




行政院環境保護署

110年度土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗專案

以微奈米氣泡反應器及生物離子液處理 含氯污染地下水:研究型試驗

期末報告(初稿)

主辦單位：  行政院環境保護署
專案執行單位： 國立臺北科技大學 / 土木工程系所
專案主持人： 陳映竹副教授
專案執行期間： 110 年 03 月 19 日起至
111 年 02 月 28 日止

中華民國 111 年 01 月 印製



專案基本資料表

專案性質		<input checked="" type="checkbox"/> 實驗性質 <input type="checkbox"/> 非實驗性質		專案類別(單選)		<input checked="" type="checkbox"/> 研究型 <input type="checkbox"/> 模場型	
研究主題		<input type="checkbox"/> 調查 <input checked="" type="checkbox"/> 整治 <input type="checkbox"/> 其他					
申請機構系所		國立臺北科技大學					
機構地址		106臺北市大安區忠孝東路三段1號					
專案主持人		陳映竹		職等 / 職稱		副教授	
協同主持人		卓英仁		職等 / 職稱		董事長	
專案 名稱	中文	以微奈米氣泡反應器及生物離子液處理含氯污染地下水：研究型試驗					
	英文	Treatment of Chlorine-contaminated Groundwater with Micro-bubble Generator and Ionic Liquid: Research-oriented Experiment					
	關鍵字	微奈米氣泡、生物離子液、含氯污染、基質、重質非水相溶液					
執行期程		自民國 110 年 3 月 19 日起至民國 111 年 2 月 28 日止					
專案主持人		姓名：陳映竹 Email： ycchen@ntut.edu.tw				專線：(02)2771-2171#2634 手機：0934292623	
專兼任人員		姓名：林重燁 Email： edrftgooo@gmail.com				專線：(02)2771-2171#2634 手機：0912934783	
經費 分 析 總 表	專 案 預 估 經 費		第一年 金額		第二年 金額		編列說明
	1.	人事費用		460,000		(1~5項相加之50%為限)	
	2.	貴重儀器使用含維護費		126,000		(與計畫實驗相關)	
	3.	消耗性器材與主要費用		201,000		(與計畫主體相關)	
	4.	其它研究相關費用		0		(含差旅與租賃費用)	
	5.	雜支費用		131,000		(1~6項相加之5%為限)	
	6.	行政管理費		102,000		(1~5項相加之10%為限)	
	7.	自籌款		200,000		(自行籌備款項)	
	申請補助金額(1~6項)			1,020,000		總金額：1,020,000	
	計畫總金額(1~7項)			1,220,000		總金額：1,220,000	

專案主持人(簽名及蓋章)：_____ 日期：_____



一、請依學術成就、技術創新、經濟效益、社會影響等方面，評估研究成果對現況或本署之學術或應用價值。（簡述成果所代表之意義、價值、影響或進一步發展之可能性，500字為限）

本計畫團隊已成功研發「微奈米氣泡生成器」及「生物離子液（TEE）」，並將兩者結合應用於降解含氯土壤地下水（CAHs）污染。試驗期間，TEE 可於水中（非必須土壤環境）長期緩慢釋放離子，促使離子化反應進行；市售 EOS 基質反應需要土壤介質存在，可見 TEE 基質可用於廢水處理之應用。MNB 樣品平均粒徑介於157.5~180.8 nm，符合奈米氣泡等級，雖然以過氧化氫溶液增強 MNB 功能有限。本計畫結果建議先以 MNB 前處理15分鐘，利用微奈米氣泡能量將 CAHs 震盪為較小分子，接續注入基質（TEE 或 EOS）進行生物反應，整體反應約20天達到平衡。TEE 對於土壤地下水中 CAHs 之降解效率約為 EOS 之1/2，但其具備成本低廉之優點，整體污染整治費用僅為1/2，仍具備市場競爭性。



110 年度土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗專案

☐構想書 ☒申請計畫書

☐期中報告 ☐期末報告

審查意見回復對照表

計畫年度	110 年度	計畫類型	<input checked="" type="checkbox"/> 研究型 <input type="checkbox"/> 模場型
計畫類別	<input checked="" type="checkbox"/> 整治 <input type="checkbox"/> 調查 <input type="checkbox"/> 其它	主持人：陳映竹 副教授 NO：C9	
計畫名稱	以微奈米氣泡反應器及生物離子液處理含氯污染地下水：研究型試驗		
委員審查意見		計畫單位回覆	
委員一： 1. 結合學校與廠商共同開發技術，值得鼓勵。		感謝委員肯定。	
委員一： 2. 本計畫所採 TEE 藥劑與以往之實務經驗是針對高濃度有機廢水，而本計畫所針對的地下水含氯污染物濃度通常都是小於數個 mg/L，試驗設計需考量。		本次試驗設計起始濃度係以過去公告之漢翔航空及台塑仁武廠等污染場址其污染物濃度為參考，並考量整治初期、中期與末期污染物之濃度變化等因素，且有將儀器偵測極限納入考量，詳見報告書表 6 之初設參數設定。 不同於以往高濃度有機廢水試驗，本計畫已調整試驗 TEE 藥劑之添加量及濃度，之後會視試驗初步結果修正參數。	
委員二： 1. 具可行性。		感謝委員肯定。	
委員三： 1. 主持人（協同主持人）與執行團隊的研究及技術研究發展績效良好。		感謝委員肯定。	
委員三： 2. 主持人與執行團隊的研究能力及技術發展能力佳，足以勝任本計畫。		感謝委員肯定。	
委員三： 3. 本專案計畫對國內土壤及地下水污染整治工作的發展具有貢獻。		感謝委員肯定。	



<p>委員三：</p> <p>4. 本計畫書撰寫具體，對研究方法的說明完整，研究方法與試驗流程具可行性。</p>	<p>感謝委員肯定。</p>
<p>委員三：</p> <p>5. 本計畫成果的實場應用性尚待驗證。</p>	<p>本計畫將製作密閉管柱狀設備，填充土壤及含 CAHs 污染地下水，再藉由水循環系統注入 TEE 及微奈米氣泡，期能符合實場整治情境（圖 8），未來可接續提模場型專案。</p>
<p>委員三：</p> <p>6. 建議說明本計畫成果實務應用的適用情境（例如：污染物物化特性...等）與應用的限制條件（例如：純相的影響...等）。</p>	<p>感謝委員建議，未來計畫成果補充。</p>
<p>委員三：</p> <p>7. 建議說明本計畫成果實務應用的適用情境及該情境下與其他可行整治工法的成本效益比較。</p>	<p>感謝委員建議，本計畫目的（四）即為「探討本計畫成果之成本經濟與市場發展可行性」，將各種 CAHs 整治技術之人力、交通、機械設備、材料、水、電等資源消耗所衍生之成本深入探討。</p>
<p>委員四：</p> <p>1. 計畫團隊過去已進行廢水微奈米氣泡與離子化處理之相關前測試，對象均為高濃度有機廢水，且都配合活性炭吸附，相關佐證資料較不足；</p>	<p>本次試驗設計起始濃度係以過去公告之漢翔航空及台塑仁武廠等污染場址其污染物濃度為參考，並考量整治初期、中期與末期污染物之濃度變化等因素，且有將儀器偵測極限納入考量，詳見報告書表 6 之初設參數設定。</p> <p>不同於以往高濃度有機廢水試驗，本計畫已調整試驗 TEE 藥劑之添加量及濃度，之後會視試驗初步結果修正參數。</p>
<p>委員四：</p> <p>2. 計畫團隊提出微奈米氣泡生成器及生物離子液(TEE)為自行研發，是否有論文發表或獲得專利？請提出佐證證明。</p>	<p>TEE 為本研究團隊研發之配方，尚未商品化，TEE 針對不同污染物有不同之處理或整治方法，未來針對本研究成果提出文章發表及專利申請。</p> <p>請委員參閱計畫書之圖 2 至圖 3，本團隊曾於美南國建協進會「2019 科學工程技術研討會」中發表研究論文，並已通過申請奈米氣泡生成器核心技術[液體渦漩</p>



	混合器] (專利編號：I577441，2017 年 4 月 11 日取得)。
<p>委員四：</p> <p>3. 實驗室自製 200 公升已知污染濃度之含氯溶劑作為模擬含氯地下水之試驗環境，濃度不宜過高，盡量接近現況。</p>	<p>本次試驗設計起始濃度係以過去公告之漢翔航空及台塑仁武廠等污染場址其污染物濃度為參考，並考量整治初期、中期與末期污染物之濃度變化等因素，且有將儀器偵測極限納入考量，詳見報告書表 6 參數設定。</p> <p>不同於以往高濃度有機廢水試驗，本計畫已調整試驗 TEE 藥劑之添加量及濃度，之後會視試驗初步結果修正參數。</p>
<p>委員四：</p> <p>4. 本研究在實驗室進行較容易，若現況直接施打，如何使四氯乙烯有機物同時被生物離子化液(TEE)及微奈米氣泡接觸反映，有其困難度。</p>	<p>本計畫將製作密閉管柱狀設備，填充含氯污染之土壤及地下水，再藉由水循環系統注入 TEE 及微奈米氣泡，符合實場整治情境，未來將接續提模場型專案。</p>
<p>委員五：</p> <p>1. 本研究計畫 KPI 訂定相當多，值得肯定，期能一一達成（包括專利之申請）。</p>	<p>感謝委員肯定，必定盡力達成本研究計畫所擬之 KPI 值。</p>
<p>委員六：</p> <p>1. 重點是“生物離子液”，如何驗證是這個“因子”的作用，應該說明清楚！</p>	<p>本試驗擬定之控制因子有 EOS 藥劑、TEE 藥劑(生物離子液)與奈米氣泡（如表 7 試驗組合所示），均可單獨驗證其成效與作用。</p>
<p>委員七：</p> <p>1. 本專案對未來土壤及地下水污染整治具貢獻。</p>	<p>感謝委員肯定。</p>
<p>委員八：</p> <p>1. 技術關鍵參數仍未釐清，未來整體成果歸屬亦應說明。</p>	<p>技術關鍵參數為 TEE 添加量與奈米氣泡系統操作條件（粒徑大小、反應時間與溶氧量等）。</p>



委員九： 1. （六）行政管理費編列超過（一）～（五）總和的 10%，請修正。	感謝委員建議，已修正經費編列。
委員九： 2. 考量預算有限建議附件 35（一）人事費：計畫主持人月支酬金統一酌調為 15,000 元/月、協同主持人月支酬金統一酌調為 10,000 元/月。	感謝委員建議，已修正經費編列。
委員九： 3. 附件 40 雜支費用請分項敘明，以利審查及估算。	感謝委員建議，已修正經費編列。



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

審查意見回覆對照表

計畫年度	110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： 陳映竹 NO：C9 副教授
計畫名稱	以微奈米氣泡反應器及生物離子液處理含氯污染地下水：研究型試驗		
委員審查意見		計畫單位回覆	
委員一		感謝委員意見，回復如下：	
1. 報告書內容過於簡略。台灣地區現況，國內外相關研究，所呈現之資料，宜再加強。		1. 國內外場址案例研析已補充於文獻回顧章節。	
2. 儀器定性定量等，非屬實驗結果。		2. 本計畫欲表達對儀器品管之要求與努力，懇請委員支持。	
3. 圖 16，各試驗反應時間長短不一，請說明。		3. 本計畫中每批次試驗時間長達 30 天，期中報告前數據較為不完整。請委員參考期末報告完整之試驗數據，已使用 GC 及 IC 儀器檢測 TCE、VC 及 Cl 離子濃度。	
4. 目前並無實際量測含氯有機物濃度。報告書中所指之 CAHs，未有明確說明。		4. 本計畫參考國外文獻以總氯數評估其基質效用，請參考 5.7 節。	
5. 該試驗為一封閉試驗，應就其中之 Cl 質量平衡進行分析探討。			
委員二		感謝委員意見，回復如下：	
1. 研究初步有獲得正面結果，建議研究在實驗設計以 MNB 與 EOS、TEE 比較的論述部分，而未納入 JMS 或 Eco-Clean，能加以補充說明。		1. 經洽基質廠商，僅 EOS 廠商願意提供研究試驗，因此本年度主要比較對象為 EOS，明年度實場計畫申請將參採委員意見，加入 JMS 及 Eco-Clean 基質比較。本年度試驗結果已證實 MNB 對於 EIB 工法有所助益。	
2. CBA 是最終市場考量的重要因素，建議期末能更清楚說明 MNB 的成本分析。		2. 本計畫已於5.8節分析本計畫提出之方法成本分析，MNB 主要成本為購置設備費，其自大氣中擷取氣體製作成 O ₃ ，無其他藥劑成本。	
委員三		感謝委員意見，回復如下：	
1. 建議能加強文獻回顧，以說明所發展之整治技術(微奈米氣泡反應器及生物離子液)對含氯污染物的降解機制和重要的影響因子。		1. 已於期末報告之文獻回章節中補述，基質及 MNB 降解含氯污染物之機制。	
		2. 已嚴格要求實驗室安衛管理。	



<p>2. 根據期中報告 p.27 圖 14 顯示，建議學生進行試驗時的穿著和裝備，應符合實驗室安衛管理的要求。</p> <p>3. 本期中報告的內容僅為初步的結果，建議期末報告能加強結果與討論的論述和數據變化的解說。</p> <p>4. 本研究主題具前瞻性，建議能補充說明產學合作的工作事項，以提升本項整治技術的推廣。</p>	<p>3. 本計畫中每批次試驗時間長達30天，期中報告前數據較為不完整。請委員參考期末報告完整之試驗數據，已使用 GC 及 IC 儀器檢測 TCE、VC 及 Cl⁻ 離子濃度。</p> <p>4. 合作公司主要為派員協助北科大研究生設置實驗環境、提供基質與 MNB 設備。其餘實驗進度、人員訓練、報告撰寫、經費核銷等事宜由北科大主責。</p>
<p>委員四</p> <p>1. 進度報告清楚確實，微奈米氣泡進度受影響之說明與因應宜補充。</p> <p>2. 經費使用情形宜補充。</p> <p>3. 本計畫由產業合作，未來可行之合作模式，值得參考。</p>	<p>感謝委員意見，回復如下：</p> <p>1. 本計畫中每批次試驗時間長達30天，期中報告前數據較為不完整。請委員參考期末報告完整之試驗數據，已使用 GC 及 IC 儀器檢測 TCE、VC 及 Cl⁻ 離子濃度，並以總氯數算法推估其整體結果。</p> <p>2. 本計畫經費支用情形如表所述，皆符合環保署要求與規範，主要用於人力資源及實驗室設備、耗材用途。</p> <p>3. 感謝委員肯定。</p>
<p>委員五</p> <p>1. 期中報告進度符合預期進度。</p> <p>2. 完成部分批次管柱與微奈米氣泡試驗。</p> <p>3. 實驗結果 EOS 反應需於含土壤介質環境，TEE 於純地下水或土壤地下水環境皆有助於脫氯反應進行，建議期末增加說明。</p> <p>4. 針對注入 MNB 之最佳操作條件，請於期末一併列出。</p>	<p>感謝委員意見，回復如下：</p> <p>1. 感謝委員肯定。</p> <p>2. 本計畫針對 TEE 及 EOS 藥劑之性質提出比較分析，據以說明 TEE 適用於液體介質環境。</p> <p>3. 本計畫使用合作廠商提供之 MNB 儀器，僅能調控為氧氣或臭氧，其他參數未能調整。本計畫藉由試驗調整其曝氣時間，發現 MNB 曝氣時間以30分鐘可達最佳狀態，請參考期末報告內文。</p>



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

審查意見回覆對照表

計畫年度	110 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：陳映竹 NO：D5
計畫名稱	以微奈米氣泡反應器及生物離子液處理含氯污染地下水：研究型試驗		
委員審查意見		計畫單位回覆	
委員一		1. 感謝委員建議及肯定。	
6. 本計畫應用已成功研發「微奈米氣泡生成器」及「生物離子液(TEE)」，結合 MNB 及基質生物反應降解土壤地下水中 CAHs 污染,期能與廠商合作開發出在處理成本、整治時間或清潔生產上具市場競爭性新技術。		2. TEE 以高濃度鉀、鈉離子進行離子化反應，以達對含氯化合物斷鍵之功效，其反應機制已補充於 5.7 節。	
7. 針對生物離子液(TEE)特性及反應機制，建議加強說明。		3. 感謝委員建議，已修正圖表編碼。	
8. P. 28 後內文圖號多處有誤。		4. 感謝委員建議，已修正 5.8 節文字敘述。	
9. 以總氯數推算 TEE 可用 2 倍之 EOS 藥劑量達到相同污染物降解效果之假設，建議佐以實驗驗證。		5. 本計畫是以土壤地下水為反應環境介質，其中包括固相土壤及液相地下水。固相土壤已藉由 XRD 分析得知無 CAHs 成分分佈，已補充於 5.7 節。	
10. CAHs 降解中於不同相中之分佈是否有分析資料，確認主要反應方式？		6. 今年實場計畫將參採委員建議，針對不同相之分佈進行反應分析。	
11. 本研究為實驗室規模，環境條件可控建議針對 CAHs 降解中於不同相中之分佈作分析方能確認主要反應方式，未來研究方向及估算實場應用可行性才有依據。			
委員二		1. 感謝委員建議及肯定。	
3. 本計畫所執行的工作項目及內容說明具體詳盡，整體的研究成果有獲得正面結果，並符合預期。		2. 感謝委員建議與肯定。	
4. 研究在實驗設計的論述部分已納入期中建議並加以補充說明。		3. 已於 5.8 節補充最終市場應用，以及第六章結論提出政策建議。	
5. 建議能在經濟效益上的成本比較與產學合作及最終市場應用上多加著墨，			



並提出政策建議。	
<p>委員三</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 期末報告中的圖表編號與文字敘述引用的編號不一致，顯得零亂，特別是在結果與討論一節中，幾乎完全不一致，請重新檢核修正。 2. 報告中水質分析數據和試驗設計操作的品質管理不佳，特別是缺少各項含氯污染物(CAHs)之處理成效的分析，以驗證本項技術在實務應用的可行性。 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 感謝委員建議，已修正圖表編碼。 2. 已於第七章說明每批次試驗時間較為冗長且受疫情影響，需較長的執行期間完整試驗。本計畫後續將完成個別CAHs（包含 TCE、DCE、VC）之試驗反應，佐證本計畫推論之反應機制，已補充於第七章其他建議。
<p>委員四</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 各項自評項目符合預期，發明專利待更多試驗支持。 2. TEE 的經濟效益分析、成效優異、未來具商業化之優勢，可推廣予業界使用。 	感謝委員肯定。
<p>委員五</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 計畫進度符合原定目標。 2. 計畫工作項目及內容說明清楚。 3. 績效自評表請更正為期末，期刊論文發表後請填寫備註。 4. 計畫使用 TEE 基質整治成本約為 EOS 之 1/2，其用量及單價較低。 	感謝委員肯定，期刊論文已於近期投稿至 Journal of Environmental Management，並依照行政程序發函環保署通知。



中文摘要

本計畫以含氯溶劑／有機物（CAHs）為目標污染物，處理受重質非水相溶液（DNALP）污染之土壤地下水。由於 DNALP 污染場址整治需進行較長期時間，選擇生物整治工法相對經濟可行，利用微生物降解或改變有害物質成為無害或低毒性產物。添加基質可促進微生物生長以降解污染物，但市場上認可的基質選擇性少、常需進口且有專利問題。目前生物處理大部分均使用美國環保署認可之基質（如 EOS）處理技術，而目前市場基質可替代性不多、且大多數基質仍在進行實驗或模場測試中。

本計畫團隊已成功研發「微奈米氣泡生成器」及「生物離子液（TEE）」於處理高濃度工業廢水（氮氮污染）。本計畫結合 MNB 及基質生物反應降解土壤地下水中 CAHs 污染。試驗期間，水中溶氧濃度穩定介於5至7 mg/L 之間，無缺氧現象。相較市售 EOS 基質反應需要土壤介質存在；TEE 可於水中（非必須土壤環境）長期緩慢釋放離子，促使離子化反應進行。TEE 在無土壤介質之反應環境中，導電度自反應第5天急速上升至1,600 mho/cm，延續至第30天仍有1,300 mho/cm 之導電度。若先於含氯地下水中注入 MNB 可使 VC 濃度於15分鐘內由8 mg/L 迅速下降至偵測極限以下濃度，添加2%過氧化氫溶液（ H_2O_2 ）加速羥基自由基產生之效果有限。MNB 樣品平均粒徑介於157.5~180.8 nm，符合奈米氣泡等級，用以前處理有助於削減水中 CAHs 污染物濃度，之後注入 TEE 基質進行生物反應之效果不顯著。整體離子濃度變化至第20天趨於平衡。

本計畫研發之技術設備製作可控，能較一般傳統處理技術縮短處理時間、減少基質用量。TEE 基質單價約為新臺幣5,000元/公升，其約為 EOS 的1/10價格，且用量約為受污染水體積之1/500~1/1,000。於案例場址之污染面積為5,000 m^2 且深度為10 m（體積為50,000 m^3 ），在污染改善工程費用中，TEE 之污染調查成本約為新臺幣2,100萬，為 EOS 之1/2。經試驗得知 WS-EOS 之污染物去除效率為 WS-TEE 之兩倍，即使需要使用兩倍 TEE 之藥劑量，污染改善工程費用增加至2124萬元，仍為 EOS 整治成本之1/2，原因為 TEE 製造成本仍屬低廉。對於含氯污染場址業者而言，TEE 無論在處理成本、整治時間或清潔生產上仍具市場競爭性。

本計畫團隊由國立臺北科技大學擔任主持單位（負責學理、實驗室檢測分析），兩家環基環境永續股份有限公司及多利鑫科技股份有限公司於實務技術面提供豐富經驗與經費支持，相信本計畫執行成果之可行性及市場需求性更為提升，可延續明年度模場型專案。



英文摘要

This project takes chlorinated solvents/organic substances as target pollutants as non-aqueous liquid (DNALP) sites. The biological remediation method using microorganisms to degrade or change harmful substances into harmless or low-toxic products is relatively economic feasible. However, the substrates in the market are less selective, often need to be imported, and have problems of patent. Most of the biological treatments using the EOS substrate is approved by the US Environmental Protection Agency, and most of them are still undergoing experiments and/or field tests.

Our team has successfully developed the "micro-bubble generator (MNB)" and "relevant ionic liquid (TEE)" (as a kind of substrate) for removal of high-concentrated ammonia nitrogen from wastewater. Therefore, both of them were applied in this study to degrade chlorinated pollutants in soil and groundwater. The preliminary results of the mid-term report found that the TEE substrate can promote the formation of ions, and their conductivity of water increase sharply to 1,600 mho/cm. In either pure wastewater or soil-based media, TEE substrate can effectively degrade CAHs under aerobic condition (DO 5~7 mg/L). Micro-nanobubbles (MNB) with 157.5~180.8 nm diameters are injected into groundwater contaminated by CAHs, and VC pollution was efficiently degraded within 5 minutes. Mixing 2% H₂O₂ was not respectively increase the MNB's efficiency. The MNB was helpful for reducing chlorinated pollutants but not TEE substrate. The whole experiments reach steady state at 20th day.

The price of the TEE substrate is about NT\$5,000/L, which is about 1/10 of the price of EOS, and the dosage is about 1/500~1/1,000 of the volume of polluted water. In the case study, the cost of pollution remediation of TEE is about NT\$21 million, which is 1/2 of EOS. Even if twice the dosage of TEE is required, the cost of pollution remediation will increase to NT\$21.24 million, which is still cheaper EOS remediation. The TEE is still competitive in the market in terms of treatment cost, remediation time or cleaner production.

The project is chaired by the National Taipei University of Technology (responsible for academic science, laboratory testing and analysis), and the two Environmental Sustainability Co., Ltd. and Dolysin Technology Co., Ltd. provide rich experience and financial support in practical and technical aspects. It is believed that the feasibility and market demand of the implementation results of this project will be improved, and the model project of next year can be continued.



目錄

目錄.....	IV
圖目次.....	V
表目次.....	VI
一、前言.....	1
二、研究目的.....	3
三、文獻回顧.....	5
3.1. CAHs 性質及臺灣污染現況.....	5
3.2. CAHs 整治技術.....	6
3.3. 基質研發現況.....	8
3.4. 微奈米氣泡（MNB）相關研究.....	11
3.5. 土壤地下水污染成本效益分析.....	13
四、研究方法與過程（含工作進度甘特圖）.....	17
4.1. 研究架構.....	17
4.2. 實驗設備及基質.....	18
4.3. 實驗步驟.....	20
4.4. 檢測分析.....	22
4.5. 成本效益分析.....	25
4.6. 工作進度甘特圖.....	27
五、結果與討論.....	29
5.1. 儀器定性與定量.....	29
5.2. 基質性質.....	29
5.3. 基質降解含氯（土壤）地下水之環境變化.....	30
5.5. 微奈米氣泡（MNB）降解含氯（土壤）地下水之效率.....	34
5.6. 管柱試驗結果.....	36
5.7. 微奈米氣泡（MNB）及基質降解含氯（土壤）地下水之反應機制.....	39
六、研究成果.....	45
七、其他建議.....	47
參考文獻.....	48
110年度專案成果績效自評表.....	52



圖目次

圖 1 含氯烯類脫氯流程示意圖	2
圖 2 美國超級基金場址地下水污染現地整治技術之應用比例	3
圖 3 臺灣運作中工廠調查超過管制標準化合物類型分布	6
圖 4 抽除處理法示意圖	6
圖 5 EIB 技術示意圖	7
圖 6 EIB 使用案例	7
圖 7 新北市某染場以 EOS 降解 CAHs 之初步成果	10
圖 8 微奈米氣泡構造	12
圖 9 本計畫架構	17
圖 10 本計畫設計之開放反應槽及密閉管柱設備圖	18
圖 11 本計畫租借之微奈米氣泡產生機設備圖	19
圖 12 本計畫使用之 EOS (a)及 TEE (b) 基質示意圖	19
圖 13 環保署綠色及永續導向整治架構圖	25
圖 14 本計畫使用之氣相層析儀(a)及離子層析儀(b)穩定性之檢量線圖	29
圖 15 不同基質降解含氯(土壤)地下水之溶氧變化	30
圖 16 不同基質降解含氯(土壤)地下水之導電度變化	31
圖 17 不同基質降解含氯(土壤)地下水之 pH 值變化	32
圖 18 不同基質降解含氯地下水(a)或土壤地下水(b)之氯離子濃度變化	33
圖 19 案例同時加熱及注入基質影響案場之氯數變化 (Nemecek et al., 2018)	34
圖 20 MNB 降解含氯地下水之 CAHs 濃度變化	35
圖 21 案例於實驗室注入 MNB 去除 CAHs 之設備環境 (a) 及氣泡粒徑分佈 (b)	36
圖 22 含氯土壤地下水污染依序以 MNB 及 TEE 處理之氯離子(a)及 CAHs(b)濃度變化	37
圖 23 含氯土壤地下水污染依序以基質及 MNB 處理之氯離子(a)及 CAHs(b)濃度變化	38
圖 24 分別注入 MNB 及 TEE 基質降解土壤地下水中 CAHs 污染之反應機制圖	39
圖 25 試驗土壤之 XRD 檢測結果	40



表目次

表 1 國內常用地下水含氯有機污染物污染整治工法.....	2
表 2 芬蘭、瑞典、丹麥工人接觸到 TCE 罹癌相對人數.....	5
表 3 應用 EIB 技術處理 CAHs 使用之基質及產物.....	8
表 4 國內常用基質比較表.....	9
表 5 微米、奈米及大氣泡特性.....	11
表 6 微奈米氣泡應用於地下水污染整治案例.....	13
表 7 廢棄工廠調查計畫歷年經費統計表.....	14
表 8 我國廢棄工廠調查污染場址改善工法暨整治經費、面積彙整表.....	15
表 9 本計畫之試驗組合.....	20
表 10 本計畫初設之操作參數.....	21
表 11 本計畫之檢測項目、方法及設備.....	22
表 12 本計畫之成本效益分析架構.....	26
表 13 本計畫之工作甘特圖.....	28
表 14 不同基質（TEE 及 EOS）性質之比較表.....	30
表 15 本研究製作之氣泡粒徑.....	35
表 16 本計畫批次試驗之總氯數含量.....	41
表 17 比較案例場址使用 TEE 及 EOS 之污染調查成本.....	43



一、前言

含氯有機溶劑為常見之地下水有機污染物之一，包括三氯乙烯（ C_2HCl_3 ，TCE）、四氯乙烯（ C_2Cl_4 ，PCE）等含氯脂肪族碳氫化合物（CAHs）。美國約有80%的超級基金場址（superfund sites）皆可發現含氯地下水污染。而臺灣具代表性之廠址為桃園縣美國無線電公司（RCA）及臺灣氯乙烯頭份廠兩座污染場址。由於CAHs之低水溶性及低沸點及高蒸氣壓等特性，屬於難去除之污染物之一，尤其當它以重質非水相溶液（DNAPL）污染源存在於地下環境時，處理難度更加提高。目前國內常用於CAHs之整治工法，包含地下水循環井（GCW）、現地化學氧化（ISO）、多相抽汲（MPE）、加強性現地生物整治（EIB）與奈米零價鐵（NZVI）等技術，各有其優缺點如表1所示。由於DNALP污染場址整治需進行較長期時間，經綜合評估污染改善經費、技術成熟度、地質條件後，最終仍常選擇生物復育整治工法，較為相對經濟可行。如圖2所示，美國超級基金場址地下水污染現地整治技術之應用中，EIB法佔有28%之比例，僅次於空氣注入法（29%）。生物復育原理係利用微生物降解或改變有害物質成為無害或低毒性產物，國內大多採用EIB技術為地下水污染改善主軸。

EIB技術中，添加基質可促進微生物生長以降解污染物，基質具有高溶解性和高生物分解性，促使微生物繁殖並更迅速地進行脫氯反應，以有效降解目標污染物（TCE、PCE與VC等），直到最終將污染物質分解為無毒性的最終產物（如乙烯與乙烷），其反應程序如圖1所示。但基質注入技術常造成地下水阻塞與酸化問題，再者基質價格不斐，對業者整治成本造成不少負荷。本計畫專案考量綠色及永續導向型整治（Green and Sustainable Remediation, GSR）趨勢，以不破壞環境與引入新穎技術方式做為整治技術選項。



表 1 國內常用地下水含氯有機污染物污染整治工法（本計畫彙整）

處理方式	含氯污染物適用性	定期操作	費用	地質條件 (若流速快)	技術成熟度
地下水循環井 (GCW)	適用	需要	高	需大量抽水	普通
多相抽汲 (MPE)	適用	需要	中	需大量抽水	優
現地化學氧化法 (ISO)	適用	不需要	高	增加藥劑消耗	優
奈米零價鐵 (NZVI)	適用	不需要	中	反應時間短	普通
加強式現地生物整治 (EIB)	適用	不需要	低	反應時間短	優

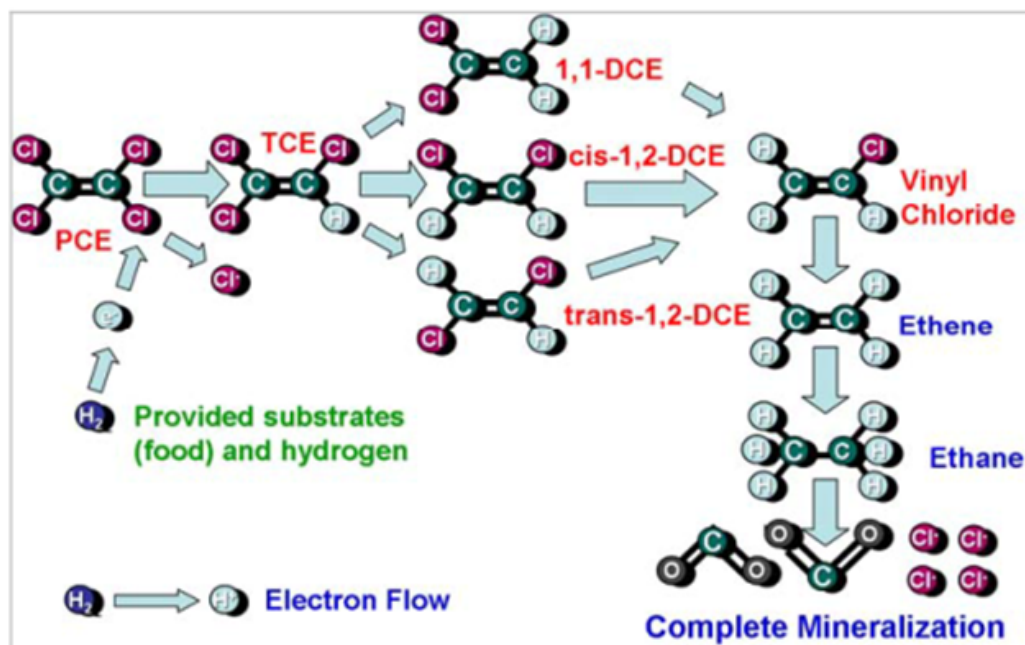
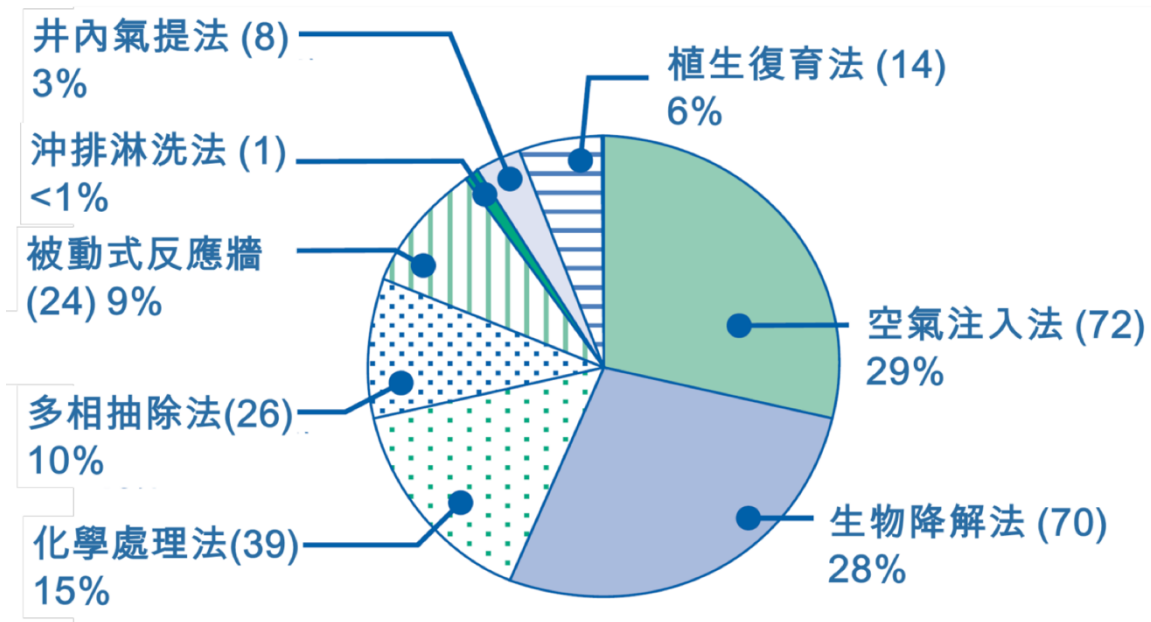


圖 1 含氯烯類脫氯流程示意圖



資料來源：USEPA, Treatment Technologies for Site Cleanup: Annual Status Report (Twelfth Edition) (EPA-542-R-07-012), 2007。

圖 2 美國超級基金場址地下水污染現地整治技術之應用比例

二、研究目的

目前 EIB 技術均使用美國環保署認可之基質（如 EOS）為主流，且市場基質可替代性不多、需進口且有專利問題。而微奈米氣泡生成器及生物離子液（Transfer Energy Element, TEE），僅為本計畫團隊開發，技術設備製作可控，能較一般傳統處理技術縮短處理時間、減少基質用量，對於業者而言，無論在處理成本、整治時間或清潔生產上均有助益，提供多元整治方式選擇，且具市場競爭性。整體而言，本計畫目的臚列如下：

1. 於實驗室建立模擬 CAHs 污染場址之開放反應槽及密閉管柱設備，模擬實場環境現況。
2. 比較市售 EOS 基質與本團隊研發之 TEE 處理 CAHs 污染物，及其最佳基質添加量及降解污染成效。
3. 依據上述研究成果，輔以微奈米氣泡產生器，提升 CAHs 污染去除效率。
4. 探討本計畫成果之成本經濟分析與市場發展可行性。





三、文獻回顧

本章節回顧 CAHs 污染物及其處理技術，再者研析 EIB 技術常使用之基質、微奈米氣泡相關應用，以及整治成本效益分析四大面向。

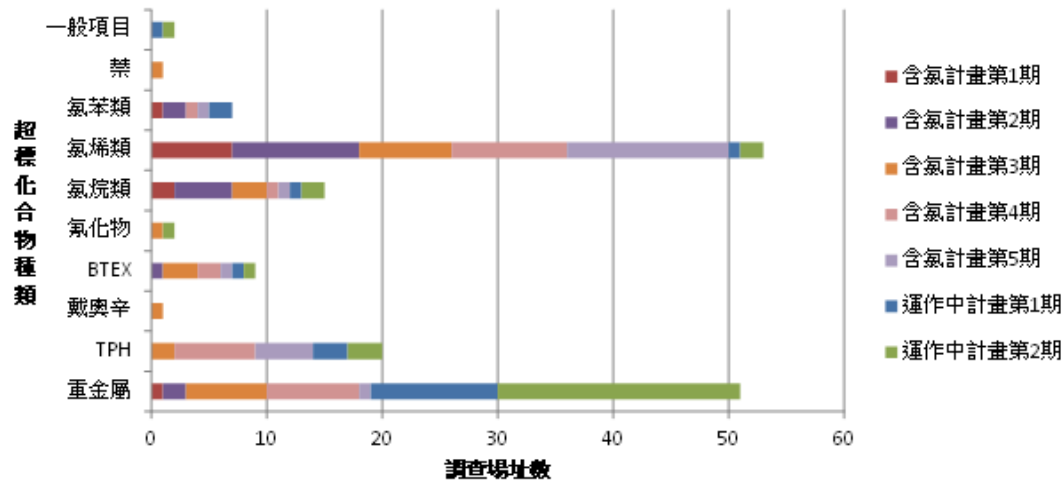
3.1. CAHs 性質及臺灣污染現況

CAHs 化學性質穩定、毒性高且不易降解，常見的種類包括 PCE、TCE 及 VC 等，其屬於重質非水相溶液、密度範圍約為 $1,100\sim 1,600\text{ kg/m}^3$ 。PCE 比重比水大且低溶解度，常累積在地下水層底部，半衰期約6年之久，當 PCE 經人體吸收後會導致暈眩、頭痛等健康危害。動物毒理研究已證實高濃度 PCE 環境下哺乳類動物胚胎生長遲緩且發展不健全，容易產生肝癌。而 TCE 具有潛在之基因突變性及致癌性等毒性特徵，研究證實肝癌、腎臟癌、前列腺癌等均可能與接觸 TCE 有關（Jollow et al., 2009）。Hansen et al. (2013) 追蹤自1947至1989年曾因工作而接觸 TCE 的5,553名工人，原先預計會有20人罹患肝癌，但最終卻有36人罹患肝癌；子宮頸癌原本預估只有7人，最後增加至16人；腎臟癌原先預估為32人，結果則與預估的一樣為32人（表2），顯示出暴露在 TCE 底下工作的工人增加了肝癌、子宮頸癌的風險。目前行政院環境保護署（以下簡稱環保署）地下水污染管制標準訂定相關 CAHs 之標準，地下水管制值為 0.05 mg/L ，飲用水水源水質保護區則加嚴至 0.005 mg/L 。

表 2 芬蘭、瑞典、丹麥工人接觸到 TCE 罹癌相對人數（Hansen et al., 2013）

罹癌種類	芬蘭		瑞典		丹麥		總計	
	實際	預估	實際	預估	實際	預估	實際	預估
肝癌(人數)	19	10	9	7	8	3	36	20
腎臟癌(人數)	16	15	11	11	5	5	32	32
子宮頸癌(人數)	11	5	1	1	4	1	16	7

環保署於民國107年11月綜整116家超過管制標準之工廠，其中以氯烯類為大宗（達39場）、重金屬（34場）、複雜性污染1（32場）等次之（圖3）。藉由歷年運作中工廠調查成果，發展本土化調查標準作業程序與專業整治技術，以有效調查各高潛勢污染場址的污染問題，俾利提升國內工業污染之管理與因應作為。



註：1.本圖統計日期為 107 年 11 月，統計 116 處場址。
2.一般項目檢出有硝酸鹽氮（運作 2 期）、氯鹽（運作 2 期）等。

圖 3 臺灣運作中工廠調查超過管制標準化合物類型分布（環保署，2021）

3.2. CAHs 整治技術

DNAPLs 污染場址之整治技術可分為離地（ex-situ）及現地（in-situ）兩種。離地處理係將地下水抽出至地表面上，再整治處理至符合法規標準，常見的工法為抽除處理法（pump and treat, P&T）（圖4）；現地整治技術包括空氣注入法、EIB 技術，其中 EIB 是目前環境污染整治趨勢（圖5）。EIB 技術主要原理是創造厭氧環境，促使微生物繁殖並加速脫氯反應，大致步驟包括灌入基質及營養鹽、藉由微生物耗氧以達成厭氧還原環境，最後則藉由發酵作用產生氫分子及醋酸鹽，加速厭氧還原脫氯作用。EIB 技術相較於其他物理整治技術，僅需基質灌注，為不需消耗大量能源之綠色整治技術（段鑫霖，2016）。鑑此，多元且低成本基質之研發，更顯為 EIB 技術之核心。

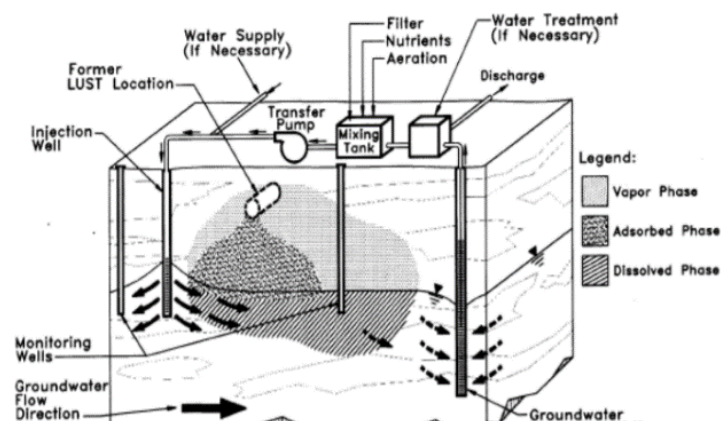


圖 4 抽除處理法示意圖（US EPA, 2004）

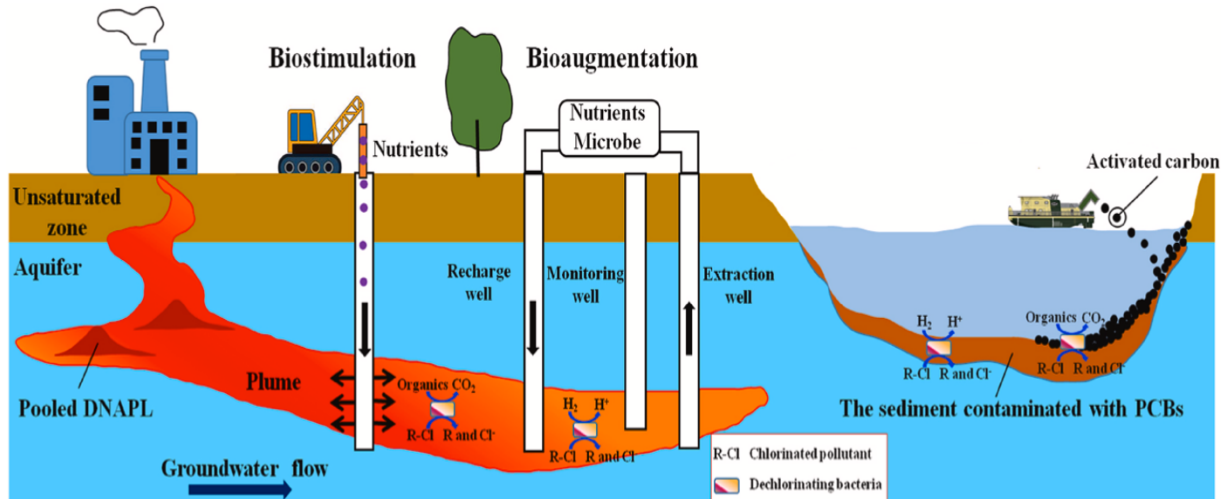


圖 5 EIB 技術示意圖 (Xiao et al., 2020)

為加強 EIB 之成效，會於現地添加微生物生長所需之基質，如碳源、營養鹽類等，支持電子提供者；能量基質則是提供能量電子（不支持生長）或碳源時，能將含氯有機物以共代謝或直接代謝等方式分解去除。通常好氧反應機制是添加氧為電子接受者；厭氧反應機制則添加硝酸鹽氧化劑作為電子接受者。

Jugnia 等人 (2019) 在利用廢甘油改善 RDX (Royal Demolition Explosive) 所污染之地下水，在檢測的三口井之中，有兩口井 RDX 初始濃度從 17~143 $\mu\text{g/L}$ 降至檢測極限值以下 ($0.1 \mu\text{g/L}$)，儘管廢甘油亦會對土壤及水體產生劑量效應，總體結果表明廢甘油可對 RDX 污染地下水有長期且半被動的修復，關鍵在於合理應用廢甘油以確保有足夠的碳濃度以進行生物降解 (圖6)。可見 EIB 技術使用提供碳源基質的重要性。

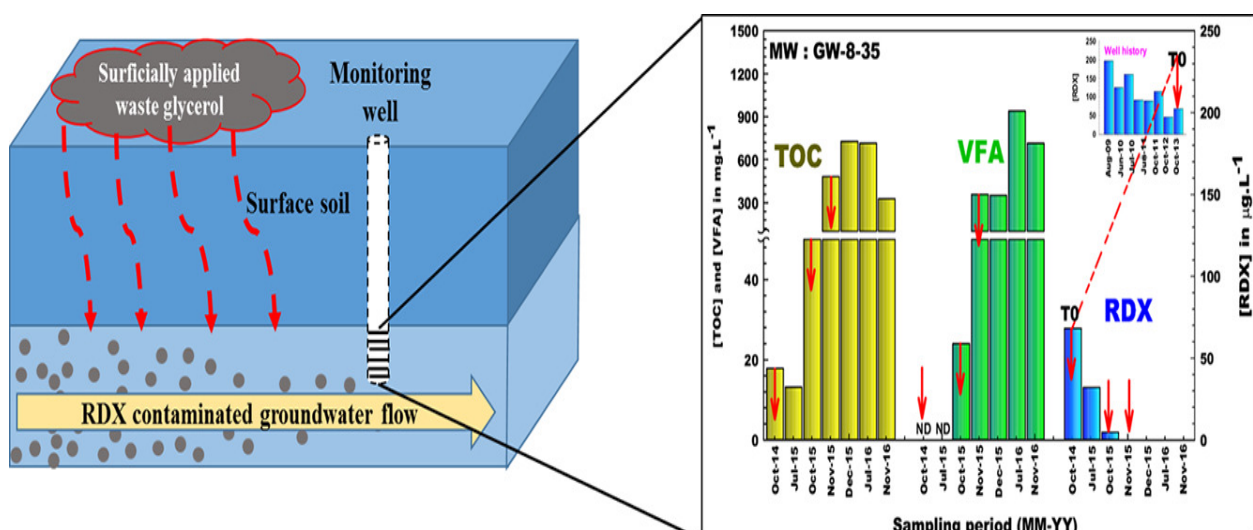


圖 6 EIB 使用案例 (Jugnia et al., 2019)



3.3. 基質研發現況

如表3所示，商業化之生物營養鹽基質，主要成分多為糖蜜、植物油、鈉、鉀、鈣等組成，乳酸（lactate）是現地試驗最常用的基質，主要發酵產物為乙酸鹽（acetate）及丙酸鹽（propionate）（Aulenta et al., 2007; Lendvay et al., 2003; Scheutz et al., 2008）。乳清（whey）、植物油等可以提供持久性有機酸和氫源的電子供體者。此外，還可採用可發酵成乙酸鹽的乙醇作為脫氯的增強劑（Hood et al., 2008; Perez-de-Mora et al., 2014）。由於與物理化學方法相比，EIB 技術的反應時間相對較長，因此延長電子供應時間是技術之關鍵挑戰之一。

表 3 應用 EIB 技術處理 CAHs 使用之基質及產物（Xiao et al., 2020）

Target CEs	Area	Electron donor/ Carbon source	Major products
TCE	Dover air force base	Lactate	Ethene
PCE	Kelly AFB, south central Texas	Methanol and Acetate	Ethene
PCE	The bachman road residential wells Site	Lactate	Ethene
PCE, TCE	Tarheel army missile plant	Emulsified oil	Vinyl chloride Ethene
TCE	Launch complex 34 (LC34), Cape canaveral air force station, Florida	Ethanol	Ethene
TCE	The Fort Lewis military base in Tacoma, WA	whey	Cis-DCE
Cis-DCE VC	Rugardsvej 234, Odense, Denmark	Soya bean oil	Ethene
TCE DCE	Burlington and ocean countries, New Jersey	Lactate	DCE Ethene
TCE	Gl. Kongevej, Copenhagen, Denmark	Molasses	Vinyl chloride Ethene
TCE	Southern Taiwan	Brown sugar	Cis-DCE Vinyl chloride Ethene
TCE	southern Ontario (ISSO), Canada	Ethanol	Ethene
TCE	Metals and halogenated organic compounds contaminated site	Acetate	Ethene
TCE	TCE contaminated, water-bearing conglomerate site near Tracy, California	Lactate	Ethene
PCE	Edwards air force base	Lactate	Ethene



國內常使用的基質有 EOS、JMS 及 Eco-Clean 等（表4）。EOS 為美國環保署、能源部與國防部等單位認可之食品及專利產品，使用天然無害的植物油及食品級界面活性劑、對含水層所造成的滲透率損失極低、持續效果長、每單位質量的電子供給量多，對自然環境友善且有高度經濟效益，已廣泛應用於世界諸多先進國家的含氯污染場址。

表 4 國內常用基質比較表（本計畫彙整）

項目	EOS	JMS	Eco-Clean
可處理 污染物	<ol style="list-style-type: none"> 含氯有機溶劑：四氯乙烯, 三氯乙烯, 三氯乙烷, 四氯化碳。 高能活性物質：過氯酸鹽, 高能炸藥, 三硝基甲苯 硝酸鹽(NO_3^-)。 氧化態重金屬：六價鉻等等。 物理放射性核種(radionuclides)：過鎳酸鹽, 氧化態二氧化鈾。 	<ol style="list-style-type: none"> 氯烯類污染物：四氯乙烯、三氯乙烯、二氯乙烯、氯乙烯等。 氯烷類污染物：三氯乙烷、二氯乙烷、二氯甲烷。 氧化態重金屬：六價鉻等。 	<ol style="list-style-type: none"> 含氯有機溶劑：四氯乙烯, 三氯乙烯, 三氯乙烷, 四氯化碳、二氯乙烯、二氯乙烷、二氯甲烷、氯乙烯。 氯苯、二氯六環。 氧化態重金屬：六價鉻等。
產品 特性	<ol style="list-style-type: none"> 主成份：60%的食品級大豆油、10%的非離子型乳化劑、4%的乳酸鈉、2%的酵母提取物及24%的水和維他命 B12。 比重：0.96~1.00 g/mL。 粒徑：約1.0 μm。 	<ol style="list-style-type: none"> 主成份：糖蜜、大豆油、界面活性劑、卵磷脂、去離子水、緩衝液、乳酸鹽、綜合維他命。 比重：N/A 粒徑：約 0.4-0.7 μm。 	<ol style="list-style-type: none"> 由氨基酸、維生素及礦物質等食品添加劑所構成。 比重：N/A 粒徑：N/A
優點	停留時間長、酸化程度低、單位提供電子供應者濃度高。	成本較低、擴散快、水溶性較高、灌注簡單。	成本低、擴散性佳、黏滯性低、可對應高濃度污染、安全性高、設備簡單，施工期間不影響工廠的正常營業和生產。
缺點	成本較高、擴散較慢、灌注較為頻繁。	停留時間短、較易酸化、單位提供電子供應者濃度較低。	客製化市場取向。



而台灣實際使用範例如新北市五股區某土壤地下水污染場址（圖6），其主要污染物為PCE、TCE、DCE及VC，整治方法以EOS注藥處理方式，並分為「廠內整治改善」及「污染物阻絕方式」，其初步成果如圖7所示，於第二階段注藥後其PCE及TCE濃度皆逐步降解為DCE及VC含氯量較少的化合物。

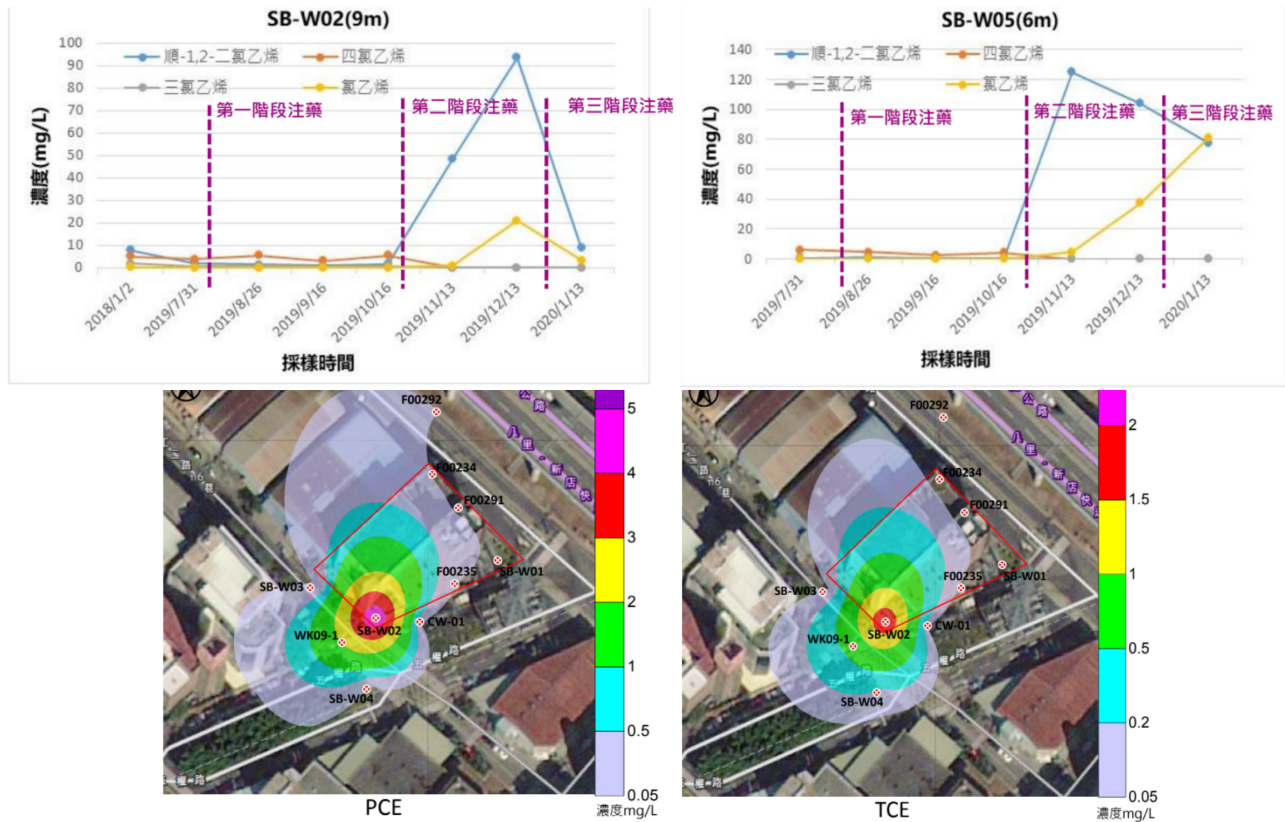


圖 7 新北市某染場以 EOS 降解 CAHs 之初步成果（環基公司提供）



3.4. 微奈米氣泡（MNB）相關研究

MNB 是直徑為微米和奈米級的微小氣泡（Alheshibri et al., 2019; Li et al., 2013）。一般來說，微米氣泡粒徑介於 $40\sim 1\text{ }\mu\text{m}$ ，而奈米氣泡粒徑小於 $1\text{ }\mu\text{m}$ （Haris et al., 2020），其特性如表5所示。除了體積小以外，MNB 還具有較大的比表面積、較高的界達電位，在水中的長停留時間以及較高的氧氣轉移效率等優點。這些屬性使 MNB 用於地下水污染整治比傳統的空氣注入法（air sparging）產生之 $2\sim 5\text{ mm}$ （macrobubbles）更有效（Haris et al., 2020）。

表 5 微米、奈米及大氣泡特性（Haris et al., 2020）

bubble type	diameter range (μm)	properties
macro-bubble/ traditional bubble	$10^2\sim 10^4$	<ul style="list-style-type: none"> ● bursts at the surface ● rises fast (retention time: seconds) ● poor mass transfer ● small surface area to volume ratio ● less hydroxyl radical ● low gas pressure
microbubble	$1\sim 10^2$	<ul style="list-style-type: none"> ● bursts in the bulk liquid ● rises slowly (retention time: minutes) ● good mass transfer ● large surface area to volume ratio ● more hydroxyl radical ● medium gas pressure
nano/ultrafine bubble	$10^{-3}\sim 1$	<ul style="list-style-type: none"> ● shrinks and bursts in the bulk liquid ● brownian motion (retention time: hours--months) ● higher mass transfer ● high surface area to volume ratio ● more hydroxyl radical ● high gas pressure



如圖8所示，MNB 如同兩個同心的氣體球包圍，兩者之間被一層水隔開（Guo et al., 2019; Khuntia et al., 2012），最外層則被反應溶液體所包圍。氣相可包含單一氣體或多種氣體，而氣體間會產生壓差而使氣泡穩定。MNB 製造的方法包括流體力學（hydrodynamic）、聲學（超聲）、電化學（electrochemical）或機械攪動（mechanical agitation）（Huang et al., 2020）。

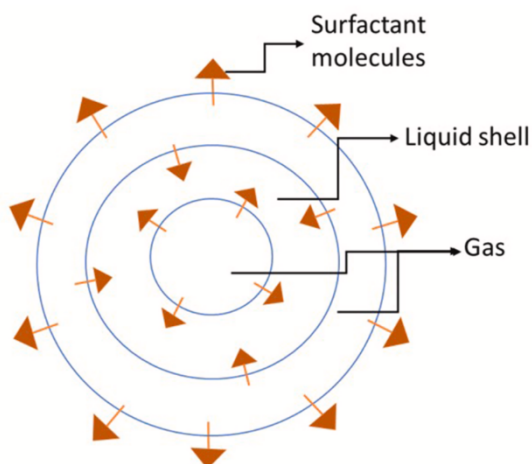


圖 8 微奈米氣泡構造（Haris et al., 2020）

隨著氣泡的連續收縮低於10 μm ，雙層氣泡的電荷密度迅速增加。當氣泡在水溶液中已達到很高濃度而破裂時，正電荷和負電荷將立即釋放累積的能量，產生許多自由基離子，例如氧離子，氫離子，氫氧根離子等，其中羥基自由基（ $\text{OH}\cdot$ ）具有很強的氧化作用，可以氧化和分解一些難降解的有機污染物（如苯酚），有助於水質淨化效果（Liu et al., 2012; Takahashi et al., 2007）。MNB 已用於降解水中甲基橙、有機質、石油碳氫化合物、三氯乙烯、硝酸銅等污染物（表6）；國內研究則應用於現地好氧生物整治石化污染物、整合電動力法及零價金屬金屬技術整治PCE 污染之土壤及地下水（行政院環境保護署，2018a & 2018b）。

然而，MNB 技術仍有待克服與研究突破之處：如缺乏實場研究案例、氣泡粒徑大小不穩定、與污染物反應之案例少（Klammler et al., 2020）、與微生物活動的協同和拮抗相互作用尚不清楚，以及 MNB 技術之成本效益分析。雖有相關研究證實 MNB 技術的成本低於其他傳統處理方法（Rizaldi et al., 2019; Vion, 2007），但仍沒有足夠的數據來進行可靠的定量分析。



表 6 微奈米氣泡應用於地下水污染整治案例 (Haris et al., 2020)

	Type	Initial concentration	Reaction time	Removal rate (%)	Size	Gas/additive	Working conditions	and year
1	methyl orange	50 mg/L	50 min	100	265 nm	ozone	reaction tank 20 L in lab, 20 °C	Xia and Hu (2019b)
2	methyl orange	10 mg/L	30 min	98.2	247 nm	ozone	colume test: 0.12 m diameter, 0.76 m high, glass beads	Hu and Xia (2018)
3	methyl orange	10 mg/L	30 min	1	247 nm	oxygen	colume test: 0.12 m diameter, 0.76 m high, glass beads	Hu and Xia (2018)
4	methyl orange	10 mg/L	2 h	99	\	ozone	colume test: 0.1 m diameter, 0.15 m high, sandy soil	Liu et al. (2018)
5	Industrial wastewater (COD)	4500 mg/L	14 h	63	266 nm	ozone	reaction tank 20 L in lab, 21 °C, pH 9.9, high salinity	Xia and Hu (2019b)
6	Contaminated Groundwater	Benzene (31); Chlorobenzene (15); Nitrobenzene (503); p (0)-nitrochlorobenzene (10), mg/L	30 min	Benzene (98); Chlorobenzene (97); Nitrobenzene (67); p (0)-nitrochlorobenzene (35)	267 nm	ozone	reaction tank 20 L in lab, 22 °C, pH 6.7	Xia and Hu (2019b)
7	Trichloroethylene (TCE)	10 mg/L	6 days; 9 h/day	99	247 nm	ozone; H ₂ O ₂	field test in an organics contaminated site; 6.5 m below the ground surface; sandy aquifer (hydraulic conductivity 10–6 m/s)	Xia et al. (2019)
8	Nitrogen	40 mg/L	24 h	99	25 µm	hydrogen	laboratory-scale cylindrical reactor with Enriched hydrogenotrophic denitrification (HD) sludge (microbial community), 32 °C.	Eamrat et al. (2020)
9	petroleum hydrocarbons	8000 mg/kg	120 min	70.9	220 nm-50 µm	ozone	0.04 m diameter, 0.7 m high column with oily sludge;	Sun et al. (2020)
10	Butylated hydroxytoluene (BHT)	0.9 µM	60 s	77	14.64 µm	ozone	a batch type reactor 16 L, flow rate of bubble generator 75 L/min; ozone flow rate 1 L/min	Achar et al. (2020)
11	n-Decane	3.3 mL	72 h	42	4.9 µm	ozone	a glass column (15 cm × 2.5 cm) with glass beads, gas flow rate of 2.0 mL/min	Kwon et al. (2020)
12	copper nitrate	500 ppm	6 h	18.48	171 nm	Hydrogen	the batch test with soil (sand), solid-liquid ratio 1:20	Kim and Han (2020)

3.5. 土壤地下水污染成本效益分析

成本效益分析 (cost benefit analysis, CBA) 是從經濟效率的角度，研議政策或計畫是否值得採行。各種相關的成本效益能夠數量化及貨幣化的程度不同，多目標分析除考慮效率外，通常兼顧處理公平、正義、生態維護等社會價值 (張四明，2001)。有鑒於環境及社會效益不易以貨幣衡量表示，常以自然單位如延長壽命之年數、存活個案數、生理或生化指標等 (梁美健等，2013)

我國環保署自民國95至105年止，已執行八期廢棄工廠土壤及地下水污染調查計畫經費及調查分析費用。如表7所示，八期計畫總經費支出累計花費超過4.5億元，場址調查分析單價介於43~90萬元/家之間，平均場址調查分析單價為68.6萬元/家。



表 7 廢棄工廠調查計畫歷年經費統計表（孫冬京，2017）

期別	年度	計畫經費 (千元)	調查分析費 (千元)	調查分析 費佔總計 畫經費比 例 (%)	調查分析數量 (家)			調查單 價 (千 元/家)
					盤查	環境場址 評估	調查	
第1期	2004	15,675	8,660	55.2%	100	25	15	577
第2期	2006	21,966	15,132	68.9%	270	40	20	756
第3期	2007	51,807	40,455	78.1%	337	80	50	809
第4期	2009	63,615	45,009	70.8%	463	92	50	900
第5期	2010	47,000	-	-	6,010	-	-	-
第6期	2012	97,232	11,992	12.3%	34,827	105	20	600
第7期	2013	73,545	8,617	11.7%	-	805	20	431
第8期	2015	87,900	16,885	19.2%	1,693	1,056	39	433
合計	-	458,740	146,750	32.0%	43,693	2,203	214	686

資料來源：全國廢棄工廠土壤及地下水污染潛勢調查計畫、全國廢棄工廠土壤及地下水污染潛勢調查計畫（第二年）、96 年度廢棄工廠土壤及地下水污染潛勢調查計畫、廢棄工廠土壤及地下水污染潛勢第四期調查計畫、全國廢棄工廠土壤及地下水污染潛勢基線普查計畫、全國廢棄工廠土壤及地下水污染潛勢總體檢第一期計畫、102 年度廢棄工廠土壤及地下水污染潛勢評估及調查計畫、104 年度廢棄工廠土壤及地下水污染潛勢評估及調查計畫（8 期廢棄工廠污染調查計畫）。

美國環保局編撰土壤地下水污染整治技術費用手冊（US EPA，2016），針對 270 個以上場址中最常用的整治技術進行評估，包括生物整治、熱脫附、土壤氣體抽除、現地焚化、地下水抽除處理及反應牆。其中生物整治費用受到土壤、地下水及污染物種類及濃度等限制，案例單價約美金 33~558 元/噸。我國整治技術費用係參考孫冬京（2017）研究報告，翻轉稀釋工法之改善費為新臺幣 128 元/平方公尺、酸洗法搭配排客土法為新臺幣 22,379 元/平方公尺、現地化學氧化法及生物復育，搭配地下水抽出及處理法為新臺幣 293~2,980 元/平方公尺（表 8），然而土壤地下水污染整治成本效益因各案場狀況而有所不同，仍需個案評析。



表 8 我國廢棄工廠調查污染場址改善工法暨整治經費、面積彙整表（孫冬京，2017）

污染類型	改善工法	改善工法家數 (家)	場址面積總和 (m ²)
土壤	排客土	13	560,559
	翻轉稀釋	9	67,955
	翻轉稀釋/排客土/生物復育	1	89,156
	翻轉稀釋/排客土	38	454,814
	排客土/土壤酸洗法	2	14,084
	翻轉稀釋/排客土/熱脫附	1	34,582
	翻轉稀釋/土壤酸洗法/磁性分選	1	8,010
	翻轉稀釋/排客土/土壤酸洗法	2	32,611
	翻轉稀釋/排客土/土壤酸洗法/生物復育	1	12,108
	翻轉稀釋/土壤酸洗法	1	11,809
	排客土/生物復育	1	33,000
	小計	70	1,318,688
土壤及地下水	土壤：風險管理 地下水：風險管理	1	365,025
	土壤：翻轉稀釋/排客土 地下水：化學氧化處理法/生物處理法	1	12,986
	土壤：排客土/現地淋洗法/現地化學氧化法/生物復育 地下水：抽出及處理法	1	20,300
	土壤：翻轉稀釋/排客土/離地熱處理法 地下水：無資料	1	14,394
	土壤：排客土/熱脫附 地下水：化學氧化處理法/生物處理法/ 抽出及處理法	1	178,463
	小計	5	591,168
地下水	生物處理法	2	66,485
	抽出及處理法	1	2,373
	小計	3	68,858
總計		78	1,978,714

備註：統計表為 78 家有蒐集到污染改善工法之污染場址統計。





四、研究方法與過程（含工作進度甘特圖）

4.1. 研究架構

本計畫架構如圖9所示，由業界提供未知濃度之 CAHs 污染物溶液（已含脫氯菌），作為模擬含氯地下水之試驗環境，土壤地下水環境則加入乾淨之粉土靜置數週後使用；再者使用研發之 TEE，作為一種天然生物鹼加入一種微生物做催化，激活其中能量，與市售之 EOS 基質比較對於 CAHs 污染物之降解效率。除了 TEE 為關鍵技術外，本計畫嘗試加入微奈米氣泡（MNB）處理法，利用小於200奈米氣泡加速羥基自由基（ $\text{OH}\cdot$ ）之產生，而達到含氯烯類脫氯之成效。

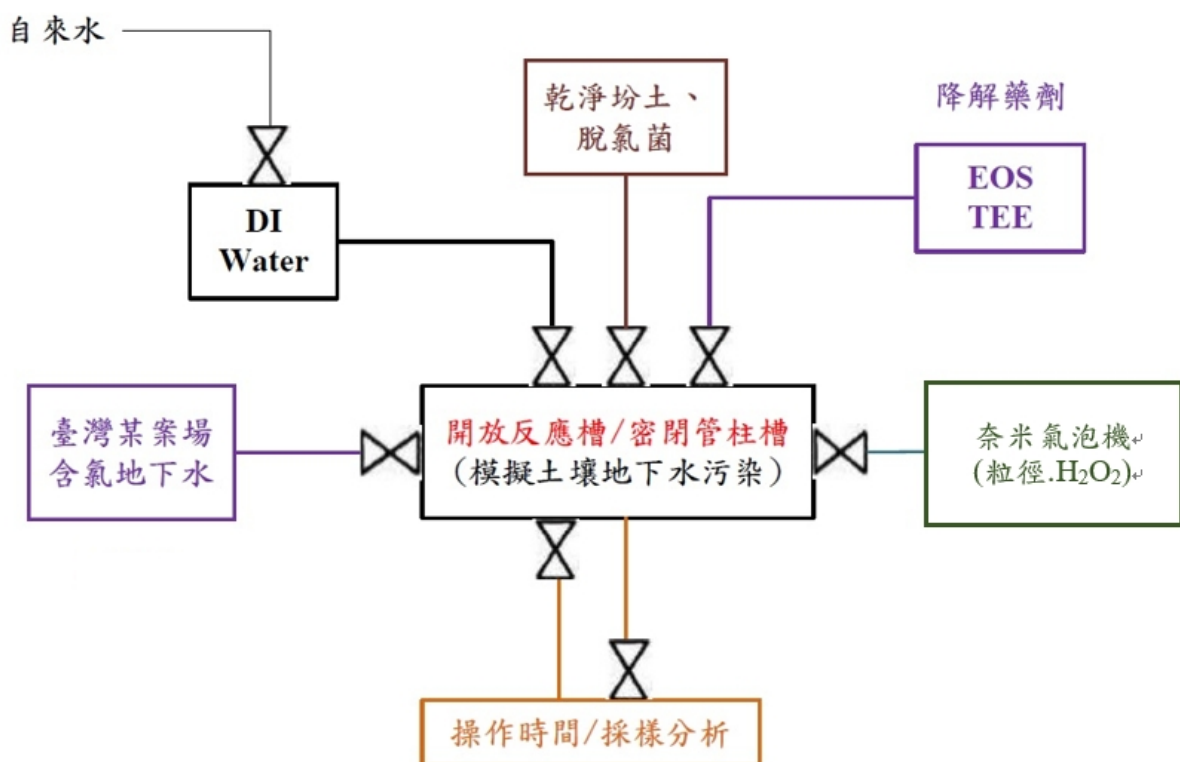


圖 9 本計畫架構



4.2. 實驗設備及基質

本計畫實驗環境可分為兩部分，分別為開放反應槽及密閉管柱設備，如圖9所示，於40公升方形桶槽中連接水管以微奈米氣泡產生機（圖10）製造 MNB 注入，操作時以木板蓋住開口以減少環境外部污染，基質添加及採水樣時以上開口進行。密閉管柱設備則參考許茹婷等（n.d.）研究，其包含填充 CAHs 之土壤地下水填充管柱、水樣循環馬達、微奈米氣泡產生器、基質添加單元，以及水質檢測點位等（圖11）。本計畫使用之基質包含 EOS 及 TEE，分別由優司亞環境科技股份有限公司及環基環境永續股份有限公司提供（圖12），現地含氯地下水則由業界取樣提供，坵土經由篩分析確認其粒徑介於0.05-0.002 mm 之間，浸至於含氯地下水數週後，模擬土壤地下水污染情境使用。

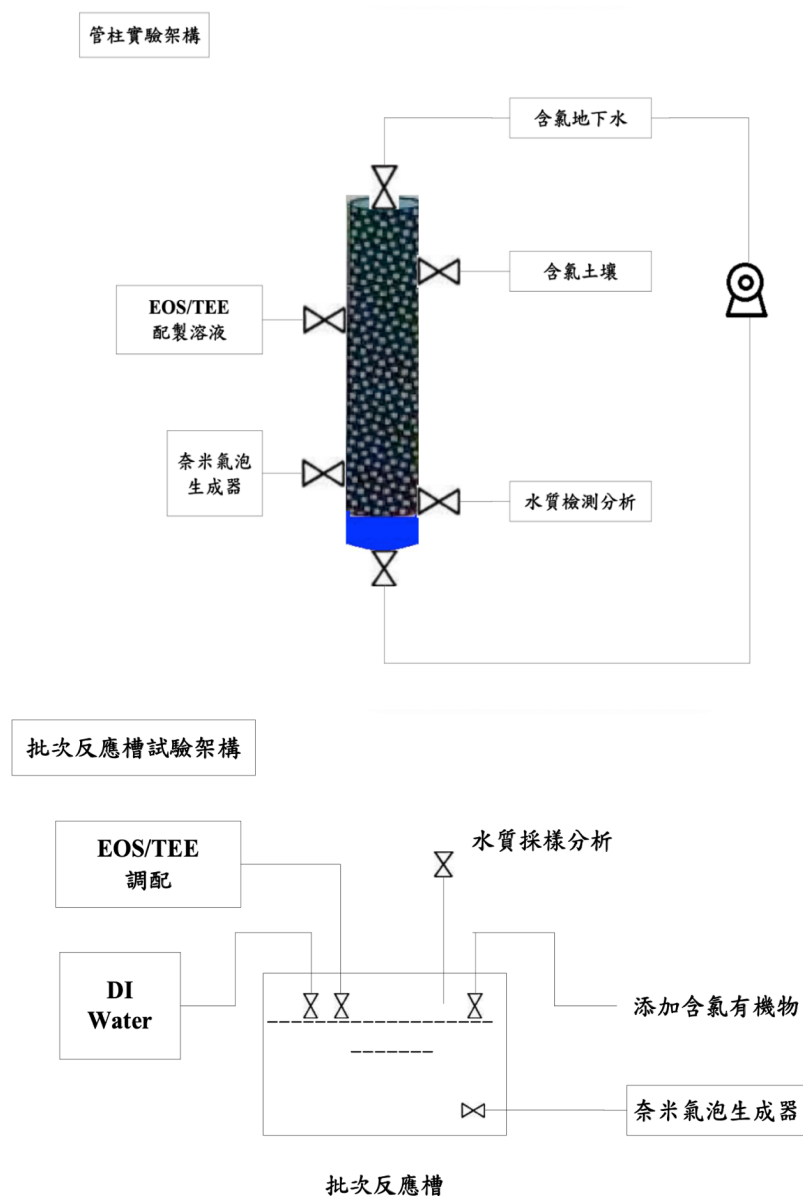


圖 10 本計畫設計之開放反應槽及密閉管柱設備圖



圖 11 本計畫租借之微奈米氣泡產生機設備圖

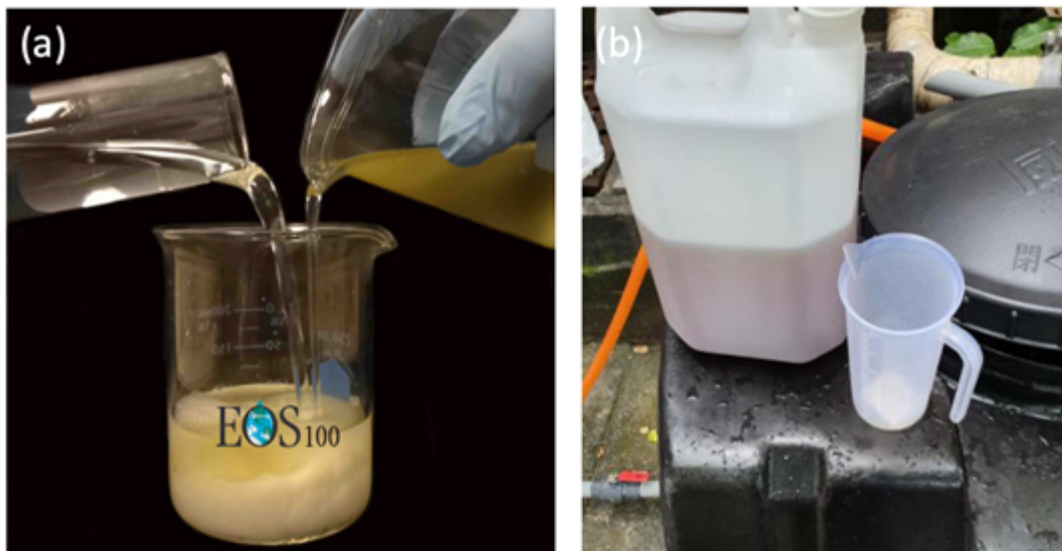


圖 12 本計畫使用之 EOS (a)及 TEE (b) 基質示意圖



4.3. 實驗步驟

本計畫試驗組合如表9所示，期中報告前完成試驗1~7，確認單位 CAHs 使用之 EOS 及 TEE 濃度及加藥量，試驗4及8則單獨探討 MNB 對 CAHs 之影響。期末報告則依據前述試驗結果，進行多重變因複合探討（試驗10~12），另試以添加總水量2%過氧化氫溶液（ H_2O_2 ）加速羥基自由基產生（2008，陳氏），建議最佳之 MNB 注入時間與加藥時間。

表 9 本計畫之試驗組合

規劃 執行 進度	反應環境		含氯地下水污染				含氯土壤地下水污染			
	試驗	代號	無添加	TEE	EOS	MNB	無添加	TEE	EOS	MNB
期中 報告	1	W-0	√							
	2	W-TEE		√						
	3	W-EOS			√					
	4	W-B				√				
	5	WS-0					√			
	6	WS-TEE						√		
	7	WS-EOS							√	
期末 報告	8	WS-B								√
	9	WS-B ⁺								√
	10	WS-B-TEE						√		√
	11	WS-B ⁺ -TEE						√		√
	12	WS-TEE-B						√		√

備註：MNB 為微奈米氣泡；B⁺為添加過氧化氫加速羥基自由基產生；TEE 及 EOS 為基質。

本計畫初設之操作參數如表10所示，參考國內污染場址濃度，預計 PCE 初始濃度約為10 mg/L，但每批次污水初始濃度恐不易掌握，計畫結果將以污染物濃度



比初始濃度（ C/C_0 ）方式呈現，探討污染物降解效率。經與原廠確認基質使用方法後，EOS 使用前需稀釋20倍，TEE 則不需稀釋即可使用，兩種基質添加量約為受污染水體積之1/50~1/1,000，原則上 TEE 添加量約為 EOS 之1/10，以 0.1~1.0 L/min 速率注入，進行污染物及水質監測，反應時間為30天。本計畫注入之 MNB 粒徑約為100~1,000 nm，每批次試驗皆做二重複，誤差值小於5%。

表 10 本計畫初設之操作參數

操作項目	參數																												
CAHs 起始濃度	<table><tr><th rowspan="2">污 染 物</th><th rowspan="2">管制濃度 單位 mg/L</th><th colspan="3">模擬整治調配濃度*</th></tr><tr><th>初期 高</th><th>整治中 中</th><th>晚期 低</th></tr><tr><td>PCE</td><td>0.05</td><td>10_(×200)</td><td>5_(×100)</td><td>0.05_(×1)</td></tr><tr><td>TCE</td><td>0.05</td><td>5_(×100)</td><td>2.5_(×50)</td><td>0.05_(×1)</td></tr><tr><td>DCE</td><td>0.7</td><td>--</td><td>14_(×20)</td><td>70_(×100)</td></tr><tr><td>VC</td><td>0.02</td><td>--</td><td>0.2_(×10)</td><td>20_(×100)</td></tr></table> <p>註:*模擬濃度係參考土基會列管場址資料預估 (如漢翔航空及台塑仁武廠等)</p>	污 染 物	管制濃度 單位 mg/L	模擬整治調配濃度*			初期 高	整治中 中	晚期 低	PCE	0.05	10 _(×200)	5 _(×100)	0.05 _(×1)	TCE	0.05	5 _(×100)	2.5 _(×50)	0.05 _(×1)	DCE	0.7	--	14 _(×20)	70 _(×100)	VC	0.02	--	0.2 _(×10)	20 _(×100)
污 染 物	管制濃度 單位 mg/L			模擬整治調配濃度*																									
		初期 高	整治中 中	晚期 低																									
PCE	0.05	10 _(×200)	5 _(×100)	0.05 _(×1)																									
TCE	0.05	5 _(×100)	2.5 _(×50)	0.05 _(×1)																									
DCE	0.7	--	14 _(×20)	70 _(×100)																									
VC	0.02	--	0.2 _(×10)	20 _(×100)																									
反應槽體積	密閉管柱：42 cm (D) * 105 cm (H) 開放反應槽：40 L (61 cm * 42 cm * 35 cm)																												
基質濃度	EOS：約為受污染水體積之1/50~1/100 TEE：約為受污染水體積之1/500~1/1000																												
土壤性質	粒徑介於0.05~0.002 mm 之粉土																												
基質注入速度	1 mL/min																												
微奈米氣泡大小	100~1,000 nm																												
反應時間	30天																												

備註:上述操作參數與條件為初設值，將視實驗實際狀況調整。

試驗1~8著重於基質添加量之探究，將以錐形瓶或燒杯進行試驗，詳細試驗步驟如下：

1. 分別於錐形瓶/燒杯中，置入500 mL 受污染之地下水，並依序編號。
2. 對照組不添加任何基質，水樣注入後以多層封口膜將瓶口密封。
3. EOS 試驗組，以定量移液管緩慢加入25 mL EOS（需稀釋20倍後，取25 mL 使



- 用)，以玻棒輕輕攪拌使其均勻混合後，以封口膜將瓶口密封。
4. TEE 試驗組，以定量移液管緩慢加入2.5 mL TEE（原液，不須稀釋），以玻棒輕輕攪拌使其均勻混合後，以封口膜將瓶口密封。
 5. 試驗樣品靜置於不受擾動、陰暗、不受陽光照射之位置，並依規劃進行採樣。
 6. 實驗進行之第0、1、5、10、15、20、25及30天，分別進行2重複採樣，每個樣品約5~10 mL。
 7. 採樣後，立即將錐形瓶重新以封口膜密封。
 8. 取得樣品後，需先進行過濾再以儀器分析污染物濃度。

4.4. 檢測分析

本計畫將針對 CAHs 於水中之濃度及微奈米氣泡性質檢測分析，試驗反應中即時監測水中 DO、EC；CAHs 則以氣相層析質譜儀分析包含 TCE、DCE 及 VC；氣泡產生過程則以界面電位分析儀檢測其粒徑大小，整體檢測規劃如表11所示。

表 11 本計畫之檢測項目、方法及設備

檢測項目	分析方法	使用儀器
溶氧 (DO)	水中溶氧檢測方法－電極法	YSI 2030
導電度 (EC)	水中導電度測定方法－導電度計法	YSI 2030
氯離子 (Cl ⁻)	水中陰離子檢測方法－離子層析法	離子層析儀 (Metrohm Eco)
三氯乙烯	水中揮發性有機化合物檢測方法-吹氣捕捉/氣相層析質譜儀法	氣相層析質譜儀 (Agilent 7890 B)
二氯乙烯		
氯乙炔		
氣泡粒徑	—	界面電位分析儀

以下分就不同儀器對應之檢測項目詳述其檢測步驟、藥品及設備環境：

1. 手持式水質檢測儀：檢測水中 DO、EC

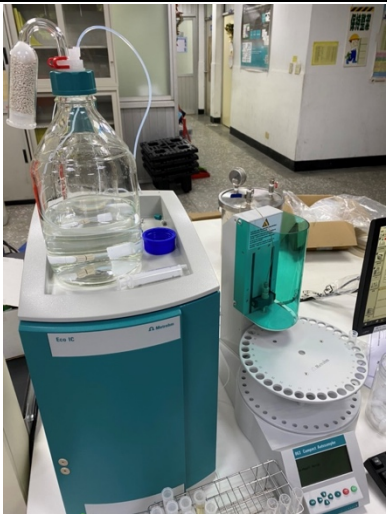
本計畫使用之儀器可同時測量溶氧量、導電度和溫度，只需按一下按鈕，即可在幾秒鐘內完成數值量測。



手持式水質檢測儀		
廠牌	YSI 2030	
溫度範圍	-5~55°C	
溶氧範圍	0 至 50 mg/L	
氣壓範圍	400 至 999.9 mmHg	

2. 離子層析儀：檢測水中氯離子


- (1) 打開離子層析儀，依樣品來源或濃度之不同，調整導電度偵測器。
- (2) 使儀器熱機約5~10分鐘，觀察偵測器圖譜達到平衡。
- (3) 依環檢所公告之離子層析法（NIEA W415.54B），製備標準品之檢量線，其濃度為0.1 mg/L、0.5 mg/L、1 mg/L、10 mg/L、20 mg/L。
- (4) 將待測樣品經注射器濾膜過濾後，置入樣品輪盤進行檢測。

設備圖	使用藥劑			
	藥品名稱	化學式	純度	廠牌
	氯離子	Cl ⁻	1,000 ppm	hps
	碳酸鈉	Na ₂ CO ₃	1,000 ppm	PanReac
	碳酸氫鈉	NaHCO ₃	1,000 ppm	SINMA
	硫酸	H ₂ SO ₄	1,000 ppm	Honeywell



3. 氣相層析質譜儀：檢測水中 VC、DCE、TCE

- (1) 打開氣相層析質譜儀，確認氧氣瓶及氬氣瓶開啟並且正常進氣。
- (2) 依環檢所（NIEA M711.04C）方法置備檢量線，其濃度為0.1 mg/L、0.5 mg/L、10 mg/L、20 mg/L、50 mg/L。
- (3) 設定欲測量溫度、時間，並建立輪盤中樣品之檢測方法及名稱。
- (4) 將待測樣品經注射器濾膜過濾後，置入樣品輪盤進行檢測。

設備圖	使用藥劑			
	藥品名稱	化學式	純度	廠牌
	<u>氯乙烯</u>	<u>C₂H₃Cl</u>	<u>2,000 ppm</u>	<u>AccuStandard</u>
	<u>二氯乙烯</u>	<u>C₂H₂Cl₂</u>	<u>2,000 ppm</u>	<u>AccuStandard</u>
	<u>三氯乙烯</u>	<u>C₂HCl₃</u>	<u>2,000 ppm</u>	<u>AccuStandard</u>
	<u>四氯乙烯</u>	<u>C₂Cl₄</u>	<u>2,000 ppm</u>	<u>AccuStandard</u>



4.5. 成本效益分析

圖13為環保署建立之綠色及永續導向整治架構圖，重視在整治工作執行過程中，均思考環境、社會及經濟三方面之影響，除了達到整治目標外，並減少環境衝擊。有鑒於環境及社會效益部分不易以貨幣衡量表示，本計畫參考（孫冬京，2017）研究方法，採用成本有效性分析，經由投入成本相對於目標實現程度的比值來研析成本效益。茲就「成本」及「效益」分析方法說明如后：

1. 成本評估：本計畫考慮之成本項目為直接成本，包括廢棄工廠污染調查及改善整治成本兩部分。整治成本係參考環保署2012年執行「污染場址綠色及永續整治策略研擬計畫」，即為投入設備、原物料、電力與人員之成本。本計畫參考陳葦亭（2016）研究建立之生物整治表單，探討人力、交通、機械設備、材料、水、電等資源消耗所衍生之成本，如表12所示。

污染調查成本包括「事前規劃設計成本」、「污染改善工程費用」及「事後監測與成效驗證成本」三項（環保署，2012）。因 EIB 屬低成本情境，「事前規劃設計成本」及「事後監測與成效驗證成本」估算方式為前述「整治成本」分別乘以0.13、0.05。加強式生物復育工法（EIB）之「污染改善工程費用」單價約為新臺幣4,000元/噸（孫冬京，2017）。

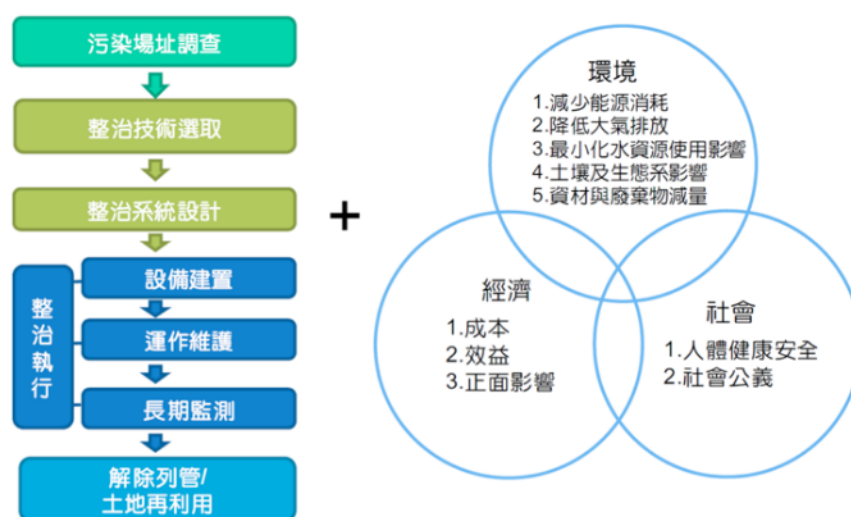


圖 13 環保署綠色及永續導向整治架構圖（環保署，2013）



表 12 本計畫之成本效益分析架構

污 染 調 查 成 本	事前規劃設計 成本				
	污染改善工程 費用				
	事後監測與成 效驗證成本				
整 治 成 本	污染物				
	處理量	土壤：	公斤	水：	公斤
	人力資源	人數：	人	時薪：	元 / 時
	使用設備	名稱	使用時間(時)	電功率(kW)	燃料類型
	材料	名稱	使用量	單價(元)	總價(元)
	用水量	噸			

2. 效益：效益可分為土地價值、健康效益、農作效益、水質改善效益、自然資源與環境效益等五項（環保署，2012）。本計畫係屬於第一年試驗計畫，無法評估土地價值、健康效益及農作效益、自然資源與環境效益。僅能就水質改善效益，探討污染削減量與水處理成本之關係性，求得效益。

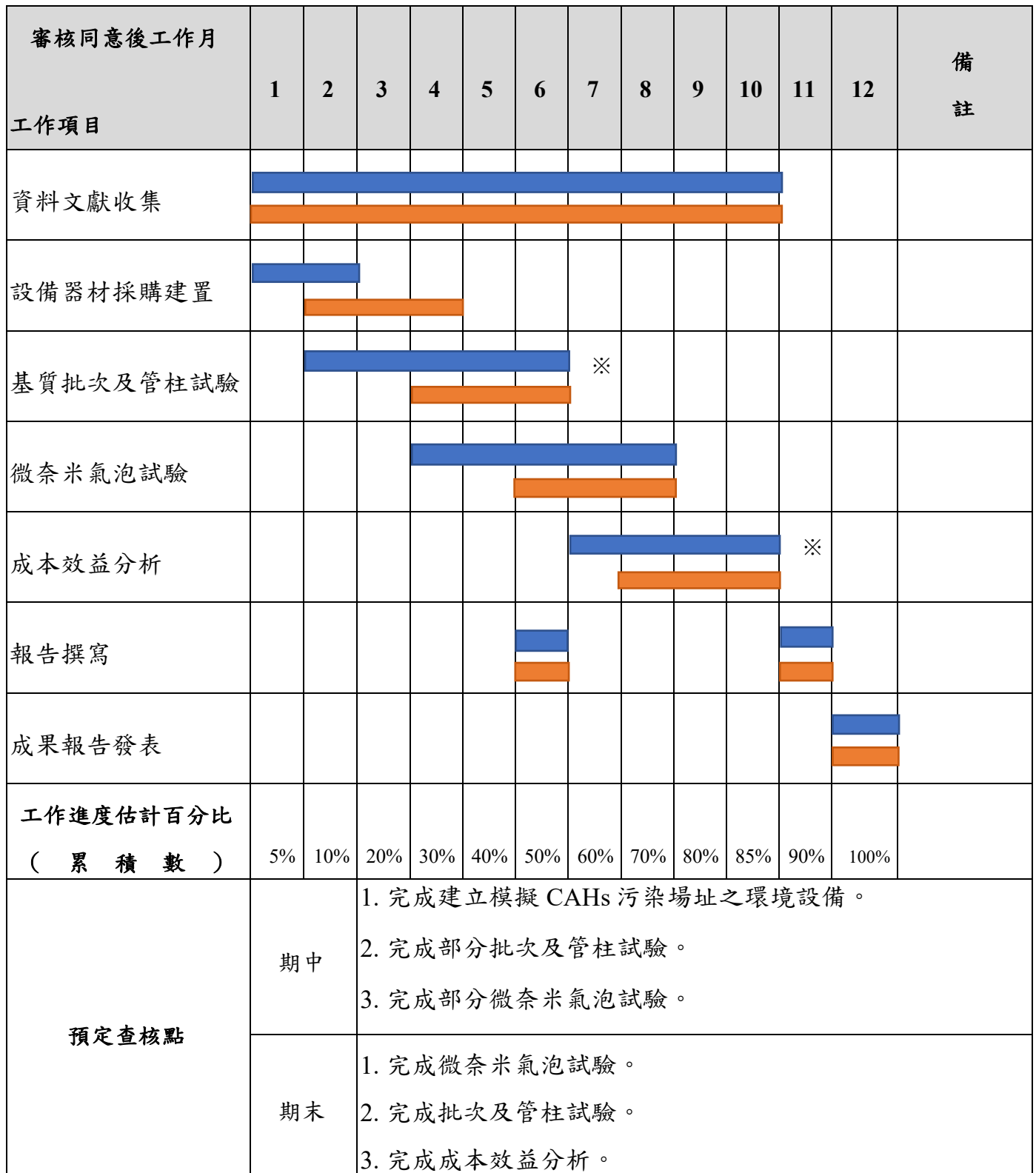


4.6. 工作進度甘特圖

本計畫之工作甘特圖如表13所示，已於2月完成氣相層析儀儀器設置、6月完成微奈米氣泡產生機租賃、7月完成離子層析儀設置，密閉管柱器材也於6月完成訂製交貨，本計畫所需之設備器材已如期完成採購建置。基質批次試驗是從5月開始執行，每批次試驗期程為30天；微奈米氣泡試驗於7月開始進行，期中報告（民國110年8月5日）僅能呈現階段性成果。本計畫在執行期間會持續收集文獻資料研析，並於期末報告（民國111年2月28日）前完成結合基質藥劑及微奈米氣泡管柱試驗，漸少受疫情影響工作進度之衝擊。



表 13 本計畫之工作甘特圖



預定進度： 實際進度：



五、結果與討論

5.1. 儀器定性與定量

本計畫使用之 Agilent 7890 B 氣相層析儀儀器是由本校化工系轉贈，從 2 月開始辦理移機工作，陸續安裝、功能測試及教育訓練，於 6 月完成後儀器穩定可打出氯乙烯 R^2 為 0.99 之檢量線（圖 14(a)），後續 DCE 及 TCE 之方法將依照 VC 成果陸續完成建置。Metrohm Eco 離子層析儀 2 月於本校完成招標採購，受疫情影響 6 月完成交貨，陸續安裝、功能測試及教育訓練，於 6 月完成後儀器穩定可打出氯離子 R^2 為 0.999 之檢量線（圖 14(b)），後續可測得水中生成之氯離子濃度。

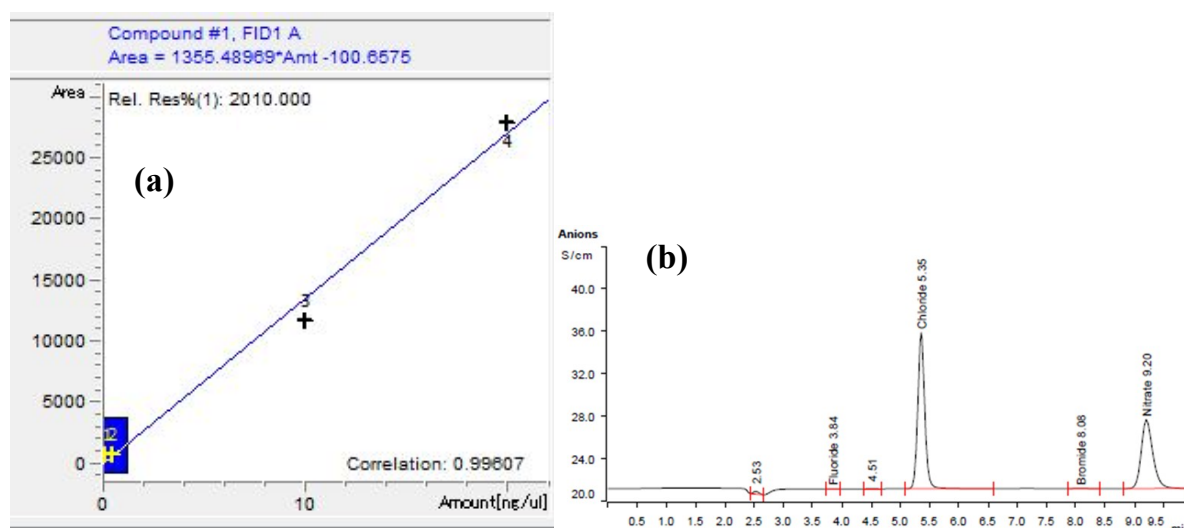


圖 14 本計畫使用之氣相層析儀(a)及離子層析儀(b)穩定性之檢量線圖

5.2. 基質性質

表14為本計畫使用之 TEE 及市售 EOS 性質比較表。從外觀來看，TEE 與 EOS 分別呈現棕褐色及乳白色液體狀。TEE 之水溶性為100%較 EOS 高，TEE 之比重也略較 EOS 高，常於試驗過程形成白色生物膜浮於水面（EOS 比水輕）。TEE 與 EOS 之黏度分別為2.914 cP 及500~1,500 cP，兩者差距甚大，前者水溶性使之黏度過低，不利於附著於土壤中，提供足夠時間讓噬氯菌作為基質食用，進而影響降解水中含氯污染物之效率。



表 14 不同基質（TEE 及 EOS）性質之比較表

基質	TEE	EOS
型態	液體	液體
顏色	棕褐色	白色
比重	1.236	0.96-0.98
黏度	2.914 cP	500-1,500 cP
沸點	103 度	212°F (100°C)
溶解度	100%	可溶性
pH	10~13	6~7

5.3. 基質降解含氯（土壤）地下水之環境變化

圖15為不同基質降解含氯（土壤）地下水之溶氧變化，試驗起始時，水中溶氧濃度穩定介於5至7 mg/L之間，無缺氧現象。然而，試驗5天後，各批次溶氧濃度逐漸降低至3~5 mg/L，推測為脫氯菌反應產生氫氣（ H_2 ）而致厭氧環境。反之，在循環管柱試驗中(Ws-TEE-B)，水中溶氧濃度保持穩定在7 mg/L 且無缺氧狀態，推測為水循環流動導致。

圖16為不同基質降解含氯（土壤）地下水之導電度變化，試驗對照組 W-0及 WS-0之導電度於反應前分別約為100 mho/cm 及200 mho/cm，可見土壤為導體介質，反應啟動後導電度皆有上升趨勢，脫氯反應可從導電度變化觀察，兩者呈正向趨

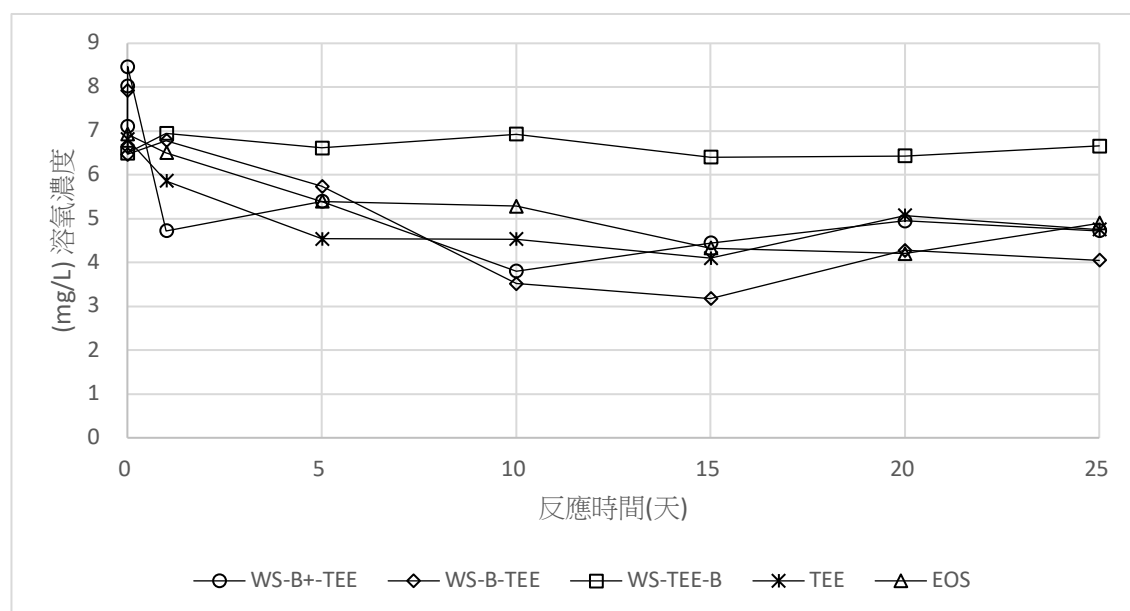


圖 15 不同基質降解含氯（土壤）地下水之溶氧變化



勢。然而，W-EOS 試驗之導電度變化趨勢與對照組（W-0）相近，證實了 EOS 反應需要土壤介質存在。

本團隊研發之 TEE 在無土壤介質之反應環境（W-TEE），其導電度自反應第5天急速上升至1,600 mho/cm，延續至第30天仍有1,300 mho/cm 之導電度，可見 TEE 可於水中（非必須土壤環境）長期緩慢釋放離子，促使離子化反應進行。TEE 於含土壤介質之反應環境（WS-TEE）離子釋放量較低，但仍較 EOS（WS-EOS）及空白對照組（WS-0）高。EOS 無助於離子化反應，無論何種介質環境。

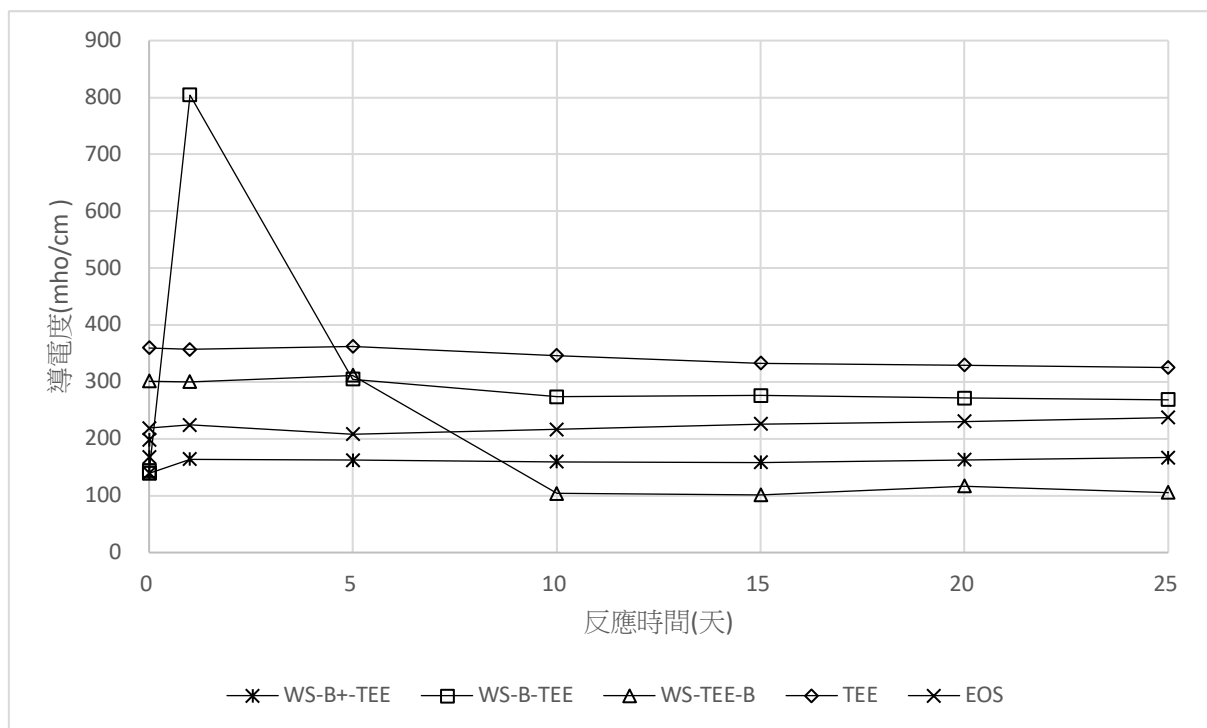


圖 16 不同基質降解含氯（土壤）地下水之導電度變化

圖17不同基質降解含氯（土壤）地下之 pH 濃度變化，由於 TEE 基質屬強鹼性生物鹼，加入後水中 pH 值自第15天逐漸降低至中性範圍（pH 6~8），應為噬氯菌在反應過程中釋出氫離子（ H^+ ）而改變 pH 環境；反之，使用 EOS 基質之 pH 環境介於7~8之穩定中性。

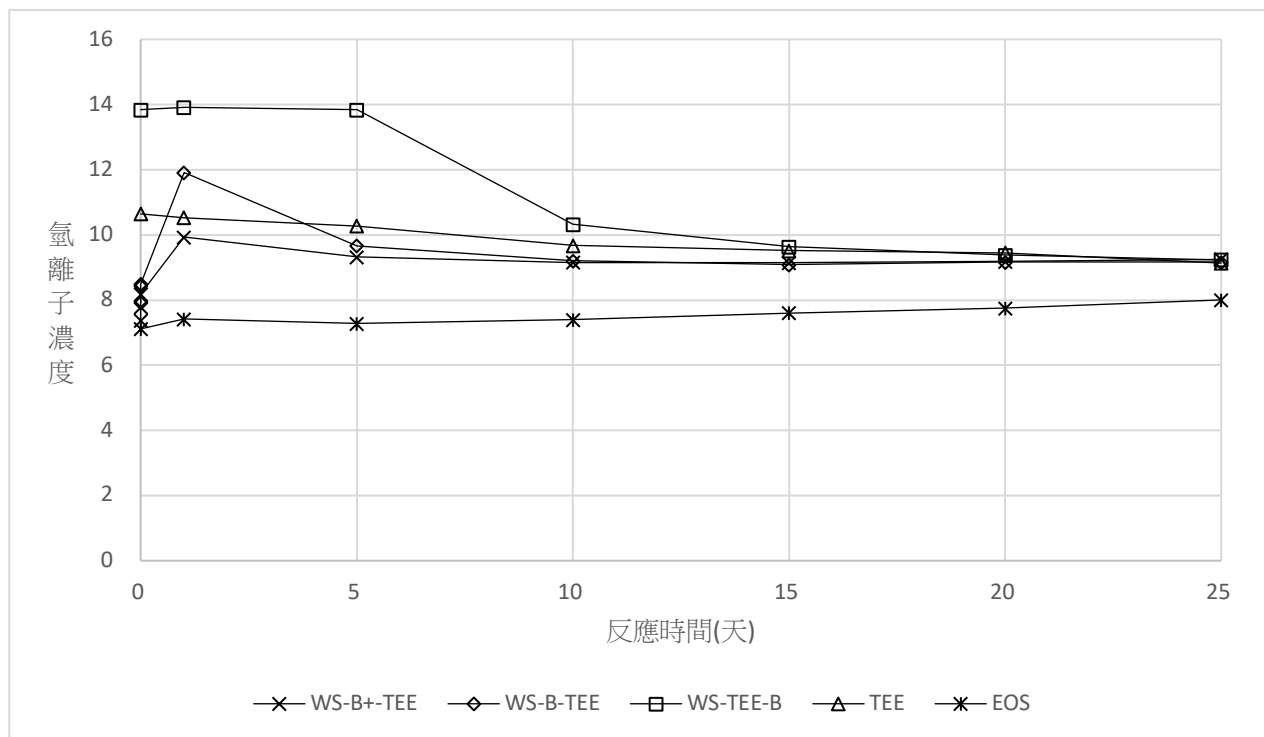


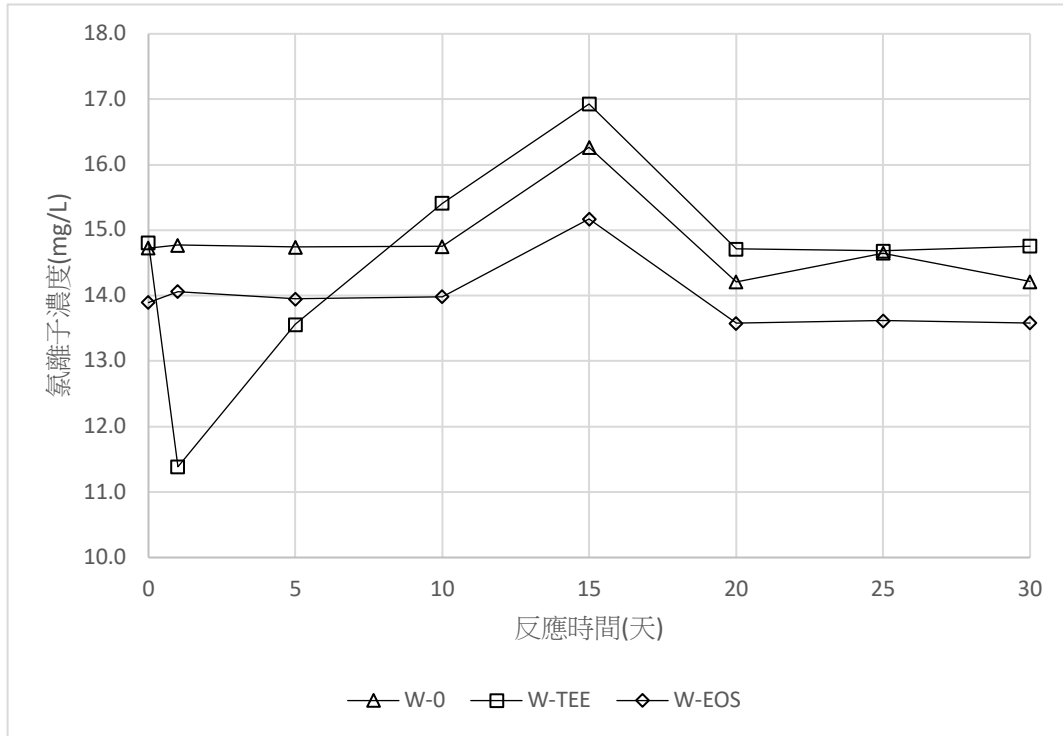
圖 17 不同基質降解含氯（土壤）地下水之 pH 值變化

5.4. 基質降解含氯（土壤）地下水污染

水中氯離子含量是由 IC 離子層析儀測得，TCE、DCE、VC 經由脫氯反應，會增加水中氯離子濃度，因此，氯離子濃度愈高，代表 CAHs 降解效率愈高，意義等同於 Nemecek et al. (2018) 使用之氯數 (chlorine number) 算法。如圖 18(a) 所示，含氯地下水之試驗組合 (W-) 中，W-TEE 生之氯離子濃度最高，其次為 W-0 約為 15 mg/L，W-EOS 最低為 14 mg/L。其中 W-TEE 於反應第 5 天就有明顯之氯離子濃度增加趨勢，直到第 15 天水中氯離子濃度最高為 17 mg/L，證實 TEE 提供脫氯菌足夠之營養，促使脫氯反應進行。相似地，含氯土壤地下水之試驗組合 (WS-) 中 (圖 18(b))，仍為 WS-TEE 試驗之氯離子濃度最高，其次為 WS-0，最後才為 WS-EOS，整體氯離子濃度變化至第 20 天趨於平衡。



(a)



(b)

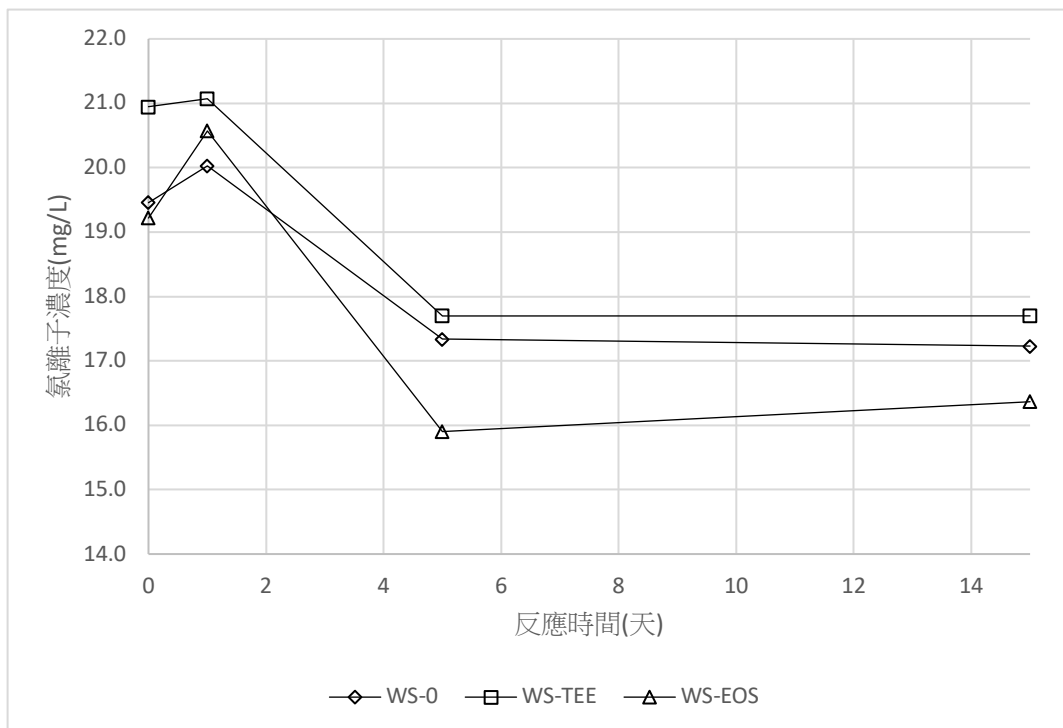


圖 18 不同基質降解含氯地下水(a)或土壤地下水(b)之氯離子濃度變化



圖 19 為 Nemecek et al. (2018) 同時測試數種基質與加熱（攝氏 20~30 度）催化 EIB 反應進行，以氯數評估 CAHs 降解效率，結果發現相同之加熱時間，不同基質之降解效果不同，注入效率較佳之基質整治約可於 34 天完成。

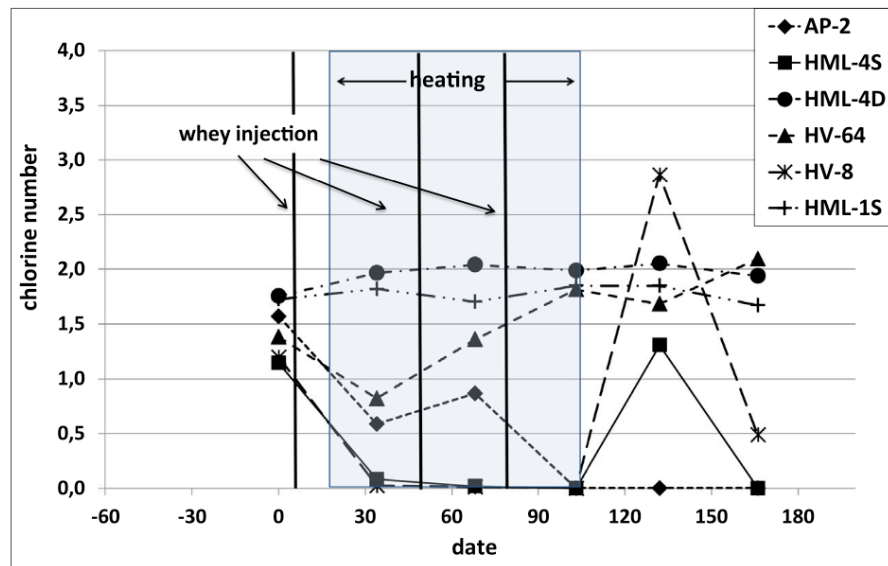


圖 19 案例同時加熱及注入基質影響案場之氯數變化 (Nemecek et al., 2018)

5.5. 微奈米氣泡 (MNB) 降解含氯 (土壤) 地下水之效率

微奈米氣泡 (MNB) 機為本團隊研發之產品，如文獻回顧所發現 MNB 高比表面積、高界達電位、在水中的長停留時間以及較高的氧氣轉移效率等特性。隨著氣泡的連續收縮而破裂時，正電荷和負電荷將立即釋放累積的能量，產生許多具有強氧化作用的自由基離子，可以氧化和分解一些難降解的有機污染物。圖 20 為本計畫於含氯地下水中注入 MNB 產生之 CAHs 濃度變化，VC 濃度於 15 分鐘內由 8 mg/L 迅速下降至偵測極限以下之濃度，產生之氯離子副產物也明顯增加至 14 mg/L，證實 MNB 有助於迅速降解水中 CAHs 污染，可能之機制為自由基離子反應，非屬生物反應。

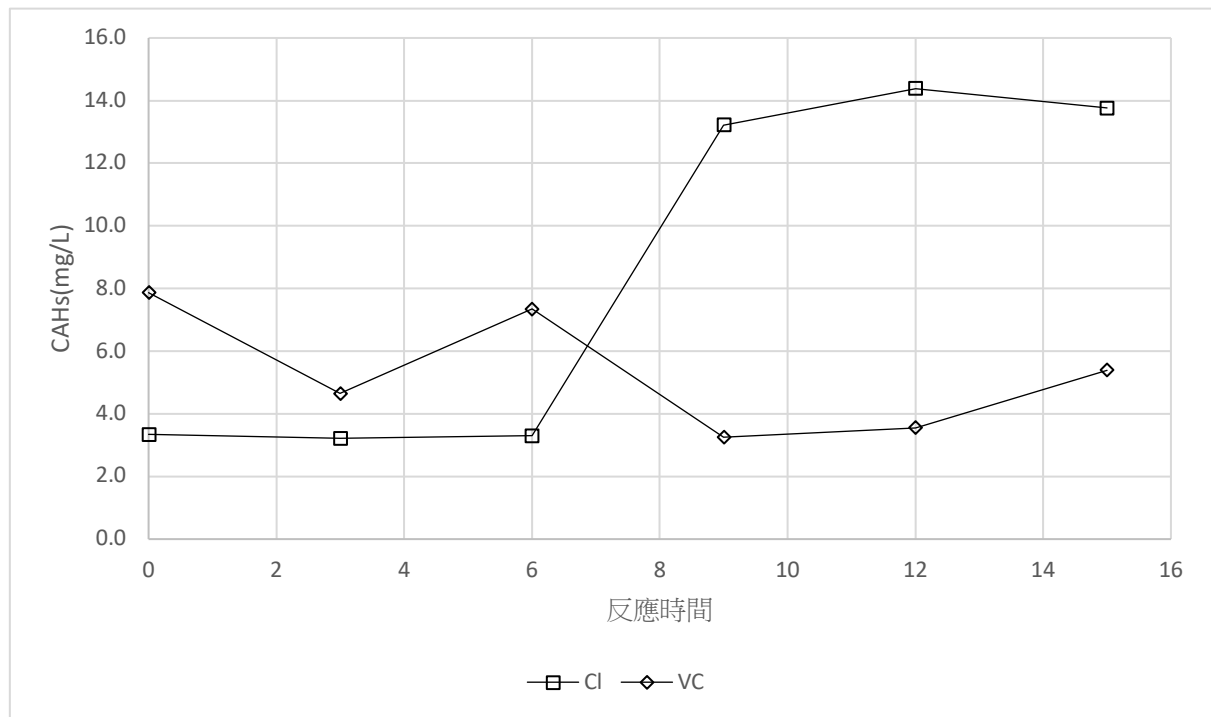


圖 20 MNB 降解含氯地下水之 CAHs 濃度變化

Xia et al. (2019) 研究中，以 MNB 處理現地 CAHs 污染，每日注入臭氧及 H_2O_2 9 小時，共計 6 天後完全去除 10 mg/L TCE 污染物。Xia and Hu et al. (2019) 於實驗室 20 公升反應槽中以 1 L/min 流速注入平均粒徑 265 nm 之 MNB (圖 21)，可於 30 分鐘內降解 97% 初始濃度為 15 mg/L 之氯苯。可見實驗室之反應條件較為單純，因此 CAHs 去除時間較短；反之，現地注入 MNB 預期污染物降解時間應較長。再者，MNB 反應效率受氣體種類、氣泡粒徑等條件影響。本團隊利用自行研發之微奈米氣泡產生機製作微奈米氣泡，機器開啟製造後 20 分鐘取樣以奈米粒子追蹤分析儀(NTA)檢測其氣泡粒徑。結果如表 15 所示，樣品平均粒徑介於 157.5~180.8 nm，符合奈米氣泡等級 (Haris et al., 2020)。

表 15 本計畫製作之氣泡粒徑

樣品	平均粒徑 (nm)	最小粒徑 (nm)	最大粒徑 (nm)
1	157.5	23.5	428.5
2	180.8	15.5	486.5
3	165.0	13.5	411.5

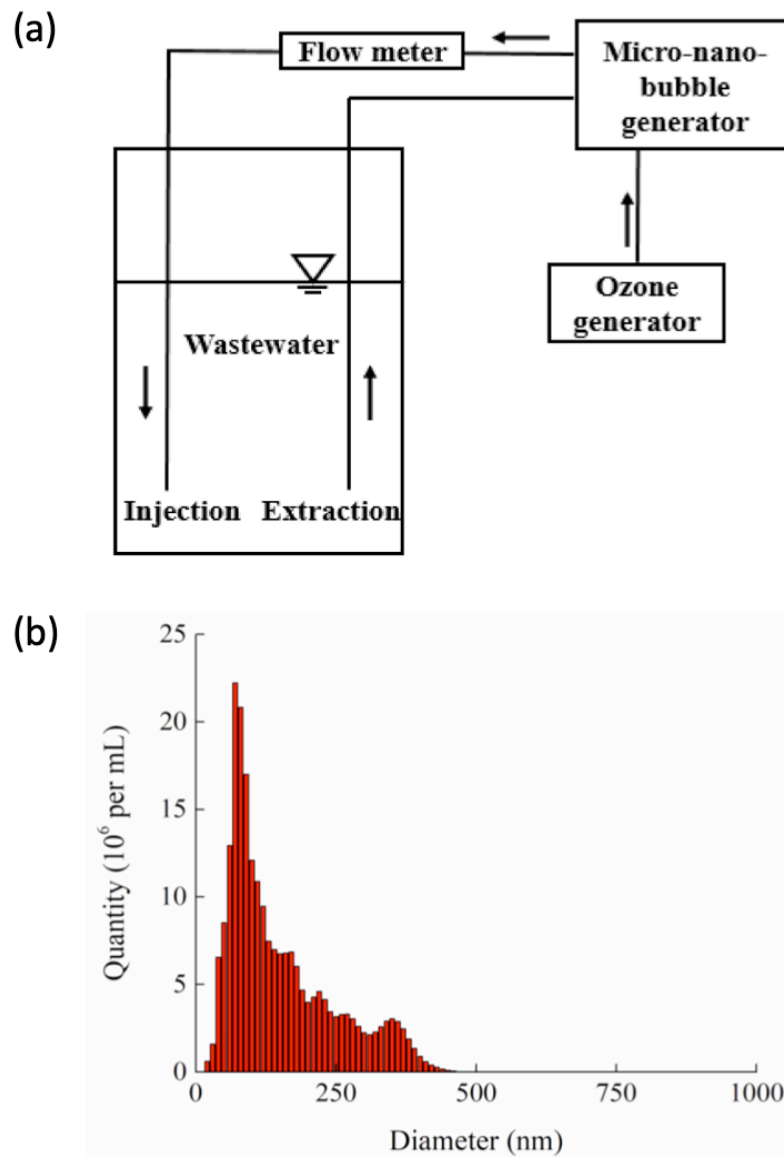


圖 21 案例於實驗室注入 MNB 去除 CAHs 之設備環境 (a) 及氣泡粒徑分佈 (b)
(Xia and Hu, 2019)

5.6.管柱試驗結果

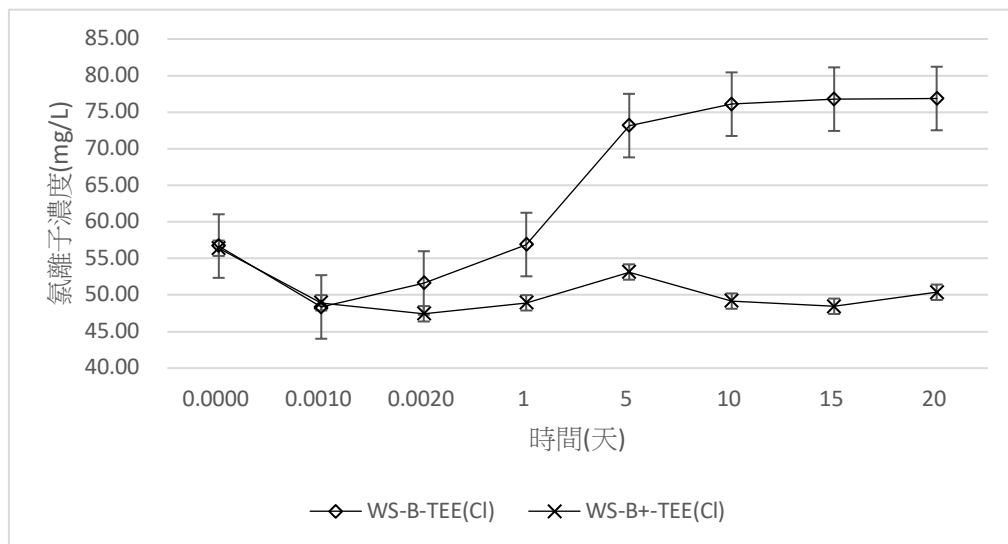
管柱試驗分為兩部分，第一部分為先以 MNB 注入土壤地下水15分鐘後，再接續注入 TEE 基質進行生物反應，標示為 WS-B-TEE；第二部分則反之，先以 TEE 基質進行生物反應30天後，最後注入 MNB 加強除氯效果，標示為 WS-TEE-B。

圖22為 WS-B-TEE 試驗結果，由氯離子濃度變化可得知添加總水體2%過氧化氫溶液 (H_2O_2) 加速羥基自由基產生之效果不如預期佳，未添加 H_2O_2 之水中氯離子濃度至第5天上升至80 mg/L，可見臭氧 MNB 有助於破壞 CAHs 斷鍵以釋出氯離子至水中；添加 H_2O_2 之水中氯離子濃度則維持穩定為50 mg/L，對於土壤地下水中



CAHs 污染削減無助益。再者觀察 CAHs 濃度變化，未添加 H_2O_2 之試驗結果中，TCE 濃度自 MNB 破壞後增強其污染削減效果，反應第5天濃度最低為0.5 mg/L，之後接續為生物反應時 TCE 濃度略為上升至2 mg/L。對照水中氯離子濃度，可推測其前5天濃度上升主要為 TCE 成功降解為氯離子之佐證。VC 濃度則在 MNB 反應前30分鐘出現明顯濃度削減，之後未因生物反應而成功降解其污染。添加 H_2O_2 之 WS-B⁺-TEE 試驗結果得知並無增強 MNB 之破壞能力，水中氯離子濃度變化不大，VC 濃度則依靠第二階段 TEE 添加之生物反應而顯著降解。整體而言，MNB 前處理有助於削減水中 CAHs 污染物濃度，之後注入 TEE 基質進行生物反應之效果不顯著。

(a)



(b)

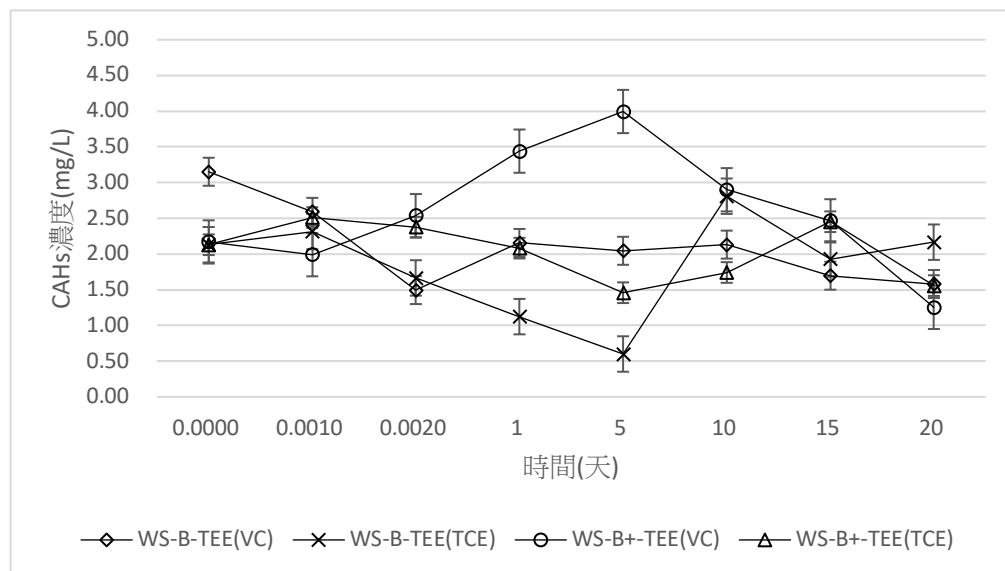


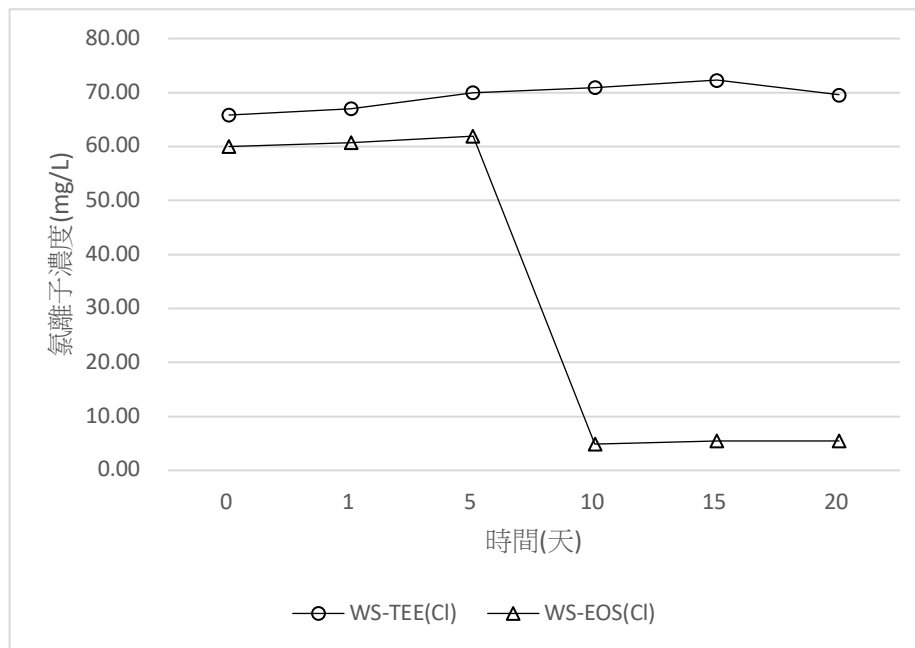
圖 22 含氯土壤地下水污染依序以 MNB 及 TEE 處理之氯離子(a)及 CAHs(b)濃度變化

化



圖 23 為 WS-TEE-B 試驗結果，市售 EOS 基質讓水中噬氯菌於 10 天內降低氯離子濃度，但對於 TCE 削減的效果不顯著。EOS 基質於反應第 1 天顯著將解 VC 為氯離子釋出，使氯離子濃度至第 5 天才顯著下降；反之本團隊研發之 TEE 藥劑，削減 1 mg/L 的 VC，對 TCE 削減效果也不顯著，使之水中氯離子濃度維持高值（約 68 mg/L），預期本試驗完成 30 天試驗後接續注入 MNB 能較為幫助降解 CAHs 污染。

(a)



(b)

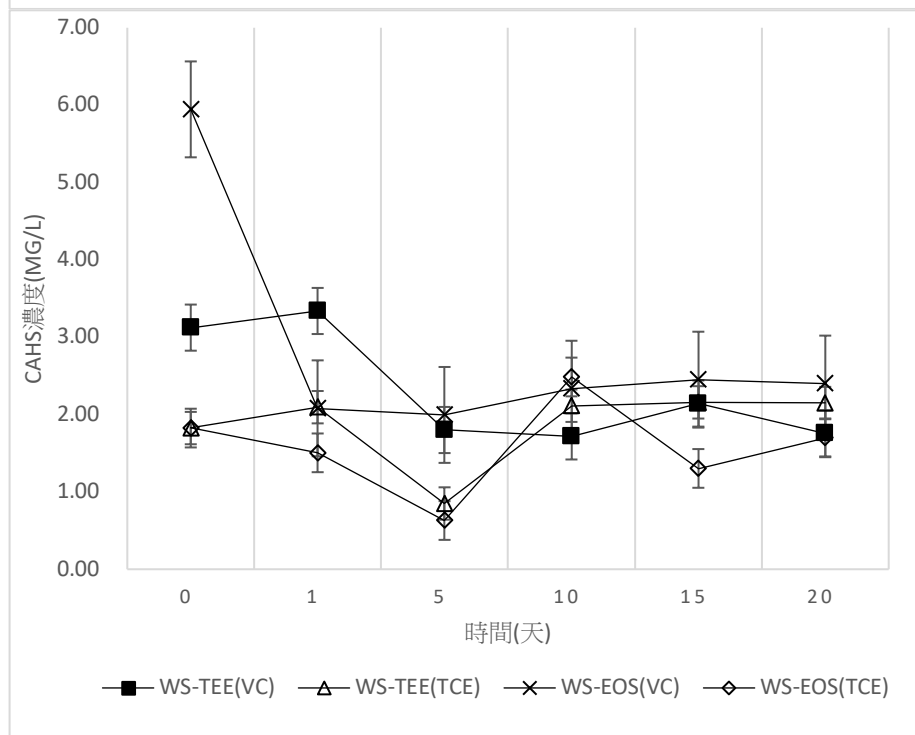


圖 23 含氯土壤地下水污染依序以基質及 MNB 處理之氯離子(a)及 CAHs(b)濃度變

化



5.7. 微奈米氣泡 (MNB) 及基質降解含氯 (土壤) 地下水之反應機制

本計畫主要以 MNB 及 TEE 基質促進噬氯菌降解土壤地下水中 CAHs 污染。如圖24所示，機器以環境中氣體製作微奈米等級的臭氧 MNB 注入污水中，其中 MNB 會破裂產生能量及氫氧自由基，始之 CAHs 斷鍵成為較短鏈之 DCE、VC 化合物，增加水中釋出之氯離子 (圖24)，可從觀察水中氯離子濃度 (增加) 變化推論 MNB 對於降解 CAHs 之效果。未降解之 CAHs 接續注入基質以生物處理反應，促進噬氯菌持續降解 CAHs 污染物。本計畫研發之 TEE 基質含有高量之鈉、鉀離子，提供微生物如同鈉鉀泵 (Na-K pump) 功能，經由水解三磷酸腺苷 (ATP) 獲得能量以主動運輸的方式，將三個鈉離子送出細胞，同時將兩個鉀離子送進細胞。釋出之鈉離子隨之與水中氯離子結合成氯化鈉固體沈積至土壤中。圖25為土壤經由 XRD 檢測得知其具有含鈉離子沈積物，並無其他 CAHs 沈積於土壤固相中。

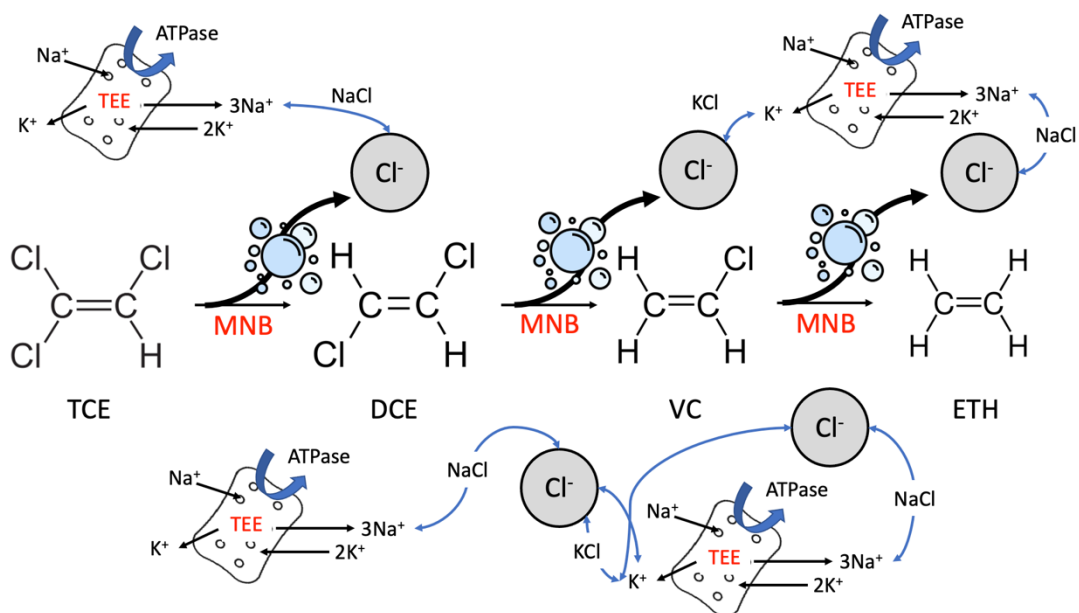


圖 24 分別注入 MNB 及 TEE 基質降解土壤地下水中 CAHs 污染之反應機制圖

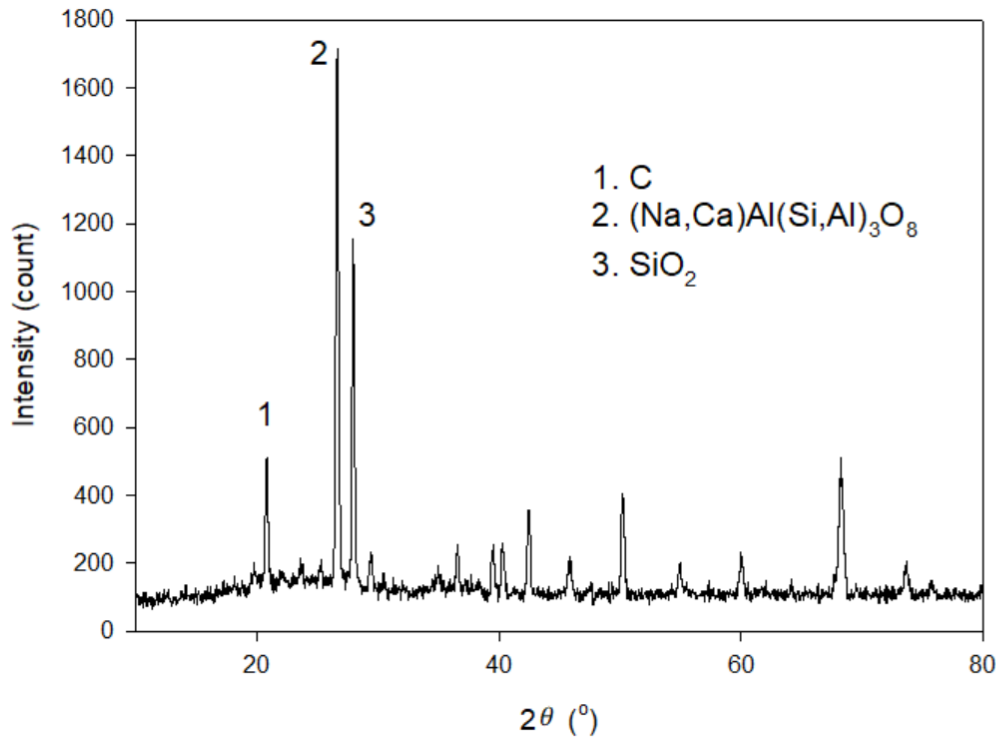


圖 25 試驗土壤之 XRD 檢測結果

表16為本計畫各批次試驗反應至少20天後之氯數總值，舉例來說，三氯乙烯濃度乘以三倍、二氯乙烯濃度乘以二倍等得到總氯數值，未進行處理之試驗（包含 W-0、WS-0）之總氯數為個位數，相較 TEE 與 EOS 在地下水試驗結果，含 EOS 之試驗（包含 W-EOS 及 WS-EOS）結果總氯數較高，其降解 CAHs 之效果較佳。於土壤地下水中單純注入 MNB 及其臭氧增強劑，其總氯數約為7~8 mg/L，接續以 TEE 基質反應後總氯數有增加趨勢，證實 TEE 基質注入仍有降解 CAHs 之功效。



表 16 本計畫批次試驗之總氯數含量

規劃執行進度	反應環境		總氯數(mg/L)
	試驗	代號	
期中報告	1	W-0	9.61
	2	W-TEE	7.13
	3	W-EOS	14.31
	4	W-B	26.80
	5	WS-0	7.82
	6	WS-TEE	7.03
	7	WS-EOS	14.70
期末報告	8	WS-B	7.49
	9	WS-B ⁺	8.41
	10	WS-B-TEE	10.52
	11	WS-B ⁺ -TEE	12.34
	12	WS-TEE-B	



5.8. 微奈米氣泡（MNB）及基質降解含氯（土壤）地下水之成本效益分析

污染調查成本包括「事前規劃設計成本」、「污染改善工程費用」及「事後監測與成效驗證成本」三項（環保署，2012）。因 EIB 屬低成本情境，「事前規劃設計成本」及「事後監測與成效驗證成本」估算方式為前述「整治成本」分別乘以 0.13、0.05。加強式生物復育工法（EIB）之「污染改善工程費用」單價約為新臺幣 4,000 元/噸（孫冬京，2017）。

本計畫使用之 TEE 基質單價約為新臺幣 5,000 元/公升，其約為 EOS 的 1/10 價格，且用量約為受污染水體積之 1/500~1/1,000。如表 17 所示，假設案例場址之污染面積為 5,000 m² 且深度為 10 m（體積為 50,000 m³）。在污染改善工程費用中，使用 TEE 之成本約為使用 EOS 1/100；事前規劃設計成本與事後監測與成效驗證成本分別估算為 553 萬及 366 萬元整；最後使用 TEE 之污染調查成本約為新臺幣 2,150 萬元及 4,650 萬元，相差 2 倍之多。

但由前述表 16 中試驗 6 及 7 之總氯數推算，得知 WS-EOS 之污染物去除效率為 WS-TEE 之兩倍（釋出較多之氯離子代表降解 CAHs 效率較佳），假設使用兩倍之 TEE 藥劑量，可達與 EOS 藥劑量相同污染物降解效果，TEE 總污染整治成本會增加至 2,174 萬元，仍為 EOS 整治成本之 1/2，原因為 TEE 製造成本仍屬低廉。



表17 比較案例場址使用 TEE 及 EOS 之污染調查成本

土地面積		5,000 m ² ×10 m (50,000 m ³ ~50,000噸)	
污染調查成本	原料/方法	使用量	單價 (元)
污染改善工程費用	TEE	50 L	250,000
	EOS	500 L	25,000,000
	MNB	—	500,000
	其他費用	—	10,000,000
事前規劃設計成本	污染調查成本	—	1,550,000
事後監測與成效驗證成本	污染監測	—	5,525,000
	相關報告與驗證	—	3,660,000
小計			21,485,000 (TEE) 46,235,000 (EOS) 21,735,000 (TEE 用量2倍)





六、研究成果

繼期中報告成果，本計畫於期末報告得到之研究成果如下：

1. EOS 反應需於含土壤介質之環境，TEE 於純地下水或土壤地下水環境皆有助於脫氯反應進行。
2. TEE 可促進離子化反應生成，水中導電度急劇增加。
3. 含 TEE 之試驗於第5天明顯增加水中氯離子濃度，證實脫氯反應進行，整體反應至第20天可達平衡。
4. 添加 H_2O_2 之無法增強 MNB 破壞水中 CAHs 之能力。
5. MNB 前處理有助於削減水中 CAHs 污染物濃度（特別針對 VCs），之後接續注入 TEE 基質進行生物反應之效果不顯著。
6. 使用 TEE 基質之整治成本約為 EOS 之1/2，因其用量且單價較低。
7. 本計畫成果有助於提供既有含氯土壤地下水污染場址，本土化且低廉之基質原料選擇，輔以業界現地整治技術執行。





七、其他建議

1. 基質成分通常涉及商業機密，因此不易比較、研析，僅能就經濟成本面向評估。
2. 本計畫租賃之微奈米氣泡機僅能挑整產生臭氧或氧氣，無法調整流速、流量等參數，因此 MNB 性質對於 CAHs 污染物之削減效果探討受限。
3. 每批次污水樣之 CAHs 濃度不易掌握，且噬氯菌種類、特性應進一步研析，以提供適合之基質（食物）。
4. 每批次試驗時間較為冗長且受疫情影響，需較長的執行期間完整試驗。未來本團隊將持續完成單一 CAHs（包含 TCE、DCE、VC）與 TEE、MNB 之試驗反應，佐證本計畫成果及推論機制。



參考文獻

- 行政院環境保護署，2013。污染場址綠色及永續整治策略研擬計畫。
- 行政院環境保護署，2018a。以超高溶氧奈米氣泡水強化現地生物整治技術試驗計畫，國立高雄師範大學生物科技系。
- 行政院環境保護署，2018b。整合零價金屬與電動力法整治四氯乙烯污染土壤及地下水，朝陽科技大學。
- 行政院環境保護署，2021。全國廢棄工廠土壤及地下水污染潛勢調查。
<https://sgw.epa.gov.tw/public/prevent/02>
- 段鑫霖，2016。地下水含氯有機污染物厭氧生物整治案例探討。國立中山大學碩士論文，高雄。
- 孫東京，2017。環保署土污整治基金執行成效評估－以全國廢棄工廠調查計畫為例，國立臺北科大自然資源與環境管理研究所，碩士論文。
- 張四明，2011。成本效益分析在政府決策上的應用與限制，行政暨政策學報第三期，45－80頁。
- 梁美健、趙麗縵，2013。成本有效性分析方法研究述評，北京工商大學學報（社會科學版）第一期。
- 許茹婷、李依穎、陳明華、EcoCycle Co.，n.d。應用現地生物降解法進行地下水中含氯乙稀類有機物質污染場址之模場試驗。冠誠環境科技工程股份有限公司。
- 陳葦亭，2016。污染場址可持續性整治技術與其環境足跡之評估系統研析，國立高雄海洋科技大學。
- Alheshibri, M., Craig, V.S.J., 2019. Generation of nanoparticles upon mixing ethanol and water; Nanobubbles or Not? J. Colloid Interface Sci. 542, 136–143.
- Aulenta, F., Canosa, A., Leccese, M., Papini, M.P., Majone, M., Viotti, P., 2007. Field study of in situ anaerobic bioremediation of a chlorinated solvent source zone. Ind. Eng. Chem. Res. 46, 6812–6819.
- Guo, W., Liu, J., Liu, J., Wang, G., Wang, G., Huang, M., 2019. A single-ended ultra-thin spherical microbubble based on the improved critical-state pressure-assisted arc discharge method. Coatings 9, 144.
- Haris, S., Qiu, X., Klammler, H., Mohamed, M.M.A., 2020. The use of micro-nano bubbles in groundwater remediation: A comprehensive review. Groundwater Sustain. Develop. 11, 100463.
- Hood, E.D., Major, D.W., Quinn, J.W., Yoon, W.S., Gavaskar, A., Edwards, E.A., 2008. Demonstration of enhanced bioremediation in a TCE source area at launch complex



- 34, cape canaveral air force station. *Ground Water Monit. Rev.* 28, 98–107.
- Huang, J., Sun, L., Liu, H., Mo, Z., Tang, J., Xie, G., Du, M., 2020b. A review on bubble generation and transportation in Venturi-type bubble generators. *Exp. Comput. Multiph. Flow* 2, 123–134.
- Hansen, J., Sallmén, M., Seldén, M., Anttila, A., Pukkala, E., Andersson, K., Bryngelsson, I.L., Raaschou-Nielsen, O., Olsen, J.H., McLaughlin, J.K., 2013. Risk of cancer among workers exposed to trichloroethylene: Analysis of three nordic cohort studies. *J. Nation. Cancer Institute* 105, 869–877.
- Jollow, D.J., Bruckner, J.V., McMillan, D.C., Fisher, J.W., Hoel, D.G., Mohr, L.C., 2009. Trichloroethylene risk assessment: A review and commentary. *Crit. Rev. Toxicol.* 39(9), 782–797.
- Jugnia, L.B., Manno, D., Dodard, S., Greer, C.W., Hendry, M., 2019. Manipulating redox conditions to enhance in situ bioremediation of RDX in groundwater at a contaminated site. *Sci. Total Environ.* 676, 368–377.
- Khuntia, S., Majumder, S.K., Ghosh, P., 2012. Microbubble-aided water and wastewater purification: a review. *Rev. Chem. Eng.* 28, 191–221.
- Klammler, H., Mohamed Mohamed, M.A., Kirk, Hatfield, Jerry, A., Jung, J., 2020. Modeling micro- and nano-bubble stability and treatment mechanisms in batch reactors. *J. Environ. Eng.* 146, 04020079.
- Lanni, J., Oh, J., Wolk, I., n.d. Trichloroethylene (TCE) and Tetrachloroethylene (PCE) exposure lawsuits. Jacob Fuchsberg, New York. <https://www.fuchsberg.com/pa/class-action-product-liability/trichloroethylene-exposure-lawsuit/>
- Lendvay, J.M., Löffler, F.E., Dollhopf, M., Aiello, M.R., Daniels, G., Fathepure, B.Z., Gebhard, M., Heine, R., Helton, R., Shi, J., Krajmalnik-Brown, R., Major, C.L., Barcelona, M.J., Petrovskis, E., Hickey, R., Tiedje, J.M., Adriaens, P., 2003. Bioreactive barriers: a comparison of bioaugmentation and biostimulation for chlorinated solvent remediation. *Environ. Sci. Technol.* 37, 1422–1431.
- Li, H., Hu, L., Song, D., Al-Tabbaa, A., 2013a. Subsurface transport behavior of micro-nano bubbles and potential applications for groundwater remediation. *Int. J. Environ. Res. Publ. Health* 11, 473–486.
- Liu, S., Wang, Q., Sun, T., Wu, C., Shi, Y., 2012. The effect of different types of micro-bubbles on the performance of the coagulation flotation process for coke wastewater. *J. Chem. Technol. Biotechnol.* 87, 206–215.
- Nemecek, J., Steinova, J., Spanek, R., Pluhar, T., Pokorny, P., Najmanova, P., Knytl, CV.,



- Cernik, M., 2018. Thermally enhanced in situ bioremediation of groundwater contaminated with chlorinated solvents — A field test. *Sci. Total Environ.* 622-623, 743-755.
- Perez-de-Mora, A., Zila, A., McMaster, M.L., Edwards, E.A., 2014. Bioremediation of chlorinated ethenes in fractured bedrock and associated changes in dechlorinating and nondechlorinating microbial populations. *Environ. Sci. Technol.* 48, 5770–5779.
- Rizaldi, M.I., Rahman, A., Deendarlianto, Prihantini, N.B., Nasruddin, 2019. Generation of microbubbles through single loop and double loop fluid oscillator for photobioreactor aeration. *International Journal of Technology* 10, 1446–1452.
- Scheutz, C., Durant, N.d., Dennis, P., Hansen, M.H., Jørgensen, T., Jakobsen, R., Cox, E. e., Bjerg, P.L., 2008. Concurrent ethene generation and growth of *Dehalococcoides* containing vinyl chloride reductive dehalogenase genes during an enhanced reductive dechlorination field demonstration. *Environ. Sci. Technol.* 42, 9302–9309.
- Takahashi, M., Chiba, K., Li, P., 2007. Free-radical generation from collapsing microbubbles in the absence of a dynamic stimulus. *J. Phys. Chem. B* 111, 1343–1347.
- US EPA, 2004a. How to Evaluate Alternative Cleanup Technologies for Underground Storage Tank Sites. EPA/510/R-04/002—Solid waste and emergency response 5401G, Washington, D.C
- US EPA, 2013. Introduction to In Situ Bioremediation of Groundwater. US EPA. https://clu-in.org/download/remed/introductiontoinsitubioremediationofgroundwater_dec2013.pdf
- US EPA, 2016. Superfund Remedial Performance Measures. US EPA. <https://www.epa.gov/superfund/superfund-remedial-performance-measures>
- Vion, P., 2007. Pressurised Water Pressure-Reducing Nozzle for Generating Microbubbles in a Flotation Plant, US20070119987A1.
- Xia, Z., Hu, L., 2019. Treatment of organics contaminated wastewater by ozone micro nano-bubbles. *Water* 11, 55.
- Xia, Z., Hu, L., Kusaba, S., Song, D., 2019. Remediation of TCE contaminated site by ozone micro-nano-bubbles. In: Zhan, L., Chen, Y., Bouazza, A. (Eds.), *Proceedings of the 8th International Congress on Environmental Geotechnics Volume 1, Environmental Science and Engineering*. Springer, Singapore, pp. 796-803.



Xiao, Z., Jiang, W., Chen, D., Xu, Y., 2020. Bioremediation of typical chlorinated hydrocarbons by microbial reductive dechlorination and its key players: A review. *Ecotoxicology Environ. Safety* 202, 110925.



行政院環境保護署土壤及地下水污染整治基金管理會 土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗專案

110年度專案成果績效自評表

二、專案基本資料

填表日期：111年01月20日

專案性質	<input checked="" type="checkbox"/> 實驗性質 <input type="checkbox"/> 非實驗性質		專案類別	<input checked="" type="checkbox"/> 研究型 <input type="checkbox"/> 模場型
研究主題	<input checked="" type="checkbox"/> 整治 <input type="checkbox"/> 調查 <input type="checkbox"/> 其他			
申請機構系所	國立臺北科技大學土木工程系所	專案主持人	陳映竹副教授	
專案名稱	以微奈米氣泡反應器及生物離子液處理含氯污染地下水:研究型試驗			
專案執行期程	<input type="checkbox"/> 申請階段 <input type="checkbox"/> 期中 <input checked="" type="checkbox"/> 期末			

三、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

項目		目標達成程度	申請 預估數	期中 達成數	期末 達成數	結案後半年 達成率	備註 (說明未達成 原因或學術產 出發表名稱)
A 學 術 產 出 及 活 動	1.國內投稿 (篇數)	(1)論文					
		(2)研討會論文	2	0	1	100%	
	2.國外投稿 (篇數)	(1)期刊論文	1	0	1	100%	
		(2)研討會論文					
	3.報告 (篇數)	(1)技術報告					
		(2)研究報告					
	4.專著(本數)						
	5.辦理學術 會議(場數)	(1)研討/說明會					
		(2)成果發表會					
		(3)論壇					
B 人 才 培 育	6.研發改良 技術(項數)	(1)已開發技術					
		(2)技術平台					
	7.研發人員 (人數)	(1)碩士	3	3	3	100%	
		(2)博士					
	8.研究團隊 (個數)	(1)跨領域團隊	1	1	3	100%	
		(2)跨機構團隊					
		(3)形成研究中 心					
		(4)形成實驗室					



目標達成程度		申請 預估數	期中 達成數	期末 達成數	結案後半年 達成率	備註 (說明未達成 原因或學術產 出發表名稱)
項目						
9.其他指標 (請自行命名)	(請自填)					



(二) 產業面

目標達成程度				申請 預估數	期中 達成數	期末 達成數	結案後半年 達成率	備註 (說明未達成原因 或專利、技術轉移 相關詳細資料)
項目								
A 智慧財產權	1.專利 (件數)	已 核 准	發明					
			新型/設計					
			合計					
		申 請 中	發明	1	0	0	0%	有待更多試驗 成果
			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		1	0	1	100%	已接洽瑞昶公司合作
		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)						
9.其他指標 (請自行命名)		(請自填)						