



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

以光催化技術處理地下水中含氯有機 污染物-光纖模組及綠能系統開發 (第二年) 期末報告(定稿)

主 辦 單 位： 行政院環境保護署
專案執行單位：國立屏東科技大學／環境工程與科學系
專案主持人：陳冠中 教授
專案執行期間：111 年 05 月 20 日起至
112 年 04 月 30 日止

中 華 民 國 112 年 05 月 印製





行政院環境保護署土壤及地下水污染整治基金管理會
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

☐構想書 ☒申請計劃書

☐期中報告 ☐期末報告

審查意見回覆對照表

計畫年度	111	專案類型	☐ 研究專案 ☒ 模場試驗	
計畫主持人	陳冠中	研究類別	☒ 整治 ☐ 評估 ☐ 預防 ☐ 自訂	
計畫名稱	以光催化技術處理地下水中含氯有機污染物-光纖模組及綠能系統開發(第二年)			
專案聯絡人	陳慶榮	連絡專線	(08)770-3202 #7082	
委員審查意見			計畫單位回覆	
委員一				
1. 本年度計畫執行範圍擴大，具體之執行步驟與方法應未敘明；另針對綠能設備應用之規劃，如何驗證與查核相關之成果？建議亦應予以說明。 2. 請補充說明本年度計畫之具體量化之查核指標，例如電源供給時數；含氯有機物去除效率，抑或是光纖使用壽命之評估等。 3. 請補充說明本技術應用之限制條件或是場址應用之特性，以利後續技術應用之參考。			1. 謝謝委員意見。綠能設備建置與架設主要為提供系統所用燈源之電力來源，因此未來若在現場缺乏電源的情況下，本年度將提出一套對於本系統適用之綠能設備配套，評估各項環境因素對儲電效率所造成的影響，詳細將在本年度期末報告進行驗證與完整說明。 2. 謝謝委員意見。已補充於八、研究預期效益及績效指標之預期完成之工作項目內容中。 3. 謝謝委員意見。本團隊將針對現地污染場址之基本特性進行研究調查，並評估光纖光催化反應牆技術之限制條件與現地使用之可行性探討，主要的限制條件說明內容補充於第八章節之執行成果方面之貢獻及成果效益，另一方面，因本場址與其他一般場址相比，具有水量大、流速快、含水層厚及水位變化幅度大等特性，上述場址應用之特性說明請參閱 6.1.2.1 節之本計畫模場場址說明。	
委員二				
1. 本技術藉由光纖系統將光催化技術直接應用於處理受污染之地下水。 2. 建議評估光纖表面塗佈觸媒的穩定性。			1. 謝謝委員意見。 2. 謝謝委員意見。本團隊於 106 年度專案研究計畫「研發光觸媒覆膜材料以提高光纖光催化處理地下水中三氯乙烯之應用性」成果顯示，以	



3. 下水中之有機污染物進行光催化反應，達成去除污染物之效果取決於光源部分，本案使用之發光二極體的波長影響，建議可進一步評估。 4. 建議考量本方法在實場應用時得使用尺度。 5. 建議於計畫完成後，評估本技術的成本。	聚乙烯醇(PVA)、二氧化矽無機樹脂和氟樹脂作為三種測試之黏著劑用於光纖表面上，具有可提升光源傳輸效率、改善光纖表面觸媒分佈性，以及增加觸媒覆膜於光纖表面之耐久性等優點，其中又以二氧化矽無機樹脂為最佳。因此，承上所述，本團隊於現地試驗所使用之覆膜光纖技術皆參考先前研究成果之最佳條件。 3. 謝謝委員意見。關於光源波長對於污染物去除效果方面，本團隊於108-109年現地試驗進行探討，利用可見光與紫外光燈源進行試驗，並搭配商業化 P25 TiO₂ 與自製氮改質之 N-TiO₂ 觸媒，由實驗設計進行四組試驗後結果得知，可以得知商業化 P25 TiO₂ 在可見光的照射條件下，去除效率較差之外，其他試驗條件皆可達到將近 100% 之去除效率。由上述結果證明，未來以可見光燈源激發，即具有有效去除效果作為目標，搭配可被可見光激發之改質觸媒為可行方法。本年度專案計畫為多井試驗，將持續針對紫外光與可見光進行評估，並在未來試驗數據統整後進行更進一步評估。 4. 謝謝委員意見。因本場址與其他一般場址相比，具有水量大、流速快、含水層厚及水位變化幅度大等特性，可能會影響污染物與光催化之反應時間，惟依目前的試驗結果得知，光催化產生之氫氧自由基與含氯有機污染物反應後，濃度顯著降低，在 108-109 年度實驗之各種操作條件下，去除率可達 98% 以上，並於 110 年在多井(反應牆)試驗結果顯示，皆具有 40-80% 之去除效率，顯示本模場之特性並未影響到本技術之處理效果。後續本團隊也將持續評估並考量使用尺度，若能克服此具有挑戰型之場址，相信有利於未來本技術應用於一般型污
---	--



	染場址。 5. 謝謝委員意見。將於本年度計畫完成後進行成本效益評估。
委員三	
1. 本計畫提出以光纖光催化技術進行地下水含氯有機物整治，針對目標污染物具一定去除效果。 2. 建議針對執行成果內容可以再多提供相關數據及資訊包括相關水質監測及含氯有機物及其代謝產物濃度變化等量化數據。 3. 針對光催化設備(光源及催化劑等)長期置入地下水中可能因積垢導致效率下降的因應作為。 4. 是否有顧問公司對此技術有意願參與技術轉移？	1. 謝謝委員肯定。 2. 謝謝委員意見。針對 110 年度之執行成果內容已補充於第八章節之執行成果方面之貢獻及成果效益。 3. 謝謝委員意見。本研究在 103 年度進行實驗室規模耐久性試驗，分別進行五批次，分別為兩小時之耐久性試驗，實驗結果顯示，去除效率並沒有隨著時間造成太大的影響。因此，在 108-109 年單井試驗皆以 14 天作為一組試驗批次，去除效率皆相當顯著(大於 98%)，綜上所述，本團隊透過 110-111 年持續改良系統模組組裝，可將因處理環境所產生的積垢進行覆膜光纖更換，目標設定為 14 天(因計畫期程有限)，只需重新進行覆膜，即可繼續使用。 4. 謝謝委員意見。本團隊與裕山公司長期合作，並於「2021 土水跨域技術產學發表暨技術媒合會」上簽署產學合作意向書，未來對於專利與技術轉移這方面將持續進行努力。
委員四	
1. 模場試驗程序規劃詳盡。 2. 請確認反應牆三口監測井間距是否達到預期成效，觸媒產生 radical 的距離與水流向影響評估。	1. 謝謝委員肯定。 2. 謝謝委員意見。在三口井的地下水流向與間距對於成效評估方面，本團隊參考裕山公司長年監測新開寮模場之地下水流場分佈資料中顯示，其豐枯水期之地下水流向變化有些許不同，豐水期地下水流向大致為東向西流動，而枯水期地下水流向大致為東南向西北方向流動，但整體來說還是往下游潮州方向流動。本團隊在進行試驗方面，將光纖光催化系統設置於三口系統井(WW1~WW3)後，受污染之地下水流經過此道光催化反應牆而受到處理，另



3. 本場址的自由水層超過 80m，污染物為含氯有機物，於下游處僅放置一口監測井是否足夠評估其效率。	外，在下游處進行四口觀測井 (OW2~OW5) 進行採樣，此三者相距皆約為 3 m，在成效驗證方面，具有兩種方式，第一，透過單井之處理段與未處理段進行比較，其次，透過系統井與觀測井相互驗證方式，可以有效驗證光纖光催化系統之成果。另一方面，光纖光催化系統所採用的是被動式處理，由污染物流經光纖反應牆後達到去除，因此未來技術上的應用將朝向反應牆之設計概念進行地下水污染物處。上述內容補充於 6.1.2.2 節之研究專案規劃。 3. 謝謝委員意見。本研究專案所設置上游處理井與下游之觀測井之詳細敘述與設置位置可參考圖 1 所示，上游系統處理井為三口 (WW1-WW3)，下游觀測井設置四口 (OW2-OW5)，進而透過上下游分析評估及驗證成效，詳細內容補充於 7.2.2 節之光纖光催化系統技術說明。
委員五	
1. 第一年(110 年)執行前期測試條件與 111 年執行實場模場計畫測試條件、設定參數，宜請檢核一致性，才能有效進行預期測試工作。 2. 本年度設定面積 15m*40m，需檢視污染場址整體濃度三維分佈與地下水流向、傳輸特徵，確認選定研究區塊之代表性及特徵，才能檢核本項技術適用條件。 3. 設置參數(表 4)宜有具體規範，以供檢核爾後評析有效性參考基準。 4. 預期完成工作項目宜有量化目標，明確分析項目	1. 謝謝委員意見。本 111 年度試驗專案與 110 年度之測試條件與設定參數具一致性，可進行預測工作。 2. 謝謝委員意見。關於場址整體濃度三維分佈與地下水流向等資料將呈現於期中與期末報告中進行整體條件評估檢核。 3. 謝謝委員意見。本團隊於 108-110 年度所執行之現地模場試驗計畫中經驗得知，在各種設置條件下進行評估，今年度主要為開發綠能設備搭配光纖光催化系統應用於污染場址之可行性評估，設置參數方面，將持續針對不同觸媒種類(N-TiO₂ 或 N-TiO₂-ZnO/CNT)與光源種類(紫外光與可見光)進行一系列評估，並與 110 年成果進行統整分析，以作為未來技術應用之參考基準。



與執行方法；第 4-2、4-4、4-6 節需具體補正。 5. 工作量不明(無次數、樣品數、項目)，如何達成預期目標存在變數。	4. 謝謝委員意見。專案所執行之工作量化目標已補充於八、研究預期效益及績效指標之預期完成之工作項目內容中，另第七章節(原第四章節)已完成所需具體補正。 5. 謝謝委員意見。已補充於八、研究預期效益及績效指標之預期完成之工作項目內容中。
委員六	
1. P.9，有關含氯有機光催化處理技術，本文提出以 UV 及 US 光作為催化劑產生氫氧自由基以降解除含氯有機化合物，建議宜新增圖表等視覺化資料，以易瞭解該處理技術；另建議宜附技術成熟度等作為本模場試驗技術指引之依據。 2. P.27，有關執行成果之貢獻，該計畫於 110 年度採用 TiO₂ 光催化劑處理技術，並於本年度採用光纖導入可見光及紫外光降解氯化有機污染物，建議宜將兩年度之執行成果製表說明，以利瞭解其執行成效。 3. 本計畫採用光纖光催化設備整治受氯化有機污染物污染之地下水，並以太陽能設備作為電源供應，建議宜將計畫期間之設備維護及整治完成後之設備處理納入規劃並說明之，以完善計畫之執行。	1. 謝謝委員意見。已補充該文獻資料之系統示意圖於圖 5，另已補充核心技術之成熟度評估於十二、核心技術之技術成熟度(TRL)評估中。 2. 謝謝委員意見。針對 110 年度之執行成果內容已補充於第五章節之執行成果方面之貢獻及成果效益，另因申請計畫書篇幅限制，無法將圖表完整呈現，故在 111 年度期中與期末報告再將兩年度執行成果製表進行說明。 3. 謝謝委員意見。關於現地各項設備維護方面，系統光源之電源以及太陽能之蓄電池這類器材，將會放置於現地貨櫃內進行保存，另一方面，本團隊預計太陽能板設置於貨櫃上方，其上方為附近周遭土地之制高點，可有利於太陽光照射與保護。目前因新年度之綠電設備與專業廠商正在進行討論規劃，因此，詳細對於計畫期間之設備相關維護與整治完成後之後續設備處理，將呈現於期中與期末報告。
委員七	
1. 本計畫擬以光催化技術來處理含氯有機物針對屏東新寮鄉污染場址進行整治實驗分析，計畫目的明確。 2. 本計畫申請費用約為 249 萬元，其中，人力費用約 102 萬元，約 41%，耗材費用約 114 萬元，約 46%，計畫執行而言，相對的人力費用略高。 3. 本計畫以太陽光電做為場址整治的能源來源，具綠色整治技術，本計畫執行過程仍應致力於相	1. 謝謝委員意見。 2. 謝謝委員意見。已調整人力費用。 3. 謝謝委員意見。本團隊持續與國內專業廠商討論綠能建置相關事宜，並將今年度可以完成系統與綠能設備建置相關規模建置指引，有利於未來應用於現地模場之可行性，並於期末報告將整體



關設備建置成本、能耗數據資料的收集與含氮有機物整治成效，始能瞭解其成本效益。 4. 本計畫合作廠商裕山環境工程公司，實收資本額 2.5 億元，屬於資本額高的工程顧問公司。	呈現後進行成本效益評估。 4. 謝謝委員意見。裕山環境工程股份有限公司(以下簡稱裕山公司)是國內具有地下水污染處理豐富實務經驗，本研究團隊與其組成合作團隊，裕山公司長年於本場址進行背景資料蒐集，故本團隊於背景資料蒐集方面，都與裕山公司進行研究討論，另外裕山公司提供本團隊 MIP 分析之技術。
委員八	
1. 本計畫結合光纖與光催化透水性反應牆技術，應用於污染場址現地有機物處理，技術構想新穎，且逐漸整合綠能概念，研究具有實務應用性。 2. 本計畫第一年已經有成果，但是建議可以補充圖表，以更清楚說明執行成效。 3. 第二年度計畫規劃完整，應可以順利執行。 4. 主持人在此研究主題已經累積相當經驗，對於國際研究進展也相當熟悉，具有領導本計畫之能力。 5. 建議相關開發的技術能申請專利，甚至爭取技術轉移。	1. 謝謝委員肯定。 2. 謝謝委員意見。因申請計畫書篇幅受限，圖表內容無法完整呈現說明執行成效，故後續將完整呈現於 111 年度之期中與期末報告中進行一系列比較與探討。 3. 謝謝委員意見。 4. 謝謝委員肯定。 5. 謝謝委員意見。本團隊持續本校研發處及創新育成中心進行專利或技術轉移評估。另外，團隊與裕山公司長期合作，並於「2021 土水跨域技術產學發表暨技術媒合會」上簽署產學合作意向書，未來，將對於專利與技術轉移這方面將持續進行努力。
本署業務單位	
1. 請依本署補助上限經費及 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徵求書規定調整本計畫經費分析表。	1. 謝謝委員意見。已依照規定調整經費分析表。



行政院環境保護署土壤及地下水污染整治基金管理會
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

☐構想書 ☐申請計劃書

☒期中報告 ☐期末報告

審查意見回覆對照表

計畫年度	111	專案類型	☐ 研究專案	☒ 模場試驗
計畫主持人	陳冠中	研究類別	☒ 整治	☐ 評估 ☐ 預防 ☐ 自訂
計畫名稱	以光催化技術處理地下水中含氯有機污染物-光纖模組及綠能系統開發(第二年)			
專案連絡人	陳慶榮	連絡專線	(08)770-3202 #7082	
委員審查意見			計畫單位回覆	
委員一				
1. 對原計畫書的建議已回覆說明。 2. 本計畫為第二年度的延續性計畫。 3. 本期中報告已說明計畫的執行狀況與試驗流程，研究方法也已具體說明(Chap.3)。 4. 本計畫無自籌款。 5. 本次報告為期中報告，計畫後續的執行工作 6. 項目已於 P.91 中簡要說明(建議:條列說明)。 7. 計畫進度已經說明，並無明顯落後(對後續擬執行工作項目及內容已有初步規劃)。 8. 期中報告所說明的研究內容與原計畫目的符合。 9. 本報告為期中報告，已提出初步的研究成果，建議期末報告能依研究內容提出在實務上的應用潛力，以及實務上適用的情境(尤其是報告中所述的現場條件與實際驗證過程所遭遇的挑戰的因應作為)。 10. 期中報告所提出的研究成果尚符合預期。 11. 建議討論 GSR。			1. 謝謝委員意見。 2. 謝謝委員意見。 3. 謝謝委員肯定。 4. 謝謝委員意見。 5. 謝謝委員意見。 6. 謝謝委員肯定。 7. 謝謝委員肯定。 8. 謝謝委員肯定。 9. 謝謝委員意見。本團隊將於期末報告彙整歷年經驗，進而提出實務應用潛力與實務上適用的情境。 10. 謝謝委員意見。 11. 謝謝委員意見。關於綠色及永續導向型整治 (Green and Sustainable Remediation, GSR)，本團隊後續將之納入討論評估。	
委員二				
1. 符合期中規劃進度。 2. 結論與建議部分可更精簡些。			1. 謝謝委員肯定。 2. 謝謝委員意見。將於期末報告將結論與建議部份進行精簡。	
委員三				
1. 報告中內容撰寫之段落過長，宜適度分段。 2. 透過光纖模組提供現地光源進行含水層中含氯有機污染物之光催化，並搭配綠能電源的開發，達成現地綠色整治目的。 3. 建議能將本計畫主要 know how 之光纖與電源模組之 SWOT 加以分析，尤其是產品市場調查，以說服未來業者應用的可行性。			1. 謝謝委員意見。於期末進行精簡與分段。 2. 謝謝委員意見。 3. 謝謝委員意見。本團隊後續將對於技術之未來發展進行評估，並希望在未來可以應用到更多的實場，以增加實場試驗成果，藉此有利於並說服未來業	



4. 符合低耗能、綠色與現地之永續發展要求。	者應用之參考。 4. 謝謝委員肯定。
委員四	
1. 根據本年度計畫執行之成果顯示，受到降雨因素之影響，光纖量測訊號之範圍將受到影響，相關量測之靈敏度、準確度及可信度等驗證分析結果為何？ 2. 有關含氯有機物污染層於試驗場址區域，如何確認仍是以淺水位為主？受到降雨及地下水傳輸之影響，是否會改變該污染物之分佈？ 3. 本年度之綠能光纖光催化系統，似受到環境及天候之因素，相關成果，並未具體驗證，後續因應及改善對策，宜儘快測試，以利確認改善是否有效？	1. 謝謝委員。本團隊設計可延伸至污染層之水中光源機，藉以降低光源在傳輸過程中所損失之能量，另一方面，試驗過程中，透過單井採樣(處理段與未處理段)與多井(上下游採樣)進行一系列之驗證比較，進而提高試驗成果驗證之可信度。 2. 謝謝委員意見，根據多年水位量測與薄膜介面探測儀(membrane interface probe, MIP)之測量後發現，一般情況下，主要污染之含氯有機物測得之污染層都落在淺水位，但因本場址背景較特殊，包含含水層厚與豐枯水期水位變化大等因素，造成污染層會隨著水位變化所移動，因此本團隊為了更了解污染層之分佈，都會安排在水位變化過程中進行 MIP 測量，藉以確認污染層之熱點位置，以利於試驗成效驗證。 3. 謝謝委員意見，承第二點所述，本團隊在新開察場址進行試驗，有許多前置作業，包含 MIP 測量、水位量測、空白背景試驗等等皆陸續進行測試，以利於後續試驗驗證。
委員五	
1. 本計畫人事費、耗材費皆甚高；唯呈現甚多資料皆為歷年數據(111/05 以前)，應請具體說明本年度計畫之執行進展與成果。 2. 本年度計畫成果有別於歷年成果之差異、精進或新發現，應請具體掌握提列。	1. 謝謝委員意見。本團隊於期末具體說明進展與成果。 2. 謝謝委員意見。
委員六	
1. 針對地下含水層浮渣物質或內部異物干擾情形，請適時注意且加以處理，以利後續試驗執行之可信度。 3. 建議可再補充說明綠能設備之太陽能聚光系統設計二項概念方案之討論比較。	1. 謝謝委員意見。本團隊會在執行試驗前進行浮渣或異物排除，以利試驗執行可信度。 2. 謝謝委員意見。本團隊於期中至期末階段完成聚光先行測試以進行比較。



行政院環境保護署土壤及地下水污染整治基金管理會
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

☐構想書 ☐申請計劃書

☐期中報告 ☒期末報告

審查意見回覆對照表

計畫年度	111	專案類型	☐ 研究專案 ☒ 模場試驗
計畫主持人	陳冠中	研究類別	☒ 整治 ☐ 評估 ☐ 預防 ☐ 自訂
計畫名稱	以光催化技術處理地下水中含氯有機污染物-光纖模組及綠能系統開發(第二年)		
專案連絡人	陳慶榮	連絡專線	(08)770-3202 #7082
委員審查意見		計畫單位回覆	
劉沛宏 委員			
1. 報告中圖表目錄錯置，編排請重整。 2. 4.5.2.成本效益分析計算方式不甚清楚，污染場址「土壤地下水」(P.97 第二行以下敘述)，請再釐清說明。 3. 模場試驗中是否取得光觸媒活性影響因子，對壽命、地下水質、溶解有機物等的影響參數。 4. 表 6(P.79)Blank NA 空白段濃度差異，請說明。		1. 謝謝委員意見。已將圖表目錄與內文進行重新查對，使編排正確無誤。 2. 謝謝委員意見。已將此章節進一步釐清說明，已將成本效益分析計算納入設備維護與現場保養之成本，並新增敘述於 4.5.2 章節中。 3. 謝謝委員意見。本團隊於現場試驗中發現，當地下水有異物黏附於光觸媒表面時，會導致系統光催化效果降低。另外，在水質變化方面，經過長時間的水質採樣分析下，並無發現影響光纖光催化之其他因素。 4. 謝謝委員意見。由表 6 的三次 Blank 數據(每次有三口系統井之單井驗證)中發現，其中出現兩次之 30 m 與 35 m 的濃度具有差異(但還是皆高於監測標準)，其餘皆濃度差異不大，主要原因為在試驗過程中，其淺水位(30 m)受到浮渣或異物干擾，又由其出現差異之這兩次，皆為 WW1 系統井，由於該點上游有養雞場，排放之污水從採樣過程中發現偶會影響地下水淺水位之水質，故推測試驗時受到干擾之影響，導致 WW1 在數據呈現上出現並未處理而具有差異的情況。	



5. 聚光設施是否有熱處理的考量，如何排除或並無影響。 6. 地下水位(P.52)是否以絕對高程表示。 7. 系統是否經穩定測試或有規劃後續測試。 8. 報告誤植處請修正。	5. 謝謝委員意見。關於聚光的部份，本團隊進行以下三點措施：(1)利用隔熱玻璃材質將熱源進行阻隔，使光源聚集後降低熱度的傳導，(2)在聚光後的光源接收端，會利用石英光纖進行收集，延伸一段距離後再以塑膠光纖進行傳導，此方法可防止熱源讓光纖受到損耗，(3)承第一點，將阻隔的玻璃材質上的熱源進行排除及傳導，後續亦會考慮其他有效的熱利用可行性。 6. 謝謝委員意見。此地下水位是以 WW2 系統井在不同時間下以水位計所測得之數據資料，並非以絕對高程進行進行而得，本團隊經前置調查中發現，既有地下水系統井與觀測井之高程差距非常小，而本試驗主要為探討其淺水位之污染層處理效果，並且上下游距離較近也不受高程差之差距影響數據資料。故在此前提條件下，以水位計測量之水位進行直接表示。 7. 謝謝委員意見。本團隊在試驗期間(110-111 年)已進行多次穩定測試，主要為光源穩定，電力設備穩定，以及環境穩定之前提條件下才進行後續試驗，也因本場址之個不穩定因素(地下水位變化大、地下水層厚等...)較多，因此在正式試驗前，本團隊皆會進行先導試驗之穩定性測試。 8. 謝謝委員意見。已修正。
盧至人 委員	
1. 本模場驗計畫期末報告已說明計畫的執行成果，也已說明計畫的執行流程及試驗方法。 2. 本模場試驗計畫期末報告已於 P. 100 (5.2 節)說明後續可繼續執行的研究項目。 3. 計畫執行進度與預定進度相符。 4. 研究內容與原訂計畫目的相符。 5. 本模場試驗計畫期末報告已依據研究結果提出適當的討論與建議，此建議對於實場的實際應用性尚待進一步確認。 6. 本模場試驗計畫的整體研究成果符合預期的研究目標。 7. 本計畫的執行可以培育土壤/地下水領域的人	1. 謝謝委員肯定。 2. 謝謝委員肯定。 3. 謝謝委員肯定。 4. 謝謝委員肯定。 5. 謝謝委員肯定與意見。 6. 謝謝委員肯定。



才。 8. 本模場試驗計畫的研究成果:申請專利未說明、論文發表:已投稿。 9. 本模場試驗計畫符合國內土水污染技術研發的政策，對國內土水領域(整治工程)的發展有所助益。 10. 請補充說明系統設置處鄰近的地方或管徑範圍之內的溫度，因國內其他廠址案例顯示，水溫40度左右 VOC 便會逸散，故簡報前述污染濃度變化不易解釋的緣由是否是因為 VOC 逸散影響? 11. 建議說明 (1) 由顧問公司協助完成的項目(或是實際參與的項目)。 (2) 最適操作條件與限制條件。 (3) 實務上於實場設計規劃的原則。	7. 謝謝委員肯定。 8. 謝謝委員肯定。 9. 謝謝委員肯定。 10. 謝謝委員意見。根據現場試驗前後之水樣採集結果發現，其內部水體水溫變化不大，淺水層水溫約為 20-25 °C，地下水水溫不易升高之原因為地下水水流速度與一般地下水水流速度相比較快，可達到 30-50 cm/day(一般地下水流速為 10 cm/day)，因而使散熱速度較快，故推測應無 VOCs 逸散而導致實驗數據異常之情形，未來光源之發熱是否會對處理效果造成影響，會再納入實驗規劃中。 11. 謝謝委員意見。 (1) 裕山公司協助本團隊之工項為定期委託之 MIP 試驗，以及先前使用封篩管之設計與製作，並擔任新開寮現場地下水歷年調查之顧問。 (2) 在技術的操作條件方面，根據現場結果調查發現，光觸媒為本技術之重要影響因子，故改質光觸媒可運用於可見光操作上將為未來最適操作條件，而技術的限制條件方面，主要為處理污染層之厚度受到限制，本團隊也規劃除了以分層施工法進行範圍增加之外，也進一步搭配多組水中光源機系統進行光源之延伸，以解決此限制。 (3) 關於本技術應用於實場之設計方面，目前本團隊規劃以打樁的方式進行現場之土壤地下水層之挖孔，因一般污染地下水之水位較淺，可以多孔式反應牆進行設置，而系統將以支撐架的方式進入，防止過程中土壤坍塌造成系統損壞，另一方面，在系統組裝的流程上，皆以套件進行串接，並且覆膜光纖之更換相當便利，因此在實務使用上可行性大大提升。另外，在應用方面，首先一定要先調查受污染地下水之基本特性，包含污染範圍，污染
---	--



	層深度，以及地下水流向，完成上述先導試驗後，即可有效進行系統設置及處理。
蔡俊鴻 委員	
1. 以上下游段處理井、觀測井之監測數據分析應用光纖光催化技術對含氯有機物破壞效果，應請檢視地下水位、流向之影響(如:P.57 所述)，確認處理效果。	1. 謝謝委員意見。本年度進行之試驗搭配地下水位進行觀察可以發現，其水位變化皆不像前三年度時所發生的劇烈，主要原因是今年之降雨量較少，無出現劇烈且長時間之豪大雨，因此試驗過程 14 天對於試驗結果應無影響，而流向也在先導試驗調查確定會由系統井往觀測井流動而進行上下游驗證比較。
2. 各項污染物濃度變化時序圖請掌握呈現(如:表 5、表 6)，並請解析系統井不同污染物去除率變化之潛在原因(表 6)。	2. 謝謝委員意見。本團隊之時序排列主要以試驗的時間為先後順序，另外，在污染物去除之潛在原因可由先前試驗結果得知，主要為光觸媒在光纖表面上所激發強氧化力之氫氧自由基，並透過水流接觸進而礦化，另一方面，其污染物可能受到降解，從大分子降解成生物可利用之小分子，因此，在受污染之地下水流經光纖光催化反應牆時，可有效受到去除。
3. 三處系統井於空白段/處理段各項污染物濃度於不同時間之變化甚大，請掌握原因，並檢視本項技術之有效性、可應用性。	3. 謝謝委員意見。在不相同時間下，其濃度變化差異主要因為含水層較厚之關係，其污染位置會具有移動的可能，從 MIP 數據結果可以得知，其污染團多位在淺水位置之範圍，因此，本團隊所收集之數據資料為淺水位之兩段(空白段與處理段)，而由數據結果可以得知，空白段之主要污染物(1,1- 二氯乙 烯)濃度大約落在 0.07-0.12 mg/L(超過管制標準)，而處理段之去除效果約為 40-80%。
4. 本項研究/技術開發於學術/產業/政策面之具體績效請掌握呈現。	4. 謝謝委員意見。本團隊在學術方面是以先前學理之批次反應瓶試驗進行至目前現地試驗，搭配學術研發，而產業方面，考量到未來實場運用方面性，已將本系統研發至模組化操作，在各種套接式零件，與可快拆式光纖設計，在未來產業推廣上運用更加方便。在政策方面，本團隊利用綠能設備搭配光纖光催化系統，進而使系統可利用太陽光源直接可於受污染之



	現場進行處理，此方法可有效減少電力使用，又可達到地下水整治之效果，正達到聯合國永續發展目標(Sustainable Development Goals, SDGs)之第 6 與第 7 點，後續本團隊也將持續針對各面向進行加強。
江康鈺 委員	
1. 請補充說明本計畫光纖模組及綠能系統之穩定度、靈敏度及可信度等品質規範，以利後續相關技術推廣之參考依據。	1. 謝謝委員意見。根據試驗結果之數據收集，目前分析出本處理系統於此場址之含氯有機污染物具有處理效率，可穩定降至監測標準以下，靈敏度及可信度之相關品質規範，則有待未來在更多場址之試驗結果後進行分析和說明。
2. 本技術於現地應用時，受到環境及地質或氣候條件之影響，建議宜研提未來應用本技術之標準作業程序，供委託單位參考。	2. 謝謝委員意見。本團隊於現地試驗皆進行先導試驗，包含地質水文，以及地下水流速流向調查，並在試驗前進行 MIP 之污染熱點確認，這一系列之參考作業程序皆呈現於報告中，未來若有相關單位進行參考，將可依循此先導試驗與系統施作，但因本場址較一般場址特殊，具有許多挑戰性之工作，因此在一般場址將可更有利於本系統之施作與整治。
許正一 委員	
1. 內容充實、執行方法與成效值得推廣。	1. 謝謝委員肯定。
2. 文字敘述過於冗長，建議將此技術 know 與操作流程用一個 flow chat 表示。	2. 謝謝委員意見。本團隊為有利於未來推廣，後續在更多場址進行驗證後，將依照委員意見，依循現場施作流程製作流程圖供相關單位參考。
土污基管會	
1. 是否會使用光的單位來評估光觸媒效果的時 候?當光的強度越強，是否會影響更深層的深 度? 以及光觸媒的材質是否也會影響其深度?	1. 謝謝委員意見。根據前期試驗結果得知，光強度為影響光催化效率重要因子之一，目前現場所使用之 LED 燈源為 50W，隨著近年 LED 技術愈發成熟，在相同面積下，以可嵌入具 100W 之 LED 燈源，故在未來應用上，當光強度增加，其光子量與光通量也會相對增加，並且可進一步增加處理深度，另一方面，光觸媒材質確實也是光反射之考慮因素之一，當光消耗較高之光觸媒，將不利於光的反射與傳導，因此光觸媒之選擇也由為重要，再者，若能進一步開發適合之



2. 光觸媒原理為污染物接觸到光纖上的物質，是否不會出現 ROI 效果的數值？

光觸媒，應用於光纖光催化技術上，透過可見光能有效進行激發，將可有效利用太陽光進行現場整治作業，達到綠色整治與永續發展之目標。

2. 謝謝委員意見。根據先前實驗室批次反應瓶試驗結果得知，以直徑 2 mm 光纖之 ROI 約為 2.5 cm，且其會隨著光纖直徑增加而提升，另一方面，由 110-111 試驗專案結果得知，在多井上下游進行系統試驗及比較時，可以發現上游之單井處理效果，經由地下水流動至下游觀測井時，污染物濃度會出現進一步的下降，這主要為光催化技術並非只有單純的氫氧自由基物質，也有可能透過光線將水中物質降解為小分子有機物，故而方便地下水中之微生物進一步利用，因而除強氧化物之礦化效果之外，其 ROI 將可視此上述試驗結果進一步擴大評估。



專案基本資料表

專案性質		☒ 實驗性質 ☐ 非實驗性質		專案技術編碼		LAB-S-R-Cl-C	
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		國立屏東科技大學環境工程與科學系					
機構地址		91201 屏東縣內埔鄉學府路 1 號					
專案主持人		陳冠中		職等／職稱		教授	
協同主持人		謝文博		職等／職稱		經理	
專案名稱	中文	以光催化技術處理地下水中含氯有機污染物-光纖模組及綠能系統開發(第二年)					
	英文	The Use of Photocatalytic Technology to Treat Chlorinated Organic Pollutants in Groundwater-Development of Optical Fiber Module and Green Energy System.					
	關鍵字	光催化透水性反應牆、模組化、含氯有機物、現地整治、綠能系統					
執行期程		自民國 111 年 05 月 20 日起至民國 112 年 04 月 30 日止					
專案主持人		姓名：陳冠中		E-mail：kcchen@mail.npust.edu.tw		專線：(08)770-3202#7039 手機：0988-096-249	
專/兼任人員		姓名：陳慶榮		E-mail：chingrung00@gmail.com		專線：(08)770-3202#7082 手機：0934-070-639	
經費分析總表	專案預估 總經費		111 年 經費		編列說明		
	1.	人事費用	949,622		(1~6 項相加之 50%為限)		
	2.	設備使用含維護費	10,000		(與計畫實驗相關)		
	3.	耗材與主要費用	1,042,187		(與計畫主體相關)		
	4.	其它研究相關費用	62,400		(含差旅與租賃費用)		
	5.	雜項費用	26,700		(1~6 項相加之 5%為限)		
	6.	行政管理費	209,091		(1~6 項相加之 10%為限)		
	7.	自籌款	0		(申請單位自行籌備款項)		
	申請補助經費(1~6 項)		2,300,000		總金額：2,300,000		
計畫總經費(1~7 項)		2,300,000		總金額：2,300,000			

專案主持人：_____（簽名及蓋章） 日期：_____

執行單位：國立屏東科技大學

單位負責人：張金龍



土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗專案

111 年度專案成果績效自評表

一、專案基本資料

填表日期：112 年 05 月 03 日

專案性質	☒ 實驗性質 ☐ 非實驗性質	專案類別	☐ 研究專案 ☒ 模場試驗
研究主題	☒ 整治 ☐ 評估 ☐ 預防 ☐ 自訂		
申請機構系所	國立屏東科技大學 環境工程與科學系	計畫主持人	陳冠中
專案名稱	以光催化技術處理地下水中含氯有機污染物-光纖模組及綠能系統開發(第二年)		
專案執行期程	☐ 1 年期 ☒ 2 年期 ☐ 3 年期	查核點	☐ 申請 ☐ 期中 ☒ 期末

二、成果績效自評

(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 達成率	備註 (說明未達成原因或學術 產出發表日期、發表處、 發表名稱、影響指數等)
A 學術 產出 及 活動	1.國內投稿 (篇數)	(1)論文	0	0	0	0%	
		(2)研討會論文	1	1	1	100%	
	2.國外投稿 (篇數)	(1)期刊論文	1	0	1	100%	已於 2023/4/27 發表刊登於 Materials Science in Semiconductor Processing 期刊 (SCI)
		(2)研討會論文	0	0	0	0%	
	3.報告 (篇數)	(1)技術報告	0	0	0	0%	
		(2)研究報告	1	1	1	100%	
	4.專著 (本數)		0	0	0	0%	
	5.辦理學術 會議(場數)	(1)研討/說明會	0	0	0	0%	
		(2)成果發表會	0	0	0	0%	
		(3)論壇	0	0	0	0%	
B 人才 培育	6.研發改良 技術(項數)	(1)已開發技術	0	0	0	0%	
		(2)技術平台	0	0	0	0%	
	7.研發人員 (人數)	(1)碩士	2	2	2	100%	
		(2)博士	1	1	1	100%	
		(1)跨領域團隊	0	0	0	0%	
		(2)跨機構團隊	0	0	0	0%	
		(3)形成研究中心	0	0	0	0%	
		(4)形成實驗室	0	0	0	0%	



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 達成率	備註 (說明未達成原因或學術 產出發表日期、發表處、 發表名稱、影響指數等)
9.其他指標 (請自行命名)						

(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 達成率	備註
項目								
A 智慧 財產 權	1.專利 (件數)	已 核 准	發明	0	0	0%		
			新型/設計	0	0	0%		
			合計	0	0	0%		
		申 請 中	發明	0	0	0%		
			新型/設計	0	0	0%		
			合計	0	0	0%		
B 研發 技術 轉移	2.先期技術 成果移轉	件數		0	0	0%		
		授權金(仟元)		0	0	0%		
		衍生利益金(仟元)		0	0	0%		
	3.技術移轉 (專利)	件數		0	0	0%		
		授權金(仟元)		0	0	0%		
		衍生利益金(仟元)		0	0	0%		
	4.技術移轉 (應用技術)	件數		0	0	0%		
		授權金(仟元)		0	0	0%		
		衍生利益金(仟元)		0	0	0%		
	5.可移轉 產業技術	(1)技術(件數)		0	0	0%		
		(2)品種/系(件數)		0	0	0%		
C 產學 研合 作	6.促成合作研究	件數		0	0	0%		
		金額(仟元)		0	0	0%		
	7.促成投資	件數		0	0	0%		
		投資金額(仟元)		0	0	0%		
	8.促成取得 業界科專	件數		0	0	0%		
		業界投資金額(仟元)		0	0	0%		
9.其他指標								



(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 達成率	備註
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 制定(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							

三、請依學術面、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) 本技術藉由光纖系統將光催化技術直接應用於處理受污染之地下水，歷年研究成果顯著，擬由本計畫執行成果，發表 1 篇國際 SCI 論文和 1 篇國內研討會論文。計畫將由本系博士生、碩士生參與執行，培養我國土壤地下水污染處理人才。
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) 本模場試驗計畫與國內具有地下水污染處理豐富實務經驗之裕山環境工程股份有限公司(以下簡稱裕山公司)組成合作團隊，由國立屏東科技大學陳冠中教授之研究團隊負責光催化處理系統相關之設備設置、操作及採樣，污染物分析由台灣檢驗科技股份有限公司，並由井帝鑿井公司協助使用之監測井和簡易/處理井維護。本計畫邀請裕山公司擔任協同主持人，與該公司研討光纖系統設置，有培育新興環保技術工程人才之效益。另一方面，本團隊已於上年度與本校研發處及創新育成中心進行專利或技術轉移評估，為專利申請或技轉作準備。
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、污染場址管理等政策及法規研訂之參考) 本技術符合綠色處理技術之要求，除可以降低處理時之能源消耗外，並可以減少化學藥劑之運送和使用，降低二次污染發生之機率，可以做為綠色環保技術推廣，且經前期計畫初步評估，所需成本較目前所採用之現地處理技術低廉。本期研究將以改質光觸媒進行可見光(太陽光)光催化試驗，研究成果可以作為使用太陽光作為光纖光催化光源和系統能源之參考，具有成本效益。



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

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	執行期間
陳冠中	國立屏東科技大學/ 環境工程與科學系	計畫主持人	整體計畫之規劃、執行和推動，進度安排和實驗規劃設計、研究報告撰寫和學術論文發表，並指導研究人員進行實驗分析、資料蒐集和數據分析。	111/05/20 -112/04/30
謝文博	裕山環境工程公司	協同主持人	提供執行技術面上支援及顧問，協助模場現地測試、光電相關設備設置等。	111/05/20 -112/04/30
陳慶榮	國立屏東科技大學/ 環境工程與科學系	專任助理	進行相關文獻蒐集、處理系統操作、採樣和分析實驗、數據整理、統計分析和圖表製作、研討會論文撰寫、協助論文投稿。	111/05/20 -112/04/30
白宇寰	國立屏東科技大學/ 環境工程與科學系	兼任助理	協助樣品採集、分析、行政事務	111/05/20 -112/04/30
胡安庭	國立屏東科技大學/ 環境工程與科學系	兼任助理	協助樣品採集、分析、行政事務	111/05/20 -112/04/30

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
無		



摘要

本研究專案在前期的研究基礎成果下，已經開發至現地試驗之光纖光催化系統，本系統對受污染地下水之處理構想，係以光纖光催化系統將光源導入地下含水層，藉由類似透水性反應牆概念，設置光催化光纖集束系統，可以經由光纖內部光源照射其表面之光觸媒後產生氫氧自由基($\cdot\text{OH}$)，與地下水中之含氯有機污染物反應，達到去除污染物和整治污染場址之效果。本團隊利用水中光源機，將發光位置有效延伸至地下水污染層，降低傳輸過程中的光損失。根據 108-109 年度以不同光觸媒種類、光源種類，以及光纖支數進行一系列試驗，結果顯示光纖光催化系統放置於污染層中進行處理，可有效去除地下水中含氯有機污染物，且模場監測知四種污染物幾乎皆達到 100% 去除效率。由上述之前期模場專案(108-109 年度)執行結果顯示，以光纖光催化系統應用於受含氯有機物污染之地下水現地處理具有極高的可行性。

在 110-111 專案計畫中，本團隊於場址周邊進行多口試驗系統井之光纖光催化試驗，並搭配地下水下游之觀測井進行驗證，本試驗期間已完成開發模組化的光纖光催化設備，以便於未來進行技術推廣時，易於現地組裝使用。同時，本團隊於第二年計畫中，已完成設計適合光纖光催化系統之太陽能儲能系統，並對於太陽能聚光設備已完成初步設計評估與測試。為因應未來系統運用至較缺電之現地場址，因此透過設計組合以及考量現場設備需求，將太陽能蓄電設備進行安裝，後續也可達到節能減碳之目標。本團隊於 110-111 年度，目前已完成三組背景空白試驗，以及九組系統試驗。在背景空白試驗可以得知，以 30 m 與 35 m 進行被動式採樣袋收集污染物濃度結果顯示，此兩地下水位在未進行任何光纖光催化處理時，濃度趨勢顯示沒有任何變化，並且由上下游之處理井與觀測井發現，其濃度趨勢大致上都相同。另外，本研究透過光纖光催化系統在不同操作條件下，由單井驗證主要污染物之去除效率最高可達 98%，而上下游比較後發現去除效率可達到 59% 至 89%，故由單井或上下游之多井雙軌驗證數據結果皆證明，系統之處理段可有效處理地下水之污染物。本團隊於 111 年度持續針對系統進行更多試驗數據驗證收集，透過改質觸媒種類($\text{N-TiO}_2\text{-ZnO/CNT}$)與光源種類進行探討。另一方面，在光纖光催化系統處理過後，分析得到氯離子濃度提高，代表此系統於地下水污染層對含氯有機污染物產生光催化降解作用；此外，處理後地下水 DOC 濃度降低也說明地下水中之有機污染物受到去除，但會受到強降雨的影響，土壤中有機物質會被沖刷致使 DOC 濃度會產生浮動變化。最後，經初步成本效益評估本技術與其他傳統技術相比，是具有競爭力的。

關鍵詞：光催化透水性反應牆、模組化、含氯有機物、現地整治、綠能系統



Abstract

According to our previous research, this project has conducted the optical fiber photocatalytic system's field test. The design of the system is based on the concept that using optical fiber to transfer the light from its source to the underground aquifer to treat organic contaminants. The photocatalytic fiber bundle system is set up as a simulated permeable reaction barrier, generating hydroxyl radicals when the internal light of the optical fiber irradiates photocatalysts that coated on the fiber surface. Thereafter, the hydroxyl radicals react with organic pollutants in the groundwater to remove contaminants and remediate polluted sites. We have designed an underwater light source suitable for use in thicker groundwater layers. It can effectively extend the light to the groundwater pollution layer and reduce light loss. According to our study results in 2019-2020, we found that the optical fiber photocatalytic system effectively removed organic pollutants when it was placed in the polluted layer. Almost all four monitored pollutants reached 100% removal efficiency. Therefore, it can be proved that our on-site treatment of groundwater contaminated by chlorinated organic compounds is feasible using the optical fiber photocatalytic system.

In the 2021-2022 project, we carried out fiber photocatalytic tests of multiple test system wells around the site, and matched with observation wells downstream of groundwater for verification. During this test period, the development and modularization has been completed. The optical fiber photocatalytic equipment is easy to assemble and use on site for future technical promotion. In the second year of the project, we had the preliminary design evaluation and testing for solar concentrating equipment., which will be tested and evaluated for feasibility in the future. In response to the future application of the system to on-site sites with less electricity, the solar energy storage equipment is installed through the design combination and consideration of on-site equipment requirements, and the goal of energy saving and carbon reduction can also be achieved in the future. We have completed three sets of background blank experiments, and nine sets of systematic experiments. From the background blank test, it can be known that the concentration of pollutants collected by passive sampling bags at 30 m and 35 m shows that there is no change in the concentration trend of these two groundwater levels without any fiber photocatalytic



treatment. In addition, in this study, the fiber photocatalytic system was used to verify that the removal efficiency of major pollutants can reach up to 98% by single well under different operating conditions. After comparing the upstream and downstream, it is found that the removal efficiency can reach 59% to 89%, so it is proved that the treatment section of the system can effectively treat the pollutants in the groundwater. In this study, we will continue to verify and collect more test data for the system in 2022, and discuss the types of modified catalysts (N-TiO₂-ZnO/CNT) and light sources. On the other hand, after the optical fiber photocatalytic system was processed, it was found that the chloride ion concentration increased, indicating that the system produced photocatalytic degradation of chlorine-containing organic pollutants in the groundwater pollution layer. The reduction of DOC concentration in groundwater after treatment also indicates that organic pollutants in groundwater have been removed, but it will be affected by heavy rainfall, and organic matter in soil will be washed away, resulting in fluctuations in DOC concentration. Finally, the technology is competitive with other traditional technologies based on preliminary cost-benefit evaluation. Finally, based on the preliminary cost-benefit evaluation, this technology is competitive compared to other conventional technologies.

Keywords: photocatalytic permeable reactive barrier, modularization, chlorinated organic matter, in-site remediation, green energy system



目錄

第一章 前言	28
1.1、研究緣起	28
1.2、研究目的	31
第二章 文獻回顧	32
2.1、土壤和地下水污染處理技術	32
2.2、含氯有機物光催化處理技術	34
2.2.1、光纖種類與應用	37
2.2.2、光觸媒種類	38
2.2.3、無機樹脂覆膜技術	39
2.3、近期相關光纖光催化成果應用	42
2.4、綠能光電設備與光催化應用	45
第三章 材料與方法	47
3.1、試劑與藥品	47
3.2、分析方法	47
3.2.1、被動式採樣袋試驗說明	47
3.2.2、含氯有機物分析方法	48
3.2.3、氯離子分析方法	48
3.2.4、總有機碳分析方法	49
3.2.5、數據之品保品管(QA/QC)	49
3.2.6、檢量線製備	49
3.2.7、方法偵測極限	49
3.2.8、樣品重複分析	50
3.3、現地調查方法	50
3.3.1、地質調查作業	50
3.3.2、場址流速流測定	51
3.3.3、薄膜介面探測作業	52
3.3.4、環境背景資料調查	52



3.3.4.1、地理及地形.....	52
3.3.4.2、氣候.....	53
3.3.4.3、地質與土壤.....	53
3.3.4.4、地表水系.....	53
3.4、污染整治方法規劃.....	53
3.4.1、試驗模場場址說明.....	53
3.4.2、現地模場整理情形說明.....	56
3.4.3、光纖光催化系統技術說明.....	57
3.5、模場試驗規劃說明.....	62
3.6、覆膜光纖製備與成份特性分析.....	65
3.7、反應途徑及中間產物.....	66
3.8、工作進度甘特圖.....	68
第四章 結果與討論.....	71
4.1、現地模場之水文地質.....	71
4.2、模場地下水位及水質情況調查.....	76
4.3、薄膜介面探測作業(MIP)試驗.....	85
4.4、應用光纖光催化於現地試驗結果.....	89
4.4.1、光纖光催化系統模組化及成本初評說明.....	89
4.4.2、應用系統於現地對於受污染之地下水中含氯有機物之影響.....	93
4.4.3、應用系統於現地對於受污染之地下水中 DOC 及 Cl-之影響.....	111
4.5、綠能設備應用規劃說明.....	113
4.5.1、應用規劃與說明.....	113
4.5.2、綠能技術評估與實際初步成本效益.....	115
第五章 結論與建議.....	120
5.1、結論.....	120
5.2、建議.....	121
參考文獻.....	123



表目錄

表1、IC分析儀器設定條件.....	48
表2、模場試驗場址基本資料.....	54
表3、模場井群基本資料.....	55
表4、模場試驗設置參數說明.....	64
表5、新現地模場系統/觀測井地下水含氯有機污染物濃度與水質紀錄一覽表....	79
表6、地下水含氯有機物測定結果(系統井)	95
表7、地下水含氯有機物測定結果(觀測井)	102
表8、處理井地下水中氯離子與溶解性有機碳測定結果.....	112
表9、光纖光催化系統應用於現地之成本初步評估.....	119
表10、新穎之光纖光催化反應牆與傳統地下水處理技術成本效益評估比較.....	119



圖目錄

圖1、流通式光電反應器系統示意圖.....	36
圖2、太陽能聚光器與光纖束耦合實體圖.....	46
圖3、離子層析儀之標準分析圖譜.....	49
圖4、現地土壤地質採樣圖.....	50
圖5、地質剖面圖.....	51
圖6、MIP系統組成示意圖.....	52
圖7、試驗模場配置圖-T00239及周遭灌注/觀測井.....	55
圖8、井中攝影情形.....	56
圖9、水中光源機設計測試.....	59
圖10、石英光纖光強度測試.....	59
圖11、光纖光催化系統整體組裝實體圖.....	59
圖12、光纖光催化處理段實體圖(紫外光).....	60
圖13、覆膜石英光纖發光實體圖(紫外光).....	60
圖14、光纖光催化處理段實體圖(可見光).....	60
圖15、覆膜石英光纖發光實體圖(可見光).....	60
圖16、光纖光催化系統放置處理井施工圖.....	60
圖17、光纖光催化系統應用於處理井之整體示意圖.....	61
圖18、光纖透水性反應牆設置示意圖.....	62
圖19、光纖光催化系統結合綠能(太陽光源/光電)概念示意圖.....	63
圖20、光纖光催化反應牆系統應用於現地處理示意圖.....	63
圖21、以不同覆鍍法之光纖結構圖.....	66
圖22、TCE降解反應途徑.....	67
圖23、工作進度甘特圖.....	70
圖24、數值模式模擬範圍分布圖.....	71
圖25、本計畫範圍之水文地質概念模型圖.....	72
圖26、歷年設置地下水監測井地質調查資料.....	72
圖27、公告污染場址區域地質剖面線.....	73



圖28、公告污染場址區域地質剖面圖.....	73
圖29、公告污染場址區域範圍3D地質概念圖.....	74
圖30、屏東縣地質分布圖.....	75
圖31、林邊溪北岸各農場地質剖面圖.....	75
圖32、新開寮模場地下水流場分佈圖.....	76
圖33、現地模場水位測量圖.....	77
圖34、MIP組裝及現場作業.....	87
圖35、108年度MIP分析結果.....	87
圖36、109年度MIP分析結果.....	88
圖37、110-111年度MIP分析結果.....	89
圖38、光纖光催化系統整體組裝3D模擬及實體圖.....	91
圖39、光纖光催化模組化套件實體圖.....	92
圖40、光纖光催化應用於現地之背景試驗(Blank、試驗I).....	108
圖41、光纖光催化應用於現地之試驗(試驗條件: UV Light/N-TiO ₂ 、試驗D).....	108
圖42、光纖光催化應用於現地之試驗(試驗條件: UV Light/ZnO-CNT-N-TiO ₂ 、試驗L).....	109
圖43、光纖光催化應用於現地之試驗(試驗條件: Visible Light/N-TiO ₂ 、試驗G).....	109
圖44、光纖光催化應用於現地之試驗(試驗條件: Vible Light/ZnO-CNT-N-TiO ₂ 、試驗J).....	110
圖45、系統結合太陽能綠能設備示意圖.....	114
圖46、太陽能綠能設備架設現場照片.....	116
圖47、綠能系統配電裝置與蓄電池及電線設備.....	116
圖48、太陽光聚光照簡易設計概念3D立體圖.....	116
圖49、太陽聚光罩外觀實體圖.....	117
圖50、太陽光聚光之燒杯(Beaker)試驗.....	117
圖51、太陽光聚光之光纖光催化瓶杯試驗.....	117
圖52、以太陽光聚光結合光纖光催化去除污染物之去除效率比較.....	117



第一章 前言

1.1、研究緣起

近年來有關地下水污染及整治案例之相關議題備受關注，造成地下水污染之原因，主要是由於各種事業廢水和生活污水，在未經妥善處理下，即排放到環境中，或是由於部分埋設於地下之化學儲存桶槽，因老舊破損或受外力而導致破裂洩漏。這些廢污水或是化學物質滲入土壤或被注入地下後，容易造成土壤和地下水受到污染。目前現有針對地下水處理整治之處理場所，不外乎現場(on-site)與離場(off-site)兩種，其中現場處理又可分為現地(in-situ)和離地(ex-situ)處理；處理方式則包括生物處理、物理/化學處理、和整治列車(treatment train)等。以化學方法進行現場處理為例，常以添加化學藥劑之方式去除地下水中之有機污染物或無機污染物，但是在實際應用上可能有最佳加藥劑量不易控制的問題，劑量使用太低恐使污染物之去除效果不佳，無法達到預期處理成果，倘若添加過量，又有發生二次污染之虞。而離場處理主要是指將受污染之地下水抽出後，運送至廢水場處理，利用專業的廢水處理技術和設備去除污染物質，但是，相對地其處理成本較現場處理昂貴。因此，在不需要大規模開挖和盡量降低化學藥劑使用量之前提下，研發效果穩定和高效率之新穎地下水現地處理技術有其必要性。含氯有機物包含最常見之三氯乙烯(trichloroethylene, TCE)為工業上常用之一種有機溶劑，主要用途包括作為金屬表面油脂去除溶劑、油脂類物質之萃取溶劑、或是製冷劑等。TCE 對於人體健康之影響包括吸入 TCE 會影響中樞神經系統，導致頭暈、頭痛、精神錯亂、面部麻痺等症狀。亦可能引起腎臟、肝臟、子宮頸和淋巴系統產生腫瘤。由於 TCE 屬於重質非水相液體(dense non-aqueous phase liquid, DNAPL)，排放到環境中容易積存在地下水層底部，整治較為困難。

目前以光催化進行土壤及地下水現地污染整治之研究極為有限，主要是由於土壤層遮蔽了光線，使其應用受限，故以抽出處理法(pump and treat)將受污染之地下水抽運到地面廢水處理設施處理為主。光催化技術(photocatalytic technology)為常應用於環境污染處理上之一種高級氧化技術，近年來，光催化技術因光觸媒製備技術之提升而受到極大關注。光催化技術係利用光之能量來使光觸媒之價軌域能帶和傳導能帶間發生電子轉移，進而產生電子-電洞對(conduction-band electron and valence-band hole)；在水中時，光觸媒附近之水分子或游離出的氫氧根離子(OH^-)會產生氫氧自由基(hydroxyl radicals, $\cdot\text{OH}$)。這些氧化力極強的 $\cdot\text{OH}$ 可以有效的礦化或是分解水中的化學物質。由於 $\cdot\text{OH}$ 的選擇性低，且可以破壞大多數的有機化合物，適合應用在各類含有複雜有機物之廢污水處理。而在光觸媒的製備技術上，目前以複合金屬觸媒為主要的研發重點。複合金屬觸媒之製備方法以覆鍍技術為例，包括了含浸法(impregnation)、浸鍍法(dip coating)和濺鍍法



(sputtering)等，這些方法可以將光觸媒覆鍍於固態載體上，避免奈米級、微米級或粉狀觸媒於處理過程中發生流失、逸散之情形，免除額外增設觸媒回收處理設備，來回收逸散至處理水中之光觸媒。光催化技術之要件除了光觸媒之外，另一要件即為光源。過去光催化技術鮮少應用於地下水現場之現地處理，主因在於所需之光源無法穿透土壤達到受污染之地下含水層。若希望以光催化技術應用在處理受污染之地下水時，則必須利用新穎的透光和光傳輸材料來解決光催化反應所需之光源問題。光纖(optical fiber, OF)近年來被大量運用於電信和資訊工程之資訊傳輸，主因在於光纖具有高導光特性，能長距離無失真地傳送訊號。另一方面，光纖也逐漸應用在部分的照明裝飾上，著眼於傳遞和延伸光能量。因此，以光纖作為光的導體，將光線由地表傳遞到土壤含水層中，使得於地下水層中進行現地的光催化反應能夠實現。以塑膠光纖為例，將光纖表層之 PVC 和鐵氟龍層剝除後，即形成透光表面，將光觸媒覆鍍在透光的光纖上，當光線傳輸到透光段，由光纖內部的光線向外照射到其表層之光觸媒時，所產生之 $\cdot\text{OH}$ 即可與地下水中之有機污染物進行光催化反應，達成去除污染物之效果。而在光源部分，由於發光二極體(light-emitting diode, LED)製備技術已經成熟，成本逐漸降低，且具有發光效率高、使用壽命長和耗電量少等優點，因此，以覆膜光纖光催化技術搭配節能之 LED 光源，進行光催化處理受污染之地下水，極具有研究和開發之價值。

根據本研究團隊 103 年度和 105 年度接受環保署土污基管會補助截至目前之研究成果顯示，覆膜光纖光催化可以有效地降解實驗室中模擬地下水中之 TCE，然而，由於在進行光觸媒覆度於光纖上之準備工作時，必須先將光纖外層之包膜(cladding)剝除，大幅降低了光纖光傳導強度之距離。因此，本團隊於 106 年度研發光纖覆膜液進行覆膜光纖試驗，研究結果顯示使用覆膜液進行觸媒覆鍍光纖可有效提升表面附著力以及均勻性，並增加覆膜光纖光催化有效長度，同時延長光觸媒附著於光纖上之使用時間。107 年度則將過去的 bench-scale 土壤箱試驗放大成噸級的土壤箱試驗，以進一步模擬未來於實場應用時可能面對之問題，以及初步評估和比較處理成效。108-109 年度進行現地模場試驗，先針對模場之流速流向進行調查，並定期以薄膜介面探測儀(membrane interface probe, MIP)分析模場之多井，優先找到污染熱點再進行光催化處理試驗。在處理井之光纖光催化系統測試上，於 108 年度試驗結果可以發現，該系統放置於污染層當中進行處理，皆可有效去除地下水中之污染物，四種污染物幾乎皆達到 100% 去除效率。109 年度測試不同光觸媒、光源種類、以及光纖支數等進行一系列試驗，探討不同操作條件對於地下水含氯有機物之去除效率，系統試驗結果顯示，以可見光作為光源，以 N-TiO_2 作為光纖上覆鍍之光觸媒，可以達到最佳的含氯有機污染物去除效率，證實本系統能有效處理高地下水流速之污染含水層，而對於較低流速之污



染場址，亦應有良好處理效果。

而自民國 89 年起，屏東縣新埤鄉新開寮地區經區域性監測井採樣調查發現，該地區地下水受到不明污染源之含氯有機物污染，經行政院環境保護署(以下簡稱環保署)及屏東縣政府環境保護局(以下簡稱環保局)啟動多項調查計畫與管制作為，包括：歷年不斷增設地下水水質監測井，每年至少 2 次地下水質調查等作業，以了解新開寮地區地下水污染範圍與程度；並於 93 年公告新開寮地區為地下水使用限制地區，進行相關管制作業，亦針對周邊區域蒐集相關環境資料，以及周邊可疑污染場址訪查，俾利釐清污染來源。該區域地下水中主要污染物為 1,1-二氯乙烯(超過管制標準)及 1,1,2-三氯乙烯(超過監測標準)，早期雖曾經檢測出四氯乙烯、三氯乙烯等污染物，但於近年監測已低於監測標準。由於本區域地下水含水層較厚、靠近林邊溪及鄰近區域可能有多處污染來源不明確之場址，造成污染來源調查困難，於多年調查過程中，亦對於後續管制作業逐漸建立主軸，並評估以監測式自然衰減方式進行。由於新開寮地區較靠近屏東平原東側，亦即位於屏東沖積平原之上游區，整體含水層厚度約達地表下 200 公尺，另由於該地區幅員廣闊，污染物以 DNAPL 為主，造成整治難度甚高，因此暫以監測自然衰減方式為主。而近年來的監測資料顯示，污染範圍已有往下游移動之趨勢，對於較下游人口稠密之區域(包括：崙東社區及更下游之潮州鎮區域)可能逐漸產生影響。因此，環保局採更積極之管制作為，近年來進行攔阻系統模場試驗，藉由田野調查、地下水水質監測、攔阻系統模場先導試驗、風險評估及整體後續管制措施擬定等工作，擬定更完善的管制策略，評估攔阻系統及自然衰減模式的可行性，作為未來整治技術採用之依據。

本團隊開發之模場試驗，係以光纖光催化透水性反應牆(permeable reactive barriers, PRB)技術，實際應用至現地模場進行地下水中污染物處理。我們以過去的研究成果和經驗作為基礎，採用之現地地下水處理應用模式為：先在受污染場址挖設處理/監測井，透過MIP分析出污染地下水之熱點位置，再將光觸媒覆膜光纖伸入預定處理深度之受污染之地下含水層，之後開啟燈源進行光催化反應，當受污染之地下水流過PRB時，污染物將被光催化產生之氫氧自由基分解，原先規劃以下游之監測井採樣進行處理效果之驗證。



1.2、研究目的

本研究之目的為開發適合現地應用之光催化處理受污染之地下水處理技術，並且由於擁有施工開挖面積極小、不添加化學藥劑、耗能較低、以及適合各種土地面積規模使用等優點，有助於廣泛應用於現地地下水有機物污染整治，並能夠符合綠色整治技術之條件。本年度規劃調查模場處理井附近地下水水質現況，並透過裕山環境顧問公司長年深入調查場址污染，將彙整場址歷年地下水及水文地質資料，以釐清場址污染範圍，並掌握地下水流向，以確保處理技術之成效驗證。本團隊於 108 年度設計一套適合應用於地下水層較厚之水中光源機，可將光源有效延伸至地下水污染層，降低光損失。在現地試驗方面，本研究以模場之流速流向進行試驗調查，並針對處理井進行 MIP 分析，優先找到污染層及熱點。試驗以被動式採樣袋進行井中污染物濃度空白分析，得到背景資料確認後，再以光纖光催化系統應用至現地試驗並進行含氯有機物之處理效果探討，試驗最後進行總有機碳與氯離子濃度之影響調查。

本模場計畫(執行期間 110-111 年度)係以現地污染場址整治進行試驗，結合先前年度研究成果，利用無機覆膜液搭配噴霧塗佈法增強光纖覆膜效率及光觸媒均勻分佈性，以分層嵌入工法建立 PRB。本研究之目的為開發適合現地應用之光催化處理受污染之地下水處理技術，並以受 TCE 污染之地下水受污染使用限制區作為模場試驗位置，進行處理效能評估。110 年度之計畫已經完成新場址(1)實驗設備購買、組裝和測試；(2)整體系統設置設計和組裝；(3)施工架設：含整地施工、貨櫃安裝、電源設置等。並且定期進行場址各井之污染物處理效果評估和濃度監測。監測結果將統整後評估後作為後續光纖光催化系統處理位置之依據。另外，新場址進行系統初步處理試驗，完成處理結果分析，並於新場址初步探討光纖光催化反應牆系統(多井)之處理效率。在 111 年度(第二年)，本團隊將持續操作整治系統，於新場址測試不同操作條件進行污染現地光催化處理，蒐集及分析長期數據。另外，本團隊為使本系統模組更加具有便利性，將暫時移除為驗證及固定光纖所需之封篩管進行試驗，僅以電線即可放入井中進行光纖光催化處理，這在未來應用於現地將更具有其可行性。另外，本團隊探討評估光纖光催化系統結合綠能之研究開發，以及光纖光催化系統應用模組化，藉以提升實場應用之效率及設備維護可靠性。



第二章 文獻回顧

2.1、土壤和地下水污染處理技術

有關去除地下水中含氯有機物之傳統處理方法，多半採用 pump-and-treat 技術。其原理為將受污染之地下水抽出至地表，並以地上處理設施處理抽出之污染地下水；且設置容易、成本低和技術門檻低等優點；但此技術也因(1)疏水性污染物溶解於水中的速率緩慢，導致污染物無法隨地下水快速且有效地抽出、(2)土壤吸附污染物的脫附速率緩慢，在停止抽水後污染物的濃度會在緩慢的升高和(3)污染物從水力傳導性低的區域擴散到水力傳導性高的區域緩慢等因素(Rodrigues al., 2020)，使該技術難以完整修復污染地下水水體。Linek et al. (1998)使用粒狀活性炭(granular activated carbon, GAC)處理地下水中 TCE，但是 GAC 僅有吸附 TCE 的作用，並無法分解 TCE，且 GAC 會因吸附飽和而必須要頻繁的更換，導致成本太高而不經濟。同時，如果使用 GAC 吸附或是使用氣提(air-stripping)的方式處理 TCE 的話，並沒有辦法真正的解決污染問題，而只是將污染物轉到另一個相而已(National Research Council, 2005)。另一方面，研究學者將土壤及地下水污染之處理技術依照處理地點的不同，大致分為現地(in situ)、現場(on site)和離地(ex situ)三種。其中，對於有機污染物如氯化碳氫化合物(chlorinated hydrocarbon，包括 TCE、PCE 等)、多環芳香族碳氫化合物(polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs)、甲基第三丁基醚(methyl tertiary-butyl ether, MTBE)、BTEX (benzene, toluene, ethylbenzene 和 xylenes)和內分泌干擾物質(endocrine disrupting chemicals, EDCs)之處理技術，則需視污染物之特性來加以適用。一般而言，對於上述有機污染物之處理技術包括：土壤氣體抽除法(soil vapor extraction)、界面活性劑沖排技術(surfactant flooding)、現地氧化法(in situ oxidation)、電熱及電動法(electrical heating and electrokinetic methods)、生物復育法(bioremediation)、反應牆整治法(reactive barrier walls)、植生復育法(phytoremediation)、吸附吸收法(adsorption/absorption)、固化/穩定化(solidification/stabilization)和熱處理法(thermal treatment)等(Caliman et al., 2011)。

以氧化處理技術為例，過去在國內的相關研究上，以臭氧化技術運用在土壤和地下水污染整治的研究並不多見。然而，從國外學者發表的研究成果可以發現，對於具有穩定性、水中溶解度低、低揮發性和高分子量等之污染物，如 PAEs 和 PAHs，則以臭氧(O₃)處理為一可行之處理技術(Masten and Davies, 1997; Choi et al., 2002; Kim and Choi, 2002; Kong et al., 2003; Goi and Trapido, 2004; Haapea and Tuhkanen, 2006; O'Mahony et al., 2006; Javorska et al., 2009)。Masten and Davies (1997)以 O₃ 處理受 PAHs 污染之土壤，目標污染物-菲(phenanthrene)和芘(pyrene)之去除率最高分別可達 95%和 91%。Choi et al. (2002)研究 O₃ 在土壤中之傳輸效



果，研究結果顯示， O_3 可以去除不飽和土壤中的 phenanthrene 和柴油有機污染物。Kim and Choi (2002)研究以 O_3 處理不飽和土壤中的非揮發性 PAHs，他們在報告中指出，雖然 O_3 可以有效的處理土壤中的 phenanthrene，但是 O_3 傳輸的範圍受到土壤中有機質含量的影響。Goi and Trapido (2004)指出， O_3 氧化和 Fenton 法都可以有效的處理受 PAHs 污染的土壤。Haapea and Tuhkanen (2006)使用整治列車方法，以土壤沖洗、臭氧化接續生物處理的方法處理受 PAHs 污染的土壤，對於 PAHs 土壤含量 1200 mg/kg 進行整治處理之後，去除率可以達到 90%，並且符合土壤污染的處理標準。O' Mahony et al. (2006)的研究也顯示， O_3 處理效果與土壤的性質和成分有關，當土壤中水分含量越低時， O_3 對於土壤中的 PAHs 去除效果越好，土壤中黏土成分越高也會降低 O_3 處理效果，最佳處理效果可以達到 85%。Javorska et al. (2009)以 O_3 處理受多氯聯苯(polychlorinated biphenyls, PCBs)污染之土壤，研究結果顯示， O_3 能夠有效的處理剛受到 PCBs 污染的土壤，同時土壤中有機質含量較少時，處理效果越佳，該研究亦認為以 O_3 進行 PCBs 土壤污染處理是一環境友善的整治技術(environmental friendly remediation technology)，因為在研究中發現，處理過程中，植物的生長並沒有受到影響，但是土壤的有機質含量和 pH 值有些許改變。另一方面，單獨臭氧化在處理天然水中的 TCE 時，由於水中的碳酸鹽(carbonates)成分干擾，而降低 $\cdot OH$ 的氧化速率。Beltran et al. (1999)研究發現，若在相同的處理條件之下，臭氧化處理純水中的 TCE 與處理天然水中的 TCE，處理效果分別為 68.8% 和 24.6%。他們同時建議以 O_3/H_2O_2 的方法處理水中的 TCE 可達到最佳的處理效果。Yasunaga and Hirotsuji (2008)兩位學者也發現， O_3/H_2O_2 可以比臭氧化產生更多的 $\cdot OH$ ，因此，其處理 TCE 之去除效率比單獨使用 O_3 處理可高出 40%。在 Fenton 法方面，結合各種技術使 H_2O_2 轉化為氫氧自由基($OH\cdot$)，如：使用 Fenton 試劑(H_2O_2 與 Fe^{2+})或 Fenton-like 試劑(H_2O_2 與 Fe^{3+})等方式去除污染物，而 Fenton 試劑反應過程中對 pH 值較敏感，在低 pH 條件時 H^+ 對 $HO\cdot$ 的清除作用增強，導致 Fenton 試劑的氧化能力降低，因在高或低 pH 條件下 Fenton 無法有效地將污染物氧化(Yang et al., 2020)。近年來過硫酸鹽(Persulfate, PS)，也被廣泛應用於現地化學氧化法中，因為與上述氧化劑相比，它在地下環境中較容易處理且更具活性，且能在地下水中做遠距離得輸送(Bacocchi et al., 2014；Ranc et al., 2016)。過硫酸鹽自生成活性氧物質(Reactive oxygen species, ROS)過程緩慢，所以需要使用外部因素進行激發，可藉由紫外光(UV)、光、熱和過渡金屬等來提高對污染物降解效率(Rayaroth et al., 2020)。

在生物處理技術研究方面，使用微生物的生長和活性等特性，此技術可在飽和層區域針對污染物進行生物性分解，且能有效的降解溶解在地下水及吸附在含水層中的有機物成分，使受污染之土壤和地下水進行清除工作(Zouboulis et al.,



2019)。在國內方面，高志明(2006)教授之研究團隊在 2006 年利用整治列車系統，處理受 DNAPL 污染之地下水，以 TCE 為目標污染物，第一階段以界面活性劑進行沖排(surfactant flushing)，第二階段之整治採用高錳酸鉀氧化及第三階段採用生物整治牆系統，處理過後之 TCE 濃度可符合地下水管制標準。該團隊 2009 年之研究重點在於設計生物透水性整治牆和研發可緩慢釋放碳源、氮源及營養物質之基質，以加速 TCE 之生物降解。其中合成之基質為結合蔬菜油(慢速分解基質)、糖蜜(快速分解基質)及生物可分解界面活性劑(simple green 和卵磷脂)，使蔬菜油乳化為較易擴散之乳化型釋氮基質，以期長期提供微生物共代謝好氧或厭氧還原脫氯所需之碳源或氮源(高志明，2009、2010)。2010 年則以上述研究為基礎，進行現地整治模廠試驗，研究結果顯示注入之基質可形成透水性反應牆，以防止 TCE 向下游傳輸擴散，且 TCE 濃度可降低至符合法規標準(簡華逸，2010)。此外，王鴻博(2007)教授之研究團隊研發以新型分散性奈米鐵微粒注入受含氯揮發性有機物污染之土壤中進行現地整治試驗，研究結果發現，目標污染物 PCE 和 TCE 有大於 95%之清除效率。劉嘉庭等學者(2011)則研發可緩慢釋放碳源及營養鹽之乳化型釋碳基質，結合生物透水性反應牆進行現地處理，加強場址內 TCE 之生物還原脫氯作用。研究結果發現，其研發之乳化型釋碳基質具有長時效供應現地微生物生長基質功能，可以加強還原脫氯效率，達到在污染場址降解 TCE 之目的。張書奇和楊書豪(2012)兩位學者研究以椰子油混合棕櫚油包覆奈米過氧化鈣，成功地在管柱中傳輸並去除 TCE，顯示當乳化液在土壤地下水中傳輸時能將通過路徑與附近之 TCE 重新分布至乳化液中，可增加 TCE 之生物可及性及可能更佳直接回收去除率。另一方面，其他學者也利用不同藥劑進行地下水處理，富含磷聚合物(HAP/C-S-H)是一種有效、低成本和環保來處理受重金屬污染土壤和地下水的方法，Liu et al., 2021 使用從廢水中回收之 HAP/C-S-H 修復受銅污染的土壤和地下水，在土壤地下水中經過 28 天后 76.3%的銅可被 HAP/C-S-H 固定，得知固定後的土壤酸鹼中和能力增加，直到接近 pH 中性，銅溶解會顯著降低。

2.2 含氯有機物光催化處理技術

近年來對於含氯有機物光催化處理研究之論文發表，有逐年增加之趨勢，研究對象主要以氣相中之含氯有機污染物為主，水相中的討論及研究較少。Yokosuka et al. (2009)以氮改質之 TiO_2 (N-doped TiO_2)和 UV 以及可見光進行氣相 TCE 之降解研究，結果顯示，N-doped TiO_2 觸媒有以在可見光的照射之下，有效的降解 TCE，並且能夠重複使用，並維持至少 4 個月的處理效果。Tashiro et al., 2019 研究溶膠-凝膠法製備 Cu- TiO_2 經 200、400、600 度鍛燒後使用可見光燈源降解氣態 TCE，光觸媒在反應器中暗吸附 180 min 達到吸附平衡後，使用 300 W Xe 燈、波長 422 nm、光強度 72 mW cm^{-2} 進行光催化活性研究。研究結果表示，



200 度鍛燒觸媒在可見光燈源降解下 TCE 的去除率達 100 %，TCE 在降解過程中轉換為 CO_2 。另外，在水相光催化處理方面，林明志和黃文鑑(2010)兩位學者則應用光催化程序，處理水中之微量三氯甲烷及二氯乙烯。研究結果發現，所使用之觸媒 ZnO 及 TiO_2 單獨吸附三氯甲烷及二氯乙烯之去除率均介於 30 - 40% 之間，若使用 UV254 搭配 ZnO 及 TiO_2 進行光催化處理，則對於兩種氯化物之去除率可大幅提升至 60 - 80%。其中，以 UV254 搭配 TiO_2 之氧化處理效果較佳，且對於二氯乙烯有較強之氧化力。由於光催化 TCE 所產生的副產物主要為 DCAC，因此，Nishikiori et al. (2010)特別對於光觸媒 TiO_2 與 DCAC 之反應進行研究，結果發現，當觸媒表面為疏水性質(hydrophobic)時，DCAC 會被轉變成為 dichloroacetic acid (DCAA)，UV 光可以將 DCAA 再繼續降解為光氣、 CO_2 和 CO 。當觸媒表面為親水性質(hydrophilic)時，DCAC 則主要被轉變成為二氯醋酸根陰離子(dichloroacetate anion)，之後則會再被降解為氯仿(chloroform)。而其他光催化研究也有發現相同結果，Mohseni (2005)將 TiO_2 (Degussa P25)覆鍍在二氧化矽微粒的表面，以不同波長之 UV 光線(254 nm, 365 nm 或 185/254 nm)照射含有 TCE 之氣體，探討光解(photolysis)和光催化(photocatalysis)對於氣相中 TCE 之去除效果。研究結果發現，使用光觸媒可以得到最大的 TCE 去除效果($6 \text{ kg TCE}/\text{m}^3/\text{hr}$)，以 O_3 配合 UV 光解亦可達到相同之處理效率。TCE 處理後所產生之主要副產物為光氣(phosgene, COCl_2)和氯乙醯氯(dichloroacetyl chloride, DCAC)。當使用光催化處理時，則無 DCAC 產生，但是有微量的 chloroform 和 carbon tetrachloride 被偵測到。另外，其他研究成果也有顯示，Rashid and Sato (2011)探討以 UV 和 US 處理模擬地下水中之 TCE、PCE 和 TCA 時發現，以結合 UV 和 US 的處理效果為最佳，並且在 26 分鐘就可以達到最好的處理效果，對於 TCE 之去除效率分別為 UV 47%、US 8%和 UV/US 55%。Parshetti and Doong (2011)兩位學者則以 Fe/TiO_2 作為光觸媒，探討在有鎳的存在下以 UV 光催化去除 TCE 和二氯酚(Dichlorophenol, DCP)。研究結果發現，在實驗條件下，TCE 和 DCP 皆能夠備有效地脫氯，且其效率優於使用奈米零價鐵。加氫脫氯反應(hydrodechlorination)和 $\cdot\text{OH}$ 連鎖反應為主要的脫氯機制，鎳的存在加強了 TCE 和 DCP 的光脫氯作用。Suarez et al. (2011)則提出相對溼度的大小，會影響 TCE 光催化的降解效果。Alcantara-Garduno et al. (2008)則發現，以醋酸(acetic acid)沖洗和 O_3 氧化處理，可以有效去除土壤中的 TCE。當土壤中腐植酸(humic acid)濃度低於 8 mg L^{-1} 時，TCE 可以在 0-25%濃度的醋酸溶液中被 O_3 分解。另外，Rashid and Sato (2012)利用紫外光(ultraviolet, UV)和超音波(ultrasound, US) 處理以 0.761 mM TCE 和 0.603 mM PCE 配製而成之模擬地下水(系統示意圖如圖 1 所示)，將總 VOCs 濃度控制在 100 mg L^{-1} ，結果發現，對於 TCE 和 PCE 之處理效果依序為 $\text{UV/US} > \text{UV} > \text{US}$ ，其中，以 UV/US 對 TCE 之去除效果在 30 分鐘可達到 70%，對於 PCE 可以達到 87%。

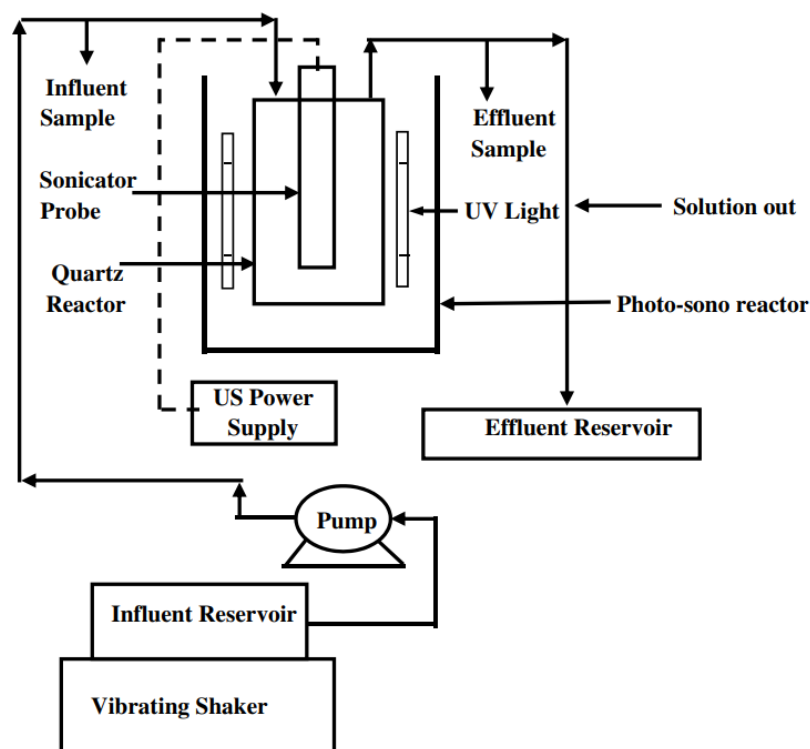


圖 1、流通式光電反應器系統示意圖

在光觸媒厚度影響方面，Seyama et al. (2012)以 TiO_2 和 WO_3 作為光觸媒，進行 TCE 降解之動力學研究，銳鈦礦奈米晶體的 TiO_2 大小約 3.9 nm， WO_3 則為 17.6 nm 大小的圓球顆粒。研究結果發現， TiO_2 之光催化活性約為 WO_3 的 2.1 倍，反應溫度對於 TiO_2 的光催化效果並沒有影響，但是對於使用 WO_3 作為光觸媒，則隨著溫度的增加而氧化速率提高。當將 WO_3 和 TiO_2 以 molar ratio 1:2 混合作為光觸媒時，可以得到 TCE 最佳的處理效果。San Vicente et al. (2012)將 TiO_2 和 SiO_2 雙層覆鍍於玻璃上，在 UVA 的波長光照射下，評估其自淨作用之效率，以甲基藍和 TCE 作為目標污染物。研究結果顯示，TCE 之去除效果與 TiO_2 膜的厚度有關，對於甲基藍之去除則以 $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$ 雙層較為佳。在環境污染物濃度影響方面，Farooq et al. (2009)則以 UV 和 TiO_2 探討在不同的 TCE 初始濃度、 TiO_2 濃度和反應時間下，對於水中 TCE 之去除效果。結果發現，粉狀 TiO_2 之光催化效果較粒狀 TiO_2 為佳，以粒狀 TiO_2 作為光觸媒時，水深最高可以達到 45 mm 仍然對 TCE 有去除效果。對 TCE 之去除效率隨著 TCE 初始濃度或是 TiO_2 濃度增加而增加，在各實驗條件下， TiO_2 0.7 g 和 TCE 濃度 35 $\mu\text{g/L}$ 可達到最佳光催化去除效果。

在光催化技術之發展上，除了各式的光反應器之外，過去 10 年來，隨著光纖材料的發展，也開始有些學者將光纖應用到光催化反應上。目前之光纖應用在光催化反應，仍以氣相介質處理為多，根據近幾年的研究顯示，以光纖製作之光反應器多半應用在溫室氣體 CO_2 處理之研究。國內吳紀聖教授團隊(Nguyen and



Wu, 2008)利用光纖反應器，探討將 CO_2 轉化為碳氫化合物，作為一種新的可再生能源。他們將 Cu-Fe/TiO_2 觸媒覆鍍在光纖(optical fibers)表面，以 UVA 和 UVC 之波長作為光源，讓 UV 光通過光纖的傳送，到達光催化反應之觸媒表面，在反應的過程之中，空氣中所存在的 CO_2 和 H_2O 反應生成甲烷(methane, CH_4)和乙烯(ethylene)。Nguyen et al. (2008)亦採用不同的材料來覆鍍 TiO_2 觸媒表面，以光纖反應器探討轉換 CO_2 的效果，所使用之覆鍍材料為 $\text{RuII (2,2'-bipyridyl-4,4'-dicarboxylate)}_2 \text{-(NCS)}_2$ (N_3 dye)，所使用之光源為聚集之太陽光。研究結果顯示，使用 $\text{N}_3\text{-dye-Cu (0.5 wt\%)-Fe (0.5\%)/TiO}_2$ 覆鍍在光纖表面，使用光照強度為 20 mW/cm^2 ，經過光纖反應器之處理後， CH_4 產率為 $0.617 \mu\text{mol/g-cat h}$ 。另外有類似的研究，也已經發表(Wu et al., 2008; Wang et al., 2010)。

顧洋教授團隊(Ma et al., 2008)則以 TiO_2 光觸媒覆鍍之光纖反應器，在不同的 UV 光強度和不同的丙酮(acetone, $\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$)初始濃度下，探討對於空氣中 $\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$ 之處理效果。其實驗結果發現，增加 UV 光強度或降低 $\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$ 的初始濃度，皆可以提高 $\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$ 的礦化效果，而光纖反應器之光量子產率(apparent quantum yield)為傳統光反應器的 2 到 3 倍。Zhu et al. (2014)等學者使用流體化床光纖光催化反應器(fluidized-bed-optical-fibers photocatalytic reactor, FBOFPR)處理氣體中的 TCE 污染物，以 TiO_2 作為光觸媒，在實驗設定之操作條件下，TCE 初始濃度為 303.32 ppm 的氣體經過 FBOFPR 處理，去除率可以達到 87%。而綜合以上的研究結果顯示，光催化對於 TCE 具有良好的處理效果，配合光纖材料作為光催化進行現地處理地下水中 TCE 污染物之處理技術，值得做更進一步之研究且極具有發展之潛能。本研究之成果，將可以作為未來以光纖將光源直接導入地下水層，進行光催化處理地下水污染之技術研究和發展基礎。

2.2.1、光纖種類與應用

光導光纖(簡稱光纖)因訊號傳導的損失較電纜低，並且價格便宜，因此目前主要作為資訊傳輸工具使用，最近也應用於裝飾以及娛樂用途。光纖結構主要可分為中芯(core)以及外皮(clad)兩層，中芯材質主要以石英、玻璃以及壓克力為主，而外皮材質為塑膠，Joo 等學者(2003)研究以石英光纖(quartz optical fibers, QOFs)與塑膠光纖(plastic optical fibers, POFs)進行光催化去除三氯乙烯之研究，實驗結果證明，以二氧化鈦做為光觸媒覆鍍於光纖表面，在波長 300nm 以上之 UVA 光源照射下，塑膠光纖即可達到良好的光催化效率，並且具有低成本的優勢。另外，在光源傳輸方面，當光源進入光纖後，光源會藉由外皮反射，進而在內部傳輸。因此光纖傳輸種類目前大致可分為端點光纖以及側光光纖兩種，當光源在內部進行全反射時，稱之為端點光纖。若光纖之外皮會使固定比例之光源射出，另一部分進行反射，稱為側光光纖，若將光纖運用於光催化實驗中，光纖所包覆之外皮



在許多研究的前處理會將其剝除或是浸泡於醇類溶掉，再將觸媒覆鍍於光纖管上，即可應用於光催化處理程序去除污染物(Joo et al., 2003)。

利用光纖作為光源的載體照射觸媒，進而進行光催化反應的研究，主要會探討光源強度、覆鍍次數、光纖管的數量，以及觸媒添加劑量的比較。學者 Jinyu et al. (2012)以側光光纖發出之光源，照射 Ag^+/TiO_2 觸媒進行光催化反應，結果顯示，當觸媒劑量由 $0.5 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 上升至 $1.167 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 在處理時間 8 小時後，對於亞甲基藍之光催化處理效率將會由 20% 提升至 97%。並且研究顯示，當所有操作條件相同時，光纖支數為 300 支進行光催化實驗，在 7.5 小時處理時間後，去除效率為 80%，當光纖支數增加至 500 支後，光催化處理效率最終達到 95%，作者表示，當光纖的數量增加，光傳輸容量也相應增加。學者再進一步以相同燈源，改變其功率(100、200、300W)，進而增加其燈源光照強度，通入側光光纖管(Side-glowing Optical Fiber, SOFs)，觸媒以 Ag^+/TiO_2 粉末添加於處理溶液中進行光催化反應，當功率由 100W 提高至 300W 時，其去除效率由 68% 增加至 97%。由結果可以得知，當提供較強之光照強度，可以增加光子能量進而激發觸媒產生電子電洞對，因此增加污染物之去除效率。

2.2.2、光觸媒種類

二氧化鈦(titanium dioxide, Degussa P-25, TiO_2)為目前廣泛所使用之光觸媒，其優點為無毒性、抗菌、防污、脫臭、環境淨化等用途。二氧化鈦之晶相結構以金紅石(rutile)、銳鈦礦(anatase)與板鈦礦(brookite)為主，Kim et al. (1999)以 TiOCl_2 為起始反應物，實驗發現非晶相之二氧化鈦將溫度升高至 400°C 可以獲得銳鈦礦之晶相，再持續升高溫度至 650°C 開始有金紅石之相態產生，由此可知，改變反應溫度條件可以得到不同的金紅石與銳鈦礦比例，另外，觸媒的晶相也會影響到光催化效率，Puddu 等學者(2010)以 sol-gel 法，在 $100 - 800^\circ\text{C}$ 進行奈米級 TiO_2 觸媒製備，在 UVA 的波長照射之下去除空氣中的 TCE。製備後的觸媒大小約 5.8 - 75.8 nm，表面積為 $4.3 - 498 \text{ m}^2/\text{g}$ 。銳鈦礦 TiO_2 在 UVA 的照射之下，其處理效果優於市售的 TiO_2 (Degusa P-25)，但是如果， TiO_2 之主要成分為金紅石(rutile)或混雜銳鈦礦/金紅石時，則處理效果明顯不佳。Arconada 等學者(2009)蒐集分析過去的 TCE 光催化研究發現， TiO_2 觸媒具有較多的孔隙與和 TCE 有較大的接觸面積，可以有效的提高 TCE 的降解速率，當 TiO_2 觸媒備製之時，以 $450^\circ\text{C}/1 \text{ h}$ 之燒結下表面積和晶相兩個條件之間達到平衡，可以得到最佳處理效果之觸媒。

二氧化鈦之能隙大小為 $3.0 \sim 3.2 \text{ eV}$ ，在紫外光的照射下會形成電子電洞對(conduction-band electron and valence-band hole)，使周圍之氧氣及水分子激發成具強氧化力的氫氧自由基($\cdot\text{OH}$)，達到有機污染物質分解和去除之效果(鄭智鴻，



2006)。而 TiO_2 光觸媒許多研究指出，二氧化鈦光觸媒可在可見光波長被激發，使觸媒內的價電帶和傳導帶發生電子轉移效果。為了增加觸媒光催化處理效率，許多學者研究在光觸媒製備過程中皆朝向摻雜不同元素或是改變其鍛燒溫度的研究方向(Wang et al., 2004)，針對 TiO_2 觸媒進行改質，使 TiO_2 光觸媒能夠更有效利用可見光波長來進行光催化反應。學者 Zhao et al.(2013)添加氮以及氟於 TiO_2 中進行改質後，激發波長範圍為 400-500nm，屬於可見光波段，因此更容易受到激發，進而增加光催化處理效率。另外許多學者也對於光觸媒改質技術進行研究，Yu 等學者(2010)先將 Pt、Ag、Cu 等金屬覆鍍在 TiO_2 上作為光觸媒，探討在室溫下進行光催化對於空氣中 nitric oxide (NO)的處理效果。結果發現，三種光觸媒之中以 Pt/ TiO_2 光觸媒有最好的 NO 去除效果，再將 Pt/ TiO_2 覆鍍到光纖表面，以連續式光纖反應器進行 NO 之處理，結果發現，以甲烷作為還原劑時，NO 之轉換效率為 10%，而當有水氣和氧存在時，轉換效果可達到 90%。以氫作為還原劑則可以達到 85%之轉換效果。Yeung 等學者(2009)則使用三種不同的奈米級 TiO_2 觸媒(nano- TiO_2 、titania-silica aerogel 和 nanotextured TiO_2 film)，發現在光催化的條件下，均可以有效地產生 $\cdot\text{OH}$ 去除氣相中的 TCE，同時讓受測之微生物不活化。Ola 等學者(2012)以 1wt% Pd/0.01 wt% Rh- TiO_2 作為光觸媒覆鍍在光纖上，成功的將 CO_2 轉換成 methane、methanol 和 acetaldehyde。Banisharif 等學者(2015) 研究 Fe- TiO_2 對三氯乙烯(trichloroethylene,TCE)去除效率探討，該研究將含有 0.1 wt % Fe- TiO_2 分別在 100、200、300、400 度鍛燒，且用波長 254 nm、365 nm 及 3 種可見光（分別為紅光、綠光、藍光）將 500 ppm 的 TCE 進行降解。研究結果表示，0.1 wt% Fe- TiO_2 在 100 度鍛燒下且燈源波長為 254 nm 的條件下，TCE 的去除效果最佳，TCE 的去除率約為 97 %。另外，在近期研究也持續對複合光觸媒效率進行探討，Volhard et al., 2021 利用磷酸鋇結合 TiO_2 (SrPP/ TiO_2)，發現在海水中經過 5 小時亞甲基藍會被完全降解，由次可知多磷酸鹽殼會置換海水中的 Ca^{2+} 或 Sr^{2+} 陽離子使多磷酸鹽塗層溶解從而釋放出具有光催化活性的 TiO_2 來降解海水中的亞甲基藍、甲基丙烯酸甲酯、對苯二甲酸和乙烯醇。Wang et al., 2021 利用 $2\text{Bi}_2\text{O}_7$ (Sr 0.6 Bi 0.305) (SBO)催化劑作為 TiO_2 的活性點位，通過水熱法在 TiO_2 表面形成 $2\text{Bi}_2\text{O}_7/\text{P25}$ (SBO/P25)。研究結果顯示使用 SBO/P25 光催化劑降解亞甲基藍(MB)的光催化性能達到 $3.42 \times 10^{-2} \text{ min}^{-1}$ (可見光)比純 P25 高 5.26 倍。由上述文獻可知，複合材料在水處理中具有良好的可見光吸收性能與穩定性。

ZnO 具有無毒、化學穩定性高、成本低等優良性能且具有較高的光催化穩定性、化學穩定性與吸收波長較廣之特性，缺點是光催化反應效率較慢，為了改善 ZnO 光降解效率會添加鋁、鎵、鎂、錳等金屬元素改變 Zn 的原子排列組成，產生更多的電子電洞，已提高其光催化效果(Fei et al., 2022；Malik et al., 2022)。奈米碳管(Carbon Nanotube, CNT)是在 1991 年 1 月由日本筑波 NEC 實驗室的物理學



家飯島澄男利用高分辨透射電子顯微鏡從電弧法生產碳纖維產物中發現。它是一種管狀的碳分子，由類似石墨烯 sp^2 鍵結所組成，相互之間以碳-碳 σ 鍵結合，形成由六邊形組成的蜂窩狀結構作為奈米碳管的骨架。其長度從微米到 100 奈米不等，可提高表面積、增加觸媒的導電性、吸附性、改善電子電洞分離藉此增強材料的光催化效果(Ahmad et al., 2022)。CNT 主要用作光催化的支撐材料，其與 ZnO 結合會產生 Zn-O-C 的鍵結，從而將 ZnO 的光反應範圍從紫外光移向可見光，根據研究指出在模擬日光的照射下純 ZnO 的 H_2 生成速率為 $11 \mu\text{mol h}^{-1}\text{g}^{-1}$ ，再加入 CNT 後其生成速率為 $267 \mu\text{mol h}^{-1}\text{g}^{-1}$ 是 ZnO 的 15.7 倍(Ahmad et al., 2022)。

2.2.3、無機樹脂覆膜技術

樹脂可分為天然樹脂與合成樹脂兩大類，天然樹脂其來源來自多種植物，特別是松柏類植物的烴(碳氫化合物)類的分泌物。大自然中原只有天然樹脂這一種，但隨著化工的發展，有很多由人工合成的聚合物產生，當中有些聚合物的化學性質及物理性質會和天然樹脂很相似，因此，聚合物會被稱為合成樹脂。因為樹脂具有特殊的化學結構，並且於商業上可以作為乳膠漆和膠合劑等材料使用，因此樹脂具有較高的商業價值。它是多種高分子化合物的混合物，所以有不同的熔點。無機樹脂是經由製備而成，其特點是製作簡易，並且製作方便、安全、成本低。目前已廣泛運用於建築、裝潢粘結劑或增稠劑。並且許多研究對於各類樹脂進行結構上的探討，林建宏(2013)學者以混練法製備 ABS 樹脂/奈米二氧化鈦複合材料之物質性質、機械性質與熱性質實驗結果得知，經由 FTIR 與 ESCA 測試，發現 ABS/奈米氧化鈦奈米複合材料之粒徑分析中奈米氧化鈦(未改質和改質)都在奈米規範；另外，在 XRD 測試可以看到晶相結構；在 FE-SEM 和 TEM 具有的良好分散性能，在物理性質方面有效提升；在機械性質測試拉力、抗張、硬度和耐磨耗，皆有效提升 4%以上，耐衝擊有下降 20%以上；在熱性質，耐熱性提高效果更加顯著的增加 10 度以上。而樹脂材料也運用於 LED 燈之封裝技術上，黃任賢(2013)學者研究指出，為了提升 LED 的光萃取效率，開發一具有高折射率之封裝材料是相當重要的。因此研究利用濕式研磨法製備穩定分散之奈米二氧化鈦(TiO_2)粉體。我們將 TiO_2 粉體添加至矽樹脂封裝材料當中，嘗試利用 TiO_2 粉體來調整矽樹脂封裝材料之折射率。研究結果顯示，當 TiO_2 添加量提高時可以有效提升複合材料之折射率。同時整體封裝材料之熱傳導係數也會因此提升。此現象有助於改善 LED 之發光效率及長期穩定性。張文華(2005)等學者以矽酸鈉溶液及鹼性溶液混合配製成不同模數比($\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$)之溶液，將其製成無機聚合樹脂(geopolymer resin)，可嘗試作為混凝土結構物補強之黏著劑，研究結果發現，傳統的環氧樹脂具不透氣性，使得水氣無法順利排除，導致混凝土內部孔隙壓力遽增而產生爆裂現象，而自行研發之無機樹脂($\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$) 硬化後為一種類似沸



石之多孔架狀結構，透氣性良好，且具有製作簡單、耐高溫、抗酸鹼腐蝕等優點，若將上述研究結果特點運用於光催化之光觸媒覆膜液配製，將有利於光催化之透氣性處理水中之有機污染物，增加其接觸機會，以達到去除污染物之效果。

另一部分，許多研究也針對樹脂與光觸媒進行合成，探討對於氣體或水體污染物之光催化去除效果，並且針對摻配參數進行探討。SHIBATA et al. (2007)以TiO₂搭配樹脂探討在不同溶質溶劑之重量百分比(1 wt%、5 wt%、10 wt%)的條件下，實驗以UVA(波長360 nm)作為實驗光源處理時間2、4、6小時測量光催化之抗真菌效果，研究結果顯示，5 wt%之混和樹脂/TiO₂(AP-TiO₂)之白色念珠菌存活細胞數降至最低，這也代表著5 wt% AP-TiO₂之光催化效果最好，實驗結論建議不可添加過量TiO₂，否則會抑制光催化效果。Dongliang et al. (2009)利用摻雜碳的二氧化碳觸媒與多孔性材質的樹脂做結合，探討結合後對污染物 rhodamine B(羅丹明 B)染料之光催化去除效率之影響，實驗結果顯示，當使用市售之 Degussa P-25 TiO₂ 粉末、添加多孔性樹脂之自製摻碳二氧化鈦粉末(RN₇₀₀A₅₅₀)與不添加多孔性樹脂之自製摻碳二氧化鈦粉末(N₇₀₀A₅₅₀)三者比較下，以可見光與紫外光作為燈源，結果皆以 RN₇₀₀A₅₅₀ 光催化去除效果最佳，結果顯示，使用多孔樹脂作為觸媒之結合劑應用於光催化系統中將有效提升光催化之表面積，進而增加光催化效率。Xie et al. (2011)利用樹脂顆粒作為基底，以硫化鎘與硫化鈉不同之摻雜比例覆鍍於樹脂顆粒上，實驗光源利用350W之氙燈，並使用濾光器控制波長於420 nm以下進行光催化反應，探討對於污染物 rhodamine B(羅丹明 B)染料之光催化去除效率，實驗結果證明，在5個小時的可見光照射下，可達到90%之去除效率，而其中又以Cds劑量為97.4 mg/g最佳，若再提高添加劑量，將會降低光催化效率，研究結果表示，當可見光通過樹脂基體時，有一個有效的覆鍍厚度。若超過臨界厚度，將對於光催化效率有負面影響。並於實驗結果證明，將Cds沉積於樹脂顆粒上，透過沉積時間及利用溶質溶劑比所調整之沉積表面密度，在適當範圍下，將可有效提升光催化效率。Zayed et al., 2021 研究以聚乙醇醇(PVA)/Cu₂O的奈米光催化複合材料，對亞甲基藍(MB)、孔雀石綠(MG)、4-硝基苯酚(4-NP)和活性紅(RR)進行氧化和還原。計算出氧化速率常數 MB 為 3.85×10^{-3} 、MG 為 $2.57 \times 10^{-3} \text{ sec}^{-1}$ ，而4-NP和RR的減少分別為 7.5×10^{-3} 和 $6.23 \times 10^{-3} \text{ sec}^{-1}$ 。由於不需要過濾、沉澱、離心等，使複合材料回收更容易。由此可知PVA/Cu₂O薄膜可以多次重複使用不會顯著降低其催化活性。

另一方面，聚四氟乙烯(PTFE)在許多聚合物中具有優異的化學穩定性、耐熱性、良好的機械強度與耐侵蝕性等特性，使其作為抗腐蝕塗料、燃料電池複合膜、微電子封裝用等材料運用，並廣泛運用於生物醫學及空間應用(Chen et al., 2014; Dong et al., 2014)，Huang et al., 2017 研究以聚四氟乙烯與 ZnO 組成的新型光催化



多孔薄膜，實驗結果發現 PTFE/PVA/ZnO 複合膜可使 ZnO 顆粒均勻地固定在超細 PTFE 纖維表面，使 ZnO 觸媒可均勻分散，避免直接添加 ZnO 顆粒而導致聚集而產生沉澱。PTFE/ZnO 膜也表現出良好的自淨能力。在 3 小時紫外光照射後，纖維薄膜之滲流通量回收率達 94% 以上。先前研究以溶膠凝膠法製備具有可見光激發能力之新型氟摻雜 TiO_2 /矽藻土(FT/DE)複合材料。FT/DE-1.0%(1.0%氟含量)複合材料在可見光的照射下，降解羅丹明 B(RhB)的光催化活性與 FT-1.0%(含 1.0%含氟摻雜 TiO_2)及純 TiO_2 觸媒相比，光催化之反應速率常數分別提升 4.4 倍和 26.1 倍，由實驗結果得知，添加氟元素皆可有效提升光催化活性(Li et al., 2017)。另外，Umadevi et al., 2014 研究也針對氟元素的添加對於光催化效率進行探討，研究中指出當氟摻雜於 TiO_2 奈米薄片進行合成，以 XRD、FTIR 和 UV-DRS 研究證實氟摻雜在 TiO_2 中，XRD 結果發現由於氟取代，顆粒尺寸減小。摻雜氟的 TiO_2 奈米薄片比純 TiO_2 奈米薄片具有更高的光催化活性，這可歸因於較小的晶體尺寸，良好的晶相相位及較窄的能隙使得可被可見光所激發。經由以上先前研究結果得知，若添加具有氟元素之聚四氟乙烯溶液作為覆膜液添加劑，將可有效增加光催化之穩定性及活性。因此，本研究主要以較低折射率之 PTFE(1.35 - 1.38)作為添加劑，以降低二氧化鈦之折射效果，提升反射回光纖內之光源，並經由添加量之控制，得到本光催化系統之發光長度之最佳 PTFE 添加劑量。另外，有研究利用四乙氧基矽烷 (TEOS) 經水解形成二氧化矽，分散在金屬基材上的保護塗層中，可以防止腐蝕性介質的滲透。Jia et al., 2021 使用了丙二酚 A 二環氧甘油醚 (BADGE) 和環氧樹脂通過溶膠-凝膠法製備成無機的二氧化矽奈米粒子用於防腐應用的有機無機混成材料。為了增加塗層的功能性，添加了光催化劑氧化鋅 (ZnO)塗層光降解。使用掃描電子顯微鏡 (SEM) 和紫外-可見光譜 (UV-vis) 等分析製造的奈米顆粒和塗層。此外，在塗層中加入 ZnO 對甲基橙有光降解作用，效率可達 55%。

2.3 近期相關光纖光催化成果應用

近幾年學界對於光纖運用於光催化處理作為傳輸光源媒介已逐漸開始討論，此技術由原先的空氣污染處理技術，延伸至水相處理。Chen et al., 2018 等人研究利用光催化劑塗佈在石英玻璃珠表面，將其加入光纖光催化系統進行實驗，目的在於降低 CO_2 濃度提高系統的光催化效率，利用不同排列方式找出最佳的實驗參數，實驗結果發現以環狀排列三圈並堆疊五層石英玻璃珠的效果最佳，光催化效果提高 11.43%。經過許多空氣污染處理研究探討後，各研究針對光纖光催化所存在的不確定因素進行研究且探討，並研究結果皆證明光纖運用於光催化技術可有效將光源延伸至不易光源穿透之污染位置，進行光催化處理程序，一些研究甚至已經將其應用延伸至水相處理，並指出光纖運用於光催化處理程序可以有效



地去除水相中的污染物，達到光催化效果。Xu et al., 2008 研究一種新的光纖反應器(optical fiber reactor, OFR)，該光纖反應器採用側光光纖(side-glowing optical fibers, SOFs)，將 TiO_2 塗覆在 SOFs 上，利用 OFR 收集太陽光，對四氯苯酚(4-chlorophenol, 4-CP)進行光催化降解，研究結果表示在陽光照射 8 h 後，4-CP 降解約 79 %。Chu et al., 2012 研究側光光纖 side-glowing optical fibers (SOFs) 降解 20 ppm 亞甲基藍做為研究目標，使用可見光燈源，並改變不同條件來研究其降解。研究結果發現，最適合的反應條件為 $1.167 \text{ gL}^{-1} \text{ Ag}^+/\text{TiO}_2$ 和 7 % Ag^+ 結合 TiO_2 ，使用 500 根 SOF，在 300 W 可見光照射 8 h 下，光催化降解效率約 97 %。Athanasίου et al., 2016 以二氧化鈦奈米材料與改質超過濾薄膜作為結合，並利用光纖延伸光源進入薄膜孔洞中進行光催化反應。研究結果指出，此結合系統在水相處理方面，除了有效降解水中污染物外，這種多功能光催化反應器利用於水分解(氫氣生產)，或是在空氣領域進行二氧化碳轉化和空氣淨化，將可運用於大量研究和商業用途的潛在應用。另外，在光源傳導方面，許多研究以石英材質作為介質，Lin et al., 2015 研發使用石英玻璃纖維為芯，矽橡膠塗層的光纖(side-glowing optical fibers, SOF)，以聚合物輔助水熱沉積法(polymer assisted hydrothermal deposition, PAHD)將摻雜鐵 TiO_2 塗覆於光纖表面上，研究中，在 UV 和可見光照射下使用不同比例摻雜鐵 TiO_2 覆膜光纖光催化降解羅明丹 B (RHB) 以觀察光催化效率。實驗結果顯示，5 % 摻雜鐵 TiO_2 且在 $\text{pH}=6$ 之降解效果可獲得最佳的光催化活性。Barton et al., 2016 研究以塗覆二氧化鈦奈米顆粒之石英光纖，進行光催化，並評估光纖側面激發的光催化活性。實驗以亞甲基藍作為污染物的情況下，光催化效率獲得了約 $1.55 \pm 0.13 \text{ min}^{-1} \text{ g}^{-1}$ 的一級速率常數。研究結果已經證明二氧化矽纖維適於將激發光引導到數十厘米之塗層距離上。使得光催化處理程序可延伸至光線較無法穿透之污染位置。另外，也有研究利用 LED 燈源進行光纖光催化處理水中污染物，研究使用光催化劑塗層塑料光纖(POF)對水中三氯乙烯(TCE)光催化降解的影響。以兩個發光二極管(LED)為光源 TiO_2 和 ZnO 為光催化劑，實驗結果表明，光催化劑層的厚度增加與塗層時間的增加會導致 TCE 的降解效率降低。光強度的增強有助於提高光催化處理效率。用 TiO_2 包覆 POF 在鹼性溶液中降解 TCE 有更高的降解效率，在 $\text{pH} 10$ 的溶液中一次性塗覆光催化劑可以達到最佳 TCE 去除率(Chen et al., 2019)。

在光纖光催化的覆膜光觸媒方面，許多研究透過各種工法將光觸媒覆膜固定於光纖上，Lin et al., 2017 研究目的是分析固定化的 TiO_2 -Fe 和 TiO_2 -rGO 納米複合材料在不同的操作條件下的光降解性能，採用聚合物輔助水熱沉積(PAHD)法塗覆光觸媒於光纖上，實驗結果不同光源測試的結果表明， TiO_2 -rGO 可增強光催化性能，主要歸因於光激發電子-空穴對的結合速率降低，但對於 TiO_2 -Fe 納米複



合材料，較窄的帶隙將有助於提高光催化活性。因此研究最後指出， TiO_2 -rGO 在紫外光照射下對藥物具有較高的光催化活性，而 TiO_2 -Fe 則更適合可見光氧化。Tugaoen et al., 2018 評估了 TiO_2 光觸媒固定於石英光纖上，以 UV-LED 作為照射燈源進行光催化處理。研究指出光有效傳遞到含有污染物之處理水與光催化劑是主要目前光催化處理的一大障礙，而光觸媒造成光滲透性差，需要處理後在進行過濾分離催化劑也是一大問題。替代方案是將光催化劑沉積在固定基板上並將光傳遞到附著的催化劑的表面上。在研究中， TiO_2 塗覆的石英光纖耦合到發光二極管(OF/LED)，研究目的改善光傳輸障礙。在 OF/LED 反應器中研究設計因素和機理包括：(i)耦合光纖搭配之 LED 光源數量的影響，以及(ii)使用捆綁在單個 LED 上的多根光纖。探討從光纖到 TiO_2 塗層的光傳輸機制。研究以對氯苯甲酸(pCBA)在反應器中進行了實驗。根據 pCBA 的降解動力學，確定氧化和電能(EEO)的定量效率(Φ)。使用 TiO_2 塗層的光纖束降低了能量傳遞光子的需求並增加了可用的表面積，從而提高了 Φ 和增強的氧化污染物去除性能(EEO)。實驗探討不同光纖支數對於光催化反應動力學之影響。實驗結果顯示，以在不同光纖支數(1、3、15 支)光纖搭配 1 顆 LED 燈源的操作條件下，以 15 支光纖搭配 1 顆 LED 燈源可以獲得最佳的反應動力學。因此實驗結果證明，單一光源使用之光纖數量對於光催化效率是重要關鍵因素。Kim et al., 2017 以浸鍍法改質塑膠光纖(plastic optic fiber, POF)表面，將 TiO_2 沉積於光纖表面上，並透過光催化降解亞甲基藍(MB)與 4-氯苯酚(4-CP)並氧化還原六價鉻(Cr(VI))試驗觀察光催化效率。實驗結果顯示，MB 降解效率會隨著 TiO_2 負載量的增加而提升，並溶液 pH 增加和 MB 初始濃度降低將會提升光催化效率。並且 POF/ TiO_2 顯示出比石墨烯(graphene oxide, GO)之 POF/ TiO_2 /GO 更好的光催化活性，此研究在最後表明，POF/ TiO_2 之光催化處理程序對於水處理是可行的。Lopes et al., 2018 研究將可見光藉由光纖傳導至地下環境，增加地下環境氧氣的量。將直徑為 5 毫米塗有白色聚合物的塑料光纖通過放射狀放置在柱子的中心，並連接到人工可見光源 150W，搭配光生物反應器，觀測氧氣變化。實驗證據證明了使用放射狀發射光纖將光傳輸到地下並由於對光刺激的微生物反應而增加 DO 的可行性。Paredes et al., 2019 將 TiO_2 固定在聚偏二氟乙烯(polyvinylidene difluoride, PVDF)雙層的中空纖維膜兩種類型的水基體中的光催化處理過程中，目的去除 8 種特定的藥物。研究將 90 根中空纖維放置在反應器內部的石英管周圍，使用 TiO_2 固定在中空纖維膜上，將目標藥物加入水中，進行光催化並分析。研究結果指出，與常規懸浮催化劑相比，負載型光觸媒的應用可以在光催化處理過程中提高這些化合物的光轉化率。結果表明，負載型催化劑可以輕鬆地重複使用，而不會降低效率，並且無需使用其他分離系統(例如薄膜處理)進行回收，其應用將逐漸成為一種有前途的選擇。並且有研究也證明可在搭配光纖系統可在太陽光下進行光催化處理，學者使用光催化塗層光纖在地下



與濁水光催化降解污染物方法。將光催化劑 TiO_2 P25 奈米粒子覆鍍在聚合物光纖 (POF) 上，並在人造陽光下評估系統的光催化性能。利用污染物環丙沙星(CIP) 評估光催化效率及其可重複使用性。結果顯示 TiO_2 P25 在人造陽光下 72 小時後可達到 95% 的降解效率，實驗重複三次後降解效率降低了 11%，顯示材料的可重複使用性並證實 TiO_2 /PVDF 塗層在光催化應用的可行性(Teixeira et al., 2018)。Abidi et al., 2022 等人利用紡織纖維(polyester, Trévira CS TM fibres)與 POFs 組成的光纖紡織品搭配 TiO_2 對氯仿與戊二醛等污染物降解進行研究，先將光纖紡織品浸泡 TiO_2 覆膜液(50 g.L^{-1}) 60 分鐘後以 70°C 乾燥兩小時進行覆膜，實驗後發現 CHCl_3 與 $\text{C}_5\text{H}_8\text{O}_2$ 降解率分別為 88% 與 87%，經過四次的重複實驗後降解率略有下降顯示其穩定可重複利用性。由上述研究證明光纖光催化之重複利用可行性。

在光纖光催化應用方面，為了提升光源延伸距離與利用效率，有學者研究探討兩種不同形式的光能(折射光和漸逝波)對光催化劑噴塗之光纖的相互作用。通過合成不同的 TiO_2 塗層石英光纖 (TiO_2 -QOFs) 並進行分析。研究發現將光纖上的二氧化鈦分佈降低至 $0.034 \text{ cm}^2/\text{cm}^2$ ，增加光纖表面和二氧化鈦塗層之間的平均間距至 114.3 nm，會使光進入 TiO_2 -QOFs 時的折射光大幅降低，91% 在光纖表面的光是漸逝波。其中會產生 24% 的漸逝波不會被二氧化鈦吸收並返回到光纖中，從而使降解水中污染物(卡馬西平)的量子產率提高 32%。通過控制光催化劑塗層結構，可最大限度地利用漸逝波來激活光催化劑，是提高光催化中光利用的有效策略(Song et al., 2021)。而許多研究也改變光纖型式藉以提高光催化效率，Zhong et al., 2019 研發以新型紫外光-可見光之光催化中空光纖(hollow optic fiber, HOF) 與 TiO_2 進行複合材料研究，以提高光催化活性降解 4-氯苯酚(4-CP)。研究中利用 $\text{Er}^{3+}:\text{YAlO}_3/\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$ (EYST)組成的 TiO_2 複合物作為光纖塗層，此材料於光纖介面顯示出良好的光傳輸能力，研究結果顯示，當 EYST 塗層厚度為 10 和 160 μm ，pH 為 6.0，溫度為 55°C 時，可獲得最佳的光催化活性。另一方面，在最新期的研究，Almansba et al., 2021 為了實驗規模擴大至工業規模，利用光纖紡織品可以提提高的光催化性能及光纖紡織品表面的光分佈均勻，此研究使用新型光纖紡織品光催化探討對水中氟美康 FLU(抗生素)與勝客敏 CET(抗組胺)的去除效果。針對化學物質降解和礦化進行探討，得知其對 FLU 與 CET 降解率分別為 97% 與 68%。

2.4 綠能光電設備與光催化應用

光催化技術主要對於能源之消耗為電力方面，因此許多光催化試驗應用於現場也侷限於電力來源，故許多研究也利用太陽光進行光催化之反應器，藉此可提高光催化之應用廣度，也可達到節約能源之綠電處理技術之研發。而本研究所使用聚光跟蓄電設備進行綠電設置，在聚光之光電系統方面，初期在 1997 年由學者 Peill et al. 研究用於光催化降解有機污染物的太陽能光纖反應器，對其原型進



行設計和測試。首先聚光收集器將陽光引導到光纖中，比較使用太陽光和人工紫外光的降解效率。結果顯示使用太陽光的反應速率比紫外光更快。可有效降解對氯苯酚，此裝置也可以將光纖延伸至地下進行污染物淨化。學者 Xu et al. 於 2008 年，實驗研究新型光纖反應器(OFR)，該反應器採用側光光纖(SOF)作為光傳輸介質和 TiO_2 的載體，與現有的側發光光纖不同的是，此實驗所使用的 SOF 是由石英芯和矽做外層所組成讓光衰減少，發光更均勻，並且傳輸更遠的距離，因此試驗可以得知，在光聚集材料方面，材質也是相當重要的因素，另外，此研究進一步利用自動追日設備收集並傳輸到光纖反應器使二氧化鈦塗層用於光催化降解污染物(氯苯酚)，此研究之設備與傳統的太陽能集光器相比，所使用的太陽能集熱器可以有效地收集太陽光，同時佔用的面積更小，實驗結果顯示對氯苯酚在陽光照射 8 小時後被完全分解。學者 Roy et al.於 2020 年研究使用太陽能處理廢水的新型技術，利用 MoS_2 光催化降解含有污染物 RhB 之廢水。設備通過太陽聚光並導入光纖束中進行輸送結合成光催化反應器(圖 2)，所得到的太陽光照是普通太陽光的 2.6 倍。普通日光照射與光催化反應器經過 120 min 後降解率分別為 39.9%和 67.4%為普通日光照射的 1.7 倍，實驗結果證明，此光催化反應器為具有成本效益且可持續作為廢水處理新穎技術進行探討。另一方面，在太陽能儲能系統方面，學者 Pandey et al. 2021 年研究適用於處理工業和生活廢水的光催化技術。其研究認為利用太陽能光催化處理廢水是一種很有前途的可再生解決方案，可以減少全球水危機壓力。研究指出與傳統廢水處理與使用太陽能儲能系統直接基於太陽能的廢水處理，其優點為白天和夜間都方便使用，並且儲能系統雖增加污水處理廠的總成本，但它也提高了系統在環境成本方面的整體效率，從而有助於實現持續發展目標。



圖 2、太陽能聚光器與光纖束耦合實體圖



第三章 材料與方法

3.1、試劑與藥品

1. 去離子水(DIW, 超純水機, Barnstead)。
2. 鹽酸(Hydrochloric acid, HCl 35~37%, SHOWA)。
3. 硫酸(Sulfuric acid, H₂SO₄, ACS reagent, 純度95-97%, Sigma-Aldrich)。
4. 硝酸(Nitric acid, HNO₃, 純度60%, SHOWA)。
5. 氫氧化鈉(Sodium hydroxide, NaOH, J. T. Baker)。
6. 甲醇(methanol, CH₃OH, 純度99.9%, HPLC等級, ECHO)。
7. 奈米碳管(Carbon nanotube, CNT, 95+%, OD 50-80 nm, L 10-20 μm)。
8. 硝酸鋅(Zinc nitrate hexahydrate, Zn(NO₃)₂ · 6H₂O, 純度99%, SHOWA)。
9. 二氧化鈦觸媒含有70%銳鈦礦結晶(Anatase)及30%金紅石結晶(Rutile), 顆粒大小為20-30 nm。(Titanium oxide, 21 nm, Degussa P-25)。
10. 氮改質二氧化鈦觸媒(N-doped TiO₂, N-TiO₂)粉末製作：實驗使用之光觸媒為自製，製作方法參考 Sheydaei et al. (2021)與 Asiri et al. (2014)文獻自行合成。
11. N-TiO₂/ZnO/CNT 粉末製作：觸媒製作方法參考 Mitroová et al. (2010)與 Khan et al. (2018)文獻進行改良，而光觸媒製備採共沉澱法及濕式浸漬法自行合成。
12. 無機樹脂(主成分為二氧化矽(SiO₂), 為無限豐富無機材料實驗室試驗提供，具有環保無毒、微透氣性及結合力之特性)
13. 聚四氟乙烯(Polytetrafluoroethylene preparation 60 wt% dispersion in H₂O, Aldrich)

3.2、分析方法

本研究分析之水質項目主要包括污染場址所公告之含氯有機物、溶解性有機碳(dissolved organic carbon, DOC)、氯離子(Cl⁻)、水質分析項目包括 pH、溶氧(dissolved oxygen, DO)、水溫、濁度、導電度、氨氮(NH₃-N)、硝酸鹽氮(NO₃-N)、亞硝酸鹽氮(NO₂-N)，皆遵照環保署環境檢驗所(以下簡稱環檢所)公告之標準方法進行。而分析之樣品將依照環檢所「PA101-檢測環境檢驗品質管制指引通則」進行數據校驗及品質管制。此外，為避免分析樣品間的污染分析任何一批樣品時，每十個樣品應執行一空白試驗，少於十個樣品時每批至少應執行一次空白試驗。空白試驗含儀器空白與試劑空白試驗。回收率測定範圍要求落在 15%誤差範圍內。採集樣品及分析方法分述如下。

3.2.1、被動式採樣袋試驗說明

本研究使用被動式採樣袋進行揮發性有機物採集，使用流程如下：

1. 將採樣緩緩垂放置監測井中，放置至預定採樣深度，可根據污染物特性做多深



度採樣袋放置。

2. 將懸掛繩固定在監測井井蓋，將井蓋蓋回井口。等待 14 天後即可取出採樣袋採樣(註)：14 天為環保署環檢所採樣方法「監測井地下水揮發性有機物被動式擴散採樣袋採樣方法 NIEA W108.50C」所規範。
3. 緩慢拉動懸掛繩，使採樣袋緩緩上升取出。
4. 取出取樣管，將取樣管對折，用以控制取樣流速。
5. 小心將取樣管刺入採樣袋，使得袋內水樣流出，穿刺位置盡量接近採樣袋底部，使水樣完全流出。
6. 控制取樣管內樣品流速，使水樣緩慢流速樣品瓶。

依據「水質檢測方法總則(NIEA W102.51C)」規定，揮發性有機物(VOCs)以 40 mL 褐色直口玻璃瓶盛裝樣品，瓶蓋內附鐵氟龍墊片。不得以擬採之水樣預洗，加鹽酸使水樣之 $\text{pH} < 2$ ，裝樣後不得含有氣泡，暗處 4°C 冷藏，若水樣中含有餘氯，則於每瓶水樣中添加 25 mg 抗壞血酸。最長保存期限為 14 天。

3.2.2、含氯有機物分析方法

將被動式採樣袋採集(3.2.1 章節)之樣品進行後續分析，本試驗之含氯有機物分析方法皆透過台灣檢驗科技股份有限公司(SGS)進行分析，分析方法採用行政院環保署環境檢驗所公告「NIEA W785.56B/水中揮發性有機化合物檢測方法-吹氣捕捉/氣相層析質譜」進行含氯有機物之分析，分析項目包括 1,1,2-三氯乙烷、1,1-二氯乙烯、四氯乙烯，以及三氯乙烯，分析方法皆按照環檢所規定。

3.2.3、氯離子分析方法

水樣中氯離子濃度分析係用以評估含氯有機物經光催化分解之處理效果，以及光纖光催化系統處理後對於水中氯離子濃度之影響。實驗分析方法採用環檢所公告之「W415.52B-水中陰離子檢測方法-離子層析法」進行分析。處理水樣經過 $0.45\ \mu\text{m}$ 濾紙過濾後，以離子層析儀(Ion chromatography, IC) (DIONEX ICS-2000) 進行分析。IC 儀器分析設定條件為：移動相 Na_2CO_3 (0.27 M)、 NaHCO_3 (0.03 M)；流速 $1.5\ \text{mL min}^{-1}$ ；管柱 AS12A(如表 1)，分析圖譜如圖 3。

表 1、IC 分析儀器設定條件

分析項目	移動相	流速 (mL/min)	管柱
Cl^-	Na_2CO_3 (0.27 M)	1.5	AS12A
	NaHCO_3 (0.03 M)		

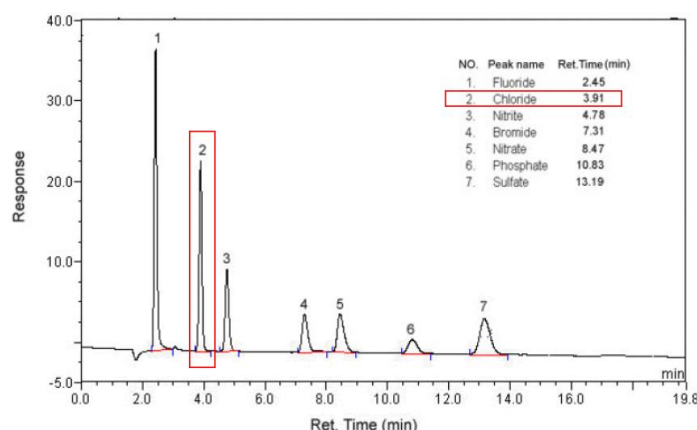


圖 3、離子層析儀之標準分析圖譜(資料來源：環檢所 NIEA W415.52B。)

3.2.4、溶解性有機碳分析方法

DOC 之分析係用以評估在不同操作條件下，光催化對於礦化含氯有機物之效果。實驗分析方法採用環檢所公告之「W530.51C-水中總有機碳檢測方法－燃燒/紅外線測定法」進行分析。水樣經過 0.45 μm 濾紙過濾後，並以磷酸將水樣酸化至 pH 2 以下吹氮(purge)後以總有機碳分析儀(TOC Analyzer) (Shimadzu TOC-VCSH) 進行分析，故實際上量測之濃度為非揮發性溶解性有機碳(Non-purgeable dissolved organic carbon, NPDOC)。

3.2.5、數據之品保品管(QA/QC)

而分析樣品將依照行政院環保署環境檢驗所「PA101-檢測環境檢驗品質管制指引通則」進行數據校驗及品質管制。此外，為避免分析樣品間的污染分析任何一批樣品時，每十個樣品應執行一空白試驗，少於十個樣品時每批至少應執行一次空白試驗。空白試驗含儀器空白與試劑空白試驗。回收率測定範圍應要求落在 15% 誤差範圍內。

3.2.6 檢量線製備

樣品分析前皆會配製符合樣品濃度之檢量線範圍，濃度包含 5 點以上之分布點，依配製檢量線濃度與儀器對應之訊號值、面積值、吸光值等，經計算後求得線性迴歸之決定係數(R^2)必須大於或等於 0.995，實驗步驟如以下所示。

3.2.7 方法偵測極限

以檢量線最低點之濃度分析三次，求其標準偏差，接著配製 7 個上述標準偏差 3 倍之濃度點，各分析一次，求 7 次值之標準偏差，方法偵測極限即是此標準偏差之 3 倍。



3.2.8 樣品重複分析

每次實驗分別取樣兩次，各個樣品的分析次數為兩次，故樣品分析為四重複，依方法所提供之相對標準偏差，以確保儀器分析之精確度和數據的可信度。

3.3、現地調查方法

本模場試驗計畫與裕山公司合作，初期從污染場址之環境調查著手。首先以現地既有監測井進行污染物濃度分析，了解水文流向、流速等條件，判斷於重點位置設置監測井進行監測之重要性。主要工作將進行場址特性調查，說明如下：

本團隊於試驗初期進行場址特性全面性調查，為使光纖系統之設置位置更加合適，將針對場址之地質特性、土壤特性、地表水文、地下水文進行調查，以了解其對於污染物分佈和流向之影響。本團隊採用「地質調查作業」及「薄膜介面探測法」方法，進行土壤及地下水污染潛勢分析，經由快速、非破壞及節省經費調查技術，深入了解土壤及地下水疑似污染之污染情形，本團隊於 108-109 年度於現地進行定期監測水位，發現本場址豐枯水期水位劇烈變化，而污染團的位置變化將是污染驗證之一大挑戰，本團隊於 110-111 年度持續搭配定期的 MIP 檢測與持續性的背景採樣，並進行滾動式檢討。

3.3.1、地質調查作業

過去鄰近模場地區之鑽探結果顯示，該地區以礫石層為主，鑽井作業較為困難，必須使用鑽堡作業，且地面下 80 m 尚未觸及到不透水層，顯示自由含水層厚度>80 m。於本模場於 108-109 年度所鑿兩口井，作業亦進行鑿井鑽探工作，以確認現地的實際狀況，以及將要進行整治的深度。本研究在 108-109 年所設置之兩口井進行不同深度之取樣並且作後續地質分析(圖 4)，可以得知 0-5 m 為黏土夾砂，6-12 m 為黑粗砂夾礫石，13-60 m 為棕色中細砂，地質剖面如圖 5 所示。



圖4、現地土壤地質採樣圖



至地表下深度(公尺)	地表		土壤柱狀圖			
0 ~ 6	黏土夾砂	5M	—CL— —CL— —CL— —CL—			
6 ~ 12	黑粗砂夾礫石	12M				
12 ~18	棕色中細砂		60.00M			
18~24						
24 ~ 30						
30 ~ 36						
36 ~ 42						
42 ~ 48						
48 ~ 54						
54 ~ 60						

圖5、地質剖面圖

3.3.2、場址流速流向測定

本場址針對本場址進行流速流向測定，探討本場址流速流向之基本資料，所使用之儀器為流速流向儀(Geotech, AquaVision Colloidal Borescope)，搭配 notenbook 進行監測，使用電腦軟體進行分析(AquaLITE 流速流向分析軟體)，測定過程如下：

1. 量測監測井內水位及記錄。
2. 確認監測井資料之篩管位置，並換算電纜線長度。
3. 將流速流向儀之感測器放置於井內之篩管位置處，並將感測器電纜固定。
4. 儀器連接電腦進行連線及相關參數設定。
5. 由電腦確認感測器之指北儀校正完成後，即啟動感測器，持續進行井內周圍之膠體粒子移動軌跡變化，偵測約 30 分鐘待數值穩定，藉此計算分析地下水流速及流向。
6. 操作人員將電腦顯示之流向及流速分析結果讀值進行記錄。

由先前試驗結果得知，測得流速分別為 0.0223、0.0450、0.0400 cm/min，地下水流向分別為東北向西南、北北西向南南東及東北向西南方向流動。由裕山環境工程公司所提供整體流場評估報告中提到，枯水期時，地下水流向大致為東向西流動，豐水期時地下水流向為東北向西南方向流動，由此結果看出整體流場往下游之潮州方向前進。



3.3.3、薄膜介面探測作業

本研究使用薄膜介面探測作業系統(Membrane Interface Probe, MIP)(圖 5)，其主要組成爲薄膜介面鑽頭、載流氣體管線、密閉室、加熱系統、半透膜、及末端所連接之分析儀器等。為於探測地下環境污染物濃度時，能同時評估土壤物理特性，目前亦有將土壤孔隙水導電度量測系統(Electrical Conductivity Measuring System, EC)整合在一起的特殊鑽頭(如圖 6 所示)。MIP 系統之分析原理主要係將嵌入不銹鋼鑽頭表面之半透膜加熱至 100 至 120°C，此時土壤/地下水中的揮發性有機污染物經過半透膜進入密閉室，並由載流氣體將污染物帶至地表的偵知器進行定量分析，提供場址調查取得與深度對比的有機污染物相對濃度。主要特色為在直接貫入過程進行連續性紀錄及分析，故可以藉由適當的佈點規劃，清楚描繪出場址之三維污染濃度分布，有利於後續光纖透水性反應牆之架設位置合適性。

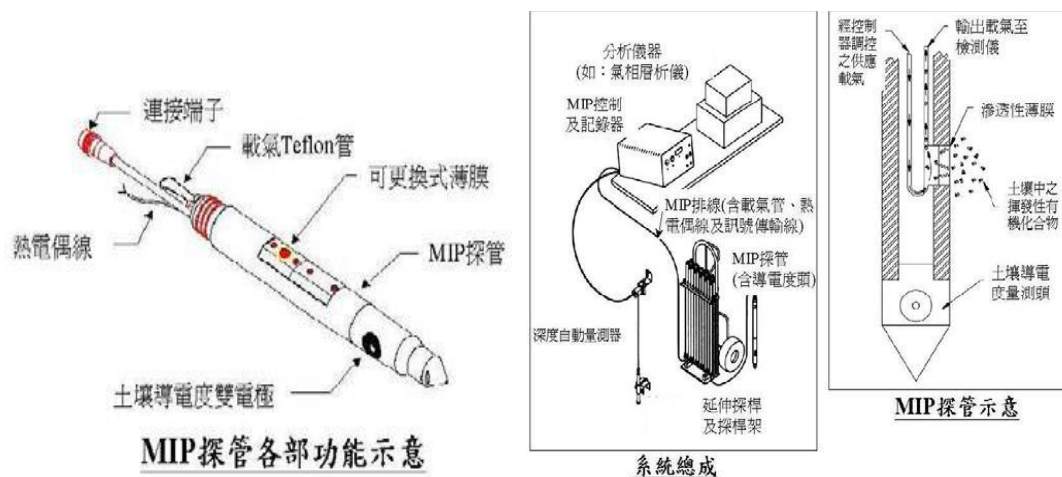


圖 6、MIP 系統組成示意圖(Geoprobe Inc.)

3.3.4、環境背景資料調查

3.3.4.1、地理及地形

屏東縣位於臺灣南端，東有大武山山脈，接連臺東縣界，西臨高屏溪與高雄市毗鄰，西南臨臺灣海峽，南臨巴士海峽，北至高樹鄉與高雄市分界。屏東縣全縣面積大約有2,775 平方公里，南北長112 公里，東西寬47 公里。其最東邊為霧台鄉雄峰山頂，以中央山脈與臺東為界，最西邊為琉球嶼西端，最南邊為恆春鎮七星岩南端，最北則為高樹鄉舊寮北端。屏東縣境內地形大致上可分為屏東沖積平原地區、中央山系南端高山地區、恆春半島地區等三區，東為中央山脈南段，為本縣全境之屏障；西部平原則連接高屏溪流域。而新開寮地下水使用限制地區（簡稱本場址）位於屏東沖積平原，係由高屏溪、東港溪、旗山溪、荖濃溪、隘寮溪、林邊溪等網狀河流沖積而成，沖積層主要以礫、砂、及黏土等地層所構成。



3.3.4.2、氣候

屏東縣是臺灣緯度最低的縣市，屬於熱帶性氣候。屏東縣氣溫平地區域南北之差異不大，年平均24.4度，惟平地與山區之差異則較顯著，年平均氣溫差異達5.3度，又冬季(1月，7.2 度)與夏季(7月，7.9度)之平均氣溫差。屏東縣內全年雨量大部份集中於5至9月間，每年6月至10月多颱風，夏季雨量以雷雨與颱風雨為主，尤以在8 月雨量最多。而平地及丘陵地於10月至隔年4月雨量甚少。山地5月至9月為真正雨期外，自10月至隔年4月降雨量亦不少。

3.3.4.3、地質與土壤

潮州斷層帶由北至南作為山地與平地之分界，斷層以西為屏東平原，以東為中央山脈南部大武地壘，在地形上屬於一種左移逆斷層。屏東縣的地質主要包括：硬頁岩板岩千枚岩夾砂岩，板岩、千枚岩石夾英岩質砂岩，黑色片岩、綠色片岩、砂質片岩等岩性。本計畫場址多為土、砂、礫之地質分佈。

3.3.4.4、地表水系

屏東縣地表水資源豐富，其主要河川有高屏溪、東港溪及林邊溪，次要河川有率芒溪，枋山溪、楓港溪、四重溪、保力溪及港口溪等六條。本計畫場址屬於林邊溪水系，林邊溪發源於大武山區，向南流經屏東縣境內，而由林邊出海，河川長度約42.2 公里，也是屏東縣平原地區主要灌溉水源之一。林邊溪豐水期可引用之水量並不多，枯水期逕流量幾乎全潛伏為地下水，估計有40 百萬立方公尺之蘊藏量。

3.4、污染整治方法規劃

3.4.1、試驗模場場址說明

本年度模場所在之污染管制區域基本資料如表 2 所示，該區域位於屏東縣新埤鄉新開寮社區東南側，屬於屏東沖積平原，主要由礫、砂、及黏土等地層所構成。民國 90 年屏東縣環保局執行「辦理潮州鎮新開寮地區疑遭非法棄置掩埋場污染地下水調查監測計畫」，在新開寮區域內多口監測井檢出 1,1-二氯乙烯、1,1,2-三氯乙烷、四氯乙烯、三氯乙烯等揮發性含氯有機污染物，並於 108 年 11 月 13 日最新公告新增六筆地號(共 52 筆地號)，列為地下水受污染限制使用地區，公告事項之污染情形主要為 1,1-二氯乙烯濃度(0.0825-0.202 mg/L)超過地下水污染管制標準(0.07 mg/L)。近幾年環保局陸續增加該地區間測井數量，且每年定期監測地下水關切污染物濃度變化，目前發現污染範圍有持續擴大的現象。本團隊已經向屏東縣環保局申請使用該地區做為本次模場試驗之場址，經會同環保局承辦和台糖股份有限公司屏東區處承辦完成現勘，決議使用新埤鄉萬隆段 73 地號



作為模場用地。本團隊於 110 年 01 月 26 日收到環保局同意備查公文，隨即於 110 年 01 月 26 號函文至台糖股份有限公司屏東區處，洽請出具土地使用同意書，獲得台糖租地使用之同意。本模場試驗專案場址為新場址(位於新埤鄉萬隆段 73 地號)，包括既有監測井 T00239 及其周圍既有觀測井及系統井(共計 8 口)。

表 2、模場試驗場址基本資料

模場名稱	新開寮模場
主管機關	屏東縣政府環境保護局
場址座標	TWD97，X： <u>208585</u> ，Y： <u>2490811</u>
場址地址	屏東縣新埤鄉
場址地號	屏東縣新埤鄉萬隆段 6、12 至 25、27、47、73、98 至 104、109、118、120 至 131、142、185、216 至 223 地號及潮州鎮崙新段 202、228、235 地號、共 52 筆地號
場址種類	其他
場址面積(m ²)	<u>704,030.78 m²</u>
場址列管狀態	地下水受污染限制使用地區
土壤污染物	無
地下水 污染物	1,1 二氯乙烯 四氯乙烯 三氯乙烯 1,1,2-三氯乙烷

根據先前的調查資料顯示，本區地層以礫石層為主要組成，鑿井時困難度高。此外，本區位於大潮州人工湖的下游地區，地下水流速較快，約可達每天 20-35 cm，同時過去鑿井鑽探結果發現，即使鑽探深度達到 80 m，仍未觸及不透水層，顯示本區之自由含水層厚度>80 m。豐水期之地下水位高度約為 15-20 m，而枯水期之地下水位高度約下降至地下 35 m 或以下，如欲能夠持續進行受污染地下水之處理，對於地下水處理系統之設置為一極大的挑戰，然而由於本技術不須灌注化學藥劑，因此較傳統之化學藥劑灌注法適合於本區域採用。

本年度計畫將模場設置於監測井 T00239 所在地，使用其周遭之系統井與觀測井作為試驗對象(如圖 7 所示)。本場址租借範圍總面積為 280 m²，模場配合近年現地調查之污染團往下游移動外，亦藉現有之監測井/灌注井/監測井進一步驗證透水性反應牆之設計概念和處理成效。上述 T00239 監測井附近 8 口井群，各井深度至 80 m，約為第一含水層厚度。由於本計畫區域之枯豐水期地下水位變化大，開篩深度則以既有監測井 T00239 井篩區間為原則，因此井篩範圍至少 50 m。8 口井包括：4 吋系統井 3 口以及 2 吋觀測井 5 口，井篩深度約為 32~80 m；井場



型式方面為隱藏式之系統井與觀測井(模場井群基本資料如表 3 所示)。本團隊於 110 年度採用多套光纖光催化處理系統，以光纖光催化系統施作於 WW1~WW3 之系統井(原灌注井)形成一道反應牆，與下游 OW2~OW5(觀測井)，利用系統井與觀測井進行前後效果驗證。

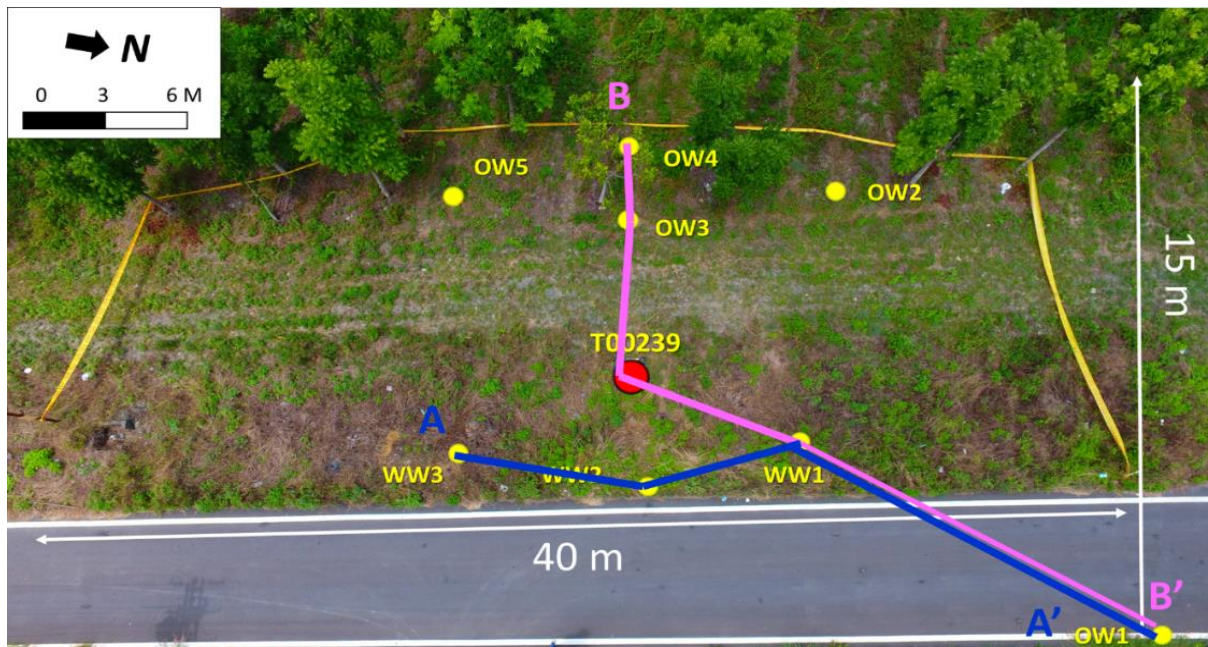


圖 7、試驗模場配置圖-T00239 及周遭灌注/觀測井

表 3、模場井群基本資料

井號	井徑 (吋)	井深 (m)	開篩深度 (m)	井頂高程 (m)	設井水位 深度(m)	水力傳導 係數 (m/s)	設井 功能
WW1	4	80.02	32.02~80.02	46.901	20.48	7.48×10^{-6}	灌注井
WW2	4	80.08	32.08~80.08	47.212	20.55	1.36×10^{-5}	灌注井
WW3	4	80.37	32.37~80.37	47.15	20.51	1.08×10^{-5}	灌注井
OW1	2	80.45	32.45~80.45	47.071	20.47	7.37×10^{-6}	背景觀測 井
OW2	2	80.63	32.63~80.63	46.545	20.03	6.90×10^{-6}	觀測井
OW3	2	80.51	32.51~80.51	46.422	19.94	6.30×10^{-6}	觀測井
OW4	2	80.45	32.45~80.45	46.467	19.95	7.33×10^{-6}	觀測井
OW5	2	80.5	32.5~80.5	46.526	20.01	8.77×10^{-6}	觀測井



3.4.2、現地模場整理情形說明

本研究場址為裕山公司於106年執行之計畫所選位址，須優先進行整理方可進行後續系統試驗，整理前後之比較圖可參閱110年模場專案報告。首先，本團隊進行模場位置除草作業，將現場雜草，以及枯木等等異物進行排除，並利用工具將現場土地整平，並將需要操作，有利於後續試驗以及操作上方便性。本場址現場整理完成後，已經將貨櫃吊掛至現場放置，以備後續試驗系統設備存放，因後續現場須架設光源機或其他貴重儀器，或光纖及其他器材需使用，為防止天氣因素不穩，故放置於貨櫃屋進行操作及保存，再者，因後續試驗系統需要使用電力，因此在現場進行電力設置電力供應完善之後，使後續光源機及其他試驗使用儀器機台時，在電源供應上是穩定的，有利於試驗進行。另一方面，因裕山公司在先前計畫中，針對此新場址進行藥劑灌注之生物處理，因此在灌注井(本試驗作為系統井使用)方面，可以發現許多先前藥劑的殘渣，此殘渣可能會有造成系統試驗效率驗證方面的疑慮，以及可能會造成設備污染或者損壞之可能，因此本團隊為確保試驗順利進行，在計畫初期，即投入長時間進行井體清洗，利用加壓抽水馬達與沉水馬達進行持續抽洗，若未清洗之地下水，不只呈現混濁狀，並且帶有些許顆粒物存在，上述工作現場照片可參閱110年模場專案報告。並且在111年度經歷梅雨季節後，井體中又出現許多浮渣，此物質可能會對試驗造成影響，因此本團隊安排井中攝影觀察浮渣情形(如圖8所示)，因此本團隊在系統試驗前，持續清洗至小於濁度5 NTU以下，並且透過溶解性有機碳之測定，判別此井體環境不會造成系統試驗效率之影響，再開始進行後續試驗。

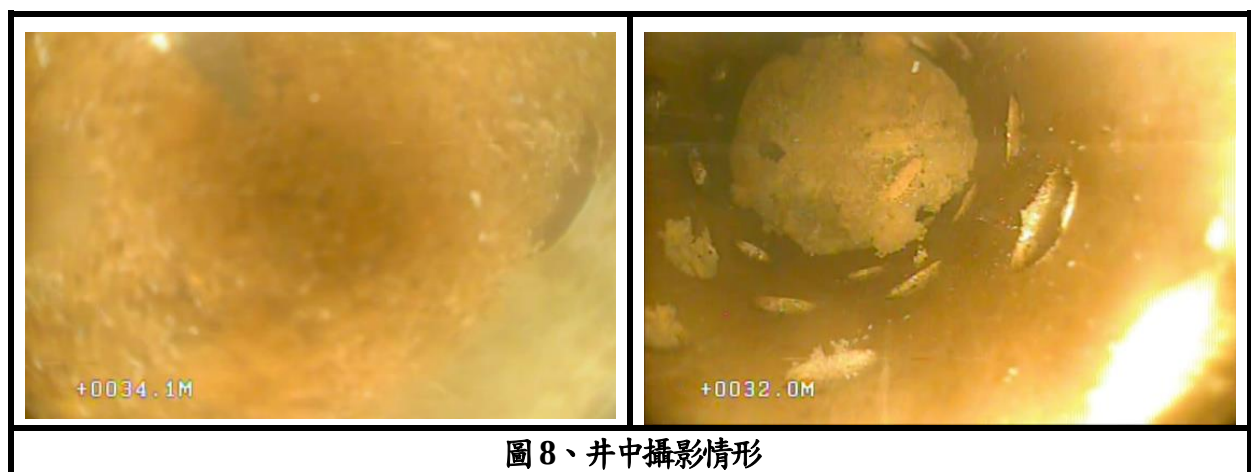


圖 8、井中攝影情形



3.4.3、光纖光催化系統技術說明

本計畫於 110-111 年度以現地污染模場作為試驗對象，利用本團隊開發之新穎光纖光催化技術進行污染處理，根據過去歷年的研究成果，110 年度所提出為兩年期之模場試驗計畫，將延續 108-109 年度在現地模場之試驗成果，持續進一步將本技術進行開發。依據貴署補助之 107 年度模擬現地污染場址整治-噸級土壤箱處理之試驗結果，本計畫所提之模場系統將採用 POF 進行光源引導傳輸，而以光催化效果較佳之 QOF 進行受污染含水層之 TCE 處理。光觸媒覆鍍採用 105 和 106 年度分別研發之噴霧塗佈法(spray coating)和無機覆膜液進行覆膜光纖之製備，再以 107 年度使用之分層嵌入工法建立現地 PRB 系列處理井。本模場試驗計畫與裕山公司組成合作團隊，進行現場光催化系統設置、地下水處理、系統模組化研發、光電綠能與系統結合等工作，現場所採樣品，含氯有機污染物委託台灣檢驗科技股份有限公司分析，其他水質項目由屏科大團隊自行分析。本光纖光催化處理技術之特點在於可以在污染場址現地進行污染控制和處理、開挖面積小、沒有添加化學藥劑、可視需要使用多種光源和以 PRB 之形式應用於現地處理，提供現有之現地和離地處理外的另一個創新處理技術選擇。本處理系統符合綠色處理技術之要求，除能源消耗較低外，與化學藥劑灌注相比，可減少化學藥劑之運送和使用，減少二次污染發生之機率，可做為綠色環保技術推廣，且初步評估之成本較目前所採用之抽取處理法低廉。本技術之模場試驗計畫執行，能更確實了解現地應用之情形，並加以檢討改善，以符合實際應用需求。故本技術之創新研發，對於未來土壤及地下水整治工作，不但重要且有其必要性。

本試驗之光纖光催化技術關鍵重點在於光源以及光纖設計與設置方式，本團隊測試後發現，塑膠光纖經長傳輸後會損耗嚴重(尤其以模場地下水層 30-80 m 較深的條件，與一般場址不同)，導致光強度不足以激發後續光催化用之石英光纖，因此本團隊設計一款水中光源機，可與封篩管進行套接(或直接與覆膜光纖直接套接)，一同進入污染地下水層，並在上方進行照射，將光源近距離導入處理段的光纖當中。因此，本團隊設計 LED 水中光源機(如圖 9 所示)，分別為可見光(400-800 nm)與紫外光(395 nm)，功率皆為 50W，並測量其光強度(如圖 10 所示)，其水中光源機可達到防水效果，並且可將光源放至最接近污染層的地方，並透過光纖傳輸，傳輸至處理段(約 1 m)，其設計概念為達到光催化在水中應用的可行性，達到降低光催化在水中因光遮蔽的難題而無法應用的可能。本光纖光催化系統實體圖組裝如圖 11 所示，圖 11 左為整體組裝完成之系統，而圖 11 右為塑膠光纖不同長度(作為分層鋪設使用)，依據本研究之 107 年度成果，進行分層鋪設光纖的方式，塑膠光纖於水中光源機延伸出至處理層，將以不同的長度進行延伸，以達到後端發光源之石英光纖處於不同深度之處理位置，因此較厚之污染層之場址，



皆可透過分層鋪設進行處理。塑膠光纖長度分別為 78、88、98、108、118 cm，直徑為 6 mm，共五段，此塑膠光纖為端點光纖，因此只有端點頭尾透光，將光源傳導至處理段之石英光纖，石英光纖長度皆固定 30 cm(直徑 6 mm)，各段石英光纖與塑膠光纖之連接處，為有利後續施工速度與便利性，本團隊利用光纖接頭進行串接上的改善，使塑膠光纖與石英光纖可有效串接，作為發光段以及覆膜光觸媒之位置約 25 cm，每次噴塗光觸媒覆膜前皆需進行光強度測試，經每次測試結果(石英光纖發光測試，紫外光方面如圖 12 與 13 所示，可見光方面如圖 14 與 15 所示)，石英光纖於發光段(20 cm)可從側邊，在紫外光方面，可發出 $5-10 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ 之光強度，可見光燈源的部份，可發出 10-15 LUX 之光強度，而實際系統施工圖如圖 16 與 17 所示。而整組系統放置污染水層約 30-40 m 處(以 MIP 分析與水位監測進行污染層確認)，陸地上只需串接氣管供應氣體(若無封篩管輔助即可無需串接)，以及連接水中光源機之電源。

本團隊考慮到污染場址地下水層深厚，並且新場之井開篩位置於 32-80 m，為確認現場污染水層及熱點流動情形，因此，本團隊定期進行 MIP 分析，利用此儀器找出實際受到污染的水層位置，並針對污染熱點進行有效光催化處理。在上述的前提下，本團隊設計並利用封篩管限縮上下流動的污染水，針對熱點進行處理。首先在封篩管頂部進行設計，封篩管頭部主要有 8 孔(以防水接頭設計)，主要構造為周圍的五大孔，外徑 20 mm，內徑為 6 mm，可供光纖插入，中間部位為支撐架(6 mm)，此支撐架是用以拉繩綁緊後可放下井中進行試驗使用，另一孔為打氣孔，主要為了將封篩管氣囊進行打氣，使氣囊膨脹後可壓住地下水井篩，使水流截斷，另一孔則留為備用孔。本團隊考慮在先前年度之封篩管所使用材質(PP 材料)與五孔光纖之間連接上會有耗損的問題，以及對地下水之有機物可能會造成破壞，因此於 111 年度之封篩管統一改良成不銹鋼材質。另外，本試驗是以被動式採樣袋進行採樣，將採樣袋懸吊於封篩管下方之處理段位置(光纖分佈區約 1 m)，另一方面，在處理段下方距離 5 m 位置再懸吊另一個被動式採樣袋，此視為未處理段，目的為本研究後續可進行單井內成效評估(如圖 17 所示)，故在放入光纖於上下封篩管中時，同時使用被動式採樣袋進行即時採集，此方式可驗證在處理過後之處理井中污染物濃度變化，在 111 年度，本團隊為達到系統輕量化以及便利化之需求，以未裝設封篩管進行試驗系統，此設計直接以燈源與覆膜光纖進行水中處理，這目的在未來應用在現地處理終將可降低其設置成本與達到施作之便利性，然而，對於光纖光催化系統之封篩管設計可作為未來其他用途之模組套件。此外，本團隊透過另外一種驗證方式，於系統井 WW1~WW3 系統井(原灌注井)設置三套光纖光催化系統同時試驗，形成反應牆概念之處理方式，本團隊原規劃透過上游背景觀測井(OW1)與下游觀測井(OW2~OW5)進行上下游成效驗



證，但因 OW1 設置於路旁，經評估放置方面有施工安全性疑慮，因此決議透過系統井與觀測井進行成效驗證。此系統前端為光源機，光源以塑膠光纖進行傳導之後，經由封篩管的防水接頭連接，進入上下封篩管中間位置之石英光纖(或不經封篩管，可直接套接石英光纖)，將光源導入石英光纖中，而污染層厚度關係，石英光纖以分層設置的概念，使污染熱點之水層可有效受到處理。

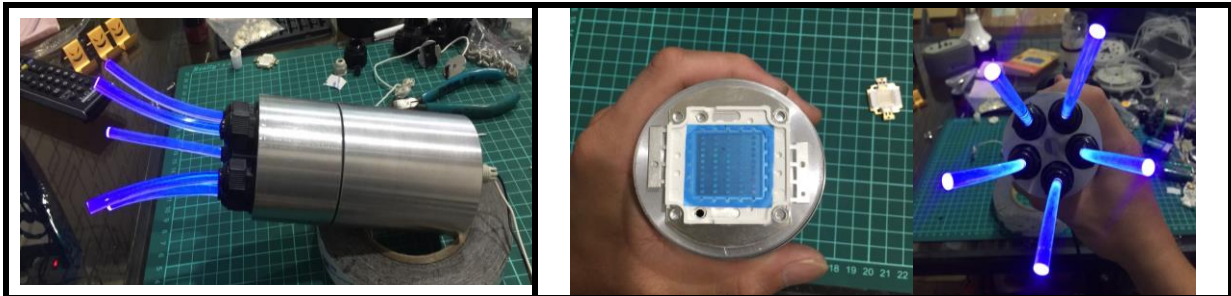


圖 9、水中光源機設計測試



圖 10、石英光纖光強度測試

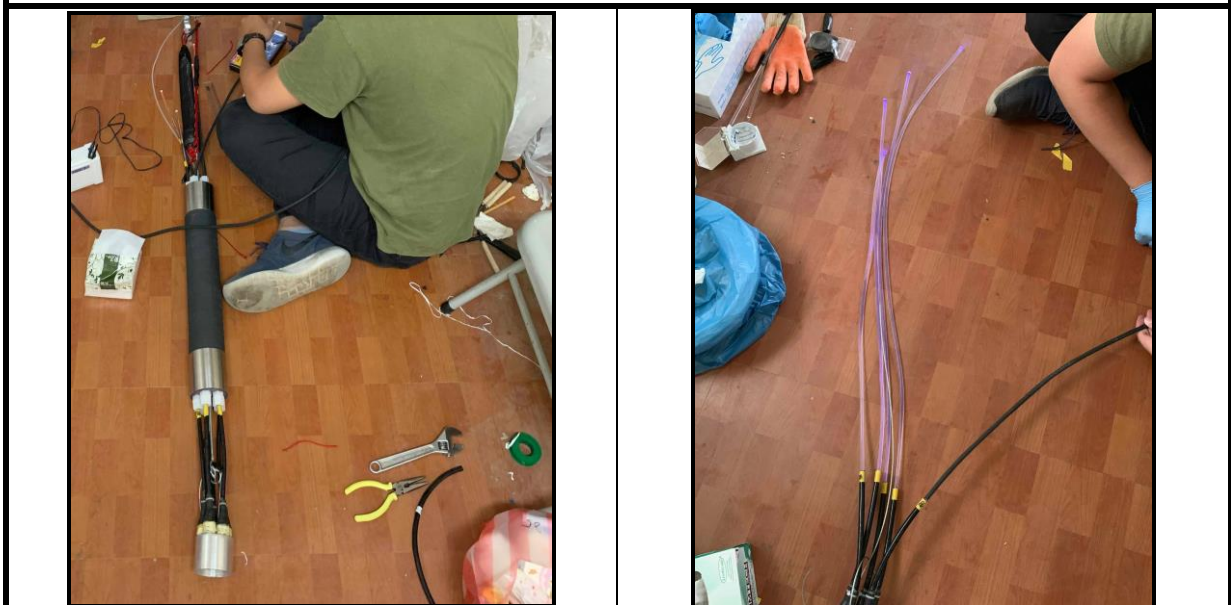


圖 11、光纖光催化系統整體組裝實體圖

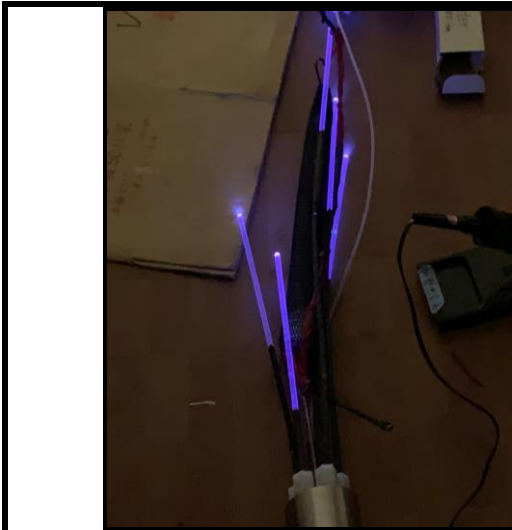


圖 12、光纖光催化處理段實體圖(紫外光)

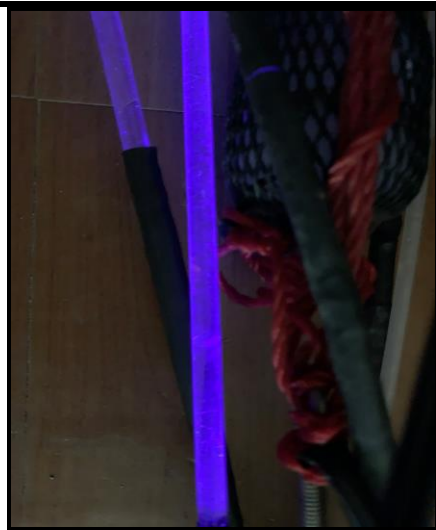


圖 13、覆膜石英光纖發光實體圖(紫外光)

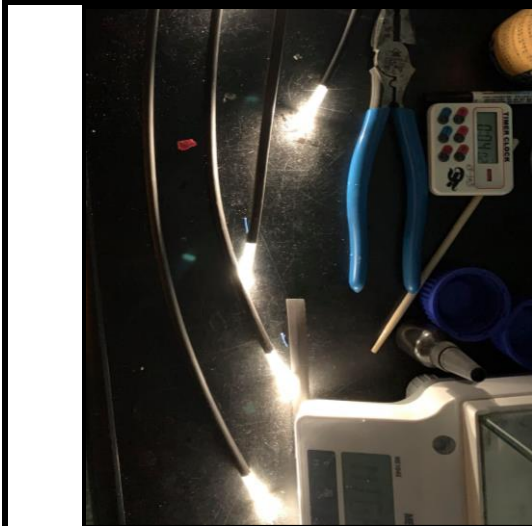


圖 14、光纖光催化處理段實體圖(可見光)

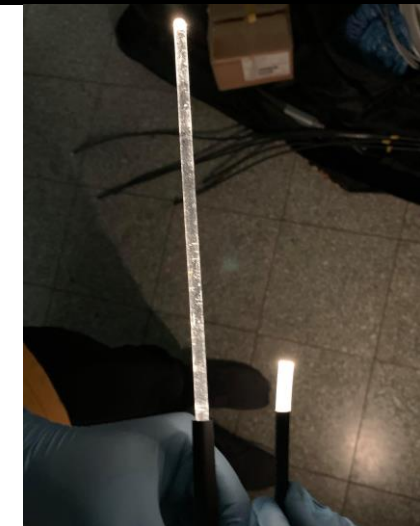


圖 15、覆膜石英光纖發光實體圖(可見光)



圖 16、光纖光催化系統放置處理井施工圖

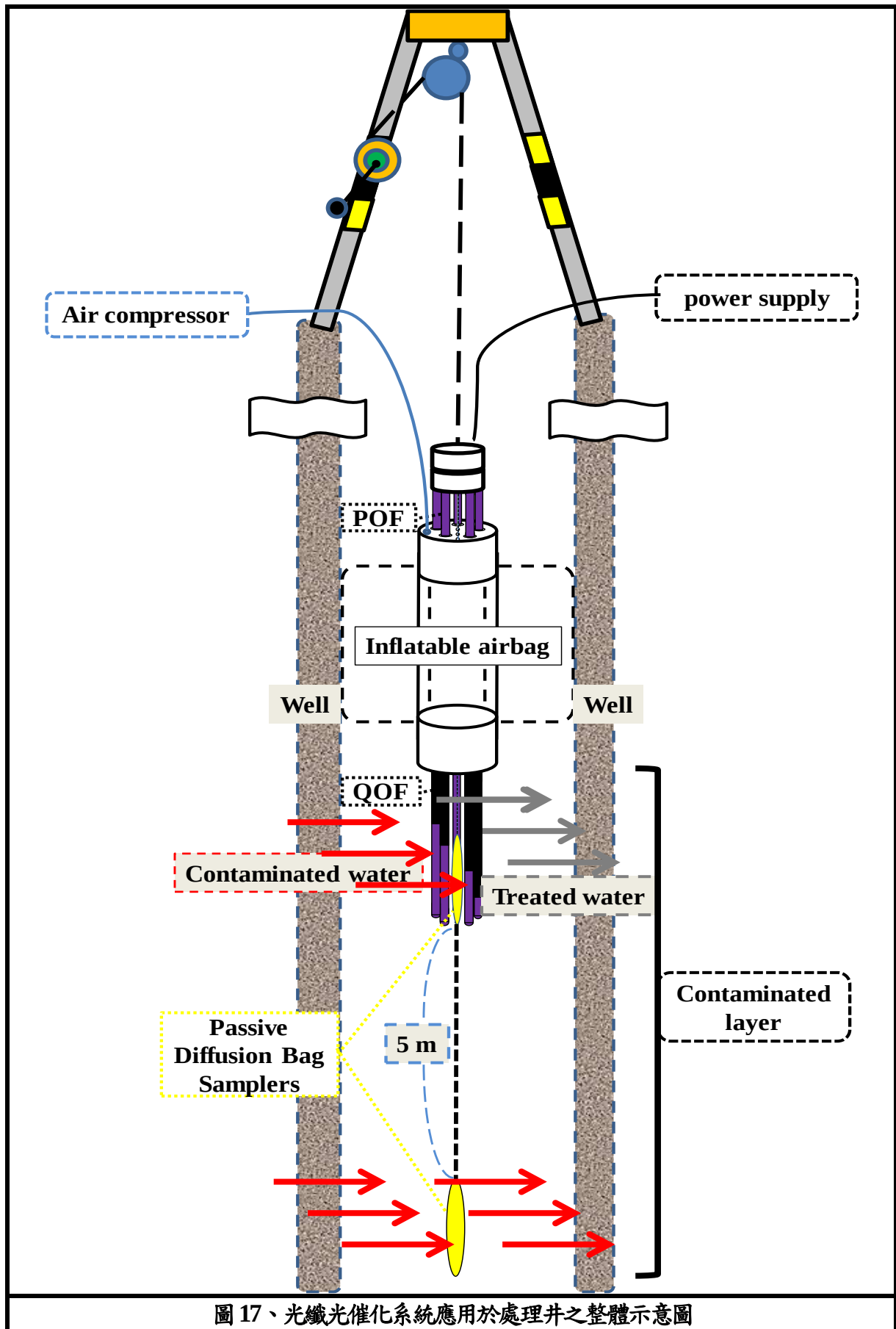


圖 17、光纖光催化系統應用於處理井之整體示意圖



3.5 模場試驗規劃說明

由本團隊前期之模場專案(108-109 年度)執行結果顯示，以光纖光催化系統應用於受含氯有機物污染之地下水現地處理具有極高的可行性，因此，本團隊於新場址(T00239)周邊進行多口試驗井之光纖光催化試驗，首先以上下游的方式，觀察系統效果，本團隊透過新現地之三口系統井(原灌注井)與上下游之觀測井，在系統處理的過程期間，同時在上下游進行採樣，測得濃度將可作為成效之驗證。在第一年度期間開發模組化的光纖光催化設備，便於現地組裝使用，同時，亦設計適合光纖光催化系統之太陽光聚光設備，測試以太陽光作為光源之處理效能。由於太陽光僅有有限的時間可以提供光催化系統使用，考量沒有太陽光時的光源和電源供應問題，因此，本研究嘗試進行太陽光電模組設備的設置，以解決光源和電源之需求。新模場由於既有之系統井和觀測井地設置方式，比較符合本處理技術之透水性反應牆的設置概念(如圖 18 所示)，為本兩年期模場計畫的重點。

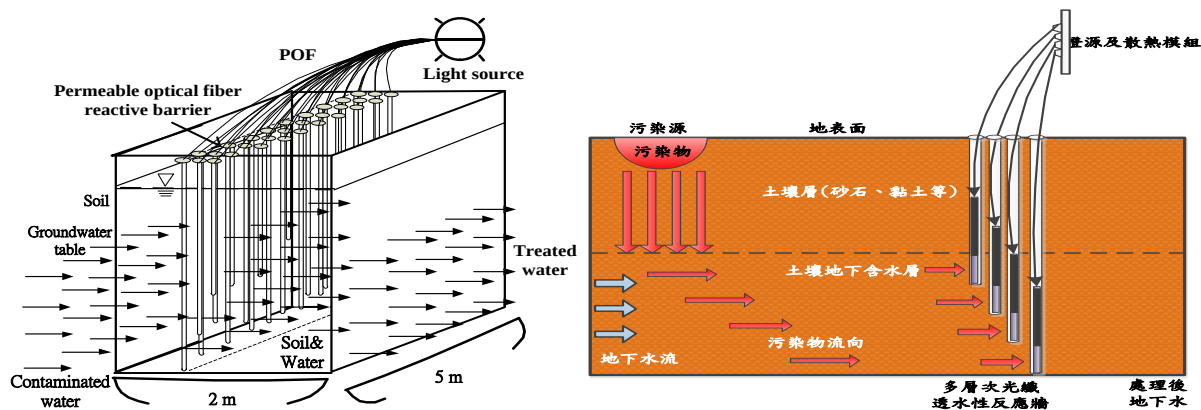


圖 18、光纖透水性反應牆設置示意圖

本系統於現地以多層式鋪設進行(設計概念可參閱 3.4.3 節之光纖光催化系統技術說明)，新場址之整治區塊之規模為 7 m × 40 m 之面積大小，設置之系統井為 4 吋井三口，觀測井 2 吋井五口。本專案於第一年與第二年皆持續評估多井(新場址)的處理效果和影響，並同時進行單井驗證(處理段與未處理段濃度比較)。在系統光源部分，因考量現地場址深度和光源傳輸因素，本團隊研發一套水中光源機，可將光源機放入水中，於接近污染層上方直接導入光源，而 110-111 年度本團隊嘗試使用地上光源機進行光源長距離傳輸，評估其應用於光纖光催化系統之處理效率。另一方面，本團隊於此專案結合太陽能之綠能概念(示意圖如圖 19 所示)，主要可分為兩個部份，第一，設計利用聚光系統將太陽光收集後直接聚集照射於光纖管中，傳導至污染熱點進行光催化處理；第二，利用太陽能板進行蓄電，以備於在沒有太陽光照射時，可以啟動電源，直接導入節能型可見光 LED 光源進行照射，以達到長時間持續現地處理之需求，使本光纖光催化技術結合綠能，達到永續應用之未來發展。本團隊為提高本技術未來應用性，於本專案期間建置模組化系統，提升組裝及零組件更換之方便性，有利於本技術未來應用於實場之



效率與可行性(光纖光催化反應牆系統應用於現地處理示意如圖 20 所示)。另一方面，關於現地各項設備維護方面，包括系統光源之電源，太陽能之蓄電池，以及市電轉換器(包含不斷電系統)主機這類器材，會放置於現地貨櫃內進行保存，另一方面，本團隊預計太陽能板設置於貨櫃上方，其上方為附近周遭土地之制高點，可有利於太陽光照射與保護，並進行遮蔽物(樹枝樹葉)定期清除，使太陽光照射時間維持正常水平，後續專案計畫結束後，整體貨櫃可作為儲存倉庫作為後續延續探討時方便使用，太陽能蓄電系統因已穩定加固於貨櫃上方，因此整體貨櫃已經為一套可自給自足的地下水處理系統，若未來可持續進行試驗或其他位置，即可直接吊掛至該場址，便能進行現地處理。

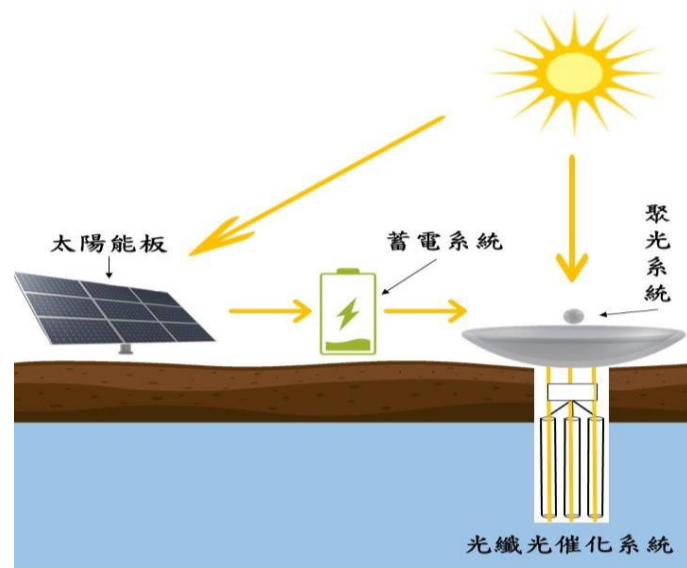


圖 19、光纖光催化系統結合綠能(太陽光源/光電)概念示意圖

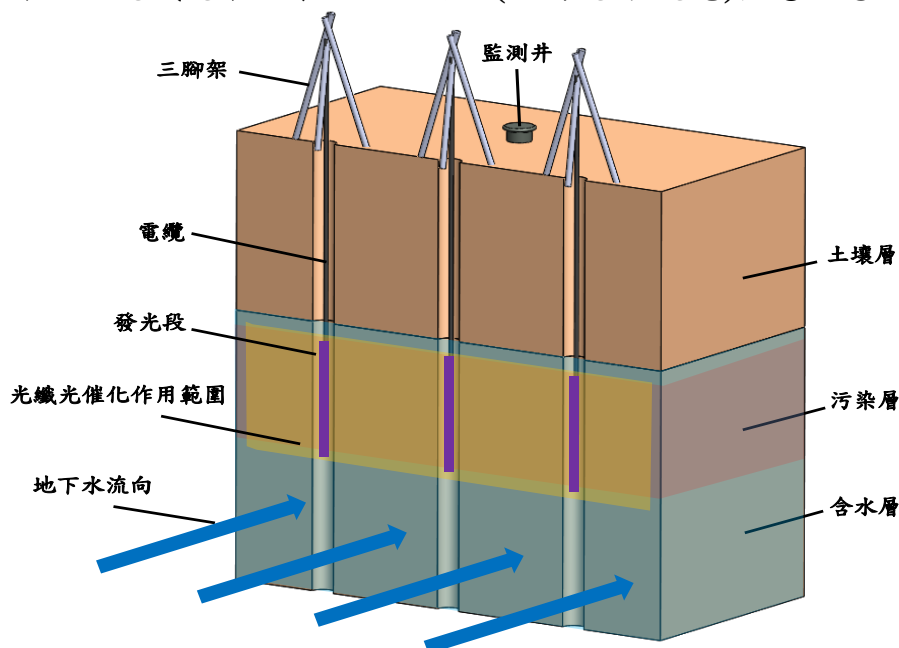


圖 20、光纖光催化反應牆系統應用於現地處理示意圖



本系統整體設置規劃說明如表 4 所示，在現地試驗處理井方面，處理井深度為 80 m，新場址之系統/觀測井開篩位置約為 30-80 m，本研究於先前以光纖光催化系統搭配封篩管進行試驗，使用封篩管之主要目的為控制光纖光催化系統針對污染熱點進行處理，在試驗前將採用薄膜介面探測法(MIP)，使用 MIP 確認污染物熱點所在深度，再利用封篩管進行充氣，將光纖系統固定於污染水層進行處理，使地下水層之受含氯有機物污染地下水與覆膜光纖進行光催化反應，而在 111 年度，本團隊探討進行輕量化做為系統整體目標，將封篩管移除後，將系統直接放進污染熱點中進行處理，這對於未來應用於各種現地場址將具有便利性，並且可以降低設置成本。另外，本計畫定期 MIP 分析與持續的空白背景試驗採樣主要是為了避免此場址之豐枯水期水位變化劇烈所造成的污染熱點移動，並確保試驗處理於污染熱點水層。試驗條件為採用不同光觸媒與光源進行光催化處理，處理深度與被動式採樣袋則以 MIP 試驗結果放置，以進行採樣分析。本研究使用 POF 與 QOF 光纖，QOF 光纖之材質為二氧化矽(99.99%)，未透光部位外層包覆反光膜，使光源全反射於光纖內，以達到發光之光觸媒反應部位。兩種光纖皆為直徑 6 mm，POF 主要目的為傳導光源，QOF 主要作為反應段之覆膜光纖使用，試驗為達分層處理，在傳導光源之 POF 以不同長度進行分佈，而反應段之 QOF 則固定長度為 30 cm。光纖於試驗前以 deionized distilled water (DDI)清洗數次。

表 4、模場試驗設置參數說明

No.	工作項目	模場試驗設置參數
1	反應牆規模	以新場址之處理/監測井，進行多口井之系統試驗
2	反應井數量	(2)新場址：多井試驗觀察光纖光催化系統處理效率
3	反應井規格	(1)以 4 英吋井作為光纖反應井，2 英吋井為觀測井 (2)開篩位置 32-80 m
4	光纖種類	(1)POF 做為端點導光介質 (2)QOF 作為反應棒，外層包覆光觸媒
5	光纖規格	(1)POF & QOF 直徑：6 mm (2)POF 長度：78~118 cm (3)QOF 長度：30 cm，
6	光纖設置	直接水中燈源放置後進行固定，五支光纖
8	光源種類	紫外光、可見光
9	觸媒種類	N-TiO ₂ 或 N-TiO ₂ -ZnO/CNT
10	綠能設備	太陽能儲能系統、太陽聚光系統評估
11	水質分析項目	pH, DO, 水溫, 濁度, 導電度, NH ₃ -N, NO ₃ -N, NO ₂ -N
12	定期監測項目	地下水水位、流速流向、MIP 檢測
13	後續監測分析	1,1-二氯乙烯、四氯乙烯、三氯乙烯、1,1,2 三氯乙烷、 溶解性有機碳、氯離子



3.6、覆膜光纖製備與成份特性分析

本研究使用 POF 與 QOF 光纖。QOF 光纖中芯之材質為二氧化矽(99.99%，購自西德科技)，未透光部位外層包覆反光膜，使光源全反射於光纖內部，以達到發光之光觸媒反應部位。兩種光纖皆為直徑 6 mm，POF 主要目的為傳導光源，QOF 主要作為反應段之覆膜光纖使用，試驗為達分層處理，在傳導光源之 POF 以不同長度進行分佈，分別為 78、88、98、108、118，共五段，而反應段之 QOF 則固定長度為 30 cm，其中的 5 cm 作為與 POF 之連接處使用，其餘 25 cm 則作為覆膜光觸媒與反應段使用。光纖於試驗前以 Deionized distilled water (DDI)清洗數次。實驗所使用之覆膜光纖製備方法採用市售之小型噴槍進行，先以乙醇作為稀釋劑，搭配 SiO_2 無機樹脂覆膜液，配製溶質溶劑比 0.5 wt% 之 TiO_2 光觸媒懸浮溶液並以超音波震盪和攪拌，再以 HCl 調整至 pH 4.5，置入噴槍之容器中，將光纖懸提空中，以噴槍將 TiO_2 溶液均勻噴塗於光催化反應部位。在覆膜液方面，研究依據 106 年度成果，以最佳覆膜條件(無機樹脂 25:75、分層覆鍍、20 mL PTFE/L、0.5 wt% TiO_2 或 N- TiO_2)進行噴霧塗佈(分層覆鍍法示意圖如圖 21B 所示)，後將光纖置於 50°C 下烘乾 12 小時靜置冷卻備用。在光觸媒特性分析方面，研究氮改質 TiO_2 與 Degussa P25 TiO_2 利用場發式電子顯微鏡與元素分析儀(field-emission scanning electron microscopy, FE-SEM/EDS)以及擴散反射光譜儀(spectrophotometer with diffuse reflectance spectra, DRS)等設備觀察覆膜光纖之表面變化和計算光觸媒能隙(energy gap)，並利用 X 光繞射儀(X-ray diffractometer, XRD)進行觸媒晶相結構之觀察，以上觸媒試驗結果皆呈現於 107 年度模場試驗計畫報告中。各組試驗進行前，會先使用 UVA meters(CHY 732, 可量測波長 320 nm ~ 400 nm)與 Illumination meter(DX-200)監控石英光纖側光之光強度，以確保光纖之品質穩定性。

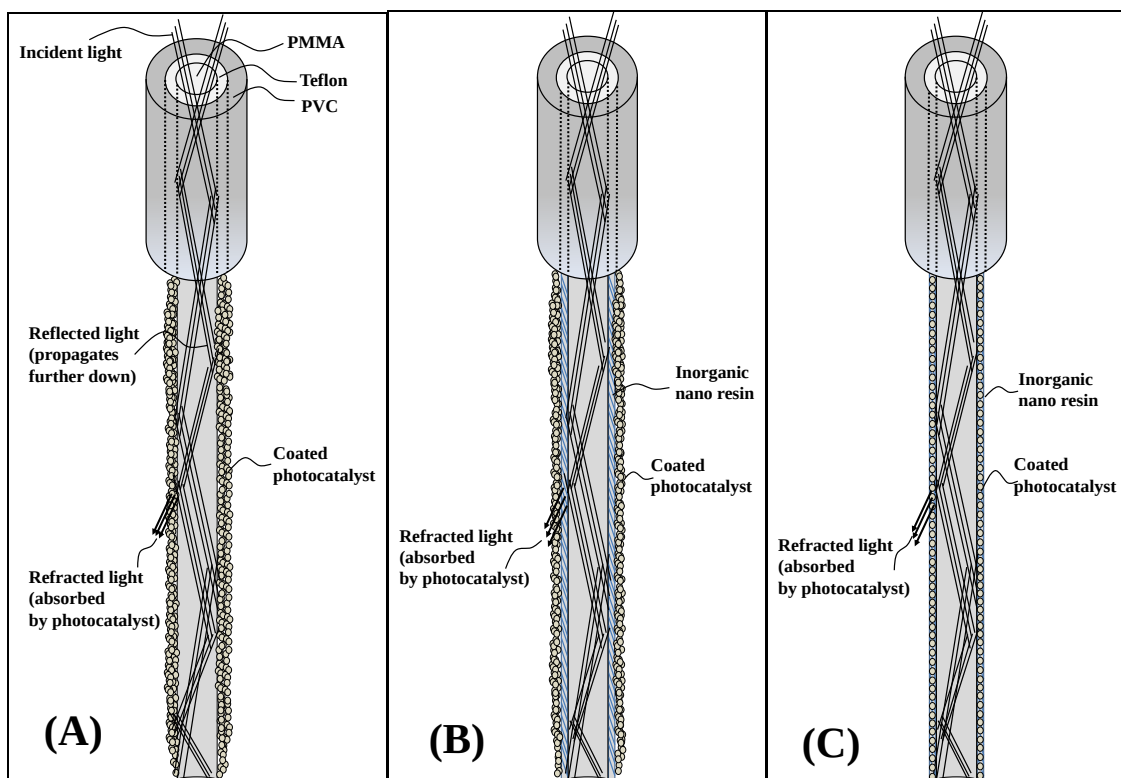
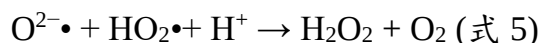
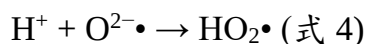
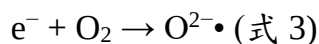
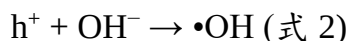
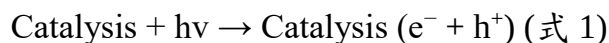


圖 21、以不同覆鍍法之光纖結構圖(a)浸鍍法與噴霧塗佈法、(b)以無機奈米樹脂覆膜液先包覆於光纖外層，再以噴霧塗佈法覆鍍 TiO_2 觸媒、(c)以無機奈米樹脂覆膜液與 TiO_2 觸媒混合後，以浸鍍法方式進行覆鍍

3.7 反應途徑及中間產物

本實驗光催化反應去除 TCE 之反應途徑推估如下列所示(式 1~8)，當觸媒接受可激發之光源，受到激發後，在觸媒表面會產生電子電洞對(式 1)，而電洞會與水中或觸媒表面之 OH^- 反應產生氫氧自由基(式 2)，另外電子會與水中氧氣產生超氧自由基(式 3)，然而水中 H^+ 再與超氧自由基反應生成 $\text{HO}_2\cdot$ (式 4)，而式 5 與式 6 則是持續在觸媒發生反應，然而，反應中 $\cdot\text{OH}$ 與電洞(h^+)具有強氧化能力，將 TCE 氧化後形成副產物(式 7、式 8)。





由於光催化 TCE 所產生的副產物主要為 DCAC，因此，Nishikiori 等學者(2010)特別對於光觸媒 TiO_2 與 DCAC 之反應進行研究，結果發現，當觸媒表面為疏水性質(hydrophobic)時，DCAC 會被轉變成為 dichloroacetic acid (DCAA)，UV 光可以將 DCAA 再繼續降解為光氣、 CO_2 和 CO 。當觸媒表面為親水性質(hydrophilic)時，DCAC 則主要被轉變成為二氯醋酸根陰離子(dichloroacetate anion)，之後則會再被降解為氯仿(chloroform)。將主要二氧化鈦光催化三氯乙烯之反應途徑整理如圖 22 表示。由上述得知，在最終產物方面，會生成氯離子(Cl^-)，因此測量 Cl^- 濃度變化作為一個參考依據，以評估後續系統處理成效。

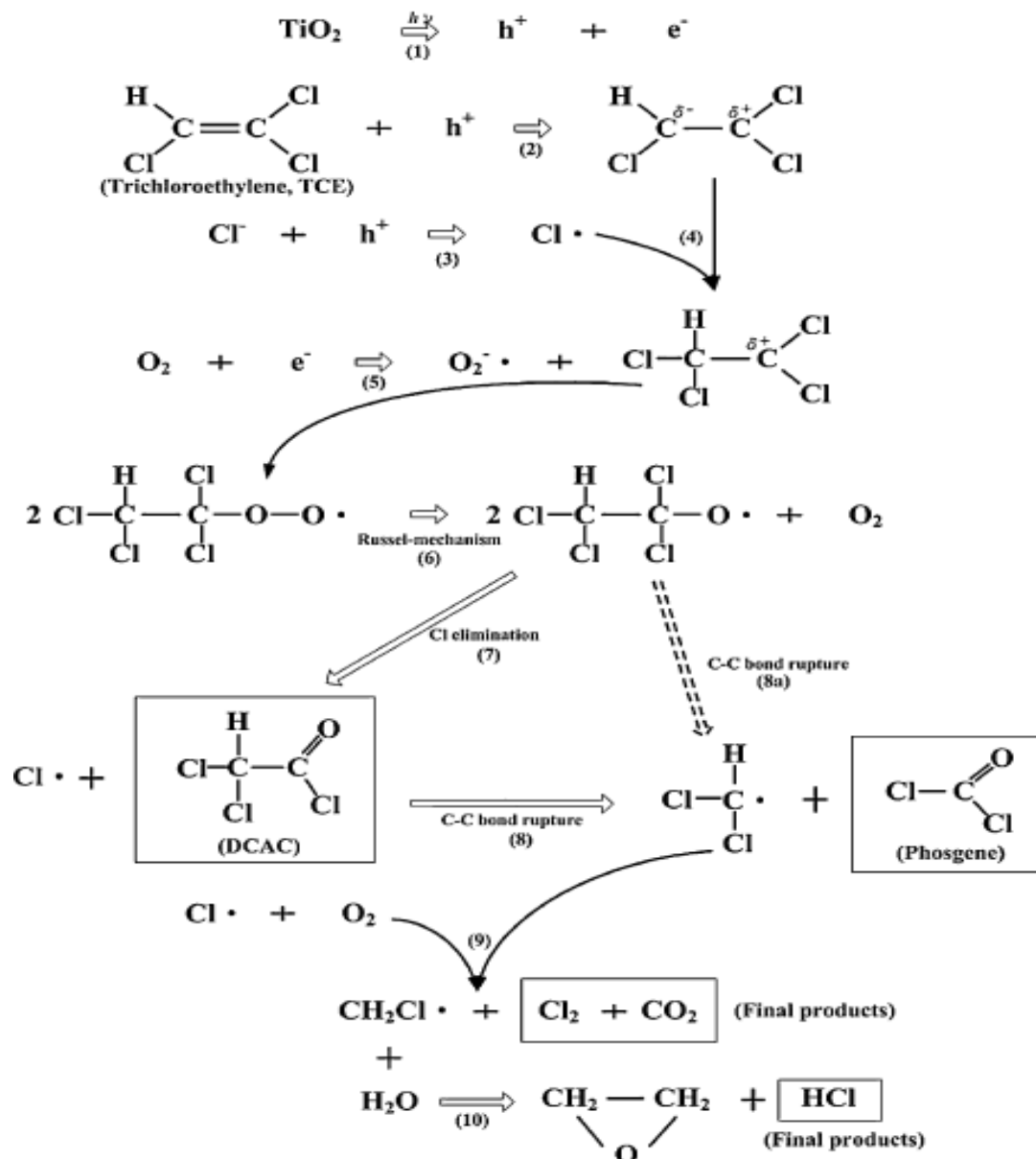


圖 22、TCE 降解反應途徑(Nishikiori et al., 2010)



3.8、工作進度甘特圖

本試驗專案為110-111年度兩年期計畫，本期專案係延續前期(108-109年度)模場專案，將處理範圍擴大至新場址以多口系統井進行試驗與驗證，透過觀測井探討其污染處理成效。於110-111年光纖光催化試驗系統結果方面，由試驗B至F與J至L結果，證明光纖光催化系統之處理段可有效處理地下水之污染物，並由單井或下游之驗證得知。另一方面，在光纖光催化系統處理過後，確實有生成氯離子，這代表此系統於地下水污染層確實進行光催化降解作用。而DOC方面，可能受到土壤中有機物質不穩定的釋出，導致濃度準確性較差，但整體DOC之分析仍顯示出系統對於DOC具有去除效率，也代表地下水中之有機污染物受到去除。

本研究現地試驗之研究方法及執执行程序主要延續110年試驗條件，在執执行程序方面，本團隊於今年持續進行之雙井與單井系統效能評估，主要以50W 可見光與紫外光LED燈作為水中光源機系統，並在試驗前先以MIP與被動式採樣袋進行污染層之調查，確認污染層位置後，在以試驗系統進行污染層處理，並以封篩管進行污染層位置掌控，後續再進行一系列的污染物分析。在操控參數方面，本團隊試驗使用之覆膜光觸媒種類以自製N-TiO₂與N-TiO₂-ZnO/CNT兩種，並透過不同光源種類(紫外光與可見光)，共四組試驗，探討對於光纖系統處理效率之影響，其中成果驗證以多井與單井結果進行探討。在工作量方面，本團隊定期執行MIP試驗(依降雨情況評估測量頻率)，確認含氯有機物污染層位置，另一方面，本團隊試驗前會執行一次空白試驗，故工作量以不同光觸媒種類與與光源種類進行探討，而上述系統試驗使用之被動式採樣袋所採集之水樣將進行本場址主要含氯有機物污染物種之分析，包含1,1-二氯乙烯、四氯乙烯、三氯乙烯、1,1,2三氯乙烷，並且進行中間產物之分析(溶解性有機碳與氯離子)，另外，期間固定持續進行水質採集，並進行後續水質分析，包括：pH、DO、水溫、濁度、導電度、NH₃-N、NO₃-N、NO₂-N，藉以更了解新開察場址之地下水質變化。

本團隊於111年度計畫重點著重於設計適合光纖光催化系統之太陽能儲能系統建置與聚光系統之設計與規劃評估，並加以進行現場應用，測試以太陽光作為光源之處理效能。由於太陽光僅有有限的時間可以提供光催化系統使用，考量梅雨季節可能長時間沒有太陽光時的光源和電源供應問題，因此，將嘗試設計更適合應用於現地之太陽光電模組設備的設置，以解決未來本光纖光催化技術之光源和電源需求。新模場由於既有之系統井和觀測井地設置方式，比較符合本處理技術之透水性反應牆的設置概念(多井)，以上是本兩年期模場計畫的重點，工作進度甘特圖如圖23。



本模場試驗計畫第二年度(111 年)完成事項敘述如下：

1. 完成新場址整治系統設置及試車，根據第一年之調查結果進行系統設置安裝。
2. 以不同操作條件，包含不同光觸媒種類(N-TiO₂或 N-TiO₂-ZnO/CNT)與光源種類(紫外光與可見光)，設定將完成四組試驗，於新場址進行污染現地之光纖光催化反應牆(多井設置)系統之處理和完成結果分析。
3. 完成水中與地上光源機進行光纖光催化系統試驗之處理效率評估。
4. 完成結合綠能研究開發，包含太陽能儲能系統與太陽能聚光系統兩大規劃，主要透過太陽能板與蓄電池之搭配，考慮環境因素所造成之蓄電效率影響，對本系統所需之電力進行評估與綠能設備建置。
5. 完成光纖光催化系統應用模組化，方便並提升後續實場應用之效率與可行性。
6. 持續監控污染物濃度變化，預計完成兩次污染場址背景濃度採樣，以及定期執行 MIP 分析進行監控，並於每次試驗(預計共四組)前後進行水質採樣分析。
7. 完成污染改善驗證，評估污染物於本系統之處理效率。
8. 完成本系統之處理效率評估，提出未來本技術應用所需之準備工作及項目，施作時之注意事項，以及操作注意事項。
9. 使用綠能設備與光纖光催化系統進行結合，以提供未來特殊現場施作與節能使用，進而提升系統未來發展之可行性。

工作項目	年月	111 年度												備註
		111								112				
		5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	
場址調查工作														
場址先導試驗														
器材與光源機設備購買與安裝 (光源機&綠能設備)														
污染物濃度監測														
整治系統設置及試車(系統模組化)														
現地之光纖光催化反應牆系統之處理														
處理結果分析														
污染改善驗證														
※期中報告撰寫														
※期末報告撰寫														
工作進度估計百分比 (%累積數)		0	10	20	35	40	45	50	60	70	80	90	100	
預定查核點		111 年度 1. 完成新場址整治系統設置及試車，根據第一年之調查結果進行系統設置安裝。 2. 以不同操作條件，包含不同光觸媒種類(N-TiO ₂ 或 N-TiO ₂ -ZnO/CNT)與光源種類(紫外光與可見光)，設定將完成四組試驗，於新場址進行污染現地之光纖光催化反應牆(多井設置)系統之處理和完成結果分析。 3. 完成結合綠能研究開發，包含太陽能儲能系統與太陽能聚光系統兩大規劃 4. 完成光纖光催化系統應用模組化，方便並提升後續實場應用之效率與可行性。 5. 持續監控污染物濃度變化，預計完成兩次污染場址背景濃度採樣，以及定期執行 MIP 分析(依水位變化評估)進行監控，並於每次試驗(預計共四組)前後進行水質採樣分析。 6. 完成本系統之處理效率評估，提出未來本技術應用所需之準備工作及項目。												

圖 23、工作進度甘特圖



第四章 結果與討論

本模場位於新開寮，因其特殊地質水文因素，地下水深度遠高於一般，因此，於歷年資料顯示，此現地模場之地下水位變化相當劇烈，流速較快，而本團隊於108年度開始持續針對其新開寮場址進行水位監測，可以發現在每年6-9月連續降雨期間，水位會由約40 m上升至最高15.80 m(約為每年9月份)，並由9月至10月期間，下雨頻率降低，使水位上升至25.85 m，並於每年5月開始，水位降至最低約為40 m左右，該時期為枯水期。而本年度(110年度)研究由4月份開始進行試驗階段，試驗初期為枯水期，而5月底開始，已進入梅雨季節(豐水期)，近期降雨豐沛，因此預估水位上升會相當劇烈，最高根據紀錄可達到15-20 m之水位，代表此地下水層在豐枯水期變化相當劇烈，因此，本團隊在此場址進行試驗，污染層之掌握須密切關注。由本研究水位調查與定期流速流向調查發現，此場址特性較為特殊，地下水水量變化劇烈及流速較快之因素也使調查難度增加，若能有效將污染層掌握與克服驗證上的困難，將有利於未來各模場試驗，因此，本模場相當適合作為探討現地處理技術開發的場地，故本團隊於110年度持續執行下列調查與試驗，對光纖光催化系統未來應用於這類困難型的模場進行探討。

4.1、現地模場之水文地質調查

本計畫工作區域為新開寮地區，依據過去相關研究之調查與評估成果，本計畫劃設數值模式區之矩形範圍如圖24所示。新開寮公告地下水受污染限制使用地區，本計畫於圖中簡稱「地下水限制區」。模式區東西長7.2公里，南北長5.6公里，包括：大潮州人工湖、林邊溪及東港溪流域。

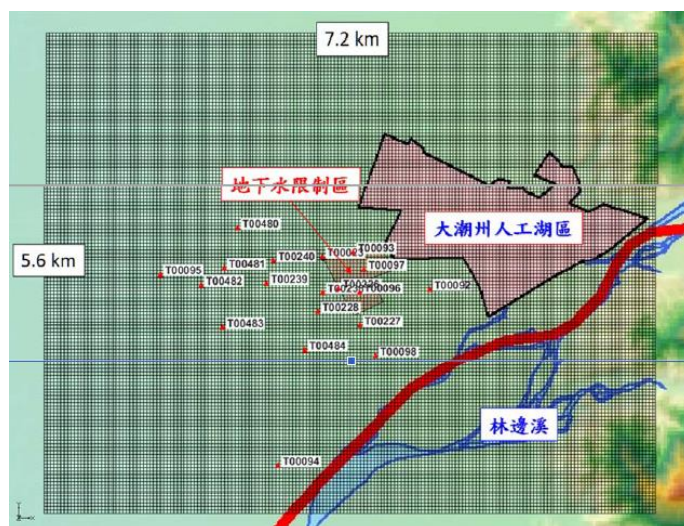


圖24、數值模式模擬範圍分布圖(裕山環境工程，2018)

依據研究區範圍與水文地質分層，配合本計畫地下水污染檢測結果及相關水文條件資訊，可概略繪出水文地質概念如圖25所示。源(source)包括：地面補注、



河川補注與湖泊補注，匯(sink)主要為地下水之抽水。1,1-二氯乙烯(1,1-DCE)污染目前在深度80公尺內皆有發現，主要在於此地區無顯著阻水層，污染容易透過地下水往深處擴散。

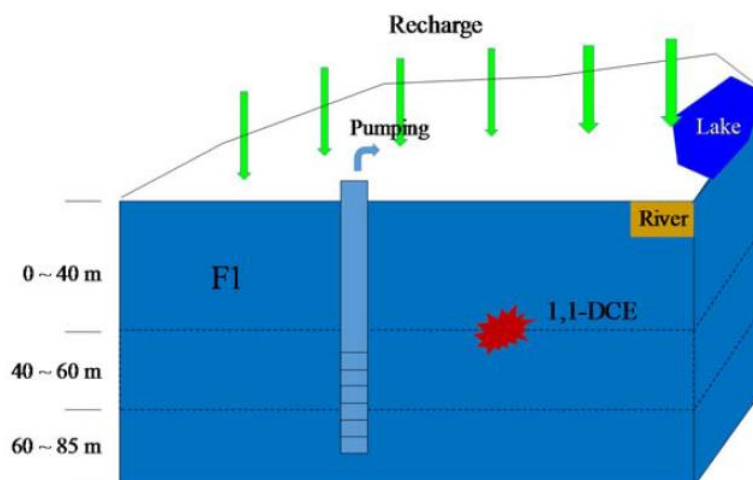


圖25、本計畫範圍之水文地質概念模型圖(裕山環境工程，2018)

本團隊與長期調查新開寮模場之裕山顧問公司合作，經彙整調查下，歷年於新開寮地區之調查計畫中(91、92 及99年)，總共設置10 口地下水質監測井，根據其中7口設井地質資料(如圖26)繪製地質剖面分布圖(如圖27)、地質柵狀圖(如圖28)及3D 概念圖(如圖29)，由圖中可得知地表下50公尺地質主要以礫石層為主，場址東南方之礫石層粒徑較大逐漸往西北方向延伸變小，較明顯之黏土層主要出現於場址之西北側(深度約地表下20公尺左右)。依據T00095地質鑽孔之資料，黏土層厚度約10公尺，黏土層厚度往東南方向大幅遞減，於T00098鑽孔之黏土層厚度約30 cm，於T00093設井之黏土層厚度僅約10 cm，黏土層厚度變化極大，依據本團隊所蒐集之林邊溪北岸地質資料研判，本計畫場址區域極可能為林邊溪沖積扇第一及第二含水層之區分點。

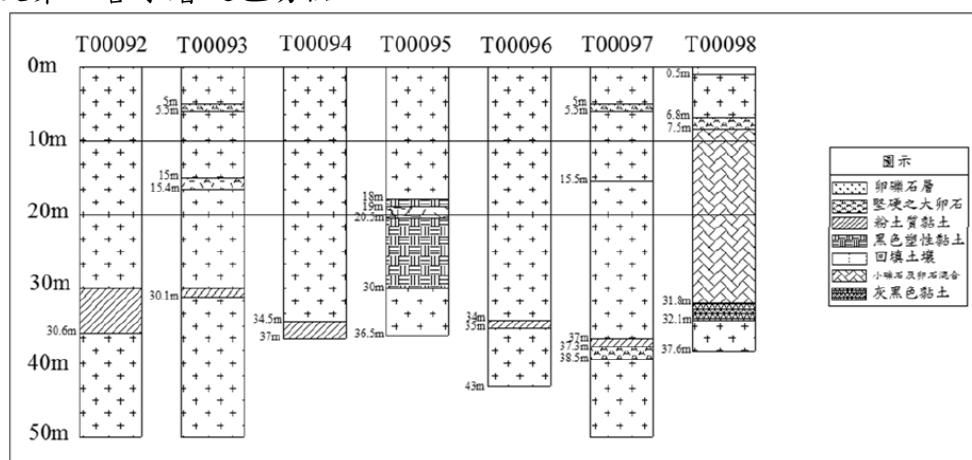


圖26、歷年設置地下水監測井地質調查資料(屏東縣環保局，2018)



註:黃色框線代表計畫場址區域範圍，紅色線代表地質剖面線。

圖27、公告污染場址區域地質剖面線(屏東縣環保局，2018)

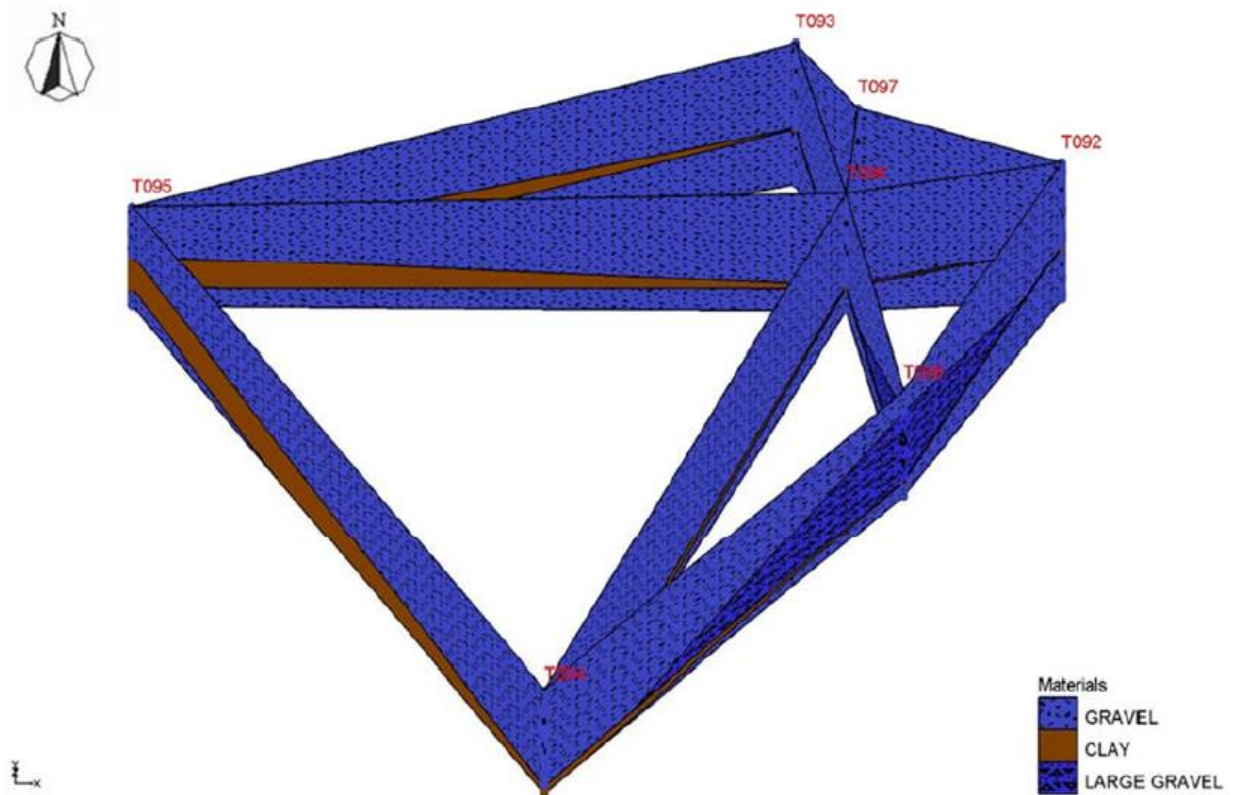


圖28、公告污染場址區域地質剖面圖(屏東縣環保局，2018)

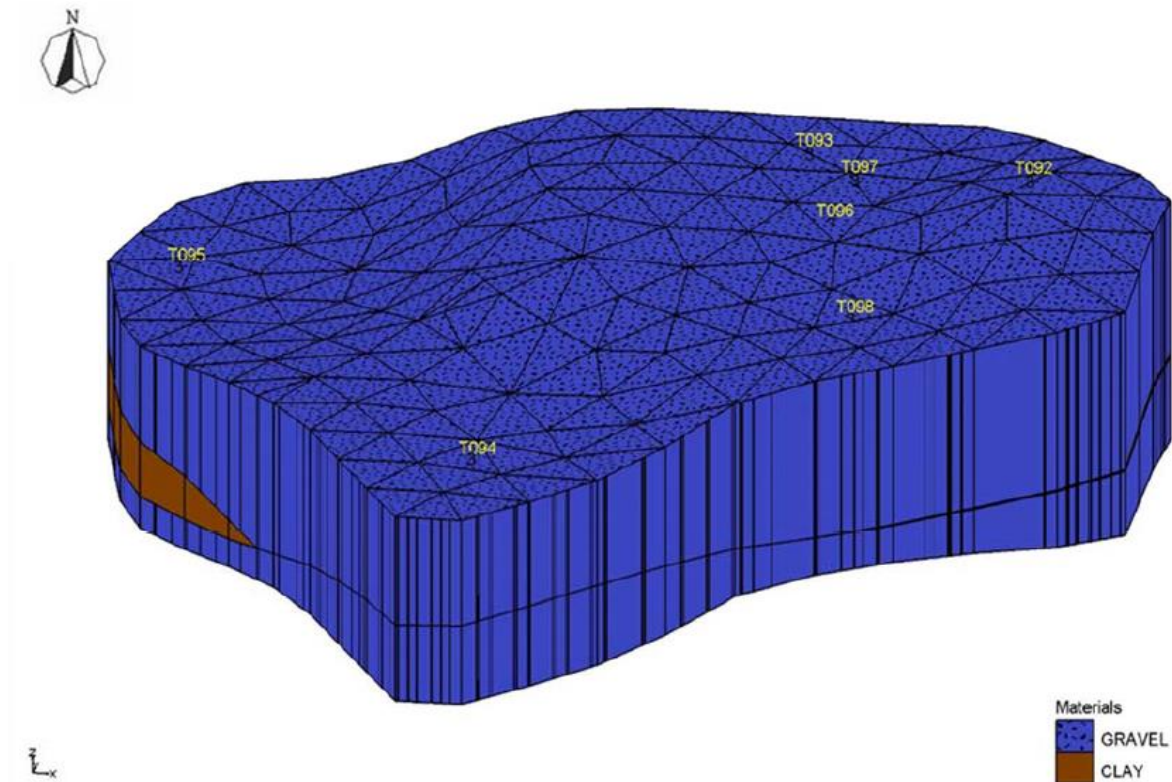
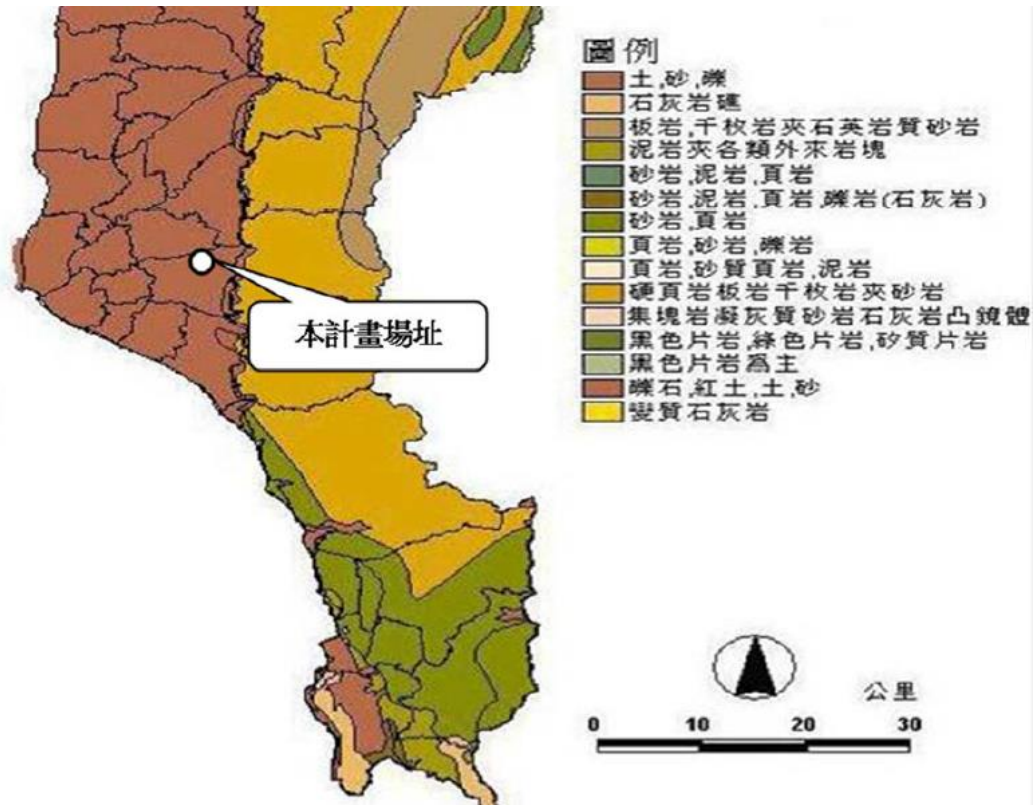


圖29、公告污染場址區域範圍3D地質概念圖(屏東縣環保局，2018)

屏東縣的地質主要包括：硬頁岩板岩千枚岩夾砂岩，板岩、千枚岩石夾英岩質砂岩，黑色片岩、綠色片岩、砂質片岩等岩性(如圖30所示)。本計畫場址區域位於林邊溪右岸並鄰近南岸農場，所蒐集本計畫區域內台糖各農場之水文地質資料可知(圖31)，林邊溪北岸地質由東向西主要由礫石層偶夾黏土層組成，至南岸農場之後(約於新開寮區域)開始於地表下10餘公尺處出現較明顯之灰色黏土層並往西逐漸遞增，開始區分為第一及第二含水層，此地質現象與場址區域地質調查結果相同；而構內農場之灰色粉土質黏土之厚度約60公尺左右，往西逐漸遞減，於三西和農場及東港間逐漸變為砂層與黃泥夾黃色黏土互層。本計畫區域約於地表下30至37公尺左右有一厚度約1公尺且不連續性之黏土層。而新開寮地區第一阻水層深度達地表下約80公尺，主要為卵礫石層所組成，粒徑較大，淘選良好，透水係數為佳至中級(約 1×10^{-5} 至 10^{-4} 公尺/秒)。

關於地下水流場方面，本計畫範圍之枯水期地下水位平均約位於地表下30至50公尺左右，豐水期地下水位約位於地表下20至40公尺左右，豐、枯水期水位變動約10至20公尺。枯水期地下水流向大致為東向西流動，而豐水期地下水流向大致為東北向西南方向流動。



註:本圖由右至左代表萬隆、南岸、建興、構內、三西和農場至東港。

圖30、屏東縣地質分布圖(經濟部中央地質調查所)

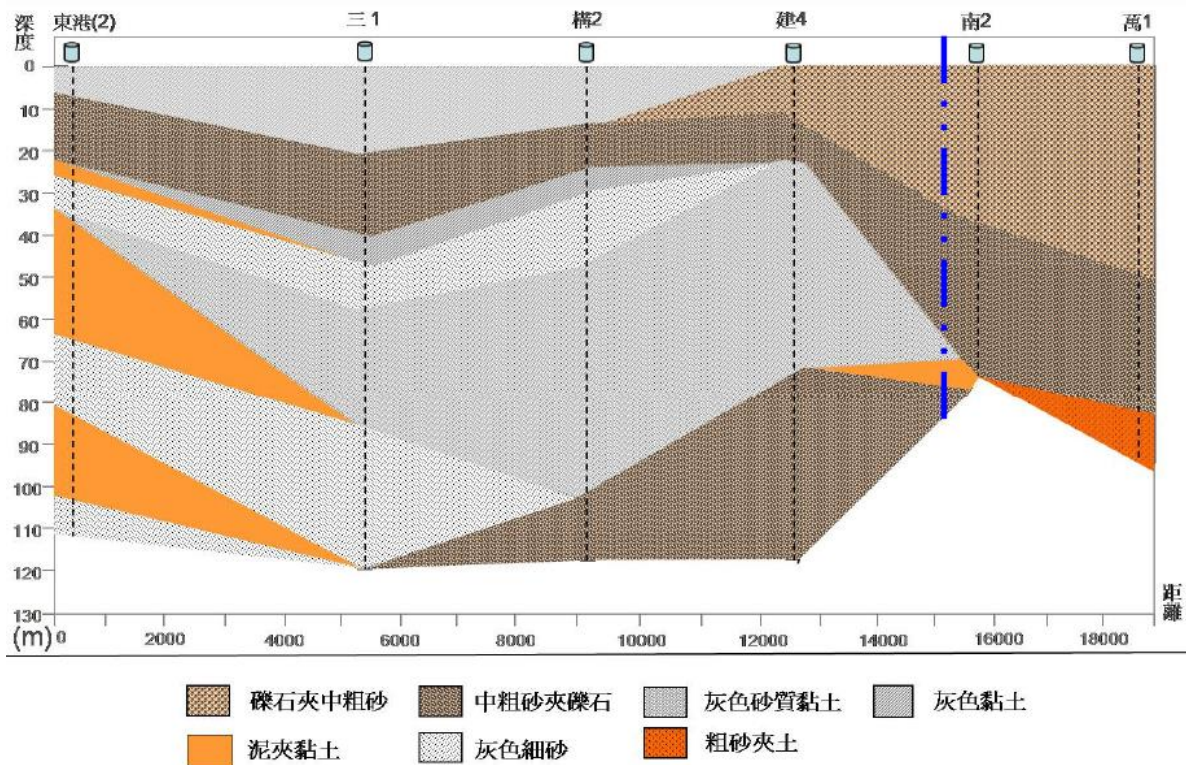
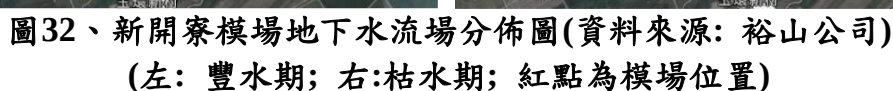


圖31、林邊溪北岸各農場地質剖面圖(屏東縣環保局, 2018)

本計畫場址位在紅點標示區域，為本試驗場址設置系統/觀測井所在位置(圖32)。由裕山公司提供新開寮模場地下水流場分佈圖可以發現，其豐枯水期之地下水流向變化有些許不同，豐水期地下水流向大致為東向西流動，而枯水期地下水流向大致為東南向西北方向流動，但整體來說還是往下游潮州方向流動。本團隊在進行試驗方面，將光纖光催化系統設置於三口系統井(WW1~WW3)後，受污染之地下水流經過此道光催化反應牆而受到處理，另外，在下游處進行四口觀測井(OW2~OW5)進行採樣，此三者相距皆約為3 m，在成效驗證方面，具有兩種方式，第一，透過單井之處理段與未處理段進行比較，其次，透過系統井與觀測井相互驗證方式，可以有效驗證光纖光催化系統之成果。另一方面，因此場址之水位變化大，由上期現地試驗(108-109年度)結果可以發現，於枯水期季節場址周邊地下水水位範圍在35~40 m區間，而豐水期降雨豐沛，因此水位上升會相當劇烈，最高紀錄可達到10-15 m之水位，代表豐枯水期地下水位變化相當劇烈。另外，透過較長時間連續監測水位變化，並依據連續量測結果繪製區域等水位圖，結果如圖4所示，由圖可以發現，今年度之地下水水位由5月枯水期，水位最低達約40 m，到5-6月進入梅雨季節，期間持續性豪大雨，水位劇烈變化，甚至在110年度的高強度降雨導致水位最高升至約8 m，而隨著10月豐水期雨季的結束，11月後降雨量顯著的減少，地下水水位相對也下降許多(水位26.57 m)。進入111年度後，水位持續進行監測，從年初水位約25 m進入枯水期直至5月中降至約31 m，而後開始進入梅雨季節，水位持續上升至約25 m，並於112年度2月底降至31 m，上述為111年度水位變化說明(如圖33)。而本團隊透過水位量測，釐清區域之豐、枯水期變化，以確實掌握並了解污染層與水位變化之關係，也認知此場址之特殊性，包括水位變化劇烈，以及豐枯水期流向可能稍微改變，因此透過單井與上下游驗證之雙軌方式同時進行，以及持續性的滾動式檢討，有利試驗系統成效驗證。



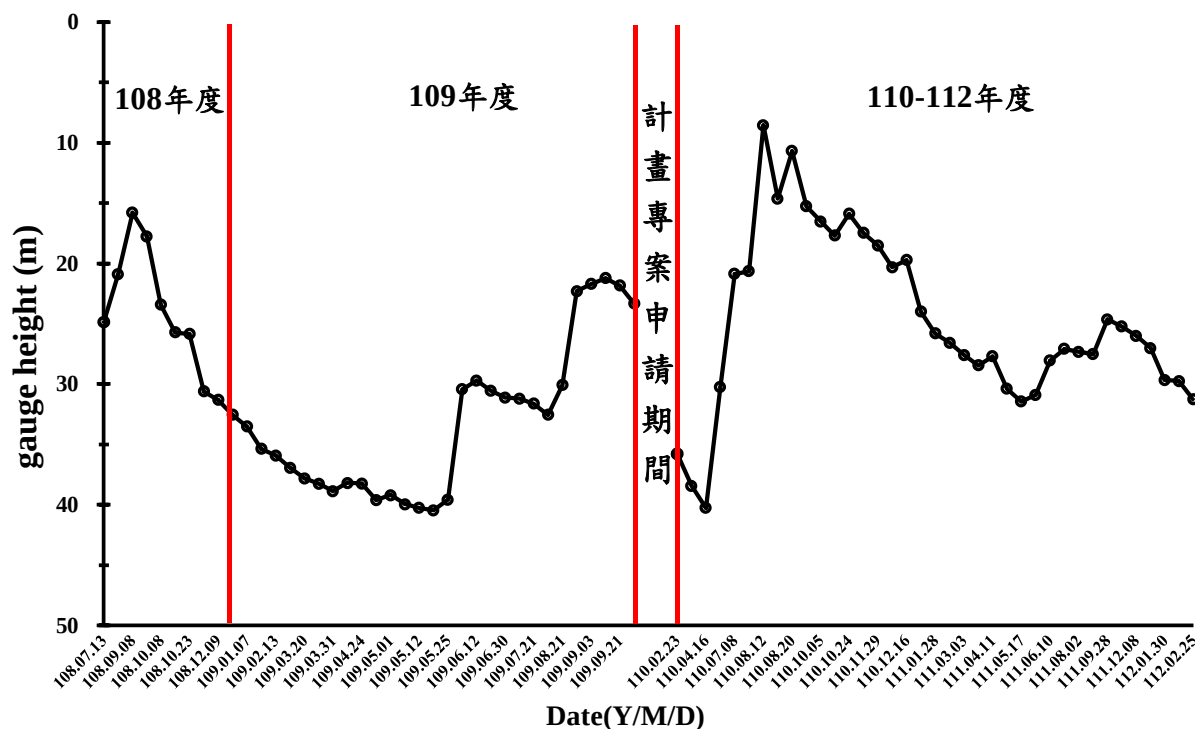


圖33、現地模場水位測量圖

另一方面，本計畫現地模場所鄰近既有監測井為T00239，其T00239-1為淺井(井深40 m)，而T00239-2為深井(井深80 m)，經過裕山公司所提供之歷年資料可以發現，在106與107年期間，於T00239-2、OW1(上游之背景觀測井)，以及OW3(下游之觀測井)，所測得之1,1二氯乙烯、1,1,2三氯乙烷、三氯乙烯、四氯乙烯濃度如表5(1)所示，在T00239-2方面，106年之污染物所測得的濃度範圍依序為0.09~0.14 mg/L、0.02~0.03 mg/L、皆小於0.01 mg/L，以及小於0.01 mg/L與ND，在107年度方面，1,1二氯乙烯測得最高濃度為0.16 mg/L，其餘污染物濃度範圍與106年相似，另外，在上下游之觀測井測得濃度可以發現，其污染物皆主要以1,1二氯乙烯為主，濃度最高可達0.14 mg/L。另一方面，由歷年資料發現，1,1二氯乙烯大部分皆超過管制標準(>0.07 mg/L)，而由更早歷史紀錄可以發現，本場址最高濃度於105年枯水期為0.190 mg/L，主要污染物種皆為1,1二氯乙烯。

另外，本團隊透過歷年水質與本年度所測得之水質進行比較，以了解清洗井體的乾淨程度，評估是否會影響光纖光催化系統之處理效率。濁度表示水對光的反射及吸收性質，當光線無法穿過水體時，水質可能是骯髒不潔的，這種水稱為濁度水。濁度來源有黏土、砂土、淤泥、無機及有機微粒、浮游生物、細菌等、濁度影響外觀、光的透過，進而影響水生植物的光合作用，魚類的生長與繁殖也將受到影響，並且會干擾消毒作用。水中之總氮主要包括硝酸鹽氮、亞硝酸鹽氮、凱氏氮(凱氏氮為氨氮與總有機氮之和)。硝酸鹽為各種型態中最穩定的含氮化合物，也是含氮有機物經氨化及硝化作用後之最終氧化產物(氨氮→亞硝酸鹽氮→硝



酸鹽氮)。在溶氧量足夠的水體之無機氮，通常以硝酸鹽(NO_3^-)佔較大比例。亞硝酸鹽可經氧化而生成硝酸鹽，在缺氧環境下，亦可受微生物的作用而還原為氨氣。氮化合物之存在被認為係有機物之存在，一般蛋白性氮、氨氮的存在表示污染時間較短，而硝酸鹽氮則表污染時間較長。通常未被污染水中的亞硝酸鹽氮自然濃度很低，約 0.01mg/L 左右，是為水中植物的營養鹽之一。當亞硝酸鹽氮濃度過高、異常或變化過劇時，常為水域生態環境惡化之表徵。

本團隊針對T00239-2與OW1兩口井進行水質歷年資料探討，由106年度與107年度之裕山公司提供資料顯示，地下水之pH值約落在6.6至7.3區間，導電度範圍為445~475 ms，溶氧方面為1.4~8.3 mg/L，DOC則為0.2~30.9 mg/L。而與本團隊在110年度所採樣之系統井(WW1~WW3)與下游觀測井(OW2~OW5)，進行五次水質採樣之日期分別是10/05、10/18、11/12、11/29、12/17，期間經歷了豐水期進入枯水期之過程，由表5(2)-表5(4)數據結果進行比較可以發現，若以OW1作為水質數據比較基準的話，此上游觀測井在106與107年度數據，與本期專案(110-111年度)觀測井(OW5與OW3)與系統井(WW1~WW3)，大部份水質參數皆落在以往範圍正常區間，但在濁度方面，各口井之數值呈現相當不穩定之情況，範圍落在0.29-162 NTU，由此可以發現，其井體內之地下水濁度並不穩定。另外，在其他的水質分析項目中，由測量數據結果得知，pH大約落在中性附近範圍居多，隨著雨水沖刷可能會造成土壤釋出物質而影響水體pH變化；而導電度範圍落在300-400區間，同樣會受到雨量的變化而有偏移，另一方面，水體中的DOC、氨氮、亞硝酸鹽氮之數值，在各口井範圍分別落在1.2-105.8 mg/L、ND(最低測得濃度為0.013 mg/L)-2.177 mg/L和ND(最低測得濃度為0.009 mg/L)-0.060 mg/L。另一方面，硝酸鹽氮測得濃度皆與OW1相比較低，濃度範圍為0.093 mg/L-2.162 mg/L，並少有出現ND之情形，由此可以發現，當氨氮存在較高之水體，表示污染時間較短，這也有可能是今年強降雨所造成水位變化之影響，將土壤中之污染物質大量沖刷，導致釋出到地下水中，因此氨氮濃度才會與往年相比提高許多，本團隊在試驗過程期間，持續監測水質變化，以了解各種可能影響系統成效之環境因子。

表5、新現地模場系統/觀測井地下水含氯有機污染物濃度與水質紀錄一覽表(1)

檢驗項目	井號	T00239-2						OW1					OW3				
	年度	106			107			106			107		106		107		
	月/日 單位	10 /12	11 /16	12 /14	01 /11	03 /19	10 /12	11 /16	12 /14	01 /11	03 /19	10 /12	11 /16	12 /14	01 /11	03 /19	
1,1-二 氯乙烷	mg/L	<u>0.09</u>	<u>0.14</u>	<u>0.13</u>	<u>0.16</u>	<u>0.15</u>	<u>0.14</u>	<u>0.13</u>	<u>0.12</u>	<u>0.13</u>	<u>0.12</u>	<u>0.13</u>	<u>0.13</u>	<u>0.11</u>	<u>0.11</u>	<u>0.13</u>	
1,1,2 三 氯乙烷	mg/L	0.02	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03	
三氯 乙烷	mg/L	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	
四氯 乙烷	mg/L	ND	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	

註：斜線加底線為超過管制標準

表5、新現地模場系統/觀測井地下水含氯有機污染物濃度與水質紀錄一覽表(2)

檢驗項目	井號	T00239-2/OW1				
	年度	106			107	
	月/日 單位	10/12~13	11/16~17	12/14~15	01/11~12	03/19~20
pH		7.2/7.3	7.3/7.2	7.2/7.3	7.2/7.2	6.6/7.2
導電度	ms	498/497	458/445	477/468	451/523	575/487
水位	m	22.01/22.16	20.88/21.07	23.59/24.33	24.73/25.90	29.86/29.93
溶氧量	mg/L	5.6/5.7	8.3/8.2	2.3/4.8	4.2/6.0	2.0/4.6
濁度	NTU	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-
DOC	mg/L	0.4/0.3	0.3	0.3/0.4	2.0/0.2	30.9/0.2
氨氮	mg/L	-/<0.05	-/<0.05	-/<0.05	-/ND	-/<0.05
亞硝 鹽氮	mg/L	-/ND	-/ND	-/<0.02	-/0.02	-/0.04
硝酸 鹽氮	mg/L	-/7.67	-/8.05	-/9.81	-/13.1	-/9.51

表5、新現地模場系統/觀測井地下水含氯有機污染物濃度與水質紀錄一覽表(3)

檢驗項目	井號	OW3(觀測井)										OW5(觀測井)		
	年度	111							112			111		
	月/日	05/18	06/10	07/01	08/02	09/28	10/22	12/22	01/30	02/25	4/10	01/07	01/28	02/11
	單位													
pH	-	7.2	7.0	6.8	6.2	7.0	7.2	5.5	5.6	5.5	6.2-	6.8	7.0	7.2
導電度	ms	337	310	264	334	610	70	83	350	365	258	305	407	546
水位	m	31.46	28.06	27.08	27.32	24.63	25.24	27.03	29.67	31.6	32.79	24.00	25.80	26.57
溶氧量	mg/L	4.6	3.0	4.9	4.7	1.3	4.8	1.9	3.9	2.9	2.3	6.0	5.1	4.2
濁度	NTU	25.6	10.2	0.40	2.30	0.20	6.30	8.05	6.05	10.5	2.50	7.07	23.1	17.0
DOC	mg/L	6.5	1.2	14	4.3	-	-	-	-	-	-	7.9	6.9	7.3
氨氮	mg/L	0.016	0.025	0.013	0.387	0.172	0.524	0.343	0.349	0.116	0.223	0.561	0.307	0.382
亞硝鹽氮	mg/L	ND	ND	ND	ND	ND	0.015	0.010	ND	ND	ND	ND	ND	ND
硝酸鹽氮	mg/L	1.35	2.35	0.552	0.691	0.895	1.49	0.956	0.444	0.505	0.565	0.304	0.380	0.140

註: ND: Not Detected、氨氮 MDL: 0.01 mg/L、亞硝鹽氮 MDL:0.007 mg/L、硝酸鹽氮 MDL:0.04 mg/L。

3/11 樣品已採樣，待測中

表5、新現地模場系統/觀測井地下水含氯有機污染物濃度與水質紀錄一覽表(4)

檢驗項目	井號	WW1 系統井													
	年度	111											112		
	月/日 單位	12/17	01/07	01/28	02/11	05/18	06/10	07/01	08/02	09/28	10/22	12/22	01/30	02/25	4/10
pH	-	6.0	6.3	6.2	6.73	7.0	7.1	6.4	6.8	7.0	7.0	6.0	6.4	5.8	6.2
導電度	ms	420	283	385	500	477	290	315	336	302	293	436	410	235	256
水位	m	19.73	24.00	25.80	26.57	31.46	28.06	27.08	27.32	24.63	25.24	27.03	29.67	31.67	32.79
溶氧量	mg/L	2.9	2.1	1.76	1.2	3.6	6.6	1.4	3.6	1.1	4.0	1.4	1.9	2.35	2.5
濁度	NTU	76.5	61.0	57.6	43.8	25.5	31.8	8.08	1.32	0.710	6.61	41.7	32.0	37.0	20.2
DOC	mg/L	88.7	9.86	8.36	15.9	7.61	1.59	19.50	3.28	-	-	-	-	-	-
氨氮	mg/L	0.415	0.023	0.052	2.177	0.078	0.014	0.157	0.097	0.497	0.027	0.431	0.123	0.126	0.235
亞硝鹽氮	mg/L	ND	ND	0.015	ND	ND	0.009	ND	ND	ND	0.065	ND	ND	ND	ND
硝酸鹽氮	mg/L	0.505	0.219	0.233	0.734	0.237	0.269	ND	ND	ND	0.548	0.194	0.086	0.401	0.566

註: ND：Not Detected、氨氮 MDL: 0.01 mg/L、亞硝鹽氮 MDL:0.007 mg/L、硝酸鹽氮 MDL:0.04 mg/L。

3/11 樣品已採樣，待測中

表5、新現地模場系統/觀測井地下水含氯有機污染物濃度與水質紀錄一覽表(5)

檢驗項目	井號	WW2 系統井													
	年度	111											112		
	月/日 單位	12/17	01/07	01/28	02/11	05/18	06/10	07/01	08/02	09/28	10/22	12/22	01/30	02/25	4/10
pH	-	6.8	6.5	6.9	8.0	7.1	7.1	6.7	6.6	7.1	7.0	5.9	6.6	6.3	6.8
導電度	ms	487	304	431	387	341	292	321	312	312	276	397	266	400	356
水位	m	19.73	24.00	25.80	26.57	31.46	28.06	27.08	27.32	24.63	25.24	27.03	29.67	31.67	32.79
溶氧量	mg/L	3.6	6.4	4.4	5.9	4.5	2.4	6.5	8.2	0.93	7.7	2.0	3.7	4.5	4.8
濁度	NTU	15.5	26.7	30.7	31.8	14.8	16.6	0.37	0.00	0.06	19.0	24.9	29.0	39.0	23.5
DOC	mg/L	7.69	13.6	10.6	18.7	5.34	1.46	29.1	3.01	-	-	-	-	-	-
氨氮	mg/L	0.119	0.062	0.076	0.049	0.017	0.014	0.157	0.061	0.261	0.417	0.284	0.235	0.604	0.220
亞硝鹽氮	mg/L	ND	ND	0.013	ND	ND	0.035	0.009	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
硝酸鹽氮	mg/L	0.147	0.935	0.731	0.824	1.407	ND	0.319	0.398	0.348	0.183	0.813	0.361	0.921	0.652

註: ND：Not Detected、氨氮 MDL: 0.01 mg/L、亞硝鹽氮 MDL:0.007 mg/L、硝酸鹽氮 MDL:0.04 mg/L。

3/11 樣品已採樣，待測中

表5、新現地模場系統/觀測井地下水含氯有機污染物濃度與水質紀錄一覽表(6)

檢驗項目	井號	WW3 系統井													
	年度	111										112			
	月/日 單位	12/17	01/07	01/28	02/11	05/18	06/10	07/01	08/02	09/28	10/22	12/22	01/30	02/25	4/10
pH	-	7.5	6.7	7.3	7.8	7.2	7.1	6.7	6.5	7.0	6.9	6.3	5.9	6.8	6.5
導電度	ms	474	311	359	420	335	304	317	312	312	276	400	225	175	302
水位	m	19.73	24.00	25.80	26.57	31.46	28.06	27.08	27.32	24.63	25.24	27.03	29.67	31.67	32.79
溶氧量	mg/L	7.8	5.4	5.7	5.4	7.5	2.3	2.3	8.2	0.93	4.5	1.9	2.3	6.3	3.5
濁度	NTU	154.3	74.00	66.19	64.00	48.43	71.00	4.090	0.000	2.940	8.750	47.1	23.0	43.0	23.0
DOC	mg/L	12.8	10.9	20.4	28.4	6.1	1.9	11.8	1.8	-	-	-	-	-	-
氨氮	mg/L	0.068	0.039	ND	0.032	0.023	ND	0.016	0.387	0.195	0.451	0.074	0.503	0.154	0.159
亞硝鹽氮	mg/L	ND	ND	0.015	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0.060	ND	ND	ND	ND
硝酸鹽氮	mg/L	0.298	0.093	0.072	0.434	1.658	0.434	0.093	0.290	ND	0.330	0.380	0.304	0.723	0.563

註: ND：Not Detected、氨氮 MDL: 0.01 mg/L、亞硝鹽氮 MDL:0.007 mg/L、硝酸鹽氮 MDL:0.04 mg/L。

3/11 樣品已採樣，待測中



4.3、薄膜介面探測作業(MIP)試驗

本計畫利用 MIP 進行井中地下水揮發性有機污染物探測，MIP 組裝及現場作業如圖 34 所示，MIP 探測器主體為直徑約 3.8 公分、長 30 公分之金屬體，其上有金屬與高分子聚合物所組成之半透性薄膜，藉由加熱薄膜與地下水中之揮發性有機物接觸，激化後進入薄膜內部，由偵測器內部氮氣攜帶至地面上移動式實驗車內，並由鹵素偵測器(Halogen Specific Detecto, XSD)進行分析，以瞭解地下水污染情形。本計畫配合現地地表裝設之懸掛系統裝置，將 MIP 探測器置入井中，MIP 由地面控制器使薄膜加溫至 100~121℃，驅使地下水中有機氣體被激化並滲透進入 MIP 探測器表面之半透性薄膜，藉由 MIP 內部之載流氣體(通常為氮氣)將有機氣體傳送至 XSD 分析，每 1.5 公分一組 XSD 之偵測分析數據。於置入過程開始時，確認訊號線與 XSD 之聯結，並開啟氮氣(流量通常為 45 至 65 mL/min)，將定位器歸零(即從地面開始為零)，並開始置入動作。置入深度由定位器持續紀錄，同時地下水中之揮發性有機物持續透過薄膜進入加溫室並由氮氣傳送至 XSD，樣品由 MIP 薄膜擴散進入樣品室到傳輸至 XSD 之延遲時間通常在 30~45 秒間，惟亦取決於深度與氮氣之流量。

由先前舊場址兩口井之 MIP 進行此新開寮場址之污染層之變化與水位之關係，研究於 108 年 07 月 13 日與 108 年 10 月 23 日進行本試驗處理井之 MIP 試驗，利用此儀器找出實際受到污染的水層位置。兩次測量時水位相近，分別是 24.87 m 與 25.85 m，因此兩次 MIP 測量水位大約從 25 m 至 60 m 範圍進行測量，其測量結果如圖 35 所示，在 07 月 13 日所測結果(圖 35 左)，可以發現污染層大約分佈在 25-34 m 區間，再繼續往下測量皆無訊號值產生，代表當時污染物分佈皆在淺層位置，而井的開篩深度為 30-60 m，這也代表污染物會隨著水位的變化，向上進行擴散。另一方面，由 10 月 23 日 MIP 測量結果得知(圖 35 右)，污染熱點大概分佈在 29-36 m 以及 40-48 m 這兩段地下水層，而其中又以 40-48 m 的污染訊號較為強烈。於 109 年度，於 04 月 15 日測量結果得知(圖 36A)，污染熱點大概分佈在 40-45 m 水層，而當時水位深度為 38.18 m，而 05 月 20 日測量結果(圖 36B)，污染熱點大概分佈在 40-48 m 水層，06 月 30 日測量結果(圖 36C)，污染熱點大概分佈在 44-52 m 水層，08 月 07 日測量結果(圖 36D)，污染熱點大概分佈在 33-51 m 水層，09 月 21 日測量結果(圖 36E)，污染熱點大概分佈在 22-52 m 水層。此 108-109 年度 MIP 試驗結果可以發現，污染層主要在地下水的淺層位置，在此段地下水層經由劇烈水位變化(豐枯水期轉換)的情況下，可能會造成污染物的移動，使污染熱點分佈於不同深度，如 6 月 30 日剛開始造成水位變化，因此污染熱點尚未在淺水位的地方發現，而 08 月 07 日與 09 月 21 日皆出現水位上升後，污染層分佈範圍變廣之情形。



由裕山公司之歷年資料可以發現，於 106 年 10 月 5~15 日調查新開寮區域地下水污染層，調查針對 T00239(介於系統與觀測井中間)進行 MIP 調查，其探測深度從地表下至 55 m，探測結果顯示，其 XSD 之電壓值較高(約 64,000 至 69,000 V 間)反應位於 30 至 40 m 間(淺水位)，並且由上而下有依序遞減情形。因此本團隊於 110 年 7 月 16 日進行第一次 MIP 試驗(測量深度至水位 60 m)，由實驗結果可以得知(圖 37A)，當時水位約為 21 m，測量後發現污染訊號出現位置相當廣泛，大約落在 22-55 m 皆有出現污染訊號。另外，在 110 年 12 月 02 日進行第二次 MIP 試驗，如圖 37B 所示，當時水位約為 20 m，污染訊號範圍出現在 23-55 m，但與降雨機率較大的 7 月相比，可以發現在枯水期 12 月之污染訊號較 7 月集中於上方(20-30 m)。由 110 年度之水位變化可以發現，從枯水期(水位 40 m)，因氣候因素所造成短時間豪大雨，而導致水位提高至 20 m(最高至 8 m)，因此由結果可以推論，水位上升初期，污染將停留於原先之水位高度，隨著時間變化，會漸漸分佈較廣(深至淺)，而當水位達到一個穩定高度後，污染熱點會再分佈於淺水位，此試驗與推論結果與 108-109 年度模場試驗結論相同，另一方面，在 111 年度 4 月 29 日之 MIP 數據中顯示，隨著水位持續降低，污染熱點也會持續地往下移動，甚至在較深處出現污染熱點的訊號，這個在 108/10/23 的 MIP 也出現相同情況，可見在水位持續降低的枯水期過程，污染熱點除了持續在地下水位表面出現外，也有一些污染熱點會出現在較深處的位置。此原因主要是新開寮場址較為特殊，地下水層較為深厚，可以達 80 m 深，豐枯水期間的水位變化非常劇烈，以上原因也是導致抓取污染熱點深度極具挑戰性的主要原因。



圖34、MIP組裝及現場作業

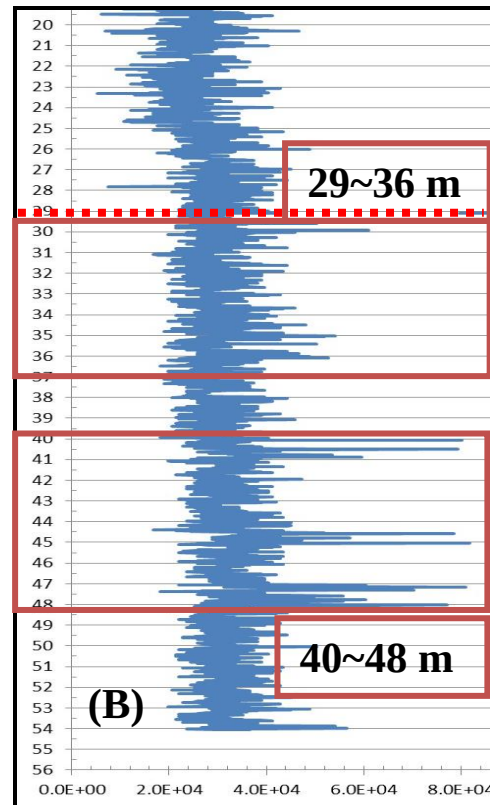
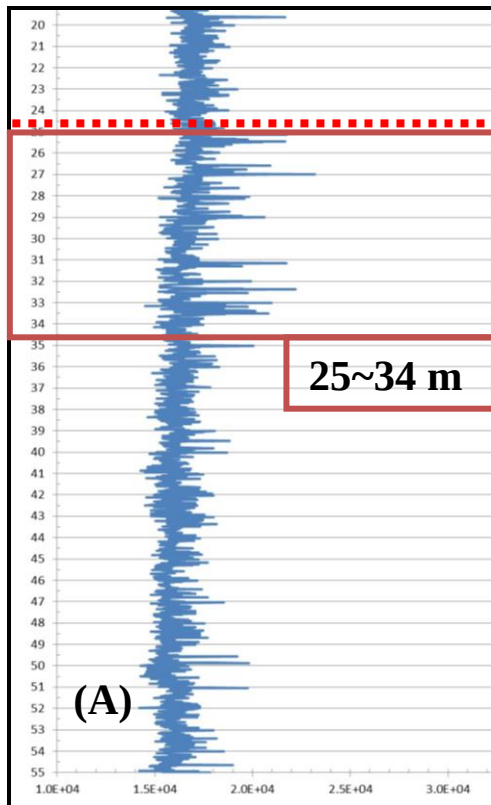


圖 35、108 年度 MIP 分析結果，測量時間(A) 108/07/13，(B) 108/10/23。

(Y 軸為地下水深度 m，虛線為水位處)

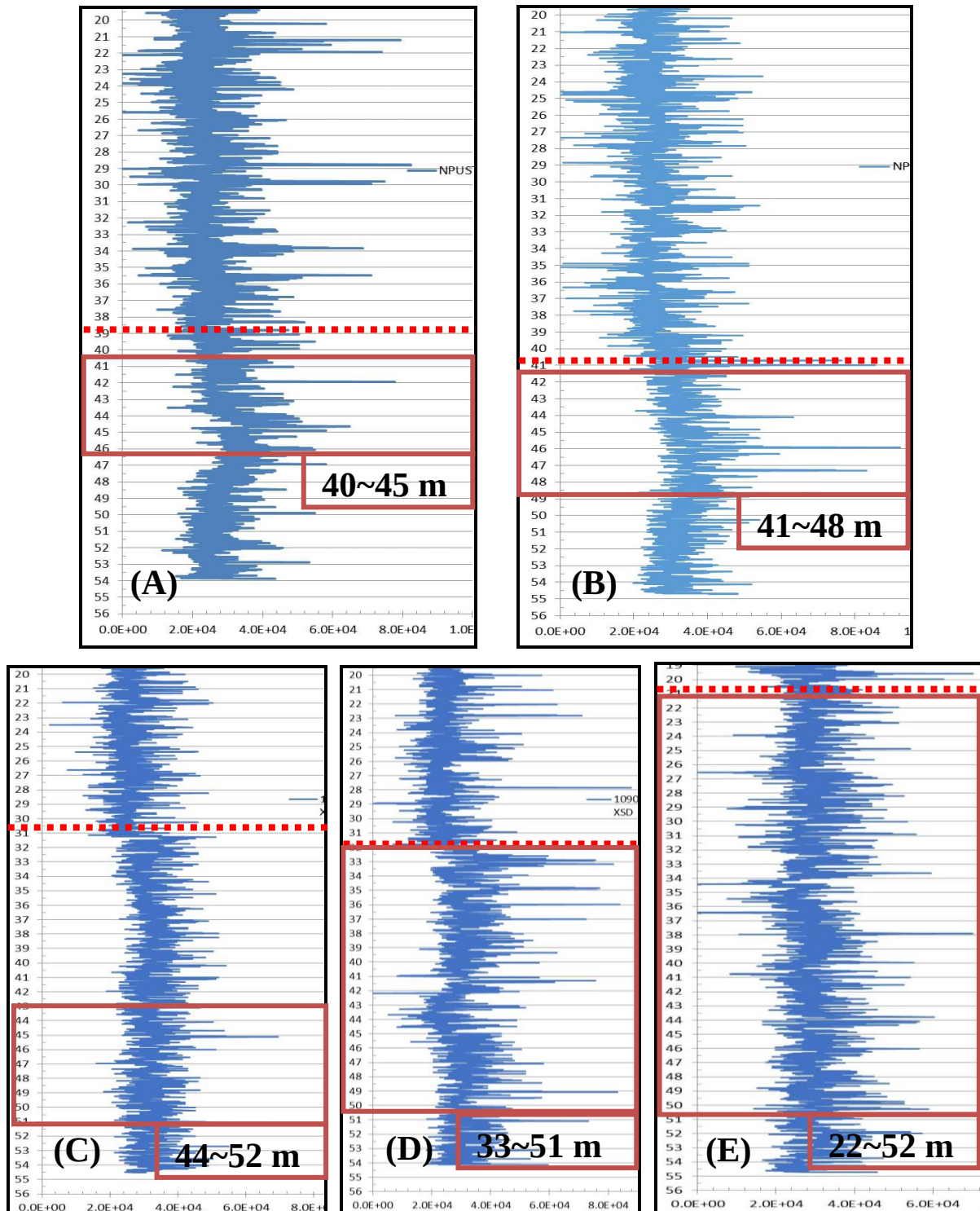


圖 36、109 年度 MIP 分析結果，測量時間(A) 109/04/15，(B) 109/05/20，(C) 109/06/30，(D) 109/08/07 和(E) 109/09/21。(Y 軸為地下水深度 m，虛線為水位處)

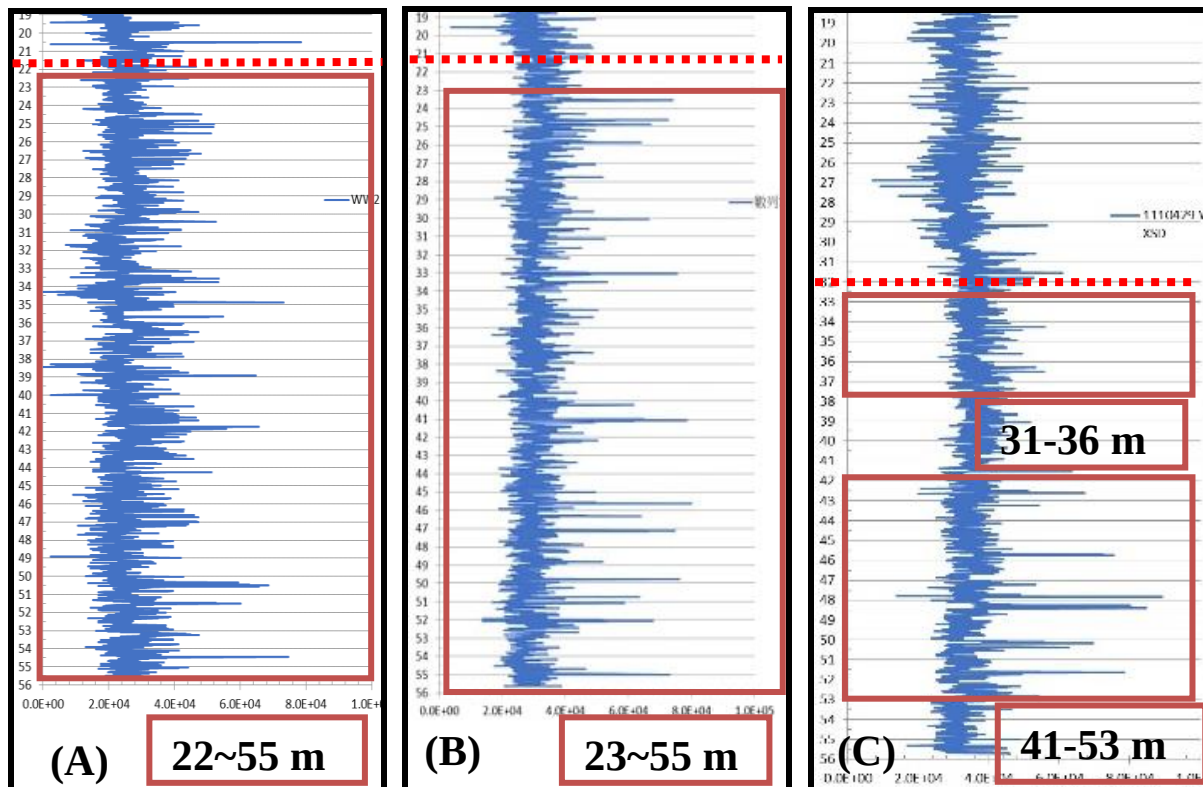


圖 37、110-111 年度 MIP 分析結果，測量時間(A) 110/07/16、(B) 110/12/02
(C) 111/04/29。(Y 軸為地下水深度 m，虛線為水位處)

4.4、應用光纖光催化於現地試驗結果

4.4.1、光纖光催化系統模組化及成本初評說明

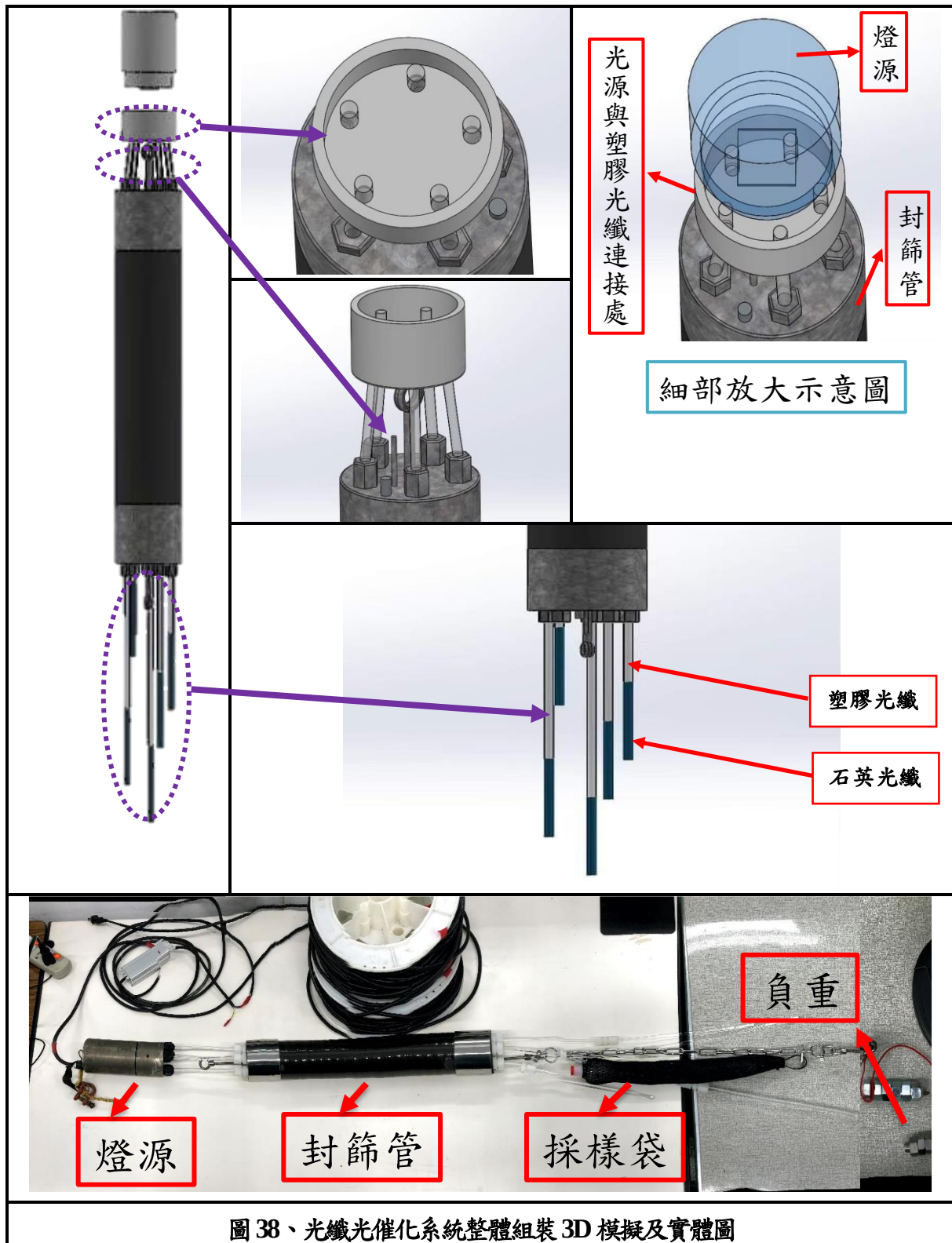
本試驗之光纖光催化技術關鍵重點在於光源以及光纖設計與設置方式，本團隊測試後發現，所購得之塑膠光纖經長傳輸後會損耗光傳輸強度(以模場地下水層 30-80 m 較深的條件)，導致光強度無法激發覆膜石英光纖。因此，本團隊設計一款水中光源機，可與封篩管進行套接(111 年度選擇不透過封篩管，直接與石英光先進行套接)，垂吊進入污染地下水層，並在上方進行照射，將光源近距離導入處理段的光纖當中。本團隊設計之 LED 水中光源機，光源分別為可見光(400-800 nm)與紫外光(395 nm)兩種，功率皆為 50W，其水中光源機可達到防水效果，並且可將光源放至最接近污染層的地方，透過光纖傳導至處理段，其設計概念為達到光催化在水中應用的可行性，降低光催化在水中因光遮蔽而無法應用的情形。

本光纖光催化系統應用於處理井之整體示意圖可參閱圖 17 所示，原先是將儀器懸吊於三腳架上，再進行後續的系統懸吊，但本團隊為了未來可能會大範圍施作，因此將所有連接材質更換為鋼索，只需利用俗稱小金剛的懸吊機將光催化設備放置下去井內，再將鋼索固定於井口，即可將井蓋蓋上進行內部處理，提升設備安全性及未來大面積施作之可行性。懸吊系統方面，由上而下分別為水中光



源機、封篩管(內含塑膠光纖)，再來是處理層(石英覆膜光纖)。試驗期間為驗證系統處理污染物之效率，故於覆膜石英光纖中間，放置一口被動式採樣袋，試驗時間一組為 14 天。本計畫以往為將處理層以上下封篩管進行間隔，主要原因是可方便驗證與固定光纖作用，在 110 年度，本團隊首先為方便後續光纖光催化系統在現地使用之便利性，因此只在處理段上方設置封篩管，並進行氣管串接，使系統可以穩固固定於處理深度(請參閱 3.4.3 節或圖 17)，以上為整組光纖光催化系統結構，實體圖組裝如圖 38 所示，並且在 111 年更進一步移除封篩管設置，為達系統便利性將直接以塑膠光纖延伸光源後，直接與覆膜石英光纖進行套接，此方式可減少不僅可增加現場操作便利性，亦可降低設置成本，而整組系統放置在污染水層約 30-40 m 處(定期以 MIP 進行分析污染熱點確認與水位監測，以作為調整處理設備之水深位置設定)，地面上只需串接氣管供應氣體，以及連接水中光源機之電源。另一方面，依據本研究之 107 年度成果，進行分層鋪設光纖的方式，塑膠光纖於水中光源機延伸出至處理層，以不同的長度進行延伸，以達到後端發光源之石英光纖處於不同深度之處理位置。塑膠光纖長度分別為 78、88、98、108、118 cm，直徑為 6 mm，共五段，此塑膠光纖為端點光纖，只有頭尾進行導光，將光源傳導至處理段之石英光纖，石英光纖長度皆固定 30 cm(直徑 6 mm)，各段石英光纖與塑膠光纖之連接處，本團隊為有利未來現地處理時容易組裝使用，針對系統模組化進行研究，在各單元間串接上進行改良，成果如圖 39 所示。首先，本團隊利用光纖接頭進行塑膠光纖與石英光纖之串接，未來在覆膜光纖製備完成後，可有利於覆膜光纖利用與更換維護，其光纖接頭之串接位置大約 5 cm，因此石英光纖約 25 cm 進行覆膜。另外，本團隊透過各類扣環、電源連接器，與鋼索進行系統連接，大大提高在系統組裝上之便利，減少耗損之工時。

在試驗模場設備操作成本初估方面，本團隊所使用的光纖光催化系統包含石英/塑膠光纖、水中光源機(自行設計)等，粗估成本約 5 萬元，遠低於一般市售商業化之光源機。另外，其它周邊設備包括：封篩管一副(後續輕量化系統後將可移除)、各種線路、吊掛系統(小金剛)、打氣機、噴槍等，合計約 10 萬元。在現地放置設備及器材之貨櫃屋 10 萬元，而依 108-110 年統計用電顯示，單口井進行光催化試驗的話，模場平均每月耗電量介於 20 度~50 度之間(其中包含在現場準備時使用之電力)，每月電費約 33 元~80 元，在監測/處理井方面，單一 4 英吋標準井以平均地下水流速 47 cm/day 計算，使用目前的系統處理，每天處理之水量約為 47 L，以上為初步成本評估，在 111 年度，本團隊以輕質化作為系統目標，將移除封篩管之設置，後續將可為光纖光催化系統更具有方便性以及實現低設置成本之最終目標。111 年度持續進行單井及多井試驗(反應牆)進行處理測試之實際成本，並收集更多現場數據後而進一步完整評估。



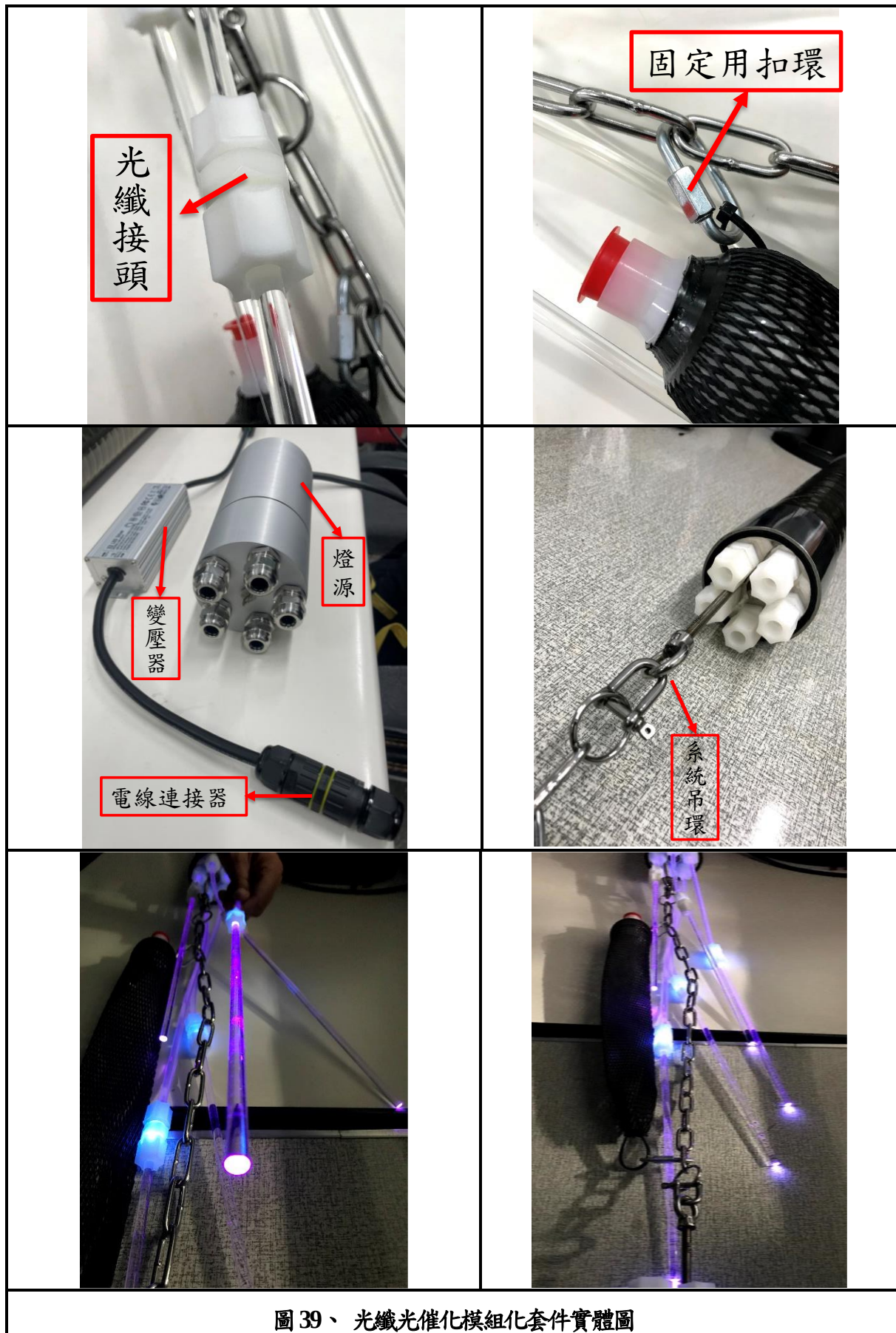


圖 39、光纖光催化模組化套件實體圖



4.4.2、應用系統於現地對於受污染之地下水中含氯有機物之影響

本試驗探討光纖光催化系統應用於現地之可行性，針對受污染之地下水中含氯有機物進行處理，於 110-111 年度，首先以 P25 TiO_2 作為對照組進行試驗，探討以商業化光觸媒種類在放大試驗規模之處理成效。另一方面，本團隊進一步以最新方法製備 N- TiO_2 ，其製備程序較先前簡易，但效果更加提升(製備方法可參閱 3.1 節)，有利於未來放大試驗之光觸媒應用。在上述光觸媒基礎下，本團隊利用可見光與紫外光 LED 作為試驗燈源，探討光纖光催化對於現地含氯有機污染物之處理效果。本團隊在進行系統試驗前，先在 110 年 07 月 16 日、110 年 12 月 02 日，以及 111 年 04 月 29 日分別進行 MIP 試驗，由試驗結果可以得知，因豐枯水季轉換的因素，導致豐水期水位長時間處於高水位(20 m 以上)，因此，在污染物分佈上，依各水層位置皆有出現污染訊號，而 12 月份那次 MIP 試驗，可以發現污染物往上集中的現象(20-30 m)，並且在 111 年度也發現因枯水期因素，污染層濃度分佈都落在水位表層與較深層位置，然而，因後續試驗本團隊為達統一性，一律將處理段位置設置於 30-32 m 井開篩位置處進行試驗。

在試驗方面，使用系統井(WW1、WW2、WW3)和觀測井(OW2、OW3、OW4、OW5)進行光催化處理效果分析。首先，本團隊針對兩口系統井(WW1、WW2)進行空白試驗(為試驗 A)，探討地下水在未放光纖光催化系統前含氯有機物濃度。接下來，本團隊以 WW1、WW2，以及 WW3 三口系統井進行系統試驗探討，首先，利用 UV light/ TiO_2 進行系統試驗(為試驗 B)，另外則是 Visible light/N- TiO_2 (為試驗 C)與 UV light/N- TiO_2 (為試驗 D)，並以 ZnO/CNT 之改質觸媒進行之試驗為 Visible light/N- TiO_2 -ZnO/CNT(為試驗 E)與 UV light/N- TiO_2 -ZnO/CNT(為試驗 F)之系統試驗，另外，於 111 年度試驗進行一組透過光纖表面處理之打磨光纖進行光纖光催化效果試驗(Visible light/N- TiO_2)為試驗 G，主要目的為表面處理後之光纖折射改變，以及光觸媒於表面之光催化效率是否具有助益，另一方面，本團隊進行兩次空白背景試驗(為試驗 H 與 I)，以及光纖光催化試驗(K 至 M)，上述試驗結果如表 6 所示。首先由空白背景試驗 A、H 與 I 這三組數據可以發現，尚未放置光纖光催化系統之系統井，在兩種深度的測量之背景濃度得知，以 1,1-二氯乙烯為例，濃度皆高於監測標準甚至管制標準，濃度範圍落在 0.041 mg/L - 0.11 mg/L，而其他污染物種濃度偏低。本團隊進一步以試驗 B 至 G 進行探討，首先以單井進行效率驗證探討，可以發現在系統試驗條件下，系統井之處理段濃度皆較空白段低，各種污染物去除效率普遍平均落在 40-80%，1,1,2-三氯乙烷方面，並且最高可達到 93%，而 1,1-二氯乙烯去除效率也最高可達到 98%，另外，TCE 與 PCE 濃度皆較低。

在觀測井方面，該井群位於系統井下游，因此透過觀測井群之含氯有機物測



量，即可知道地下水污染物通過系統井反應牆後之濃度變化，其對應系統試驗同步進行，因此觀測井數據相對應於系統試驗。在上述系統井與觀測井中，本團隊在每口井同時放置兩種深度之被動式採樣袋，分別位於系統處理段(30m)、系統空白段(35m)，而四口觀測井也相對應放置兩種深度，藉以了解系統處理段與系統空白段(未處理)之污染物濃度，也可透過此方式，在單井中看出濃度差異，有利後續成效驗證。若以多井試驗作為驗證，其結果顯示於表 7，試驗 B 以觀測井探討比較污染物濃度變化，以主要污染物種 1,1-二氯乙烯為例，可以發現 OW2 兩種深度之污染物濃度皆較高，而 OW3 與 OW4 之 30 m 污染物濃度皆比 35 m 低，OW5 的污染物濃度也較高(達管制標準)。另一方面，研究探討以 N-TiO₂作為觸媒，搭配 Visible light(試驗 C)與 UV light(試驗 D)進行試驗之效率比較，以試驗 C 進行試驗可以發現，在單井驗證方面(表 6)，1,1,2-三氯乙烷方面，在 WW1 發現最高去除效率 89%，而 1,1-二氯乙烯去除效率也可達到 59%，另外，TCE 與 PCE 濃度皆較低，但可以看出處理段濃度皆較低。而試驗 C 以觀測井探討比較污染物濃度變化，其結果顯示於表 7，以主要污染物種 1,1-二氯乙烯為例，可以發現 OW2、OW3 與 OW4 之 30 m 污染物濃度皆比 35 m 低，可有效呼應前端處理段之去除效率，而 OW5 的污染物濃度也較高(達管制標準)，再者以試驗 D 進行探討，可以發現四口觀測井之 35 m 位置濃度皆比 30 m 處濃度高，主要原因為 30 m 處在前端系統井有放置光纖光催化系統，因此該水層之污染物具有明顯的去除效果。另一方面，由另一種光觸媒(N-TiO₂-ZnO/CNT)進行之試驗可以發現，在試驗 E 與 F 的觀測井方面，30 m 污染物濃度皆比 35 m 低，可以由此得知，經系統井之處理段(30 m)的處理效果皆可達到管制標準下，並且與未處理段(35 m)相比，在下游觀測井具有去除成效。總結上方試驗結果，可以由試驗 B 至 G 與 K 至 L 試驗結果得知，確實可有效證明光纖光催化系統之處理段可有效處理地下水之污染物，並由單井或上下游之雙軌驗證得知。另外，可由觀測井中的背景空白試驗 H 與 I 數據中發現，若不經處理，其濃度 30 m 與 35 m 濃度差異不大，亦可再次說明本系統之處理效率。根據上述歷年 A 至 M 之試驗結果進行比較，由圖 40 至 44 顯示，針對主要污染物 1,1-二氯乙烯為例，在未設置光纖光催化系統的情況下，背景濃度在 30 m 與 35 m 濃度相差不大，但放置光纖光催化系統後可以發現，在各項試驗條件下(圖 41-44)，30 m 處理段之濃度皆普遍下降，並在觀測井(OW 系列)的位置也可以發現其去除效果。



表 6、地下水中含氯有機物測定結果(系統井)

試驗別	試驗條件	井編號	樣品編號	地下水污染	深度		
			檢驗項目	管制標準 (第二類)	處理段 (30 m)	空白段 (35 m)	Removal (%)
A (110/ 09/09)	blank	WW1	1,1,2-三氯乙烷	0.050	<0.0100	0.0160	NA
			1,1-二氯乙烯	0.070	0.0692	0.0976	
			三氯乙烯	0.050	<0.0100	0.00247	
			四氯乙烯	0.050	<0.0100	ND	
		WW2	1,1,2-三氯乙烷	0.050	—		NA
			1,1-二氯乙烯	0.070			
			三氯乙烯	0.050			
			四氯乙烯	0.050			
	UV light / TiO ₂	WW3	1,1,2-三氯乙烷	0.050	0.0121	<0.0100	NA
			1,1-二氯乙烯	0.070	0.0968	0.102	
			三氯乙烯	0.050	0.00114	<0.0100	
			四氯乙烯	0.050	ND	<0.0100	
		WW1	1,1,2-三氯乙烷	0.050	0.00678	0.0175	62%
			1,1-二氯乙烯	0.070	0.0608	0.111	45%
			三氯乙烯	0.050	0.00102	<0.0100	NA
			四氯乙烯	0.050	ND	<0.0100	100%
B (110/ 11/11)	UV light / TiO ₂	WW2	1,1,2-三氯乙烷	0.050	0.00831	0.0122	32%
			1,1-二氯乙烯	0.070	0.0683	0.0895	24%
			三氯乙烯	0.050	0.00141	0.00176	20%
			四氯乙烯	0.050	ND	ND	NA
		WW3	1,1,2-三氯乙烷	0.050	<0.00100 (0.00043)	ND	NA
			1,1-二氯乙烯	0.070	ND	ND	NA
			三氯乙烯	0.050	ND	ND	NA
			四氯乙烯	0.050	ND	ND	NA

註：1.超過第二類地下水監測標準者以「粗體」表示；超過第二類地下水管制標準者以「粗體+底線」表示。

2.ND：Not Detected；NA：Not Apply

3.ND 表示低於偵測極限(MDL)；<表示低於檢量線第一點(QDL)。

4.單位mg/L



表 6、地下水中含氯有機物測定結果(系統井)

試驗 別	試驗 條件	井編 號	樣品編號	地下水污染	深度		
			檢驗項目	管制標準 (第二類)	處理段 (30 m)	空白段 (35 m)	Removal (%)
C (110/ 12/17)	Visible light /N-TiO ₂	WW1	1,1,2-三氯乙烷	0.050	0.00199	0.0183	89%
			1,1-二氯乙烯	0.070	0.0516	0.124	59%
			三氯乙烯	0.050	<0.00100 (0.00078)	<0.0100	NA
			四氯乙烯	0.050	ND	<0.0100	NA
		WW2	1,1,2-三氯乙烷	0.050	0.0125	0.0142	12%
			1,1-二氯乙烯	0.070	0.0780	0.0805	4%
			三氯乙烯	0.050	<0.00100 (0.00053)	0.00184	71%
			四氯乙烯	0.050	ND	ND	NA
		WW3	1,1,2-三氯乙烷	0.050	0.0108	ND	NA
			1,1-二氯乙烯	0.070	0.0647	0.00328	NA
			三氯乙烯	0.050	0.00147	ND	NA
			四氯乙烯	0.050	0.00199	0.0183	89%
D (111/ 01/07)	UV light /N-TiO ₂	WW1	1,1,2-三氯乙烷	0.050	0.005	0.0173	71%
			1,1-二氯乙烯	0.070	0.0797	0.125	36%
			三氯乙烯	0.050	0.00118	<0.0100	NA
			四氯乙烯	0.050	ND	<0.0100	NA
		WW2	1,1,2-三氯乙烷	0.050	0.0121	0.0126	4%
			1,1-二氯乙烯	0.070	0.0705	0.0986	28%
			三氯乙烯	0.050	0.00130	0.00185	30%
			四氯乙烯	0.050	ND	ND	NA
		WW3	1,1,2-三氯乙烷	0.050	0.00242	0.0114	79%
			1,1-二氯乙烯	0.070	0.00779	0.0719	89%
			三氯乙烯	0.050	ND	0.00214	NA
			四氯乙烯	0.050	ND	ND	NA

註: 1.超過第二類地下水監測標準者以「粗體」表示；超過第二類地下水管制標準者以「粗體+底線」表示。

2.ND：Not Detected；NA：Not Apply

3.ND 表示低於偵測極限(MDL)；<表示低於檢量線第一點(QDL)。

4.單位:mg/L



表 6、地下水中含氯有機物測定結果(系統井)

試驗別	試驗條件	井編號	樣品編號	地下水污染	深度		
			檢驗項目	管制標準 (第二類)	處理段 (30 m)	空白段 (35 m)	Removal (%)
E (111/ 01/28)	Visible light /N-TiO ₂ -ZnO/C NT	WW1	1,1,2-三氯乙烷	0.050	0.00238	0.0124	81%
			1,1-二氯乙烯	0.070	0.0745	0.122	39%
			三氯乙烯	0.050	ND	< 0.0100	NA
			四氯乙烯	0.050	0.00109	< 0.0100	NA
		WW2	1,1,2-三氯乙烷	0.050	0.0103	0.0120	14%
			1,1-二氯乙烯	0.070	0.0707	0.0741	5%
			三氯乙烯	0.050	ND	ND	NA
			四氯乙烯	0.050	0.00112	0.00145	23%
	UV light /N-TiO ₂ -ZnO/C NT	WW3	1,1,2-三氯乙烷	0.050	0.0109	0.00197	NA
			1,1-二氯乙烯	0.070	0.0717	0.00900	NA
			三氯乙烯	0.050	ND	ND	NA
			四氯乙烯	0.050	0.00196	0.00044	NA
		WW1	1,1,2-三氯乙烷	0.050	0.00164	0.0121	86%
			1,1-二氯乙烯	0.070	0.0697	0.101	31%
			三氯乙烯	0.050	ND	< 0.0100	NA
			四氯乙烯	0.050	0.00091	< 0.0100	NA
F (111/ 02/11)	UV light /N-TiO ₂ -ZnO/C NT	WW2	1,1,2-三氯乙烷	0.050	0.0128	0.0133	4%
			1,1-二氯乙烯	0.070	0.0717	0.0858	16%
			三氯乙烯	0.050	ND	ND	NA
			四氯乙烯	0.050	0.00130	0.00167	22%
		WW3	1,1,2-三氯乙烷	0.050	0.00084	0.0120	93%
			1,1-二氯乙烯	0.070	0.00132	0.0953	98%
			三氯乙烯	0.050	ND	ND	NA
			四氯乙烯	0.050	ND	0.00226	NA

註: 1.超過第二類地下水監測標準者以「粗體」表示；超過第二類地下水管制標準者以「粗體+底線」表示。

2.ND：Not Detected；NA：Not Apply

3.ND 表示低於偵測極限(MDL)；<表示低於檢量線第一點(QDL)。

4.標示*處為井體環境或設備異常。

5.單位:mg/L



表 6、地下水中含氯有機物測定結果(系統井)

試驗別	試驗條件	井編號	樣品編號	地下水污染	深度		
			檢驗項目	管制標準 (第二類)	處理段 (30 m)	空白段 (35 m)	Removal (%)
G (111/ 05/18)	Visible light /N-TiO ₂ (打磨)	WW1	1,1,2-三氯乙烷	0.050	<0.001	0.0012	>17%
			1,1-二氯乙烯	0.070	0.0193	0.0897	78%
			三氯乙烯	0.050	<0.001	0.00499	>80%
			四氯乙烯	0.050	ND	ND	NA
		WW2	1,1,2-三氯乙烷	0.050	<0.001	0.00186	>46%
			1,1-二氯乙烯	0.070	0.0172	0.077	78%
			三氯乙烯	0.050	0.00599	0.0118	49%
			四氯乙烯	0.050	ND	ND	NA
		WW3	1,1,2-三氯乙烷	0.050	<0.001	0.00272	>63%
			1,1-二氯乙烯	0.070	0.0176	0.0761	77%
			三氯乙烯	0.050	0.00328	0.0116	72%
			四氯乙烯	0.050	ND	<0.001	NA
H (111/ 07/29)	blank	WW1	1,1,2-三氯乙烷	0.050	0.00523	0.0141	NA
			1,1-二氯乙烯	0.070	0.0594	0.11	
			三氯乙烯	0.050	0.0014	<0.001	
			四氯乙烯	0.050	<0.001	ND	
		WW2	1,1,2-三氯乙烷	0.050	0.0123	0.0135	NA
			1,1-二氯乙烯	0.070	0.077	0.0893	
			三氯乙烯	0.050	0.0029	0.00402	
			四氯乙烯	0.050	<0.001	<0.001	
		WW3	1,1,2-三氯乙烷	0.050	0.012	0.0117	NA
			1,1-二氯乙烯	0.070	0.0789	0.0829	
			三氯乙烯	0.050	0.00211	0.00281	
			四氯乙烯	0.050	<0.001	<0.001	

註: 1.超過第二類地下水監測標準者以「粗體」表示；超過第二類地下水管制標準者以「粗體+底線」表示。

2.ND：Not Detected；NA：Not Apply

3.ND 表示低於偵測極限(MDL)；<表示低於檢量線第一點(QDL)。

4.標示*處為井體環境或設備異常。

5.單位:mg/L



表 6、地下水中含氯有機物測定結果(系統井)

試驗別	試驗條件	井編號	樣品編號	地下水污染	深度		
			檢驗項目	管制標準 (第二類)	處理段 (30 m)	空白段 (35 m)	Removal (%)
I (111/ 09/02)	blank	WW1	1,1,2-三氯乙烷	0.050	0.00514	0.00542	NA
			1,1-二氯乙烯	0.070	0.0531	0.041	
			三氯乙烯	0.050	<0.001	0.00128	
			四氯乙烯	0.050	ND	<0.001	
		WW2	1,1,2-三氯乙烷	0.050	0.00719	0.00662	NA
			1,1-二氯乙烯	0.070	0.0523	0.05	
			三氯乙烯	0.050	0.00174	0.0019	
			四氯乙烯	0.050	<0.001	<0.001	
		WW3	1,1,2-三氯乙烷	0.050	0.00876	0.00784	NA
			1,1-二氯乙烯	0.070	0.0747	0.0663	
			三氯乙烯	0.050	0.00217	0.00208	
			四氯乙烯	0.050	<0.001	<0.001	
		* WW1	1,1,2-三氯乙烷	0.050	0.00191	0.0106	82%
			1,1-二氯乙烯	0.070	0.0344	0.108	68%
			三氯乙烯	0.050	<0.001	0.0012	NA
			四氯乙烯	0.050	ND	ND	NA
J (111/ 12/22)	Visible light /N-TiO ₂ -ZnO/C NT	WW1	1,1,2-三氯乙烷	0.050	0.00595	0.0127	53%
			1,1-二氯乙烯	0.070	0.0291	0.098	70%
			三氯乙烯	0.050	<0.001	0.00245	NA
			四氯乙烯	0.050	ND	ND	NA
		WW2	1,1,2-三氯乙烷	0.050	0.00209	0.0206	90%
			1,1-二氯乙烯	0.070	0.0204	0.07	71%
			三氯乙烯	0.050	<0.001	<0.001	NA
			四氯乙烯	0.050	ND	ND	NA
		WW3	1,1,2-三氯乙烷	0.050	0.00209	0.0206	90%
			1,1-二氯乙烯	0.070	0.0204	0.07	71%
			三氯乙烯	0.050	<0.001	<0.001	NA
			四氯乙烯	0.050	ND	ND	NA

註: 1.超過第二類地下水監測標準者以「粗體」表示；超過第二類地下水管制標準者以「粗體+底線」表示。

2.ND：Not Detected；NA：Not Apply

3.ND 表示低於偵測極限(MDL)；<表示低於檢量線第一點(QDL)。

4.標示*處為井體環境或設備異常。

5.單位:mg/L



表 6、地下水中含氯有機物測定結果(系統井)

試驗別	試驗條件	井編號	樣品編號	地下水污染	深度		
			檢驗項目	管制標準 (第二類)	處理段 (30 m)	空白段 (35 m)	Removal (%)
K (112/ 01/14)	UV light / N-TiO ₂	WW1	1,1,2-三氯乙烷	0.050	0.00295	0.0108	73%
			1,1-二氯乙烯	0.070	0.00753	0.0992	92%
			三氯乙烯	0.050	0.00102	0.00136	25%
			四氯乙烯	0.050	ND	ND	NA
		WW2	1,1,2-三氯乙烷	0.050	0.00131	0.0137	90%
			1,1-二氯乙烯	0.070	0.0195	0.0902	78%
			三氯乙烯	0.050	0.00215	0.00227	5%
			四氯乙烯	0.050	ND	ND	NA
		WW3	1,1,2-三氯乙烷	0.050	0.013	0.0131	1%
			1,1-二氯乙烯	0.070	0.087	0.0805	0%
			三氯乙烯	0.050	0.00334	0.00328	0%
			四氯乙烯	0.050	ND	ND	NA
L (112/ 02/16)	UV light /N-TiO ₂ -ZnO/C NT	WW1	1,1,2-三氯乙烷	0.050	0.00449	0.00952	53%
			1,1-二氯乙烯	0.070	0.0357	0.0611	42%
			三氯乙烯	0.050	0.00285	0.00271	0%
			四氯乙烯	0.050	ND	ND	NA
		WW2	1,1,2-三氯乙烷	0.050	0.00121	0.0122	90%
			1,1-二氯乙烯	0.070	0.0252	0.0541	53%
			三氯乙烯	0.050	0.00316	0.00305	0%
			四氯乙烯	0.050	ND	ND	NA
		WW3	1,1,2-三氯乙烷	0.050	0.0069	0.0111	38%
			1,1-二氯乙烯	0.070	0.017	0.0455	63%
			三氯乙烯	0.050	0.00257	0.00347	25%
			四氯乙烯	0.050	ND	ND	NA

註：1.超過第二類地下水監測標準者以「粗體」表示；超過第二類地下水管制標準者以「粗體+底線」表示。

2.ND：Not Detected；NA：Not Apply

3.ND 表示低於偵測極限(MDL)；<表示低於檢量線第一點(QDL)。

4.標示*處為井體環境或設備異常。

5.單位:mg/L



表 6、地下水中含氯有機物測定結果(系統井)

試驗 別	試驗 條件	井編 號	樣品編號	地下水污染	深度		
			檢驗項目	管制標準 (第二類)	處理段 (30 m)	空白段 (35 m)	Removal (%)
M (112/ 04/10)	UV light /N-TiO ₂	WW1	1,1,2-三氯乙烷	0.050	0.00734	0.0164	55%
			1,1-二氯乙烯	0.070	0.0196	0.0827	76%
			三氯乙烯	0.050	0.00131	0.00143	8%
			四氯乙烯	0.050	ND	ND	NA
		WW2	1,1,2-三氯乙烷	0.050	0.00117	0.0141	91%
			1,1-二氯乙烯	0.070	0.0067	0.0613	89%
			三氯乙烯	0.050	0.00173	0.00361	52%
			四氯乙烯	0.050	ND	ND	NA
		WW3	1,1,2-三氯乙烷	0.050	0.0139	0.0142	2%
			1,1-二氯乙烯	0.070	0.0591	0.0758	22%
			三氯乙烯	0.050	0.00211	0.00281	25%
			四氯乙烯	0.050	ND	ND	NA

註: 1.超過第二類地下水監測標準者以「粗體」表示；超過第二類地下水管制標準者以「粗體+底線」表示。

2.ND：Not Detected；NA：Not Apply

3.ND 表示低於偵測極限(MDL)；<表示低於檢量線第一點(QDL)。

4.標示*處為井體環境或設備異常。

5.單位:mg/L



表 7、地下水中含氯有機物測定結果(觀測井)

對應系統 試驗別	日期	樣品編號	地下水污染	深度(m)	
		檢驗項目	管制標準(第二類)	30	35
B (110/ 11/11)	OW2	1,1,2-三氯乙烷	0.050	0.00253	0.0122
		1,1-二氯乙烯	0.070	<u>0.0841</u>	<u>0.0877</u>
		三氯乙烯	0.050	0.00059	0.00117
		四氯乙烯	0.050	ND	ND
	OW3	1,1,2-三氯乙烷	0.050	0.0124	0.0147
		1,1-二氯乙烯	0.070	0.0483	<u>0.0988</u>
		三氯乙烯	0.050	0.00107	0.00157
		四氯乙烯	0.050	ND	ND
	OW4	1,1,2-三氯乙烷	0.050	0.0132	0.0158
		1,1-二氯乙烯	0.070	0.0667	<u>0.0908</u>
		三氯乙烯	0.050	0.00050	0.00143
		四氯乙烯	0.050	ND	ND
	OW5	1,1,2-三氯乙烷	0.050	0.0133	0.0112
		1,1-二氯乙烯	0.070	<u>0.0701</u>	0.0672
		三氯乙烯	0.050	0.00162	0.00145
		四氯乙烯	0.050	ND	ND
C (110/ 12/17)	OW2	1,1,2-三氯乙烷	0.050	0.00557	0.0118
		1,1-二氯乙烯	0.070	0.0476	<u>0.0720</u>
		三氯乙烯	0.050	ND	0.00130
		四氯乙烯	0.050	ND	ND
	OW3	1,1,2-三氯乙烷	0.050	0.0122	0.0137
		1,1-二氯乙烯	0.070	0.0220	<u>0.0795</u>
		三氯乙烯	0.050	0.00048	0.00106
		四氯乙烯	0.050	ND	ND
	OW4	1,1,2-三氯乙烷	0.050	0.00962	0.0132
		1,1-二氯乙烯	0.070	0.0482	0.0485
		三氯乙烯	0.050	0.00044	0.00068
		四氯乙烯	0.050	ND	ND
	OW5	1,1,2-三氯乙烷	0.050	0.00968	0.0138
		1,1-二氯乙烯	0.070	<u>0.0746</u>	0.0593
		三氯乙烯	0.050	0.00165	0.00101
		四氯乙烯	0.050	ND	ND

註: 1.超過第二類地下水監測標準者以「粗體」表示；超過第二類地下水管制標準者以「粗體+底線」表示。

2.ND：Not Detected；NA：Not Apply

3.ND 表示低於偵測極限(MDL)；<表示低於檢量線第一點(QDL)。

4.單位mg/L



表 7、地下水中含氯有機物測定結果(觀測井)

對應系統 試驗別	日期	樣品編號	地下水污染	深度(m)	
		檢驗項目	管制標準(第二類)	30	35
D (111/ 01/07)	OW2	1,1,2-三氯乙烷	0.050	0.00635	0.0116
		1,1-二氯乙烯	0.070	0.0414	0.0968
		三氯乙烯	0.050	ND	0.00137
		四氯乙烯	0.050	ND	ND
	OW3	1,1,2-三氯乙烷	0.050	0.00824	0.0129
		1,1-二氯乙烯	0.070	0.0210	0.118
		三氯乙烯	0.050	ND	<0.0100
		四氯乙烯	0.050	ND	<0.0100
	OW4	1,1,2-三氯乙烷	0.050	0.00981	0.0126
		1,1-二氯乙烯	0.070	0.0478	0.103
		三氯乙烯	0.050	ND	<0.0100
		四氯乙烯	0.050	ND	<0.0100
	OW5	1,1,2-三氯乙烷	0.050	0.0105	0.0112
		1,1-二氯乙烯	0.070	0.0375	0.0763
		三氯乙烯	0.050	0.00079	0.00189
		四氯乙烯	0.050	ND	ND
E (111/ 01/28)	OW2	1,1,2-三氯乙烷	0.050	0.00583	0.0124
		1,1-二氯乙烯	0.070	0.0324	0.0657
		三氯乙烯	0.050	ND	ND
		四氯乙烯	0.050	ND	0.00134
	OW3	1,1,2-三氯乙烷	0.050	0.00697	0.0129
		1,1-二氯乙烯	0.070	0.0173	0.0807
		三氯乙烯	0.050	ND	ND
		四氯乙烯	0.050	ND	0.00115
	OW4	1,1,2-三氯乙烷	0.050	0.00892	0.0151
		1,1-二氯乙烯	0.070	0.0330	0.0795
		三氯乙烯	0.050	ND	ND
		四氯乙烯	0.050	ND	0.00123
	OW5	1,1,2-三氯乙烷	0.050	0.0105	0.0115
		1,1-二氯乙烯	0.070	0.0509	0.0824
		三氯乙烯	0.050	ND	ND
		四氯乙烯	0.050	0.00105	0.00191

註: 1.超過第二類地下水監測標準者以「粗體」表示；超過第二類地下水管制標準者以「粗體+底線」表示。

2.ND：Not Detected；NA：Not Apply

3.ND 表示低於偵測極限(MDL)；<表示低於檢量線第一點(QDL)。

4.單位mg/L



表 7、地下水中含氯有機物測定結果(觀測井)

對應系統 試驗別	日期	樣品編號	地下水污染	深度(m)	
		檢驗項目	管制標準(第二類)	30	35
F (111/ 02/11)	OW2	1,1,2-三氯乙烷	0.050	0.00653	0.0147
		1,1-二氯乙烯	0.070	0.0356	0.120
		三氯乙烯	0.050	ND	< 0.0100
		四氯乙烯	0.050	ND	< 0.0100
	OW3	1,1,2-三氯乙烷	0.050	0.00528	0.0141
		1,1-二氯乙烯	0.070	0.0123	0.130
		三氯乙烯	0.050	ND	< 0.0100
		四氯乙烯	0.050	ND	< 0.0100
	OW4	1,1,2-三氯乙烷	0.050	0.00903	0.0155
		1,1-二氯乙烯	0.070	0.0367	0.128
		三氯乙烯	0.050	ND	< 0.0100
		四氯乙烯	0.050	ND	< 0.0100
	OW5	1,1,2-三氯乙烷	0.050	0.00875	0.0107
		1,1-二氯乙烯	0.070	0.0819	0.101
		三氯乙烯	0.050	ND	< 0.0100
		四氯乙烯	0.050	0.00155	< 0.0100
G (111/ 05/18)	OW2	1,1,2-三氯乙烷	0.050	0.00583	0.0124
		1,1-二氯乙烯	0.070	0.0324	0.0657
		三氯乙烯	0.050	ND	ND
		四氯乙烯	0.050	ND	0.00134
	OW3	1,1,2-三氯乙烷	0.050	0.00697	0.0129
		1,1-二氯乙烯	0.070	0.0173	0.0807
		三氯乙烯	0.050	ND	ND
		四氯乙烯	0.050	ND	0.00115
	OW4	1,1,2-三氯乙烷	0.050	0.00892	0.0151
		1,1-二氯乙烯	0.070	0.0330	0.0795
		三氯乙烯	0.050	ND	ND
		四氯乙烯	0.050	ND	0.00123
	OW5	1,1,2-三氯乙烷	0.050	0.0105	0.0115
		1,1-二氯乙烯	0.070	0.0509	0.0824
		三氯乙烯	0.050	ND	ND
		四氯乙烯	0.050	0.00105	0.00191

註: 1.超過第二類地下水監測標準者以「粗體」表示；超過第二類地下水管制標準者以「粗體+底線」表示。

2.ND：Not Detected；NA：Not Apply

3.ND 表示低於偵測極限(MDL)；<表示低於檢量線第一點(QDL)。

4.單位mg/L



表 7、地下水中含氯有機物測定結果(觀測井)

對應系統 試驗別	日期	樣品編號	地下水污染	深度(m)	
		檢驗項目	管制標準(第二類)	30	35
H (111/ 07/29)	OW2	1,1,2-三氯乙烷	0.050	0.0114	0.0118
		1,1-二氯乙烯	0.070	0.0827	0.0711
		三氯乙烯	0.050	0.00303	0.00253
		四氯乙烯	0.050	<0.001	<0.001
	OW3	1,1,2-三氯乙烷	0.050	ND	0.0126
		1,1-二氯乙烯	0.070	0.0087	0.0866
		三氯乙烯	0.050	ND	0.00324
		四氯乙烯	0.050	ND	<0.001
	OW4	1,1,2-三氯乙烷	0.050	0.00788	0.00148
		1,1-二氯乙烯	0.070	0.0535	0.0967
		三氯乙烯	0.050	0.00109	0.0014
		四氯乙烯	0.050	ND	ND
	OW5	1,1,2-三氯乙烷	0.050	0.0129	0.0126
		1,1-二氯乙烯	0.070	0.0846	0.087
		三氯乙烯	0.050	0.00333	0.00363
		四氯乙烯	0.050	<0.001	<0.001
I (111/ 09/02)	OW2	1,1,2-三氯乙烷	0.050	0.00558	0.00524
		1,1-二氯乙烯	0.070	0.051	0.0494
		三氯乙烯	0.050	0.00211	0.00115
		四氯乙烯	0.050	<0.001	<0.001
	OW3	1,1,2-三氯乙烷	0.050	0.00489	0.00118
		1,1-二氯乙烯	0.070	0.0396	0.0166
		三氯乙烯	0.050	0.00115	<0.001
		四氯乙烯	0.050	<0.001	ND
	OW4	1,1,2-三氯乙烷	0.050	0.00629	0.00615
		1,1-二氯乙烯	0.070	0.0546	0.0549
		三氯乙烯	0.050	0.00182	0.00175
		四氯乙烯	0.050	<0.001	<0.001
	OW5	1,1,2-三氯乙烷	0.050	0.0114	0.0119
		1,1-二氯乙烯	0.070	0.0949	0.0936
		三氯乙烯	0.050	0.0034	0.00286
		四氯乙烯	0.050	<0.001	ND

註: 1.超過第二類地下水監測標準者以「粗體」表示；超過第二類地下水管制標準者以「粗體+底線」表示。

2.ND：Not Detected；NA：Not Apply

3.ND 表示低於偵測極限(MDL)；<表示低於檢量線第一點(QDL)。

4.單位mg/L



表 7、地下水中含氯有機物測定結果(觀測井)

對應系統 試驗別	日期	樣品編號	地下水污染 管制標準(第二類)	深度(m)	
		檢驗項目		30	35
J (111/ 12/22)	OW2	1,1,2-三氯乙烷	0.050	0.00432	0.012
		1,1-二氯乙烯	0.070	0.0339	0.120
		三氯乙烯	0.050	<0.001	0.00187
		四氯乙烯	0.050	ND	ND
	OW3	1,1,2-三氯乙烷	0.050	ND	0.0127
		1,1-二氯乙烯	0.070	0.00546	0.0102
		三氯乙烯	0.050	ND	0.00186
		四氯乙烯	0.050	ND	ND
	OW4	1,1,2-三氯乙烷	0.050	0.00155	0.0152
		1,1-二氯乙烯	0.070	0.013	0.123
		三氯乙烯	0.050	0.00152	0.00207
		四氯乙烯	0.050	ND	ND
	OW5	1,1,2-三氯乙烷	0.050	0.0119	0.0122
		1,1-二氯乙烯	0.070	0.0852	0.0982
		三氯乙烯	0.050	0.0027	0.00258
		四氯乙烯	0.050	ND	<0.001
K (112/ 01/14)	OW2	1,1,2-三氯乙烷	0.050	0.0142	0.0135
		1,1-二氯乙烯	0.070	0.0888	0.0893
		三氯乙烯	0.050	0.00191	0.00183
		四氯乙烯	0.050	ND	ND
	OW3	1,1,2-三氯乙烷	0.050	0.0164	0.0155
		1,1-二氯乙烯	0.070	0.0105	0.0101
		三氯乙烯	0.050	0.0017	0.0042
		四氯乙烯	0.050	ND	ND
	OW4	1,1,2-三氯乙烷	0.050	0.00963	0.017
		1,1-二氯乙烯	0.070	0.0496	0.107
		三氯乙烯	0.050	<0.001	0.0015
		四氯乙烯	0.050	ND	ND
	OW5	1,1,2-三氯乙烷	0.050	0.0119	0.0133
		1,1-二氯乙烯	0.070	0.0534	0.0933
		三氯乙烯	0.050	0.00153	0.00226
		四氯乙烯	0.050	ND	ND

註: 1.超過第二類地下水監測標準者以「粗體」表示；超過第二類地下水管制標準者以「粗體+底線」表示。

2.ND：Not Detected；NA：Not Apply

3.ND 表示低於偵測極限(MDL)；<表示低於檢量線第一點(QDL)。

4.單位mg/L



表 7、地下水中含氯有機物測定結果(觀測井)

對應系統 試驗別	日期	樣品編號	地下水污染 管制標準(第二類)	深度(m)	
		檢驗項目		30	35
L (112/ 02/16)	OW2	1,1,2-三氯乙烷	0.050	0.0126	0.00122
		1,1-二氯乙烯	0.070	0.0574	0.0611
		三氯乙烯	0.050	0.00315	0.00301
		四氯乙烯	0.050	ND	ND
	OW3	1,1,2-三氯乙烷	0.050	<0.001	0.0125
		1,1-二氯乙烯	0.070	0.00448	0.0634
		三氯乙烯	0.050	0.00211	0.00288
		四氯乙烯	0.050	ND	ND
	OW4	1,1,2-三氯乙烷	0.050	0.00709	0.014
		1,1-二氯乙烯	0.070	0.0223	0.0696
		三氯乙烯	0.050	0.00238	0.00282
		四氯乙烯	0.050	ND	ND
	OW5	1,1,2-三氯乙烷	0.050	0.0114	0.0122
		1,1-二氯乙烯	0.070	0.0466	0.051
		三氯乙烯	0.050	0.00305	0.00314
		四氯乙烯	0.050	ND	ND
M (112/ 04/10)	OW2	1,1,2-三氯乙烷	0.050	0.00949	0.00152
		1,1-二氯乙烯	0.070	0.0489	0.0634
		三氯乙烯	0.050	0.00188	0.00152
		四氯乙烯	0.050	ND	ND
	OW3	1,1,2-三氯乙烷	0.050	0.00666	0.0129
		1,1-二氯乙烯	0.070	0.021	0.0733
		三氯乙烯	0.050	0.00165	0.00181
		四氯乙烯	0.050	ND	ND
	OW4	1,1,2-三氯乙烷	0.050	0.0152	0.0156
		1,1-二氯乙烯	0.070	0.0828	0.0849
		三氯乙烯	0.050	0.00278	0.00203
		四氯乙烯	0.050	ND	ND
	OW5	1,1,2-三氯乙烷	0.050	0.0106	0.0112
		1,1-二氯乙烯	0.070	0.056	0.0656
		三氯乙烯	0.050	0.00229	0.00219
		四氯乙烯	0.050	ND	ND

註: 1.超過第二類地下水監測標準者以「粗體」表示；超過第二類地下水管制標準者以「粗體+底線」表示。

2.ND：Not Detected；NA：Not Apply

3.ND 表示低於偵測極限(MDL)；<表示低於檢量線第一點(QDL)。

4.單位:mg/L

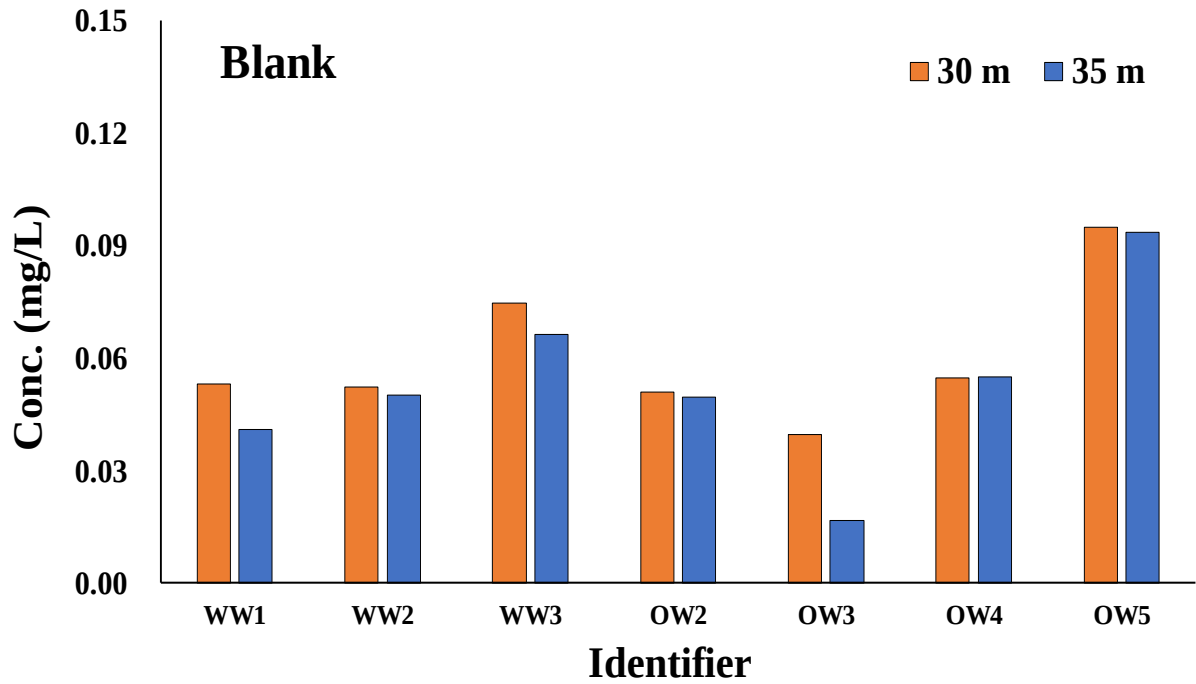
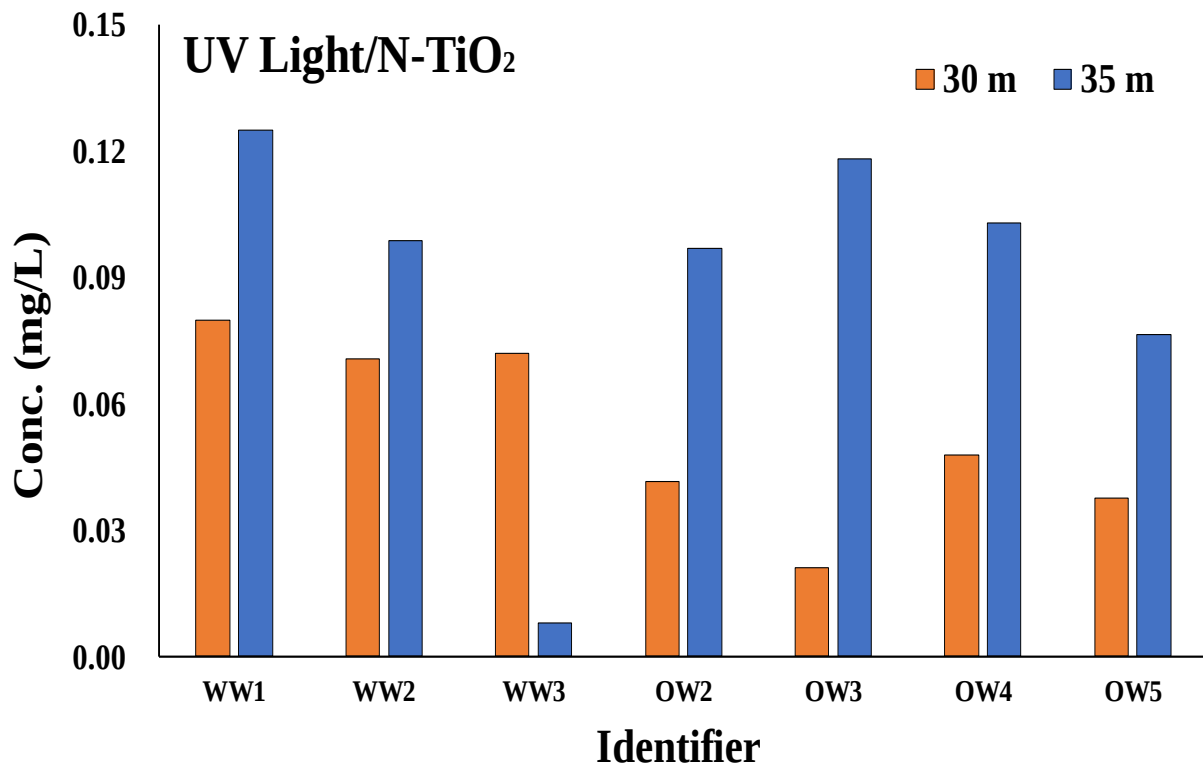


圖 40、光纖光催化應用於現地之背景試驗(試驗 I)

圖 41、光纖光催化應用於現地之試驗(試驗條件: UV Light/N-TiO₂、試驗 D)

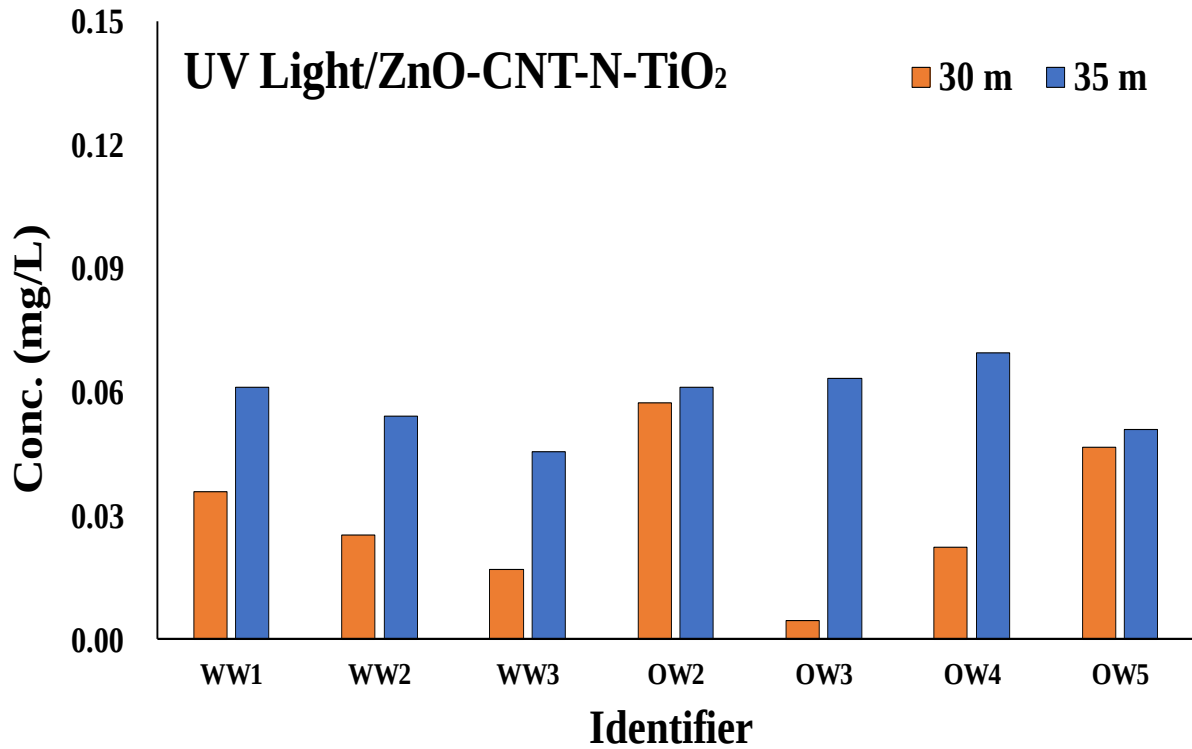


圖 42、光纖光催化應用於現地之試驗(試驗條件: UV Light/ZnO-CNT-N-TiO₂、試驗 L)

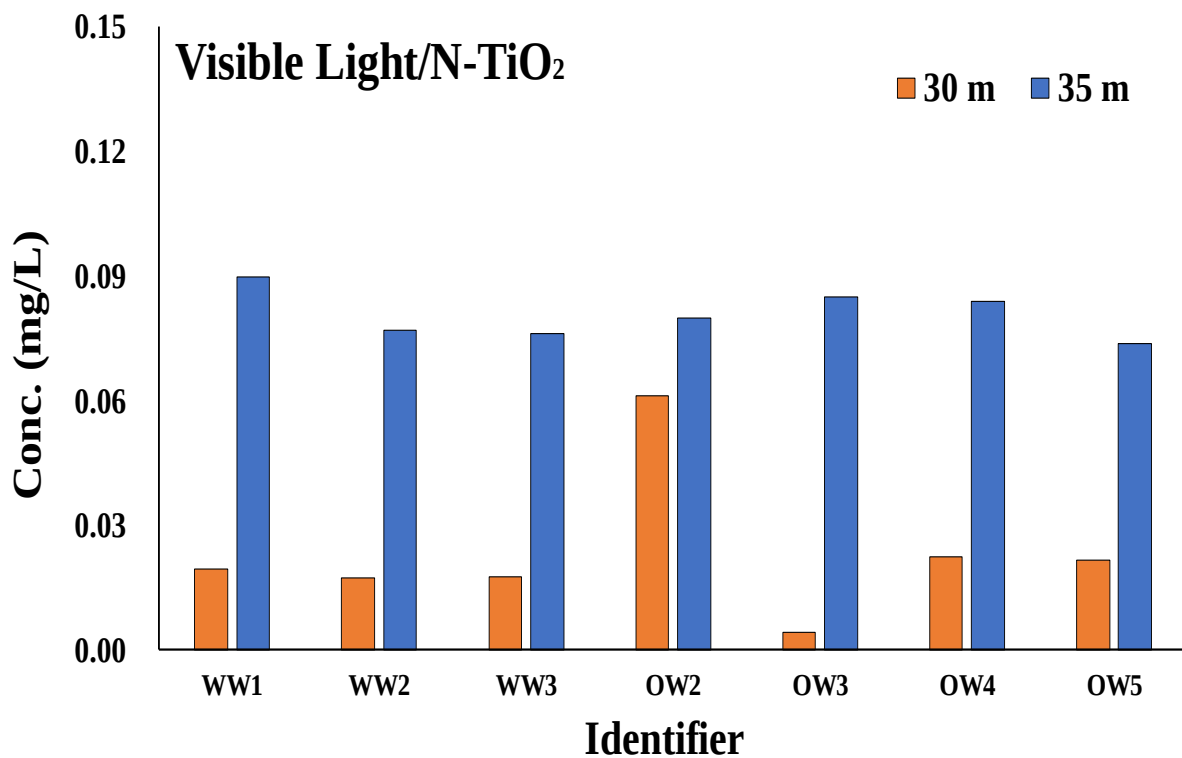


圖 43、光纖光催化應用於現地之試驗(試驗條件: Visible Light/N-TiO₂、試驗 G)

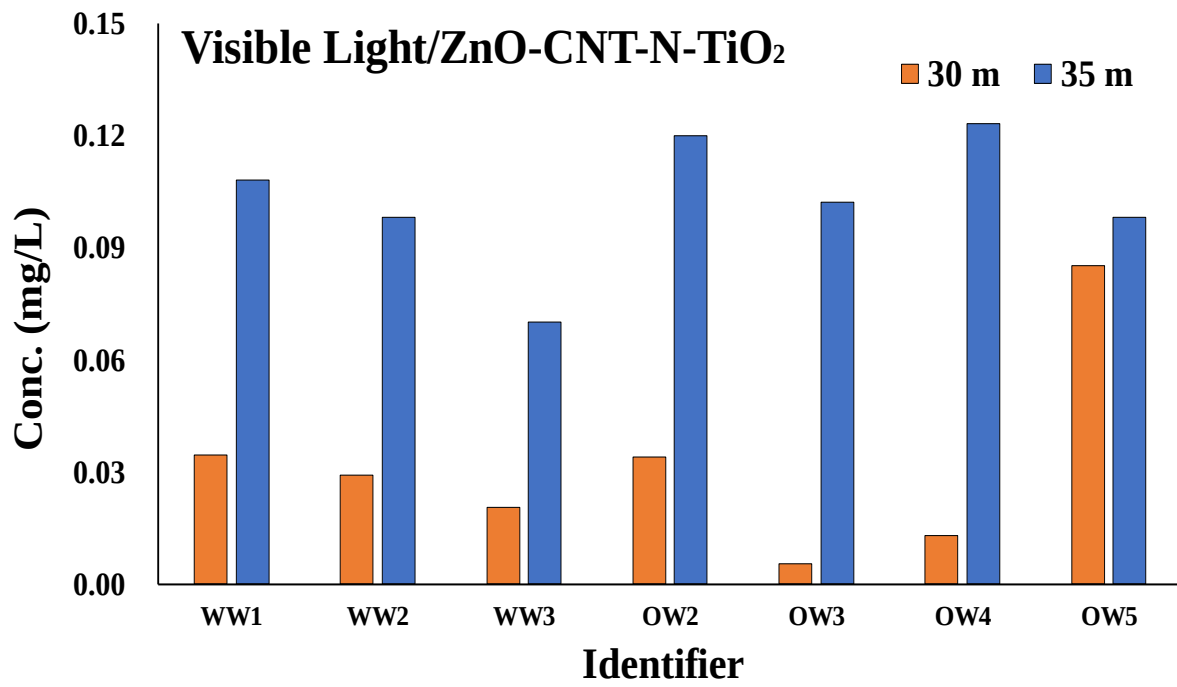


圖 44、光纖光催化應用於現地之試驗(試驗條件: Vible Light/ZnO-CNT-N-TiO₂、試驗 J)



4.4.3、應用系統於現地對於受污染之地下水中 DOC 及 Cl⁻之影響

本模場試驗為了解並驗證光纖光催化系統對於地下水污染改善成效，因此透過溶解性有機碳(DOC)與氯離子(Cl⁻)生成進行探討。試驗以最佳覆膜條件(無機樹脂 25:75、分層覆鍍、20 mL PTFE/L、0.5 wt% N-TiO₂)進行探討。實驗以 6 mm 直徑之石英光纖進行覆膜後，進入污染層中進行光催化，光纖光催化系統操作時間為 14 天，取樣後進行後續分析。由去年度(109 年度)在舊模場之試驗結果可得知氯離子方面，五組試驗分別生成 0.047、0.024、0.100、0.027、0.088 mg/L 之氯離子。在 DOC 方面，各測得 DOC 濃度去除效率依序分別為 15、4、7、56、53%。

由 110-111 年度試驗結果(表 8)得知，試驗 A 在 WW1、WW2、WW3、OW5 四口井所測得氯離子濃度依序為 1.47、1.41、1.07、1.78 mg/L，DOC 方面為 35.51、3.210、73.76、8.210 mg/L，而在 B 試驗前四口井的氯離子濃度範圍落在 1.85-2.98 mg/L，而在 B 試驗結束後測量，氯離子濃度範圍落在 2.75-3.35 mg/L；另外，DOC 方面，只有 WW1 之去除效果較明顯，由 105.8 降至 68.70 mg/L，其他濃度變化皆不大。而在 C 試驗前，四口井的氯離子濃度範圍落在 1.98-3.03 mg/L，而在 C 試驗結束後測量，氯離子濃度範圍落在 3.10-4.48 mg/L；另外，DOC 方面，只有 WW1 之無去除效果，WW2 由 28.90 降至 7.690 mg/L，WW3 由 51.50 降至 12.77 mg/L，OW5 由 33.23 降至 9.040 mg/L。在 111 年度結果方面，進行四組系統試驗以及兩組空白背景試驗，由試驗結果可以發現，當四組試驗在結束後，其中三組試驗(試驗 D、E、F)的氯離子濃度範圍為 1.79-3.14 mg/L，而試驗 G 範圍為 0.33-0.53 mg/L，並且在試驗 H 與 I 的空白背景試驗濃度範圍為 0.14-0.28 mg/L，主要會有此濃度差異主要判斷微豐枯水期的變化，在試驗 D、E、F 的過程為枯水期，而試驗 G、H、I 為豐水期進行試驗，與過去研究資料顯示，兩者相比之下，豐水期之含氯有機物濃度會較枯水期低，因此所測得之基準不相同，試驗 G 會與試驗 H、I 之背景進行比較。而由 J、K 以及 L 試驗測量結果可以顯示，在氯離子方面，在試驗前後確實濃度提升，其他學者研究指出，含氯有機物受到光催化之處理，氯離子會隨著光照時間的增加而提高，這也表示確實有受到光催化之降解(Alexander et al., 2008；Choo et al., 2008)，研究結果顯示，在光纖光催化系統處理過後，確實有生成氯離子，這代表此系統於地下水污染層確實進行光催化降解作用。而 DOC 方面，雖然可能受到土壤地下水有機物質不穩定釋出 DOC，導致濃度無法準確，並且由試驗 H、I 之空白背景濃度顯示，在 DOC 方面，有些數據甚至比系統試驗組(試驗 G)低，主要原因是因為在 111 年 5 月中已經開始進入梅雨季節，其 DOC 濃度可能因地下水流速快慢，亦或是土壤沖刷導致 DOC 浮動較為不穩定，當地下水位升高時，總體水量會上升，進而影響 DOC 濃度無法準確量測，並降雨量減少後，水位達到較穩定，由 J 試驗結果看出 DOC 也相對穩定。

表 8、處理井地下水中氯離子與溶解性有機碳測定結果

年度	日期	試驗別	Chloride ion (mg/L)				Dissolved organic carbon (mg/L)			
			WW1	WW2	WW3	OW5	WW1	WW2	WW3	OW5
110	10/05	A(blank)	1.47	1.41	1.07	1.78	35.51	3.210	73.76	8.210
	11/11	B 後	2.75	3.35	-	3.26	68.70	8.690	-	7.980
	12/17	C 後	3.10	3.07	4.48	3.43	88.67	7.690	12.77	9.040
111	01/07	D 後	1.95	1.79	1.99	3.46	9.860	13.57	10.87	7.880
	01/28	E 後	2.70	2.28	2.30	3.98	8.362	10.35	20.38	6.945
	02/11	F 後	3.14	2.23	2.77	2.96	15.86	18.68	28.35	7.321
	05/16	G 後	0.33	0.53	0.34	0.66	7.610	5.335	6.095	6.460
	07/29	H(blank)	0.14	0.23	0.19	0.19	3.285	1.455	1.805	4.315
	09/02	I(blank)	0.25	0.21	0.28	0.23	8.375	3.005	4.110	4.370
	12/22	J 後	3.31	2.56	2.63	2.06	5.350	6.315	2.850	3.286
112	01/14	K 後	2.44	3.28	3.48	1.97	-	-	-	-
	02/16	L 後	3.45	2.80	2.61	2.17	-	-	-	-
	04/10	M 後	2.25	3.26	2.10	2.85	-	-	-	-

註:「後」:代表試驗後立即採樣之濃度



4.5、綠能設備應用規劃與說明

4.5.1、應用規劃與說明

本團隊於此專案結合太陽能之綠能概念，主要可分為兩個部份，第一，設計利用聚光系統將太陽光收集後直接聚集照射於光纖管中，傳導至污染熱點進行光催化處理；第二，利用太陽能板進行蓄電，以備於在沒有太陽光照射時，可以啟動電源，直接導入節能型可見光 LED 光源進行照射，以達到長時間持續現地處理之需求，使本光纖光催化技術結合綠能，達到永續應用之未來發展。

本團隊於110年進行綠能系統規劃後，已於111年度期中前針對太陽能蓄電(供電)系統進行設置與探討(示意圖如圖40所示)，現場已完成設置如圖41與42，主要設置4片太陽能板(A規/320W/聯合再生/尺寸:1694*1002*40mm)搭配4顆深循環電池(湯淺/12V/125AH/YUASA NPA125-12)進行蓄電，再搭配太陽能主機(GROWATT/3KW/離網儲能機 SPF3000TL LVM/電池電壓48V/電源輸出110V)進行變壓以及市電轉換之功能。經過上述設置說明後，本團隊透過預先規劃蓄電能力，以一般現地模場之正常氣候情況下，4片320W太陽能板在一小時最多可具有1280W(1.2度)的蓄電能力，並搭配4顆125AH的蓄電池(充飽為6度電)，只需花費4-5小時即可充滿蓄電池之儲電量。另一方面，在一天正常日照情況下，以每天主要的日照時段早上9點至下午2點(5小時)來計算，一小時可以產生1-1.2度的電力，因此此綠能蓄電設備總產電量約為5-6度電。本研究於現地模場利用3組50W燈源進行光纖光催化系統反應牆設置，假設一天有5度電力可以使用，即可供給光纖光催化系統(三組)使用33個小時，因此此配置方式對於目前現場相當充足，若為考量地區季節因素之連續降雨，或無日照之情形，此綠能蓄電系統可透過太陽能板數量與蓄電池數量進行調整，即可因應各種地區環境氣候之光纖光催化系統電力供給問題，再者，若現場具有市電來源，亦可使用此套綠能蓄電設備，因為本蓄電系統可以市電作為備用電源，若現場太陽能充電效率不佳時，將會藉由切換器轉化為備用電源啟用，使電力來源無虞，並且可達到節能減碳之雙贏功效。

關於太陽能聚光系統方面，目前規劃在實驗室進行太陽光聚光設備研發及測試，透過雙凸透鏡，以及聚光罩之相關聚光設備，研發出小型聚光系統，經由折射角度的設計，以及在集光後與光纖系統之連接方式，如何使光子於空氣中傳導中達到最低的損失，以及最佳的聚光效率，上述系統設計示意圖如圖45所示。本團隊將規劃兩種聚光方式，第一方案(圖45方案1)，設置太陽光聚光罩，經由曲面與光入射角度之控制，集中收集照射至一鏡面，再由此鏡面集中光源折射入光纖集束之中；第二方案，會透過多顆雙凸透鏡形成一個聚光點收集太陽光源，再將光源收集至各自的光纖管中，以多顆的方式聚集，進而形成光纖集束(可參閱圖45方案2)，而後預計將光源導入系統欲處理之污染段，並且考量到光源聚集後之



熱能考量，將接收端設置石英光纖，再來延伸會以塑膠光纖為主，最後進入到處理段進行光催化，若未來可透過太陽光進行聚集後延伸至欲處理段，再進而搭配光源進行輔助，將可達到處理之加乘效果。在國外許多研究也討論聚集太陽光可作為各種應用處理之議題，隨著全球能源需求的急劇增加，太陽能的有效利用是一個重要的議題。

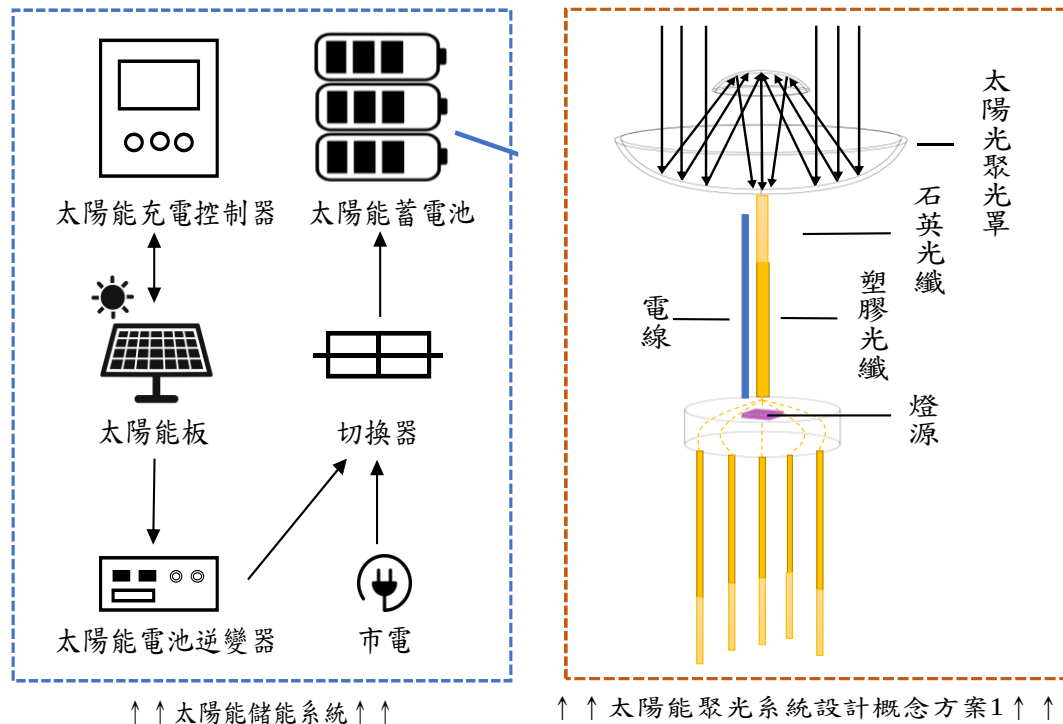


圖 45、系統結合太陽能綠能設備示意圖

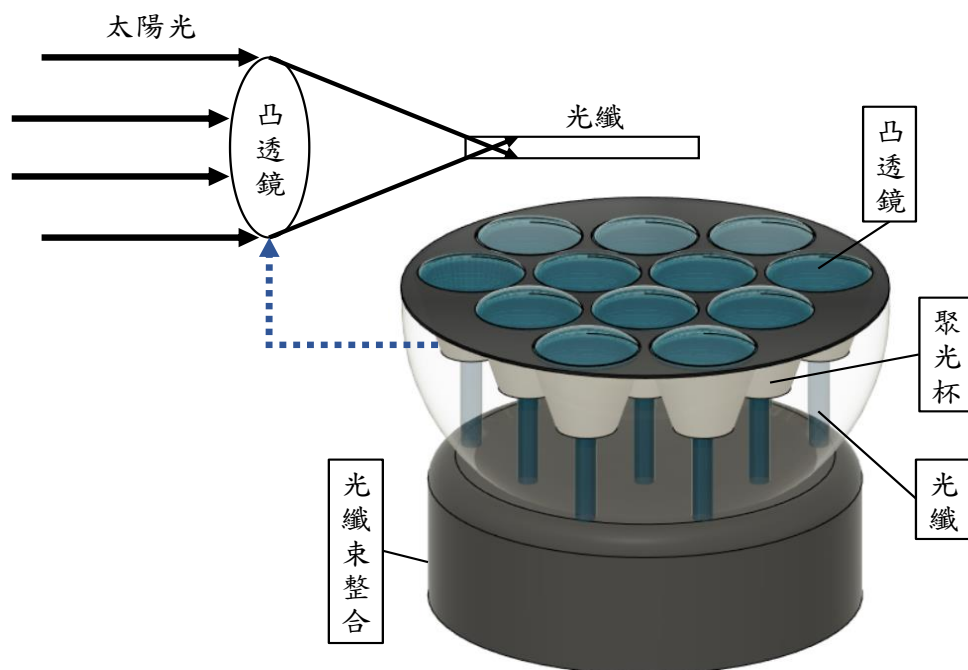


圖 45、系統結合太陽能綠能設備示意圖(續)



4.5.2、綠能技術評估與實際初步成本效益

本團隊根據太陽能架設現場情形(圖 46)，從圖中可以看到，本技術只需在現場架設太陽能儲能系統(圖 47)，並在架設前，要估算符合電力使用之太陽能板與蓄電池數量，即可直接應用於現場場址達到綠色技術的優勢。本研究於 111 年度 9 月份即安裝架設好太陽能儲能設備，依每月約執行 1 至 2 次試驗，在未安裝儲能系統前，由現場之台電電費表顯示每月所使用之電力消耗約為 200 度，主要消耗來源為試驗所使用之 3 顆 50W 燈源，以及試驗前都會執行之前置作業(洗井)，從 9 月開始安裝太陽能以來，電費表顯示使用度數為 90 度，故節省約 110 度電力，與 4.5.1 章節所提到之電力生成約一天 4-5 度稍低一些，有可能是受到當月可能有幾天陰天影響導致，但由此可知，太陽儲能系統只要搭配適當之太陽能板數量與蓄電池，即可直接應用至現場場址並符合綠色處理的技術。

另一方面，在太陽光聚光系統評估方面，本團隊以一套光導設備-太陽光聚光罩(實體設置如圖 48 所示)進行太陽光運用於光纖光催化系統於現地之可行性評估，我們將聚光罩放置於國立屏東科技大學環工系館頂樓處(圖 49)，並於固定上午 10 點至下午三點期間進行試驗，試驗前進行光纖之側光強度量測，並於 0.25-0.30 kLUX 之光照強度下之條件進行各項試驗，本研究選擇以亞甲基藍做為測試評估之污染物，主要原因為亞甲基藍為一般常見之光催化效率之評估指標，試驗以不導光之一般聚光後直接進入之燒杯試驗(圖 50)與內部避光之血清瓶並使用光纖導光(圖 51)之光纖光催化之方法進行效率比較，試驗皆為二重覆，結果由圖 52 顯示，在完全暗室條件下，空白背景去除效率為 2%，當以大面積光源直接進行照射燒杯之試驗效率約為 80%，而光纖光催化方面，可以發現去除效率主要隨著光纖支數(光源照射強度)進而增加光催化效果，而光觸媒劑量影響次之，並由 20 mg 光觸媒搭配 2 根光纖之去除效果最好，但由試驗可以發現，光纖支數增加至 3 支時，並沒有進而提升光催化效果，反而降低去除效率，主要原因在先前文獻提到，光照強度的提升也有可能造成氫氧自由基生成過多而互相競爭(Tugaoen et al., 2018)，因此適量的光源與光觸媒比例才可達到最佳的光催化效率。由此太陽光聚光罩試驗可以初步得知，將太陽光直接應用於現場進行光纖光催化處理具有可行性，本團隊在未來也希望更加精進太陽光之聚光效率，並應用於現場之研究，並透過圖 45 之透鏡方式，將太陽光源之利用率提升。此聚光研究在國外也有一些相關研究有學者研究使用太陽能集中輸送系統 (ECoSEnDS)其針對採光和可持續處理廢水作設計。ECoSEnDS 由雙反射鏡太陽能聚光器和純石英光纖束製成。該學者利用的太陽能設備可以集中相當於 813 個 60 W 白熾燈泡或 149 個 15 W LED 燈源的光能，若使用適當之光催化劑可作為光催化系統持續降解廢水中的污染物，實驗結果顯示在一小時內就可完全光催化降解亞甲基藍(Roy et al., 2021)。另外，有研究指出，透過聚光後的集中太陽光，將可有效提升光強度，進而提升光催化降解污染



物之反應速率，學者 Roy et al. 在 2020 年以鈎酸銀作為光觸媒，並以普通太陽光與集中太陽光進行污染物亞甲基藍染料之降解效率比較，由試驗結果可以得知，透過集中太陽光可提高光催化效率至少兩倍以上，由試驗結果證明，在集中的陽光照射下，可以更快的降解降解 MB 染料，並表明使用光纖束耦合的太陽能聚光器可以用來淨化，並且可以持續利用太陽能來處理工業廢水，是一項具有成本效益的新技術。由上述文獻可以證明，太陽光搭配光纖之光纖光催化技術是具備綠色及永續導向型整治與未來發展之可行技術



圖 46、太陽能綠能設備架設現場照片



圖 47、綠能系統配電裝置(左)與蓄電池及電線設備(右)

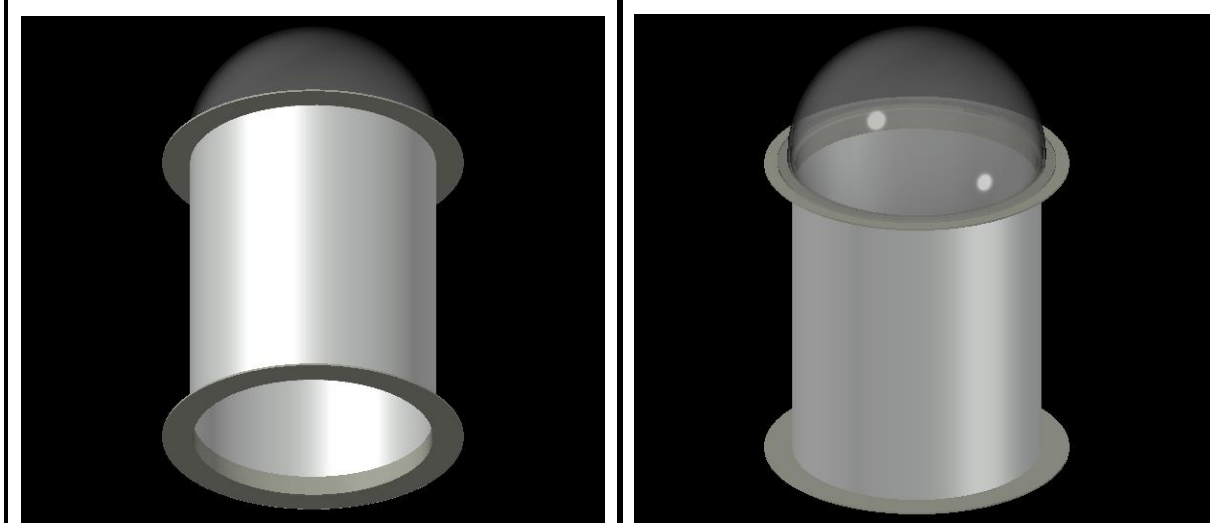


圖 48、太陽光聚光照簡易設計概念 3D 立體圖

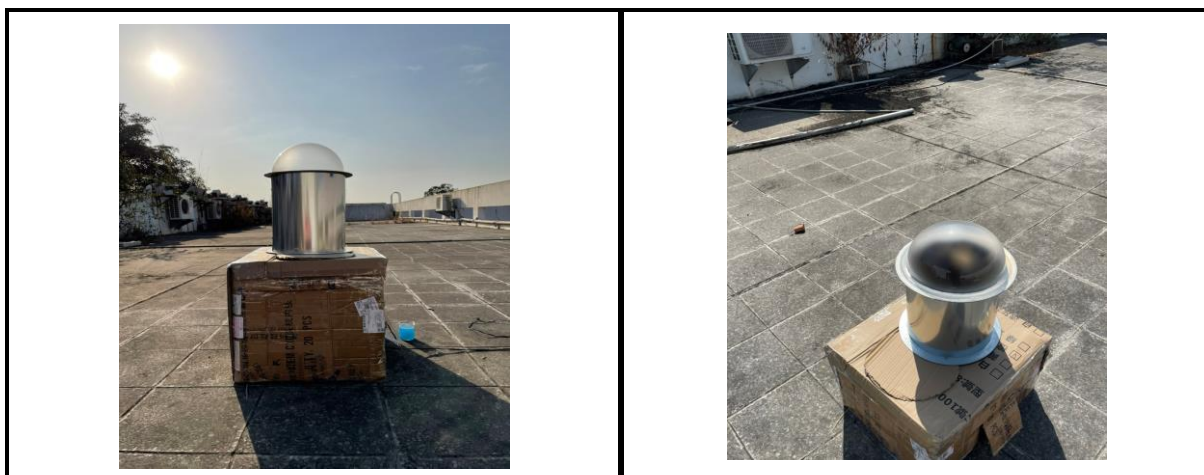


圖 49、太陽聚光罩外觀實體圖



圖 50、太陽光聚光之燒杯(Beaker)試驗

圖 51、太陽光聚光之光纖光催化瓶杯試驗

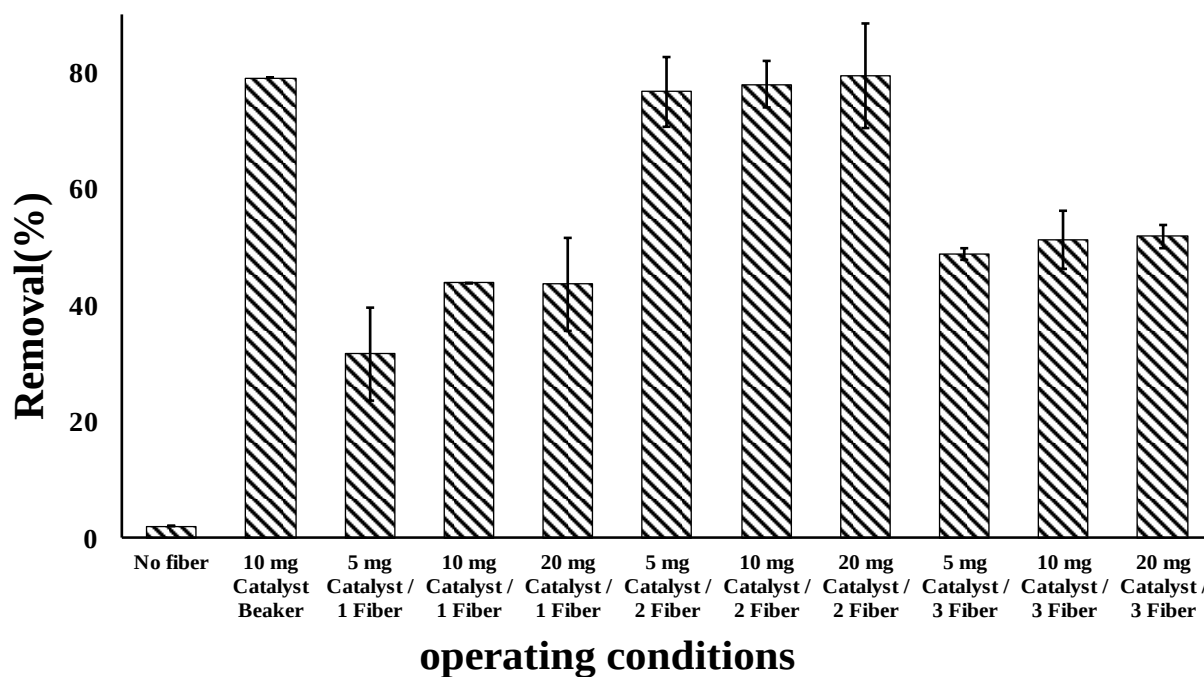


圖 52、以太陽光聚光結合光纖光催化去除污染物之去除效率比較(試驗條件：No fiber 無使用光纖之空白背景、Beaker 為燒杯試驗、Fiber 為光纖光催化試驗，光觸媒種類：P25 TiO_2 ，光觸媒劑量：5、10、20 mg，光纖支數：1、2、3。)



本實驗進行現地模場之初步成本效益評估，以估計本光纖光催化系統之反應牆應用於其他範圍更大之實場運用時，所需花費之成本。假設受污染場址之土壤地下水之長、寬、高面積為 $50 \times 20 \times 10$ m(以一般地下水污染深度約為 10 m)，總處理土方估計為 $10,000 \text{ m}^3$ ，水力停留時間設定為 4~6 個月(處理期程)，設置系統前，首先調查污染物流向及水文流向，判斷主要污染土層位置，假設以分層施工法進行 3 層鋪設(處理主要受污染之土壤層)，以 110-111 年度執行成果進行初步成本估算，系統將每 5 m 進行一口簡易井設置，目前施工法預計可用簡易打樁方式進行即可，因此鑿井費用可再降低，假設欲處理深度為 10 m 之受污染土壤地下水，以本團隊所研發之水中光源機，即可直接近距離透過塑膠光纖與石英光纖(覆膜)進行光催化處理，本技術唯一需更換之耗材為覆膜光觸媒，其餘設備包含燈源，變壓器可長時間使用，因此在設備維護保養上，只需定期進行保養燈源及系統外觀，以及井體的基本維護即可，實驗器材成本初估結果如表 9 所示。本團隊將現場施工工程成本部分納入考量，本團隊參考「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-徵求計畫書」費用估算表，將以打樁或簡易井的方式作為光纖放置方式，並對後續維護保養之成本進行評估。本團隊未來將透過太陽能儲電系統作為光纖光催化系統之電力主要來源，經電力估計後，若以 10 口處理系統井為例，將需要 20 組太陽能板與蓄電池即可有效供應系統所需，若未來有系統整治需求，目前規劃可以使用移動車輛直接裝備好，提供高機動及便利性之技術，並達到綠色整治之目標。

如表 10 所示，若將處理土方面積設定為 10000 m^3 ，本系統利用地下水流動特性，地下水流動距離一般而言約 10~100 cm/day(視不同土壤質地而定)，地下水由高處往低處流，故後續選擇本系統反應牆之設置位置也是一關鍵重點，另於處理費用方面縮減至 162 元/ m^3 ，與其他傳統處理技術相比都有成本效益上的優勢。相關實際應用上之成本效益，包括長時間之處理效率評估，亦仍有待後續現地模場研究計畫進行實際計算和評估。在現地污染場址適用條件方面，主要可分為四大部分，首先為光纖光傳輸及反應距離，在光傳輸距離受到限制下，故本團隊預計使用水中光源機將光源延伸至致受污染地下土壤層，再以覆膜石英光纖進行處理，再者，於後續現地處理，應評估覆膜光纖上之光觸媒反應耐久性，應確切評估重新覆膜光纖之時間頻率，以達到最佳光催化處理效率，並且因 110-111 年模組化系統所益，目前覆膜石英光纖更換相當便利，只需重新噴塗後再直接更換上即可，第三限制條件為土壤地下水之流速限制，因土壤地下水流速因土壤質地不同而有所差異，故為影響反應效率因子之一，最後限制條件為光纖反應半徑，此條件需經後續更多現地試驗進行探討，但由 108-111 年之現地試驗經驗來看，除了光纖光催化系統本身之反應半徑，亦可將污染物質透過光催化降解成小分子有機物，進而使生物更有效進行利用，此論述也需要更多實例進行證明，上述四種限制適用條件皆為影響本技術於現地處理之關鍵。



表 9、光纖光催化系統應用於現地之成本初步評估

編號	設備名稱	單價	數量	單位	總價(元)	備註
1	水中光源機	25,000	10	組	250,000	包含鋁製散熱基板(特製車工件), LED 燈源, 100 米電線
2	石英光纖	1,000	60	支	60,000	每套系統可安裝 5 支, 十組共 50 支, 備用採 10 支
3	無機樹脂覆膜液	7,500	1	桶/16 公斤	7,500	用於水中光源機之燈片封膜
4	太陽能蓄電系統	200,000	1	套	200,000	其中包含太陽能板 20 片, 蓄電池 20 顆, 離網儲能機 1 台, 施工費
5	模組零件	3,000	2	組	6,000	包含絕緣膠帶, 各式不鏽鋼套接零組件, 止瀉帶等...
6	一般簡易井	100,000	10	口	1,000,000	架設光纖反應牆之開孔
7	設備與井體維護保養	10,000	10	式	100,000	光纖設備維護與井口維護
總金額					1,623,500	

表 10、新穎之光纖光催化反應牆與傳統地下水處理技術成本效益評估比較

編號	廠址類型	場址面積(m ²)	污染土方(實際值, m ³)	處理土方估計(m ³)	土壤地下水污染物	地下水污染改善工法	總期程(月)	總成本	單位總成本(元/m ³)
1	加油站	1,004	N.A.	6,024	苯; 甲苯; 總酚; 萘	化學氧化法、生物復育法	24	1,700,000	282
2	工廠	27,191	N.A.	17,269	鉻; 鋅; 鎳; 1,2-二氯乙烷	地下水抽出處理; 現地化學氧化	24	49,900,000	2,890
3	模擬污染場址	-	-	10,000	含氯有機物(VOCs)	光纖光催化(COFB)反應牆	4~6	1,623,000	162

註：污染土方為實際受污染之土壤；處理土方為經評估需處理之土壤

(資料來源：行政院環境保護署，105 年土壤及地下水污染整治費徵收制度檢討暨調整、規劃計畫第三期)



第五章 結論與建議

5.1、結論

在 110-111 年度之模場試驗方面，本團隊首先針對場址位於所在地之屏東，進行地理及地形、氣候、地質與土壤、地表水系，以及模場所在地之新開寮水文地質進行調查，且在進一步測量本計畫之場址之地下水水位，以及模場在先前裕山公司所測量之污染物濃度調查及水質比較。並於 110 年度已完成現場整理作業，包括整地作業、除草作業、井體外觀維護，以及後續現場帆布鋪設，利於後續施工作業，並且完成現場貨櫃與相關電力配置。本團隊為有利未來現地模場試驗，針對系統模組化進行研究，在各類單元間之串接上探討，首先，利用光纖接頭進行塑膠光纖與石英光纖之串接，未來在覆膜光纖備製完成後，可有利於後續覆膜光纖利用與更換維護。另外，本團隊透過各類扣環、電源連接器，與鋼索進行整體系統連接，大大提高在系統組裝上之便利，減少耗損之工時。本團隊使用之場址，因先前裕山顧問公司在此場址之灌注井進行灌注藥劑的相關試驗，因此本團隊在開始系統試驗前，必先確保整體井體環境之完善，包括井篩通暢(洗井)與井中水質進行量測。於本期計畫監測之地下水水質方面，可以發現大部份水質參數皆落在以往範圍正常區間，但在濁度、DOC、氨氮之數值較高，氨氮濃度較高之水體，表示污染時間較短，這也有可能是今年強降雨使水位變化產生之影響，將土壤中之污染物質大量沖刷，導致物質釋出到地下水中，使氨氮濃度與往年相比提高許多。本團隊持續監測水質變化，以了解各種可能影響系統成效之環境因子。

試驗在進行開始前，將會評估近期水位變化，進而定期進行井中地下水 MIP 分析，由 110 年度與 111 年度所進行總共三次之分析結果可以得知，因南部從 5 月底開始間歇有豪大雨或降雨日數較長之情形發生，導致至年底都處於高水位(約地表下 20 m)，因此測得之含氯有機物污染訊號分佈相當廣(約 20-50 m)，但與降雨機率較大的 7 月相比，可以發現在枯水期 12 月之污染訊號較 7 月集中於上方(20-30 m)。由上述推論，水位上升初期，污染將停留於原先之水位高度，隨著時間變化，會漸漸分佈較廣(深至淺)，而當水位達到一個穩定高度後，污染熱點會再分佈於淺水位，並且由 111 年度 MIP 分析結果得知，當處於枯水期水位下降的過程，也有可能擾動到地下水之污染層，因此由數據分析結果顯示，當水位變化過程中，污染層分佈可能會較厚，但由各項分析數據顯示，在本場址之含氯有機物污染層主要分佈於淺水位，故後續系統將皆放置於淺水位為主。

在光纖光催化試驗系統方面，本團隊於 110-111 年度，目前已完成三組背景空白試驗，以及九組系統試驗。在背景空白試驗可以得知，以 30 m 與 35 m 進行被動式採樣袋收集污染物濃度結果顯示，此兩地下水位在未進行任何光纖光催化處理時，濃度趨勢顯示沒有任何變化，並且由上下游之處理井與觀測井發現，其濃



度趨勢大致上都相同。因此，本研究透過光纖光催化系統在不同操作條件下，包括不同燈源種類，光觸媒種類進行比較，由試驗 B 至 G 與試驗 J 至 L 之數據結果顯示，可有效證明光纖光催化系統之處理段可有效處理地下水之污染物，並由單井或上下游之多井雙軌驗證得知。

此外，本團隊於 111 年度持續針對系統進行更多試驗數據驗證收集，透過改質觸媒種類(N-TiO₂-ZnO/CNT)與光源種類進行探討，搭配太陽能蓄電系統，將此綠能設備結合光纖光催化系統進行運用，在未來可在缺電之污染場址直接進行使用，若為有市電之場址，將可進行市電轉換達到節能減碳之效益。在太陽能聚光系統方面，本團隊將持續進行研發並探討其可行性，以期未來能夠搭配本系統達到更具便利性，以及更具效率利用太陽光進行光纖光催化系統處理。另一方面，由試驗結果顯示，在光纖光催化系統處理過後，經過分析可以確認氯離子濃度的提高，代表此光催化系統於地下水污染層確實進行光催化降解作用。在 DOC 方面，雖然可能受到土壤地下水有機物質不穩定釋出 DOC，尤其為降雨時期，其 DOC 濃度可能會受到土壤沖刷影響，導致無法判斷是否具有去除效率，但由先前較天氣穩定時收集之數據顯示，DOC 確實有受到光催化所降解。最後，經初步成本效益評估本技術與其他傳統技術相比，是具有競爭力的。

5.2、建議

本團隊執行兩年期之專案計畫後，關於本技術後續應用所需之準備工作方面提供下列建議，首先，因新開察試驗場址之困難性較高，主因為地下水層厚，地下水流速快等因素，造成在濃度驗證上具困難性，故進行一系列 MIP 與採樣袋背景空白試驗採樣，進行相關性驗證，探討出在豐枯水季不同之污染層之移動，以確實掌握污染層之去除效率之驗證，並多井試驗結果得知成效驗證可行性。

本團隊以現地整治工程實務的觀點，針對試驗相關的整治操作參數進行說明，以直徑 2 mm 光纖之有效反應半徑(radius of influence, ROI)約為 2.5 cm，且其會隨著光纖直徑增加而提升，故本團隊光纖選擇以直徑 6 mm 為主(ROI>2.5 cm)。本團隊透過驗證提出下列光纖光催化系統施作時之工作注意事項及建議：(1)由光纖支數試驗中得知，測試 3 支和 5 支光纖(光纖直徑 6 mm)在 4 英吋之標準井(直徑 10.16 cm)，並分佈於處理層約 1 m，污染物去除效率僅 1,1-二氯乙烯為 98%，其餘濃度皆可達到 ND，代表此設計試驗規格，可有效達到污染處理範圍，此結果若應用於一般場址(含水層較淺)，即可有效掌握並控制。(2)若含水層較厚的污染場址，也可使用分層設置覆膜光纖的方式，可有效延伸處理段長度，(3)由 108-109 試驗結果得知，光纖光催化系統在可見光搭配 N-TiO₂ 覆膜光纖皆可達到 100%去除效率，而由 110-111 年度多井試驗結果得知，去除效率範圍為 40-80%，主要原因可能是地下水流向以及水位變化所造成的不確定因素(4)由 108-111 試驗結果可以得



知，可見光作為光源應用於光纖光催化系統之可行性研究，期望未來在本系統的應用可以直接利用太陽光作為光來源，(5)透過太陽光聚光試驗評估結果可以得知，若未來在較淺之地下水或土壤層污染場址，相當適合運用太陽光直接聚集進行處理，可以具備綠色整治技術之優點，(6)因本場址水量大及流速快，以及含水層較厚之特殊性，使污染物濃度與其他受污染場址相比較低，因此後續期望能應用於其他較高濃度之污染場址，而流速與新開寮模場相比較慢時，光催化反應時間反而較長，推測亦可得到良好的去除效率，惟後續若應用於其他場址，仍須注意去除效率之表現和進行評估，(7)未來在實際實場應用之施作方面，可利用反應牆之概念進行施作，搭配一般光源與水中光源系統，再透過覆膜光纖將光源進行延伸，到達污染熱點進行去除，將可有效針對污染區域處理，並且搭配 LED 或太陽光作為光源，並且透過太陽能儲電系統進行電力提供，除了可以在電力較缺乏之污染現場進行直接整治之外，還可符合綠色整治技術之創新，為整治技術提供一個良好的選擇。



參考文獻

- Abidi, M., Hajjaji, A., Bouzaza, A., Lamaa, L., Peruchon, L., Brochier, C., Rtimi, S., Wolbert, D., Bessais, B., Assadi, A.A (2022) Modeling of indoor air treatment using an innovative photocatalytic luminous textile: Reactor compactness and mass transfer enhancement. Volume 430, Part 1, 15 February 2022, 132636.
- Alcantara-Garduno, M.E., Okuda, T., Nishijima, W. and Okada, M. (2008) Ozonation of trichloroethylene in acetic acid solution with soluble and solid humic acid. *Journal of Hazardous Materials* 160(2-3), 662-667.
- Almansba, A., Kane, A., Nasrallah, N., Maachi, R., Lamaa, L., Peruchon, L., Brochier, L., Brochier, C., Béchohra, I., Amrane, A., Assadi, A. A. (2021) Innovative photocatalytic luminous textiles optimized towards water treatment: Performance evaluation of photoreactors. *Chemical Engineering Journal* 416, 129195
- Arconada, N., Duran, A., Suarez, S., Portela, R., Coronado, J.M., Sanchez, B. and Castro, Y. (2009) Synthesis and photocatalytic properties of dense and porous TiO₂-anatase thin films prepared by sol-gel. *Applied Catalysis B-Environmental* 86(1-2), 1-7.
- Asiri, A. M., Al-Amoudi, M. S., Bazaid, S. A., Adam, A. A., Alamry, K.a., Anandan, S., (2014) Enhanced visible light photodegradation of water pollutant over N-, S-doped titanium dioxide and n-titanium dioxide in the presence of inorganic anions. *Journal of Saudi Chemical Society* (2014) 18, 155-163.
- ATSDR (Agency for Toxic Substances and Disease Registry). (1997) Public Health Statement for Trichloroethylene, <http://www.atsdr.cdc.gov/phs/phs.asp?id=171&tid=30>.
- ATSDR, (2007) Case Studies in Environmental Medicine, TRICHLOROETHYLENE (TCE) TOXICITY, Course: SS3056
- Athanasiou, D. A., Romanos, G. Em., Falaras, P. (2016) Design and optimization of a photocatalytic reactor for water purification combining optical fiber and membrane technologies. *Chemical Engineering Journal* 305, 92-103.
- Ahmad, I., Shukrullah, S., Naz, M.Y., Ahmed, Y., Ahmad, M., (2022). Rare earth metals co-doped ZnO/CNTs composite as high performance photocatalyst for hydrogen production from water-triethanolamine mixture. *international journal of hydrogen energy*, 47, 9283-9294.
- Bacocchi, R., D'Aprile, L., Innocenti, I., Massetti, F., Verginelli, I., (2014). "Development of technical guidelines for the application of in-situ chemical oxidation to groundwater remediation." *Journal of cleaner production*, Vol. 77, pp. 47-55.
- Banisharif, A., Khodadadi, A. A., Mortazavi, Y., Firooz, A. A., Beheshtian, J., Agah, S., Menbari, S., (2015) Highly active Fe₂O₃-doped TiO₂ photocatalyst for degradation of trichloroethylene in air under UV and visible light irradiation: Experimental and computational studies. *Applied Catalysis B: Environmental*. 165, 209–221.
- Barton, I., Matejec, V., Matousek, J. (2016) Photocatalytic activity of nanostructured TiO₂ coating on glass slides and optical fibers for methylene blue or methyl orange



- decomposition under different light excitation. *Journal of photochemistry and photobiology A: Chemistry* 317, 72-80.
- Behnajady, M.A., Modirshahla, N. and Hamzavi, R. (2006) Kinetic study on photocatalytic degradation of C.I. acid yellow 23 by ZnO photocatalyst. *Journal of Hazardous Materials*, 133, pp. 226–232.
- Beltran, F.J., Gonzalez, M., Rivas, J. and Acedo, B. (1999) Aqueous degradation of VOCs in the ozone combined with hydrogen peroxide or UV radiation processes. 2. Kinetic modeling. *Journal of Environmental Science and Health Part a-Toxic/Hazardous Substances & Environmental Engineering* 34(3), 673-693.
- Bove, F., Shim, Y. and Zeitz, P. (2002) Drinking water contaminants and adverse pregnancy outcomes: A review. *Environmental Health Perspectives* 110, 61-74.
- Brown Dzubow, R., Makris, S., Siegel Scott, C., Barone Jr, S., (2010). "Early lifestage exposure and potential developmental susceptibility to tetrachloroethylene." *Birth Defects Research Part B: Developmental and Reproductive Toxicology*, Vol. 89, No. 1, pp. 50-65.
- Caliman, F. A., Robu, B. M., Smaranda, C., Pavel, V. L. and Gavrilescu, M. (2011). Soil and groundwater cleanup: benefits and limits of emerging technologies. *Clean Technologies and Environmental Policy* 13(2): 241-268.
- Choi, H., Lim, H.N., Kim, J., Hwang, T.M. and Kang, J.W. (2002) Transport characteristics of gas phase ozone in unsaturated porous media for in-situ chemical oxidation. *Journal of Contaminant Hydrology* 57(1-2), 81-98.
- Chen, K.-C., Y.-H. Wang and Y.-C. Lu, (2011) Treatment of polluted water for reclamation using photocatalysis and constructed wetlands. *Catalysis Today*, Vol. 175, No. 1, pp. 276-282.
- Chen, H., Lin, Q., Xu, Q., Yang, Y., Shao, Z., Wang, Y., (2014) Plasma activation and atomic layer deposition of TiO₂ on polypropylene membranes for improved performances of lithium-ion batteries. *Journal of Membrane Science* 458, 217-224.
- Chen, H., Chu, F., Yang, L., Ola, O., Du, X., Yanga, Y (2018) Enhanced photocatalytic reduction of carbon dioxide in optical fiber monolith reactor with transparent glass balls. Volume 230, 15 November 2018, Pages 1403-1413.
- Chen, C.J., Wu, C.C., Hsieh, L.T., Chen, K.C. (2019) Treatment of Trichloroethylene with Photocatalyst-Coated Optical Fiber. *Water* 2019, 11, 2391.
- Chu, J., Zhong, L., (2012) Photocatalytic Degradation of Methylene Blue with Side-glowing Optical Fiber Delivering Visible Light. *Chinese Journal of Chemical Engineering*. 20(5), 895-899.
- Doherty, R.E. (2000a) A history of the production and use of carbon tetrachloride, tetrachloroethylene, trichloroethylene and 1,1,1-trichloroethane in the United States: Part 1 - Historical background; Carbon tetrachloride and tetrachloroethylene. *Environmental Forensics* 1(2), 69-81.
- Doherty, R.E. (2000b) A history of the production and use of carbon tetrachloride, tetrachloroethylene, trichloroethylene and 1,1,1-trichloroethane in the United States: Part 2 - Trichloroethylene and 1,1,1-trichloroethane. *Environmental Forensics* 1(2), 83-93.



- Dongliang, H., Xiangju, M., Yanchun, T., Lin, Z., Fengshou, X., (2009) Synthesis of carbon-doped TiO₂ using porous resin and its excellent photocatalytic properties. *Chinese journal of catalysis* 30(2), 83-85.
- Elovitz, M.S. and von Gunten, U. (1999) Hydroxyl radical ozone ratios during ozonation processes. I-The R-ct concept. *Ozone-Science & Engineering* 21(3), 239-260.
- Euvananont, C., Junin, C., Inpor, K., Limthongkul, P. and Thanachayanont, C. (2008) TiO₂ optical coating layers for self-cleaning applications. *Ceramics International* 34(4), 1067-1071.
- Farooq, M., Raja, I.A. and Pervez, A. (2009) Photocatalytic degradation of TCE in water using TiO₂ catalyst. *Solar Energy* 83(9), 1527-1533.
- Fei, Y., Li, Y., Li, Y., Xiea, A., Li, Y., Suna, D., (2022). Properties study of ZnO films prepared by ALD. *Journal of Molecular Structure*, 1269, 133804.
- Goi, A. and Trapido, M. (2004) Degradation of polycyclic aromatic hydrocarbons in soil: The fenton reagent versus ozonation. *Environmental Technology* 25(2), 155-164.
- Goldberg, S. J., Lebowitz, M. D. and Graver, E. J. (1990) An association of human congenitalcardiac malformations and drinking water contaminants. *J Am CollCardiol*16:155–64.
- Haapea, P. and Tuhkanen, T. (2006) Integrated treatment of PAH contaminated soil by soil washing, ozonation and biological treatment. *Journal of Hazardous Materials* 136(2), 244-250.
- Hasan, M.M., Haseeb, A.S.M.A., Saidur, R., Masjuki, H.H. and Hamdi, M. (2010) Influence of substrate and annealing temperatures on optical properties of RF-sputtered TiO₂ thin films. *Optical Materials*, 32(6), 690-695.
- HHS (U.S. Department of Health and Human Services) (1997) Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR). Toxicological Profile for Trichloroethylene. U.S. Public Health Service, U.S. Department of Health and Human Services, Atlanta, GA. 1997.
- Huang, Q.-L., Huang, Y., Xiao, C.-F., You, Y.-W., Zhang, C.-X. (2017) Electrospun ultrafine fibrous PTFE-supported ZnO porous membrane with self-cleaning function for vacuum membrane distillation, *Journal of Membrane Science*, 534, 73-82.
- IARC (International Agency for Research on Cancer) (2014) Trichloroethylene. Volume 106. <http://monographs.iarc.fr/ENG/Monographs/vol106/mono106-001.pdf>
- Ikhlaq, A., Brown, D. R. and Kasprzyk-Hordern, B. (2012) Mechanisms of catalytic ozonation on alumina and zeolites in water: Formation of hydroxyl radicals. *Applied Catalysis B: Environmental*, 123–124(0), 94-106.
- Javorska, H., Tlustos, P., Komarek, M., Lestan, D., Kaliszova, R. and Szakova, J. (2009) Effect of ozonation on polychlorinated biphenyl degradation and on soil physico-chemical properties. *Journal of Hazardous Materials* 161(2-3), 1202-1207.



- Johnson, P.D., Dawson, B.V. and Goldberg, S.J. (1998) Cardiac teratogenicity of trichloroethylene metabolites. *Journal of the American College of Cardiology* 32(2), 540-545.
- Joo, H., Jeong, H., Jeon, M. and Moon I., (2003) The use of plastic optical fibers in photocatalysis of trichloroethylene. *Solar Energy Material & Solar Cells*, 79, 93-101.
- Jinyu, C. and Lei, Z., (2012) Photocatalytic Degradation of Methylene Blue with Side-glowing Optical Fiber Delivering Visible Light. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 20(5), 895-899.
- Jia Z., Hong R. (2021) Anticorrosive and photocatalytic properties research of epoxy-silica organic-inorganic coating. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* 622, 126647.
- Joo, J.C., Ahn, C.H., Jang, D.G., Yoon, Y.H., Kim, J.K., Campos, L. and Ahn, H. (2013) Photocatalytic degradation of trichloroethylene in aqueous phase using nano-ZnO/Laponite composites. *Journal of Hazardous Materials*, 263, 2, 569-574.
- Köppel, C., Lanz, H.J., Ibe, K., (1988). "Acute trichloroethylene poisoning with additional ingestion of ethanol—concentrations of trichloroethylene and its metabolites during hyperventilation therapy." *Intensive Care Medicine*, Vol. 14, No. 1, pp. 74-76.
- Khan, J., Ilyas, S., Akram, B., Ahmad, K., Hafeez, M., Siddiq, M., & Ashraf, M. A. (2018). ZnO/NiO coated multi-walled carbon nanotubes for textile dyes degradation. *Arabian journal of chemistry*, 11(6), 880-896.
- Kim, S.J., Park, S.D., Jeong, Y.H., (1999) Homogeneous precipitation of TiO₂ ultrafine powders from aqueous TiOCl₂ solution. *J. Am. Ceram. Soc.*, 82, 927.
- Kim, J. and Choi, H. (2002) Modeling in situ ozonation for the remediation of nonvolatile PAH-contaminated unsaturated soils. *Journal of Contaminant Hydrology*. 55(3-4), 261-285.
- Kong, S.H., Kwon, C.I. and Kim, M.H. (2003) Ozone kinetics and diesel decomposition by ozonation in groundwater. *Korean Journal of Chemical Engineering* 20(2), 293-299.
- Krishnakumar, B. and Swaminathan, M. (2011) Influence of operational parameters on photocatalytic degradation of a genotoxic azo dye Acid Violet 7 in aqueous ZnO suspensions. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 81: 739-744.
- Kim, S., Kim, M., Lim, S. K., Park, Y. (2017) Titania-coated plastic optical fiber fabrics for remote photocatalytic degradation of aqueous pollutants. *Journal of*
- Linek, V., Sinkule, J. and Janda, V. (1998) Design of packed aeration towers to strip volatile organic contaminants from water. *Water Research* 32(4), 1264-1270.
- Lin, L., Wang, H., Luo, H., Xu, P. (2015) Enhanced photocatalysis using side-glowing optical fibers coated with Fe-doped TiO₂ nanocomposite thin films. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*. 307-308, 88-98.



- Lin, L., Wang, H., Jiang, W., Mkaouar, A.R., Xu, P. (2017) Comparison study on photocatalytic oxidation of pharmaceuticals by TiO₂-Fe and TiO₂-reduced graphene oxide nanocomposites immobilized on optical fibers. *Journal of Hazardous Materials*. 333, 162-168.
- Li, C., Sun, Z., Ma, R., Xue, Y., Zheng, S. (2017) Fluorine doped anatase TiO₂ with exposed reactive(001) facets supported on porous diatomite for enhanced visible-light photocatalytic activity, *Microporous and Mesoporous Materials*, 243, 281-290.
- Liu, Y., Zhang, R., Sun, Z., Shen, Q., Li, Y., Wang, Y., Xia, S., Zhao, J., Wang, X., (2021) Remediation of artificially contaminated soil and groundwater with copper using hydroxyapatite/calcium silicate hydrate recovered from phosphorus-rich wastewater. *Environmental Pollution* 272, 115978.
- Lopes, M.L., Delgado, A.G., Guo, Y., Dahlen, P., Westerhoff, P. (2018) Optical fiber-mediated photosynthesis for enhanced subsurface oxygen delivery. *Chemosphere*. 195, 742-748.
- Ma, C.M., Ku, Y., Wang, W. and Jeng, F.T. (2008) A new optical fiber reactor for the photocatalytic degradation of gaseous organic contaminants. *Reaction Kinetics And Catalysis Letters* 94(2), 199-206.
- Masten, S.J. and Davies, S.H.R. (1997) Efficacy of in-situ ozonation for the remediation of PAH contaminated soils. *Journal of Contaminant Hydrology* 28(4), 327-335.
- Mitroova, Z., Koneracká, M., Tomašovičová, N., Timko, M., Jadžyn, J., Vávra, I. Éber, N., Fodor-Csorba, K., Tóth-Katona, T., Vajda, A. and Kopčanský, P. (2010). Structural transitions in nematic liquid crystals doped with magnetite functionalized single walled carbon nanotubes. *Physics Procedia*, 9, 41-44.
- Mohseni, M. (2005) Gas phase trichloroethylene (TCE) photooxidation and byproduct formation: photolysis vs. titania/silica based photocatalysis. *Chemosphere* 59(3), 335-342.
- Moran, M.J., Zogorski, J.S. and Squillace, P.J. (2007) Chlorinated solvents in groundwater of the United States. *Environmental Science & Technology* 41(1), 74-81.
- Mohapatra, D.P., Brar, S.K., Daghrir, R., Tyagi, R.D., Picard, P., Surampalli, R.Y., Drogui, P., (2014) Photocatalytic degradation of carbamazepine in wastewater by using a new class of whey-stabilized nanocrystalline TiO₂ and ZnO. *Science of the Total Environment* 485-486, 263-269.
- Malik, A.Q., Mir, T.G., Amin, O., Sathish, M., Kumar, D., (2022). Synthesis, characterization, photocatalytic effect of CuS-ZnO nanocomposite on photodegradation of Congo red and phenol pollutant. *Inorganic Chemistry Communications*, 143, 109797.
- National Academy of Sciences (2006) Assessing the Human Health Risks of Trichloroethylene.
http://www.epa.gov/region7/cleanup/chicago_heights/pdf/ar/000040393284.pdf



- National Research Council (2005) Contaminants in the Subsurface, Source Zone Assessment and Remediation, Committee on Source Removal of Contaminants in the Subsurface, National Research Council, Washington, DC.
- Nguyen, T.-V. and Wu, J.C.S. (2008) Photoreduction of CO₂ in an optical-fiber photoreactor: Effects of metals addition and catalyst carrier. *Applied Catalysis A-General* 335(1), 112-120.
- Nguyen, T.-V., Wu, J.C.S. and Chiou, C.-H. (2008) Photoreduction of CO₂ over Ruthenium dye-sensitized TiO₂-based catalysts under concentrated natural sunlight. *Catalysis Communications* 9(10), 2073-2076.
- Nishikiori, H., Tagahara, M., Mukoyama, L. and Fujii, T. (2010) Photocatalytic degradation of dichloroacetyl chloride adsorbed on TiO₂. *Research on Chemical Intermediates* 36(8), 947-957.
- Ola, O., Maroto-Valer, M., Liu, D., Mackintosh, S., Lee, C.-W. and Wu, J.C.S. (2012) Performance comparison of CO₂ conversion in slurry and monolith photoreactors using Pd and Rh-TiO₂ catalyst under ultraviolet irradiation. *Applied Catalysis B-Environmental* 126, 172-179.
- O'Mahony, M.M., Dobson, A.D.W., Barnes, J.D. and Singleton, I. (2006) The use of ozone in the remediation of polycyclic aromatic hydrocarbon contaminated soil. *Chemosphere* 63(2), 307-314.
- Parshetti, G.K. and Doong, R.-a. (2011) Synergistic effect of nickel ions on the coupled dechlorination of trichloroethylene and 2,4-dichlorophenol by Fe/TiO₂ nanocomposites in the presence of UV light under anoxic conditions. *Water Research* 45(14), 4198-4210.
- Paredesa, L., Murgolob, S., Dzinunc,d, H., Dzarfan Othman, M.H., Ismail, A.F., Carballa, M., Mascolob, G. (2019) Application of immobilized TiO₂ on PVDF dual layer hollow fibre membrane to improve the photocatalytic removal of pharmaceuticals in different water matrices. *Applied Catalysis B: Environmental*. 240, 9-18.
- Puddu, V., Choi, H., Dionysiou, D.D. and Puma, G.L. (2010) TiO₂ photocatalyst for indoor air remediation: Influence of crystallinity, crystal phase, and UV radiation intensity on trichloroethylene degradation. *Applied Catalysis B-Environmental* 94(3-4), 211-218.
- Pozan, G.S. and Kambur, A. (2014) Significant enhancement of photocatalytic activity over bifunctional ZnO-TiO₂ catalysts for 4-chlorophenol degradation. *Chemosphere* 105, 152-159.
- Rashid, M.M. and Sato, C. (2011) Photolysis, Sonolysis, and Photosonolysis of Trichloroethane (TCA), Trichloroethylene (TCE), and Tetrachloroethylene (PCE) Without Catalyst. *Water Air And Soil Pollution* 216(1-4), 429-440.
- Rashid, M.M. and Sato, C. (2012) Degradation of Trichloroethylene and Tetrachloroethylene in Simulated Groundwater in a Flow-Through Photosono Reactor. *Journal of Environmental Engineering-Asce* 138(12), 1179-1185.
- Ranc, B., Faure, P., Croze, V., Simonnot, M., (2016). "Selection of oxidant doses for in situ chemical oxidation of soils contaminated by polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs): A review." *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 312, pp. 280-297.



- Rayaroth, M.P., Oh, D., Lee, C.-S., Kang, Y.-G., Chang, Y.-S., (2020). "In situ chemical oxidation of contaminated groundwater using a sulfidized nanoscale zerovalent iron–persulfate system: Insights from a box-type study." *Chemosphere*, Vol. 257, No. Issue, pp. 127117.
- Rosenfeldt, E.J. and Linden, K.G. (2007) The $R_{OH,UV}$ Concept to Characterize and the Model UV/H₂O₂ Process in Natural Waters. *Environmental Science & Technology* 41(7), 2548-2553.
- Rowe, B.L., Toccalino, P.L., Moran, M.J., Zogorski, J.S. and Price, C.V. (2007) Occurrence and potential human-health relevance of volatile organic compounds in drinking water from domestic wells in the United States. *Environmental Health Perspectives* 115(11), 1539-1546.
- Rodrigues, R., Betelu, S., Colombano, S., Tzedakis, T., Masselot, G., Ignatiadis, I., (2020). In Situ Chemical Reduction of Chlorinated Organic Compounds, *Environmental Soil Remediation and Rehabilitation*. Springer, pp. 283-398.
- Roy, J.S., Dugas, G., Morency, S., Ribeiro, S., Messaddeq, Y. (2020) Enhanced photocatalytic activity of silver vanadate nanobelts in concentrated sunlight delivered through optical fiber bundle coupled with solar concentrator. *SN Applied Sciences* 2, 185.
- Roy, J.S., Morency, S., Dugas, G., Messaddeq, Y. (2021) Development of an extremely concentrated solar energy delivery system using silica optical fiber bundle for deployment of solar energy: Daylighting to photocatalytic wastewater treatment. *Solar Energy* 214, 93–100.
- Saien, J. and Khezrianjoo, S. (2008) Degradation of the fungicide carbendazim in aqueous solutions with UV/TiO₂ process; optimization, kinetics and toxicity studies. *Journal of Hazardous Materials*, 157: 269-276.
- Saillefait AM, Langonne I, Sabate JP. (1995) Developmental toxicity of trichloroethylene, tetrachloroethylene and four of their metabolites in rat wholeembryo culture. *Arch Toxicol* 70:71–82.
- San Vicente, G., Morales, A., German, N., Suarez, S. and Sanchez, B. (2012) SiO₂/TiO₂ Antireflective Coatings With Photocatalytic Properties Prepared by Sol-Gel for Solar Glass Covers. *Journal of Solar Energy Engineering-Transactions of the Asme* 134(4).
- Seyama, T., Adachi, K. and Yamazaki, S. (2012) Kinetics of photocatalytic degradation of trichloroethylene in aqueous colloidal solutions of TiO₂ and WO₃ nanoparticles. *Journal Of Photochemistry And Photobiology A-Chemistry* 249, 15-20.
- Sheydaei, M., Ayoubi, B., (2021) Nitrate reduction through the visible-light photoelectrocatalysis and photoelectrocatalysis/reverse osmosis processes: Assessment of graphene/Ag/N-TiO₂ nanocomposite. *Journal of Water Process Engineering* 39 (2021) 101856.
- Sonnenfeld N. (1998) Volatile Organic Compounds in DrinkingWater and Adverse Pregnancy Outcomes. Interim Report. United States Marine Corps Base Camp Le Jeune, North Carolina. Atlanta, GA: Agency for Toxic Substances and Disease Registry.



- Song, Y., Ling, L., Westerhoff, P., Shang, C. (2021) Evanescent waves modulate energy efficiency of photocatalysis within TiO₂ coated optical fibers illuminated using LEDs. *Nat Commun* 12, 4101 (2021).
- Suarez, S., Arconada, N., Castro, Y., Coronado, J.M., Portela, R., Duran, A. and Sanchez, B. (2011) Photocatalytic degradation of TCE in dry and wet air conditions with TiO₂ porous thin films. *Applied Catalysis B-Environmental* 108(1-2), 14-21.
- SHIBATA, T., HAMADA, N., KIMOTO, K., SAWADA, T., SAWADA, T., KUMADA, H., UMEMOTO, T. and TOYODA, M. (2007) Antifungal effect of acrylic resin containing apatite-coated TiO₂ photocatalyst. *Dental Materials Journal*, 26(3), pp. 437-444.
- Tashiro, K., Tanimura, T., Yamazaki, S., (2019) Photocatalytic degradation of gaseous trichloroethylene on porous titanium dioxide pellets modified with copper(II) under visible light irradiation. *Journal of Photochemistry & Photobiology A: Chemistry*. 377, 228–235.
- Teixeira, S., Magalhães, B., Martins, P. M., Kühn, K., Soler, L., Lanceros-Méndez, S., Cuniberti, G., (2018) Reusable Photocatalytic Optical Fibers for Underground, Deep-Sea, and Turbid Water Remediation. *Global Challenges* 2018, 2, 1700124.
- Tugaoen, H.O., Segura, S.G., Hristovski, K., Westerhoff, P. (2018) Compact light-emitting diode optical fiber immobilized TiO₂ reactor for photocatalytic water treatment. *Science of the Total Environment*. 613-614, 1331-1338.
- Umadevi, M., Parimaladevi, R., Sangari, M. (2014) Synthesis, characterization and photocatalytic activity of fluorine doped TiO₂ nanoflakes synthesized using solid state reaction method, *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 120, 365-369.
- USEPA (2001) Sources, Emission, and Exposure for Trichloroethylene and Related Chemicals, U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC.
- Vasanth Kumar, K., Porkodi, K. and Selvaganapathi, A. (2007) Constrain in solving Langmuir-Hinshelwood kinetic expression for the photocatalytic degradation of Auramine O aqueous solutions by ZnO catalyst. *Dyes and Pigments*, 75: 246-249.
- Volhard, M.-F., Christ, J. J., Blank, L. M., Jüstel, T. (2021) Seawater activated TiO₂ photocatalyst for degradation of organic compounds. *Sustainable Chemistry and Pharmacy* 16, 100251.
- Wang, T.M., Zheng, S.K., Hao, W.C. and Wang, C. (2002) Studies on photocatalytic activity and transmittance spectra of TiO₂ thin films prepared by r.f. magnetron sputtering method. *Surface and Coatings Technology*, 155(2–3), 141-145.
- Wu, C., Yue, Y., Deng X., Hua, W., Gao, Z., (2004), Investigation on the synergetic effect between anatase and rutile nanoparticles in gas-phase photocatalytic oxidations, *Catalysis Today*, 93-95, 863.
- Wert, E.C., Rosario-Ortiz, F.L., Drury, D.D. and Snyder, S.A. (2007) Formation of oxidation byproducts from ozonation of wastewater. *Water Research* 41(7), 1481-1490.



- Wu, J.C.S., Wu, T.-H., Chu, T., Huang, H. and Tsai, D. (2008) Application of optical-fiber photoreactor for CO₂ photocatalytic reduction. *Topics in Catalysis* 47(3-4), 131-136.
- Wang, Z.-Y., Chou, H.-C., Wu, J.C.S., Tsai, D.P. and Mul, G. (2010) CO₂ photoreduction using NiO/InTaO₄ in optical-fiber reactor for renewable energy. *Applied Catalysis A-General* 380(1-2), 172-177.
- Welderfael, T., Yadav, O. P., Taddesse, A. M. and Kaushal, J. (2013). Synthesis, characterization and photocatalytic activities of Ag-N-codoped ZnO nanoparticles for degradation of methyl red. *Bulletin of the Chemical Society of Ethiopia* 27(2): 221-232.
- Wikipedia, Trichloroethylene. <http://en.wikipedia.org/wiki/Trichloroethylene>, Retrieved October 17, 2014.
- Wu, C. (2014) Facile one-step synthesis of N-doped ZnO micropolyhedrons for efficient photocatalytic degradation of formaldehyde under visible-light irradiation. *Applied Surface Science* 319, 237-243.
- Xie, Y., Zhang, S., Pan, B., Lv, L. and Zhang, W. (2011) Effect of Cds distribution on the photocatalytic performance of resin-CdS nanocomposites. *Chemical Engineering Journal*, 174, pp. 351-356.
- Xiao, S., Zhao, L., Leng, X., Lang, X., Lian, J., (2014) Synthesis of amorphous TiO₂ modified ZnO nanorod film with enhanced photocatalytic properties. *Applied Surface Science*, 299, 97-104.
- Wang, X., Hu, C., An, H., Zhu, D., Zhong, Y., Wang, D., Tang, C., Sun, L., Zhou, H. (2021) Photocatalytic removal of MB and hydrogen evolution in water by (Sr_{0.6}Bi_{0.305})₂Bi₂O₇/TiO₂ heterostructures under visible-light irradiation. *Applied Surface Science* 554, 148920.
- Xu, J., Ao, Y., Fu, D., Lin, J., Lin, Y., Shen, X., Yuan, C., Yin, Z., (2008) Photocatalytic activity on TiO₂-coated side-glowing optical fiber reactor under solar light. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry* 199, 165–169.
- Yang, L., Yu, L.E. and Ray, M.B. (2008) Degradation of paracetamol in aqueous solutions by TiO₂ photocatalysis. *Water Research*, 42, pp. 3480–3488.
- Yang, H., Li, G., An, T., Gao, Y. and Fu, J. (2010) Photocatalytic degradation kinetics and mechanism of environmental pharmaceuticals in aqueous suspension of TiO₂: a case of sulfa drugs. *Catalysis Today*, 153, pp. 200–207.
- Yasunaga, N. and Hirotsuji, J. (2008) Efficient decomposition of trichloroethylene (TCE) in groundwater by ozone-hydrogen peroxide treatment. *Ozone-Science & Engineering* 30(2), 127-135.
- Yang, Z.-H., Verpoort, F., Dong, C.D., Chen, C.W., Chen, S., Kao, C.-M., (2020). "Remediation of petroleum-hydrocarbon contaminated groundwater using optimized in situ chemical oxidation system: Batch and column studies." *Process Safety and Environmental Protection*, Vol.138, pp.18-26.
- Yeung, K.L., Leung, W.K., Yao, N. and Cao, S. (2009) Reactivity and antimicrobial properties of nanostructured titanium dioxide. *Catalysis Today* 143(3-4), 218-224.



- Yokosuka, Y., Oki, K., Nishikiori, H., Tatsumi, Y., Tanaka, N. and Fujii, T. (2009) Photocatalytic degradation of trichloroethylene using N-doped TiO₂ prepared by a simple sol-gel process. *Research on Chemical Intermediates* 35(1), 43-53.
- Yu, Y.-H., Su, I.H. and Wu, J.C.S. (2010) Photocatalytic reduction of NO pollutant using an optical-fibre photoreactor at room temperature. *Environmental Technology* 31(13), 1449-1458.
- Zayed, M. F., Eisa, W. H., Anis, B. A., (2021) Gallic acid-assisted growth of cuprous oxide within polyvinyl alcohol; a separable catalyst for oxidative and reductive degradation of water pollutants. *Journal of Cleaner Production* 279, 123826.
- Zhao, C., M. Pelaez, X. Duan, H. Deng, K. O'Shea, D. Fatta-Kassinos and D. D. Dionysiou, (2013) Role of pH on photolytic and photocatalytic degradation of antibiotic oxytetracycline in aqueous solution under visible/solar light: Kinetics and mechanism studies. *Applied Catalysis B: Environmental*, 134–135, 0, 83-92.
- Zhu, R.S., Che, S.A., Liu, X.B., Lin, S.X., Xu, G.L. and Ouyang, F. (2014) A novel fluidized-bed-optical-fibers photocatalytic reactor (FBOFPR) and its performance. *Applied Catalysis A-General* 471, 136-141.
- Zhong, N., Chen, M., Luo, Y., Wang, Z., Xin, X., Rittmann, B. E. (2019) A novel photocatalytic optical hollow-fiber with high photocatalytic activity for enhancement of 4-chlorophenol degradation. *Chemical Engineering Journal* 355, 731-739.
- Zouboulis, A.I., Moussas, P.A., Psaltou, S.G., (2019). "Groundwater and soil pollution: bioremediation.
- 四氯乙烯，維基百科，自由的百科全書，檢索於 2022 年 01 月 09 日，
<https://zh.wikipedia.org/wiki/%E5%9B%9B%E6%B0%AF%E4%B9%99%E7%83%AF>
- 三氯乙烯，維基百科，自由的百科全書，檢索於 2022 年 01 月 09 日，
<https://zh.wikipedia.org/wiki/%E4%B8%89%E6%B0%AF%E4%B9%99%E7%83%AF>
- 王鴻博，2007，新型分散性奈米鐵微粒在土壤介質中傳輸之現地模場研究，EPA-96-04-005，行政院環境保護署補助計畫。
- 列管場址查詢系統，行政院環境保護署土壤及地下水污染整治基金管理會，
<http://sgw.epa.gov.tw/public/default.aspx>，查詢日期：2022 年 01 月 01 日。
- 統計資料庫查詢系統，財政部關稅總局海關進出口統計，
https://portal.sw.nat.gov.tw/APGA/GA30_LIST，查詢日期：2022 年 01 月 01 日。
- 地下水污染管制標準，2013 年 12 月 18 日行政院環境保護署環署土字第 1020109478 號令修正發布。
- 林明志，黃文鑑，2010，應用光催化程序分解水相微量氯化有機物之研究，中華民國環境工程學會 2011 土壤與地下水研討會，屏東。
- 林建宏，陳景祥，2013，以混練法製備 ABS 樹脂/奈米二氧化鈦複合材料之研究，碩士論文，中國文化大學，台北。



- 高志明，2006，利用整治列車系統處理受 DNAPL 污染之地下水，EPA-95-U1U4-001，行政院環境保護署計畫。
- 高志明，2009，以乳化型釋氮基質之整治牆技術處理受含氯溶劑污染之地下水，EPA-98-U1U4-04-001，行政院環境保護署補助計畫。
- 高志明，2010，以乳化型釋氮基質之整治牆技術處理受含氯溶劑污染之地下水，EPA-98-U1U4-04-001，行政院環境保護署補助計畫。
- 涂秀娟，2007，奈米級零價鐵懸浮液之應用性探討：不同環境氣氛下對於水溶液中 TCE 之降解反應途徑與成效、在土體中之傳輸現象及菌落數之影響，碩士論文，國立中山大學，高雄。
- 屏東縣政府環境保護局，2018 年 12 月，屏東縣地下水受含氯污染使用限制地區應變必要措施之阻絕評估計畫，期末報告
- 張書奇，楊書豪，2012，以釋氧乳化液進行地下水中三氯乙烯移除之研究，中華民國環境工程學會 2012 土壤與地下水研討會，桃園。
- 張文華，鄭大偉，吳傳威，2005，以飛灰製成無機聚合樹脂應用於混凝土補強之可行性研究，第十屆海峽兩岸環境保護學術研討會，台中。
- 黃任賢，黃瑞雄，李秋萍，2013，高折射率矽樹脂/二氧化鈦複合材料於發光二極體之應用，台灣中油綠能科技研究所，高雄。
- 鄭智鴻，2006，量身訂做的二氧化鈦光觸媒之合成及應用，**碩士論文**，國立成功大學，台南。
- 劉嘉庭，郭育嘉，邱漢瑜，何曉蓉，高志明，2011，利用乳化型釋碳基質提升三氯乙烯污染地下水之生物降解效率，現地模場試驗，中華民國環境工程學會 2011 土壤與地下水研討會，台南。
- 簡華逸，2010，應用現地生物整治技術處理受三氯乙烯污染之地下水，博士論文，國立中山大學，高雄。



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

模場試驗場址基本資料

模場名稱	新開寮模場
主管機關	屏東縣政府環境保護局
場址座標	TWD97，X： <u>208585</u> ，Y： <u>2490811</u>
場址地址	屏東縣新埤鄉
場址地號	屏東縣新埤鄉萬隆段 6、12 至 25、27、47、73、98 至 104、109、118、120 至 131、142、185、216 至 223 地號及潮州鎮崙新段 202、228、235 地號、共計 52 筆地號
場址種類	其他
場址面積(m ²)	<u>704,030.78</u> m ²
場址 列管狀態	地下水受污染限制使用地區
土壤污染物	無
地下水污染物	1,1 二氯乙烯(<u>0.190</u> mg/L) 四氯乙烯(<u>0.0469</u> mg/L) 三氯乙烯(<u>0.0331</u> mg/L) 1,1,2-三氯乙烷(<u>0.0437</u> mg/L)

註* 1,1 二氯乙烯管制標準 0.070 mg/L，監測標準 0.035 mg/L
 四氯乙烯管制標準 0.050 mg/L，監測標準 0.025 mg/L
 三氯乙烯管制標準 0.050 mg/L，監測標準 0.025 mg/L
 1,1,2-三氯乙烷管制標準 0.050 mg/L，監測標準 0.025 mg/L



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

地方主管機關核定確核表

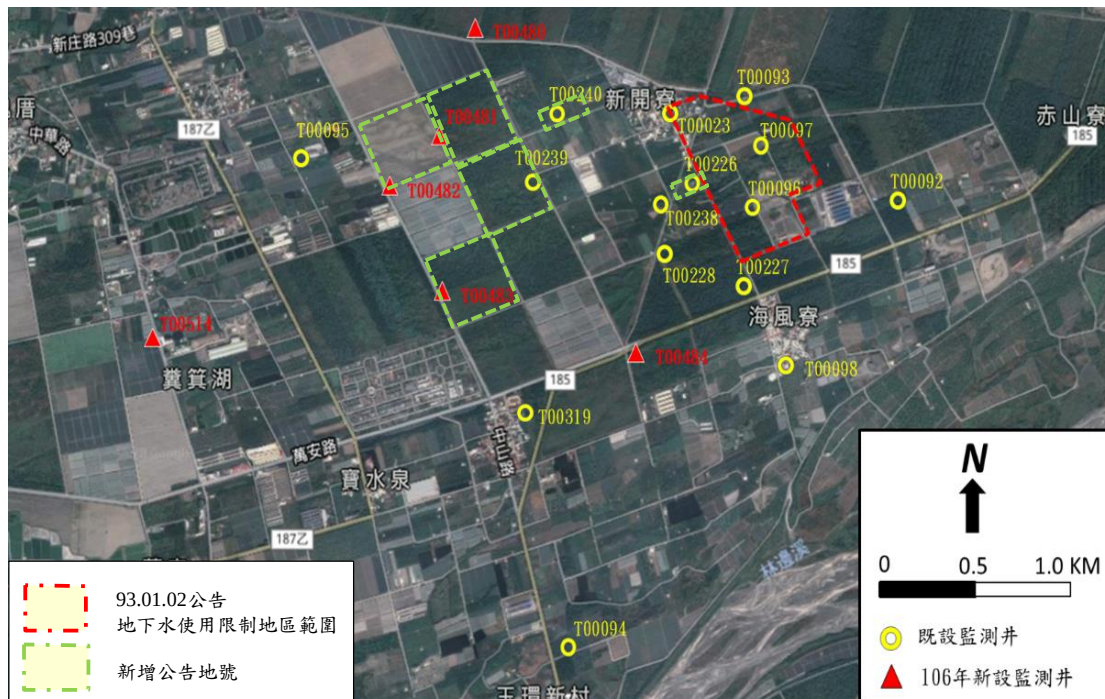
場址名稱	新開寮模場
轄區主管機關	屏東縣政府環境保護局
場址地址	屏東縣新埤鄉
場址地號	屏東縣新埤鄉萬隆段 6、12 至 25、27、47、73、98 至 104、109、118、120 至 131、142、185、216 至 223 地號及潮州鎮崙新段 202、228、235 地號、共計 52 筆地號
場址種類	☐ 工廠 ☐ 加油站 ☐ 農地 ☐ 儲槽 ☒ 其他，請說明：
場址面積(m ²)	704,030.78 m ²
場址列管狀態	☐ 無 ☒ 有，請說明： <u>地下水受污染限制使用地區</u>
場址列管日期	☐ 無 ☒ 有，請說明： <u>民國 93 年 1 月 2 日</u>
執行應變或各類計畫	☐ 無 ☒ 有，請說明： <u>106~107 年度執行本場址應變必要措施之阻絕評估計畫：由於本場址的主要關切污染物(1,1 二氯乙烯)分布範圍相當廣泛(約 3.6 平方公里)，且深度大(深度 80 公尺仍檢出地下水之 1,1 二氯乙烯超過管制標準)，因此本計畫利用 SRS 營養劑營造厭氧環境的效果不佳，其主要原因為本場址地下水層厚、傳輸快及營養鹽易擴散流失等特性，屬於具挑戰性場址。</u>
周邊高污染事業與敏感受體	☐ 無 ☒ 有，請說明： <u>本地區附近曾有非法棄置場址情形，附近有新開寮、萬隆、崙東、海豐寮等社區。</u>
污染行為人及潛在污染行為人	☒ 無 ☐ 有，請說明：
場址訴願、訴訟、行政裁罰或強制執行	☒ 無 ☐ 有，請說明：



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

場址現況概述

本模場位於屏東縣新埤鄉新開寮社區東南側，屬於屏東沖積平原，主要由礫、砂、及黏土等地層所構成，四周主要為台糖公司及私人的農業用地。民國 90 年，縣環保局執行「辦理潮州鎮新開寮地區疑遭非法棄置掩埋場污染地下水調查監測計畫」結果顯示，新開寮區域內多口監測井地下水檢出 1,1-二氯乙烯、1,1,2-三氯乙烷、四氯乙烯、三氯乙烯等揮發性含氯有機污染物，並持續增加下游監測井數量，且每年定期監測地下水關切污染物變化，目前發現污染物有持續擴大的現象。



建議說明

因本場址為高挑戰性污染場址，主要原因為污染分布廣，地下水層厚等特性，故導致使用生物處理方式效果不佳，期望貴單位新穎光纖技術可有效運用於此場址，解決地下水污染問題。

檢 附 文 件	■ 污染防治及場址衛生安全措施	■ 試驗場址土地謄本
	■ 場址公告污染使用限制地區公文	■ 台糖土地租賃契約書
	■ 屏東環保局同意公文	



污染防治及場址衛生安全措施

針對整治施作時危害的預防，本計畫在現場工作執行前，擬定安全衛生管理計畫，並週知計畫相關人員，以減少危害發生的機率；且針對可能發生的危害狀況，制訂緊急應變計畫，執行人員於危害發生時，可依循應變計畫進行相關處置，以維護人員安全並減少損失；相關措施分述如下：

一、安全衛生管理計畫

安全衛生管理計畫主要依據勞工安全衛生法令之相關規定，主要部分包括確認安全基本事項、擬定安全衛生管理架構、制訂工作守則、實施安全衛生會議與教育訓練、實施與回報作業，以達到預防危害之目的。包含下列事項：

(一)確認安全基本事項

本團隊於現地進行任何施作或試驗前，將針對人員自身及場地環境之安全基本事項進行確認，包括各項防護設備(手套、安全鞋等...)進行確認，以確保人員施行操作過程中安全無虞。

(二)擬定安全衛生管理架構

本團隊將充分運用規劃(Plan)、實施(Do)、查核(Check)及改進(Action)等管理手法，擬定並實現職業安全衛生管理目標，且藉由持續不斷的稽核制度發現管理上之問題，即時研討矯正方法及實施預防措施，以達到及進一步提昇職業安全衛生管理績效，有效防止在現地場址所有可能所造成的職業災害，促進參與人員安全與健康。

(三)宣導工作守則

為了提升計畫執行者安全衛生的認知並預防現地之模場可能所造成職業災害，本團隊每年將針對新進人員、在職人員及主管安全衛生介紹有關現地安全衛生之規定，課程中除宣導職業安全衛生相關法規外，亦加強宣導工作場所應注意事項，包括防止機械、設備或器具等引起之危害、防止危害性化學品引起之危害、防止墜落、物體飛落等之危害、防止高溫、噪音等引起之危害、個人防護具之使用、工作場所通風及照明相關管理、工作安全分析。

(四)安全衛生與教育訓練

本團隊於現地所進行之安全衛生與教育訓練工作方面，於新僱人員或在職人員於工作前，應使其接受適於各該工作必要之一般安全衛生教育訓練，包括工作環境認識與介紹，以及從事機械或設備之操作及營造



作業；對使用危害險性化學品認識與防護措施介紹。

(五)實施與回報作業

本團隊於現地試驗作業開始與結束將會進行確認及回報作業，包括(1)各項拆除之設備、管線應確實復原並測試無誤。(2)確實清點人數、工具並回報。(3)於執行過程，所進行間歇性之收工時，現場不得留置易燃易爆、毒性、強氧化性、高腐蝕性等危害物質。(4)施作地點除必要之通風、照明外，其他電源應關妥，以策安全。(5)現地之出入開口尚未封閉之局限空間場所，本團隊將於各開口處設置圍欄等障礙設施及警告標誌，防止人員貿然進入或跌落而發生危險。

二、緊急應變計畫

緊急應變計畫之目的在於建立一套因天然災害、施工過程、操作疏失或意外所引起的緊急事故之應變能力的適當程序，使緊急狀況發生時能採取適當措施，並藉由對事故發生原因與機率的瞭解，進一步積極預防緊急事故的發生，以降低災變對人員、設備和環境的危害...

(一)緊急應變流程

本現地整治計畫執行過程，將針對本場址主要關切物質之可能不當暴露危害，規劃緊急事故應變措施，以避免計畫執行期間人員傷亡、減少財產損失或破壞環境品質，具體內容說明如下：

平日或日間之緊急應變之運作由計畫主持人擔任事故指揮官，並由研究助理及人員決定執行與否；而在夜間或假日發生事故時，則由研究助理擔任臨時事故指揮官，直至計畫主持人接管該職務止。

本控制計畫之緊急應變計畫運作流程如圖 1 所示，並說明如下：(1)經由目擊者察覺災害並確認災害無法立即控制時；(2)第一時間向計畫主持人報告 (a.報告人姓名、b.事故發生地點、c.事故型態)；(3)研究助理或人員擔任現場指揮官，指揮緊急應變並進行搶救；(4)若發生無法自行處置之災害，即提升為第 2、3 階段狀況，則執行第 2 階段應變計畫；(5)判斷是否需全面停止運作及擴大隔離事故區域；(6)準備緊急應變計畫及動員應變人員和設備，並申請外部支援；(7)確定完成所有應變單位之通知。

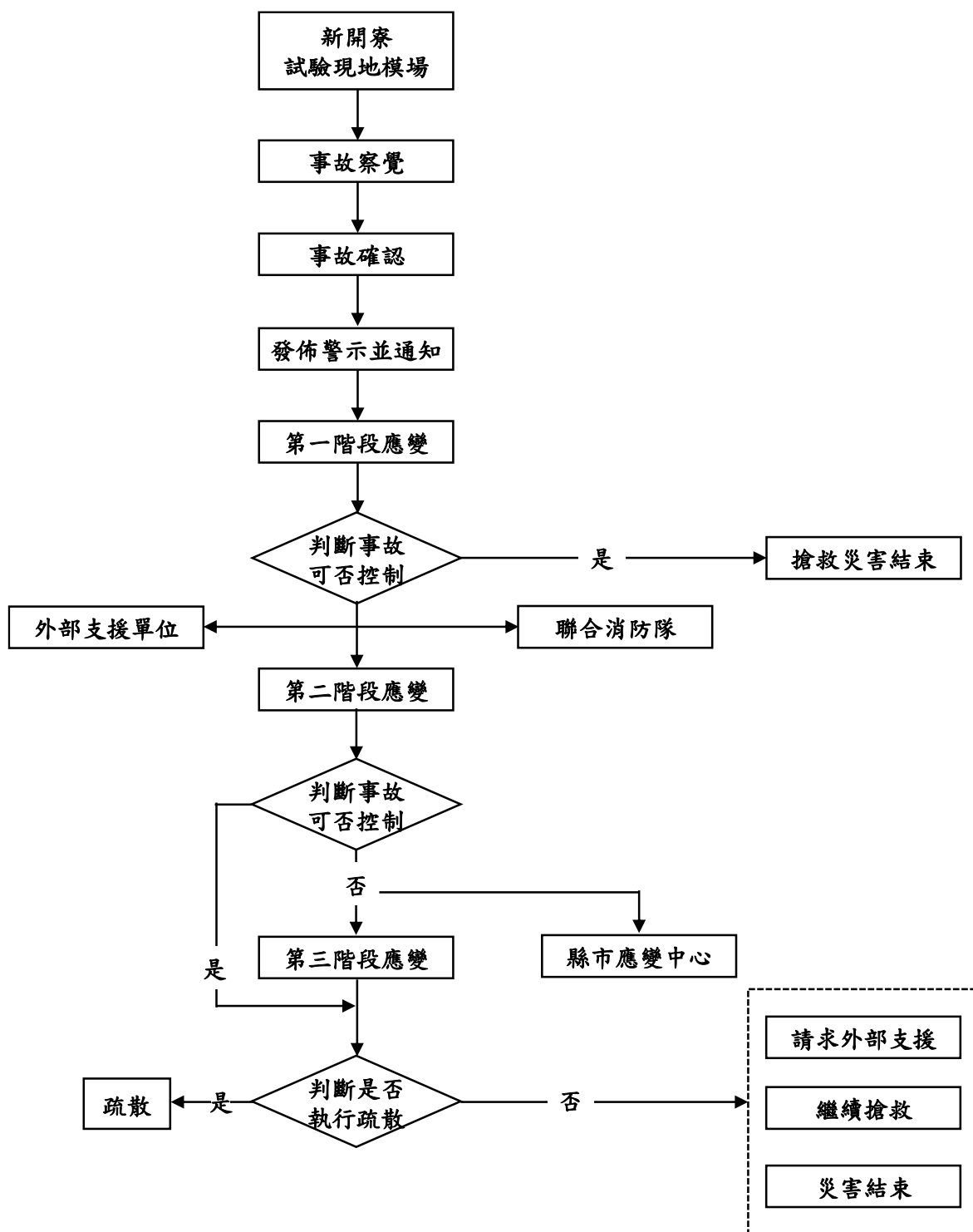


圖 1、緊急應變計畫流程圖

(二)緊急事故通報單位資訊

本團隊於現場入口處及施作位置設置告示，並於試驗監測井處設置井牌，清楚告知若遇緊急事故之通報單位資訊(國立屏東科技大學/環工系/08-7703202#7082/陳慶榮 研究助理)



三、二次污染防治計畫說明

本兩年期專案(110-111 年度)為延續 108-109 年度模場專案之延續計畫，主要針對系統模組化與太陽光電結合光纖光催化系統作為目標，並將以多井之試驗規模進行系統驗證，且利用既有處理井與監測井進行觀測，對現地場址無再次施工開挖之二次污染風險。另一方面，本團隊以光纖光催化技術進行污染復育工作進行時，針對空氣污染、噪音及振動污染、水污染、以及固體廢棄物污染進行二次污染防治評估，評估當本技術若不當處理時，是否將對於執行期間可能造成二次污染之產生。首先，在空氣及噪音及振動方面，本整治工程進行期間有關空氣污染的活動行為，經評估皆無活動會產生空氣污染的要項，主要原因是本試驗系統皆使用光源進行激發，並於地下水層中進行處理，後續進行水樣瓶採集，並封裝後立即送往實驗室分析，不會有二次空氣污染物產生之可能。另外，在噪音及振動防治方面，因本系統皆無使用大型機械或設備，因此無產生噪音污染之可能。另外，在水污染防治方面，因本技術所使用光觸媒為無毒性之二氧化鈦(P25 TiO_2)，並無添加任何化學藥劑，因此與傳統技術相比，大大降低水源二次污染之可能。