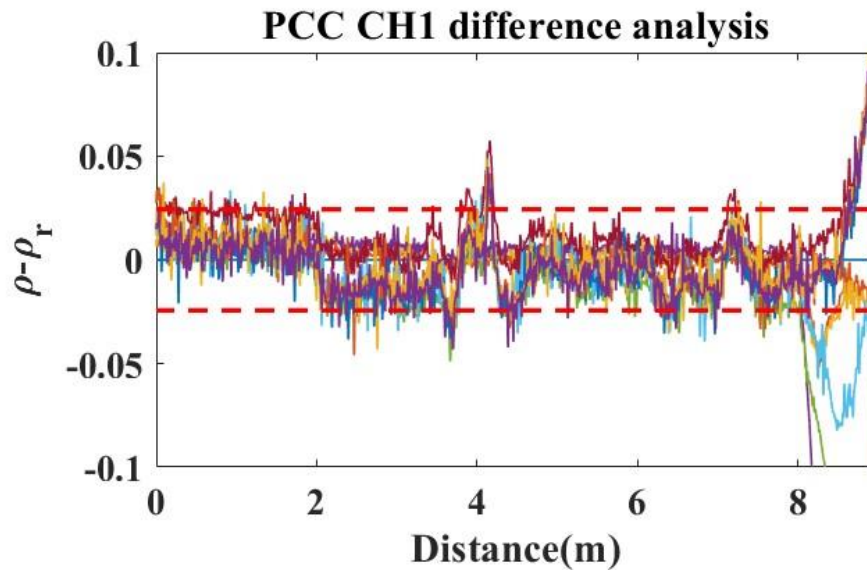


圖 26 以三倍標準差(圖中紅色虛線)為判斷滲漏事件發生的標準。此圖為明管線下方之纜線，因其裸露餘地表面上容易受到非滲漏事件的其他環境因素干擾，但利用三倍標準差可以發現滲漏位置發生在末端的位置。



4.2 滲漏模場試驗

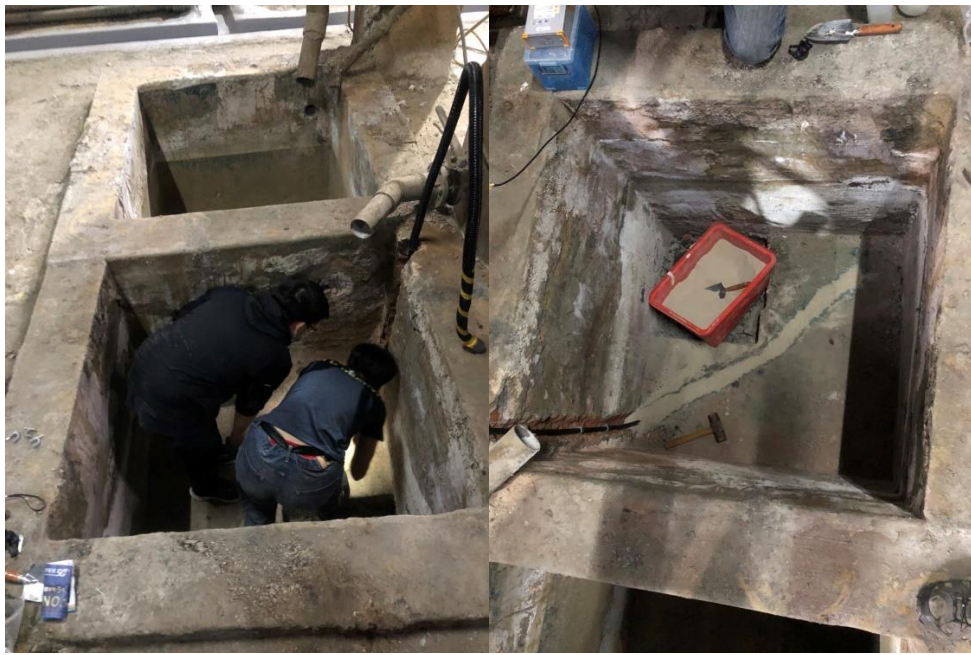


圖 27 地下槽體監測纜線安裝



圖 28 溝渠監測纜線安裝與洩漏試驗



不確定監測系統建置好之後是否有機會監測到滲漏事件，因此在監測系統建置的過程中，進行模擬實際發生滲漏事件狀況之滲漏試驗，過程如下：

1. 收錄無滲漏情形發生之背景值，作為差異分析內使用的原始波形。
2. 將定量之滲漏物倒在感應元件之已知位置以模擬滲漏發生情形。
3. 收錄模擬滲漏發生之資料。
4. 重複步驟 2、3 直到於感應元件因滲漏處產生之滲漏波形產生明顯變化。
5. 對資料進行後處理，以及滲漏事件發生前後訊號分析。

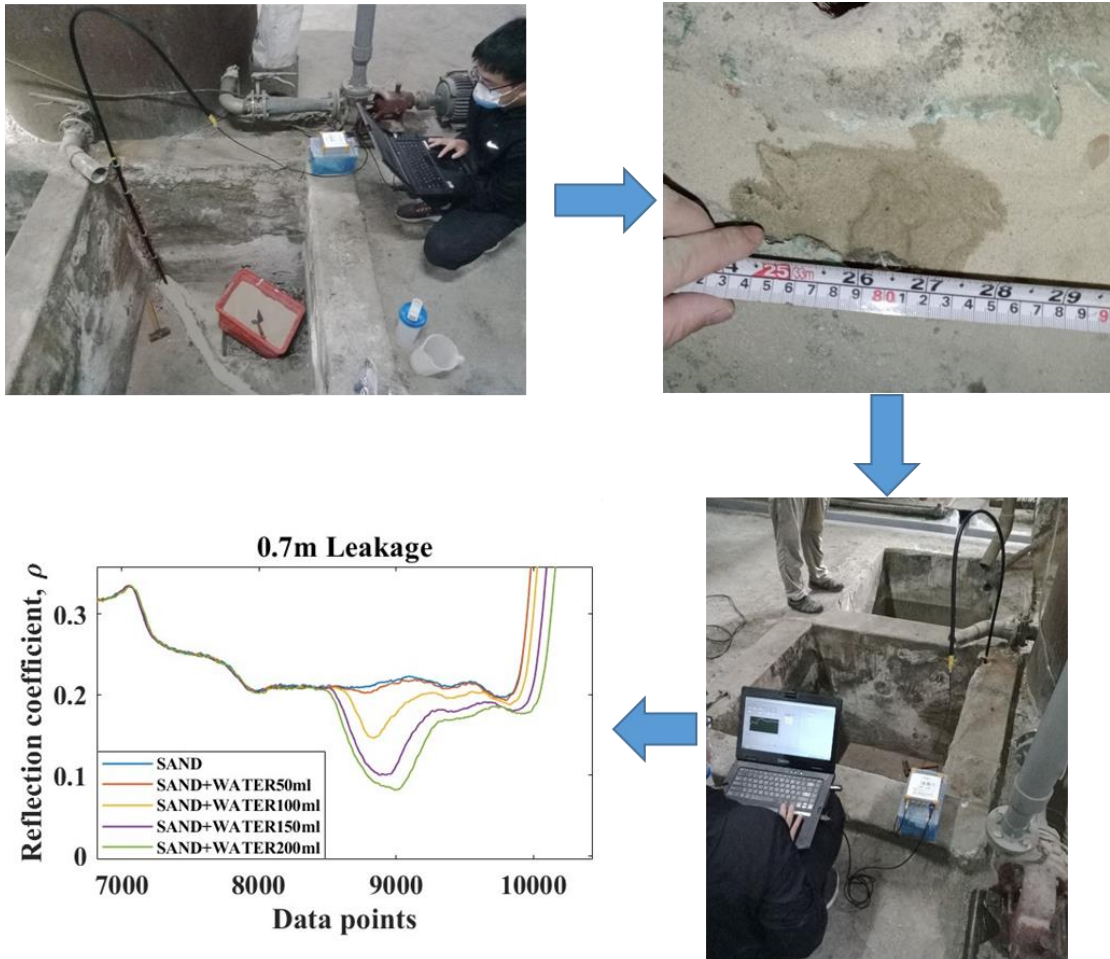


圖 29 滲漏試驗流程圖



4.2.1 第一年模場試驗

本計畫第一年的模場試驗場址擇定為陸昌化工，本場址因為應變計畫與相關工作期程的要求，所以本團隊優先進行監測元件安裝，並規劃導入滲漏情境以完整描繪出本智慧型監測系統之完整監測模式。目前已完成監測系統的安裝，圖 30 為現場滲漏監測之模場位置。並完成透過現場廢液模擬真實槽體洩漏情境。現地工作總共完成兩大項，第一於 112 年 10 月初進場規劃模場監測位置，確認相關可埋設監測纜線之位置與深度，規劃陸昌化工以監測溝渠與地下儲槽為主，配合廠商對於滲漏潛勢高且容易破壞位置進行規劃與設置監測系統。第二為本團隊製作完成所有監測纜線，並完成實驗室 QA 與 QC 工作，於 112 年 10 月中旬開始進場陸昌化工，進行現地埋設工作，並完成現場滲漏模擬試驗，達到良好滲漏點監測工作成果，並配合現場土木工程完成主要幹道監測纜線設置。配合現地整治裝修工程完成預期監測纜線之埋設工作。相關成果於 4.2.2 節完整說明。

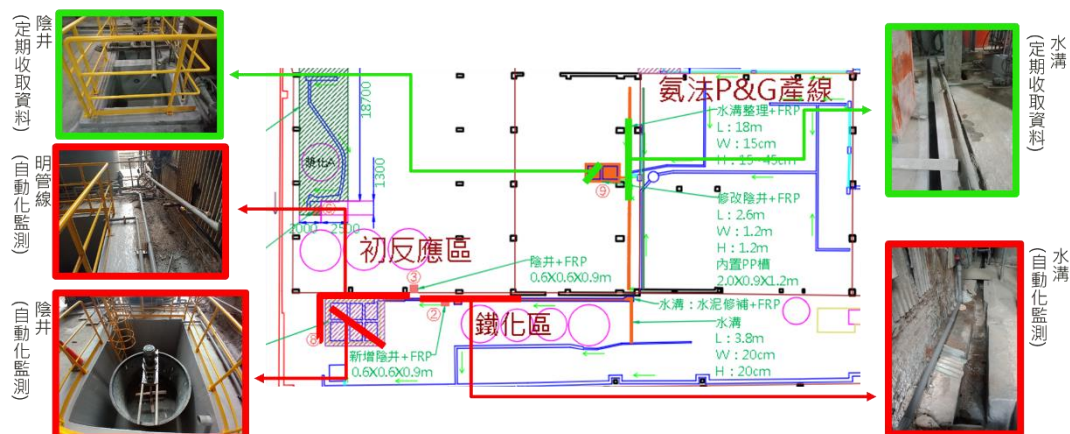


圖 30 現場滲漏監測之模場位置



4.2.2 測試成果

(一) 滲漏試驗

TDR 滲漏監測技術主要基於介電性質，管線內污水和自來水的介電性質差異不大，利用自來水可以初步測試管線滲漏所造成的波形變化，若為低介電度之有機污染物，則前一年度之基礎研究亦有實驗驗證其可行性。纜線以回填材覆蓋，上方為監測的管線或槽溝，監測的影響範圍主要是監測纜線約 5cm 直徑範圍，因此覆蓋後不會影響其監測訊號。

收錄纜線施作完畢之後尚未發生滲漏事件之資料作為背景值，再使用自來水來做為試驗中使用的滲漏液體，於已知長度之位置進行滲漏試驗；現場以累積滲漏量間隔每 50ml 進行一次資料收錄，圖 31。在背景值與模擬滲漏資料收錄完畢之後，利用背景值作為原始波形進行差異分析法之後，再利用分析後資料的走時計算滲漏位置與實際滲漏位置進行比對，藉以評估滲漏監測系統的準確性。

使用差異分析法對滲漏試驗的資料進行分析，發現在累積滲漏量達到 100ml 時在波形上即可產生明顯的變化，如圖 32；於滲漏試驗中，所量測的已知滲漏點位置距起始點位置的長度約為 3m，而根據資料分析計算出之長度為 3.014m，誤差值約為 0.5%；此準確度已經足夠我們定位實際管線或是儲槽滲漏的發生位置。

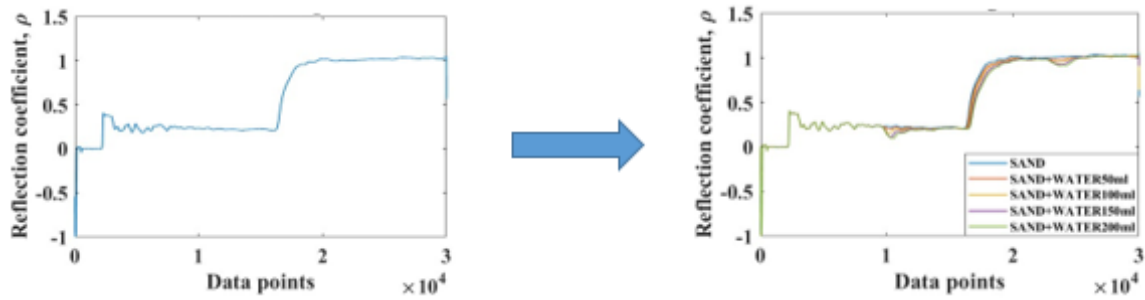


圖 31 收錄滲漏試驗資料

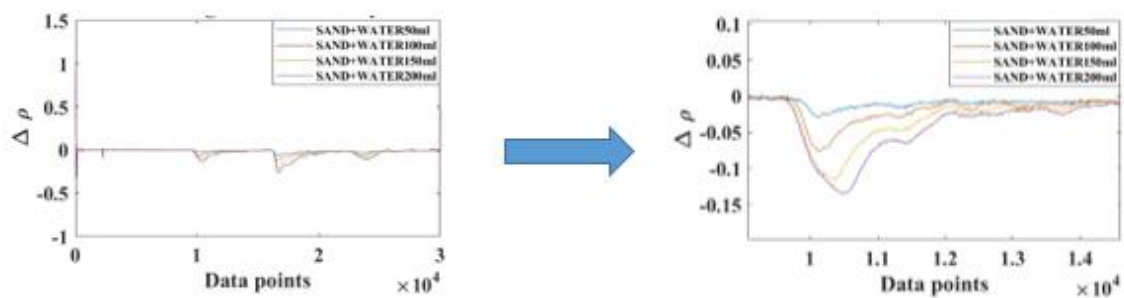


圖 32 滲漏試驗差異分析

(二) 現場監測

現場感應元件埋設完畢以後，本團隊將監測系統設置於現場之適當位置，並利用自行開發的自動化收錄資料程式將收錄資料頻率設定為每間隔二個小時收錄一筆資料，而在監測系統建置以後在明管線的監測波形資料當中發現滲漏事件，如圖 33；滲漏事件源自明管線上方輸送冷卻液體的管線，由於管線內外溫差造成輸送管線之管壁外有水滴產生，而這些水滴由本團隊所進行監測之明管線上方滴落，並沿著明管線之管壁流至明管線下方的感應元件。滲漏事件發生位於距離置於明管線下方之監測感應元件的末端約 0.7 公尺處，如圖 34，也就是總長 8.97 公尺感應元件的約 8.27 公尺處，而利用監測波形進行資料分析計算出的長度為 8.23 公尺處，誤差約為 0.5%；透過此試驗的成果可以瞭解此滲漏監測技術實際應用至現地監測具有相當高的可行性。



此模場為室內場址，若欲進行室外場址進行監測，可於監測管線上方鋪設防水設施以避免因降雨造成雨水滲流進入感應纜線監測範圍，並保持高靈敏度且準確的監測數據；若無鋪設防水設施，而現地場址受降雨滲流影響時，由於現地整體土壤含水量增加，感應纜線整段皆收錄到異常訊號類似於圖 38，而非如圖 33 中的小區域變化，藉由異常訊號可判斷是否為雨水影響監測數據並降低滲漏監測的靈敏度，當降雨停止後，土壤中之水分會向下溢散並使監測訊號回復正常，以持續高靈敏度監測。

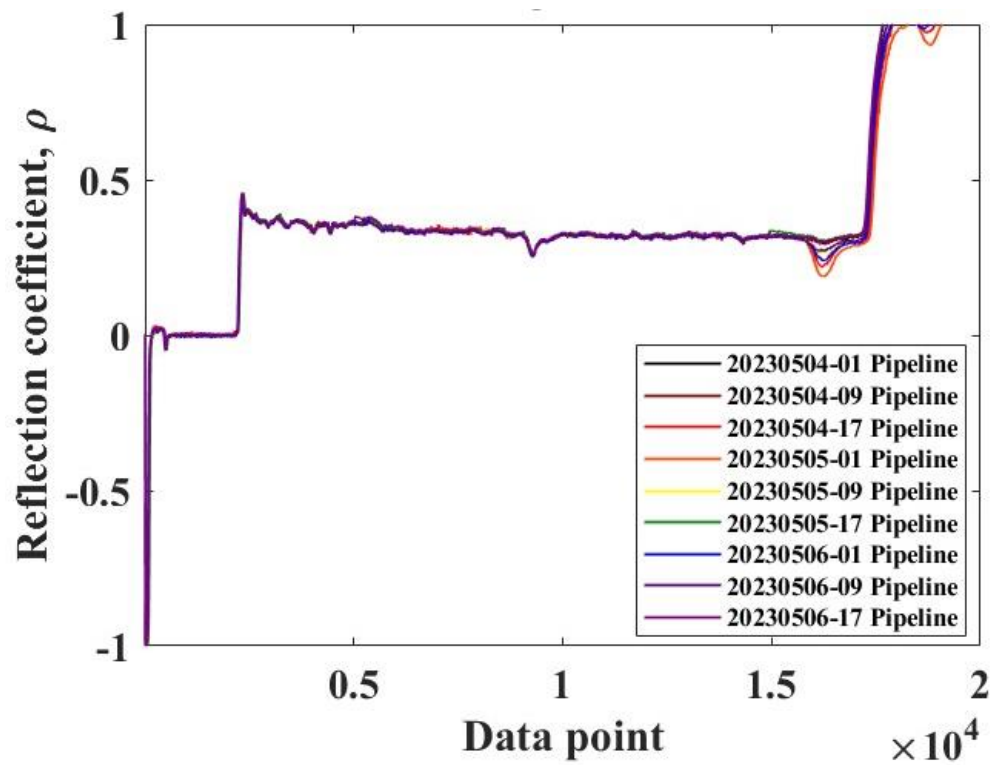


圖 33 現場滲漏事件發生波形



圖 34 現場滲漏事件發生位置



將截至目前為止的現場監測成果呈現在下方，自動化監測:明管線(圖 35)、陰井(圖 36)、水溝(圖 37)，定期收取資料(約每月一次):水溝(圖 38)、陰井(圖 39)。

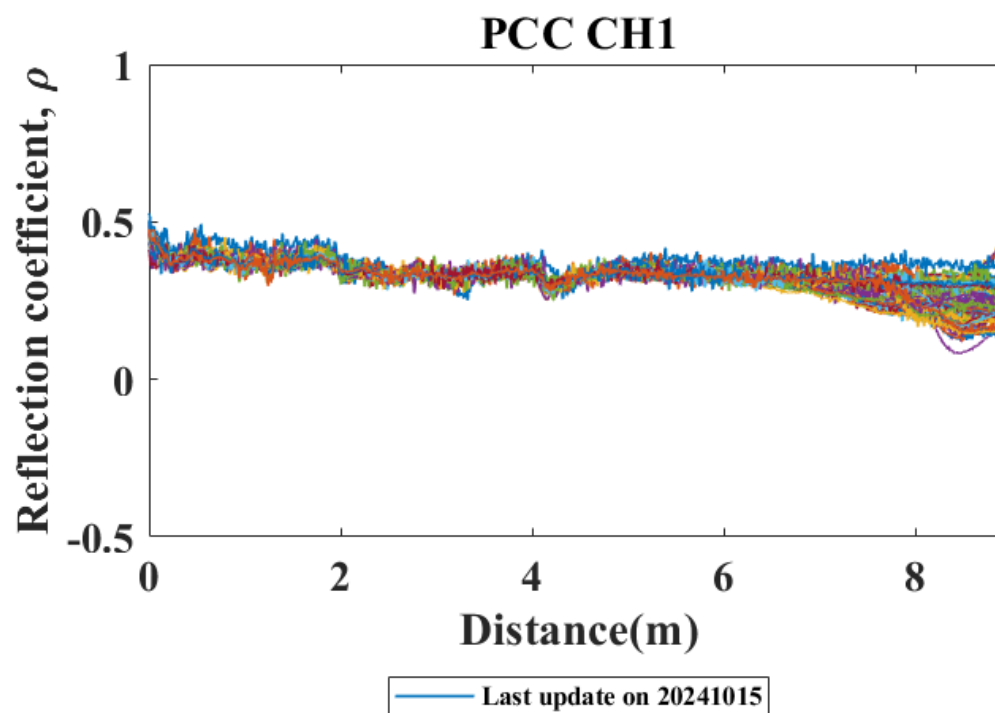


圖 35 自動化監測-明管線(CH1)

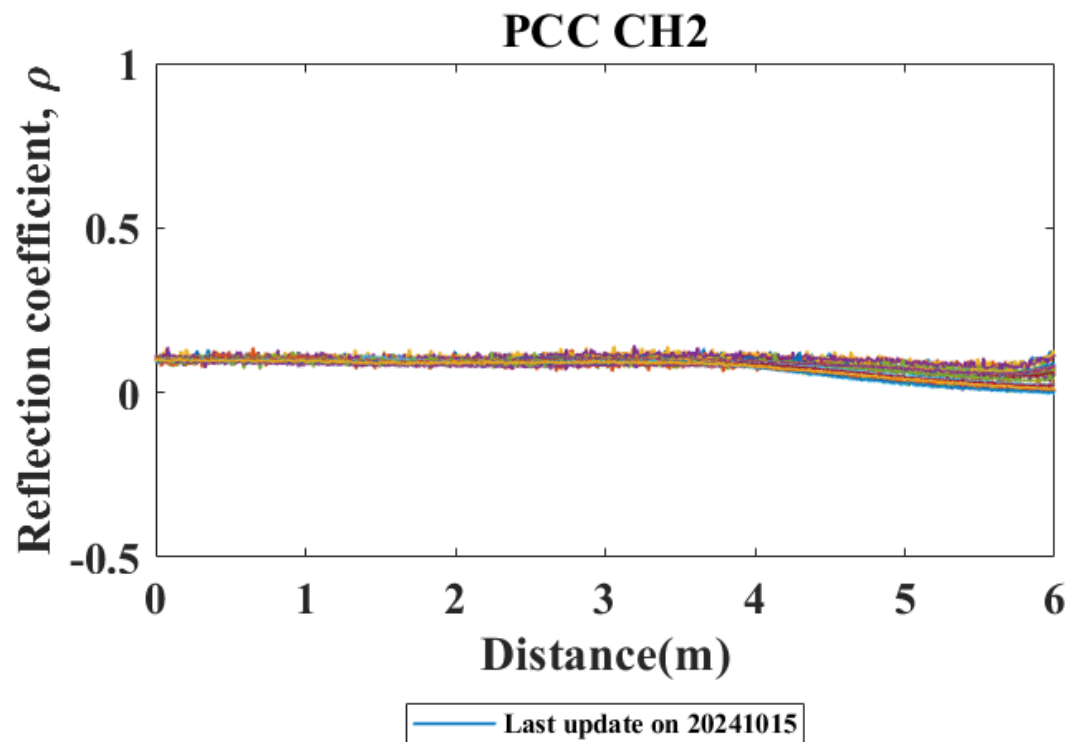


圖 36 自動化監測-陰井(CH2)

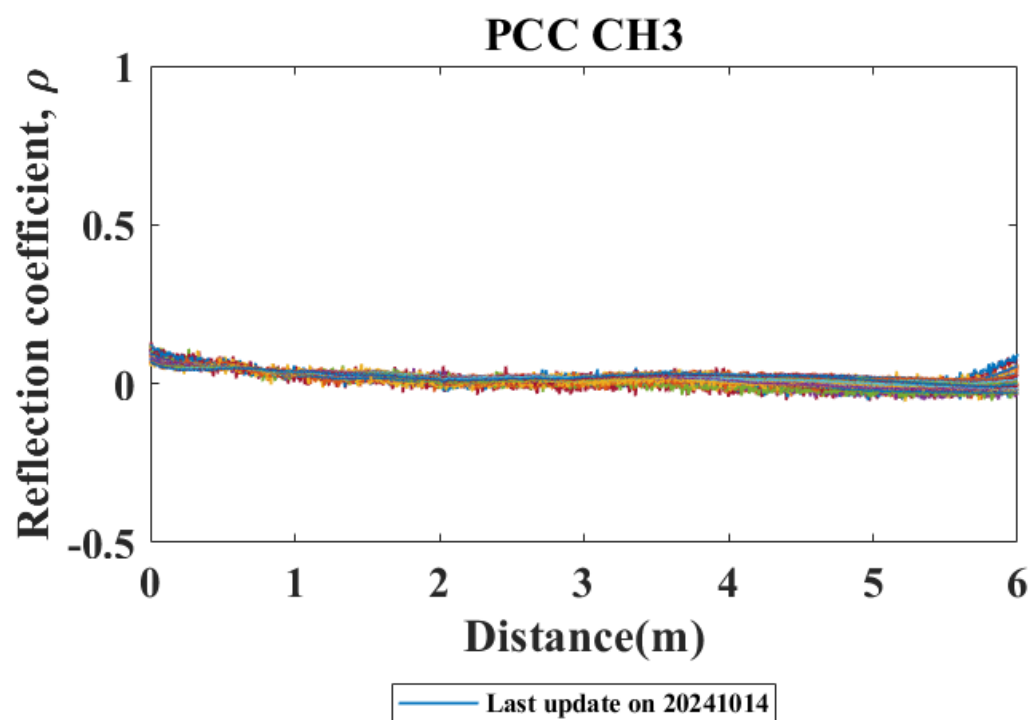


圖 37 自動化監測-水溝(CH3)

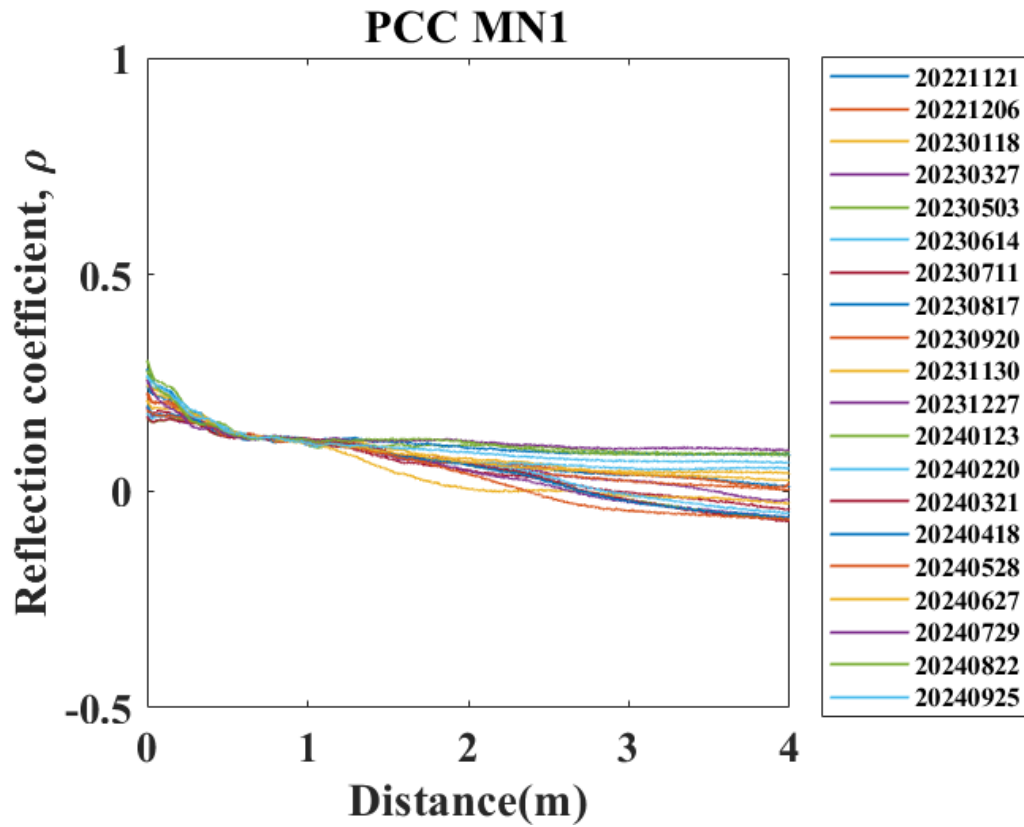


圖 38 定期收取資料-水溝(MN1)。此監測區域纜線底部為回填材底部為混凝土，因未將底部打穿至土層，導致回填層上方水溝施作時水泥中的水份向下滲流影響監測品質。

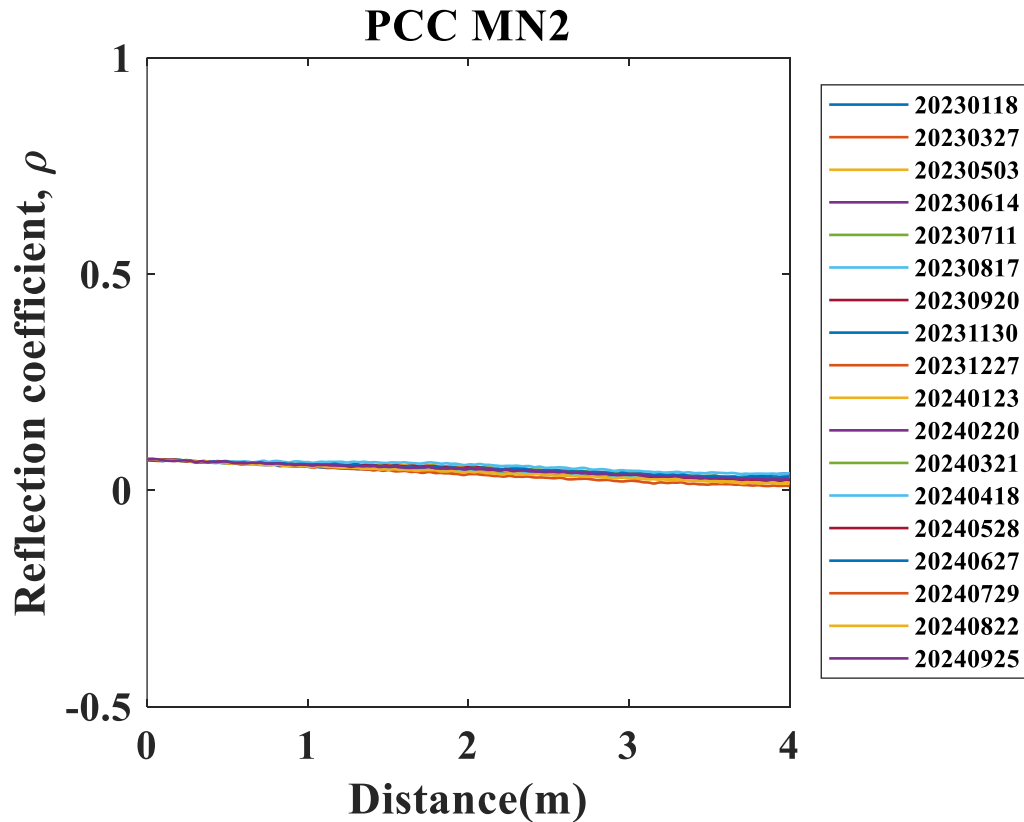


圖 39 定期收取資料-陰井(MN2)

4.2.3 執行階段遭遇之困難與解決方法

本計畫團隊於第一年模場試驗之監測系統建置時，埋設之感應元件接觸到上方施作中之水泥向下滲流的水份，進而影響監測品質；在後續系統建置中，本計畫團隊透過將感應元件下方混凝土或阻礙水份溢散之材料貫穿，或可於感應元件下方鋪設透水係數較高的回填材製造優勢滲流路徑，使水份不被圍困於感應元件周遭並進一步改善監測品質。



4.3 浮油監測技術分析方法

本研究先利用室內物理實驗模擬現地情形，初步評估 TDR 監測浮油技術之可行性。利用 TDR 浮油監測系統之室內物理實驗的結果，探討 TDR 技術在浮油監測之應用與發展。

4.3.1 室內物理實驗

室內物理實驗以直立玻璃圓筒模擬現地測漏井與油品滲漏情形，實驗中使用之儀器、滲漏物與其他配置項目，茲說明如下：

Constant Water-Column

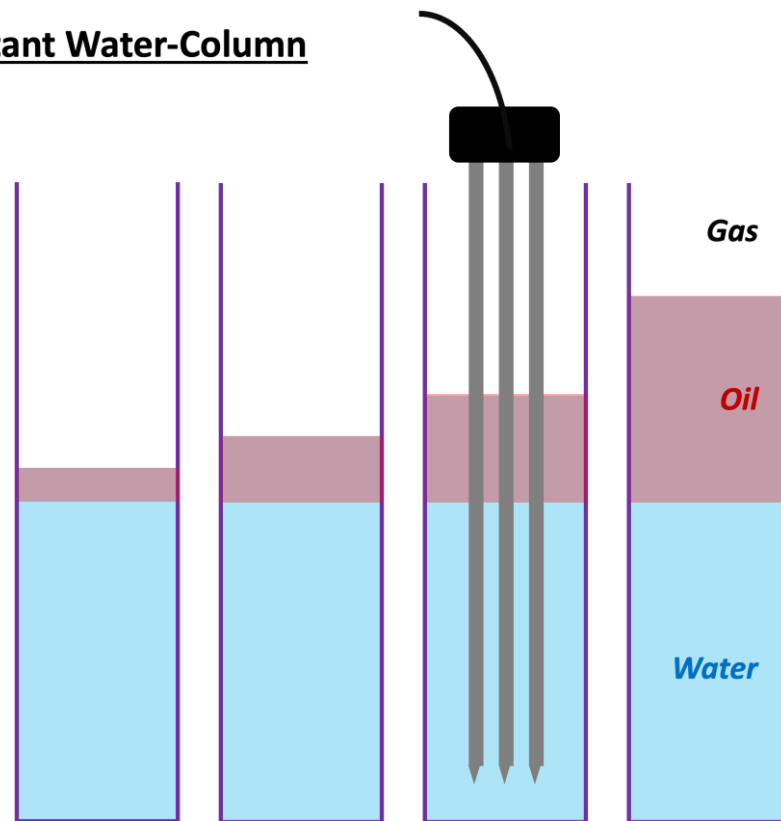


圖 40 TDR 浮油監測之室內試驗方式示意圖

實驗儀器包含 TDR3000、玻璃直立圓筒以及感應元件，以下逐一介紹：



1. TDR3000

TDR3000 為德國 SYMPULS 公司製造，其可以產生一步階脈衝進入纜線，若搭配多工器，則可以同時量測多個頻道 TDR 感測器，若是搭配資料擷取器，則能夠具有可程式化及自動化量測的功效，詳細規格，如表 2，可用於量測土壤體積含水量、土壤體積電導率與岩石變形監測等。本研究將 TDR3000 連接現有的資料擷取器(筆記型電腦)，並透過本研究團隊自行研發撰寫的程式進行資料擷取與分析。

表 2 TDR3000 規格

垂直系統(Vertical System)	
輸入(Input)	50 Ω ,SMA-Connector
上升時間(Rise Time)(10-90%)	80 ps
帶寬(Bandwidth)(3dB)	5 GHz
線路阻抗範圍(Range of Line Impedance)	0 to 1000 Ω
解析度(Resolution)	0.01%
顯示解析度(Display Resolution)	40 dots/div, 400 dots/screen
水平系統(Horizontal System)	
時間解析度(Time Resolution)	1 ps
顯示解析度(Display Resolution)	50 dots/div, 500 dots/screen
距離尺度(Distance Scale) (/div)	1 cm, 2 cm, 5 cm ... 100 m
內部測量 TDR 脈衝發生器(Internal Pulse Generator for TDR-Measurement)	
脈衝形狀(Pulse Shape)	Rectangular 24.4 kHz, app. 0.5V into 50 Ω



上升時間(Rise Time)	< 80 ps
雜項(Miscellaneous)	
電源供應(Power Supply)	4.5V ... 5.5V / 0.5A Powered over USB-port
尺寸(Dimensions)	Aluminum Case, W x H x D = 115mm x 55mm x 175mm

2. 玻璃直立圓筒

玻璃直立圓筒為模擬現地監測井內含浮油狀況，圓筒內部高度及直徑分別為 50cm 和 10cm，如圖 41。實驗可針對不同浮油厚度做分段增加浮油變化進行評估。

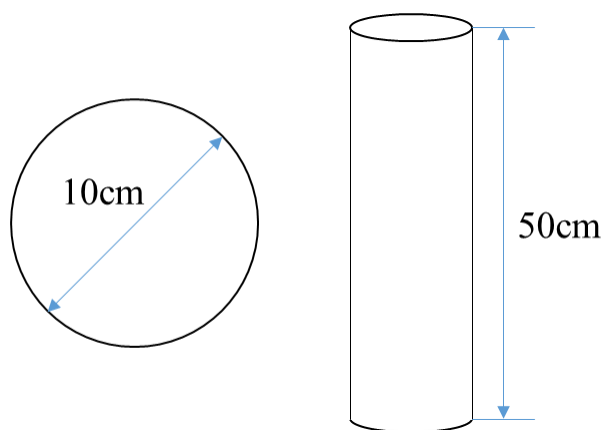


圖 41 玻璃直立圓筒尺寸示意圖

3. 感應元件

同軸纜線(Coaxial Cable)構造由內至外分別為內導體、絕緣介質、遮蔽層、外導體與外殼保護層，本研究以常使用於 TDR 監測應用的 CommScope 公司生產的 P3-500 同軸纜線之外導體(當作內導體)與吊線之導體(當作外導體)，監測感應元件周圍之環境變化，附有吊線之同軸纜線剖面示意圖如圖 42 所示。



圖 42 同軸纜線示意圖

同軸感測器(Coaxial Sensor)構造類似同軸纜線，如圖 43 所示，但僅有內導體及外導體，並無內部絕緣介質及遮蔽層；於外導體上鑽有孔洞允許液體通過進入，藉以限制感應範圍於內外導體之間並收錄高品質的量測訊號。

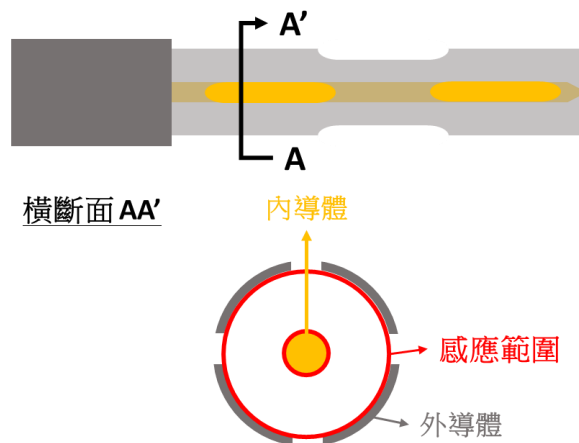


圖 43 同軸感測器示意圖

4.3.2 室內試驗成果

本研究在室內試驗中利用自來水模擬地下水位面，再利用與模場滲漏油品電學性質相近的市售沙拉油模擬儲槽滲漏物；首先將自來水填入圓筒當中，接著將沙拉油也倒入圓筒，使其形成浮油層，最後將感應元件以直立的方式放置於圓筒內，使其穿過浮油層；以定量增加浮油厚度模擬現地因持續滲漏造成浮油累積，如圖 44，並測試感應元件的適用性。

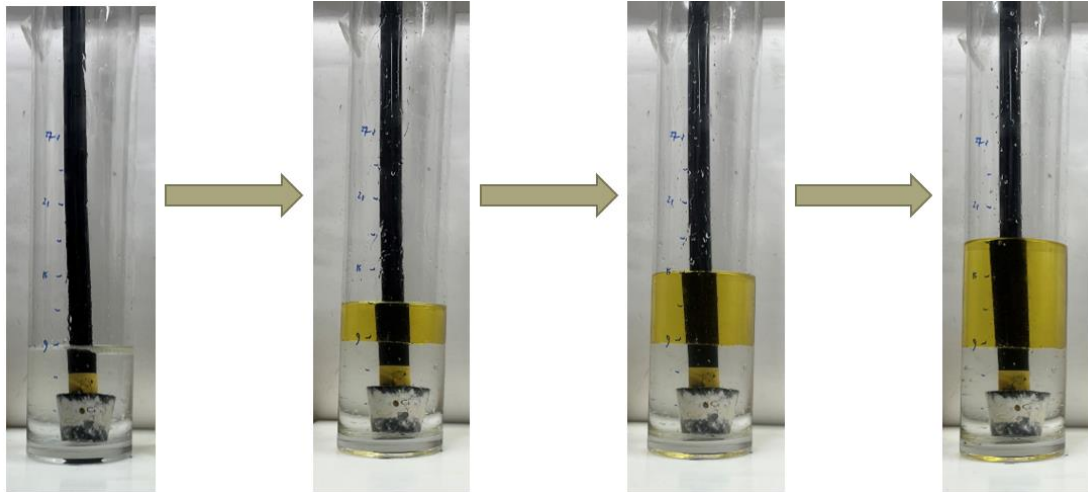


圖 44 定量增加浮油厚度

圖 45 中可以發現在感應元件周遭介質改變時，TDR 波形會因為阻抗不匹配而產生訊號上的變化，並且可以找出由各個不同介質交界處所形成的界面；當油層厚度產生變化時，如圖 46，也可以發現介質之間的界面因為位置上升或者下降造成界面位置的不同。

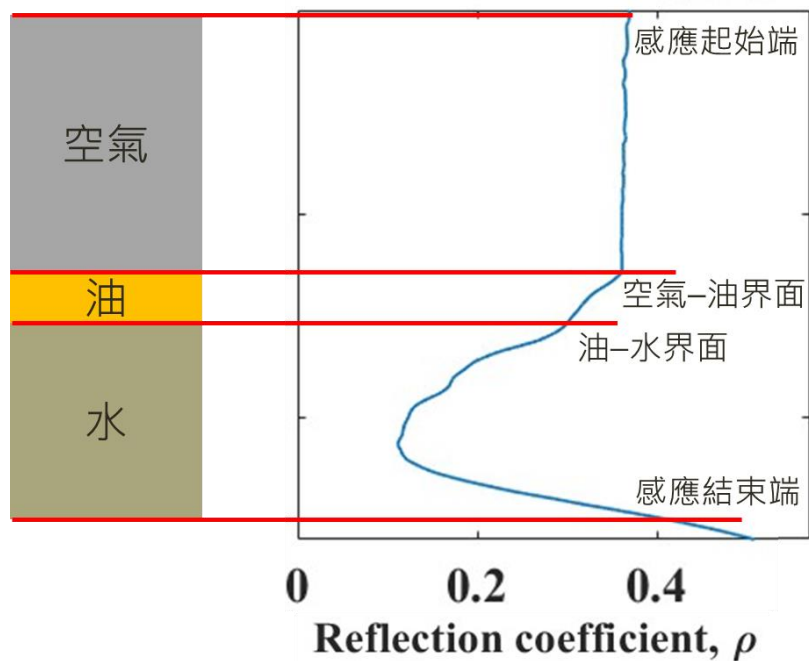


圖 45 TDR 波形中的空氣-油-水界面

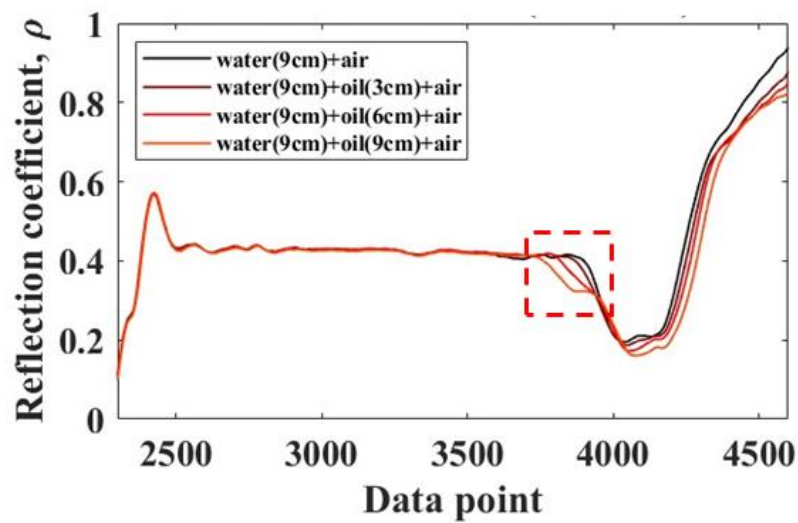


圖 46 油層厚度增加造成波形變化

為找出有效定位界面位置的分析方法，本團隊利用數值模擬 TDR 的波形傳播方式 (Lin and Tang, 2007)，在理想狀態之下因浮油厚度改變而造成訊號改變的趨勢，設定數值較為極端的浮油層厚度進行空氣-油-水三相介質之初步測試，如圖 47，在水位固定的情況下，若油層的厚度增加則空氣層的厚度就會隨之減少，感應元件會更早產生變化；模擬資料經過標準化、濾波和起始點對齊等後處理可以利用一階導數得到相當準確的空氣-油的界面也就是第一個界面的位置，如圖 48，以及利用此界面計算出空氣層也就是第一層厚度之誤差值如表 3 所示，誤差皆為毫米等級。在室內物理實驗當中，資料經過後處理仍然相當不易僅依賴一階導數得到準確的界面位置，對於薄油層中的空氣-油界面位置的判斷相當困難，如圖 46，可能對於設計智慧化自動偵測方法會產生相當大的影響。

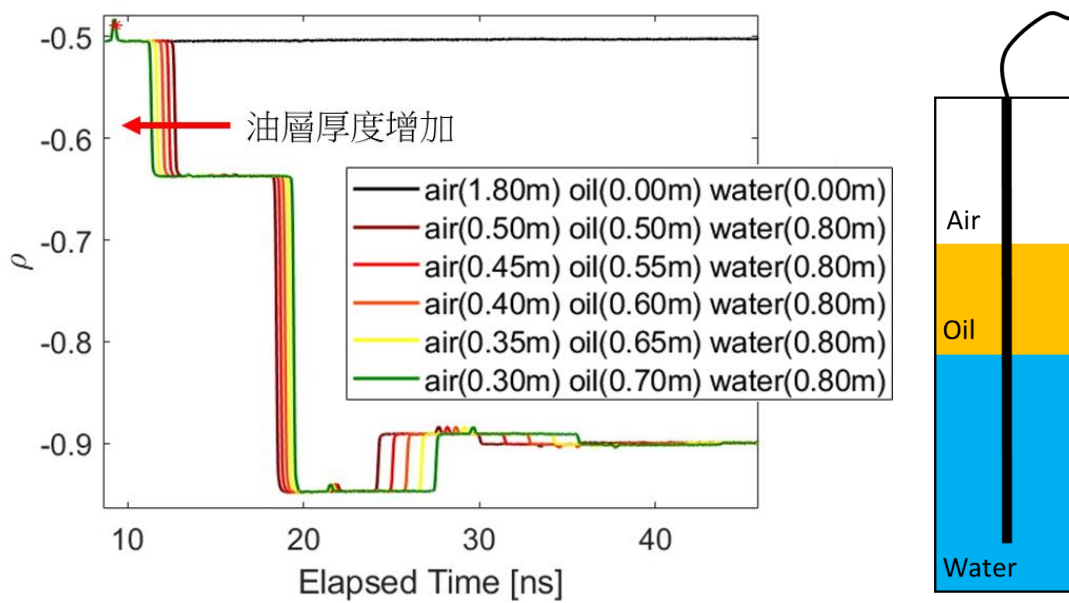


圖 47 數值模擬 TDR 波形傳播

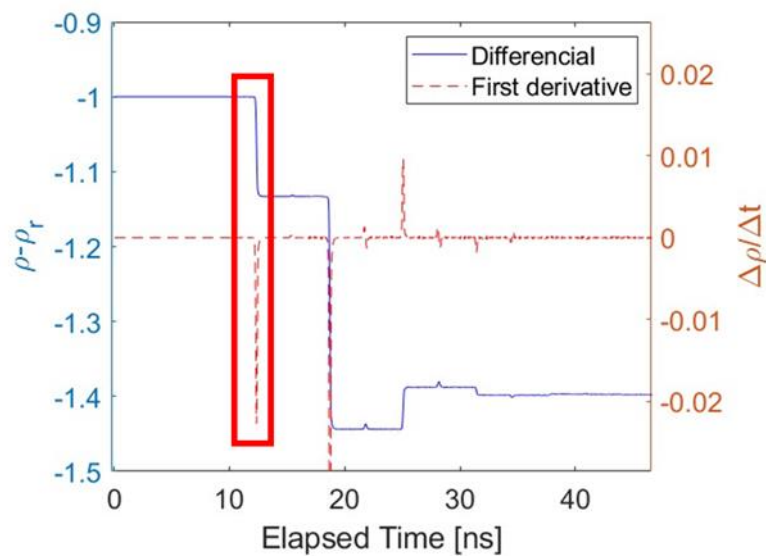


圖 48 第一個界面的位置

表 3 空氣層厚度計算誤差

空氣層厚度計算(單位:cm)					
模擬值	50	45	40	35	30
計算值	50.5	45.25	40.4	35.15	30.3
誤差	0.5	0.25	0.4	0.15	0.3



本團隊嘗試以波形圖中較容易判斷介面所在位置之訊號作為量測重點，藉由電磁波於不同介質中具有不同傳播速度的特性並利用厚度校正方法，繞過難以判讀的部分，達到量測浮油層厚度的結果；此方法利用特殊的感應元件設置使電磁波透過延伸段(同軸段)由下至上進行傳播至感應段，藉由判斷較為明顯的油-水/空氣-水介面(t_2)、感應元件開始段(t_1)與結尾段(t_3)，如圖 49 所示，在獲得上述三個介面的走時之後，計算水層走時差異(ΔT_w)及總感應元件走時差異(ΔT)如下：

$$\Delta T_w = (t_2 - t_1) - (t'_2 - t'_1)$$

$$\Delta T = (t_3 - t_1) - (t'_3 - t'_1)$$

再取 $\Delta T_w - \Delta T$ 與 ΔT 之比值進行不含油層情況下基準值的建立，並於校正中加入已知油層厚度，計算公式如下：

$$\frac{\Delta T_w - \Delta T}{\Delta T_w} = \frac{v_w}{v_a} + \frac{\Delta L_o}{\Delta T_w} \left(\frac{v_o - v_a}{v_a v_o} \right)$$

v_a, v_o, v_w 分別是電磁波於空氣、油和水當中的傳播速度，而 ΔL_o 為相對於參考值的油層厚度變化，此方法藉由電磁波在空氣、油及水中具有不同的傳播速度的關係，確定油層厚度對於走時變化所產生之影響，並於實際量測中使用此關係式計算油層厚度。

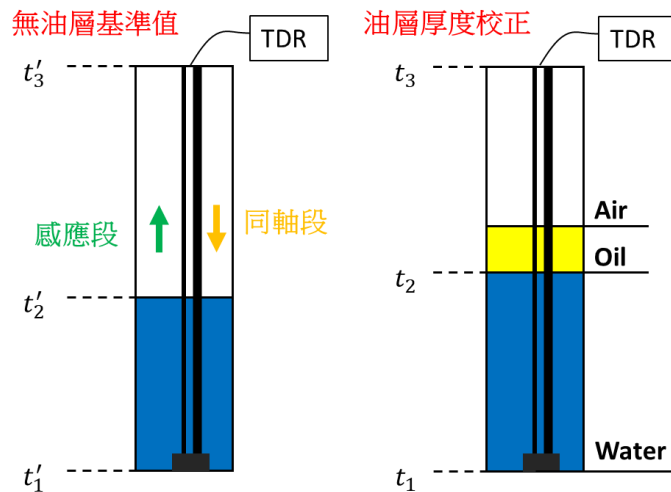


圖 49 厚度校正方法示意圖 (左)無油層參考值(右)油層厚度校正；主要量測感測器開始段(t_1)、油-水/空氣-水介面(t_2)及感測器結束段(t_3)。

於室內實驗量測之結果如圖 50 所示，可以發現圖中的三個主要量測部分都可以清楚的判斷，並藉由厚度校正方法計算油層厚度如圖 51 所示，由圖中可以觀察到量測值與實際值的趨勢相同，但仍有誤差存在，且大約在油層厚度大於五釐米時才能偵測到油層存在。

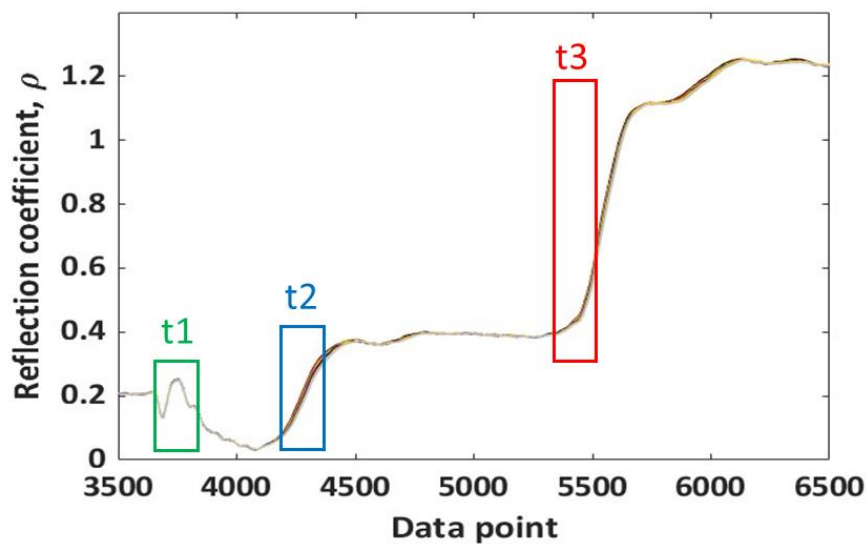


圖 50 實際量測波形

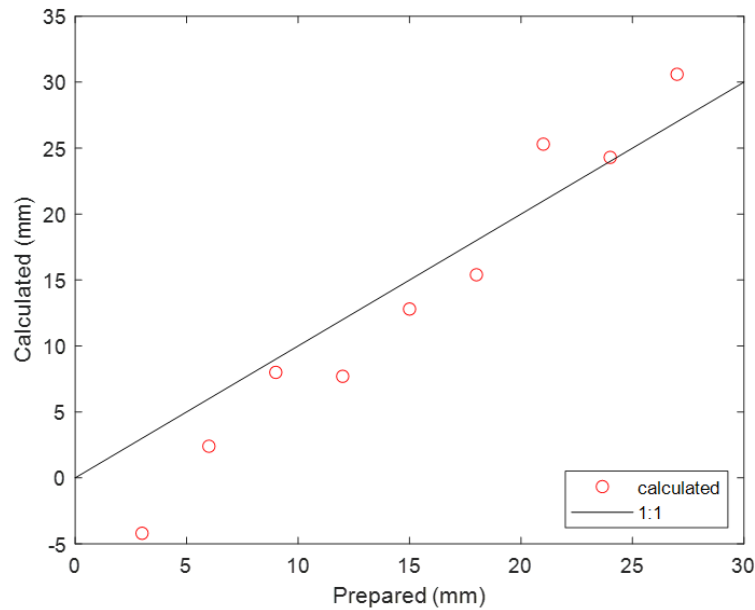


圖 51 厚度校正計算油層厚度結果；實線為實際值，圓點為量測值。

為達到偵測較薄浮油層之早期預警，本團隊嘗試使用互相關(cross-correlation)分析方法觀察有無浮油層之間的訊號波形差異，藉由此方法於浮油層厚度較薄時判斷浮油層是否存在；而浮油層僅出現於地下水層上方，因此可以將計算範圍限縮於地下水層介面附近進行局部分析。

互相關計算兩個訊號之間於不同座標偏移量中的相似程度，於此分析結果的最大值對應最佳匹配位置；

$$R_{fg}[k] = \sum_x f[x] \cdot g[x - k]$$

上式中 R_{fg} 為互相關數值、 $f[x], g[x]$ 為基準訊號及量測訊號、 k 為座標偏移量；於浮油層量測中，地下水位時常變動，使用此方法可以避免由於水位變化造成的訊號平移並限縮分析範圍進行局部互相關分析；但 TDR 波形信號受到雜訊以及衰減的影響，在無浮油層的情況下波形震幅呈現不一致，如圖 52 所示，透過進行正規化可以降低不同震幅對於



相關性計算的影響(Lewis, 1995)，正規化互相關(Normalized Cross-Correlation, NCC)計算方式如下，

$$NCC[k] = \frac{\sum_x [f[x] - \bar{f}_u] [g[x - k] - \bar{g}]}{\sqrt{\sum_x [f[x] - \bar{f}_u]^2 \cdot \sum_x [g[x - k] - \bar{g}]^2}}$$

$\bar{f}_u, \bar{g}$ 分別為基準訊號與量測訊號的平均值，此方法透過將兩個訊號間的互相關數值除去兩個訊號自己的自相關數值已達成正規化的效果；另外亦嘗試使用快速正規化互相關(Fast Normalized Cross-Correlation, FNCC)方法進行計算(Yoo and Hen, 2009)，

$$FNCC[k] = \frac{1}{N} \sum_x \frac{f[x] - \bar{f}_u}{|f[x] - \bar{f}_u|} \cdot \frac{g[x - k] - \bar{g}}{|g[x - k] - \bar{g}|}$$

其中 N 為資料點總長度，此方法將訊號大於及小於平均值的數值轉換為1和-1，藉由此二元分類法快速對比兩個波形的相關性。

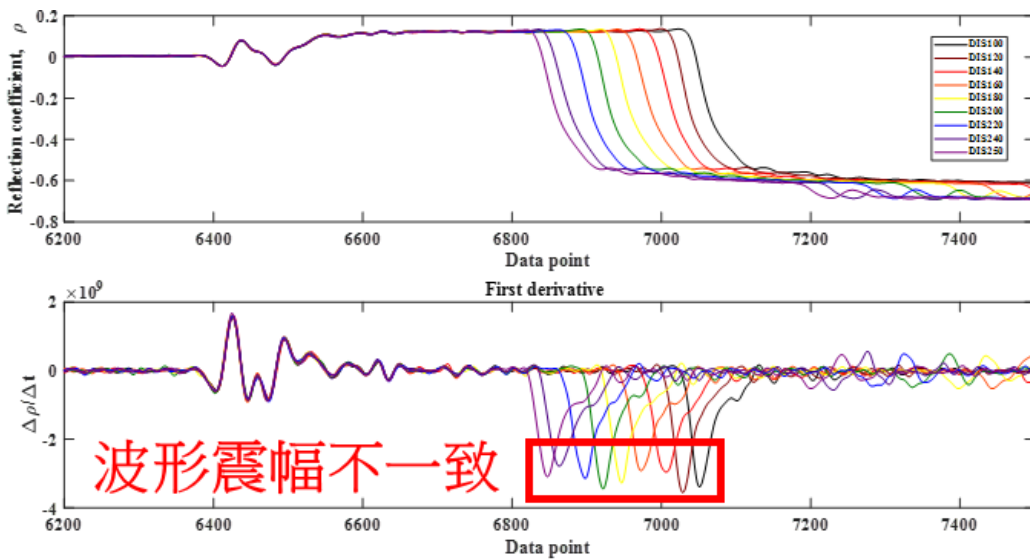


圖 52 無浮油層量測波形 (上)原始波形 (下)一階微分波形

由於互相關分析需觀察量測波形的細微變化，為收錄高品質且不受外部干擾的量測訊號，本團隊設計一堅固且適用於現場環境之同軸感測



器，如圖 53 所示，將電磁波感應範圍限縮在感測器當中，並在感測器上留有允許液體流經之孔洞，使地下水及浮油層能順利地被感測器偵測，以排除可能接收到的外部干擾，降低量測可能發生誤判的機率。



圖 53 同軸感測器

互相關分析可用以評估兩原始波形之間的相似度，亦可使用一階微分波形進行評估，後續將對比使用這兩種波形之結果並嘗試擷取不同波形資料長度藉以得到較佳的分辨可靠度。在進行分析之前經過實驗觀察可以發現當浮油層厚度增加時，TDR 波形主要變化處在一階微分最小值之前，因此後續僅擷取最小值之前之波形進行互相關分析，如圖 54 所示，藉此以降低後續資料中所帶的雜訊影響；互相關分析中，使用無浮油層之訊號波形作為基準訊號與其餘量測訊號進行比對，並僅評估波形最相似處，也就是互相關分析之最大數值隨浮油厚度增加的變化，如圖 55 所示，使用 NCC 及 FNCC 皆能有效分辨出小於 5 mm 的浮油層厚度；由於互相關分析方法主要用於提前預警因此後續將縮小擷取波形範圍至 250 ps 並僅評估浮油層厚度小於 10 mm 之情境，藉以降低多餘訊號可能造成之雜訊影響，且加入原始波形一同進行比較，因一階微分之波形雖能放大波形不同之處但也同時放大雜訊之影響；而分析結果如圖 56、圖 57 所示，當使用較小的擷取範圍時，FNCC 方法較可能出現誤判，而原始波形之 NCC 方法提供較高之分辨可靠度，因此當浮油層小於 10 mm 時，可以藉由 NCC 方法以及適當之擷取範圍分析原始波形以分辨浮油層是否存在，作為定量分析前之提前預警方法。

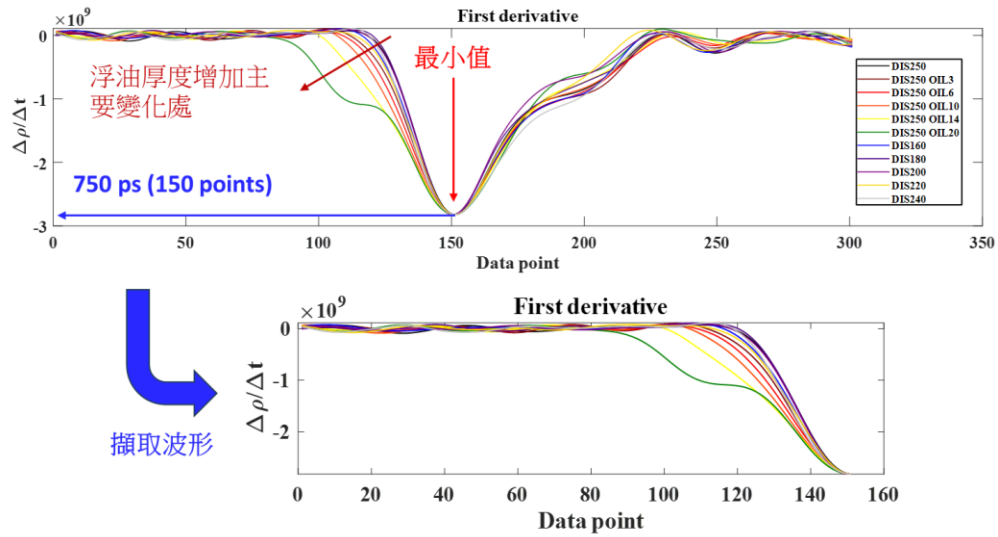


圖 54 擷取波形方法

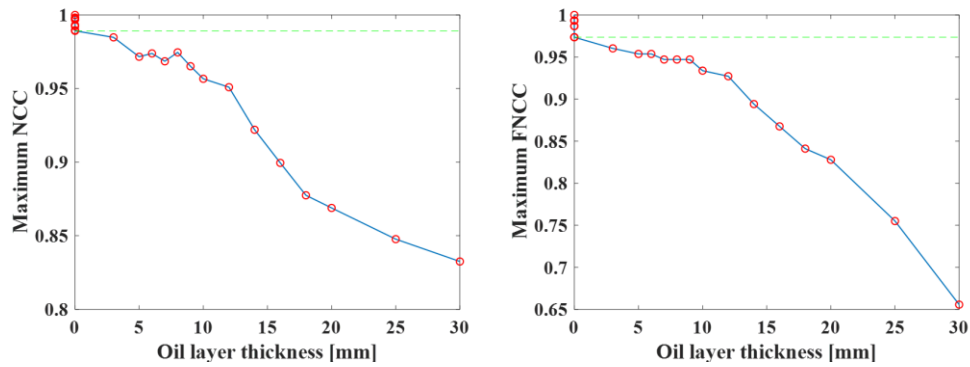


圖 55 一階微分波形進行正規化互相關分析之結果，擷取一階微分最小值之前 750 ps 之波形 (左) NCC (右) FNCC

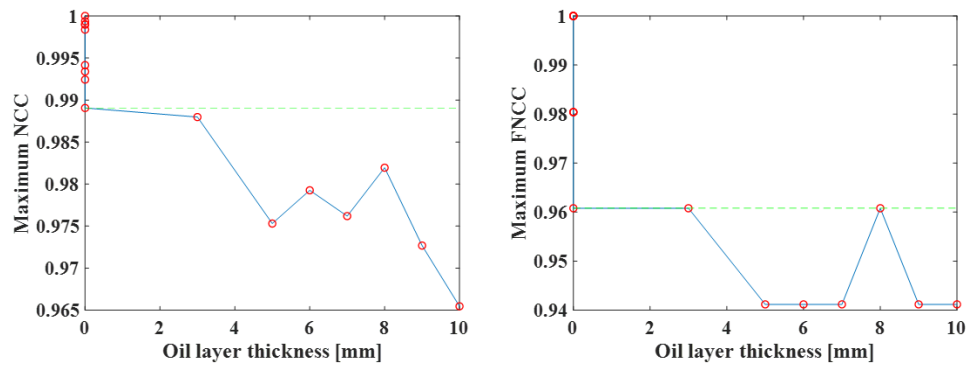


圖 56 一階微分波形進行正規化互相關分析之結果，擷取一階微分最小值之前 250 ps 之波形 (左) NCC (右) FNCC

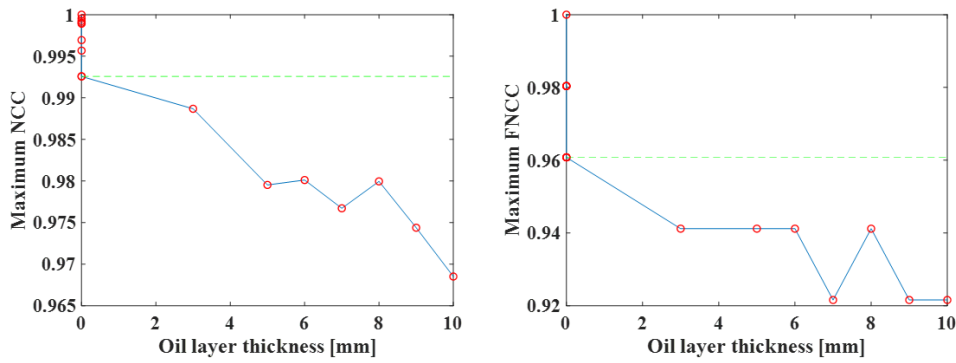


圖 57 原始波形進行正規化互相關分析之結果，擷取一階微分最小值之前 250 ps 之波形 (左) NCC (右) FNCC

雖然時域分析方法有其可行性，但其分析可能受到雜訊的影響進而導致可信度受限，且不容易自動化。為了突破性提升浮油偵測的精度與進行自動化的定量分析，本年度執行期間提出一創新的想法將量測資料推展至頻率域進行分析，藉由頻率間隔等於總時間長度倒數的關係，利用將時間域資料進行零值填充拓展總時間長度以增加頻率域解析度及量測的可信度；並利用計畫團隊前期發展之 TDR 量測介電頻譜技術 (Ngui and Lin, 2022)，如圖 58 所示，透過增加一阻抗不匹配段與創新的 Reflection-Decoupled 分析以排除量測儀器之輸入訊號影響，關於此方法之說明如下：

TDR 系統的基本模式為一維 TEM 模式，並可以利用射線追蹤圖定義 TDR 訊號的波傳播，其中傳播函數

$$H(L, \varepsilon^*(f))$$

可以用來表示電磁波沿傳輸線傳播過程中的衰減和相位變化， L 代表傳輸距離、 $\varepsilon^*(f)$ 為傳輸線中介質之複介電常數、 f 為頻率，當輸入訊號進入傳輸線系統並沿著同軸電纜 (Leading Cable, LC) 傳播至介面一 (Interface I) 時，部分入射波被第一次反射 (R_1)



$$R_1 = X \cdot F \cdot \rho_1 \cdot B$$

X 為儀器輸入訊號之函數、 F 和 B 分別為訊號在 LC 中向前和向後傳播的函數，而 ρ_1 為介面一處的反射係數並可由下式計算得出

$$\rho_1 = \frac{Z_{cMS} - Z_{cLC}}{Z_{cMS} + Z_{cLC}}$$

其中 Z_{cLC} , Z_{cMS} 分別為 LC 和阻抗不匹配段(Mismatched Section, MS)中之特性阻抗。剩餘未被反射的訊號經由介面一後傳播並進入 MS ，當傳播至 MS 和感測段(Sensing Section, SS)之間的介面二(Interface II)時會引起第二次的反射，而 ρ_2 為介面二處的反射係數，其中包含來自感測器的所有影響，透過 TDR 綜合波傳播模型(Lin and Tang, 2007)可以將其等效為單一阻抗以減少分析的複雜性並推導出

$$\rho_2 = \frac{Z_{cSS} \cdot \coth(\gamma_{SS} L_{SS}) - Z_{cMS}}{Z_{cSS} \cdot \coth(\gamma_{SS} L_{SS}) + Z_{cMS}}$$

$$Z_{cSS} = \frac{Z_{pSS}}{\sqrt{\epsilon^*}}, \quad \gamma_{SS} = \frac{j2\pi f}{c} \sqrt{\epsilon^*}$$

其中 Z_{cSS} , Z_{pSS} 為 SS 中的特性阻抗及幾何阻抗、 L_{SS} 為 SS 之長度、 γ_{SS} 為的傳播常數、 c 為真空中的光速、 $j = \sqrt{-1}$ 。前兩次主要的反射之後進一步分析在 MS 內的多重反射，透過射線追蹤和級數收斂推導第一次反射之後的反射($R_{remaining}$)

$$R_{remaining} = XFB[H_{MS}(1 - \rho_1^2)(\rho^2)] \frac{1}{1 + \rho_1 \rho_2 H_{MS}}$$

其中 H_{MS} 為 MS 中的傳播函數，並與第一次反射(R_1)取比值得到 RDR 值

$$RDR = \frac{R_{remaining}}{R_1} = \frac{\rho_2 H_{MS}(1 - \rho_1^2)}{\rho_1(1 + \rho_1 \rho_2 H_{MS})}$$



藉由此 RDR 值可以將與儀器輸入相關的 X 、 F 、 B 函數抵銷，並使用 TDR 綜合波傳模型(Lin and Tang, 2007)之理論值最佳化擬合實際量測波形，以描繪出單一介質的介電頻譜；而在此方法中 Z_{CLC} , H_{MS} , Z_{CMS} , L_{SS} , Z_{pSS} 為系統參數，於實際量測之前只須使用已知材料進行單次校正，並且在更換儀器後亦不需重新校正，這些優勢大幅提升感測器設計的靈活性及實際量測的便利性。

在浮油量測的情境下量測材料為已知(空氣、油和水)，如圖 59 所示，藉由輸入已知材料的介電頻譜則可以量測各層材料的厚度，同樣使用 TDR 綜合波傳模型(Lin and Tang, 2007)推導 ρ_2 如下：

$$\rho_2 = \frac{Z_{pSS} \cdot \frac{ow + \tanh(\gamma_A L_A)}{1 + ow \cdot \tanh(\gamma_A L_A)} - Z_{CMS}}{Z_{pSS} \cdot \frac{ow + \tanh(\gamma_A L_A)}{1 + ow \cdot \tanh(\gamma_A L_A)} + Z_{CMS}}$$

$$ow = \frac{1 + \sqrt{\epsilon_W^*} / \sqrt{\epsilon_O^*} \cdot \tanh(\gamma_O L_O) \cdot \tanh(\gamma_W L_W)}{\sqrt{\epsilon_W^*} \cdot \tanh(\gamma_W L_W) + \sqrt{\epsilon_O^*} \cdot \tanh(\gamma_O L_O)}$$

ϵ_W^* , ϵ_O^* , γ_A , γ_W , γ_O 為已知空氣、油、水之介電頻譜及傳播常數， L_A , L_O , L_W 分別為空氣、油、水之層厚度，同樣透過擬合量測值和理論值以反算出各層厚度。

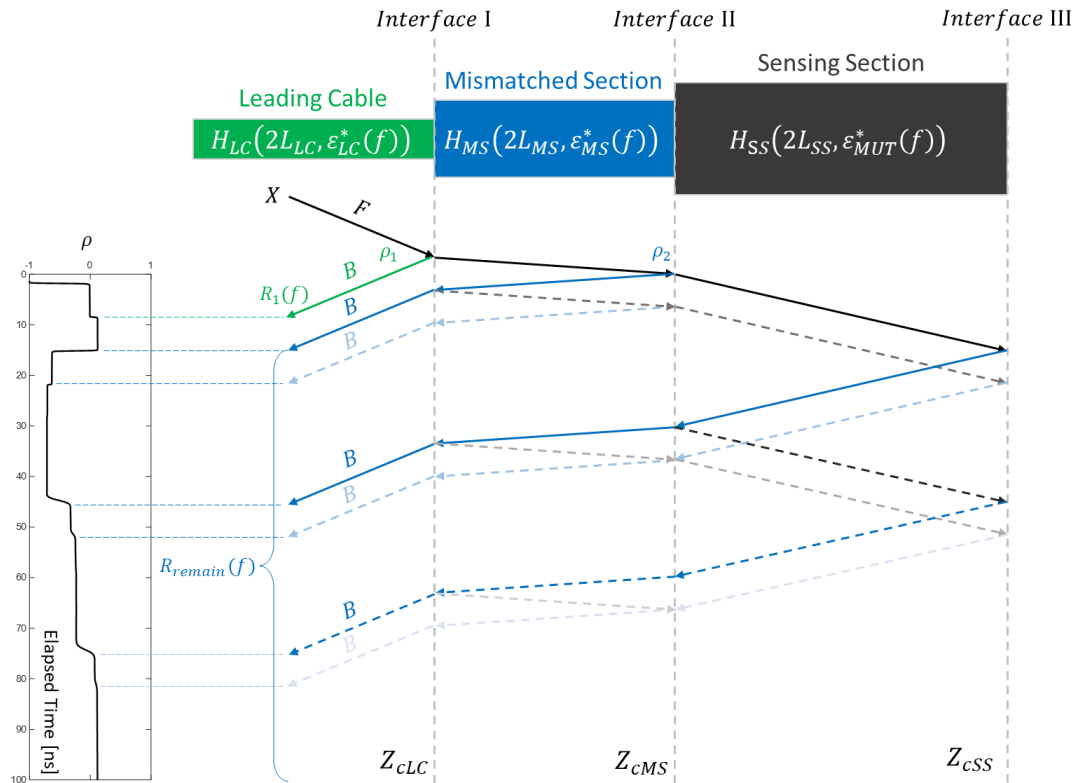


圖 58 TDR 介電頻譜量測技術示意圖

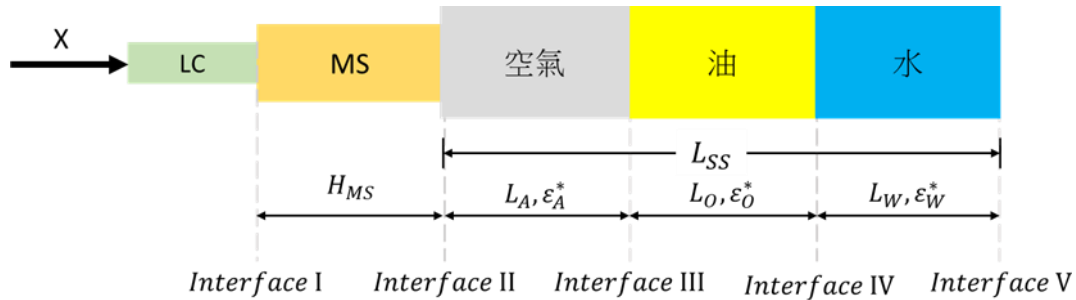


圖 59 浮油量測參數示意圖

此 RDR 方法所需使用之感測器只需將本團隊設計之同軸感測器之纜線連接處進行更換即可使用，如圖 60 所示，透過於纜線連接處後加長並置入介電塊以製作人為阻抗不匹配段；由圖 61 可明顯觀察到人工阻抗不匹配段導致之波形變化，而後透過最小二乘法進行參數擬合 RDR 於有效頻率範圍內之理論值及量測值，如圖 62 所示，由圖可知理論值參數大致上擬合量測值，但仍有部



分誤差存在，此現象由於感測器與纜線連接處之阻抗匹配仍未完善所導致，感測器連接處之調適做工精細且需多方嘗試，未來將持續精進感測器製作；而針對浮油層的實際量測結果如圖 63 所示，由於參數擬合仍有誤差存在，無法很好的使理論參數反映量測值，因此僅能量測到油層厚度大於 10 mm 的情況；若使用數值模擬 TDR 波形(Lin and Tang, 2007)模擬去除連接處不匹配之波形進行分析則能夠量測到大於 3 mm 之浮油層厚度，如圖 64 所示，將定量分析往更薄浮油層厚度推進。

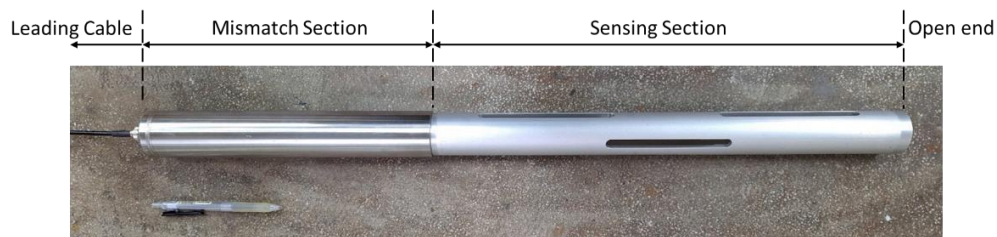


圖 60 RDR 方法感測器

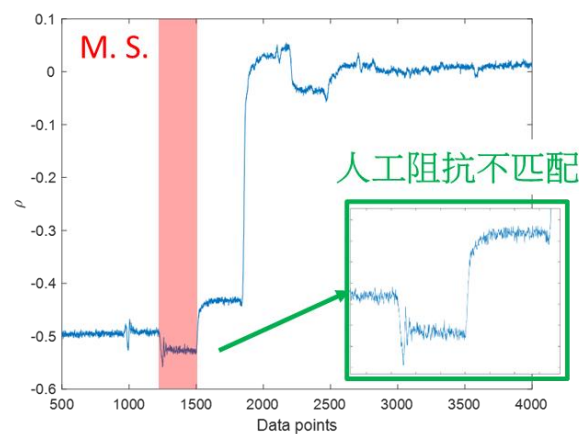


圖 61 RDR 方法感測器收錄原始波型

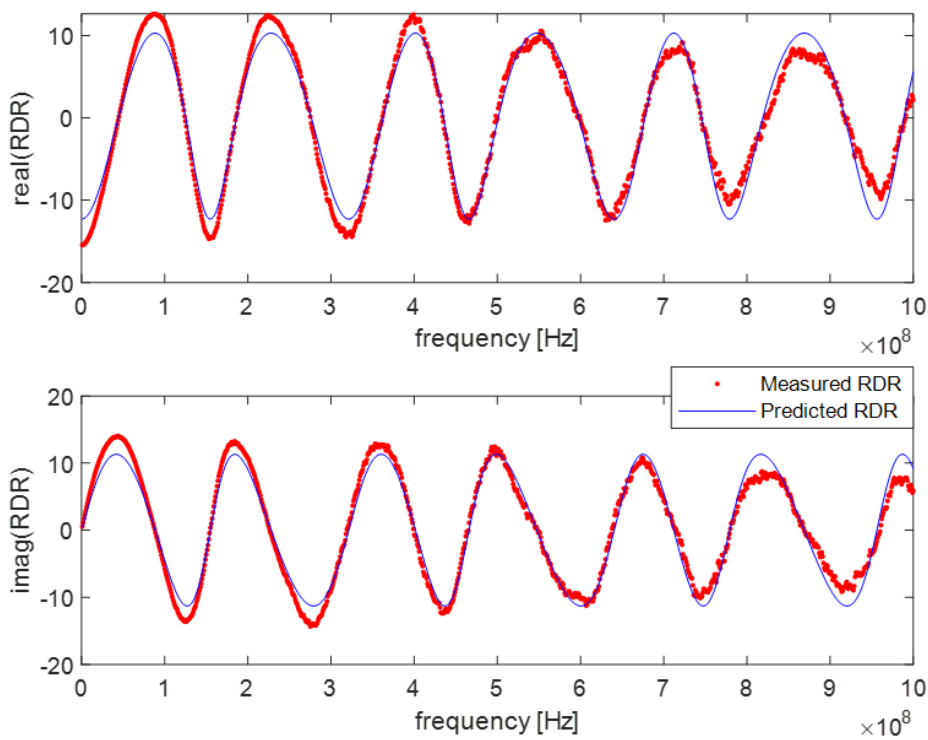


圖 62 RDR 方法參數擬合

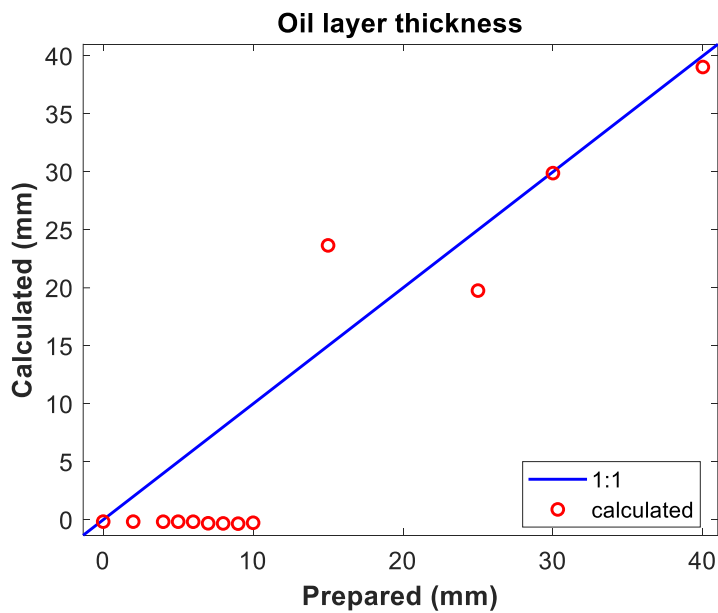


圖 63 RDR 方法室內實驗量測結果

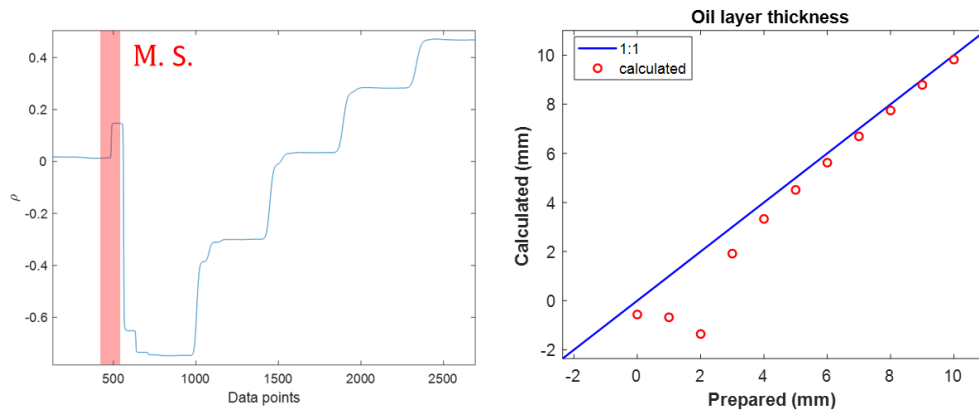


圖 64 RDR 方法數值模擬結果 (左)數值模擬 TDR 原始波形 (右)模擬資料分析結果

4.4 第二年模場試驗

4.4.1 模場場址勘查

第二年的模場試驗場址為昱佑加油站，根據計畫書審查委員的建議與第二年建置監測系統的需求，透過高解析度三維透地雷達與三維地電阻影像剖面法進行期中場址探勘，瞭解本場址地底下電性地層之電阻率與透地雷達異常訊號分布，提供後期安裝智慧型監測系統位置之參考。

(A)三維透地雷達成果

探測工作採用非破壞檢測技術「透地雷達」(Ground-Penetrating Radar)，主要原理是藉著發射雷達波 (Radar Wave) 訊號，並利用雷達波遇到地層介面因上下地層之介電常數差異而產生反射波，分析反射波來回所需要的時間、波型、振幅等資料，來判別反射體的性質 (例如：管線、地層岩性、空洞等) 與位置，此一反射訊號為地面上的接收器所接收、放大、數位化後，記錄成原始資料，經由室內資料處理後，可以研判地下構造、層面、地下異常物分佈狀況。

場址油槽區可藉由地層中埋設不同材質管線所造成的反射波形特性，探測地下管線埋設深度與位置，透地雷達設備採用美國 GSSI 公司



SIR3000 透地雷達系統，機體主要分為五大部分：主機、雷達天線、移動式車架、電源供應器（鋰電池）和專用傳輸線，天線頻率為 400 MHz，探測深度為 0~3 公尺，透地雷達作業施測流程如圖 5-1 所示，施測時所應設定的數包括使用頻率、天線間距、天線組移動距離、天線排列方式、時間視窗及疊加次數等，可依野外施測實際狀況進行調整。

在 GPR 圖像特徵判識上，依照國內地下環境探測經驗，可以透過地下介面之強烈反射、能量衰減速度、波幅變化情形，其他特徵如不連續、錯動、分叉、合併、倒 V、重複反射、拱形現象等雷達波特徵，評估地下環境特徵，但雷達波反射特徵仍須考量場址地質條件、干擾條件、污染分布特性等，如現場對於訊號有疑慮，請現場增加探測測線，避免後續無法正確成果判識，茲彙整環境調查中常見雷達成果圖判識圖形供相關使用單位判識參考，如表 4 所示。

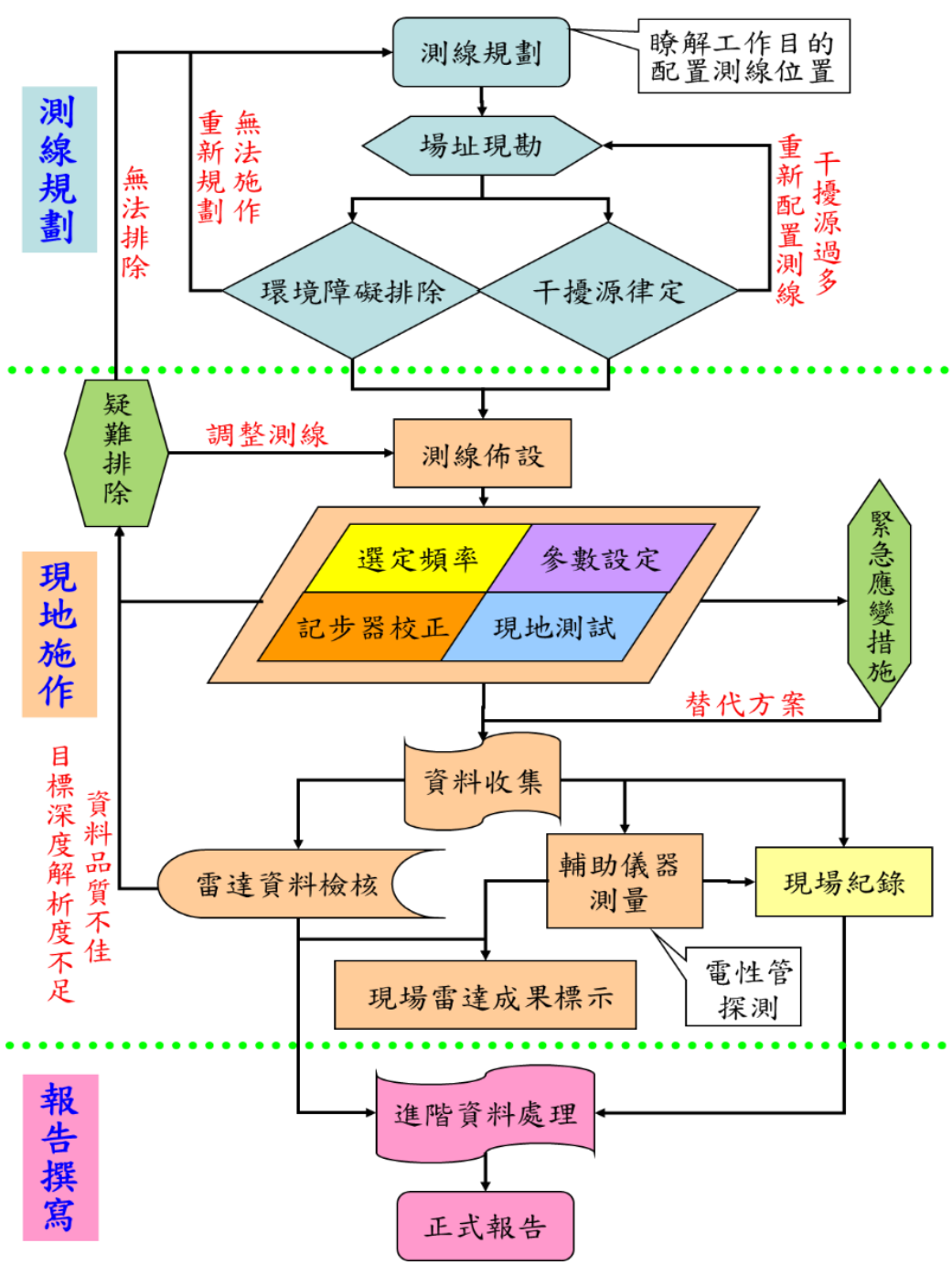


圖 65 透地雷達作業施測流程圖

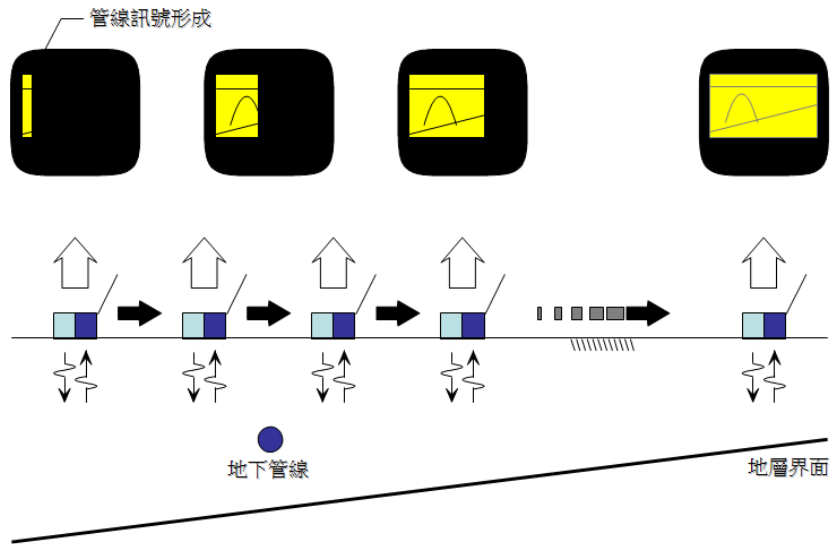


圖 66 透地雷達訊號成形示意圖



表 4 透地雷達波形特徵判識參考表

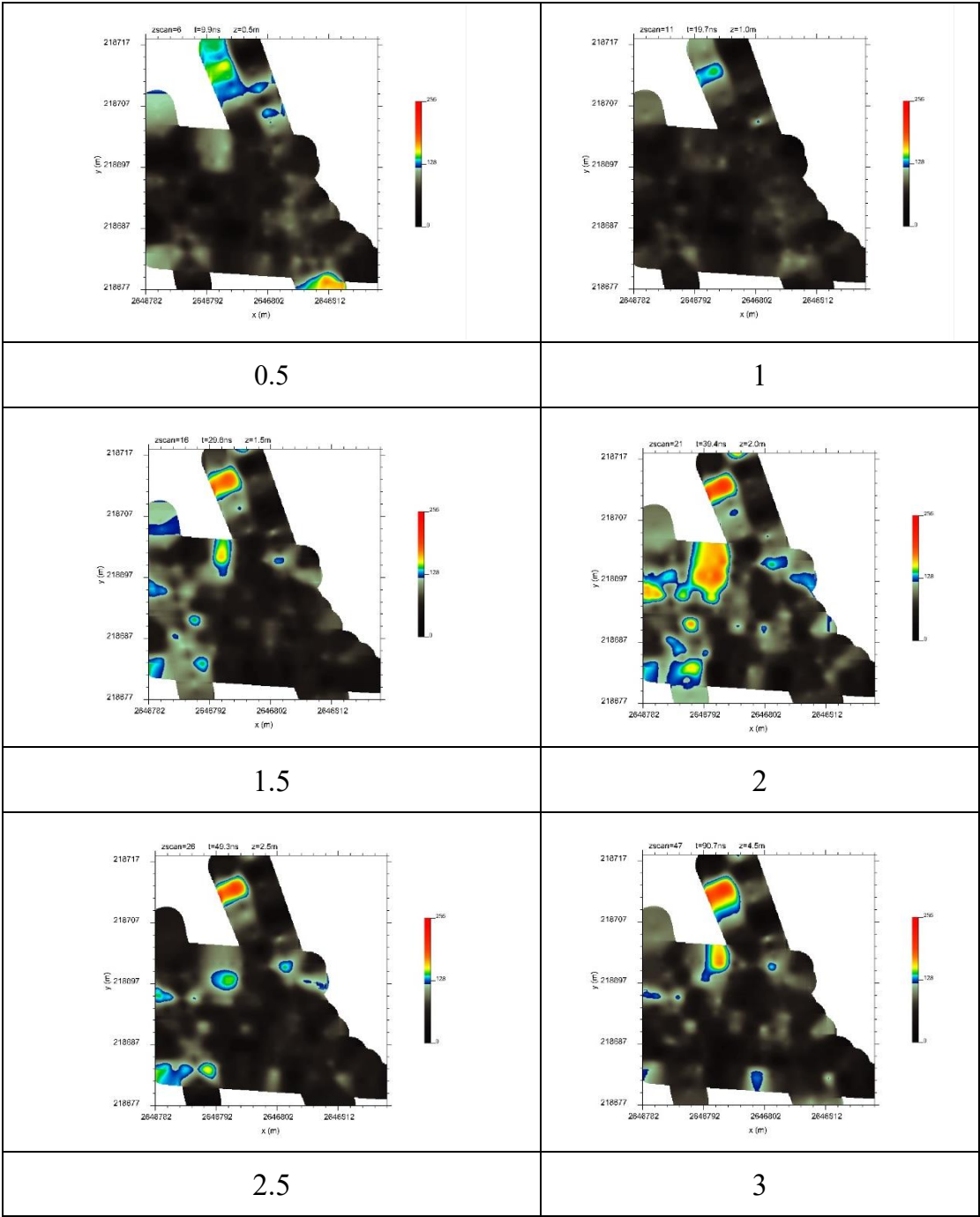
常見反射型態	波形特徵	波形參考	常見反射型態	波形特徵	波形參考
層狀地層	連續層狀		異常反射特徵	異常強烈反射、能量衰減、波幅變化	
複雜層狀地層	不平整特徵呈波形層狀		地表上結構干擾：如屋頂、高壓電塔、管架	雙曲線繞射(通常電磁波速 > 0.2m/ns)	
傾斜地層或構造	傾斜層狀		導電差的塑膠材料	電磁波能量上下震盪造成類似重覆反射	
礫石層或級配層	連續小且密集繞射		導電佳的金屬管線	金屬物質遮蔽造成重覆倒V強反射現象	
地下管線	倒V或繞射特徵		金屬結構側向反應	類似地層傾斜波幅形狀	
RC 鋼筋結構	等間距繞射波幅		電磁波干擾	不明強弱雜訊波幅形狀	
混凝土鋪面裂隙	強反射波幅形狀		地層疏鬆與掏空	不連續強反射發生邊界有傾斜反射特徵	
鋼筋網鋪面	連續鋸尺狀繞射波幅				
金屬水溝或金屬人孔	平面重覆反射波幅		常見市區道路管線	強反射繞射分布複雜	

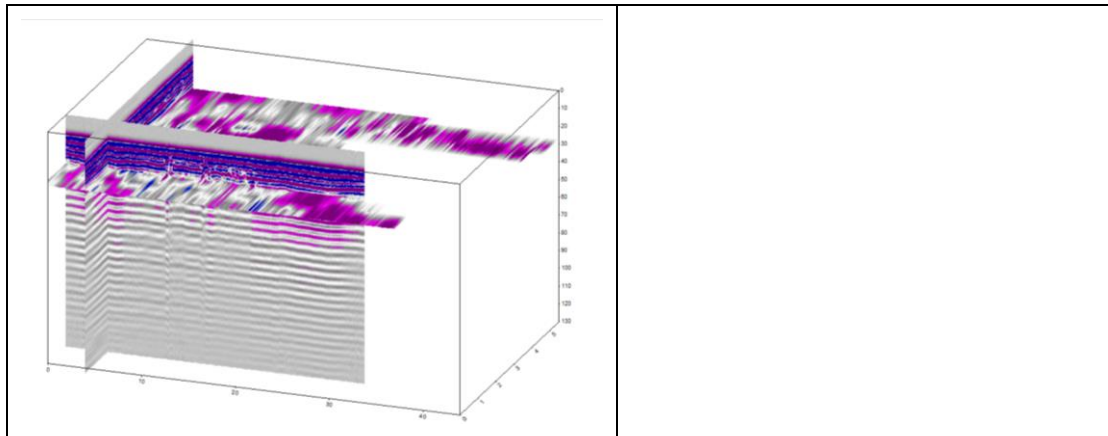


圖 67 三維透地雷達測線示意圖

本計畫採用非破壞檢測技術「三維透地雷達」(3D Ground-Penetrating Radar)進行探測，可藉由地層中埋設不同材質管線所造成的反射波形特性及接收地下通過電流而產生電磁信號，探測可能污染洩漏深度與位置，依模場檢測區域共探測 11 條測線形成之三維成果。相關等深度切片圖成果如下所示：

很清楚淺層 1 公尺內並無明顯異常，但超過 1 公尺，如圖紅色圈圈位置即監測井超標位置開始出現異常反射訊號，尤其是 2 公尺左右最為清楚。隨著深度越深，此異常開始減弱。此異常位置與近期監測結果符合，推測汙染仍未移動至場外。所以未來本監測系統會以此處為監測重點區域。





(B)三維地電阻影像剖面法成果

地電測勘技術可以分為主動發射電流以量測地層的電阻率，或被動量測地層的自然電位。主動量測依訊號源不同，可再分為直流電阻法(Direct Current method; DC method)與交流電阻法(Alternating Current method; AC method)。直流電阻法是地電法中最早使用的測勘技術，特別是在井孔內的地電井測(electrical well logging)，將探測設備放入井中，可量測到地質材料隨深度的電性改變，藉以瞭解地下構造，此法至今仍是石油探勘所必須進行的井測量測方法之一。直流電阻法於地表上量測最早發展成熟的是一維垂直測深法 (Vertical Electrical Sounding, VES)，量測方式是以成對的電流極 A、B 和成對的電位極 M、N 設置於地表，藉由改變 AB、MN 的間距長度，或 AB 與 MN 之間的長度以量測不同深度的地層視電阻率(Apparent Resistivity)，以瞭解地下電性。直流電阻法(DC resistivity method)簡稱地電阻法(resistivity method)。它是使用人為方式將電流通入地層中以建立電場，電流通常經由一對接地導體稱為電流極 (current electrodes)通入地層，在另一對接地導體之間測量此電場的電位差。供作測量電位差之用的接地導體稱為電位極(potential electrodes)。由於通入地層中的電流分布與電極的位置及地層的電阻率有關，改變電極的位置可測得不



同位置或涵蓋不同深度的電流分布訊號，加以解釋，可以逆推出地層電阻率分布的形貌。地電阻影像法(Resistivity Image Profiling, RIP)屬於地球物理學中直流電阻法的衍伸應用，係主動式將直流電通入地層以量測地下材料電位差，反算地層的視電阻率，經由軟體逆推地層之電阻率，再以電阻率描繪地層之電性剖面，即地電阻率剖面(resistivity profiling)，藉此描繪地層環境特徵，地電阻影像法應用於地層探測可協助正確地研判地層岩性分布、地質構造變化區域、水文地質分布、地下水資源、地層中之異常區、礦產資源、地熱探勘。施作方式是在地表上以「直線」且「等間距」的方式配置若干個電極，每個電極再與金屬探棒連接，金屬探棒釘於地表且與地層有良好的接觸，由地電儀主機控制不同對的電極分別作為電流極與電位極，地電阻影像法的儀器設計概念就是在地表一次配置多個電極，然後以電腦控制各電極作為不同的電流極或電位極，如此，一次就能收集到不同深度的電位差，依地電量測原理，量測點類成一個三角形或倒梯形的分布，再將所有量測值以數值方法逆推演算後再進行內插即可呈現出測線下電性剖面的等值圖，進而推演出不同深度的電阻率變化。本計畫透過三維電阻率法量測加油站地下電性地層分布，並描繪出可能異常區域與深度。由於加油站站體的地板為鋼筋混凝土結構，鋼筋會影響資料品質，所以本計畫每一個電極位置都透過 RC 螺旋鑽機洗出讓不銹鋼電極不接觸地板鋼筋的孔，雖然耗時耗工目的是得到最佳的三維電阻率成果圖。相關施測與洗孔照片如下所示：



圖 68 電極洗孔照片圖



圖 69 電極施測孔照片圖



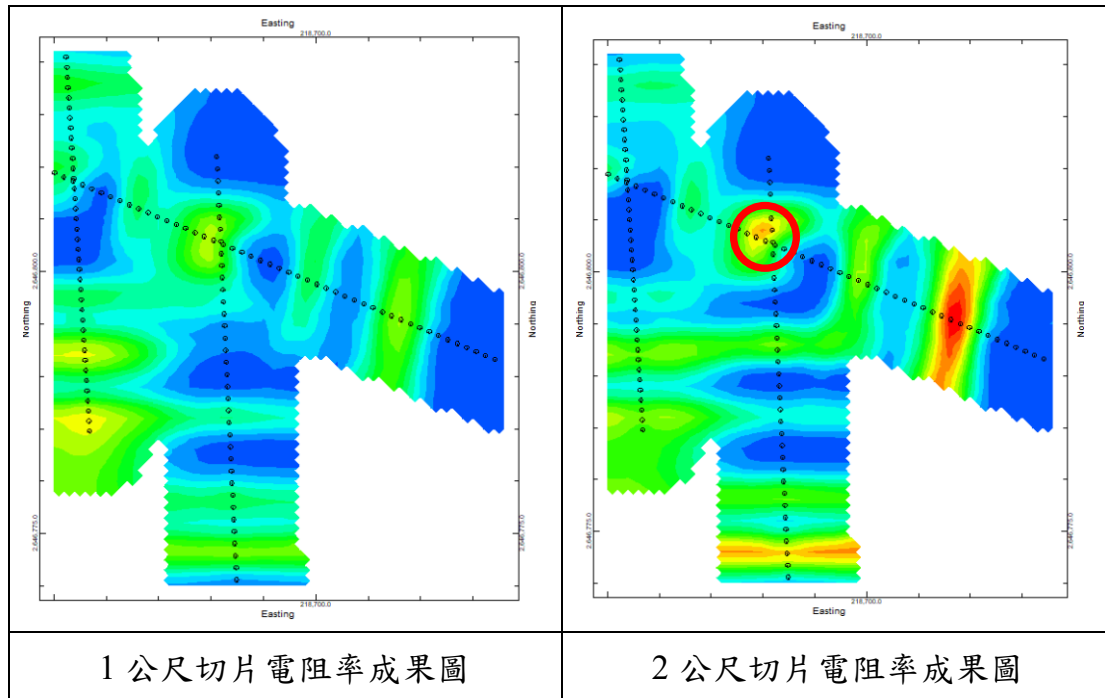
圖 70 地電阻法施測照片圖

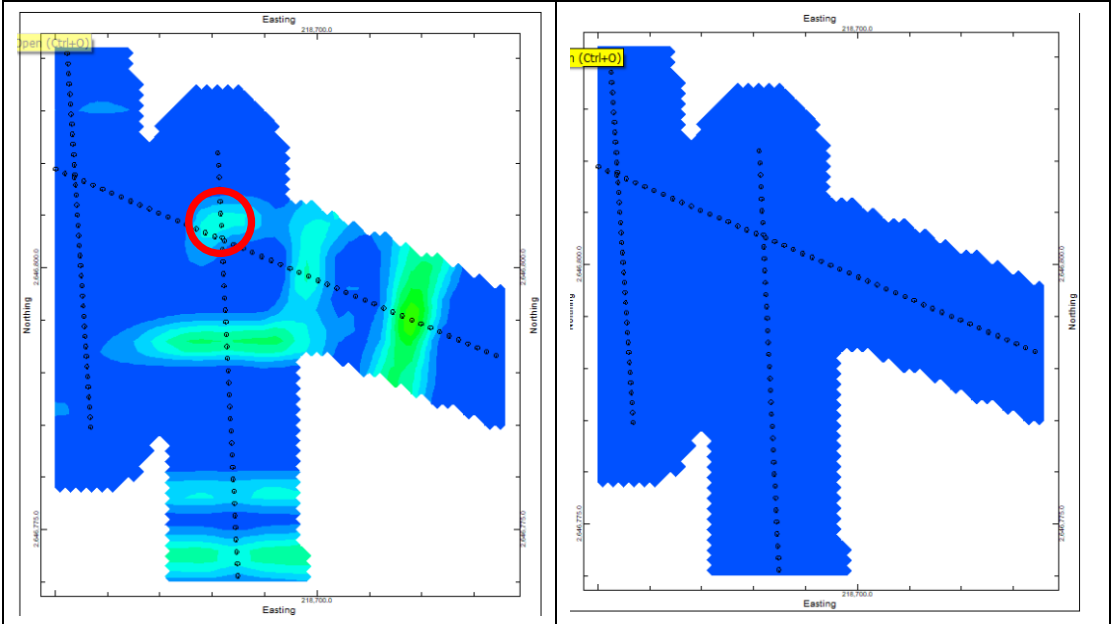
本計畫採用三維電阻率探測法進行探測，可藉由地層中不同材質電阻率，探測可能污染洩漏深度與位置，相關三維成果。相關等深度切片圖成果如下所示：

很清楚淺層 1 公尺內並無明顯異常，但超過 1 公尺，如圖紅色圈圈位置即監測井超標位置開始出現異常反射訊號，尤其是 2 公尺左右最為清楚。隨著深度越深，此異常開始減弱。此異常位置與三維透地雷達成果和近期監測結果符合，推測汙染仍未移動至場外。所以未來本監測系統會以此處為監測重點區域。其餘帶狀異常推測維管線或者人工構造物。



圖 71 三維地電阻測線示意圖





3 公尺切片電阻率成果圖

4 公尺切片電阻率成果圖

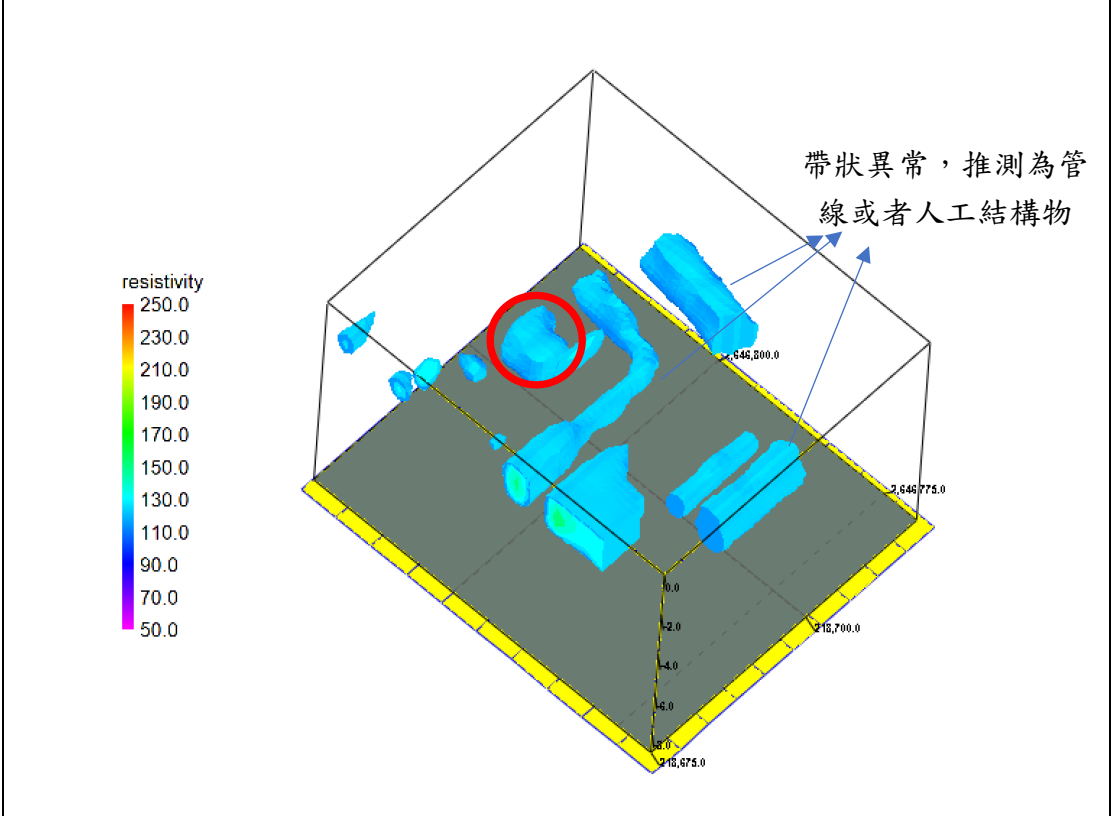


圖 72 三維異常成果圖



4.4.2 浮油監測模場試驗

模場現地監測系統架設如圖 73 所示，在監測箱內部使用 Raspberry Pi (樹梅派) 微型單板電腦做為資料擷取器連接 TDR 監測儀器，並透過 Python 程式達到自動化收錄資料的效果，再將自動化收錄資料透過網路由現地監測系統端傳送至使用者端進行資料後處理；但因現地並無市電可供樹梅派主機使用，本團隊使用太陽能作為主要供電來源，架設太陽能板於陽光充分處並於監測箱內設置車用電瓶作為儲電設施使夜間或天候不佳時仍有電力可供使用；而 TDR 感測器需要觸碰到地下水位面及浮油層才能進行量測，而感測器製作費時且須經過多次調整，本團隊於計畫時程內先行製作有限長度之感測器作為於此模場中使用並以鋼纜懸吊感測器於監測井內使其接觸地下水位面如圖 74，再以低衰減之同軸傳輸纜線連接至 TDR 儀器進行量測。

現場進行貝勒管取樣觀察到現地確實有浮油層存在，如圖 75，而使用 TDR 收錄資料並進行局部正規化互相關(NCC)分析可以發現現場量測資料之相關性明顯低於無浮油層基準值，當 NCC 小於閾值時，表示監測波形的變化大於雜訊的跳動，因此判斷為浮油層存在，而由於互相關分析主要判斷浮油層是否存在並不適用於定量分析，在此迴歸曲線僅為方便呈現使用，此量測結果驗證浮油監測策略於現場監測之可行性。於監測站架設完畢之後續監測中，由正規化互相關分析中發現監測資料皆小於門檻值，如圖 76 所示，因此判斷為浮油層持續存在，由此可顯示自動化監測方法之有效性，並建議未來進一步精進正規化互相關分析之訊號處理方法，以增加此分析方法之穩定性。

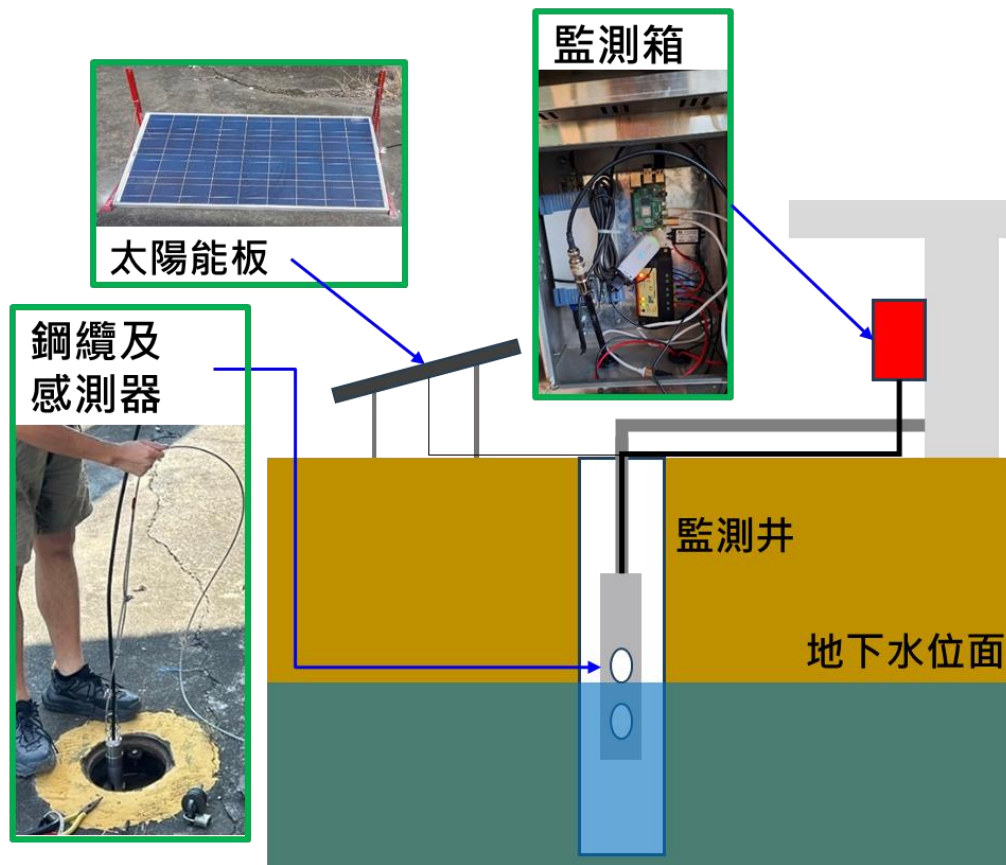


圖 73 浮油監測模場架設配置圖



圖 74 將感測器藉由鋼索懸吊於監測井內

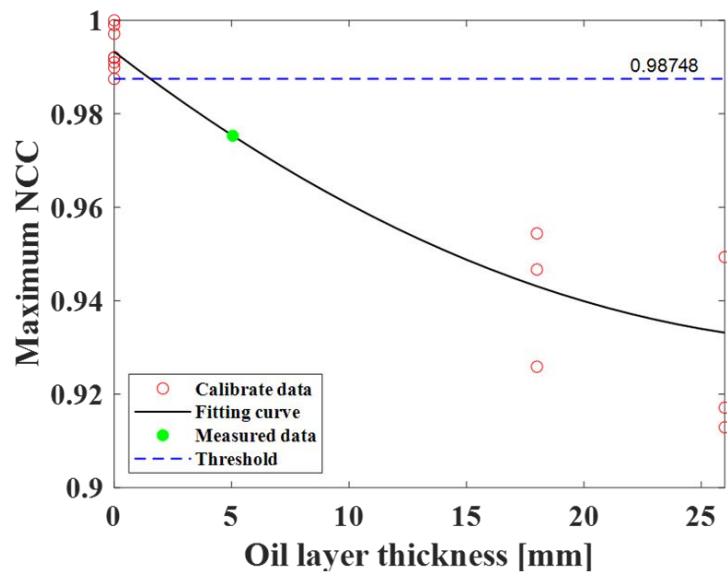


圖 75 現地貝勒管取樣及 TDR 資料分析；(左)貝勒管取樣，藍色圈起處有明顯浮油層存在。(右)局部正規化互相關分析，紅色空心圓點為實驗室建立之基準值，黑色實線為基準值回歸線，綠色實心圓點為量測資料，藍色虛線為判斷浮油層是否存在之閾值。

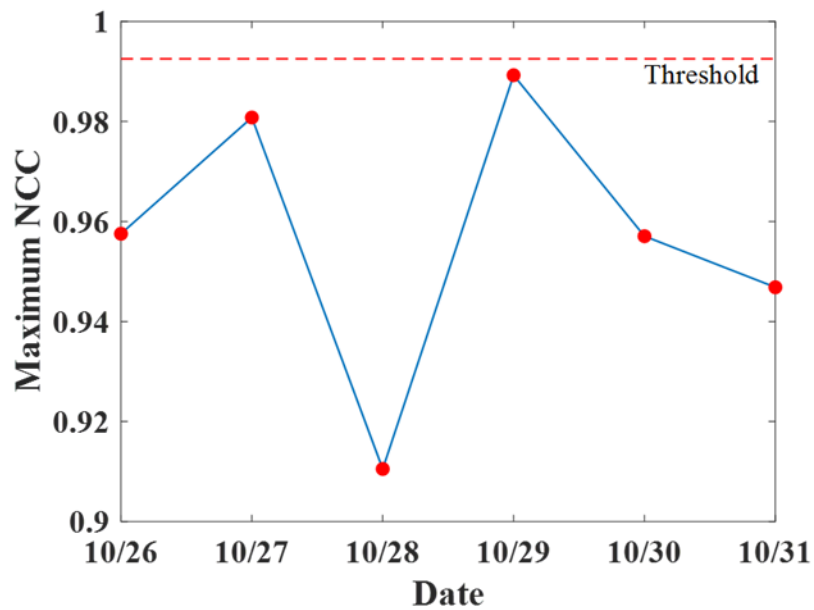


圖 76 模場現地監測數據



4.4.3 執行階段遭遇之困難與解決方法

由於 TDR 感測器需接觸到地下浮油層才能進行偵測，但由於現場地下水位較深，感測器長度難以到達地下水位面，因此本團隊於感測器頂端另外加裝吊環並利用鋼纜將感測器懸吊至可感應到地下浮油層處，另外，初版感測器之連接頭尺寸無法放入監測井內，後續將連接頭尺寸縮小後才得以將感測器完全放入監測井內，感測器後續的微型化設計也相當重要。



第五章 結論

本研究的目的是在於探討 TDR 技術在儲槽與管線滲漏監測的實際應用，透過更全面性的考量，建置監測技術在不同管道與不同液體的標準流程，並探討現場實際環境變化對於監測之影響以及發展測漏管浮油監測技術，再進一步建立自動化收錄資料之監測系統，發展出適用於土壤與地下水污染防治的滲漏監測系統標準建置流程。

本研究完成工作成果與主要發現如下：

(1) 建置 TDR 儲槽管線污染滲漏之標準建置與分析方法：

監測系統之感應纜線需預埋至管線儲槽下方，並於感應纜線周遭填充適當之回填材，同時確保回填材下方保持通透，不使液體淤積於感應纜線底部；且若欲監測之場址為室外環境，可於欲監測之管線儲槽上方建立防水設施以避免因降雨造成雨水滲流進入感應纜線監測範圍，藉以保持高靈敏度且準確的監測數據。

本研究基於過去對於 TDR 量測技術的學理基礎以及室內試驗，已建立 TDR 滲漏監測系統標準流程與分析方法，並利用自動化收錄資料持續觀察滲漏情形並與現場實際情況進行比對，以驗證實際收錄資料之適用性及合理性。

(2) 模場試驗場址擇定：

本次模場計畫選擇了兩個試驗模場：第一個模場為南投昱佑加油站，第二個模場為陸昌化工幼獅廠。在前者模廠已經透過高解析度三維透地雷達與三維地電阻影像剖面法進行期中場址探勘，瞭解本場址地底下電性地層之電阻率與透地雷達異常訊號分布，藉此決定安裝智慧型監測系統位置。第二個模場試驗場已完成監測系統之安裝，並持續超過一年的連續持續監測，且捕捉到現場實際發生之異常訊號。



(3) 建置 TDR 即時監測系統：

本研究採用梅樹派建置智慧型洩漏監測系統，收錄電磁波波形數據，利用已建置管線污染滲漏之標準流程至現場安裝，並利用滲漏試驗模擬真實滲漏事件發生時的情況，用以測試感測系統在現場進行量測的可行性，根據試驗結果所計算之理論滲漏點為合乎現場實際滲漏情形之位置以驗證其可行性；且現場監測系統建置完畢之後，在自動化即時監測的過程當中也發現異常滲漏的狀況產生，經過現場勘查確實有滲漏事件發生，更進一步驗證即時監測系統應用在現地的可行性。

(4) 建置 TDR 測漏管浮油自動偵測與量測方法：

本研究藉由數值模擬以及室內物理實驗驗證浮油層厚度定量分析之可行性，但此方法僅適用於浮油層厚度較厚之情境，而監測目的在於即早發現及預警，因此進一步於前期使用正規化局部互相關分析進行預警並於油層厚度增加後使用厚度校正方式進行定量分析。為進一步提升偵測的靈敏度與定量分析，本年度提出創新的頻率域全波形分析方法，此分析方法之學理嚴謹並可達到定量分析浮油層厚度之效果，但其對於接頭的阻抗不連續較為敏感，因此其感測器需要更精密的改良，而藉由數值模擬及室內實驗表現出其預期達到成果與可行性，因此現地模場實驗以時域分析方法的應用為主，前述提到創新的頻域方法未來可進一步研究，監測站之架設由於感測器製作耗時且經過多次修改及調整以至於較晚執行；未來將持續收錄資料觀察時域方法於長時間監測中的成效，並與既有貝勒管採樣式監測法交叉比對，進一步驗證此方法於實際應用中之適用性、誤差及合理性。

(5) 即時監測系統與監測技術之成效評估：



即時監測系統於第一年之滲漏監測中即可看出成效，且由監測開始至今仍每日正常回傳資料，顯示此監測系統之穩定性；TDR 儀器可以額外串接多工器進行多頻道的量測並達到一機多工同時進行滲漏及浮油監測的效果，於監測成本上也有相當的優勢，監測系統的成本花費主要反映於測站架設之上，每個站點僅需約三十萬左右並視現場監測之需求而有所差異，開始監測後自動收錄傳送之資料量不大，因此所需之網路成本不高；使用單一 TDR 儀器即可進行電纜線可到達有效範圍內之自動化滲漏監測，可以減少人力到達現場的次數並兼具縮短油品滲漏預警時間的效果。

本計畫期末報告按照計畫書規劃，完成以上五點工作項目，模場試驗成果顯示 TDR 滲漏監測的可行性，於新建置之設施可沿管線預先鋪設感應纜線並利用儲槽管線滲漏監測技術以準確偵測並定位滲漏位置，而既有建置設施則可利用附近之監測井，將感測器放入井中偵測地下水以上是否存在浮油層，藉由油品滲漏影響範圍評估滲漏位置，如圖 77 所示。未來建議可持續精進 TDR 頻率域全波形分析之浮油層厚度定量方法及其所需使用之感測器配置(如感測器材質與尺寸)以提高偵測靈敏度，進一步縮短油品滲漏預警時間。

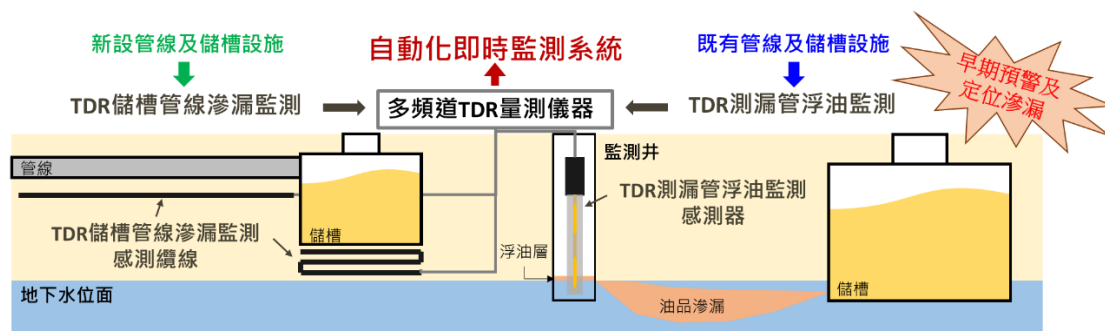


圖 77 TDR 滲漏監測應用情境示意圖



透過自動化監測系統，進行高頻率之滲漏偵測以彌補現行規範中之人工現地量測的時間間隔限制，於 TDR 滲漏監測系統偵測到滲漏同時可輔以土壤氣體監測或貝勒管取樣進行驗證，即早發現滲漏位置並進行源頭防治。



參考文獻

1. 國立交通大學防災與水環境研究中心 (2021),『電磁波時域反射法之儲槽管線滲漏監測技術評估與發展』,行政院環境保護署委託計畫。
2. 林志平、魏殷哲、王凱、林婉婷、吳采容、鐘志忠(2020)。地工電磁波導監測技術之新近發展,地工技術,166,7-16。
3. Lin, C.-P., Chung, C.-C., and Tang, S.-H. (2007). Accurate Time Domain Reflectometry Measurement of Electrical Conductivity Accounting for Cable Resistance and Recording Time. *Soil Science Society of America Journal*, 71(4), 1278.
4. Lin, C.-P., and Tang, S.-H. (2007). Comprehensive wave propagation model to improve TDR interpretations for geotechnical applications. *Geotechnical Testing Journal*, 30(2), 90–97.
5. Lin, C.-P., Tang, S.-H., Lin, C.-H., and Chung, C.-C. (2015). An improved modeling of TDR signal propagation for measuring complex dielectric permittivity. *Journal of Earth Science*, 26(6), 827–834.
6. Wang, K., Lin, C.-P., and Chung, C.-C. (2019). A bundled time domain reflectometry-based sensing cable for monitoring of bridge scour. *Structural Control and Health Monitoring*, 26(5), e2345.
7. Aghda, S. F., GanjaliPour, K., and Nabiollahi, K. (2018). Assessing the accuracy of TDR-based water leak detection system. *Results in Physics*, 8, 939–948.
8. Cataldo, A., Cannazza, G., De Benedetto, E., and Giaquinto, N. (2012a). A New Method for Detecting Leaks in Underground Water Pipelines. *IEEE Sensors Journal*, 12(6), 1660–1667.



9. Cataldo, A., Cannazza, G., De Benedetto, E., and Giaquinto, N. (2012b). A TDR-based system for the localization of leaks in newly installed, underground pipes made of any material. *Measurement Science and Technology*, 23(10), 105010.
10. Cataldo, A., De Benedetto, E., Cannazza, G., Giaquinto, N., Savino, M., and Adamo, F. (2014). Leak detection through microwave reflectometry: From laboratory to practical implementation. *Measurement*, 47, 963–970.
11. Cataldo, A., De Benedetto, E., Cannazza, G., Masciullo, A., Giaquinto, N., D'Aucelli, G., Costantino, N., De Leo, A., and Miraglia, M. (2015). Large-scale implementation of a new TDR-based system for the monitoring of pipe leaks. *XXI IMEKO World Congress 'Measurement in Research and Industry*, 1174–1177.
12. Cataldo, A., De Benedetto, E., Cannazza, G., Masciullo, A., Giaquinto, N., D'Aucelli, G. M., Costantino, N., De Leo, A., and Miraglia, M. (2017). Recent advances in the TDR-based leak detection system for pipeline inspection. *Measurement*, 98, 347–354.
13. Woo, S., Kim, T., Lee, J., Oh, H., Youn, B. D., and Kwon, D. (2018). TDR-based Multiple Leak Detection System using an S-parameter Transmission Line Model for Long-Distance Pipelines. *International Journal of Prognostics and Health Management*, 9(3).
14. Chung, C.-C., Lin, C.-P., Wu, I.-L., Chen, P.-H., and Tsay, T.-K. (2013). New TDR waveguides and data reduction method for monitoring of stream and drainage stage. *Journal of Hydrology*, 505, 346–351.
15. O'Connor, K. M. (2001). *Use of TDR to Monitor Changes in Ground*



- Water Level and Crude Oil Thickness*. TDR 2001 Symposium.
16. Bruvik, E., Hjertaker, B., Folgerø, K., and Meyer, S. (2012). Monitoring oil–water mixture separation by time domain reflectometry. *Measurement Science and Technology*, 23(12), 125303.
 17. Cataldo, A., Tarricone, L., Attivissimo, F., & Trotta, A. (2007). A TDR method for real-time monitoring of liquids. *IEEE transactions on instrumentation and measurement*, 56(5), 1616-1625.
 18. Giaquinto, N., D'Aucelli, G. M., De Benedetto, E., Cannazza, G., Cataldo, A., Piuze, E., & Masciullo, A. (2015). Criteria for automated estimation of time of flight in TDR analysis. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 65(5), 1215-1224.
 19. Lewis, J. P. (1995, May). Fast template matching. In *Vision interface* (Vol. 95, No. 120123, pp. 15-19). Retrieved September 6, 2024
 20. Lin, C. P., Wang, K., Chung, C. C., & Weng, Y. W. (2017). New types of time domain reflectometry sensing waveguides for bridge scour monitoring. *Smart Materials and Structures*, 26(7), 075014.
 21. Lin, C. P. (1999). *Time domain reflectometry for soil properties* (Doctoral dissertation, Purdue University).
 22. Ngui, Y. J., & Lin, C. P. (2022). Self-referencing TDR dielectric spectroscopy using reflection-decoupled analysis with a mismatched section. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 71, 1-15
 23. Yoo, J. C., & Han, T. H. (2009). Fast normalized cross-correlation. *Circuits, systems and signal processing*, 28, 819-843.

附件一 研究進度及預期完成之工作項目(甘特圖)

年月 工作項目	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	備註
TDR 儲槽管線污染滲漏之標準建置與分析方法													
TDR 測漏管浮油自動偵測與量測方法													
模場試驗場址擇定													
期中報告													
建置 TDR 即時監測系統													
即時監測系統與監測技術之成效評估													
期末報告													
工作進度估計百分比 (累 積 數)	5%	10%	20%	30%	40%	50%	60%	65%	70%	80%	90%	100%	
預定查核點	期中		1. 模場試驗場址擇定 2. 建置 TDR 儲槽管線污染滲漏之標準建置與分析方法 3. 建置 TDR 測漏管浮油自動偵測與量測方法										
	期末		1. 建置 TDR 即時監測系統 2. 即時監測系統與監測技術之成效評估										

**說明：**

- 1、工作項目請視專案性質及需要自行訂定。預定進度以粗線表示其起迄日期。
- 2、「工作進度百分比」欄係為配合管考作業所需，累積百分比請視工作性質就以下因素擇一估計訂定：(1)工作天數，(2)經費之分配，(3)工作量之比重，(4)擬達成目標之具體數字。
- 3、「預定查核點」，請在條形圖上標明 ※
符號，並在「預定查核點」欄具體註明關鍵性工作要項。
- 4、以12個月作規劃，其中期中報告書提送要件需達計畫執行進度50%以上，期末報告書需於計畫結束前1.5個月提送。