



環境部環境管理署

113 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

現地緩釋滲流化學氧化整治未飽和層 土壤殘留相氯化有機物消弭地下水長 期污染潛勢

成果報告書 (定稿)

主 辦 單 位：  環境部環境管理署
專案執行單位： 國立中興大學／環境教育暨永續科技研
發中心／環境工程學系
專案主持人： 梁振儒 教授
專案執行期間： 113 年 11 月 01 日起至
114 年 11 月 30 日止

中 華 民 國 114 年 12 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	113 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：梁振儒 NO：S3	
計畫名稱	現地緩釋滲流化學氧化整治未飽和層土壤殘留相氯化有機物消弭地下水長期污染潛勢		
審查意見		執行單位回覆	
委員一 1. 本計畫開發一應用於未飽和層土壤之 ISCO 系統，選用於地表下相對穩定之過硫酸鈉作為氧化劑，並透過滴灌設備原理設計改良之滲透管緩釋灌注系統，控制滲流頻率、水量與壓力參數，將氧化劑緩慢釋入土壤中，以毛細作用停留於土壤顆粒間並誘發氧化反應，有效提升反應效率並降低優勢流風險，以解決殘留 TCE 在土壤中低於管制標準，但卻可能再次變成地下水污染源的問題。建議後續能針對不同質地土壤加以測試，更符合現實需求。		委員一 1. 感謝委員寶貴之建議，本計畫第二年將於華淵電機工業股份有限公司進行系統試驗，將先針對該場址土壤質地與相關水文地質參數進行資料收集，納入 HYDRUS 模擬以評估不同灌注條件下之滲流行為與氧化劑分布，據以選定最適合該場址之灌注條件，以提升氧化劑停留於為飽和層土壤增加與殘留相污染之接觸機會，降低優勢流之液體傳輸，避免導致再次地下水污染之可能。另待依本次計畫之模場試驗規劃測試完畢，未來將持續修正並發展至其他不同質地之場址測試，亦將依循「土壤特性調查 → Hydrus 模擬評估 → 參數最佳化 → 現地驗證」之流程調整設計與操作條件，使技術更貼近各類型場址之實際需求。	
委員二 1. 成果豐碩建議應擴大模場測試		委員二 1. 感謝委員對本計畫成果之肯定，第二年計畫將進入實際模場操作階段，從設計階段邁入實務應用測試，將依據第一年建立之整治系統標準作業流程進行模場測試。	
委員三 1. 本計畫已完成系統設置並測試具良好成果，建議後續可挑選場址進行模場實場測試，並可擴大應用範圍，如灌注其他藥劑、不同土壤層/礫石層質地之未飽和層灌注。		委員三 1. 感謝委員對本計畫成果之肯定與建議，本計畫於第二年將規劃以華淵電機工業股份有限公司為示範場址，進行模場/實場測試與操作驗證，現階段規劃先以過硫酸鈉作為藥劑進行灌注，並針對該場址之土壤地質及水文條件進行 Hydrus 模擬，以選擇最適合該場址之灌注條件進行整治及技術測試。待試驗完成，未來將可	



	應用於不同液體試劑及於不同地質條件下之灌注
委員四 1. 本計畫透過滴灌式緩釋滲流結合 ISCO 以處理未飽和層殘留相，具高度創新性與現地應用價值，值得肯定。 2. Hydrus 模型為本計畫核心，建議後續以更多現地量測資料進行模型校正，以提高模擬準確度。 3. 有關長期滲流系統易受介質堵塞及含水變動影響，建議考量通水或脈衝式灌注方式提升長期穩定性。	委員四 1. 感謝委員對本計畫成果之肯定。 2. 感謝委員寶貴之建議，本計畫第二年將於華淵電機工業股份有限公司進行實務模場試驗，且其該場址之整治計畫書已針對該處之土壤質地進行完整的調查，後續將依據其資料進行 Hydrus 模擬，以提高模擬準確性。 3. 感謝委員寶貴之建議與提醒，本計畫選擇過硫酸鈉作為主要液體試劑，過硫酸鈉溶解度為 730 g/L，水溶解甚高，不易產生過飽和而產生結晶之情形，且若有水與其接觸，亦會快速溶解，另外，於開始灌注氧化劑前，會先以 GroPoint Profile 探針進行土壤含水率之測量，並將其結果輸入於 Hydrus 軟體進行模擬，目前於第一年計劃中測試結果，初步規劃應會以脈衝式方式進行灌注，此外，於氧化劑灌注期間，亦會使用 GroPoint Profile 探針進行土壤含水率之監測，觀察氧化劑之分布情形。
委員五 1. 第一年於中興大學校園測試，但發現測試區地底下有一回填層，其性質與透水性應該與原生土層不同。於測試及模擬時是否有納入考量？第二年運用於實場時是否會有差異？	委員五 1. 感謝委員寶貴之建議，第一年於中興大學校園測試時，確實發現測試區下方存在回填層，惟仍依既定程序完成系統啟動與完整測試，以確認設備安裝、操作流程及控制參數均可正常運行。第二年實場運用時，將依第一年經驗強化前期施工規劃，並安排鑽機進場採鑽孔施作，其將可避免類似情形（若遇到建築材料回填或夾雜礫石之地質）而無法順利埋入滲透管，相關工程費用亦已編列於第二年申請計畫書中。



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	113 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：梁振儒 NO：S3	
計畫名稱	現地緩釋滲流化學氧化整治未飽和層土壤殘留相氯化有機物消弭地下水長期污染潛勢		
審查意見		執行單位回覆	
委員一 利用滴灌原理進行不飽和土層以過硫酸鹽處理 ISCO，構想創新。		委員一 感謝委員對本計畫構想之肯定。	
委員二 1. 本研究計畫針對三氯乙烯 (Trichloroethylene, TCE) 於未飽和層所形成之殘留相污染問題，提出一創新之現地化學氧化整治技術。分為兩年期，已具體說明研究方法與流程。 2. 期中執行成果已完成滲透管緩釋灌注裝置與機電控制系統建置、含水率監測設備配置，以及數值模擬工具之準備，整體進度符合預期目標進度，惟建議補充經費使用狀況說明。 3. 本計畫選用 Hydrus 模擬軟體之主因，在於其已被廣泛應用於污染場址風險評估、修復設計與土壤水文研究，為強化模型結果信賴度，建議仍須強化驗證模型穩定性與適用性，以確保模型於本研究場域中之準確性與可靠性。 4. 本計畫申請預估成果國內研討會論文、國際研討會論文發表各為 1 篇，研發改良一項、專利申請 1 件，期中成果達成數研發改良一項，其他成果績效已預計投稿及專利申請中，建議後續仍應加速研究成果績效展現。 5. 本計畫已有初步結論，建議補充建議。		委員二 1. 感謝委員對本計畫構想及研究設計之肯定。 2. 感謝委員對本計畫執行狀況之肯定。關於經費使用狀況，本研究第一年核定經費包含人事費 (858,820 元)、耗材與主要費用 (1,214,400 元)、其他研究相關費用 (26,780 元) 及行政管理費 (300,000 元)，總計 2,400,000 元。截至繳交期中報告，目前人事費皆依計畫書規劃按月支出。耗材與主要費用則根據查核點中主要工作項目，且配合後續現地試車規劃，已完成滲透管主要製作之相關實驗耗材、灌注控制系統建置及 HYDRUS 軟體套件等採購。整體經費使用狀況已達 60%，符合計畫執行狀況及使用。 3. 感謝委員寶貴之建議。Hydrus 模擬軟體誠如委員所述，已廣泛應用於污染場址之水文行為模擬、修復設計與風險評估中，為本計畫模擬滲流與氧化劑傳輸行為的主要分析工具。針對委員所提模型穩定性與適用性之建議，研究團隊將採取以下強化措施，以確保模擬結果之準確性與可靠性： ➤ 以現地監測資料進行驗證： 本計畫已於試驗過程設置 GroPoint Profile 多深度土壤含水率探針，以連續監測不同深度之含水量變化。後續將以此監測數據	



	與 Hydrus 模擬結果進行比對，藉以驗證模型對滲流與水分傳輸行為的再現能力，並嘗試以統計學量化模型精度。 ➤ 參數校正與文獻比對： 模型建立過程中，將依據土壤實測物化性質(如水力傳導係數、孔隙率等)與相關場址文獻進行比對與校正，確保關鍵參數設定具合理性。此外，對於氧化劑滲流與反應相關之參數，亦將參考既有 ISCO 實驗研究成果，以提升模擬精度。 透過上述措施，本計畫應可提升 Hydrus 模擬結果與現地實測數據之相互驗證，確立模型於本研究場域中之準確性、可靠性及可重現性，進而提升整體技術開發之科學嚴謹性與應用價值。 4. 感謝委員之建議與提醒，計畫團隊申請之預估成果截至目前，除研發改良一項外，另已完成將相關計畫成果投稿至 2025 9th Asia Conference on Environment and Sustainable Development (ACESD 2025)，並獲舉辦單位接受發表，擬於 11 月前往日本福岡參加研討會。後續計畫團隊會參照委員之建議，其他研究成果績效將持續著手積極準備。 5. 感謝委員之建議。本期中報告所呈現之內容為本計畫第一年度執行階段之暫時性研究成果，主要目的在於呈現技術開發與模擬分析之進展與初步結果。針對委員建議，本計畫團隊將於第一年度執行完成後，依據實驗測試、監測資料及數值模擬之綜合結果，進一步進行系統性分析與技術評估，於第一年期末報告中補充完整的研究建議與後續改進方向，包含技術優化策略、操作參數修正及可能之應用情境說明等。
委員三 本計畫後續滲透水平範圍為現地試驗重點，應持續評估有效控制方式。	委員三 感謝委員之建議。確如委員所述，滲透水平範圍為本計畫於後續現地模場試驗中之關鍵參數之一，將直接影響滴灌水及氧化劑之傳輸效率與整治範圍。本計畫已於第一年期中完成實驗設備建置，其包含有滲透管緩釋灌注系統、機電控制系統與含水率監測設備，並初步藉由設備現地試車建立相關參數，



	階段性成果將提供為後續評估有效控制方式。
委員四 二年期模廠計畫，本次為第一年度期中報告，執行半年工作項目與內容符合計畫書。	委員四 感謝委員對本計畫執行狀況之肯定。
委員五 計畫執行進度符合預期，建議可以考量若長期使用此之滲透管緩釋灌注系統是否會造成堵塞的問題。	委員五 感謝委員肯定與建議。本計畫目前之滲透管緩釋灌注系統已完成設備建置，並正於校內場域進行現地試車測試。由於本系統所使用之氧化劑為過硫酸鈉之鹽類物質，其溶解性高且不具膠體或有機沉積特性，因此理論上不易因藥劑特性造成孔洞堵塞。此外，系統設計中已考量適當灌注壓力與流量控制，可維持滲透管孔洞內部流體持續流動，減少沉積或結晶生成的可能性。惟考量長期操作下仍可能出現預期外之孔洞縮塞或表層積垢等現象，計畫團隊將於後續現地模場試驗階段持續觀測孔隙壓力及流量變化，並依委員建議，若發現堵塞傾向，將適時調整操作參數、建立滲透管清洗程序或尋找其他改善措施，以確保系統穩定運作與長期可靠性。



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	113 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：梁振儒 NO：S3	
計畫名稱	現地緩釋滲流化學氧化整治未飽和層土壤殘留相氯化有機物消弭地下水長期污染潛勢		
審查意見		執行單位回覆	
委員一 - 驗證模廠施作有效性的規劃? - 極端氣候下(如暴雨)對此方法的影響。		委員一 感謝委員提寶貴意見 - 此計畫針對未飽和層殘留相 VOC 污染物進行整治技術開發，對於有效性之評估，於第二年目標二之第三項中規劃，擬以被動式土壤氣體採樣方式，進行高密度監測土壤孔隙間之 VOC 濃度變化，以確認土壤殘留相 VOC 之移除。 - 此計畫所欲解決之問題，即針對降雨滲流至地表下之水體，可能造成未飽和層土壤殘留相污染物溶出而污染地下水體，使污染擴散移動。因應極端氣候下(如暴雨)對污染之潛在影響，此技術之開發即欲解決殘留相污染雖符合土壤污染標準，但卻是地下水之持久性污染源，氧化劑滲透管緩釋管灌注系統消除此土壤殘留相污染，可降低對於極端氣候遭遇強降雨之氣候影響使污染擴大之風險，若整治過程，欲強降雨之雨水滲流至地表下，則可能稀釋所灌注之藥劑而減弱整治反應性。	
委員二 本實驗未來於校園實場轉移至電子場場址應用時，尺寸放大 (scale-up) 項目及因子如何考量？		委員二 對於開發過程會於校園未受污染之場地確認技術之系統性應用，並且對於氧化劑滲流之劑量，將於實驗室進行土壤氧化劑需求量(soil oxidant demand, SOD) 評估，當於實場應用時，所開發之設備即可直接移至實場應用，另對 SOD 則需以實場土壤進行評估，當放大尺寸時，此項目因子將會依據所欲處理之土壤範圍體積量體，予以放大，藉以調整氧化劑滲透管緩釋管灌注系統。	



委員三 1. 試驗對應目前整治關鍵與瓶頸？	委員三 1. 此技術之開發乃對目前現行整治技術對於未飽和層土壤殘留相所面臨之瓶頸，即當 TCE 污染土壤及地下水，於通氣層 LPZ 土壤中殘留 TCE 具有潛在污染地下水之源頭，雖然已經符合土壤 TCE 管制標準，然而經由 DAF 及 SSL 之相關計算得知土壤中僅需微量之殘留相濃度便具有污染地下水超過管制標準之潛勢。現有之通氣層污染土壤處理方式，除挖除外運處理外，土壤氣體抽除法(SVE)為最普遍採用之未飽和層現地整治工法，但受限於 SVE 受到污染物質傳(吸附相至氣相之轉換)限制，會出現污染物拖尾現象(Tailing)使得處理效能下降，當污染物存在 LPZ 土壤中時，此現象將會更加顯著，導致未飽和層土壤整治的難度增加。
委員四 1. 建議補充過硫酸鹽使用量與土壤酸化程度的關聯研究，並說明控制 pH 值變化的具體策略。	委員四 1. 過硫酸鹽化學氧化法之應用，為一項可有效破壞移除 TCE 之工法，然而其中可能對環境之影響為 pH 之降低。通常此現象為整治過程之暫時性衝擊，待一段時間後，因土壤之 pH 緩衝能力或地下水之移動，可使其自然恢復。然而若大量灌注氧化劑，則可能造成較大之酸化程度，因此，此技術即透過氧化劑滲透管緩釋管灌注藉以降低及控制氧化劑之灌注量，當土壤氧化劑需求量(SOD)評估過程，會加以考量土壤酸化之潛勢，評估整治過後，利用此系統灌注清水以降低土壤酸化之影響，此部分之說明將補充於第二年目標之工作項目敘述中。
委員五 1. 本計畫規劃完整，應用可行性高	委員五 1. 感謝委員此計畫執行規劃之審視及肯定。
委員六 1. 請再強化說明如何控制且精準施用氧化劑劑量，以降低操作成本。 2. 請留意所選用殘留氧化劑對地下環境之影響？	委員六 1. 感謝委員之提醒，對於氧化劑之灌注量及濃度，將依據土壤氧化劑需求量(SOD)之評估結果，予以調整氧化劑滲透管緩釋管灌注系統。此部分之說明將補充於第二年目標之工作項目敘述中。 2. 感謝委員之提醒，過硫酸鹽化學氧化法之應用，為一項可有效破壞移除 TCE 之工法，然而其中可能對環境之影響為 pH 之降低，通常此現象為整治過程之短暫衝擊，待一段時間後，因土壤之 pH 緩衝能力或地下水之移動，可使其自然恢復。然而若大量灌注氧化劑，則可能造成



	較大之酸化程度，因此，此技術即透過氧化劑滲透管緩釋管灌注藉以降低及控制氧化劑之灌注量，當土壤氧化劑需求量(SOD)評估過程，會加以考量土壤酸化之潛勢，評估整治過後，利用灌注清水以降低土壤酸化之影響。
委員七 1. 耗材費：軟體使用請以租賃或依年度攤提費用（建議以單機版 6 個月~一年租用），建議酌減。 2. 請依補助上限調整各項經費，並修正於申請計畫書定稿。	委員七 1. 感謝委員的建議，經檢視 HYDRUS 軟體及此計畫模擬之需求，擬採購 3D-Standard Main Program, Single License 僅用於一台裝置。若以租賃 6-12 月，其費用為 50-65%之價格，若為 24 個月，則為 85%。當採用分年租賃，總費用會相當或大於直接購買之價格，且使用時間少於兩年。然此計畫期程為 24 個月，且計劃之執行具學生教育之目的，因此，預計第一年以直接購買之方式，擁有此軟體，以利有充裕之時間以執行計畫與訓練學生，並且後續若有相關應用技術移轉，此軟體亦可發揮功能作為推廣此技術之一環。因經審視不須其他附屬軟體，相關費用低於所編之預算費用，酌減之差額將進行調整至其他耗材項目。 2. 感謝委員的提醒，已依補助上限調整於各項經費。



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	113 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：梁振儒	NO：S3
計畫名稱	現地緩釋滲流化學氧化整治未飽和層土壤殘留相氯化有機物消弭地下水長期污染之潛勢		
審查意見		執行單位回覆	
委員一			
1. 附件 1-13 建議可針對試驗場只提供更詳細的資料，如污染深度。		1. 針對場址資料，會依據委員意見，於申請計畫書中提供更詳細之資訊。	
2. 附件 1-19～附件 1-20，請確認參考文獻之引用格式。		2. 感謝委員提醒，會加以檢視文獻資料之引用格式，並進行修正。	
委員二			
1. 技術具創新性。		1. 感謝委員肯定。	
2. 請說明擬研究之污染場址不飽和層污染情形。		2. 針對場址不飽和層污染情形，會依據委員意見，於申請計畫書中提供資訊。	
委員三			
1. 內文提及本技術已通過實驗室規模之批次試驗及二維砂箱試驗之測試，相關成果已發表於國際期刊，現擬進一步於真實環境中試驗予以驗證，建議宜分析本技術之成本效益分析，將有助於思考未來商轉之可能性。		1. 感謝委員建議，會將此技術之成本效益分析納入工作項目之一，予以執行。	
2. 考量綠色化學整治為未來之發展方向，建議可於內文著墨如何將化學藥劑使用最小化。		2. 感謝委員建議。採用滲透管輸送氧化劑，突破 ISCO 技術較不適合應用於未飽和含水層應用之限制，並且間歇式的輸送試劑方式，亦可減少藥劑使用或提升藥劑使用之效能，計畫書會另加以強調此面向。	
3. 過硫酸鹽反應後 pH 變動性大，建議宜說明本技術於 pH 之反應及控制。		3. 使用過硫酸鹽或其他 ISCO 氧化有機污染物反應，皆具有使水體 pH 產生下降之情形。會依據委員建議，說明並納入控制 pH 變化之考量。	
委員四			
1. 本研究計畫已有先期經驗且提出之內容詳盡可行。		1. 感謝委員肯定。	
委員五			
1. 本案核心技術已通過實驗室規模之批次試驗及二維砂箱試驗之測試，本階段研究整合前期研究成果，進一步於真實環境中試		1. 感謝委員肯定。	



驗予以驗證，取得操作參數，以發展出較完整之系統，並將此技術規模系統化。整體研究架構完整且預期達成目標具體，申請者前期專案和相關研究成果佳。	
委員六 1. 模場若能位於測試場址不飽和層確實含有殘留 DNAPL 之區域，比較能凸顯效果。	1. 針對場址不飽和層污染情形，會加以檢視污染情形，擇定適切之位置，進行試驗。
委員七 1. 符合主題，規劃可行。	1. 感謝委員肯定。



專案基本資料表

專案性質		☒ 實驗性質 ☐ 非實驗性質		專案類別(單選)		☐ 先導型 ☐ 研究型 ☒ 模場型	
研究主題		☐ 調查 ☒ 整治 ☐ 其他					
申請機構系所		國立中興大學 環境教育暨永續科技研發中心/環境工程學系					
機構地址		台中市南區興大路 145 號 中興大學環工系					
專案主持人		梁振儒		職等／職稱		特聘教授	
協同主持人		何哲豪		職等／職稱		技師	
專案名稱	中文	現地緩釋滲流化學氧化整治未飽和層土壤殘留相氯化有機物消弭地下水長期污染潛勢					
	英文	In-situ Slow-Release Chemical Oxidation of Unsaturated Zone Soils Contaminated with Residual Chlorinated Organics to Mitigate Long-Term Groundwater Pollution Potential					
	關鍵字	未飽和層土壤、地下水污染、含氯有機溶劑、現地化學氧化法、滴灌					
執行期程		自民國 113 年 11 月 01 日起至民國 114 年 11 月 30 日止					
專案主持人		姓名：梁振儒 Email：cliang@nchu.edu.tw 專線：04-22856610 手機：0937-009106					
專兼任人員		姓名：張辰 E-mail：zc512007@gmail.com 專線：04-22840441~524 手機：0963665565					
經費分析總表 (僅模場試驗專案需填寫兩年度金額)		專案預估經費		第一年金額	第二年金額	編列說明	
		1.	人事費用	858,820	904,820	(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	1,214,400	1,381,000	(與計畫主體相關)	
		4.	其它研究相關費用	26,780	189,510	(含差旅與租賃費用)	
		5.	行政管理費	300,000	270,000	(1~5 項相加之 15%為限)	
		6.	自籌款	0	0	(自行籌備款項)	
		申請補助金額(1~5 項)		2,400,000	2,745,330	總金額：5,145,330	
計畫總金額(1~6 項)		2,400,000	2,745,330	總金額：5,145,330			

專案主持人(簽名或蓋章)：_____ 日期：_____



113 年度專案成果績效自評表

一、專案基本資料

填表日期：114 年 05 月 04 日

專案性質	☒ 實驗性質 ☐ 非實驗性質	專案類別	☐ 先導型 ☐ 研究型 ☐ 模場型
研究主題	☒ 整治 ☐ 調查 ☐ 其他		
執行機構	國立中興大學 環境教育暨永續科技研發中心	專案主持人	梁振儒
專案名稱	現地緩釋滲流化學氧化整治未飽和層土壤殘留相氯化有機物消弭地下水長期污染潛勢		
專案執行期程	☐ 申請階段 ☐ 期中 ☒ 成果		

二、成果績效自評表：「計畫總預估數」應與計畫審查核定值相符，請執行單位依實

際達成之量化成果填寫於欄位中。

(一) 學術面

項目		目標達成程度	申請 預估數	期中 達成數	成果 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					
		(2)研討會論文	1		1		投稿於 2025 年第十屆消防工程與環境永續前瞻技術研討會(12 月)
	2.國外投稿 (篇數)	(1)期刊論文					
		(2)國際研討會論文發表	1		1		2025 年投稿於 2025 9th Asia Conference on Environment and Sustainable Development (11 月)
	3.報告 (篇數)	(1)技術報告					
		(2)研究報告					
	4.專著 (本數)						
	5.辦理學術 會議(場數)	(1)研討/說明會					
		(2)成果發表會					
		(3)論壇					
B 人 才 培 育	6.研發改良 技術(項數)	(1)已開發技術	1	1			已達成
		(2)技術平台					
	7.技術獎項(項數)						
	8.研發人員 (人數)	(1)碩士	2	2			已達成
		(2)博士					
	9.研究團隊 (個數)	(1)跨領域團隊					
		(2)跨機構團隊					
		(3)形成研究中心					
		(4)形成實驗室					
	10.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	成果 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)	已核 准	發明					
			新型/設計					
			合計					
		申請 中	發明					
			新型/設計	1		0		提出申請中
			合計					
B 研發 技術轉 移	2.先期技術 成果移轉	件數						
		授權金(仟元)						
		衍生利益金(仟元)						
	3.技術移轉 (專利)	件數						
		授權金(仟元)						
		衍生利益金(仟元)						
	4.技術移轉 (應用技術)	件數						
		授權金(仟元)						
		衍生利益金(仟元)						
	5.可移轉 產業技術	(1)技術(件數)						
		(2)品種/系 (件數)						
C 產學研 合作	6.促成合作 研究	件數						
		金額(仟元)						
	7.促成投資	件數						
		投資金額 (仟元)						
	8.促成取得 業界科專	件數						
		業界投資金額 (仟元)						



目標達成程度		申請 預估數	期中 達成數	成果 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						
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	成果 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					
		收入(仟元)					
	2.諮詢服務	次數					
		收入(仟元)					
B 政策 推動	3.協助政府推動 (件數)	(1)政策					
		(2)法規					
C 技術 效益	4.整治技術提升(%)						
	5.整治成本降低(%)						
	6.提升能源效率(%)						
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)
開發現地緩釋滲流化學氧化技術，用以整治未飽和層土壤殘留相氯化有機物以消弭地下水長期污染潛勢，計畫之執行可有效訓練參與研究之同學其工程設計與污染整治之實務能力，培育土水污染整治之人才，且亦可將成果融入大學及研究所教學，以擴大研究效益。首先著重於學術基礎理論之教育，應用開發過程，學生們將會接觸實際應用需考量之因素，參與裝置設計、機電系統整合、軟體模擬等，待裝置及整體整治技術系統完成後，應用時將會結合污染調查及整治規劃、污染物分析及整治成效評析等，參與計畫將可提供學生們學習之研究成果於國內外研討會與國際期刊分別進行發表。
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)
開發現地緩釋滲流化學氧化技術，預計將會開發相關整治設備，藉由實場規模之應用驗證，並進一步將設備優化，邁向商業化產品，並透過專利申請等智慧財產權之保護，預期可將技術設備技轉於業界。待計畫完成將與產業內相關廠商進行合作，並洽談技術移轉以提升國內整治工程技術。
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、染查核、場址管理等政策及法規研訂之參考)



本團隊開發現地緩釋滲流化學氧化技術，將會提供現行針對未飽和層土壤整治技術之瓶頸例如開挖、土壤氣體抽除等方法，並且對於含氯有機物污染場址常見之整治期程過長、地下水污染之 Rebound 回復之現象、甚至是造成停滯場址之情事等，提供一項新穎的整治技術選項。此技術之開發，有別於傳統上現地化學氧化法(ISCO)僅多利用於飽和含水層整治之作法，進一步開發新做法使 ISCO 技術導入未飽和層土壤整治，可使污染整治效率提升，提供政府對於場址管理面上可更具有整治時程之掌控。



四、主要研究人力

請依照「專案主持人」、「協同主持人」、「專任人員」、「兼任人員」及「臨時工」等類別之順序分別填寫

類別	姓名	服務機構/系所	職稱	在本研究專案內擔任之具體工作性質、項目及範圍	每週平均投入工作時數比率 (%)
	梁振儒	國立中興大學 /環境教育暨永續科技研發中心/環境工程學系	專案主持人	實驗設計規劃、參與及指導實驗進行、掌握進度、報告撰寫	30%
	何哲豪	瑞昶科技股份有限公司	協同主持人	現場實驗規劃與執行、協助試驗之執行進度、協助整治成效監測及評估	10%
	張辰	國立中興大學 /環境教育暨永續科技研發中心/環境工程學系	碩士級專任人員	執行實驗、數據整理、報告撰寫、現場執行及採樣等	80%

五、產業界資源投入表

專案執行若有與產業界合作，請執行單位依實際量化成果填寫於欄位中。

投入資源類別	數量	說明
1.自籌款	0 元	
2.人力	0 人月	
3.設備	0	
4.其他資源 (請自行增列)	(請自填)	



研究成果中文摘要

本研究計畫為針對三氯乙烯(Trichloroethylene, TCE)於未飽和層所形成之殘留相污染問題，提出一創新之現地化學氧化整治技術(In situ chemical oxidation, ISCO)。TCE 常因大量洩漏滲流至地表下，形成液滴相或土壤吸附殘留相，並於遇低滲透性土層(Low permeability zone, LPZ)時停止移動，進一步以正向擴散進入 LPZ。此殘留污染物雖可能符合土壤管制標準，但雨水滲流或地下水位變化接觸污染土壤之影響，因濃度梯度反轉而發生反向擴散(Back-diffusion)，造成污染回復(Rebound)現象，再度污染地下水超過法規標準，成為污染場址整治之重大挑戰。為因應上述之困境，本研究開發一應用於未飽和層土壤之 ISCO 系統，選用於地表下相對穩定之過硫酸鈉(Sodium persulfate, SPS)作為氧化劑，並透過農業滴灌原理設計滲透管緩釋灌注系統，利用控制滲流頻率、水量與壓力參數，將氧化劑緩慢釋入土壤中，以毛細作用停留於土壤顆粒間並誘發氧化反應，有效提升反應效率並降低優勢流風險。相較於傳統 ISCO 僅限於飽和含水層應用，此技術可望擴展 ISCO 應用至未飽和層土壤，並針對殘留相 TCE 進行整治去除。

於現階段研究成果，研究團隊已完成滲透管緩釋灌注系統之裝置設計與製作。裝置之主體採304不鏽鋼製成，具備剛性高與耐氧化特性。裝置結構上採四片帶孔不鏽鋼護板，並組合為通道型空間使滲透管穿越其中，孔洞之設計亦可使氧化劑液體有效釋出於土壤之中。裝置經通過初步測試，可順利將氧化劑穩定滲漏，顯示其具備實地操作應用性。同時，研究團隊亦完成機電控制系統設計，整合蠕動馬達、定時電控閥、流量與壓力感測器，以及可程式邏輯控制器系統，同時執行進行十隻滲透管之自動化緩釋灌注，利於整治作業之推進，並可支援資料即時記錄與後端分析。另為掌握整治期間土壤含水率之動態變化，研究團隊選用具備分段量測與降低土壤干擾特性之 GroPoint Profile 120 cm 多層式土壤含水率探針進行試驗，並整合無紙式紀錄系統，配合後續現地施作進行含水率即時監測。此外，研究團隊亦完成 Hydrus 模擬軟體之採購並進行訓練，Hydrus 用以模擬未飽和多孔介質中水分與氧化劑溶質遷移傳輸行為，於後續研究中搭配實測含水率資料進行模擬與模型校正，提升對氧化劑滲流與反應範圍之預測進而調整滲透管緩釋灌注系統之操作。

綜而言之，本研究計畫第一年執行成果已完成整體整治架構之設備組件，包括滲透管緩釋灌注系統、機電控制系統與含水率監測設備，並完成 Hydrus 模擬軟體之初步模擬，同時完成建立整治系統標準作業流程(SOP)，整體進度符合預期目標進度，為後續場址整治施作建立良好基礎。

關鍵字：未飽和層土壤、地下水污染、含氯有機溶劑、現地化學氧化法、滴灌



研究成果英文摘要

This research project proposes an innovative in-situ chemical oxidation (ISCO) technology specifically designed to address residual-phase contamination of trichloroethylene (TCE) in the unsaturated zone. TCE often leaks in large quantities and migrates below the surface, forming non-aqueous phase liquids or adsorbed residues on soil particles. Its movement typically halts upon encountering low-permeability zones (LPZs), from where it can gradually diffuse into the LPZ. Although the residual contamination may meet regulatory soil standards, changes in groundwater levels or infiltration from rainfall can reverse the concentration gradient, triggering back-diffusion. This leads to contaminant rebound, where TCE re-enters the groundwater at concentrations exceeding regulatory limits, posing a significant challenge for site remediation. To address this issue, the study develops an ISCO system tailored for unsaturated zone soils. Sodium persulfate (SPS), a relatively stable oxidant under subsurface conditions, is selected as the chemical oxidant. A slow-release infiltration system, inspired by agricultural drip irrigation, is designed to control the delivery frequency, volume, and pressure of the oxidant. This approach allows the oxidant to gradually infiltrate the soil, remain within the soil pores via capillary action, and then initiate oxidation reactions. The method enhances reaction efficiency while minimizing the risk of preferential flow. Compared to conventional ISCO methods, which are typically limited to saturated zones, this technique has the potential to extend ISCO applications to the unsaturated zone and effectively remediate residual-phase TCE contamination.

At the current stage of research, the team has completed the design and fabrication of a porous pipe-based controlled-release injection system. The main structure of the injection device is made of 304 stainless steel, which offers high rigidity and excellent oxidation resistance. Structurally, the device features four perforated stainless-steel protective plates assembled into a channel-like configuration and specifically designed to enable effective release of oxidizing agents into the surrounding soil. Initial testing has demonstrated that the system can steadily and reliably release the oxidant, confirming its potential for field application. The team has also completed the design of the electromechanical control system, integrating a peristaltic pump, timed solenoid valves, flow and pressure sensors, and a programmable logic controller (PLC). This setup allows automated controlled release through ten porous tubes simultaneously, supporting large-scale remediation efforts and enabling real-time data logging and



back-end analysis. To monitor dynamic changes in soil moisture during the remediation process, the team selected the GroPoint Profile 120 cm multi-layer soil moisture probe, which offers segmented measurement and reduced soil disturbance. This probe was integrated with a paperless recording system to support real-time soil moisture monitoring in future field applications. Additionally, the team has completed the early procurement and training for the Hydrus simulation software. Hydrus will be used to model water flow and oxidant solute transport in unsaturated porous media. Combined with the measured soil moisture data, the software will support simulation and model calibration to improve predictions of oxidant infiltration and reaction zones, thereby informing adjustments to the operation of the controlled-release injection system.

In summary, during the first year of project execution, the research team has successfully completed the setup of the experimental remediation framework, including the controlled-release infiltration system, electromechanical control unit, and soil moisture monitoring instruments. Initial Hydrus simulations and the standard operating procedures (SOP) for the remediation system have also been established. The overall progress aligns with the planned objectives and lays a solid foundation for future on-site remediation implementation.

Keywords: Unsaturated soils, Groundwater contamination, Chlorinated solvents, In situ chemical oxidation, Drip irrigation





目次

研究成果中文摘要.....	I
研究成果英文摘要.....	II
目次.....	1
圖次.....	3
表次.....	5
(一)前言	6
(二)研究目的	13
2.1 第一年之研究目標 - 氧化劑滲流系統設備設計與組裝建置及場址設備安裝與試車	13
2.2 第二年之研究目標 - 場址未飽和層土壤 ISCO 氧化劑滲流整治施作及成效監測	13
2.3 模場試驗場址資料	14
(三)文獻探討	25
(四)研究方法與過程(含工作進度甘特圖).....	28
4.1 第一年目標 - 氧化劑滲流系統設備設計與組裝建置及場址設備安裝與試車	28
4.2 第二年目標 - 場址未飽和層土壤 ISCO 氧化劑滲流整治施作及成效監測	30
4.3 研究進度及預期完成之工作項目(甘特圖).....	31
(五)結果與討論	33
5.1 滲透管之設計及組裝	34
5.2 機電控制系統設計及組裝	37
5.3 含水率監測系統設計及組裝	48
5.4 現地土壤場域機電控制系統、滲透管緩釋灌注系統及含水率監測系統運作試車 (中興大學現地試驗場地).....	56
5.5 氧化劑溶液灌注操作條件 HYDRUS 軟體模擬	60
5.6 建立整治系統標準作業流程(SOP).....	71
5.7 污染場址整治系統設置	72



(六)結論	73
(七)參考文獻	74



圖次

圖 1、未飽和層 TCE 殘留相之反相擴散造成環境之污染情境	6
圖 2、(a)二維砂箱模擬未飽和層土壤殘留相 TCE 反相擴散裝置，(b)砂箱填充石英砂及 坊土 TCE 殘留相之近照，及(c)DAF 評估示意砂箱相關位置	9
圖 3、二維砂箱模擬未飽和層土壤中殘留相 TCE 對地下水之污染潛勢分析	10
圖 4、水文測站(華興站)之地質資料	15
圖 5、本場址 3 口監測井 J00196、J00197 及 J00198 之土壤取樣紀錄資料	16
圖 6、地下水等水位線圖(112 年 8 月)。	17
圖 7、土壤採樣位置及查證結果示意圖(103 年 2、4 月)	18
圖 8、地下水監測井採樣位置及查證結果示意圖	18
圖 9、土壤污染整治範圍示意圖	20
圖 10、土壤污染整治灌注範圍示意圖(MW51、MW52).....	20
圖 11、地下水監測井 J00196 地下水污染物濃度/莫耳濃度變化示意圖	22
圖 12、地下水監測井 J00197 地下水污染物濃度/莫耳濃度變化示意圖	22
圖 13、地下水監測井(a) J00196、(b) J00197 現場環境狀況.....	24
圖 14、土壤質地與滴灌流量影響濕潤前緣位置之比較圖	25
圖 15、滲透管緩釋氧化劑液體之示意	26
圖 16、氧化劑滲流系統之示意圖	28
圖 17、滲透管緩釋灌注系統運作流程及元件	33
圖 18、計畫主持人與(左)設備製造商(右)設備製造商及機電控制系統整合之會議照片。	34
圖 19、滲透管緩釋灌注系統實驗裝置設計圖及照片	35
圖 20、滲透管緩釋灌注系統之不鏽鋼護板設計圖及實體照片	35
圖 21、滲透管緩釋灌注系統之細部零件構造圖及照片	36
圖 22、人機系統設備外觀照片	37
圖 23、計畫主持人與設備製造廠商商討軟體設計之照片	38
圖 24、人機系統設備內部照片	39
圖 25、機電控制系統蠕動馬達整合箱之設計圖	41
圖 26、於工廠訪視機電控制系統蠕動馬達整合箱設備建置情形	42



圖 27、機電控制系統蠕動馬達整合箱外觀照片	42
圖 28、機電控制系統蠕動馬達內部構造	43
圖 29、滲透管與機電控制系統銜接測試	44
圖 30、蠕動馬達轉速與灌注流量之關係	45
圖 31、機電控制系統 SOP 操作流程圖	47
圖 32、GroPoint Profile 多層式土壤含水率監測探針。	48
圖 33、GroPoint Profile 探針於土壤設置與監測示意圖。	50
圖 34、含水率監測系統各模組接線圖	51
圖 35、土壤含水率監測系統照片	51
圖 36、土壤質地三角座標圖	55
圖 37、土壤含水率探針於不同飽和含水區域之石英砂介質測試結果	55
圖 38、中興大學校園平面示意圖	56
圖 39、試驗場地佈點規劃及丈量	57
圖 40、現場施作照片	57
圖 41、油壓動力裝置及其操作過程	58
圖 42、試驗場址挖出之回填物	58
圖 43、現地緩釋滲流系統安裝位置與分佈圖	59
圖 44、整治系統標準作業流程圖	71
圖 45、模場試驗場址之滲透管佈點規劃	72



表次

表 1、華淵電機工業股份有限公司所在土壤及地下水污染整治場址資料.....	14
表 2、場內地下水監測井 113 年 2 月污染物濃度分析結果彙整表.....	23
表 3、人機系統設備觸控螢幕之介面.....	40
表 4、溶液集中槽壓力為 5 psi 滲透管流量測試結果.....	45
表 5、溶液集中槽壓力為 2.5 psi 滲透管流量測試結果.....	45
表 6、GroPoint Profile 多層式土壤含水率監測探針之規格.....	49
表 7、無紙紀錄器之規格.....	52
表 8、無紙記錄器操作步驟.....	53
表 9、HYDRUS 軟體模擬不同操作條件對土壤水分滲流分布變化之規畫表.....	62
表 10、單支滲透管 HYDRUS 軟體模擬結果 (灌注流量 0.05 L/min；灌注體積 0.25 PV)	63
表 11、單支滲透管 HYDRUS 軟體模擬結果 (灌注流量 0.05 L/min；灌注體積 0.5 PV)	64
表 12、單支滲透管 HYDRUS 軟體模擬結果 (灌注流量 0.07 L/min；灌注體積 0.25 PV)	65
表 13、單支滲透管 HYDRUS 軟體模擬結果 (灌注流量 0.07 L/min；灌注體積 0.5 PV)	66
表 14、雙支滲透管 HYDRUS 軟體模擬結果 (灌注流量 0.05 L/min；灌注體積 0.25 PV)	67
表 15、雙支滲透管 HYDRUS 軟體模擬結果 (灌注流量 0.05 L/min；灌注體積 0.5 PV)	68
表 16、雙支滲透管 HYDRUS 軟體模擬結果 (灌注流量 0.07 L/min；灌注體積 0.25 PV)	69
表 17、雙支滲透管 HYDRUS 軟體模擬結果 (灌注流量 0.07 L/min；灌注體積 0.5 PV)	70



(一)前言

美國於 1987 年至 1993 年統計所有使用有機溶劑並且排放量超過 10000 磅的工廠，指出共超過約 130 公噸三氯乙烯(Trichloroethylene, TCE)可能洩漏至土壤與地下水環境中[1]。大量的 TCE 排放至土壤及地下水體中，加上 TCE 對於人體危害，各國對於 TCE 之排放多已進行相關管制措施，我國於《土壤污染管制標準》中 TCE 土壤規範濃度為 60 mg/kg [2]，《地下水管制標準》中地下水規範濃度為 0.05 mg/L，飲用水用途之地下水規範濃度為 0.005 mg/L [3]，美國環境保護署制定 TCE 飲用水管制標準最高污染容許濃度為 0.005 mg/L [1]。截至 2024 年，行政院環境部環境管理署統計台灣受 TCE 污染之土壤與地下水污染場址共 126 處，其中 82 處污染場址仍然未解除列管[4]，可知約有 60%之 TCE 污染場址尚未能解除列管。

當 TCE 洩漏於地表後，因其密度比水重的物化特性，使 TCE 進入土壤中受到重力主導而向下滲流，滲流過程中受毛細力的影響使部分 TCE 受土壤吸附停留於未飽和層形成不連續的純相 TCE，或產生土壤殘留相 TCE。若 TCE 洩漏量甚大時，無法以被土壤所吸持，TCE 則會向下滲流直到與低滲透度區(Low permeability zone, LPZ)土壤接觸後停止移動並逐漸累積，因而導致 TCE 滲入 LPZ 土壤中，TCE 微溶於水的特性，若地下水流經殘留 TCE 存在之區域，會使其緩慢溶於地下水產生溶解相 TCE，造成大範圍之地下水污染團[5]。此外，溶解相或是純相 TCE 因其高蒸氣壓之特性(69 mmHg @25°C)而揮發產生氣相 TCE，於未飽和層中，TCE 以四種不同型態純相、土壤吸附相、氣相、溶解相，並且進行型態之間的轉換。受到 TCE 蒸氣壓特性之影響，其轉換為氣相、受到溶解度的影響轉換為溶解相、受到土壤-水分配係數之影響轉換為殘留相；溶解相與殘留相之間則是透過土壤-水分分配係數進行轉換；而溶解相與氣相濃度轉換可透過亨利定律常數 (Henry's law constant) 進行估算[5]。

如圖 1 所示，當 TCE 於土壤中向下滲流至觸及低滲透度區並於上方開始累積，若 TCE 之洩漏狀況未即時發現，將使 TCE 長時間受濃度梯度與低滲透度區土壤吸附力驅動下，以正向擴散(Forward-diffusion) 的方式進入低滲透度土壤中，形成殘留相 TCE。後續整治工

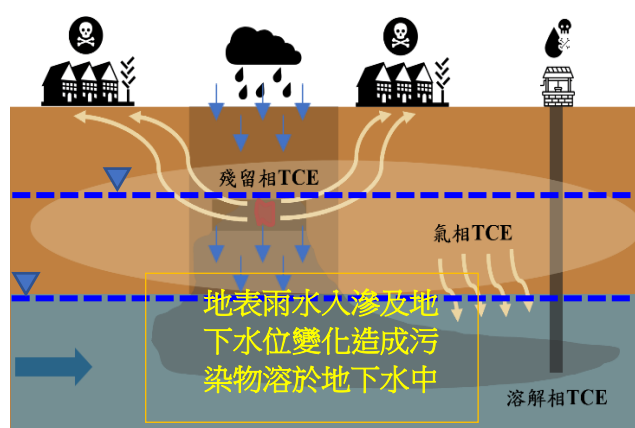


圖 1、未飽和層 TCE 殘留相之反相擴散造成環境之污染情境。



現地緩釋滲流化學氧化整治未飽和層土壤殘留相氯化有機物消弭地下水長期污染潛勢

作使地下水濃度低於法規標準後，往往會發生低滲透度區所累積之殘留相 TCE，因高滲透度區濃度較低、地下水持續流動下，產生濃度梯度的反轉，造成殘留相 TCE 反向擴散(Back-diffusion)從低滲透度區再度擴散至高滲透度區中，造成地下水 TCE 濃度再次超過法規標準，此為污染整治上常見之污染回復(Rebound)現象[6]。TCE 往往比其他類型之污染需要更長整治時間，如前所提到台灣 TCE 污染場址至今解除列管數量低於四成，其一項原因在於未飽和層中低滲透度土壤中殘留相反向擴散所造成之持久性污染。

反向擴散之污染問題透過許多相關研究數值模擬指出[7, 8]，恐持續影響地下水之 TCE 濃度，造成無法低於法規標準的污染情境長達數十年之久。此外，TCE 其高蒸氣壓的特性導致易揮發至土壤孔隙中，以氣相 TCE 進行傳輸，因氣相擴散係數($8.11 \times 10^{-2} \text{ cm}^2/\text{s}$ @ 20°C)遠大於水相擴散係數($8.3 \times 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{s}$ @ 20°C) [9] 導致大範圍之氣相 TCE 水平擴散，並且因 TCE 氣相密度大於空氣(空氣氣相密度為 1, TCE 則為 4.53)，會受到重力影響而下沉，使地下水位面暴露於氣相 TCE，並透過亨利定律氣液濃度平衡，使地下水體產生溶解相 TCE 污染，此外土壤通氣層 TCE 氣相傳輸亦可能進入建築物中，對於人體產生暴露危害之風險[10]。其中低滲透度土壤中(例如粉黏土)殘留相 TCE 之反相擴散污染，以及通氣層或未飽和層中土壤殘留相 TCE，因為豐枯水期水位變化及地表水滲流等因素，對於地下水可能造成之長期污染，為含氯有機溶劑例如 TCE 無法達到有效整治之一項原因，因此，特別是通氣層土壤殘留相污染之整治，目前此類污染之整治方法仍未能有效的強化或仍受限，為值得探究之土壤及地下水環境污染議題。

美國環保署於土壤篩選指南(Soil Screening Guidance)中使用稀釋衰減因子(Dilution-Attenuation Factor, DAF)估算未飽和層土壤中殘留相污染物因降雨或水位面變動使污染物向下滲流至飽和含水層之過程中，經土壤吸附且受環境降解造成溶解相之濃度衰減變化，如式 1 所示，SL 為未飽和層土壤中殘留相溶解於滲濾液之可移動溶解相濃度(The Concentration of Compound Dissolved in Leachate at the Source Zone) ($\text{mg}/\text{L}_{\text{source}}$)；CR 為在飽和含水層中測得之溶解相濃度($\text{mg}/\text{L}_{\text{receptor}}$)。透過 DAF 可進行雙向之換算，正向計算(Forward calculation)用以評估已知未飽和層低滲透土壤殘留相濃度對地下水體之污染影響；反向計算(Rreverse calculation)則可透過該地區之相關排放標準評估未飽和層之土壤殘留相最大容許污染物濃度。因此，若 DAF 數值越大代表污染物於未飽和層滲流至飽和層的過程中受土壤稀釋與化學及生物衰減之影響越大，若皆無衰減與稀釋則 DAF 值為 1 [11]。美國環保署於《全面性環境對策、賠償及責任法》(Comprehensive Environmental Response, Compensation, and Liability Act, CERCLA)中指出若受污染之未飽和層土壤濃度低於土壤篩選值(Soil Screening Levels, SSLs)，則無須進行相關之土壤整



現地緩釋滲流化學氧化整治未飽和層土壤殘留相氯化有機物消弭地下水長期污染潛勢

治調查行動[12]。SSLs 利用 DAF 反向計算之方式，評估造成地下水濃度超標之未飽和層土壤之污染物最低濃度，以防止污染區域該地之居民處於暴露之危害，同時避免未飽和層土壤中殘留相污染至民生飲用之地下水體。

$$DAF \left[\frac{(\text{mg}_i/\text{L}_{\text{H}_2\text{O}})_{\text{source}}}{(\text{mg}_i/\text{L}_{\text{H}_2\text{O}})_{\text{receptor}}} \right] = \frac{S_L}{C_R} \quad (1)$$

DAF 相較於單純透過分配係數平衡值計算方式之適用性較佳，且於調查之場址中計算一次 DAF 值後即可進行換算應用。Abrano 等[11]於 DAF 公式加入不同污染物特性與場址類型之衰減情境考量後，以相關圖表進行快速對照之方式，達到適用於不同水文地質條件與污染情境下，同時保有其便利性之 DAF 計算方法。Abrano 等[11]於其文獻中詳記計算式 1 套入不同稀釋衰減之情境，例如：濃度隨時間之變化、地下水中三維空間之取樣位置、污染物於質量傳輸所發生之累積、平流、分散與反應等。式 2 為推導後之 DAF 轉換因子：

$$DAF = \frac{1}{\left\{ \frac{1}{T} \int_0^T \frac{S_L(t)}{S_L(0)} dt \right\}} \times \frac{1}{f\left(\frac{L_R}{\alpha_L}, \frac{\beta_s \alpha_L}{U_{GW}}\right)} \times \frac{1}{g\left(\frac{W}{\sqrt{\alpha_T L_R}}\right)} \times \frac{1}{h^*\left(\frac{H_w}{b}, \frac{H}{\sqrt{\alpha_V L_R}}, \frac{H}{H_w}\right)} \quad (2)$$

式 2 共包含四部分，第一部分為未飽和層土壤中污染物產生之溶解相濃度隨時間之衰減變化， $S_L(0)$ 為初始溶解相濃度(mg/L)， $S_L(t)$ 為因污染物自然衰減隨時間變化之溶解相濃度(mg/L)；第二部分之 f 表示縱向分散、化學反應與生物降解導致之溶解相衰減因子， L_R 為地下水縱向之取樣距離(m)， α_L 為縱向分散度(m)， β_s 為一階衰減係數(d^{-1})， U_{GW} 為地下水流速(m/d)；第三部分之 g 表示橫向分散導致之溶解相衰減因子， W 為未飽和層污染區域之寬度(m)， α_T 為橫向分散度(m)；第四部分 h^* 表示垂直分散與取樣深度導致之溶解相衰減因子， H_w 為井篩深度(m)， b 為含水層深度(m)， H 為污染區域厚度(m)， α_V 為垂直分散度(m) [11]。

欲將此 DAF 公式評估未飽和層土壤中殘留相 TCE 對於地下水之污染潛勢，需取得上述公式中四個部分之必要參數，即可透過反向計算求得未飽和層土壤中殘留相 TCE 最低濃度限值。如圖 2 所示計畫主持人之國科會計畫之實驗裝置二維砂箱之參數： L 為 3 cm， b 為 25 cm， H 為 21 cm， H_w 為 25 cm， L_R 為 23.5 cm， U_{GW} 為 8.64 m/d， β_s 透過 TCE 於地下水中之半衰期求得 $2.0 \times 10^{-3} \text{ d}^{-1}$ [13]，其中 L_R 為 23.5 cm 且與三向分散度之關係如式 3 所示。

$$\alpha_L = \frac{L_R}{10}, \alpha_T = \frac{L_R}{30}, \alpha_V = \frac{L_R}{100} \quad (3)$$



現地緩釋滲流化學氧化整治未飽和層土壤殘留相氯化有機物消弭地下水長期污染潛勢

假設若不考慮未飽和層源頭濃度隨時間之衰減，則式 2 第一部分為 1，第二部分縱向分散、生物降解導致之溶解相衰減，透過 Abrano 等[11]文獻中之參數後可求出 f 因子為 1，第三部分橫向分散導致之溶解相衰減透過 Abrano 等[11]文獻中參數後求出 g 因子為 0.1，第四部分 h^* 表示垂直分散與取樣深度導致之溶解相衰減分別透過 Abrano 等[11]文獻中參數帶入後求出無限含水層因子 h_{inf}^* 為 1 與有限含水層之修正因子 h_{cor}^* 遠小於 1，如式 4 所示兩者加總後為 h^* 為 1 [14]。

$$h^* = h_{inf}^* \left(\frac{\sqrt{\alpha_T L_R}}{H}, \frac{H}{H_w} \right) + h_{cor}^* \left(\frac{\sqrt{\alpha_T L_R}}{H}, \frac{H}{b}, \frac{H}{H_w} \right) \quad (4)$$

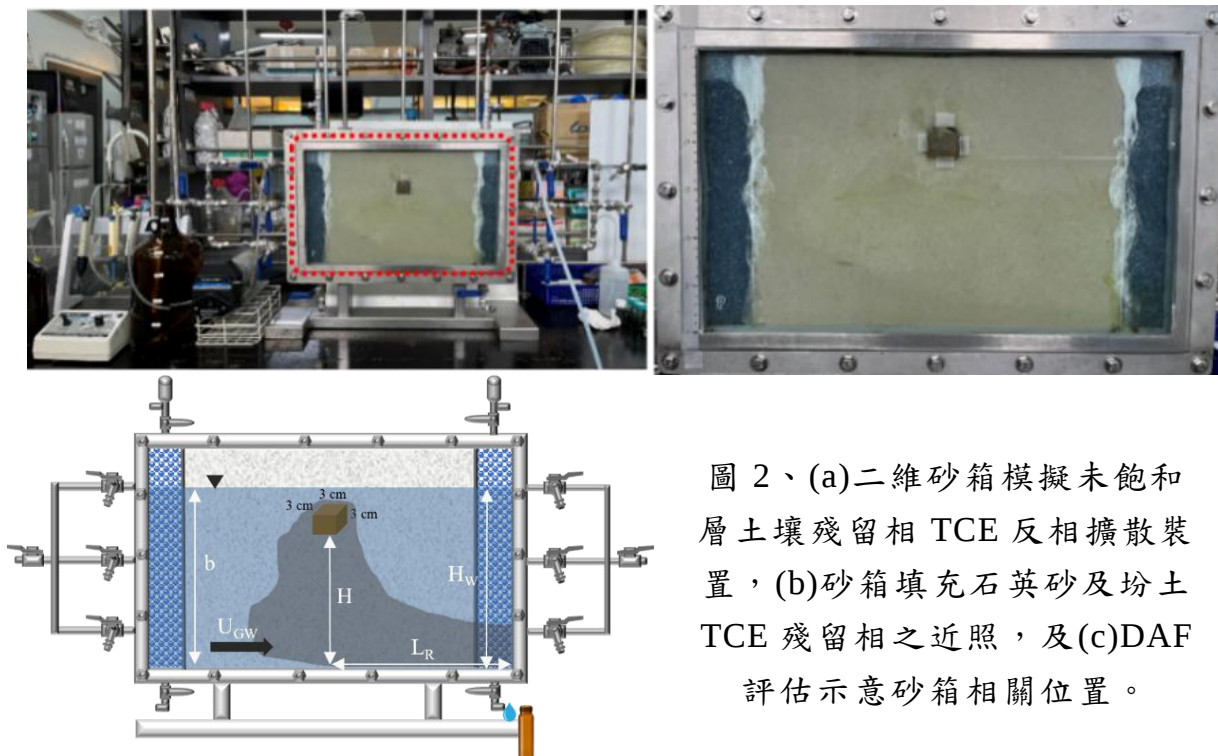


圖 2、(a)二維砂箱模擬未飽和層土壤殘留相 TCE 反相擴散裝置，(b)砂箱填充石英砂及膨土 TCE 殘留相之近照，及(c)DAF 評估示意砂箱相關位置。

將四部分之因子代入式 2 中計算出 DAF 值為 10，於式 5 假設污染區域之砂箱寬度 W 為 3 cm，土壤總體密度 ρ_b 為 1.43 g/cm^3 ，土壤顆粒密度 ρ_s 為 2.39 g/cm^3 ，土壤孔隙率 n 為 0.40，最終求得土壤濃度為 0.14 mg/kg 。如圖 3 所示，透過此方式計算之理論值說明當二維砂箱中未飽和層低滲透度土壤中殘留相 TCE 大於 0.14 mg/kg ，恐造成出流水之 TCE 濃度高於 0.05 mg/L 之法規標準，而台灣《土壤污染管制標準》中 TCE 土壤規範濃度卻為 60 mg/kg [2]。緣此，若未防止地下水體遭受未飽和層土壤中 TCE 反相擴散造成之持久性污染，則必須徹底根除未飽和層土壤中殘留相 TCE。



現地緩釋滲流化學氧化整治未飽和層土壤殘留相氯化有機物消弭地下水長期污染潛勢

$$\frac{0.05 \frac{\text{mg}}{\text{L}} \times 27 \text{ cm}^3 \times \frac{1 \text{ L}}{10^3 \text{ cm}^3} \times 0.40 \times 10}{27 \text{ cm}^3 \times \frac{1.43 \text{ g}}{\text{cm}^3} \times \frac{1 \text{ kg}}{10^3 \text{ g}}} = 0.14 \frac{\text{mg}}{\text{kg}} \quad (5)$$

現地化學氧化法(In situ chemical oxidation, ISCO)是常應用於處理飽和層含氯有機溶劑污染之整治技術，將 ISCO 氧化劑傳輸至目標污染區域後，使含氯有機溶劑與氧化劑有效接觸，透過電子轉移使氧化劑獲得電子，產生礦化作用(Mineralization)之最終降解產物二氧化碳、氯離子與水。除應用於整治 DNAPL 之含氯有機溶劑之外，ISCO 技術可對於苯、甲苯、乙苯、二甲苯(Benzene, Toluene, Ethylbenzene, Xylene, 合稱為 BTEX)、總石油碳氫化合物、多環芳香族、三硝基甲苯等污染物加以分解破壞，而氧化劑與污染物反應主要與動力

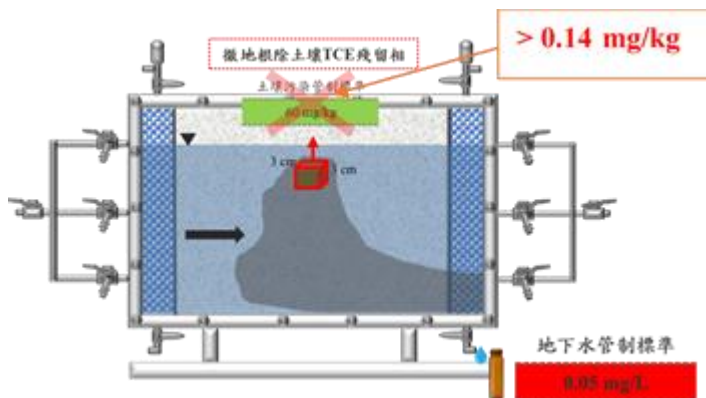


圖 3、二維砂箱模擬未飽和層土壤中殘留相 TCE 對地下水之污染潛勢分析。

學、熱力學與化學劑量之三個面向有關，於環境中化學反應會受到 pH、溫度與污染物、氧化劑及催化劑濃度、最終產物及存在於環境中之可氧化物質等之影響[15]。作為 ISCO 整治技術之氧化劑需具備數點特性，包含：可安全釋放於土壤中；於地表下環境中可降解污染物並發生礦化分解作用；無產生對環境有害之副產物；氧化劑需具有持久性，具備充分時間與污染物接觸；土壤氧化劑需求量(Soil oxidant demand, SOD)較低；不產生固體沉澱物，避免影響地下水流動；操作應簡單，避免同時灌注數種藥劑之整治方式等。

因此，過硫酸鹽(Persulfate, $\text{S}_2\text{O}_8^{2-}$)為一種高還原電位($E^0 = 2.01 \text{ V}$)之強氧化劑，於環境上常使用於廢水處理、儀器分析上作為總有機碳分析儀中氧化有機物之藥劑，應用甚廣。對於 ISCO 之應用上，過硫酸鈉(sodium persulfate (SPS), $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_8$)為主要用於 ISCO 整治之氧化劑[16]。雖然過硫酸鹽自身還原電位高，但與污染物反應速率較慢需較高之活化能，因此，亦可透過不同活化方式產生硫酸根自由基(Sulfate radical, $\text{SO}_4^{\cdot-}$)，其具有更高之還原電位($E^0 = 2.6 \text{ V}$)以降解污染物。其活化之方式包含物理性活化(熱)(式 6)、過渡金屬活化(式 7)及鹼活化(式 8)等，產生之硫酸根自由基同時會與水分子、氫氧根離子(鹼性條件下)進行轉換反應(式 9-



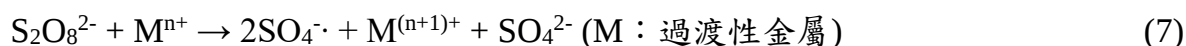
現地緩釋滲流化學氧化整治未飽和層土壤殘留相氯化有機物消弭地下水長期污染潛勢

10)，生成高還原電位之氫氧根自由基($\cdot\text{OH}$) [17]。Liang 與 Su [18] 透過有機物與自由基之產生之攫取反應以作為化學探針，以辨別不同環境條件下降解污染物之主導自由基物種，並透過實驗觀察不同 pH 與室溫條件下對於過硫酸鹽氧化 TCE 之影響，結果得知於不同溫度下(10-30°C)皆可完全礦化 TCE，其過硫酸根鹽與 TCE 之反應如式 11 所示；pH 於酸性與中性條件下由 $\text{SO}_4\cdot^-$ 主導礦化 TCE，而 pH 9 以上之鹼性條件時則由 $\cdot\text{OH}$ 主導礦化 TCE [19]。可知 SPS 具有在一般環境溫度之活化下氧化 TCE 之能力，因此於應用上，無需額外提供活化程序，將氧化劑直接注入地表下，確保 SPS 與 TCE 之接觸，即可達到有效整治 TCE 污染之潛力。

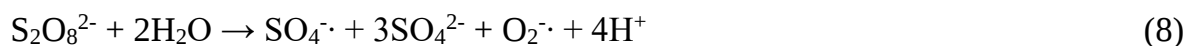
物理性活化[19, 20]：



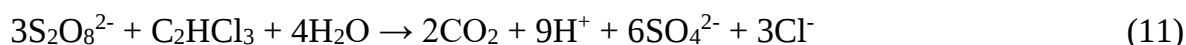
過渡金屬活化[21]：



鹼活化[22]：



自由基轉換[22]：



過硫酸鹽於地底下相對穩定，可存在數小時至數周，過硫酸鹽與土壤中可氧化物質之反應速率較低，因此具有較低 SOD，可增加氧化劑傳輸及污染物有效接觸之時間。此外，過硫酸鹽溶液密度比水重之特性，透過重力向下可進入低滲透度降解土壤中污染物，達到更好的整治效果[23]。氧化劑之傳輸對於 ISCO 整治技術至關重要，是否可將氧化劑傳輸至目標污染物區域並達到有效接觸，將直接影響到整治之成敗。相較於其他 ISCO 過氧化氫和臭氧氧化劑相比，過硫酸鹽與過錳酸鹽作為較持久之氧化劑，進入地表後之傳輸擴散距離更遠，因其氧化劑溶液之密度比水重，受重力影響而下沉至飽和層深處，與存在 DNAPL 污染物殘留相之低滲透度區域進行接觸，並以正向擴散之方式進入低滲透度土壤中降解污染殘留相。過硫酸鹽作為同樣可與污染物有效接觸、SOD 低不易與土壤中可氧化性物質反應等優點外，於一般室溫、中性條件下，過硫酸鹽以無添加活化劑之方式即可將 TCE 礦化至二氧化碳與氯離子[19]。如同式(9)可知，過硫酸鹽或硫酸根自



現地緩釋滲流化學氧化整治未飽和層土壤殘留相氯化有機物消弭地下水長期污染潛勢

由基與水反應後會生成 H^+ ，1 摩爾過硫酸鹽完全降解後會產生化學劑量比 2 摩爾之 H^+ ，因此若大量使用過硫酸鹽之應用，通常會造成水體酸化，然而，一般此情形都屬於過渡現象，於地表下環境中，土壤之緩衝能力，長時間而言例如數月，pH 值皆會回到原始環境狀態，當然，一些極端狀態，例如，早期 Fenton 反應施作於地表下污染整治時，先行注入硫酸將地表下環境酸化，以利注入液體催化劑二價鐵以避免其沉澱，之後再行注入過氧化氫，此類程序因注入試劑之先後順序，硫酸已經造成土壤 pH 緩衝能力之突破，後續要恢復背景地下水狀態，可能需要更久之時間或不易復原。然而，過硫酸鹽反應所需的活化能較高，不易快速分解，因此其分解產生酸之狀況較緩和，因此，低劑量之分解作用，對於土壤或地下水 pH 之衝擊則較輕微，緩慢釋放過硫酸鹽之應用，將會減緩 ISCO 整治程序對於地表下環境之衝擊。緩此綜上說明，過硫酸鹽可做為整治低滲透度土壤中 TCE 污染殘留相之氧化劑。

綜上所述，當 TCE 污染土壤及地下水，於通氣層 LPZ 土壤中殘留 TCE 具有潛在污染地下水之源頭，雖然已經符合土壤 TCE 管制標準，然而經由 DAF 及 SSL 之相關計算得知土壤中僅需微量之殘留相濃度(0.14 mg/kg)即具有污染地下水超過管制標準之潛勢。現有之通氣層污染土壤處理方式，除挖除外運處理外，土壤氣體抽除法(Soil vapor extraction, SVE)為最普遍採用之未飽和層現地整治工法，但受限於 SVE 受到污染物質傳(吸附相至氣相之轉換)限制，會出現污染物拖尾現象(Tailing)使得處理效能下降，當污染物存在 LPZ 土壤中時，此現象將會更加顯著，導致未飽和層土壤整治的難度增加。雖然，已知 ISCO 技術為一項整治有機物污染的有效反應，但氧化劑必須存在於水體中才得以進行氧化反應，因此鮮少有 ISCO 於未飽和層土壤污染整治之應用。有鑒於此，本研究計畫為運用農業滴灌系統之傳輸水分之方式，將 ISCO 過硫酸鈉氧化劑溶液以滲透管(Porous pipe)經由控制滲流頻率、水量、流速壓力等參數緩慢傳輸氧化劑至未飽和層土壤，不致使過多液體下沉至含水層，緩釋 ISCO 使得 SPS 可以毛細力吸持停留於土壤顆粒，誘發 ISCO 反應得以於未飽和層土壤中進行，氧化劑液體亦可停留滲入至 LPZ 土壤中，此方式可將 ISCO 技術應用於未飽和層土壤整治，處理殘留相污染物及克服液體輸送優勢流等問題，以降低土壤殘留相污染物造成長期地下水污染之潛勢。研究計畫分二年期進行，其目標包含有(1)氧化劑滲流系統設備設計與組裝建置及場址設備安裝與試車及(2)污染場址未飽和層土壤 ISCO 氧化劑滲流整治施作及成效監測。期藉由本研究計畫之開發，建立現地緩釋滲流化學氧化技術，並用以整治未飽和層土壤殘留相氯化有機物以消弭地下水長期污染潛勢。



現地緩釋滲流化學氧化整治未飽和層土壤殘留相氯化有機物消弭地下水長期污染潛勢

(二)研究目的

本研究計畫為運用農業滴灌系統之傳輸水分之方式，將 ISCO 過硫酸鈉氧化劑溶液以滲透管(Porous pipe)經由控制滲流頻率、水量、流速壓力等參數緩慢傳輸氧化劑至未飽和層土壤，不致使過多液體下沉至含水層，緩釋 ISCO 使得 SPS 可以毛細力吸持停留於土壤顆粒，誘發 ISCO 反應得以於未飽和層土壤中進行，氧化劑液體亦可停留滲入至 LPZ 土壤中，此方式可將 ISCO 技術應用於未飽和層土壤整治，處理殘留相污染物及克服液體輸送優勢流等問題，以降低土壤殘留相污染物造成長期地下水污染之潛勢。研究計畫分為兩年執行，研究目標分年陳述如下：

2.1 第一年之研究目標 - 氧化劑滲流系統設備設計與組裝建置及場址設備安裝與試車

此階段主要之工作為建立未飽和層 ISCO 滲流系統輸送氧化劑之系統，將於中興大學之場地進行實地系統操作以確保滲流系統之正常運作，以便銜接目標二移至污染場址進行實際之污染整治進行。相關工作項目簡述如下：

1. 滲透管緩釋灌注系統設計及組裝。
2. 機電控制系統設計及組裝。
3. 含水率監測系統設計及組裝
4. 現地土壤場域機電控制系統、滲透管緩釋灌注系統及含水率監測系統運作試車。(中興大學現地試驗場地)
5. 氧化劑溶液灌注操作條件 Hydrus 軟體模擬。
6. 建立整治系統標準操作流程 (SOP)。
7. 污染場址整治系統設置。(華淵電機場址)

2.2 第二年之研究目標 - 場址未飽和層土壤 ISCO 氧化劑滲流整治施作及成效監測

此階段主要之工作為實際驗證氧化劑滲流系統，執行過程為利用 Hydrus 軟體模擬灌注條件，並將整套滲透管緩釋灌注系統依據試驗場地之範圍，置入所需之緩釋滲透管隻數，以及置入 FTDR 監測水分，以機電控制系統調整 HYDRUS 模擬之操作參數進行設定，予以灌注過硫酸鹽氧化劑；而後將以主、被動式採樣分析進行高解析三維監測，並進行污染整治成效評估。相關工作項目簡述如下：

1. 污染場址試驗區域 Hydrus 軟體模擬灌注條件。
2. 氧化劑滲流系統設備現場設置及試車。



現地緩釋滲流化學氧化整治未飽和層土壤殘留相氯化有機物消弭地下水長期污染潛勢

3. 主、被動式地表下土壤氣體及地下水監測井規劃設置進行高解析三維監測。
4. 污染整治成效評估。

2.3 模場試驗場址資料

第一年研究計畫選取一場址執行計畫相關事宜，目前規劃選定新竹縣湖口鄉建興段建興小段 0028 地號(華淵電機工業股份有限公司)場址進行研究設備與系統設置，以確保後續進一步進行場址試驗之可行性；第二年則於該處場址進行氧化劑滲流系統之全面性試驗、Hydrus 軟體模擬、高解析三維監測與污染整治成效評估。場址相關資訊如下表 1 所示。

表 1、華淵電機工業股份有限公司所在土壤及地下水污染整治場址資料。

場址名稱	(J10085) 新竹縣湖口鄉建興段建興小段 0028 地號 (華淵電機工業股份有限公司)
座標	(X)：250906；(Y)：2751457
場址種類	工廠
場址地址	新竹縣湖口鄉鳳山村中華路一八號
場址地號	新竹縣湖口鄉建興段建興小段○○二八地號
場址公告面積	34,562 平方公尺
現況列管面積	34,562 平方公尺
場址列管狀態	公告為整治場址
土壤污染物	四氯乙烯：28.2 mg/Kg；總石油碳氫化合物： 6510mg/Kg
地下水污染物	1,1-二氯乙烯：1.4 mg/L；順-1,2-二氯乙烯：2.81 mg/L；四氯乙烯：3.27 mg/L；三氯乙烯：13.1 mg/L； 氯乙烯：1.58 mg/L；1,1,1-三氯乙烷：10.6 mg/L

● 場址背景

本場址為新竹縣湖口鄉建興段建興小段 0028 地號，場址位於新竹產業園區內，地址為新竹縣湖口鄉中華路 18 號（華淵電機工業股份有限公司），面積為 19,321 平方公尺。華淵公司為台灣華夏海灣集團與日本馬淵馬達株式會社於 1969 年攜手出資成立的台灣子公司，主要從事發電機、輸電、配電機械製造業，產品為汽車零組件及微小型直流馬達，經歷次增建廠房與生產線，目前主要生產項目以汽車用電動窗馬達、專業自動機械、模具為主。



現地緩釋滲流化學氧化整治未飽和層土壤殘留相氯化有機物消弭地下水長期污染潛勢

華淵公司早期於民國 67 年初建廠時使用四氯乙烯，該年底即改為毒性較低的三氯乙烷，後又考量臭氧層的破壞問題，於 82 年再改用三氯乙烯及部分二氯甲烷至 92 年 7 月 31 日全面終止含氯溶劑的使用並註銷毒性化學物質使用許可，以減少對環境的影響。部品清潔過程中所使用之三氯乙烯均以密閉式容器採循環回收使用並嚴加控管，其廢棄處理亦依毒性化學物質管理法及事業廢棄物清理法等相關規定申報，並委託合格之廢棄物清除處理單位妥善處理

● 水文地質資料

本場址處於湖口台地西部，其地質特性主要由下部礫石層和上部紅土層組成，厚度約 10~20 公尺。礫石淘選度差，顆粒支持，呈次圓形，平均粒徑 10~15 公分，最大約 60 公分，礫石原岩大部分由石英砂岩組成，另有少量細砂顆粒岩質礫石，湖口鄉地高乾燥，地勢向西北漸次傾斜。根據鄰近本場址不遠的水文測站(華興站)之地質資料如圖 4，顯示本區域 17 m 深度以下為基盤，其上層則屬於礫石層，與前述地質特徵大致相符。

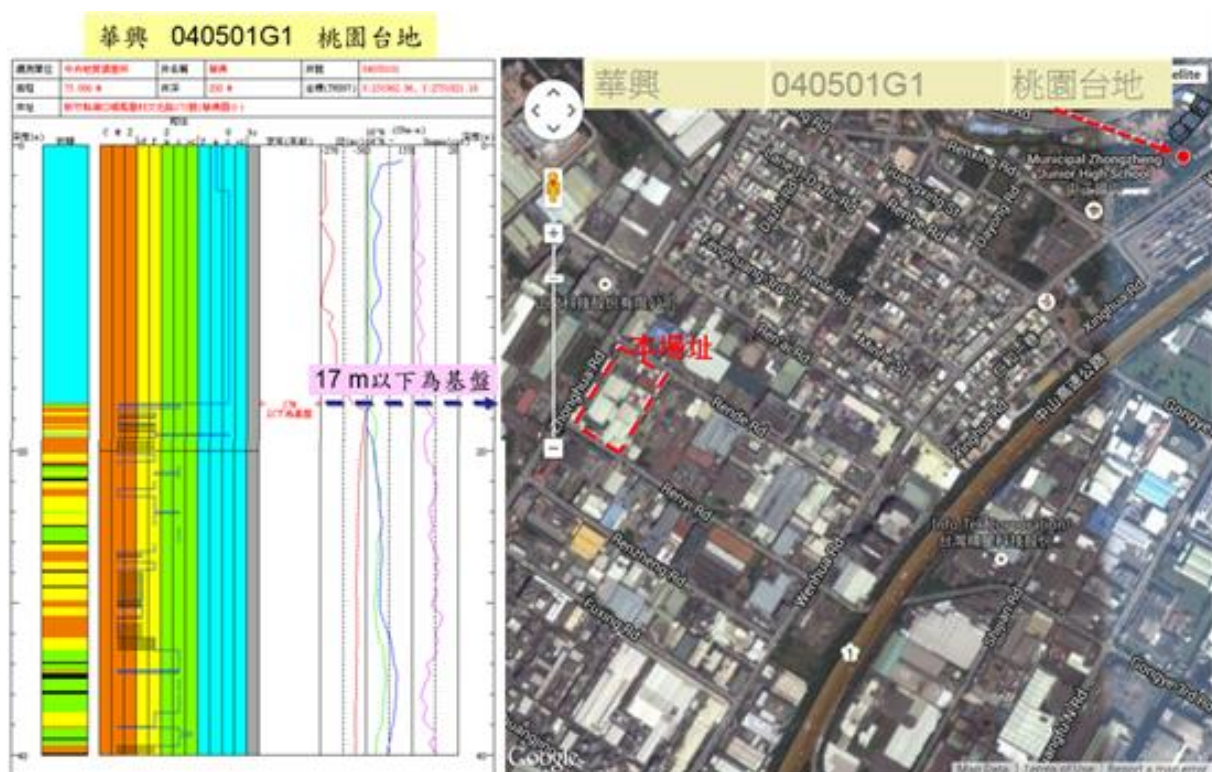


圖 4、水文測站(華興站)之地質資料。

而原環保署(現為環境部)於本場址設置 3 口監測井 J00196、J00197 及 J00198 之土壤取樣紀錄資料(圖 5)亦顯示，場內的土壤以夾雜礫石為主，上層(約 0~4 m)則覆有低透性的砂質土。由監測井設置後進行為水試驗所取得三口監測井水力傳



現地緩釋滲流化學氧化整治未飽和層土壤殘留相氯化有機物消弭地下水長期污染潛勢

導係數 K 分別為 9.57×10^{-5} cm/s、 1.02×10^{-4} cm/s、 4.28×10^{-4} cm/s；華淵公司自行設置 3 口監測井 AW01~A03 之水力傳導係數 K 則分別為 5.141×10^{-4} cm/s、 1.231×10^{-3} cm/s、 9.754×10^{-4} cm/s。依據歷年地下水監測井地下水位量測結果，地下水位約在地表下 2~5 公尺左右，部分區域受改善期間灌注藥劑影響，地下水位略有所差異，整體區域地下水流向仍為東北往西南或東往西方向，以 112 年 8 月場址內與區外監測井水位繪製之等水位線如圖 6 所示。

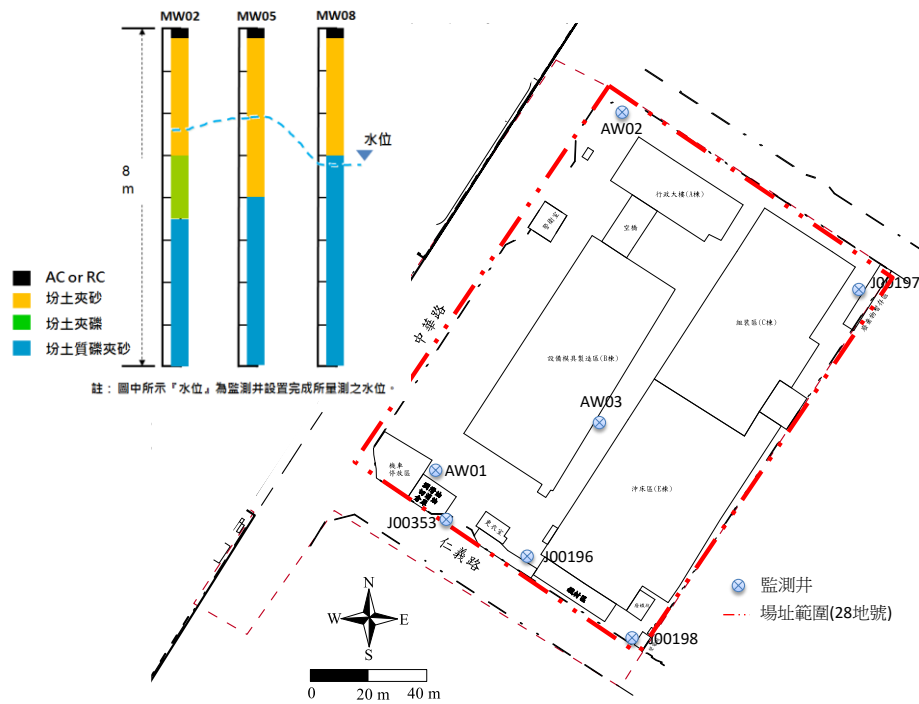


圖 5、本場址 3 口監測井 J00196、J00197 及 J00198 之土壤取樣紀錄資料。



現地緩釋滲流化學氧化整治未飽和層土壤殘留相氯化有機物消弭地下水長期污染潛勢

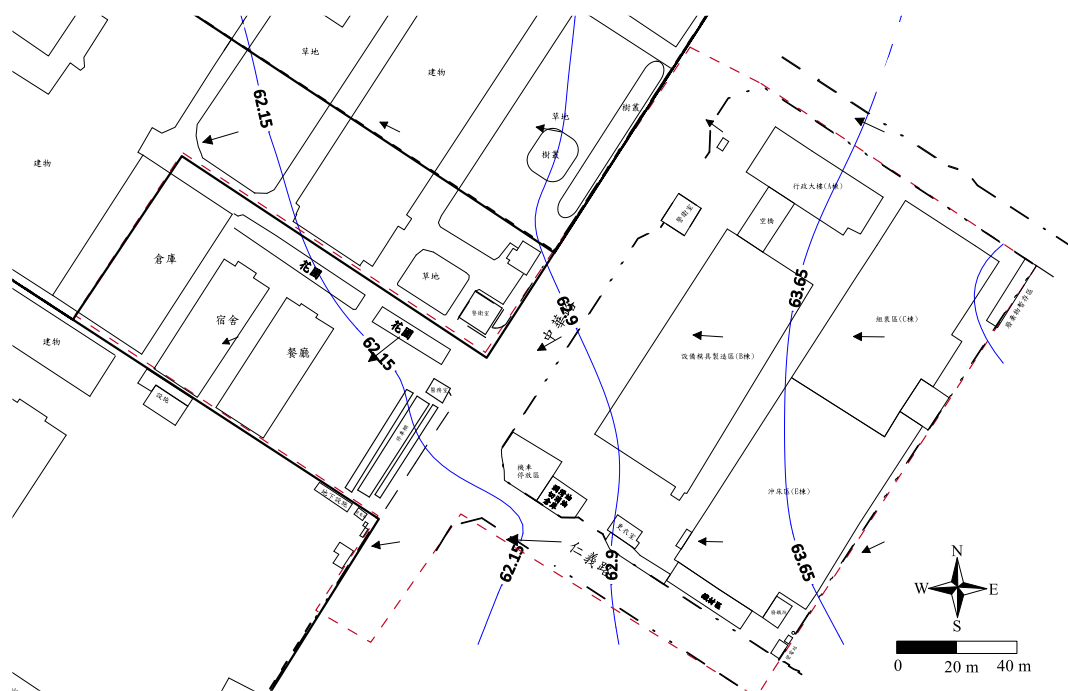


圖 6、地下水等水位線圖(112 年 8 月)。

● 污染列管歷程

原環保署(現為環境部)於民國 102 年至 103 年期間辦理「運作中工廠土壤及地下水含氯有機溶劑污染潛勢調查及查證計畫(第 5 期)(甲、乙)」，將本場址列為含氯有機溶劑污染潛勢調查之對象，並分別於 103 年 2 月及 4 月進行土壤、地下水污染調查及查證工作，根據其採樣點位及檢測結果圖 7、圖 8 所示。依調查結果於 104 年 4 月 30 日公告本場址為土壤及地下水污染整治場址(環署土字第 1040033668 號)。調查結果說明如下：

- 土壤檢測部分：於 S02 檢出四氯乙烯 28.2 mg/kg、三氯乙烯 29.8 mg/kg，S06 檢出總石油碳氫化合物 6,510 mg/kg。
- 地下水檢測部分：監測井 MW02(井號：J00196)檢出 1,1,1-三氯乙烷最高濃度 10.6 mg/L、1,1-二氯乙烯最高濃度 1.40 mg/L、順-1,2-二氯乙烯最高濃度 2.81 mg/L、四氯乙烯最高濃度 3.27mg/L、三氯乙烯最高濃度 13.1 mg/L、氯乙烯最高濃度 1.58 mg/L；MW05(井號：J00197)檢出 1,1-二氯乙烯最高濃度 0.131 mg/L、氯乙烯最高濃度 0.0240 mg/L。另根據新竹縣環保局「104 年度新竹縣土壤及地下水污染調查及查證工作計畫」，104 年 4 月 27 日於本場址新設 1 口監測井(井號：J00220，毀損後改設 J00353)，並於 104 年 5 月 29 日進行地下水採樣，檢出該監測井地下水 1,1-二氯乙烯最高濃度 0.169 mg/L、四氯乙烯最高濃度 0.492 mg/L、三氯乙烯最高濃度 1.88 mg/L、氯乙烯最高濃度 0.0329 mg/L。



現地緩釋滲流化學氧化整治未飽和層土壤殘留相氯化有機物消弭地下水長期污染潛勢

管制區範圍劃設，土壤部分以新竹縣湖口鄉建興段建興小段 0028 地號內；地下水管制區範圍則包含新竹縣湖口鄉建興段建興小段 0028、0193-1 地號及 0208 部分地號，公告面積為 34,562 平方公尺。

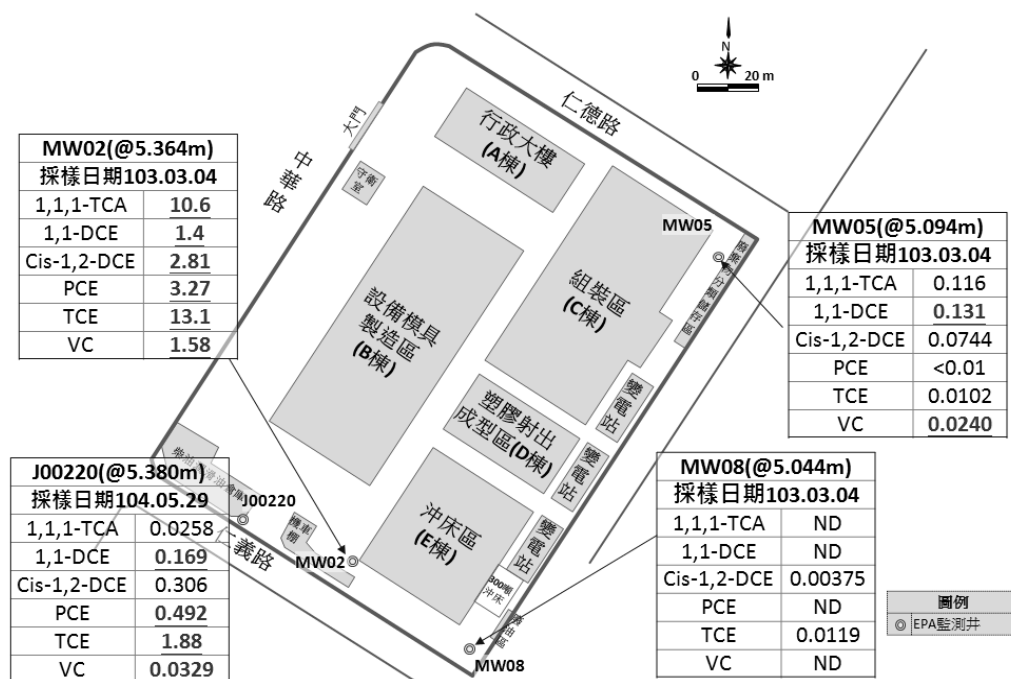


圖 7、土壤採樣位置及查證結果示意圖(103 年 2、4 月)。

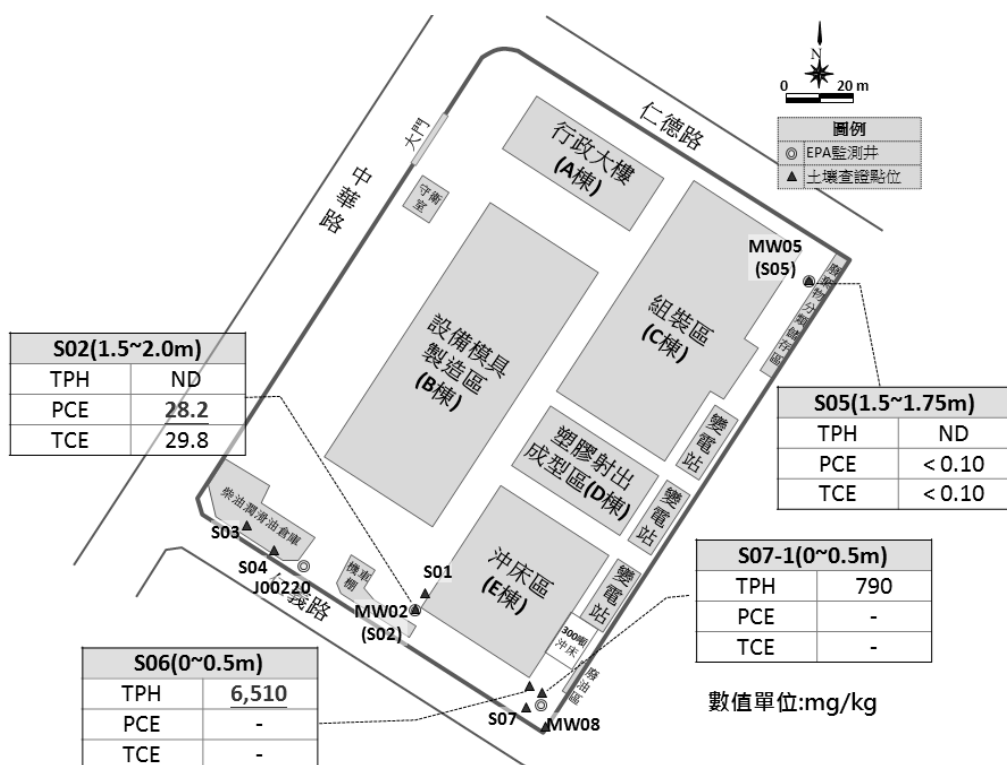


圖 8、地下水監測井採樣位置及查證結果示意圖。



現地緩釋滲流化學氧化整治未飽和層土壤殘留相氯化有機物消弭地下水長期污染潛勢

本場址整治計畫書依新竹縣政府函(107 年 6 月 26 日府環水字第 1070108333 號函)准予核定，整治計畫期程為 5 年(至 112 年 6 月)；後經場外管制區(193-1 地號)補充調查，納入場外管制區改善方案規劃工作提出第一次變更計畫；依各次審查會議決議結論針對管制區外所涉區域(192、193 及 194 地號)進行補充調查作業，制訂 192、193、194 等地號所涉區域必要之應變改善工作提出第二次變更計畫，調整整治期程 6 年(至 113 年 6 月)。

場內外管制區於 113 年 2 月辦理第一次土壤及地下水自主驗證，污染已明顯縮限而無擴散，然局部土壤及地下水自行驗證之標定污染物檢出濃度未符合整治目標(管制標準)，將持續進行污染整治。目前針對局部難以降解、改善區域調整為化學氧化方法之替代工法，另外更新定期監測規劃內容，並調整計畫期程為 7.5 年(至 114 年 12 月)，提送第三次變更計畫執行中。

- 污染改善狀況

- (1)土壤污染改善

本場址土壤改善包含排土客土法、現地化學氧化法(In-Situ Chemical Oxidation, ISCO)兩部分，相關分布如圖 9 及圖 10 所示。

目前已於 108 年 5、6 月分別完成 C 區、A 區污染土壤開挖，並於 108 年 5 月 30 日離場清運含揮發性有機物污染土壤(S-0109)至大寧股份有限公司，清運數量共約 40 立方公尺，約 58 公噸。而含總石油碳氫化合物污染土壤(S-0111)則於 108 年 6 月 27、28 日進行離場清運。

B 區以 ISCO 法整治該區地表下約 2~3 m 處土壤 TPH 污染，惟 TPH 可能殘留於淺層粉黏土地層(粉黏土範圍約地表下 0.35~2.2 公尺，地下水位約地表下 1.8~2 公尺)，考量本區主要高濃度污染位於滲透性較差的黏土層，現地重力灌注的有效範圍有限，化學氧化劑未能與污染物有效接觸，於 111 年 6 月提出土壤離場處置變更計畫書(納入 B 區西北側局部區域)，針對 B 區西北側局部區域採用排土客土法直接移除污染土壤。針對高濃度污染土壤之區域循 A、C 區土壤開挖作業方式，採排土客土法進行土壤整治。於 111 年 10 月完成 B 區西北側區域(B1 區)污染土壤開挖作業，並於 10 月離場清運含總石油碳氫化合物污染土壤(S-0111)至明春窯業股份有限公司進行再利用代處理，清運數量共約 178 立方公尺，約 265.62 公噸。



現地緩釋滲流化學氧化整治未飽和層土壤殘留相氯化有機物消弭地下水長期污染潛勢

依土壤污染改善成效結果，土壤污染區域僅殘存零星污染(開挖邊界附近)，且侷限於部分區域，目前採 ISCO 灌注 SPS 執行重力井灌注作業中。

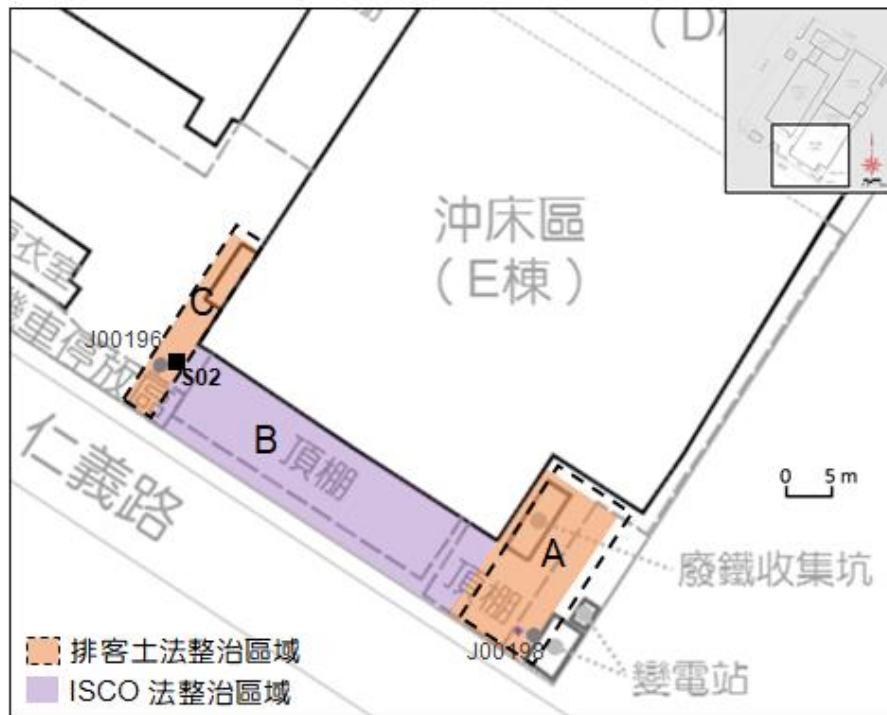


圖 9、土壤污染整治範圍示意圖。

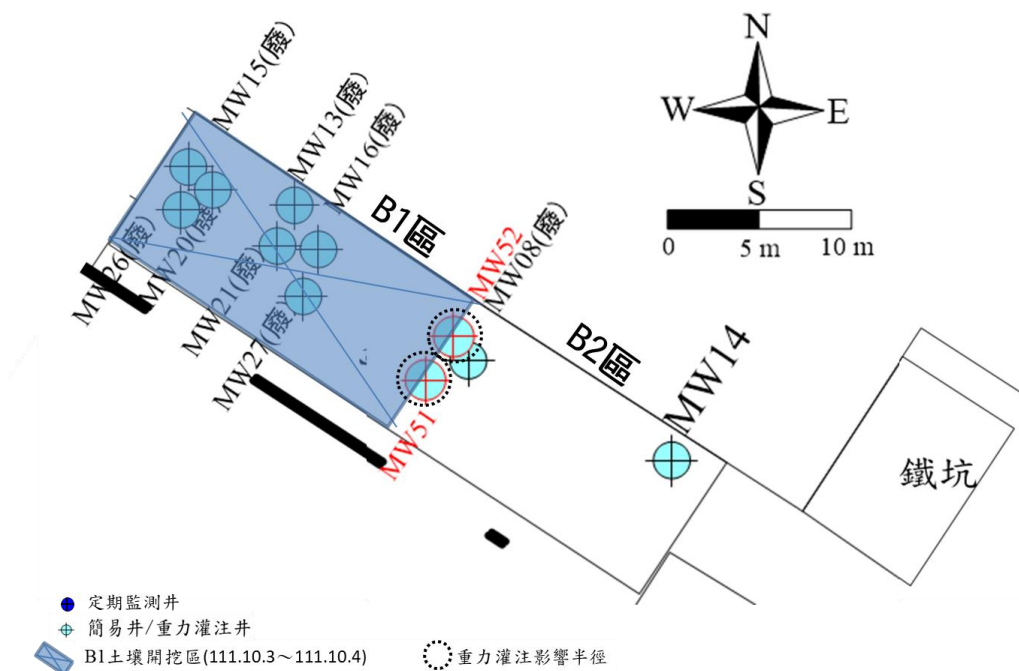


圖 10、土壤污染整治灌注範圍示意圖(MW51、MW52)。



現地緩釋滲流化學氧化整治未飽和層土壤殘留相氯化有機物消弭地下水長期污染潛勢

(2)地下水污染改善

本場址地下水污染改善採用現地生物復育法，以雙環塞灌注工法(Double Packer Injection)灌注生物營養鹽生物刺激藥劑(Biostimulation)以能持續降解低氯數污染物，或視情況調整成為好氧環境或選擇生物增殖法(Bioaugmentation)等，另考量降解產物(特別是 VC)於多數含氯有機物整治場址已成為主要濃度拖尾或回升的棘手問題，加強地下水含氯有機物現地生物地化轉化(In Situ Biogeochemical Transformation, ISBGT)機制，透過微生物作用產生之地質礦物以非生物性降解途徑將污染物轉化為無害物質。

自整治計畫核定後，針對場內、外、下游所涉區域陸續於污染熱區、場址邊界、下游等處設置多口 DPI 灌注井，約每半年執行一次灌注，目前地下水污染以獲得明顯改善成效，僅仍有零星降解產物 1,1 二氯乙烯、氯乙烯超過管制標準。監測井 J00196、J00197 地下水濃度變化如圖 11 及圖 12 所示，摘錄近期(113 年 2 月)場內監測井地下水分析結果如表 2 所示。顯示歷次灌注後污染熱區均已獲得控制、污染潛勢已逐漸降低，停止灌注 2 個月後(113 年 2 月)分析結果僅局部熱區(如東北 J00197 區、西南側 J00196、J00353、AW01 等區)仍有零星單點污染，針對局部難以降解區域、改善區域將啟動替代工法，採以化學氧化法進行灌注作業。

目前依據變更計畫持續執行地下水改善中，針對局部難以降解區域、改善區域(如 J00196、J00197、J00353、AW01 及 BW25 等)，每 1~2 個月進行藥劑灌注，每區採 1~4 口重力井或 DPI 灌注井進行 ISCO 過硫酸鈉灌注作業，灌注藥劑與灌注量視現場傳輸狀況分批次灌注，並搭配後續地下水定期監測評估改善成效；其他整治成效良好之區域仍以 3~6 個月不定期補充生物碳源持續進行地下水改善作業，定期監測改善成效。



現地緩釋滲流化學氧化整治未飽和層土壤殘留相氯化有機物消弭地下水長期污染潛勢

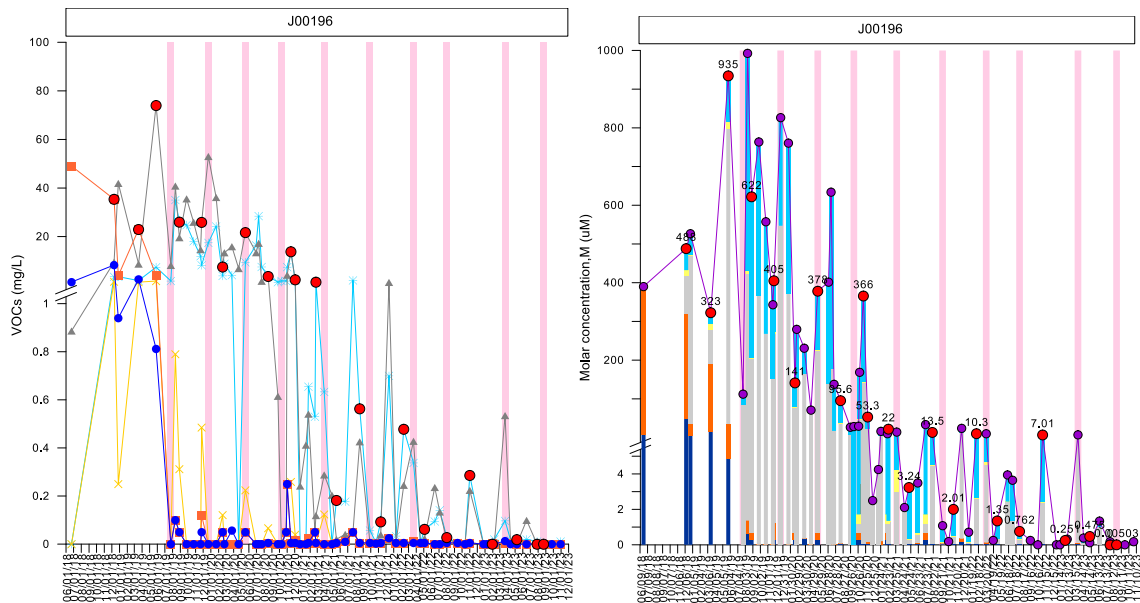


圖 11、地下水監測井 J00196 地下水污染物濃度/莫耳濃度變化示意圖。

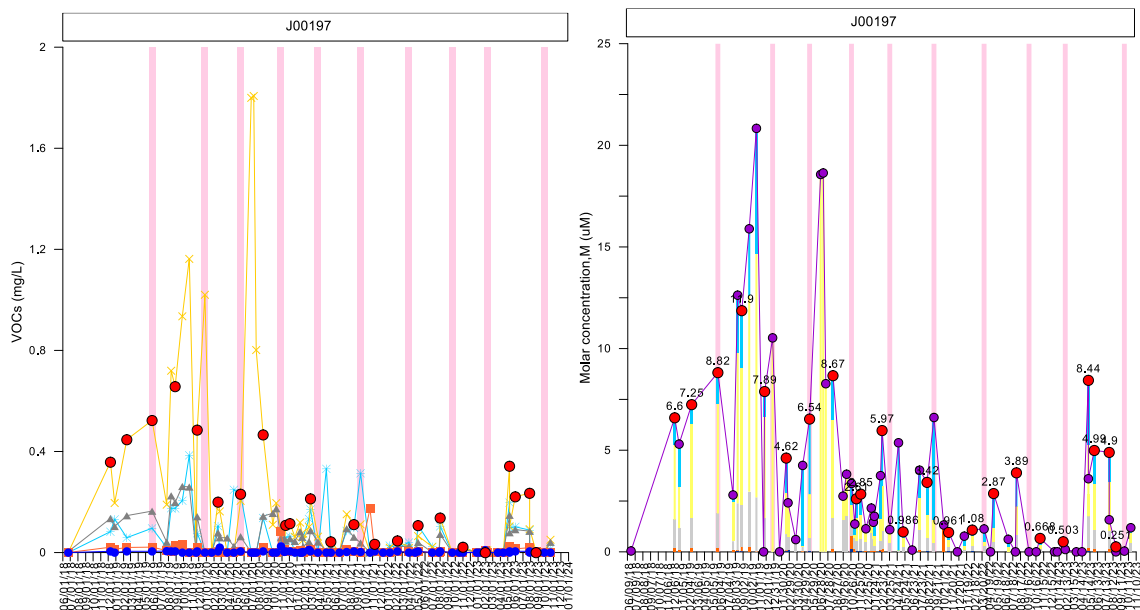


圖 12、地下水監測井 J00197 地下水污染物濃度/莫耳濃度變化示意圖。



現地緩釋滲流化學氧化整治未飽和層土壤殘留相氯化有機物消弭地下水長期污染潛勢

表 2、場內地下水監測井 113 年 2 月污染物濃度分析結果彙整表。

項次	檢驗項目	監測標準	管制標準	單位	J00196	J00197	J00353	J00198	AW01	AW02
1	導電度	—	—	μmho/cm	9690	5630	33400	4580	3440	31300
2	水位	—	—	m	2.257	1.492	1.592	2.164	2.214	1.940
3	溶氧量	—	—	mg/L	2.2	2.4	2.3	2.4	0.7	0.7
4	氧化還原電位	—	—	mv	104	-115	-118	-59.3	-155	-189
5	1,1,1-三氯乙烷	1.00	2.0	mg/L	<0.0100	<0.0100	<0.0200	<0.0200	<0.0100	<0.0200
6	1,1,2-三氯乙烷	0.025	0.05	mg/L	<0.0100	<0.0100	<0.0200	<0.0200	<0.0100	<0.0200
7	1,1-二氯乙烯	0.035	0.07	mg/L	<0.0100	<u>0.0713</u>	<0.0200	<0.0200	<0.0100	<0.0200
8	1,1-二氯乙烷	4.25	8.50	mg/L	0.0172	0.0149	<0.0200	<0.0200	<0.0100	<0.0200
9	1,2-二氯苯	3.00	6.0	mg/L	<0.0100	<0.0100	<0.0200	<0.0200	<0.0100	<0.0200
10	1,2-二氯乙烷	0.025	0.05	mg/L	<0.0100	<0.0100	<0.0200	<0.0200	<0.0100	<0.0200
11	1,4-二氯苯	0.375	0.75	mg/L	<0.0100	<0.0100	<0.0200	<0.0200	<0.0100	<0.0200
12	苯	0.025	0.05	mg/L	<0.0100	<0.0100	<0.0200	<0.0200	<u>0.299</u>	<0.0200
13	四氯化碳	0.25	0.5	mg/L	<0.0100	<0.0100	<0.0200	<0.0200	<0.0100	<0.0200
14	氯苯	0.50	1.0	mg/L	<0.0100	<0.0100	<0.0200	<0.0200	<0.0100	<0.0200
15	三氯甲烷(氯仿)	0.50	1.0	mg/L	<0.0100	<0.0100	<0.0200	<0.0200	<0.0100	<0.0200
16	氯甲烷	0.15	0.30	mg/L	0.0620	<0.0100	<0.0200	<0.0200	0.0231	<0.0200
17	順-1,2-二氯乙烯	0.35	0.7	mg/L	0.0223	0.0444	0.114	<0.0200	0.0101	<0.0200
18	乙苯	3.50	7.0	mg/L	0.0156	<0.0100	<0.0200	<0.0200	<0.0100	<0.0200
19	二甲苯	50.00	100	mg/L	<0.0300	<0.0300	<0.0600	<0.0600	<0.0300	<0.0600
20	二氯甲烷	0.025	0.05	mg/L	<0.0100	<0.0100	<0.0200	<0.0200	<0.0100	<0.0200
21	苯	0.20	0.4	mg/L	<0.0100	<0.0100	<0.0200	<0.0200	<0.0100	<0.0200
22	四氯乙烯	0.025	0.05	mg/L	<0.0100	<0.0100	<0.0200	<0.0200	<0.0100	<0.0200
23	甲苯	5.00	10	mg/L	<0.0100	<0.0100	<0.0200	<0.0200	<0.0100	<0.0200
24	反-1,2-二氯乙烯	0.50	1.0	mg/L	<0.0100	<0.0100	<0.0200	<0.0200	<0.0100	<0.0200
25	三氯乙烯	0.025	0.05	mg/L	<0.0100	<0.0100	<0.0200	<0.0200	<0.0100	<0.0200
26	氯乙烯	0.01	0.02	mg/L	<u>0.0754</u>	<u>0.0565</u>	<u>0.0358</u>	<0.0200	<0.0100	<0.0200
27	總石油碳氫化合物	5	10	mg/L	<u>105</u>	—	—	—	—	—

● 模場試驗區

依據本場址目前狀況，可選擇監測井 J00196 或監測井 J00197 附近區域做為本計畫模場試驗區，現場照片可參考圖 13 所示。

監測井 J00196 位於沖床區西南側機車停車場附近，為本場址過去主要污染熱區，土壤污染部分已進行開挖排土客土法進行改善，回填 1~2 公尺厚度之水泥，但是依目前地下水數據顯示，地下水中仍存在順-1,2-二氯乙烯、氯乙烯等降解產物；監測井 J00197 位於廢棄回收暫存區附近，目前仍有地下水 1,1-二氯乙烯、氯



現地緩釋滲流化學氧化整治未飽和層土壤殘留相氯化有機物消弭地下水長期污染潛勢

乙烯等降解產物，可能與早期土壤中殘留 PCE 或 TCE 污染有關。

未來可視本場整治計畫執行狀況，以及第一年度模場試驗視車成果，彈性調整(選擇)合適之試驗區。



圖 13、地下水監測井(a) J00196、(b) J00197 現場環境狀況。



(三)文獻探討

滴灌系統(Drip irrigation)於農業用途上係透過滴灌網準確地輸送水與營養鹽至植物根部區域，藉此不僅掌控時間及輸送量以提升糧食產率，減少肥料與能源之消耗，亦能減少淋溶作用(Leaching)、土壤鹽化(Soil salinization)等環境問題[24]，其操作上需要供水系統、壓力調節器、滲透管或滴管(Driple lines)等主要結構，搭配分配管線、過濾器及配件，架設安裝與管理成本較其他灌溉技術更高，故大多用在高價值作物。滴灌網域使用之管線分為兩種形式：點源及線源：(1)點源意指出水口為一點狀，此管線稱滴灌管(Drip tape)，為於一定間距開設微小圓孔之塑膠管線，液體能因壓力由孔洞溢出以澆灌植物；(2)線源意指整條管路皆可溢出輸送液，管線名滲透管(Porous pipe)，此種管線由多孔材質組成，其製造方式是將塑膠或橡膠微粒，以高溫高壓方式擠壓而成，管線之顆粒間會有微小孔隙，因此於鋪設所經之處管內液體可因壓力而由眾多孔隙溢出。

Subbaiah 整理之文獻內容[25]指出當滴灌進行時，於出水處形成一積水區域，並因為滲透速率隨時間增加而增加其半徑，成為水下滲的勢能。而水體下滲的過程主要可分為滲透(Infiltration)以及重新分配(Redistribution)。滲透即是水由土壤表面入滲的過程，主要依靠毛細力以及基質勢進行作用，此時土壤上方呈飽和狀態，下方則是飽和度陡峭下降的濕潤區，緊接著是區分乾濕區域的濕潤前緣(Wetting front)。另外在入滲過程中的土壤每個位置的滲透速率皆不同，於飽和中心最小，濕潤前緣最大，這導致於水平或垂直方向的入滲速度差異。當入滲結束後，入滲的水在土壤中進行重新分配，此階段主要依靠毛細力以及重力，並受到遲滯效應影響。土壤特性不同使濕潤前緣的形狀不同，孔隙較小的土壤比孔隙大的土壤有更多水平擴散，如圖 14 呈現土壤質地與滴灌流量影響濕潤前緣位置之比較[26]，於圖 14 上半部(壤土，孔隙小)及下半部(砂土，孔隙大)的差異，因水分下滲若阻力較大，垂直重力作用受限而使水平毛細力增加，造成水平移動較多。滴灌流量的增加也會導致濕潤前緣往水平方向移動，如圖 14 左半部(4 L/hour)及右半部(20 L/hour)所示，流量增加也造成濕度梯度故土壤質地及滴灌流量會顯著影響水分於土壤中

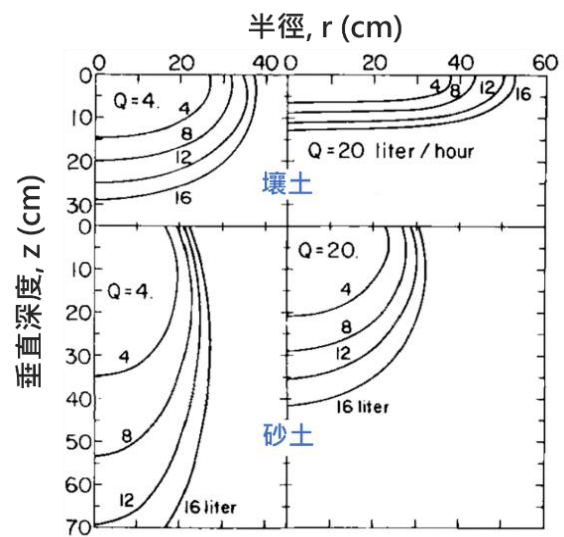


圖 14、土壤質地與滴灌流量影響濕潤前緣位置之比較圖。



現地緩釋滲流化學氧化整治未飽和層土壤殘留相氯化有機物消弭地下水長期污染潛勢

的分布，當土壤質地固定，可以調整流量使濕潤前緣達到目標位置。

滴灌系統可以進一步調整控制滲流水分的頻率，即以間歇性進行滲流。Zur [27] 提出滲流頻率也會影響濕潤前緣的形狀，其原理主要為前述改變滴灌流量，即使操作流量不變，但總體流量變小，使得達到更小滴灌流量的目的。要使水分於滴灌後直接達到飽和（以基質流形式存在），所需滴灌流速（單位時間中灌注體積通過灌注截面積之距離）需在 0.5 至 2.0 mm/hour 的範圍，而目前技術較難達到如此低的流量，故需發展間歇滲流的滴灌方式。該文獻中指出平均滴灌流量相同（例如操作流速 10 mm/hr 時運作時間：總時間 = 1：2，與操作流速 20 mm/hr 時運作時間：總時間 = 1：4 之平均滴灌流速皆為 5 mm/hr）造成相同的土壤含水量，並且在相同的滲流頻率下，滴灌流速與土壤含水量之間存在固定的關係。另外在不同滲流頻率下，濕潤前緣的位置與時間的關係皆呈現線性，其線性斜率隨頻率增加而下降。整體來說，改變滴灌之滲流頻率可以達到以更低滴灌流量進行滴灌的效果，藉以改變含水量分布以及濕潤前緣的前進速度。

計畫主持人建立在國科會計畫「新式滲透緩釋輸送之現地化學氧化技術應用於未飽和含水層三氯乙烯污染土壤整治」之研究成果，其中部分成果「Preliminary validation of persulfate delivery through porous pipe in the vadose zone: A two-dimensional sandbox experiment」已發表於國際期刊[28]，研究結果透過評估滲透管之操作特性，建議進流速率控制於低於 0.1 L/min 時，且進流初期之水壓應低於 20 kPa，可使系統避免孔隙擴張導致優勢流產生。另於

二維沙箱實驗顯示，於 0.05 L/min 之脈衝式進流操作條件下，可有效誘導基質流與橫向移動，進而抑制連續滲流所導致的優勢流現象。在此條件下施加濃度為重量比 10% 之 SPS，約可達成沙箱面積 90% 之濕潤覆蓋率，顯示 SPS 可藉由滲透管成功進行滲流分佈。驗證結合滲透管滲流 ISCO 過硫酸鈉氧化劑用於未飽和層土壤整治殘留相 TCE 污染物為一項已達 TRL4 成熟度之技術，邁向 TRL5 以上可於真實環境執行現地試驗之新穎技術。本研究擬使用滲透管（如圖 15）進行試驗，根據 Kunze 等[29]所述，滲透管的應用有別於傳統滴管僅在固定距離開孔釋出水分，滲透管整體皆能釋出水分，代表可利用更低的用水量達到目標含水量，以及避免水源累積在單點之現象，並且提供水分更均勻的傳輸，達到更均勻的含水量。滲



(<https://www.slideshare.net/tchang101/20150201-44133305>)

圖 15、滲透管緩釋氧化劑液體之示意。



現地緩釋滲流化學氧化整治未飽和層土壤殘留相氯化有機物消弭地下水長期污染潛勢

透管應用上多使用在地下滴灌(約地下 0.02 至 0.7 公尺以下之深度)，以避免水分於地表過度蒸發，能更減少用水量，而使用地下滴灌須特別針對土壤中水分、流速等數據監測以確保液體之輸送[30]。



現地緩釋滲流化學氧化整治未飽和層土壤殘留相氯化有機物消弭地下水長期污染潛勢

(四)研究方法與過程(含工作進度甘特圖)

本研究計畫為開發現地緩釋滲流化學氧化技術以整治未飽和層土壤殘留相氯化有機物消弭地下水長期污染潛勢。研究方法分期兩年簡要說明如下：

4.1 第一年目標 - 氧化劑滲流系統設備設計與組裝建置及場址設備安裝與試車

整體氧化劑滲流系統運作概念如圖 16 所示。

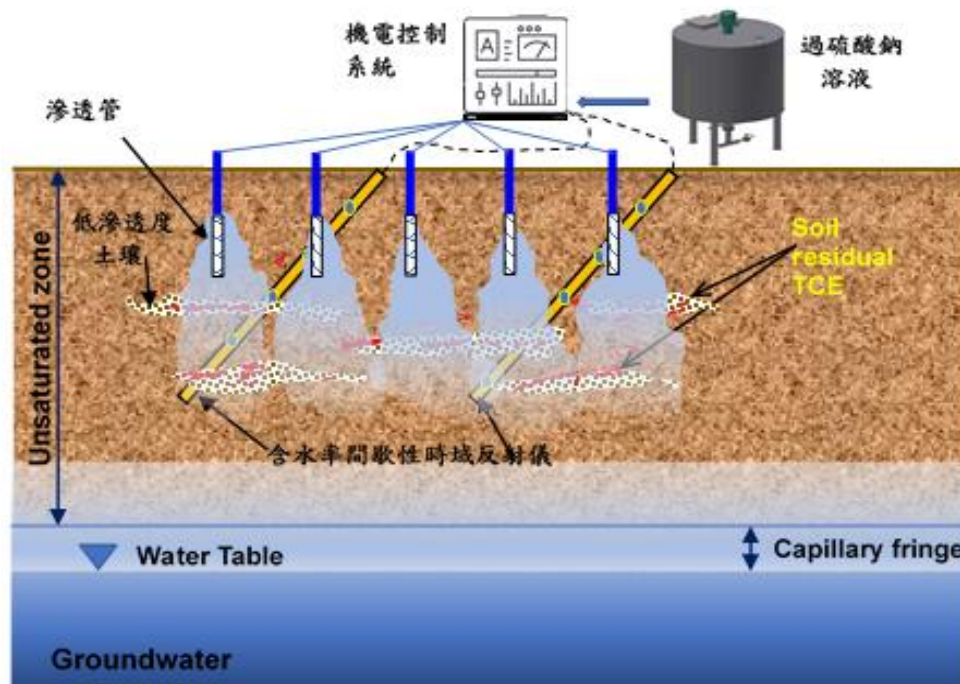


圖 16、氧化劑滲流系統之示意圖。

據此，擬進行之工作項目如下：

- (1) 滲透管緩釋灌注系統設計及組裝。
- (2) 機電控制系統設計及組裝。
- (3) 含水率監測系統設計及組裝。
- (4) 現地土壤場域機電控制系統、滲透管緩釋灌注系統及含水率監測系統運作試車。
- (5) 氧化劑溶液灌注操作條件 Hydrus 軟體模擬。
- (6) 建立整治系統標準操作流程。
- (7) 污染場址整治系統設置

此階段主要之工作為建立未飽和層 ISCO 滲流系統輸送氧化劑之系統，將於中興大學之場地進行實地系統操作以確保滲流系統之正常運作，以便銜接目標

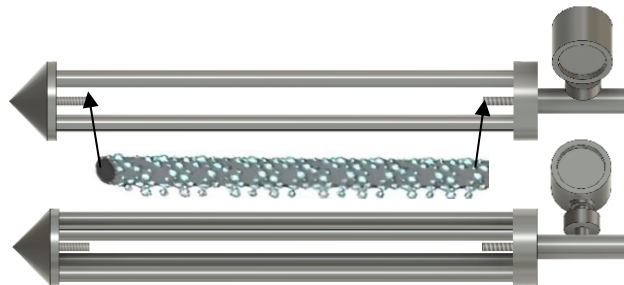


現地緩釋滲流化學氧化整治未飽和層土壤殘留相氯化有機物消弭地下水長期污染潛勢

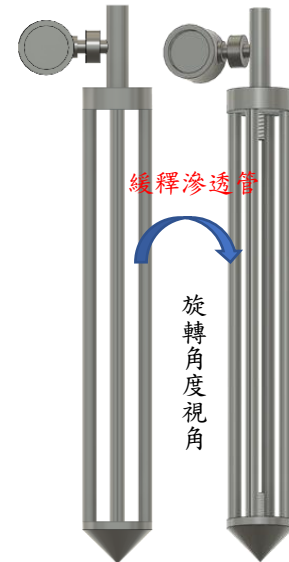
二移至污染場址進行實際之污染整治進行。目標一工作項目簡述如下：

1. 滲透管緩釋灌注系統設計及組裝。

單組緩釋滲透管設計簡要示意如右圖，滲透管裝置於中間，上下及周圍為不鏽鋼之開放式支架，當置入地表下時，其周遭填充石英砂或適切之填充材料。



PVC 軟性滲透管裝入滲透管組中間液體輸送管道。



設置時，將先以電動柱孔挖掘機挖至所需之深度後，置入滲透管。

2. 機電控制系統設計及組裝

機電控制系統功能：流量控制、灌注頻率、灌注壓力

3. 含水率監測系統設計及組裝

含水率監測系統功能：不同土壤深度之含水率監測、土壤溫度監測

4. 現地土壤場域機電控制系統、滲透管緩釋灌注系統及含水率監測系統運作試車(於中興大學現地試驗場地進行)



5. 氧化劑溶液灌注操作條件 Hydrus 軟體模擬。

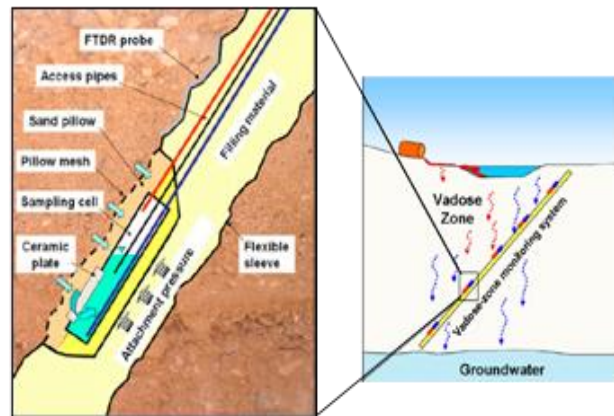
目前市面上有許多商業化用以模擬未飽和含水層中水分移動之模擬軟體，例如：HYDRUS、SWAP、HydroGeoSphere、VS2DI 等。本研究所選擇之模擬軟體為 HYDRUS，此軟體為捷克 PC-PROGRESS 軟體工程公司之模擬軟體，可對於農業灌溉、土壤中溶質、熱與污染物傳輸等進行一維至三維之模擬傳輸情形。主要設定條件可分成 Main Process、Project Information、Geometry、Initial



現地緩釋滲流化學氧化整治未飽和層土壤殘留相氯化有機物消弭地下水長期污染潛勢

Conditions、Boundary Conditions、Calculation and Result。

於此目標下，亦包括含水率監測系統設計及組裝，示意如右圖。間歇性時域反射儀(Flexible time domain reflectometry, FTDR)主要由三大部份組成：(1)產生能量訊號之脈衝電壓產生器；(2)訊號接收器；(3)波導器。以一傾斜角度 FTDR 插入未飽和含水層土壤，波型及時間進行含水量換算。



6. 建立整治系統標準操作流程(SOP)

7. 污染場址整治系統設置(於華淵電機場址進行)

4.2 第二年目標 - 場址未飽和層土壤 ISCO 氧化劑滲流整治施作及成效監測。

基於第一年之實驗成果，本研究計畫將進一步之於污染整治場址進行測試，詳細工作項目包含有污染場址試驗區域 Hydrus 軟體模擬灌注條件、氧化劑滲流系統設備現場設置及試車、主、被動式地表下土壤氣體及地下水監測井規劃設置進行高解析三維監測及污染整治成效評估。目標二工作項目簡述如下：

1. 污染場址試驗區域 Hydrus 軟體模擬灌注條件。

本研究選擇 HYDRUS 模擬軟體，此軟體為捷克 PC-PROGRESS 軟體工程公司之模擬軟體，可對於農業灌溉、土壤中溶質、熱與污染物傳輸等進行一維至三維之模擬傳輸情形[31]。主要設定條件可分成 Main Process、Project Information、Geometry、Initial Conditions、Boundary Conditions、Calculation and Result，將依據華淵電機場址所選定之試驗區域之地質水文條件，透過模擬之結果將系統之操作參數優化。

2. 氧化劑滲流系統設備現場設置及試車。

將整套滲透管緩釋灌注系統依據試驗場地之範圍，置入所需之緩釋滲透管隻數，以及置入 FTDR 監測水分，以機電控制系統調整 HYDRUS 模擬之操作參數進行設定，予以灌注過硫酸鹽氧化劑，氧化劑所需之劑量則會依據該場址土壤污染濃度於實驗室中進行泥水相試驗加以決定，依據土壤氧化劑需求量(soil oxidant demand, SOD)之評估結果，予以調整氧化劑滲透管緩釋管灌注系統。



現地緩釋滲流化學氧化整治未飽和層土壤殘留相氯化有機物消弭地下水長期污染潛勢

3. 主、被動式地表下土壤氣體及地下水監測井規劃設置進行高解析三維監測。

將於華淵電機場址之監測井，或依據現場試驗區域另行設置監測井，進行新型被動式採樣器之未飽和層土壤氣體及飽和含水層地下水濃度進行高密度置放採樣器，以及搭配傳統地下水採樣方式進行監測，達到高解析之場址污染調查。

4. 污染整治成效評估。

進行氣相及液相污染分布前後局部區域 CSM 之比較，整理相關數據，發表於期刊或研討會，確認及提升整套系統之 TRL 等級。

4.3 研究進度及預期完成之工作項目(甘特圖)

年月 工作項目	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	備註
第一年目標：氧化劑滲流系統設備設計與組裝建置及場址設備安裝與試車。													
1.1 滲透管緩釋灌注系統設計及組裝													
1.2 機電控制系統設計及組裝													
1.3 含水率監測系統設計及組裝						※							
1.4 現地土壤場域機電控制系統、滲透管緩釋灌注系統及含水率監測系統運作試車													
1.5 氧化劑溶液灌注操作條件 Hydrus 軟體模擬													
1.6 建立整治系統標準操作流程													
1.7 污染場址整治系統設置												※	
第二年目標：場址未飽和層土壤 ISCO 氧化劑滲流整治施作及成效監測。													
2.1 污染場址試驗區域 Hydrus 軟體模擬灌注條件													
2.2 氧化劑滲流系統設備現場設置及試車						※							



現地緩釋滲流化學氧化整治未飽和層土壤殘留相氯化有機物消弭地下水長期污染潛勢

2.3 主、被動式地表下土壤氣體及地下水監測井規劃設置進行高解析三維監測													
2.4 污染整治成效評估												※	
工作進度估計百分比 (累 積 數)	5%	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	95%	100%	
預定查核點	期中	第一年 目標 1.1 滲透管緩釋灌注系統設計及組裝；目標 1.2 機電控制系統設計及組裝；目標 1.3 含水率監測系統設計及組裝。 第二年 目標 2.1 污染場址試驗區域 Hydrus 軟體模擬灌注條件；目標 2.2 氧化劑滲流系統設備現場設置及試車。											
	成果	第一年 目標 1.4 現地土壤場域機電控制系統、滲透管緩釋灌注系統及含水率監測系統運作試車；目標 1.5 氧化劑溶液灌注操作條件 Hydrus 軟體模擬；目標 1.6 建立整治系統標準操作流程；目標 1.7 污染場址整治系統設置。 第二年 目標 2.3 主、被動式地表下土壤氣體及地下水監測井規劃設置進行高解析三維監測；目標 2.4 污染整治成效評估。											



(五)結果與討論

本研究為計畫主持人基於國科會計畫「新式滲透緩釋輸送之現地化學氧化技術應用於未飽和含水層三氯乙烯污染土壤整治」之研究成果，以及發表於國際期刊 *Soil and Sediment Contamination: An International Journal* 之論文「Preliminary validation of persulfate delivery through porous pipe in the vadose zone: A two-dimensional sandbox experiment」研究成果，進一步將其開發成實場可應用之設備，用以解決環境污染問題。此技術之核心概念係運用農業滴灌系統之傳輸水分方式，將 ISCO 過硫酸鈉氧化劑溶液以滲透管經由控制滲流頻率、水量、流速壓力等參數緩慢傳輸氧化劑至未飽和層土壤，過程中不致使過多液體下沉至含水層，緩釋 ISCO 使得 SPS 可以毛細力吸持停留於土壤顆粒，誘發 ISCO 反應得以於未飽和層土壤中進行，氧化劑液體亦可停留滲入至 LPZ 土壤中，此方式可將 ISCO 技術應用於未飽和層土壤整治，處理殘留相污染物及克服液體輸送優勢流等問題，以降低土壤殘留相污染物造成長期地下水污染之潛勢。滲透管緩釋灌注系統運作流程之元件包含：滲透管、機電控制系統、試劑輸送單元以及氧化劑儲存槽，其系統運作流程如圖 17 所示。

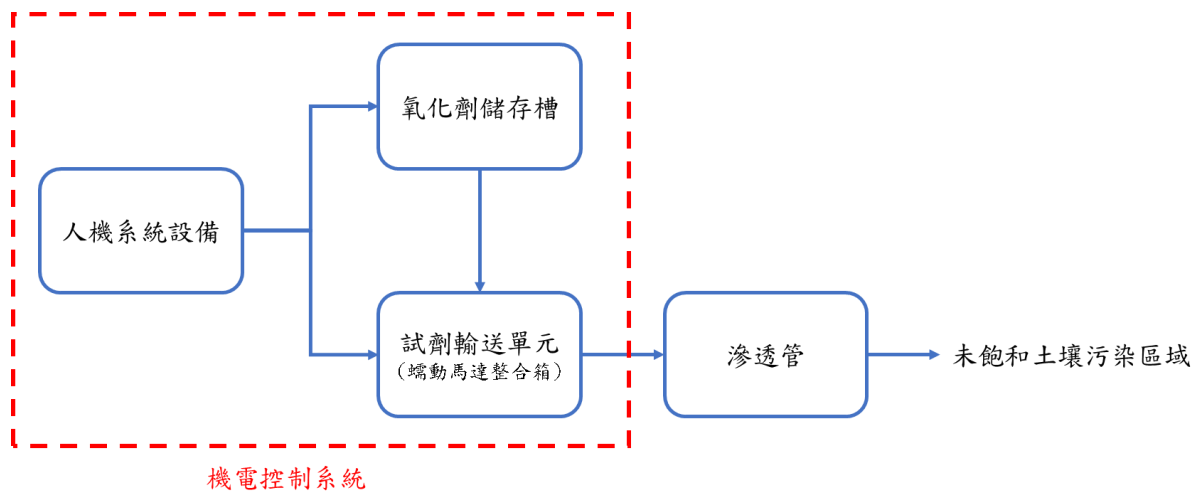


圖 17、滲透管緩釋灌注系統運作流程及元件



現地緩釋滲流化學氧化整治未飽和層土壤殘留相氯化有機物消弭地下水長期污染潛勢

5.1 滲透管之設計及組裝

當前階段已完成之「滲透管」之實驗裝置設計繪製，並委請相關廠商製作，圖 18 為計畫主持人與(左)設備製造商(右)設備製造商及機電控制系統整合之會議照片，其滲透管緩釋灌注系統裝置設計圖如圖 19 所示，裝置中不鏽鋼護板設計如圖 20 及細部零件如圖 21 所示。



圖 18、計畫主持人與(左)設備製造商(右)設備製造商及機電控制系統整合之會議照片。

圖 19 為本研究計畫之滲透管緩釋灌注系統實驗裝置設計圖，裝置為 $3\text{ cm} \times 3\text{ cm} \times 100\text{ cm}$ 之長方體物件，裝置之材質皆以 304 不鏽鋼製作，構造上係以四片帶規律孔洞之不鏽鋼板作為護板(如圖 20 所示)，彼此交扣並前後端以螺絲螺帽固定於固定板而成，四片不鏽鋼護板固定後之中間空間呈通道狀，可供以滲透管穿越於其中，使滲透管可藉由該裝置順利進入表層土壤運作。本研究計畫之裝置選用 304 不鏽鋼製作之原因為：滲透管緩釋灌注系統操作時，需埋入表層土壤中並灌注氧化劑，因此不銹鋼材質具有較佳之剛性，於滲透管外可保護其深入表層土壤不易破損與形變，以及不鏽鋼材質於氧化劑存在之環境下不易遭受氧化腐蝕，提升裝置之耐久度。此外，由圖 19 及圖 20 可觀察到不鏽鋼護板上開有許多規律孔洞，主要目的係藉由孔洞之存在，使滲透管於輸送、滲漏氧化劑時，氧化劑液體可藉由孔洞而向外直接接觸土壤，不致使因為不鏽鋼護板於外而影響氧化劑於土壤孔隙介質之傳輸。



現地緩釋滲流化學氧化整治未飽和層土壤殘留相氯化有機物消弭地下水長期污染潛勢

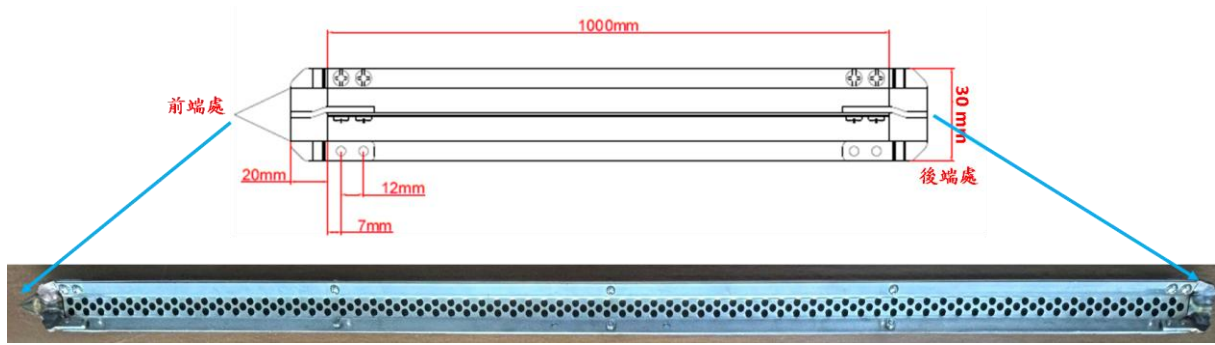


圖 19、滲透管緩釋灌注系統實驗裝置設計圖及照片。

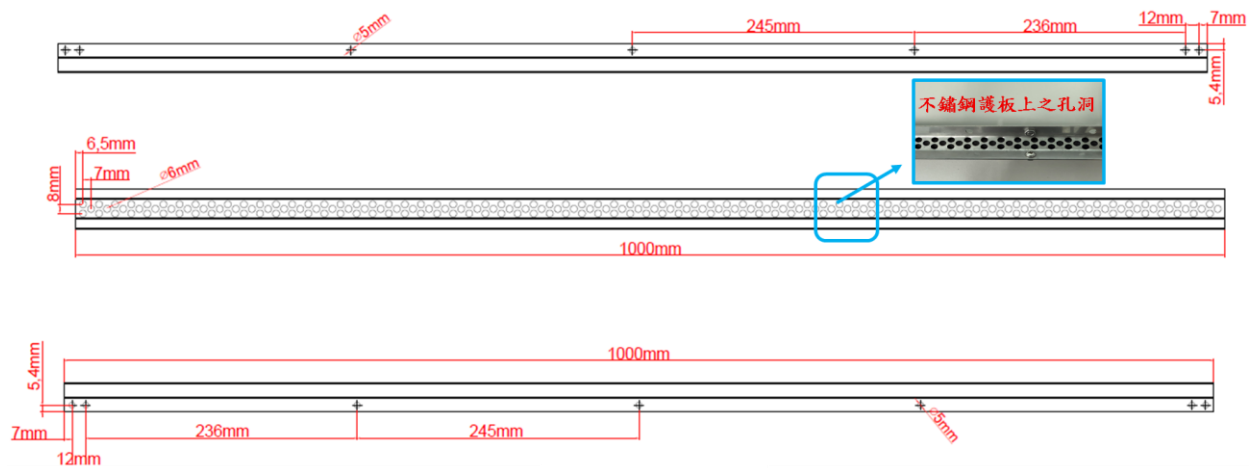


圖 20、滲透管緩釋灌注系統之不鏽鋼護板設計圖及實體照片。



現地緩釋滲流化學氧化整治未飽和層土壤殘留相氯化有機物消弭地下水長期污染潛勢

進一步於圖 21 呈現滲透管緩釋灌注系統之細部零件構造設計及實體照片，細部零件同其他裝置之材質選用 304 不鏽鋼製作，其細部零件可分前後端蓋構造，前後端蓋皆具有一插梢設計供滲透管插入固定使用。前端蓋功能主要為固定四片不鏽鋼板護板之前端固定板，另尖口端設計係輔助裝置設置於土壤時，較易插入土壤；後端蓋功能則為固定四片不鏽鋼護板之後端固定板及銜接由蠕動幫浦系統送至裝置之氧化劑液體接口處。

根據研究計畫書之規劃及上述之結果，研究團隊已於預定進程內完成滲透管緩釋灌注系統設計，並藉由專業廠商協助修正調整及焊接製作。經初步組裝測試，滲透管緩釋灌注系統之不鏽鋼組件於組合後可順利將滲透管穿入於其中，並以適當之水壓送水至滲透管中，滲透管可有效發揮其滲漏之功能。因此基於本節之成果，研究團隊進一步規劃機電控制系統之設計及組裝，以利銜接滲透管及自動機電控制兩系統之運作。

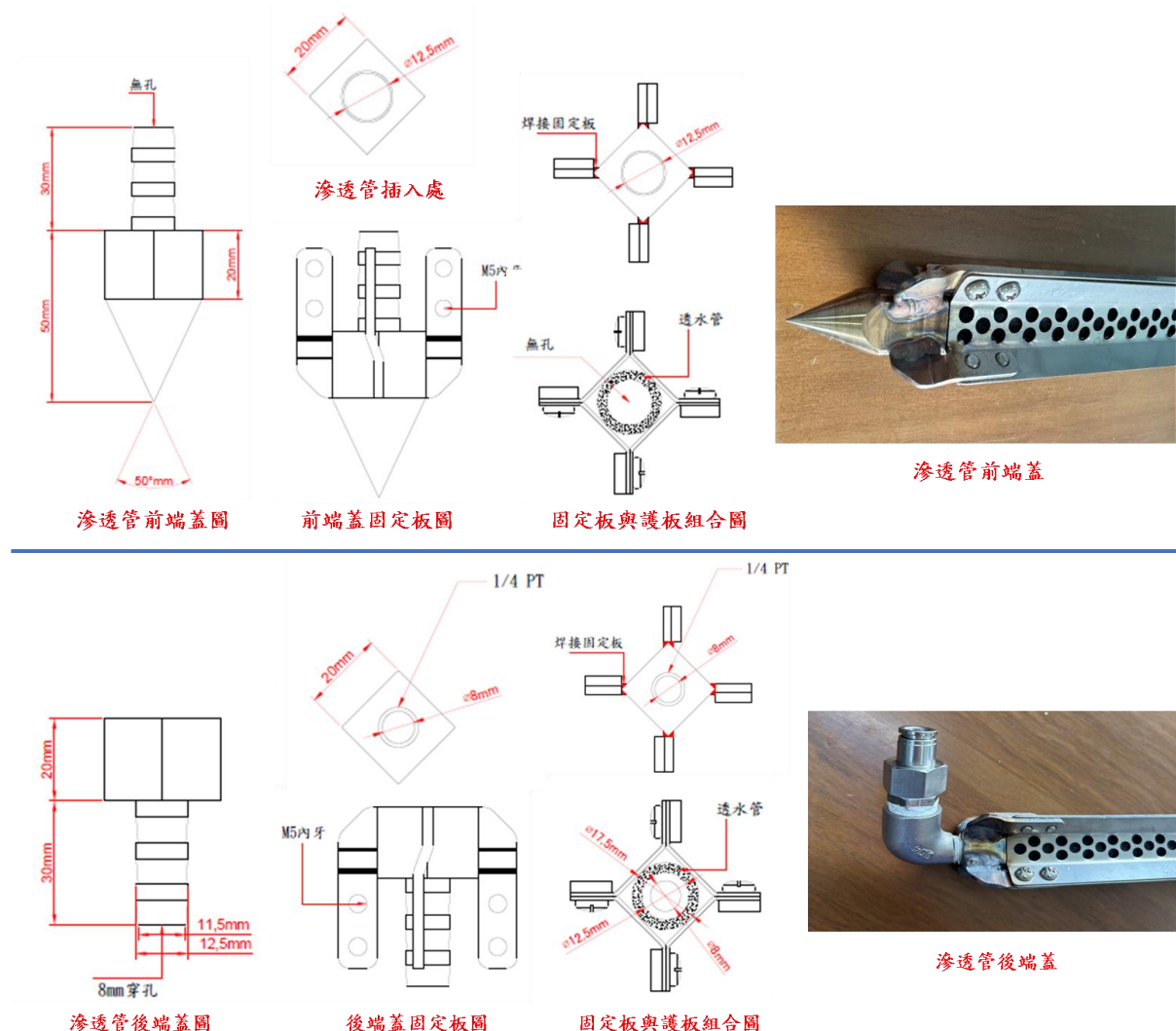


圖 21、滲透管緩釋灌注系統之細部零件構造圖及照片。



現地緩釋滲流化學氧化整治未飽和層土壤殘留相氯化有機物消弭地下水長期污染潛勢

5.2 機電控制系統設計及組裝

5.1 節設計完成之滲透管緩釋灌注系統需進一步銜接機電控制系統，以操作 ISCO 過硫酸鈉氧化劑溶液於滲流管之滲流頻率、流速、流速壓力等參數進行整治作業，因此 5.2 節說明機電控制系統設計及組裝情形。本計畫針對以滲透管滲流氧化劑處理未飽和層土壤，除滲透管緩釋灌注系統外，尚需建置一套具時序控制與流量調節功能之機電控制系統。因此本研究計畫所使用之機電控制系統係由人機系統設備與蠕動馬達整合箱組成，其中人機系統內建有定時電控閥門模組，可依設定程序自動啟閉以控制滲流頻率與時段，並結合可程式邏輯控制器 (Programmable logic controller, PLC)，用以整合操作流程並具備監控與數據記錄功能，而蠕動馬達整合箱則負責穩定輸送 ISCO 過硫酸鈉氧化劑溶液。

人機系統設備

圖 22 為人機系統設備外觀照片，其尺寸大小為 60 cm × 50 cm × 20 cm 之立體結構。於機體左側設置兩個銜接口，分別銜接蠕動馬達整合箱和氧化劑儲存槽內之浮球，以控制蠕動馬達之運轉，並避免因儲存槽內液面過低造成抽水馬達空轉之情形；機體右側則設立一個 110V 之插座，提供抽水馬達電源並於上方配置其控制開關，因此當蠕動馬達整合箱與抽水馬達接入人機系統設備後，即可透過該系統進行統一控制。此外，人機系統設備另設有觸控螢幕，供使用者設定與記錄滲流管之滲流/等待時間及滲流流速等參數。



圖 22、人機系統設備外觀照片



現地緩釋滲流化學氧化整治未飽和層土壤殘留相氯化有機物消弭地下水長期污染潛勢

圖 23 為計畫主持人與設備製造廠商商討軟體設計之照片，透過雙方溝通將本研究計畫所需功能及操作邏輯納入考量，並最終達成人機系統設備之操作軟體設計。其軟體介面設計如表 3 所示，觸控面板於首頁顯示有系統設定、警報、即時數據和遠端設定四大項目，下方則設有國旗圖示作為語言切換按鈕，且本系統支援繁體中文及英文兩種語言模式。首先在系統設定介面中，使用者可調整蠕動馬達之轉速，以達成所需灌注流量，且為方便操作，研究團隊將於後續校正蠕動馬達轉速與灌注流量之對照表提供參考。研究設備之蠕動馬達轉速範圍為 5~300 rpm，亦可設定灌注時間(最小 0 秒；最大 6553 秒)和等待時間(最小 3 秒(因切換灌注和停止之過程至少需 3 秒)；最大 6553 秒)，最後則可設定循環次數(最大 10 次)，上述參數可依據使用者需求進行設定。



圖 23、計畫主持人與設備製造廠商商討軟體設計之照片



現地緩釋滲流化學氧化整治未飽和層土壤殘留相氯化有機物消弭地下水長期污染潛勢

此外，系統內提供 No.1 至 No.10 之滲透管選擇功能，使每支滲透管均可獨立啟動。當完成參數設定並選定欲啟用之滲流管後，即可按下啟動鍵以開啟蠕動馬達運轉。於即時數據介面中，系統則會顯示 No.1 至 No.10 滲流管之開啟狀態，並記錄每次循環之開始與停止灌注時間，且以國家標準時間進行標註(year/month/day/hr/min/s)。當所有滲透管之灌注循環結束後，相關數據(含設定參數)將自動儲存至記憶卡中，提供使用者後續分析使用。於警報介面中設有抽水馬達過載和儲水桶低水位兩類警示，當警報觸發時，抽水馬達電源將自動關閉並跳出表 3 之警報視窗並閃爍紅燈。若因抽水馬達過載而觸發，則需打開人機系統設備進行復歸(復歸按鈕如圖 24 所示)，待紅燈停止閃爍，再重新開啟抽水馬達電源；若因儲水桶低水位而觸發，則需將儲水桶補滿並確認紅燈已經停止閃爍，方能將抽水馬達電源開啟。最後，為了方便使用者存取數據及緊急時之操作，因此系統亦具有遠端設定之功能，然考慮到系統當下運作之安全及操作權問題，遠端連線之權限須於現場設備上確認後方可開啟。

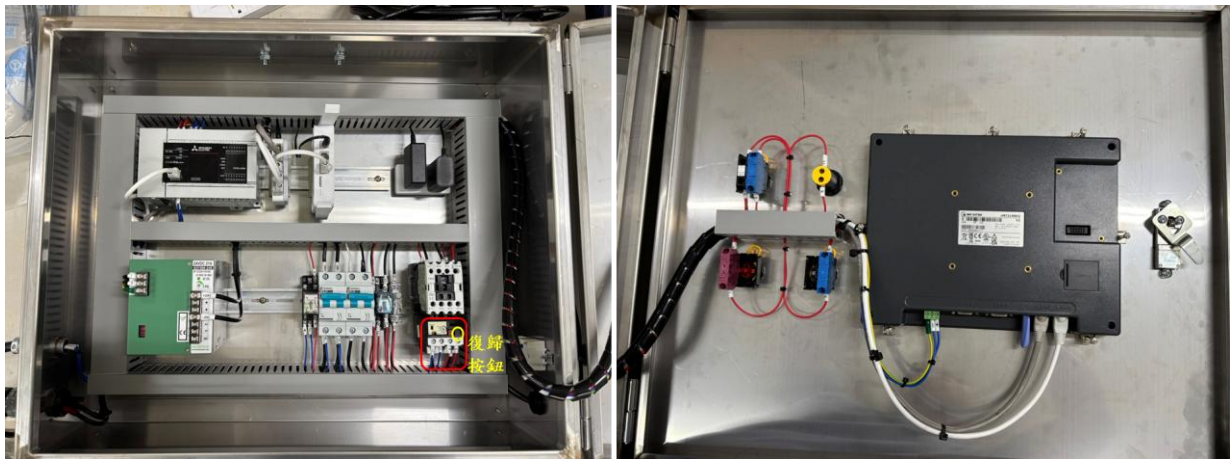


圖 24、人機系統設備內部照片



現地緩釋滲流化學氧化整治未飽和層土壤殘留相氯化有機物消弭地下水長期污染潛勢

表 3、人機系統設備觸控螢幕之介面

模式	中文版介面	英文版介面
首頁		
系統設定	 (No6.~No10.點選“下一頁”)	 (No6.~No10.點選“Next”)
即時數據 (No1. No5.)	 (循環次數 3~10 點選“下一頁”)	 (循環次數 3~10 點選“Next”)
即時數據 (No6. No10.)	 (循環次數 3~10 點選“下一頁”)	 (循環次數 3~10 點選“Next”)
警報		



現地緩釋滲流化學氧化整治未飽和層土壤殘留相氯化有機物消弭地下水長期污染潛勢

蠕動馬達整合箱

圖 25 為本研究計畫之機電控制系統中蠕動馬達整合箱之設計圖，其尺寸大小為 60 cm × 52 cm × 18 cm 之立體結構，並且外部設有 1 提把、1 處入流口(含壓力錶)、1 處溢流口及 10 處管線接口；內部則配置有 1 處溶液集中供應槽及 10 組蠕動馬達，其中，整合箱內部 10 組蠕動馬達進流端可分別自溶液集中供應槽汲取 ISCO 過硫酸鈉氧化劑溶液，且透過逆止閥之設置以防止溶液發生逆流現象而損傷設備；另 10 組蠕動馬達出流端分別連接 10 處管線接口，因此可使用 PU 管銜接 10 處管線接口並同時操作、控制 10 組滲透管緩釋灌注系統裝置(如圖 25 左側視圖中之滲透管緩釋灌注系統與蠕動馬達整合箱銜接示意圖所示)，達到範圍式土壤滲流作業，提升整治效率。

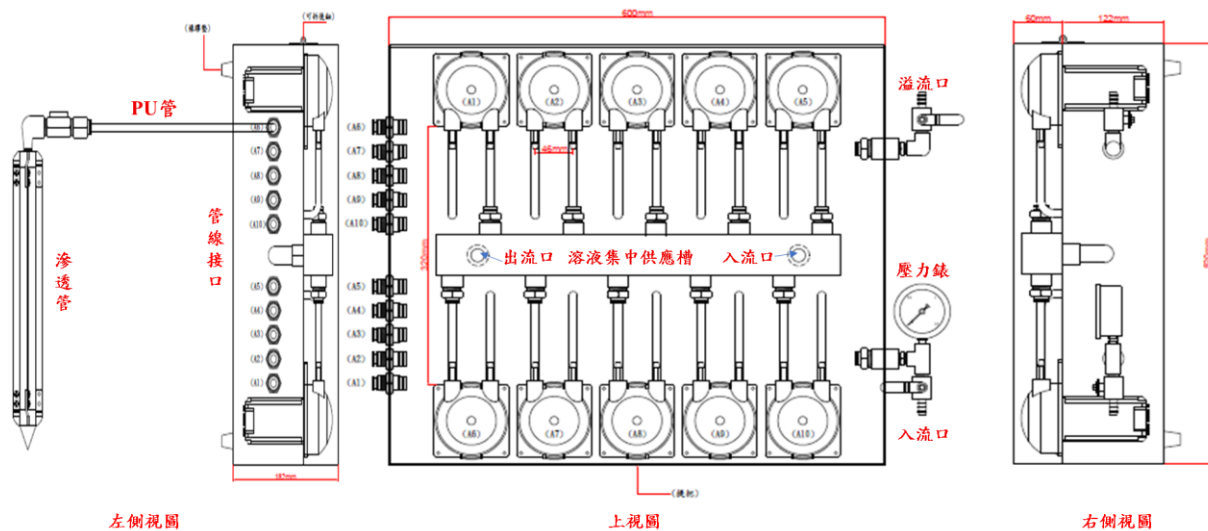


圖 25、機電控制系統蠕動馬達整合箱之設計圖



現地緩釋滲流化學氧化整治未飽和層土壤殘留相氯化有機物消弭地下水長期污染潛勢

圖 26 為計畫主持人於工廠訪視機電控制系統蠕動馬達整合箱設備建置情形，以確保設備製作可符合預期，圖 27 顯示機電控制系統蠕動馬達整合箱及其兩側照片，右側為入流口、溶液集中供應槽之壓力錶及溢流口以及人機系統設備之銜接口；左側為滲透管管線接口，由圖 28 可見，整合箱內之 10 組蠕動馬達均可獨立接收訊號，當蠕動馬達整合箱連接至人機系統設備，即可透過人機系統設備進行參數設定與開關控制。



圖 26、於工廠訪視機電控制系統蠕動馬達整合箱設備建置情形



左側視圖

上視圖

右側視圖

圖 27、機電控制系統蠕動馬達整合箱外觀照片
(左側為滲透管管線接口；右側為入流口、壓力錶、溢流口以及銜接口)



現地緩釋滲流化學氧化整治未飽和層土壤殘留相氯化有機物消弭地下水長期污染潛勢



圖 28、機電控制系統蠕動馬達內部構造

為確保本研究計畫製作之不同系統整合情形，將 5.1 節製作之 10 組滲透管與 5.2 節之蠕動馬達整合箱、人機系統設備以及抽水馬達銜接完成後進行之測試(如圖 29 所示)，並製作蠕動馬達轉速與灌注流量之對照表。於測試過程中可發現，開啟不同數量之蠕動馬達會影響灌注流量，此現象係因開啟馬達數量不同導致溶液集中槽之錶壓變化所致，而蠕動幫浦管線採用橡膠材質，易受壓力影響，為減少壓力對灌注流量之干擾，後續測試將設定錶壓固定於一定值。測試分別於同時開啟 1、5 及 10 支滲透管之情況下，設定轉速為 300、250、200、150、100、50、20、15、10 及 5 rpm 進行測試，因於轉速 300 rpm 且 10 支滲透管全開時所測得之最大壓力 6 psi，因此後續測試以 5 及 2.5 psi 作為固定值進行實驗。測試程序為：先於人機系統設備上完成參數設定並啟動，隨後將溶液集中槽之錶壓調整至 5 或 2.5 psi，並等待 1 分鐘以確保水流穩定，再開始進行流量測量。每組實驗皆進行三次重複，以確認數據之再現性與可靠性。測試結果如表 4 及表 5 所示，在滲透管同時開啟 1、5 及 10 支之情況下，所有轉速測得之誤差值皆小於 5%。將三組數據取平均後，可得到各轉速對應之灌注流量平均值，並繪製蠕動馬達轉速與灌注流量之關係圖(見圖 30 所示)。結果顯示，雖然 5 和 2.5 psi 皆呈高度線性關係，但於 2.5 psi 組別中，其關係式中的截距相對較大，即於較低轉速條件下選擇低壓力時，流量受其截距影響較大，導致在低轉速條件下代入計算時易產生較大之誤差，因此本計畫最終選擇 5 psi 作為溶液集中槽之固定壓力值。



現地緩釋滲流化學氧化整治未飽和層土壤殘留相氯化有機物消弭地下水長期污染潛勢



圖 29、滲透管與機電控制系統銜接測試



現地緩釋滲流化學氧化整治未飽和層土壤殘留相氯化有機物消弭地下水長期污染潛勢

表 4、溶液集中槽壓力為 5 psi 滲透管流量測試結果

轉速 (rpm)	滲透管開1支 (mL/min)	滲透管開5支 (mL/min)	滲透管開10支 (mL/min)	平均 (mL/min)	Error (%)
300	2482 ± 25	2324 ± 30	2004 ± 42	2270 ± 243	10.7
250	2015 ± 37	1911 ± 30	1767 ± 33	1897 ± 125	6.6
200	1554 ± 27	1512 ± 12	1454 ± 29	1507 ± 50	3.3
150	1144 ± 12	1117 ± 14	1084 ± 7	1115 ± 30	2.7
100	776 ± 13	783 ± 19	753 ± 10	771 ± 16	2.1
50	392 ± 3	392 ± 7	386 ± 10	390 ± 4	1.0
5	39 ± 1	37 ± 2	37 ± 2	37 ± 1	2.7

表 5、溶液集中槽壓力為 2.5 psi 滲透管流量測試結果

轉速 (rpm)	滲透管開1支 (mL/min)	滲透管開5支 (mL/min)	滲透管開10支 (mL/min)	平均 (mL/min)	Error (%)
300	2207 ± 12	2093 ± 23	1800 ± 0	2033 ± 210	10.3
250	1847 ± 12	1767 ± 31	1533 ± 23	1716 ± 163	9.5
200	1443 ± 23	1447 ± 23	1310 ± 10	1400 ± 78	5.6
150	1097 ± 21	1033 ± 12	1033 ± 12	1054 ± 37	3.5
100	730 ± 10	723 ± 6	713 ± 12	722 ± 8	1.1
50	363 ± 6	367 ± 12	357 ± 6	362 ± 5	1.4
5	36 ± 1	36 ± 1	35 ± 1	35 ± 1	2.9

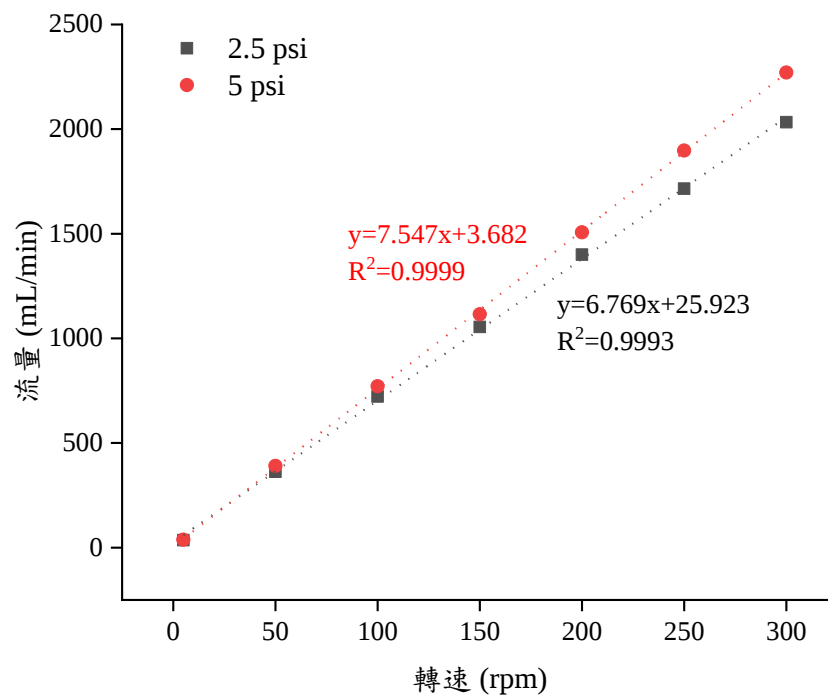


圖 30、蠕動馬達轉速與灌注流量之關係



現地緩釋滲流化學氧化整治未飽和層土壤殘留相氯化有機物消弭地下水長期污染潛勢

本研究計畫之設備係由滲透管緩釋灌注系統與機電控制系統(包含蠕動馬達整合箱與人機系統設備)所組成，其中機電控制系統亦涉及多道程序之設定，因此計畫團隊為使設備操作上更加直覺且安全，繪製圖 31 之機電控制系統標準操作流程(Standard Operating Procedures, SOP)以供參考。於圖 31 中，在開啟電源前，須先檢查蠕動馬達整合箱、抽水馬達電源及浮球是否正確接上人機系統設備。確認無誤後，即可開啟電源並啟動抽水馬達；接著需檢視蠕動馬達整合箱之溶液集中供應槽是否已充滿水，確認方式為開啟滲透管並觀察是否有水流聲；若有水流聲，可同時啟動 10 支滲透管以加速充滿，直至水流聲消失後，方可進入系統設定介面調整參數。系統設定包含以下五項參數：

- 轉速：依照灌注流量對照圖設定所需轉速。
- 灌注時間：最大可設定 6553 秒。
- 等待時間：最小 3 秒(因切換灌注與停止至少需 3 秒)，最大 6553 秒。
- 循環次數：最大 10 次。
- 確認灌注參數並選擇欲開啟之滲流管(ON)

完成設定後，按下「啟動」鍵，並將溶液集中槽錶壓調整至 5 psi。運作過程直至所有循環完成，系統需等待約 15 秒以自動儲存操作參數與數據，方可取下隨身碟或進行下一次操作。若過程中出現儲水桶低水位或抽水馬達過載之警報，須先排除問題，再重新開啟抽水馬達電源，並確認設定參數無誤後，方可再次啟動滲透管灌注系統。



現地緩釋滲流化學氧化整治未飽和層土壤殘留相氯化有機物消弭地下水長期污染潛勢

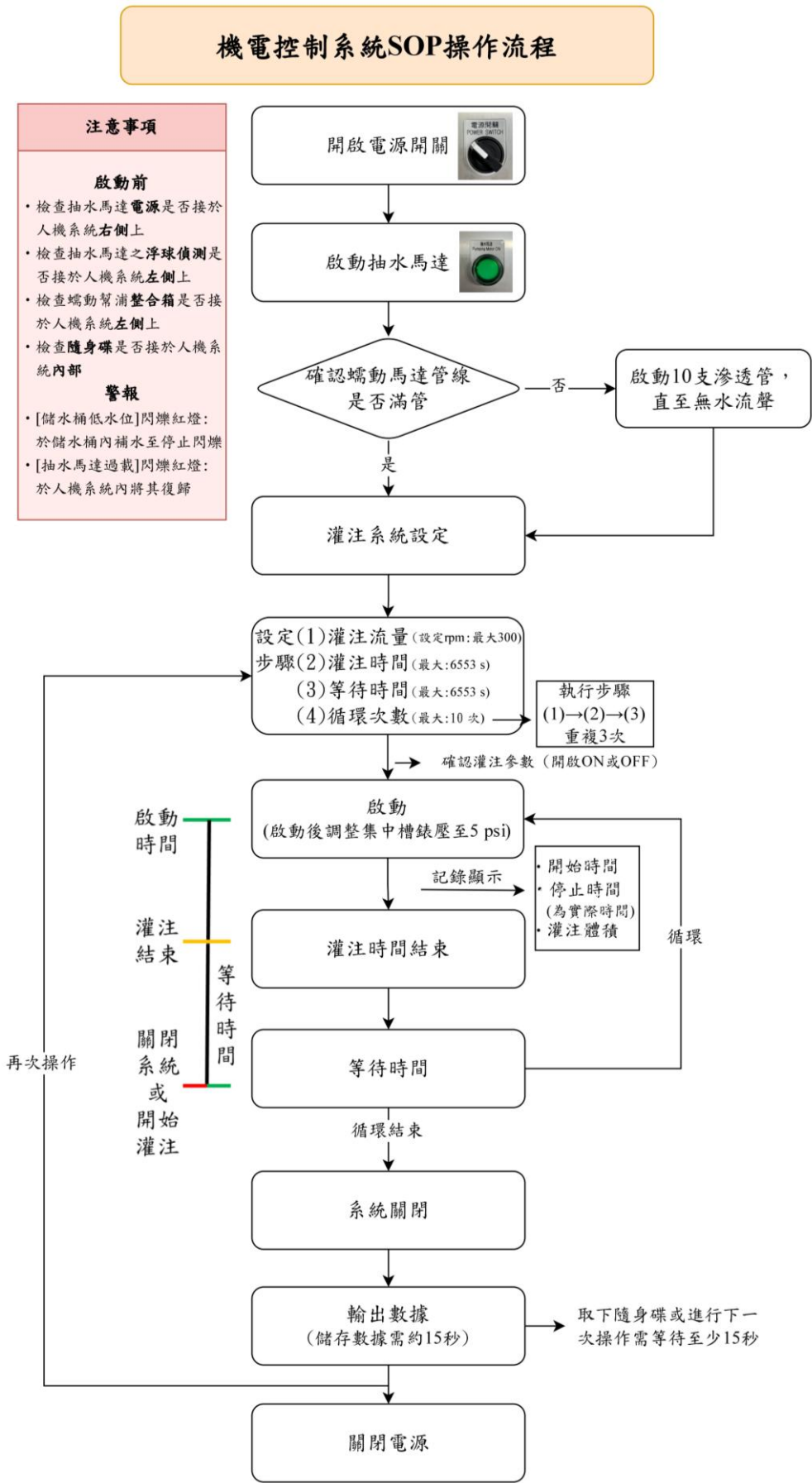


圖 31、機電控制系統 SOP 操作流程圖



現地緩釋滲流化學氧化整治未飽和層土壤殘留相氯化有機物消弭地下水長期污染潛勢

5.3 含水率監測系統設計及組裝

本研究計畫於執行現地緩釋滲流化學氧化整治未飽和層土壤殘留相氯化有機物時，為精確掌握未飽和層土壤中氧化劑滲流行為與水分動態，因此選定加拿大 Riot Technology Corp. 開發之 GroPoint Profile 多層式土壤含水率監測探針作為主要含水率監測設備(GroPoint Profile 多層式土壤含水率監測探針如圖 32 所示)。GroPoint Profile 具備多項技術優勢，特別適用於本研究所需之高解析度、低干擾性與長期穩定監測需求。GroPoint Profile 商品化尺寸為 3.5 cm 至 120 cm，共計有 6 種長度提供選擇，本計畫擬採購長



圖 32、GroPoint Profile 多層式土壤含水率監測探針。

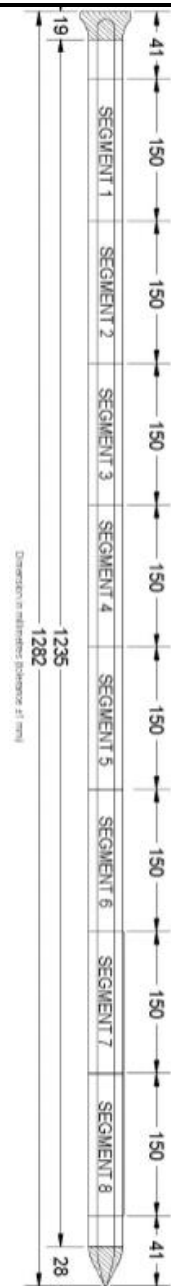
度為 120 cm 之監測探針，目的在於涵蓋表層至中層土壤之多深度水分分布狀況，實現對未飽和層整體水分傳輸過程的連續監控與剖面解析。如圖 32 所示，GroPoint Profile 探針採用專 TDT5 (Time Domain Transmission) 技術，能有效降低土壤電導度與質地變異對測量結果的影響，提供高精度的體積含水率(Volumetric water content, VWC)與土壤溫度資料，其規格如表 6 所示，並於表格右側呈現此探針之感測器分布，每段長度為 15 cm，可於每段內平均測量該深度範圍之含水率，避免傳統點位式感測所產生的單一點位誤差問題，因此該項設計適合於本研究有效評估氧化劑於不同深度之傳輸與反應行為。此外，GroPoint Profile 探針具備 SDI-12 與 RS-485 等數位通訊介面，便於與本計畫所購置之無紙式紀錄器之資料記錄與遠端監控系統整合。其低功耗特性亦適用於長期配置與偏遠場址之自動化監測需求。探針整體採用環氧樹脂封裝，具備優異的耐候性與抗腐蝕能力，適合於本計畫場址之氧化劑條件及多變環境條件下長期使用。



現地緩釋滲流化學氧化整治未飽和層土壤殘留相氯化有機物消弭地下水長期污染潛勢

表 6、GroPoint Profile 多層式土壤含水率監測探針之規格

濕度 (Moisture)	
測量範圍	0% 至 100% 體積含水率
準確度	$\pm 2.0\%$
精確度	$< \pm 0.2\%$
溫度 (Temperature)	
測量範圍	-20°C 至 70°C
準確度	$\pm 0.5^{\circ}\text{C}$
環境條件 (Environmental)	
操作溫度	-20°C 至 70°C
儲存溫度	-40°C 至 85°C (限探針)
物理特性 (Physical)	
長度	每個段落長度約 15 公分。 總長度=段數 $\times$ 15 公分。
探針重量	642 g
溫/濕度感測點	8 段探針：15 公分、30 公分、45 公分、60 公分、75 公分、90 公分、105 公分、120 公分，總長 120 公分





現地緩釋滲流化學氧化整治未飽和層土壤殘留相氯化有機物消弭地下水長期污染潛勢

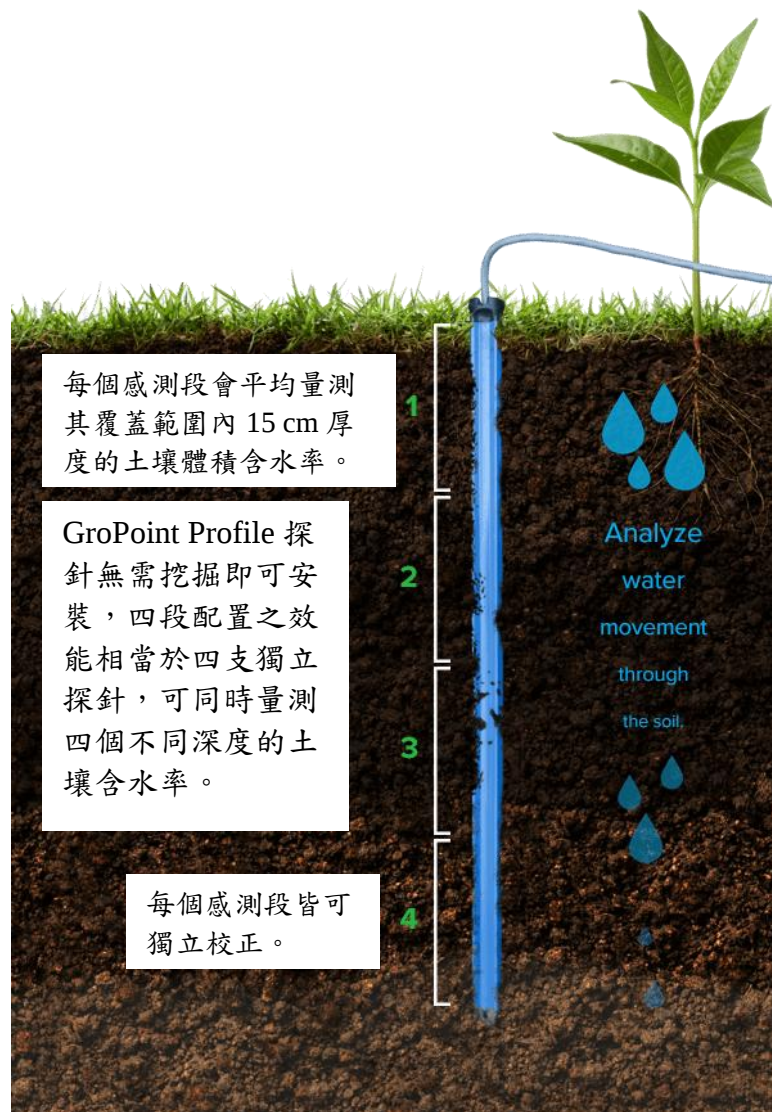


圖 33、GroPoint Profile 探針於土壤設置與監測示意圖。

含水率監測系統配置與安裝方面可參考圖 33，可將 GroPoint Profile 探針埋入土壤中進行監測，GroPoint Profile 探針可透過專用導向桿與滑鉋工具或自行以器具挖掘達快速垂直埋設，無需額外填充泥漿等物質，減少對土壤結構的擾動，並縮短感測器與土壤之間的穩定期，提升數據可靠性。此特性對於本計畫需頻繁調整滲流參數與進行多次施作的整治場址而言，提供操作之彈性與效率。綜上所述，GroPoint Profile 探針之高解析度、多層次監測能力、環境適應性與便利之安裝方式，符合本研究計畫對於未飽和層土壤水分動態監測之需求，將有助於提升滲透管緩釋滲流系統整治技術之成效評估與優化。圖 34 為土壤含水率偵測系統之各模組接線圖，當需要進行測量時，可將 RS485 轉換器與 GroPoint Profile 探針連接(如圖 35 所示)，即可將探針所偵測之數值呈現於無紙記錄器上，該記錄器可



現地緩釋滲流化學氧化整治未飽和層土壤殘留相氯化有機物消弭地下水長期污染潛勢

即時顯示數據，且能夠以曲線圖、長條圖或表格等方式呈現歷史數據(圖 35 呈現方式為表格)，所測量的數據可以儲存至支援 FAT32 之記憶卡，並透過電腦軟體進行後續分析。表 7 為無紙紀錄器之規格，本研究計畫選用之通道數為 16 通道，其中 CH-01 至 CH-08 用於呈現土壤含水率，CH-09 至 CH-16 則用於呈現溫度，此外，該記錄器內建電池，於斷電後可持續供電，電池有效時間超過 30 天，所有數據均儲存於記憶體中，確保所有歷史數據和配置參數不會因斷電而遺失。

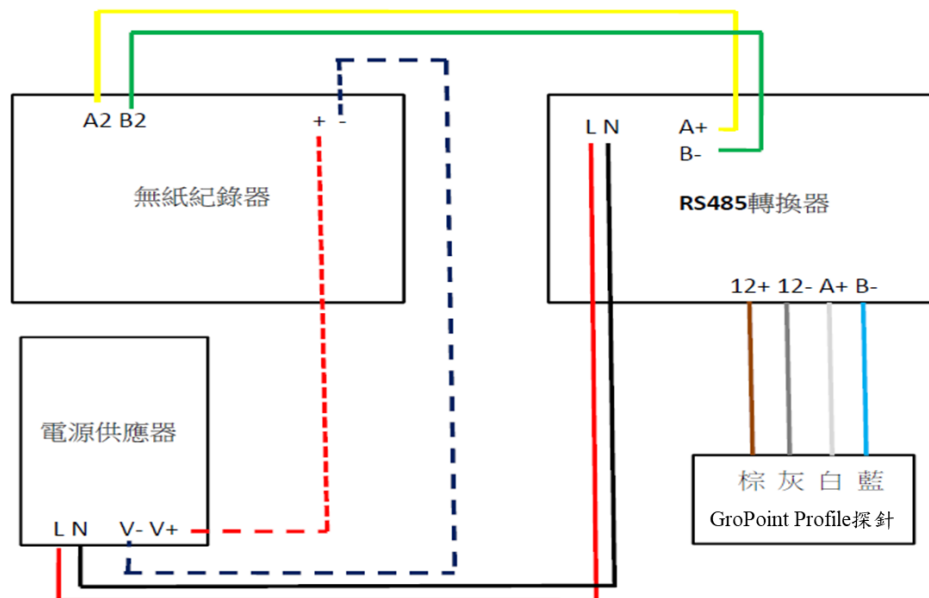


圖 34、含水率監測系統各模組接線圖



圖 35、土壤含水率監測系統照片



現地緩釋滲流化學氧化整治未飽和層土壤殘留相氯化有機物消弭地下水長期污染潛勢

表 7、無紙紀錄器之規格

項目	說明
輸入通道數	8、16、24、32、40 通道 (可選)
輸入型式	熱電偶、RTD、mV、V、mA 等通用輸入
通訊方式	RS485 (Modbus-RTU)、 乙太網路 (Modbus-TCP/IP)
資料型態	32-bit 單精度浮點、64-bit 雙精度浮點
供電電源	100–240VAC (47–63Hz)，或 24VDC
功率消耗	約 25W
顯示螢幕	7 吋彩色 TFT 液晶觸控螢幕
記憶體	內建 Flash 記憶體(128–256 Mbit)，無須備援電池
USB 儲存	支援 8G、16G、32G (FAT32 格式)
實時時鐘	內建電池，斷電後可持續供電超過 30 天
使用環境	溫度 0~50°C，相對濕度 0~85% (無凝結)

土壤含水率監測系統之操作流程為：先將電源供應器、無紙記錄器及 RS485 轉換器依序串接，並與 GroPoint Profile 探針連接，接上電源後無紙記錄器即自動啟動，操作步驟如表 8 所示。完成量測後，插入記憶卡即可進行數據輸出，輸出過程隨身碟會閃爍紅燈，並於螢幕上方顯示「儲存資料...%」之進度條，同時隨身碟中會產生一個「.DAT」格式之檔案，其命名方式依照「年份/月份/日期」，當螢幕顯示「OK」且記憶卡停止閃爍後，為確保資料完整傳輸，仍須等待約 5~10 秒再將隨身碟取出。最後，將記憶卡中之 .DAT 檔案匯入電腦，作為後續數據分析之依據。



現地緩釋滲流化學氧化整治未飽和層土壤殘留相氯化有機物消弭地下水長期污染潛勢

表 8、無紙記錄器操作步驟

操作步驟	操作畫面
點選「Menu」進入主畫面	
點選「Configuration」進入系統設置	
輸入密碼，點選 OK (密碼為 00000000)	
點選「SYSTEM」進入參數設定	
點選「Rec-Intv」 設定記錄時間間隔，範圍 1~3600 秒	



現地緩釋滲流化學氧化整治未飽和層土壤殘留相氯化有機物消弭地下水長期污染潛勢

本研究計畫使用之土壤含水率探針，於出廠時各感測均已完成獨立校正，並針對圖 36 不同土壤質地所標註紅色區域中各種土壤類型進行校正，藉以確認此探針可適用於大多數土壤環境。其規格表標示量測範圍為體積含水率 0~100%。然而，根據廠商技術文件指出，GroPoi Profile 探針主要設計用於體積含水率在 45%左右的無機土壤，當體積含水率超過 41%時，感測器的精確度會開始下降，最大讀值約為 55~60%，因此體積含水率高於該範圍或孔隙率高之環境較不適合使用此探針。為了驗證此條件狀況，本研究團隊將探針完全浸入水中，讀值停留於約 58%，顯示超過該區間後數值已不再隨水分增加而變化，接著為驗證此探針之準確性，將探針插入半徑 8 公分高 80 公分之圓柱桶中，測試不同含水量之石英砂介質，經計算 1050 毫升或 3500 毫升之水量理論會分別影響石英砂介質中 15 公分或 50 公分之含水率，測試結果如圖 37 所示，結果顯示於理論水位上升 15 公分之組別，僅有 CH-08(約 11 公分處)有測得數值，而於理論水位上升 50 公分之組別，可於 CH-08、CH-07 和 CH-06 皆測得數值，CH-08 及 CH-07 之讀值約為 43.5%，為飽和狀態，因前述所述當體積含水率超過 41%時，感測器的精確度會開始下降，因此僅顯示 43.5%，而 CH-06 受毛細力之讀值為 23%，因此綜合以上結果，雖然規格表形式上涵蓋 0~100%，但實際應用時應以 0~41%為最佳精度範圍，並將 55~60%視為感測器之最大上限值，因此本研究計畫後續含水率監測與數據分析皆以 0~41%之範圍作為主要參考區間，以確保量測結果之精度與可靠性。



現地緩釋滲流化學氧化整治未飽和層土壤殘留相氯化有機物消弭地下水長期污染潛勢

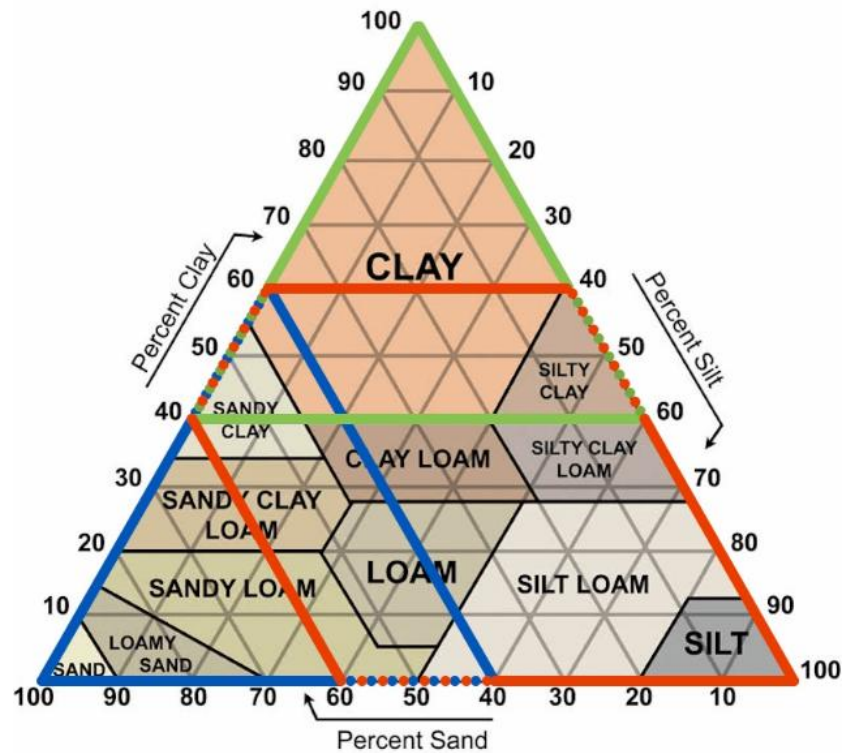


圖 36、土壤質地三角座標圖

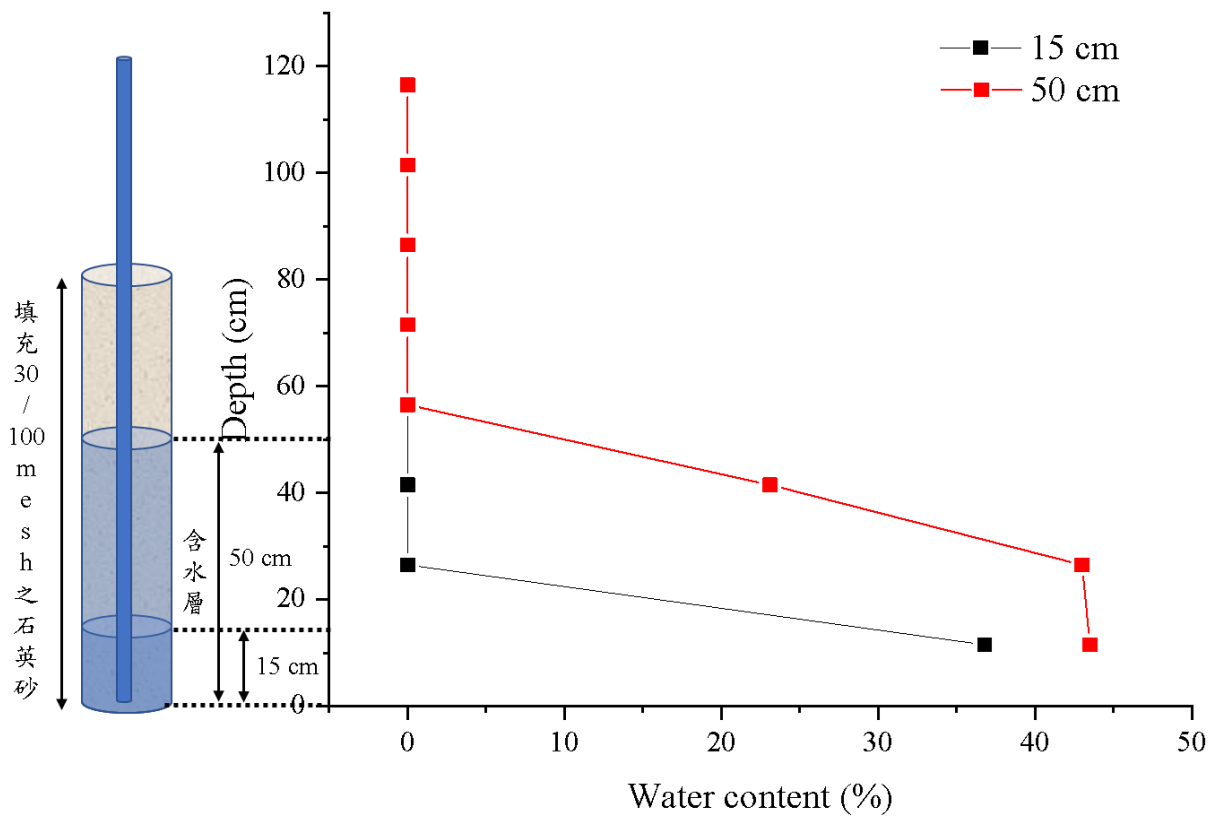


圖 37、土壤含水率探針於不同飽和含水區域之石英砂介質測試結果



現地緩釋滲流化學氧化整治未飽和層土壤殘留相氯化有機物消弭地下水長期污染潛勢

5.4 現地土壤場域機電控制系統、滲透管緩釋灌注系統及含水率監測系統運作試車 (中興大學現地試驗場地)

5.1 節至 5.3 節完成組裝之滲透管緩釋灌注系統、機電控制系統以及含水率監測系統需整合並進行運作試車，本研究計畫選擇之試車場地為中興大學土木環工大樓前(如圖 38 所示)。首先於試驗位置進行鑽孔，而後將滲透管置入土壤中，隨後將滲透管接上機電控制系統即可控制其灌注流量及灌注頻率。



圖 38、中興大學校園平面示意圖



現地緩釋滲流化學氧化整治未飽和層土壤殘留相氯化有機物消弭地下水長期污染潛勢

試驗場地之佈點如圖 39 所示，於 $7.5\text{ m} \times 6\text{ m}$ 範圍內，以每隔 1.5 公尺繪製網格，並於其中設置 10 支滲透管，隨後於設置位置進行鑽孔，以利滲透管能夠插入土壤中，鑽孔方式選擇油壓式鑽入配合手動鑽入採樣(如圖 40 所示)，操作程序為，利用油壓式鑽入進行採樣，其係於雙套管採樣器(Dual tube soil sampler)上方接上油壓動力裝置(如圖 41 所示)，藉由機械原理將油壓轉換成動能，產生更大的力量破碎混凝土或其他材質，當深度無法再進一步推進時，則改以手動破碎及鑽入方式，直至達到目標深度，本研究計畫預期鑽入 1 公尺深，但由於試驗場址之 0 至 1.1 公尺之土層屬於營建廢棄物回填(如圖 42 所示)，僅能鑽約至 50 公分即無法再向下。

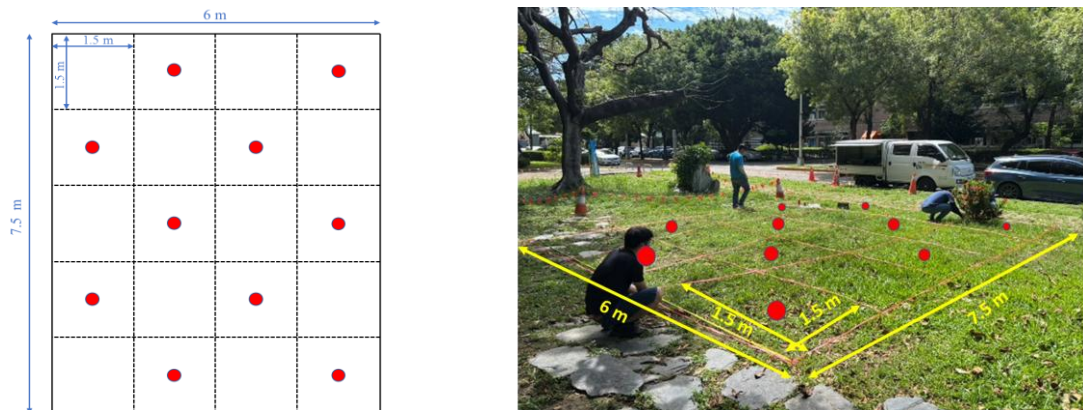


圖 39、試驗場地佈點規劃及丈量



圖 40、現場施作照片
(左圖為油壓式鑽入；右圖為手動式鑽入)



現地緩釋滲流化學氧化整治未飽和層土壤殘留相氯化有機物消弭地下水長期污染潛勢



圖 41、油壓動力裝置及其操作過程



圖 42、試驗場址挖出之回填物



現地緩釋滲流化學氧化整治未飽和層土壤殘留相氯化有機物消弭地下水長期污染潛勢

現地緩釋滲流系統安裝位置與分佈圖如圖 43 所示，並於試驗場地進行實地操作，操作流程為：先將儲水桶注入水並放置抽水馬達，將抽水馬達電源及浮球偵測接上人機系統設備，再連接人機系統設備與蠕動馬達整合箱以及滲透管緩釋灌注系統之所有管線，最後於人機系統設備上輸入欲操作之參數並按下啟動即完成現地緩釋滲流系統之操作。

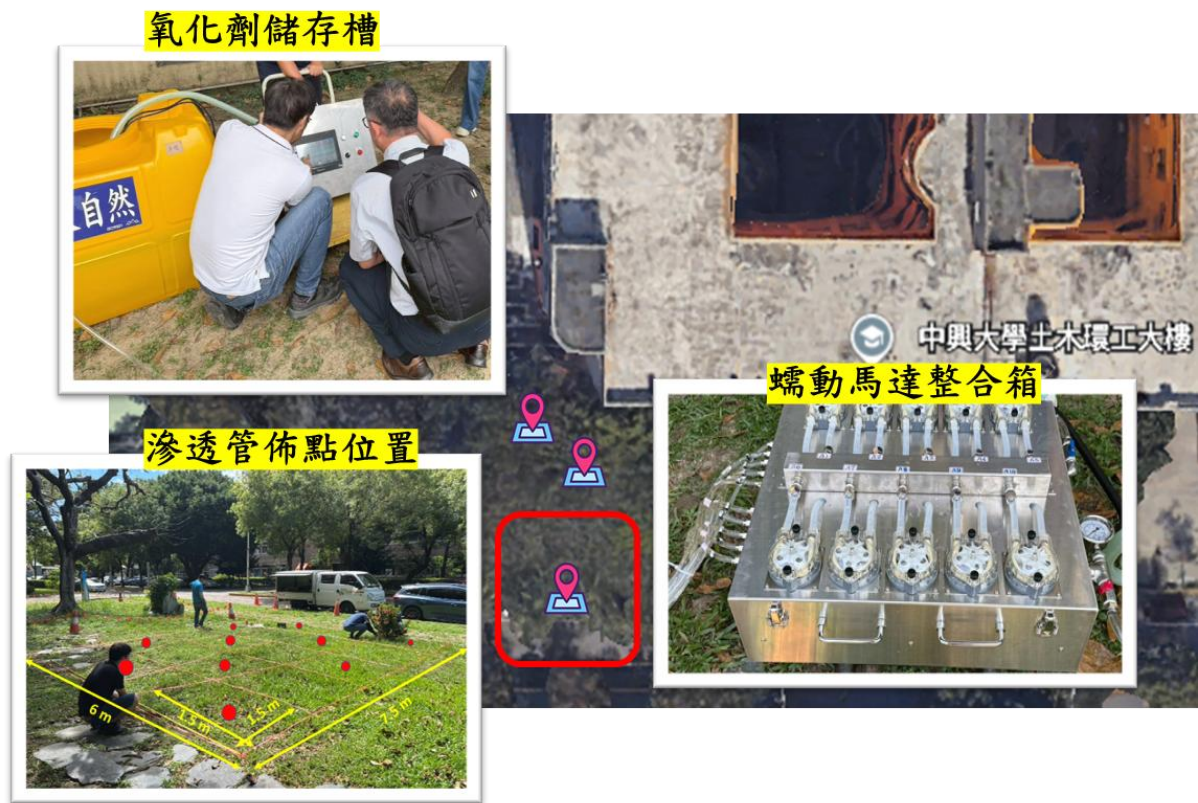


圖 43、現地緩釋滲流系統安裝位置與分佈圖



現地緩釋滲流化學氧化整治未飽和層土壤殘留相氯化有機物消弭地下水長期污染潛勢

5.5 氧化劑溶液灌注操作條件 Hydrus 軟體模擬

本研究計畫執行現地緩釋滲流化學氧化整治未飽和層土壤殘留相氯化有機物時，為結合現地滲透管滲流 ISCO 過硫酸鈉氧化劑溶液實驗與含水率監測資料，以提升本研究對未飽和層水分傳輸與氧化劑擴散行為之理解與預測能力，研究團隊規劃於後續階段導入 Hydrus 模擬軟體進行土壤含水率變化與水流模式之數值模擬。

Hydrus 模擬軟體為一套廣泛應用於環境工程、水文地質與農業工程領域的土壤水分與溶質運移模擬工具，主要開發者為捷克布拉格捷克科學院。Hydrus 模擬軟體可模擬一維至三維的水分與溶質在飽和與未飽和多孔介質中的流動行為，並內建多種土壤水力特性模型，可根據現地實測或文獻數據進行參數設定，具備良好的模組彈性與適用性。本研究預計採用 Hydrus-3D 模組，分別模擬垂直與橫向滲流狀況，以搭配 GroPoint Profile 探針所提供之多深度含水率數據，進行模型校正與驗證。藉由模擬結果，將有助於推估 ISCO 過硫酸鈉氧化劑溶液在不同滲流參數下之傳輸速率、反應區域範圍及潛在殘留區塊，提供更具科學依據之整治作業調整建議。選用 Hydrus 模擬軟體之主因，在於其已被廣泛應用於污染場址風險評估、修復設計與土壤水文研究，具備可靠性高、技術文獻完整及操作靈活等優點。相較於其他商用軟體，Hydrus 模擬軟體可同時支援多物理耦合過程的模擬，適用於評估 ISCO 過硫酸鈉氧化劑溶液於未飽和層中之動態行為，應可進一步處理本研究計畫關注之土壤水分分布對污染擴散與氧化反應效率之影響，預期可提升本研究計畫整治施作策略之預測準確性與量化程度。

為了探討灌注體積、灌注流量、灌注頻率以及滲透管數量對土壤水分滲流分布之影響，本研究計畫以 HYDRUS 軟體進行模擬(如表 9 所示)，共設計 48 組模擬條件，模擬結果如表 10 至表 17 所示，其中，表 10 至表 13 為單支滲透管於各種灌注條件下之模擬結果；表 14 至表 17 為雙支滲透管於相同條件下之模擬結果。綜合模擬結果可歸納以下幾點結論：

1. 單支滲透管

- 相同灌注體積、灌注流量和灌注時間(1)：停留時間(1)下，脈衝式灌注(循環次數 5 次和 10 次)與直接灌注(循環次數 1 次)相比，前者之土壤水分分布較為均勻，顯示脈衝式操作有助於水分擴散。
- 當灌注時間(1)：停留時間(100)時，水分分布範圍較廣；而灌注時(1)：停留時間(1)時，水分分布則較集中。
- 當灌注流量分別為 0.05 L/min 與 0.07 L/min 且灌注時間(1)：停留時間(1)時，兩者之水分分布差異不大。
- 當灌注流量分別為 0.05 L/min 與 0.07 L/min 且灌注時間(1)：停留時間



現地緩釋滲流化學氧化整治未飽和層土壤殘留相氯化有機物消弭地下水長期污染潛勢

(100)時，整體水分分布無明顯變化，但在相同分布範圍內，流量 0.07 L/min 之土壤含水率略高於 0.05 L/min。

2. 雙支滲透管

- 整體變化趨勢與單支滲透管相似：在相同灌注體積、灌注流量與灌注時間(1)：停留時間(1)條件下，脈衝式灌注(5 次及 10 次)與直接灌注相比，分布差異不大，脈衝式灌注之水分分布相對較均勻。
- 當灌注時間(1)：停留時間(100)時，水分分布範圍較廣；而灌注時(1)：停留時間(1)時，水分分布則較集中。
- 當灌注流量分別為 0.05 L/min 與 0.07 L/min 且灌注時間(1)：停留時間(1)時，兩者之水分分布差異不大。
- 然而，於灌注時間(1)：停留時間(100)條件下，雙支滲透管組別並未出現與單支組別相同之現象，顯示在雙支滲透管配置下，灌注流量對水分分布之影響相對較小。



現地緩釋滲流化學氧化整治未飽和層土壤殘留相氯化有機物消弭地下水長期污染潛勢

表 9、HYDRUS 軟體模擬不同操作條件對土壤水分滲流分布變化之規畫表

灌注體積	灌注流量	灌注頻率	滲透管數量
25%PV	0.05 L/min · m	1 cycle	1
		$t_p/1t_{np}$	
50%PV	0.07 L/min · m	5 cycle	
		$t_p/100t_{np}$	2
		10 cycle	

註：模擬灌溉體積為長 750 cm 深 350 cm，總灌注體積=750 cm × 350 cm × 0.3 = 78750 cm³

模擬灌注體積 19688 cm³ = 25%總灌注體積

模擬灌注體積 39375 cm³ = 50%總灌注體積

模擬滲透管為直徑 1.7 cm，深 100 公分，總表面積為 534 cm²

灌注流量 0.05 L/min = 模擬流速 0.09 cm/min = $\frac{0.05 \text{ L}}{\text{min}} \times \frac{1000 \text{ cm}^3}{1 \text{ L}} \times \frac{1}{534 \text{ cm}^2}$

灌注流量 0.07 L/min = 模擬流速 0.13 cm/min = $\frac{0.07 \text{ L}}{\text{min}} \times \frac{1000 \text{ cm}^3}{1 \text{ L}} \times \frac{1}{534 \text{ cm}^2}$

t_p 為灌注時間， t_{np} 為停止灌注時間，1 $t_p=1 t_{np}$

一循環灌注方式為 $t_p \rightarrow t_{np}$ ，一循環之 $t_p = \frac{\text{模擬灌注體積}}{1 \times \text{灌注流量} \times \text{滲透管數量}}$

五循環灌注方式為 $t_p \rightarrow t_{np} \rightarrow t_p \rightarrow t_{np} \rightarrow t_p \rightarrow t_{np} \rightarrow t_p \rightarrow t_{np} \rightarrow t_p \rightarrow t_{np}$ ，五循環之 $t_p = \frac{\text{模擬灌注體積}}{5 \times \text{灌注流量} \times \text{滲透管數量}}$

十循環以此類推



現地緩釋滲流化學氧化整治未飽和層土壤殘留相氯化有機物消弭地下水長期污染潛勢

表 10、單支滲透管 HYDRUS 軟體模擬結果 (灌注流量 0.05 L/min；灌注體積 0.25 PV)

模擬條件	模擬結果	含水率顏色 對照表
灌注體積 0.25 PV 灌注流量 0.05 L/min 循環次數 1 cycle 灌注時間：停留時間=1：1		 0.430 0.390 0.360 0.330 0.300 0.270 0.240 0.210 0.180 0.150 0.120 0.091 Max: 0.430 Min: 0.091
灌注體積 0.25 PV 灌注流量 0.05 L/min 循環次數 1 cycle 灌注時間：停留時間=1：100		
灌注體積 0.25 PV 灌注流量 0.05 L/min 循環次數 5 cycle 灌注時間：停留時間=1：1		
灌注體積 0.25 PV 灌注流量 0.05 L/min 循環次數 5 cycle 灌注時間：停留時間=1：100		
灌注體積 0.25 PV 灌注流量 0.05 L/min 循環次數 10 cycle 灌注時間：停留時間=1：1		
灌注體積 0.25 PV 灌注流量 0.05 L/min 循環次數 10 cycle 灌注時間：停留時間=1：100		



現地緩釋滲流化學氧化整治未飽和層土壤殘留相氯化有機物消弭地下水長期污染潛勢

表 11、單支滲透管 HYDRUS 軟體模擬結果 (灌注流量 0.05 L/min；灌注體積 0.5 PV)

模擬條件	模擬結果	含水率顏色 對照表
灌注體積 0.5 PV 灌注流量 0.05 L/min 循環次數 1 cycle 灌注時間：停留時間=1：1		 0.430 0.390 0.360 0.330 0.300 0.270 0.240 0.210 0.180 0.150 0.120 0.091 Max: 0.430 Min: 0.091
灌注體積 0.5 PV 灌注流量 0.05 L/min 循環次數 1 cycle 灌注時間：停留時間=1：100		
灌注體積 0.5 PV 灌注流量 0.05 L/min 循環次數 5 cycle 灌注時間：停留時間=1：1		
灌注體積 0.5 PV 灌注流量 0.05 L/min 循環次數 5 cycle 灌注時間：停留時間=1：100		
灌注體積 0.5 PV 灌注流量 0.05 L/min 循環次數 10 cycle 灌注時間：停留時間=1：1		
灌注體積 0.5 PV 灌注流量 0.05 L/min 循環次數 10 cycle 灌注時間：停留時間=1：100		



現地緩釋滲流化學氧化整治未飽和層土壤殘留相氯化有機物消弭地下水長期污染潛勢

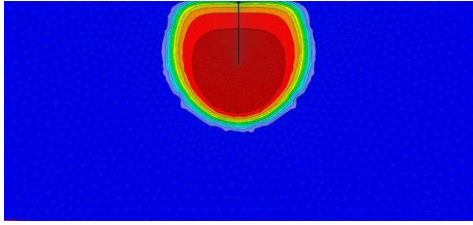
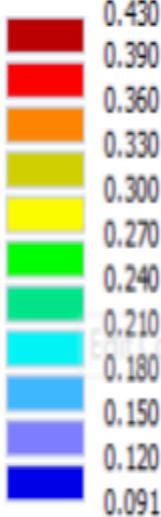
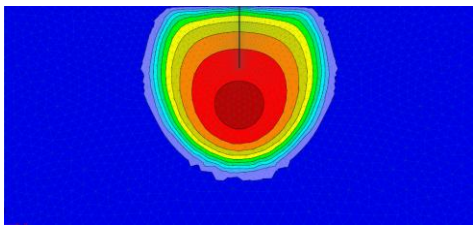
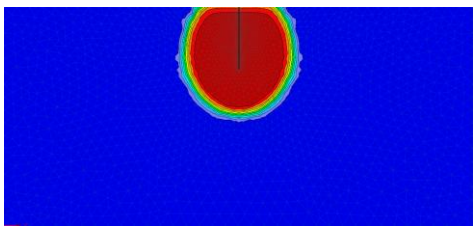
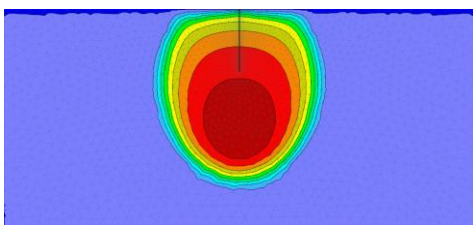
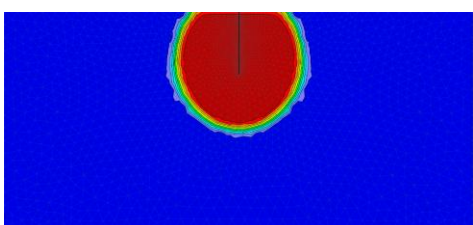
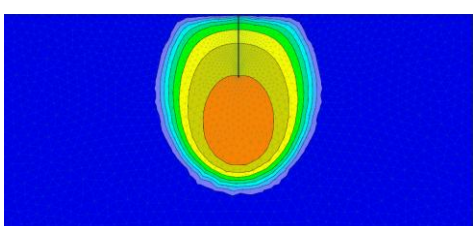
表 12、單支滲透管 HYDRUS 軟體模擬結果 (灌注流量 0.07 L/min；灌注體積 0.25 PV)

模擬條件	模擬結果	含水率顏色 對照表
灌注體積 0.25 PV 灌注流量 0.07 L/min 循環次數 1 cycle 灌注時間：停留時間=1：1		0.430 0.390 0.360 0.330 0.300 0.270 0.240 0.210 0.180 0.150 0.120 0.091 Max: 0.430 Min: 0.091
灌注體積 0.25 PV 灌注流量 0.07 L/min 循環次數 1 cycle 灌注時間：停留時間=1：100		
灌注體積 0.25 PV 灌注流量 0.07 L/min 循環次數 5 cycle 灌注時間：停留時間=1：1		
灌注體積 0.25 PV 灌注流量 0.07 L/min 循環次數 5 cycle 灌注時間：停留時間=1：100		
灌注體積 0.25 PV 灌注流量 0.07 L/min 循環次數 10 cycle 灌注時間：停留時間=1：1		
灌注體積 0.25 PV 灌注流量 0.07 L/min 循環次數 10 cycle 灌注時間：停留時間=1：100		



現地緩釋滲流化學氧化整治未飽和層土壤殘留相氯化有機物消弭地下水長期污染潛勢

表 13、單支滲透管 HYDRUS 軟體模擬結果 (灌注流量 0.07 L/min；灌注體積 0.5 PV)

模擬條件	模擬結果	含水率顏色 對照表
灌注體積 0.5 PV 灌注流量 0.07 L/min 循環次數 1 cycle 灌注時間：停留時間=1：1		 Max: 0.430 Min: 0.091
灌注體積 0.5 PV 灌注流量 0.07 L/min 循環次數 1 cycle 灌注時間：停留時間=1：100		
灌注體積 0.5 PV 灌注流量 0.07 L/min 循環次數 5 cycle 灌注時間：停留時間=1：1		
灌注體積 0.5 PV 灌注流量 0.07 L/min 循環次數 5 cycle 灌注時間：停留時間=1：100		
灌注體積 0.5 PV 灌注流量 0.07 L/min 循環次數 10 cycle 灌注時間：停留時間=1：1		
灌注體積 0.5 PV 灌注流量 0.07 L/min 循環次數 10 cycle 灌注時間：停留時間=1：100		



現地緩釋滲流化學氧化整治未飽和層土壤殘留相氯化有機物消弭地下水長期污染潛勢

表 14、雙支滲透管 HYDRUS 軟體模擬結果 (灌注流量 0.05 L/min；灌注體積 0.25 PV)

模擬條件	模擬結果	含水率顏色 對照表
灌注體積 0.25 PV 灌注流量 0.05 L/min 循環次數 1 cycle 灌注時間：停留時間=1：1		 0.430 0.390 0.360 0.330 0.300 0.270 0.240 0.210 0.180 0.150 0.120 0.091 Max: 0.430 Min: 0.091
灌注體積 0.25 PV 灌注流量 0.05 L/min 循環次數 1 cycle 灌注時間：停留時間=1：100		
灌注體積 0.25 PV 灌注流量 0.05 L/min 循環次數 5 cycle 灌注時間：停留時間=1：1		
灌注體積 0.25 PV 灌注流量 0.05 L/min 循環次數 5 cycle 灌注時間：停留時間=1：100		
灌注體積 0.25 PV 灌注流量 0.05 L/min 循環次數 10 cycle 灌注時間：停留時間=1：1		
灌注體積 0.25 PV 灌注流量 0.05 L/min 循環次數 10 cycle 灌注時間：停留時間=1：100		



現地緩釋滲流化學氧化整治未飽和層土壤殘留相氯化有機物消弭地下水長期污染潛勢

表 15、雙支滲透管 HYDRUS 軟體模擬結果 (灌注流量 0.05 L/min；灌注體積 0.5 PV)

模擬條件	模擬結果	含水率顏色 對照表
灌注體積 0.5 PV 灌注流量 0.05 L/min 循環次數 1 cycle 灌注時間：停留時間=1：1		 0.430 0.390 0.360 0.330 0.300 0.270 0.240 0.210 0.180 0.150 0.120 0.091 Max: 0.430 Min: 0.091
灌注體積 0.5 PV 灌注流量 0.05 L/min 循環次數 1 cycle 灌注時間：停留時間=1：100		
灌注體積 0.5 PV 灌注流量 0.05 L/min 循環次數 5 cycle 灌注時間：停留時間=1：1		
灌注體積 0.5 PV 灌注流量 0.05 L/min 循環次數 5 cycle 灌注時間：停留時間=1：100		
灌注體積 0.5 PV 灌注流量 0.05 L/min 循環次數 10 cycle 灌注時間：停留時間=1：1		
灌注體積 0.5 PV 灌注流量 0.05 L/min 循環次數 10 cycle 灌注時間：停留時間=1：100		



現地緩釋滲流化學氧化整治未飽和層土壤殘留相氯化有機物消弭地下水長期污染潛勢

表 16、雙支滲透管 HYDRUS 軟體模擬結果 (灌注流量 0.07 L/min；灌注體積 0.25 PV)

模擬條件	模擬結果	含水率顏色 對照表
灌注體積 0.25 PV 灌注流量 0.07 L/min 循環次數 1 cycle 灌注時間：停留時間=1：1		 0.430 0.390 0.360 0.330 0.300 0.270 0.240 0.210 0.180 0.150 0.120 0.091 Max: 0.430 Min: 0.091
灌注體積 0.25 PV 灌注流量 0.07 L/min 循環次數 1 cycle 灌注時間：停留時間=1：100		
灌注體積 0.25 PV 灌注流量 0.07 L/min 循環次數 5 cycle 灌注時間：停留時間=1：1		
灌注體積 0.25 PV 灌注流量 0.07 L/min 循環次數 5 cycle 灌注時間：停留時間=1：100		
灌注體積 0.25 PV 灌注流量 0.07 L/min 循環次數 10 cycle 灌注時間：停留時間=1：1		
灌注體積 0.25 PV 灌注流量 0.07 L/min 循環次數 10 cycle 灌注時間：停留時間=1：100		



現地緩釋滲流化學氧化整治未飽和層土壤殘留相氯化有機物消弭地下水長期污染潛勢

表 17、雙支滲透管 HYDRUS 軟體模擬結果 (灌注流量 0.07 L/min；灌注體積 0.5 PV)

模擬條件	模擬結果	含水率顏色 對照表
灌注體積 0.5 PV 灌注流量 0.07 L/min 循環次數 1 cycle 灌注時間：停留時間=1：1		 0.430 0.390 0.360 0.330 0.300 0.270 0.240 0.210 0.180 0.150 0.120 0.091 Max: 0.430 Min: 0.091
灌注體積 0.5 PV 灌注流量 0.07 L/min 循環次數 1 cycle 灌注時間：停留時間=1：100		
灌注體積 0.5 PV 灌注流量 0.07 L/min 循環次數 5 cycle 灌注時間：停留時間=1：1		
灌注體積 0.5 PV 灌注流量 0.07 L/min 循環次數 5 cycle 灌注時間：停留時間=1：100		
灌注體積 0.5 PV 灌注流量 0.07 L/min 循環次數 10 cycle 灌注時間：停留時間=1：1		
灌注體積 0.5 PV 灌注流量 0.07 L/min 循環次數 10 cycle 灌注時間：停留時間=1：100		



現地緩釋滲流化學氧化整治未飽和層土壤殘留相氯化有機物消弭地下水長期污染潛勢

5.6 建立整治系統標準作業流程(SOP)

圖 44 顯示整治系統標準作業流程，首先，需調查場址之水文及地質資料，以利後續於 HYDRUS 軟體中進行模擬，需收集之資料包含場址大小、土壤質地、土壤含水率，以及預設之滲透管位置與數量，完成資料蒐集後，將相關參數輸入 HYDRUS 進行模擬，可透過調整灌注體積、灌注流量以及灌注頻率等條件，評估不同操作參數下之灌注情形，進而選擇適合該污染場址之灌注條件進行整治，隨後於場址內進行鑽孔，並將滲透管緩釋灌注系統及含水率監測系統埋設於土壤中，滲透管之灌注方式由機電控制系統統一控制，以確保流量及頻率穩定，氧化劑灌注完成後，需定期監測以評估污染去除之成效。

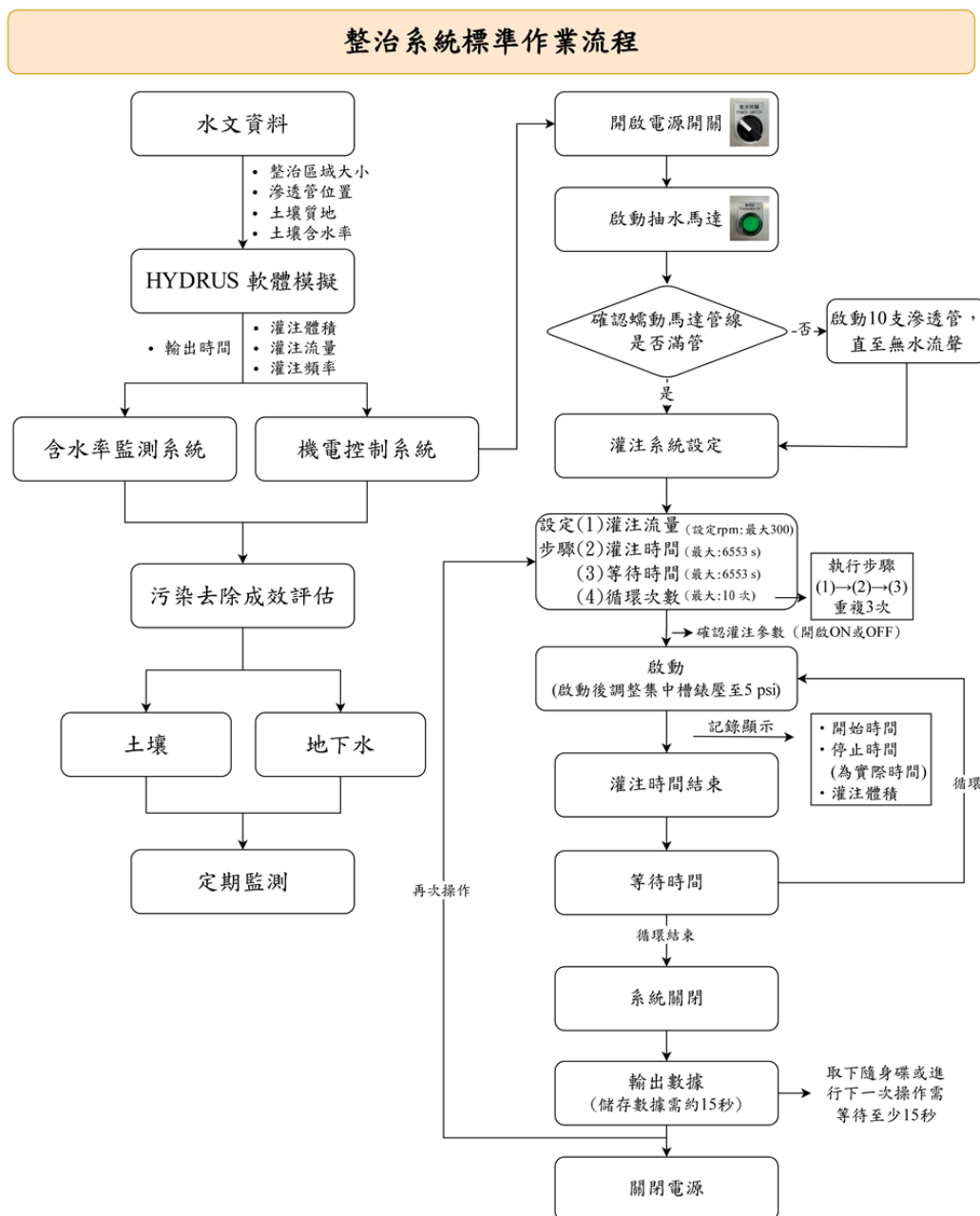


圖 44、整治系統標準作業流程圖



現地緩釋滲流化學氧化整治未飽和層土壤殘留相氯化有機物消弭地下水長期污染潛勢

5.7 污染場址整治系統設置

本研究計畫之模場試驗場址規劃選定於新竹縣湖口鄉建興段建興小段 0028 地號(華淵電機工業股份有限公司)之場址，依據該場址監測情形，監測井 J00196 為過去主要污染熱區，土壤污染部分已透過開挖排土客土法進行改善，惟地下水仍檢出 1,1-二氯乙烯、順-1,2-二氯乙烯以及氯乙烯等降解產物，推測可能與土壤中殘留四氯乙烯和三氯乙烯污染有關，因此，本研究計畫於監測井 J00196 附近區域之滲透管佈點規劃(如圖 45 所示)，並將針對該場址進行 HYDRUS 模擬分析，以獲得合適之滲流頻率、滲流量以及滲流流速等參數，作為滲透管緩釋灌注系統之設計依據，期望藉由土壤毛細力使氧化劑在未飽和層中停留並分布於土壤顆粒間，使 ISCO 反應得以於未飽和含水層土壤中進行，進而降低土壤殘留相污染物對地下水之長期污染潛勢。

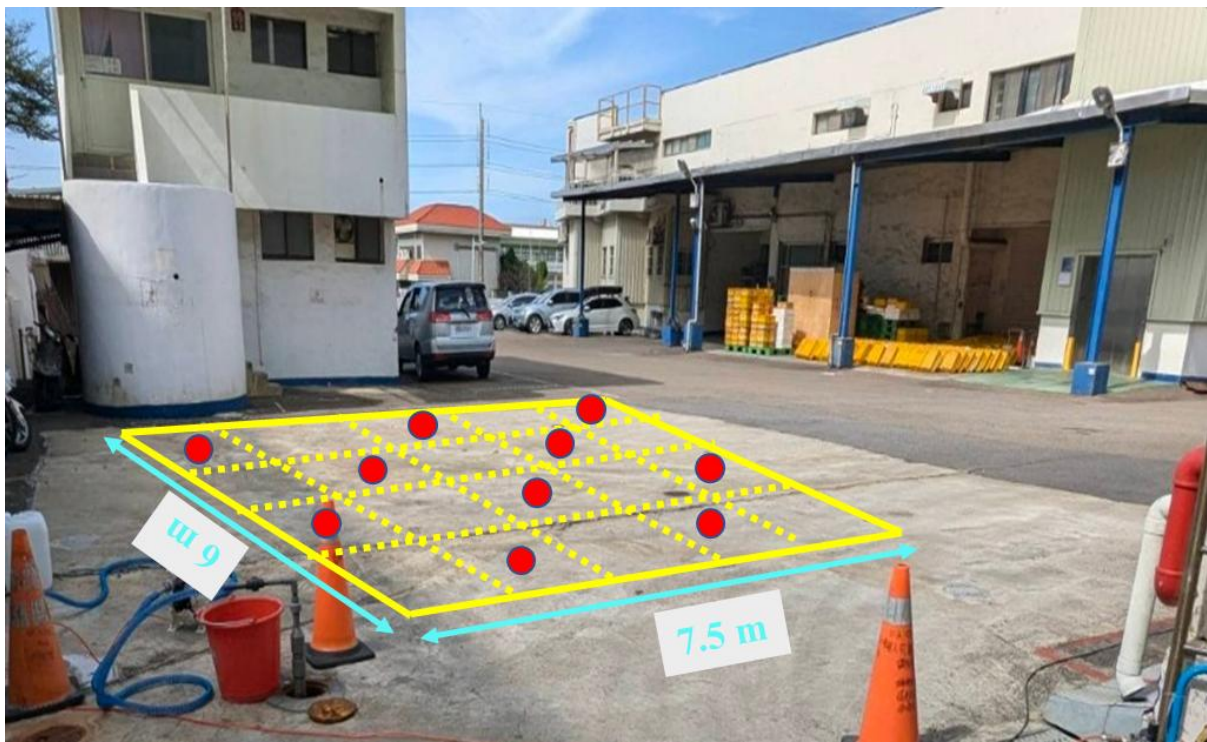


圖 45、模場試驗場址之滲透管佈點規劃



(六)結論

本研究計畫主要係以解決 TCE 於未飽和層形成之殘留相污染所導致之反向擴散與污染回復問題為核心，提出結合滲透管緩釋輸送與過硫酸鈉氧化劑之 ISCO 整治技術。研究進程上規劃第一年目標為氧化劑滲流系統設備設計與組裝建置及場址設備安裝與試車；第二年目標則為場址未飽和層土壤 ISCO 氧化劑滲流整治施作及成效監測。目前階段之研究與系統建置，已完成整體整治架構之實驗設備組件，包括滲透管緩釋灌注系統、機電控制系統與含水率監測設備，並完成 Hydrus 模擬軟體之初步模擬，同時完成建立整治系統標準作業流程(SOP)。

於滲透管緩釋灌注系統方面，本研究計畫成功將農業滴灌原理轉化為具工程應用價值之污染整治工具，並以 304 不鏽鋼材料構建灌注氧化劑系統主體，確保滲流作業中之結構穩定性與耐久性。測試結果顯示，系統中滲透管可滲流傳輸溶液，符合研究計畫之技術預期。此設計有助於克服未飽和層中傳統液體灌注易產生優勢而降低處理效率之限制。於機電控制系統亦已整合完成，具備自動控制、多點灌注與參數調控功能，其模組化設計可同時操作十組灌注裝置，有效進行範圍式污染場址之整治，並能透過即時數據監控與資料紀錄，協助後續施作優化與成效評估。於含水率監測方面，研究團隊選用 GroPoint Profile 多深度土壤含水率探針，有效對未飽和層中之水分變化進行剖面式監控，未來可搭配氧化劑灌注時程進行反應區範圍之觀測。此外，Hydrus 模擬軟體亦已完成安裝並進行操作測試，後續將結合現地含水率以及水文地質資料進行模型校正與預測分析，以支援計畫施作規劃與後期整治效力評估。最後，研究團隊亦已建立一套整治系統之標準作業流程(SOP)，可供現場施作與後續應用參考。

綜合而言，計畫目前進度符合預定時程與技術目標，設備組裝與功能測試結果良好，顯示本研究所開發之技術架構具可行性與實地應用潛力。後續將進入未飽和含水層土壤 ISCO 氧化劑滲流整治施作及成效監測，並配合數值模擬進行輔助分析，以驗證本計畫整體技術之有效性與工程實用價值。



(七)參考文獻

- [1] United States Environmental Protection Agency (USEPA), Consumer Factsheet on Trichlorethylene.
<https://archive.epa.gov/water/archive/web/pdf/archived-consumer-fact-sheet-on-trichlorethylene.pdf>. (Access : 6 March 2024), (2014).
- [2] 全國法規資料庫, 土壤污染管制標準 <https://law.moj.gov.tw/> (Accessed : 15 February 2024), (2011).
- [3] 全國法規資料庫, 地下水污染管制標準 <https://law.moj.gov.tw/> 6 (Accessed : 15 February 2024), (2013).
- [4] 環境部環境管理署土壤及地下水污染整治網, 列管場址查詢 <https://sgw.moenv.gov.tw/SgwSiteInfo/SituationMap/> (Access : 12 February 2024), (2024).
- [5] United States Environmental Protection Agency (USEPA), Dense Nonaqueous Phase Liquids (EPA/540/4/91/002), USEPA, Office of Research and Development, Washington, D.C., (1991).
- [6] B.L. Parker, S.W. Chapman, M.A. Guilbeault, Plume persistence caused by back diffusion from thin clay layers in a sand aquifer following TCE source-zone hydraulic isolation, *Journal of Contaminant Hydrology*, 102 (2008) 86-104.
- [7] J. Wilson, Removal of aqueous phase dissolved contamination: Non-chemically enhanced pump-and-treat, *Subsurface Restoration*, 17 (1997) 271-285.
- [8] S.W. Chapman, B.L. Parker, Plume persistence due to aquitard back diffusion following dense nonaqueous phase liquid source removal or isolation, *Water Resources Research*, 41 (2005).
- [9] United States Environmental Protection Agency (USEPA), DNAPL Site Evaluation (EPA/600/R-93/022), USEPA, Office of Research and Development, Oklahoma., (1993).
- [10] M.L. Brusseau, K.C. Carroll, M.J. Truex, D.J. Becker, Characterization and remediation of chlorinated volatile organic contaminants in the vadose zone, *Vadose Zone Journal*, 12 (2013) 1-7.



- [11] D. Abranovic, P.C. Johnson, R.J. Charbeneau, T.J. Hemstreet, A graphical approach for determining dilution-attenuation factors: Basic theory and approach for submerged sources, *Groundwater Monitoring & Remediation*, 21 (2001) 115-124.
- [12] United States Environmental Protection Agency (USEPA), Soil Screening Guidance: User's Guide (EPA/540/R-96/018), USEPA, Office of Solid Waste and Emergency Response, Washington, D.C., (1996).
- [13] 環境部環境管理署土壤及地下水污染整治網, 三氯乙烯安全資料表 <https://sgw.moenv.gov.tw/Public/Upload/CMS/chemistry/> (Access : 3 March 2024), (2023).
- [14] P.C. Johnson, D. Abranovic, R.J. Charbeneau, T. Hemstreet, Graphical approach for determining site-specific dilution-attenuation factors (DAFs): Technical Background Document, American Petroleum Institute Publications, (1998) x-R-5.
- [15] The Interstate Technology and Regulatory Council (ITRC), Technical and Regulatory Guidance for In Situ Chemical Oxidation of Contaminated Soil and Groundwater, ITRC, Washington. D.C., (2005).
- [16] National Center for Biotechnology Information, Sodium persulfate. <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Sodium-persulfate>. (Access : 20 March 2024), (2024).
- [17] R.O.C. Norman, P.M. Storey, P.R. West, Electron spin resonance studies. Part XXV. Reactions of the sulphate radical anion with organic compounds, *Journal of the Chemical Society B: Physical Organic*, (1970) 1087-1095.
- [18] C. Liang, H.-W. Su, Identification of sulfate and hydroxyl radicals in thermally activated persulfate, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 48 (2009) 5558-5562.
- [19] C. Liang, Z.-S. Wang, C.J. Bruell, Influence of pH on persulfate oxidation of TCE at ambient temperatures, *Chemosphere*, 66 (2007) 106-113.
- [20] Y.-T. Lin, C. Liang, J.-H. Chen, Feasibility study of ultraviolet activated persulfate oxidation of phenol, *Chemosphere*, 82 (2011) 1168-1172.
- [21] K. Tian, L. Hu, L. Li, Q. Zheng, Y. Xin, G. Zhang, Recent advances in



- persulfate-based advanced oxidation processes for organic wastewater treatment, *Chinese Chemical Letters*, 33 (2022) 4461-4477.
- [22] O.S. Furman, A.L. Teel, R.J. Watts, Mechanism of base activation of persulfate, *Environmental Science & Technology*, 44 (2010) 6423-6428.
- [23] K.-C. Huang, R.A. Couttenye, G.E. Hoag, Kinetics of heat-assisted persulfate oxidation of methyl tert-butyl ether (MTBE), *Chemosphere*, 49 (2002) 413-420.
- [24] C.C. Shock, Drip Irrigation: An Introduction, Oregon State University. Extension Service (Sustainable Agriculture Techniques, EM 8782 report), (2013).
- [25] R. Subbaiah, A review of models for predicting soil water dynamics during trickle irrigation, *Irrigation Science*, 31 (2013) 225-258.
- [26] E. Bresler, Trickle-Drip Irrigation: Principles and Application to Soil-Water Management, in: N.C. Brady (Ed.) *Advances in Agronomy*, Academic Press, 1977.
- [27] B. Zur, The pulsed irrigation principle for controlled soil wetting, *Soil Science*, 122 (1976) 282-291.
- [28] C. Liang, C.-Y. Kuo, Preliminary validation of persulfate delivery through porous pipe in the vadose zone: A two-dimensional sandbox experiment, *Soil and Sediment Contamination: An International Journal*, (2024) 1-17.
- [29] A. Kunze, W. Spreer, R. Dangtungee, C. Boonrahong, U. Sanguangpong, J.F.J. Max, Comparison of an innovative porous pipe irrigation system to drip irrigation under controlled conditions, in: S.T.I.-M. University (Ed.) *The 1st International Conference on Science Technology & Innovation-Maejo University*, Science Technology & Innovation-Maejo University, 2021, pp. 38-46.
- [30] C.R. Camp, Subsurface drip irrigation: a review, *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers (ASAE)*, 41 (1998) 1353-1367.
- [31] J.J. Simunek, M. Šejna, M. Van Genuchten, The HYDRUS Software Package for Simulating the Two- and Three-Dimensional Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably-Saturated Porous Media.



現地緩釋滲流化學氧化整治未飽和層土壤殘留相氯化有機物消弭地下水長期污染潛勢

Technical Manual Version 2.0, April 1999, U.S. Salinity Laboratory,
Agricultural Research Service, U.S. Department of Agriculture, Riverside,
California (accessed from <https://www.pc-progress.com/>)