



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

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)

期末報告（定稿）

主辦單位： 行政院環境保護署

專案執行單位：國立陽明交通大學

專案主持人：周珊珊 博士

專案執行期間：111 年 05 月 20日起至

112 年 04 月 30 日止

中 華 民 國 112 年 05 月 印製





審查意見回復

行政院環境保護署「土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗專案」

☐申請計畫書 ☐期中報告
☐修正計畫書 ☒期末報告 審查意見回復對照表

計畫年度	111 年度	計畫類型	☐ 研究型 ☒ 模場型
計畫類別	☒ 整治 ☐ 調查 ☐ 其它	主持人：周珊珊 NO：A10	
計畫名稱	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		
審查意見		執行計畫單位回覆	
盧至人委員 1. 本模場試驗計畫期末報告已說明計畫的執行成果，也已說明計畫的執行流程及試驗方法。 2. 本模場試驗計畫期末報告已於 P. 120 說明後續可繼續執行的研究項目。 3. 計畫執行進度與預定進度相符。 4. 研究內容與原訂計畫目的相符。 5. 本模場試驗計畫期末報告已依據研究結果提出適當的討論與建議，此建議對於實場的實際應用性尚待進一步確認。 6. 本模場試驗計畫的整體研究成果符合預期的研究目標。 7. 本計畫的執行可以培育土壤地下水領域的人才。 8. 本模場試驗計畫的研究成果已申請專利與論文發表。 9. 本模場試驗計畫符合國內土水污染技術研發的政策，對國內土水領域整治工程的發展有助益。 10. 請補充說明本項技術與傳統 GCW 之間的差異。 11. 建議說明： (1) 由顧問公司協助完成的項目(或是實際參與的項目)。 (2) 最適操作條件(或地質條件...等)與限制條件。 (3) 實務上於實場設計規劃的原則。		1. 略。 2. 略。 3. 謝謝委員肯定。 4. 謝謝委員肯定。 5. 略。 6. 謝謝委員肯定。 7. 略。 8. 略。 9. 謝謝委員肯定。 10. 謝謝委員意見，GCW系統設計主要為處理 DNAPL 污染，HFS系統設計主要為處理 LNAPL污染，相關污染移除的深度位置與方式不盡相同，如抽除位置等。另外，HFS有霧化功能，一般GCW並未設置霧化功能。 11. 謝謝委員意見，回覆如下： (1) 捷力英公司主要協助本計畫之相關現場工作，包括HFS系統設置與操作、土壤及地下水採樣與位置確認、HFS成果說明與相關會議出席等。 (2) HFS主要不適用地層為粉土黏土地質，如果地下水位變化過大(如超過3~5公尺)也不建議使用。 (3) 運用在實場上，主要規劃在不容易進行污染移除的地方，如製程區/儲槽區下方，可運用水力將污染物牽引後移除；若需要處理區域範圍的污染整治作業，亦可參考系統的影響半徑，進行全面性的污	



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

12. 建議執行團隊可以參考國內案例，工廠使用廢熱刻意重新製造熱源，成果顯示升高溫度對VOC有明顯的改善。	染整治與處理規劃。 12. 謝謝委員建議，本計畫在第二年度的模場試驗中，我們將水層增溫處理系統(GIT)導入模場試驗，並由結果顯示確實能夠將殘留在地層中的污染釋放出，且造成濃度有明顯的提升，爾後運用整治系統將污染移除，可大幅縮減整治的期程。
劉沛宏委員 1. 模場試驗取得相關參數，且敘述詳實。 2. HFS系統搭配RAP及GIT確有一定的整治成效，操作時的安全事項，請說明。 3. RAP以O₃ 80°C再生及常溫再生對活性的影響。 4. 氯離子或其他陰離子對RAP活性是否造成干擾。	1. 謝謝委員肯定。 2. 謝謝委員肯定，當執行現場工作時，首要注意廠區內的工安要求，並且嚴格遵守。另在操作時，也要注意系統的操作條件，不可將系統運轉量過大或溫度增加太高，避免造成潛在的工安問題發生，因此系統在運作期間都需要時常巡查確認是否正常。 3. 在80°C高溫環境下，以臭氧再生4小時雖較常溫(25°C)臭氧再生4小時之效率佳，但考量現場實際狀況，無法以臭氧產生機及額外熱源進行臭氧高溫再生，故研究團隊另測試以曝空氣於常溫狀態下進行再生24小時，發現其再生效率(72~89%)與臭氧再生4小時(81~86%)效果相當，顯示現地以曝空氣方式於常溫環境下進行同步催化氧化再生RAP時，因可供較高水中溶氧，使RAP具持續氧化水中有機物和再生之功能，達到在不加藥與不加溫等情況下，實現更經濟且有效之綠色整治技術。 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，水中含有結垢的鈣鎂鐵離子，長期則會造成RAP表面點位被遮蔽而有所影響，後續仍可藉由RAP活化將其恢復至新鮮RAP態。
蔡俊鴻委員 1. 第二年計畫目標達成度，請分點提列說明(2種技術整合處理6項污染物)。 2. 進行第二年計畫初期，模場實驗區域地下水污染物濃度、分佈，請比對第一年計畫期初狀態，	1. 謝謝委員意見，第二年計畫係採用可再生型吸附顆粒(Regenerative Adsorption Particles，簡稱RAP)與多介質水力沖洗循環系統(Hydraulic circulation Flushing Soil remediation System，簡



檢視持續整治之污染改善績效。 3. 6項污染物地下水監測濃度多為ND值；TPH濃度卻常常超過管制標準；請檢視本項技術之有效性與可應用性。 4. 依圖47、49、52之變化趨勢，如何確認本項技術之整治效果？請補充分析。 5. 請說明計畫績效(學術面/產業面/政策面)。	稱HFS)2種技術處理土壤及地下水中污染物，分別有苯、甲苯、乙苯、二甲苯、萘及總石油碳氫化合物等6項。於地下水定期採樣監測數據得知，水中苯、甲苯、乙苯、二甲苯及萘等苯環類化合物皆以符合法規限值，然總石油碳氫化合物雖超過第二類地下水污染管制標準，但綜觀長期數據則呈下降趨勢。於土壤定期採樣監測數據得知，苯、甲苯、乙苯、二甲苯皆以符合法規限值，總石油碳氫化合物則尚未符合土壤污染管制標準，但距離HFS系統較遠(約18公尺)之土壤採樣點濃度有降低，距HFS系統較近(約11公尺)之土壤採樣點濃度有明顯上升，顯示HFS系統可將地層中潛在污染物有效牽引聚集至系統周圍，並透過RAP將其逐漸移除。 2. 謝謝委員意見，第一年計畫期初為距系統最遠之監測井OW-07之地下水TPH濃度(110/09/09: 219 mg/L)最高，至第二年計畫期初OW-07之地下水TPH濃度(111/02/17: 5.8 mg/L)已顯著降低至低於管制標準，顯示本系統之操作成效良好。 3. 謝謝委員意見，本計畫場址污染物主要為TPH中柴油類污染物，因此定期監測項目中屬於汽油類污染物之苯、甲苯、乙苯、二甲苯、萘測值大多為N.D，由TPH測值有明顯上升後下降趨勢，顯示本計畫系統對柴油類污染物亦有顯著改善成效。 4. 謝謝委員意見，本計畫於第一年(110年4月至111年1月)運作後，由圖47定期地下水TPH監測值可看出明顯下降趨勢；由於本計畫場址主要污染物為柴油類，為加速地下污染物釋出，本計畫於第二年(111年5月至112年3月)增加設置2口監測井搭配水層增溫處理系統(GIT)及RAP處理，圖49為新設2口井於GIT+RAP施作前後之地下水TPH濃度變化，可看出水質於GIT施作後濃度明顯上升，再經處理後濃度又下降；此外，圖52為土壤定期監測TPH濃度變化，顯示距離HFS系統最遠(約18公尺)土壤採樣點
---	--



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

	S03之TPH濃度略有下降，而距離HFS系統最近(約11公尺)土壤採樣點S01之TPH濃度也有明顯下降，顯示循環系統將地層中之污染聚集至系統周圍再加以去除。 5. 本計畫目前於學術面已完成1篇國內期刊論文、1篇國內研討會論文及1篇技術報告，並已培育2位碩士生畢業及2位跨領域團隊成員；說明請參見專案成果績效自評表。產業面則已於第一年度(110年)申請專利：觸媒及其應用，並在今年獲准(發明第I799122號)；政策面如HFS程序本身不需化學藥劑且能現地進行地下水抽除與回注可避免二次污染及額外處理成本；RAP具高污染物吸附效能、可再生重複使用，為一環境友善「綠色材料」；另今年度新增的GIT加熱地下水層，可藉由地層溫度上升而提高污染物之水中溶解度等助於整體系統移除污染物效率之目標。綜整而言，此計畫將三本土技術結合使用成為「綠色材料模場試驗」，可大幅減少整治經費、縮短整治時程，以達到循環整治土壤及復育地下水。有機會讓署內成功輔導一創新技術外，達到扶助土水污染整治產業，以及協助污染場址大幅降低整治成本和時間的三贏成果。
江康鈺委員 1. 有關RAP實驗再生參數與驗證試驗，其最佳化參數之建立，宜進一步評析RAP再生條件操作之穩定性，例如pH條件是否在再生過程會有所變化是否影響臭氧之反應等。 2. 地下水水質中除TPH外，其他可溶性離子是否會影響RAP之去除效率？ 3. 本技術應用之成本效益為何應用之限制條件亦應予以敘明。	1. 謝謝委員意見，研究團隊於其他廢污水領域已有豐富的試驗經歷，並且部分已投入設置實廠案例，其處理量約80 CMD，目前仍持續精進中。建議日後可參照廢水處理系統模式設計，進一步評析RAP於受LNAPL或DNAPL污染土壤及地下水情形下，其再生效能及再生穩定性驗證。 2. 大部分離子都無影響，但某些地區地下水硬度較高，水中含有會造成結垢的鈣鎂鐵離子長期會造成RAP表面活性點位被遮蔽而有影響。整體而言，在高硬度水質中的使用壽命會較短，但仍可藉由後續洩出RAP再活化而恢復。 3. 謝謝委員意見，本計畫運用之RAP主要為一可



	再生型吸附顆粒，可降低現場廢碳清運等操作成本；HFS系統主要不適用地層為粉土黏土地質，如地下水位變化過大(如超過3~5公尺)也不建議使用，另外，HFS系統受到井體設置井徑較大(20~24吋)，因此不建議設置在礫石層中。
許正一委員 1. 場址之土壤地下水背景雖有所描述，但運用在GIT+RAP系統操作時，特別是土壤特性如何影響成效，可再做說明。 2. RAP 元素分析表20之濃度單位不宜用無因次之“%”，如係因智權而以代號表示雖可理解，但宜提供重複性、MDL與ICP條件等QA/QC數據。	1. 謝謝委員意見，GIT+RAP使用限制為需位於地下水層中，且不適用於粉土黏土質土壤，最好搭配水力系統之傳輸，擴大污染改善影響範圍。 2. 謝謝委員意見，已將無因次的%修正為%(w/w)，並備註為三重覆之平均值與加上ICP的MDL為0.1~50 ug/L (依測量元素及實際應用需求有所不同，僅供參考)。
土污基管會 1. 請補充說明或提供數據佐證VOC初始去除率是多少？ 2. 請執行團隊補充說明設置初設及後續維運的成本估算。 3. 因本計畫研究第二年有加入GIT，是否有探討耗能問題及能量來源？能量來源是否可用綠色能源代替？ 4. 請補充說明本項技術是否使用條件限制？是否會對某些物質出現不適用的狀態？	1. 謝謝委員意見，因模場試驗VOC測值含量較低，故建議以濃度表示較去除率合適。模場試驗於計畫第一年度(110年)並未分析處理前的HFS系統尾氣VOC濃度，但知悉現場VOC濃度較低。至計畫第二年度(111年)起監測尾氣VOC進氣濃度，並得知VOC進氣測值為~77.3 ppm。整個試驗過程多次分析尾氣處理前後濃度(如表14)，HFS尾氣進氣以FID檢測VOC值為0.6~77.3 ppm，出口尾氣VOC降至0~59.9 ppm。 2. 謝謝委員意見，本計畫第一年初設費用主要為HFS設置，第二年主要是增加GIT+RAP施作，而設備運作電力、土壤及地下水定期檢測、土壤採樣及第二年2口監測井設置則為中油公司協助支援；因此本計畫HFS系統設置費用300~350萬，操作維護15~30萬/年，RAP設置與操作維護費用約15~30萬/年。 3. 謝謝委員建議，GIT施作大多為短期加熱，本計畫施作為每週期5日，計畫期間僅施作2次，並非長期使用，且需配合工廠安全規定加裝防爆裝置；先前GIT有在其他場址執行過，在增溫60℃且溫度達設定值後會自動停機，控制系統設



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

	計上屬變頻式，每日耗電量約2~3度電，未來可規劃以太陽能供電方式來執行。 4. 謝謝委員意見，本計畫HFS系統之處理技術需運用地下水中的傳導與水力牽引，因此需設置在地下含水層中執行相關土壤及地下水整治工作，但由於坭土黏土質土壤地層會造成傳導性不佳因此不建議使用。另外，由於HFS系統、GIT系統及RAP皆屬於物理處理，因此在污染物去除上較無不適用之情形，儘可能去除成效較低或需要移除時間較久。
--	--



專案基本資料表

111 年度土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗申請計畫書

一、專案基本資料表

申請編號：

專案性質	☐ 實驗性質 ☒ 非實驗性質		專案技術編碼	NLAB-S-R-C1C2R1-M (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	陳銘健 李鴻志	職等/職稱	捷力英環境有限公司/總經理 中油公司石化事業部林園廠/經理		
專案名稱	中文	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)			
	英文	Combination of regenerative adsorption particles (RAP) and hydraulic circulation flushing soil remediation system (HFS) for the remediation of contaminated soil and groundwater			
	關鍵字	可再生型吸附顆粒，多介質水力沖洗循環系統，土壤整治，地下水整治，LNAPL			
執行期程	自民國 111 年 05 月 20 日起至民國 112 年 04 月 30 日止				
專案主持人	姓名：周珊珊	E-mail：shanshan_chou@ncut.edu.tw	專線：03-5712121#55553	手機：0937-154-623	
專/兼任人員	姓名：游子儀	E-mail：g00641@nycu.edu.tw	專線：03-5712121#31918	手機：0917-755-936	
經費分析總表 (僅模場試驗專案需填寫兩年度金額)	專案預估總經費		第一年申請經費	第二年申請經費	編列說明
	1.	人事費用	1,011,108	664,097	(1-6 項相加之 50%為限)
	2.	設備使用含維護費	45,000	39,700	(與計畫實驗相關)
	3.	耗材與主要費用	1,882,532	1,604,400	(與計畫主體相關)
	4.	其它研究相關費用	52,540	24,778	(含差旅與租賃費用)
	5.	雜項費用	26,900	30,627	(1-6 項相加之 5%為限)
	6.	行政管理費	301,808	236,360	(1-6 項相加之 10%為限)
	7.	自籌款	300,000	200,000	(申請單位自行籌備款項)
	申請補助經費(1-6 項)		3,319,888	2,599,962	總金額：5,919,850
計畫總經費(1-7 項)		3,619,888	2,799,962	總金額：6,419,850	

說明：

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

專案主持人： 周珊珊 (簽名及蓋章) 日期：民國 112 年 5 月 15 日

校長林奇宏





111 年度專案成果績效自評表

1. 專案基本資料

填表日期：112年05月10日

專案性質	☐ 實驗性質 ☒ 非實驗性質	專案類別	☐ 研究型 ☒ 模場型
研究主題	☒ 整治 ☐ 調查 ☐ 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	專案主持人	周珊珊
專案名稱	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		
專案執行期程	☐ 申請階段 ☐ 期中 ☒ 期末		

2. 成果績效自評

「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	期末 達成數	結案後半年 達成率	備註 (說明未達成原因或學術產出發 表名稱)
項目							
A 學術產 出及活 動	1.國內投稿 (篇數)	(1)論文	1	0	1		
		(2)研討會論文	1	1	1		
	2.國外投稿 (篇數)	(1)期刊論文					
		(2)研討會論文					
	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.研發人員 (人數)	(1)碩士	1	2	2		
		(2)博士					
	8.研究團隊 (個數)	(1)跨領域團隊	2	2	2		
		(2)跨機構團隊					
		(3)形成研究中 心					
		(4)形成實驗室					
	9.其他指標 (請自行命名)		(請自填)				



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

(二) 產業面

項目 \ 目標達成程度				申請 預估數	期中 達成數	期末 達成數	結案後半年 達成率	備註 (說明未達成原因或專利、技術轉移相關詳細資料)
A 智慧財產權	1.專利 (件數)	已核准	發明			1		獲准，發明第 I799122 號
			新型/設計					
			合計			1		
		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 (應用技術)	件數						
		授權金(仟元)						
		衍生利益金(仟元)						
	5.可移轉 產業技術	(1)技術(件數)						
		(2)品種/系(件數)						
C 產學研合作	6.促成合作 研究	件數						
		金額(仟元)						
	7.促成投資	件數						
		投資金額(仟元)						
	8.促成取得 業界科專	件數						
		業界投資金額(仟元)						



專案成果績效自評表

目標達成程度		申請 預估數	期中 達成數	期末 達成數	結案後半年 達成率	備註 (說明未達成原因或專利、技術轉移相關詳細資料)
項目						
9.其他指標 (請自行命名)	(請自填)					

(三) 政策面

目標達成程度			申請預 估數	期中 達成數	期末 達成數	結案後半年 達成率	備註 (說明未達成原因或 其他詳細資料)
項目							
A 服務便 民	1.技術服務	次數	1	1	1		
		收入(仟元)	50	50	50		
	2.諮詢服務	次數					
		收入(仟元)					
B 支援合 作	3.協助政府制定 (件數)	(1)政策					
		(2)法規					
		(3)規範					
		(4)標準					
C 技 術效益	4.整治技術提升(%)		10	10	10		
	5.政治成本降低(%)		10	10	10		
	6.提升能源效率(%)		10	10	10		
8.其他指標 (請自行命名)		(請自填)					

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

學術面(如國內外研討會、期刊投稿件數、或人才培育碩博士生說明)

1. 國內期刊論文

周珊珊、簡偉倫、陳國源、陳銘健、吳芳鈴、郭宥妍(112年3月出刊)。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。

2. 國內研討會論文發表

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。

本模場型研究係以一新型材料可再生型吸附顆粒(RAP)搭配一團隊自有專利程序



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

多介質水力沖洗循環系統(HFS)，組成一創新土壤及地下水整治程序，並對中油林園廠 LNAPL 污染場址進行模場型整治測試。第二年度模廠試驗於整治井中短時間施作水層增溫處理系統(Groundwater Increase Temperature System，簡稱 GIT)，GIT 系統有助於提高污染物之水中溶解度、降低土壤黏滯性及揮發水中污染物質等，進而使 HFS 系統運轉帶動的水流循環及 RAP 本身特有的處理功能，有效將影響半徑範圍內之地層污染物移除。本研究整合 RAP 與 HFS 技術成創新系統，目前已培育 2 位碩士學生畢業；完成 1 篇國內研討會論文、1 篇國內期刊論文和 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)

專利已獲准

本計畫已於第一年度(110 年)申請專利，並在今年獲准，發明第 I799122 號：觸媒及其應用。

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)

HFS 程序本身不需化學藥劑、整治時程短，影響半徑大，污染整治效能高，且現地進行地下水抽除與回注可避免二次污染及額外處理成本；RAP 具高污染物吸附效能、可再生重複使用，除可降低材料成本，為一環境友善「綠色材料」；另今年度新增的 GIT 加熱地下水層，藉由地層溫度上升而提高污染物之水中溶解度、降低黏滯係數、揮發水中污染物質。綜整而言，此計畫將三本土技術結合使用成為「綠色材料模場試驗」，可大幅減少整治經費、縮短整治時程，以達到循環整治土壤及復育地下水。有機會讓署內成功輔導一創新技術外，達到扶助土水污染整治產業，以及協助污染場址大幅降低整治成本和時間的三贏成果。



計畫摘要

輸油管線和加油站與油槽的洩漏是常見的油品污染土壤與地下水污染源。本計畫係採用兩種不同領域的高端處理技術，來處理輕質非水相溶液非水相液體(light non-aqueous phase liquid, LNAPL)污染物，兩種技術分別為可再生型吸附顆粒(Regenerative Adsorption Particles，簡稱 RAP)與多介質水力沖洗循環系統(Hydraulic circulation Flushing Soil remediation System，簡稱 HFS)。其中 RAP 係以活性碳為基底，覆蓋貴金屬成分，具有極佳的吸附與氧化還原特性，且可再生循環使用，可處理水中有機物和 VOC；HFS 系統設計構想係依據油類污染物特性，於現地藉由系統循環抽除、淋洗並結合霧化及曝氣原理，以同時去除土壤及地下水中氣相、浮油相及溶解相之污染物。結合 RAP 及 HFS 技術於現地設置處理時，應可對於現地高濃度之 LNAPL 污染物將有明顯之移除效果，而使整治效率有效提升。

第一年度模場試驗，本計畫模場設置區為台灣中油股份有限公司石化事業部林園石化廠「100 油槽區」儲槽 LY-109 南側，本場址之土壤污染物與地下水污染物均為苯、甲苯及總石油碳氫化合物(TPH)。計畫初期在模場區先進行土壤及地下水調查以確認背景濃度，土壤背景調查引用「中油林園廠」107 年之檢測結果-3 採樣點 TPH 皆超過土壤污染管制標準(1,000 mg/kg)。

在完成模場 HFS 整治井及相關地表上設備設置後，於 110 年 08 月 12 日正式試運轉，運用兩種試驗方式(試驗一)RAP 放置於 HFS 系統之地表上，RAP 於地表上主要用於吸附 HFS 系統運轉期間產生之揮發性氣體；(試驗二)放置於循環水處理槽系統之 RAP，主要是移除地下水中之污染物。第一年模場試驗成效，運用定期進行 HFS 尾氣、地下水及土壤監測作業，初步結果得知地下水 TPH 濃度有整體下降趨勢，由土壤監測結果顯示循環系統已將地層中之污染聚集至 HFS 系統周圍；另外，尾氣處理效果良好，至今操作約一年半並未發現 RAP 有吸附飽和現象，這與我們在實驗室測試甲苯有類似的現象-即在常溫下經由 RAP 和空氣氧化對 VOCs 有相當的降解效果。

第二年度模場試驗已於 111 年 07 月於系統影響半徑範圍內增設 2 口整治井，先於整治井中短時間施作水層增溫處理系統(Groundwater Increase Temperature System，簡稱 GIT)，藉由增加地層溫度以提高污染物在水中之溶解度、降低土壤之黏滯性以利於污染物的揮發，進而將污染物激發後去除，GIT+RAP 分別於 8 月和 11 月各施作一次。由 HFS 系統周圍監測井的定期地下水採樣數據可知，其 TPH 雖仍超過管制標準，但整體總濃度呈下降趨勢，但 GIT 增溫期間地下水濃度有上升趨勢，顯示本區域依然有殘留的污染在地層中；土壤的 TPH 雖仍高於土壤管制標準，但可觀察出 HFS 系統可將地層中之污染



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

物聚集至系統周圍，並將其整治移除。另本年度搭配 GIT 系統增設的兩口整治井地下水污染物濃度則皆有上升趨勢，顯示受到 HFS 系統及增溫效應將區域內殘留地層的污染釋出，建議後續須持續進行污染整治作業。

此外，針對 GIT 施作後兩口整治井的 RAP 與尾氣 RAP，分別採樣回實驗室測試，驗證 RAP 以曝空氣再生 24 hr 與臭氧再生 4 hr 之效果相當，表示以空氣再生 RAP 具可行性；此結果間接驗證具有曝氣功能的 HFS 系統因溶氧較高(約 4~7 mg/L，一般整治井溶氧只有 0~2 mg/L)，故可大幅提昇 RAP 可持續氧化水中有機物和再生之功能。

綜合而言，本計畫的第二年度模場實驗，結合 HFS、RAP 及 GIT 系統進行整治，已確認搭配 GIT 增溫處理系統可以增加污染移除成效，有效加速移除影響半徑範圍內之地層污染物，且 RAP 可分別針對 HFS 運轉所產生的揮發性氣體及循環水中之污染物，進行同步吸附/氧化與現地曝氣再生，可大幅減少傳統整治採用活性碳造成的大量廢棄物問題，驗證這三種處理技術的整合，可以大大強化整體整治的效果及縮短整治期程，且達到綠色整治之效益。



Abstract

Petroleum hydrocarbons leaks from oil pipes, storage tanks of gas station and oil farm can contaminate soil and groundwater. The main R&D concept of this project integrates two key technologies- regenerative adsorption particles (RAP) and hydraulic circulation flushing soil remediation system (HFS) for on-site light non-aqueous phase liquid (LNAPL) remediation. RAP is the activated carbon-based material, and doping with noble metal oxide thin-film. RAP has excellent adsorption-regeneration and redox, so it can be applied in treating VOCs and the organic pollutants in wastewater and groundwater. According to the characteristics of LNAPL pollutants, HFS combining pumping and recirculating, flushing, and air injection with mist atomization will be conducted. Therefore, HFS can remove the pollutants in gas phase, oil phase, and aqueous phase remained in soil and groundwater. Combining HFS and RAP, it should have the significant removal performance and improve the remediation efficiency.

In the first year, the pilot test study was conducted in Lin Yuan petrochemical plant of CPC Corporation. The major pollutants of benzene, toluene, and TPH (total petroleum hydrocarbons) dissolved into soil and groundwater and migrated from a LNAPL source in a sandy aquifer under this site. In this study, the site background information about soil and groundwater contamination was investigated first. The background soil pollution applies the data sampled from CPC in 2018, which TPH concentration of 3 sampling points are all beyond the soil pollution control standard (1,000 mg/kg).

After installing the HFS pilot system and related facilities on the ground, the HFS system has been normally operated on site since Aug 12, 2021. Two pilot tests were conducted on-site. For Test I, RAP bed was installed on the ground to treat the VOC of vent produced from HFS, since HFS has the good hydraulic circulation and flushing. For Test II, RAP bed was installed in the recirculated water treatment system of HFS to treat groundwater. Furthermore, to evaluate the remediation performance of this pilot HFS and RAP system, the sampling and analysis of vent, groundwater and soil were conducted after this pilot system is commissioned. The preliminary results show that the TPH concentration in the groundwater was decreasing. From the monitoring results of soil, it is shown that the recirculating flow has moved the pollution in the soil to the nearby area of HFS system. On the other hand, the outlet vent after RAP bed shows good performance and saturated adsorption has not been



found up to now (about one and half years of operation). This may be similar to our experimental results of toluene degradation in the lab, that is, it shows the fairly desirable VOC removal only by RAP and air oxidation at room temperature.

In the second year of the pilot study in July 2022, two additional remediation wells were installed within the influence radius of HFS. GIT (Groundwater Increase Temperature System) was applied inside the remediation wells for a short period. By increasing the underground temperature to enhance the solubility of pollutants and lower the soil viscosity, the volatility of pollutants is improved. GIT+RAP was applied two cycles in August and November 2022, separately. Based on remediation wells' regular monitoring data, total TPH concentration is decreasing but it is still beyond pollution control standard. When GIT was applied to increase underground temperature, the pollutant concentrating is in rising trend, that shows there is residual pollutant in the ground. Although TPH concentration in ground is beyond pollution control standard, we can conclude that HFS system is effective in removing the pollutants. Two additional installed remediation wells for GIT system this year shows rising trend of underground water pollutants, that means HFS and temperature effect will release residual pollutants in the ground. Therefore, it is highly recommended to continue following pollutant remediation.

We also take the RAP samples from the remediation wells and vent treatment tank after GIT+RAP applied cycle. The result in the laboratory with 24 h- air aeration regeneration is equivalent to that of 4 h- ozone regeneration, that means RAP regeneration with aeration is feasible. We found HFS with aeration can get higher dissolved oxygen (normally it is 0-2 mg/L, here we can get 4-7 mg/L) that leads RAP to continuously oxidizing organics and regeneration dramatically.

In summary, for the 2nd year pilot tests of this project, we combined HFS, RAP, and GIT systems to remediate the pollutants. It is confirmed that GIT with temperature increasing system can enhance pollutant removal efficiency. It accelerates pollutant removal rate in influence radius. RAP can target the VOC generated by HFS and pollutants in recirculation water, conduct adsorption/oxidation and regeneration on-site simultaneously. Compared to traditional activated carbon method, waste is dramatically reduced. We verify that integration of these 3 techonolies can maximize remediation effect and shorten remediation time, that benefits from green remediation.



目錄

頁次

審查意見回復

專案基本資料表

111 年度專案成果績效自評表

計畫摘要

Abstract

目錄

圖目錄

表目錄

一、前言	1
二、研究目的	2
(一) 專案背景	2
(二) 專案目的	2
三、專案技術及模場場址背景資料	3
(一) 專案技術	3
1. 可再生型吸附顆粒(RAP)	3
2. 多介質水力沖洗循環系統(HFS)	7
(二) 模場試驗場址	12
1. 地理位置	12
2. 地質與土壤	12
3. 地下水文	17
4. 中油林園廠列管公告資料	20
5. 中油林園廠運作歷史	20
6. 中油林園廠污染情況說明	25
(三) 模場設置區	30



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

1. 100 油槽區土壤污染情形	30
2. 100 油槽區地下水污染情形	30
四、文獻探討	41
(一) 活性碳再生方式	41
(二) 熱再生	42
(三) 臭氧再生	42
(四) 臭氧再生參數	42
1. 臭氧再生時間	42
2. 臭氧劑量	43
(五) 貴金屬釘之特性	43
五、研究方法與過程	44
(一) 研究方法	44
(二) 模場設置	45
1. 背景調查	45
2. 模場設置規劃與運轉	47
(1) 第 1 年(110 年)	47
(2) 第 2 年(111 年)	56
3. 成效評估	61
4. 系統維護	63
(三) 工作進度說明	63
六、結果與討論(含結論與建議)	65
(一) 模場背景調查	65
1. 土壤調查	65
2. 地下水調查	65
(二) 模場整治井與設備設置說明	68
1. 模場 HFS 整治井及設備設置	68
2. GIT+RAP 試驗	77



(三) 系統影響半徑測試	84
(四) 定期監測	87
1. 尾氣監測	87
2. 地下水監測	91
(1)定期監測	91
(2) GIT+RAP 試驗成效監測	99
(3)認證機構採樣檢測	103
3. 土壤定期監測	105
(五) RAP 實驗室再生驗證	108
1. RAP 元素分析	108
2. 再生參數探討-臭氧再生	109
3. 多次循環/再生之 RAP 吸附容量評估	112
4. 再生參數探討-空氣再生	113
5. 第二次 GIT/RAP 樣品&尾氣 RAP-空氣再生驗證	115
(六) 論文及專利	118
1. 國內期刊論文	118
2. 國內研討會	118
3. 專利	118
(七) 結論	119
(八) 建議	120
七、參考文獻	121
專案執行績效審核自評表	123



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

圖目錄

頁次

圖 1、RAP 外觀	3
圖 2、鈎金屬在水中之 pH-電位相圖	3
圖 3、RAP 可能的氧化還原機制	4
圖 4、O ₃ + RAP 對甲苯去除之測試系統	5
圖 5、O ₃ + RAP 對甲苯去除之測試結果-1	6
圖 6、多介質水力沖洗循環系統(HFS)專利證書	8
圖 7、多介質水力沖洗循環系統(HFS)示意圖	9
圖 8、HFS 整治系統物化特性	10
圖 9、HFS 論文於中國環境科學學會 2019 年科學技術年會發表	11
圖 10、「林園工業區」工廠配置圖示意圖	14
圖 11、「中油林園廠」地質資料分區地層柱狀圖	15
圖 12、「中油林園廠」地質剖面圖	16
圖 13、「林園工業區」地下水流向示意圖	18
圖 14、「中油林園廠」廠區地下水等勢水位圖	19
圖 15、「中油林園廠」廠區配置圖	23
圖 16、「中油林園廠」製程流程圖	24
圖 17、「中油林園廠」廠內土壤調查位置圖	27
圖 18、「中油林園廠」廠內土壤污染範圍推估圖	28
圖 19、「中油林園廠」廠內地下水污染範圍及程度推估圖	29
圖 20、「中油林園廠」模場位置圖	31
圖 21、「中油林園廠」模場位置現勘照片	32
圖 22、「中油林園廠」108 年下半年土壤 TPH 超過管制標準點位圖	33
圖 23、「中油林園廠」100 油槽區地下水苯污染範圍模擬圖	37
圖 24、「中油林園廠」100 油槽區地下水 TPH 污染範圍模擬圖	39



圖 25、碳基底吸附劑再生技術分類	41
圖 26、模場試驗執行流程	44
圖 27、「中油林園廠」100 油槽區模場區土壤及地下水背景資料調查範圍	46
圖 28、HFS 系統井體設計示意圖	48
圖 29、HFS 設備配置圖	49
圖 30、系統與自計式水位計放置位置示意圖	51
圖 31、系統運轉後之水位變化圖（範例）	52
圖 32、RAP&HFS 整治系統設計示意圖(110 年 Phase I)	54
圖 33、RAP&HFS 整治系統設計示意圖(110 年 Phase II)	55
圖 34、水層增溫處理系統(GIT)專利證書	58
圖 35、「DNAPL(a)溶解度(b)蒸氣壓(c)黏滯性與溫度關係圖	58
圖 36、水層增溫處理系統(GIT)整合 RAP 之施作流程圖	59
圖 37、GIT+RAP 搭配 HFS 示意圖(放置於影響半徑周圍)(第 2 年)	60
圖 38、土壤及地下水監測位置圖	62
圖 39、「中油林園廠」100 油槽區儲槽 LY-109 南側土壤採樣點位及測值	66
圖 40、「中油林園廠」100 油槽區儲槽 LY-109 南側地下水採樣點位及測值	67
圖 41、「中油林園廠」100 油槽區模場設備	72
圖 42、「中油林園廠」100 油槽區模場設備及施工照片	73
圖 43、「中油林園廠」100 油槽區 GIT+RAP 施作照片	82
圖 44、HFS 系統影響半徑測試成果(第 1 年)	85
圖 45、HFS 系統影響半徑測試成果(第 2 年)	86
圖 46、「中油林園廠」100 油槽區 HFS 尾氣監測照片	88
圖 47、「中油林園廠」100 油槽區定期監測地下水總石油碳氫化合物濃度變化 趨勢圖	92
圖 48、「中油林園廠」100 油槽區地下水定期監測照片	95
圖 49、「中油林園廠」100 油槽區 GIT+RAP 試驗井地下水總石油碳氫化合物 濃度變化趨勢圖	99



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

圖 50、「中油林園廠」100 油槽區 GIT+RAP 試驗井地下水監測照片	101
圖 51、「中油林園廠」100 油槽區認證機構採樣檢測地下水總石油碳氫 化合物濃度變化趨勢圖	103
圖 52、「中油林園廠」100 油槽區土壤定期監測總石油碳氫化合物濃度變化 趨勢圖	105
圖 53、「中油林園廠」100 油槽區土壤定期監測照片	107
圖 54、臭氧再生之實驗流程	109
圖 55、臭氧進氣質量流率對臭氧再生 RAP 之 RE 影響	110
圖 56、不同操作溫度下對 RAP 臭氧再生 RE 之影響	111
圖 57、不同操作 pH 下對 RAP 以臭氧再生 RE 之影響	111
圖 58、再生時間對 RAP 臭氧再生 RE 之影響	112
圖 59、RAP 連續流吸附容量探討	113
圖 60、合成廢水①模擬水樣製備流程	113
圖 61、合成廢水模擬水樣再生後吸附實驗示意	114
圖 62、第一次 GIT/RAP 之不同 RAP 再生前後吸附量	115
圖 63、合成水樣②模擬水樣製備流程	116
圖 64、兩次尾氣 RAP 於臭氧與空氣再生之前後吸附量比較	117
圖 65、第二次 GIT/RAP 之不同 RAP 再生前後吸附量比較	118



表目錄

頁次

表 1、常見地下水整治技術的使用限制與問題·····	1
表 2、O ₃ + RAP 對甲苯去除之測試條件·····	5
表 3、O ₃ + RAP 對甲苯去除之測試結果- 2·····	6
表 4、「中油林園廠」各煉製工場生產使用之原料及產品概況表·····	22
表 5、「中油林園廠」主要污染物最高濃度表·····	26
表 6、「中油林園廠」100 油槽區土壤監測結果·····	34
表 7、「中油林園廠」100 油槽區地下水監測結果·····	36
表 8、HFS 系統操作紀錄表·····	53
表 9、研究進度及預期完成之工作進度表·····	64
表 10、模場設置作業監工紀錄·····	68
表 11、HFS 系統實際操作紀錄表·····	69
表 12、水層增溫處理系統(GIT)整合 RAP 施作期程·····	77
表 13、GIT 系統紀錄表·····	78
表 14、HFS 尾氣監測成果·····	87
表 15、「中油林園廠」100 油槽區地下水定期監測成果(第 1 年)·····	93
表 16、「中油林園廠」100 油槽區地下水定期監測成果(第 2 年)·····	94
表 17、「中油林園廠」100 油槽區 GIT+RAP 試驗井地下水監測成果·····	100
表 18、「中油林園廠」100 油槽區地下水認證機構採樣檢測成果·····	104
表 19、土壤定期監測成果·····	106
表 20、RAP 與活性碳之金屬成分負載量分析·····	109
表 21、不同臭氧進氣流率對應之水中臭氧溶解濃度·····	110
表 22、第一次 GIT/RAP 不同再生天數吸附量比較·····	114
表 23、第一次 GIT/RAP 之不同 RAP 再生前後數據·····	115
表 24、第二次 GIT/RAP 樣品&尾氣 RAP-空氣再生數據·····	117





一、前言

我國自從土壤及地下水污染整治法實施後，環保署持續推動各類型場址土壤及地下水污染調查與整治工作，目前更以推動綠色永續型整治(Green and Sustainable Remediation，簡稱 GSR)為重要里程碑，希望在進行場址整治工作時能兼顧環境、社會與經濟效益三面向，以減少整體環境衝擊，包括減少能源消耗、降低空氣污染排放、最小化水資源使用影響、土壤及生態系影響、以及資材與廢棄物減量。 輸油管線和加油站與油槽的洩漏是常見的油品污染土壤與地下水污染源，這些油品污染場址可能因儲存不當、管線洩漏、卸油口及卸油管線附近因卸油處理不當造成油品污染。過去常見油品污染整治工法如空氣注入法、土壤氣體抽除法、現地化學氧化法等，表 1 為這些常見的地下水整治技術的使用限制與問題，普遍具有整治時程長、整治經費高昂，或者是化學藥劑添加成本高等問題，且其對環境衝擊較大，另外也常見廢棄活性碳衍生二次污染等，造成污染場址整治困難及後續對環境的影響。因此尋找新型綠色整治材料及永續型整治技術是 GSR 整治的首要目標。	
表 1、常見地下水整治技術的使用限制與問題	
常見地下水整治技術	使用限制與問題
現地化學氧化法 (ISCO)	某些藥劑半衰期太短，或易形成沉澱造成堵塞 常規化學藥劑成本高，影響整治經費 短時間內對現地環境改變及衝擊較大
空氣注入法 (AS)	適用於揮發性或半揮發性有機污染物 土壤不均質性可能形成部分地下水污染區域無法被處理 曝氣處理影響半徑有限
抽出處理法 (P&T)	整治期程一般都很長 需長期處理抽出的廢水 停止抽水後常會有濃度回升的現象
加強好氧生物整治法	通常只適用於低濃度污染或整治後期 整體整治期程較長 產生的微生物和有機基質可能需移除



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

二、研究目的

(一) 專案背景

儲油槽及輸油管線常因受腐蝕或其他原因造成油品洩漏，導致油品滲漏至土壤及地下水，造成區域性土壤及地下水污染問題。本計畫研究構想主要運用可再生型吸附顆粒(RAP)搭配多介質水力沖洗循環系統(HFS，台灣專利字號 M566206)，針對 LNAPL 污染場址進行土壤及地下水高效率整治作業。

統計 91 年至 108 年 6 月，歷年地下儲槽系統共計 3,762 家，其中 289 站次經公告列管及 63 站列管中，累積污染查出比例約 7.7%，而尚未解除土壤/地下水污染列管場址，主要原因除了受限於水文地質條件外、更重要的是污染整治工法的篩選、選用不同工法所需整治時程、開挖移除所面臨到的污染廢土去處，及龐大的土壤/地下水污染整治經費，皆為影響因素。本團隊考量業者面臨到相關污染整治的問題，因此評估運用 RAP+HFS 之整治工法，除了可大幅度地縮減整治經費外，亦可協助 LNAPL 污染場址加速改善並縮短整治時程。

(二) 專案目的

本計畫主要設計構想為在土壤及地下水受到高濃度之輕質非水相溶液(light non-aqueous phase liquid, LNAPL)主要為油類污染，依據油類污染物之污染特性，於現地藉由地下水循環整治系統之抽回水循環處理、地層淋洗及霧化原理，並搭配可再生型吸附顆粒(RAP)以同時去除土壤及地下水中氣相、浮油相及溶解相等污染物，第一年已完成，第二年預計以水層增溫處理系統(Groundwater Increase Temperature System，簡稱 GIT)輔助，利用將地層溫度增加以提高污染物在水中溶解度、降低污染物在地層中之黏滯性及增加污染物揮發性的特性進而將污染物去除。經由兩種不同領域的高端處理技術進行多樣化的整治運用搭配，以期望能夠更完善的將受油類污染之土壤及地下水更快及更有效率地移除污染問題。



三、專案技術及模場場址背景資料

(一) 專案技術

本計畫係採用兩種不同領域的高端處理技術，主要為可再生型吸附顆粒(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。以下就兩項技術內容進行說明。

1. 可再生型吸附顆粒(RAP)

(1) 可再生型吸附顆粒(RAP)介紹

可再生型吸附顆粒(Regenerative Adsorption Particles，簡稱 RAP)是以椰殼活性碳為基底，顆粒大小約 20~40 目，為黑色顆粒狀具金屬光澤(詳見圖 1)，覆蓋三種有效貴金屬氧化物，其中一主要貴金屬鈥成分具有多種氧化態，具有極佳的氧化特性，如圖 2 所示在不同條件下可由 0~+8。對比市場上一般的貴金屬觸媒，其獨特的金屬氧化物奈米薄膜製備技術使活性成分覆蓋均勻、活性更強、成本更低，可在短時間催化氧化有機污染物，並可重複活化使用。



圖 1、RAP 外觀

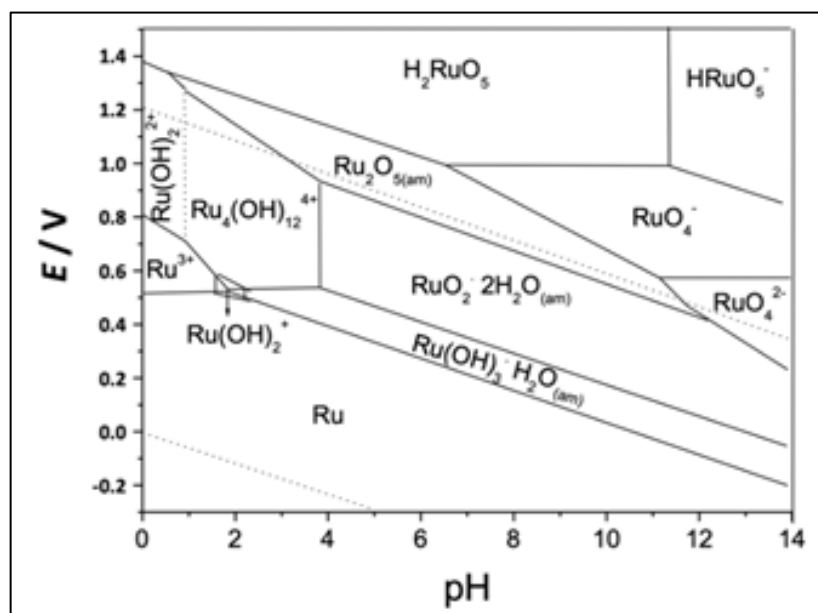


圖 2、鈥金屬在水中之 pH-電位相圖



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

RAP 在此地下水整治的應用為取代過去一般活性碳，以固定床方式吸附有機物，吸附到一定飽和程度後再抽換出來以臭氧再生，RAP 可能的氧化還原機制詳見圖 3。

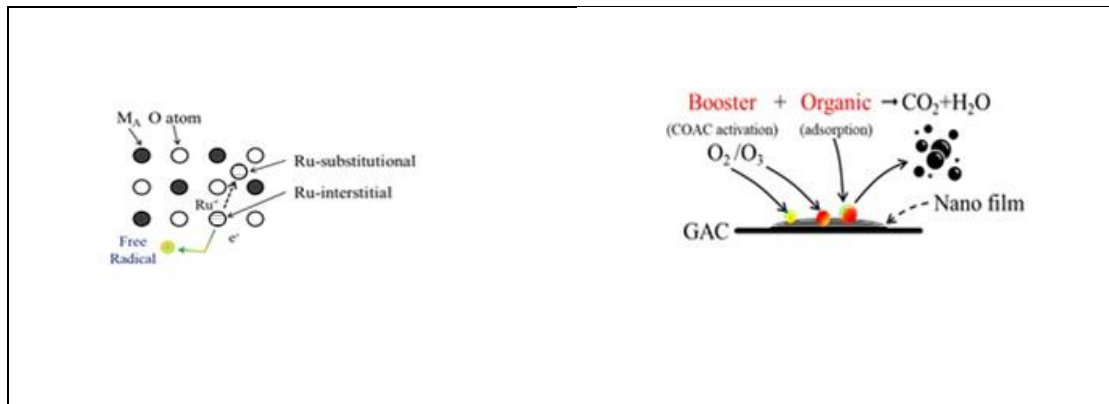


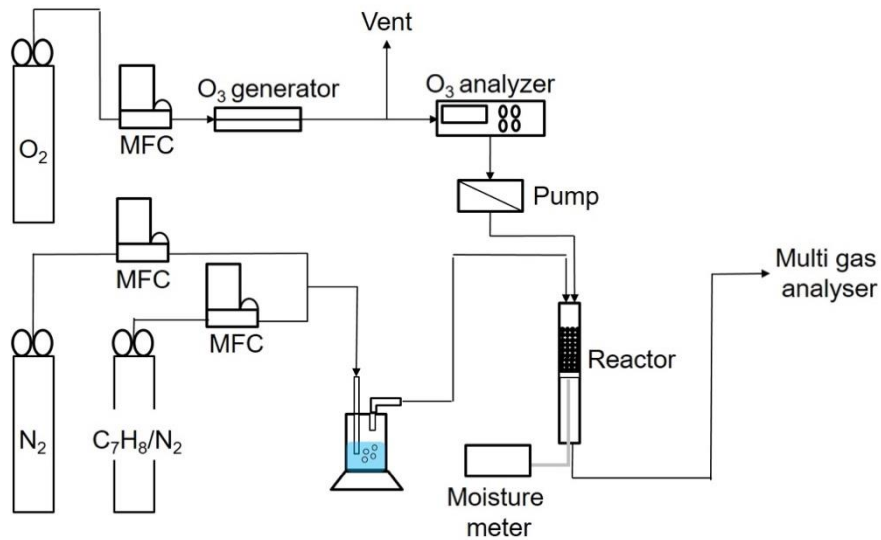
圖 3、RAP 可能的氧化還原機制

(2) RAP 應用在氣相 VOC 防治的應用

一般去除氣相 VOC 的觸媒氧化大多使用條件在 200°C 以上，但 RAP 可在室溫下搭配曝臭氧即可以催化氧化方式去除 VOC，RAP 加臭氧對 VOC(以甲苯為例)去除之系統流程圖詳見圖 4，相關測試條件詳見表 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進入 RAP 固定床的混合氣體 VOC 濃度約 235 ppm，臭氧濃度則控制在 250-280 ppm，相對溼度 90%。RAP 加臭氧對 VOC(以甲苯為例)之實驗結果詳見圖 4 與表 3，可看出當反應時間拉長到 300 min 時，此系統之去除率仍能維持在 85%，另外藉由觀察 CO₂ 濃度可看出 VOC 濃度減少之機制，反應之前兩個小時所製造出之 CO₂ 濃度較低，為 RAP 吸附 VOC 之反應，反應超過兩小時後 CO₂ 濃度大幅上升，可看出是 RAP 與臭氧進行催化氧化 VOC 之反應。



三、專案技術及模場場址背景資料

圖 4、O₃ + RAP 對甲苯去除之測試系統表 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

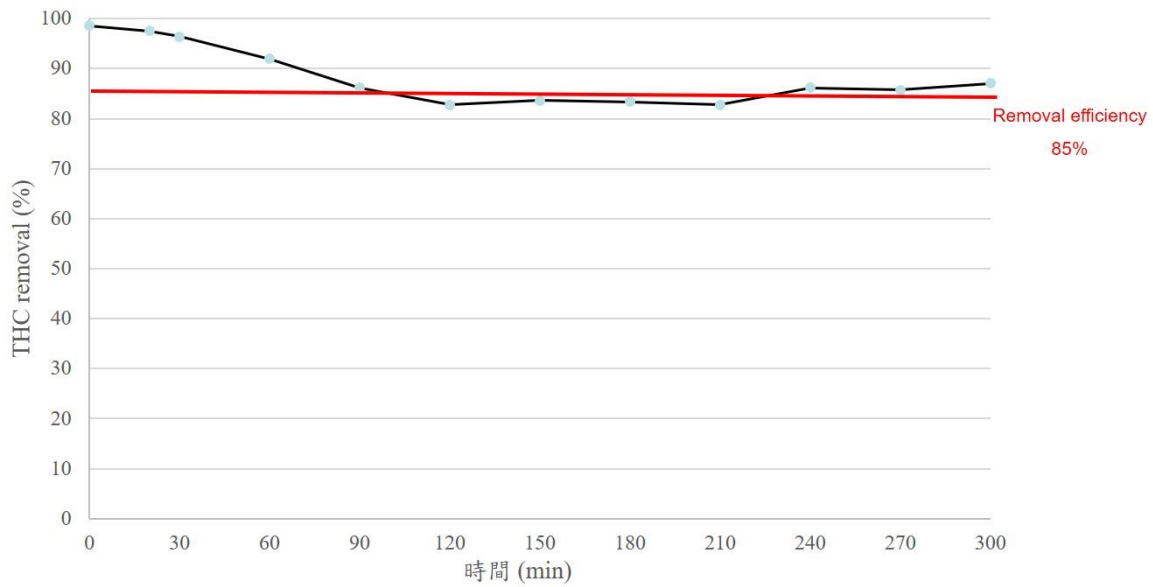


圖 5、O₃ + RAP 對甲苯去除之測試結果-1

表 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



2. 多介質水力沖洗循環系統(HFS)

(1) 多介質水力沖洗循環系統(HFS)

多介質水力沖洗循環整治系統係捷力英環境有限公司取得專利「水力土壤污染沖洗整治系統(Hydraulic circulation Flushing Soil remediation System, 簡稱 HFS)」, 專利字號 M566206, 專利證書詳見圖 6, 系統示意圖詳見圖 7。主要針對油類污染場址進行多介質之高效率整治, 其設計構想為依油類污染物特性, 於現地藉由系統循環抽除、淋洗並結合霧化及曝氣原理, 以同時去除土壤及地下水中氣相、浮油相及溶解相之污染物。此系統實際於現地設置處理時, 經系統全方位連續運轉處理, 對於現地高濃度之輕質非水相溶液非水相液體(light non-aqueous phase liquid, LNAPL)污染物將有明顯之移除效果, 而使整治效率有效提升。

依據油類污染物之物化特性, 系統內部設計針對污染移除作用說明如下:

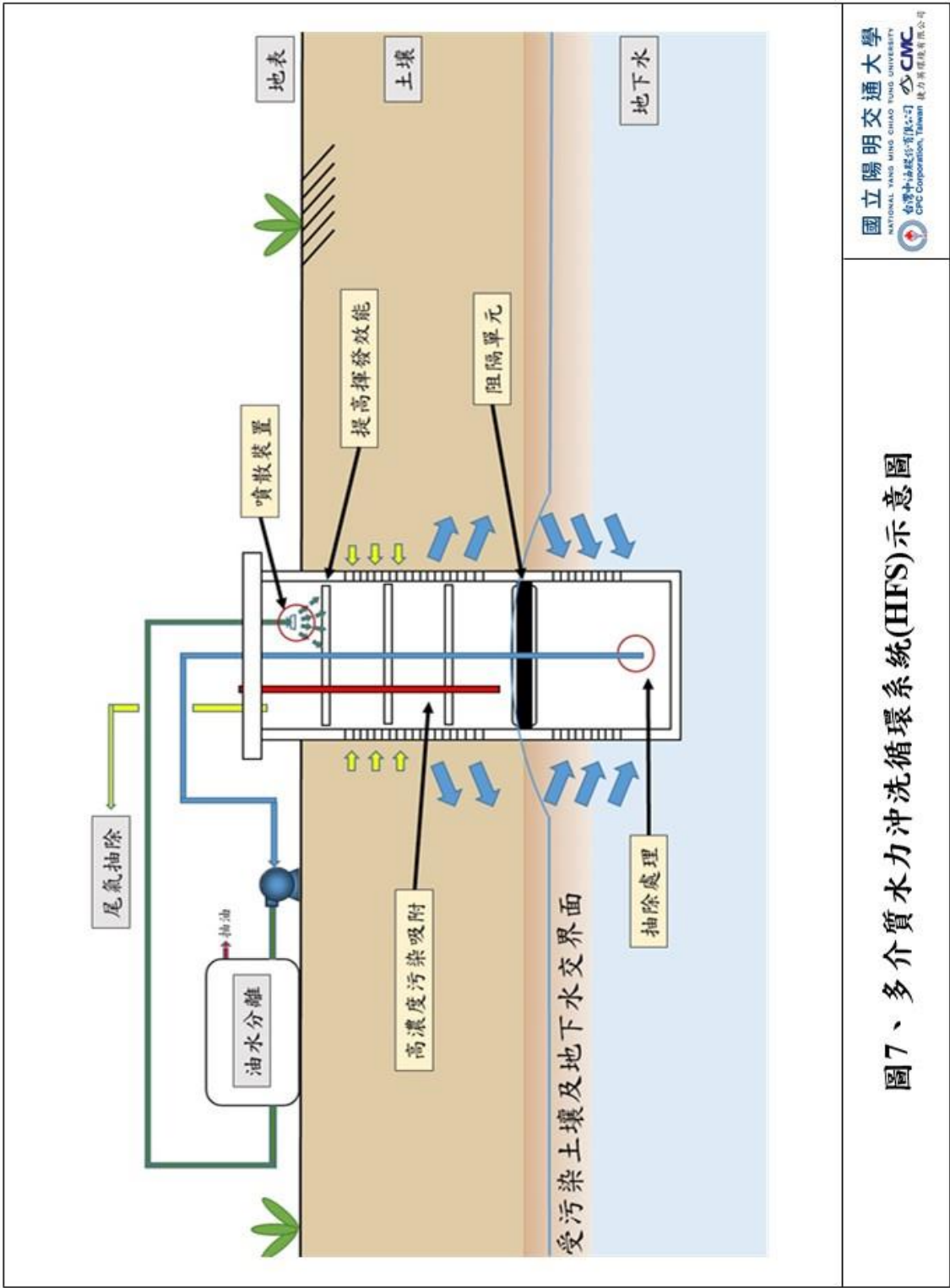
- I. 霧化作用: 當場址中土壤及地下水受到油品污染時, 系統將受污染土壤及地下水交界面之地下水抽至地表, 經由系統內部噴散裝置回注使地下水形成霧化作用。由相關研究證實, 當水霧化後之氣液比及霧化粒徑越小時, 可有效提高地下水與空氣接觸的表面積, 而使水中污染物揮發, 詳見圖8(a)(b)所示。
- II. 污染物質傳作用: 霧化後之地下水經由系統內部板件開孔設計, 提升污染物氣液介面間之質傳作用, 液相中高濃度的氣體或揮發性物質, 傳送至低濃度的氣相中, 有效降低液體中污染物濃度, 錢海平(2011)相關研究指出板件開孔率及孔徑設計參數影響氣液接觸效率, 進而影響污染物去除成效, 詳見圖8(c)(d)所示。
- III. 加熱及淋洗作用: 系統將受污染之地下水抽出, 經油水分離後再回注於地層中, 油水分離裝置中並搭配溫度控制, 除可提高地下水油品回收率外, 回注過程因地下水溫度提高, 藉由淋洗作用使累積於不飽和含水層中之吸附相溶出, 相關研究證實隨著水溫提升, 可降低 LNAPL 附著在土壤表面黏度並增加流動率, 詳見圖8(e)。藉由現地地下水抽除與回注可避免二次污染產生及處理成本。
- IV. 吸附作用: 系統中亦設有更換式吸油材, 可直接將累積於地層中高濃度 LNAPL 吸附, 可降低 LNAPL 污染擴散並提升土壤及地下水環境中 LNAPL 移除效率。

8





三、專案技術及模場場址背景資料





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

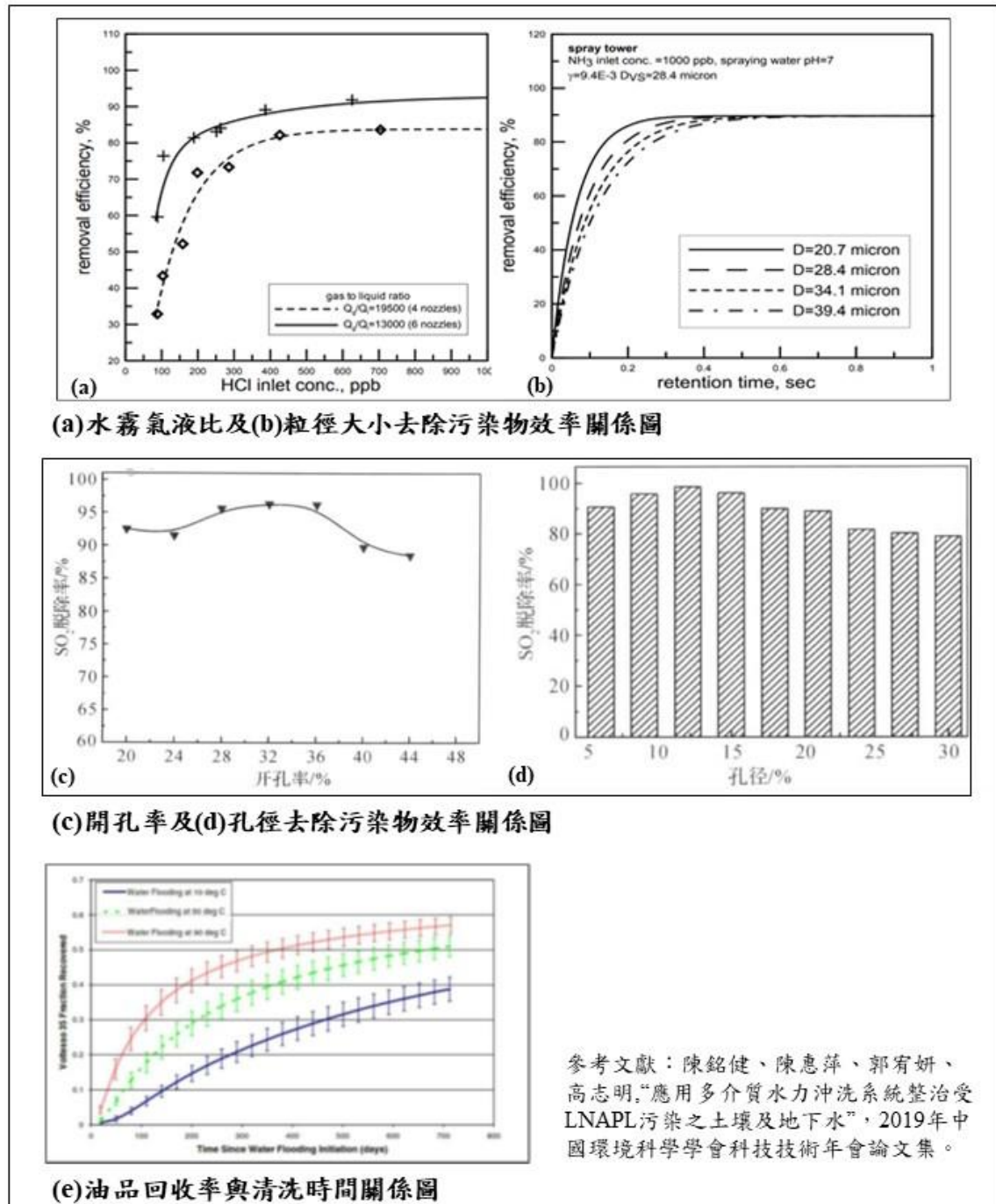


圖8、HFS 整治系統物化特性

(2) 多介質水力沖洗循環系統(HFS)發表成果

捷力英環境有限公司曾以 HFS 專利於中國環境科學學會 2019 年科學技術年會發表論文「水力土壤污染沖洗系統運用於土壤及地下水受 LNAPL 污染去除之原理探討(詳見圖 9)」。



圖9、HFS論文於中國環境科學學會2019年科學技術年會發表表



(二)模場試驗場址

本計畫之模場位於高雄市林園區之林園工業區，場址為「台灣中油股份有限公司石化事業部林園石化廠(以下簡稱中油林園廠或本場址)」，中油林園廠為公告之土壤及地下水污染整治場址，以下就場址地理位置、地質、水文、列管公告資料、污染情形、現況及模場設置區說明如下。

1. 地理位置

林園工業區為南部最大石化工業區，依據林園工業區服務中心統計資料，林園工業區面積約 403.2 公頃，工業區內廠商共計 33 家，總設廠面積 318.5191 公頃，目前(109 年 12 月)生產中 28 家(化學材料製造業 19 家、化學製品製造業 4 家、石油及煤製品製造業 1 家、非金屬礦物製品製造業 1 家、金屬製品製造業 1 家、橡膠製品製造業 1 家、電力及燃氣供應業 1 家)、未建廠 5 家，林園工業區工廠配置及中油林園廠位置示意見圖 10。

2. 地質與土壤

依據經濟部中央地質調查所地質資料指出，林園地區的地層屬現代沖積層，該地層廣泛地覆蓋在西部海岸平原之上，主要組成岩性為黏土、粉砂、砂及礫石，其透水性略差於以粗砂礫為主的屏東平原中、上游沖積層。由於本區岩盤略深，故仍具有優良之透水性。

中油林園廠過去執行多次地質鑽探(資料來源：中國石油股份有限公司高雄煉油總廠林園廠土地改良地質調查分析工作,萬鼎股份有限公司,1993)，將場址地質資料彙整成 13 個區域，繪出各區域之地層柱狀圖(圖 11)，本場址地表下 50 公尺內淺層地質屬現代沖積層，地質組成主要由砂、粉砂、粉土及黏土等組成，地質分層構造複雜，淺層多為較為透水之粗砂層和細砂層組成，透水性較佳，覆於其下為粉土層或粉土質砂層與黏土層互層，場址深度 20 公尺以下透水性較差，本區域岩盤深度至少約地表下 80 公尺。綜合過去地質資料分析，將地層柱狀圖分別繪成場址東西向及南北向地質剖面圖(圖 12)，本場址地表下 50 公尺內地質狀況為砂層、粉土層與黏土層互層，由上而下可概分為 4 個層次，分別說明如下：

(1)粗砂及細砂層

根據鑽探資料分析顯示，本層主要由鬆散的中至細砂夾雜小礫石或粗砂組成，此層分佈由地表至 18 公尺左右，厚度約 13 至 19 公尺，由於組成顆粒較大且膠結較為鬆散，因此透水性良好為場址主要透水帶。



(2) 玢土質砂層

由緊密的細砂與玢土質細砂組成，此層可分為兩個位置出露，一層位於細砂層底部，厚度變化約 1 至 10 公尺不等且連續性差，透水性隨其中含細粒物質量增加而遞減，以不整合覆蓋於黏土層或玢土層上方，主要分佈在廠區東南側，透水性中等；第二層分佈於場址深度約 30 至 40 公尺以下呈水平堆積，地層連續性佳，以不整合方式與上方黏土層接觸。

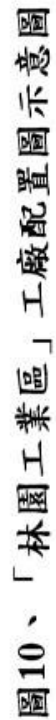
(3) 玢土層

此層是由玢土所構成，本層於場址內以互層形式薄層夾雜於黏土層中，透水性較差。

(4) 黏土層

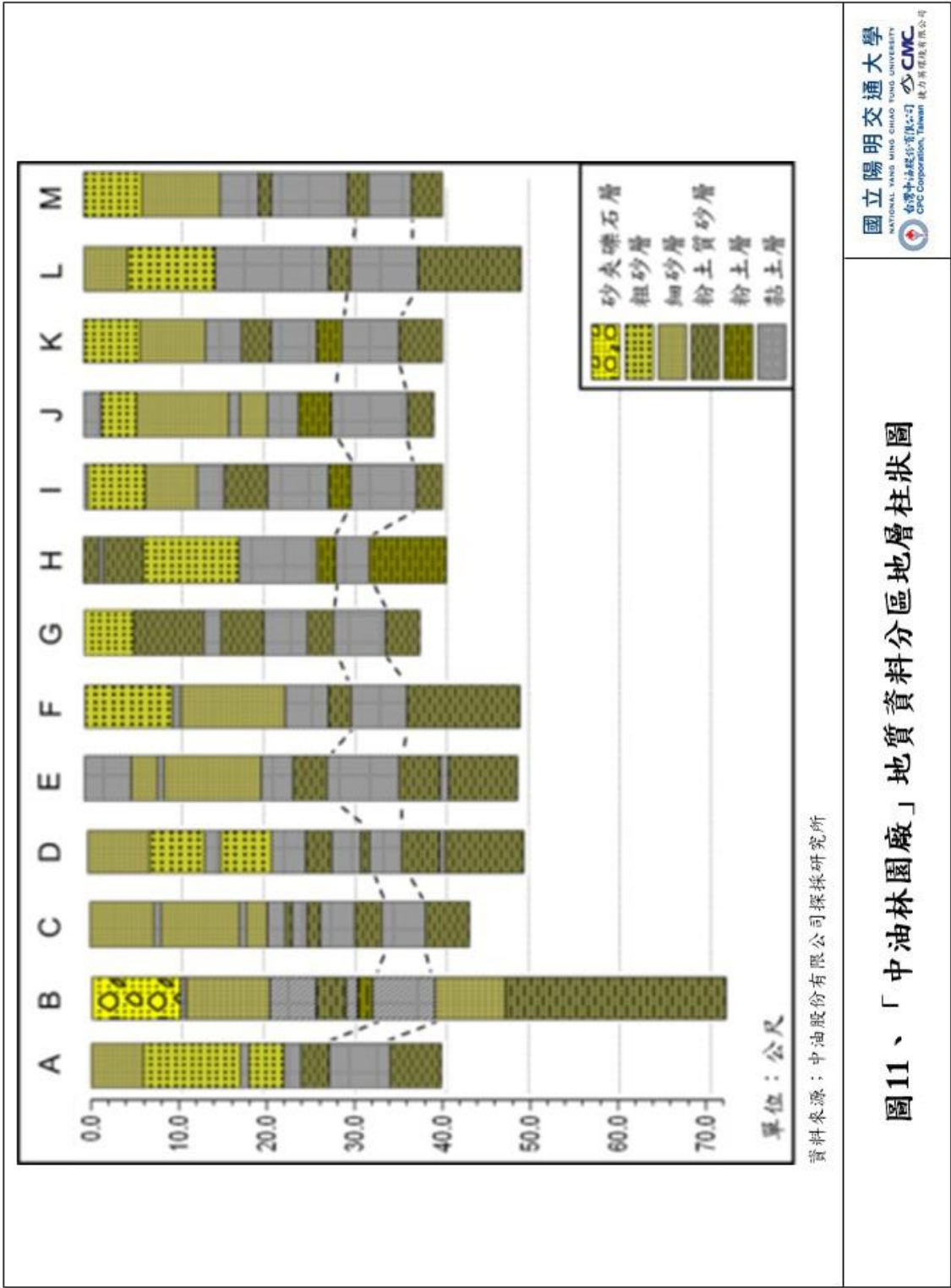
此層主要由黏土構成，顆粒細密緊實且透水性差，場址內具有多層黏土層互層，各區域在深度 50 公尺範圍內出現 3 至 6 層不等之黏土層，由於部分黏土層較薄且連續性差，並非良好之阻水層，觀察場址資料發現於場址深度 20 至 25 公尺範圍存在一連續性良好的黏土層，但此層於區域較薄；而場址深度 28 至 40 公尺範圍內之黏土層連續性佳且層厚較厚，應為一良好之阻水層，分隔上下兩個含水層。

14





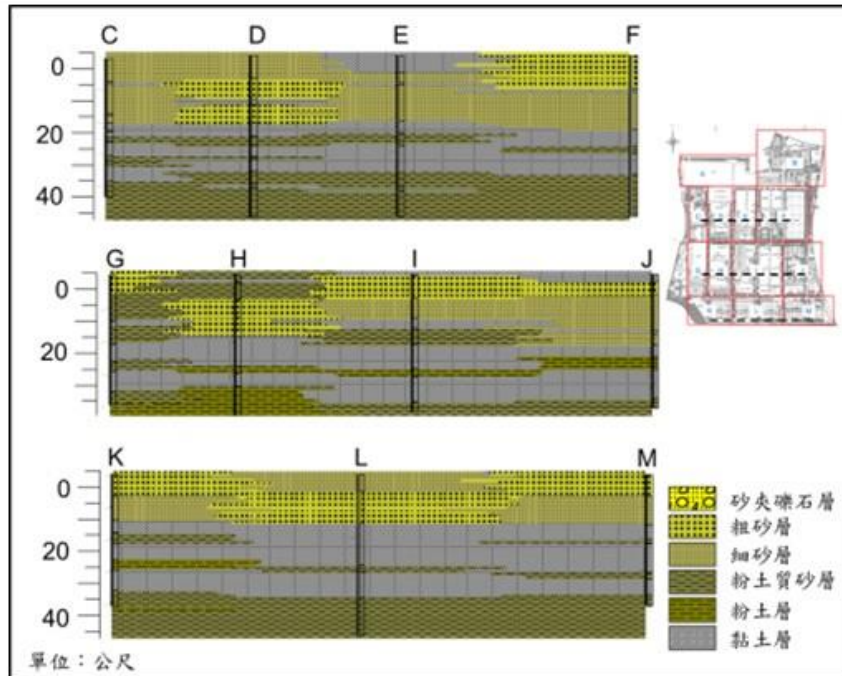
三、專案技術及模場場址背景資料



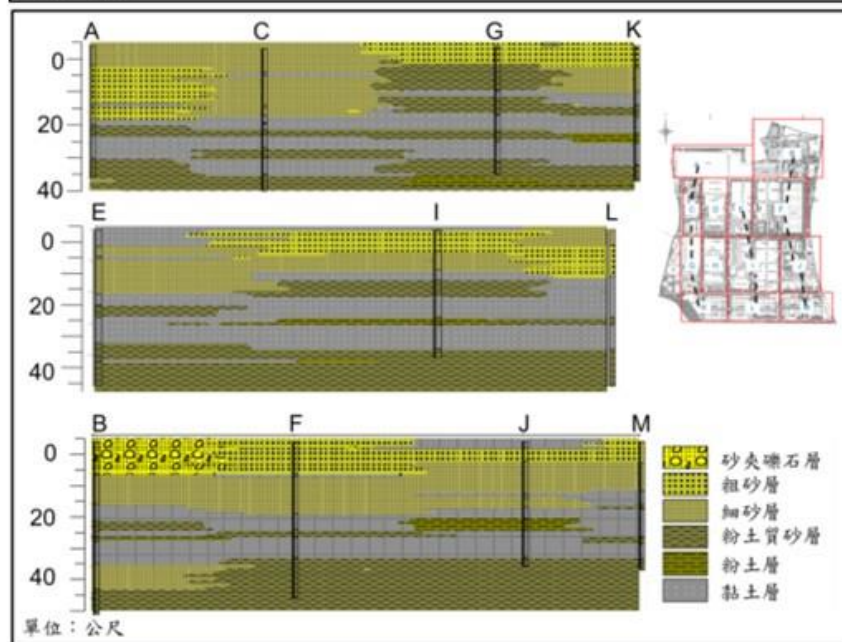


應用可再生型吸附顆粒(RAP)搭配多介質水力沖洗循環系統(HFS)去除受 LNAPL 污染之土壤及地下水

東西向



南北向



資料來源：中油股份有限公司探採研究所

圖12、「中油林園廠」地質剖面圖



3. 地下水文

屏東地區的水文地質概況，在深度約 250 公尺內，東北部地層分層較不明顯，主要的阻水層(泥層)可能只有一至二層，地下水上下流通限制較少；西南部地層(港東至林園)分層明顯，大致有二層主要的阻水層(泥層)，地下水上下流通已受限制。若以深度作為分層參考，第一含水層的深度約在 0 至 60 公尺，第二含水層的深度約在 60 至 120 公尺，第三含水層的深度約在 120 至 250 公尺，第三含水層又可分為兩段，但不同含水層分層深度隨區域而變。

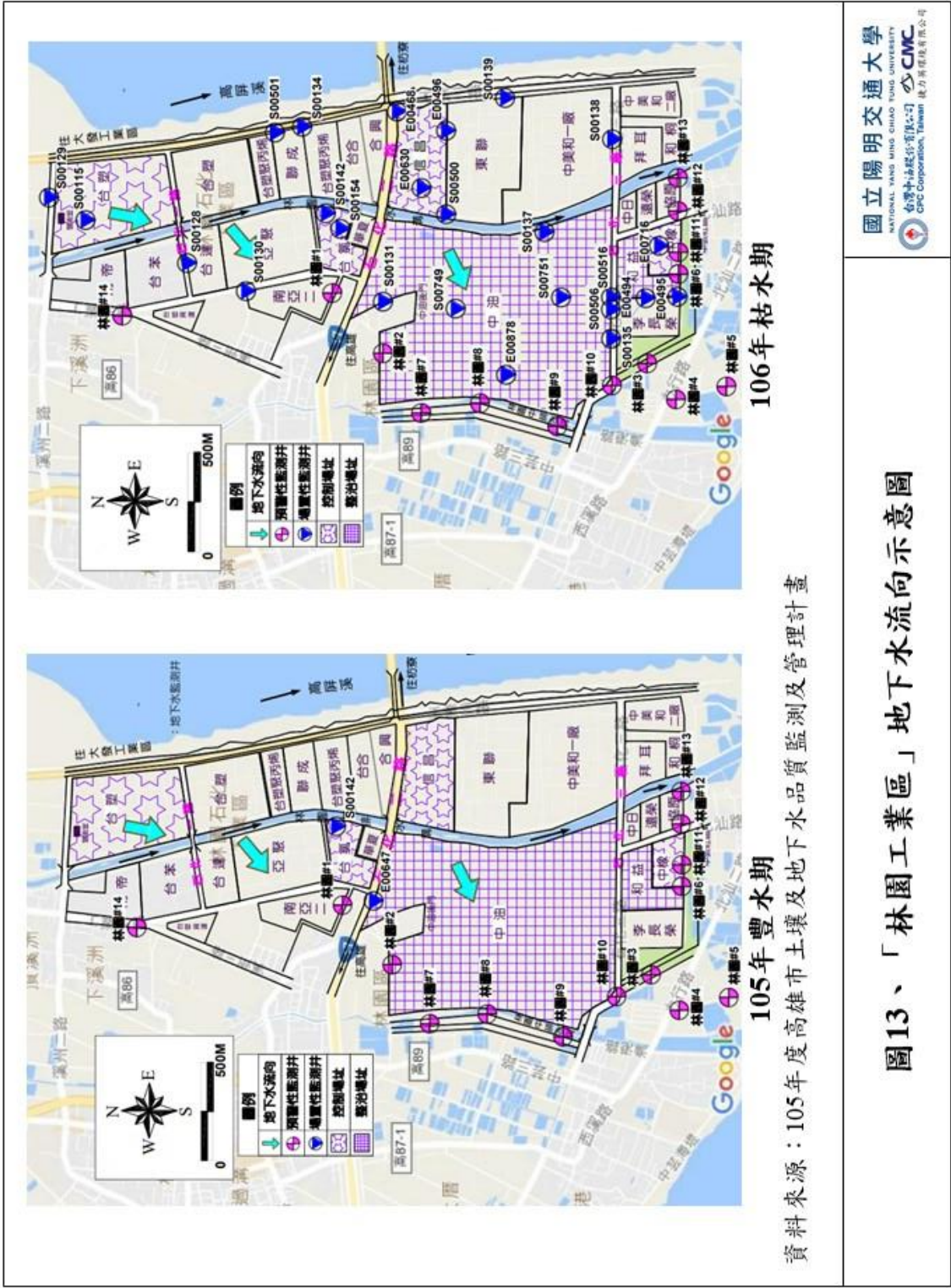
另依據「105 年度高雄市土壤及地下水品質監測及管理計畫」所述，林園工業區地下水流向大致為由東北向西南，流向示意圖詳見圖 13。

為了進一步了解廠區內地下水受潮汐與季節水位變化情形，藉由廠區內 14 口自記式水位記錄觀測井水位資料(監測期為 101 年 4 月至 102 年 12 月)，依觀測紀錄繪製廠區內地下水流向詳見圖 14，由圖中觀測出廠區內南側地下水流向由東南往西方向流動；廠區內北側地下水流向由東往西流，且廠區內東西向水力坡度介於千分之五至千分之七；而南北向水力坡度範圍為千分之三至千分之四間，由此可看出廠區內地下水流速東西向分量較大，符合大區域地下水流向。

綜合場址等勢水位資料顯示本場址整體而言，地下水流向以東向西流動方向為主，西側地下水流向穩定，由東往西流動，水力坡度可達千分之十；廠區東側地下水位流向於豐水期有一股由東南向西方向的局部地下水流，枯水期則有一股由東北向西方向的局部地下水流，水力坡度較小，地下水流速緩慢，導致此種現象為豐枯水期地下水補注來源不同，使本場址地下水流向變化較大。

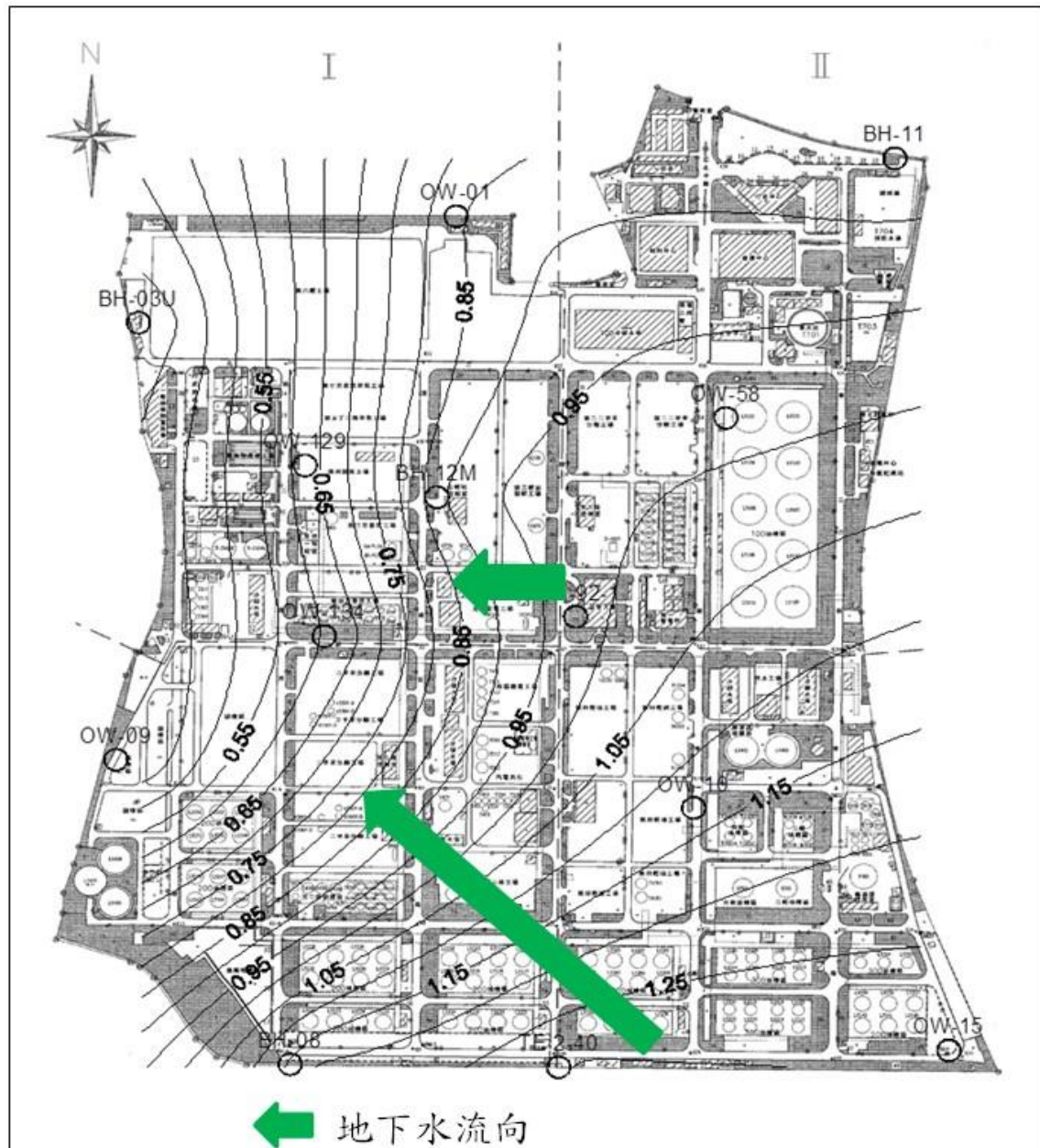


應用可再生型吸附顆粒(RAP)搭配多介質水力沖洗循環系統(HFS)去除受 LNAPL 污染之土壤及地下水





三、專案技術及模場場址背景資料



資料來源：中油股份有限公司探採研究所

圖14、「中油林園廠」廠區地下水等勢水位圖

國立陽明交通大學
NATIONAL YANG MING CHIAO TUNG UNIVERSITY
台灣中油股份有限公司 CPC Corporation, Taiwan CMC 捷力英環境有限公司



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

4. 中油林園廠列管公告資料

- (1) 場址類別：土壤及地下水污染整治場址。
- (2) 公告日期：2012/12/21。
- (3) 場址名稱：台灣中油股份有限公司石化事業部林園石化廠。
- (4) 場址地址：高雄市林園區林園工業區石化二路三號。
- (5) 場址地號：高雄市林園區汕尾段 1823、1824、1825、1826、1827、1828、1829、中芸段 1068-2、1073-2、溪州段三小段 3634-0000、3634-0003、3634-0005、3634-0006、3634-0007、3634-0008、3634-0009、3635-0000、3635-0001 地號，共計 18 筆地號。
- (6) 土壤污染物：苯 7,680 mg/kg；甲苯 3,700 mg/kg；總石油碳氫化合物 32,000 mg/kg。
- (7) 地下水污染物：苯 264 mg/L；甲苯 33.6 mg/L；萘 30.3 mg/L；四氯化碳 0.097 mg/L。
- (8) 場址現況：本場址為運作中工廠，分別為從事乙烯、苯、乙炔、丙烯、丁二烯、鄰二甲苯、對二甲苯等石化原料製程及原料產品儲槽區。

5. 中油林園廠運作歷史

中油林園廠配置大致可略分三區，分別為製程區、油槽區與公用區，其配置圖詳見圖 15。製程區位於廠區正中央，主要工場皆位於此區域內，其中又劃分為六個煉製操作工場，分別為芳一組、芳二組、芳三組、四輕組、新三輕組及公用組。芳一組內有第三芳香烴工場；芳二組內有第一與第二分離工場、第一轉烷化工場及中間油槽區；芳三組內有第六芳香烴工場、第二轉烷化工場、第三吸附分離工場、第三異構化工場及中間油槽區；四輕組內有第四輕油裂解工場、汽油氫化工場及丁二烯工場；新三輕組內有第六輕油裂解工場、汽油氫化工場、丁二烯工場及第七芳香烴工場；公用組包括動力工場、冷卻水塔、變電所、蒸汽鍋爐、及汽電共生場。油槽區位於廠區東側、南側及西南側，東側為 100 油槽區、地表球槽區，南側為 200 油槽區、300 油槽區，西南側則為二甲苯油槽區。公用區分布在廠區東北側、北側與西側，此區域內有工安大樓、消防水池、環管大樓、宿舍、球場、材料倉庫及修護工場等。

中油林園廠以生產烯烴類與芳香烴類兩大石化原料為主，其製程流程詳見圖 16，烯烴類製程的部分建有兩座輕油裂解工場，分別為第四輕油裂解工場與第六輕油裂解工場，以產製烯烴類產品；芳香烴類製程的部分，主要由芳香烴工場與二甲苯分離工場，芳香烴工場分別為芳一組、芳三組及新三輕組內共三座（分別於 65 年 12 月、69 年 10 月及 103 年 7 月起正式運轉），二甲苯



分離工場則有轉烷化、異構化及吸附分離等三製程，主要將芳香烴萃取工場產出之混二甲苯及甲苯作為進料，產製高純度之鄰二甲苯及對二甲苯，於 69 年 10 月正式運轉。

中油林園廠製程所使用原料主要來源為中油公司大林煉油廠，包括輕石油腦、重石油腦、製氣油與媒組油。主要產品包括乙烯、乙炔、丙烯、丁二烯、丁二烯萃餘油、苯、鄰二甲苯、對二甲苯與碳煙進料油。中間產物有重組油、甲苯與混合二甲苯等。各煉製工場使用之原料及產品詳見表 4。

中油林園廠已陸續辦理部分工場除役，分別有芳二組(不包含第一轉烷化工場)及芳三組第三分離工場、第二轉烷化工場除役工作，除役之煉製工場位置詳見圖 15。



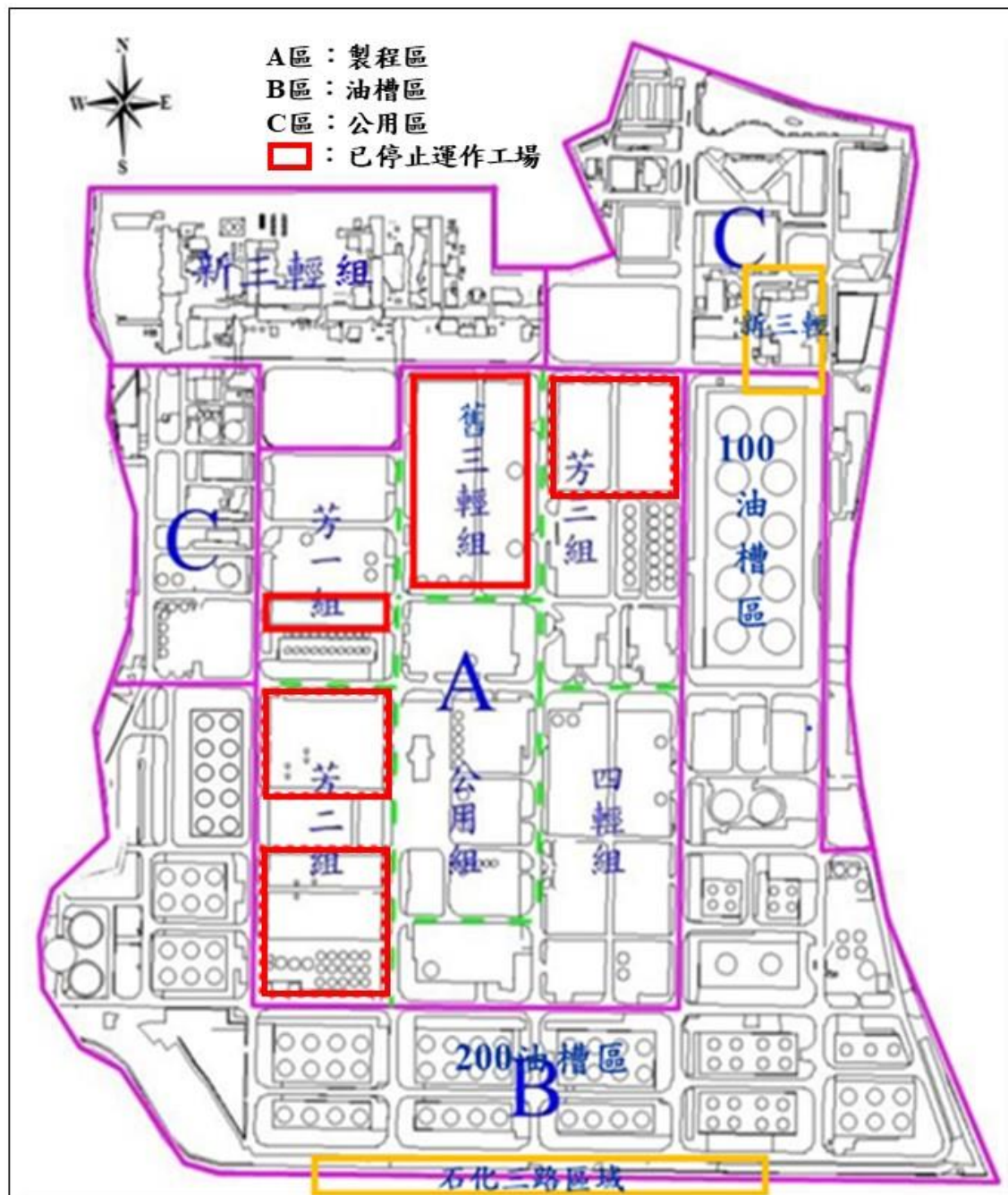
應用可再生型吸附顆粒(RAP)搭配多介質水力沖洗循環系統(HFS)去除受 LNAPL 污染之土壤及地下水

表 4、「中油林園廠」各煉製工場生產使用之原料及產品概況表

工場別		進料油	設計煉量 (公噸/年)	主要產品	
				種類	產量(公噸/年)
芳 一 組	第三芳香煙工場	重組油	1,028,759	苯	137,458
				甲苯	225,089
				苯餘油	262,927
				混合二甲苯	403,285
芳 二 組	第一轉烷化工場	甲苯	279,011	苯	114,344
		C9	145,410	混合二甲苯	269,902
		氫氣	9,531		
	第一吸附分離工場 (除役)	混合二甲苯	478,802	燃料氣	10,569
				C7	45,221
				甲苯	8,354
				C9	67,281
				C10	6,652
				對二甲苯	264,000
	第二吸附分離工場 (除役)	混合二甲苯	509,260,	燃料氣	11,042
				C7	47,246
				甲苯	8,728
				C9	70,294
				C10	6,950
				對二甲苯	288,000
芳 三 組	第六芳香煙工場	煤組油	1,136,070	苯	144,836
				甲苯	269,593
				混合二甲苯	550,476
				苯餘油	171,165
	第二轉烷化工場(除役)	甲苯/C9	472,085	苯	103,666
				混合二甲苯	357,461
	第三異構化工場(除役)	二甲苯萃取油	1,380,786	混合二甲苯	1,342,115
				混合二甲苯	1,342,115
四 輕 組	第四輕油裂解工場	輕油(重石油腦)	1,324,731	聚合級乙烯	467,784
				聚合級丙烯	172,572
				化學級丙烯	92,856
				燃料油	237,396
	汽油氫化工場	裂解汽油	459,900	汽油	456,396
	丁二烯工場	四碳煙油	169,068	丁二烯	76,212
				丁烷/丁烯苯餘油	90,228
新 三 輕組	第六輕油裂解工場	重石油腦	2,717,000	乙烯	800,000
				丙烯	487,000
				四碳煙油	364,000
				裂解汽油	519,000
				PFO 燃料油	107,000
	汽油氫化工場	裂解汽油	526,000	C5 汽油	46,000
				芳香煙	328,000
	丁二烯工場	四碳煙油	391,600	丁二烯	143,400
				苯餘油	230,600
	第七芳香煙工場	芳香煙	819,500	苯	250,200
				甲苯	198,600
				混合二甲苯	157,600
				苯餘油	211,400



三、專案技術及模場場址背景資料



資料來源：中油林園廠土壤及地下水整治計畫書(第一次變更)

圖15、「中油林園廠」廠區配置圖



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

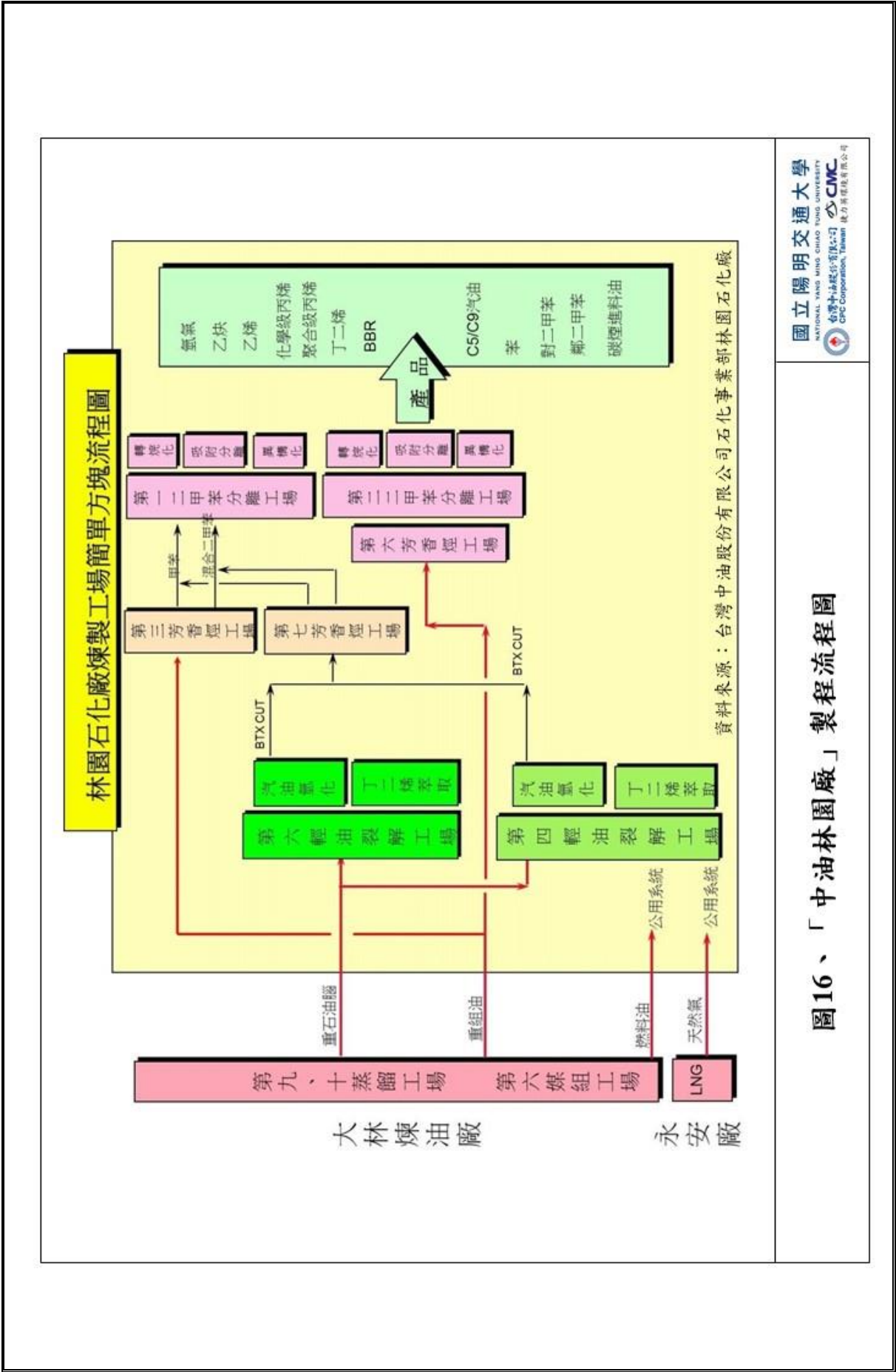


圖16、「中油林園廠」製程流程圖



6. 中油林園廠污染情況說明

中油林園廠最主要之污染來源為設備及管線之洩漏，由於建廠已有 40 餘年，部分設備與地下管線老舊，造成油品或製程原料的洩漏，已陸續進行查漏檢修作業。

由歷次調查及監測資料顯示，土壤中污染物包含苯、甲苯、乙苯、二甲苯及總石油碳氫化合物；地下水中之污染物則包含苯、甲苯、乙苯、二甲苯、萘及總石油碳氫化合物；此外，本場址無生產及使用 MTBE 物質，無該項污染物之污染疑慮。依據本場址土壤及地下水污染調查成果，彙整主要污染物最高濃度與管制標準詳見表 5。

(1) 廠內土壤污染

根據中油林園廠土壤及地下水污染調查及評估成果報告與整治計畫執行期間之監測結果顯示，廠內土壤污染物主要為苯、甲苯、乙苯、二甲苯及總石油碳氫化合物，縱向污染濃度分布於地表下 2~6m，與地下水位變動範圍相符，其中又以 4~5m 為高濃度污染區間；污染橫向分布主要位於製程區：四輕組南側與 200 油槽區北側間、芳一組與芳二組間、芳三組西側、廠區東北側及 100 油槽區南側等五區；而廠內主要之地下水污染物則為苯及總石油碳氫化合物為主，其分布於製程區四輕組南側與 200 油槽區北側之間、芳一組與芳二組間、芳三組與廠區東北側等區域，範圍與土壤污染區域大致相符。

本場址於 103 年 2 月執行第一階段廠區內 137 點土壤污染調查，分析項目為 VOCs、TPH；另於民國 103 年 6 月 18、19 日分別於污染範圍邊界增設 15 口土壤調查點位(P1~P15)進行第二階段廠區內土壤調查，分析項目為 BTEX、TPH。廠區內土壤調查點位詳見圖 17，污染範圍推估詳見圖 18。

(2) 廠內地下水污染

本場址於 103 年 2 月、103 年 4 月，進行廠區內第一階段地下水污染調查作業，採樣共計 48 口次，並於 103 年 6 月，在污染範圍邊界增設 6 口地下水調查點位(NC6-3、OW-128、OW-149、OW-102、OW-113 及 OW-121)，進行第二階段地下水污染調查，此外，為確保芳一組與芳二組之地下水污染未擴散至廠區外，於 104 年 1 月 14 及 23 日進行補充調查，分別在廠區東北側增加 6 口及西側增加 3 口地下水補充調查點位，分析項目皆為 VOCs、TPH、萘及總酚。



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

由廠區內地下水污染調查結果顯示，廠區內地下水主要受苯、甲苯、乙苯、萘及總石油碳氫化合物污染。苯污染熱區主要位於四輕組及 200 油槽區北側之間、芳一組第三芳香烴工場北側、芳一組第四芳香烴工場南側及芳二組北側之間、芳三組、廠區東北側等五處；甲苯污染範圍主要位於芳三組及舊三輕組間以及廠區東北側；乙苯污染範圍主要位於芳二組及西側油槽區間之北側以及廠區東北側；總石油碳氫化合物(TPH)污染熱區於芳一組及芳二組之間、芳三組及舊三輕組間、四輕組南側及 200 油槽區北側之間、廠區東北側等四處；萘污染範圍主要位於四輕組南側及 200 油槽區北側間。各項污染物之污染範圍及程度推估詳見圖 19。

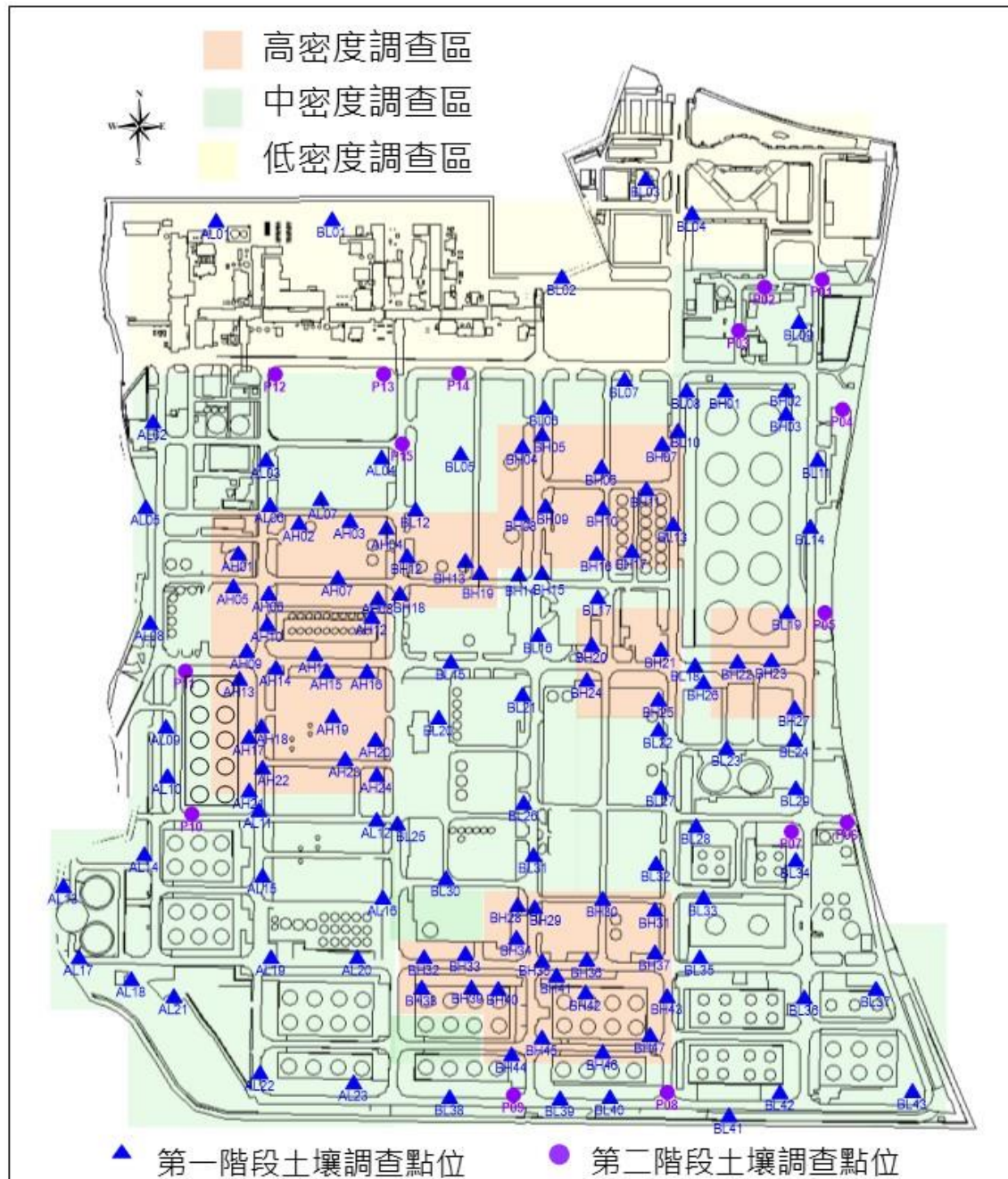
表 5、「中油林園廠」主要污染物最高濃度表

介質	污染物	最高濃度	管制標準	超過管制標準倍數	單位
土壤	苯	14,800	5	2960.0	mg/kg
	甲苯	13,900	500	27.8	mg/kg
	乙苯	2,660	250	10.6	mg/kg
	二甲苯	16,500	500	33.0	mg/kg
	總石油碳氫化合物	94,300	1,000	94.3	mg/kg
地下水	苯	61	0.05	1220.0	mg/L
	甲苯	18	10	1.8	mg/L
	乙苯	9.51	7	1.4	mg/L
	萘	1.01	0.4	2.5	mg/L
	總石油碳氫化合物	279	10	27.9	mg/L

註：主要污染濃度依據中油林園廠土壤及地下水污染調查成果彙整。



三、專案技術及模場場址背景資料

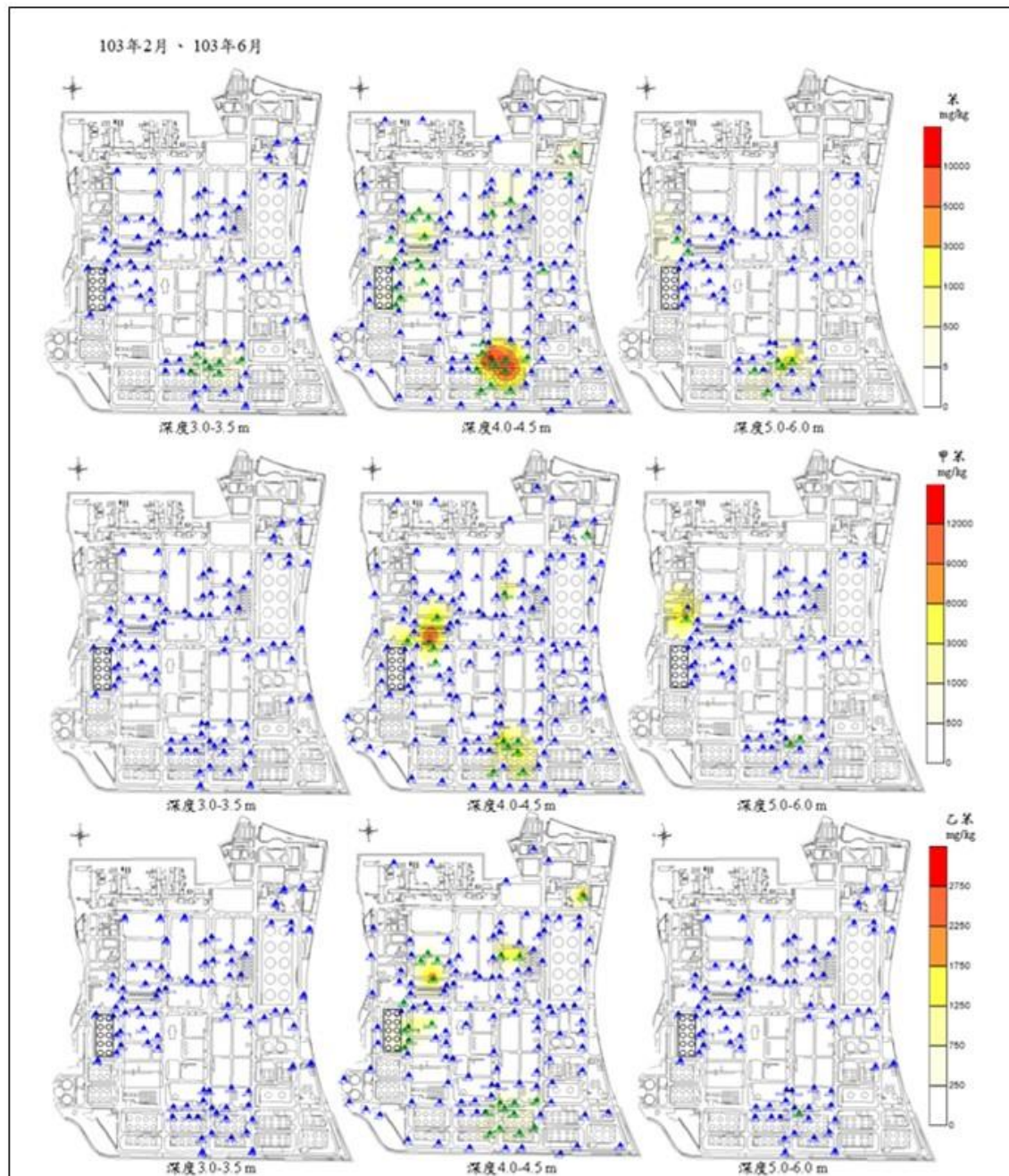


資料來源：中油林園廠土壤及地下水整治計畫書(第一次變更)

圖17、「中油林園廠」廠內土壤調查位置圖



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

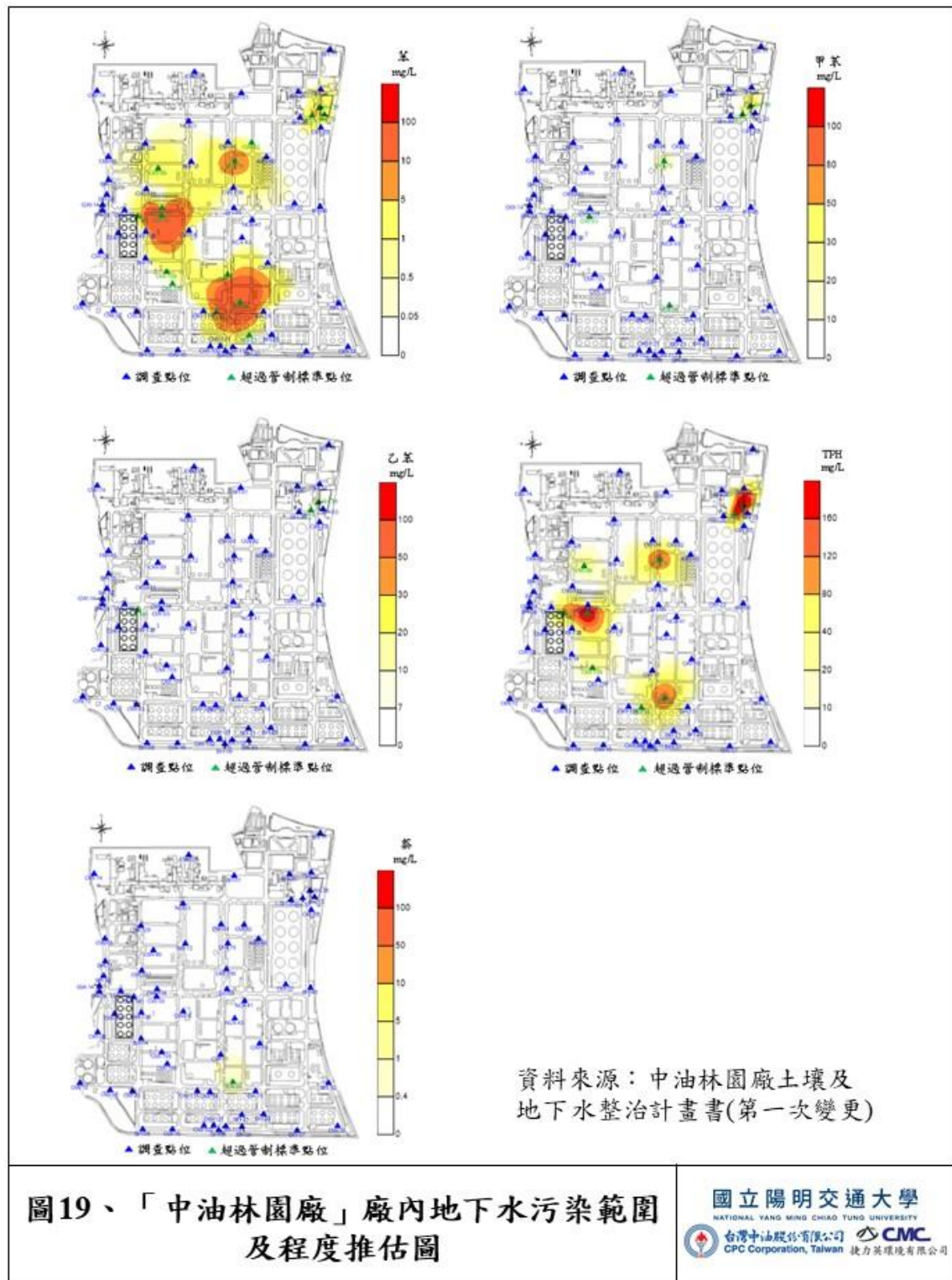


資料來源：中油林園廠土壤及地下水整治計畫書(第一次變更)

圖18、「中油林園廠」廠內土壤污染範圍推估圖



三、專案技術及模場場址背景資料





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

(三)模場設置區

本計畫模場位於中油林園廠「100 油槽區」儲槽 LY-109 南側(詳見圖 20)，現場勘查照片詳見圖 21，現就此區土壤及地下水污染現況說明如下。

1. 100 油槽區土壤污染情形

中油林園廠「100 油槽區」於整治計畫土壤定期監測點分別有東北側 5 點(S03~07)、100 油槽區 9 點(S08~16)及芳三組東側 2 點(S23~24)，土壤定期監測點位及結果詳見圖 22 及表 6。本區 108 年 8 月監測結果僅採樣點 S13 之 TPH 測值(1,940 mg/kg)超過管制標準。

2. 100 油槽區地下水污染情形

為確認中油林園廠 100 油槽區南側地下水情形，故以該區域既設井(NC8-E06、NC8-E16、NC8-E01)進行監測，檢測結果(詳見表 7)分別為苯、萘及 TPH 超過管制標準，其中以 109 年 1 月監測井 NC8-E01 檢驗出地下水苯(66.3 mg/L)及 TPH(190 mg/L)濃度最高，地下水苯及 TPH 污染範圍模擬圖詳見圖 23 及圖 24。



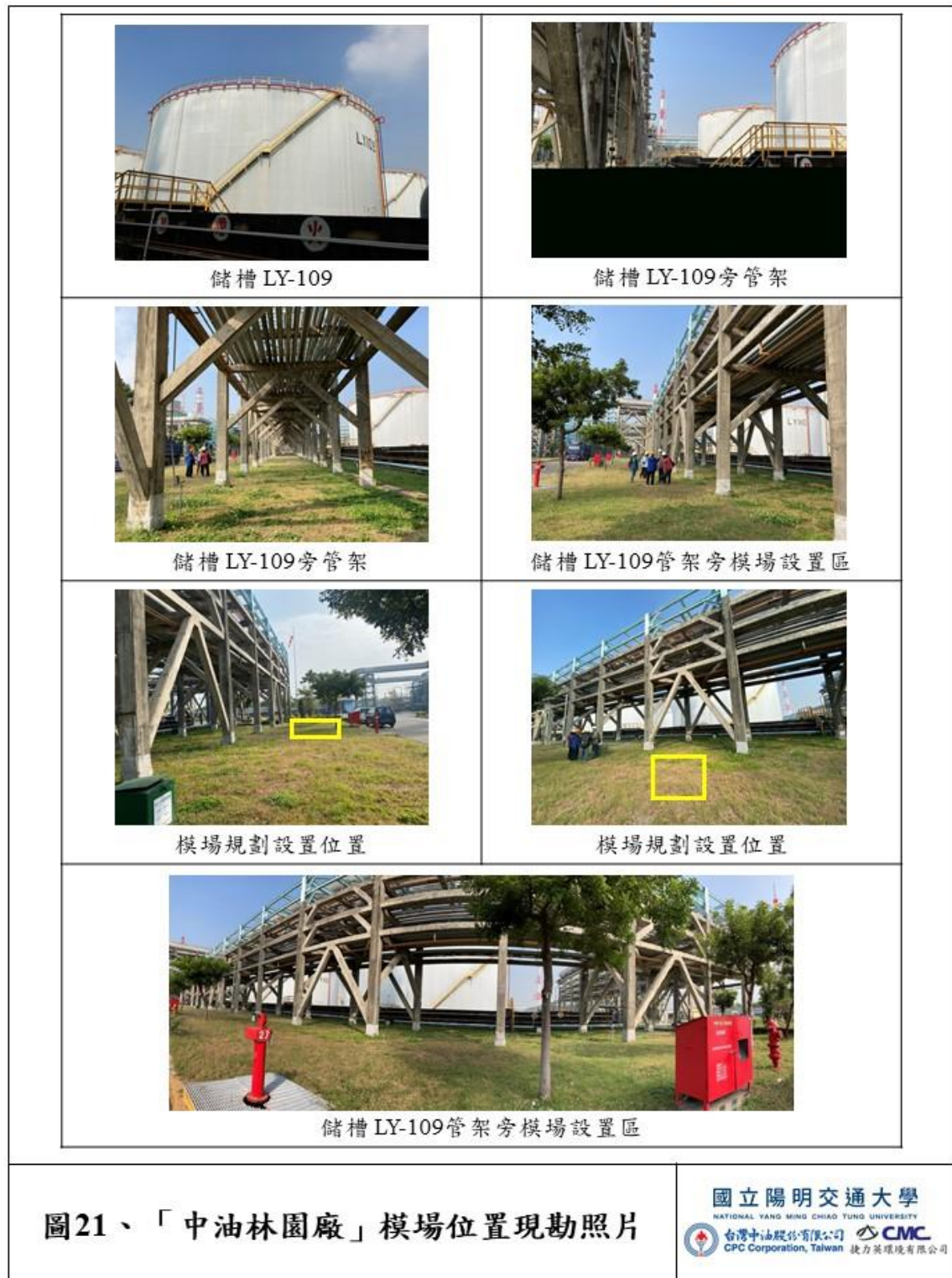
三、專案技術及模場場址背景資料



圖20、「中油林園廠」模場位置圖

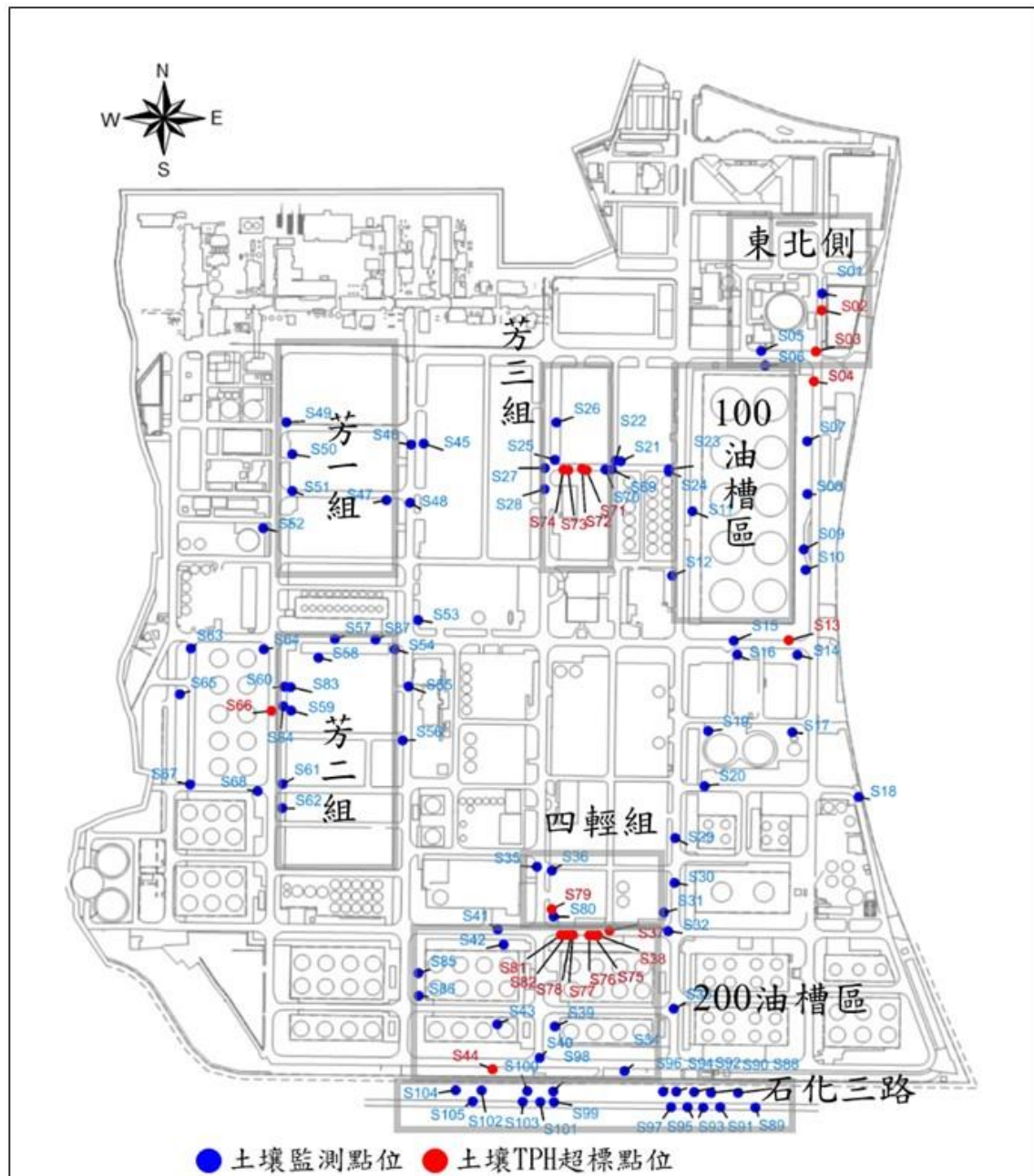


應用可再生型吸附顆粒(RAP)搭配多介質水力沖洗循環系統(HFS)去除受 LNAPL 污染之土壤及地下水





三、專案技術及模場場址背景資料



資料來源：中油林園廠土壤及地下水整治計畫書(第一次變更)

圖22、「中油林園廠」108年下半年土壤
TPH超過管制標準點位圖



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

表 6、「中油林園廠」100 油槽區土壤監測結果

編號	採樣日期	送樣深度 (cm)	苯	甲苯	乙苯	二甲苯	TPHg (C6-C9)	TPHd (C10-C40)	TPH	萘
土壤污染管制標準			5	500	250	500	-	-	1,000	-
S03 (東北側)	105.08.18	430-450	<0.40	0.89	211	993	2,560	264	2,820	1.92
	106.03.01	530-550	<0.40	363	556	3,720	10,900	456	11,300	3.6
	106.11	530-550	<0.40	38.6	175	1,740	4,520	560	5,080	4.76
	107.03.09	530-550	3.08	196	359	2,210	5,260	997	6,260	49.3
	107.07	480-500	63.1	543	957	6,240	16,700	1,140	17,800	79
	108.03	580-600	ND	0.64	0.105	2.52	<10.0	ND	<160	<0.10
S04 (東北側)	105.08.17	480-500	8.77	<0.40	<0.40	<1.20	239	8,730	8,970	67.3
	106.03.01	330-350	<0.40	<0.40	107	37.6	580	4,720	13,800	420
	106.11	430-450	<0.40	<0.40	<0.40	<1.46	ND	ND	5,300	123
	107.03.09	430-450	<0.40	<0.40	0.88	2.63	857	1,760	4,370	9.09
	107.07	280-300	ND	ND	ND	ND	ND	ND	2,620	<0.10
	108.03	480-500	<0.40	<0.40	1	<1.20	596	6,750	7,350	8.59
S05 (東北側)	105.08.17	580-600	2.52	ND	ND	ND	<10	ND	14,000	<2.00
	106.03.01	580-600	ND	ND	ND	<0.30	ND	ND	6,880	<0.40
	106.06	380-400	ND	ND	ND	ND	ND	ND	49.1	<0.10
	107.03.09	580-600	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	<0.10
	107.07	580-600	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	<0.10
	108.03	530-550	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	<0.10
S06 (東北側)	105.08.17	580-600	ND	ND	ND	ND	ND	ND	<150(60.7)	<160(64.7)
	106.03.01	530-550	ND	ND	ND	<0.30	ND	ND	ND	<0.10
	106.06	530-550	ND	ND	ND	ND	<10	ND	ND	<0.10
	107.03.09	580-600	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	<0.10
	107.07	480-500	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	<0.10
	108.03	580-600	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	<0.10
S07 (東北側)	105.08.17	580-600	ND	ND	ND	ND	ND	ND	<150(66.1)	<160(70.1)
	106.03.01	530-550	ND	ND	ND	<0.30	ND	ND	ND	<0.10
	106.06	530-550	ND	ND	ND	ND	<10	ND	ND	<0.10
	107.03.09	580-600	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	<0.10
	107.07	480-500	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	<0.10
	108.03	580-600	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	<0.10
S08 (100 油槽區)	105.08.17	380-400	<0.40	<0.40	<0.40	<1.20	243	503	745	<0.40
	106.03.01	430-450	<0.40	<0.40	8.12	4.06	1,720	1,330	3,040	101
	106.06	380-400	ND	ND	ND	ND	ND	ND	72.4	<0.10
	107.03.12	430-450	<0.40	<0.40	<0.40	<1.20	297	<150	353	<0.40
	107.07	480-500	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	<0.10
	108.03	480-500	<0.40	<0.40	<0.40	<1.20	3,120	2,190	5,310	18.6
S09 (100 油槽區)	105.08.17	430-450	<0.40	<0.40	<0.40	<1.20	1,330	5,890	7,220	8.74
	106.03.01	280-300	ND	ND	ND	ND	<10.0	ND	48.8	<0.10
	106.06	430-450	<0.40	<0.40	<0.40	<1.20	91.2	5,040	5,130	4.71
	107.03.12	280-300	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	<0.10
	107.07	430-450	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	<0.10
	108.03	480-500	ND	ND	ND	ND	10.6	ND	<160	<0.10
S10 (100 油槽區)	105.08.17	380-400	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	<0.10
	106.03.01	380-400	<0.40	<0.40	0.64	<1.20	12,100	24,500	36,600	19.7
	106.06	430-450	<0.40	<0.40	<0.40	<1.20	4,120	2,660	6,780	<5.00
	107.03.13	430-450	<0.40	<0.40	<0.40	<1.20	ND	ND	600	<0.40
	107.07	480-500	<0.40	<0.40	<0.40	<1.20	2,940	832	3,770	<5.00
	108.03	430-450	<0.40	<0.40	<0.40	<1.20	<10.0	ND	ND	<0.10
S11 (100 油槽區)	105.08.17	480-500	<0.40	<0.40	<0.40	<1.20	514	ND	566	<5.00
	106.03.02	480-500	<0.40	<0.40	<0.40	<1.20	ND	ND	ND	<0.10
	106.06	480-500	<0.40	<0.40	<0.40	<1.20	ND	ND	ND	<0.10
	107.03.13	430-450	<0.40	<0.40	<0.40	<1.20	525	1,730	2,250	<0.40
	107.07	430-450	<0.40	<0.40	<0.40	<1.20	2,440	349	2,790	<5.00
	108.05	480-500	<0.40	<0.40	<0.40	<1.20	21.60	ND	<160	<0.40
S12 (100 油槽區)	105.08.18	430-450	<0.40	<0.40	<0.40	<1.20	39.3	<150(73.0)	<160(112)	<0.40
	106.03.02	430-450	ND	ND	ND	ND	ND	ND	64.20	<0.10
	106.06	280-300	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	<0.10
	107.03.13	280-300	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	<0.10
	107.07	380-400	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	<0.10
	108.03	280-300	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	<0.10

註 1：單位：mg/kg，粗體+底線表示超過監測標準，粗體+底線+黑底表示超過管制標準。

註 2：部分區域採樣點因為於沖排區域，因殘存少量之界面活性劑會影響分析儀器之操作，因此樣品需進行稀釋後方能分析，其分析結果呈現均依據認證實驗室標準作業程序。



三、專案技術及模場場址背景資料

表 6、「中油林園廠」100 油槽區土壤監測結果(續)

編號	採樣日期	送樣深度 (cm)	苯	甲苯	乙苯	二甲苯	TPHg (C6-C9)	TPHd (C10-C40)	TPH	萘
土壤污染管制標準			5	500	250	500	-	-	1,000	-
S12 (100 油 槽區)	105.09.13	430-450	ND	ND	ND	ND	<10.0	ND	ND	<0.10
	106.03.02	430-450	ND	ND	ND	ND	ND	ND	<160	<0.10
	106.06	580-600	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	<0.10
	107.03.13	480-500	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	<0.10
	107.07	230-250	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	<0.10
	108.03	580-600	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	<0.10
S13 (100 油 槽區)	105.08.18	380-400	ND	ND	ND	N.D.	ND	ND	59.40	<0.10
	106.03.02	430-450	<0.40	<0.40	<0.40	<1.20	1,360	5,060	21,700	<5.00
	106.11	430-450	<0.40	<0.40	<0.40	<1.20	1,960	5,910	6,430	<0.40
	107.03.13	480-500	<0.40	<0.40	<0.40	<1.20	1,960	5,910	7,870	<5.00
	107.07	480-500	<0.40	<0.40	<0.40	<1.20	82.10	ND	<160	<0.40
	108.03	430-450	<0.40	<0.40	<0.40	<1.20	2,180	<150	2,330	<5.00
S14 (100 油 槽區)	105.08.18	530-550	<0.40	<0.40	<0.40	<1.20	334	1,610	1,940	<0.40
	106.03.02	380-400	<0.40	<0.40	<0.40	<1.20	469	440	910	<2.00
	106.06	530-550	ND	ND	ND	ND	565	2,100	2,660	<2.00
	107.03.13	380-400	<0.40	<0.40	<0.40	<0.40	394	288	54.7	<0.10
	107.07	230-250	ND	ND	ND	ND	ND	ND	<0.40	<0.40
	108.03	480-500	ND	ND	ND	ND	20.90	ND	<160	<0.10
S15 (100 油 槽區)	105.08.18	530-550	ND	ND	ND	ND	ND	<150(52.5)	<160(56.5)	<0.10
	106.03.02	580-600	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	<0.10
	106.06	580-600	ND	ND	ND	ND	<10	ND	<160	<0.10
	107.03.13	480-500	ND	ND	ND	ND	<10.0	ND	ND	<0.10
	107.07	480-500	<0.40	<0.40	<0.40	<1.20	ND	ND	ND	<0.40
	108.03	580-600	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	<0.10
S16 (100 油 槽區)	105.08.18	480-500	ND	ND	ND	ND	<10.0	ND	<160(57.4)	<0.10
	106.03.02	380-400	ND	ND	ND	ND	<10	ND	46.20	<0.10
	106.06	580-600	ND	ND	ND	ND	<10.0	ND	<160	<0.10
	107.03.13	530-550	ND	ND	ND	ND	<10.0	ND	ND	<0.10
	107.07	330-350	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	<0.10
	108.03	380-400	ND	ND	ND	ND	ND	ND	<160	<0.10
S23 (芳三 組)	105.08.18	480-500	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	<0.10
	106.02.16	430-450	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	<0.10
	106.06	530-550	ND	0.10	ND	0.38	ND	ND	ND	<0.10
	107.02.26	430-450	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	<0.10
	107.07	480-500	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	<0.10
	108.03	580-600	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	<0.10
S24 (芳三 組)	105.08.18	480-500	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	<0.10
	106.02.18	530-550	0.11	1.20	0.19	1.24	<10	ND	46.40	<0.10
	106.11	480-500	ND	ND	ND	ND	13.90	ND	64.20	<0.10
	107.02.26	430-450	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	<0.10
	107.07	530-550	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	<0.10
	108.03	580-600	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	<0.10
S24 (芳三 組)	108.08	530-550	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	<0.10

註 1：單位：mg/kg，粗體+底線表示超過監測標準，粗體+底線+黑底表示超過管制標準。

註 2：部分區域採樣點因為為沖排區域，因殘存少量之界面活性劑會影響分析儀器之操作，因此樣品需進行稀釋後方能分析，其分析結果呈現均依據認證實驗室標準作業程序。



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

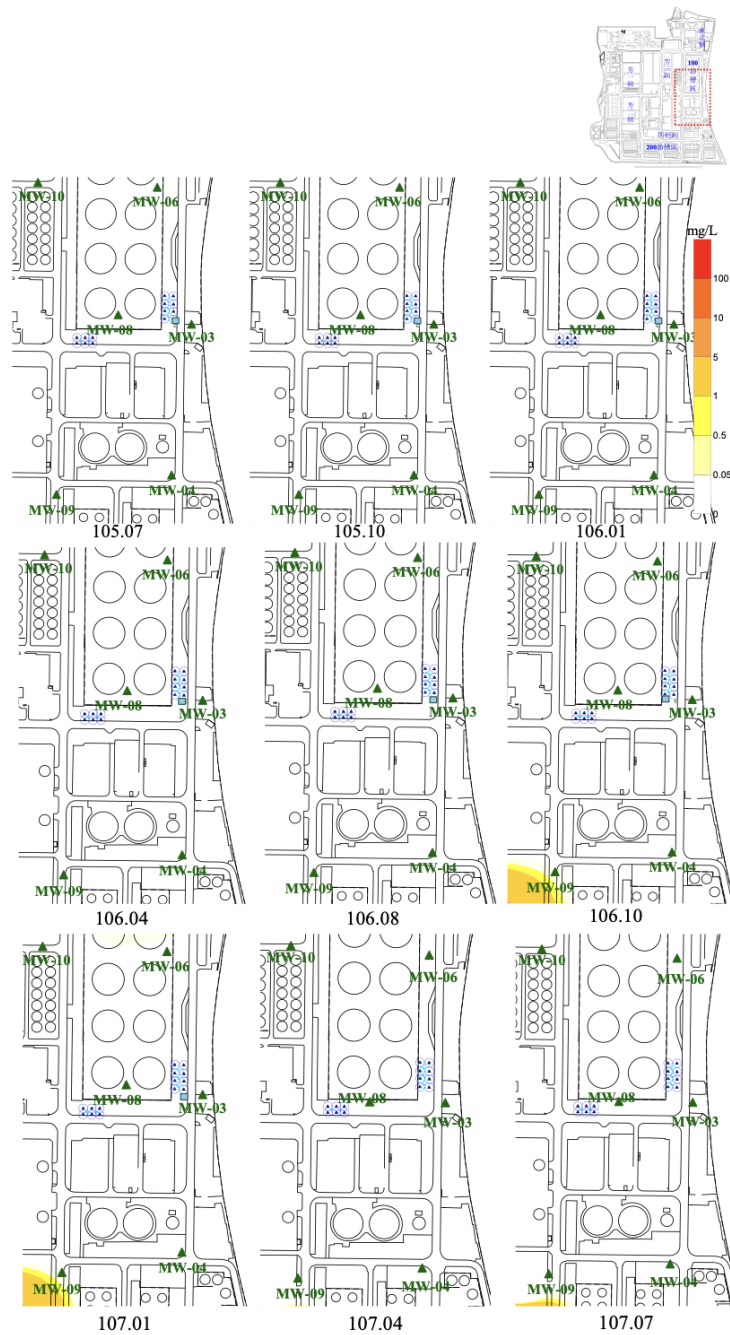
表 7、「中油林園廠」 100 油槽區地下水監測結果

監測區域	井號	採樣日期	水位 (m)	苯 (mg/L)	甲苯 (mg/L)	乙苯 (mg/L)	二甲苯 (mg/L)	萘 (mg/L)	TPH (mg/L)	四氯化碳 (mg/L)
第二類地下水污染管制標準				0.05	10	7	100	0.4	10	0.05
廠區內整治成效監測井	MW-03 (油槽區)	103.02	3.776	0.0023	0.00559	0.0034	0.0375	0.00124	0.0614	-
		105.07	2.857	ND	ND	ND	ND	ND	0.413	ND
		105.10	2.874	0.00032	ND	ND	ND	ND	0.264	ND
		106.01	3.414	ND	ND	ND	ND	ND	<0.500	ND
		106.04	3.518	<0.00100	ND	ND	ND	ND	<0.500	ND
		106.08	2.985	ND	ND	0.00218	0.02380	ND	0.09	ND
		106.10	3.310	0.00219	ND	ND	ND	ND	0.542	ND
		107.01	3.500	<0.00100	ND	ND	ND	ND	0.534	ND
		107.05	3.653	0.0265	0.00314	0.00131	0.0264	0.00117	<0.500	ND
		107.07	0.00268	ND	ND	ND	ND	<0.500	0.00268	ND
		107.10	ND	ND	ND	ND	ND	<0.500	ND	ND
		108.01	3.292	ND	ND	ND	ND	ND	<0.500	ND
		108.04	3.450	ND	ND	ND	ND	ND	<0.500	ND
		108.07	3.045	ND	ND	ND	ND	ND	<0.500	ND
		108.10	3.134	ND	ND	ND	ND	ND	0.288	ND
		109.01	3.573	ND	ND	ND	ND	ND	0.4	ND
	MW-06 (油槽區)	105.07	3.374	ND	ND	ND	ND	ND	0.260	ND
		105.10	3.463	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
		106.01	3.819	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
		106.04	3.935	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
		106.08	3.585	ND	ND	0.00885	0.08420	0.00631	0.228	ND
		106.10	3.773	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
		107.01	3.945	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
		107.05	4.128	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
		107.07	3.003	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
		107.10	3.447	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
		108.01	3.432	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
		108.04	3.897	ND	ND	ND	ND	ND	<0.500	ND
		108.07	3.475	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
		108.10	3.514	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
		109.01	4.006	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
	MW-08 (油槽區)	103.02	4.321	ND	ND	ND	ND	ND	0.661	-
		105.07	3.334	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
		105.10	3.510	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
		106.01	3.901	<0.00100	<0.00100	ND	0.00416	<0.00100	1.12	ND
		106.04	4.008	ND	ND	ND	<0.00300	ND	0.642	ND
		106.08	3.476	ND	ND	ND	0.00500	ND	ND	ND
		106.10	3.810	ND	ND	ND	<0.00300	ND	0.995	ND
		107.01	4.010	ND	ND	ND	ND	ND	0.732	ND
		107.05	4.187	<0.001	ND	ND	ND	ND	<0.500	ND
		107.07	3.345	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
		107.10	3.323	ND	ND	ND	ND	ND	<0.500	ND
		108.01	3.183	ND	ND	ND	<0.0300	ND	0.906	ND
		108.04	3.958	ND	ND	ND	ND	ND	1.08	ND
		108.07	3.582	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
		108.10	3.595	ND	ND	ND	0.00127	ND	0.874	ND
		109.01	4.087	ND	ND	ND	0.00088	ND	ND	ND
	NC8-E01 (四輕組)	108.04	3.793	5.42	0.0865	0.26	0.316	0.272	11	<0.0500
		109.01	3.998	66.3	3.144	5.984	5.068	4.47	190	<0.0500
	NC8-E06 (四輕組)	108.04	3.437	0.0127	0.00038	0.0127	0.0098	0.0234	0.584	ND
		109.01	3.603	0.00070	ND	0.00714	0.00196	0.01382	0.81	ND
	NC8-E16 (四輕組)	108.04	3.608	0.0384	0.00082	0.00608	0.00338	0.0082	0.332	ND
		109.01	3.795	1.4	0.0521	1.047	0.3756	0.387	5.62	<0.0100

註 1：粗體+底線+黑底表示超過第二類地下水污染管制標準。註 2：“-”表示無相關檢測數據。



三、專案技術及模場場址背景資料



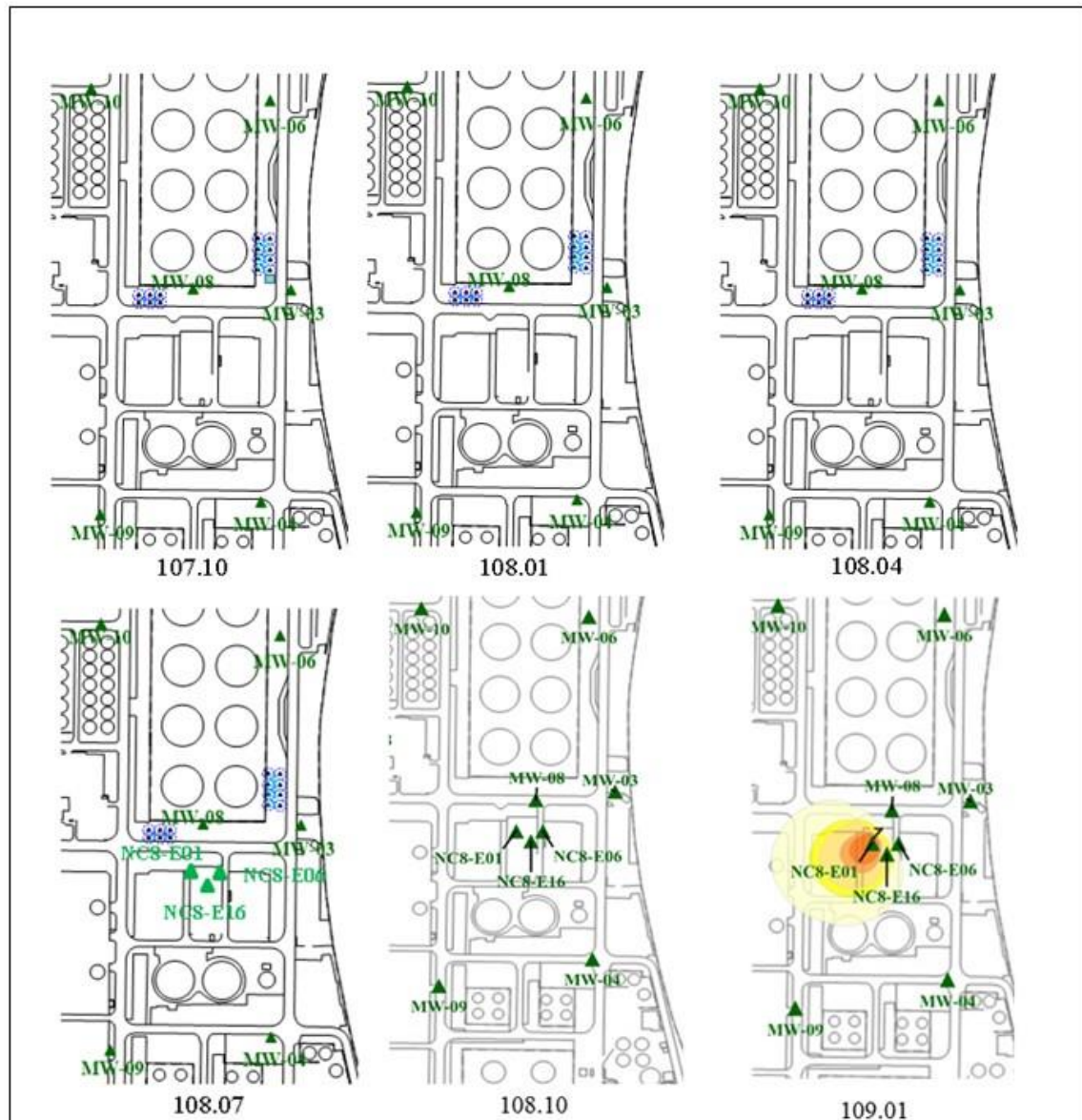
資料來源：中油林園廠土壤及地下水整治計畫書(第一次變更)

**圖23、「中油林園廠」100油槽區地下水苯
污染範圍模擬圖**

國立陽明交通大學
NATIONAL YANG MING CHIAO TUNG UNIVERSITY
台灣中油股份有限公司
CPC Corporation, Taiwan
捷力英環境有限公司



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

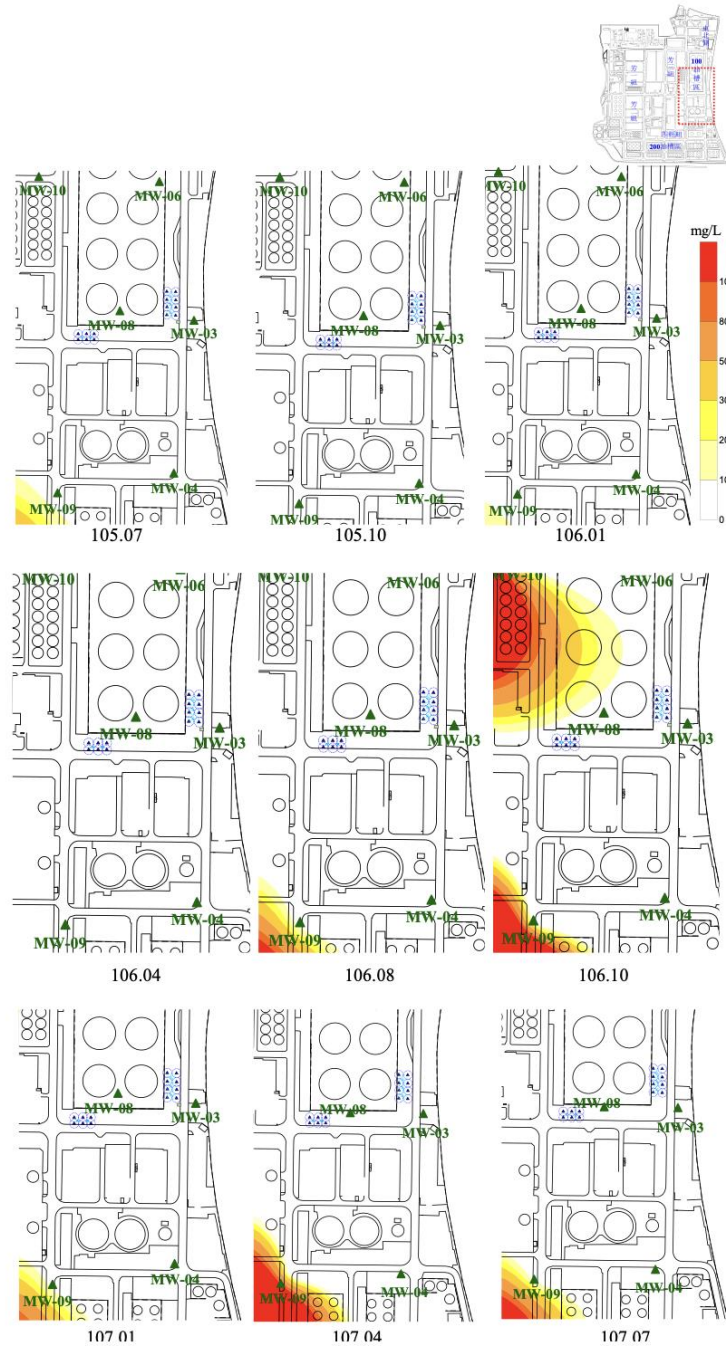


資料來源：中油林園廠土壤及地下水整治計畫書(第一次變更)

圖23、「中油林園廠」100油槽區地下水苯污染範圍模擬圖(續)



三、專案技術及模場場址背景資料



資料來源：中油林園廠土壤及地下水整治計畫書(第一次變更)

圖24、「中油林園廠」100油槽區地下水
TPH污染範圍模擬圖



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



資料來源：中油林園廠土壤及地下水整治計畫書(第一次變更)

圖24、「中油林園廠」100油槽區地下水
TPH污染範圍模擬圖(續)



四、文獻探討

(一) 活性碳再生方式

以碳為基底的多孔吸附劑由於其表面積大且吸附性能優異，廣泛應用於去除液態和氣態污染物等方面，雖然多孔吸附劑擁有良好去除污染物的能力，一旦吸附達到飽和後，因再生困難且成本高、高耗能，故通常以掩埋場焚燒處置，而所殘留的物質還可能造成二次污染。為達到節省成本並兼顧環境友善的目的，開發再生技術是碳基底吸附劑需要突破的挑戰，依再生技術的機制及使用的再生劑主要劃分為熱再生、化學再生、微生物再生和真空再生四大類，如圖 25 (Salvador *et al.*,2015) 所示。

另外，可用再生前後吸附容量之間的比較 (Salvador *et al.*,2014) 來判斷再生效率 (Regeneration Efficiency, RE)，如式4-1:

RE=(再生後吸附量/再生前吸附量) × 100%

(式4-1)

		Type of Regeneration Mechanism					
		Extraction	pH changes	Reaction/ Degradation	Thermal desorption	Vacuum	
Type of Regeneration Agent	Hot gases				THERMAL REGENERATION		
	Physical waves						
	Electrical currents						
	Chemical Reagents	CHEMICAL REGENERATION					
	Supercritical Fluids						
	Microorganisms						
					MICROBIOLOGICAL REGENERATION		
						VACUUM REGENERATION	

圖25、碳基底吸附劑再生技術分類



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

(二) 熱再生

熱再生為透過提供熱能來打斷吸附劑及污染物之間的鍵結而非直接降解污染物(Salvador *et al.*, 2015)，是目前廣泛用於工業應用上以活性碳吸附氣態揮發性有機化合物的方法，其中以變溫脫附（temperature swing adsorption，簡稱 TSA）為最常見的方法，其機制是在高溫脫附過程中加入惰性氣體（ N_2 、He、Ar），目的除了用來提供熱能外，同時又能吹走被脫附出來的污染物，但此種方法的缺點為若溫度低於 $300^\circ C$ 時脫附速度緩慢且脫附效果差；若以高溫 $800\sim 900^\circ C$ 進行脫附，雖具有極強的脫附污染物效果，但過程中造成質量損失、孔隙不斷被破壞且有結焦造成堵塞，導致吸附能力逐漸下降，無法完全再生活性碳(Jibin Zhou *et al.*, 2019)。

(三) 臭氧再生

臭氧再生屬於化學再生中的氧化方法，所需成本雖然比一般氧氣再生高，但臭氧具有較高的氧化劑特性，在室溫下即可達到去除活性碳中殘留物質的效果，在再生過程中適當升溫可較快達到去除效果進而減少能耗。以臭氧再生不僅能有效去除活性碳孔隙內的污染物，同時以氧化去除結焦(Jibin Zhou *et al.*, 2019)。

以臭氧再生主要分兩種機制去除污染物(K. Yaghmaeian *et al.*, 2014；H. Valdes *et al.*, 2016)，一為直接由分子態臭氧進行氧化；另一途徑為臭氧在活性碳表面形成高氧化力的氫氧自由基和氧氣自由基（ $\cdot OH$ 及 $O_2\cdot$ ），可氧化在活性碳孔隙殘留的有機物。

雖然臭氧再生對活性碳有良好的再生效率，對許多有機物污染物也都有很好的氧化效果，但曝過量臭氧可能會造成活性碳表面結構改變，如表面積變小或活性碳表面化學性質的改變，造成吸附能力下降，再生效率也隨著再生次數增加而變差(P.M. Álvarez *et al.*, 2009)。

(四) 臭氧再生參數探討

1. 臭氧再生時間

臭氧再生間影響活性碳孔洞中污染物是否能有效去除，同時也與活性碳的碳損失(Alejandro *et al.*, 2014)及表面特性是否因過度臭氧化而造成改變有關係。

活性碳在吸附有機物質後，其 BET 表面積會因為孔洞被遮蔽而減少，以臭氧再生活性碳能有效再生，但若曝臭氧時間過程則可能使活性碳造成表面積被破壞(Alva' rez *et al.*, 2004)。再生時間過長造成再生後活性碳孔洞被遮蔽的原因為吸附在活性碳表面之有機物並沒有藉由臭氧的直接氧化(非利用 $\cdot OH$ 氧化)礦化，而是形成了中間產物，藉由熱重分析(Thermogravimetric Analysis, TGA)可以看



出，在長時間臭氧再生條件下，活性碳孔洞中有非目標物之化學物質存在，影響吸附能力。

除了以 TGA 測出中間產物波峰之方法外，中間產物的生成也影響著表面酸鹼度 (Beltrán & Pocostales, 2009)。在全新的活性碳表面上，含有許多鹼性氧化基團，其維持了活性碳零電荷點(pH_{zpc})，使活性碳在大多數 pH 環境下表面帶正電，容易吸引帶負電之有機物。在過長的再生時間下，因過度的暴露在臭氧環境，容易使原先在活性碳表面的鹼性氧化基團轉為酸性，不僅影響表面積，也影響了 pH_{zpc} ，使其偏酸性而導致活性碳在再生後不容易與帶負電目標物互相吸引，吸附能力下降。

2. 臭氧劑量

臭氧劑量跟再生時間相關，較高的臭氧劑量在未過量情況下可以有較好的去除吸附質能力，高濃度的臭氧可以產生更多的氫氧自由基($\cdot\text{OH}$)，可在短時間內達到一定的氧化效果，而過量的臭氧量也可能會造成活性碳的碳損失、表面性質改變。

臭氧劑量的提高關乎臭氧機的功率、氧氣的純度以及氧氣/臭氧混合流的進氣流量有關，雖然利用高濃度的臭氧劑量再生活性碳能獲得較好的再生效率，但其成本需要納入考慮 (Yaghmaeian & Alahabadi, 2014)，在臭氧去除效力($\text{mg O}_3/\text{吸附質 mg}$)與操作成本之間需做取捨。

(五) 貴金屬鈦之特性

貴金屬材料雖價格昂貴但其耐高溫、耐腐蝕等優異特性，許多研究仍會當做觸媒改質的材料之一，由於 d 電子軌道都未填滿，表面易吸附反應物，貴金屬常作為催化劑，常被使用的貴金屬為鉑、鈀、銻、銀、鈦。

鈦金屬最常見的氧化物為二氧化鈦，其在鹼性環境下 (J. Electrochem, 2016) 與強氧化力自由基反應後會形成高價態貴金屬 Ru 離子 (Floquet & Eysseric, 2005)。四氧化鈦具有分解有機物的能力，醇類、胺類 (Mario Pagliaro *et al.*, 2005) 到複雜的難分解有機物戴奧辛 (D. C. Ayres, 1981)，都可以藉由與四氧化鈦反應去除。

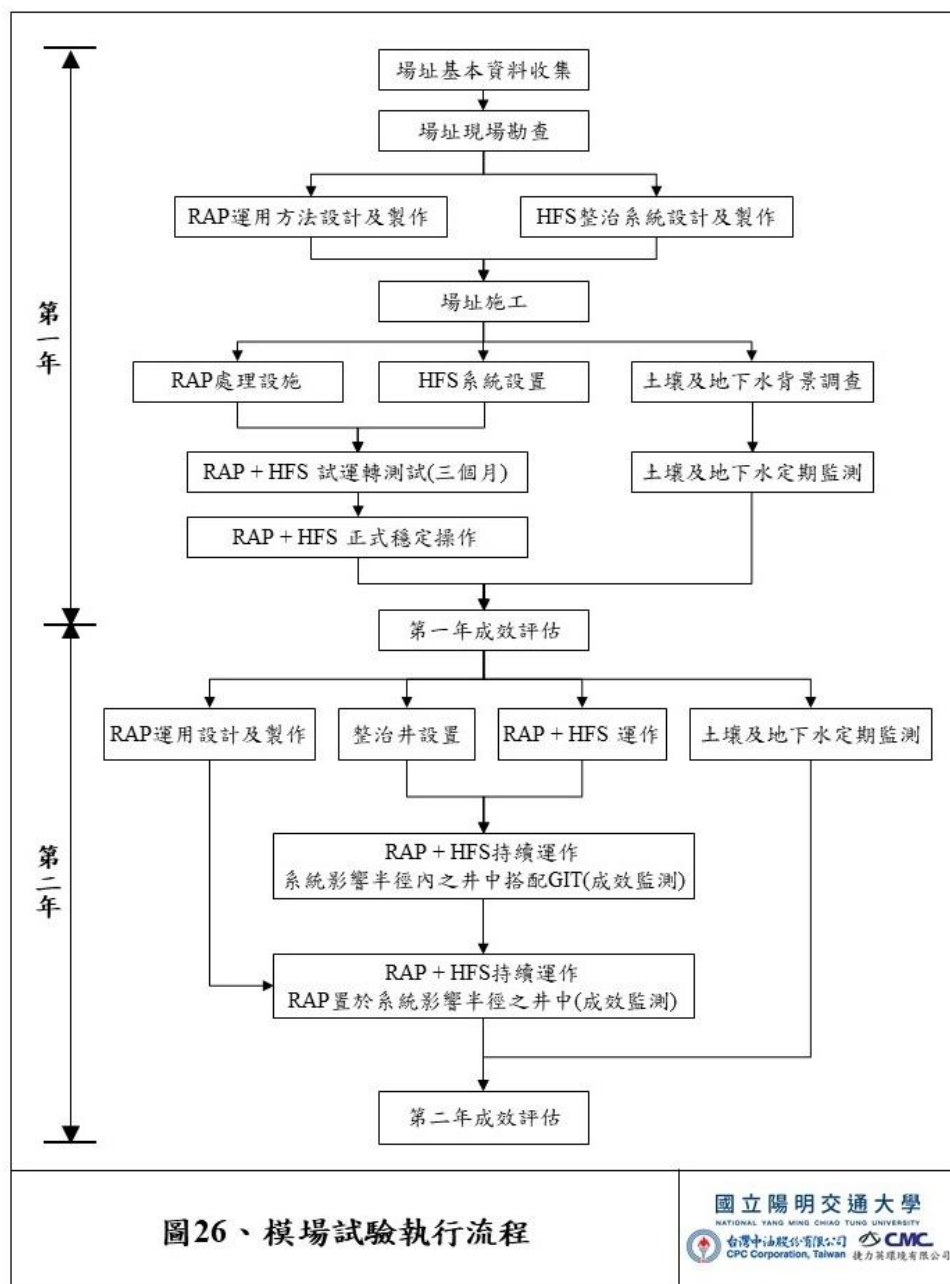


應用可再生型吸附顆粒(RAP)搭配多介質水力沖洗循環系統(HFS)去除受 LNAPL 污染之土壤及地下水

五、研究方法與過程

(一)研究方法

本計畫係採用兩種不同領域的高端處理技術，主要為可再生型吸附顆粒(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，第一年已完成模場背景調查、HFS 及 RAP 整治系統設置、整治設施操作與維護、土壤及地下水定期監測與 RAP 實驗室再生驗證與參數探討。第二年預計再加入水層增溫處理系統(GIT)，設置 RAP 於影響半徑內及探討再生最佳化條件，本計畫試驗執行流程詳見圖 26。





(二) 模場設置

1. 背景調查

本計畫模場預定設置於中油林園廠「100 油槽區」儲槽 LY-109 南側(詳見圖 20)，現場勘查照片詳見圖 21，由中油林園廠提供歷次監測資料可看出，108 年 8 月土壤採樣點 S13(位置及測值詳見圖 22 及表 6)之 TPH 測值(1,940 mg/kg，深度 4.8~5.0m)超過管制標準(1,000 mg/kg)，109 年 1 月監測井 NC8-E01(測值詳見表 7)檢驗出地下水苯(66.3 mg/L)、萘(4.47 mg/L)及 TPH(190 mg/L)濃度最高且超過管制標準(苯：0.05mg/L、萘 0.4 mg/L、TPH：10 mg/L)。

為確實掌握模場區域之土壤及地下水現況及後續成效評估，本計畫預定於模場設置前再進行一次土壤及地下水現況調查，調查範圍詳見圖 26，現就土壤及地下水調查規劃說明如下。

(1) 土壤調查

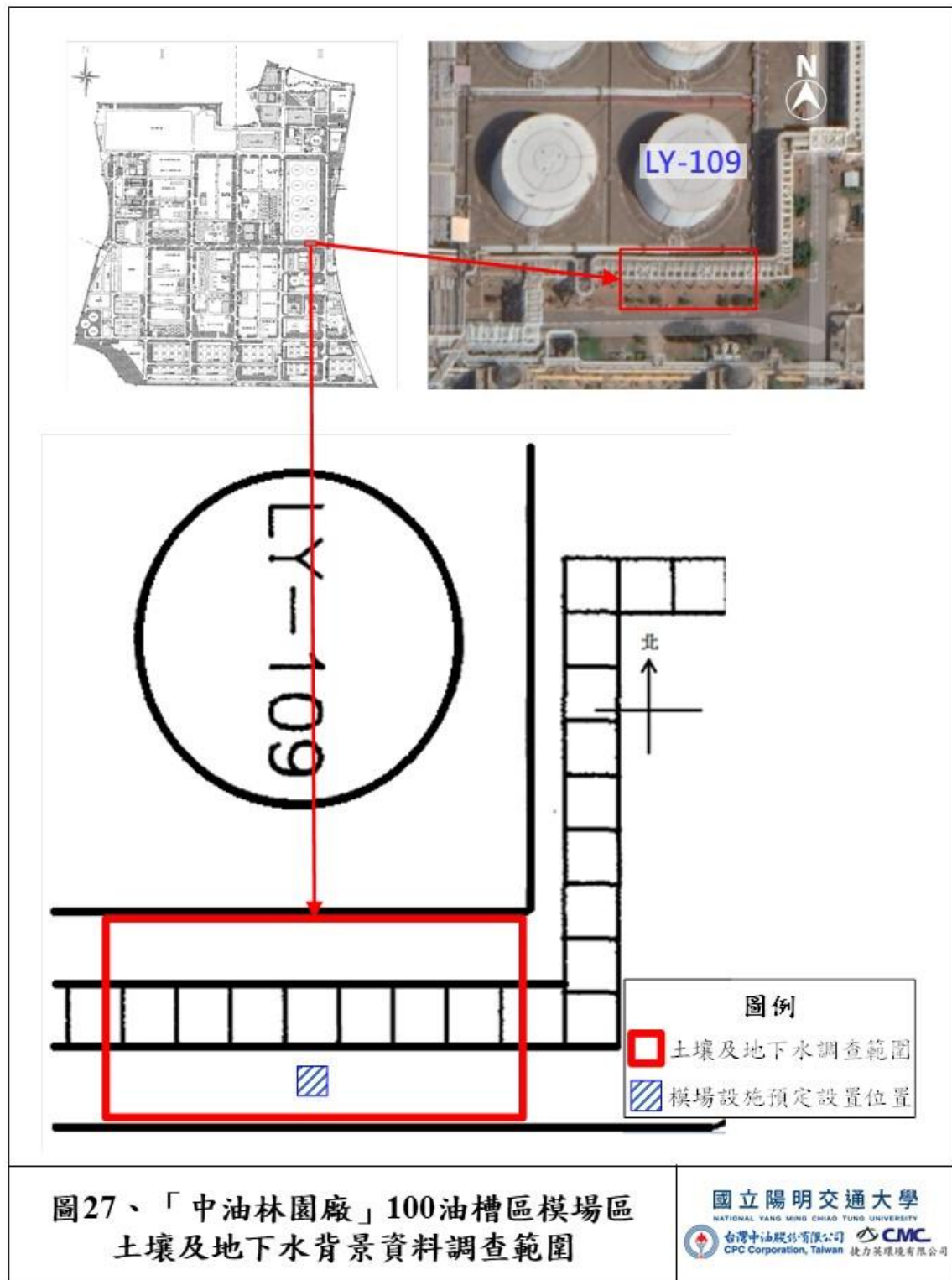
本計畫規劃於模場區域進行 3 點土壤採樣，考量中油林園廠過去調查之土壤污染縱向深度規劃採樣深度，檢測總石油碳氫化合物。此外，土壤採樣作業亦可配合中油林園廠定期監測執行。

(2) 地下水調查

本計畫選定模場區域既設 3 口地下水監測井執行，既設監測井深度為地表下 5 至 10 公尺之間，既設井位置將依據 HFS 系統設置運轉後可能之影響半徑範圍，選定距離約 10 至 20 m 處之 3 口監測井，作為系統運轉影響範圍確認及地下水整治成效監測。地下水檢測項目為苯、甲苯、乙苯、二甲苯、萘及總石油碳氫化合物。此外，採樣作業亦可配合中油林園廠定期監測執行。



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





2. 模場設置規劃與運轉

本模場設置規劃主要運用 RAP 搭配 HFS，來加速整治系統在運轉過程中污染物之移除，以縮短場址整治期程。本計畫分為兩年，第一年(110 年)第一階段 RAP 置於地表上尾氣抽除段，主要用於吸附 HFS 系統運轉期間產生之揮發性氣體；第一年(110 年)第二階段則於原本地下水抽除至地面以油水分離處理後，再增加經過 RAP 處理，來加強去除水中污染物。

第二年(111 年)則將 RAP 設置於 HFS 系統之影響半徑範圍內之地下水監測井中，藉由 HFS 系統運轉帶動下，並運用 RAP 本身之特有處理功能，有效將影響半徑範圍內之地層污染物移除，各階段執行規劃說明如下。

(1) 第一年(110 年)

I. HFS 整治系統設置與運轉

i. 系統設置作業

系統設置前會依本場址前期之背景調查結果，評估場址地下水污染狀況，並考量系統設置位置周圍環境限制等因素，擇定系統設置位置，後續即針對系統設置位置進行地質調查確認地層地質狀況，推估污染物累積區域、深度並考量含水層水位變化等，作為後續規劃系統設置深度及系統內部設計之依據。

系統設置選用之鑿井工法為傳統衝擊鑽機工法(cable tool drilling)，主要利用鋼纜帶動衝擊鑽頭上下運動，利用衝擊方式挖掘至指定深度時，井體設置時間亦需掌握得宜，需避免設置過程時間過長造成地層崩塌之情況發生；下管完成後續井體周圍濾料選用、填充方式，及完井程序品質掌握為系統運轉成效之重要關鍵，此步驟對於系統後續運轉維護頻率亦有相當程度之影響；井體完井程序結束後，隨即進行內部設備組裝程序，待系統組裝完成後即進行系統試運轉作業，並依據現地情況調整系統之穩定性操作；井體完井程序結束後，隨即進行內部設備組裝程序，待系統組裝及地表設施裝設完成後即進行系統試運轉作業，並依據現地情況調整系統之穩定性操作。

本套系統設置深度依據地層結構進行設計，HFS 系統之整治井口徑為 16 吋，井體長度為地表下 10 公尺，地表上 1 公尺，合計 11 公尺，井體分別設置兩層井篩，於上井篩中設置噴散裝置，上下井篩則利用 HFS 阻隔盤將上下井篩進行分層。井體設計規畫示意詳見圖 28，HFS 設備配置詳見圖 29。



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





- HFS系統地下設施：包括地底下井管及井篩(不鏽鋼材質)、地下水阻水單元、地下水抽除管線及油污抽除管線等相關整治系統地下設施。
- HFS系統地表設施：包括系統開關裝置、流量計、活性碳槽、油水分離裝置及防撞與防護設施。
- 地表管線
包括抽回水管線、電力線等。

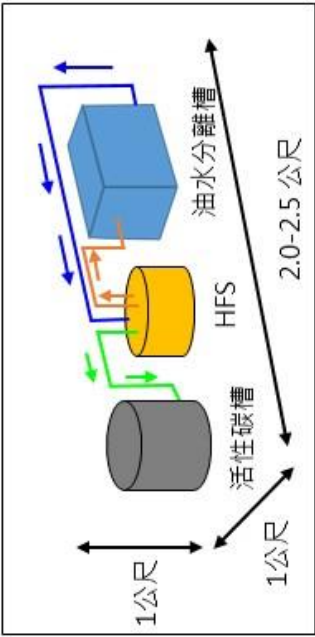


圖 29、HFS 設備配置圖



ii. 系統影響半徑測試

為了得知系統初期穩定運轉後成效，影響半徑測試(ROI)為評估系統之有效影響範圍之重要指標，首先透過系統附近監測井放置自計式水位計自動監測系統運轉過程之水位變化，如圖 30 所示。系統啟動期間，須依地層狀況控制地下水抽、回水量，確保系統運轉過程地下水抽、回水量可維持平衡狀態，經系統穩定運轉一段時間後即可讀取自計式水位計紀錄資料，確認系統運轉期間地層水位變化，如圖 31 所示。

系統試運轉測試時間為三個月，HFS 整治系統於試運轉期間需每週紀錄 1 至 2 日運轉情形，透過試運轉期間觀察並紀錄系統運轉情形，將系統調整至最佳操作條件，HSF 系統操作紀錄表如表 8 所示。後續運用系統影響半徑測試建構各套系統在不同地層狀況下的最佳運轉條件，以期達到系統最佳處理效能。

iii. 系統正式運轉

HFS 系統設置完成後，經三個月試運轉、確認影響半徑範圍並取得最佳化運轉操作參數後，HFS 系統即啟動正式 24 小時連續式操作，正式運轉期間仍會定期進行系統巡檢，確認系統運轉正常，並定期配合土壤及地下水現況監測，以掌握系統運轉對地下環境污染之整治成效。

II. RAP 處理設施設置

本設施在整治初期先以處理 HFS 系統運轉期間產生之揮發性有機氣體(VOC)為主，設置 RAP 固定床進行吸附，飽和後再將 RAP 抽換出來，以臭氧進行觸媒作維護性活化(maintenance activation, MA)，或視狀況再進一步添加活化液作恢復性活化(recovery activation, RA)。

i. 尾氣處理設備 RAP

運用 RAP 設置於地表上作為 HFS 系統運轉期間產生之揮發性有機氣體進行吸附處理，避免造成環境中的二次污染，詳見圖 32。本設施設置於地表上，包含 2 個 30 公升管柱(直徑約 10 吋)，管柱內共放置 40 公升 RAP，以吸附為主，飽和後以臭氧臭生。後續依執行現況亦可針對 HFS 系統運轉期間抽出之地下水，經由油水分離裝置及裝填 RAP 之管柱進行第一階段之污染物去除後，再回注於 HFS 系統中進行二次處理，強化地下水中污染物去除效果，RAP&HFS 整治系統設計示意圖(110 年 Phase I)詳見圖 32。

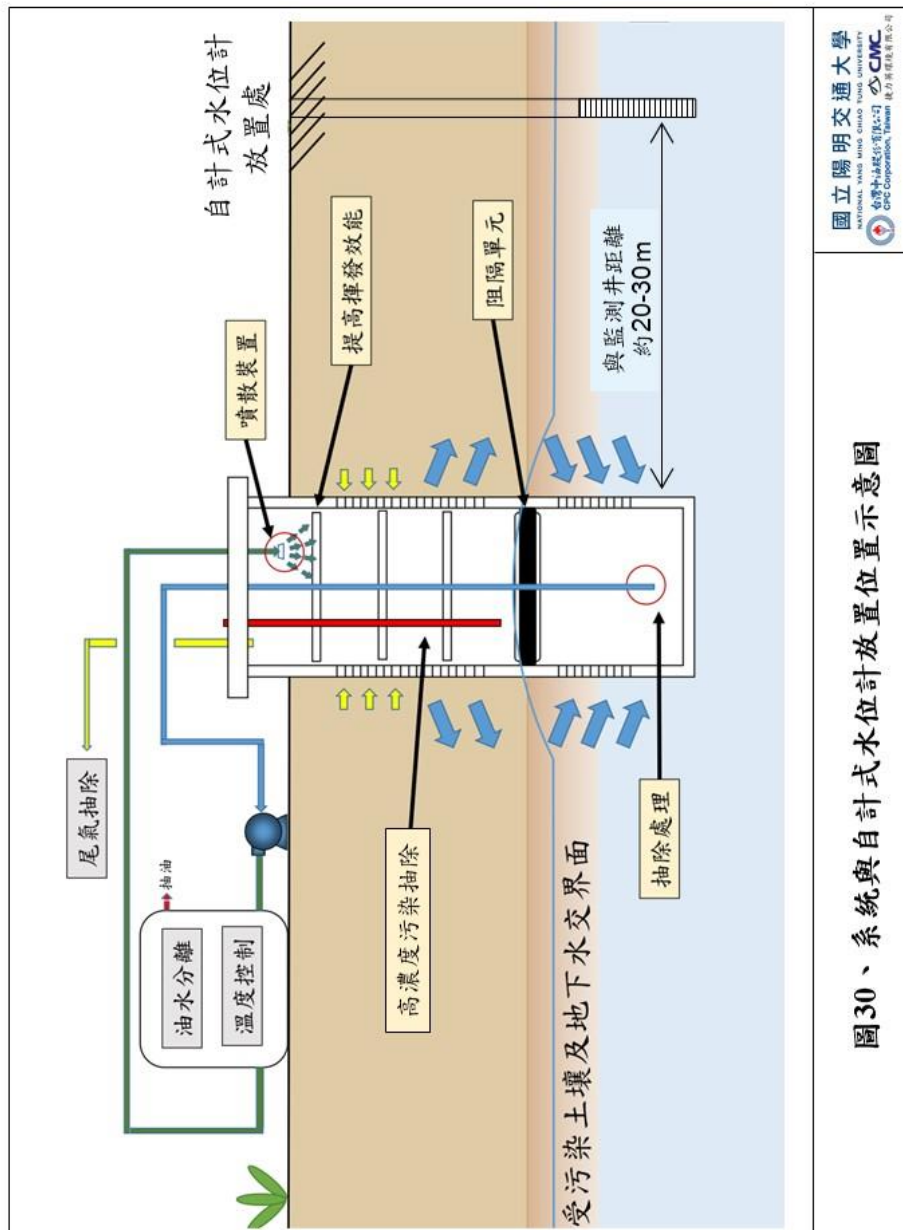
ii. 地下水抽出處理設備 RAP

待 HFS 系統設置後並完成試運轉後，在正式運轉過程因水中恐仍有



些浮油，除了井中高濃度污染物持續抽除外，將井中地下水抽至地面經油水分離後，再經過 RAP 處理，可有效將流經之地下水進行污染吸附移除，以提升整體污染移除效率，RAP&HFS 整治系統設計示意圖(110 年 Phase II)詳見圖 33。

RAP 處理設施於試運轉期間需確認 RAP 活化週期，測試期間進行 PID 量測，當測值大於 10 ppm 時進行更換 RAP，並將 RAP 攜回以臭氧機在 80 度 C 活化再生後，再運回至場址進行再次吸附以驗證活化成效，活化週期與處理效果為重要的記錄參數。





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

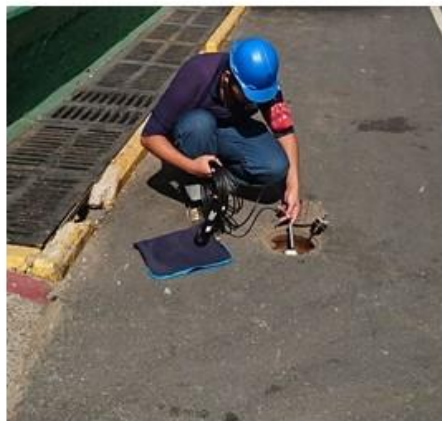
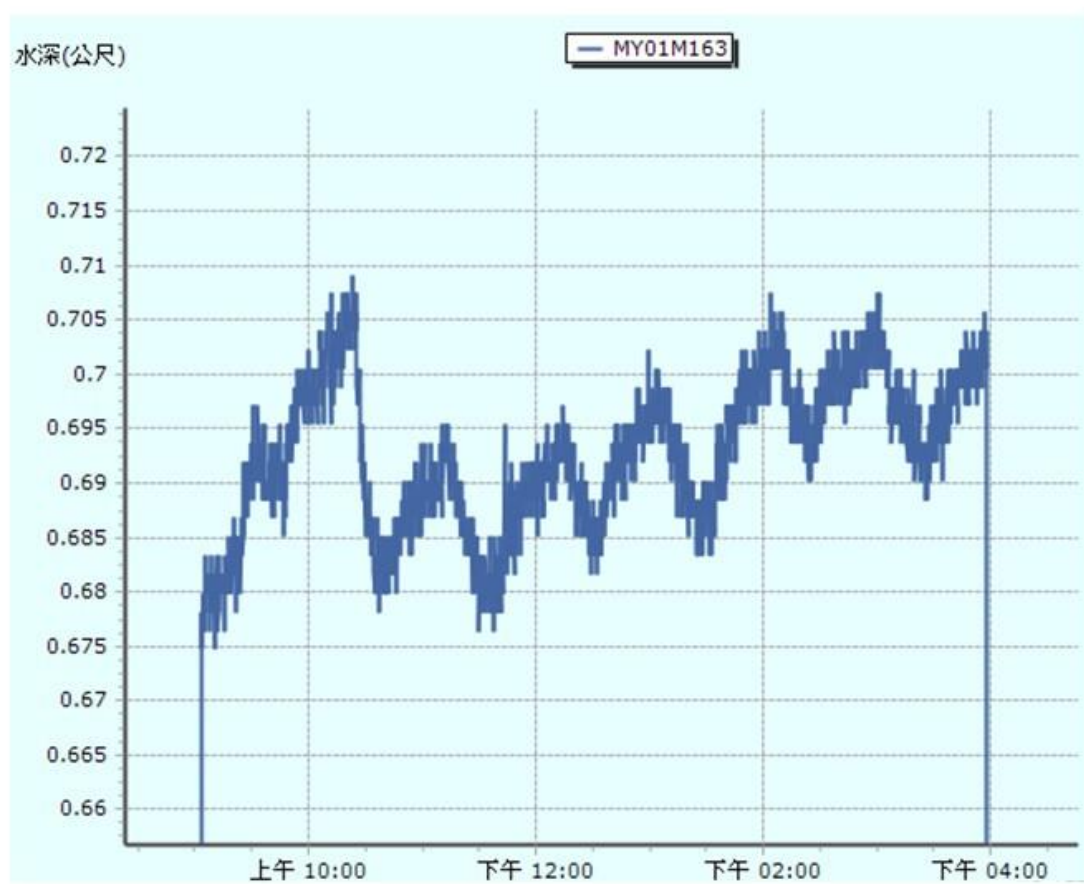


圖31、系統運轉後之水位變化圖(範例)

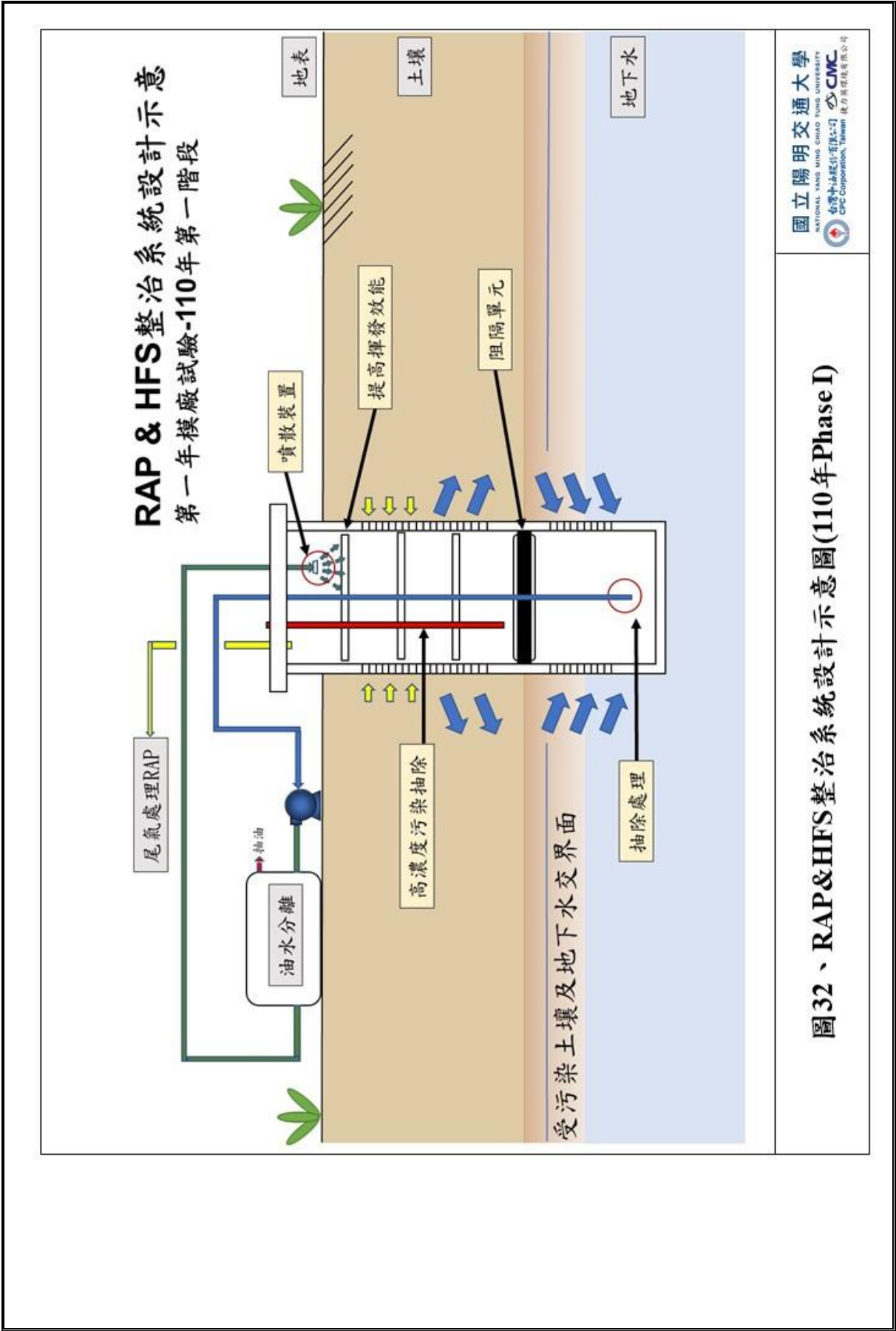
五、研究方法與過程

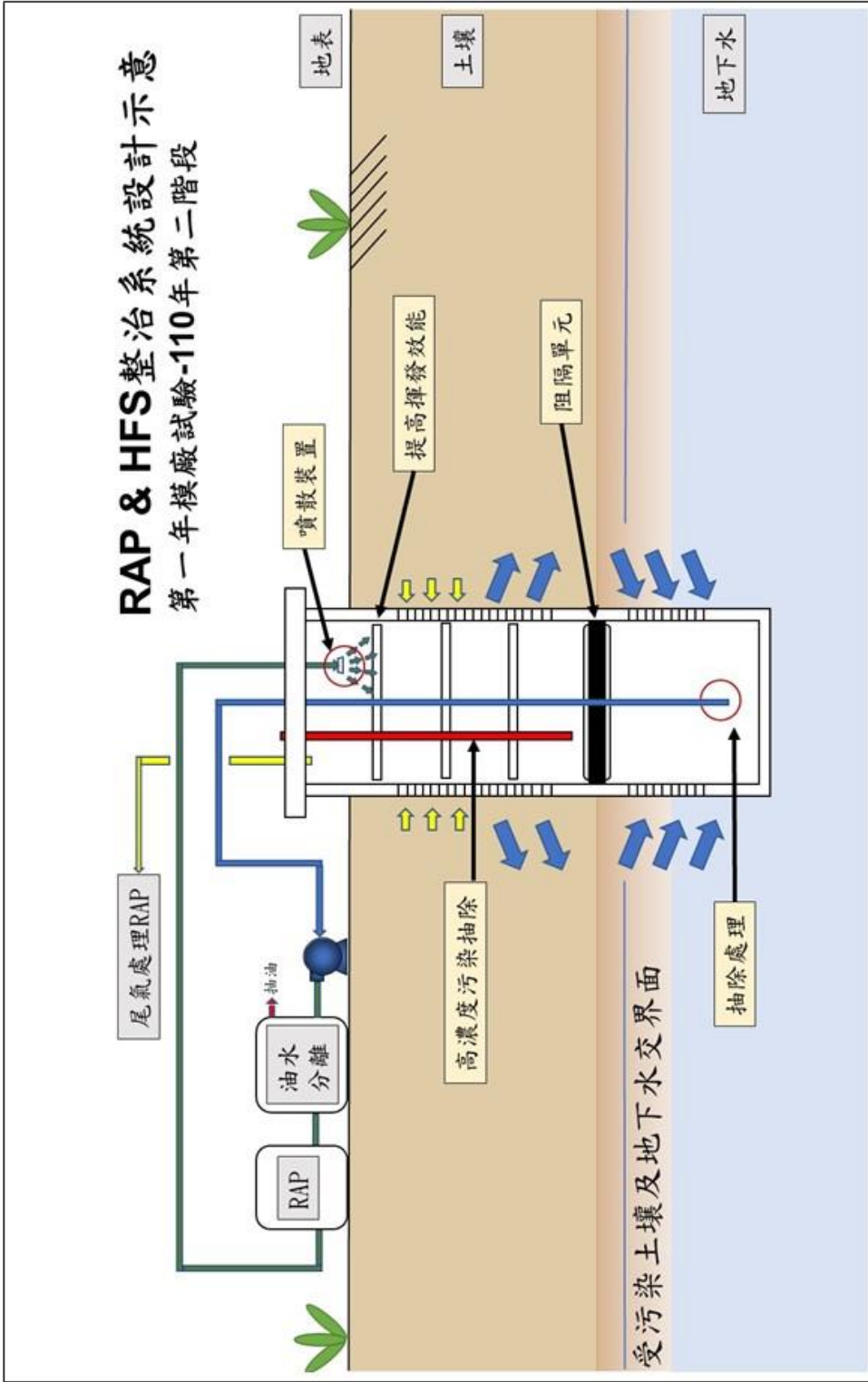
表 8、HFS 系統操作紀錄表

[illegible]



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





國立陽明交通大學
NATIONAL YANG MING CHIAO TUNG UNIVERSITY
台灣中油股份有限公司
CPC Corporation, Taiwan 康力興有限公司

圖33、RAP&HFS 整治系統設計示意圖(110年Phase II)



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

(2) 第二年(111 年)

I. HFS 系統持續運轉

經由第一階段系統試運轉至正式運轉期間，已確認系統於運轉之最佳操作參數，本階段將使系統持續穩定運轉，並配合定期系統巡查確認系統正常運轉，以確保藉由系統連續式運作有效將地層中污染物移除。

II. GIT 系統設置與操作

由於本場址超過污染管制標準項目為總石油碳氫化合物，且確認污染物應為柴油類油品，因此為加速污染整治成效，本計畫擬於第二年增加 2 口整治井，搭配捷力英公司自行研發之水層增溫處理系統(Groundwater Increase Temperature System，簡稱 GIT)，專利字號 M506146 詳見圖 34。

GIT 系統原理為持續於特定深度地下水層加熱後，特定範圍內之地下水受熱，造成體積膨脹，密度減少，熱浮力上升之物理現象，熱源慢慢往淺層方向及兩側延伸。因地層溫度上升有助於提高污染物之水中溶解度、亦可增加水中蒸氣壓進而加速水中污染物質揮發等物理特性。當水層增溫系統於現地地下水整治井增溫後，受地層溫度增加之影響，驅使累積於地層中之污染物質脫附釋出，污染物濃度明顯抬升，而隨著地層溫度抬升時間拉長，污染物濃度有緩慢下降趨勢。因此評估增溫處理運用在現地地下水整治，可有效將地層溫度抬升，進而將長期累積於地層中之污染物質脫附釋出再搭配物理整治技術，更促使污染濃度降低，對於整治成效的提升以及整治時間的縮短有顯著幫助，含氯污染積物與溫度之相關性詳見圖 35。

因此利用將地層溫度增加以提高污染物在水中溶解度、降低污染物在地層中之黏滯性及增加污染物揮發性的特性進而將污染物去除。增溫處理系統(GIT)主要配備為加熱裝置內建恆溫控制系統及溫度控制裝置，本計畫在場址中主要操作條件為加熱裝置置入地下水整治井中，溫度控制在 50°C，操作以 8~24 小時/日運轉 5 日為 1 批次，施作流程詳見圖 36。現就系統設置及運作模式說明如下。

(i) 整治井設置作業

本計畫規劃於 HFS 系統西側距離 5 及 15 公尺處各設置 1 口整治井，合計 2 口，規劃整治井口徑 2 吋，地表下 0~1 公尺為井管，地表下 1~10 公尺為井篩，井深為地表下 10 公尺，地面型式採用隱藏式，設置方式參酌「地下水水質整治井設置作業原則」。



(ii) GIT 系統施作程序

本計畫規劃針對模場中 2 口新設井分別執行兩批次 GIT，每批次預計 5 個工作日，合計 20 個工作日。每批第 1 口預定針對 HFS 系統西側新設置距離 5 公尺之整治井，每批第 2 口預定針對 HFS 系統西側新設置距離 15 公尺之整治井。

(iii) GIT 成效評估

本計畫預定於每口整治井或監測井施作 GIT 前、施作 GIT 後第 1、2 週各執行 1 次地下水採樣檢測作業，檢測項目為苯、甲苯、乙苯、二甲苯、萘及總石油碳氫化合物，因此每口 GIT 試驗井將執行 3 次地下水採樣檢測作業，合計 4 口井 12 口次地下水採樣檢測作業。

III. 設置 RAP 於影響半徑範圍內

(i) RAP 設置作業

為提高地層中溶解相污染物之去除成效，將 RAP 置於 HFS 系統之影響半徑範圍內之地下水整治井中詳見圖 37，運用 RAP 本身之特有處理功能，將影響半徑範圍內之溶解相污染有效吸附，並配合地下水成效監測結果，適時針對地下水整治井中之 RAP 進行活化再生，以提高整治成效。

置入 RAP 之整治井則選定施作完成 GIT 一批次者，於 GIT 成效評估之地下水採樣檢測作業完成後，將 RAP 置於井中，第 1 口預定放置 1 個月後取出，分析 RAP 的吸附成效，再依分析結果調整放置 RAP 之時間。

(ii) RAP 成效評估

本計畫預定置入 RAP 之整治井取出 RAP 後，執行 1 次地下水採樣檢測作業，檢測項目為苯、甲苯、乙苯、二甲苯、萘及總石油碳氫化合物，用以評析 RAP 置於井中對地下水質之影響。



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



圖34、水層增溫處理系統(GIT)專利證書

國立陽明交通大學
NATIONAL YANG-MING CHIAO TUNG UNIVERSITY
台灣中油股份有限公司 CPC Corporation, Taiwan 捷力環境股份有限公司

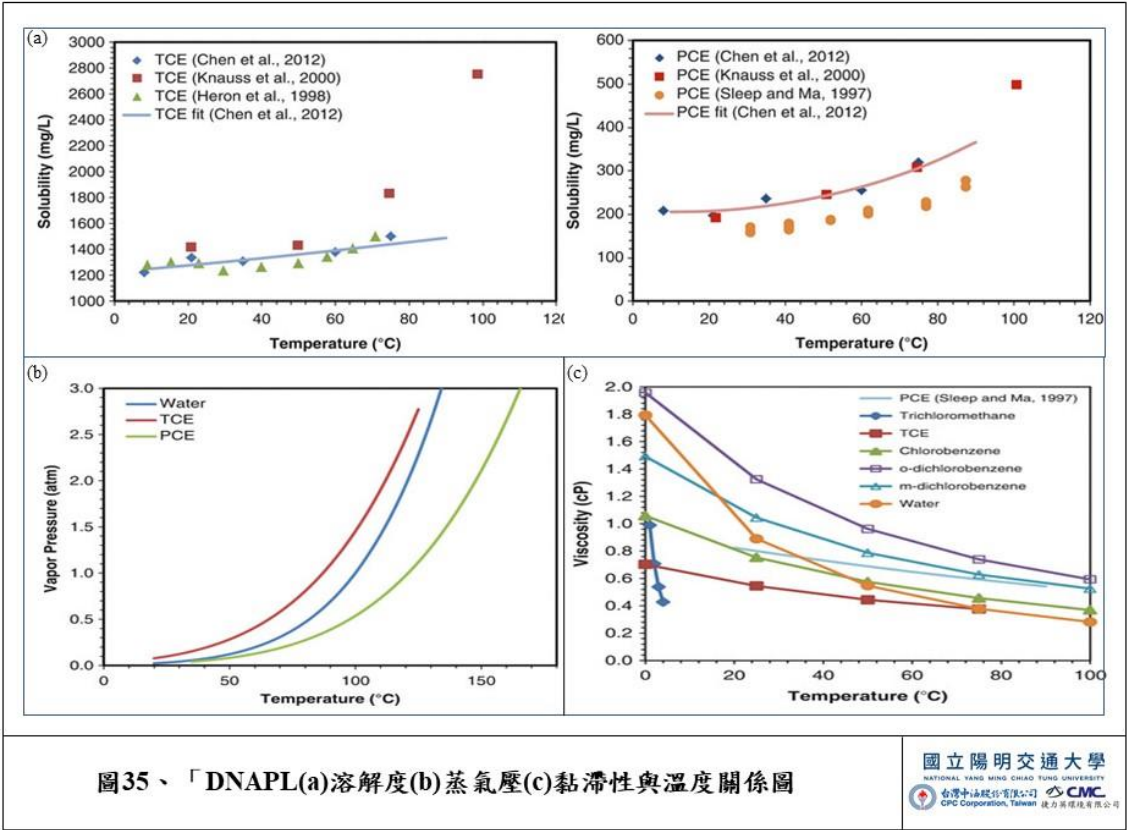
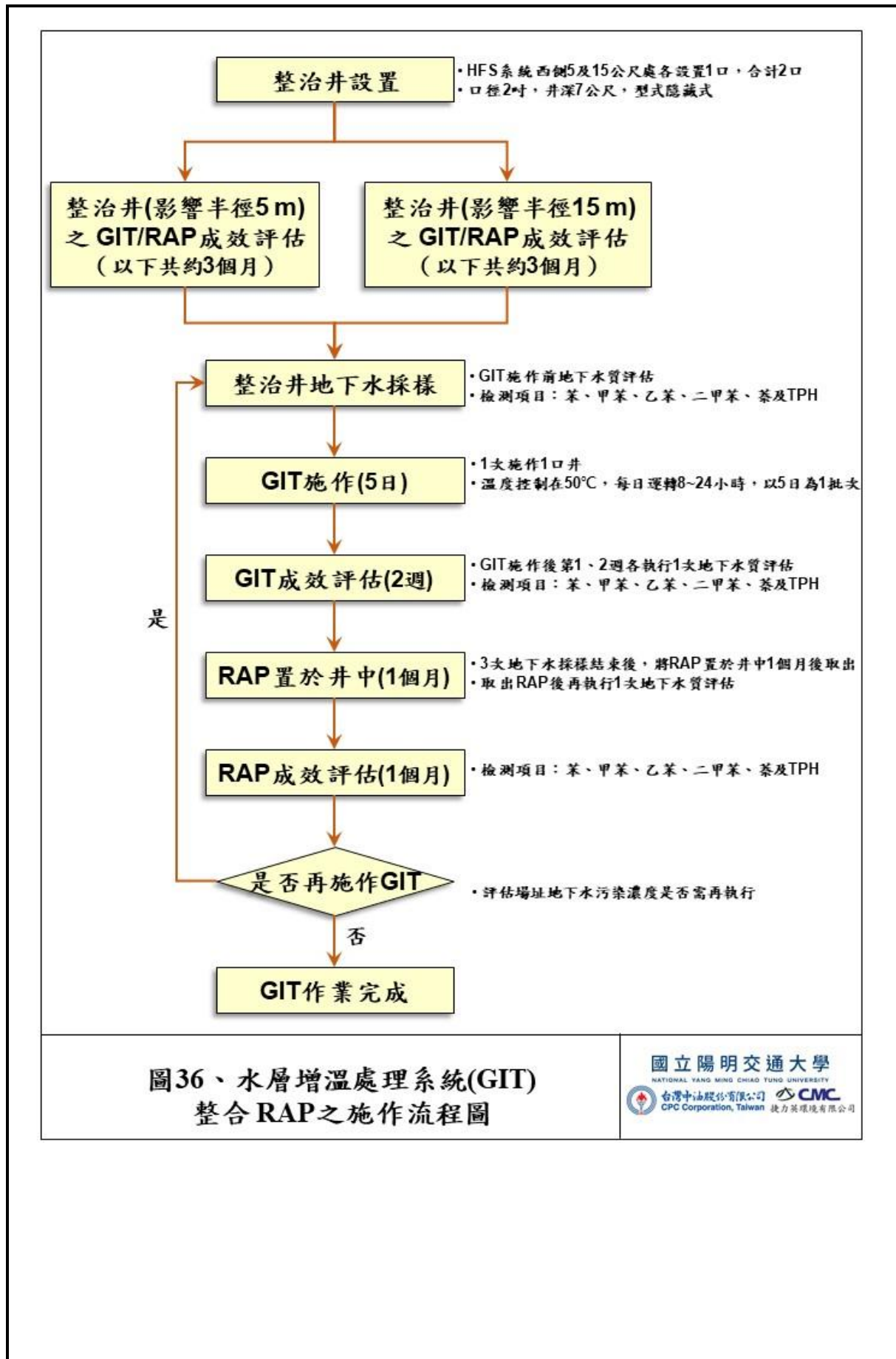


圖35、「DNAPL(a)溶解度(b)蒸氣壓(c)黏滯性與溫度關係圖

國立陽明交通大學
NATIONAL YANG-MING CHIAO TUNG UNIVERSITY
台灣中油股份有限公司 CPC Corporation, Taiwan 捷力環境股份有限公司

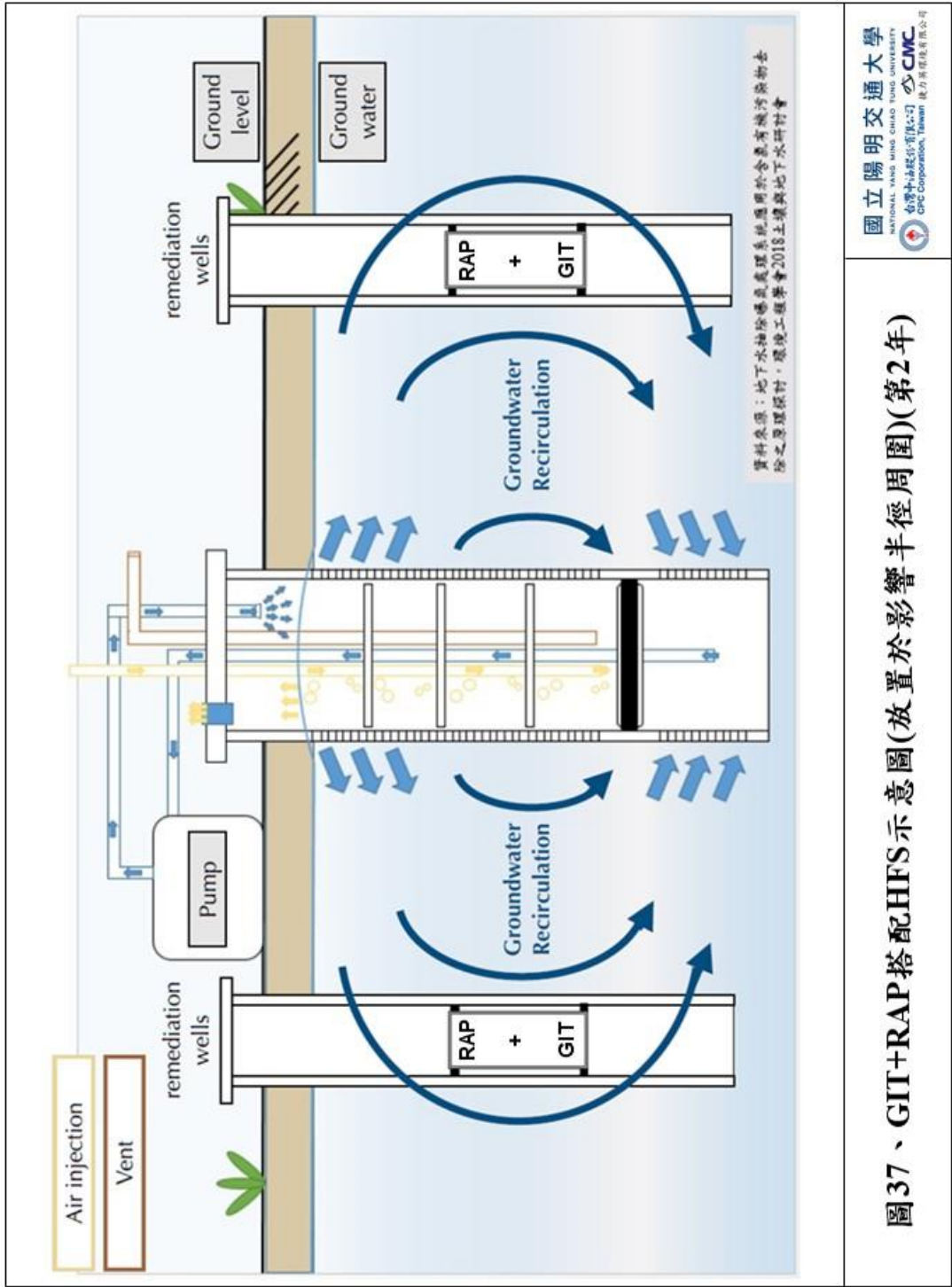


五、研究方法與過程





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





3. 成效評估

本計畫模場試驗第 1 年(110 年)主要運用 RAP+HFS 模式進行規劃設置，依據模場試驗期間 HFS 整治系統搭配 RAP 多樣化處理功用，並配合土壤及地下水定期監測，以確認模場土壤及地下水整體污染整治成效；模場試驗第 2 年(111 年)主要運用第 1 年既有且穩定運轉之 HFS 設備進行測試，另於 HFS 系統西側距離 5 及 15 公尺處各設置 1 口整治井，合計 2 口，分別執行兩批次 GIT，並配合 GIT 作業於施作前、施作後第 1、2 週各執行 1 次地下水採樣檢測作業，合計 3 次，以瞭解 GIT 作業後污染物釋出情形，並於 GIT 試驗檢測完成後，再將 RAP 放置於影響半徑範圍內之地下水整治井中，運用 RAP 本身之特有處理功能，將影響半徑範圍內之溶解相污染有效吸附，RAP 放置約 1 個月後取出，再採集地下水檢測。

為瞭解第 2 年(111 年)模場運轉成效，於模場試驗期間監測作業分為尾氣、地下水及土壤等 3 類，土壤及地下水監測位置詳見圖 38。，現就監測頻率及檢測項目說明如下。

- (1) **尾氣監測**：以攜帶式 PID 或 FID 量測地表上 RAP 固定床進口與排放尾氣的 VOC 外，約每月量測 1 次。
- (2) **地下水監測**：檢測項目為苯、甲苯、乙苯、二甲苯、萘及總石油碳氫化合物，第 2 年地下水監測有下列三類。
 - a. 定期監測：4 口地下水監測井(井號：OW-07、OW-25、TE-C5、OW-26)，監測頻率為每月 1 次。
 - b. GIT+RAP 試驗成效監測：2 口地下水整治井(井號：HFS-W01、HFS-W02)，監測頻率為每批次 GIT 施作前、施作後第 1、2 週各執行 1 次地下水採樣檢測作業，合計 3 次；前述 3 次檢測完成後會在井中置入 RAP，置入 1 個月後取出 RAP，本計畫規劃於 RAP 置入 4 週及取出後各執行 1 次地下水採樣檢測作業。
 - c. 認證機構採樣檢測：4 口地下水監測井(井號：OW-07、OW-25、TE-C5、OW-26)，監測頻率為每季 1 次。
- (3) **土壤監測**：檢測項目為苯、甲苯、乙苯、二甲苯及總石油碳氫化合物，採樣點數 3 點，採樣深度至地表下 6 公尺，配合現場以人工試挖至 2.4m 後再開始土壤採樣作，採集樣品每 0.6 公尺以 FID 篩測，每點選篩測值最高段分析，監測頻率原則上為每季採樣檢測一次。



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

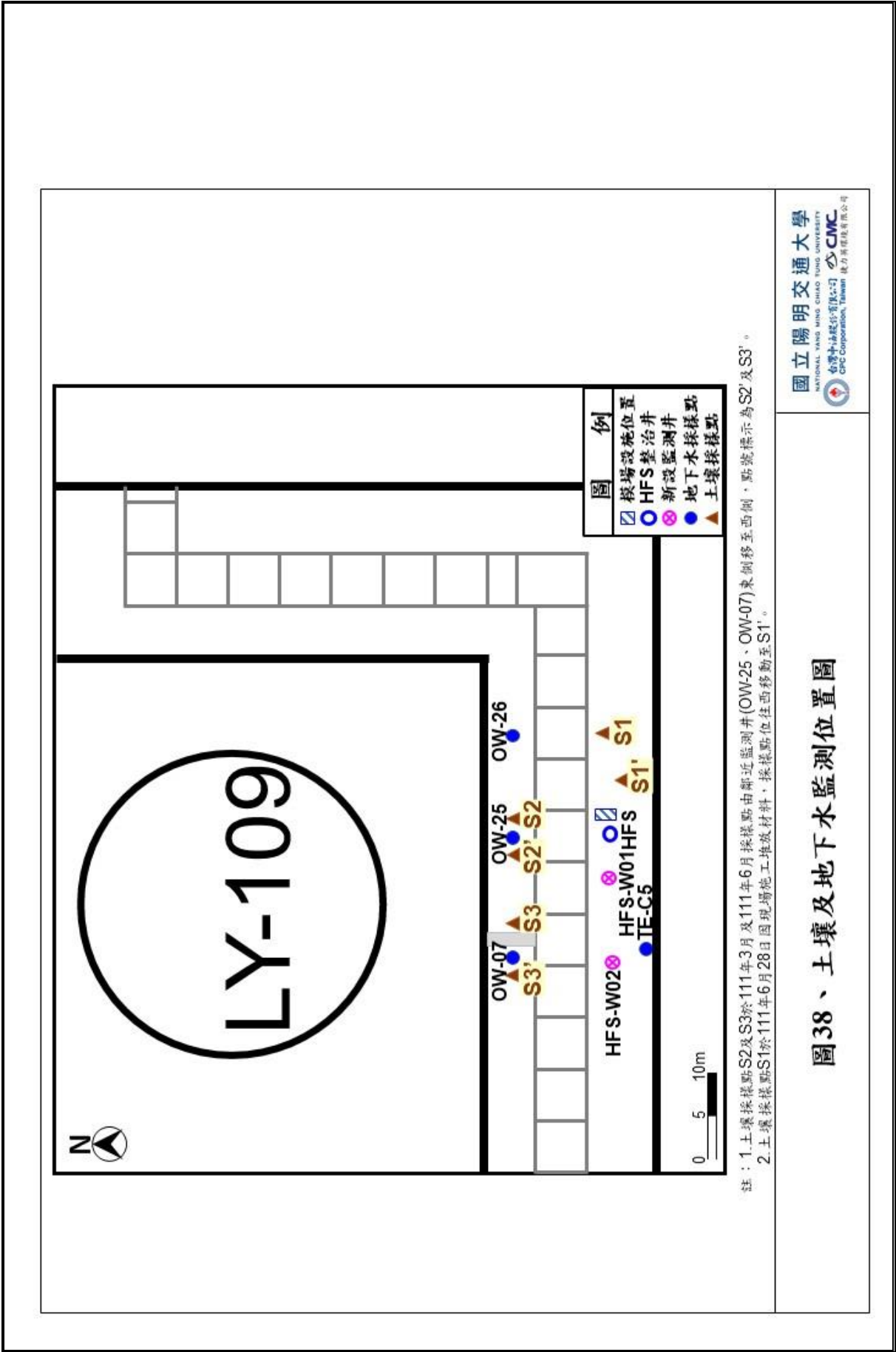


圖38、土壤及地下水監測位置圖



4. 系統維護

(1) HFS 系統定期巡檢

為確保 HFS 整治系統正常運轉，每月定期進行系統巡檢，若巡檢結果確認系統抽水狀況不如預期時，再評估是否須針對 HFS 系統井體設備執行洗井維護，以確保系統運轉功能正常，依各場址地層狀況不同，系統洗井維護頻率亦有所不同，目前規劃本場址系統維護頻率約 2~3 年洗井 1 次，後續仍將依本模場運轉結果進行調整。

(2) RAP 再生

本模場試驗階段依現場整治需求，RAP 可吸附空氣中及地下水中之揮發性有機物，後續將配合定期進行現場尾氣量測及地下水成效監測結果，依檢測結果進行模場中之 RAP 再生，並確認 RAP 之再生週期，適時更換再生，使其模場整治成效最大化。本年度加以確認現地再生之可行性。

(三) 工作進度說明

本計畫第 1 年(110 年)執行期間為 110 年 3 月 19 日至 111 年 03 月 31 日，完成了模場背景調查、整治井及設備設置、整治井設施操作及維護、土壤及地下水定期監測採樣分析，皆符合查核點工作內容；第 2 年(111~112 年)執行期間為 111 年 5 月 20 日至 112 年 04 月 30 日，計畫進度詳見表 9。



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

表 9、研究進度及預期完成之工作進度表

期程年月 實際年月 工作項目		第 1 年				第 2 年			
		第 1-3 個月	第 4-6 個月	第 7-9 個月	第 10-12 個月	第 1-3 個月	第 4-6 個月	第 7-9 個月	第 10-12 個月
		110 年 3-5 月	110 年 6-8 月	110 年 9-11 月	110 年 12 月 -111 年 2 月	111 年 5-7 月	111 年 8-10 月	111 年 11-12 月~ 112 年 1 月	112 年 2-4 月
計畫書核定(下達公文)									
模場背景調查									
整治井及設備設置			※						
整治井設施操作與維護			※						
定期監測採樣分析			※						
RAP 放置於影響半徑試驗							※		※
GIT 施作									
期中報告									
期末報告									
工作進度估計百分(累積數)		10%	25%	40%	50%	65%	80%	90%	100%
預定查核點	期 中	第一年第 6 個月(110 年 8 月) ●場址水文地質資料 ●HFS 系統及 RAP 尾氣處理設備建置 第二年第 6 個月(111 年 11 月) ●整治井增設完成 ●RAP 置影響半徑全範圍測試							
	期 末	第一年第 11 個月(111 年 1 月) ●RAP in HFS 系統之 LNAPL 處理效益評估 ●RAP 尾氣處理效益評估 第二年第 11 個月(112 年 3 月) ●RAP 置影響半徑全範圍測試之監測與採樣分析							
說明： 1. 「預定查核點」以※標記。 2. 預定進度以 表示;實際進度以 表示。									



六、結果與討論

本計畫執行迄今(統計 110 年 3 月 19 日至 111 年 10 月 30 日期間)已完成模場背景調查、整治井及設備設置、整治井設施操作及維護、定期監測採樣分析、實驗室 RAP 吸附 VOC 實驗及 RAP 實驗室再生驗證及條件測試、GIT 及 RAP 放置於影響半徑試驗等，現就前述工作執行成果說明如下。

(一)模場背景調查

本計畫模場位於「中油林園廠」100 油槽區儲槽 LY-109 南側，於整治設備安裝前先進行模場土壤及地下水污染現況調查檢測，作為未來整治成效評估之背景值，現就該處土壤及地下水檢測結果說明如下。

1. 土壤調查

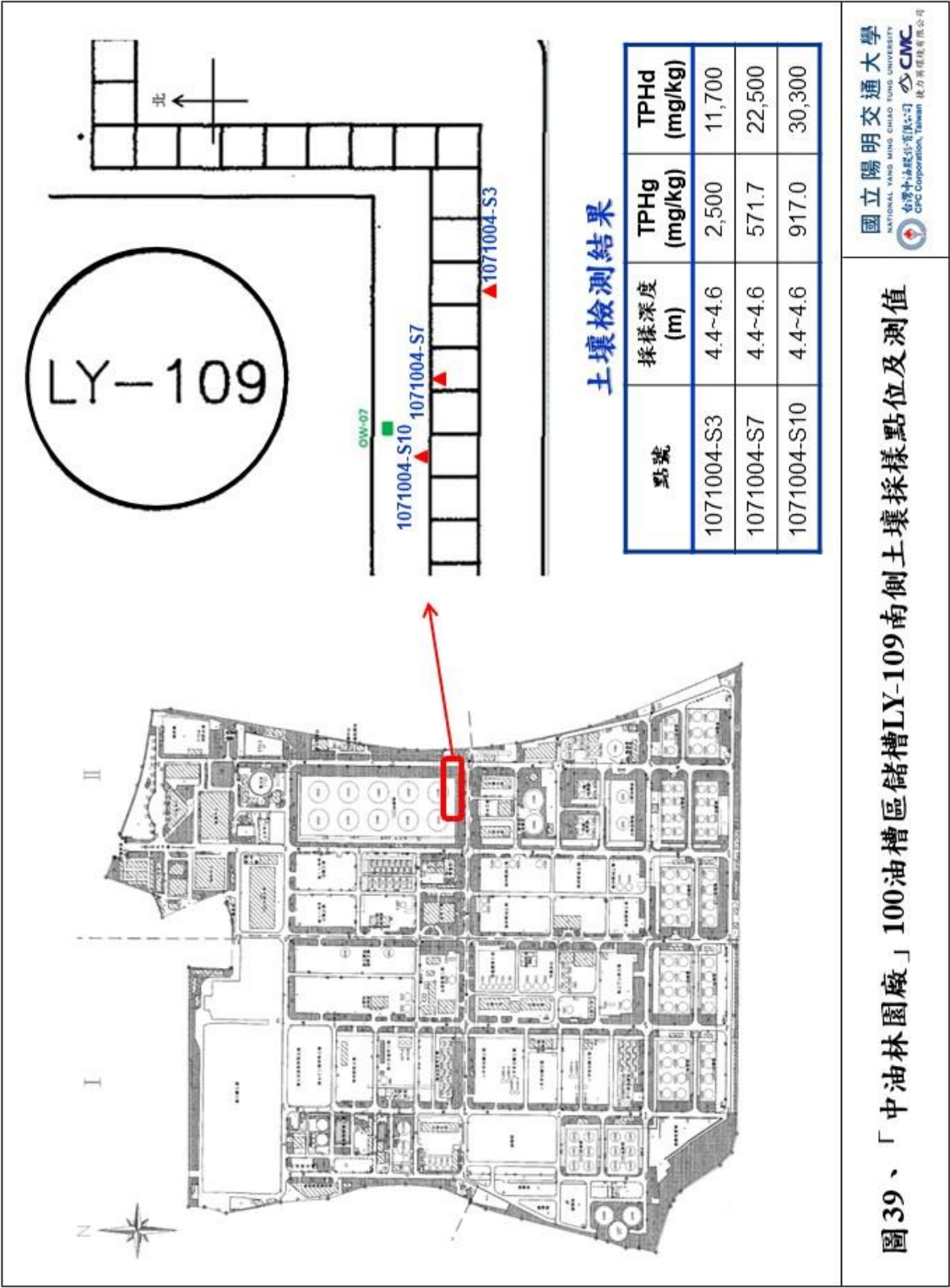
引用「中油林園廠」107 年針對 100 油槽區儲槽 LY-109 南側補充調查之 3 點(點號：1071004-S3、S7、10)土壤採樣點資料，樣品深度為地表下 4.4~4.6 公尺，檢測項目為 TPHg 及 TPHd，3 點檢測結果 TPH 皆超過土壤污染管制標準(1,000 mg/kg)，採樣點位及測值詳見圖 39。

2. 地下水調查

本計畫於 110 年 4 月 28 日針對「中油林園廠」100 油槽區儲槽南側 3 口地下水監測井(井號：OW-07、OW-25、TE-C5)進行採樣作業，檢測項目為苯、甲苯、乙苯、二甲苯、萘及總石油碳氫化合物，檢測結果 3 口井除 TPH 項目超過第二類地下水污染管制標準(10 mg/L)外，其餘項目皆低於定量下限值，採樣點位及測值詳見圖 40。



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





六、結果與討論

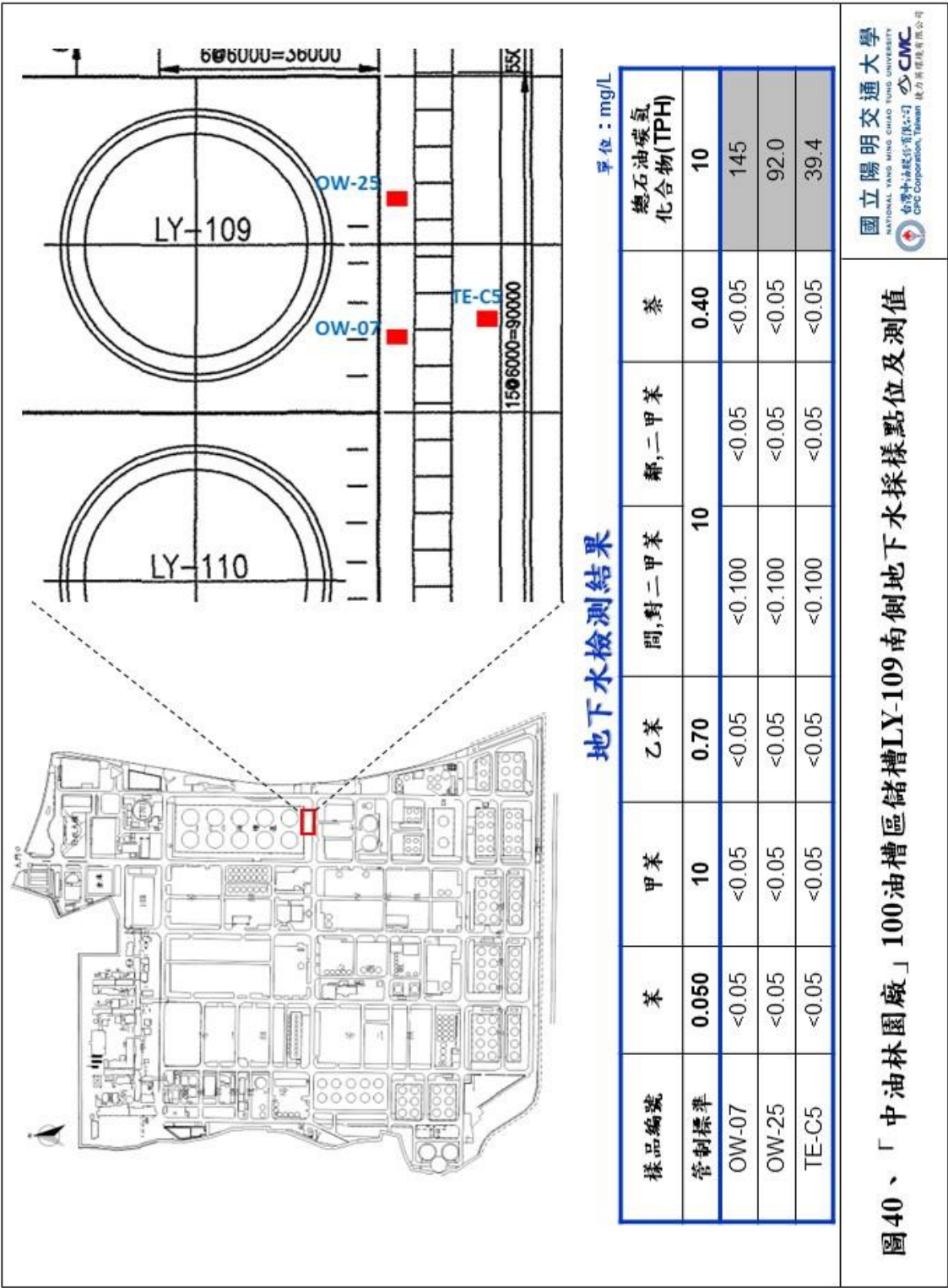


圖40、「中油林園廠」100油槽區儲槽LY-109南側地下水採樣點位及測值



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

(二)模場整治井與設備設置說明

1. 模場 HFS 整治井及設備設置

本計畫已於 110 年 6 至 7 月在「中油林園廠」100 油槽區儲槽 LY-109 南側進行整治井設置作業，施工前先於施工區域設置圍籬，並於設置地點進行人工試挖至地表下 2 公尺，確認地表下無管線後，再以傳統衝擊鑽機鑽探至地表下 11.5 公尺，接著進行鑽孔擴孔作業、井管下管、濾料填充、完井、井內阻隔系統(阻隔版)安裝、水泥平台設置、現場環境整理及設備管線配置作業。

本計畫整治井規格為口徑 16 吋，井體長度共 11 公尺，分別為地表下 10 公尺及地表上 1 公尺，井體分別設置兩層井篩，於上井篩中設置噴散裝置，上下井篩則利用 HFS 阻隔盤將上下井篩進行分層。井篩位置分別為上井篩 2.0~6.0 公尺，下井篩 6.5~10.5 公尺。井體設計規畫示意詳見圖 28，設備配置詳見圖 29。

由於部分設備需配合現場規定調整為防爆規格，因此在 7 月 16 日先行拆除設備及管線，另於 8 月 4 日配合防爆電箱重新安裝，並於 8 月 12 日管線及電力測試完成，HFS 正式試運轉，此外，也在 10 月 21 日將廢氣處理槽之活性碳替換為 RAP，且在循環水處理槽添加 RAP，模場設置作業監工紀錄詳見表 10，實際操作紀錄詳見表 11，累計試運轉三個月後已確認系統最佳操作參數，目前即時流量皆維持 1.6~2.0 m³/h 之間，截至 112 年 02 月 16 日止系統累計總抽水量達 15,208 噸(立方公尺)，其中 111 年 12 月 01 日至 112 年 02 月 10 日期間因流量計故障送修，系統仍持續運作，惟總抽水量暫停累計。模場設備及施工照片詳見圖 41 及圖 42。

表 10、模場設置作業監工紀錄

日期	現場施工作業摘要
110/06/11	施工區域設置圍籬，設井地點進行人工試挖至地表下 2 公尺。
110/06/15	以傳統衝擊鑽機進行鑽探作業，鑽探深度至地表下 11.5 公尺。
110/06/16	井管運送入廠，接著進行鑽孔擴孔作業。
110/06/17	持續進行鑽孔擴孔作業。
110/06/18	鑽孔擴孔作業完成，進行井管下管及濾料填充作業。
110/06/21	以震盪洗井及氣提法掏沙進行完井作業，完成井內阻隔系統(阻隔版)安裝作業。
110/06/22	設置水泥平台，整理環境並拆除施工圍籬。
110/06/23	鑿井設備離廠。
110/07/02	HFS 系統地面設備(油水分離槽、活性碳槽、抽水馬達、鼓風機)入廠，進行設備管線配置作業。
110/07/05	配合現場管線配置規定，移動調整地表設備位置。
110/07/08	設備移動後，重新進行設備管線配置作業。
110/07/16	配合現場規定另訂做「防爆電箱」，先行拆除設備及管線，HFS 系統地面設備(油水分離槽、活性碳槽、抽水馬達、鼓風機)離廠。
110/08/04	HFS 系統地面設備(油水分離槽、活性碳槽、抽水馬達、鼓風機)重新入廠，設備管線組裝，防爆電箱安裝完成，但現場電力未接。
110/08/12	管線及電力測試完成，HFS 正式試運轉。
110/10/21	將廢氣處理槽之活性碳替換為 RAP，且在循環水處理槽添加 RAP。



六、結果與討論

表 11、HFS 系統實際操作紀錄表

日期	設備編號	紀錄時間	即時流量 (m ³ /hr)	總抽水量 (噸)	備註	記錄人員	承辦人員
8/12	HFS01	1000	-	-	系統測試中	林龍生	蔡民鏞
8/13	HFS01	1011	-	-	系統測試中	林龍生	蔡民鏞
8/16	HFS01	0930	-	-	系統測試中	林龍生	謝承明
8/17	HFS01	1540	-	-	系統測試中	林龍生	蔡民鏞
8/19	HFS01	0931	-	-	系統測試中	林龍生	蔡民鏞
8/20	HFS01	0830	-	-	系統測試中	林龍生	蔡民鏞
8/23	HFS01	1408	-	-	系統測試中	林龍生	蔡民鏞
8/25	HFS01	1421	-	-	系統測試中	林龍生	蔡民鏞
8/26	HFS01	1105	1.49	34.69	系統測試中	林龍生	蔡民鏞
8/27	HFS01	0815	1.73	63.58	系統測試中	林龍生	蔡民鏞
8/30	HFS01	0900	1.61	155.39	系統測試中	蔡松宗	蔡民鏞
9/1	HFS01	1030	1.74	220.22	系統測試中	蔡松宗	蔡民鏞
9/6	HFS01	0920	1.64	310.78	系統測試中	林龍生	蔡民鏞
9/9	HFS01	1124	1.69	344.58	系統測試中	林龍生	蔡民鏞
9/13	HFS01	0842	1.64	500.74	系統測試中	林龍生	蔡民鏞
9/14	HFS01	1446	1.60	544.63	系統測試中	林龍生	蔡民鏞
9/17	HFS01	1130	1.60	625.46	系統測試中	林龍生	蔡民鏞
9/23	HFS01	1110	1.64	784.95	系統測試中	蔡松宗	蔡民鏞
9/30	HFS01	0956	1.67	982.76	系統測試中	蔡松宗	蔡民鏞
10/4	HFS01	0910	1.66	1093.92	系統測試中	林龍生	蔡民鏞
10/8	HFS01	12:30	1.83	1196.2	系統測試中	林龍生	蔡民鏞
10/13	HFS01	08:51	1.88	1422.06	系統測試中	蔡松宗	蔡民鏞
10/20	HFS01	08:47	1.92	1741.9	系統測試中	蔡松宗	蔡民鏞
10/21	HFS01	10:38	1.92	1790.86	系統測試中	蔡松宗	蔡民鏞
10/28	HFS01	11:25	1.71	2107.76	系統測試中	蔡松宗	蔡民鏞
11/3	HFS01	08:40	1.81	2367.35	系統測試中	蔡松宗	謝承明
11/8	HFS01	08:47	1.72	2367.79	系統測試中	林龍生	謝承明
11/8	HFS01	08:42	1.81	2798.9	系統測試中	蔡松宗	蔡民鏞



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

表 11、HFS 系統實際操作紀錄表(續 1)

日期	設備編號	紀錄時間	即時流量 (m ³ /hr)	總抽水量 (m ³)	備註	記錄人員	承辦人員
11/28	HFS01	1120	1.72	3097.87	系統測試中	李松年	李松年
12/2	HFS01	0850	1.65	3366.65	系統測試中	李松年	李松年
12/9	HFS01	0855	1.83	3615.87	系統測試中	李松年	李松年
12/16	HFS01	0840	1.75	3884.65	系統測試中	李松年	李松年
12/23	HFS01	1030	1.99	4057.05	系統測試中	李松年	李松年
12/29	HFS01	0830	1.84	4497.84	系統測試中	林龍主	李松年
12/30	HFS01	0845	1.77	4635.92	系統測試中	林龍主	李松年
01/03	HFS01	0927	1.77	4714.19	系統測試中	林龍主	李松年
01/06	HFS01	1430	1.84	4854.66	系統測試中	林龍主	李松年
01/13	HFS01	0935	1.78	5146.30	系統測試中	林龍主	李松年
01/18	HFS01	1335	1.75	5609.26	系統測試中	林龍主	李松年
02/21	HFS01	1245	1.83	5609.67	系統測試中	林龍主	李松年
02/23	HFS01	1045	1.93	5698.65	系統測試中	李松年	李松年
03/01	HFS01	0915	1.43	5973.29	系統測試中	李松年	李松年
03/08	HFS01	1019	1.84	5975.08	系統測試中	林龍主	李松年
5/9	HFS01	0845	1.90	9325.52	正常運轉中	林龍主	李松年
6/17	HFS01	0940	1.91	9681.4	正常運轉中	林龍主	李松年
6/20	HFS01	1515	1.94	9681.67	正常運轉中	林龍主	李松年
7/7	HFS01	0900	0	10026.96	系統停機中	林龍主	李松年
7/11	HFS01	1601	1.92	10027.33	正常運轉中	林龍主	李松年
7/20	HFS01	1600	1.99	10397.36	正常運轉中	林龍主	李松年
8/4	HFS01	0900	2.12	11131.36	正常運轉中	李松年	李松年
8/5	HFS01	1037	2.17	11701.07	正常運轉中	林龍主	李松年
8/16	HFS01	1410	2.01	11758.32	正常運轉中	林龍主	李松年
8/17	HFS01	1108	2.03	11803.17	正常運轉中	林龍主	李松年
8/18	HFS01	1415	2.02	11852.01	正常運轉中	林龍主	李松年
8/19	HFS01	0910	2.03	11891.01	正常運轉中	李松年	李松年
8/22	HFS01	1435	2.18	12052.06	正常運轉中	林龍主	李松年



六、結果與討論

表 11、HFS 系統實際操作紀錄表(續 2)

日期	設備編號	紀錄時間	即時流量	總抽水量	備註	記錄人員	承辦人員
11/8/23	HFS01	1450	2.01	12101.63	正常運轉中	林龍主	蔡民偉
11/8/24	HFS01	1548	2.08	12154.6	正常運轉中	林龍主	蔡民偉
11/8/25	HFS01	1450	0	12187.13	流量計故障停運	林龍主	蔡民偉
11/8/26	HFS01	1330	0	12187.13	流量計故障停運	林龍主	蔡民偉
11/8/27	HFS01	1413	0	12187.13	流量計故障停運	林龍主	蔡民偉
11/9/6	HFS01	1535	0	12187.13	流量計故障停運	林龍主	蔡民偉
11/10/6	HFS01	1449	2.13	12187.6	正常運轉中	林龍主	蔡民偉
11/10/13	HFS01	1320	2.21	12547.71	正常運轉中	林龍主	蔡民偉
11/11/3	HFS01	1410	2.26	13695.00	正常運轉中	林龍主	蔡民偉
11/11/14	HFS01	1403	2.2	14290.17	正常運轉中	林龍主	蔡民偉
11/11/15	HFS01	1345	2.14	14343.24	正常運轉中	林龍主	蔡民偉
11/11/16	HFS01	1318	2.23	14395.82	正常運轉中	林龍主	蔡民偉
11/11/17	HFS01	1447	2.15	14452.48	正常運轉中	林龍主	蔡民偉
11/11/18	HFS01	1550	2.2	14508.42	正常運轉中	林龍主	蔡民偉
11/11/21	HFS01	1330	2.21	14662.38	正常運轉中	林龍主	蔡民偉
11/11/22	HFS01	1340	2.18	14715.96	正常運轉中	蔡果宇	蔡民偉
11/11/23	HFS01	1400	2.18	14779.48	正常運轉中	蔡果宇	蔡民偉
11/11/24	HFS01	1330	2.19	14821.04	正常運轉中	蔡果宇	蔡民偉
11/11/25	HFS01	0940	2.2	14865.18	正常運轉中	林龍主	蔡民偉
11/12/01	HFS01	1525	—	—	流量計故障停運	林龍主	蔡民偉
11/12/08	HFS01	1530	—	—	流量計故障停運	林龍主	蔡民偉
11/12/15	HFS01	1525	—	—	流量計故障停運	蔡果宇	蔡民偉
11/12/12	HFS01	1000	—	—	流量計故障停運	蔡果宇	蔡民偉
11/12/22	HFS01	0910	—	—	流量計故障停運	林龍主	蔡民偉
11/2/10	HFS01	1037	2.38	14870.86	正常運轉中	林龍主	蔡民偉
11/2/16	HFS01	1123	2.34	15207.83	正常運轉中	林龍主	蔡民偉



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



1. HFS：井體直徑 16 吋;長度為地表下10公尺，地表上1公尺，合計11公尺
- 2.廢氣處理槽(填充 50L RAP)：直徑60公分，高度90公分 (total V=250L)
- 3.循環水處理槽(填充 50L RAP)：直徑 40公分 高度170公分 (total V=200L)
- 4.水封箱
- 5.暫存槽
- 6.油水分離槽

圖41、「中油林園廠」100油槽區模場設備



六、結果與討論

 井管及井篩管	 阻隔系統(阻隔盤)
 現場施工圍籬及井管	 設井地點進行人工試挖
 以傳統衝擊鑽機進行鑽探作業	 鑽孔擴孔作業
 下井管	 下井管
圖42、「中油林園廠」100油槽區模場設備及施工照片 國立陽明交通大學 NATIONAL YANG MING CHIAO YUNG UNIVERSITY 台灣中油股份有限公司 CPC Corporation, Taiwan CMC 捷力英理境有限公司	



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



回填濾料



完井作業



井內阻隔系統(阻隔版)安裝作業



井內阻隔系統(阻隔版)安裝作業



水泥平台設置作業



水泥平台設置作業



現場環境整理



設備管線配置作業

圖42、「中油林園廠」100油槽區模場設備及施工照片(續1)



六、結果與討論



設備拆除離廠



設備拆除離廠



防爆設備及電箱安裝作業



防爆設備及電箱安裝作業



防爆設備及電箱安裝作業



設備測試作業



設備測試作業



設備測試完成，正式試運轉

圖42、「中油林園廠」100油槽區模場設備及施工照片(續2)



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

 廢氣處理槽之活性碳	 RAP
 原廢氣處理槽中之活性碳	 廢氣處理槽之活性碳更換為RAP
 循環水處理槽添加RAP	 循環水處理槽添加RAP
 循環水處理槽添加RAP	 循環水處理槽添加RAP
圖42、「中油林園廠」100油槽區模場設備及施工照片(續3) 國立陽明交通大學 NATIONAL YANG MING CHIAO TUNG UNIVERSITY 台灣中油股份有限公司 CPC Corporation, Taiwan 捷力英環境有限公司 JELLY ENVIRONMENTAL CO., LTD.	



2. GIT+RAP 試驗

本計畫第二年(111 年)增加執行 GIT+RAP 系統，規劃距離 HFS 系統西側 5 及 15 公尺處各設置 1 口地下水整治井，口徑 2 吋，型式隱藏式，設置深度至地表下 7 公尺，開篩區間為地表下 2~7 公尺，本計畫已於 111 年 7 月完成 2 口整治井設置作業，整治井號為 HFS-W01、HFS-W02，整治井位置詳見圖 38。

整治井設置完成後已於 111 年 08 月 15~26 日施作第一次 GIT 試驗，111 年 11 月 14~25 日施作第二次 GIT 試驗，施作期程詳見表 12，GIT 施作設定溫度為 50℃，施作期間各整治井中即時溫度量測結果詳見表 13，GIT 施作後 2 週，再將 RAP 置於井中 1 個月，施作照片詳見圖 43。

表 12、水層增溫處理系統(GIT)整合 RAP 施作期程

序號	週期	第一次		第二次	
	整治井號	HFS-W01	HFS-W02	HFS-W01	HFS-W02
1	施作前水質監測	07/07	07/07	—	—
2	GIT 施作	08/15~19	08/22~26	11/14~18	11/21~25
3	GIT 成效評估 1(水質監測)	08/25	09/01	11/24	12/01
4	GIT 成效評估 2(水質監測)	09/01	09/06	12/01	12/08
5	RAP 置於井中	09/01~09/30	09/06~10/05	12/01~01/12	12/08~01/12
6	RAP 成效評估(水質監測)	10/06、 10/13	10/06、 10/13	01/05、 01/12	01/05、 01/12



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

表 13、GIT 系統紀錄表

日期	監測井編號	紀錄時間	即時溫度(°C)	備註	記錄人員
11/8/15	HFS-W1	0943		系統測試中	林龍主
11/8/16	HFS-W1	1051	47.1	HFS井內溫度30.7°C	林龍主
		1158	50.1		
		1410	50.9	HFS井內溫度32.3°C	
		1550	48.4		
11/8/17	HFS-W1	1000	50.6		林龍主
		1108	48.6	HFS井內溫度31.5°C	
		1408	50.8		
		1530	50.6	HFS井內溫度32.4°C	
11/8/18	HFS-W1	1043	50.8		林龍主
		1156	49.5	HFS井內溫度30.1°C	
		1430	48.6	HFS井內溫度31.1°C	
		1540	51.6		
11/8/19	HFS-W1	1035	50.2	HFS井內溫度30.3°C	梁永弘
		1145	49.6		
		1400	51.1	HFS井內溫度31.7°C	
		1530	50.7		
11/8/22	HFS-W2	1026	46.9	HFS井內溫度30.4°C	林龍主
		1146	52.1		
		1435	50.1	HFS井內溫度32.6°C	
		1540	51.6		
11/8/23	HFS-W2	1050	47.7	HFS井內溫度31.9°C	林龍主
		1700	52.0		
		1450	48.6	HFS井內溫度32.7°C	
		1545	48.8		



六、結果與討論

表 13、GIT 系統紀錄表(續 1)

日期	監測井編號	紀錄時間	即時溫度(°C)	備註	記錄人員
111/8/24	HFS-W02	1030	49.6	HFS井內溫度30.6°C	林龍主
		1150	52.4		
		1430	49.4	HFS井內溫度31.4°C	
		1545	51.0		
111/8/25	HFS-W02	1100	49.3	HFS井內溫度31.8°C	林龍主
		1200	49.9		
		1450	50.3	HFS井內溫度33.2°C	
		1545	49.9		
111/8/26	HFS-W02	1030	50.6	HFS井內溫度30.4°C	林龍主
		1140	51.6		
		1450	49.7	井內溫度33.8°C	
		1530	50.2		



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

表 13、GIT 系統紀錄表(續 2)

日期	監測井編號	紀錄時間	即時溫度(°C)	備註	記錄人員
11/11/14	HFS-W01	1010	43.3		林龍主
		1100	46.3		
		1400	45.7		
		1530	46.5		
11/11/15	HFS-W01	1000	45.7		林龍主
		1120	46.7		
		1400	45.7		
		1525	47.0		
11/11/16	HFS-W01	0940	45.6		賴慶輝
		1115	47.4		
		1350	46.5		
		1535	47.3		
11/11/17	HFS-W01	1010	46.7		林龍主
		1130	47.3		
		1350	46.5		
		1530	47.2		
11/11/18	HFS-W01	1020	46.8		林龍主
		1150	47.2		
		1330	46.5		
		1530	47.3		
11/11/21	HFS-W02	1020	46.9		林龍主
		1130	47.4		
		1420	47.0		
		1540	47.3		
11/11/22	HFS-W02	1020	46.0		甘樂宇
		1120	46.3		
		1420	46.1		
		1520	46.5		



六、結果與討論

表 13、GIT 系統紀錄表(續 3)

日期	監測井編號	紀錄時間	即時溫度(°C)	備註	記錄人員
111 11/23	HFS-W02	1020	46.1		葉景宇
		1120	46.5		
		1400	46.2	中途發電機停止,重啟	
		1500	46.5		
111 11/24	HFS-W02	1020	46.5		葉景宇
		1120	46.3		
		1400	46.1		
		1500	46.4		
111 11/25	HFS-W02 HFS-W02	1000	40.2		林龍平



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

HFS-W01	HFS-W02
  GIT 試驗日期：111/08/15	  GIT 試驗日期：111/08/22
  GIT 試驗日期：111/08/16	  GIT 試驗日期：111/08/23
  GIT 試驗日期：111/08/17	  GIT 試驗日期：111/08/24
  GIT 試驗日期：111/08/18	  GIT 試驗日期：111/08/25
  GIT 試驗日期：111/08/19	  GIT 試驗日期：111/08/26
 RAP 放置於井中日期：111/09/01	  RAP 放置於井中日期：111/09/06
圖43、「中油林園廠」100油槽區 GIT+RAP施作照片	
國立陽明交通大學 NATIONAL YANG MING CHIAO TUNG UNIVERSITY 台灣中油股份有限公司 CPC Corporation, Taiwan 捷力英環境有限公司	



六、結果與討論

HFS-W01	HFS-W02
  GIT試驗日期：111/11/14	  GIT試驗日期：111/11/21
  GIT試驗日期：111/11/15	  GIT試驗日期：111/11/22
  GIT試驗日期：111/11/16	  GIT試驗日期：111/11/23
  GIT試驗日期：111/11/17	  GIT試驗日期：111/11/24
  GIT試驗日期：111/11/18	  GIT試驗日期：111/11/25
  RAP放置於井中日期：111/12/01	  RAP放置於井中日期：111/12/08
圖43、「中油林園廠」100油槽區 GIT+RAP施作照片(續)	
國立陽明交通大學 NATIONAL YANG MING CHIAO TUNG UNIVERSITY 台灣中油股份有限公司 CPC Corporation, Taiwan 捷力英環境有限公司	



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

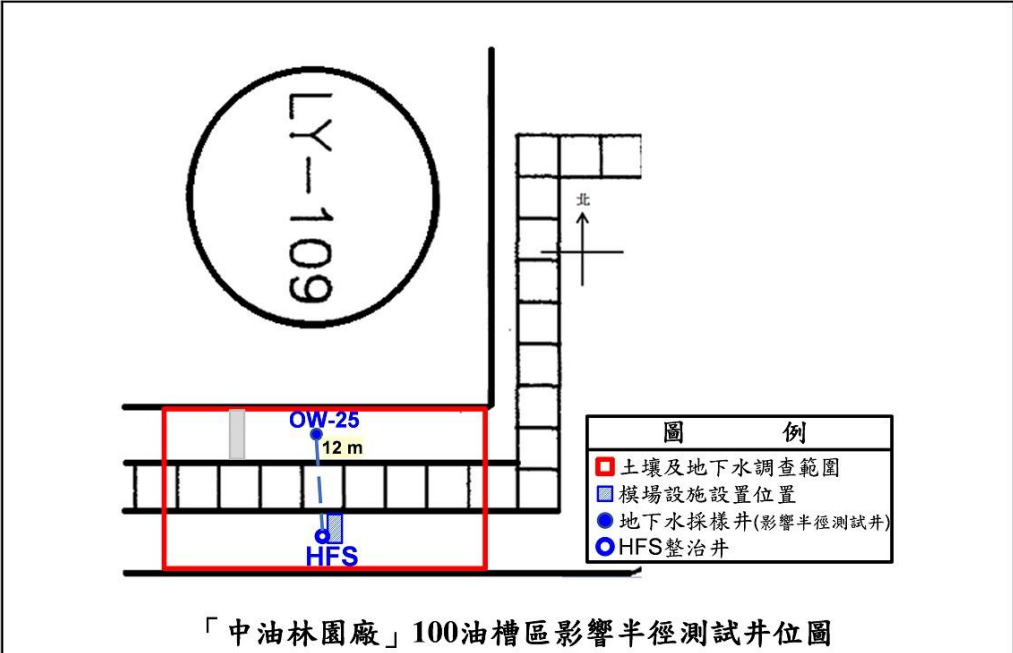
(三) 系統影響半徑測試

本計畫規劃在系統試運轉三個月後執行系統影響半徑測試(ROI)，現場先將自計式水位計放入地下水井中，接著暫時關閉 HFS 系統 1 小時後，再重新啟動系統，用以確認系統停止與運轉期間，是否有造成地下水井之水位變化情況，由圖中地下水位變化曲線可看出 HFS 系統對周圍監測井有造成明顯水位洩降曲線。

第 1 年(110 年)於 110 年 12 月 17 日針對模場區的 1 口地下水井(OW-25) 系統影響半徑測試，觀測井與 HFS 井位置及測試成果詳見圖 44，第 2 年(111 年)則於 111 年 08 月 22~26 日期間針對模場區 5 口監測井執行，測試井與 HFS 井位置及測試成果詳見圖 45。



六、結果與討論



觀測井OW-25放置自計式水位計

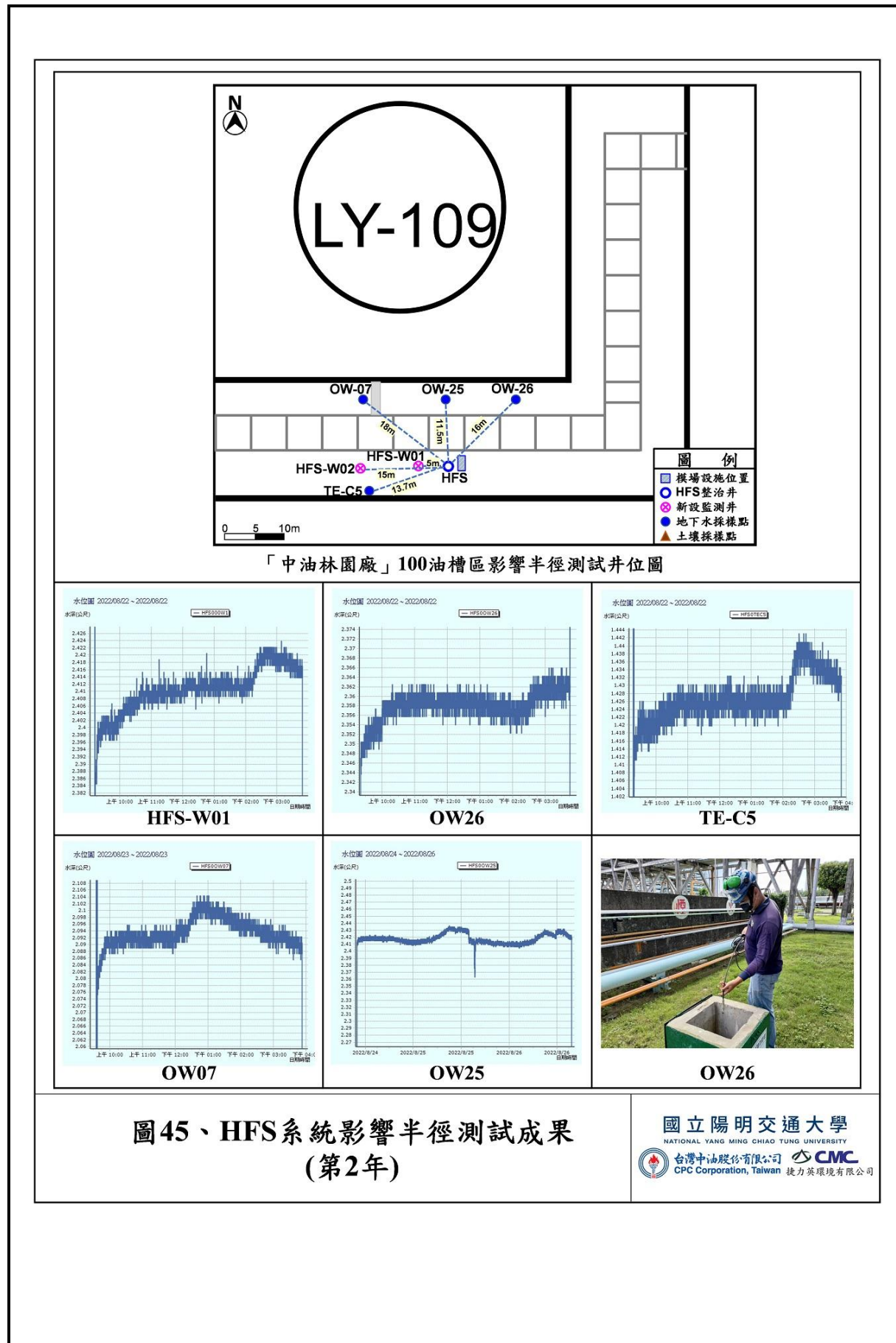


觀測井OW-25水位變化

圖44、HFS系統影響半徑測試成果
(第1年)



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





(四) 定期監測

為瞭解模場運轉成效，於模場試驗期間監測作業分為尾氣、地下水及土壤等 3 類，本場址自 110 年 8 月 12 日正式試運轉後，即依各類監測頻率及規劃內容執行，現就監測成果說明如下。

1. 尾氣監測

本計畫第 1 年(110 年)以攜帶式 PID 或 FID 量測地表上 RAP 固定床進口與排放尾氣的 VOC 外，約每月量測 1 次，本場址自 110 年 8 月 12 日正式試運轉後，每月以 PID 量測尾氣，測值皆為 0.0 ppm；而本計畫第 2 年(111 年)則以攜帶式 PID 或 FID 量測系統之進氣及尾氣，測值範圍為 0.0~10.4 ppm，顯示設備運轉未有 VOC 逸散情形，測值及現場量測照片詳見表 14 及圖 46。

表 14、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
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。



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

			
PID尾氣監測日期： 110/08/26	PID尾氣監測日期： 110/08/26	PID尾氣監測日期： 110/09/23	PID尾氣監測日期： 110/09/23
			
PID尾氣監測日期： 110/10/28	PID尾氣監測日期： 110/10/28	PID尾氣監測日期： 110/11/25	PID尾氣監測日期： 110/11/25
			
PID尾氣監測日期： 110/12/23	PID尾氣監測日期： 110/12/23	FID進氣監測日期： 111/04/07	FID進氣監測日期： 111/04/07
			
FID尾氣監測日期： 111/04/07	FID尾氣監測日期： 111/04/07	PID進氣監測日期： 111/05/05	PID尾氣監測日期： 111/05/05
			
PID尾氣監測日期： 111/05/05	FID進氣監測日期： 111/05/05	FID進氣監測日期： 111/05/05	FID尾氣監測日期： 111/05/05

圖46、「中油林園廠」100油槽區
HFS尾氣監測照片



六、結果與討論

PID進氣監測日期： 111/06/09	PID進氣監測日期： 111/06/09	PID尾氣監測日期： 111/06/09	FID進氣監測日期： 111/06/09
FID進氣監測日期： 111/06/09	FID尾氣監測日期： 111/06/09	PID進氣監測日期： 111/07/20	PID尾氣監測日期： 111/07/20
PID進氣監測日期： 111/08/04	PID尾氣監測日期： 111/08/04	FID進氣監測日期： 111/08/04	FID尾氣監測日期： 111/08/04
進氣監測日期： 111/09/01	PID進氣監測日期： 111/09/01	尾氣監測日期： 111/09/01	FID尾氣監測日期： 111/09/01
PID進氣監測日期： 111/10/06	PID尾氣監測日期： 111/10/06	FID進氣監測日期： 111/10/06	FID尾氣監測日期： 111/10/06

圖46、「中油林園廠」100油槽區
HFS尾氣監測照片(續1)



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

			
PID進氣監測日期： 111/11/03	PID進氣監測日期： 111/11/03	PID尾氣監測日期： 111/11/03	FID進氣監測日期： 111/11/03
			
FID進氣監測日期： 111/11/03	FID尾氣監測日期： 111/11/03	PID進氣監測日期： 111/12/01	PID尾氣監測日期： 111/12/01
			
PID尾氣監測日期： 111/12/01	FID進氣監測日期： 111/12/01	FID進氣監測日期： 111/12/01	FID尾氣監測日期： 111/12/01
			
FID進氣監測日期： 112/01/12	FID尾氣監測日期： 112/01/12	PID進氣監測日期： 112/01/12	PID尾氣監測日期： 112/01/12
			
FID進氣監測日期： 112/02/02	FID尾氣監測日期： 112/02/02	PID進氣監測日期： 112/02/02	PID尾氣監測日期： 112/02/02
圖46、「中油林園廠」100油槽區 HFS尾氣監測照片(續2)			國立陽明交通大學 NATIONAL YANG MING CHIAO TUNG UNIVERSITY  台灣中油股份有限公司 CPC Corporation, Taiwan  捷力英環境有限公司



2. 地下水監測

(1) 定期監測

本場址地下水定期監測之檢測項目為苯、甲苯、乙苯、二甲苯、萘及總石油碳氫化合物，由捷力英公司以貝勒管洗井採樣，中油公司分析，本計畫第 1 年(110 年)監測數量為 3 口地下水監測井，井號為 TE-C5、OW-07 及 OW-25，地下水採樣點位圖置詳見圖 38，監測頻率為模場正式運轉後第 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，本場址第 1 年自 110 年 08 月 12 日正式試運轉至 111 年 02 月，共執行 9 次定期監測作業。

本計畫第 2 年(111 年)增加監測模場西側之地下水監測井 1 口(OW-26)，總口數增為 4 口，井號分別為 TE-C5、OW-07、OW-25 及 OW-26，地下水採樣點位圖置詳見圖 38，監測頻率為每月 1 次，第 2 年已自 111 年 04 月至 112 年 02 月執行 11 次。

本計畫 2 年地下水監測成果可看出苯、甲苯、乙苯、二甲苯及萘之監測結果大多低於定量偵測極限值或 $<1\text{ mg/L}$ ，主要是總石油碳氫化合物超過第二類地下水污染管制標準，彙整歷次地下水總石油碳氫化合物測值繪製變化趨勢圖詳見圖 47，本場址第 1 年(110 年)HFS 於 110 年 8 月 12 日正式運轉，初期受到水力循環系統影響，地下水總石油碳氫化合物濃度有明顯上下起伏趨勢，在 HFS 運轉半年(111 年 02 月)後，距離 HFS 較遠之監測井 OW-07(距 HFS 約 18 公尺，詳見圖 45)濃度已明顯下降，而距離 HFS 較近之監測井 OW-25(距 HFS 約 11.5 公尺)濃度則逐漸上升，顯示透過 HFS 系統能將污染物聚集處理。本計畫為加強處理成效，於第 2 年(111 年)增加 GIT+RAP 試驗，本計畫 GIT 於 111 年 8 月執行第 1 批次後，污染濃度有明顯上升，顯示於特定深度地下水層加熱後，有助於提高污染物之水中溶解度，本計畫 GIT 於 111 年 11 月執行第 2 批次後，污染濃度更加明顯上升，確認於特定深度地下水層加熱後，有助於提高污染物之水中溶解度。

本計畫第 1 年及第 2 年地下水定期監測成果詳見表 15 及表 16，歷次地下水定期監測採樣照片詳見圖 48。



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

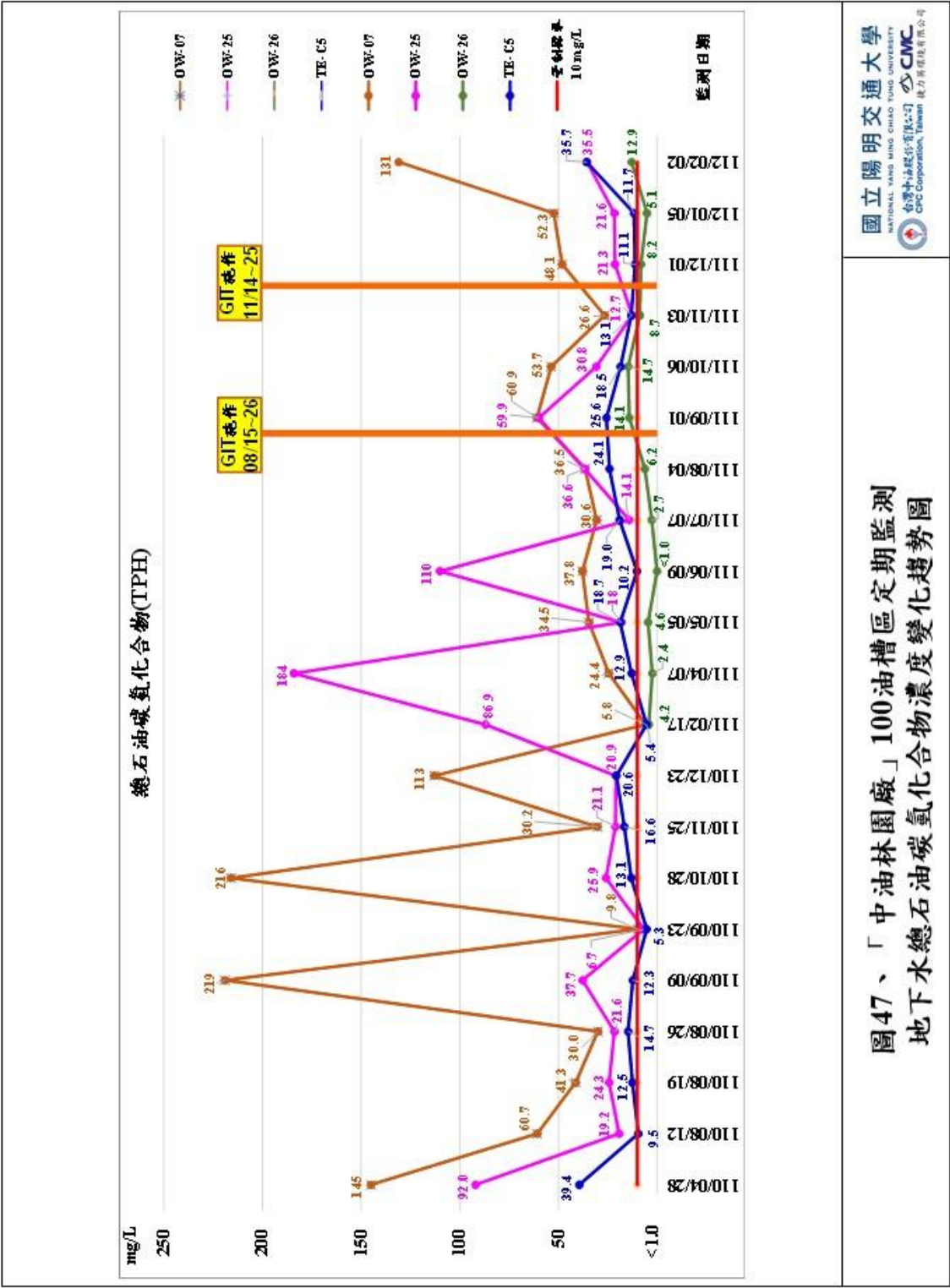


圖47、「中油林園廠」100油槽區定期監測
地下水總石油碳氫化合物濃度變化趨勢圖



六、結果與討論

表 15、「中油林園廠」100 油槽區地下水定期監測成果(第 1 年)

井號	採樣日期	苯	甲苯	乙苯	間,對二甲苯	鄰,二甲苯	萘	總石油碳 氫化合物
第二類地下水 污染管制標準		0.050	10	7.0	100		0.40	10
第二類地下水 污染監測標準		0.025	5	3.5	50		0.20	5
TE-C5	110/04/28	<0.050	<0.050	<0.050	<0.100	<0.050	<0.050	39.4
	110/08/12	<0.050	<0.050	<0.050	<0.100	<0.050	<0.050	9.5
	110/08/19	<0.050	<0.050	<0.050	<0.100	<0.050	<0.050	12.5
	110/08/26	<0.050	<0.050	<0.050	<0.100	<0.050	<0.050	14.7
	110/09/09	<0.050	<0.050	<0.050	<0.100	<0.050	<0.100	12.3
	110/09/23	<0.050	<0.050	<0.050	<0.100	<0.050	<0.100	5.3
	110/10/28	<0.050	<0.050	<0.050	<0.100	<0.050	<0.050	13.1
	110/11/25	<0.050	<0.050	<0.050	<0.100	<0.050	<0.050	16.6
	110/12/23	<0.050	<0.050	<0.050	<0.100	<0.050	<0.050	20.6
	111/02/17	<0.050	<0.050	<0.050	<0.100	<0.050	<0.050	5.4
OW-07	110/04/28	<0.050	<0.050	<0.050	<0.100	<0.050	<0.050	145
	110/08/12	<0.050	<0.050	<0.050	<0.100	<0.050	<0.050	60.7
	110/08/19	<0.050	<0.050	<0.050	<0.100	<0.050	<0.050	41.3
	110/08/26	<0.050	<0.050	<0.050	<0.100	<0.050	<0.050	30.0
	110/09/09	<0.050	<0.050	<0.050	<0.100	<0.050	0.190	219
	110/09/23	<0.050	<0.050	<0.050	<0.100	<0.050	<0.100	9.8
	110/10/28	<0.050	<0.050	<0.050	<0.100	<0.050	<0.050	216
	110/11/25	<0.050	<0.050	<0.050	<0.100	<0.050	<0.050	30.2
	110/12/23	<0.050	<0.050	<0.050	<0.100	<0.050	<0.050	113.0
	111/02/17	<0.050	<0.050	<0.050	<0.100	<0.050	<0.050	5.8
OW-25	110/04/28	<0.050	<0.050	<0.050	<0.100	<0.050	<0.050	92.0
	110/08/12	<0.050	<0.050	<0.050	<0.100	<0.050	<0.050	19.2
	110/08/19	<0.050	<0.050	<0.050	<0.100	<0.050	<0.050	24.3
	110/08/26	<0.050	<0.050	<0.050	<0.100	<0.050	<0.050	21.6
	110/09/09	<0.050	<0.050	<0.050	<0.100	<0.050	<0.100	37.7
	110/09/23	<0.050	<0.050	<0.050	<0.100	<0.050	<0.100	6.7
	110/10/28	<0.050	<0.050	<0.050	<0.100	<0.050	<0.050	25.9
	110/11/25	<0.050	<0.050	<0.050	<0.100	<0.050	<0.050	21.1
	110/12/23	<0.050	<0.050	<0.050	<0.100	<0.050	<0.050	20.9
	111/02/17	<0.050	<0.050	<0.050	<0.100	<0.050	<0.050	86.9

註：1.單位：mg/L。

2.測值粗體表示超過第二類地下水污染監測標準，測值粗體陰影表示超過第二類地下水污染管制標準。



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

表 16、「中油林園廠」100 油槽區地下水定期監測成果(第 2 年)

井號	採樣日期	苯	甲苯	乙苯	間,對二甲苯	鄰,二甲苯	萘	總石油碳 氫化合物
第二類地下水 污染管制標準		0.050	10	7.0	100		0.40	10
第二類地下水 污染監測標準		0.025	5	3.5	50		0.20	5
TE-C5	111/04/07	<0.050	<0.050	<0.050	<0.100	<0.050	<0.050	12.9
	111/05/05	<0.050	<0.050	<0.050	<0.100	<0.050	<0.050	18.7
	111/06/09	<0.001	<0.001	<0.001	<0.002	<0.001	<0.001	10.2
	111/07/07	<0.001	<0.001	<0.001	<0.002	<0.001	<0.001	19.0
	111/08/04	0.0024	<0.001	<0.001	<0.002	<0.001	<0.001	24.1
	111/09/01	<0.001	<0.001	<0.001	<0.002	<0.001	<0.001	25.6
	111/10/06	<0.001	<0.001	<0.001	<0.002	<0.001	<0.001	18.5
	111/11/03	<0.001	<0.001	<0.001	<0.002	<0.001	<0.001	13.1
	111/12/01	<0.001	<0.001	<0.001	<0.002	<0.001	<0.001	11.1
	112/01/05	<0.001	<0.001	<0.001	<0.002	<0.001	<0.001	11.7
OW-07	112/02/02	<0.001	<0.001	<0.001	<0.002	<0.001	<0.001	35.7
	111/04/07	<0.050	<0.050	<0.050	<0.100	<0.050	<0.050	24.4
	111/05/05	<0.050	<0.050	<0.050	<0.100	<0.050	<0.050	34.5
	111/06/09	0.0022	<0.100	<0.100	0.0097	0.009	0.0021	37.8
	111/07/07	<0.010	<0.010	<0.010	<0.020	<0.010	<0.010	30.6
	111/08/04	0.0131	<0.010	<0.010	<0.020	<0.010	<0.010	36.5
	111/09/01	0.0023	<0.001	<0.001	0.0085	0.0078	0.0033	60.9
	111/10/06	0.0101	<0.001	<0.001	0.0113	0.0106	0.0061	53.7
	111/11/03	0.0021	<0.001	<0.001	0.0077	0.0071	0.0025	26.6
	111/12/01	0.0014	<0.001	0.003	0.004	0.0037	<0.001	48.1
OW-25	112/01/05	0.0012	<0.001	0.002	0.0027	0.0023	0.0012	52.3
	112/02/02	<0.001	<0.001	<0.001	<0.002	<0.001	0.0028	131
	111/04/07	<0.050	<0.050	<0.050	<0.100	<0.050	<0.050	184
	111/05/05	<0.050	<0.050	<0.050	<0.100	<0.050	<0.050	18.0
	111/06/09	<0.001	<0.001	0.0015	0.002	<0.001	<0.001	110
	111/07/07	<0.001	<0.001	0.0022	0.003	<0.001	<0.001	14.1
	111/08/04	0.0066	<0.001	0.0020	0.0027	0.0025	<0.001	36.6
	111/09/01	<0.001	<0.001	<0.001	0.0024	<0.001	<0.001	59.9
	111/10/06	0.0020	<0.001	<0.001	0.0024	<0.001	<0.001	30.8
	111/11/03	<0.001	<0.001	0.0011	<0.002	<0.001	<0.001	12.7
OW-26	111/12/01	<0.001	<0.001	0.0011	<0.002	<0.001	<0.001	21.3
	112/01/05	<0.001	<0.001	<0.001	<0.002	<0.001	<0.001	21.6
	112/02/02	<0.001	<0.001	<0.001	<0.002	<0.001	<0.001	35.5
	111/04/07	<0.050	<0.050	<0.050	<0.100	<0.050	<0.050	2.4
	111/05/05	<0.050	<0.050	<0.050	<0.100	<0.050	<0.050	4.6
	111/06/09	<0.001	<0.001	<0.001	<0.002	<0.001	<0.001	<1.0
	111/07/07	<0.001	<0.001	<0.001	<0.002	<0.001	<0.001	2.7
	111/08/04	0.0036	<0.001	<0.001	<0.002	<0.001	0.0015	6.2
	111/09/01	<0.001	<0.001	<0.001	<0.002	<0.001	<0.001	14.1
	111/10/06	0.0014	<0.001	<0.001	<0.002	<0.001	0.0034	14.7
OW-26	111/11/03	<0.001	<0.001	<0.001	<0.002	<0.001	<0.001	8.7
	111/12/01	<0.001	<0.001	<0.001	<0.002	<0.001	<0.001	8.2
	112/01/05	<0.001	<0.001	<0.001	<0.002	<0.001	<0.001	5.1
	112/02/02	<0.001	<0.001	<0.001	<0.002	<0.001	<0.001	12.9

註：1.單位：mg/L。

2.測值粗體表示超過第二類地下水污染監測標準，測值粗體陰影表示超過第二類地下水污染管制標準。



六、結果與討論

TE-C5	OW-25	OW-07
		
監測日期：110/08/12	監測日期：110/08/12	監測日期：110/08/12
		
監測日期：110/08/19	監測日期：110/08/19	監測日期：110/08/19
		
監測日期：110/08/26	監測日期：110/08/26	監測日期：110/08/26
		
監測日期：110/09/09	監測日期：110/09/09	監測日期：110/09/09
		
監測日期：110/09/23	監測日期：110/09/23	監測日期：110/09/23
圖48、「中油林園廠」100油槽區 地下水定期監測照片		
國立陽明交通大學 NATIONAL YANG MING CHIAO TUNG UNIVERSITY 台灣中油股份有限公司 CPC Corporation, Taiwan 捷力英環境有限公司		



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

TE-C5		OW-25		OW-07			
							
監測日期：110/10/28		監測日期：110/10/28		監測日期：110/10/28			
							
監測日期：110/11/25		監測日期：110/11/25		監測日期：110/11/25			
							
監測日期：110/12/23		監測日期：110/12/23		監測日期：110/12/23			
TE-C5		OW-07		OW-25		OW-26	
							
監測日期：111/02/17		監測日期：111/02/17		監測日期：111/02/17		監測日期：111/02/17	
							
監測日期：111/04/07		監測日期：111/04/07		監測日期：111/04/07		監測日期：111/04/07	

圖48、「中油林園廠」100油槽區
地下水定期監測照片(續1)

國立陽明交通大學
NATIONAL YANG MING CHIAO TUNG UNIVERSITY

台灣中油股份有限公司
CPC Corporation, Taiwan

捷力英環境有限公司
捷力英環境有限公司



六、結果與討論

監測日期	TE-C5	OW-07	OW-25	OW-26
111/05/05				
111/06/09				
111/07/07				
111/08/04				
111/09/01				

圖48、「中油林園廠」100油槽區
地下水定期監測照片(續2)



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

監測日期	TE-C5	OW-07	OW-25	OW-26
111/10/06				
111/11/03				
111/12/01				
112/01/05				
112/02/02				

圖48、「中油林園廠」100油槽區
地下水定期監測照片(續3)



(2) GIT+RAP 試驗成效監測

由於本場址超過污染管制標準項目為總石油碳氫化合物，且確認污染物應為柴油類油品，因此為加速污染整治成效，本計畫第2年於距模場5及15公尺各增設1口整治井，合計2口，井號為HFS-W01及HFS-W02，位置詳圖38，本計畫於井中執行2批次GIT+RAP試驗(流程詳見圖36)，為評估試驗成效，規劃地下水監測作業。

每批次GIT+RAP作業成效之地下水監測時機為GIT施作前、施作後第1、2週各執行1次地下水採樣檢測作業，合計3次，檢測項目為苯、甲苯、乙苯、二甲苯、萘及總石油碳氫化合物；前述3次檢測完成後會在井中置入RAP，置入1個後取出RAP，本計畫規劃於RAP置入4週及取出後各執行1次地下水採樣檢測作業，總計5次。

本計畫第2年(111年)第1次GIT試驗於111年8月執行，第2次GIT試驗於111年11月執行，試驗井地下水濃度變化趨勢圖詳見圖49，由圖中可看出地下水總石油碳氫化合物於第1次GIT試驗後濃度有明顯上升，之後配合HFS系統及井中置放RAP之吸附作業，地下水總石油碳氫化合物濃度有逐漸下降趨勢，於第2次GIT試驗後濃度仍然有明顯上升，本計畫GIT+RAP試驗井地下水監測成果詳見表17，GIT+RAP試驗井地下水監測照片詳見圖50。

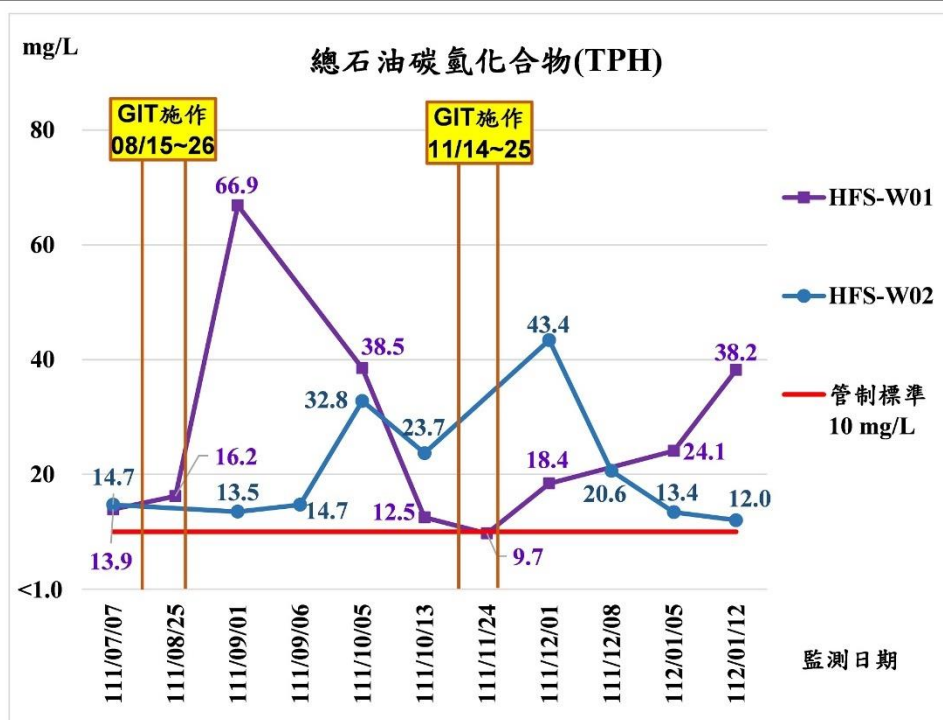


圖49、「中油林園廠」100油槽區GIT+RAP試驗井地下水總石油碳氫化合物濃度變化趨勢圖



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

表 17、「中油林園廠」100 油槽區 GIT+RAP 試驗井地下水監測成果

井號	採樣日期	苯	甲苯	乙苯	間,對二甲苯	鄰,二甲苯	萘	總石油碳氫化合物
第二類地下水污染管制標準		0.050	10	7.0	100		0.40	10
第二類地下水污染監測標準		0.025	5	3.5	50		0.20	5
HFS-W01	111/07/07 (試驗前)	<0.010	<0.010	<0.010	<0.020	<0.010	<0.010	13.9
	111/08/25 (試驗後第 1 週)	<0.001	<0.001	<0.001	<0.002	<0.001	<0.001	16.2
	111/09/01 (試驗後第 2 週)	<0.001	<0.001	<0.001	<0.002	<0.001	<0.001	66.9
	111/10/05 (RAP 放置 4 週後)	<0.001	<0.001	<0.001	<0.002	<0.001	<0.001	38.5
	111/10/13 (RAP 取出後)	<0.001	<0.001	<0.001	<0.002	<0.001	<0.001	12.5
	111/11/24 (試驗後第 1 週)	<0.001	<0.001	<0.001	<0.002	<0.001	<0.001	9.7
	111/12/01 (試驗後第 2 週)	<0.001	<0.001	<0.001	<0.002	<0.001	<0.001	18.4
	112/01/05 (RAP 放置 4 週後)	<1.0	<1.0	<1.0	<2.0	<1.0	<1.0	24.1
	112/01/12 (RAP 取出後)	<1.0	<1.0	<1.0	<2.0	<1.0	<1.0	38.2
HFS-W02	111/07/07 (試驗前)	<0.010	<0.010	<0.010	<0.020	<0.010	<0.010	14.7
	111/09/01 (試驗後第 1 週)	<0.001	<0.001	<0.001	<0.002	<0.001	<0.001	13.5
	111/09/06 (試驗後第 2 週)	<0.001	<0.001	<0.001	<0.002	<0.001	<0.001	14.7
	111/10/05 (RAP 放置 4 週後)	<0.001	<0.001	<0.001	<0.002	<0.001	<0.001	32.8
	111/10/13 (RAP 取出後)	<0.001	<0.001	<0.001	<0.002	<0.001	<0.001	23.7
	111/12/01 (試驗後第 1 週)	<0.001	<0.001	<0.001	<0.002	<0.001	<0.001	43.4
	111/12/08 (試驗後第 21 週)	<0.001	<0.001	<0.001	<0.002	<0.001	<0.001	20.6
	112/01/05 (RAP 放置 4 週後)	<1.0	<1.0	<1.0	<2.0	<1.0	<1.0	13.4
	112/01/12 (RAP 取出後)	<1.0	<1.0	<1.0	<2.0	<1.0	<1.0	12.0

註：1.單位：mg/L。

2.測值粗體表示超過第二類地下水污染監測標準，測值粗體陰影表示超過第二類地下水污染管制標準。



六、結果與討論

監測時機	HFS-W01	HFS-W02
GIT試驗前	 監測日期：111/07/07	 監測日期：111/07/07
GIT試驗後1週	 監測日期：111/08/25	 監測日期：111/09/01
GIT試驗後2週	 監測日期：111/09/01	 監測日期：111/09/06
RAP置於井中4週	 監測日期：111/10/06	 監測日期：111/10/06
RAP取出後	 監測日期：111/10/13	 監測日期：111/10/13
圖50、「中油林園廠」100油槽區 GIT+RAP試驗井地下水監測照片		國立陽明交通大學 NATIONAL YANG MING CHIAO TUNG UNIVERSITY 台灣中油股份有限公司 CPC Corporation, Taiwan 捷力英環境有限公司 CMC



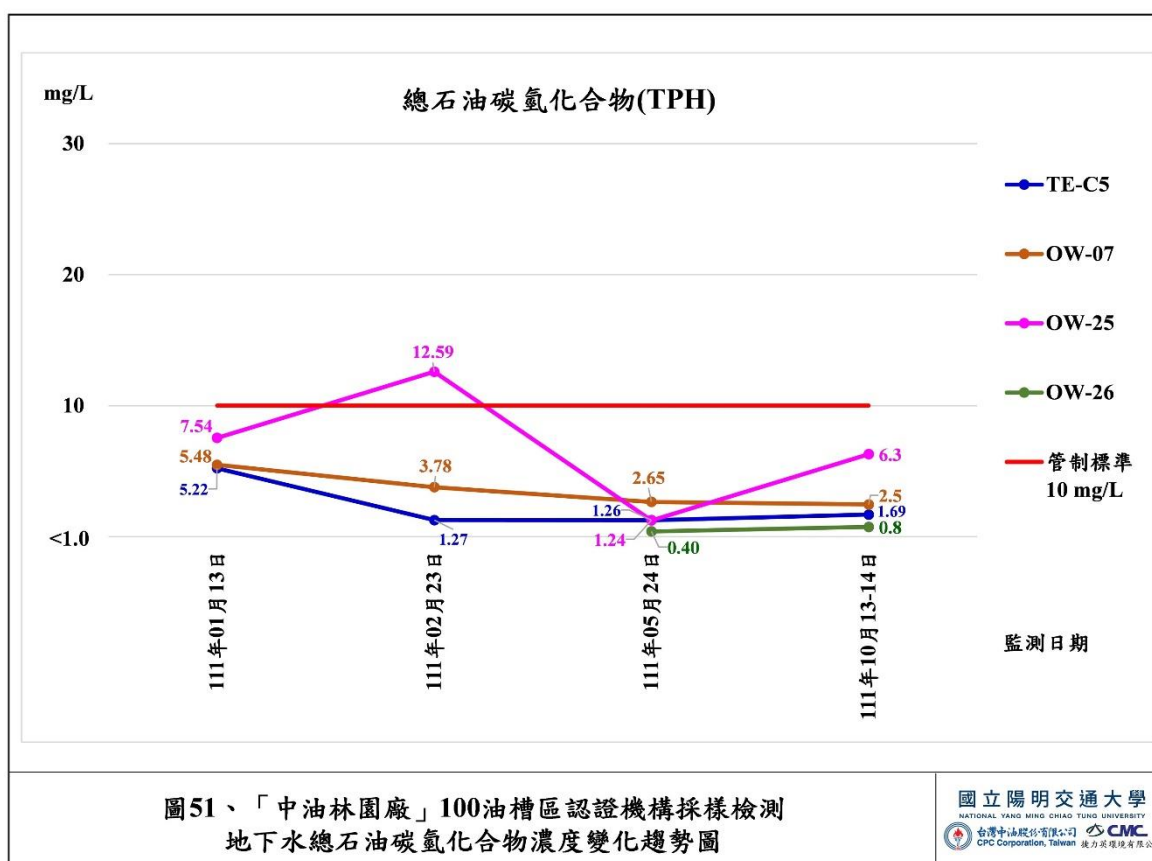
應用可再生型吸附顆粒(RAP)搭配多介質水力沖洗循環系統(HFS)去除受 LNAPL 污染之土壤及地下水

監測時機	HFS-W01	HFS-W02
GIT試驗後1週	 監測日期：111/11/24	 監測日期：111/12/01
GIT試驗後2週	 監測日期：111/12/01	 監測日期：111/12/08
RAP置於井中4週	 監測日期：112/01/05	 監測日期：112/01/05
RAP取出後	 監測日期：112/01/12	 監測日期：112/01/12
圖50、「中油林園廠」100油槽區 GIT+RAP試驗井地下水監測照片(續)		國立陽明交通大學 NATIONAL YANG MING CHIAO TUNG UNIVERSITY 台灣中油股份有限公司 CPC Corporation, Taiwan 捷力英環境有限公司 JELLYEING ENVIRONMENTAL CO., LTD.



(3) 認證機構採樣檢測

本計畫於第 1 年期末委由認證機構針對 3 口監測井(井號：TE-C5、OW-07、OW-25)，於 111 年 01、02 月執行 2 次地下水採樣檢測作業，第 2 年則規劃於期中前針對 4 口監測井(井號：TE-C5、OW-07、OW-25、OW-26)執行 2 次(111 年 05、10 月)地下水採樣檢測作業，檢測項目為苯、甲苯、乙苯、二甲苯及總石油碳氫化合物，認證機構洗井及採樣方式為微洗井，檢測結果僅監測井 OW-07 曾於 111 年 02 月之總石油碳氫化合物(TPH)超過第二類地下水污染管制標準，監測井 TE-C5、OW-07、OW-25 皆曾檢出 TPH 測值超過第二類地下水污染監測標準，本場址委由認證機構採樣檢測之地下水總石油碳氫化合物測值繪製變化趨勢圖詳見圖 51，監測成果詳見表 18。





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

表 18、「中油林園廠」100 油槽區地下水認證機構採樣檢測成果

井號	採樣日期	苯	甲苯	乙苯	二甲苯	總石油碳氫化合物
第二類地下水 污染管制標準		0.050	10	7.0	100	10
第二類地下水 污染監測標準		0.025	5	3.5	50	5
TE-C5	111/01/13	ND<0.00041	<0.001	ND<0.00040	ND<0.00057	5.22
	111/02/23	ND<0.00041	ND<0.00037	ND<0.00040	0.00161	1.268
	111/05/24	<0.0100	<0.0100	<0.0100	<0.0300	1.26
	111/10/13	ND<0.00041	ND<0.00037	ND<0.00040	0.00108	1.69
OW-07	111/01/13	0.0017	0.00146	<0.001	0.0366	5.48
	111/02/23	0.0015	<0.001	ND<0.00040	0.0206	3.7774
	111/05/24	<0.0100	<0.0100	<0.0100	<0.0300	2.65
	111/10/13	<0.00100	<0.00100	ND<0.00040	0.00451	2.46
OW-25	111/01/13	0.0202	<0.001	<0.001	0.0129	7.54
	111/02/23	ND<0.00041	<0.001	ND<0.00040	0.0077	12.5876
	111/05/24	<0.0100	<0.0100	<0.0100	<0.0300	1.24
	111/10/14	ND<0.00041	<0.00100	ND<0.00041	0.00272	6.30
OW-26	111/05/24	ND<0.00042	ND<0.00040	ND<0.00037	ND<0.00115	<0.500(0.402)
	111/10/14	ND<0.00041	ND<0.00037	ND<0.00040	ND<0.00057	0.75

註：1.單位：mg/L。

2.測值粗體表示超過第二類地下水污染監測標準，測值粗體陰影表示超過第二類地下水污染管制標準。



3. 土壤定期監測

土壤定期監測規劃採樣點數 3 點，由中油公司協助採樣及檢測，採樣點位詳見圖 38，採樣深度至地表下 6 公尺，配合現場以人工試挖至 2.4 m 後再開始土壤採樣作，採集樣品每 0.6 公尺以 FID 篩測，每點選篩測值最高段分析，檢測項目為苯、甲苯、乙苯、二甲苯及總石油碳氫化合物，第 1 年(110 年)之監測頻率為期中(110/09/23)和期末(110/11/25)各採樣檢測一次，第 2 年(111 年)之監測頻率為每季一次，惟第 2 年第 3 季因採樣機具故障由 111 年 9 月延至 111 年 10 月執行。

由土壤定期監測成果可看出苯、甲苯、乙苯及二甲苯之監測結果皆低於定量偵測極限值，僅總石油碳氫化合物超過土壤污染管制標準，土壤定期監測總石油碳氫化合物濃度變化趨勢圖詳見圖 52，由定期監測結果顯示，距離 HFS 系統最遠(約 18 公尺)土壤採樣點 S03 之 TPH 濃度略有下降，而 111 年 03 及 06 月因配合現場環境及施工略調整採樣點位置詳見圖 38，距離 HFS 系統最近(約 11 公尺)土壤採樣點 S01 之 TPH 濃度也有明顯下降，顯示循環系統將地層中之污染聚集至系統周圍再加以去除。本計畫之土壤定期監測成果詳見表 19，現場採樣照片詳見圖 53。

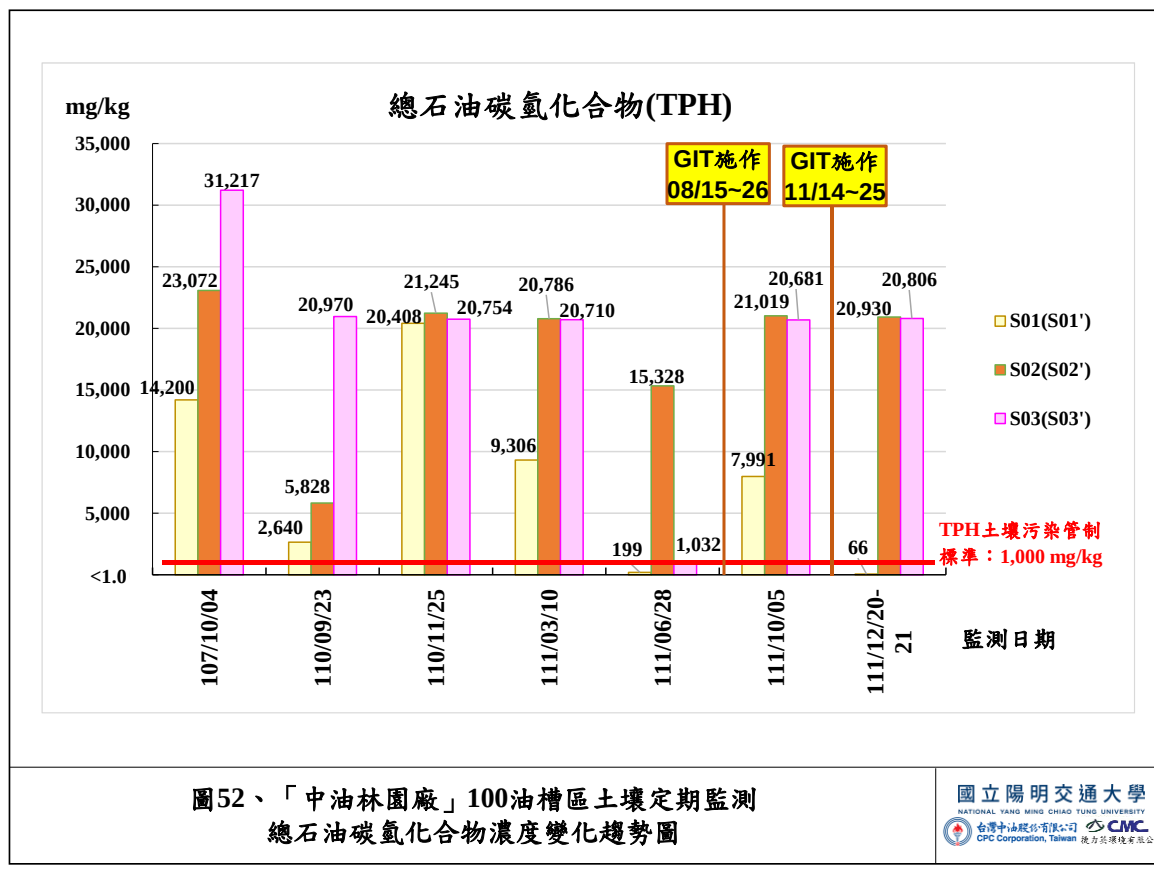


圖52、「中油林園廠」100油槽區土壤定期監測
總石油碳氫化合物濃度變化趨勢圖



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

表 19、「中油林園廠」100 油槽區土壤定期監測成果

採樣日期	採樣點號	送樣 深度(m)	苯	甲苯	乙苯	間,對- 二甲苯	鄰- 二甲苯	總石油碳氫化合物	
								TPHg	TPHd
土壤污染管制標準			5	500	250	500		1000	
110/09/23	S01	4.3~4.4	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0	970	1,670
	S02	4.5~4.6	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0	367	5,461
	S03	4.3~4.4	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0	970	>20,000
110/11/25	S01	4.4~4.5	1.8	<1.0	<1.0	2	<1.0	>7,600	12,808
	S02	4.3~4.4	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0	1,245	>20,000
	S03	4.3~4.4	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0	754	>20,000
111/03/10	S01	4.7~4.8	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0	4758	4548
	S02’	4.4~4.5	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0	786	>20,000
	S03’	4.3~4.4	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0	710	>20,000
111/06/28	S01’	4.4~4.5	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0	ND	199
	S02’	4.4~4.5	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0	624	14704
	S03’	4.7~4.8	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0	31	1001
111/10/05	S01	4.5~4.6	2.2	12	48	18	18	5098	2893
	S02	4.5~4.6	<1.0	<1.0	<1.0	1.1	<1.0	1019	>20,000
	S03	4.7~4.8	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0	681	>20,000
111/12/20- 21	S01	4.7~4.8	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0	ND	66
	S02’	4.4~4.5	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0	930	>20,000
	S03’	4.4~4.5	2.1	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0	806	>20,000

註：1.單位：mg/kg。

2.測值粗體陰影表示超過土壤污染管制標準。

3.總石油碳氫化合物 TPHg、TPHd 如顯示>7,600 mg/kg 或>20,000 mg/kg 表示樣品大於定量範圍，樣品可能存在自由相。

4.111 年 03 及 06 月配合現場環境及施工略調整點位，調整採樣點號加「'」表示。



六、結果與討論

採樣日期	S01	S02	S03
110/09/23			
110/11/25			
111/03/10			
111/12/20 -21			
圖53、「中油林園廠」100油槽區 土壤定期監測照片			國立陽明交通大學 NATIONAL YANG MING CHIAO TUNG UNIVERSITY 台灣中油股份有限公司 CPC Corporation, Taiwan 捷力英環境有限公司



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

(五) RAP 實驗室再生驗證

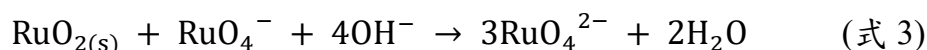
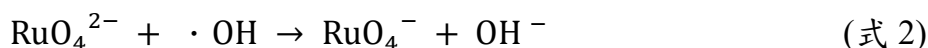
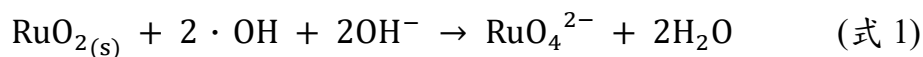
為進一步驗證本計畫所使用之材料 RAP 具有再生效果，分為兩部分實驗。第一部分先以過去工業廢水處理的 RAP 吸附/氧化經驗為基礎，延續第一年計畫採用苯甲酸作為目標吸附質，以較強氧化能力的臭氧進行再生了解其最適操作參數。第二部分則模擬現場的 TPH 地下水污染水樣，同時考量未來方便現地實施，以較弱氧化能力的空氣進行再生。

臭氧再生：選用苯甲酸作為目標吸附質，苯甲酸在特性上屬於難吸附之有機物，較一些易吸附物質作為吸附質時更容易使吸附劑達到飽和或需再生狀態，並找出最佳之再生條件。

空氣再生：使用柴油製備合成廢水作為目標吸附質，柴油(diesel fuel)主要成分是壬烷 nonane(C₉H₂₀)到十六烷 hexadecane(C₁₆H₃₄)，廣義為 9 到 18 個碳原子的鏈烷、環烷或芳烴所組成，屬於高碳數之石油碳氫化合物。更換吸附質可模擬實際模場污染狀態，而搭配空氣再生下，可節省將 RAP 洩出送回實驗室再生之人力、物力，直接於現地進行再生。為此，此部分著重在模擬現場不加藥、不加溫情況下找出更加經濟、有效之再生條件。

1. RAP 元素分析

RAP 是在活性碳表面負載貴金屬鈦等複合金屬，而貴金屬鈦在與臭氧反應後形成高價態之鈦氧化物，亦可作為催化臭氧產生更多氫氧自由基之催化劑。鈦金屬最常見之氧化物為二氧化鈦，一般金屬容易在酸性環境溶出，而二氧化鈦(RuO₂)在鹼性環境下受臭氧形成之氫氧自由基氧化之後，形成溶於水之過鈦酸離子(RuO₄²⁻)，且 RuO₂ 在與 RuO₄²⁻氧化形成之 RuO₄⁻反應會加速自身氧化。如式 1、2、3。許多文獻證實 RuO₄²⁻為具有高氧化力之氧化劑，可氧化胺類化合物、氯仿、硝基甲烷等難分解有機物。





為了解 RAP 實際金屬組成和負載金屬量，將活性碳以及 RAP 先置入高溫爐以 550°C 煅燒後，以環檢所公告之王水消化法使金屬溶出，後取溶液之上澄液以 ICP-OES 分析，分析結果如表 20，從分析結果得知活性碳在改質前表面就有少量金屬-M，而 RAP 經改質程序後，表面負載重量百分比佔 0.0053% (w/w) 之 Ru、0.072% (w/w) 之金屬-M、0.0012% (w/w) 之 Zn、0.024% (w/w) 之金屬-A。

表 20、RAP 與活性碳之金屬成分負載量分析

元素	RAP % (w/w)	活性碳 % (w/w)
Ru	0.0053	0.0000
M*	0.0720	0.0012
Zn	0.0012	0.0011
A*	0.0240	0.0000

* M、A 為不公開金屬

本表數值皆為三重覆取平均值

MDL= 0.1~50 ug/L(依元素及實際狀況不同，供參考)

2. 再生參數探討-臭氧再生

RAP 臭氧再生之初篩試驗為利用少量 RAP (1 g) 以批次吸附 1 天後進行再生(經驗證後此吸附條件在進行 1 天後達吸附平衡)，進行最適操作參數的篩選，比較不同再生條件下，RAP 之再生效率，如：不同再生溫度、pH、臭氧流量及再生時間。臭氧再生流程如圖 54 示，以純氧供給臭氧製造機透過高壓放電原理產生臭氧氣體，並調整不同臭氧進氣質量流率、再生溫度、pH 值及時間等測試參數，找尋最佳臭氧再生條件。

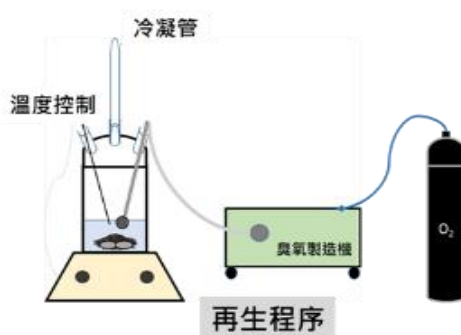


圖 54、臭氧再生之實驗流程

(1) 臭氧進氣質量流率

本研究分別將臭氧進氣質量流率調整至 1.25、2.42、2.8 g O₃/h，以觀察不同質量流率對 RAP 以臭氧再生 RE 的影響。由於水中臭氧溶解度才是實際的反應參數，因此於實驗室以常溫曝臭氧 1 小時測試不同臭氧進氣質量流率的水中



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

溶解臭氧濃度。實驗結果如表 21 所示，進氣流率為 1.25、2.42、2.8 g O₃/h 時，對應水中臭氧溶解度分別為 1.2、2.3、2.66 mg/L，得知臭氧進氣流率與水中溶解臭氧濃度成正比關係。再生數據顯示(圖 55)，質量流率為 1.25、2.42、2.8 g O₃/h 之 RE 分別為 84、98、100%。再生效率隨臭氧進氣質量流率增加亦隨之提高，故選擇能使水中臭氧濃度最高之 2.8 g O₃/h 臭氧進氣質量流率作為再生最適參數。

表 21、不同臭氧進氣流率對應之水中臭氧溶解濃度

臭氧進氣質量流率 (O ₃ g/h)	水中溶臭氧濃度 (mg/L)
1.25	1.2
2.42	2.3
2.8	2.66

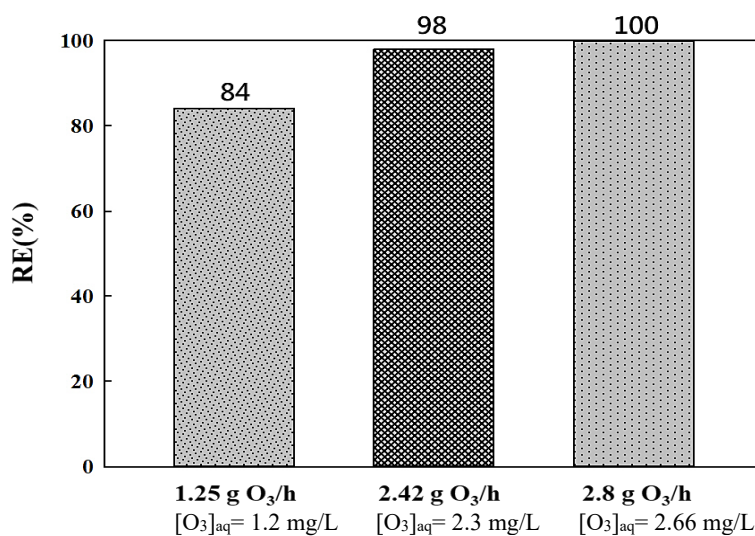


圖 55、臭氧進氣質量流率對臭氧再生 RAP 之 RE 影響

(2) 操作溫度

數據顯示(圖 56)，溫度於 25、50、80°C 環境下，RE 由高至低分別為 80°C (100%)、25°C (53%)及 50°C (36%)，而水中臭氧濃度隨溫度升高而降低，25°C、50°C 及 80°C 下水中臭氧濃度分別為 2.66、0.14、0.024 mg/L。推測在高溫環境下，雖水中臭氧量最低，但卻能提高 RAP 上之貴金屬鈦活性，且在高溫下也有利於吸附質從孔洞脫附到水溶液中，故選用 80°C 作為最適參數。

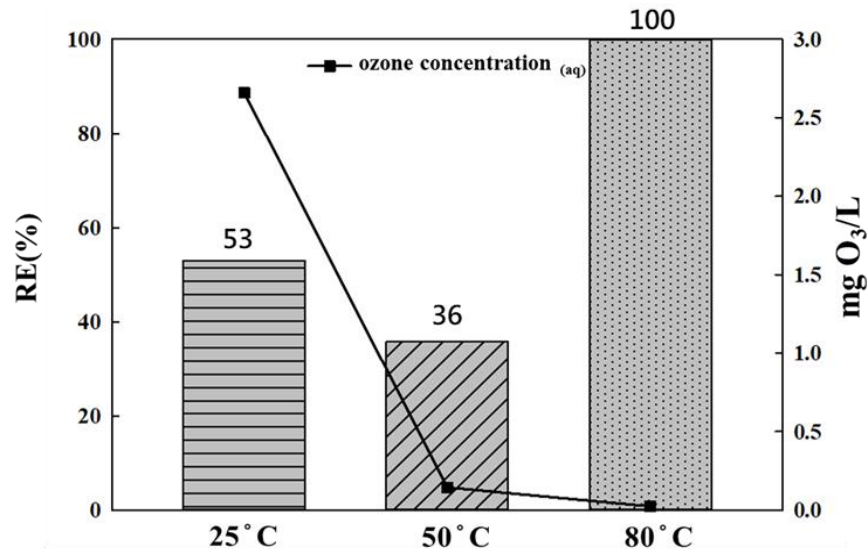


圖 56、不同操作溫度下對 RAP 臭氧再生 RE 之影響

(3) 操作 pH

將再生條件維持在 pH 5、7、8、9 以及 12 下，以觀察操作 pH 對 RAP 以臭氧再生 RE 的影響。實驗結果如圖 57 所示，pH 5、7、8、9、12 下之 RE 分別為 51、60、71、100、100%。而在 pH 9、12 環境下，RAP 以臭氧再生呈現之 RE 皆能達到 100%，故選用 pH 9 作為最適參數。

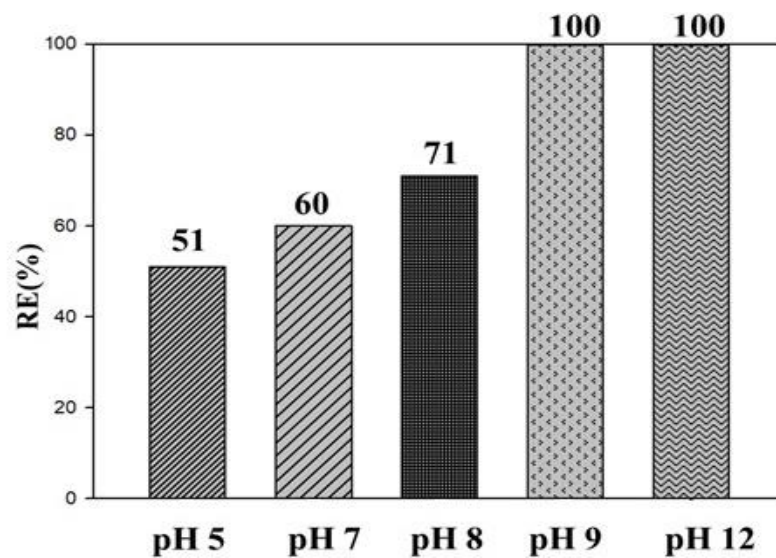


圖 57、不同操作 pH 下對 RAP 以臭氧再生 RE 之影響



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

(4) 再生時間

本試驗分別比較不同再生時間如 1、2、3 及 4 hr，觀察 RAP 於不同臭氧再生時間對 RE 的影響。結果顯示(圖 58)，再生時間 1、2、3 及 4 hr 下之 RE 分別為 38、83、87、100%。再生一小時由於與臭氧反應時間較短，且水中臭氧量未達穩定，造成再生效率較差(38%)，而從再生 2、3 及 4 hr 之 RE 結果可觀察出，在再生時間達 2 hr 後，大部分孔洞中之吸附質已被去除，並隨臭氧反應時間增加，RE 亦隨之提升(83%、87%及 100%)，故後續實驗以臭氧再生時間 4 hr 作為再生最適操作參數。

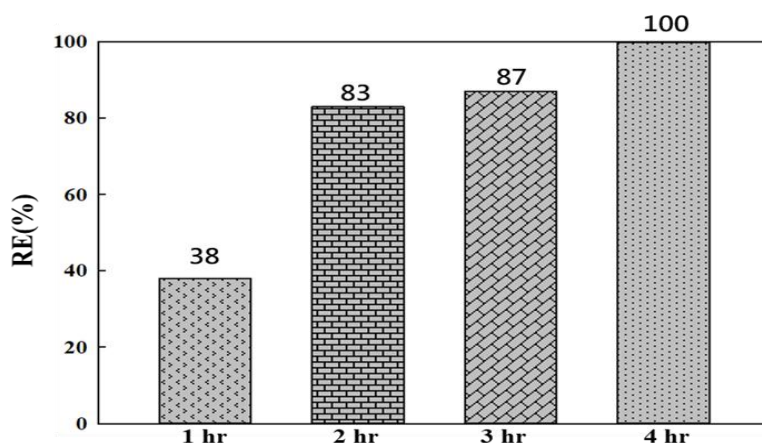


圖 58、再生時間對 RAP 臭氧再生 RE 之影響

3. 多次循環/再生之 RAP 吸附容量評估

本測試以連續流吸附評估 RAP 吸附容量，將其吸附至飽和後以前述所得之最適操作參數進行再生，經歷多次吸附/再生循環後，觀察其累積吸附量能否維持。RAP 持續 4 個吸附/再生循環的實驗結果如圖 59 所示，Fresh RAP 通過水量達 1150 BV 時，累積吸附量為 0.22 g COD/g RAP，再生後再一次進行連續流吸附(cycle 1)得到累積吸附量為 0.16 g COD/g RAP，而後持續進行三次吸附/再生 cycle，累積吸附量皆維持在 0.14 g COD/g RAP 上下，顯示已大到一定的穩定度。連續流試驗在再生後累積吸附量恢復效果略差於 Fresh RAP (RE≐70%)，推測可能是連續流試驗是將 RAP 吸附至近飽和後再進行再生，在再生過程中可能有積碳沉積在孔洞的情形，但若可以飽和度不要過高時即再生，或甚至可以同步吸附/再生，則吸附容量會和 Fresh RAP 差不多。

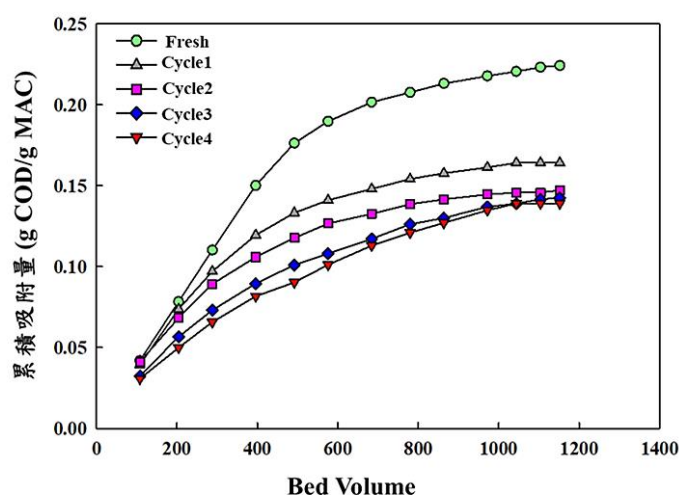


圖 59、RAP 連續流吸附容量探討

4. 再生參數探討-空氣再生

RAP 空氣再生之初篩試驗為利用現場洩出之少量 RAP (1 g)進行再生，固定於常溫、未調整 pH、曝氣流量為 4 L/min 之環境下比較不同再生時間，篩選出最經濟、有效之條件。

(1) 製備合成廢水模擬水樣

為模擬實際模場殘存高碳鏈物質所對應 COD 濃度，將 2.5 mL 柴油加入 5 L 自來水，使用紙巾吸附上浮油滴，曝氣 24 小時，此法製備為合成廢水①，COD 濃度約為 55 mg/L 詳如圖 60 所示。

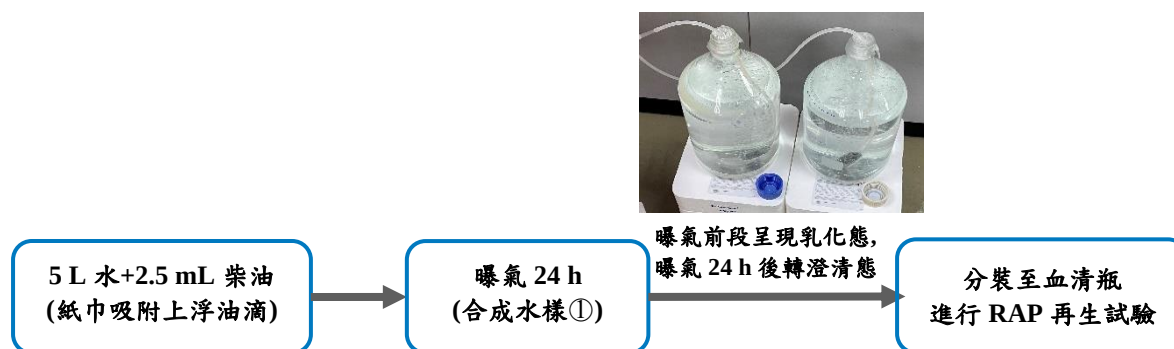


圖 60、合成廢水①模擬水樣製備流程



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

(2) 第一次 GIT/RAP - 空氣再生可行性評估試驗

取 1 g 於 HFS-W01 整治井第一次施作 GIT/RAP 放入燒杯後，再加入 300 mL 自來水並以磁石攪拌，於常溫、未調整 pH 及曝氣流量為 4 L/min 之環境下進行再生試驗，詳見圖 61。合成廢水①(有曝氣) COD 濃度為 55 mg/L，吸附試驗 RAP 用量為 0.1 g，再生時間分為 1、2 及 3 天，經式 4 求得再生效率 (RE) 進行比較整理如表 22，全新之 RAP 吸附量為 0.31 g COD/g RAP，現場洩出且未經再生之 RAP 吸附量僅剩 0.05 g COD/g RAP，再生 1、2 及 3 天之吸附量分別為 0.19、0.22 與 0.17 g COD/g RAP，吸附量相仿，故選擇再生 1 天作為再生最適參數。另依過去廢水處理經驗，經 HFS-W01 第一次 GIT/RAP 經臭氧再生 4 小時，得 0.22 g COD/g RAP 之 COD 吸附量。由此可證，空氣再生 1~3 天與臭氧再生 4 小時效果相仿。

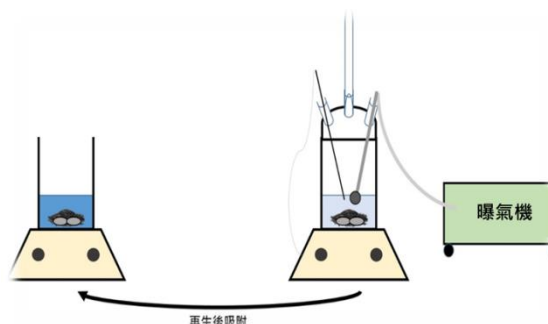


圖 61、合成廢水模擬水樣再生後吸附實驗示意

$$RE = \frac{q_{reg}}{q_{orig}} \times 100 \% \quad (\text{式 4})$$

q_{reg} = 再生後吸附量(g COD/g RAP)

q_{orig} = 初始吸附量(g COD/g RAP)

表 22、第一次 GIT/RAP 不同再生天數吸附量比較(合成水樣①)

實驗條件 \ 參數	批次	COD (mg/L)	q (吸附量)
合成水樣①(有曝氣)	-	55	N/A
全新 RAP	-	24	0.31 g COD/g RAP
未再生	HFS-W01 RAP (第一次 GIT/RAP)	50	0.05 g COD/g RAP
再生 1 day		36	0.19 g COD/g RAP
再生 2 day		33	0.22 g COD/g RAP
再生 3 day		38	0.17 g COD/g RAP
臭氧再生 4 hr		33	0.22 g COD/g RAP



選定再生天數後，分別取 1 g 於 HFS-W02 整治井第一次施作 GIT/RAP 執行再生試驗。合成水樣①COD 濃度為 55 mg/L，吸附試驗 RAP 用量為 0.1 g。由表 23 及圖 62 得知，HFS-W02 之 RAP 吸附量由 0.23 g COD/g RAP 提升至 0.38 g COD/g，顯示 RAP 以曝氣再生具有可行性。

表 23、第一次 GIT/RAP 之不同 RAP 再生前後數據(合成水樣①)

批次 (第一次 GIT/RAP)	RAP 再生前		RAP 再生後	
	COD (mg/L)	q (吸附量)	COD (mg/L)	q (吸附量)
HFS-W01 (5M)	50	0.05 g COD/g RAP	36	0.19 g COD/g RAP
HFS-W02 (15M)	19	0.23 g COD/g RAP	4	0.38 g COD/g RAP

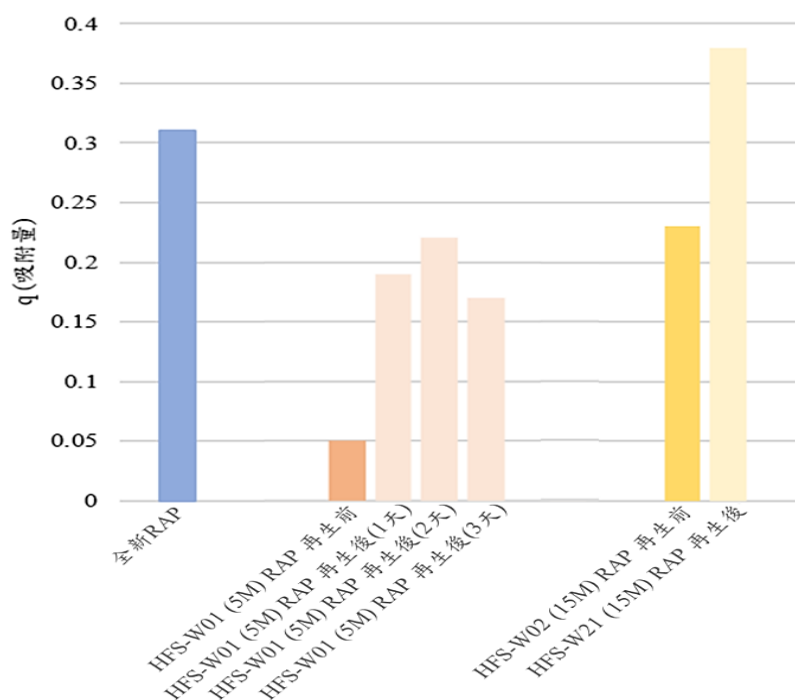


圖 62、第一次 GIT/RAP 之不同 RAP 再生前後吸附量(合成水樣①)

5. 第二次 GIT/RAP 樣品&尾氣 RAP - 空氣再生驗證

考量未來 RAP 在現地再生的可行性，比較以臭氧與曝空氣方式進行再生實驗並評估整體效益，以找出 RAP 再生最經濟且有效之條件，進而節省整治所投入的人力及物力。於實驗室選定全新 RAP、第一次尾氣 RAP、第二次尾氣 RAP、第二次施作 GIT/RAP 之 HFS-W01 (5M) RAP 及 HFS-W02 (15M) RAP 等五種可再生行顆粒活性炭，進行臭氧與空氣再生試驗，其中第一及第二次尾氣 RAP 係以臭氧再生 4 小時及空氣再生 24 小時兩種再生方式進行比較，而第二次施作



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

GIT/RAP 之 HFS-W01 (5M) RAP 及 HFS-W02 (15M) RAP 則以空氣再生 24 小時方式進行再生效能評估，再生完成後分別取樣分析 COD 及 TOC 數值，並求得再生前後吸附量。另合成水樣①因配製完後有曝氣 24 小時，促使 VOCs 揮發，使其 COD 偏低，造成實驗數據有偏差。故空氣再生驗證試驗另製備合成水樣②(無曝氣)進行測試，如圖 63 示。

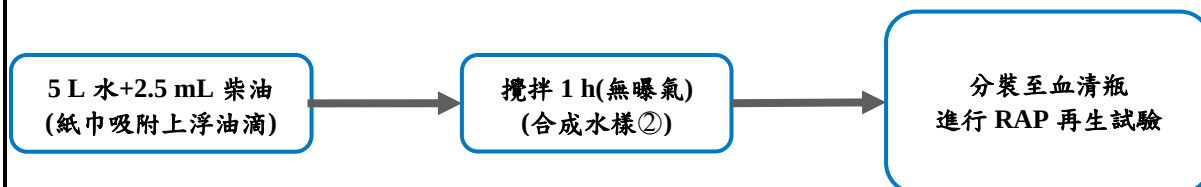


圖 63、合成水樣②模擬水樣製備流程

無曝氣之合成水樣②之 COD 濃度為 390 mg/L，TOC 濃度為 81.8 mg/L，吸附試驗 RAP 用量為 1 g。RAP 再生前後數據如圖 64、圖 65 及表 24，顯示 COD 和 TOC 的變化趨勢差不多。由表 24 可知，全新 RAP 吸附量為 0.32 g COD/g RAP 及 0.063 g TOC/g RAP，第一次尾氣 RAP 經空氣 24 小時再生與臭氧 4 小時再生後，其 COD 吸附量皆優於未再生的第一次尾氣 RAP (0.29 及 0.26 > 0.21 g COD/g RAP)；第二次尾氣 RAP 透過空氣 24 小時再生與臭氧 4 小時再生後，其 COD 吸附量皆較未再生的第二次尾氣 RAP 佳(0.26 及 0.28 > 0.15 g COD/g RAP)。第二次 GIT/RAP 之 HFS-W01 及 W02 RAP 經空氣再生 24 小時後，其 COD 吸附量亦有恢復一定效能(0.21 g COD/g RAP 提升至 0.23 及 0.27 g COD/g RAP)，若以臭氧再生 4 小時，則得 0.27 與 0.26 g COD/g RAP 之 COD 吸附量，效果亦優於未再生之 HFS-W01 及 W02 RAP (第二次 GIT/RAP)。

此外，於現場 HFS 系統因具有曝氣功能，所以溶氧較高，在運作期間監測過數次，溶氧均在 4~7 mg/L，相對於一般整治井溶氧只是 0~2 mg/L 的條件下，顯然可以大幅提昇 RAP 可持續氧化水中有機物和再生之功能。

綜上所述，RAP 以同步吸附氧化再生方式進行為可行性技術，其 RE 值與臭氧再生 4 小時媲美，以不加藥與不加溫等情況下，達成更經濟且有效之綠色再生條件，實現本計畫宗旨。



表 24、第二次 GIT/RAP 樣品&尾氣 RAP - 空氣再生數據(合成水樣②)

批次	條件	COD _i (mg/L)	COD _f (mg/L)	COD _q (g COD/g RAP)	TOC _i (mg/L)	TOC _f (mg/L)	TOC _q (g TOC/g RAP)
第一次 尾氣 RAP	未再生	390	180	0.21	81.8	54.8	0.027
	空氣 24 hr		105	0.29		40.6	0.041
	臭氧 4 hr		132	0.26		41.0	0.041
第二次 尾氣 RAP	未再生		240	0.15		52.1	0.030
	空氣 24 hr		128	0.26		42.9	0.039
	臭氧 4 hr		114	0.28		44.0	0.038
第二次 GIT/RAP HFS-W01 RAP (5M)	未再生		180	0.21		42.5	0.039
	空氣 24 hr		160	0.23		37.9	0.044
	臭氧 4 hr		122	0.27		34.6	0.047
第二次 GIT/RAP HFS-W02 RAP (15M)	未再生		180	0.21		43.3	0.039
	空氣 24 hr		120	0.27		38.8	0.043
	臭氧 4 hr		131	0.26		43.7	0.038

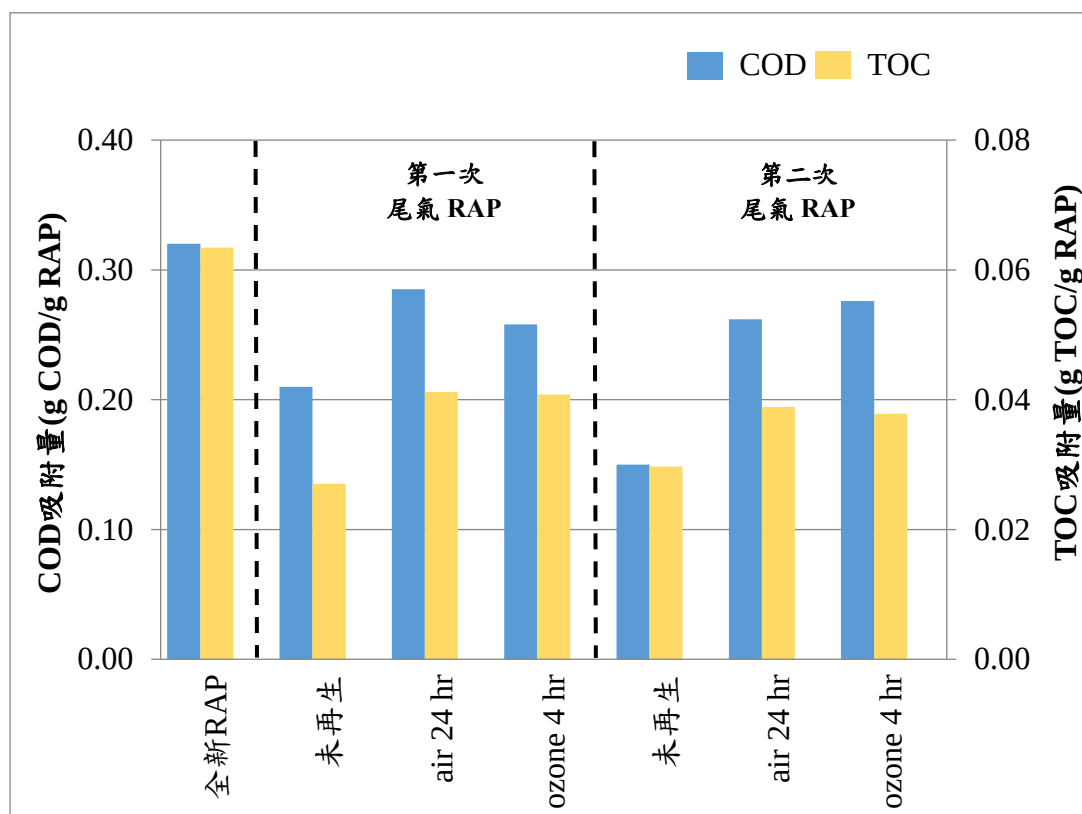


圖 64、兩次尾氣 RAP 於臭氧與空氣再生之前後吸附量比較(合成水樣②)



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

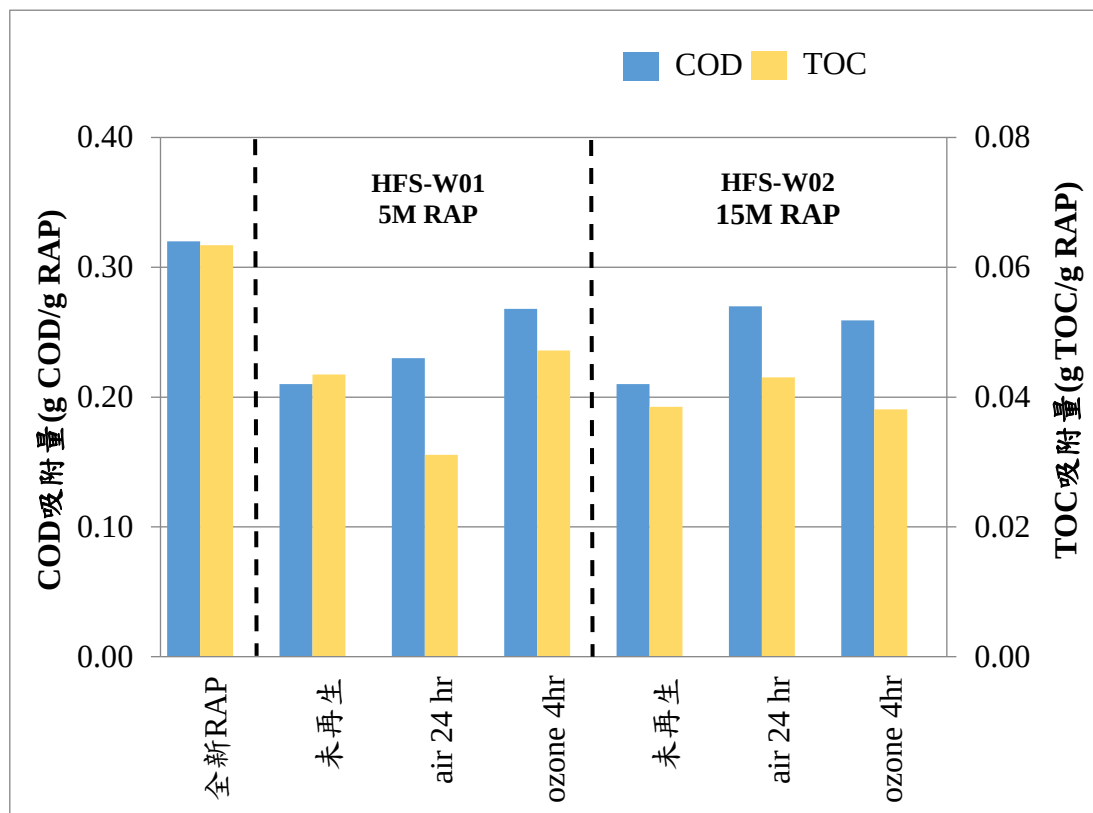


圖 65、第二次 GIT/RAP 之不同 RAP 再生前後吸附量比較(合成水樣②)

(六) 論文及專利

1. 國內期刊論文

周珊珊、簡偉倫、陳國源、陳銘健、吳芳鈴、郭宥妍（112 年 3 月出刊）。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。

2. 國內研討會

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

3. 專利

本計畫已於第一年度(110 年)申請專利，並在今年獲准，發明第 I799122 號：觸媒及其應用。



(七) 結論

1. 整治設施操作與維護

於 110 年 08 月 12 日啟動試運轉，試運轉三個月後各項設備皆正常運作，即時流量皆維持 1.6~2.0 之間，截至 112 年 3 月 2 日止系統累計總處理量達 15,975 噸。且於試運轉三個月後，111 年 8 月 22~26 日在模場區的 5 口地下水井中放置自計式水位計，測試系統影響半徑，由井中地下水位變化曲線可看出 HFS 系統對周圍監測井有造成明顯水位洩降曲線。

2. 定期監測

- (1) 尾氣監測：每月以 PID 量測 RAP 尾氣出口測值皆<5 ppm。
- (2) 地下水監測：苯、甲苯、乙苯及二甲苯之監測結果皆低於定量偵測極限值，而 TPH 皆超過第二類地下水污染監測及污染管制標準，目前場址地下水污染受到水力循環系統影響，地下水 TPH 濃度有明顯上下起伏趨勢，但整體總濃度是有下降趨勢。
- (3) 土壤監測：苯、甲苯、乙苯及二甲苯之監測結果皆低於定量偵測極限值，而 TPH 皆超過土壤污染管制標準，距離 HFS 系統較遠(約 18 公尺)採樣點之濃度有降低，距離 HFS 系統較近(約 11 公尺)之土壤採樣點之濃度有明顯上升，顯示 HFS 系統將地層中之污染聚集至系統周圍，並將污染逐漸移除。

3. GIT 試驗成果

受到 GIT 增溫影響，兩口整治井地下水濃度皆有上升趨勢，且本模廠試驗區域地下水濃度皆有提升，顯示受到 HFS 系統將增溫後的地下水造成本區域的地下水同時增溫，因此將區域內殘留地層的污染釋出，建議後續須持續進行污染整治作業。

4. RAP 實驗室再生參數與驗證探討

- (1) RAP 再生參數探討：本團隊於實驗室已驗證 RAP 於吸附飽和後，在水相中進行 RAP 再生最適化操作參數。RAP 以臭氧於水相中再生時，其臭氧進氣流率為 2.8 g O₃/hr (水中溶解臭氧濃度 2.66 mg/L)、溫度 80°C、4 小時臭氧再生時間及 pH=9 狀態下，可達最佳的再生效果。另以曝空氣方式於水相中再生 RAP 時，發現在常溫、未調整 pH 及曝氣風量 4 L/min 條件下，再生時間以 24 小時為佳。



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

- (2) RAP 再生驗證：RAP 經空氣 24 小時再生時，其 RE 值為 72~89%，再生效果與臭氧 4 小時再生(81~86%)相當，顯示以空氣再生 RAP 具可行性，即表示若以曝空氣方式進行同步催化氧化再生 RAP 時，因可供較高水中溶氧，使 RAP 具持續氧化水中有機物和再生之功能，達到在不加藥與不加溫等情況下，實現更經濟且有效之綠色整治技術。
- (3) 以上結果間接驗證具有曝氣功能的 HFS 系統因溶氧較高(約 4~7 mg/L，一般整治井溶氧只有 0~2 mg/L)，故可大幅提昇 RAP 進行同步吸附/氧化與現地曝氣再生之功能。

(八) 建議

1. 增加 HFS 系統並搭配 RAP 及 GIT

由於本場址受到 LNAPL 的污染分布較大，且現階段為營運中工廠，受到環保局整治/控制計畫的進度要求，需階段性的將污染進行移除；但由於部分高濃度區域如製程區或儲槽區，整治不易或無法執行大型工程，因此建議在確認有污染且無法順利移除的區域，設置本模廠試驗的相關整治工法，以確保能夠順利將污染移除，目前由監測結果得知的確具備一定的成效。

因此，建議 HFS 系統搭配 GIT/RAP 可用於(1)整治不易或無法執行大型工程的區域(如製程區或儲槽區)；(2)若製程區周界或廠區周界，為防止污染擴散，也可設置 HFS 水力阻隔系統，或運用 RAP 作為被動式阻隔系統，以確保將污染阻絕在污染區域。



七、參考文獻

- Alejandro, S., Valdés, H., Manéro, M. H., & Zaror, C. A. (2014). Oxidative regeneration of toluene-saturated natural zeolite by gaseous ozone: the influence of zeolite chemical surface characteristics. *Journal of hazardous materials*, 274, 212-220.
- Alvarez, P. M., Beltran, F. J., Gomez-Serrano, V., Jaramillo, J., & Rodríguez, E. M. (2004). Comparison between thermal and ozone regenerations of spent activated carbon exhausted with phenol. *Water research*, 38(8), 2155-2165.
- Beltrán, F. J., Masa, F. J., & Pocostales, J. P. (2009). A comparison between catalytic ozonation and activated carbon adsorption/ozone-regeneration processes for wastewater treatment. *Applied Catalysis B: Environmental*, 92(3-4), 393-400.
- Dusenbury, J. S., & Cannon, F. S. (1996). Advanced oxidant reactivity pertaining to granular activated carbon beds for air pollution control. *Carbon*, 34(12), 1577-1589.
- Floquet, S., & Eysseric, C. (2006). Effect of ozone on ruthenium species in alkaline medium—Part I: Oxidative dissolution of ruthenium dioxide hydrate. *Radiochimica Acta*, 94(1), 5-13.
- Hwang, K. S., Choi, D. K., Gong, S. Y., & Cho, S. Y. (1997). Adsorption and thermal regeneration of methylene chloride vapor on an activated carbon bed. *Chemical engineering science*, 52(7), 1111-1123.
- Moussavi, G., Aghapour, A. A., & Yaghmaeian, K. (2014). The degradation and mineralization of catechol using ozonation catalyzed with MgO/GAC composite in a fluidized bed reactor. *Chemical Engineering Journal*, 249, 302-310.
- Pagliaro, M., Campestrini, S., & Ciriminna, R. (2005). Ru-based oxidation catalysis. *Chemical Society Reviews*, 34(10), 837-845.
- Salvador, F., Martin-Sanchez, N., Sanchez-Hernandez, R., Sanchez-Montero, M. J., & Izquierdo, C. (2015). Regeneration of carbonaceous adsorbents. Part I: thermal regeneration. *Microporous and Mesoporous Materials*, 202, 259-276.
- Salvador, F., Martin-Sanchez, N., Sanchez-Hernandez, R., Sanchez-Montero, M. J., & Izquierdo, C. (2015). Regeneration of carbonaceous adsorbents. Part II: chemical, microbiological and vacuum regeneration. *Microporous and Mesoporous Materials*, 202, 277-296.
- Trahanovsky, W. (1982). *Oxidation in Organic Chemistry*, 5-B, Academic Press.
- Valdés, H., & Zaror, C. A. (2006). Ozonation of benzothiazole saturated-activated carbons: influence of carbon chemical surface properties. *Journal of hazardous materials*, 137(2), 1042-1048.



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

Yaghmaeian, K., Moussavi, G., & Alahabadi, A. (2014). Removal of amoxicillin from contaminated water using NH₄Cl-activated carbon: Continuous flow fixed-bed adsorption and catalytic ozonation regeneration. *Chemical Engineering Journal*, 236, 538-544.

Zhou, J., Zhao, J., Zhang, J., Zhang, T., Ye, M., & Liu, Z. (2020). Regeneration of catalysts deactivated by coke deposition: A review. *Chinese Journal of Catalysis*, 41(7), 1048-1061.

應用多介質水力沖洗系統整治受 LNAPL 污染之土壤及地下水，2019 年中國環境科學學會科學技術年會，2749 頁。

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。

陳銘健，水層增溫處理系統，中華民國專利證書新型第 M506146 號，專利權期間自 2015 年 8 月 1 日至 2025 年 5 月 14 日止。

陳銘健、陳惠萍、郭宥妍、黃志彬。地下水抽除曝氣處理系統應用於含氯有機污染物去除之原理探討，環境工程學會 2018 土壤與地下水研討會。

陳銘健，水力土壤污染沖洗整治系統，中華民國專利證書新型第 M566206，專利權期間自 2018 年 9 月 1 日至 2028 年 6 月 18 日止。

陳銘健、陳惠萍、郭宥妍、高志明。應用多介質水力沖洗系統整治受 LNAPL 污染之土壤及地下水，2019 年中國環境科學學會科技技術年會論文集。



專案執行績效審核自評表

專案執行績效審核自評表

專案主持人	周珊珊	專案名稱	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			
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 系統與科技部 GRB 系統）	☒	☐	
二	期中及期末	1 點	依規定期限內備文提送	☒	☐	
		1 點	書面資料完整且無補件情況	☒	☐	
		1 點	報告依格式規定撰寫	☒	☐	
		1 點	依規定期限內上傳電子檔	☒	☐	
		1 點	系統資料依規定期限內登錄且資料登錄完整（含本署 SRFS 系統與科技部 GRB 系統）	☒	☐	
三	結案及核銷	2 點	依規定期限至本署 BAF 系統上傳支用單據	☒	☐	
		3 點	結案上傳支用單據及相關資料完整	☒	☐	
四	其他	4 點	計畫主持人配合出席本專案成果發表活動（或指定代理人如協同主持人、同專業且為助理研究員以上職等）	☒	☐	
		1 點	計畫執行者於執行期間與單位內各處室溝通良好，行政作業效率良好。	☒	☐	
合計		20 點				

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

未依實況登錄者，由本署補登依各階段執行紀錄進行缺失點數扣款。

缺失扣款機制：

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





附件一

行政院環境保護署「土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗專案」

☐申請計畫書 ☒期中報告 審查意見回復對照表
☐修正計畫書 ☐期末報告

計畫年度	111 年度	計畫類型	☐ 研究型 ☒ 模場型
計畫類別	☒ 整治 ☐ 調查 ☐ 其它	主持人：周珊珊 NO：A10	
計畫名稱	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		
審查意見		執行計畫單位回覆	
委員一 1. 對原計畫書的建議已回覆說明。 2. 本計畫為第二年度的延續性計畫。 3. 本期中報告已說明計畫的執行狀況與試驗流程，研究方法也已具體說明(Chap.4)。 4. 本計畫含自籌款。 5. 本次報告為期中報告，計畫後續的執行工作項目已於 P.109 中簡要說明。 6. 計畫進度已經說明，並無明顯落後(對後續擬執行工作項目及內容已有具體規劃)。 7. 期中報告所說明的研究內容與原計畫目的符合。 8. 本報告為期中報告，已提出初步的研究成果，建議期末報告能依研究內容提出在實務上的應用潛力，以及實務上適用的情境(建議說明與 GCW(含配合 GCW 的輔助性物化/生物機制)的異同)(建議說明只處理溶解相?或是也可以同時處理原液相(純相浮油)?) 9. 期中報告所提出的研究成果尚符合預期。 10. 建議討論 GSR。		1. 謝謝委員肯定。 2. 是的，本計畫第二年度持續針對HFS系統與RAP搭配的方式，並加上GIT技術，進行模廠試驗，希望能提高整治效率。 3. 略。 4. 本計畫第一年與第二年皆有自籌款。 5. 期中報告後續主要評估 GIT+RAP試驗協同HFS系統，對整治功能的影響。 6. 謝謝委員肯定。 7. 略。 8. 針對水力土壤污染沖洗整治系統HFS，主要運用抽回水水流拉力將污染團聚集並進行處理；本計畫設置位置主要處理污染物之溶解相。倘若要處理純相浮油，則可於系統井體內進行浮油抽除。 9. 謝謝委員肯定。 10. 本計畫為短期模場試驗，現場設備模組中RAP係可再生型吸附顆粒(Regenerative Adsorption Particles)，可吸附抽出氣體及地下水中污染物，且可再生循環使用，達到綠色及永續導向型整治(GSR)中降低空氣污染排放及資材與廢棄物減量之目的。	
委員二 符合期中規劃進度。		謝謝委員肯定。	
委員三 1. 依 HFS、RAP 及 GIT 系統的設計基礎，主要處理的是地下含水層中的 LNAPL，但以計畫名稱與研究目的所描述的，如可以處理的對象為污染土壤，建議能將固相、液相污染受體的操作方式加以說明。		1. 謝謝委員意見，HFS可處理地下土壤及含水層中的 LNAPL，藉由HFS系統運轉帶動土壤中非水相液態污染物釋出，再加以處理；而GIT則是透過將地層加溫，讓長期累積於地層中之污染物脫附釋出，再配合地面HFS及RAP系統進行污染處理。	



2. 技術成熟度高。 委員四 1. 本計畫應用開發之吸附劑(RAP)探討去除受 LNAPL 污染之土壤及地下水，相關實驗室規模試驗，已獲取相關成果；然由於使用 RAP之數量甚少，未來如何 scale 一節？建議應有規劃與驗證。 2. 請補充說明目前 RAP 之飽和吸附容量為何？相關試驗規劃是否包括 recyclability？ 3. 請補充說明 RAP 再生過程，脫附之相關試驗規劃，以及污染物之後續因應與驗證規劃。	2. 謝謝委員肯定。 1. 謝謝委員意見，研究團隊於其他廢污水領域已設置實廠案例，其處理量約80 CMD，並持續精進中。日後可參照廢水處理系統模式設計，並驗證RAP於受LNAPL污染之土壤及地下水去除效能。 2. 有關RAP 之飽和吸附容量及相關循環吸附/再生試驗結果，詳補充於第六章第(五)節說明。 3. 謝謝委員意見，再生流程為RAP使用少量已吸附飽和/現場洩出之 RAP，比較不同再生條件下 RAP之再生效率，如：不同再生溫度、pH、臭氧/氧氣流量及再生時間，進行最適操作參數的篩選。再生實驗規劃則分成臭氧再生及空氣再生兩部分，第一部分先以過去工業廢水處理的 RAP吸附/氧化經驗為基礎，延續第一年計畫採用苯甲酸作為目標吸附質，以較強氧化能力的臭氧進行再生；第二部分則模擬現場的 TPH地下水污染水樣，同時考量未來方便現地實施，以較弱氧化能力的空氣進行再生。
委員五 1. 本計畫為第二年研究工作，紀錄具持續性。 2. 研究耗材費用甚高，請檢視規劃工作負荷與實際運作之差異性。 3. 實驗項目/分析項目甚多，數據品質管控請完整掌握，俾確認整治技術潛在達成效果之可靠性。	1. 謝謝委員肯定。 2. 謝謝委員意見，由於2年計畫規劃不同的整治系統與搭配RAP並增加GIT整治設備所致，實際運作情形與當初規劃內容相符。本計畫之研究耗材費用含整治設備租賃費、地下水分析、RAP材料費用與實驗相關耗材。HFS系統地表上設備、GIT設備及監測井或整治井設置等費用共計126萬8千元整(佔研究耗材費79.3%)，其餘如地下水分析及RAP材料費佔14.7%，實驗相關耗材約佔6%。 3. 謝謝委員意見，本計畫檢測作業主要由中油公司與認證實驗室協助，中油公司常年自行檢測內部各單位之樣品，有豐富完整之檢測及品管經驗，認證實驗室則受到環檢所相關品保品管的要求。
委員六 5. 針對臭氧加 RAP 對甲苯的去除測試結果，去除效率平均維持在 85%，因目前單一工法無法解決場址所有污染物，建議可說明適合搭配本技術之其他工法，以有效加速場址解列。 6. 本技術再現地土壤及地下水污染物 BTEX 有顯著成效，至於 TPH 污染濃度仍有浮動情形，是否因複合污染物而造成本技術尚有需要克服的地方。	5. 謝謝委員意見，期中報告表3提到臭氧加 RAP 對甲苯的去除率約 85%，是在較低溫度(14°C)且較高進流濃度的條件下 (VOC= 235 ppm)，原先實驗目的只是為了確認可行性與甲苯的去除量。一般場址若遇有高濃度尾氣VOC時，常需較高頻率的更換活性碳，此時若改用RAP技術，可調整操作條件使其同步再生，可大幅減少活性碳吸附飽和後即廢棄之浪費。 6. 謝謝委員意見，針對每個場址土壤與地下水污



	染的部分，都有不一樣的污染特性，由於本場址主要為大型石化廠，污染年代較久遠，在處理方面需要較長久的時間來進行，本模場僅有一套系統，處理範圍與處理能力有限，因此僅能慢慢將污染牽引後移除；針對揮發性與流動性較快的污染物來說，HFS系統確實有較佳的處理效率。
--	---