



行政院環境保護署

110年度土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗專案

以流體電容去離子法實地整治 重金屬污染地下水之模場試驗與示範

期末報告(定稿)

主辦單位：



行政院環境保護署

專案執行單位：

國立成功大學 環境工程學系

專案主持人：

王鴻博講座教授

專案執行期間：

110 年 3 月 19日起至111年2月28日止





行政院環境保護署「土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗專案」

☐申請計畫書 ☐期中報告

☐修正計畫書 ☒期末報告

審查意見回復對照表

計畫年度	110 年度	計畫類型	☐ 研究型 ☒ 模場型
計畫類別	☒ 整治 ☐ 調查 ☐ 其它	主持人：王鴻博	NO：B9
計畫名稱	以流體電容去離子法實地整治重金屬污染地下水之模場試驗與示範		
委員審查意見		計畫單位回覆	
(一)江康裕委員		1. 本電容去離子(CDI)技術已有實務處理重金屬濃度相對較高(>2000 mg/L)之電鍍廢水之經驗，地下水之污染重金屬濃度較低，更加容易適用，尤其，從多年 CDI 累積之實驗數據，可獲得 CDI 電吸附效率與離子強度或電荷密度之共通關係(p.23 (圖 3.26))，以預估水中目標離子與背景離子之電吸附效率。 毒性金屬或陰離子污染地下水之綠色整治之關鍵包括：水中毒性物質之分離/富集與地殼元素離子之回注，因此，本模組化 CDI 設備設置 6~8 個電極組(set)(每 1 set 含 51 個塗佈活性碳(AC)電極板(每一電極板面積：18 cm × 18 cm)，在實務操作時，可依目標毒性離子與地殼元素離子之電吸附效率不同，再調控串聯電極組之電吸附與脫附次序，以有效分離/富集前者，尤其，另設置迴流(recycling)工作槽，除可穩定進流量及濃度，也可透過重複電吸附與脫附模式提存目標毒性離子濃度。因此，在含 8 個電極組之 CDI 設備，可處理受污染地下水之離子濃度(例如：鋅、鉻、氟)小於 1000 mg/L；地殼元素離子濃度低於 2000 mg/L。 2. 若有多重物化性質相近之重金屬及陰離子污染之地下水，擬進行整治，除可採行上述調控串聯電極組之電吸附與脫附次序，以有效分離/富集毒性物質；也可將電極表面塗佈之 AC 改質，使具特定離子電吸附選擇性，目前，我們只有銅、鋅及陰(砷)離子之選別能力。 3. 由 CDI 設備分離/富集之重金屬及陰離子濃縮液，可回收應用於廠內原製程(例如：電鍍、表面處理)，另外，含砷離子溶液，可運用於(例如)太陽能產業或殺蟲劑製程。	
1. 本計畫對於地下水受重金屬污染之濃度適用範圍及種類等應用資訊，是否有相關建議？ 2. 多重之重金屬及離子存在於污染地下水之中，對流體電容去離子之試驗程序中，是否有相關干擾或影響之探討或評估？ 3. 受重金屬污染地下水實地應用時，濃縮之重金屬廢水(廢液)是否具有後續回收再利用之價值？抑或是其他建議之後續方案。		1. 本電容去離子(CDI)技術已有實務處理重金屬濃度相對較高(>2000 mg/L)之電鍍廢水之經驗，地下水之污染重金屬濃度較低，更加容易適用，尤其，從多年 CDI 累積之實驗數據，可獲得 CDI 電吸附效率與離子強度或電荷密度之共通關係(p.23 (圖 3.26))，以預估水中目標離子與背景離子之電吸附效率。 毒性金屬或陰離子污染地下水之綠色整治之關鍵包括：水中毒性物質之分離/富集與地殼元素離子之回注，因此，本模組化 CDI 設備設置 6~8 個電極組(set)(每 1 set 含 51 個塗佈活性碳(AC)電極板(每一電極板面積：18 cm × 18 cm)，在實務操作時，可依目標毒性離子與地殼元素離子之電吸附效率不同，再調控串聯電極組之電吸附與脫附次序，以有效分離/富集前者，尤其，另設置迴流(recycling)工作槽，除可穩定進流量及濃度，也可透過重複電吸附與脫附模式提存目標毒性離子濃度。因此，在含 8 個電極組之 CDI 設備，可處理受污染地下水之離子濃度(例如：鋅、鉻、氟)小於 1000 mg/L；地殼元素離子濃度低於 2000 mg/L。 2. 若有多重物化性質相近之重金屬及陰離子污染之地下水，擬進行整治，除可採行上述調控串聯電極組之電吸附與脫附次序，以有效分離/富集毒性物質；也可將電極表面塗佈之 AC 改質，使具特定離子電吸附選擇性，目前，我們只有銅、鋅及陰(砷)離子之選別能力。 3. 由 CDI 設備分離/富集之重金屬及陰離子濃縮液，可回收應用於廠內原製程(例如：電鍍、表面處理)，另外，含砷離子溶液，可運用於(例如)太陽能產業或殺蟲劑製程。	
(二)李俊福委員(書面意見)		1. 除已達成計畫預期目標，結案後半年內需達成之項目：發明專利申請(毒性金屬污染地下水整治之方法與裝置，案號：111107093)已於111年2月25日完成。	
1. 本研究計畫以自行開發 FdCDI 技術達成低耗能、高效率去除水中金屬離子。期末報告撰述詳實、完整，已達成計畫預期目標。 2. 流體電容去離子技術在操作		2. CDI 採電吸附(類 Van der Waals force (<5 kJ/mol))分離水中離	



前是否需要先了解金屬離子存在的物種型態？是否應配合 pE, pH 而改變電壓。 3. 實驗結果顯示金屬離子之電吸附率偏低，如何提升電吸附率？ 4. 陰離子與陽離子同時存在是否會影響電吸附率？	子，利用調控串聯電極組之電吸附與脫附次序，在 1.0~1.2 V 電壓條件，可以有效分離/富集毒性物質，另外，電極表面塗佈 AC，管線以 PVC 材質為主，不易被酸鹼腐蝕。過去實驗經驗顯示，採近定電流(1 A)操作方式，較有利於電吸附與脫附。 3. 利用調控串聯電極組之電吸附與脫附次序，在 1.0~1.2 V 電壓條件，搭配迴流操作單元，除可穩定進流量及濃度，也可透過重複電吸附與脫附模式提存目標毒性離子濃度，可以有效分離/富集毒性物質。但提升電吸附效率，也可能增加後續地殼元素離子分離困難，因此，選擇相對有利條件進行。 4. 過去實驗經驗顯示，電極之陰、陽極會分別電吸附陽、陰離子，維持水中電中性，電極之電吸附容量(或離子濃度)與速率影響電吸附效率較明顯。
(三) 李有豐委員 1. FdCDI 方法技術成熟，已於廢水處理推廣多年，研究團隊許多相關經驗，用於地下水處理具可行性。 2. 建議補充分析方法之 QA/QC。 3. EC 與 ICP 分析值應進行適當之回歸校正。 4. 研究團隊自製之 FdCDI 處理效率仍有待提升，可能需藉由提升停留時間、電場強度、電極放電效率等進行改善。 5. 成本分析部分，是否能與其他現有處理方法進行比較？	1. 感謝鼓勵，持續努力。 2. 科技部貴儀中心分析方法之 QA/QC 詳如 p.86 附件 2。 3. 依審查意見，已提出 EC 及 ICP 校準分析圖(p.61(圖 5.31))，併同校準結果修正圖 5.17~5.30。 4. 利用調控串聯電極組之電吸附與脫附次序，在 1.0~1.2 V 電壓條件，搭配迴流操作單元，除可穩定進流量及濃度，也可透過重複電吸附與脫附模式提存目標毒性離子濃度，可以有效分離/富集毒性物質。但提升電吸附效率，也可能增加後續地殼元素離子分離困難，因此，選擇相對有利條件進行。 5. 已與沉澱法、離子交換樹脂法、吸附法、逆滲透法及電透析法進行成本分析比較，詳 p.63 表 5.5。
(四) 吳一民委員 1. 執行進度與成果佳，達成計畫目標。 2. 有關報告書排版形式，請修正如下： (1) P4、P5 中(1)、(2)項目是否縮排？ (2) P8 表 3.1、3.2 建議應有表格格線。 (3) P.29 圖 4.2 及 P.31 圖 4.6 之標題文字排版，請再調整。	1. 感謝鼓勵，持續努力。 2. 報告書排版修正如下： (1) 已修正縮排，詳 p.4 及 p.5。 (2) 已加列表格線。 (3) 標題已調整置中。 (4) 已將資料來源統一調整於圖表下方。



(4) P.31 表 4.4，請統一整份報告資料來源備註位置。 (5) P.33 請再修正「圖 4.7 監測井地下水採樣作業流程」文字位置。 (6) P.55「電吸附效率分別為 12、22 及 34%」，建議修正為 12%、22%及 34%。 3. P.28 計畫工作甘特圖，建議以實際執行年月(110.3.19-111.2.28)撰寫，以利查核。並確認與 P.35 前置作業期程一致。 4. P.60 內容略以，本新穎 FdCDI 支出設固定成本(分 10 年攤提)與年操作費用合計約 48 萬元，為何與 P.62 表 5.4 成本分析所載之 40 萬不符，請說明。 5. P.61 第二段第五行略以，設計處理量：100L/h，預估處理費係以元/T 做計算，應注意單位表示方法。且應與 P.62 表 5.5 所載設計處理量：0.1T/h 同單位。 6. P.63 與 P.64 頁數錯置，請修正。	(5) 標題已調整置中。 (6) 已修正為 12%、22%及 34%。 3. 依審查意見修正計畫工作甘梯圖之執行年月為 110 年 3 月至 111 年 2 月，而圖中所列之「現地管線工程設計與施工」及「現地整治測試及驗證」之工作期程，與前置作業期程一致。 4. p.60 所載金額為計畫申請書之估計金額，於計畫執行後依據實際作業數量及成本修正，每年操作成本為 40 萬元(詳 p.61)。 5. 依審查意見修正，p.61 設計處理量：100 L/h 為設計處理量：0.1 T/h。 6. 依審查意見修正。
--	---





110年度土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗

專案基本資料表

專案性質		☒ 實驗性質 ☐ 非實驗性質		專案類別(單選)		☐ 研究型 ☒ 模廠型	
研究主題		☐ 調查 ☒ 整治 ☐ 其他					
申請機構系所		國立成功大學環境工程學系					
機構地址		台南市東區大學路1號					
專案主持人		王鴻博		職等／職稱		講座教授	
協同主持人		劉守恒		職等／職稱		教授	
		孫元邦		職等／職稱		總經理	
專案名稱	中文	以流體電容去離子法實地整治重金屬污染地下水之模場試驗與示範					
	英文	In situ remediation of a heavy metal contaminated groundwater by fluidized capacitive deionization					
	關鍵字	Fluidized capacitive deionization, groundwater remediation, toxic metals					
執行期程		自民國 110 年 3 月 19 日起至民國 111 年 2 月 28 日止					
專案主持人		姓名：王鴻博講座教授 E-mail：wanghp@ncku.edu.tw				專線：06-2757575#65832 手機：0955630099	
專/兼任人員		姓名：段宇君博士 E-mail：eugenet@ncku.edu.tw				專線：06-2757575#65832 手機：0912766725	
經費分析總表 (僅模場試驗專案需填寫兩年度金額)	專案預估總經費		第一年申請金額	第二年申請金額	編列說明		
	1.	人事費用	571,000	-	(1~5項相加之50%為限)		
	2.	貴重儀器使用含維護費	111,000	-	(與計畫實驗相關)		
	3.	消耗性器材與主要費用	1,111,000	-	(與計畫主體相關)		
	4.	其它研究相關費用	48,600	-	(含差旅與租賃費用)		
	5.	雜項費用	22,000	-	(1~6項相加之5%為限)		
	6.	行政管理費	186,360	-	(1~5項相加之10%為限)		
	7.	自籌款	0	-	(申請單位自行籌備款項)		
	申請補助金額(1~6項)		2,049,960		-		
計畫總金額(1~7項)		2,049,960		-			

專案主持人：

王鴻博

(簽名及蓋章)

日期：

111 年 2 月 22 日



110年度專案成果績效自評表

一、專案基本資料

填表日期：111年02月22日

專案性質	☒ 實驗性質 ☐ 非實驗性質	專案類別	☐ 研究型 ☒ 模場型
研究主題	☒ 整治 ☐ 調查 ☐ 其他		
申請機構系所	國立成功大學環境工程學系	專案主持人	王鴻博講座教授
專案名稱	以流體電容去離子法實地整治重金屬污染地下水之模場試驗與示範		
專案執行期程	☐ 申請階段 ☐ 期中 ☒ 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欄位中。

(一) 學術面

項目		目標達成程度	申請 預估數	期中 達成數	期末 達成數	結案後半 年達成率	備註 (說明未達成原因或 學術產出發表名稱)
A 學術 產 出 及 活 動	1.國內投稿 (篇數)	(1)論文					
		(2)研討會論文	3	0	3		
	2.國外投稿 (篇數)	(1)期刊論文	3	0	3		
		(2)研討會論文					
	3.報告 (篇數)	(1)技術報告	1	0	1		
		(2)研究報告					
	4.專著(本數)						
	5.辦理學術 會議(場數)	(1)研討/說明會					
		(2)成果發表會	1	0	1		
		(3)論壇					
B 人 才 培 育	7.研發人員 (人數)	(1)碩士	2	2	2		
		(2)博士	1	1	1		
	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)						



(二) 產業面

項目			目標達成程度	申請 預估數	期中 達成數	期末 達成數	結案後半 年達成率	備註 (說明未達成原因 或專利、技術轉移 相關詳細資料)
A 智慧 財產 權	1.專利 (件數)	已 核 准	發明					
			新型/設計					
			合計					
		申 請 中	發明	1	0	1		
			新型/設計					
			合計	1	0	1		
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

目標達成程度			申請預 估數	期中 達成數	期末 達成數	結案後半 年達成率	備註 (說明未達成原因或 其他詳細資料)
項目							
A 服務 便民	1.技術服務	次數	6	3	6		
		收入(仟元)	0	0	0		
	2.諮詢服務	次數	6	3	6		
		收入(仟元)	0	0	0		
B 政策 推動	3.協助政府 推動(件數)	(1)政策	0	0	0		
		(2)法規	0	0	0		
C 技術 效益	4.整治技術提升(%)		20	5	20		
	5.整治成本降低(%)		30	10	30		
	6.提升能源效率(%)		20	5	20		
7.其他指標 (請自行命名)		(請自填)					



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

學術面(如國內外研討會、期刊投稿件數、或人才培育碩博士生說明)

完成國內投稿3篇研討會論文(環工年會)及國外期刊論文3篇，另針對電容去離子技術應用於重金屬污染場址整治之工程經濟效益評估及評估場址整治可行性等建議事項作成技術報告供參；活動部分則辦理成果發表會推廣前述技術應用。人才培育碩士2人及博士1人。

產業面(如合作研發產業、申請專利、洽談技術移轉廠商件數說明)

透過執行本模場試驗專案，期能建立一套可自動化、不受地域限制、無衍生廢棄物、及可遠端操控之受重金屬汙染之地下水整治技術、設備及其示範，以做為其他污染場址整治參考。將申請國內發明專利1件。

政策面(如整治費用降低、特定污染物整治效益提升、或提供政府作為監測/管制標準、污染查核、場址管理等政策及法規研訂之參考)

本案之新穎可自動化及遠端操控之 FdCDI 技術與設備具優勢例如：無中間與最終處置需求，尤其，整治過程，未添加任何化學藥劑，而無衍生汙泥需再處理等，屬綠色及永續整治技術。



計畫摘要

(一)中文部分：

綠色與永續整治(Green and sustainable remediation (GSR))是目前重要趨勢，可實現平衡社會、經濟、環境需求的聯合國永續發展目標(SDGs)。地下水整治通常耗時費工，其中抽水處理法(P&T)經常是整治策略之必要手段之一，尤其針對地下水受重金屬污染之場址，我們開發一種新穎流體電容去離子(FdCDI)技術，以流體電極擴增電雙層量，增加電吸附之效率，減少反應器體積，並且透過電吸附水中離子，可實現低導電度水回收再利用；被電吸附之離子可在飽和後，調整為零電壓或施加反電壓(例如：-1.2 V)以加速離子脫附，富集回收及濃縮水中重(毒性)金屬離子，再以電解法予以還原，而無中間與最終處置需求，尤其，整治過程，未添加任何化學藥劑，而無衍生污泥需再處理，屬 GSR 技術。本試驗場址為傳統金屬製品製造業之五金零件電鍍(鋅、鉻)廠區，公告超過地下水污染管制標準之污染物含陰陽離子：鎳、鋅、鉻、及氟鹽，為典型重金屬污染場址。整治操作區狹小、受限，經現勘，本小型化(0.6 m (L) × 0.6 m (W) × 0.7 m (H))FdCDI 模組設備可適確進行現地整治。本模場試驗專案重點工作包括：(1)污染場址地下水檢測、(2)自動化 FdCDI 模組設備之設計與組裝、(3)模擬污染場址地下水之實驗室級 FdCDI (含電解分離回收毒性金屬(鋅、鉻)測試、(4) FdCDI 設備之現地整治工程可行性研究(含單元、連續及自動化操作與經濟效益評估)，測試結果顯示可有效分離污染場址地下水之管制物種(鋅、鉻、及氟鹽)，以符合管制標準，例如：鋅(200 mg/L)經5個串聯電極組(51片電極(0.18 m×0.18 m)/組)分離去除可達285 g/d，若以受污染地下水700 T 估算，採循環回注方式，使用1套可遠端操控自動化 FdCDI (1.44 T/d)設備，則預估需時約491日((700 T×1000L/T×0.2 g/L)/(285 g/d))。此可遠端操控自動化 FdCDI 設備1套成本約800,000元(NTD)，操作成本含電費(約10,000元/年)、人力費(約340,000元/年)(50,000元/月×13.5月×0.5人)、耗材維修費 (40,000元/年(以設備成本之5%估計)及雜費(10,000元/年)，共計約400,000元/年。目前，類似污染場址整治約需3年施作，費用至少5,000,000元，因此，本可遠端操控自動化 FdCDI (1.44 T/d)設備運用於現地整治，預期工程可行。本模場現地試驗結果確能提供一套低成本、低耗能、高效率、可自動化、不受地域限制、無衍生廢棄物、及可遠端操控之受重金屬污染之地下水整治技術、設備及其示範，以做為其他污染場址整治參考。

關鍵字：綠色與永續整治、流體電容去離子、重金屬污染、地下水整治、自動化



(二)英文部分：

Green and sustainable remediation (GSR) is becoming one of the most important trend for soil and groundwater remediation, especially in emerging contaminants remediation. Many countries are eagerly seeking new scientific knowledge and the policy to achieve the balance social, economic, and environmental needs of the United Nations Sustainable Development Goals. Remediation of heavy-metal contaminated groundwater frequently suffers from the drawbacks of high cost and energy consumption, high risk of secondary pollution and long treatment period (possibly prolongs many years). A novel fluidized capacitive deionization (FdCDI) method using fluidized electrodes to amplify the electric double layer for enhancing electrosorption was, therefore, developed in our research laboratory. Under a low voltage (e.g., +1.2 V), heavy metal ions could be captured by electrosorption during FdCDI, and deionized water could be recycled and reused. Concentrated ions (in water) that could be reduced to metals for separation and recycling by the newly-developed solar-driven photoelectrocatalysis or electrolysis were obtained by removing the voltage (0 V) or applied a reversed voltage (-1.2 V) in the regeneration step. Since no chemical was used in the FdCDI process, no sludge was to be treated. The FdCDI process was practically and effectively applied in the treatments of at least six streams of industrial inorganic wastewater (e.g., electroplating wastewater). Note that the ion concentrations in the contaminated groundwater are usually much less than those in electroplating wastewater, which makes the FdCDI method better fit in groundwater remediation in a GSR way. Additionally, the experimental data of the FdCDI electrosorption efficiencies for many ions that were highly related with their ionic strength as well as charge density were obtained, which allowed us to be able to predict behaviors of target ions in a contaminated groundwater during FdCDI. The case study site that was a typical small electroplating company was contaminated by toxic ions such as nickel, zinc, chromium and fluoride (F^-) in groundwater. The project goals include introduction the novel FdCDI method for *in situ* clean-up by P&T under the very limited operation space. The removal efficiencies (REs) of toxic ions (such as Zn^{2+} and F^-) from simulated and real contaminated groundwater by a laboratory-scale FdCDI reactor using an electrode set (consisted of 51 electrode sheets (the size of each AC coated SS sheet was 0.18 m (L)×0.18 m (W)) under a constant voltage (1.2 V) or current (1.0 A) were studied to obtain scale-up engineering design parameters. Experimentally, the REs of toxic metals and fluoride by electrosorption were 10-15% for a one-pass through an electrode set. A fixed and operational cost of 400,000 NTD/year for the *in situ* remediation of the contaminated groundwater were estimated. Proceeding in this manner, the relatively low cost, low energy consumption, high efficiency, high automation, zero waste approach, and ready for remote-control FdCDI process was demonstrated for *in situ* remediation of contaminated groundwater, which would also promote the GSR concepts.



目錄

審查意見回覆對照表.....	I
專案基本資料表.....	V
專案成果績效自評表.....	VI
研究成果中英文摘要.....	XI
目錄.....	XIII
圖目錄.....	XIV
表目錄.....	XVIII
一、前言.....	1
二、研究目的.....	2
三、文獻探討.....	3
3.1 綠色及永續整治	3
3.2 土壤與地下水之調查與採樣分析	6
3.3 土壤與地下水之整治技術	9
3.4 去離子關鍵技術及應用實績	20
四、研究方法與過程(含工作進度甘特圖).....	26
五、結果與討論(含結論與建議).....	38
5.1 結果與討論.....	38
地下水檢測	38
自動化 FdCDI 模組設備之設計與組裝(含操作模式建立)	39
模擬污染場址地下水之實驗室級 FdCDI 測試	49
FdCDI 設備之現地整治工程可行性研究	53
5.2 結論與建議.....	66
六、參考文獻.....	68
期中報告審查意見回覆對照表	72
附件1：學術產出及活動(研討會、期刊論文摘要、成果發表會).....	75
附件2：附件2 科技部貴儀中心 QA/QC	86



圖目錄

圖2.1 毒性金屬地下水污染場址現地整治程序.....	2
圖3.1 整治領域發展的三個階段.....	3
圖3.2 以永續整治定義的永續性評估框架.....	4
圖3.3 P&T程序示意圖	10
圖3.4 SVE/AS程序	11
圖3.5 透水性反應牆處理法示意圖(左) (USEPA, 1998)及延伸技術(右).....	12
圖3.6 PRB處理法 (左)、填充反應材料之漏斗式PRB (中)及PBR復育井(右)	12
圖3.7 生物反應牆處理法.....	13
圖3.8 植物整治法，運用植物整治復育土壤中重金屬	14
圖3.9 (a) AACE整治復育系統，將EDTA溶液再循環以洗滌受污染的土壤，AACE 過濾器從洗滌液中回收重金屬陽離子，並循環EDTA溶液以重複使用；(b) AACE過濾器，由兩個平行的Ami-PC電極與一個隔板組成	14
圖3.10 電動力整治法.....	15
圖3.11 SRM 兩階段處理	15
圖3.12 奈米零價鐵(NZVI)反應途徑	16
圖3.13 生物碳吸附有機污染物之吸附過程：(a) 分配到非晶相、(b) 在孔洞中擴散、 (c) PEP及EDA互相反應、(d) 疏水作用、及(e) 氫鍵作用力.....	17
圖3.14 (a) 科技部土水學研計畫與(b) 環保署土水學研計畫之污染類別	18
圖3.15 環保署學研計畫中有機物處理技術.....	18
圖3.16 電容去離子(CDI)電吸附原理	19
圖3.17 以CDI去除水中不同pH值之鉻離子.....	19
圖3.18 活性碳孔洞及內孔隙之分類.....	20
圖3.19 CDI活性碳與石墨烯電極之循環伏安曲線.....	20
圖3.20 CDI活性碳電極之EIS.....	20
圖3.21 CDI之離子吸附量(SAC)	21
圖3.22 CDI之去除效率(%)	21
圖3.23 CDI裝置結構分為：(a) 流經式 (FbCDI)、(b) 薄膜式 (MCDI)、(c) 穿透式 (FtCDI)、(d) 倒置式 (iCDI)、(e) 流動式 (FCDI)、(f) 混合式 (hCDI)、(g) 嵌	



合式、及(h) 脫鹽電池式CDI	21
圖3.24 SGO薄膜應用於CDI電極與AC@SGO之去離子效率	22
圖3.25 FdCDI電極設計	23
圖3.26 FdCDI效率與離子強度(左)與電荷密度(右)之關係	23
圖3.27 FdCDI之流體電極模組、電吸附/再生組合(24x10組)與自動化設備(0.2 T/h)	23
圖3.28 CDI技術處理實場含砷水樣	24
圖4.1 整治作業流程	27
圖4.2 場址位置	29
圖4.3採取水樣與實施整治之水井(紅色圈內)	29
圖4.4 場址地質剖面	30
圖4.5 試驗場址地表水文分布	31
圖4.6 試驗場址地下水流向	31
圖4.7 監測井地下水採樣作業流程	33
圖4.8 現地整治作業環境	36
圖4.9 現場測試設備及管路配置	37
圖5.1 FdCDI設備設計結構	39
圖5.2 FdCDI設備電極組構造	40
圖5.3 FdCDI設備電極組組裝	40
圖5.4 FdCDI設備電容去離子處理設備-動作邏輯	41
圖5.5 FdCDI設備人機介面主畫面及參數設定頁面	42
圖5.6 FdCDI設備流量校正設定頁面	43
圖5.7 FdCDI設備控制說明 (A模式)	44
圖5.8 FdCDI設備控制說明 (B模式)	45
圖5.9 FdCDI設備控制說明 (C模式)	46
圖5.10 FdCDI設備控制說明 (D模式)	47
圖5.11 遠端監控單元輸入顯示介面	48
圖5.12 即時數據顯示頁面實例(電壓、電流)	48
圖5.13 即時數據顯示頁面實例(導電度)	48



圖5.14 現地影像顯示實例.....	48
圖5.15 模擬地下水 ($[Zn^{2+}] = 100$ (□), 200 (○), 及 500 (△) ppm) 之單電極組測試結果 (3-cycle (電吸附(1.2 V)與脫附再生(0 V)))。 (線條為連續監測EC校準值；實心符號為鉍實測值(ICP-MS)).....	49
圖5.16 模擬地下水($[Zn^{2+}] = 100$ ppm (□), $[Cr^{3+}] = 100$ ppm (○), $[Ni^{2+}] = 100$ ppm (△), 及 $[F^-] = 100$ ppm (◇))之單電極組測試結果(1-cycle (電吸附(1.2 V)與脫附再生(0 V)))。 (線條為連續監測EC校準值；實心符號為實測值(ICP-MS及氟電極法)).....	50
圖5.17 模擬地下水($[Zn^{2+}] = 300$ ppm (□), $[Fe^{3+}] = 1000$ ppm (○), 及 $[Na^+] = 200$ ppm (△))之單電極組測試結果(1-cycle (電吸附(1.0 A)與脫附再生(0 A)))。 (線條為連續監測EC校準值；實心符號為實測值(ICP-MS)).....	50
圖5.18 模擬地下水($[Zn^{2+}] = 300$ ppm (□), $[Fe^{3+}] = 1000$ ppm (○), 及 $[Na^+] = 200$ ppm (△))之串聯2組電極組測試結果(1-cycle (電吸附(1.0 A)與脫附再生(0 A)))。 (線條為連續監測EC校準值；實心符號為實測值(ICP-MS)).....	51
圖5.19 模擬地下水($[Zn^{2+}] = 300$ ppm (□), $[Fe^{3+}] = 1000$ ppm (○), 及 $[Na^+] = 200$ ppm (△))之串聯3組電極組測試結果(1-cycle (電吸附(1.0 A)與脫附再生(0 A)))。 (線條為連續監測EC校準值；實心符號為實測值(ICP-MS)).....	51
圖5.20 模擬地下水($[F^-] = 20$ ppm)於單(□), 串聯2組(○), 及串聯3組(△)電極組測試結果 (1-cycle (電吸附(1.0 A)與脫附再生(0 A)))。 (線條為連續監測EC校準值；實心符號為實測值(氟電極法)).....	52
圖5.21 模擬地下水($[Zn^{2+}] = 200$ ppm, $[Cr^{3+}] = 3$ ppm, $[Ni^{2+}] = 1$ ppm, 及 $[F^-] = 2$ ppm)於不同定電壓及流量之單電極組測試結果(1-cycle (電吸附(1.0及1.2 V)與脫附再生(0 V)；流量0.5及1.0 L/min))。 (線條為連續監測EC校準值).....	52
圖5.22 現地整治測試之主要設備	53
圖5.23 MW03實際地下水(稀釋4倍 (□)及 8倍 (○))單電極組測試結果(1-cycle (電吸附(1.0 A)與脫附再生(0 A)))。 (線條為連續監測EC校準值；實心符號為實測值(ICP-MS)).....	56
圖5.24 MW03實際地下水(稀釋4倍 (□)及 8倍 (○))串聯2組電極組測試結果(1-cycle (電吸附(1.0 A)與脫附再生(0 A)))。 (線條為連續監測EC校準值；實心符號為實測值(ICP-MS))	56
圖5.25 MW03實際地下水(稀釋4倍 (□)及 8倍 (○))串聯3組電極組測試結果(1-cycle (電吸附(1.0 A)與脫附再生(0 A)))。 (線條為連續監測EC校準值；實心符號為實測值(ICP-MS)).....	57



圖5.26 MW05實際地下水(稀釋4倍 (□)及 8倍 (○))單電極組測試結果(1-cycle (電吸附(1.0 A)與脫附再生(0 A))。(線條為連續監測EC校準值；實心符號為實測值(ICP-MS))	57
圖5.27 MW05實際地下水(稀釋4倍 (□)及 8倍 (○))串聯2組電極組測試結果(1-cycle (電吸附(1.0 A)與脫附再生(0 A))。(線條為連續監測EC校準值；實心符號為實測值(ICP-MS))	58
圖5.28 MW05實際地下水(稀釋4倍 (□)及 8倍 (○))串聯3組電極組測試結果(1-cycle (電吸附(1.0 A)與脫附再生(0 A))。(線條為連續監測EC校準值；實心符號為實測值(ICP-MS))	58
圖5.29 MW05實際地下水(稀釋4倍 (□)及 8倍 (○))4組電極組(3座串聯電吸附，1座再生)連續操作測試結果(1-cycle (電吸附(1.0 A)與脫附再生(0 A))。(線條為連續監測EC校準值；實心符號為實測值(ICP-MS))	59
圖5.30 MW05實際地下水(稀釋4倍 (□)及 8倍 (○))4組電極組(3座串聯電吸附，1座再生)連續操作測試結果(1-cycle (電吸附(1.0 A)與脫附再生(0 A))。(線條為連續監測EC校準值；實心符號為實測值(ICP-MS))	59
圖5.31 不同陰陽離子ICP檢測及EC值校準分析結果	60
圖5.32 光驅動金屬離子還原光電催化反應器	61



表目錄

表3.1 場址特性(Site characterization)：水系統(含水層)的地質與水力特性	8
表3.2 污染物特性.....	8
表3.3 土壤與地下水之整治技術.....	9
表4.1 研究進度及預期完成之工作項目	28
表4.2 現地整治場址之公告超過第二類地下水污染管制標準之污染物	29
表4.3 現地整治之監測井土壤物理性質分析.....	30
表4.4 現地整治地下水污染場址之109年地下水調查檢測結果	31
表4.5 現地整治前置作業.....	35
表4.6 採樣位置及分析項目表.....	35
表4.7 現地測試設備清冊.....	37
表5.1 新明利地下水污染場址主要污染物109年調查及本計畫檢測結果	38
表5.2 電極組串並聯分組.....	43
表5.3 現地整治場址地下水經前過濾測試結果.....	54
表5.4 FdCDI應用於重金屬污染場址成本分析	63
表5.5 地下水抽出及處理(pump and treat)之處理方法(地上)相對成本效益分析	63
表5.6 FdCDI技術應用潛力與機會	64
表5.7 完成目標與工作項目及執行現況.....	65



一、前言

綠色與永續整治(Green and sustainable remediation (GSR))是目前重要趨勢，各國正積極尋求新的科學知識、政策手段與其他努力以實現平衡社會、經濟、環境需求的聯合國永續發展目標(SDGs)。地下水整治通常耗時費工，其中抽水處理法(P&T)經常是整治策略之必要手段之一，尤其針對地下水受重金屬污染之場址，我們開發一種新穎流體電容去離子(FdCDI)技術，以流體電極擴增電雙層量，增加電吸附之效率，減少反應器體積，並且透過電吸附水中離子，可實現低導電度水回收再利用；被電吸附之離子可在飽和後，調整為零電壓或施加反電壓(例如：-1.2 V)以加速離子脫附，富集回收及濃縮(超過千倍($<1/1000$))水中重(毒性)金屬離子，再以新建立之光驅動選擇性(或傳統電解法)予以還原，而無中間與最終處置需求，尤其，整治過程，未添加任何化學藥劑，而無衍生污泥需再處理，屬 GSR 技術。本 FdCDI 技術已有實務處理重金屬濃度相對較高之電鍍廢水之經驗，地下水之污染重金屬濃度較低，預期更加容易適用，尤其，從多年 FdCDI 累積之實驗數據，可獲得 FdCDI 效率與離子強度或電荷密度之共通關係(predictable relationship)，以預估目標離子之電吸附效率。國內小型表面加工處理廠非常多(超過4000家)，本試驗場址為傳統金屬製品製造業之五金零件電鍍(鋅、鎳、鉻等)廠區，公告超過地下水污染管制標準之污染物含陰陽離子：鎳、鋅、鉻、及氟鹽，為典型重金屬污染場址。整治操作區狹小、受限，經現勘，本小型化模組型 FdCDI 設備可適確進行整治。透過執行本模場實地(*in situ* (現地))試驗操作與驗證，期能建立一套低成本、低耗能、高效率、可自動化、不受地域限制、無衍生廢棄物、及可遠端操控之受重金屬污染之地下水整治技術、設備及其示範，以做為其他污染場址整治參考。



二、研究目的

本計畫試驗場址為傳統金屬製品製造業之五金零件電鍍(鋅、鉻)廠區，公告超過地下水污染管制標準之污染物含陰陽離子：鎳、鋅、鉻及氟鹽，為典型重金屬污染場址。採抽水處理法(P&T)將重金屬污染場址之地下水抽出後，再以新穎流體電容去離子(FdCDI)技術，以流體電極擴增電雙層量，增加電吸附之效率，減少反應器體積，並且透過電吸附水中離子，可實現低導電度水回收再利用；被電吸附之離子可在飽和後，調整為零電壓或施加反電壓(例如：-1.2 V)以加速離子脫附，富集回收及濃縮(超過千倍(< 1/1000))水中重(毒性)金屬離子。

經現場現勘及地下水採樣過程，瞭解污染場址現況，以作為現地試驗時設置設備及管路之參考。依地下水水質特性，進行實驗室測試，以獲得主要操作參數，作為現地試驗之參考。另也測試前過濾、FdCDI 回收水及濃縮液之效率，以為模場試驗之參考。

地下水污染場址整治規劃詳如圖2.1，包括：(1)前處理裝置濾除懸浮固體及部分地殼元素離子、(2)FdCDI 電吸附地下水中陰陽離子、(3)回收水再使用(回注迴流工作槽)或注返(含地殼元素離子)地下水井(依法規許可條件進行)、(4)濃縮液則電解分離水中毒性離子、(5)上澄液則併入回收水再利用。主要處理系統含：前處理、電容去離子及電解等設備，另由於整治操作區狹小、受限，經現勘，先進行實驗室測試，以瞭解現地整治之困難度及解決方案，使本小型化模組型 FdCDI 設備可適確進行現地整治。

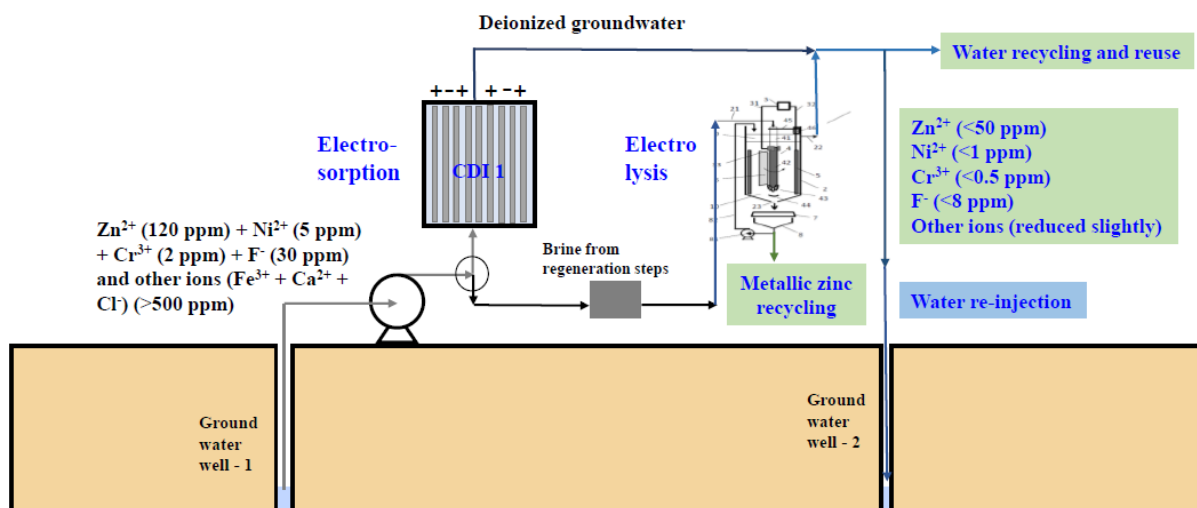


圖2.1 毒性金屬地下水污染場址現地整治程序



三、文獻探討

3.1 綠色及永續整治(Green and sustainable remediation (GSR))

工業發展無可避免造成環境污染，包含：空氣、土壤、水污染等，對動植物等生態環境造成危害，其中土壤與地下水的污染相對較難處理，需花費更多的人力、物力、經費，才能有效整治。近年，各國正熱切尋求新的科學知識、政策手段與其他努力以實現平衡社會、經濟、環境需求的聯合國永續發展目標(SDGs)。在過去40年，土壤與地下水整治以持續重視永續整治(Sustainable Remediation (SR))與綠色整治(Green Remediation (GR))(如圖3.1)，永續性也被許多國家(例如：英國與美國等)視為當務之急 (Hou and Al-Tabbaa, 2014; Hou et al., 2014b)。

綠色及永續整治(Green and Sustainable Remediation (GSR))概念也為新興污染物整治市場帶來益處，比較傳統整治措施更著眼於受污染的場址本身與場地使用者的健康風險，GSR則從更廣泛的社會、經濟、環境等層面去檢驗生命週期的影響，以採取更整體的整治措施 (Hou et al., 2014a; Song et al., 2018)，如此全方位取向也使資源利用更有效率，也為須處理大量污染場址的國家帶來變革性的政策調整與獲益，在已開發國家已進行充分的研究與證明，但更須擴展至開發中國家(Hou et al., 2016b)。

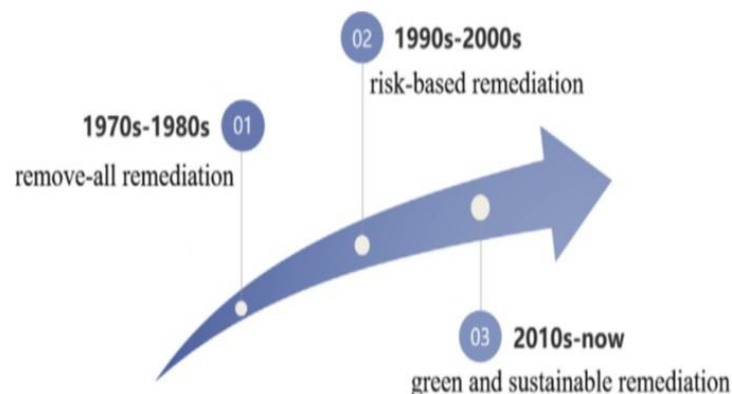


圖3.1 整治領域發展的三個階段(Yong et al., 2020)

永續整治材料與程序(Sustainable Remediation (SR) Materials and Process)

永續整治(Sustainable Remediation (SR))概念是將整治場址與周遭區域併同考量，尋求對於現在及未來的利害關係者而言，在環境、社會、經濟效益都能最大化的整治方案，永續整治需滿足以下條件：

- (1) 所有可行的整治措施均通過對環境、社會、經濟影響實證的永續性評估；
- (2) 在生命週期的基礎上，所選整治措施的永續性收益超過對當地或更廣泛區域的有害影響；
- (3) 應用最新及最佳的管理實務，以最大程度降低二次排放、廢棄物、能資源的使用與對生態的影響；



- (4) 通過利益關係者的參與，以考量及解決對工作者與當地社區的社會影響；及
- (5) 整治措施可最小化生命週期成本與最大化經濟收益。

圖3.2 說明不同層級的永續評估框架，新的 SR 概念在時間、空間及所考慮的影響類別數量等三個方面優於傳統採用的基於風險評估的整治措施。

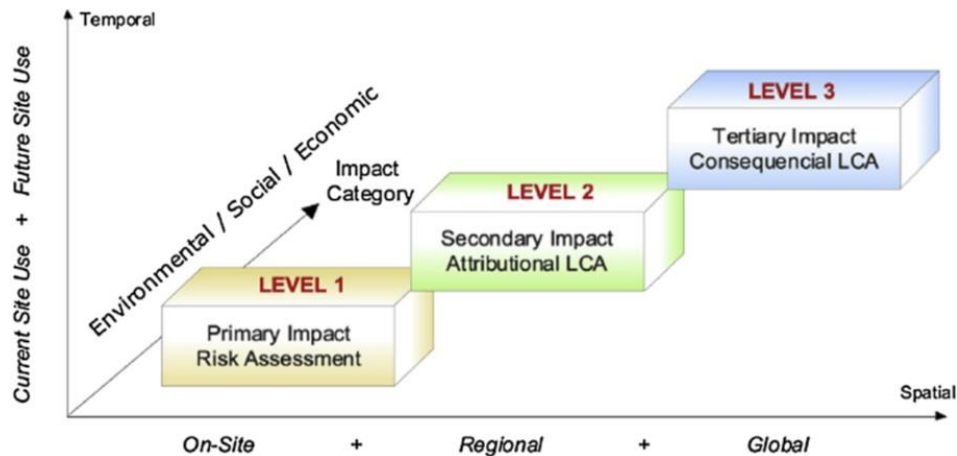


圖3.2 以永續整治定義的永續性評估框架(Hou, 2019)

永續整治可為當前甚至未來帶來最佳結果，但由於自然環境是動態的，整治策略應應對環境變化例如：海平面上升、降雨量增加或地下水枯竭對應採取對策與行動；社會經濟與監管環境也可能發生變化，永續整治須考慮這些變化，並應具有以下特徵(Hou and Al-Tabbaa, 2014)：

- (1) 滿足不斷改進的人類健康與環境標準的能力；
- (2) 對場址未來的各種開發選擇之適應性；及
- (3) 對地球物理條件(如氣候變遷)的抵抗力。

必須解決永續性的多個面向，才能達到永續整治(Hou et al., 2018a)，大多數永續性評估研究都集中於生命週期的環境影響，但缺少量化社會及經濟影響評估(Hou et al., 2016a)。同時，對於污染整治從業者而言，通常難以確知相關資訊(尤其是量化資料)，但在進行整體性整治措施規劃與設計的決策制定時，為平衡方案成本、社會福祉與更廣泛的經濟效益，便需要相關資料，可在多準則分析(Multiple Criteria Analysis, MCA)中結合質化與量化分析訪法，以簡化社會與經濟的永續性評估。

綠色及永續整治(Green and Sustainable Remediation (GSR))

美國國家環境保護局(USEPA)於2008年提出綠色整治(Green Remediation (GR))的概念，追求有效率使用能資源、減少對環境負面影響、污染源頭消除與減量、及盡可能減少廢棄物等方向，並考量所採取之污染場址整治措施對環境的所有影響後，選擇對環境最大淨效益的整治手段。更進一步將兩者結合，即是綠色及永續整治(Green and Sustainable Remediation (GSR))概念，由美國州際環境技術與監管委員會(Interstate Technology and Regulatory Council, ITRC)定義為在特定地點使用的產品、流程、技術與



程序，在減輕受體污染風險的同時能兼顧社區目標、經濟影響與乾淨環境效益等標的。以永續經營的角度，在解決當前污染問題的同時也能考量土地現在與未來的利用方式，從社會與環境影響、環境足跡等層面考量整治工作的投入及其衍生的影響，尋求最適之污染整治方式，管理與評估部分採用 ISO14000 的概念，在合乎法規標準的前提建立綠色及永續整治目標，根據選用的整治措施與工法，考量社會、環境與經濟三方面因子擬定符合場址需求的管理方法並執行，並確實紀錄與產生資料文件。

社會與經濟影響構成永續性三大指標之二，但在 GSR 概念發展的早期階段通常缺乏對社會影響的考慮，大多數對於經濟影響的評估都侷限於專案成本，而且缺乏對社會經濟的考量，例如對於當地經濟的影響。這可能歸因於制度上的障礙，在整治行業中工作的人之技術背景通常只專注於環境，對於整治措施造成的社會影響缺乏認知。近年來(2010-20年)專業人員與研究人員對於社會及經濟影響更加看重，所選用整治措施的不同對於 GSR 有很大的影響：

- (1) 雖然對於任何特定場址條件而言，各種整治技術通常是可行的，但這些技術帶來的影響相差甚大，對於社會(如影響當地交通流量)、經濟(如影響當地就業與稅收)及環境(如逸散排放與全球暖化)等層面在全球造成生命週期衝擊；及
- (2) 即使所有整治措施都能達到整治目標，但它們仍可能在現地造成不同程度的污染殘留，因此對於未來的發展選擇產生影響，進而影響當地社區的永續發展。

最佳管理實務(Best Management Practice (BMP)) 是由土木工程借用的概念，適用於永續整治的發展，美國材料與試驗協會(ASTM)在制定「Standard Guide for Greener Cleanups」規範時已採用該標準(E2893-16)，將其定義為「若適用於特定情況，通常能減少清除行為的環境足跡」。BMP 為永續整治的基礎方法，為選擇與實行永續整治 BMP 提供一種循序漸進的方法，由於有流程可供依循，使得選擇最具成本效益與收益的可行方案變得更加容易：

步驟一、識別，識別潛在的可適用於方案的 BMP；

步驟二、評估，實施 BMP 評估方法例如：排名或評分系統或某種其他類型的 MCDA 模型；

步驟三、選擇，根據評估結果選擇一組可行的 BMP，應實質使每個永續指標皆受益，同時不會對其他任何永續指標產生重大負面影響(即確保每 BMP 不會在為某個指標獲益的同時意外地對另一指標產生負面影響)；

步驟四、實行，實行所選定之 BMP，若有 BMP 無效、實施不可行或成本過高致使決定不實行，務必妥善紀錄；

步驟五(可選)、量化，如果預期結果是有益的，可選擇量化 BMP 結果，但有些 BMP，尤其是社會相關指標可能無法量化；及

步驟六、紀錄，必須紀錄所有進行的活動與評估。

為使上述步驟易於被執行，需工具協助綠色及永續整治措施，因此美國永續整治



論壇(SURF)制定一種技術倡議以開發包含綠色整治產品與永續整治服務的資料庫，該資料庫遵循 ASTM 標準指南中對 BMP 的基本概述，並列出綠色產品與服務，提供該公司網站鏈結，同時指出數據庫中與產品相關的可用技術、BMP 分類與美國國家環境保護局(USEPA) 更綠色整治(Greener Cleanup)的核心要素。

隨著對 GSR 的興趣不斷增長，各式不同成分整治藥劑的商業生產正逐漸開發，但在追求環境整治的工作，使用可能對環境有危害的物質是不明智的，如使用有害物質(包含：有機溶劑、有毒化學物質與不可生物降解的穩定劑) (Kalaiselvi et al., 2015; Yang et al., 2016)，或在生產過程會有安全疑慮，如以常見的由 bottom-up 合成奈米顆粒(nanoparticle (NP))的過程，常使用有毒的硼氫化鈉且會產生氫氣，有安全疑慮。近年，許多綠色合成的方法與概念被提出，包含：(1) 使用綠色材料作為合成試劑；或(2) 採用消耗較少能源或自然資源的生產方式，例如以微生物(細菌、真菌、酵母、病毒等)及植物合成的方法，較具成本效益、生物相容性、無毒且生態友好(Cheng Keong et al., 2017)。

綠色與永續治理使用綠色整治材料(Green Remediation Materials)，與傳統方法有所不同，例如：(1) 構成功能單元材料，設計符合綠色化學概念；或(2) 與傳統措施相比，其生命循環造成衝擊較小。衝擊可分為主要衝擊(primary impacts)、次要衝擊(secondary impacts)、及三級衝擊(tertiary impacts)，主要衝擊指與污染場址及場址污染物相關的影響，例如：污染物對健康的直接影響、場址周遭的景觀退化、溫室氣體排放等。次要衝擊為整治措施造成的影響，常來自能資源(如燃料或電力)與材料(如滲透性反應性屏障裡零價鐵的製造或用於增強現地生物降解能力打入的基質)的使用，整治後的監測行為亦會造成次要衝擊，尤其是帶有較高不確定性的整治措施，需要頻繁或長時間監測。三級衝擊為整治後場址使用相關的影響，通常涉及場地重建，市區的褐地重建作為發展郊區綠地的替代方案，從而減少對新建道路及公用事業等基礎建設的需求與資源，同時縮短通勤時間與能資源消耗。

3.2 土壤與地下水之調查與採樣分析

工業化衍生的污染包括廢棄物的不當處理、垃圾掩埋場的滲漏、儲槽的洩漏、肥料與殺蟲劑的過量使用等，皆會削減能使用的天然水資源，因此對於水資源的管理與品質維持成為重要議題之一，而進行土壤與地下水整治的首要工作也是對其特性與現況進行調查與採樣分析，整治方式與技術，例如：物理、化學及生物等方法，針對不同場址特性進行選用與組合，以求最適及最佳解方。不同水體與地質也有不同整治方式，例如：水量(飽和層、不飽和層)、土質(砂土、黏土)、深度(表土、底土)等；不同污染物也有不同處理方式，例如：生物整治法較適用於有機污染物，但不適用於重金屬污染。

場址特徵調查

為適當表徵場址，需根據：(1)地質資料、(2)水文資料、(3)污染物、及(4)污染物可能影響的位置與人口相關統計資料，在完成場址特徵調查後，便能針對其危害性進行風



險評估並選用適當的整治措施，必須根據採樣結果與技術妥善選用，並配合持續監測達到整治目標。在整個整治計畫執行的過程皆須同步進行監測以判斷整治措施是否有效與污染物是否有擴散之趨勢，若有措施效果不明顯、污染狀況有惡化、或污染造成的風險不可接受，應立即採取相關補救措施。

採樣與分析(Sampling and analysis)

因為水層是開放系統，含水層會不斷地與周圍環境交換水、物質與能量，地下水中主要的物質輸入由地表入滲通過土壤而來。而工業產生的水污染物溢流會隨時間(通常是數年)與隨地下水流擴散，綿延數公里，從而對存在於同一含水層的供水系統造成長期危險，因此需要採樣方法與分析技術以確認污染物種類與污染區域。表3.1 指出場址表徵的項目包含：水體定位與測量、土質檢測、化學性質檢測、衝擊評估等，另外，表3.2說明污染物特性(information needed about the contaminants)。採樣後需檢驗化學性質與成分，而許多污染物以低濃度存在，需要非常準確的檢測方式，因此根據可能污染物進行對應性檢測，可提升檢驗結果準確度與節省檢測時間。檢測項目主要為 pH 值、陽離子與陰離子濃度、生化需氧量等。

檢驗結果可作為後續決策依據或確認現況。常規分析方法為使用氣相色譜法與質譜法，廣泛定性與定量所有天然元素及其無機化合物與大多數有機化合物(ASTM, 2019)。但在執行檢測方法以確定水中污染物濃度及種類之前，需先將水製成樣品以方便保存，才不會因樣品變質造成檢測結果失真，某些樣品需維持樣品瓶無菌或添加防腐劑，某些項目需於取樣後立即檢測，如餘氯、pH、濁度，以避免其於貯存或運輸中改變。應盡量減少取樣與檢驗時間間隔，建議以玻璃瓶或聚乙烯瓶貯存於低溫(4°C)暗室。

若採樣地點偏遠或無法到達時，可能造成樣品在運輸到實驗室設施期間質量下降。若因為樣品存儲技術不足或在長時間運輸過程中需要保存，從而限制了採樣範圍。若因樣品運輸、分析、報告出具的時程延遲，可能致使整治措施的延後。因為上述原因，許多偏遠地區都適合使用便攜式設備進行現場水質檢測。

通常而言對水取樣較對土壤取樣容易，原因為：

- (1) 水的成分較土壤更均勻，在鄰近採樣點取得之樣品，變化較小；
- (2) 收集水樣在物理上較容易，可由泵和軟管來完成；
- (3) 可以相對容易地從已知深度收集固定量的水。

而採樣點挑選應考慮各個位置並遵循以下準則：

- (1) 採樣點的選擇，應使所採的樣本能代表取水的來源，即具代表性；
- (2) 採樣點應包含能代表水系統狀況的點，特別是可能受到污染的點；
- (3) 採樣點應在整個水系統平均分布。

採樣點建議固定，若採樣點隨機或變動，雖可能較易發現水體問題，但有無法做到隨時間分析水體變化的問題。

檢驗方法可遵循我國環境檢驗所公告之檢驗方法或參考美國材料與試驗協會



(ASTM)之試驗方法，以檢測水中污染物類型與濃度，包括：物理性質檢測、化學性質檢測、微生物相關檢測等，物理性質檢驗主要是確定顏色、濁度、總溶解固體、懸浮固體、氣味等，氣味用於指示部分揮發性有機化合物；化學性質檢驗包括：pH 值、硬度、對含有之金屬離子及其無機物與有機物的定性及定量、生物需氧量與化學需氧量等。

表3.1 場址特性(Site characterization)

水系統(含水層)的地質與水力特性

含水層	項 目
含水層範圍	位置、深度、寬度
物理性質	孔徑、沉積物或岩石種類、水力擴散係數、通過水層的水流量。
衝擊	污染物宿命、污染物的擴散、污染物自然條件下的成分改變。
化學性質	含水層中沉積物或岩石的化學性質、污染源上游含水層的純度、含水層中溶解的氣體量。

表3.2 污染物特性

污染物性質	項 目
類型	識別源頭、識別不同類別之污染物
時段	污染水體的時間
來源	污染物來源的空間分布
物理性質	密度(較水輕或重、漂浮或下沉)、(與水的)溶解度、場地所需的其他物理性質。
化學性質	與氧反應性、與沉積物或礦物質或岩石的反應性、場地所需的其他化學性質。
濃度	濃度對空間分布(大型場址)
毒性	對人類、動物、植物的影響、對生態系統的影響。



3.3 土壤與地下水之整治技術

地下水體受重金屬污染不但影響水質，更造成土壤污染與生態的破壞，亦間接危害人體健康，因此，土壤與地下水之整治勢在必行。污染場址整治技術可依受污染土壤或地下水之取出與否、整治機制、處理程度差異及待整治之污染物濃度分類，受污染土壤或地下水之取出與否可分為：現地(*in-situ*)方法及離地(*ex-situ*)方法；依整治技術所使用之機制歸屬可分為：物理化學、生物、及化學處理法等(如表3.3所示)。依其對污染物之處理程度差異可分為：不移動化或阻絕技術、破壞性技術、分離濃縮技術、毒性/移動性降低技術等；依待整治污染物濃度及強度則又可分為污染源整治技術、污染團中心區整治技術、以及污染團邊緣區整治技術等(Siegrist et al., 2001; Siegrist, 2002; Kao et al., 2006; Brar et al., 2006; Kao et al., 2010)。在污染源區域整治方式，主要是應用物理、化學或熱處理方法加強回收或現地破壞之方法包括：油液回收、界面活性劑或共溶劑熱加強回收、蒸氣注入回收、熱加強回收及化學氧化法；在污染團中心區整治方法包括：空氣注入與土壤氣體抽取法、生物復育法、化學氧化法及化學還原法等；污染團邊緣區整治方法則包括：監測式自然衰減法、生物整治法、化學氧化法、化學還原法及透水性反應牆等(Wu et al., 2005; Brar et al., 2006)。

表3.3 土壤與地下水之整治技術 (Hashim, 2011)

生物/生化處理法		
Biological activity in subsurfaces	Enhanced Bioremediation: • Radionuclide immobilization • In situ bio-precipitation • Biological sulfate reduction • In situ As removed by Fe oxides & microorganisms	Biosorption: • Biosurfactants • Metal uptake by organism • Cellulosic materials & agricultural wastes
化學處理法		
Reduction: • Dithionites • H₂S gas • Ion based tech • Zero valence iron (ZVI) • Ferrous salt	Chemical flushing: • Soil washing • Chelate flushing • Ion exchange	In situ
物理化學處理法		
Permeable reactive barriers: • Sorption • Red mud • Activated carbon • Zeolites • Iron sorbents • Precipitation • ZVI • Complexing agents	Adsorption/Absorption/Filtration: • Surfactants • Membrane separation • Synthetic activated carbon • Industrial by-products & wastes • Ferrous materials • Iron-based soil amendments • Mineral products	Electrokinetic treatments



- Atomized slag
- Caustic magnesia
- Biological
- Dithionites & sulfate reduction
- Microbes & ZVI

Pump and Treat technology (P&T)

P&T法是第一個使用於污染地下水整治的復育技術(如圖3.3)，為運用物理方式去除污染物的整治方法，在其物理去除過程中，污染物的物理性質尤為重要，特性的不同會影響到污染物從土壤與地下水轉移到其他介質的過程，而在這些介質中，可以對污染物進行處理及破壞，以此達成場址復育的目的。

將地下水抽取上來後，有許多不同的方法可以進行後續的污染物處理，包括：吸附、氣提法、生物處理法、化學氧化法以及化學沉澱法，皆可用於地下水中污染物的去除，處理過後的乾淨水即可再透過幫浦導回土壤中，亦或排入公共下水道。

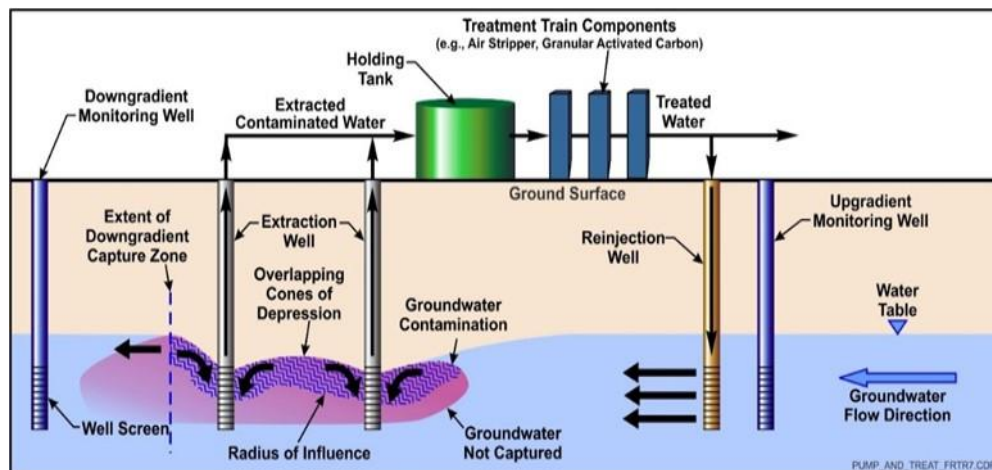


圖3.3 P&T 程序示意圖(FRTR, 2020)

土壤氣體抽取法/空氣注入法

針對土壤不飽和層中高揮發性污染物進行整治，利用真空抽氣之方法使污染物由固相轉變為氣相，並藉由抽氣井造成之負壓使污染物排出，此抽出氣體須經處理後排放至大氣中或注入地表。

空氣注入法是將空氣注入地下水中使其產生氣泡，將水中污染物氣提趕出到不飽和層中，再配合氣體抽取設備(SVE)將氣體抽至地面處理的現地整治技術。而在注入氣體過程中，亦可增加地下水及不飽和層中氧氣濃度，因此能提升污染物之生物降解作用。此一整治技術主要先去除低分子量、高揮發性污染物後，再去除高分子量低揮發性物質。其優勢在於較少廢水處理問題，但其缺點為耗時長，且在操作不佳情況下，氣體分布不均勻可能會造成污染團擴大。

土壤氣體抽除法(Soil Vapor Extraction, SVE)是針對揮發性有機化合物(VOCs)之整治方法，可將污染物從地下水位上方非飽和區的土壤中以氣體形式去除。透過使用真空泵



以抽氣方式使土壤內形成負壓，進而將有機污染物揮發之蒸氣去除。SVE 與抽水處理法相同，需在場址內鑽井，但 SVE 的抽氣井是鑽入土壤內；而不是鑽入地下水層。

為了加速抽氣過程，可使用空氣注入法(Air Sparging, AS) 輔助，AS 可用於去除地下水位以下受污染的土壤與地下水相中的有機揮發化合物，透過使用鼓風機將氣體注入土壤，藉此擾動地下水，幫助 VOC 揮發。

在 SVE 及 AS 同時施作(如圖3.4)，場址內的井數量可從一到數百個不等，端視整治範圍之大小，而被抽取出之有機化合物氣體收集後，透過地上的空氣污染處理設備進行吸附、氧化以及熱處理等方式處置。另外 SVE 及 AS 處理時可能增加土壤及地下水中的氧氣濃度，藉此提高土壤內原有的微生物活性，增加復育效率。

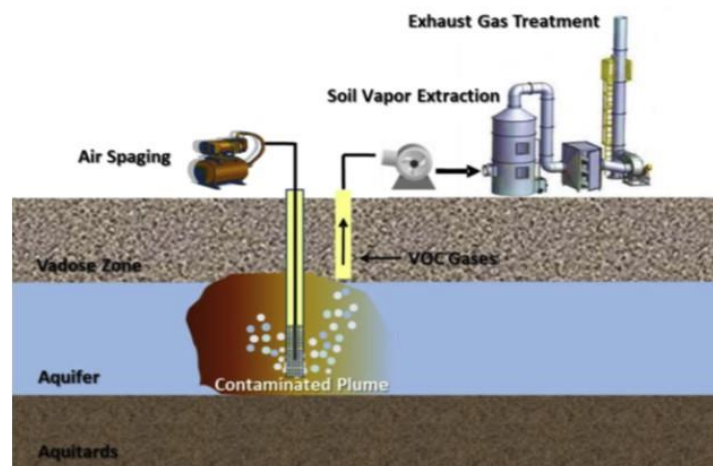


圖3.4 SVE/AS 程序 (Liao, 2018)

現地化學氧化技術(In situ chemical oxidation, ISCO)

在現地分解與破壞污染物，使其可在短時間內削減與降解。其原理將氧化劑送入到地下，以轉換目標污染物，並降低其質量、移動性及/或毒性的方法。因此氧化劑之氧化能力與傳輸能力即是影響整治效率主因。目前應用處理污染物氧化劑包括：芬頓試劑(Fenton)、臭氧(Ozone)、高錳酸鹽(Permanganate)及過硫酸鹽(Persulfate)等。現地化學氧化法的適用範圍非常廣，不論是污染源區或污染團區，均有其潛在應用性，但必須注意注入之劑量，以免對於現地微生物生態造成影響。於現場探勘時，水文地質條件是相當重要的評估因素，此因素常限制化學氧化劑是否能有效與污染團接觸。化學氧化劑不易灌入含大量石油污染物之均質或非均質之低滲透性土壤。現場氧化劑的氧化速率受許多因素影響，包括：溫度、pH 值、污染物濃度、催化劑、副產物、背景水質及有機物等。化學氧化劑若應用於土壤，容易造成有機物與污染物競爭氧化劑情況發生，進而造成氧化劑損失與增加整治費用。不同化學氧化技術適合不同水文地質條件。

化學氧化法可以被用來分解污染物以此來減少污染物在受污染地下水中之濃度，在化學氧化過程中，氧化劑用於污染物的破壞(氧化) 並產生為危害性較小的副產物及最終產物(二氧化碳、水)。化學氧化法可用於不同類型污染物，包括：燃油、溶劑以及殺蟲劑等等，當使用現地化學氧化法進行場址整治時，場址內受污染土壤並不需要挖除，



地下水也不需要抽取，相對的，氧化劑透過污染區及熱區周圍的修復井及注射井注入地下進行污染物氧化，注入的氧化劑會與目標化學物質反應，進而分解。另利用地下水循環增強氧化劑及污染物質的混合，可加速場址整治速度。

透水性反應牆處理法

污染源的下游設立一道垂直於地下水水流方向之溝渠或整治牆、一排垂直式或水平式之整治井、或一個漏斗式集水處理系統，溝渠、整治井、或漏斗式集水處理系統內置反應物質，這些系統統稱被動式整治牆或障壁(如圖3.5)。當污染之地下水流過此透水性之整治牆時，污染物和整治牆內之反應物質發生氧化還原反應而被去除。廣義來說，任何能在現地以被動之方式造成污染物濃度降低之方法均可稱為現地整治牆技術。目前已發展反應性及生物性整治牆技術應用於不同污染物種類及地下水情況。

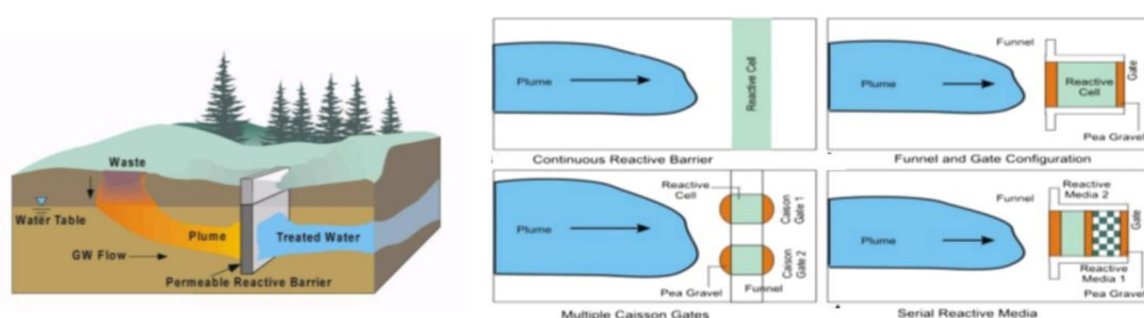


圖3.5 透水性反應牆處理法示意圖(左) (USEPA, 1998)及延伸技術(右) (Hashim, 2011)

被動式透水性反應牆 - 在含水層內安裝透水性反應牆(Permeable Reactive Barrier, PRB)，使受污染地下水被動復育的整治方法，已被廣泛使用(圖3.6)。當受污染地下水通過水利梯度流過含有專門設計用來去除污染物之反應性材料或基質的PRB後，地下水中污染物便會被降解及清除，使得PRB另一側流出乾淨的地下水。此種技術與現行其他地下水整治修復技術(抽水處理法、空氣注入法)相比，PRB系統具有許多優勢，屬現地處理法，不需要將地下水抽出及回注，也不需要地上的水處理設施，所以成本相較低廉。PRB透過不同材料與基質設計，運用吸附、沉澱、化學氧化或生物降解等不同方式降解地下水中污染物，例如：將不同種類的反應性金屬介質，例如零價鐵、零價銅或含亞鐵複合材料安裝在PRB內，以通過化學還原方式整治被氯化溶劑污染的含水層。

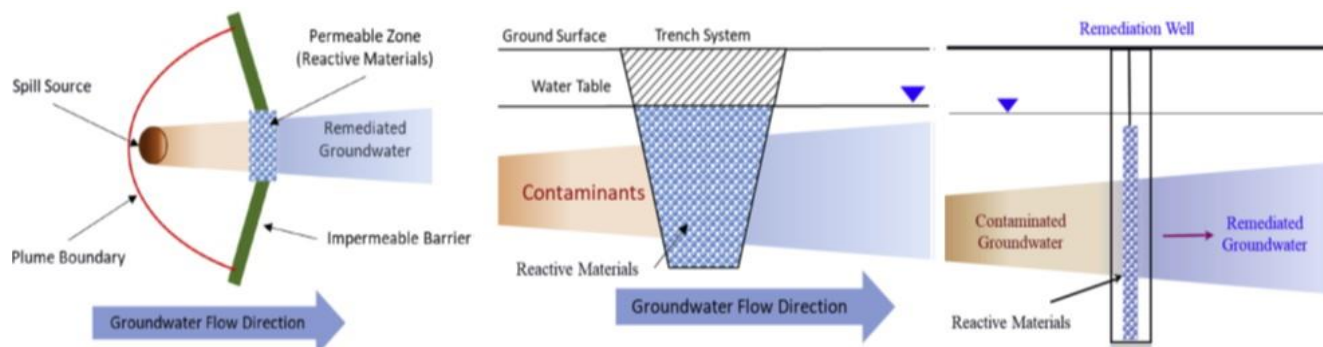


圖3.6 PRB 處理法(左)、填充反應材料之漏斗式PRB(中)及PRB復育井(右) (Deyi, 2019)

生物反應牆 - 有機污染物可自發性發生氧化，形成無害化合物，此過程為自然降解，



而本身被氧化的有機污染物例如：硝酸鹽、氯化試劑，則傾向發生還原反應。土壤地下環境中含有許多不同的電子供體(石油碳氫化合物)及電子受體(氧氣、硝酸鹽、鐵、硫酸鹽)，而不同微生物可以透過這些電子供體與受體進行代謝反應以獲得能量並合成新細胞(硝化反應、脫硝反應、固氮作用等)，而生物反應牆便是運用此種微生物反應進行整治，其牆面通常為多孔表面，並垂直於地下水流向安裝，截面積足以覆蓋污染物，牆內填充的材料可以有效增強現地微生物反應，使生物復育效率提升。生物反應牆可以做為獨立系統單獨施作，也可以與其他整治技術結合使用(如圖3.7)。在設計有效及可行的生物反應牆之前，需對整治場址作詳盡調查，包括：場址的土壤組成及滲透性是否良好，地下水之流速、流向及水力傳導率，另外還有污染物濃度及物理、化學性質。

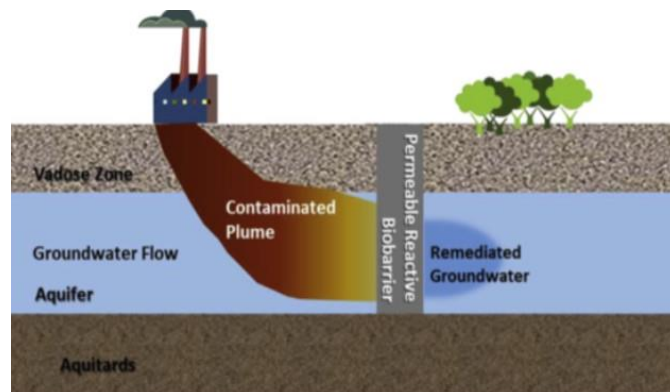


圖3.7 生物反應牆處理法 (Deyi, 2019)

生物復育技術

利用自然界微生物降解現象，再加以改善、強化，使其反應速率更合於工程化的需求，換言之，生物復育是利用微生物將污染場址中的污染物(尤其是有機污染物)予以轉化分解，以控制污染源，並防止污染擴散及降低污染危害的處理程序。

一般生物復育技術分為現地及離地處理，現地生物復育技術較受土壤及地下水整治重視的工法。因為在現地復育期間不需要挖掘土壤或抽除地下水，僅針對施作區域進行曝氣、基質/菌種灌注/植入或其他輔助微生物生長之措施等重複操作步驟，因而可節省大量成本且在污染現場操作即可。生物復育技術本身對環境友好，已被廣泛運用於有機化合物污染的現地整治，將微生物運用於污染物的生物降解，同時可以實現有機污染物的完全礦化，對於可生物降解的有機污染物，例如石油碳氫化合物，生物復育是現地整治的其中一項可行方案。現地生物復育技術的效率可以透過補充微生物營養、通入氧氣或添加其餘活性劑使微生物活性增強，抑或是透過與特定微生物接種混合增強其生物降解的能力，另外當整治場址條件不適合使用生物復育技術時，例如缺乏電子受體、微生物所需養分及可降解污染物之微生物，可以透過人工添加的方式提高整治效率。

運用植物整治復育技術處理重金屬 - 植物復育技術為近年來開發的新興整治技術(如圖3.8)，運用植物的各項特性來進行污染物的去除處理，植物可將污染物吸收，並透過植物生理反應將其轉化或揮發，或是將污染物累積於特定部位，後續再由人工割除處理。植物本身根系也有將污染物固定的功能，另外特定植物根系會分泌化學物質進入土



壤，可將污染物分解。雖然不需要增設額外設備所以成本較低，但是植物復育技術相較其他復育技術所需時間較長，通常運用於偏遠地區的復育整治，另外植物中積累的污染物質也有可能造成二次污染。

非對稱交流電化學(AACE)

通常重金屬在土壤中以陽離子形式存在(例如： Pb^{2+} 、 Cd^{2+})，並透過靜電庫侖力或配位化學鍵結保留在土壤顆粒。而其中復育方法是使用強螯合劑對受污染土壤進行清洗，螯合劑可以從土壤顆粒表面的官能基團將陽離子洗出。但此種方式消耗大量螯合劑，同時洗出後之螯合劑廢水也缺乏有效的處理手段，另外經過螯合劑洗滌後的土壤也會流失過多養分，對後續利用有負面影響。也因此產生另一種方法是運用高表面積吸附劑來降低重金屬陽離子的遷移率及生物有效性，但是此種方式有著吸附容量低以及吸附速度緩慢的缺點，吸附固定後的重金屬也需要長期的監控。對重金屬而言，其最穩定的形式是固體形式，例如電中性金屬或合金，因此最終目標不僅僅是將重金屬與土壤分離，同時還要將重金屬還原成零價金屬態，不僅提高復育能力，收集後的重金屬還有回收再利用的可能性(如圖3.9)。

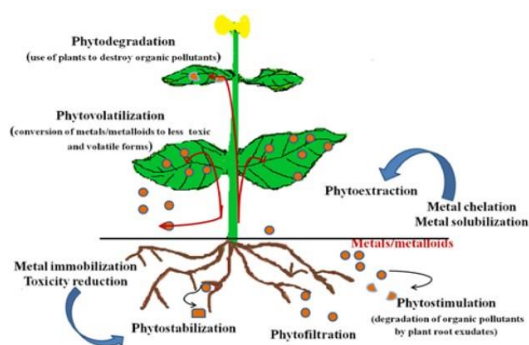


圖3.8 植物整治法，運用植物整治復育土壤中重金屬(Ojuederie, 2017)

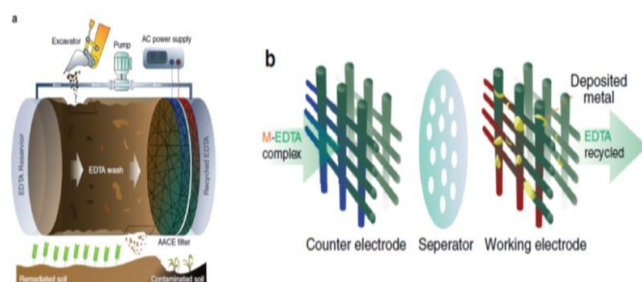


圖3.9(a) AACE 整治復育系統，將 EDTA 溶液再循環以洗滌受污染的土壤，AACE 過濾器從洗滌液中回收重金屬陽離子，並循環 EDTA 溶液以重複使用；(b) AACE 過濾器，由兩個平行的 Ami-PC 電極與一個隔板組成(Xu, 2019)

電動力整治法 - 土壤表面本身帶有電荷，通過施加電壓於土壤中，產生電動力(圖3.10)，使土壤中陰陽離子與液體產生電滲透作用移動至對應電極，再將離子收集後處理，進而達到去除重金屬污染物的效果。電極於陽極可水解產生高濃度氫離子，在氫離子滲透至陰極的過程中可將土壤中重金屬離子溶出，達到移除重金屬效果。電化學是還原重金屬陽離子的最簡便方法，根據還原電位的差異將重金屬與營養源區分收集，目前最先進的電化學復育技術為施加直流電場到土壤上，利用電滲透將重金屬移動，接著使其沉積到負極上，形成零價金屬態(圖3.13)。但此技術為了維持電滲透需要強電場($\sim 100 \text{ V/m}$)，需要施加高直流電壓，另外離子在土壤中的遷移速度低，而且電極處會發生水被電解的情形，造成能量的損失。

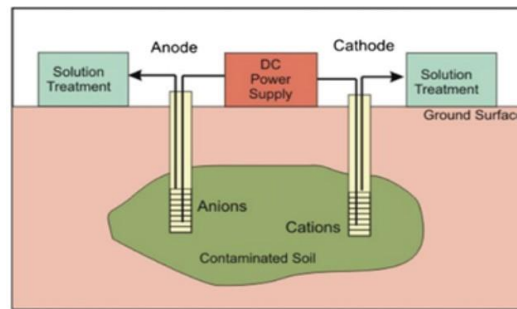


圖3.10 電動力整治法(Hashim, 2011)

緩釋材料(SRM)

地下水復育整治通常是長時間的過程，而在復育過程中，污染物可能會發生向後擴散、反彈以及拖尾的現象，對整治復育十分不利。另外傳統的整治復育技術，例如抽水處理法，通常需要長時間的操作運行，使其對能量的需求巨大，而且對環境也是種負擔。也因此近年來提出了許多的緩釋材料(SRM)來解決上述問題，SRM 的優勢在於其持續性，如此便可以減少氧化劑及各項處理試劑的消耗，同時減少有毒氧化副產物的產生。

SRM 由結合劑與反應材料組成，反應材料可大致區分為三種：(1)用於厭氧微生物活性化之電子供體的碳源；(2)用於有氧微生物活性化之電子受體的氧源以及(3)參與氧化還原反應的氧化劑，而非反應性結合劑則做為緩慢釋放反應性成分的基底。

2019年，Kao 等人提出 SRM 在透水性反應牆(PRB)、生物反應牆以及液體注入系統中的應用，SRM 透過釋放化學氧化劑氧化分解有機污染物的過程(如圖3.11所示)(Kao et al., 2019)，另外，SRM 也已證實可用於 TCE、PCE、BTRX 以及1,2-DCA 等有機污染物的化學氧化處理，在不同污染物的操作條件下，SRM 均可實現100%的去除效率。使用 SRM 作為整治復育技術有許多好處，可減少副產物產生，但是 SRM 目前還缺乏現場整治實績，使其在進入業界使用上還有段距離。

世界各地的許多地方皆在地下水中發現高濃度污染物，也因為難以定位，尤其，屬於自由相及殘留相態之尚未溶解的污染物難以清除，所以首要目標通常為防止污染物進一步的遷移，控制過程必須長期保持，因此以 SRM 控制污染物傳輸以及可長時間清理污染物的特性，成為成本低廉且實用性高的復育整治方法。

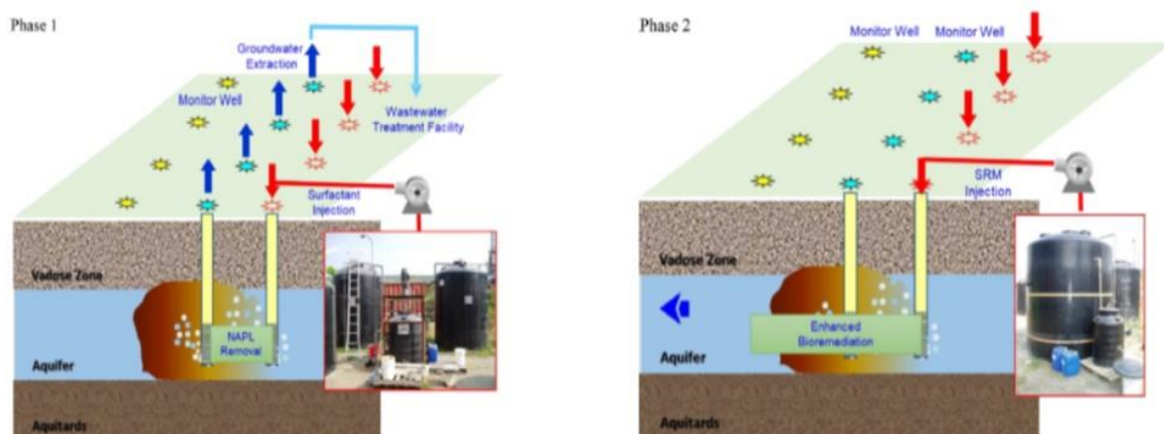


圖3.11 SRM 兩階段處理(Kao et al., 2019)



奈米零價鐵(Nanoscale zero-valent iron)

零價鐵可作為還原劑，將重金屬離子還原成金屬態，再將金屬回收，處理重金屬污染；也可提供給電子給有機物，而將之降解，尤其，奈米大小之核殼形狀可增加反應面積，將電子直接傳遞給污染物，適用於許多含氯有機物例如：氯化鉀烷類、三鹵甲烷類、氯化苯類、氯化乙烯類、農藥、戴奧辛、重金屬離子等，而且奈米零價鐵反應後產物為氧化型態的鐵，不會造成環境二次污染也毋須回收(詳圖3.12)。

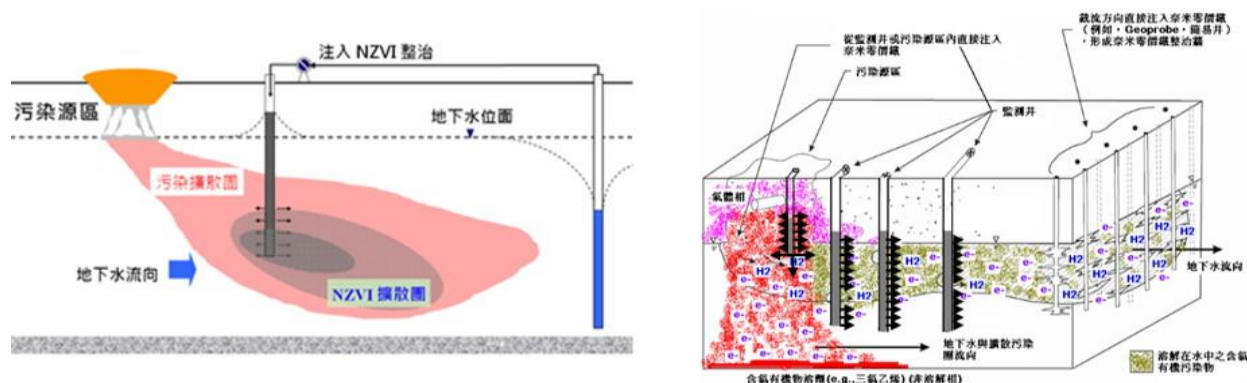


圖3.12 奈米零價鐵(NZVI)反應途徑 (連興隆，2004)

生物碳之應用可持續性處理受污染土壤及地下水

工業革命後，大量燃燒化石學燃料及森林無節制的砍伐，再加上其他資源的過度濫用，使大氣中CO₂濃度不斷攀升，導致氣候異常變化(Edenhofer, 2015)，例如：全球溫度上升、海平面上升、極端氣候增加以及沙漠面積擴大(Lu et al., 2007)，為減少異常氣候，全球對於碳捕獲以及封存(CCS)十分關注，自2006年開始，生物碳技術便被認為是極具前景的技術(Lehmann et al., 2006)，不僅可以儲存碳，並在廢棄物再生利用、能源產生以及土壤改良方面皆具有許多優勢。

生物碳可使用農業、家庭與工業廢物(例如：農作物殘留物、食物殘渣、肥料、污泥等)作為原料(Ronsse et al., 2013)，此廢棄物再利用方式使得碳足跡大幅減少，而且熱解過程中產生的副產物(燃氣與生物油)可以作為綠色能源，可抵消與生產生物碳之能源使用(Lehmann and Environment, 2007)，生物碳可以將污染物固定在土壤中，從而降低污染物對人體的暴露風險(Cao et al., 2011)。另外，生物碳可幫助土壤保留營養源，提高土壤的保留能力與自我復原力，有助於受污染土地的綠化與植被恢復(Beesley et al., 2011)，生物碳本身可在土壤中長期存在數百年以上，不會再加入碳循環 (Lehmann and Environment, 2007)。因此生物碳的應用被認為是對環境友善且可長期維持的復育技術。

如圖3.13所示，生物碳對有機污染物的吸附由多個機制控制，分配機制是指污染物分子在水相與固相之間的分配情形，孔洞填充是吸附物被傳輸至吸附位置的過程，但分配機制與吸附卻又不同。三種主要的吸附機制是 π - π 電子供給與接受體(π - π EDA)的相互作用、疏水或冷凝作用以及氫鍵的作用力。目前生物碳在土壤整治復育中主要應用於現地整治，且被認為其在透水性反應牆(PRB)以及植物整治復育技術的結合運用有較大潛力。土壤整治復育的目的在於控制、改變或破壞有著不可接受風險的污染物，根據來源



-途徑-受體模型(Lynch and Moffat, 2005)，大致可以透過三種形式，實現土壤整治復育：(1) 隔離或去除污染源，(2) 阻斷或管控傳輸途徑，(3) 保護受體或減少暴露程度。而大部分處理技術都集中在(1)及(2)途徑。

污染物可分為有機污染物與無機污染物，可透過熱、化學或微生物整治復育技術整治，但重金屬類污染物無法在土壤中降解，反而可在土壤中長期存在(Zhang et al., 2013b)。因此添加土壤改良劑，使滲透性與生物有效性降低，從而將重金屬固定，此為封鎖傳輸途徑的整治復育方法(Wang et al., 2014; Zhang et al., 2013b)。由於生物碳本身特性有利於陽離子交換，靜電吸附，表面結合與沉澱，在固定重金屬具相當高的能力，故生物碳可作為土壤改良劑，應用於受污染土壤，以固定重金屬並降低其環境風險。

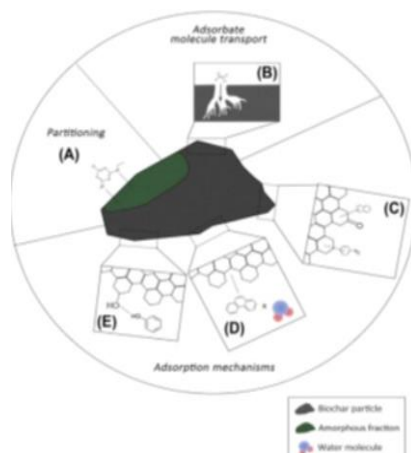


圖3.13生物碳吸附有機污染物之吸附過程：(a) 分配到非晶相、(b) 在孔洞中擴散、(c) PEP 及 EDA 互相反應、(d) 疏水作用、及(e) 氫鍵作用力(Wang et al., 2014)

國內場址整治現況

目前場址污染物主要是含氯有機物及重金屬(土壤及地下水污染整治網, 2019)；而在整治技術與工法方面，則相對注重物化與生物整治技術及搭配即時偵測技術之整合；在發展藥劑方向較著重新興污染物之新型氧化劑、界面活性劑及奈米零價鐵，尤其考量這些添加劑之再利用性以及環境友善性。技術發展方向亦以加強能適用於各種處理環境或市場特性，使技術的發展與運用得以完備。並藉研發與改良技術以適應本國環境特性，多年下來經驗的累積已經為地下水與土壤整治技術之開發與應用奠定雄厚的基礎。

圖3.14(a)為科技部與環保署計畫近年來之目標污染物類別，主要包括：有機物(78%)及重金屬(22%)，其中，有機物又以含氯有機物最具代表性(~59%)。整治技術則以物化(81%)及生物處理(19%)為主。圖3.14(b)則為近年環保署的學研計畫比例，其中重金屬與有機物的比例約為1：4，與科技部計畫相似。有機物處理技術之比例分佈如圖3.15，以物化(47%)與生物(42%)方法為主；而其餘11%係物化與生物整合技術。(中華民國環境工程學會電子報, 2015)

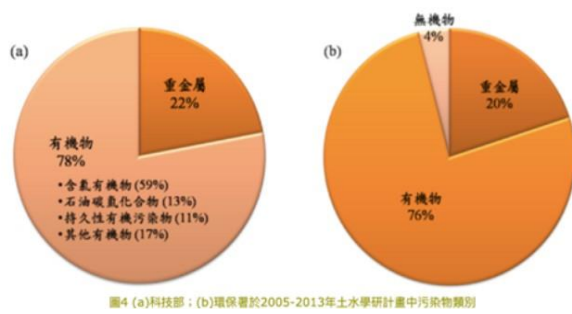


圖3.14 (a) 科技部土水學研計畫與(b) 環保署土水學研計畫之污染類別(中華民國環境工程學會電子報, 2015)

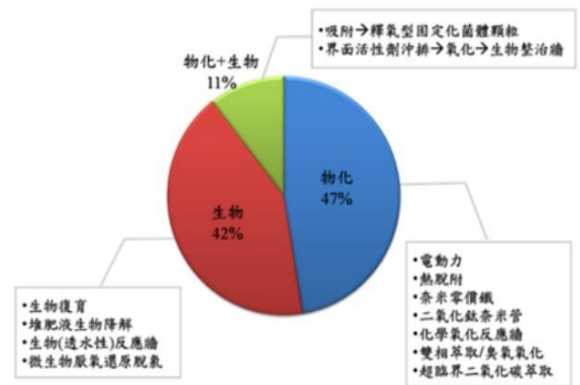


圖3.15 環保署學研計畫中有機物處理技術(中華民國環境工程學會電子報, 2015)

我國污染場址委由專業調查整治技術人員進行調查，根據場址不同的污染狀況與地質水文狀況選擇處理技術，通常採行不同的目標處理階段，並搭配多種工法實施，以達成整治目標。整治前，需與業者充分溝通，先做現場評估，並提供過去相關改善成功的案例作為參考，在確切掌握多方資訊後才決定整治工法。當要開始進行土壤調查工作之前，需先確定檢測目的、檢測項目、精密度、準確度及檢測結果用途，其次規劃取樣地點，相關位置圖及取樣時間與頻率。選擇適當檢測方法，評估精確度並規劃品保及品管步驟。實務上常用佈點方式為網格法與環境場址評估法，如調查發現污染後，可在實施細部調查，釐清污染範圍及程度後，再依場址現況評估選擇合適之整治技術進行整治。

地下水污染整治工作首要任務是先進行污染場址的「場址特徵」調查。場址特徵包含：地下水的流動特性、地下水的流速、流量、及影響地下水流動的參數、含水層的地質特徵、地質構造、水文質地等特徵。藉由場址特徵調查可以收集相關資料，並藉由這些一手資訊以建立污染整治的「概念模式」，進行整治工作的設計、預估、規劃。因此場址特徵調查工作越詳盡，所得資料越豐富，所建立概念模式將更貼近真實的污染狀況而使整治工作更加順利。

污染土壤現行的復育技術可分為兩類：現地處理(*in-situ treatment*)，直接於受污染的土壤或地下水進行處理；另一種則為非現地處理(*ex-situ or off-site treatment*)，將受污染的土壤或地下水搬離原來的場所到其他地方進行處理。現地處理工法包含以下幾種：土壤淋洗、土壤氣體抽除、現地化學氧化以及生物復育等。非現地處理則含：土壤清洗、加熱處理、熱脫附法以及固化/穩定化法。但基於場址的複雜程度不同，因此許多整治技術可同時適用於現地與非現地處理，通常非現地處理，因已移出至地表，故地下水文地質複雜等因素幾可完全排除。值得注意的是，國內土壤及地下水受重金屬污染程度十分嚴重，整治技術包括：

- 反轉耕(翻土法)：將底層乾淨的土壤與表層受污染的土壤轉換對調，藉以稀釋土壤中污染物質的濃度；



- 客土法：可區分為上層客土法與排土客土法，前者在污染的土壤上復蓋上乾淨的土壤；後者是將受污染的土壤全部挖除，並換上乾淨的土壤；
- 施用土壤改良劑：添加化學物質可降低土壤中重金屬的活性，常用的藥劑有石灰，硫化物，硫酸鹽，磷酸鹽等。加入石灰可改變土壤的 pH 值使大部分重金屬行成氫氧化物化的沉澱。在通氣不良或是水分含量較高的土壤中，添加硫化物或硫酸鹽可使部分重金屬產生硫化物沉澱，降低污染物的遷移和植物吸收；
- 生物去除法：利用花卉，蕨類，觀賞草類等植物的強力吸收性，種植在重金屬污染的土地上，藉以清除污染物質，土壤中水分的含量可控制其氧化還原狀態，掌握重金屬在土壤中的行為；
- 預防重金屬進入土壤中：加強水污染、空氣污染以及廢棄物的管理，避免污染物質再次進入土壤，造成污染範圍擴大。

3.4 去離子關鍵技術及應用實績

電容去離子(CDI)技術

地下水體受重金屬污染造成生態破壞，間接危害人體健康，大多數金屬離子不可生物降解，且易在水體系統移動。若飲用、養殖或農作物灌溉受污染之地下水體，可能導致身體器官組織失調而引起疾病。電容去離子(capacitive deionization (CDI))為低成本、操作簡單去除水中重金屬離子之淨水技術，透過低電壓在電極塗佈之高表面積、孔洞碳材表面產生之電雙層，將水中陰陽離子電吸附(electrosorption)，可有效去除水中帶電離子，使去離子水回收、再利用(如圖3.16)，Bharath 等人指出鉻濃度約50 mg/L，鉻離子去除效率可達98% (如圖3.17所示)(Bharath et al., 2019)。CDI 電吸附飽和後，只需透過逆或零電壓，即可脫附、富集及濃縮(至少千倍($<1/1000$))水中陰陽離子。由於 CDI 操作未添加化學藥劑而無傳統廢水處理衍生污泥需再處理問題，此種低耗能($0.1\sim0.6 \text{ kWh/m}^3$)CDI 技術應用於地下水整治，確可達到綠色及永續整治目標。

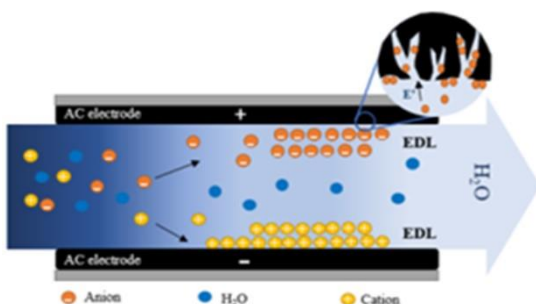


圖3.16 電容去離子(CDI)電吸附原理
(our data)

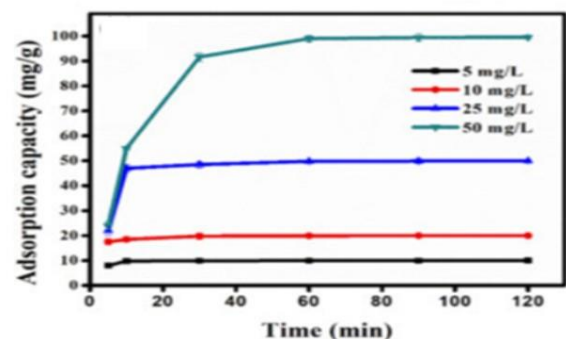


圖3.17 以 CDI 去除水中不同 pH 值之鉻離子(Bharath et al., 2019)

CDI 電極 - CDI 電極以高表面積、多孔碳材為主，依據電雙層原理，電容大小取決於電極之比表面積，也影響 CDI 之電吸附效率。活性碳(AC)之孔洞可分為3種型式(如圖



3.18) (Porada et al., 2012)：大孔(> 50 nm)、中孔(2~50 nm)及小孔(< 2 nm)，大孔洞雖可提供較佳傳輸路徑，但比表面積較小；小孔洞影響離子傳輸速率，因此選擇大小適當之孔洞是關鍵，也需考慮多孔洞碳材之內部孔隙，若內部皆為封閉之孔洞，可能降低去離子效率，碳材表面性質也可能影響電吸附量，例如：碳材表面親(疏)水性的官能基可能影響水溶液中離子吸附效率，透過官能基改質，可提高親水性與電吸附效率。

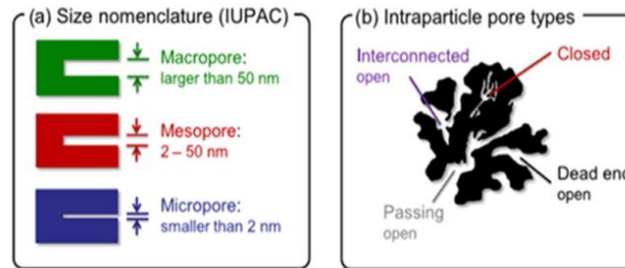


圖3.18 活性碳孔洞及內孔隙之分類 (Porada et al., 2012)

碳材電極之電化學特性亦相當重要，需有良好電化學特性，才可在充放電時，更穩定且能延長電極使用壽命。最常使用循環伏安法，利用充放電可知電極之電化學特性。進一步可計算出電容量，電容量越高代表電吸附之電荷離子可愈多(圖3.19)。電化學試驗亦使用 EIS 觀測電極之電子阻抗，從高頻與低頻處，可得知電極表面至溶液間之阻抗情況(圖3.20)。阻抗越小，電子傳遞越快，電吸附效率亦能提高。

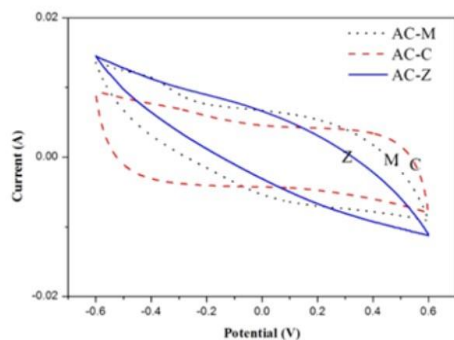


圖3.19 CDI 活性碳與石墨烯電極之循環伏安曲線 (our data)

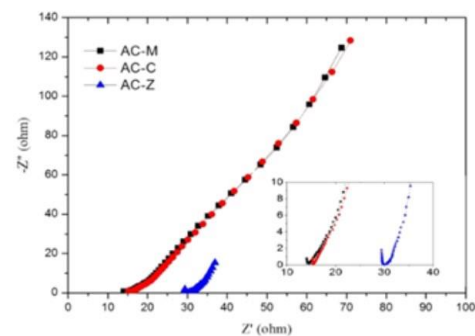


圖3.20 CDI 活性碳電極之 EIS (our data)

CDI 電吸附反應動力 - 溶液中之離子被電吸附於電極表面上達到平衡，可由 Langmuir isotherm ($q = q_m K_L C / (1 + K_L C)$) 與 Freundlich isotherm ($q = K_F C^{1/n}$) 兩種模式以驗證電吸附離子之實驗數據。其中：C 為平衡之濃度(mg/L)；q 為電極平衡時之離子吸附量(mg/g)； q_m 為其最大之吸附量； K_L 為吸附熱之常數； K_F 為電極吸附能力之常數； $1/n$ 為異質性係數。吸附動力模式含兩種吸附模式，分別為一階動力吸附模式(Lagergren's pseudo-first-order model) ($\log(q_e - q) = \log q_e - (K_1 t / 2.303)$) 及二階動力吸附模式(pseudo-second-order kinetic model) ($t/q = ((1/K_2 q_e^2) + (t/q_e))$)，其中， q_e 與 q 為平衡時欲吸附之離子量(mg/g)；t 為時間(min)； K_1 (min⁻¹) 及 K_2 (g/mg min) 分別為一階及二階之反應速率常數(Nordstrand et al., 2019)。



CDI 離子吸附量(SAC)與去除效率 - SAC 有兩種計算方式：第一種以循環伏安法計算可得電極之電容值(capacitance (C))(圖3.21)，將計算電容值(C)與操作之電位(E)帶入公式($q=CE$)，即可獲吸附離子量(q)，又稱為理想吸附量；另一種以去除離子總量(W (mg))帶入公式($SAC=W/WAC$)，所獲得之離子吸附量(圖3.22)， WAC 為活性碳使用量(g)。CDI 去除率(R (%))指初始濃度(C_0) (mg/L)與電吸附後濃度(C_t)之差與 C_0 之百分比(R (%))= $((C_0-C_t)/C_0)100\%$ 。

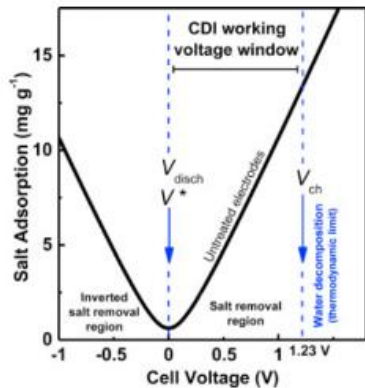


圖3.21 CDI 之離子吸附量(SAC) (Gao et al., 2016)

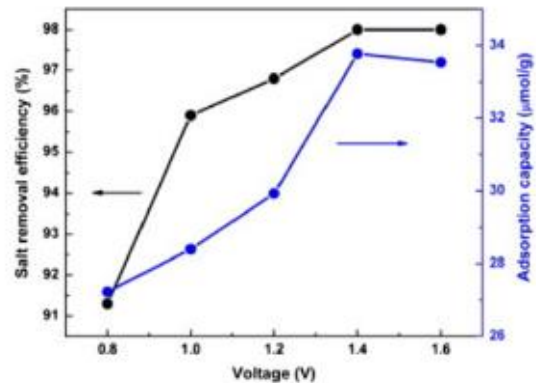


圖3.22 CDI 之去除效率(%) (Li et al., 2011)

CDI 反應器設計 - CDI 反應器已有多種設計，圖3.23指出 CDI 電吸附水中陰陽離子之各種裝置設計(Xing et al., 2020)，最常使用為流經式(FbCDI)或稱平板式及穿透式(FtCDI)，FbCDI 之電吸附與再生可採用反覆式流體逆向操作；FtCDI 則較有彈性應用，垂直方向分別進行電吸附與再生，可利用碳布等可穿透式電極增加反應面積，但電極材料改質相對不易。因此，常以基底生長氧化金屬物或官能基改質等方式改質；反之，平板式電極材料相對易製備，將多孔碳材塗佈至導電板(例如：碳板、鈦板、及不鏽鋼板)，即可組裝成一對 CDI 電極組。其他 CDI 裝置設計大多在平板式電極對之間，另增加陰陽離子選擇性薄膜(membranes)，以減少共離子效應(co-ion effect)。

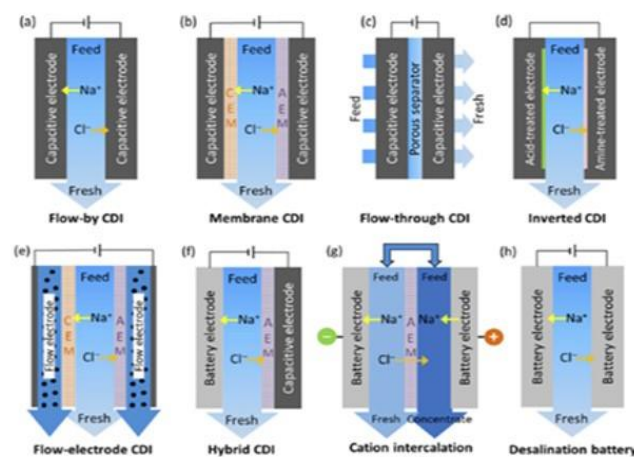


圖3.23 CDI 裝置結構分為: (a) 流經式 (FbCDI)、(b) 薄膜式 (MCDI)、(c) 穿透式 (FtCDI)、(d) 倒置式 (iCDI)、(e) 流動式 (FCDI)、(f) 混合式 (hCDI)、(g) 嵌合式、及(h) 脫鹽電池式 CDI (Xing et al., 2020)



FbCDI是最常見與廣泛使用之 CDI 反應器設計，將多孔碳材塗佈在電極板上，將一對電極板以2 mm 間距組裝起來，透過低電壓產生電雙層，將水中帶電離子吸附至電極表面，以獲去離子水。FtCDI 是選擇多孔及透水之碳材電極，電極與水流動之方向呈垂直，鹽水流透碳電極後，水與多孔碳表面充分接觸，使吸附效果提高，由於 FtCDI 可充分與 AC 電極接觸，所以脫鹽效率相較高。MCDI 利用多孔電極表面插入陰陽離子交換膜，在通過電壓情況下，相對離子可通過交換膜，被吸附至電雙層，將兩個帶相反電荷的膜電極組件分開，使離子流經交換膜時因電位差而移動，並存儲在多孔電極的孔洞中，而流出水為去離子水。再生時，可通過移除電位或施加逆電壓，將捕捉之離子釋放回溶液中，獲得高濃度之鹽水。由於陰陽離子交換膜可限制離子進出，使 CDI 電極表面電荷使用率達到最高效益，減少共離子效應，應而提升脫鹽效率。我們另開發一種新穎低成本高效之離子選擇層 Sulfonated Graphene Oxide (SGO)包夾活性碳(AC)成為 AC@SGO 電極(如圖3.24所示)，具高比電吸附量及穩定性，可篩選特定離子，並加速傳輸能力，有效降低同離子效應的發生，大幅提升效率。

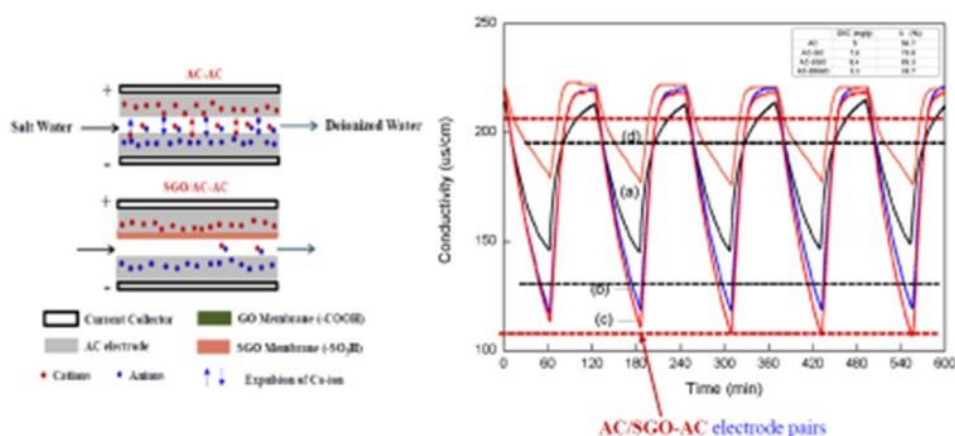


圖3.24 SGO 薄膜應用於 CDI 電極與 AC@SGO 之去離子效率(our data)

新穎流體電容去離子(FdCDI)技術

為提升電吸附效率，我們另開發一種新穎流體電容去離子(FdCDI)技術(如圖3.25之 FdCDI)，在高表面積、多孔洞碳固定電極間填充多孔洞碳材流體電極，延伸電極之電吸附效應，可應用及施作於含重金屬污染之無機廢水(液)或海水脫鹽(seawater desalination)之去離子水及金屬離子之分離與回收，因無添加化學藥劑而不衍生污泥，實現金屬離子與去離子水的回收與再利用之永續目標。FdCDI 以流體電極擴增電雙層量，增加電吸附之效率，減少反應器體積，並且透過電吸附水中離子，使獲得低導電度水；被電吸附之離子可在飽和後，調整為零電壓或施加反電壓(例如：-1.2 V)以加速離子脫附，而可富集與回收離子。從累積之實驗數據，可獲得 FdCDI 效率與離子強度(左)與電荷密度(右)之共通關係(predictable correlations)，以預估目標離子之去除效率(如圖3.26)。FdCDI 應用範圍相當廣泛，可分離/去除或富集/回收廢水(例如：電鍍廢水(液))、受重金屬污染地下水等金屬離子(例如：鉻、鎳、銅、銀、鈷、及稀貴金屬等)，甚至應用於海水脫鹽，



尤其，具不添加任何化學藥劑(綠色製程)而不衍生污泥)、設備體積小/低成本、自動化設計不須操作人員、低維修頻率/降低營運成本等優勢，適合受污染地下水與無機廢水(液)之有價金屬及去離子水回收、再利用。圖3.27為我們設計及組裝之低成本全自動FdCDI設備(0.2 T/h)，可應用於整治與回收處理無機廢水(液)中有價金屬及受污染地下水之現地(on-site)循環回收再利用，而成為綠色、清潔製程。

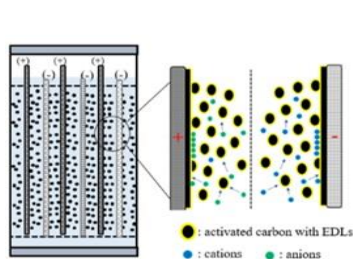


圖3.25 FdCDI 電極設計(our data)

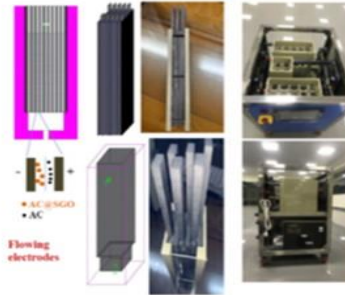


圖3.27 FdCDI 之流體電極模組、電吸附/再生組合(24x10組)與自動化設備(0.2 T/h) (外觀大小：60 cm x 60 cm x 70 cm) (our data)

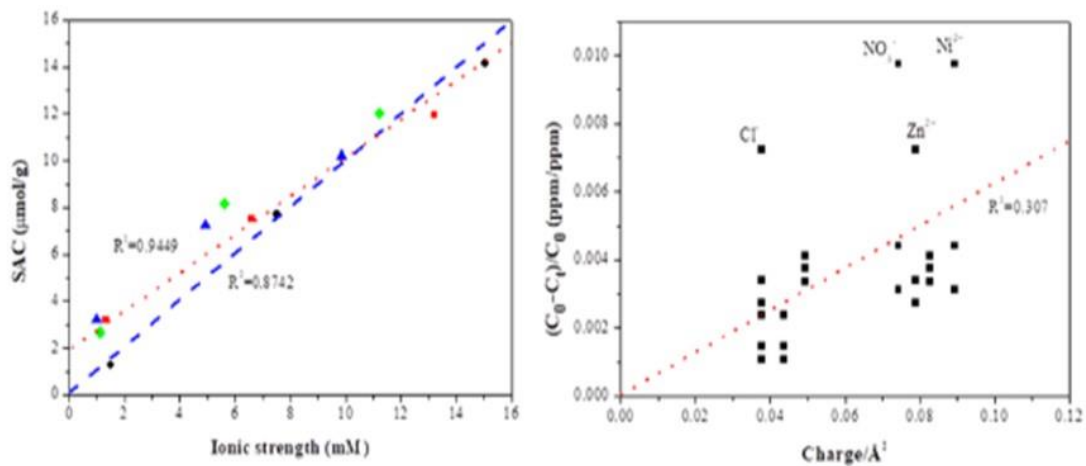


圖3.26 FdCDI 效率與離子強度(左)與電荷密度(右)之關係 (our data)

CDI 之應用實例

在2016~2020年，土基會曾補助研究型計畫中，台大侯嘉洪教授曾以 CDI 技術模組處理含砷水樣(圖3.28)，以改質生物炭作為 CDI 電極材料，達到良好去除砷之效率。砷在水中大多以無機砷為主要物種，型態根據環境之氧化還原電位與 pH 值影響，砷酸鹽具有劇毒性，在地下水中會危害環境與生態。

由於氰化物具高毒性，使含氰電鍍廢液難以處理，採用傳統沉澱法又產生含氰污泥，處理成本昂貴。我們曾使用 CDI 處理電鍍廢水中之氰化物，使出流水達到排放標準，也可回收貴重與有價金屬離子。

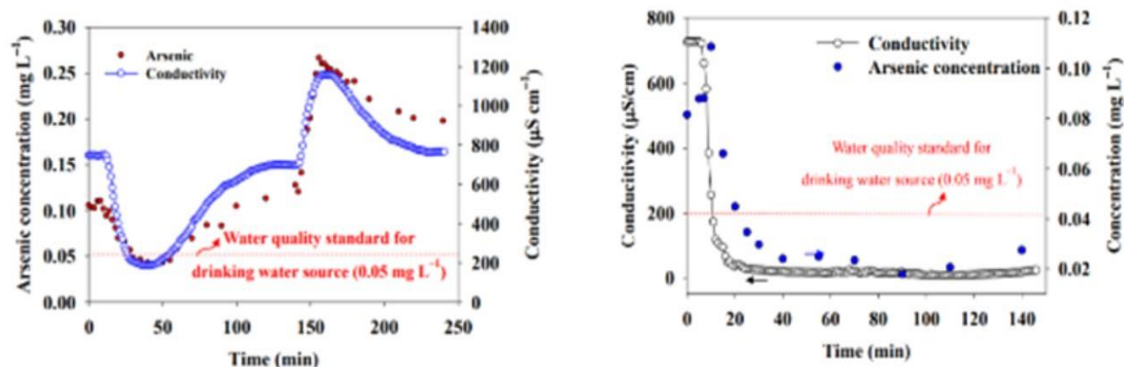


圖3.28 CDI 技術處理實場含砷水樣 (2016年土基會期末報告)

我們曾以新穎性 FdCDI 應用於不同種電鍍廢水(酸性(含銅)、鹼性(含鋅)廢水)，高濃度之電鍍廢液可於1 h內去除鋅與銅效率分別高達90與50%以上，並已開發完成低成本全自動電鍍廢水之有價金屬回收及水再利用設備設計、建造、與示範(107.12.13~15) (12 T/D)(適合小型電鍍廢水廠之廢水資源化處理)。

以相同概念，開發全自動廢鋰電池之有價金屬回收設備及攜帶式個人淨水飲管及家用飲水壺(Life straw/Kettle)，其中有價金屬包含：鋰、鈹、鈮、鉭、稀土、鍺、鎵、銦、金、銀、及鉑族金屬等，我國稀土金屬需求量高居全球第4位，我們也以 FdCDI 技術將電子廢棄物(E-waste)衍生無機廢水中回收有價金屬離子。運用低成本、高效率、全循環回收之新穎 FdCDI 技術，協助解決無機廢水處理衍生污泥問題，提升產業競爭力。

光驅動還原金屬離子技術

FdCDI 可將含電荷之離子、分子或分子團等從地下水中分離與富集，併同去離子水之回收再利用，需進一步純化、還原金屬離子。透過將 FdCDI 併同光催化技術，得以將金屬離子還原。另以太陽能驅動光電催化(Photoelectrocatalysis (PEC))氧化有機污染物及提供電力供給 FdCDI，電吸附與富集回收地下水中的金屬離子，再以太陽能驅動 PEC 還原，而實現金屬純化回收。本創新技術程序簡易，易自動化設計，尤其使用綠色能源(太陽能驅動)，又不添加化學藥劑、無二次污染及污泥產生，技術優勢包括：(1)有效調控地下水中離子與太陽能驅動 e^- 與 h^+ 之傳輸，富集金屬及產生綠電提供製程需求、(2)易自動化操作設計與低維護需求、(3)低成本、(4)環境友善(不需添加化學藥劑)、及(5)可彈性增減處理能力，成為可創造高經濟效益與便利性之綠色技術。

FdCDI 地下水整治應用

地下水整治通常耗時費工，本新技術所提出之方法已有實務處理重金屬濃度相對較高之電鍍廢水之經驗，尤其，地下水之污染重金屬濃度較低，預期比較容易適用，本 FdCDI 富集回收之濃縮重(毒性)金屬將以新建立之光驅動選擇性(或傳統電解法)予以還原，而無中間與最終處置需求。因此，本計畫目標將建立一套可自動化、可遠端遙控之重金屬污染之地下水整治技術、設備及其示範，以作為其他污染場址整治參考。

根據環保署土壤及地下水整治網之場址查詢，目前台灣重金屬污染場址，共計28



處。其中14家為控制場址，北部8家，中部2家皆為工廠，南部4家，其中3家為工廠，1家為非法棄置場址。

本模場試驗專案之現地整治測試與示範場址位於嘉義市新明利五金加工廠，公告超過地下水污染管制標準之污染物：鉻(1.28 mg/L)；氟鹽(15.9 mg/L)；鋅(114 mg/L)；鎳(4.17 mg/L)。重金屬與氟鹽污染物常以現地或離地的化學方法處理，但可能造成環境其他污染問題，因此，在本計畫中，新流體電容去離子(FdCDI)法之自動化設備，使用微小電壓電吸附(electrosorption)重金屬與負離子，使去離子水回收再利用；飽和吸附後，施以零或反向電壓，使離子脫附、富集(濃縮至少千倍(1/1000))，再以新建立之光驅動選擇性(或傳統電解法)予以還原，無中間與最終處置需求，尤其，整治過程，未添加任何化學藥劑，而無衍生污泥需再處理，屬綠色及永續整治技術。



四、研究方法與過程（含工作進度甘特圖）

以 FdCDI 技術整治重金屬污染之地下水之測試及驗證，期以耗能小、無添加化學藥劑、無衍生汙泥、體積小、自動化設備進行現地整治作業。本模場試驗專案重點工作包括：(1)污染場址地下水檢測、(2)自動化 FdCDI 模組設備之設計與組裝、(3)模擬污染場址地下水之實驗室級 FdCDI (含電解分離回收毒性金屬(鋅、鉻)測試、及(4) FdCDI 設備之現地整治工程可行性研究(含單元、連續及自動化操作與經濟效益評估)等項目，圖4.1顯示整治作業流程，計畫執行之項目及期程則詳工作進度甘特圖(表4.1)，各階段作業內容分述如下：

(1) 污染場址地下水檢測：

- 地下水採樣分析 - 毒性金屬、氟鹽與其他陰陽離子濃度分析、EC 及 pH 值等。

(2) 自動化 FdCDI 模組設備之設計與組裝

- 模組設計及組裝 - 包括：人機、控制模組、電磁閥、管路、供電系統及電極組等。
- 串並聯配置模式建立 - 以 6 個電極組為操作單元，建立 4 種串、並聯模式，提供不同濃度及流量之操作需求。
- 自動化模組建置 - 建立電吸附、再生及濃縮液自動化操作模式。
- 遠端監控模組建置 - 建置手機連網系統，達成即時數據顯示及現場影像監測等功能。

(3) 模擬污染場址地下水之實驗室級 FdCDI (含電解分離回收毒性金屬(鋅、鉻)測試

- 以 Na^+ 、 Fe^{3+} 、 Zn^{2+} 、 Cr^{3+} 、 Ni^{2+} 、 F^- 等離子為測試對象。

(4) FdCDI 設備之現地整治工程可行性研究(含單元、連續及自動化操作與經濟效益評估)

- 現地管線工程設計與建置 - 配合 FdCDI 及迴流工作槽之設置地點，將 MW03 及 MW05 地下水汲取至迴流工作槽。
- 現地整治採樣分析項目與頻率 - 試驗場址地下水採樣分析(MW03 及 MW05)及現地測試各單元(前處理、FdCDI、電解分離等單元)效率評估，分析項目包括：重金屬、氟鹽及其他陰陽離子濃度與 EC 及 pH 值等。
- 前處理單元測試 - 以濾心(5 μm)及濾材進行前處理。
- 電解分離測試 - 針對電容去離設備所富集之離子濃縮液，採電解程序分離



重金屬離子(如： Zn^{2+} 、 Ni^{2+} 等)及地殼元素離子(如： Ca^{2+} 、 Fe^{3+} 等)，含地殼元素離子水可返注。

- **測試及驗證成果**- 於現場進行單元、連續及自動化測試及驗證。
- **工程經濟效益評估**- 分析現地整治測試數據，評估設備及操作成本(含人力及耗材與現地配管工程，進行經濟效益評估)。

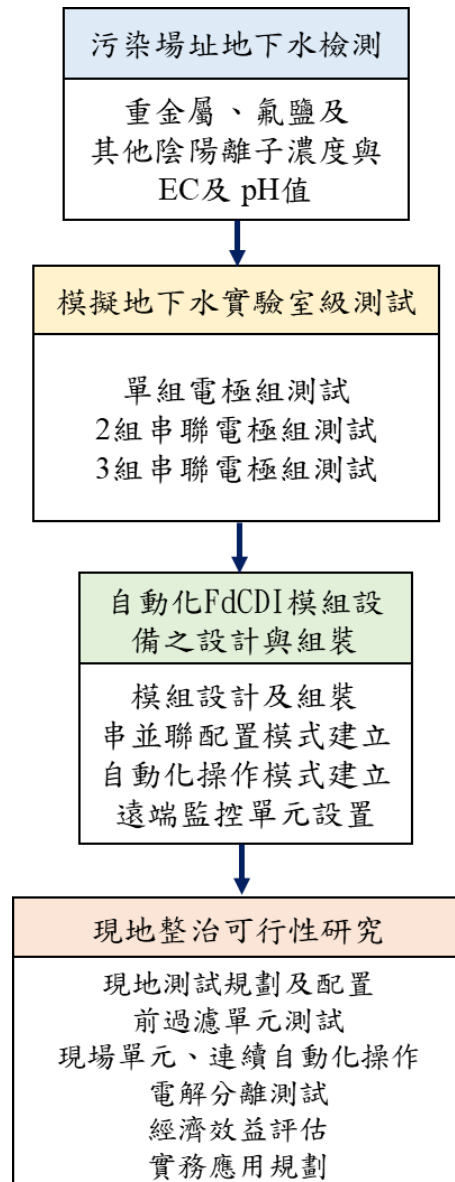


圖4.1 整治作業流程



表 4.1 研究進度及預期完成之工作項目

工作項目	年月	110年										111年		備註
	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2		
場址現況調查		—												
採樣分析		—	—											
實驗室 FdCDI 測試			—	—	—	※ ₍₁₎								
自動化模式建立					—	—								
組裝 FdCDI 設備與測試						—	—	—	※ ₍₂₎					
現地管線工程設計與施工									—	—				
現地整治測試及驗證									—	—	※ ₍₃₎			
成本效益分析										—	—	※ ₍₄₎		
實務應用規劃											—	—		
期中報告							—	—						
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 %	95 %	100 %	
預定查核點	期中	(1)完成實驗室級 FdCDI 測試；(2) 完成 FdCDI 設備建置；												
	期末	(3) 完成現地整治測試及驗證；(4) 完成成本效益分析。												
說明：														
1、 工作項目請視專案性質及需要自行訂定。預定進度以粗線表示其起迄日期。														
2、 「工作進度百分比」欄係為配合管考作業所需，累積百分比請視工作性質就以下因素擇一估計訂定：(1) 工作天數，(2) 經費之分配，(3) 工作量之比重，(4) 擬達成目標之具體數字。														
3、 「預定查核點」，請在條形圖上標明※符號，並在「預定查核點」欄具體註明關鍵性工作要項。														



現地整治場址環境資料

現地整治場址為金屬製品製造業，從事五金零件電鍍業務，主要製程為將五金零件經脫脂及水洗程序，進行電鍍(鋅、鉻)製程，再經水洗及烘乾後出貨。本模場試驗專案整治對象為重金屬污染場址(電鍍廠)地下水，與元新環境科技股份有限公司及睿元奈米環境科技股份有限公司合作進行現地整治示範，場址資料：(1)場址名稱：新明利五金加工廠(為土壤及地下水污染控制場址)；(2)場址地址：嘉義市後湖里保順路150號(位置如圖4.2所示)；(3)場址面積：共605平方公尺；(4)污染情形：如表4.2所示；(5)污染體積：地下水700 m³；(6)汲取地下水監測井：MW03、MW05(如圖4.3所示)。



圖4.2 現地整治場址位置

表4.2 現地整治場址之公告超過第二類地下水污染管制標準之污染物

污染物	最高濃度(mg/L)	管制值(mg/L)
鎳	4.17	1.0
鋅	114	50
鉻	1.28	0.5
氟鹽	15.9	8

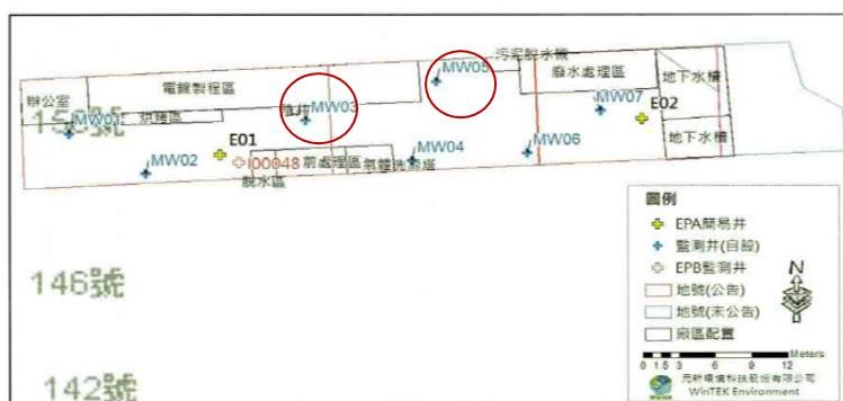


圖4.3 現地整治場址之監測井(MW03、MW05 (紅色圈內))

資料來源：新明利五金加工廠土壤及地下水污染控制計畫書(修正二版)，2020。

地質土壤 - 本現地整治場址之監測井土壤地質剖面圖(詳圖4.4)顯示地表下2~4公尺以粉土為主，地表下4~8公尺以黏土質砂為主，地表下8~9.5公尺為粉土質砂，地表下9.5公尺則以粗砂為主(各監測井土壤性質詳表4.3)。

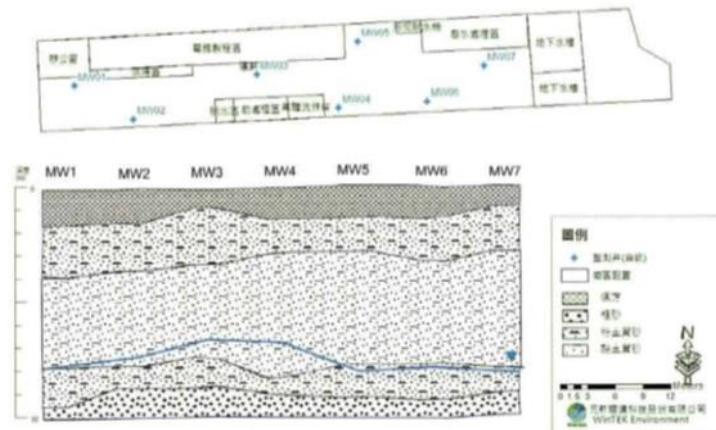


圖4.4 現地整治場址地質剖面

資料來源：新明利五金加工廠土壤及地下水汙染控制計畫書(修正二版)，2020。

表4.3 現地整治之監測井土壤物理性質分析

監測井	深度	分類	礫石	砂土	粉土	粘土	含水量	比重	單位重	孔隙率	液性限度 L.L.	塑性指數 P.I.
單位	m	—	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	—	g/cm ₃	(%)	(%)	(%)
MW01	4.0~8.0	CL	0	1.6	72.6	25.8	28.8	2.72	1.78	49.24	32.8	16.7
	8.0~9.8	CL	0	10.9	73.4	15.7	25.6	2.7	1.89	44.13	20.8	7.2
MW02	0.1~1.6	GM	52.1	28.1	18.8	1	8.5	2.66	1.52	47.37	—	NP
	9.0~10.3	SM	27.6	50.4	21	1	9	2.66	1.46	49.75	—	NP
MW03	0.2~1.0	GM	40	34.5	24.5	1	10.8	2.66	1.47	50.00	—	NP
	1.0~3.5	CL	2.5	29.1	52.5	15.9	25.1	2.7	1.84	45.65	20.9	7.4
	3.5~7.7	CL	0	2.8	76.8	20.4	30.3	2.71	1.93	45.36	28.9	14.2
	7.7~9.0	CL	0	12.5	72	15.5	25.9	2.7	1.83	46.24	21.5	7.6
	9.0~10.3	GM	38.4	28.1	32.5	1	13	2.67	1.72	42.86	—	NP
MW04	3.0~8.5	CL	0	2.6	71.2	26.2	30.5	2.72	1.79	49.49	29.7	15.5
	9.3~10.3	GM	37.7	32	22.5	7.8	11.2	2.67	1.7	42.86	—	NP
MW05	1.5~3.0	CL	0.5	12.8	74.3	12.4	20.7	2.7	1.65	49.49	21.2	8.6
	8~9.5	CL	0	18.1	63.9	18	23.5	2.7	1.96	41.18	20.3	7.9
	9.5~10.4	GM	31.9	25.7	32.6	9.8	17.2	2.68	1.9	39.39	—	NP
MW06	2.2~3.0	CL	0	8.8	78.9	12.3	18.7	2.7	1.53	52.15	20.5	7.2
	8.2~9.30	CL	0	10.5	71.6	17.9	23.2	2.7	1.94	41.52	21.1	8.1
	9.6~10.3	ML	1.2	37.6	52	9.2	17.5	2.69	1.89	40.12	—	NP
MW07	3.4~8.0	CL	0	2.8	75.6	21.6	26.7	2.71	1.93	43.82	28.4	13.9
	8.0~9.6	CL	0	14	72.4	13.6	23.2	2.7	1.92	42.20	20.7	7.6
	9.6~10.3	GM	41.7	24.4	26.1	7.8	13.8	2.67	1.81	40.48	—	NP

資料來源：新明利五金加工廠土壤及地下水汙染控制計畫書(修正二版)，2020。

地表水文 - 試驗場址位於嘉義市東區，嘉義市南北分別以八掌溪及朴子溪與嘉義縣為界，屬嘉南平原。場址北面緊鄰牛稠溪(為朴子溪上游)，流經民雄牛稠山後始稱朴子溪，最後由嘉義縣東石鄉流入台灣海峽。鄰近地表水文分布詳圖4.5。



圖4.5 現地整治場址地表水文分布

資料來源：新明利五金加工廠土壤及地下水汙染控制計畫書(修正二版)，2020。

地下水文 - 圖4.6顯示模擬監測井水位資料，試驗場址地下水流向為南往東北及溪北流動。

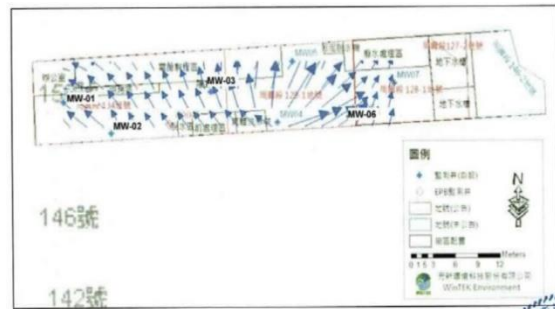


圖4.6 現地整治場址地下水流向

資料來源：新明利五金加工廠土壤及地下水汙染控制計畫書(修正二版)，2020。

現地整治場址地下水污染 - 依據環保署執行「運作中高污染潛勢工廠土壤及地下水污染潛勢調查計畫(第三期)」採樣結果顯示，試驗場址地下水重金屬鋅及鎳濃度分別為114及4.17 mg/L，為第二類地下水管制標準之2.28及4.17倍。另於109年地下水調查檢驗結果(詳表4.4顯示，亦有多個監測點超出管制標準，包括：MW03重金屬鉻、鎳及鋅；MW04及MW06的氟鹽、重金屬鎳及鋅；與MW05的重金屬鎳及鋅。根據地下水調查結果，各項污染物及指標顯示，除氟鹽外，其他污染物及數值(包括：重金屬鉻、鎳、鋅及pH值)皆以MW03為主要污染來源。

表4.4 現地整治地下水汙染場址之109年地下水調查檢測結果

檢測項目	單位	監測標準	管制標準	監測點位						
				MW01	MW02	MW03	MW04	MW05	MW06	MW07
檢測日期				109.02.21			109.03.10		109.04.21	
井深	m	-	-	10.061	9.929	9.997	10.078	10.290	10.064	10.191
井頂高程	m	-	-	29.346	29.394	29.462	29.418	29.519	29.533	29.469
水位(距井頂)	m	-	-	7.673	7.732	6.998	7.674	7.708	8.161	8.280
水位高程	m	-	-	21.673	21.662	22.464	21.744	21.811	21.372	21.189
採樣深度 (距井頂)	m	-	-	8.867	8.831	8.498	8.876	8.999	9.113	9.236
採樣高程	m	-	-	20.479	20.563	20.964	20.542	20.520	20.42	20.233
水溫	℃	-	-	26.2	25.7	25.2	25.8	25.7	26.1	25.9
pH	-	-	-	5.83	5.88	4.46	5.63	4.39	6.09	6.17
DO	mg/L	-	-	1.9	2.2	3.2	0.7	0.7	0.13	0.22
ORP	mv	-	-	-43	-44	122	-4	141	-72	-81
導電度	μmho/cm	-	-	9.58	7.88	20.4	11.12	17.57	2.30	2.61
氟鹽	mg/L	4.0	8.0	0.11	0.40	1.14	9.57	2.10	15.9	4.61
鉻(Cr)	mg/L	0.25	0.5	ND	<0.01	1.28	0.016	0.029	0.010	0.018
鎳(Ni)	mg/L	0.5	1	ND	ND	1.56	1.90	2.91	0.832	ND
銅(Cu)	mg/L	5	10	ND	ND	0.476	0.027	0.063	ND	ND
鎘(Cd)	mg/L	0.025	0.05	ND	ND	0.008	ND	ND	0.007	ND
鉛(Pb)	mg/L	0.05	0.1	0.00164	0.00554	0.0273	0.00728	0.00469	0.0172	0.0227
鋅(Zn)	mg/L	25	50	0.033	0.093	381	155	583	29.3	0.151

註 1: ND 表示偵測值低於方法偵測極限(MDL)。

註 2: 超出污染監測標準以「粗體+底線」標示；超出污染管制標準以「灰底粗體+底線」標示。

(資料來源：新明利五金加工廠土壤及地下水汙染控制計畫書(修正二版)，2020)



污染場址地下水採樣分析

參考環保署公告之方法(NIEA W103.56B)進行地下水採樣作業，採樣步驟詳如圖4.7所示，採樣方法及作業內容則節錄如下：

1. 採樣前作業

- (1) 去污：須清洗之設備包括：水位計、非一次式使用之貝勒管、抽水機、汲水管線、水流元。
- (2) 樣品容器清洗：參照「水質檢測方法總則 (NIEA W102.5)」規定執行。
- (3) 填寫「監測井地下水採樣紀錄表」。

2. 洗井

採樣前以適當流率汲取地下水，抽換監測井中之滯留水，以取得代表性地下水樣品。對補注流率較佳之監測井，其汲水流率小於補水流率，即避免洗井時，水位有明顯洩降。

若以 0.1 L/min 至 0.5 L/min 流率汲水，水位洩降超過 1/8倍井篩長，或以貝勒管汲水且能把水抽乾時，則由設井時之岩芯取樣紀錄判斷該含水層是否屬低滲透性地層。屬低滲透性含水層，將汲水機置於井管底部附近以較大之汲水流率將井內積水抽除，待水位回升後採集新鮮地下水樣品；非屬低滲透性含水層，可能井篩產生阻塞，須進行完井(well completion) 作業後再採樣。

常用之洗井方式含井柱水體積置換法及微洗井二種：

- (1) 井柱水體積置換法：洗井時可採用抽水機或貝勒管進行，將井柱水抽換 3~5 倍井柱水體積後進行採樣。
- (2) 微洗井(或稱為小流率抽除滯留水)：需使用可調整汲水流率之抽水機，並能將汲水流率穩定控制於0.1~0.5 L/min，適用之抽水機型式包括：氣囊式泵或離心泵等，惟離心泵不適合作為揮發性有機化合物樣品採樣設備。

3. 採樣

- (1) 採樣在洗井完成後 2 小時內進行，若監測井位於低滲透性地層，洗井後，待新鮮水回補，應儘快於井底採樣，較具代表性。
- (2) 如以貝勒管採樣，原則上將貝勒管放置於井篩中間部位(當水位高於井篩頂部時)、井篩內水位之中點(當水位低於井篩頂部時)。另若考量污染物在地表下之流布特性、現場篩測結果及採樣目的等因素，將貝勒管放置於井篩中適當位置進行取樣。貝勒管在井中的移動緩慢上升或下降，以避免造成井水之擾動，造成氣提或曝氣作用。
- (3) 如以原來洗井之抽水機採樣，則俟洗井完成或水質參數穩定後，在不對井內作任何擾動或改變位置情形下，維持洗井之低流率，直接以樣品瓶接取。



- (4) 開始採樣時，記錄採樣開始時間。以抽水泵或貝勒管取足量體積的樣品，裝於樣品瓶內。並填好樣品標籤，貼在樣品瓶上。
- (5) 若待測項目為溶解性金屬時，應於採樣現場以 $0.4\sim 0.45\ \mu\text{m}$ 之濾膜過濾。若未於現場進行過濾，地下水樣品可能因化學作用(如氧化沉澱)而增加水中膠體或細微顆粒，而不具代表性。
- (6) 進行現場過濾時，採樣設備如為抽水泵，採線上直接過濾；採樣設備如為貝勒管，則使用過濾裝置直接加壓過濾。

4. 樣品保存

樣品保存方法，請參照「水質檢測方法總則(NIEA W102.5)」之規定。

5. 分析項目

分析污染場址主要污染物(鉻、鎳、鋅及氟等)與其他金屬濃度、pH 值等。

6. 分析方法

重金屬污染地下水水樣導電度值、pH 值、重金屬及氟離子濃度分別以導電度計(SUNTEX SC-2300)、WTW InoLab pH/Cond 720、高解析感應耦合電漿質譜分析儀(inductively coupled plasma-mass spectrometer (ICP-MS)) (THERMO-ELEMENT XR)及氟電極(EW-27504-14, Cole-Parmer)進行測定，其中導電度值每分鐘自動監測與紀錄，並定期取樣以 pH 計、ICP-MS 及氟電極檢測實測值。

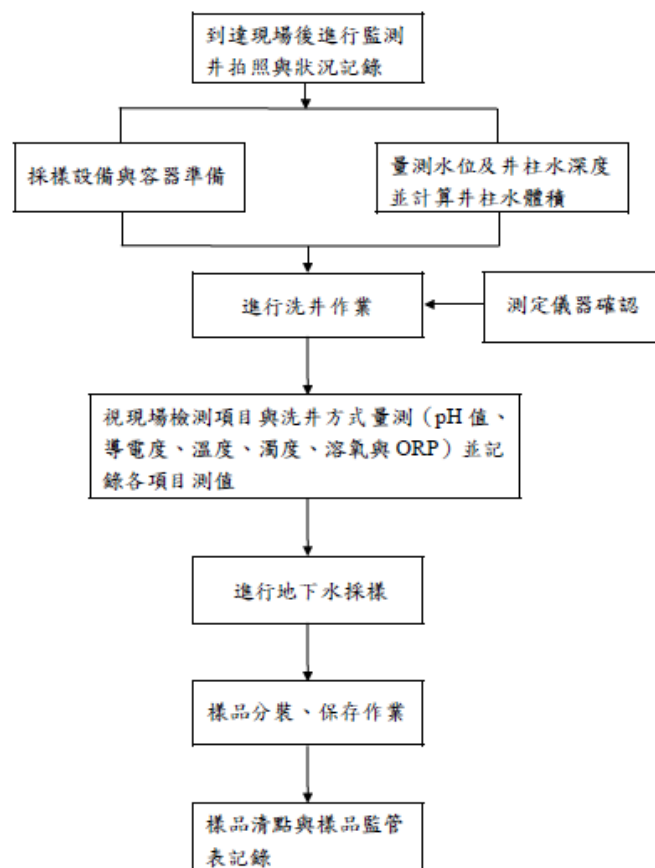


圖4.7 監測井地下水採樣作業流程



模擬污染場址地下水之實驗室級 FdCDI 測試

依據污染場址地下水採樣分析結果，針對單物種與混合物種等模擬地下水，以電容去離子電極組進行實驗室級測試，測試之離子主要包括：地殼元素(鈉、鐵)、陰(氟)、陽(鉻、鎳、鋅)離子，測試用化學品則以污染場址電鍍廠之製程原物料氯化物進行模擬。

現地整治地下水檢測結果顯示，重金屬鋅含量最高約204 mg/L，而鉻、鎳及氟離子則分別為3、1、1.3及2.1 mg/L。實驗室級測試進行單及混合物種模擬地下水之處理效率。其中，鋅離子為污染場址地下水之主要污染毒性金屬，於模擬地下水則分別針對不同濃度(100、200及500 mg/L)、電源供應方式採定電壓或定電流，在不同流量進行測試，而其他污染物(鉻、鎳、氟)及地殼元素(鈉、鐵)等物種測試，則模擬地下水濃度分別為100、100、20~100及200、1000 mg/L。另以 MW03及MW05監測井中重金屬及氟濃度模擬地下水，並以定電壓(1.0、1.2 V)及不同流量(0.5及1.0 L/min)進行測試。

現地測試

於110年11月10~12日至新明利電鍍廠污染場址進行現場測試，各項工作項目內容、期程及重要查核點如表4.5，其中，現場測試作業3人，準備期間則採任務編組僅形事前測試及查核；前處理單元組裝則配合模擬廢水測試，符合現場需求之規格及數量；電極組、人機控制測試及模擬廢水測試，則於現場測試前1星期完成。基本測試完成後，即開始進行現地設備器材盤點並確認運輸工具，以利設備之運送；測試前1天則需於現地進行管路系統及各操作單元之安裝與測試；操作期間則依據測試採樣計畫進行操作及採樣工作，所採樣品則依據檢測方法送貴儀或環工系其他老師檢測分析。

測試採樣位置及分析項目如表4.6，主要針對前處理進口、出口(迴流工作槽入口)、電容去離子設備進口(迴流工作槽出口)、回收水出口、濃縮液、電解槽電解槽液、電解槽出口等位置進行採樣，採樣頻率主要比對操作前後之差異，故於每天開始及結束進行採樣，而 FdCDI 單元則以連續監測 EC 值方式瞭解單元處理現況。



表4.5 現地整治前置作業

項次	項目	工作內容	期程
1	前處理設備組裝	過濾(5 μm 及活性碳濾心)	10/25~11/4
2	電極組組裝	電極裁切、塗佈、組裝	10/25~10/28
3	人機控制測試	流量校正、模組操作	10/28~11/1
4	電解分離單元測試	操作電壓、電流設定	10/25~11/1
5	模擬廢水測試	含重金屬及地殼元素離子	11/1~11/5
6	現地管路系統安裝	施作及測試	11/9
7	操作	連續自動化操作	11/10~11/12
8	採樣	連續自動化操作	11/10~11/12
9	分析	現地測試完成後 2 週內完成分析作業	11/15~11/26

表4.6 採樣位置及分析項目

設備	採樣位置	分析項目			
		EC (連續監測)	重金屬 (鋅、鉻、鎳)	地殼元素 (鐵、鈉)	氟
前處理	進口		◎	◎	◎
	出口(工作槽入口)		◎	◎	◎
FdCDI	進口(工作槽出口)		◎	◎	◎
	回收水出口	◎	◎	◎	◎
	濃縮液		◎	◎	◎
電解	電解槽液		◎	◎	◎
	電解槽出口		◎	◎	◎



現地整治設備及管路配置

依據調查結果，顯示地下水監測井 MW03及 MW05之地下水重金屬濃度超過管制標準，故測試及驗證之對象為 MW03及 MW05之地下水，測試期間因無排放許可，回收水仍排回廠內廢水貯存槽進行後續處理作業。現地整治作業環境如圖4.8，MW03及 MW05分別位於陰井附近與塑膠成裝桶放置區。

	
監測井 MW03	監測井 MW05
	
廢水陰井	現地整治設備設置地點(廢水地下貯槽上方)

圖4.8 現地整治作業環境

現場測試設備及管路配置如圖4.9，而現地整治所需設備清冊如表4.7。現場測試及驗證設備之配置需避開實際整治計畫之開挖面及翻土暫存區，選擇適當地點設置迴流工作槽及 FdCDI 設備(尺寸小且可移動)，管線部份則以軟管連接設置，以便因應整治期間可施作場地之變化。

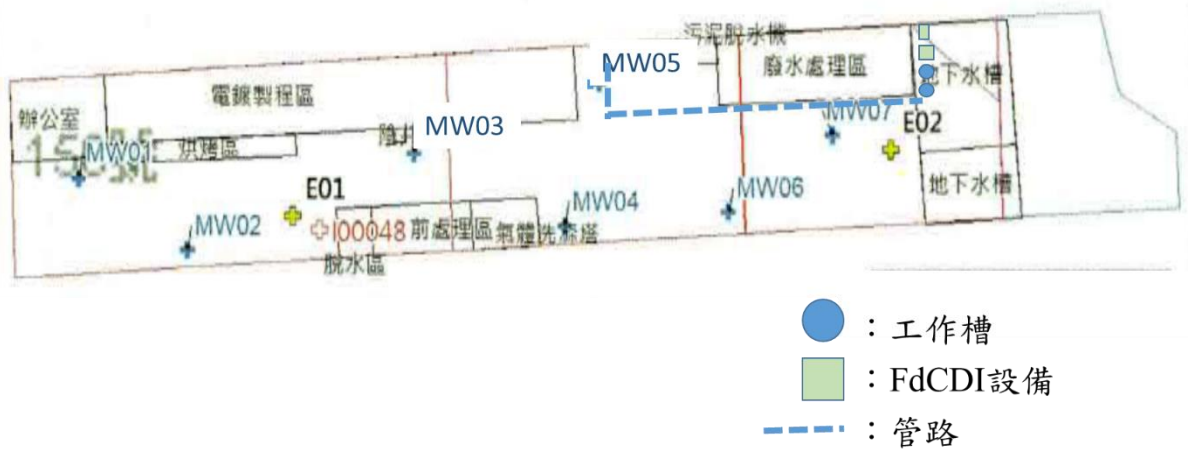


圖4.9 現場測試設備及管路配置

表4.7 現地測試設備清冊

序次	設備名稱	數量	規格/說明
1	管路	1式	監測井至前處理單元(1/8") 前處理單元至迴流工作槽(1/8") 迴流工作槽至電容去離子單元(1/2") 電容去離子單元至電解分離單元(1/4") 回收水出口(至迴流工作槽)(1/4")
2	泵浦	2台	110 V
3	前處理設備	1組	選擇性過濾器1組2個(並聯備源)
4	迴流工作槽	2個	500 L PVC 槽
5	電容去離子設備	1座	移動型(60 × 70 × 80 cm；含即時 EC 監測)
6	電解系統	1組	電解槽、流量控制系統、電源供應器
7	工業級延長線	3條	50 m
8	pH 計	1台	攜帶型
9	ORP 計	1台	攜帶型
10	EC 計	3台	配合 Notebook 即時記錄
11	採樣瓶	80個	50 mL



五、結果與討論(含結論與建議)

5.1 結果與討論

本模場試驗專案重點工作包括：(1)污染場址地下水檢測、(2)自動化 FdCDI 模組設備之設計與組裝、(3)模擬污染場址地下水之實驗室級 FdCDI (含電解分離回收毒性金屬(鋅、鎳、鉻)測試、及(4) FdCDI 設備之現地整治工程可行性研究(含單元、連續及自動化操作與經濟效益評估)等項目。

地下水採樣分析

現地整治作業前，先進行 MW03及 MW05地下水主要污染物：鋅、鉻、鎳及氟採樣分析，檢測結果詳表5.1，受豐、枯水期(109年1月(原污染場址調查)及110年7月(本計畫))影響，鉻及鎳維持相對低之濃度(仍超過監測標準)；氟鹽變化不大；另由 ICP-MS 半定量檢測之其他金屬濃度中，以鐵及鈉的濃度最高，MW05地下水樣之鐵及鈉的濃度接近 MW03的2倍。

表5.1 新明利地下水污染場址109年調查及本計畫檢測結果

109年調查檢測結果								本計畫檢測結果		
檢測點 項目	MW 01	MW 02	MW 03	MW 04	MW 05	MW 06	MW 07	MW 03	MW 05	檢測 方法
pH	5.83	5.88	4.46	5.63	4.39	6.09	6.17	3.16	4.16	
鉻 (mg/L)	ND	<0.01	1.28	0.016	0.029	0.010	0.018	3.08	1.54	ICP-MS
鎳 (mg/L)	ND	ND	1.56	1.90	2.91	0.83	ND	1.29	0.78	
鋅 (mg/L)	0.033	0.093	381	155	583	29.3	0.151	204	135	
氟 (mg/L)	0.11	0.40	1.14	9.5	2.10	15.9	4.61	1.29	1.69	氟電極 法
其他金屬										ICP-MS
鋁 (mg/L)	—							50	28	
鈣 (mg/L)	—							240	453	
鐵 (mg/L)	—							457	994	
鎂 (mg/L)	—							60	103	
鈉 (mg/L)	—							228	29.5	

註：粗體字表示該離子濃度超過管制標準。



自動化 FdCDI 模組設備之設計與組裝(含操作模式建立)

本模組化 CDI 設備設置6~8個電極組(set)(每1 set 含51個塗佈活性碳(AC)電極板(每一電極板面積：18 cm × 18 cm))，在實務操作時，可依目標毒性離子與地殼元素離子之電吸附效率不同，在調控串聯電極組之電吸附與脫附次序，以有效分離/富集目標毒性離子，尤其，另設置迴流(recycling)工作槽，除可穩定進流量及濃度，也可透過重複電吸附與脫附模式提存目標毒性離子濃度。

主要控制參數包括：吸附/再生時間、電流、電壓、EC 及水流量。設備操作模式設定參照實驗室級之測試結果，並建置自動化操作模式，以吸附單元電流值或出流水之 EC 值進行連續監測，獲得電吸附效率數據。而各控制參數之設定及操作，則由人機操作介面、控制程式及電磁閥組進行設定及控制，達成自動化操作目標。

組裝 FdCDI 設備 - 設計6個(其中之1進行再生)串聯電極組為主要電容去離子處理單元，配合人機操作介面、控制程式及電磁閥組進行設定及控制，使具遠端控制與自動化操作之功能。FdCDI 設備設計結構如圖5.1，其中，控制人機位於設備側方，電源供應器及控制元件盤(含電導度計與遠端遙控主機)則位於設備最下層，與泵浦、流量計為鄰；中層部分，則包括2個電極組及電磁閥元件；上層置4個電極組。地下水流入、回收水流出及濃縮液流出，則以由各電極組連結至各股管路後，進行分配、模式調整或收集。

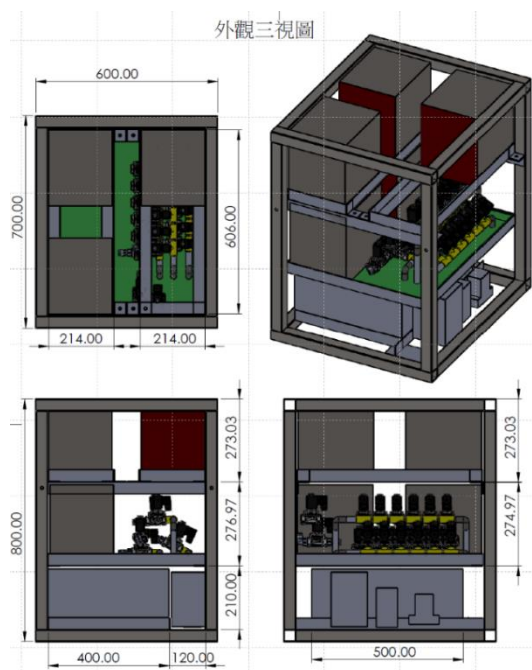


圖5.1 FdCDI 設備設計結構



電極組之組成包括51片塗佈 AC 碳材之不銹鋼片(厚度0.5 mm)、固定塑膠片、上下蓋及周邊塑膠片等(圖5.2)，人工組裝程序含：電極片組裝(51片)、電極片絕緣橡膠組裝、電極導電銅片插接、正負極絕緣填膠、及上下蓋組裝(如圖5.3)，進水方向為由下至上，濃縮液排出則與進水口共用，因濃縮液排出水頭不足流量較小，有加裝排水泵浦加強排出效率。

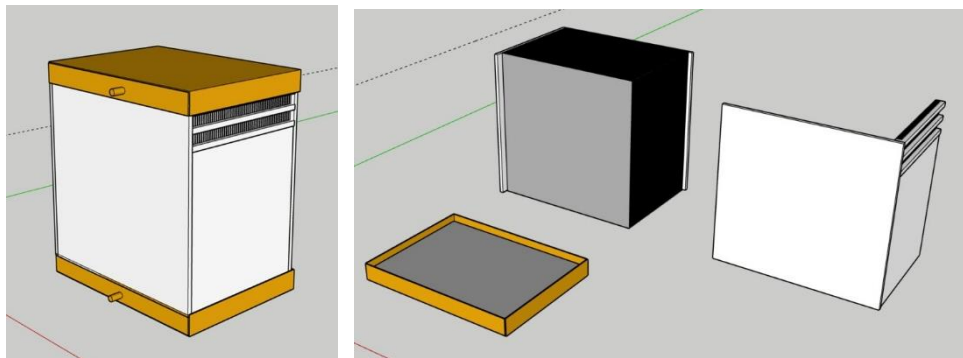


圖5.2 FdCDI 設備電極組構造



圖5.3 FdCDI 設備電極組組裝

電容去離子處理設備-動作邏輯如圖5.4，主要以各單元吸附及再生時間作為動作控制之依據，配合電壓值的變化達成吸附或再生程序的運作。

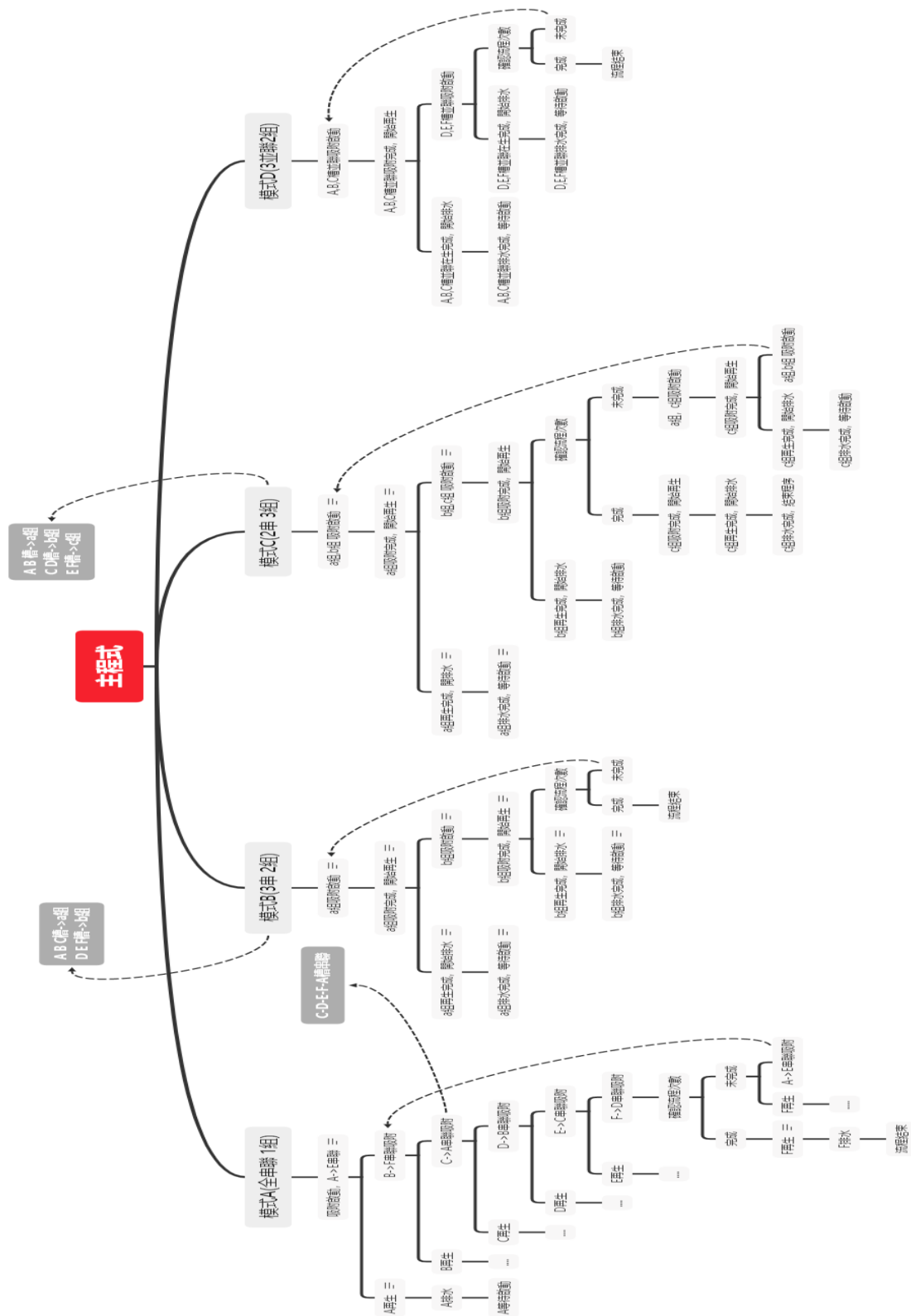


圖5.4 電容去離子處理設備-動作邏輯



本 FdCDI 設備係以人機裝置作為介面，達成設定、顯示及控制的目的。人機介面主畫面包括：模式選擇(含手動)、執行次數設定、流程啟動/停止、流程暫停/恢復、參數設定、定電流/電壓模式選擇、電壓設定、電流設定、流量校正、流量設定等按鈕，可做選擇或進一步設定(下一層)。其中，參數設定頁面可針對4種操作模式(A 至 D)之吸附時間、再生時間及濃縮液排出時間進行設定(圖5.5)；而流量校正按鈕及流程詳圖5.6，以比例閥開度作為流量控制之依據，為操作前須針對4個開度(25, 50, 75及 99%)進行實測，經人機計算後完成流量校正作業。

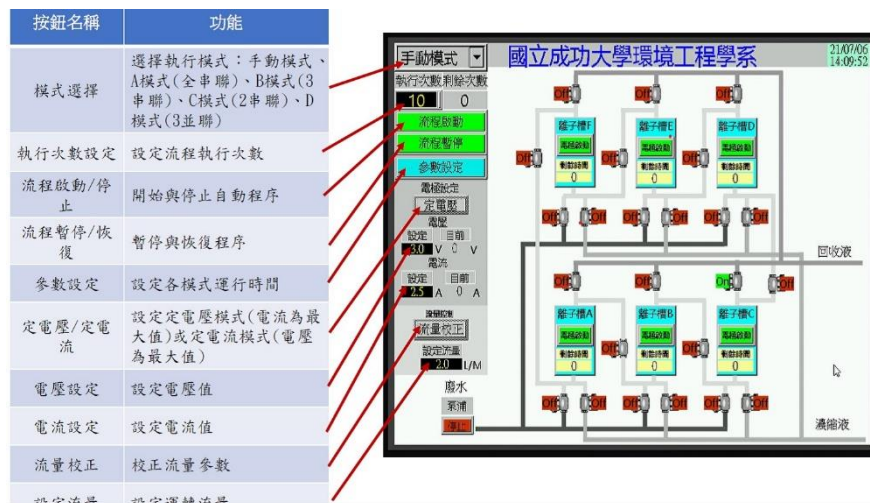


圖5.5 FdCDI 設備人機介面主畫面及參數設定頁面



按鈕名稱	功能
時間	設定比例閘閥開度運轉時間
開始	啟動馬達，使出水已比例閘閥開度運轉
測量值	輸入測量值
計算	主機重新計算數值，並帶入流量設定使用

- 校正流程：
1. 準備量杯放置於出水口
 2. 設置啟動時間
 3. 按下開始按鈕，出水口開始出水
 4. 觀測量杯，將數值輸入測量值。
 5. 依照1-4步驟依序完成開度25%-99%之測量
 6. 確認數值無誤後按下計算按鈕PLC將自動帶入數值計算。

圖5.6 FdCDI 設備流量校正設定頁面

操作控制模式含4種(A至D)，電極組串、並聯分組說明如表5.2，各模式操作流程說明詳圖5.7至5.10所示，其中，模式D在進水濃度較低時，可提供最高流量操作；而A、B及C三組，操作流量相同，惟其投入操作及再生電極數不同，影響其電吸附效率。

表5.2 電極組串並聯分組

模式	電極組數	組合數	操作模式	串聯電極數	流量
A	6	1	5組串聯吸附；1組再生	5	Q
B	2	3	1組串聯吸附；1組再生	3	Q
C	3	2	2組串聯吸附；1組再生	4	Q
D	2	3	1組並聯吸附；1組再生	1	3Q

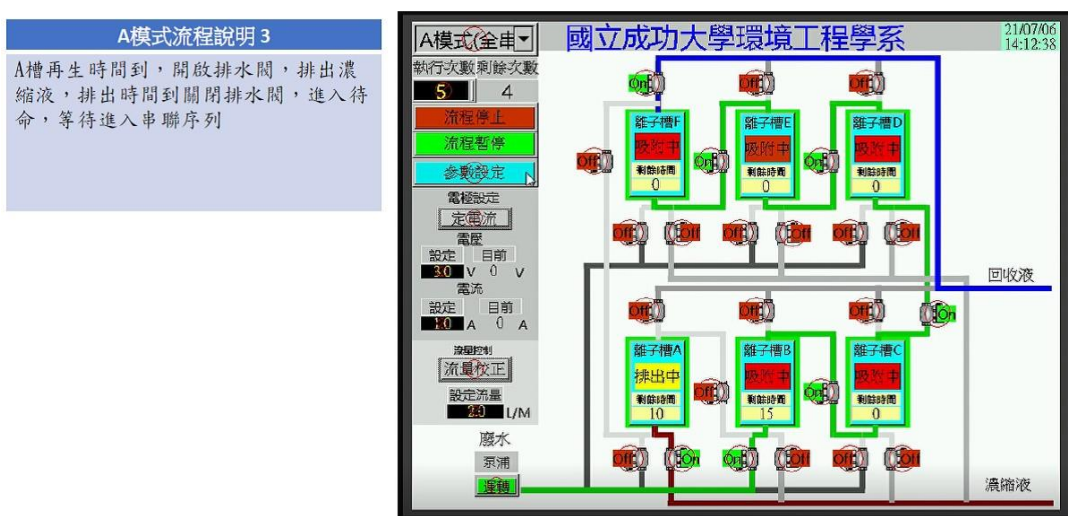
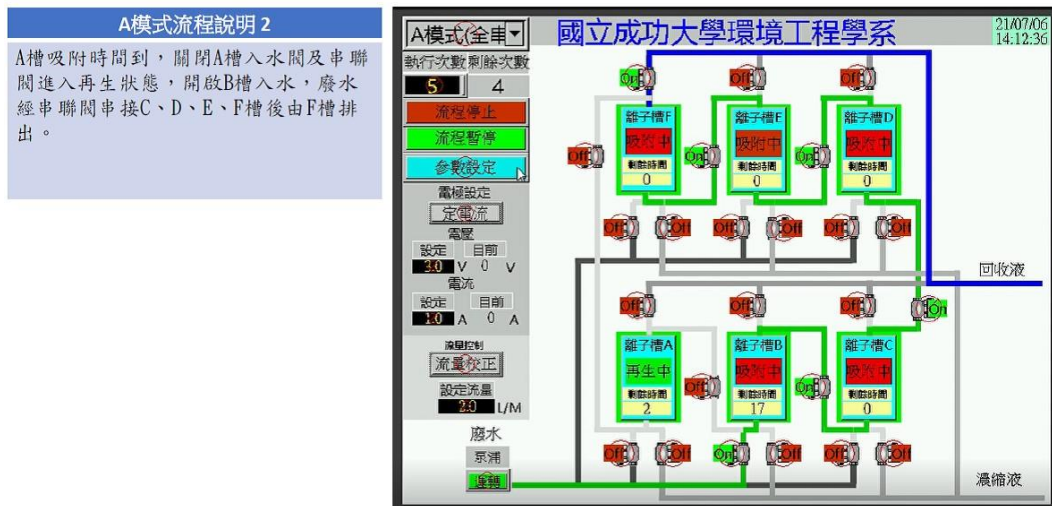
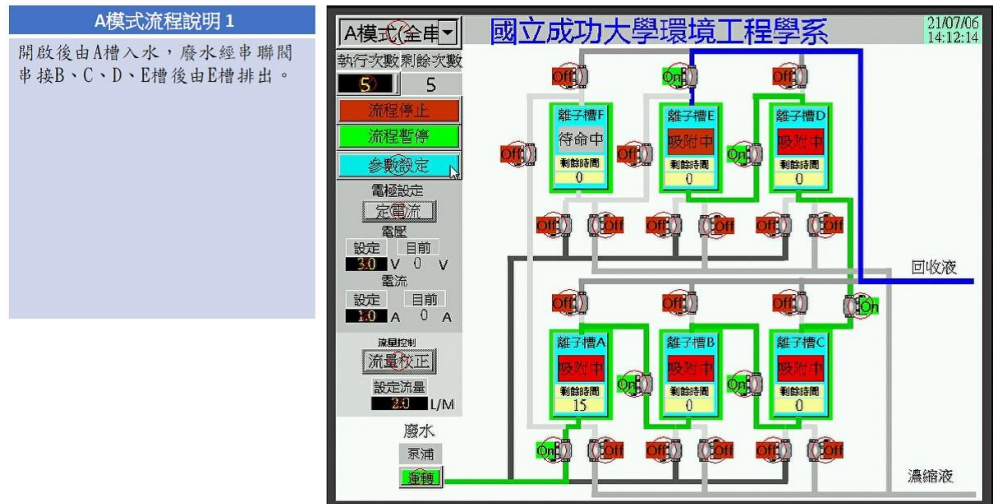
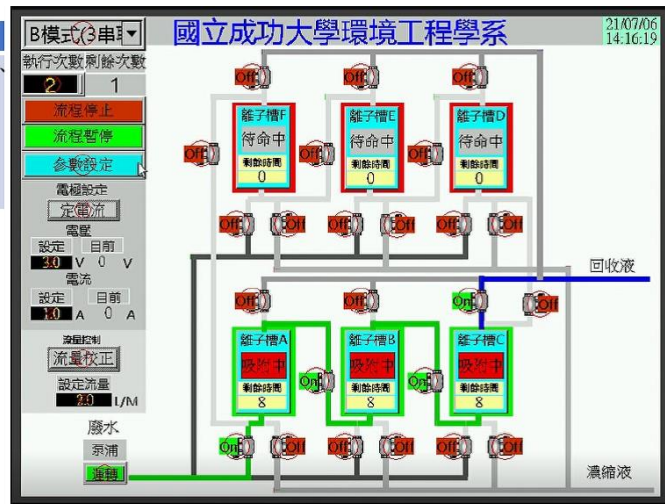


圖5.7 FdCDI 設備控制說明 (A 模式)



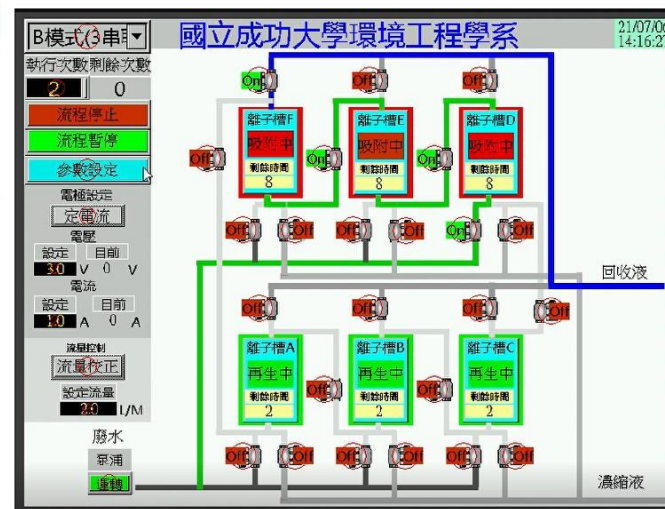
B模式流程說明 1

開啟後由A槽入水，廢水經串聯間串接B、C槽後由C槽排出。



B模式流程說明 2

A、B、C槽吸附時間到，關閉A槽入水閥及串聯閥進入再生狀態，開啟D槽入水，廢水經串聯閥串接E、F槽後由F槽排出。



B模式流程說明 3

A、B、C槽再生時間到，開啟排水閥，排出濃縮液，排出時間到關閉排水閥，進入待命，等待進入串聯序列

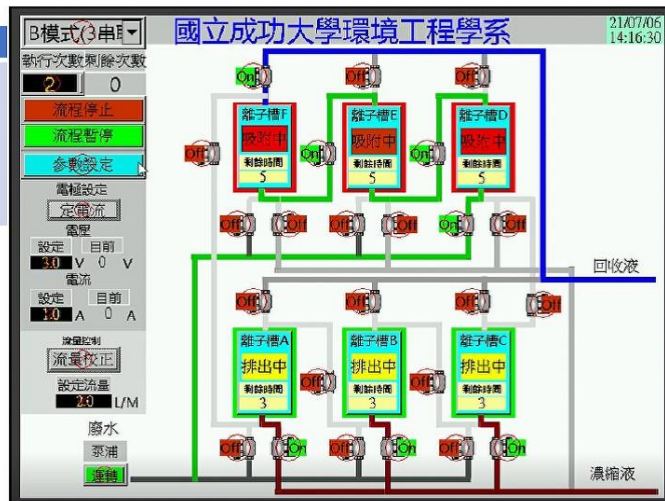
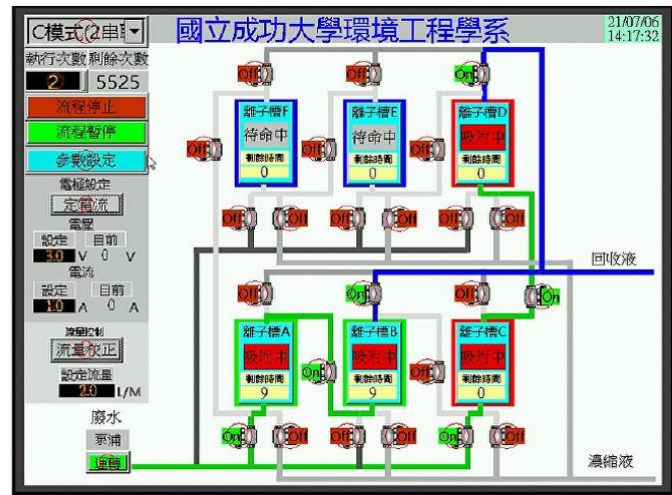


圖5.8 FdCDI 設備控制說明 (B 模式)



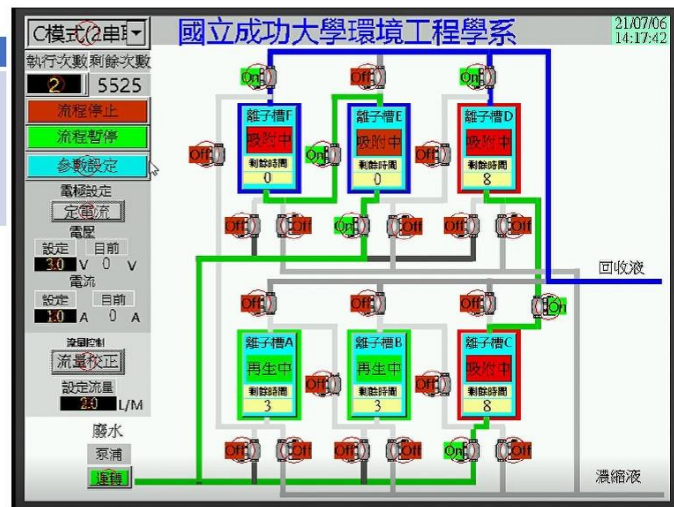
C模式流程說明 1

開啟後由A、C槽入水，廢水經串聯間串接B、D槽(A串聯B，C串聯D)後由B、D槽槽排出。



C模式流程說明 2

A、C槽吸附時間到，關閉A槽入水閥及串聯閥進入再生狀態，開啟E槽入水，廢水經串聯間串接F槽後由F槽排出。



C模式流程說明 3

A、C槽再生時間到，開啟排水閥，排出濃縮液，排出時間到關閉排水閥，進入待命，等待進入串聯序列

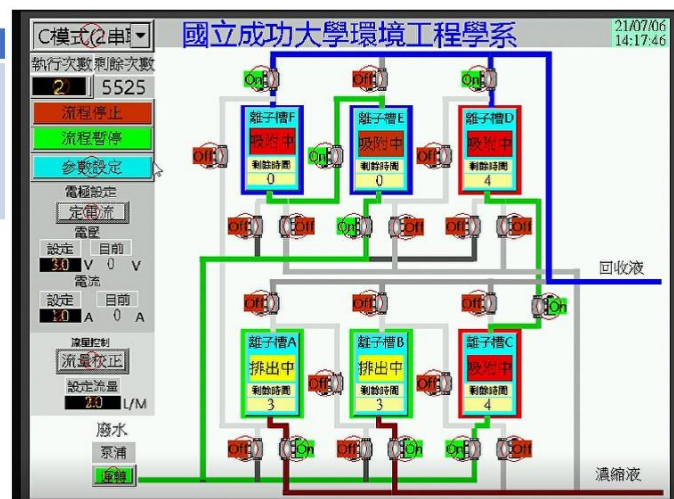


圖5.9 FdCDI 設備控制說明 (C 模式)

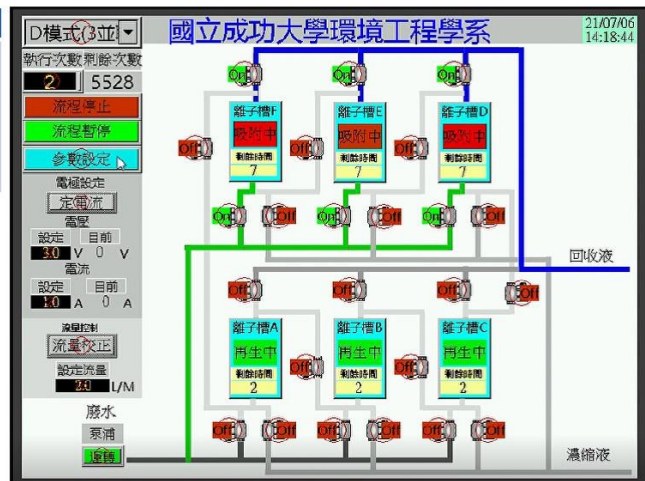
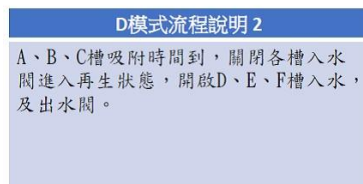
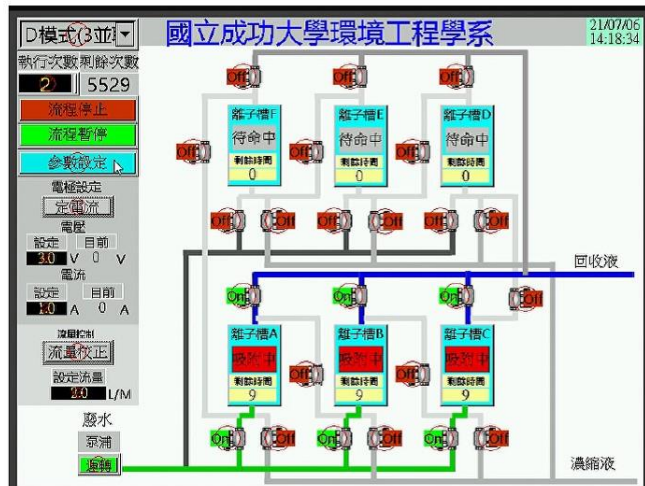
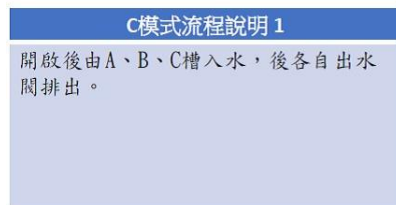


圖5.10 FdCDI 設備控制說明 (D 模式)

遠端監控單元設置 - 開發之 FdCDI 設備亦提供手機連網功能，可由手機介面監控及時數據及影像，手機介面之各圖層顯示情形(如圖5.11~14)，其中，手機聯結網址後，即顯示選單、設備現況及操作設定值與監測值(流量、電壓、電流及 EC 值)(圖5.11)。圖5.12~13則為顯示電壓、電流及 EC 值之歷史數據頁面，可瞭解各參數變化趨勢並可以點選曲勢線上任意點獲得相關數值。另備網路攝影機，可監測 FdCDI 周遭或設備人機介面顯示狀況(圖5.14)。



圖5.11 遠端監控單元輸入顯示介面

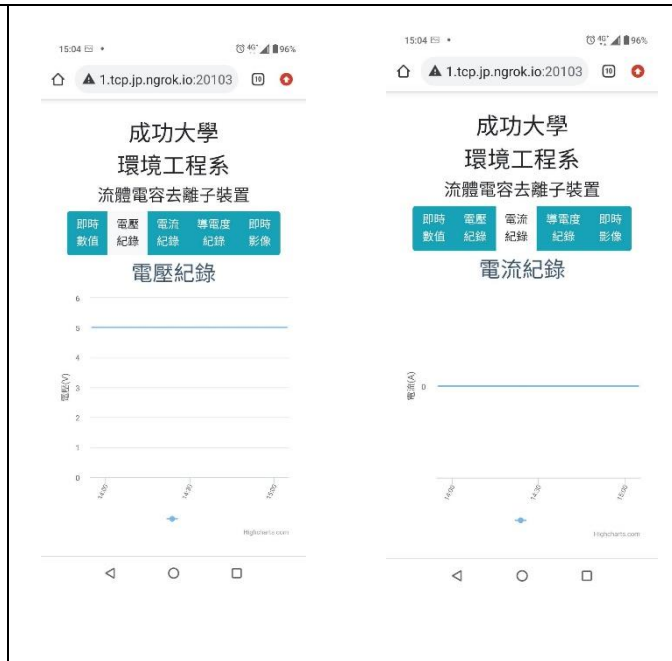


圖5.12 即時數據顯示頁面實例(電壓、電流)

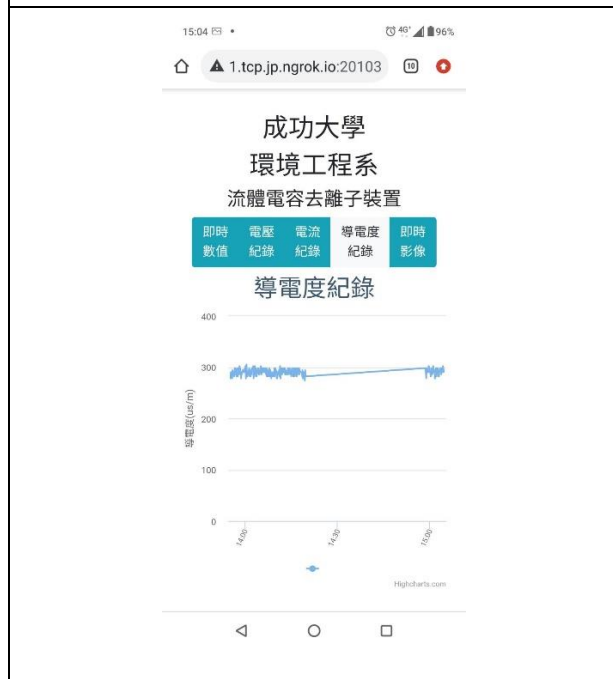


圖5.13 即時數據顯示頁面實例(導電度)



圖5.14 現地影像顯示實例



模擬現地整治場址地下水之實驗室級 FdCDI 測試

模擬地下水測試結果如圖5.15~5.20，其中，主要污染重金屬污染物鋅在定電壓1.2 V、0.5 L/min (單電極組)操作條件下，不同鋅離子濃度電吸附效率如圖5.15，以100 mg/L 約30%為較高，電吸附效率則隨濃度增加而減少。若與其他離子比較(100 mg/L)(圖5.16)，仍以鋅離子電吸附效率最高，其他離子(鉻、鎳、氟)則維持在約15~25%的去除效率。

另也測試電極組串聯之離子電吸附效率，針對不同陰陽離子(Zn^{2+} 、 F^- 、 Fe^{3+} 、 Na^+ 等)進行多組電極組(1~3座)串聯及定電流(1 A)操作測試比較(圖5.17~5.20)，測試結果顯示單電極組操作於30~40 min 達吸附飽和，而2~3座串聯則至60 min 仍持續維持電吸附效率，符合本電容去離子技術(吸附60 min、再生30 min)之操作需求。而關於模擬地下水之電吸附效率(以連續監測 EC 校準值趨勢分析)，除氟離子選用較低濃度，最大(3組串聯)電吸附效率高達80%外(圖5.20)，其餘陽離子(Zn^{2+} 、 Na^+)濃度在200~300 mg/L 範圍者，其最大電吸附效率約落在20~40%之間；而地殼元素鐵離子濃度最大(1000 mg/L)，其電吸附效率約5%。若以鋅離子實測值(以 ICP-MS 分析)結果，電吸附效率則增至為22~47% (1~3組電極組串聯)。

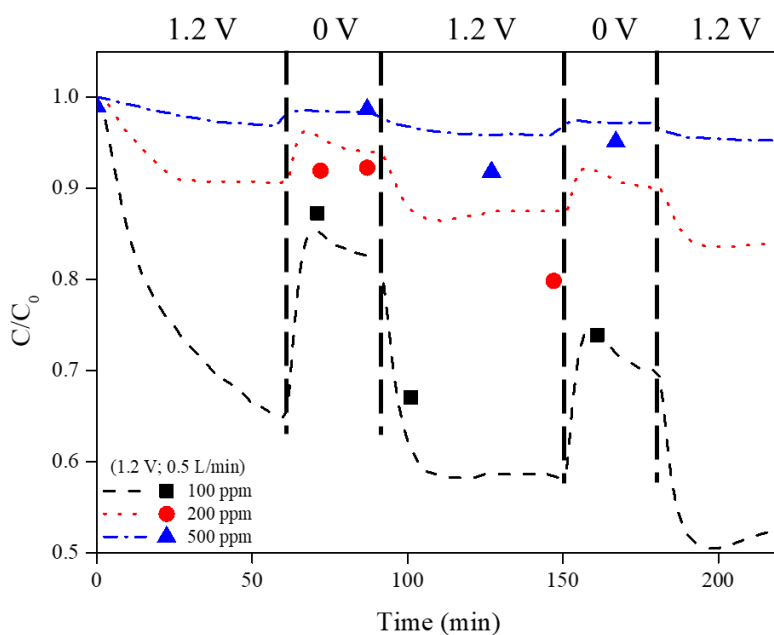


圖5.15 模擬地下水 ($[\text{Zn}^{2+}] = 100 (\square), 200 (\circ), \text{及 } 500 (\triangle) \text{ ppm}$) 之單電極組測試結果 (3-cycle (電吸附(1.2 V)與脫附再生(0 V)))。(線條為連續監測 EC 校準值；實心符號為鋅實測值(ICP-MS))

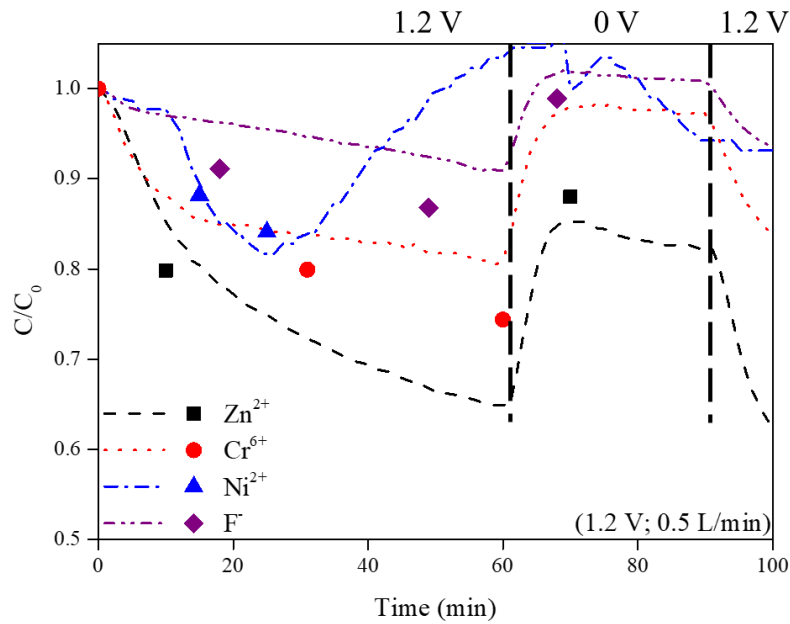


圖5.16 模擬地下水($[Zn^{2+}] = 100 \text{ ppm}$ ($\square$), $[Cr^{3+}] = 100 \text{ ppm}$ ($\circ$), $[Ni^{2+}] = 100 \text{ ppm}$ ($\triangle$), 及 $[F^-] = 100 \text{ ppm}$ ($\diamond$))之單電極組測試結果(1-cycle (電吸附(1.2 V)與脫附再生(0 V)))。 (線條為連續監測 EC 校準值；實心符號為實測值(ICP-MS 及氟電極法))

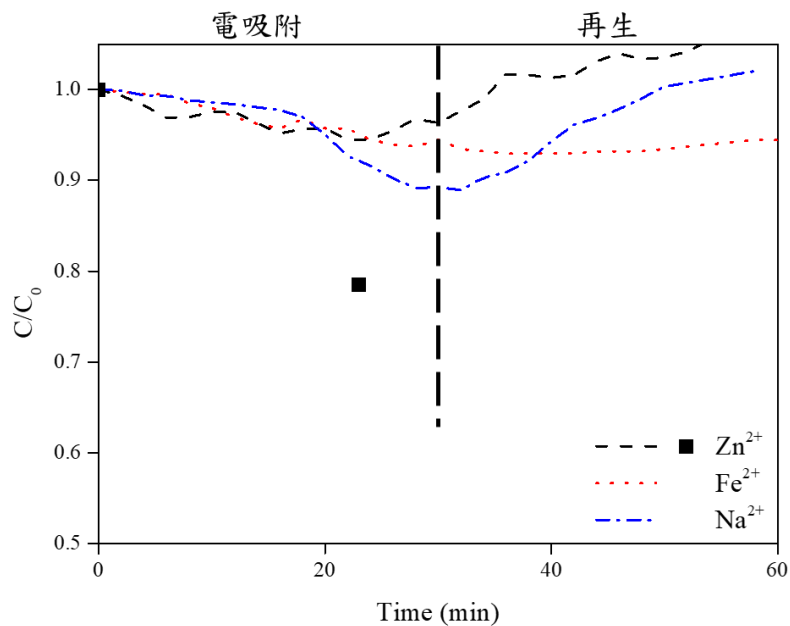


圖5.17 模擬地下水($[Zn^{2+}] = 300 \text{ ppm}$ ($\square$), $[Fe^{3+}] = 1000 \text{ ppm}$ ($\circ$), 及 $[Na^+] = 200 \text{ ppm}$ ($\triangle$))之單電極組測試結果(1-cycle (電吸附(1.0 A)與脫附再生(0 A)))。 (線條為連續監測 EC 校準值；實心符號為實測值(ICP-MS))

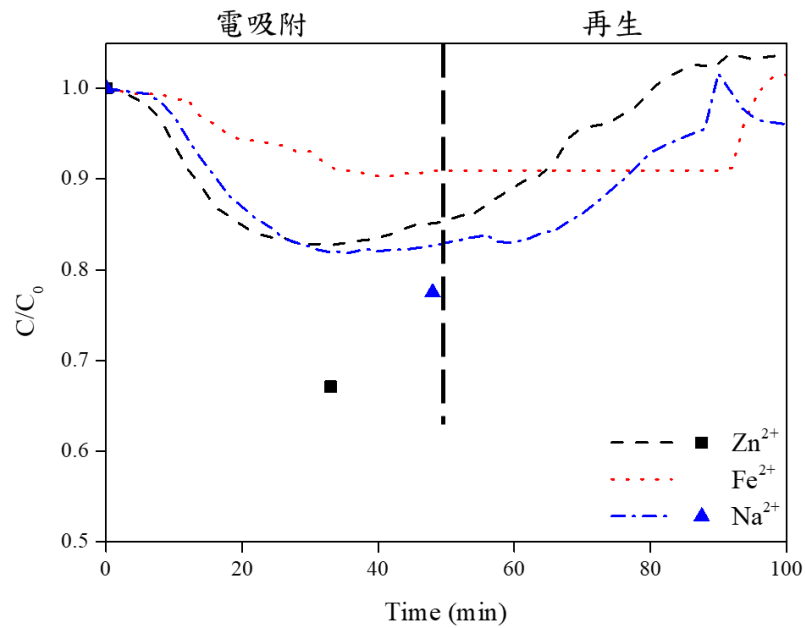


圖5.18 模擬地下水($[Zn^{2+}] = 300 \text{ ppm}$ ($\square$), $[Fe^{3+}] = 1000 \text{ ppm}$ ($\circ$), 及 $[Na^+] = 200 \text{ ppm}$ ($\triangle$)) 之串聯2組電極組測試結果(1-cycle (電吸附(1.0 A)與脫附再生(0 A))。(線條為連續監測 EC 校準值；實心符號為實測值(ICP-MS))

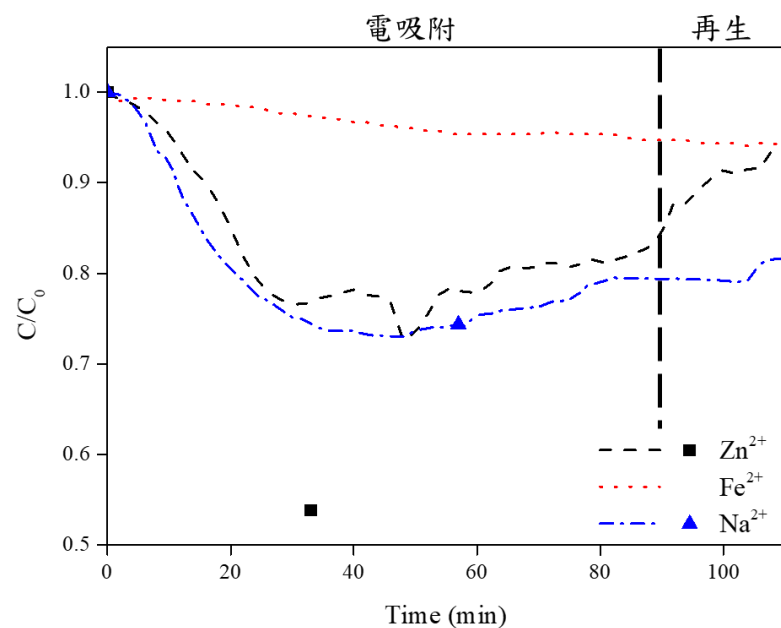


圖5.19 模擬地下水($[Zn^{2+}] = 300 \text{ ppm}$ ($\square$), $[Fe^{3+}] = 1000 \text{ ppm}$ ($\circ$), 及 $[Na^+] = 200 \text{ ppm}$ ($\triangle$)) 之串聯3組電極組測試結果(1-cycle (電吸附(1.0 A)與脫附再生(0 A))。(線條為連續監測 EC 校準值；實心符號為實測值(ICP-MS))

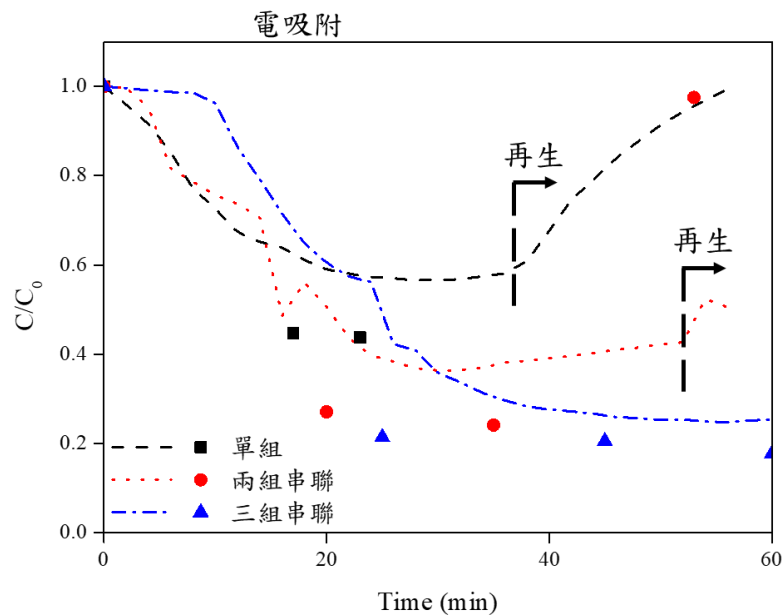


圖5.20 模擬地下水($[F^-]=20$ ppm)於單(□), 串聯2組(○), 及串聯3組(△)電極組測試結果(1-cycle (電吸附(1.0 A)與脫附再生(0 A))。(線條為連續監測 EC 校準值；實心符號為實測值(氟電極法))

模擬地下水除進行單一陰陽離子之測試外，亦依污染場址受污染地下水中重金屬濃度 (Zn^{2+} (200 ppm)、 Cr^{3+} (3 ppm)、 Ni^{2+} (1 ppm)、及 F^- (2 ppm)) 調配模擬地下水，以不同定電壓及流量條件下進行單電極組之測試(圖5.21)，測試結果顯示以流量1.0 L/min 時電吸附效率(約12%)較高。

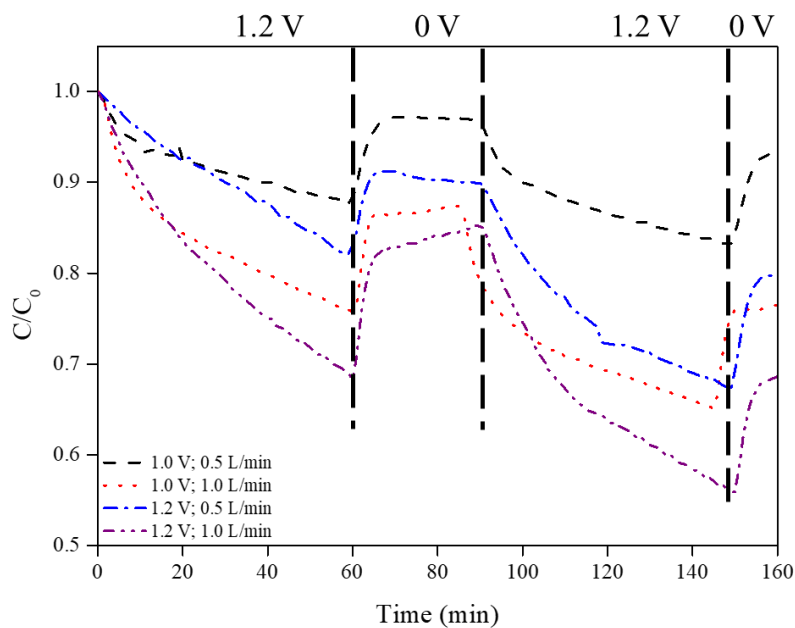


圖5.21 模擬地下水($[Zn^{2+}]=200$ ppm, $[Cr^{3+}]=3$ ppm, $[Ni^{2+}]=1$ ppm, 及 $[F^-]=2$ ppm)於不同定電壓及流量之單電極組測試結果(1-cycle (電吸附(1.0及1.2 V)與脫附再生(0 V)；流量0.5及1.0 L/min))。(線條為連續監測 EC 校準值)



FdCDI 設備現地整治工程可行性研究

現地整治場址之地下水採自 MW03及 MW05監測井，其中，MW03位於製程陰井附近且其地下水中 Zn^{2+} 及 Na^{+} 離子含量高；而 MW05則 Fe^{3+} 離子含量較高。現場配置如圖5.22，因 MW03位於廠區堆高機行車動線，故測試期間主要地下水來源為 MW05，而 MW03地下水之測試，則以事先抽取操作所需之地下水，做為測試之地下水源，以減少於測試期間干擾廠區營運。

	
地下水抽取(MW05)	地下水槽 T01 (500 L)
	
前處理單元	迴流工作槽 T02 (500 L)
	
電容去離子單元	電解分離單元

圖5.22 現地整治測試之主要設備



地下水經泵浦抽出經過前處理單元(採用並聯備源方式配置過濾裝置，方便切換及更換)進行前處理後，導入迴流(recycling)工作槽貯存，再由 FdCDI 電容去離子單元進行電吸附，依據地下水濃度及處理流量選擇操作模式，若地下水進水濃度較高，無法降至目標濃度時，則將回收水泵送回迴流工作槽，以穩定進流量及濃度，也可透過重複電吸附與脫附模式提存目標毒性離子濃度。濃縮液之毒性金屬離子則以電解還原成固態金屬分離回收；其它水相之地殼元素(鈉、鐵)含前處理單元以濾材吸附去除，併同回收水導入廠區廢水處理系統處理。惟於測試期間地下水位較低致汲水體積不足以進行現地連續操作，經配合該場址現場整治工廠停工期間，經多日收集 MW03及 MW05水樣後，進行各項試驗，包括1~3電極組串聯及4槽(3槽串聯吸附、1槽再生)連續操作等模式。

前過濾測試

地下水先以過濾器模組(1 L)(淨水用； ϕ 15 cm; H: 30 cm)進行兩階段串聯前過濾，測試結果顯示，經過兩階段5 μ m 及粒狀活性碳串聯過濾，結果如表5.3，顯示實際地下水經前處理後，各離子去除率分別為鈣 (9~57%)、鉻 (10~26%)、鐵 (5~11%)、鈉 (0~8%)、鎳 (3~7%)、鋅 (2~11%)。

表5.3 現地整治場址地下水經前過濾測試結果

監測項目	MW03			MW05		
	過濾前	5 μ m 濾心	粒狀活性碳	過濾前	5 μ m 濾心	粒狀活性碳
pH	2.67	2.68	3.33	2.72	2.64	2.76
EC (mS/cm)	6.39	6.38	5.83	17.39	17.15	17.22
鈣 (mg/L)	328	231	140	462	423	418
鈉 (mg/L)	4.27	4.20	3.18	1.63	1.51	1.47
鐵 (mg/L)	323	320	305	1311	1163	1164
鈉 (mg/L)	140	141	147	565	513	520
鎳 (mg/L)	1.22	1.18	1.19	2.26	2.13	2.11
鋅 (mg/L)	227	227	222	395	364	351



FdCDI 電吸附效率測試

由於地下水含鐵及鈉離子濃度偏高，而將 MW03及 MW05地下水稀釋4倍及8倍後(以迴流工作槽穩定進流量及濃度)，以1~3組電極組串聯操作方式進行，測試結果如圖5.23~28，又 EC 測值無法顯示單一陰陽離子之電吸附效率，另針對目標離子進行 ICP-MS 量測實際離子濃度。MW03地下水經1~3組電極組串聯操作，電吸附效率由8%提升至15% (連續監測 EC 校準值)，而由 ICP-MS 所量測的鋅最大電吸附效率則提高至32%。而 MW05地下水測試，其電吸附效率為2~10% (EC 校準值)及18~48% (ICP-MS 實測值)。

另也以稀釋4倍及8倍之 MW03及 MW05地下水，進行4組電極組(3座串聯電吸附，1座再生)連續操作(3-cycle)測試(詳圖5.29~30)。測試結果(EC 校準值)顯示，1st~3rd cycle 電吸附效率約為13%；由 ICP-MS 分析之鋅濃度結果，1st~3rd Cycle 之電吸附效率分別為12%, 22%及34%。

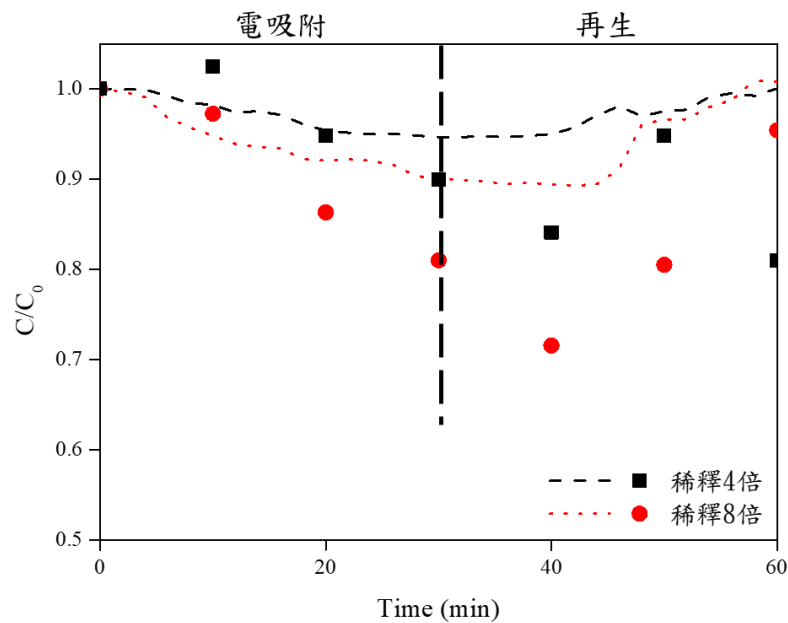


圖5.23 MW03地下水(稀釋4倍 (□)及 8倍 (○))單電極組測試結果(1-cycle (電吸附(1.0 A)與脫附再生(0 A)))。(線條為連續監測 EC 校準值；實心符號為實測值(ICP-MS))

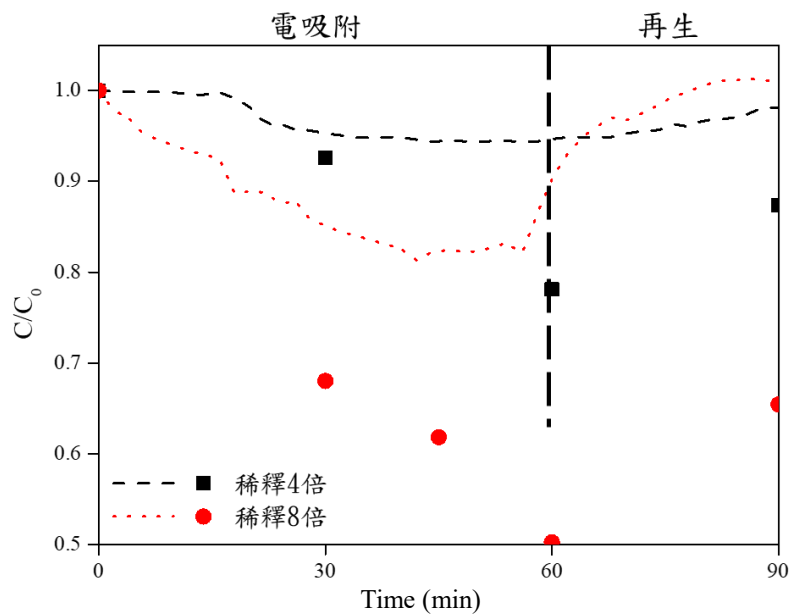


圖5.24 MW03地下水(稀釋4倍 (□)及 8倍 (○))串聯2組電極組測試結果(1-cycle (電吸附(1.0 A)與脫附再生(0 A)))。(線條為連續監測 EC 校準值；實心符號為實測值(ICP-MS))

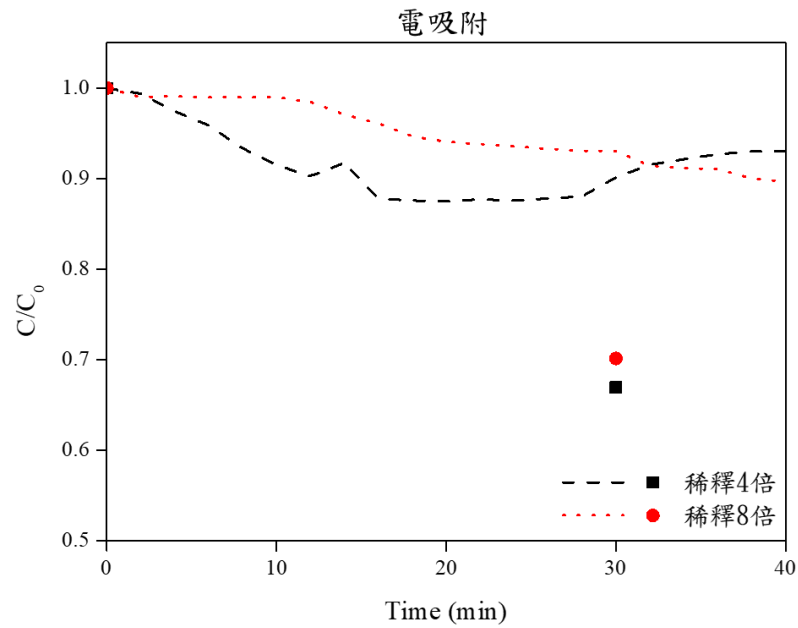


圖5.25 MW03實際地下水(稀釋4倍 (□)及 8倍 (○))串聯3組電極組測試結果(1-cycle (電吸附(1.0 A)與脫附再生(0 A))。(空心符號為連續監測導電度(EC)值；實心符號為實測值(ICP-MS))

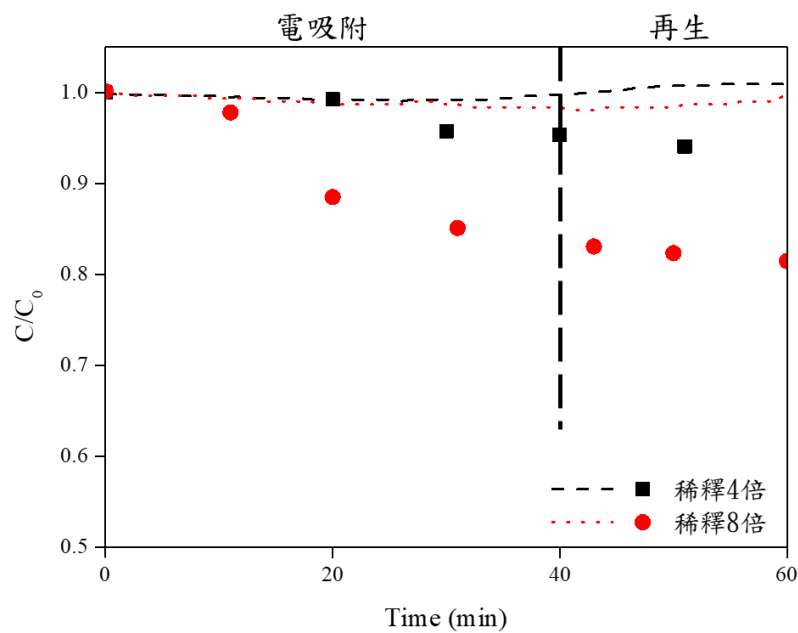


圖5.26 MW05地下水(稀釋4倍 (□)及 8倍 (○))單電極組測試結果(1-cycle (電吸附(1.0 A)與脫附再生(0 A))。(線條為連續監測 EC 校準值；實心符號為實測值(ICP-MS))

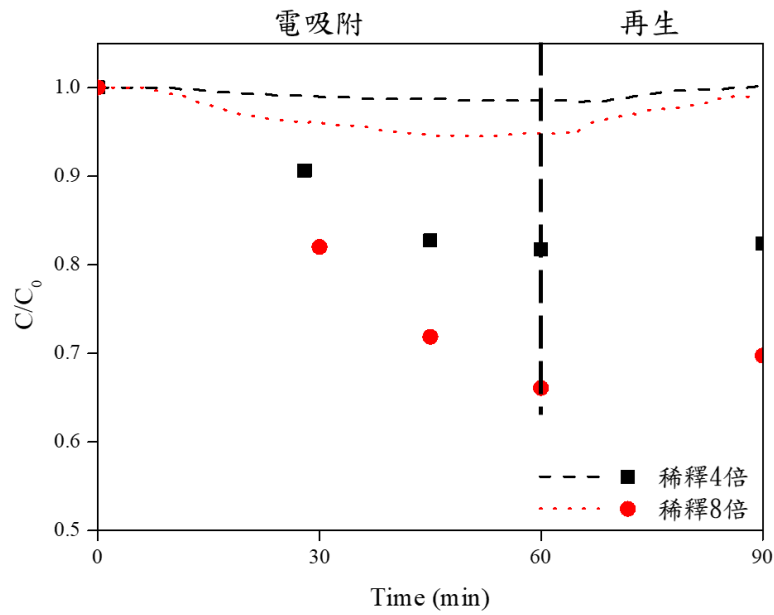


圖5.27 MW05地下水(稀釋4倍(□)及 8倍(○))串聯2組電極組測試結果(1-cycle (電吸附(1.0 A)與脫附再生(0 A))。(線條為連續監測 EC 校準值；實心符號為實測值(ICP-MS))

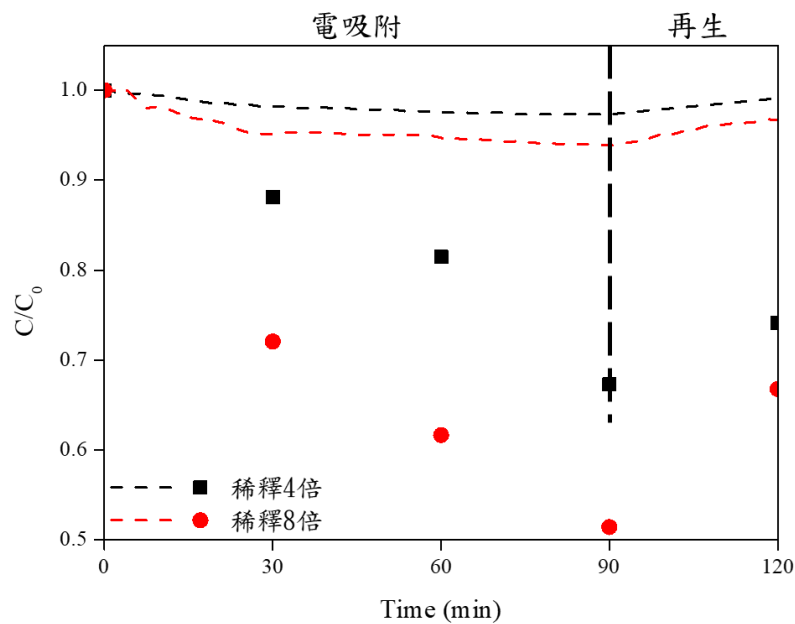


圖5.28 MW05地下水(稀釋4倍(□)及 8倍(○))串聯3組電極組測試結果(1-cycle (電吸附(1.0 A)與脫附再生(0 A))。(線條為連續監測 EC 校準值；實心符號為實測值(ICP-MS))

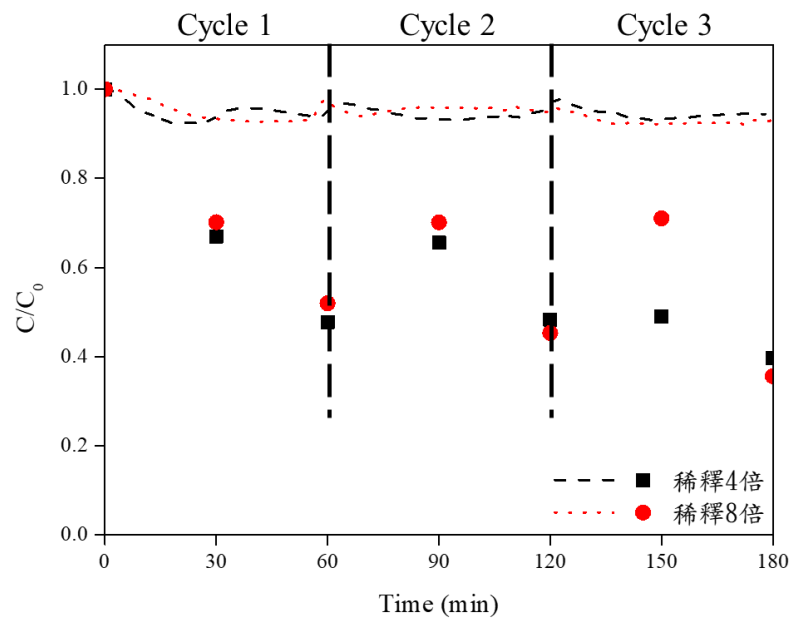


圖5.29 MW05地下水(稀釋4倍(□)及 8倍(○))4組電極組(3座串聯電吸附，1座再生)連續操作測試結果(3-cycle (電吸附(1.0 A)與脫附再生(0 A))。(線條為連續監測 EC 校準值；實心符號為實測值(ICP-MS))

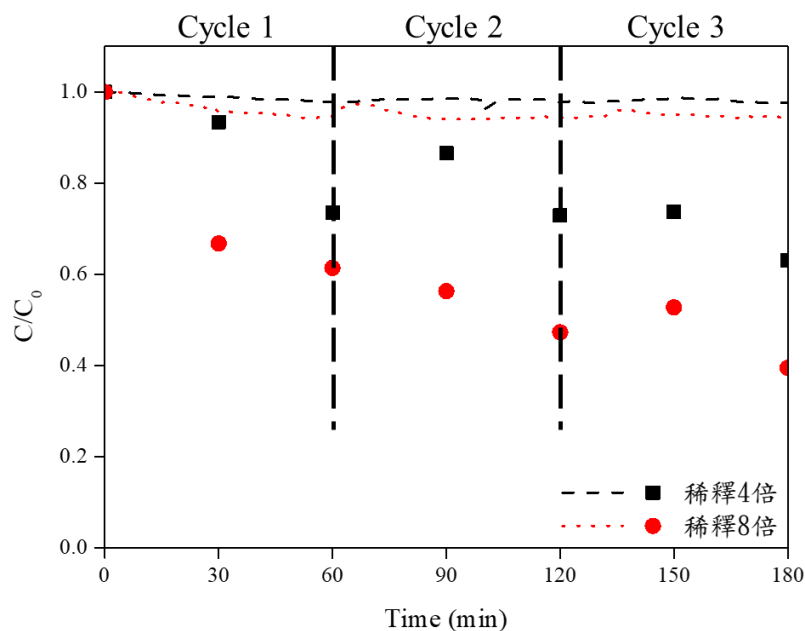


圖5.30 MW05地下水(稀釋4倍(□)及 8倍(○))4組電極組(3座串聯電吸附，1座再生)連續操作測試結果(1-cycle (電吸附(1.0 A)與脫附再生(0 A))。(線條為連續監測 EC 校準值；實心符號為實測值(ICP-MS))



陰陽離子 ICP 檢測及 EC 值校準分析

由本次試驗結果顯示，由即時量測之 EC 值與實際 ICP 檢測值，在計算電吸附效率時有落差，故針對不同陰陽離子之檢測分析結果進行校準分析，校準結果如圖5.31所示，顯示模擬及實際地下水分別校準後，呈現正相關趨勢，惟實際地下水中所含離子種類多濃度高，於相同 ICP 檢測值下，所呈現目標離子之 EC 值遠大於模擬地下水之 EC 值。

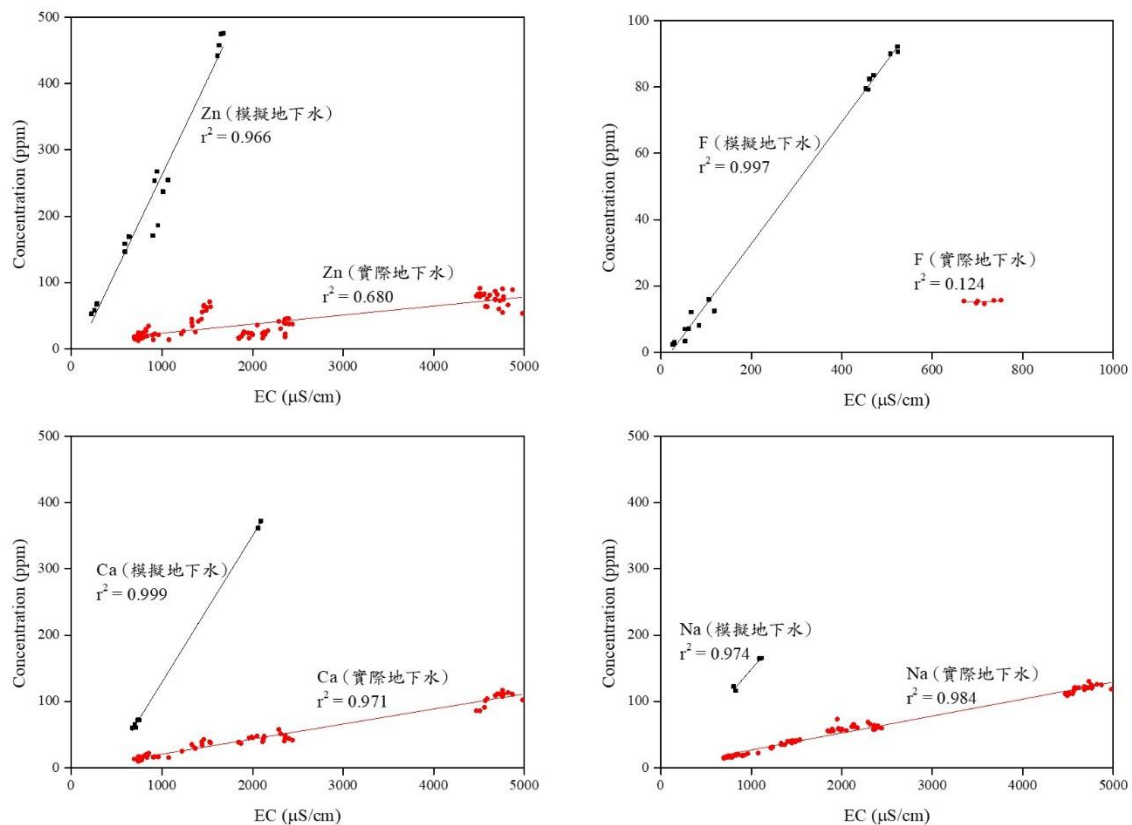


圖5.31 不同陰陽離子 ICP 檢測及 EC 值校準分析結果



電解還原毒性金屬離子

完成毒性金屬離子電吸附後，即進行脫附再生作業，回收濃縮液，採電解程序分離毒性重金屬(還原為固態金屬以利分離)及地殼元素，以平板式電解反應器，在定電流0.4 A(電壓變化5 V)進行1 h 電解測試，以電流密度0.01A/cm²，電解還原效率13~15%，另含地殼元素離子之回收水則導入廠區廢水處理系統。

光電催化還原毒性金屬離子

將導電玻璃製成半圓弧形再組合，將內側可導電的左右部分分別鍍上光陽極觸媒與光陰極觸媒，而無機廢水將從反應器中間流過，透過可見光照射1 h，還原金屬離子於光陰極，還原效率約15%藉此還原回收為零價金屬。

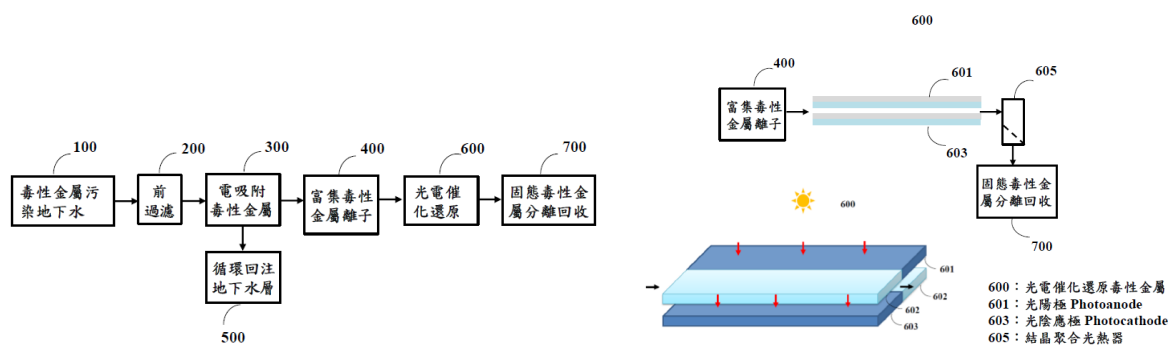


圖5.32 光驅動金屬離子還原光電催化反應器

現地整治經濟效益評估

FdCDI 設備具低成本、低耗能、全自動操作、微小/模組化、設置/操作空間需求小、不需添加化學藥劑而無污泥產生等優勢，有利於進行受重金屬污染地下水之現地整治。FdCDI 應用於現地整治地下水污染場址之成本分析如表5.4，電極組以不銹鋼薄片塗佈高表面積、孔洞碳材方式製作，除可增加吸附面積外，亦有防蝕的效能。現地整治之固定成本，除 FdCDI 設備外，另含抽水泵(地下水抽至迴流工作槽)、迴流工作槽、前過濾裝置、電解槽及管路配置等附屬設備或作業；操作成本部分，因 FdCDI 採低耗能、微小/模組化、全自動操作，且不需添加化學藥劑，無污泥產生與後續所衍生的處理成本。僅有 FdCDI 設備及抽水泵之低電力消耗，以及前過濾裝置之濾心耗材(反沖洗重複使用)，電極組則以替換2座估算。本新穎 FdCDI 設備之初設固定成本(分10年攤提)與年操作費用合計約40萬元，低於一般傳統整治工程費用(目前類似污染場址整治約需3年施作，費用至少500萬元)，尤其，整治結束後，FdCDI 設備仍可運用於其他需求。

因此，自動化 FdCDI (1.44 T/d)設備運用於現地整治，預期工程可行。現地整治模場試驗結果顯示，自動化 FdCDI 設備為低成本、低耗能、高效率、可自動化、



不受地域限制、無衍生廢棄物、及可遠端操控之受重金屬污染之地下水整治技術、設備及其示範，以做為其他污染場址整治參考。

FdCDI 之技術與設備具優勢例如：無中間與最終處置需求，尤其，整治過程，未添加任何化學藥劑，而無衍生污泥需再處理等，屬綠色及永續整治技術。與其他地下水抽出及處理(pump and treat)之處理方法例如：沉澱法、離子交換樹脂法、吸附法、逆滲透法、及電透析法等不同，相對成本效益比較，詳如表5.5，其中，成本效益分析之計算基準：設計處理量：0.1 T/h；地下水中金屬離子(Zn^{2+})濃度：100 mg/L，針對固定成本(包括：主要設備及附屬槽體、管路及泵設備等)及年操作成本(包括：電力、耗材、場地、人力、維修及衍生廢棄物處理費用等)進行相對比較，沈澱法經多段流程，需添加藥劑而衍生污泥處理費用，致操作成本高於其他處理方法；逆滲透法則因設備及耗材價格高，且須高壓操作致固定及操作成本(含RO膜廢棄費用)皆較高；離子交換樹脂法之操作成本則與逆滲透法相當；FdCDI 與電透析法則除固定成本稍有差異外，操作成本則類似且無污泥或衍生廢棄物產生，總結前述比較，FdCDI 技術之固定及操作成本皆較其他處理方法低，預估處理費約400元/T，適合應用於地下水污染場址現地自動化、連續整治。



表5.4 FdCDI 應用於重金屬污染場址成本分析

	項目	數量	單價	金額	說明
固定成本	1. 自動化 FdCDI 設備	1 台	800,000	800,000	含迴流工作槽、管路及泵送設備
小 計				800,000	
操作成本	1. 電力(每年)			10,000	
	2. 人力費用	6.75 人月	50,000	340,000	13.5 月×0.5 人
	3. 耗材維修費用	1 式	40,000	40,000	設備成本之5%估計
	4. 雜費	1 式	10,000	10,000	
小 計				400,000	

表5.5 地下水抽出及處理(pump and treat)之處理方法(地上)相對成本效益分析
(設計處理量：0.1 T/h；地下水中金屬離子(Zn^{2+})濃度：100 mg/L)

項目		預估金額 (新台幣)	處理方法						說明
			Fd CDI	沉澱 法	離子 交換 樹脂 法	吸附 法	逆滲 透法	電透 析法	
固定成本	1. 主設備	500,000	1	1	2	3	3	2	含槽體、管路及泵送設備
操作成本 (年)	1. 電力	20,000	1	2	2	2	3	2	
	2. 耗材	64,000	1	4	3	3	2	2	含電極、藥劑、活性碳、樹脂及濾材
	3. 場地租金	10,000	1	4	3	3	2	2	
	4. 人力	160,000	1	4	2	3	2	1	1 人月 40,000 元
	5. 維修	50,000	1	1	1	1	2	1	
	6. 污泥處理費用	3,000	0	5	3	1	1	0	有害污泥處理費用 20,000 元/噸
加總		354,000							固定成本分5年攤提
相對成本			1	3.5	3	2.7	2.5	1.7	



實務應用規劃

FdCDI 具低成本、低耗能、可自動操作化、不受地域限制及無衍生廢棄物等優點，且不產生污泥，大幅減少後續有害污泥處理成本，相同原理、方法與設備可推廣應用於(如表 5.6)：(1)海水脫鹽生成淡水、(2)無機廢水(例如：金屬表面處理衍生含重金屬廢水、半導體業之含氟廢水(液)、廢電池拆解業之有價金屬廢液等)資源化處理、及(3)烏腳病流行區域含砷地下水整治(其中，毒性較高之 As(III)^0 ，在施以 1.2 V 時，可被氧化生成 As(V)^- 離子，以利電吸附去除)。

表 5.6 FdCDI 技術應用潛力與機會

產業別	製程	可循環回收產品	技術成熟(TRL)評估
電鍍業	鍍槽後清洗程序 廢水處理	Zn^{2+} 、 Ag^+ 、水	4~5
半導體業	鍍槽後清洗程序	Cu^{2+} 、 Ag^+ 、水	4~5
金屬表面處理業	鍍槽後清洗程序	Ni^{2+} 、 Cu^{2+} 、 Zn^{2+} 、水	4~5
毒性金屬污染地下水	現地整治	Zn^{2+} 、 Cu^{2+}	5
無機廢水處理業	無機廢水處理	Ni^{2+} 、 Cu^{2+} 、 Zn^{2+} 、 水	4~5
廢棄物回收業	貴重金屬富集	Cu^{2+} 、 Ni^{2+}	4
廢電池回收業	貴重金屬富集	Li^+ 、 Co^{2+} 、 Ni^{2+}	3
海水脫鹽	脫鹽、Li mining	NaCl 、Li、淡水	4~5
烏腳病流行區域含砷地下水	現地整治	As(III)^0 氧化生成 As(V)^- 離子，以利電吸 附去除	4~5



完成目標與工作項目

表5.7 完成目標與工作項目及執行現況

預期完成目標	工作項目	執行現況
1.現地勘查	- 廠區現況調查 - 監測井位確認 - 現地測試設備安裝位置確認	已完成
2.污染場址地下水檢測	水樣之重金屬、氟鹽及其他陰陽離子濃度與 EC、pH 值	已完成
3.模擬地下水實驗室級測試	- 單電極組測試 2組串聯電極組測試 3組串聯電極組測試 - 前處理單元測試 - 電解分離測試	已完成
4.自動化 FdCDI 設備	- 模組設計及組裝 - 串並聯配置模式建立 - 自動化模組建置 - 遠端監控模組建置	已完成
5.現地整治可行性研究	- 現地測試規劃及配置 - 現場單元、連續及自動化操作 - 經濟效益評估	已完成



5.2 結論與建議

1. 實驗室模擬廢水測試結果顯示，經由不同陰陽離子(Zn^{2+} 、 F^- 、 Fe^{3+} 、 Na^+ 等)進行多組電極組(1~3座)串聯及定電流(1 A)操作測試，比較不同電極組數量之測試結果顯示，單電極組操作於 30~40 min 即吸附飽和，而 2~3 座串聯則至 60 min 仍持續維持電吸附效率，符合本電容去離子技術(吸附 60 min，再生 30 min)之運作需求。另可將回收水泵送回迴流工作槽與污染濃度較高之地下水混合後進行電吸附。
2. 模擬地下水之電吸附效率(連續監測 EC 值趨勢)，除氟離子為因應污染場址現況選用較低濃度，電吸附效率高達 80%外，其餘陽離子(Zn^{2+} 、 Na^+)濃度在 200~300 mg/L 範圍者，其最大電吸附效率約落在 25~30%之間；而地殼元素鐵離子因其測試濃度最大(1000 mg/L)，其最大處理效率僅為 5%。若以鋅離子實測值(以 ICP-MS 分析)結果，電吸附效率則增至為 22~57%(1~3 組電極組)。
3. 另針對 FdCDI 設備連續測試部分，則同樣針對稀釋 4 倍及 8 倍之 MW03 及 MW05 地下水，進行 4 組電極組(3 座串聯電吸附，1 座再生)連續操作(3-cycle)測試。測試結果(EC 值)顯示，Cycle-1 電吸附效率約為 13%，Cycle-2 維持電吸附效率 9%，Cycle-3 則保持 13%的電吸附效率。而由 ICP-MS 分析之鋅濃度結果，1st~3rd Cycle 之電吸附效率分別為 12, 22 及 34%。
4. 測試結果顯示可有效分離污染場址地下水之管制物種(鋅、鉻、及氟鹽)，經經濟效益評估，例如：200 mg/L 鋅經 5 個串聯電極組(51 電極(0.18 m × 0.18 m)/組)分離去除(以單組效率 60%計)可達 285 g/d (1.44 T/d)，若以受污染地下水 700 噸(T)估算，採循環回注方式，使用 1 套可遠端操控自動化 FdCDI (1.44 T/d)設備，則預估需時約 491 日((700 T × 1000L/T × 0.2 g/L)/(285 g/d))。
5. 地下水整治通常耗時、費工且所需經費龐大，所提出之方法已有重金屬濃度相對較高之電鍍/表面處理廢水之實務處理經驗，地下水之污染重金屬濃度相對較低，預期更加容易推廣應用。
6. 流體電容去離子 (FdCDI)技術與設備可電吸附(electrosorption)富集回收之濃縮重(毒性)金屬水溶液，可配合新建立光驅動選擇性(或傳統電解法)予以還原，而無中間與最終處置需求，尤其，整治過程，未添加任何化學藥劑，無衍生污泥需再處理，屬綠色及永續整治技術。
7. FdCDI 之電吸附可使水回收再利用；脫附則可分離、富集重金屬離子，提供



原廠回收再利用。現地整治測試及驗證結果，有利於提升自動化/連續操作效率及穩定性，尤其，由困難排除之經驗累積而較易建置操作手冊，也使工程經濟效益評估之可信賴度提高。

8. 建立一套低成本、低耗能、可自動操作化、不受地域限制、無衍生廢棄物、及可遠端操控之受重金屬污染之地下水整治技術、設備及其示範，以做為其他污染場址整治參考。



六、參考文獻

中華民國環保署，2013，固定污染源戴奧辛及重金屬排放調查及管制計畫。

土壤及地下水污染整治網，2019，場址查詢。源自：

<https://sgw.epa.gov.tw/ContaminatedSitesMap/Default.aspx>

中華民國環境工程學會電子報，2015，我國土壤及地下水整治技術發展願景。源

自：https://www.cienve.org.tw/EPaper/104_1/tech2.aspx

Abdul, K.S.M., Jayasinghe, S.S., Chandana, E.P., Jayasumana, C. and De Silva, P.M.C., 2015. Arsenic and human health effects: A review. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 40(3), 828–846.

Bharath, G., Rambabu, K., Banat, F., Hai, A., Arangadi, A. F., & Ponpandian, N., 2019. Enhanced electrochemical performances of peanut shell derived activated carbon and its Fe₃O₄ nanocomposites for capacitive deionization of Cr (VI) ions. *Science of the Total Environment*, 691, 713-726.

Blacksmith Institute, 2011. The world worst toxic pollution problems. Blacksmith Institute, Riverside Drive, NY.

Brar, S. K., Verma, M. R., Surampalli, Y., Misra, K., Tyagi, R. D. and N. Meunier, J. F., 2006. “Bioremediation of hazardous wastes – a review”, *Practice Periodical of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste Management*, 10(2), 59-72

Chao, H.P., Hsieh, L.H.C., Tran, H.N., 2018. Increase in volatilization of organic compounds using air sparging through addition in alcohol in a soil-water system. *Journal of Hazardous Materials* 344, 942-949.

Cheng Keong, C., Sunitha Vivek, Y., Salamatina, B., Amini Horri, B., 2017. Green synthesis of ZnO nanoparticles by an alginate mediated ion-exchange process and a case study for photocatalysis of methylene blue dye. *Journal of Physics: Conference Series* 829, 12-14.

Esdaile, L. J. & Chalker, J. M., 2018. The mercury problem in artisanal and small-scale gold mining. *Chem. Eur. J.* 24, 6905–6916

Federal Remediation Technologies Roundtable, 2020. Groundwater Pump and Treat, FRTR Remediation Technologies Screening Matrix.

Gao, X., Porada, S., Omosebi, A., Liu, K. L., Biesheuvel, P. M., & Landon, J., 2016. Complementary surface charge for enhanced capacitive deionization. *Water research*, 92, 275-282.

Glimun, 2009. Access to safe drinking water. Great Lakes invitational Conference



- association, Great Lakes region, Michigan.
- Hashim, M.A., Mukhopadhyay, S., Sahu, J.N., Sengupta, B., 2011. Remediation technologies for heavy metal contaminated groundwater. *J. Environ. Manage.*, 92, 2355-2388.
- Hou, D., & Al-Tabbaa, A., 2014. Sustainability: A new imperative in contaminated land remediation. *Environmental Science & Policy*, 39, 25-34.
- Hou, D., Al-Tabbaa, A., Chen, H., Mamic, I., 2014. Factor analysis and structural equation modeling of sustainable behaviour in contaminated land remediation. *Journal of Cleaner Production* 84, 439-449
- Hou, D., Al-Tabbaa, A., Guthrie, P., 2014. The adoption of sustainable remediation behavior in the US and UK: a cross country comparison and determinant analysis. *The Science of the Total Environment* 490, 905-913.
- Hou, D., Al-Tabbaa, A., Guthrie, P., Hellings, J., 2014. Using a hybrid LCA method to evaluate the sustainability of sediment remediation at the London Olympic park. *Journal of Cleaner Production* 83, 87-95.
- Hou, D., G. Li, and P. Nathanail, 2018. An emerging market for groundwater remediation in China: Policies, statistics, and future outlook. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 12(1): 16. *Management* 184, 18-26
- Hou, D., Guthrie, P., Rigby, M., 2016. Assessing the trend in sustainable remediation: a questionnaire survey of remediation professionals in various countries. *Journal of Environmental Management* 184, 18-26.
- Hou, D., 2019. *Sustainable Remediation of Contaminated Soil and Groundwater*. Butterworth-Elsevier.
- Kalaiselvi, A., Roopan, S.M., Madhumitha, G., Ramalingam, C., Elango, G., 2015. Synthesis and characterization of palladium nanoparticles using *Catharanthus roseus* leaf extract and its application in the photo-catalytic degradation. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy* 135, 116-119.
- Kao, C.M., Chien, H.Y., Surampalli, R.Y., Chien, C.C., Chen, C.Y., 2010. "Assessing of Natural Attenuation and Intrinsic Bioremediation Rates at a Petroleum-Hydrocarbon Spill Site: Laboratory and Field Studies", *Journal of Environmental Engineering-ASCE*, 136(1), 54-67.
- Kao, C.M., Huang, W.Y., Chang, L.J., Chen, T.Y., Chien, H.Y., Hou, F., 2006. "Application of monitored natural attenuation to remediate a petroleum-hydrocarbon



- spill site”, *Water Science and Technology*, 53(2), 321-328.
- Li, H., & Zou, L. 2011. Ion-exchange membrane capacitive deionization: A new strategy for brackish water desalination. *Desalination*, 275(1-3), 62-66. *search Bulletin* 78, 112-118.
- Liao, X., Yan, X., Ma, D., Zhao, D., Sun, L., Li, Y., Tao, H., 2018. The research and development of technology for contaminated site remediation. In: *Twenty Years of Research and Development on Soil Pollution and Remediation in China*. Springer, Singapore, 785-798.
- O’Steen, W.N., Howard Jr., R.O., May 2014. Challenges in planning for groundwater remedy transition at a complex site. In: *2014 NGWA Groundwater Summit*. Ngwa.
- Ojuederie, O. B., and Babalola, O. O., 2017. Microbial and plant-assisted bioremediation of heavy metal polluted environments: a review. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 14:1504
- Saha, D. and Sahu, S. 2016. A decade of investigations on groundwater arsenic contamination in Middle Ganga Plain, India. *Environmental Geochemistry and Health*, 38(2), 315-337.
- Shakoor, M., Niazi, N., Bibi, I., Rahman, M., Naidu, R., Dong, Z., Shahid, M. and Arshad, M. 2015. Unraveling health risk and speciation of arsenic from groundwater in rural areas of Punjab, Pakistan. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 12(10), 12371-12390.
- Song, Y., Hou, D., Zhang, J., O’Connor, D., Li, G., Gu, Q., et al., 2018. Environmental and socioeconomic sustainability appraisal of contaminated land remediation strategies: a case study at a mega-site in China. *The Science of the Total Environment* 610, 391-401.
- United Nations Environment Programme, 2019. *Global Mercury Assessment 2018*, 12
- United States Environmental Protection Agency, Office of Solid Waste and Emergency Response Washington DC 20460, 1998. *Permeable Reactive Barrier Technologies for Contaminant Remediation*.
- Vidonish, J.E., Zygourakis, K., Masiello, C.A., Sabadell, G., Alvarez, P.J.J., 2016. Thermal treatment of hydrocarbon-impacted soils: a review of technology innovation for sustainable remediation *Engineering*, 2, 426-437.
- World Health Organization, 2019. *Lead poisoning and health*.
- Wu, Y. W., Huang, G. H., Chakma, A. and Zeng, G. M., 2005. “Separation of petroleum



hydrocarbons from soil and groundwater through enhanced bioremediation”, *Energy Sources*, 27, 221-232.

Xu, J., Liu, C., Hsu, P., Zhao, J., Wu, T., Tang, J., Liu, K., Cui, Y., 2019. Remediation of heavy metal contaminated soil by asymmetrical alternating current electrochemistry, *Nature Communication*, 10,2440.

Yang, H., Liu, X., Sun, S., Nie, Y., Wu, H., Yang, T., 2016. Green and facile synthesis of graphene nanosheets/ K₃PW₁₂O₄₀ nanocomposites with enhanced photocatalytic activities. *Materials Research Bulletin*, 78, 112-118.



期中報告審查意見回復對照表

行政院環境保護署「土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗專案」

☐申請計畫書 ☒期中報告 ☐修正計畫書 ☐期末報告 **審查意見回復對照表**

計畫年度	110 年度	計畫類型	☐ 研究型 ☒ 模場型
計畫類別	☒ 整治 ☐ 調查 ☐ 其它		主持人：王鴻博 NO：B10
計畫名稱	以流體電容去離子法實地整治重金屬污染地下水之模場試驗與示範		
委員審查意見		計畫單位回覆	
委員一			
1. 請補充說明期中報告第 36 至 42 頁所述之現地場址相關調查數據，係本計畫今年度之執行成果，亦或是前年度或其他相關計畫？請先預釐清與說明。		1. 左述調查數據係引用新明利廠址整治計畫書，也註明資料來源(新明利五金加工廠土壤及地下水汙染控制計畫書(修正二版)，2020)內容，作為污染場址現況之參考，主要著重於場址區位、現有監測井分布、地表與地下水水文現況、及地下水質調查結果(詳如：四、研究方法與過程，污染場址整治資料分析(p. 29~31))。 另也依現地場址整治所需數據，進行污染場址地下水檢測(結果詳如表 5.1 (p. 38))。	
2. 依表 4.6 之地下水水質檢測結果，重金屬鉻、鋅之變化差異較大，其相關原因為何？宜先針對相關地下水水質變動之差異進行檢討與分析，以利後續技術應用之評估參考。		2. 重金屬鉻、鋅之變化差異較大，可能是 MW03 位於電鍍製程陰井附近，因陰井龜裂造成製程廢水滲漏；而 MW05 則位於 MW03 地下水下游，致 MW03 及 MW05 地下水毒性金屬濃度皆較其他地下水高，因此，選擇 MW03 及 MW05 地下水做為整治研究對象。除針對各主要單一離子(不同濃度範圍)進行實驗室級模擬地下水測試(單、2 組、3 組電極組串聯)(如圖 5.15~20 (p.49~52))，也進行實際地下水之電吸附效率測試(圖 5.23~30 (p.56~59))，以完成單元、連續及自動化操作模式。	
3. 依實驗室測試之模擬結果，實驗規劃係以單一離子(如 Zn、Cr、Ni 及 F)為測試，然實際場址之多重離子狀況下相關離子之競爭反應影響，建議亦應予以評估與分析。		3. 實驗室測試除含各單一離子，也針對現地地下水 Zn^{2+} 、 Cr^{3+} 、 Ni^{2+} 及 F^{-} 濃度範圍，模擬地下水進行測試(如圖 5.21 (p. 52))，以利以符合地下水管制規範之回注地下水層作業。	
4. 本計畫預期建立低成本、低耗能、可遠端操控之示範技術，相關推動期程是否可如期於本年度達成？另成本及耗能分析，宜請納入期末報告之中。		4. 本模場試驗專案重點工作包括：(1)污染場址地下水檢測、(2)自動化 FdCDI 模組設備之設計與組裝、(3)模擬污染場址地下水之實驗室級 FdCDI (含電解分離回收毒性金屬(鋅、鉻)測試、及(4) FdCDI 設備之現地整治工程可行性研究(含單元、連續及自動化操作與經濟效益評估)，測試結果顯示可有效分離污染場址地下水之管制物種(鋅、鉻、及氟鹽)，以符合管制標準。此 FdCDI (1.44 T/d)設備運用於現地整治，確能提供一套低成本、低耗能(如表 5.4~5.5 (p. 62))、高效率、可自動化、不受地域限制、無	



	衍生廢棄物、及可遠端操控之受重金屬污染之地下水整治技術、設備及其示範，以做為其他污染場址整治參考。
委員二 1. 本計畫以五金零件電鍍廠遭重金屬污染之地下水為研究對象，在整治過程(P&T)將重金屬污染之地下水抽出後，再以流體電容去離子技術(FdCDI)，利用流體電極擴增電雙層量增加吸附效率並可減少反應器體積，而被吸附之離子可經電壓的調整(改變)加速脫附，達成富集回收及濃縮目的，期中報告內容撰述大致完整，文獻資料蒐集完備，至期中已完成自動化操作模式建立以及現地整治設備整裝與表 4.1 甘特圖所列進度大致吻合。計畫摘要應修正為期中報告摘要並增補期中執行成果以及結論與建議，期末報告提出時應補充申請經費與自籌款使用情形說明。	(1)本模場試驗專案重點工作包括：(1)污染場址地下水檢測、(2)自動化 FdCDI 模組設備之設計與組裝、(3)模擬污染場址地下水之實驗室級 FdCDI (含電解分離回收毒性金屬(鋅、鉻)測試、及(4) FdCDI 設備之現地整治工程可行性研究(含單元、連續及自動化操作與經濟效益評估)，測試結果顯示可有效分離污染場址地下水之管制物種(鋅、鉻、及氟鹽)，以符合管制標準。此 FdCDI (1.44 T/d)設備運用於現地整治，確能提供一套低成本、低耗能、高效率、可自動化、不受地域限制、無衍生廢棄物、及可遠端操控之受重金屬污染之地下水整治技術、設備及其示範，以做為其他污染場址整治參考。 (2)已於 110 年 11 月配合環保署經費系統進行經費科目變更作業，以符合計畫經費實務運用。 (3)未編列自籌款。
委員三 5. 計畫是先進行地下水採樣分析，在進行以電吸附重金屬與負離子。方法簡單可行，且回收的水可回注土壤中。 6. 有進行模擬地下水條件去除效率與實測地下水去除效率，二者皆有數據，如何精進模擬的準確性，是下一階段的重要工作。 7. 實際進度與預期進度相符。	1. 在現地測試時，毒性金屬富集回收後，除將符合排放標準之回收水排入廠址所屬廢水處理設施外，亦可進行回注地下水層(惟需先獲得核可)。 2. 依據現地採樣地下水之分析結果，進行不同離子及濃度配比之模擬地下水(增加地殼元素離子之項目及濃度)進行單組、2 組及 3 組串聯電及組之電吸附效率測試(圖 5.15~20 (p. 49~52))，測試結果顯示可有效分離污染場址地下水之管制物種(鋅、鉻、及氟鹽)，以符合管制標準。 3. 已依進度完成本模場試驗專案重點工作包括：(1)污染場址地下水檢測、(2)自動化 FdCDI 模組設備之設計與組裝、(3)模擬污染場址地下水之實驗室級 FdCDI (含電解分離回收毒性金屬(鋅、鉻)測試、及(4) FdCDI 設備之現地整治工程可行性研究(含單元、連續及自動化操作與經濟效益評估)。
委員四 1. 本計畫以流體電容去離子法現地整治重金屬污染地下水，已完成實場地下水採樣分析及實驗室測試，去除效果依不同離子而有高低差異，其適用特性	(1) 依據現地採樣地下水之分析結果，進行不同離子及濃度配比之模擬地下水(增加地殼元素離子之項目及濃度)進行單組、2 組及 3 組串聯電及組之電吸附效率測試(圖 5.15~20 (p. 49~52))，測試結果顯示可有效分離污染場址地下水之管制物種(鋅、鉻、及氟鹽)，以符合管制標準。



可再研討。	(2) 過去已累積 FdCDI 電吸附效率與離子強度及電荷密度關係(圖 3.26 (p. 23))。另外，FdCDI 應用於台南烏腳病流行區域含砷地下水整治可行性，其中，毒性較高之 $(\text{As(III)})^0$ ，在施以 1.2 V 時，可被氧化生成 As(V)^- 離子，以利電吸附去除(p. 63)，也可供參考。
委員五 1. P.36 圖 4.2 場址位置圖不易辨識，建請調整解析度。 2. 專案成果績效自評表所列專案執行期程，建請調整為期中。 3. P.64，觀察地下水樣品 MW03、MW05 經過 5μ 濾心前處理後，Na 濃度大幅下降，MW03 由 228 降至 2.95，MW05 由 29.5 降至 2.94，此現象相當特別；另對應頁次 47，計畫檢測結果 MW03 鈉 Na 濃度 228 mg/L，MW05 鈉 Na 濃度 0.87 mg/L，與表 4.11 所載 29.5 的數值有出入，請再確認表 4.6 與表 4.11 之水質參數。	1. 已重新製作圖 4.2 場址位置圖(p. 29)。 2. 已修正(p. 74)。 3. 有關鈉濃度大幅下降之現象，已於前處理單元(5 μm 及活性碳濾心)測試時，確認地下水水樣經前處理後鈉濃度變化不明顯約 0~8% (表 5.3 (p. 54))。 另有關期中報告表 4.6 及 4.11 之 MW05 地下水鈉濃度，經比對 ICP-MS 原始數據應為 29.5 mg/L (表 5.1 (p.38))。



附件1 學術產出及活動

國內研討會論文(摘要3篇)

以自動化流體電容去離子法整治鋅污染地下水

張博鈞 國立成功大學環境工程學系碩士班研究生

段宇君 國立成功大學環境工程學系博士後研究員

吳俊毅 國立成功大學環境工程學系博士後研究員

王鴻博 國立成功大學環境工程學系講座教授

計畫編號：110GA0008001047

摘要

綠色與永續整治(Green and sustainable remediation (GSR))是目前重要趨勢，各國正積極尋求新的科學知識、政策手段與其他努力以實現平衡社會、經濟、環境需求的聯合國永續發展目標(SDGs)。我們開發一種新穎流體電容去離子(fluidized capacitive deionization (FdCDI))方法，以流體電極擴增電雙層，增加電吸附效率並減少反應器體積，以利富集回收及濃縮(超過千倍)($<1/1000$)水中(毒性)重金屬離子，尤其，整治過程中未添加任何化學藥劑，而無衍生污泥處理問題，屬 GSR 技術。本 FdCDI 技術已有實務處理重金屬濃度相對較高之電鍍廢水之經驗，地下水之污染重金屬濃度較低，預期更加容易適用。本試驗場址為傳統金屬製品製造業之五金零件電鍍(鋅、鉻)廠區，公告超過地下水污染管制標準之污染物含陰陽離子：鎳、鋅、鉻、及氟鹽，為典型重金屬污染場址。整治操作區狹小、受限，所設計、組裝之小型化模組型 FdCDI 設備(70 cm (H)×60 cm (W)×60 cm (L))應可適確進行現地整治。以 bench-scale FdCDI 試驗而獲自動化 FdCDI 操作所需參數(1.2 V、1.0 L/min)作為現地整治之自動化/連續操作效率之操作值，可獲較佳效率。模擬地下水則以 Zn^{2+} (200 mg/L)、 Cr^{3+} (3 mg/L)、 Ni^{2+} (1 mg/L)及 F^- (16 mg/L)，另以不同的電壓(1.0、1.2 V)及流量(0.5、1.0 L/min)進行電吸附效率研究，以 1.0 L/min 流量及電壓 1.2 V 作為實際污染場址地下水進行測試，顯示初步實驗結果，發現實測 Zn^{2+} 電吸附效率約 5%，原因與較高濃度地殼元素例如： Ca^{2+} (453 mg/L)及 Fe^{3+} (994 mg/L)之電吸附競爭有關。此種初步模廠試驗結果，有利於建立一套低成本、低耗能、高效率、可自動化、不受地域限制、無衍生廢棄物、可遠端操控之受重金屬污染之地下水整治技術、設備及其示範，以做為其他污染場址整治參考。

關鍵字：綠色與永續整治、流體電容去離子、重金屬污染、地下水整治、自動化



Water recycling and reuse from RO wastewater by capacitive deionization

康珉瑄，國立成功大學環境工程研究所碩士班研究生

王鴻博，國立成功大學環境工程研究所教授

計畫編號：MOST108-2221-E-006 -165 -MY3 and 10GA0008001047

摘要

Mainly due to the rapid industrial development, the environment has suffered from the increasing pollution especially in water resource for drinking water. The overexploitation of freshwater trigger new methods for water recycling and reuse from wastewater by cost-effective and environment-friendly manners. Capacitive deionization (CDI) is an emerging desalination method based on the principle of electrosorption in the electrical double layers (EDLs) of porous carbon electrodes. In the electrosorption steps, the unwanted ions such as Na^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , Fe^{3+} and Cl^- in water migrate to the counter electrodes and captured by the porous carbon materials on electrodes. When saturated, the electrosorbed ions can be easily released and enriched for recycling under zero or reversed voltage. With the advantages of easy-operation, direct energy recovery, zero chemical consumptions and high efficiency for desalination, CDI broadens the applications for water softening.

Reverse osmosis (RO) has been used for the commercial desalination processes. While the RO system extends significant advantages over traditional desalination technologies, the relatively high energy consumption and operation cost are becoming the major problems for freshwater generation. The negative effect of fouling and scaling caused by the inorganic ions, especially for hardness ions, reduce the efficiency and decline the lifetime of membranes, leading to consume more chemicals to clean the membranes. The CDI method was used to treat the RO wastewater for water recycling and reuse. The RO-CDI hybrids, replacing the RO-RO devices, can have a better salt rejection efficiency and reduce the specific energy consumption.

Experimentally, the novel flow-through capacitive deionization (FtCDI) reactor for treatment RO wastewater using the ion-selectivity electrodes (SGO/AC) can enhance the removal efficiencies of hardness ions such as Ca^{2+} , Mg^{2+} and Fe^{3+} at high stable and reversible electrosorption-regeneration cycles. Thus, the FtCDI device can not only be used in the existing RO apparatus for water recycling and reuse in a relative low cost, and, very capably, replace the RO for clean water with much low energy consumption.

Keywords: capacitive deionization, hard water, RO wastewater, water recycling



光驅動還原回收鑷離子

吳慈恩，國立成功大學環境工程學系碩士生

王鴻博，國立成功大學環境工程學系教授

計畫編號：MoST110-2221-E-006-107-MY2 and 110GA0008001047

摘要

稀貴金屬(RPMs)已是國際公認的關鍵材料與戰略資源，傳統機械破碎、火法冶金、濕法冶金等方法回收RPM受限於高耗能、高二次污染與低回收率，因此，開發一種分離回收RPMs的新技術刻不容緩。以 Bi_2WO_6 為光電催化(PEC)陰極材料，透過可見光驅動PEC還原RPM離子，得以實現RPM之純化回收。此種整合流體電容去離子(FdCDI)技術(可濃縮RPM離子)與太陽能驅動PEC，除具能源自主，也可在環境友善、循環經濟之利基下，提供高科技產業之關鍵RPM原料。雖然光電催化效率相對低($0.612 \text{ M/g}\cdot\text{h}$)，但此種應用無窮盡太陽能光電催化鑷離子還原，以利純化、分離與回收，尤其，也產生電力(約1 eV)回饋FdCDI反應，確具發展潛力，尤其，也可擴展運用於其他RPMs之光電催化還原。

關鍵字：光電催化還原、稀貴金屬、電子廢棄物、電容去離子、 Bi_2WO_6



國外期刊論文(摘要3篇)

Simultaneous Capacitive Deionization and Disinfection of Saltwater by Ag@C/rGO Electrodes, *Environmental Chemistry* (2022) (In press)

W.-T. Chang, P.-A. Chen, W.-R. Chen, S.-H. Liu, and H. Paul Wang*

¹*Department of Environmental Engineering, National Cheng Kung University, Tainan 701, Taiwan*

*Corresponding author. Tel.: +886-6-276-3608, Fax: +886-6-275-2790

E-mail address: wanghp@ncku.edu.tw

Abstract

Capacitive deionization (CDI) of saltwater with the advantages of low energy consumption and environmentally friendly has been considered a potential solution to the scarcity of fresh water from sea, contaminated or waste waters. In the present work, the new Ag@C core-shell nanoparticle dispersed rGO (Ag@C/rGO) electrodes were synthesized and used as electrodes for CDI of saltwater. To better understand the formation mechanism of the Ag@C core-shell nanoparticles, temperature-programmed carbonization of the Ag⁺- β -cyclodextrin complexes was studied by in situ synchrotron small angle X-ray scattering spectroscopy. At 573 K, the core Ag metal with the most probability nanosizes of 40-80 nm in the Ag@C core-shell nanoparticles could be yielded. In the 4-cycle flow-by CDI (one through) experiments using the Ag@C/GO electrodes, high electrosorption efficiencies (25.0-44.9%) were obtained. Each CDI cycle involving electrosorption at 1.2 V and regeneration at 0 V for 1 h was highly reversible. In addition, the disinfection efficiency of the Ag@C/rGO electrodes, contributed by both silver and rGO, was very high (>97%). This study exemplifies that the easy-synthesis Ag@C/rGO core-shell carbon-based electrodes are feasible for simultaneous deionization and disinfection of saltwater to potential drinking water.

Keywords: Capacitive deionization, graphene, Ag@C, desalination, disinfection, SAXS.



Removal of toxic As(III) from a black-foot disease groundwater by oxidative capacitive deionization, *Water Research* (2022) (Submitted)

P.-A. Chen and H. Paul Wang*

¹*Department of Environmental Engineering, National Cheng Kung University, Tainan 701, Taiwan*

*Corresponding author. Tel.: +886-6-276-3608, Fax: +886-6-275-2790

E-mail address: wanghp@ncku.edu.tw

Abstract

Arsenic in the groundwater of Taiwan southwest seashore caused the black-foot disease (BFD) in 1950s. Although seldom used for livelihood, very recently, we found that the naturally occurring arsenic concentration of the groundwater still exceeded the water quality standard of Taiwan EPA. Thus, it is of great importance to develop a feasible and environmental-friendly method for arsenic removal from the groundwater in the BFD endemic area to lessen other possible utilization. Capacitive deionization (CDI) having advantages of relatively low energy consumption and secondary pollution is effective in the removal of charged ions from contaminated water or inorganic wastewater. Although CDI has been proven to be very feasible, a better understanding of arsenic electrochemistry involved in the CDI is of great significance. In this study, speciation of arsenic during CDI of the BFD groundwater was studied by *in situ* X-ray absorption near edge structure (XANES) spectroscopy. It appears that under a potential of 1.2 V, As(III)⁰ (H₃AsO₃) can be oxidized to less toxic As(V)⁻ (H₂AsO₄⁻) that can be captured by CDI electrosorption and separated from the groundwater. The removal efficiencies for As(III)⁰ that involves oxidation (As(III)⁰→As(V)⁻) and As(V)⁻ from the groundwater are 93% and 97%, respectively. Nevertheless, due to the presence of other ions in the BFD endemic groundwater, relatively low arsenic removal efficiencies (74-78%) are found. The As(V)⁻ ion possessing a relatively small hydration radius benefits its high removal efficiency from the groundwater. The kinetic data using the pseudo first-order kinetic model for the electrosorption show the diffusion of electrosorbed ions onto the EDLs are rapid and the charges are balanced by counter-ion electrosorption from the interparticle pore space into the EDLs. The oxidative As(III)⁰ under a small voltage to less toxic As(V)⁻ ions allowing removal from the electrosorption exemplify the feasibility for CDI applications.

Keywords: Capacitive deionization, arsenic, XANES, black-foot disease.



Photocatalytic Reduction of CO₂ to Methanol by Cu₂O/TiO₂ Heterojunctions, *Sustainability* (2022) (In press)

S. P. Cheng, L. W. Wei and H. Paul Wang*

¹*Department of Environmental Engineering, National Cheng Kung University, Tainan 701, Taiwan*

*Corresponding author. Tel.: +886-6-276-3608, Fax: +886-6-275-2790

E-mail address: wanghp@ncku.edu.tw

Abstract

The conversion of CO₂ to low-carbon fuels using solar energy is considered an economically attractive and environmentally friendly route. The development of novel catalysts and the use of solar energy via photocatalysis are key to achieving the goal of chemically reducing CO₂ under mild conditions. TiO₂ is not very effective for the photocatalytic reduction of CO₂ to low-carbon chemicals such as methanol (CH₃OH). Thus, in this work, novel Cu₂O/TiO₂ heterojunctions that can effectively separate photogenerated electrons and holes were prepared for photocatalytic CO₂-to-CH₃OH. More visible light-active Cu₂O in the Cu₂O/TiO₂ heterojunctions favors the formation of methanol under visible light irradiation. On the other hand, under UV-Vis irradiation for 6 h, the CH₃OH yielded from the photocatalytic CO₂-to-CH₃OH by the Cu₂O/TiO₂ heterojunctions is 21.0–70.6 μmol/g-catalyst. In contrast, the yield of CH₃OH decreases with an increase in the Cu₂O fraction in the Cu₂O/TiO₂ heterojunctions. It seems that excess Cu₂O in Cu₂O/TiO₂ heterojunctions may lead to less UV light exposure for the photocatalysts, and may decrease the conversion efficiency of CO₂ to CH₃OH.



成果發表會

地下水重金屬污染場址整治成果發表會

以流體電容去離子法實地整治重金屬污染地下水之模場試驗與示範

議 程

會議時間：110 年 12 月 17 日 13:30-15:30

會議地點：國立成功大學環境工程學系 47111 教室

時間	議 程	主講者/主持人
13:30~14:00	報到	
14:00~14:40	1.毒性金屬地下水污染場址現地整治 2.電鍍廢水回收再利用	王鴻博講座教授
14:40~15:10	流體電容去離子設備現場操作示範	段宇君博士
15:10~15:30	技術交流與綜合討論	王鴻博講座教授

主辦單位：國立成功大學環境工程學系 FdCDI 研究團隊

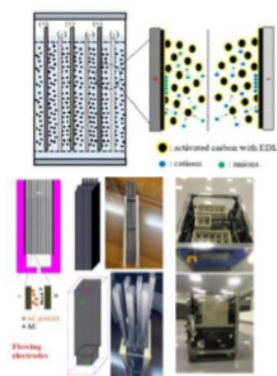


110年度土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗專案 地下水重金屬污染場址整治成果發表會

綠色與永續整治(Green and sustainable remediation (GSR)) 地下水重金屬污染場址

技術說明：

地下水整治通常耗時費工，我們開發一種新穎流體電容去離子(FdCDI)技術，以流體電極擴增電雙層量，增加電吸附之效率，減少反應器體積，並且透過電吸附水中離子，可實現低導電度水回收再利用；被電吸附之離子可在飽和後，調整為零電壓或施加反電壓(例如： -1.2 V)以加速離子脫附，富集回收及濃縮水中重(毒性)金屬離子，再以電解法予以還原，而無中間與最終處置需求，尤其，整治過程，未添加任何化學藥劑，而無衍生污泥需再處理，屬 GSR 技術。

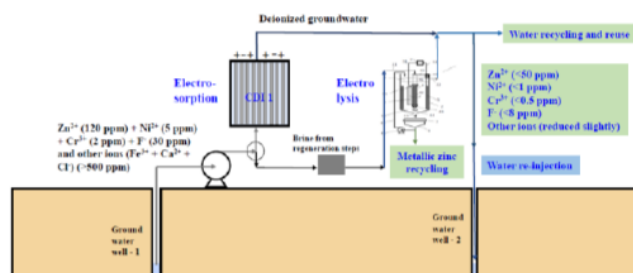


FdCDI 之電極設計、流體電極模組、電吸附/再生組合與自動化設備

實地整治：

某一試驗場址為傳統金屬製品製造業之五金零件電鍍(鋅、鉻)廠區，公告超過地下水污染管制標準之污染物含陰陽離子：鎳、鋅、鉻、及氟鹽，為典型重金屬污染場址。整治操作區狹小、受限，本小型化($0.6\text{ m (L)} \times 0.6\text{ m (W)} \times 0.7\text{ m (H)}$)FdCDI 模組設備可適確進行現地整治。試驗工作包括：

(1)污染場址地下水檢測、(2)自動化 FdCDI 模組設備之設計與組裝、(3) 模擬污染場址地下水之實驗室級 FdCDI (含電解分離回收毒性金屬(鋅、鉻)測試、及(4) FdCDI 設備之現地整治工程可行性研究(含單元、連續及自動化操作與經濟效益評估)，測試結果顯示可有效分離污染場址地下水之管制物種(鋅、鉻、及氟鹽)。



若以受污染地下水700 T 估算，採循環回注方式，使用1套可遠端操控自動化 FdCDI (1.44 T/d)設備，則預估需時約500日，遠低於傳統整治方法需至少3年施作，費用只需約10%。本模場現地試驗結果確能提供一套低成本、低耗能、高效率、可自動化、不受地域限制、無衍生廢棄物、及可遠端操控之受重金屬污染之地下水整治技術、設備及其示範，以做為其他污染場址整治參考。

創新關鍵技術：

- **自動化 FdCDI 模組設備：**(1)模組設計及組裝包括：人機、控制模組、電磁閥、管路、供電系統及電極座等；(2)串並聯配置模式建置，以6個電極座為操作單元，建立4種串、並聯模式，提供不同濃度及流量之操作需求；(3)自動化模組建立電吸附、再生及濃縮液自動化操作模式；及(4)遠端監控模組建置手機連網系統，達成即時數據顯示及



現場影樣監測等功能等。

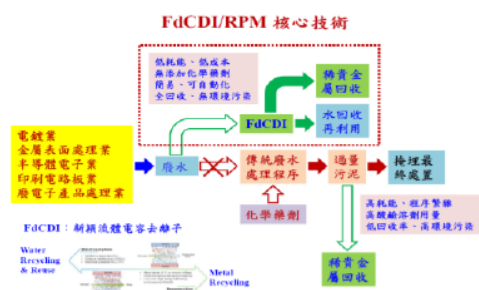
- **光驅動還原金屬離子純化回收技術：**太陽能驅動光電催化(photoelectrocatalysis (PEC))氧化有機污染物及提供電力供給 FdCDI，電吸附與富集回收地下水中的金屬離子，再以太陽能驅動 PEC 還原，而實現金屬純化回收。本創新技術程序簡易，易自動化設計，尤其使用綠色能源(太陽能驅動)，又不添加化學藥劑、無二次污染及污泥產生，技術優勢包括：(1)有效調控地下水中離子與太陽能驅動 e^- 與 h^+ 之傳輸，富集金屬及產生綠電提供製程需求、(2)易自動化操作設計與低維護需求、(3)低成本、(4)環境友善(不需添加化學藥劑)、及(5)可彈性增減處理能力，成為可創造高經濟效益之綠色技術。

其他應用：

- **低成本全自動無機廢水之稀有、貴重金屬回收及水再利用設備(0.2~2.0 T/h)-**

FdCDI 之特殊工藝係於電極間填充流體多孔洞碳材電極，形成延伸電極效應，擴增電雙層範圍，大幅提升電吸附(electrosorption)效率，減少反應器體積，並透過電吸附水中金屬離子，使低導電度水穿過電吸附層，可直接回收去離子水(deionized water)；

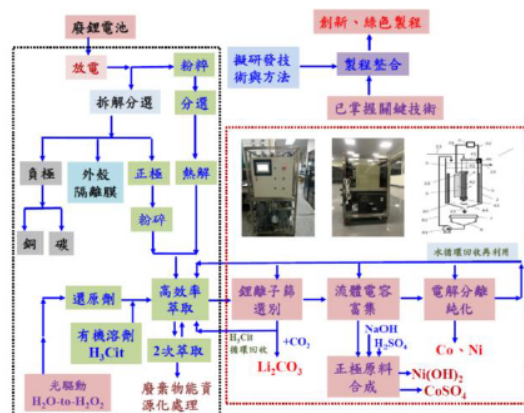
被電吸附之金屬離子可在飽和後調整為零電壓或施加反電壓以加速離子脫附，而可富集與回收無機金屬，因此，可應用及施作於回收高科技或廢電子產品回收處理等產業之無機廢水(液)之金屬離子，除資源循環再利用外，也因無添加化學藥劑而無衍生污泥，而可實現金屬與水的回收與再利用之循環經濟模式。



- **廢鋰電池提取高純正極前驅物原料技術-**

創新廢鋰電池提取高純正極前驅物原料技術：整合(萃取、鋰離子篩選別、流體電容富集及電解純化分離等技術)之工程設計概念。

- (1) 鋰離子篩選別技術與設備(2 T/h)：以低電壓加速廢水中鋰離子選別嵌入離子篩中，再施以反電壓釋出鋰離子，達到回收與富集鋰之目的。因不需添加化學藥劑，可減少衍生污泥清處費用，可自動化設計。
- (2) 流體電容富集稀貴金屬技術與設備(0.5 T/h)：新穎性流體電容去離子工藝，應用於回收高科技或廢電子產品回收處理等產業之無機廢水所含金屬離子，除資源循環再利用外，也因無衍生污泥而有效處理無機廢水，以實現水的回收與再利用之永續目標。
- (3) 電解純化分離技術(專利)：本技術利用轉軸下部安裝為一充作陰極之中空金屬管，與外部電源供應器之負極相接；一充作陽極之金屬筒，設置於絕緣容器之內側壁，且環繞所述之轉軸，與外部電源供應器之正極相接；一刮刀偏心裝設置於中空金屬管旁，在轉軸轉動下刮除電解回收之金屬。





發表會簽到表

行政院環境保護署

110 年度土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗專案
以流體電容去離子法實地整治重金屬污染地下水之模場試驗與示範
成果發表會出席簽到表

序號	機構名稱	姓名	簽名
1	總機中導作	何坤發	何坤發
2	禾旬利技	廖世凱	廖世凱
3	二	王健至	王健至
4	二	湯遠勤	湯遠勤
5	成功大學	陳泳文	陳泳文
6	〃	楊惠閔	楊惠閔
7	〃	謝衍宏	謝衍宏
8	〃	鄭孟偉	鄭孟偉
9	〃	王鴻培	王鴻培
10	縣大	朱滿政	朱滿政
11	環資中心	張志平	張志平
12	二	吳俊毅	吳俊毅
13	成功大學	劉守仁	劉守仁
14	天祥	林秋立	林秋立
15	莊山科大	黃明銘	黃明銘
16	宏騰科技	胡凱編	胡凱編
17	成功大學	吳恩恩	吳恩恩
18	〃	蔡宇傑	蔡宇傑
19	〃	郭漢龍	郭漢龍
20	〃	張博鈞	張博鈞

行政院環境保護署

110 年度土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗專案
以流體電容去離子法實地整治重金屬污染地下水之模場試驗與示範
成果發表會出席簽到表

序號	機構名稱	姓名	簽名
21	成功大學	陳怡豪	陳怡豪
22	〃	段宇君	段宇君
23			
24			
25			
26			
27			
28			
29			
30			
31			
32			
33			
34			
35			
36			
37			
38			
39			
40			



成果發表會活動照片

	
會議簡介及說明	發表會簡報(計畫主持人)
	
發表會簡報	設備現場操作示範



附件2 科技部貴儀中心 QA/QC

Sample Report

Author:

Published: 2021/12/13 05:24:53

Notes:

Blank

Acquire Date: 2021/12/10 03:51:55

Sample Type: Standard

Correction Factor: 1.0000

SW: 1.0000

NW: 1.0000

IV: 1.0000

FV: 1.0000

AF: 1.0000

Analyst Name: admin

Method Name: 20211210_Ca,Cu,Zn

Method Revision: 1

Elem	Flags	Avg	Units	Stddev	%RSD
Ca3933		649.8	Cts/S	8.783	1.352
Ca3968		550.7	Cts/S	5.845	1.061
Ca4226		-45.34	Cts/S	2.047	4.515
Cu2247		0.6297	Cts/S	1.193	189.5
Cu3247		104.4	Cts/S	1.680	1.610
Cu3273		-68.08	Cts/S	5.700	8.372
Zn2025		1.539	Cts/S	0.4910	31.90
Zn2062		-0.2952	Cts/S	0.1763	59.71
Zn2138		-0.3656	Cts/S	0.3283	89.79

CalibStd-1

Acquire Date: 2021/12/10 03:58:17

Sample Type: Standard

Correction Factor: 1.0000

SW: 1.0000

NW: 1.0000

IV: 1.0000

FV: 1.0000

AF: 1.0000

Analyst Name: admin

Method Name: 20211210_Ca,Cu,Zn

Method Revision: 1

Elem	Flags	Avg	Units	Stddev	%RSD
Ca3933		99,170	Cts/S	195.7	0.1974
Ca3968		75,880	Cts/S	96.73	0.1275
Ca4226		4,363	Cts/S	8.802	0.2017
Cu2247		232.7	Cts/S	1.554	0.6680
Cu3247		2,082	Cts/S	2.518	0.1210
Cu3273		879.3	Cts/S	3.512	0.3994
Zn2025		743.9	Cts/S	1.998	0.2686
Zn2062		516.7	Cts/S	2.857	0.5530
Zn2138		617.0	Cts/S	1.941	0.3146

CalibStd-2

Acquire Date: 2021/12/10 04:02:17

Sample Type: Standard

Correction Factor: 1.0000

SW: 1.0000

NW: 1.0000

IV: 1.0000

FV: 1.0000

AF: 1.0000

Analyst Name: admin

Method Name: 20211210_Ca,Cu,Zn

Method Revision: 1

Elem	Flags	Avg	Units	Stddev	%RSD
Ca3933		183,000	Cts/S	151.1	0.08259
Ca3968		142,800	Cts/S	504.5	0.3532
Ca4226		8,191	Cts/S	77.77	0.9494
Cu2247		480.9	Cts/S	2.186	0.4546
Cu3247		4,214	Cts/S	19.54	0.4638
Cu3273		1,895	Cts/S	7.993	0.4217
Zn2025		1,535	Cts/S	4.187	0.2728
Zn2062		1,058	Cts/S	3.972	0.3755
Zn2138		1,259	Cts/S	1.944	0.1544

Color Legend

Pass/Unchecked

Internal Standard

Check Fail

Check Warn

Published: 2021/12/13 05:24:53

□ 1 □ / □ 5 □



CalibStd-3

Acquire Date: 2021/12/10 00:04:05:52

Sample Type: Standard

Correction Factor: 1.0000

SW: 1.0000

NW: 1.0000

IV: 1.0000

FV: 1.0000

AF: 1.0000

Analyst Name: admin

Method Name: 20211210_Ca,Cu,Zn

Method Revision: 1

Elem	Flags	Avg	Units	Stddev	%RSD
Ca3933		862,600	Cts/S	3,606	0.4181
Ca3968		662,400	Cts/S	5,110	0.7715
Ca4226		39,030	Cts/S	74.36	0.1905
Cu2247		2,326	Cts/S	2.736	0.1176
Cu3247		19,720	Cts/S	29.41	0.1492
Cu3273		9,257	Cts/S	23.12	0.2498
Zn2025		7,471	Cts/S	33.19	0.4442
Zn2062		5,171	Cts/S	16.79	0.3246
Zn2138		6,099	Cts/S	12.79	0.2097

CalibStd-4

Acquire Date: 2021/12/10 00:04:09:40

Sample Type: Standard

Correction Factor: 1.0000

SW: 1.0000

NW: 1.0000

IV: 1.0000

FV: 1.0000

AF: 1.0000

Analyst Name: admin

Method Name: 20211210_Ca,Cu,Zn

Method Revision: 1

Elem	Flags	Avg	Units	Stddev	%RSD
Ca3933		1,652,000	Cts/S	5,114	0.3096
Ca3968		1,281,000	Cts/S	2,083	0.1626
Ca4226		77,250	Cts/S	472.9	0.6122
Cu2247		4,779	Cts/S	3.199	0.06694
Cu3247		40,160	Cts/S	220.3	0.5486
Cu3273		18,970	Cts/S	132.7	0.6996
Zn2025		15,100	Cts/S	55.59	0.3681
Zn2062		10,510	Cts/S	11.21	0.1067
Zn2138		12,350	Cts/S	10.17	0.08235

CalibStd-5

Acquire Date: 2021/12/10 00:04:13:34

Sample Type: Standard

Correction Factor: 1.0000

SW: 1.0000

NW: 1.0000

IV: 1.0000

FV: 1.0000

AF: 1.0000

Analyst Name: admin

Method Name: 20211210_Ca,Cu,Zn

Method Revision: 1

Elem	Flags	Avg	Units	Stddev	%RSD
Ca3933	^	0.0000	Cts/S	0.0000	0.0000
Ca3968	^	0.0000	Cts/S	0.0000	0.0000
Ca4226		362,600	Cts/S	3,450	0.9514
Cu2247		23,160	Cts/S	27.17	0.1173
Cu3247		195,800	Cts/S	1,102	0.5628
Cu3273		94,200	Cts/S	628.3	0.6670
Zn2025		70,780	Cts/S	144.0	0.2035
Zn2062		50,640	Cts/S	86.73	0.1713
Zn2138		57,470	Cts/S	77.80	0.1354

Color Legend

Pass/Unchecked

Internal Standard

Check Fail

Check Warn

Published: 2021/12/13 00:05:24:53

2 / 5



CalibStd-6

Acquire Date: 2021/12/10 04:17:55

Sample Type: Standard

Correction Factor: 1.0000

SW: 1.0000

NW: 1.0000

IV: 1.0000

FV: 1.0000

AF: 1.0000

Analyst Name: admin

Method Name: 20211210_Ca,Cu,Zn

Method Revision: 1

Elem	Flags	Avg	Units	Stddev	%RSD
Ca3933	^	0.0000	Cts/S	0.0000	0.0000
Ca3968	^	0.0000	Cts/S	0.0000	0.0000
Ca4226		702,600	Cts/S	3,485	0.4960
Cu2247		46,010	Cts/S	88.16	0.1916
Cu3247		384,700	Cts/S	1,078	0.2804
Cu3273		189,500	Cts/S	392.9	0.2074
Zn2025		134,000	Cts/S	312.1	0.2329
Zn2062		98,840	Cts/S	94.53	0.09564
Zn2138		107,500	Cts/S	172.7	0.1607

D1_10x

Acquire Date: 2021/12/10 04:25:19

Sample Type: Unknown

Correction Factor: 1.0000

SW: 1.0000

NW: 1.0000

IV: 1.0000

FV: 1.0000

AF: 1.0000

Analyst Name: admin

Method Name: 20211210_Ca,Cu,Zn

Method Revision: 2

Elem	Flags	Avg	Units	Stddev	%RSD
Ca3933	^	0.0000	ppm	0.0000	0.0000
Ca3968	^	0.0000	ppm	0.0000	0.0000
Ca4226		29.74	ppm	0.1013	0.3408
Cu2247		0.01014	ppm	0.0001020	1.004
Cu3247		0.01128	ppm	0.0002860	2.534
Cu3273		0.01303	ppm	0.0001390	1.066
Zn2025		0.1477	ppm	0.0004710	0.3187
Zn2062		0.1464	ppm	0.0005210	0.3558
Zn2138		0.1541	ppm	0.0002740	0.1780

D2_10x

Acquire Date: 2021/12/10 04:30:05

Sample Type: Unknown

Correction Factor: 1.0000

SW: 1.0000

NW: 1.0000

IV: 1.0000

FV: 1.0000

AF: 1.0000

Analyst Name: admin

Method Name: 20211210_Ca,Cu,Zn

Method Revision: 2

Elem	Flags	Avg	Units	Stddev	%RSD
Ca3933	^	0.0000	ppm	0.0000	0.0000
Ca3968	^	0.0000	ppm	0.0000	0.0000
Ca4226		29.18	ppm	0.1159	0.3971
Cu2247		0.02309	ppm	0.0002590	1.123
Cu3247		0.02427	ppm	0.0001690	0.6943
Cu3273		0.02592	ppm	0.0003510	1.356
Zn2025		0.2149	ppm	0.0005860	0.2728
Zn2062		0.2125	ppm	0.0006690	0.3145
Zn2138		0.2236	ppm	0.0003660	0.1638

Color Legend Pass/Unchecked Internal Standard Check Fail Check Warn

Published: 2021/12/13 05:24:53

3 / 5



E1_10x

Acquire Date: 2021/12/10 04:33:41

Sample Type: Unknown

Correction Factor: 1.0000

SW: 1.0000

NW: 1.0000

IV: 1.0000

FV: 1.0000

AF: 1.0000

Analyst Name: admin

Method Name: 20211210_Ca,Cu,Zn

Method Revision: 2

Elem	Flags	Avg	Units	Stddev	%RSD
Ca3933		0.05853	ppm	0.0001180	0.2023
Ca3968		0.05903	ppm	0.00005200	0.08735
Ca4226		0.06316	ppm	0.00008000	0.1265
Cu2247		0.02452	ppm	0.0001780	0.7249
Cu3247		0.02497	ppm	0.0004130	1.655
Cu3273		0.02623	ppm	0.0002860	1.089
Zn2025		22.76	ppm	0.09616	0.4225
Zn2062		24.79	ppm	0.05572	0.2248
Zn2138		20.96	ppm	0.02260	0.1078

E2_10x

Acquire Date: 2021/12/10 04:36:41

Sample Type: Unknown

Correction Factor: 1.0000

SW: 1.0000

NW: 1.0000

IV: 1.0000

FV: 1.0000

AF: 1.0000

Analyst Name: admin

Method Name: 20211210_Ca,Cu,Zn

Method Revision: 2

Elem	Flags	Avg	Units	Stddev	%RSD
Ca3933		0.08537	ppm	0.0004660	0.5461
Ca3968		0.08735	ppm	0.0001850	0.2117
Ca4226		0.09221	ppm	0.0003800	0.4118
Cu2247		0.05622	ppm	0.0002240	0.3978
Cu3247		0.05767	ppm	0.0001480	0.2560
Cu3273		0.05762	ppm	0.0001900	0.3304
Zn2025		22.28	ppm	0.08917	0.4002
Zn2062		24.01	ppm	0.05393	0.2247
Zn2138		20.39	ppm	0.03178	0.1559

D1_100x

Acquire Date: 2021/12/10 04:44:13

Sample Type: Unknown

Correction Factor: 1.0000

SW: 1.0000

NW: 1.0000

IV: 1.0000

FV: 1.0000

AF: 1.0000

Analyst Name: admin

Method Name: 20211210_Ca,Cu,Zn

Method Revision: 2

Elem	Flags	Avg	Units	Stddev	%RSD
Ca3933	^	0.0000	ppm	0.0000	0.0000
Ca3968	^	0.0000	ppm	0.0000	0.0000
Ca4226		3.720	ppm	0.01809	0.4863
Cu2247		0.001428	ppm	0.0001710	11.96
Cu3247		0.001903	ppm	0.0001260	6.597
Cu3273		0.003412	ppm	0.0003380	9.899
Zn2025		0.01848	ppm	0.0002120	1.148
Zn2062		0.01832	ppm	0.00003600	0.1974
Zn2138		0.01903	ppm	0.00002000	0.1075

Color Legend

Pass/Unchecked

Internal Standard

Check Fail

Check Warn

Published: 2021/12/13 05:24:53

4 / 5

**D2_100x**

Acquire Date: 2021/12/10 04:47:16

Sample Type: Unknown

Correction Factor: 1.0000

SW: 1.0000

NW: 1.0000

IV: 1.0000

FV: 1.0000

AF: 1.0000

Analyst Name: admin

Method Name: 20211210_Ca,Cu,Zn

Method Revision: 2

Elem	Flags	Avg	Units	Stddev	%RSD
Ca3933	^	0.0000	ppm	0.0000	0.0000
Ca3968	^	0.0000	ppm	0.0000	0.0000
Ca4226		3.613	ppm	0.01339	0.3705
Cu2247		0.002443	ppm	0.0001100	4.519
Cu3247		0.003374	ppm	0.0002860	8.470
Cu3273		0.005204	ppm	0.0004120	7.921
Zn2025		0.02406	ppm	0.0001150	0.4775
Zn2062		0.02378	ppm	0.00008200	0.3440
Zn2138		0.02473	ppm	0.00006500	0.2612

E1-100X

Acquire Date: 2021/12/10 04:50:27

Sample Type: Unknown

Correction Factor: 1.0000

SW: 1.0000

NW: 1.0000

IV: 1.0000

FV: 1.0000

AF: 1.0000

Analyst Name: admin

Method Name: 20211210_Ca,Cu,Zn

Method Revision: 2

Elem	Flags	Avg	Units	Stddev	%RSD
Ca3933		0.01949	ppm	0.00004700	0.2395
Ca3968		0.01948	ppm	0.0001260	0.6477
Ca4226		0.02111	ppm	0.0002390	1.132
Cu2247		0.003171	ppm	0.0002940	9.264
Cu3247		0.003327	ppm	0.00002900	0.8603
Cu3273		0.005257	ppm	0.0005970	11.35
Zn2025		2.672	ppm	0.005722	0.2141
Zn2062		2.646	ppm	0.005005	0.1892
Zn2138		2.704	ppm	0.004205	0.1555

E2-100X

Acquire Date: 2021/12/10 04:52:55

Sample Type: Unknown

Correction Factor: 1.0000

SW: 1.0000

NW: 1.0000

IV: 1.0000

FV: 1.0000

AF: 1.0000

Analyst Name: admin

Method Name: 20211210_Ca,Cu,Zn

Method Revision: 2

Elem	Flags	Avg	Units	Stddev	%RSD
Ca3933		0.02148	ppm	0.00006200	0.2889
Ca3968		0.02129	ppm	0.0001090	0.5131
Ca4226		0.02293	ppm	0.0001450	0.6316
Cu2247		0.005696	ppm	0.0003470	6.096
Cu3247		0.006401	ppm	0.0001530	2.383
Cu3273		0.008010	ppm	0.0001820	2.273
Zn2025		2.533	ppm	0.006454	0.2548
Zn2062		2.513	ppm	0.003994	0.1589
Zn2138		2.571	ppm	0.002450	0.09529

Color Legend Pass/Unchecked Internal Standard Check Fail Check Warn

Published: 2021/12/13 05:24:53

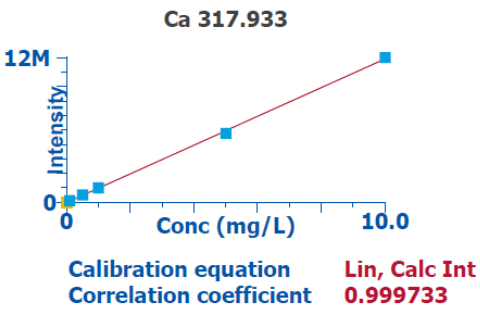
□ 5 □ / □ 5 □



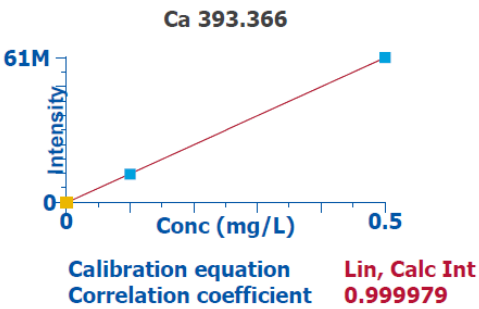
Calib

Method: 20211213-2
Result:

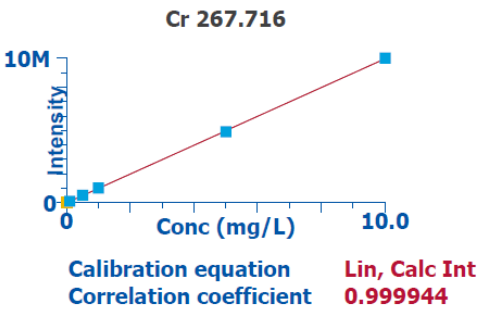
1



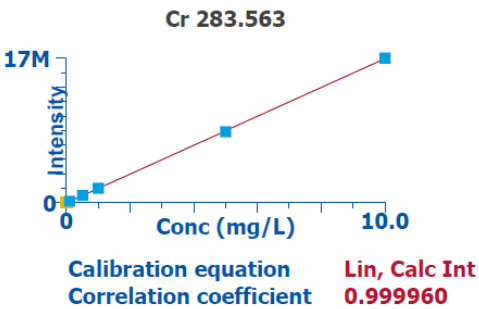
2



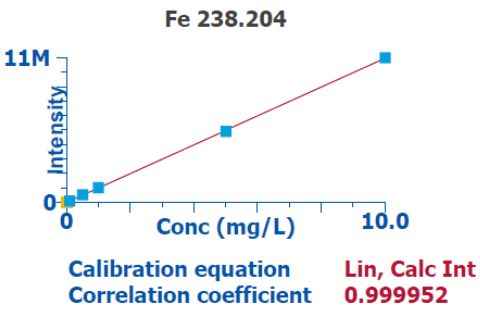
3



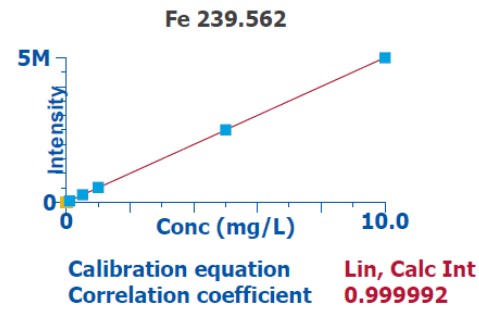
4



5



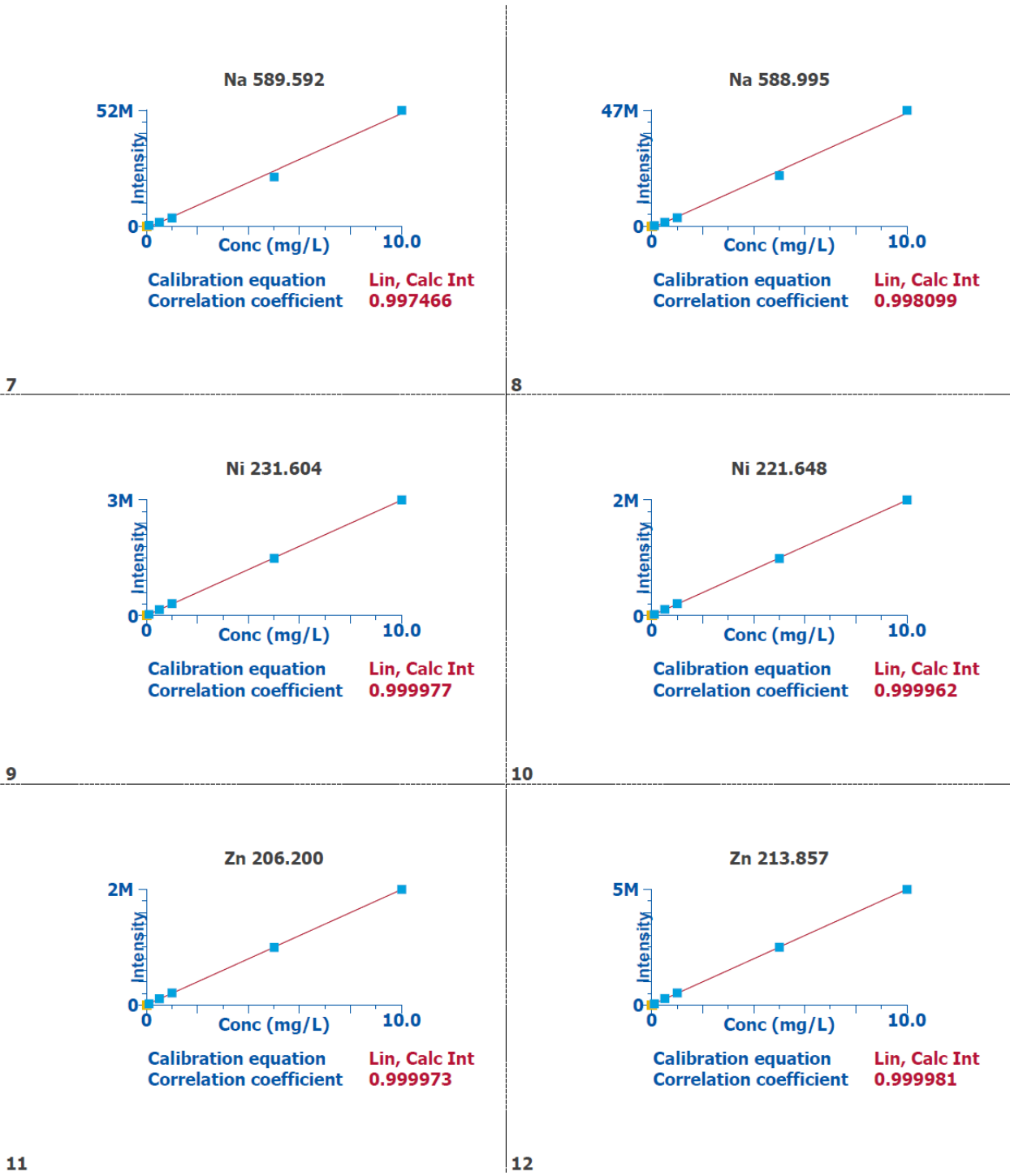
6





Calib

Method: 20211213-2
Result:





Calib

Method: 20211213-2
Result:

