

行政院環境保護署

「100 年度土壤及地下水污染研究與技術提昇計畫」

電動力技術現地模組設立及測試之研究

期末報告

主 辦 單 位 ：  行政院環境保護署

受 託 單 位 ： 國立高雄大學土木與環境工程系

計 畫 主 持 人 ： 袁菁

中 華 民 國 101 年 10 月

中文摘要

電動力技術係一現地(in-situ)整治技術，可藉由調整電動力操作參數及處理時間，使得地面活動及原有建物不受影響，且因具備外在驅動力及污染物擴散方向可控制之特點，特別適合應用於大多技術不適合處理之黏土層污染。其主要優勢為：(1)可產生均勻之電滲透流於異質且低滲透性之土壤介質中移動，(2)可有效控制電滲透之流向，(3)高降解率與移除率且具安全性，(4)為一種高經濟效益之現地永續處理技術(Li et al., 1998, Pamukcu et al., 1997)。落實實場整治，建立本土現地操作參數，將可有效解決現有污染場址之技術瓶頸。

本研究之目的是為設計一電動力現地三維模組，並進行一系列之土壤整治實驗，探討電極接觸面積及電位坡降對土壤整治效率之影響。討論模組之設計標準。最終定案要點為：

1. 模組尺寸大小設計為1.5 m × 1 m × 1.1 m，且為可移動性；
2. pH值自動控制裝置；
3. 實驗過程中需對pH值、導電度及電流/電壓監測。

本研究實驗所使用之電極棒為空心不銹鋼棒(SUS 316)，操作流質之選用為0.05 M之乳酸(Lactic acid)，整治時間為20天，電位坡降為0.2~0.35 V/cm，電極接觸面積為28,260~37,680 cm²，以探討電極接觸面積及電位坡降之影響。

在Test 1實驗中電滲透流係數(K_e)為23.9 cm²/V-s，其Zn、Cu、Pb、Cr及Ni金屬之去除效率分別為82.4 %、81.9 %、51.6 %、88.1 %及44.9 %，主要是藉由電滲透流及離子遷移方式移除目標污染物，在陰極槽液中發現有少量污染物濃度，並推測其主要污染物皆因電鍍而在陰極電極上被發現；而在目標污染物Cu之序列萃取中發現，在電位坡降為0.35 V/cm時可有效改變其與土壤之鍵結型態，並藉由電滲透流及電子遷移方式移除；相較於Test 2實驗(K_e)為23.9 cm²/V-s，其Zn、Cu、Pb、Cr及Ni金屬之去除效率分別為41.8 %、4.2 %、32.8 %、31.6 %及35.6 %，而與Test 1相同的是實驗結束後發現陰極電極有金屬污染物鍍於外層，使電極重量增加，而比較對污染物之去除效率即可發現，當降低電位坡降為0.2 V/cm時，將無法有效達到去除之成效，且在Cu之鍵結型態分析中，降低電位坡降以致無法有效改變其鍵結型態達到移除之成效，但在殘留濃度分佈中仍可發現有緩慢往陰極移動之現象。

比較Test 1及Test 2之殘留濃度分佈可發現，本研究之三維模場污染物移動

方式有別於一般實驗室小型模組模擬實場整治情形，除了一般由陽極往陰極移動之縱向去除外，明顯可看出本研究之試驗仍有一垂直向往上移動之現象發生，推測應是模擬實場整治，在模場上方無額外施加壓力，以致在電動力整治過程中產生之氣體往上逸散時，同時將污染物往上推動所造成；另在土壤溫度量測部分，平均室溫為32.1 °C，期末土體平均溫度為36.6 °C，土體溫度量測結果平均高於室溫4~5 °C，是一可接受之範圍。

而在成本考量方面，電極費用佔總成本之85 %、操作流質費用佔14 %，電極是主要影響成本多寡之主因(本研究電極以每次試驗接更新計算)，而主要電極之消耗原因為槽液腐蝕及電流造成之氧化腐蝕情形，因此若能有效控制pH值及藉由試驗找出一最佳操作參數，即可使電極重複使用，將可有效降低整治成本。

英文摘要

Electrokinetic (EK) process is classified as an in-situ remediation technology. It will be conducted in site without disturbing present resident activities with proper operation and reasonable treatment time. EK process is much fit in contaminated site with clay soil because pollutant will be forced to migrate by the electrical driving force. The advantages EK process includes : (1) production of uniform electroosmotic flow in heterogenous medium, especially in low permeable soil; (2) easy control of flow direction; (3) high removal and degradation efficiency; (4) high economy. To establish pilot-scale operation parameters will be beneficial to promote in application

The aim of this project is to design a 3-D pilot-scale EK modul and conduct a series of soil remediation experiments to investigate the effect of electrode area and potential gradient on remediation efficiency. The 3-D pilot-scale EK modul was set up as follows,

- The size of 3-D modeul is 1.5 m x 1m x1m, with mobile function;
- The reservoir pH was maintained at a range of 6~8 to prevent clogging of metal precipitates;
- The reservoir pH, reservoir/soil temperature, and electro current were continuously monitored throughout the experiments.

Considering reducing cost, hollow stainless electrodes (SUS 316) are selected for test. A series of the experiments were conducted with 0.05 M lactic acid as processing fluid under potential gradient of 0.2~0.35 V/cm and electrode area of 28260 ~ 37680 cm² for 20 days. Results showed that the treatment efficiency of Zn, Cu, Pb, Cr and Ni were 82.4 %, 81.9 %, 51.6 %, 88.1 % and 44.9 %, respectively, conducted with potential gradient of 0.35 V/cm and electrode area of 28260 cm². As decreased to potential gradient to 0.2 V/cm, the treatment efficiency of Zn, Cu, Pb, Cr and Ni were also decreased to 41.8%, 4.2 %, 32.8 %, 31.6% and 35.6 %, respectively. It was found that most of removed pollutants are coating on the cathode electrode surface and part of remained in the cathode reservoir. It was concluded that the treatment mechanism was dominated by EO flow. Based on

sequential extraction results, it was found that the binding strength of Cu with soil was shifted from strong to weak after EK process and, however, it became insignificant at lower potential gradient.

Other than pollutants migrated from anode to cathode, it was also found that the pollutants were migrated from bottom layer to top layer. Such vertical migration of pollutants will be beneficial to remediate contamination in depth. The soil temperature after EK treatment was 4~5 °C higher than room temperature which was at reasonable range for in-situ remediation. For cost analysis, 85%, 14%, and less than 1% was accounted for the cost of electrodes, processing fluid and electricity, respectively. To prevent corrosion of electrode would tremendously lower the remediation cost.

第一章 前言

摘要

電動力技術係一現地(in-situ)整治技術，可藉由調整電動力操作參數及處理時間，使得地面活動及原有建築物在不受影響下進行整治，且因具備外在驅動力及污染物擴散方向可控制之特點，特別適合應用於大多技術不適合之黏土層污染。其主要優勢為：(1)可產生均勻之電滲透流於異質且低滲透性之土壤介質中移動，(2)可有效控制電滲透之流向，(3)高降解效率與移除率且較具安全性，(4)為一種高經濟效益之現地永續處理技術(Li et al., 1998，Pamukcu et al., 1997)。故本研究計畫重點將設計三維模組，並進行組裝使之作為實場處理前之測試實驗設施，建立實驗操作數據，以作為後續現地實驗之依據。

1.1 研究緣起

自 90~99 年度環保署共執行 133 件次場址應變及查證工作，其中有 9 處場址於不同年度延續執行相關應變計畫，因此共可視為 117 處獨立場址之應變工作。由於場址應變相關計畫其執行時間、地點、內容及後續作業，皆不如一般調查計畫易於掌握，因此藉由以下相關執行成果統計，協助了解計畫執行內容與成果。90~99 年度各專案計畫執行之應變場址所在縣市場址數量分布比例彙整如圖 1。由圖中可以得知，117 處場址所分布縣市以彰化市 17 處為最多，台中縣(舊制)14 處為次之，苗栗縣 12 處，高雄縣 9 處，桃園縣及台南市各 7 處，台北縣、高雄市及台南縣各 5 處，澎湖縣 4 處，新竹縣市、雲林縣、屏東縣、台東縣及跨縣市案件各 3 處，台北市、台中市、嘉義縣市、宜蘭縣及金門縣各 2 處，花蓮縣、連江縣各 1 處。彰化縣線西鄉於 94~95 年間發生戴奧辛鴨蛋事件，因此進行多次調

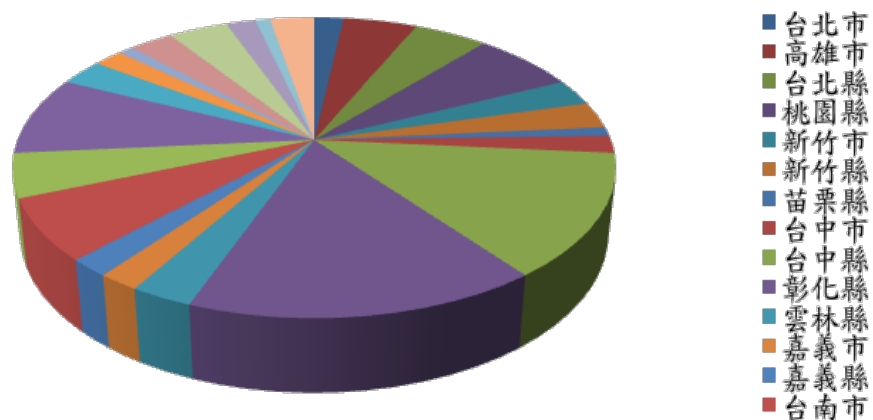


圖 1、90~99 年度應變場址所在縣市統計圖

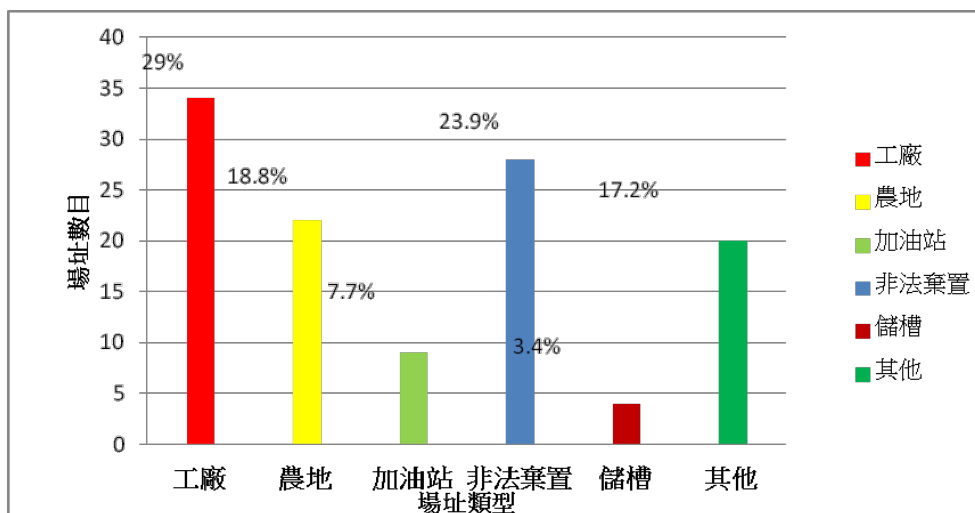


圖 2、90~99 年度應變廠址類型統計圖

查與查證工作，使得場址數量明顯較其他縣市多。

在已完成 117 處場址應變工作中，其場址類型以工廠 30 處為最大宗，所占比例為 27%，非法棄置場址 26 處，其他類型 22 處，包括輸油管漏油、意外事故及不明原因污染等，農地 20 處，加油站 9 處，儲槽 4 處，顯示工廠較易產生污染問題。近年來環保署大規模進行加油站污染查證之相關工作，使得加油站與儲槽場址的數量相對較少，並加強宣導儲槽地上化的觀念，使得加油站與儲槽場址的數量相對較少，各應變場址分佈比例如圖 2 所示。

統計歷年整治廠址查證結果顯示，117 處場址中有 58 處場址土壤或地下水污染物濃度超過管制標準，其中土壤超過管制標準有 43 處，地下水超過管制標準有 25 處(其中土壤及地下水同時超過管制標準有 11 處)。43 處場址土壤超過管制標準之污染物種類為有機化合物之 TPA、苯、甲苯、二甲苯、乙苯及戴奧辛，其中有 14 處場址之有機污染物為 TPH；重金屬污染物則包括銅、鎘、鎳、鉍、

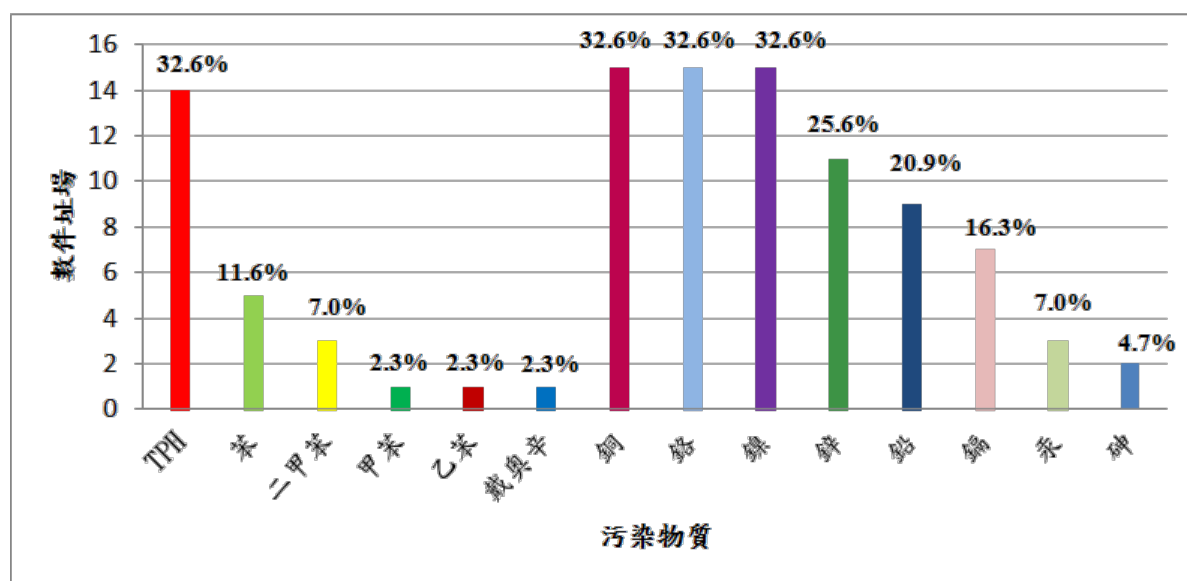


圖 3、90~99 年度土壤污染物出現次數統計圖

鉛、鎘、汞及砷等八大重金屬，其中有 14 處場址之銅與鎳超過管制標準，為最常見之重金屬污染物。圖 3 為不同土壤污染物出現次數之統計。

正泰化工（以下簡稱本場址）自民國 53 年開始營運，於民國 78 年停工，並於 81 年辦理土地分割變賣，現今場址已改建為商業住宅區，土地面積約為 32,122 平方公尺。該場址從事鹼氯生產，採用汞極法電解鹽水生產液鹼與氯氣，並利用氯氣與苯為原料，製造有機氯農藥，生產過程會產生含汞之污泥與廢水（濃度較低），其中以清洗電解槽排放之汞鹽泥污染濃度較高（達數千 PPM 以上）。由歷史文件與前正泰員工訪談，推測含汞污泥原堆置於廠區後側，為現大唐江山住宅區(見圖 4)，但於大唐江山基礎施工時，將該污泥移動至廠區前側掩埋，造成汞污染擴散。



圖 4、正泰化工廠位置圖

98 年新北市（原台北縣）環保局執行土壤與地下水管理及緊急應變計畫時，發現廠區土壤仍存在汞廢棄物，地底 7 公尺處近期仍可見到汞污泥蹤跡，當地每公斤土壤重金屬汞含量最高濃度達 4830 毫克，超過管制標準 241 倍，目前已列為汙染控制場址。而且除土壤汞含量嚴重超標外，每公升地下水中含有的汞濃度為 0.196 毫克，達限值 9.8 倍。且正泰化工新莊廠汙染廠區已改建成工業住宅，約有 20 多戶居民，去年已公告禁用地下水。因此對於具揮發性之汞汙染，且廠址上亦有民宅存在之正泰化工新莊廠址，開挖式之離場處理絕非解決良方，而應採取且不干擾地上既有之居民活動/建物之現地(in-situ)整治技術為首要。

針對正泰化工土壤污染調查規劃 10 個採樣點(JT-S1~JT-S10)，其土壤採樣點分佈圖如圖 5 所示，土壤採樣時間為民國 100 年 7 月底，其分析項目為 pH、CEC、粒徑分析、總汞及甲機汞分析，其結果整理如表 1-表 3。結果得知高達 7 個採樣位置之汞濃度超過管制標準，位於 JT-M10 附近之採樣點，如 JT-S5、JT-S6 及 JT-S7 之汞濃度偏高，尤其 JT-S6 測得之汞濃度高達 2650 mg/kg，高於管制標準(20 mg/kg)約 130 倍，此外，污染深度達地表下 7 公尺，而污染分佈為連續之情形，從級配以下(1.5m)至 7 公尺皆發現有超過管制標準之情形；而於甲基汞分析數據皆未有檢測出，初步認定，土壤及地下水中，汞主要以無機態存在。



圖 5、土壤調查採樣位置圖

正泰化工場址內計有 11 口場置性監測井(JT-M1~JT-M11)，地下水位約為地表下 6 公尺，監測井大部分坐落於 1.新北市新莊區新樹路與民安西路交叉口；2.新北市新莊區 民安西路 408 巷；3.新北市新莊區民安西路四八二號對面等 3

表 1、土壤檢測結果(JT-S1~S3)

單位：mg/kg

| 樣品名稱 | 監測標準 | 管制標準 | JT-S1 座標(TWD97) E:293621, N:276662 | | | | | | | | | | | |
|--------|------|------|------------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | | | 採樣深度(m) | | | | | | | | | | | |
| | | | 0.30~0.75 | 0.75~1.20 | 1.20~1.80 | 1.80~2.40 | 2.40~3.00 | 3.00~3.60 | 3.60~4.20 | 4.20~4.80 | 4.80~5.40 | 5.40~6.00 | 6.00~6.50 | 6.50~7.00 |
| pH | 〃 | 〃 | 〃 | 〃 | 7.2 | 〃 | 〃 | 〃 | 6.8 | 〃 | 〃 | 〃 | 〃 | 7.1 |
| 汞(XRF) | 10 | 20 | 14 | <5 | <5 | <5 | <5 | <5 | <5 | <5 | <5 | <5 | <5 | <5 |
| 汞(全量) | | | 〃 | 〃 | 0.132 | 〃 | 〃 | 〃 | <0.100 | 〃 | 〃 | 〃 | 〃 | 0.131 |
| 甲基汞 | 〃 | 〃 | 〃 | 〃 | <0.0596 | 〃 | 〃 | 〃 | <0.0596 | 〃 | 〃 | 〃 | 〃 | <0.0596 |
| 樣品名稱 | | | JT-S2 座標(TW97) E:293615, N:2766653 | | | | | | | | | | | |
| pH | 〃 | 〃 | 〃 | 8.3 | 〃 | 〃 | 4.2 | 〃 | 4.4 | 〃 | 〃 | 〃 | 〃 | 4.1 |
| 汞(XRF) | 10 | 20 | 7 | 59 | <5 | <5 | 22 | <5 | <5 | <5 | <5 | <5 | <5 | <5 |
| 汞(全量) | | | 〃 | 32.9 | 〃 | 〃 | 23.2 | 〃 | 2.53 | 〃 | 〃 | 〃 | 〃 | 0.388 |
| 甲基汞 | 〃 | 〃 | 〃 | <0.0596 | 〃 | 〃 | <0.0600 | 〃 | <0.0596 | 〃 | 〃 | 〃 | 〃 | <0.0596 |
| 樣品名稱 | | | JT-S3 座標(TW97) E:293604, N:2766643 | | | | | | | | | | | |
| pH | 〃 | 〃 | 〃 | 7.7 | 4.2 | 〃 | 〃 | 〃 | 4.4 | 〃 | 〃 | 〃 | 〃 | 5.5 |
| 汞(XRF) | 10 | 20 | 50 | <5 | 55 | <5 | <5 | <5 | 6 | <5 | <5 | <5 | <5 | <5 |
| 汞(全量) | | | 〃 | 0.865 | 34.3 | 〃 | 〃 | 〃 | 19.0 | 〃 | 〃 | 〃 | 〃 | <0.100 |
| 甲基汞 | 〃 | 〃 | 〃 | <0.0596 | <0.0600 | 〃 | 〃 | 〃 | <0.0596 | 〃 | 〃 | 〃 | 〃 | <0.0596 |

註：採樣日期為 100/7/20~22。灰底黑字表超過監測標準；黑底白字表超過管制標準

處，監測井設置位置如圖 6 所示。101 年上半年度地下水監測井之檢測項目包括重金屬(總汞)、一般項目(pH、總硬度、總溶解固體、氮鹽、氨氮、硝酸鹽氮、硫酸鹽、TOC、亞硝酸鹽氮)、VOCs (機關每次遴選 3 口次)，一般項目中僅 JT-M4 之氨氮檢測出有超過監測標準，重金屬-汞檢測部分僅 JT-M3 檢測出微量數值，而 JT-M10 則檢測出汞有超過管制標準高達 120 倍，而 VOC 之監測結果，挑選的三口井中僅 JT-M5 檢測出微量氯仿，JT-M11 檢測出微量順-1，2-二氯乙烯。此外，歷年地下水中汞監測數據彙整結果得知 JT-M10 監測井位置為高濃度汞之污染區域。

表 2、土壤檢測結果(JT-S4-S7)

單位：mg/kg

| 樣品名稱 | 監測標準 | 管制標準 | JT-S4 座標(TWD97)E:293600, N:2766629 | | | | | |
|--------|------|------|------------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | | | 採樣深度(m) | | | | | |
| | | | 1.30-2.00 | 2.00-3.00 | 3.00-4.00 | 4.00-5.00 | 5.00-6.00 | 6.00-7.00 |
| pH | ~ | ~ | 9.6 | - | 6.6 | - | - | 5.0 |
| 汞(XRF) | 10 | 20 | <5 | <5 | <5 | <5 | <5 | <5 |
| 汞(全量) | | | 4.73 | - | 2.23 | - | - | 3.13 |
| 甲基汞 | ~ | ~ | <0.0600 | - | <0.0600 | - | - | <0.0600 |
| 樣品名稱 | | | JT-S5 座標(TWD97)E:253593, N:2766625 | | | | | |
| | | | 採樣深度(m) | | | | | |
| | | | 1.50-2.00 | 2.00-3.00 | 3.00-4.00 | 4.00-5.00 | 5.00-6.00 | 6.00-7.00 |
| pH | ~ | ~ | 7.8 | - | - | 5.3 | - | 5.0 |
| 汞(XRF) | 10 | 20 | 899 | <5 | <5 | <5 | <5 | 24 |
| 汞(全量) | | | 1540 | - | - | 6.03 | - | 21.2 |
| 甲基汞 | ~ | ~ | <0.0600 | - | - | <0.0600 | - | <0.0600 |
| 樣品名稱 | | | JT-S6 座標(TWD97)E:293586, N:2766618 | | | | | |
| | | | 採樣深度(m) | | | | | |
| | | | 0.00-2.50 | 2.50-3.00 | 3.00-4.00 | 4.00-5.00 | 5.00-6.00 | 6.00-7.00 |
| pH | ~ | ~ | - | 9.0 | - | - | 8.6 | 8.6 |
| 汞(XRF) | 10 | 20 | - | 1140 | 867 | 634 | 254 | 322 |
| 汞(全量) | | | - | 2650 | - | - | 522 | 514 |
| 甲基汞 | ~ | ~ | - | <0.0600 | - | - | <0.0600 | <0.0600 |
| 樣品名稱 | | | JT-S7 座標(TWD97)E:293581, N:2766608 | | | | | |
| | | | 採樣深度(m) | | | | | |
| | | | 1.50-2.00 | 2.00-3.00 | 3.00-4.00 | 4.00-5.00 | 5.00-6.00 | 6.00-7.00 |
| pH | ~ | ~ | 8.0 | - | 9.3 | - | - | 7.5 |
| 汞(XRF) | 10 | 20 | 1270 | 1150 | 1010 | 408 | <5 | 9 |
| 汞(全量) | | | 398 | - | 568 | - | - | 14.4 |
| 甲基汞 | ~ | ~ | <0.0600 | - | <0.0600 | - | - | <0.0600 |

註：採樣日期為 100/7/28~29。灰底黑字表超過監測標準；黑底白字表超過管制標準

單位：mg/kg

| 樣品名稱 | 監測標準 | 管制標準 | JT-S8 座標(TWD97)E:293574 , N:276604 | | | | | |
|--------|------|------|--------------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | | | 採樣深度(m) | | | | | |
| | | | 1.50-2.00 | 2.00-3.00 | 3.00-4.00 | 4.00-5.00 | 5.00-6.00 | 6.00-7.00 |
| pH | ~ | ~ | 7.4 | - | - | 8.0 | - | 7.2 |
| 汞(XRF) | 10 | 20 | 19 | <5 | <5 | <5 | <5 | <5 |
| 汞(全量) | | | 26.0 | - | - | 0.472 | - | 1.04 |
| 甲基汞 | ~ | ~ | <0.0600 | - | - | <0.0600 | - | <0.0600 |
| 樣品名稱 | 監測標準 | 管制標準 | JT-S9 座標(TWD97)E:293582 , N:2766597 | | | | | |
| | | | 採樣深度(m) | | | | | |
| | | | 1.50-2.00 | 2.00-3.00 | 3.00-4.00 | 4.00-5.00 | 5.00-6.00 | 6.00-7.00 |
| pH | ~ | ~ | 7.5 | - | 7.1 | - | - | 5.5 |
| 汞(XRF) | 10 | 20 | <5 | <5 | <5 | <5 | <5 | 71 |
| 汞(全量) | | | 4.39 | - | 8.01 | - | - | 70.4 |
| 甲基汞 | ~ | ~ | <0.0600 | - | <0.0600 | - | - | <0.0600 |
| 樣品名稱 | 監測標準 | 管制標準 | JT-S10 座標(TWD97)E:293593 , N:2766589 | | | | | |
| | | | 採樣深度(m) | | | | | |
| | | | 1.30-2.00 | 2.00-3.00 | 3.00-4.00 | 4.00-5.00 | 5.00-6.00 | 6.00-7.00 |
| pH | ~ | ~ | 8.1 | - | - | 6.2 | - | 8.1 |
| 汞(XRF) | 10 | 20 | <5 | <5 | <5 | <5 | <5 | <5 |
| 汞(全量) | | | 2.37 | - | - | 8.41 | - | 7.73 |
| 甲基汞 | ~ | ~ | <0.0600 | - | - | <0.0600 | - | <0.0600 |

註：採樣日期為 100/7/28~29。灰底黑字表超過監測標準；黑底白字表超過管制標準



圖 6、原正泰化工既設 11 口監測井位置圖

1.2 研究目的

1. 第一代三維現地模組設計及組裝

本年計畫重點將設計三維現地模組(約 1.5 m × 1 m × 1.1 m) ，並進行組裝(由台境公司出資)，使之作為實場處理前之測試實驗設施，以決定操作參數，日後並可作為現地移動式處理設備。

2. 建立實場初步操作參數

探討電極接觸面積及電位坡降之影響，進行現地模場實驗，實驗結果將作為後續現地實驗之依據。

1.3 研究內容

本研究之主要內容彙整如下

1. 現地三維模組之設立，並由台境公司進行組裝及測試。
2. 探討現地三維模組於不同參數(電極接觸面積、電位坡降等參數)設計下，對污染物之去除效率影響，建立初步模場操作條件，以利作為後續現地實驗之參考依據。
3. 探討重金屬移除機制及鍵結型態分析。

第二章 文獻回顧

摘要

藉文獻回顧了解目標污染物重金屬之特性、分布情形及處理機制，以及處理方式之優缺點比較，期找出一高效率且低成本之處理操作參數，並探討電動力技術於模場之基本設置及影響參數，以做為未來於實場應用之參考依據。

2.1 土壤污染來源

土壤污染之來源包括自然界、工業界及農業界，其中包含廢水、工廠操作不當產生、農業活動或非法棄置之污染源，若由廢水導致為主，其污染特性分析如下(行政院環保署，2007)：

1. 絕大多數為水田：因水田灌溉水量用大，每公頃每年約 2 萬噸水，極易將污染物質攜入農地，因此污染之農地 90%以上均為水田。
2. 工業發達工廠集中之縣市：如彰化、桃園、台北、高雄、新竹五個縣即占污染區 80%以上，且工廠甚為集中於少數鄉鎮如彰化市、鹿港、和美與香山，工廠集中排放含重金屬之廢水使承受水體稀釋能力不足。
3. 土地利用規劃不良：田區中間常混有工廠，需借用灌溉渠道排放廢水。
4. 污染途徑絕大多數為灌溉系統傳輸：缺水地區灌溉使用回歸水，其組成幾乎都以廢水為主，如彰化東西二、三圳系統。
5. 公害事件以鎘米為主：因國內食米訂有鎘(限量 0.4 ppm)、汞(限量 0.05 ppm)、鉛(限量 0.2 ppm)標準，尚無其他重金屬含量標準。

由上述幾點看來，因廢水造成的土壤地下水污染為目前最嚴重之問題，由於許多產業在生產過程中所產生的廢水或廢棄，如這些廢水未經處理而流入河川中，極可能污染水源。而地表水和地下水的硝酸鹽污染是在世界各地的許多農業領域的問題，由於硝酸鹽非常易於溶於水，它可以累積在地下水，最終進入飲水供應系統(Lee et al., 2011)；在中國大慶某場址因油井使用不當而洩漏造成的當地石油污染(Wan et al., 2011)；或是在美國陸軍靶場挖出的泥土中所含重金屬污染(Larson et al., 2004)。

2.2 土壤污染法規

在全世界土壤污染問題日趨嚴重情況下，土壤污染問題漸漸備受重視，各國及各自訂定各種土壤污染物之管制法。而我國行政院環保署亦針對重金屬、一般有機化合物、農藥及其他一般有機化合物訂定管制標準及監測基準，依據行政院環保署於台灣地區八大土壤重金屬管制標準及監測基準如(表 1)、台灣地區土壤

重金屬含量區分為五個等級如(表 1)，以作為後來監測及污染管制之依據；而一般有機化合物、農藥及其他有機化合物現行之土壤污染管制標準及監測基準如(表 2)。

表 4、八大重金屬土壤管制標準及監測基準(行政院環保署，2011) 單位：mg/kg

| | | As (砷) | Cd (鎘) | Cr (鉻) | Cu (銅) | Hg (汞) | Ni (鎳) | Pb (鉛) | Zn (鋅) |
|------|--------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 管制標準 | 一般土壤 | 60 | 20 | 250 | 400 | 20 | 200 | 2000 | 2000 |
| | 食用作物農地 | | 5 | | 200 | 5 | | 500 | 600 |
| 監測基準 | 一般土壤 | 30 | 10 | 175 | 220 | 10 | 130 | 1000 | 1000 |
| | 食用作物農地 | | 2.5 | | 120 | 2 | | 300 | 260 |

表 5、台灣地區土壤重金屬含量等級區分表(行政院環保署，2002)

| 重金屬 項目 | 第一級 mg/kg | 第二級 mg/kg | 第三級 (背景值) mg/kg | 第四級 (觀察值) mg/kg | 第五級 mg/kg | |
|-----------|--------------|--------------|-----------------------|-----------------------|-----------|-------------|
| | | | | | 監測值 | 農地優先 整治值 |
| As(砷) | | 表土<4 | 4-9 | 10-60 | >60 | >60 |
| | | 裡土<4 | 4-15 | 16-60 | >60 | >60 |
| Cd(鎘) | | <0.05 | 0.05-0.39 | 0.40-10* | >10 | >10* |
| Cr(鉻) | | <0.10 | 0.10-10 | 11-16 | >16 | >40 |
| Cu(銅) | <1 | 1-11 | 12-20 | 21-100 | >100 | >180 |
| Hg(汞) | | <0.10 | 0.10-0.39 | 0.40-20* | >20 | >20* |
| Ni(鎳) | | <2 | 2-10 | 11-100 | >100 | >200 |
| Pb(鉛) | | <1 | 1-15 | 16-120 | >120 | >200 |
| Zn(鋅) | <1.5 | 1.5-10 | 11-25 | 26-80 | >80 | >300 |

1.As 及 Hg 為全量，Cd、Cr、Cu、Ni、Pb 及 Zn 為 0.1N 鹽酸抽出量；重金屬含量以三位有效數字表示為原則。

2.*栽種稻米之農地土壤，其鎘與汞含量大於 1mg/kg 時，應比照第五級地區，進行監測與整治事宜。

2.3 電動力法復育技術原理與機制

電動力復育技術亦被稱電化學去污技術(Electrokinetic Decontamination)，此為一新穎且具經濟效應之現地土壤復育技術。於受污染的土壤中，插入電極通以

直流電壓產生電場，使得污染物依其電性或隨電滲透流移動至對應電極，藉此去除土壤中污染物或濃縮之以便集中移除，如圖 7 所表示。目前電動力技術應用於低滲透性土壤復育最具有效性，因其提供驅動力，使污染物於土相移除加速移動性，其主要優點為：(1)可產生均勻之電滲透流於異質且低滲透性之土壤介質中移動，(2)可有效控制電滲透之流向，(3)高移除效率且具安全性，(4)為一種高經濟效益之現地處理技術(Yuan et al., 2006) (Achille et al., 2007)。

利用電動力法程序時，其主要藉由下列四種機制而移除污染物，分別為：電解反應(Electrolysis)、電滲透流(Electroosmosis)、電子遷移(Electromigration) 與電泳(Electrophoresis) (Shapiro et al., 1989)。

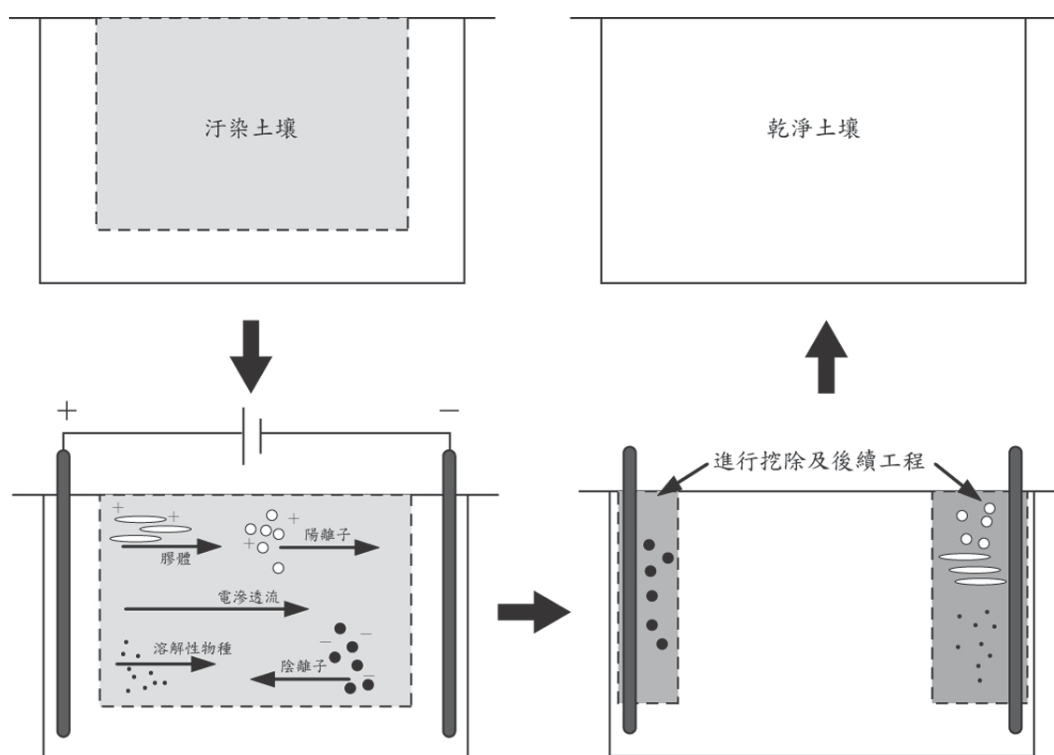
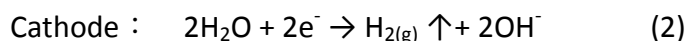
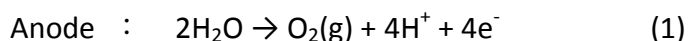


圖 7、土壤電動力復育技術示意圖

1. 電解反應

於電動力進行時，將會產生電解反應使得陽極槽液於氧化環境下持續產生大量氫離子而呈酸性，而陰極槽液於還原狀態下也因氫氧根離子之持續產生而呈鹼性，且陰、陽兩極槽液之酸鹼值可達 2 及 12 左右，顯示電場之電解反應均相當激烈。陰陽兩極產生電解反應如下(鄭孟嘉，2000)：



2. 電滲透流

一般而言，當在土壤施加電場時，電滲透流的流動方向為由陽極向陰極流動。

土壤所含有的離子型態分佈會對電滲透大小造成影響，因此，pH 值、離子強度、土壤表面帶電荷情形等亦會對電滲透流造成影響。電滲透流率可以達西定律 (Darcy Law) 加以表示，如下所示(江姿幸，2005)：

$$Q_e = K_e \cdot i \cdot A \quad (3)$$

其中， Q_e 為電滲透流率(cm^3/s)； K_e 為電滲透係數($\text{cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$)； i 為電位坡降(V/cm)； A 為截面積(cm^2)。

3. 電子遷移

土壤中可移動性離子會受電場作用移動，此稱為電子遷移。與離子有效移動、電壓強度、離子價數、法拉第常數及絕對溫度有關。離子遷移流的質量傳輸大於電滲透流 10 倍以上，因此電動力法在整治污染土壤過程中，電子遷移為主要的移除機制(蔡在唐，2002)。

在電場作用下土壤中離子的移動速率可以下式加以描述(蔡在唐，2002)：

$$u^* = D^* z F / RT \quad (4)$$

其中：

u^* 為有效離子移動速率；
 D^* 為有效擴散係數(cm^2/s)；
 z 為離子價數； F 為法拉第常數；
 R 為理想氣體常數；
 T 為絕對溫度。

以往的研究中指出，污染物在土壤中電遷移的速率會因電流密度、土壤質地粗細、污染物濃度及總離子濃度等因子而改變(袁菁，翁誌煌，江姿幸，2002)。

4. 電泳

當帶電膠體粒子受到外加電場的影響，帶電固體表面相對於電解液運動。如圖 8 所示，帶正電的膠體粒子存在於電解質溶液中，受到外加電場的作用而向帶負電的極板移動，此種膠體粒子的運動稱之為電泳運動(劉永章，1998)。但因為土壤中孔隙非常小，土壤中顆粒並不容易被移動，故於土壤系統中電泳現象並不明顯。

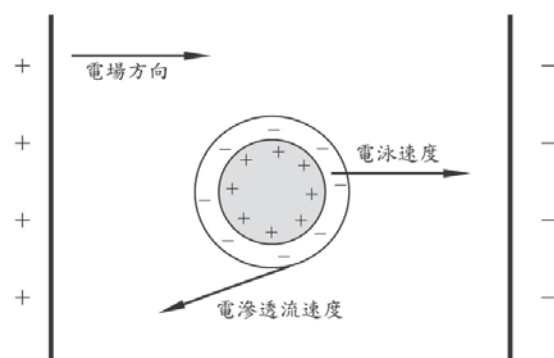


圖 8、電泳作用示意圖(劉永章，1998)

電動力法可應用於低滲透性污染場址之現地或離地整治，該法被美國環保署認可為整治地下層有關 DNAPLs 污染之黏質土壤場址可行技術之一。現地電動力復育技術係在污染土壤中將電極安裝至其中，通以較低之直流電壓於其中，使其產生離子、粒子與水的移動，當液體流經帶電量較多之介質時，即產生電動現象，將土壤及地下水重金屬或其他污染物加以驅動移除如圖 9 所示。

電動力整治技術具有以下優點：(1)能於現地將污染物由污染介質中去除；(2)不受污染物種類限制；(3)可有效控制電滲透流之流向；(4)高移除效率及具安全性；(5)對於低滲透性之土壤其處理效果亦十分顯著；(6)具有與其他整治技術搭配之彈性(陳呈芳，2008)。

於土壤中主要污染物的傳輸機制是：(1)孔隙流體電滲透運動，一般是從陽極朝向陰極；(2)離子和離子的電遷移運輸，朝向相反電荷的電極孔隙流體；(3)電泳運輸，帶電膠體朝向相反電荷的電極孔隙流體；(4)以擴散方式的化學運輸，利用濃度梯度關係(Reddy et al., 2010)。

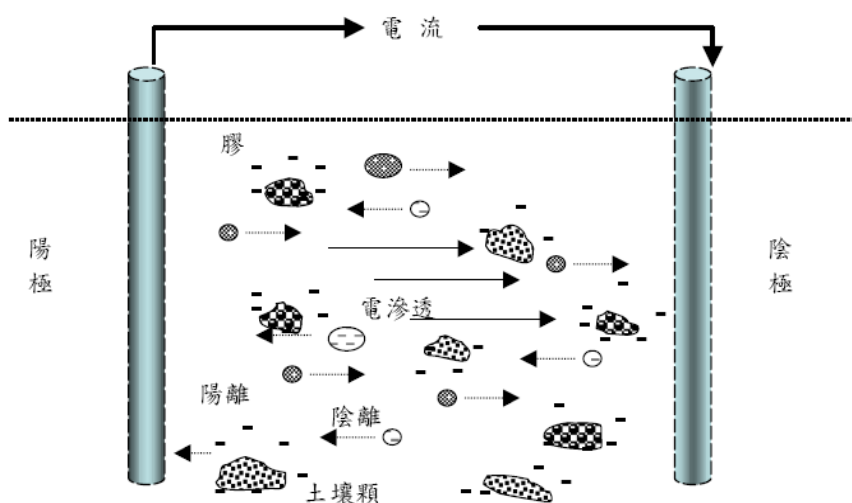


圖 9、電動力整治原理示意圖(陳呈芳，2008)

2.4 電動力技術用於處理重金屬污染土壤之研究-實驗尺度

電動力技術對於土壤受重金屬污染的復育有相當多的研究，而對於處理土壤中八大重金屬之研究也不少，除了處理汞金屬污染之整治只有較少數之研究。電動力技術去除土壤中重金屬污染之成效，由表 6 可知一般而言處理重金屬之效率也頗佳，基本去除效率皆有 50~60%以上。但大部份無法再提升去除效率的原因，係由於靠近陰極端，在電動力進行時，陰極因電解反應會產生 OH^- ，而與金屬陽離子產生沉澱，進而造成阻塞。

表 6 中，Yuan and Weng., (2006)研究指出，使用 Citric acid 作為操作流質時，可中和陰極的鹼性，阻止 OH^- 濃度過高造成沉澱量過大，因此，使用操作流質為 Citric acid 時，可提升去除效率，且最高可達到 78%。但如果過酸會造成逆流現象的發生，使電動力機制裡的電滲透流改變方向而與主要去除機制的之電子遷移方向相反，導致污染物停滯在土壤中間而無法移動，相對也造成去除效率無法提升。

Do-Hyung Kim et al.,(2009)研究指出，他們將污染土先以硝酸洗過，然後使用醋酸作為操作流質，讓整個土壤之 pH 值在酸性範圍內，卻造成土壤表面帶電由負變正，而土壤表面帶正電會使得電滲透流之方向改變，而形成一股阻力，所以去除效率最高也才 40%左右。

近年來，電動力技術運用於處理土壤中重金屬，但當電動力結束後卻會使 pH 值波動很大，原因來自於水的電解反應。雖然控制 pH 值這類之研究在近期已經漸漸被注視，研究也慢慢增多，但是大部分都是研究將 pH 值控制於酸性或鹼性範圍，甚少在同一篇中將 pH 值控制在酸性和鹼性範圍來做比較。因此，這是值得我們去探討的。

2.4.1 電動力法整治鋅、鎳污染之土壤

如表 6 中，Kim et al.,(2009)研究指出，他們將污染土壤先以硝酸洗過，然後使用醋酸作為操作流質，使整個土壤之 pH 值控制在酸性範圍內，卻造成土壤表面帶電由負變正，而土壤表面帶正電會使得電滲透流之方向改變，而形成一股阻力，所以去除效率最高只能達到 40%左右。

2.4.2 化學試劑配合電動力整治銅污染紅土

如表 6 中，Zhou et al.,(2004)指出，使用 HAc-NaAc(pH = 2.6-3.6)、Lactic acid+NaOH(pH = 3±0.05)，處理銅污染土壤的去除效率分別為 65%及 81%。

2.4.3 電動力試模整治銅污染紅土

如下表 6 中，由 Zhou et al.,(2006)研究中發現，以中試規模電動力整治 700 kg 遭受銅污染之紅土，整治時間為 140 天，並提供一穩定電壓為 80 V，於陰極電解液中加入 0.05 M 的乳酸，達到調整槽液之 pH 值及作為增益劑(乳酸對銅金屬具有增溶之效果)與土壤中的 Cu 絡合後去除，加入乳酸後槽液 pH 值的下降趨勢只在 0.1 至 1.6 個單位，亦即達到控制 pH 值之目的，結果顯示，在 140 天的整治後，去除效率可達 76%。

近幾年來，電動力技術運用於處理污染土壤中的重金屬，但當電動力整治結束後往往造成 pH 值有大幅度的波動，其因係來自於水的電解反應。雖然控制 pH 值之研究在近期已漸漸被重視，且目前針對 pH 值控制之研究也漸漸增多，但大部分研究僅探討局部控制 pH 範圍，無法究得全貌，有必要針對 pH 值影響進行深入了解。

表 6、電動力復育技術應用於處理重金屬污染土壤彙整表

| 污染物 | 操作流質 | 操作條件 | 重要結果 | 文獻 |
|----------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|------------------------|
| Cu Zn | DI water | 電壓：10、20、40V 處理時間：960、554 hrs | 使用不同操作流質(DI water、Lactic acid、Lactic acid+CaCl ₂) 且不同電壓(10、20、40 V) | Zhou et al., (2005) |
| | Lactic acid | 此試驗使用 Lactic acid 添加在陰極，中和氫氧根離子以達到控制 pH 值的目的。 | 使用 DI water 作為操作流質時，Cu 去除效率為 6-8 %，Zn 去除效率為 21-44 %，兩者皆屬電壓為 10 V 時最佳。 | |
| | Lactic acid+CaCl ₂ | | 不過，Cu 和 Zn 去除率最高時是使用 Lactic acid+CaCl ₂ 達 69 %、66 %。 | |
| Cu | DI water | 電壓：20V、40V 處理時間：900 hrs | HAc-NaAc+EDTA、Lactic acid+NaOH) 且不同電壓(20、40 V) | Zhou et al.,(2004) |
| | Acetic acid - sodium acetate | 使用 HAc-NaAc、Lactic acid+NaOH 之緩衝液添加至陰極槽以控制 pH 值。 | Cu 的去除率介在 50-81 %，以 Lactic acid+NaOH，40 V 作為操作流質最佳。 | |
| | Acetic acid - sodium acetate +EDTA Lactic acid+NaOH | | | |
| Pb Cd Cu | NTA(Nitrilotriacetic acid) DTPA(Diethylenetriamine pentaacetic acid) EGTA(Ethyleneglycol tetraacetic acid) | 電壓：22V 處理時間：552hrs 試驗中使用 HAc 或 NaOH 以清洗土壤的方式，調整 pH 值 | Pb 去除效率皆小於 20% Cd 去除效率範圍為 65-95% Cu 去除效率範圍為 15-60% 使用 NTA 作操作流質為最佳。 | Giannis et al., (2009) |

表 6、電動力復育技術應用於處理重金屬污染土壤彙整表(續)

| 污染物 | 操作流質 | 操作條件 | 重要結果 | 文獻 |
|-----|---------------------------------|-----------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|------------------------------|
| Cr | Tap water SDS Citric acid | 電位坡降：1.25 V/cm 處理時間：5 days | 使用不同操作流質(TW、SDS、CA) Cr 之去除效率為 | Yuan and Weng., (2006) |
| Cu | | | 29-53% | |
| Ni | | | Cu 之去除效率為 35-43% Ni 之去除效率為 60-78% | |
| Pb | | | Pb 之去除效率為 11-59% Zn 之去除效率為 21-67% | |
| Zn | | | 以上五種金屬使用 CA 為操作流質時效果最佳。 | |
| Cu | Nitric acid | 電流密度：1.5、2.9、5.9 mA/cm ² 處理時間：15 days | 不同電流(1.5、2.9、5.9 mA/cm ²) Cu 之去除效率為 32-65 % | Buchireddy et al., (2009) |
| As | | | Cr 之去除效率為 57-72 % | |
| Cr | | | As 之去除效率為 35-77 % | |
| | | | 使用電流為 5.9 mA/cm ² 效果為最佳。 | |
| Cu | 0.05 M Lactic acid | 電壓：80 V 處理時間：140 days | 於操作流質添加 Lactic acid 後之移除效率可達 76%。 | Zhou et al., (2006) |

表 7、電極種類及設計對於處理效能影響彙整之文獻

| Type of electrode | Pollutants | Operation parameters | Summary results | Literatures |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|
| Anode : Graphite(6.0cm×0.5cm, D×L) Cathode : Graphite(6.0cm×0.5cm, D×L) | Total petroleum hydrocarbon(TPH) | Processing fluid : β -CD Power supply : 200V/m pH : 8.2 ; Duration : 10 days Initial concentration : 78.6 mg/g | pH : 8.2→6.4 concentration(mg/g) : 78.6 removed reach to 48.4 | Wan et al.,(2011) |
| Anode : Titanium hollow tubes(2.54 cm×0.9 m, D×L) Cathode : Stainless steel(3.2 mm× 5.2 cm× 3m) | Heavy metal (Cr、Cd) | Processing fluid : citric acid Power supply : Day1-20 60V, Day20-118 45V pH : 4-9 ; Duration : 118 days Initial concentration : Cr 180-1000mg/kg Cd 100-500mg/kg | pH : 8.2→2 以下 concentration(mg/g) : Cr can removed reach to over 50%, Cd can removed reach to over 50% | Larson et al.,(2004) |
| Test I : Iron stick (5 cm × 150 cm, D×L) | Nitrate from greenhouse soil | Processing fluid : Fertilizer ($\text{KNO}_3 : \text{NH}_4\text{NO}_3 = 1 : 1$) Power supply : 1-5A ; pH : 7.8 Initial concentration : 27,985mg/kg Duration : 54 days | Concentration(mg/g) : nitrate can removed reach to over 90% | Lee et al.,(2011) |

表 7、電極種類及設計對於處理效能影響彙整之文獻(續)

| Type of electrode | Pollutants | Operation parameters | Summary results | Literatures |
|------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|-------------------------|
| Test II : Iron stick (5 cm × 80 cm, D×L) | Nitrate from greenhouse soil | Processing fluid : Fertilizer (KNO ₃ : NH ₄ NO ₃ = 1 : 1) Power supply : 1A ; pH : 7.1 Initial concentration : 15,489mg/kg Duration : 64 days | Nitrate can removed reach to 70% | Lee et al.,(2011) |
| Iron stick (0.2 cm × 70 cm, D×L) | Heavy metal (Pu) | Processing fluid : 0.04M Citric acid Power supply : 60V ; pH : 6-6.5 Duration : 60 days | Removed reach to less than 0.4 Bq/g<1.7 Bq/g | Agnew et al.,(2011) |
| Stainless steel (6 cm × 75 cm, D×L) | Heavy metal (Cu) | Processing fluid : 0.05M Lactic acid Power supply : 80V ; pH : 4.8 Initial concentration : 829 mg/kg Duration : 140 days | Removed when added lactic acid can reach to 76% | Zhou et al.,(2006) |
| Anode: Stainless steel/Ir Cathode:Stainless steel (5 cm × 7.5 cm, D×L) | Heavy metals (Hg) | Processing fluid : 0.1M KI Power supply : 52V ; pH : 8.5 Initial concentration : 1000 mg/kg Duration : 15 days | Removal efficiency can reach to 35%. | Rubio et al., (2011) |

2.5 電動力技術用於處理重金屬污染土壤之研究-實場尺度

電動力法之優勢以及特色在於可以針對處理不同種類污染物、處理土體體積等操作參數改變電極設計之尺寸及種類之應用，電極一般分為三種，金屬電極、惰性電極以及複合電極(Yuan., 2000)，而針對現地模組處理土壤體積的量設計所需使用電極尺寸。其中最常被使用之電極為金屬電極及複合電極，這是因其擁有較多之自由電子，例如碳棒電極之碳纖維擁有吸附能力使污染物聚集在電極表面後收集去除，達到去除之效果。。

2.5.1 荷蘭電動力整治場址案例-Haagse Hogeschool

場址位於荷蘭海牙，原為製造木材加工及輻射器之製造工廠，受二氯乙烯類(dichlooretheen, Cis)及氯乙烯(Vinylchloride, VC)之污染，土壤僅表土受到污染，地下水則發系高濃度之 Cis 及 VC。目前進行整治中，預計三年完成，並已改為學校用地，參觀當日之學生活動照常，BioSoil 於校園設置一間監測中心，定期收取監測數據(ORP, voltage, 槽液 pH 值等)。

此處採 in-situ Electro-Bioreclamation 進行整治，共設立 38 根電極及 20 口 extraction well(如圖 10)，深度至 7.5m 處，Extraction well 於 3~7m 開篩(與場址地下水位有關)。

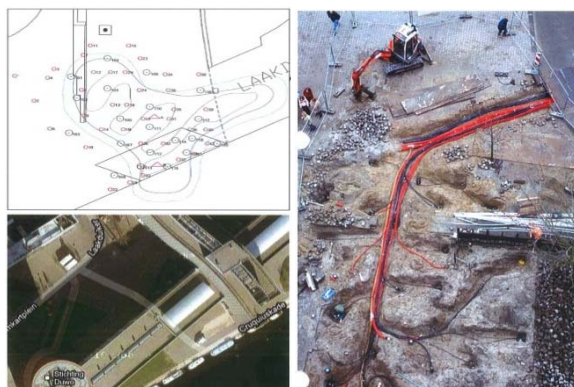


圖 10、荷蘭海牙校園整治場址電動力裝置設立圖

2.5.2 荷蘭電動力整治場址案例-Resident Area

本場址位於荷蘭海牙，原為氣體製造工廠，土壤污染物為 CN-，周遭即為住宅區，其形成之 CN-(g)對附近居民影響甚大。電動力技術採用鹼液作為操作流質，並於土壤、地下水監控 CN-濃度及空氣中嚴格監控 HCN 氣體，迄今尚未檢出 HCN(g)。此處採 in-situ Electro-Bioreclamation 進行整治，所採用之電位坡降小於 1.0 V/cm，電極尺寸為 12cm(ϕ) \times 400cm(L)，電極及線路置放於 PVC 管中再置於不飽和層中，安裝過程中需注意不可干擾家庭電路，以維安全經過數年整治，大部分 CN-已清除，目前仍在整治中。電動力裝置設立圖如圖 11 所示。



圖 11、荷蘭海牙住宅區整治場址電動力裝置設立圖

電動力整治裝置即裝設於住宅區人行道及住家門口(如圖 12)，外觀上僅看到多個約 15cm × 15cm 之方形孔蓋，與地表齊平，若非標識顏色，無法分辨其為整治設施，監測管線連接至附近監控中心，BioSoil 工程師定期至現場採樣及瞭解現場情形。住戶亦能接受整治工法之進行，絲毫不影響其既有之家居生活及活動。



圖 12、荷蘭海牙住宅區電動力裝置(a)住家門口；(b)人行道；(c)電極孔

2.5.3 荷蘭電動力整治場址案例-Gas Station

本場址位於荷蘭海牙，現址為加油站，目前正營運中。土壤污染物為礦物油(mineral oil)及芳香烴碳氫化合物(aromates)。此場址早期曾經開挖處理，然在 3.5~5m 深處仍發現殘留污染物，礦物油濃度達 5,700mg/kg，地下水亦遭受污染。

本場址係採生物處理為主，電動力技術係輔助污染物移動，使之接觸微生物，進而提升降解率。本場主要控制氧量、營養鹽之加入量，以維處理效率。電動力裝置設立圖如圖 13 所示。

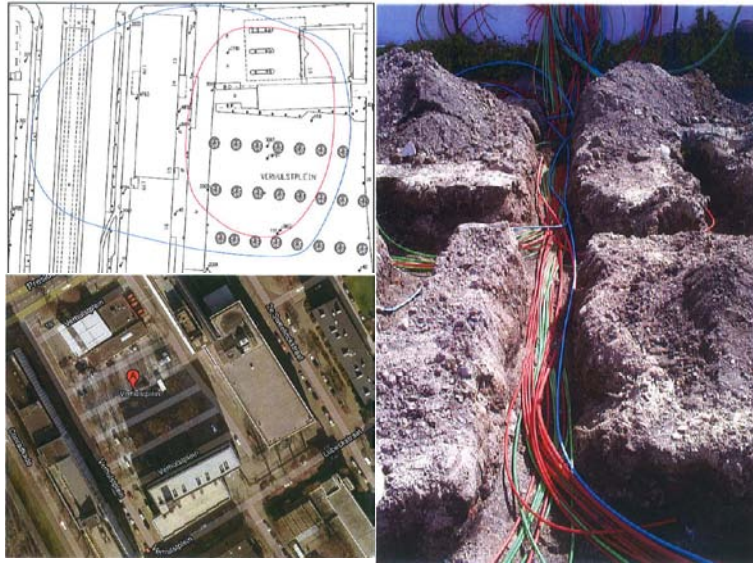


圖 13、荷蘭海牙加油站整治場址電動力裝置設立圖

2.5.4 多重電極模組系統整治石化污染場址

Wan et al., (2011)研究中陰陽極皆使用碳棒(Graphite)電極(電極尺寸設計如表 3 所示)，將陰極置於中心部分，六支碳棒電極圍繞著陰極擺放如圖 14 所示，採用 β -CD 為電解質，進行對總石油碳氫化合物(TPH)污染土壤的整治，因其 β -CD 對石油污染性化合物有增溶效果，結果顯示可將總碳氫化合物從 78.6 mg/g 降至 48.4 mg/g。

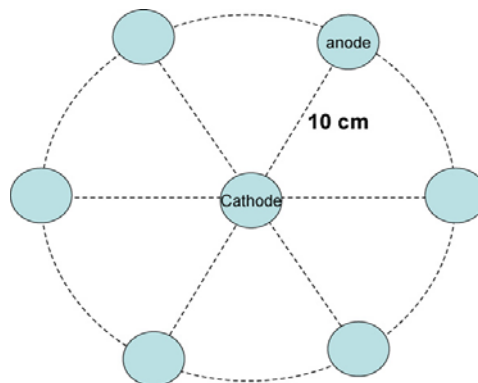


圖 14、電動力整治模組電極示意圖(Wan et al., 2011)

2.5.5 電動力萃取技術 Cr 及 Cd 之研究

Larson et al., (2004)試驗中以不鏽鋼棒為陰極，而陽極需在高腐蝕條件下運行，利用鈦空心管於外層鍍上鉍氧化物為陽極電極(電極尺寸設計如表 7 所示)，研究中為去除土壤中含 Cr 及 Cd 之重金屬，並利用檸檬酸為其電解液，總運行天數為 118 天，初始電壓為 60 V，但因其高電壓下較難以控制 pH 值，因此可能使陽極

槽液過酸導致電擊溶解，所以在第 20 天後將電壓降至 45 V，配合作為增益劑的檸檬酸加入後，在 118 天的整治下 Cr 及 Cd 金屬的去除率皆可達到超過 50% 以上。

2.5.6 電動力法消除硝酸鹽之實場研究

Lee et al., (2011) 研究中以 PVC(聚氯乙烯)包覆鐵管電極(電極尺寸設計如表 7 所示)，並於其上留有小縫隙以利操作流質流入，且防止土壤之滲入，以利進行硝酸鹽污染土壤整治動作如圖 15；於現地污染場址 Test II 之陰極電極被安置於兩支陽極電極之間，且陰極所埋深度要比陽極深 10 cm，此設計是為了增加電位坡降和引導產生電滲透流；Test I 在 1~5 A 的電流供應下，經過 54 天試驗後硝酸鹽去除率可達 90% 以上，而在 Test II 於 1 A 的穩定電流供應下，經過 64 天試驗後整體去除率可達 70%。

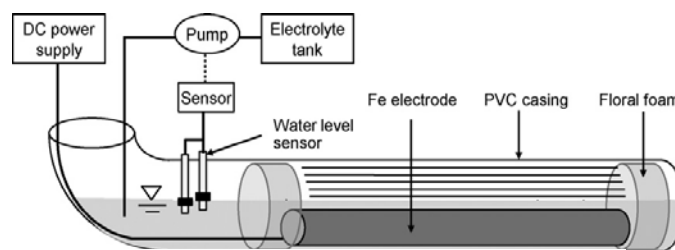


圖 15、電極模組示意圖(Lee et al., 2011)

2.5.7 電動力法修復核廢料銻污染之實場研究

Agnew et al., (2011) 研究中以鐵棒為電極(電極尺寸設計如表 7)，使用 0.04M 的檸檬酸為電解液，利用檸檬酸係因其為食用有機酸，較不易造成環境之影響，所以選用檸檬酸為操作流質，並在 20V 的直流電源供應下，經過 50 天的運行試驗，可有效將銻(Pu)金屬降至 0.4 Bq/g 符合環境容許最小值 1.7 Bq/g。

2.5.8 電動力法移除六氯苯和銅之混合污染紅土之實場研究

Zhou et al., (2006) 試驗中欲去除銅污染紅土，以不鏽鋼棒為電極(電極尺寸設計如表 7)，於電解液中加入 0.05M 的乳酸，幫助調整槽液之 pH 值以及作為一增益劑與土壤中的 Cu 絡合後去除，加入如酸後槽液 pH 值下降只在 0.1 至 1.6 個單位，亦有達到控制 pH 值之目的，最後結果顯示，在 140 天的整治後，去除效率可達 76%。

2.5.9 應用電動力技術處理射擊場重金屬污染土壤之異地整治

Lee et al.,(2012)應用電動力技術於土壤中整治一韓國某射擊場造成之重金屬 Cu、Pb 污染場址（圖 16）之處理。

圖 17 為實場整治系統外觀及電極擺放設計之照片，圖 17A 為實場整治之外觀，左邊之桶槽則為操作流質配置桶及陰陽極出流收集桶，圖 17B 則為電動力系統之電極擺設設計，陰陽極以六角形陣列方式排列，電極間距為 100 cm，電極置放槽體長度為 150 cm，污染土壤深度則為 100 cm。



圖 16、實場整地照片；(A)原廠址；(B)整地中；(C)污染土壤過篩；(D)實場當地工寮(Lee et al.,2012)

圖 18 為此現地整治場址中土壤 Pb、Cu 濃度空間分布圖，在經過 80 天的整治時間後，圖 18A 及 18B 分別為 Pb、Cu 之污染濃度分布，去除效率分別為 Pb：63.8±12%、Cu：39.5±35%。

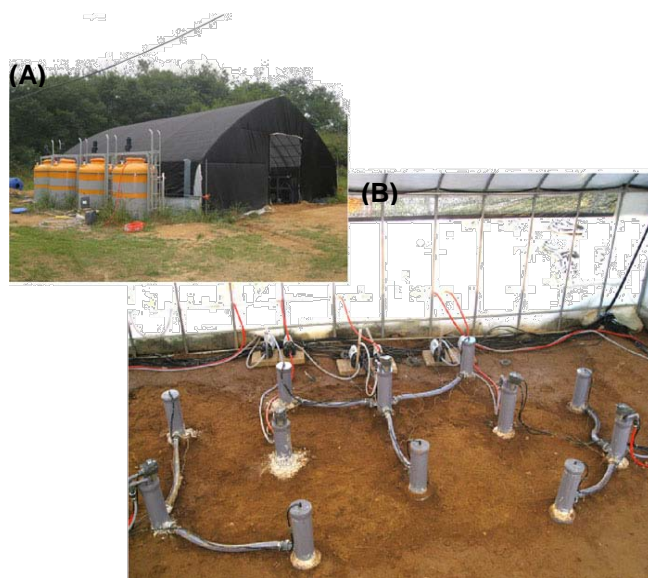


圖 18、實場整治照片：(A)電動力系統外觀；(B)電極擺放位置(Lee et al.,2012)

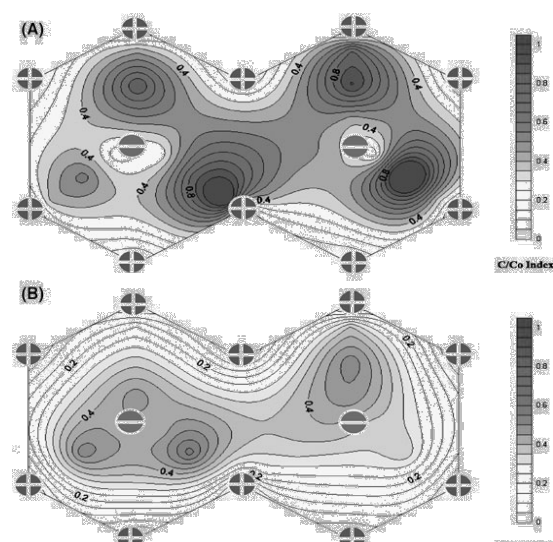


圖 17、現場應用土壤鉛和銅的標準化濃度的空間分佈(A)Pb；(B)Cu(Lee et al.,2012)

2.5.10 電動力整治-於阿爾瑪登進行一適用於此污染之汞型態研究

Rubio et al., (2011)研究一阿爾瑪登採礦區冶金廠之污染土壤，土壤特性如表 8，表中可看出此土壤有機物含量較低(1%)，是一呈現弱鹼性且含有碳酸鹽之土壤性質，並呈現一中低陽離子交換容量特性(類似高嶺土)，其水力傳導係數也要

低於一般砂質壤土。從上述可得知，因此電動力技術要比其他技術適用於此土壤污染中，而主要污染物為汞及鐵。

表 8、土壤基本性質(Rubio et al., 2011)

在此研究試驗中初始電壓為 52 V 隨著實驗進行最後降至 7 V，並利用 0.1 M KI

| Particle size distribution (%) | | Total concentration (mg/kg) | |
|---------------------------------------|----------------------|-------------------------------|-------------|
| Sand | 64.6 | Hg | 6100±800 |
| Silt | 30 | Fe | 45,900±1700 |
| Clay | 5.4 | Zn | 96±10 |
| Specific gravity (g/cm ³) | 2.24 | Cu | 31±8 |
| Porosity (%) | 36 | Pb | 29±5 |
| Tortuosity | 0.71 | Cd | 0.60 |
| Hydraulic conductivity (cm/s) | 2.1×10^{-6} | As | 17 |
| Organic matter (%) | 0.960 | SO ₄ ²⁻ | 92±6 |
| pH (distilled water) (1/2.5, w/w) | 8.5 | CO ₃ ²⁻ | 68,000±4000 |
| CEC (cmol/kg) | 14.0±1.2 | | |
| Humidity (%) | <1 | | |

為操作流質之系統整治，15 天的整治時間，汞與整治期間形成負離子之絡合物 (HgI_4^{2-} 、 HgI_3^-)，於陽極中 Hg 之去除效率可達 35%，陰極則為 0.4%。此研究之電動力系統為(圖 19)中型圓柱狀試模，試模之尺寸為直徑 8 cm，長 20 cm，電極為圓盤狀電極，電極尺寸為直徑 5 cm，長 7.5 cm，並在電極中間置入一長度 4 cm 之鐵棒連接供應電源，而於陽極電極表面塗佈氧化物防止其氧化，陰極則為不鏽鋼電極，操作流質則為 0.1 M KI，模組製作圓柱狀之主要原因為：(1)可使填土較為便利，且可避免氣泡之生成並增加其水利傳導係數；(2)利於實驗結束後之下架拆卸，且可做橫向切片利於後續實驗分析。

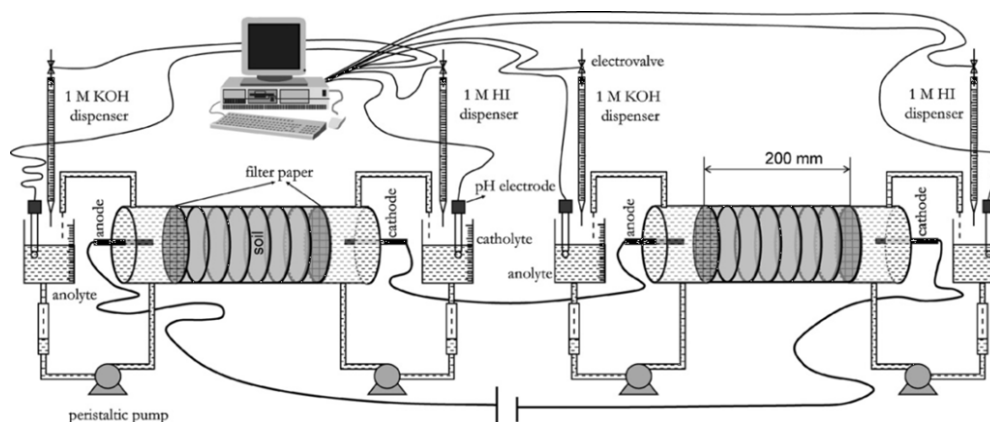


圖 19、電動力系統設計圖(Rubio et al., 2011)

第三章 研究方法

3.1 研究架構

本研究將於規劃第一代三維現地模場，並與環工設備公司洽商，討論現地試模設計藍圖之規劃，並針對所需使用之設備及監測儀器等做完整設計及擺放位置之規劃，以能完成三維現地模組之設立。研究架構如圖20所示。

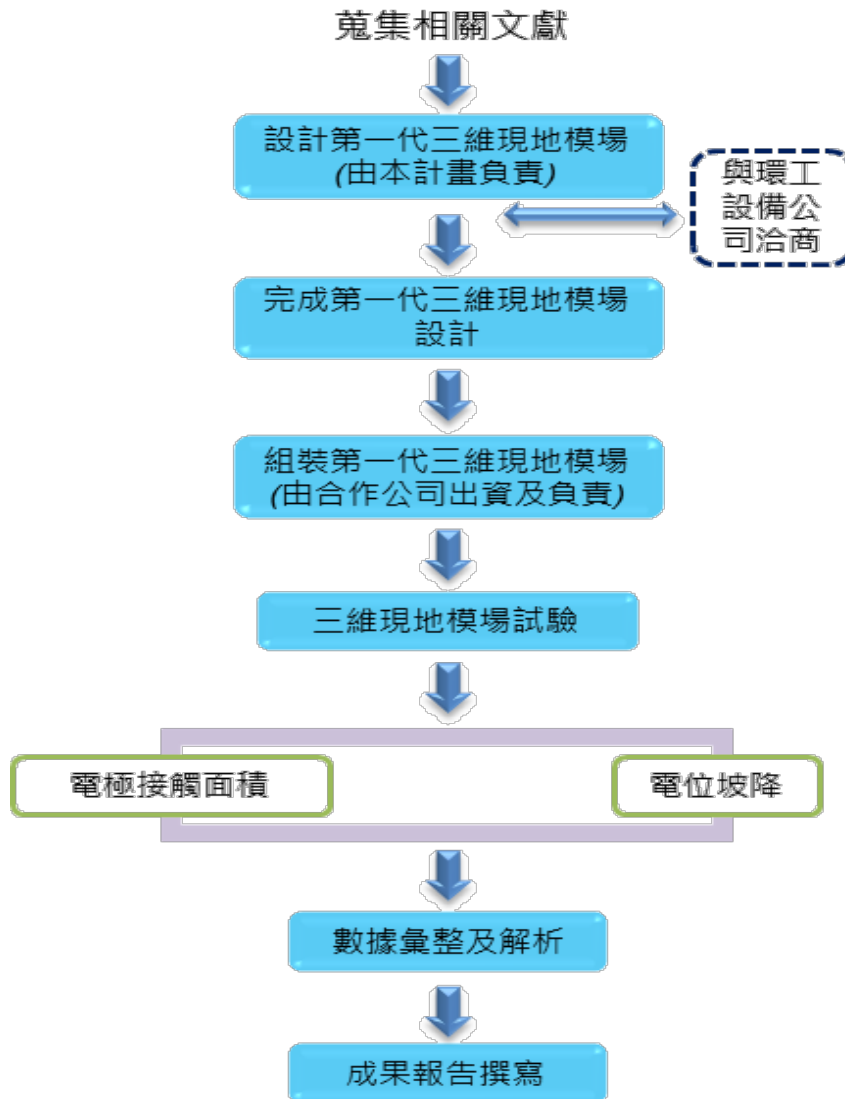


圖 20、研究架構圖

本研究將利用三維現地模組針對電極接觸面積及電位坡降等實場操作參數對污染物去除率之影響，以了解其去除效率，進而討論其可行性，建立最佳操作參數。

3.2 實驗儀器及設備

1. pH meter：Denver Instrument Company Model220，USA。
2. 精密電子天平：AND GR-200，10 mg-210 g，Japan。
3. 精密電子天平：AND GF-2000，0.5-2100 g，Japan。
4. 感應耦合電漿原子發射光譜儀(ICP)：Perkin Elmer Optima 2000DV，USA。
5. 微波消化

3.3 土壤 pH 值分析程序

在實驗中期及實驗結束後，必須採集其整治土壤之樣品，並分為75個區塊，利用pH值分析技術以確立土壤pH值之改變。詳細步驟如下所述：

1. 取10 g土壤樣品至燒杯中。
2. 加入10 mL DI water至燒杯中，均勻攪拌。
3. 利用pH meter量測pH值。

3.4 土壤殘留濃度分析程序

在實驗中期及實驗結束後，必須採集其整治土壤之樣品，並分為75個區塊，利用微波消化將土壤中重金屬移出，再利用ICP進行分析，由此得知重金屬在土壤。詳細步驟如下所述：

1. 取1 g之土壤樣品至消化管中。
2. 加入5 mL氫氟酸、20 mL(5%)之硼酸及5 mL之硝酸至微波消化管中。
3. 將微波消化管制於消化機中以每支110 rpm及180 °C下旋轉消化30分鐘。
4. 取出消化管再加入15 mL之硼酸，再置入微波消化機中旋轉消化30分鐘。
5. 取出消化管後過濾，即可進行ICP進行分析。

3.5 序列萃取

於序列萃取部分，因本實驗之土壤主要污染物為 Cu 金屬，所以在序列萃取部分只針對 Cu 金屬做分析，以下為序列萃取實驗步驟。

使用不同萃取劑萃取 Cu 與土壤不同建結型態，分別以 1 MMgCl₂、1 M 醋酸鈉、0.04 M NH₂OH · HCl、25%醋酸、0.02 M HNO₃、和 30% H₂O₂ 萃取出交換態(exchangeable)、碳酸鹽鍵結態(carbonate-bound)、鐵錳氧化物鍵結態(Fe-Mn oxide bound)、有機物鍵結態(organically bound)、殘留態(residual)。

1. 取1 g土壤樣品至離心管加入1 M MgCl₂ 8 mL(pH=7)於室溫下震盪

60min(往復式震盪機，震盪頻率 130 次/min，振幅2.5 cm)，取出後於離心機中以3000 rpm離心45 min後取出上層液。

2. 加入8 mL(1M)醋酸鈉(pH=5)，於室溫下震盪300 min(往復式震盪機，震盪頻率 130 次/min，振幅2.5 cm)，取出後於離心機中以3000 rpm離心45 min後取出上層液。
3. 加入20 mL(0.04 M) $\text{NH}_2\text{OH} \cdot \text{HCl}$ 、25%的醋酸(v/v)，於85℃下震盪300 min(往復式震盪機，震盪頻率 130 次/min，振幅2.5 cm)，取出後於離心機中以3000 rpm離心45 min後取出上層液。
4. 加入3 mL(0.02 M) HNO_3 ，和5 mL(30%)的 H_2O_2 ，於85℃連續攪拌120 min後再加入3 mL的(30%)的 H_2O_2 ，於85℃下震盪180 min(往復式震盪機，震盪頻率 130 次/min，振幅2.5 cm)，冷卻後加入5 mL 的 HNO_3 ，於室溫下震盪30 min(往復式震盪機，震盪頻率 130 次/min，振幅2.5 cm)，取出後於離心機中以3000 rpm離心45 min後取出上層液。
5. 微波消化後過濾，利用ICP分析。

3.6 現地三維模組初步設計

本研究於3月初完成現地三維模組初步之設計，包括了模組尺寸、土壤來源、電極之製備、操作流質、監測系統、出流回收、電極放置位置及實驗結束後之清理動作等等，初步構思圖如圖21所示。以上初步設計步驟皆模擬實驗操作完整流程進行逐一細項討論，並將之分為前處理、實驗進行中及實驗後三大部分，再與環工公司洽商討論後確立問題並解決。於最初三維模組之尺寸設計為1 m × 1 m × 1 m，而為了根據陰陽兩極槽槽體的設計及為探討電極距離參數影響的原因，

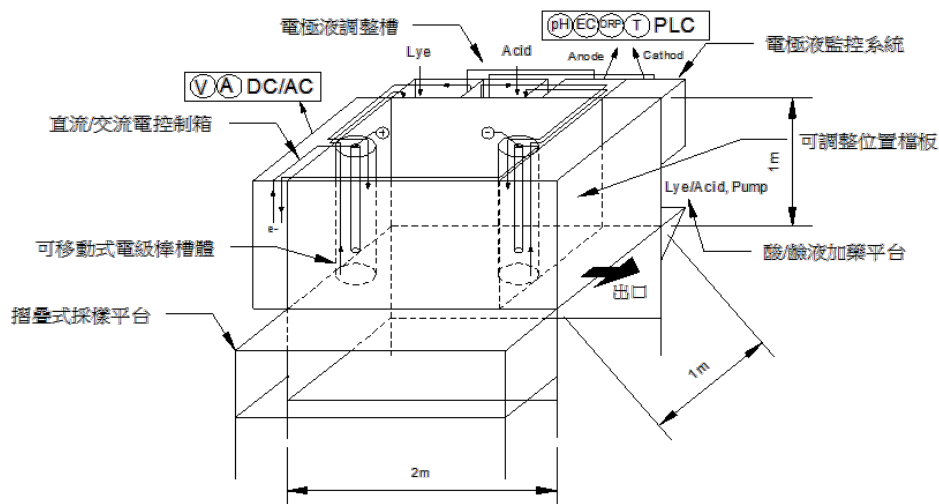


圖 21、第一代三維現地模場初步構想圖(重金屬污染場址)

長度將可能設計為可彈性調整長度之方式，初步設計細節將依據上述所提，分為前處理、實驗進行中及實驗後三大部分提出討論及說明。

3.6.1 前處理規劃考量因素

於此實驗運行前之考量因素視為前處理考量因素，如：污染土壤之來源或配置方法、初始汙染濃度分析、污染土壤填入試模之方式等前置作業之問題。詳細處理流程如下所列，並針對問題逐一敘述：

1. 實驗之污染土壤配置方法及將土壤均質後進行初始濃度採樣分析。
2. 污染土壤將以人工或小怪手配合人工之方式將污染土壤填入試模中。
3. 土壤孔隙率控制：為模擬現地土壤孔隙率，需做夯實動作。
4. 土壤飽和：設計一大型圓桶盛裝操作流質，並設計水位監控系統及補充槽液保持水平之高度。
5. 電極放置形式：槽體上蓋設置固定孔洞，利於電極插入以及達到固定之作用。

3.6.2 實驗執行考量因素

於此實驗執行中之考量因素視為實驗執行考量因素，如：監測系統之建立、操作流質補充系統之建立及初流回收系統之建立等執行作業之問題。詳細處理流程如下所列，並針對問題逐一敘述：

1. 監測系統之建立：在實驗操作運行時，必須監控pH值、導電度、溫度、氧化還原電位、電流密度及通過土體電流值，並與電腦連結後自動記錄於電腦中，以利於實驗後數據之紀錄。
2. 操作流質補充系統之建立：於實驗運行中會因電滲透流之緣故導致槽液的減少，故必須建立補充系統做定期補充操作流質之動作。
3. 電滲透流通暢性：於實驗進行中為使土壤反應槽及電極槽之電解液及電滲透流可順利流通，並且避免土壤之滲漏情形發生，而於檔板上設有孔洞之設計。
4. 出流密閉回收系統之建立：於實驗進行中會因電滲透流之緣故，必須收集陰陽極出流液體，且因其槽液可能因為氧化還原反應而形成強酸或強鹼之環境，固為安全著想需設計採用密閉式回收系統收集。
5. 槽液pH值控制系統之建立：於實驗進行中因氧化還原反應產生之 H^+ 及 OH^- ，可能造成土體之阻塞情形發生，進而造成電滲透流難以在土體間流動，導致污染物去除效率降低，因此需建立槽液pH值控制系統；此

外槽液pH值可能偏強酸或偏強鹼，進而對電極造成腐蝕作用。

6. 溫度及土體電流量測：實驗運行中量測土壤溫度及土壤通過電流之情形，將土壤分成上中下三層，每層30 cm，分成9塊量測溫度圖22(a)，從而得知室溫與土體溫度之差異；圖22(a)中由陽極往陰極方向分為三等份，插入三支不銹鋼棒為量測電流部分，從而推測土壤是否有阻塞現象發生(如圖22a)
7. 採樣設計系統之建立：實驗運行中將會進行一次中期採樣動作，為使採樣有效性故設計之採樣方式為，將土壤分為上、中、下三層，每層30 cm 分成25塊(如圖22b)，於每塊土壤中間部分進行採樣動作。(採樣孔設計如圖23所示)

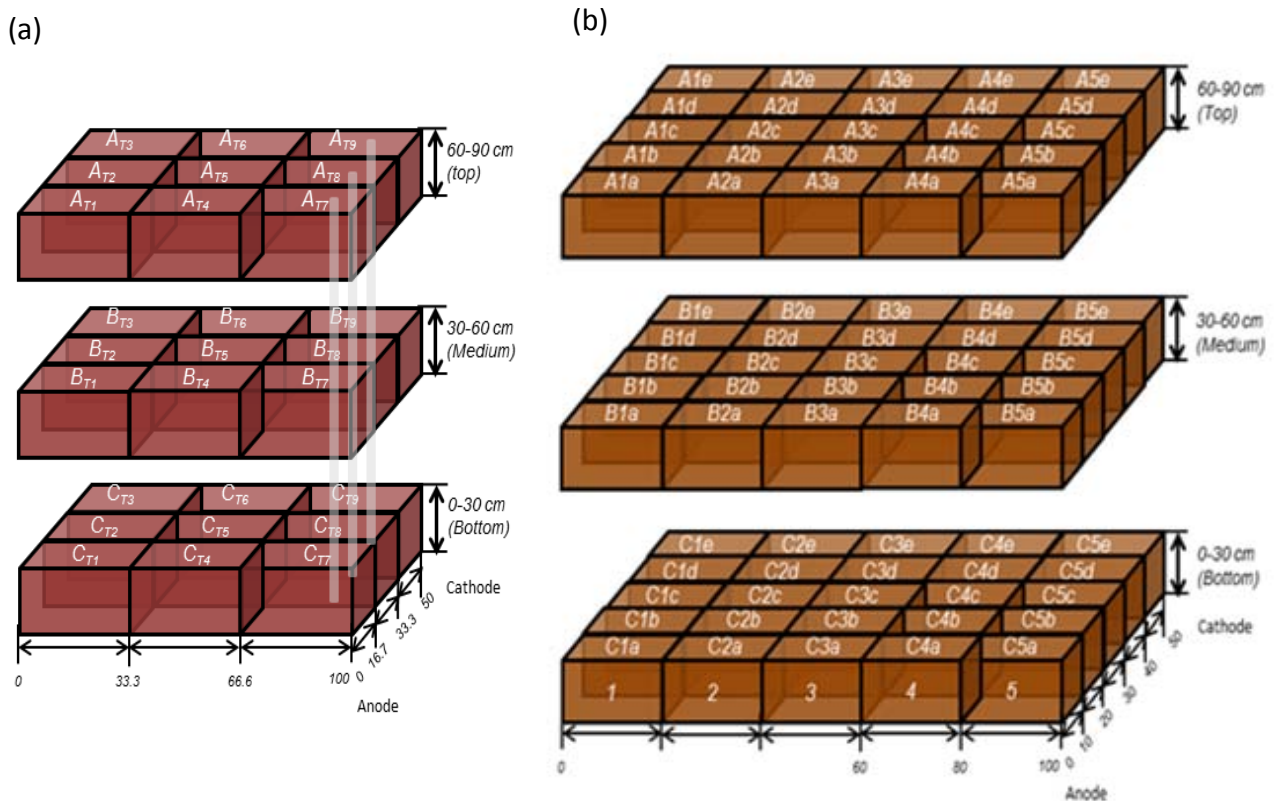


圖 22、(a)土壤溫度及電流量測示意圖；(b)第一代三維現地模場土壤採樣示意圖；(A:top layer；B:middle layer；C:bottom layer)

3.6.3 實驗完成後續考量因素

於此實驗完成後之考量因素視為實驗完成後續考量因素，如：電極回收再利用、實驗後之土壤處理及現地試模及器具之清洗等執行作業之問題。詳細處理流程如下所列，並針對問題逐一敘述：

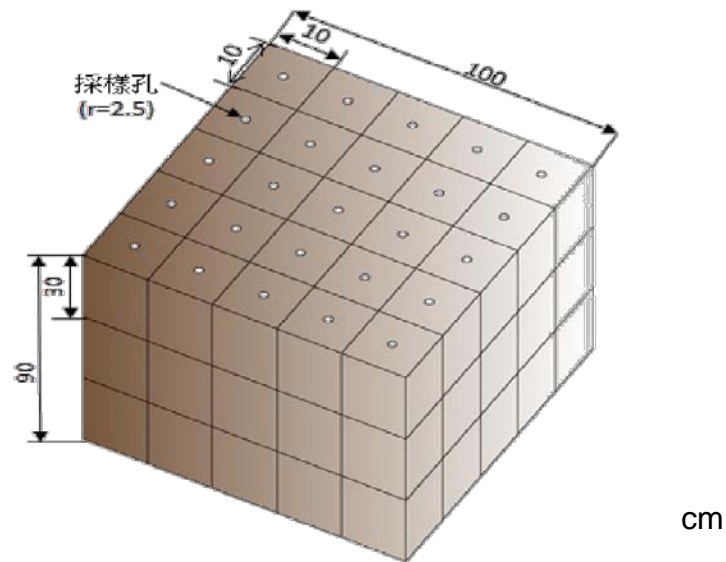


圖 23、第一代三維現地模場採樣孔設計示意圖

1. 電極回收再利用：實驗結束後之電極利用大量清水清洗處理後應可於下次實驗中重新使用，亦或視為大型回收垃圾回收。
2. 實驗後之土壤處理：實驗結束後之土壤將利用小怪手配合人工方式移出試模，並利用太空包裝袋。
3. 現地試模及各器具之清洗：於實驗完成並將土壤移出後將利用大量清水進行實驗試模及實驗儀器之清洗動作，清水來源將於現場取用當地自來水為來源。

3.7 第一代電動力模場實驗規劃

本計畫前半年要點在規劃設計及組裝第一代三維現代模場，再配合期末報告繳交期限，僅有 5 個月進行模場試驗及報告撰寫，考量每一組試驗時間、前置作業及分析時間，故規劃之三組試驗探討電位坡降、電極接觸面積之改變，對土相中重金屬污染去除效率之影響，以建立初步模場操作條件，利於作為後續現地實驗之參考依據。

表 9、實驗規劃表

| Test | Type of electrode | Pollutants | Duration (d) | Operation parameters | | | | |
|------|-----------------------------|--------------|--------------|----------------------|-------------------------------------------|-------------------------|--------------|---------------------------|
| | | | | Processing fluid | Electrode contact area (cm ²) | Electrode distance (cm) | Power supply | Potential gradient (V/cm) |
| 1 | Hollow Stainless steel rods | Heavy metals | 20 | 0.05 M | 26,400 | 70 | 25 | 0.35 |
| 2 | | | | Lactic acid | | | 15 | 0.2 |
| 3 | | | | | 39,600 | | 25 | 0.35 |

第四章 初步結果與討論

摘要

電動力整治試驗前，需對試驗使用土壤做基本物化特性分析，了解其性質用於推估實驗可能產生之影響，三維現地模組之設計之可行性為本研究重要工作項目，本章節中將展現土壤特性及模組設計之具體影響參數之結果。

4.1 與台境公司協商會議成果

在模組設計規劃下，與台境公司經過五次的會議協商，此三次之會議主題分別容為：1.「電動力技術現地模組設立及測試之研究」投標一案；2.「電動力技術現地模組設立及測試之研究」案第一代三維模場尺寸、材質問題及組裝期程；3.「電動力技術現地模組設立及測試之研究」案之第一代三維模場尺寸及根據電動力實驗過程之操作步驟釐清所需儀器及材料確定；4.「電動力技術現地模組設立及測試之研究」案之第一代三維模場設計確立及完成期程；5.「電動力技術現地模組設立及測試之研究」案第一代模場問題之解決、第二代模場尺寸定案及成果發表準備項日期程討論；6.「電動力技術現地模組設立及測試之研究」案第一代三維模場成果發表討論及第二代模場尺寸更改定案；在密切與台境公司之聯絡討論下，逐步完成現地三維模組之設計，並由台境公司協助詢問所需儀器及尋找現地模組製作廠商。詳細之會議紀錄及與會人員請參考如附錄 A、B、C、D、E 及 F。

4.2 土壤基本物化性質

由於土壤在施加電場下會產生吸附、沉澱、溶解、氧化及還原等反應，因此，土壤的組成亦會影響到實驗的效果。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。本計畫使用之土壤基本性質分析如表 10 所示。

4.3 第一代三維現地模場設計因子規劃

依據 3.6 節所述現地三維模組之設計，主要包括了：

1. 模組尺寸；
2. 土壤來源；
3. 電極之製備；
4. 操作流質；
5. 監測系統；

6. 出流液體之回收；
7. 電極擺放位置設計及實驗結束後之清理動作；

在根據 3.6 節之現地三維模組初步設計之問題及現地模組尺寸之設計將對：
 1. 整治土體體積；2. 電極之尺寸；3. 電位坡降等操作參數造成影響，並可藉由電極設計之尺寸、電極置入之設計及相關操作參數制定之變化來評估現地試模之尺寸設計，進而調整試模尺寸大小，探討污染物在不同操作參數條件下可達之去除效率；本研究是藉由操作流質及電位波降之改變，探討污染物之去除效率，以利後續實驗之進行，在與台境公司進行多次會議討論提出，並根據電動力實驗之操作步驟，將之分為前處理、實驗進行中及實驗後從而逐一做細項規劃及討論。

表 10、土壤基本性質

| Characteristics | Values |
|------------------------------|--------------------|
| Texture | Loamy Sand |
| Organic content (%) | 3.1 |
| Soil pH | 8.18 |
| pH _{zpc} | 2.70 |
| CEC(meq/100 g) | 16.4 |
| Specific density | 2.41 |
| Moisture content(%) | 17.5 |
| Hydraulic conductivity(cm/s) | 7×10^{-5} |

4.3.1 第一代三維現地模場設計-前處理

於此將實驗通電運行前所需過程如：污染土壤之均質、操作流質之配置或土壤飽和之過程等等，合併為前處理過程。詳細處理流程如下所示，並做逐一之詳述：

1. 污染土壤的配置：若直接使用現地污染土壤及不需事先配置污染土壤，僅需於實驗前將土壤作均質化動作並採樣分析初始濃度。
2. 土壤進入試模方式：利用小怪手配合人工方式填入污染土壤。
3. 孔隙率控制：為模擬現地土壤孔隙率，利用小型夯實機械做壓密程序。
4. 土壤飽和：將設計一大型圓桶盛裝操作流質，並以馬達泵浦配合水位監控系統做自動補充以保持槽液水平之高度。
5. 電極放置形式：槽體底部設置固定孔洞，利於電極插入及達到固定電極之作用。

4.3.2 第一代三維現地模場設計-實驗進行中

於此將實驗開始通電運之流程：如監測系統之運行、操作流質之補充、實驗中期採樣之過程等等，合併為實驗進行中。詳細處理流程如下所示，並做逐一之詳述：

1. 連續監測系統：在實驗操作運行時，必須監控 pH 值、導電度、溫度、氧化還原電位、電流密度及通過土體電流值，與環工公司洽談將以電腦連接各項監測儀器並做自動監控儲存數據之安排設計。
2. 操作流質補充系統：於實驗運行中因電滲透流之緣故，會導致槽液之減少，為保持槽液水面高度及做自動控制液面補充系統設計，將利用馬達以及水位監測器做為控制程序。
3. 出流回收系統：於實驗進行中因電滲透流之緣故，必須收集陰陽極出流液體，並利用封閉式收集容器收集，以利後續監測處理作業。
4. 槽液 pH 值控制系統：於實驗進行中因氧化還原反應產生之 H^+ 及 OH^- ，陰陽極槽液 pH 值可能偏強鹼或偏強酸，易對電極產生腐蝕作用，因此需利用 pH meter 監測槽液 pH 值及利用酸鹼液體對槽液之 pH 值做調整控制程序。(如圖 24)

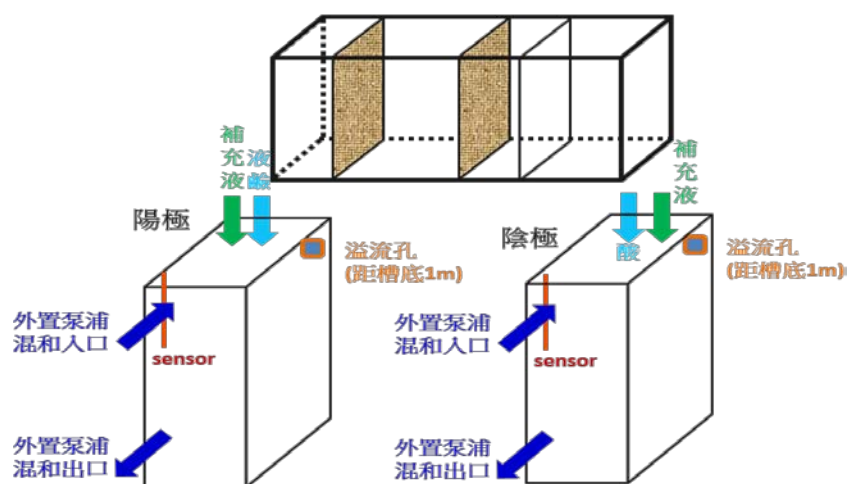


圖 24、電極液回收及酸鹼中和系統

5. 實驗中採樣：實驗運行中將會進行一次期中採樣動作，採樣棒採用螺旋式採樣管，於土體上方設有採樣點，利用採樣棒從採樣孔貫入後依據所需土壤位置深度調整做採樣動作。

4.3.3 第一代三維現地模場設計-實驗後

於此將實驗運行結束後之處理流程：如實驗後之採樣、電極之處理回收或現地模組之清洗過程等等，合併為實驗後。詳細處理流程如下所示，並做逐一之詳

述：

1. 實驗後採樣：採樣工具及方式參考實驗中採樣方式及器具。
2. 電極液收集:處理程序結束後，陰陽極兩槽之電解液將從兩槽底部溢流孔收集至密閉容器中(如圖 25)。

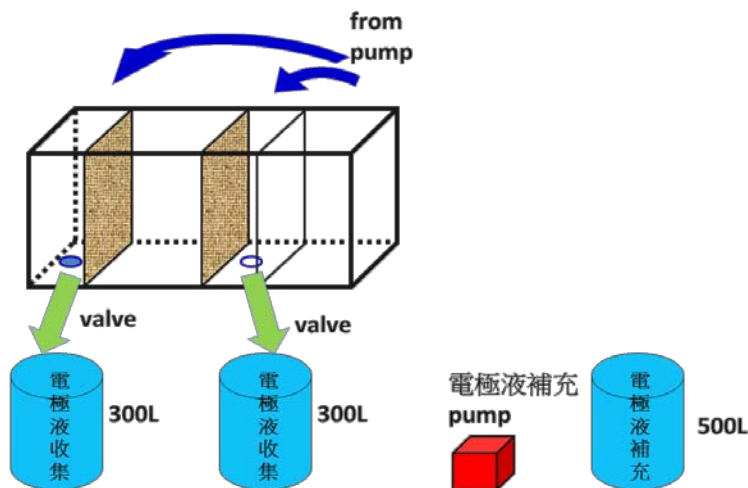


圖 25、電極液之收集及補充系統

3. 電極回收：處理完之電極將做蝕刻清潔回收或丟棄。
4. 土體輸出試模方式:將在槽體其中一側利用懸吊或油壓方式舉起一定高度後，利用小怪手或人工將整治後土壤裝入太空包中。(如圖 26)
5. 試模以及各器具儀器清洗：利用清水對現地模組及各項器具做清洗。

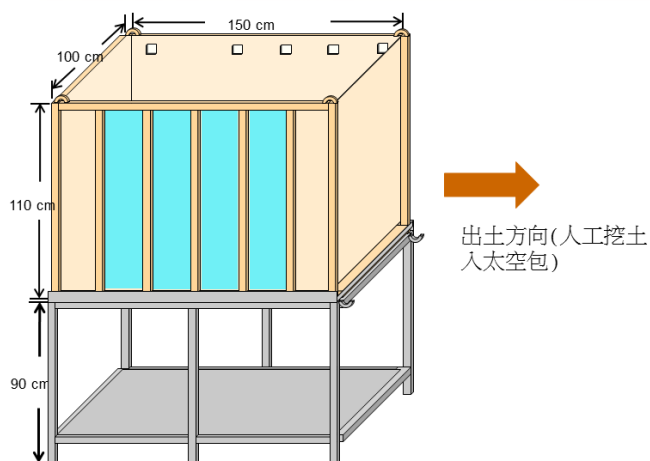


圖 26、第一代三維現地模場整體架構圖

4.4 現地三維模組展示設計

現地三維模組架構之設計，在與台境公司多次研商後，最終確立其完整架構之設計理念，並由環工公司委託包商開始設計製作模組，下圖 27 為現地三維模組完整架構之設計圖，土壤體積為可彈性調整式設計，可依據實驗操作參數之設

計改變隔板位置以達到調整土壤體積之設計，而內外隔板之設計如下圖 28 及 29，並為了隔板與模組主體能夠完整密合，故設計以螺絲固定檔板，以避免槽體與土壤反應空間之操作流質及土壤的滲漏發生，於模組下方之鐵架作為支撐模組之設計，並於下放放置模組運行期間之監測系統。

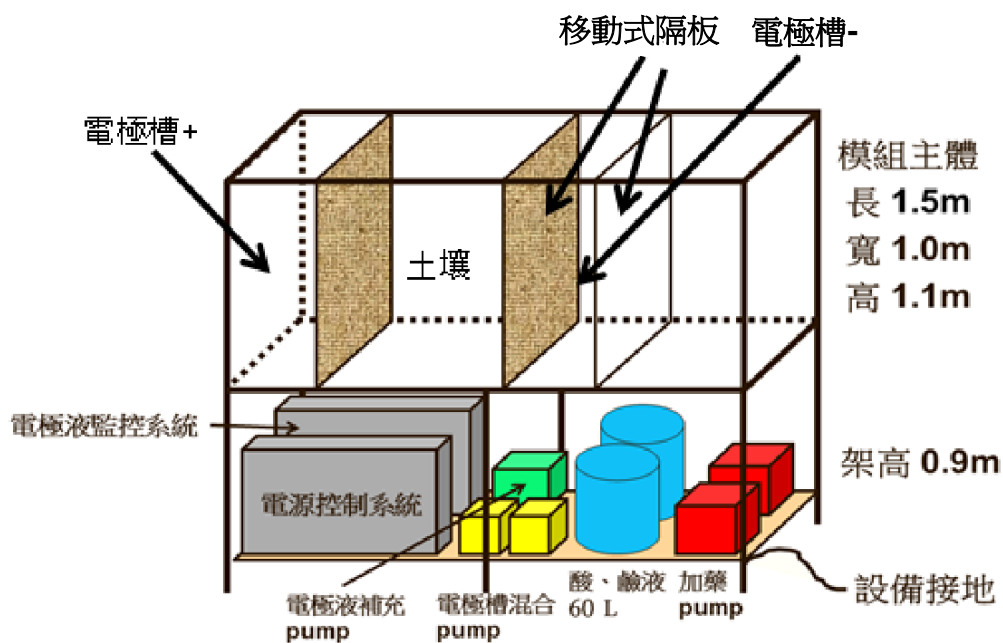


圖 29、第一代三維現地模場完整架構圖

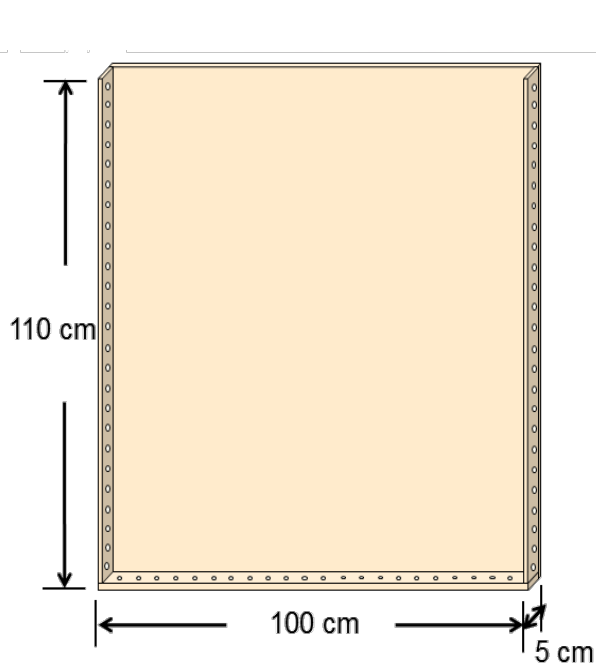


圖 28、內側活動式檔板

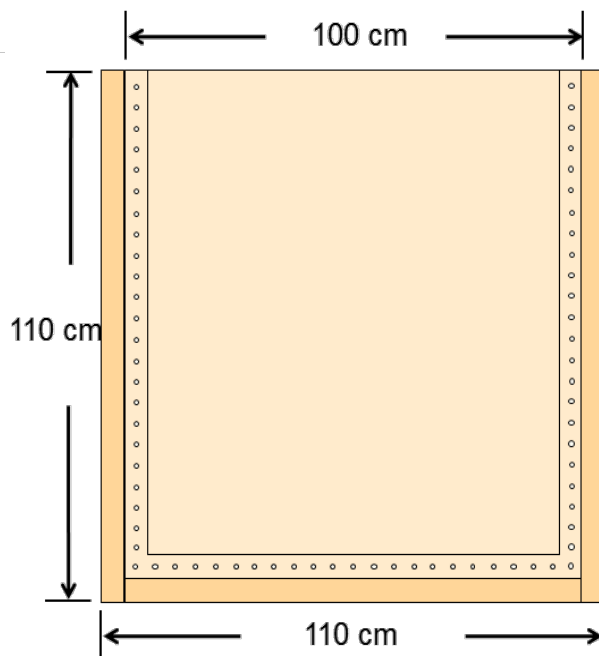


圖 27、外側活動式檔板

4.4.1 第一代三維現地模場設計圖展示

現地試模之設計在與環工公司多次研商會議後確立最大土體體積為 $1\text{ m} \times 1\text{ m} \times 0.75\text{ m}$ ($L \times W \times H$)，而模組長度將設計為可活動調整式，可根據當次實驗土體體積或電極距離之參數改變做調整，並在試模製作過程中要求廠商於內層鍍上鐵氟龍材質以防止試模腐蝕情形，在陰陽極槽之槽體設計為 $1\text{ m} \times 0.25\text{ m} \times 1.1\text{ m}$ ($L \times W \times H$)，換算後可容納之流質體積為 250 L ，除了使電極與電極之間擁有足夠的間距外，並可符合兩排電極置放形式之設計如圖 30 所示。

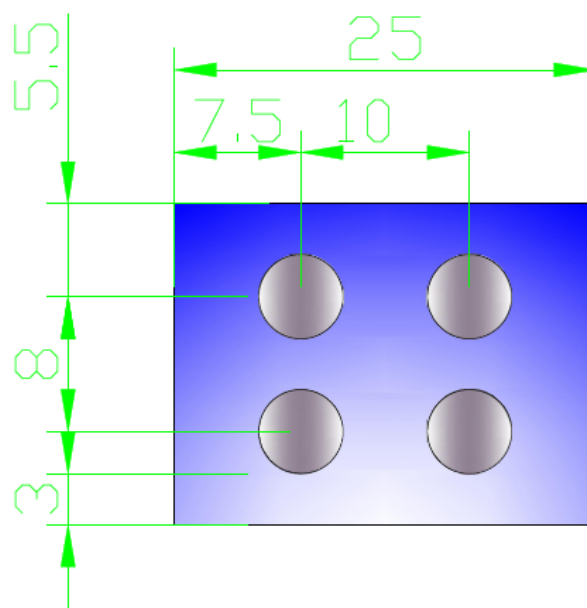


圖 30、電極擺放示意圖

4.4.2 電極尺寸設計

本研究整治處理之主要污染物為重金屬之，固選用不鏽鋼棒(Stainless steel)為陰極及陽極之電極，現地三維模組設計之土壤體積總量為 0.75 m^3 ，整治時間為 30 天，根據上述之條件參數設計可得知，當每支電極尺寸之設計為 $5\text{ cm} \times 100\text{ cm}$ ($D \times L$)時，陰陽兩槽分別各需置入 9 支不鏽鋼電極棒，而於陰陽極槽分別置入 9 支不鏽鋼棒電極後之俯視圖，如下圖 31 所示。

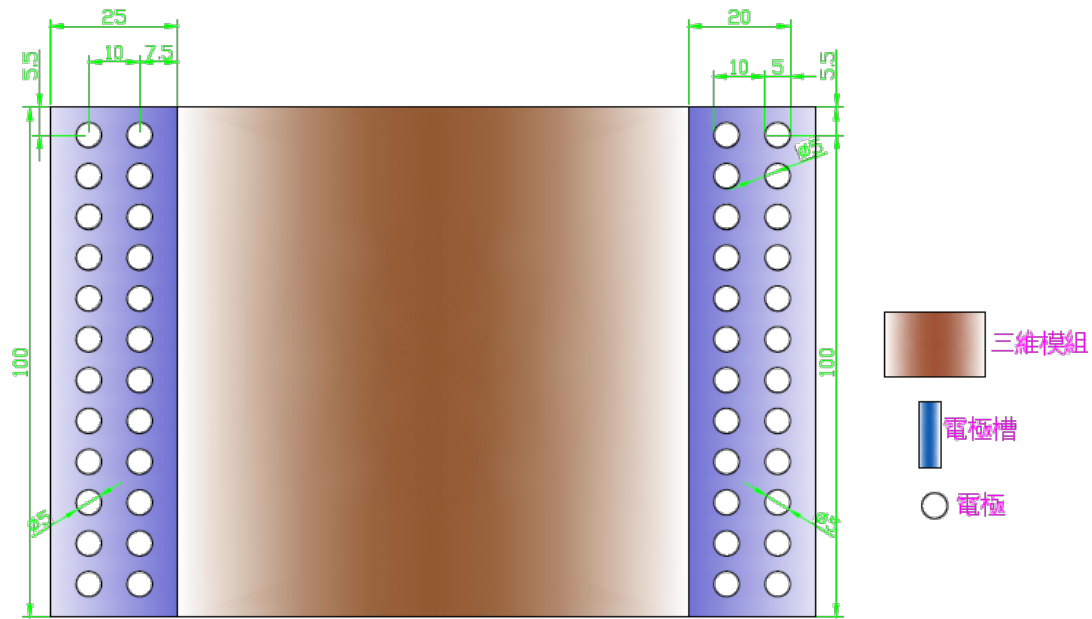


圖 31、電極排列俯視圖

4.5 模組實體組裝

本研究之模組實體於五月初完成，且整治之污染物為重金屬，為避免受酸蝕及重金屬附著情形發生，故模組主體材料使用為 PP(polypropylene)，並委託新岱興公司製作模組。模組尺寸為 $1.5\text{ m} \times 1\text{ m} \times 1.1\text{ m}$ (L × W × H)，模組完整架構又可細分為陰陽極槽、土壤反應槽、內部檔板、外部檔板及監控設備(下圖 32、33 為模組完整組裝之正視圖、側視圖)。



圖 32、第一代三維現地模場完整組裝正視圖照片



圖 33、第一代三維現地模場完整組裝俯視圖照片

4.5.1 槽體組裝

模組主體主要由土壤反應槽、陰陽極槽及內外部檔板所組成。陰陽極槽槽體尺寸為 $1.0\text{ m} \times 0.25\text{ m} \times 1.1\text{ m}$ ($L \times W \times H$)、土壤反應槽槽體尺寸為 $0.5 \sim 1.0\text{ m} \times 1.0\text{ m} \times 1.0\text{ m}$ ($L \times W \times H$)、內部檔板尺寸為 $1.0\text{ m} \times 1.1\text{ m}$ ($L \times H$)、外部檔板尺寸為 $1.1\text{ m} \times 1.1\text{ m}$ ($L \times H$)，因其模組設計特點為土體長度可根據當次實驗設計之參數彈性調整之，其土壤反應槽長度分別可為 0.5 m 、 0.75 m 及最大可達 1.0 m 長，此外於此次實驗模組設計之特點之一為，於模組正面設有強化玻璃面可於實驗進行中直接透過強化玻璃直視內部土壤反應情形；下圖 35 為模組外部檔板拆卸後之側視圖照片，內部檔板設有孔洞(如圖 36 所示)利於操作流質及電滲透流流通。



圖 34、第一代三維現地模場主體正視圖照片



圖 35、外部檔板拆卸後側視圖照片



圖 36、內部檔板照片 (1.0 m × 1.1 m，L × H)

4.5.2 監控設施

於實驗操作運行時，將會建立監測系統、操作流質補充系統、出流回收系統、槽液 pH 值控制系統、土壤溫度變化及採樣設計系統，以做實驗中之自動監控及記錄實驗情形，所使用之監控設施如：pH meter(監測 pH 值)、酸鹼控制加藥系統(加入酸或鹼液，控制電解液 pH 值)、電流監測器(監測通過之電流)、自動泵浦(補充操作流質)、液位監測器(監測電解液液面高度)、密閉式收集容器(於出流口收集出流液)、土壤溫度計(量測電動力期間土壤溫度變化)及採樣管(於實驗期中及

期末之採樣器具)等等，以下為各監測儀器之照片及型號。儀器照片如下圖 37~40 所示：



圖 37、A:操作流質補充泵浦(型號 CPT65)； 圖 38、桌上型三用電表(型號 UT804)
B:土壤溫度計

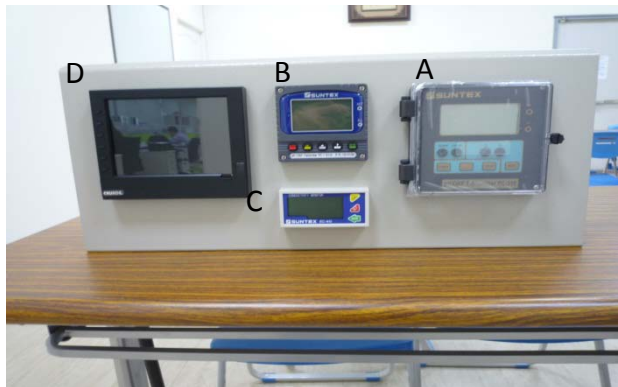


圖 39、(A)pH 監測器；(B)ORP 監測器；(C) 導電度監測器；(D)顯示面板



圖 40、整流器(型號 GD-201-5A)

4.5.3 實體組裝

本研究實驗於四中旬完成各項監測設施及實驗器材之購置，並於五月初模組



圖 41、模組試水側視圖



圖 42、模組試水俯視圖

製作委託之新岱興公司製作完成，並在模組完成後進行試水之測試動作(如圖 41-43)，以確定模組製作完成之密閉性及支撐性，以避免實驗中發生土壤或電解液滲漏及模組變形等情形。以下呈現之照片為模組製作完成之廠商試水照片及監控儀器與模組完整組裝之照片。



圖 43、模組試水完整俯視圖



圖 44、第一代三維現地模場完整組裝之照片

4.6 第一代電動力模場實驗

本研究係探討改變電位坡降、電極接觸面積，對重金屬污染土壤處理效率之

影響，選定電位坡降為 0.21~0.35 V/cm、電極接觸面積 26,400~39,600 cm² 為參數之設計，整治時間為 20 天，共進行 3 組實驗。Test3 目前正運行中，預計 10 月 30 日完成測試，數據將於期末定稿本補齊。

4.6.1 Test 1 實驗結果分析

Test 1 試驗中，污染物之去除效率之。以期末採樣分析後所得之結果，分為土體殘留濃度、陽極、陰極槽液及出流收集桶濃度和電鍍於電極上之金屬濃度，與土壤污染之初始分析所得濃度計算得知。

其中污染物主要分為 Cu、Cr、Ni、Pb 及 Zn 五種金屬，其 Test 1 之初始土壤平均污染濃度分別為 902、270、766、1322 及 436 mg/kg，本研究之電動力系統在 20 天時進行期末採樣，但因在採樣過程中發現電極有腐蝕現象，因此又延長 10 天整治時間，於 30 天時再一次採樣，30 天後發現陽極電極因電流造成之氧化腐蝕現象，於陰極則有還原電鍍之情形，因此在電位坡降高低之限制上，是為應用於實場整治之一主要限制條件，其電動力參數變化及殘留濃度分佈敘述如下。

4.6.1.1 土壤 pH 值分析

圖 45、46 為土壤 pH 值分佈圖，期末以及 30 天整治之土壤 pH 值變化不大，其應係系統對陰、陽極槽液皆有控制 pH 值之原因，而陰、陽極分別控制在 9 和 6。從圖中可看到土體大部分之 pH 值約落在 8.5 接近中性，除了接近陽極部分之

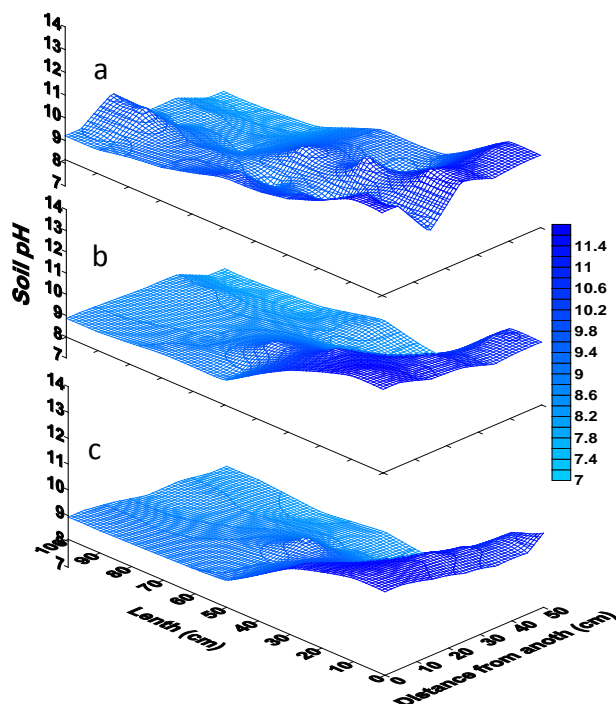


圖 45、Test 1 土壤 pH 分佈圖(20 天)
(a)top ; (b)middle ; (c)bottom

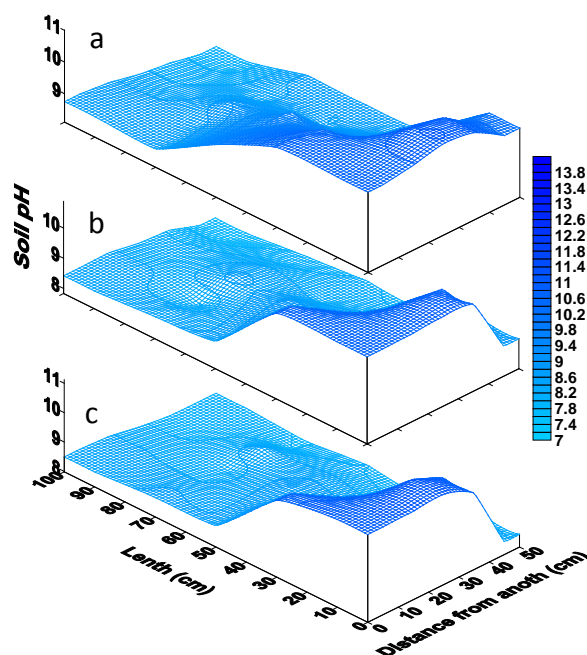


圖 46、Test 1 土壤 pH 分佈圖(30 天)
(a)top ; (b)middle ; (c)bottom

pH 值較高，期末之 pH 值大約落在 11，而 30 天後大約落在 10 左右，其原因應係陽極 pH 控制添加液鹼之添加口位於靠近陽極後端部分，而當陽極槽液 pH 低於 6 泵浦系統啟動，而所添加之液鹼未經過循環泵浦與槽液混合即進入土體，以致在土體接近陽極後端部分之 pH 值呈現較高之情形。

4.6.1.2 陰陽極槽液 pH 值

圖 47 為在電動力系統整治過程中，系統中陰、陽兩極槽槽液之 pH 值之變化情形。兩極槽槽液皆為 0.05 M 乳酸(Lactic acid)，其中初始之 pH 值皆為 3.0，而於電動力系統進行時，所產生之電解反應會使得陽極槽液於氧化環境下持續產生大量氫離子(H^+)而使得 pH 值持續下降呈現酸性環境，而陰極槽槽液於還原狀態下也因氫氧根離子(OH^-)之產生使得 pH 值上升呈現鹼性環境，而本研究於此系統中對陰陽極槽液皆有做 pH 值之控制，在實驗中陰、陽兩極之 pH 值分別控制在 9 和 6 接近中性，其因係為避免土壤中帶正電之金屬離子在鹼性環境下與氫氧根離子產生沉澱等因素；在 pH 值控制方面，當陽極 pH 值低於 6 時，將會自動加入液鹼做酸鹼中和，而期末之平均為 6.8，陰極部分則是 pH 值超過 9 時，亦會自動加入液酸做中和動作降低陰極 pH 值，而期末之平均為 6.5，於圖中在 7 天以前 pH 變動幅度較大，係因泵浦初始調整添加劑量較多，而在調整後變動幅度已趨於穩定。

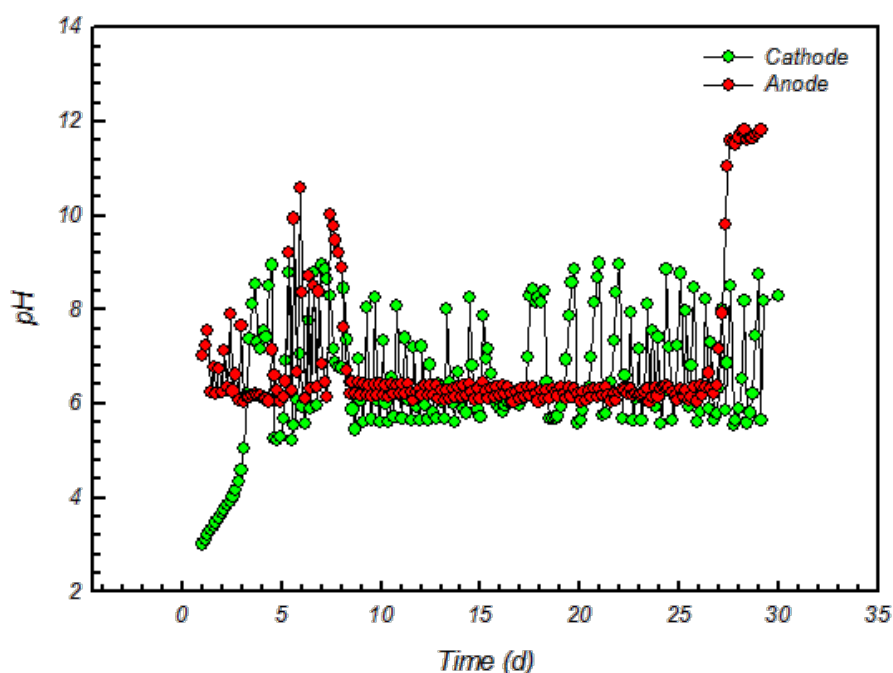


圖 47、Test 1 陰陽極 pH 值隨時間變化圖

4.6.1.3 電流密度變化情形

圖 48 為 Test1 電動力處理過程之電流密度變化情形，電動力系統初始電位坡降為 0.8 V/cm，運行期間由圖形變化可看出電流密度初始值約在 2.4 mA/cm²，之後快速上升直到第 5 天達到了 4.17 mA/cm² 而後因其電流超過 20 A，超出電源供應器之安全值造成跳電，以致在第 7 天將供應電壓改為 0.35 V/cm 進行後續實驗，而從圖中可發現在改變電壓後，電流平均在 3.4 mA/cm²，而後略為降低穩定在 2.8-3.0 mA/cm²，其比較一般電動力技術在處理過程中，電流密度會隨時間降低之情形較為不同，其主要原因應為：(1)系統中對陰陽極槽之槽液 pH 值控制，減少了操作流質與土壤中之離子產生鍵結或沉澱以及(2)避免酸峰遷移時所導致土壤中帶電離子如 Ca²⁺、Mg²⁺等物質，因電場效應往陰極移動產生沉澱因素等。

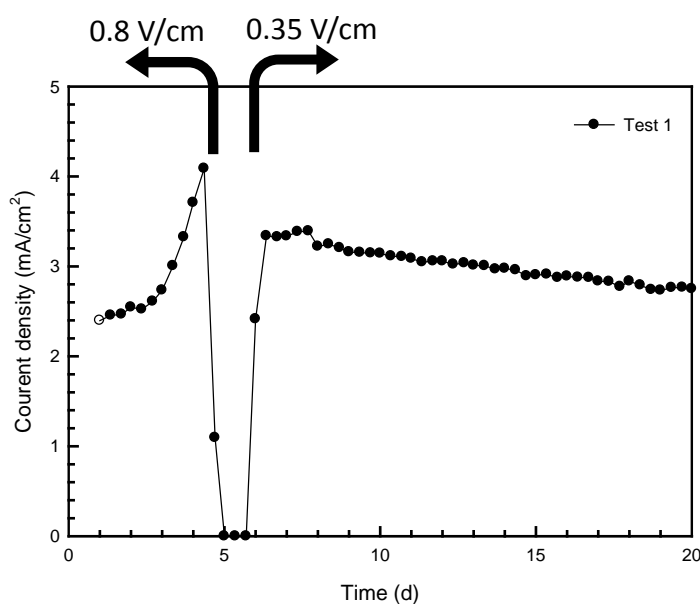


圖 48、Test 1 電流密度隨時間變化圖

4.6.1.4 陰陽極導電度

圖 49 為陰陽極槽槽液之導電度變動情形。於圖中第 7 天之分隔箭頭係因初始電位坡降為 0.8 V/cm 時，造成電源供應器之電流過高超出負荷而發生跳電情形，以致實驗中只，所以後續實驗則將電壓降為 0.35 V/cm 進行。於圖中可看出在陰極槽之導電度是呈現緩慢增加之情形，其應係電動力過程中產生之電滲透流推動土壤之金屬離子往陰極槽移動，使得陰極槽液中金屬離子濃度增加進而增加其導

電性，使之呈現穩定且持續上升之情形。在陽極槽部分則是在初使通入操作流質時應有部分金屬離子溶出，導致陽極槽導電度上升，又因其電滲透流關係槽液中金屬離子逐漸往陰極移動而下降，而在 14 天左右陽極槽導電度突增至 17.5 ms/cm，應係陽極槽所擺放之不鏽鋼棒電極有部分因氧化腐蝕而產生大量金屬離子溶於槽液中所造成，而後陽極槽之金屬離子因電滲透流往陰極移動，使陽極槽之電導度值降至 5.5 ms/cm，但在 17 天左右陽極之電導度又急遽上升應同樣是陽極槽擺放之不銹鋼棒電極腐蝕氧化所造成。

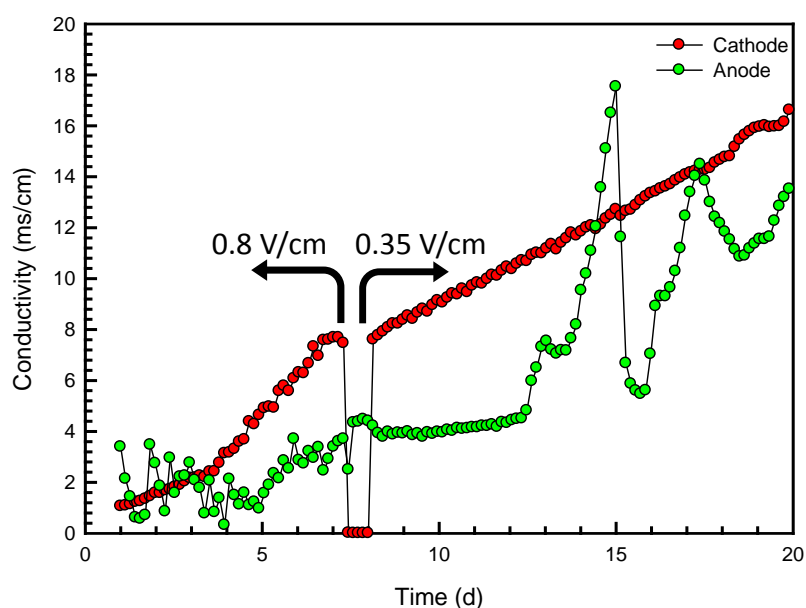


圖 49、Test 1 陰陽極電導度隨時間變化圖

4.6.1.5 陰陽極槽液溫度

圖 50 為陰、陽極槽槽液溫度變化之情形，箭頭所標示之範圍為在初始電壓為 0.8 V/cm 運行至第 7 天時，因電源供應器之電流超出負荷導致斷電，於後續之實驗則將電壓降為 0.35 V/cm 進行。陰陽極槽槽液之初使溫度皆為 30 °C，在電動力系統運行期間，因電解反應使槽液溫度快速上升，在陰、陽極最高溫分別可達到 55.1 及 65.6 °C，而後因電流過高導致斷電之原因，後續實驗電壓則改為 25 V，此時陰、陽極溫度則分別穩定在 48.5 °C 及 53.5 °C 左右。

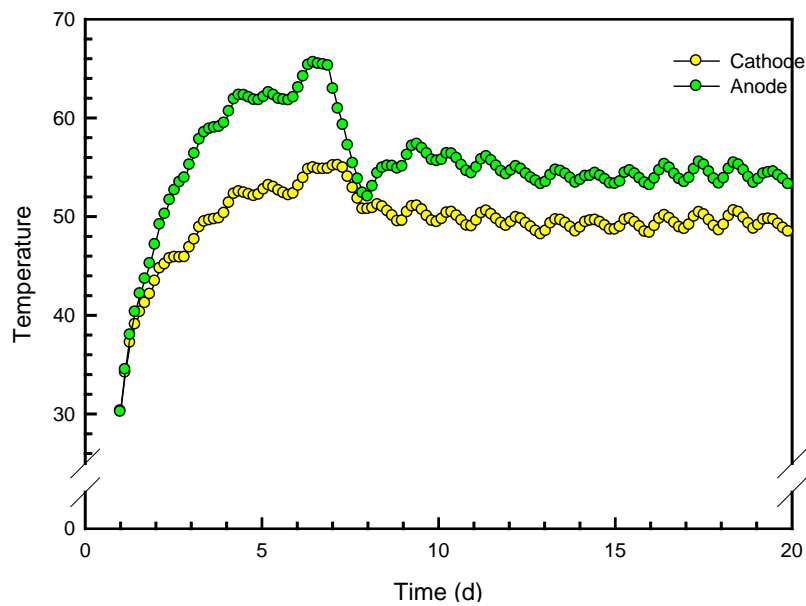


圖 50、Test 1 陰陽極槽液溫度隨時間變化圖

4.6.1.6 土壤殘留濃度分析

圖 51-54 分別為金屬 Cr 及 Ni 期末及實驗延長至 30 天之分析所得之殘留濃度分佈圖，Cr、Ni 之初使濃度分別為 270、766 mg/kg，在經過 20 天的電動力整治後於期末採樣殘留濃度分析可看出土壤中的 Cr 明顯有達到移動以及去除之效果，土壤中含 Cr 金屬之平均濃度已降到 32 mg/kg，而在圖 51 則可看到 Ni 亦有明顯之移動情形發生，污染物被聚集在土壤上層，而 Ni 金屬之濃度為 325 mg/kg，推測應係 Ni 金屬移動速率較慢之金屬以致 20 天整治之效率並不如 Cr 佳，且在圖中皆發現土壤有部分累積之情形發生，此應係實驗為模擬實場整治，於模組上方不另設計加蓋，且在土壤及操作流質通入後模組前端有凹陷情形，導致前端有積水現象，因此污染物隨之累積，造成土壤前端之污染物濃度要比其他部分要高；在期末下架時發現陽極電極有腐蝕現象，因此為探討其後續之情形，將此實驗延長 10 天，於 30 天後再行下架，而繪出圖 52、54，以此與期末採樣分析比較後發現，30 天整治之 Cr 及 Ni 平均濃度為 97、616 mg/kg，並發現在陽極槽液中測得含有大量 Cr 和 Ni，於實驗結束清理時發現，陽極端之不鏽鋼棒電極多已氧化溶解，並有斷裂之情形發生，從而推測期末土壤中 Cr、Ni 金屬濃度反之較期末高之原因係(1)電極氧化溶解釋出之 Cr、Ni 金屬從陽極槽進入土體，(2)以及因電極斷裂導致電流無法均勻順利通過，使原與電動力系統運行時產生之氣泡上升至表層之污染物，重新溶入土體造成濃度反之上升之情形。

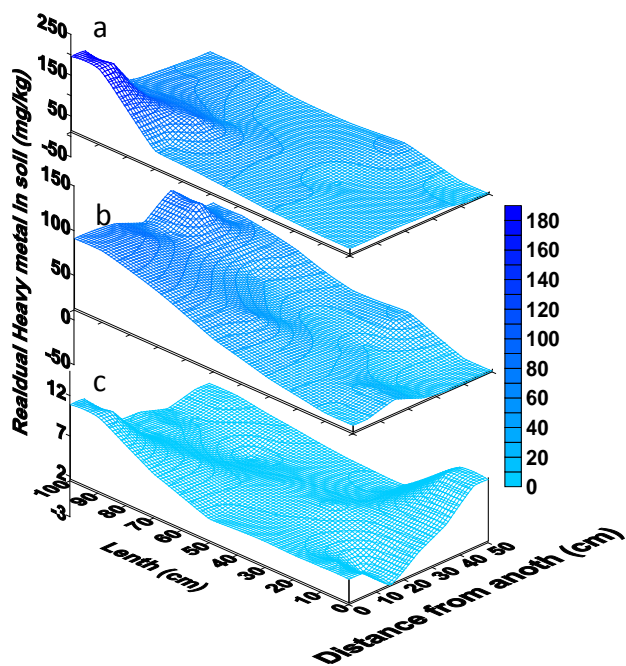


圖 51、Test 1 Cr 殘留濃度分布圖(20 天)(a)top ; (b)middle ; (c)bottom

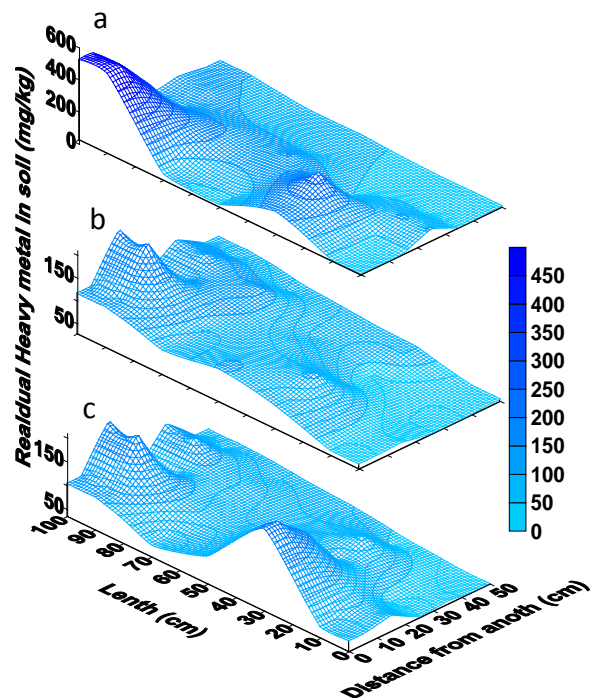


圖 52、Test 1 Cr 殘留濃度分布圖(30 天) (a)top ; (b)middle ; (c)bottom

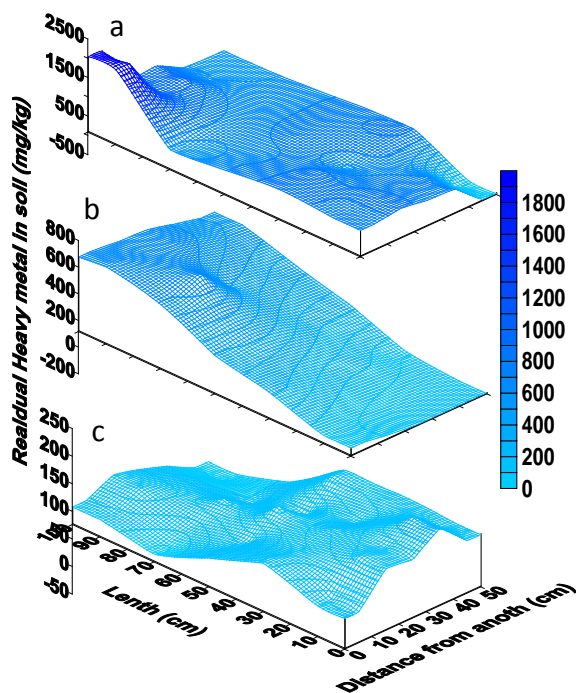


圖 53、Test 1 Ni 殘留濃度分布圖(20 天)(a)top ; (b)middle ; (c)bottom

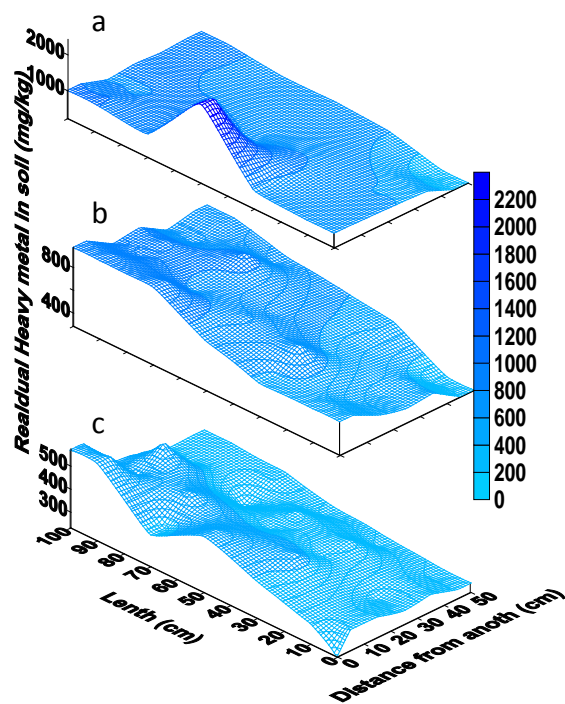


圖 54、Test 1 Ni 殘留濃度分布圖(30 天) (a)top ; (b)middle ; (c)bottom

圖 55、56 分別為金屬 Cu 於期末及延長實驗整治時間為 30 天分析所得之殘留濃度分佈圖。Cu 之初始濃度為 902 mg/kg，經過 20 天的電動力整治後，期末採樣殘留濃度分析可看出土壤中的 Cu 明顯有達到移動及去除之效果，土壤中含 Cu 金屬之平均濃度已降到 164 mg/kg；在圖 55 中發現，在土壤有部分累積之情形發生，其應與上文中 Cr 金屬所述相同，愈模擬實場整治情形而不加蓋所造成，比較圖 56 之延長至 30 天整治後採樣分析發現，Cu 之平均濃度為 511 mg/kg，從而推測期末土壤中 Cu 金屬反而較期末(20 天)高之原因係因，在接近期末時因電極斷裂導致電流無法均勻且順利通入土體，使電動力系統無法正常運作，而導致原溶於土壤上層懸浮液及陰極之 Cu 因電極斷裂造成電動力系統無法正常運作之影響重回至土壤中，使得 30 天採樣分析所得之土壤重金屬 Cu 之殘留濃度要比期末(20 天)電動力系統正常運作時之濃度高之原因。

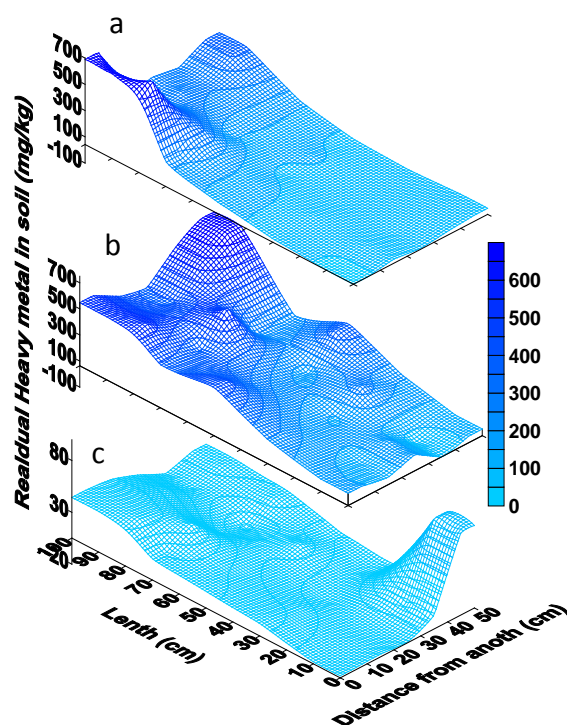


圖 55、Test 1 Cu 殘留濃度分布圖(20 天)(a)top；(b)middle；(c)bottom

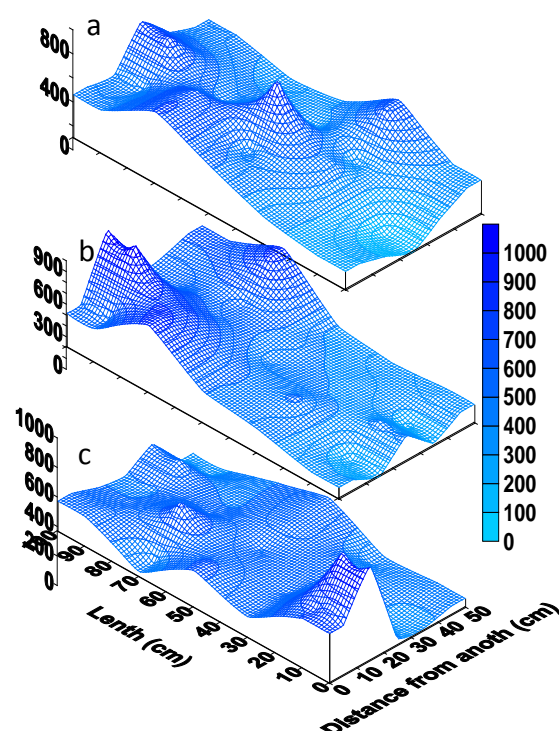


圖 56、Test 1 Cu 殘留濃度分布圖(30 天)(a)top；(b)middle；(c)bottom

圖 57、58 分別為金屬 Pb 於期末、30 天之整治期間後分析所得之土壤中污染殘留濃度分析圖，重金屬 Pb 之初始濃度為 1322 mg/kg，從圖 57 中可發現經過 20 天的電動力整治後，期末採樣土壤殘留濃度分析可看出，土壤中的 Pb 很明顯有達到移動及去除之效果，於土壤中 Pb 金屬之平均濃度已降到 1170 mg/kg，

其中從期末殘留濃度明顯可看出，土壤中 Pb 之移動效果非常顯著，底層之土壤已完全沒有 Pb 金屬，而於中層只含有少量 Pb 金屬，大部分的污染物都被被移動到最上層之土壤中，此結果推測應是為模擬實場於土壤頂部不加蓋之設計，從而電滲透流隨著反應期間產生之氣體往上曾被移動，因而將底部之污染物往上層推動所造成之現象；圖 58 為延長電動力時間為 30 天採樣分析所得之 Pb 金屬殘留濃度分析圖，從圖中可看出原累積於上層之大量 Pb 金屬已被移除，且被鍍在陰極之電極棒上，但亦發現原中層及底層之濃度反之上升，此現象推測應與其他金屬相同，因陽極電極棒溶解斷裂，造成電動力系統無法正常運作，而導致原溶於土壤上層之污染物重回至土壤中，而導致土壤中層及底層之濃度較期末採樣分析所得之濃度高，但 Pb 金屬於 30 天所得之土壤殘留濃度比期末所得之濃度相對要低，推測應是在上層累積之 Pb 金屬在電動力系統停滯前已被移出並鍍於陰極電極棒上，以致未發生 30 天之電動力系統整治後土壤中殘留濃度比期末(20 天)分析所得之濃度高之情形。

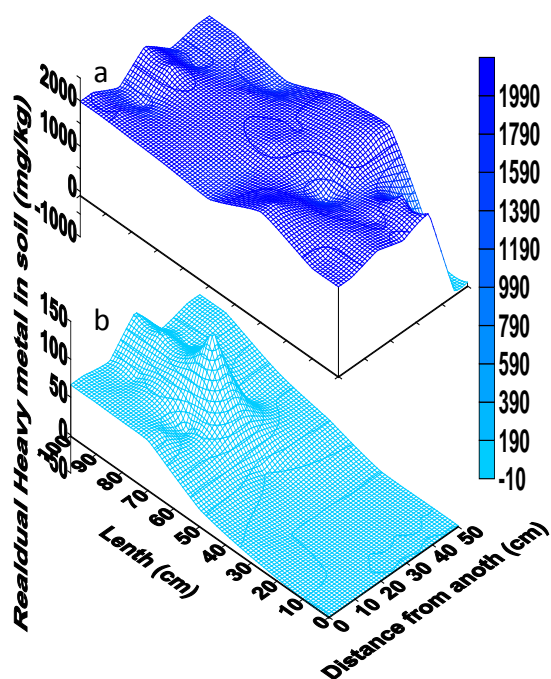


圖 57、Test 1 Pb 殘留濃度分布圖(20 天)
(a)top ; (b)middle ; (c)bottom

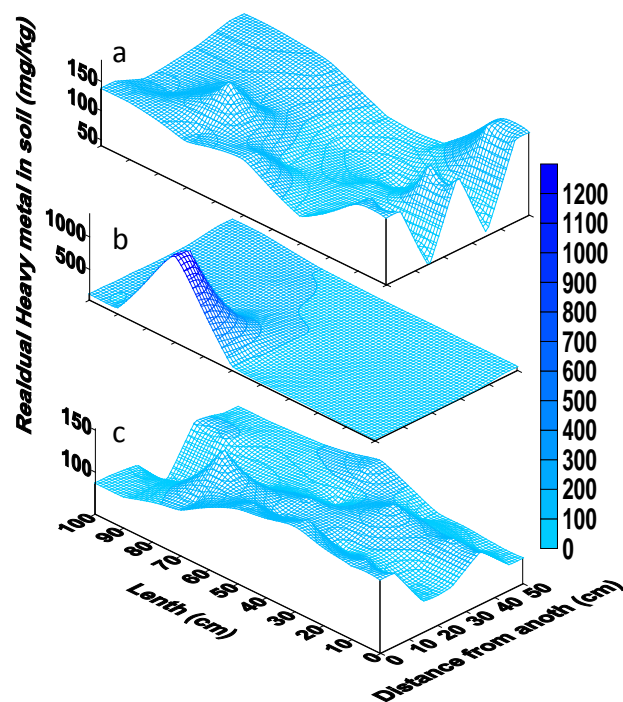


圖 58、Test 1 Pb 殘留濃度分布圖(30 天)
(a)top ; (b)middle

圖 59、60 分別為金屬 Zn 於期末、延長實驗整治為時間 30 天分析所得之殘留濃度分佈圖。Zn 之初始濃度為 436 mg/kg，經過 20 天的電動力整治後，期末採樣殘留濃度分析可看出土壤中的 Zn 明顯亦達到移動以及去除之成效，土壤中含金屬 Zn 之平均濃度已降到 77 mg/kg；在圖 59 中亦可發現於上述情形相同，在土壤有累積之情形發生，其應與上文中所述相同，愈模擬實場整治情形以致不加蓋，及模組於土壤填入後造成之下陷不平均造成土壤前端污染物濃度較高之情形，比較圖 60 中 30 天採樣分析後發現，Zn 之平均濃度為 209 mg/kg，其土壤中 Zn 金屬反之較期末濃度高，係因其在延長整治時間為 30 後電極氧化斷裂而導致電流無法均勻且順利通入土體，使電動力系統無法正常運作，而導致原溶於土壤上層懸浮液之污染物重回到土壤中，使採樣分析所得之土體中重金屬 Zn 之殘留濃度要比期末(20 天)電動力系統正常運作下分析所得濃度高。

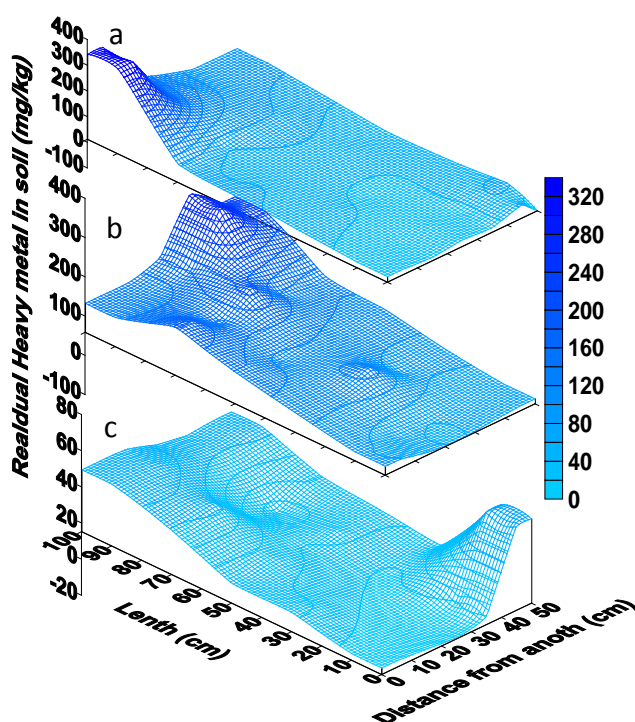


圖 59、Test 1 Zn 殘留濃度分佈圖(20 天)
(a)top ; (b)middle ; (c)bottom

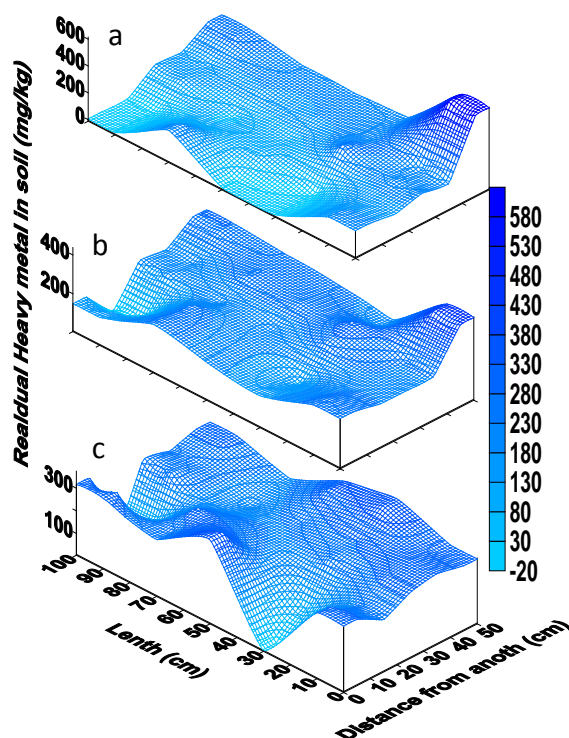


圖 60、Test 1 Zn 殘留濃度分佈圖(30 天)
(a)top ; (b)middle ; (c)bottom

4.6.2 Test 2 實驗結果分析

Test 2 試驗中，土壤污染物 Cu、Cr、Ni、Pb 及 Zn 之初始濃度分別為 702、218、393、219 及 425 mg/kg；Test 2 操作條件設計為整治時間 20 天、操作流質 0.05 M 乳酸、電位坡降為 0.2 V/cm、電極接觸面積則為 26,400 cm²，在期中(10 天)時進行一次期中，期末(20 天)進行期末採樣，其電動力參數變化及殘留濃度分佈敘述如下。

4.6.2.1 土壤 pH 值分析

圖 61、62 為 Test 2 土壤 pH 值分佈圖，其為期中(10 天)及期末(20 天)整治之土壤 pH 值變化情形，期中土壤 pH 值之平均為 8.2、期末則為 8.5，皆達到系統對 pH 值之控制，而從圖中可看出在陽極有部分 pH 值達到 10.5，其因係此處為液鹼之添加口，應係在液鹼添加後未經泵浦沖刷混合即被土體吸收，導致此處之 pH 值呈現較高之雲原因。

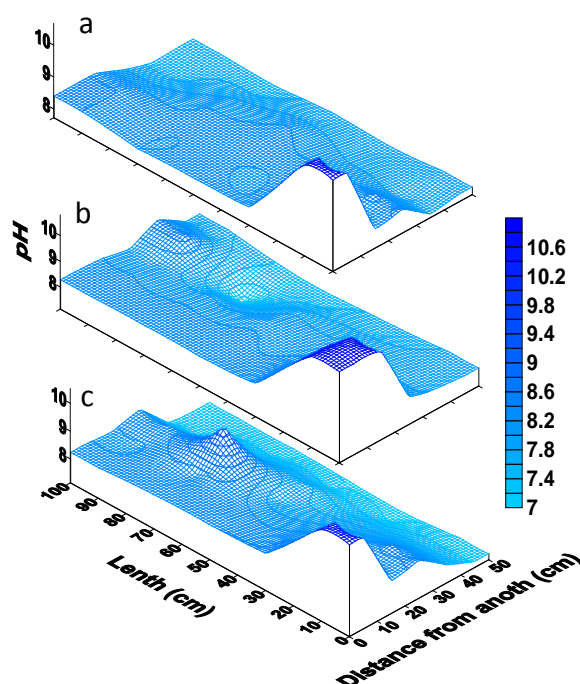


圖 61、Test 2 土壤 pH 分佈圖(10 天)
(a)top；(b)middle；(c)bottom

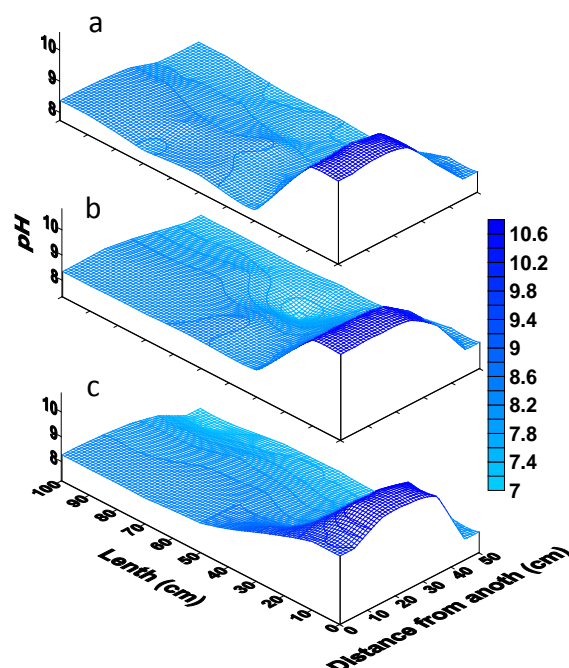
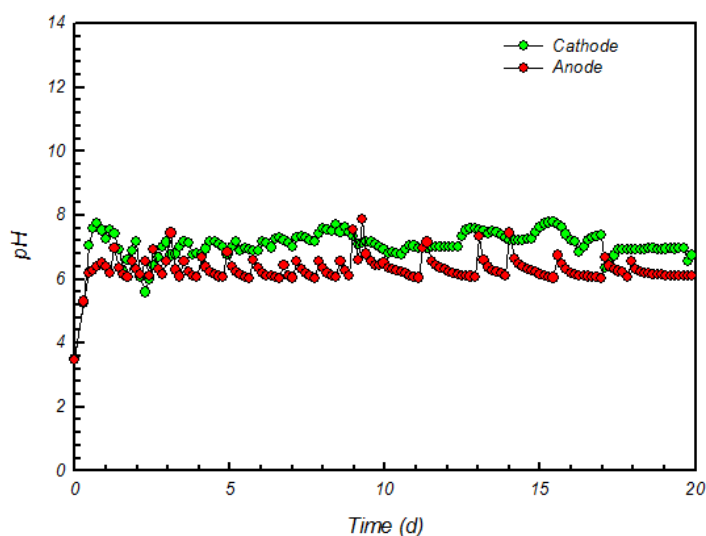


圖 62、Test 2 土壤 pH 分佈圖(20 天)
(a)top；(b)middle；(c)bottom

4.6.2.2 陰陽極槽液 pH 值

圖 63 為 Test 2 電動力系統整治過程中，陰、陽兩極槽槽液之 pH 值變化情形。陰、陽兩極槽槽液操作流質為 0.05 M 乳酸(Lactic acid)，初始之 pH 值為 3.5；在電動力系統進行時，所產生之電解反應，於陽極產生氫離子(H^+)使陽極 pH 值降低呈現酸性環境，反之陰極則產生氫氧根離子(OH^-)而呈現鹼性環境；而在本電動力系統中，因其對陰陽極槽槽液 pH 值控制於 8.0，以致從圖中可看出其值呈現穩定變化情形，在陽極之平均 pH 值則為 7.08，陰極則為 6.32，而與 Test 1 比較，



推測其應係 Test 2 之電流降低，使得反應較無如 Test 1 如此劇烈，因而在 Test 2 之 pH 值變化情形亦較緩慢緣故下，槽液之 pH 值即可呈現穩定且受到控制之現象。

4.6.2.3 電流密度變化情形

圖 64 為 Test 2 電動力處理過程之電流密度變化情形，於 Test2 之試驗中，電位坡降為 0.2 V/cm，從圖中可看出，Test2 之電流呈現持續且緩慢之上升情形，20 天的處理過程中，平均電流值為 0.36 mA/cm^2 ，因電壓降低之關係，反應並不

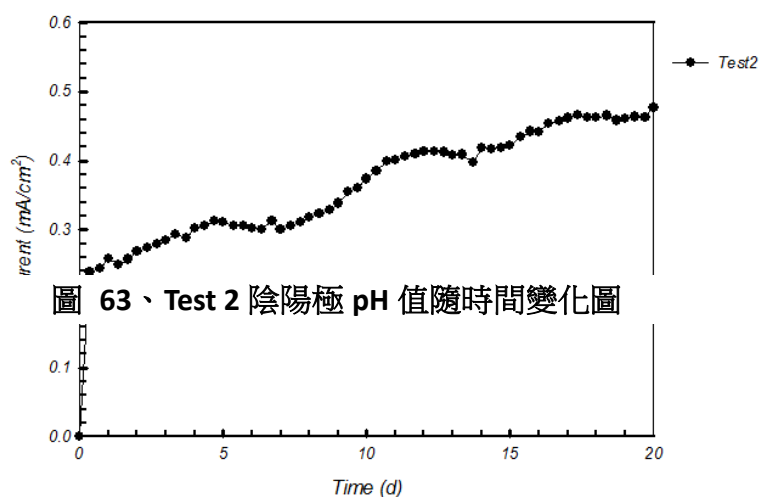


圖 63、Test 2 陰陽極 pH 值隨時間變化圖

圖 64、Test 2 電流密度隨時間變化圖

如 Test1 之劇烈且快速，因此污染物之移除亦不如 Test 1 佳，其下圖之電流密度呈現緩慢且持續上升之情形，推測應係土壤中金屬污染物受電動力系統緩慢移動移除之原因，使土壤之電阻減少，消耗電流亦隨之減少之緣故，使得電流值在 20 天的整治時間下，呈現緩慢且穩定上升之情形。

4.6.2.4 陰陽極導電度

圖 65 是為陰、陽極兩槽槽液之導電度隨時間變化情形。初始電位坡降為 0.2 V/cm，由圖中可看出在陰、陽兩極槽液之導電度初始為 2.1~2.4 ms/cm，而從圖可發現，在試驗啟動後陰極由初始 2.4 ms/cm 持續上升至第三天的 2.8 ms/cm，而後降至 1.5 ms/cm，並穩定於 1.0-1.5 ms/cm，並持續且緩慢的下降，於陰極第三天之數據顯示中，推測應係初始時本系統通以一直流電場於土體中，使土壤中較容易移除之污染物朝向陰極移出，因此使得陰極槽液之導電度上升，而後因金屬污染度鍍於陰極電極上，使槽液中之金屬污染物大量減少，因此陰極之導電度數據呈現劇降之情形，而在陽極槽之部分，呈現緩慢之上升，並穩定在 2.94 ms/cm 左右，其應係由於酸性操作流質對一般金屬污染物具有增溶之效果，以致實驗過程中，當操作流質通入陰陽極槽後，即有少部分污染物溶於陰、陽極槽槽液，使陽極槽槽液導電度上升。

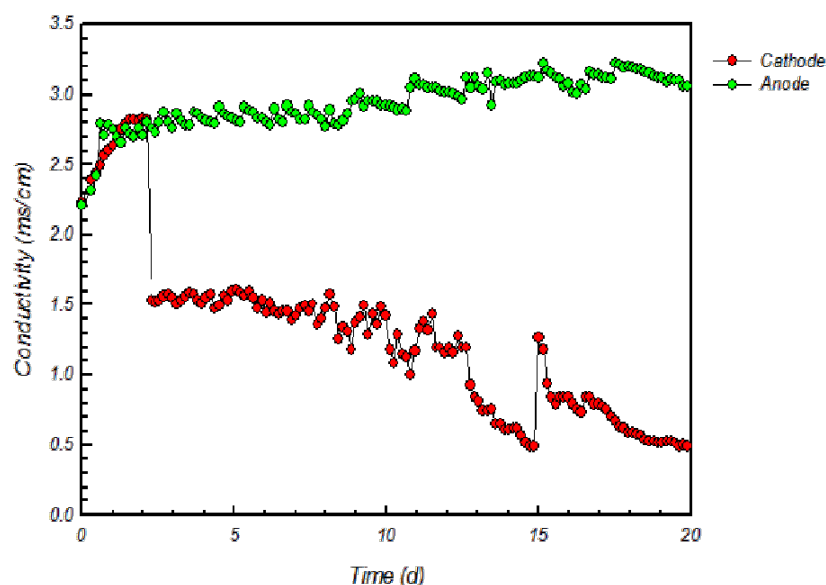


圖 65、Test 2 陰陽極電導度隨時間變化圖

4.6.2.5 陰、陽極槽液及土體溫度

圖 66 為陰、陽極槽槽液溫度隨時間變化情形及土壤期末平均溫度。陰陽極

槽槽液初始溫度皆為 31.5 °C，於本系統之電動力運行期間，因電解反應使槽液溫度急遽上升，在陰、陽極槽液之最高溫分別為 43.1、43.8 °C，Test2 因電位坡降低至 0.2 V/cm，其與 Test1 電位坡降為 0.35 V/cm 時之陰、陽極槽液最高溫 48.5 及 53.5 °C 差了 5-10 °C，因其電流大小造成之反應快慢及劇烈所造成，而 Test 2 之陰、陽極槽液之溫度分別穩定於 40.9 及 41.6 °C (如圖 66a)；圖 66(b)則為土體期末平均溫度，期末室溫為 32.1 °C，而土體溫度依 3.6.2 節敘述量測，於期末時土體平均溫度為 36.6 °C，與室溫相差 4.5 °C。

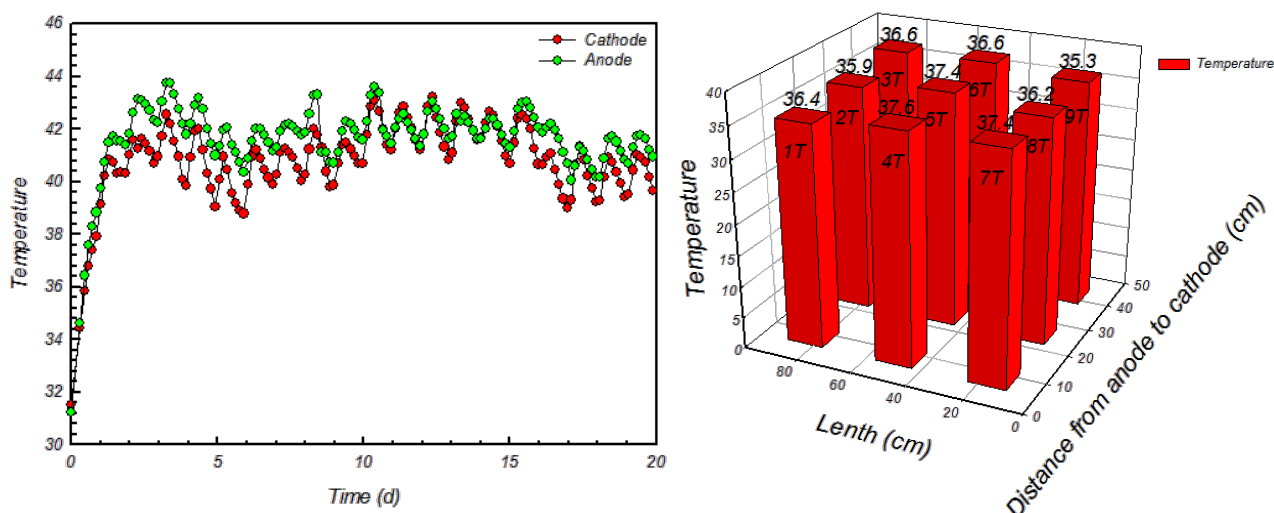


圖 66、Test 2(a)陰陽極槽液溫度隨時間變化圖；(b)土壤期末平均溫度

4.6.2.6 土壤殘留濃度分析

圖 67、68 為金屬 Cr 於實驗期中(10 天)及期末(20 天)採樣分析後所得之土壤

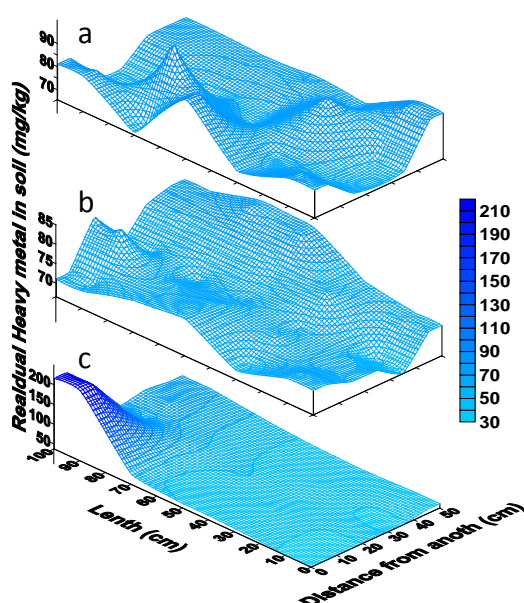


圖 67、Test 2 Cr 殘留濃度分布圖(10 天)
(a)top；(b)middle；(c)bottom

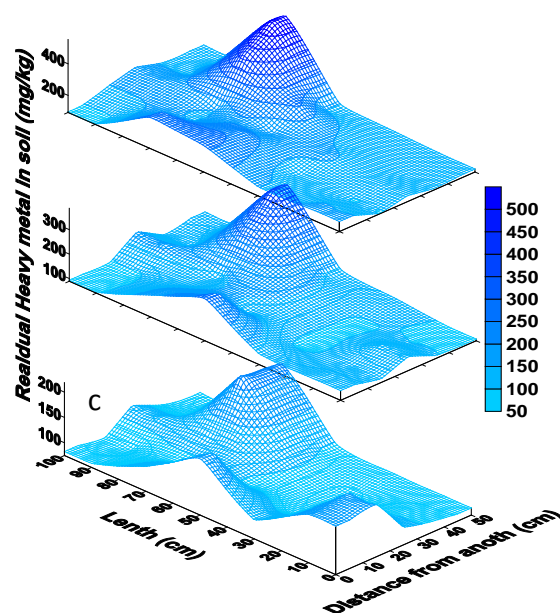


圖 68、Test 2 Cr 殘留濃度分布圖(20 天)
(a)top；(b)middle；(c)bottom

污染物殘留濃度分佈圖。Cr 之初始濃度為 218mg/kg，於期中殘留濃度分佈圖中可發現，其中底層污染物多數往上層移動，除在靠近陽極部分因模組有略為變形之緣故，有積水現象發生因此濃度較高，而在 a、b 層中，亦可看出污染物有逐漸往陰極移動去除之趨勢；在經過 20 天整治後，污染物主要聚集在與 a 及 b 層，並明顯累積於近陰極部分，平均濃度已降至 149 mg/kg。

圖 69、70 為金屬 Ni 於實驗期中(10 天)及期末(20 天)採樣分析後所得之土壤污染物殘留濃度分佈圖。Ni 金屬之初始濃度為 393 mg/kg，在 10 天的整治過程中，b 層明顯可看出有部分金屬之去除，其平均濃度降至 253 mg/kg，而於期末可發現污染物平均濃度 171 mg/kg，反之上升之原因推測應係與 Test 1 中所述電極腐蝕現象導致相同，Test 2 之電位坡降雖降至 0.2 V/cm，電極棒並無如 Test 1 中電極腐蝕斷裂之情形，但仍可發現電極表層有腐蝕剝落之情形發生，因此推測期末 Ni 之濃度上升情形應是電極棒腐蝕導致。

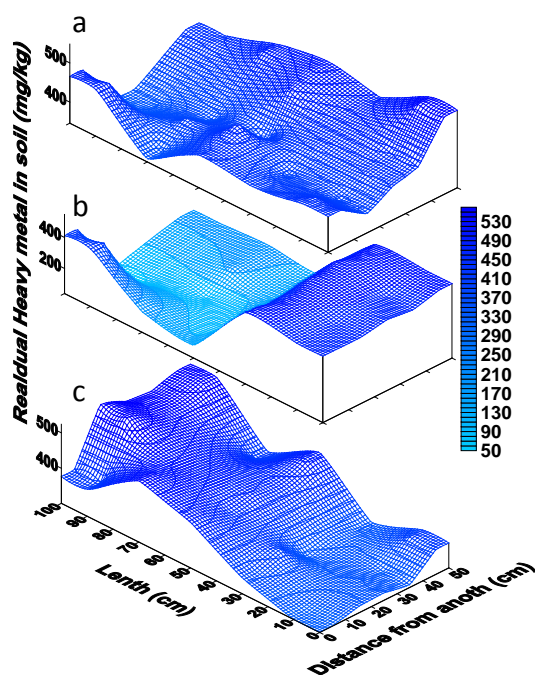


圖 69、Test 2 Ni 殘留濃度分布圖(10 天)
(a)top ; (b)middle ; (c)bottom

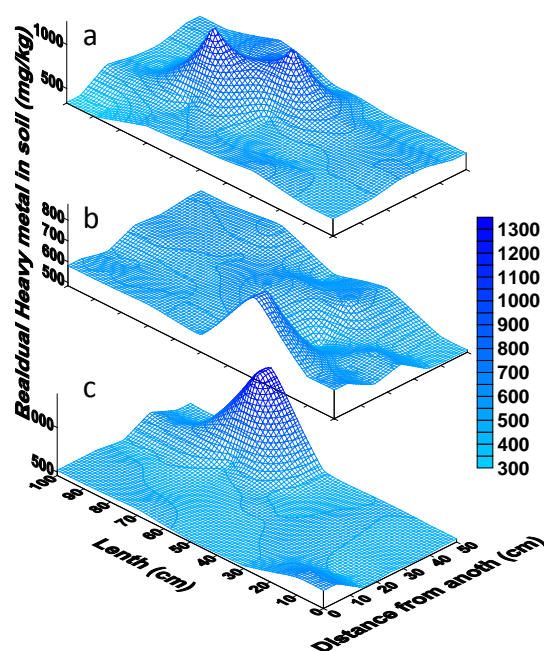


圖 70、Test 2 Ni 殘留濃度分布圖(20 天)
(a)top ; (b)middle ; (c)bottom

圖 71、72 為金屬 Cu 於實驗期中(10 天)及期末(20 天)採樣分析後所得之土壤污染物殘留濃度分佈圖。Cu 之初始濃度為 702 mg/kg，經過 10 天之整治後，期

中採樣濃度降至 672 mg/kg，從圖 71 之其中污染物分佈圖，可發現 Cu 金屬於本系統中緩慢往陰極移動去除，c 層近陽極濃度累積部分與上述 Cr 金屬所述，因模組變形，部分槽液累積於此造成，而在 a、b 層其濃度分布可看出皆往緩慢朝向陰極移動，而在 20 整治結束後，其平均濃度為 655 mg/kg，從圖 72 中可看出，a、c 層平均濃度降低，而 b 層平均濃度上升，其主要為 a、c 層污染物聚集在 b 層往陰極移動，但因其 Test 2 電位坡降為 0.2 V/cm，去除效果較 Test 1 之 0.35 V/cm，緩慢，因此在 20 天之整治後，雖明顯可看出逐漸往陰極移動之趨勢，但由於整治時間較短，尚未能移出土體，達到有效之去除成效。

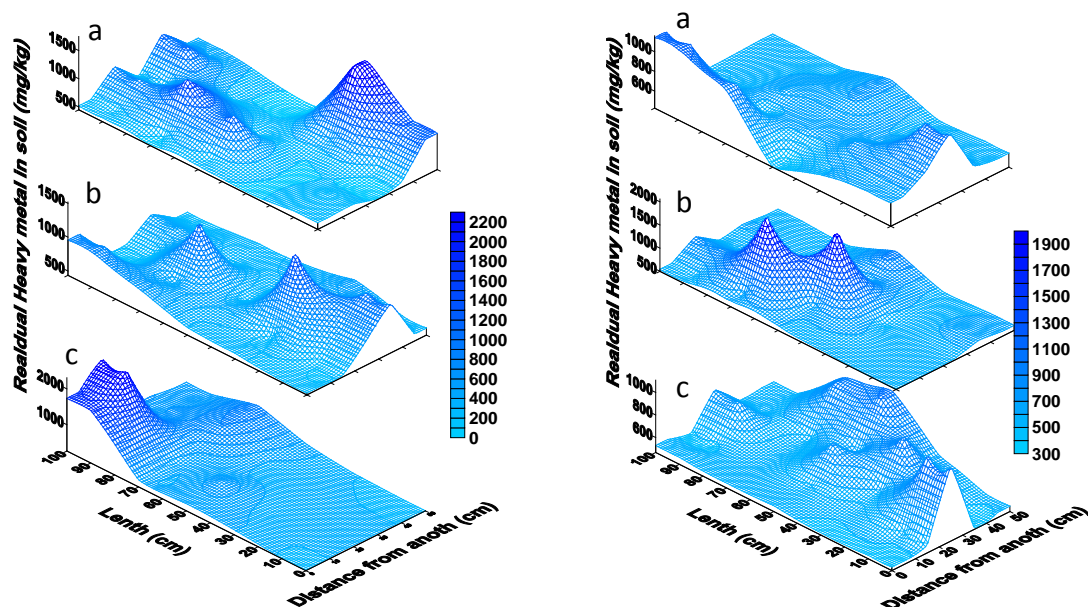


圖 71、Test 2 Cu 殘留濃度分布圖(10 天) 圖 72、Test 2 Cu 殘留濃度分布圖(20 天)
(a)top ; (b)middle ; (c)bottom (a)top ; (b)middle ; (c)bottom

圖 73、74 為金屬 Pb 於實驗期中(10 天)及期末(20 天)採樣分析後所得之土壤污染物殘留濃度分佈圖。Pb 之初使濃度為 219 mg/kg，而 Pb 之期末之平均濃度分別為 147 mg/kg，Pb 屬較難以移動之重金屬，且 Test 2 之電位坡降降為 0.2 V/cm 之情況下，相對對於 Pb 之移動去除效果亦不明顯，，與 Test 1 試驗成效相似，從圖中可發現 Pb 已有明顯往陽極移動之趨勢，但由於移動速度較為緩慢，以致去除成效不彰。

圖 75、76 為金屬 Zn 於實驗期中(10 天)及期末(20 天)採樣分析後所得之土壤污染物殘留濃度分佈圖。Zn 之初使濃度為 425 mg/kg，在圖 75 期中採樣分析後

發現，Zn 之平均濃度為 315 mg/kg，而從圖中發現，在近陰極部分之 Zn 濃度分佈皆較近陽極部分低，推測其主要去除之 Zn 皆為在近陰極部分，因係電位坡降較低，電滲透流較不顯著，無法有效移動土體中之污染物導致陽極殘留濃度較陰極高之原因，而在期末採樣分析後發現，土壤平均濃度降為 247 mg/kg，從圖 76 中可發現，本系統對 Zn 之移動去除仍具一定成效，在整治 20 天後，土壤中的 Zn 逐漸往陰極移動並移除，為期末採樣分析之濃度比期中之濃度低主因。

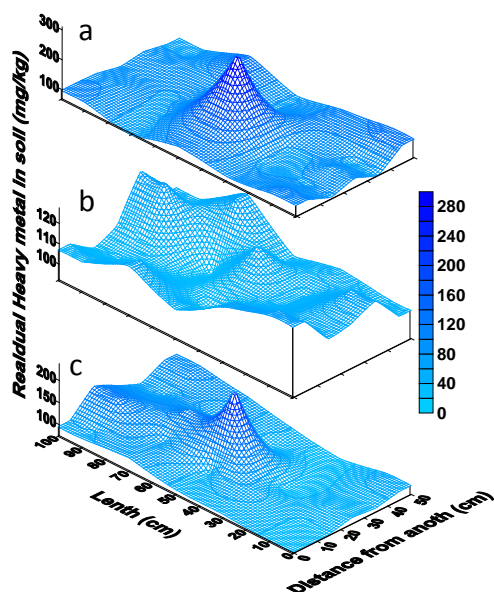


圖 76、Test 2 Zn 殘留濃度分布圖(10 天)
(a)top ; (b)middle ; (c)bottom

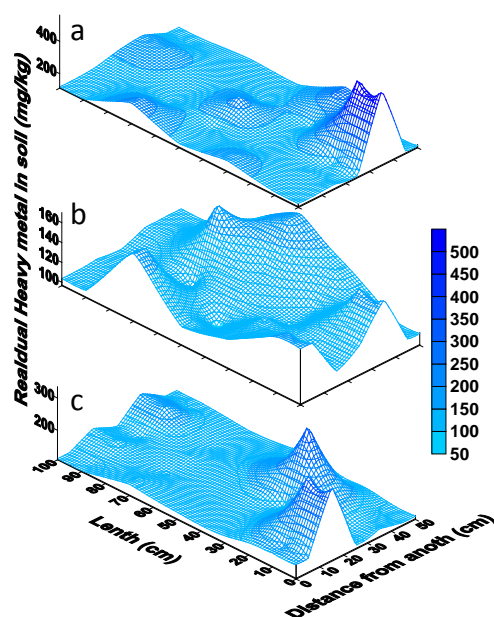


圖 74、Test 2 Zn 殘留濃度分布圖(20 天)
(a)top ; (b)middle ; (c)bottom

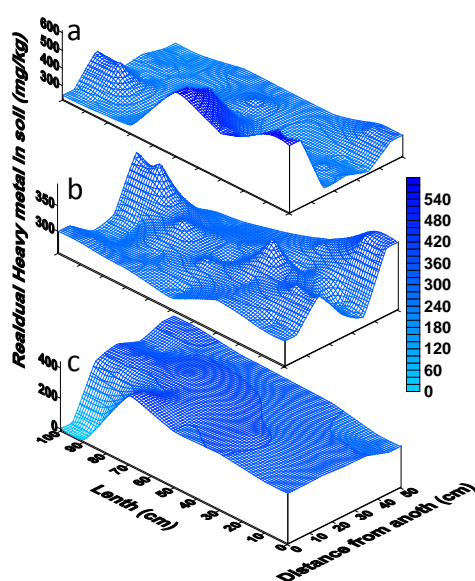


圖 75、Test 2 Pb 殘留濃度分布圖(10 天)
(a)top ; (b)middle ; (c)bottom

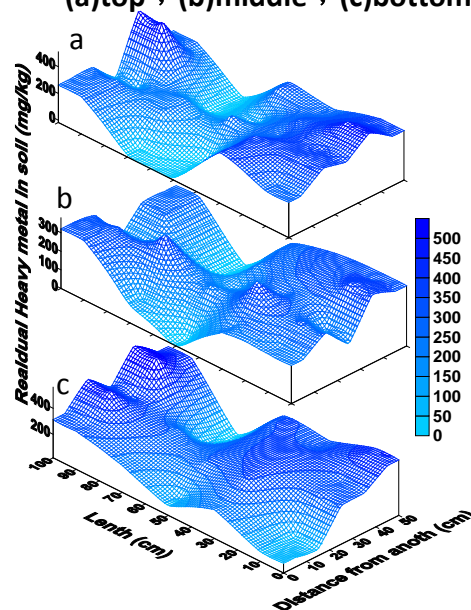


圖 73、Test 2 Pb 殘留濃度分布圖(20 天)
(a)top ; (b)middle ; (c)bottom

4.6.3 處理效率及機制分析

Test 1 及 Test 2 實驗處理機制繪如圖 77，為不同金屬於整治時間 20 天，操作流質為 0.05 M 乳酸、電位坡降 0.02~0.35 V/cm、電極接觸面積為 26,400 cm²，陰陽極電極皆為空心不銹鋼棒電極(SUS 316)之操作條件下處理機制圖，而後續之從而得到初步實場操作參數。

本研究之污染土壤為某電鍍工廠因地下管線破裂造成之重金屬污染，主要為 Cu、Cr、Ni、Pb 及 Zn，其利用本研究之電動力系統整治後，Test1(圖 77a)實驗中重金屬之去除效率分別為 81.9、93.6、44.9、51.6 及 82.4 %，其中被去除之金屬污染物大部分被發現鍍在陰極電極棒上，除了 Cu 有 25.5 %及 Ni 有 10.9 %在槽液中被發現外，其他金屬都只有不到 5 %在槽液中，而在殘餘之部分，除了 Pb 及 Ni 分別殘餘 48.4 %及 55.1%，其他三個金屬之殘餘率都在 20 %以下，而其中 Pb 及 Ni 之陽離子遷移率分別為 0.15~0.56 m²/V.s 及 0.09~0.18 m²/V.s，於本系統之條件下應屬較難以移動之金屬離子，因此 Pb 及 Ni 之去除效率較其他金屬差，但仍顯示在 Test1 實驗中對目標污染物皆已達到有效移動及去除之成效，特別是在較難以去除之金屬 Pb 及 Ni 部分，於殘留濃度分析中亦可看出已達有效移動之成效。(結果彙整如下表 11)

Test 2(圖 77b)實驗中重金屬之去除效率分別為 4.2、31.6、35.6、32.8 及 41.8%，其中 Tset 2 之試驗中，期末採樣時發現陰極電極外層有鍍上金屬，而 Test 2 實驗改變參數為電位坡降，從 0.35 V/cm 降至 0.2 V/cm，操作流質同為 0.05 M 乳酸、電極接觸面積為 26,400 cm²，將去除率與 Test 1 比較即可發現要低很多，尤其在金屬 Cu，從殘留濃度中雖可明顯看出在 Test 2 系統中仍可有效使其有效移動，但移動速度緩慢，且由於電位坡降降低之緣故，無法有效將金屬 Cu 與土壤之鍵結型態由較強鍵結之氧化態及有機態改變成較弱之鍵結型態，如 Test 1 試驗從而藉由電滲透流及電子遷移方式移出，而金屬 Cu 之陽離子遷移率分別為 0.05~0.54 m²/V.s，在無法有效改變其鍵結型態之情形下，如 Pb 及 Ni 在本系統中屬難以移動之金屬離子，因此比較 Test 1 及 Test 2 對 Cu 之去除效果可發現，電位坡降之改變是一非常重要之影響因素。

4.6.4 銅鍵結型態分析

在經初步檢測分析後 Cu 之初始濃度為法規標準之 2.3 倍(見表 11)，因此鍵結型態分析則以 Cu 為主要分析對象，圖 62 為 Test 1 電動力系統處理後之重金屬

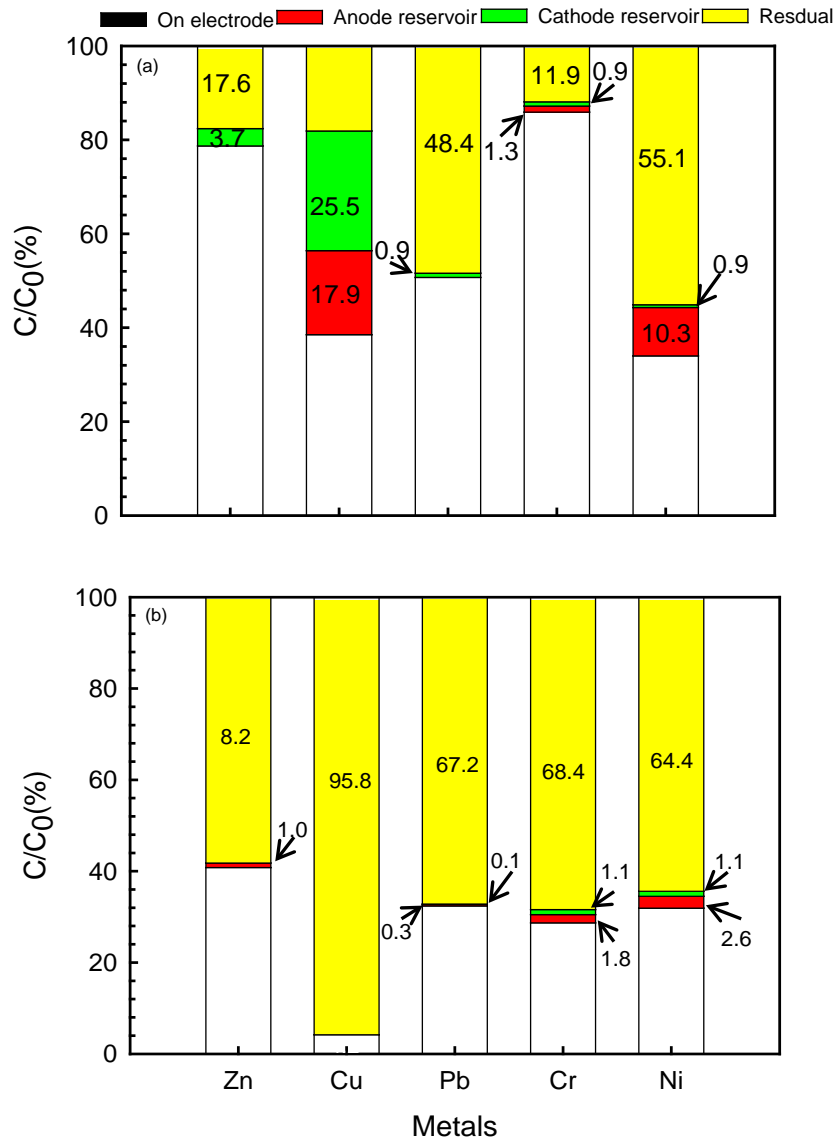


圖 77、處理機制圖(a)Test 1；(b)Test 2

Cu 與土壤鍵結型態分析圖。

圖 78 為 Test 1 及 Test 2 金屬 Cu 與土壤之鍵結型態分析圖。序列萃取由陽極至陰極分成五等分進行採樣分析，得到如圖 78；在 Test 1 中(圖 78a)，整治前 Cu 之鍵結型態為 97.7 %氧化態、2.3 %有機態，皆屬較難以移動去除之鍵結型態，其中扣掉已被去除之金屬 Cu 佔 81.9 %，分析結果得到由陽極往陰極的型態分布主要為氧化態及有機態，而氧化態又在近陽極部分為 14.4 %而逐漸往陰極遞減至 1.2 %，有機態則為由近陽極的 3.7 %往陰極遞增至 16.9 %，其推測靠近陰極部分之土壤因通過電流在土壤電阻的消耗下而降低，使之無法有效改變近陰極部分之 Cu 鍵結型態，而在近陽極部分，反之則為通過電流較高，改變金屬 Cu 之鍵結型態，並朝陰極移動去除，而與初始土壤鍵結型態分析比較可得知，本研究之電動力處理過程應已有效將大部分 Cu 之鍵結型態從較難以移動之有機態及氧化態轉

換成較易移動之碳酸鹽態及可交換態等，並已達到有效去除之成效。

而在 Test 2 中(圖 78b)，初始土壤之鍵結型態為 96.4 %氧化態、3.6 %有機態，屬難以移除之鍵結型態，而在經過 20 天整治後，Test 2 Cu 之去除率為 4.2 %，其大部分之鍵結型態主要仍為氧化態及有機態，平均分別為 42.4 %及 38.6 %，從中推測應係電位坡降降為 0.2 V/cm 後，無法有效改變 Cu 與土壤之鍵結型態，以致 Cu 之鍵結大部分仍屬較難以移動之氧化態和有機態，無法有效利用電滲透流及電子遷移對其達到移除之成效；與 Test 1 比較即可明顯看出鍵結型態之差異性，因此可得知在本電動力系統中，電位坡降之改變是對移除目標污染物金屬 Cu 的一大主要影響因素。

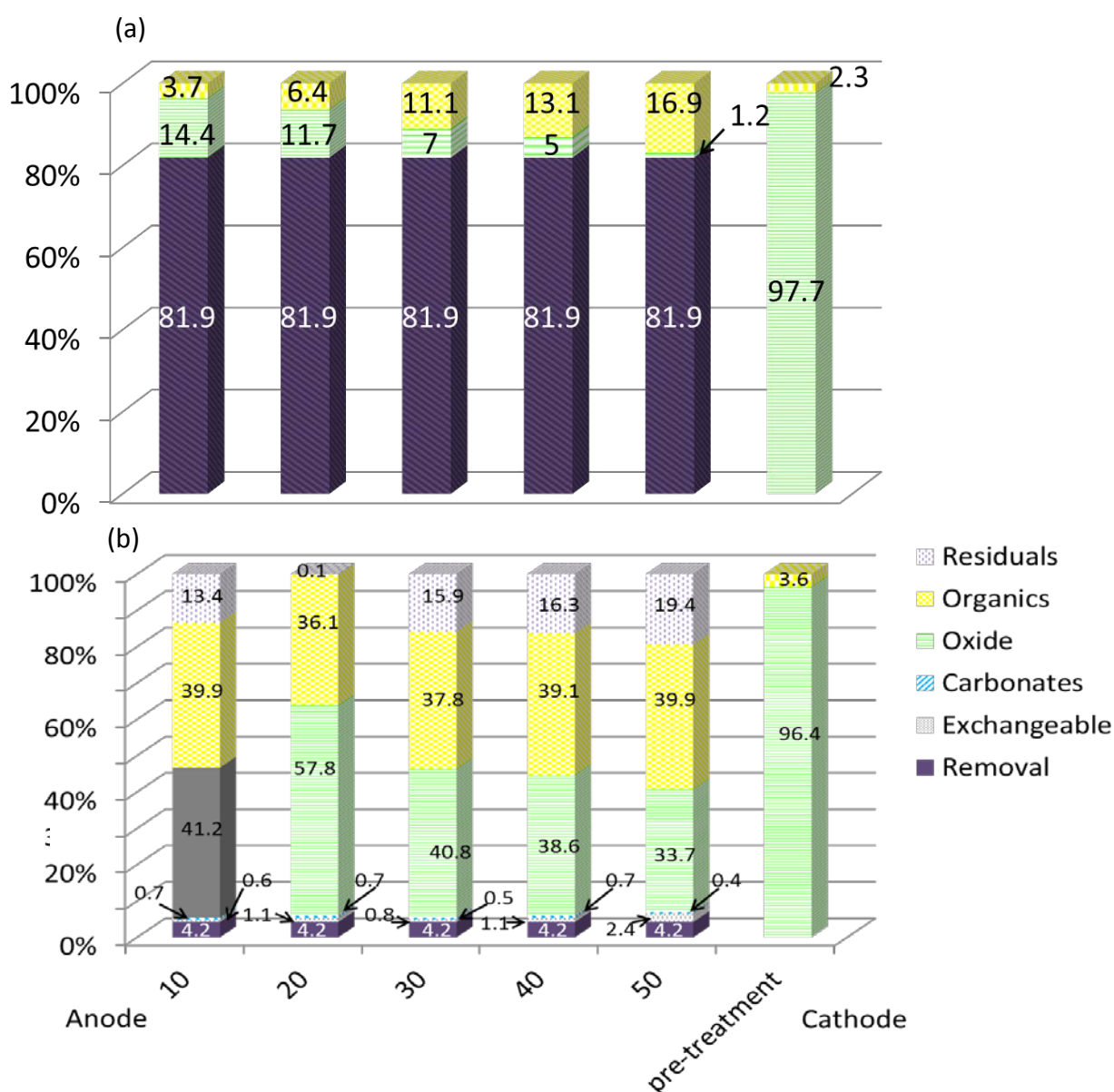


圖 78、電動力系統處理後銅之鍵結型態分佈圖(a)Test 1；(b)Test 2

表 11、實驗結果彙整表

| Test | Electrode | Pollutants | | Electrode contact area (cm ²) | Q _e ×10 ⁻⁴ (cm ³ /s) | K _e ×10 ⁻⁶ (cm ² /V-s) | Residual in soil (%) | Collected in | | Collected on electrode (%) | Remove efficiency % |
|------|------------------------------|------------|------------------|----------------------------------------------|----------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|-------------------------|--------------|-------------|-------------------------------|------------------------|
| | | metal | Conc. (mg/kg) | | | | | Anode (%) | Cathode (%) | | |
| | | | | | | | | | | | |
| 1 | Stainless steel (SUS 316) | Zn | 436 | 26,400 | 752.3 | 47.8 | 17.6 | ND | 3.7 | 78.7 | 82.4 |
| | | Cu | 902 | | | | 18.1 | 17.9 | 25.5 | 38.5 | 81.9 |
| | | Pb | 1322 | | | | 48.4 | ND | 0.9 | 50.7 | 51.6 |
| | | Cr | 270 | | | | 11.9 | 1.3 | 0.9 | 85.9 | 88.1 |
| | | Ni | 766 | | | | 55.1 | 10.3 | 0.6 | 34.0 | 44.9 |
| 2 | Stainless steel (SUS 316) | Zn | 425 | 26,400 | 520.8 | 57.9 | 58.2 | 1.0 | ND | 40.8 | 41.8 |
| | | Cu | 702 | | | | 95.8 | ND | ND | 4.2 | 4.2 |
| | | Pb | 219 | | | | 67.2 | 0.3 | 0.1 | 32.4 | 32.7 |
| | | Cr | 218 | | | | 68.4 | 1.8 | 1.1 | 28.7 | 31.6 |
| | | Ni | 393 | | | | 64.4 | 2.6 | 1.1 | 31.9 | 35.6 |
| 3 | Stainless steel (SUS 316) | Zn | | | | | * 測試進行中，將於定稿本補齊 | | | | |
| | | Cu | | | | | | | | | |
| | | Pb | | | | | | | | | |
| | | Cr | | | | | | | | | |
| | | Ni | | | | | | | | | |

* 測試進行中，將於定稿本補齊

Ps : Potential gradient : 0.35 V/cm : Processing time : 20 days : Processing fluid : 0.05 M Lactic acid ; Power consumption(kwh/m³):Test1: 74.47 kwh/m³ ; Test2: 9.83 kwh/m³

4.6.5 經濟效益分析

表 12、13 分別為經濟效益評估表(耗材、監測儀器)，從下表中可發現電極為實驗中主要耗材部分，其中每處理一立方米的土量，電極即佔成本達 85 %之多(本試驗之電極以使用一次即更新計算)，而主要影響電極耗用之原因為槽液 pH 值，若能有效且穩定的控制 pH 變化情形，應能有效降低電極之耗用，達到節省成本之效果；在監測儀器部分，以本研究為例，30 天即可完成一組實驗，每年最多即是 12 組實驗，儀器之使用年限為五年之計算下，每一組實驗中監測儀器之耗用只佔成本不到 1 %，因此監測儀器在正常情形的使用下，對於成本之影響甚小。

表 12、經濟效益估算表(耗材)

| Test No. | Electrode | | | | Processing fluid | | | |
|----------|--------------------------|-----------------------|----------------------|-----------------------------------|---------------------|--------------------------|---------------------------|-----------------------------------|
| | Substrate ⁽¹⁾ | Amount ⁽²⁾ | Price ⁽³⁾ | NTD/m ³ ⁽⁴⁾ | Name ⁽⁵⁾ | Price (L) ⁽⁶⁾ | Volume (L) ⁽⁷⁾ | NTD/m ³ ⁽⁸⁾ |
| 1 | Stainless steel | 24 | 556 | 46,014 | 0.05 M | 273 | 8.22 | 7,738 |
| 2 | Stainless steel | 24 | | 41,700 | Lactic acid | | | 7013 |

[(2) × (3)]/(10) = (4) ; [(6) × (7)]/(10) = (8) ; PS.Lactic acid: NTD 6,825/25L ; 電極以每組實驗皆更新計算

| Test No. | Soil | | Electricity | | Total/m ³ ⁽¹³⁾ |
|----------|---------------------------------|-----------------------------------------------|---------------------------------------------------------|---------------------|--------------------------------------|
| | Soil weight (kg) ⁽⁹⁾ | Soil volume (m ³) ⁽¹⁰⁾ | Power consumption (kwh/m ³) ⁽¹¹⁾ | NTD ⁽¹²⁾ | |
| 1 | 700.0 | 0.29 | 74.5 | \$260 | \$54,012 |
| 2 | 770.0 | 0.32 | 9.8 | \$34.3 | \$48,747 |

[(9) × 1000/2.41]/10⁶ = (10) ; (11) × 3.5 = (12) ; (4) + (8) + (12) = (13)

PS.Soil particle density:2.41 g/cm³ ; Industrial electricity:3.5 NTD/kwh

表 13、經濟效益估算表(監測儀器)

| Monitoring instruments | Amount ⁽¹⁾ | Price ⁽²⁾ | NTD/year ⁽³⁾ | NTD/month ⁽⁴⁾ |
|------------------------|-----------------------|----------------------|-------------------------|--------------------------|
| 微電腦酸鹼度傳送器 | 2 | 32,800 | 13,120 | 1093 |
| 微電腦電導度監視器 | 2 | 11,000 | 4,400 | 367 |
| 六點式無紙式紀錄器 | 2 | 34,000 | 13,600 | 1133 |
| 耐酸鹼無軸封傳送泵 | 2 | 7,800 | 3,120 | 260 |
| 電磁式隔膜加藥泵 | 2 | 5,000 | 2,000 | 167 |
| 桌上型三用電表+電容 | 3 | 7,000 | 4,200 | 350 |
| 電磁式定量加藥機 | 2 | 7,100 | 2,840 | 237 |
| 圓桶型 MC60 | 2 | 495 | 198 | 17 |
| 運輸桶 SLT300 | 2 | 1,890 | 756 | 63 |
| 其他耗材 | | 3,085 | 617 | 51 |
| 合計 | | | \$44,851 | \$3738 |

[(1) × (2)]/5 = (3) ; (3)/12 = (4)

PS.監測儀器以五年為使用期限計算

第五章 結論

本研究主要之成果可歸納如下：

1. 在第一代現地三維模場尺寸之設計，而在與環工公司多次洽商後確立最大土體尺寸為(1.0 m × 1.0 m × 0.75 m, L × W × H)，而三維模場之設計則是根據電極距離及土體體積多寡之參數改變，針對陰陽極槽做彈性調整之控制。
2. 在電極設計方面，採用空心不銹鋼棒電極，底部為密閉式設計，避免槽液累積於空心管內部造成腐蝕之現象，電極之尺寸為(5 cm × 100 cm, D × L)，接觸面積經計算後為 1,100 cm²；處理土壤為受重金屬污染，因此選用不鏽鋼棒(Stainless steel rod)為陰陽極電極；整治時間以 20 天為基準，計算後陰陽極所需電極接觸面積為 26,400~39,600 cm²。
3. 本研究之 Test1 實驗中，操作條件為整治時間為 20 天、電位坡降為 0.35 V/cm、操作流質為 0.05 M 乳酸(Lactic acid)且電極接觸面積為 26,400 cm²時，其對土相中重金屬(Zn、Cu、Pb、Cr 及 Ni)之去除效率分別為 82.4 %、81.9 %、51.6 %、88.1 %及 44.9 %去除效率，可看到除了 Pb 及 Ni 其他金屬皆已達 80 %以上，因其 Pb 及 Ni 之陽離子遷移率較低之緣故，因此去除率較其他金屬差；改變電位坡降為 0.2 V/cm(Test 2)，其對土相中重金屬(Zn、Cu、Pb、Cr 及 Ni)之去除效率分別為 41.8 %、4.2 %、32.8 %、31.6 %及 35.6 %，比較 Test 1 及 Test 2 之去除效率，電位坡降對污染物移除之效率是一重要影響因素。
4. 在本研究系統 Test 1 及 Test 2 中從上述污染物土壤殘留濃度分布中皆可發現，其污染物有別於一般實驗室小型模組，除了藉由電滲透流由陽極往陰極去除之縱向移動外，另明顯可看出有發生垂直向移動之現象，較深層之污染物明顯往中層及頂層聚集，其推測應係為模擬現地試驗，土壤頂部不另施加壓力，以致污染物藉由反應期間所產生之氫氣往上移動而往土壤頂部聚集。
5. 在電動力整治過程中，因化學反應之發生，以致整治土壤溫度會有上升之情形，因此於試驗過程中將對土壤溫度做定期之量測動作，而在 20 天之整治期間，土壤平均溫度為 38.2℃，平均室溫則為 32.8℃，土壤溫度與室溫差異在 5.4℃。
6. 本研究系統亦對土體監測其導電度，由陽極往陰極分成 3 等分做量測，在 20 天整治後平均分別為 0.8、0.2 及 0.08 mA/cm²，而初始值分別為 0.6、0.11 及 0.08 mA/cm²並無明顯變化情形，表在整治過程中無阻塞之情形發生，其因係在整治期間本系統在陰陽極皆設有 pH 監測器，做 pH 值控制，避免產生金屬沉澱物，。

7. 在目標污染物金屬 Cu 之序列萃取上，於 Test 1 中，Cu 之型態分布主要有 97.7 % 為氧化態及 2.3 % 為有機態，當電位坡降為 0.35 V/cm 時，有 81.9 % 的 Cu 被去除，不到 20 % 殘留於土體，而其型態分佈在近陽極因電流較強其形態分布為氧化態(14.4 %)，而近陰極部分則因電流在經土壤電阻消耗下已逐漸降低，因此近陰極部分 Cu 之鍵結型態分布主要為呈現有機態(16.9 %)；在 Test 2 中，從鍵結型態即可看出，由於電位坡降降為 0.2 V/cm，無法有效改變 Cu 之鍵結型態，在整治後 Cu 之鍵結型態仍有 42.4 % 及 38.6 % 屬難以移動之氧化態及有機態，使之無法有效達到去除之成效。
8. 於 Test 1 中由於在 0.35 V/cm 電位坡降能有效將 Cu 之鍵結型態由強鍵結轉為若鍵結，並主要藉由電滲透流及電子遷移方式，朝向陰極收集去除，而在 Test 2 實驗中，因降低電位坡降為 0.2 V/cm，無法有效將 Cu 之鍵結型態由強轉弱，以致無法如 Test 1 藉由電滲透流或電子遷移方式移除，但在實驗結束時發現，在 Test 1 及 Test 2 陰極電極棒皆有金屬電鍍於外層，使電極重量增加。
9. 於成本效益方面之考量，電極棒的消耗為主要經費耗用之原因，其中電極佔成本的 85 % 之多。實驗處理之土體體積及操作時間將直接影響電極棒使用數量，且金屬電極處於酸性液體時會有腐蝕情形，因此槽液 pH 值之控制是一重要控制因素，而在本研究之試驗中，電位坡降在 0.35 V/cm 時發現電極發生氧化腐蝕之現象，而於陰極還原電鍍，造成電極棒之耗損，是為未來應用於實場之主要限制之一，其中每次實驗所需之電極接觸面積為 26,400~39,600 cm² (電極以每次皆更新計算)，換算為電極數量為 24~36 支，在試驗期間若能達到有效控制 pH 值之目的，將可減少電極腐蝕情形，使電極可重複使用，即可減少電極之消耗及降低成本。

參考文獻

行政院環保署 <http://www.niea.gov.tw>.

陳琨焯(2008),環境介質中壬基苯酚聚乙氧基醇(NPnEO)類之光觸媒催化降解及電動力復育處理技術之研究,國立高雄大學土木與環境工程學系碩士論文.

蔡在唐(2002),以電動力法復育受油品污染土壤,國立屏東科技大學環境工程與科學系碩士論文.

袁菁、翁誌煌、江姿幸(2002),零價鐵粉提昇電動力處理四氯乙烯污染土壤之初步研究,第十七屆廢棄物處理技術研討會,雲林.

劉永章(1998),具表面帶電層細管與帶電複合粒子懸浮液中之電動力現象,國立台灣大學化學工程學研究所博士論文.

Agnew, K., Andrew, B., Cundy, Hopkinson, L., Ian, W., Croudace, P. E. and Warwick, P.P. (2011). Electrokinetic remediation of plutonium-contaminated nuclear site wastes:Results from a pilot-scale on-site trial. Journal of Hazardous Materials, 186, 1405-1414.

Altin, A. and Dehirmenci, M. (2005). Lead (II) removal from natural soils by enhanced electrokinetic remediation. Science of the Total Environment, 337, 1-10.

Amrate, S., Akretche, D.E., Innocent, C. and Seta, P. (2005). Removal of Pb from a calcareous soil during EDTA-enhanced electrokinetic extraction. Science of the Total Environment, 349, 56-66.

Babel, S. and Dacera, M. (2006). Heavy metal removal from contaminated sludge for land application: A review. Waste Management, 26, 988-1004.

Battisti, A.D. and Ferro, S. (2007). Electrokinetic remediation Methods of remediation of soils and ground waters.Electrochimica Acta, 52, 3345-3348.

David, B., Gent, R., Bricka, M., Akram, N., Alshawabkeh, A.N., Steven, L., Larson. Fabian, G. and Granade, S. (2004). Bench- and field-scale evaluation of chromium

Giannis, A., Nikolaou, A., Pentari, D. and Gidarakos, E. (2009). Chelating agent-assisted electrokinetic removal of cadmium, lead and copper from contaminated soils. Environmental Pollution, 157, 3379-3386.

Khebiuab, C. and Bauer, F. C. (1987). Accuracy of selective extraction procedures for metal speciation in model aquatic sediments. Anal. Chem, 59, 1417-1423.

Kim, D.H., Ryu, B.G., Park, S.W., Seo, C.I. and Baek, K. (2009). Electrokinetic remediation of Zn and Ni-contaminated soil.Journal of Hazardous Materials, 165, 501-505

Lee, Y.J., Choi, J.H., Lee, H.G., Ha, T.H. and Bae, J.H. (2011). Pilot-scale study on in situ electrokinetic removal

- of nitrate from greenhouse soil. *Separation and Purification Technology*, 79, 254-263.
- Lee, K.Y., Kim, H.A., Lee, W.C., Kim, S.O., Lee, J.U., Kwon, Y.H. and Kim, K.W. (2012). Ex-situ field application of electrokinetic for remediation of shooting-range soil. *Environ Geochem Health*, 34, 151-159.
- Legeman, R., Clarke, R.L. and Pool, W. (2005). Electro-reclamation, a versatile soil remediation solution. *Engineering Geology*, 77, 191-201.
- Prashanth, R., Buchireddy, R., Bricka, M., David, B. and Gent. (2009). Electrokinetic remediation of wood preservative contaminated soil containing copper, chromium, and arsenic. *Journal of Hazardous Materials*, 162, 490-497.
- Rubio, J.M., Maroto, C., Lahoz, F., Herruzo, C. and Alonso (2011). Electrokinetic remediation: The use of mercury speciation for feasibility studies applied to a contaminated soil from Almaden. *Electrochimica Acta*, 56, 9309-9310.
- Shapiro, A. P., Renaud, P. C. and Probstein, R. F. (1989). Preliminary Studies on the Removal of Chemical Species from Saturated Porous Media by Electroosmosis. *Physicochemical Hydrodynamics*, Vol. 11, No. 56, pp. 785-802.
- Shen, Z., Zhang, H., Qu, L., Dong, Z., Zheng, S. and Wang, W. (2009). A modified EK method with an I-/I₂ lixiviant assisted and approaching cathodes to remedy mercury contaminated field soils. *Environ Geol*, 57, 1399-1407.
- University of Missouri-Columbia, Department of Civil Engineering, Columbia, MO 65201, U.S.A. (1990). Use of sequential extraction to evaluate the heavy metals in mining wastes.
- Wan, C., Du, M., Lee, D.J., Yung, X., Ma, W. and Zheng, L. (2011). Electrokinetic remediation of β -cyclodextrin dissolved petroleum hydrocarbon-contaminated soil using multiple electrodes. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*.
- Wang, J., Feng, X., Anderson, W.N., Xing, Y. and Shang, L. (2012). Remediation of mercury contaminated sites – A review. *Journal of Hazardous Materials*.
- Yuan, Y. and Weng, C.H., (2006). Electrokinetic enhancement removal of heavy metals from industrial wastewater sludge. *Chemosphere*, 65, 88–96.
- Zhou, D.M., Cang, L., Akram, N. and Alshawabkeh. (2006). Pilot-scale electrokinetic treatment of a Cu contaminated red soil. *Chemosphere*, 63, 964-971.
- Zhou, D.M., Deng, C.F., Cang, L., Akram, N. and Alshawabkeh, A.N. (2005). Electrokinetic remediation of a Cu-Zn contaminated red soil by controlling the voltage and conditioning catholyte pH. *Chemosphere*, 61, 519-527.

Zhou, D.M., Deng, C.F., Long and Cang. (2004). Electrokinetic remediation of a Cu contaminated red soil by conditioning chemical reagents. *Chemosphere*, 56, 265-273.