



環境部環境管理署

112 年度土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗專案

應用地下水抽出處理(P&T)系統搭配預濃縮 以可再生型吸附顆粒(RAP)削減地下水中 PFAS

成果報告（定稿）

主辦單位： 環境部環境管理署

專案執行單位：國立陽明交通大學／環境科技及智慧系
統研究中心

專案主持人：周珊珊 博士

專案執行期間：112 年 12 月 15 日起至
113 年 11 月 29 日止

中 華 民 國 113 年 12 月 印製



審查意見回覆對照表

環境部環境管理署「土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗專案」

構想書 申請計畫書 期中報告
修正計畫書 ■ 成果報告 審查意見回覆對照表

計畫年度	112 年度	計畫類型	☐ 先導型 ☐ 研究型 ☒ 模場型
計畫類別	☒ 調查 ☐ 整治 ☐ 其他	主持人：周珊珊	NO： D5
計畫名稱	應用地下水抽出處理(P&T)系統搭配預濃縮以可再生型吸附顆粒(RAP)削減地下水中 PFAS		
審查意見		執行單位回覆	
委員一			
1. 研究成果具體，成果報告撰述嚴謹，第一年成果已達預期目標。		1. 感謝委員予以肯定。	
2. RAP 失活後再活化程序，除探討孔洞積碳佔據活性點位外，建議未來可加強探究 Ru(III)-Ru(VII)去活化影響因子(廢水中)。		2. 本團隊在另一個產學合作計畫(觸媒處理煉焦廢水)中發現最主要活化影響因子為積碳程度，可藉由比表面積分析和氧化功能指標兩數據來作為評估指標，如完全失活的觸媒比表面積僅剩不到 10 m ² /g，氧化功能指標則< 25% (已補充說明於 章節 5.1.6)。另外有關 Ru 的不同氧化狀態可能是和使用的氧化劑強弱能力有關(已補充說明於 章節 3.2)。	
3. 儀器與分析方法建立可再加強說明，例如 MDL、精密度與準確度數據。		3. 陽明交大環工所目前 LC/MS/MS 係以直接注入法進行 PFAS 分析，其查核樣品回收率落在 81~108%、重複樣品分析的相對差異百分比為 6~15%。團隊將添購固相萃取濃縮裝置，以精進儀器 MDL 至 ng/L level (目前為 µg/L)。	
4. 交大環工所檢量線範圍 0.2~500ppb，是否符合研究需求？		4. 考量第一年度計畫未有固相萃取濃縮裝置情形下，團對於實驗室所配置的 PFAS 合成廢水設定為 1~5 ppm，削減後殘餘濃	
5. 不同 pH 對 PFBA、PFHxA 及 PFOA 之吸附容量(langmuir 最大吸附量)是否有差異。			
6. 不同氧化劑種類、劑量與反應時間所產生之副產物值得深入探討。			



應用地下水抽出處理(P&T)系統搭配預濃縮以可再生型吸附顆粒(RAP)削減地下水中 PFAS

	度均落在 0.2~500 ppb 檢量線範圍內。於第二年度計畫添購固相萃取濃縮裝置後，檢量線會精進至 ppt level，以符合真實水樣的濃度檢測需求。 5. 已補充於章節 5.1.2。在過去 RAP 與活性炭比較，兩種吸附劑於不同 pH 值吸附容量相當。文獻指出，PFBS 於不同 pH 情形下，在 pH 值 3 時有最好的吸附容量，於 pH 值 5~9 之間，則無顯著差異。 6. 謝謝委員建議。第二年度計畫規劃以較強的氧化促進劑如雙氧水(輔以空氣曝氣)，來觀察不同劑量與反應時間對 PFAS 礦化情形，同時使用 LC/MS/MS 定性與定量中間產物生成情形，以經濟效益為考量找出最適化削減 PFAS 操作參數。
委員二 1. 本計畫係採用三種不同的處理技術於潛在污染場址削減 PFAS，分別為可再生型吸附顆粒(regenerative adsorption particles，簡稱 RAP)、中空纖維納濾膜(hollow fiber NF)及地下水抽出處理系統(P&T)。方法可行。 2. 圖 5.1-2 顯示單獨使用本研究之活性炭對於 PFAS 的吸附量高於(會類似)RAP 的效果。建議釐清表面吸附 Ru 的作用及其最低需求含量。 3. 本研究將地下水抽出後使用中空纖維納濾膜進行預濃縮，請補充說明中空纖維濾膜可以處理的 PFAS 濃度下限為何。建議應同時評估預濃縮對 RAO 毒化物質(如高濃度重金屬、懸浮固體、油脂類等)的去除效率。	1. 謝謝委員予以肯定。 2. RAP 技術反應機制為先吸附再經氧化斷鍵 PFAS 產生氟離子，推估吸附占比約 10%。本研究 RAP 表面披覆的 Ru 貴金屬含量為 0.001~0.007% (w/w)，為目前最適化比例，具有不錯的氧化能力及能降低生產成本。 3. 謝謝委員建議，已補充修正於章節 5.3.5。目前以 NF 膜濃縮模場地下水 PFAS，經三段串聯可將 PFOS 從 11 ppb 濃縮至約 1 ppm。另為模擬第二年度增設 NF 預濃縮設施，評估地下水背景主要可能影響兩技術的影響物質，目前於實驗室以活



審查意見回覆對照表

4. 本研究使用可再生型吸附顆粒(regenerative adsorption particles,RAP) 表面有 0.01% 之 Ru。此種材料對於 PFAS 的去除機制涉及吸附及氧化作用。請補充說明再生機制的脫附及氧化態再生的考量。 5. RAP 氧化功能指標測試方法(圖 4.2-2)以苯甲酸為測試樣品，與本案所探討的 PFAS 不同，請說明其合理性。建議選定一種 PFAS 為測試樣品。 6. 本研究仍須使用臭氧或雙氧水輔助氧化，以增加去除效果，請補充說明成本的增加問題。 7. 再生程序結果顯示，添加 1000 ppm 次氯酸鈉與 500 ppm 次氯酸鈉的實驗組，RAP 的氧化功能指標可分別恢復至 85%及 60%。由此可知，次氯酸鈉能有效清除 RAP 孔洞上的積碳，使其恢復原有的處理效能。建議補充說明 Ru 再生程度的影響。	性過濾介質-AFM除油玻璃砂作為NF膜前處理，加以去除懸浮固體及少量油脂，後再串接三段NF預濃縮PFAS，於數批次小型連續流小型管柱實驗(運行時間>14天)初步結果得知，地下水經濃縮後對RAP削減PFAS成效不受影響，且斷鏈後PFAS有氟離子生成，另以RAP氧化功能指標評估來確認RAP活性狀態目前皆為良好。 4. 謝謝委員建議，已補充修正於章節 5.1.6。RAP失活主因為孔洞的活性點位被污染物占據，使氧化促進劑無法有效激活Ru呈氧化態來降解污染物。因此須藉由再活化程序將活性點位上的污染物加以去除，係於80℃溫度下，使用空氣曝氣搭配次氯酸鈉進行4小時再活化程序，此氧化劑劑量、反應時間或溫度皆能隨污染的嚴重度作適當調整。 5. 苯甲酸氧化功能指標的驗證實驗為觸媒活性測試的標準試驗流程(SOP)，並已在不同工業廢水中進行測試。可參見章節 5.1.4。團隊使用PFOA實驗經五批次吸附/催化氧化程序重複實驗後的RAP，分成兩組進行再生效率(RE值)與苯甲酸氧化功能指標驗證實驗，其中再生效率的測試樣品為PFOA，氧化功能指標的測試樣品為苯甲酸，比照兩種再生後效能指標變化趨勢一致。
---	--



應用地下水抽出處理(P&T)系統搭配預濃縮以可再生型吸附顆粒(RAP)削減地下水中 PFAS

	6. 第二年度將以空氣曝氣作為 RAP 主要氧化促進劑，然添加雙氧水輔助氧化的時機有二，第一個考量為下年度使用 NF 預濃縮後，PFAS 濃度會提升至數百~一千 ppb，因此須設定固定頻率添加一定劑量來維持 RAP 活性，第二個為再活化程序時添加以取代次氯酸鈉。使用現場 100 L RAP 模組來計算，假設雙氧水以批次添加方式作添加，每周添加兩次，四周共八次，若添加劑量為 200 mg/L 時，加藥成本為 0.18 元/次，劑量為 100 mg/L 時，加藥成本為 0.09 元/次。 7. 已補充於章節 5.1.6。Ru 再生程度為 RAP 氧化功能指標，即 5~7 batch 的 TOC 平均去除率須符合 80~85%標準，若不符合則表示活性點位積碳尚未清除乾淨，須調整劑量或活化時間等方式加以去除，另個可能原因為 RAP 的 Ru 貴金屬流失，此情況則要使用大活化程序將貴金屬氧化物重新披覆至 RAP 上，披覆後 Ru 含量須符合 0.001~0.007% (w/w)之標準。
委員三 1. P.44，自評已完成預期之工作項目和計畫目標，且成果績效自評亦達成預期目標，整體研究成果豐碩。 2. 宜增列計畫構想書與申請計畫書階段委員意見與回覆處理情形對照表。 3. 具體回應期中報告審查意見。 4. 實場地下水基質較複雜，下階段宜持續探	1. 謝謝委員予以肯定。 2. 已將各階段委員意見與回覆處理情形對照表新增於附錄，供委員參閱。 3. 感謝委員肯定。 4. 謝謝委員建議，會參考委員建議，明年度計畫將持續探討干擾 RAP 吸附與氧化目



審查意見回覆對照表

討干擾 RAP 吸附與氧化目標污染物(PEAS)之可能影響物種和程度？RAP 吸附是否具有選擇性或專一性？ 5. 下階段宜持續探討進行所建置系統(RAP、NF、P&T 等)之穩定性和耐久性等測試？ 6. 建議持續優化所建置系統和處理程序等，降低處理成本並提升研究效益？ 7. 所發展技術系統(RAP+NF+P&T)具實場應用性且 PFAS 處理為環境部政策發展重點之一。	標污染物之可能影響物種(如鈣離子)及 RAP 吸附是否具有選擇性等議題。若以目前於實驗室測試結果(可參見章節 5.3.6)，以活性過濾介質-AFM 除油玻璃砂作為 NF 膜前處理，加以去除懸浮固體及少量油脂，後再串接三段 NF 預濃縮 PFAS，於數批次小型連續流小型管柱實驗(運行時間> 14 天)初步結果得知，地下水經濃縮後對 RAP 削減 PFAS 成效不受影響，且斷鍵後 PFAS 約氟離子生成，另以 RAP 氧化功能指標評估來確認 RAP 活性狀態目前皆為良好。 5. 謝謝委員建議，本年度計畫已於現場模組運轉一、二個月，分別取適量 RAP 回實驗室進行氧化功能指標試驗，以瞭解 RAP 的穩定性。後續會參考委員建議，明年度計畫將持續強化模場設備之穩定性和耐久性，如 NF 膜回收率及反洗建議、運轉模式調整與 RAP 活化頻率及劑量建議等，以提高整體成效。 6. 謝謝委員建議，明年度將加大至少一倍抽水量，搭配 NF 膜預濃縮於 RAP 設施前，預期可大幅提升處理成效，另透過調整運轉模式及評估氧化促進劑添加劑量及頻率，以經濟效益評估 RAP 技術削減
---	---



應用地下水抽出處理(P&T)系統搭配預濃縮以可再生型吸附顆粒(RAP)削減地下水中 PFAS

	PFAS 最適化參數，來降低整體處理成本。 7. 感謝委員予以肯定。
委員四 1. 已完成第一年 RAP 對 PFAS 反應基本特性，可以有效進行脫氟反應，第二年規劃濃縮後進行 RAP 反應是國際上處理低濃度 PFAS 的方式，可行。 2. 部分 PFAS 反應後未發現中間產物，是否為分析儀器的限制或已完全礦化？ 3. 經 RAP 反應後水溶液是否有 Ru 的存在？ 4. 地下水中陰離子或硬度是否會干擾反應。 5. 反應發現有降低至低碳數的副產物，其於地下水中有更高的移動性，反應後如何處置。 6. 脫氟反應效率與濃度有關，經前濃縮(NF)排水殘留 PFAS 的濃度及處理方式？	1. 謝謝委員肯定。 2. 交大環工所 LC/MS/MS 可分析 PFAS 項目可參見表 5.1-1，數據呈現於表 5.1-6，於 RAP+空氣曝氣實驗組削減 PFOA 時，會產生少量的 PFHxA (2.28%)及 PFHpA (0.25%)生成，其餘 PFAS 初步判定皆已礦化，後續團隊會持續追蹤中間產物生成情形。 3. 說明已補充於章節 3.2。過去本團隊有相關研究(Chen <i>et al.</i>, 2024)，確認在 pH 5 ~ 10 狀態下水溶液無 Ru 溶出。 4. 大部分離子(含氯離子)皆不干擾 RAP 活性，但某些地區因地下水硬度較高，水中鈣離子含量若長期大於 500~1000 mg/L，則會造成 RAP 表面點位被遮蔽而有所影響。另本團隊過去曾進行 3 個月的 RAP 連續流測試，操作在硬度 500 mg/L 的廢水中，對其催化氧化活性並無影響。 5. 中間產物的降解可(1)添加較強的氧化促進劑(如雙氧水等)或(2)使用第二段 RAP 吸附/催化氧化程序來礦化去除。後續團隊於第二年度會比較兩種方式的整體效益及經濟評估。 6. NF 濃縮後產水的 PFAS 濃度甚低，團隊規劃於明年度計畫採用另一種 RAP 固定床方式加以處理膜法的產水，即吸附處理至飽和後，再添加氧化劑進行活化再



審查意見回覆對照表

	生程序，此法於處理過程中無須添加任何氧化促進劑。
委員五 1. 本期計畫執行進程符合預計進度。 2. 考量現場環境與實驗室差異，現階段現場僅檢測經 RAP 處理後之地下水 PFAS 濃度，建議可評估第二期增加檢測經 RPA 前之地下水 PFAS 濃度之合宜性，以確認 PFAS 實際削減率。	1. 謝謝委員予以肯定。 2. 謝謝委員建議。第二年度將調整運轉模式來加速評估整體運轉成效，持續以監測井觀測地下水數值外，各單元設施的處理前後 PFAS 等水質濃度，將一併納入監測當中，以確認 PFAS 實際削減率。



專案基本資料表



專案基本資料表

112 年度土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗申請計畫書

一、專案基本資料表

申請編號：

專案性質	☐ 實驗性質 ☒ 非實驗性質	專案技術編碼	NLAB-S-I-N1-C (如非實驗性質含氣溶劑之生物整治模場為 NLAB-S-R-C1-B，填寫請參考附件 1-4)
專案類別(單選)	☐ 先導型 ☐ 研究型 ☒ 模場型	研究主題	☐ 整治 ☒ 調查 ☐ 政策類或其他
申請機構系所	國立陽明交通大學/環境科技及智慧系統研究中心		
機構地址	新竹市東區博愛街 75 號實驗一館 3 樓		
專案主持人	周珊珊	職等/職稱	約聘研究員
協同主持人	郭奕好	職等/職稱	組長
專案名稱	中文 應用地下水抽出處理(P&T)系統搭配預濃縮以可再生型吸附顆粒(RAP)削減地下水中 PFAS 英文 Application of pump-and-treat (P&T) system coupled with pre-concentration and regenerative adsorption particles (RAP) to reduce PFAS in groundwater 關鍵字 吸附, 再生, 納濾, 地下水抽出處理, PFAS		
執行期程	自民國 112 年 12 月 15 日起至民國 113 年 11 月 29 日止		
專案主持人	姓名：周珊珊 E-mail：shanshan_chou@nctu.edu.tw 專線：03-5712121#55553 手機：0937-154-623		
專/兼任人員	姓名：簡偉倫 E-mail：jommy841228@nycu.edu.tw 專線：03-5712121#55296 手機：0981-550-584		
經費分析總表 (僅模場試驗專案需填寫兩年度金額)	專案預估總經費	第一年申請經費	第二年申請經費
1.	人事費用	635,547	686,671
2.	設備使用含維護費	642,820	1,366,200
3.	耗材與主要費用	917,202	904,185
4.	其它研究相關費用	7,631	11,760
5.	行政管理費	388,800	523,908
6.	自籌款		
	申請補助經費(1-5 項)	2,592,000	3,492,724
	計畫總經費(1-6 項)	2,592,000	3,492,724

說明：

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

專案主持人：_____ (簽名或蓋章) 日期：12/5





112 年度專案成果績效自評表

填表日期：113 年 12 月 3 日

一、專案基本資料

專案性質	☐ 實驗性質 ☒ 非實驗性質	專案類別	☐ 先導型 ☐ 研究型 ☒ 模場型
研究主題	☐ 整治 ☒ 調查 ☐ 其他		
執行機構	國立陽明交通大學 環境科技及智慧系統研究中心	專案主持人	周珊珊
專案名稱	應用地下水抽出處理(P&T)系統搭配預濃縮以可再生型吸附顆粒(RAP)削減地下水中 PFAS		
專案執行期程	☐ 申請階段 ☐ 期中 ☒ 成果		

二、成果績效自評表：「計畫總預估數」應與計畫審查核定值相符，請執行單位依實際達成之量化成果填寫於欄位中。

(一)學術面

目標達成程度			申請 預估數	期中 達成數	成果 達成數	結案後半年 達成率	備註 (說明未達成 原因或學術產 出發表名稱)
項目							
A 學術產 出及活 動	1.國內投稿 (篇數)	(1)論文	1	1	1		
		(2)研討會論文	1	0	1		
	2.國外投稿 (篇數)	(1)期刊論文					
		(2)國際研討會 論文發表					
	3.報告 (篇數)	(1)技術報告	1	0	1		
		(2)研究報告					
	4.專著 (本數)						
	5.辦理學術 會議(場數)	(1)研討/說明會					
		(2)成果發表會					
		(3)論壇					
B 人才 培育	6.研發改良 技術(項數)	(1)已開發技術					
		(2)技術平台					
	7.技術獎項(項數)						
	8.研發人員 (人數)	(1)碩士	2	0	2		
		(2)博士					



應用地下水抽出處理(P&T)系統搭配預濃縮以可再生型吸附顆粒(RAP)削減地下水中 PFAS

項目 \ 目標達成程度			申請 預估數	期中 達成數	成果 達成數	結案後半年 達成率	備註 (說明未達成 原因或學術產 出發表名稱)
	9.研究團隊 (個數)	(1)跨領域團隊	2	1	2		
		(2)跨機構團隊					
		(3)形成研究中心					
		(4)形成實驗室					
10.其他指標 (請自行命名)		(請自填)					

(二) 產業面

項目 \ 目標達成程度			申請 預估數	期中 達成數	成果 達成數	結案後半年 達成率	備註 (說明未達成 原因或專利、 技術轉移相關 詳細資料)
A 智慧財產權	1.專利 (件數)	已核准	發明				
			新型/設計				
			合計				發明第 I799122 號
		申請中	發明				
			新型/設計				
			合計				
B 研發技術轉移	2.先期技術 成果移轉	件數					
		授權金(仟元)					
		衍生利益金(仟元)					
	3.技術移轉 (專利)	件數					
		授權金(仟元)					
		衍生利益金(仟元)					
	4.技術移轉	件數					



專案成果績效自評表

項目 \ 目標達成程度			申請 預估數	期中 達成數	成果 達成數	結案後半年 達成率	備註 (說明未達成 原因或專利、 技術轉移相關 詳細資料)
	(應用技術)	授權金(仟元)					
		衍生利益金(仟元)					
	5.可移轉 產業技術	(1)技術(件數)					
		(2)品種/系 (件數)					
C 產學研合 作	6.促成合作研 究	件數	1	0	1		
		金額(仟元)	100	0	100		
	7.促成投資	件數					
		投資金額 (仟元)					
	8.促成取得業 界科專	件數					
		業界投資金額 (仟元)					
9.其他指標 (請自行命名)							

(三) 政策面

目標達成程度			申請預 估數	期中 達成數	成果 達成數	結案後半年 達成率	備註 (說明未達成原因或其他詳細資料)
項目							
A 服務便民	1.技術服務	次數	1	0	1		
		收入(仟元)	50	0	121		
	2.諮詢服務	次數					
		收入(仟元)					
B 政策推動	3.協助政府推動 (件數)	(1)政策					
		(2)法規					
C 技術效益	4.整治技術提升(%)		10	0	10		
	5.整治成本降低(%)		10	0	10		
	6.提升能源效率(%)		10	0	10		
7.其他指標 (請自行命名)							



應用地下水抽出處理(P&T)系統搭配預濃縮以可再生型吸附顆粒(RAP)削減地下水中 PFAS

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

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) ● 國內外研討會 Wei-Lun Chien, Ching-Hsuan Chuang, Anh Nguyen Thi Ngoc, Shan-Shan Chou, Chih-Pin Huang, Ruthenium doped activated carbon as regenerative adsorption particles for PFAS degradation in contaminated groundwater, IWA, 2024. ● 國內期刊論文 莊沁璇、簡偉倫、朱順傑、郭奕好、周珊珊(113 年 4 月出刊，201 期)。削減地下水中 PFAS 綠色技術開發。國家環境研究院環境教育及訓練電子報/環保技術新知。 本模場型研究為一團隊自有專利程序 P&T 搭配預濃縮以綠色材料(RAP)組成一創新地下水 PFAS 削減程序，並對潛勢區域進行模場研究。本研究將兩種不同領域三技術整合應用於 PFAS 削減程序，截至第一年成果階段，已培育 2 位碩士學生，發表 1 篇國內外研討會、1 篇國內期刊論文及 1 篇技術報告。
產業面(如合作研發產業、申請專利、洽談技術移轉廠商件數說明) 本計畫以學術單位主導，可促使人才培育、研究發展及推廣本土技術外，所開發之創新技術可行性高，且 RAP 技術已有 1 件專利，團隊預計於結案後半年內申請另 1 件專利。承蒙前年度環管署土基會模場專案補助計畫，於中油林園廠受 LNAPL 污染場址已有模場整治經歷，期望本計畫可再精進 RAP 技術於土壤及地下水領域應用，進而商轉有實際污染物削減的案例。
政策面(如整治費用降低、特定污染物整治效益提升、或提供政府作為監測/管制標準、污染查核、場址管理等政策及法規研訂之參考) 利用 RAP 技術之再生活化特性，可大幅降低整治時產生之廢棄處理，進而減少事業廢棄物處理費用(活性碳)，達到綠色整治目的。另評估中空纖維納濾預濃縮方式在地下水 PFAS 濃度相對較低條件下串接 RAP 技術的應用成效，期望能更有效、低建置、操作成本且無二次污染疑慮情形下削減水中 PFAS，達到復育地下水的環境友善創新工法。



四、主要研究人力

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
專案主持人	周珊珊	國立陽明交通大學	執行長	整體計畫規劃、主持、模場試驗進度追蹤及
協同主持人	郭奕好	業興環境科技股份	組長	模場規畫、設計、監造、成效評估與成果
專任人員	簡偉倫	國立陽明交通大學	專任助理	模場規畫、報告撰寫及彙整、成效評估與
兼任人員	羅惠如	國立陽明交通大學	碩士生	執行實驗、數據整理、現場採樣協助
兼任人員	林祐霆	國立陽明交通大學	碩士生	執行實驗、數據整理、現場採樣協助
兼任人員	趙子權	國立陽明交通大學	碩士生	執行實驗、數據整理、現場採樣協助
兼任人員	吳宜軒	國立陽明交通大學	碩士生	執行實驗、數據整理、現場採樣協助
兼任人員	林大鈞	國立陽明交通大學	碩士生	執行實驗、數據整理、現場採樣協助

五、產業界資源投入表

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





中文摘要

全氟/多氟烷基化合物(per- and polyfluoroalkyl substances, PFAS)為持久性有機污染物，具有疏油疏水、熱穩定和化學穩定等特性，難以自然衰減且長期存在於環境中，對人類健康有負面影響。聯合國自 2009 年起通過斯德哥爾摩公約，逐步禁止與限制多種 PFAS 的使用。台灣已在半導體、染整和電鍍業等行業周遭環境中，如放流水或地下水，檢測出 PFAS 污染，因此迫切需要研發適當的處理技術。

本計畫係採用三種不同的處理技術於潛在污染場址削減 PFAS，分別為可再生型吸附顆粒(regenerative adsorption particles, 簡稱 RAP)、中空纖維納濾膜(hollow fiber NF)及地下水抽出處理系統(P&T)。RAP 係以活性碳為基底，表面披覆薄層的貴金屬氧化物，具極佳的吸附與氧化還原特性，並可再生循環使用，已證實用於地下水 LNAPL 污染物移除已獲有不錯的成效。另外考量地下水中 PFAS 濃度極低，因此採用中空纖維 NF 進行預濃縮再搭配 RAP 進行處理，中空纖維 NF 較傳統卷式納濾膜具備進水水質預處理要求低且可反洗等特性；國外研究學者亦證實 NF 對 PFAS 污染物皆有極佳的截留率，值得深入探討。本計畫使用的 P&T 系統為一新型專利系統，有別於傳統抽水處理方法，具有占地面積少、方便移動、易維修保養並可同時移除自由相浮油等優點。

本計畫掌握環境部地下水計畫歷次地下水 PFAS 濃度相對較高區域，該區位在某工業區污水處理廠區域，其地下水 PFOA 及 PFOS 調查濃度皆大於美國環保署 2016 年訂定 PFOA 或/及 PFOS 終生健康建議值 0.00007 mg/L，且為 PFOS 歷次調查濃度最高點位，因此選定此標的區位為模場試驗地點。本計畫第一年主要構想為運用 P&T 搭配 RAP 進行高級氧化處理，經水力控制將改善之水體回注，以達到去除地下水 PFAS 的目標；第二年規劃在 P&T 後使用中空纖維 NF，以預濃縮的方式，擬增加較第一年多一倍的抽水量，試驗在地下水 PFAS 濃度相對較低條件下的應用成效，並評估地下水 PFAS 的去除效率及優化實務操作參數，進一步評估整體系統的處理效果。

在實驗室試驗部分，除了建立 LC/MS/MS 的 PFAS 分析方法外，並進行以下幾項 RAP 相關處理技術之評估，包括 RAP 對 PFAS 吸附容量、RAP 催化氧化可行性試驗、吸附/催化氧化及再生試驗等，以完成 RAP 技術削減 PFAS 成效評估。我們發現 RAP 具有與原始活性碳相當的 PFAS 吸附容量；在最重要的吸附/催化氧化及再生試驗中，發現使用 RAP 技術搭配不同氧化促劑削減 PFAS 成效顯著，其中臭氣曝氣反應最快(0.5 小時)，其次為雙氧水輔以空氣曝氣(4 小時)，空氣曝氣則需 48



小時。同時，我們僅在 RAP 配合空氣曝氣處理 PFOA 時，觀察到極少量的 PFAS 中間產物生成，其他組未見中間產物，顯示這與促進劑的氧化能力相關。另外，經由 NF 膜的預濃縮試驗，發現藉由兩段式 NF 串聯方式，可將 PFHpA (C7)及 PFOA(C8) 的濃縮倍數大幅提升至 11.7 及 45.9 倍。

在模場試驗部分，本團隊建置了一口抽水井、一口注水井及 RAP 設備，並於七月開始運轉及進行採樣分析。結果顯示，八種 PFAS 化合物在試驗第二個月濃度上升，推測原因可能是水力牽引加上地勢低及鋼板結構阻水，或颱風季大量雨水滲入帶入土壤中的 PFAS。於現場 RAP 設施運轉三個月數據顯示，除 PFOS 濃度和前一個月差不多外，其餘 PFAS 濃度皆開始下降，已初步看見成效，後續團隊將持續追蹤。另為快速了解 RAP 對現場地下水中 PFAS 的處理效果，因此我們另行取現場水樣，先以 NF 濃縮至少 50 倍後，模擬模場試驗的方式，進行 2 天的小型連續流管柱實驗，確認 PFOS 可由 1 ppm 降至 0.2 ppm 左右，發現和實驗室吸附/催化氧化及再生試驗的結果相當。

根據以上各項可行性評估結果，初步判斷未來可以藉由 NF 膜的預濃縮效應，並搭配氧化促進劑輔助 RAP 進行吸附和催化氧化，達到持續再生 RAP 及削減 PFAS 的目標。由再生效率與氧化功能指標顯示出一致的變化趨勢，進一步驗證了 RAP 的吸附、催化氧化和再生程序能保持其活性，且可重複使用，因此適合作為處理地下水中 PFAS 的解決方案。



Abstract

Per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) are persistent organic pollutants characterized by their oil and water repellency, thermal stability, and chemical stability. They are difficult to naturally degrade and can persist in the environment for a long time, negatively impacting human health. Since 2009, the United Nations has implemented the Stockholm Convention to gradually ban and restrict the use of various PFAS. In Taiwan, PFAS contamination has been detected in environmental media surrounding industries such as semiconductors, dyeing and finishing, and electroplating, particularly in effluents and groundwater. Therefore, there is an urgent need to develop suitable treatment technologies.

This project will apply three different treatment technologies to reduce PFAS at potentially contaminated site. These technologies include regenerative adsorption particles (RAP), hollow fiber nanofiltration membranes (hollow fiber NF), and pump-and-treat groundwater extraction systems (P&T). RAP is a regeneratable precious metal oxide catalyst based on activated carbon, has superior adsorption, redox property, and advantages in recyclability. RAP has been demonstrated to effectively remove LNAPLs in groundwater. Considering the extremely low PFAS concentration in groundwater, hollow fiber NF will be used for pre-concentration, combined with RAP for treatment. The hollow fiber NF has the advantages such as low inlet water quality requirements and backwashing capability compared to the traditional spiral-wound NF. Foreign studies have shown that NF have high trapping efficiency of PFAS, making it more promising for further exploration. The P&T used in this project is a newly patented system, distinguished from traditional air-lift and water-lift treatment methods. It is easily transportable, and not only requires less space but also minimal maintenance. Additionally, it can simultaneously remove free-phase floating oil.

This project aims to identify areas with relatively higher concentrations of PFAS in groundwater, the area near the wastewater treatment plant of one industrial park. The concentrations of PFOA and PFOS in the groundwater in this area are both higher than the lifetime health advisory levels of 0.00007 mg/L set by the US Environmental Protection Agency in 2016. This location represents a prime testing site due to its historical high concentrations of PFOS. The primary concept for the first year of the project is to use pump and treat (P&T) in conjunction with RAP for advanced oxidation treatment. Treated



water will be reinjected into the aquifer under hydraulic control to achieve the goal of removing PFAS from the groundwater. In the second year, the plan is to use hollow fiber nanofiltration (NF) after P&T for pre-concentration. This involves doubling the pumping rate compared to the first year and testing the application effectiveness under conditions of relatively lower PFAS concentrations in the groundwater. The project will evaluate the efficiency of PFAS removal and optimize practical operating parameters, further assessing the overall effectiveness of the treatment system.

In the laboratory experiments, we not only established the LC/MS/MS analytical method for PFAS but also evaluated several RAP-related treatment techniques. These include assessing RAP's PFAS adsorption capacity, feasibility tests for RAP catalytic oxidation, and adsorption/catalytic oxidation and regeneration tests, all aimed at evaluating the effectiveness of RAP technology in reducing PFAS. We found that RAP has a PFAS adsorption capacity comparable to that of original activated carbon. In the crucial adsorption/catalytic oxidation and regeneration tests, RAP technology combined with different oxidizing accelerating agents showed significant PFAS reduction effects. Ozone aeration had the fastest reaction time (0.5 hours), followed by hydrogen peroxide with air aeration (4 hours), while air aeration alone took 48 hours. Additionally, we observed only trace amounts of PFAS intermediate products during PFOA treatment with RAP and air aeration, while no intermediates were found in the other groups, indicating that this outcome is related to the oxidizing power of the agents used. Additionally, through the pre-concentration tests using two-stage NF series system, the concentration factors of PFHpA (C7) and PFOA (C8) were significantly increased to 11.7 and 45.9 times, respectively.

In the pilot field test, our team established one extraction well, one injection well, and RAP equipment, and began operations and sampling analysis in July. The results showed that the concentration of eight PFAS compounds increased during the second month of the test. This may be due to hydraulic pull combined with the area's low location and steel structures blocking water flow, or from the infiltration of rainwater during the typhoon season, carrying PFAS from the soil into the groundwater. Data from three months of operation at the on-site RAP facility indicate that PFOS concentration keeps almost the same compared to the previous month, while all other PFAS concentrations have decreased. This shows preliminary effectiveness, and the team will continue to monitor the situation. To quickly assess the effectiveness of RAP in treating PFAS in the



groundwater, we collected additional site water samples, concentrated them at least 50 times using NF, and conducted a two-day small-scale continuous flow column experiment simulating the field conditions. The results confirmed that PFOS could be reduced from 1 ppm to about 0.2 ppm, consistent with the results of laboratory adsorption/catalytic oxidation and regeneration tests.

Based on the feasibility assessments, it is preliminarily estimated that the NF membrane pre-concentration effect can be utilized in the future. By combining this with the use of oxidizing accelerating agents to assist RAP in adsorption and catalytic oxidation, RAP can be continuously regenerated, achieving PFAS reduction. The consistent trend between regeneration efficiency and oxidation function index further verifies that the adsorption/catalytic oxidation, and regeneration processes of RAP can maintain its activity, allowing it to be reused. Therefore, RAP is suitable as a solution for treating PFAS in groundwater.





目錄

專案基本資料表

112 年度專案成果績效自評表

中文摘要

ABSTRACT 1

目錄

圖目錄

表目錄

一、前言1

二、研究目的 3

 2.1 專案背景 3

 2.2 專案目的 4

三、文獻回顧 5

 3.1 傳統 PFAS 處理技術介紹 5

 1. 活性碳吸附法 5

 2. 離子交換樹脂 5

 3. 薄膜過濾法 6

 4. 化學氧化法 6

 5. 超聲波氧化法 6

 3.2 可再生型吸附顆粒技術 7

 1. 可再生型吸附顆粒技術介紹 7

 2. RAP 於氣相 VOC 防治應用 8

 3. RAP 於工業廢水處理應用及學術成果發表12

 3.3 中空纖維納濾16

 3.4 地下水抽出處理系統19

四、研究方法及過程.....21

 4.1 研究方法21



應用地下水抽出處理(P&T)系統搭配預濃縮以可再生型吸附顆粒(RAP)削減地下水中 PFAS

4.2 實驗室測試規劃	22
1. RAP 氧化功能指標測試方法	23
2. RAP 失活後再活化程序	24
3. 中空纖維納濾膜預濃縮試驗	24
4.3 模場設置規劃	26
1. 試驗區域背景資料	26
2. 模場設置規劃	38
4.4 工作進度說明	43
五、結果與討論	45
5.1 實驗室測試結果	45
1. 儀器與分析方法建立	45
2. 評估 RAP 對 PFAS 吸附容量	46
3. RAP 催化氧化可行性試驗	51
4. RAP 吸附/催化氧化及再生程序試驗	54
5. hi-NF 預濃縮試驗	60
6. 完成 RAP 技術削減 PFAS 的成效評估	61
5.2 場址水文地質調查	62
5.3 模場 RAP 及 P&T 設施建置、操作與維護	64
1. 地球物理探測	64
2. 抽除井與注入井設置	67
3. RAP 及 P&T 系統建置	70
4. 例行性設施操作及維護	75
5. 地下水定期採樣分析	76
6. 現場 RAP 氧化功能指標驗證	82
5.4 結論	82
1. P&T 及 RAP 設施操作與維護	82
2. 定期監測採樣分析	82
3. 實驗室測試成果	83



5.5 建議84

 1. 增加中空纖維 NF 膜預濃縮設備84

 2. 優化實驗室測試參數.....84

六、後續工作說明85

 1. P&T 及 RAP 設備設置暨設施操作與維護85

 2. 定期監測採樣分析85

 3. 精進實驗室測試條件86

七、參考文獻87

專案執行自評表93

附件一

附件二

附件三





圖目錄

圖 3.2-1 (a)RAP 外觀及(b)(c)為可能的氧化還原機制.....	8
圖 3.2-2 RAP 覆蓋 Ru 與傳統高級氧化之氧化電位比較.....	8
圖 3.2-3 O ₃ + RAP 對甲苯去除之測試條件.....	9
圖 3.2-4 O ₃ + RAP 對甲苯去除之測試結果-1	10
圖 3.2-5 RAP 流動床系統示意	13
圖 3.2-6 RAP 固定床系統示意	13
圖 3.3-1 傳統雙膜法與 hi-NF 水回收系統差異	17
圖 3.3-2 中空纖維納濾膜全球應用案例	18
圖 3.3-3 中空纖維納濾膜在各種 PFAS 上的截留率.....	18
圖 3.4-1 P&T 系統示意圖.....	20
圖 4.3-1 新竹科學園區新竹園區地圖	27
圖 4.3-2 模場周邊區域地質鑽探位置圖	28
圖 4.3-3 BH-1 鑽孔地質柱狀圖	30
圖 4.3-4 BH-81 鑽孔地質柱狀圖	31
圖 4.3-5 BH-2 鑽孔地質柱狀圖	33
圖 4.3-6 BH-4 鑽孔地質柱狀圖	34
圖 4.3-7 O00297 設井地質剖面圖	34
圖 4.3-8 竹科-新竹園區區域水文地質概況	35
圖 4.3-9 模場區域現場現勘照片	37
圖 4.3-10 模場區位圖	37
圖 4.3-11 RAP 搭配 P&T 系統示意圖(第一年).....	38
圖 4.3-12 前過濾與納濾膜預濃縮設備搭配 RAP 及 P&T 系統示意圖(第二年) ...	38
圖 4.3-13 RAP 搭配 P&T 系統設備空間配置圖	39
圖 4.3-14 系統設計組裝示意圖	39
圖 4.3-15 設井前管線會勘現場照片	40
圖 5.1-1 批次式吸附反應流程示意圖	47



應用地下水抽出處理(P&T)系統搭配預濃縮以可再生型吸附顆粒(RAP)削減地下水中 PFAS

圖 5.1-2 兩種吸附材料(RAP 及 AC)對 PFBA 的吸附容量	48
圖 5.1-3 兩種吸附材料(RAP 及 AC)對 PFHxA 的吸附容量	49
圖 5.1-4 兩種吸附材料(RAP 及 AC)對 PFOA 的吸附容量	50
圖 5.1-5 RAP 吸附/催化氧化及再生試驗程序.....	54
圖 5.1-6 五循環批次(吸附/催化氧化)RAP 削減 PFOA 及氟生成量對照圖	57
圖 5.1-7 五循環批次(吸附/催化氧化)RAP 削減 PFOA 後之再生效率	59
圖 5.2-1 模場試驗區域鑽孔地質柱狀圖	63
圖 5.2-2 模場試驗區域地質柵狀圖	63
圖 5.3-1 透地雷達測線位置分布圖	65
圖 5.3-2 透地雷達施作情形.....	65
圖 5.3-3 透地雷達測線影像剖面圖	66
圖 5.3-4 設井施工照片	69
圖 5.3-5 RAP 及 P&T 系統平面配置圖.....	70
圖 5.3-6 RAP 及 P&T 系統模場設備架設情形	71
圖 5.3-7 RAP 及 P&T 系統模場裝設施工及完工照片	72
圖 5.3-8 模擬第二年模場試驗流程(實驗室).....	77
圖 5.3-9 現場 RAP 設施基本水質監測數據.....	77
圖 5.3-10 地下水背景採樣 PFAS 委測正式報告-113 年 07 月	79
圖 5.3-11 地下水背景採樣 PFAS 委測正式報告-113 年 09 月	80
圖 5.3-12 地下水背景採樣 PFAS 委測正式報告-113 年 10 月	81



表目錄

表 1.1-1 103-111 年國內地下水全氟化合物調查成果	2
表 2.1-1 美國環保署飲用水 PFAS 標準	3
表 3.2-1 一般金屬氧化物觸媒與 RAP 比較	7
表 3.2-2 O ₃ + RAP 對甲苯去除之測試條件	9
表 3.2-3 O ₃ + RAP 對甲苯去除之測試結果-2	10
表 3.2-4 HFS 尾氣監測成果	11
表 3.2-5 兩種 RAP 反應器比較	12
表 3.3-1 納濾膜各種形態的優缺點	16
表 3.3-2 中空纖維納濾組件參數	17
表 4.3-1 模場試驗區域鄰近區域地質鑽探彙整資料	29
表 4.3-2 地下水 PFAS 調查數據彙整	36
表 4.3-3 模場系統巡檢紀錄表	43
表 4.4-1 研究進度與預期完成之工作進度表	44
表 5.1-1 中興工程顧問社實驗室與陽明交大環工所 PFAS 分析種類及濃度比較	46
表 5.1-2 RAP 和 AC 之比表面積與孔洞特性	47
表 5.1-3 RAP 催化氧化 PFBS 的初步可行性評估實驗結果	52
表 5.1-4 RAP 催化氧化 PFOA 的初步可行性評估實驗結果	53
表 5.1-5 五循環批次(吸附/催化氧化程序)RAP 削減 PFHxA 數據	55
表 5.1-6 五循環批次(吸附/催化氧化程序)RAP 削減 PFOA 數據	58
表 5.1-7 五循環批次(吸附/催化氧化)RAP 削減 PFOA 後之氧化功能驗證數據	60
表 5.1-8 hi-NF 濃縮測試條件及結果	60
表 5.1-9 兩段串聯 hi-NF 操作對不同 PFAS 的濃縮結果	61
表 5.1-10 不同再活化程序數據彙整表	62
表 5.3-1 透地雷達測線位置分布圖	64
表 5.3-2 注入井(IT-1)附近地下管線及結構體分佈一覽表	66
表 5.3-3 抽除井(PT-1)附近地下管線及結構體分佈一覽表	67



應用地下水抽出處理(P&T)系統搭配預濃縮以可再生型吸附顆粒(RAP)削減地下水中 PFAS

表 5.3-4 抽除井與注入井基本資料67

表 5.3-5 設井過程施工紀錄.....68

表 5.3-6 模場試驗系統巡檢紀錄彙整75

表 5.3-7 模場地下水 PFAS 及氟離子數據彙整表.....78

表 5.3-8 模場 RAP 氧化功能驗證82



一、前言

全氟/多氟烷基化合物(Per- and Polyfluoroalkyl Substances, PFAS)為持久性有機污染物，於國際上已陸續禁/限用多種 PFAS，同時進行源頭管制及評估管理程序(Brunn *et al.*, 2023；Cotruvo *et al.*, 2023)。然環境部目前於列管毒性化學物質及其運作管理事項中納管數種 PFAS，如 PFOA、PFOS 及 PFHxS (113 年 04 月新增)等，正持續關注此類新興污染物，致力於蒐集國內外 PFAS 管制動態、掌握國內 PFAS 物質流向及評估管制範疇等事項，接軌國際管制趨勢^(環管署土基會，2023 年)。

國外地下水 PFAS 改善技術，在考量此類物種具有長鏈疏水性全氟化碳鏈和親水性官能基，其化學穩定性高且具水溶性的特性後，多以抽出處理法進行，後端的處理法以(1)顆粒活性碳、(2)離子交換樹脂及(3)薄膜法較為常見^(Lu *et al.*, 2020)，但多有建置及營運成本高、處理過後的廢棄耗材仍需去化及能源使用高等缺點。

台灣高科技產業、傳統產業如紡織業與電鍍業等產業別發展興盛，製程使用的光阻劑、防水性塗料及電鍍用抑制劑等，皆含不同 PFAS 物種。國內在各環境介質如地下水、土壤及工業廢水等，已陸續調查檢驗出 PFAS 存在，表 1.1-1 為國內地下水 PFAS 的調查成果，主要調查對象為潛在運作事業如科學園區、紡織產業及其他產業別，調查區域為淺層地下水(非飲用或農業澆灌水源)。調查結果整理如表 1.1-1 所示，台灣特定區域地下水 PFOS、PFOA 及 PFHxS 現況，雖主要濃度範圍皆低於國外調查濃度，但因 PFAS 無法自然衰減，若未經適當處理對於環境或人類將會造成負面影響。

因此，為解決削減 PFAS 主流技術產生的廢棄耗材棄置，衍生二次污染之疑慮，本計畫運用地下水抽出處理系統將地下水中 PFAS 抽出離地後，選用搭配中空纖維納濾預濃縮技術削減地下水中 PFAS，搭配團隊開發的綠色材料之可再生活性碳吸附顆粒，對 PFAS 化學鍵結產生破壞，以達到削減水中 PFAS 的目標。可再生活性碳吸附顆粒係以椰殼活性碳為基底覆蓋有效成分(Ru-A-B 金屬氧化物)，其中 Ru 披覆量僅 0.01%。Ru(III)-Ru(VII)的氧化電位高達 3.65 V，明顯較傳統產生氫氧自由基的高級氧化程序有更佳的氧化能力。另可藉由添加氧化劑及活化液，分別清除表面積碳與回復流失的金屬氧化物催化劑，使其重複使用減少廢棄物產生，為一復育地下水環境綠色永續友善的新工法，讓環境治理朝 4L+C (低污染、低耗能、低成本、低空間及循環經濟)發展。



應用地下水抽出處理(P&T)系統搭配預濃縮以可再生型吸附顆粒(RAP)削減地下水中 PFAS

表1.1-1 103-111年國內地下水全氟化合物調查成果^(環管署土基會，2023年)

國家	調查對象	PFOS	PFOA	PFHxS
日本	東京地區(n= 53)	< 0.25-990	< 0.25-1800	< 0.25-56
美國	美東飲用水水源 含水層(n= 254)	1.5-98	1.1-1500	1-81
台灣	科學園區 (n= 81)	N.D-22.8 (5.3)	0.72-100.5 (40.2)	N.D-39.9 (n= 17) (N.D)
	紡織產業 (n= 33)	N.D-26.6 (15.6)	1.2-89.3 (31.9)	N.D-21.2 (n= 4)
	其他產業 (n= 23)	N.D	N.D-5.5 (1.3)	-

濃度單位：ppt；括弧內數值為中位數，無括號者表示未列出；「-」表示無調查數值



二、研究目的

2.1 專案背景

全氟/多氟烷基化合物(per-and polyfluoroalkyl substances, PFAS)為持久性有機污染物，因其具疏油疏水、熱穩定及化學穩定等特性，易長期存在於各環境介質(空氣、土壤、地表水及地下水等)中且難以自然衰減，流行病學研究亦顯示對於人類健康將造成負面影響。

PFAS 是指含有至少一個完全氟化碳原子的氟化有機化學品一個類別的總稱，PFAS 的家族成員目前已超過 12,000 種^(USEPA, 2021)，這些物質自 1940 年代末期以來一直是人為合成製造的，不是天然存在的物質^(Brunn et al., 2023)。其中開始先關注的是 8 個碳的全氟辛酸(perfluorooctanoic acid, PFOA)及其鹽與結構異構物和全氟辛烷磺酸(perfluorooctane sulfonate, PFOS)及其鹽與結構異構物，後來逐步關切到其他 PFAS，如 4 個碳的全氟丁烷磺酸及其鹽類(perfluorobutane sulfonate, PFBS)、6 個碳的全氟己烷磺酸(perfluorohexane sulfonate, PFHxS)、六氟環氧丙烷二聚體酸(hexafluoropropylene oxide-dimer acid, HFPO-DA，俗稱 GenX) 等。

美國環保署於 2024 年訂定包括保障地下水水源的 6 種 PFAS 飲用水最大污染物容許濃度(Maximum Contaminant Levels, MCL)如表 2.1-1^(USEPA, 2024)。

表2.1-1 美國環保署飲用水 PFAS 標準

項目	最大污染物容許濃度 MCL (ppt)
全氟辛酸(PFOA)	4.0
全氟辛烷磺酸(PFOS)	4.0
全氟己烷磺酸(PFHxS)	10
全氟壬酸(PFNA)	10
六氟環氧丙烷二聚體酸 (HFPO-DA)	10
全氟己烷磺酸、全氟壬酸、六氟環氧丙烷二聚體酸、全氟丁烷磺酸之兩種以上混合物	危害指數(Hazard Index) (無單位) $= \frac{GenX}{10ppt} + \frac{全氟丁烷磺酸}{2000ppt} + \frac{全氟壬酸}{10ppt} + \frac{全氟己烷磺酸}{10ppt} \leq 1.0$



聯合國於 2009 年訂定斯德哥爾摩公約，陸續禁/限用全氟辛酸(2009 年)、全氟辛烷磺酸(2019 年)、全氟己烷磺酸(2022 年)、長鏈全氟羧酸(評估程序中)等多種 PFAS；進行源頭管制的同時，美國、歐盟等也開始針對環境介質及飲用水中的 PFAS 進行評估管理程序。環境部重視國際接軌及環境安全，持續關注此類新興污染物，於列管毒性化學物質及其運作管理事項中納管全氟辛酸、全氟辛烷磺酸、全氟己烷磺酸等物質，環境衛生用藥禁用全氟辛烷磺酸等，同時於環境介質及飲用水計畫辦理調查，對於環境流布情形已有掌握，目前持續納管評估。

國外地下水 PFAS 改善技術以(1)顆粒活性碳、(2)離子交換樹脂及(3)薄膜法較為常見，雖各有其優點，但多有建置及營運成本高、處理過後的廢棄耗材仍需去化及能源使用高等缺點。因此，本團隊選用地下水抽出處理系統搭配預濃縮以可再生活性碳吸附顆粒削減水中 PFAS，期望能找出經濟且有效的綠色處理工法。

2.2 專案目的

本計畫主要設計構想為第一年度運用地下水抽出處理系統(新型第 M528311 號)之抽出再處理技術(Pump & Treat)將地下水中 PFAS 抽出離地，搭配團隊開發之可再生型吸附顆粒(Regenerative Adsorption Particles, RAP)進行高級氧化處理，對 PFAS 化學鍵結產生破壞，於潛在污染場址削減 PFAS，並經水力控制將改善之水體回注，以達到去除地下水 PFAS 的目標。此外，RAP 經再生活化可重複使用，無廢棄活性碳處置疑慮，可大幅降低營運成本，為一綠色材料。於第二年規劃在地下水抽出後使用中空纖維納濾膜(hollow fiber nano filtration)，以預濃縮的方式試驗評估在地下水 PFAS 濃度相對較低條件下的應用成效，並以評估 PFAS 的去除效率及優化實務操作參數。且因為增加了中空纖維納濾膜預濃縮單元，預期可提升地下水量處理量，故規劃第二年將增大抽水量，觀察評估 RAP 單元於抽水量增加一倍的影響下，該區地下水 PFAS 能否藉由預濃縮方式使 RAP 整體處理成效提升。



三、文獻回顧

3.1 傳統 PFAS 處理技術介紹

國內外至今已發展出多種全氟化合物之去除技術，可依原理分為分離和破壞兩大類型。分離技術之目的主要是將全氟化合物從水溶液中分離出來，其中包括活性炭吸附法、薄膜過濾和離子交換樹脂等方法。而破壞技術則是將全氟化合物降解成分子量較小的化合物，例如化學氧化法、超聲波氧化法等高級氧化程序。本計畫所使用之 RAP 技術屬於為「破壞」類型之技術，以降解的方式降低水中 PFAS 濃度。而應用在受 PFAS 影響的地下水整治技術發展上，早在 2008 年就有報導在美國明尼蘇達州的 3M 公司的三處場址中，就有利用抽出處理法 (P&T)，將地下水抽出後以粒狀活性炭吸附處理，以控制受 PFAS 影響的地下水擴散方式 (MPCA 2008a, 2008b, and 2009)。以下彙整針對受 PFAS 影響的地下水正在研發或評估整治技術。

1. 活性炭吸附法

活性炭是一種典型用於去除水體中 PFAS 的吸附劑，吸附法係利用介面傳輸將污染物累積於吸附劑表面進而從廢水中分離。常用的吸附劑除了活性炭，還有離子交換樹脂及礦質材料等。活性炭可由多種不同材料製成，如椰子殼、木材或煙煤等，因具有非極性表面，使其適合吸附疏水性質的污染物 (Du *et al.*, 2014)。透過研究報告結果顯示，活性炭在去除水中的 PFAS 方面有其限制，除了對於短碳鏈之全氟化合物之去除效果較差之外 (Eschauzier *et al.*, 2012)，若處理水體中含有機化合物也會影響其吸附效率。總體而言，雖然活性炭廣泛用於去除 PFAS，但其效果可能會因特定的 PFAS 化合物和水體性質而異，且需考慮廢活性炭或用過的吸附劑後續處置和處理方式。

2. 離子交換樹脂

離子交換樹脂為一種常見處理 PFAS 的吸附單元，是由碳氫化合物的多孔聚合物材料所製成，不溶於酸、鹼以及水。離子交換樹脂分為陽離子和陰離子兩大類，帶負電的陽離子交換樹脂 (CER) 可有效去除帶正電的污染物 (如全氟烷基磺醯胺, PFOSA)，而帶正電的陰離子交換樹脂 (AER) 可有效去除大部分帶負電的 PFAS 污染物 (如 PFOA 及 PFOS 等)，其因對於親水性 PFAS 之親和力佳，且時間效率相較其他吸附技術更高，但此方法之吸附限制和上述提及之活性炭吸附相同，對於短碳鏈全氟化合物之去除效果有限 (Das, S., & Ronen, A., 2022)，加上樹脂之成本昂貴，雖然可以重複再生利用但所需之費用高。



3. 薄膜過濾法

文獻指出 (Safulko, T.Y. Cath *et al.*, 2023) NF 和 RO 對 PFAS 有不錯的截留率，兩者去除率皆大於 90%。NF 及 RO 因其高可靠性和穩定性而適合被用來去除水中的 PFAS。然傳統 NF 膜及 RO 膜無法重複使用，一旦被污染就只能拋棄換新，廢棄的 RO 亦有二次污染疑慮。NF 則因其膜表面分離層由聚電解質所構成，在被 PFAS 吸附污染的同時，反而會因為膜與 PFAS 間的相互作用，使得去除率得以維持甚至有所提升 (Mu Li *et al.*, 2021 ; Timothy D. Appleman *et al.*, 2013)；其中中空纖維式的 NF 因其製作工藝的關係，可以藉由反沖洗去除 NF 膜表面的污染，延長 NF 的使用壽命。

4. 化學氧化法

常見化學氧化法如氯化法、臭氧法、紫外線(UV)處理和高級氧化處理方式(AOPs)已被證明對 PFOA 和 PFOS 無效 (Dickenson and Higgins, 2016 ; USEPA, 2016a & b)。然經適當的前處理或其他搭配高級氧化單元如結合光催化臭氧的化學氧化技術 (Huang *et al.*, 2016)、超臨界水氧化 (Krause *et al.*, 2022 ; McDonough *et al.*, 2022) 被證實對 PFOA 和 PFOS 具有氧化破壞的能力。

5. 超聲波氧化法

超聲波為頻率大於 20 kHz 之聲波，此技術是利用超聲波的壓力在容器底部以膨脹與壓縮原理讓水溶液中形成小氣泡，在膨脹期間氣體會被吸入小氣泡中隨後在壓縮期間加熱，使得氣泡內溫度達 4000 K，在氣泡和水之介面溫度為 600 至 1000 K，高溫的環境會造成水分子熱解，水蒸氣熱分解並在氣泡表面產生高濃度 OH· 自由基，吸附於氣泡上的污染物可與 OH· 自由基反應降解 (Kotronarou *et al.*, 1991; Wei *et al.*, 2017)，或是在氣泡爆裂期間被熱分解。此技術適用於疏水性之化合物如 PFAS，因其疏水的特性會使污染物更容易進入以及聚集在氣泡當中。因此，利用超聲波產生的高壓高能量可對多種 PFAS 有效降解，並且於 25°C 的工作條件下，PFAS 降解速率隨著功率密度和溫度的增加而成比例增加 (Kulkarni *et al.*, 2022)。



3.2 可再生型吸附颗粒技术

1. 可再生型吸附颗粒技术介绍

可再生型吸附颗粒(regenerative adsorption particles, RAP)粒径大小约 20-40 Mesh，係以椰壳活性炭为基底(圖 3.2-1a)覆盖有效成分(Ru-A-B 金属氧化物)，其中 Ru 披覆量仅 0.01%，对比市场上一般的贵金属触媒，其独特的奈米薄层制备技术使活性成分均匀覆盖，较一般活性炭更具催化臭氧产生氢氧自由基(OH·)的效果，为一具有吸附、催化氧化特性的贵金属覆盖多孔活性炭催化剂。Ru(III)-Ru(VII)的氧化电位高达 3.65 V，明显较氢氧自由基(2.80 V)及臭氧(2.07 V)高，显示其具有较传统产生氢氧自由基的高级氧化程序有更佳的氧化能力(圖 3.2-2)，可在短时间催化氧化有机污染物，且活性更强、成本更低、并可重复活化使用。RAP 可处理水中有有机物和 VOC，且已验证对多种含难降解有机物废水之处理效能优于 Fenton 法，及具可再生之特性以减少废弃物产生达到绿色永续之目的。

RAP 在地下水整治的应用将以取代颗粒活性炭为主，定位为可再生型的活性炭，即能处理同时加入氧化剂，进行同步吸附和催化氧化再生。再生过程会利用活性炭表面披覆奈米薄层的多金属氧化物，并透过加入适量的氧化促进剂(如臭氧、次氯酸钠、双氧水或氧气等)，形成电子电洞于水中产生自由基以提高水中氧化还原电位，促进 Ru 金属的氧化态以有效处理难分解有机物。RAP 若以氧气曝气，可使表面上之 Ru 金属从 3 价氧化为 4 价，转换为氧化型 RAP；而添加次氯酸钠、双氧水或臭氧等氧化促进剂，因其强氧化性质，可使表面上之贵金属氧化为 4~8 价，能更有效氧化去除有机物。RAP 表面披覆的 Ru 金属粒径小于 1 nm，故相较于一般传统触媒所需之贵金属使用量少很多，而其催化活性约为一般触媒 100 倍，RAP 特性详见表 3.2-1，可能的氧化还原机制详见圖 3.2-1b, c。

表3.2-1 一般金属氧化物触媒与 RAP 比较

種類	一般金屬氧化物觸媒	RAP
表層的金屬氧化物顆粒	3~4 nm	小於 1 nm
催化活性	強	增強約 100 倍
成本	高	貴金屬用量降低至一般用量之 1%，成本顯著降低



應用地下水抽出處理(P&T)系統搭配預濃縮以可再生型吸附顆粒(RAP)削減地下水中 PFAS

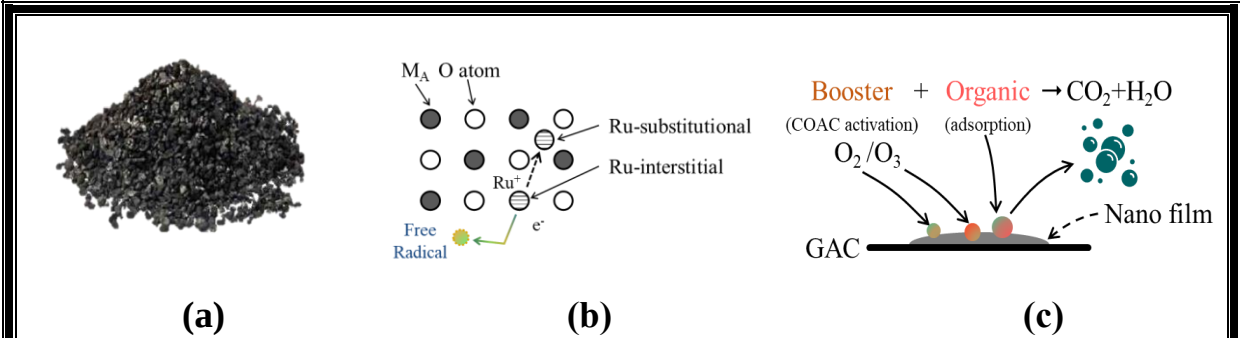


圖3.2-1 (a)RAP 外觀及(b)(c)為可能的氧化還原機制

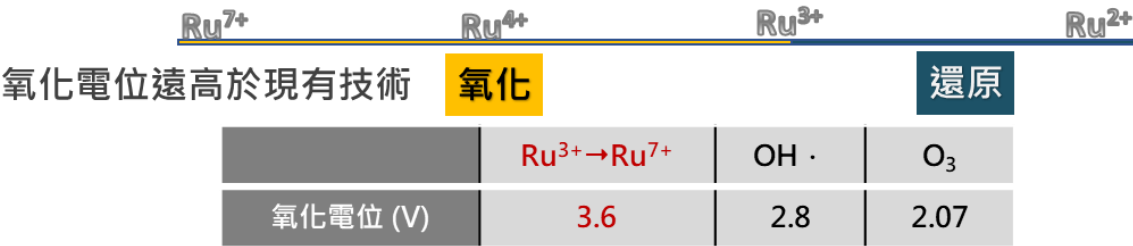


圖3.2-2 RAP 覆蓋 Ru 與傳統高級氧化之氧化電位比較

綜上所述，RAP 的物理及化學特性如(1)具優異的氧化還原特性、(2)適用於各種具生物抑制特性廢水(包括地下水)、(3)易回收再利用及(4)佔地面積小、(5)可原位活化等優勢。另過去本團隊有相關研究^(Chen et al., 2024)，使用觸媒搭配臭氧氧化促進劑，設定催化氧化反應時間 60 分鐘，確認在 pH 5 ~ 10 狀態下水溶液無 Ru 溶出，不會造成二次污染。

2. RAP 於氣相 VOC 防治應用

一般移除氣相 VOC 的觸媒氧化大多使用條件於 200°C 以上，但 RAP 技術可在室溫下搭配臭氧曝氣即能以催化氧化方式去除 VOC。RAP 技術加臭氧對 VOC(以甲苯為例)去除之系統流程圖詳如圖 3.2-3，測試條件參見表 3.2-2。本實驗採用 RAP 固定床結合臭氧進行催化氧化反應，利用甲苯氣體鋼瓶來調配氣體 VOC 濃度約 235 ppm，臭氧濃度則控制在 250~280 ppm，相對溼度為 90%。結果顯示(圖 3.2-4 與表 3.2-3)，將反應時間拉長至 300 min 時，此系統之去除率仍維持在 85%，另藉由觀察 CO₂ 濃度可看出 VOC 濃度減少之機制，反應前兩小時為 RAP 吸附 VOC 之反應，所製造出之 CO₂ 濃度較低，反應超過兩小時後 CO₂ 濃度大幅上升，表明 RAP 正與臭氧進行催化氧化 VOC 反應，且其效能穩定性極佳。

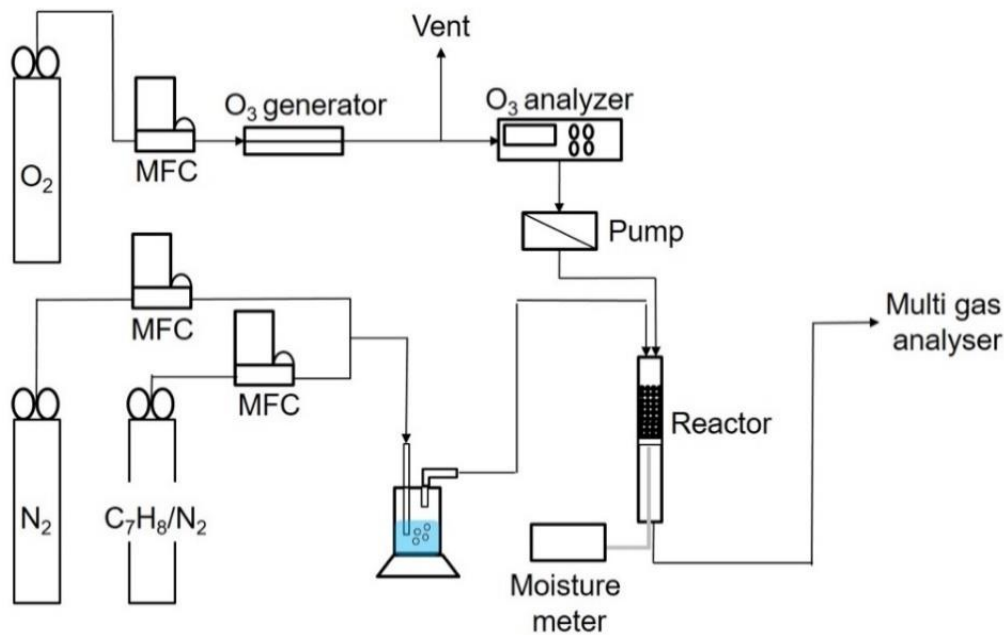


圖3.2-3 O₃ + RAP 對甲苯去除之測試條件

表3.2-2 O₃ + RAP 對甲苯去除之測試條件

項目	條件
觸媒型態	觸媒粉粒
VOCs 種類與濃度	甲苯= 235 ppm
O ₃ 濃度	250~280 ppm
O ₂ 濃度	33%
空間流速(標準狀態下)	3667 h ⁻¹
溫度	室溫
相對濕度(RH)	90 %



應用地下水抽出處理(P&T)系統搭配預濃縮以可再生型吸附顆粒(RAP)削減地下水中 PFAS

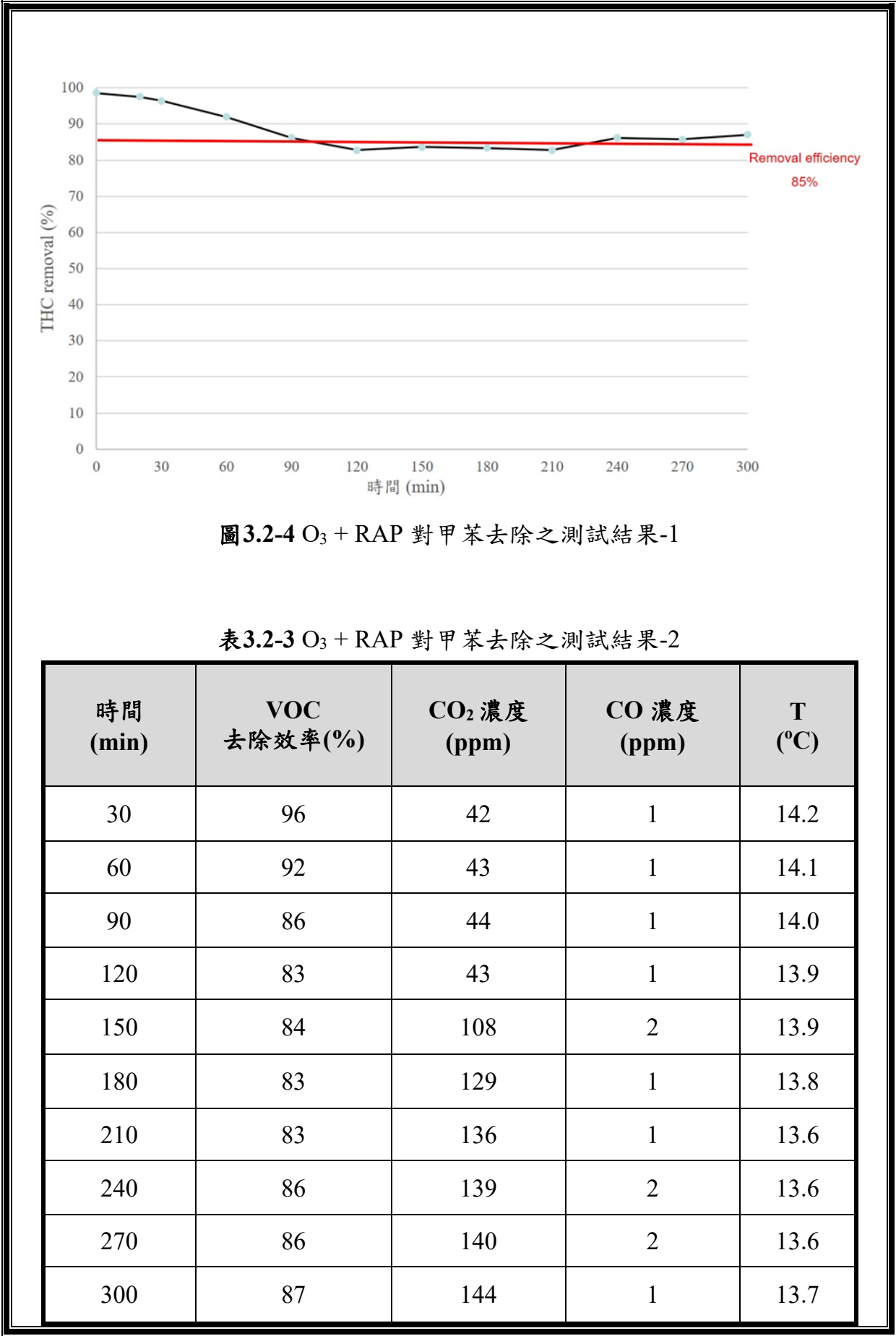


圖3.2-4 O₃ + RAP 對甲苯去除之測試結果-1

表3.2-3 O₃ + RAP 對甲苯去除之測試結果-2

時間 (min)	VOC 去除效率(%)	CO ₂ 濃度 (ppm)	CO 濃度 (ppm)	T (°C)
30	96	42	1	14.2
60	92	43	1	14.1
90	86	44	1	14.0
120	83	43	1	13.9
150	84	108	2	13.9
180	83	129	1	13.8
210	83	136	1	13.6
240	86	139	2	13.6
270	86	140	2	13.6
300	87	144	1	13.7



另於前年度土基會模場專案補助計畫在中油 LNAPL 污染場址運用(試驗一)多介質水力沖洗循環系統(Hydraulic circulation Flushing Soil remediation System, HFS) RAP 放置於地表上，吸附 HFS 系統運轉期間產生之 VOCs。結果得知(表 3.2-4)，前案第 1 年(110 年)以攜帶式 PID 量測地表上 RAP 固定床排放尾氣的 VOCs，其每月測值皆為 0.0 ppm；第 2 年(111 年)則以攜帶式 PID 及 FID 量測系統之進氣及尾氣，FID 監測進氣數值範圍為 0.6-77.3 ppm，排放尾氣範圍為 0.0-59.9 ppm，顯示 RAP 技術對 VOCs 尾氣處理具一定潛力，且操作約一年半未發現 RAP 有吸附飽和現象，與在實驗室測試甲苯有類似的趨勢-即在常溫下經由 RAP 和空氣氧化對 VOCs 有一定程度的降解效果。

表3.2-4 HFS 尾氣監測成果

序號	監測日期	PID 測值(ppm)		FID 測值(ppm)	
		進氣	尾氣	進氣	尾氣
1	110/08/26	—	0.0	—	—
2	110/09/23	—	0.0	—	—
3	110/10/28	—	0.0	—	—
4	110/11/25	—	0.0	—	—
5	110/12/23	—	0.0	—	—
6	111/04/07	—	—	3.8	2.2
7	111/05/05	0.0	0.0	7.9	3.8
8	111/06/09	0.0	0.0	3.9	3.2
9	111/07/20	0.2	0.0	—	—
10	111/08/04	0.0	0.0	3.5	3.3
11	111/09/01	2.2	2.1	5.2	5.0
12	111/10/06	0.4	0.0	1.0	0.7
13	111/11/03	0.0	0.0	0.6	0.0
14	111/12/01	0.0	0.0	10.4	4.1



應用地下水抽出處理(P&T)系統搭配預濃縮以可再生型吸附顆粒(RAP)削減地下水中 PFAS

15	112/01/12	0.0	0.0	2.6	1.7
16	112/02/02	0.0	0.0	3.1	2.8

註：1.本計畫第1年設備運轉期間(110/08~110/12)以PID監測尾氣濃度。
2.本計畫第2年設備運轉期間(111/04~112/02)以PID或FID監測進氣及尾氣濃度。
3.”—“表示未量測。
4.111/01/13委外採樣FID監測數據於HFS進氣及尾氣RAP濃度分別為77.3及59.9 ppm。

3. RAP 於工業廢水處理應用及學術成果發表

(1) RAP 於工業廢水處理應用

RAP 於工業廢水的應用實例眾多，包含 COD、氰化物、硝酸鹽氮及有機氮等難降解有機物處理。然而因各式廢水種類複雜，水中若含有導致 RAP 毒化物質(如高濃度重金屬、懸浮固體、油脂類等)，通常會先進行適當前處理將之移除後再進行 RAP 處理，以下統整列出最佳進流水質條件：

- (a) 水中重金屬濃度< 50 mg/L
- (b) 懸浮固體< 30 mg/L
- (c) 無油脂類、H₂O₂(還原反應時)殘留
- (d) pH 介於中性(最佳 pH 為 9)

一般 RAP 反應器分為流動床與固定床兩種，反應器比較如表 3.2-5 所列，流動床是以催化氧化為主，一般廢水 COD 大於 500 mg/L，建議採用流動床型式處理(圖 3.2-5)，此處理工業廢水的高級氧化應用上，會另外採用 COAC 觸媒(催化氧化型活性碳)的簡稱；固定床(圖 3.2-6)則是以吸附氧化為主，適合用在 COD 小於 500 mg/L 時，經吸附氧化後 COD 可降至 50 mg/L 以下；固定床有兩種操作模式，其一為吸附處理是等吸附飽和後，再加氧化劑(臭氧)與活化液將觸媒活化；另一種方式為處理時同時加入氧化劑，同步進行吸附和催化氧化再生。因此 RAP 也可稱為可再生型活性碳。

表3.2-5 兩種 RAP 反應器比較

反應器	流動床	固定床
處理機制	催化氧化為主 (90%氧化、10%吸附)	吸附為主，飽和後再活化 (活化時加臭氧和曝氣)
處理過程	要曝氣、加氧化劑	不曝氣、不加氧化劑

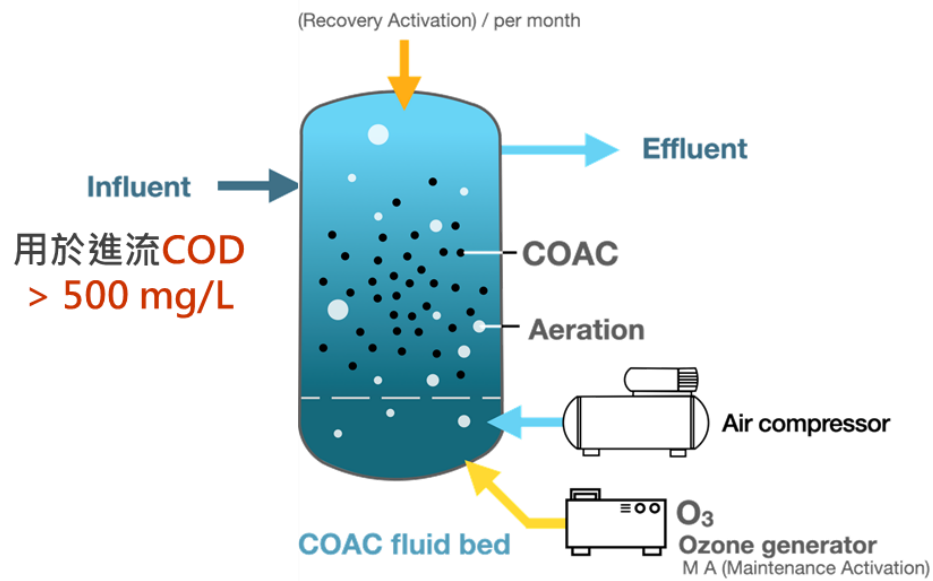


圖3.2-5 RAP 流動床系統示意

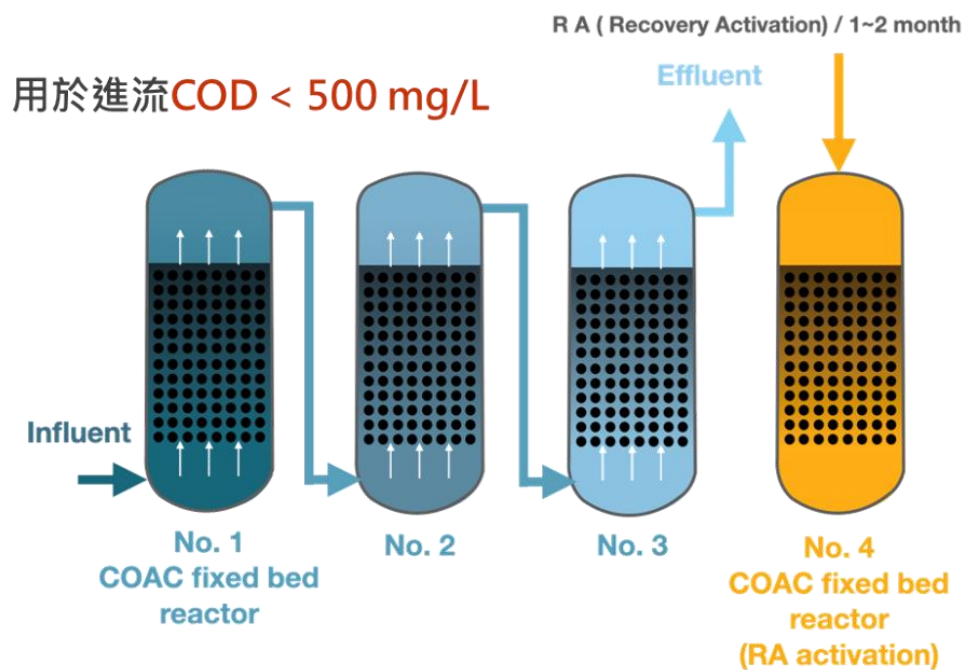


圖3.2-6 RAP 固定床系統示意

**RAP 技術實廠案例一：**

應用廠商為上海某烤漆塗裝廠液態氟碳烤漆廢水，處理水量：50 m³/d (至今約操作 4.0 年)。改善前處理流程：原有處理方式為電混凝＋沉澱＋臭氧氧化，電混凝和沉澱後 COD 可降至 900-1100 mg/L，再經臭氧氧化約只能降至 COD 500 mg/L；改善後處理流程：電混凝＋沉澱＋RAP/臭氧催化氧化(流動床，停留時間 30 min)，RAP 催化氧化系統進出流水質：進流 COD 約 900-1100 mg/L，出流 COD 約 60-80 mg/L。

RAP 技術實廠案例二：

應用廠商為台灣某金屬表面處理業的空污洗滌塗裝廢水(高濃度廢水)，處理水量：此股高濃度廢水 1-2 m³/d (至今約操作 2.5 年)，另有低濃度清洗水約 50-100 m³/d。改善前處理流程：原有此股高濃度廢水處理方式為混凝沉澱(對 COD 降解幾乎無效果)，再混入低濃度清洗水排放，因此常超標；改善後處理流程：RAP/臭氧催化氧化(流動床，停留時間 1 h)，RAP 臭氧催化氧化系統進出流水質：高濃度廢水 COD 約 10000 mg/L，先與等量低濃度清洗水調整至 COD 5000 mg/L，而後進入 RAP 臭氧催化氧化系統處理至 COD < 500 mg/L，再混入低濃度清洗水排放，目前均可穩定達標。

RAP 技術實廠案例三：

應用廠商為台灣新竹某科技廠有機氮廢水，處理設計水量為 80 m³/d (至今約操作 1.0 年)，COD 約 3000-6000 mg/L，水溫約 50°C。實廠新設廢水處理流程依序為暫存槽 1＋pH 調整槽＋RAP 反應槽 1 (HRT= 1 h)＋RAP 反應槽 2 (HRT= 1 h)＋玻璃砂過濾＋暫存槽 2，後出水 COD 濃度即能符合科學園區納管限值 < 500 mg/L。其中 RAP 反應槽 1 係使用 O₃/RAP 對有機物進行降解，RAP 反應槽 2 則以次氯酸鈉搭配觸媒進一步移除殘餘 COD，使 COD < 500 mg/L 符合排放標準。

實廠設備在氧化塔曝氣或添加少量的氧化劑(如臭氧)處理有機物，當 RAP 處理效率下降至一定程度後，可在線上添加氧化劑加熱 80°C，作定期維護型活化(MA, maintenance activation)，去除表面的積碳；若 RAP 表面金屬氧化物磨損或發生不可逆失活後，可線上添加活化劑加熱 80°C，作回復型活化(RA, recovery activation)，回復流失的金屬氧化物催化劑。



(2) 可再生型吸附顆粒(RAP)學術成果發表

- Wei-Lun Chien, Ching-Hsuan Chuang, Anh Nguyen Thi Ngoc, Shan-Shan Chou, Chih-Pin Huang, Ruthenium doped activated carbon as regenerative adsorption particles for PFAS degradation in contaminated groundwater, *IWA*, 2024
- 莊沁璇、簡偉倫、朱順傑、郭奕妤、周珊珊(113 年 4 月出刊，201 期)。削減地下水中 PFAS 綠色技術開發。國家環境研究院環境教育及訓練電子報/環保技術新知。
- 周珊珊、簡偉倫、陳國源、陳銘健、吳芳鈴、郭宥妍(112 年 3 月出刊，189 期)。應用可再生型吸附顆粒(RAP)搭配多介質水力沖洗循環系統(HFS)去除受 LNAPL 污染之土壤及地下水案例介紹。環保署環訓所環境教育及訓練電子報/環保技術新知。
- 許東鈞、周珊珊、黃志彬(111 年 8 月 26 日)。複合金屬改質活性碳臭氧再生之研究。台灣水環境再生協會第三十二屆下水道與水環境再生研討會論文集。
- 周珊珊、賴怡芬、許東鈞(110 年 9 月出刊)。油品污染場址之新穎綠色整治材料與系統介紹。環保署環訓所環境教育及訓練電子報/環保技術新知。
- 蔡明瀚、簡偉倫、陳國源、周珊珊、黃思蓁、趙淑如、黃志彬、張莉珣、顏旭明(2022 年第 155 期)。含氮廢污水綠色處理系統建立。工業污染防治期刊廢(污)水處理類。



3.3 中空纖維納濾(hollow fiber nano filtration, hi-NF)

因應近年全球與臺灣對於水質及水回收率要求的增加，發展新穎的高效能水處理技術是全球此領域專業人士的焦點。納濾膜依外型可分為平板式、管式、卷式及中空纖維式，各型態的特性如表 3.3-1 所示。目前在工程應用上多以卷式為主，然而隨著技術的發展，現今的中空纖維膜較傳統卷式膜具高填充密度、耐氯性、耐酸鹼性、通量大、可反洗、預處理要求及低裝置占地面積小等特點，有良好的環境效益、經濟效益和展望性。

表3.3-1 納濾膜各種形態的優缺點

型態	平板式	管式	卷式	中空纖維式
優點	1. 結構簡單 2. 能承受高壓 3. 性能穩定 4. 可單獨更換膜片	1. 通量大 2. 易操作 3. 換膜、維修方便 4. 可機械清洗	1. 結構緊湊 2. 單位體積內膜面積大 3. 單體價格低廉 4. 適合工程實際應用	1. 裝填密度高 2. 占地面積小 3. 耗能低 4. 通量大 5. 可反洗 6. 預處理要求低 7. 適合工程實際應用(工業廢水/生活污水/水回收等)
缺點	1. 體表面積小 2. 通量小 3. 處理能力偏低 4. 不易清洗 5. 不可反洗 6. 僅適合小規模測試	1. 裝填密度低 2. 單位體積內膜面積小 3. 耗能大 4. 不可反洗 5. 僅適合中、小規模測試	(1)預處理要求高 (2)不能承受高壓 (3)易污染 (4)不易清洗 (5)不可反洗	1. 製作工藝較為複雜，製造商較少

本計畫在實驗室測試將採用中空纖維納濾膜(新加坡公司的濾膜產品—NanoPure)，其組件參數如表 3.3-2 所示。內部由聚醚砜(polyethersulfone, PES)改性中空纖維所組成，表面具選擇性帶電特性，在保留所有中空纖維納濾膜優點同時，可依實際應用需求選擇性地去除水中重金屬、硬度和有機化學物質等有害雜質，且能保留水中一定的礦物質含量。另模場試驗零組件取得方便性，將先採用卷式納濾膜。



表3.3-2 中空纖維納濾組件參數

膜參數	膜材質	改性 PES
	膜纖維內徑	0.7 mm
	膜電荷	負電
	過濾方式	由內到外，錯流
	截留分子量(MWCO)	300 Dalton
進水參數	最大跨膜壓力	4.5 bar
	純水通量(25℃條件下)	20-25 LMH/bar
	最高總懸浮固體	~100 ppm
	最高濁度	~30 NTU
	最高粒徑	~160 μm
操作參數	溫度	10-40 ℃
	pH	0-14
	最大耐氯範圍(pH 9 條件下)	250000 ppm-hr

實廠操作上，傳統水回收處理系統因多採雙膜法(UF+RO)，所須前處理要求繁瑣，然採用中空纖維納濾膜具前處理簡單、所需占地面積減少 15-25%、固定投資減少 10-30%、運營費用減少 15-30%，碳排放更是減少 50-65%等優勢，為一綠色且新穎膜分離技術。圖 3.3-1 為傳統雙膜法與 hf-NF 水回收系統示意。

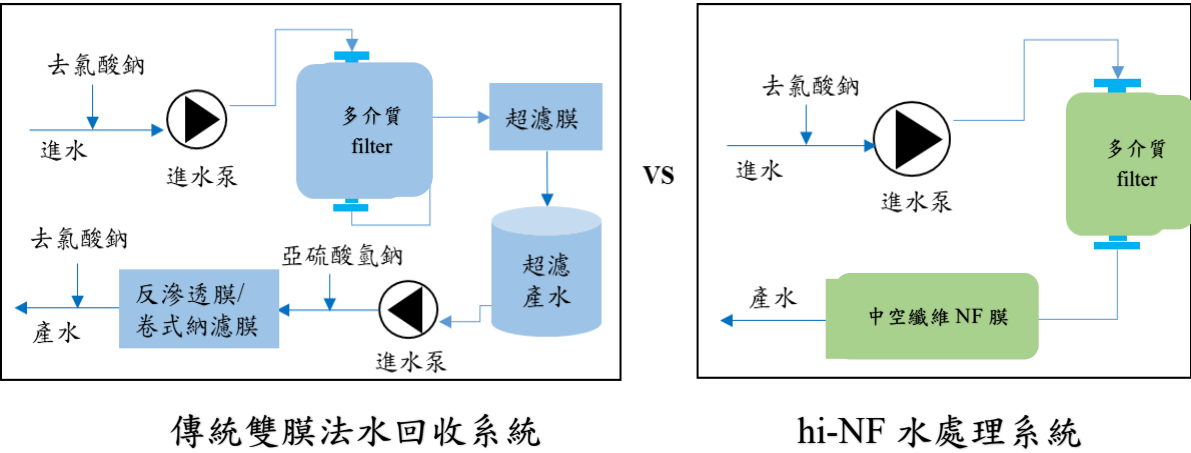


圖3.3-1 傳統雙膜法與 hi-NF 水回收系統差異



應用地下水抽出處理(P&T)系統搭配預濃縮以可再生型吸附顆粒(RAP)削減地下水中 PFAS

中空纖維納濾膜在全球多處如美國、中國、印度和東南亞多國等地區已有實廠案例(圖 3.3-2)，應用領域遍及紡織工業、工業廢水及生活污水處理與回收再利用、飲用水處理和地下水與地表水處理等。

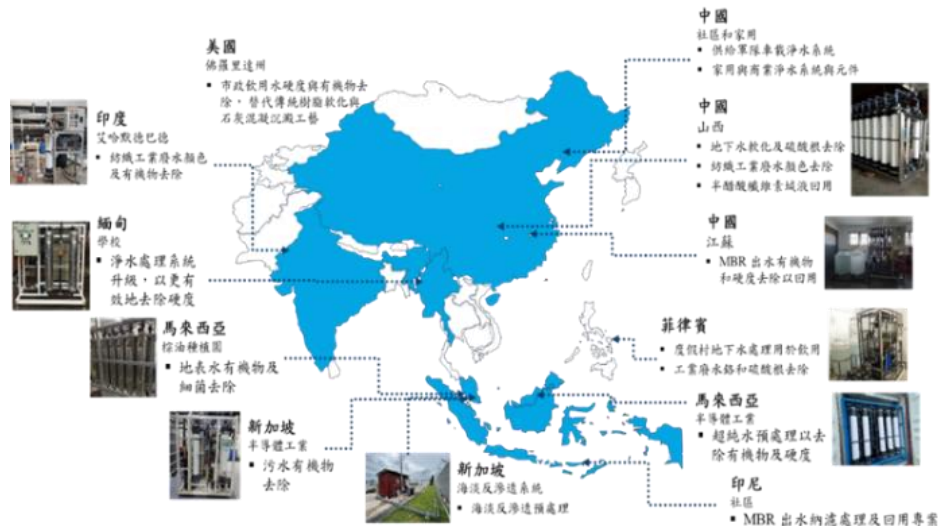


圖3.3-2 中空纖維納濾膜全球應用案例

另一荷蘭 NX Filtration 公司已有使用他牌中空纖維納濾膜—dNF40 對 PFAS 地表水污染場址進行現地試驗，其對多種 PFAS 皆有極佳的截留率。數據如圖 3.3-3 所示，dNF40 在各種 PFAS 上的截留率皆可> 90%，即表示該技術作為 PFAS 預濃縮串接 RAP 技術將其削減構想可行性甚高，值得深入研究。

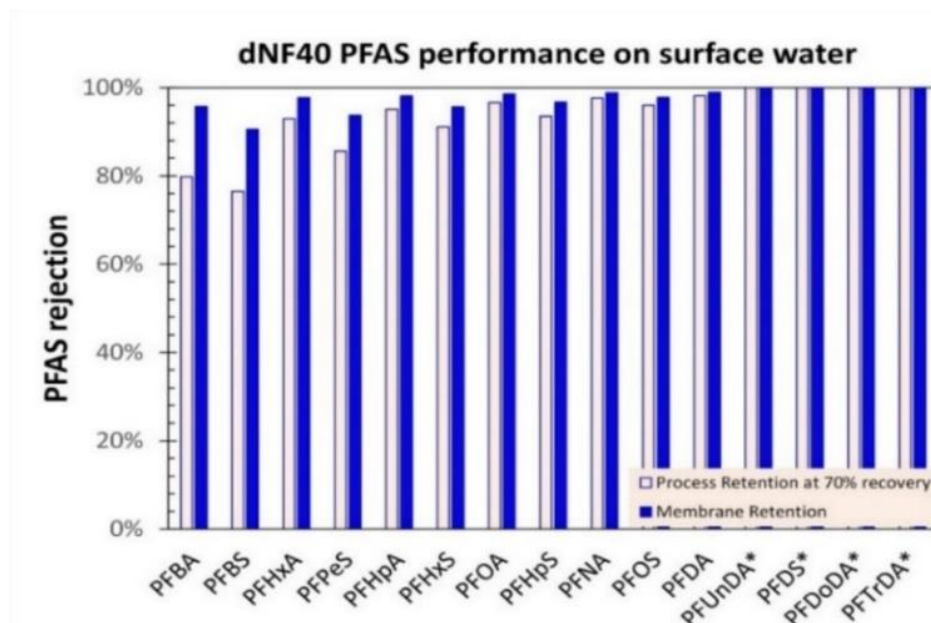


圖3.3-3 中空纖維納濾膜在各種 PFAS 上的截留率



3.4 地下水抽出處理系統

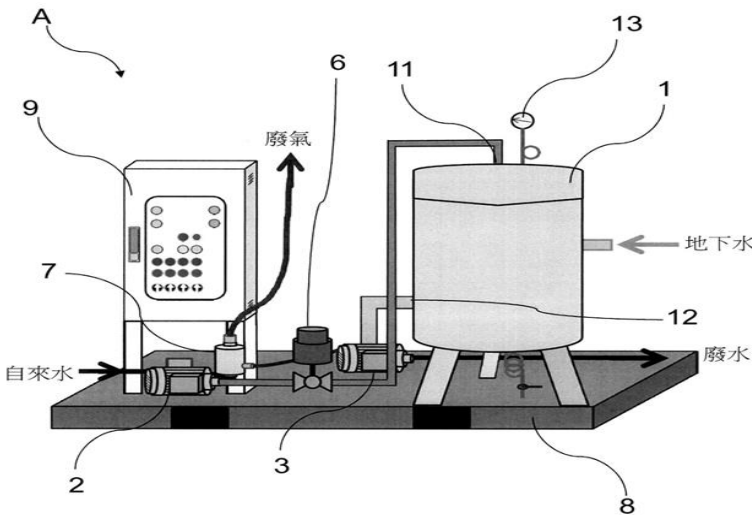
本模場試驗擬參考採用之地下水抽出處理系統(pump & treat system, P&T) (圖3.4-1)，為業興環境科技股份有限公司分別在臺灣及大陸取得的專利(臺灣專利字號 M528311號、中國專利字號第5543538號)。P&T 包括：一氣液分離槽，連接至少一地下水井場，該氣液分離槽設有一氣體輸出口及一液體輸出口；一真空泵，連接該氣體輸出口，藉該真空泵使該氣液分離槽形成真空負壓狀態，自該地下水井場抽出廢氣及廢水，同時達到氣液分離效果，並分別由該氣體輸出口及該液體輸出口排出廢氣及廢水，而後分別導入廢氣處理系統及廢水處理系統進行處理；以及一排水輸送泵，連接該液體輸出口將廢水排出，藉以加快移除地下之污染物。本系統體積小、占地使用面積少，方便移動至任何需要處理污染之地區。

一般地下水抽出處理系統，需於每一口抽水井設置抽出設備，並將抽出至一大型水處理設備。其中抽出設備之設置後如需調整，需進行設備拆卸及重新安裝，大型廢水處理設備則體積大、佔地廣，如需移動時會遇到拆卸麻煩、組裝緩慢、管線與訊號線等重新拉線問題，且於施工空間受限之工廠中，須另覓空間擺放廢水處理系統，增加工程困難度，實為相關技術領域者目前所迫切需要解決之問題。

本系統提供一種結合人機介面自動控制處理設備，應用高真空及流量控制器，可自動化持續抽出污染區內單口或多口抽水井中之地下水，並可同時移除純相有機物和受污染地下水，分離污染之氣體及液體分別予以淨化處理，有別於傳統抽氣抽水處理方法及設置方式，提供一種增加抽水處理效能及操作彈性，並且體積小、占地使用面積少，方便移動至任何需要處理污染之地區，方便維修保養之水處理系統。此外，特別針對存在自由相浮油污染場址，尤其是在自由相之浮油尚未移除之前，並不適合直接利用生物或化學方法進行整治，利用本系統可於短時間內有效移除自由相浮油，以利搭配後續化學或生物整治技術實施。本次試驗計畫係針對低濃度、數個 ppb 等級或更低濃度的全氟化物溶解相進行可行性處理研究，因此，應用本系統應可快速且穩定提供後端處理單元受 PFAS 影響的地下水，進行處理成效試驗。



應用地下水抽出處理(P&T)系統搭配預濃縮以可再生型吸附顆粒(RAP)削減地下水中 PFAS



1	氣液分離槽、連接至少一地下水井場	8	基板
2	真空泵	9	控制器
3	排水輸送泵	11	氣體輸出口
6	開關閥	12	液體輸出口
7	消音器	13	負壓表

資料來源：中華民國專利字號 M528311號之新型專利說明書

圖3.4-1 P&T 系統示意圖



四、研究方法及過程（含工作進度甘特圖）

4.1 研究方法

本計畫係採用兩種不同領域的高端處理技術，第一年主要為可再生型吸附顆粒(RAP)搭配地下水抽出處理系統(P&T)削減 PFAS。第二年則結合中空纖維納濾膜(hollow fiber NF)提高整體移除效能，同時評估中空纖維納濾膜在地下水 PFAS 濃度相對較低條件下的應用成效，模場試驗研究架構如圖 4.1-1。

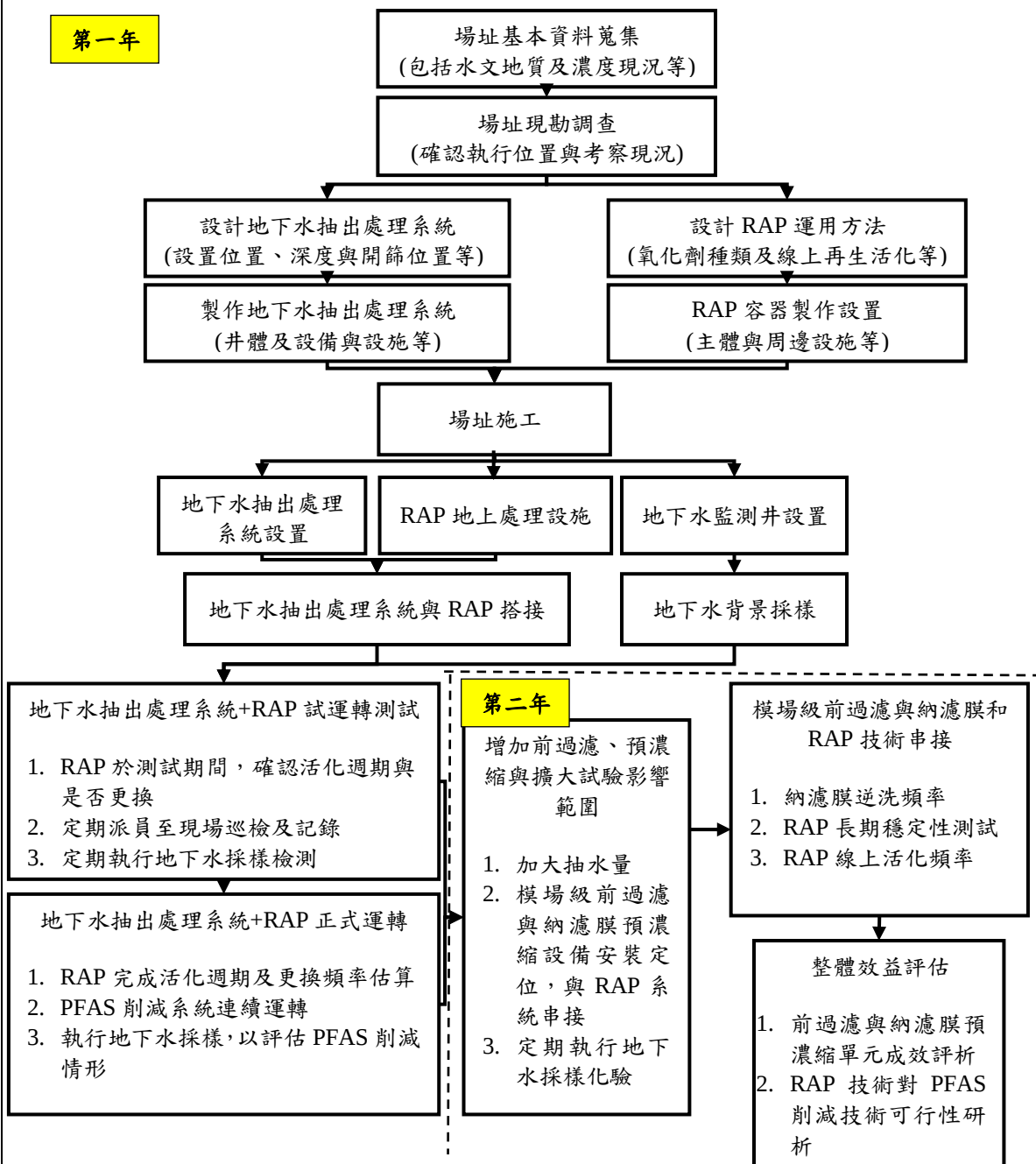


圖4.1-1 研究架構



應用地下水抽出處理(P&T)系統搭配預濃縮以可再生型吸附顆粒(RAP)削減地下水中 PFAS

4.2 實驗室測試規劃

本計畫第一年度實驗室研究架構如圖 4.2-1 所示，主要研究標的物為 PFAS，以 RAP 技術於實驗室進行測試，係從 LC/MS/MS 的 PFAS 分析方法建立、評估 RAP 對 PFAS 吸附容量及 hi-NF 預濃縮 PFAS 可行性、RAP 催化氧化可行性試驗(批次快篩試驗)、吸附/催化氧化及再生程序最佳化試驗等(項次 1-4)。後續將依循此研究架構執行一系列探討，以完成 RAP 技術削減 PFAS 成效評估(項次 5)。

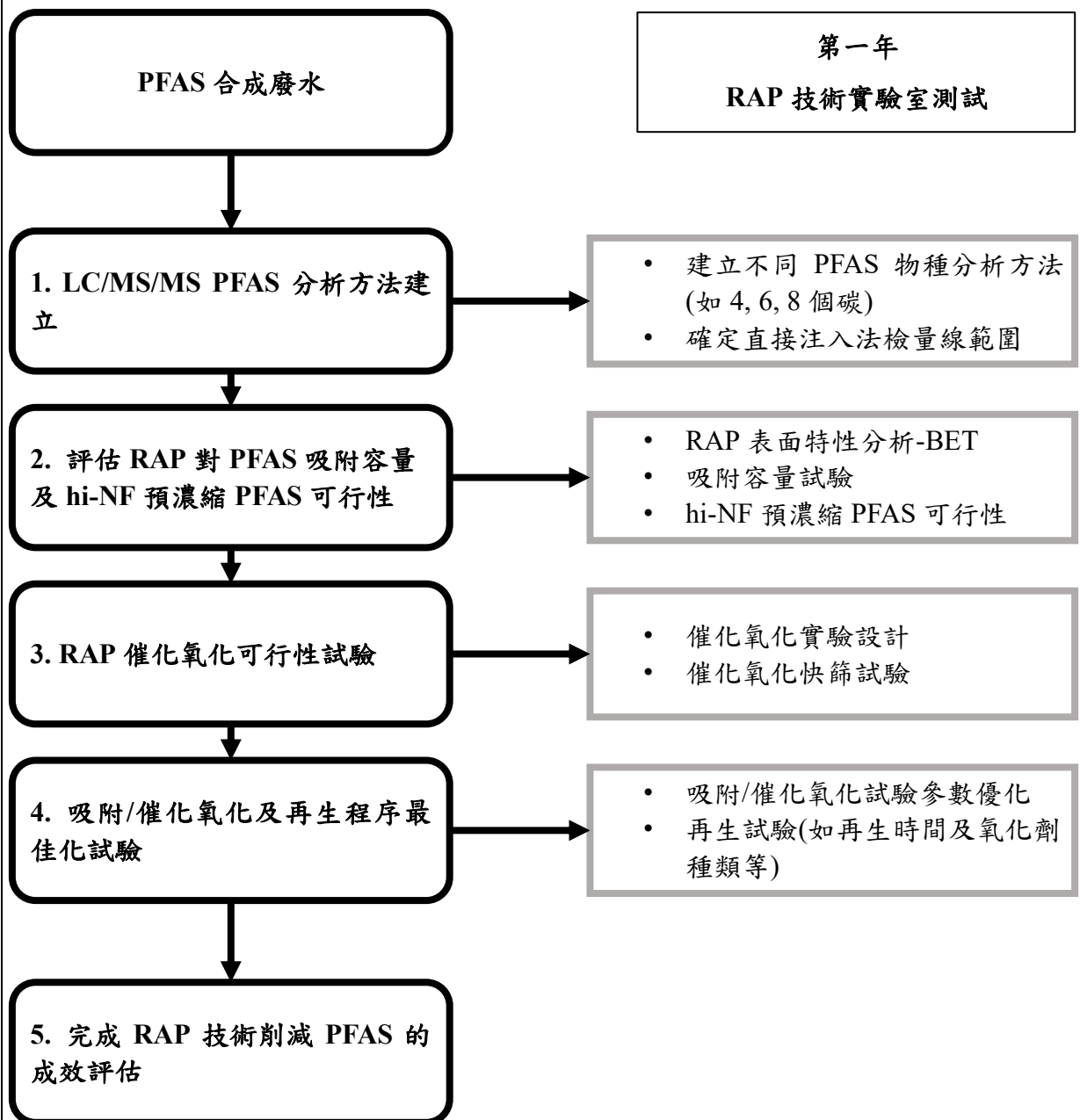


圖4.2-1 RAP 技術實驗室測試研究架構



1. RAP 氧化功能指標測試方法

為了評估 RAP 的吸附/催化氧化功能，也便於了解 RAP 是否已經毒化而需再生，參考本團隊針對難降解工業廢水高級氧化處理技術所建立的觸媒氧化功能指標測試方法，修正後訂定 RAP 的氧化功能指標測試方法，實驗流程如圖 4.2-2 所示。本測試方法以性質穩定且不易揮發的苯甲酸為測試對象，配置濃度 50 ppm 之苯甲酸合成廢水(相當於 COD 濃度 100 mg/L)，以合成廢水體積為 300 mL、RAP 量 75 mL 進行反應，使用迴旋往復式振盪箱(250 rpm)進行十個循環批次氧化測試，每批次反應時間為 30 分鐘，重覆試驗只須執行換水程序，不更換 RAP。每批次實驗後均分析反應後的 TOC，若 TOC 去除率在 5~7 次平均值需落在 80~85%，8~10 次平均值不低於 80%，即表示 RAP 仍維持正常的氧化功能。

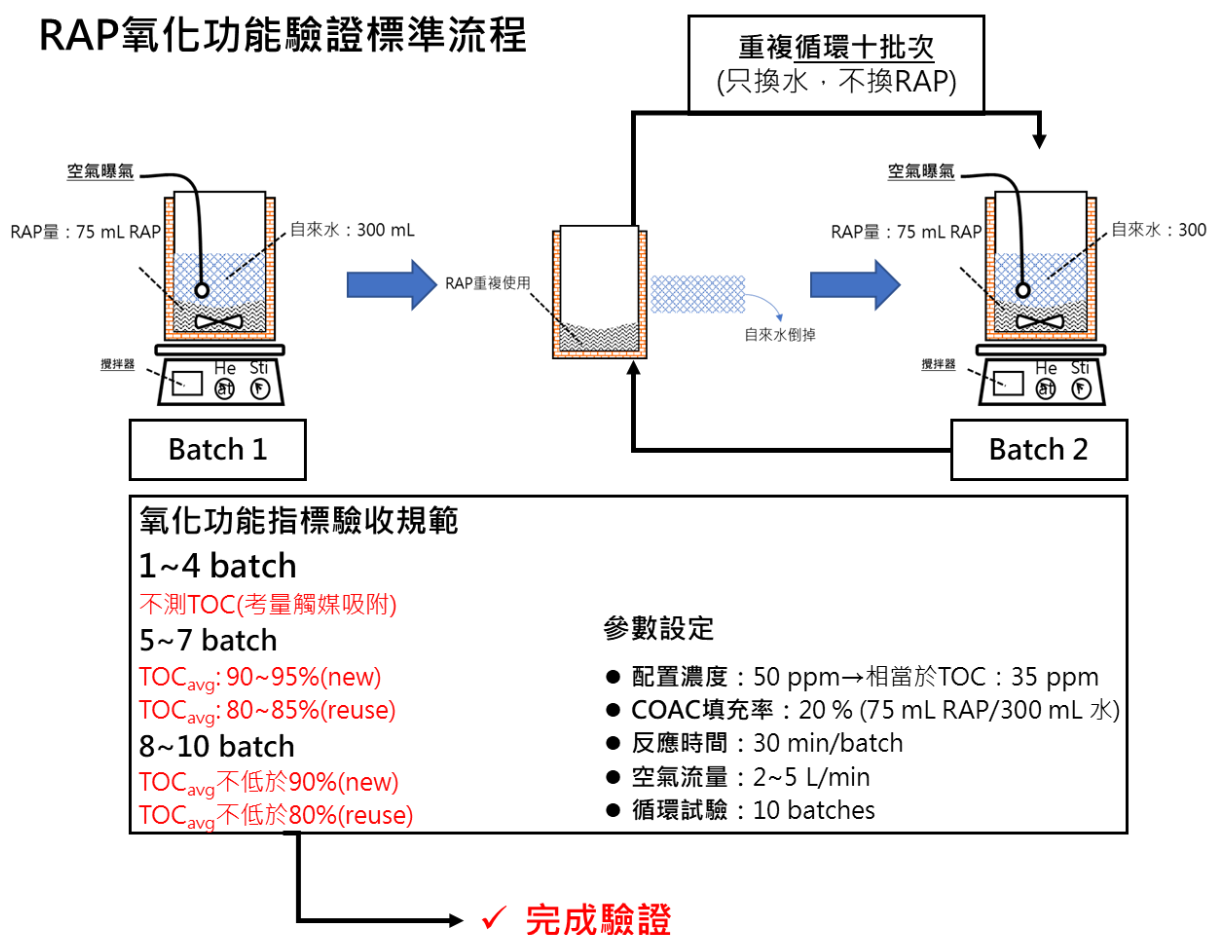


圖4.2-2 RAP 氧化功能指標驗證程序



2. RAP 失活後再活化程序

再活化程序為 RAP 日常保養，其目的係將 RAP 孔洞積碳清除。為模擬 RAP 經高濃度 PFAS 污染後，其孔洞的活性點位被污染物占滿，致使失去活性，需以較強的氧化劑進行再活化程序，使 RAP 恢復原有處理效能。本試驗參照工業廢水標準再活化程序將以添加不同劑量次氯酸鈉、80°C及曝空氣 4 小時進行觸媒孔洞及表面積碳清除，以釐清活化後氧化功能指標恢復情形，示意圖如圖 4.2-3 所示。

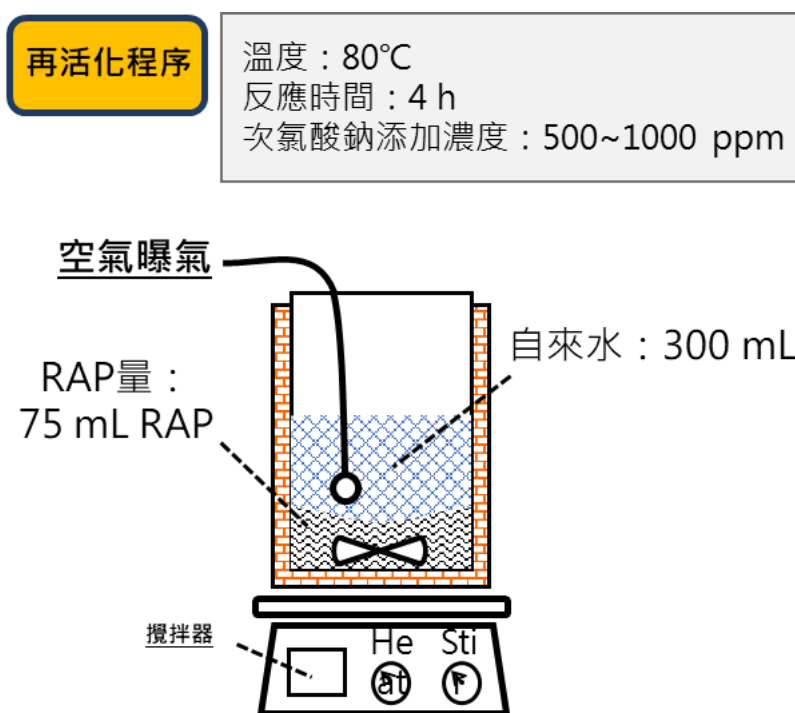


圖4.2-3 再活化程序示意圖

3. 中空纖維納濾膜預濃縮試驗

本團隊在第一年於實驗室建置了 hi-NF 預濃縮實驗裝置(如圖 4.2-4 所示)，並測試了針對 PFAS 濃縮的操作參數，以便為第二年度的模場試驗做準備。hi-NF 薄膜的表面含有聚電解質，對分子量介於 300 至 2000 Dalton 之間的有機物截留效果較好，且分子量越大時，截留率與濃縮效率也相應提高。因此，實驗室 hi-NF 濃縮的先期測試，先以截留率較差且較易取得的低分子量 PFBA (C4, 全氟丁酸，分子量 214)作為初步測試目標，找到較佳的操作條件後，再以此條件進行 PFHpA (C7, 全氟庚酸，分子量 364)及 PFOA (C8, 全氟辛酸，分子量 414)的濃縮截留效率評估。實驗室的 hi-NF 預濃縮測試示意圖如圖 4.2-5 所示。



四、研究方法及過程



圖4.2-4 實驗室 NF 模組及示意圖

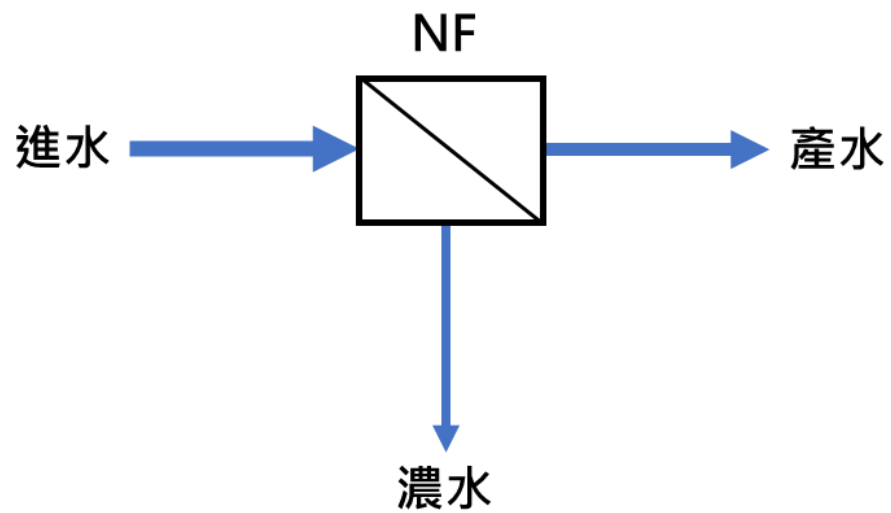


圖4.2-5 實驗室 hi-NF 預濃縮測試示意圖



4.3 模場設置規劃

1. 試驗區域背景資料

本計畫模場位於新竹市新竹科學園區新竹園區污水處理廠內，為環境部近年地下水 PFAS 調查濃度偏區域，以下就模場試驗區地理位置、地質、區域地下水文、地下水 PFAS 調查成果、及現況說明如下。

(1) 地理位置

新竹科學園區新竹園區位於新竹縣市交界處，西北邊與交通大學為鄰，西側靠近十八尖山，東北側接近關東橋，南邊毗鄰寶山鄉，園區呈東西向狹長不規則形狀。區內主要以高科技電子業為主，分為一期、二期及三期用地，中山高速公路以南北向貫穿園區。依據新竹科學園區新竹園區網站資料顯示，該園區面積約 776.75 公頃，主要為積體電路、電腦及周邊、通訊、光電、精密機械和生物技術等產業發展主軸之科學園區，為我國第一個科學園區。依產業別新竹園區內已入區登記廠商家數為積體電路 161 家、光電 68 家、電腦及周邊 48 家、通訊 41 家、精密機械 36 家、生物技術 39 家、其他 7 家，合計 400 家。新竹科學園區新竹園區位置示意如圖 4.3-1 所示。

(2) 地質與土壤

新竹科學園區新竹園區位於新竹市的東南方，園區範圍內多為紅土台地及丘陵，其高程約介於海平面以上 130 公尺至 60 公尺之間。該區出露於新竹區域的地層，主要以礫石及砂、泥互層為主，各地層依其年代由老至新為：頭嵙山層、階地堆積層、現代沖積層；區內地層分布，自地表而下依序是表土(包括回填土、礫石或風化紅土等)、礫石層(包括礫石或粗砂等)及粉砂層(包括粉砂、黏土或細砂等)，粉砂層可視為阻水層。依據經濟部地質調查及礦業管理中心的工程地質探勘資料庫資料，本計畫模場試驗區域周邊有工程地質探勘鑽孔資料 4 孔及監測井土壤取樣紀錄資料 1 處，鑽井資料顯示該區 10 公尺內淺層地質主要為棕黃色粉土，漸次夾卵礫石及棕紅色粉土質粘土、棕黃色細砂、灰色風化砂岩等。周邊地質鑽探點位詳圖 4.3-2，彙整地質資料詳表 4.3-1，地質圖詳圖 4.3-3 至圖 4.3-7。



四、研究方法及過程



資料來源：國家科學及技術委員會新竹科學園區管理局網站資料。網址：
<https://www.sipa.gov.tw/>，資料擷取日期: 2023/12/29。

圖4.3-1 新竹科學園區新竹園區地圖



應用地下水抽出處理(P&T)系統搭配預濃縮以可再生型吸附顆粒(RAP)削減地下水中 PFAS



圖4.3-2 模場周邊區域地質鑽探位置圖



表4.3-1 模場試驗區域鄰近區域地質鑽探彙整資料

項次	1	2	3	4	5
鑽孔編號	BH-1	BH-81	BH-2	BH-4	O00297
性質	工程地質探 勘鑽孔	工程地質探 勘鑽孔	工程地質探 勘鑽孔	工程地質探 勘鑽孔	環保監測井 地質剖面
鑽孔地表高程 (公尺)	71.66	84.93	85.64	67.08	70.61 (井頂高程)
孔口 X 座標(97)	250503	250377.3	250358	250633	250508.3
孔口 Y 座標(97)	2742177	2742138	2742042	2742336	2742211
鑽孔總深度 (公尺)	25.07	60.09	25.1	10	10
地下水位(公尺)	5.7	8.25	9.2	9.6	5.83
鑽探日期	(無資料)	11001	(無資料)	10010	10109
計畫名稱	[1]	[2]	[1]	[3]	[4]

計畫名稱：

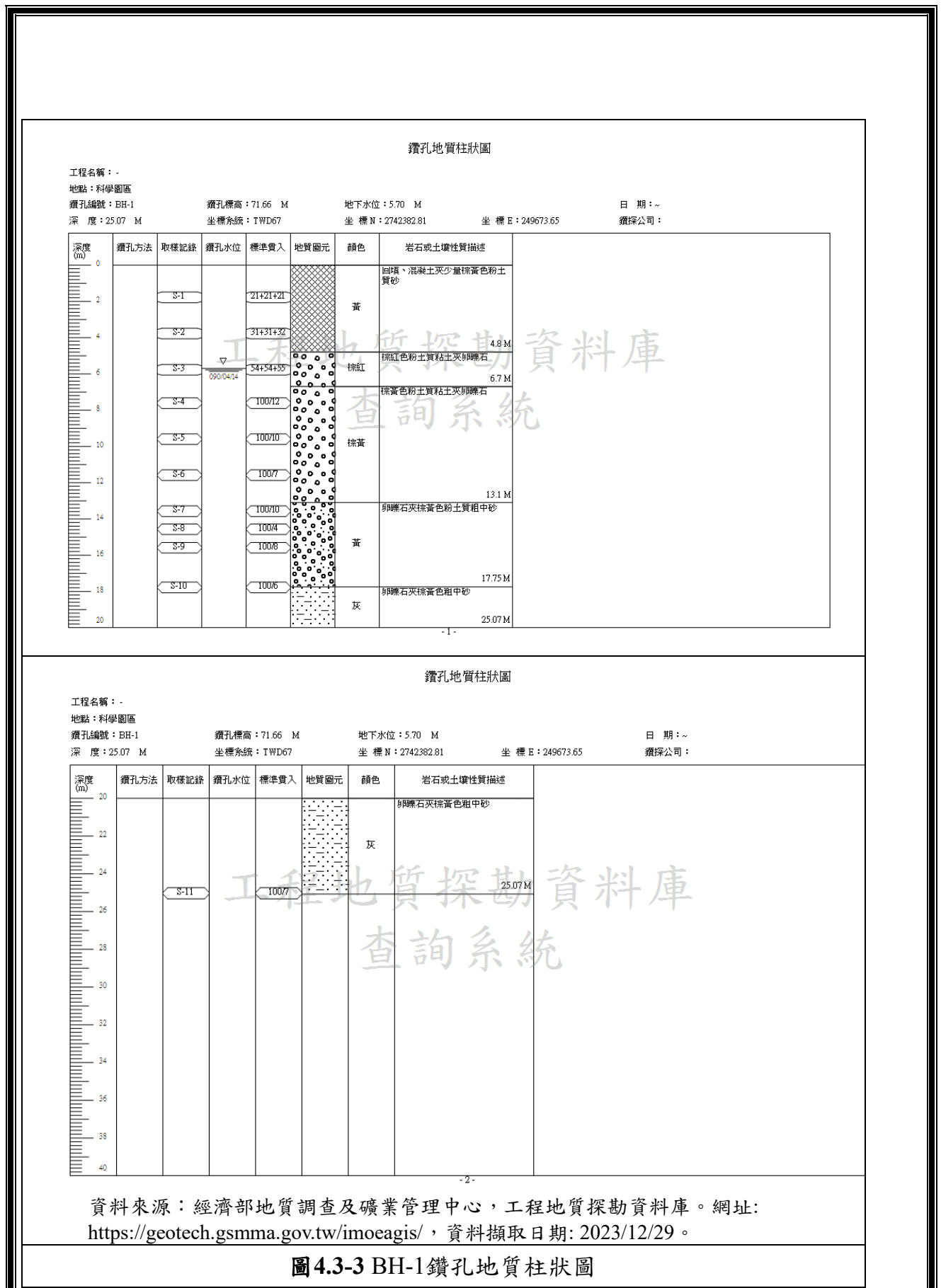
- [1] 新竹科學園區三期給水污水放流管線第三階段延伸工程鑽探試驗調查工作。
- [2] 國道1號楊梅至頭份段拓寬計畫綜合規劃暨配合工作委託技術服務。
- [3] 清華大學學人宿舍新建工程基地地質鑽探及分析工作。
- [4] 地下水有害物質環境傳輸調查及管制標準檢討計畫(第一期)。

資料來源：

- 1. 經濟部地質調查及礦業管理中心，工程地質探勘資料庫。網址：
<https://geotech.gsmma.gov.tw/imoeagis/>，資料擷取日期: 2023/12/29。
- 2. 行政院環境保護署，2013，地下水有害物質環境傳輸調查及管制標準檢討計畫(第一期)。

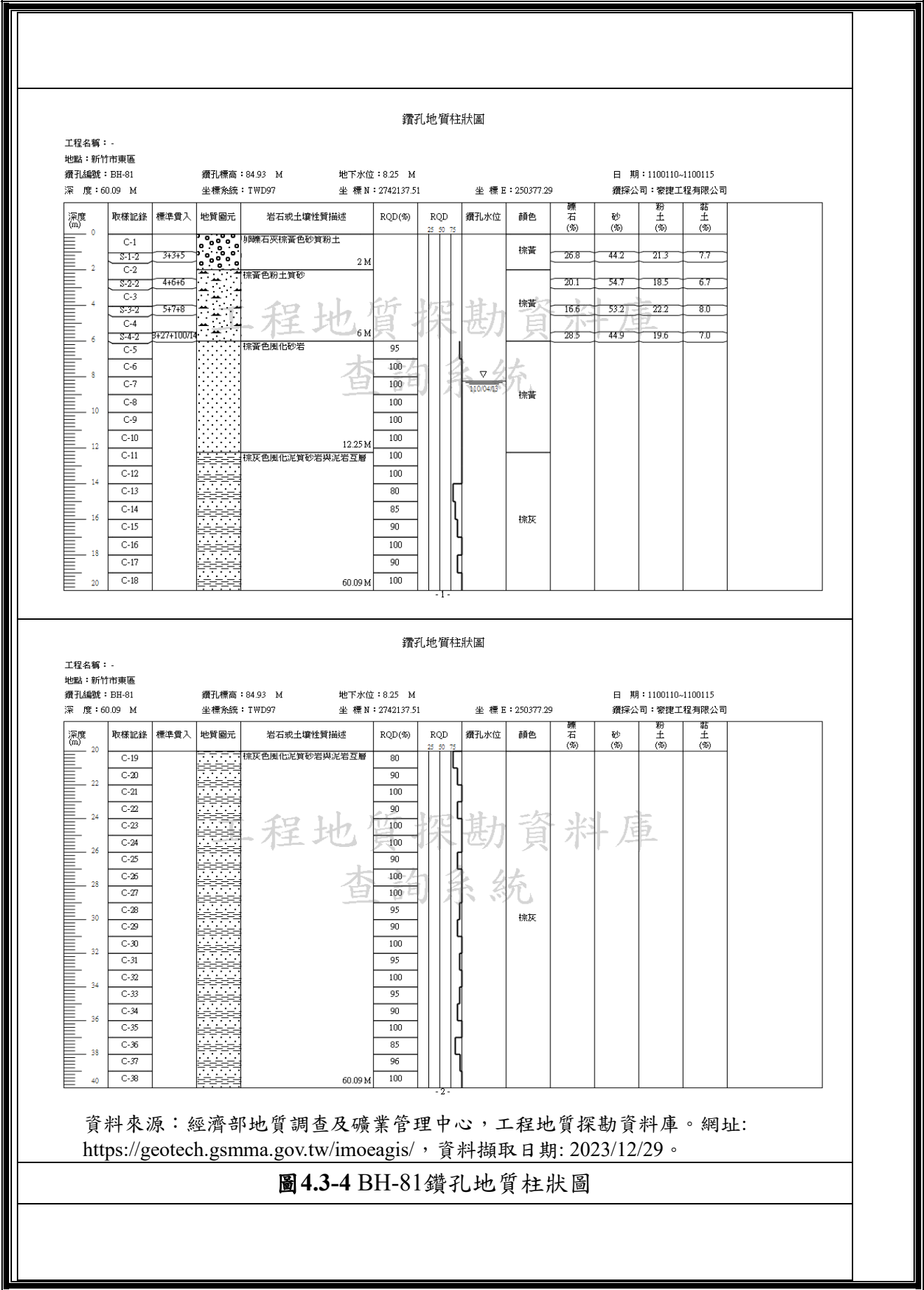


應用地下水抽出處理(P&T)系統搭配預濃縮以可再生型吸附顆粒(RAP)削減地下水中 PFAS



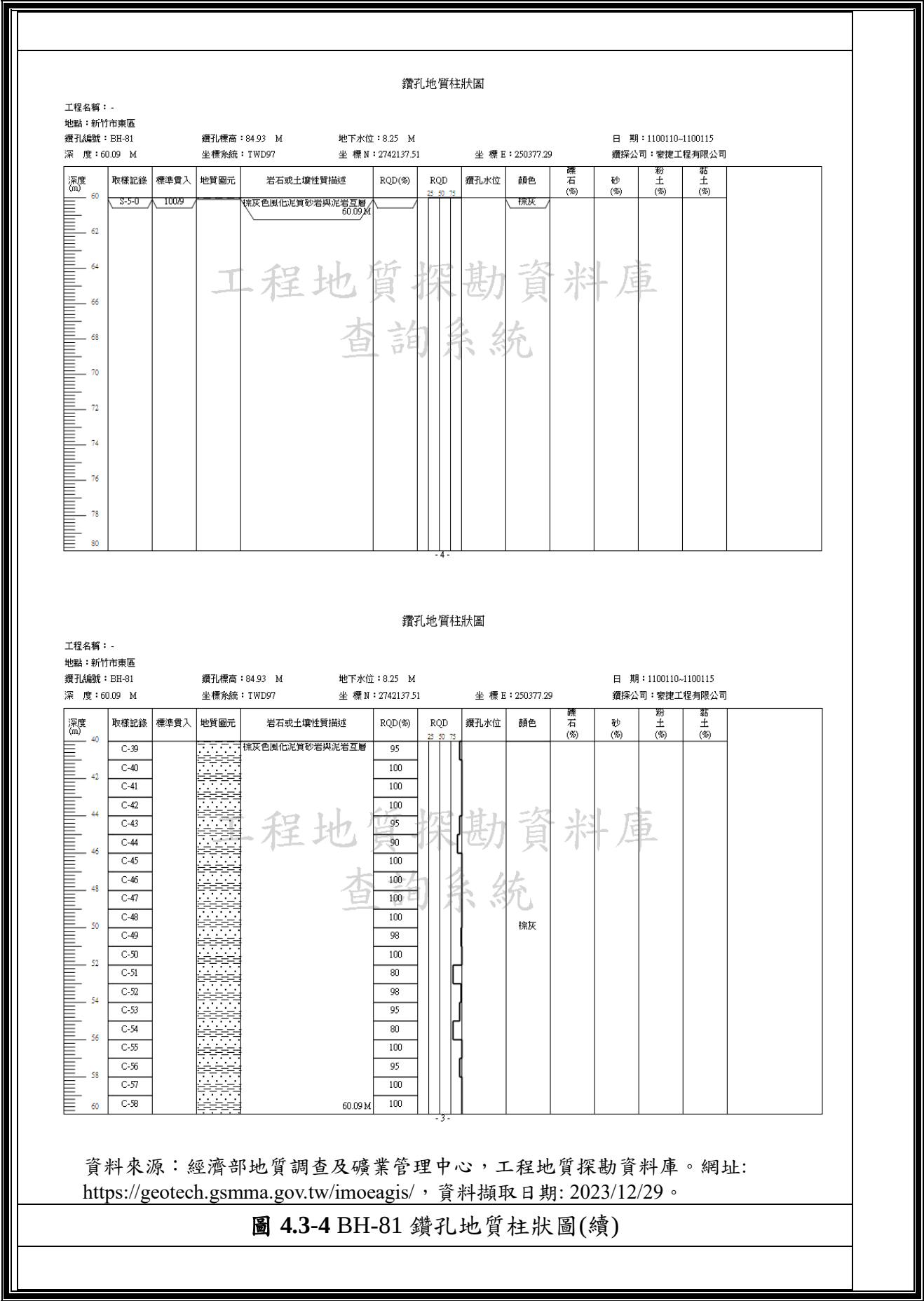


四、研究方法及過程



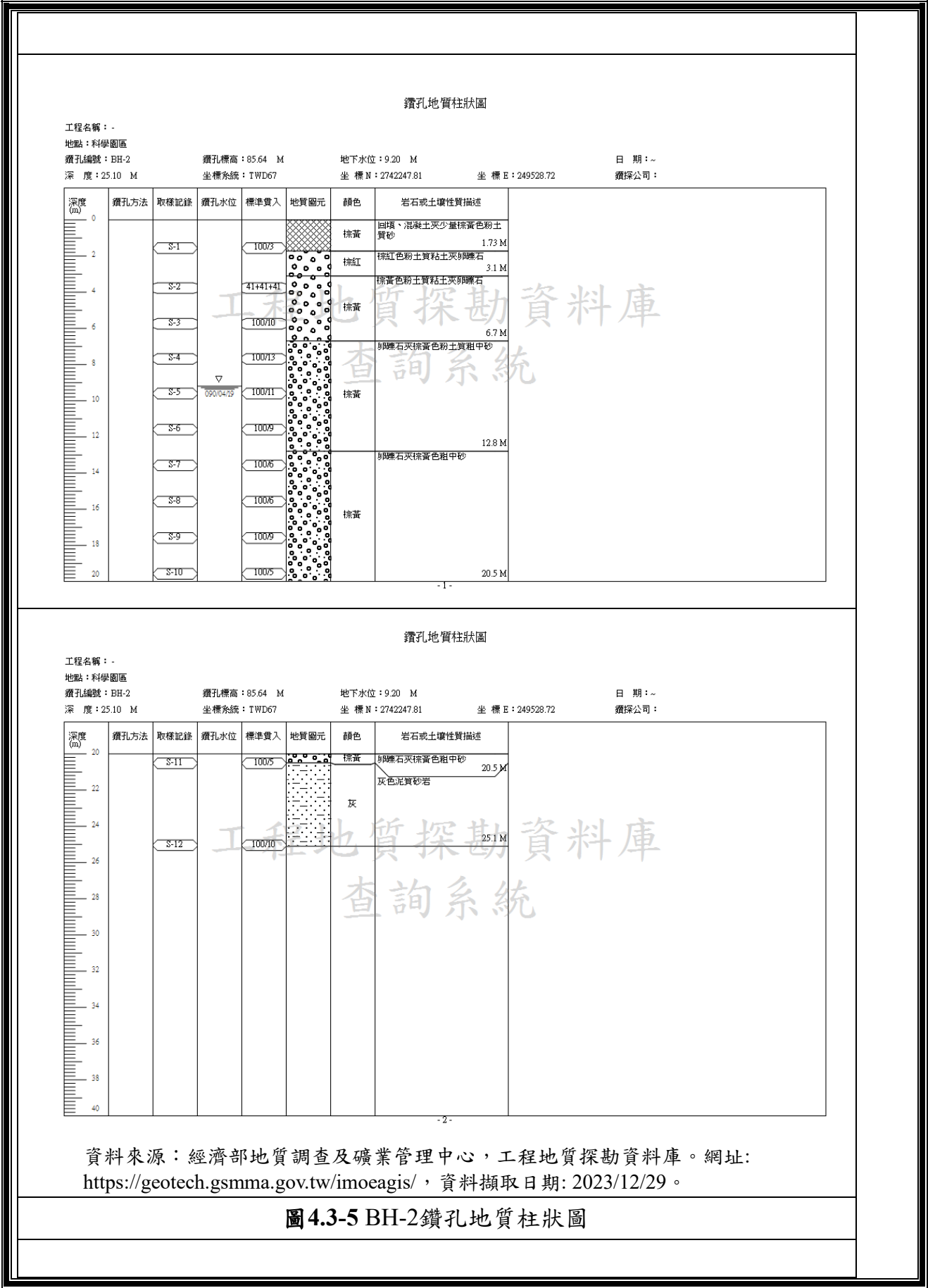


應用地下水抽出處理(P&T)系統搭配預濃縮以可再生型吸附顆粒(RAP)削減地下水中 PFAS





四、研究方法及過程



鑽孔地質柱狀圖

工程名稱：-
地點：科學園區
鑽孔編號：BH-2
深度：25.10 M

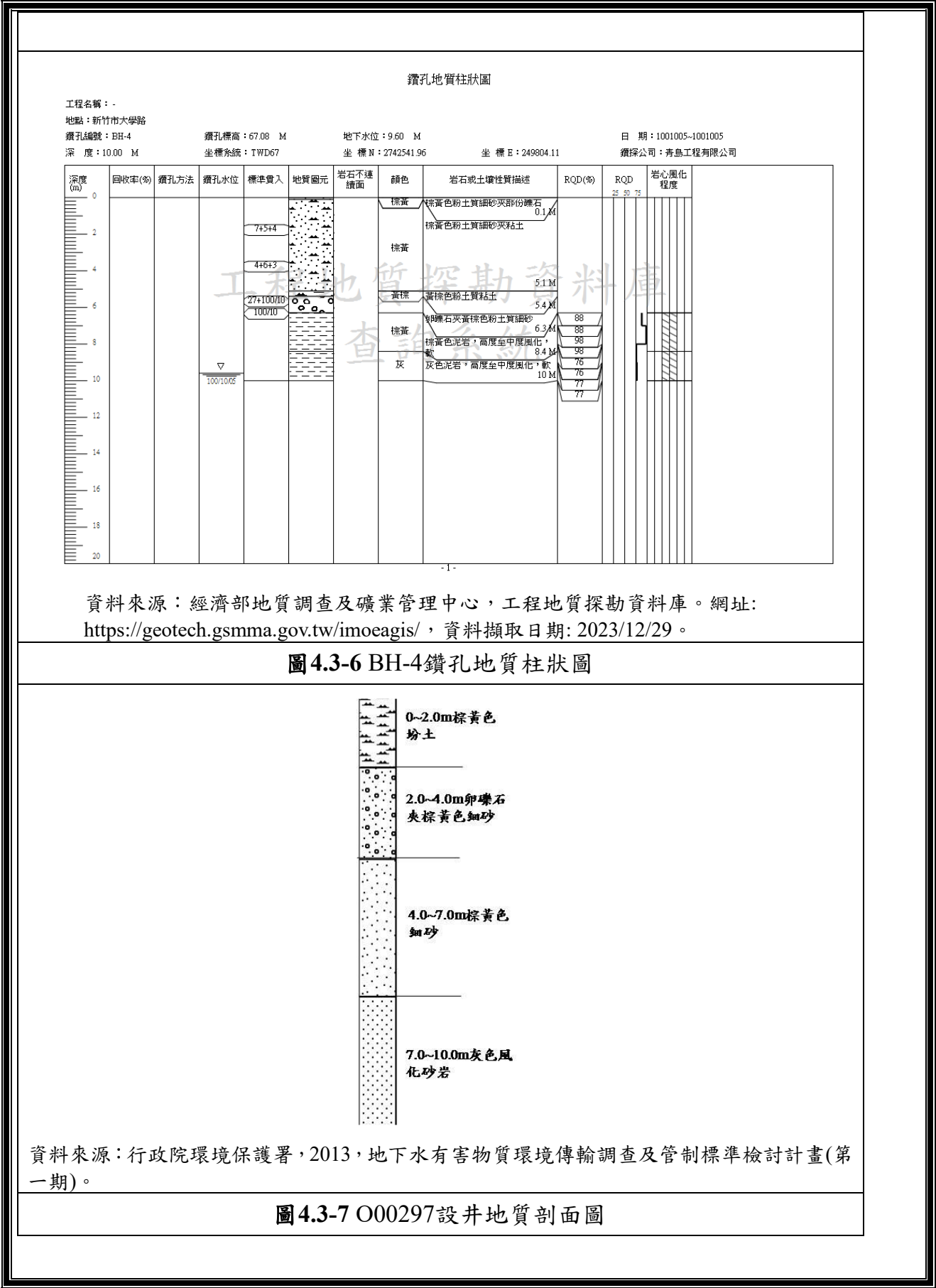
鑽孔標高：85.64 M
坐標系統：TWD67

地下水位：9.20 M
坐標 N：2742247.81
坐標 E：249528.72

日期：~
鑽探公司：



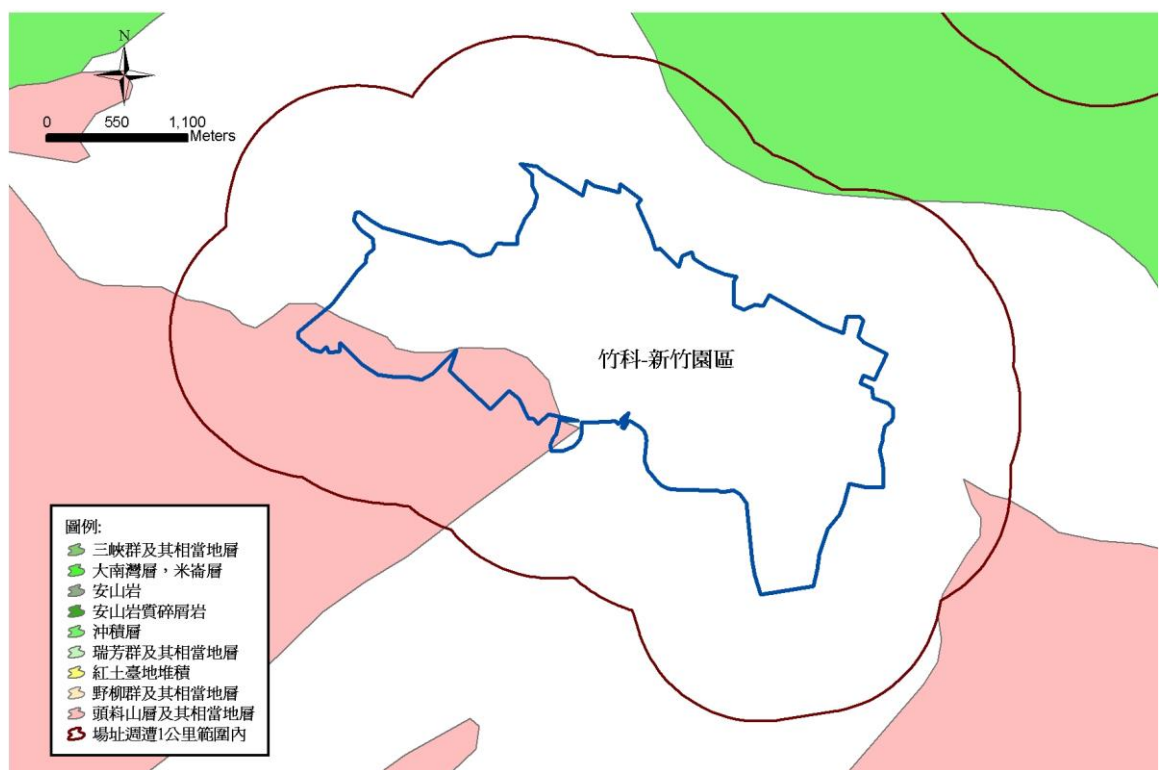
應用地下水抽出處理(P&T)系統搭配預濃縮以可再生型吸附顆粒(RAP)削減地下水中 PFAS





(3) 區域地下水文

新竹科學園區位於頭前溪流域和客雅溪流域範圍內，屬臺灣十大地下水區之「新竹苗栗臨海地區」之一部分，最富地下水資源的沖積層，多分布於台地或丘陵之間，其厚度僅約二十餘公尺。由新竹科學工業園區歷年地下水水位量測紀錄顯示，第一含水層之地下水水位約在地表下 15~20 公尺間，為一非侷限含水層，其組成物為卵礫石沉積物。該園區地下水流向大致在園區中間處匯集後，再分別往北方及南方流去，地表坡度約 7.96，地下水水位約為地表下 8.7 公尺，含水層水力傳導係數約 1.93 m/day。西南方地層為頭嵙山地層，竹科-新竹園區水文地質概況詳圖 4.3-8。



資料來源：環境部環境管理署，工業區燈號分級資訊展示系統。
<https://sgwref.epa.gov.tw/sgcm>，資料擷取日期：2023/12/29。

圖4.3-8 竹科-新竹園區區域水文地質概況



(4) 地下水 PFAS 背景濃度說明

依據環境部「地下水水質管理及污染預防示範計畫」期末報告，國內地下水 PFAS 調查包括科學園區、紡織產業及其他產業(特用化學品、電鍍業、金屬表面處理業等)，調查成果詳表 4.3-2，其中於 108 年與 111 年兩次調查科學園區，結果顯示全氟辛酸(PFOA) 0.0000015~0.0006387 mg/L (108 年)，ND~0.0005647 mg/L (111 年)；全氟辛烷磺酸(PFOS) ND~0.0047642 mg/L (108 年)，ND~0.00414 mg/L (111 年)。新竹科學園區新竹園區為地下水 PFAS 濃度測得相對較高區域，又以鄰近竹科-新竹園區污水處理廠內監測井 O00297 其全氟辛烷磺酸(PFOS)為歷次調查濃度最高點位，故本計畫以監測井 O00297 鄰近區域作為模場試驗區，現場勘查照片詳圖 4.3-9，模場試驗區位圖詳圖 4.3-10。

表4.3-2 地下水 PFAS 調查數據彙整

調查物質	全氟辛酸(PFOA)		全氟辛烷磺酸(PFOS)	
	108 年	111 年	108 年	111 年
調查年度	108 年	111 年	108 年	111 年
最小值	0.000001	ND	ND	ND
最大值	0.001454	0.00152	0.004767	0.00414
平均值	0.000105	0.00012	0.000071	0.000176
中位數	0.000045	0.000014	0.000007	0.000008
樣品數	93	29	93	29

資料來源：行政院環境保護署，2022，地下水水質管理及污染預防示範計畫。

註：單位為 mg/L



四、研究方法及過程



圖4.3-9 模場區域現場現勘照片



圖4.3-10 模場區位圖



應用地下水抽出處理(P&T)系統搭配預濃縮以可再生型吸附顆粒(RAP)削減地下水中 PFAS

2. 模場設置規劃

本計畫模場試驗選用地下水抽出處理系統(P&T)搭配預濃縮以可再生型活性碳吸附顆粒(RAP)削減地下水中 PFAS。本計畫分為兩年，第一年度(113 年)已完成設置地下水抽出處理系統(P&T)及可再生型吸附顆粒(RAP)設施，進行地下水中 PFAS 削減模場試驗，處理系統流程設計、現場空間配置與組裝細部設計如圖 4.3-11、4.3-13 及圖 4.3-14。第二年度計畫(114 年)則增加前過濾與納濾膜預濃縮設備於 RAP 設施前，以提高整體移除效能，同時評估納濾膜在地下水 PFAS 濃度相對較低條件下的應用成效，示意圖如圖 4.3-12。

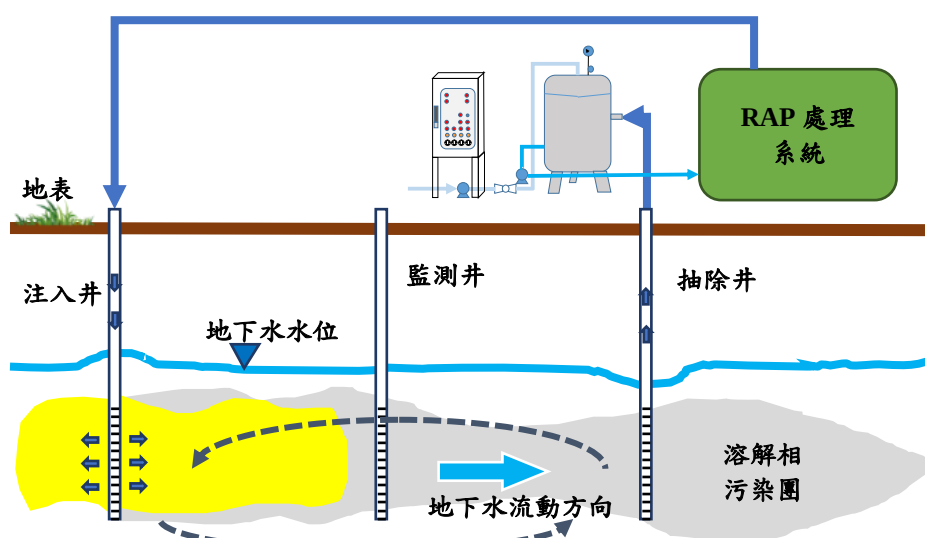
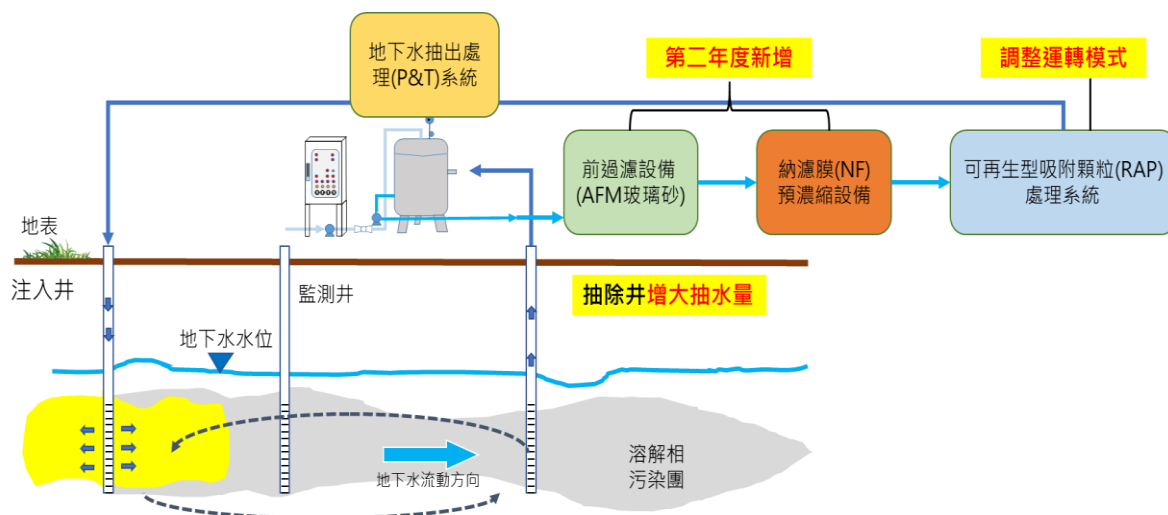


圖4.3-11 RAP 搭配 P&T 系統示意圖(第一年)



註：考量現場地線管線複雜且可施作空間有限，第二年考慮以提高抽水量方式增加處理量

圖4.3-12 前過濾與納濾膜預濃縮設備搭配 RAP 及 P&T 系統示意圖(第二年)



四、研究方法及過程



圖4.3-13 RAP 搭配 P&T 系統設備空間配置圖

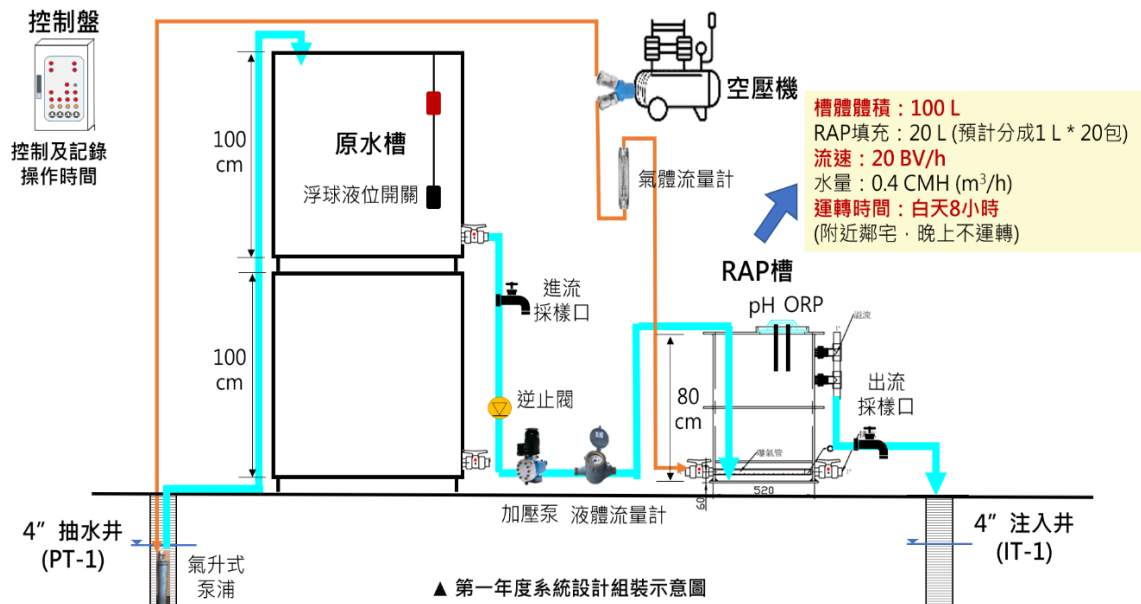


圖4.3-14 系統設計組裝示意圖



(1) P&T 系統設置

依試驗區域背景區域地質、區域性地下水流向及地下水 PFAS 調查結果，並考量試驗區域周邊環境、地下水管線限制等因素，擇定抽除井、注入井及處理系統設置位置，作為規劃設井深度及處理系統設計之依據。參考周邊既有監測井 O00297 資料，井深為 10.3 m，開篩區間為 4.3-10.3 m，地下水位距井頂 6.225 m(113 年 1 月量測)、水力傳導係數為 3.25×10^{-5} m/sec，地表至地表下 2 m 為棕黃色粉土、地表下 2-4 m 為卵礫石夾棕黃色細砂、地表下 4-7 m 為棕黃色細砂、地表下 7-10 m 為灰色風化砂岩。

P&T 系統抽水井與注入井原則各設置 1 口 4 吋井，井深以不超過 12 公尺為原則。鑿井工法採旋鑽法，以氣旋式鑽堡進行施作，設置前依管理單位規定辦理相關施工申請，並為避免破壞地下管線及結構，確保施工安全，設井前邀集園管局與各管線單位於 113 年 1 月 15 日至現場進行會勘(現場照片如圖 4.3-15)，釐清周邊管線埋設情形，確認設井位置未影響園區內管線配置或後續施工規劃。實際設井前以透地雷達進行地球物理探測，搭配人工試挖至 2 公尺確認施作位置下方無地下管線或結構物經過，抽水井與注入井設置完成後，需進行完井，避免細小顆粒進入井內造成水樣混濁，造成抽除處理系統運轉時堵塞及不利水質分析。



圖4.3-15 設井前管線會勘現場照片



P&T 系統在抽水泵的選用，由於試驗區周邊水力傳導係數為 $3.25 \times 10^{-5} \text{ m/sec}$ ，初步判斷透水性應不佳，考量若地下水位洩降過大或是回水過慢時，為不影響抽水功能，擬選用氣升式泵浦為原則。氣升式泵浦是以壓縮空氣為動力，根據聯通器的基本原理設計的一種抽水設備，它主要由三部分筒體連線而成：下筒開有進水口；中筒是套筒狀氣室，其中間是水流通道，氣室外側壁開有一個連線進氣管的接口，氣室內壁上鑽有噴氣口；上筒是揚水管。具有可過濾，成本低，噪音小，能耗低，又不需經常維護，使用廣泛靈活的優點。另考量該區位於污水處理廠邊緣並鄰近民宅，原則上將選用低噪音設備及系統運轉時段原則為日間運作，避免影響周邊居民。

(2) RAP 處理系統(第一年)

抽出之地下水先暫存於 1 噸桶槽或是直接進入 RAP 系統單元。RAP 系統規劃為 1 個長 50 cm × 寬 50 cm × 高約 80 cm 有效體積 100 L 的 PP 反應槽，反應槽內預計填充 10-20% RAP，並將其包覆於透水布內防止 RAP 隨水流流失，同時保有一定接觸空間，以透過曝氣氧化或添加適量氧化劑方式提供 RAP 表面 Ru 金屬提升氧化態數將 PFAS 斷鍵削減，處理後的水原則上會設計以重力流動方式回灌至相對上游的注入井中，若有需要，將再裝設泵浦幫助回灌。

於第一年度先使用曝氣方式，使其表面貴金屬氧化物 Ru 呈氧化態提高以對 PFAS 破壞斷鍵、及其處理成效並探討中間產物為何。另考慮使用不同氧化劑如雙氧水或次氯酸鈉，以少量添加方式以維持 RAP 活性同時對水體中其他有機物提供較強的氧化效果加以去除。

(3) 前過濾設備與納濾膜預濃縮搭配 RAP 處理系統(第二年)

於第二年度規劃再加大抽水量時，透過前過濾設備與納濾膜預濃縮方式試驗評估在地下水 PFAS 濃度相對較低條件下的 RAP 技術應用成效。構想係將新增的兩項設備串接於 RAP 系統之前，並參照第一年實驗室測試之回收率、跨膜壓力、迴流時間、化學清洗時間及正/逆洗頻率的最適參數，且根據現場實際情況做調整，以測試評估地下水 PFAS 濃度相對較低條件下的應用成效。增大試驗範圍的部分，試驗區域因位於污水處理廠放流口附近，有高壓電塔、放流水匯合井、放流抽水巴歇爾計量槽、放流抽水站及地下管線，地下管線複雜且可施作空間有限，因此第二年擬以加大抽水量方式，達到提升地下水處理量的目的，期望能增大試驗影響範圍。



(4) 模場級處理系統測試及運轉

系統正式運轉期間仍會定期進行設備巡檢，巡檢表單如下表 4.3-3，預計操作查核事項分成系統監測暨操作參數和系統運轉狀態兩部分，發生異常狀況時即時維護，以確保系統正常運轉。

此外，本計畫後續將評估利用地下水模擬系統(groundwater modeling system, GMS)或環境部地下環境分析模式平台(Taiwan subsurface environmental simulation model platform, TWESMP)，依據試驗區域水文地質特性，建置本場址之地下水流模式，透過設定抽水井與注入井(位置、抽水泵放置深度、抽/注水流率等)，模擬地下環境變化狀態，了解抽水影響範圍。

(5) 定期採樣分析

為掌握處理系統對地下水中 PFAS 削減成效，試驗期間定期進行水質採樣檢測分析，監測頻率預計為系統運轉前背景採樣 1 次，爾後監測頻率為第 1 個月每週 1 次，第 2 個月調整為每 2 週 1 次，自第 3 個月起再調整為每月 1 次至第一年專案結束前一個月。檢測項目為 PFOS、PFOA、氟鹽、基本水質項目如 pH、水溫、ORP、導電度、濁度等，此外將額外擬嘗試進行 PFOS 及 PFOA 氧化轉換後的中間產物定性分析，以確認 RAP 對 PFOS 及 PFOA 的破壞轉換成效。所有採樣工作原則上規劃由本團隊自行執行，預計地下水採樣方法將參照 NIEA W103.56B 監測井地下水採樣方法執行，RAP 處理單元之進出流水的採樣，則參考 NIEA W109.53B 事業放流水採樣方法執行。PFOS 及 PFOA 的分析方法將參考水中全氟與多氟化合物檢測方法—液相層析串聯式質譜儀法(NIEA W542.51B)、水中氟鹽的分析方法將參考水中氟鹽檢測方法—氟選擇性電極法 (NIEA W413.52A)。有關 PFOS 及 PFOA 的採樣分析，所有實驗器皿、採樣工具、溶劑洗瓶及管路避免使用鐵氟龍材質。實驗器皿先用甲醇潤洗，存放於乾淨之環境自然風乾。儀器內部含鐵氟龍材質的配件，置換成其他如不銹鋼或聚醚醚酮(polyetheretherketone, PEEK)材質，以去除來自儀器設備的背景值。



四、研究方法及過程

表4.3-3 模場系統巡檢紀錄表

模場試驗系統巡檢紀錄表

日期：_____年_____月_____日 天氣：☐晴 ☐陰 ☐雨 ☐其他_____

一、校正紀錄：

- 1. pH 計使用緩衝溶液(Buffer)【 / / 】，儀器測值為：【 / / 】。
- 2. 導電度計使用標準液【 】 $\mu\text{S/cm}$ ，儀器測值為：【 】 $\mu\text{S/cm}$ 。
- 3. 溶氧計滿點確認之讀值：【 】 mg/L 。
- 4. 氧化還原電位計標準液之氧化還原電位值【 】 mV ，儀器測值為：【 】 mV 。
- 5. 濁度計標準液之濁度值【 】 NTU ，儀器測值為：【 】 NTU 。
- 6. 現場 pH sensor 標準液【 / 】，儀器測值為：【 / 】。
- 7. 現場 ORP sensor 標準液【 】，儀器測值為：【 】 mV 。

二、操作紀錄：

紀錄時間	紀錄數值	RAP 單元			控盤
		液體流量		氣體流量	用電量
		L (累積)	L/min (瞬時)	L/min	度

三、水質分析：

紀錄時間	紀錄數值	RAP 單元															
		進流水					RAP 槽內						出流水				
		Temp.	pH	EC	ORP	濁度	Temp.	pH	EC	ORP	DO	濁度	Temp.	pH	EC	ORP	濁度
		($^{\circ}\text{C}$)	(-)	($\mu\text{S/cm}$)	(mV)	(NTU)	($^{\circ}\text{C}$)	(-)	($\mu\text{S/cm}$)	(mV)	(mg/L)	(NTU)	($^{\circ}\text{C}$)	(-)	($\mu\text{S/cm}$)	(mV)	(NTU)

4.4 工作進度說明

本計畫第 1 年(113 年)執行期間為 112 年 12 月 15 日至 113 年 11 月 29 日，完成模場試驗區域水文地質調查、RAP 及 P&T 設備設置、RAP 及 P&T 設施操作與維護、第一年定期監測採樣分析，皆符合查核點工作內容，計畫進度詳見表 4.4-1。



應用地下水抽出處理(P&T)系統搭配預濃縮以可再生型吸附顆粒(RAP)削減地下水中 PFAS

表4.4-1 研究進度與預期完成之工作進度表

工作項目	年月	第一年				第二年				備註
	1-3月	4-6月	7-9月	10-12月	1-3月	4-6月	7-9月	10-12月		
計畫書核定(下達公文)										
場址水文地質調查	※									
P&T 及 RAP 設備設置										
P&T 及 RAP 設施操作與維護			※							
第一年定期監測採樣分析										
增設前過濾設備與納濾膜設備										
P&T、前過濾設備、納濾膜設備與 RAP 設施操作與維護						※	※			
第二年定期監測採樣分析										
本計畫模場期中報告										
本計畫模場期末報告										
工作進度估計百分比 (累 積 數)	10%	25%	35%	50%	65%	80%	90%	100%		
預定查核點	期中	第一年(2024 年 6 月) ● 完成試驗場域水文地質調查 ● 完成地下管線探勘、試挖及正式施工 ● 完成 P&T 及 RAP 設備設計、發包與建置 第二年(2025 年 6 月) ● 前過濾設備與納濾膜預濃縮設備建置								
	成果	第一年(2024 年 10 月) ● RAP 技術移除水中 PFAS 最適化操作參數建立 ● P&T 及 RAP 系統削減地下水中 PFAS 成效評估 第二年(2025 年 10 月) ● 建立前過濾設備與納濾膜預濃縮搭配 RAP 技術對 PFAS 削減最適化參數 ● 完成兩種不同領域三技術的成效評估及碳排估算								
說明： 1、 「預定查核點」，以※符號標記。 2、 預定進度以 表示；實際進度以 表示。										



五、結果與討論

本計畫執行迄今(統計 113 年 12 月 25 日至 113 年 10 月 18 日期間)已完成所有工作項目，含場址水文地質調查、模場 RAP 及 P&T 設施建置、操作與維護、定期採樣分析、以及 RAP 削減 PFAS 實驗室測試，以下為各項工作執行成果說明。

5.1 實驗室測試結果

1. 儀器與分析方法建立

本計畫遵循國家環境研究院之水中全氟與多氟化合物檢測方法—液相層析串聯式質譜儀法(NIEA W542.51B)，使用液相層析串聯式質譜儀(LC/MS/MS)的多重反應監測模式(multiple reaction monitoring mode, MRM)，每一種待測物監測其前驅/產物離子對兩對，以其中感度較高的前驅/產物離子對作為定量，第二前驅/產物離子對作為定性的依據。

目前本團隊已於陽明交大環工所實驗室建立全氟丁酸(perfluorobutanoic acid, PFBA)(C4)、全氟丁烷磺酸(perfluorobutane sulfonate, PFBS)(C4)、全氟己酸(perfluorohexanesulfonic acid, PFHxA)(C6)、全氟庚酸(perfluoroheptanoic acid, PFHpA)(C7)、全氟庚烷磺酸(perfluoroheptanesulfonic acid, PFHpS)(C7)、全氟辛酸(perfluorooctanoic acid, PFOA)(C8)及全氟辛烷磺酸(perfluorooctane sulfonate, PFOS)(C8)分析方法，若以直接注入法(無前濃縮)其檢量線範圍為 0.2-500 ppb，因此實驗室合成廢水水樣配置 1-5 ppm 濃度進行測試，以更全面釐清 PFAS 經 RAP 技術削減後，其中間產物變化情形。另規劃於明年度計畫建立固相萃取法，使偵測極限精進至 ng/L level (目前已知其他有機化合物偵測極限為 2 ng/L)。

另現場地下水 PFAS 水樣係委託中興工程顧問社實驗室分析，實驗室相關試驗則為陽明交大環工所自行分析，兩實驗室 PFAS 分析種類及濃度檢測範圍整理如表 5.1-1 所示。



應用地下水抽出處理(P&T)系統搭配預濃縮以可再生型吸附顆粒(RAP)削減地下水中 PFAS

表5.1-1 中興工程顧問社實驗室與陽明交大環工所 PFAS 分析種類及濃度比較

實驗室 物種	中興工程顧問社實驗室 偵測極限(有濃縮)	陽明交大環工所實驗室 檢量線範圍(無濃縮)
全氟丁酸(PFBA)	0.00154	0.2-500
全氟丁基磺酸(PFBS)	0.00534	
全氟戊酸(PFPeA)	0.00085	
全氟己酸(PFHxA)	0.00059	
全氟己基磺酸與其支鏈 同分異構物(PFHxS)	0.00077	
全氟庚酸(PFHpA)	0.00072	
全氟辛酸(PFOA)	0.00111	
全氟辛烷磺酸與其支鏈 同分異構物(PFOS)	0.00310	

單位：μg/L (ppb)

2. 評估 RAP 對 PFAS 吸附容量

由於 RAP 係獨特的奈米薄層製備技術，使貴金屬氧化物(Ru-A-B 金屬氧化物)活性成分均勻覆蓋於椰殼活性碳上，其中 Ru 披覆量為 0.01%，因此團隊在 RAP 製備完成後，使用高解析比表面積分析儀，比較全新 RAP 和 AC 兩者的比表面積與孔洞差異，表 5.1-2 整理為 RAP 和 AC 之孔洞特性，RAP 之 BET 比表面積、孔洞容積分別為 938 m²/g、0.45 cm³/g、略低於 GAC 之 961 m²/g、0.45 cm³/g，顯示雖所負載於表面之金屬氧化物沉積於部分孔洞間，但仍保有相當的吸附能力。而兩者之孔洞直徑皆落在 1.9 nm 之間，屬於微孔材料(< 2 nm)。



表5.1-2 RAP 和 AC 之比表面積與孔洞特性

孔洞特性 \ 材料	全新 AC	全新 RAP
BET surface area (m ² /g)	961	938
Pore volume (cm ³ /g)	0.45	0.45
Pore width (nm)	1.89	1.90

從上述孔洞特性結果得知，推測 RAP 吸附能力應與 AC 相當，因此為加速探討 RAP 對 PFAS 吸附容量，本計畫吸附試驗以 2 mg/L 的 PFAS 合成廢水進行測試，分別選用 RAP 及 AC 兩種吸附材料，探討全氟丁酸(C4)、全氟己酸(C6)及全氟辛酸(C8)的吸附容量差異。實驗吸附材料與 PFAS 合成廢水固/液比為 1:1.5 (g:L)，在不調整 pH 值情形下，於不同時間採樣(0、15、30、45、60、90、180、360 及 1440 分鐘)，再以 LC/MS/MS 進行分析 PFBA、PFHxA 及 PFOA 濃度變化，計算出吸附材料的污染物吸附容量，實驗流程示意如圖 5.1-1 所示。

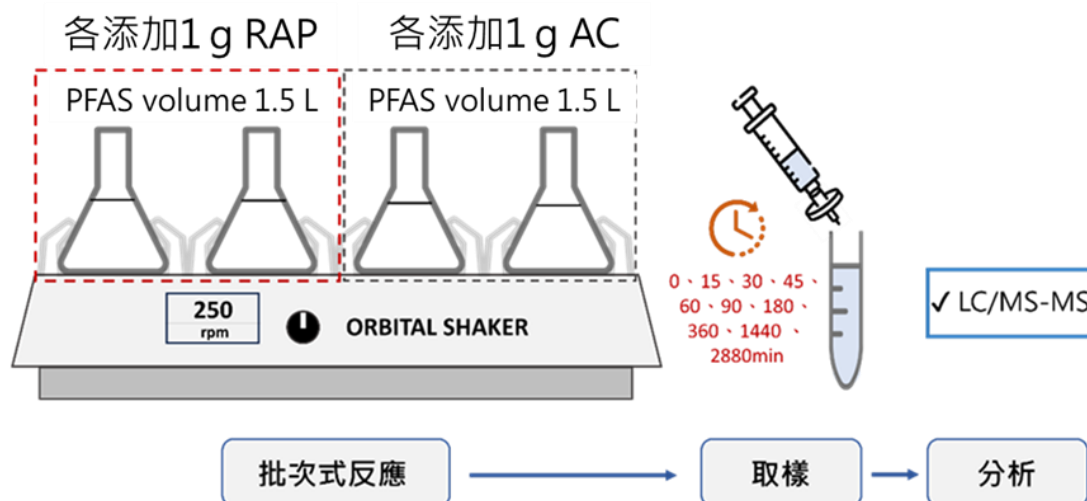


圖5.1-1 批次式吸附反應流程示意圖



應用地下水抽出處理(P&T)系統搭配預濃縮以可再生型吸附顆粒(RAP)削減地下水中 PFAS

(1) RAP 及 AC 對 PFBA 吸附容量

本實驗配置 PFBA 濃度為 2.12 mg/L，測試體積為 1.5 L，精秤 1 g 的 RAP 與活性碳，探討兩種吸附材料對 PFBA 吸附效果的差異。結果整理如圖 5.1-2 所示，經吸附 2880 min 後，水中 PFBA 仍有殘餘濃度(~100 ppb)，表示兩種吸附材料已幾近吸附飽和，計算其吸附容量至少分別為活性碳 3.12 mg PFBA/g AC 與 RAP 吸附容量 3.07 mg PFBA/g RAP。

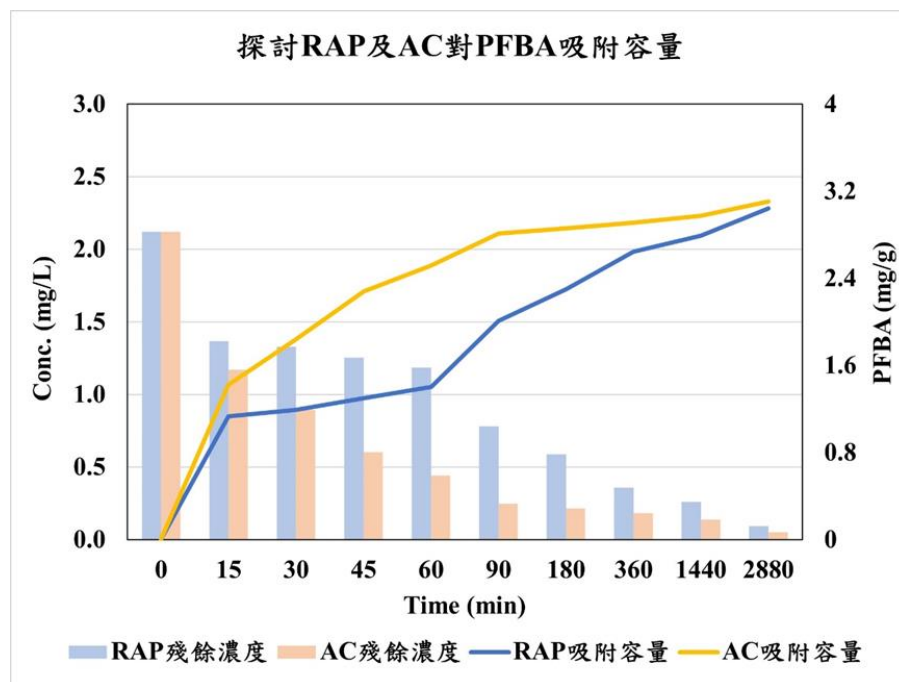


圖5.1-2 兩種吸附材料(RAP 及 AC)對 PFBA 的吸附容量



(2) RAP 及 AC 對 PFHxA 吸附容量

本實驗配置 PFHxA 實際濃度約為 2.59 mg/L，測試體積為 1.5 L，精秤 1 g 的 RAP 與活性碳，探討兩種吸附材料對 PFHxA 吸附效果的差異。結果整理如圖 5.1-3 所示，經吸附 2880 min 後，吸附容量曲線變化已趨近平緩，表示兩種吸附材料幾近達飽和吸附容量，計算其吸附容量分別為活性碳 3.86 mg PFHxA/g AC 與 RAP 吸附容量 3.88 mg PFHxA/g RAP。

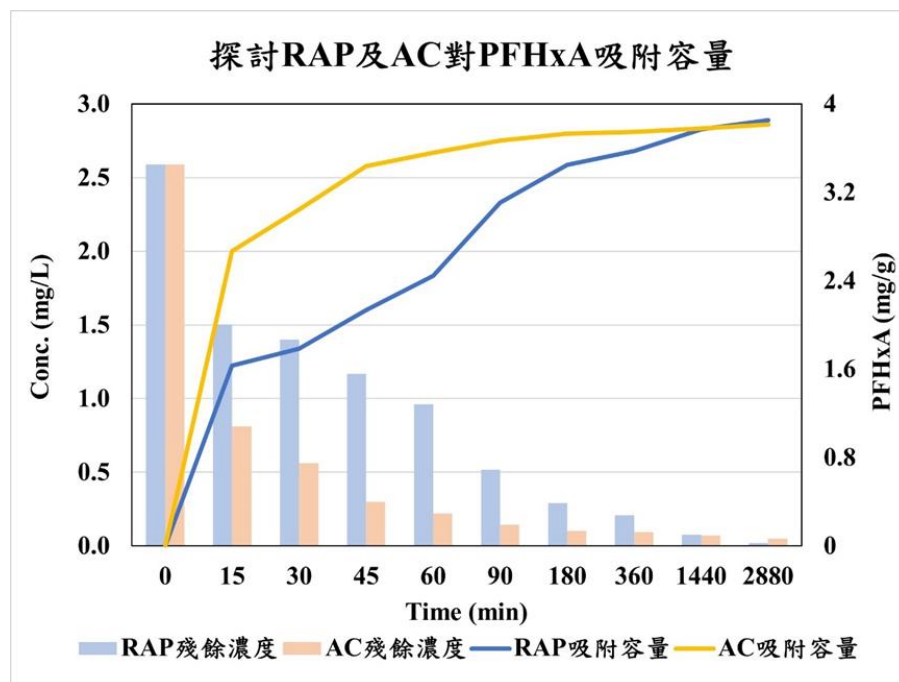


圖5.1-3 兩種吸附材料(RAP 及 AC)對 PFHxA 的吸附容量



應用地下水抽出處理(P&T)系統搭配預濃縮以可再生型吸附顆粒(RAP)削減地下水中 PFAS

(3) RAP 及 AC 對 PFOA 吸附容量

文獻指出，活性碳的吸附容量與分子碳數成正比。因此，本實驗設定 PFOA 的濃度高於前述兩種短鏈 PFAS，約為 3.11 mg/L，測試體積為 1.5 L，並精確秤取 1 g 的 RAP 和活性碳，探討這兩種吸附材料對 PFOA 吸附效果的差異。結果整理如圖 5.1-4 所示，經過 2880 分鐘的吸附過程後，吸附容量曲線已趨於平緩，表明兩種吸附材料的吸附容量已接近飽和，計算其吸附容量分別為活性碳 4.45 mg PFOA/g AC 與 RAP 吸附容量 4.36 mg PFOA/g RAP。

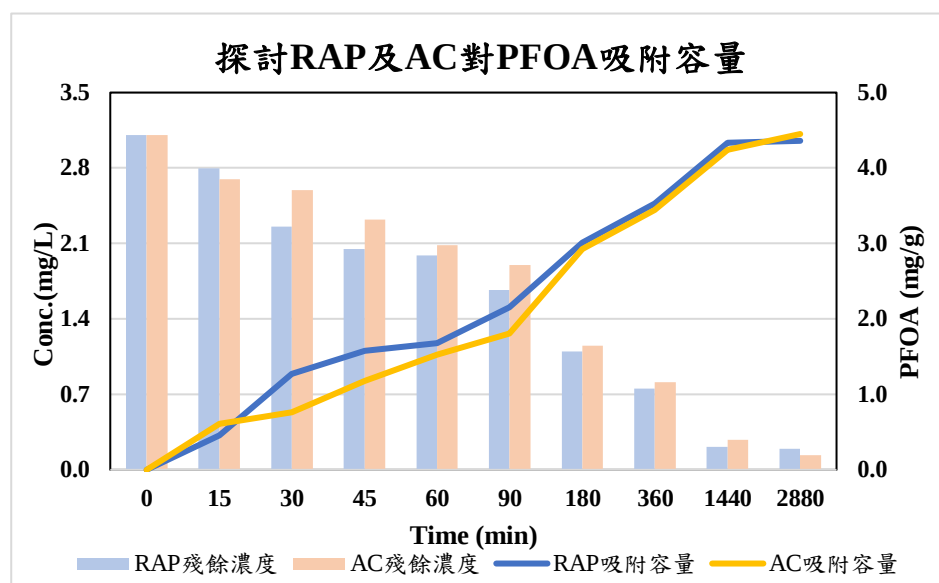


圖5.1-4 兩種吸附材料(RAP 及 AC)對 PFOA 的吸附容量

綜上所述，雖然 AC 的吸附速率遠高於 RAP，但因為處理 PFAS 的機制是以催化氧化為主，依照過去本團隊在工業廢水的研究結果，吸附速率對處理 PFBA 無影響。另有研究指出，PFBS 在 pH 值為 3 時，有最好的吸附容量，於 pH 值為 5~9 時，其吸附容量無明顯差異，即正常 pH 值範圍 5~9 情形下，不影響 RAP 技術吸附/催化氧化程序進行。

另兩種吸附材料(RAP 及 AC)對 PFBA、PFHxA 及 PFOA 吸附容量相當，與表 5.1-2 孔洞特性相互應證。原期中階段僅提及以再生效率(regeneration efficiency, RE)來評估 RAP 再生前後之吸附量差異(式 1 為再生效率計算式)，後為加速實驗及再生時標的物的一致性，本團隊主要以新擬定之 RAP 氧化功能指標試驗來評斷再生成效，將於後續章節說明。



$$RE = \frac{q_{reg}}{q_{fresh}} \times 100\% \quad (式 1)$$

q_{fresh} : 吸附劑再生前之吸附量

q_{reg} : 吸附劑再生後之吸附量

另考量RAP技術無論催化氧化法或吸附後再生程序，皆需添加氧化促進劑(如空氣)提升表面貴金屬氧化態數，對吸附於孔洞上的目標污染物氧化斷鍵，同時活化本身使其恢復成新鮮狀態。在工業廢水的應用上，污染物濃度較高，氧化促進劑多用氧化力較強的臭氧，其次為氧化力較弱的雙氧水或次氯酸鈉；本計畫的應用因污染物濃度較低，且前期本團隊曾以RAP進行受LNAPL污染的地下水場址模場試驗，發現針對柴油水樣，RAP以曝空氣再生24 h與臭氧再生4 h之效果相當。因此於本計畫規劃RAP搭配不同氧化促進劑對PFAS進行處理，以氧化斷鍵成效、反應時間、中間產物生成情形及氧化功能指標等參數，建立RAP技術削減PFAS最適化操作條件。另多篇研究指出，單純使用氧化劑對於不同PFAS皆無降解效果，主要原因為C-F鍵結構具有極大之解離能，造就化學性質穩定，故於本計畫不探討單純氧化試驗(不添加RAP)對PFAS的削減情形。

3. RAP 催化氧化可行性試驗

本計畫針對地下水中微量的PFAS處理策略，是藉由吸附的濃縮效應來提昇RAP的催化氧化效率。為評估RAP對PFAS的吸附/催化氧化可行性，於期中階段我們先配製兩種不同的PFAS化合物，利用本團隊之前建立處理廢水的催化氧化法，來測試較高濃度的PFAS (20-50 mg/L)分解效果，包括另外分析是否因為氧化後生成氟離子來進行實驗。三組實驗方法和結果分述如下：



(1) 全氟丁烷磺酸 PFBS (perfluorobutane sulfonate)

由於半導體業已逐漸淘汰毒性和生物累積性較大的長碳鏈全氟化合物(C8)，轉而使用毒性及生物累積性較小的短碳鏈替代品(C4)，但隨著使用量的增加，C4 在環境中仍陸續被檢測出來，因此仍需關切，我們也以目前有被使用的 C4 指標性化合物—sodium perfluorobutane sulfonate ($C_4F_9SO_3Na$ ，分子量 322)，作為目標污染物來進行測試。

本團隊自行配製 50 mg/L 的 PFBS ($C_4F_9SO_3Na$)，參考過去進行難降解廢水的實驗條件，在水樣體積 0.5 L 中加入 10 g RAP 後，加熱至 50°C，加臭氧進行 1 小時的氧化反應，以同一批 RAP 重複進行 5 批次實驗，分析處理後的 DOC (溶解性有機碳) 和氟離子，我們選擇第 3-5 批次的實驗結果進行討論(前 2 次由於 RAP 的吸附效應較顯著，處理後 DOC 和氟離子會偏低，不納入討論)。關於 RAP 對 PFBS 和氟離子的吸附容量，有另外以等溫吸附實驗初步估算，約為 4 mg PFBS/g RAP 以及 0.35 mg F/g RAP，所以 10 g RAP 約可吸附 40 mg 的 PFBS 和 3.5 mg 的氟離子，初始加入的 PFBS 有 25 mg。表 5.1-3 為其實驗結果，顯示氧化 1 小時後，約有 8 mg/L 的氟離子生成，且 DOC 的含量可由 11.2 mg/L 降至 4.5 mg/L 左右(去除率約 60%)，由減少 60% 的 PFBS 推算氧化分解後產生的理論氟離子應有 8 mg ($25 \text{ mg} \times 60\% \times (19 \times 9 / 322)$ ，19 及 322 分別為氟和 PFBS 的原子量/分子量)，因此經過前 2 批次實驗後，PFBS 幾乎吸附完全，故後面 3 批次實驗結果可作為催化氧化效果的評估，發現搭配臭氧(氧化促進劑)的觸媒氧化法在上述條件下，對 PFBS 有不錯的處理效果。

表5.1-3 RAP 催化氧化 PFBS 的初步可行性評估實驗結果

水樣	pH	DOC (mg/L)	DOC 去除率 (%)	氟 (mg/L)
原水	8.60	11.2	-	ND
第 3 批次氧化(1 h)	6.17	4.47	60.2%	7.5
第 4 批次氧化(1 h)	6.23	4.80	57.2%	7.9
第 5 批次氧化(1 h)	6.18	4.55	59.5%	8.2

條件：PFBS 濃度 50 mg/L；體積 0.5 L；觸媒 10 g；溫度 50°C；反應時間 1 h；重複 5 批次



(2) 全氟辛酸 PFOA (perfluorooctanoic acid)

以下以本計畫的其中之一 C8 目標污染物 PFOA 為處理標的，配製 20 mg/L 的 PFOA ($C_8F_{15}HO_2$ ，分子量 414)，在水樣體積 0.5 L 中加入 10 g RAP 後在常溫下進行 3 組氧化反應，由於 PFOA 相對 PFBS 應較不易分解，RAP 的氧化促進劑分別是添加 200 mg/L 雙氧水或 200 mg/L 次氯酸鈉反應 2 小時(輔以空氣曝氣)，及單獨空氣曝氣反應 2 天，每組實驗分別以同一批 RAP 重複進行 4 批次實驗，分析處理後的 DOC 和 氟離子，也是類似上段實驗所述，推估經過前 2 批次實驗後，PFBS 和 氟離子幾乎吸附完全，因此選擇第 3-4 批次的實驗結果進行討論。表 5.1-4 為其實驗結果，顯示 RAP 的觸媒氧化法搭配次氯酸鈉氧化效果不好，但 RAP 搭配 200 mg/L 雙氧水反應 2 小時及單獨曝氣 2 天都有些氧化效應，尤其由產生的 氟離子濃度應更具參考價值。根據以上初步可行性評估實驗的結果，可初步判斷未來藉由吸附的濃縮效應，然後再以氧化促進劑輔助 RAP 進行催化氧化來持續再生 RAP，應可作為處理地下水中 PFAS 的方案。

表5.1-4 RAP 催化氧化 PFOA 的初步可行性評估實驗結果

水樣	pH	DOC (mg/L)	DOC 去除率 (%)	氟離子 (mg/L)
原水	調至 8.0	4.94	-	N.D
添加 200 mg/L 雙氧水+曝氣				
第 3 批次氧化(2 h)	7.61	4.12	16.6%	1.03
第 4 批次氧化(2 h)	7.70	4.22	14.6%	1.12
添加 200 mg/L 次氯酸鈉+曝氣				
第 3 批次氧化(2 h)	8.51	4.72	4.45%	0.14
第 4 批次氧化(2 h)	8.45	4.80	2.83%	0.22
單獨空氣曝氣				
第 3 批次氧化(2 d)	7.55	4.30	13.0%	0.28
第 4 批次氧化(2 d)	7.59	4.42	10.5%	0.46

條件：PFOA 濃度 20 mg/L；體積 0.5 L；觸媒 10 g；常溫；重複 4 批次



應用地下水抽出處理(P&T)系統搭配預濃縮以可再生型吸附顆粒(RAP)削減地下水中 PFAS

4. RAP 吸附/催化氧化及再生程序試驗

如前章節所述，催化氧化法通常適用於污染物濃度較高情形下，需以一定劑量的促進劑，才能對單位克數的 RAP 提升氧化能力，來處理水體中的污染物。考量地下水微量的 PFAS 濃度及實驗的方便性，且估算未來經由 NF 後至少可濃縮 50 倍，在實驗室先以 ppm 級的 PFAS，進行 RAP 吸附/催化氧化與再生程序的試驗，實驗流程如圖 5.1-5 所示。每次實驗先以同一批 RAP 進行重複 5 循環批次的吸附/催化氧化實驗，於吸附濃縮效應至一定程度後進行再生程序(以空氣曝氣反應 2 天)，RAP 經多批次吸附/再生程序後，觀察比較再生前後的氧化功能指標(如 4.2 節所示)及吸附容量變化，建立 RAP 削減水中 PFAS 的吸附/催化氧化與再生操作參數。

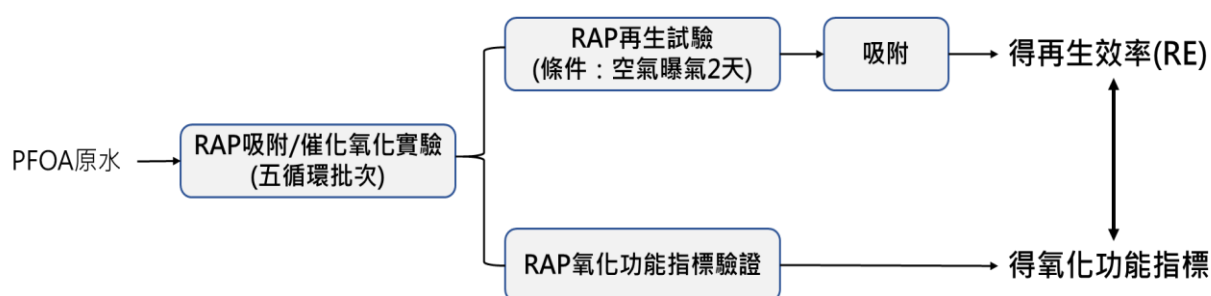


圖 5.1-5 RAP 吸附/催化氧化及再生試驗程序

催化氧化的操作參數包括氧化劑種類、氧化劑劑量及反應時間等，反應溫度則先均以常溫進行。氧化劑除了和現場測試模組一樣採用空氣曝氣外，也選擇臭氧及雙氧水進行測試。參考之前本團隊以 RAP 執行 LNAPL 處理的經驗，依氧化劑強弱，分別以臭氧 0.5 小時、雙氧水 4 小時及空氣曝氣 2 天作為比較基準。如圖 5.1-5 所示，選擇全氟己酸(PFHxA)及全氟辛酸(PFOA)兩種不同的 PFAS 污染物進行實驗，每循環批次的吸附/催化氧化實驗後取樣分析 pH 值、PFAS 及氟離子濃度，後端空氣曝氣 2 天的再生程序則是取第五循環批次吸附/催化氧化反應後的 RAP 進行。新 RAP 與再生前後的 RAP 均要分別進行氧化功能指標及吸附容量測試。

本計畫 RAP 吸附/催化氧化與再生程序試驗標的物分別為 PFHxA 及 PFOA 兩種。測試時，設定 PFAS 濃度約為 2.50 mg/L、水樣體積為 1 L、填充 RAP 量 1 g、常溫反應、pH 值除 RAP 搭配臭氧實驗組參照團隊工業廢水處理經驗以初始 pH 值為 9.0 測試外，其餘實驗組皆調整至初始 pH 值 7.5 進行。RAP 的氧化促進劑共分三種條件進行，分別為(A) 1.88 g O₃/h 臭氧曝氣反應 0.5 小時、(B)添加 50 mg/L 雙氧水(輔以空氣曝氣)反應 4 小時及(C)單獨空氣曝氣反應 2 天，每組實驗分別以同一批 RAP 重複進行 5 批次實驗，分析處理後的 pH 值、PFAS 和氟離子濃度。



(1) 全氟己酸 PFHxA (perfluorohexanesulfonic acid)-RAP 吸附/催化氧化程序

RAP 對 PFHxA 吸附容量約為 3.88 mg PFHxA/g RAP(章節 5.1-2)，因此本實驗在前兩批次主要為吸附作用，選擇第 3~5 批次的實驗結果進行討論。表 5.1-5 為其實驗結果，配製的 PFHxA 濃度為 2.45 mg/L，三組實驗結果如下：

- (a) RAP+臭氧曝氣-反應 0.5 小時即能將 PFFxA 削減至 0.098~0.211 mg/L，同時生成 1.39~1.51 mg/L 氟離子；
- (b) RAP+ 50 mg/L 雙氧水(輔以空氣曝氣)-反應 4 小時後可將 PFHxA 削減至 0.377~0.498 mg/L 及產生 1.19~1.27 mg/L 氟離子；
- (c) RAP+空氣曝氣-反應 2 天後可削減 PFHxA 至殘餘濃度 0.468~0.545 mg/L 及生成 1.11~1.18 mg/L 氟離子。

RAP 搭配不同氧化促進劑削減 PFHxA 有不錯的氧化斷鍵能力，且各實驗組暫無觀察到中間產物生成，後續可參照該實驗參數應用於其他 PFAS 物種，以釐清 RAP 技術對短鏈及長鏈 PFAS 的最適化操作參數。

表5.1-5 五循環批次(吸附/催化氧化程序)RAP 削減 PFHxA 數據

實驗組	條件	批次	反應 時間	pH	PFHxA conc.	氟離子	中間產物
					(mg/L)	(mg/L)	
PFHxA 原水			-	-	2.45	N.D	-
RAP+臭氧曝氣實驗組：初始 pH 值調整至 9.0 (參照工業廢水-觸媒技術最佳反應 pH 值)							
RAP + 臭氧曝氣	1.88 g O ₃ /h	B3	0.5 h	7.65	0.143	1.45	-
		B4	0.5 h	7.68	0.211	1.39	-
		B5	0.5 h	7.52	0.098	1.51	-
RAP+雙氧水實驗組(輔以空氣曝氣)：初始 pH 值調整至 7.5							
RAP + 雙氧水 (輔以空氣曝氣)	50 mg/L H ₂ O ₂	B3	4 h	7.38	0.377	1.24	-
		B4	4 h	7.29	0.498	1.19	-
		B5	4 h	7.39	0.459	1.27	-
RAP+空氣曝氣實驗組：初始 pH 值調整至 7.5							
RAP + 空氣曝氣	細氣泡	B3	48 h	7.41	0.545	1.15	-
		B4	48 h	7.26	0.468	1.18	
		B5	48 h	7.34	0.496	1.11	



(2) 全氟辛酸 PFOA (perfluorooctanoic acid)-RAP 吸附/催化氧化+再生程序

A. 吸附/催化氧化：

本團隊曾於期中階段以催化氧化法處理 20 mg/L PFOA 合成廢水，其削減成效不彰，後逐步確認實驗環節發現可能原因有二，第一為空氣曝氣實驗組無使用曝氣石，以至於氣泡較粗導致溶氧較低($DO \approx 3.0$ mg/L)，第二為雙氧水實驗組加藥比例不足(原為雙氧水濃度：PFAS 濃度為 10：1)，故此次實驗流程如圖 5.1-5，RAP 吸附/催化氧化實驗改用細氣泡曝氣石，並將雙氧水濃度：PFAS 濃度修正為 20：1。

RAP 對 PFOA 吸附容量約為 4.36 mg PFOA/g RAP(章節 5.1-2)，因此本實驗在前兩批次主要為吸附作用，選擇第 3~5 批次的實驗結果進行討論。圖 5.1-6 及表 5.1-6 為其實驗結果，配製的 PFOA 濃度為 2.50 mg/L，對照組及三組氧化實驗組的實驗結果如下：

- (a) 單獨 AC 及單獨 RAP 對照組：兩實驗組明顯呈吸附飽和狀態，無氟離子生成；
- (b) RAP+臭氧(1.88 g O_3 /h)曝氣：反應 0.5 小時即能將 PFOA 削減至 0.00957 mg/L，同時生成 1.55 mg/L 氟離子；
- (c) RAP+50 mg/L 雙氧水(輔以空氣曝氣)：反應 4 小時後可將 PFOA 削減至 0.244 mg/L 及產生 1.44 mg/L 氟離子；
- (d) RAP+空氣曝氣：反應 2 天後可將削減 PFOA 至殘餘濃度 0.601 mg/L 及生成 1.19 mg/L 氟離子。



另於 RAP+空氣曝氣實驗組，有觀察到中間產物 PFHxA (C6)及 PFHpA (C7)生成，削減 PFOA 後會有產生 2.28% 的 PFHxA 及 0.25 %的 PFHpA，其他短鏈中間產物則無生成。然 RAP 搭配臭氧曝氣與 RAP 搭配雙氧水實驗組，於 PFOA 氧化斷鍵後，初步評估應無中間產物生成，團隊將持續追蹤確認 PFAS 經 RAP 技術削減其中間產物轉化情形，規劃於明年度計畫釐清。

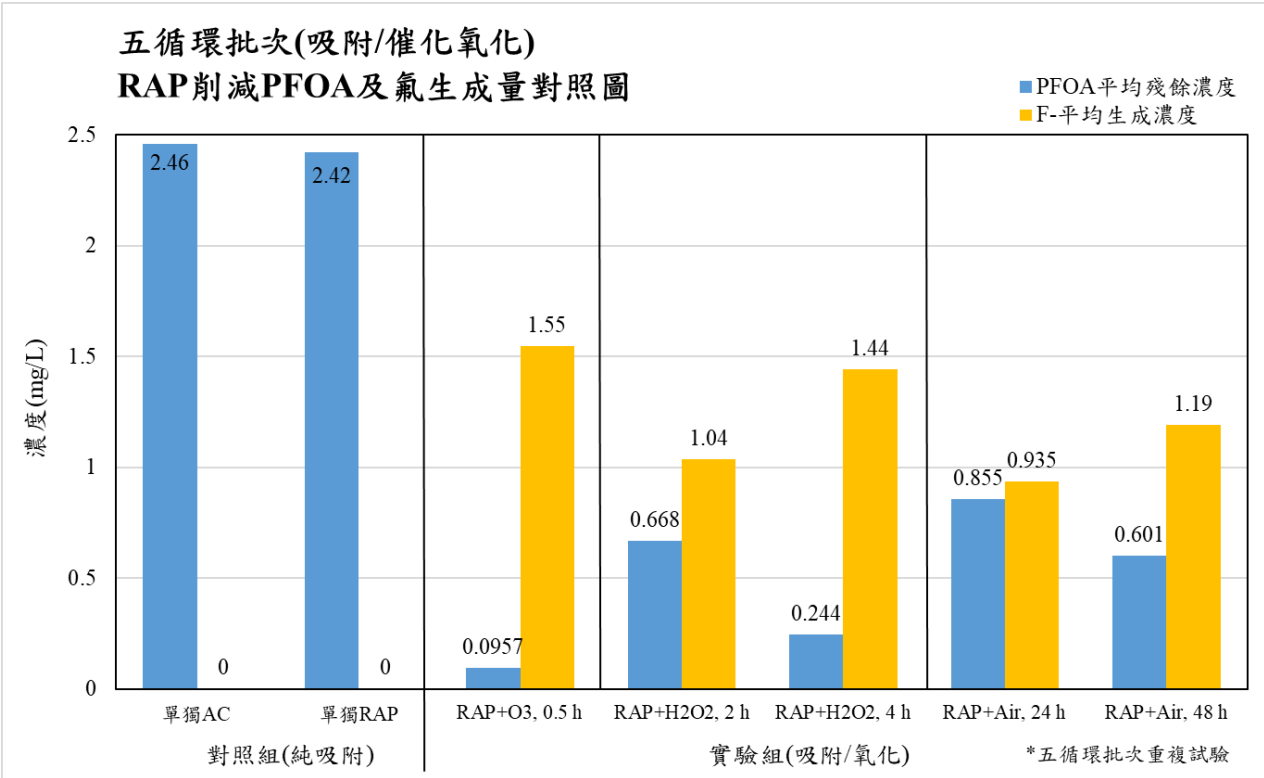


圖5.1-6 五循環批次(吸附/催化氧化)RAP 削減 PFOA 及氟生成量對照圖



應用地下水抽出處理(P&T)系統搭配預濃縮以可再生型吸附顆粒(RAP)削減地下水中 PFAS

表5.1-6 五循環批次(吸附/催化氧化程序)RAP 削減 PFOA 數據

實驗組	條件	批次	反應 時間	pH	PFOA conc.	氟離子	中間產物
					(mg/L)	(mg/L)	
PFOA 原水			-	-	2.51	N.D	-
RAP+臭氧曝氣實驗組：初始 pH 值調整至 9.0 (參照工業廢水-觸媒技術最佳反應 pH 值)							
RAP + 臭氧曝氣	1.88 g O ₃ /h	B3	0.5 h	7.51	0.102	1.61	-
		B4		7.42	0.118	1.58	
		B5		7.60	0.067	1.45	
RAP+雙氧水實驗組(輔以空氣曝氣)：初始 pH 值調整至 7.5							
RAP + 雙氧水 (輔以空氣曝 氣)	50 mg/L H ₂ O ₂	B3	2 h	7.48	0.521	1.13	-
			4 h	7.45	0.165	1.58	
		B4	2 h	7.41	0.784	0.97	
			4 h	7.29	0.357	1.35	
		B5	2 h	7.35	0.698	1.01	
			4 h	7.26	0.211	1.39	
RAP+空氣曝氣實驗組：初始 pH 值調整至 7.5							
RAP + 空氣曝氣	細氣泡	B3	24 h	7.41	0.878	0.923	PFHxA: 2.28% 約 0.055 mg/L PFHpA: 0.25% 約 0.006 mg/L
			48 h	7.33	0.552	1.26	
		B4	24 h	7.35	0.832	0.945	
			48 h	7.31	0.653	1.13	
		B5	24 h	7.43	0.856	0.937	
			48 h	7.39	0.598	1.19	

條件：常溫；每批次間只執行換水程序，同批 RAP 循環使用五批次



B. 再生試驗

添加氧化促進劑除可作為 RAP 吸附/催化氧化程序 使用外，應亦可促進在該條件下進行同步再生程序的功能，以維持 RAP 活性，因此將取用前述 PFOA 實驗經五循環批次吸附/催化氧化程序重複實驗後的 RAP，分別以(1)再生試驗及(2)氧化功能指標試驗 RAP 活性變化，兩種 RAP 活性指標數據分述說明如下(圖 5.1-7 及表 5.1-7)：

- (a) 再生效率(RE)：使用空氣曝氣再生兩天處理 PFOA 的 RAP (經五循環批次吸附/催化氧化程序，除臭氧實驗組)，其 RE 值以雙氧水實驗組 81%為最佳，其次為空氣曝氣實驗組(RE= 72%)，無使用氧化促進劑的單獨 RAP 吸附對照組 RE 值僅剩 15%，表示活性點位被吸附質占據，須另以較強再生條件進行清除孔洞積碳再活化試驗以恢復活性，此測試於下小節說明再活化試驗結果。
- (b) 氧化功能指標：最佳為雙氧水實驗組(≒85%)，空氣實驗組(≒83%)略差於前者，單獨 RAP 吸附對照組則僅剩 13%。
- (c) 比照再生效率與氧化功能指標兩參數其變化趨勢一致。RAP 技術搭配不同氧化促進劑具削減 PFAS 能力，且能藉由再生程序維持 RAP 活性，使其可重複使用，因此適合作為處理地下水中 PFAS 的方案。

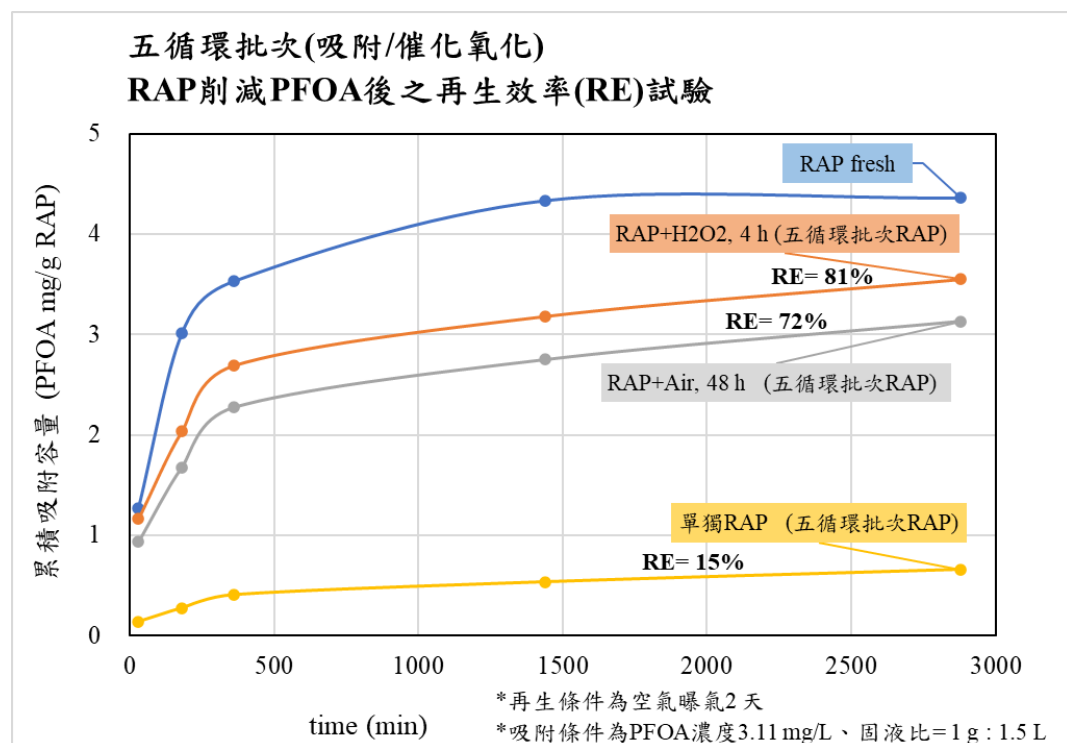


圖5.1-7 五循環批次(吸附/催化氧化)RAP 削減 PFOA 後之再生效率



應用地下水抽出處理(P&T)系統搭配預濃縮以可再生型吸附顆粒(RAP)削減地下水中 PFAS

表5.1-7 五循環批次(吸附/催化氧化)RAP 削減 PFOA 後之氧化功能驗證數據

樣品	批次	TOC 平均去除率
RAP+雙氧水 (輔以空氣曝氣)	B5~ B7	86.0%
	B8~ B10	84.8%
RAP+空氣曝氣	B5~ B7	84.1%
	B8~ B10	82.2%
單獨 RAP 吸附 對照組	B5~ B7	14.5%
	B8~ B10	12.1%

*苯甲酸原水 TOC: 36.8 mg/L

5. hi-NF 預濃縮試驗

目前已有文獻探討以 NF 分離 PFAS 的研究，其中 Wang *et al.* (2018)的研究針對溶質濃度、離子強度以及大分子有機污染物對 NF 截留 PFOS 及 PFBS 的影響，發現分子量較大的 PFOS 截留率(rejection)均大於 88%，分子量較小的 PFBS 截留率均小於 69%。同時，兩者主要的截留機制亦不同，PFOS 的截留機制為尺寸排除(size exclusion)，PFBS 則為靜電排斥(electrostatic repulsion)。本團隊的先期研究先探討回收率對 PFBA 截留率與濃縮效果的影響，配置 200 ppb 濃度作 PFBA 為進水，控制操作壓力在 4 kg/cm² 的情況下，比較回收率 90%和 95%時的 PFBA 濃縮效果；測試條件及結果如表 5.1-8 所示。實驗結果顯示，對於分子尺寸(molecular size)小於膜孔尺寸(membrane pore size)的 PFBA，回收率 95%組的出水檢測出比回收率 90%組更高濃度的 PFBA，截留率從 60.8%降為 25.4%；濃縮倍數亦隨著回收率的提升而下降，從 4.84 倍降為 2.94 倍。Safulko *et al.* (2023)及 Wang *et al.* (2018)的研究亦發現有此現象，其原因可能與 NF 孔洞內的靜電排斥有關；當回收率提升時，NF 孔洞內的靜電排斥會跟著提升，排斥 PFBA 流向濃水端，改流向出水端。

表5.1-8 hi-NF 濃縮測試條件及結果

實驗目的：測試在相同操作壓力下，比較 2 種回收率的濃縮效果

控制條件：進水 PFBA 濃度 200 ppb、操作壓力 4 kg/cm²

PFBA	進水 (ppb)	出水 (ppb)	濃水 (ppb)	截留率 (%)	濃縮倍數 (倍)	水通量 (LMH)
回收率 90%	193	75.7	934	60.8	4.84	17.2
回收率 95%	189	141	556	25.4	2.94	16.8

註：進出濃水各採樣 3 點取平均值



依據目前的實驗結果，得知低分子量的 PFBA 亦可達到一定的截留率。以操作壓力 4 kg/cm^2 、回收率 90%、PFAS 進水濃度約 200 ppb 為操作條件，另外進行較高分子量的 PFHpA (C7)及 PFOA(C8)的濃縮截留效率評估，並以兩段式 NF 串聯方式測試，希望能進一步提升 PFAS 的截留率與濃縮率。實驗方式為第一次 NF 過濾實驗在水樣循環 15 分鐘後，收集出水及濃水，再將濃水做為第二次實驗之進水(串聯濃水)，以提升濃縮倍數。實驗結果如表 5.1-9 發現 NF 分離 PFHpA (C7)及 PFOA (C8)的產水濃度均為 ND，濃縮倍數大幅提升至 11.7 及 45.9，此與其上述文獻的研究結果相當，顯見未來在場址中以 NF 來濃縮 PFOA 及 PFOS 的可行性極高。

表5.1-9 兩段串聯 hi-NF 操作對不同 PFAS 的濃縮結果

物種	PFBA (C4)	PFHpA (C7)	PFOA (C8)
化學式	$\text{C}_4\text{HF}_7\text{O}_2$	$\text{C}_7\text{F}_{13}\text{CO}_2\text{H}$	$\text{C}_8\text{F}_{15}\text{CO}_2\text{H}$
分子量	214	364	414
濃縮倍數	4.17	11.7	45.9

6. 完成 RAP 技術削減 PFAS 的成效評估

前幾個章節已完成 RAP 技術削減 PFAS 程序建立，另為模擬 RAP 經高濃度 PFAS 污染後，其孔洞的活性點位被污染物占滿，致使失去活性，需以較強的氧化劑進行再活化程序，使 RAP 恢復原有處理效能。因此本實驗使用章節 5.1.4 的五循環批次對照組吸附飽和 RAP 進行再活化程序試驗，並依循團隊於工業廢水領域調整適用土水領域的再活化條件，係將 2000 ppm 次氯酸鈉加溫 80°C 曝空氣 4 小時條件，調整為(1) 500 ppm 次氯酸鈉及(2) 1000 ppm 次氯酸鈉兩種次氯酸鈉劑量，以加溫 80°C 曝空氣 4 小時進行再活化程序，評估失活 RAP 其氧化功能指標恢復情形，數據彙整(表 5.1-10)如下：

- (a) 失活 RAP 其 TOC 平均去除率僅剩約 13%，比表面積僅剩不到 $10 \text{ m}^2/\text{g}$ (以觸媒處理煉焦廢水為例)；
- (b) 添加 500 ppm NaOCl 再活化，其 TOC 平均去除率可提升至 $\approx 60\%$ ；
- (c) 添加 1000 ppm NaOCl 進行再活化，其活化效能明顯優於 500 ppm NaOCl 再活化實驗組，效率再提升至 83~86.9%。



應用地下水抽出處理(P&T)系統搭配預濃縮以可再生型吸附顆粒(RAP)削減地下水中 PFAS

表5.1-10 不同再活化程序數據彙整表

樣品	批次	TOC 平均去除率	比表面積 (以觸媒處理煉焦廢水為例)
失活 RAP (五循環批次單獨 RAP 吸附對 照組)	B5~ B7	14.5%	< 10 m ² /g (全新為 900~950 m ² /g)
	B8~ B10	12.1%	
再活化-1 (次氯酸鈉 500 ppm)	B5~ B7	60.3%	—
	B8~ B10	59.0%	
再活化-2 (次氯酸鈉 1000 ppm)	B5~ B7	86.9%	
	B8~ B10	83.0%	

RAP 量：20% (75mL RAP/300mL 水)；溫度：80℃；反應時間：4 小時；曝氣方式：空氣

由上述數據得知，失活 RAP 可藉由次氯酸鈉能清除孔洞上積碳，使其恢復原有處理效能。若活性點位積碳尚未清除乾淨，須調整劑量或活化時間等方式加以去除，另個可能原因為 RAP 的 Ru 貴金屬流失，此情況則要使用大活化程序將貴金屬氧化物重新披覆至 RAP 上，披覆後 Ru 含量須符合 0.001~0.007% (w/w)之標準。儘管如此，失活 RAP 能藉由再活化程序使其恢復原有效能，乃因添加次氯酸鈉藥劑可能於地下水層中有二次污染疑慮，本團隊規劃於第二年度改以其他氧化劑(如雙氧水，分解後為氧氣)進行再活化試驗，分別評估不同種類氧化劑、添加劑量、反應時間等參數，以經濟效益評估 RAP 應用於土水整治的最適化再活化條件。

5.2 場址水文地質調查

以模場試驗區域既設監測井 O00297 與本計畫新設之抽水井(PT-1)、注入井(IT-1)鑽井過程土壤取樣紀錄(圖 5.2-1)，搭配周邊區域地質鑽探資料，繪製模場試驗區域之地質柵狀圖如圖 5.2-2，顯示小區域範圍內地表高程由西北側往東南側微微傾斜，地表下約 1.5-2 公尺內主要為回填，漸次為粉土質砂、細砂及細砂夾礫石，至地表下約 9.5 公尺開始出現透水性較差之泥質物質。而依據監測井 O00297 之水力傳導係數(K 值) 3.25×10^{-5} m/sec，K 值介於 10^{-4} m/sec~ 10^{-6} m/sec 間屬回水狀況中等。



五、結果與討論

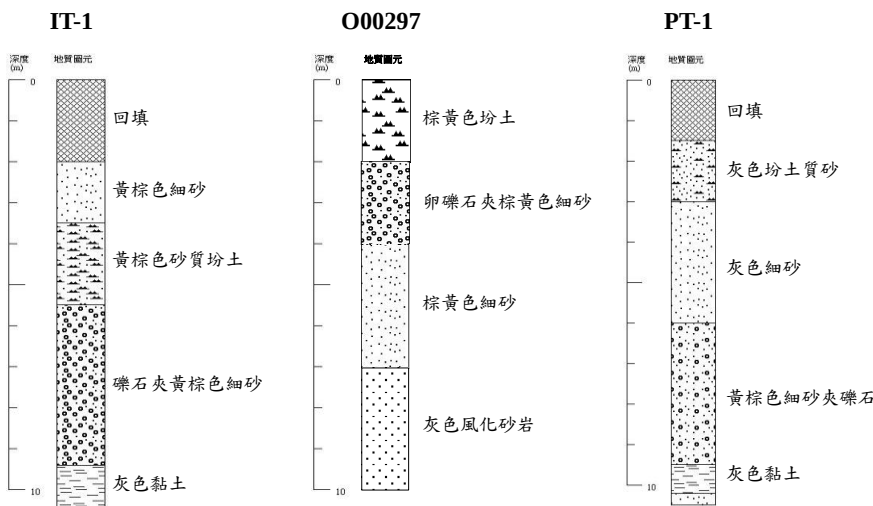


圖5.2-1 模場試驗區域鑽孔地質柱狀圖

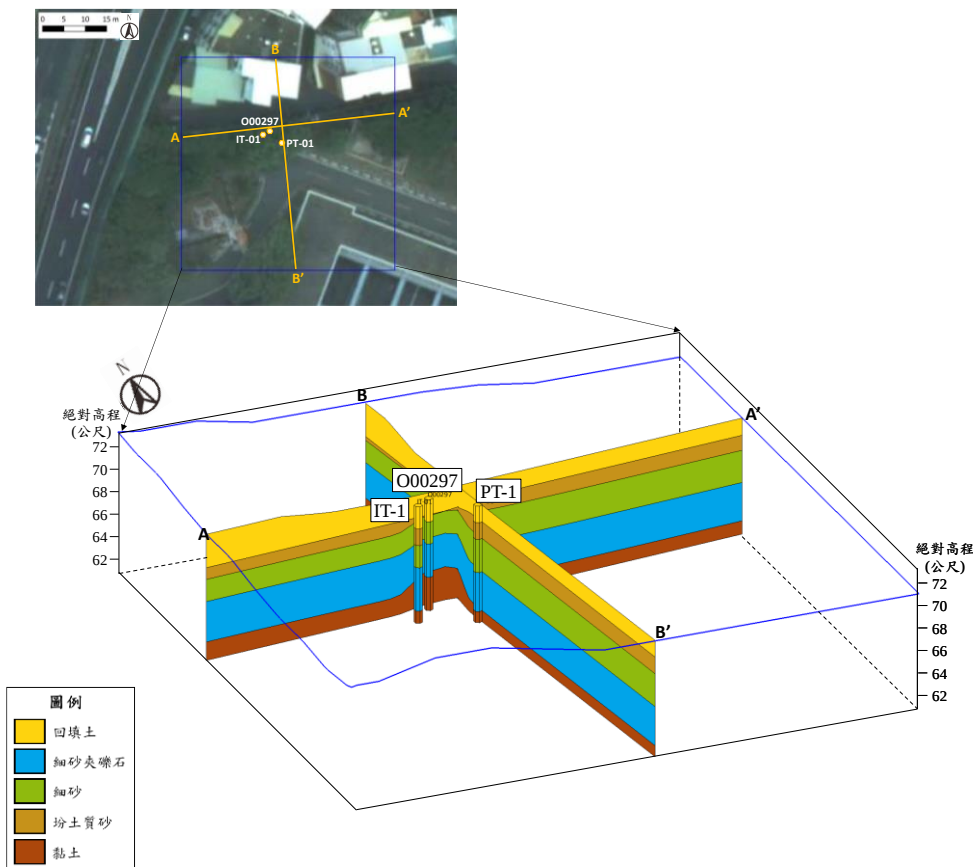


圖5.2-2 模場試驗區域地質柵狀圖



應用地下水抽出處理(P&T)系統搭配預濃縮以可再生型吸附顆粒(RAP)削減地下水中 PFAS

5.3 模場 RAP 及 P&T 設施建置、操作與維護

1. 地球物理探測

本計畫於 113 年 2 月 1 日以透地雷達進行地球物理探測，釐清設井點位周邊地下管線與結構分布情形，共佈設 4 條測線，總施測長度達 10.6 公尺(表 5.3-1 及圖 5.3-1)，雷達剖面圖水平軸由左至右為測線起始點至終點(單位：公尺)，垂直軸為測深(單位：公尺)，現場施作情形如圖 5.3-2。注入井 IT-1 附近，測線 IT-1A 全長 2.8 公尺，由東往西佈設，經透地雷達剖面(圖 5.3-3)顯示推測共有 1 處地下結構體及 2 處地下管線訊號存在；測線 IT-1B 全長 3.1 公尺，由北往南佈設，經透地雷達剖面(圖 5.3-3)顯示共有 1 處地下結構體及 4 處地下管線訊號存在，相關地下結構體、管線及異常區資訊彙整如表 5.3-2。抽水井 PT-1 附近，測線 PT-1A 全長 3.6 公尺，由南往北佈設。經透地雷達剖面(圖 5.3-3)顯示推測共有 1 處地下結構體及 3 處地下管線訊號存在；測線 PT-1B 全長 1.1 公尺，由西往東佈設，經透地雷達剖面(圖 5.3-3)顯示本測線無明顯地下管線或結構體訊號存在。相關地下結構體、管線及異常區資訊彙整如表 5.3-3。經透地雷達探測後，於現場標定建議設井位置，實際鑽井前仍需進行人工試挖，確認地表下無施工安全虞慮後方進行鑿井工作。

表5.3-1 透地雷達測線位置分布圖

項目	井孔名稱	測線名稱	施測長度(m)	施測方向	測線起點座標(TWD97)		測線終點座標(TWD97)	
					E	N	E	N
1	IT-1	IT-1A	2.8	東-西	250507.115	2742209.866	250503.907	2742209.568
		IT-1B	3.1	北-南	250506.491	2742210.945	250506.939	2742208.337
2	PT-1	PT-1A	3.6	南-北	250510.513	2742206.501	250511.169	2742209.02
		PT-1B	1.1	西-東	250510.795	2742208.176	250512.2	2742207.892



五、結果與討論

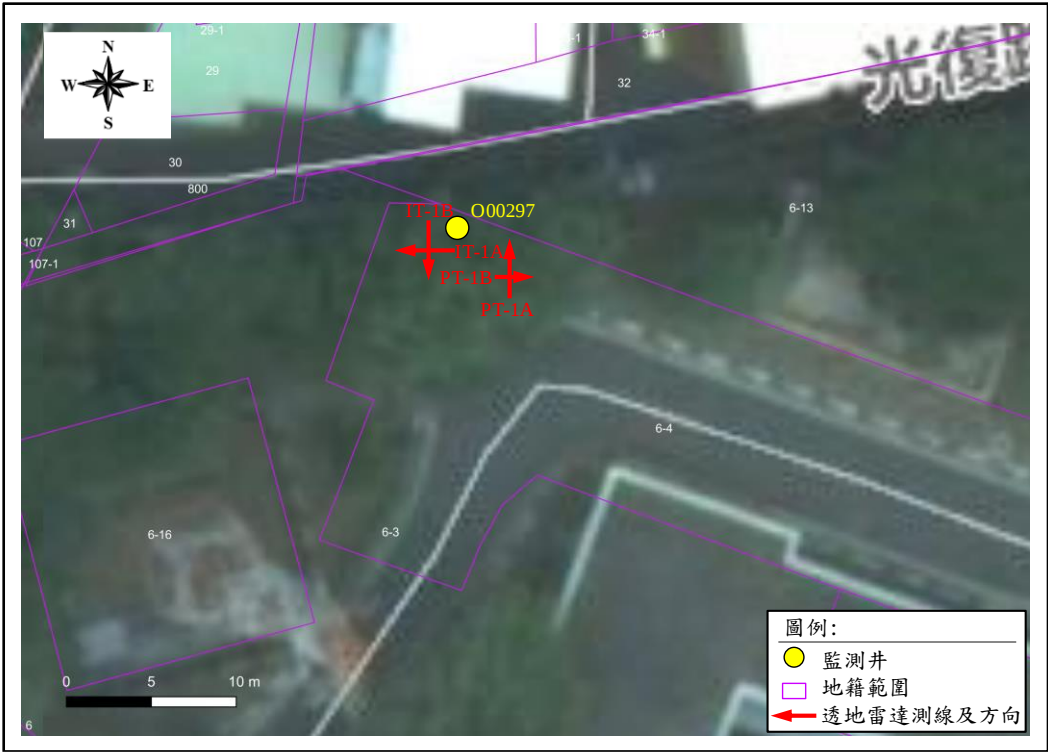


圖5.3-1 透地雷達測線位置分布圖



注入井(IT-1)透地雷達探測



抽除井(PT-1)透地雷達探測

圖5.3-2 透地雷達施作情形



應用地下水抽出處理(P&T)系統搭配預濃縮以可再生型吸附顆粒(RAP)削減地下水中 PFAS

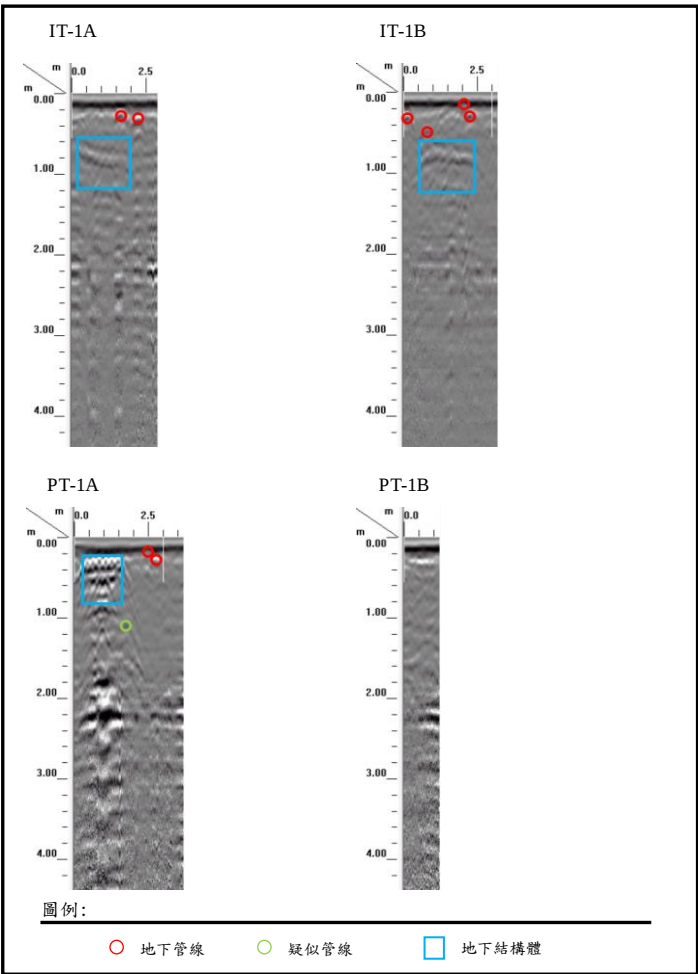


圖5.3-3 透地雷達測線影像剖面圖

表5.3-2 注入井(IT-1)附近地下管線及結構體分佈一覽表

IT-1A項目	1	2	3	4	5
距測線起點水平距離(M)	0.1~2	1.7	2.3		
地表下垂直深度(M)	0.55	0.2	0.22		
備註	地下結構體	明確管線	明確管線		
IT-1B項目	1	2	3	4	5
距測線起點水平距離(M)	0.1	0.5~2.4	0.7	2	2.3
地表下垂直深度(M)	0.25	0.6	0.42	0.1	0.22
備註	明確管線	地下結構體	明確管線	明確管線	明確管線



表5.3-3 抽除井(PT-1)附近地下管線及結構體分佈一覽表

PT-1A項目	1	2	3	4	5
距測線起點水平距離(M)	0.2~1.6	1.7	2.5	2.8	
地表下垂直深度(M)	0.5	1.05	0.1	0.22	
備註	地下結構體	疑似管線	明確管線	明確管線	
PT-1B項目	1	2	3	4	5
距測線起點水平距離(M)	無				
地表下垂直深度(M)	無				
備註	無				

2. 抽除井與注入井設置

本計畫於 113 年 4 月 9 日至 10 日完成抽除井(PT-1)與注入井(IT-1)設置作業，設井前進行人工試挖深度至地表下 2 公尺，確認施作位置下方均無地下管線經過，再以氣旋式鑽堡鑽探至地表下 10.5 公尺，接著拆除鑽桿、安裝井管、濾料填充、完井、隱藏式井蓋設置、現場環境整理作業。

本次設置之抽除井(PT-1)與注入井(IT-1)井徑均為 4 吋，開篩區間為全開篩，井基本資料如表 5.3-4 設井過程施工紀錄詳見表 5.3-5，施工照片詳見圖 5.3-4。

表5.3-4 抽除井與注入井基本資料

類型	井名	X(TWD97)	Y(TWD97)	井頂高程 (MSL,m)	井徑 (in)	井深 (m)	地下水位 (m)
抽除井	PT-1	250513.189	2742208.873	71.320	4	10.43	6.223
注水井	IT-1	250508.430	2742207.183	70.859	4	10.30	6.192



應用地下水抽出處理(P&T)系統搭配預濃縮以可再生型吸附顆粒(RAP)削減地下水中 PFAS

表5.3-5 設井過程施工紀錄

時間	現場施工要事摘要
1.抽除井(PT-1)	
4/9 09：30	到達現場及PT-1設置位置確認
17：40	施工點進行人工試挖至深度2.0m
18：00	環境復原及離開現場
4/10 12：05	開始設井(機械鑽井)
13：23	鑽井至10.5m
13：25	開始拆除內鑽桿
13：30	安裝井管及填充濾料
13：40	開始拆除外套鐵管
13：55	進行完井作業
14：55	隱藏式人孔設置作業
16：10	環境復原及離開現場
2.注入井(IT-1)	
4/10 09：45	到達現場及IT-1設置位置確認
09：50	施工點進行人工試挖至深度2.0m
10：00	開始設井(機械鑽井)
10：30	鑽井至10.5m
10：40	拆除內鑽桿
10：48	安裝井管及填充濾料
10：52	開始拆除外套鐵管
11：20	進行完井作業
11：30	隱藏式人孔設置作業
16：10	環境復原及離開現場



五、結果與討論

	
人工試挖至2m	氣旋式鑽堡鑽井
	
下井管	濾料填封
	
完井	隱藏式井蓋設置
	
抽除井(PT-1)設置完成	注入井(IT-1)設置完成

圖5.3-4 設井施工照片



應用地下水抽出處理(P&T)系統搭配預濃縮以可再生型吸附顆粒(RAP)削減地下水中 PFAS

3. RAP 及 P&T 系統建置

本計畫已完成 RAP 及 P&T 設備設計(圖 4.3-14)，並於 113 年 5 月 10 日完成發包工作，由業興環境科技股份有限公司協助 RAP 及 P&T 設備組裝與建置，於 6 月 3 日至 4 日進行地下水抽出處理系統(P&T)裝設，單元包括 1 組氣升式泵浦(含控制組件及配管)、水錶、氣體流量計、空壓機、1 噸原水槽、100 L RAP 反應槽及周邊水電配管配電銜接等，並於裝設完成後根據現場實際情況進行測試調整，確保系統運轉過程地下水抽、回水量可維持平衡狀態。P&T 系統設備搭配 RAP 平面配置如圖 5.3-5。整套 RAP 及 P&T 系統設備現場架設完成照片如圖 5.3-6，設備裝設施工及完工照片如圖 5.3-7。

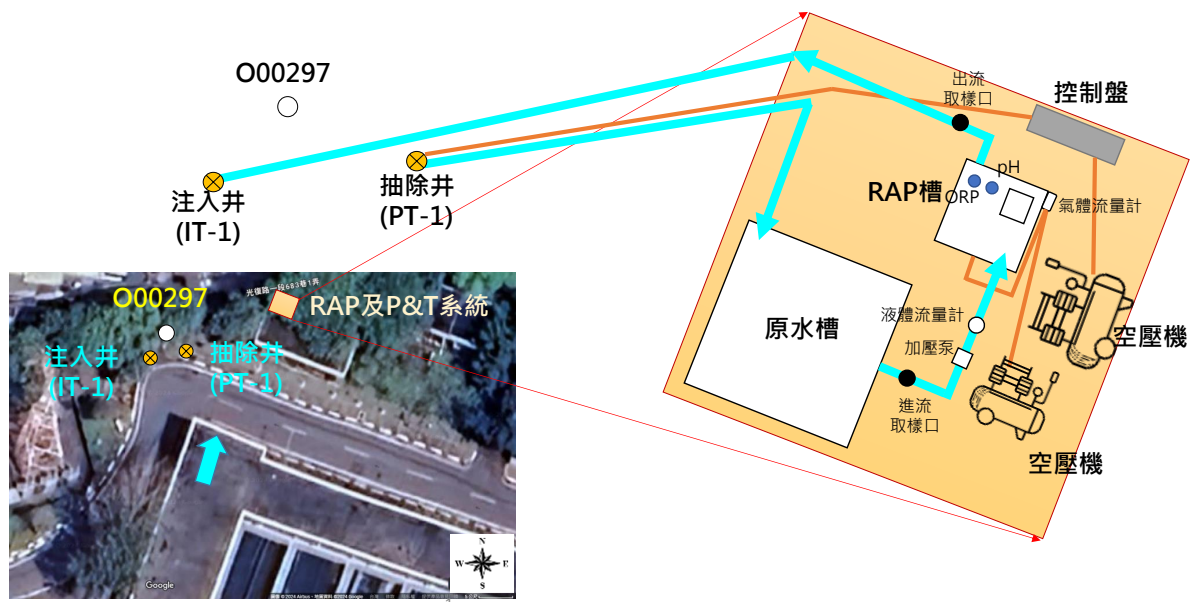
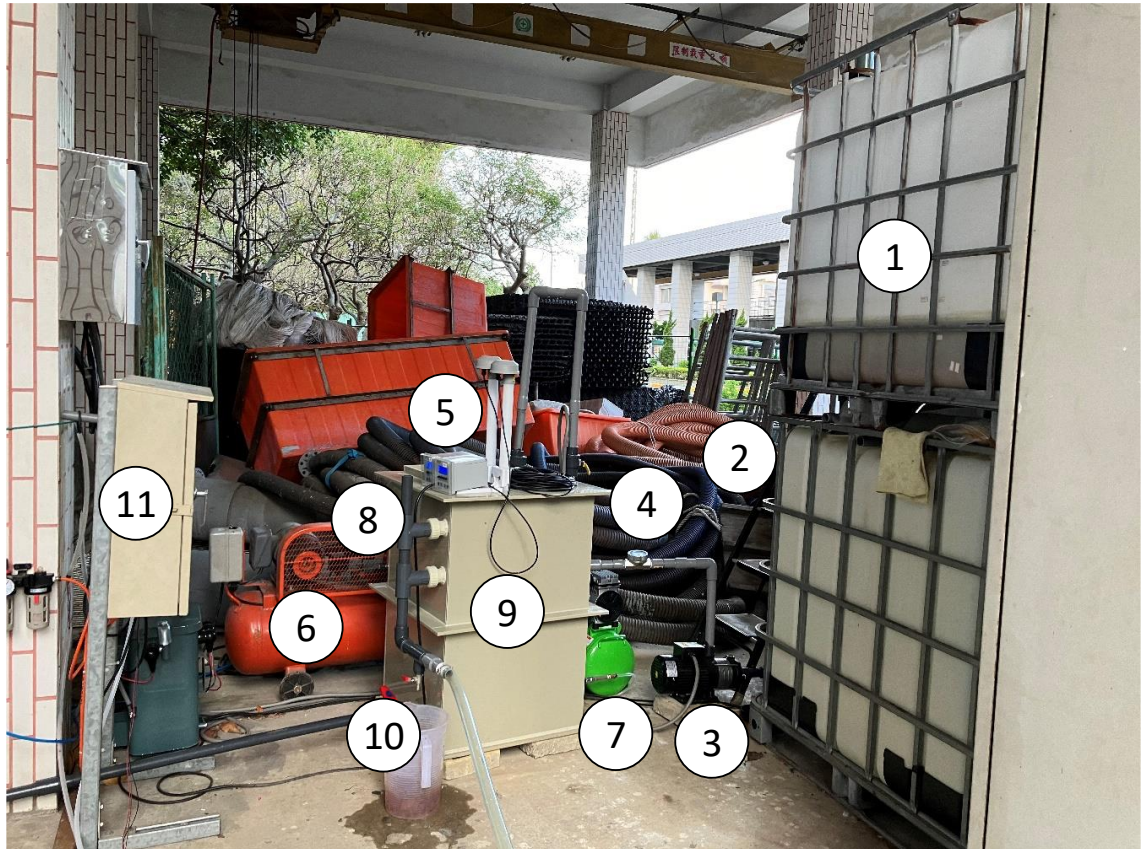


圖5.3-5 RAP 及 P&T 系統平面配置圖



項次	名稱
1	原水槽(體積1,000L)
2	進流採樣口
3	加壓泵
4	電子式流量計(水錶)
5	水質感測器(pH、ORP)
6	空壓機
7	空壓機
8	浮子式氣體流量計
9	RAP槽(有效體積100 L，填充20L RAP)
10	出流採樣口
11	控制盤

圖5.3-6 RAP 及 P&T 系統模場設備架設情形



應用地下水抽出處理(P&T)系統搭配預濃縮以可再生型吸附顆粒(RAP)削減地下水中 PFAS

	
氣升式泵浦	氣升式泵浦安裝
	
原水槽	進流採樣口
	
加壓泵	電子式流量計(水錶)
	
水質感測器 (左：pH、右：ORP)	空壓機

圖5.3-7 RAP 及 P&T 系統模場裝設施工及完工照片



五、結果與討論

	
空壓機	浮子式氣體流量計
	
RAP槽	RAP槽底曝氣孔
	
吸附材料	RAP槽放置吸附材料

圖5.3-7 RAP 及 P&T 系統模場裝設施工及完工照片(續1)



應用地下水抽出處理(P&T)系統搭配預濃縮以可再生型吸附顆粒(RAP)削減地下水中 PFAS

	
出流採樣口	控制盤(上)
	
控制盤(下)	濾液器
	
設備調整測試	RAP及P&T系統設備站屋

圖5.3-7 RAP 及 P&T 系統模場裝設施工及完工照片(續2)



4. 例行性設施操作及維護

本系統設置完成後即進行測試調整，待運轉狀況穩定後自 7 月 1 日開始正式運轉，在 RAP 處理槽添加 RAP，正式運轉期間曾因氣管破損、進水管脫落、空壓機皮帶斷裂進行 3 次維修，迄今持續穩定運轉中，瞬時水流量主要維持在 4.5 ~6.5 L/min 間，瞬時氣體流量維持在 10 L/min，維護保養巡檢紀錄彙整詳表 5.3-6。

表5.3-6 模場試驗系統巡檢紀錄彙整

日期	累積 抽水量 (L)	水流 瞬時流量 (L/min)	氣體 瞬時流量 (L/min)	累計 用電量 (度)	巡檢備註
113/06/11	-	-	-	-	系統測試調整
113/06/12	-	-	-	-	系統測試調整
113/06/18	-	6.50	10	24.1	系統測試調整
113/06/28	-	6.50	10	31.4	系統測試調整， 氣管破損更換
113/07/01	1,800.0	4.03	10	72.5	系統正式運轉， 無異常
113/07/08	4,915.0	6.50	10	79.75	加裝 1 台空壓機
113/07/16	28,800.0	4.52	10	138.9	無異常
113/07/23	43,110.0	4.80	10	197.1	無異常
113/07/29	56,070.0	4.50	10	249.5	空壓機皮帶斷裂更換
113/08/08	77,780.0	5.01	10	319.3	氣管破損更換、 出流管堵塞疏通
113/08/15	117,330.0	5.10	10	377.5	無異常
113/08/23	139,180.0	6.28	11	426.0	無異常
113/08/28	145,850.0	6.52	10	445.6	進水管鬆脫固定、 回注井濾網疏通
113/09/02	159,240.0	6.05	10	471.2	空壓機積水排除
113/10/15	255,540.0	3.00	10	828.1	無異常



5. 地下水定期採樣分析

本模場地下水定期採樣分析項目為水溫、pH 值、ORP、導電度、濁度、氟鹽及 PFAS 等項目，其中除氟鹽及 PFAS 為設施運轉前地下水背景值、設施運轉後第一個月、第二個月及第三個月採樣分析外，其餘皆於現場設施巡檢當日進行化驗分析，以確保數據準確性，說明如下：

- (a) 基本水質數據彙整如圖 5.3-9 所示，進出流 pH 值範圍維持在 6.5~8.0 之間，ORP 值維持在氧化態 150 mV 以上，RAP 槽內溶氧則保持至少 6.5 mg/L，顯示空氣曝氣足夠供 RAP 技術呈氧化態利於吸附氧化程序進行。
- (b) 水中氟離子分析係檢測 RAP 設施進出流濃度，數據得知(表 5.3-7)皆為 ND，主因推估為地下水 PFAS 總濃度極微量(< 20 ppb，實驗室離子層析儀偵測極限為 0.5 ppm)，即使斷鍵分解後仍無法測得。
- (c) 地下水 PFAS 數據(表 5.3-7、圖 5.3-10、圖 5.3-11 及圖 5.3-12)，於測試兩個月後 PFAS 濃度整體呈上升趨勢，團隊推測原因可能為二：
 - (c-1) 受 P&T 設施水力牽引以及該區域地勢較低，加上周圍有鋼板結構物阻擋水流，導致水流性不佳。若上游持續有 PFAS 滲漏，這些化合物將在試驗區域蓄積，導致濃度上升。
 - (c-2) 於七月至九月的颱風季節期間，大量雨水滲入並補充地下水，流經土壤時可能帶有潛在的 PFAS，進而進入試驗區域的地下水層，導致 PFAS 濃度上升。
- (d) 現場運轉三個月數據顯示，除 PFOS 濃度和前一個月差不多外，其餘 PFAS 濃度皆開始下降，已初步看見成效，後續團隊將持續追蹤。

另為快速瞭解 RAP 對現場地下水中 PFAS 的處理效果，因此我們另行取現場水樣，先以活性過濾介質-可除油的玻璃砂砂濾作為 NF 膜前處理，加以去除懸浮固體及少量油脂，再以 hi-NF 膜預濃縮至少 50 倍後，模擬現場的方式，進行數批次的小型連續流管柱實驗(運行時間> 14 天)，初步確認地下水經濃縮後對 RAP 削減 PFAS 成效(> 70%)不受影響，且斷鍵後 PFAS 約有 50~60% 氟離子生成，發現和實驗室吸附/催化氧化及再生試驗的結果相當，流程示意如圖 5.3-8 所示。另以 RAP 氧化功能指標評估，數值皆大於 80%，表示 RAP 活性狀態良好。

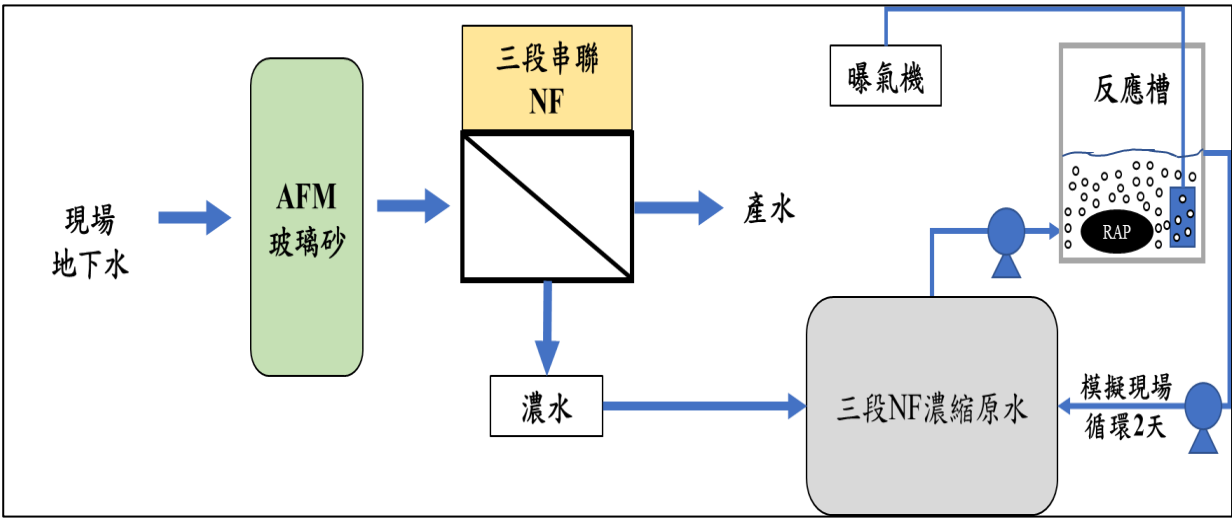


圖5.3-8 模擬第二年模場試驗流程(實驗室)

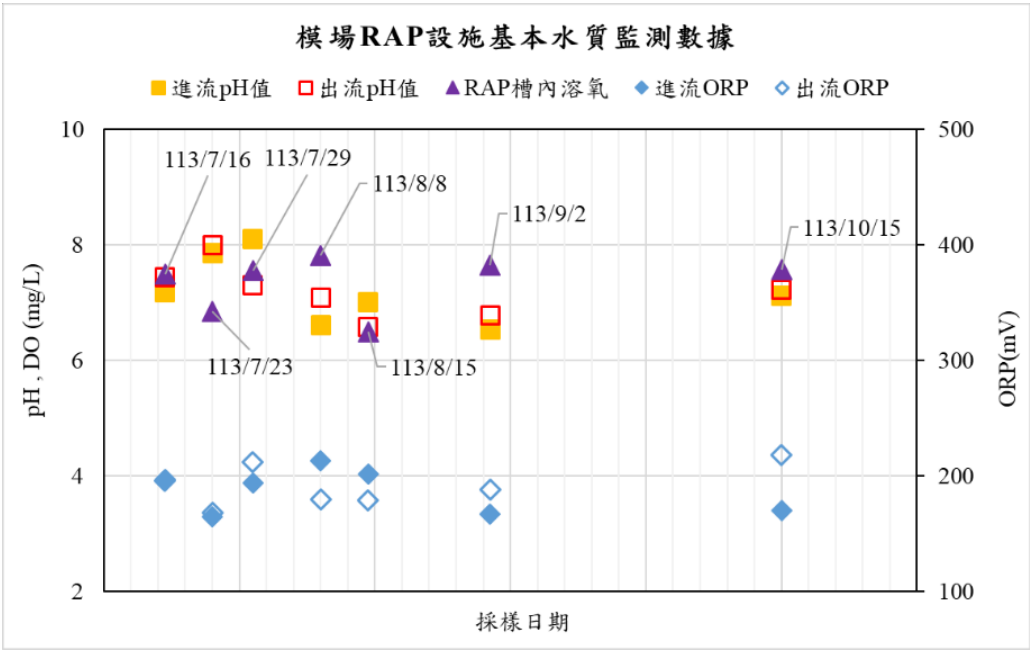


圖5.3-9 現場 RAP 設施基本水質監測數據



應用地下水抽出處理(P&T)系統搭配預濃縮以可再生型吸附顆粒(RAP)削減地下水中 PFAS

表5.3-7 模場地下水 PFAS 及氟離子數據彙整表

	物種	日期	7/18 背景 採樣	9/12 運轉兩個月	10 月份 運轉三個月	偵測極限
陽明交大環 工所	氟離子(F ⁻)		ND	ND	ND	500
中興工程顧 問社實驗室	全氟丁酸(PFBA)		0.120	0.332	0.194	0.00154
	全氟丁基磺酸(PFBS)		0.694	1.76	1.08	0.00534
	全氟戊酸(PFPeA)		0.0835	0.132	0.119	0.00085
	全氟己酸(PFHxA)		0.0772	0.153	0.134	0.00059
	全氟己基磺酸與其支 鏈 同 分 異 構 物 (PFHxS)		0.247	0.596	0.455	0.00077
	全氟庚酸(PFHpA)		0.0218	0.0504	0.0382	0.00072
	全氟辛酸(PFOA)		0.101	0.210	0.176	0.00111
	全氟辛烷磺酸與其支 鏈同分異構物(PFOS)		7.73	11.1	11.9	0.00310

單位：μg/L (ppb)

表 R00

D-EC-I7999-114
版 次：1.2

實驗室地址：台北市內湖區新湖二路二八〇號六樓 電話：886-2-8791-9198 傳真：886-2-2791-8858 電子郵件信箱：eerc-ctr@sinotech.org.tw

報告編號： 24A21TE24801-001MTN010101

委託日期： 2024/07/03

採樣日期：_____

收樣日期：2024/07/03

報告日期：2024/10/21

检测目的:	试验
-------	----

檢測目的:	試驗
樣品特性:	地下水

計畫編號： TE24801-001

報告名稱：應用地下水抽出處理(P&T)系統搭配精濾箱以可再生型吸膠顆粒(RAP)削減地下水中PFAS

委託單位：國立陽明交通大學

聯絡人員：簡偉倫

採樣單位：_____

採樣地點: _____

編製人員： 吳欣慧

1. 本報告封面 1 頁，樣品檢測報告表 1 頁，共計 2 頁，報告分離使用無效。
2. 本報告僅對委方委送之樣品負責。報告內容不得隨意複製、引用或作為商業廣告之用。

聲明書：

(一)本分析報告係依委方委託服務項目執行，秉持公正、誠實進行採樣、檢測，絕無虛偽不實。

(二)本分析報告所使用之檢測方法係經委方同意，參考國內外相關檢測方法執行，報告內容不得作為環保法規任何申報用途。

實驗室主任

吳 紗 系
報告專用章

檢 測 組
組 長

許國忠
報告專用章

(存檔)第 1 頁(共 2 頁)

(本表)第 1 頁(共 1 頁)

D-EC-I7999-115
版 次：1.7

表R10

[illegible]

(存檔)第 2 頁(共 2 頁)

(本表)第 1 頁(共 1 頁)

圖5.3-10 地下水背景採樣 PFAS 委測正式報告-113年07月

[illegible]

表R00

D-EC-I7999-114
版 次：1.2

實驗室地址：台北市內湖區新潮二路二八〇號六樓 電話：886-2-8791-9198 傳真：886-2-2791-8858 電子郵件信箱：ecrc-ctr@sinotech.org.tw

報告編號:	24A17TE24801-003RTN010101
委託日期:	2024/10/08
採樣日期:	—
收樣日期:	2024/10/08
報告日期:	2024/10/17
檢測目的:	調查
樣品特性:	地下水

計畫編號:	TE24801-003
報告名稱:	應用地下水抽出處理(PACT)系統搭配預凝縮以可再生型吸附劑(RAP)削減地下水中共PFAS
委託單位:	國立陽明交通大學
聯絡人員:	簡偉倫
採樣單位:	—
採樣地點:	—
編製人員:	吳欣慧

1. 本報告封面 1 頁，樣品檢測報告表 1 頁，共計 2 頁，報告分離使用無效。
2. 本報告僅對委方委送之樣品負責。報告內容不得隨意複製、引用或作為商業廣告之用。

聲明書：

(一)本分析報告係依委方委託服務項目執行，秉持公正、誠實進行採樣、檢測，絕無虛偽不實。

(二)本分析報告所使用之檢測方法係經委方同意，參考國內外相關檢測方法執行，報告內容不得作為環保法規任何申報用途。



實驗室主任

吳永宗

吳 紗 糸
報告專用章

檢 測 組
組 長

許國恩

許國恩
報告專用章

(存檔)第 1 頁(共 2 頁)

(本表)第 1 頁(共 1 頁)

表R10

分析報告表

D-EC-I7999-115
版 次：1.7

[illegible]

(存檔)第 2 頁(共 2 頁)

(本表)第 1 頁(共 1 頁)

圖5.3-12 地下水背景採樣 PFAS 委測正式報告-113年10月



應用地下水抽出處理(P&T)系統搭配預濃縮以可再生型吸附顆粒(RAP)削減地下水中 PFAS

6. 現場 RAP 氧化功能指標驗證

模場 RAP 及 P&T 設施於 113 年 07 月 01 日正式運轉，本團隊為釐清現場 RAP 活性狀態，分別於運轉後一個月及兩個月，取出模組內少量 RAP 攜回實驗室進行氧化功能指標試驗。數據顯示(表 5.3-8)，現場模組運轉第一個月及第二個月 RAP 的 TOC 平均去除率分別約為 87.7%及 87.5%，即現場 RAP 活性狀態為佳，初步判定亦無受地下水其他基質(如總有機碳或硫酸鹽等)影響氧化功能。後續於第二年計畫將持續定期追蹤現場 RAP 活性情形，確保運轉過程中 RAP 保持良好狀態，使其本專案能發揮最好成效來削減地下水中 PFAS。

表5.3-8 模場 RAP 氧化功能驗證

樣品	批次	TOC 平均去除率
現場第一個月 RAP	B5~ B7	88.2%
	B8~ B10	87.2%
現場第二個月 RAP	B5~ B7	86.7%
	B8~ B10	88.3%

*苯甲酸原水 TOC: 36.8 mg/L

5.4 結論

1. P&T 及 RAP 設施操作與維護

本系統設置完成後即進行測試調整，待運轉狀況穩定後自 7 月 1 日開始正式運轉，在 RAP 處理槽添加 RAP，正式運轉期間曾因氣管破損、進水管脫落、空壓機皮帶斷裂進行 3 次維修，迄今持續穩定運轉中，瞬時水流量主要維持在 4.5~6.5 L/min，瞬時曝氣量維持在 10 L/min，模場試驗系統已連續運轉超過三個月，截至 113 年 10 月 15 日，累積總抽水量約 256 噸，累計使用電力 828 度。初步估算以該 P&T 搭配 RAP 曝氣程序削減 PFAS，每單位水量功耗約 3.24 kW/h，操作成本約 13 元/m³ 水(每度電以 4 元計)。

2. 定期監測採樣分析

本計畫於 P&T 及 RAP 設施操作與維護開始前，執行第一次地下水背景值採樣，並於運轉第二個月進行了第二次地下水水質採樣，之後委託檢測公司進行 PFAS 分析。分析報告顯示，八種 PFAS 化合物在試驗開始後的第二個月濃度呈現上升趨勢。團隊推測可能原因有兩點：



(1) 由於 P&T 設施水力牽引以及該區域地勢較低，加上周圍有鋼板結構物阻擋水流，導致水流性不佳。若上游持續有 PFAS 滲漏，這些化合物將在試驗區域蓄積，導致濃度上升。

(2) 於七月至九月的颱風季節期間，大量雨水滲入並補充地下水，流經土壤時可能帶有潛在的 PFAS，進而進入試驗區域的地下水層，導致 PFAS 濃度上升。

於現場 RAP 設施運轉三個月數據顯示，除 PFOS 濃度和前一個月差不多外，其餘 PFAS 濃度皆開始下降，已初步看見成效，後續團隊將持續追蹤。

3. 實驗室測試成果

(1) RAP 技術搭配不同氧化促進劑削減 PFAS

使用 RAP 技術搭配不同氧化促進劑削減 PFAS 效果良好，其中臭氧曝氣反應最快(0.5 小時)，其次是雙氧水輔以空氣曝氣(4 小時)，而空氣曝氣則需 48 小時。在 PFAS 降解過程中，僅在 RAP 配合空氣曝氣處理 PFOA 時，觀察到極少量的中間產物生成(2.28%的 PFHxA 和 0.25%的 PFHpA)，其他組別未見中間產物，顯示促進劑的氧化能力對降解效果有顯著影響，氧化能力的強弱順序為臭氧曝氣>雙氧水(輔以空氣曝氣)>空氣曝氣。團隊將在第二年度進一步確認 PFAS 降解後的中間產物生成情況。考量水體成分的複雜性，團隊計畫於下一年度配置多種 PFAS 合成廢水，觀察物種間的移除效率影響，並研究 RAP 氧化功能指標與 RAP 失活後的再活化條件，進一步優化技術應用，為應對未來國際管制做好準備。

(2) RAP 再生程序評估

本計畫建立以苯甲酸進行十個循環批次氧化測試，來驗證 RAP 氧化功能指標的測試方法。結果顯示，現場 P&T 及 RAP 設施在運轉的第一、第二個月取回的 RAP，仍保持良好的氧化功能，初步判定未受地下水中其他基質(如總有機碳或硫酸鹽)影響。在實驗室進行五循環批次處理 PFOA 後，不論是臭氧曝氣、雙氧水輔以空氣曝氣，或單純空氣曝氣組，其氧化功能指標均無顯著差異，顯示 RAP 技術搭配不同氧化促進劑能有效削減 PFAS，並且同步進行再生程序，使 RAP 得以重複使用。

因此，本計畫確認 RAP 技術搭配空氣曝氣能有效斷鍵氧化削減 PFAS，並同時再生 RAP 以維持其活性，適合作為處理地下水中 PFAS 的可行方案。



(3) RAP 失活之再活化方案

評估已失活的 RAP(氧化功能指標降< 20%)再活化的成效，係添加不同劑量次氯酸鈉、溫度 80°C及曝空氣 4 小時進行觸媒孔洞及表面積碳清除。結果顯示，添加 1000 ppm 次氯酸鈉與 500 ppm 次氯酸鈉的實驗組，RAP 的氧化功能指標可分別恢復至 85% 及 60%。由此可知，次氯酸鈉能有效清除 RAP 孔洞上的積碳，使其恢復原有的處理效能。

(4) hi-NF 預濃縮試驗

經 NF 膜的預濃縮試驗，藉由兩段式 NF 串聯方式，可將 PFBA 濃縮 4.17 倍，高分子量的 PFHpA (C7)及 PFOA(C8)濃縮倍數可大幅提升至 11.7 及 45.9 倍。

5.5 建議

1. 增加 NF 膜預濃縮設備

預計明年度計畫於模場(1)建置 NF 膜預濃縮設備於 RAP 設施前，並透過加大抽水量來提升削減 PFAS 成效。另測試 RAP 設施以(2)不同水力停留時間及添加氧化促進劑(如雙氧水)等試驗參數，(3)評估整體運轉成效、現場 RAP 活性及延長再生頻率時程等指標，做為明年度試驗目標。

2. 優化實驗室測試參數

規劃測試 RAP 技術應用於以下三個方面：(1)處理多種 PFAS 化合物時，觀察是否會產生競爭效應或影響其削減效能；(2)透過搭配不同氧化促進劑及劑量，持續優化 RAP 技術的同步吸附氧化/再生程序；(3)進行失活後之再活化試驗，以找出最適合的活化條件。另測試 hi-NF 膜預濃縮條件，如回收率、多段式串並聯程序及多種 PFAS 濃縮試驗。期望經由這些測試，確定 RAP 技術在土壤及地下水領域的最適化操作參數。



六、後續工作說明

本模場專案計畫提出期程為 2 年，本報告為第一年工作執行成果，在第二年除延續第一年系統運轉操作維護及定期採樣監測外，預計於第二年度增設預濃縮設備於 RAP 設施前，期望能提升整體運轉成效，執行規劃工作說明如下：

1. P&T 及 RAP 設備設置暨設施操作與維護

(1) 加大模場試驗抽水量

於第二年度規劃再加大抽水量時，透過中空纖維納濾膜預濃縮方式試驗評估在地下水 PFAS 濃度相對較低條件下的 RAP 技術應用成效。增大試驗範圍的部分，試驗區域因位於污水處理廠放流口附近，有高壓電塔、放流水匯合井、放流抽水巴歇爾計量槽、放流抽水站及地下管線，地下管線複雜且可施作空間有限，因此第二年擬以加大抽水量方式，達到提升地下水處理量的目的，期望能增大試驗影響範圍。

(2) 模場增設預濃縮設備於 RAP 設施前

預期透過濃縮裝置能提升削減 PFAS 效果。另測試 RAP 設施以(2)不同水力停留時間及添加氧化促進劑(如雙氧水)等試驗參數，(3)評估整體運轉成效、現場 RAP 活性及延長再生頻率時程等指標，做為明年度試驗目標。

(3) RAP 氧化功能指標

因第二年度模場計畫預計加大抽水量及增設預濃縮設備於 RAP 設施前，將延續第一年工作持續於第二年度進行現場 RAP 氧化功能指標驗證，以確認現場 RAP 活性狀態，適時更換或至現場再活化 RAP，同時於成果階段估算 RAP 活化週期，使其未來模場削減地下水 PFAS 成效最大化。

2. 定期監測採樣分析

為掌握處理系統對地下水中 PFAS 削減成效，試驗期間延續第一年度將定期進行水質採樣檢測分析，監測頻率預計為增設預濃縮設備後，系統運轉前背景採樣 1 次，爾後監測頻率調整為第 1 及 2 個月每兩週 1 次，自第 3 個月起再調整為每月 1 次至第二年專案結束前一個月。檢測項目為 PFOS、PFOA、氟鹽、基本水質項目如 pH、水溫、ORP、導電度及濁度等，此外擬額外進行 PFOS 及 PFOA 氧化轉換後的中間產物分析，以確認增設預濃縮設備後其濃縮成效及



應用地下水抽出處理(P&T)系統搭配預濃縮以可再生型吸附顆粒(RAP)削減地下水中 PFAS

RAP 對 PFOS 及 PFOA 的破壞轉換成效。

3. 精進實驗室測試條件

目前實驗室已證實 RAP 搭配不同氧化促進劑，以吸附/催化氧化法能削減 PFAS，且能同步進行再生程序，使 RAP 得以重複使用。若失活 RAP 透過再活化程序可將 RAP 的氧化功能指標恢復至 85%。因此未來會持續探討 RAP 技術處理 PFAS 之相關應用，如搭配不同氧化劑及劑量，以找出 RAP 技術的同步吸附氧化/再生程序與 RAP 失活後之再活化條件，整合出 RAP 技術既經濟且能有效削減 PFAS 最適化條件。



七、參考文獻

- Arvaniti, O. S., Hwang, Y., Andersen, H. R., Stasinakis, A. S., Thomaidis, N. S., & Aloupi, M. (2015). Reductive degradation of perfluorinated compounds in water using Mg-aminoclay coated nanoscale zero valent iron. *Chemical Engineering Journal*, 262, 133-139.
- Birk, G.M. (2016). Immobilization of PFASs using activated carbon and aluminum hydroxide. *Emerging Contaminants Summit*, March 1-2, 2016, Westminster, Colorado.
- Blotevogel, J. (2017). An Electric Fix for Removing Long-Lasting Chemicals in Groundwater. *The Conversation*, 10 Apr 2017. < <https://theconversation.com/an-electric-fix-for-removing-long-lasting-chemicals-in-groundwater-69610> >
- Brunn, H., Arnold, G., Körner, W., Rippen, G., Steinhäuser, K. G., & Valentin, I. (2023). PFAS: forever chemicals—persistent, bioaccumulative and mobile. Reviewing the status and the need for their phase out and remediation of contaminated sites. *Environmental Sciences Europe*, 35(1), 1-50.
- Burns, D. J., Hinrichsen, H. M., Stevenson, P., & Murphy, P. J. (2022). Commercial-scale remediation of per-and polyfluoroalkyl substances from a landfill leachate catchment using Surface-Active Foam Fractionation (SAFF®). *Remediation Journal*, 32(3), 139-150.
- Burns, D. J., Stevenson, P., & Murphy, P. J. (2021). PFAS removal from groundwaters using Surface-Active Foam Fractionation. *Remediation Journal*, 31(4), 19-33.
- Chen, C. P., Chen, Y. M., Nguyen, T. N. A., Chou, S. S., & Huang, C. (2024). Effective treatment of cyanide containing coking wastewater by catalytic ozonation with a novel ruthenium-supported catalyst. *Environmental Chemical Engineering*, 12(6), 114356.
- Cotruvo, J. A., Goldhaber, S. B., & Cohen, A. J. (2023). EPA's Unprecedented Interim Drinking Water Health Advisories for PFOA and PFOS. *Groundwater*, 61(3), 301-303.
- Crimi, M. (2016). PFAS Treatment Options for Soil & Groundwater. *NEWMOA PFAS Treatment & Remediation Webinar*.
- Cummings L., et al. (2015). *Recommendation on Perfluorinated Compound Treatment*



Options for Drinking Water. New Jersey Drinking Water Quality Institute, Treatment Subcommittee, June 2015.

Dasu, K. and L.S. Lee. (2016). Aerobic biodegradation of toluene-2,4-di(8:2 fluorotelomer urethane) and hexamethylene-1,6-di(8:2 fluorotelomer urethane) monomers in soils. *Chemosphere* 144:2482-2488.

Dickenson, E. and C. Higgins. (2016). Treatment Mitigation Strategies for Poly- and Perfluoroalkyl Substances, Water Research Foundation, Project #4322.

Dudley, L.-A., et al. (2015). Removal of Perfluoroalkyl Substances by PAC Adsorption and Anion Exchange: Executive Summary. Water Research Foundation, Project #4344, 5 pp.

Emerging Contaminants Summit, March 1-2, (2016), Westminster, Colorado. Poster abstract.

Gu, Y., Dong, W., Luo, C., & Liu, T. (2016). Efficient reductive decomposition of perfluorooctanesulfonate in a high photon flux UV/sulfite system. *Environmental science & technology*, 50(19), 10554-10561.

Horneman, A. (2016). Applications of ScisoR® for In-situ Treatment of PFOS in Soil and Groundwater

Huang, C. & Chou, S. (2023), On-site regeneration of a modified activated carbon by ozone. The 6th IWA international conference on eco-technologies for wastewater treatment.

Huang, J., Wang, X., Pan, Z., Li, X., Ling, Y., & Li, L. (2016). Efficient degradation of perfluorooctanoic acid (PFOA) by photocatalytic ozonation. *Chemical Engineering Journal*, 296, 329-334.

J. Wang, L. Wang, C. Xu, R. Zhi, R. Miao, T. Liang, X. Yue, Y. Lv, T. Liu, Perfluorooctane sulfonate and perfluorobutane sulfonate removal from water by nanofiltration membrane: The roles of solute concentration, ionic strength, and macromolecular organic foulants, *Chem. Eng. J.* 332 (2018) 787–797.

Krause, M. J., Thoma, E., Sahle-Damesessie, E., Crone, B., Whitehill, A., Shields, E., & Gullett, B. (2022). Supercritical water oxidation as an innovative technology for PFAS



destruction. *Journal of Environmental Engineering*, 148(2), 05021006.

Kulkarni, P. R., Richardson, S. D., Nzeribe, B. N., Adamson, D. T., Kalra, S. S., Mahendra, S., ... & Popovic, J. (2022). Field demonstration of a sonolysis reactor for treatment of PFAS-contaminated groundwater. *Journal of Environmental Engineering*, 148(11), 06022005.

Leahy, M. C., Byrd, J. & Nelson, D. (2019) PFAS: lessons learned during the evolution of global regulations. Battelle Bioremediation Symposium.

Lee, L.S., S. Park, and J. Zenobio. (2015). Abiotic Treatment Technologies for In-Site Remediation of Persistent Perfluoroalkyl Acids. NICOLE Workshop, June 26, 2015, Manchester, UK. 37 slides.

Liu, C. S., Higgins, C. P., Wang, F., & Shih, K. (2012). Effect of temperature on oxidative transformation of perfluorooctanoic acid (PFOA) by persulfate activation in water. *Separation and purification technology*, 91, 46-51.

Liu, J. and S.M. Avendaño. 2013. Microbial degradation of polyfluoroalkyl chemicals in the environment: A review. *Environment International* 61:98-114.

Lu, D., Sha, S., Luo, J., Huang, Z., & Jackie, X. Z. (2020). Treatment train approaches for the remediation of per-and polyfluoroalkyl substances (PFAS): A critical review. *Journal of hazardous materials*, 386, 121963.

Martin, B., & Hay, K. (2019), PFAS treatment method optimization for a large public water utility. Battelle Bioremediation Symposium.

McDonough, J. T., Kirby, J., Bellona, C., Quinnan, J. A., Welty, N., Follin, J., & Liberty, K. (2022). Validation of supercritical water oxidation to destroy perfluoroalkyl acids. *Remediation Journal*, 32(1-2), 75-90.

Merino, N., Qu, Y., Deeb, R. A., Hawley, E. L., Hoffmann, M. R., & Mahendra, S. (2016). Degradation and removal methods for perfluoroalkyl and polyfluoroalkyl substances in water. *Environmental Engineering Science*, 33(9), 615-649.

MPCA (Minnesota Pollution Control Agency). (2008a). Minnesota Decision Document, 3M



Oakdale Disposal Site, City of Oakdale, Washington County, Minnesota.

MPCA (Minnesota Pollution Control Agency). (2008b). Minnesota Decision Document, 3M Woodbury Disposal Site, City of Woodbury, Washington County, Minnesota.

MPCA (Minnesota Pollution Control Agency). (2009). Minnesota Decision Document, 3M Cottage Grove Disposal Site, City of Cottage Grove, Washington County, Minnesota.

NanoPure (2023). Novel nanofiltration membrane for water and wastewater treatment. Water & Wastewater Asia.

Ochoa-Herrera, V., Sierra-Alvarez, R., Somogyi, A., Jacobsen, N. E., Wysocki, V. H., & Field, J. A. (2008). Reductive defluorination of perfluorooctane sulfonate. *Environmental Science & Technology*, 42(9), 3260-3264.

Park, S., Lee, L. S., Medina, V. F., Zull, A., & Waisner, S. (2016). Heat-activated persulfate oxidation of PFOA, 6: 2 fluorotelomer sulfonate, and PFOS under conditions suitable for in-situ groundwater remediation. *Chemosphere*, 145, 376-383.

Rodriguez-Freire, L., Balachandran, R., Sierra-Alvarez, R., & Keswani, M. (2015). Effect of sound frequency and initial concentration on the sonochemical degradation of perfluorooctane sulfonate (PFOS). *Journal of hazardous materials*, 300, 662-669.

Safulko, T.Y. Cath, F. Li, B. Tajdini, M. Boyd, R.P. Huehmer, C. Bellona. 2023. Rejection of perfluoroalkyl acids by nanofiltration and reverse osmosis in a high-recovery closed-circuit membrane filtration system. *Separation and Purification Technology*.

Sharma, S., Shetti, N. P., Basu, S., Nadagouda, M. N., & Aminabhavi, T. M. (2022). Remediation of per-and polyfluoroalkyls (PFAS) via electrochemical methods. *Chemical Engineering Journal*, 430, 132895.

Tellez, M. H. (2014). Treatment of perfluorinated compounds and nitroaromatics by photocatalysis in the presence of ultraviolet and solar light.

Thi, L. A. P., Do, H. T., & Lo, S. L. (2014). Enhancing decomposition rate of perfluorooctanoic acid by carbonate radical assisted sonochemical treatment. *Ultrasonics sonochemistry*, 21(5),



1875-1880.

US EPA .(2021). PFAS master list of PFAS substances.

<https://comptox.epa.gov/dashboard/chemical-lists/pfasmaster>. Accessed 15 March 2024.

USEPA. (2016a). Drinking Water Health Advisory for Perfluorooctanoic Acid (PFOA). Office of Water, EPA 822-R-16-005, 103 pp.

USEPA. (2016b). Drinking Water Health Advisory for Perfluorooctane Sulfonate (PFOS). Office of Water, EPA 822-R-16-004, 88 pp.

USEPA. (2023). Best Available Technologies and Small System Compliance Technologies for Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFAS) in Drinking Water. EPA 822-P-23-009.

Yin, P., Hu, Z., Song, X., Liu, J., & Lin, N. (2016). Activated persulfate oxidation of perfluorooctanoic acid (PFOA) in groundwater under acidic conditions. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 13(6), 602.

Zhang, P., Li, Z. (2014). Photocatalytic Degradation of Perfluorooctanoic Acid. In: Hu, A., Apblett, A. (eds) *Nanotechnology for Water Treatment and Purification. Lecture Notes in Nanoscale Science and Technology*, vol 22. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-06578-6_3

USEPA. (2024). PFAS National Primary Drinking Water Regulation, 89 FR 32532 (to be codified at 40 C.F.R. §141 and 40 C.F.R §142) <https://www.federalregister.gov/d/2024-07773>

行政院環境保護署(2013)，地下水有害物質環境傳輸調查及管制標準檢討計畫(第一期)

行政院環境保護署(2022)，地下水水質管理及污染預防示範計畫

何心平、簡偉倫、陳國源、周珊珊、黃志彬(2023)，催化氧化活性碳結合臭氧處理高科技廠高濃度有機廢水應用，112 年綠色技術與工程實務研討會

周珊珊、何心平、賴怡芬、梁文龍、黃志彬(2020)，新型觸媒處理難降解 COD 與含氮廢水之技術與應用介紹，中華民國環境工程學會電子報，中華民國 109 年第 3 期

周珊珊、簡偉倫、陳國源、陳銘健、吳芳鈴、郭宥妍(2023)，應用可再生型吸附顆粒(RAP)



應用地下水抽出處理(P&T)系統搭配預濃縮以可再生型吸附顆粒(RAP)削減地下水中 PFAS

搭配多介質水力沖洗循環系統(HFS)去除受 LNAPL 污染之土壤及地下水案例介紹。環保署環訓所環境教育及訓練電子報/環保技術新知

胡景堯等人(2019)，以浮除法回收廢水中的全氟化合物(PFCs)-新收集劑及新浮除程序之開發期末報告。

許東鈞、周珊珊、黃志彬(2022)，複合金屬改質活性碳臭氧再生之研究，第三十二屆下水道與水環境再生研討會

蔡明瀚、簡偉倫、陳國源、周珊珊、黃思蓁、趙淑如、黃志彬、張莉珣、顏旭明(2022)，含氮廢污水綠色處理技術系統建立，工業污染防治，第 155 期，85-102。

周珊珊(2022)，應用可再生型吸附顆粒(RAP)搭配多介質水力沖洗循環系統(HFS)去除受 LNAPL 污染之土壤及地下水(第二年)，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

環境部環境管理署土壤及地下水污染整治基金管理會(2023)，PFAS 在土壤及地下水調查之國際趨勢、國內情形及展望，全氟及多氟烷基物質管理現況暨未來展望研討會

環境部水質保護司(2023)，PFAS 於放流水與飲用水國際管制趨勢及國內現況與展望，全氟及多氟烷基物質管理現況暨未來展望研討會

鄭郁欣(2021)，以摻鈉和錳之活性碳去除全氟丁烷磺酸之研究(碩士論文)，國立臺灣大學

孫塘澤(2020)，以顆粒活性碳吸附全氟丁烷磺酸及其微波再生之研究(碩士論文)，國立臺灣大學



專案執行自評表

專案主持人	周珊珊	專案名稱	應用地下水抽出處理(P&T)系統搭配預濃縮以可再生型吸附顆粒(RAP)削減地下水中 PFAS			
專案類型	☐ 先導型 ☐ 研究型 ☒ 模場型		專案主題	☒ 調查 ☐ 整治 ☐ 其他		
項次	類別	缺失點數	自評項目	執行單位檢核		本署審核
				是	否	
一	計畫書核定修正	1 點	依規定期限內備文提送	☒	☐	
		1 點	書面資料完整且無補件情況	☒	☐	
		1 點	報告依格式規定撰寫	☒	☐	
		1 點	依規定期限內上傳電子檔	☒	☐	
		1 點	系統資料依規定期限內登錄且資料登錄完整（含本署 SRFS 系統與國科會 GRB 系統）	☒	☐	
二	期中及期末	1 點	依規定期限內備文提送	☒	☐	
		1 點	書面資料完整且無補件情況	☒	☐	
		1 點	報告依格式規定撰寫	☒	☐	
		1 點	依規定期限內上傳電子檔	☒	☐	
		1 點	系統資料依規定期限內登錄且資料登錄完整（含本署 SRFS 系統與國科會 GRB 系統）	☒	☐	
三	結案及核銷	2 點	依規定期限至本署 BAF 系統上傳支用單據	☒	☐	
		3 點	結案上傳支用單據及相關資料完整	☒	☐	
四	其他	4 點	計畫主持人配合出席本專案成果發表活動（或指定代理人如協同主持人、同專業且為助理研究員以上職等）	☒	☐	
		1 點	計畫執行者於執行期間與單位內各處室溝通良好，行政作業效率良好。	☒	☐	
合計		20 點				

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

未依實況登錄者，由本署補登依各階段執行紀錄進行缺失點數扣款。





附件一

模場試驗場址所在地主管機關同意函

模場試驗場址基本資料及地方主管機關確核表



正本

檔 號：

保存年限：

國家科學及技術委員會新竹科學園區管理局
函

地址：3016新竹市新安路2號
聯絡人：賴昱璋 技士
電話：03-5773311分機2331
傳真：03-5798340
電子信箱：yclai@sipa.gov.tw

30010 P2-掛號
國立陽明交通大學
新竹市大學路1001號

受文者：國立陽明交通大學

發文日期：中華民國113年1月4日

發文字號：竹環字第1130000814號

速別：普通件

密等及解密條件或保密期限：

附件：如主旨

主旨：檢送貴校環境科技及智慧系統研究中心執行環境部「112年度土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗專案」土地使用同意書1式3份，請查照。

說明：復貴校112年12月27日陽明交大訊環科字第1120056901號函。

正本：國立陽明交通大學
副本：本局環安組

局長王永壯

總收文



1130000855



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

場址名稱	新竹科學園區污水廠 O00297 監測井
主管機關	新竹科學園區管理局
場址座標	X：250503，Y：2742204
場址地址	新竹市東區園區一路 4 號
場址地號	新竹市科園段科園小段 6-28 地號
場址種類	污水處理廠內 O00297 監測井
場址面積 (m ²)	30.0 (m ²)
場址 列管狀態	無列管 環境部地下水水質管理及污染預防示範計畫資料：全氟辛酸(2018 年：0.0001370 mg/L，2021 年：0.0001130 mg/L)、全氟辛酸磺酸(2018 年：0.0047672 mg/L，2021 年：0.0041400 mg/L)國內目前暫無相關標準目前屬非列管公告場址，惟調查濃度大於美國環保署 2016 年訂定 PFOA 或/及 PFOS 終生健康建議值(Lifetime Health Advisories)0.00007 mg/L。本次整治試驗 PFAS 屬國際及國內關注研究污染物，故計畫超前部署，以了解削減地下水中 PFAS 的處理技術與成效。
土壤 污染物	全氟辛酸 0.00113 mg/L、全氟辛酸磺酸 0.00414 mg/L
地下水 污染物	全氟辛酸 0.00113 mg/L、全氟辛酸磺酸 0.00414 mg/L



土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗專案
地方主管機關確核表

場址名稱	新竹科學園區污水廠 O00297 監測井
轄區主管機關	新竹市環境保護局
場址地址	新竹市東區園區一路四 4 號
場址地號	新竹市科園段科園小段 6-28 地號
場址種類	☐ 工廠 ☐ 加油站 ☐ 農地 ☐ 儲槽 ☒ 其他，請說明：屬非列管公告場址惟本次整治試驗 PFAS 屬國際及國內關注研究污染物，故計畫超前部署，以了解削減地下水中 PFAS 的處理技術與成效。
場址面積 (m ²)	30.0 (m ²)
場址列管狀態	☐ 控制場址 ☐ 整治場址 ☐ 劃定地下水限制使用地區 ☒ 其他，請說明：屬非列管公告場址惟本次整治試驗 PFAS 屬國際及國內關注研究污染物，故計畫超前部署，以了解削減地下水中 PFAS 的處理技術與成效。
場址列管日期	____年____月____日
執行應變 或各類計畫	☒ 無 ☐ 有，請說明：如七條五、控制計畫、整治計畫
周邊高污染事業 與敏感受體	☒ 無 ☐ 有，請說明：
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：
-------------------	--



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		
此區域為新竹市環保局管轄，土地所有權人為新竹科學園區管理局。該區位地下水全氟辛酸(2018 年：0.0001370 mg/L，2021 年：0.0001130 mg/L)、全氟辛烷磺酸(2018 年：0.0047672 mg/L，2021 年：0.0041400 mg/L)。		
建議說明		
本場址適合進行模場試驗，本專案技術並非整治計畫，惟因應國內及國際趨勢超前部屬研究了解削減地下水中 PFAS 的處理技術與成效。		
檢 附 文 件	☐ 初步評估報告(整治場址)	☐ 公司／工廠登記證明
	☒ 土地登記第二類謄本	☐ 已列管之公告
	☐ 污染檢驗報告書	☒ 場址污染地籍圖(黏貼於下頁)



土地建物查詢資料

新竹市新竹市科園段科園小段 0006-0028地號

資料查詢時間：民國112年12月26日09時47分

頁次：1

***** 土地標示部 *****

登記日期：民國105年10月04日
地目：建
使用分區：(空白)
民國112年01月
地上建物建號：(空白)
其他登記事項：(權狀註記事項)科園段科園小段623建號之建築基地地號：科園段科園小段6、6-3至6-10、6-12至6-14地號
(權狀註記事項)科園段科園小段628建號之建築基地地號：科園段科園小段6、6-3至6-10、6-12至6-14地號
(權狀註記事項)科園段科園小段632建號之建築基地地號：科園段科園小段6、6-3、6-4、6-5、6-6、6-7、6-8、6-9、6-10、6-11、6-12、6-13、6-14地號
(權狀註記事項)科園段科園小段639建號之建築基地地號：科園段科園小段6、6-3至6-10、6-12至6-14地號
分割自：0006-0004地號

***** 土地所有權部 *****

(0001)登記次序：0001
登記日期：民國074年03月23日
原因發生日期：民國074年03月19日
所有權人：中華民國
統一編號：0000000158
住址：(空白)
管 理 者：國家科學及技術委員會新竹科學園區管理局
統一編號：04177036
住址：新竹市新安路2號
權利範圍：全部 *****分之1*****
權狀字號：--(空白)字第-----號
當期申報地價：111年01月***11,700.0元/平方公尺
前次移轉現值或原規定地價：
073年02月 ****1,400.0元/平方公尺
歷次取得權利範圍：全部 *****分之1*****
其他登記事項：申請免給發權利書狀辦理公有土地權利登記
(資料顯示完畢)
列印人員：張雅華
收件號：1120A045413
查驗號碼：1120A045413RBGACTD7EE883074988AB804180CDA77
本查詢資料結果之處理及利用應依個人資料保護法相關規定辦理。



土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗專案

土地使用同意書

土地所有權人 國家科學及技術委員會新竹科學園區管理局（以下簡稱甲方）等同意無償將上開所述土地（面積、位置及權利證明文件如附件），自 112 年 12 月 15 日 至 113 年 11 月 29 日 提供 國立陽明交通大學（以下簡稱乙方）執行環境部環境管理署土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗專案，專案名稱為「應用地下水抽出處理(P&T)系統搭配預濃縮以可再生型吸附顆粒(RAP)削減地下水中 PFAS」，進行模場試驗，並願配合辦理下列事項：

- 一、上開土地實際位置及面積，以經所在地地政事務所複丈成果為準。
- 二、土壤、地下污染管制區內禁止行為，請依土壤及地下水污染整治法第 17 條規定辦理。

三、存在地上物權利歸屬及處理：（無地上物者不需勾選）

☐ 為甲方所有，同意無條件自行或由乙方移置、拆除或收取，並放棄補償權利。

☐ 非甲方所有，而係第三人_____所有。

四、土地上其他第三人權利：

☒ 無 ☐ 有，租賃權（承租人為：_____）。

☐ 有，用益物權—地上權（地上權人為：_____）、
地役權（地役權人為：_____）、典權（典權人
為：_____）、永佃權（永佃權人
為：_____）。

☐ 有，擔保物權—抵押權人（抵押權為：_____）

☐ 有，耕地三七五租約

五、甲方認知本同意書依法對日後土地之全體繼承人均仍有拘束力；且甲方應同意日後土地所有權如因法律行為（例如：買賣、贈與）而移轉時，將土地已同意由上揭模場試驗使用之事實告知全體繼承人及相對人。

六、模場試驗專案不得隸屬於列管場址污染改善、控制或整治計畫之一部分。本模場試驗專案不會干擾現行控制/整治計畫之進行，若因研究執行不當，致模場試驗場址產生二次污染或污染擴散者，其責任由乙方負責。



七、甲方土地做為模場試驗專案研究，乙方報告以無識別的方式展現，如以「北部某污水處理廠」呈現。另惟為防範研究結果不當引用，未經甲方書面同意除環境部外勿將調查研究相關內容洩漏與第三方或對外公開。

甲方（土地所有權人）：國家科學及技術委員會新竹科學園區管理局

統一編號：04177036

住址：新竹市東區新安路2號

電話：(03)5773311



簽名 蓋章



乙方（機構/單位）：國立陽明交通大學 校長林奇宏 蓋章

代表號/統一編號：87557573

住址：新竹市東區大學路1001號

電話：03-5712121

乙方專案主持人：

身分證字號：Y220049069

住址：新竹縣竹東鎮三重一路115號4樓

電話：0937-154623



周淑娟

簽名 蓋章



此同意書應至少1式3份，一份交由所在地主管機關存查，一份交由乙方存查。

中 華 民 國 112 年 12 月 26 日



附件二

污染防治及場址衛生安全措施說明



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

除一般性勞工作業可能發生意外之防止外，實施本計畫時，另應考量預防作業人員受來自作業環境中主要污染物之暴露與接觸危害，原則上至少需達符合國內有關作業場所之勞工安全衛生之法令規定。

(二) 擬定安全衛生管理架構

整治工作期間安全衛生工作之執行及相關負責人職掌詳表 1 所

示。



表 1 承包商安全衛生管理各級負責人權責表

負責人	權責
工地負責人	- 計畫之執行與協調 - 研擬及修改安全與衛生計畫 - 管理與運作 - 專案調查小組之組成與運作 - 安全與衛生計畫之擬訂與執行 - 與相關企業及主管機關之聯繫
安全衛生管理員	- 現場執行時，若現場人員之行為逾越安全衛生規定，應予以制止且記錄於管理計畫中，並向工地主任回報 - 訂定防護安全設備等級與需求 - 安全防護設備之定期檢視 - 安全防護設備之維修與保存 - 現場人員進出之管制 - 工作人員是否適合於現場工作之安全考量 - 工作人員衛生與安全計畫之擬定 - 緊急應變聯絡者 - 現場緊急急救之協調與執行 - 工地管制之區劃 - 除污設備之管理 - 廢棄物之管理 - 員工醫療記錄之保存 - 意外記錄之撰寫與保存
現場工作人員	- 注意自身與同事之健康衛生與安全 - 遵守現場衛生與安全計畫之規定 - 服從安全衛生管理員之糾正 - 依工作計畫書之規定執行其所負責工作 - 若有安全疑慮，應向工地主任報告與安全衛生管理員討論 - 切勿單獨工作 - 若有意外發生，立即向工地主任與安全衛生管理員報告



(三) 宣導工作守則

確實遵照安全衛生計畫及勞工安全衛生相關法規規定執行，避免發生任何意外事件，其中一般通則與規定事項如下：

- 1、場址內區分為施工開挖區、處理區、除污區及暫存區，並設立告示牌，人員應依各區之安全衛生規定執行工作。
- 2、如有夜間作業，工地現場應配置反光衣及充足之照明。
- 3、工地應派專人進行人車管制，避免閒人進入。
- 4、各機械之操作與運轉人員，應由對該機械有操作經驗者擔任之。
- 5、機械運轉中或未安全停機時，操作員嚴禁與任何人聊天交談。
- 6、應注意機械所在住置是否安全可靠。
- 7、所有轉動齒輪或皮帶均應有護網隔絕。
- 8、機械產生之廢油，應妥盛於容器內後，由合格清除處理機構回收，不得任意排放或傾棄。
- 9、工地內除指定區域，嚴禁飲食。
- 10、所有進入工地人員均需衣著整齊，穿著拖鞋、短褲、背心者不得進入。
- 11、施工期間所有運輸車輛及機具，輪胎及車體應清洗乾淨，若路面有因土方或材料之運送遭受污染時應隨時處理。
- 12、施工用之起重吊重應堅固，安置於穩固之地面上。其附屬鋼索、橫擔、螺絲帽等，應於每日工作前詳加檢查，鋼索等如有脫落損壞應即換新。
- 13、安全衛生負責人應自行或指派專人負責巡視工地，查核有關安全事項執行情形，隨時糾正通告改善。
- 14、應備妥維持交通及安全措施所需之各種標誌、拒馬、交通錐、警示燈、圍籬、旗幟等，並預備適量之備品，以備臨時之需。
- 15、每日工作結束後，應整理各項機具設備、保持環境整潔。
- 16、依勞安法規不允許未滿 18 歲、懷孕及授乳期婦女進入工區。



(四) 安全衛生與教育訓練

現場安全衛生管理員必須對現場工作人員施予防護訓練，使其瞭解除污步驟及個人防護裝備使用方法。現地工作實施前，將污染物依「危險物及有害物質通識規則」製作物質安全資料表，並標示張貼於明顯處。

(五) 實施與回報作業

發生如火災或其他緊急事件，而無法控制且有擴大之慮時，應立即通知相關支援單位，其程序如下：

- 1、儘速通知當地勞工檢查機構及消防單位，如有必要亦通知鄰近醫院與警政單位。
- 2、管制現場，並協助支援單位之各項支援作業。
- 3、事件解除後，保持現場以利調查。
- 4、撰寫意外事件報告，並向主管機關申報備查。

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

如圖 1 所示。

(二) 緊急事故通報單位資訊

如表 2 所示。

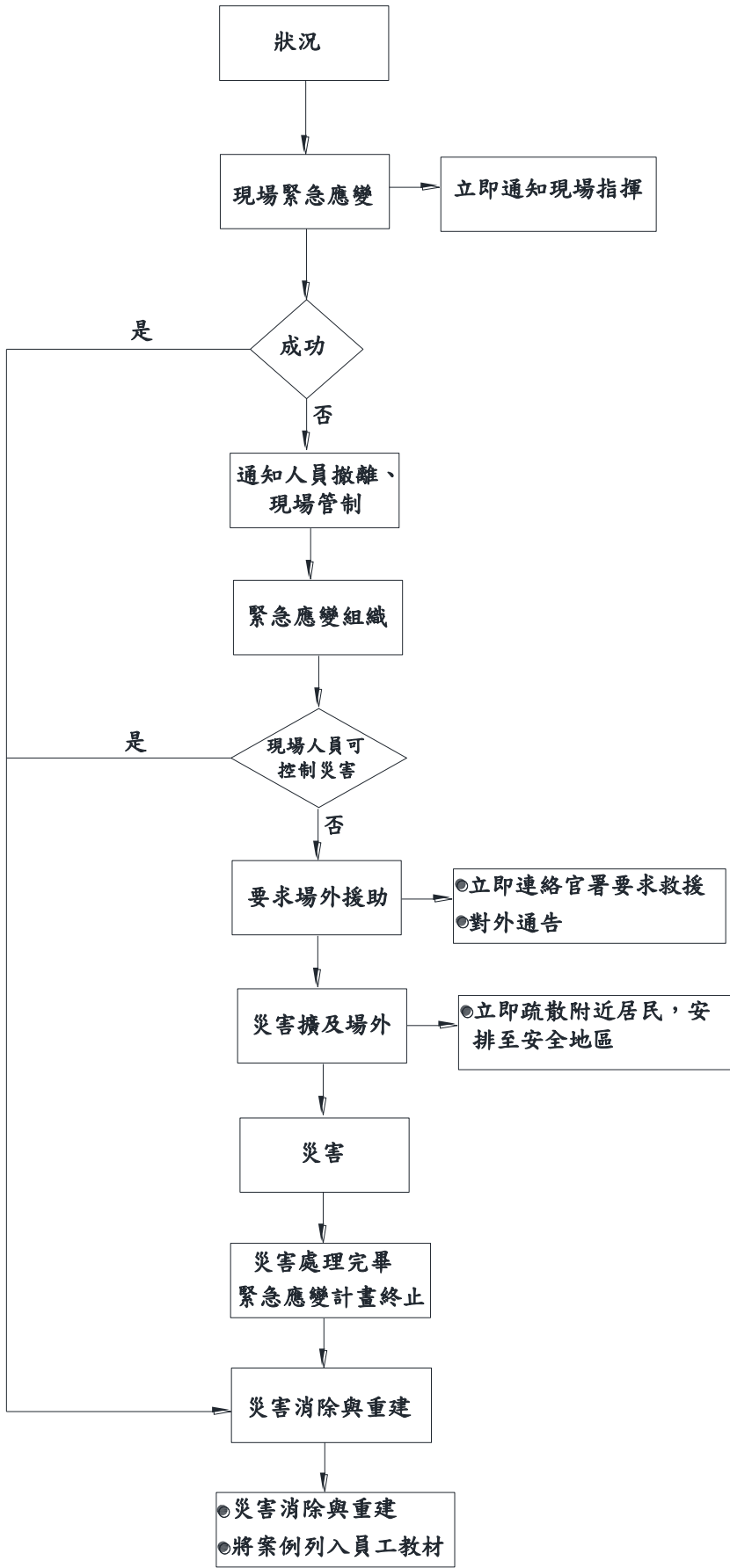


圖 1 緊急事故之應變流程規劃



表 2 緊急事件通報聯絡資料

緊急通報單位	電話
新竹市政府環境保護局	03-5368920
新竹科學園區竹科管理局維修班	03-5784541 03-5785865
新竹科學園區竹科管理局緊急應變中心 (24 小時通報專線)	03-5776666
新竹市消防局	03-5229508
新竹市警察局	03-5224168
新竹市馬偕紀念醫院	03-6119595
新竹臺大分院新竹醫院	03-5326151



三、二次污染防治計畫

污染復育工作進行時，若不當處理時，將可能造成二次污染之產生。本計畫提出之二次污染防治計畫，對於執行期間可能發生之污染問題有效防治，避免二次污染之發生。

(一) 空氣污染防治

- (1) 本計畫施工面及工區內運輸道路於非雨天地表乾燥時，將適時灑水，以減少粒狀物之飛揚。
- (2) 定期清掃工區出入口鄰近道路，防止工程車輛行駛引起塵土飛揚之可能性。
- (3) 於工區內之車行路徑將鋪設瀝青混凝土，其餘工區則鋪設鋼板、粗級配或其他同等功能之粒料等抑制粉塵防制設施，減少車行揚塵。
- (4) 具粉塵逸散性之工程材料、砂石、土方或廢棄物需堆置於營建工地者，應採行覆蓋防塵布、防塵網、工區灑水或配合定期噴灑化學穩定劑抑制揚塵，並適時增加灑水頻率，以加強防制效果。
- (5) 各項運輸及作業相關機具，定期進行保養維護，以保持良好操作狀況及防制效率。
- (6) 加強維修保養及防制設備操作人員之訓練，並加強操作程序控制，以減少設備異常、事故或防制設備故障而排放污染物之機會。

(二) 噪音與振動污染防治

在開挖或鑿井設備旁工作，通常會暴露於過量噪音下，為防止工作人員受過量噪音的危害，每人必須配備聽力保護設備(如耳塞)並訓練如何配戴。重機具的操作員與助手，以及在重機具工作區內的工作人員均須配戴聽力保護設備。妥善規劃大型機具作業時間，除涉及安全性或必要之連續工程外(如基礎工程、灌漿工程等)，將避免於晨間(上午 8 點前)、中午(12 點~下午 1 點(例假日到 2 點))、夜間(晚上 10 點後)操作大型機具；如於前述晨間、中午及夜間時段因涉及安全性或必要性之連續工程時，將再採取噪音防制措施(如使用低噪音機具、待機停止發動..等方式)，以降低大型機具之施工噪音影響。



(三) 水污染防治

地下水抽出作業主要包含設井/井維護/地下水採樣作業洗井水地下水抽水控制或其他改善方案之抽出水(例如：周界抽水圍堵系統)、污染區開挖或其他零星工程施作之祛水及土壤暫存場、處理場之廢(污)水或地表逕流水等，各類抽出地下水的收集方式與污染防治系統彙整如表 3 所示

表 3 本廠整治期間各類抽出地下水之污染防治系統說明

抽出水來源	收集方式	處理/污染防治對策
設井/井維護/地下水採樣作業洗井水	桶裝/管溝匯集	納入廠內廢水處理場處理
地下水抽水控制或其他改善方案之抽出水(例如：周界抽水圍堵系統)	管溝匯集	納入廠內廢水處理場處理
污染區開挖或其他零星工程施作之祛水	管溝匯集	納入廠內廢水處理場處理
暫存場、處理場之廢(污)水或地表逕流水	管溝匯集	納入廠內廢水處理場處理

(四) 固體廢棄物清理

- (1) 施工期間廢棄物之產生主要來自各工區之施工人員及機具維修保養，由於係屬事業廢棄物，
- (2) 施工期間產生之事業廢棄物，由工程包商自行或委託公民營廢棄物清除處理機構負責清除處理之。施工人員所產生之一般廢棄物，將責成工程包商負責委託代清理業者代為清除處理，或繳費委託環保單位或鄉鎮公所代為清運。
- (3) 機具維修保養所產生之廢棄物中，以可回收之金屬類及廢油類等物質所佔之比例較大，要求包商分類收集，使達垃圾減量之目標。
- (4) 營運期間產生之事業廢棄物，其貯存將依「事業廢棄物貯存清除處理方法及設施標準」相關規定辦理。
- (5) 營運期間廠內機具設備維修所產生之廢料及人員廢棄物，將確實交付予合格之清除處理機構，俾予以妥善清運及處理。



附件三

計畫各階段審查意見回覆對照表



環境部環境管理署「土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗專案」

■構想書 □申請計畫書 □期中報告 審查意見回覆對照表
□修正計畫書 □期末報告

計畫年度	112 年度	計畫類型	□先導型 □研究型 ■模場型
計畫類別	■調查 □整治 □其他	主持人：周珊珊	NO：S9
計畫名稱	應用地下水抽出處理(P&T)系統搭配預濃縮以可再生型吸附顆粒(RAP)削減地下水中 PFAS		
審查意見		執行單位回覆	
委員一 1. 本計畫採真空泵抽水仍有其深度限制，其理論揚程為 10m，視模場狀況若深層污染團建議採其他抽水設備。 2. 請問吸附劑對於水中 PFAS 污染物吸附處理的敏感度，亦即多少濃度以下會吸附不到？此案場址中污染物濃度範圍到達 PPB(μg/L)範圍及更低，是否影響吸附效果？ 3. 吸附劑以氧化劑再生氧化，建議監測再生氧化後之產物，以避免產出其他有害環境物質。		1. 根據目前掌握 PFAS 異常監測井深度為 10.3 公尺，水位距井頂下約 5.8 公尺，應是可用真空泵抽水。本計畫實際施作時會再考慮抽水量及揚程選用適當之抽水泵浦。 2. 本研究之 RAP 核心技術為可再生型吸附顆粒，係催化氧化型活性碳，給予促進劑(如空氣或氧化劑)同時可對吸附於活性碳表面點位的污染物進行同步催化氧化再生 RAP。然調查結果顯示，此模場研究案地下水中 PFAS 濃度雖低(4 ppb)，但因地下水層流布範圍廣及其總量大，故透過中空纖維 NF 預濃縮將其提濃後，使用 RAP 技術加速移除水中 PFAS，期望能找出兩技術的最適化操作參數及能縮短該新興污染物的整治時程。	



	3. 謝謝委員建議。RAP 技術於工業廢水處理實例豐碩，亦確認再生後無其他有害環境物質釋出疑慮。後續於模場測試研究過程中，可針對再生後是否有中間產物或是否溶出陰陽離子進行追蹤，確保安全無虞。
委員二 1. P&T 抽出地下水以可再生型吸附顆粒 RAP 吸附並及氧化處理 PFAS、及以中空纖維奈濾膜進行預濃縮。唯 PFAS 在地下水中的背景濃度極低，如何避免環境中其他基質發生的競爭效應需加以考量。	謝謝委員意見。經新竹科學園區環境品質監測成果資訊網監測資料查詢，O00297 監測井地下水水質檢驗資料中已初步確認其他基質(如有機物或重金屬等)濃度也極低，且由於本計畫採用的 RAP 顆粒可同步進行吸附氧化與再生，只要控制好氧化再生，便不致於影響 PFAS 的吸附效果。
委員三 1. 本計畫建議邀請企業提供自籌款，以顯示模場計畫成果後續應用性。 2. P&T 為傳統技術，對於地下水去除時間需要非常久，因此本計畫亮點為抽出後之 PFAS 處理技術，建議後續可以強化評估本技術與其他方法的經濟性及減碳效益。	1. 謝謝委員建議，會視現場測試實際狀況，請配合單位給予適當的協助。 2. 謝謝委員建議。RAP 技術應用於工業廢水領域時，由於無污泥產生且觸媒可再生使用，已評估較傳統化學氧化法更具經濟效益，且總碳排約可減少 30%，後續針對此議題將持續研酌。
委員四 1. 本研究計畫符合徵求主題新興污染課題之新興污染評析。 2. 研究團隊針對 RAP 應用於土壤地下水整治，已有前年模場試驗專案補助，並有成果。 3. 本研究計畫已有執行流程圖，詳述研究方法與流程，針對 P&T 系統周圍流場模擬，利用地下水模擬系或臺灣環保署地下環境分析模式平台，兩種模擬方式方法差異性建議強化說明。	1. 謝謝委員肯定。 2. 謝謝委員肯定。 3. 地下水模擬系統(GMS)及環境部地下環境分析模式平台(TWESMP)，兩者均適用於地下水流場模擬。其中，GMS 因具有圖形化操作介面及功能發展成熟等特點，廣泛運用於國內污染場址之地下水流及污染傳輸模擬。GMS 主要以有限差分法的 MODFLOW 作為計算核心，其將地層空間分布、地下水數值模式前置處理（如格網建立、內差等）與模擬結果展示等功能結合，並提供地理資訊系統(GIS)、地理統計、參數校正、地質分層輔助等功能，廣泛運用於國內污染場址之地下水流及污染傳輸



	模擬。而 TWESMP 主要計算核心為有限元素法的 FEMWATER，具有熱-水力-化學反應傳輸-地質力學機制耦合模擬能力，對於土壤及地下水污染之應用層面廣泛。TWESMP 為國內本土開發模式，亦具備化學反應傳輸模擬功能，惟 PFAS 涵蓋物種繁多，如有模擬 PFAS 化學反應需求，須向國內開發團隊洽詢該平台是否已具備 PFAS 參數資料，以及模擬地下水中 PFAS 傳輸之可行性。
委員五 1. 建議先以小規模測試。	謝謝委員建議。第一年度將針對一抽一注進行小範圍測試，第二年度將搭配中空纖維納濾膜預濃縮擴大試驗範圍試驗。同時實驗室已開始籌備 RAP 技術與中空纖維納濾預濃縮對 PFAS 削減最適化參數相關試驗。
委員六 1. 利用過去開發系統，且於實場 PFAS 地下水測試，成果具應用性。	謝謝委員肯定。
委員七 1. 氟離子對 RAP 活性的影響，處理後廢水是注入地下或排放。 2. PFAS 經 RAP 反應後的產物。 3. 符合專案主題。	1. 112 年 7 月管理機關自行監測關切井的氟離子濃度為 0.07 mg/L，該濃度對 RAP 活性無影響。目前規劃是將處理後水回灌至上游地下水，形成循環之狀態。 2. PFAS 經 RAP 技術反應後的產物將於實驗室先行測試，並透過儀器進行定性及定量分析。 3. 謝謝委員認可。
委員八 1. 計畫主持人已執行類似計畫(土污基金會)多年，已建立試驗所需的設備。 2. 已經具有相關設備。 3. 計畫書中已經說明：“...本技術於國內已有實廠實績，在不同環境(工業廢水)條件經歷豐碩。用於土壤及地下水污染場址承蒙前年度土水整	1. 謝謝委員肯定。 2. 謝謝委員肯定。 3. 謝謝委員建議。近年來 PFAS 議題於國際逐漸受到重視，我國環境部亦持續關注環境安全及與國際接軌，此新興污染物處理技術發展當務之急。本團隊與業興環境科技公司開發的 P&T 系統將地下水抽出後，



治計畫已有不錯先例...””。是否有必要再重新探討本議題?建議評估。	使用中空纖維納濾預濃縮結合 RAP 技術加速 PFAS 削減，期望能實現綠色且有效的雙贏目標。
------------------------------------	---



環境部環境管理署「土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗專案」

☐構想書 ☒申請計畫書☐期中報告 ☐修正計畫書☐期末報告 審查意見回覆對照表

計畫年度	112 年度	計畫類型	☐ 先導型 ☐ 研究型 ☒ 模場型
計畫類別	☒ 調查 ☐ 整治 ☐ 其他		NO： 主持人：周珊珊 S9
計畫名稱	應用地下水抽出處理(P&T)系統搭配預濃縮以可再生型吸附顆粒(RAP)削減地下水中 PFAS		
審查意見		執行單位回覆	
委員一 1. 本案政策面成果績效，預估技術提升 10%、能源效率提升 10%，其評估基準為何？是否有明確量化計算方式？ 2. 第二年抽除井預計增設為 2 組，可納入探討群井相互影響程度及處理效率。		1. 本案成果績效之評估，是以 RAP(至少使用壽命為 3 年)和活性碳吸附(至少需半年換碳一次)作為比較基準，因為 RAP 為常溫的吸附氧化，活性碳僅為吸附，吸附飽和需用高溫處理，因此使用 RAP 可徹底破壞 PFAS 且不會造成後續的二次污染。因此整體而言，整治技術與能源效率均會提升不少、整治成本也可降低不少，暫以保守的 10%來預估。 2. 根據本團隊現勘及與管理單位溝通後，確認本試驗區位置位於污水處理場地勢最低窪處，附近有許多地下管線，已無多餘空間可以再設置第 2 組抽除及注入井，第二年將以加大抽水量方式執行評估。爰此，將無井群間相互影響的虞慮。	
委員二 1. PFAS 在地下環境中濃度極低，且疏水性高，是否可有效藉 P&T 帶出及 NF 濃縮，仍待測試，且極可能發生吸附在 NF 膜上最後吸附飽和再釋出，是否可藉 RAP 方式進行濃度消滅仍待測試。		國外多篇文獻已證實 NF 對多種 PFAS 有極佳的截流率，故以 NF 濃縮 PFAS 可行性極高。吸附飽和疑慮可藉由增加進水流速，或利用無機結構架橋來降低膜污堵頻率，同時	



	提高 PFAS 截流率及濃縮率，將利於串接 RAP 技術削減水中 PFAS 整體成效。
委員三 - PFAS 目前推薦處理技術包括活性碳、樹脂、以及薄膜法，建議應用本技術時，能與前述進行詳細比較其優缺點，包括成本與去除效率，以確認技術可行性。 - PFAS 分析成本貴，請說明擬分析之物種、頻率及樣品數。	- 謝謝委員建議。關於本技術成本與去除效率之比較待成果報告時會加以說明敘述。 - 本實驗室已有 LC-MS/MS，正在建立 PFAS 物種如 PFOA、PFOS、PFHxA 及 PFBA 等，後續將依循實驗規劃進行樣品分析。
委員四 - 建議可補充說明本計畫預估整治技術提升 10%、整治成本降低 10%，與提升能源效率 10%之計算方式或其依據。 - P.62，有關十一、研究經費(1)人事費用請確認協同主持人經費是否需編列。另(3)耗材與主要費用合計似有誤，建議宜重新計算並修正。 - 本計畫已於前年專案補助計畫，於中油林園廠受 LNAPL 污染場址已有模場整治經歷，若再精進 RAP 技術於土壤及地下水領域應用，進而商轉有實際污染物削減之案例，其未來執行可行性高。 - 本計畫利用 RAP 技術之再生活化特性，可大幅降低整治系統產生之廢棄處理，進而降低事業廢棄物處理費用(活性碳)，達到綠色整治的目的。 - 中空纖維 NF 預濃縮係將地下水中 PFAS 提濃後，再進一步以 RAP 技術來削減。由於濃縮預期可提升 RAP 技術吸附/氧化效果，故將擴大試驗範圍以提升 PFAS 移除效率，且該技術較傳統 NF 有可逆洗優勢，能降低整體成本，且成果具應用性。	- 本案成果績效之評估，是以 RAP(至少使用壽命為 3 年)和活性碳吸附(至少需半年換碳一次)作為比較基準，因為 RAP 為常溫的吸附氧化，活性碳僅為吸附，吸附飽和需用高溫處理，因此使用 RAP 可徹底破壞 PFAS 且不會造成後續的二次污染。因此整體而言，整治技術與能源效率均會提升不少、整治成本也可降低不少，暫以保守的 10%來預估。 - 謝謝委員指正。此部分已於計畫書修正稿完成修改。 - 謝謝委員肯定。 - 感謝委員認可。本計畫將依循環境部所推動之低污染、低耗能、低成本、低空間及循環經濟目標(4L+C)邁進。 - 本計畫將於第一年度進行中空纖維 NF 預濃縮地下水中 PFAS 之可行性與最適化操作參數，並於第二年度擴大試驗範圍，使用中空纖維 NF 預濃縮搭配 RAP 技術，提升地下水中 PFAS 整體移除效能。
委員五 建議先以小規模測試本技術去除地下水中低濃度 PFAS 的效能及相關操作參數。	謝謝委員建議。本計畫於第一年度建立



2. 另應評估以傳統吸附材料和本計畫開發之吸附材料之性能及經濟效益比較。	RAP 技術吸附氧化應用於低濃度 PFAS 削減測試及相關操作參數。 2. 本計畫使用之 RAP 綠色材料具低碳與可重複再生使用之特性，故較於傳統吸附材料更符合經濟效益。
委員六 1. 研究團隊已有前年模場試驗專案補助，並有成果。本期計畫工作可算協助業者改善，故宜請企業分攤經費。	謝謝委員建議，本計畫案主要以技術研發與模場測試為導向，會視現場測試實際狀況，請配合單位給予適當的協助。
委員七 1. 針對 PFOA、PFOS 降解後產物定性分析的方法以 LC-MS/MS 是否足夠，請再評估。 2. 除 PFOA/PFOS 外是否含有其他 PFAS。	1. 謝謝委員意見，本實驗室正在建立 PFAS 物種如 PFOA、PFOS、PFHxA 及 PFBA 等，後續將依循實驗測試瞭解降解產物。 2. 現場地下水中已有檢測出 PFOA 及 PFOS，但無針對其他 PFAS 種類進行定性，本計畫於實驗室將以四、六、八個碳之 PFAS 種類進行測試。
委員八 1. 計畫主持人及本計畫執行團隊的學術研究能力佳，足以勝任本計畫。主持人及本計畫執行團隊近五年的研究績效佳。 2. 本計畫對國內土壤及地下水污染整治的推動有貢獻。 3. 本計畫書撰寫具體完整，計畫書中已經說明本計畫的執行方式。本計畫的研究架構與之前已執行(土基會模場試驗計畫)的計畫類似，但所探討的污染物質不同。 4. 計畫書所述的構想具可行性，且具有實務應用潛力。是否需以此類型(P&T)的操作方式處理地下水中極微量的 PFAS?建議評估。 5. 計畫執行期限合理，也已經說明預期的研究成果。 6. 計畫經費編列:無自籌款。 7. 已執行類似計畫多年。	1. 謝謝委員肯定。 2. 感謝委員認可。 3. 謝謝委員，RAP 技術針對油品污染物(LNAPL)之去除成效佳，但應用於 PFAS 削減尚待測試確認。 4. 謝謝委員肯定。目前台灣尚未立法管制地下水中的 PFAS，本次模場計畫是以過去調查到全氟辛烷磺酸(PFOS)含量達約 4 ppb 的 O00297 監測井作為試驗區，這濃度是大於美國環保署 2016 年訂定引用 PFOA 或/及 PFOS 終生健康建議值(Lifetime Health Advisories)0.07 ppb。 5. 感謝委員予以肯定。 6. 感謝委員建議，本計畫案主要以技術研發與模場測試為導向，會視現場測試實際狀況，請配合單位給予適當的協助。 7. 承蒙土基會模場試驗專案補助研究，RAP 技術正擴展於土壤及地下水領域整治相關應用。

**委員九**

1. 人事費:人事費加總金額 1,063,474 元與總計 (924,760)+ 保費 (134,814)=1,059,574 元不一致，請確認。
2. 耗材費:耗材項目加總為 1,782,716 元，與合計 1,772,716 元金額不一致，請確認。
(1) 再生型吸附顆粒活性碳塔過濾設備租用應歸在設備使用含維護費，請修正。
(2) P&T 系統設備租賃與操作維護應歸在設備使用含維護費，請修正。
3. 設井請以簡易井為優先。

1. 謝謝委員指正，已於計畫書進行修改。
2. 感謝委員改正，已於計畫書進行修改。
3. 本次模場是設計以 4 吋井作為抽除井與注入井，井管外圍濾水層區域規劃回填石英砂濾料，以確保井具有一定的抽水及注水效果。



環境部環境管理署「土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗專案」

☐構想書 ☐申請計畫書 ☒期中報告
☐修正計畫書 ☐期末報告

審查意見回覆對照表

計畫年度	112 年度	計畫類型	☐ 先導型 ☐ 研究型 ☒ 模場型
計畫類別	☒ 調查 ☐ 整治 ☐ 其他		主持人：周珊珊 NO：S9
計畫名稱	應用地下水抽出處理(P&T)系統搭配預濃縮以可再生型吸附顆粒(RAP)削減地下水中 PFAS		
審查意見		執行單位回覆	
委員一		1. 謝謝委員肯定。 2. 謝謝委員建議，hi-NF 相關文獻更新於報告內。 3. 已補充於章節 5.1-4。本計畫除使用曝氣方式外，另使用臭氧或雙氧水作為 RAP 氧化促進劑，發現能縮短 RAP 技術削減 PFAS 反應時間(如空氣曝氣需兩天、雙氧水四小時、臭氧半小時)，且可同步再生 RAP 以維持活性。團隊規劃於明年進一步研究 RAP 使用不同氧化劑削減 PFAS 後，其 RAP 表面特性變化之情形。 4. 謝謝委員建議。因本年度計畫執行期程較緊湊，團隊目前正在彙整數據，預計於成果報告定稿版呈現，懇請委員諒解。	
委員二		1. 感謝委員肯定。 2. 已補充於章節 5.1-2。雖然 AC 的吸附速率遠高於 RAP，但因為處理 PFAS 的機制是以催化氧化為主，依照過去本團隊在工業廢水的研究結果，吸附速率對處理 PFBA 無影響。 3. 已補充於章節 5.1-2 及 5.1-3。RAP 削減 PFBS 係使用臭氧作為氧化促進劑，然考量降低投資成本及操作成本情形下，另以雙氧水、次氯酸鈉或空氣進行 PFOA 測試，因此氧化時間隨氧化能力有所不同。	



3. 表 5.1-2 及表 5.1-3 分別為 RAP 催化氧化 PFBS 及 PFOA 的實驗結果。兩者的氧化時間不同。請補充說明。 4. 本案擬進行催化氧化來持續再生 RAP，觀察 RAP 再生前後吸附容量差異，得計算出再生效率。請補充相關數據。	4. 已補充於章節 5.1-4。將經過五循環批次吸附/催化氧化程序處理 PFOA 的 RAP，使用空氣曝氣再生兩天處理，其再生效率(RE)以雙氧水實驗組 81%為最佳，其次為空氣曝氣實驗組(RE= 72%)。
委員三 1. 本研究已初步完成場址水文地質調查和 P&T 與 RAP 系統設置並於實驗室測試探討 AC 和 RAP 之吸附特性及對目標污染物之去除效果，符合期中階段預期工作規劃進度，研究成果豐碩。 2. 建議可先藉由地下水進流液 PFAS 濃度和 NF 膜體積濃縮倍數等加以估算濃縮液液之 PFAS 濃度，或可作為實驗參數選定之參考。 3. 實場地下水基質較複雜，宜先瞭解干擾 RAP 吸附與氧化目標污染物(PEAS)之可能影響物種和程度？ 4. 後續宜強化呈現所建置系統(RAP、NF、P&T 等)之穩定性和耐久性等測試成果？ 5. 建議實驗室測試結果可進行系統氟之質量平衡計算，或許可估算瞭解 PFAS 被 RAP 吸附或氧化的比例？ 6. 建議進行處理成本效益估算分析？ 7. 建議後續可評估奈米金屬或雙金屬等取代貴重金屬之可行性，以降低操作成本？ 8. 成果報告宜說明本研究成果的實場應用性和限制及後續具體可行的精進或優化的研究方向？	1. 謝謝委員予以肯定。 2. 謝謝委員建議。目前實驗室已初步完成 hi-NF 膜 PFAS 濃縮測試，數據請參見章節 5.1-5。經兩段 hi-NF 串聯濃縮，得 PFHpA 可濃縮 12 倍，PFOA 可濃縮約 46 倍。 3. 數據整理於章節 5.3-6。本團隊分別於現場模組運轉一個月及兩個月，取適量 RAP 回實驗室進行氧化功能指標試驗，驗證現場 RAP 活性狀態為佳，初步判定亦無受地下水其他基質(如總有機碳或硫酸鹽等)影響氧化功能。 4. 謝謝委員建議，本年度計畫已於現場模組運轉一、二個月，分別取適量 RAP 回實驗室進行氧化功能指標試驗，以了解 RAP 的穩定性。後續團隊將持續強化模場設備之穩定性和耐久性，如運轉模式調整等，以提高整體成效。 5. 謝謝委員建議，數據可參見章節 5.1-4。PFAS 以 RAP 搭配空氣曝氣，其氧化占比約 70%，若以雙氧水或臭氧則分別為 75% 及 85%。另 RAP 技術反應機制為先吸附再氧化，推估吸附占比約 10%。 6. 經實驗室測試確認 RAP 搭配空氣曝氣能有效削減 PFAS，無須另添加氧化藥劑，因此操作成本主要來源為電費。另推估 RAP 的使用壽命至少為三年(參照工業廢水觸媒可至少使用兩年)。模場試驗系統已連續運轉超過三個月，截至 113 年 10 月 15 日，累積總抽水量 255.54 噸，累計使用電力 828.1 度，初步以該 P&T 搭配 RAP 曝氣程序削減 PFAS，每單位水量功耗約 3.24 kW/h，操作成本約 13 元/m³ (每度電以 4



	元計)。 7. 謝謝委員建議。團隊於工業廢水領域處理難降解有機物(如有機氯廢水)時,使用其他雙金屬觸媒無法有效將其斷鍵氧化,然RAP因特殊奈米薄膜技術,使表面披覆之Ru-A-B金屬氧化物能均勻分布在RAP表面,Ru金屬使用量極低,僅為0.01%,因此成本可大幅下降(市售貴金屬觸媒的貴金屬使用量可達1%)。 8. RAP技術限制說明於章節3.2-3。後續工作規劃將於模場增設預濃縮設備於RAP設施前,並藉由加大抽水量,達到處理量提升增大試驗影響範圍,加速試驗成效。另於實驗室精進RAP技術削減PFAS之相關應用,如搭配不同氧化劑及劑量,找出RAP技術的<u>同步吸附氧化/再生程序</u>與RAP失活後之<u>再活化</u>條件,整合出RAP技術既經濟且能有效削減PFAS最適化條件。
委員四 1. 以RAP催化氧化PFBS的過程中,是否有其他中間或副產物被發現,有無進一步規劃。 2. RAP再生後的效率如何?	1. 數據可參見章節5.1-3及5.1-4。使用RAP搭配臭氧催化氧化PFBS無發現其他中間產物生成。以空氣曝氣作為RAP氧化促進劑削減PFOA,除觀察氟離子生成及PFOA濃度減低外,有測出PFHxA及PFHpA產生,其比例約2.28%及0.25%,若使用臭氧曝氣或雙氧水(輔以空氣曝氣)則無觀察到中間產物生成。後續於第二年度計畫將加以釐清並確認PFAS降解後中間產物生成情形及其產生後如何加以氧化降解。 2. 數據說明於章節5.1-4。將經過五循環批次吸附/催化氧化程序處理PFOA的RAP,使用空氣曝氣再生兩天處理,其再生效率(RE)以雙氧水實驗組81%為最佳,其次為空氣曝氣實驗組(RE=72%),後續可持續優化再生條件。
委員五 1. 本計畫目前執行進程大致符合預計進度。	1. 謝謝委員予以肯定。 2. 美國環保署於2024年訂定包括保障地下水水源的6種PFAS飲用水最大污染物容



2. p.2 美國飲用水終身建議值於 2022 年有更新，建議可一併更新。 3. 建議可於後續期末報告補充本研究技術與傳統技術差異與優缺點比較。 4. 本研究屬於創新型研究，建議後續可評估申請專利可行性。	許濃度 (Maximum Contaminant Levels, MCL)，相關標準已更新至報告內。 3. 謝謝委員建議，說明請參見章節 3.2-1。本專案 RAP 技術與傳統活性碳吸附法相比，具(1)優異的氧化還原特性、(2)無廢棄物棄置及二次污染疑慮與(3)可原位重複活化再生等優勢。 4. 謝謝委員建議，團隊將在不影響明年度計畫工作執行預定時程及經費情形下，預計於結案後半年內執行專利申請相關事宜。
---	---