



行政院環境保護署「105 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」研究成果中英文摘要

- 一、中文計畫名稱：現地電解整治受氯乙烯污染地下水之模場試驗
- 二、英文計畫名稱：Pilot Study on In-situ Electrolytic Remediation of Vinyl Chloride Contaminated Groundwater
- 三、計畫編號：
- 四、執行單位：崑山科技大學/環境工程系
- 五、計畫主持人(包括共同主持人)：吳庭年
- 六、執行開始時間：民國104 年11 月17 日
- 七、執行結束時間：民國105 年11 月16 日
- 八、報告完成時間：民國105 年11 月16 日
- 九、報告總頁數：88 頁
- 十、使用語文：中文
- 十一、報告電子檔名稱：現地電解整治氯乙烯污染地下水(期末)
- 十二、報告電子檔格式：PDF
- 十三、中文摘要關鍵詞：氯乙烯、現地電解、太陽能、綠色整治、永續整治
- 十四、英文摘要關鍵詞：vinyl chloride, in-situ electrolysis, solar energy, green remediation, sustainable remediation
- 十五、中文摘要：

本研究提出現地電解整治工法的概念，整合太陽能供電系統與電解處理系統，開發綠色整治工法應用於地下水氯乙烯污染場址之整治。研析太陽能應用於環境污染整治之潛力，實驗裝置以太陽能為電力來源，太陽能板發電，儲存於電池，以直流電輸出，電化學反應器以電壓控制，觸發電化學反應產生氫氧自由基，可快速氧化降解整治井中氯乙烯污染物，達到地下水污染整治之成效。本研究規劃模場試驗確立現地電解整治系統的操作條件，展示現地電解整治工法應用於地下水氯乙烯污染場址之可行性。本專案模場試驗場址位於高雄市小港區伍桐股份有限公司地下水污染控制場址，利用現地電解整治工法降低地下水中氯乙烯濃度，本案例落實綠色及永續整治概念，操作以太陽能為動力之電解系統，可降低污染整治的長期操作費用，並兼具節能減碳的成效，未來可進一步開發太陽能應用於環境污染整治的工具。

本研究內容包括實驗室電解實驗與現地模場試驗，實驗室電解實驗比對氯乙烯經由曝氣作用與電解機制移除的效果，確認未添加電解質直接電解地



下水的可行性，建立現地電解系統電壓操作條件。現地模場試驗已完成單井流速流向測定、鑽設 1 口簡易井(整治井)、鑽設 1 口標準井(背景監測井)、現地電解整治設備製作與系統安裝等工作，現地電解整治系統已正常操作約 6 個月，整治井氯乙烯濃度迅速降至地下水管制標準以下(ND 值)，成效監測井氯乙烯濃度略有上下浮動，於整治系統操作 1 個月內亦降至地下水管制標準以下(ND 值)。歷經 4 個月之現地電解整治期程，呈現場址區域地下水無污染情況，顯現應用現地電解整治工法處理地下水氯乙烯污染的具體整治成效。

十六、英文摘要：

This study proposed the concept of in-situ electrolysis remedy scheme to integrate solar energy power supply system with electrolytic treatment system. The proposed remedy scheme, one of green remediation methods, was applied to the cleanup of groundwater contaminated with vinyl chloride. For applying solar energy on environmental cleanup, experimental apparatus is designed using solar energy as power source. Solar energy was collected from the solar plate unit, stored in a battery, and transferred as a DC current. The electrochemical reactor received the electrical current, initiated serial electrochemical reactions, generated the OH radicals, degraded chlorinated pollutants, and remediated contaminated groundwater. The objective of the pilot study is focused on confirming the operation control of the in-situ electrolysis (ISE) remediation system and illustrating the feasibility of ISE application on a vinyl chloride-contaminated groundwater case. The selected study site is a groundwater contaminated site with vinyl chloride located at Kaohsiung, Taiwan. This study tried to remediate residual vinyl chloride with in-situ electrolysis remedy scheme, and the concept of green and sustainable remediation was implemented by the designed solar-driven energy system. The benefits of employing the proposed remedy scheme include energy saving, green-house gas (GHG) reduction, treatment cost cutback, and thus the application of the solar-driven electrolysis system can be prevailed in the near future.

Research works include lab electrolysis experiments and pilot-scale field experiments. In the lab, the effects of vinyl chloride (VC) removal through bubble stripping and/or electrolysis were compared under the control of operating potentials. The feasibility of electrolyzing field VC-contaminated groundwater samples without the addition of electrolytes were examines in lab experiments. Based on the results of lab



electrolysis experiments, the optimal operating control was applied to the operation of the in-situ electrolysis remediation system. Pilot-scale field experiments including the measurement of flow direction and flow velocity in one monitoring well, the establishments of a remediation well and an efficiency monitoring well, the manufacture of the in-situ electrolysis remediation system and the setup. Pilot-scale field experiment has been conducted for about six month, the VC concentrations dropped rapidly to the undetected level in the remediation well and also reduced up and down to the undetected level within one month in the efficiency monitoring well. After continual operation of the in-situ electrolysis remediation system for 4 months, groundwater has been decontaminated in the study site. The remediation efficiency is remarkable in this case, and in-situ electrolysis remediation method has successfully demonstrated its feasibility to clean up VC-contaminated groundwater.





行政院環境保護署「105 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」期末報告

目次

期中報告審查意見回覆表	
申請計畫書審查意見回覆表	
專案基本資料表	
105 年度專案成果績效自評表	
研究成果中英文摘要	
目次	I
圖次	III
表次	V
第一章 前言	1
1.1 研究計畫背景	1
1.2 研究計畫構想	2
1.3 已掌握之關鍵技術	3
第二章 研究目的	5
2.1 目的說明	5
2.2 研究重要性	5
2.3 預期目標	6
第三章 文獻探討	7
3.1 含氯有機污染物特性與宿命傳輸	7
3.2 地下水含氯有機污染物整治技術概述	12
第四章 研究方法與過程	18
4.1 模場場址背景	18
4.1.1 場址水文地質資料	22
4.1.2 場址污染現況	24
4.2 現地電解整治工法	27
4.2.1 專利權說明	28
4.2.2 模場應用實績	29
4.3 研究方法	32
4.3.1 實驗室電解試驗	34
4.3.2 現地模場試驗	36
4.4 執行進度	38
第五章 結果與討論	40
5.1 實驗室電解試驗	40



5.1.1	電極特徵	42
5.1.2	曝氣作用移除氯乙烯	43
5.1.3	電解氧化破壞氯乙烯	44
5.1.4	最佳電解操作條件	47
5.2	現地模場試驗	49
5.2.1	地下水流速流向測定	49
5.2.2	整治井與監測井設置	56
5.2.3	現地電解整治系統操作	60
5.2.4	整治成效評析	64
5.2.5	污染物 rebound 試驗	78
5.3	現地電解整治工法之應用性	80
5.3.1	電解整治工法反應機制之驗證	80
5.3.2	電解整治工法之應用限制	82
5.3.3	電解整治工法之經濟效益評析	83
第六章	結果與討論	85
6.1	結論	85
6.2	建議	86
第七章	參考文獻	87



圖次

圖 1.1 DNAPL 進入土壤及地下水中污染宿命及其所對應之污染整治效率	2
圖 3.1 DNAPL 洩漏至土壤及地下水傳輸	10
圖 3.2 在土壤中有機污染物不同的物理形式	11
圖 4.1 臨海工業區列管場址位置圖	18
圖 4.2 民國 97 年至 103 年伍桐公司地下水氯乙烯濃度變化圖	21
圖 4.3 伍桐公司 MIP-EC 訊號值三維模擬圖	23
圖 4.4 臨海工業區地下水位定期監測成果	23
圖 4.5 伍桐公司 MIP-ECD/FID 訊號值三維模擬套繪圖	24
圖 4.6 伍桐公司既有監測井地下水調查之監測井位置圖	25
圖 4.7 伍桐公司氯乙烯歷年檢出濃度圖	26
圖 4.8 現地電解法(ISE)之系統運作示意圖	27
圖 4.9 發明專利證書	28
圖 4.10 「井中電解裝置」(a)設計示意圖；(b)外觀	29
圖 4.11 三氯乙烯降解試驗氯平衡計算	30
圖 4.12 三氯乙烯降解試驗碳平衡計算	31
圖 4.13 本發明現地電解法(ISE)之實場應用成效	31
圖 4.14 本研究架構流程圖	33
圖 4.15 實驗室電解試驗設備組裝	35
圖 4.16 模場試驗成效監測示意圖	37
圖 5.1 電解反應器電極外觀	40
圖 5.2 白金電極之循環伏安圖	42
圖 5.3 電解曝氣移除氯乙烯試驗反應過程氯乙烯濃度變化	43
圖 5.4 電解曝氣移除氯乙烯試驗 $\ln(C_0/C)$ 隨反應時間變化情形	43
圖 5.5 電解氧化破壞氯乙烯試驗反應過程氯乙烯濃度變化	46
圖 5.6 電解氧化破壞氯乙烯試驗 $\ln(C_0/C)$ 隨反應時間變化情形	46
圖 5.7 電解曝氣試驗與電解氧化試驗反應過程氯乙烯濃度變化	48
圖 5.8 電解曝氣試驗與電解氧化試驗移除氯乙烯之電流效率	48
圖 5.9 曝氣作用與電解氧化反應對氯乙烯移除效率之貢獻	48
圖 5.10 C207S 監測井自計式水位計量測地下水位紀錄	55
圖 5.11 新設整治井與監測井相關位置圖	56
圖 5.12 新設監測井構造剖面圖	58
圖 5.13 新設整治井構造剖面圖	59



圖 5.14 電極積垢成份之 SEM 分析結果	63
圖 5.15 C207S 監測井於整治歷程氯乙烯濃度變化趨勢	68
圖 5.16 整治井於整治歷程氯乙烯濃度變化趨勢	68
圖 5.17 成效監測井於整治歷程氯乙烯濃度變化趨勢	69
圖 5.18 C208S 監測井於整治歷程氯乙烯濃度變化趨勢	69
圖 5.19 場址地下水氯乙烯濃度分布垂直剖面圖(105 年 4 月 2 日)	71
圖 5.20 場址地下水氯乙烯濃度分布垂直剖面圖(105 年 4 月 8 日)	71
圖 5.21 場址地下水氯乙烯濃度分布垂直剖面圖(105 年 4 月 15 日)	72
圖 5.22 場址地下水氯乙烯濃度分布垂直剖面圖(105 年 4 月 22 日)	72
圖 5.23 場址地下水氯乙烯濃度分布垂直剖面圖(105 年 4 月 29 日)	73
圖 5.24 場址地下水氯乙烯濃度分布垂直剖面圖(105 年 5 月 6 日)	73
圖 5.25 場址地下水氯乙烯濃度分布垂直剖面圖(105 年 5 月 13 日)	74
圖 5.26 場址地下水氯乙烯濃度分布垂直剖面圖(105 年 5 月 20 日)	74
圖 5.27 場址地下水氯乙烯濃度分布垂直剖面圖(105 年 6 月 3 日)	75
圖 5.28 場址地下水氯乙烯濃度分布垂直剖面圖(105 年 6 月 17 日)	75
圖 5.29 場址地下水氯乙烯濃度分布垂直剖面圖(105 年 7 月 1 日)	76
圖 5.30 場址地下水氯乙烯濃度分布垂直剖面圖(105 年 7 月 15 日)	76
圖 5.31 場址地下水氯乙烯濃度分布垂直剖面圖(105 年 7 月 29 日)	77
圖 5.32 場址地下水氯乙烯濃度分布垂直剖面圖(105 年 8 月 12 日)	77
圖 5.33 地下水氯乙烯 rebound 後濃度分布垂直剖面圖(105 年 8 月 26 日)	79
圖 5.34 地下水氯乙烯 rebound 後再次電解整治之濃度分布垂直剖面圖 (105 年 9 月 23 日)	79
圖 5.35 氯乙烯電解實驗之質量平衡圖	80
圖 5.36 場址監測井土壤氣體 CO ₂ 濃度分布垂直剖面圖	81



表次

表 3.1 常見含氯有機物於 25°C 下的物理及化學特性參數	8
表 3.2 含氯有機物土壤及地下水污染整治技術採用案例數量統計	13
表 3.3 常見之 DNAPL 地下水污染整治技術說明	14
表 4.1 臨海工業區列管場址資訊	19
表 4.2 伍桐股份有限公司場址大事紀	19
表 4.3 伍桐公司既有監測井基本資料	26
表 4.4 研究實際執行進度及預定工作查核點	39
表 5.1 實驗室電解試驗氯乙烯污染樣品水質特性	41
表 5.2 電解曝氣移除氯乙烯試驗反應前後水質比較	44
表 5.3 電解氧化破壞氯乙烯試驗反應前後水質比較	46
表 5.4 C207S 監測井流速流向測定紀錄	50
表 5.5 水位尺量測地下水位紀錄驗證單井流速流向測定結果	54
表 5.6 新設整治井與監測井設置作業照片	57
表 5.7 現地電解整治系統操作照片	61
表 5.8 整治系統維護保養與定期監測採樣照片	62
表 5.9 場址地下水氯乙烯背景監測結果(105 年 4 月 2 日)	65
表 5.10 各監測井氯乙烯定期監測數據(105 年 4 月 2 日至 105 年 6 月 3 日)	66
表 5.11 各監測井氯乙烯定期監測數據(105 年 6 月 17 日至 105 年 11 月 16 日)	67





第一章 前言

1.1 研究計畫背景

近年國內發生許多土壤及地下水污染案例，其中比水重非水相液體 (Dense Non-Aqueous Phase Liquid, DNAPL) 污染場址之問題特別嚴重，這是由於 DNAPL 污染物質之物理與化學之特殊性，再加上地質之不均質性與不確定性，使得處理相關之土壤及地下水污染調查及整治工作，相對提高其困難度。然而受到含氯有機污染物的特性及場址地質組成複雜的影響，含氯有機污染物進入土壤及地下水中污染宿命及其所對應之污染整治效率如圖 1-1 所示，在場址污染初期，採用積極性的整治工法，可快速減少污染濃度，但到了後期，DNAPL 的回收效率受到技術限制及污染物傳輸特性限制，使得積極性的整治技術效率下降，投入之整治資源不易達到預效益。

國內目前針對地下水含氯有機污染物整治可選用的技術，包括：抽出處理、土壤間隙氣體抽除搭配多相回收、地下水注氣、電動力法、現地化學氧化或還原、現地生物整治或透水性反應牆等方式。現階段國內含氯有機物污染的場址最普遍採行之整治工法為大多屬高耗能並會消耗各種資源的程序，若整治時程過久，其整治費用及其消耗的能資源將極為可觀。

有鑑於綠色整治概念逐漸受到重視，本研究將應用電化學電解方法，並利用太陽能板將太陽能轉為電能，以電池儲存電能兼具穩壓的功能，直接以直流電輸出，提供電化學處理系統電力來源，開發便於現場拆解與操作的井中電解設備。本研究將於實驗室針對場址地下水中的含氯有機污染物進行電解試驗，取得最佳操作參數。爾後於實場進行模場測試，應用不同設備組合策略，測試井中電解設備的整治效果，期望透過本研究所發展之現地電解整治工法，突破現有整治技術瓶頸，提供國內一具真正可達綠色整治目標，且實際可行之整治技術。



現地電解整治受氯乙烯污染地下水之模場試驗

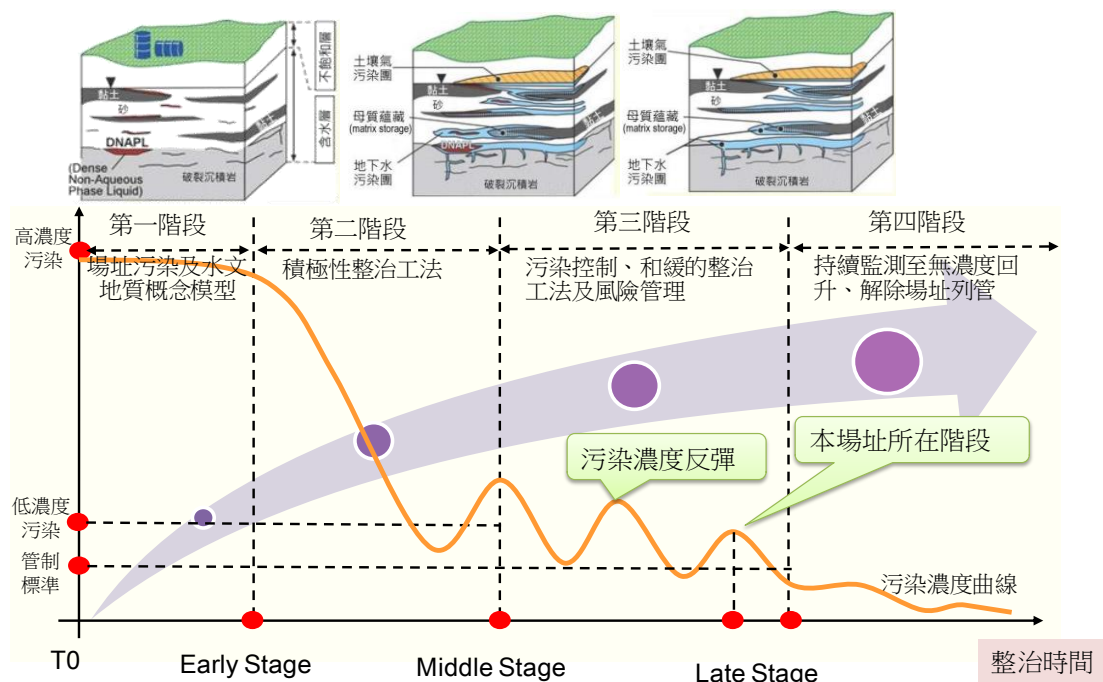


圖 1.1 DNAPL 進入土壤及地下水中污染宿命及其所對應之污染整治效率

1.2 研究計畫構想

本專案模場試驗提出新概念的地下水污染整治工法，現地電解(ISE)整治工法原理係利用電解機制於地下水中觸發氧化還原反應以降解污染物，其污染物移除方式與電動力技術(EK)造成土壤中離子遷移的效果大不相同，但與現地化學氧化法(ISCO)之污染物移除方式類似。現場設置整治井，置入井中電解裝置，則可將整治井轉變成電解反應器，並可適現地污染物分布的深度，調整井中電解裝置之置入深度，使現地污染物藉由地下水流傳輸至整治井管中，即可被電解觸發生成之氫氧自由基所破壞。若地下水含水層透水性良好，污染物可透過地下水傳流、擴散、延散作用緩慢自土壤吸附相或殘留相釋出，可於整治井電解破壞。

針對含氯有機物之地下水污染整治，一般 DNAPL 殘留相會致使整治時間拖很久，以積極性的物化處理技術，通常經濟因素不允許長時間的抽除作業或化學藥劑灌注，因此生物處理技術或自然衰減法常成為含氯有機物污染場址最終整治的選項。現地生物降解反應的控制變因相當複雜，常有降解三氯乙烯卻造成氯乙烯累積的問題案例；相對自然衰減法，現地電解整治工法展



現更積極的處理效果。含氯有機物之地下水污染整治以經費成本與整治時間為重要考量，現地電解整治工法規劃能源取自於太陽能發電系統，則可達到長時間低成本整治的目的。太陽能系統已普遍使用於熱水器與電力系統，且目前已有部分商品化的產品，惟將太陽能系統與污染整治系統整合的案例並不多。本專案模場計畫首度提出結合太陽能供電與電化學處理技術的概念，此種方式屬於綠色整治技術的雙組合，兼具節能減碳的成效，同時可大幅降低污染整治的操作成本。

1.3 已掌握之關鍵技術

電化學技術為一項新型之高級氧化技術(Advanced Oxidation Technologies, AOTs)，不僅程序易於控制、處理效率佳、佔地面積小、且無後續處理之問題。污染物的電解的基本上是提供一大於化學反應電位差之電壓，使得該化學反應於陽極產生氧化反應，於陰極產生還原反應，用以破壞水溶液中的污染物。此外，帶有正電荷的離子於水溶液中，會從陽極游向陰極，帶有負電荷的離子，則會向陽極移動，在電極上發生氧化還原反應。電動力法的原理係將正負電極置於待處理之污染場址中，使污染區域被包圍，並施加適當直流電壓或電流後，藉由陰、陽電極間生成之電場作用，驅使帶正電荷之離子被吸引到負極(陰極)；相反地，帶負電荷之離子則向正極(陽極)移動；此外，實驗證實溶解性非離子物種另可藉由電滲透流(electroosmotic flow)之傳輸，藉以引導土壤中電解質溶液之移動，進而達到去除土壤中污染物的目的。由於電動力的進行，電極鄰近會發生水的電解反應，其反應如下所示：



在陽極區由於 H^+ 的濃度增加，將形成一酸鋒(acid front)，而在陰極增加的 OH^- ，亦將促使一鹼鋒(base front)的形成。由於土壤顆粒的同構取代作用與斷鍵的存在，使得大部分土壤顆粒表面都帶負電，當陽極附近的酸鋒開始向土壤毛細移動，將打破污染物與土壤的結合鍵，此時，大量的水以電滲透方式在土壤中流動，土壤毛細孔中的液體被帶到陽極附近，這樣就將溶解到土壤溶液中的污染物吸收至土壤表層而得以去除。電動力法適用於水力傳導係數低之土壤（介於約 10^{-7} cm/s 之間）。除須考量水力傳導係



現地電解整治受氯乙烯污染地下水之模場試驗

數及離子濃度外，於選用電動力法時，應一併考量電力需求、最大深度（一般小於 20 公尺）、土壤中可能改變之化學特性，如礦物質之分解、沉澱物之合成、pH 值之改變等因素。基於大多 DNAPL 皆屬無極性，若僅是於污染區域間生成電場，恐不足以促使 DNAPL 之移動，可利用其電化學反應機制或其他改善技術（例如界面活性劑之添加）達到整治成效。因此對於 DNAPL 的電化學處理上，大多仰賴電極附近的電解氧化機制。電解氧化機制反應方式包括直接氧化與間接氧化：

1. 直接氧化

直接氧化的方式通過陽極氧化使污染物在電極上發生氧化還原轉變為無害物質，陰極還原則可自水中去除重金屬離子，同時伴隨產生 H_2 與 O_2 氣體之反應副產物，易使電流效率降低，因此選擇電極材料與電位控制至為關鍵，可有效防止電流效率之下降。

2. 間接氧化

間接氧化電解的方式是利用電化學反應產生氧化還原劑（又稱媒子），而媒子則扮演污染物與電極交換電子中介體的角色，使污染物在溶液中一樣可進行電子轉移反應被氧化破壞。媒子本身可為催化劑，亦可為電化學產生的瞬式中間產物（如 OH radical），因此部分研究曾利用 O_2 在陰極還原為 H_2O_2 ，隨後生成 OH radical，將污染物氧化分解，此過程屬於不可逆間接電解氧化的反應。

一般而言，在電解處理的過程中，會影響電解氧化效果的因素，除了所處理的物質本身特性外，電極材料、電流密度、pH、溫度及水中的電導度都是需要考慮的因素。

電解氧化技術已成功應用於應用於處理滲出水(Chiang et al., 1995)、紡織廢水(Naumczyk et al., 1996)、及酚類化合物(Azzam et al., 2000)、納乃得(吳庭年等人, 2004)、PCB(Arienzo et al., 2001)、MTBE(林宗志, 2005)及 PCP(Chunyue et al., 2005)。電解氧化技術除具有高級氧化處理技術所具備的優點，更可利用其電催化功能將污染物選擇性降解至某一特定階段，使污染物無毒化或降低毒性後，可接續利用生物處理技術將中間產物礦化至二氧化碳，此乃電解氧化技術最具吸引力與挑戰性之處。



第二章 研究目的

2.1 目的說明

本研究延續國內外長期發展之電化學原理，應用電解氧化之概念，開發井中電解設備，利用整治井執行現地整治工法，應用於含氯污染場址之地下水污染整治。當井中電解裝置置入整治井中，則整治井可視為一電解反應器，污染物整治的原理以電化學反應為基礎，於整治井中透過電解機制持續生成氫氧自由基氧化污染物，或生成氫原子參與污染物還原反應。污染物藉由地下水傳輸進入整治井內，即可參與電化學觸發之氧化還原反應，進行污染物之破壞移除；若污染物於整治井內有足夠的滯留時間，自整治井流出之淨化地下水，即可藉由混合、延散、稀釋等作用逐步降低污染物的濃度，來達到地下水整治的目的。

本研究開發之現地電解整治工法，將在實驗室進行含氯有機物電解氧化試驗，並於現地進行模場試驗，場址選定於高雄市小港區伍桐股份有限公司地下水污染控制場址，本專案模場試驗之研究目的主要為展示現地電解整治工法應用於地下水氯乙烯污染場址之可行性。

2.2 研究重要性

含氯有機污染物之整治技術發展已有多年歷史，從物理性、化學性及生物性之方法均已被大量應用於國內場址中，然截至目前為止，即便國內已擁有各類不同含氯有機污染物之整治經驗，但仍面臨污染物再釋出情況，污染整治期程遙遙無期，需要長期投入大量經費與資源進行污染整治的情形。針對國際趨勢與對於綠色及永續性考量，進而發展「綠色及永續導向型整治」概念型工法，主要提倡低耗能、低排碳、低用水、低廢棄物排放等觀念，本研究發展新穎之現地電解(In Situ Electrolysis, ISE)整治工法，並開發便於組裝、操作、節能之井中電解設備。現地電解法為一創新性整治工法，因設計的電極型式可直接伸入整治井中，抵達污染物深度，利用電解機制直接於現地破壞地下水污染物，不須將污染地下水抽出地面處理，故可降低處理成本，尤其針對地下水深層污染物處理的效益更為顯著。融入綠色及永續



現地電解整治受氯乙烯污染地下水之模場試驗

整治概念執行太陽能供電系統建置與低耗能工法，現地電解幾乎不須額外供電，可達節能減碳之目標，正符合國內整治工業推動方向。

2.3 預期目標

本專案模場試驗研究目標以確立現地電解整治的操作條件為主，研究內容包含實驗室電解試驗、現地模場準備與設備單元製作、現地電解模場實車測試與調整、定期成效監測等部分。預期目標說明於下：

1. 提供微洗井地下水採樣與被動式採樣袋之分析數據關聯性。
2. 建立實驗室氯乙烯電解之最佳操作條件。
3. 建立現地電解整治工法之模場硬體，及彙整現場操作監控數據。
4. 提供地下水氯乙烯污染整治之創新工法。
5. 改善模場試驗場址內地下水氯乙烯污染情況。
6. 提供綠色及永續整治的實場案例



第三章 文獻探討

3.1 含氯有機污染物特性與宿命傳輸

近年來國內工業活動造成之土壤及地下水污染案例，對國土資源與生活環境形成莫大威脅。在各類型污染物中，含氯有機溶劑屬比水重非水相液體(Dense Non-Aqueous Phase Liquid，簡稱 DNAPL)所造成之問題最為棘手，如原 RCA 桃園廠、飛利浦竹北廠及台灣氯乙烯公司頭份廠等，其污染整治經耗費鉅額資源與時間後仍未能達成。而環保署 97 年度「運作中工廠土壤及地下水含氯有機溶劑污染潛勢調查及查證計畫」(第 1 期)調查發現之台塑仁武廠土壤及地下水污染事件，也高度引起政府各單位與國人之重視。國內使用含氯有機溶劑工廠遍及各類業別(如金屬製品、塑膠製品、化學製品、化學材料、電子及光學製品、機械設備…等)，致癌風險性高。為掌控高污染潛勢業別，行政院環境保護署(以下稱環保署)乃於民國 97 年起首次針對全國含氯溶劑之運作中工廠展開調查，而此計畫屬延續性至本年度(103 年)已執行第五期計畫，期能達成地下環境預防管理、及早期發現污染之功能，以維護國民健康與國土資源之永續利用。

國內使用含氯溶劑工廠遍及各類業別，含氯有機溶劑致癌風險性高，污染洩漏後其移動分佈深受複雜的水文地質變化所影響，其污染流佈迥異於重金屬或油品類污染。因此在管理含氯污染場址時，應針對場址污染調查及評估工作有完整之概念，方可有效管理含氯污染場址，督促污染行為人確實進行場址調查及整治工作。

含氯有機溶劑之廣泛定義為含有氯之取代基及特性或者是被發展來作為溶劑使用之有機化合物，狹義包括含氯之芳香族化合物及含氯脂肪族化合物。最常見之用法已經將含氯有機溶劑當作是含氯脂肪族化合物(Henry et al., 2002)。工業常用的含氯有機溶劑基本都具備以下數種特質，符合溶劑使用上的限制條件：(1)蒸氣密度高；(2)與要處理之物件不起反應；(3)不可燃；(4)化性安定；(5)蒸氣壓高；(6)沸點低；(7)潛熱低；與(8)溶解力高。



現地電解整治受氯乙烯污染地下水之模場試驗

表 3.1 常見含氯有機物於 25°C 下的物理及化學特性參數

化合物	分子量	蒸氣壓(P ⁰) (torr)	溶解度(S) (mg/L)	亨利常數(H) (atm·m ³ /mol)	相對蒸 氣密度	沸點 (°C)
Dichloromethane	84.9	415	20000	0.00212	2.05	41
Chloroform	119.4	194	8000	0.00358	1.80	62
Bromodichloromethane	163.8	64.2	4500	0.0206	1.39	90
Dibromochloromethane	208.3	17	4000	0.00115	1.14	119
Trichlorofluoromethane	137.4	796	1100	0.0888	4.91	23.8
Carbon tetrachloride	153.8	109	825	0.0298	1.62	76.7
1,1-dichloroethane	99	221	5100	0.00543	1.70	57.3
1,2-dichloroethane	99	82.1	8500	0.0015	1.26	83.5
1,1,1-trichloroethane	133.4	124.6	1300	0.0167	1.59	
1,1,2-trichloroethane	133.4	24.4	4400	0.00108	1.12	113.7
1,1,2,2-tetrachloroethane	167.9	6.36	2900	0.000459	1.04	146.4
1,1-dichloroethylene	97	603	3350	0.0255	2.86	31.9
Cis-1,2-dichloroethylene	97	205	3500	0.00374	1.63	60
Trans-1,2-dichloroethylene	97	315	6300	0.00916	1.97	48
Trichloroethylene (TCE)	131.5	75	1100	0.00937	1.35	86.7
Tetrachloroethylene (PCE)	165.8	18.9	200	0.0174	1.12	121.4
1,2-dichloropropane	113	52.3	2800	0.00262	1.20	96.8
Trans-1,3-dichloropropane	110	34	2800	0.0013	1.10	112
Bis(chloro)methylether	115	30	22000	0.00021	1.09	104
Bis(2-chloro)methylether	143	1.11	10200	0.00013	1.004	178
Bis(2-chloroisopropyl)ether	171	0.73	1700	0.00011	1.003	189
2-chloroethylvinylether	106.6	34.3	15000	0.00025	1.010	108
Chlorobenzene	112.6	11.7	500	0.00390	1.04	132
o-dichlorobenzene	147	1.39	140	0.00198	1.01	179
m-dichlorobenzene	147	2.25	119	0.00325	1.01	172

參考資料：R.D. Morrison, B. L. Murphy and R. E. Doherty, *Chlorinated Solvents.*, in Environmental Forensics. Contaminant Specific Guide, ed. R.D. Morrison, and B. L. Murphy, Elsevier Academic Press, 2006.



以下針對目前我國常用的數種含氯有機溶劑進行說明。

1. 含氯有機溶劑基本物化特性

含氯類溶劑在 20 世紀中期開始於全世界廣泛且大量地被製造及使用，其用途包括乾洗、金屬表面處理之清洗劑、製造藥劑、製造殺蟲劑及化學中間物等，常見的含氯類溶劑且列為「地下水污染管制標準」之污染物有：1,1-二氯乙烷(1,1-Dichloroethane)、1,2-二氯乙烷(1,2-Dichloroethane)、1,1-二氯乙烯(1,1-Dichloroethylene)、順-1,2-二氯乙烯(cis-1,2-Dichloroethylene)、反-1,2-二氯乙烯(trans-1,2-Dichloroethylene)、三氯乙烯(Trichloroethylene)、四氯乙烯(Tetrachloroethylene)、四氯化碳(Carbon tetrachloride)等，常見之含氯有機溶劑基本物理及化學特性如表 3.1 所示。

2. 含氯有機溶劑宿命傳輸

含氯有機物，大部分密度範圍在 1,100~1,600 kg/m³，黏度範圍在 0.57~1.0 cp 間，其微溶於水，但因位密度大、黏滯性低等之特性，使得它們在地表下的移動性佳，能夠穿過連水都不能穿過之孔隙，所以可以從土壤表層一直往下移動至不透水層，這也使得整治工作更加困難(Palmer and Johnson, 1989)。

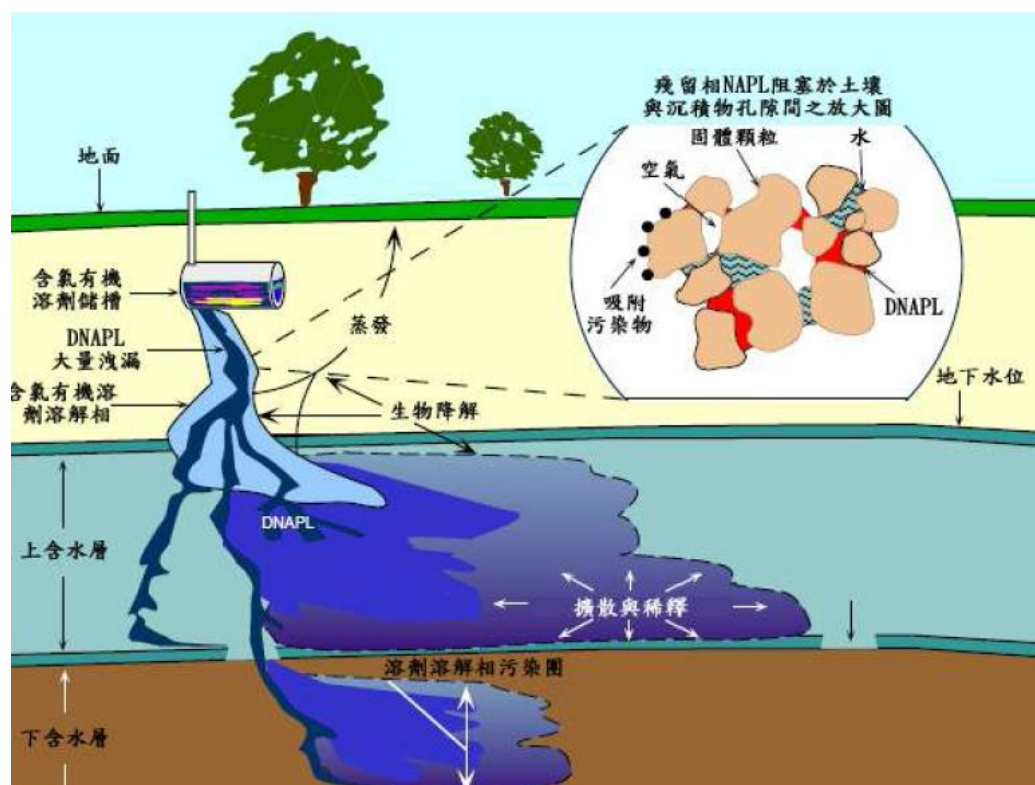
當 DNAPL 從污染源釋放出而流到地下後，宿命與傳輸方式將根據物化特性及水文地質而有所差異。推測當污染發生洩漏，污染物將依土壤質地與通透特性，移動至不飽和之通氣層(vadoze zone)，於此土壤孔隙同時存在少量水分及空氣或其他氣體，且因 DNAPL 本身的特性以及重力，故於通氣層中 DNAPL 可能存在數種型態—揮發成蒸氣相、溶解相、吸附在土壤有機碳上成吸附相、殘留於通過的路徑成殘留相及不斷往下或左右流動之移動相(Henry et al., 2002)。

當 DNAPL 穿過毛細層及地下水位，進入含水飽和層後，主要以溶解相、移動相及殘留相存在此層當中，進而往下移動至不透水層才停止或變慢(Palmer and Johnson, 1989)。DNAPL 在移動過程中，可能附著在不飽和層中的土壤孔隙及裂縫，形成殘留相；再者遇到不同直徑的顆粒大小土壤層時，則選擇最小阻力的路徑移動；土壤有機碳含量高，提高污染物吸附效果等因素，這將增加辨識 DNAPL 的傳輸與流佈困難。



現地電解整治受氯乙烯污染地下水之模場試驗

假使在不斷移動過程中碰到顆粒較細小之土壤(例如黏土),就可能因為無法穿過這些細顆粒的土壤而堆積,就會堆積變成重非水相液體團(DNAPL pool),或者另外尋找黏土層周圍較好通過的通道繼續往下移動,形成污染團後慢慢溶解至地下水。但是本來連續的 DNAPL 在土壤孔隙移動過程中會被阻擋而變成不連續狀殘留態, DNAPL 是可以穿過水無法穿過的土壤間隙,所以一旦有殘留相產生,它就不容易被水帶著走,所以殘留相又稱為不可移動相(陳, 1997)。而且因為它不易被水帶走加上溶解速度緩慢,所以常常成為土壤地下水的持久性污染源,圖 3.1 為 DNAPL 污染土壤地下水之圖解機制。



資料來源：USEPA，1999。

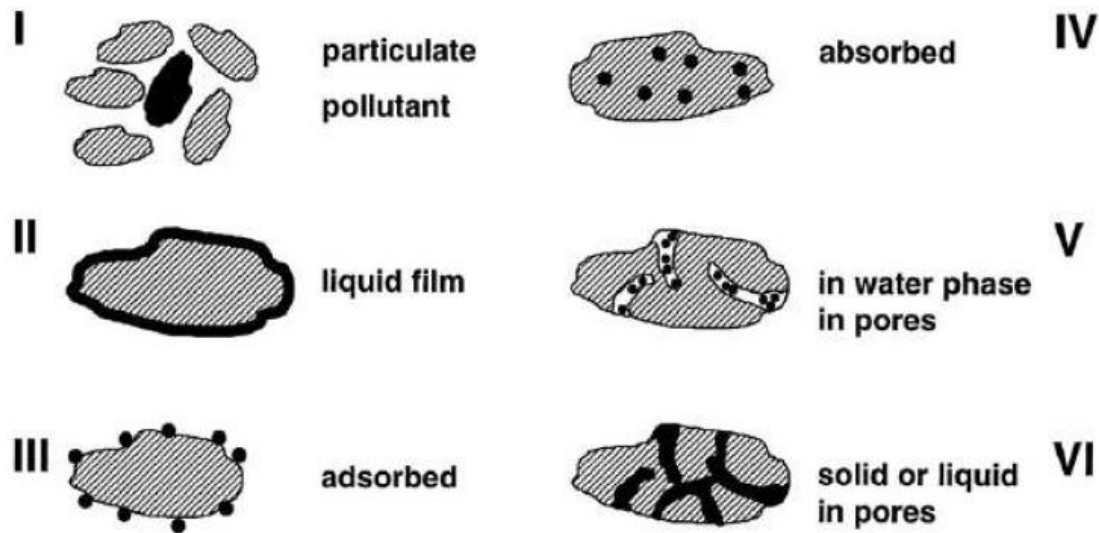
圖 3.1 DNAPL 洩漏至土壤及地下水傳輸

有機物在土壤有許多不同型態,而其中有一型態為土壤吸附,因本研究目的主要是提升 DNAPL 現場調查方式與辨識污染濃度成效,因此瞭解其吸附機制對於本研究極為重要。所謂吸附(adsorption)作用指化合物與固相物質間的結合,依二者間作用力的大小及形式,吸附的機制可以分為化學性吸附與物理性吸附。化學性吸附 (chemisorption)為吸附質分子與吸附劑產生



第三章 文獻探討

化學反應後，藉由原子共用電子形成吸附力強的化學鍵結，如共價鍵 (covalent bond)。離子鍵指帶電荷的吸附質與吸附劑間(正、負離子)藉由靜電引力吸附而產生的鍵結，如吸附質為金屬離子時，因為土壤顆粒所攜帶的負電荷吸引帶正電荷的金屬離子，如圖 3.2 所示。



備註：I：固體顆粒；II：液態膜；III：吸附在土壤上；IV：吸附進入土壤裡；V：在土壤大孔隙中的水相；VI：在土壤大孔隙中的固體或液體。(Source: Paria, 2008)

圖 3.2 在土壤中有機污染物不同的物理形式

污染物的分佈行為必須同時考慮土壤、污染物與土壤中之液體(如地下水)特性與三者間交互作用。土壤主要會影響污染物行為為土壤有機質含量，因污染物會被其吸附。而污染物的特性則定考慮其水溶解度大小及解離與否。另外土壤中之液體的特性，包括 pH 值、導電度等皆可能會改變土壤特性或污染物特性影響分佈行為。三者交互作用達到動態平衡後，會以固定之比例分佈於土壤有機碳上及土壤之液體中，在此可以以分佈係數 (distribution coefficient) 來表示之：

$$K_p = C_s / C_w$$

K_p ：污染物在兩相間的分佈係數 (kg/L)

C_s ：污染物在土壤濃度 (mg/Kg)

C_w ：污染物在溶液中濃度 (mg/L)



現地電解整治受氯乙烯污染地下水之模場試驗

而因考慮到土壤中有機質是有機污染物最主要吸附中心，故可進一步將式子表示如下：

$$K_p = K_{oc} \times f_{oc}$$

K_{oc} ：污染物在土壤有機碳與水溶液間的分佈係數 (Kg/L)

f_{oc} ：土壤中有機碳之體積分率

3.2 地下水中含氯有機污染物整治技術概述

美國環保署 2007 年針對超級基金 DNAPL 整治場址主要整治技術選用情形，彙整如表 3.2 所示。其中地下水中 DNAPL 主要的整治技術，包括：監測式自然衰減、土壤間隙蒸氣抽除法、生物整治法、地下水注氣法、透水性反應牆與植物整治法等，表 3.3 為常見之 DNAPL 整治技術概述及說明。

表 3.2 含氯有機物土壤及地下水污染整治技術採用案例數量統計

污染技術 \ 污染物種類		揮發性 鹵化物	其他半揮發 性鹵化物	多環芳香族碳 氫化物(PAH)	多氯聯 苯(PCB)
土 壤（污染源）整 治	土 壤間隙蒸氣抽除法	217	33	15	1
	焚化法	52	34	27	36
	加熱脫附法	33	12	21	16
	固化穩定化法	20	7	17	35
	生物整治法	22	17	37	2
	電分離法	18	8	9	1
	化學處理法	12	4	1	4
	沖洗法	11	3	3	0
	現地熱處理	8	3	5	0
	機械式土壤氧化法	7	1	0	0
	植物整治法	4	1	1	0
	熔融法	3	1	0	2
	溶劑萃取法	2	0	2	2
	多相萃取法	1	0	0	0
	中和法	0	0	2	0
	物理分離法	0	0	4	4
	土壤清洗法	0	0	1	1
	合 計	410	124	145	104
地 下 水 整 治	地下水注氣法	53	5	5	7
	生物整治法	40	7	20	12
	化學處理法	25	9	3	3
	多相萃取法	16	7	6	0
	透水性反應牆	11	0	1	0
	植物整治法	11	3	1	2
		合 計	156	31	36

註：1982 年至 2005 年間美國超級基金污染場址之資料。



現地電解整治受氯乙烯污染地下水之模場試驗

表 3.3 常見之 DNAPL 地下水污染整治技術說明

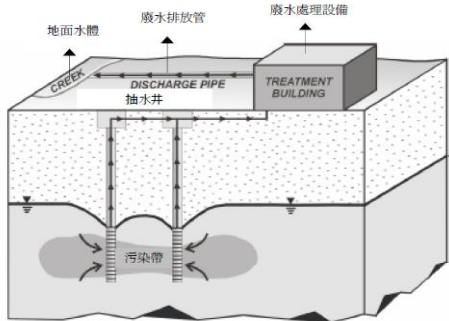
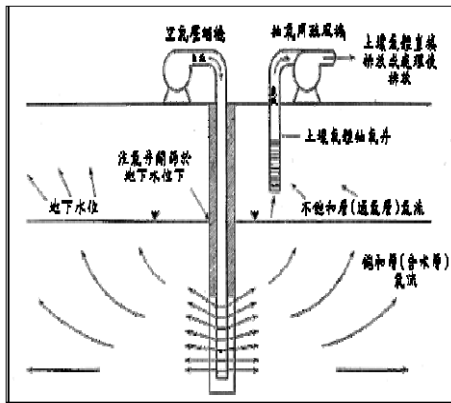
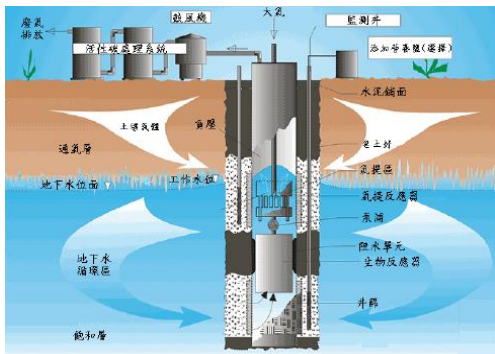
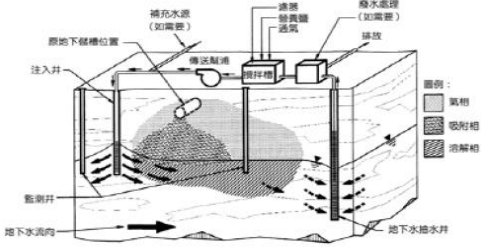
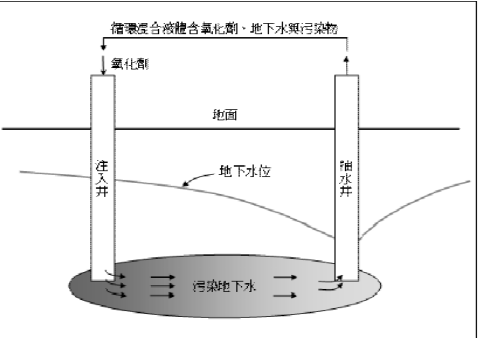
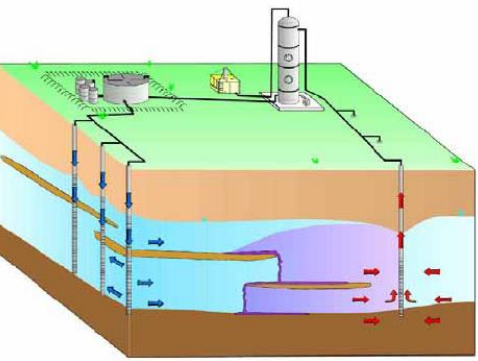
整治技術	原理說明
地下水抽出處理法 (pump & treat) 	地下水抽出處理法係藉由抽水井或抽水渠 (drain)等抽除系統，將受污染地下水抽除至地表進行處理，抽除系統於操作過程會形成一個捕捉區(capture zone)，可將經過捕捉區之受污染地下水進行抽除。可配合 SVE、AS 及蒸氣注入等方式，同時處理含水層及不飽和層土壤中之 DNAPL 污染物。
地下水注氣法(air sparging, AS) 	地下水注氣法係利用壓力將空氣或氧氣注入地下水，產生氣泡，促使含水層（飽和層）之地下水污染物溶出，並揮發至氣相進入透氣層（不飽和層）中，為有效控制氣相污染物的流動，通常會結合土壤間隙蒸氣抽除法，將氣體抽出至地面處理後予以排放。由於本法必須注入空氣或氧氣，可增加地下水溶氧量及不飽和層氣體氧氣濃度，因此可促進污染物被好氧微生物降解。此外，在注入空氣加入甲烷（營養鹽），則可促進含氯有機物（如三氯乙烯）被共代謝微生物降解。
地下水循環井法 (groundwater circulation well, GCW) 	整治原理為將井內受污染之地下水，經由氣提程序或氣提設備處理，使地下水中揮發性污染物由溶解相轉變為氣相後，進行氣相污染物收集工作；氣相污染物藉由揮發性有機物處理設備進行整治，或回注至通氣層中，以生物整治方式進行處理；而經過氣提作用處理後之污染濃度降低，地下水則回注入井內補注含水層，藉由此補注及抽除之程序，以循環方式處理含水層中之污染地下水，過程中同時進行土壤間隙蒸氣抽除。



表 3.3 常見之 DNAPL 地下水污染整治技術說明（續 1）

整治技術	原理說明
現地生物整治(in-situ bioremediation) 	生物整治工法是經由人工添加植入或自然發生的過程中，以微生物污染物降解或轉移成較低毒性或無毒性的型態，藉此降低或排除整治污染物之濃度，完成整治作業，但本法需人工添加或植入營養源之生物性整治作業，具有成本低、整治時效長之特性。
現地化學氧化法（In situ chemical oxidation, ISCO） 	現地化學氧化／還原法不需將污染土壤挖除或將污染地下水抽除，而是在污染區域（污染帶）中設置不同深度的注入井，再利用泵浦加壓，將化學氧化劑或還原劑透過井注入地下環境中。氧化劑與污染物混合、反應，使土壤與地下水中的污染物破壞、分解成較不具危害性的物質，理想狀況下，可轉化成二氧化碳、水與無機鹽類，但亦可能產生有毒的中間副產物。如為縮短整治期程，通常會利用一個井注入化學氧化劑，另一個井將污染地下水抽除出來，並且設置氧化劑循環再利用設備。
界面活性劑/共溶劑沖洗法 (surfactant/ cosolvent flushing) 	界面活性劑/共溶劑沖洗系統通常為包含成對的注入井與抽出井之系統。將已針對整治場址與污染物性質調整為適當濃度之界面活性劑/共溶劑經由注入井加入地下水層中，當沖洗污染區域時，可使 DNAPL 溶入微胞(micelle)內部，減少界面張力且增加其移動性及溶解性，接著 DNAPL 與地下水經由抽出井抽出，最終將 DNAPL 完全移除。



現地電解整治受氯乙烯污染地下水之模場試驗

表 3.3 常見之 DNAPL 地下水污染整治技術說明（續 2）

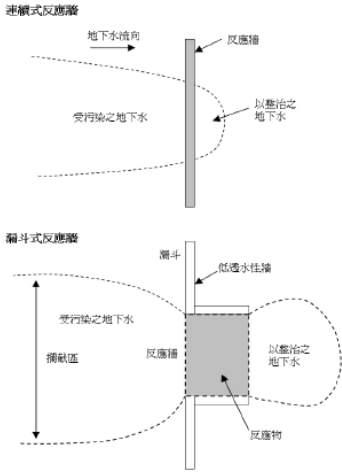
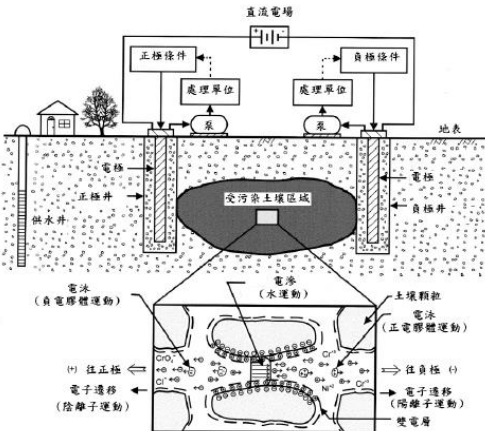
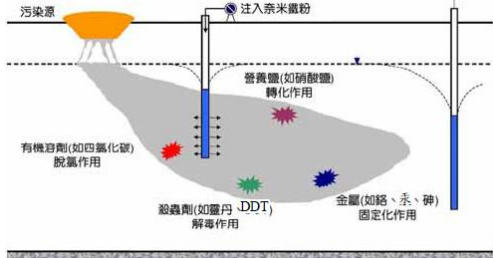
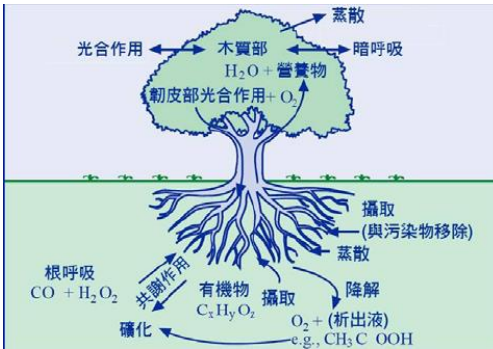
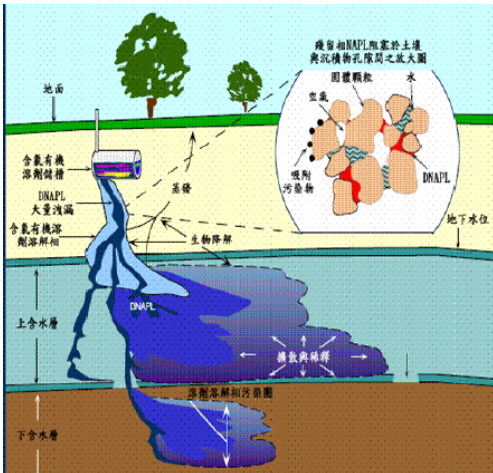
整治技術	原理說明
開挖及圍堵技術 	「開挖」之原理係經確認範圍後，直接以重型施工機具，如挖土機、推土機將受污染土壤挖除，並將其運送至離地處理設施，進行後續處理。「圍堵」為安裝於污染介質周圍的地下溝渠、地牆或地膜所組成之「垂直阻絕系統」，有時亦與地面生態覆蓋系統結合。
現地透水性反應牆 (permeable reactive barrier, PRB) 	透水性反應牆之設計主要在地下水污染帶下游，設置一不透水的障壁，藉由此不透水障壁將污染帶引導至位於其內之滲透性、半滲透性或可置換的反應牆。在此反應牆中，會進行關切污染物之處理。處理過後之地下水流出反應牆後，再沿著自然水流方向行進。
電動力整治技術 (electrokinetics remediation) 	電動力法的原理係將正負電極置於待處理之污染場址中，使污染區域被包圍，並施加適當直流電壓或電流後，藉由陰、陽電極間生成之電場作用，驅使帶正電荷之離子被吸引到負極(陰極)；相反地，帶負電荷之離子則向正極(陽極)移動；此外，實驗證實溶解性非離子物種另可藉由電滲透流(electroosmotic flow)之傳輸，藉以引導土壤中電解質溶液之移動，進而達到去除土壤中污染物的目的。



表 3.3 常見之 DNAPL 地下水污染整治技術說明 (續 3)

整治技術	原理說明
奈米科技處理法(nanotechnology) 	在目前 DNAPL 地下水污染整治的領域中，奈米科技之主要應用，係結合原有零價鐵還原脫氯技術，藉由將零價鐵的顆粒奈米化，以強化零價鐵脫除地下水含氯有機物之能力，並增進反應速率。
植物整治法 (phytoremediation) 	植物整治法係利用植物將土壤中污染物予以吸收、固定、轉化或累積，同時亦提供有利於生物整治的條件，以促進土壤中的微生物，將污染物予以降解或無害化。研究顯示，植物通常經由直接及間接的方式來移除地下環境中的污染物。一般而言，污染物進入植物組織的途徑，可以經由植物的吸附或吸收作用，達到移除部分的土壤污染物質。此外，土壤中的污染物也可經由植物的代謝過程而被轉化或礦化成低毒性或無毒性的物質。
監測式自然衰減 (Monitored Natural Attenuation, MNA) 	依據美國環保署之自然衰減法定義：在有利的土壤及地下水環境中，無人為干預而自然發生之衰變程序，以減少或降低土壤及地下水中污染物的質量、毒性、移動性、體積或濃度，這些於現地所發生之程序包括生物分解、擴散、稀釋、吸附、揮發、污染物之化學性或生物性之穩定或破壞污染物等。污染場址在嚴謹的控制與長期成效監測下，藉由自然衰減過程進行清理之方法，且與其他積極性整治技術比較，利用監測式自然衰減法達到污染整治目標所需之整治時間仍是合理可接受的。



第四章 研究方法與過程

4.1 模場場址背景

本專案模場場址為伍桐股份有限公司，位於高雄市臨海工業區東南側，地址為高雄市小港區中利路 2 號，設立於 1997 年，屬於化學材料製造業，迄今設有 M01 熱媒加熱製程及 M02 其他化學製造程序運作，原物料及產品為二乙二醇(MEG)、三乙二醇(DEG)與重油。截至目前，臨海工業區內共有 4 個公告列管場址，包含 1 個土壤及地下水污染整治場址、2 個土壤及地下水污染控制場址及 1 個七條五應變必要場址，其相對位置繪製於圖 4.1 所示，各列管場址資訊整理如表 4.1。



圖 4.1 臨海工業區列管場址位置圖

伍桐股份有限公司場內監測井 C085S 於 92 年 7 月設置，自 93 年檢測出氯乙烯超過地下水污染管制標準，歷年調查結果亦顯示氯乙烯有持續超過地下水污染管制標準之情形，環保局遂於 101 年 6 月 22 日公告伍桐公司為地



第四章 研究方法與過程

下水污染控制場址，包含小港區中林子段 1089、1090 地號等兩筆地號，場址面積為 6,864 平方公尺，場址大事紀如表 4.2 所示。

表 4.1 臨海工業區列管場址資訊

場址編號	場址名稱	污染物 (土壤/地下水)	場址面積 (m ²)	污染行為人	列管狀態 (公告日期)	整治進度
E10033	台灣中油股份有限公司煉製事業部大林煉油廠	苯、二甲苯/苯、甲苯、總酚、TPH-d	260,766	台灣中油股份有限公司	整治場址 (101.11.26)	執行土壤、地下水調查及評估計畫中
E10080	伍桐化學公司	無/VC	6,864	未明確	控制場址 (101.06.22)	無
E10014	山隆加油站	TPH-d/無	1,910	山隆通運股份有限公司	控制場址 (96.09.14)	審核控制成果報告中
E10315	永記造漆工業股份有限公司	鎘、鉻、銅/無	76,280	永記造漆工業股份有限公司	七條五採取 應變必要措施	審查污染改善計畫中

表 4.2 伍桐股份有限公司場址大事紀

日期	大事紀
101.06.05	伍桐股份有限公司場內監測井 C085S 地下水中氯乙烯濃度持續超過地下水污染管制標準，環保局公告伍桐公司為地下水污染控制場址。
101.06.05	公告伍桐股份有限公司為地下水污染管制區範圍，即日起管制區內之土地使用或人為活動予以管制或限制。
101.11.22	環保局於 101 年 11 月 28 日、29 日於伍桐公司廠內設置之標準監測井 C207S 及於廠外設置標準監測井 C208S，查證土壤及地下水污染物濃度。
101.12.22	浩宇公司提送環保局「101 年度高雄市土壤及地下水污染調查及查證工作計畫」於 101 年 12 月 3 日伍桐化學公司地下水調查現場採樣與分析報告。
103.6	「103 年高雄市土壤及地下水污染調查及查證工作計畫」持續調查伍桐化學公司地下水氯乙烯污染情況。
103.10	「高雄市土壤及地下水含氯污染補充調查與管理流程研擬計畫」釐清污染範圍與定期監測伍桐化學公司地下水氯乙烯濃度。



現地電解整治受氯乙烯污染地下水之模場試驗

針對伍桐股份有限公司歷年地下水污染調查成果彙整於下：

1. 「97 年度高雄市土壤及地下水品質監測及管理計畫」

環保局為調查伍桐公司監測井 C085S 地下水氯乙烯濃度污染範圍，於 97 年 3 月在 C085S 周界設置 3 口簡易井(簡易井 4、簡易井 5、簡易井 6)，檢測結果地下水氯乙烯皆未檢出，設置位置及檢測結果如圖 4.2(a)。98 年 6 月於廠內鄰近 C085S 監測井處設置 3 口簡易井(簡易井 1~3)，地下水檢測結果簡易井 1 與簡易井 2 之氯乙烯濃度皆超過地下水污染管制標準，設置位置及檢測結果如圖 4.2(b)，並推估地下水流向為北往南。

2. 「99 年度高雄市土壤及地下水污染調查及查證工作計畫」與「99 年度高雄市土壤及地下水污染品質監測及管理計畫」

99 年 11 月環保局依歷年調查成果於監測井 C085S 上游、下游各設置新簡易井 6、簡易井 7，檢測結果 C085S、簡易井 1、7 之氯乙烯皆超出地下水管制標準，設置位置及檢測結果如圖 4.2(c)。100 年 3 月於地下水氯乙烯濃度較高之監測井附近執行 4 點次土壤採樣，場址周邊 3 點次土壤採樣，各點次氯乙烯及其他土壤污染管制項目皆無檢出，尚未發現未飽和層污染。

3. 「100 年高雄市土壤及地下水污染調查及查證工作計畫」

100 年 10 月進行 8 口地下水定期監測作業，其監測結果 C085S、簡易井 1、2、7 之氯乙烯濃度仍超出地下水污染管制標準，檢測結果濃度分布圖如圖 4.2(d)所示。

4. 「101 年高雄市土壤及地下水污染調查及查證工作計畫」

101 年 11 月環保局於伍桐公司廠內及廠外分別設置之一口標準監測井 C207S 及 C208S，其中位於廠內的監測井 C207S 地下水中氯乙烯濃度超過地下水污染管制標準外，另有氯苯、1,2-二氯乙烷、1,1-二氯乙烯、順-1,2-二氯乙烯、反-1,2-二氯乙烯、三氯乙烯、1,1,2-三氯乙烷等化合物的檢出。而監測井 C208S 監測井地下水則有 1,1-二氯乙烷、氯乙烯的檢出；而歷年持續超過管制標準的監測井 C085S 則無檢出，101 年地下水氯乙烯濃度分布圖如圖 4.2(e)所示。



第四章 研究方法與過程

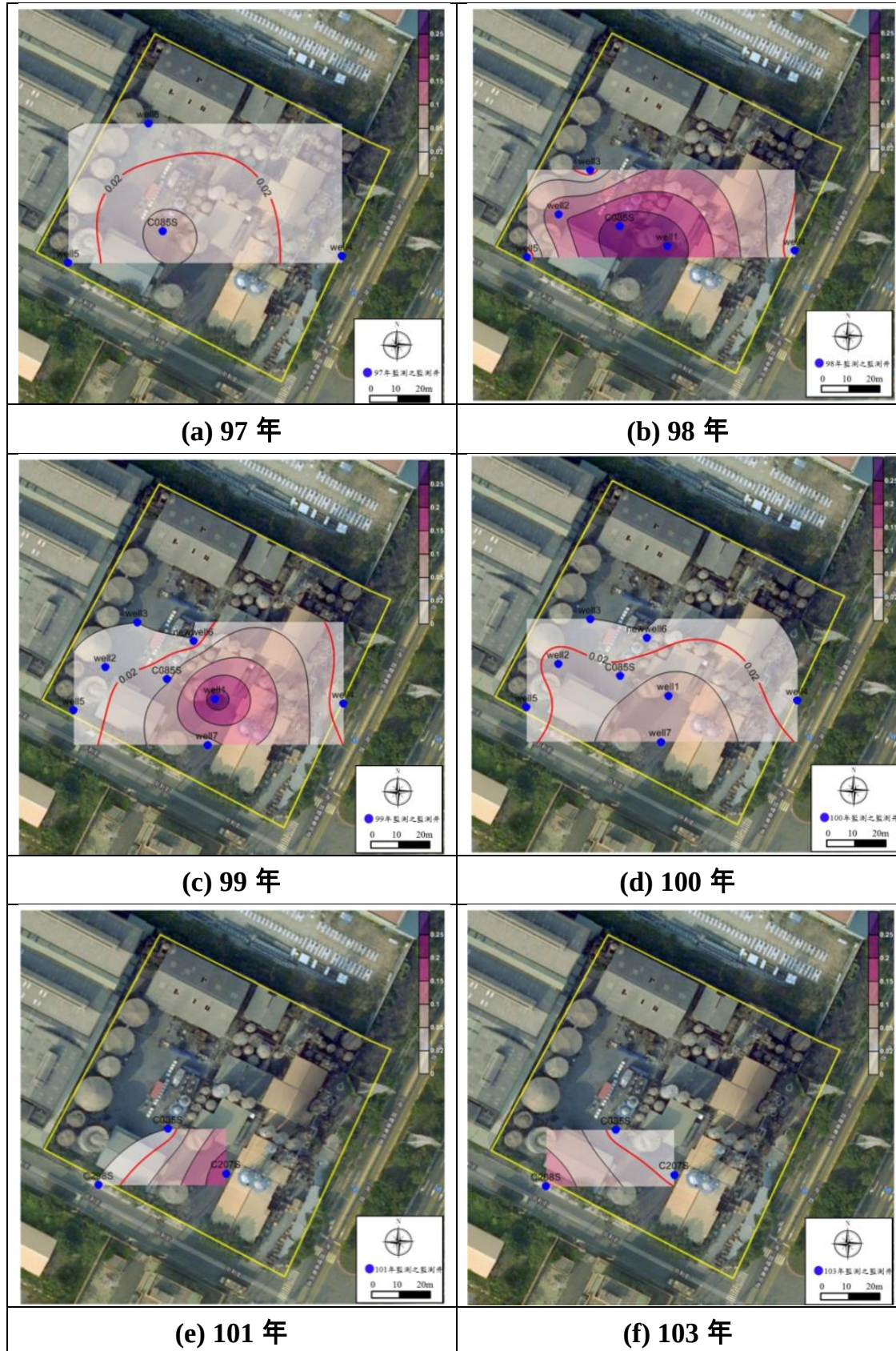


圖 4.2 民國 97 年至 103 年伍桐公司地下水氯乙烯濃度變化圖



現地電解整治受氯乙烯污染地下水之模場試驗

5. 「103 年高雄市土壤及地下水污染調查及查證工作計畫」

103 年 6 月持續針對伍桐公司三口標準監測井進行監測，監測井 C085S 及 C207S 地下水氯乙烯持續有檢出，其中 C207S 也有 1,2-二氯乙烷、1,1-二氯乙烯、順-1,2-二氯乙烯檢出情形，而廠外監測井 C208S 於此年度地下水氯乙烯濃度檢測出 0.14 mg/L，超過地下水污染管制標準，103 年地下水氯乙烯濃度分布圖如圖 4.2(f)所示。

彙整標準監測井 C085S、C207S、C208S 歷年監測數據如圖 4.2 所示，由圖可知 99 年前 C085S 地下水氯乙烯濃度與地下水位具同步性，C085S 及 C207S 濃度有下降趨勢，並於 103 年低於地下水污染管制標準。但於場址外之監測井 C208S 於 103 年反而超過地下水污染管制標準，推測污染已擴散至場外，實際污染範圍尚待釐清。

4.1.1 場址水文地質資料

臨海工業區屬於現代沖積層，土壤多由細砂、粉土及黏土所組成，彙整臨海工業區內監測井土壤岩心取樣資料，地表下 0-6 公尺左右主要為棕黃色黏土，地表下 6-8 公尺下為棕灰色細砂層。與中央地調所小港鑽探成果相符，地表下 20 公尺以內，除了 0-7 公尺、13.5-14 公尺、17-19 公尺由粉土及黏土組成，其餘皆由砂及細砂組成。

「103 年高雄市土壤及地下水含氯污染補充調查與管理流程研擬計畫」薄膜界面探測器導電度(MIP-EC)結果，伍桐公司薄膜界面探測器導電度之模擬結果如圖 4.3 所示。伍桐公司東側 EC 測值起伏較大，於深度 7.0 公尺內約落於 25~100 mS/m 區間，研判土壤質地為細沙、粉土質細砂及黏土質細沙地層，於地表下 7.0~15.0 公尺處有 EC 測值約落於 25~50 mS/m 區間，可能為細砂地層為主，與鑽探成果大致相符。而西側部分 EC 測值大多為 25~50 mS/m，可能也以細砂地層為主。

臨海工業區位於嘉南平原地下水分區，由工業區內 12 口工業局地下水監測井歷年水位監測成果顯示，地下水流向大致是由東南往西北流，豐、枯水期之地下水流向無太大差異性，如圖 4.4 所示，地表坡度約 2.68，地下水水位約為地表下 4.53 公尺，含水層水力傳導係數約為 0.017-24.062 m/day，平均為 5.397 m/day。



第四章 研究方法與過程

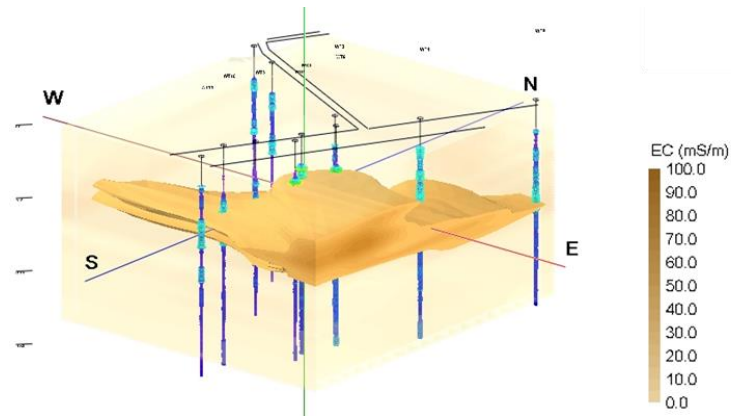
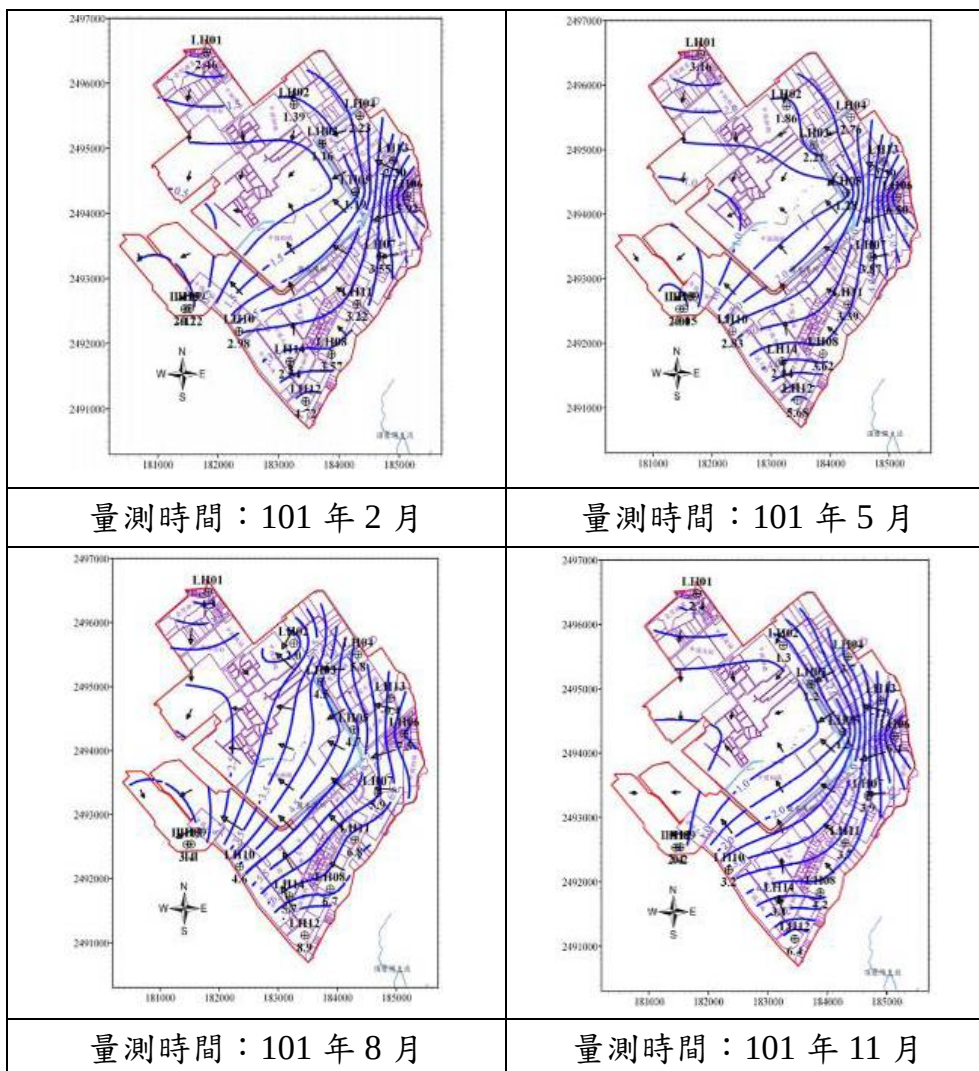


圖 4.3 伍桐公司 MIP-EC 訊號值三維模擬圖



資料來源：經濟部工業局「推動工業區土壤及地下水採樣監測調查計畫」

圖 4.4 臨海工業區地下水位定期監測成果



現地電解整治受氯乙烯污染地下水之模場試驗

4.1.2 場址污染現況

「103 年高雄市土壤及地下水含氯污染補充調查與管理流程研擬計畫」薄膜界面探測器搭載電子捕獲偵測器(MIP-ECD)結果,顯示伍桐公司 MIP-ECD 訊號值高值分布於沿海三路及其東側為主。在沿海三路靠北處, MIP-ECD 訊號較高值約分佈於深度 4-8 公尺處;在沿海三路靠南處則在深度約 3-5 公尺有一極高之 MIP-ECD 訊號,而在深度 9-12 公尺又有一較高之 MIP-ECD 訊號。伍桐公司薄膜界面探測器搭載火焰離子偵測器(MIP-FID)之測量結果,顯示 MIP-FID 訊號較高之位置也位於沿海三路一側,分布於北側為 3.0-7.0 米附近有測得較高之訊號,靠南側則為近 15.0 米處有些微測得較高之訊號。套疊 MIP-ECD 與 MIP-FID 三維空間模擬圖於圖 4.5,顯示 ECD 高異常測值區, FID 訊號較不明顯;反之, FID 探測訊號顯著時,則 ECD 普遍測值偏低。透過 MIP 探測結果,可初步掌握伍桐公司污染團分佈範圍, ECD 訊號較高之位置以沿海三路南側地表下較淺處,約 3-6 公尺處為主; FID 之訊號則以沿海三路北側地表下較深處,約 8-14 公尺處。

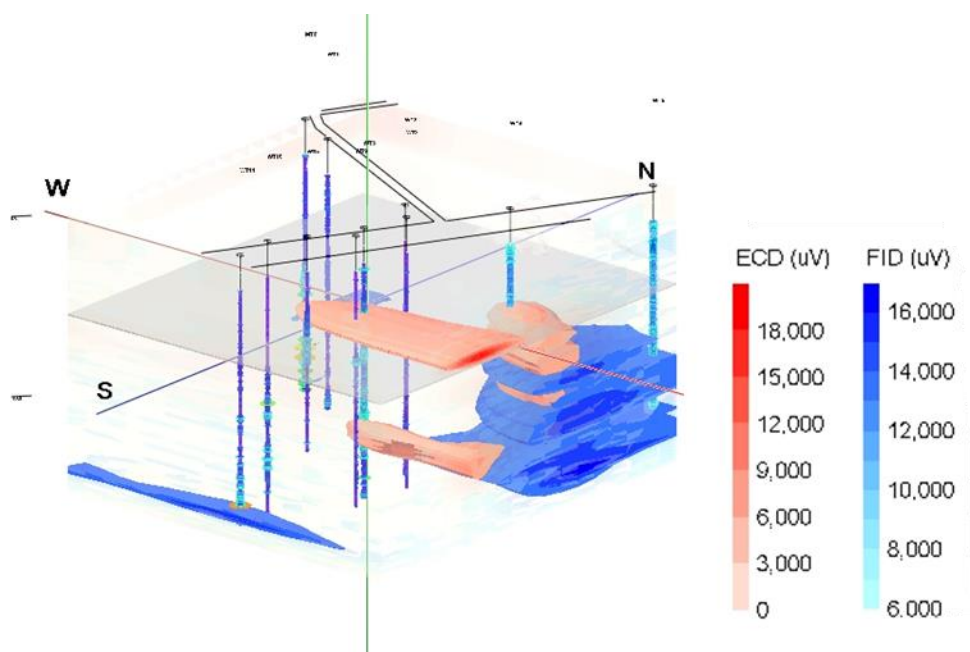


圖 4.5 伍桐公司 MIP-ECD/FID 訊號值三維模擬套繪圖



第四章 研究方法與過程

由於伍桐公司之含氯有機污染以氯乙烯為主，因此參考 MIP-ECD 之訊號為主，於 MIP-ECD 高異常區域進行土壤及地下水採樣調查，而場址周界土壤採樣結果並未檢出含氯相關污染物。伍桐公司選定調查之既有監測井位置如圖 4.6 所示，監測井基本資料如表 4.3 所示。於 104 年 3 月 9 日至 3 月 11 日進行臨海工業區枯水期既有井地下水採樣作業，調查結果顯示廠內監測井 C085S 之氯乙烯濃度為 0.00566mg/L，已低於管制標準；然而廠內監測井 C207S 之氯乙烯濃度為 0.144mg/L，廠外監測井 C208S 之氯乙烯濃度為 0.226mg/L，皆超過管制標準，如圖 4.7 所示。C085S 監測井自 99 年起氯乙烯檢出濃度呈下降之趨勢，反之廠外監測井 C208S 氯乙烯檢出濃度呈上升之趨勢，而廠內監測井 C207S 氯乙烯檢出濃度起伏大，仍需持續定期監測以了解變化趨勢。伍桐公司公告資料顯示污染行為人尚未確定，主要原因其歷年製程資料未有含氯碳氫化合物使用歷程，且場內土壤未有含氯碳氫化合物污染檢出，雖然歷年已針對本區東北側之區內外進行污染調查與追查污染源，但卻無明顯事證可釐清污染範圍分布與污染源。



圖 4.6 伍桐公司既有監測井地下水調查之監測井位置圖



現地電解整治受氯乙烯污染地下水之模場試驗

表 4.3 伍桐公司既有監測井基本資料

井碼	井深 (公尺)	井頂高層 (公尺)	井篩區間 (公尺)	座標	水力傳導係數 (公尺/天)
C085S	11.79	11.47	5.79~11.79	X:184650 Y:2491520	0.094
C207S	12.16	8.26	6.16~12.16	X:184659 Y:2491508.9	3.491
C208S	12.24	7.395	6.24~12.24	X:184611.7 Y:2491503	3.309

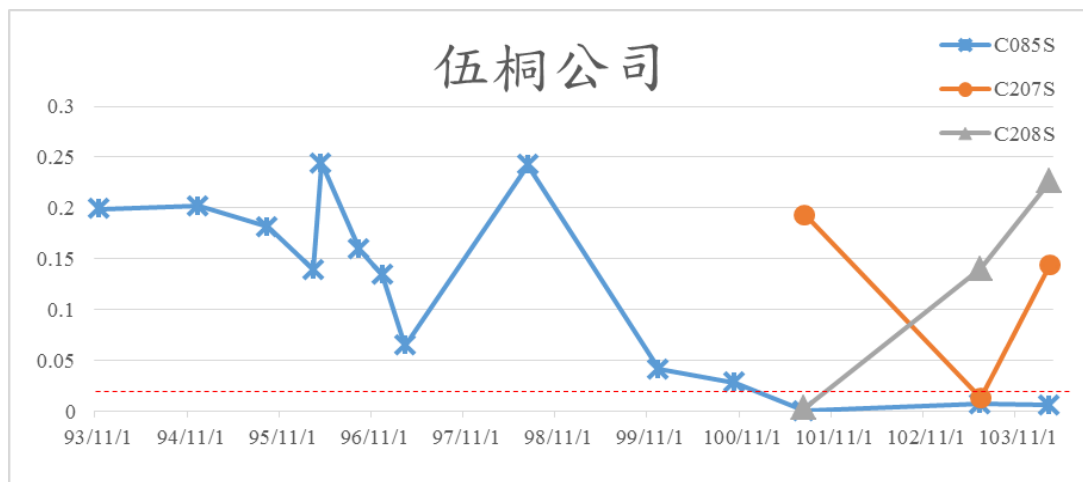


圖 4.7 伍桐公司氯乙烯歷年檢出濃度圖



4.2 現地電解整治工法

傳統地下水整治工法以抽取處理法為主，其缺點為處理時需抽取過量地下水，但因地下含水層質地之非均質性，某些區域污染物無法順利抽出處理。物理性整治工法以土壤氣體抽除法(Soil Vapor Extraction)廣受採用，但僅限於處理土壤中揮發性物質，抽出之污染氣體仍須再進一步處理，常結合空氣注入法(Air Sparging)同時可處理土壤與地下水之揮發性有機污染物，但仍限於土質較疏鬆區域，對於質地緊密之土壤處理效果不佳。化學性整治工法以現地化學氧化法(In Situ Chemical Oxidation)近年來極為普遍使用，雖然可達到快速降解地下水污染物的目的，一般需添加化學氧化藥劑如雙氧水(H_2O_2)、芬騰試劑(Fenton Reagent)、過硫酸鹽藥劑(Persulfate)等，若大量添加所費不貲。而現地生物整治工法雖被認為是最符合生態且有效之處理方法，不僅耗時甚久，且現地微生物菌種控制不易，以三氯乙烯降解為例，常生成氯乙烯導致地下水毒性增加，無法滿足實際整治需求。本發明之現地電解法(ISE)為一創新性整治工法，系統運作如圖 4.8 所示，因設計的電極型式可直接伸入整治井中，抵達污染物深度，利用電解機制直接現地破壞地下水污染物，不須將污染地下水抽出地面處理，故可降低處理成本，尤其針對地下水深層污染物處理的效益更為顯著。

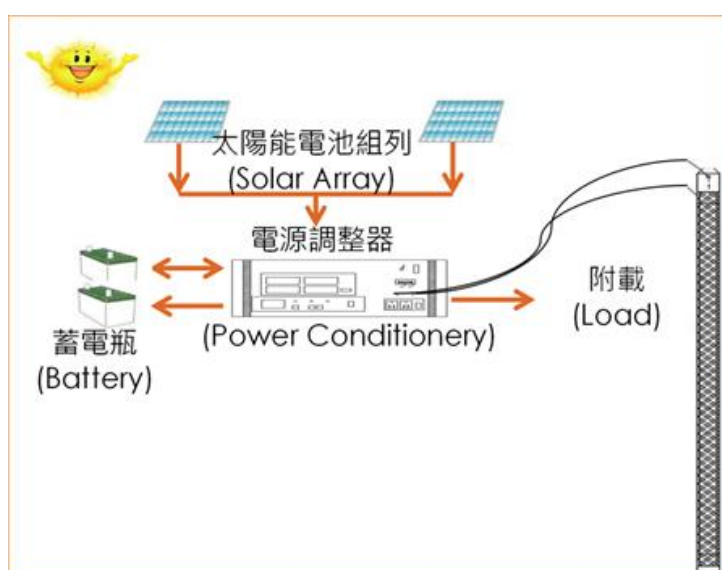


圖 4.8 現地電解法(ISE)之系統運作示意圖



現地電解整治受氯乙烯污染地下水之模場試驗

4.2.1 專利權說明

本研究使用之「井中電解裝置」已取得中華民國專利發明第 I516453 號證書，如圖 4.9(a)所示；開發之「現地電解之地下水整治工法」已取得中華民國專利發明第 I530458 號證書，如圖 4.9(b)所示，並申請大陸發明專利第 IP150397 號。本研究使用之整治工法展示模型於 2014 高雄國際發明展競賽榮獲金牌獎，於 2015 臺灣國際創新發明暨設計競賽榮獲發明類社會組 iVAN 金牌最高榮譽。本發明之現地電解法(In Situ Electrolysis; ISE)使用之設備包含供電控制系統與井中電解裝置，運作方式由供電控制系統連接市售電力或其他綠電(如太陽能發電)，透過交/直流電力轉換、蓄電儲存、定電壓/電流輸出的方式，透過電源線連接將電流傳輸至井中電解裝置，如圖 4.8 所示。井中電解裝置主體為一管狀式雙層網狀催化電極，以材料催化特性考量白金電極為較佳的選擇，基於製造成本經費考量以白金鍍層鈦網為實體規格，井中電解裝置外觀如圖 4.10 所示。

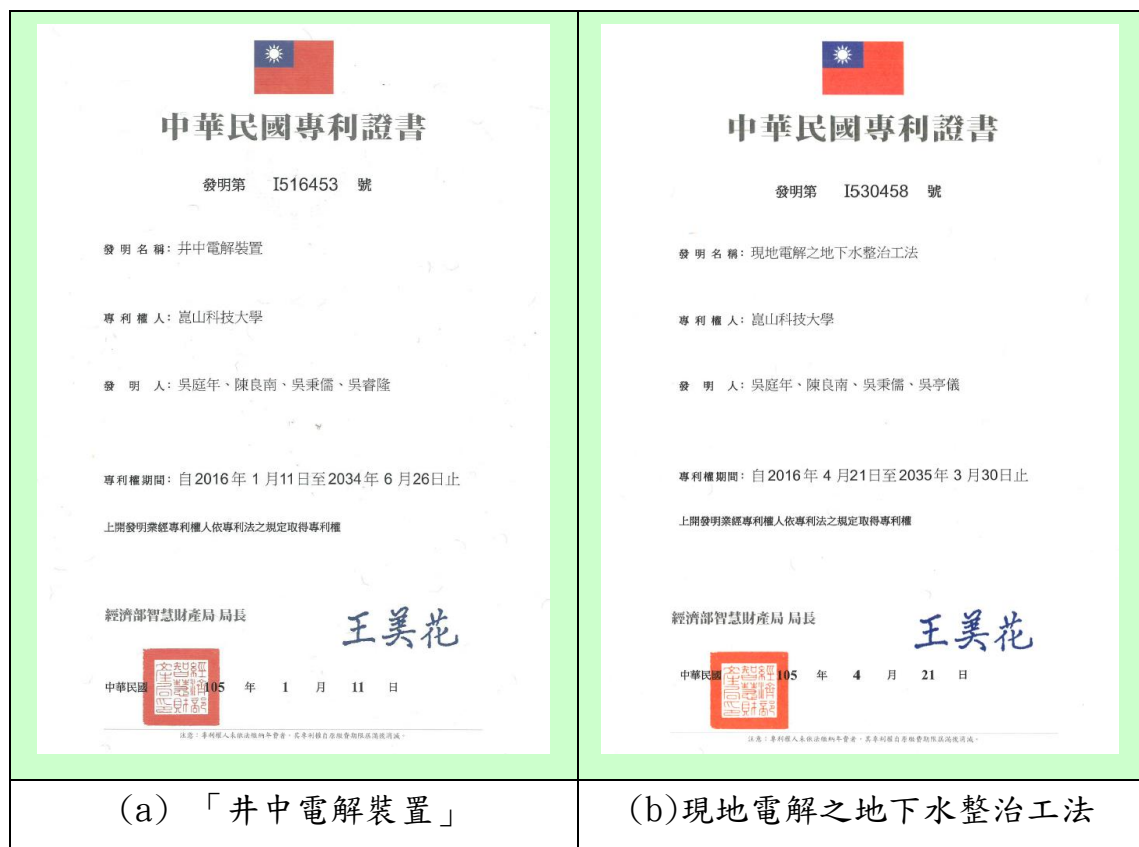
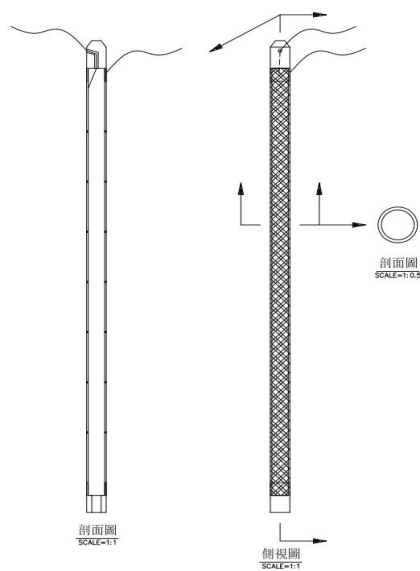


圖 4.9 發明專利證書



第四章 研究方法與過程

當井中電解裝置置入整治井中，則整治井可視為一電解反應器，污染物整治的原理以電化學反應為基礎，於整治井中透過電解機制持續生成氫氧自由基氧化污染物，或生成氫原子參與污染物還原反應。污染物藉由地下水傳輸進入整治井內，即可參與電化學觸發之氧化還原反應，進行污染物之破壞移除；若污染物於整治井內有足夠的滯留時間，自整治井流出之淨化地下水，即可藉由混合、延散、稀釋等作用逐步降低污染物的濃度，來達到地下水整治的目的。



(a)



(b)

圖 4.10 「井中電解裝置」(a)設計示意圖；(b)外觀

4.2.2 模場應用實績

本發明之現地電解法可應用於地下水污染整治工作，尤以含氯有機物污染的場址為主，因井中電極設計為管狀，不僅方便使用者握持攜帶，亦容易直接伸入污染場址之整治井中，依污染物分布深度可使電極深入現地污染物鄰近範圍，直接降解地下水污染物。因不須將污染地下水抽出地面處理，故



現地電解整治受氯乙烯污染地下水之模場試驗

可降低處理成本，尤其針對地下水深層污染物處理的效益更為顯著。針對地下水三氯乙烯污染之整治案例，一般微生物降解三氯乙烯過程中可能生成氯乙烯、二氯乙烷、順-二氯乙烯、逆-二氯乙烯等中間產物，於實驗室電解批次反應過程中皆未測得，顯現電解反應十分迅速且完全。三氯乙烯還原脫氯反應測得 91% 氯離子釋出量，如圖 4.11 所示；三氯乙烯礦化約有 88% 二氧化碳生成量，如圖 4.12 所示。質量平衡計算結果尚在合理的分析數據誤差範圍內，因此可視為電解反應可達到 TCE 完全脫氯降解及 TCE 完全礦化。本發明之現地電解法應用於高雄市大寮區福德爺廟三氯乙烯地下水污染整治場址，藉由太陽能發電系統提供綠電，足以驅動井中電解裝置 24 小時持續運作之電源所需，不須額外供電。模場試驗結果顯示於操作電壓 3 V 條件下，直接電解三氯乙烯污染之地下水，電解 21 天後井中電極放置之整治井三氯乙烯去除效率達 53%，下游 1 公尺處觀測井三氯乙烯去除效率達 90%，地下水污染團亦局部縮減，如圖 4.13 所示。本發明整治工法成功展示應用於三氯乙烯地下水污染場址之整治案例，藉由電化學反應機制可將三氯乙烯完全脫氯及完全礦化。結合太陽能發電之綠能應用，可使本開發產品的使用場址成為永續與綠色整治工法的示範案例。

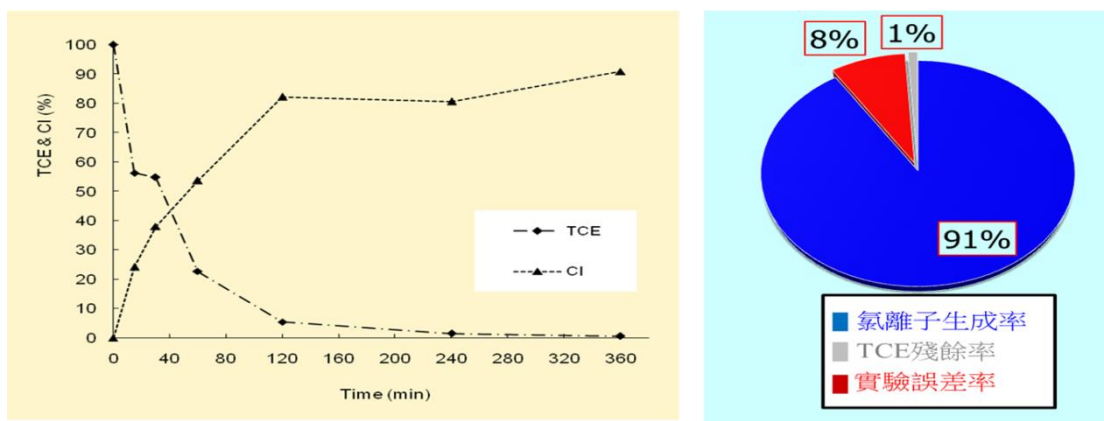


圖 4.11 三氯乙烯降解試驗氯平衡計算



第四章 研究方法與過程

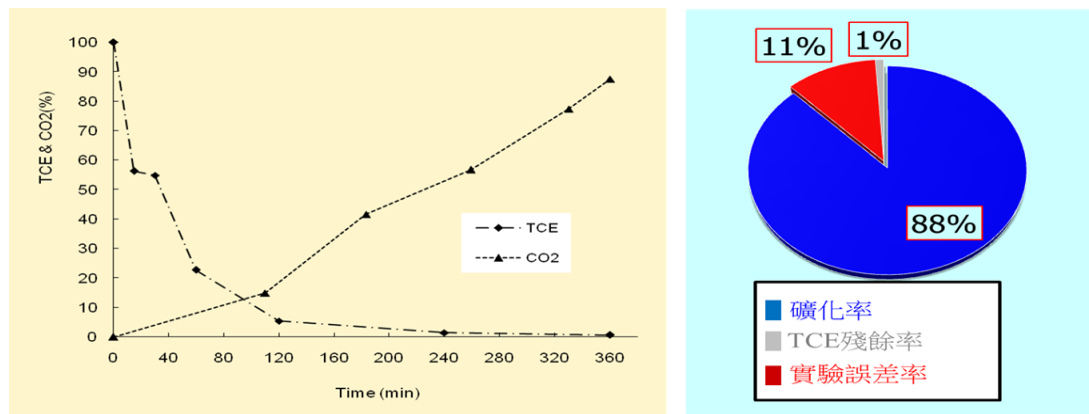


圖 4.12 三氯乙烯降解試驗碳平衡計算

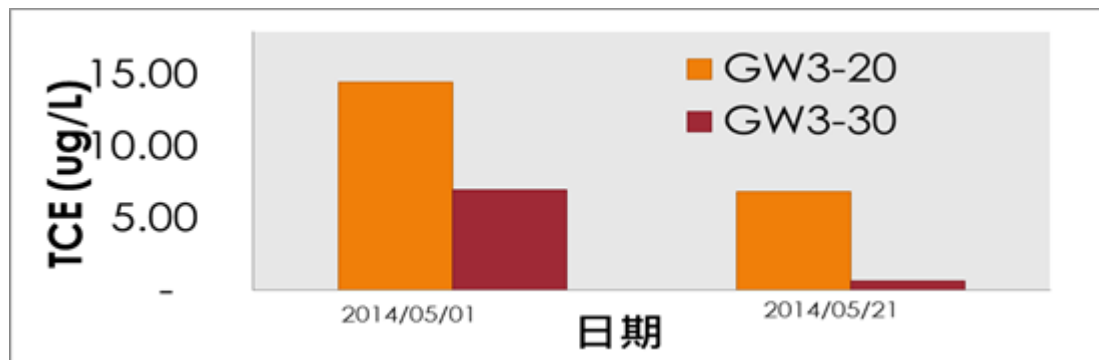


圖 4.13 本發明現地電解法(ISE)之實場應用成效



4.3 研究方法

本發明現地電解整治工法已展示應用於三氯乙烯地下水污染場址之整治案例，氯乙烯為三氯乙烯降解得中間產物，預期地下水中氯乙烯亦可利用現地電解整治工法予以去除。然而地下水整治現場作業仍存在諸多不確定因素，如含水層地質條件、地下水流況、地下水水質特性、污染物洩漏情況、污染源分布範圍等，各場址現地背景特徵互異，整治方法套用並不一定可以如法泡製，皆有賴模場試驗一一釐清整治工法適用範圍與限制條件。現地電解整治工法之推廣需奠基於模場試驗成功應用之成果，另一方面累積模場試驗的經驗對操作實務益顯重要。本專案模場試驗場址經高雄市政府環保局及相關業務執行單位的大力協助，順利媒合高雄市小港區伍桐股份有限公司，目前場址內 C207S 監測井地下水氯乙烯濃度為 0.144mg/L（超標 7 倍），場址外 C208S 監測井地下水氯乙烯濃度為 0.226mg/L（超標 11 倍），規劃之模場試驗範圍以場址內 C207S 監測井為中心進行劃設，研究目標主要為展示現地電解整治工法應用於地下水氯乙烯污染場址之可行性。

研究架構流程如圖 4.14 所示，研究內容包含實驗室電解試驗及現地模場試驗兩部分，實驗室電解試驗係以密閉式反應器進行批次實驗，測試電解電壓的操作範圍，確認可運作之電解質條件，以提供整治井最佳操作條件。現地模場試驗係組裝太陽能供電系統與現地電解整治系統，展現現地電解整治工法的效能。

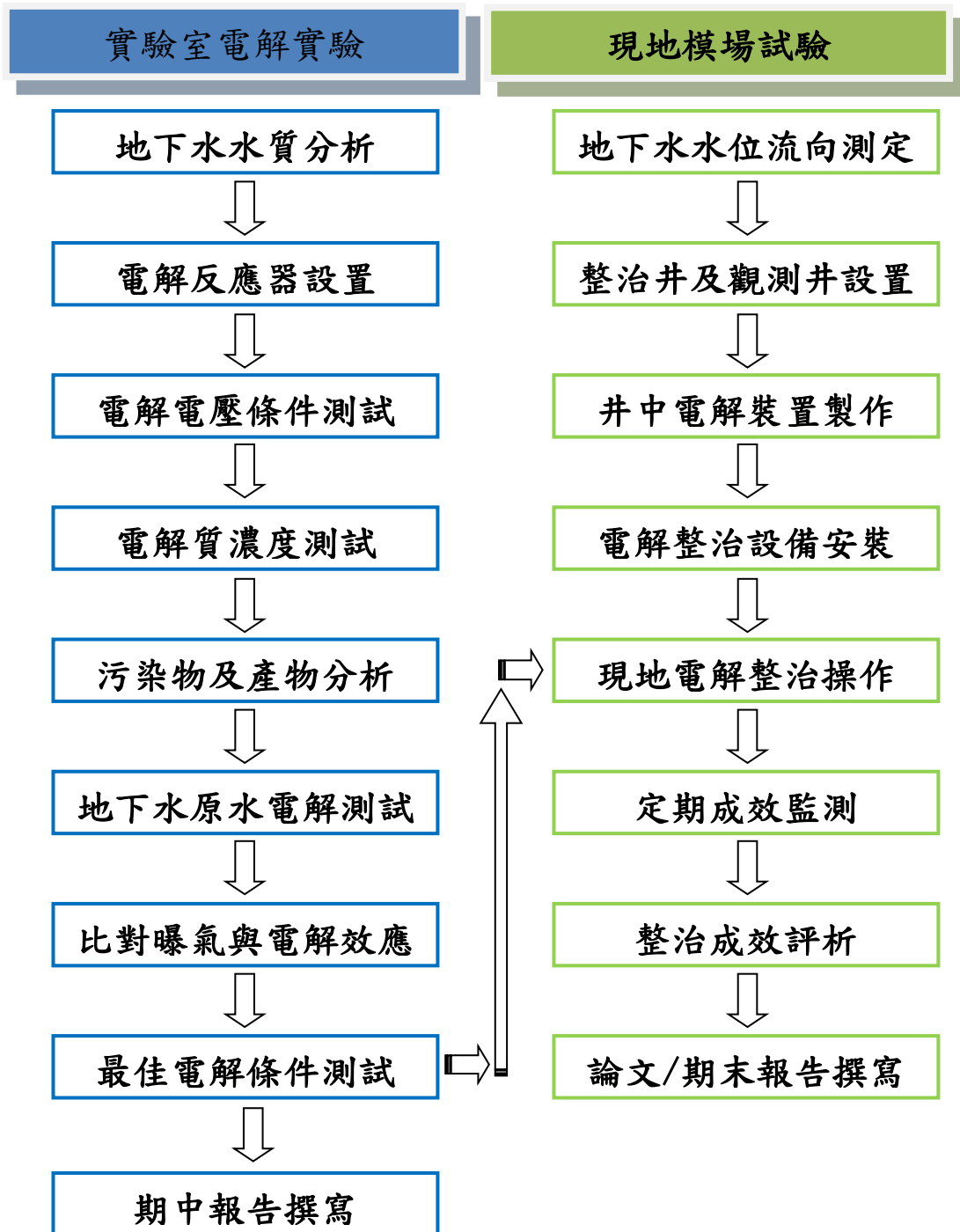


圖 4.14 本研究架構流程圖



4.3.1 實驗室電解試驗

實驗室電解試驗主要測試電解電壓的操作範圍，及確認可運作之電解質條件。對於地下水存在之離子，可能干擾標的物降解或可充做支持電解質，進行探討。瞭解以地下水原水電解之可行性，並評估現地電解是否需添加電解質。另一方面，電解過程產氣同時可經由曝氣作用移除水中氯乙烯，因此需釐清氯乙烯的移除機制係以曝氣作用或以電解氧化反應為主。實施內容包括地下水原水水質分析、電解反應器製備、電解條件測試、地下水原水電解、比對曝氣作用與電解氧化反應、提供模場試驗操作參數等。

1. 地下水原水水質分析得知 pH 6.94、ORP 13 mV、EC 1187 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 、氯離子濃度 345 mg/L，除基本水質參數測定外，並分析含氯有機物各物種濃度，以瞭解地下水水質背景。
2. 電解反應器採用密閉式 4 孔口血清瓶反應槽，其容積為 1 L，反應槽頂部有 4 孔口，供工作電極與輔助電極安裝、氣體釋壓口、採樣口等用途，4 孔口皆進行密封，氣體釋壓口外接採氣袋可同步收集氣體樣品，反應槽底部以磁石攪拌避免氣泡累積於電極表面。採樣二極式電極皆設計為三環柱狀白金鈦網電極，三環柱狀電極長度 12 cm，工作電極由直徑 8 cm、6 cm、4 cm 三個 $4\mu\text{m}$ 白金鈦網並聯組成，輔助電極由直徑 7 cm、5 cm、3 cm 三個 $4\mu\text{m}$ 白金鈦網並聯組成，且輔助電極可直接嵌入工作電極，電極間距僅 1 cm，並以鐵弗龍套環固定，避免電極接觸造成短路。
3. 實驗室電解實驗影響電解效果的因素包括操作電壓、電解質濃度等，操作條件採用定電壓電解，工作電極電位由太陽能供電系統之微處理機控制，再並聯 6 位半精密高階數位電表量測實驗進行中電流的變化，操作電壓範圍介於 2 至 3.5 V 之間，每組實驗時間配合日照時間調整，至少為 3 小時。每 30 min 取樣一次，以玻璃注射針自採樣口採集 1 mL 液體樣品，提供氣相層析質譜(GC/MS)分析之用，以判定氯乙烯之降解效率。
4. 對於地下水存在之離子，可能干擾標的物降解或可充做支持電解質，進行探討。一般實驗室電解實驗之電解質濃度採用 0.5M Na_2SO_4 ，以



第四章 研究方法與過程

加速氧化還原反應之電子傳遞，地下水含有離子可供作電解實驗的電解質，然而地下水中電解質濃度並不高，因此酌量添加電解質，探討不同電解質濃度對氯乙烯降解效率的影響，用以評估電解實驗所需之最低電解質濃度。由地下水電導度測值評估電解質濃度，並採集現場氯乙烯污染之地下水樣品，以最佳之電解操作條件進行氯乙烯電解實驗，以確認直接應用現地電解的可行性條件，如操作電壓大小、是否需添加電解質等。

5. 現地電解整治系統規劃含氯有機物的移除機制為電解氧化，但因氯乙烯的揮發性較佳，且電解過程中同步產氣亦有曝氣脫除的效果。實驗室試驗規劃低電壓(1.5 V)電解實驗，僅可電解產氣但無法生成自由基，藉以瞭解曝氣脫除機制對氯乙烯移除的貢獻。
6. 實驗室試驗樣品分析項目主要為氯乙烯及其降解產物，包括液體樣品及氣態樣品，以進行降解反應之碳質量平衡檢核。另外，降解生成的氯離子亦同步檢測，以進行脫氯反應之氯質量平衡檢核。
7. 實驗室電解實驗結果將提供現地模場試驗操作參數控制的基礎，最佳電解條件之確認包括操作電壓、電解質濃度、原水是否需添加電解質…等。

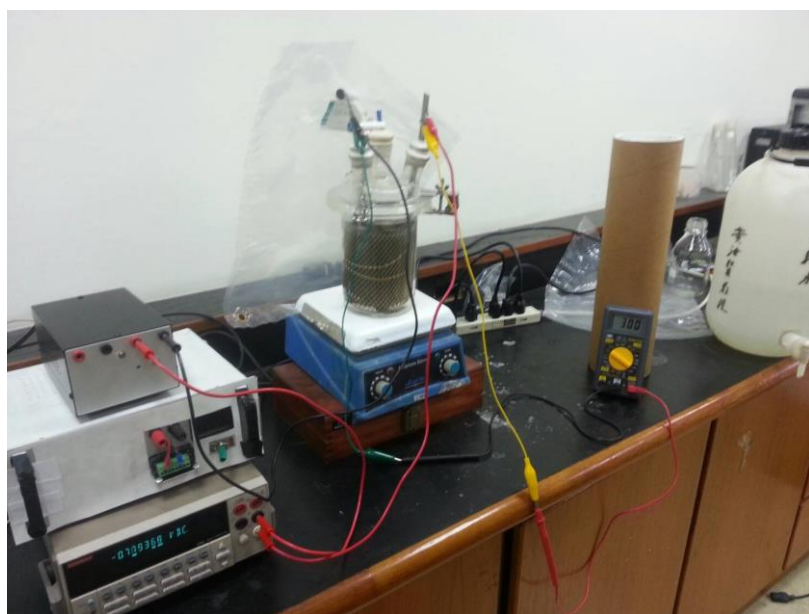


圖 4.15 實驗室電解試驗設備組裝



4.3.2 現地模場試驗

現地模場試驗內容包含太陽能供電系統製作、 現地電解整治系統製作、 現場地下水水位與流向測定、 整治井及監測井設置、 現地電解整治井操作、定期成效監測、 整治成效評析等部分。

1. 太陽能供電系統製作：因太陽能板發電受日照強度影響，且太陽能板的設置須考慮日照角度與方位，一般由太陽能板經轉換器提供之發電量極不穩定，無法直接利用，因此須將電量儲存於電池以提供較穩定且持續之電壓。本系統規劃直接使用直流電，減少因交/直流轉換間之能量損耗，為提供電化學反應器成功運作須提供 3 伏特以上之電壓，因此須確認太陽能供電系統供電之電壓操作範圍與供電電壓之穩定性。
2. 現地電解整治系統製作：電解氧化氯乙烯之效果與電極材料、支持電解質、添加之媒子等因素有密切關係，白金電極雖經確認可應用於多種污染物之降解，但因電極外觀型式會直接影響處理系統內污染物之質傳，且電極界面是電化學反應發生的場所，初步考慮以白金鈦網設計網狀電極使用。為將電極置入場址 2 吋整治井中，重新設計電極型式為雙層管狀，電極長約 1 m，正負極間距約 0.5 cm，材質為白金鈦網，新開發之井中電解裝置外觀如圖 4.10(b)所示。
3. 現場地下水水位與流向測定：於場址內 C207S 監測井進行單井流速流向儀量測，以決定局部地下水流向，界定 C207S 監測井之上游區域範圍，做為整治井設井選點之依據。
4. 整治井及監測井設置：利用場址內 C207S 監測井作為成效監測井，因此 1 口整治井設置於 C207S 監測井上游 1 公尺處，ISE 整治井規格為 2 吋井，設井深度約 12 m，井管採全開篩型式。另於 ISE 整治井上游 5 公尺處規劃設置 1 口背景監測井，瞭解氯乙烯背景濃度與污染物之傳輸通量。背景監測井、ISE 模場整治井、C207S 監測井之相關位置，如圖 4.16(a)示意圖所示。
5. 現地電解整治井操作：整治井設置完成後，即可組裝太陽能供電系統與現地電解整治系統，並進行實車測試，其運作方式由供電控制



第四章 研究方法與過程

系統連接太陽能板發電，透過交/直流電力轉換、蓄電儲存、定電壓/電流輸出的方式，透過電源線連接將電流傳輸至井中電解裝置，提供全天候電解運作之電力所需。於整治井中電解可產生 OH 自由基及其他強氧化劑，直接氧化地下水中污染物，達到地下水整治效果。同時電解生成氫原子，可參與污染物還原反應，未使用之氫原子則結合生成氫氣或於水中形成氫離子。

6. 定期成效監測：至少每 2 周於背景監測井、ISE 模場整治井、C207S 監測井進行地下水水質採樣，水質分析測項包括 pH、ORP、DO、EC、氯乙烯及其他含氯揮發性有機物等。基於氯乙烯之高揮發性，地下水採樣方式以微洗井採樣為主，並比對貝勒管採樣方式，比對揮發效應的影響。一般地下水採樣分析結果，僅能代表採樣時間當下地下水水質情況，另行置放被動式擴散袋於背景監測井及 C207S 監測井進行採樣，判斷採樣期間 2 周內之地下水水質變化。
7. 整治成效評析：背景監測井、ISE 模場整治井、C207S 監測井之上下游關連性如圖 4.16 所示，背景監測井之水質提供污染進流量資訊，ISE 模場整治井之水質提供污染削減量資訊，C207S 監測井之水質提供含水層淨化資訊。

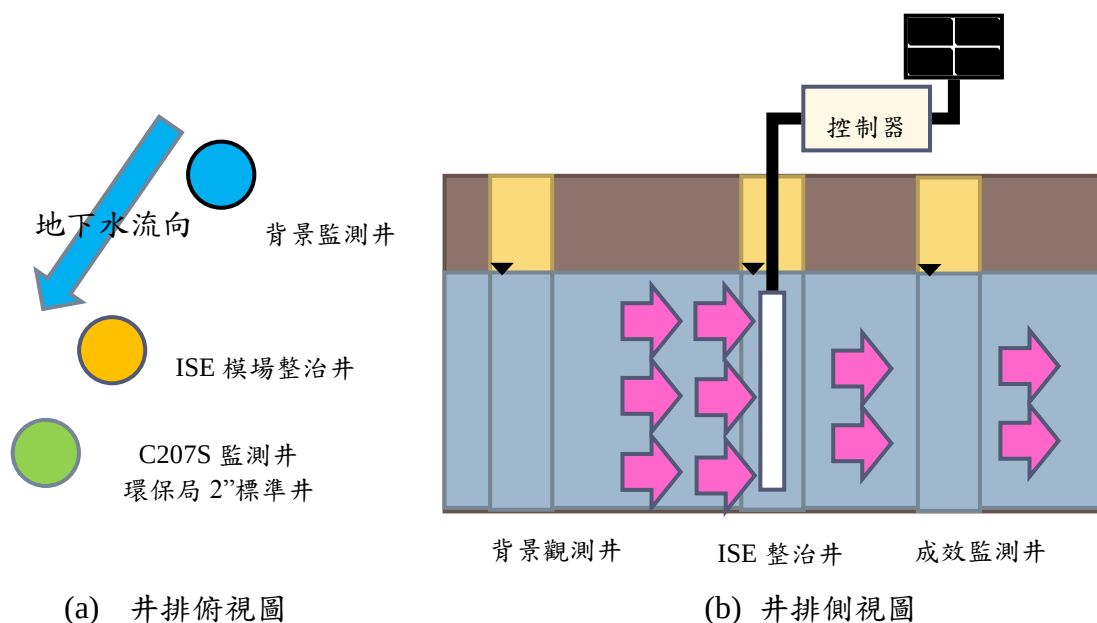


圖 4.16 模場試驗成效監測示意圖



4.4 執行進度

本計畫執行期間自民國 104 年 11 月 17 日起至 105 年 11 月 16 日止，共計 365 日曆天，研究實際執行進度詳見表 4.4。本計畫自計劃核定通過後開始執行日起至第 6 個月份提交期中報告，預定繳交日期為民國 105 年 5 月 11 日，於第 11 個月份須提交期末報告初稿，預定繳交日期為民國 105 年 10 月 16 日，於計劃期間預定 4 個查核點為執行期程之第 4 個月份、期中、第 10 個月份與期末等。期中報告實際執行進度已全數達成期中查核點進度要求，完成實驗室電解電壓實驗、完成現地電解系統製作及現地安裝、完成實驗室最佳電解條件確認等工作項目。期中階段執行進度約 60%，較預定進度 50% 略微超前，已完成整治井及觀測井設置、現場操作現地電解整治系統。期末報告實際執行進度已全數達成本計畫查核點進度要求，現地電解整治系統自 105 年 4 月啟動，持續定期地下水監測，進行模場試驗整治成效評估，至 105 年 7 月底模場試驗區地下水氯乙烯濃度已低於污染管制標準，自 105 年 8 月啟動地下水污染物 rebound 試驗，待模場試驗區地下水氯乙烯濃度回升後，於 105 年 9 月再次啟動現地電解整治系統操作，目前已累積長達 6 個月的地下水監測數據，提供完整的現地電解整治系統之整治成效評估。



第四章 研究方法與過程

表 4.4 研究實際執行進度及預定工作查核點

年月 工作項目	1	2	3	4※	5	6※	7	8	9※	10	11	12※
電解反應器設置												
電解電壓條件測試												
電解質濃度測試												
地下水原水電解測試												
最佳電解條件確認												
期中報告撰寫						▲						
地下水位流向測定												
整治井及觀測井設置												
井中電解裝置製作												
太陽能供電系統製作												
現地電解系統操作												
整治成效評析												
期末報告撰寫												▲
工作進度累積百分比	5%	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	95%	100%
預定查核點	期中	第 4 個月完成實驗室電解電壓實驗，現地電解系統製作完成； 第 6 個月完成實驗室最佳電解條件確認，提出期中報告。										
	期末	第 9 個月完成整治井及觀測井設置，進行現地電解系統操作； 第 12 個月完成現地電解整治成效評析，提出期末報告。										

說明： 預定進度； 實際執行



第五章 結果與討論

5.1 實驗室電解試驗

實驗室電解試驗係以密閉式反應器進行批次實驗，測試電解電壓的操作範圍，確認可運作之電解質條件，以提供整治井最佳操作條件。電解反應器採用非分離式4孔口反應槽，其容積為1 L，反應槽頂部有4孔口，供工作電極與輔助電極安裝、氣體釋壓口、採樣口等用途，4孔口皆進行密封，氣體釋壓口外接採氣袋可同步收集氣體樣品，反應槽底部以磁石攪拌避免氣泡累積於電極表面。二極式電極皆設計為三環柱狀白金鈦網電極，三環柱狀電極長度12 cm，工作電極由直徑8 cm、6 cm、4 cm 三個4 μm 白金鈦網並聯組成，輔助電極由直徑7 cm、5 cm、3 cm 三個4 μm 白金鈦網並聯組成，且輔助電極可直接嵌入工作電極，電極間距僅1 cm，並以鐵弗龍套環固定，避免電極接觸造成短路，如圖 5.1 所示。

電解反應器的電力來源可使用市售電力，透過電源控制系統將交流電轉為直流電輸出。亦可使用太陽能板發電，本實驗採用2片100 W 太陽能板，最大電壓25.38 伏特、電流7.89 安培，連接電源控制系統具變頻器、升降壓穩壓器、蓄電池配備，以微處理機進行直流輸出電壓控制。



圖 5.1 電解反應器電極外觀



第五章 結果與討論

氯乙烯為人造物質，自然界並不存在，常溫下為一種無色略帶醚味的氣體。化學品販售以鋼瓶填充，且氯乙烯極易燃燒，高溫下不穩定，因此氯乙烯鋼瓶恐有爆炸風險須妥善儲放。少量的氯乙烯可溶於水，氯乙烯標準品一般配製於甲醇溶劑，實驗室欲配製氯乙烯污染樣品，可能得到甲醇污染樣品而非氯乙烯污染樣品。幾經考量，電解實驗所需的氯乙烯污染樣品直接取自伍桐公司現場地下水，經過採樣過程樣品瓶震動，極易造成水樣中氯乙烯揮發逸散。現場採樣作業以微洗井採樣方式，直接將地下水樣品裝填於電解反應器，以取得高濃度氯乙烯污染樣品，現場封存減少樣品中氯乙烯揮發逸散，立即攜回實驗室進行電解實驗。取得之氯乙烯污染樣品水質特性彙整於表 5.1，氯乙烯濃度介於 0.13 mg/L 至 0.37 mg/L、pH 介於 6.71 至 7.23、氧化還原電位 ORP 介於 -113 mV 至 211 mV、電導度 EC 介於 733.9 μ S/cm 至 864.2 μ S/cm、總溶解固體物 TDS 介於 504.8 mg/L 至 552.1 mg/L、氯離子濃度介於 30.4 mg/L 至 35.8 mg/L。

表 5.1 實驗室電解試驗氯乙烯污染樣品水質特性

批次樣品	VC 濃度 (mg/L)	pH	ORP (mV)	EC (μ S/cm)	TDS (mg/L)	Cl ⁻ (mg/L)
1	0.33	6.97	-33	767.2	530.3	30.8
2	0.31	7.23	-72	772.7	532.3	31.8
3	0.23	7.17	-88	757.9	524.9	32.6
4	0.37	7.17	139	808.6	548.9	30.8
5	0.18	7.04	-89	768.1	531.0	30.6
6	0.16	6.83	-43	771.7	530.6	32.9
7	0.33	6.91	-41	733.9	504.8	30.4
8	0.30	7.14	-40	766.3	530.3	32.7
9	0.13	6.71	211	788.8	534.9	31.6
10	0.28	7.05	-113	864.2	552.1	35.8



5.1.1 電極特徵

一般伏特安培法皆使用固態電極，如金、銀、鉑、鎳、銅等為工作電極，並施予電位掃描，再以一定的速率改變外加電位，記錄瞬間電流，以電位與電流變化的關係作圖。其中，循環伏安法主要是用來探討物質在溶液環境中之電化學行為，藉由還原掃描及氧化掃描所表現出來的峰值電位、電流值及形狀等，可以藉由掃描出來的資料判斷出分析物的電化學特性。循環伏安法圖所呈現的方式為電流對電位作成的曲線圖。在循環伏安法圖上可以獲得各種不同的資訊，如峰的電流(i_p)、峰的電位(E_p)等，這些數值對不同的分析物具有代表性，可應用於定性分析上。

圖 5.2 呈現白金電極的循環伏安圖，當電解電壓約高於 1.20 V 時，會出現電解水的反應，而有氧氣還原電流的發生。而反應中陽極會產生氧氣，並同時產生 H^+ ，陰極會產生氫氣，亦同時產生 OH^- ，其反應式如下：

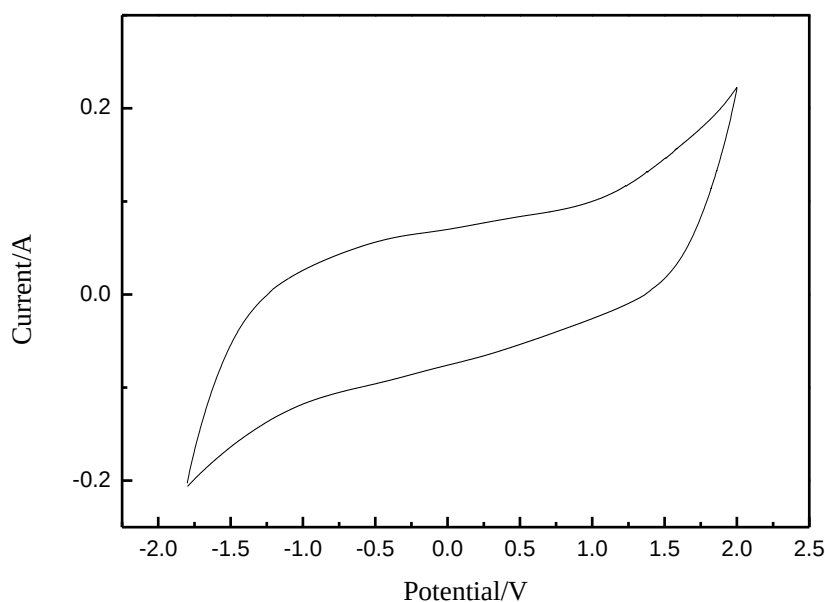
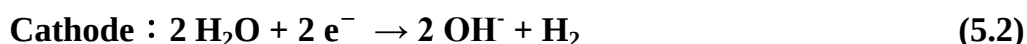
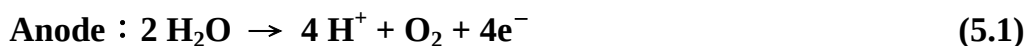


圖 5.2 白金電極之循環伏安圖 (掃描範圍：-2.0~2.5 V；掃描速率：0.1 V/s)



5.1.2 曝氣作用移除氯乙烯

電解試驗的操作電壓控制在 1.2 V 以上，因電解水反應過程會有產氯現象，類似曝氣作用可移除水中氯乙烯。電解試驗的操作電壓控制在 1.63 V 以上，可將水中氯離子氧化為氯氣分子，接續與水反應氧化為次氯酸(HOCl)，如反應式(5.3)與(5.4)所示。HOCl 為強氧化劑，可將水中氯乙烯氧化破壞，為釐清曝氣作用移除氯乙烯效率，圖 5.3 中電解操作電壓選擇 1.2 V 與 1.5 V，避免電解過程觸發電化學機制生成強氧化劑。

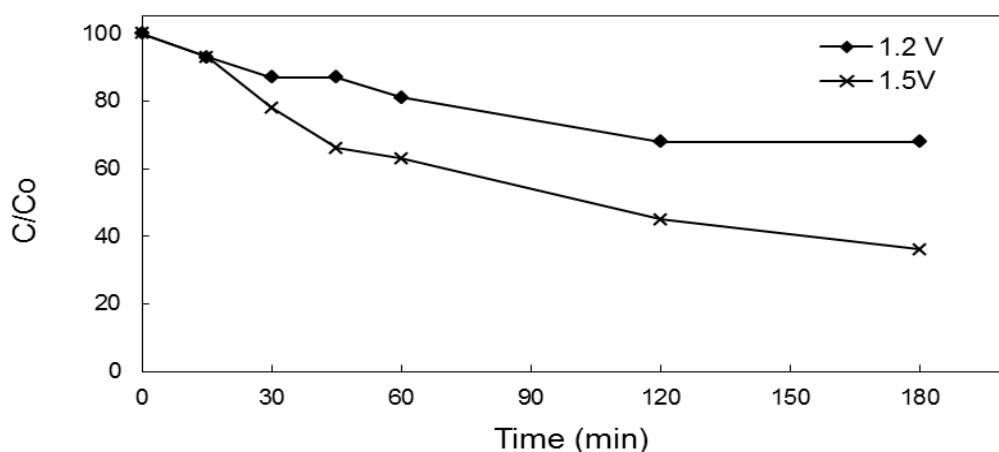
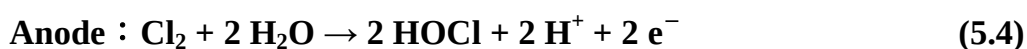


圖 5.3 電解曝氣移除氯乙烯試驗反應過程氯乙烯濃度變化

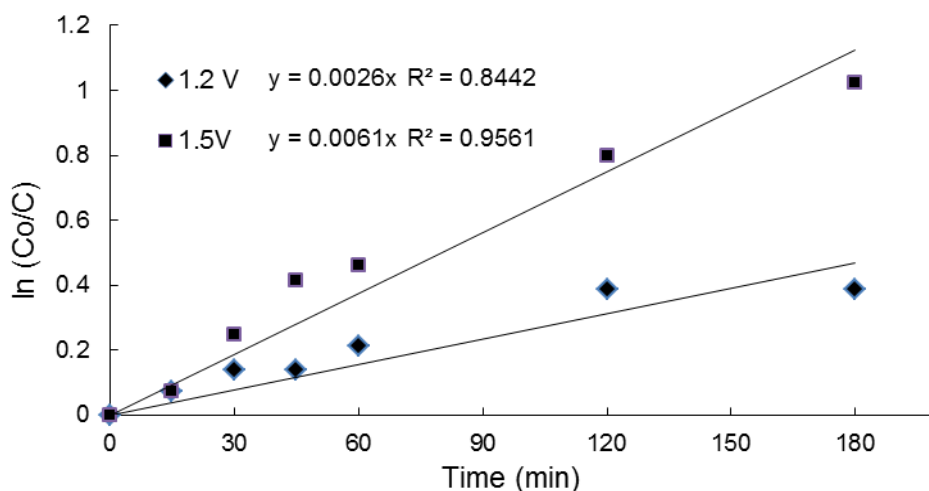


圖 5.4 電解曝氣移除氯乙烯試驗 $\ln(C_0/C)$ 隨反應時間變化情形



現地電解整治受氯乙烯污染地下水之模場試驗

電解曝氣試驗過程中發現，操作電壓 1.2 V 於 3 小時內經曝氣作用可移除約 33.6% 氯乙烯，比對操作電壓 1.5 V 於相同時間內可移除約 63.9% 氯乙烯，主要原因為操作電壓 1.5 V 之電解曝氣效果較劇烈。以 $\ln(C_0/C)$ 對反應時間作圖，發現實驗數據呈現良好線性關係 ($R^2=0.8442\sim0.9561$)，線性斜率則為擬一階反應速率常數，顯示曝氣作用移除氯乙烯反應循擬一階反應動力式進行，如圖 5.4 所示。若陰陽極電解水的反應速率相同時，反應式(5.1)之 H^+ 離子產生量及反應式(5.2)之 OH^- 離子產生量應一致，水溶液的 pH 值變化就不大。表 5.2 比較曝氣作用移除氯乙烯反應後 pH 呈現上升趨勢，顯示陰極析氫反應速率略大於陽極析氧反應速率。因曝氣作用之影響，致使反應後 ORP 皆呈現上升趨勢，將厭氧環境轉化為好氧環境。氯離子濃度反應前後變化不大，未有大量氯離子參與反應式(5.3)之反應，可進一步佐證操作電壓 1.2 V 與 1.5 V 電解實驗移除氯乙烯的機制主要為曝氣作用，操作電壓 1.2 V 曝氣移除氯乙烯之擬一階反應速率常數為 0.0026 min^{-1} ，操作電壓 1.5 V 曝氣移除氯乙烯之擬一階反應速率常數為 0.0061 min^{-1} 。

表 5.2 電解曝氣移除氯乙烯試驗反應前後水質比較

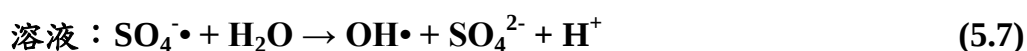
操作電壓		VC 濃度 (mg/L)	pH	ORP (mV)	EC ($\mu\text{S/cm}$)	Cl^- (mg/L)	移除 效率	移除速率 常數
1.2 V	反應前	0.16	6.83	-43	771.7	32.9	33.6%	0.0026 min^{-1}
	反應後	0.11	7.42	135	826.4	32.3		
1.5 V	反應前	0.33	6.97	-33	767.2	30.8	63.9%	0.0061 min^{-1}
	反應後	0.12	7.16	179	758.8	31.3		

5.1.3 電解氧化破壞氯乙烯

伍桐公司場址位於臨海工業區內，鄰近海岸地帶，地下水樣品氯離子濃度介於 30.4 mg/L 至 35.8 mg/L，如表 5.1 所示。反應式(5.3)與(5.4)顯示氯離子在陽極氧化可產生氯氣，氯氣溶於水中可繼續氧化產生次氯酸(HOCl)，而次氯酸為強氧化劑可間接氧化水中的有機物。反應式(5.4)之觸發電壓須達 1.63 V 以上，因此電解氧化破壞氯乙烯試驗之操作電壓採 2.0 V、2.5 V 及 3.0



V。若水中含有硫酸鹽，操作電壓達 2.01 V 以上可觸發反應式(5.5)，硫酸鹽可扮演間接氧化還原媒子的角色，硫酸根離子 SO_4^{2-} 在陽極氧化形成過硫酸根離子 $\text{S}_2\text{O}_8^{2-}$ ；循反應式(5.6)過硫酸根離子接續解離生成硫酸根自由基 $\text{SO}_4^{\cdot-}$ ；循反應式(5.7) 硫酸根自由基與水反應生成氫氧自由基 $\text{OH}^{\cdot}$ ，並釋出硫酸鹽。硫酸鹽氧化還原媒子連鎖反應可生成自由基，可間接氧化水中的有機物。此外，操作電壓達 2.85 V 以上可觸發反應式(5.8)，電解水直接生成氫氧自由基 $\text{OH}^{\cdot}$ 。



電解氧化試驗過程中發現，操作電壓 2.0 V 及 2.5 V 於 3 小時內可分別氧化去除約 83.9%及 78.6%氯乙烯，氯乙烯的去除效率相當；操作電壓 3.0 V 於 2 小時內即可完全破壞氯乙烯，如圖 5.5 所示。以 $\ln(C_0/C)$ 對反應時間作圖，發現實驗數據呈現良好線性關係($R^2=0.9189\sim0.9391$)，線性斜率則為擬一階反應速率常數，顯示電解氧化破壞氯乙烯反應循擬一階反應動力式進行，如圖 5.6 所示。操作電壓 2.0 V 及 2.5 V 電解氧化破壞氯乙烯之擬一階反應速率常數極為相近，分別為 0.011 min^{-1} 及 0.0092 min^{-1} ，推估此 2 組試驗之氯乙烯去除機制應屬相似，推估依循反應式(5.3)及(5.4)藉由電解生成次氯酸，接續進行間接氧化破壞水中氯乙烯。次氯酸生成反應亦同步生成氫離子 H^+ ，致使反應後 pH 值下降，如表 5.3 所示。操作電壓 3.0 V 電解氧化破壞氯乙烯之擬一階反應速率常數 0.041 min^{-1} ，明顯增大數倍，其氯乙烯去除機制主要依循反應式(5.8)，直接電解水生成氫氧自由基，接續進行間接氧化破壞水中氯乙烯。氫氧自由基生成反應亦同步生成氫離子 H^+ ，致使反應後 pH 值下降。不同於電解曝氣試驗(1.2 V 及 1.5 V)，電解氧化破壞試驗(2.5 V 及 3.0 V)反應後 ORP 皆呈現下降趨勢，如表 5.3 所示，進一步提供佐證資料說明操作電壓 2.5 V 與 3.0 V 電解氧化破壞氯乙烯的機制，與操作電壓 1.2 V 與 1.5 V 曝氣作用移除氯乙烯的機制明顯不同。



現地電解整治受氯乙烯污染地下水之模場試驗

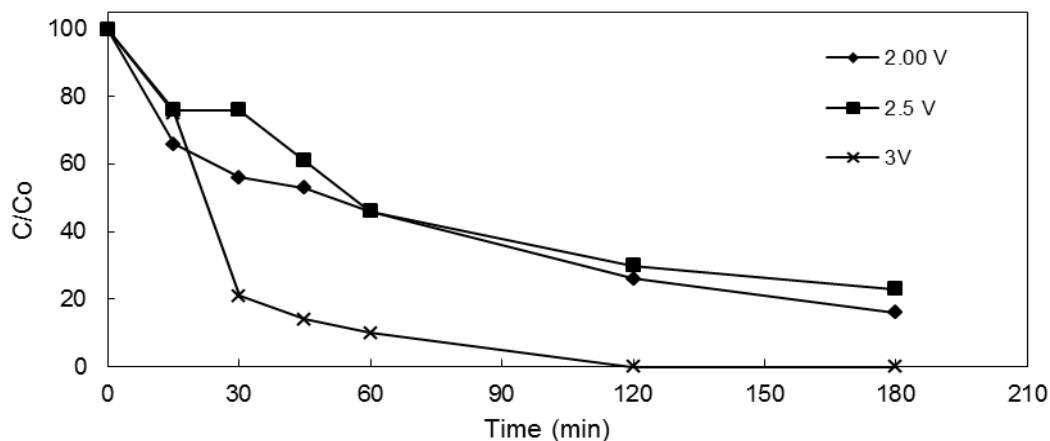


圖 5.5 電解氧化破壞氯乙烯試驗反應過程氯乙烯濃度變化

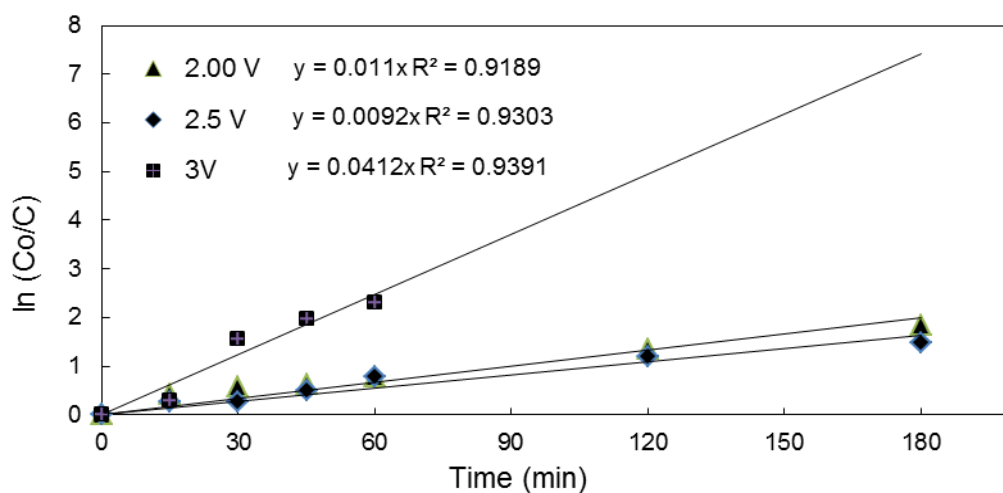


圖 5.6 電解氧化破壞氯乙烯試驗 $\ln(C_0/C)$ 隨反應時間變化情形

表 5.3 電解氧化破壞氯乙烯試驗反應前後水質比較

操作電壓		VC 濃度 (mg/L)	pH	ORP (mV)	EC (μ S/cm)	Cl ⁻ (mg/L)	移除 效率	移除速率
2.0 V	反應前	0.31	7.23	-70	772.7	31.8	69.6%	0.015 min ⁻¹
	反應後	0.09	7.13	-67	540.1	30.19		
2.5 V	反應前	0.13	6.71	211	788.8	31.6	78.6%	0.0092 min ⁻¹
	反應後	0.03	6.05	24	402	31.2		
3.0 V	反應前	0.28	7.17	139	808.6	35.8	100%	0.041 min ⁻¹
	反應後	N.D	6.59	-14	347.1	30.6		



5.1.4 最佳電解操作條件

實驗室電解實驗一般採用 0.5M 電解質濃度，以高濃度電解質可促進氧化還原反應之電子傳遞。本研究因取得氯乙烯標準品之困難度，因此以場址氯乙烯污染水樣替代實驗室配製模擬氯乙烯污染樣品。場址地下水水樣中含有各種離子，樣品實測電導度介於 733.9 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 至 864.2 $\mu\text{S}/\text{cm}$ ，可作為電解反應之支持電解質，不須額外添加電解質。經由電解曝氣試驗與電解氧化試驗證實皆具有移除水中氯乙烯的效果，電解曝氣試驗以操作電壓 1.5 V 之移除效率最佳達 63.9%，擬一階反應速率常數為 0.0061 min^{-1} ；電解氧化試驗以操作電壓 3.0 V 之移除效率最佳達 100%，擬一階反應速率常數為 0.041 min^{-1} ，如圖 5.7 所示。

圖 5.8 比對電解曝氣試驗與電解氧化試驗之電流效率，經過相同電解時間 180 min 後，定電壓電解所通入的電量以電解曝氣試驗較低，操作電壓 1.5 V 電解曝氣試驗於實驗過程只通入 90 庫倫的電量，而操作電壓 3.0 V 電解氧化試驗於實驗過程則通入 5,899 庫倫的電量。以電解曝氣試驗之電流效率較佳，曝氣作用所需的通入電量雖然較少，但氯乙烯的移除效率僅達 63.9%。電解氧化試驗所需的通入電量明顯高出不少，在操作電壓 3.0 V 的高電位下，過電壓電解會產生電解水消耗更多的能量，部分電量非使用於強氧化劑或自由基的生成反應，而消耗於無效的水電解，致使電流效率下降。

現地模場試驗的電力來源使用太陽能發電，因此最佳電解條件以氯乙烯之破壞效率與反應速率為主要考量，選用以操作電壓 3.0 V 之定電壓電解條件，未額外添加電解質，作為現地模場試驗的操作條件，預期可順利 100% 移除地下水中氯乙烯。然而電解過程的產氣亦可經由曝氣作用移除氯乙烯，因此地下水中氯乙烯之移除機制可藉由曝氣作用與電解氧化反應同時貢獻。圖 5.9 以操作電壓 1.5 V 之氯乙烯移除效率視為曝氣作用所貢獻，將操作電壓 3.0 V 之氯乙烯移除效率扣除操作電壓 1.5 V 之氯乙烯移除效率視為電解氧化反應所貢獻，曝氣作用之移除貢獻計算約佔整體氯乙烯移除效率之 25.1% 至 39.7%。



現地電解整治受氯乙烯污染地下水之模場試驗

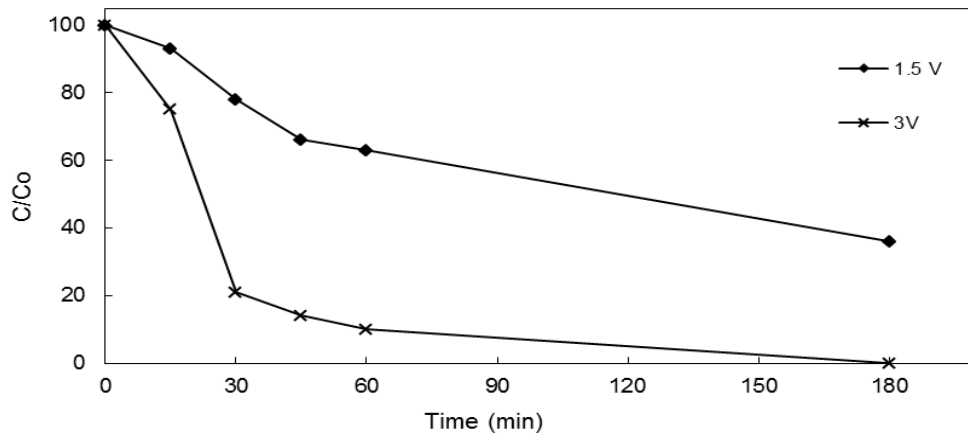


圖 5.7 電解曝氣試驗與電解氧化試驗反應過程氯乙烯濃度變化

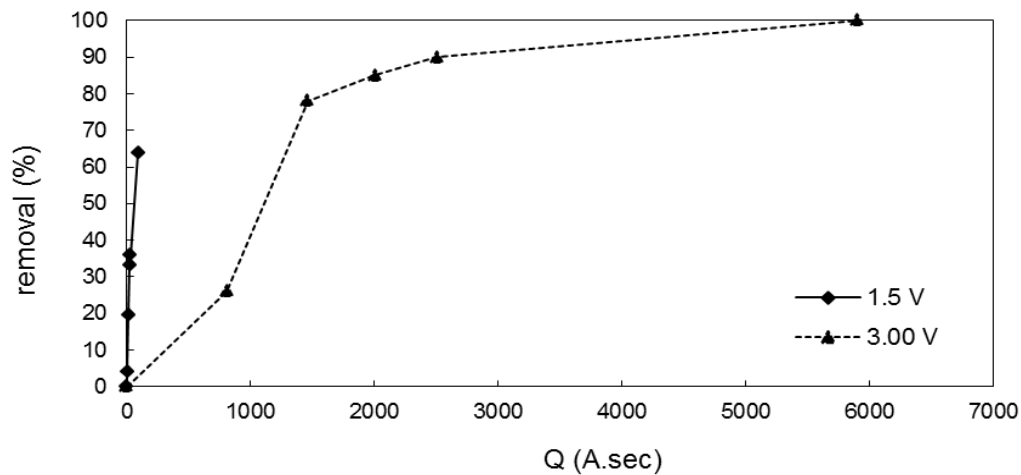


圖 5.8 電解曝氣試驗與電解氧化試驗移除氯乙烯之電流效率

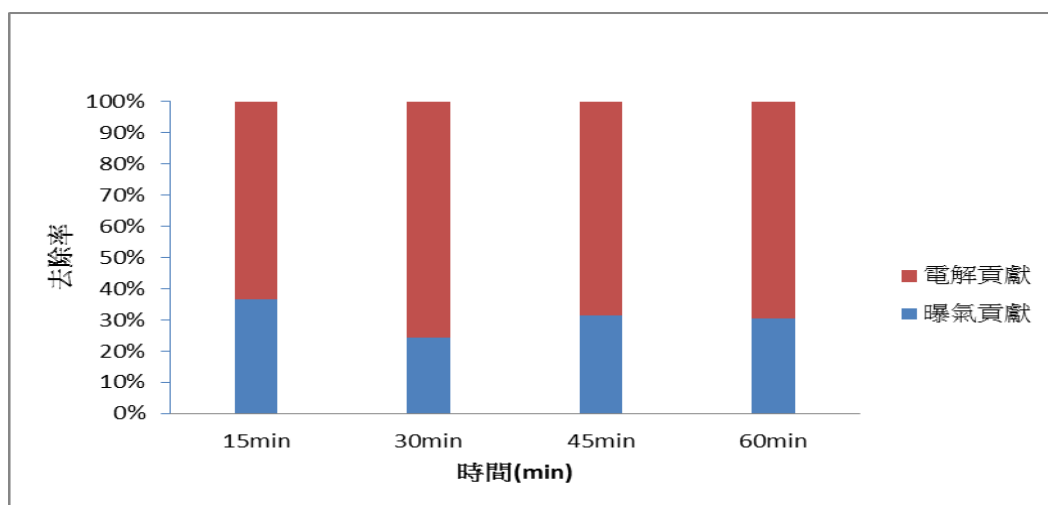


圖 5.9 曝氣作用與電解氧化反應對氯乙烯移除效率之貢獻



5.2 現地模場試驗

現地模場試驗係安裝現地電解整治系統於場址，利用電解氧化破壞地下水中氯乙烯。現場須鑽設 1 口整治井，以提供裝設井中電解裝置使用；另須鑽設 1 口監測井，作為成效監測之用途。為決定整治井與監測井之設置位置，先利用單井流速儀測定地下水流向，續依上下游關係決定之。完成整治井及監測井設置後，即可啟動現地電解整治井操作，並依定期成效監測結果，調整現場操作參數，以提升整治成效。

5.2.1 地下水流速流向測定

民國 105 年 3 月 18 日進場啟動現地模場試驗工作，於場內 C207S 監測井利用單井流速儀確認局部地下水流向，一般單井流速儀量測大多僅執行 1 次，為慎重起見，本研究共執行 4 次單井流速流向測定，測定紀錄如表 5.4 所示。第 1 次單井流速流向測定結果，井內流速 0.931 cm/min，井內流向 110.4 度；第 2 次單井流速流向測定結果，井內流速 9.865 cm/min，井內流向 94.9 度；第 3 次單井流速流向測定結果，井內流速 1.244 cm/min，井內流向 93.5 度；第 4 次單井流速流向測定結果，井內流速 14.815 cm/min，井內流向 349.5 度。前 3 次測定地下水流向大略為由西向東流，而第 4 次測定地下水流向明顯轉向為由南向北流。且第 4 次測定結果地下水流速明顯較前次測定結果增大 10 倍以上，疑似附近有抽水行為影響地下水流向。單井流速儀的測定結果發現，地下水流向紊亂，且 1 天內數變，可能工業區內有抽水行為或有排水管線洩漏等不明原因，因而不定時影響地下水流況。

為進一步釐清地下水流向，於單井流速流向測定過程，同步於 C085S、C207S、C208S 等 3 口既設監測井以水位尺量測地下水位深度，3 次水位尺測定結果呈一致性，地下水流向判定為 C207S 流往 C208S，大略為由東向西流，如表 5.5 所示。水位尺量測判定的流向與大範圍地下水流向趨勢吻合，即鳳山丘陵流往台灣海峽沿岸的方向。



現地電解整治受氯乙烯污染地下水之模場試驗

表 5.4 C207S 監測井流速流向測定紀錄



業興環境科技股份有限公司

監測井流速流向測定紀錄表

作業日期：105 年 3 月 18 日

天氣：☐晴 ☐陰 ☐雨

監測井名稱：伍桐化學公司

紀錄人員：蘇詩博

表單編號	D016
修訂日期	100.5.4

監測井資料卡基本資料		監測記錄資料	
井號	C207s	儀器放置深度(儀器至井口深度)	9.16m
井深	12.03m	執行時間	施作開始 10:05
井篩長度	6m		加熱開始 10:06
井篩區間(井篩至井口深度)	井篩頂 6.16(m)~ 井篩底 12.16(m)		施作結束 11:06
水位(水面至井口深度)	5.220(m)	井內流速(cm/min)	0.931
水力傳導係數	E- m/s	井內流向(度)	110.4
井篩區間地質紀錄		備註：	

現場作業紀錄					
時間	井內流速(cm/min)	井內流向(度)	時間	井內流速(cm/min)	井內流向(度)
10:06	21.04	294.6	10:46	0.993	110.4
10:16	2.668	111.8	10:51	0.976	110.4
10:26	1.335	111.8	10:56	0.968	111.8
10:36	1.076	111.8	11:01	0.940	110.4
10:41	1.016	111.8	11:06	0.931	110.4

The screenshot shows the GPS Control Software interface. It includes a 'Measurement' section with buttons for 'Auto', 'Manual', 'SET', 'OFF', 'On', and 'Off'. The 'Measured data' section displays: Velocity: 0.931 cm/min, Compass: 0.0°, Direction: 110.4°, Average Temp: 3.070 °C, Depth: 9.00 m, and Temp. (Max - Min): 1.007 °C. Below this is a 'Temperature graph (°C)' showing a curve over 16 minutes. A 'Data list' table is also visible, showing columns for Measurement time, Velocity, Direction, O.L., Compass, Average Temp, Temp. (Max - Min), and Heater. The table contains 10 rows of data points.



第五章 結果與討論

表 5.4 C207S 監測井流速流向測定紀錄(續 1)



業興環境科技股份有限公司

監測井流速流向測定紀錄表

作業日期：105 年 3 月 18 日

天氣：☒晴 ☐陰 ☐雨

監測井名稱：伍桐化學公司

紀錄人員：蘇詩博

表單編號	D016
修訂日期	100.5.4

監測井資料卡基本資料		監測記錄資料	
井號	C207s	儀器放置深度(儀器至井口深度)	9.16m
井深	12.03m	執行時間	施作開始 11:10
井篩長度	6m		加熱開始 11:11
井篩區間(井篩至井口深度)	井篩頂 6.16(m)~ 井篩底 12.16(m)		施作結束 12:11
井篩區間(井篩至井口深度)	井篩頂 6.16(m)~ 井篩底 12.16(m)	井內流速(cm/min)	9.865
水位(水面至井口深度)	5.220(m)	井內流向(度)	94.9
水力傳導係數	E- m/s	備註：	
井篩區間地質紀錄			

現場作業紀錄					
時間	井內流速(cm/min)	井內流向(度)	時間	井內流速(cm/min)	井內流向(度)
11:11	0.025	114.6	11:51	9.961	100.5
11:21	15.699	65.4	11:56	9.899	99.1
11:31	11.316	85.1	12:01	9.985	92.1
11:41	10.588	100.5	12:06	9.602	96.3
11:46	10.088	97.7	12:11	9.865	94.9



現地電解整治受氯乙烯污染地下水之模場試驗

表 5.4 C207S 監測井流速流向測定紀錄(續 2)



業興環境科技股份有限公司

監測井流速流向測定紀錄表

作業日期：105 年 3 月 18 日

天氣：■晴 □陰 □雨

監測井名稱：伍桐化學公司

紀錄人員：蘇詩博

表單編號	D016
修訂日期	100.5.4

監測井資料卡基本資料		監測記錄資料	
井號	C207s	儀器放置深度(儀器至井口深度)	9.16m
井深	12.03m	執行時間	施作開始 12:58
井篩長度	6m		加熱開始 12:59
井篩區間(井篩至井口深度)	井篩頂 6.16(m)~ 井篩底 12.16(m)		施作結束 13:59
井篩區間(井篩至井口深度)	井篩頂 6.16(m)~ 井篩底 12.16(m)	井內流速(cm/min)	1.244
水位(水面至井口深度)	5.220(m)	井內流向(度)	93.5
水力傳導係數	E- m/s	備註：	
井篩區間地質紀錄			

現場作業紀錄					
時間	井內流速(cm/min)	井內流向(度)	時間	井內流速(cm/min)	井內流向(度)
12:59	0.006	89.3	13:39	1.330	94.9
13:09	4.299	89.3	13:44	1.311	96.3
13:19	2.110	96.3	13:49	1.291	93.5
13:29	1.484	96.3	13:54	1.263	96.3
13:34	1.404	96.3	13:59	1.244	93.5

The screenshot shows the GPD Control Software interface. It includes a 'Manual data' section with fields for Velocity (1.244 cm/min), Direction (93.5 °), Depth (9.00 m), Average Temp (5.522 °C), and Temp (Max - Min) (1.052 °C). Below this is a 'Temperature graph (°C)' showing a curve over time. At the bottom is a 'Data list' table with columns for Measurement time, Velocity, Direction, O.L., Compass, Average Temp, Temp (Max - Min), Amplitude, Temp zone, and Filter.

Measurement time	Velocity	Direction	O.L.	Compass	Average Temp	Temp (Max - Min)	Amplitude	Temp zone	Filter
yyyyMMAMPd hh:mm:ss	[cm/min]	[°]	[m]	[°]	[°C]	[°C]	[°C]		
2016/3/18 下午 01:58:16	1.246	89.5	9.16	0.0	5.520	1.050	0.264	ON	ON
2016/3/18 下午 01:58:17	1.245	89.5	9.16	0.0	5.520	1.050	0.264	ON	ON
2016/3/18 下午 01:58:18	1.245	89.5	9.16	0.0	5.520	1.054	0.264	ON	ON
2016/3/18 下午 01:58:19	1.245	89.5	9.16	0.0	5.521	1.063	0.264	ON	ON
2016/3/18 下午 01:58:20	1.244	89.5	9.16	0.0	5.521	1.060	0.264	ON	ON
2016/3/18 下午 01:59:21	1.244	89.5	9.16	0.0	5.521	1.060	0.264	ON	ON
2016/3/18 下午 01:59:22	1.245	89.5	9.16	0.0	5.520	1.060	0.264	ON	ON
2016/3/18 下午 01:59:23	1.244	89.5	9.16	0.0	5.522	1.061	0.264	ON	ON



第五章 結果與討論

表 5.4 C207S 監測井流速流向測定紀錄(續 3)



業興環境科技股份有限公司

監測井流速流向測定紀錄表

作業日期：105 年 3 月 18 日

天氣：■晴 □陰 □雨

監測井名稱：伍桐化學公司

紀錄人員：蘇詩博

表單編號	D016
修訂日期	100.5.4

監測井資料卡基本資料		監測記錄資料	
井號	C207s	儀器放置深度(儀器至井口深度)	9.16m
井深	12.03m	執行時間	施作開始 14:02
井篩長度	6m		加熱開始 14:03
井篩區間(井篩至井口深度)	井篩頂 6.16(m)~ 井篩底 12.16(m)		施作結束 15:03
水位(水面至井口深度)	5.220(m)	井內流速(cm/min)	14.815
水力傳導係數	E- m/s	井內流向(度)	349.5
井篩區間地質紀錄		備註：	

現場作業紀錄					
時間	井內流速(cm/min)	井內流向(度)	時間	井內流速(cm/min)	井內流向(度)
14:03	0.029	100.5	14:43	21.470	85.1
14:13	20.705	356.5	14:48	18.345	31.6
14:23	0	282.0	14:53	15.804	343.8
14:33	0	33.0	14:58	14.968	332.6
14:38	0	262.3	15:03	14.815	349.5

The screenshot shows the C207S monitoring software interface. It displays real-time data for Velocity (14.815 cm/min), Direction (349.5 degrees), and Depth (0.00 m). A temperature graph is visible, showing temperature fluctuations over time. The interface also includes a compass rose and a data table with columns for Measurement time, Velocity, Direction, O.L., Compass, Average temp, Temp (Max - Min), Amplitude, Temp zone, and Heater.

Measurement time	Velocity (cm/min)	Direction (°)	O.L. (m)	Compass (°)	Average temp (°C)	Temp (Max - Min) (°C)	Amplitude (°C)	Temp zone	Heater
2016/3/18 下午 03:03:14	14.829	349.5	9.16	0.0	0.478	0.292	0.099	ON	ON
2016/3/18 下午 03:03:16	14.824	349.5	9.16	0.0	0.478	0.294	0.099	ON	ON
2016/3/18 下午 03:03:16	14.825	349.5	9.16	0.0	0.478	0.290	0.099	ON	ON
2016/3/18 下午 03:03:17	14.820	349.5	9.16	0.0	0.479	0.294	0.099	ON	ON
2016/3/18 下午 03:03:18	14.814	349.5	9.16	0.0	0.479	0.292	0.099	ON	ON
2016/3/18 下午 03:03:19	14.810	349.5	9.16	0.0	0.479	0.292	0.099	ON	ON
2016/3/18 下午 03:03:20	14.821	349.5	9.16	0.0	0.479	0.290	0.099	ON	ON
2016/3/18 下午 03:03:21	14.811	349.5	9.16	0.0	0.478	0.292	0.099	ON	ON



現地電解整治受氯乙烯污染地下水之模場試驗

表 5.5 水位尺量測地下水位紀錄驗證單井流速流向測定結果

監測井	井頂高程 (m)	測量時間	井頂至水位深度 (m)	相對水位 (m)
C085S	10.2549	11:40	4.98	5.2749
		12:56	4.976	5.2789
		14:00	4.985	5.2699
C207S	10.5334	11:40	5.22	5.3134
		12:56	5.22	5.3134
		14:00	5.218	5.3154
C208S	10.1232	11:40	4.852	5.2712
		12:56	4.84	5.2832
		14:00	4.835	5.2882
地下水流向判定：		C207S → C208S	判定流向與單井流速儀結果是否一致？	☐ 是 ☒ 否





第五章 結果與討論

因場址位於臨海工業區內，離海岸位置不遠，懷疑單井流速儀測定的地下水流轉向是否受到潮汐漲退潮的影響，民國 105 年 3 月 28 日於場內 C207S 監測井置放自計式水位計，共記錄 4 天地下水位變化的情形，如圖 5.10 所示。量測期間地下水位變化介於 5.698 m 至 5.843 m，每日地下水高水位出現在 AM7:00 附近，每日地下水低水位出現在 PM5:30 附近，似呈規律性變化，地下水位變化或受漲退潮變化，但並不明顯。民國 105 年 3 月 28 日自計式水位計置放當日發現較明顯的地下水位洩降，主要原因為當日於 C207S 監測井附近分別設置 1 口簡易井與 1 口監測井，設置完成後氣提式完井作業所致。其中簡易井距離 C207S 監測井僅 1 m，造成地下水位洩降甚為明顯。



圖 5.10 C207S 監測井自計式水位計量測地下水位紀錄



現地電解整治受氯乙烯污染地下水之模場試驗

5.2.2 整治井與監測井設置

依單井流速儀判定的地下水流向，以 C207S 作為成效監測井，於地下水上游 1 公尺處設置 1 口簡易井，做為整治井使用；於整治井之地下水上游 5 公尺處設置 1 口標準井，做為背景監測之用途，新設整治井與監測井之相關位置圖如圖 5.11 所示。設井作業包括試挖、鑽孔、設置井管、回填濾料、回填皂土、完井等，相關作業照片如表 5.6 所示。地質鑽探土壤取樣結果發現，地表 0 至 2 m 為黃棕色細砂夾礫石，2 至 6 m 為黃棕色粉土夾細砂，6 至 16 m 為黃棕色細砂。新設監測井構造剖面如圖 5.12 所示，設井深度為 15.2 m，井管孔徑 2 英吋，井管底部開篩，井篩長度 12 m。新設監測井構造剖面如圖 5.13 所示，設井深度為 15.2 m，井管孔徑 2 英吋，井管底部開篩，井篩長度 12 m。



圖 5.11 新設整治井與監測井相關位置圖



表 5.6 新設整治井與監測井設置作業照片

新設監測井設置作業			
		設井	放置井管
		濾料填充(石英砂)	濾料填充(皂土)
新設整治井設置作業			
		設井	放置井管
		濾料填充(石英砂)	濾料填充(皂土)



現地電解整治受氯乙烯污染地下水之模場試驗

設置日期：105.03.28

井 號：梧桐化學-觀測井

井頂高程：5.428 m

地表高程：5.931 m

鑽井方法：中空螺旋鑽

井孔直徑：8 吋 至 15.2 m
至 m
至 m

井管型式：PVC sch 40 2"

井管接頭：螺牙式

井篩型式：PVC sch 40 2"

篩孔尺寸：0.02 井篩長度：12 m

井頂蓋型式：膨脹式井帽

井底封型式：螺牙式

濾料型式：石英砂

濾料粒徑：0.886 ~ 1.113 mm

濾料封：2.533 至 15.200 m

細砂封：1.933 至 2.533 m

皂土封：1.033 至 1.933 m

表層封：0.000 至 1.033m

保護井管：手孔蓋 直徑 9 英寸

完井方法：氣提式 日期 105.03.28

日期

說 明：

監測井示意圖

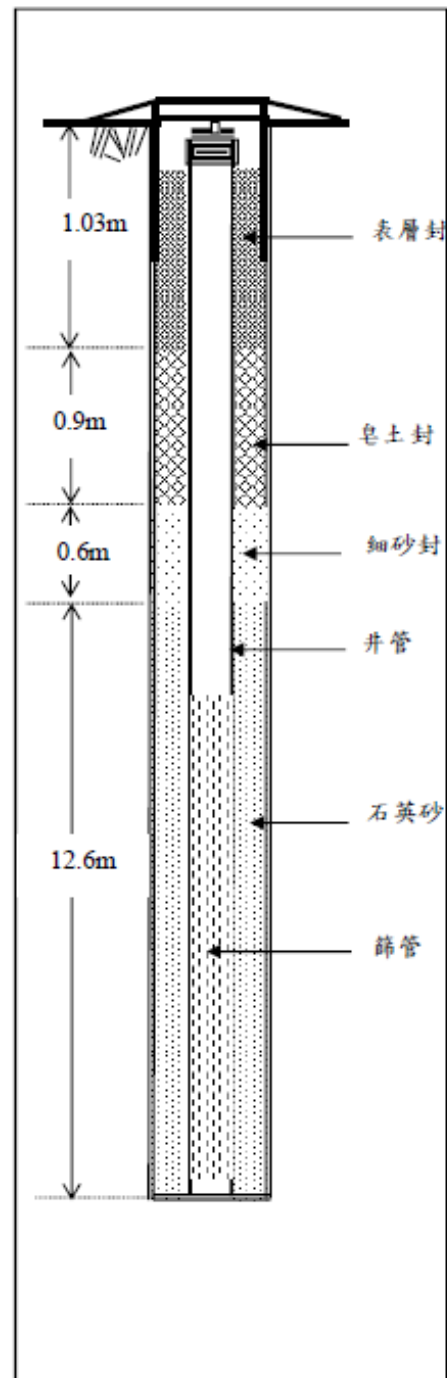


圖 5.12 新設監測井構造剖面圖



第五章 結果與討論

設置日期：105.03.28

井 號：梧桐化學-整治井

井頂高程：5.438 m

地表高程：5.938 m

鑽井方法：中空螺旋鑽

井孔直徑：8 吋 至 15.2 m
至 m
至 m

井管型式：PVC sch 40 2"

井管接頭：螺牙式

井篩型式：PVC sch 40 2"

篩孔尺寸：0.02 井篩長度：12 m

井頂蓋型式：膨脹式井帽

井底封型式：螺牙式

濾料型式：石英砂

濾料粒徑：0.886 ~ 1.113 mm

濾料封：2.583 至 15.200 m

細砂封：1.983 至 2.583 m

皂土封：0.983 至 1.983 m

表層封：0.000 至 0.983m

保護井管：手孔蓋 直徑 9 英寸

完井方法：氣提式 日期 105.03.28

日期

說 明：

監測井示意圖

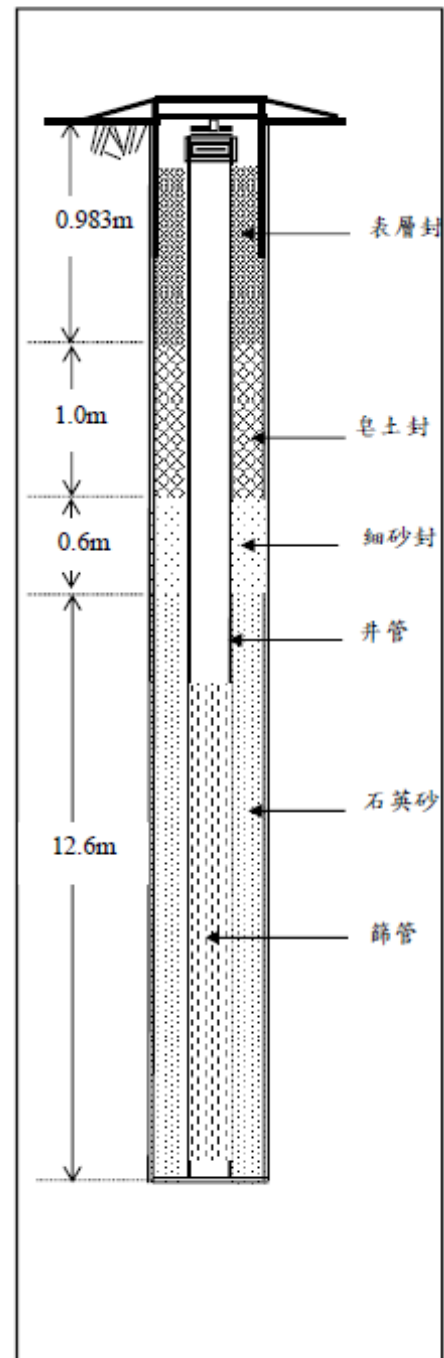


圖 5.13 新設整治井構造剖面圖



5.2.3 現地電解整治系統操作

現地電解整治系統設備單元包括太陽能板、電源電力控制機組、井中電極等，太陽能板以 100 W 規格應足以提供電解反應器操作電壓所需，太陽能發電可提供直流電力，但受天候及日照強度影響一般發電量並不穩定，需將電量儲存於蓄電池方可提供較穩定且持續之電壓，選用蓄電池的規格為 45AH/12V。電源電力控制機組可輸入太陽能發電量、具儲存電量功能、輸出端可調整控制電壓或電流，以供應電解設備所需電力。井中電極選用白金鈦網做為電極材料，長度 1 公尺、外徑約 5 公分，已可置入 2 吋整治井為原則。

民國 105 年 4 月 1 日進場進行現地電解整治系統按裝，太陽能板設置於原料倉庫屋頂上，附近沒有遮蔽物阻擋，白天皆可接受日照發電。電源電力控制機組紀錄太陽能發電效率，電力儲存於電池，再以升降壓控制器調整定電壓 3.0 V 輸出，進行現地電解整治。井中電極置入整治井中，含氯有機物屬於 DNAPLs，但氯乙烯密度僅 0.91 g/cm^3 ，因此井中電極設置於含水層上半部，置入井管深度介於 8.5 m 至 9.5 m。民國 105 年 4 月 2 日進行現地電解整治系統實車測試，現場測試太陽能供電系統之正常運作，連接現地電解整治井設備線路完整，測試井中電極作動功能正常。實車測試完成後，隨即啟動系統執行模場試驗整治，現地電解整治系統操作情況，如表 5.7 中照片所示。

民國 105 年 4 月 2 日於現地電解整治系統啟動前，以微洗井採樣設備進行地下水污染背景採樣，共執行 C085S、C207S、整治井、成效監測井、C208S 等 5 口監測井多深度採樣，分別採集深度 7.5 m、9.5 m、11.5 m 的地下水樣品。模場試驗現地電解整治期間，每周以微洗井採樣設備執行 5 口監測井 3 個深度地下水採樣，共採集 15 個樣品。民國 105 年 4 月 8 日分別於 C207S、整治井、成效監測井等 3 口監測井放置被動式擴散袋，進行不同採樣方式的比對，以研判地下水流之污染傳輸通量。定期監測採樣作業情況，如表 5.8 中照片所示。

因場址地下水富含礦物質成分，井中電極操作運轉過程發現積垢及生物膜生成嚴重，因而降低電解效率。配合定期地下水採樣作業，每周進行電極積垢及生物膜清理，並以反轉電解進行電極維護保養。



第五章 結果與討論

表 5.7 現地電解整治系統操作照片

	
太陽能板裝設於屋頂上	太陽能發電效率監控
	
輸出電解電壓電流監控系統	白金鈦網電極置入整治井
	
白金鈦網使用後積垢及生物膜	電極維護保養



現地電解整治受氯乙烯污染地下水之模場試驗

表 5.8 整治系統維護保養與定期監測採樣照片

	
維護保養前電極	維護保養後電極
	
整治井開啟	以水位尺量測地下水位
	
微洗井採樣	被動式擴散袋採樣



第五章 結果與討論

針對電極清洗後剝落下來之積垢，利用場放射型掃描式電子顯微鏡 (FE-Scanning Electronic Microscopy, SEM) 來進行元素分析，以確認積垢之組成份。SEM 主要用於觀察物體表面型態，其工作原理是利用高電壓產生高能電子束，經過電磁透鏡組後，將電子束聚焦至試片上，使得電子束撞擊樣品表面，造成樣品激發出各種訊號，如二次電子、背向散射電子、吸收電子及 X 射線等，在一般掃描式電子顯微鏡偵測系統上，主要為偵測二次電子及背向散射電子成像，經訊號放大器放大解析，並輸出至顯像管上成像，便能觀察樣品的微表面特徵，包括晶體結構、表面型貌及元素分析等。井中電極積垢分析結果顯示，主要元素成分包括碳(C)、氧(O)、鎂(Mg)、鈣(Ca)、鋯(Zr)、銻(Sb)、鈪(Hf)，其含量比例依序為 11.28 %、22.98 %、1.41 %、45.15 %、0.14 %、17.95 %、0.82 %，其中鈣的含量最高達 45.15%，氧的含量次高為 22.98%，積垢成分分析結果如圖 5.14 所示。推估電極被覆之積垢成分為氫氧化鈣，水解後溶液 pH 介於 9.31~9.76。

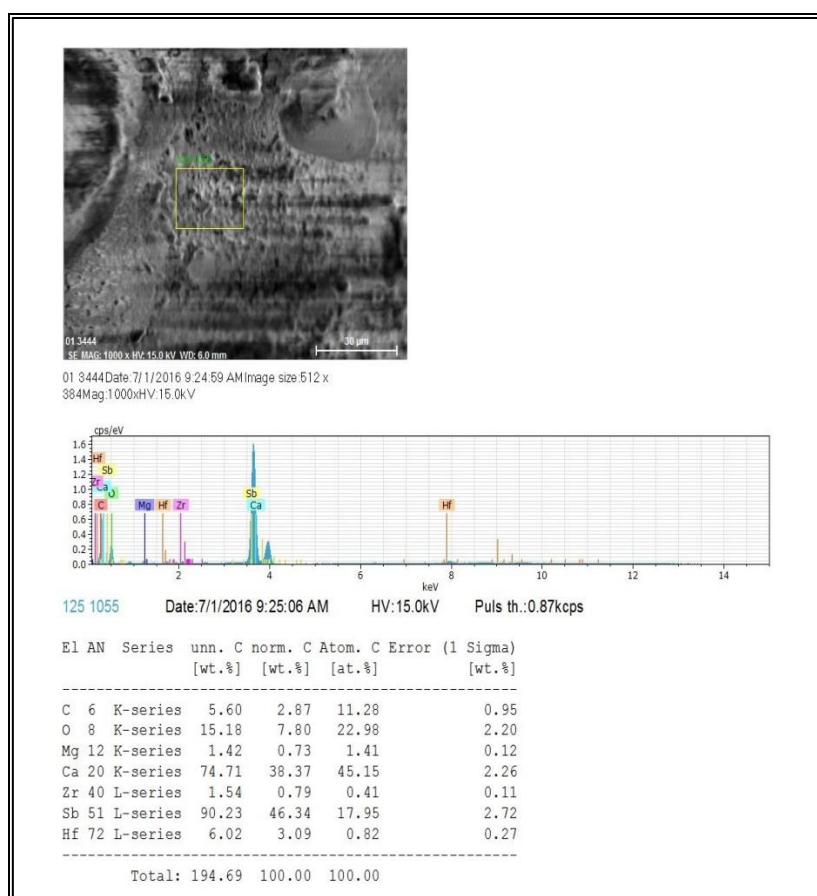


圖 5.14 電極積垢成份之 SEM 分析結果



5.2.4 整治成效評析

民國 105 年 4 月 2 日於現地電解整治系統啟動前，以微洗井採樣設備進行地下水採樣，場址地下水氯乙烯污染背景濃度如表 5.9 所示。C085S 監測井 3 個深度氯乙烯濃度皆未檢出，其中整治井因進行現地電解整治系統實車測試，氯乙烯濃度較其他監測井測值稍低，介於 0.04 mg/L 至 0.08 mg/L。C207S 監測井、成效監測井、C208S 監測井氯乙烯濃度相近，介於 0.11 mg/L 至 0.17 mg/L，且 3 個深度氯乙烯濃度差異不大，污染區域含水層氯乙烯污染分布均勻，氯乙烯背景濃度約 0.14 mg/L 左右。

現地電解整治系統啟動後，每週以微洗井採樣設備進行地下水採樣 1 次，待電解整治系統操作穩定後，調整定期地下水監測頻率至每 2 週採樣 1 次。場址內各監測井氯乙烯定期監測數據彙整於表 5.10 及表 5.11，數據監測期間 C085S 監測井 3 個深度氯乙烯濃度皆未檢出，顯示場內污染範圍並未擴及 C085S。整治井因井中電極現地電解氧化作用，井中氯乙烯順利被氧化破壞，整治歷程中整治井 3 個深度氯乙烯濃度皆未檢出。距離整治井 5 m 處成效監測井於 1 週內氯乙烯移除率約 57%，於 1 個月後井內氯乙烯濃度幾近全數移除。地下水上游 C207S 監測井氯乙烯濃度呈現上下浮動變化，主要受污染源斷斷續續釋出(rebound)的影響。地下水下游 C208S 監測井距離模場試驗區甚遠，已超出整治井有效影響範圍，氯乙烯濃度亦呈現上下浮動變化。

為進一步鑑別現地電解整治成效，分別彙整 C207S 監測井、整治井、成效監測井、C208S 監測井於整治歷程氯乙烯濃度變化趨勢。圖 5.15 呈現 C207S 監測井氯乙烯濃度上下震盪的現象，值得注意的是整治初期氯乙烯濃度變化趨勢淺層較中層遞延 1 週、中層較深層遞延 1 週，如氯乙烯最高濃度淺層出現於 4 月 22 日、中層出現於 4 月 15 日、深層出現於 4 月 8 日。此現象暗示 C207S 監測井內氯乙烯濃度有往上傳輸的驅動力，其一為氯乙烯密度小於水的浮力傳流效應，另一為淺層氯乙烯往整治井濃度擴散的機制所貢獻。C207S 監測井位於整治井上游，整治成效不易顯現，井中電極係裝設於整治井中層至淺層的位置，因而淺層可能位於電解反應之影響範圍，5 月 13 日 C207S 氯乙烯濃度明顯下降至地下水污染管制標準以下，應歸功於整治井間接電解效應所貢獻。惟 6 月 3 日 C207S 明顯出現污染物 rebound 現象，氯乙烯濃度



第五章 結果與討論

表 5.9 場址地下水氯乙烯背景監測結果(105 年 4 月 2 日)

採樣深度	井號	氯乙烯濃度 (mg/L)	說明	氯乙烯濃度分布圖
7.5 m	C085S	< 0.02	未污染	
	C207S	0.13	污染背景	
	整治井	0.08	整治	
	監測井	0.14	成效監測	
	C208S	0.14	地下水下游	
9.5 m	C085S	< 0.02	未污染	
	C207S	0.17	污染背景	
	整治井	0.07	整治	
	監測井	0.12	成效監測	
	C208S	0.11	地下水下游	
11.5 m	C085S	< 0.02	未污染	
	C207S	0.15	污染背景	
	整治井	0.04	整治	
	監測井	0.14	成效監測	
	C208S	0.13	地下水下游	



現地電解整治受氯乙烯污染地下水之模場試驗

表 5.10 各監測井氯乙烯定期監測數據(105 年 4 月 2 日至 105 年 6 月 3 日)

採樣 深度	採樣 日期	4/2	4/8	4/15	4/22	4/29	5/6	5/13	5/20	6/3
7.5 m	C085S	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02	-
	C207S	0.13	0.22	0.15	0.37	0.05	0.14	< 0.02	0.15	0.8
	整治井	0.08	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02
	監測井	0.14	0.06	0.09	0.07	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02
	C208S	0.14	0.15	< 0.02	0.15	< 0.02	0.13	0.26	0.15	0.05
9.5 m	C085S	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02	-
	C207S	0.17	0.20	0.32	0.19	0.18	0.19	< 0.02	0.23	0.62
	整治井	0.07	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02
	監測井	0.12	0.06	0.08	0.08	< 0.02	0.04	< 0.02	< 0.02	< 0.02
	C208S	0.11	0.14	< 0.02	0.15	< 0.02	0.14	0.26	0.14	0.05
11.5 m	C085S	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02	-
	C207S	0.15	0.32	0.21	0.16	0.16	0.20	< 0.02	0.19	0.34
	整治井	0.04	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02
	監測井	0.14	0.05	0.08	0.08	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02
	C208S	0.13	0.13	< 0.02	0.15	0.21	0.16	0.24	0.14	0.05

單位：mg/L



第五章 結果與討論

表 5.11 各監測井氯乙烯定期監測數據(105 年 6 月 17 日至 105 年 11 月 16 日)

採樣 深度	採樣 日期	6/17	7/1	7/15	7/29	8/12	8/26	9/9	9/23	11/16
7.5 m	C085S	-	-	-	< 0.02	-	-	-	-	-
	C207S	< 0.02	0.12	< 0.02	< 0.02	< 0.02	0.14	0.39	0.11	0.06
	整治井	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02
	監測井	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02
	C208S	0.05	0.14	0.45	0.19	< 0.02	0.14	< 0.02	0.06	0.16
9.5 m	C085S	-	-	-	< 0.02	-	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02
	C207S	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02	0.03	0.05	0.03	0.06
	整治井	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02
	監測井	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02
	C208S	0.023	0.16	0.56	0.10	< 0.02	0.11	< 0.02	0.09	0.17
11.5 m	C085S	-	-	-	< 0.02	-	-	< 0.02	-	-
	C207S	< 0.02	0.04	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02	0.05	0.06
	整治井	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02
	監測井	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02
	C208S	< 0.02	0.14	< 0.02	0.06	< 0.02	0.04	< 0.02	0.05	0.13

單位：mg/L



現地電解整治受氯乙烯污染地下水之模場試驗

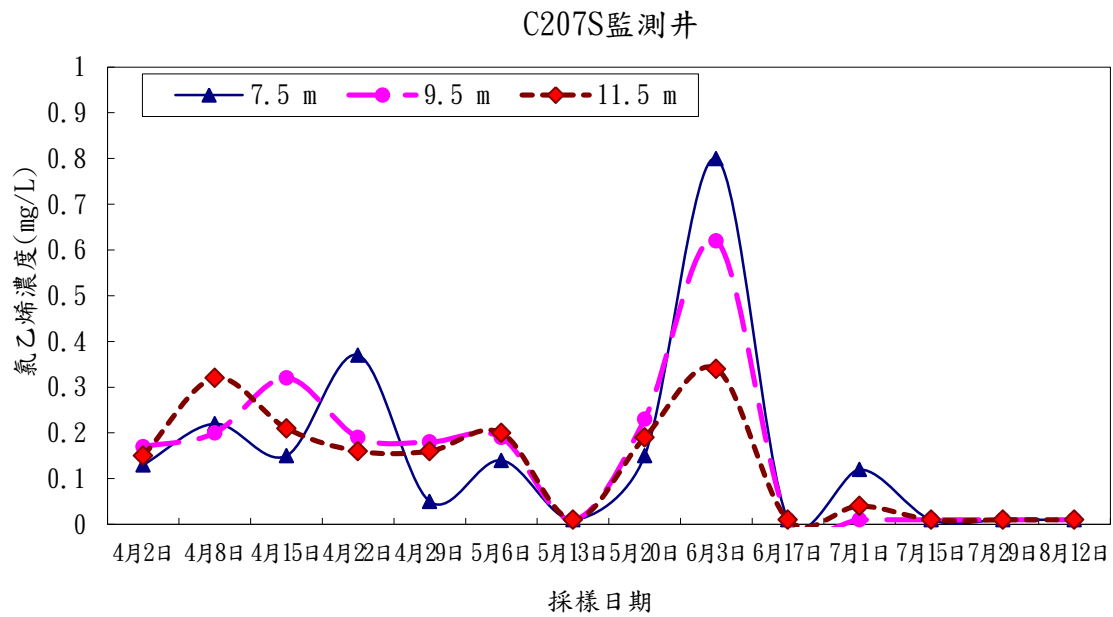


圖 5.15 C207S 監測井於整治歷程氯乙烯濃度變化趨勢

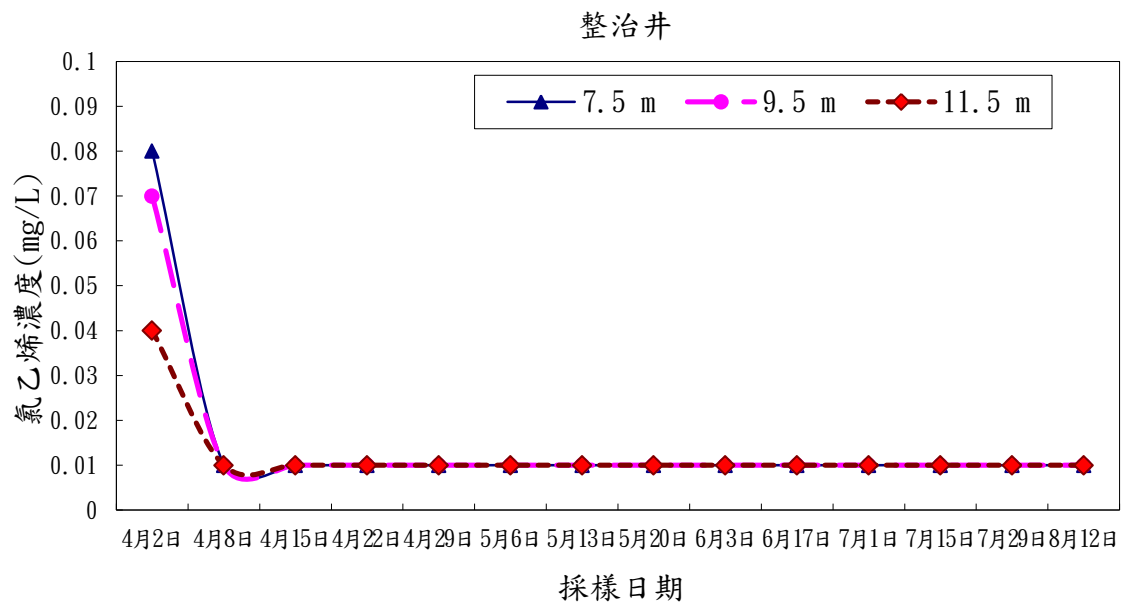


圖 5.16 整治井於整治歷程氯乙烯濃度變化趨勢

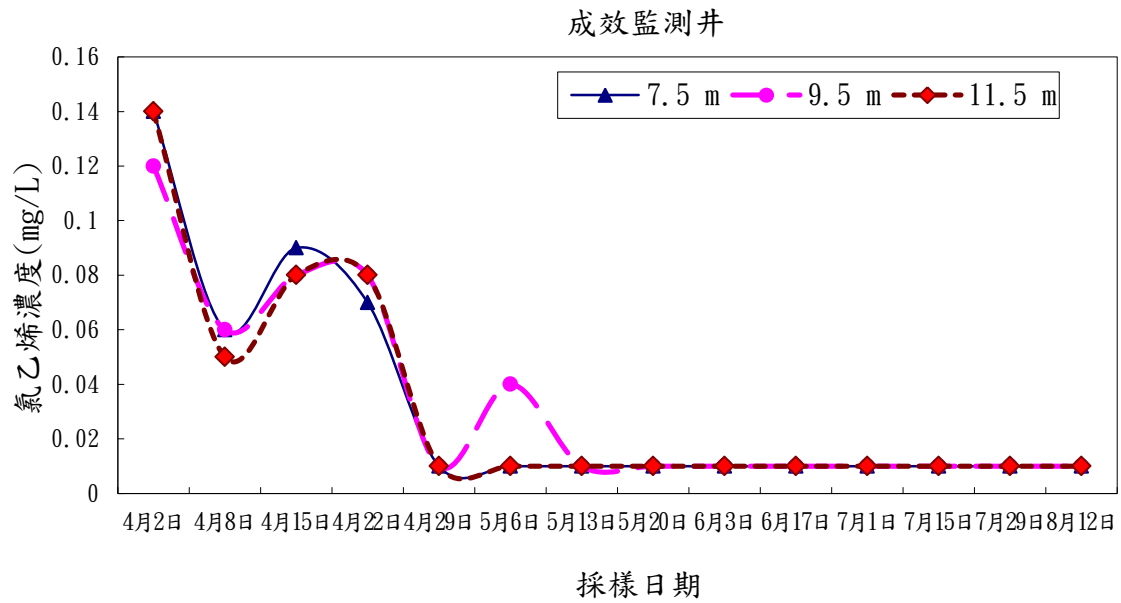


圖 5.17 成效監測井於整治歷程氯乙烯濃度變化趨勢

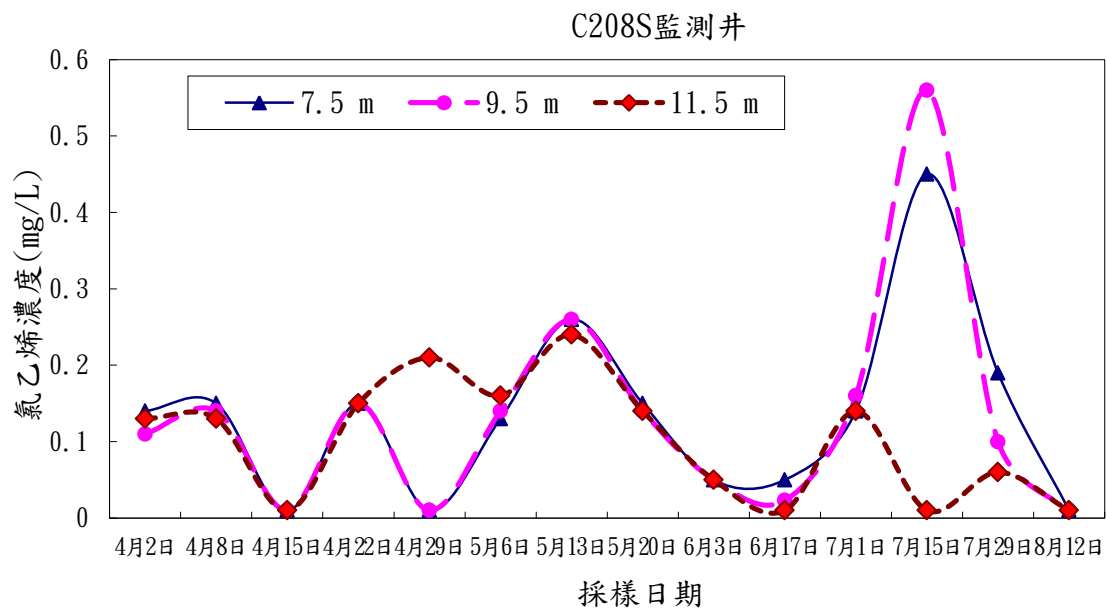


圖 5.18 C208S 監測井於整治歷程氯乙烯濃度變化趨勢



現地電解整治受氯乙烯污染地下水之模場試驗

高達 0.8 mg/L，歷經 2 週現地電解整治，氯乙烯濃度再次下降至地下水污染管制標準以下。而後於 7 月 1 日 C207S 再次出現污染物 rebound 現象，氯乙烯濃度最高僅 0.12 mg/L，持續現地電解整治系統操作，定期監測結果顯示氯乙烯濃度皆在地下水污染管制標準以下。歷經 4 個月之現地電解整治系統操作，已顯現地下水整治的具體成效。

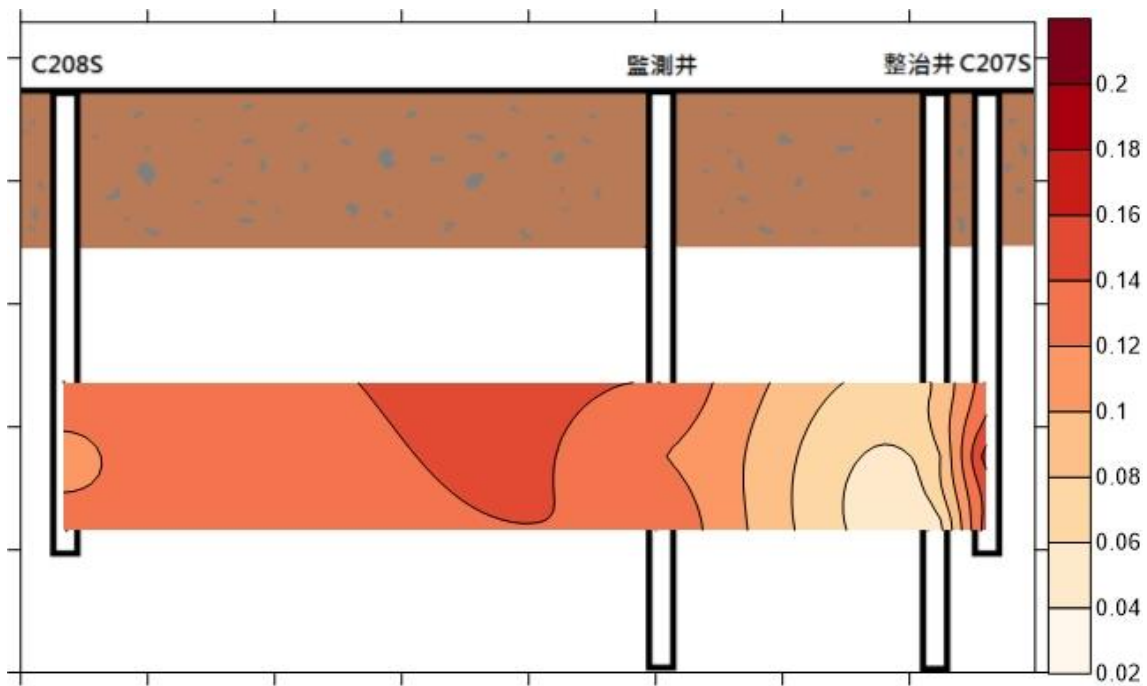
整治井因井中電極現地電解氧化作用，井中氯乙烯順利被氧化破壞，自現地電解整治系統啟動後，整治井 3 個深度氯乙烯濃度皆未檢出，如圖 5.16 所示。距離整治井 5 m 處成效監測井 3 個深度氯乙烯濃度均勻，於 1 週內氯乙烯濃度自 0.14 mg/L 降低至 0.06 mg/L，污染移除率約 57%。持續現地電解整治系統操作，歷經 6 週整治歷程，氯乙烯濃度已順利降至地下水污染管制標準以下，整治歷程中雖有污染物 rebound 現象，但氯乙烯濃度仍呈現遞減趨勢，整體整治成效良好，如圖 5.17 所示。據此，本模場試驗場址藉由地下水流傳輸，電解整治井之影響範圍可擴及下游 5 m 處。

圖 5.18 呈現 C208S 監測井氯乙烯濃度上下震盪的現象，歷經 1 個月整治歷程，淺層與中層氯乙烯濃度已降至未檢出，然而 4 月 29 日 C208S 深層氯乙烯濃度有大幅回升的情況。C208S 監測井位於場址周界外，距離整治井約 30 m，雖處於地下水下游，但並未在地下水流向上，因此 C208S 氯乙烯濃度變化受污染傳輸擴散影響較為顯著。整治歷程中出現污染物 rebound 現象頻繁，值得注意的是污染物 rebound 於 7 月 15 日出現 C208S 最高氯乙烯濃度達 0.56 mg/L，相較 C207S 出現之氯乙烯峰值 0.8 mg/L 略小，出現時間延遲約 1 個月，據此作為 rebound 污染團傳輸時間的推估依據。

針對 C207S 監測井、整治井、成效監測井、C208S 監測井定期監測之 3 個深度氯乙烯濃度，依上下游位置分別繪製場址地下水氯乙烯濃度分布垂直剖面圖，如圖 5.19 至圖 5.32 所示。現地電解整治系統操作 1 個月後，整治井與成效監測井間之模場試驗區域呈現無污染情況，如圖 5.23 至圖 5.32 所示。圖 5.28 首次呈現場址區域地下水無污染情況，現地電解整治 11 週即顯現具體整治成效。整治歷程中出現污染物 rebound 現象，大多發生於場址外 C208S 監測井位置，持續現地電解整治系統操作，歷經 4 個月之整治期程，圖 5.32 再次呈現場址區域地下水無污染情況，因此已順利完成第一階段整治目標。

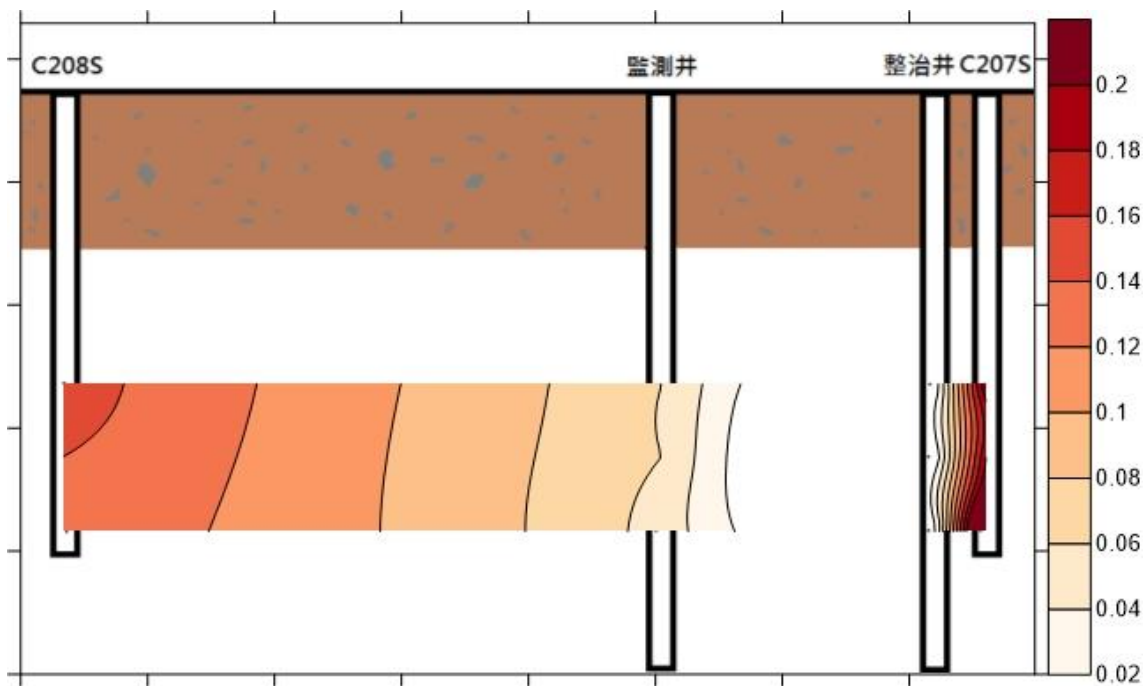


第五章 結果與討論



註：垂直剖面深度 7.5m 至 11.5m

圖 5.19 場址地下水氯乙烯濃度分布垂直剖面圖(105 年 4 月 2 日)

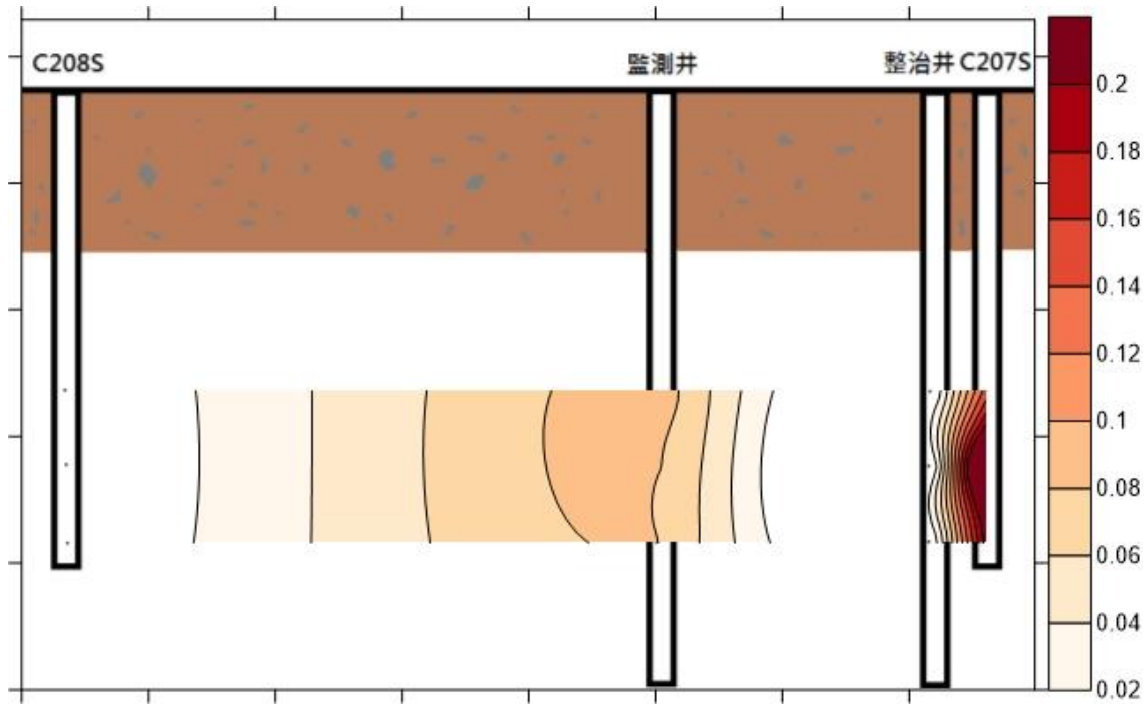


註：垂直剖面深度 7.5m 至 11.5m

圖 5.20 場址地下水氯乙烯濃度分布垂直剖面圖(105 年 4 月 8 日)

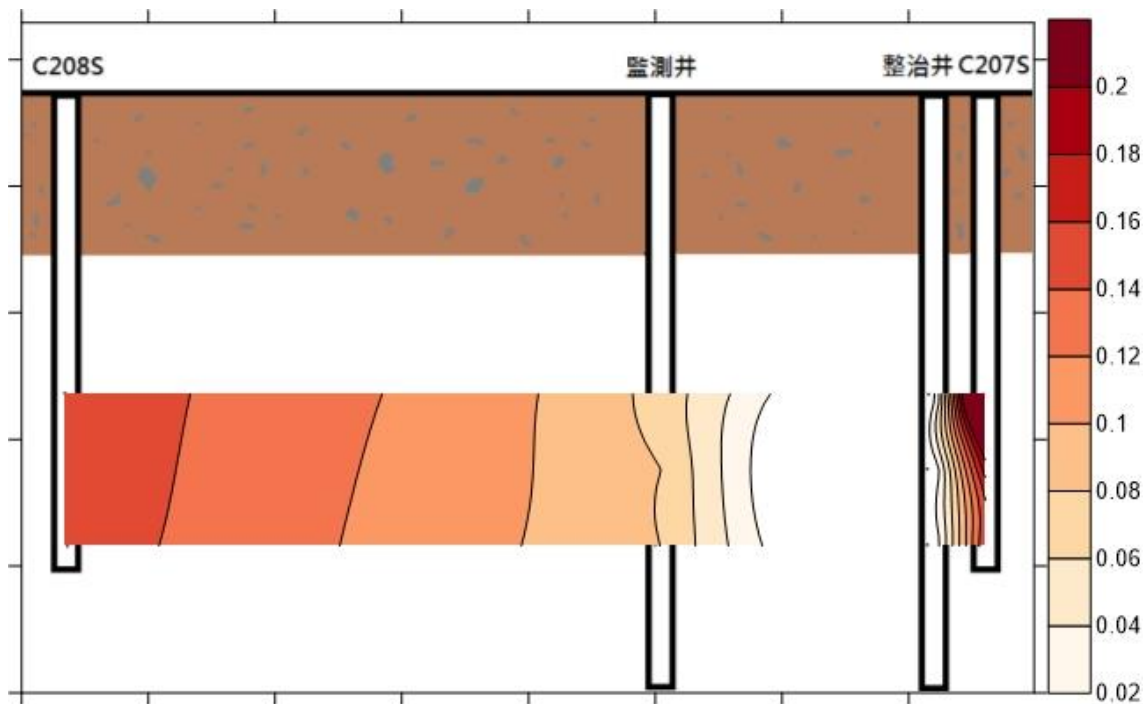


現地電解整治受氯乙烯污染地下水之模場試驗



註：垂直剖面深度 7.5m 至 11.5m

圖 5.21 場址地下水氯乙烯濃度分布垂直剖面圖(105 年 4 月 15 日)

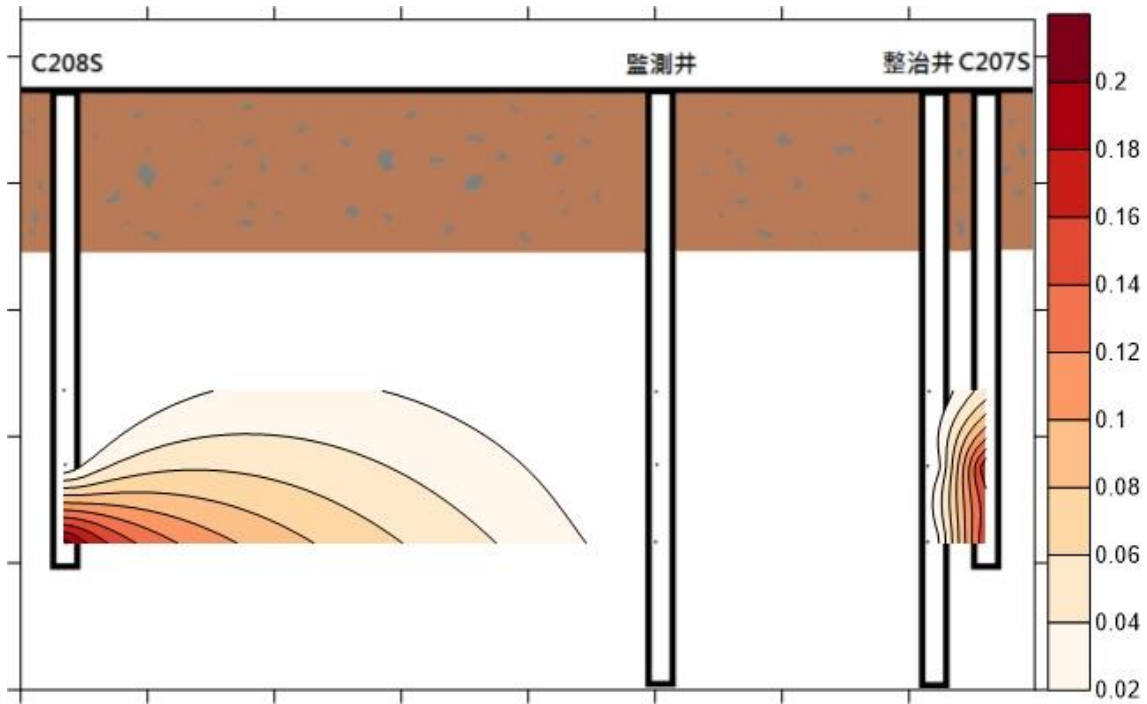


註：垂直剖面深度 7.5m 至 11.5m

圖 5.22 場址地下水氯乙烯濃度分布垂直剖面圖(105 年 4 月 22 日)

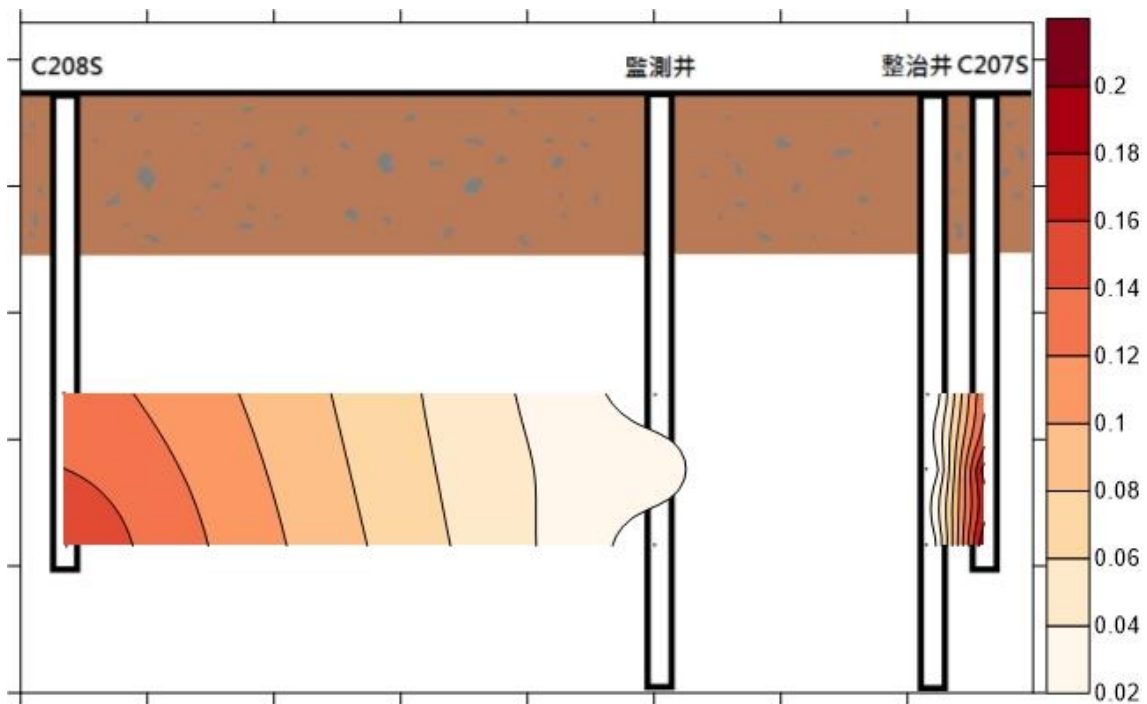


第五章 結果與討論



註：垂直剖面深度 7.5m 至 11.5m

圖 5.23 場址地下水氯乙烯濃度分布垂直剖面圖(105 年 4 月 29 日)

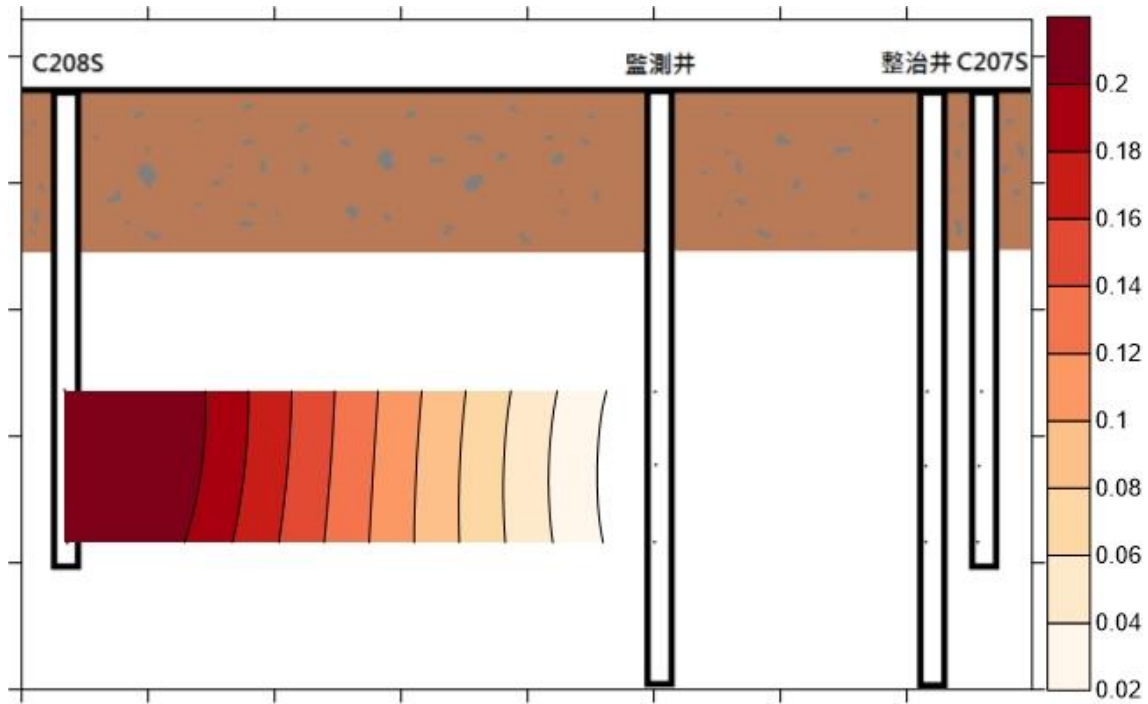


註：垂直剖面深度 7.5m 至 11.5m

圖 5.24 場址地下水氯乙烯濃度分布垂直剖面圖(105 年 5 月 6 日)

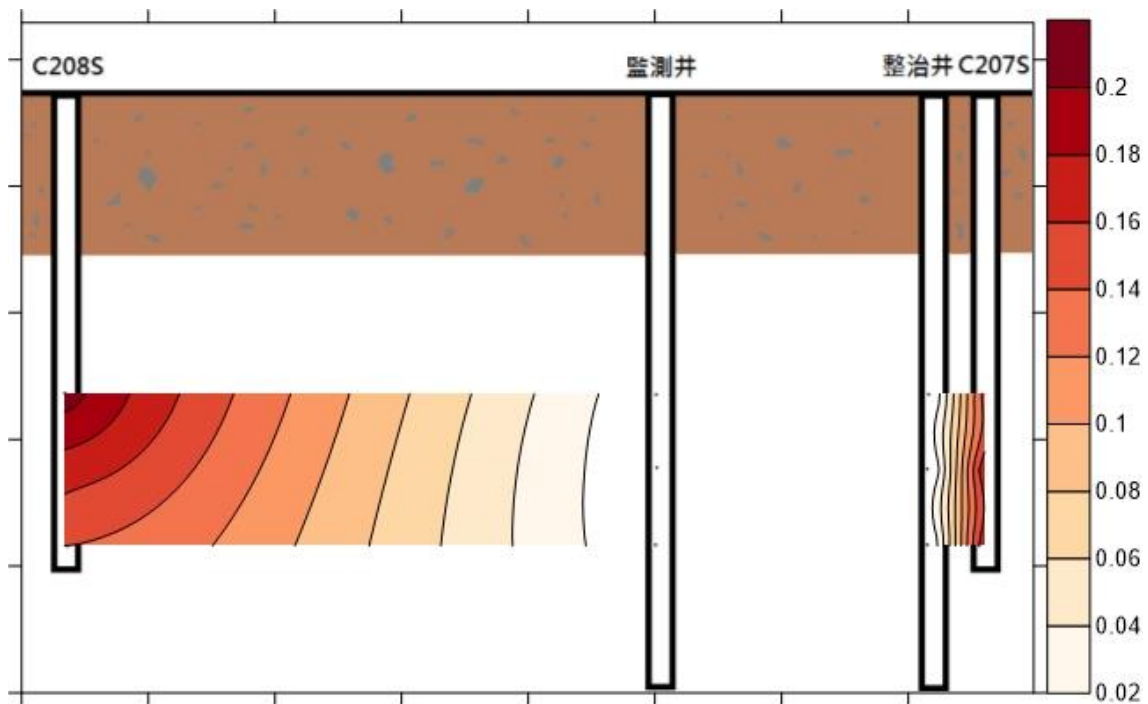


現地電解整治受氯乙烯污染地下水之模場試驗



註：垂直剖面深度 7.5m 至 11.5m

圖 5.25 場址地下水氯乙烯濃度分布垂直剖面圖(105 年 5 月 13 日)

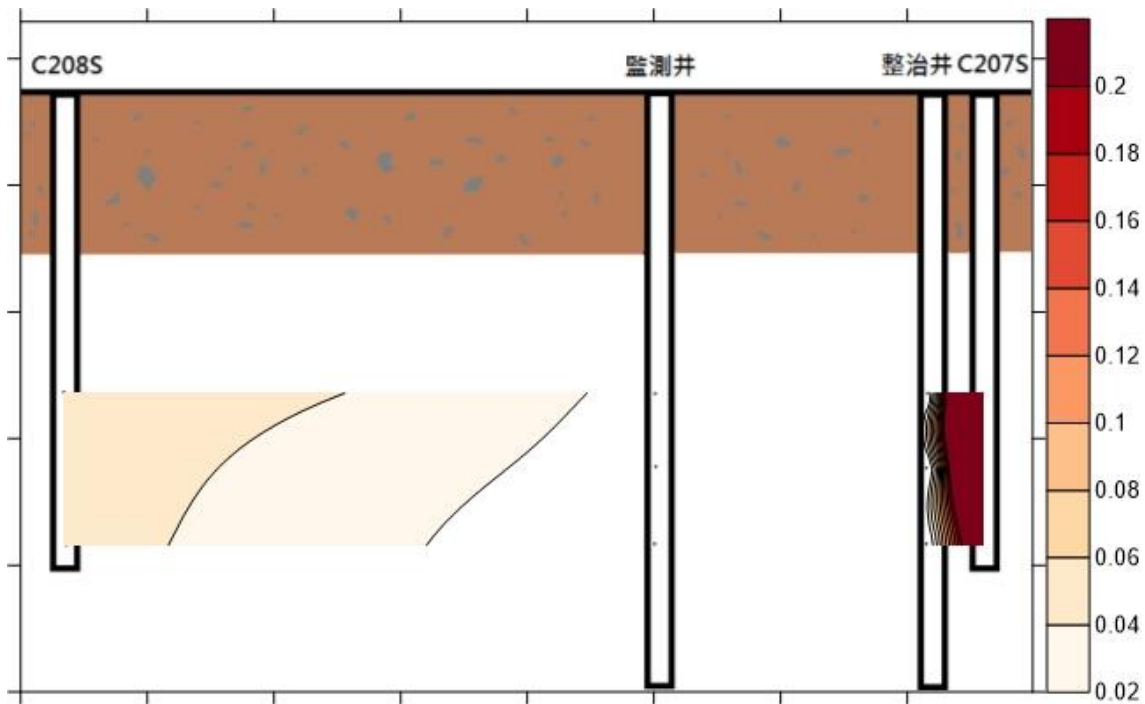


註：垂直剖面深度 7.5m 至 11.5m

圖 5.26 場址地下水氯乙烯濃度分布垂直剖面圖(105 年 5 月 20 日)

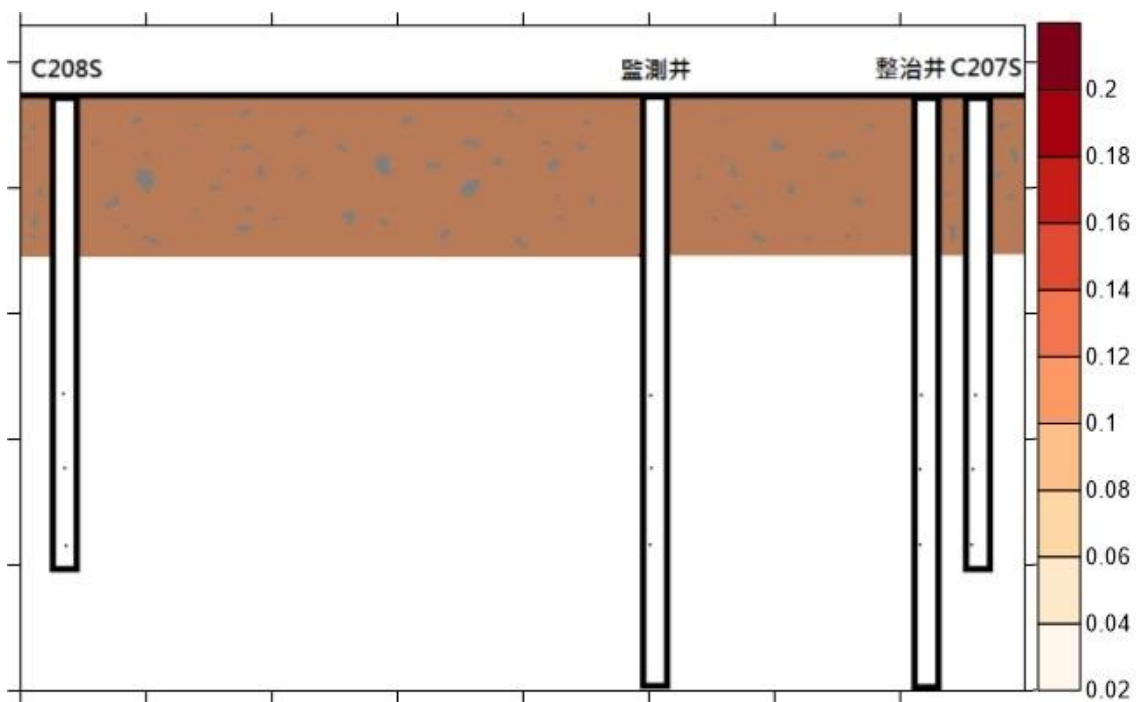


第五章 結果與討論



註：垂直剖面深度 7.5m 至 11.5m

圖 5.27 場址地下水氯乙烯濃度分布垂直剖面圖(105 年 6 月 3 日)

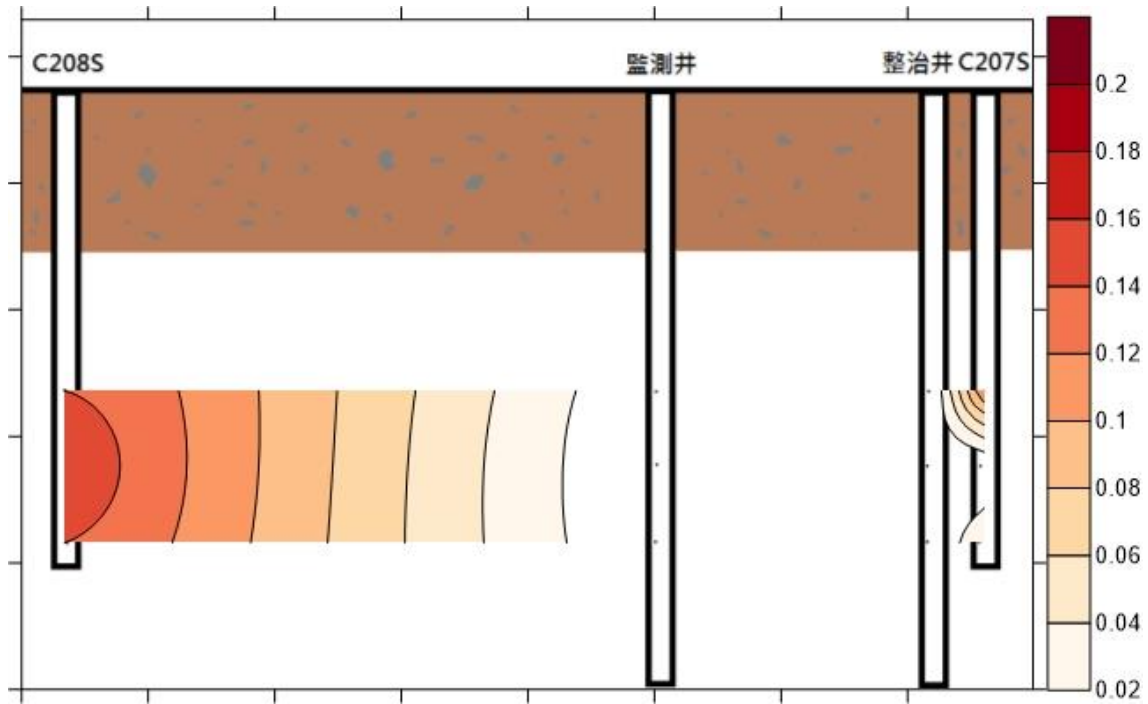


註：垂直剖面深度 7.5m 至 11.5m

圖 5.28 場址地下水氯乙烯濃度分布垂直剖面圖(105 年 6 月 17 日)

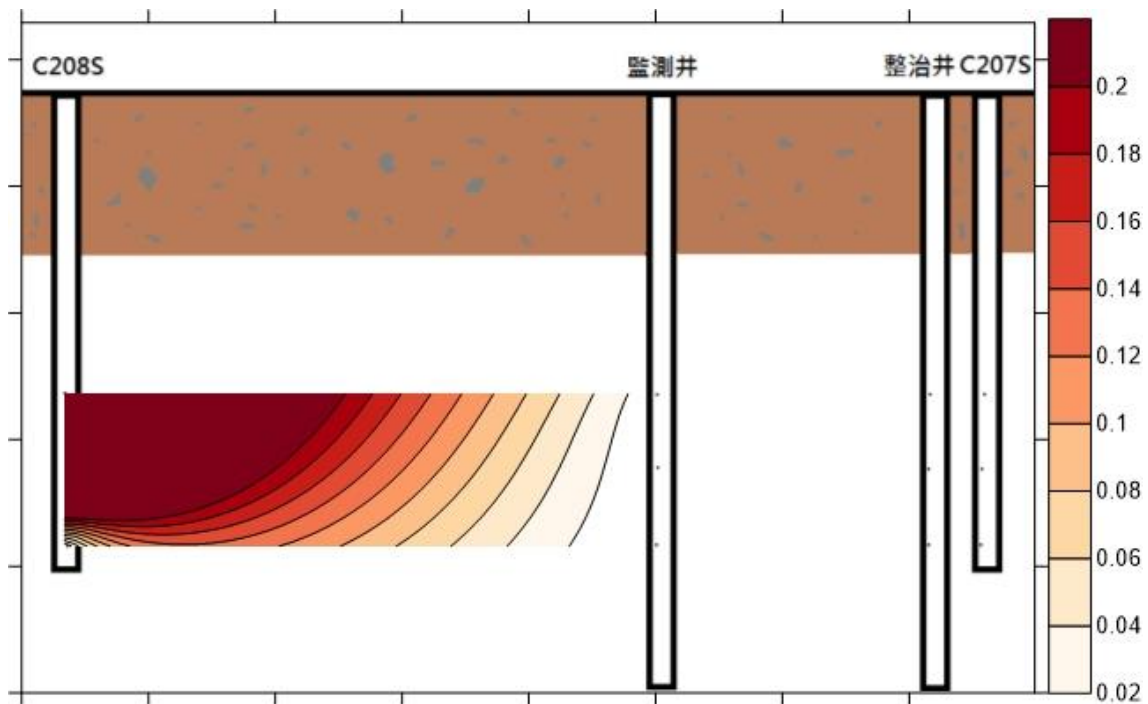


現地電解整治受氯乙烯污染地下水之模場試驗



註：垂直剖面深度 7.5m 至 11.5m

圖 5.29 場址地下水氯乙烯濃度分布垂直剖面圖(105 年 7 月 1 日)

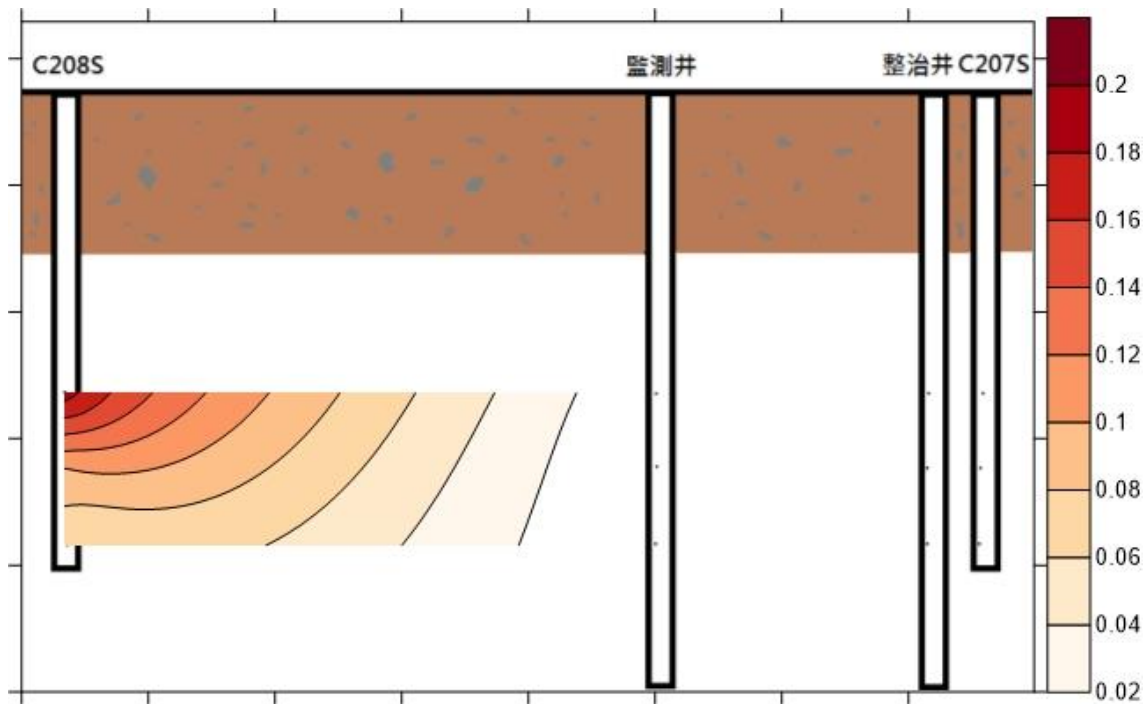


註：垂直剖面深度 7.5m 至 11.5m

圖 5.30 場址地下水氯乙烯濃度分布垂直剖面圖(105 年 7 月 15 日)

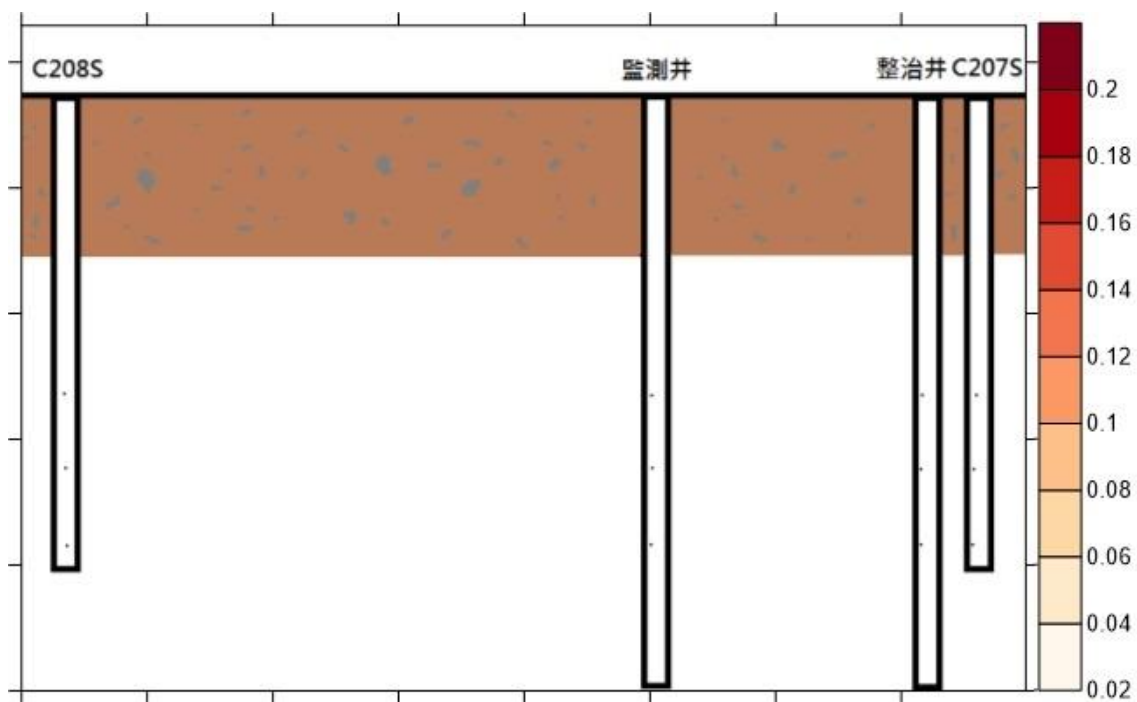


第五章 結果與討論



註：垂直剖面深度 7.5m 至 11.5m

圖 5.31 場址地下水氯乙烯濃度分布垂直剖面圖(105 年 7 月 29 日)



註：垂直剖面深度 7.5m 至 11.5m

圖 5.32 場址地下水氯乙烯濃度分布垂直剖面圖(105 年 8 月 12 日)



現地電解整治受氯乙烯污染地下水之模場試驗

5.2.5 污染物 rebound 試驗

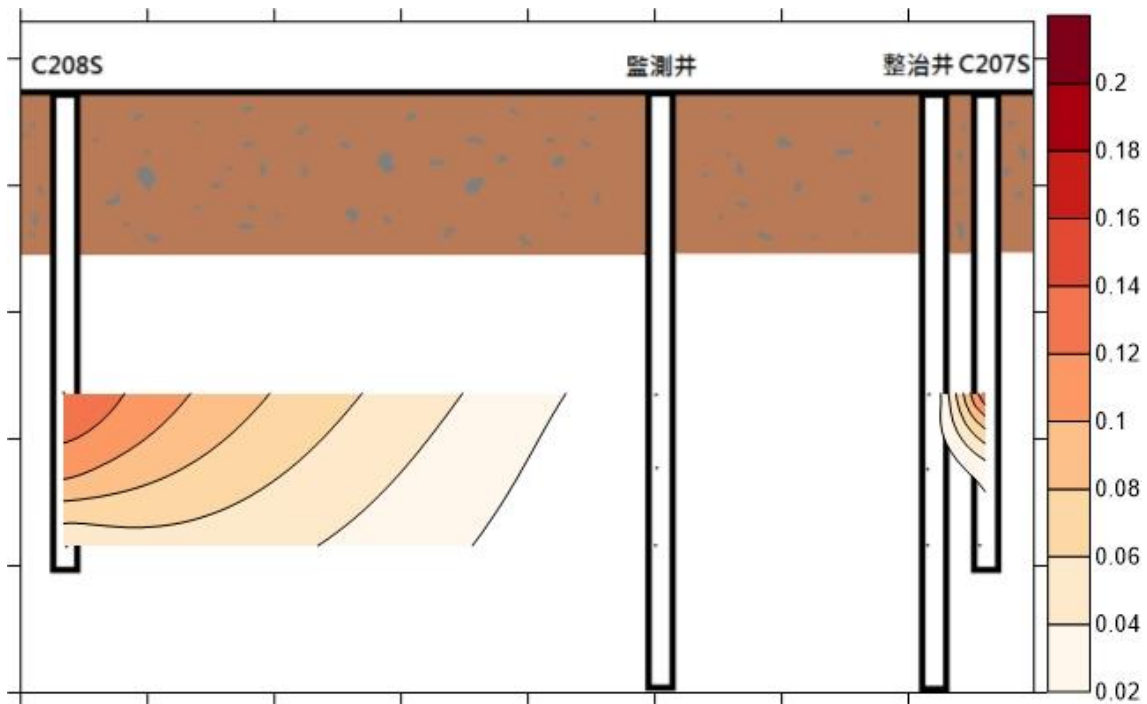
民國 105 年 4 月 2 日啟動現地電解整治系統，歷經 4 個月之整治期程，C207S 監測井、整治井、成效監測井 3 個深度氯乙烯濃度連續 1 個月定期監測皆未檢出，如圖 5.30 及圖 5.31 所示，模場試驗區域已呈現地下水無污染情況，順利完成第一階段整治目標。因此，於 105 年 7 月 29 日將整治井內電極取出，停止現地電解整治系統操作，進行第二階段污染物 rebound 試驗。105 年 8 月 12 日定期監測結果呈現場址區域地下水無污染情況，如圖 5.32 所示。歷經 1 個月 rebound 時間，場址區域地下水氯乙烯濃度再次回升，場址地下水氯乙烯濃度分布垂直剖面圖如圖 5.33 所示。C207S 監測井及 C208S 監測井淺層氯乙烯濃度皆回升至 0.14 mg/L(表 5.11)，接近整治前場址地下水氯乙烯背景濃度。

民國 105 年 9 月 9 日於整治井內置入電極，再次啟動現地電解整治系統，進行第三階段污染物 rebound 後再次電解整治試驗，105 年 9 月 23 日地下水定期監測結果顯示模場試驗區域地下水無污染情況，C207S 監測井及 C208S 監測井地下水氯乙烯濃度皆有降低的趨勢，氯乙烯濃度峰值分別為 0.09 mg/L 及 0.11 mg/L，定期監測數據如表 5.11 所示。圖 5.34 呈現污染物 rebound 後再次電解整治之場址地下水氯乙烯濃度分布垂直剖面圖，比對圖 5.33 污染物 rebound 後地下水氯乙烯濃度分布垂直剖面圖，污染團亦有往 C208S 監測井限縮的趨勢。

民國 105 年 11 月 16 日地下水定期監測結果，上游 C207S 監測井 3 個深度氯乙烯濃度均一，峰值濃度僅 0.06 mg/L，污染物 rebound 後歷經 2 個月現地電解整治期間，地下水氯乙烯濃度已有改善，模場試驗區域再次呈現地下水無污染情況。至於場址周界之下游 C208S 監測井氯乙烯濃度仍維持在場址背景濃度左右，中上層深度氯乙烯濃度約 0.16 mg/L，下層深度氯乙烯濃度約 0.13 mg/L，顯示整治井的影響範圍無法擴及下游 30 公尺外的場址周界。

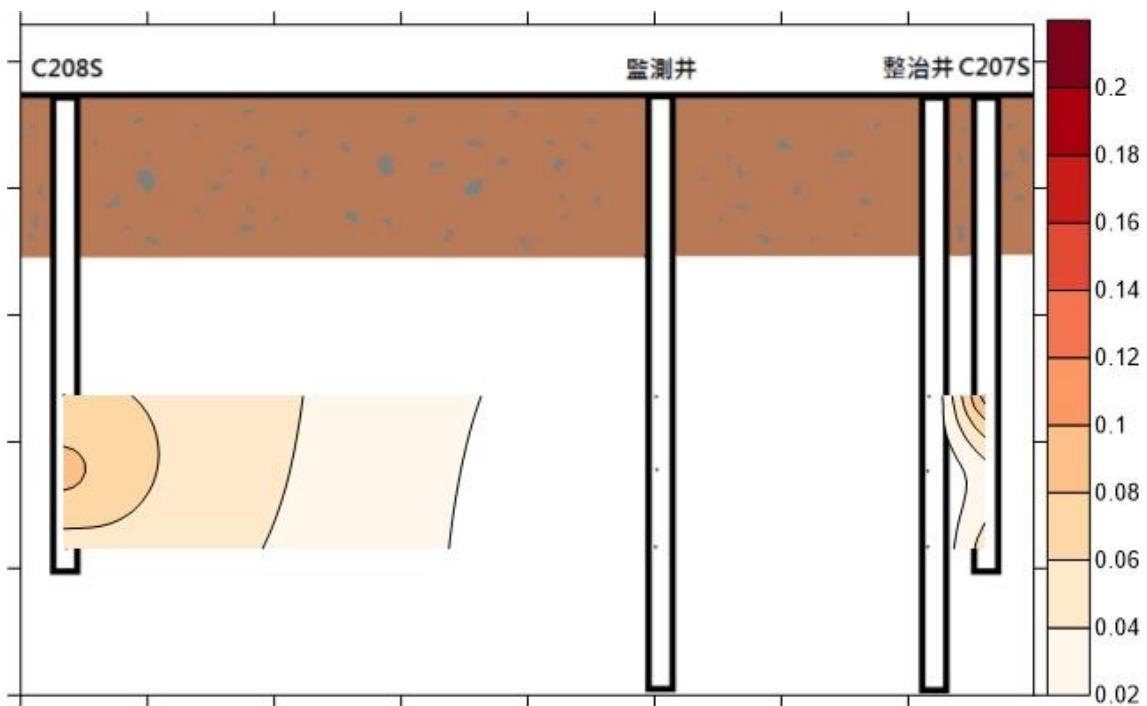


第五章 結果與討論



註：垂直剖面深度 7.5m 至 11.5m

圖 5.33 地下水氯乙烯 rebound 後濃度分布垂直剖面圖(105 年 8 月 26 日)



註：垂直剖面深度 7.5m 至 11.5m

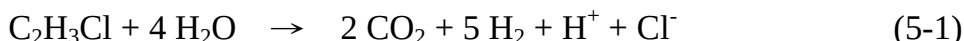
圖 5.34 地下水氯乙烯 rebound 後再次電解整治之濃度分布垂直剖面圖
(105 年 9 月 23 日)



5.3 現地電解整治工法之應用性

5.3.1 電解整治工法反應機制之驗證

本模場試驗之污染標的物為氯乙烯，常溫下飽和蒸汽壓為 2,600 mm-Hg，亨利常數為 99，具高揮發性。電解整治工法的原理係電解水產生氫氧自由基及強氧化劑，藉由間接氧化的機制將污染物予以破壞去除。以氯乙烯為例，其氧化反應方程式如下：



然而電解水的過程中會產生析氫及析氧反應，因此曝氣作用亦會對氯乙烯的移除產生貢獻。藉由實驗室質量平衡實驗，可釐清氯乙烯的移除機制係以電解氧化破壞反應或電解曝氣作用為主。

1. 實驗室質量平衡實驗

本研究使用氯乙烯標準品配製污染物溶液，於密閉反應器中進行電解實驗，分析反應器頂空氣體成分組成、溶液中反應前後反應物與產物濃度，進行質量平衡計算。頂空氣體氯乙烯質量佔 1.7%，氯離子生成佔氯乙烯質量 92%，其他歸屬實驗分析誤差約 6.3%，如圖 5.35 所示。因此，電解整治工法應用於氯乙烯的移除仍以電解氧化破壞機制為主。

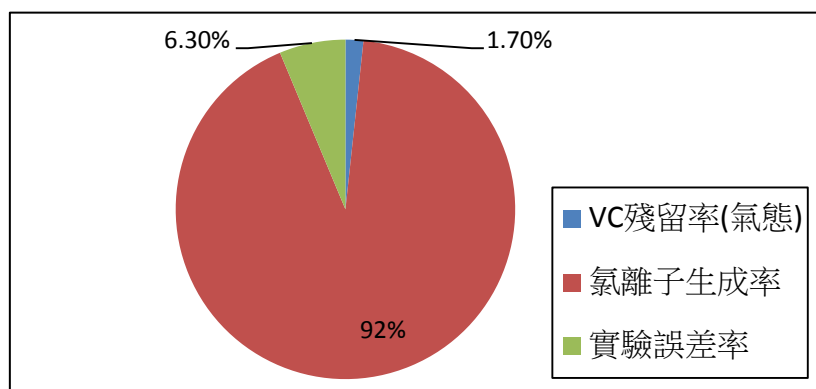


圖 5.35 氯乙烯電解實驗之質量平衡圖

2. 現地模場試驗土壤氣體成分分析

現地模場試驗無法進行質量平衡實驗，因此藉由土壤氣體成分分析，確認整治井是否有氯乙烯氣體逸散，電解氧化破壞氯乙烯是否有



第五章 結果與討論

CO₂ 氣體產出。於模場試驗場址以 CO₂ 直讀儀及 TVOC 直讀儀測定 C207S 監測井、整治井、成效監測井、C208S 監測井之井口上方周界空氣濃度，另以採氣幫浦抽取監測井內土壤氣體進行 CO₂ 及 TVOC 濃度。

C207S 監測井、整治井、成效監測井、C208S 監測井之土壤氣體 TVOC 濃度峰值分別為 12.6 ppm、0.4 ppm、0.4 ppm、0.5 ppm，4 口井上方周界空氣 TVOC 濃度皆未檢出。上游 C207S 監測井因氯乙烯濃度較高，測得較高之土壤氣體 TVOC 濃度應屬合理。整治井土壤氣體 TVOC 濃度甚低，因電解曝氣作用移除氯乙烯的貢獻不高所致，因此電解整治工法應用亦不需額外裝設尾氣處理設備。

C207S 監測井、整治井、成效監測井、C208S 監測井之土壤氣體 CO₂ 濃度峰值分別為 550 ppm、> 6,000 ppm、830 ppm、525 ppm，皆高於各井上方周界空氣 CO₂ 濃度 382 ppm、467 ppm、521 ppm、382 ppm。圖 5.36 呈現場址監測井土壤氣體 CO₂ 濃度分布垂直剖面圖，整治井土壤氣體 CO₂ 濃度破錶，提供電解整治工法係以電解氧化破壞反應為主要機制之有利佐證。

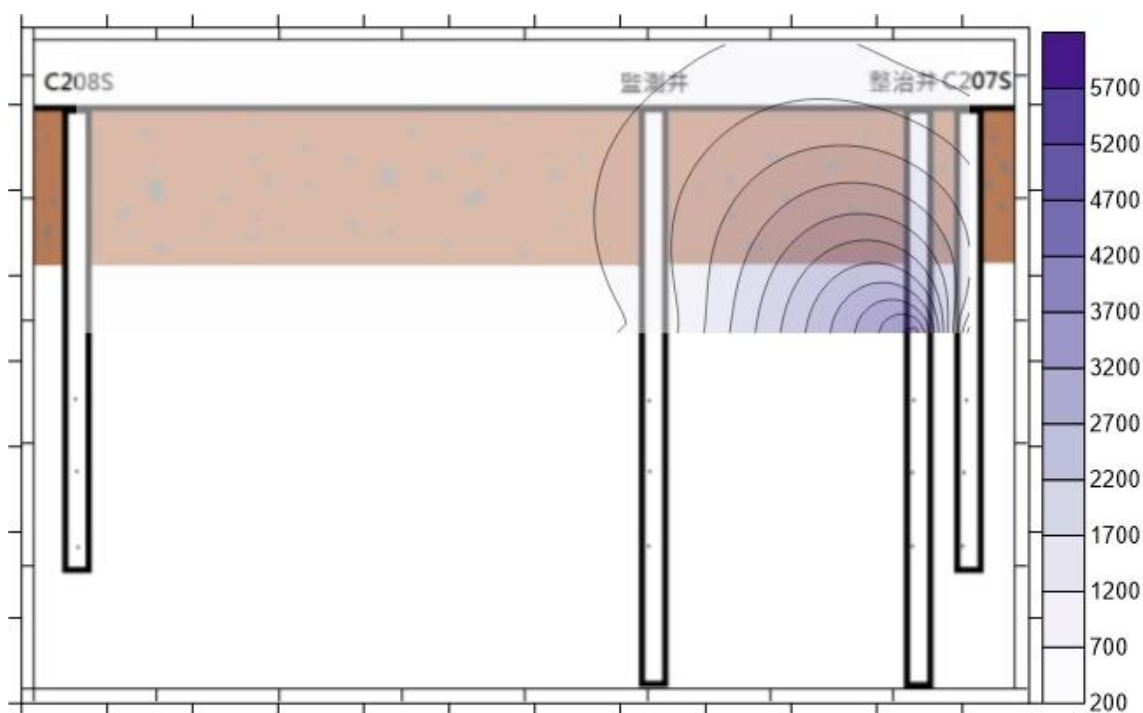


圖 5.36 場址監測井土壤氣體 CO₂ 濃度分布垂直剖面圖



5.3.2 電解整治工法之應用限制

電解整治工法之應用係利用電解反應機制，因此需有電解質存在，方有利於溶液中電子傳遞。天然地下水含有各種離子，可作為電解質使用，不須額外添加電解質。若以導電度作為指標，地下水導電度大於 $500 \mu\text{S}/\text{cm}$ ，即可直接應用電解整治工法。對於 NAPL 純相是無法電解的，只能針對 NAPL 溶液進行電解，先前測試 50 mg/L 三氯乙烯污染地下水亦能於 6 小時內順利降解。

天然地下水含有各種離子，亦會參與電解反應，如 Ca^{2+} 、 Fe^{3+} 等陽離子亦於電極表面形成被覆物，正常操作情況無法避免，定期進行電極維護保養是必要的。一般使用酸液可造成被覆物自電極表面脫落，並配合電極反轉電解將金屬沉澱物剝離。因此，電解整治工法應用宜避免地下水鐵離子濃度過高，造成電極表面被覆而損失活性。

電解整治工法之應用需仰賴地下水流將污染物傳輸至整治井，參與電解氧化反應，因此地下水流況佳亦為必要的條件，數個試驗場址水力傳導係數皆在 $1 \times 10^{-4} \text{ cm/sec}$ 以上。若無法藉由地下水流傳輸污染物至整治井，則須配合抽水機制，如結合水力循環井將污染物抽引至整治井進行氧化破壞。本研究並未規劃 ROI 試驗，但以成效監測井與整治井的距離為 5 m，仍具整治成效，因此本場址整治井的影響範圍可達 5 m。

現地電解整治技術應用於實場整治，設計規畫仍宜依循本研究架構流程。首先進行地下水原水電解測試，獲得可運作之電解條件，現場整治井設置須依據污染調查評估結果判定，整治系統之安裝與運轉則可本研究之執行方式。現地整治系統操作之主要影響因子為電壓與電解質，利用地下水中離子充當電解質，地下水電導度約 $600 \mu\text{S}/\text{cm}$ 以上即可操作。本系統使用的電極於操作電壓 3.0 V 以上，即可產生 OH 自由基將污染物氧化破壞。然因污染物需經由地下水傳輸至整治井，地下水流通性不可太差，場址若屬砂土質地，K 值約 $1 \times 10^{-5} \text{ cm/sec}$ 以上之條件，較符合現地電解整治工法之應用。電極於整治井中置放深度，視場址污染物分布深度而定，若不清楚應執行多深度採樣。針對污染物 rebound 為地下水污染的特有現象，DNAPLs 污染物更為明顯，污染物濃度 rebound 與場址水文地質特徵有密切關連性，整治實場操作可藉由監測結果，判定污染物 rebound 的優勢路徑，適時調整整治井中電極的置



放位置與深度。現地電解整治系統操作過程中，電極積垢和生物膜生成乃自然現象，於定期採樣時透過噴氣清理被覆物，與電極反轉方式進行電極維護保養，皆可清理大部分的電極積垢和生物膜，維護保養後測試電流效率皆可回復，建議電極維護保養的頻率為 2 週，以確保電極之正常功能。

5.3.3 電解整治工法之經濟效益評析

電解整治工法因使用白金電極，初設成本較高，惟運作成本僅需電力費用，以 DNAPLs 污染場址為例，地下水污染整治期程長達 10 年，操作成本的高低至為關鍵。若結合太陽能發電，電解整治工法幾乎沒有操作費用，僅維護保養的耗材需求。

太陽能發電受天候及日照強度影響，日發電量的歷時變化趨勢與日照強度變化呈一致性，以上午 9 點至下午 2 點之間為發電高峰。太陽能發電提供直流電力，但一般發電量並不穩定，無法直接做為供電電源，因此需將電量儲存於 80AH/12V 蓄電池，方可提供較穩定且持續之電壓。以先前實場測試案例經驗，晴天測試之太陽能日發電量最高達 594.53W，發電高峰時段電壓約 17 伏特、電流約 3 安培；陰雨天測試之太陽能日發電量最高僅 184.06W，發電高峰時段電壓約 17 伏特、電流約 2 安培，但相當不穩定。

本研究採用 24 小時連續操作並定電壓 3V 進行實驗，在系統耗電量的情形，也分別選取 1 天晴天及 1 天陰天，進行數據分析。在晴天及陰天狀況下，耗電量均呈現一致性，耗電量均介於 0.8Wh 之間，一日耗電量均約 20W。本研究太陽能電解系統蓄電池在平日日照充足時，除需滿足供電解系統負載端輸出需求外，更需預留在陰天、雨天發電量不足及夜晚無發電時，可足夠供應電解系統之用電，以避免產生停電情況。故本系統蓄電池為 12V/80AH 電量，本系統於最低日照度月份其日發電量最低可達 184W，足以供電解系統每日 20W 之用電需求，且蓄電池設置容量為 12V/80AH，也可滿足陰天、雨天及夜間完全無發電狀態，所需之用電。

針對操作成本分析比較，尚未進行市場詢價，且場址條件互異，無法提供具體數字。以概念性說明，現地電解整治技術除初設成本較高，而營運成本僅有電費與電極維護費用，若使用太陽能綠色電力，則僅需定期維護的



現地電解整治受氯乙烯污染地下水之模場試驗

人事費用，可併同定期監測進行電極維護，因此長期操作費用與監測式自然衰減法相近，於整治工法中屬於低成本的整治技術。



第六章 結論與建議

6.1 結論

期末報告實際執行進度已全數達成本計畫查核點進度要求，研究內容包含實驗室電解試驗及現地模場試驗兩部分，實驗室電解試驗係以密閉式反應器進行批次實驗，測試電解電壓的操作範圍，確認可運作之電解質條件，以提供整治井最佳操作條件。現地模場試驗係組裝太陽能供電系統與現地電解整治系統，展現現地電解整治工法的效能。

實驗室電解實驗，比對電解曝氣試驗操作電壓 1.5 V 與電解氧化破壞試驗操作電壓 3.0 V 之氯乙烯移除效果，曝氣作用之移除貢獻計算約佔整體氯乙烯移除效率之 25.1%至 39.7%。場址地下水氯乙烯污染樣品，於未添加電解質的條件下，可順利電解氧化破壞，適合使用現地電解整治工法。現地電解整治系統採定電壓操作方式，最佳電解條件採用操作電壓 3.0 V，移除效率最佳達 100%，擬一階反應速率常數為 0.041 min^{-1} 。

現地模場試驗完成單井流速流向測定、鑽設 1 口簡易井(整治井)、鑽設 1 口標準井(背景監測井)、現地電解整治設備製作與系統安裝等工作，現地電解整治系統啟動後，整治井氯乙烯濃度迅速降至地下水管制標準以下(ND 值)；成效監測井氯乙烯濃度略有上下浮動，電解整治系統持續操作約 1 個月，氯乙烯濃度亦降至地下水管制標準以下(ND 值)。整治歷程中出現污染物 rebound 現象，大多發生於場址外 C208S 監測井位置，持續現地電解整治系統操作，歷經 4 個月之整治期程，呈現場址區域地下水無污染情況，已顯現地地下水整治的具體成效。第二階段污染物 rebound 試驗，約 1 個月上游監測井回升至整治前場址地下水氯乙烯背景濃度，再次啟動電解整治系統操作。第三階段污染物 rebound 後再次電解整治試驗，污染物 rebound 後歷經 2 個月現地電解整治期間，上游 C207S 監測井氯乙烯濃度已有改善，模場試驗區域再次呈現地下水無污染情況。至於場址周界之下游 C208S 監測井氯乙烯濃度仍維持在場址背景濃度左右，顯示整治井的影響範圍無法擴及下游 30 公尺外的場址周界。



現地電解整治受氯乙烯污染地下水之模場試驗

現地模場試驗土壤氣體成分分析發現，整治井土壤氣體 TVOC 濃度甚低，因電解曝氣作用移除氯乙烯的貢獻不高所致，因此電解整治工法應用亦不需額外裝設尾氣處理設備。整治井土壤氣體 CO_2 濃度破錶，提供電解整治工法係以電解氧化破壞反應為主要機制之有利佐證。

6.2 建議

因場址地下水富含礦物質成分，井中電極操作運轉過程發現積垢及生物膜生成嚴重，因而降低電解效率。針對電極清洗後剝落下來之積垢，利用場放射型掃描式電子顯微鏡進行元素分析，確認電極被覆之積垢成分為氫氧化鈣，水解後溶液 pH 介於 9.31~9.76。一般使用酸液可造成被覆物自電極表面脫落，配合定期地下水採樣作業，每周進行電極積垢及生物膜清理，並配合電極反轉電解可將金屬沉澱物剝離。



第七章 參考文獻

- 行政院環保署。2008。土壤及地下水受比水重非水相液體污染場址整治技術選取、系統設計要點與注意事項參考手冊。台北。
- 行政院環保署。2008。土壤及地下水受比水重非水相液體污染場址之初步篩試調查、查證及驗證作業技術參考手冊。台北。
- 吳庭年、林宗志、陳志豪，“利用電解氧化去除水中納乃得”，第二十九屆廢水處理技術研討會論文集(光碟版)，WW-B-02-09，2004。
- 林宗志，“電化學氧化技術應用於水中 MTBE 之去除”，碩士論文，崑山科技大學環境工程系，(2005)。
- Air Force Center for Engineering and the Environment (AFCEE), (2007) AFCEE Source Zone Initiative, Contributing Authors – T. Sale, B. Twitchell, F. Marinelli, Colorado State University, - T. Illangasekare, B. Wilking, and D. Rodriguez, Colorado School of Mines, Final Submitted to AFCEE September 2007
- Arienzo M., Chiarenzelli J., Scrudato R., Pagano J., Fallanga L. and Connor B., “Iron-Mediated Reactions of Polychlorinated Biphenyls in Electrochemical Peroxidation (ECP)”, *Chemosphere*, Vol. 44, 2001, pp.1339-1346.
- Azzam, M.O., Al-Tarazi, M., Tahboub, Y. (2000) “Anodic destruction of 4-chlorophenol solution”, *Journal of Hazardous Materials*, B75, 99-113.
- Chapman, S.W. and Parker, B.L., (2005) Plume Persistence Due to Aquitard Back Diffusion Following Dense Nonaqueous Phase Liquid Removal or Isolation, *Water Resource Research*, Vol. 41, No. 12.
- Chiang, L. C., Chang, J. E., and Wen, T. C., (1995) Indirect oxidation effect in electrochemical oxidation treatment of landfill leachate”, *Water Research.*, 29, 671-678.
- Henry, S.M., Hardcastle, C.H., Warner, S.D. (2002) Chlorinated Solvent and DNAPL Remediation: An Overview of Physical, Chemical, and Biological Processes. American Chemical Society, Washington, DC.
- Morrison, R.D., Murphy, B. L., Doherty, R. E. Chlorinated Solvents., in *Environmental Forensics. Contaminant Specific Guide*, ed. R.D. Morrison, and B. L. Murphy, Elsevier Academic Press, 2006.



現地電解整治受氯乙烯污染地下水之模場試驗

- Naumczyk, J., Szpyrkowicz, L., Zilio-Grandi, F. (1996) Electrochemical treatment of textile wastewater, *Water Science and Technology*, 34 , 17-24.
- Palmer, C.J., Johnson, R.L. (1989) *Physucal Processes Controlling the Transport of Non-aqueous Phase Liquids in the Subsurface*. Seminar Publication: Transport and Fate of contaminants in the Subsurface. EPA/625/4-89/019 23-28. United States Enviromental Protection Agency. USA.
- Sale, T., Newell, C., Stroo, H., Hinchee, R., and Johonson, P. (2008) Frequently Asked Questions Regarding Management of Chlorinated Solvents in Soils and Groundwater . ESTCP.
- Wu, T.N. (2010) “Electrochemical removal of pentachlorophenol in a lab-scale platinum electrolyzer.” *Water Science & Technology*, 62(10), 2313-2320.
- Wu, T.N. (2011) “Electrochemical removal of MTBE from water using the iridium dioxide coated electrode”, *Separation and Purification Technology*, 79(2), 216-220.
- Wu, T.N.; Pan, T.C.; Chen, L.C. (2012) “Electrophotocatalysis of aqueous methyl tert-butyl ether on a titanium dioxide coated electrode”, *Electrochimica Acta*, 86, 170-176.
- Wu, T.N.; Chen, L.N.; Pan, S.C. (2014) “Electrochemical Removal of TCE from Contaminated Groundwater by Using Solar Energy”, *The 7th Annual Conference on the Challenges on Environmental Science and Engineering (CESE 2014)*, Johor Bahru, Malaysia, Octorber 12-16, 2014, paper no. ADVI_15.
- Wu, T.N.; Yu, C.L.; Chen, L.N. (2015) “In-situ Electrolysis of TCE Contaminated Groundwater by Using Solar Energy”, *International Conference on Challenges in Environmental Science & Engineering (CESE 2015)*, Sydney, Australia, September 28 - Octorber 2, 2015, paper no. 3-050.