



行政院環境保護署

108 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

結合電化學氧化處理與現地即時分析 技術於油品污染場址整治之可行性評估 期末報告(定稿)

主 辦 單 位



行政院環境保護署

專案執行單位

國立屏東科技大學／環境工程與科學系所

專案主持人

趙浩然 教授、黃國林 教授

專案執行期間

108 年 01 月 04 起至

108 年 11 月 30 日止

中 華 民 國 108 年 12 月 印製





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	108 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： 趙浩然 NO：B4
計畫名稱	結合電化學氧化處理與現地即時分析技術於油品污染場址整治之可行性評估		
委員審查意見		計畫單位回覆	
委員一		1.1. Ans:感謝委員指導。	
1. 本期末報告對計畫執行現況、流程及方法說明具體。		1.2. Ans:感謝委員指導。	
2. 計畫後續執行工作項目及內容已於 p.97 說明。		1.3. Ans:感謝委員指導。	
3. 計畫執行進度與預定進度查核表大致相符。		1.4. Ans:感謝委員指導。因污染場址周圍環境無完整電力設備，且摻硼鑽石電極處理尚在開發階段，因此今年計畫目標以現地即時分析為主，本研究執行進度符合預期。	
4. 本期末報告並未說明執行進度是否落後，也未說明計畫執行期間的困難點。		1.5. Ans:感謝委員指導。計畫主要為探討即時分析技術之可行性，並於期中報告以前，測量電高級氧化處理找出最佳之電流密度與電解質條件，利用最佳參數條件處理污染場址，最後利用三種生物法判斷現地污染狀況及改善狀況。	
5. 本期末報告所提出的研究內容與計畫目的的相符程度建議說明。		1.6. Ans: 感謝委員指導。本計畫目標可分為兩個面向:其一為即時分析技術，並探討此系統應用於油品污染場址地下水整治之可行性。另一為摻硼鑽石電極處理程序及生物毒性篩檢技術於受染地下水整治可行性研究。透過研究可確認即時分析技術及電高級氧化程序的可應用性。	
6. 根據研究內容所提出之討論與建議的可行性與應用性的說明，建議應更具體，以期具參考意義。本計畫的確切研究目標為何？如何應用本研究成果？建議說明。		1.7. Ans:感謝委員的提問。本計畫執行之研究人員皆為實驗室之研究生及研究助理，其該計畫之運行及實驗之執行為計畫主持人負協同監督及改善之責。	
7. 本計畫執行是否有研究人員(學生或助理)參與建議說明。		1.8. Ans:感謝委員指導。計畫除了期末報告外，關於新穎整治地下水技術之研究成	
8. 本計畫的學術產出為：本期末報告與研討會論文。			
9. 本計畫執行期間是否有研究人員(學生或助理)參與？在人才培育方面是否符合預期？建議說明。			
10. 本期末報告並未對研究成果提出專利申請說明，也未說明技術轉移的情況。			
11. 本計畫的執行與研究成果對土水污染整治的政策，以及對社會經濟發展的			



結合電化學氧化處理與現地即時分析
技術於油品污染場址整治之可行性評估

<p>效益，不易由本報告中評估。</p> <p>12. 由本報告中不易理解報告內容以及本研究的研究成果與「結合電化學氧化處理與現地即時分析技術於油品污染場址整治之可行性評估」之間的關係。</p>	<p>果，目前已投稿至 SCI 期刊中 (Environmental Monitoring and Assessment, IF=1.959)，目前進入 under review 之階段。</p> <p>1.9. Ans: 感謝委員指導。本計畫共有三位碩士級研究生負責，執行過程中學生可學習到水體採樣、偵測及處理技術，最後蒐集相關研究論文選讀及數據分析。在人才培育方面符合當初設定目標。</p> <p>1.10. Ans: 感謝委員指導。本研究中關於即時分析系統以及摻硼鑽石電高級氧化處理程序，目前尚在發展階段，因此尚未對研究成果提出專利說明。</p> <p>1.11. Ans: 感謝委員指導。本計畫主要目的為利用電化學降解油品污染之樣本，探討該技術用於地下水樣本整治之可行性。本次期末報告研究成果說明進行電解試驗及添加不同電解質，使污染物的去除效率有顯著提升，配合現地即時分析技術，可評估其去除效率，顯示該技術為可行之整治方法，與原計畫目的相符。</p> <p>1.12. Ans:</p>
<p>委員二</p> <p>1. 表格式不一；各井或各樣品編號之關聯性或代表性為何，似乎未加以說明；實驗進行之水樣是採混樣或分別進行，請說明原因，p.46 之陳述宜有較具邏輯性之陳述說明；5-2 節每段落開頭陳述皆將實驗條件陳述，其不斷重複。報告撰寫之內容及格式宜多加以著墨。</p> <p>2. 溫度變化之數據宜提出加以佐證，所獲得之污染物去除效果非主要由揮發所造成。</p> <p>3. 請說明 TOC 分析儀之資訊，並說明此儀器是否可用以分析 VOC 之 TOC。其他分析儀器或實驗設備，亦請提供相關儀器型號等資訊。</p> <p>4. 本計畫中文名稱與英文名稱不符，英</p>	<p>2.1. Ans: 感謝委員指導。(1)本團隊已將各井或各樣品編號之關聯性之資訊補充於期末報告 (page: 40 "5-1-1 採樣場址及編號.....分別進行之水樣") 中。(2)由於 p.46 及 5-2 節的部分為操作實驗參數，不同實驗水樣皆有不同之實驗參數，故敘述較為繁雜，已將文中不同操作參數條件分項，配合參考表 5-9 較易理解該說明。</p> <p>2.2. Ans: 感謝委員指導。由於溫度變化主要為影響試驗進行以及儀器耗損，而其去除效果皆可由 TOC 數據及 BTEX 數據來佐證其去除效率之可信性。</p> <p>2.3. Ans: 感謝委員指導。本團隊已將 TOC 分析儀之資訊補充於期末報告 (page: 24 "4-4-2 總有機碳分析儀(TOC).....如圖 4-4 所示")。而該儀器無法分析不溶於水之 VOC 其 TOC，故本團隊是將試驗</p>



<p>文名稱較符合此計畫之研究內容。此計畫標的為處理地下水，而非以處理油品污染土壤，應於摘要中敘明此計畫處理地下水為主要目標。此外，本計畫之成果似乎是以抽出之地下水進行地表上之電化學高級氧化處理，應在討論章節或結論章節說明關於計畫名稱「現地」做法之關聯性。</p> <p>5. 此計畫非為現地處理技術，而是抽出地下水處理，因此針對審查意見回覆對於電解質或飽和/未飽和層之應用答覆，似未針對問題答覆。</p> <p>6. 結論與建議應分開撰寫。</p> <p>7. 此計畫補助之最終目標為提供實務應用上之技術，請明確於結論中說明此計畫之成果，並且針對研究成果與污染整治工程實務應用關聯進行說明或提出規劃建議。</p> <p>8. 績效自評表中發表之研討會論文與本計畫無關。</p> <p>9. 未有工作進度甘特圖。</p>	<p>之水樣委外進行 BTEX 分析來確認其 VOC 數值。</p> <p>2.4. Ans:感謝委員指導。已修正內文摘要處裡目標。原先計畫提案設定為污染場址即時偵測技術應用，且實地執行時，污染場周圍並無完整電力供給設備，因此僅能針對各污染場址進行現地即時分析。</p> <p>2.5. Ans: 感謝委員指導。今年計畫目標僅利用即時分析技術進行現地污染場址監測評估，並非現地處理技術，但未來若摻硼鑽石電化學氧化法開發完成，即可一併進行污染場址整治之研究。</p> <p>2.6. Ans: 感謝委員指導。已修正內文將結論與建議分開，煩請參閱紙本內文 P.101。</p> <p>2.7. Ans:感謝委員指導。本研究可分為兩個面向探討:其一為即時分析技術(MiTAP UTLD)之應用，可於現地自動連續監測並即時產生分析結果，能針對個別揮發性有機化合物（VOC）進行全定性及定量分析，但目前 MiTAP UTLD 能處於開發測試階段，需透過不同地下水監測，以確認其準確性；第二面向為摻硼鑽石電化學氧化法及生物毒性篩檢技術於受染地下水整治可行性研究。</p> <p>2.8. Ans:感謝委員指導。關於所發表之研討會，於內容中有使用相同即時監測及生物法應用於不同種介質，另外本研究已有投稿至 Environmental Monitoring and Assessment 期刊中(IF=1.959)，目前進入 under review 之階段。</p> <p>2.9. Ans:感謝委員指導。工作進度甘特圖以補充至內文 P.102。</p>
<p>委員三</p> <p>1. 期末報告應條列本計畫不同階段之審查意見，以及回覆辦理情形，以供計畫執行成效追蹤之參考。</p> <p>2. 請具體彙整與說明電化學試驗之成</p>	<p>3.1. Ans:感謝委員指導。本團隊會將其審查意見回覆於期末定稿中附上。</p> <p>3.2. Ans:感謝委員指導。本團隊在各場址的電化學試驗中，大多為不同之操作參數，在其 TOC 及 BTEX 的部分皆有做比</p>



結合電化學氧化處理與現地即時分析
技術於油品污染場址整治之可行性評估

<p>果，其中四季採樣水質之變化結果，尤其是不同場址之試驗，應有比較與歸納，以利技術應用之參考。</p> <p>3. 報告書內容及數據豐富，然報告書撰寫方式不易閱讀，例如 P.54~P.60，段落之文字冗長，未於適當處分段說明重點，請予以全面檢視後修正。</p> <p>4. 氯乙烯電解後之濃度變化，除以 TOC 表示外，是否針對不同之代謝或中間產物進行分析與檢討？</p> <p>5. 跟據 MTT bioassay 檢測結果，細胞存活率增加，然對於後續健康風險評估而言，如何進一步詮釋與評估？建議應有具體之說明。</p>	<p>較，其結果皆能將水樣中之污染物有效的去除。</p> <p>3.3. Ans:感謝委員指導。由於在 P.54~P.60 處，皆為不同水樣之 BTEX 分析數據，棋分析項目較多，其數值皆不同，故只能細項說明，本團隊會將其適當分段後再由期末報告之定稿中更正。</p> <p>3.4. Ans:感謝委員指導。研究並未針對衍生物進行分析，僅利用生物法評估電化學處理前後差異，在綜合毒性探討中(MTT Bioassay)處理後之水樣，其細胞存活率皆有明顯上升，顯示出電化學氧化能有效降解為低毒性或無毒性之中間產物。</p> <p>3.5. Ans:感謝委員指導。本研究中 MTT bioassay 用於評估電化學氧化法處理前後細胞毒性實驗，其結果顯示，透過電化學實驗可使地下水中大分子污染物降解成小分子，而使電化學處理後細胞存活率皆有明顯上升，因此，當毒性降低時，其暴露量的危害影響也相對減少。</p>
<p>委員四</p> <p>1. 本計畫結合電高級氧化技術與快速分析技術、以及毒性分析實驗，探討地下水中油品污染處理之可行性。研究內容包括地下水水質分析、氧化實驗、分析技術測試、以及毒性實驗。整體而言，實驗內容豐富。</p> <p>2. 本計畫其實分成兩種技術，即水處理技術、以及偵測技術，建議後續可以考慮個別討論。另，所測試之檢測技術，其實應該只是近即時，而非即時，建議後續發表文章時，適度修正。</p> <p>3. 後續若進行研究時，建議應考慮其應用性評估，例如電力及成本，以及處理時間(反應槽體積)，並與一般傳統高級氧化方法比較，以確認後續開發之價值。</p>	<p>4.1. Ans:感謝委員誇獎。</p> <p>4.2. Ans:感謝委員指導。在後續發表文章時會檢討及修正。</p> <p>4.3. Ans:感謝委員指導。在未來進行研究時，會將其可行性之評估及成本效益考量進去，以利確認後續開發之價值。</p>
<p>委員五</p>	<p>5.1. Ans:感謝委員的肯定。</p>



1. 整體而言，期末報告進度符合預期且報告內容成果豐碩。	5.2.Ans:感謝委員指導。生物分析方法由於需依靠檢量線進行公式配適後換算樣本濃度，因此本實驗在進行前需先依照實驗需求配製對應濃度之檢量線，當標準品濃度小於 100 pM 時使用理性模式(Rational Model)進行配適，根據最小平方最適迴歸法則 (Least-squares best-fit) 找出最符合小於 100 pM 的標準品檢量線。
2. 研究中所開發之生物快篩平台是否有針對不同污染物建立其與污染物濃度之檢量線關係？其相關性與濃度範圍為何？	
3. 98 頁結論 14 提到致癌性提升可能是電化學所釋放之自由基所導致，此結論是否說明本研究所建立之生物快篩平台仍有許多困難點需要克服？	5.3.Ans:感謝委員指導。本次利用 P53 bioassay 致癌性研究所測得電化學實驗前後樣品，發現致癌性提升現象，但兩者利用成對樣本 t 檢定後發現兩者濃度並無差異。因此推測出當樣品經由電化學後，可能產生部分衍生物，但本研究僅為評估經化學處理前後，其生物毒性影響，尚無法鑑定是甚麼二次產物導致致癌性提升





行政院環境保護署土壤及地下水污染整治基金管理會
108 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

構想書審查意見表

專案類型	<input checked="" type="checkbox"/> 研究型 <input type="checkbox"/> 模場型	申請經費	1,500,000	NO : 25
專案主持人	趙浩然 教授	專案主題	<input checked="" type="checkbox"/> 整治 <input type="checkbox"/> 調查 <input type="checkbox"/> 其它	
服務單位	國立屏東科技大學 環境工程與科學系所			
專案名稱	結合電化學氧化處理與現地即時分析技術於油品污染場址整治之可行性評估			

委員一：

1. 現地即時分析技術與現有商業化產品之優勢請說明。
2. 宜說明本年計畫與去年計畫之關聯性。

委員二：

1. 請補充說明即時分析技術。
2. 請補充說明電化學處理成果和生物毒性的關聯性。

委員三：

1. 電化學發展為本土即時監控設備與公告方法比對(校正)宜具體規劃？
2. 本研究若運用於油品污染場址之瓶頸宜評估。

委員四：

1. 此為延續性計畫。
2. 計畫主持人主持類似計畫已有成果。
3. 本計畫與既有成果之間的關係待釐清。類似計畫的實務應用性建議討論(已執行土污基金計畫)(尤其是如何應用本研究成果?)。
4. 計畫書中說明:“...本次研究擬發展一套可應用於油品污染場址之整治系統,將透過電化學氧化處理與即時分析技術評估其整治成效與數據準確性,後續藉由動物與離體實驗評估處理後之水樣對環境與人體之健康風險...”,建議說明本計畫所設定的整治方式是 in situ、off site 或 on site,以利評估”... 處理後之水樣對環境與人體之健康風險...”是何種暴露途徑所致？

委員五：

1. 歷年計畫與本計畫相關性及差異性為何？
2. 請補充檢測毒性與土壤及地下水污染物濃度之關連性。



結合電化學氧化處理與現地即時分析
技術於油品污染場址整治之可行性評估



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	108 年度	計畫類型	■研究計畫 □模場試驗
計畫類別	□調查■整治□其他	主持人：趙浩然 NO：25	
計畫名稱	結合電化學氧化處理與現地即時分析技術於油品污染場址整治之可行性評估		
委員審查意見		計畫單位回覆	
委員一：			
1.1 現地即時分析技術與現有商業化產品之優勢請說明。		1.1Ans: 感謝委員的意見。本次計畫擬採用之現地即時分析技術為微型氣相層析儀(MiTAP-UTLD)，其技術原理、數據準確度及與台灣現有商業化產品之優勢等敘述已新增至提案計畫書 page10-11“ <u>即時偵測為環境……可明確分辨出苯類污染物是否超過管制標準且其結果與實驗室檢測數據一致</u> ”	
1.2 宜說明本年計畫與去年計畫之關聯性。		1.2Ans: 感謝委員的意見。本年度計畫為 107 年度之延續性計畫，以 107 年度結果為基礎，進行初步模場評估測試。將本團隊所開發之 BDD 電極於現地進行放大，並找出應用於現地整治最佳之電流密度與電解質條件。此外，本年度計畫也將導入地下水即時分析技術，後續透過化學分析法比對即時分析技術之準確性，探討此系統應用於油品污染場址地下水整治之可行性。	
委員二：			
2.1 請補充說明即時分析技術。		2.1Ans: 感謝委員的意見。即時分析技術為環境檢測揮發性有機化合物相當重要之技術。本團隊已將此技術之說明，包含應用於污染監測之現況新增於提案計畫書 page10-11“ <u>3-3-2 即時偵測工具於污染監測之應用</u> ”章節中。	
2.2 請補充說明電化學處理成果和生物毒性的關聯性。		2.2Ans: 感謝委員指導，生物毒性分析法將可做為評估整治效益與生態風險之依據，快速	



結合電化學氧化處理與現地即時分析
技術於油品污染場址整治之可行性評估

	<p>確認其毒性是否為目標化合物或降解中間產物所貢獻。相關之說明已新增至提案計畫書中(page: 13-14 “降解中間產物為地下水整治技術需審慎考慮之因素，.....將可於整治後快速決策經處理之地下水樣是否適合補注回現地場址中”。</p>
<p>委員三：</p>	
<p>3.1 電化學發展為本土即時監控設備與公告方法比對(校正)宜具體規劃？</p>	<p>3.1Ans:感謝委員指導。本次研究中之電化學高級氧化法，係運用於污染場址地下水中污染物之降解試驗；而本土即時監控設備與公告方法比對(校正)將參照 NIEA W785.55B 進行定義，已將此段說明新增至提案計畫書中(page: 23 “<u>相關之 QA/QC 規範將參照 NIEA W785.55B 進行定義.....應在 60%至 140% 範圍之間；即時偵測不需進行</u>”)。</p>
<p>3.2 本研究若運用於油品污染場址之瓶頸宜評估。</p>	<p>3.2Ans: 感謝委員的指導。運用於油品污染場址之瓶頸，目前本研究所使用的處理技術僅能將地下水抽出地面進行電化學降解，處理後再進行補注。以目前技術仍無法架設於監測水井中直接進行高級氧化處理。另外，本計畫需要大量的電力(電化學法與即時偵測系統均須 110V 的電源)，現場如果電力缺乏時，則需攜帶柴油發電機。界面活性劑使用將影響電導度，本年度計畫將評估使用離子溶液如硫酸或硝酸等增加其導電度。</p>
<p>委員四：</p>	
<p>4.1 此為延續性計畫。</p>	
<p>4.2 計畫主持人主持類似計畫已有成果。</p>	<p>4.1Ans: 感謝委員的意見。本年度計畫為 107 年度計畫之延續，請見審查意見 1.2 之回覆。</p>
<p>4.3 本計畫與既有成果之間的關係待釐清。類似計畫的實務應用性建議討論(已執行土污基金計畫)(尤其是如何應用本研究成果?)。</p>	<p>4.2Ans: 感謝委員的意見。</p>
	<p>4.3 Ans: 感謝委員的指導。本團隊於 107 年度計畫開發本土化 BDD 電極，除了可大幅度降低成本，降解效益亦可比擬國外公司所生產</p>



之電極。預計於 108 年度計畫找出應用於現地整治最佳之電流密度與電解質條件搭配本團隊開發之電極，克服前年度不利電降解實驗操作之因素。並於第二階段將此整治方法移至現場操作，評估其處理受油品污染地下水之成效。

4.4 計畫書中說明：“…本次研究擬發展一套可應用於油品污染場址之整治系統，將透過電化學氧化處理與即時分析技術評估其整治成效與數據準確性，後續藉由動物與離體實驗評估處理後之水樣對環境與人體之健康風險…”建議說明本計畫所設定的整治方式是 in situ、off site 或 on site，以利評估” … 處理後之水樣對環境與人體之健康風險…”是何種暴露途徑所致？

4.4 Ans: 感謝委員的指導。於 107 年度計畫中，電化學試驗結果，對於地下水中 BTEX 與 TPH 等油品污染物去除效率可達 90%以上，處理後之水樣符合地下水管制標準(趙浩然，2018)。在應用於現地污染處理前，尚須測試部分操作條件，以便日後可應用於模場試驗。本次研究中透過電化學試驗，進行重複試驗及參數測試(電流密度、電解質及電解時間)，找出適用於現地整治較佳之操作條件，探討此系統應用於油品污染場址地下水整治之可行性。本計畫進行處理後水樣毒性檢測，旨在使用細胞實驗評估其整治方法是否衍生二次污染增加毒性，進而可評估水樣對環境與人體之健康風險。其暴露途徑仍須待本計畫實驗結果，方能提出完整之論述。本計畫所設定的整治方式為 on site 整治。

委員五：

5.1 歷年計畫與本計畫相關性及差異性為何？

5.1 Ans: 感謝委員的指導。本年度計畫旨為結合電化學氧化處理與現地即時分析技術於油品污染場址整治之可行性評估，其中電化學氧化法將以 107 年補助計畫所開發之本土化 BDD 電極為基礎，更完整性的評估該系統於現地所需之參數條件(如：電流密度、電解質及電解時間)，並搭配秀麗線蟲及三種生物毒性分析法評估其毒性效應，其中三種生物毒性分析法為 106 及 107 年度補助計畫所建立。此外，本年度計畫導入即時偵測系統與動物實驗(秀麗線蟲生物平台)等概念，將可突破現地整治之瓶頸，除了可快速評估整治效益與生態風險外，亦可從不同面向提出整治

5.2 請補充檢測毒性與土壤及地下水污染物濃度之關連性。



結合電化學氧化處理與現地即時分析
技術於油品污染場址整治之可行性評估

決策建議。

5.2 Ans: 感謝委員的意見。因電化學氧化法為產生大量自由基降解污染物之原理，其所生成之自由基可能會對環境或生物體產生不利之影響。本研究主要針對電化學處理後之地下水樣本進行毒性評估，探討此處理方法是否衍生中間產物並產生毒性概況，已將此段討論新增至提案計畫書中(page: 13 “降解中間產物為地下水整治技術需審慎考慮之因素.....將可於整治後快速決策經處理之地下水樣是否適合補注回現地場址中”)。



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

☐期末報告

審查意見回覆對照表

計畫年度	108 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"/> 其他	主持人：趙浩然 教授	
計畫名稱	結合電化學氧化處理與現地即時分析技術於油品污染場址整治之可行性評估		
委員審查意見		計畫單位回覆	
<p>委員一：</p> <p>3. 建議多朝目前的土壤及地下水污染整治技術之結合或加值。</p> <p>4. 建議要解決未來在實場現地操作簡單、方便、穩定等條件。</p> <p>委員二：</p> <p>1. 請補充說明本案所開發之技術未來在現地處理時，如何控制電解質。</p> <p>2. 請補充說明電化學反應槽的尺寸。</p>		<p>1.1Ans:感謝委員的建議。本次專案擬使用即時分析技術結合電化學氧化處理法，透過化學分析法比對現地即時分析技術之準確性。以期開發一套可應用於油品污染場址之整治系統，未來於整治過程中可即時且準確判斷整治成效。</p> <p>1.2Ans:感謝委員的建議。本專案第二階段時擬將電化學處理系統移至現場環境進行試驗，因本計畫需要大量電力(電化學法與即時偵測技術)，若實場現地電力缺乏則需攜帶發電機。並考慮污染場址多使用界面活性劑整治，進而影響導電度，本團隊將評估使用離子溶液增加其導電度，提高實驗穩定性。並於後續報告提出此系統於現地操作之最佳條件。</p> <p>2.1Ans: 感謝委員的意見。未來在現地處理之前，本團隊將於實驗室進行電解質(硫酸或硫酸鈉)測試，以做為未來在現地處理時，進行現場測試之參考。</p>	



結合電化學氧化處理與現地即時分析
技術於油品污染場址整治之可行性評估

<p>3. 本年度擬進行部分現場整治實驗，但是計畫書對於相關工作的說明略為不足，請補充。</p>	<p>2.2Ans: 感謝委員的意見。反應槽尺寸預設能裝載反應水體為 1L 的反應槽，採批次試驗，後續接上即時監測系統進行現場監測。</p>
<p>4. 生物毒性分析的部分應在現場整治後進行，請修正甘特圖。</p>	<p>2.3Ans: 感謝委員的意見。本次研究共分為兩階段進行測試，第一階段將測試 5 批次受油品污染樣本送至實驗室進行電化學處理，找出較佳之電解參數(電流密度及電解質)並利用即時分析技術與傳統化學分析技術分析，比對兩者處理前、後之水樣數據；第二階段將以前述所得較佳之電解參數，進行現地污染場址測試，反應水體為 1L 採批次試驗另接上即時監測系統，透過批次抽水的方式，擬處理 3 批次地下水樣本，並利用即時分析技術與生物毒性評估快速了解該地污染之狀況。(以補充於 P15 頁第 4-1 節中第 9 行)。</p>
<p>委員三：</p> <p>3. 本研究已有過去執行基礎，宜對不同油品污染土壤，以評估現場可行電流、電解質條件，規劃相關試驗，方能強化本計畫之重點。</p> <p>4. 油品土壤對生態風險如何以本土生態作即時整治成效與風險參考，宜在試驗規劃或強化成果之說明。</p>	<p>2.4Ans:感謝委員的意見。本計畫分為兩階段，第一階段於實驗室進行電化學氧化處理法；第二階段於現場放大電化學試驗，後續皆會進行生物毒性分析(page:15，圖 4-1)。</p> <p>3.1Ans:感謝委員的意見。參考前年度研究結果，現地整治可能發生電流條件不佳、導電度低等情況增加試驗困難度。因此本</p>



5. 耗材費用編列偏高。

委員四：

1. 主持人的學術研究能力與土水污染技術發展能力均佳，其專業能力足以勝任本計畫。主持人近五年研究與土水污染技術發展績效亦佳。
2. 本計畫執行團隊的學術研究能力與土水污染技術發展能力佳，其研發能力足以勝任本研究計畫。本計畫執行團隊近五年執行與土水污染相關計畫的執行績效佳。
3. 本計畫的執行對國內未來土壤及地下水污染調查及整治工作推動有其貢獻，但工程實務應用的可行性仍待進一步評估。本專案的屬性為”補助研究與模場試驗專案”，本計畫為延續性計畫，建議執行團隊就既有的研究成果加以說明。回覆意見表中說明執行團隊已開發可與國外競爭的產品，建議具體說明（本計畫書中的說明不易理解）。
4. 依申請計畫書內所提出的成果績效自評表，可推估本專案所預估的執行成果對國內土水污染的技術研發有其貢獻。
5. 本計畫書撰寫具體，計畫書中對研究方法的說明具可行性。但計畫執行成果對未來土水污染的實場實務應用性仍待評估。電化學處理已有相關文獻可參考（含國內文獻與土污基金所執行的模廠專案），建議重新評估實驗設計。

研究今年度將針對此情況進行調整，如增加電解質提升導電度等。若成效優異，將可大幅提升實驗穩定度。

3.2Ans:感謝委員的意見。本團隊預計比較電化學整治受油品污染之地下水前、後之生物毒性，以做為評估整治效益與生態風險之依據。已將此部分說明補充於提案計畫書修正稿 page:15-16“本次研究擬發展一套可應用於油品污染場址之整治系……”
地下水樣是否適合補注回現地場址中”

3.3Ans:感謝委員的意見。已依照委員建議於提案計畫書修正稿中重新編列。

4.1Ans:感謝委員的肯定。

4.2Ans:感謝委員的肯定。

4.3 Ans: 感謝委員的意見。內文中敘述較模糊的部分已予以刪除。



6. 本計畫書中對相關文獻蒐集尚完整。計畫主持人對國內外本研究領域現況了解。

7. 本計畫書所規畫之執行期限合理，本計畫書對預期成果已有適當的說明。

8. 本計畫屬於延續性計畫。

9. 本計畫書已將原初審意見加以說明(或修正)。

4.4Ans:感謝委員的肯定。

4.5 Ans: 感謝委員的意見。國內已有學者在現地電解整治受氯乙烯污染地下水之模場試驗中，利用現地電解法((In Situ Electrolysis, ISE))進行受氯乙烯污染之地下水，該整治方法以電化學反應為基礎，雖然指出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(吳庭年，2016)，但所使用的電極為鈦鍍白金電極，其屬於不易產生氫氧自由基的活性電極(Madsen et al., 2014; Ridruejo et al., 2017)，處理效能較差。而本計畫則採用BDD非活性電極，易於迅速有效產生較多的氫氧自由基，處理效能明顯較佳。再者，鈦鍍白金電極容易積垢與易產生生物膜，導致初設之成本較高與維護頻率高(吳庭年，2016)。(於內文中第 10 頁 3-3-1-3 的 4 行~11 行)



	<p>4.6 Ans:感謝委員的肯定。</p> <p>4.7 Ans:感謝委員的意見。</p> <p>4.8 Ans:感謝委員的意見。</p> <p>4.9Ans:感謝委員的意見。</p>
本署審查意見	計畫單位回覆
行政管理費用超出編列說明標準，請修正。	感謝委員的意見，已於提案計畫書修正稿中更正。



結合電化學氧化處理與現地即時分析
技術於油品污染場址整治之可行性評估

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	108 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：趙浩然 NO：B4	
計畫名稱	結合電化學氧化處理與現地即時分析技術於油品污染場址整治之可行性評估		
委員審查意見		計畫單位回覆	
<p>委員一</p> <p>13. 研究計畫的執行現況、流程及方法已具體說明(Chap.4)。</p> <p>14. 計畫後續執行工作項目及內容已說明(P. 56)。</p> <p>15. 計畫執行進度與預定進度符合，執行進度並無延遲。</p> <p>16. 依期中報告所說明的成果，研究內容與計畫目的相符。</p> <p>17. 本次報告屬於期中報告，完整的研究成果尚待於期末報告中說明。建議期末報告能根據研究內容提出具體的討論與建議，並建議說明研究成果與工程實務應用的關係。</p> <p>18. 依期中報告的成果所示，本計畫目前的研究成果符合預期。</p> <p>19. 有助理(或學生)參與本計畫的執行，符合土水污染人才培育的預期。</p> <p>20. 土水污染為國內目前所面臨的議題，本計畫的執行對污染整治技術發展，環境整治政策與社會經濟發展有所助益。</p>		<p>1.1Ans:感謝委員的意見。</p> <p>1.2Ans:感謝委員的意見。</p> <p>1.3Ans:感謝委員的意見。</p> <p>1.4Ans:感謝委員的意見。</p> <p>1.5Ans:感謝委員的意見。期末報告時將會附上完整的研究成果，以及在工程實務應用的關係。</p> <p>1.6Ans:感謝委員的肯定。</p> <p>1.7Ans:感謝委員的肯定。</p> <p>1.8Ans:感謝委員的肯定。</p>	



<p>委員二</p> <p>10. 計畫書意見答覆提及此工法需大量電力，為需克服之處，對於此點應有所討論著墨。</p> <p>11. 現地應用控制電解質維持液態為需考量之重點(審查意見答覆)，此開發之技術面對之污染情境為未飽和或是飽和含水層，應先予以確定污染環境，而後對於電解質之疑慮加以討論。</p>	<p>2.1.Ans:感謝委員指導。因仍需採得合適水樣做完測試後，評估此工法需電力能耗，故擬於期末報告補充說明。</p> <p>2.2.Ans:感謝委員指導。因仍需採得合適水樣做完測試後，評估此工法電解質之需求與技術需面對之污染情境，故擬於期末報告補充說明。</p>
<p>委員三</p> <p>6. 建議對於兩季水質分析結果之比較，宜以統計分析方法予以說明差異性。</p> <p>7. 報告內容對於數據之解析似有不足，建議應多加討論與分析，並非僅是數據說明。</p> <p>8. 對於前兩次試驗 TOC 之去除率差異，建議應探討差異原因。</p> <p>9. 對於後續場址變更後，對本計畫成果之評估，應有相關說明。</p>	<p>3.1.Ans:感謝委員的指導。本計畫利用成對樣本 T 檢定(Paired T Test)將第一季與第二季基本水質特性與經電化學降解處理前後之總有機碳去除效率進行水質差異性統計。此段已補充說明置於 P.51 頁第 5-1-5 章節中。</p> <p>3.2.Ans:感謝委員指導。本團隊持續的再將樣品送化學法分析，因仍需採得合適水樣做完測試後，以評估比較，其討論與分析擬在期末報告中一併補充說明。</p> <p>3.3.Ans:感謝委員指導。由於試驗可知 TOC 之去除效率與其初始濃度有關。例如，SV01-S2 有最高 TOC 初始濃度 19.2 mg/L，其去除效率達 92%，而其餘較低 TOC 初始濃度者之去除效率皆不佳。一般而言，電高級氧化降解污染物的反應常為準一階反應，若污染物初濃度不是很高，其反應速率正比於污染物濃度。因此，污染物初濃度低時，其反應速率與降解率均相對較低。再者，本電解程序的反應機制，可能異相及均相反應皆有，於濃度很低時易受質傳限制，降低反應速率與降解效率。此段補充說明置於 P.50 頁第 5-1-4 章節中第 18 行。</p> <p>3.4.Ans:感謝委員的建議。由於期中結果可知該場址污染濃度較低，將不利計畫整治</p>



	試驗評估，因此本團隊將在下半年度透過《土壤及地下水污染整治網》找尋污染濃度較高之合適場址，確認現地即時分析技術應用於油品污染場址地下水整治可行性與化學分析法比對之準確性。
<p>委員四</p> <p>4. 本研究擬結合電化學高級氧化技術及即時分析技術，探討整治地下水中油品污染之可行性，並搭配毒性分析實驗，探討處理有效性。目前已完成目標場址地下水兩季水質分析，及測試其降解成效。</p> <p>5. 建議說明本方法處理的目標，看起來似乎是以抽水處理的廢水處理為目標，以及與一般廢水處理之差異性。</p> <p>6. 研究中測試進出流水中之BTEX及TOC濃度，效率相當高，但均在單一條件下測試，建議說明測試條件是否已經優化？</p> <p>7. 即時分析實驗，目前測得的濃度均為ND，建議後續應包括不同濃度等級的地下水測試，如此才可以研判儀器之適用性。</p>	<p>4.1.Ans:感謝委員指導。</p> <p>4.2.Ans:感謝委員的指導。本方法處理的目標是以現地受油品污染地下水樣品進行整治效益與健康風險評估。本方法處理的目標分為兩階段，第一階段係以抽水泵或貝勒管(Bailers)等採樣設備，將受油品污染樣本送至實驗室進行電化學處理，找出最佳電解參數並同時利用即時分析技術與傳統化學分析技術分析，比對兩者處理前、後之水樣數據；第二階段則透過所得之較佳電解參數搭配即時監測系統進行現地污染場址測試。計畫最後利用所得之即時分析技術與生物毒性評估可快速了解該地污染之狀況。</p> <p>4.3.Ans:感謝委員指導。目前皆還在測試階段，仍需採得合適水樣做完測試後，以評估較佳實驗參數之實驗(電流密度、電解質濃度及電極間距)，故擬於期末報告補充說明。</p> <p>4.4.Ans:感謝委員指導。</p>
<p>委員五</p> <p>4. 整體而言，期中報告進度符合預期且報告內容成果豐碩。</p> <p>5. 建議本計畫應針對所開發技術未來實際應用於MTBE與BTEX污染地下水整治的策略進行整體概念說明，是否採pump-and-treat方式？如果是，本計畫所開發技術和現行使用技</p>	<p>5.1.Ans:感謝委員的指導。</p> <p>5.2.Ans:感謝委員的建議。本計畫是採抽出處理法(pump-and-treat)的方式，將所受污染之地下水抽出至地表，研究將搭配高級氧化技術(Electrochemical Advanced Oxidation Processes, EAOPs)去除受油品污染地下水樣品。EAOPs相比於國內其他整治技術(現地化學氧化法、空氣注入法及電氧化法)具有低成本與對於污染物較高之礦化效率等優點(Özcan et al., 2008)，且可</p>



術的優劣比較為何？

6. 本研究探討的污染物質包括 MTBE 與 BTEX 等，若以 TOC 儀器分析代表數據是否會有準確性的問題？BTEX 是否會在 TOC 儀器進行分析過程而揮發散？

7. 同樣在電化學處理過程中，BTEX 是否會因反應增溫而揮發逸散？

因應目標污染物的不同，使用不同之電極材料進行污染處理。目前 EAOPs 所使用之電極均由國外公司設計製造，其建置成本高昂仍無法被國內業者接受，導致國內目前電化學技術仍相當稀少或停留於實驗室測試階段。

5.3.Ans:(1)感謝委員指導。本團隊除了在電化學試驗後將電降解期間不同時間點所採之樣品送 TOC 儀器分析，也會將電降解完畢之水體送化學法分析。目前皆還在測試階段，仍需採得合適水樣做完測試後，以評估開發技術未來實際應用方式，其和現行使用技術的優劣比較，擬於期末報告補充說明。

(2)感謝委員指導。為避免 BTEX 在 TOC 儀器分析過程中會揮發，本計畫將一點位地下水污染樣品實施三重覆 TOC 測定，根據其重覆性所得之標準差與平均數即可算出變異係數 (CV) 值，藉由 CV 值判定誤差大小，其一樣品 CV 值在 $\leq 2\%$ 以內皆為可接受之誤差範圍。

5.4. Ans:感謝委員的指導。在電化學處理過程中，因水溫上升及電解產生氣體的氣提，可預期部分 BTEX 將會因此而揮發逸散。

委員六

1. 本計畫目前係以水樣於實驗室中進行試驗，應於試驗中加入現地執行可能之要素(如現地水質、監測井形式)，以確認技術於實地運用之可行性。

2. 團隊正積極尋找合適場址，可透過本署《土壤及地下水污染整治網》篩選所需場址。

6. 1.Ans: 感謝委員指導。

6. 2.Ans: 感謝委員指導。

專案主持人：_____ (簽名及蓋章)



結合電化學氧化處理與現地即時分析
技術於油品污染場址整治之可行性評估

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

108 年度專案成果績效自評表

一、專案基本資料

填表日期：108 年 12 月 19 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"/> 研究專案 <input type="checkbox"/> 模場試驗
研究主題	<input checked="" type="checkbox"/> 調查 <input type="checkbox"/> 整治 <input type="checkbox"/> 其他		
	屏東科技大學環境工程與科學系	計畫主持人	趙浩然
專案名稱	結合電化學氧化處理與現地即時分析技術於油品污染場址整治之可行性評估		
專案執行期程	<input type="checkbox"/> 申請階段 <input type="checkbox"/> 期中 <input checked="" type="checkbox"/> 期末		

二、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「結案達成數」欄位中。**(僅模場試驗類型專案需填寫工作進度達成數)**

(一) 學術面

項目		目標達成程度	申請 預估 數	工作進 度達成 數	期中 達成數	期末 達成數	結案 達成率	備註 (說明未達成原因 或學術產出發表名 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			2	100%	研討會: 2019 Conference on Fine Particulate Matter (PM2.5) and Air Quality 2019 年細懸浮微粒 (PM2.5)管制與空氣品質研討會 1.投稿題目: A New Type of Air Quality Sensor Based on the Internet of Things for the Monitoring of Atmospheric Persistent Organic Pollutants (POPs) 2.屏科大碩士論文: 應用物聯網感測器評估大氣戴奧辛濃度並確認其可行性
	2. 國外投稿 (篇數)	(1)期刊論文	1			0	0%	撰寫中，將盡快完成。
		(2)研討會論文						



目標達成程度			申請 預估 數	工作進 度達成 數	期中 達成數	期末 達成數	結案 達成率	備註 (說明未達成原因 或學術產出發表名 稱)
項目								
	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						
	6.研發改良 技術(項數)	(1)已開發技術						
		(2)技術平台						
B 人 才 培 育	7.研發人員 (人數)	(1)碩士						
		(2)博士						
	8.研究團隊 (個數)	(1)跨領域團隊						
		(2)跨機構團隊						
		(3)形成研究中 心						
		(4)形成實驗室						
9.其他指標 (請自行命名)		(請自填)						



結合電化學氧化處理與現地即時分析
技術於油品污染場址整治之可行性評估

(二) 產業面

項目 \ 目標達成程度				申請 預估數	工作進 度達成 數	期中 達成數	期末 達成數	結案 達成率	備註 (說明未達成原因或專 利、技術轉移相關詳細資 料)
A 智慧財產權	1.專利 (件數)	已 核 准	發明						
			新型/設計						
			合計						
		申 請 中	發明						
			新型/設計						
			合計						
B 研發技術轉移	2.先期技術 成果移轉	件數							
		授權金(仟元)							
		衍生利益金(仟元)							
	3.技術移轉 (專利)	件數							
		授權金(仟元)							
		衍生利益金(仟元)							
	4.技術移轉 (應用技術)	件數							
		授權金(仟元)							
		衍生利益金(仟元)							
	5.可移轉 產業技術	(1)技術(件數)							
(2)品種/系(件數)									
C 產學研合作	6.促成合作 研究	件數							
		金額(仟元)							
	7.促成投資	件數							
		投資金額(仟元)							
	8.促成取得 業界科專	件數							
		業界投資金額(仟元)							
9.其他指標 (請自行命名)		(請自填)							



(三) 政策面

項目		目標達成程度	申請 預估 數	工作進 度達成 數	期中 達成數	期末 達成數	結案 達成率	備註 (說明未達成原因或 其他詳細資料)
A 服 務 便 民	1.技術服務	次數						
		收入(仟元)						
	2.諮詢服務	次數						
		收入(仟元)						
B 支 援 合 作	3.協助政府制定 (件數)	(1)政策						
		(2)法規						
		(3)規範						
		(4)標準						
D 社 會 效 益	4.獲得認證(件數)							
	5.獲得獎項(件數)							
	6.提升能源效率(%)							
	7.節能減碳效率(%)							
8.其他指標 (請自行命名)		(請自填)						

三、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)



結合電化學氧化處理與現地即時分析
技術於油品污染場址整治之可行性評估

本團隊自 107 年度執行土壤及地下水污染整治基金補助研究之成果，已成功開發。本土化生產之 BDD(boron-doped diamond)電極材料，對於目標污染物去除效率可達 90%以上。本年度計畫應用前一年度計畫成果於電化學氧化處理法並結合現地即時分析技術，並以化學分析法比對即時分析技術之準確性。本研究之結果將突破目前現地整治之瓶頸，可解決以往污染物分析需攜回實驗室耗時較長之問題，並可即時監測污染狀況。此外，本研究將於初步現場模擬試驗中，將本研究處理設備進行放大，並找出應用於現地整治最佳之電流密度與電解質條件，將有助於未來現地污染整治中直接於監測井設置本研究設備。



中文摘要

電化學高級氧化法(electrochemical advanced oxidation process)為高級氧化技術(advanced oxidation processes, AOPs)的一種，他具有高效節能、操作簡單、環保及設備簡單，其中又以 BDD (boron-doped diamond)電極做為陽極對於污染物之去除效率較高，相較於其它材料具有低成本與較高之污染物礦化效率等優點。本研究以國外 BDD 摻硼鑽石電極降解位於高雄市某加油站、高雄某化工廠及澎湖某化工廠其皆受總石油碳氫化合物污染且曾被檢測苯類污染物超標之地下水中的污染物，本研究已採集 19 件次苯類污染之地下水樣本。研究結果顯示，經電化學處理後之 BTEX 分析，第一季水樣僅 MTBE (甲基第三丁基醚)、toluene(甲苯)及 m,p-xylene (m,p -二甲苯)被檢測出，但其濃度均符合地下水污染物管制標準。第二季水樣僅在 Benzene (苯)、Toluene(甲苯)及 Chlorobenzene (氯苯)被檢測到，其化合物濃度均符合地下水污染物管制標準。第三季及第四季水樣其污染物幾乎皆被檢測出，其在電化學降解處理後，去除效率大多為 100%，其餘未降至 ND 之化合物濃度均符合地下水污染物管制標準第二類。其中 GW-377-1-S2-1 經電化學試驗後之結果顯示，其水樣在總有機碳(TOC)降解的部份濃度從 85.2 mg/L 降至 1.3 mg/L(去除效率達 98%)。經電化學氧化降解 4 小時，第一季水樣 SV02 的 TOC 降解從 24.8 mg/L 降至 3.3 mg/L，有最佳的去除效率(86.6%)。第二季水樣的 TOC 降解，則以 SV01-S2 從 19.2 mg/L 降至 1.5 mg/L，有最佳的去除效率(92.3%)。比較 TOC 降解效能，發現較佳電極間距 為 0.2 cm、添加電解質有助於降低系統電位、且添加 H₂SO₄ 電解質較添加 Na₂SO₄ 電解質為佳(TOC 去除效率 = 87%~98%)，當混合 H₂SO₄ 及 Na₂SO₄ 為電解質時(以 0.0025 M H₂SO₄+0.0025 M Na₂SO₄ 較佳)，TOC 的去除效率為 89%~97%。

本研究除了進行傳統化學分析，另同步使用即時分析系統 MiTAP-UTLD 分析地下水水樣。惟分析結果顯示，Toluene 於兩種化學分析方法中具有顯著相關性。進一步使用三種生物毒性篩測平台 (綜合細胞毒性分析(Cytotoxic ATP bioassay)、致癌毒性分析(P53 bioassay)與發炎反應生物偵測法(NF- κ B bioassay))，研究發現經電化學實驗後，細胞存活率皆有之提高趨勢，顯示出 BDD 電極用於處理污染之地下水有機污染物具有良好之潛力，且此整治方法可顯著改善受污染地下水對人體毒性影響。



英文摘要

Electrochemical oxidation process is one of the advanced oxidation processes (AOPs) for contaminant remediation wherein anode material production technique is the main technology applied. Boron-doped diamond (BDD) anode has advantages such as low cost and high mineralization efficiency of contaminants, compared with other materials. The aim of this study is to use locally produced and commercial BDD anode material to remediate groundwater contaminated phenyl compounds. Nineteen samples were collected from phenyl compounds in the groundwater in south Taiwan. The research showed that only MTBE, Toluene, and m,p-xylene were detected in season one, and Benzene, Toluene, Chlorobenzene were detected in season two. The remaining phenyl levels of contaminants were lower than the standard values. In season 3 and 4, after electrochemical oxidation treatment, most of the compounds exhibited a removal efficiency of 100%. The results of electrochemical tests of GW-377-1-S2-1 showed that the concentration of water in the total organic carbon (TOC) degradation decreased from 85.2 mg/L to 1.3 mg/L (removal efficiency reached 98%). After 4 hours of electrochemical oxidation degradation, the TOC degradation of the first season water sample, SV02, decreased from 24.8 mg / L to 3.3 mg / L, with the best removal efficiency (86.6%), while the TOC degradation of the second season water sample, SV01-S2, decreased from 19.2 mg/L to 1.5 mg/L, which had the best removal efficiency (92.3%). Upon comparison of the degradation efficiency of TOC, it is found out that the preferred electrode spacing is 0.2 cm. The electrolyte added helped in reducing the system potential, and it was shown that using H₂SO₄ electrolyte led to a better result than using Na₂SO₄. In addition to traditional chemical analysis, this study uses the real-time analysis system MiTAP-UTLD to analyze groundwater samples. However, the analysis showed that Toluene has a significant correlation between the two chemical analysis methods. Furthermore, through the use of different bioassay procedures, the study found that after electrochemical experiments the cell viability has increased, showing that BDD electrodes have good potential for treating contaminated groundwater organic pollutants and this remediation method can be significantly improved.





結合電化學氧化處理與現地即時分析
技術於油品污染場址整治之可行性評估



目錄

(一) 前言	1
(二) 研究目的	5
(三) 文獻探討	7
3-1 電化學氧化法(Electrochemical oxidation,EO)	7
3-2 電極優缺點比較	7
3-3 電化學氧化法與其它高級氧化法比較	9
3-4 台灣近年來相似電化學現地整治之研究	10
3-5 即時偵測工具於污染監測之應用	11
3-6 生物平台篩選工具	11
3-6-1 綜合毒性分析(MTT bioassay)	12
3-6-2 致癌性毒性分析(P53 bioassay).....	12
3-6-3 發炎反應分析(NF- κ B bioassay).....	13
3-7 秀麗線蟲生物分析	13
3-8 生物毒性效應與電化學處理成效之關聯性	14
(四) 研究方法與過程	15
4-1 實驗設計	16
4-2 樣本採集	16
4-2-1 採樣器材及樣品容器	16



結合電化學氧化處理與現地即時分析
技術於油品污染場址整治之可行性評估

4-3 場址地理與運作概況	17
4-4 實驗儀器與設備	17
4-4-1 電化學裝置	17
4-4-2 總有機碳分析儀(Total Organic Carbon, TOC).....	18
4-5 化學分析法.....	19
4-6 即時偵測系統分析法	19
4-7 化學分析方法與即時偵測系統 QA/QC.....	19
4-8 生物分析法.....	20
4-8-1 綜合細胞毒性分析 (MTT Bioassay).....	20
4-8-1-1 MTT bioassay 原理.....	20
4-8-2 致癌毒性分析(p53 bioassay).....	23
4-8-3 發炎反應分析(NF- κ B bioassay).....	25
4-8-4 秀麗線蟲毒性測試	26
(五) 結果與討論	35
5-1 地下水現地水質檢測	35
5-1-1 採樣場址及編號	35
5-1-2 第三季及第四季之水質檢測	38
5-2 各樣品電降解試驗操作條件	41
5-2-1 第一季及第二季其樣品電降解試驗操作條件	41



5-2-2 第三季及第四季其樣品電降解試驗操作條件	42
5-3 苯類與含氯乙烯類污染物分析	45
5-3-1 第一季高雄某加油站水樣之 BTEX 分析	45
5-3-2 第二季高雄某加油站水樣之 BTEX 分析	48
5-3-3 第三季及第四季水樣之 BTEX 分析	51
5-4 樣品中總有機碳去除效率比較	65
5-4-1 第一、二季水樣其比較有無添加電解質之總有機碳去除效率比較	65
5-4-2 比較不同電極間距之總有機碳去除效率比較	67
5-4-3 添加不同電解質之總有機碳去除效率比較	69
5-4-4 不同 H ₂ SO ₄ 電解質添加量之總有機碳去除效率比較	71
5-4-6 地下水即時分析	81
5-5 Cytotoxic MTT bioassay 樣品暴露及偵測	86
5-6 地下水樣本中致癌毒性探討	88
5-7 地下水樣本中發炎反應探討(NF-κB bioassay).....	92
5-8 線蟲實驗結果探討(C.elegan).....	93
(六) 結論	97
(七) 建議	99
(八) 參考文獻	102



結合電化學氧化處理與現地即時分析
技術於油品污染場址整治之可行性評估



圖目錄

圖 4-1、實驗流程圖.....	15
圖 4-2、電化學處理系統結合即時分析技術	16
圖 4-3、雙槽之形式(陳，2011).....	18
圖 4-4、總有機碳分析儀(TOC).....	18
圖 4-5、MTT assay 作用原理示意圖	21
圖 4-6、細胞繼代培養步驟.....	22
圖 4-7、H4IIE 細胞種殖步驟.....	23
圖 4-8、MTT bioassy 分析步驟	24
圖 4-9、8-OHdG 作用原理示意圖	27
圖 4-10、培養基製備.....	29
圖 4-11、同期/齡化步驟.....	29
圖 4-12、同期/齡培養步驟	30
圖 4-13、急毒性評估步驟.....	錯誤！尚未定義書籤。
圖 4-14、運動行為評估方法.....	32
圖 4-15、生殖毒性試驗步驟.....	33
圖 5-1 改變其間距之水樣經電降解後之降解趨勢圖	69
圖 5-2 比較有無電解質及不同電解質之水樣經電降解後之降解趨勢圖	71
圖 5-3 比較不同 H_2SO_4 電解質量之水樣 GW-377-1-S1 經電降解後之降解趨勢圖	73
圖 5-4 比較不同 H_2SO_4 電解質添加量之水樣 GR-2-S1 經電降解後之降解趨勢圖	74
圖 5-5 比較不同 H_2SO_4 電解質添加量之水樣 GW-377-1-S2 經電降解後之降解趨勢圖	75
圖 5-6 比較不同混合添加 H_2SO_4 及 Na_2SO_4 電解質之水樣 GW-377-S2 經電降	



結合電化學氧化處理與現地即時分析
技術於油品污染場址整治之可行性評估

<u>解後之降解趨勢圖</u>	77
<u>圖 5-7 比較不同混合添加 H₂SO₄ 及 Na₂SO₄ 電解質之高雄水樣經電降解後之降解趨勢圖</u>	79
<u>圖 5-8、UTLD-MiTAP 基本儀器資料(創控公司)</u>	85
<u>圖 5-9、ATP assay 之酒精試驗示意圖</u>	86
<u>圖 5-10、第三、四季地下水樣本中細胞存活率分析</u>	87
<u>圖 5-11、AML-12 細胞株最佳敏感度參數測試</u>	88
<u>圖 5-12、DOX 檢量線反應</u>	89
<u>圖 5-13、第三、四季電化學處理前、後之濃度進行致癌性比較比較</u>	91
<u>圖 5-14、NF-κB bioassay 劑量反應曲線</u>	92
<u>圖 5-15、線蟲急毒性暴露澎湖第三季水樣樣品之線蟲存活率圖</u>	94
<u>圖 5-16、線蟲急毒性暴露澎湖第四季水樣樣品之線蟲存活率</u>	95
<u>圖 5-17、線蟲急毒性暴露高雄第三季水樣樣品之線蟲存活率</u>	96
<u>圖 5-18、線蟲急毒性暴露高雄第四季水樣樣品之線蟲存活率</u>	96
<u>圖 5-19、研究進度及預期完成之工作項目 (甘特圖)</u>	100



表目錄

表 3-1、第一季場址水質檢測.....	8
表 5-1、第一季場址水質檢測.....	36
表 5-2、第二季場址水質檢測.....	37
表 5-3 第一季與第二季水質比較	38
表 5-4、第三季場址水質檢測.....	39
表 5-5、第四季場址水質檢測.....	39
表 5-6、第三季與第四季水質比較	40
表 5-7、第一季及第二季實驗參數條件	41
表 5-8、第三季及第四季實驗參數條件	44
表 5-9、第一季各項水樣處理前與處理後 BTEX 值(mg/L)及降解效率(%)	46
表 5-10、第二季 SV01-S1~SV03-S1 各項水樣處理前與處理後 BTEX 值(mg/L)及降解效率(%).....	49
表 5-11、第二季 SV01-S2~SV03-S2 各項水樣處理前與處理後 BTEX 值(mg/L)及降解效率(%).....	50
表 5-12、第三季澎湖某化工廠各項水樣處理前與處理後 BTEX 值(mg/L)及降解效率(%).....	53
表 5-13、第三季高雄某化工廠各項水樣處理前與處理後 BTEX 值(mg/L)及降解效率(%).....	56
表 5-14、第三季澎湖某化工廠 GW-377-1-S2 各項水樣處理前與處理後 BTEX 值(mg/L)及降解效率(%).....	61
表 5-15、第三季澎湖某化工廠 GW-377-S2 各項水樣處理前與處理後 BTEX 值(mg/L)及降解效率(%).....	62
表 5-16、第四季高雄某化工廠各項水樣處理前與處理後 BTEX 值(mg/L)及降解效率(%).....	64
表 5-17、第一季水樣經電降解後 TOC 濃度	66



結合電化學氧化處理與現地即時分析
技術於油品污染場址整治之可行性評估

表 5-18、第二季水樣經電降解後 TOC 濃度	67
表 5-19、改變其間距之水樣經電降解後 TOC 濃度	68
表 5-20、比較有無電解質及不同電解質之水樣經電降解後 TOC 濃度	70
表 5-21、比較不同添加 H_2SO_4 電解質之水樣經電降解後 TOC 濃度	72
表 5-22、比較不同混合添加 H_2SO_4 及 Na_2SO_4 電解質之水樣經電降解後 TOC 濃度	76
表 5-23、地下水水樣經 MiTAP 所測定之濃度	82
表 5-24、第三、四季地下水水樣經 GC/MS 與 MiTAP 所測定之濃度	83
表 5-25、UTLD-MiTAP 與 BTEX 相關性統計(Spearman's rho)	85
表 5-26、澎湖 BTEX Sample 中致癌毒性與化學分析之相關性統計(Spearman's rho)	90



前言

台灣自民國 60 年代起產業全面轉型朝向工業發展為主，至 90 年代達到高峰後再轉型往高科技產業與產業群聚化，現今為世界電子產品重要的出口國家。然而，早期台灣在低生產成本之思維下與對環境財的不重視，其成本轉嫁至生活環境中，導致環境污染事件日益增加，特別是重工業使用油品所造成之地下水污染問題等。因此，開發可整治地下水中污染之可行技術為近十年世界與台灣的重要趨勢。高級氧化程序(Advanced Oxidation Processes, AOPs)為處理地下水污染物可行之方法，其原理為利用具高氧化力的氫氧自由基(hydroxyl radicals, $\bullet\text{OH}$)來氧化有機物，而氫氧自由基是一種非選擇性的強氧化劑，能與有機物進行脫氫(dehydrogenated)或羥基化衍生物(hydroxylated derivatives)反應，直到有機物完全礦化(轉化成 CO_2 、水及無機離子)(Oturán et al., 2001; Brillas et al., 2004)。AOPs 包括化學、光化學催化氧化法、濕式催化氧化法、超臨界水氧化法、臭氧類氧化法、電化學氧化法及超聲氧化法等技術來降解有機污染物。

其中電化學高級氧化技術(Electrochemical Advanced Oxidation Processes, EAOPs)相較於其它分析方法具有低成本與對於污染物較高之礦化效率等優點(司等, 2003; Tröster et al., 2002; Özcan et al., 2008)。除此之外，電化學處理程序可因應目標污染物的不同，使用不同之電極材料進行處理廢(污)水。常見陽極材料如下所述：石墨(graphite)、 PbO_2/Ti (lead dioxide coated titanium)、DSA(binary Ru-Ti oxide-coated titanium anode)、BDD(boron-doped diamond)、 SnO_2/Ti 、 MnO_2/Ti 等；陰極材料則有不銹鋼板(steel plate)及鈦板等(袁等, 2011; Chiang et al., 1995; Zheng et al., 2011; Madsen et al., 2014)。在電極材料的選用需具備良好的穩定性、使用壽命長、成本低、導電性佳、高析氧過電位、良好的電催化活性及耐腐蝕等特性。其中本研究所使用之 BDD 電極為非活性電極，具備低背景電流(Background current)及高化學穩定性、高析氧過電位、良好的導電性、耐腐蝕、電極壽命長及鍍層不易脫落等優點，當 BDD 電極用作陽極時，電極表面與氫氧自由基之間的吸附力小，使析氧等副反應減少，所以能夠產生較多的氫氧自由基有利於氧化難分解的有機物(陳, 2016; Huang et al., 2014; Urtiaga et al., 2014; Ammar et al., 2016)。

國際間電化學處理程序已是成熟之分析方法，但目前所使用的 BDD 電極均由國外公司設計與製造，其建置成本高昂仍無法被國內業者接受，導致國內目前電化學技術仍相當稀少或停留於實驗室測試階段。本研究所使用之純本土化電化學氧化技術與生物毒性分析技術均已具備相當穩固之基礎：本團隊黃國林教授自



結合電化學氧化處理與現地即時分析
技術於油品污染場址整治之可行性評估

民國 90 年起即投入電化學處理污染物、資源回收及綠能相關技術之研究，與台灣本土公司長期合作下，已具備生產純本土化之 BDD 電極材料之能力，除了可大幅度減低成本外，並計畫開始於國內大量生產，更可針對目標化合物設計相對應之電極進行現地污染樣本整治。電化學相關的研究成果發表的國際 SCI 期刊論文已超過 20 篇(計畫申請人皆擔任主要作者(第一或通訊作者))，其中不乏環境科學/工程、電化學及能源領域頂尖國際 SCI 期刊(前 5~10%，例如 Environmental Science & Technology (ES&T))、Journal of Hazardous Materials(JHM)、Journal of Power Sources (JPC))(另如 Journal of The Electrochemical Society (JEC)) 及 Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers)。依據 107 年度執行土壤及地下水污染整治基金補助研究之成果，本團隊已成功開發本土化之 BDD 電極材料，除了可大幅度降低成本，降解效益亦可比擬國外公司所生產之電極，對於地下水中 BTEX 與 TPH 等油品污染物去除效率可達 90%以上，處理後之水樣符合地下水管制標準(趙浩然，2018；Lu et al., 2019)。在該研究中透過實驗室規模之測試找出處理油品污染物之最佳操作參數(如：反應時間、電流強度與電極材料等)，但若應用於現地處理尚有許多問題仍需釐清，如電流密度、溫度、PH 值與電解質等反應參數是否會影響本土化電化學處理系統之成效。此外，污染物定期監測為整治過程中相當重要的一環，透過此項數據可評估污染場址之改善成效與修正檢討整治工法。目前尚無公告任何地下水現地量測之方法，僅能依靠巡檢採樣送至實驗室分析，導致無法準確判斷現地污染狀況及改善狀況。即時分析系統能解決上述情況，採樣後於現場即時檢測，並了解目標污染物之整治情形。故本次專案擬結合電化學氧化處理法與現地即時分析技術，找出應用於現地整治最佳之電流密度與電解質條件，後續透過化學分析法比對即時分析技術之準確性，探討此系統應用於油品污染場址地下水整治之可行性。

雖然 EAOPs 去除污染物之效率良好且成本低廉，但在污染物降解過程中，仍可能產生些許具毒性反應之降解中間產物。根據 Ridruejo et al., (2017)文獻指出，EAOP 降解飲用水中砷化合物後，其對於水蚤與細胞之毒性反應均隨著污染物一併被移除；但在 DNA 損傷之測試中，發現降解後之水樣仍對人體淋巴細胞(human peripheral blood lymphocytes)產生微量之 DNA 損傷。García-Espinoza et al., (2017)則針對受卡馬西平(Carbamazepine, CBZ)污染之水體進行降解實驗，該結果發現卡馬西平氧化後生成 6 種芳香族中間產物，且經處理後所殘留之活性氯產生毒性反應之現象。本團隊趙浩然教授長期從事開發毒性篩測系統，相較於上述文獻所使用之水蚤毒性試驗，本團隊所開發之系統除了可進行大量且快速之人體細胞急毒性、多環芳香烴活性、雌激素效應、致癌性與發炎反應等毒性評估。於 107 年度執行土壤及地下水污染整治基金補助研究中，發現降解試驗前、後之受苯類及氯



乙烯類污染水樣於細胞毒性未有顯著差異($p=0.957$; $p=0.624$)；但在致癌毒性分析，其經降解後反應濃度均有明顯降低($p<0.05$)；發炎反應分析則在受苯類污染之水樣發現處理後反應濃度顯著降低($p<0.05$)，受含氯乙烯類污染之水樣無顯著降低反應濃度($p=0.165$)(趙浩然，2018)。上述研究也表明除了短期毒性測試之外，即時且長期的毒性監測仍有其必要性(Ridruejo et al., 2017)。為此，本團隊擬使用趙浩然教授所開發之秀麗線蟲活體生物偵測平台(*C. elegans*)及生物篩檢平台進行毒性測試，本團隊曾應用細胞染色法探討 p53 與肺癌之間的關係並發表 SCI paper-Pulmonary CYP2A13 levels are associated with early occurrence of lung cancer—Its implication in mutagenesis of non-small cell lung carcinoma (Chiang et al., 2013)，並實際應用 p53 bioassay 偵測受苯類及含氯乙烯類污染之地下水(Lu et al., 2019)。此外，應用本研究團隊開發之 Ad-DR bioassay 篩測土壤中總芳香族碳氫化合物毒性(Aryl hydrocarbon receptor, AhR)，Ad-DR bioassay 系統在過去與環保署合作之下已產出四篇 SCI 學術論文。在戴奧辛毒物偵測方面，本研究團隊除了應用 Ad-DR bioassay 系統，過去也曾運用人類肝腫瘤細胞株的戴奧辛偵測系統 Huh7-DRE-Luc cells 發表四篇 SCI 論文。除生物分析平台部分已發表多篇文獻，本研究團隊已將先前獲土壤及地下水污染整治基金補助之相關計畫成果整理，並撰寫論文投稿，其題名為 Relationship of Dichloroethene and Trichloroethylene Concentrations and Dissolve Organic Matters Characteristics (Lu et al., 2017)，以及 Environmental Monitoring and Assessment—Assessment of Electrochemical Advanced Oxidation Process (EAOP) treated groundwater from a gasoline station in Taiwan (for publication)。



結合電化學氧化處理與現地即時分析
技術於油品污染場址整治之可行性評估



研究目的

污染物定期監測為整治過程中相當重要的一環，透過此項數據可評估污染場址之改善成效與修正檢討整治工法。目前尚無公告任何地下水現地量測之方法，僅能依靠巡檢採樣送至實驗室分析，導致無法準確判斷現地污染狀況及改善狀況。故本次研究擬結合電化學氧化處理法與現地即時分析技術，找出應用於現地整治最佳之電流密度與電解質條件，後續透過化學分析法比對即時分析技術之準確性，探討此系統應用於油品污染場址地下水整治之可行性。此外，因電化學氧化法為產生大量自由基降解污染物之原理，其所生成之自由基可能會對環境或生物體產生不利之影響。故本專案亦將搭配本團隊趙浩然教授所開發之秀麗線蟲 (*Caenorhabditis elegans*, *C. elegans*) 及三種生物毒性分析方法：綜合細胞毒性分析 (MTT bioassay)、致癌毒性分析 (P53 bioassay)、發炎反應分析 (NF κ B bioassay)，探討現地受油品污染地下水樣品之整治效益與健康風險評估，其中秀麗線蟲系統亦可用於預測生態風險之概況。



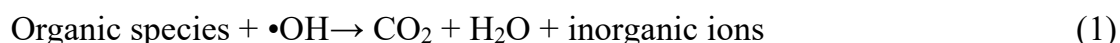
結合電化學氧化處理與現地即時分析
技術於油品污染場址整治之可行性評估



文獻探討

3-1 電化學氧化法(Electrochemical oxidation,EO)

高級氧化處理程序(Advanced Oxidation Processes, AOPs) 是藉由氧化劑將廢水中有機及臭味物質經氧化分解成 CO_2 、 H_2O 或無害鹽類其反應式如(1)所示，在反應過程中產生氫氧自由基(Hydroxy radicals ($\bullet\text{OH}$))對廢水中有機物及無機物進行氧化而去除廢水中污染物。



常見的高級氧化處理程序(AOPs)有光催化法、臭氧氧化法、芬頓法、光芬頓法及電化學法等(陳碧慧，2014; Oturan et al.,2001)，目前已知電化學高級氧化處理程序(Electrochemical Advanced Oxidation Processes, EAOPs)比起其它高級氧化程序它具有高效節能、環境兼容性、運行成本低、操作容易及較高的礦化效率等優點，也被認為是目前處理廢水中有毒及難降解知有機污染物較有效的方法(Oturan et al., 2013; Yapeng et al.,2015)。電化學氧化法具備 AOPs 之優點，透過直接與間接氧化之方式，將污染物降解為低毒性或無毒性之中間產物，進而達到整治之效，至今已被廣泛應用於處理各種受污染之地下水，如：三氯乙烯、石油碳氫化合物與砷污染(Jasman et al.,2017; Palma et al.,2017 ; Radić et al.,2016)。

3-2 電極優缺點比較

電化學處理程序可因應目標污染物的不同，使用不同之電極材料進行處理廢(污)水。常見陽極材料如下所述：石墨(graphite)、 PbO_2/Ti (lead dioxide coated titanium)、DSA (dimensionless stable anode)、BDD (boron-doped diamond)、 SnO_2/Ti 、 MnO_2/Ti 、 IrO_2 等；陰極材料則有不銹鋼板(steel plate)及鈦板等(袁等人，2011; Chiang et al., 1995; Zheng et al., 2011; Madsen et al., 2014)，且結果顯示由於 $\bullet\text{OH}$ 的產率不佳而導致的有機物礦化程度差(Mora-Gomez et al., 2018)。電化學氧化過程中的降解效率取決於穩定的電極材料，而在電極材料的選用，需考量其是否具備良好的穩定性、使用壽命長、成本低、導電性佳、高析氧過電位、良好的電催化活性及耐腐蝕等特性。表 3-1 為各陽極材料氧化能力比較可分別看出各電極的氧化能力。



結合電化學氧化處理與現地即時分析
技術於油品污染場址整治之可行性評估

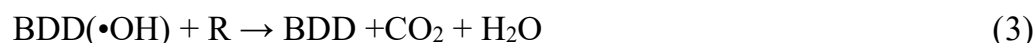
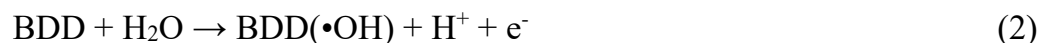
表 3-1、各陽極材料析氧電位比較

陽極材料	析氧電位 (V/SHE (標準氫電極))
RuO ₂	1.4 - 1.7
IrO ₂	1.5 - 1.8
鉑	1.6 - 1.9
石墨	1.7
Ebonex® (Ti ₄ O ₇)	1.7 - 1.8
PbO ₂	1.8 - 2.0
SnO ₂	1.9 - 2.2
BDD	2.2 - 2.6

(Comninellis et al., 2008; Panizza et al., 2006; Cardarelli et al., 2008)

摻硼鑽石電極 (BDD) 被確定為優秀的非活性陽極，其具有多種電分析的可能性、穩定性、結構耐性、分子吸附力較弱及較大的工作電位等優點(Silva et al., 2016)， BDD 電極表面可以產生大量的•OH，在有機污染物處理中具有較高的氧化及礦化能力而被廣泛應用在廢水中有機物的去除(García-Espinoza et al., 2017; Ridruejo et al., 2016; Körbahti and Demirbüken, 2017)。

H₂O 在 BDD 電極的表面被電解產生•OH 之反應及其與溶液中的有機污染物 (R)反應，最後將有機污染物礦化為 CO₂ 及 H₂O 的反應式分別如(2)及(3)所示(林，2017)。



有學者使用摻硼鑽石電極(BDD)、白金電極(Pt)與二氧化鉛電極(PbO₂)用於降解農藥生產中常見的成分對甲基苯酚(p-methylphenol (PMP)，在控制的實驗條件下(陽極:BDD、60 mA cm⁻²、電解質 0.05 M Na₂SO₄、pH 3、420 min、T 20 °C)進行 PMP 的電極氧化過程中，主要反應是連續親電加成芳環上的羥基自由基，導致形成多羥基苯衍生物，在 60 分鐘時後發現了甲基氫醌(Methylhydroquinone)、甲基-



對苯醌 Methylbenzoquinone 及 3-甲基兒茶分(3-Methycatechol)整體經過 420 分鐘後由結果可看到均可將中檢產物及目標污染物去除，另外化學需氧量(Chemical Oxygen Demand, COD)在台灣為常見的放流水標準之一，環保署在農藥的放流水規範的排放最大限值為 100 mg L⁻¹ (行政院環保署, 2014)，PMP 經 420 分鐘的電高級氧化法由結果可看出 BDD、Pt 及 PbO₂ 的 COD 去除效率分別為 96 %、52 % 及 72 %，使用 BDD 電極經 420 分鐘處理後的 PMP 廢水 COD 可達放流水標準進行排放(Mohamed et al., 2016)。由於現今取得 PPCPs (成藥及個人保健用品)較為方便 (如：17 β -雌二醇 (17 β -estradiol)、卡馬西平(carbamazepine)等) 也常在水環境中測得殘餘的 PPCPs，因此有學者開始這方面的研究，使用電化學氧化法降解 17 β -雌二醇，在相同的電極工作面積下以 BDD、Pt 和玻璃碳(GC)電極，固定的操作條件(電流密度: 25 mA cm⁻²、17 β -雌二醇的初始濃度為 500 μ g dm⁻³)下在經過電化學試驗 180 分鐘後 BDD 在 30 分鐘降解率優於其它電極，而 Pt 電極在 180 分鐘後僅達 90 %與 BDD 陽極相比幾乎高出 9 倍，在 GC 電極 180 分鐘後僅達 22 %，結果可看出 BDD 陽極氧化快速且完全降解 E2 較解效率達 100% (Murugananthan et al., 2007)，另外有學者在控制實驗條件下以 Ti/SnO₂、Ti/BDD 和 Ti/PbO₂ 電極為條件：電流密度 (2A)、電解質濃度 (400 mg L⁻¹) 和卡馬西平濃度 (10 mg L⁻¹) 進行電化學試驗，經 100 分鐘後可得知 Ti/BDD 及 Ti/PbO₂ 電極去除效率約 90%，而在 Ti/SnO₂ 的試驗過程中電阻迅速增加，電極表面可能被有機物質覆蓋而造成鈍化 2 在降解污染物的效率較差 (Garcia-Gomez et al., 2014)。由上述的研究結果可以得知，BDD 電極在有機污染方面的處理效果比其它陽極好。近年來環保意識的增長土壤及地下水也受到各界的關注，在台灣雖然有許多的現地場址整治方法，但運用電化學法進行實際整治的案例較少，而本研究以摻硼鑽石電極 (BDD) 應用電化學氧化法及生物毒性篩檢技術於受含氯乙烯及苯類污染地下水現地整治可行性研究。

3-3 電化學氧化法與其它高級氧化法比較

高級氧化技術 (AOPs) 在環境問題上的應用引起了相當的關注。許多學者們發表了這些技術從空氣，水和廢水中氧化和去除各種有機和無機化合物的能力。其中包括有光催化、芬頓法、光芬頓法、臭氧氧化、超聲波氧化法及電化學氧化法(Cruz et al.,2013; Neamtu et al.,2014; Huber et al.,2005 ; Je-Min et al.,2018)，光催化法雖然可以運用在水處理上但也存在以下缺點如光催化需要解決透光度及改善目標污染物在催化劑表面上的吸附並降低光生電子對的重組率，從而提高光催化活性的問題和某些廢水中的一些懸浮物和較深的色度都不利於光催化且目前所使用的光催化觸媒多為奈米顆粒回收較為困難，芬頓法在高級氧化的過程中則



結合電化學氧化處理與現地即時分析
技術於油品污染場址整治之可行性評估

會產生大量的污泥雖然可以處理廢水但後續污泥處理又是一個問題所在，光芬頓法雖然可以減少污泥產量但在太陽能利用率仍然不高、能耗較大及處理設備費用較高(馬，1999)，臭氧氧化雖然具有高氧化能力污染物去除效率也比較高但相對的處理費用昂貴，超聲波氧化法具有同相反應、不須添加藥劑、不受廢水色度、濁度影響但相對的處理設備較為昂貴(司，2002)，電化學法具有在沒有添加化學藥劑的情況下營運成本相對來得較低，它也具有高校節能、環境兼容性、運行成本低、操作容易及較高的礦化效率等優點。

3-4 台灣近年來相似電化學現地整治之研究

近年來土壤及地下水備受關注因此台灣也的土壤及地下水污染整治法於民國 89 年 01 月 13 日號公告施行，有許多的整治方法相繼被提出而在現地整治的部分有限地物理整治技術及化學整治技術，在現地整治技術方面包括(土壤氣體抽除法、空氣注入法及雙向抽除法)，化學整治技術包括(現地化學氧化法、界面活性劑沖排法、電氧化法)，國內已有學者利用現地電解法(in situ electrolysis, ISE)進行受氯乙炔污染之地下水，該整治方法以電化學反應為基礎，雖然指出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，但所使用的電極為白金電極，其屬於不易產生氫氧自由基的活性電極(Madsen et al., 2014; Ridruejo et al., 2017)，或生成的氫參與污染物還原反應，進而將污染物破壞移除，來達到地下水整治的目的(吳，2016)。該方法操作電壓條件為 3V 時，於 2 小時內可完全去除氯乙炔，並已成功應用於三氯乙炔地下水污染場址，惟該電極為白金電極容易積垢與易產生生物膜，導致初設之成本較高與維護頻率高(吳庭年，2016)；另有學者應用透水電化學生物反應牆整治受 BTEX 污染之地下水，該方法為設置電化學微生物反應牆，以電極為最終電子接受者，進行水中 BTEX 之分解。然而，該方法需依賴污染現地存在可分解有機污染物之微生物，且設置完成後僅能從電流量與水質狀況了解污染物降解粗略狀況，對於細部反應機制亦無法得知(行政院環保署，2011)。本團隊於 107 年度執行土壤及地下水污染整治基金補助研究所使用之方法與吳學者相似，但本團隊使用本土生產之 BDD 電極，其作為陽極具有較高的污染物之去除效率，通過上季電化學試驗後受苯類污染之水樣處理後降解效率均達 90% 以上，總石油碳氫化合物處理後去除效率也高達 97%。而 m,p-Xylene 及 o-Xylene 於第一季電解 2 小時試驗中之去除率僅 69.4%、87.5%，但其在第二季電解 4 小時試驗之去除效率則卻高達 90.3%及 99%，由上述結果可知增加電解時間可有效提升去除率。本研究又以國內電極及國外電極進行三重複電化學試驗，在實驗參數與水樣一致的條件下結果顯示國內及國外電極均可將污染物降解至 98% 以上，符合地下水管制標準第二類，另外總有機碳去除效率為 95%，顯示 BDD 電極有



運用於處理污染之地下水有機污染物之良好潛力(趙及黃，2018)。

3-5 即時偵測工具於污染監測之應用

即時偵測為環境現場檢測揮發性有機化合物(Volatile Organic Compounds, VOCs)相當重要之技術，即時偵測技術目前仍普遍用於空氣污染領域中，應用於地下水污染之即時偵測系統仍相當稀少。微型氣相層析儀(MiTAP)技術為創控生技(TRICORNTECH Corp.)所開發之可攜式 VOCs 分析設備，應用先進氣體分析架構，微流道設計與奈米材料感測開發的 MiTAP 系統，結合自動化採樣系統、微型氣相層析管柱以及高感度微型陣列偵測器，其效能可比擬傳統實驗室分析設備，可於現地自動連續(on-site and continuous)監測並即時產生分析結果，並獲得國家新創獎之肯定(國家新創獎，2015)。此項系統也被證實其數據與傳統實驗室數據具有良好的關聯性(Wu et al., 2016)，可做為現場連續空氣毒物監測工具，用於評估台灣社區中毒性 VOCs 長期暴露之影響(Tsai et al., 2018)，亦可用為工業區毒性 VOCs 物質追蹤及背景調查(Chen et al., 2018)。本次計畫本團隊擬採用創控生技公司所開發之地下水現地量測分析微型氣相層析儀(MiTAP-UTLD)，將該技術導入本團隊所建立之電化學整治系統中，配合現地整治進行地下水快速分析與判別污染改善狀況。相較於其他市售之可攜式儀器(如：Thermo Fisher TVA 2020、RAE systems (Honeywell) MiniRAE 3000、Defiant Technology Frog 4000TM)，MiTAP-UTLD 具備下述幾項優點：(1)可針對個別 VOC 進行量測(2)可自動調整檢測濃度範圍(3)數據取得不需專人判讀，操作介面友善(4)台灣原廠開發製造，不需送至國外進行維修。MiTAP-UTLD 也於近年被應用於台灣現地某大型油品製造與儲存場整治中，在現地實際進行豐水期與枯水期地下水中苯類污染物調查與實驗室比對，可明確分辨出苯類污染物是否超過管制標準且其結果與實驗室檢測數據一致(劉，2017)。

3-6 生物平台篩選工具

近代化學的進步，產業界可以利用比較少的實驗步驟，在短時間內合成眾多新穎的化合物，並應用在新的產品上，提供新的產品功效。然而，新產品在環境及人體健康議題上，往往帶來變相之污染效應，近年來學者提出生物平台篩選工具做為新興化合物毒性效應評估之工具。生物平台篩選工具可在短時間內對大量樣品完成毒性篩選，其類型包括微量毒理實驗模型、樣品庫系統管理、機器人化的實驗操作系統、高靈敏度的細胞檢測系統以及數據處理資料庫等，這一連串單元的運作，提供篩選工具能執行評估大量環境毒物物質。本團隊趙浩然教授長期從事環境毒物生物開發技術，例如：土壤中生物冷光戴奧辛偵測平台 (Ad-DR bioassay)及水體中雌激素效應偵測平台(T47D-KBluc assay)，Ad-DR bioassay 及



結合電化學氧化處理與現地即時分析
技術於油品污染場址整治之可行性評估

T47D-KBluc assay 都已進入商品化實際應用於環境檢體。故本計畫擬應用本團隊所開發之三種細胞報導基因法技術，分別為綜合細胞毒性分析(MTT bioassay)、致癌毒性分析(P53 bioassay)與發炎反應分析(NF- κ B bioassay)評估經電化學氧化法處理後之地下水毒性效應。

3-6-1 綜合毒性分析(MTT bioassay)

本計畫使用 MTT bioassay 為綜合毒性篩檢平台工具，MTT bioassay 操作步驟如下，毒性效應是指化合物對生物體結構產生破壞或者造成其功能損壞的一種性質，含毒性之化合物可能經由皮膚、呼吸或攝入而導致生物體產生急性或慢性疾病之症狀。一般而言，毒性效應之評估藉由有效濃度(EC₅₀, effective concentration 50%)、有效劑量(ED₅₀, effective dosage 50%)、致死濃度(LC₅₀, dethal concentration 50%)或致死劑量(LD₅₀, lethal dosage 50%)來表示。應用動物實驗(in-vivo)評估化合物毒性效應雖較貼近生物體真實之反應，但其觀察時間太長，對於特定區域危害鑑定與污染物毒性調查等狀況應用性較低。因此，離體實驗(in-vitro)評估污染物毒性效應之技術逐漸受到重視，該方法具有高再現性、快速等特性在污染物毒性鑑定上具有極高的應用價值(環保署，1994)。Microtox 生物毒性試驗方法為利用深海螢光細菌 *Vibrio fischeri* 之發光特性，藉由檢測該細菌發光強度探討毒性物質之相對毒性(Boluda et al., 2002)，該方法已成功應用於檢測重金屬(陳，2011)與污染處理場加氯消毒後之毒性(Bayo et al., 2009)，且近年也開始應用此方法評估新興物質如：生物碳(Lyu et al., 2016)、烴基多氯聯苯(Hydroxylated polychlorinated biphenyls, HO-PCBs) (Bhalla et al., 2016)、化學品對活性污泥之毒性(Cai et al., 2010)等。雖然該方法已被廣泛應用於檢測環境基質或化合物樣本之毒性效應，但細菌對於各種毒性物質反應結果與生物體仍存在差異，與動物實驗之結果相比未必存在良好的相關性。近年來許多研究開始嘗試利用生物體細胞之生物分析方法(如：MTT assay 與 ATP assay)進行毒性效應之評估，其結果應較貼近於生物體對於毒性物質之反應。故本次研究將使用 MTT assay 做為評估細胞毒性(Cytotoxic)之分析工具。

3-6-2 致癌性毒性分析(P53 bioassay)

P53 bioassay 為本計畫所使用之致癌性毒性分析工具，主要使用 p53 為腫瘤抑制蛋白（也稱為 p53 蛋白或 p53 腫瘤蛋白），在癌細胞中最常發現 p53 表現或功能不正常(Haupt and Haupt, 2006)。p53 為一個重要的暴露指標評估暴露化合物是否對人體產生致癌性，故於 2014 年學者提出利用基因轉殖技術，將帶有 p53 基因載體轉殖入細胞株中，發展出一套快速且方便之毒性篩選工具並將其定義為



p53 chemically activated luciferase gene expression (CALUX) (Linden et al., 2014)。雖然該方法提供了珍貴的化合物毒理學資料，但大部分的研究仍僅探討特殊病症(如:肝纖維化)與 p53 基因之反應(Liu et al., 2016)，仍缺乏複合性化合物致癌性之數據與受污染之環境樣本可能造成人體致癌風險資料。台灣目前仍沒有相關生物平台污染物致癌性篩選技術與研究數據，故本研究將參照本團隊承接『106 年度土壤及地下水汙染整治基金補助研究』之成果，使用生物平台致癌性篩選技術並嘗試應用於測試真實地下水樣本。

3-6-3 發炎反應分析(NF- κ B bioassay)

發炎反應為人體先天免疫系統為移除有害刺激及促進修復之保護措施，可做為生物體是否受到外因性物質干擾之反應指標。NF- κ B 調控機制為人體發炎反應機制之一，可做為人體前期毒性影響評估，該機制與免疫、炎症、病毒感染息息相關，可透過 NF- κ B 的基因表現，評估污染物是否會造成發炎之風險。研究指出環境樣本中存在之污染物質可能對人體產生炎症反應，如：PM_{2.5}、灰塵等(Bi et al., 2012; Green et al., 2016; Xiang et al., 2016)。Bi et al. (2012)指出 PM_{2.5} 濃度越高且停留在空氣中的時間越久，就容易引起支氣管發炎與氣喘疾病；Green et al. (2016)研究說明，暴露於 PM_{2.5} 對中年婦女的心血管凝血機制有不良的影響，且會誘發心血管的發炎反應。本團隊已成功建立發炎反應分析技術(NF- κ B bioassay)，並將其實際應用半定量之發炎反應評估，偵測到血管內皮細胞被重金屬鋅誘發顯著的發炎反應(Tsou et al., 2013)。且應用於對於 PM_{2.5} 誘發的發炎效應上，發現交通警察的發炎效應當量(TNF α -EQ)比待在辦公室的警察高(Chao et al., 2018)。

3-7 秀麗線蟲生物分析

評估毒性效應之方法大致分為離體實驗(*in-vitro*)與動物實驗(*in-vivo*)兩種，其中又以 *in-vivo* 之結果更能反應整個生物體的毒性作用(Madani et al., 2013)。秀麗線蟲 (*C. elegans*) 為悉尼布倫納於 1965 年建立為模式生物 (Brenner, 1973)，其作為動物模型具有成本低廉、符合倫理與易於維護等優點，將可用於評估污染物之毒性效應。*C. elegans* 是生存於土壤中的線蟲，以科學分類是屬於小桿線蟲科的隱桿線蟲屬，透過攝食微生物生存，目前已成為基因學、細胞生物學、神經科學及衰老等研究的熱門的模組(WormAtlas et al., 2018)。其優勢在於其生命週期短、培養及維護的過程中簡易，適合在實驗室內培養(Corsi et al., 2015)，且實驗成本低，並符合體外標準法處理。尤其是急毒性檢驗法結果能獲得完整得資訊，加上 *C. elegans* 代謝反應快可應用於生殖、內分泌、感覺及神經系統，作為綜合毒性試驗，已有學者應用於 PM_{2.5} 微粒進行急毒性檢驗(Zhao et al., 2014)。此部分與哺乳動物模組相比，急毒性檢驗能評估毒理學及此方法能改善哺乳動物模組的缺



結合電化學氧化處理與現地即時分析
技術於油品污染場址整治之可行性評估

陷，同時降低哺乳動物在毒性評估中的成本、時間(Hunt et al., 2017)。現階段，應用線蟲之研究方法已受到政府的注意及推動，用此方法改善毒性篩選和預測毒理學發展(Corsi et al., 2015)。故本研究旨在應用秀麗線蟲系統評估受油品污染之地下水樣本毒性效應，透過觀察線蟲之生殖毒理學終點（產卵大小）、衰老（老化）分析、行為（身體彎曲與頭部擺動等）和急性暴露(24 小時)測定致死率，了解其急毒性與神經發展毒性之影響。

3-8 生物毒性效應與電化學處理成效之關聯性

降解中間產物為地下水整治技術需審慎考慮之因素，因其仍可能產生些許毒性反應，將導致二次污染問題。雖然在學理中可大致推估何種中間產物可能被生成，但因中間產物種類繁多，僅使用化學分析法進行定性確認在時效性與整治成本考量上仍略顯不足。本團隊 107 年研究成果顯示，生物平台系統可用以評估人體細胞急毒性、致癌性與發炎反應等毒性。在致癌毒性分析方面，經降解後之水樣其反應濃度均顯著低於處理前之樣本($p<0.05$)；發炎反應分析結果則顯示在受苯類污染之水樣發現處理後反應濃度顯著降低($p<0.05$)，受含氯乙烯類污染之水樣則無顯著之結果($p=0.165$)(趙浩然，2018)。o-Xylene 濃度與發炎反應呈極顯著正相關($p<0.001$)，Benzene、Toluene、cis-1,2-Dichloroethene 為顯著相關($p<0.05$)；致癌毒性與 Toluene 及 o-Xylene 濃度呈極顯著正相關($p<0.01$)，與 MTBE 及 Ethylbenzene 為顯著正相關($p<0.05$)(趙浩然，2018)。

雖然目前仍沒有明確定義受污染水體對於人體誘發致癌性與發炎反應之標準，但從上述研究成果可發現經電化學處理後之水樣其生物毒性反應與目標污染物具有相當之關聯性，意味著生物毒性篩檢法將可做為評估整治效益與生態風險之依據。將此項技術導入本團隊整治概念中，即可快速解決降解中間產物不易確認之問題，若進一步搭配即時性地下水污染偵測系統，將可於整治後快速決策經處理之地下水樣是否適合補注回現地場址中。



研究方法與過程

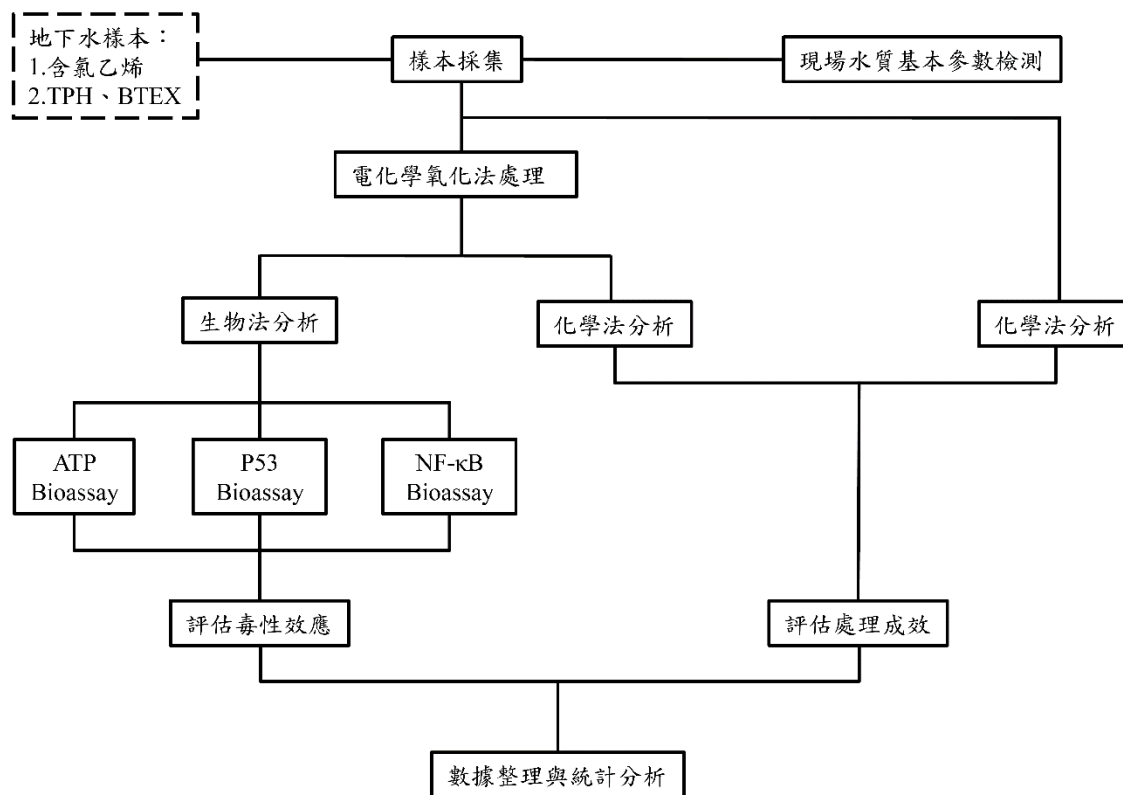


圖 4-1、實驗流程圖



結合電化學氧化處理與現地即時分析
技術於油品污染場址整治之可行性評估

4-1 實驗設計

本次研究擬發展一套可應用於油品污染場址之整治系統，將透過電化學氧化處理與即時分析技術評估其整治成效與數據準確性，後續藉由動物與離體實驗評估處理後之水樣對環境與人體之健康風險，如圖 4-2 所示。本次研究將採集受總石油碳氫化合物污染之地下水，地下水樣本採樣參考環保署公告監測井地下水採樣標準方法(NIEA W103.54B)，由業興環境科技公司協助本團隊進行。本次研究共分為兩階段進行測試，第一階段已測試 6 批次受油品污染樣本送至實驗室進行電化學處理，找出目前最佳之電解參數並利用即時分析技術與傳統化學分析技術分析，比對兩者處理前、後之水樣數據；第二階段將以前述所得較佳之電解參數，進行現地污染場址測試，反應水體為 1L 採批次試驗另接上即時監測系統，透過批次抽水的方式，擬處理 3 批次地下水樣本，並利用即時分析技術與生物毒性評估快速了解該地污染之狀況。

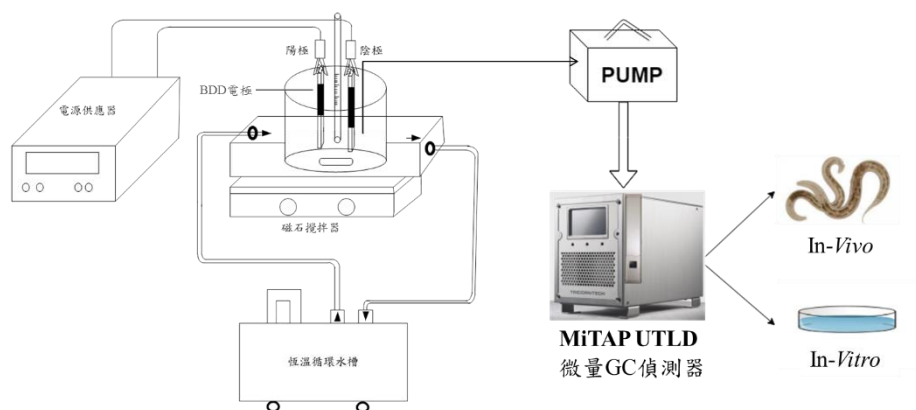


圖 4-2、電化學處理系統結合即時分析技術

4-2 樣本採集

本計畫採現地採樣攜回實驗室進行批次試驗，採樣方法係以抽水泵或貝勒管（Bailers）為採樣設備，在品保品管的規範下，進行地下水採樣，以確保採得具有代表性之地下水水樣。樣品採集完畢以低溫方式進行保存，當日即運送回屏東科技大學環境工程與科學系保存於 4°C 環境並於一周內完成批次試驗。

4-2-1 採樣器材及樣品容器

1. 攜帶式 pH 計：在 25 °C 下，其解析度需可達 0.01 單位，附有溫度補償裝置。
2. 攜帶式導電度計：附有溫度補償裝置。



3. 攜帶式溶氧計：執行揮發性有機物採樣時需備用，附有溫度及鹽度補償功能。
4. 攜帶式氧化還原電位計：執行揮發性有機物採樣時需備用。
5. 樣品容器：依據水質檢測方法總則－保存篇 NIEA W102 之規定，使用適當之容器。
6. 水位計：應採用電子偵測式水位計，材質應具化學鈍性且不易對分析物造成吸附或脫附者為宜，其刻度需可讀到 0.1 cm，或採用其他功能相當之水位計。
7. 洗井設備：以貝勒管洗井或選用可調整汲水速率之抽水機，其材質應具化學鈍性，汲水時不致產生氣提、氣曝作用及濁度增加等現象者為宜，建議可選用氣囊式泵或離心泵，其表現較佳。
8. 採樣設備：使用可調整速率之貝勒管。貝勒管材質以鐵弗龍為佳，但亦可採用化學相容性材質。依需要選用單止逆閥式（Single check valve bailers）或點源式貝勒管（Point-source bailers），採揮發性有機物水樣時，應使用附流速調節底面流出配件（Controlled-flow, bottom emptying assembly）之貝勒管。
9. 過濾裝置：包括塑膠或鐵氟龍固定座及濾紙。
10. 水流元（Flow cell 或 Flow through chamber）：於量測水質時，為避免水樣因接觸空氣或擾動造成水質不穩定之問題，用以測得穩定之水質參數。

4-3 場址地理與運作概況

本次計畫選定之場址為台灣南部某受油品污染之場址，以南部加油站場址為例，該場址位於高雄市，並曾被檢出超標之苯類化合物之濃度值。

4-4 實驗儀器與設備

4-4-1 電化學裝置

本實驗反應槽為雙槽，為分離式反應槽，以玻璃材質訂製之反應槽。雙槽間使用 Nafion-212 離子交換膜並且使用矽膠墊片於交換膜兩側，配合半圓型鐵夾相互緊扣防止漏液，雙槽之形式如圖 4-3 所示。於雙槽之陰陽兩極之電極接上電源供應器，通入電流進行實驗。



結合電化學氧化處理與現地即時分析
技術於油品污染場址整治之可行性評估

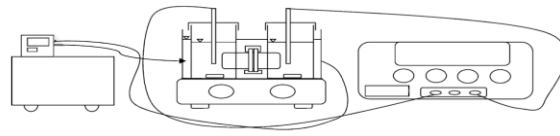


圖 4-3、雙槽之形式(陳，2011)

4-4-2 總有機碳分析儀(Total Organic Carbon, TOC)

本研究選用總有機碳分析儀(廠商 SHIMADZU, 型號 TOC-L CPH/CPN), 依照環檢所公告的方法水中總有機碳檢測方法-燃燒/紅外線測定法(NIEA W530.51C), 檢測的過程使用鄰苯二甲酸氫鉀作為檢量線, 用來分析受油品污染之地下水總有機碳含量, 以利觀察其地下水電降解的過程中有機碳(Organic Carbon, OC)及無機碳(Inorganic Carbon, IC)的濃度變化情形, 藉此得知降解有機物之濃度與降解效率。總有機碳分析儀如圖 4-4 所示。



圖 4-4、總有機碳分析儀(TOC)



4-5 化學分析法

本次研究化學分析目標化合物為 BTEX 與 MTBE，參照環保署公告水中揮發性有機物檢測方法—吹氣捕捉／氣相層析質譜儀法(NIEA W785.55B)。含揮發性有機物之水樣以針筒或自動進樣設備注入吹氣捕捉裝置的吹氣管中，於室溫下通以惰性氣體，將其中揮發性有機物導入捕捉管收集。待捕捉完成後，以瞬間加熱脫附並使用氬氣逆向通過捕捉管之方式，將有機物質導入氣相層析儀中。利用氣相層析管柱分離各個成分後，再以質譜儀作為偵測器，進行水中揮發性有機物之檢測。

4-6 即時偵測系統分析法

本次研究現地即時分析系統擬採用創控科技公司所開發之 MiTAP UTLD 微量 GC 偵測器進行地下水中 BTEX 與 MTBE 等污染物檢測，該設備利用微型製程奈米技術之專利微氣相層析管柱與精準晶片式控溫，透過自動化的吹氣捕捉前處理裝置，搭配不同的偵測器(如 EC、Nano-coating sensors、TCD、FID、PID 等)，可於 15 分鐘內完成地下水樣本分析。

4-7 化學分析方法與即時偵測系統 QA/QC

因地下水並無公告即時偵測系統之標準方法，相關之 QA/QC 規範將參照 NIEA W785.55B 進行定義，分述如下：(一)化學分析法檢量線確認：所得之感應因子與檢量線平均感應因子相對誤差不得超過 $\pm 20\%$ (或所測得濃度之相對誤差不得超過 $\pm 20\%$)；即時偵測系統檢量線平均感應因子相對誤差不得超過 $\pm 30\%$ 。(二)檢量線查核：每批次或每十二小時樣品分析，其感應因子與檢量線平均感應因子相對誤差不得超過 $\pm 25\%$ (或所測得濃度之相對誤差不得超過 $\pm 25\%$)；即時偵測系統感應因子與檢量線平均感應因子相對誤差不得超過 $\pm 25\%$ 。(三)空白樣品分析：每 10 個或每批樣品至少執行 1 次空白樣品分析，須低於待測物方法偵測極限的 2 倍。(四)查核樣品分析：每 10 個或每批樣品至少執行 1 次查核樣品分析，其回收率應在 75% 至 125% 之間。(五)重複樣品分析：每 10 個或每批樣品至少執行 1 次重複樣品分析，其相對差異百分比應在 25% 內。(六)化學分析添加樣品分析：每 10 個或每批樣品至少執行 1 次添加樣品分析，其回收率應在 65% 至 135% 之間；即時監測則不需進行。(七)內標準品監測：進行樣品分析時，必須同時評估內標準品之感應面積，其感應面積與檢量線標準溶液之感應面積比較，應在 50% 至 150% 範圍之間，或其感應面積與最近的檢量線查核溶液之感應面積比較，應在 70% 至 130% 範圍之間；即時偵測不需進行。(八)



結合電化學氧化處理與現地即時分析
技術於油品污染場址整治之可行性評估

擬似標準品回收率：進行樣品分析時，必須同時評估擬似標準品之回收率，應在 60% 至 140% 範圍之間；即時偵測不需進行。

4-8 生物分析法

本次專案擬使用本團隊所開發之秀麗線蟲及三種生物毒性分析法(NF- κ B bioassay、p53 bioassay、MTT bioassay)進行整治後之地下水毒性效應評估。現階段對於毒性效應評估僅止於探討急毒性、致癌性與非致癌性，站在健康風險的角度上仍略顯不足。本團隊所開發之三種毒性分析法，探討細胞致死率、致癌性與發炎反應之狀況，分別可代表人體前期、中期及後期毒性現象，具有極佳之人體健康風險評估代表性。NF κ B 調控機制為人體發炎反應機制之一，可做為人體前期毒性影響評估，該機制與免疫、炎症、病毒感染息息相關，可透過 NF- κ B 的基因表現，評估污染物是否會造成發炎之風險；P53 機制則反應 DNA 損傷與染色體異常，亦為致癌之主要因子，可作為中期毒性評估之依據；MTT 機制則為後期細胞毒性反應，透過檢測細胞粒線體中 MTT 濃度，了解污染物對於細胞之致死率，進一步評估對人體產生之健康危害。詳細原理如下所述：

4-8-1 綜合細胞毒性分析 (MTT Bioassay)

細胞致死率與存活率廣泛被用於離體實驗中，可評估與確認污染物質是否對人體細胞或生物體產生毒性影響。目前傳統檢測細胞毒性方法多為 MTT assay(3-(4,5-Dimethylthiazol-2-yl)-2,5-diphenyltetrazolium bromide)，該方法穩定與操作簡易。故本計畫參照下述實驗流程步驟，利用大鼠肝腫瘤細胞株(H4IIE)進行實驗。

4-8-1-1 MTT bioassay 原理

MTT assay 原理為利用檢測活細胞受到物質的影響導致細胞凋亡，24 小時後藉由藥劑破碎細胞將 ATP 釋放與 luciferase 及 luciferin 作用產生冷光反應，做為檢測活細胞的指標(如圖 4-6 所示)。

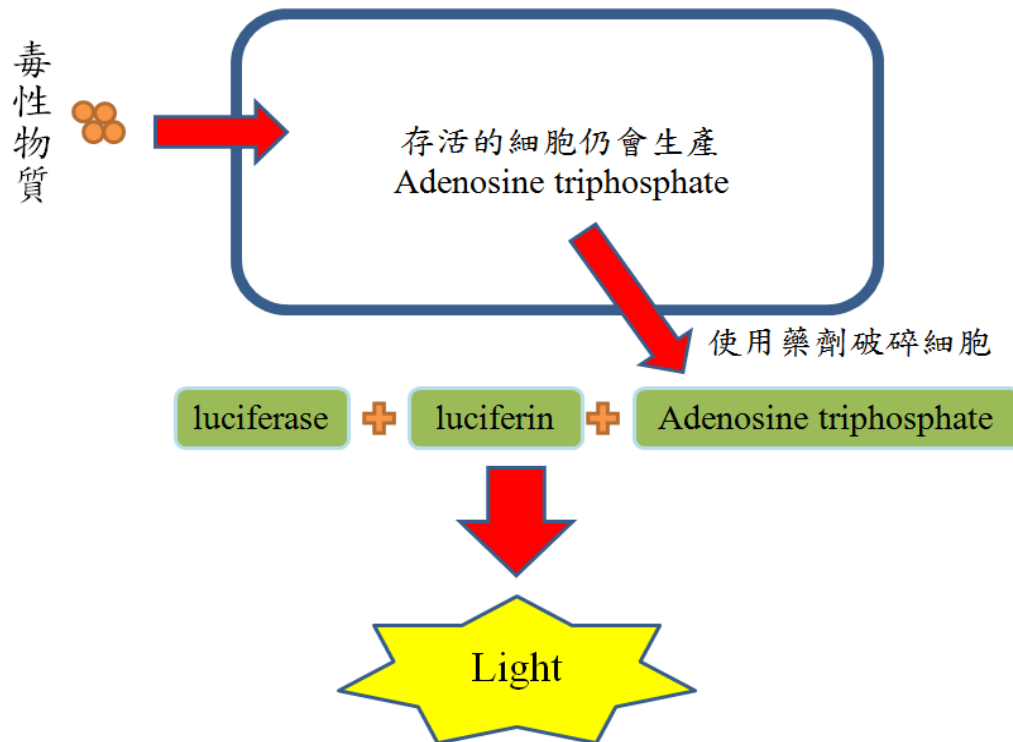


圖 4-5、MTT assay 作用原理示意圖

4-8-1-2 H4IIE 細胞培養與種植細胞

本次研究使用細胞 H4IIE，並進行細胞繼代培養。此細胞培養需在無菌操作台進行，首先將實驗用細胞自液態氮桶取出，回溫後將 H4IIE 細胞培養至 10 cm 培養皿中，觀察其生長狀況，當細胞覆蓋盤面約八成後進行繼代培養如圖 4-7 所示。將培養皿中 MEM 抽起，加入 DPBS 溶液清洗兩次，接著加入 1.5 mL (1X Trypsin EDTA, TE) 均勻覆蓋盤面，放置 CO₂ 培養箱培養 3 分鐘，取出培養皿並拍打盤面使細胞脫離盤面，加入 6 mL MEM 充分混合均勻，取 100 μ L 加入 400 μ L Trypan blue 混和均勻後，取 100 μ L 於血球計數器計算細胞數量，再依實驗設計將 5×10^4 細胞分別加入 24 wells 白盤內，每一孔中體積為 500 μ L。最後放置 CO₂ 培養箱培養隔夜即完成，細胞種植流程如圖 4-8 顯示。



結合電化學氧化處理與現地即時分析
技術於油品污染場址整治之可行性評估

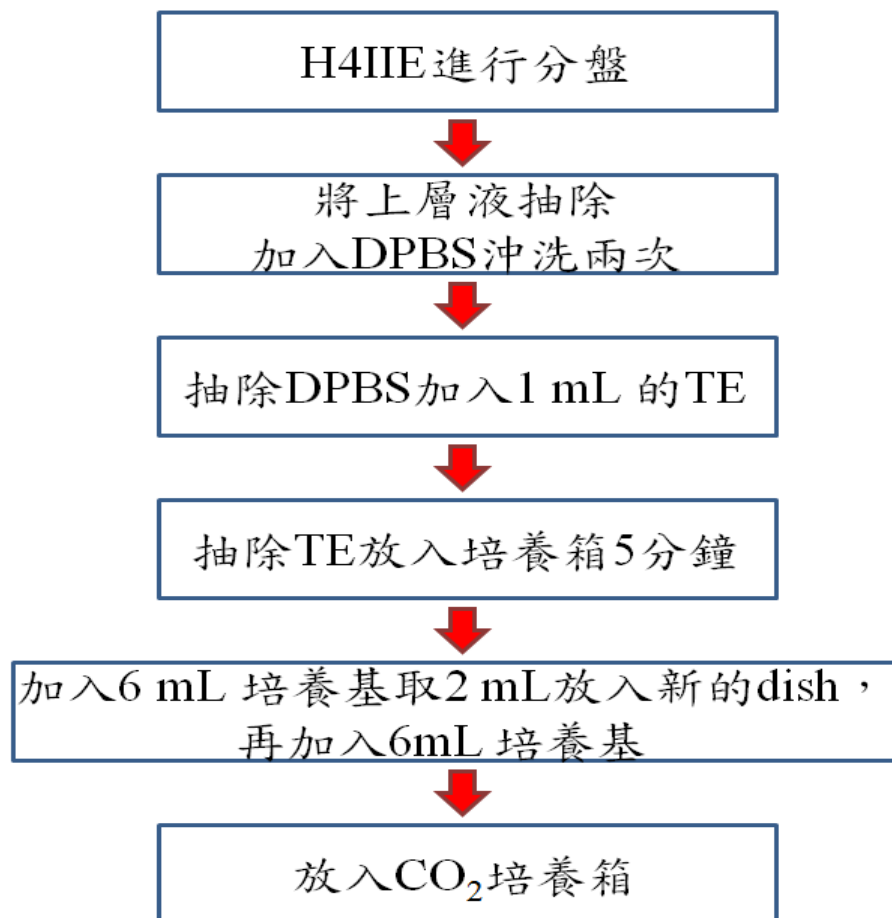


圖 4-6、細胞繼代培養步驟

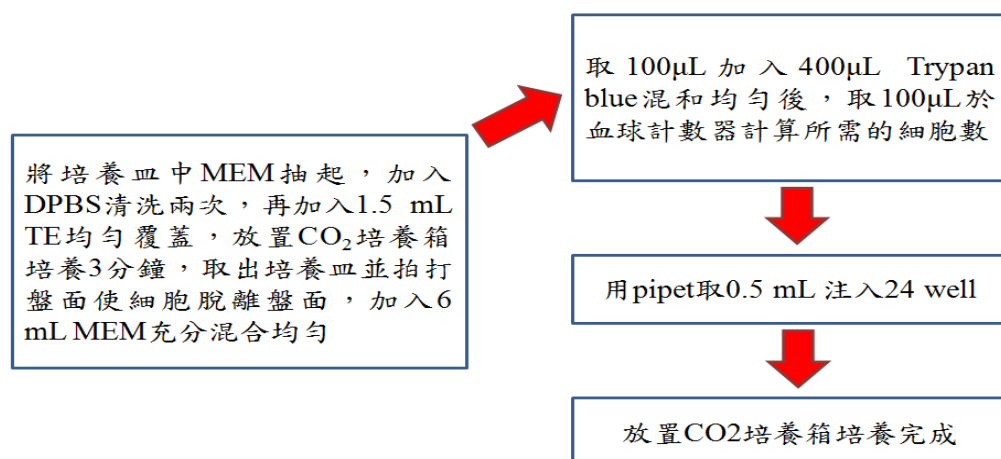


圖 4-7、H4IIE 細胞種殖步驟



4-8-1-3 Cytotoxic MTT bioassay 樣品暴露及偵測

將待測物質稀釋成 8 個不同濃度含比較組(例如：0、10、20、30、40、50、60、70%，或者連續 10 倍稀釋成 8 個濃度)，取稀釋後的化合物質以每孔體積 100 μ L/well 加入，另外需注意的是因 DMSO 仍會對細胞產生毒性影響，故經稀釋後 DMSO 濃度需為 1%，暴露時間為 24 小時加入 50 μ L/wells 藥劑放入儀器偵測，完整流程如圖 4-9 顯示。

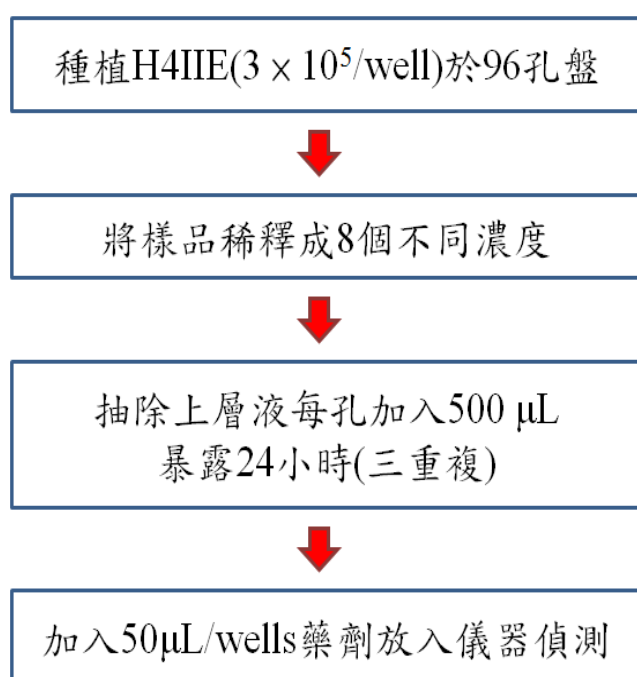


圖 4-8、MTT bioassay 分析步驟

4-8-2 致癌毒性分析(p53 bioassay)

p53 之 8-OHdG(8-hydroxy-2-deoxy Guanosine)物質是生物受到 DNA 損傷而產生，其影響範圍有凋亡、代謝、衰老、分化的抑制及加速 DNA 修復、激活等條件常與癌症的病發相關，如直接性的 DNA 損傷、染色體異常、非致命性癌基因的活化、缺氧性或更多相關因素，已有文獻指出 8-OHdG 的濃度與某些癌症有正相關性(Baik et al., 1996; Farinati et al., 1998)。故檢測 8- OHdG 濃度反應將可用於判斷樣本可能產生致癌之風險，輔助評估毒性化學物質之致癌風險與非致癌風險



結合電化學氧化處理與現地即時分析
技術於油品污染場址整治之可行性評估

數據。研究參照前人之研究相關成果，建立 ELISA 檢測法，發展屬於台灣土壤之 DNA 損傷篩選技術並嘗試應用於測試真實環境基質樣本。詳細原理與步驟如下所述。

4-8-2-1 p53 bioassay 原理

將 DNA 損傷而產生之 8- OHdG 於貼覆於板模下方，再添加抗體(8-OHdG Monoclonal Antibody-HRP Conjugated)與 8-OHdG 結合，接續移除廢液用 Wash buffer 清洗移除多餘的 8-OHdG 及抗體，再次添加 TMB Substrate 與抗體結合產生螢光，最後加入 Stop Solution 終止 TMB Substrate 反應，藉由偵測冷光的強度即可間接得知此物質是否含有活化性質(如圖 4-10 所示)。

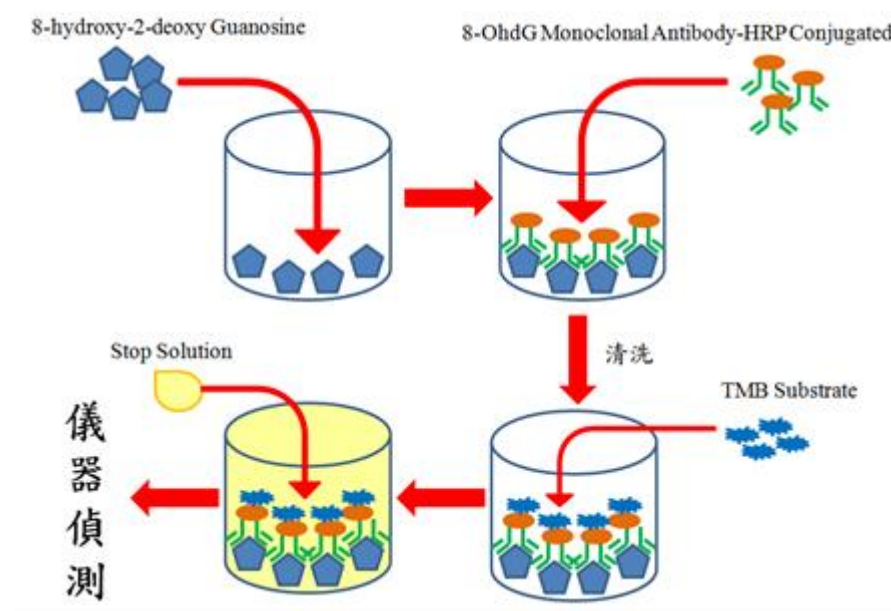


圖 4-9、8-OHdG 作用原理示意圖



4-8-3 發炎反應分析(NF- κ B bioassay)

發炎反應生物偵測法使用之腺病毒載體上含有 AdEasy-NF κ B-Luc、AdEasy-C/EBP-Luc 或 AdEasy-CRE-Luc 感染到人類早期單核白血球(Human promonocytic leukemia cell line, HL-CZ)，當暴露到有發炎反應的物質，會激發 reporter 基因的冷光表現，最後偵測的生物指標 (biomarker)，則以量測螢火蟲發光酵素活性(luciferase activity) 作為判斷濃度的依據。

4-8-3-1 發炎反應分析(NF- κ B bioassay)原理

NF- κ B bioassay 為將含螢火蟲發光基因 (Adv-NF- κ B-Luc) 之腺病毒 (Adenoviruses) 感染人類早期單核白血球(HL-CZ)，使其可對發炎反應系統進行冷光偵測。本實驗使用誘發細胞發炎反應之因子(TNF- α)做為檢量線，藉由比對樣本與 TNF- α 誘導發炎之冷光強度，量化暴露樣本所產生之發炎反應程度。

4-8-3-2 發炎反應分析(NF- κ B bioassay)細胞培養與種殖細胞

人類早期單核白血球(HL-CZ)為本計畫用於檢測發炎反應之細胞株，其使用的培養基為 RPMI1640 (Sigma, R6504)內含約 10% FBS (SAFS, 12003C)與約 1% P/S (Sigma, P0781)。將 RPMI1640 粉末倒入 1000 mL 量筒中並加入去離子水 600 ~ 700 mL，接著加入 2 g 的 NaHCO₃ 並放置電磁爐上利用磁石旋轉均勻混合一小時後，再倒入 200 ~ 300 mL 去離子水使其為 890 mL，測定 pH 值，使其 pH 值介於 7.2 ~ 7.3 之間，測量過程中如呈現酸性加入 NaOH 中和，反之呈鹼性則加入 HCl 中和。最後加入 90 mL FBS、10 mL P/S，總體積為 990 mL 並使用 0.22 μ m 過濾器過濾使培養基達到無菌狀態。

4-8-3-3 發炎反應分析(NF- κ B bioassay)樣品暴露及偵測

HL-CZ 細胞培養實驗進行前需先將細胞株自液態氮桶中取出回溫，於 10 cm 培養皿中進行培養，使用有酚紅之 RPMI1640 培養基，當細胞覆蓋盤面約八成後進行分盤，依實驗設計將或 2×10^4 HL-CZ 細胞分別接種至 96 孔盤內，放置 CO₂ 培養箱培養十二小時，並將剩餘細胞移置培養皿中完成繼代培養。

首先將穩定轉殖之腺病毒(Adv-NF- κ B-Luc)溶於含有 FBS 的培養液經隔夜培養，接著取出 96 wells 白盤，將上層培養液抽離，加入(MOI=1 PFU/cell)病毒進行感染程序，腺病毒感染過程所添加之病毒濃度可視實驗需求調整，添加體積為 100 μ L，感染 24 小時。感染完畢後，將上層液移除加入地下水樣本與不同濃度之



結合電化學氧化處理與現地即時分析
技術於油品污染場址整治之可行性評估

TNF- α 利用連續稀釋方式將濃度配置七個點以上(1×10^{-12} 、 2×10^{-12} 、 5×10^{-12} 、 1×10^{-11} 、 5×10^{-11} 、 1×10^{-10} 、 5×10^{-10} 、 1×10^{-9} g/mL)。需注意的是二甲亞砜(Dimethyl sulfoxide, DMSO)會對細胞產生毒性影響，故稀釋後細胞株暴露樣品的二甲亞砜(DMSO)濃度需為 1%，添加完放置溫度 37 °C 之 CO₂ 培養箱暴露 24 小時後，加入 Promega 公司出產的短效 luciferase assay buffer 與 luciferase substrate 粉末(Cat. No. E1501)並利用冷光儀判讀其冷光數值。

4-8-4 秀丽線蟲毒性測試

秀丽線蟲 (*C. elegans*) 為悉尼布倫納於 1965 年建立為生物模型 (Brenner, 1973)，其作為動物模型具有成本低廉、符合倫理與易於維護等優點，將可用於評估污染物質之毒性效應。本團隊也將進一步探討經電化學處理後水樣其自由基對於生物體氧化壓力之影響，使用線蟲顯微注射(microinjection)技術，將轉殖基因質體轉殖入線蟲中，並使其子代攜帶此轉殖基因。攜帶質體為氧化壓力(Stress)感受器基因(secNluc, EGFP)與分泌性 secNluc 定量兩個報導基因。將基因轉殖完畢後之線蟲取出並培養至液態培養基中，將生長狀況良好之線蟲挑選至 12 孔盤中，再將經電化學處理後不同時間之樣本與過氧化氫標準品共同添加入盤內，觀察其生長狀況與破碎線蟲後使用冷光儀進行分析。除此之外，為了解受油品污染之地下水樣本造成之急毒性與神經發展毒性之影響，將觀察線蟲之生殖毒理學終點（產卵大小）和行為（身體彎曲與頭部擺動等）。

4-8-4-1 *C. elegans* 繼代及培養

4-8-4-1-1 Nematode growth media(NGM) plates 製備

精秤 2 g 的消化蛋白凍、2.4 g 的氯化鈉、24 g 的洋菜膠加入 1 L 廣口血清試藥瓶，接續加入 780 mL 去離子水混合均勻，放入高溫高壓滅菌爐滅菌 30 分鐘，等待 3 小時後移至循環水槽降溫並維持 55°C，接續加入 1 mL 的 1M-CaCl₂、1 M 的 MgSO₄、5 mg/mL 的 Cholesterol 及 25 mL 的 1 M -Phosphate，搖晃均勻加入 10 mL 至 5.5 公分培養皿，放置無菌操作台待培養基凝固，並照射紫外燈至隔天確認無水滴後倒至收入 4°C 冰箱保存，一個月為限(如圖 4-14)。

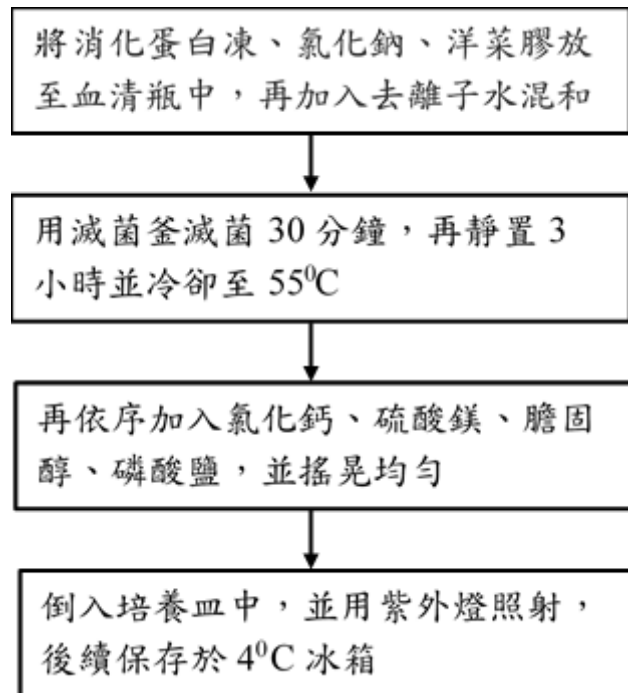


圖 4-10、培養基製備

4-8-4-1-2 培養 *Escherichia coli* (*E. coli*) OP50 之 NGM plates 製備

取 20 g 的 LB Broth 至 1 L 廣口血清試藥瓶，並加入去離子水定量至 1 L，放入高溫高壓滅菌爐殺菌等待 3 小時，結束後取出放到藥品保存櫃冷卻，取出 40 mL 至 50 離心管，加入 200 μ L 的 *E. coli* OP50 及 20 μ L 的 Ampicillin(100 μ g/mL)，37°C 震盪(175 rpm)培養 16-18 小時，取出 10 μ L 於 5.5 公分培養皿，並三角彎棒塗抹成方形放至 20 度培養箱 1 天，剩餘 *E. coli* 保存於 4 °C 冰箱即可。

4-8-4-1-3 *C. elegans* 繼代(chunk)

將挑蟲器過火消毒後，取 *C. elegans* 之 NGM plates 在解剖顯微鏡下觀察高密度區域，並切下約 1 平方公分之方形，將其倒至於新的 NGM plates 上培養，此方法又稱 chunk，可培養健康之 *C. elegans* 一週。

4-8-4-1-4 同期/齡化(Bleach)

取 chunk 第二天之 NGM plates 觀察，挑選含有大量未孵化的卵及 L4 型態之 *C. elegans* 之成蟲 NGM plates，使用塑膠滴管吸取乙醇(ethanol)殺菌後換去離子水(DD water)沖洗，反覆吸取 3 mL 的 DD water 沖洗培養基上方的卵及 *C. elegans*



結合電化學氧化處理與現地即時分析
技術於油品污染場址整治之可行性評估

移至 15 mL 離心管，並定量到 15 mL 放置離心機用轉速 1200g(2800RPM)處理 1 分鐘，接續去除 14 mL 上層液並重複沖洗離心 2-3 次確保卵及 *C. elegans* 已轉移到 15 mL 離心管。移除廢液留下 3.5 mL 水，依順序加入 0.5 mL 的 5M KOH 及 1 mL 的 NaOCl 並在此藥劑添加步驟完成後限時 6 分鐘，每搖晃 30 秒後用顯微鏡觀察 *C. elegans* 斷裂及卵釋出的量，重複 2-3 次確認 *C. elegans* 消失剩餘大量的卵，待鈴聲響立即加入 DD water 定量至 15mL 離心管，用轉速 1200 g(2800 RPM)處理 1 分鐘後重複加水離心 2 次，小心移除所有上層液留下卵團塊，輕敲後加入 4 mL 的 M9-medium 把卵均勻沖散放入 5.5 公分培養皿搖晃均勻，放至 22°C 培養箱孵化 12~48 小時。

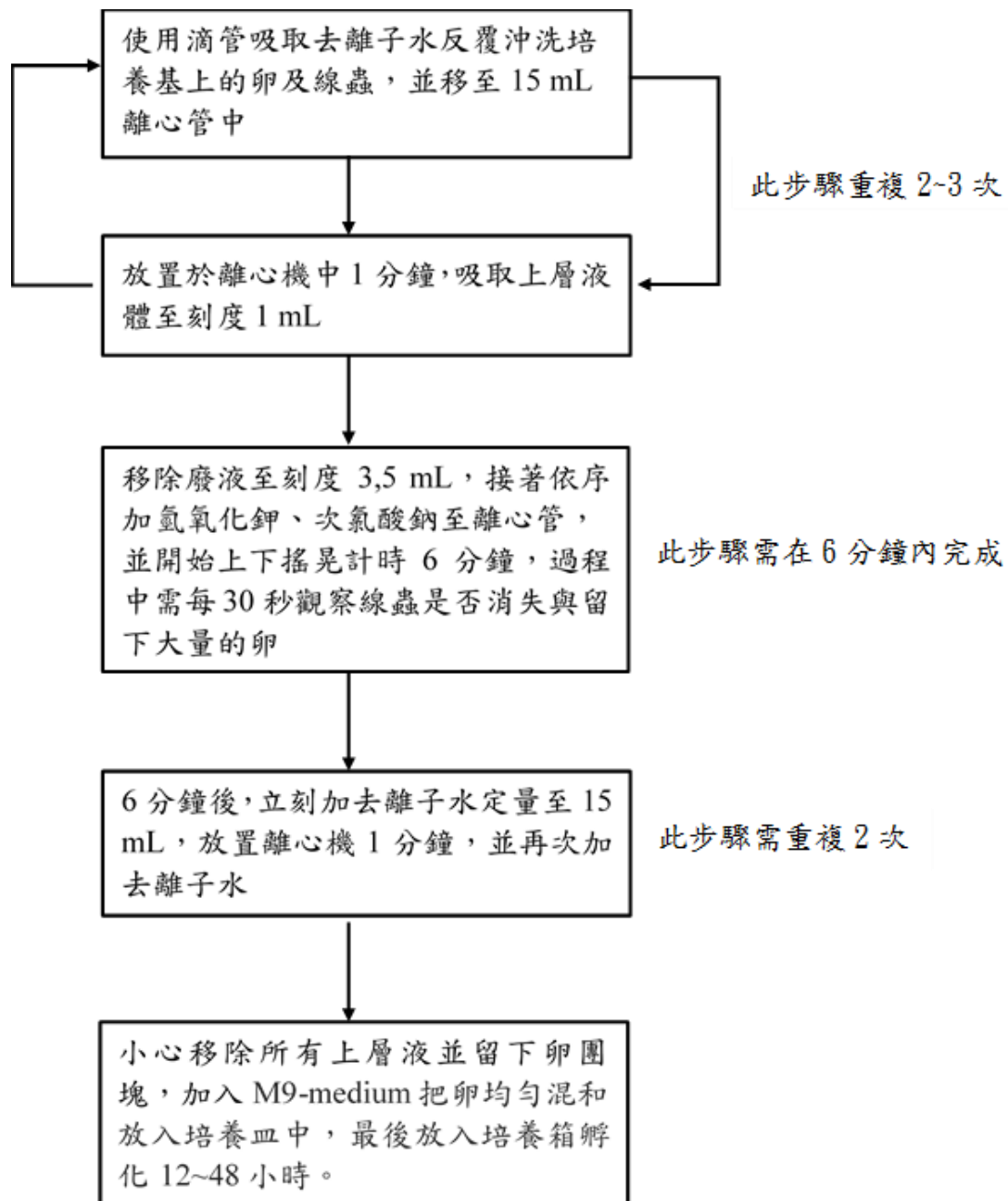


圖 4-11、同期/齡化步驟

4-8-4-1-5 同期/齡培養(Seeding)

取出 Bleach 後孵化之 L1 型態 *C. elegans* 於無菌操作台內，將 5.5 公分培養皿搖晃均勻，並使用口徑大的 tip 或剪除 20 μ L-tip 的前方一節，吸取 10 μ L 放置玻璃片上劃開成小線條兩重複，計數 *C. elegans* 數量($C. elegans$ 數量/20=總數/ μ L)，取出 3500 隻的量放入 5.5 公分培養皿，待 L1 型態成長成 L4 型態。



結合電化學氧化處理與現地即時分析
技術於油品污染場址整治之可行性評估

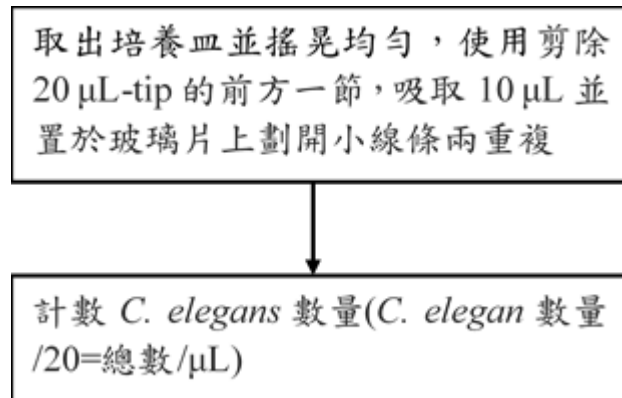


圖 4-12、同期/齡培養步驟

4-8-4-2 樣品暴露

將樣品以 DMSO 稀釋成以 10 倍連續稀釋成 7 個濃度(樣品稀釋)，接續使用 *C. elegans* 培養基 K+ medium，以 1：100(樣品：K+ medium)方式稀釋(實驗稀釋)，確保 DMSO 濃度降為 1%，然後加入 12 well 盤，總共為 8 種濃度三重複。

4-8-4-3 急毒性評估

將同步的 L1 線蟲接種到 NGM 盤上並孵育直至 L3 或年輕 L4 階段。取出 L4 型態 *C. elegans*，以 K+ medium 沖洗 *C. elegans* 收集至 1.7 mL 之 tube，並以 2200 g 轉速離心 2 分鐘，移除廢液再加入 K+ medium 淨化 *C. elegans* 後再次離心，最後加入 1 mL 的 K+ medium 均勻搖晃，吸取 10 µL 放置玻璃片上劃開成小線條兩重複，計數 *C. elegans* 數量(*C. elegans* 數量/20=總數/µL)，每孔放入 200 隻的量在 12 well(8 個濃度三重複)，處理 24 小時取出 50 隻放入不含 *E. coli* 的 NGM plates，利用挑蟲器輕微碰觸評估其活性，若無反應及判定死亡。

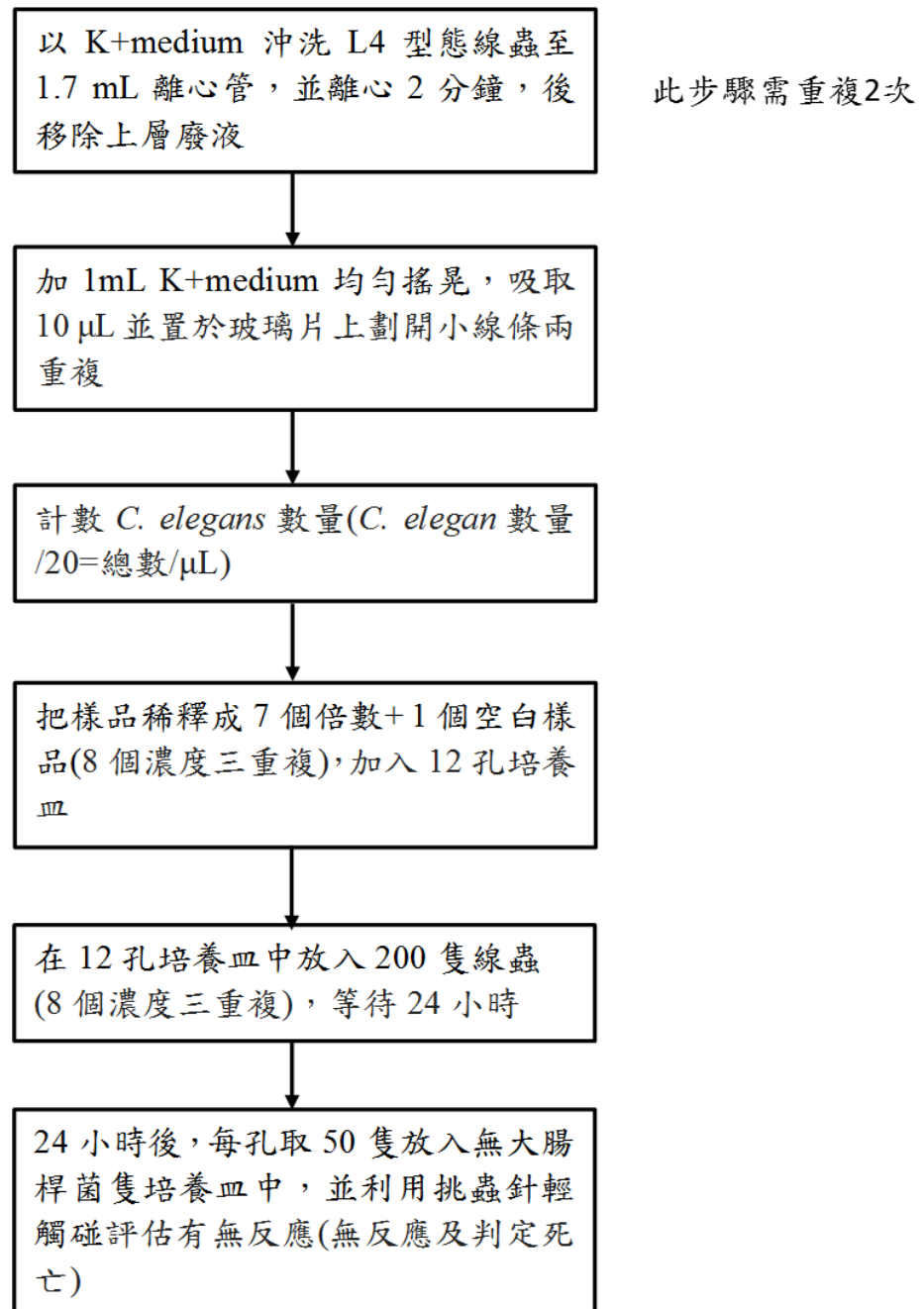


圖 4-13、急毒性評估步驟



結合電化學氧化處理與現地即時分析
技術於油品污染場址整治之可行性評估

4-8-4-4 運動行為評估

透過 Acute Toxicity 處理 24 小時之 *C. elegans*，利用顯微鏡觀察 20 隻 *C. elegans* 的頭部擺動及身體彎曲的次數，用來評估毒性對 *C. elegans* 造成的影響，兩者判斷方式都為由平行彎曲至任一方向計算一次，頭部擺動為 20 秒，身體彎曲為 1 分鐘，一個濃度進行 3 重複。

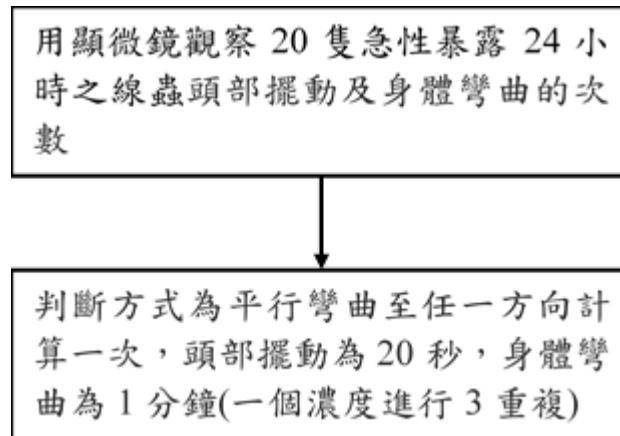


圖 4-14、運動行為評估方法

4-8-4-5 生殖毒性檢驗

將 Acute Toxicity 處理 24 小時之 *C. elegans* 放至 12 well 每孔 1 隻，8 個濃度分別 12 重複，每孔都是含有 *E. coli* 的 NGM plates，待 *C. elegans* 下蛋兩天後挑起移至新的 12 well，第三天計算舊的 12 well 之 *C. elegans* 數量，第二盤在第 6 天後計算 *C. elegans* 數量，以兩次產蛋數量來評估產蛋期間的生殖毒性影響。

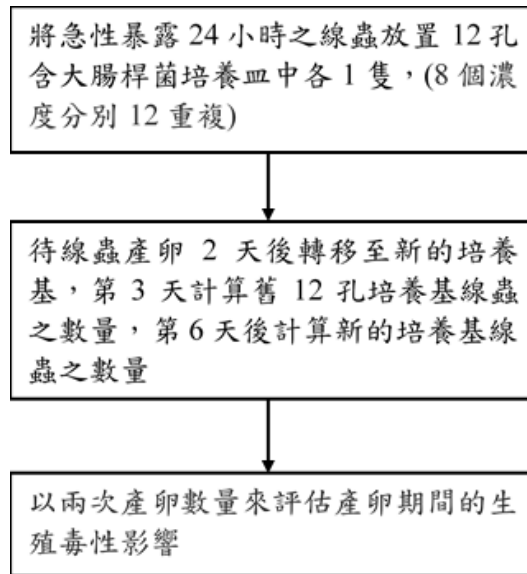


圖 4-15、生殖毒性試驗步驟



結合電化學氧化處理與現地即時分析
技術於油品污染場址整治之可行性評估



結果與討論

5-1 地下水現地水質檢測

5-1-1 採樣場址及編號

本研究實驗中其各井及各樣品編號，分別為第一季至第四季，一季惟採一批水樣，共三個採樣場址及共八個採樣井，個別皆採兩批水樣，第一季(採樣井 SV01、SV02 及 SV03)及第二季(採樣井 SV01-S1、SV02-S1 及 SV03-S1)皆為高雄某加油站之水樣，只是不同時間所採之水樣。而第三季及第四季之水樣，分別為澎湖某化工廠(採樣井 GW-377 及 GW-377-1)及高雄某化工廠(採樣井 GR-1、GR-2 及 GR-3)，其樣品編號之 S1 及 S2 為第一次採樣及第二次採樣之代碼，各場址之水樣皆至少會做 1 至 6 次不同試驗，故採樣井及採樣次數後之代碼為該水樣第幾次電化學試驗(例:GW-377-S1-5 為澎湖場址採樣井為 GW-377 第一次採樣(S1)之第五次電化學試驗)，其電化學實驗進行之水樣皆為個別之水樣。

5-1-2 第一季及第二季之水質檢測

本研究第一季樣品採集位於高雄市某加油站受總石油碳氫化合物污染且曾被檢測苯類污染物超標之地下水(SV01、SV02、SV03)，其水質檢測結果如表 5-1 所示。水樣溫度為 25.0 °C、pH 值為 7.26~7.88 之間、溶氧為 4.63 mg/L~6.89 mg/L 之間。各水井間導電度差異較大，經運輸送至實驗室後，其濃度介於 815 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 至 1885 $\mu\text{S}/\text{cm}$ ，ORP 範圍則為 165 mv~227 mv 之間。



結合電化學氧化處理與現地即時分析
技術於油品污染場址整治之可行性評估

表 5-1、第一季場址水質檢測

樣品編號	檢測項目				
	導電度($\mu\text{S}/\text{cm}$)	溫度($^{\circ}\text{C}$)	pH	溶氧(mg/L)	ORP (mv)
SV01	815	25	7.26	4.63	165
SV02	1885	25	7.75	5.21	202
SV03	1358	25	7.88	6.11	227
SV01*	9020	25	7.87	5.23	137
SV02*	10160	25	8.25	6.68	150
SV03*	10120	25	8.42	6.89	306
備註:*為有添加 0.05 M 之 Na_2SO_4 電解質					

第二季樣品採集地點同第一季，樣品採集位於高雄市某加油站受總石油碳氫化合物污染且曾被檢測苯類污染物超標之地下水(SV01-S1、SV02-S1、SV03-S1、SV01-S2、SV02-S2、SV03-S2)，由於 S1(SV01-S1、SV02-S1、SV03-S1)之水樣與 S2(SV01-S2、SV02-S2、SV03-S2)其檢測結果相似，故以下由 S1 舉例，其水質檢測結果如表 5-2 所示。溫度為 25°C 、pH 值為 7.16 ~ 8.25 之間、溶氧為 $3.30 \text{ mg}/\text{L}$ ~ $6.20 \text{ mg}/\text{L}$ 之間。各水井間導電度差異較大，其介於 $973 \mu\text{S}/\text{cm}$ 至 $10490 \mu\text{S}/\text{cm}$ ，ORP 範圍則為 334 mv ~ 360 mv 之間。



表 5-2、第二季場址水質檢測

樣品編號	檢測項目				
	導電度($\mu\text{S}/\text{cm}$)	溫度($^{\circ}\text{C}$)	pH	溶氧(mg/L)	ORP (mv)
SV01-S1	973	25	7.16	3.83	360
SV02-S1	2220	25	7.37	3.30	358
SV03-S1	1779	25	8.2	3.33	334
SV01*-S1	9640	25	7.54	6.20	359
SV02*-S1	10490	25	8.06	5.49	358
SV03*-S1	10180	25	8.25	5.36	349
備註:*為有添加 0.05 M 之 Na_2SO_4 電解質					

由表 5-3 可以看出同採樣點在第一季與第二季的水質差異，SV01 在第一季導電度分別為 $815 \mu\text{S}/\text{cm}$ 與 $973 \mu\text{S}/\text{cm}$ 、溫度上並沒有太大的差異、pH 值為 7.26 與 7.16、溶氧在第一季時為 $4.63 \text{ mg}/\text{L}$ 在第二季採樣時降至 $3.83 \text{ mg}/\text{L}$ 、在 ORP 氧化還原電位第一季測值為 165 mv 第二季升至 360 mv，SV02 在第一季時導電度測值為 $1885 \mu\text{S}/\text{cm}$ 第二季微上升至 $2220 \mu\text{S}/\text{cm}$ 、溫度上並沒有太大的差異、pH 值為 7.75 與 7.37、溶氧在第一季測值為 $5.21 \text{ mg}/\text{L}$ 在第二季採樣時降為 $3.30 \text{ mg}/\text{L}$ 、在 ORP 氧化還原電位第一季測值為 202 mv 為氧化性第二季測值為 358 mv，SV03 導電度第一季測得 $1358 \mu\text{S}/\text{cm}$ 而第二季微上升至 $1779 \mu\text{S}/\text{cm}$ 、在溫度的部分第一季與第二季並沒有太大的差異、pH 值從 7.88 變為 8.20、溶氧在第一季時為 $6.11 \text{ mg}/\text{L}$ 在第二季採樣時降至 $3.33 \text{ mg}/\text{L}$ 、在 ORP 氧化還原電位第一季測值為 227 mv 為氧化性第二季測值為 334 mv。

而在添加電解質的部分，SV01*在第一季導電度分別為 $9020 \mu\text{S}/\text{cm}$ 與 $9640 \mu\text{S}/\text{cm}$ 、溫度上並沒有太大的差異、pH 值為 7.78 與 7.54、溶氧在第一季時為 $5.23 \text{ mg}/\text{L}$ 在第二季為至 $6.20 \text{ mg}/\text{L}$ 、在 ORP 氧化還原電位第一季測值為 137 mv 第二季升至 359 mv，SV02*在第一季時導電度測值為 $10160 \mu\text{S}/\text{cm}$ 第二季上升至 $10490 \mu\text{S}/\text{cm}$ 、溫度上並沒有太大的差異、pH 值為 8.25 與 8.06、溶氧在第一季測值為 $6.68 \text{ mg}/\text{L}$ 在第二季採樣為 $5.49 \text{ mg}/\text{L}$ 、在 ORP 氧化還原電位第一季測值為 150 mv 為氧化性第二季測值為 358 mv，SV03*導電度第一季測得



結合電化學氧化處理與現地即時分析
技術於油品污染場址整治之可行性評估

10120 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 而第二季微上升至 10180 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 、在溫度的部分第一季與第二季並沒有太大的差異、pH 值從 8.42 與 8.25、溶氧在第一季時為 6.89 mg/L 在第二季為 5.36 mg/L、在 ORP 氧化還原電位第一季測值為 306 mv 為氧化性第二季測值為 349 mv。

表 5-3 第一季與第二季水質比較

檢測項目	樣品編號											
	SV01		SV02		SV03		SV01*		SV02*		SV03*	
	一	二	一	二	一	二	一	二	一	二	一	二
導電度 ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	815	973	188 5	222 0	135 8	177 9	902 0	964 0	1016 0	1049 0	1012 0	1018 0
溫度($^{\circ}\text{C}$)	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25
pH	7.2 6	7.1 6	7.75	7.37	7.88	8.20	7.78	7.54	8.25	8.06	8.42	8.25
溶氧(mg/L)	4.6 3	3.8 3	5.21	3.30	6.11	3.33	5.23	6.20	6.68	5.49	6.89	5.36
ORP(mv)	165	360	202	358	227	334	137	359	150	358	306	349
備註*:為有添加 0.05 M 之 Na_2SO_4 電解質。一:為第一季水樣。二:為第二季水樣。												

5-1-2 第三季及第四季之水質檢測

由於第一季及第二季採樣之場址由期中結果得知該場址污染濃度較低，不利整治試驗進行，故本團隊在第三季樣品分別採集位於高雄市某化工廠及澎湖某化工廠其皆受總石油碳氫化合物污染且曾被檢測出苯類污染物超標之地下水水樣(GW-377-S1、GW-377-1-S1、GR-1-S1、GR-2-S1、GR-3-S1)，其水質檢測結果如表 5-4 所示。水樣溫度為 25~29 $^{\circ}\text{C}$ 、pH 值為 6.84~7.29 之間、溶氧為 1.58 mg/L~3.56 mg/L 之間。兩個不同場址之導電度差異較大，其導電度介於 124.8 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 至 1670 $\mu\text{S}/\text{cm}$ ，ORP 範圍則為 161 mv~281 mv 之間。



表 5-4、第三季場址水質檢測

樣品編號	檢測項目				
	導電度 ($\mu\text{s}/\text{cm}$)	溫度 ($^{\circ}\text{C}$)	pH	溶氧 (mg/L)	ORP (mv)
GW-377-1-S1	1663	28	7.29	3.14	161
GW-377-1-S1	1670	29	7.09	3.56	172
GR-1-S1	285	27	6.88	2.10	275
GR-2-S1	124.8	25	7.09	1.59	278
GR-3-S1	210	26	6.84	1.58	281

第四季樣品採集地點同第三季，樣品分別採集位於高雄市某化工廠及澎湖某化工廠其皆受總石油碳氫化合物污染且曾被檢測苯類污染物超標之地下水(GW-377-S2、GW-377-1-S2、GR-1-S2、GR-2-S2、GR-3-S2)，其水質檢測結果如表 5-5 所示。溫度為 25~26 $^{\circ}\text{C}$ 、pH 值為 7.05~7.84 之間、溶氧為 1.68 mg/L ~4.31 mg/L 之間。各場址間導電度差異較大，其介於 3283 $\mu\text{s}/\text{cm}$ 至 1885 $\mu\text{s}/\text{cm}$ ，ORP 範圍則為 162 mv ~215 mv 之間。

表 5-5、第四季場址水質檢測

樣品編號	檢測項目				
	導電度 ($\mu\text{s}/\text{cm}$)	溫度 ($^{\circ}\text{C}$)	pH	溶氧 (mg/L)	ORP (mv)
GW-377-S2	1412	26	7.84	4.31	211
GW-377-1-S2	1885	25	7.75	3.64	215
GR-1-S2	332	25	7.11	1.96	162
GR-2-S2	331	26	7.05	1.68	165
GR-3-S2	328	25	7.09	1.72	163

由表 5-6 可以看出同採樣點在第三季與第四季的水質差異，GW-377 在第三季及第四季導電度為 1663 $\mu\text{s}/\text{cm}$ 及 1412 $\mu\text{s}/\text{cm}$ 、pH 值為 7.29 及 7.84、溶氧在第三季時為 3.14 mg/L 在第四季時升至 4.31 mg/L 、在 ORP 氧化還原電位第三季測值為 161 mv 第四季升至 211 mv ，GW-377-1 在第三季及第四季導電度為 1670 $\mu\text{s}/\text{cm}$ 及 1885 $\mu\text{s}/\text{cm}$ 、pH 值為 7.09 及 7.75、溶氧在第三季時為 3.56 mg/L 在第四季時升至 3.64 mg/L 、在 ORP 氧化還原電位第三季測值為 172 mv 第四季升至 215 mv ，GR-1 在第三季及第四季導電度為 285 $\mu\text{s}/\text{cm}$ 及 332 $\mu\text{s}/\text{cm}$ 、pH 值為 6.88 及 7.11、溶氧在第三季時為 2.10 mg/L 在第四季時降至 1.96 mg/L 、在 ORP 氧化還原電位第三季測值為 275 mv 第四季降至 162 mv ，GR-2 在第三季及第四季導電度為



結合電化學氧化處理與現地即時分析
技術於油品污染場址整治之可行性評估

124.8 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 及 331 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 、pH 值為 7.09 及 7.05、溶氧在第三季時為 1.59 mg/L 在第四季時升至 1.68 mg/L、在 ORP 氧化還原電位第三季測值為 278 mv 第四季降至 165 mv，GR-3 在第三季及第四季導電度為 210 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 及 328 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 、pH 值為 6.84 及 7.09、溶氧在第三季時為 1.58 mg/L 在第四季時升至 1.72 mg/L、在 ORP 氧化還原電位第三季測值為 281 mv 第四季降至 163 mv。

表 5-6、第三季與第四季水質比較

檢測項目	樣品編號									
	GW-377		GW-377-1		GR-1		GR-2		GR-3	
	S1	S2	S1	S2	S1	S2	S1	S2	S1	S2
導電度($\mu\text{S}/\text{cm}$)	1663	1412	1670	1885	285	332	124.8	331	210	328
溫度($^{\circ}\text{C}$)	28	25	29	26	27	25	25	26	26	25
pH	7.29	7.84	7.09	7.75	6.88	7.11	7.09	7.05	6.84	7.09
溶氧(mg/L)	3.14	4.31	3.56	3.64	2.10	1.96	1.59	1.68	1.58	1.72
ORP(mv)	161	211	172	215	275	162	278	165	281	163



5-2 各樣品電降解試驗操作條件

5-2-1 第一季及第二季其樣品電降解試驗操作條件

第一季及第二季樣品各批次試驗的參數條件如表 5-7 所示，在電極的方面陽極均為摻硼鑽石電極(BDD)、陰極則為鈦板(Ti)，各批次陰陽極工作面積分別為 14 及 7 cm²、電流為 2 A、電流密度 0.14 A/cm²、溫度 25 °C、樣品體積 500 mL。此外，為比較各批水樣在加入電解質後的去除效率，故本團隊分別在 SV01*、SV02*、SV03*、SV01*-S1、SV02*-S1、SV03*-S1、SV01*-S2、SV02*-S2 及 SV03*-S2 加入 0.05 M Na₂SO₄，藉以調整其導電度以進行實驗，其參數分述如下：陽極工作面積為 14 cm²、陰極工作面積為 7 cm²、電流為 2 A、電流密度 0.14 A/cm²、溫度 25 °C、樣品體積 500 mL。水樣均進行二重複批次，共 18 批次之 4 小時電化學試驗，其中六批為配合即時分析系統及化學法進行分析。應第一次水樣來的較為急迫，因此本團隊為求較佳參數，故在第二季水樣時再次進行相同條件參數下的電化學試驗。

其中由於 SV03*-S1 其樣品較少，故依照等比例計算其陽極工作面積為 12 cm²、陰極工作面積為 6 cm²、電流為 2 A、電流密度 0.14 A/cm²、溫度 25 °C、樣品體積 450 mL。上述水樣均進行電化學試驗 4 小時。

表 5-7、第一季及第二季實驗參數條件

樣品編號	條件					
	陽極電極	陰極電極	電流	電流密度	溫度	樣品體積
	面積(cm ²)	面積(cm ²)	(A)	(A/cm ²)	(°C)	(mL)
第一季						
SV01	14	7	2	0.14	25	500
SV01*	14	7	2	0.14	25	500
SV02	14	7	2	0.14	25	500
SV02*	14	7	2	0.14	25	500
SV03	14	7	2	0.14	25	500
SV03*	14	7	2	0.14	25	500



第二季

SV01-S1	14	7	2	0.14	25	500
SV01*-S1	14	7	2	0.14	25	500
SV02-S1	14	7	2	0.14	25	500
SV02*-S1	14	7	2	0.14	25	500
SV03-S1	14	7	2	0.14	25	500
SV03*-S1	14	7	2	0.14	25	500
SV01-S2	14	7	2	0.14	25	500
SV01*-S2	14	7	2	0.14	25	500
SV02-S2	14	7	2	0.14	25	500
SV02*-S2	14	7	2	0.14	25	500
SV03-S2	14	7	2	0.14	25	500
SV03*-S2	14	7	2	0.14	25	500

備註 陽極電極為摻硼雜鑽石電極、陰極電極為鈦板 *為有添加 0.05M Na₂SO₄ 電解質

5-2-2 第三季及第四季其樣品電降解試驗操作條件

第三季及第四季樣品各批次試驗的參數條件如表 5-8 所示，在電極的方面陽極均為摻硼鑽石電極(BDD)、陰極則為鈦板(Ti)，陰陽極工作面積分別為 14 及 7 cm²、陽極電流密度分別為 0.14 及 0.25 A/cm²、電流分別為 2 及 3.5 A、溫度 25℃、樣品體積 500 mL。其中改變之操作參數會分別比較不同電極間距、改變其電流、不同電解質、及不同電解質濃度及混合不同電解質及濃度，其改變操作參數如下。

1. 為比較不同電極間距對其去除效率之影響，本團隊分別在 SV03-S2-1、SV03-S2-2、SV03-S2-3 的電解試驗中之電極間距改變以進行試驗，其改變參數電極間距分別為 0.2、1、3 cm。後續電解試驗為提升去除效率其電流升至 3.5 A。

2. 為比較有無添加 0.05 M Na₂SO₄ 電解質及不同電解質(H₂SO₄)的部分，本團隊分別在 GW-377-S1-1 添加 0.05 M Na₂SO₄、GW-377-S1-2 無添加電解質及 GW-377-S1-3 添加 0.05 M H₂SO₄ 藉以比較以進行實驗，其電極間距為 0.2 cm。



3. 為比較不同場址之不同之電解質濃度去除效率之影響，本團隊分別在 GW-377-1-S1-1、GR-2-S1-1 及 GW-377-1-S2-1 添加 0.0017 M H_2SO_4 ，GW-377-1-S1-2、GR-2-S1-2 及 GW-377-1-S2-2 添加 0.0086 M H_2SO_4 ，GW-377-1-S1-3、GR-2-S1-3 及 GW-377-1-S2-3 添加 0.0344 M H_2SO_4 ，GW-377-1-S2-4 添加 0.0043 M H_2SO_4 ，GW-377-1-S2-5 添加 0.05 M H_2SO_4 藉以比較以進行實驗。

4. 為比較混合不同電解質及不同濃度，藉以比較其去除效率、降低系統電位並控制其 pH 值，故本團隊分別在 GW-377-S2-1 添加 0.0025 M H_2SO_4 +0.0025 M Na_2SO_4 、GW-377-S2-2 添加 0.001 M H_2SO_4 、GW-377-S2-3 添加 0.005 M H_2SO_4 、GW-377-S2-4 添加 0.0025 M H_2SO_4 +0.025 M Na_2SO_4 、GW-377-S2-5 添加 0.01 M H_2SO_4 +0.01 M Na_2SO_4 、GW-377-S2-6 添加 0.01 M H_2SO_4 +0.04 M Na_2SO_4 、GR-1-S1 添加 0.02 M H_2SO_4 +0.03 M Na_2SO_4 、GR-3-S1 添加 0.01 M H_2SO_4 +0.04 M Na_2SO_4 、GR-2-S2 添加 0.005 M H_2SO_4 +0.045 M Na_2SO_4 、GR-1-S2 添加 0.0075 M H_2SO_4 +0.0425 M Na_2SO_4 及 GR-3-S2 添加 0.0025 M H_2SO_4 +0.0475 M Na_2SO_4 。上述水樣均進行電化學試驗 4 小時。



結合電化學氧化處理與現地即時分析
技術於油品污染場址整治之可行性評估

表 5-8、第三季及第四季實驗參數條件

條件 批次	陽極電極 面積(cm ²)	陰極電 極面積 (cm ²)	電 流 (A)	電流密 度 (A/cm ²)	溫度 (°C)	樣品體 積(mL)	電解時 間(hr)	電極 間距 (cm)	電解質
SV03-S2-1	14	7	2	0.14	25	500	4	0.2	0.05 M Na ₂ SO ₄
SV03-S2-2	14	7	2	0.14	25	500	4	1	0.05 M Na ₂ SO ₄
SV03-S2-3	14	7	2	0.14	25	500	4	3	0.05 M Na ₂ SO ₄
GW-377-S1-1	14	7	3.5	0.25	25	500	4	0.2	0.05 M Na ₂ SO ₄
GW-377-S1-2	14	7	3.5	0.25	25	500	4	0.2	-
GW-377-S1-3	14	7	3.5	0.25	25	500	4	0.2	0.05 M H ₂ SO ₄
GW-377-1-S1-1	14	7	3.5	0.25	25	500	4	0.2	0.0017 M H ₂ SO ₄
GW-377-1-S1-2	14	7	3.5	0.25	25	500	4	0.2	0.0086 M H ₂ SO ₄
GW-377-1-S1-3	14	7	3.5	0.25	25	500	4	0.2	0.0344 M H ₂ SO ₄
GR-2-S1-1	14	7	3.5	0.25	25	500	4	0.2	0.0017 M H ₂ SO ₄
GR-2-S1-2	14	7	3.5	0.25	25	500	4	0.2	0.0086 M H ₂ SO ₄
GR-2-S1-3	14	7	3.5	0.25	25	500	4	0.2	0.0344 M H ₂ SO ₄
GW-377-1-S2-1	14	7	3.5	0.25	25	500	4	0.2	0.0017 M H ₂ SO ₄
GW-377-1-S2-2	14	7	3.5	0.25	25	500	4	0.2	0.0086 M H ₂ SO ₄
GW-377-1-S2-3	14	7	3.5	0.25	25	500	4	0.2	0.0344 M H ₂ SO ₄
GW-377-1-S2-4	14	7	3.5	0.25	25	500	4	0.2	0.0043 M H ₂ SO ₄
GW-377-1-S2-5	14	7	3.5	0.25	25	500	4	0.2	0.05 M H ₂ SO ₄ 0.0025 M
GW-377-S2-1	14	7	3.5	0.25	25	500	4	0.2	H ₂ SO ₄ +0.0025 M Na ₂ SO ₄
GW-377-S2-2	14	7	3.5	0.25	25	500	4	0.2	0.001 M H ₂ SO ₄
GW-377-S2-3	14	7	3.5	0.25	25	500	4	0.2	0.005 M H ₂ SO ₄
GW-377-S2-4	14	7	3.5	0.25	25	500	4	0.2	0.005 M H ₂ SO ₄ +0.005 M Na ₂ SO ₄
GW-377-S2-5	14	7	3.5	0.25	25	500	4	0.2	0.01 M H ₂ SO ₄ +0.01M Na ₂ SO ₄
GW-377-S2-6	14	7	3.5	0.25	25	500	4	0.2	0.01 M H ₂ SO ₄ +0.04 M Na ₂ SO ₄
GR-1-S1	14	7	3.5	0.25	25	500	4	0.2	0.02 M H ₂ SO ₄ +0.03 M Na ₂ SO ₄
GR-3-S1	14	7	3.5	0.25	25	500	4	0.2	0.01 M H ₂ SO ₄ +0.04 M Na ₂ SO ₄
GR-2-S2	14	7	3.5	0.25	25	500	4	0.2	0.005 M H ₂ SO ₄ +0.045 M Na ₂ SO ₄ 0.0075 M
GR-1-S2	14	7	3.5	0.25	25	500	4	0.2	H ₂ SO ₄ +0.0425M Na ₂ SO ₄ 0.0025 M
GR-3-S2	14	7	3.5	0.25	25	500	4	0.2	H ₂ SO ₄ +0.0475 M Na ₂ SO ₄



5-3 苯類與含氯乙烯類污染物分析

5-3-1 第一季高雄某加油站水樣之 BTEX 分析

本研究經電化學氧化法試驗後的第一季水樣分別進行 BTEX 分析，在經電化學試驗 4 小時後，其結果如表 5-9 所示。由表可以得出有許多的化合物是沒有被檢測到的，其原因可以由溶解度的部分，這些化合物的溶解度都不高，但可溶於甲醇和乙醚之化合物被檢測，在 MTBE (甲基第三丁基醚)、Toluene(甲苯)及 m,p-Xylene (m,p - 二甲苯)有被檢測。

在 MTBE (甲基第三丁基醚)的部分只有在 SV01、SV02、SV02*被檢測到，SV01 經處理後自濃度 1.35 mg/L 降至 ND、SV02 經處理後自濃度 0.089 mg/L 降至 ND 及 SV02*經處理後自濃度 3.61 mg/L 皆降至 ND。

Toluene(甲苯)的部分在每個樣本中均被檢測出，SV01 處理前濃度為 0.0015 mg/L，處理後濃度為 0.0023 mg/L、SV01*處理前濃度為 0.0015 mg/L，處理後濃度降至 0.0014 mg/L、SV02 處理前濃度為 0.0012 mg/L，處理後濃度為 0.0015 mg/L、SV02*處理前濃度為 0.0015 mg/L，處理後濃度為 0.0016 mg/L、SV03 處理前後濃度均為 0.0016 mg/L 及 SV03*處理前濃度為 0.0016 mg/L，處理後濃度降至 0.0014 mg/L。其中比較特別的是在 SV01、SV02、SV02*在電化學試驗過後均有微幅上升的趨勢，雖在電化學試驗過後均未降至 ND，但試驗前後均符合飲用水水源水質保護區內之地下水之第二類標準。

而 m,p-Xylene (m,p - 二甲苯)的部分跟 Toluene(甲苯)一樣在每個樣本中均被檢測出，SV01 處理前濃度為 0.0027 mg/L，處理後濃度為 0.0048 mg/L、SV01*處理前濃度為 0.0027 mg/L，處理後濃度降至 0.0019 mg/L、SV02 處理前濃度為 0.0025 mg/L，處理後濃度降至 ND、SV02*處理前濃度為 0.0025 mg/L，處理後濃度為 0.0027 mg/L、SV03 處理前濃度為 0.0031 mg/L，處理後濃度降至 ND 及 SV03*處理前濃度為 0.003 mg/L，處理後濃度降至 0.009 mg/L。其中在 SV01、SV02*、SV03*在電化學試驗過後均有微幅上升的趨勢，SV02 及 SV03 電化學後均有下降至 ND 的趨勢，而 SV01*雖在電化學試驗過後未降至 ND 但有下降趨勢，雖然有測出數值但試驗前後均符合飲用水水源水質保護區內之地下水之第二類標準。

表 5-9、第一季各項水樣處理前與處理後 BTEX 值(mg/L)及降解效率(%)

檢測項目	樣品編號																				
	溶解度	SV01			SV01*			SV02			SV02*			SV03			SV03*			平均	S
		前	後	%	前	後	%	前	後	%	前	後	%	前	後	%	前	後	%	%	
MTBE (甲基第三丁基醚)	42 g/L (20 °C)	1.35	ND	100	ND	ND	-	0.089	ND	100	3.61	ND	100	ND	ND	-	ND	ND	-	100	1
Benzene(苯)	1.8g/L (15 °C)	ND	ND	-	ND	ND	-	ND	ND	-	ND	ND	-	ND	ND	-	ND	ND	-	-	0.05
Toluene (甲苯)	0.52 g/L (20 °C)	0.0015	0.0023	-	0.0015	0.0014	6.7	0.012	0.0015	-	0.0015	0.0016	-	0.0016	0.0016	-	0.0016	0.0014	12.8	9.7	10
Chlorobenzene (氯苯)	0.05 g/L (20 °C)	ND	ND	-	ND	0.0342	-	ND	ND	-	ND	ND	-	ND	ND	-	ND	ND	-	-	1
Ethylbenzene (乙苯)	0.2 g/L (20 °C)	ND	ND	-	ND	ND	-	ND	ND	-	ND	ND	-	ND	ND	-	ND	ND	-	-	7

m,p-Xylene	可溶於甲醇																					100
(m,p - 二甲苯)	和乙醚	0.0027	0.0048	-	0.0027	0.0019	29	0.0025	ND	100	0.0025	0.0027	-	0.0031	ND	100	0.003	0.009	-	76.4		
o-Xylene	0.13 g/L																					
(鄰二甲苯)	(20 °C)	ND	ND	-	ND	ND	-	ND	ND	-	ND	ND	-	ND	ND	-	ND	ND	-	-	100	
1,3-Dichlorobenzene	0.002 g/L																					
(1,3 - 二氯苯)	(25 °C)	ND	ND	-	ND	ND	-	ND	ND	-	ND	ND	-	ND	ND	-	ND	ND	-	-	-	
1,4-Dichlorobenzene	0.01 g/L																					
(1,4 - 二氯苯)	(20 °C)	ND	ND	-	ND	ND	-	ND	ND	-	ND	ND	-	ND	ND	-	ND	ND	-	-	0.75	
1,2-Dichlorobenzene	可溶於丙																					
(1,2 - 二氯苯)	酮、	ND	ND	-	ND	ND	-	ND	ND	-	ND	ND	-	ND	ND	-	ND	ND	-	-	6	
	苯、醚、醇																					

備註 S:地下水污染物管制標準第二類 (行政院環保署, 2001) *:表加 0.05M Na₂SO₄



5-3-2 第二季高雄某加油站水樣之 BTEX 分析

本研究第二季水樣，其結果如表 5-10 及表 5-11 所示。由表 5-10 得出許多化合物沒有被檢測出，其原因與溶解度有關，這些化合物溶解度皆不高，故僅在 Benzene (苯)及 Toluene(甲苯)被檢測到。

在 Benzene (苯)的部分只有在 SV02- S1、SV02*-S1 被檢測到，SV02-1 經處理後自濃度 0.0011 mg/L 降至 ND 及 SV02*-S1 經處理後自濃度 0.0011 mg/L 降至 ND，其去除效率皆達至 100 %。

Toluene(甲苯)的部分在每個樣本中均被檢測出，SV01-S1 處理前濃度為 ND，處理後濃度升為 0.0029 mg/L、SV02-S1 處理前濃度為 0.0043 mg/L，處理後濃度降至 0.0017 mg/L、SV03-S1 處理前濃度為 0.0035 mg/L 降至 ND、SV01-S1 處理前濃度為 ND，處理後濃度升為 0.0025 mg/L、SV02*-S1 處理前濃度為 0.0043 mg/L，處理後濃度為 0.0019 mg/L 及 SV03*-S1 處理前濃度為 0.0035 mg/L 降至 ND，其去除效率為 79.4%。其中比較特別的是在 SV01-S1 及 SV01*-S1 在電化學試驗過後均有微幅上升的趨勢，在電化學試驗過後均未降至 ND，但試驗前後均符合飲用水水源水質保護區內之地下水之第二類標準。

表 5-11 的部分僅在 Toluene(甲苯)及 Chiorbenzene (氯苯)被檢測到。Toluene(甲苯)的部分在每個樣本中均被檢測出，SV01-S2 處理前濃度為 ND，處理後濃度升為 0.0033 mg/L、SV02-S1 處理前濃度為 0.0019 mg/L，處理後濃度升至 0.0042 mg/L、SV03-S1 處理前濃度為 ND，處理後濃度升為 0.0049mg/L、SV01-S1 處理前濃度為 ND，處理後濃度升為 0.0016 mg/L、SV02*-S1 處理前濃度為 0.0019 mg/L，處理後濃度升為 0.0028 mg/L 及 SV03*-S1 處理前濃度為 ND，處理後濃度升為 0.0014 mg/L。其較特別是在各水樣在電化學試驗過後 Toluene(甲苯)均有微幅上升的趨勢，雖在電化學試驗過後均未降至 ND，但其濃度均符合飲用水水源水質保護區內之地下水之第二類標準。在 Chiorbenzene (氯苯)的部分只有在 SV01-S1 被檢測到，SV01-S1 經處理後自濃度 0.0103 mg/L 降至 ND，其去除效率達至 100%

表 5-10、第二季 SV01-S1~SV03-S1 各項水樣處理前與處理後 BTEX 值(mg/L)及降解效率(%)

檢測項目	樣品編號																			S
	SV01-S1			SV02-S1			SV03-S1			SV01*-S1			SV02*-S1			SV03*-S1			平均	
	前	後	%	前	後	%	前	後	%	前	後	%	前	後	%	前	後	%	%	
MTBE (甲基第三丁基醚)	ND	ND	-	ND	ND	-	ND	ND	-	ND	ND	-	ND	ND	-	ND	ND	-	-	1
Benzene(苯)	ND	ND	-	0.0011	ND	100	ND	ND	-	ND	ND	-	0.0011	ND	100	ND	ND	-	100	0.05
Toluene (甲苯)	ND	0.0029	-	0.0043	0.0017	61.8	0.0035	ND	100	ND	0.0025	-	0.0043	0.0019	56.0	0.0035	ND	100.0	79.4	10
Chlorbenzene (氯苯)	ND	ND	-	ND	ND	-	ND	ND	-	ND	ND	-	ND	ND	-	ND	ND	-	-	1
Ethylbenzene (乙苯)	ND	ND	-	ND	ND	-	ND	ND	-	ND	ND	-	ND	ND	-	ND	ND	-	-	7
m,p-Xylene (m,p - 二甲苯)	ND	ND	-	ND	ND	-	ND	ND	-	ND	ND	-	ND	ND	-	ND	ND	-	-	100
o-Xylene (鄰二甲苯)	ND	ND	-	ND	ND	-	ND	ND	-	ND	ND	-	ND	ND	-	ND	ND	-	-	100
1,3-Dichlorobenzene (1,3 - 二氯苯)	ND	ND	-	ND	ND	-	ND	ND	-	ND	ND	-	ND	ND	-	ND	ND	-	-	-
1,4-Dichlorobenzene (1,4 - 二氯苯)	ND	ND	-	ND	ND	-	ND	ND	-	ND	ND	-	ND	ND	-	ND	ND	-	-	0.75
1,2-Dichlorobenzene (1,2 - 二氯苯)	ND	ND	-	ND	ND	-	ND	ND	-	ND	ND	-	ND	ND	-	ND	ND	-	-	6
備註	S:地下水污染物管制標準第二類 (行政院環保署, 2001) *:加 0.05M NaSO ₄																			

表 5-11、第二季 SV01-S2~SV03-S2 各項水樣處理前與處理後 BTEX 值(mg/L)及降解效率(%)

檢測項目	樣品編號																				S
	SV01-S2			SV02-S2			SV03-S2			SV01*-S2			SV02*-S2			SV03-S2			平均		
	前	後	%	前	後	%	前	後	%	前	後	%	前	後	%	前	後	%	%		
MTBE (甲基第三丁基醚)	ND	ND	-	ND	ND	-	ND	ND	-	ND	ND	-	ND	ND	-	ND	ND	-	-	1	
Benzene(苯)	ND	ND	-	ND	ND	-	ND	ND	-	ND	0.0010	-	ND	ND	-	ND	ND	-	-	0.05	
Toluene (甲苯)	ND	0.0033	-	0.0019	0.0042	-	ND	0.0049	-	ND	0.0016	-	0.0019	0.0028	-	ND	0.0014	-	-	10	
Chlorbenzene (氯苯)	0.0103	ND	100	ND	ND	-	ND	ND	-	ND	ND	-	ND	ND	-	ND	ND	-	100	1	
Ethylbenzene (乙苯)	ND	ND	-	ND	ND	-	ND	ND	-	ND	ND	-	ND	ND	-	ND	ND	-	-	7	
m,p-Xylene (m,p - 二甲苯)	ND	ND	-	ND	ND	-	ND	ND	-	ND	ND	-	ND	ND	-	ND	ND	-	-	100	
o-Xylene (鄰二甲苯)	ND	ND	-	ND	ND	-	ND	ND	-	ND	ND	-	ND	ND	-	ND	ND	-	-	100	
1,3-Dichlorobenzene (1,3 - 二氯苯)	ND	ND	-	ND	ND	-	ND	ND	-	ND	ND	-	ND	ND	-	ND	ND	-	-	-	
1,4-Dichlorobenzene (1,4 - 二氯苯)	ND	ND	-	ND	ND	-	ND	ND	-	ND	ND	-	ND	ND	-	ND	ND	-	-	0.75	
1,2-Dichlorobenzene (1,2 - 二氯苯)	ND	ND	-	ND	ND	-	ND	ND	-	ND	ND	-	ND	ND	-	ND	ND	-	-	6	

備註 S:地下水污染物管制標準第二類 (行政院環保署, 2001) *:加 0.05M NaSO₄



5-3-3 第三季及第四季水樣之 BTEX 分析

5-3-3-1 第三季澎湖某化工廠水樣之 BTEX 分析

本研究經過電化學試驗後之第三季及第四季水樣分別進行 BTEX 分析，經電化學試驗 4 小後，其結果如表 5-12、5-13、5-14、5-15 及 5-16 所示。由表 5-12 得出，第三季澎湖某化工廠其受總石油碳氫化合物污染且曾被檢測苯類污染物超標之水樣僅在 Chlorobenzene(氯苯)、1,3-Dichlorobenzene (1,3-二氯苯)及 1,4-Dichlorobenzene (1,4-二氯苯)未被檢測到。

MTBE (甲基第三丁基醚)的部分在各水樣均被檢測到，GW-377-S1-1 經處理後自濃度 108.869 mg/L 降至 ND、GW-377-S1-2 經處理後自濃度 108.869 mg/L 降至 ND、GW-377-S1-3 經處理後自濃度 108.869 mg/L 降至 ND、GW-377-1-S1-1 經處理後自濃度 115.73 mg/L 降至 ND、GW-377-1-S1-2 經處理後自濃度 115.73 mg/L 降至 ND、GW-377-1-S1-3 經處理後自濃度 115.73 mg/L 降至 ND，其去除效率皆達 100 %。

Benzene (苯)的部分，GW-377-S1-1 經處理後自濃度 0.589 mg/L 降至 0.0016 mg/L、GW-377-S1-2 經處理後自濃度 0.589 mg/L 降至 0.0044 mg/L、GW-377-S1-3 經處理後自濃度 0.589 mg/L 降至 ND、GW-377-1-S1-1 經處理後自濃度 0.521 mg/L 降至 ND、GW-377-1-S1-2 經處理後自濃度 0.521 mg/L 降至 ND、GW-377-1-S1-3 經處理後自濃度 0.521 mg/L 降至 ND，其去除效率皆達 100 %。

Toluene(甲苯)的部分只有在 GW-377-S1-2 及 GW-377-1-S1-2 被檢測到，GW-377-S1-2 處理前濃度為 ND，處理後濃度升為 0.0075 mg/L 及 GW-377-1-S1-2 處理前濃度為 ND，處理後濃度升為 0.0028 mg/L，雖然 GW-377-S1-2 及 GW-377-1-S1-2 在電化學試驗過後均有上升的趨勢，但其濃度均符合飲用水水源水質保護區內之地下水之第二類標準。

Ethylbenzene(乙苯)的部分，GW-377-S1-1、GW-377-S1-2 及 GW-377-S1-3 均經處理後自濃度 0.332 mg/L 降至 ND、GW-377-1-S1-1、GW-377-1-S1-2 及 GW-377-1-S1-3 均經處理後自濃度 0.275 mg/L 降至 ND，其去除效率皆達 100 %。

m,p-Xylene (m,p - 二甲苯)的部分，GW-377-S1-1、GW-377-S1-2 及 GW-377-S1-3 均經處理後自濃度 0.871 mg/L 降至 ND、GW-377-1-S1-1 經處理後自濃度 0.631 mg/L 降至 0.0011 mg/L、GW-377-1-S1-2 及 GW-377-1-S1-3 均經處理後自濃度 0.631 mg/L 降至 ND，其去除效率皆達 100 %，其去除效率達 100 %。



結合電化學氧化處理與現地即時分析
技術於油品污染場址整治之可行性評估



o-Xylene(鄰二甲苯)的部分，僅在 GW-377-S1-1、GW-377-S1-2 及 GW-377-S1-3 被檢測出，GW-377-S1-1、GW-377-S1-2 及 GW-377-S1-3 均經處理後自濃度 0.507 mg/L 降至 ND，去除效率達 100 %。

而 1,2-Dichlorobenzene (1,2- 二氯苯)，GW-377-S1-1、GW-377-S1-2 及 GW-377-S1-3 均經處理後自濃度 1.015 mg/L 降至 ND GW-377-1-S1-2 及 GW-377-1-S1-3 均經處理後自濃度 3.86 mg/L 降至 ND，其去除效率皆達 100 %

結合電化學氧化處理與現地即時分析
技術於油品污染場址整治之可行性評估

表 5-12、第三季澎湖某化工廠各項水樣處理前與處理後 BTEX 值(mg/L)及降解效率(%)

檢測項目	樣品編號																				S
	GW-377-S1-1			GW-377-S1-2			GW-377-S1-3			GW-377-1-S1-1			GW-377-1-S1-2			GW-377-1-S1-3			平均		
	前	後	%	前	後	%	前	後	%	前	後	%	前	後	%	前	後	%	%		
MTBE (甲基第三丁基醚)	108.869	ND	100	108.869	ND	100	108.869	ND	100	115.73	ND	100	115.73	ND	100	115.73	ND	100	100	1	
Benzene(苯)	0.589	0.0016	99.7	0.589	0.0044	99.3	0.589	ND	100	0.521	ND	100	0.521	ND	100	0.521	ND	100	99.8	0.05	
Toluene (甲苯)	ND	ND	-	ND	0.0075	-	ND	ND	-	ND	ND	-	ND	0.0028	-	ND	ND	-	-	10	
Chlorbenzene (氯苯)	ND	ND	-	ND	ND	-	ND	ND	-	ND	ND	-	ND	ND	-	ND	ND	-	-	1	
Ethylbenzene (乙苯)	0.332	ND	100	0.332	ND	100	0.332	ND	100	0.275	ND	100	0.275	ND	100	0.275	ND	100	100	7	
m,p-Xylene (m,p - 二甲苯)	0.871	ND	100	0.871	ND	100	0.871	ND	100	0.631	0.0011	99.8	0.631	ND	100	0.631	ND	100	100	100	
o-Xylene (鄰二甲苯)	0.507	ND	100	0.507	ND	100	0.507	ND	100	ND	ND	-	ND	ND	-	ND	ND	-	100	100	
1,3-Dichlorobenzene (1,3 - 二氯苯)	ND	ND	-	ND	ND	-	ND	ND	-	ND	ND	-	ND	ND	-	ND	ND	-	-	-	
1,4-Dichlorobenzene (1,4 - 二氯苯)	ND	ND	-	ND	ND	-	ND	ND	-	ND	ND	-	ND	ND	-	ND	ND	-	-	0.75	
1,2-Dichlorobenzene (1,2 - 二氯苯)	1.015	ND	100	1.015	ND	100	1.015	ND	100	3.86	ND	100	3.86	ND	100	3.86	ND	100	100	6	

備註 S:地下水污染物管制標準第二類 (行政院環保署, 2001)



5-3-3-2 第三季高雄某化工廠水樣之 BTEX 分析

而由表 5-13 得出第三季高雄某化工廠其受總石油碳氫化合物污染且曾被檢測苯類污染物超標之水樣，僅在 MTBE (甲基第三丁基醚) 及 1,4-Dichlorobenzene (1,4 -二氯苯) 未被檢測到。

Benzene (苯) 的部分僅在 GR-3-S1 未被檢測到，GR-1-S1 經處理後自濃度 0.0020 mg/L 降至 0.0017 mg/L、GR-2-S1-1 經處理後自濃度 0.011 mg/L 降至 0.0068 mg/L、GR-2-S1-2 經處理後自濃度 0.011 mg/L 降至 ND、GR-2-S1-3 經處理後自濃度 0.011 mg/L 降至 ND，其去除效率達 62.6 %。

Toluene(甲苯)的部分，GR-1-S1 經處理後自濃度 0.0267 mg/L 降至 ND、GR-2-S1-1 經處理後自濃度 0.0755 mg/L 降至 0.01 mg/L、GR-2-S1-2 經處理後自濃度 0.0755 mg/L 降至 ND、GR-2-S1-3 經處理後自濃度 0.0755 mg/L 降至 0.001 mg/L、GR-3-S1 經處理後自濃度 0.0021 mg/L 降至 ND，其去除效率達 100 %。

Chlorobenzene (氯苯) 的部分只有在 GR-1-S1 及 GR-2-S1-1 被檢測到，其 GR-1-S1 處理前濃度為 ND，處理後濃度上升至 0.0870 mg/L 及 GR-2-S1-1 處理前濃度為 ND，處理後濃度上升至 0.1098 mg/L，雖 GR-1-S1 及 GR-2-S1-1 在電化學試驗過後皆被檢測出 Chlorobenzene，但其檢測之濃度均符合飲用水水源水質保護區內之地下水之第二類標準。

Ethylbenzene(乙苯)的部分僅在 GR-2-S1-1、GR-2-S1-2、GR-2-S1-3 及 GR-3-S1 被檢測出，其 GR-2-S1-1、GR-2-S1-2 及 GR-2-S1-3 處理前濃度均為 ND，處理後濃度分別上升至 0.2591、0.1467 及 0.0014 mg/L，GR-3-S1 處理前濃度為 0.1266 mg/L，處理後濃度降至 ND，其去除效率達 100 %，而 GR-2-S1-1、GR-2-S1-2 及 GR-2-S1-3 在電化學試驗過後才被檢測出 Ethylbenzene，但其濃度均符合飲用水水源水質保護區內之地下水之第二類標準。

m,p-Xylene(m,p-二甲苯)的部分與 Benzene 的部分一樣僅在 GR-3-S1 未被檢測到，GR-1-S1 經處理後自濃度 0.0235 mg/L 降至 0.0051 mg/L、GR-2-S1-1、GR-2-S1-2 及 GR-2-S1-3 經處理後自濃度 0.0256 mg/L 降至 ND，其去除效率達 94.6 %。

o-Xylene(鄰二甲苯)的部分與 m,p-Xylene 一樣僅在 GR-3-S1 未被檢測到，GR-1-S1 經處理後自濃度 0.0068 mg/L 降至 ND、GR-2-S1-1、GR-2-S1-2 及 GR-2-S1-3 經處理後自濃度 0.0018 mg/L 降至 ND，其去除效率達 100 %。

1,3-Dichlorobenzene (1,3 -二氯苯) 的部分僅在 GR-2-S1-1 的部分被檢測出，處理前濃度為 ND，處理後濃度上升至 0.0011 mg/L，及 1,4-Dichlorobenzene (1,4 -二氯苯) 的部分僅在 GR-1-S1 的部分被檢測出，處理前濃度為 ND，處理後濃度上升至 0.0019 mg/L，雖 GR-2-S1-1 及 GR-1-S1



結合電化學氧化處理與現地即時分析
技術於油品污染場址整治之可行性評估

在電化學試驗過後被檢測出 1,3-Dichlorobenzene 及 1,4-Dichlorobenzene，但其檢測之濃度均符合飲用水水源水質保護區內之地下水之第二類標準。

最後 1,2-Dichlorobenzene (1,2 -二氯苯)的部分與 Benzene、m,p-Xylene 及 o-Xylene 的部分一樣僅在 GR-3-S1 未被檢測到，GR-1-S1 經處理後自濃度 0.0071 mg/L 降至 ND、GR-2-S1-1 經處理後自濃度 0.0080 mg/L 降至 0.0076 mg/L、GR-2-S1-2 及 GR-2-S1-3 經處理後自濃度 0.0080 mg/L 降至 ND，其去除效率達 76 %。

表 5-13、第三季高雄某化工廠各項水樣處理前與處理後 BTEX 值(mg/L)及降解效率(%)

檢測項目	樣品編號																S
	GR-1-S1			GR-2-S1-1			GR-2-S1-2			GR-2-S1-3			GR-3-S1			平均	
	前	後	%	前	後	%	前	後	%	前	後	%	前	後	%	%	
MTBE (甲基第三丁基醚)	ND	ND	-	ND	ND	-	ND	ND	-	ND	ND	-	ND	ND	-	-	1
Benzene(苯)	0.0020	0.0017	14.6	0.0106	0.0068	35.6	0.011	ND	100	0.011	ND	100	ND	ND	-	63	0.05
Toluene (甲苯)	0.0267	ND	100	0.0755	0.0058	92.3	0.075	ND	100	0.075	0.001	98	0.0021	ND	100	98	10
Chlorbenzene (氯苯)	ND	0.0870	-	ND	0.1098	-	ND	ND	-	ND	ND	-	ND	ND	-	-	1
Ethylbenzene (乙苯)	ND	ND	-	ND	0.2591	-	ND	0.1467	-	ND	0.0014	-	0.1266	ND	100	100	7
m,p-Xylene (m,p - 二甲苯)	0.0235	0.0051	78.5	0.02555	ND	100	0.026	ND	100	0.0256	ND	100	ND	ND	-	95	100
o-Xylene (鄰二甲苯)	0.0068	ND	100	0.00181	ND	100	0.002	ND	100	0.0018	ND	100	ND	ND	-	100	100
1,3-Dichlorobenzene (1,3 - 二氯苯)	ND	ND	-	ND	0.0011	-	ND	ND	-	ND	ND	-	ND	ND	-	-	-
1,4-Dichlorobenzene (1,4 - 二氯苯)	ND	0.0019	-	ND	ND	-	ND	ND	-	ND	ND	-	ND	ND	-	-	0.75
1,2-Dichlorobenzene (1,2 - 二氯苯)	0.0071	ND	100.0	0.0080	0.0076	4.1	0.0080	ND	100	0.0080	ND	100	ND	ND	-	76.0	6

備註 S:地下水污染物管制標準第二類 (行政院環保署, 2001)



結合電化學氧化處理與現地即時分析
技術於油品污染場址整治之可行性評估

5-3-3-3 第四季澎湖某化工廠水樣之 BTEX 分析

表 5-14 得出，第四季澎湖某化工廠其受總石油碳氫化合物污染且曾被檢測苯類污染物超標場址之水樣 (GW-377-1-S2 及 GW-377-S2)，其中 GW-377-1-S2 之水樣僅在 1,2-Dichlorobenzene (1,2-二氯苯) 未被檢測。

MTBE (甲基第三丁基醚) 的部分，GW-377-1-S2-1 經處理後自濃度 0.0533 mg/L 降至 0.0294 mg/L、GW-377-1-S2-2、GW-377-1-S2-3、GW-377-1-S2-4 及 GW-377-1-S2-5 經處理後自濃度 0.0533 mg/L 降至 ND，其去除效率達 89 %。

Benzene (苯) 的部分，GW-377-1-S2-1 經處理後自濃度 0.5108 mg/L 上升至 1.421 mg/L、GW-377-1-S2-2 經處理後自濃度 0.5108 mg/L 降至 0.0054 mg/L、GW-377-1-S2-3、GW-377-1-S2-4 及 GW-377-1-S2-5 經處理後自濃度 0.5108 mg/L 均降至 ND，其去除效率達 100 %，GW-377-1-S2-1 經由電化學降解處理後，苯濃度 (1.421 mg/L) 反而高於飲用水水源水質保護區內之地下水之第二類之標準，但該水樣在總有機碳降解的部份濃度從 85.2 mg/L 降至 1.3 mg/L，此值接近由苯分子量推算其理論 TOC 值 $(1.421 \times (6 \times 12)) / (6 \times 12 + 6 \times 1) = 1.31 \text{ mg/L}$ ，而且水中甲苯的最終濃度為 3.047 mg/L，推測苯為水樣中含有苯環之前驅有機污染物 (例如 m,p-二甲苯及 1,4-二氯苯) 或其他含有苯環污染物降解形成，苯的最終濃度可能高估。若延長電解時間，應該可使其濃度降解至合乎標準。而在 GW-377-1-S2-2 的部分，雖電化學降解後未能降至 ND，但其去除效率達 98.9 %，且其污染物濃度符合飲用水水源水質保護區內之地下水之第二類之標準。

Toluene (甲苯) 的部分在各水樣中均被檢測出，GW-377-1-S2-1 經處理後自濃度 0.0070 mg/L 上升至 3.047 mg/L、GW-377-1-S2-2 經處理後濃度自 0.0070 mg/L 微幅上升至 0.0087 mg/L、GW-377-1-S2-3 經處理後濃度自 0.0070 mg/L 降至 0.002 mg/L、GW-377-1-S2-4 經處理後濃度自 0.0070 mg/L 降至 0.0012 mg/L 及 GW-377-1-S2-5 經處理後濃度自 0.0070 mg/L 降至 0.0010 mg/L。與苯的部分相似，GW-377-1-S2-1 中的甲苯經由電化學降解處理後的濃度為 3.047 mg/L，仍低於飲用水水源水質保護區內之地下水之第二類之標準 10 mg/L。但由苯及甲苯分子量推算其理論 TOC 值為 $1.421 \times (6 \times 12) / (6 \times 12 + 6 \times 1) + (3.047 \times (7 \times 12)) / (7 \times 12 + 8 \times 1) = 1.31 + 2.78 = 4.09 \text{ mg/L}$ ，此值明顯高於最終實測 TOC 值 1.3 mg/L，故甲苯的最終濃度可能高估。若延長電解時間，應該可使其濃度降解至更低。而在 GW-377-1-S2-2 的部分，雖電化學降解後有微幅的上升，但其污染物濃度符合飲用水水源水質保護區內之地下水之第二類之標準。在 GW-377-1-S2-3、GW-377-1-S2-4 及 GW-377-1-S2-5 雖電化學降解後未能降至 ND，但其去除效率達 80 %，且其污染物濃度符合飲用水水源水質保護區內之地下水之第二類之標準。



Chlorobenzene (氯苯)的部分在各水樣均被檢測出，GW-377-1-S2-1 經處理後自濃度 0.0024 mg/L 上升至 0.0749 mg/L、GW-377-1-S2-2 經處理後濃度自 0.0024 mg/L 上升至 0.1358 mg/L、GW-377-1-S2-3、GW-377-1-S2-4 及 GW-377-1-S2-5 經處理後濃度均自 0.0024 mg/L 降至 ND。雖 GW-377-1-S2-1 及 GW-377-1-S2-2 的部分，在電化學降解後均有微幅上升的跡象，但其污染物濃度均符合飲用水水源水質保護區內之地下水之第二類之標準。

Ethylbenzene(乙苯)的部分，僅在 GW-377-1-S2-1、GW-377-1-S2-3 及 GW-377-1-S2-4 被檢測出，其餘水樣均為 ND。GW-377-1-S2-1 經處理後自濃度 ND 上升至 0.2684 mg/L、GW-377-1-S2-3 經處理後自濃度 ND 上升至 0.0215 mg/L、GW-377-1-S2-4 經處理後自濃度 ND 上升至 0.0053 mg/L，雖 GW-377-1-S2-1、GW-377-1-S2-3 及 GW-377-1-S2-4 均為在電降解試驗後才檢測出 Ethylbenzene 之污染物濃度，但其污染物濃度皆符合飲用水水源水質保護區內之地下水之第二類之標準。

m,p-Xylene (m,p - 二甲苯)的部分在每個水樣電化學降解前均被檢測出，GW-377-1-S2-1 經處理後自濃度 0.3263 mg/L 上升至 0.5081 mg/L、GW-377-1-S2-2 經處理後濃度自 0.3263 mg/L 降至 0.0017 mg/L、GW-377-1-S2-3 及 GW-377-1-S2-4 經處理後濃度均自 0.3263 mg/L 降至 ND、GW-377-1-S2-5 經處理後濃度自 0.3263 mg/L 降至 0.0025 mg/L，雖全水樣在電化學降解後均未能被降解至 ND 且有些微上升的現象，但其污染物濃度皆符合飲用水水源水質保護區內之地下水之第二類之標準。

o-Xylene(鄰二甲苯)的部分，僅在 GW-377-1-S2-1、GW-377-1-S2-2 及 GW-377-1-S2-5 在電化學降解後被檢測出，GW-377-1-S2-1 經處理後自濃度 ND 上升至 0.3066 mg/L、GW-377-1-S2-2 經處理後自濃度 ND 上升至 0.0015 mg/L、GW-377-1-S2-5 經處理後自濃度 ND 上升至 0.0016 mg/L，其餘水樣皆為 ND。雖然 GW-377-1-S2-1、GW-377-1-S2-2 及 GW-377-1-S2-5 皆在電降解試驗後被檢測出污染物濃度，但其污染物濃度皆符合飲用水水源水質保護區內之地下水之第二類之標準。

1,3-Dichlorobenzene (1,3-二氯苯)的部分，僅在 GW-377-1-S2-1 被檢測出，該水樣經處理後自濃度 ND 上升至 0.0312 mg/L，雖在電降解試驗後才被檢測出其污染物濃度，但其污染物濃度皆符合飲用水水源水質保護區內之地下水之第二類之標準。



結合電化學氧化處理與現地即時分析
技術於油品污染場址整治之可行性評估

1,4-Dichlorobenzene (1,4-二氯苯) 在每個樣本降解前均被檢測出，GW-377-1-S2-1 經處理後自濃度 0.4683 mg/L 降至 0.0999 mg/L、GW-377-1-S2-2、GW-377-1-S2-3 及 GW-377-1-S2-4 經處理後濃度均自 0.4683 mg/L 降至 ND、GW-377-1-S2-5 經處理後濃度自 0.4683 mg/L 降至 0.0019 mg/L，其去除效率達 95.7 %。雖然除 GW-377-1-S2-2、GW-377-1-S2-3 及 GW-377-1-S2-4 外，其餘 GW-377-1-S2-1 及 GW-377-1-S2-5 未能在電化學降解後降至 ND，但其污染物濃度皆符合飲用水水源水質保護區內之地下水之第二類之標準。

表 5-15 得出，第四季澎湖某化工廠之 GW-377-S2 水樣 BTEX 分析之數據，在電化學降解後僅在 Toluene(甲苯)、Ethylbenzene(乙苯)、1,4-Dichlorobenzene (1,4-二氯苯) 及 1,2-Dichlorobenzene (1,2-二氯苯) 被檢測出。

Toluene(甲苯)的部分僅在 GW-377-S2-2 被檢測出，處理前濃度為 ND，處理後濃度上升至 0.0014 mg/L。Ethylbenzene(乙苯)的部分僅在 GW-377-S2-3 及 GW-377-S2-4 被檢測出，分別 GW-377-S2-3 處理前濃度為 ND，處理後濃度上升至 0.1087 mg/L 及 GW-377-S2-4 處理前濃度為 ND，處理後濃度上升至 0.0018 mg/L。1,4-Dichlorobenzene (1,4-二氯苯)的部分在每個水樣均被檢測出，其水樣 GW-377-S2-1、GW-377-S2-2、GW-377-S2-3、GW-377-S2-4、GW-377-S2-5 及 GW-377-S2-6 均在處理前濃度為 0.0011 mg/L，處理後濃度均降至 ND。1,2-Dichlorobenzene (1,2-二氯苯)的部分僅在 GW-377-S2-1 及 GW-377-S2-6 的部分被檢測出，GW-377-S2-1 處理前濃度為 ND，處理後濃度上升至 0.0058 mg/L 及 GW-377-S2-6 處理前濃度為 ND，處理後濃度上升至 0.0056 mg/L。此批水樣雖在 Toluene(甲苯)、Ethylbenzene(乙苯)及 1,2-Dichlorobenzene (1,2-二氯苯)皆在原水樣時未被檢測出，而在電化學降解後被檢測到，但其污染物濃度均符合飲用水水源水質保護區內之地下水之第二類之標準。

表 5-14、第三季澎湖某化工廠 GW-377-1-S2 各項水樣處理前與處理後 BTEX 值(mg/L)及降解效率(%)

檢測項目	樣品編號																S
	GW-377-1-S2-1			GW-377-1-S2-2			GW-377-1-S2-3			GW-377-1-S2-4			GW-377-1-S2-5			平均	
	前	後	%	前	後	%	前	後	%	前	後	%	前	後	%	%	
MTBE (甲基第三丁基醚)	0.0533	0.0294	45	0.0533	ND	100	0.0533	ND	100	0.0533	ND	100	0.0533	ND	100	89	1
Benzene(苯)	0.5108	1.421	-	0.5108	0.0054	99	0.5108	ND	100	0.5108	ND	100	0.5108	ND	100	100	0.05
Toluene (甲苯)	0.0070	3.047	-	0.0070	0.0087	-	0.0070	0.002	73	0.0070	0.0012	82	0.0070	0.0010	85	80	10
Chlorbenzene (氯苯)	0.0024	0.0794	-	0.0024	0.1358	-	0.0024	ND	100	0.0024	ND	100	0.0024	ND	100	100	1
Ethylbenzene (乙苯)	ND	0.2684	-	ND	ND	-	ND	0.0215	-	ND	0.0053	-	ND	ND	-	-	7
m,p-Xylene (m,p - 二甲苯)	0.3263	0.5081	-	0.3263	0.0017	99	0.3263	ND	100	0.3263	ND	100.0	0.3263	0.0025	99	100	100
o-Xylene (鄰二甲苯)	ND	0.3066	-	ND	0.0015	-	ND	ND	-	ND	ND	-	ND	0.0016	-	-	100
1,3-Dichlorobenzene (1,3 - 二氯苯)	ND	0.0312	-	ND	ND	-	ND	ND	-	ND	ND	-	ND	ND	-	-	-
1,4-Dichlorobenzene (1,4 - 二氯苯)	0.4683	0.0999	79	0.4683	ND	100	0.4683	ND	100	0.4683	ND	100	0.4683	0.0019	100	96	0.75
1,2-Dichlorobenzene (1,2 - 二氯苯)	ND	ND	-	ND	ND	-	ND	ND	-	ND	ND	-	ND	ND	-	-	6

備註 S:地下水污染物管制標準第二類 (行政院環保署, 2001)

結合電化學氧化處理與現地即時分析
技術於油品污染場址整治之可行性評估

表 5-15、第三季澎湖某化工廠 GW-377-S2 各項水樣處理前與處理後 BTEX 值(mg/L)及降解效率(%)

檢測項目	樣品編號																				S
	GW-377-S2-1			GW-377-S2-2			GW-377-S2-3			GW-377-S2-4			GW-377-S2-5			GW-377-S2-6			平均		
	前	後	%	前	後	%	前	後	%	前	後	%	前	後	%	前	後	%	%		
MTBE (甲基第三丁基醚)	ND	ND	-	ND	ND	-	ND	ND	-	ND	ND	-	ND	ND	-	ND	ND	-	-	1	
Benzene(苯)	ND	ND	-	ND	ND	-	ND	ND	-	ND	ND	-	ND	ND	-	ND	ND	-	-	0.05	
Toluene(甲苯)	ND	ND	-	ND	0.0014	-	ND	ND	-	ND	ND	-	ND	ND	-	ND	ND	-	-	10	
Chlorbenzene (氯苯)	ND	ND	-	ND	ND	-	ND	ND	-	ND	ND	-	ND	ND	-	ND	ND	-	-	1	
Ethylbenzene (乙苯)	ND	ND	-	ND	ND	-	ND	0.1087	-	ND	0.0018	-	ND	ND	-	ND	ND	-	-	7	
m,p-Xylene (m,p - 二甲苯)	ND	ND	-	ND	ND	-	ND	ND	-	ND	ND	-	ND	ND	-	ND	ND	-	-	100	
o-Xylene (鄰二甲苯)	ND	ND	-	ND	ND	-	ND	ND	-	ND	ND	-	ND	ND	-	ND	ND	-	-	100	
1,3-Dichlorobenzene (1,3 - 二氯苯)	ND	ND	-	ND	ND	-	ND	ND	-	ND	ND	-	ND	ND	-	ND	ND	-	-	-	
1,4-Dichlorobenzene (1,4 - 二氯苯)	0.0011	ND	-	0.0011	ND	-	0.0011	ND	-	0.0011	ND	-	0.0011	ND	-	0.0011	ND	-	-	0.75	
1,2-Dichlorobenzene (1,2 - 二氯苯)	ND	0.0058	-	ND	ND	-	ND	ND	-	ND	ND	-	ND	ND	-	ND	0.0056	-	-	6	

備註 S:地下水污染物管制標準第二類，單位 mg/L (行政院環保署，2001)



5-3-3-4 第四季高雄某化工廠水樣之 BTEX 分析

由表 5-16 得出第四季高雄某化工廠其受總石油碳氫化合物污染且曾被檢測苯類污染物超標之水樣，與第三季不同的是在 MTBE(甲基第三丁基醚)、Chlorobenzene(氯苯)、Ethylbenzene(乙苯)、1,4-Dichlorobenzene (1,4-二氯苯)及 1,2-Dichlorobenzene (1,2-二氯苯)皆未被檢測出。

Benzene (苯)的部分，僅在 GR-1-S2 處理前濃度為 ND，處理後濃度上升至 0.0011 mg/L，其餘水樣 GR-2-S2 處理前濃度為 0.0957 mg/L，處理後濃度降至 ND、GR-3-S2 處理前濃度為 0.0024 mg/L，處理後濃度降至 ND，其去除效率達 100 %。其中 GR-1-S2 之 1,2-Dichlorobenzene 濃度雖經電化學電解後被檢測出，但其濃度符合飲用水水源水質保護區內之地下水之第二類標準。

Toluene(甲苯)的部分在每個樣本中均被檢測出，GR-1-S2 處理前濃度為 0.0182 mg/L，處理後濃度降至 ND、GR-2-S2 處理前濃度為 0.4030 mg/L，處理後濃度降至 ND、GR-3-S2 處理前濃度為 0.0380 mg/L，處理後濃度降至 ND，其去除效率達 100 %。m,p-Xylene(m,p-二甲苯)的部分僅 GR-2-S2 未被檢測出，其餘水樣 GR-1-S2 處理前濃度為 0.0184 mg/L，處理後濃度降至 ND、GR-3-S2 處理前濃度為 0.0283 mg/L，處理後濃度降至 ND，其去除效率達 100 %。

o-Xylene(鄰二甲苯)的部分一樣僅在 GR-3-S1 未被檢測到，GR-1-S2 處理前濃度為 0.0066 mg/L，處理後濃度降至 ND、GR-2-S2 處理前濃度為 0.309 mg/L，處理後濃度降至 ND，其去除效率達 100 %。1,3-Dichlorobenzene (1,3-二氯苯)的部分僅在 GR-2-S1-1 的部分被檢測出，處理前濃度為 0.0011 mg/L，處理後濃度降至 ND，其去除效率達 100 %。

表 5-16、第四季高雄某化工廠各項水樣處理前與處理後 BTEX 值(mg/L)及降解效率(%)

檢測項目	樣品編號										S
	GR-1-S2			GR-2-S2			GR-3-S2			平均	
	前	後	%	前	後	%	前	後	%	%	
MTBE (甲基第三丁基醚)	ND	ND	-	ND	ND	-	ND	ND	-	-	1
Benzene(苯)	ND	0.0011	-	0.0957	ND	100	0.0024	ND	100	100	0.05
Toluene(甲苯)	0.0182	ND	100	0.4030	ND	100	0.0380	ND	100	100	10
Chlorbenzene (氯苯)	ND	ND	-	ND	ND	-	ND	ND	-	-	1
Ethylbenzene (乙苯)	ND	ND	-	ND	ND	-	ND	ND	-	-	7
m,p-Xylene (m,p - 二甲苯)	0.0184	ND	100	ND	ND	-	0.0283	ND	100	100.0	100
o-Xylene (鄰二甲苯)	0.0066	ND	100	0.0309	ND	100	ND	ND	-	100	100
1,3-Dichlorobenzene (1,3 - 二氯苯)	ND	ND	-	0.0011	ND	100	ND	ND	-	100	-
1,4-Dichlorobenzene (1,4 - 二氯苯)	ND	ND	-	ND	ND	-	ND	ND	-	-	0.75
1,2-Dichlorobenzene (1,2 - 二氯苯)	ND	ND	-	ND	ND	-	ND	ND	-	-	6

備註 S:地下水污染物管制標準第二類 (行政院環保署, 2001)



5-4 樣品中總有機碳去除效率比較

各水樣在 4 小時電化學氧化法降解試驗過程中分別採了 0、10、20、30、60、90、120、150、180、210 及 240 分鐘為十一個採樣點分別進行 TOC 總有機碳分析，並且比較不同之操作參數進行試驗，其降解前、後數據與降解效率如下。

5-4-1 第一、二季水樣其比較有無添加電解質之總有機碳去除效率比較

第一季高雄某加油站水樣其比較有無添加電解質之降解前、後數據與降解效率如表 5-17 所示。研究結果顯示，SV01 在經 240 分鐘電降解試驗過程中，TOC 濃度可從 10.8 mg/L 降至 3.3 mg/L (69%)、SV02 濃度從 24.8 mg/L 降至為 3.3 mg/L (87%)、SV03 濃度從 16.7 mg/L 降至 2.7 mg/L (84%)、SV01*濃度從 7.6 mg/L 降至為 3.0 mg/L (60%)、SV02*濃度 從 17.6 mg/L 降至為 5.1 mg/L (71%) 及 SV03*濃度 從 19.8 mg/L 降至為 3.2 mg/L (71%)。

其中以 SV02 去除效率最佳(89%)，SV03、SV03*去除效率達 80%以上，另 SV01、SV01*及 SV02*也相繼到達 60%以上。而其中有添加電解質之水樣，可提升其導電度，SV01 在添加 0.05 M 之 Na_2SO_4 電解質後導電度由 815 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 提升至 9020 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 、SV02-S1 在添加 0.05 M 之 Na_2SO_4 電解質後導電度由 1885 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 提升至 10160 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 及 SV03 在添加 0.05 M 之 Na_2SO_4 電解質後導電度由 1358 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 提升至 10120 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 。於本團隊試驗中在未添加電解質的情況下進行電化學試驗過程中，溫度會較高反應較為激烈，會導致其沸騰，使得 BDD 摻硼鑽石電極較易毀損，及設備電源供應器系電過高使其超過負荷，因此將其水樣 SV01、SV02 及 SV03 添加電解質以便提高電導度使試驗中以降低 BDD 摻硼鑽石電極得損害及以利電源供應器符合其系統限制進行試驗。

一般而言，電高級氧化降解污染物的反應常為準一階反應，若污染物初濃度不是很高，其反應速率正比於污染物濃度。因此，污染物初濃度低時，其反應速率與去除率均相對較低。再者，本電解程序的反應機制，可能異相及均相反應皆有，於濃度很低時易受質傳限制，降低反應速率與去除率表示此方法對於去除受總石油碳氫化合物污染且曾被檢測苯類污染物之地下水是可行的，而去除效率之成效會受初始污染濃度影響，未能到達 99%的去除效率，推測是由於該場址污染濃度較低的關係。



結合電化學氧化處理與現地即時分析
技術於油品污染場址整治之可行性評估

表 5-17、第一季水樣經電降解後 TOC 濃度

樣品編號	降解前 0 min (mg/L)	降解後 240 min (mg/L)	去除效率(%)
SV01	10.8	3.3	69
SV02	24.8	3.3	87
SV03	16.7	2.7	84
SV01*	7.6	3.0	60
SV02*	17.6	5.1	71
SV03*	19.8	3.2	84

備註:*為有添加 0.05 M 之 Na_2SO_4 電解質

第二季高雄某加油站水樣比較有無添加電解質之水樣其降解前、後數據與去除效率如表 5-18 所示。結果顯示 SV01-S1 處理前濃度為 6.3 mg/L，處理後濃度為 7mg/L。SV02-S1 處理前濃度為 12.1 mg/L，處理後濃度降為 4.5 mg/L(62%)。SV03-S1 處理前濃度為 12.7 mg/L，處理後濃度降為 3.3 mg/L(74%)。SV01*-S1 處理前濃度為 9.2 mg/L，處理後濃度降為 8.4 mg/L(8%)。SV02*-S1 處理前濃度為 9.5 mg/L，處理後濃度降為 1.7 mg/L(82%)。SV03*-S1 處理前濃度為 10.3 mg/L，處理後濃度降為 2.8 mg/L(73%)。SV01 -S2 處理前濃度為 19.2 mg/L，處理後濃度降為 1.5 mg/L(92%)。SV02 -S2 處理前濃度為 12.6 mg/L，處理後濃度降為 3.9 mg/L(69%)。SV03 -S2 處理前濃度為 14.5 mg/L，處理後濃度降為 4.2 mg/L(71%)。SV01* -S2 處理前濃度為 4.3 mg/L，處理後濃度降為 1.9 mg/L(56%)。SV02* -S2 處理前濃度為 9 mg/L，處理後濃度降為 3.1 mg/L(66%)。SV03* -S2 處理前濃度為 6.8 mg/L，處理後濃度降為 2.9 mg/L(57%)。

以 SV01-S2 去除效率最佳(92%)，SV02*-S1 去除效率達 80%以上，SV03-S1、SV03*-S1、SV03-S2 去除效率達 70%以上，SV02-S1、SV02-S2 及 SV02*-S2 也相繼到達 60%以上，另外 SV01*-S2、SV03*-S2 去除效率達 50%以上。其中 SV01-S1 及 SV01*-S1 之去除效率不顯著僅 8%以下，推測是由於水樣放置時間、初始濃度較低以及在其電化學氧化法降解試驗過程中，衍生較高濃度之中間產物，使其消耗氫氧自由基導致去除效率降低甚至有有機碳濃度提高的情形。



表 5-18、第二季水樣經電降解後 TOC 濃度

樣品編號	降解前	降解後	去除效率
	0 min (mg/L)	240 min (mg/L)	(%)
SV01-S1	6.3	7.0	-
SV02-S1	12.1	4.5	62
SV03-S1	12.7	3.3	74
SV01*-S1	9.2	8.4	8
SV02*-S1	9.5	1.7	82
SV03*-S1	10.3	2.8	73
SV01 -S2	19.2	1.5	92
SV02 -S2	12.6	3.9	69
SV03 -S2	14.5	4.2	71
SV01* -S2	4.3	1.9	56
SV02* -S2	9.0	3.1	66
SV03* -S2	6.8	2.9	57

備註:*為有添加 0.05 M 之 Na_2SO_4 電解質。

5-4-2 比較不同電極間距之總有機碳去除效率比較

由於不同的電極間距大小，它會影響在電化學降解試驗中的系統電位，當系統電位越高時會越耗能，反之系統電位越低時較省能，故本團隊接續第二季高雄某加油站之水樣，比較不同電極間距對其去除效率之影響，分別在 SV03-S2-1、SV03-S2-2、SV03-S2-3 的電解試驗中改變其電極間距以進行試驗，其改變參數電極間距分別為 0.2、1、3 cm。在 4 小時電化學氧化法降解試驗過程中分別採十個採樣點分別進行 TOC 總有機碳分析，其降解前、後數據與降解效率如表 5-19 及



結合電化學氧化處理與現地即時分析
技術於油品污染場址整治之可行性評估

降解趨勢圖如圖 5-1 所示。本研究結果顯示，SV03-S2-1 處理前濃度為 14.9 mg/L，處理後濃度為 2.6 mg/L(83%)。SV03-S2-2 處理前濃度為 12.6 mg/L，處理後濃度為 6.0 mg/L(52%)。SV03-S2-3 處理前濃度為 10.4 mg/L，處理後濃度為 3.1mg/L(73%)。以總有機碳去除率來說，SV03-S2-1 其電極間距為 0.2 cm 有著較好的去除效率，其去除效率可達 82.5 %。

表 5-19、改變其間距之水樣經電降解後 TOC 濃度

樣品編號	降解前 0 min (mg/L)	降解後 240 min (mg/L)	去除效率(%)
SV03-S2-1	14.9	2.6	83
SV03-S2-2	12.6	6.0	52
SV03-S2-3	10.4	3.1	73

備註:皆有添加 0.05 M 之 Na_2SO_4 電解質。

而由圖 5-1 之降解趨勢圖來看，在 SV03-S2-1 的部分有著較快且穩定降解的趨勢，雖在 SV03-S2-2 的部分其降解趨勢雷同 SV03-S2-1 呈穩定下降，但其有機碳去除效率較低且有機碳之殘餘較多，故不考慮為實驗條件參數之一。相較於第一季及第二季所使用之電極間距(3 cm)有著更好的去除效率，其電化學降解期間之系統電位可由 SV03-S2-3(電極間距為 3 cm) 的 40.8~25.9 降低至 SV03-S2-1(電極間距為 0.2 cm)的 17.6~15.3，可以得知縮短電極間距確實能夠降低電化學試驗中的系統電位，達到較省能的實驗條件，故後續電化學試驗其電極間距為 0.2 cm。

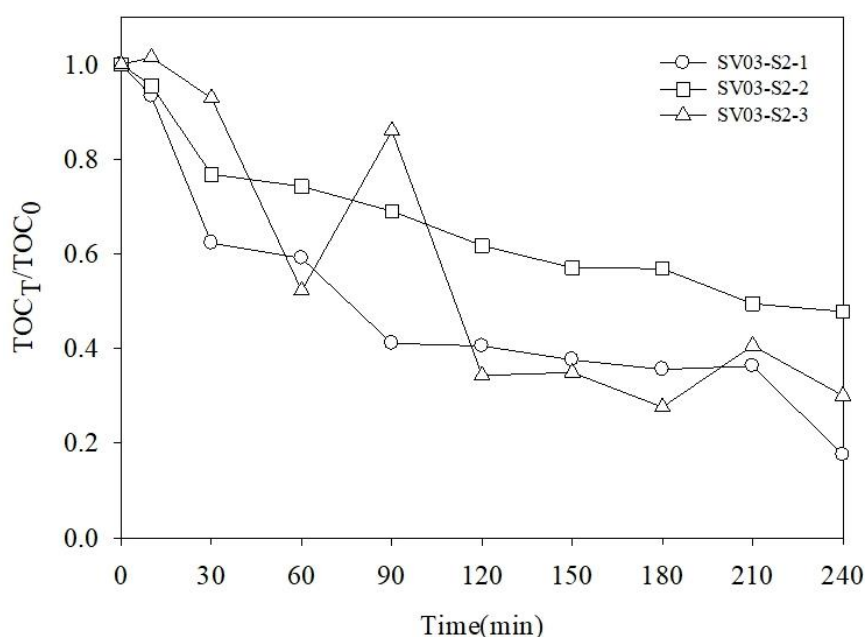


圖 5-1 改變其間距之水樣經電降解後之降解趨勢圖

5-4-3 添加不同電解質之總有機碳去除效率比較

接下來本團隊為解決在試驗中未添加電解質的情況下，進行電化學試驗的過程中，溫度會較高反應較為激烈導致沸騰，使 BDD 摻硼鑽石電極較易毀損，及設備電源供應器系電過高使其超過負荷，故本團隊將後續第三季所採集到濃度較高之澎湖某化工廠之水樣，將其水樣 GW-377-S1-1、GW-377-S1-2 及 GW-377-S1-3 分別添加 0.05 M 之 Na_2SO_4 電解質、無添加電解質及添加 0.05 M 之 H_2SO_4 電解質，以比較其去除效率在無添加電解質之原水樣與不同添加之電解質，在 4 小時電化學降解，過程中各別採十一個採樣點進行 TOC 總有機碳分析，其降解前、後數據與降解效率如表 5-20 及降解趨勢圖如圖 5-2 所示。本研究結果顯示，GW-377-S1-1 處理前濃度為 68.2 mg/L，處理後濃度為 3.9 mg/L(94%)。GW-377-S1-2 處理前濃度為 77.0 mg/L，處理後濃度為 2.0 mg/L(97%)。GW-377-S1-3 處理前濃度為 85.4 mg/L，處理後濃度為 3.8 mg/L(96%)。以總有機碳去除率來說，GW-377-S1-2 其在未添加電解質有著較好的去除效率，其去除效率可達 97%。



結合電化學氧化處理與現地即時分析
技術於油品污染場址整治之可行性評估

表 5-20、比較有無電解質及不同電解質之水樣經電降解後 TOC 濃度

樣品編號	降解前 0 min (mg/L)	降解後 240 min (mg/L)	去除效率 (%)
GW-377-S1-1	68.2	3.9	94
GW-377-S1-2	77.0	2.0	98
GW-377-S1-3	85.4	3.8	96

由圖 5-2 之降解趨勢圖來看，雖 GW-377-S1-2 有著最穩定其最佳的降解趨勢且有著最佳的總有機碳去除率，但在電化學試驗過程中，其有著較高之系統電位 (122~56.1) 且溫度較高 (25~58 °C) 反應較為激烈，會導致其沸騰，使 BDD 摻硼鑽石電極較易毀損，及設備電源供應器系電過高使其超過負荷。添加電解質的部分，添加電解質不僅能夠提高導電度也能降低系統電位，在 GW-377-S1-1 及 GW-377-S1-3，皆有著 94% 及 96% 的去除效率，且 GW-377-S1-1 及 GW-377-S1-3 的系統電位分別為 55~37.2 及 11.1~10.3，相較於 GW-377-S1-2 (系統電位 122~56.1) 下，不僅有著較低之系統電位且去除效率皆達 90% 以上。其中在 GW-377-S1-3 的部分，雖其總有機碳去除率略低於 GW-377-S1-2，其去除效率分別為 96% 及 97%，但其總有機碳去除量會高於 GW-377-S1-2，分別 GW-377-S1-3 處理前總有機碳濃度為 85.4 mg/L 處理後濃度降至 3.8 mg/L、GW-377-S1-2 處理前總有機碳濃度為 77.0 mg/L 處理後濃度降至 2.0 mg/L。故後續試驗皆會添加電解質以利後續實驗之成效。

而在添加不同電解質的部份，可以由圖 5-2 得知，GW-377-S1-1 及 GW-377-S1-3 之降解趨勢，GW-377-S1-1 的降解趨勢較穩定且規律，GW-377-S1-3 的降解趨勢從電化學降解 10 分鐘處較 GW-377-S1-1 快，但從電化學降解 30 分鐘處開始，GW-377-S1-1 降解趨勢較 GW-377-S1-3 快，但最終有機碳殘餘相近 (3.8、3.9 mg/L)。而由於添加 0.05 M Na₂SO₄ 之 GW-377-S1-1 其系統電位 (37.2~55) 高於添加 0.05 M H₂SO₄ 之 GW-377-S1-3 之系統電位 (10.3~11.8)，且在電化學試驗期間之溫度控制，比起穩定的 GW-377-S1-3 (20~25 °C)，GW-377-S1-1 之溫度 (25~44 °C) 較不易控制，且 GW-377-S1-1 (9.9~11.6 ms/cm) 導電度也較低於 GW-377-S1-3 (35.3~39.9 ms/cm)，故後續試驗將會以添加不同濃度之 H₂SO₄ 電解質進行比較。

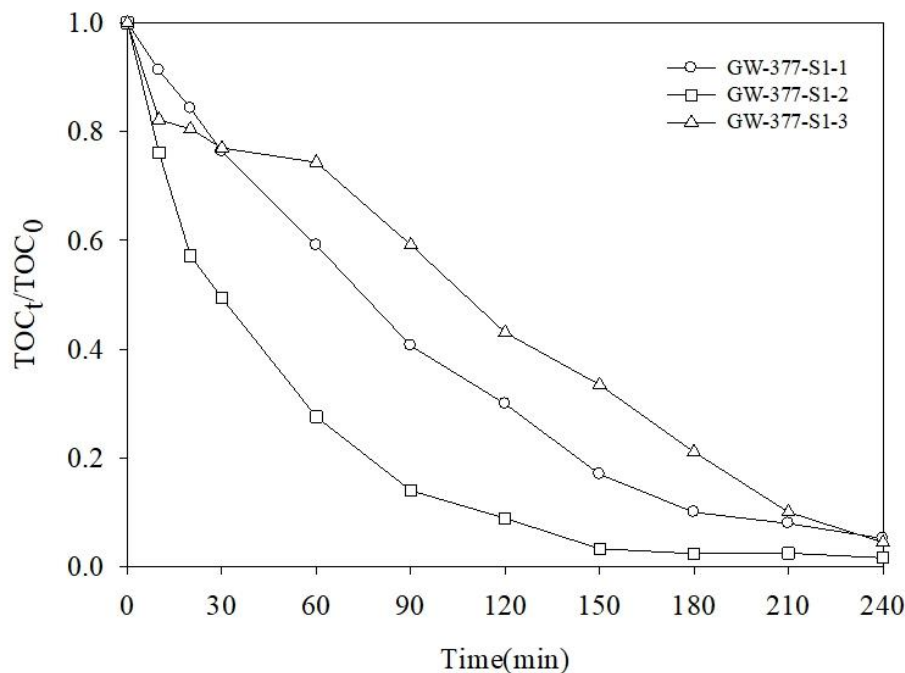


圖 5-2 比較有無電解質及不同電解質之水樣經電降解後之降解趨勢圖

5-4-4 不同 H_2SO_4 電解質添加量之總有機碳去除效率比較

本團隊為找尋較佳且不添加過量之 H_2SO_4 電解質參數，分別在第三季澎湖之水樣 GW-377-1-S1、第三季高雄之水樣 GR-2-S1 及第四季澎湖之水樣 GW-377-1-S2，個別添加 0.0017 M H_2SO_4 、0.0086 M H_2SO_4 及 0.0344M H_2SO_4 之電解質。其中不同的是在第四季澎湖之水樣 GW-377-1-S2 中多增加兩個電解質參數分別為添加 0.0043 M H_2SO_4 及 0.05 M H_2SO_4 進行 4 小時電化學試驗，過程中分別採十一個採樣點分別進行 TOC 總有機碳分析，並個別比較其總有機碳降解效率，其降解前、後數據與降解效率及其降解趨勢圖如表 5-21、圖 5-3、圖 5-4 及圖 5-5 所示。



結合電化學氧化處理與現地即時分析
技術於油品污染場址整治之可行性評估

表 5-21、比較不同添加 H_2SO_4 電解質之水樣經電降解後 TOC 濃度

樣品編號	降解前 0 min (mg/L)	降解後 240 min (mg/L)	去除效率(%)
GW-377-1-S1-1	65.8	1.1	98
GW-377-1-S1-2	65.6	2.5	96
GW-377-1-S1-3	64.1	2.0	95
GR-2-S1-1	22.9	3.0	87
GR-2-S1-2	24.0	1.8	93
GR-2-S1-3	19.6	1.9	90
GW-377-1-S2-1	85.2	1.3	98
GW-377-1-S2-2	68.0	2.5	96
GW-377-1-S2-3	70.4	2.2	97
GW-377-1-S2-4	79.7	2.6	97
GW-377-1-S2-5	92.2	5.1	95

GW-377-1-S1 之水樣由表 5-21 研究結果顯示，GW-377-1-S1-1 處理前濃度為 65.8 mg/L，處理後濃度為 1.1 mg/L(98%)。GW-377-1-S1-2 處理前濃度為 65.6 mg/L，處理後濃度為 2.5 mg/L(96%)。GW-377-1-S1-3 處理前濃度為 64.1 mg/L，處理後濃度為 2.0 mg/L(65%)，在添加 0.0017 M H_2SO_4 之 GW-377-1-S1-1 有著最佳之總有機碳去除效率 98%。而其降解趨勢由圖 5-3，可得知在添加較少電解質之 GW-377-1-S1-1，其不管是降解趨勢或總有機碳去除效率皆優於 GW-377-1-S1-2 及 GW-377-1-S1-3。

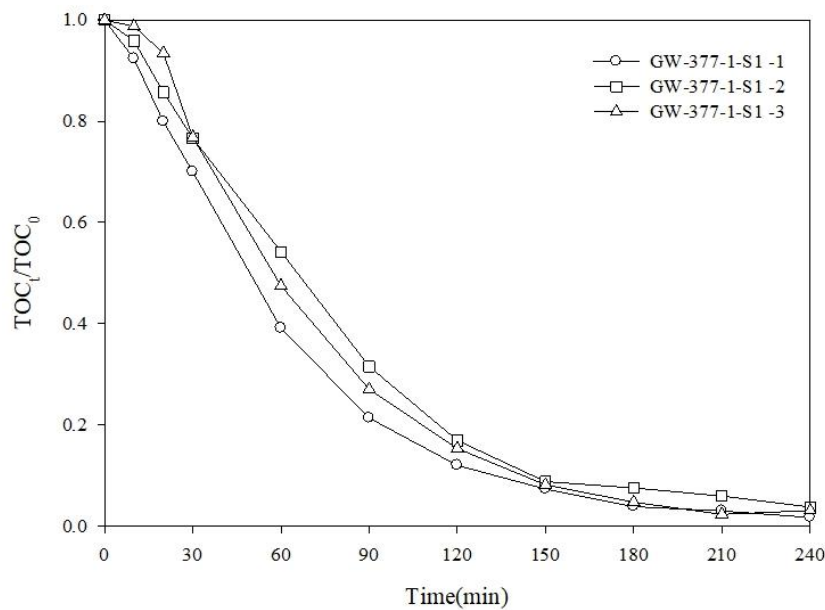


圖 5-3 比較不同 H_2SO_4 電解質量之水樣 GW-377-1-S1 經電降解後之降解趨勢圖

GR-2-S1 之水樣由表 5-21 研究結果顯示，GR-2-S1-1 處理前濃度為 22.9 mg/L，處理後濃度為 3.0 mg/L(87%)。GR-2-S1-2 處理前濃度為 24.0 mg/L，處理後濃度為 1.8 mg/L(93%)。GR-2-S1-3 處理前濃度為 19.6 mg/L，處理後濃度為 1.9 mg/L(90%)，在添加 0.0086 M H_2SO_4 之 GR-2-S1-2 有著最佳之總有機碳去除效率 93%。而其降解趨勢由圖 5-4，可以看到 GR-2-S1-1 的降解趨勢較穩定且規律下降，在 GR-2-S1-2 的部分較 GR-2-S1-1 緩慢，GR-2-S1-3 的部份在電化學降解過程中在試驗時間 10、20、30 及 180 分鐘處皆有上升的趨勢，但隨後皆下降，本團隊推測是由於該場址曾添加界面活性劑的關係，在電化學降解過程中與其反應，導致在此 4 個分鐘處濃度有些微上升的趨勢，但後續 GR-2-S1-2 及 GR-2-S1-3 其總有機碳殘餘差異不大，分別為 1.8 及 1.9 mg/L。而在添加 0.0086 M H_2SO_4 之 GR-2-S1-2 有著最佳的總有機碳去除效率 93%。



結合電化學氧化處理與現地即時分析
技術於油品污染場址整治之可行性評估

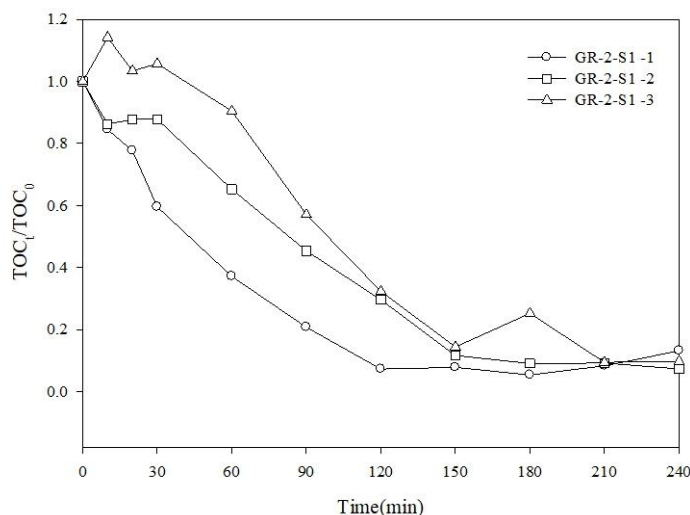


圖 5-4 比較不同 H_2SO_4 電解質添加量之水樣 GR-2-S1 經電降解後之降解趨勢圖

GW-377-1-S2 之水樣由表 5-21 研究結果顯示，GW-377-1-S2-1 處理前濃度為 85.2 mg/L，處理後濃度為 1.3 mg/L(98%)。GW-377-1-S2-2 處理前濃度為 68.0 mg/L，處理後濃度為 2.5 mg/L(96%)。GW-377-1-S2-3 處理前濃度為 70.4 mg/L，處理後濃度為 2.2 mg/L(97%)。GW-377-1-S2-4 處理前濃度為 79.7 mg/L，處理後濃度為 2.6 mg/L(97%)。GW-377-1-S2-5 處理前濃度為 92.2 mg/L，處理後濃度為 5.1 mg/L(95%)。在 GW-377-1-S2-1 有著最好的總有機碳去除率 98%，其餘水樣其總有機碳去除率也皆達 95% 以上。而其降解趨勢由圖 5-5 可以看到，在 GW-377-1-S2-1、GW-377-1-S2-2、GW-377-1-S2-3 及 GW-377-1-S2-4 的部份，其餘降解趨勢雷同，而其中較特別的 GW-377-1-S2-5 雖有著此批水樣最低的總有機碳去除率 95%，且總有機碳殘餘量也最多(5.1 mg/L)，但該水樣之總有機碳去除量為最多，且降解趨勢成規率下降。

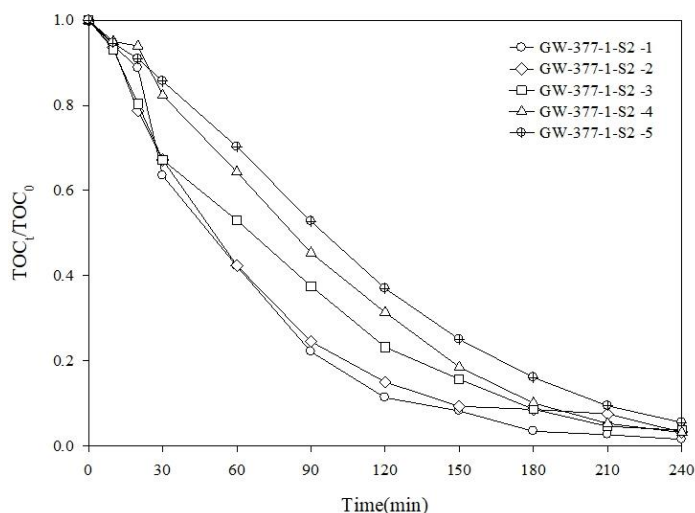


圖 5-5 比較不同 H_2SO_4 電解質添加量之水樣 GW-377-1-S2 經電降解後之降解趨勢圖

由此三批水樣個別試驗比較下，可得在添加 $0.0017 \text{ M H}_2\text{SO}_4$ 之條件有著最佳去除效率 98%，在添加 $0.0086 \text{ M H}_2\text{SO}_4$ 及 $0.0344 \text{ M H}_2\text{SO}_4$ 之條件皆有著 97% 去除效率。而該實驗參數條件皆能到達至少 87% 以上之總有機碳去除效率。但所添加之電解質為 H_2SO_4 其會導致該實驗水樣之 pH 值偏酸性，影響後續之生物毒性分析，故接下來將會分別比較混合不同電解質之電化學降解試驗。

5-4-5 混合不同電解質(H_2SO_4 及 Na_2SO_4)及添加量之總有機碳去除效率比較

藉由所添加之不同電解質(H_2SO_4 及 Na_2SO_4)來控制水樣之 pH 值，使用第四季澎湖之水樣 GW-377-S2、第三季高雄之水樣 GR-1-S1 及 GR-3-S1、第四季高雄之水樣 GR-1-S2、GR-2-S2 及 GR-3-S2 水樣，個別添加不同混合濃度之電解質 ($0.0025 \text{ M H}_2\text{SO}_4 + 0.0025 \text{ M Na}_2\text{SO}_4$ 、 $0.001 \text{ M H}_2\text{SO}_4$ 、 $0.005 \text{ M H}_2\text{SO}_4$ 、 $0.005 \text{ M H}_2\text{SO}_4 + 0.005 \text{ M Na}_2\text{SO}_4$ 、 $0.01 \text{ M H}_2\text{SO}_4 + 0.01 \text{ M Na}_2\text{SO}_4$ 、 $0.01 \text{ M H}_2\text{SO}_4 + 0.04 \text{ M Na}_2\text{SO}_4$ 、 $0.002 \text{ M H}_2\text{SO}_4 + 0.003 \text{ M Na}_2\text{SO}_4$ 、 $0.01 \text{ M H}_2\text{SO}_4 + 0.04 \text{ M Na}_2\text{SO}_4$ 、 $0.005 \text{ M H}_2\text{SO}_4 + 0.045 \text{ M Na}_2\text{SO}_4$ 、 $0.0075 \text{ M H}_2\text{SO}_4 + 0.0425 \text{ M Na}_2\text{SO}_4$ 、 $0.0025 \text{ M H}_2\text{SO}_4 + 0.00475 \text{ M Na}_2\text{SO}_4$)，在試驗過程中分別採十一個採樣點分別進行 TOC 總有機碳分析，個別比較其總有機碳降解效率，其降解前、後數據與降解效率及其降解趨勢圖如表 5-23、圖 5-6 及圖 5-7 所示。



結合電化學氧化處理與現地即時分析
技術於油品污染場址整治之可行性評估

表 5-22、比較不同混合添加 H_2SO_4 及 Na_2SO_4 電解質之水樣經電降解後 TOC 濃度

樣品編號	降解前 0 min (mg/L)	降解後 240 min (mg/L)	去除效率(%)
GW-377-S2-1	60.1	1.8	97
GW-377-S2-2	54.3	1.5	97
GW-377-S2-3	61.2	2.7	96
GW-377-S2-4	63.5	2.8	96
GW-377-S2-5	63.9	1.7	97
GW-377-S2-6	61.8	1.8	97
GR-1-S1	21.2	2.1	90
GR-3-S1	9.0	0.7	92
GR-2-S2	47.3	3.5	93
GR-1-S2	23.8	1.3	94
GR-3-S2	13.4	1.5	89

第四季澎湖之水樣 GW-377-S2 水樣的部份，由表 5-22 研究結果顯示，GW-377-S2-1 處理前濃度為 60.1 mg/L，處理後濃度為 1.8 mg/L(97%)。GW-377-S2-2 處理前濃度為 54.3 mg/L，處理後濃度為 1.5 mg/L(97%)。GW-377-S2-3 處理前濃度為 61.2 mg/L，處理後濃度為 2.7 mg/L(96%)。GW-377-S2-4 處理前濃度為 63.5 mg/L，處理後濃度為 2.8 mg/L(96%)。GW-377-S2-5 處理前濃度為 63.9 mg/L，處理後濃度為 1.7 mg/L(97%)。GW-377-S2-6 處理前濃度為 61.8 mg/L，處理後濃度為 1.8 mg/L(97%)。其去除效率皆高達 96%以上。

由降解趨勢圖 5-6 來看，其六批水樣之降解趨勢皆雷同，且總有機碳殘餘量



皆相近(1.5~2.8 mg/L)，但在 GW-377-S2-1、GW-377-S2-4 及 GW-377-S2-6 其 pH 值為偏鹼性外，其餘之 GW-377-S2-2、GW-377-S2-3 及 GW-377-S2-5 其 pH 值為皆偏酸性，由研究結果顯示當混合不同電解質之 H_2SO_4 添加越多或純添加 H_2SO_4 作為電解質時，其會越不易控制 pH 值，雖其總有機碳去除率皆高達 96% 以上。因此後續之水樣，皆會使用不同比例之混合不同電解質來進行電化學降解試驗。

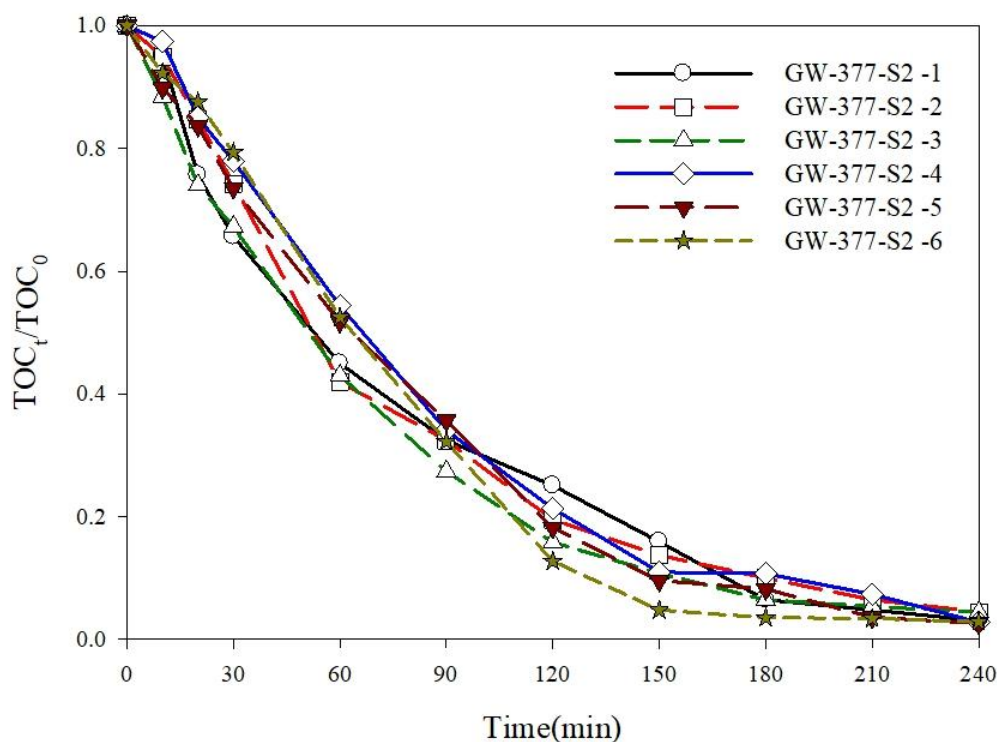


圖 5-6 比較不同混合添加 H_2SO_4 及 Na_2SO_4 電解質之水樣 GW-377-S2 經電降解後之降解趨勢圖

第三季高雄之水樣 GR-1-S1 及 GR-3-S1 及第四季高雄之水樣 GR-1-S2、GR-2-S2 及 GR-3-S2 水樣的部份，由表 5-23 研究結果顯示，GR-1-S1 處理前濃度為 21.2 mg/L，處理後濃度為 2.1 mg/L(90%)。GR-3-S1 處理前濃度為 9.0 mg/L，處理後濃度為 0.7 mg/L(92%)。GR-1-S1 處理前濃度為 21.2 mg/L，處理後濃度為 2.1 mg/L(90%)。GR-2-S2 處理前濃度為 47.3 mg/L，處理後濃度為 3.5 mg/L(93%)。GR-1-S2 處理前濃度為 23.8 mg/L，處理後濃度為 1.3 mg/L(94%)。GR-3-S2 處理前濃度為 13.4 mg/L，處理後濃度為 1.5 mg/L(89%)。在 GR-1-S2 有著最佳的總有機碳去除效率 94%，其餘總有機碳去除效率皆達 89% 以上。其中較為特別的是在 GR-3-S1 的部分，其初始濃度很低，但其去除率卻可達 92%，表示不同水樣下在透過設定不同之實驗操作參數後皆可使其污染之水樣有著良好的電化學降解總有機碳。



結合電化學氧化處理與現地即時分析
技術於油品污染場址整治之可行性評估

由降解趨勢圖 5-7 來看，其 GR-1-S1、GR-3-S1、GR-2-S2、GR-1-S2 及 GR-3-S2 水樣皆在電化學試驗 150 分鐘後，皆趨近規律的下降，在電化學試驗 150 分鐘前皆有起伏不規律之降解趨勢，本團隊推測是由於該採樣場址曾添加界面活性劑，在電化學降解初期皆與其他污染物形成反應，導致在降解趨勢初期起伏不定。

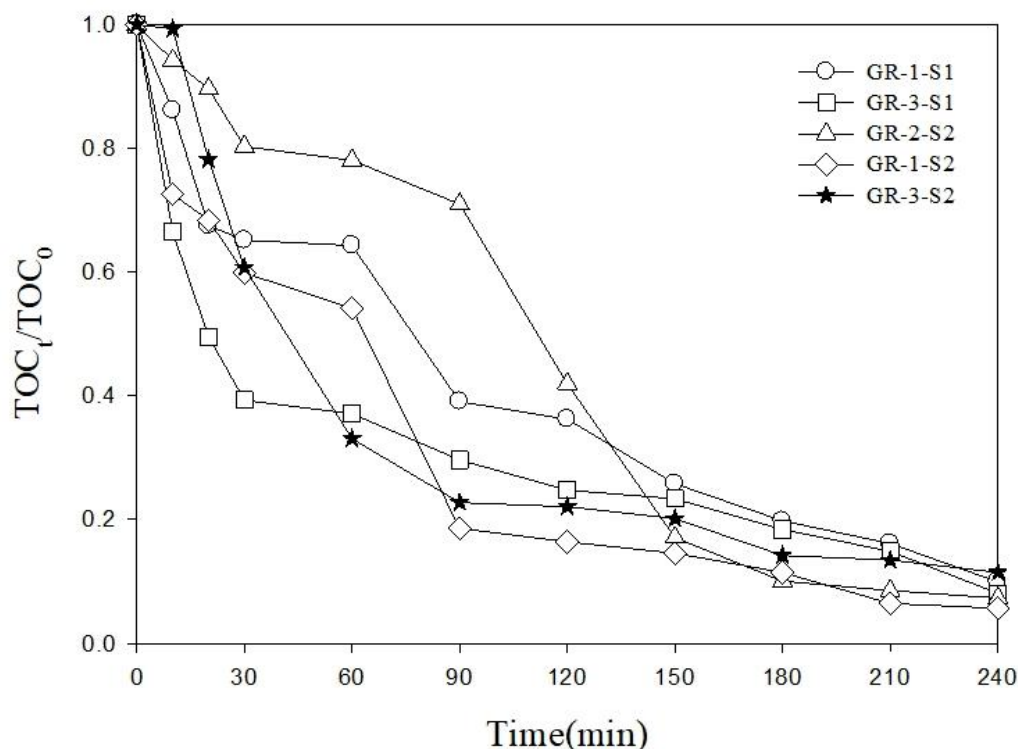


圖 5-7 比較不同混合添加 H_2SO_4 及 Na_2SO_4 電解質之高雄水樣經電降解後之降解趨勢圖

由上述研究得知，在第一季與第二季水樣的初始濃度皆偏低(4.3~24.8 mg/L)，於濃度很低時易受質傳限制，因此在電化學試驗中導致，反應速率與去除率較低之問題。雖在初始濃度較低的因素，但在第一季 SV02 處理前濃度為 24.8 mg/L，處理後濃度降至 3.3 mg/L，有著最佳總有機碳去除效率 87%，而第二季的部份在 SV01-S2 處理前濃度為 19.2 mg/L，處理後濃度降至 1.5 mg/L，有著最佳總有機碳去除效率 92%。藉由第二季之水樣改變電極間距之參數進行試驗，透過總有機碳去除率比較，得出在電極間距為 0.2 cm 時，有著最佳最去除效率 82%。

本團隊由上半年度計畫之初步結果發現對於初始濃度相對較低之 TOC 水樣，在處理前後之處理無較大之差異，雖處理後 TOC 濃度有略微下降，但相較於初始 TOC 濃度較高之水樣可得出較高的去除效率。故本團隊在下半年度之計畫內，找到較高濃度之澎湖及高雄之新場址，並透過調整實驗操作參數，來提高電化學降解效率。在第三季及第四季批次試驗中，GW-377-S1-2、GW-377-1-S1-1 及 GW-377-1-S2-1 有著最佳總有機碳去除率 98%，而 GW-377-S1-1、GW-377-S1-3、GW-377-1-S1-2、GW-377-1-S1-3、GR-2-S1-2、GR-2-S1-3、GW-377-1-S2-2、GW-377-1-S2-3、GW-377-1-S2-4、GW-377-1-S2-5、GW-377-S2-1、GW-377-S2-2、GW-377-S2-3、GW-377-S2-4、GW-377-S2-5、GW-377-S2-6、GR-1-S1、GR-3-S1、GR-2-S2、GR-1-S2 及 GR-3-S2 其總有機碳去除效率也可達 90% 以上。



結合電化學氧化處理與現地即時分析
技術於油品污染場址整治之可行性評估

綜合上述結果所述，雖未能使總有機碳降至 ND，但可能由於水樣中未檢測之其他有機污染物以及曾添加之介面活性劑，消耗在電化學試驗中之氫氧自由基，造成總有機碳去除效率些微的降低。透過上述之實驗，比較電極間距、增加電流、系統電位、pH 值以及總有機碳去除率，得出其各水質之性質特性皆不相同，各個水樣皆須有符合其需求之電化學降解之操作參數，而本團隊得出本計畫之較佳參數為陰陽極及工作面積分別為 BDD 14 及 Ti 7 cm²、電流為 3.5 A、電流密度 0.25 A/cm²、溫度 25 °C、樣品體積 500 mL、電極間距為 0.2 cm 及添加 0.0025 M H₂SO₄+0.0025 M Na₂SO₄ 之電解質。



5-4-6 地下水即時分析

本次研究所採集之地下水樣，除了使用傳統實驗室設備進行分析外，亦使用儀器 MiTAP-UTLD 進行即時分析，共分析 18 件次樣本。表 5-23 為本次即時分析數據，無論經電化學處理前、後之水樣，其 BTEX 濃度均低於 MiTAP-UTLD 偵測極限(LOD: 0.01 mg/L)。與化學分析結果相比較可發現到相同趨勢，所有樣品濃度普遍低於偵測極限僅部分樣本檢測出極低濃度；在 TOC 數據也發現相同之現象，本年度所採集之原水樣本 TOC 濃度約低於本團隊上年度水樣 84 倍，與上年度電化學處理後之 TOC 濃度相似(趙浩然，2018)。綜合上述結果，本次研究所採集之原水樣中 BTEX 污染物應屬於極低之濃度範圍，MiTAP-UTLD 與化學分析法數據具一致性，無任何偽陽性之情形。

表 5-24 與圖 5-8 為 GC/MS 與 MiTAP 所測定之濃度比較，雖部分地下水污染樣品顯示出，當 UTLD-MiTAP 超過偵測極限時，即時分析濃度與化學法測值有差異，但兩者利用斯皮爾曼相關性(Spearman's rho)比對後，Toluene 在兩個分析中發現有顯著性相關，顯示出即時監測系統具有化學分析方法發展潛力。後續研究將使用 MiTAP 分析苯類標準品，找出已知濃度待測物標準品與其相對應之儀器訊號值之關係，修正 MiTAP 定量校正因子。



結合電化學氧化處理與現地即時分析
技術於油品污染場址整治之可行性評估

表 5-23、地下水水樣經 MiTAP 所測定之濃度

樣品編號 檢測項目	MTBE	Benzene	Toluene	Ethylbenzene	Xylene
SV01-S1	ND	ND	ND	ND	ND
SV01 電-S1	ND	ND	ND	ND	ND
SV01 電*-S1	ND	ND	ND	ND	ND
SV02-S1	ND	ND	ND	ND	ND
SV02 電-S1	ND	ND	ND	ND	ND
SV02 電*-S1	ND	ND	ND	ND	ND
SV03-S1	ND	ND	ND	ND	ND
SV03 電-S1	ND	ND	ND	ND	ND
SV03 電*-S1	ND	ND	ND	ND	ND
SV01-S2	ND	ND	ND	ND	ND
SV01 電-S2	ND	ND	ND	ND	ND
SV01 電*-S2	ND	ND	ND	ND	ND
SV02-S2	ND	ND	ND	ND	ND
SV02 電-S2	ND	ND	ND	ND	ND
SV02 電*-S2	ND	ND	ND	ND	ND
SV03-S2	ND	ND	ND	ND	ND
SV03 電-S2	ND	ND	ND	ND	ND
SV03 電*-S2	ND	ND	ND	ND	ND



表 5-24、第三、四季地下水水樣經 GC/MS 與 MiTAP 所測定之濃度(GC)

澎湖(單位:ug/L)	MTBE	Benzene	Toluene	Ethylbenzene	Xylene
GW-377-1-S1	115700	521	ND	275	1017
GW-377-1-S1-1	ND	ND	2.19	ND	1.07
GW-377-1-S1-2	ND	ND	2.82	ND	ND
GW-377-1-S1-3	ND	ND	2.08	ND	ND
GW-377-S1	108800	589	ND	332	1378
GW-377-S1-1	ND	1.6	4.5	ND	ND
GW-377-S1-2	ND	4.39	7.48	ND	ND
GW-377-S1-3	ND	ND	1.95	ND	ND
GW-377-1-S2	53.33	510.82	7.02	ND	326.3
GW-377-1-S2-1	29.44	1421	3047	268.4	814.7
GW-377-1-S2-2	ND	5.4	8.74	ND	3.23
GW-377-1-S2-3	ND	ND	1.89	21.51	ND
GW-377-1-S2-4	ND	ND	1.24	5.31	ND
GW-377-1-S2-5	ND	ND	1.04	ND	4.08
GW-377-S2	ND	ND	ND	ND	ND
GW-377-S2-1	ND	ND	2.46	ND	ND
GW-377-S2-2	ND	ND	1.41	ND	ND
GW-377-S2-3	ND	ND	ND	108.66	ND
GW-377-S2-4	ND	ND	1.21	1.81	ND
GW-377-S2-5	ND	ND	1.23	ND	ND
GW-377-S2-6	ND	ND	1.09	ND	ND
高雄					
GR-1-S1	ND	1.98	26.66	ND	30.29
GR-1-S1-1	ND	1.69	3.07	ND	5.05
GR-2-S1	ND	10.56	75.47	ND	27.36
GR-2-S1-1	ND	6.8	5.84	259.1	ND
GR-2-S1-2	ND	ND	1.59	146.7	ND
GR-2-S1-3	ND	ND	1.41	1.35	ND
GR-3-S1	ND	ND	ND	126.6	ND
GR-3 電 1 -S1	ND	ND	ND	ND	ND
GR-1 -S2	ND	ND	18.15	ND	25.04
GR-1 電 1 -S2	ND	1.09	ND	ND	ND
GR-2 -S2	ND	95.65	403.0	ND	30.93
GR-2 電 1 -S2	ND	ND	ND	ND	ND
GR-3 -S2	ND	2.36	38.01	ND	28.32
GR-3 電 1 -S2	ND	ND	ND	ND	ND



結合電化學氧化處理與現地即時分析
技術於油品污染場址整治之可行性評估

UTLD-MiTAP

(單位:ug/L)

澎湖		MTBE	Benzene	Toluene	Ethylbenzene	Xylene
GW-3771	-S1	ND	ND	ND	ND	ND
GW-3771 電 1-S1		ND	ND	ND	ND	ND
GW-3771 電 2-S1		ND	ND	ND	ND	ND
GW-3771 電 3-S1		ND	ND	ND	ND	ND
GW-377	-S1	ND	ND	ND	ND	ND
GW-377 電 1 -S1		ND	ND	ND	ND	ND
GW-377 電 2 -S1		ND	ND	ND	ND	ND
GW-377 電 3 -S1		ND	ND	ND	ND	ND
GW-3771	-S2	ND	ND	ND	ND	ND
GW-3771 電 1-S2		ND	ND	ND	ND	ND
GW-3771 電 2-S2		ND	ND	ND	ND	ND
GW-3771 電 3-S2		ND	ND	ND	ND	ND
GW-3771 電 4-S2		ND	ND	ND	ND	ND
GW-3771 電 5-S2		ND	ND	ND	ND	ND
GW-377	-S2	ND	ND	ND	ND	ND
GW-377 電 1 -S2		ND	ND	ND	ND	ND
GW-377 電 2 -S2		ND	ND	ND	ND	ND
GW-377 電 3 -S2		ND	ND	ND	ND	ND
GW-377 電 4 -S2		ND	ND	ND	ND	ND
GW-377 電 5 -S2		ND	ND	ND	ND	ND
GW-377 電 6 -S2		ND	ND	ND	ND	ND
高雄						
GR-1	-S1	ND	ND	ND	75.67±17.56	13.00±2.449
GR-1 電 1	-S1	ND	ND	ND	ND	ND
GR-2	-S1	ND	ND	1.000±1.500	85.00±11.52	13.67±1.700
GR-2 電 1	-S1	ND	ND	ND	ND	ND
GR-2 電 2	-S1	ND	ND	ND	ND	ND
GR-2 電 3	-S1	ND	ND	ND	ND	ND
GR-3	-S1	ND	ND	2.000±3.464	39.33±18.12	3.333±4.714
GR-3 電 1	-S1	ND	ND	ND	ND	ND
GR-1	-S2	ND	ND	38.67±6.506	20.33±13.05	ND
GR-1 電 1	-S2	ND	ND	ND	ND	ND
GR-2	-S2	ND	ND	32.67±13.32	78.00±72.52	15.33±6.506
GR-2 電 1	-S2	ND	ND	ND	ND	ND
GR-3	-S2	ND	ND	42.33±10.12	12.33±4.619	ND
GR-3 電 1	-S2	ND	ND	ND	ND	ND




Model	Spec	
<p>MiTAP UTLD 3-in-1 Analyzer</p>  <p>The Best Solution for On-Site LNAPL Detection</p>	Techniques	μ-GC; Portable purge and trap device; Innovative detector arrays module
	Mode	Soil Gas Underground Water
	Cycle time	15 mins
	Precision	≤ 20%
	Accuracy	≤ 20% (Decane : 30%) ≤ 20%
	VOC List	MTBE Benzene Toluene Ethylbenzene Xylenes Decane
	Range	0 - 1000 ppmv; Decane: 0-300 ppmv 0.01 - 5 mg/L
	Dimension	Width : 188.0 ± 2.0 mm; Height : 252.5 ± 2.0 mm; Deep : 344.5 ± 2.0 mm Weight : 8.5 kg
If PID Mode used, range from 0 to 3000 ppmv with cycle time < 10 sec.		

圖 5-8、UTLD-MiTAP 基本儀器資料(創控公司)

表 5-25、UTLD-MiTAP 與 BTEX 相關性統計(Spearman's rho)

	GC-MTBE	GC-Benzene	GC-Toluene	GC-Ethylbenzene	GC-Xylene
UTLD-Toluene	r=-0.161 p=0.377	r=-0.143 p=0.434	r=0.382* p=0.031	r=-0.118 p=0.519	r=0.329 p=0.066
UTLD-Ethylbenzene	r=-0.180 p=0.325	r=0.216 p=0.235	r=0.455** p=0.009	r=-0.157 p=0.391	r=0.404* p=0.022
UTLD-Xylene	r=-0.142 p=0.438	r=0.252 p=0.164	r=-0.315 p=0.079	r=-0.074 p=0.688	r=0.294 p=0.102



結合電化學氧化處理與現地即時分析
技術於油品污染場址整治之可行性評估

5-5 Cytotoxic MTT bioassay 樣品暴露及偵測

本計畫已完成 MTT bioassay 之實驗方法之建立，並利用已知對細胞具有毒性之化合物(乙醇)進行該系統測試。經由實驗結果顯示，將不同濃度(以培養基稀釋乙醇濃度為10、20、40、50、60、80、90%)之乙醇化合物暴露於細胞株中，其細胞存活率會隨著乙醇濃度增加而減少(如圖 5-9)。乙醇濃度為 90%時對細胞致死率最高(62.02%)，由上述的研究結果顯示，本研究所建置之 Cytotoxic MTT bioassay 確實可用於評估毒性化合物對細胞之影響，可快速判別樣本對於細胞之毒性影響。



圖 5-9、ATP assay 之酒精試驗示意圖

本研究利用 MTT bioassay 檢測受到苯類(BTEX Sample)之地下水樣經電化學氧化法處理前後之細胞毒性。每件次樣本均進行三重覆試驗，依據環保署公告之生物分析法 QA/QC 規範(NIEA S901.60B)，其標準偏差值均<30%符合 QA/QC 之規範，研究將樣本分為處理前(Before)與處理後(After)共計 32 個樣本。根據研究顯示，BTEX Sample 於處理前、後平均細胞存活率為 29-151%與 63-321%(如圖 5-10)，樣本之存活率於處理後皆有明顯提升；少部分樣本則於處理後降低細胞存活率。推測其原因為經電化學處理後之樣品，使毒性降至極低或趨近於無毒性，即可能產生細胞增生之現象導致存活率上升；而部分樣品可能因處理過程衍生中間產物造成細胞存活率下降。BTEX 樣本中毒性效應最強之樣本為國橋之 GR-2-S2，其細胞存活率為 29%，在經過電化學之後細胞存活率上升到 79%，證明電化學確實能降低水樣中 BTEX 毒性，使細胞存活率提升。

毒性物質所影響人體內毒性反應之機制均不同，仍需透過不同之毒理機制確認，方能更全面性的評估其毒理(毒性)效應。MTT bioassay 試驗結果不僅可評估污染物是否直接性的產生細胞死亡或凋亡現象，亦可提供後續兩種毒性篩檢平台(P53 bioassay、NF-κB bioassay)樣本稀釋資訊。

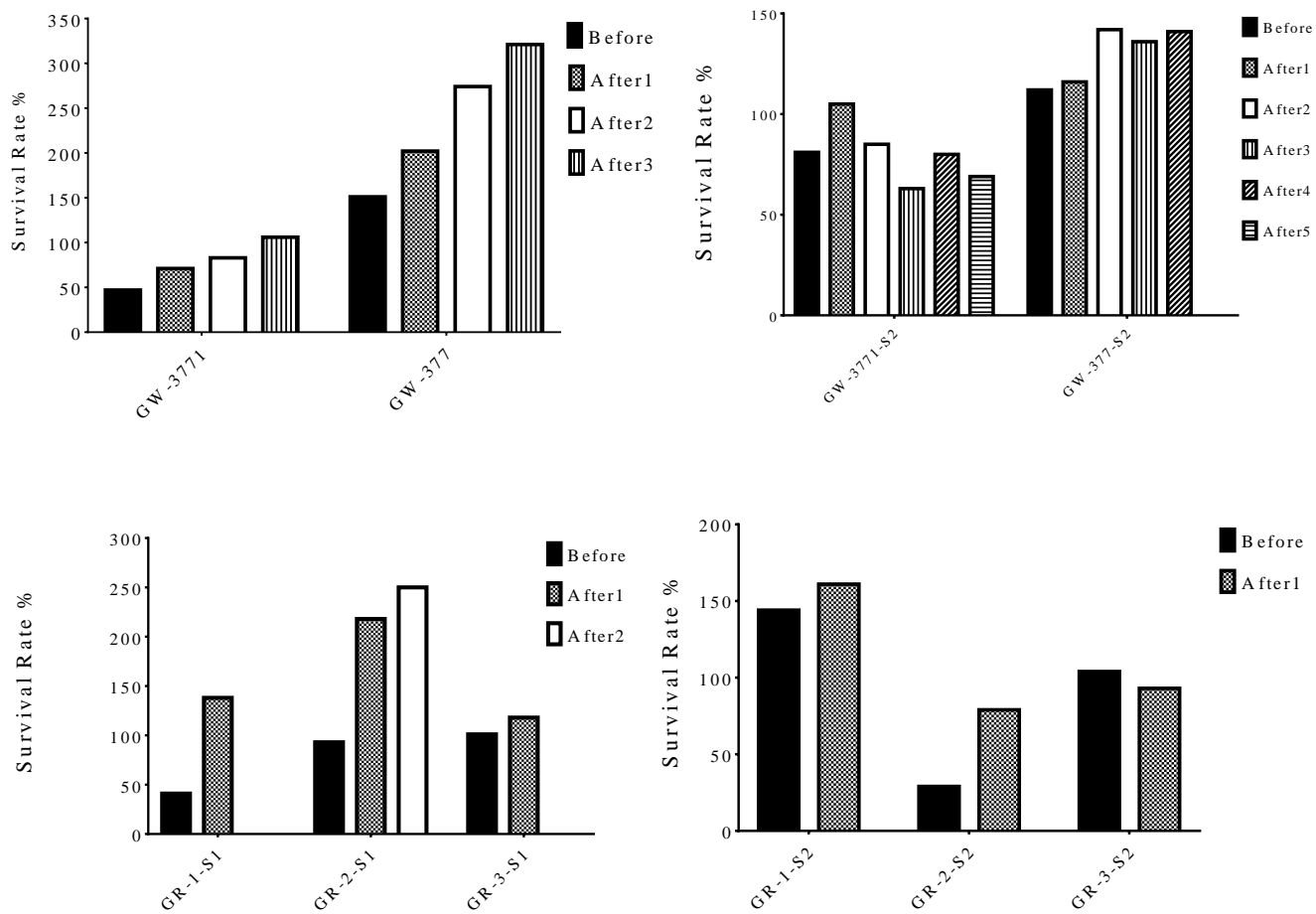


圖 5-10、第三、四季地下水樣本中細胞存活率分析



結合電化學氧化處理與現地即時分析
技術於油品污染場址整治之可行性評估

5-6 地下水樣本中致癌毒性探討

人體中 P53 機制反應 DNA 損傷與染色體異常，亦為致癌之主要因子，故可作為致癌性評估之依據。本研究目前已完成 P53 bioassay 方法之建立，利用基因工程將 p53 質體 reporter 轉殖入 AML12-6 細胞株。參照本團隊去年研究計畫-應用電化學氧化法及生物毒性篩檢技術於受含氯乙烯及苯類污染地下水之現地整治可行性研究，AML12-6 具有較高之誘導反應，以此來進行最佳化參數測試，最佳反應參數則為暴露 24 小時(趙浩然，2017)。圖 5-11 為將三種細胞株暴露確定致癌物質之標準品 Camptothecin, CPT (1 uM)，其 36 件次劑量反應曲線結果顯示，依去年的計畫選定 AML12-6 對於 Doxorubicin(DOX)標準品的敏感度(圖 5-12)，本研究將藉由轉殖後之 AML12-4 細胞株檢測受污染之地下水樣本其 DOX 濃度效應，評估電化學處理前、後之水樣致癌風險之依據。

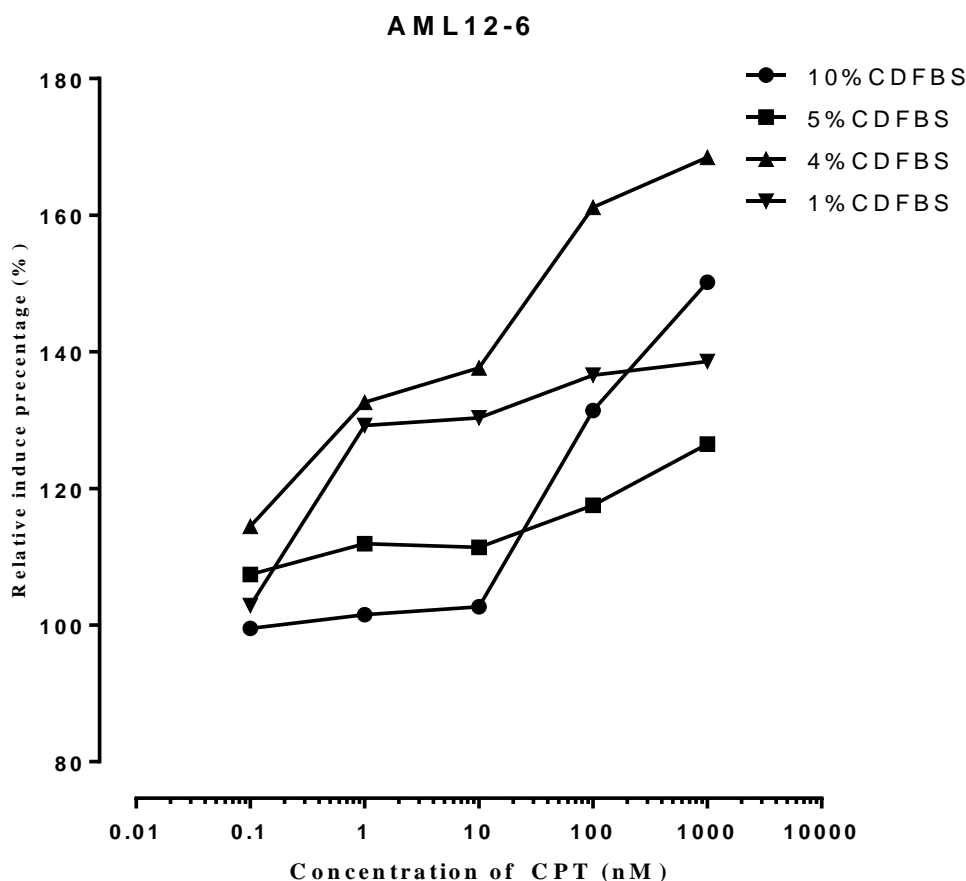


圖 5-11、AML-12 細胞株最佳敏感度參數測試

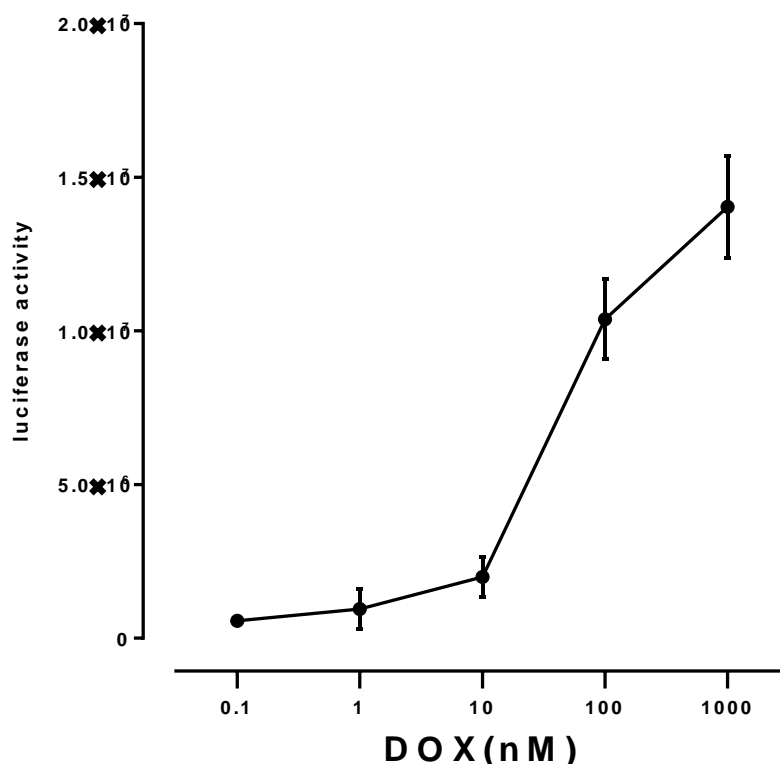


圖 5-12、DOX 檢量線反應

根據實驗最佳條件之測試結果，本研究將選定 DOX 化合物做為致癌性反應之標準品，其在醫療上被為歸類為強效之抗生素(Tacar et al., 2013)，除了可治療癌細胞之外，亦會透過 DNA 損傷及 p53 上調之影響，判別正常細胞產生凋亡之現象 (Zhao et al., 2017; Rocha et al., 2016; Kobashigawa et al., 2014; Wang et al., 2004)。研究以 DOX 標準品做為致癌性毒性效應之風險指標，評估經電化學氧化降解實驗後是否能降低毒性或於降解後衍生出其他生物毒性。高污染場址致癌性與 BTEX 相關性統計(表 5-26)，除了 Ethylbenzene 為負相關，其餘 MTBE、Benzene、Toluene 和 Xylene 為正相關，顯示出 BTEX 污染物可能影響 P53/AP1 致癌性，但並未發現顯著關係性。本研究經電化學處理前、後之濃度進行比較，由圖 5-13 可知，大部分的樣品在電化學後致癌性濃度有上升之趨勢，少部分則會下降，推測其原因為，電化學實驗會釋放出自由基使致癌因子濃度上升，形成衍生污染物。經由實驗所產生的自由基將會引起 DNA 損傷，提高癌症影響 (Valko M et al., 2012)。



結合電化學氧化處理與現地即時分析
技術於油品污染場址整治之可行性評估

表 5-26、澎湖 BTEX Sample 中致癌毒性與化學分析之相關性統計(Spearman's rho)

	致癌性	MTBE	Benzene	Toluene	Ethylbenzene	Xylene
致癌性	1.000					
MTBE	r=0.400 p=0.600	1.000				
Benzene	r=0.200 p=0.800	r=0.800 p=0.200	1.000			
Toluene	r=0.775 p=0.225	r=-0.258 p=0.742	r=-0.258 p=0.742	1.000		
Ethylbenzene	r=-0.105 p=0.895	r=0.738 p=0.262	r=0.949 p=0.051	r=-0.544 p=0.456	1.000	
Xylene	r=0.200 p=0.800	r=0.800 p=0.200	r=1.000**	r=-0.258 p=0.742	r=0.949 p=0.051	1.000

* p -value<0.05, ** p -value<0.01, *** p -value<0.001

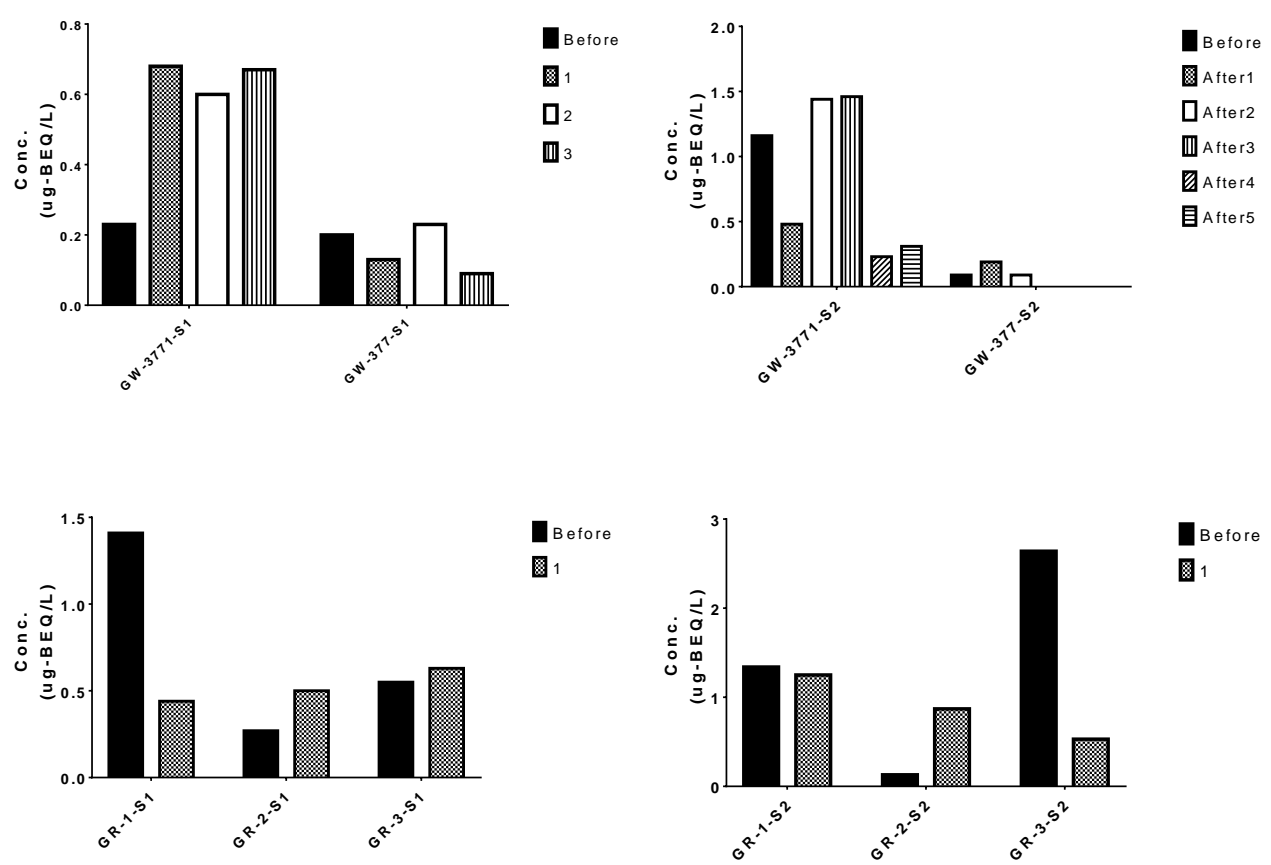


圖 5-13、第三、四季電化學處理前、後之濃度進行致癌性比較比較



結合電化學氧化處理與現地即時分析
技術於油品污染場址整治之可行性評估

5-7 地下水樣本中發炎反應探討(NF- κ B bioassay)

本研究目前已完成 NF- κ B bioassay 方法之建立，其原理為將含螢火蟲發光基因(Adv-NF- κ B-Luc)之腺病毒(Adenoviruses)感染人類肺癌細胞株(A549)，使其可對發炎反應系統進行冷光偵測，圖 5-14 為 NF- κ B bioassay 之劑量反應曲線，該劑量反應曲線($R^2 > 0.98$, $p < 0.01$)符合土壤中類戴奧辛化合物篩檢方法—冷光酵素報導基因法(NIEA S901.60B)法規。

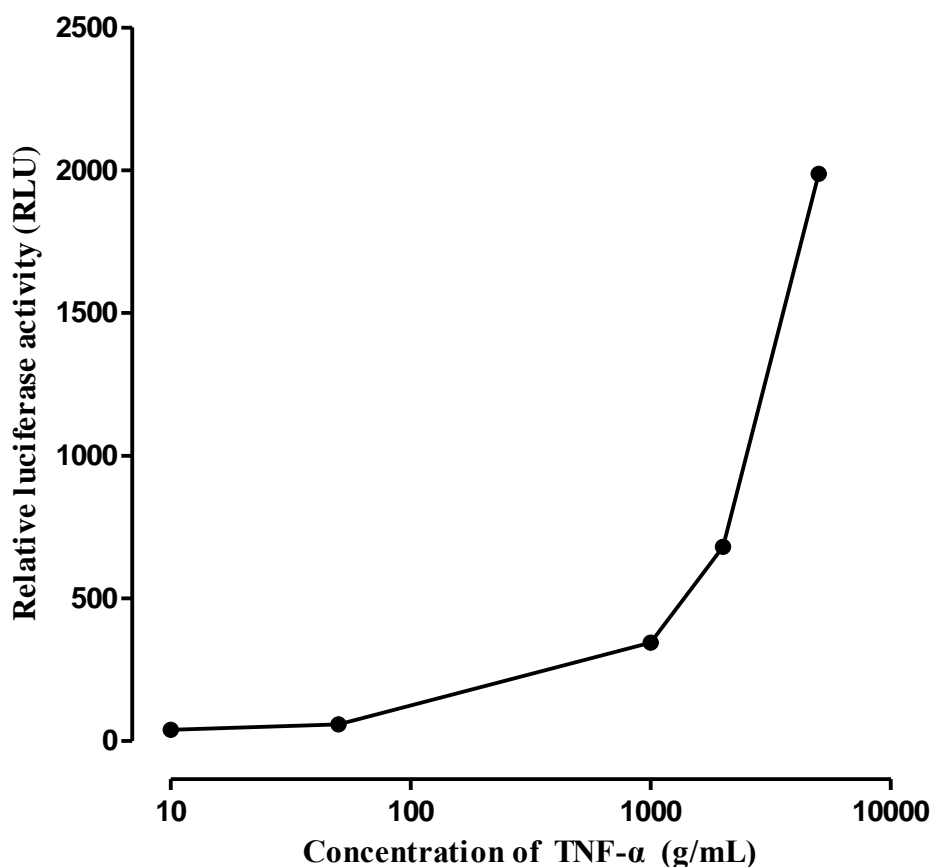


圖 5-14、 NF- κ B bioassay 劑量反應曲線

NF- κ B 為人體先天免疫系統為移除有害刺激及促進修復之保護措施，可做為生物體是否受到外因性物質干擾之反應指標。NF- κ B 調控機制為人體發炎反應機制之一，可做為人體前期毒性影響評估，此次利用 NF- κ B bioassay 檢測受污染之地下水樣本 BTEX Sample，就本研究結果顯示 NF- κ B 對經電化學處理後之 BTEX 水樣誘導發炎反應之風險，並無發炎反應產生。



5-8 線蟲實驗結果探討(C.elegan)

線蟲與人體內基因有 70%相似，其作為動物模型具有成本低廉、符合倫理與易於維護等優點，可用於評估污染物之毒性效應，作為對人體健康影響之風險評估依據，目前本研究之線蟲已完成毒性試驗之建置，經由急毒性暴露後，測試對行為（身體彎曲與頭部擺動等）和急性暴露(24 小時)測定致死率，每個水樣樣品進行三重複試驗，了解其急毒性與神經發展毒性之影響，本研究之線蟲實驗分為兩季，評估電化學處理前、後之水樣致癌風險之依據。

利用線蟲急毒性試驗，圖 5-15、5-16、5-17、5-18 為分析結果，澎湖廠址之第三季水樣線蟲存活率範圍為 91%-100%，第四季為 99%-100%，高雄國橋廠址之水樣第三季電化學存活率範圍為 99%-100%，第四季為 99%-100%，經過實驗結果得知，水樣電化學前後對於線蟲之存活率並無產生明顯之影響，因此並未造成存活率有明顯的下降。



結合電化學氧化處理與現地即時分析
技術於油品污染場址整治之可行性評估

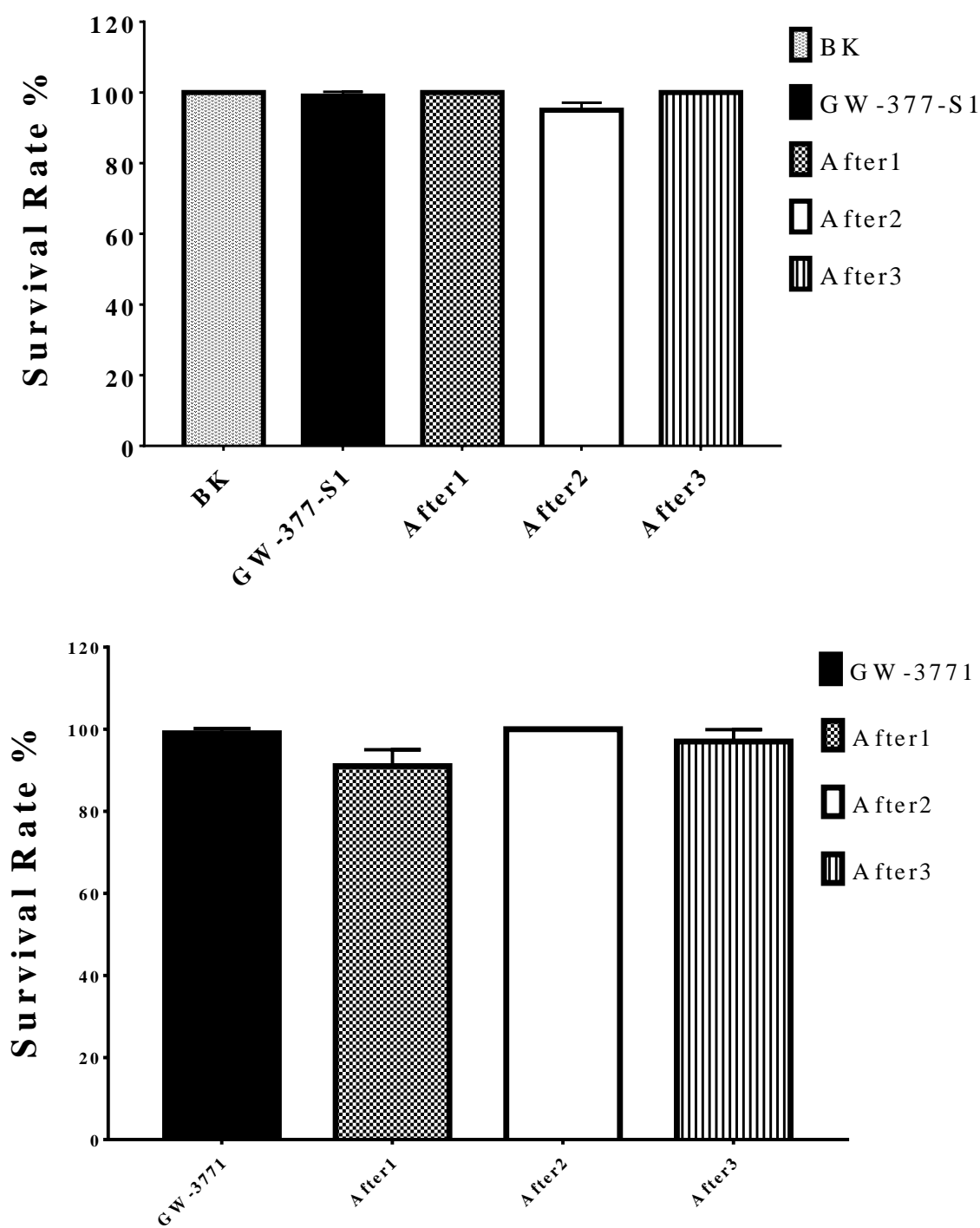


圖 5-15、線蟲急毒性暴露澎湖第三季水樣樣品之線蟲存活率圖

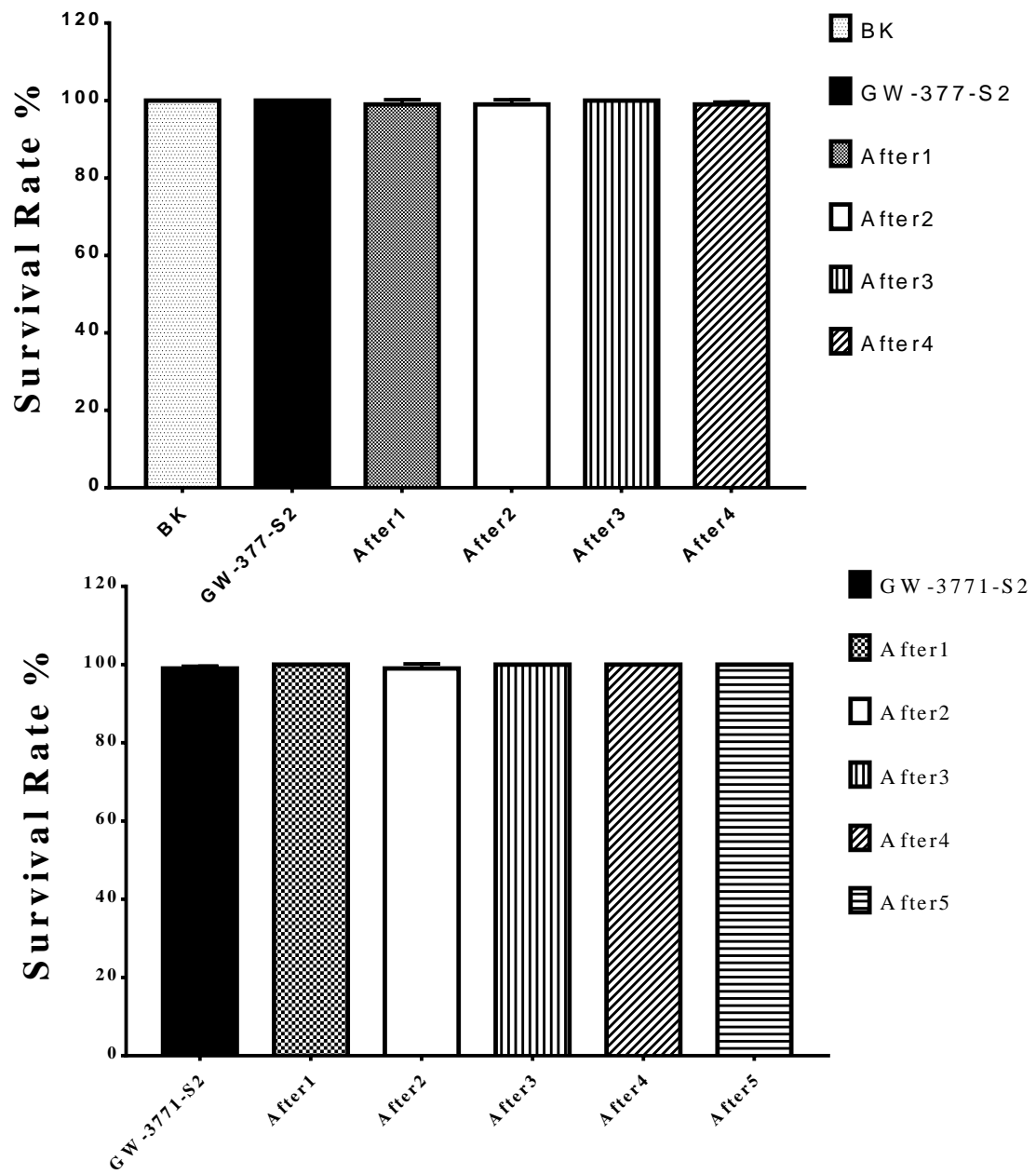


圖 5-16、線蟲急毒性暴露澎湖第四季水樣樣品之線蟲存活率



結合電化學氧化處理與現地即時分析
技術於油品污染場址整治之可行性評估

16、線蟲急毒性暴露澎湖第四季水樣樣品之線蟲存活率

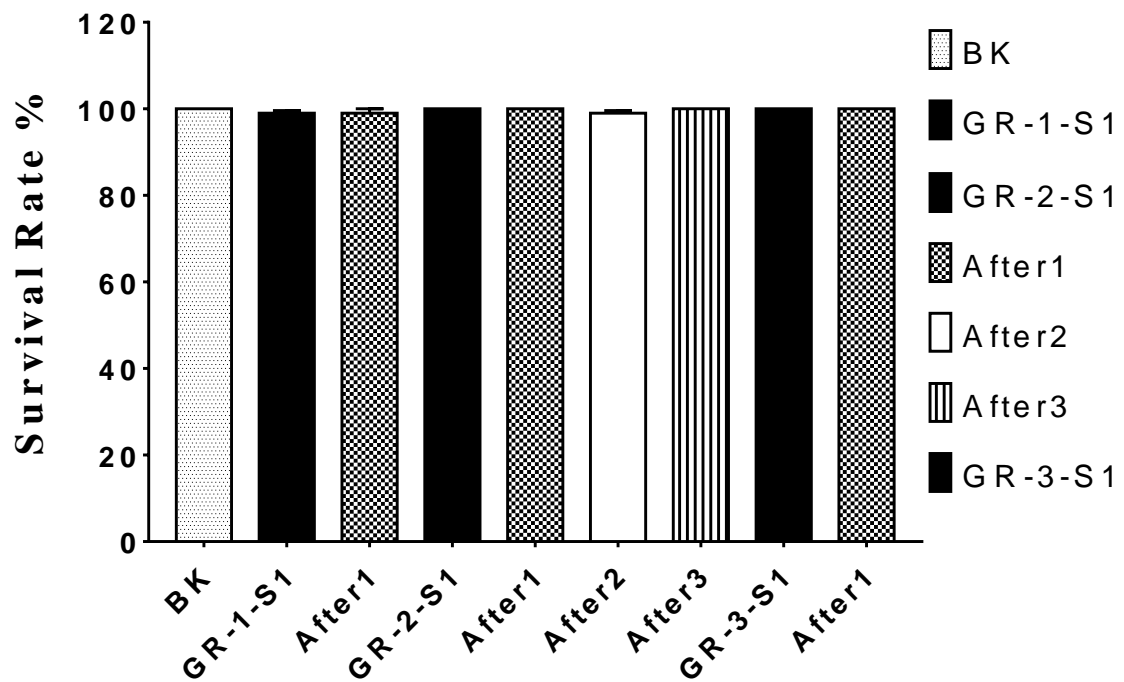


圖 5-17、線蟲急毒性暴露高雄第三季水樣樣品之線蟲存活率

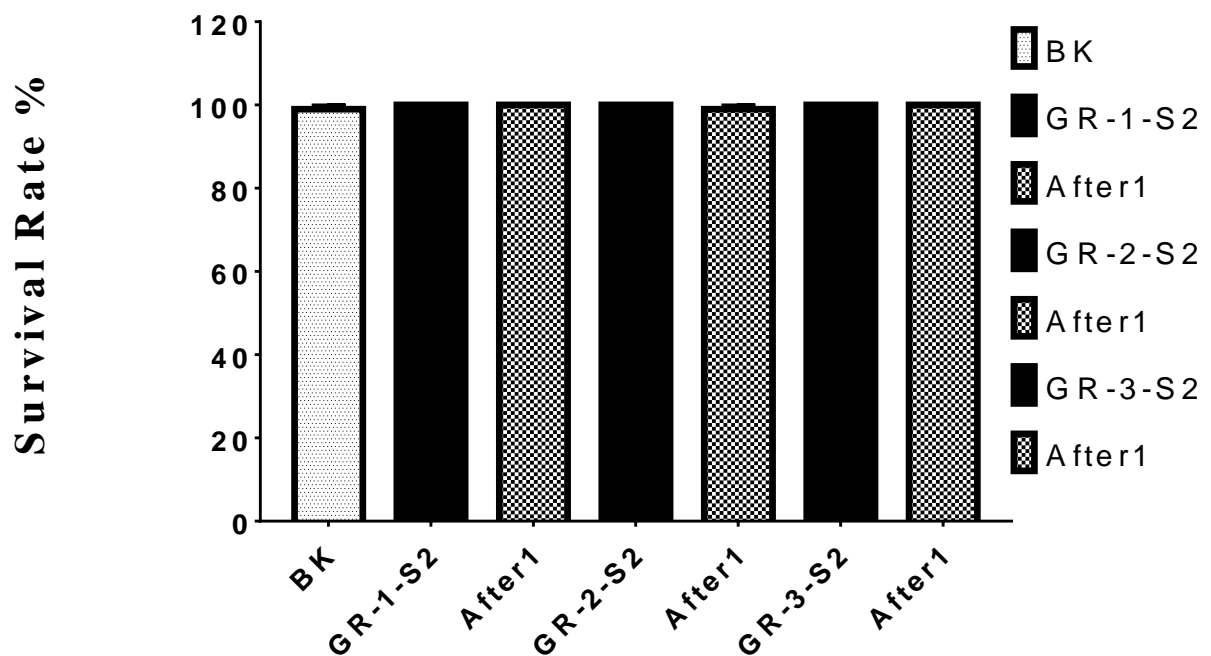


圖 5-18、線蟲急毒性暴露高雄第四季水樣樣品之線蟲存活率



結論

1. 本研究第一季水樣經電化學試驗後之結果顯示，僅有在 MTBE (甲基第三丁基醚)、Toluene(甲苯)及 m,p-Xylene (m,p -二甲苯)有被檢測到，但 MTBE (甲基第三丁基醚)、Toluene(甲苯)及 m,p-Xylene (m,p -二甲苯)等化合物濃度均符合地下水污染物管制標準。其中 MTBE (甲基第三丁基醚)之去除效率為 100%，m,p-Xylene (m,p -二甲苯)之去除效率為 76.4%。另外 Toluene(甲苯)之去除效率僅為 9.7%。

2. 本研究第二季水樣經電化學試驗後之結果顯示，僅在 Benzene (苯)、Toluene(甲苯)及 Chlorobenzene (氯苯)被檢測到，但 Benzene (苯)、Toluene(甲苯) 及 Chlorobenzene (氯苯)等化合物濃度均符合地下水污染物管制標準。其中在 SV01-S1~SV03-S1 中 Benzene (苯)之去除效率為 100%，Toluene(甲苯)的部分在 SV01-S1~SV03-S1 其去除效率為 79.4%。另外 Chlorobenzene (氯苯)之去除效率為 100%。

3. 本研究第三季及第四季水樣經電化學試驗後之結果顯示，在電化學降解前之水樣其污染物幾乎皆有被檢測到，而在電化學試驗後其去除效率大多皆為 100%，其餘未降至 ND 之化合物濃度均符合地下水污染物管制標準第二類。

4. TOC 總有機碳的部分降解效率部分，在第一季水樣經電化學氧化法試驗 4 小時 SV02 從 24.8 mg/L 降至 3.3 mg/L (86.6%)最佳的去除效率，SV03、SV03* 去除效率達 80%以上，另外 SV01、SV01*及 SV02*也相繼到達 60%以上。

5. TOC 總有機碳的部分降解效率部分，第二季水樣為 S01 -S2 從 19.2 mg/L 降至 1.5 mg/L (92.3%)為最佳的去除效率，SV02*-S1 去除效率達 80%以上，SV03-S1、SV03*-S1、SV03-S2 去除效率達 70%以上，SV02-S1、SV02-S2 及 SV02*-S2 也相繼到達 60%以上，另外 SV01*-S2、SV03*-S2 去除效率達 50%以上。

6. 在找尋適當之 H₂SO₄ 電解質參數之試驗中，TOC 總有機碳降解效率以 GW-377-1-S1-1 及 GW-377-1-S2-1 其有著較好的去除效率，其去除效率可達 98%，其餘批次之去除效率皆可達 87%以上。

7. 為添加之不同電解質(H₂SO₄ 及 Na₂SO₄)以控制水樣 pH 值之試驗中，TOC 總有機碳降解效率以 GW-377-S2-1、GW-377-S2-2、GW-377-S2-5 及 GW-377-S2-6 其有著較好的去除效率，其去除效率可達 97%，其餘批次之去除效率皆可達 89%以上。



結合電化學氧化處理與現地即時分析
技術於油品污染場址整治之可行性評估

8. 本計畫之電化學降解較佳參數為使用 BDD 陽極 Ti 陰極其工作面積分別為 14 及 7 cm²、電流為 3.5 A、陽極電流密度 0.25 A/cm²、溫度 25 °C、樣品體積 500 mL、電極間距為 0.2cm 及添加 0.0025 M H₂SO₄+0.0025 M Na₂SO₄ 之電解質。

9. UTLD-MiTAP 超過偵測極限時，即時分析濃度與化學法測值有差異，但兩者利用斯皮爾曼相關性(Spearman's rho)比對後，Toluene 在兩個分析中發現有顯著性相關，顯示出即時監測系統具有化學分析方法發展潛力。

10. 本研究利用三種生物快篩平台檢測受到苯類(BTEX Sample)之地下水樣經電化學氧化法處理前後之細胞影響，在 MTT 實驗發現經電化學後細胞存活率皆有明顯提升，但 P53 實驗發現致癌性有提升，推測原因為電化學會釋放出自由基使致癌因子濃度上升，形成衍生污染物。對於 NF-κB 與線蟲則無明顯反應產生。



建議

1. 其較特別的為 GW-377-1-S2-1 經電化學試驗後之結果顯示，其水樣在電降解後，苯及甲苯的部分濃度皆上升，但該水樣在總有機碳降解的部份濃度從 85.2 mg/L 降至 1.3 mg/L，苯及甲苯的最終濃度可能高估。若延長電解時間，應該可使其濃度降解至更低。
2. 在比較不同電極間距試驗中，TOC 總有機碳降解效率部分，以 SV03-S2-1 有著較好的去除效率，其去除效率達 83 %，故得其電極間距為 0.2 cm 較佳。
3. 在比較有無添加電解質及不同電解質之試驗中，TOC 總有機碳降解效率以 GW-377-S1-2 其在未添加電解質有著較好的去除效率，其去除效率可達 97%。但由於該水樣在試驗過程中有著較耗能之高系統電位，且添加 Na_2SO_4 之總有機碳降解效率較低於添加 H_2SO_4 之總有機碳降解效率，故得添加 H_2SO_4 作為電解質較佳。
4. 第一階段使用即時分析系統 MiTAP-UTLD 分析 18 件次水樣，其結果均與化學分析結果呈相同趨勢，無任何偽陽性。後續實驗將嘗試使用 BTEX 標準品配置模擬樣品，以提高電化學成效，且利於判斷儀器 MiTAP-UTLD 分析之數據可信度。



結合電化學氧化處理與現地即時分析
技術於油品污染場址整治之可行性評估

工作項目	年月												備註
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	

圖 5-19、研究進度及預期完成之工作項目（甘特圖）



建議

1.文獻收集														
2.樣本採集與運送														
3.建立最佳電流密度與電解質參數														
4.現場樣本採集與測試														
5.即時分析														
6.化學分析														
7.細胞毒性分析														
8.秀麗線蟲毒性分析														
9.數據整理與分析														
11.期中報告							※							
12.期末報告											※			
工作進度估計百分比（累積數）	5%	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%			
預定查核點	期中	1. 完成部分地下水樣本採集，並運送至實驗室進行電化學處理。 2. 找出最佳電流密度與電解質參數。 3. 完成樣本處理前、後即時與化學分析數據 4. 完成期中報告												
	期末	1. 進行部分現場電化學氧化法測試 2. 完成秀麗線蟲與三種生物毒性分析數據 3. 所有數據整理與分析 4. 完成期末報告												



參考文獻

- 行政院環保署，2014，行政院環境保護署環署水字第 1030005842 號令修正發。
- 林祺偉，2017，水中阿斯巴甜電化學降解之研究碩士論文，國立屏東科技大學，環境工程與科學系，屏東。
- 司洪濤、呂冠霖、黃香玫，2003，「氧化技術在高濃度 COD 廢水處理之應用」，經濟部工業局高濃度 COD 廢水處理技術講習會，財團法人台灣產業服務基金會，台北。
- 吳庭年，徐明逸，2016，以循環模式電解氧化處理地下水三氯乙烯之可行性研究，崑山科技大學，環境工程研究所，台南。
- 陳建龍，2011，利用 Microtox®法評估複合重金屬之毒性。
- 陳碧慧，2014，電化學氧化降解 78DEET(敵避)之研究，碩士論文，國立屏東科技大學，環境工程與科學系，屏東。
- 陳宇軒，2016，過氯酸溶液中 Ce (IV)電再生之研究，碩士論文，國立屏東科技大學，環境工程與科學系，屏東。
- 袁菁、陳昌億、蔡嘉仁，2011，「雙金屬氧化電極之製備與效能評估-以 SnO₂/Ti、MnO₂/Ti、PbO₂-Co/Ti 為例」，中華民國環境工程學會 2011 土壤與地下水研討會，台南，計畫編號：98-2221-E-390-007。
- 馬英石，1999，超音波程序應用於鄰氯酚以及腐植酸處理之研究，碩士論文，國立交通大學，環境工程研究所，新竹。
- 國家新創獎，社團法人國家生技醫療產業策進會，
<https://innoaward.taiwan-healthcare.org/AwardList.php?ParentID=0mge2pv6fmqrxaol&Num=2¤tLayer=cell1¤tDiv=d1>
- 劉文治，周裕傑，賴宣婷，謝佑昀，王禮鵬，周宗冠，現地微氣相層析技術檢測地下水中 LNAPL 污染，中華民國環境工程學會 2017 年環境工程實務技術研討會暨論文競賽。
- 趙浩然、黃國林，2018，應用電化學氧化法及生物毒性篩檢技術於受含氯乙烯及苯類污染地下水支現地整治可行性研究，行政院環保署，屏東。



- Bayo, J., Angosto, A.M., Gomez-Lopez, M.D., 2009 “Ecotoxicological screening of reclaimed disinfected wastewater by *Vibrio fischeri* bioassay after a chlorination–dechlorination process” *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 172 PP. 166-171.
- Bhalla, R., Tehrani, R., Van Aken, B., 2016 “Toxicity of hydroxylated polychlorinated biphenyls (HO-PCBs) using the bioluminescent assay Microtox(®).” *Ecotoxicology*, pp. 1438-44.
- Boluda, R.I., Quintanilla, J.F., Bonilla, J.A., Sáez, E., Gamón, M., 2002 “Application of the Microtox test and pollution indices to the study of water toxicity in the Albufera Natural Park (Valencia, Spain).” *Chemosphere*, Vol. 46 PP. 355-369.
- Brenner, S., 1974 “The genetics of *Caenorhabditis elegans*.” *Genetics* Vol. 77 pp.71-94.
- Brillas, E., Boye, B., Sires, I., Garrido, J.A., Rodriguez, R.M., Arias, C., Cabot, P.L., and Comninellis, C., 2004, “Electrochemical destruction of chlorophenoxy herbicides by anodic oxidation and electro-Fenton using a boron-doped diamond electrode,” *Electrochimica Acta*, Vol. 49, pp. 4487– 4496
- Bruguera-Casamada, C., Sires, C., Brillas, E., Araujo R.M., 2017“Effect of electrogenerated hydroxyl radicals, active chlorine and organic matter on the electrochemical inactivation of *Pseudomonas aeruginosa* using BDD and dimensionally stable anodes, ” *Separation and Purification Technology* Vol. 178 pp. 224-231.
- Cardarelli, F., *Materials Handbook: A Concise Desktop Reference* (2nd ed.), Springer-Verlag London Limited, London, United Kingdom (2008).
- Chaplina, B.P., Hubler, D.K., Farrell, J., 2013, “Understanding anodic wear at boron doped diamond film electrodes,” *Electrochimica Acta*, Vol. 89, pp. 122-131.
- Chao, H.R., Tsou, T.C., Li, L.A., Tsai, F.Y., Wang, Y.F., Tsai, C.H., Chang, E.E., Miao, Z.F., Wu, C.h., Lee, W.J., 2006“Arsenic inhibits induction of cytochrome P450 1A1 by 2,3,7,8-tetrachlorodibenzo-p-dioxin in human hepatoma cells. *Journal of Hazardous Materials*, pp. 716-722.



- Chao, H.R., Wang, Y.F., Chen, H.T., KO, Y.C., Chang, E.E., Huang, Y.J., Tsai, F.Y., Tsai, C.H., Wu, C.H., Tsou, T.C., 2007 "Differential effect of arecoline on the endogenous dioxin-responsive cytochrome P450 1A1 and on a stably transfected dioxin-responsive element-driven reporter in human hepatoma cells" *Journal of Hazardous Materials*, pp.234-237.
- Chao, H.R., Tsou, T.C., Chen, H.T., Chang, E.E., Tsai, F.Y., Lina, D.Y., Chen, F.A., Wang, Y.F., 2009 "The inhibition effect of 2,3,7,8-tetrachlorinated dibenzo-p-dioxin-induced aryl hydrocarbon receptor activation in human hepatoma cells with the treatment of cadmium chloride" *Journal of Hazardous Materials*, pp. 351–356.
- Chao, H.R., Wang, Y.F., Lin, D.Y., Cheng, Y.T., Tsou, T.C., 2011 "Fast Cleanup System Combined with a Dioxin-responsive Element-driven Luciferase Bioassay for Analysis of Polychlorinated Dibenzo-p-dioxins/furans in Sediments and Soils" *Bull Environ Contam Toxicol*, pp. 278-282.
- Chao, H.R., Wang, Y.F., Wang, Y.N., Lin, D.Y., Gou, Y.Y., Chen, C.Y., Chen, C.K., Wu, W.K., Chiang, B.A., Huang, Y.T., Hsieh, L.T., Yeh, K.J.C., Tsou, T.C., 2012 "An improved AhR reporter gene assay for analyzing dioxins in soil, sediment and fish." *Bull Environ Contam Toxicol*, PP. 739-743.
- Chao, H.R., Hsu, J.W., Ku, H.Y., Wang, S.L., Huang, H.B., Liou, S.H., Tsou, T.C., 2018 "Inflammatory Response and PM2.5 Exposure of Urban Traffic Conductors" *Aerosol and Air Quality Research*, Vol. 18 pp. 2633-2642.
- Cheng, Y., Hsu, C.Y., Guo, Y.L., 2018 "Field Study on Online Monitoring Network of Air Toxics and Tracking near a Petrochemical Industrial Park" *National Ambient Air Monitoring Conference - Portland, OR*
- Chiang, L.-C., Chang, J.-E., and Wen, T.-C., 1995, "Indirect oxidation effect in electrochemical oxidation treatment of landfill leachate," *Water Research*, Vol. 29, pp. 671-678.
- Chiang, H.C., Lee, H., Chao, H.R., Tsou, T.C., 2013 "Pulmonary CYP2A13 levels are associated with early occurrence of lung cancer—Its implication in mutagenesis of non-small cell lung carcinoma" *Cancer Epidemiology*, Vol. 37,



- pp. 653-659.
- Chiang, H.C., Chao, H.R., Li, L.A., Tsai, F.Y., Tsoua, T.C., 2015 “Reliable and sensitive adenovirus-based reporter system for high-throughput screening of dioxins” *Environmental Technology & Innovation*, pp. 8-16.
- Chou, H.M., Chao, H.R., Lin, C., Chiang, P.C., Wang, G.S., Tsou, T.C., 2016 “An improved estrogenic activity reporter gene assay (T47D-KBluc) for detecting estrogenic activity in wastewater and drinking water” *Toxicological & Environmental Chemistry*, Vol. 98 pp.376-384.
- Comninellis, C., Kapalka, A., Malato, S., Parsons, A., Poullos, I., Mantzavavinos, D., 2008“Advanced oxidation processes for water treatment: advances and trends for R&D,” *Chemical Technology and. Biotechnol.*, Vol. 83 pp. 769-776.
- Corsi, A. K., Wightman, B., and Chalfie, M., 2015, "A Transparent window into biology: A primer on *Caenorhabditis elegans*," *WormBook*, pp. 1-31.
- Cruz, D.N., Romero,V., Dantas, F.R., Marco, P., Bayarri, B., Gimenez, J., ES, 2013,“o-Nitrobenzaldehyde actinometry in the presence of suspended TiO₂ for photocatalytic reactors”*Catalysis Today*, Vol.15 pp.209-214.
- García-Espinoza, J.D., Mijaylova-Nacheva, P. and Avilés-Flores, M. (2017). “Electrochemical Carbamazepine Degradation: Effect of the Generated Active Chlorine, Transformation Pathways and Toxicity.” *Chemosphere*. Vol, 192 pp.142-151
- Garcia-Gomez, C., Drogui, P., Zaviska, F., Seyhi, B., Gortares-Moroyoqui, P., Buelna, G., Neira-Saenz, C., Estrada-alvarado, M., Ulloa-Mercado, RG., 2014,“Experimental design methodology applied to electrochemical oxidation of carbamazepine using Ti/PbO₂ and Ti/BDD electrodes” *Journal of Electroanalytical Chemistry*, pp.1-10.
- Green, R., Broadwin, R., Malig, B., Basu, R., Gold, E.B., Qi, L., Sternfeld, B., Bromberger, J.T., Greendale, G.A., Kravitz, H.M., Tomey, K., Matthews, K., Derby, C., Jackson, E.A., Green, R. and Ostro, B. (2016). “Long- and Short-Term Exposure to Air Pollution and Inflammatory/Hemostatic Markers in Midlife Women.” *Epidemiology (Cambridge, Mass.)* Vol, 27 pp. 211-220.



- Gou, Y.Y., Lin, S., Que, D.E., Tayo, L.L., Lin, D.Y., Chen, K.C., Chen, F.A., Chiang, P.C., Wang, G.S., Hsu, Y.C., Chuang, K.P., Chuang, C.Y., Tsou, T.C., Tsou, T.C., Ghao, H.R., 2016 “Estrogenic effects in the influents and effluents of the drinking water treatment plants.” *Environ Science Pollut Res Int*, PP.8518-28.
- Guo, L, Li, X, Chen, G., 2010, “Techniques of Electrode Fabrication.” *Electrochemistry for the Environment* pp.55-98
- Hunt, P. R., 2017, "The C. elegans model in toxicity testing," *J Appl Toxicol*, Vol. 37, , pp. 50-59.
- Hung, T.T., Chung, L.T., Tzu, H.K., Yung, C.K., Wen, T.L., Chung, H.Y., Tsung, K.A., 2018 “Integrated Method of Combining Fixed and Mobile Stations for Air Pollution Tracking and Reduction Assessment” *National Ambient Air Monitoring Conference - Portland, OR*.
- I Cheng LU, How Ran Chao* “Electrochemical Advanced Oxidation Process(EAOP) assessment treated groundwater in south Taiwan” *Technique Taiwan Forum on Sustainable Environment (2019 T&T TFOSE)*, Taiwan 2019 (Poster)
- Jasmann, J.R., Gedalanga, P.B., Borch, T., Mahendra, S. and Blotevogel, J. (2017). “Synergistic Treatment of Mixed 1,4-Dioxane and Chlorinated Solvent Contaminations by Coupling Electrochemical Oxidation with Aerobic Biodegradation.” *Environmental Science & Technology* Vol, 51 pp. 12619-12629.
- Kishimoto, N., Morita, Y., Tsuno, H., Oomura, T., Mizutani, H., 2005 “Advanced oxidation effect of ozonation combined with electrolysis. ” *Water Research* Vol.39 pp. 4661-4672
- Korbahti, B.K. and Demirbukan, P. (2017). “Electrochemical Oxidation of Resorcinol in Aqueous Medium Using Boron-Doped Diamond Anode: Reaction Kinetics and Process Optimization with Response Surface Methodology. ” *Front Chem* 5: 75.
- Korbahti, B.K. and Demirbukan, P., 2017. “Electrochemical Oxidation of Resorcinol in Aqueous Medium Using Boron-Doped Diamond Anode: Reaction Kinetics



- and Process Optimization with Response Surface Methodology.” *Front Chemistry* 5: 75.
- Lin, D.Y., Shy, C.G., Chen, F.A., Wang Y.F., Chen, K.C., Hsieh, L.T., Tsai, F.Y., Tsou, T.C., Chao, H.R., 2013 “Use of a highly sensitive recombinant hepatoma cell method to determine dioxin concentrations in samples of fish and crab from a hotspot area.” *Environmental Science Processes & Impacts* pp. 1264-70.
- Lin, S.C., Bergh, A.R.M., Lussenburg, B.V., Jonker, L.R.A., Teunis, M., Krul, C.A., Burg, B.V., 2014 “Development of a panel of high-throughput reporter-gene assays to detect genotoxicity and oxidative stress.” *Mutation Research/Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis*, Vol.760 pp. 23-32.
- Lyu, H., He, Y., Tang, J., Hecker, M., Liu, Q., Jones, P.D., Codling, G., Giesy, J.P., 2016 “Effect of pyrolysis temperature on potential toxicity of biochar if applied to the environment” *Environmental Pollution*,” Vol. 218 pp. 1-7.
- M. Valko, C.J. Rhodes, J. Moncol, M. Izakovic, M. Mazur. “Free radicals metals and antioxidants in oxidative stress-induced cancer.” *Chemico-Biological Interactions*. Volume 160, Issue 1, 2006, Pages 1-40.
- Madani, M., Mirlohi, M., yahay, M., and Hassanzadeh, A., 2013 “ How Much In Vitro Cholesterol Reducing Activity of Lactobacilli Predicts Their In Vivo Cholesterol Function? ”*Int J Prev Med*, pp. 404-413.
- Madsen, H. T., Søgaard, E. G., and Muff, J., 2014, "Study of degradation intermediates formed during electrochemical oxidation of pesticide residue 2,6-dichlorobenzamide (BAM) at boron doped diamond (BDD) and platinum–iridium anodes," *Chemosphere*, Vol, 109 pp. 84-91.
- Morched, Hamza., Ridha, Abdelhedi., Enric, Brillas., Ignasi, Sires., 2009, “Comparative electrochemical degradation of the triphenylmethane dye Methyl Violet with boron-doped diamond and Pt anodes” *Journal of Electroanalytical Chemistry*, pp.41-50.
- Murugananthan, M., Yoshihara, S., Rakuma, T., Uehara, N., Shirakashi, T., 2007, “Electrochemical degradation of 17-estradiol (E2) at boron-doped.” *Electrochimica Acta* Vol. 52 pp. 3242-3249.



- Oturan, M.A., Oturan, N., Lathitte, C., and Trevin, S., 2001, "Production of hydroxyl radicals by electrochemically assisted Fenton's reagent: Application to the mineralization of an organic micropollutant, pentachlorophenol," *Journal of Electroanalytical Chemistry*, Vol. 507, pp. 96-102.
- Oturan, M.A., Oturan, N., Lathitte, C., and Trevin, S., 2001, "Production of hydroxyl radicals by electrochemically assisted Fenton's reagent: Application to the mineralization of an organic micropollutant, pentachlorophenol," *Journal of Electroanalytical Chemistry*, Vol. 507, pp. 96-102.
- Özcan, A., Şahin, Y., Koparal, A. S., and Oturan, M. A., 2008, "Propham mineralization in aqueous medium by anodic oxidation using boron-doped diamond anode: Influence of experimental parameters on degradation kinetics and mineralization efficiency," *Water Research*, Vol. 42, pp.2889-2898.
- Panizza, M., Cerisola, G., Zinger, D.V., *Advances in Chemistry Research*, vol. 2, Nova Science, New York, United States (2006), pp. 1-38.
- Palma, E., Daghighi, M., Franzetti, A., Petrangeli Papini, M. and Aulenta, F. (2017). "The Bioelectric Well: A Novel Approach for in Situ Treatment of Hydrocarbon-Contaminated Groundwater." *Microb Biotechnol*, pp.112-118.
- Radić, S., Crnojević, H., Vujčić, V., Gajski, G., Gerić, M., Cvetković, Ž., Petra, C., Garaj-Vrhovac, V. and Oreščanin, V. (2016). "Toxicological and Chemical Assessment of Arsenic-Contaminated Groundwater after Electrochemical and Advanced Oxidation Treatments." *Science of The Total Environment* Vol, 543 pp. 147-154.
- Ridruejo, C., Centellas, F., Cabot, P.L., Sirés, I. and Brillas, E. (2018). Electrochemical Fenton-Based Treatment of Tetracaine in Synthetic and Urban Wastewater Using Active and Non-Active Anodes. *Water Research* Vol. 128 pp.71-81.
- Sahoo, M.K., Marbaniang, M. Sinha, B., Sharan, R.N., 2014 "Fenton and Fenton-like processes for the mineralization of Ponceau S in aqueous solution: Assessment of eco-toxicological effect of post treated solutions, " *Separation*



- and Purification Technology Vol. 124 pp. 155-162.
- Silva, T.A., Pereira, G.F., Fatibello-Filho, O., Eguiluz, K.I.B., Salazar Banda, G.R., 2016, "Electroanalytical sensing of indigo carmine dye in water samples using a cathodically pretreated boron-doped diamond electrode," *J. Electroanal. Chem.* 769, pp. 28-34.
- Shy, C.G., Chao, H.R., Lin, D.Y., Gou, Y.Y., Chuang, C.Y., Chuang, K.P., Cheng, K.P., Chen, C.C., Hsiao, Y.C., Chen, F.A., 2016 "An AhR-Luciferase Adenovirus Infection System for Rapid Screening of Dioxins in Soils." *Bull Environ Contam Toxicol*, pp.192-196.
- Tröster, I., Fryda, M., Herrmann, D., Schäfer, L., Hänni, W., Perret, A., Blaschke, M., Kraft, A., and Stadelmann, M., 2002, "Electrochemical advanced oxidation process for water treatment using DiaChem® electrodes," *Diamond and Related Materials*, Vol. 11, pp. 640-645.
- Tsou, T.-C., Liou, S.-H., Yeh, S.-C., Tsai, F.-Y. and Chao, H.-R. (2013). "Crucial role of Toll-like receptors in the zinc/nickel-induced inflammatory response in vascular endothelial cells." *Toxicology and Applied Pharmacology* Vol. 273, pp. 492-499.
- Woo, J.M., Seo, J.Y., Kim, H., Lee, D., Park, Y.C., Yi, Y.S., Moo, J., 2018 "CuY zeolite catalysts prepared by ultrasonication-assisted ion-exchange for oxidative carbonylation of methanol to dimethyl carbonate." *Ultrasonics Sonochemistry* Vol. 44 pp. 146-151
- WormAtlas, Altun, Z.F., Hall, D.H., 2018, pp.2002-2006. <http://www.wormatlas.org>, accessed 4 June
- Wu, T.G., Chan, C.C., Ho, S.H., Wu, C.F., 2016 "Monitoring BTEX concentrations at bus stops in Taipei, Taiwan with portable VOC analyzers" *National Ambient Air Monitoring Conference - St. Louis, MO*
- Xiang, P., Liu, R., Sun, H., Han, Y.-H., He, R., Cui, X. and Ma, L. (2016). "Molecular Mechanisms of Dust-Induced Toxicity in Human Corneal Epithelial Cells: Water and Organic Extract of Office and House Dust." *Environment*



結合電化學氧化處理與現地即時分析
技術於油品污染場址整治之可行性評估

International Vol. 92-93, pp. 348-356

Xing, Y.-F., Xu, Y.-H., Shi, M.-H. and Lian, Y.-X. (2016). The Impact of Pm2.5 on the Human Respiratory System. *Journal of Thoracic Disease* 8: E69-E74.

Yang, Y., Lu, Y., Wu, Q.Y., Hu, H.Y., Chen, Y.H., Liu, W.L., 2015. Evidence of ATP assay as an appropriate alternative of MTT assay for cytotoxicity of secondary effluents from WWTPs. *Ecotoxicology and environmental safety* Vol.122, pp. 490-496.

Yapeng, He., Weimin, Huang., Rongling, Chen., Wenli, Zhang., Haibo, Lin., Hongdong, Li., 2015, "Anodic oxidation of aspirin on PbO₂, BDD and porous Ti/BDD electrodes: Mechanism, kinetics and utilization rate" *Separation and Purification Technology*, Vol. 156, Part 2, pp. 124-131.

Zhao, Y., Lin, Z., Jia, R., Li, G., Xi, Z., and Wang, D., 2014, "Transgenerational effects of traffic-related fine particulate matter (PM_{2.5}) on nematode *Caenorhabditis elegans*," *J Hazard Mater*, Vol. 274, No. pp. 106-14..

Zheng, Y., Su, W., Chen, S., Wu, X., and Chen, X., 2011, "Ti/SnO₂-Sb₂O₅-RuO₂/α-PbO₂/β-PbO₂ electrodes for pollutants degradation," *Chemical Engineering Journal*, Vol. 174, pp. 304-309.