



目錄

第一章 前言	1
1.1 台灣土壤及地下水污染現況	1
1.2 高雄市列管場址類型彙整	2
1.3 國內現地土壤/地下水整治方法	3
第二章 研究目的	6
2.1 計畫目的	6
2.2 計畫重要性及優勢	7
2.2.1 計畫重要性	7
2.2.2 執行優勢	7
2.3 計畫目標	9
第三章 文獻探討	10
3.1 高雄市鼓山區內惟段九小段 55 地號場址	10
3.2 電化學地質氧化技術	11
3.3 電化學地質氧化技術之影響因子	12
3.4 複合金屬種類	14
3.5 電極排列之影響	15
3.6 電動力技術應用於實場尺度污染土壤之研究	17
3.7 實場尺度電極設計	19
3.8 本團隊實場整治經驗	19
第四章 研究方法與過程	20
4.1 研究架構	20
4.2 實驗設備及材料	23



4.2.1 儀器與設備	23
4.2.2 實驗材料	24
4.3 整治試驗規劃	24
4.3.1 實驗室乳酸濃度擇選試驗	24
4.3.2 現地整治	26
4.4 土壤基本特性分析	26
4.4.1 土壤 pH 值分析試驗	26
4.4.2 陽離子交換容量 (CEC)	27
4.4.3 土壤界達電位	28
4.5 重金屬分析方法	28
4.6 電力設備施工方法	28
4.7 設井作業	29
第五章 結果與討論	30
5.1 與捷博公司討論現地設井事宜	30
5.2 整流器設計	30
5.3 設井作業	30
5.4 電力系統設置	30
5.5 電動力標準作業流程建立	31
5.5.1 前置工程施作階段	31
5.5.1.1 選址及現勘	32
5.5.1.2 土壤鑽探試驗	33
5.5.1.3 電極排列模組設計及規劃	33
5.5.1.4 地電阻測勘及整流器設計/製造	34



5.5.1.5 電極井設置作業	34
5.5.1.6 電極安裝及電力系統架設/測試	35
5.5.2 整治作業階段	35
5.5.3 場址復原階段	35
5.6 乳酸濃度擇選試驗	35
5.7 現地重金屬污染土壤電動力整治試驗	39
5.8 土壤重金屬鍵結型態分析	47
5.9 蜂巢型及方型排列模組重金屬污染土壤整治成效匯整	49
5.10 經濟成本分析	51
5.10.1 前置工程施作階段及場址復原階段	51
5.10.2 整治作業階段	52
5.10.3 總整治成本分析	56
5.10.4 電動力技術與其他現地技術經濟成本比較	57
5.11 結論及建議.....	59
5.11.1 結論.....	59
5.11.2 建議.....	60
第六章 參考文獻.....	61



圖目錄

圖 1.全國土壤/地下水整治及控制場址事業類別 ^[1] (本研究繪製).....	1
圖 2.全國土壤/地下水整治及控制場址事業類別 ^[1] (本研究繪製).....	1
圖 3.台灣污染場址類型數量 ^[2]	2
圖 4.各縣市整治場址所佔數量之比例 ^[2] (本研究繪製).....	2
圖 5.高雄市污染場址類型數量 ^[2] (本研究繪製).....	3
圖 6.高雄市污染場址列管類型比例 ^[2] (本研究繪製).....	3
圖 7.高雄市土水污染場址列管數量與面積 ^[2] (本研究繪製).....	4
圖 8.高雄市列管場址污染物種類出現次數統計 ^[2] (本研究繪製).....	4
圖 9.高雄市污染場址改善工法使用次數.....	5
圖 10.計畫目的 (本研究繪製).....	6
圖 11.計畫重要性說明 (本研究繪製).....	8
圖 12.本計畫預期目標 (本研究繪製).....	9
圖 13.內惟段九小段 55 地號場址採樣點位圖 ^[3]	11
圖 14.內惟段九小段 55 地號場址.....	11
圖 15.內惟段九小段 55 地號場址.....	11
圖 16.電化學地質氧化技術示意圖 (本研究繪製).....	12
圖 17.水平電極陣列及採樣點位示意圖 ^[19]	16
圖 18.中央陽/陰極之六角形電極排列 ^[19]	17
圖 19.鹽化農地模場試驗採樣點及電極配置示意圖 ^[23]	18
圖 20.實場電極之設計 (本研究繪製).....	19
圖 21.固定電極之相關材料配置 (本研究繪製).....	19
圖 22.傳輸試驗之電流趨勢圖.....	19



圖 23.傳輸試驗之生物試劑濃度趨勢圖	19
圖 24.第一年 (108 年) 研究架構圖 (本研究繪製)	21
圖 25.第一年 (108 年) 研究甘特圖	22
圖 26.內惟九小段 55 地號場址電極井配置規劃 (本研究繪製)	23
圖 27.第二年 (109 年) 研究架構圖 (本研究繪製)	24
圖 28.第二年 (109 年) 研究甘特圖	25
圖 29.二維管柱試驗示意圖	26
圖 30.方型排列模組示意圖	27
圖 31.破地平	32
圖 32.地下水井套筒安裝	32
圖 33.工作面恢復作業	32
圖 34.完成設井作業	32
圖 35.整流器電線配置	32
圖 36.電極井電線配置	32
圖 37.電動力標準作業流程 (SOP)	33
圖 38.重金屬銅 (Cu) 土壤殘留濃度分佈	36
圖 39.重金屬鋅 (Zn) 土壤殘留濃度分佈	38
圖 40.重金屬鉻 (Cr) 土壤殘留濃度分佈	38
圖 41.重金屬鎳 (Ni) 土壤殘留濃度分佈	39
圖 42.重金屬鉛 (Pb) 土壤殘留濃度分佈	40
圖 43.方型排列模組整治示意圖	41
圖 44. S1 (0.6 V/cm, 地下水) 整治後重金屬殘留濃度分佈圖 (a) 銅；(b) 鋅；(c) 鉻；(d) 鎳；(e) 鉛	42



圖 45. S2 (1.0 V/cm，地下水) 整治後重金屬殘留濃度分佈圖 (a) 銅；(b) 鋅；(c) 鉻；(d) 鎳；(e) 鉛.....	43
圖 46. S3 (Fe/Al 氧化電極，1.0 V/cm) 整治後重金屬殘留濃度分佈圖 (a) 銅；(b) 鋅；(c) 鉻；(d) 鎳；(e) 鉛	45
圖 47. S4 (1.4 V/cm，0.30 M 乳酸) 整治後重金屬殘留濃度分佈圖 (a) 銅；(b) 鋅；(c) 鉻；(d) 鎳；(e) 鉛	46
圖 48. 方型排列模組重金屬鍵結型態殘留濃度分佈圖	48



表目錄

表 1.內惟段九小段 55 地號場址歷年污染濃度彙整表 ^[3]	10
表 2.二維管柱實驗規劃.....	26
表 3.試驗參數及期程規劃表.....	27
表 4.歷代整流器規格彙整.....	31
表 5.重金屬於土壤之移動速率 (Biosoil, 2011).....	39
表 6.土壤基本特性分析.....	40
表 7.蜂巢型及方型排列模組處理成效彙整.....	50
表 8.前置工程施作階段及場址復原階段材料費用彙整表.....	51
表 9.前置工程施作階段及場址復原階段經濟成本彙整表.....	53
表 10.整治作業階段材料費用彙整表.....	54
表 11.整治作業階段經濟成本彙整表.....	55
表 12.電動力現地模場經濟總成本彙整表.....	56
表 13.本研究與他研究經濟成本及污染物整治成效彙整.....	58





第一章 前言

1.1 台灣土壤及地下水污染現況

統計由 102 年 9 月 1 日至 107 年 8 月 31 日止，全國土壤及地下水執行中整治及控制場址共 4,377 處，依查證結果顯示，農地場址有 3,963 處佔比高達 90.5%，而事業場址為 401 處佔比為 9.2%，其中事業場址污染又可分為工廠 228 處 (5.2%)、加油站 72 處 (1.6%) 及其他 79 處 (1.8%)^[1]，如圖 1 所示。

若考量污染類型，農地場址以土壤污染為主 (100%)，而 401 處事業場址中，僅土壤污染有 167 處 (42%)、僅地下水污染有 158 處 (39%)，而土壤及地下水均有污染計 118 處 (29%)；若統計列管場址達 10 年以上之 56 處事業場址，僅土壤污染為 25 處 (44%)，僅地下水污染為 15 處 (27%)，土壤及地下水均有污染計 16 處 (29%)，分析前述 56 處事業場址污染統計，僅有機物污染為 46 處 (82%)，僅重金屬污染為 9 處 (16%)，有機物與重金屬共同污染有 1 處 (2%)。

此外，若考量污染物種類，土壤中八大管制重金屬當中以銅污染出現次數最高達 1,091 處，佔比為 66.8%；有機物於地下水當中以三氯乙烯比例最高，為 37.5% (如圖 2 所示)，顯示土壤及地下水污染整治場址中，以重金屬銅及有機物三氯乙烯污染物為主。

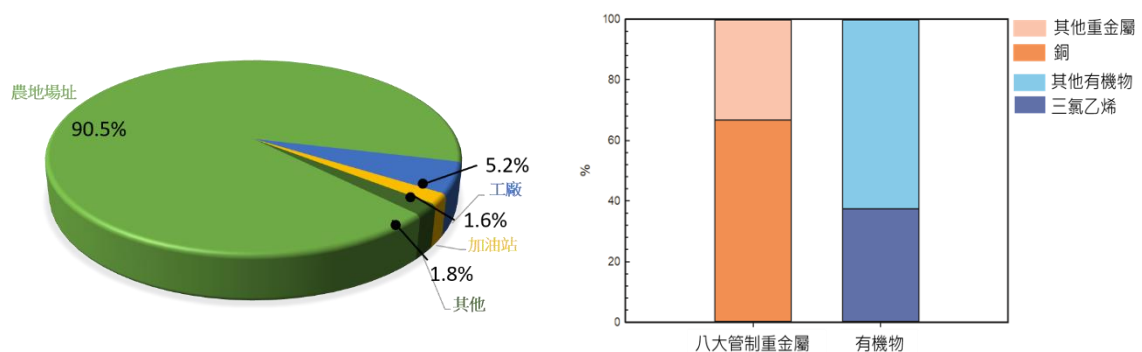


圖 1.全國土壤/地下水整治及控制場址事業類別^[1] (本研究繪製)

圖 2.全國土壤/地下水整治及控制場址事業類別^[1] (本研究繪製)

由台灣土壤及地下水污染場址查詢平台^[1]統計至 105 年 7 月，台灣早期未管制工廠廢水排放，使農地之灌溉水與工廠廢水共用渠道，造成含有重金屬之廢水排入農田中，造成農地重金屬污染，環保署於民國 91 年針對 319 公頃農地辦理污染查證工作，民國 92 ~ 98 年則由地方環保機關針對轄區內具高污染潛勢農地及個案污染陳情案件辦理土壤調查及監測，民國 99 年後則進入農地整體管制及永續經營期，主要是由環保署發動全國系統性農地土壤污染查證工作，台灣



農地污染調查縝密，故目前農地污染為居冠污染場址，再者為工廠土壤及地下水污染，而環保署也持續進行工廠、加油站及儲槽等污染查證，污染場址類型彙整如圖 3 所示，統計至民國 105 年 8 月仍在執行之整治場址共有 90 處，其各縣市所佔比例如圖 4 所示，其中以重工業與石化產業為主之高雄市佔 19 處，再者為台南市佔 16 處。

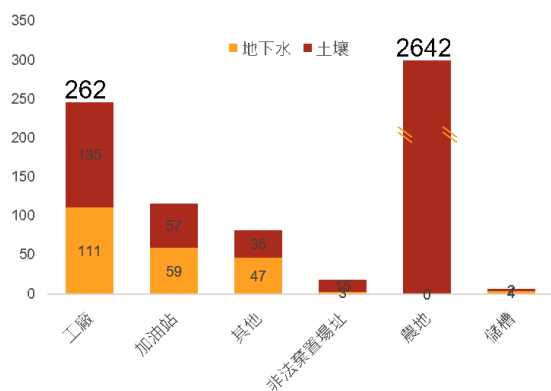


圖 3.台灣污染場址類型數量^[2]
(本研究繪製)

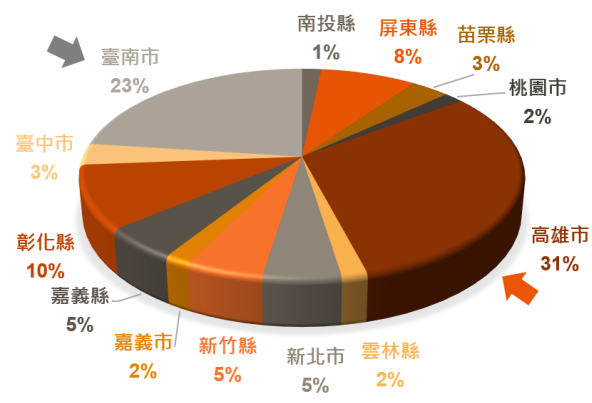
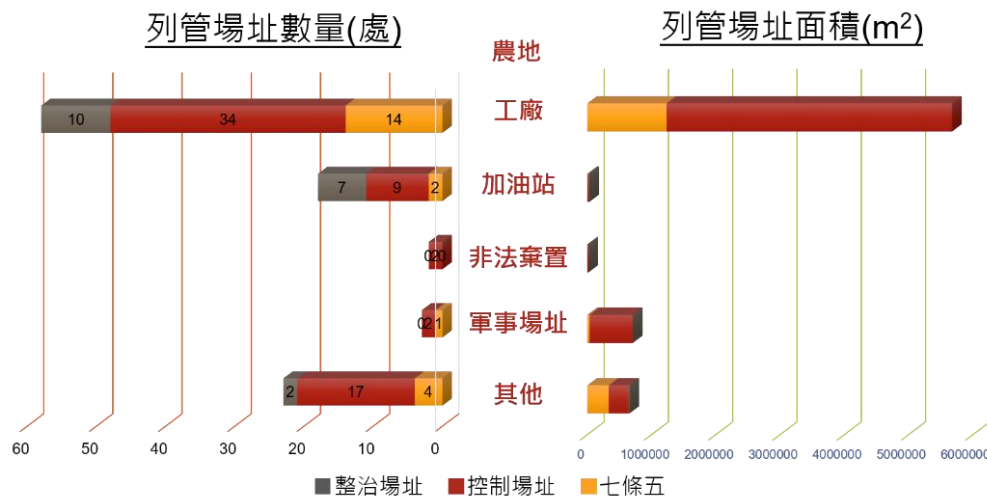
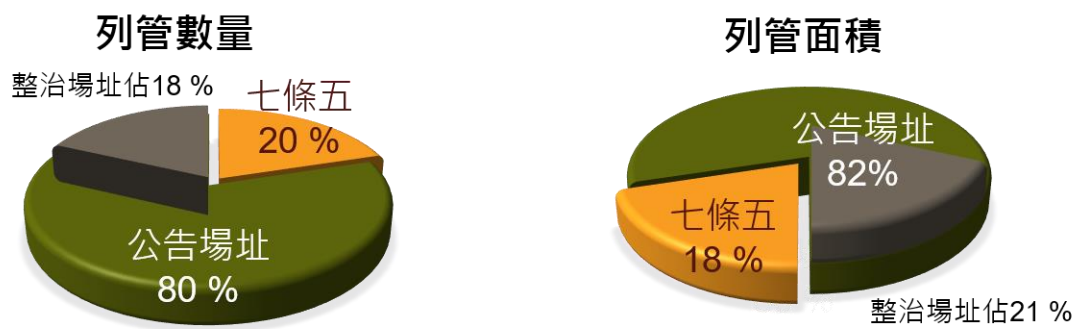


圖 4.各縣市整治場址所佔數量之比例^[2]
(本研究繪製)

1.2 高雄市列管場址類型彙整

高雄市因重工業與石化產業發展，如中油、台塑等石油製品及化學製品產業、皮革業、基本金屬冶煉、及金屬製品鄉製造業、半導體產業、電子零件製造業、廢棄物處理業及加油站等，因此高雄市為整治場址數量最高之縣市主要以工廠類型為最大宗，其彙整如圖 5 所示^[2]，工廠場址佔 104 處中 58 處為 55.8%。根據列管種類分類，統計彙整高雄市環保局列管場址資料，仍在執行整治場址共 104 處，其中七條五佔 21 處、控制場址佔 64 處與整治場址佔 19 處，污染面積也由控制場址佔最大宗，彙整如圖 6 所示。由列管場址資料中，主要為土壤污染為最大宗共 64 件；同時存在土壤及地下水污染佔 26 件為次之；接著為地下水污染佔 14 件，統計如圖 6 所示。

彙整高雄市列管場址之污染物種類，主要分為重金屬、油品及含氯有機物污染，土壤污染場址中主要為重金屬污染 40%，接著為油品污染佔 57%，地下水污染場址主要為油品污染佔 62%，接著為含氯有機物污染佔 35%。土壤污染場址中，油品污染場址佔 40%，但其污染面積為最大宗約 7,604,032 m² (71%)，而地下水則佔 3,975,563 m² (57%)，由統計結果顯示，高雄市主要以油品污染佔大宗，次者為含氯有機物污染，上述成果彙整如圖 7 所示，油品污染主要為加油站與儲槽，而含氯有機物主要污染源為工廠等，因其比重比水大，故較容易存在於地下岩盤區域致調查不易。

圖 5.高雄市污染場址類型數量^[2] (本研究繪製)圖 6.高雄市污染場址列管類型比例^[2] (本研究繪製)

統計高雄市列管場址之污染物種類，彙整如圖 8 所示，其中污染頻率最高之為油品污染其種類主要為總石油碳氫化合物 (TPH)、總酚、苯、乙苯、甲苯、二甲苯及 MTBE 等，土壤污染中重金屬污染頻率最高，以銅、鋅污染為最大宗，次者為油品类有機物，又以測得苯污染為最大宗；而地下水污染主要為有機污染物，又以苯污染頻率最高，次者為含氯有機物；因其具有疏水特性，如於地下水測得污染濃度，則可推測該區域存在含氯有機物之污染團，因含氯有機物易沉積於地下岩盤上，使調查不易且無法掌握污染範圍，亦增加整治之困難性。

1.3 國內現地土壤/地下水整治方法

統計至 105 年高雄市地區土壤及地下水列管之污染場址^[2]，針對其污染改善措施部分改善工法與技術進行分析，彙整如圖 9 所示，土壤污染場址改善工法主要以生物處理法、化學氧化法及排土客土法為主，而高雄市土壤污染主要以重金屬及含氯有機物為主，故主要以整治含氯有機物與重金屬之技術為主；地下水主要使用之改善工法為化學氧化法、SVE 及生物處理法為最多，而高雄市地

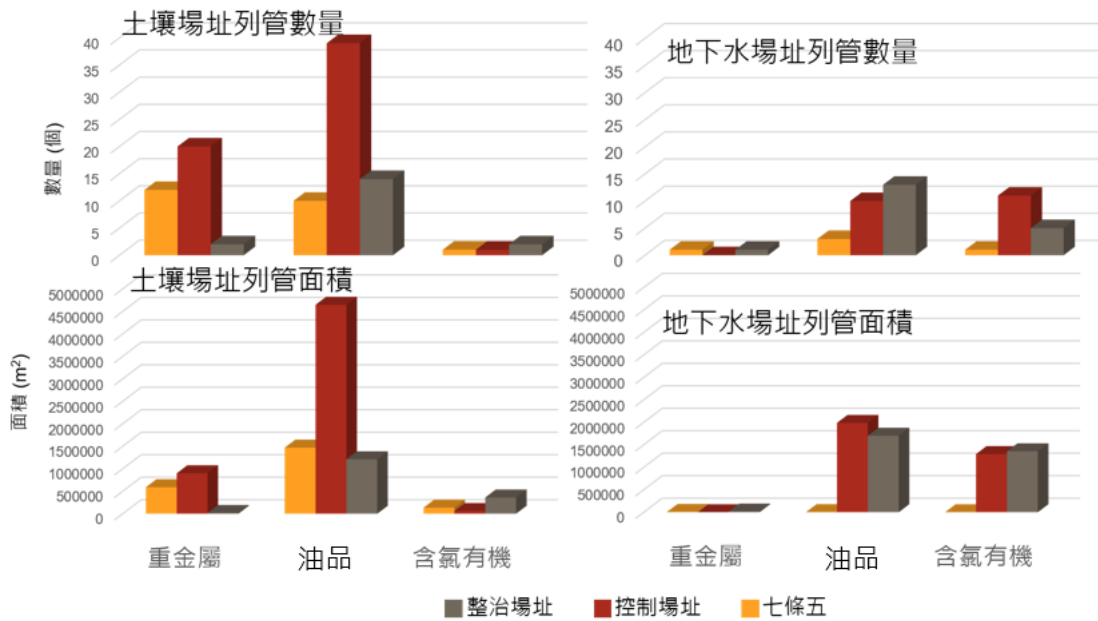


圖 7.高雄市土水污染場址列管數量與面積^[2] (本研究繪製)

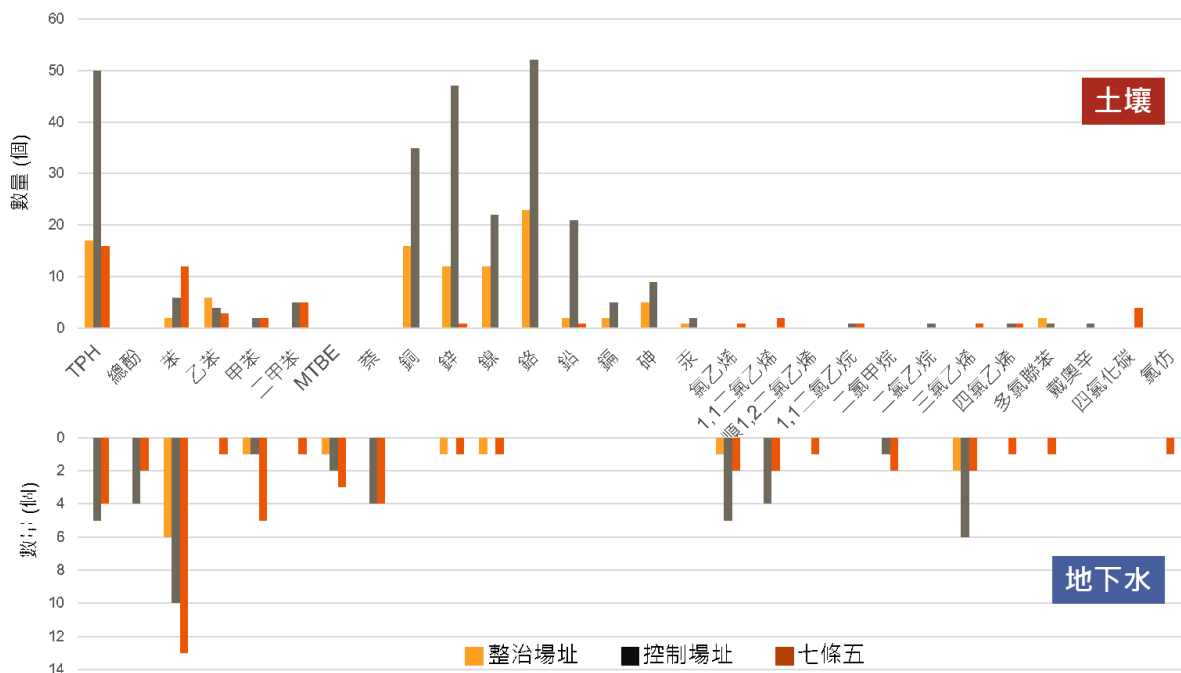


圖 8.高雄市列管場址污染物種類出現次數統計^[2] (本研究繪製)

下水污染主要為油品有機類污染，次者為含氯有機物污染；而土壤及地下水污染場址多數採用化學氧化法、生物處理法及排土客土法等，而完成解除列管之場址主要以排土客土法為主，視污染土壤如廢棄物，而未進行整治。圖 9 又顯示，單一整治技術很難有效解決含氯有機物及油品污染之問題，故目前核定工法多為整治列車概念，同時串聯或並聯多種工法進行污染改善，如中油高煉廠、

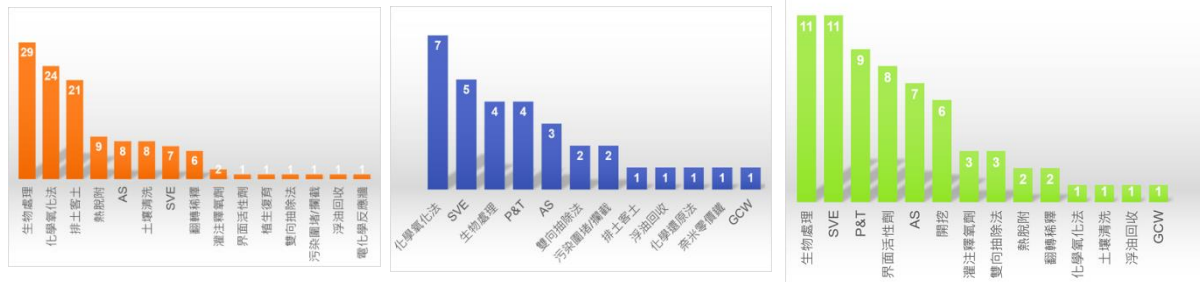


圖 9.高雄市污染場址改善工法使用次數
(a)土壤、(b)地下水、(c)土壤及地下水^[2] (本研究繪製)

苓雅寮儲運所及加油站等油品類污染場址，多採用現地生物復育+化學氧化法，然因注入此類整治試劑皆無法病投藥灶，仍無法達成改善目標，應對生物試劑傳輸有效性再行探討。



第二章 研究目的

2.1 計畫目的

本計畫之目的有四(如圖 10 所示)，並彙整如下所示：



圖 10.計畫目的 (本研究繪製)

(1) 電動力技術操作模組化

本團隊過去於實驗室尺度下完成許多科技部及環保署計畫，而實驗結果也充分顯示電動力技術對於重金屬及有機污染物都有不錯之處理成效，而本計畫預計使用 Al 惰性電極及 Fe/Al 氧化電極配合地下水或乳酸進行重金屬污染土壤處理，而實場之電極井設置需考慮地面建物、地下水流向及地下水高程等相關因素；重金屬其不可降解特性也必須透過先集中處理再由電極井移除，因此陰、陽極電極井井位配置設計便相形重要；藉本計畫應用電動力技術於實場整治之計畫，將建立電動力實場整治之模組化系統。

(2) 電動力模場系統配置優勢化

實場電極尺寸受到井口尺寸、地下水高程及相關配電設施所影響，為符合各現地之地下水高程，本計畫將設計一具有螺牙之電極 (見 3.7 模場尺度 Fe/Al 氧化電極之設計所示) 以符合續接性，透過電極之續接使電極長度達到電動力之可作用範圍，電極頂端也需固定於井口以防滑落於井中(見 3.7 模場尺度 Fe/Al 氧化電極之設計所示)；因實場相關配電



設施包含電源供應器之擺放位置及電線於地表下之配置易受到地面建物及地表人為活動之影響皆需透過縝密之規劃。

(3) 模場配電設施規劃系統化

電動力技術透過電滲透流等特性可將重金屬污染物由土體往陰極端移動、而透過氧化電極自由基之生成，因而降解有機污染物，使其礦化為較無害之物質；透過電動力機制及電極井配置優勢化（W 型、菱型、蜂巢型及方型）可將污染物之移除及降解更具效率化。

(4) 環境保護與經濟發展共榮化

國內現有土/水整治技術中，大多以離地及離場為主，除須額外花費挖除污染土壤之經費外，對於業者亦無法繼續其經濟活動而造成嚴重之影響，而本計畫所選用之技術為現地處理技術，即可在進行整治同時亦使業主持續進行地面上工廠之營運，以達到環境保護與經濟發展並存之願景。

2.2 計畫重要性及優勢

2.2.1 計畫重要性

本計畫之重要性彙整如圖 11 所示：

- (1) 建立電動力技術實場模組系統，透過電極改良及電極井之配置，將污染物去除更具效率。
- (2) 透過電滲透流之方向性，將污染物限縮於污染場址範圍內，降低危害至民眾及其生活區域之可能性。
- (3) 針對現地土壤/地下水污染問題進行共同整治，降低整治成本及縮短整治時間。
- (4) 透過電動力現地整治技術，兼顧環境保育及經濟發展。

2.2.2 執行優勢

本團隊根據過去多年於電化學地質氧化技術研究成果顯示，可有效處理土相及液相之重金屬及有機污染物，然研究場域都限於實驗室尺度，欲將電動力技術應用於實場整治，還須藉由模場試驗，以了解整治系統放大（scale up）後對技術操作、試驗參數及電極井排列之影響，因此今年著重於模場試驗，探討

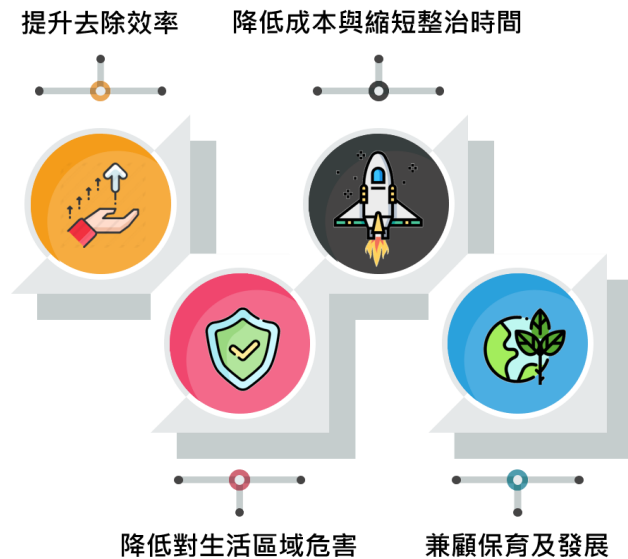


圖 11.計畫重要性說明 (本研究繪製)

電動力模場系統中電極井配置優化研究，同時邀請具豐富實場土水整治經驗之王凱中 技師（捷博公司）擔任協同主持人，以協助設井、佈點及地質水文資訊之提供，本研究團隊之執行優勢彙整如下：

1. 充分掌握電動力技術操作關鍵及複合金屬氧化電極製備核心技術

計畫主持人具有四項國內電動力技術專利（如下），對本計畫具高掌握度。

-袁菁、戴永惇，電動力法採用雙金屬氧化物電極之再生系統，中華民國專利證書發明第 I408258 號，2013 年 9 月 11 日~2029 年 11 月 24 日。

-袁菁、蔡嘉仁，電動力三維現地模型土壤整治系統及其施作方法，中華民國專利證書發明第 I488696 號，2015 年 6 月 21 日~2033 年 5 月 22 日。

-袁菁、張耿榕、蔡嘉仁、方彥程、吳宗翰，電動力土壤整治裝置，中華民國專利證書發明第 I568512 號，2017 年 2 月 1 日~2033 年 5 月 7 日。

-袁菁、張詠荃、連興隆，複合金屬氧化電極構造及其製造方法，中華民國專利證書發明第 I571326 號，2017 年 2 月 21 日~2035 年 3 月 26 日。

2. 主持人具有豐富之實場整治審查經驗，充分了解整治盲點

計畫主持人擔任高雄市環保局、新北市環保局、苗栗縣環保局及環保署土基會多項實場整治案件審查委員，對於現今土水整治技術所面臨瓶頸及場址中整治盲點多所了解，眾多業者視污染土壤為廢棄物，採離場處理，將導致土壤資源枯竭，因此竭力推動現地整治技術。



3. 具備完善土水污染整治實場設立及操作技術

王凱中 技師（捷博公司）擔任本模場計畫協同主持人，其帶領之捷博公司執行國內多件大型土壤/地下水污染整治案，該團隊對於預定第一順位場址地下水文地質及污染現況相當了解；且捷博公司擁有設井器材及機電專業團隊，更可給予高雄大學團隊專業之建議及協助。本團隊與捷博公司曾共同執行計畫（民國 106 年高雄市 SBIR 計畫）已具有相當好之合作默契。

2.3 計畫目標

本模場試驗計畫目標如圖 12 所示，以期達到建立本土現地整治技術操作規範，利於推廣應用。



圖 12.本計畫預期目標 (本研究繪製)

第一年 (108/1-108/11) 建置電動力三維模場系統之研究

- 建立實場尺度鋁電極（或 Fe/Al 氧化電極）之製備方式。
- 規劃及建置電動力模場配置系統。
- 建立電動力技術模場初步操作參數（電位坡降）。

第二年 (109/1-109/11) 執行電動力模場優化試驗之研究

- 建立電動力技術三維多向性模場之優化系統。
- 建立重金屬之三維多向性優化系統模場長期操作參數。
- 建立電動力模場處理效能及經濟效益分析。



第三章 文獻探討

3.1 高雄市鼓山區內惟段九小段 55 地號場址

高雄市鼓山區內惟段九小段 55 地號場址為環保署土基會【土壤與地下水綠色整治技術發展計畫 (105/11~107/8)】選定之示範場址^[3]，民國 107 年 2 月檢測結果發現該場址土壤已遭受重金屬之污染。目前為高雄市環保局清潔隊停車場，污染行為人為早期廢棄工廠，環保署於民國 98/10 及 99/1 執行「廢棄工廠土壤及地下水污染潛勢第四期調查計畫」，檢測結果發現，其土壤中重金屬含量鉻、銅及鎳均超出土壤管制標準，其濃度分別為 309 mg/kg、4,070 mg/kg 及 484 mg/kg，其各項土壤重金屬濃度表如表 1 所示，採樣點位如圖 13 所示。此場址未來將會由高雄市政府執行污染改善工作。此污染場址污染熱區無建物利於模場試驗進行，且為高雄市政府用地，已透過高市環保局土水科取得地主同意函。

表 1.內惟段九小段 55 地號場址歷年污染濃度彙整表^[3]

年代	內惟段九小段 55 地號		鉛	鎘	鉻	銅	鋅	鎳	砷
98-99 年	S230020-15	1.0-2.0	564	3.19	309	4,070	1,020	484	44.5
	S230020-16	1.0-2.0	973	4.55	94.7	340	977	100	21.7
	S230020-17	2.0-3.0	114	1.73	108	111	371	48.3	10.9
106 年	A24-19-d3	1.0-1.5	546	1.82	76	1,530	1,420	71.2	69.7
	A24-20-d6	2.5-3.0	327	1.96	500	242	2,680	50	<5
	A24-21-d2	0.5-1.0	435	2.27	125	674	1,160	126	69
土壤污染監測標準			1,000	10	175	220	1,000	130	30
土壤污染管制標準			2,000	20	250	400	2,000	200	60

Unit: mg/kg

※粗體字為超過土壤管制標準

本場址於民國 107 年 2 月由業興環境公司規劃以 225 平方公尺 (15×15, m×m) 正方形網格規劃點位 (如圖 14 所示)，採樣深度至少 4 公尺，採樣土壤每 0.5 公尺執行 XRF 篩測，針對污染篩測高值分析全量土壤重金屬濃度，其檢出重金屬濃度超過污染管制標準者區分為超過 1 倍與 2 倍以上並依據顏色區分 (如圖 15 所示)，如圖可發現東北側 (03-05) 及西南側 (12 及 14) 污染較為嚴重，其中 03 區塊之銅達監測基準以上；04 區塊之銅、鋅達污染監測基準以上，鎳達管制標準以上；第 12 區塊之鉛、鋅達污染監測基準以上，銅達管制標準以上；第 14



區塊之銅、鉛、鋅達管制標準以上；以上四點之污染深度都位在 1.5~2.0 m 之間，其餘區域最深達 3.0 m，已掌握污染範圍。



圖 13.內惟段九小段 55 地號場址採樣點位圖^[3]

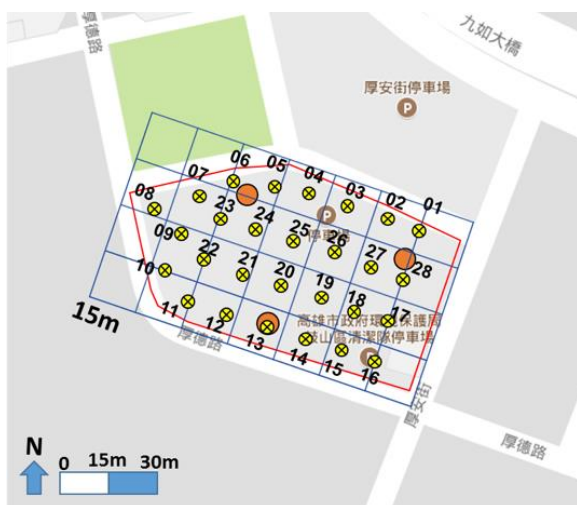


圖 14.內惟段九小段 55 地號場址土壤採樣點位圖^[3]

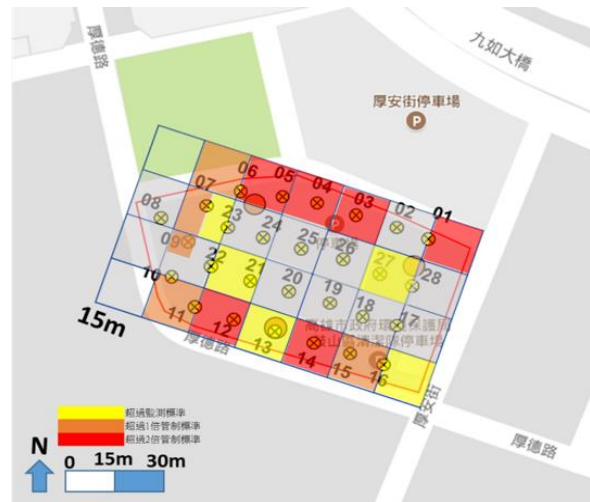


圖 15.內惟段九小段 55 地號場址土壤補充調查成果示意圖^[3]

3.2 電化學地質氧化技術

電化學氧化廣泛應用於液相處理，係利用電極之電化學特性，將有機污染物破壞分解，快速且具高效率；電動力復育技術（如圖 16 所示）則應用於土壤之處理，係於受污染場址插入電極，並通以直流電，增加污染物於土相中之移動性，使污染物依照特性集中於陰極端或陽極端，再予以移除。電化學地質氧化技術係結合前述二技術之優勢，改以反應性電極應用於電動力技術，藉由電動力機制集



中移除至陽極槽，再由氧化性電極與污染物產生電化學降解，達到永續處理之目的，同時縮少污染面積，減少後續污染土之整治工程，達到土壤之復育，地質氧化技術主要藉由電動力技術四種機制，同時亦利用反應性電極產生電化學降解，於移除污染物同時進行污染物降解，提升處理技術之永續及便捷性。

電化學地質氧化技術是一種創新且經濟之現地土壤/地下水復育技術，主要優點為：

- (1) 電滲透流使污染物移動具方向性；
- (2) 具降解有機污染物之能力；
- (3) 污染場址處理多元化；
- (4) 易於結合其他技術提升處理成效；
- (5) 為一種高經濟效益之現地處理技術。

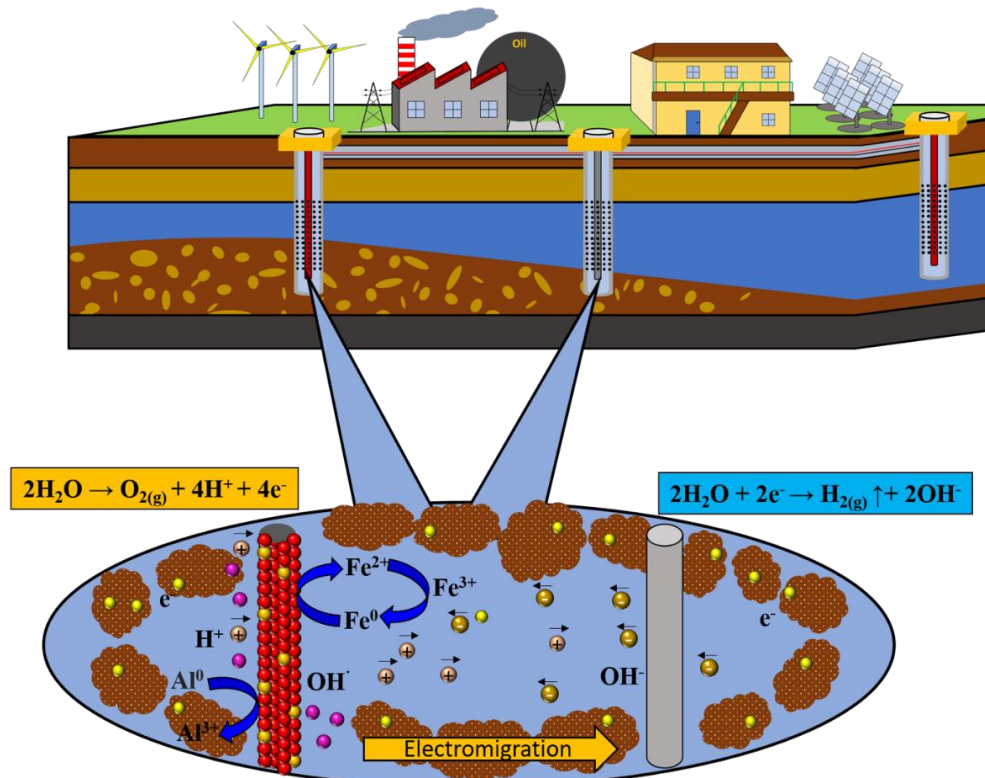


圖 16.電化學地質氧化技術示意圖 (本研究繪製)

3.3 電化學地質氧化技術之影響因子

1.操作流質

電動力技術處理之優勢係其於低滲透性土壤同樣可產生移除之效用，而對於溶解度低及非離子性之有機物，則可藉由與界面活性劑及氧化性操作流質之配合增加其溶解度與土壤中之氧化反應。而電動力常用之操作流質為界面活性



劑、EDTA、檸檬酸及乳酸等，對於疏水性有機污染物因具高親脂之特性，容易與土壤親合，以利電動力反應之進行，添加界面活性劑或共溶劑，可助於電動力處理過程中以提升疏水性有機污染物之水溶解度^[4]。

2. 電壓及電流強度

電化學地質氧化技術中，電壓及電流均係一重要影響因子，其影響水電解之效率，使氫離子所造成之電滲透流流速改變，電觸媒、電極產生氧化或還原污染物之功能亦受電壓之影響，連帶影響整體處理效率^{[5]、[6]}。

Tanaka et al.^[7]應用 Pt/Ti 電極降解含有 1.0 mM BPA 之水體，電壓範圍為 0.75 ~ 1.05 V，1.05 V 與 0.75 V 之電壓達到 80 % 降解之時間分別為 30 min. 及 50 min.，同時 Kuramitz et al. [8] 由碳棒電極處理 0.1 mM BPA，藉由使用不同電壓 0.75 V ~ 1.0 V 進行試驗，結果顯示當使用 1.0 V 之電壓僅需 60 min. 即可完全降解 BPA，顯示出於電化學反應之過程，不同電位坡降可能會影響雙金屬氧化電極其對污染物之氧化能力。

在氧化過程中被發現在較高的電位坡降會有更好的效果。因此，為了增強過氧化氫的運輸，NaCl 和 Na₂SO₄ 被用作電動芬頓處理電解質^{[9]、[10]、[11]}。提高電流強度，可以進一步增強系統的電滲透率，進而提高處理效率。除了使用較高之電位坡降及電解質之外，使用更高濃度過氧化氫的為提高處理效率的另一種方法。

3. 土壤組成

土壤於施加電場後會產生吸附、沉澱、溶解、氧化及還原等反應，因此，土壤的組成亦會影響到電動力的效果。電動力法復育技術常受到土壤性質的差異，而有不同處理成效，其中包括土壤質地、pH 值、風化程度、礦物型態等因素影響。

Polcaro et al.^[12]研究中指出黏質土壤之滲透性低，電滲透流效應相對差，致較壤質砂土耗損較高之電力，於使用高嶺土以及黏土進行二氯酚之去除試驗，結果顯示出在相同條件下，高嶺土可達到 90% 之去除效果，黏質土壤卻僅有 35%，因此不同之土壤質地會影響污染物之移動性及後續實驗耗用之電量。

4. 電極基材

於電化學技術及電動力技術中會使用不同類型之電極做為反應施加電場之介質，依電極材料類型可分為三種類型，第一類為傳統電動力所使用之惰性電



極，如石墨棒（藉由自由電子移動而導電）；第二類為金屬電極，如鈦棒、不鏽鋼、鐵網、泡沫鎳等；第三類為複合電極，由金屬塗佈另一種金屬或其氧化物，於通以電流時達到電催化之效果。

當在不考慮電極壽命及成本之情況下，其效率鐵電極 > 石墨電極 > 不鏽鋼電極。鐵電極的腐蝕產物作為催化劑的 Fenton 反應比石墨電極提供了更高的處理效率。

3.4 複合金屬種類

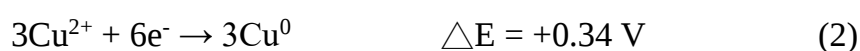
零價金屬已經利用探針式化合物（甲醇、甲酸）確認其氧化機制。也證實此技術是利用水中溶氧進行氧化反應能去除含氧類污染物。然而零價金屬在長時間的反應之下，會造成活性快速損失，限制其運用的價值。所以近年來零價金屬應用的研究重點是在於有效提高去除污染效率。因此，複合金屬是成效最顯著的技術，高活性之獲得與再生是突破瓶頸的關鍵。以下針對複合金屬做介紹，其中複合金屬種類大致可分為鈀鐵複合金屬 (Pd/Fe)、銅鋁複合金屬 (Cu/Al) 及鐵鋁複合金屬 (Fe/Al) 等。茲介紹如下：

1. 鈀鐵複合金屬

鈀金屬為在化學或環工上常用之催化劑，將其複合於零價鐵金屬上即為鈀鐵合金屬，經實驗證實可降低表面沉澱物的產生，並有效加強零價鐵金屬之能力，使反應速度加快，但鈀鐵複合金屬之缺點為對一些環境中不易分解污染物是無法處理的，尤其對含氯數較低之有機污染物不具處理效果^{[13]~[15]}。

2. 銅鋁複合金屬

銅為一惰性金屬，具有較低之還原電位 (+0.34 V)，因此可能經由銅的覆蓋以保護內層的零價鋁金屬，使鋁金屬表面不易生成氧化鋁殼。此外銅也為一種具備催化功能之金屬^{[16]~[17]}，因此銅鋁複合金屬可能藉由銅的催化能力以還原分解各種含氯污染物。銅鋁複合金屬乃是以鋁的還原能力將銅離子還原並附著於鋁之表面，零價鋁金屬放出電子，並形成三價鋁離子釋出水中（如 式(1)），二價銅離子接受電子還原形成零價銅金屬（如 式(2)），總反應如 式(3)。





目前已確認藉由銅鋁複合金屬可有效去除數種含鹵素有機污染物，但缺點為其亦為土壤及地下水污染管制項目，將會增加土壤及水體負擔，降低土壤及水體品質^[17]。

3.鐵鋁複合金屬

鐵鋁複合金屬之合成，乃是以零價鋁金屬釋出電子去還原鐵離子，使其形成零價鐵金屬，並附於鋁金屬之表面，如下 式(4)~(6) 所示：



鐵鋁複合金屬已被證實是良好的電子供應者，可透過還原脫氯反應降解多種之含氯有機污染物^[18]。在零價鐵的氧化反應系統中，保持電子與亞鐵離子的持續供應，是維持零價鐵氧化能力的關鍵。以鋁金屬做為電子供應者之鐵鋁複合金屬具有使亞鐵離子持續高濃度與穩定電子提供之能力，為一種可以保有零價鐵金屬之優點，且可克服其表面生成沉澱物缺點的設計。零價鋁的氧化機制可由下列方程式表示，主要涉及到零價金屬與水中氧氣之間的電子轉移。先形成過氧化氫，再產生氫氧自由基，進而氧化降解污染物，如 式(7)~(10) 所示。



3.5 電極排列之影響

近年來，許多文獻開始針對電極排列之配置作探討，乃因電極排列將影響電場分布，完善的電場分布將有助提升整治效能，相較於一般實驗室尺度之二維排列配置 (2D configurations)，由於其主要針對電動力對污染土壤之水平流向作討論，所能觀察之電動力整治效果有限，為使將電動力技術有效應用到實場整治且達到經濟效益，電極排列方式之探討開始成為一項電動力技術操作之重要參數。



1.水平並列

Risco et al.^[19]利用電動力技術復育受到商業乙氧氟草酸試劑（FLUOXIL 24 EC）之污染土壤，並以模擬試驗裝置（pilot plant）評估線性排列電極對其處理效果之影響，反應器大小為 $175 \times 10^3 \text{ cm}^3$ （LWH： $70 \times 50 \times 50 \text{ cm}^3$ ），陰陽極槽體分別為 $1 \times 1 \times 10 \text{ cm}^3$ ，如圖 17 所示，此研究所使用同方向之電極排列為具有相同極性的線性排列，相對於天然揮發在 34 天之後可增加 26.88% 的乙氧氟草酸處理效果，而由於線性排列之結果沿著陰陽兩極會產生一土壤 pH 梯度，此梯度可能會影響土壤中污染物之流動性。

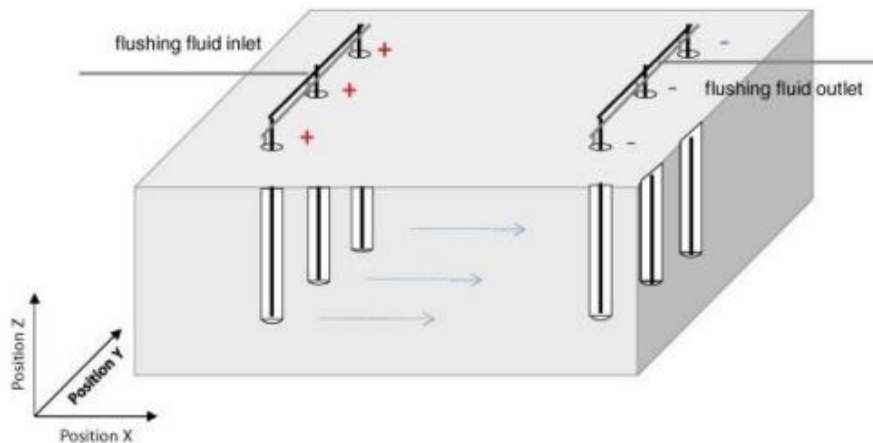


圖 17.水平電極陣列及採樣點位示意圖^[19]

2.蜂巢狀排列

Cuevas and Herrada^[20]研究指出，電動力技術可透過適當調整電極排列，並以直流電進行現地低透水性細顆粒土壤整治，且可有效控制其污染物之移動方向，且有能量耗用低之優勢，然而，在施行電動力技術時，其成效受到污染物之性質及系統中氧化還原之反應影響。

López-Vizcaíno^[21]在體積為 32 m^3 ，含有乙氧氟草酸、2,4-二氯苯氧乙酸 (2,4-D) 污染土壤，以六角形電極排列方式擴大對污染場址之全面復育，並觀察其土體及電解質井平均溫度、殘留濃度，此研究之主要目的為擴大電動力技術之土體範圍，且發現高揮發性污染物使用較高電流密度會因電流熱效應產生較強揮發效果。

此外，Vocciante et al.^[22]對於電動力之電極排列對於現地處理進行評估，同樣指出蜂巢狀排列情況下，污染物會因為其不同之特性而向陰極或陽極端蒐集，且不同污染物之性質各不相同，依照污染物在電動力系統之流動特性，而設計電極之配置方式，此方法具有下列優點：(1)提高電滲透流及離子遷移之匯流效果，



並減少提取出流液時所消耗之成本；(2)利用所使用之電解質的性質，幫助污染物進行有方向性之遷移，電極之電位坡降由 $0.07 \sim 0.4 \text{ V/cm}$ ，可看出線性排列可藉由施加較多組數之電場減少未受到電力效果之區域，而由中心電極排列之方式可以看出，同樣使用較多電極可以減少無電力效果之區域，然而電極增加意味其能量耗用量較高，為取其平衡，Vocciante et al.^[22]採用單一中心電極，外圍擺放相異極性電極之六角形排列，在處理效能及電力耗用間衡量。

Risco et al.^[19]同時指出，六角形之電極排列方式亦可以中央陰極 (1C6A) 或中央陽極 (1A6C)，兩種不同之操作單元進行試驗，如圖 18 所示，此種電極排列方式主要包含以下優點：(1)可以控制污染物之移動方向以利於蒐集 (取決於污染物之物理及化學特性)^[23]；(2)有效控制土壤之 pH 值、電場效應較一般線性排列均勻，並產生熱效應，對於揮發性有機物處理有所助益。

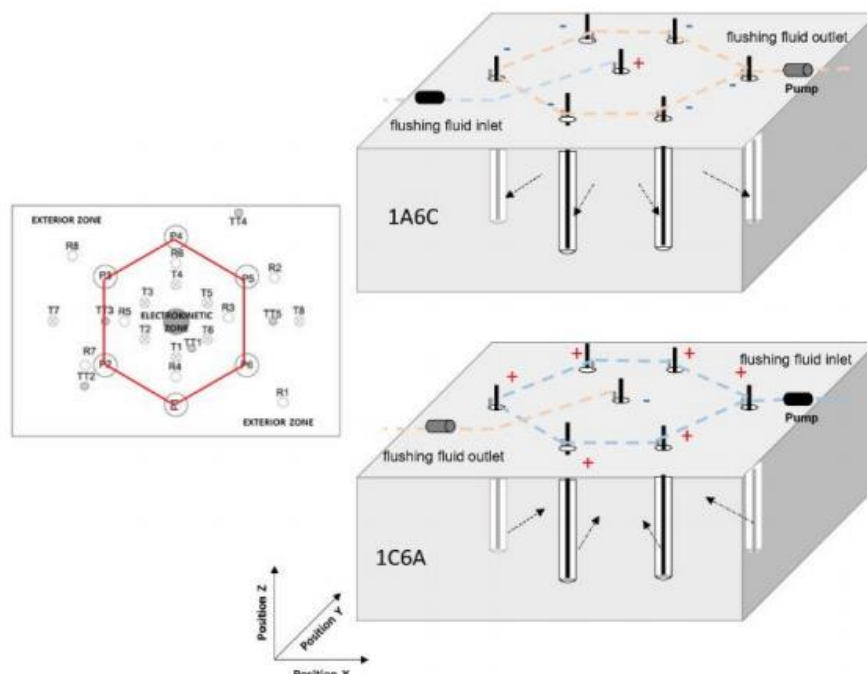


圖 18.中央陽/陰極之六角形電極排列^[19]

3.6 電動力技術應用於實場尺度污染土壤之研究

電動力相較於其他現地土壤整治技術而言為一項新穎的技術，目前多數研究探討實驗室尺度系統對於污染物移除效果之影響，而在這些研究中，通常使用密封的管柱或菱形試體作為電動力反應裝置，在此尺度下進行電動力試驗可以大大減少處理過程中可能產生之變因，然而，將其作為現地實際應用之依據卻有待商榷，因此此技術之放大 (scale-up) 於近年來亦開始受到重視。

Kim et al.^[23]針對南韓鹽鹼化 (salinization) 之農地進行模場規模之電動力試



驗，為改善土壤中氯化物、硝酸鹽、硫酸鹽之影響，以 $1 \times 1 \times 0.25 \text{ m}^3$ 之模場進行試驗，其實驗配置如圖 19 所示，研究結果顯示，在 1.0 V/cm 電位坡降下處理 14 天，氯化物之去除效率上層為-62.3%，中層為-32%，底層為 31.3%，集中於頂層及中層，由於操作流質使用自來水使氯化物濃度提高；硝酸鹽透過電子遷移由陰極傳輸至陽極，而上、中、下層處理效果分別為 21.5%、35.6%、44.7%，處理效果最佳，而硫酸鹽受到土壤中陽離子影響使傳輸效果下降，而六角形之電極排列則使電場無效之區域達最小化，對於放大規模具有一定優勢。

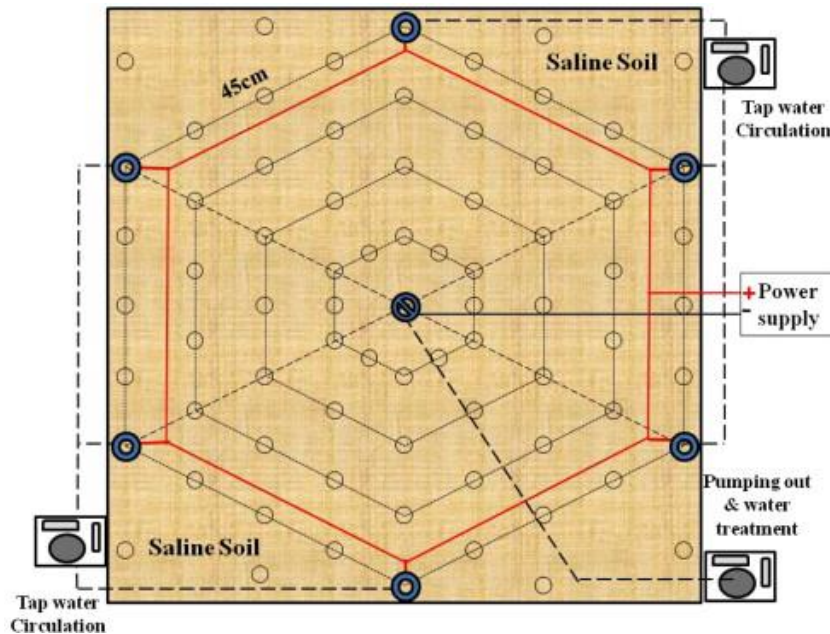


圖 19.鹽化農地模場試驗採樣點及電極配置示意圖^[23]

Vieira dos Santos et al.^[24]研究使用 $1,000 \text{ mg/dm}^3$ 之 SDS 作為增溶劑，處理 30 mg/kg 之 Atrazine 及 oxyfluorfen，結果顯示 oxyfluorfen 之揮發性較高，會受到電動力技術之熱效應影響，若於電動力系統中結合活性碳反應牆藉此提高對於 oxyfluorfen 之吸附能力，則可以有效將揮發損失量由 $60 \sim 65 \%$ 降低至 $45 \sim 50 \%$ 。

Risco et al.^[25]選擇 $70 \text{ cm} \times 50 \text{ cm} \times 50 \text{ cm}$ 大小之試模尺寸進行電動力試驗，操作流質使用十二烷基苯磺酸鈣，電位坡降 1.0 V/cm ，反應時間 34 天，觀察電動力之影響，結果顯示經過 34 天處理，土體之殘留 oxyfluorfen 濃度從 20.0 mg/kg 下降至 7.4 mg/kg ，而由於 oxyfluorfen 污染物之揮發性較高，若污染土壤未經電動力處理之去除率約為 5.5% ，而經由電動力系統處理後可增加 60.7% 之處理效果，可得知電動力對於此類揮發性較高之污染物之處理分為移除以及電場熱效應所造成之揮發效果。



3.7 實場尺度電極設計

過去本研究團隊都以實驗室尺度之電動力實驗為主，未來進入實場除增加現地配電材料等電動力相關設備外亦需製備實場尺寸之電極，本研究設計每段 30 公分之電極棒，前、後設有公、母之螺紋（如圖 20 所示），可視污染物深度予以調整至最佳處理深度，電極棒亦可使用相關金屬材料固定於井口（如圖 21 所示）。

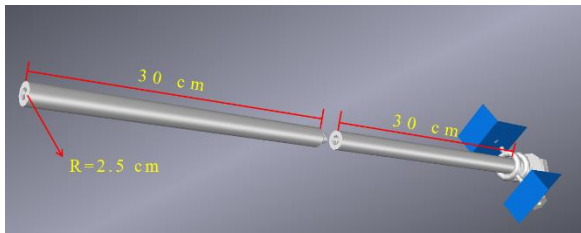


圖 20.實場電極之設計（本研究繪製）

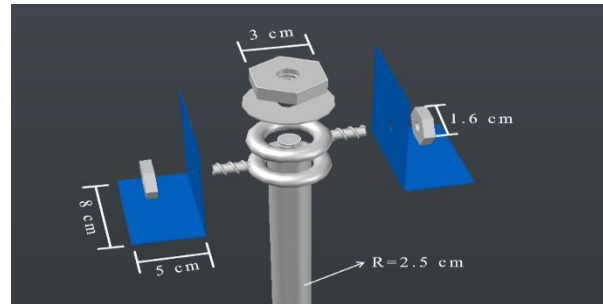


圖 21.固定電極之相關材料配置（本研究繪製）

3.8 本團隊實場整治經驗

本模場係位於高雄市某工業園區，此試驗總共分為南北兩側進行不同試驗，北側模場進行整治試驗，陽極端使用 Fe/Al 氧化電極結合電動力反應，利用氧化還原反應產生氫氧自由基降解有機污染物；南側模場為傳輸試驗，使用惰性金屬鈦 (Ti) 電極將生物試劑透過電滲透流傳輸至欲到達之位置，使生物試劑提供地下微生物更充足之營養源。

傳輸試驗組 T1 井到 T2 井為順地下水流，T2 到 T3 為逆地下水流；圖 22 為電壓隨時間之變化情形，如圖可看出通電初期為最高，隨後緩慢下降之原因可能為地電阻所導致；圖 23 為生物試劑 Eco-clean 傳輸試驗結果，如圖可看出於 12 天前 T2 井濃度為上升，12 天後則為下降，代表當電壓足夠時電滲透流是可以對抗地下水流，進而將生物試劑傳輸至指定地點。

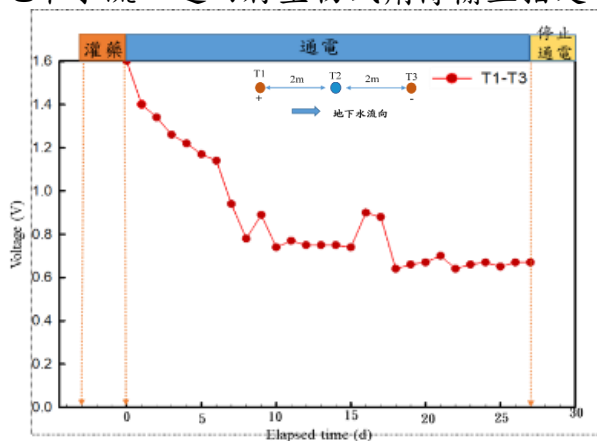


圖 22.傳輸試驗之電流趨勢圖

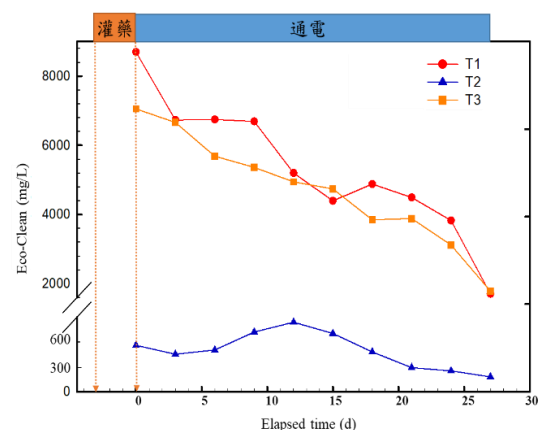


圖 23.傳輸試驗之生物試劑濃度趨勢圖



第四章 研究方法與過程

4.1 研究架構

本研究藉文獻彙整當前台灣土壤/地下水所遇之瓶頸，並統整過去多年於實驗室尺度之重大成果，提出一「建立三維多向性電動力模場系統之優化研究」計畫，將電動力技術實際應用於現地污染場址中。本計畫選定**高雄市鼓山區內惟段九小段 55 地號場址**為整治場址（依土污法 17-2 條所列之相關內容撰寫於附件），將使用 Al 電極及 Fe/Al 氧化電極配合地下水或乳酸操作流質進行重金屬污染土壤整治，藉由電滲透流將土壤中重金屬由陽極端及土體往陰極端移動且集中，再由陰極端移除，達到整治之目的。

4.1.1 第一年 (108 年) 計畫架構及甘特圖

第一年 (108 年) 模場整治試驗研究架構如圖 24 所示，甘特圖見圖 25，詳細說明如下：

第一階段：第 1～6 個月。

設計具實場規模之 Al 電極及 Fe/Al 氧化電極，其須符合污染區域之污染深度，高雄市鼓山區內惟段九小段 55 地號場址為重金屬污染場址，污染深度為 2.5 m。

現場勘查以了解現地地面上是否有相關建築或構造物，與捷博公司討論設井之位置及相關配電設施之規劃。

第二階段：第 7～9 個月。

蜂巢型排列模組進場佈點、設井、裝設電壓設備控制系統、佈線及系統測試等。

第三階段：10～12 個月。

以電化學地質氧化技術（電動力技術）於水井當中放入具實場規模之 Al 電極及 Fe/Al 氧化電極進行整治作業，並定期監測電動力相關參數以確認其正常運行；其採樣方式進行高濃度污染土壤全量分析。電極井規劃如圖 26 所示。

4.1.2 第二年 (109 年) 計畫架構及甘特圖

第二年 (109 年) 模場整治試驗研究架構如圖 27 所示，甘特圖見圖 28，詳細說明如下：

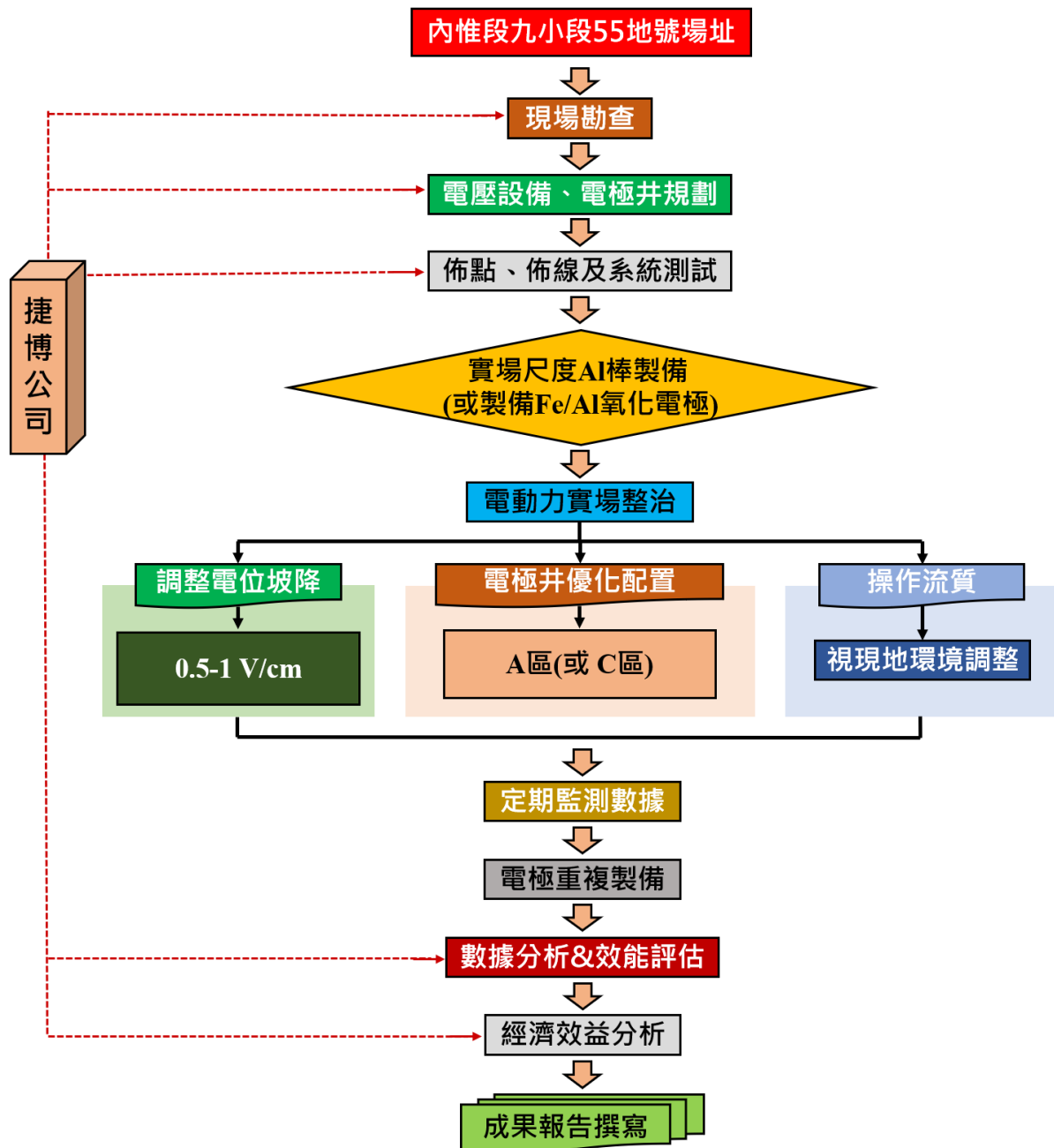


圖 24.第一年 (108 年) 研究架構圖 (本研究繪製)

第一階段：第 1～3 個月。

方型排列模組電壓設備規劃及裝設、電極井配置規劃、佈點、設井、佈線、系統測試等。

第二階段：第 4～9 個月。

進行電動力實驗，方型排列模組操作參數以電極種類、操作流質種類及操作流質濃度進行污染整治試驗。



工作項目	108 年												備註
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
製備 Al 電極、Fe/Al 氧化電極及實驗室測試													
現場勘查													
電壓設備規劃、電極井規劃													
進場佈點、設井、裝設電壓設備控制系統、系統測試等													
進行整治試驗													
定期監測重金屬濃度、電壓等(含背景值)													
數據彙整分析													
期中/期末報告						★					★		
工作進度估計百分比 (累 積 數 ， %)	8	16	24	32	40	50	56	64	72	75	88	100	
預定查核點	期中		1. 完成 Al 電極、Fe/Al 氧化電極製備及實驗室測試。 2. 完成 A 區域電壓設備及電極井佈點規劃。										
	期末		1. 完成進場佈點、設井、裝設電壓設備及系統測試等。 2. 執行 A 區域整治試驗。 3. 完成污染物濃度、電壓(電流)、水質參數等定期監測。 4. 經濟效益分析及第一年報告撰寫。										
說明： 1、 工作項目請視專業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。													

圖 25.第一年 (108 年) 研究甘特圖

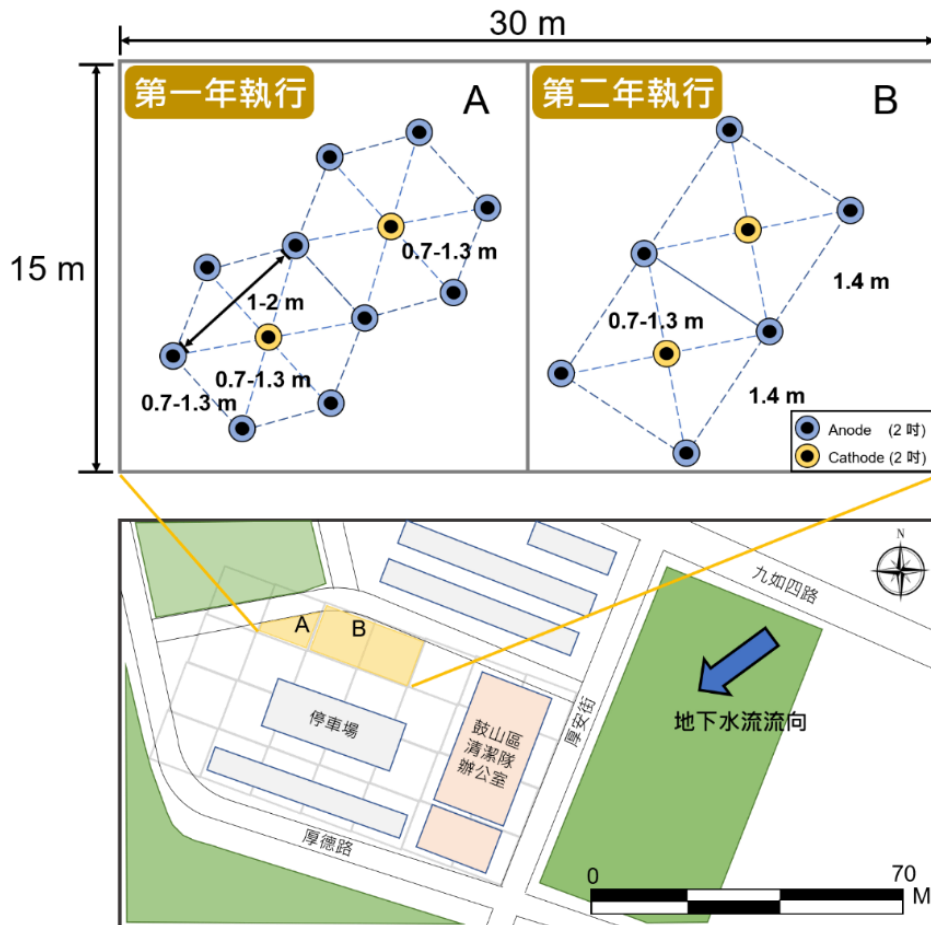


圖 26.內惟九小段 55 地號場址電極井配置規劃 (本研究繪製)

第三階段：10～12 個月。

數據彙整分析及報告撰寫。

4.2 實驗設備及材料

4.2.1 儀器與設備

本研究所需設備與分析儀器如下所示：

1. 感應耦合電漿光譜儀 (Inductively Coupled Plasma): Optima 2000 DV, PerkinElmer, USA。
2. 精密電子天秤: AND GR-200, 10 mg ~ 210 g, Japan。
3. pH meter: G&B Instruments, PL-700PV, USA。
4. 高溫爐: CARBOLITE, CWF1300, UK。
5. 烘箱: MEMERT, UM 400-1, Germany。

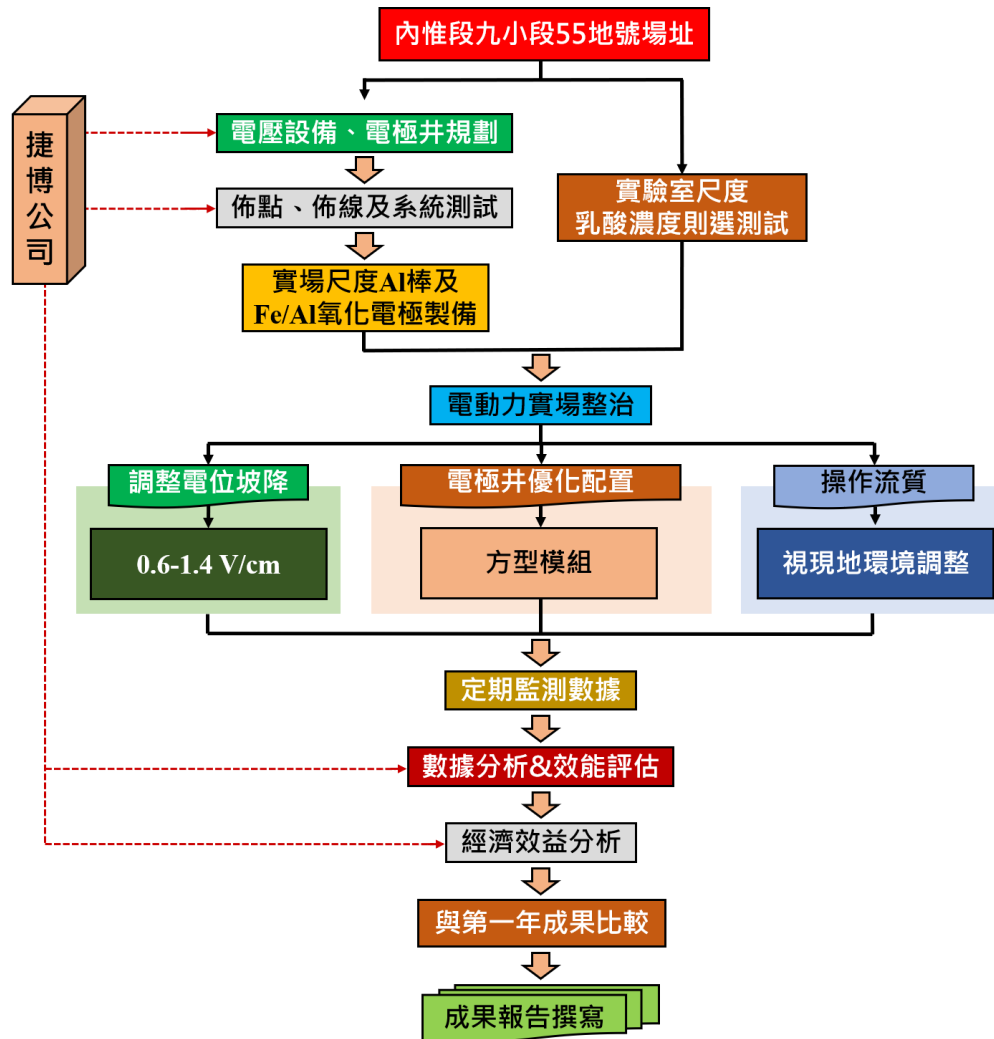


圖 27.第二年 (109 年) 研究架構圖 (本研究繪製)

4.2.2 實驗材料

1. 鹽酸 (Hydrochloric Acid): GR 級, Merck, Germany。
2. 硝酸 (Nitric Acid): GR 級, 65%, Japan。
3. 氯化鐵 (Iron Chloride): GR 級, SHOWA, Japan。
4. 鋁棒 (ϕ : 0.63 cm, L: 15 cm): 興貿鋁業, Taiwan。
5. 鋁棒 (ϕ : 2.2 cm, L: 30 cm): 興貿鋁業, Taiwan。
6. 整流器 (220 VDC, 8 孔式): 文成工作室。
7. 整流器 (220 VDC, 6 孔式): 文成工作室。

4.3 整治試驗規劃

4.3.1 實驗室乳酸濃度擇選試驗

實驗室尺度乳酸濃度擇選試驗為於實驗室尺度中，進行鼓山區現地污染土壤



工作項目	109 年												備註
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
新增區域電壓設備規劃、電極井 規劃、佈點、設井、裝設電壓設 備控制系統、系統測試等													
進行整治試驗													
定期監測重金屬濃度、 電壓等													
數據彙整分析及 與第一年成果比較													
期中/期末報告						★					★		
工作進度估計百分比 (累 積 數 ， %)	8	16	24	32	40	50	56	64	70	75	88	100	
預定查核點	期中		1. 新增區域(B 區域)電壓設備規劃、電極井規劃、佈點、設井、裝設電壓設備控制系統及系統測試等。 2. 執行 B 區域整治試驗(進度 50%)。 3. 完成定期監測重金屬(含氮)污染物濃度、電壓、水質參數等(進度 50%)。										
	期末		1. 執行 B 區域整治試驗(進度 50%)。 2. 完成定期監測重金屬污染濃度、電壓等(進度 50%)。 3. 經濟效益分析及第二年報告撰寫。										
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。													

圖 28.第二年 (109 年) 研究甘特圖

模擬試驗，探討於高電位坡降 (1.4 V/cm) 下，改變乳酸濃度 (0.05 ~ 0.5 M) 之整治成效。試驗於一長 12.0 公分、直徑 4.0 公分透明玻璃管中進行，前後設有陽、陰極槽，陽、陰極電極皆使用鋁棒 (惰性電極)，操作示意圖如圖 29 所示，實驗規劃如表 2 所示。

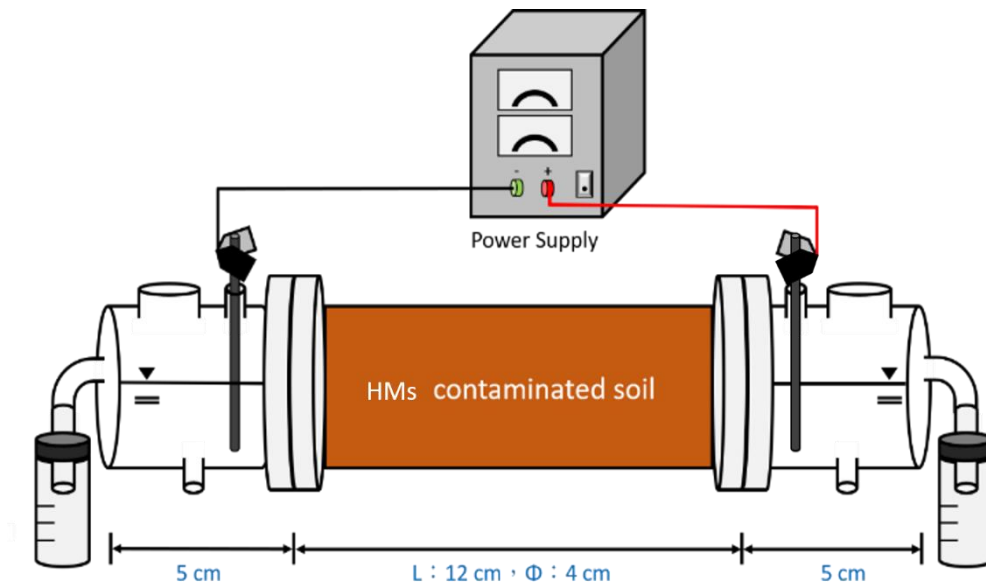


圖 29.二維管柱試驗示意圖

表 2.二維管柱實驗規劃

Test No.	Potential gradient (V/cm)	Parameters	Duration (days)
		Processing fluid	Electrode
A1	1.4	0.05 M Lactic acid	Al electrode
A2	1.4	0.20 M Lactic acid	
A3	1.4	0.50 M Lactic acid	

4.3.2 現地整治

方型排列模組示意圖如圖 30 所示，本計畫之土壤採樣特訂製土壤採樣管，以敲擊方式採取地下土樣，再透過 ICP 進行全值分析；試驗參數之規劃以電動力技術重要參數：電位坡降、操作流質及電極種類為主，試驗規劃表如表 3 所示；土壤採樣規劃於每週固定採樣一次，若遇雨天或天氣不佳則予以調整。

4.4 土壤基本特性分析

4.4.1 土壤 pH 值分析試驗

土壤之 pH 值係參照環檢所 NIEA S410.62C 方法，步驟如下：

1. 土壤經風乾過篩後秤取 20 g 土壤放入燒杯內，加入 20 mL 實驗室去離子水（土：水=1：1）並蓋上錶玻璃，持續攪拌 5 分鐘。
2. 靜置 1 小時，使混合液大部分固體沉澱。
3. 取土壤沉澱後之水相層並測定其 pH 值及記錄溫度。

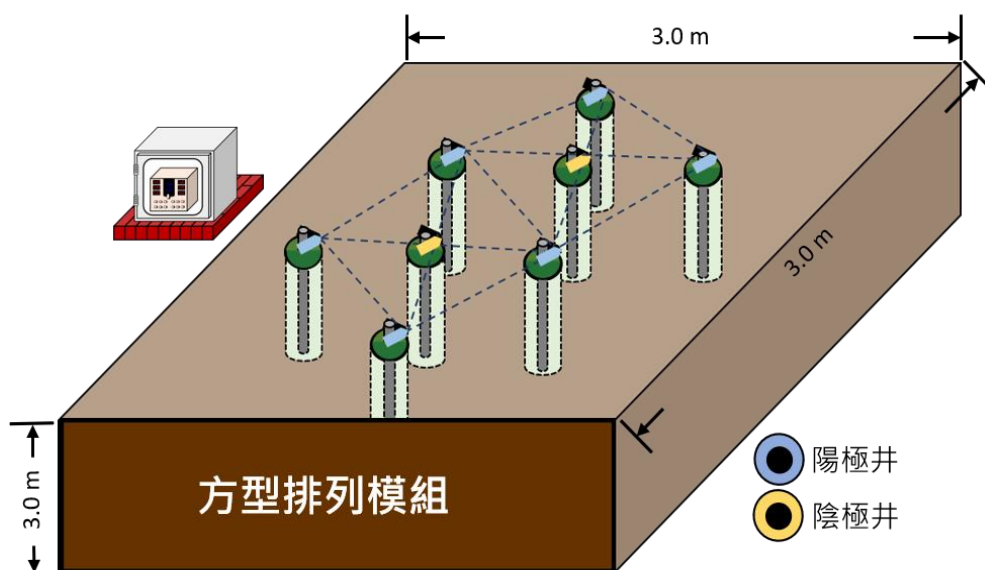


圖 30.方型排列模組示意圖

表 3.試驗參數及期程規劃表

Test No.	Parameters			Duration (days)
	Potential gradient (V/cm)	Processing fluid	Electrode	
S1	0.6	Groundwater	Inert electrode	30
S2	1.0	Groundwater	Inert electrode	30
S3	1.0	Groundwater	Oxidation electrode	30
S4	Based on Lab test			30

4.4.2 陽離子交換容量 (CEC)

本土壤中陽離子交換容量係參照環檢所 NIEA S291.60T 方法，步驟如下：

1. 風乾之土壤經測定水分含量後，秤取 4.00 g (精秤至 0.01 g) 中或細之風乾土壤或 6.00 g (精秤至 0.01 g) 的粗土壤，放置於離心管中。
2. 加入 33.0 mL 1 M 醋酸鈉溶液，用超音波洗淨機震盪 5 分鐘，後離心至溶液澄清為止。
3. 移出並丟棄上層液，重複步驟 2 三次。
4. 加入 33.0 mL 99.0% 異丙醇，用超音波洗淨機震盪 5 分鐘，後離心至溶液澄清為止。
5. 移出並丟棄上層液，重複步驟 4 三次。
6. 加入 33.0 mL 中性 1.0 M 醋酸銨溶液，用超音波洗淨機震盪 5 分鐘，後離心至溶液澄清為止，將洗滌液體倒入 100.0 mL 定量瓶中定量，以感應耦合電漿光譜儀測定鈉離子濃度。



7. 陽離子交換容量之計算方法：

$$\text{陽離子交換容量 (meq/100 g)} = (C \times V) / [W / (1/R)] \times 100$$

式中，

C：鈉離子濃度 (M)；

V：結合上澄液之稀釋後最終體積 (mL)；

W：秤取之土壤重 (g)；

R：風乾土壤之水分含量。

4.4.3 土壤界達電位

土壤界達電位之測定，其步驟如下：

1. 秤取 10.0 g 過篩後之土壤，後加入 250 mL 實驗室去離子水。
2. 將配製好之共溶液分配至各 50.0 mL 之採樣瓶中，並分別調整 pH 值至 2、3、4、5、6、7、8、9、10 及 11。
3. 使用界達電位儀量測不同 (pH 值) 環境下土壤顆粒表面帶電情形。
4. 當 pH 值間產生由正電轉為負電，即該 pH 區間為土壤之零電位點 (pH_{zpc})。

4.5 重金屬分析方法

土壤重金屬分析方法參考環檢所 NIEA M103.02C 並稍作改良，其步驟如下：

1. 採樣完之土壤帶回實驗室烘乾並隨機採點；
2. 於精秤儀上秤重 0.1 g；
3. 將土壤置入微波消化管；
4. 後依序置入 9.0 毫升硝酸及 3.0 毫升氫氟酸；
5. 微波消化程式設定如下：
 - (a) 由室溫上升至 120°C，保溫 15 分；
 - (b) 由 120°C 上升至 150°C，保溫 15 分鐘；
 - (c) 由 150°C 上升至 180°C，保溫 30 分鐘；
6. 後再加入 15.0 mL (5.0%) 硼酸至消化管中，再次微波樣品 (升溫程式如上)。

4.6 電力設備施工方法

本計畫特請捷博公司機電部門協助電纜之架設，包含總電源之牽線工程、斷路器及電錶之裝設。



4.7 設井作業

本計畫與協力廠商捷博公司一同進行現地設井工作，由本計畫兼任助理先就預設井之位置進行放樣，再由捷博公司實驗室團隊進行設井之工程。



第五章 結果與討論

本計畫為兩年計畫 (108~109 年) 之第二年計畫，續以 108 年計畫使用高雄市鼓山區內惟段九小段 55 地號場址為整治場址，其目前作為高雄市環保局清潔隊停車場所用，其為一土壤重金屬污染場址，目前並無相關整治作業。

本計畫試驗之初即透過實驗室尺度 (lab scale) 乳酸濃度擇選試驗進行實場電動力試驗乳酸濃度擇選，並續使用由 108 年計畫所設計之時場尺度電極進行現地整治。

5.1 與捷博公司討論現地設井事宜

捷博科技股份有限公司為本計畫之協力廠商，帶領其公司之王技師團隊亦具有豐富之土壤/地下水整治經驗，本年度 (109 年) 計畫續邀請捷博公司團隊負責 B 區域 (方型排列模組) 設井及牽線事宜。

5.2 整流器設計

109 年度計畫之整流器採用電子式設計，相較於傳統工業式整流器具有輕量化及高靈敏度偵測等優勢，外觀與第二代工業式相同，彙整如表 4 所示。

5.3 設井作業

本計畫 (109 年) 續邀請捷博公司團隊進行新增區域 (方型排列模組) 現地井位施作，設井作業步驟如下，亦請參考圖 31 至圖 34 所示：

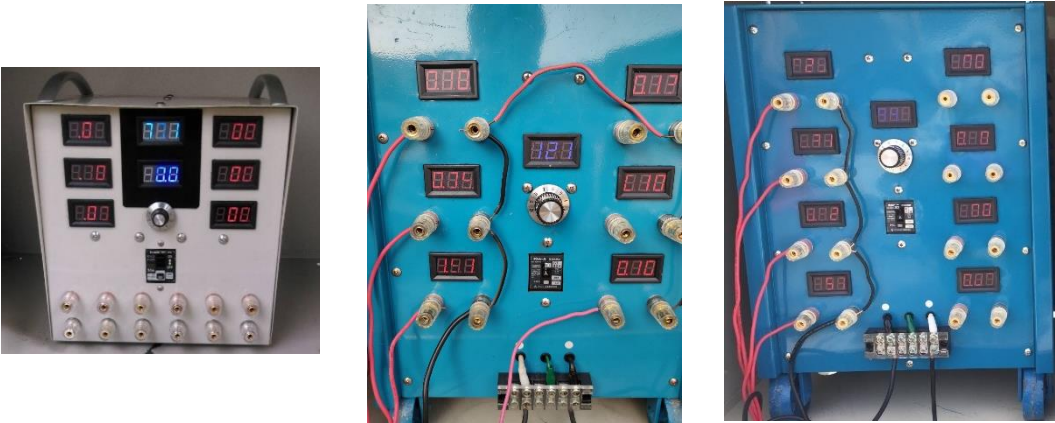
- (1) 刨除柏油路面及級配：利用怪手將路面柏油刨除以利設井作業；
- (2) 人工試挖：以土鏟進行人工試挖，將大顆粒石頭清除，較利鑽井儀器之運作；
- (3) 鑽機鑽井：利用鑽機進行鑽井作業，規格為四吋井，本計畫以 2.0 m 作為設井之預設深度，但開挖後發現地下留有早期工廠地基，不利怪手施作，與工程師討論後決定以 1.0 m 作為開挖深度。
- (4) 放置地下水井之塑膠井管：完成設井後，將地下水井管置於鑿井處。
- (5) 混凝土工作面之鋪設：為防止雨天積水及泥濘產生，澆灌混凝土將工作面與原始路面切齊。

5.4 電力系統設置

完成電極井位施作後即進行現地配線工程，包含：牽線、安裝及電力系統測試，請參考圖 35 至圖 36 所示。



表 4.歷代整流器規格彙整

項目	第一代工業式	第二代工業式	第三代電子式
外觀			
操作性	配線操作不易	將操作面板面積加大，操作及觀測更為直觀	
重量	電磁線圈，重量較重		電子式零件， 重量降低 70%
耐候性	具有較高之耐候性		電子零件易受潮，須加裝 防水部件
保養/ 維護	均使用外箱保護，每 6 個月做乙次保養		
試驗組			
使用代 別	Test S1	Test S2	Test S3 及 S4
價格	均同		

5.5 電動力標準作業流程建立

本計畫以電動力技術執行現地重金屬污染土壤整治試驗，5.5.1~5.5.3 節將整體系統設置流程分為前置工程施作階段、整治作業階段及場址復原階段具體說明，建立一電動力系統模場設置標準作業流程 (SOP) 以作為未來電動力現地模場設置之參考，SOP 流程如圖 37 所示。

5.5.1 前置工程施作階段

本階段需執行選址、現勘、地主整治意願調查、土壤鑽探作業、電動力技術適宜性評估、電極排列模組設計及規劃、地電阻量測及整流器設計及製造、整地、電極井設置作業、電極安裝/架設及電力系統架設/測試等前置作業，流程說明如下。



圖 31.破地平



圖 32.地下水井套筒安裝



圖 33.工作面恢復作業



圖 34.完成設井作業



圖 35.整流器電線配置



圖 36.電極井電線配置

5.5.1.1 選址及現勘

選址及現場勘查前應先了解欲整治場址相關背景資料，且於現場勘查時收集現地各項資訊以進行後續工程評估，現勘項目包含：

1. 整治範圍框列。
2. 現場水力來源確認。

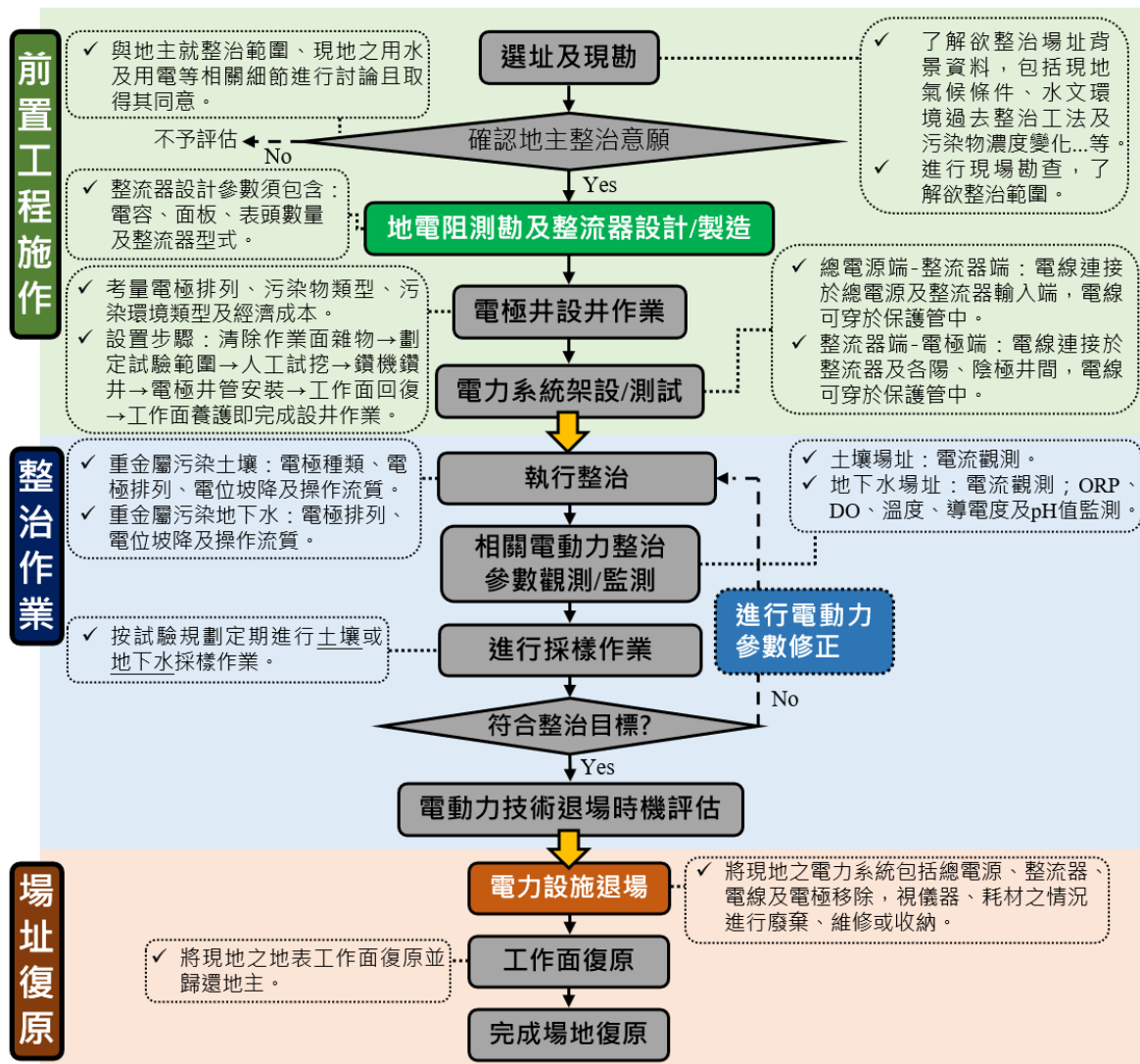


圖 37. 電動力標準作業流程 (SOP)

3. 現場電力來源確認。

5.5.1.2 土壤鑽探試驗

進行土壤鑽探試驗之目的為進行土壤基本特性分析，確認污染物種類、污染濃度範圍及現地污染範圍。鑽探試驗欲了解：

1. 土壤特性：土壤粒徑、含水率及有機質等土壤基本特性。
2. 污染物種類及其濃度範圍分析：進行土壤鑽探試驗，將採集後之土樣進行污染物種類、污染濃度及污染範圍分析，以了解現地土壤污染情形，較利進行電極排列模組單元設計。

5.5.1.3 電極排列模組設計及規劃

電極排列模組設計及規劃為電動力現地整治處理成效之重要影響因子，其規劃及設計應考量各式模組之整治效益、整治場址大小及經濟成本。電極排列模



組設計及規劃因子包含整治場址範圍、污染類型、整治目的及整治效益。

5.5.1.4 地電阻測勘及整流器設計/製造

電動力技術使用之整流器，其電容設計需仰賴地電阻儀進行整治場址地電阻測勘。地電阻測勘及整流器設計/製造說明如下：

1. 地電阻測勘流程為：
 - (1) 清除欲測勘範圍之地表障礙物；
 - (2) 測繪欲測勘方向及距離，需考慮周邊障礙物及建築設施；
 - (3) 電極點位鑽孔（需鑽破柏油路面）；
 - (4) 根據電極點位鑽孔進行電極佈設（約每隔 1.0 m 置入一支電極）；
 - (5) 於電極點位周圍澆水以提升電極與土壤之導電性；
 - (6) 進行地電阻測勘
2. 整流器設計/製造應考量：
 - (1) 入電壓
 - (2) 出電壓
 - (3) 電容
 - (4) 串聯/並聯負載系統
 - (5) 整流器連接端數量

5.5.1.5 電極井設置作業

為使電動力整治作業順利進行，整地程序為設井作業、大型機具進場及電動力相關電力設備進場前之重要步驟；電極井之設置需考量電極排列、污染物類型（重金屬或有機物）、污染介質（土壤或地下水）及工程經濟成本。本研究之整地及電極井設置工程步驟如下：

- (1) 移除欲整治模場地面上暫置之雜物，以利後續工程之進行；
- (2) 劃定整治試驗範圍；
- (3) 破地坪；
- (4) 人工試挖；
- (5) 執行鑽機鑽井作業；
- (6) 電極井管及套筒安裝；
- (7) 工作面鋪設；
- (8) 混凝土工作面養護。



5.5.1.6 電極安裝及電力系統架設/測試

電力系統為電動力技術之核心，其包含總電源、整流器、電極及各部分連接之網絡，電力系統架設指將總電源、整流器及電極用以電線連接，並可正常運作，待電力系統架設完成後即執行電力系統測試作業，以下將分成電力系統架設及電力系統測試二部份說明。步驟如下：

- (1) 整治區域總電源架設；
- (2) 整流器安置；
- (3) 總電源端-整流器端電線佈線作業；
- (4) 整流器端-電極端電線佈線作業；
- (5) 電力系統測試。

5.5.2 整治作業階段

本階段需執行電動力技術整治，流程說明如下：

- (1) 電動力技術整治；
- (2) 電動力相關整治數值觀測/監測；
- (3) 採樣作業；
- (4) 電力系統維護；
- (5) 數據分析及彙整；
- (6) 整治成效及退場時機評估。

5.5.3 場址復原階段

本階段需執行場址復原，完成電動力整治即進行相關現地設施之退場作業，電力系統之退場作業包含總電源、整流器、電線及電極之移除，應進行相關儀器、耗材之可回收性確認，一般總電源及整流器等設備可重複使用，電線及電極應視材料耗損情形予以斟酌。本研究之整流器於鼓山場址試驗後可再使用，先移至室內環境暫置。

5.6 乳酸濃度擇選試驗

本小節進行實場重金屬污染土壤操作流質乳酸濃度擇選試驗，比較濃度 0.05 ~ 0.50 M 乳酸 (lactic acid)，於 1.4 V/cm 電位坡降下 (如鼓山場址用電壓)、5 天對重金屬銅 (Cu)、鋅 (Zn)、鉻 (Cr)、鎳 (Ni) 及鉛 (Pb) 之整治成效，作為後續電動力實場重金屬污染土壤整治之乳酸濃度參考。

整治試驗之完成則將污染土壤由陽極端至陰極端分成六等分 (試驗裝置示意



圖見圖 29 所示)，每一等分約 2.0 公分，實驗分別於距陽極處 1.0、3.0、5.0、7.0、9.0 及 11.0 cm 處進行污染土採樣。如圖 38 所示，x 軸左側至右側為陽極端至陰極端距離 (cm)，y 軸為重金屬銅污染土壤殘留濃度 (mg/kg)，紅色虛線為污染土初始污染濃度 310.5 mg/kg，綠色 bar、藍色 bar 及桃紅色 bar 分別代表添加 0.05 M、0.20 M 及 0.50 M 乳酸之污染土殘留濃度。

圖 38 為添加 0.05 ~ 0.50 M 乳酸，施予 1.4 V/cm 電位坡降下經 5 天整治之重金屬銅殘留濃度分佈圖，重金屬銅初始污染濃度為 310.1 mg/kg，經整治 5 天重金屬銅殘留濃度分別為 130.8 mg/kg、117.0 mg/kg 及 49.0 mg/kg，重金屬銅去除率分別為 57.9%、62.3%及 84.2%，由試驗結果可看出，添加 0.05 ~ 0.50 M 乳酸各試驗組之重金屬銅殘留濃度皆由陽極端往陰極端累積，此因為電解反應所產生之電滲透流由陽極端往陰極端流動，致重金屬銅受到電滲透流之推移而移出土體，由試驗結果可看出，於固定電位坡降 (1.4 V/cm) 下，提升乳酸濃度可提高整治成效，但於試驗進行至第三天發現，於 0.20 M 及 0.50 M 試驗組陰極端電極槽有部分黏稠物附著，使槽體乳酸呈現淡褐色，推測為電滲透流將土壤中基質推出於陰極端，與添加之乳酸溶液反應而產生之現象，其中 0.50 M 乳酸試驗組明顯較 0.20 M 乳酸試驗組現象明顯，故未來於現地模場使用之乳酸濃度應介於

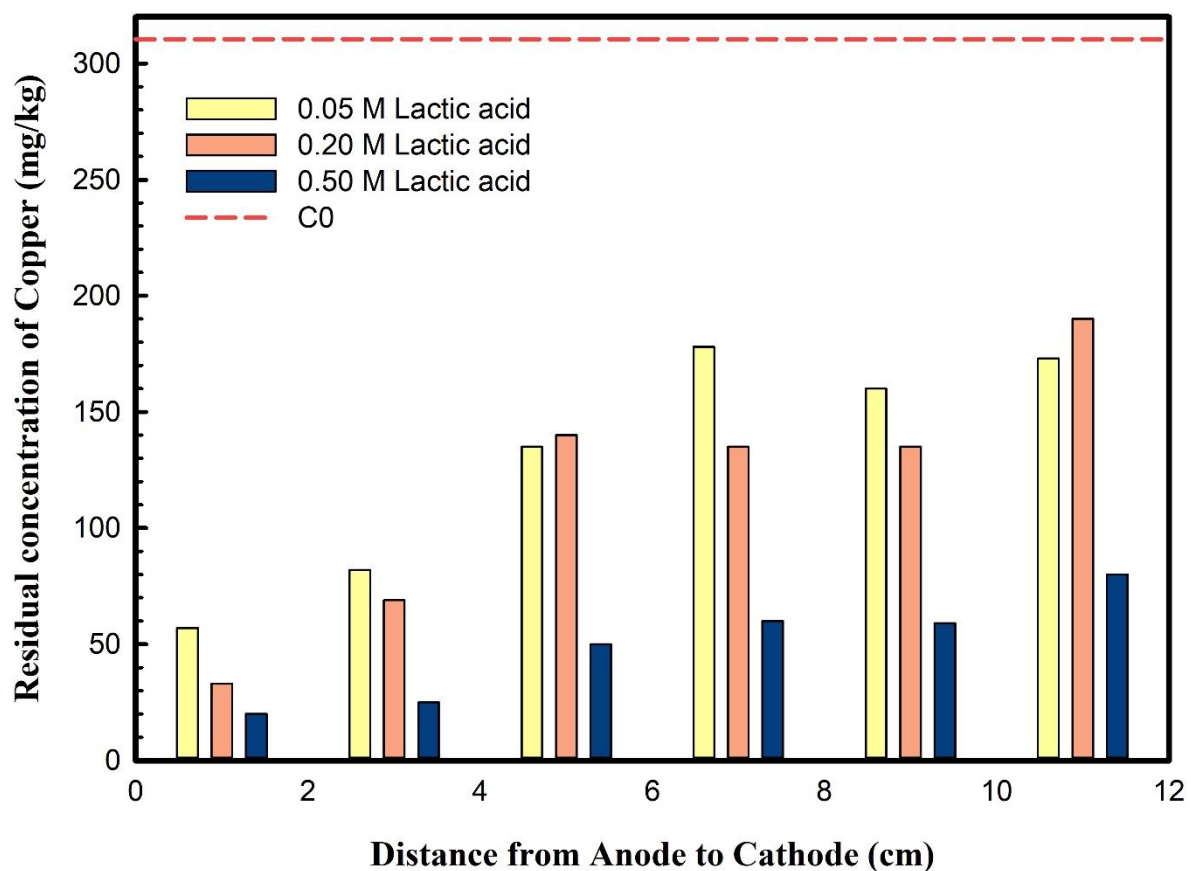


圖 38.重金屬銅 (Cu) 土壤殘留濃度分佈



0.20 ~ 0.50 M 較為合適。

圖 39 為添加 0.05 ~ 0.50 M 乳酸，施予 1.4 V/cm 電位坡降下經 5 天整治之重金屬鋅殘留濃度分佈圖，重金屬鋅初始污染濃度為 990.0 mg/kg，經整治 5 天重金屬鋅殘留濃度分別為 560.3 mg/kg、321.5 mg/kg 及 210.0 mg/kg，重金屬鋅去除率分別為 43.4%、67.5% 及 78.8%，由試驗結果可看出，提升乳酸濃度亦可提高重金屬鋅整治成效，此趨勢與重金屬銅類似。

圖 40 為添加 0.05 ~ 0.50 M 乳酸，施予 1.4 V/cm 電位坡降下經 5 天整治之重金屬鉻殘留濃度分佈圖，重金屬鉻初始污染濃度為 189.0 mg/kg，經整治 5 天重金屬鉻殘留濃度分別為 81.5 mg/kg、79.2 mg/kg 及 58.4 mg/kg，重金屬鉻去除率分別為 57.0%、58.9% 及 69.1%，由試驗結果可看出，提高乳酸濃度亦可提高重金屬鉻去除率，但相較於重金屬銅 (84.2%) 及鋅 (78.8%) 之整治成效，重金屬鉻 (69.1%) 之整治效益較不明顯，推測因重金屬鉻於土壤中殘留濃度較低所致。

圖 41 為添加 0.05 ~ 0.50 M 乳酸，施予 1.4 V/cm 電位坡降下經 5 天整治之重金屬鎳殘留濃度分佈圖，重金屬鎳初始污染濃度為 72.4 mg/kg，經 5 天整治之重金屬鎳殘留濃度分別為 56.9 mg/kg、49.2 mg/kg 及 29.9 mg/kg，重金屬鎳去除率分別為 20.1%、32.0% 及 58.7%，由試驗結果可看出，添加 0.05 M 及 0.20 M 乳酸試驗組靠近陰極端之重金屬鎳幾乎沒有被移除，因受到電滲透流將靠近陽極端之重金屬鎳推移而累積於陰極端，又因重金屬鎳於土壤中移動力 (見表 5 所示) 及污染濃度較低，使重金屬鎳整治成效有待提升。

圖 42 為添加 0.05 ~ 0.50 M 乳酸，施予 1.4 V/cm 電位坡降下經 5 天整治之重金屬鉛殘留濃度分佈圖，重金屬鉛初始污染濃度為 262.4 mg/kg，經 5 天整治之重金屬鉛殘留濃度分別為 81.9 mg/kg、90.3 mg/kg 及 39.9 mg/kg，重金屬鉛去除率分別為 68.7%、65.6% 及 84.8%，由試驗結果可看出，提升乳酸濃度亦將重金屬鉛整治成效往上提升，重金屬鉛去除率與重金屬銅去除率類似。

實驗室尺度乳酸濃度擇選試驗結果於 1.4 V/cm 電位坡降下，添加 0.05 ~ 0.50 M 乳酸，進行 5 天之整治試驗，重金屬銅、鋅、鉻、鎳及鉛分別有 57.9% ~ 84.2%、43.4% ~ 78.8%、57.0% ~ 67.1%、20.1% ~ 58.7% 及 68.7% ~ 84.8% 之整治成效，重金屬銅、鋅及鉛整治成效較高，其中重金屬銅及鉛去除率相似；重金屬鉻及鎳之處理成效推測因土壤初始污染濃度較低，致去除率較不顯著，其中重金屬鎳於土壤中金屬移動力較低 (見表 5)，致整治成效有待提升；試驗結果顯示，以乳酸作為操作流質，可提高重金屬去除率；試驗考量現地場址之異質性，後續方型排列模組整治試驗則施予電位坡降 1.4 V/cm、乳酸濃度 0.30 M 進行現地整治試驗。

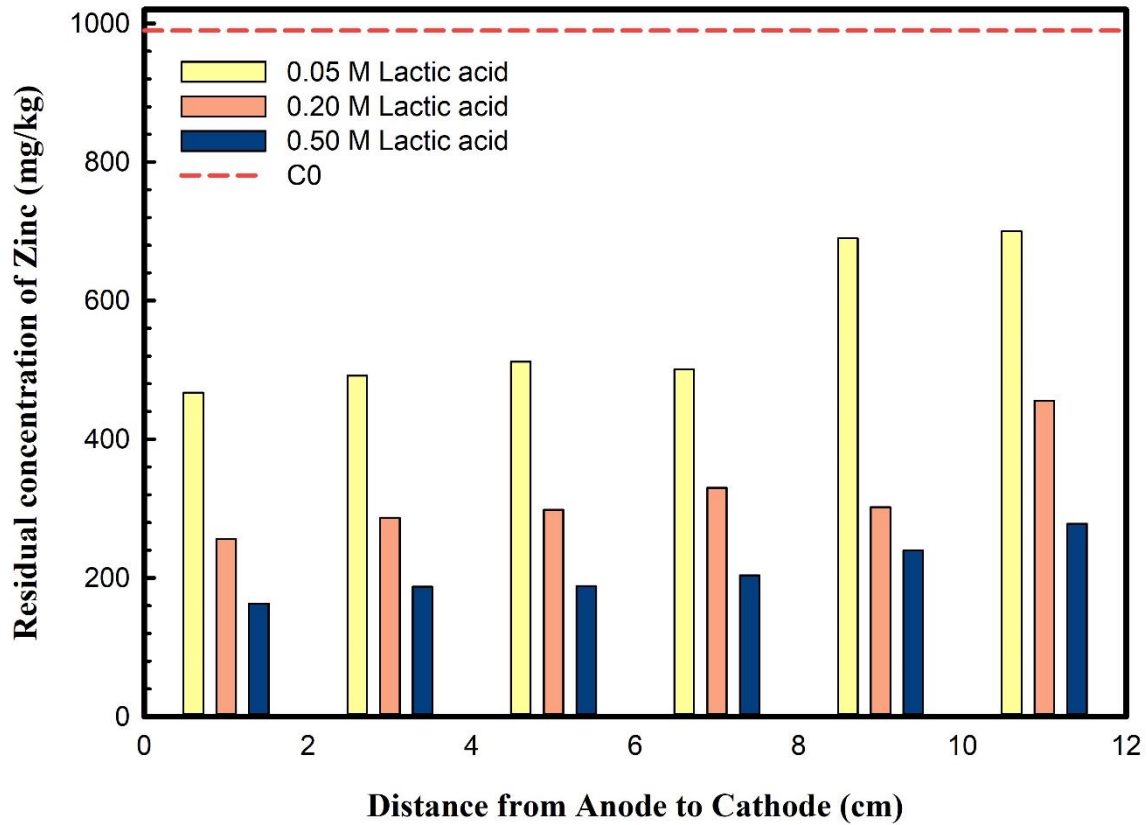


圖 39.重金屬鋅 (Zn) 土壤殘留濃度分佈

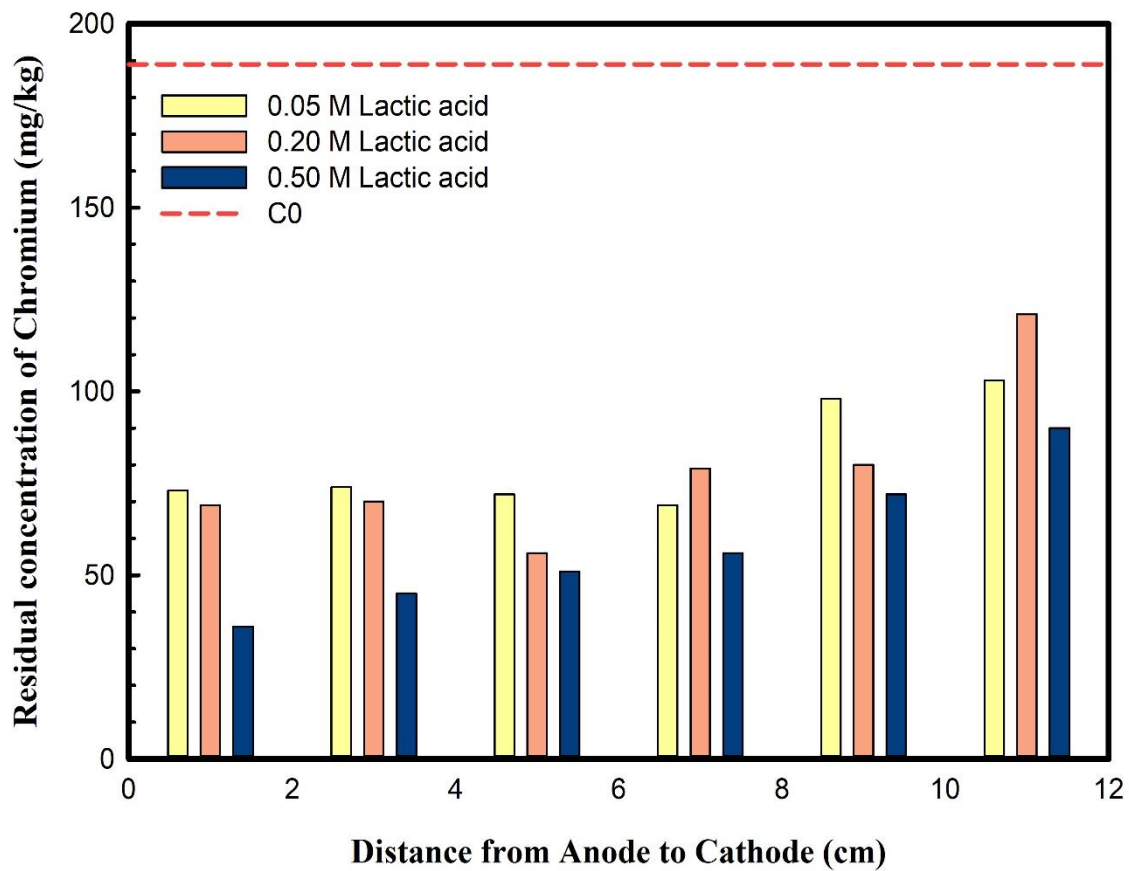


圖 40.重金屬鉻 (Cr) 土壤殘留濃度分佈

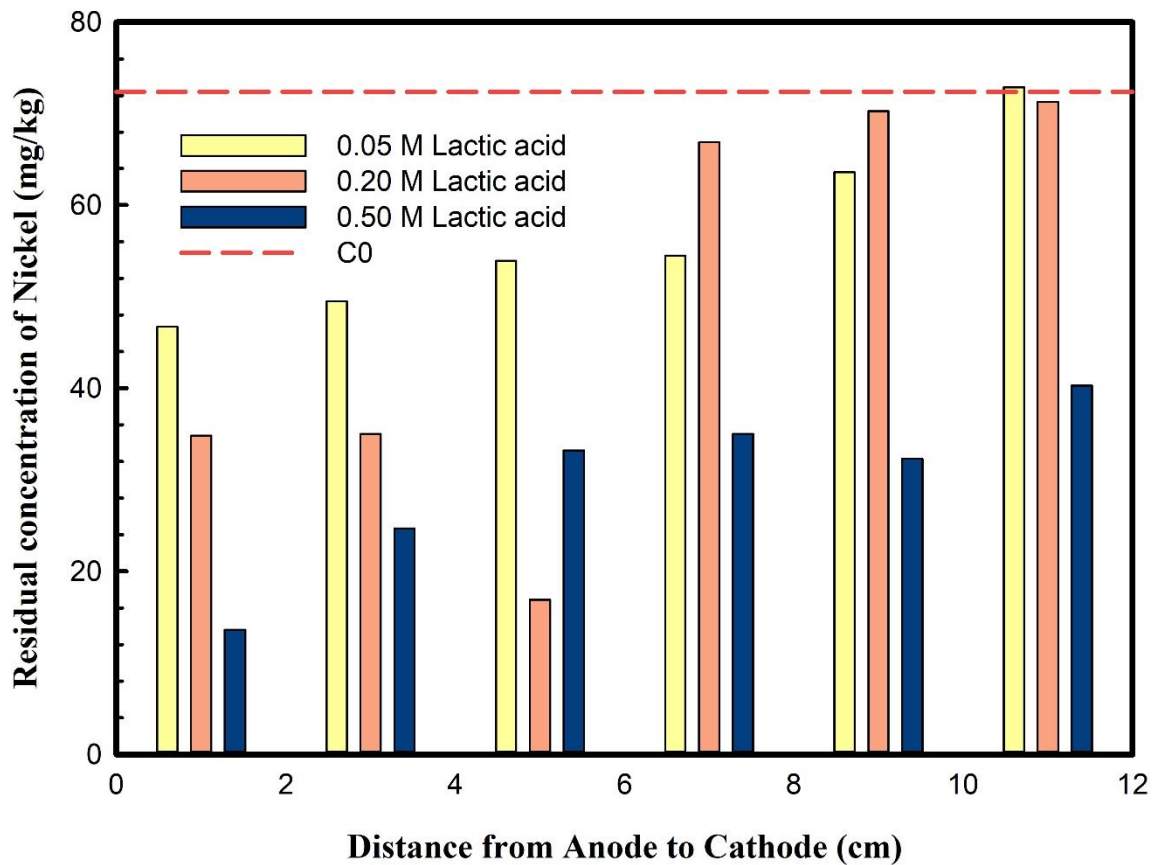


圖 41.重金屬鎳 (Ni) 土壤殘留濃度分佈

表 5.重金屬於土壤之移動速率 (Biosoil, 2011)

Metals	Cu	Zn	Cr	Ni	Pb
Ion mobilities in soil	0.05 ~ 0.54	0.00 ~ 0.55	0.07 ~ 0.55	0.09 ~ 0.18	0.15 ~ 0.56

Unit: $\text{m}^2/\text{V}\cdot\text{s}$

5.7 現地重金屬污染土壤電動力整治試驗

本小節以電動力技術配合陽、陰極電極排列於鼓山區清潔隊停車場進行現地重金屬污染土壤整治成效探討，本 (109 年度) 年度以方型排列模組進行重金屬污染土壤之整治，研究架構圖見圖 27，現地污染土壤土壤基本特性及重金屬污染濃度為進行 3 重複之試驗結果，詳見表 6 所示，方型排列模組整治示意圖如圖 43 所示。

電動力試驗參數之規劃於參考本研究團隊歷年研究成果，電動力技術調整參數包含電位坡降、操作流質及電極種類，(1)電位坡降即施予電力之大小，較強之電位坡降可提供地下環境穩定之電滲透流，驅使土壤離子移動較不受土壤異質性所影響；(2)重金屬離子於酸性條件下遷移效果較佳，本研究團隊選擇乳

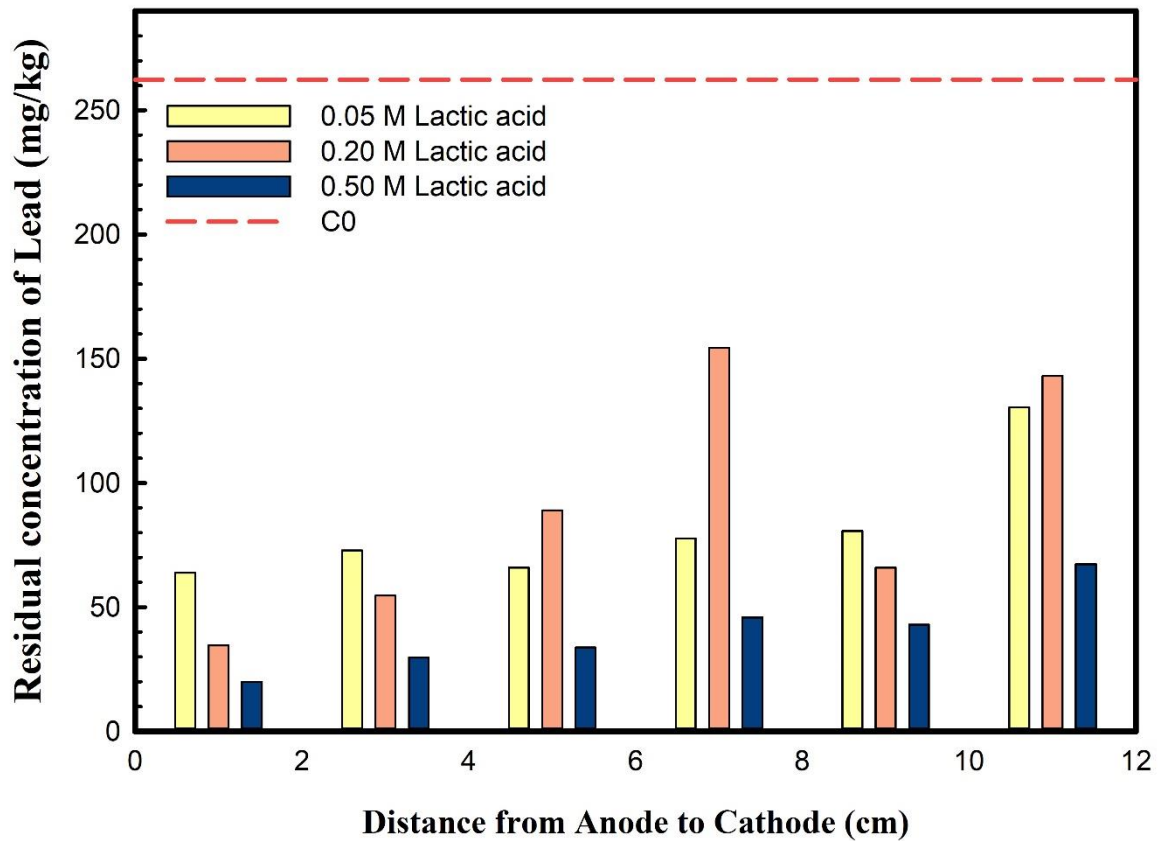


圖 42.重金屬鉛 (Pb) 土壤殘留濃度分佈

表 6.土壤基本特性分析

Characteristics	Values	管制標準	監測基準
Texture	Sand	-	-
Sand (%)	96.0%	-	-
Silt (%)	0.0%	-	-
Clay (%)	4.0%	-	-
Soil pH	7.77±0.11	-	-
pH _{zpc}	2.62±0.14	-	-
CEC (meq/100 g)	6.43±0.62	-	-
Moisture content (%)	12.5	-	-
Cu (mg/kg)	297.9±27	400	220
Zn (mg/kg)	942.4±21	2,000	1,000
Cr (mg/kg)	185.7±13	250	175
Ni (mg/kg)	131.8±15	200	130
Pb (mg/kg)	426.6±20	2,000	1,000

※網底：超過管制標準；粗體：超過監測基準

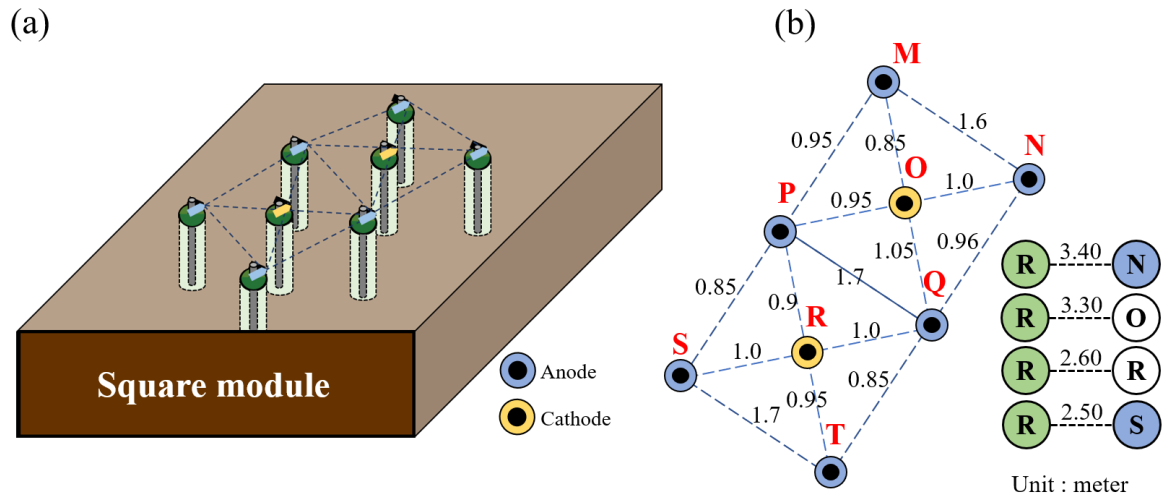


圖 43.方型排列模組整治示意圖

酸(S4) 作為操作流質，乳酸具可食用性，其添加於地下環境除有效促使重金屬離子之遷移，亦不會造成環境負擔；(3)電極種類之擇選及製備為電動力技術重要參數之一，本試驗選擇惰性電極 (Test S1-S2 及 S4) 及 Fe/Al 氧化電極 (Test S3) 分別進行試驗，惰性電極於通電後因電解反應產生電滲透流，Fe/Al 氧化電極因氧化還原作用使其具有改變土壤重金屬型態之能力，本年度 (109 年度) 試驗規劃表如表 3 所示，並藉由實驗室尺度乳酸濃度擇選試驗作為 S4 (乳酸操作流質) 之參考，經實驗室尺度電動力試驗後，將試驗結果較佳之試驗參數用於現地環境，致原 Test S1 及 S2 試驗組 (地下水操作流質試驗) 將不改變，Test S3 及 S4 則分別進行 Fe/Al 氧化電極 (地下水操作流質) 及操作流質乳酸 (Al 惰性電極) 整治試驗。

以電動力技術方型排列模組進行重金屬污染土壤整治，試驗土壤由土壤頂層至土壤底層共 0.9 m，分別依序為 Layer A：0.0 ~ 0.3 m、Layer B：0.3 ~ 0.6 m 及 Layer C：0.6 ~ 0.9 m，以電動力技術配合方型排列模組之陽、陰極電極排列模組，圖中橘色菱形為陽極井，綠色三角形為觀測井，紫色圓形則為陰極井。

圖 44a ~ 圖 44e 為施予 0.6 V/cm 電位坡降，使用 Al 惰性電極，以地下水作為操作流質，重金屬銅、鋅、鉻、鎳及鉛整治後殘留濃度分佈圖，研究結果發現，重金屬離子由土壤底層 (Layer C) 往土壤頂層 (Layer A) 移動趨勢明顯，顯示電動力技術有效將深層土壤污染物移動至淺層土壤；重金屬銅、鋅、鉻、鎳及鉛經 28 天 (0.6 V/cm，地下水) 整治，重金屬去除率分別為 25.8%、17.2%、12.2%、46.2% 及 21.6%，試驗結果發現，各重金屬之整治成效皆顯著提升，顯示於施予低電位坡降 (0.6 V/cm) 下，以地下水作為操作流質，重金屬離子去除成效顯著。

圖 45a ~ 圖 45e 為提升電位坡降由 0.6 V/cm (Test S1) 至 1.0 V/cm (Test S2)，

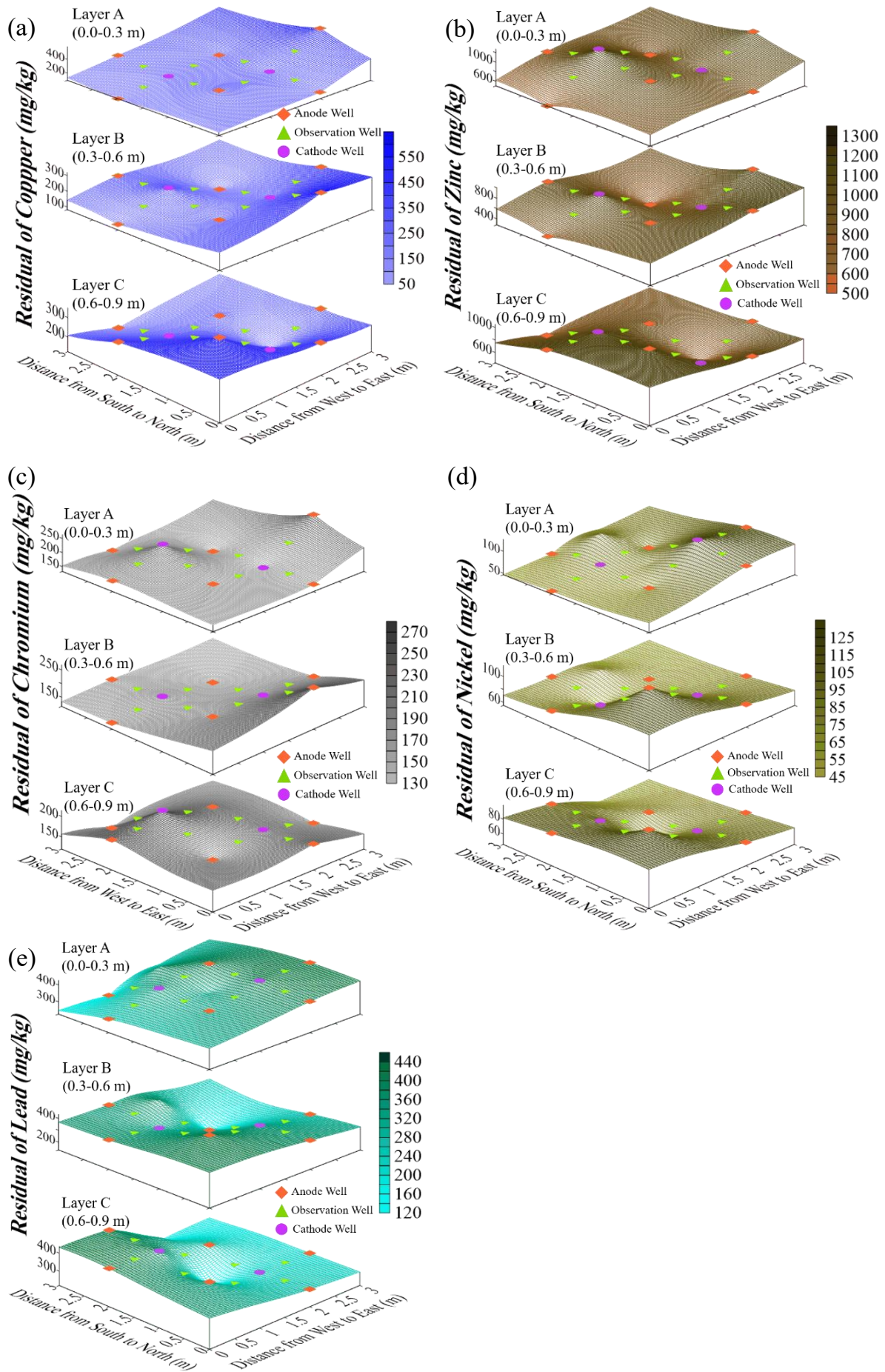


圖 44. S1 (0.6 V/cm，地下水) 整治後重金屬殘留濃度分佈圖

(a) 銅；(b) 鋅；(c) 鉻；(d) 鎳；(e) 鉛

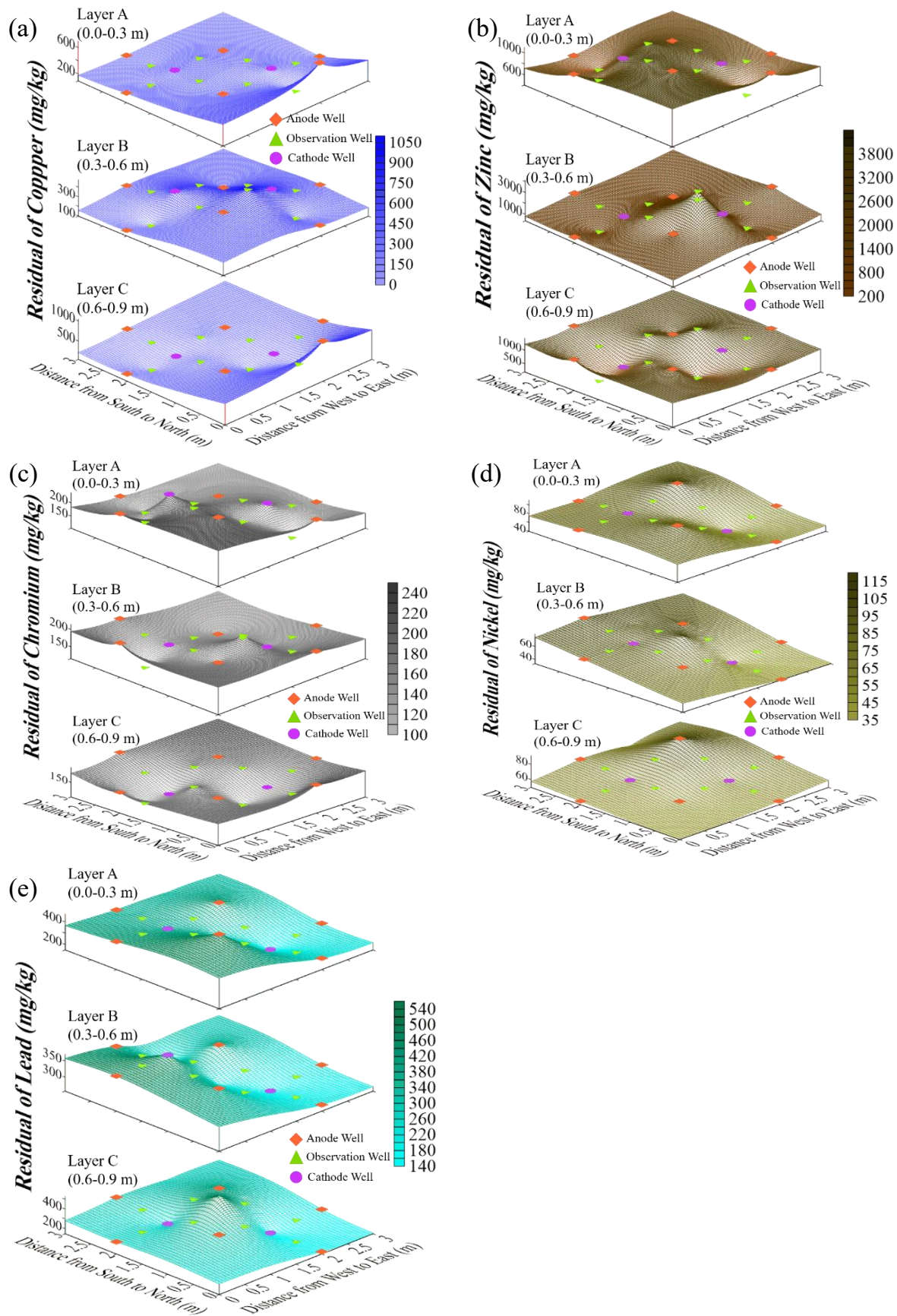


圖 45. S2 (1.0 V/cm，地下水) 整治後重金屬殘留濃度分佈圖

(a) 銅；(b) 鋅；(c) 鉻；(d) 鎳；(e) 鉛



使用 Al 惰性電極，以地下水作為操作流質，重金屬銅、鋅、鉻、鎳及鉛整治後殘留濃度分佈圖，研究結果發現，重金屬鉻及鎳由土壤底層 (Layer C) 往土壤頂層 (Layer A) 移動，但重金屬銅、鋅及鉛則由土壤頂層 (Layer A) 向土壤底層 (Layer C) 遷移，其中重金屬銅及鋅以 Layer B (中間層) 去除率較低，而重金屬鉛則以 Layer C 有較高之殘留濃度；重金屬銅、鋅、鉻、鎳及鉛經 34 天 (1.0 V/cm，地下水) 整治，重金屬去除率分別為-4.7%、-2.8%、3.1%、48.5%及 25.6%；由此可看出，提高電位坡降有限度提高重金屬去除率，推測因陰極井端於高電位坡降 (1.0 V/cm) 下大量釋出氫氧根離子，氫氧根離子與重金屬離子結合後生成金屬氫氧化物沉澱，降低重金屬去除率。

圖 46a ~ 圖 46e 為施予 1.0 V/cm 電位坡降，更換由 Al 惰性電極至 Fe/Al 氧化電極，以地下水作為操作流質，重金屬銅、鋅、鉻、鎳及鉛整治後殘留濃度分佈圖，研究結果發現，重金屬銅及鋅由土壤底層 (Layer C) 往土壤頂層 (Layer A) 移動趨勢明顯，重金屬鉻及鎳則由土壤頂層 (Layer A) 往土壤底層 (Layer C) 遷移，而重金屬鉛於 Layer A 及 B 去除率相當，Test S3 試驗組因長期採樣及降雨，致 Layer C 土樣過少，部分重金屬於 Layer C 無法進行分析；重金屬銅、鋅、鉻、鎳及鉛經 31 天 (1.0 V/cm，Fe/Al 氧化電極) 整治，重金屬去除率分別為 21.1%、31.1%、10.7%、49.1%及 33.0%，試驗結果發現，重金屬鉻、鎳及鉛整治成效提升顯著，整體而言，以 Fe/Al 氧化電極進行重金屬污染土壤整治，重金屬去除率提升明顯。

圖 47a ~ 圖 47e 為將電位坡降由 1.0 V/cm 提升至 1.4 V/cm，使用 Al 惰性電極，更換由地下水至 0.30 M 乳酸作為操作流質，重金屬銅、鋅、鉻、鎳及鉛整治後殘留濃度分佈圖，研究結果發現，重金屬離子由土壤中層 (Layer B) 往土壤頂層 (Layer A) 移動趨勢明顯，與 Zhou et al., 2005；Kim et al., 2012 及蔡，2013 相同；重金屬銅、鋅、鉻、鎳及鉛經 60 天 (1.4 V/cm，0.30 M 乳酸) 整治，重金屬去除率分別為 24.5%、8.2%、-1.7%、29.7%及 24.5%，與 Test S2 比較後發現，重金屬銅及鋅整治成效提升，重金屬鉻、鎳及鉛整治成效微幅下降，推測因整治期間之強降雨導致操作流質乳酸受到稀釋，又於高電位坡降環境下 (1.4 V/cm)，大量氫氧根離子由陰極井釋出形成金屬氫氧化物沉澱，進一步使重金屬去除率降低。

綜上所述，提升電位坡降有限度提升重金屬去除率，乃因以地下水作為操作流質，陰極井釋出大量氫氧根離子，氫氧根離子與重金屬離子結合後沉澱，進而降低重金屬移動力；更換陽極井端電極由 Al 惰性電極至 Fe/Al 氧化電極，重金屬

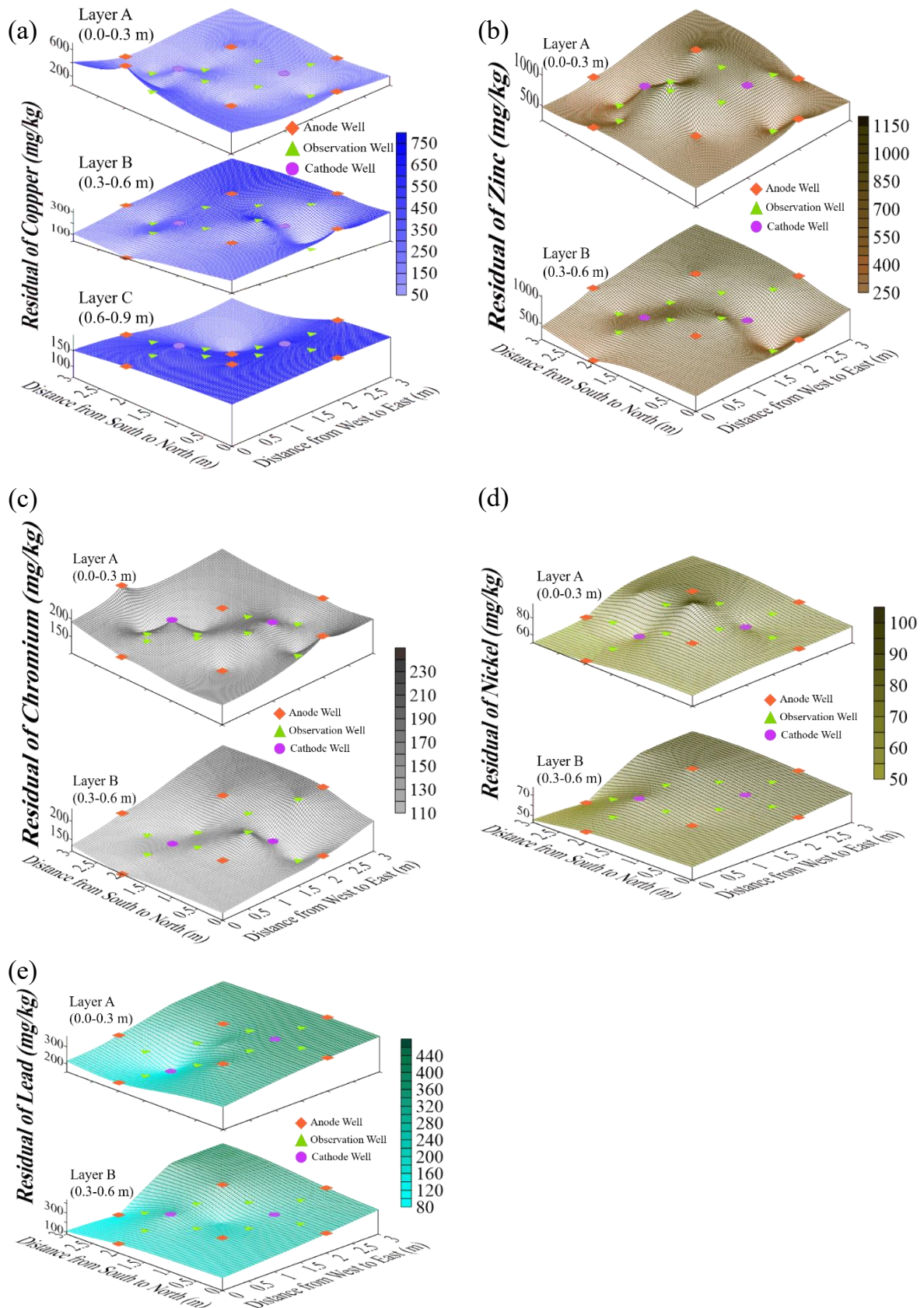


圖 46. S3 (Fe/Al 氧化電極，1.0 V/cm) 整治後重金屬殘留濃度分佈圖
(a) 銅；(b) 鋅；(c) 鉻；(d) 鎳；(e) 鉛

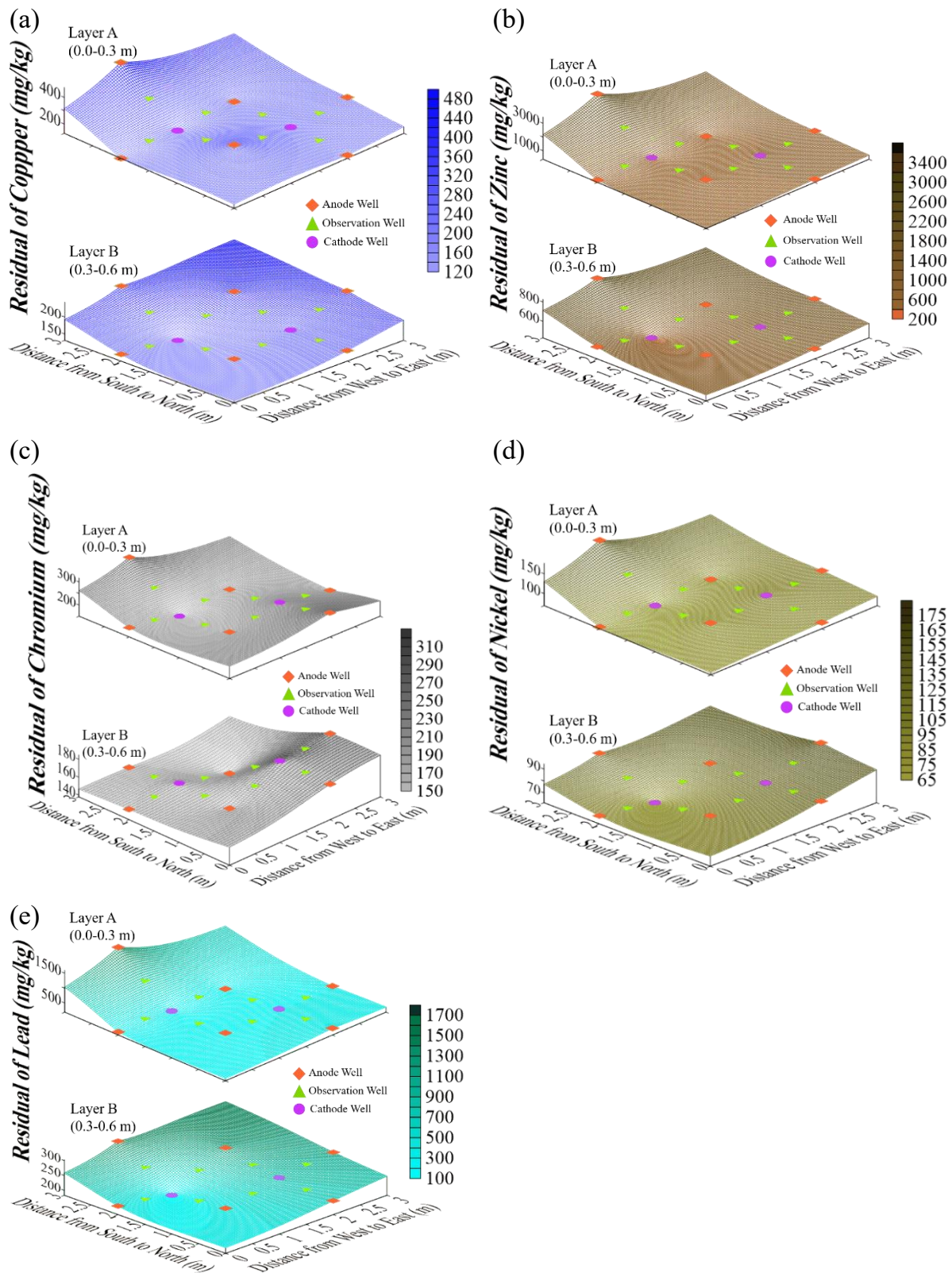


圖 47. S4 (1.4 V/cm, 0.30 M 乳酸) 整治後重金屬殘留濃度分佈圖
(a) 銅；(b) 鋅；(c) 鉻；(d) 鎳；(e) 鉛



整治成效明顯提升，因 Fe/Al 氧化電極有效弱化土壤重金屬之鍵結型態，重金屬整治成效增幅明顯；將電位坡降由 1.0 V/cm 提升至 1.4 V/cm，由地下水操作流質更換至 0.30 M 乳酸，重金屬整治成效提升有限，推測因整治期間之強降雨使操作流質乳酸受到稀釋，致整治成效降低。

5.8 土壤重金屬鍵結型態分析

本小節執行電動力現地模場重金屬污染土壤整治鍵結型態分析，以序列萃取分析 Fe/Al 氧化電極 (Test S3) 整治前、後污染土壤重金屬鍵結型態變化，探討電位坡降、電極種類及操作流質種類對重金屬鍵結型態之影響。重金屬銅、鋅、鉻、鎳及鉛於土壤中鍵結型態分佈如圖 48 所示，其中 F1~F5 分別代表可交換態 (Exchangeable)、碳酸鹽結合態 (Bound to Carbonates)、鐵錳氧化態 (Bound to Iron and Manganese Oxides)、有機結合態 (Bound to Organic Matter) 及殘留態 (Residual)，其中可交換態及碳酸鹽結合態屬於弱鍵結態，鐵錳氧化態、有機結合態及殘留態屬於強鍵結態。

如圖 48 所示，重金屬銅經 Test S3 整治前 F5 ~ F1 各型態濃度分別為 65.1 mg/kg、86.6 mg/kg、106.8 mg/kg、3.2 mg/kg 及 0.0 mg/kg，強鍵結態濃度為 258.5 mg/kg，弱鍵結態濃度為 3.2 mg/kg；重金屬鋅經 Test S3 整治前 F5 ~ F1 各型態濃度分別為 266.2 mg/kg、146.3 mg/kg、606.3 mg/kg、87.8 mg/kg 及 0.0 mg/kg，強鍵結態濃度為 1,018.8 mg/kg，弱鍵結態濃度為 87.8 mg/kg；重金屬鉻經 Test S3 整治前 F5 ~ F1 各型態濃度分別為 114.0 mg/kg、9.5 mg/kg、20.5 mg/kg、0.0 mg/kg 及 0.0 mg/kg，強鍵結態濃度為 144.0 mg/kg，弱鍵結態濃度為 0.0 mg/kg；重金屬鎳經 Test S3 整治前 F5 ~ F1 各型態濃度分別為 104.5 mg/kg、0.6 mg/kg、27.4 mg/kg、0.0 mg/kg 及 0.0 mg/kg，強鍵結態濃度為 132.5 mg/kg，弱鍵結態濃度為 0.0 mg/kg；重金屬鉛經 Test S3 整治前 F5 ~ F1 各型態濃度分別為 97.0 mg/kg、71.7 mg/kg、241.1 mg/kg、25.2 mg/kg 及 0.0 mg/kg，強鍵結態濃度為 409.8 mg/kg，弱鍵結態濃度為 25.2 mg/kg；由此得知方型排列模組土壤重金屬鍵結以殘留態、有機結合態及鐵錳氧化態之強鍵結態為主，以電動力技術執行現地整治較有挑戰性。

如圖 48 所示，重金屬銅經 Test S3 整治後 F5 ~ F1 各型態濃度分別為 55.9 mg/kg、56.0 mg/kg、71.6 mg/kg、43.7 mg/kg 及 5.2 mg/kg，強鍵結態濃度為 183.5 mg/kg，弱鍵結態濃度為 48.9 mg/kg；重金屬鋅經 Test S3 整治後 F5 ~ F1 各型態濃度分別為 199.9 mg/kg、117.4 mg/kg、399.3 mg/kg、43.9 mg/kg 及 0.0 mg/kg，強鍵結態濃度為 716.6 mg/kg，弱鍵結態濃度為 43.9 mg/kg；重金屬鉻經 Test S3 整治後 F5 ~ F1 各型態濃度分別為 98.1 mg/kg、11.5 mg/kg、16.6 mg/kg、14.7 mg/kg

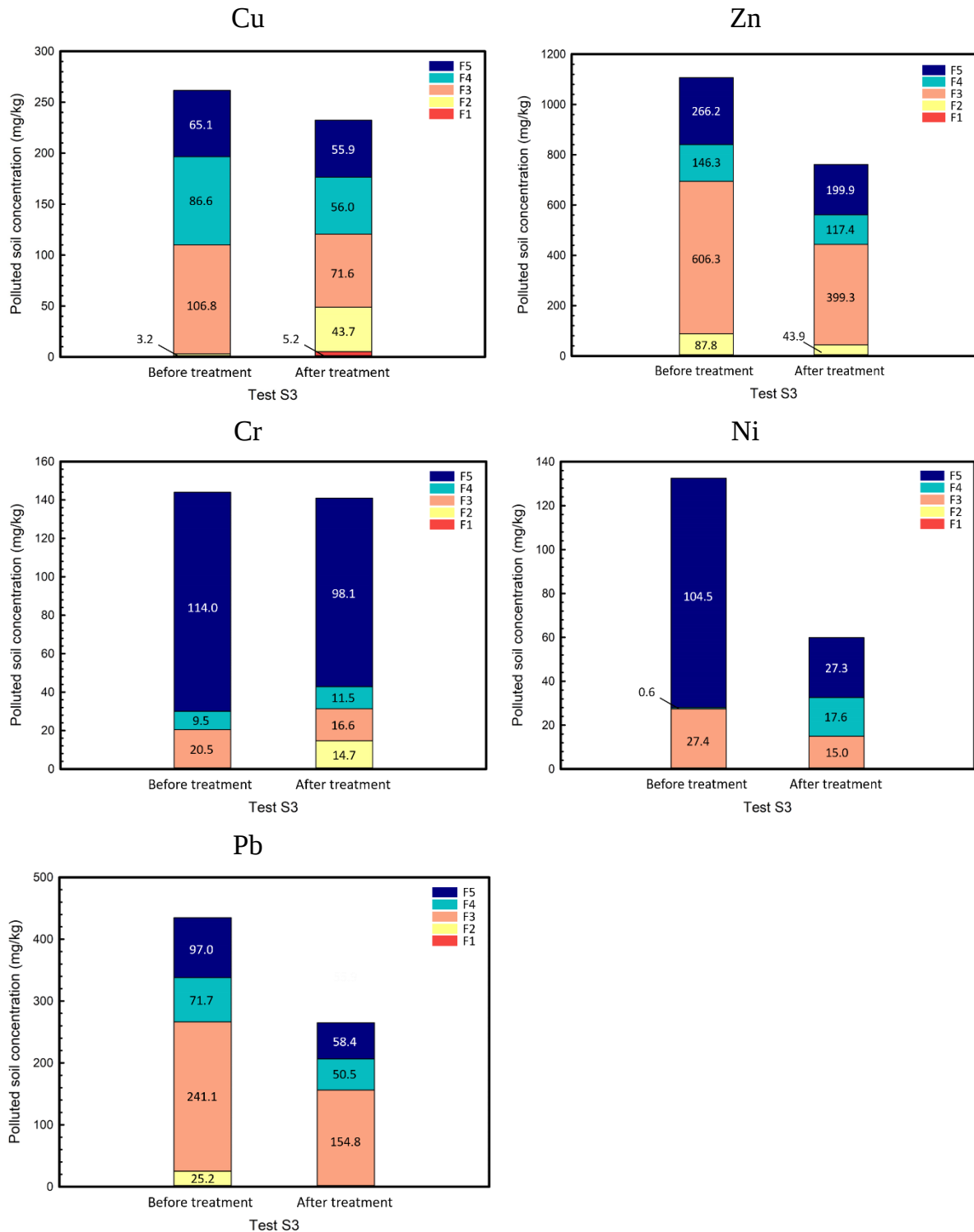


圖 48.方型排列模組重金屬鍵結型態殘留濃度分佈圖

及 0.0 mg/kg，強鍵結態濃度為 126.2 mg/kg，弱鍵結態濃度為 14.7 mg/kg；重金屬鎳經 Test S3 整治後 F5 ~ F1 各型態濃度分別為 27.3 mg/kg、17.6 mg/kg、15.0 mg/kg、0.0 mg/kg 及 0.0 mg/kg，強鍵結態濃度為 59.9 mg/kg，弱鍵結態濃度為 0.0 mg/kg；重金屬鉛經 Test S3 整治後 F5 ~ F1 各型態濃度分別為 58.4 mg/kg、



50.5 mg/kg、154.8 mg/kg、0.0 mg/kg 及 0.0 mg/kg，強鍵結態濃度為 263.7 mg/kg，弱鍵結態濃度為 0.0 mg/kg。

經 Fe/Al 氧化電極整治後發現，重金屬銅弱鍵結態濃度由 3.2 mg/kg 提升至 48.9 mg/kg，重金屬鋅弱鍵結態濃度由 87.8 mg/kg 下降至 43.9 mg/kg，重金屬鉻弱鍵結態濃度由 0.0 mg/kg 提升至 14.7 mg/kg，重金屬鎳弱鍵結態濃度無變化，重金屬鉛弱鍵結態濃度由 25.2 mg/kg 下降至 0.0 mg/kg，其中重金屬銅及鉻弱鍵結態濃度提升，重金屬鋅及鉛弱鍵結態濃度下降，重金屬鎳弱鍵結態濃度則無變化，對比重金屬總量及鍵結型態轉化可明顯看出，**重金屬銅及鉻弱鍵結態轉化比例較高，重金屬總量去除率較低，而重金屬鋅、鎳及鉛整治成效較高，但弱鍵結態轉化比例則較低，推測因重金屬鋅、鎳及鉛經轉化後之弱鍵結態均被移除，致整治成效明顯提升。**

5.9 蜂巢型及方型排列模組重金屬污染土壤整治成效匯整

本小節進行蜂巢型排列模組 (108 年度) 及方型排列模組 (109 年度) 重金屬污染土壤處理成效彙整，蜂巢型及方型排列模組處理成效彙整如表 7 所示。

蜂巢型及方型排列模組重金屬銅、鋅、鉻、鎳及鉛整治成效分別為 68.0% 及 24.5%、3.4% 及 8.2%、22.0% 及 -1.7%、24.5% 及 29.7%、25.7% 及 24.5%，整體整治成效以蜂巢型排列模組整治成效較佳，因蜂巢型排列模組之陽極端電極數量為方型排列模組之 1.5 倍，蜂巢型排列模組提供重金屬離子較高之金屬移動力，致整治成效較佳。

其中分別比較施予 0.6 V/cm 電位坡降，以地下水作為操作流質試驗組，蜂巢型及方型排列模組重金屬銅、鋅、鉻、鎳及鉛整治成效分別為 5.5% 及 25.8%、-9.2% 及 17.2%、12.0% 及 12.0%、36.1% 及 46.2%、37.5% 及 21.6%，整體而言，蜂巢型及方型排列模組整治成效均明顯提升，其中方型排列模組整治成效較佳，方型排列模組重金屬離子由土壤底層往頂層移動趨勢較蜂巢型排列模組顯著，因方型排列模組污染土壤深度較淺 ($0.8\text{ m} < 2.0\text{ m}$)，重金屬離子移動距離較短，整治成效較高。

比較施予 1.0 V/cm 電位坡降，以地下水作為操作流質試驗組，蜂巢型及方型排列模組重金屬銅、鋅、鉻、鎳及鉛整治成效分別為 7.4% 及 -4.7%、-5.7% 及 -2.8%、6.1% 及 3.1%、27.3% 及 48.5%、43.1% 及 25.6%，整體而言，提高電位坡降重金屬整治成效未明顯提升，因陰極井端氫氧根離子之釋出與重金屬離子結合後形成金屬氫氧化物沉澱，重金屬去除率下降，其中蜂巢型排列模組整治成效較佳，推測因蜂巢型排列模組陽極井端電極數量較多所致。



比較施予 1.0 V/cm 電位坡降，以地下水作為操作流質試驗組，陽極井端電極由 Al 惰性電極更換至 Fe/Al 氧化電極，蜂巢型及方型排列模組重金屬銅、鋅、鉻、鎳及鉛整治成效分別為 15.7%及 21.1%、9.5%及 31.2%、13.9%及 10.7%、41.6%及 49.1%、47.5%及 33.0%，整體而言，各重金屬整治成效均明顯提升，因 Fe/Al 氧化電極有效弱化重金屬強鍵結態，進一步提高重金屬去除率。

比較施予 1.4 V/cm 電位坡降、以 0.30 M 乳酸作為操作流質試驗組，蜂巢型及方型排列模組重金屬銅、鋅、鉻、鎳及鉛整治成效分別為 68.0%及 24.5%、-3.4%及 8.2%、22.0%及-1.7%、24.5%及 29.7%、25.7%及 6.6%，整體而言，提高

表 7.蜂巢型及方型排列模組處理成效彙整

		蜂巢型排列模組 (108 年度)	方型排列模組 (109 年度)
整治示意圖			
整治面積 (m ²)		12.0	9.0
整治深度 (m)		2.0	0.8
電極數量 (Anode / Cathode)		10 / 2	6 / 2
整治 成效	銅	68.0%	24.5%
	鋅	3.4%	8.2%
	鉻	22.0%	-1.7%
	鎳	24.5%	29.7%
	鉛	25.7%	24.5%
弱鍵 結態 轉化 率	銅	5.6% ~ 10.0%	22.2% ~ 24.2%
	鋅	2.3% ~ 3.6%	5.4% ~ 6.7%
	鉻	16.7% ~ 18.2%	10.5% ~ 12.4%
	鎳	9.5% ~ 16.5%	0.0%
	鉛	3.5% ~ 9.0%	0.3% ~ 0.4%



電位坡降未使整治成效明顯增加，因實驗期間之強降雨導致乳酸受到稀釋，進一步使重金屬離子移動受阻，整治成效下降。

5.10 經濟成本分析

本小節進行蜂巢型排列模組 (108 年) 及方型排列模組 (109 年) 經濟成本分析，經濟成本將針對前置工程施作階段、整治作業階段及場址復原階段等三階段進行經效益評估，為更明確彰顯整治作業階段所花費之成本，致本計畫將前置工程施作階段及場址復原階段之花費合併計算，並於 5.10.1 節彙整說明，整治作業階段成本分析說明見 5.10.2 節所示。

5.10.1 前置工程施作階段及場址復原階段

本小節主要執行前置工程施作階段及場址復原階段經濟成本分析，前置工程施作階段及場址復原階段材料費用彙整如表 8 所示，前置工程施作階段材料費用包含 (1)電力系統建置之總電源及其電纜架設、(2)電極井材料/建置、(3)整流器設計/製造、(4)整流器外箱設計/製造及 (5)整流器端電線/電夾等成本。本電動力現地模場整治試驗現場工程材料如電極井，因整治期限之因素，以 2.0 年進行攤提，電力系統如總電源及整流器則因具有較長之使用年限，致以 5.0 年進行折舊。

表 8.前置工程施作階段及場址復原階段材料費用彙整表

Stage	(1) Item	(2) Unit Price (NTD)	(3) Amount	(4) Total Price (NTD)	(5) Amortize (month)	(6) NTD/ month
Stage of pre-engineering	Main power system and its cable	55,000	1	55,000	60	916.7
	Material of electrode well	250,000	1	250,000	24	10,416.7
	Rectifier	78,000	2	156,000	60	2,600.0
	Rectifier Protector	20,000	2	40,000	60	666.7
	Wire (100.0 m)	3,600	2	7,200	24	300.0
	Clips	10	20	200	24	8.3
Stage of site restoration	Material of pavement recovery	50,000	1	50,000	24	2,083.3
Total						16,991.7

$$(4) = (2) \times (3); (6) = (4)/(5)$$



前置工程施作階段及場址復原階段經濟成本彙整見表 9 所示，蜂巢型排列模組 Test H1 ~ H3 於前置工程施作階段及場址復原階段經濟成本為 534.4 NTD/m³ (表 9 column (13))，Test H4 於前置工程施作階段及場址復原階段經濟成本為 1,425.0 NTD/m³ (表 9 column (13))，由此可看出 Test H4 整治成本大幅提高，此因係 Test H4 整治土壤體積減少及延長整治時間至 2.0 個月，致整治成本提升。

方型排列模組 Test S1 ~ S3 於前置工程施作階段及場址復原階段經濟成本為 1,326.1 NTD/m³ (表 9 column (13))，Test S4 於前置工程施作階段及場址復原階段經濟成本為 2,652.2 NTD/m³ (表 9 column (13))，由此可看出 Test S4 整治成本亦大幅上升，此趨勢與同蜂巢型排列模組類似，其因亦為整治土壤體積減少及延長整治時間，致整治成本提高。

由表 9 可看出，蜂巢型排列模組 Test H1 ~ H4 於前置工程施作階段及場址復原階段之經濟成本介於 534.4 ~ 1,425.0 NTD/m³ (表 9 column (13)) 之間，方型排列模組 Test S1 ~ S4 於前置工程施作階段及場址復原階段之經濟成本則介於 1,326.1 ~ 2,652.2 NTD/m³ (表 9 column (13)) 之間，經比較後發現，蜂巢型排列模組較方型排列模組設置成本低，此因係方型排列模組土壤體積較小，致設置成本較高。

5.10.2 整治作業階段

本小節主要執行整治作業階段經濟成本分析，整治作業階段材料費用彙整如表 10 所示，整治作業階段材料費用包含 (1)電極材料及其加工、(2)電力系統維護、(3)操作流質藥劑、(4)能耗及 (5)採樣工具等成本。本電動力現地模場整治試驗中，電極材料鋁棒自購買後經加工即可使用於惰性電極實驗組 (Test H1 ~ H2、Test H4、Test S1 ~ S2 及 Test S4)，而 Fe/Al 氧化電極 (Test H3 及 S3) 則需經加工後方可使用於現地整治。

整治試驗期間電力系統維護費用同整流器攤提年限，以 5.0 年進行攤提，電力系統之耗材如電夾及電線應視現地使用情形應予以斟酌，本研究除於前置工程施作階段執行電夾及電線之佈設外，亦於 0.30 M 乳酸試驗組 (Test H4 及 S4) 試驗前進行更換，以防鏽蝕而造成電力輸送受阻；於整治試驗中，因現地土壤含水率較低，致需進行水分之補給，於使用乳酸作為操作流質試驗組 (Test H4 及 S4) 亦以水車進行灌藥作業；實場試驗需考量能耗及採樣工具成本，能耗成本按台電非營業用電夏月/非夏月之累進電費計算，採樣工具因整治期限之因素，致以 2.0 年進行折舊。整治作業階段經濟成本彙整表參照表 11 所示。

表 9.前置工程施作階段及場址復原階段經濟成本彙整表

Test No.	Stage of pre-engineering								Stage of site restoration			(12) Remediation periods (month)	(13) Total cost (NTD/m³)
	(1) Rectifier set up (NTD/month)	(2) electrode well set up (NTD/month)	(3) Rectifier (NTD/month)	(4) Rectifier protector (NTD/month)	(5) Wire (NTD/month)	(6) Clips (NTD/month)	(7) Polluted soil (m³)	(8) Subtotal (NTD/m³ • month)	(9) Material of pavement recovery (NTD/month)	(10) Polluted soil (m³)	(11) Subtotal (NTD/m³ • month)		
H1								447.6			86.8	1	534.4
H2	916.7	6,250.0	2,600.0	666.7	300.0	8.3	24.0	447.6	2,083.3	24.0	86.8	1	534.4
H3								447.6			86.8	1	534.4
H4	916.7	6,250.0	2,600.0	666.7	300.0	8.3	18.0	596.8	2,083.3	18.0	115.7	2	1,425.0
S1								1,068.9			257.2	1	1,326.1
S2	916.7	4,166.7	2,600.0	666.7	300.0	8.3	8.1	1,068.9	2,083.3	8.1	257.2	1	1,326.1
S3								1,068.9			257.2	1	1,326.1
S4	916.7	4,166.7	2,600.0	666.7	300.0	8.3	8.1	1,068.9	2,083.3	8.1	257.2	2	2,652.2

(8) = [(1) + (2) + (3) + (4) + (5) + (6)]/(7) ; (11) = (9)/(10) ; (13) = [(8) + (11)] × (12)

P.S: The life cycle for power system is 5.0 years, the life cycle for hardware is 2.0 years.



表 10. 整治作業階段材料費用彙整表

Stage	(1) Item	(2) Unit Price (NTD)	(3) Amount	(4) Total Price (NTD)	(5) Amortize (month)	(6) NTD/ month
Stage of remedial work	Al rod / 2.2 cm (d) × 30.0 cm (L)	125.0	312	39,000.0	12	3,250.0
	Al rod machining (each)	90.0	312	28,080.0	12	2,341.0
	Hydrochloric acid (each)	5.9	108	637.2	2	318.6
	Ferric chloride (each)	22.5	108	2,430.0	2	1,215.0
	Rectifier maintenance	10,000.0	2	20,000.0	60	333.3
	Wire	3,600.0	2	7,200.0	24	300.0
	Clips	10.0	20	200.0	24	8.3
	Processing fluid (lactic acid)	3,600.0	15	54,000.0	4	13,500.0
	Water wheel	3,500.0	10	35,000.0	10	3,500.0
	Power cost	2,020.0	1	2,020.2	12	168.4
	Sampling tools	2,600.0	5	13,000.0	12	1,083.3
	Total					26,017.9

$$(4) = (2) \times (3) ; (6) = (4)/(5)$$

整治作業階段經濟成本彙整見表 11 所示，蜂巢型排列模組 Test H1 ~ H4 於整治作業階段經濟成本介於 432.6 ~ 5,468.9 NTD/m³ (表 11 column (16)) 之間，其中以 Test H1 及 H2 整治成本最低，僅介於 432.6 ~ 459.0 NTD/m³ (表 11 column (16)) 之間，調高電位坡降之 Test H2 整治成本與 Test H1 差異不大，能耗成本佔比由 0.9% 提升至 6.6%；Test H3 整治成本由 459.0 NTD/m³ 提升至 1,036.6 NTD/m³ (表 11 column (16))，此因係 Test H3 需使用 Fe/Al 氧化電極執行整治，致電極製備成本大幅提升；Test H4 為使用乳酸作為操作流質執行整治，Test H4 因乳酸藥劑及水車灌藥成本大幅提升，操作流質成本佔比由 21.2% 提升至 75.9%，整治階段總成本由 459.0 NTD/m³ 提升至 5,468.9 NTD/m³ (表 11 column (16))。

表 11. 整治作業階段經濟成本彙整表

Test No.	Electrode							Power system maintenance	Processing fluid			(12) Power cost (NTD/month)	(13) Samp-ling tools (NTD/month)	(14) Remedi-ation time (month)	(15) Pollut-ed soil (m³)	(16) Unit cost for remedial work (NTD/m³)
	(1) Al rod/ 2.2 cm (d) × 30 cm (L) (NTD/ each)	(2) Machi-ning (NTD/ /each)	Oxidation electrode		(5) Quantity (each)	(6) Polluted soil (m³)	(7) Subtotal (NTD/ m³)	(8) Rectifier main-tenance (NTD/ month)	(9) Wire and Clips replace (NTD/ month)	(10) Lactic acid (NTD/ month)	(11) Water wheel (NTD/ month)					
			(3) Hydro-chloric acid (NTD/each)	(4) Ferric chloride (NTD/ each)												
H1	125.0	90.0	-	-	28	24.0	250.8	333.3	308.3	-	2,333.4	89.0	1,300	1	24.0	432.6
H2					28	24.0	250.8					721.6		1	24.0	459.0
H3			5.9	22.5	84	24.0	851.9					156.8		1	24.0	1,036.6
H4			-	-	72	18.0	860.0			28,800	10,500.0	238.3		2	18.0	5,468.9
S1	125.0	90.0	-	-	8	8.1	212.3	333.3	308.3	-	2,333.4	18.9	1,300	1	8.1	742.4
S2					8	8.1	212.3					136.9		1	8.1	757.0
S3			5.9	22.5	24	8.1	721.2					42.5		1	8.1	1,254.2
S4			-	-	24	8.1	637.0			7,200	10,500.0	79.6		2	8.1	5,506.4

(1) = [(1) + (2) + (3) + (4)] × (5)/(6) ; (16) = (7) + [(8) + (9) + (10) + (11) + (12) + (13)] × (14)/(15)



方型排列模組 Test S1 ~ S4 於整治作業階段經濟成本介於 742.4 ~ 5,506.4 NTD/m³ (表 11 column (16)) 之間，方型排列模組經濟成本趨勢同蜂巢型排列模組，Test S1 ~ S2 整治成本為最低，介於 742.4 ~ 757.0 NTD/m³ (表 11 column (16)) 之間，差異之主因亦為 Test S2 電位坡降之提升，能耗成本佔比由 0.3% 提升至 2.3%；Test S3 整治成本由 757.0 NTD/m³ 提升至 1,254.2 NTD/m³ (表 11 column (16))，成本差異乃因 Test S3 以 Fe/Al 氧化電極進行整治，電極成本佔比由 25.7% 提升至 54.6%；Test S4 使用乳酸作為操作流質，整治成本為 5,506.4 NTD/m³ (表 11 column (16))，操作流質成本佔比由 39.3% 提升至 80.4%，整治階段總成本由 757.0 NTD/m³ 提升至 5,506.4 NTD/m³ (表 11 column (16))。

綜上所述，提升電位坡降由 0.6 V/cm 至 1.0 V/cm，能耗成本由 0.3% ~ 0.9% 提升至 2.3% ~ 6.6%，其中蜂巢型排列模組能耗成本花費較高，係因蜂巢型排列模組陽極端電極數量為方型排列模組之 1.5 倍；更換由 Al 惰性電極更換至 Fe/Al 氧化電極，電極製備成本比例大幅提升，由 25.7% ~ 54.6% 提升至 54.6% ~ 82.2%，Fe/Al 氧化電極之製備增加整治成本；更換操作流質由地下水至 0.30 M 乳酸，操作流質成本由 21.2% ~ 39.3% 提升至 75.9% ~ 80.4%，乃因操作流質乳酸需定期補充，致整治成本大幅提升。

5.10.3 總整治成本分析

執行電動力現地模場經濟總成本分析比較，電動力現地模場經濟總成本彙整表如表 12 所示，Test H1 ~ H4 總成本約介於 967.0 ~ 6,893.9 NTD/m³ 之間 (

表 12. 電動力現地模場經濟總成本彙整表

Test No.	(1) Stage of pre-engineering (NTD/m ³)	(2) Stage of remedial work (NTD/m ³)	(3) Stage of site restoration (NTD/m ³)	(4) Total cost (NTD/m ³)
H1	447.6	432.6	86.8	967.0
H2	447.6	459.0	86.8	893.4
H3	447.6	1,036.6	86.8	1,571.0
H4	1,193.6	5,468.9	231.4	6,893.9
S1	1,068.9	742.4	257.2	2,068.5
S2	1,068.9	757.0	257.2	2,083.1
S3	1,068.9	1,254.2	257.2	2,580.3
S4	2,137.8	5,506.4	514.4	8,158.6

$$(4) = (1) + (2) + (3)$$



表 12 column (4))，Test S1 ~ S4 總成本約介於 2,068.5 ~ 8,158.6 NTD/m³ 之間 (表 12 column (4))，方型排列模組整治成本約為蜂巢型排列模組整治成本之 1.18 ~ 2.14 倍之間，此差距主要來自方型排列模組整治土壤體積較小之故。

整體而言，以電動力技術進行現地重金屬污染土壤整治，前置工程施作階段、整治作業階段及場址復原階段中，場址復原階段經濟成本佔比最低，僅介於 3.2% ~ 12.6% 之間，整治作業階段則以分別使用 Fe/Al 氧化電極及乳酸操作流質試驗組成本為最高，分別介於 47.0% ~ 80.4% 之間，顯示以電動力技術進行現地整治，電極及操作流質成本影響整體成本高。

5.10.4 與其他電動力技術經濟成本及整治成效比較

與他研究進行經濟成本及整治成效彙整見表 13 所示。Christopher (2009) 以電動力技術整治重金屬污染場址指出，重金屬污染場址經濟成本主要影響因素包含場址大小、污染場址整治深度、整治時間、pH 及化學調節劑及前置準備工程等項目，其中重金屬污染場址之 pH 及化學調節劑成本佔比為最高，佔總整治經費 35.0% 以上；由此可看出，以電動技術進行現地整治，以場址大小、污染場址整治深度、整治時間及前置準備工程經濟成本比例為最高。

Christopher (2009) 另提出，以電動力技術應用於現地整治工程時，電力成本約介於 7.0% ~ 25.0% 之間、整地工程成本約介於 5.0% ~ 25.0% 之間、電極井等相關設備安裝成本約介於 10.0% ~ 60.0% 之間、整治期間操作等消耗性材料使用成本約介於 15.0% ~ 50.0% 之間、離場作業成本約介於 5.0% ~ 20.0% 之間，重金屬污染總整治成本約介於 3,450.0 NTD/m³ ~ 12,000.0 NTD/m³ 之間。

本研究重金屬污染土壤整治試驗中，前置工程施作階段成本約介於 15.8% ~ 52.3% 之間、整治作業階段成本約介於 32.5% ~ 80.2% 之間、場址復原階段成本約介於 3.2% ~ 12.6% 之間，與 Christopher (2009) 有相似之成本比例；然本研究總經濟成本僅介於 967.0 NTD/m³ ~ 8,158.6 NTD/m³ 之間，約為 Christopher (2009) 之 28.0% ~ 68.0%；另發現，雖 Wan (2020) 之固化/穩定化及耕犁法看似較具經濟效益，但於地狹人稠之台灣較不適用，由此看出本計畫重金屬污染土壤整治試驗具經濟優勢。

表 13.本研究與他研究經濟成本及污染物整治成效彙整

Literature	Technology		Pollutants	Duration (month)	Removal rate (%)	Total cost (NTD/m ³)
	EK	ECGO				
This research		✓	Cr & Ni	4.0	27.3 ~ 49.1	96.6 ~ 313.2
Rahman et al (2020)	✓		Cu、Zn、Cr、Ni & Pb	2.0 ~ 18.0	50.0 ~ 91.7	11,772.0 ~ 19,617.0
Kim et al (2012)	✓		As、Cu & Pb	3.4	-48.8 ~ 23.9	-
Head et al (2020)	✓		Cl-VOCs	8.0	7.0 ~ 32.0	-
Christopher (2009)	✓		Heavy metals	-	-	3,450.0 ~ 12,000.0
		Immobilization			Immobilization decreased the noncarcinogenic RI by 38%	≐ 456,000 (ha)
Wan et al (2020)		Phytoremediation	As、Cd & Pb	36.0	As: 18.4 kg/ha、Pb: 7.9 kg/ha & Cd: 15 g/ha (HMs amount)	≐ 1,689,000 (ha)
		Turnover and attenuation			T&A decreased the noncarcinogenic RI by 48%	≐ 360,000 (ha)



5.11 結論及建議

5.11.1 結論

本計畫為兩年計畫 (108~109 年) 之第二年計畫，續以 108 年計畫之高雄市鼓山區內惟段九小段 55 地號場址為整治場址，本年度 (109 年) 以方型排列模組進行重金屬污染土壤整治，並透過實驗室尺度 (lab scale) 乳酸濃度擇選試驗進行實場電動力試驗，結論如下：

1. 現地整治中，提升電位坡降 (由 0.6 V/cm 至 1.0 V/cm) 並未明顯提升整治成效，係因高電位坡降下，陰極井端釋出大量氫氧根離子，致重金屬離子移動受限，重金屬累積於部分土體，使整治成效提升不易。
2. 現地整治中，更換由 Al 惰性電極至 Fe/Al 氧化電極，各重金屬整治成效明顯提升，因 Fe/Al 氧化電極有效將重金屬強鍵結態轉化至弱鍵結態並移除，進一步提升重金屬去除率。
3. 實驗室尺度中，以 1.4 V/cm 電位坡降配合 0.05~0.50 M 乳酸作為操作流質，研究結果顯示使用 0.50 M 乳酸作為操作流質重金屬整治成效可達八成，顯示以乳酸作為操作流質可提高重金屬去除率，試驗考量現地場址異質性，後續方型排列模組整治試驗則施予電位坡降 1.4 V/cm、乳酸濃度 0.30 M 進行現地整治試驗。
4. 現地整治中，以 0.30 M 乳酸作為操作流質、提升電位坡降由 1.0 V/cm 至 1.4 V/cm，整治成效未顯著提升，乃因整治期間之強降雨使操作流質乳酸受到稀釋，致整治成效提升不易，顯示電動力技術若應用於戶外環境，下雨天氣不利整治進行。
5. 執行本研究經濟成本分析，蜂巢型及方型排列模組整治成本分別介於 967.0~6,893.9 NTD/m³ 及 2,068.5~8,158.6 NTD/m³ 之間，研究結果發現提升電位坡降，能耗成本僅由 0.3%~0.9% 提升至 2.3%~6.6%；更換由 Al 惰性電極至 Fe/Al 氧化電極或由地下水至 0.30 M 乳酸，整治成本大幅提升，係因 Fe/Al 氧化電極之製備及操作流質需定期補充，致整治成本大幅提升。
6. 執行經濟成本比較，本研究與 Christopher (2009) 所提出之電動力實場整治之前置工程施作階段、整治作業階段及場址復原階段花費成本比例接近，但總成本僅約 Christopher (2009) 之 28.0%~68.0%、Rahman et al



(2020) 之 8.2%~16.0%，顯示本團隊之電動力技術具經濟成本優勢。

5.11.2 建議

1. 本計畫於整治之初進行電動力實場前置工程施作，發現土壤中有許多垃圾及廢棄物回填，該場址並非典型之重金屬土壤污染場址，然由過去許多顧問公司報告中皆未提及，顯示於大範圍之土壤污染場址調查中，採樣密度有提升之必要性。
2. 以電動力技術進行實場整治，能耗成本僅約總經費之 0.3%~6.6%，相較於許多國外研究之能耗成本需花費總經費之 10.0%~20.0%，台灣應優先發展電動力技術。



第六章 參考文獻

- [1] 土壤及地下水整治網，網址：<https://sgw.epa.gov.tw/public>
- [2] 「105 年度高雄市土壤與地下水污染調查及查證工作計畫」期末報告，高雄市政府，105 年 12 月。
- [3] 「土壤與地下水綠色整治技術發展計畫 (105/11~107/8)」期末報告初稿，環保署土基會，107 年 9 月。
- [4] Weng, C. H. and Yuan, C. (2001) Removal of Cr (III) from clay soils by electrokinetics. *Environ. Geochem. Hlth.* 23, 281-285.
- [5] Mendez, E., Perez, M., Romero, O., Beltan, E. D., Castro, S., Corona, J. L., Cuevas, M. C. and Bustos, E. (2012) Effects of electrode material on the efficiency of hydrocarbon removal by an electrokinetic remediation process. *Electrochim. Acta* 30, 148-156.
- [6] Ottosen, L. M. and Christensen, I. V. (2012) Electrokinetic desalination of sandstones for NaCl removal-test of different clay poultices at the electrodes. *Electrochim. Acta* 86, 192-202.
- [7] Tanaka, S., Nakata, Y., Kimura, Yustiawati, T., Kawasaki, M., Kuramits, H. (2002) Electrochemical decomposition of bisphenol A using Pt/Ti and SnO₂/Ti anodes. *J. Appl. Electrochem.*, 32, 197-201.
- [8] Kuramitz, H., Matsushita, M. and Tanaka, S. (2004) Electrochemical removal of bisphenol A based on the anodic polymerization using a column type carbon fiber electrode. *Water Res.* 38, 2331–2338.
- [9] Park, J. Y., Kim, S. J., Lee, Y. J., Baek, K. and Yang, J. W. (2005) EK-Fenton process for removal of phenanthrene in a two dimensional soil system. *Eng. Geol.* 77,217-224.
- [10] Alcantara, T., Pazos, M., Gouveia, S., Cameselle, C., Sanroman, M. A. and Aaron J. J. (2008) Remediation of phenanthrene from contaminated kaolinite by electroremediation-Fenton technology. *J Environ. Sci. Health. A* 43,901-906.
- [11] Tsai, T. T., Sah, J. and Kao, C. M. (2010) Application of iron electrode corrosion enhanced electrokinetic-Fenton oxidation to remediate diesel contaminated soils: a laboratory feasibility study. *J. Hydrol.* 380, 4-13.
- [12] Polcaro, A. M., Vacca, A., Mascia, M. and Palmas, S. (2007) Electrokinetic removal of 2,6-dichlorophenol and diuron from kaolinite and humic acid-clay system. *J. Hazard Mater.* 148, 505-512.



- [13] Lien, H. L. and Zhang, W. (2005) Hydrodechlorination of Chlorinated Ethanes by Nanoscale Pd/Fe bimetallic Particles. *J. Environ. Eng.* 131,4-10.
- [14] Yang, G. C. C. and Liu, C. Y. (2001) Remediation of TCE contaminated soils by in situ EK Fenton process. *J. Hazard Mater.* 85, 317-331.
- [15] Yang, C. C. and Chang, D. G. (2006) Degradation of Trichloroethylene in the Subsurface by Nanoscale Bimetallic Pd/Fe Slurry Under an Electric Field. *J. Environ. Sci. Heal. A*, 40-47.
- [16] Yang, M. X., Sarkar, S. and Bent, B. E. (1997) Degradation of multiply-chlorinated hydrocarbons on Cu(100). *Langmuir* 13, 229-242.
- [17] Lien, H. L. and Zhang, W. (2002) Enhanced dehalogenation of halogenated methanes by bimetallic Cu/Al. *Chemosphere* 49, 371-378.
- [18] Chen, L. H., Huang, C. C. and Lien, H. L. (2008) Bimetallic iron–aluminum particles for dechlorination of carbon tetrachloride. *Chemosphere* 73, 692-697.
- [19] Risco, C., Rodrigo, S., Vizcaíno, R. L., Yustres, A., Saez, C., Cañizares, P., Navarro, V. and Rodrigo, M. A. (2016) Removal of oxyfluorfen from spiked soils using electrokinetic soil flushing with linear rows of electrodes. *Chem. Eng. J.* 294, 65-72.
- [20] Cuevas, O., Herrada, R. A., Corona, J. L., Olvera, M. G., Sepúlveda-Guzmán, S., Sirésd, I. and Bustos, E. (2016) Assessment of IrO₂-Ta₂O₅/Ti electrodes for the electrokinetic treatment of hydrocarbon-contaminated soil using different electrode arrays. *Electrochim. Acta.* 208, 282-287.
- [21] López-Vizcaíno, R., Navarro, V., León, M. J., Risco, C., Rodrigo, M. A., Sáez, C. and Canizares, P. (2016) Scale-up on electrokinetic remediation: Engineering and technological parameters. *J. Hazard. Mater.* 315, 135-143.
- [22] Vocciante, M., Caretta, A., Bua, L., Bagatin, R. and Ferro, S. (2016) Enhancements in ElectroKinetic Remediation Technology: Environmental assessment in comparison with other configurations and consolidated solutions. *Chem. Eng. J.* 289, 123-134.
- [23] Kim, D. H., Jo, S. U., Choi, J. H., Yang, J. and Baek, S.K. (2012) Hexagonal two dimensional electrokinetic systems for restoration of saline agricultural lands: A pilot study. *Chem. Eng. J.* 198-199, 110-121.
- [24] Vieira dos Santos, E., Souza, F., Saez, C., Canizares, P., Lanza, M. R. V., Martinez-Huitle, C. A. and Rodrigo, M. A. (2016) Application of electrokinetic soil flushing to four herbicides: A comparison. *Chemosphere*. 153 (2016) 205-211.



- [25] Risco, C., Rubí-Juárez, H., Rodrigo, S., Vizcaíno, R. L., Saez, C., Cañizares, P., Barrera-Díaz, C., Navarro, V. and Rodrigo, M. A. (2016) Removal of oxyfluorfen from spiked soils using electrokinetic fences. *Sep. Purif. Technol.* 167, 55-62.
- [26] Tang, J., He, J., Liu T., Xin, X. and Hu, H. (2017) Removal of heavy metal from sludge by the combined application of a biodegradable biosurfactant and complexing agent in enhanced electrokinetic treatment. *Chemosphere.* 189, 599-608.
- [27] Park, S., Park, G., Kim, D., Yang, J. and Baek, K. (2010) Electrokinetic separation of heavy metals from wastewater treatment sludge. *Sep. Sci. Technol* 45, 1982-1987.