



行政院環境保護署

111 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(第一年) 期末報告(定稿)

主辦單位： 行政院環境保護署

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：111 年 09 月 01 日起至
112 年 08 月 31 日止

中華民國 112 年 8 月 印製



111 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 - 1 - C2 - P (如非實驗性質含風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		
	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 111 年 09 月 01 日起至民國 112 年 08 月 31 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	800,448	843,832	(1~6 項相加之 50%為限)
	2. 設備使用含維護費	0	100,000	(與計畫實驗相關)
	3. 耗材與主要費用	650,552	706,168	(與計畫主體相關)
	4. 其它研究相關費用	80,000	100,000	(含差旅與租賃費用)
	5. 雜項費用	17,000	50,000	(1~6 項相加之 5%為限)
	6. 行政管理費	172,000	200,000	(1~6 項相加之 10%為限)
	7. 自籌款	0	0	(申請單位自行籌備款項)
	申請補助經費(1~6 項)	1,720,000	2,000,000	總金額：3,720,000
	計畫總經費(1~7 項)	1,720,000	2,000,000	總金額：3,720,000

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，應自行撥款不得申請。
2. 非實驗性質之專案，若第一項費用編列金額超出比率，須於申請書文內向本署說明，俾利審查。
3. 補助專案經費編列自申請起經專案核撥後，經費編列中各項費用單價與數量只可減少不得增加。

專案主持人： 林志平 (簽名及蓋章)

附件 11-1

日期：111.10.19

校長 林奇宏

(請蓋上申請單位大小章)



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：B7	
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 1 年)		
審查意見		執行單位回覆	
委員一			
1. 陸昌化工的污染主要是以重金屬為主，建議可以補充說明其污染的來源與本計畫在規劃時候偵測重點。目前用自來水來做為管線洩漏，是否模擬管線的污水？其差異性為何？與覆蓋後之訊號差別為何？ 2. 51 頁測試的油厚度是 50 公分，這個數值有可能太大，實際上如果漏到 50 公分浮油，似乎已經很嚴重了，失去預警的意義。 3. 4.2.2 節，目前完成的測漏成果似乎滿好的，但是未來如何跟實際的現場情況比對？如果管線沒有漏的話，怎麼樣因應？ 4. 目前市面上已經有浮油的量測設備，本技術與設備，跟現有的方法間優缺點，建議可以說明。		1. 本監測技術主要基於介電性質，管線內汙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。 2. 謝謝委員指教，數值模擬假設之參數為測試此方法之可行性，後續會逐漸縮小浮油層厚度的數值，以符合現場的狀況。 3. 若滲漏事件發生，管線應會有裂縫存在，根據數據分析之滲漏位置與現場實際位置相互比較；可於現場的 PVC 管線上人工製造一裂縫使滲漏發生，再收錄資料進行分析相互比較。 4. 謝謝委員指教，已在期末報告定稿中補上既有量測設備的相關資訊。本技術的主要有優點在於感應端單純為纜線，沒有任何電子元件，主要的電子元件為控制端的發射與接收器，且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。
委員二 1. 本計畫為兩年期計畫，第一年已完成污染滲漏之標準建置與分析方法、場址選擇、監測系統建置，均符合原計畫時程規劃。 2. 計畫報告滲漏試驗測試成果，顯示滲漏量達100ml時即出現明顯差異變化，說明監測系統具有效性。 3. 本計畫利用 Raspberry Pi 建置監測系統，利用 Raspberry Pi 建置其成本相對低，但長時間測試其穩定性仍須注意。	1. 謝謝委員肯定。 2. 謝謝委員肯定。 3. 謝謝委員指教，後續會持續觀察監測系統之穩定性。
委員三 1. 第一年計畫工作事項完成。 2. 請補充期中報告審查意見回覆表。 3. 建議未來能針對監測系統穩定性，增加說明。 4. 自評表期末各項達成數均未填，期中報告已有提醒。 5. 模場計畫報告欠缺計畫進度甘特圖。 6. 針對管線測漏的環境影響變化下，對監測干擾，建議後續納入考量。	1. 謝謝委員肯定。 2. 謝謝委員提點，已於期末報告定稿中附上期中報告審查意見回覆表。 3. 謝謝委員指教，後續會持續觀察監測系統之穩定性。 4. 謝謝委員提點，已於期末報告定稿中填寫完畢。 5. 謝謝委員提點，已於期末報告定稿中附上計畫進度甘特圖。 6. 謝謝委員指教，後續會將環境影響納入考量。
委員四 1. 本計畫預計分兩年研發建置 TDR 技術用以監測儲槽與管線洩漏，第一年研發成果包含完成儲槽與管線洩漏監測建置與分析方法，並完成現地實務驗證，期末報告撰述完整，成果具體。 2. 建議將本年度執行遭遇之困難(區分為管線與儲槽、廢水與漏油)與解決方法彙整列表以供第二年執行參考。 3. TDR 監測技術之相關 QA/QC 數據(例如精密度、準確度、MDL)建議於第二年度建立。	1. 謝謝委員肯定。 2. 謝謝委員指教，已於期末報告定稿中補充列表。 3. 謝謝委員指教。
委員五 1. 本技術有早期發現儲槽及管線洩漏之預防效益，具有發展並多元應用價值。 2. 於土壤氣體監測井(測漏管)之試驗規劃，因土氣井於加油站現場，井上方有井蓋並為常閉狀態，建議應將現場狀況納入相關設計，可使本技術未來可具應用性。	1. 謝謝委員肯定。 2. 謝謝委員指教，後續會將此因素納入考量。



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。

本研究將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。透過智慧即時監測技術之創新構想，在儲槽與管線洩漏監測管理中未來可協助儘早發現污染物滲漏，有望藉由源頭污染防治，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。

本計畫第一年度基於前期研發成果完成儲槽與管線滲漏監測之標準建置與分析方法，於擇定之模場實際建置監測系統，成果驗證了現地實務應用之可行性，並透過即時自動化監測第一時間成功發現現場之異常滲漏事件；而測漏管浮油技術也在室內實驗當中取得初步成果，利用模擬現地可能發生的情境找到訊號變化趨勢。



英文摘要

Petrol stations has grown rapidly in Taiwan, the issue of underground environmental pollution caused by the leakage from underground oil storage tanks and pipelines have 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 aims to establish an intelligent leak detection monitoring technique for storage tank, pipeline, and leak detection pipe of petrol station, which is based on decision-making system and self-developed electromagnetic wave sensors. This monitoring technique will be practically applied to model field tests, including petrol stations and underground storage tank areas. This research will research and develop the leak detection technique based on time-domain reflectometry (TDR) technique, designed for storage tank pipelines and leak detection pipe technology, in a two-year phase. Through this innovative concept of intelligent 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

中文摘要	5
英文摘要	I
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 .	24
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	28
3.3 研究流程.....	29
第四章 結果與討論.....	30
4.1 TDR 儲槽管線污染滲漏之標準建置與分析方法.....	30
4.1.1 環境建置	30
4.1.2 軟硬體建置	33
4.1.3 分析方法	34
4.2 滲漏模場試驗.....	37
4.2.1 第一年模場試驗	40
4.2.2 測試成果	41
4.2.3 執行階段遭遇之困難與解決方法	47
4.3 浮油監測技術初步評估	47
4.3.1 室內物理實驗	47
4.3.2 室內試驗初步成果.....	50
4.4 第二年模場試驗場址	54
第五章 初步結論與後續工作說明	64
5.1 初步結論.....	64
5.2 第二年期工作規劃	65



5.2.1 研究構想之可行性與未來發展	65
5.2.2 預期目標	68
5.2.3 可能成果與效益	68
參考文獻	69
附件一 專案執行績效審核-自評表	72
附件二 專案成果績效自評表	73
附件三 計畫書審查意見回覆對照表	78
附件四 研究進度及預期完成之工作項目(甘特圖)	87



第一章 研究動機與目的

自從經濟部能源委員會(現能源局)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，依據能源局資料顯示，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，行政院環境保護署(以下簡稱環保署)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。至今環保署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，環保署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，在幾小時中油品味注入或移出儲槽，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爭氣的濃度，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(環保署，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。

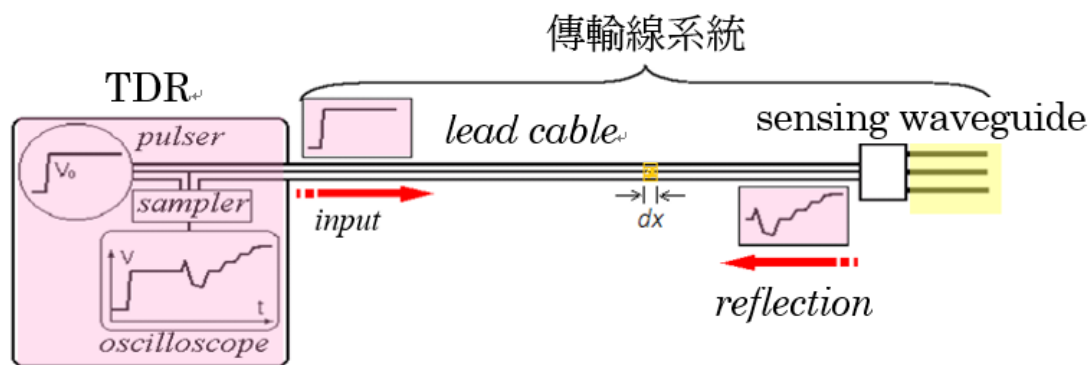


圖 2 TDR 量測設備的組成與量測架構

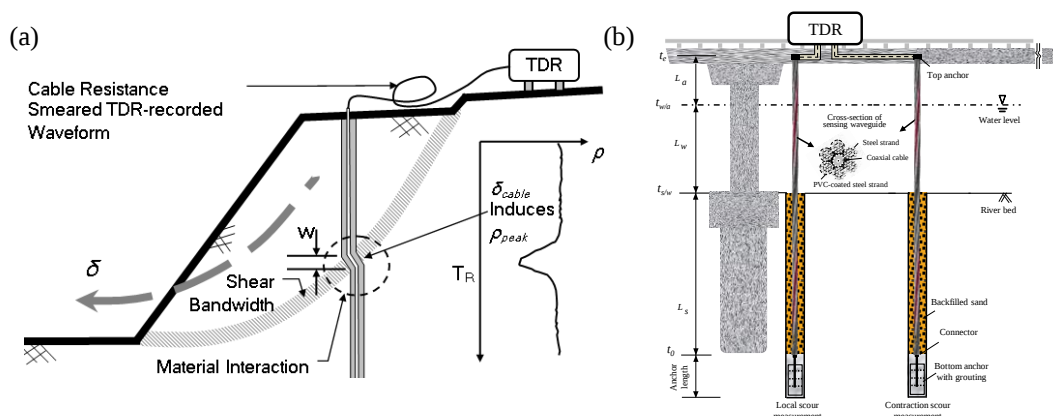


圖 3 (a)TDR 地滑監測示意圖; (b) TDR 冲刷監測纜設置示意圖

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。

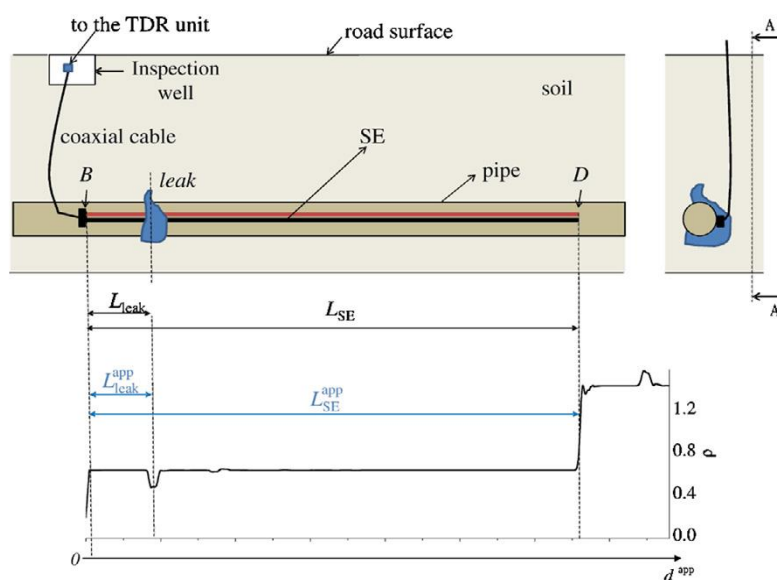


圖 4 TDR 管線滲漏監測原理與其對應之量測波形示意，因滲漏造成左側一下凹的反射訊號，其中 L_{leak} 為滲漏位置距離， L_{SE} 為感應纜線的總長；下圖橫坐標為時間，亦可換算為視傳輸距離 L_{app}
(取自 Cataldo et al., 2014)

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。

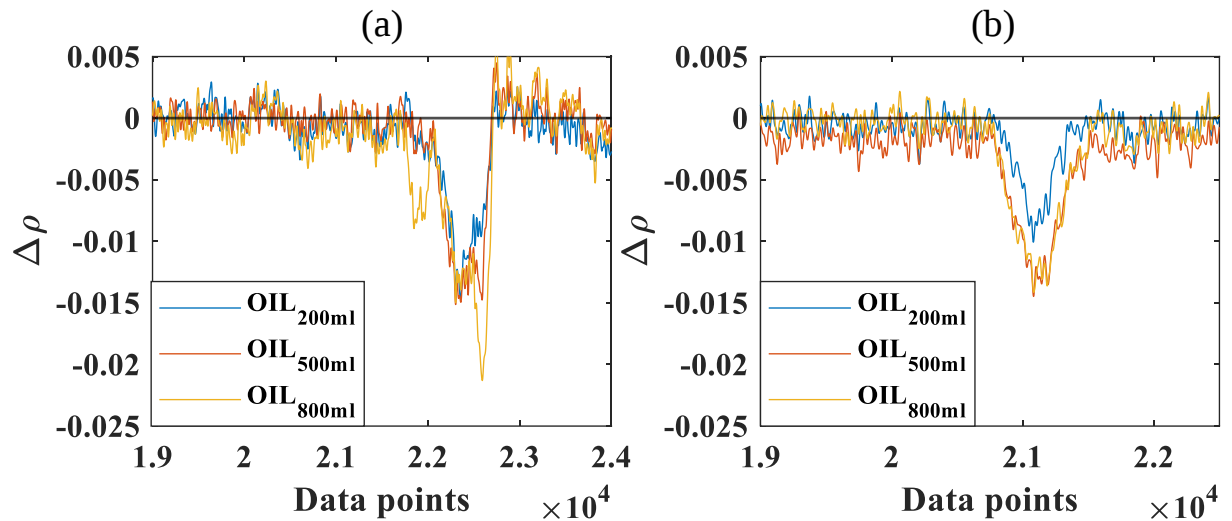


圖 5 附有吊線之 P3-500 纜線不同環境中汽油滲漏波形差異分析

(a) 七厘石環境；(b) 細砂環境

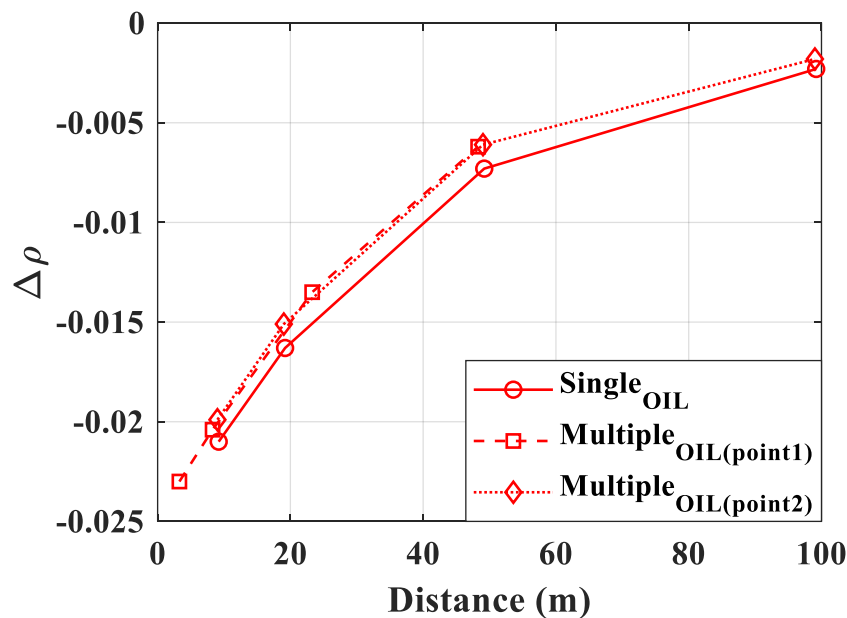


圖 6 模擬汽油在細砂中單點與多點滲漏比較

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

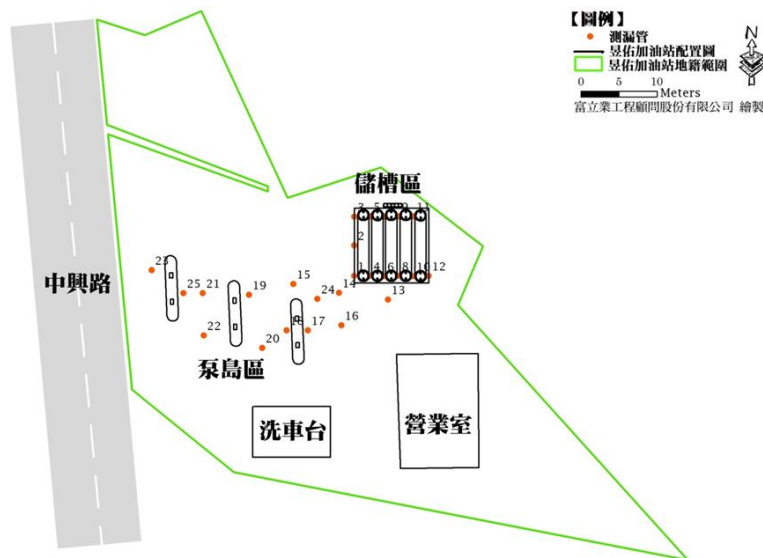
為了完整執行本次模場計畫，本團隊主持人與相關協同主持人根據產學合作精神與智慧監測設備的適用性、可發展性、真實可以描繪出洩漏場景性，選擇了兩個試驗模場：一為南投昱佑加油站，原因是目前為暫停使用場址，方便進行相關研究設施的搭建與建置且推測仍有汙染潛勢；二為陸昌化工幼獅廠，原因是目前進行管線與地下槽體整建工程，於核心製程區域進行溝渠、管線與地下槽體更新，而且現場廢液濃度高且有腐蝕性，本計畫用來模擬新設溝渠與槽體，智慧型洩漏系統的建置，進行長時間的監測，目的是進行洩漏預警系統建置，是非常難能可貴的經驗與廠址。

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污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以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。本場址因行政院環保署執行「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，土壤重金屬污染物砷(344mg/kg)、鎘(33.5mg/kg)、鉻(404mg/kg)、銅(13,200mg/kg)、鎳(4,230mg/kg)、鉛(24,200mg/kg)及鋅濃度(116,000mg/kg)超過土壤污染管制標準；地下水中污染物硝酸鹽氮(159mg/L)、鎘(0.451mg/L)、鉛(1.6mg/L)及鋅濃度(193mg/L)超過第二類地下水污染管制標準，依土壤及地下水污染整治法相關規定，臺中市政府環保局於111年2月11日(中市環水字第1110011239號函)公告「陸昌化工股份有限公司幼獅廠(臺中市大甲區幼獅段1232、1234、1246、1247地號)」為土壤及地下水污染控制場址，並於111年3月25日(中市府環水字第11100271492號函)公告為土壤及地下水污染管制區，隨後於111年4月12日進行修正公告(修正公告地址)(中市府環水字第1110035491號函)。相關污染訊息與預期模擬滲漏情境之模場試驗位置如下圖所示。





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』，透過室內試驗驗證其實際可行性，並建立其自動化分析方法，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。這些標準程序的建立可利用滲流模擬，或向下滲流影響錐之試驗以驗證其適用性與合理性。

本研究預期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，於第一年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，後續再於第二年結合測漏管於另一模場中，輔以常時自動化監測系統收錄電磁波波形，透過第一年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

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-空氣界面辨識其浮油厚度。其類似氣液界面 TDR 監測方法如由圖 12(a)中 O'Connor(2001) 和圖 12(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 13 係計畫團隊前期利用 TDR 監測技術來監測水位變化與底泥淤積厚度之初步試驗結果，右側 TDR 反射訊號圖可明確識別水位抬升和底泥淤積厚度增加對於訊號之影響，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 14 中 Cataldo et al. (2007)和圖 15 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。

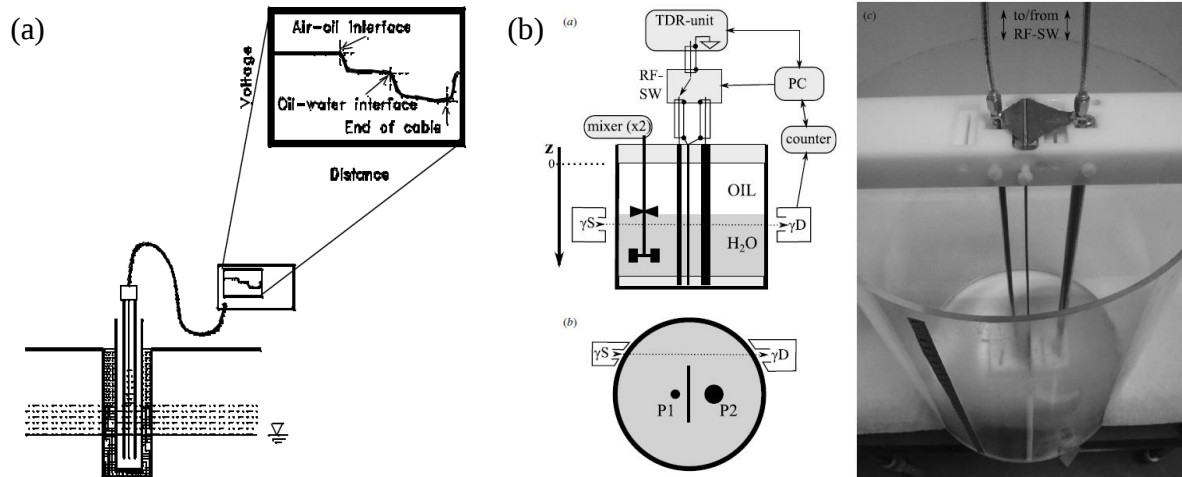


圖 12 (a) 鑽孔中油-氣界面測得之典型 TDR 反射訊號示意圖 (O'Connor, 2001)；(b) 混合油水分離過程以 TDR 技術觀測油水界面變化之配置示意圖 (Bruvik et al., 2012)

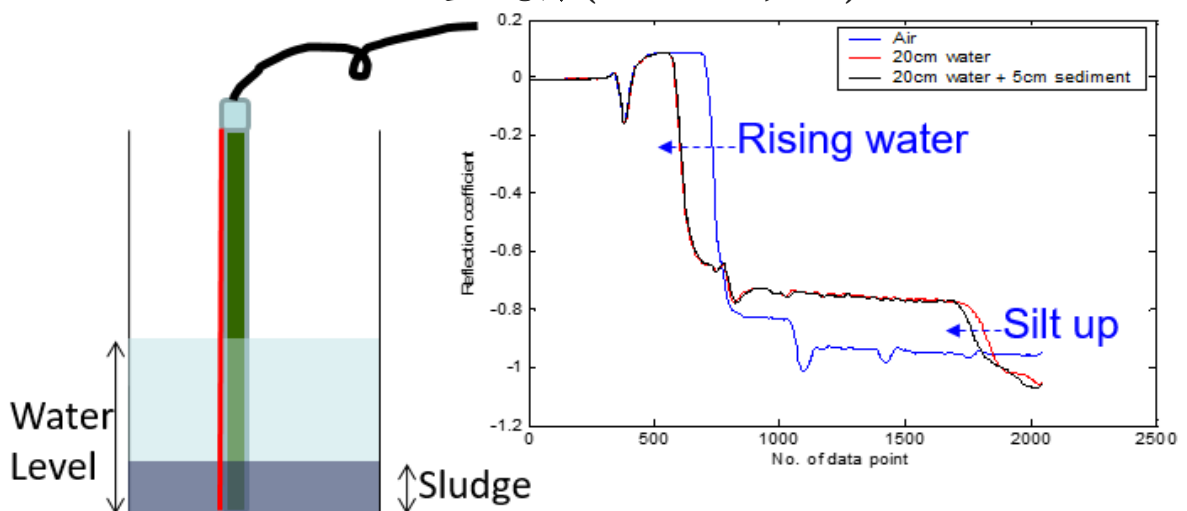


圖 13 TDR 監測水位與淤積厚度之前期試驗示意圖

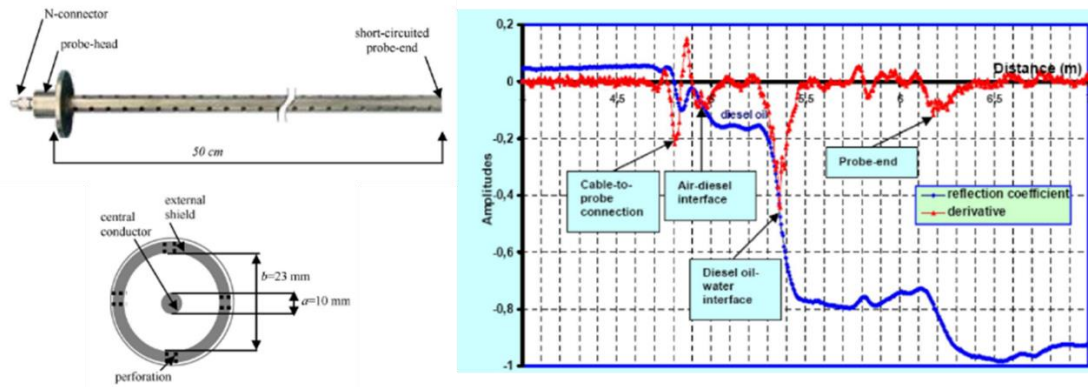


圖 14 利用一階微分的最大值判斷在同軸纜線中介質產生變化的界面位置(Cataldo et al., 2007)

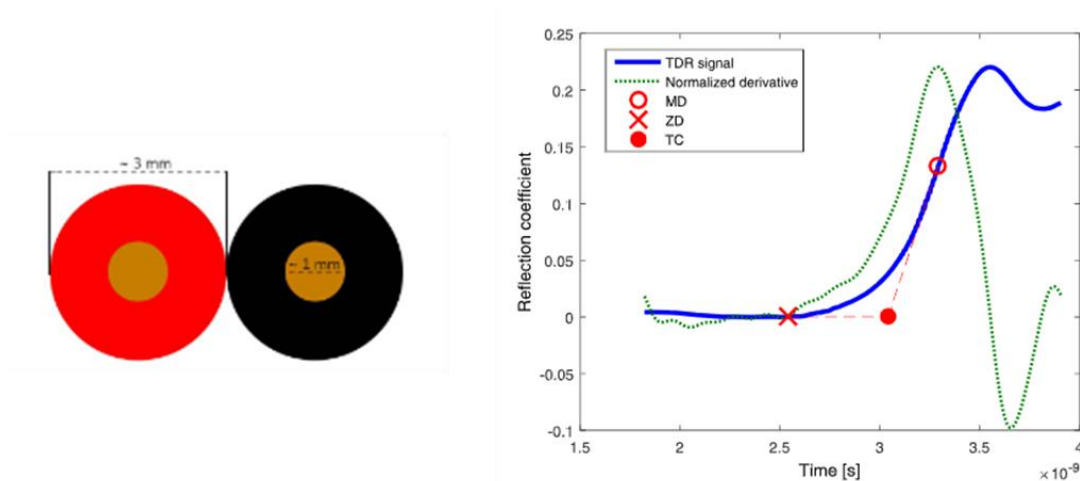


圖 15 利用一階微分以及線性擬合判斷在同軸纜線以及平行纜線中介質產生變化的界面位置(Giaquinto et al., 2015)

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。計畫團隊預計於室內建置第二年所需的即時自動化觀測系統，先於室內進行長時運行以探討量測資料品質與系統穩定性。

擇定模場場址後，本計畫預計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纜線、其纜線配置與安裝方法、如何在不影響既有定期監測作業下設置該監測纜等因素。本計畫預期在油槽至泵島管線、泵島與泵島監測漏管、監測井與加油站下游周界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。計畫在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

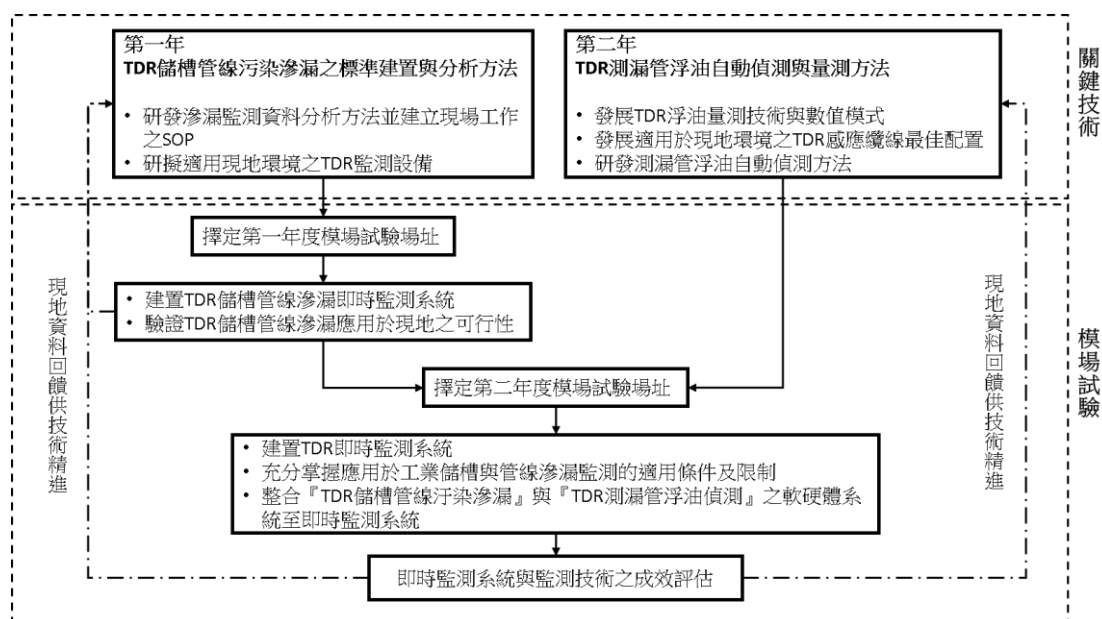


圖 16 所示。

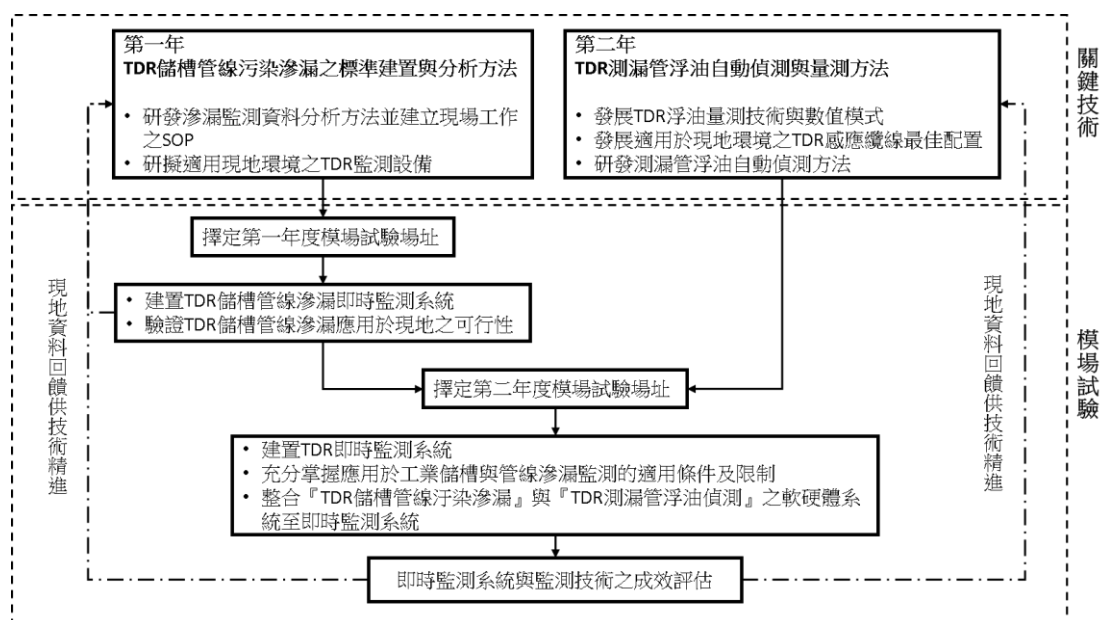


圖 16 研究流程圖

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 17，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。

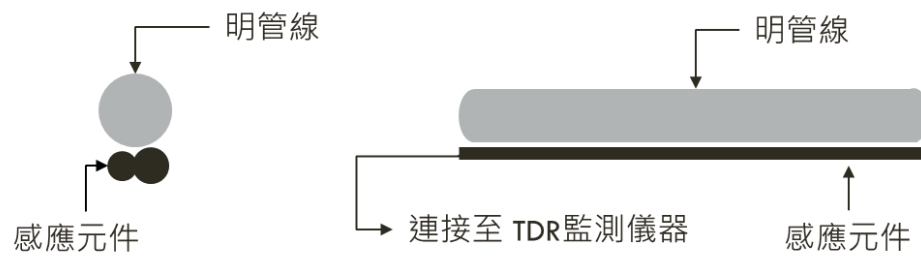


圖 17 PVC 明管線安裝感應元件示意圖

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 18，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。

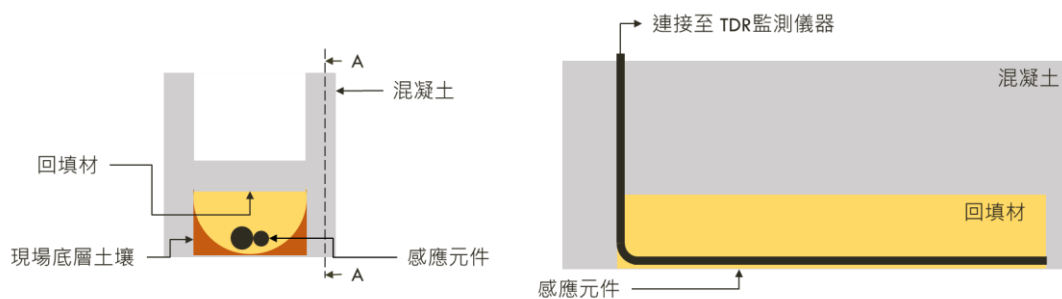


圖 18 地下管線安裝感應纜線示意圖(以現地混凝土水溝滲漏監測設置為例)



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。

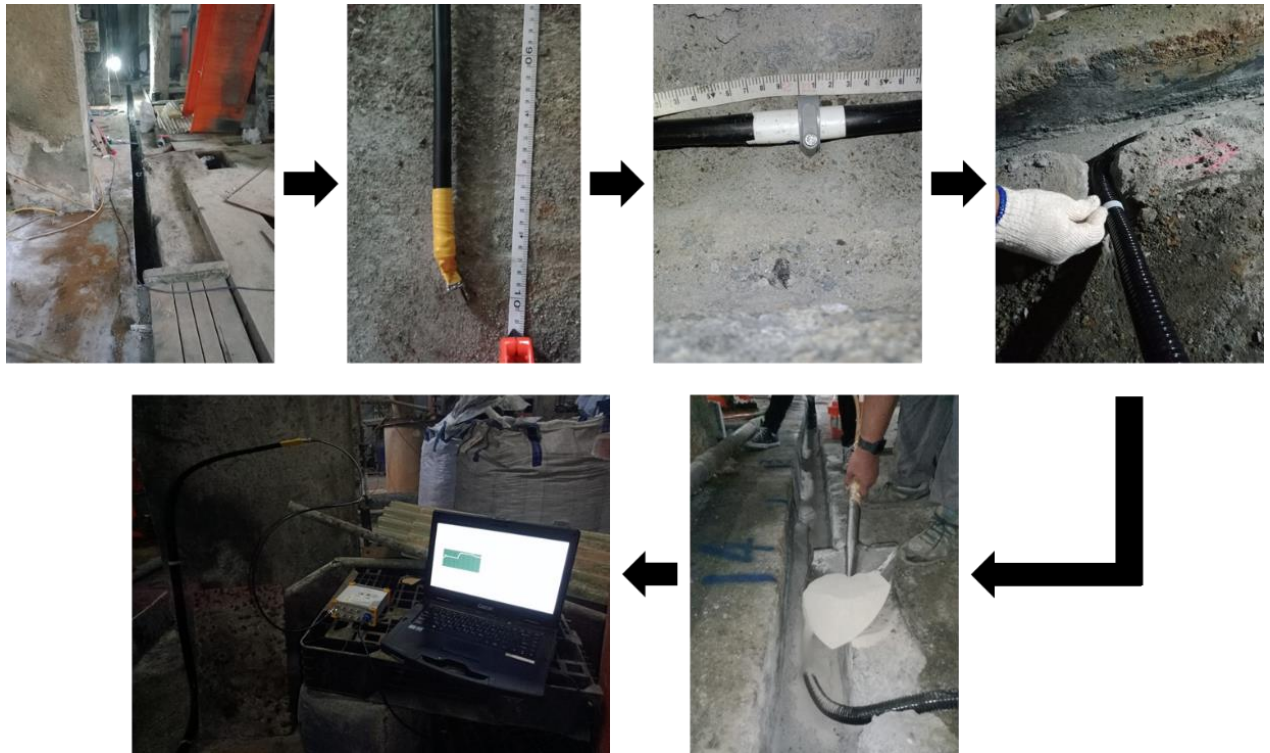


圖 19 現場安裝流程圖

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 20，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 21，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 20 監測系統硬體建置

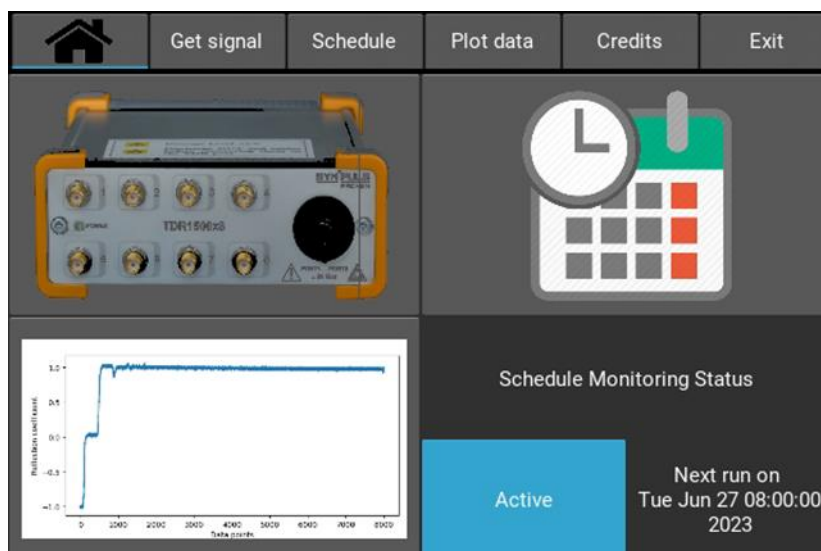


圖 21 Python 使用者介面

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 22:對原始資料做濾波，使波形平滑(lowpass frequency=1.5GHz)；並做 xshift 將資料量測起點對齊。
- 二、 圖 23: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 24: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。

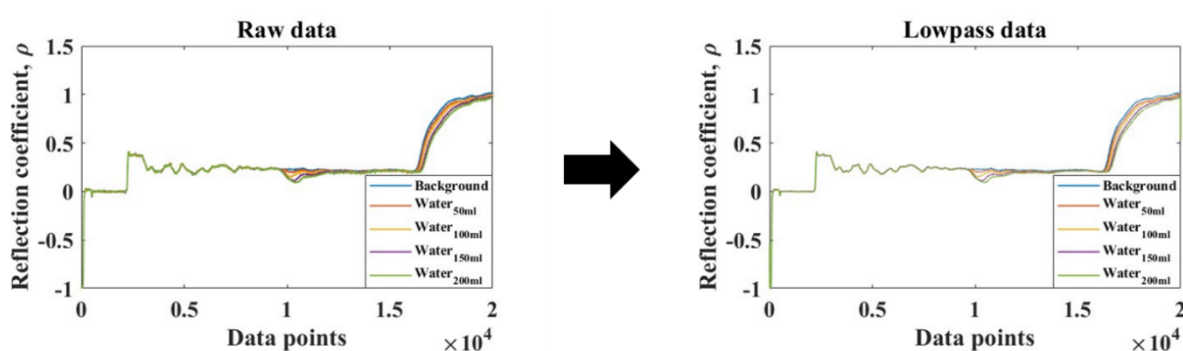


圖 22 差異分析法步驟一

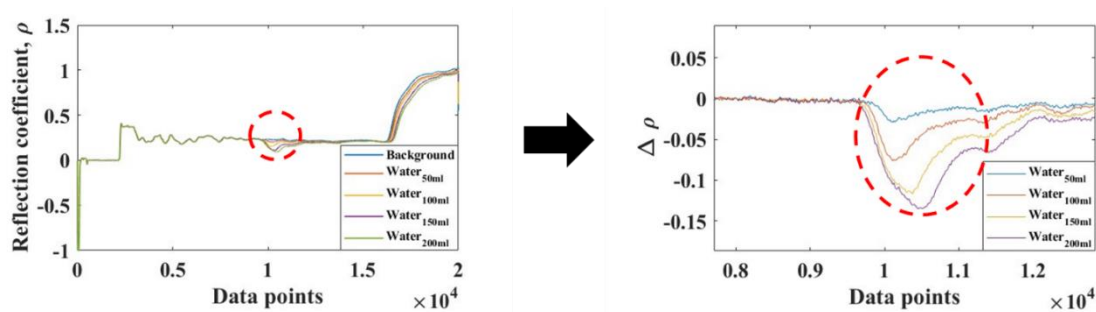


圖 23 差異分析法步驟二

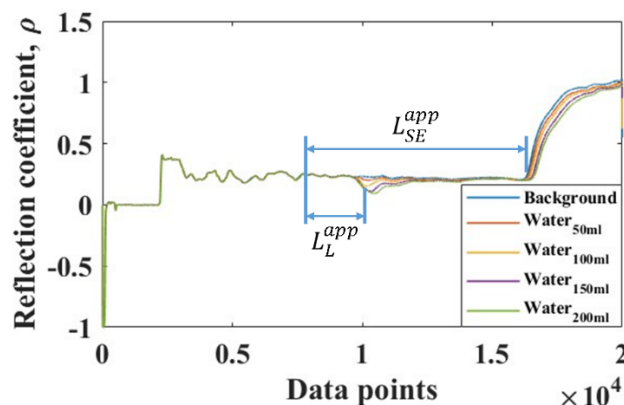


圖 24 差異分析法步驟三

(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。

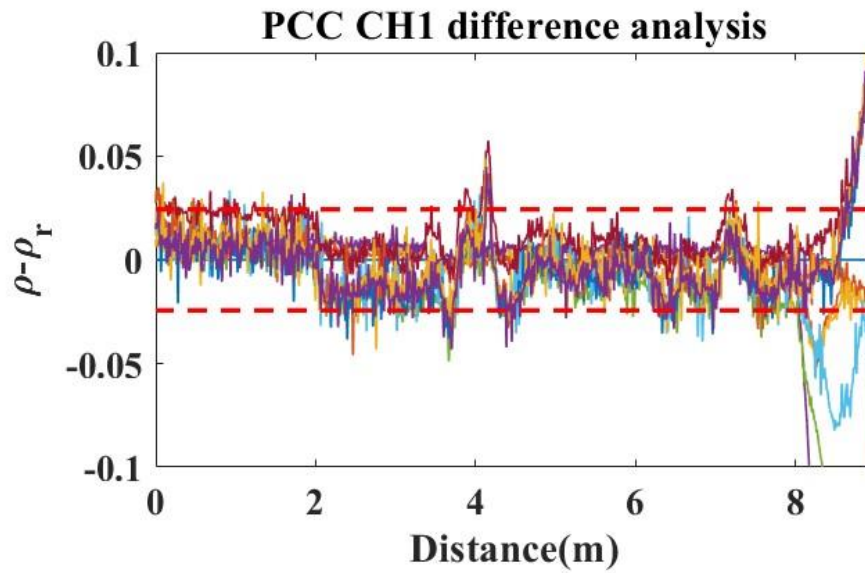


圖 25 以三倍標準差(圖中紅色虛線)為判斷滲漏事件發生的標準。此圖為明管線下方之纜線，因其裸露餘地表面上容易受到非滲漏事件的其他環境因素干擾，但利用三倍標準差可以發現滲漏位置發生在末端的位置。

4.2 滲漏模場試驗

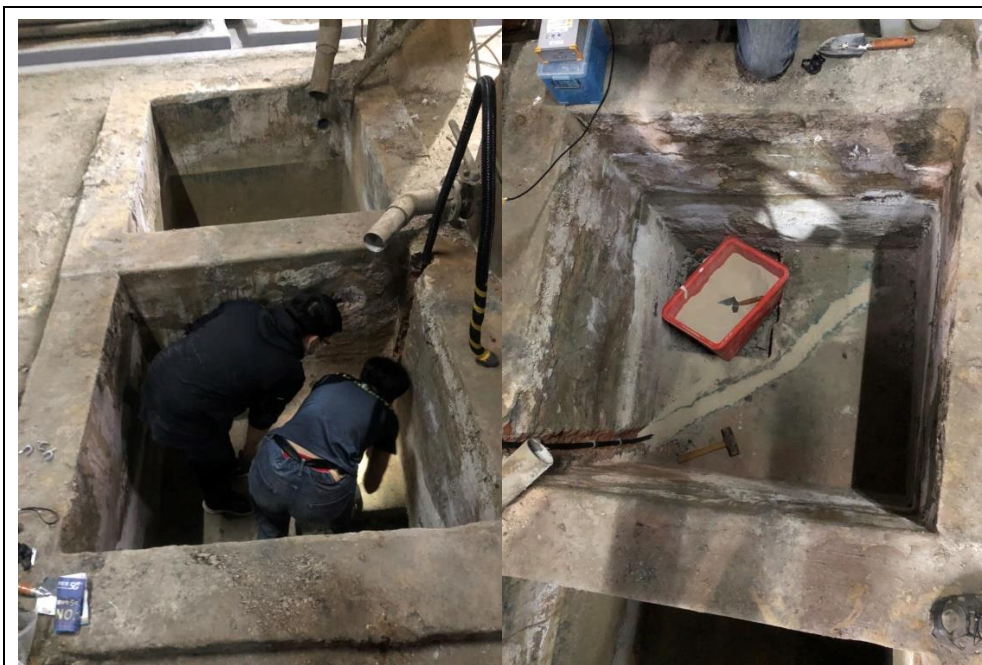


圖 26 地下槽體監測纜線安裝



圖 27 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。

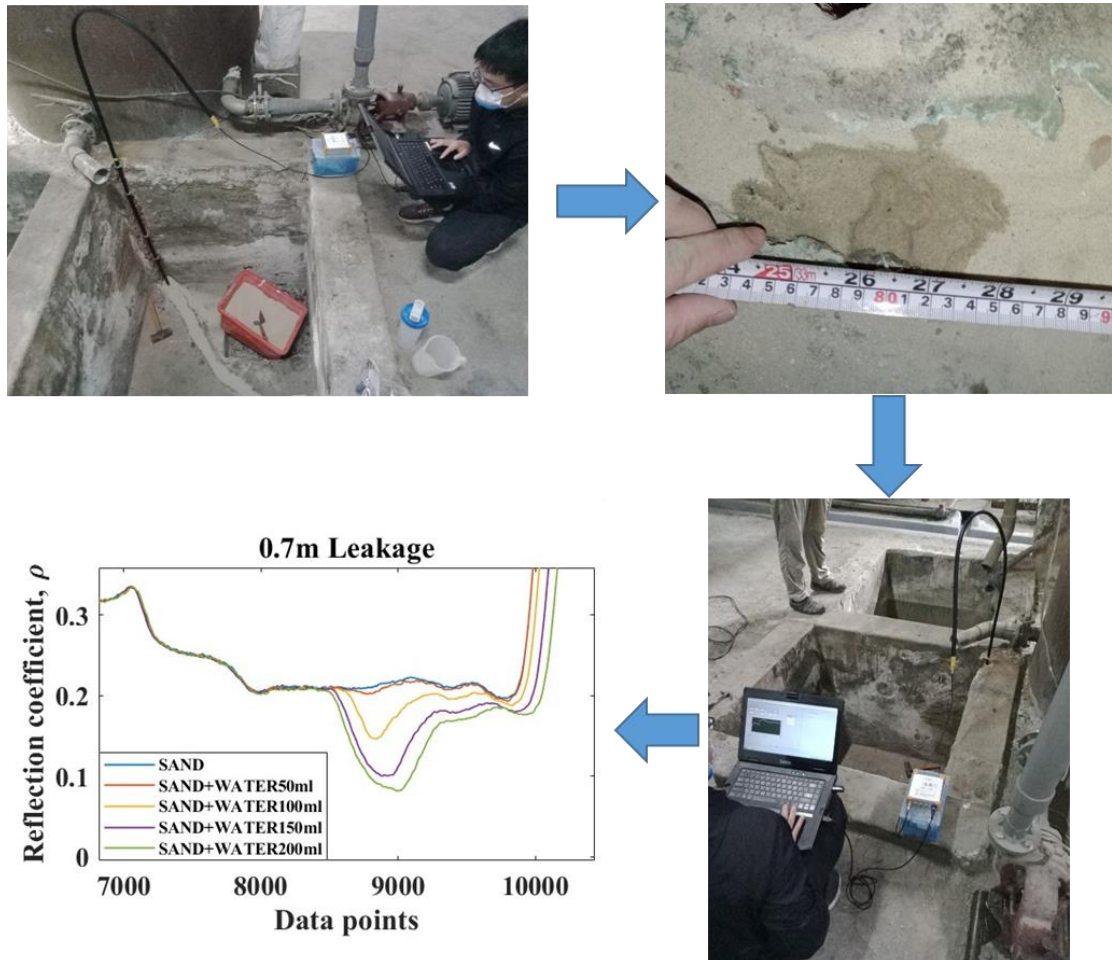


圖 28 滲漏試驗流程圖

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纜線安裝，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 29 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 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 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。





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，管線內汙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 30。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 31；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。

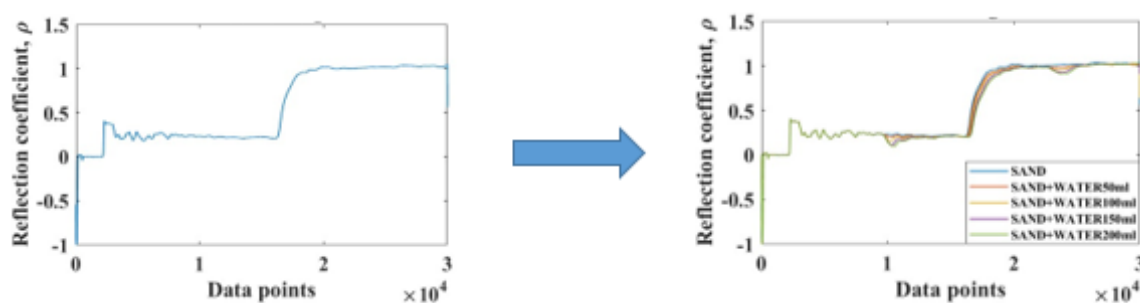


圖 30 收錄滲漏試驗資料

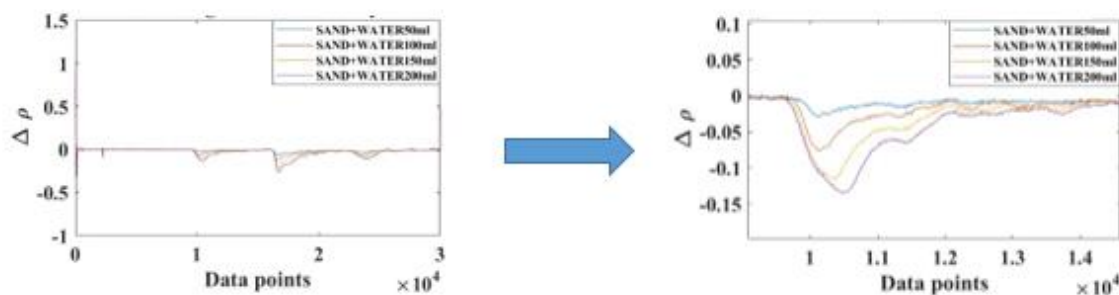


圖 31 滲漏試驗差異分析

(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八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 32；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 33，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。

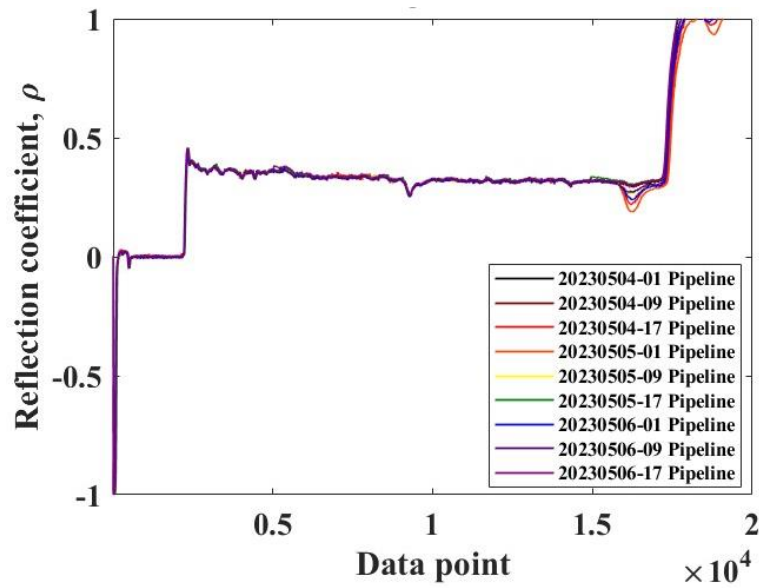


圖 32 現場滲漏事件發生波形



圖 33 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 34)、陰井(圖 35)、水溝(圖 36)，定期收取資料(約每月一次):水溝(圖 37)、陰井(圖 38)。

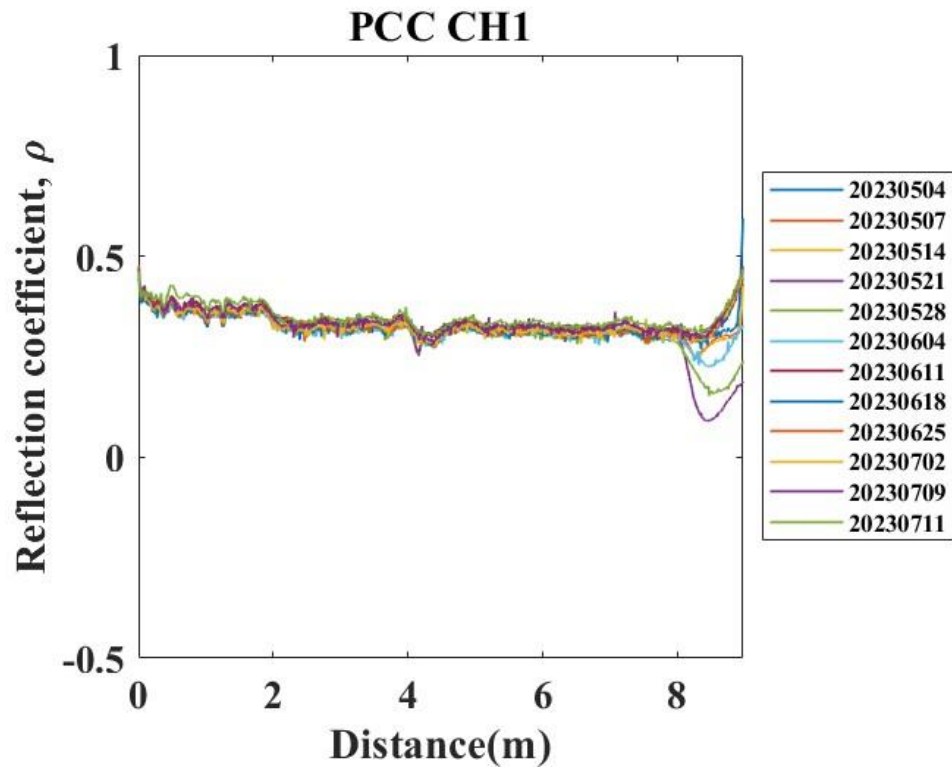


圖 34 自動化監測-明管線(CH1)

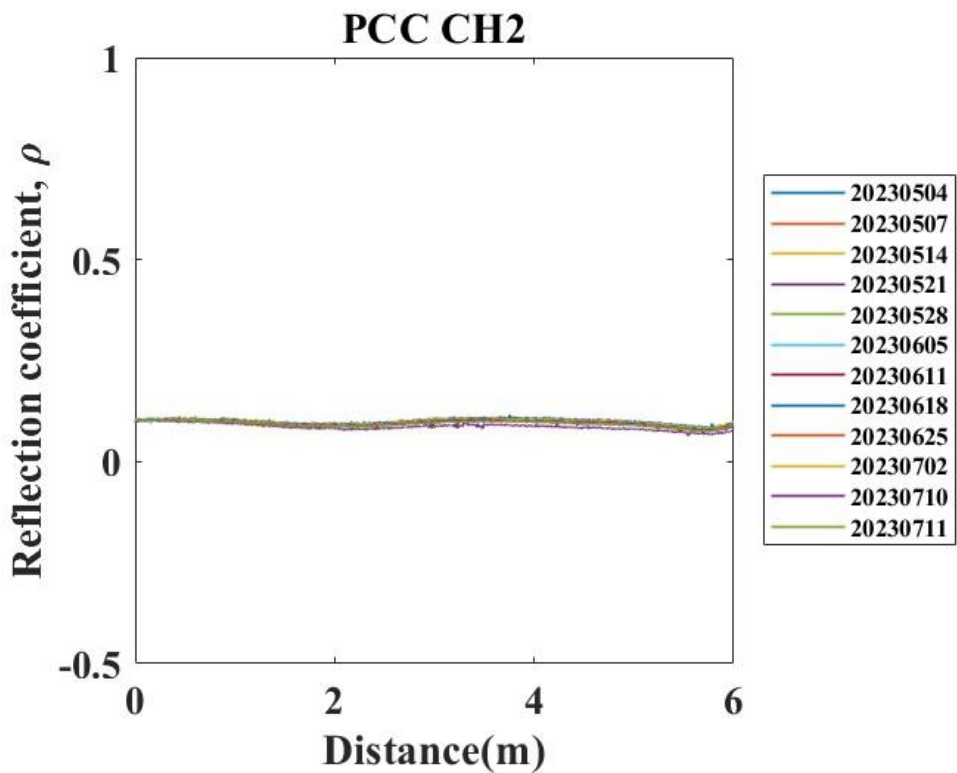


圖 35 自動化監測-陰井(CH2)

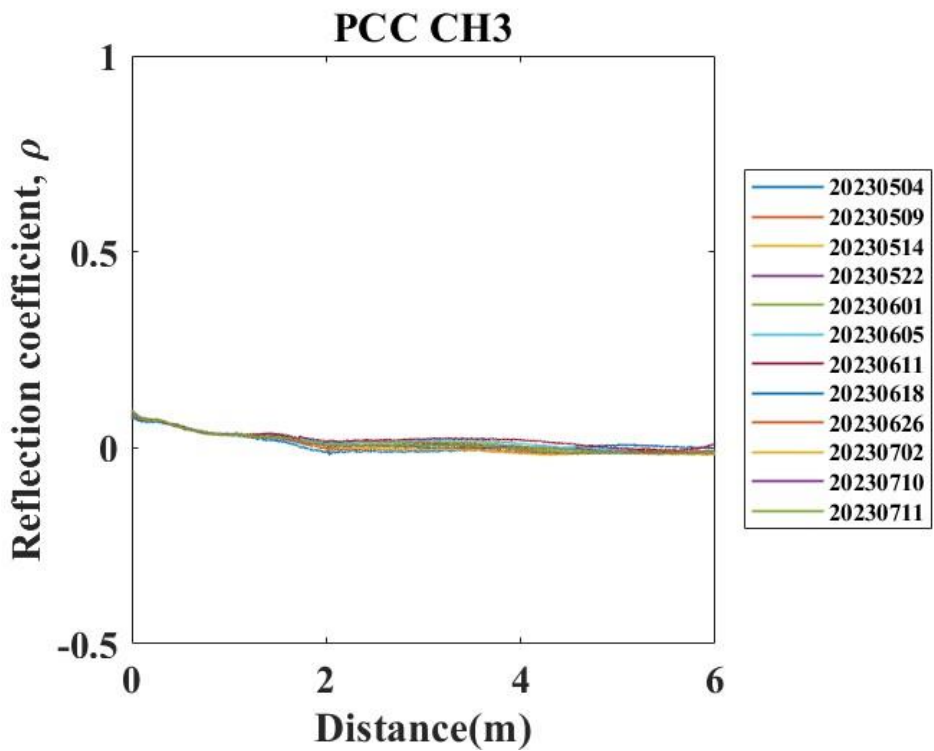


圖 36 自動化監測-水溝(CH3)

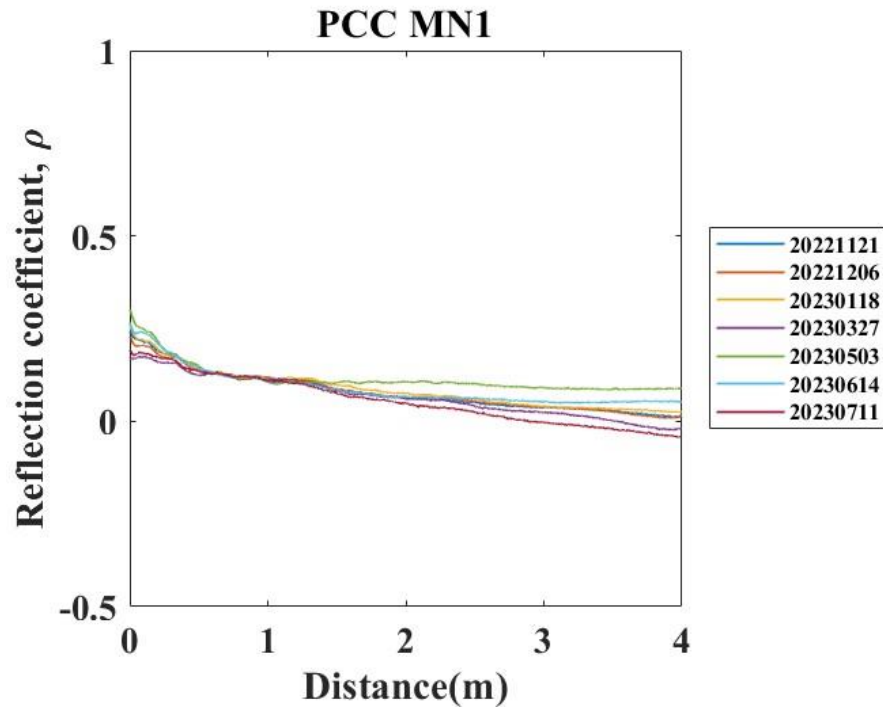


圖 37 定期收取資料-水溝(MN1)。此監測區域纜線底部為回填材底部為混凝土，因未將底部打穿至土層，導致回填層上方水溝施作時水泥中的水份向下滲流影響監測品質。

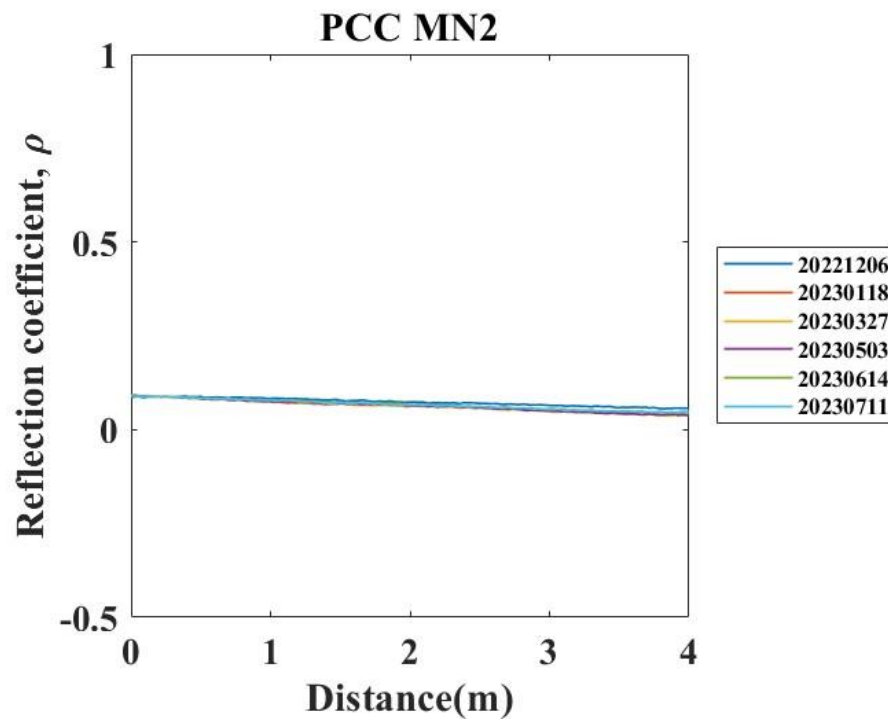


圖 38 定期收取資料-陰井(MN2)



4.2.3 執行階段遭遇之困難與解決方法

表 2 遭遇困難與解決方法

遭遇困難	解決方法
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。	將感應元件下方混凝土或阻礙水份溢散之材料貫穿，使水份不被圍困在感應元件周遭改善監測品質。

4.3 浮油監測技術初步評估

本研究利用室內物理實驗模擬現地情形，初步探討 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

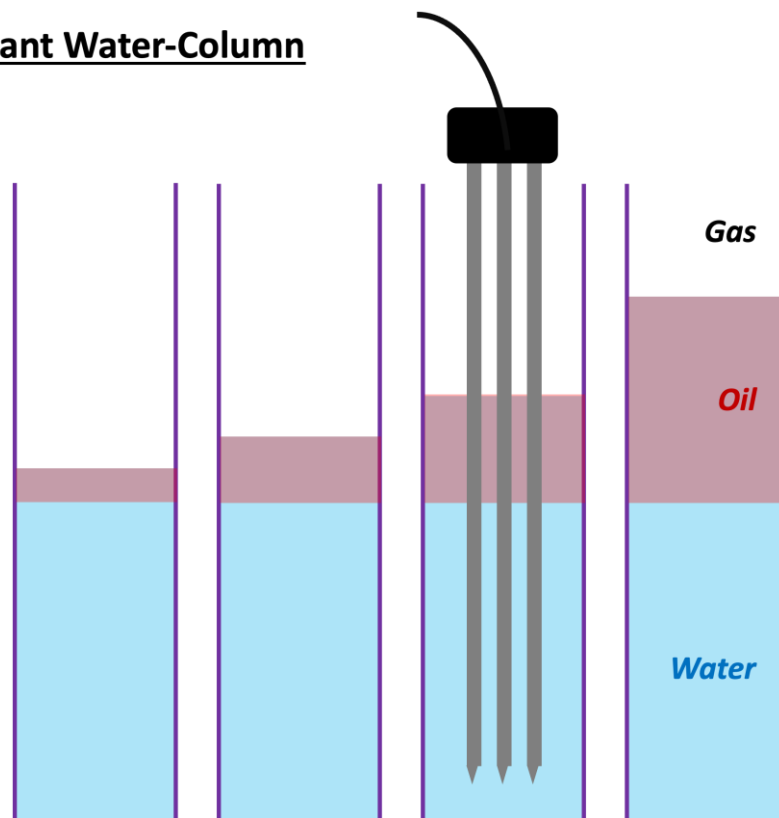


圖 39 TDR 浮油監測之室內試驗方式示意圖

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 3，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 3 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 40。實驗可針對不同浮油厚度做分段增加浮油變化進行評估。

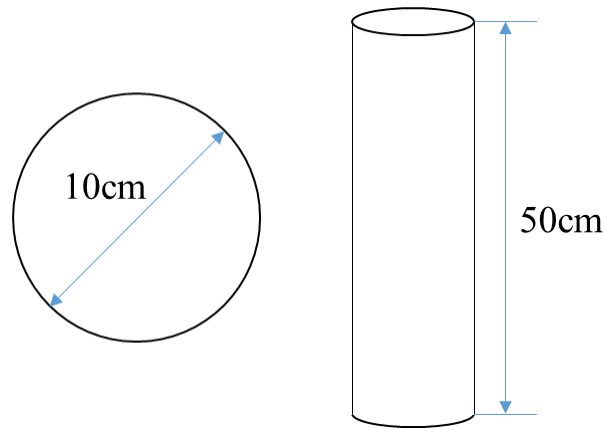


圖 40 玻璃直立圓筒尺寸示意圖

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 41 所示。



圖 41 感應元件示意圖

4.3.2 室內試驗初步成果

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 42，並測試感應元件的適用性。

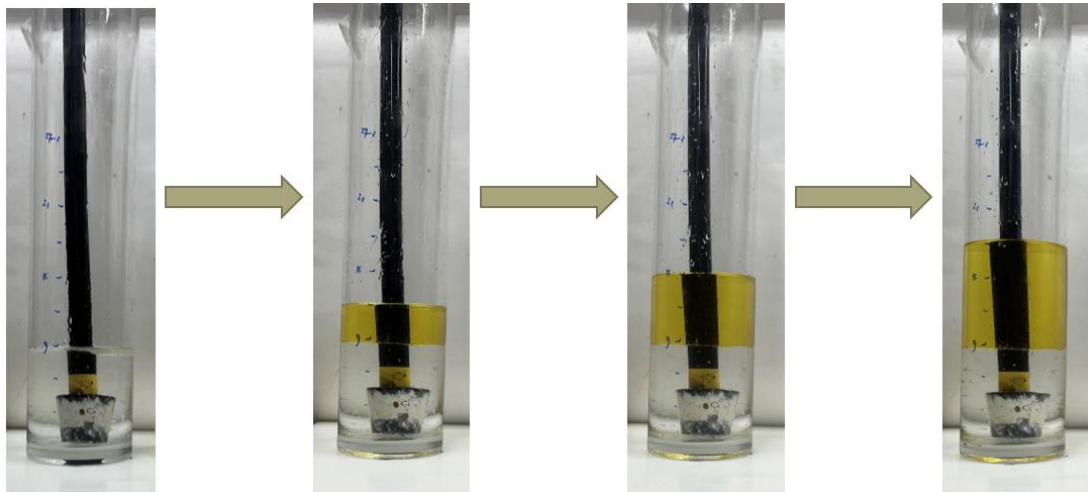


圖 42 定量增加浮油厚度

圖 43 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 44，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。

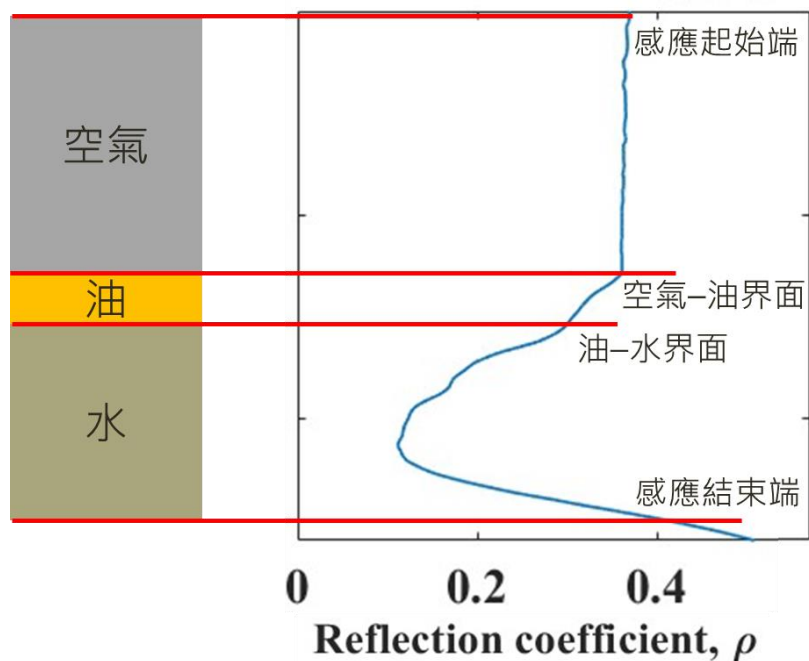


圖 43 TDR 波形中的空氣-油-水界面

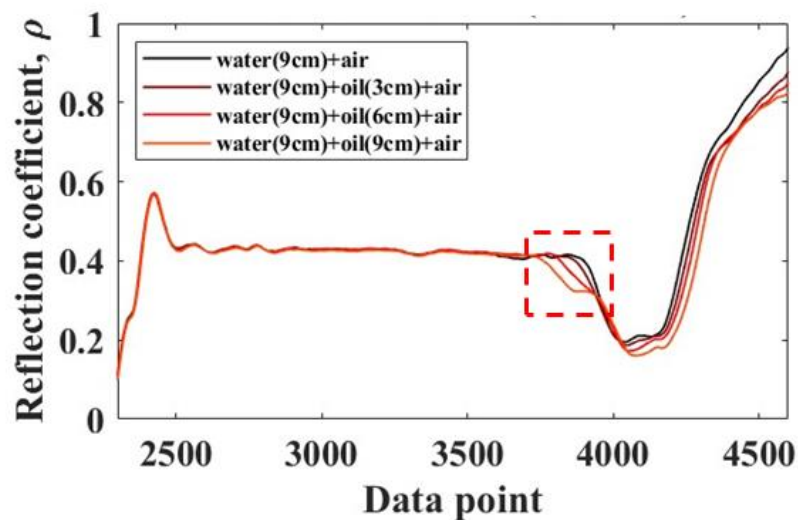


圖 44 油層厚度增加造成波形變化

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, 1999)，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初步測試，如圖 45，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 46，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 4 所示，誤差皆為毫米等級。在使用放置於現地的感應纜線的情況下，資料經過後處理仍然相當不易僅依賴一階導數就能得到準確的界面位置，需要研發其他更加可靠的標準來定位不同介質交界面的位置。

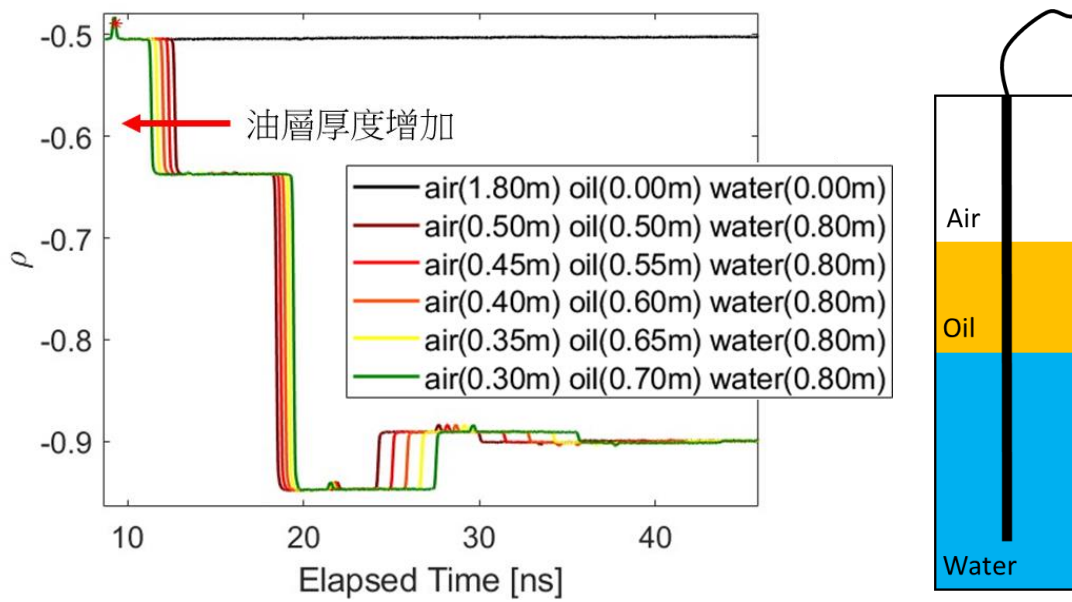


圖 45 數值模擬 TDR 波形傳播

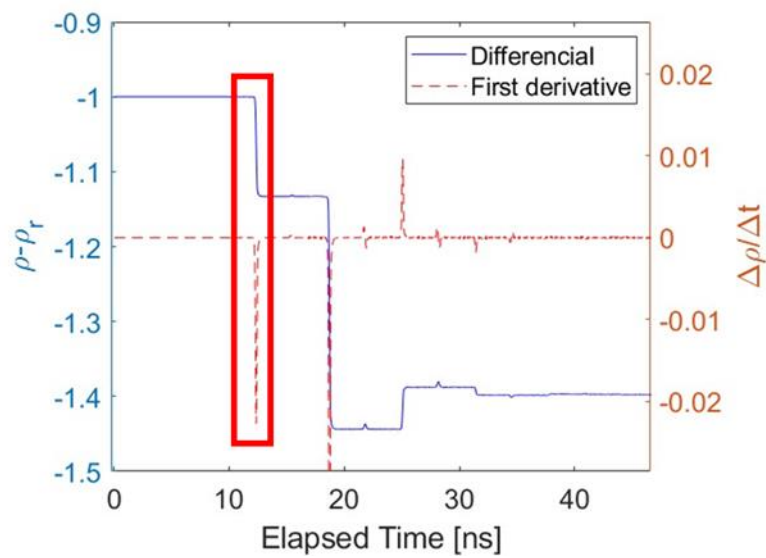


圖 46 第一個界面的位置

表 4 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



4.4 第二年模場試驗場址

第二年的模場試驗場址擇定為昱佑加油站，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 5 所示。

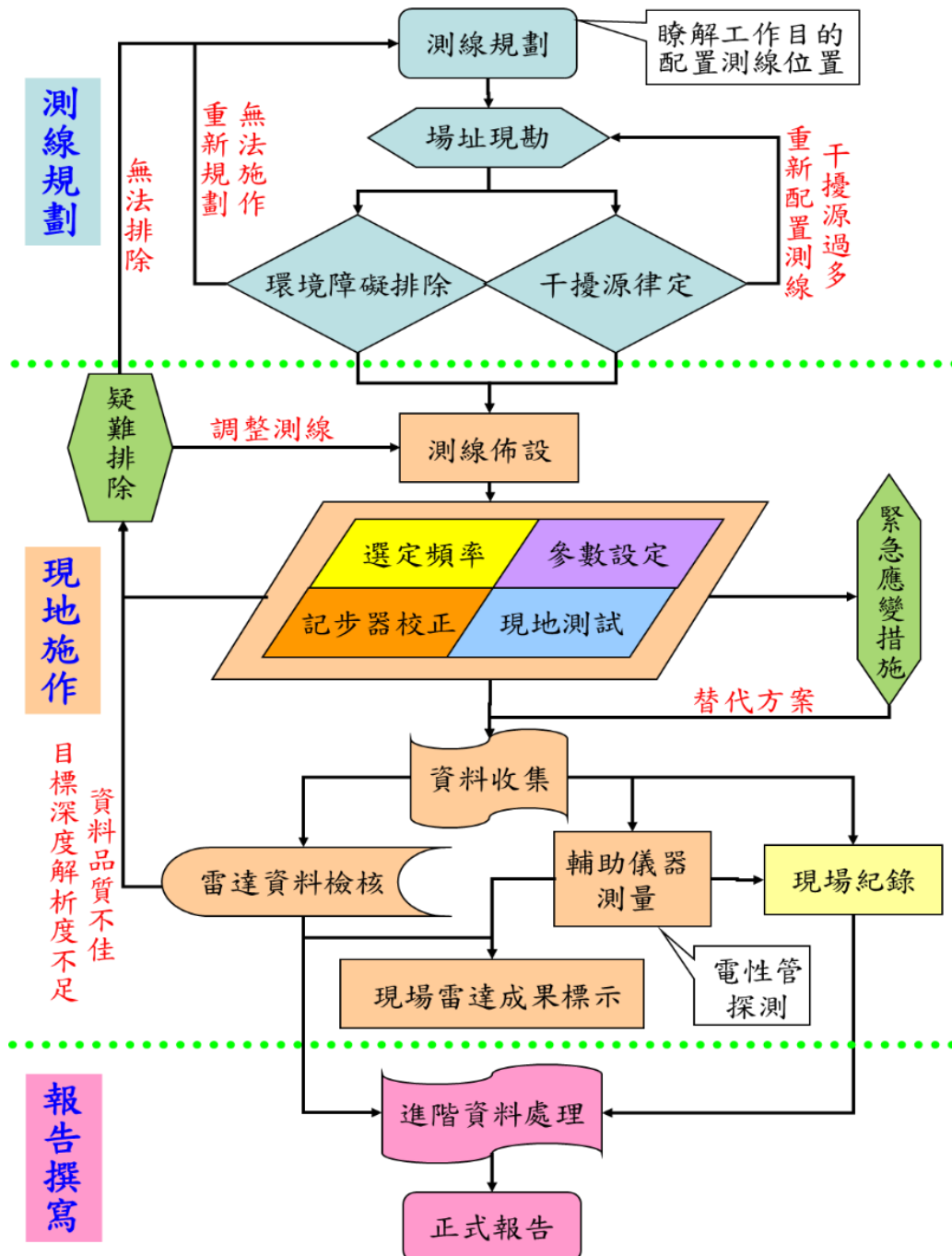


圖 47 透地雷達作業施測流程圖

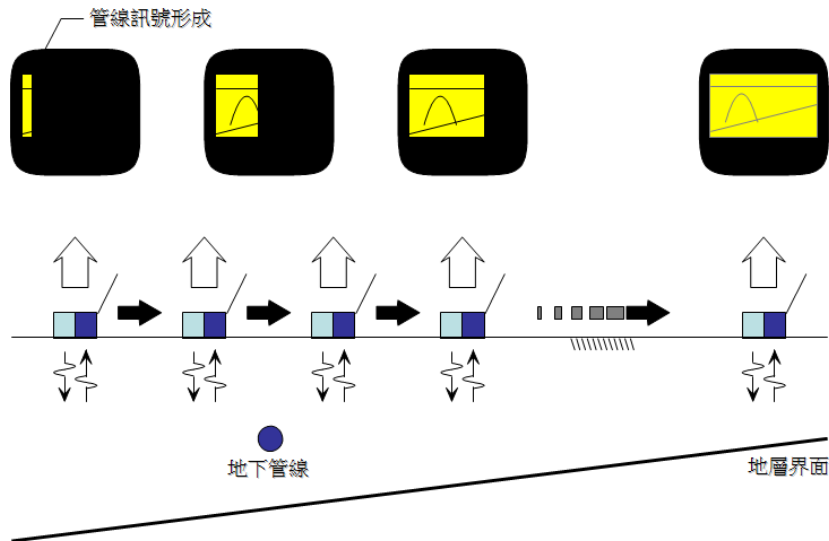


圖 48 透地雷達訊號成形示意圖

表 5 透地雷達波形特徵判識參考表

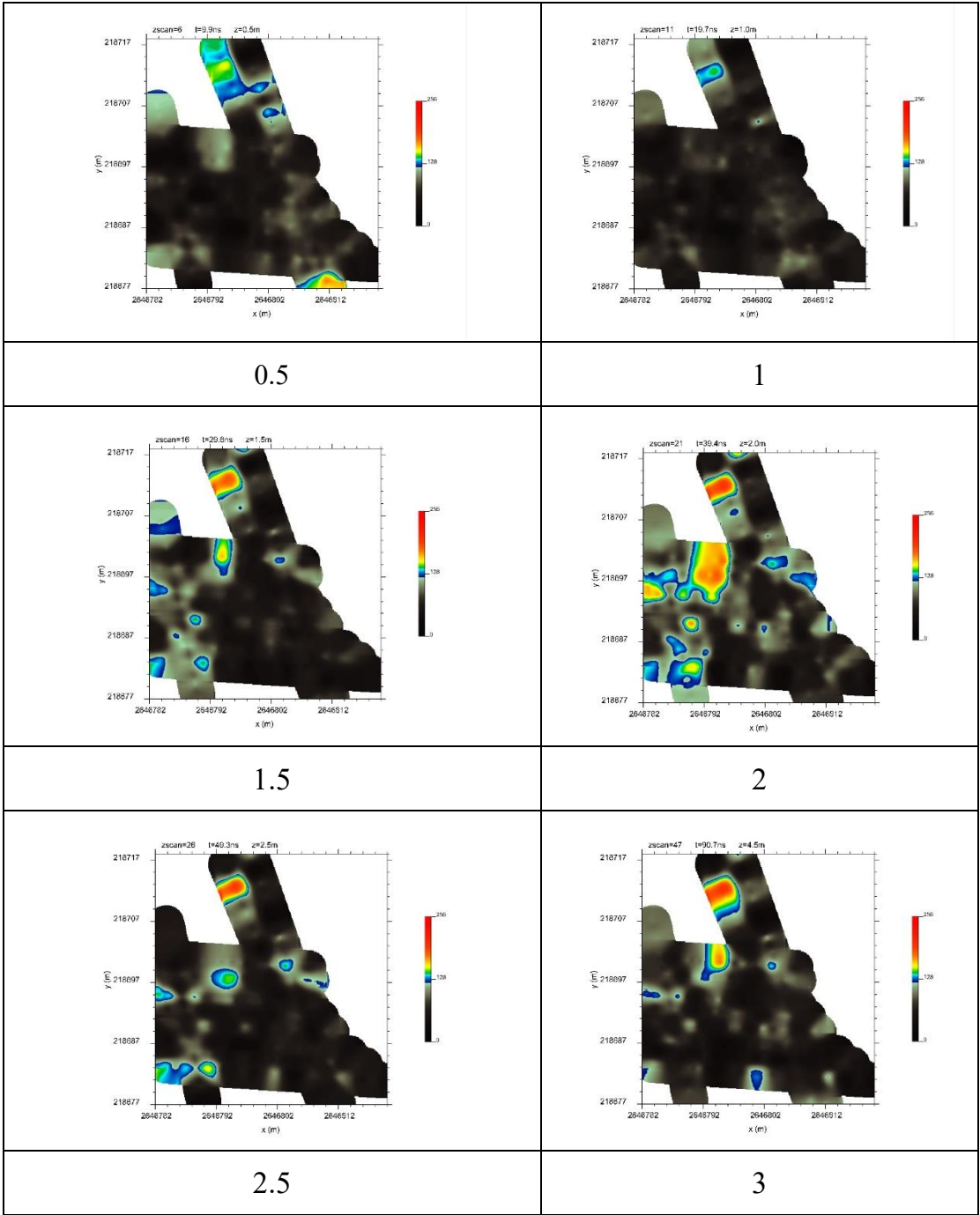
常見反射型態	波形特徵	波形參考	常見反射型態	波形特徵	波形參考
層狀地層	連續層狀		異常強烈反射特徵	異常強烈反射、能量衰減、波幅變化	
複雜層狀地層	不平整特徵呈波形層狀		地表上結構干擾：如屋頂、高壓電塔、管架	雙曲線繞射(通常電磁波速 > 0.2m/ns)	
傾斜地層或構造	傾斜層狀		導電差的塑膠材料	電磁波能量上下震盪造成類似重覆反射	
礫石層或級配層	連續小且密集繞射		導電佳的金屬管線	金屬物質遮蔽造成重覆倒V強反射現象	
地下管線	倒V或繞射特徵		金屬結構側向反應	類似地層傾斜波幅形狀	
RC 鋼筋結構	等間距繞射波幅		電磁波干擾	不明強弱雜訊波幅形狀	
混凝土鋪面裂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

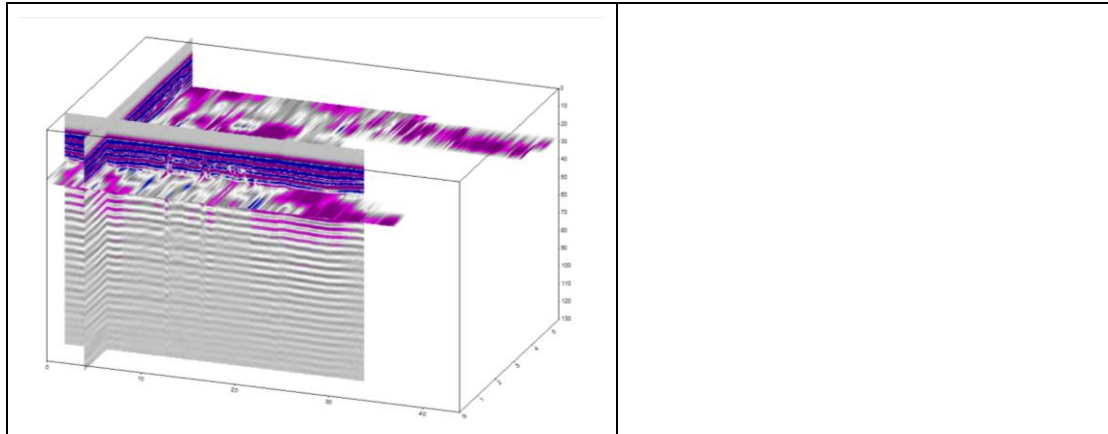


圖 49 三維透地雷達測線示意圖

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 50 電極洗孔照片圖



圖 51 電極施測孔照片圖



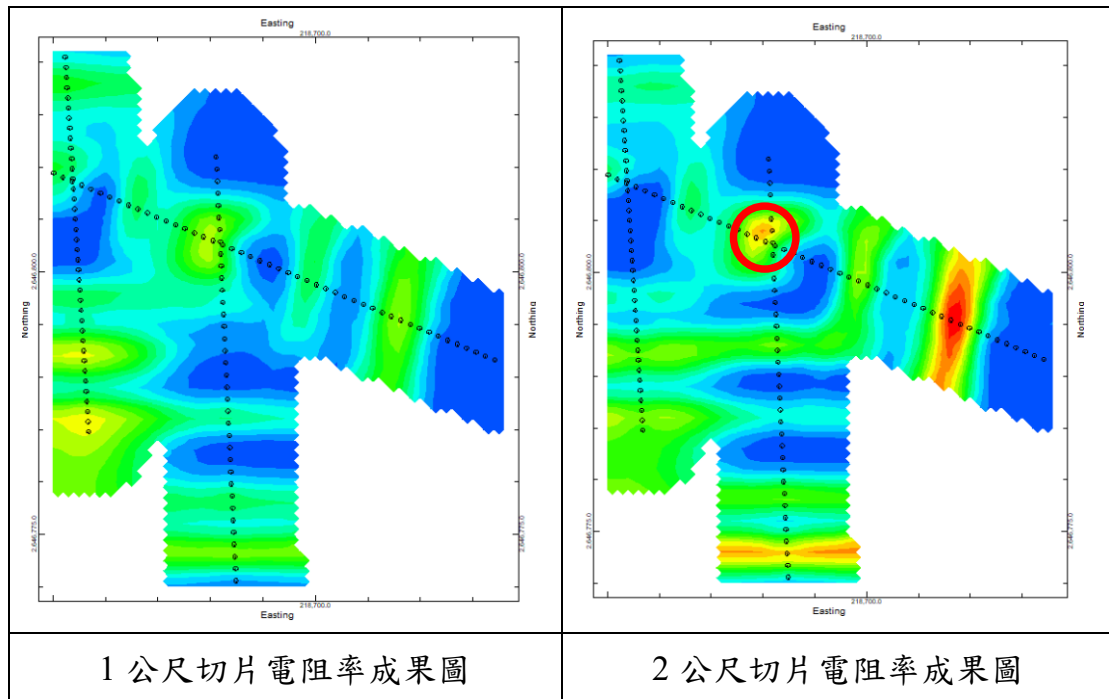
圖 52 地電阻法施測照片圖

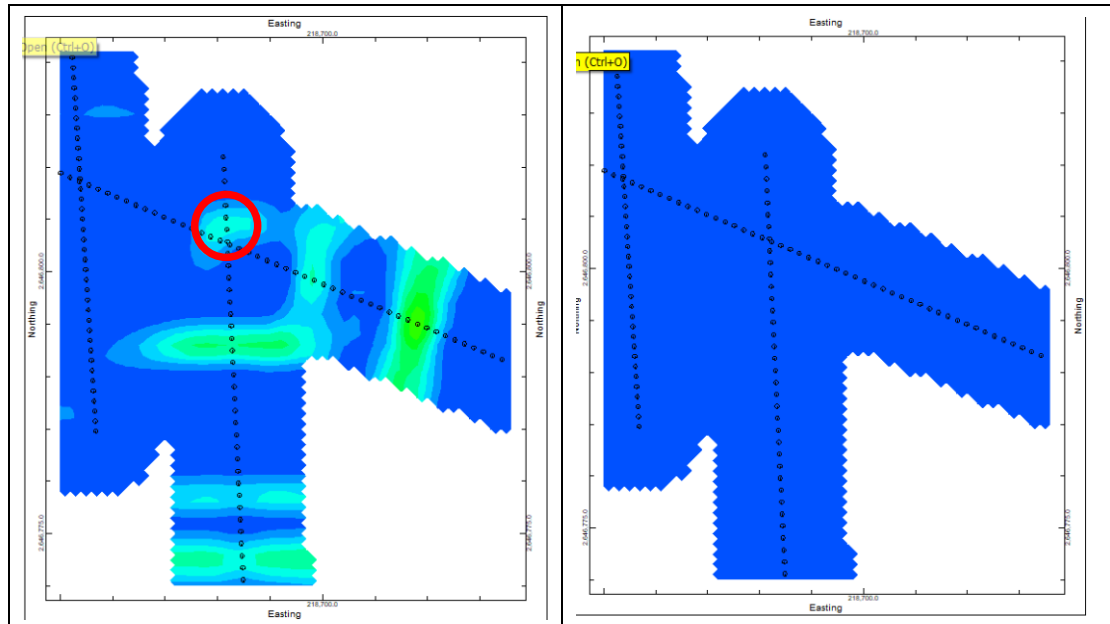
本計畫採用三維電阻率探測法進行探測，可藉由地層中不同材質電阻率，探測可能污染洩漏深度與位置，相關三維成果。相關等深度切片圖成果如下所示：

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 53 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

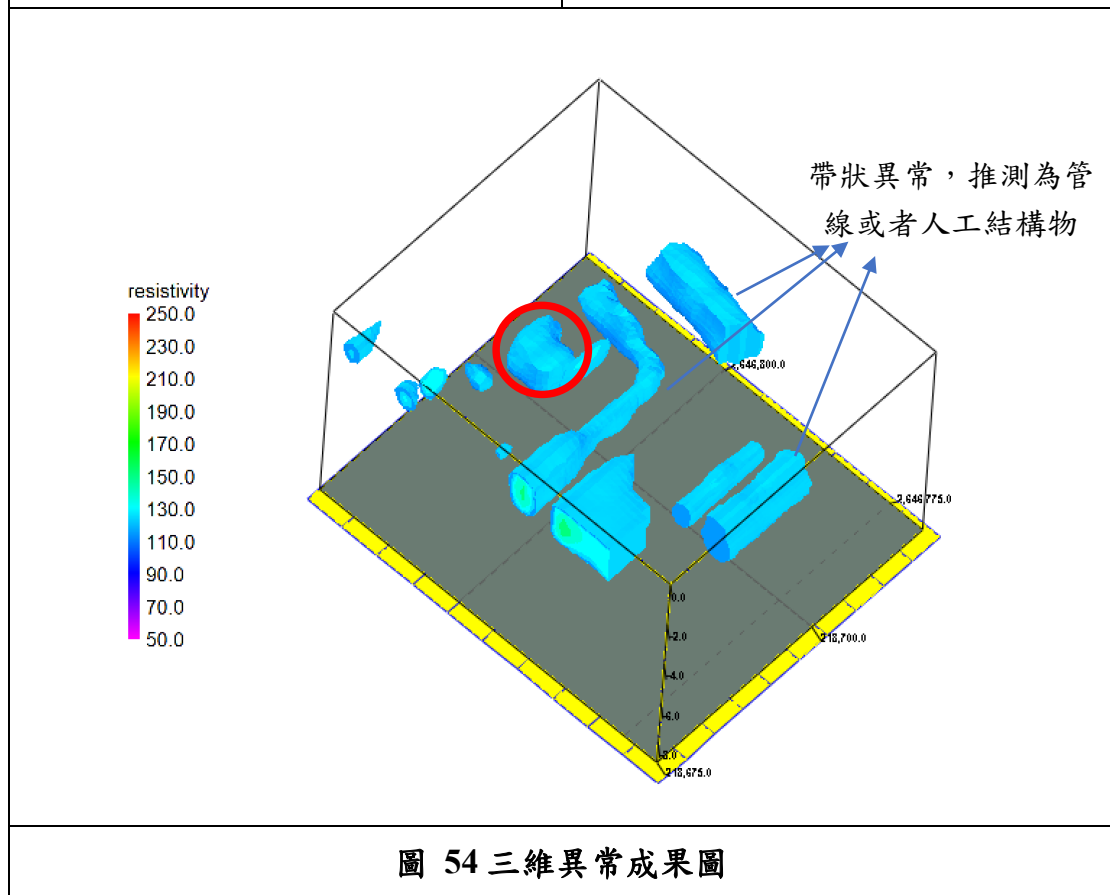


圖 54 三維異常成果圖



第五章 初步結論與後續工作說明

5.1 初步結論

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，期望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。

本研究目前已完成工作成果及後續工作說明如下

(1) 建置 TDR 儲槽管線污染滲漏之標準建置與分析方法：

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。後續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，以探討收錄資料之誤差及合理性。

(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，提供後期安裝智慧型監測系統位置之參考。第二個模場試驗場已經進行監測纜線安裝，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。

(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。

本計畫第一年已按照計畫書規劃，完成以上三點工作項目，第二年計畫將繼續執行建置 TDR 測漏管浮油自動偵測與量測方法，與即時監測系統與監測技術之成效評估。

5.2 第二年期工作規劃

測漏管浮油自動偵測將先初步進行室內實驗規劃，評估之項目包括感應元件之量測限制(包括感應靈敏度、感應空間解析度等)與其他環境因子之影響(如監測井/測漏管尺寸與材質導電度的影響)。先透過自來水與汽油分層的監測，評估感應元件之感應靈敏度與感應空間解析度，找出最適合使用於測漏管浮油監測當中的感應元件，後續再評估管徑尺寸與材質差異的影響。

即時監測系統與監測技術之成效評估，將進行長時間的監測，先於室內進行長時運行以探討量測資料品質與系統穩定性，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。

5.2.1 研究構想之可行性與未來發展

計畫團隊於 110 與 111 年執行相關電磁波時域反射法之儲槽管線滲漏監測技術工作，已將技術成熟度由實驗室驗證程度推進至可於現地真實環境測試階段，而 112 年度構想為即時浮油監測技術亦基於相同量測原理，其可行性由前述研究（O'Connor, 2001; Bruvik et al., 2012; Cataldo et al., 2007; Giaquinto et al., 2015; Chung et al., 2013）、以及 111 年度陸昌化工實



場試驗證實其高度可實現。此創新構想迄今尚未有實際應用案例與文獻，國外僅有相似技術應用於自來水滲漏監測，尚無應用在污染物(特別是有機污染物)的相關技術，其極具新穎性且可衍生多項專利發明。

(一) TDR 應用於加油站監測井/測漏管的工作規劃

計畫團隊發展 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、快速進行水位高度監測 (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監測井/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。類似氣液界面 TDR 監測方法如由圖 55 (a) 中 (O'Connor, 2001) 和圖 55 (b) 的 (Cataldo et al., 2007) 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放入油水使其分層再以 TDR 技術觀測其界面變化，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 56 (Lin et al., 2017) 係本計畫團隊前期利用 TDR 監測技術來監測橋墩沖刷之初步試驗結果，右側 TDR 反射訊號圖可明確識別沖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。本研究預期研發加油站監測井/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，透過即時監測資料及時、儘早發現污染物滲漏以達到智慧加油站管理。

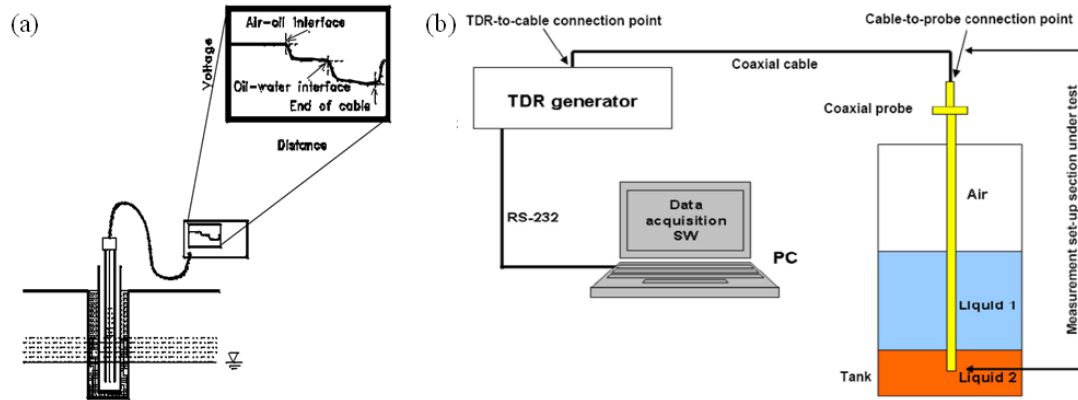


圖 55 (a) 鑽孔中油-氣界面測得之典型 TDR 反射訊號示意圖(O'Connor, 2001)；(b) 使用油水製造分層效果以 TDR 技術觀測其界面之配置示意圖 (Cataldo et al., 2007)

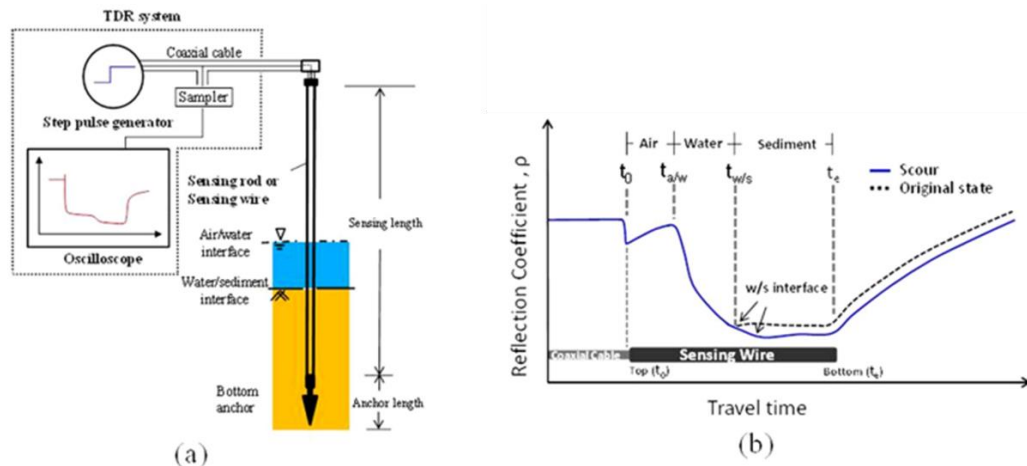


圖 56 (a)TDR 橋墩冲刷監測系統示意圖 (b)冲刷發生前後波形差異 (Lin et al., 2017)

(二) 建立 TDR 測漏管浮油自動偵測與量測方法

本計畫提出一加裝於加油站監測井/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-空氣界面辨識其浮油厚度。由於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纜線、其纜線配置與安裝方法、如何在不影響既有定期監測作業下設置該監測纜線等因素。



TDR 測漏管浮油自動偵測與量測方法亦為本研究關鍵課題，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。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，有望及時、儘早發現污染物以縮短油品滲漏預警時間。其中智慧化自動偵測方法之研究產出預期可申請第二項專利發明。

5.2.2 預期目標

1. 持續精進 TDR 儲槽管線污染滲漏與 TDR 監測井/測漏管浮油技術。
2. 充分掌握現階段 TDR 技術應用於工業儲槽與管線滲漏監測的適用條件與限制。
3. 發展整合『TDR 儲槽管線污染滲漏』與『TDR 監測井/測漏管浮油偵測』至即時監測系統之軟硬體系統即時監測系統應用於模場試驗場址之成效評估。

5.2.3 可能成果與效益

1. 專利申請至少 1 項
2. 國際研討會論文投稿至少 1 篇



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. 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.
 20. Lin, C. P. (1999). *Time domain reflectometry for soil properties* (Doctoral dissertation, Purdue University).



附件一 專案執行績效審核-自評表

專案執行績效審核—自評表

專案主持人	林志平		專案名稱	儲槽管線污染滲漏與加油站測漏管智慧監測技術		
專案類型	☐ 先導型 ☐ 研究型 ☒ 模擬型		專案主題	☒ 調查 ☐ 整治 ☐ 其他		
項次	類別	缺失點數	自評項目	執行單位 檢核		本署 審核
				是	否	
一	計畫書 核定修正	1點	依規定期限內備文提送	☒	☐	
		1點	書面資料完整且無補件情況	☒	☐	
		1點	報告依格式規定撰寫	☒	☐	
		1點	依規定期限內上傳電子檔	☒	☐	
		1點	系統資料依規定期限內登錄且資料登錄完整(含本署 SRFS 系統與科技部 GRB 系統)	☒	☐	
二	期中及期末	1點	依規定期限內備文提送	☒	☐	
		1點	書面資料完整且無補件情況	☒	☐	
		1點	報告依格式規定撰寫	☒	☐	
		1點	依規定期限內上傳電子檔	☒	☐	
		1點	系統資料依規定期限內登錄且資料登錄完整(含本署 SRFS 系統與科技部 GRB 系統)	☒	☐	
三	結案及核銷	2點	依規定期限至本署 BAF 系統上傳支用單據	☒	☐	
		3點	結案上傳支用單據及相關資料完整	☒	☐	
四	其他	4點	計畫主持人配合出席本專案成果發表活動(或指定代理人如協同主持人、同專業且為助理研究員以上職等)	☒	☐	
		1點	計畫執行者於執行期間與單位內各處室溝通良好，行政作業效率良好。	☒	☐	
合計		20點		20點		

註：執行單位於計畫執行期間進行缺失檢核於期中及期末送本署審核，並於期末統一計算。

未依實況登錄者，由本署補登依各階段執行紀錄進行缺失點數扣款。

缺失扣款機制：

- 1.依結案標準，於專案執行期間，視各執行單位行政作業配合度，依「專案執行績效審核—自評表」(附件 17)進行績效缺失記點，缺失點數達扣款規定者，依核定總金額按比例扣款(或追繳)。
- 2.缺失點數達 5 點者總金額款項扣 1.5%，缺失點數達 7 點者總金額款項扣 3%，缺失點數達 7 點以上者每增加缺失 1 點，加扣總金額款項 1%。



附件二 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	0		
	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	0		
	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		



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)
項目						
9.其他指標 (請自行命名)	(請自填)					

(二) 產業面

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 (說明未達成原因或專利、技術 轉移相關詳細資料)
項目							
A 智慧 財產權	1.專利 (件數)	已發明	0	0	0		
		核新型/設計	0	0	0		
		准合計	0	0	0		
		申請發明	0	0	0		
		請新型/設計	1	0	0		
		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		



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)
		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)					

三、請依前述學術面、產業面、政策面等預期量化成果，具體敘明研究成果對本署政策推動之助益。（200 字為限）

學術面(如國內外研討會、期刊投稿件數、或人才培育碩博士生說明) 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。因此將以研究期刊投稿一篇與國際研究接軌並培育專精研究之人員碩士博士各一名。
產業面(如合作研發產業、申請專利、洽談技術移轉廠商件數說明) 本計畫擬發展 TDR 技術在儲槽與管線滲漏監測的應用，發展出適用於土壤與地下水污染防治的滲漏監測技術。預期於本計畫執行結束後，應可進入真實環境執行現地測試與實證，並推動業界的技術移轉與實質申請至少一項新型發明專利。
政策面(如整治費用降低、特定污染物整治效益提升、或提供政府作為監測/管制標準、污染查核、場址管理等政策及法規研訂之參考)



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 TDR 滲漏監測技術是否可適用在不同的監測環境需求，需要進一步的研究與調適。本計畫目的是進入真實環境執行現地測試與實證，提供政府作為智慧監測/管制、污染場址管理等政策及法規研訂之參考。



附件三 計畫書審查意見回覆對照表

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」

☐申請計畫書 ☐期中報告 審查意見回覆對照表
☒修正計畫書 ☐期末報告

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：林志平教授 NO：SA8
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. 計畫主持人於 2020 年獲科技部研究傑出獎，研究能力強。 2. 本計畫已洽請顧問公司協助，具可行性。 3. 本計畫屬於模場監測調查性質，非屬於模場整治類，所需經費應較低。		謝謝委員的肯定。	
委員二 1. 本計畫開發本土化應用技術，具有創新及應用價值。 2. 主持人在此研究領域，已累積相當經驗，期望可以成功應用在有機物汙染領域，預期將可以發表不錯的期刊文章。 3. 本計畫有顧問公司團隊加入，建議可以尋求技轉、或是共同開發商轉技術之機會。		謝謝委員的肯定。未來會尋求技轉與共同開發技術之機會。	
委員三 1. 本計畫透過智慧即時監測技術之創新思維，建置儲存槽及管線洩漏監測管理系統，可即時確認是否有無污染物滲漏之情形，藉由源頭防治降低整體整治成本及提高其成效，有助於提升我國土壤及地下水污染預防之成效。 2. 有關本計畫之智慧監測技術之應用，該技術易受電磁波等因素影響，建議宜補充其應用條件及限制，並評估於不同條件之場址下，該技術建置之可行性，以利相關單位參考。		1. 謝謝委員的肯定。 2. 謝謝委員指教，感應段主要埋設於地底下，電磁波干擾通常不大，且電磁波干擾之頻率特性往往與滲漏監測訊號不同，亦可透過濾波技術處理。相關應用條件與限制會基於執行模場計畫之經驗，於期末報告提供相關技術建置的成果與限制說明。	



委員四 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廠址需求。	謝謝委員的肯定。本智慧監測技術會提供模場公司長期監測使用，以提供未來推廣之經驗分享。
委員五 試驗規劃細節宜在第一年完成，尤其是導入滲漏情境。	謝謝委員指教，第一年成果會導入滲漏情境。已將導入滲漏情境之場址於修正稿中說明。
委員六 1. 監測井的自動化監測內容及傳輸方式可進一步說明。 2. 洩漏檢測器的靈敏度受現地環境的影響可以執行期間進一步評估。	1. 監測井的自動化監測內容主要為液位與浮油厚度偵測，屬於傳輸線監測技術，TDR 主機發射與接收延著纜線傳輸的訊號，從接收到之波形可以處理獲得上述自動化監測內容。 2. 前期已有評估含水特性可能造成的影響，透過鋪設濾料的選擇基本上可以降低此環境因子的影響。其他現地環境可能的影響，將於模場試驗中進一步評估。
委員七 1. 請補充說明智慧監測之執行方法、實施步驟，以及本計畫預期目標達成之驗證方法。 2. 請研提成本效益之分析結果，同時對於國內不同不同規模之加油站，建議可行之推動策略。	1. 監測智慧化主要在於自動偵測的資料處理方法的研擬，目前有初步的構想，但具體的細節將於計劃執行期間提出並考慮提出專利申請。預期目標的驗證方法可區分為模擬情境的準確度評估以及模場試驗的穩定性評估。 2. 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。
委員八 下列意見請確認，並於計畫書修正稿中修正： 1. 缺模場地方環保局同意函。 2. p. 11-30、p. 11-36 協同主持人服務機構不一致。 3. p. 11-49 細項費儀未說明詳細費用，且計算錯誤。 4. p. 11-50 耗材費用：怪手租賃費用單價應為 15,000 元、地面刨除費用計算錯誤 5. 雜項費用建議酌減，請確認有編列碳粉匣也有編列影印費用是否有重複編列。 6. 行政管理費編列超過 10%。(四捨五入問題)	1. 已補充模場地方環保局同意函 2. 已修正 3. 已修正費用計算與說明 4. 已修正 5. 已刪除並酌減雜項費用 6. 已修正



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汙染的滲漏監測，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。
---	--



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：B7
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 1 年)		
審查意見		執行單位回覆	
委員一		1. 謝謝委員肯定。	
1. 本計畫為模場計畫，擬以電磁波時域反射 (TDR) 技術，偵測污染場址管線洩漏及浮油。目前已完成包括標準方法建立、場址選定、即時監測系統建立等，計畫進度符合原先規劃。		2. 謝謝委員指教，後續預計將會在本計畫中的加油站場址進行油污監測。	
2. 目前 TDR 現場監測之場址，以水測試顯示及果良好，但是該場址中不見得會有漏油，建議應找尋油污污染場址，以進行更真實之測試。		3. 謝謝委員指教，待加油站場址中的 TDR 監測系統架設完畢後，可再將結果相互比較。	
3. 計畫中所使用之三維地電阻、三維 GPR 之結果(5.2 節)，建議也能與 TDR 三者間，彼此比較，並說明其各自優缺點及互補性。			
委員二		1. TDR 波形經過差異分析之後無滲漏事件發生	
1. 計畫報告第 23 頁中差異分析法，是否可能進行滲漏事件發生前後不受影響部分與滲漏事件發生後才受影響部分進行滲漏事件發生的淨效果分析。		部分可做為雜訊影響程度，並根據此段雜訊數據設定閾值，建立判定滲漏事件發生之警戒值。	
2. 報告第 37 頁說明以 Raspberry Pi 做為資料收集，Raspberry Pi 是個經濟實惠的工具，建議這方面可做更完整的說明，包括軟體設計部分。		2. 謝謝委員指教。	



委員三 本計畫以 110 年度電磁波時域反射法之新滲漏監測方法持續精進實驗室和現地測試以符合不同環境需求。在 110 年完成水位變化與底泥淤積厚度試驗後，本年度持續探討孔隙率影響與 TDR 訊號和油品飽和度之關係。期中報告已完成三項具體成果包含 TDR 管線建置與分析方法、模場試驗場址擇定與 TDR 即時監測系統建置等，大致符合期中報告需求，以下幾點建議提供計畫主持人參考： 1. 應加強國內、外相關文獻資料蒐集。 2. 應注意報告撰寫格式與品質，每章開始置於每頁開始，補充甘特圖及查核點。 3. 昱佑加油站油污洩漏探討因子(濃度、含水率、土壤質地與 TDR 關係)要加強說明。 4. 陸昌化之亦同(廢水複雜與 TDR)。	1. 謝謝委員肯定與指教，後續會多加注意委員所提供的建議。
委員四 1. 期中報告符合預期進度。 2. 已選擇昱佑加油站及陸昌化工幼獅廠兩個實驗模場，並建置 TDR 儲槽管線污染滲漏之標準建置及分析方法。 3. 期末建議能針對系統穩定性、現場環境因素評估說明。 4. 自評表期中達成數未填，期中報告欠缺計畫進度甘特圖。 5. P.14 頁報告內並無等濃度圖如圖 3-2。	1. 謝謝委員肯定。 2. 謝謝委員肯定。 3. 謝謝委員指教。 4. 謝謝委員提點，後續將補上相關資訊。 5. 謝謝委員提點，後續會將其修正。



委員五 1. 本計畫進度符合期中報告。 2. 加油站管線常見埋設深度為 1 至 2 公尺間，又本次昱佑加油站探測結果於前述深度反應明顯，故建議可針對如何排除既設管線干擾補充說明，以使試驗結果更為明確。 3. 請補充進度甘特圖，請依徵求書附件 12 格式補充主要研究人力、產業界資源投入表。	
---	--



附件四 研究進度及預期完成之工作項目(甘特圖)

	年月	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	備註
工作項目														
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														
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														
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. 建置 TDR 儲槽管線污染滲漏之標準建置與分析方法 2. 建置 TDR 測漏管浮油自動偵測與量測方法												
	期末	1. 模場試驗場址擇定 2. 建置 TDR 即時監測系統 3. 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。														