

大漢學校財團法人大漢技術學院

土木工程與環境資源管理系

碩士論文

利用電化學法處理簡易自來水設施

之水質改善特性研究

(以花蓮縣壽豐鄉米棧村、玉里鎮春日里為例)

Study of water quality improvement: Simple tap water facilities treatment  
with electrochemical method

指導教授：何志軒 博士

研究生：畢宜翔 撰

中 華 民 國 1 1 0 年 6 月

# 論文口試委員會審定書

大漢技術學院 土木工程與環境資源管理 系碩士班

研究生 畢宜翔 君所提之論文

利用電化學法處理簡易自來水設施之水質改善特性研

經本委員會審查並舉行口試，認為符合碩士學位標準。

|            |            |    |
|------------|------------|----|
| 學位考試委員會召集人 | <u>張福祐</u> | 簽章 |
| 指導教授       | <u>何志軒</u> | 簽章 |
| 委員         | <u>胡紹華</u> | 簽章 |
| 委員         | <u>張福祐</u> | 簽章 |
| 系主任        | <u>王世忠</u> | 簽章 |

中華民國 110 年 6 月 24 日

## 致謝

在學期間兩年中，非常的感謝指導教授何志軒博士，給予學生莫大的鼓勵與指導方針，從計劃案至論文架構的討論與方法，即使是廢水專責人員證照的考取，老師都是無微不至的教導，為了論文內容的完整性、精確性，縱使研究過程中遇到的瓶頸與癥結點，在老師諄諄教導、不辭辛勞的指導與提供寶貴的意見，猶如學生實驗研究中之明燈。在實驗藥品、器材及其竭盡藥品的添購，指導老師都會提供最大幫助，使學生能夠順利的完成本研究。也非常感謝蔡大勇學長的傳授與經驗分享，在致電給學長詢問實驗過程中不懂的地方，學長都是慷慨仗義的停下手邊工作，細心的指導與儀器使用，並且協助及教導我在最有限的時間內完成任務，也非常開心能與學長互相討論實驗方法及參考資料蒐集，時常給我鼓勵與打氣，並分享實驗歷程遇到的困難點該如何克服。

萬分感謝張禎祐教授、胡紹華教授百忙抽空協助學生口試論文，並給予寶貴的建議及指導，使得學生的論文更加的完整。

感謝我的妻子，每當在實驗室度過時總會關心我的三餐溫飽，在家庭上默默的付出，將兩個孩子顧的體貼入微，讓我有最多的時間完成實驗並不須擔心家裡的事物，成就歸功於另一半的付出。

畢宜翔 謹誌

中華民國 110 年 6 月

## 中文摘要

山區水源得來不易，水源的水質與水量不穩定性，多數簡易自來水系統大腸桿菌數檢測為不合格，本研究以山區水質改善為研究主軸，利用電化學氧化法對山區水質處理，以 NaCl(氯化鈉)為電解質進行電化學氧化法殺菌方式淨水處理的效果探討，做為山區一級公共用水的使用，研究內容分別為 NaCl(氯化鈉)濃度間的關係、石墨板片數、電極頭夾法、餘氯及電化學氧化方法、大腸桿菌去除效果。本研究區分實驗室模擬及實場實驗：

1. 實驗室模擬係利用電化學氧化法添加不同濃度 NaCl(氯化鈉)，以直流電連續通電，探討不同濃度電解液之pH、氧化還原電位、分光光度計吸收值及導電度。以相同極板間電壓差不同通電時間，探討最佳石墨板片數及電極頭夾法。石墨電極板最佳排列方式 (Type E)，其餘氯及大腸桿菌去除效果。
2. 實場實驗採取花蓮縣壽豐鄉米棧村、玉里鎮春日里兩處之簡易自來水設施，最佳條件分別操作，探討不同稀釋倍率之大腸桿菌除率效果。兩處簡易自來水設施儲水塔以不同稀釋倍率壽豐鄉米棧村、玉里鎮春日里，測定大腸桿菌去除效果。
3. 實驗結果顯示，在實驗室模擬中以 5g/L NaCl(氯化鈉)電解液、石墨電極板排列以(Type E)形式，10分鐘與20分鐘通電時間，極板間電壓差10V，條件最佳，可達大腸桿菌去除率90%以上。在實場實驗以上述最佳條件，稀釋倍率可達大腸桿菌去除率75%以上。

關鍵詞：電化學法、食用鹽、氯化鈉、簡易自來水

# Abstract

Obtaining water from the mountain area is not easy due to the instability of water quality and the insufficiency of the amounts of water. Most of the tap water systems in these areas fail to pass the E. coli count standard. This research focuses on the improvement of the water quality in these mountainous areas through electrochemical oxidation. This would be carried out by using NaCl (sodium chloride) as an electrolyte for sterilization. Its compatibility for public and irrigation use will be determined by discussing its water purification effects on these mountainous areas. This research would include the relation between NaCl's (sodium chloride's) concentration, the number of graphite plates, the electrode voltage clamp method, the residual chlorine and electrochemical oxidation's efficiency on E. coli removal. This research distinguishes both laboratory simulations and field experiments.

1. The laboratory simulation uses electrochemical oxidation added with different concentrations of NaCl (sodium chloride) and continuous electrification using a direct current to explore the difference in pH values, oxidation-reduction potential, spectrophotometer absorption and conductivity of electrolytes of varying concentrations. Using the voltage difference produced by electrifying two graphite plates at different durations, we can analyze the electrode voltage clamp method, the optimal number of graphite plates, the most effective arrangement of graphite plates (Type E), residual chlorine and the efficiency of E. coli removal.
2. Two tap water facilities were used in the field experiment: one in Mizhan Village, Shoufeng Township, Hualien County and the other in Chunri Village, Yuli Township, Hualien County. Different conditions were operated separately to explore the efficiency of various dilution ratios in removing E. coli. The two tap water storage towers were used to determine the most efficient condition in E. coli removal.

3. Experimental results in laboratory simulations show that 5g/L of NaCl (sodium chloride) electrolytes, with the graphite plates arranged in Type E formation, powered for 10 and 20 minutes produces the best efficiency in eliminating E. coli with as much as 90% E. coli removal rate. Field experiments performed under the above conditions, dilution rate can achieve more than 75% of E. coli removal rate.

Keywords: Electrochemical oxidation, edible salt, sodium chloride, tap water



# 目錄

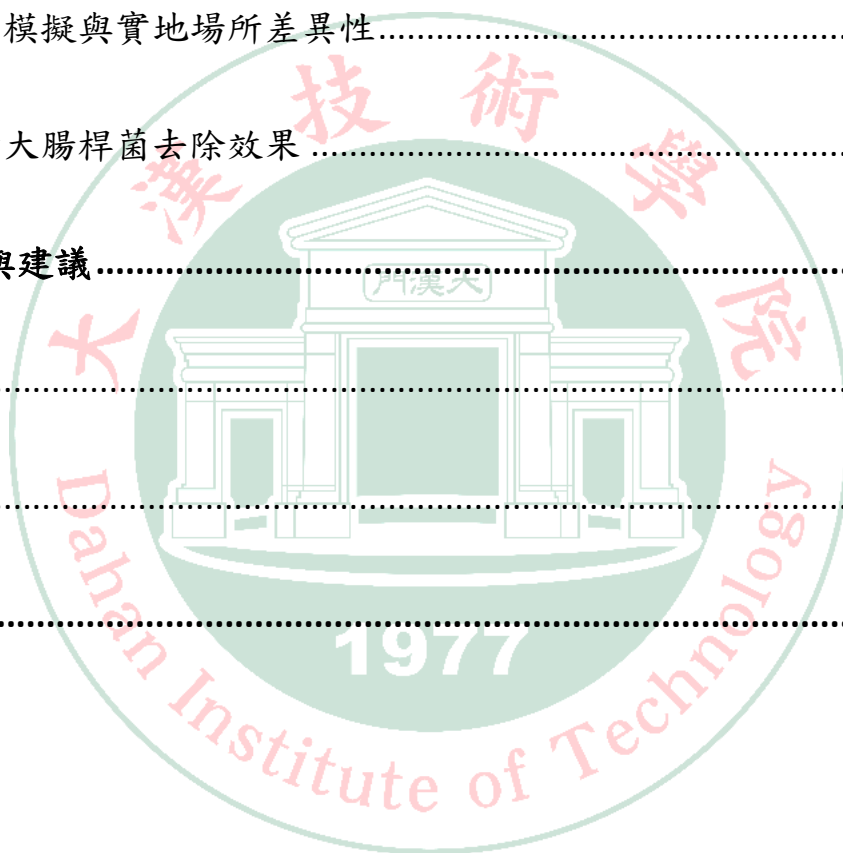
|                          |     |
|--------------------------|-----|
| 致謝.....                  | I   |
| 中文摘要.....                | II  |
| Abstract.....            | III |
| 目錄.....                  | V   |
| 第一章 前言.....              | 1   |
| 1-1 研究動機.....            | 1   |
| 1-2 研究目的.....            | 1   |
| 1-3 研究內容.....            | 2   |
| 第二章 文獻回顧.....            | 3   |
| 2-1 自來水設施.....           | 3   |
| 2-1-1 自來水設施標準.....       | 3   |
| 2-1-2 飲用水表準檢驗項目.....     | 3   |
| 2-1-3 簡易自來水事業管理條例.....   | 4   |
| 2-1-4 自來水設施.....         | 6   |
| 2-1-5 自來水水源需注意之水質問題..... | 7   |

|                                      |           |
|--------------------------------------|-----------|
| 2-2 簡易自來水系統 .....                    | 7         |
| 2-2-1 簡易自來水設施 .....                  | 8         |
| 2-2-2 簡易自來水系統與飲用水標準差異性 .....         | 9         |
| 2-2-3 簡易自來水設置及管理 .....               | 9         |
| 2-2-4 簡易自來水水源需注意之水質及供水問題 .....       | 12        |
| 2-3 花蓮縣簡易自來水系統 .....                 | 14        |
| 2-4 水質滅菌處理介紹 .....                   | 15        |
| 2-4-1 公(私)場所固定供水設備介紹 .....           | 15        |
| 2-4-2 影響消毒效率包括物理、化學或其他生物性因子 .....    | 15        |
| 2-5 電化學氧化處理技術 .....                  | 16        |
| 2-5-1 電化學混凝法 .....                   | 16        |
| 2-5-2 電聚浮除法 .....                    | 17        |
| 2-5-3 電芬頓(electro-Fenton, EF)法 ..... | 18        |
| 2-5-4 電化學處理法 .....                   | 19        |
| <b>第三章 實驗研究設備與方法 .....</b>           | <b>27</b> |
| 3-1 實驗藥品與實驗材料、設備 .....               | 27        |



|                                      |           |
|--------------------------------------|-----------|
| 3-1-1 實驗藥品.....                      | 27        |
| 3-1-2 實驗儀器.....                      | 31        |
| 3-2 實驗方法.....                        | 39        |
| 3-2-1 間接電化學法.....                    | 40        |
| 3-2-2 間接電化學法大腸桿菌試驗檢測.....            | 42        |
| <b>第四章結果與討論.....</b>                 | <b>44</b> |
| 4-1 NaCl(氯化鈉)、食用鹽濃度間的變化.....         | 46        |
| 4-1-1 不同濃度及時間的差異性.....               | 46        |
| 4-1-2 連續通電不同時間與不同濃度間的變化.....         | 47        |
| 4-1-3 食用鹽與 NaCl(氯化鈉)分光光譜吸收值變化關係..... | 55        |
| 4-2 石墨電極板間數量、夾法的影響.....              | 56        |
| 4-2-1 石墨電極板數量、夾法選定.....              | 56        |
| 4-2-2 石墨電極板數量、夾法選定探討.....            | 56        |
| 4-2-3 石墨電極板間差異性對大腸桿菌去除效果.....        | 61        |
| 4-3 石墨電極板排列方式(Type E)與濃度關係.....      | 64        |
| 4-3-1 四種濃度間 pH、ORP、導電度變化.....        | 64        |

|                                    |           |
|------------------------------------|-----------|
| 4-3-2 四種濃度間餘氯監測 .....              | 67        |
| 4-3-3 四種濃度 10、20 分鐘對大腸桿菌去除效果 ..... | 69        |
| 4-3-4 稀釋倍率對大腸桿菌去除效果 .....          | 69        |
| 4-4 實場實驗 .....                     | 71        |
| 4-4-1 實驗室模擬與實地場所差異性 .....          | 71        |
| 4-4-2 米棧村大腸桿菌去除效果 .....            | 71        |
| <b>第五章結論與建議 .....</b>              | <b>76</b> |
| 5-1 結論 .....                       | 76        |
| 5-2 建議 .....                       | 77        |
| <b>參考文獻 .....</b>                  | <b>78</b> |



## 圖目錄

|  |    |
|--|----|
| 圖 2.1 自來水廠設施 .....   | 6  |
| 圖 2.2.1 進水井 .....  | 8  |
| 圖 2.2.2 沉沙池 .....  | 8  |
| 圖 2.2.3 蓄水池 .....  | 8  |
| 圖 2.2.4 配水管 .....  | 8  |
| 圖 2.5.1 不同 pH 值 $\text{Cl}_2/\text{HOCl}/\text{OCl}^-$ 存在百分比變化 ..... | 23 |
| 圖 3.1.1 氯化鈉 .....  | 27 |
| 圖 3.1.2 大腸菌群快檢片 .....  | 28 |
| 圖 3.1.3 食用鹽 .....  | 29 |
| 圖 3.1.4 水中餘氯檢測粉枕包 .....  | 30 |
| 圖 3.1.5 氧化還原電位偵測計及酸鹼度計 .....   | 31 |
| 圖 3.1.6 水質分析分光光度計(UV/Vis) .....                                      | 32 |
| 圖 3.1.7 三用電錶 .....   | 33 |
| 圖 3.1.8 石墨電極板 .....  | 34 |
| 圖 3.1.9 電化學壓克力反應槽 .....  | 35 |
| 圖 3.1.10 電源供應器 .....   | 36 |
| 圖 3.1.11 四位數標準型電子分析天平 .....  | 36 |

|   |    |
|---|----|
| 圖 3.1.12 恆溫培養箱 .....                          | 37 |
| 圖 3.1.13 電磁加熱攪拌器.....                         | 38 |
| 圖 3.1.14 加熱蒸餾水機.....                          | 39 |
| 圖 3-2-1 本研究論文架構圖.....                         | 39 |
| 圖 3-2-2 不同夾法示意圖 .....                         | 41 |
| 圖 4-1 實驗討論流程圖 .....                           | 46 |
| 圖 4-1-1 連續通電 10 分鐘與不同濃度間的變化.....              | 50 |
| 圖 4-1-2 連續通電 20 分鐘與不同濃度間的變化.....              | 51 |
| 圖 4-1-3 連續通電 30 分鐘與不同濃度間的變化.....              | 53 |
| 圖 4-1-4 1~10g/L NaCl(氯化鈉)與食用鹽電解液之吸收光譜關係圖..... | 55 |
| 圖 4-2-1 連續通電 10 分鐘石墨電極板不同數量及夾法 .....          | 58 |
| 圖 4-2-2 連續通電 20 分鐘石墨電極板不同數量及夾法 .....          | 59 |
| 圖 4-2-3 石墨電極板間差異性連續通電 10 分鐘對大腸桿菌去除效果 .....    | 62 |
| 圖 4-2-4 石墨電極板間差異性連續通電 20 分鐘對大腸桿菌去除效果 .....    | 62 |
| 圖 4-2-5 溝渠水複查電化學氧化劑對大腸桿菌去除效果.....             | 63 |
| 圖 4-2-6 電化學氧化劑 10 分鐘對大腸桿菌去除率 .....            | 64 |
| 圖 4-3-1 石墨電極板排列方式(Type E)與濃度關係 .....          | 66 |
| 圖 4-3-2 四種不同度電解液對大腸桿菌去除效果 .....               | 69 |

圖 4-3-3 直流電連續通電 10 分鐘稀釋倍率對大腸桿菌去除效果..... 70

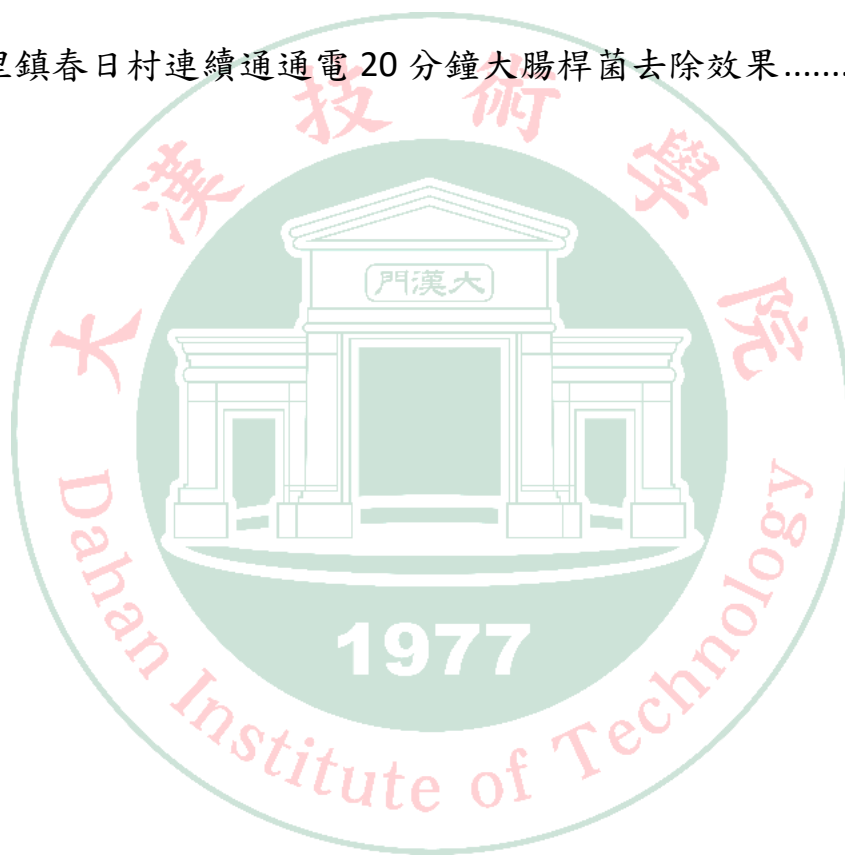
圖 4-3-4 直流電連續通電 20 分鐘稀釋倍率對大腸桿菌去除效果..... 70

圖 4-4-1 壽豐鄉米棧村連續通通電 10 分鐘大腸桿菌去除效果..... 72

圖 4-4-2 壽豐鄉米棧村連續通通電 20 分鐘大腸桿菌去除效果..... 73

圖 4-4-3 玉里鎮春日村連續通通電 10 分鐘大腸桿菌去除效果..... 74

圖 4-4-4 玉里鎮春日村連續通通電 20 分鐘大腸桿菌去除效果..... 75



## 表目錄

|  |    |
|--|----|
| 表 2.1.1 自來水常見之水質問題.....  | 7  |
| 表 2-2-2 簡易自來水系統與飲用水標準差異性 .....   | 9  |
| 表 2.2.1 地下水與山泉水常見之水質問題.....  | 12 |
| 表 1.5.1 不同 pH 與溫度條件 HOCl 濃度百分比.....                                    | 22 |
| 表 2.5.2 不同 pH 之水溶液中 Cl <sub>2</sub> /HOCl/OCl <sup>-</sup> 含量百分比 ..... | 23 |
| 表 3-2-1 石墨電極板不同夾法型式.....   | 40 |
| 表 4-1 花蓮地區水質檢測成果統計.....  | 45 |
| 表 4-1-2 通電 10 分鐘不同濃度 NaCl(氯化鈉) pH、ORP、導電度、溫度值 .....                    | 47 |
| 表 4-1-3 通電 20 分鐘不同濃度 NaCl(氯化鈉) pH、ORP、導電度、溫度值 .....                    | 48 |
| 表 4-1-4 通電 30 分鐘不同濃度 NaCl(氯化鈉) pH、ORP、導電度、溫度值 .....                    | 49 |
| 表 4-2-2 石墨電極板數量、夾法間連續通電 20 分鐘 .....                                    | 57 |
| 表 4-3-1 石墨電極板排列方式(Type E) 四種濃度(食用鹽 pH、ORP、導電度、溫度).....                 | 64 |
| 表 4-3-2 連續七日餘氯監測 .....   | 67 |
| 表 4-3-3 餘氯監測衰退率 .....  | 68 |

# 第一章 前言

## 1-1 研究動機

依據 108 年經濟部水利署國情統計通報 102 號，全國自來水生活用水量為 2,300 百萬立方公尺換算平均每人每日生活用水量達 284 公升<sup>[1]</sup>，緊鄰著工業發展之下，設施須用水實施冷卻、洗滌、沖洗。因此水資源乃是國家經濟發展、人民的起居重要根基。台灣地形因受到地理環境複雜的條件，崇山峻嶺水流湍急，地貌不一使降雨分布不均，時有暴雨沖刷導致水庫砂石淤泥囤積，而造成儲水效益不彰，山區用水缺乏。

以花蓮縣地區而言，部分民眾居住山區，因受地形影響，大多數居民都以地域聚落或是山區分散之地形區域，地形環境限制條件，無法供應到每位山區居民使用設施完善的自來水；以民國 108 年為例，花蓮縣 66 處簡易自來水設施供給民生用水，分別散佈於鳳林鎮、玉里鎮、壽豐鄉、光復鄉、瑞穗鄉、豐濱鄉、富里鄉、秀林鄉、萬榮鄉、卓溪鄉等 10 鄉(鎮)，約有 2 萬餘人需依賴簡易自來水供水<sup>[2]</sup>。

山區供水與自來水公司供水系統的相較之下，其中並無加藥、沉澱、混凝、過濾等設施。山區簡易自來水系統供水的水質、水量不穩定，而近年來氣候變化多端、每年 5 至 10 月颱風季節，如山泉水或是地下水遭受到地表逕流污染，導致水源斷絕情形時有發生，居家用水無法得到正常使用。

對於山區簡易自來水未經過衛生處理及消毒監控下，山泉水經地表逕流為開放性水質，長期暴露在環境之下有許多水生動、植物棲息，較容易遭受來自排泄物衍生出的微生物、寄生蟲等污染導致細菌孳生，因此本研究探討如何改善山區水質條件，提供山區民眾穩定與安定之用水水質。

## 1-2 研究目的

依花蓮縣府委託顧問公司辦理 66 處簡易自來水事業的水質檢測結果得知，大腸桿菌不合格情形較為嚴重，至今大腸桿菌不合格情形並未能得以全部改善完成<sup>[2]</sup>。

本研究目的以電化學氧化法，作為大腸桿菌去除，水質改善之方法，使山區居民使用簡易自來水水源可以安心使用。

本實驗以電化學氧化法處理利用 NaCl(氯化鈉) 為電解質經由石墨板連續通電方式產生次氯酸之氧化劑，處理山區原水中的大腸桿菌，以最佳的條件之下能達到大腸桿菌去除。

### 1-3 研究內容

- A. 調配不同濃度(氯化鈉)電解液，探討以極板間電壓差以直流電連續通電探討之電解液pH(酸鹼度)、ORP(氧化還原電位)、導電度、分光光度計吸收值檢測。
- B. 以石墨電極板2~5片不同片數、電極夾法選定濃度差異性明顯兩種NaCl(氯化鈉)之電解液，極板間電壓差以直流電連續通電探討對大腸桿菌去除效果。
- C. 最佳石墨電極板排列方式，以食用鹽做為電解值，極板間電壓差以直流電連續通電，探討階段性濃度，對大腸桿菌去除效果、餘氯。
- D. 實驗室最佳條件稀釋倍率 1:1000、1:2000、1:3000、1:4000、1:5000 對大腸桿菌去除效果。
- E. 實地場所稀釋倍率 1:10000、1:7500對大腸桿菌去除效果。
- F. 實地場所稀釋倍率 1:10000 投放至儲水塔內，靜待10分鐘混合時間，採取排放口之混合水檢測大腸桿菌去除效果。



## 第二章 文獻回顧

### 2-1 自來水設施

#### 2-1-1 自來水設施標準

中華民國九十二年十二月三日公布在案，擬具「自來水工程設施標準」<sup>[3]</sup>。應考慮自來水設施地點選定之調查事項、設施全盤配置考量之事項、設施之構造規定、取水及貯水設施標準、導水及送水設施標準、淨水設施標準、配水設施標準、機電設施標準、儀表控制設施標準。加藥設備、過濾設備之儀器控制設置原則及操作、構造之應注意事項，並規定各項設備之儀表控制應通盤考量之原則，所使用藥品及其加藥率之選定，依規定加藥設備、混合設備、膠羽池、沉澱池、高速膠凝沉澱池、快濾池、清水池之設置，加氯消毒之設計原則應行訂定標準作業程序與氯氣外洩之緊急應變計畫，並定期實施演練。鐵錳、二氧化碳，硫化氫及臭味等處理方式之選定原則，並規定自來水軟化方法之選用。

#### 2-1-2 飲用水標準檢驗項目

飲用水之水源如下<sup>[4]</sup>：

- A. 地面水體：指存在於河川、湖潭、水庫、池塘或其他體系內全部或部水。
- B. 地下水體：指存在於地下水層之水。
- C. 其他經中央主管機關指定之水體。

地面水體分類：

- 一級公共用水：指經消毒處理即可供公共給水之水源。
- 二級公共用水：指需經混凝、沈澱、過濾、消毒等一般通用之淨水方法處理可供公共給水之水源。
- 三級公共用水：指經活性碳吸附、離子交換、逆滲透等特殊或高度處理可供公共給水之水源。
- 一級水產用水：在陸域地面水體，指可供鱒魚、香魚及鱸魚培養用水之水源。

二級水產用水：在陸域地面水體，指可供鱈魚、草魚及貝類培養用水之水源。

行政院環保署公告之水質檢驗項目介紹<sup>[5]</sup>：

A. 細菌性：

(a) 大腸桿菌群

(b) 總菌落數

B. 物理性：

臭度、濁度、色度

C. 化學性標準項目：

(a) 影響健康物質

- i. (砷、鉛、硒、鉻『總鉻』、鎘、鋇、銻、鎳、汞、氰鹽『以CN<sup>-</sup>計』、亞硝酸鹽氮『以氮計』)
- ii. 消毒副產物 (總三鹵甲烷、鹵乙酸類、溴酸鹽、亞氯酸鹽)
- iii. 揮發性有機物 (三氯乙烯、四氯化碳、1,1,1-三氯乙烷、1,2-二氯乙烷、氯乙烯、苯、對-二氯苯、1,1-二氯乙烯、二氯甲烷、鄰-二氯苯、甲苯、二甲苯、順-1,2-二氯乙烯、反-1,2-二氯乙烯、四氯乙烯)
- iv. 農藥 (安殺番、靈丹、丁基拉草、2,4-地、巴拉刈、納乃得、加保扶、滅必蟲、達馬松、大利松、巴拉松、一品松、亞素靈)
- v. 持久性有機物 (戴奧辛)

(b) 可能影響健康物質

氟鹽、硝酸鹽氮、銀、鉍、銻

(c) 影響適飲性、感觀物質

鐵、錳、銅、鋅、硫酸鹽、酚類『以酚計』、陰離子界面活性劑『MBAS』、氯鹽『以Cl<sup>-</sup>計』、氨氮『以氮計』、總硬度『以CaCO<sub>3</sub>』、總溶解固體量、鋁

(d) 自由有效氯

(e) 酸鹼度

### 2-1-3 簡易自來水事業管理條例

依據自來水法第 110 條之規定：

每日供水量在三千立方公尺以下之簡易自來水事業，得不適用第九條、第四十三條、第四十六條及第五十九條之規定，由直轄市或縣（市）主管機關另行訂定自治法規管理之。前項每日供水量在三百立方公尺以下之簡易自來水事業，得不適用第五十七條之規定。前二項簡易自來水事業得由所有權人或管理委員會代表人申請自來水事業同意後，由自來水事業代管或接管其供水系統<sup>[5]</sup>。

A. 第 9 條：民營之自來水事業應依法組織股份有限公司。

B. 第 43 條：自來水事業應具有左列必要之設備：

- (a) 取水設備應具備集取必需原水水量之能力。
- (b) 貯水設備應具備必要之貯水能力，俾枯水季節，原水無缺。
- (c) 導水設備應設置適當之抽水機、導水管及其他設備，以導送必需之原水。
- (d) 淨水設備設置適當之沉澱池、過濾池、消毒、水質控制及其他淨水設備。
- (e) 送水設備應設置適當之抽水機、送水管及其他設備，以輸送必需之清水。
- (f) 配水設備應設置適當之配水池、抽水機、配水管及其他配水設備。

C. 第 46 條：自來水事業應配合公共消防設置救火栓。其設置標準，分別由中央及直轄市主管機關會商消防主管機關定之。前項設置救火栓所增加之各種費用，由所在地地方政府、鄉鎮（市）公所酌予補助。

D. 第 57 條：自來水事業所聘僱之總工程師、工程師，均以登記合格之工程技師為限。其他施工、管理、化驗、操作等人員，應具有專科之技術，並經考驗合格。前項考驗辦法由中央主管機關訂定之。

E. 第 59 條

自來水價之訂定，應考量自來水供應品質，以水費收入抵償其所需成本，並獲得合理之利潤；其計算公式及詳細項目，由主管機關訂定；其由直轄市或縣（市）主管機關訂定者，應報請中央主管機關核定之。自來水

事業依前項規定擬定水價詳細項目或調整水費，應申請主管核定之；其由直轄市或縣（市）主管機關核定者，應報中央主管機關備查。用戶使用度數較上年度同期比較如負成長，自來水事業體得視營業收支盈虧狀況，給予費用折扣，其辦法，由主管機關會同自來水事業訂定。第一項合理利潤，應以投資之公平價值，並參酌當地通行利率、利潤訂定。

社區自設公共供水設備配給各用戶，意指由社區開發單位設置並由社區管理委員會管理，以供應社區飲用之取水、貯水、導水、淨水、輸水或配水設備及水井，且其每日供水量在一百立方公尺以上者。係指其規模可容納五百人以上或總計一百戶以上居住，並於飲用水水源水質標準施行後申請取得建築物使用執照者。

#### 2-1-4 自來水設施

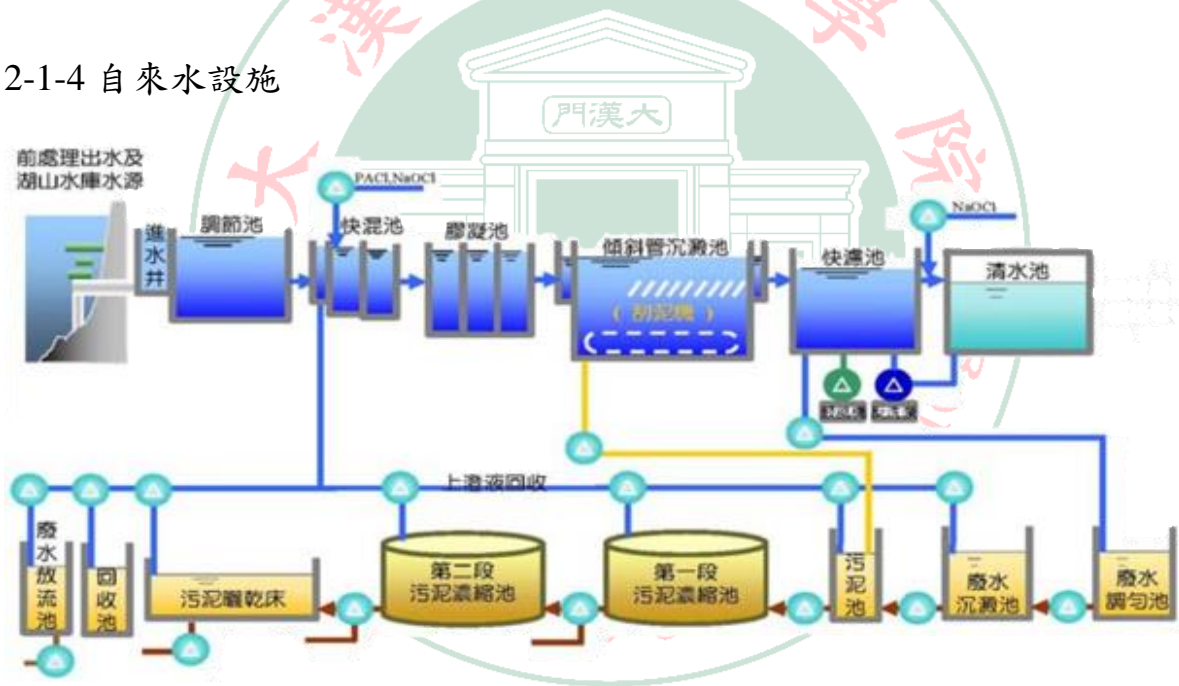


圖 2.1 自來水廠設施<sup>[6]</sup>

引流河川、湖泊、水庫、地下水之前處理出水水源，進水井供給至調節池調節水量及水質變化提供均勻及定量的水量，以快混池吸附及凝聚原水中懸浮固體、於原水中加入混凝劑，由重力流水躍式或電動攪拌機等形式實施攪拌達成快速混合作用，加藥混合之原水，產生膠羽顆粒，藉由快逐漸變慢

速度之膠凝機攪拌，膠凝作用使小膠羽逐漸結合較大且重之膠羽進入沈澱池進行沈澱並刮除膠羽、淤泥，由上層溢流堰，至快濾池使原水中的細小懸浮物質及微生物等藉由濾料之隔料清潔快濾後的清水經加氯消毒進入清水池，主要係維持淨水場保持穩定出水量之調節能力及確保加氯消毒停留時間、增加消毒效果<sup>[6]</sup>。

## 2-1-5 自來水水源需注意之水質問題

表 2.1.1 自來水常見之水質問題<sup>[7]</sup>

| 水源  | 水質問題 | 健康效應                | 改善方法                 |
|-----|------|---------------------|----------------------|
| 自來水 | 餘氯不足 | 缺乏餘氯去除水中可能存在之病原體    | 加氯或煮開後再行飲用           |
|     | 濁度偏高 | 影響適飲性，不影響健康         | 加裝過濾裝置               |
|     | 三鹵甲烷 | 長期暴露可能提高致癌風險或導致生殖危害 | 本身為揮發性，水煮沸後掀開鍋蓋再煮三分鐘 |

沉澱及過濾處理水中的細菌及微生物，未能完全去除雜質、獲得飲用水上的安全，須再加以消毒，把水中的病菌消滅。以目前廣泛所使用的消毒法大多採用以氯或次氯酸鹽（次氯酸鈣或次氯酸鈉）等型式加入水中以利去除病菌、病毒及阿米巴囊蟲等，以氯氣較為常用，為目前實用性較好的消毒劑，用量少、經濟性好且在適時加量下能產生餘氯量等優點。為使用不同水源做為飲水來源時需注意常見之水質項目。

## 2-2 簡易自來水系統

## 2-2-1 簡易自來水設施

引流山泉水、地下水至進水井(圖 2.3.1)，導水至不鏽鋼沉沙池(圖 2.3.2)，取上澄液導流至蓄水池加藥殺菌消毒(圖 2.3.3)，再將水配送各個簡易自來水用戶(圖 2.3.4)，水利署為了民眾飲用到品質標準用水，協助直轄市及縣(市)政府一起推動簡易自來水事業管理業務，確實落實簡易自來水事業自主管理，更致力於協助輔導提升簡水系統操作效能及管理人員操作技能，以確保簡易



自來水用水安全。

圖 2.2.1 進水井



圖 2.2.2 沉沙池



## 2-2-2 簡易自來水系統與飲用水標準差異性

表 2-2-2 簡易自來水系統與飲用水標準差異性

| 項目                     | 最大限值                            |                       | 單位                       |
|------------------------|---------------------------------|-----------------------|--------------------------|
|                        | 簡易自來水系統設置(原水)                   | 飲用水水質標準               |                          |
| 大腸桿菌群密度                | 20,000(具備消毒單元者)<br>50(未具備消毒單元者) | 6 (多管發酵酵法)<br>6 (濾膜法) | MPN/100 毫升<br>CFU/100 毫升 |
| 氨氮(NH <sub>3</sub> -N) | 1                               | 0.1                   | 毫克/公升                    |
| 化學需氧(COD)              | 25                              | -                     |                          |
| 總有機碳(TOC)              | 4                               | -                     |                          |
| 砷(As)                  | 0.05                            | 0.01                  |                          |
| 鉛(Pb)                  | 0.05                            | 0.01                  |                          |
| 鎘(Cd)                  | 0.01                            | 0.005                 |                          |
| 鉻(Cr)                  | 0.05                            | 0.05                  |                          |
| 汞(Hg)                  | 0.002                           | 0.001                 |                          |
| 硒(Se)                  | 0.05                            | 0.01                  |                          |

因簡易自來水設施僅有進流山泉水，簡易過濾至蓄水池經過消毒程序，導(送)配水池出流個用戶家中僅能使用民生用水，並非與飲用水質標準總菌落數採樣地點限於有完整消毒系統之水廠配水管網的配置相呼應，故最大限值有些許落差。

## 2-2-3 簡易自來水設置及管理

簡易自來水工程多位於偏遠地區，進流水源不穩定，處理單元因地勢影響以簡單為主，人員未經專業訓練導致維護管理不易等因素，並無法適用自來水工程設施標準之虞。故水利署研擬「簡易自來水設施規範」、「簡易自來水工程審查作業參考手冊」，等相關資料作為簡易自來水工程設置及改善參考方針設施規劃設計標以經濟部水利署節約用水目標計畫最大每人每日需

水量 240 公升設計，及計畫現地調查人口或戶籍供水人口。

簡易自來水係指取用地面水體或地下水體，其用水人數達五百人 或供水戶數達一百戶以上，每人每日需水量(公升)概略約 240~300，且每日供水量在 120~150 立方公尺之間。其取水水源必須水量充足，方能滿足設計取水量引水，因取水設施照理來說容易遭毀損，造成供水系統中斷者，需增設備援取水設施以備不時之需，取水量也必須與系統設計取水量相當及貯水設施，而取水方式自然流或機械動力抽汲引流水最高不超過計劃每人每日 200 公升，設計取水上限為每人每日 500 公升<sup>[8]</sup>。

簡易自來水主要設施：

#### A. 簡易自來水水源<sup>[4]</sup>

- (a) 地下水：地下水是來自降雨所形成的地面逕流，通過土壤與岩層等層層空隙滲入地下而成地下水層。由於水流經砂岩層進入地下水層的過濾程序，多數民眾認為地下水水質比地表水優良，因此忽略了沒有經過檢驗的地下水可能存在的危害污染的地下水可能增加使用罹癌的風險。此外化糞池洩漏而導致地下水遭到致病性微生物污染也時有發生；使用臺灣早期西南沿海因含砷地下水導致烏腳病盛行等，都是一些因為飲用受污染地下水的案例。
- (b) 山泉水：因為流經山區地表，屬於那種開放性的系統，容易遭受到山區人類或動物活動的污染，水中也可能含有肉眼看不出來、來自動物排泄物的寄生蟲或微生物的污染；加上上游以農業維生的區域山泉水可能長期殘留農藥、肥料的污染，含有較高濃度的農藥和硝酸鹽氮。所以，山泉水中反而經常出現微生物、氨氮和硝酸鹽氮之類的污染物。

取水水量及水權：

- (a) 地面水水源：通常保持剩餘水量之超越天然流量機率(Q85%之水量)應能滿足設計取水量。
- (b) 地下水水源：以枯水期臨界抽水量百分之七十訂定。



(c) 水權登記：應以直轄市、縣(市)政府提出申請，如有水源流經二縣(市)

以上者，需向經濟部水利署各區水資源局提出申請。

## B. 導水及送水設施：

### (a) 管材選用

- I. 高密度聚乙烯管(HDPE)、延性鑄鐵管或(鍍鋅)鋼管為耐久性較佳。
- II. 埋放暗管採用耐衝擊硬質之聚乙烯塑膠管(HIP)。
- III. 如管內水壓高於管材許可操作壓力之下，應裝設減壓安全設施，以避免破裂。

(b) 管線布設：縱橫深谷之虞，應考慮以鋼纜線作為水管線依附支撐之用橫過。

## C. 淨水設施

- (a) 設計容量：因沈澱排泥、過濾反沖洗、加藥及清潔用水等損耗水量以剩餘水量之超越天然流量機率(Q10%估算)，故最大日供水量另加簡易自來水場用水量。
- (b) 過濾：反沖洗應設自動控制設備，保持定常維護。
- (c) 加藥消毒設備：節省維護人力多為自動化控制系統適宜，設自動控制設備，以保持定時定量之加注率。

## D. 配水設施

- (a) 多採用自然壓力流下方式配給水，節省額外加壓所需能源外，方能維持供水時穩定性水壓。
- (b) 設計配水量應能滿足最大時供水量。

## E. 附屬設施(有配電之簡易自來水廠)

- (a) 備用抽水機、加壓設備以備不時之需避免系統斷水之情勢。
- (b) 停電時刻，持續電力運轉所需備用電力設備。
- (c) 儀表設施主要控制「流量、水位、水壓、濁度及制水閘開度等監測設備」即可得簡易自來水系統運轉正常與否。

## 2-2-4 簡易自來水水源需注意之水質及供水問題

表 2.2.1 地下水與山泉水常見之水質問題<sup>[7]</sup>

|     |          |                     |                              |
|-----|----------|---------------------|------------------------------|
| 地下水 | 砷        | 懷疑與烏腳病有關            | 停止飲用或使用逆滲透處理                 |
|     | 硝酸鹽氮     | 在人體內可能轉為亞硝酸鹽氮，導致藍嬰症 | 以陰離子交換樹脂去除或使用逆滲透處理           |
|     | 大腸桿菌群    | 水中可能有其他致病微生物之存在     | 加氯消毒或煮沸後再行飲用                 |
| 山泉水 | 原生動物、微生物 | 可能傳播疾病              | 加裝 1 $\mu$ m 濾心之過濾設備或煮沸後再行飲用 |
|     | 大腸桿菌群    | 水中可能有其他致病微生物之存在     | 加氯消毒或煮沸後再行飲用                 |
|     | 硝酸鹽氮     | 在人體內可能轉為亞硝酸鹽氮，導致藍嬰症 | 以陰離子交換樹脂去除或使用逆滲透             |

簡易自來水事業的設置各主管機關均有明確法規命令，法令依據：自來水法、飲用水管理條例、飲用水管理條例施行細則、飲用水水源水質標準相關法令規章。環保機關除了自來水進行水質檢驗，也會針對簡易自來水進行水質抽驗。根據水質抽驗結果得知，主要不合格項目以大腸桿菌群超過標準值居多，其次總菌落數、酸鹼度(pH 值)、氨氮、濁度和硝酸鹽氮等其項目。水中大腸桿菌群不合格，顯示水中可能含有其他致病細菌的存在，若民眾直接飲用或清潔習慣不佳，及有可能引發腸胃方面的相關疾病。

為改善原水水質及地下水水質符合飲用水標準，不須淨水處理，僅消毒就足夠。淨水工程有沉砂、沉澱(普通沉澱、混凝沉澱)、過濾(慢砂濾法、快砂濾法、特殊過濾)、加氯消毒及其他特殊處理法各淨水場的處理流程都是依據水源水質設計。

## 供水問題主要五大因素：

A. 水量：地面水源枯水期水量不足。

B. 設備：

(a) 簡易自來水設備簡陋或不足，影響水質。

(b) 淨水設施缺乏或維護的不易，維護編列經費不足。

(c) 供水管線多採用塑膠管，易毀損、破裂、漏水、脫落、淤塞，影響供水的穩定性。

(d) 貯、配水設施容量不足，無缺水緩衝能力。

(e) 配水設施未(無)加蓋、淤積。

C. 水質

(a) 管理委員會因囿於財力，無力負擔水質檢驗費用，自主檢驗水質頻率不足或未檢驗。

(b) 目前主因原水水質、清水水質大腸桿菌群或總菌落數均超標，原水水質大腸桿菌群高於飲用水水源水質標準 50CFU/100ml(未具備消毒單元者)。

(c) 過濾、蓄水等設備久未清洗維護，出水端之水質明顯劣於原水水質。

(d) 取水設施因為未經常清理常有淤埋、淤積、阻塞等問題。

D. 管理

(a) 應登記而未向所在縣市政府登記為自來水事業單位

(b) 未成立管理組織

E. 水權

(a) 未申請水權登記

(b) 水權、土地歸屬劃分不清

## 2-3 花蓮縣簡易自來水系統

以花蓮縣原民處統計簡易自來水系統概況：水源計有 64 處地面水、2 處地下水合計共 66 處簡易自來水系統，截至 109 年上半年尚有 2 萬 762 人須依賴簡易自來水設施山區居民用水，分別散佈於鳳林鎮 1 座、玉里鎮 11 座、壽豐鄉 6 座、光復鄉 1 座、瑞穗鄉 1 座、豐濱鄉 7 座、富里鄉 8 座、秀林鄉 5 座、萬榮鄉 13 座、卓溪鄉 13 座等 10 鄉(鎮)共 66 處簡易自來水設施<sup>[9]</sup>，多數座落位處山區或偏遠地區。

因地勢限制處理淨水方式僅有沉沙、過濾、加藥，設置沉澱或過濾設施過於簡易，使用一段時間，簡易自來水設施及設施老舊，管理人員缺乏專業技術，人員在管理上維護不足，時有設備故障、失竊、管線阻塞、斷裂、取水池嚴重淤砂，無法正常供水或影響濾水功能，惟各該鄉鎮公所未儘速修復損壞之供水設施，影響設施正常運作，無法保障部落居民日常用水。因山泉水屬於開放性水流經地表上，常受到人類農作噴灑農藥或動物排泄物等污染影響，是肉眼無法觀測的微生物、細菌、氨氮及硝酸鹽氮等污染物。其中常見的水生動植物、寄生蟲，易以蟲卵的形式接觸人體導致身體不適。

縣府委託顧問公司辦理 66 處簡易自來水系統設施之水質檢測結果：109 年上半年度檢測報告結果得知原水部分計有大腸桿菌 57 處不合格、不合格比列為 87.69%；清水部分計有 58 處不合格、不合格比例為 86.57%，然而針對於縣內山泉水進行採樣檢測，檢驗發現不少總生菌數與大腸桿菌群超標，清水水質大腸桿菌不合格情形未能全部得已改善完成，影響簡易自來水用戶用水安全及身體健康。

## 2-4 水質滅菌處理介紹

### 2-4-1 公(私)場所固定供水設備介紹

依據飲用水管理條例第 9 條規定：公私場所設置供公眾飲用之連續供水固定設備，係指公(私)場所以管線輸送固定水源並能連續處理及連續供水之飲水機，或將其處理後之水以管線輸送至飲水檯供人飲用之裝置者，應規定維護每月至少自行或委託維護 1 次，維護的內容並未限定，並作成維護紀錄應予揭示。

應每隔 3 個月委託環保署許可之環境檢驗測定機構檢驗處理後的水質狀況並保存供主管機關查驗。倘若飲水機或飲水檯僅有熱水出口，且其出水溫度維持於攝氏 90 度以上時，則該台飲水機或飲水檯處理後因大腸桿菌一般適合生環境溫度攝氏 10-42 度，通常在攝氏 75 度持續一分鐘即可殺菌，得水質免檢驗大腸桿菌群。

非自來水水源者則該水源水質應每隔 3 個月增加檢測硝酸鹽氮( $\text{NO}_3\text{-N}$ )及砷 (AS)，若連續 1 年符合水源水質標準者，自次年起改為每隔 6 個月檢驗 1 次水源水質，前述維護內容及水質檢驗狀況，應詳細記錄在「飲用水設備水質檢驗及設備維護紀錄表」，紀錄及相關檢驗資料應保存 2 年備查，並公布張貼於飲用水設備明顯處。

經處理後的水質不符合飲水水質標準，此飲水設備管理單位應立即關閉進水水源，停止飲用並張貼或懸掛「暫停使用」之告示警語於明顯處，進行設備維修工作，避免造成他人身體不適；若水質複驗以符合飲用水水質標準，方可開放提供使用。

### 2-4-2 影響消毒效率包括物理、化學或其他生物性因子

- A. 消毒劑：每種消毒劑消毒能力不同，而相同消毒劑劑量增加可提高消毒效率，但過量也可能衍生消毒副產物的化學物質影響健康危害。
- B. 微生物：因原蟲的抵抗能力比細菌或病毒高，而微生物對消毒劑的抵抗能力並不相同。
- C. 接觸時間：增加與消毒劑的接觸時間可以減少消毒劑劑量。
- D. 溫度：無法達到一定的溫度也會影響消毒效率。
- E. 濁度：水中的濁度影響到透光率屏蔽致病菌，濁度高時需增加消毒劑劑量，或者先用預先過濾降低水中濁度。
- F. 溶解性有機或無機物質：水中有機物質與消毒劑反應，導致微生物接觸消毒劑劑量變少，降低消毒效率。
- G. 其他：  
微生物吸附在微粒表面形成生物膜，而生物膜內的微生物無法與消毒劑接觸而影響消毒劑的作用。

## 2-5 電化學氧化處理技術

### 2-5-1 電化學混凝法

在傳統的化學混凝處理系統主要經由添加混凝劑和助凝劑來形成絮凝體去除廢水中的懸浮微粒和有機物。以鐵系或鋁系混凝劑一般為固態，調製成一定濃度後再通過計量配藥至槽池和儲藥槽裝置加以投入到廢水系統中，其操作和管理較為繁瑣。

電混凝處理技術，經由控制電流和電壓對金屬氫氧化物的生成量，減少了傳統的配藥及加藥等一系列等設備，操作和管理更方便<sup>[11]</sup>。

優點：

- A. 設備：簡單及操作容易、維護較簡單、易實現自動控制，能以綠色能源

作為設備驅動。

- B. 浮除：處理效果與傳統化學混凝相比，電混凝程序之陰極反應所析出之氫氣具有浮除作用，可於上浮過程中帶走污染物，提高污染物去除率、出水所含可溶性顆粒比化學混凝法要得低。
- C. 生物處理：電混凝與生物處理相比，前者能同時去除水中的有機物、細菌、濁度及含有毒重金屬等物質、操作時間較短，且不需要培養微生物，只需電源進行水處理。
- D. 有機廢水：經由電混凝程產出強氧化劑對進而提升有機廢水之生物可降解性能用於處理生物難降解廢水。
- E. 濁度：電混凝程序在處理低溫低濁度之廢水能以傳統化學混凝法較無法達成之效果。
- F. 化學藥品需求量小及清潔環保。
- G. 污泥：電混凝所形成的絮凝體較粗大而穩定且所含結合水較少，因此易於沉澱及過濾去除處理。

缺點：

- A. 處理效果：影響因素複雜，電混凝處理效果不易對反應進行全面控制。
- B. 極板鈍化：電極過程中生成了附著於電極表面的不導電的不溶性物質，進而增加了電極的電阻，降低廢水處理效率，甚至無法進行電混凝處理
- C. 懸浮固體：高懸浮固體處理效果不好。
- D. 電費：電混凝處理成本的最主重是電壓，電費高昂的地區會是一個瓶頸。

## 2-5-2 電聚浮除法

水中電場融合電子學、流體力學、電化學強化電荷凝聚使污染物自凝

及膠羽成長利用電場強度誘導，促使粒子結合、凝聚；此外，在不外加任何物質情況下，利用電解所產生的氣泡與膠羽充分結合，產生自動浮除之效果。

電聚浮除法可區分成五階段電場之建立、粒子偶極化、粒子聚合、膠羽的形成、膠羽浮除<sup>[12]</sup>。

- A. 自凝行為：經電場作用後，帶電荷粒子外圍各環繞著磁場，流體產生劇烈擾流藉流動過程使粒子電荷互相接近，於是粒子瞬間碰撞結合，成聚合顆粒，經反覆碰撞結合後，雜質粒徑便不斷成長，而得以順利凝集去除。
- B. 浮除：異性電荷瞬間碰撞時會產生放熱反應，使膠羽周圍水溫局部上升，導致水分子蒸發形成氣泡，並附著於膠羽上，加上水分子本身受到電解作用的影響之下，陽極反應產生氧氣  $O_2(g)$ ，陰極反應產生氫氣  $H_2(g)$ 、氫氧根離子  $OH^-(aq)$ ，產生大量氣泡無須外加空氣情況下，使膠羽與氣泡結合為海綿狀複合物，加速上浮與水分離。
- C. 優點：具短時間處理廢水、回溶作用、低污泥量、無臭、佔地面積小且具機動性、具滅菌效果、免添加藥劑。

### 2-5-3 電芬頓(electro-Fenton, EF)法

高級氧化技術(Advanced Oxidation Processes, 簡稱 AOPs)，意指通過化學或物理化學的方法，使水中的污染物直接礦化為  $CO_2$  和  $H_2O$  及其它無機物，或將污染物轉化為低毒及易生物降解的小分子物質，高級氧化處理法中氫氧自由基( $OH\cdot$ )的產生形式，可分類為雙氧水系 peroxide-based( $H_2O_2$ )<sup>[13-26]</sup>、臭氧系列 ozone-based( $O_3$ )<sup>[27-31]</sup>、紫外光系列 UV-based<sup>[30-31]</sup>。大部分的應用為結合化學方式(Chemicals)與發光輻射方式(Irradiation)。

通常雙氧水之光解作用(pHotolysis of  $H_2O_2$ )產生機制如下：





除了雙氧水光催化方式外，臭氧提供另一種形式的方法，以快速分解臭氧的形式產生氫氧自由基(OH·)。



高級氧化技術主要包括以下六種：

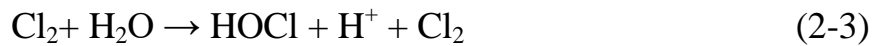
- A. 光化學催化氧化法
- B. 濕式催化氧化法
- C. 超臨界水氧化法
- D. 臭氧類氧化法
- E. 電化學氧化法
- F. 超聲氧化法。

傳統 Fenton 法進行運行時需大量消耗的過氧化氫(H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>)且利用率不高；電-Fenton 氧化是利用電解反應產生過氧化氫 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 或鐵(Fe<sup>2+</sup>)，或同時產生此兩種物質，而光-Fenton 法雖可提高有機物的礦化程度，但存在光量子效率低和自動產生 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 的機制不完善的缺點。電-Fenton 與光-Fenton 法比較有以下優點：

- A. 自動產生 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 的機制較完善。
- B. 影響有機物降解的因素變化多，除羥基自由基(OH·)的氧化作用外，還有陽極氧化、電吸附和電絮凝等作用。由於過氧化氫(H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>)成本高於鐵(Fe<sup>2+</sup>)，因此電化學反應將自動產生羥基自由基(OH·)的機制引入 Fenton 體系更具有實際應用意義，可以說電-Fenton 氧化是 Fenton 氧化發展的新方向[37]。

#### 2-5-4 電化學處理法

傳統電化學氧化法區分為：直接法與間接法二種，不同電化學程序中主要因電解作用所產生氧化劑皆能氧化分解，如雙氧水(H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>)、臭氧、次氯酸(HOCl)、次氯酸根離子(OCl<sup>-</sup>)或氯氣(Cl<sub>2</sub>)<sup>[32]</sup>。氯與水作用，形成氫氯酸與次氯酸如下公式：



水中氫離子濃度的變化影響游離氯的變化：

pH 值在 2~3 之間，以  $\text{Cl}_2$  為主。

pH 值 > 4 且為稀薄溶液時，上述平衡式趨向右邊，以 HOCl 為主。

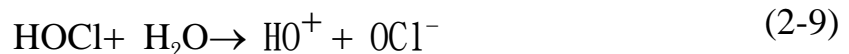
水中的 HOCl 亦會解離：



次氯酸為弱酸水質，當 pH 值低於 6 以下，在水中僅微弱的解離。隨著 pH 逐漸增加反應往右邊進行，當 pH 為 7.5 左右，HOCl 及  $\text{OCl}^-$  之濃度約各佔 50%。

藉由 NaCl 電解質，使其水溶液解離方程式表示鈉 ( $\text{Na}^+$ ) 與氯 ( $\text{Cl}^-$ ) 兩種離子。經通電後，透過電極板釋放電子到電解液內，當導電電子通過時，則會在陽極形成氯氣 ( $\text{Cl}_2$ )、氧氣 ( $\text{O}_2$ )，陰極產生氫氣 ( $\text{H}_2$ )，水溶液中的氯氣 ( $\text{Cl}_2$ ) 會與水反應酸性水質形成次氯酸 (HOCl)，反之鹼性水質則解離成次氯酸根離子 ( $\text{OCl}^-$ )<sup>[33]</sup>，詳如化學反應如以下說明：

陽極反應部分：



陰極反應部分：



依據 White<sup>[34]</sup> 的研究，氯氣、次氯酸以及次氯酸根離子彼此之間會因在水溶液內的氫離子濃度值指數 (pH) 不同，而轉換成  $\text{Cl}_2/\text{HOCl}/\text{OCl}^-$  不同比例

之形式出現(如圖 2.5.1 所示)。

而實驗過程所量測反應槽內電解液在鹼性條件  $\text{pH} > 9$  時，以次氯酸根離子為主由此可斷定在電化學反應下反應槽內電解液可產生次氯酸根離子 ( $\text{OCl}^-$ )；電化學實驗過程電解液在酸性條件則氧化劑轉換為氯氣及次氯酸。不同  $\text{pH}$  值時，在水溶液內  $\text{HOCl}$  存在濃度之百分比可由(如表 2.7.1)得知<sup>[34]</sup>，當  $\text{pH}$  值越高， $\text{HOCl}$  存在百分比越低， $\text{pH}$  值為 10.0  $\text{HOCl}$  含量近乎 0。此外由(如表 2.7.2)得不同  $\text{pH}$  6~9 之間水溶液中  $\text{Cl}_2/\text{HOCl}/\text{OCl}^-$  彼此物種轉換之含量百分比<sup>[36]</sup>，並與(如圖 2.7.1)比較可得知在不同  $\text{pH}$  值下主要的氧化劑物種。

電化學氧化程序的原理係利用電流透過極板導入廢水中，電流由陽極經水溶液解離傳達陰極，藉由陽極的直接氧化作用或透過電解液產生的間接形成氧化劑氧化水中污染物的廢水處理方法；如一般廢水中未加入電解質會使溶液因阻抗因素需以極大電壓才能推動水中導電，因此大部分有關電化學的研究皆採用可在水中有近乎完全解離的化合物如：鹽類（氯化鈉、氯化鉀、硫酸鈉）、強酸（硫酸、鹽酸）或強鹼（氫氧化鈉、氫氧化鈣）等作為電解質以提升水溶液之導電效果。

表 1.5.1 不同 pH 與溫度條件 HOCl 濃度百分比<sup>[36]</sup>

HOCl

| pH   | 0°C   | 5°C   | 10°C  | 15°C  | 20°C  | 25°C  | 30°C  |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 5.0  | 99.85 | 99.82 | 99.80 | 99.79 | 99.74 | 99.71 | 99.68 |
| 5.5  | 99.53 | 99.45 | 99.36 | 99.27 | 99.18 | 99.09 | 99.00 |
| 6.0  | 98.53 | 98.28 | 98.00 | 97.73 | 97.45 | 97.18 | 96.92 |
| 6.5  | 95.50 | 94.75 | 93.96 | 93.16 | 92.37 | 91.60 | 90.87 |
| 7.0  | 87.04 | 85.08 | 83.10 | 81.16 | 79.29 | 77.53 | 75.90 |
| 7.5  | 67.99 | 64.33 | 60.88 | 57.68 | 54.77 | 52.18 | 49.90 |
| 8.0  | 40.18 | 36.32 | 32.98 | 30.12 | 27.69 | 25.65 | 23.95 |
| 8.5  | 17.52 | 15.28 | 13.46 | 11.99 | 10.80 | 9.84  | 9.06  |
| 9.0  | 6.29  | 5.39  | 4.69  | 4.13  | 3.69  | 3.33  | 3.05  |
| 9.5  | 2.08  | 1.77  | 1.53  | 1.34  | 1.19  | 1.08  | 0.98  |
| 10.0 | 0.67  | 0.57  | 0.49  | 0.43  | 0.38  | 0.34  | 0.31  |
| 10.5 | 0.21  | 0.18  | 0.15  | 0.14  | 0.12  | 0.11  | 0.10  |
| 11.0 | 0.07  | 0.06  | 0.05  | 0.04  | 0.04  | 0.03  | 0.03  |
| 11.5 | 0.02  | 0.02  | 0.015 | 0.013 | 0.012 | 0.01  | 0.01  |

表 2.5.2 不同 pH 之水溶液中 Cl<sub>2</sub>/HOCl/OCl<sup>-</sup> 含量百分比

| Solution Concentration (mg/L) |                 |       |                  |                 |       |                  |                 |       |                  |
|-------------------------------|-----------------|-------|------------------|-----------------|-------|------------------|-----------------|-------|------------------|
|                               | 5000            |       |                  | 7000            |       |                  | 10000           |       |                  |
| pH                            | Cl <sub>2</sub> | HOCl  | OCl <sup>-</sup> | Cl <sub>2</sub> | HOCl  | OCl <sup>-</sup> | Cl <sub>2</sub> | HOCl  | OCl <sup>-</sup> |
| 6.5                           | .0063           | 92.28 | 7.71             | .0088           | 92.28 | 7.71             | .126            | 92.28 | 7.71             |
| 7.0                           | .0017           | 79.10 | 20.89            | .0024           | 79.10 | 20.89            | .0034           | 79.10 | 20.89            |
| 7.5                           | .0004           | 54.84 | 45.51            | .0005           | 54.49 | 49.51            | .0007           | 54.49 | 45.51            |
| 8.0                           | .0001           | 27.46 | 72.54            | .0001           | 27.46 | 72.54            | .0001           | 27.46 | 72.54            |
| 8.5                           | .0000           | 10.69 | 89.31            | .0000           | 10.69 | 89.30            | .0000           | 10.69 | 89.30            |
| 9.0                           | .0000           | 3.65  | 96.35            | .0000           | 3.65  | 96.35            | .0000           | 3.65  | 96.35            |

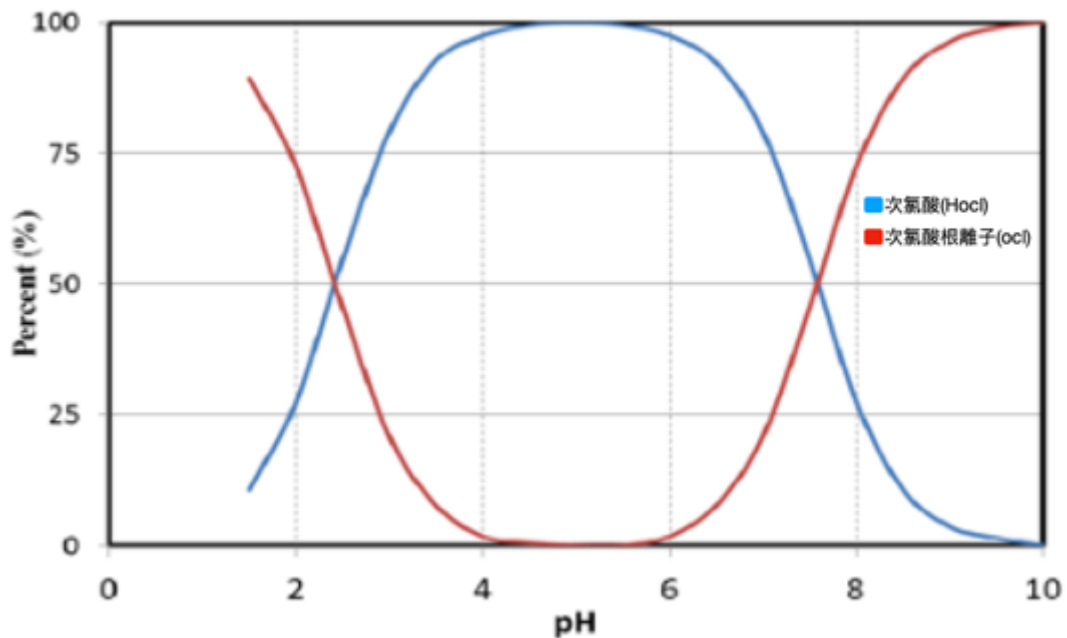


圖 2.5.1 不同 pH 值 Cl<sub>2</sub>/HOCl/OCl<sup>-</sup> 存在百分比變化

A. 間接電化學處理法

利用反應槽內添加 NaCl 電解質，通電電解反應後產生之氧化劑，並取出與山區水源混合，以利探討不同濃度電解液、通電時間下的氧化分解效果。

## B. 直接電化學處理法

則在反應槽內添加了 NaCl 電解質與山區水質直接進行電解反應，並探討通電後在不同濃度電解液與通電時間下之氧化分解效果。

## C. 影響電化學氧化程序因素

### (a) 電解質：

水中添加電解質除最直接影響溶液的導電度外，也是降解污染物的最主要因素之一，與電解質離子在陰極與陽極所產生的氧化還原有關。部分電解質雖有使水溶液導電度增高之優點，但在操作過程中無氧化劑產生，因此降解效果較差，如：硫酸、氫氧化鈉等。若以氯化鈉做為電解質，不僅能提供導電度，同時在操作過程中也能產生大量的氧化劑促進汙染物的氧化分解。

### (b) pH值：

原水經由電化學所產生之氯氣、次氯酸及次氯酸根的含量隨著水溶液的pH值變動而不同，當水溶液pH值趨於鹼性時優勢物種多為次氯酸根，反之酸性為氯氣，微酸性時則是次氯酸。

而在本研究中控制濃度在最佳pH值，在操作過程中趨向微酸性，因此本研究之電化學氧化程序中產生的主要氧化劑為次氯酸(HOCl)。

### (c) 電流密度：

反應過程中的所施加的電壓會影響其極板間之電流密度，而電流密度與反應中的氧化還原速率有相關影響，這是因為電流密度越大，通過單位面積之電子量越多，進而使得電化學反應速度增加。

本研究中選定最佳之固定直流電、時間通過石墨板間的電場強度，

以利觀察水中之pH值、氧化還原電位的影響。

(d) 極板材質：

極板在陽極主要產生氧化作用，與電化學反應相關。陽極所產生的氧化反應主要產生氧化劑來源，而陽極極板採用之材質則因不同化合物的標準、還原電位不同而具有不同的氧化能力。

D. 影響消毒程序因素

自由餘氯(free available residual chlorine)：

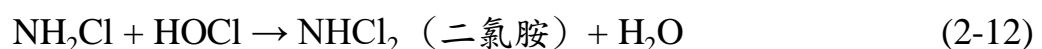
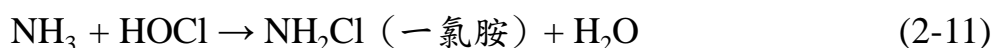
水中形成之次氯酸(HOCl)及次氯酸根離子(OCl<sup>-</sup>)離子一般水體中，而HOCl和OCl<sup>-</sup>稱為自由有效氯。當水體pH值偏低時氯主要以HOCl存在，pH值偏高則以OCl<sup>-</sup>為主。不論兩者中的任一形式，都為強力的氧化劑。

氯投入加入水中反應後，得結果HOCl和OCl<sup>-</sup>形式殘存餘量，稱為自由有效餘氯。自來水廠出水，確保在配水管網系統中保持殺菌消毒效果，以確保用水安全、水質衛生，加氯消毒處理後，須維持飲用水標準0.2至2 mg/L的自由有效餘氯。

結合餘氯(Combined Available Residual Chlorine)：

水中氨、氮化合物與氯與次氯酸結合形成一系列氯化氮化合物稱為氯胺(chloramines)。水體中銨離子、氯與氮離子三者間會依水體結合有效餘氯(一氯胺、二氯胺)之生成速率及分配百分率，由pH值、溫度、反應時間及氯(Cl<sub>2</sub>)和氨氮(NH<sub>3</sub>)之最初比率而異。

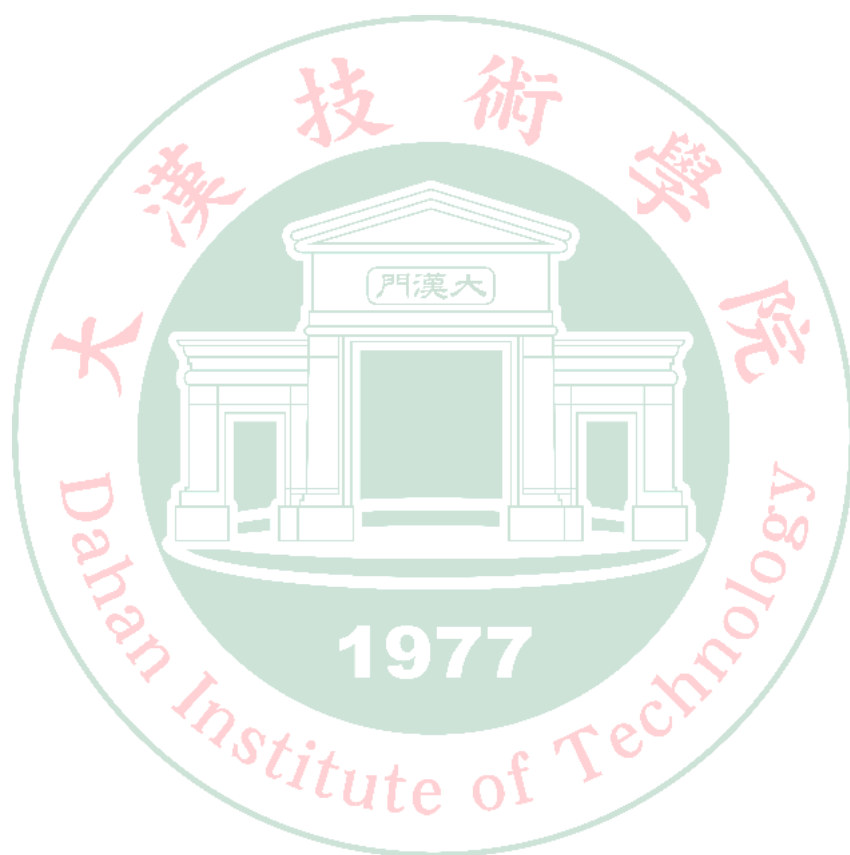
pH值之範圍達成平衡，形成一氯胺(monochloramine)、二氯胺(dichloramine)與三氯胺(trichloramine)，這三者稱為結合餘氯：



而所加之氯量剛好將氨完全反應掉，斷點(breakpoint)前之殘留氯幾乎全

為結合有效餘氯，仍具有相當之消毒能力，但反應相當慢，故消毒效果較自由有效餘氯(free available residual chlorine)差。

結合餘氯消毒法(combined residual chlorination)一般適用於過濾後，控制藻類或細菌再繁殖，減少配水管死端(dead end)之紅水麻煩，並保持穩定之餘氯量至用戶，雖效果比不上自由餘氯，但因在水中較為安定，可在配水管線中持續進行消毒作用。





## 第三章 實驗研究設備與方法

### 3-1 實驗藥品與實驗材料、設備

本實驗所採用之藥品、材料以及實驗儀器設備如下：

#### 3-1-1 實驗藥品

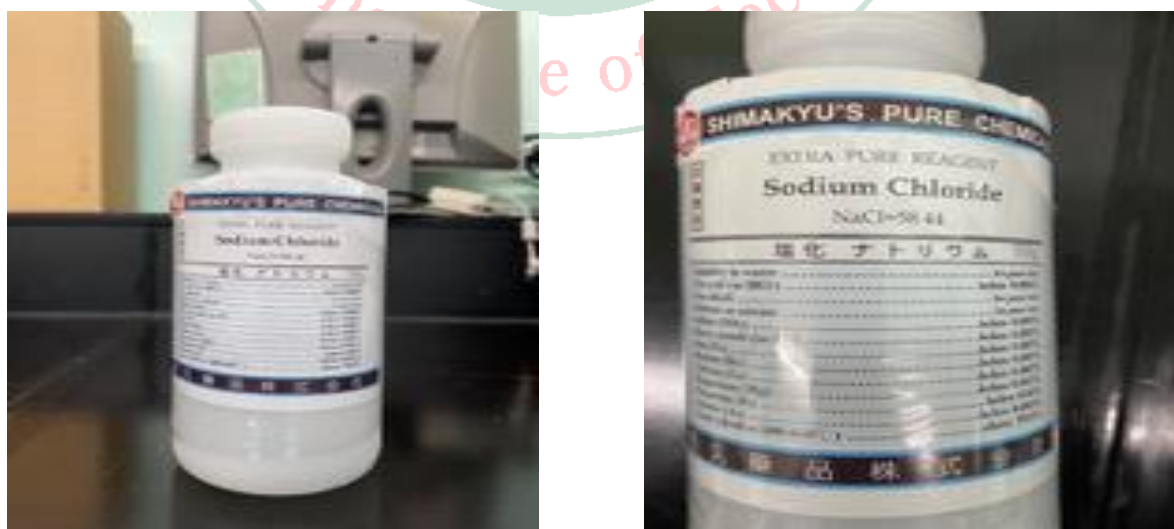
##### A. 氯化鈉(NaCl; Sodium Chloride)

本實驗採用之氯化鈉為日本島久藥品株式會社公司所生產(如圖 3.1.1)。

由電解飽和食鹽水溶液製取氫氧化鈉、氯氣和氫氣的工業生產方法，是重要的基礎化學工業之一。其反應如下：



氯化鈉(NaCl)白色的粉末(晶體)結晶為半透明的立方體，溶於水或甘油，微溶於乙醇、液氨。與鹽酸不相容，在空氣中易受潮解性，但也可能因雜質影響呈現出藍或紫的色調。本實驗氯化鈉(Sodium Chloride)，分子式為(NaCl)，分子量為 58.443 g/mol(如圖 3.1.1)、熔點為攝氏 801℃、沸點為 1,465℃，在攝氏 25℃ 下在水中的溶解度是 359 克/升，食鹽水的物理性質與純水有較大的差異。常壓下水鹽體系的低



共熔點為 $-21.12\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，。

圖 3.1.1 氯化鈉

- B. 3M™ Petrifilm™ 大腸桿菌/大腸菌群快檢片 6404/6414/6444
- (a) 快速、準確、僅三個簡單步驟在 24-48 小時即可得出內結果。
  - (b) 增加生產力，減少實驗室整體支出
  - (c) 接菌容易，只要揭開上方薄膜，加入樣品即可。
  - (d) 節省空間設計，讓培養箱空間可做最大利用。
  - (e) 確認大腸桿菌群為紅色與藍色菌落，有氣泡。確認大腸菌中的大腸桿菌為藍色菌落，有氣泡。
  - (f) 省略製備培養基/培養皿等耗時等麻煩的步驟。
  - (g) 相比較之下傳統培養皿檢測方法對應 3M™ Petrifilm™ 快檢片更是減少了 75%的能源使用、79%的水源使用、75%的溫室氣體產生、以及 66%的廢棄物產生(以重量和體積估計)。
  - (h) 免去了許多傳統檢測方法所需等後續確認步驟，3M™ Petrifilm™ 大腸桿菌/大腸桿菌群快檢片可幫助提高生產力，並整體減少實驗室成本。
  - (i) 國際間各企業信任 3M™ Petrifilm™ 快檢片的檢測結果，準確、有效、一致的結果 3M™ Petrifilm™ 大腸桿菌/大腸桿菌群快檢片提供節省成本效益、方便可靠的確認方法，來檢測設備、原物料、食品



和製造環境樣品。

圖 3.1.2 大腸菌群快檢片

### C. 食用鹽-碘鹽

- (a) 製造商: 臺鹽實業股份有限公司
- (b) 產地: 台灣
- (c) 以離子交換膜電透析製程濃縮海水, 可濾除農藥、戴奧辛、洗劑、重金屬等有害物質, 安全又衛生。
- (d) 2014-2017 國民營養健康狀況變遷調查得知, 我國 7 歲以上整體碘營養狀況僅達世界衛生組織建議充足標準之下限。
- (e) 包裝食用鹽品之碘標示規定: 添加碘化鉀或碘酸鉀的包裝食用鹽品, 其品名、醒語及營養等依規定標示。
- (f) 世界衛生組織意指出食鹽加碘是安全且具成本效益的政策, 可確保到每人每天攝取到足夠的碘, 以此建議民眾選用加碘鹽取代一般鹽, 但也千萬不能為了補充碘而多吃鹽, 而飲食中的鹽(鈉)攝取過量是導致血壓升高及高血壓的主因之一, 因此每人每日食鹽總攝取量仍不宜超過 6 公克。
- (g) 碘營養不足對健康影響: 碘為合成甲狀腺素的必需營養素, 與調節代謝及生長發育息息相關, 成人如缺碘容易覺得疲勞、怕冷, 也可能會有記憶力變差、智力減退及反應遲鈍等問題。
- (h) 鹽的主要成分為乾基 95%氯化鈉( $\text{NaCl}$ )、20~35ppm 碘酸鉀, 並含有少量水份、雜質及其他鐵、磷、碘等元素。



圖 3.1.3 食用鹽

#### D. 水中餘氯檢測試劑(DPD Free Chlorine Reagent Powder Pillows)

- (a) 所屬美國Danaher Water Platform 丹納赫集團，水中餘氯檢測試劑預製粉枕包。
- (b) 使用方法:取10ml之水樣，加入DPD餘氯測試粉，水樣顏色改變呈色，以Hach DR3900為智慧型實驗室分光光度計檢測每公升含毫克數。
- (c) 內容物: 乙烯二胺醋酸二鈉、磷酸氫二鈉N，N-二乙基對苯二胺鹽。
- (d) 警語: 避免造成皮膚刺激、嚴重眼睛刺激，操作時應著防護手套、眼睛防護具/臉部防護具。如有滲入眼睛，用水小心沖洗數分鐘。
- (e) 以Hach DR3900分光光度計設定在波長515nm（或其他特定波長）處測其吸光度。若於磷酸緩衝液溶和N,N-二乙基-對-苯二胺溶液中再加入多量碘化鉀，則水中結合餘氯會將碘化鉀氧化而釋出碘，碘再氧化DPD 使紅色溶液之顏色加深，再以分光光度計在波長515nm（或其他特定波長）處測其吸光度。由同一檢量線分別求得自由餘氯和總餘氯之濃度，二者之差即為結合餘氯之濃度，適用濃度範圍約0.2~4mg/L，若總餘氯大於4mg/L時，則水樣應予稀釋。

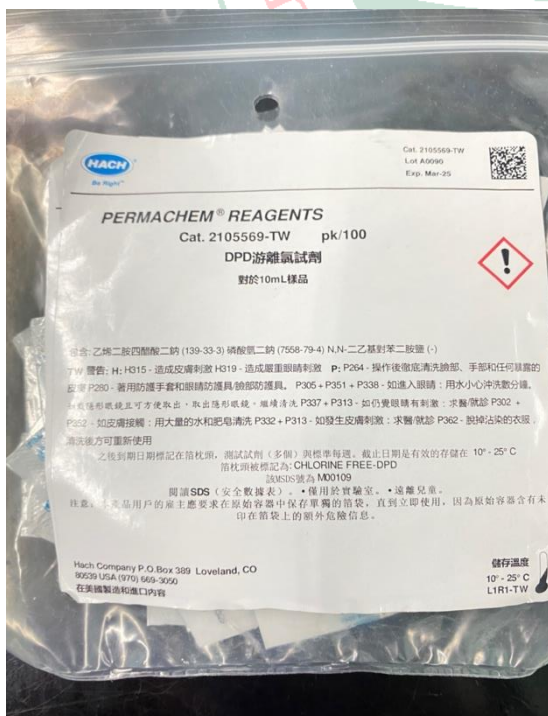


圖 3.1.4 水中餘氯檢測粉枕包

### 3-1-2 實驗儀器

#### A. 酸鹼度、氧化還原電位偵測計(Oxidation Reduction Potential、Hydrogen ion concentration index；ORP、pH meter)

本實驗研究採用 SUNTEX 桌上型酸鹼度計 SP-2300 的氧化還原電位暨酸鹼度測定器，其主要用於溶液中酸鹼程度的衡量偵測、水中強氧化劑標定其氧化還原電位濃度；以利用氧化還原定理偵測其由高(低)電位，以測其水溶液中酸鹼對應的氧化程度效果強氧性的程度。(如圖 3.1.5)所示。

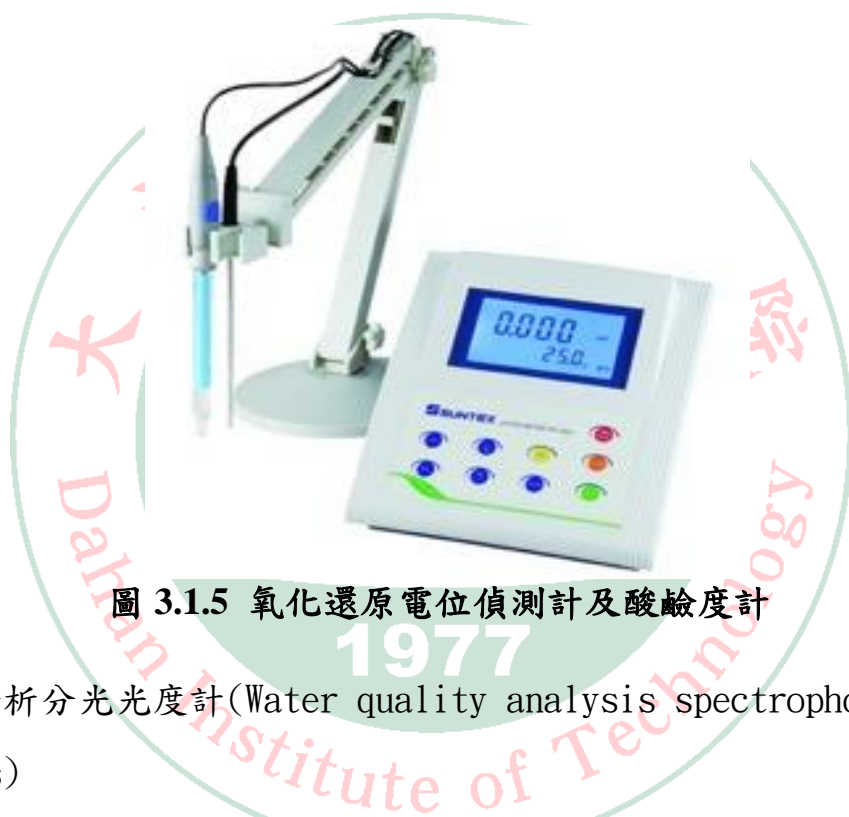


圖 3.1.5 氧化還原電位偵測計及酸鹼度計

#### B. 水質分析分光光度計(Water quality analysis spectrophotometer UV/Vis)

Hach DR3900 實驗室分光光度計，採分光光度法，內建 220 多個水質測試方法應用程式，也可建立多達 100 個使用者自定義程式，廣泛應用於工業用水，縣市污水，環保，教育科學研究等領域的水質檢測分析。

於本研究作為餘氯之檢測可嵌入電腦傳輸數據以便辨別，實驗室和線上數據達成雙向傳輸，不需再到現場校正電極。對於重要參數，分光光度計具有數據儲存功能，可儲存 2000 組實驗數據，數據包括日期，時間，測試結果，水樣名稱，實驗人員等資訊。數據可透過 USB 介面或網路線直接下載或傳輸至電腦，便於數據的儲存與管理，主要在偵測實驗過後水

質所殘留餘氯在 515nm 下吸收值測定。(如圖 3.1.6)所示。



圖 3.1.6 水質分析分光光度計(Benchtop Spectrophotometer UV/Vis)

### C. 三用電錶

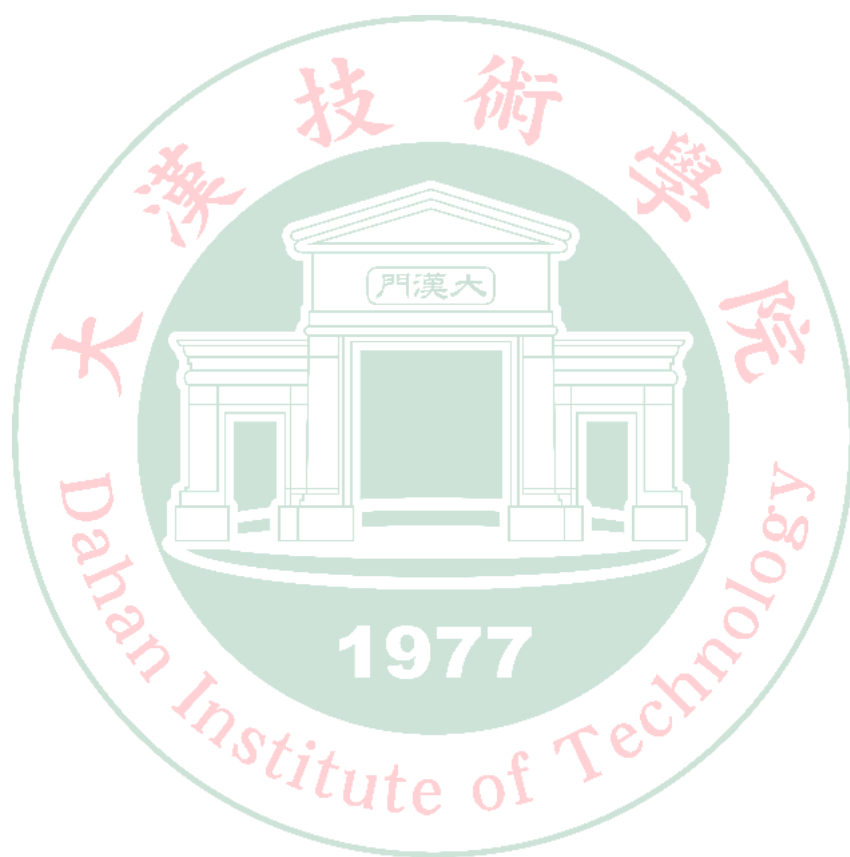
所使用之三用電錶為堅固耐：KILTER 電錶耐用型 249，所最大交流電壓 600V(伏特)、直流電壓 600V(伏特)、直流電流 200mA(毫安培)、電阻 20M $\Omega$ (百萬歐姆)、電池測試 1.5V/9V(伏特)，本體自身保護裝置：電阻檔測到電壓,不燒毀、過載保護。

本實驗用於石墨板在不同片數及電擊頭的夾法不同，量測石墨板間的電流導通影響電壓的效果，以利作為選定效果較佳的方式試用到實場



實驗。(如圖3.1.7)所示。

圖 3.1.7 三用電錶



#### D. 電極板

本實驗採用之極板為石墨材質 寬:50公分、長:20公分、厚度:0.5公分，以高純度、低燒失的大鱗片石墨經特殊化學處理後經高溫膨化軋製而成的優質石墨板材做陽極電極板及陰極電極作電解之材料(如圖3.1.8)所示。石墨特性可承受溫度於 $-40^{\circ}\text{C} \sim +500^{\circ}\text{C}$ 、擊穿電壓導電、導熱係數5.5、體積電阻 $0.07 \Omega\text{m}$ 、熱阻抗 $0.05 \sim 0.1^{\circ}\text{Cin}^2/\text{W}$ 、潤滑、可塑和抗腐蝕性，也能耐強酸、強鹼、及有機溶劑的侵蝕等功能非金屬礦物，具有較強還原的能力，處理水質殺菌是很好的工具之一。石墨在常溫下，有非常好的化學穩定性，石墨板運用電化學處理上，適用流體包含熱水、高溫、高壓蒸氣、熱交換流體、氨氣、氫氣、有機溶劑、碳氫化合物、低溫流體等。

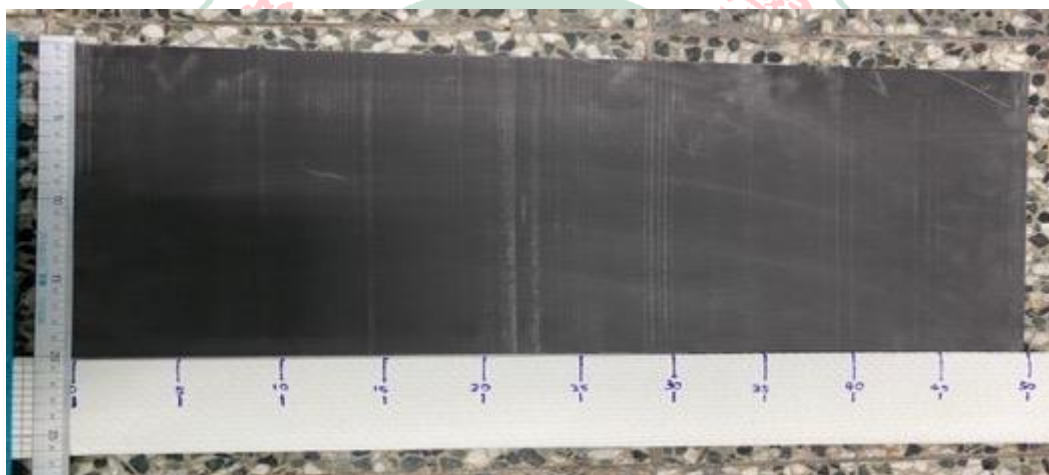


圖 3.1.8 石墨電極板



## E. 電化學壓克力反應槽

電化學反應槽(Reactor)以壓克力(PMMA)材質訂製之反應槽，電極板之長20cm、寬50cm、高15cm(實際作用10cm)，二極板間距為30 mm，極板之反應面積為1000cm<sup>3</sup>槽內可容納10L電解液，本實驗將電解液容量固定為10L，反應槽內設有間隔3cm的小凹槽可置放並固定石墨版，應用於本電化學實驗用反應電解。(如圖3.1.9)所示。

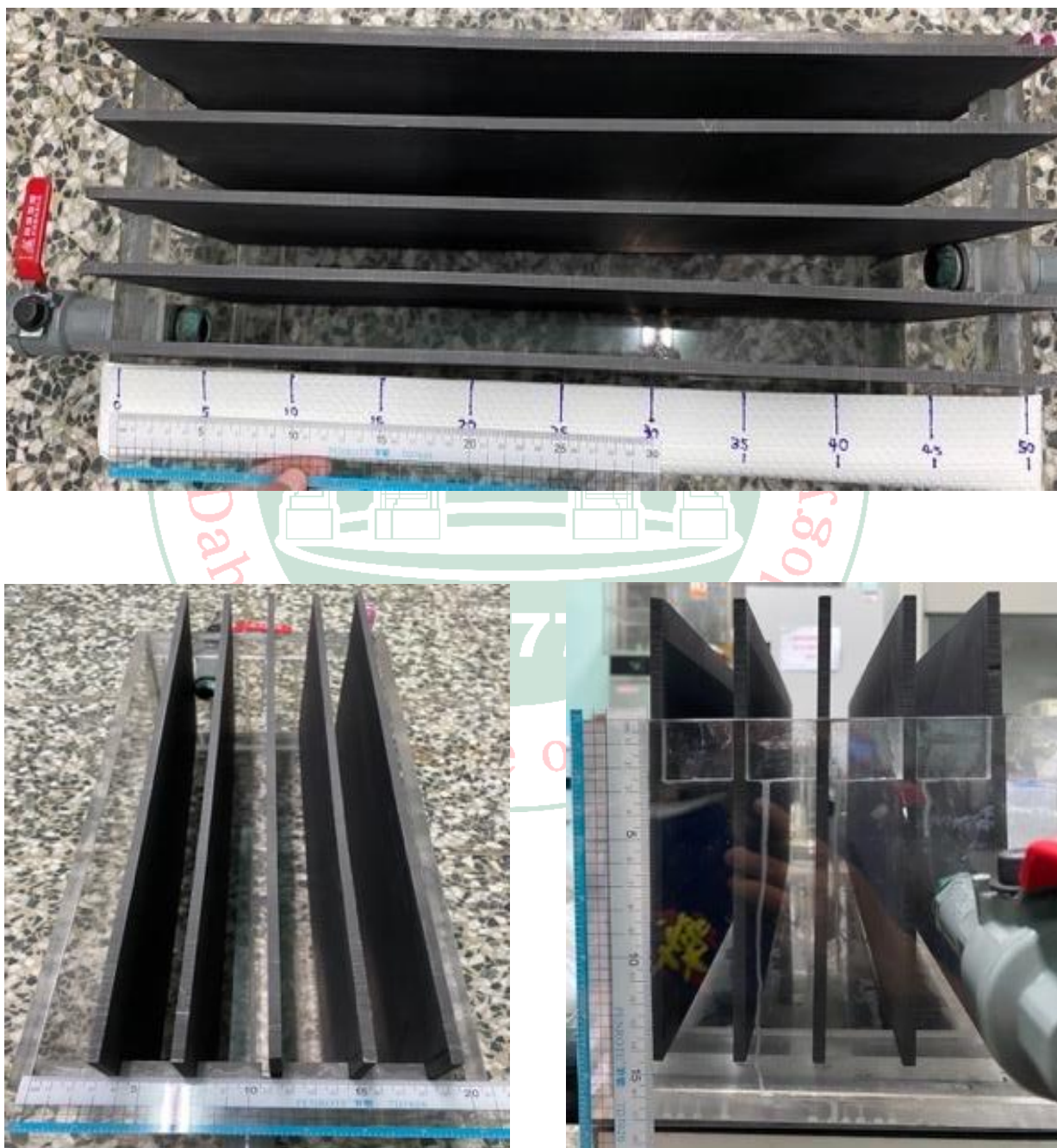


圖 3.1.9 電化學壓克力反應槽

## F. 電源供應器

直流/交流電源供應器採用TECPEL泰菱電子公司GW固緯 GPR-6060D型電源供應器，可調整電壓0~60伏特電壓及0~6安培電流，於本實驗做電化學反應槽內穩定之直流電壓使用。(如圖3.1.10)所示。



圖 3.1.10 電源供應器

#### G. 電子分析天平(ATX/ATY)

電子分析天平採用日本島津 SHIMADZU 四位數標準型電子分析天(ATX/ATY)系列，20種秤重單位可供選擇或自訂單位，秤重量:220g，精密度:0.1mg，校正:內部砝碼自動校正，作為實驗時秤重量實驗藥品



之重要儀器。(如圖 3.1.11)所示。

圖 3.1.11 四位數標準型電子分析天平

## H. 恆溫培養箱

- (a) 適用於普通的微生物、細胞、組織、生化、遺傳、培養用，常用於細胞培養的器材和試劑的預溫，及生物實驗室之設備。(如圖 3.1.12)所示。
- (b) 針對於微生物、細胞組織、生化、遺傳、培養用。
- (c) 長時間保持內部的溫度恆定，維護樣品的穩定培養。
- (d) 如異常有過溫警報、自動停止功能，控溫精確。



- (e) 特點：加熱控制，不帶製冷。

圖 3.1.12 恆溫培養箱

## I. 電磁加熱攪拌器

其功能為可控制加熱時的溫度、可控制電磁攪拌的轉速，以提供安全穩定熱源及均勻攪拌溶液的器具。作為調配不同濃度的氯化鈉(NaCl)

作為電解溶液混合實驗藥品之使用，利用 LMS 出產的 HTS-1003 電磁加熱攪拌器(如圖 3.1.1)所示。即可達成精確加熱及均勻攪拌之效果；其外觀及規格如下說明。品牌：LMS，型號：AL-HTS1003，產地：美國，規格：溫度範圍 RT +5°C~380°C，轉速 60~1500rpm，版面材質不鏽鋼



披覆珐瑯耐酸鹼，外觀耐熱耐腐蝕一體成型鋁製外殼。

圖 3.1.13 電磁加熱攪拌器

#### J. 蒸餾水機

- (a) 開啟電源前操作：由冷水卻管處酌量注入自來水，當滿冷卻層後由右側流入調節水箱，調節盒水位與加熱槽相連通，達限定高度，即從溢流出口排出。
- (b) 如溢流水過少或不足，處線斷電並警報。
- (c) 避免機構，不得使用純水或軟水等。

品牌：CHANNEL，型號：WS-5，規格：3~5L/小時，本實驗蒸餾水用於調配氯化鈉(NaCl)濃度 g/L，作為無電解值原水之測試水體電流導電



效果、氧化還原電位、酸鹼度等相關數值調配。(如圖 3.1.14)所示。

圖 3.1.14 加熱蒸餾水機

### 3-2 實驗方法

學生實驗研究為實驗室選定最佳濃度、石墨版數量、電壓、時間以便食用鹽取代 NaCl(氯化鈉)，至實地場所做大腸桿菌去除率之探討；主要研究流程(如圖 3-2-1)所示。

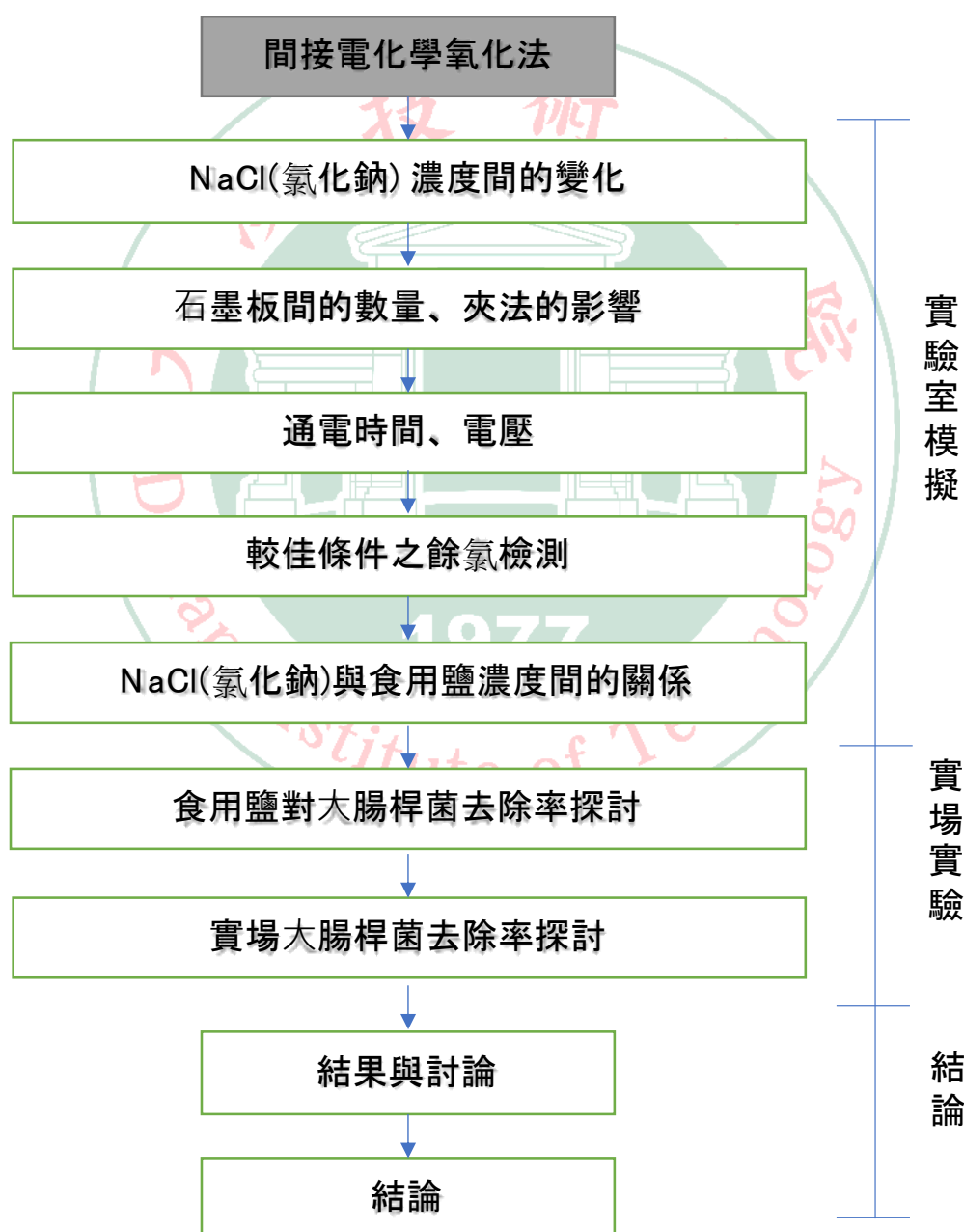


圖 3-2-1 本研究論文架構圖

### 3-2-1 間接電化學法

直接電氣化學法以 NaCl(氯化鈉)為電解質與原水作為混合氧化分解效果破壞水質本身電解離子態直接作為大腸桿菌滅菌效果；研究間接電化學法探討以不同連續通電時間、電壓、濃度 NaCl(氯化鈉)所最佳氧化分解效果以利爾後食用鹽稀釋倍率同時達到最佳殺菌效果。

#### A. 間接電化學法濃度間的變化

電化學反應槽內先置入陰極(-)與陽極(+)石墨電極板，調配不同濃度之 NaCl 氯化鈉與蒸餾水溶液，以不同濃度電解液(g/L)，倒入電化學反應槽 300ml 試驗不同 NaCl(氯化鈉) g/L 與蒸餾水混合溶液，並設定固定極板間電壓差 10V(伏特)、連續通電訂定(10、20、30 分鐘)等 3 個時段，通電後測定電解液合計 30 組水樣檢測水中 pH(酸鹼度)、導電度、ORP(氧化還原電位)、溫度變化關係。

B. 石墨版排列數量及通電方式，本實驗以差異性明顯的兩組不同濃度連續通電 10、20 分鐘，固定電壓、選定最佳石墨版排列方式訂定 4 種不同濃度以利反向探討濃度及時間最佳效果，不同夾法如(表 3-2-1)所示。

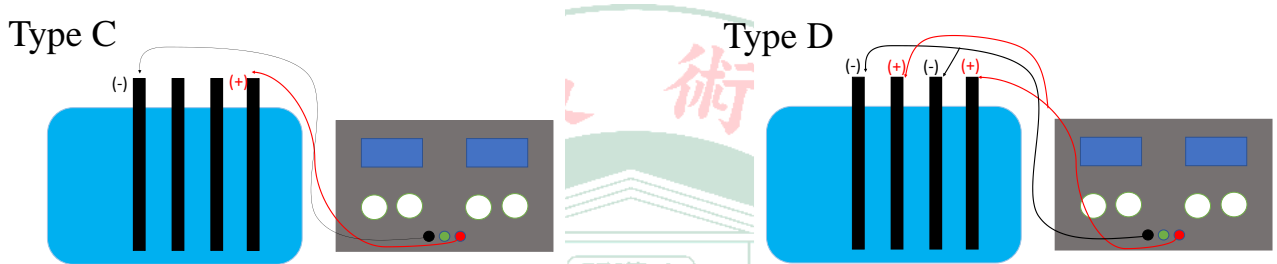
表 3-2-1 石墨電極板不同夾法型式

| 型式     | 電極板數量 | 通電夾法                 |
|--------|-------|----------------------|
| Type A | 3 片   | 右正(+)左負(-)           |
| Type B |       | 正(+)負(-)正(+)         |
| Type C | 4 片   | 右正(+)左負(-)           |
| Type E |       | 負(-)正(+)負(-)正(+)     |
| Type F | 5 片   | 左正(+)右負(-)           |
| Type G |       | 左正(+)中負(-)右正(+)      |
| Type H |       | 正(+)負(-)正(+)負(-)正(+) |

三片：[Type A]右正(+)左負(-)、[Type B]正(+)負(-)正(+)



四片：[Type C]右正(+)左負(-)、[Type D]負(-)正(+)負(-)正(+)



五片：[Type E]左正(+)右負(-)、[Type F]左正(+)中負(-)右正(+)  
[Type G]正(+)負(-)正(+)負(-)正(+)

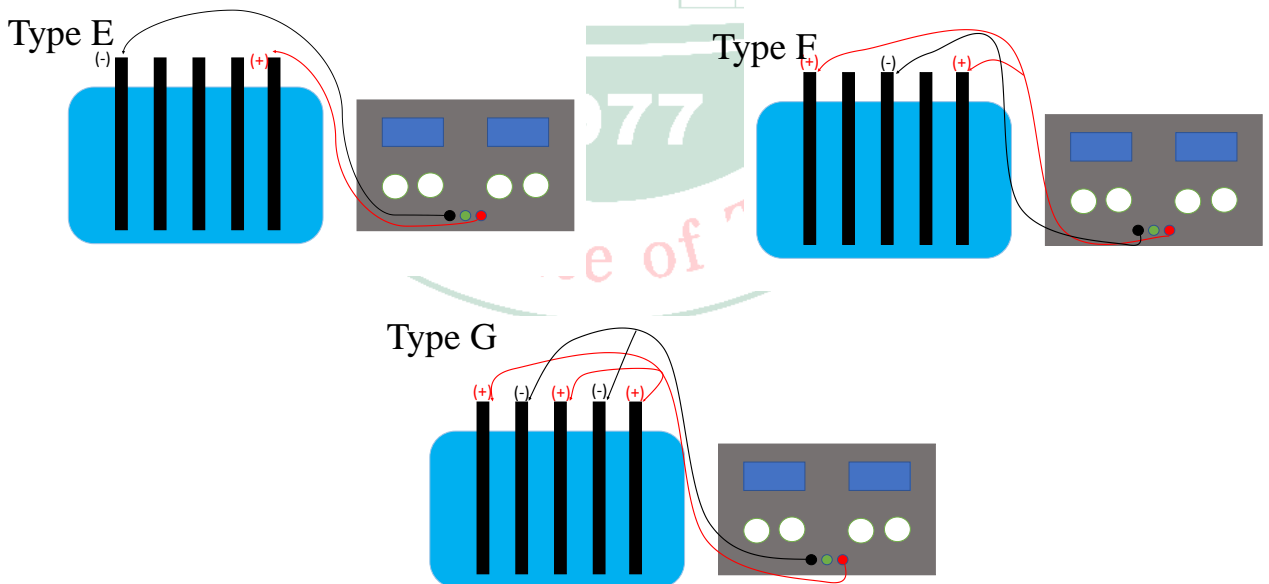


圖 3-2-2 不同夾法示意圖

### 3-2-2 間接電化學法大腸桿菌試驗檢測

將調配完成電解水溶液連續通電，以 1:1000 (使用無菌吸管各抽取 1ml 電解水溶液氧化劑，滴定各 1000ml 山泉水均勻混合)，於實驗室調配出濃度、時間、石墨版排列方式，於實場稀釋倍率檢驗效果。大腸桿菌群及大腸桿菌快速檢驗測試片派讀手冊，以 6044/6414/6444 快速總生菌數快篩片，方可準確判讀菌落數，將混合水樣使用無菌吸管各抽取 1ml 進行大腸桿菌快篩片菌落數培養，靜置一分鐘培養基凝固，將快篩片至於大腸桿菌培養箱中，並設定溫度  $35\pm 1^{\circ}\text{C}$ 、培養  $24\pm 2$  小時，統計菌落數。本實驗研究區分為實驗室、實場實驗檢測大腸桿菌去除效果。

#### A. 實驗室模擬

最佳石墨板數量、夾法選定：將食用鹽差異性較為明顯的兩種濃度，選定石墨板數量、夾法測定最佳方式，將原水以濃度電解液(g/L)，倒入電化學反應槽 1L(公升)試驗濃度(g)與蒸餾水(L)混合溶液電解水溶液，以相同電壓、時間，不同的石墨版數量、夾法以 1:1000 (使用無菌吸管各抽取 1ml 電解水溶液氧化劑，滴定各 1000ml 水溝水均勻混合) 之混合水溶液使用無菌吸管各抽取 1ml 水樣檢測大腸桿菌菌落數。

#### B. 最佳濃度選定：

最佳的石墨版數量、夾法反向探討濃度間以訂定區分四種條件較為合適的濃度作為大腸桿菌快篩片菌落數培養檢測結果，倒入電化學反應槽 1L(公升)試驗濃度(g)與蒸餾水(L)混合溶液，做濃度間 1:1000 (使用無菌吸管各抽取 1ml 電解水溶液氧化劑，滴定各 1000ml 水溝水均勻混合)之混合水溶液使用無菌吸管各抽取 1ml 水樣檢測大腸桿菌去除效果最佳之濃度，以利爾後實場實驗之條件。

#### C. 實場稀釋倍率

本實驗至花蓮縣壽豐鄉米棧村採取之山泉水，於實驗室以最佳的條件之電解水溶液氧化劑做為稀釋倍率分別為 1:1000、1:2000、1:3000、1:4000、1:5000、



1:7500、1:10000 (電化學氧化劑 ml：山泉水 ml)，之混合水溶液使用無菌吸管各抽取 1ml 水樣檢測大腸桿菌菌落數，以利實地場所實驗至多倍率的條件。

#### D. 實地場所實驗

- (a) 將實驗儀器至實地場所，以壽豐鄉米棧村為例，稀釋倍率 1:10000 (電化學氧化劑 ml：山泉水 ml)、1:7500 (電化學氧化劑 ml：山泉水 m;)，故採取 10 公升、7.5 公升的原水(L)與最佳條件之電解水溶液氧化劑，分別與山泉水混合，採取混合水溶液使用無菌吸管各抽取 1ml 水樣檢測大腸桿菌菌落數。
- (b) 將實驗儀器至實地場所，分別為花蓮縣壽豐鄉米棧村儲水塔為 100 噸 (T)、玉里鎮春日村儲水塔為 300 噸(T)為實驗地點，電解水溶液氧化劑：稀釋倍率 1:10000(電解水溶液氧化劑 L：山泉水 L) ，故分別到入米棧村 10 公升、春日村 30 公升與山泉水混合等待時間 10 分鐘，至排放口採取混合水溶液使用無菌吸管各抽取 1ml 水樣檢測大腸桿菌去除效果。

## 第四章結果與討論

經由花蓮縣政府 109 年上半年度水質檢測報告<sup>[9]</sup>，得知實驗場所(壽豐鄉米棧村及玉里鎮春日村)僅大腸桿菌超標如(表 4-1)，因此本次實驗僅考量大腸桿菌去除，以 3M™ Petrifilm™ 大腸桿菌快檢片測定原水(E.coli count)大腸桿菌去除效果探討。

本實驗區分為實驗室模擬、實地場所實驗，以實驗室模擬得出最佳條件至兩處實地場所以電化學氧化劑對大腸桿菌去除效果如(圖 4-1)。

### A. 實驗室模擬

- (a) 以 1-10g/L NaCl(氯化鈉)，10、20、30 分鐘進行濃度間 pH、ORP、導電度變化，較合適濃度 5g/L，直流電連續通電 10、20 分鐘，pH:4~7，ORP:750 以上。
- (b) 分別以食用鹽與 NaCl(氯化鈉)藥劑添加，電化學氧化劑置於分光光譜儀檢測吸收值變化關係，經由吸收峰值得知食用鹽 5g/L 與 NaCl(氯化鈉)10g/L 相當。
- (c) 因應實地場所實驗研究所用之石墨板為長:50 公分、寬:20 公分、厚度:0.5 公分，以濃度間差異明顯之二種濃度作為電解質，探討石墨板數量及夾法對大腸桿菌去除效果，選定最佳石墨版數量及夾法方式，得(Type E)排列方式最佳。
- (d) 石墨板數量及夾法之最佳條件中選定最佳濃度，以四種階段性明顯濃度測定 pH、ORP、導電度變化、餘氯及對大腸桿菌去除效果，測得結果為(Type E)，5g/L，直流電連續通電 10、20 分鐘，pH:4~6，ORP:800 以上，導電度:10±1(μs/cm)，餘氯:34~64(mg/L)，大腸桿菌總菌落數：5100CFU/ml 去除率達 90% 以上。
- (e) 最佳石墨板數量、夾法及濃度，探討最佳稀釋倍率對大腸桿菌去除效果，稀釋倍率 5000 倍時去除率尚有 80% 以上。

### B. 實地場所試驗

- (a) 因水中電解質進行離子可逆交換反應，造成水中電壓壓降與實驗室所測得電壓有所落差，得實驗室模擬與實地場所差異性。於實驗室中所用水溶液為蒸餾水；實地場所所使用之水溶液為原水。
- (b) 水桶試驗、儲水塔試驗做大腸桿菌去除率，探討大腸桿菌去除結果。
- i. 將其投放置儲水塔內稀釋倍數 10000 倍對大腸桿菌消毒殺菌率可達（10 分鐘可達 78% 以上、20 分鐘可達 80% 以上）
  - ii. 放置水桶內稀釋倍數 7500 倍對大腸桿菌消毒殺菌率可達（10 分鐘可達 75% 以上、20 分鐘可達 100% 以上）
  - iii. 放置水桶內稀釋倍數 10000 倍對大腸桿菌消毒殺菌率可達（10 分鐘可達 70% 以上、20 分鐘可達 93% 以上）

表 4-1 花蓮地區水質檢測成果統計<sup>[9]</sup>

| 檢測地點                   |           | 壽豐鄉米棧村        | 玉里鎮春日村   |          |
|------------------------|-----------|---------------|----------|----------|
| 檢測時間                   |           | 109/4/28      | 109/5/5  |          |
| 水質檢測項目                 | 單位        | 水質檢測項目標準      | 水質檢測成果   |          |
| 大腸桿菌群密度                | CFU/100ml | 2000(A),50(B) | 2.70E+03 | 1.10E+02 |
| 氨氮(NH <sub>3</sub> -N) | mg/L      | 0.1           | 0        | 0        |
| 化學需氧量(COD)             |           | 25            | 0        | 0        |
| 總有機碳(TOC)              |           | 4             | 0.6      | 0.8      |
| 砷(As)                  |           | 0.05          | 0.00048  | 0.00037  |
| 鉛(Pb)                  |           | 0.01          | 0        | 0        |
| 鎘(Cd)                  |           | 0.01          | 0        | 0        |
| 鉻(Cr)                  |           | 0.05          | 0        | 0.00046  |
| 汞(Hg)                  |           | 0.002         | 0        | 0        |
| 硒(Se)                  |           | 0.05          | 0        | 0.00024  |

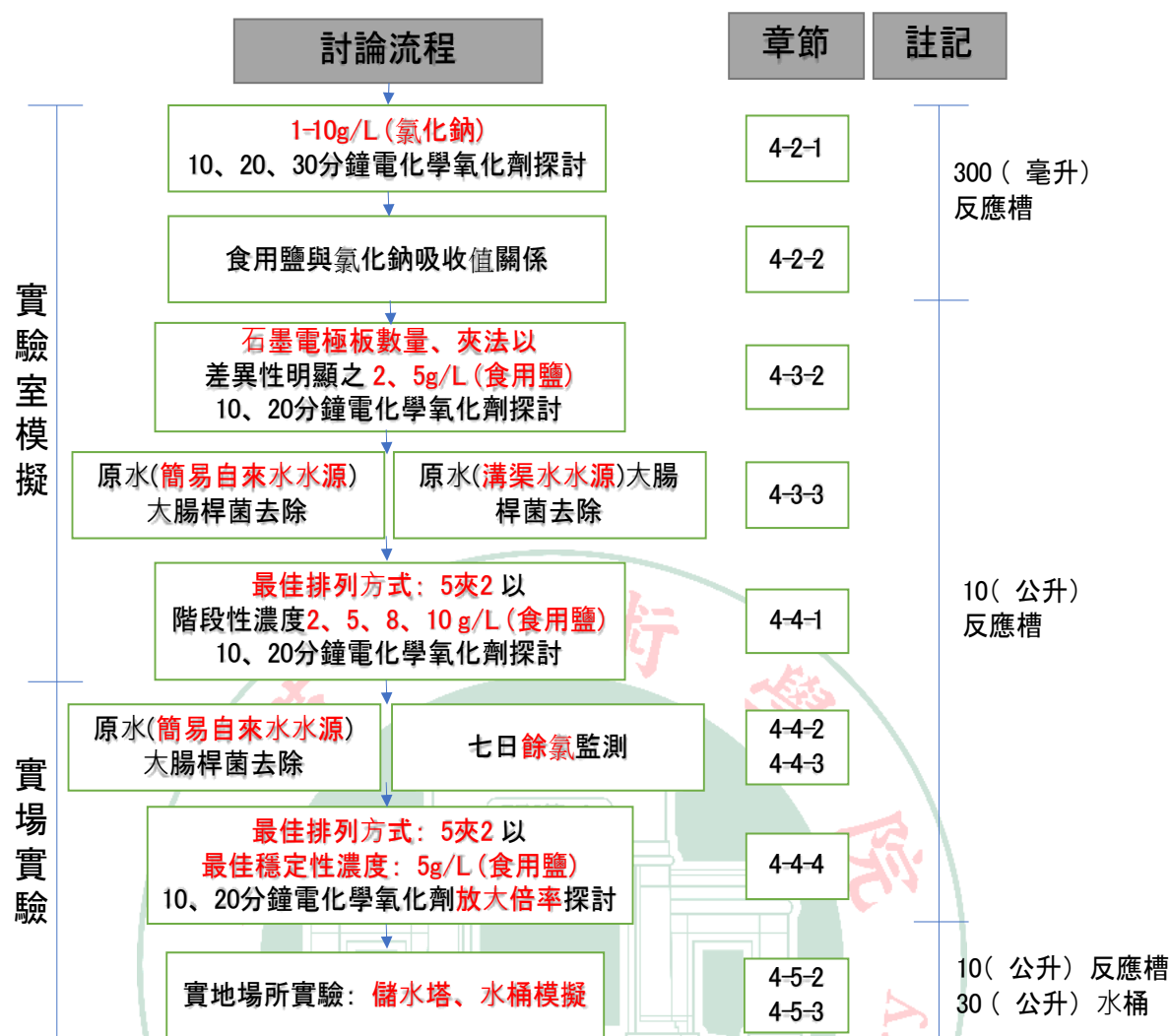


圖 4-1 實驗討論流程圖

#### 4-1 NaCl(氯化鈉)、食用鹽濃度間的變化

##### 4-1-1 不同濃度及時間的差異性

測試二片電極板，放置於間距3公分之反應槽(反應槽體積為300c.c.)，以蒸餾水溶液與1-10g NaCl(氯化鈉)混合為電解液，濃度如(表4-1-1)：

表 4-1-1 NaCl(氯化鈉)電解液濃度

| NaCl(氯化鈉)(g/L) | 濃度(mM) | NaCl(氯化鈉)(g/L) | 濃度(mM)  |
|----------------|--------|----------------|---------|
| 1              | 1.7111 | 6              | 10.2669 |
| 2              | 3.4223 | 7              | 11.9781 |
| 3              | 5.1334 | 8              | 13.6892 |
| 4              | 6.8446 | 9              | 15.4    |
| 5              | 8.5557 | 10             | 17.1115 |

電源供應器固定石墨電極板間電壓 10v(伏特)，直流電連續通電電解後在 10 分鐘、20 分鐘、30 分鐘，探討不同時間的情況下濃度間 pH、ORP、導電度、溫度變化，掌握不同濃度間在直流電連續通電的情形之下的穩定性，作為後續實驗電解質的濃度選定、氧化分解、通電電解中電流密度之基本條件。

條件濃度為後續實驗室模擬，以石墨電極板不同排列方式之濃度添加量參考方針，以便未來實地場所之實驗成果。

#### 4-1-2 連續通電不同時間與不同濃度間的變化

進行添加不同濃度 NaCl(氯化鈉)，石墨電極板間電壓 10v(伏特)、通電時間 10、20、30 分鐘，所測得氫離子濃度 pH、氧化還原電位 ORP(mv)、導電度( $\mu\text{s}/\text{cm}$ )、溫度( $^{\circ}\text{C}$ )值如 (圖 4-1-1~圖 4-1-3)，

##### A. 10 分鐘

溫度於濃度 8g/L 為最高 37.5 $^{\circ}\text{C}$ 、其餘溫度約在 32~36 $^{\circ}\text{C}$ ，伴隨著濃度添加量增加其 pH 濃度隨其升高並維持在:5.85~10.3 範圍。氧化還原電位於 1g/L、2g/L NaCl(氯化鈉)效果較不明顯；反觀 5 g/L、6g/L NaCl(氯化鈉)二者條件效果呈現較為良好，未來可適用於實驗室模擬、實場場域添加用。

表 4-1-2 通電 10 分鐘不同濃度 NaCl(氯化鈉) pH、ORP、導電度、溫度值

| 檢驗項目<br>濃度(g/L) | pH    | ORP (mv) | 溫度( $^{\circ}\text{C}$ ) | 導電度( $\mu\text{s}/\text{cm}$ ) |
|-----------------|-------|----------|--------------------------|--------------------------------|
| 1               | 5.85  | 240      | 32.4                     | 2.53                           |
| 2               | 6.043 | 346      | 32.9                     | 4.42                           |
| 3               | 5.640 | 734      | 33.1                     | 6.4                            |
| 4               | 6.904 | 778      | 32.9                     | 8.49                           |
| 5               | 6.334 | 789      | 32.9                     | 9.89                           |
| 6               | 5.549 | 878      | 33.6                     | 12.00                          |
| 7               | 7.510 | 743      | 35.5                     | 14.18                          |
| 8               | 9.130 | 584      | 37.5                     | 15.88                          |
| 9               | 7.485 | 747      | 35.5                     | 17.38                          |

|    |        |     |    |       |
|----|--------|-----|----|-------|
| 10 | 10.324 | 730 | 36 | 18.59 |
|----|--------|-----|----|-------|

## B. 20 分鐘

與連續通電 10 分鐘相較得知 pH 濃度隨著 NaCl(氯化鈉)增加量，處於穩定上升，差別於連續通電 20 分鐘在:4.69~9.83 範圍較小，溫度於濃度 10g/L 為最高 46.2、其餘溫度約在 33~40°C。氧化還原電位於 5 g/L、6g/L NaCl(氯化鈉)二者條件效果呈現依然較為良好，與連續通電 10 分鐘相較之下 10g/L NaCl(氯化鈉)則通電時間拉長，其效果衰退明顯。

表 4-1-3 通電 20 分鐘不同濃度 NaCl(氯化鈉) pH、ORP、導電度、溫度值

| 檢驗項目<br>濃度(g/L) | pH    | ORP (mv) | 溫度(°C) | 導電度(μs/cm) |
|-----------------|-------|----------|--------|------------|
| 1               | 4.694 | 272      | 33     | 2.53       |
| 2               | 4.967 | 360      | 34.1   | 4.5        |
| 3               | 5.580 | 757      | 35.3   | 6.42       |
| 4               | 5.749 | 812      | 37.4   | 8.55       |
| 5               | 5.560 | 830      | 36.4   | 10.10      |
| 6               | 5.371 | 866      | 38.1   | 12.44      |
| 7               | 7.432 | 763      | 38.5   | 14.60      |
| 8               | 8.705 | 664      | 39.8   | 15.92      |
| 9               | 7.067 | 787      | 43.4   | 17.36      |
| 10              | 9.832 | 473      | 46.5   | 18.69      |

### C. 30 分鐘

與連續通電 10 分鐘、20 分鐘相較得之下 pH 濃度較為酸性在:2.95~8.39 範圍，溫度於濃度 10g/L 為最高 53.3、其餘溫度約在 32.6~45℃。連續通電 30 分鐘導電度與連續通電 10 分鐘、20 分鐘為相同，與時間無關係、與濃度有關。氧化還原電位於 7g/L NaCl(氯化鈉)較好，與連續通電 10 分鐘、20 分鐘相較之下 5g/L NaCl(氯化鈉)則效果為平穩可做未來實場條件。

表 4-1-4 通電 30 分鐘不同濃度 NaCl(氯化鈉) pH、ORP、導電度、溫度值

| 檢驗項目<br>濃度(g/L) | pH    | ORP (mv) | 溫度(°C) | 導電度(μs/cm) |
|-----------------|-------|----------|--------|------------|
| 1               | 2.958 | 6-0      | 32.6   | 2.61       |
| 2               | 5.543 | 791      | 34.7   | 4.55       |
| 3               | 5.590 | 789      | 36     | 6.44       |
| 4               | 6.228 | 790      | 36     | 6.44       |
| 5               | 6.197 | 821      | 40.4   | 10.50      |
| 6               | 6.108 | 843      | 41.1   | 12.72      |
| 7               | 6.140 | 852      | 42.6   | 14.30      |
| 8               | 7.388 | 748      | 42.2   | 16.23      |
| 9               | 7.420 | 754      | 45.6   | 17.27      |
| 10              | 8.390 | 659      | 53.3   | 18.26      |

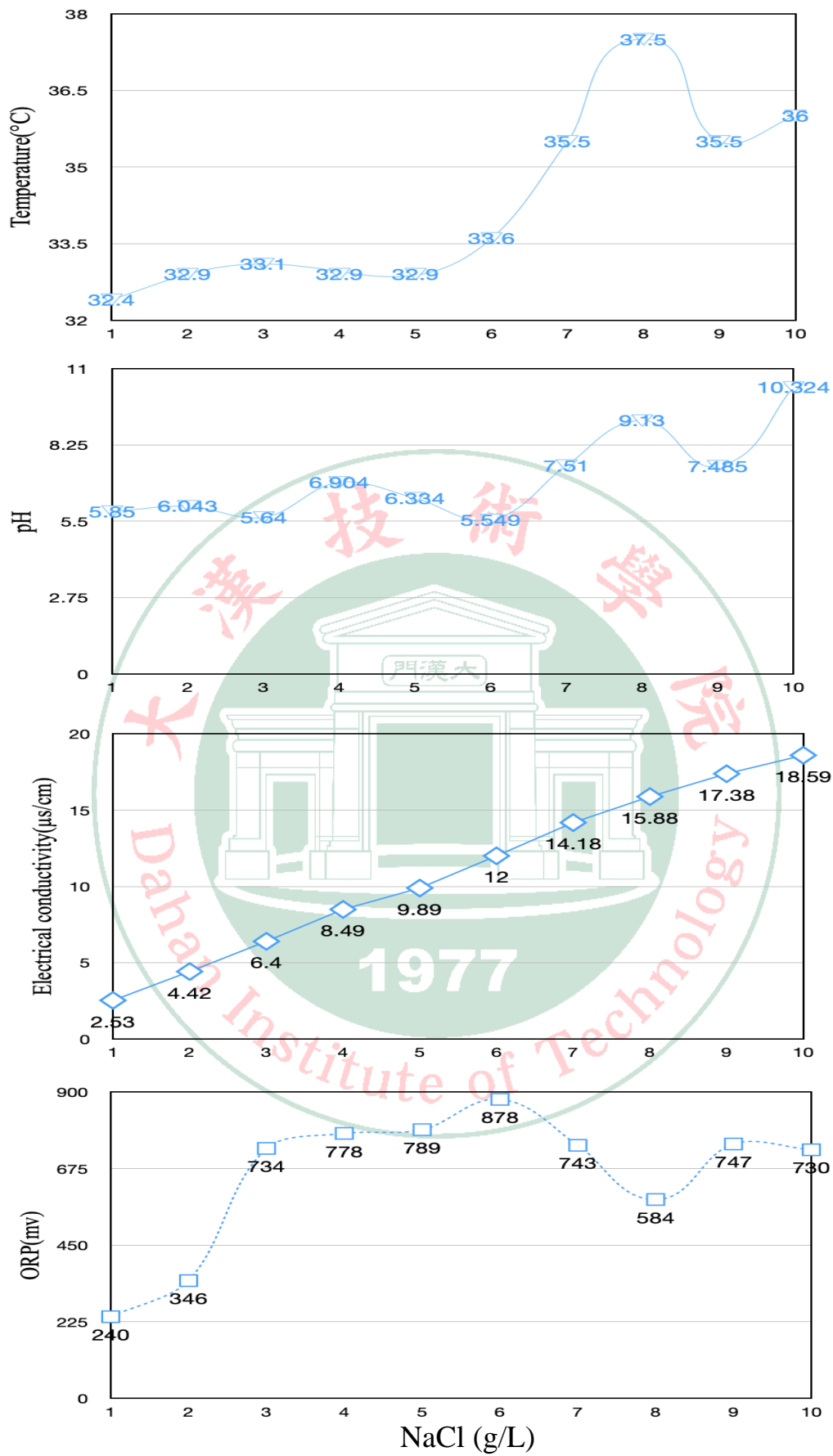


圖 4-1-1 連續通電 10 分鐘與不同濃度間的變化



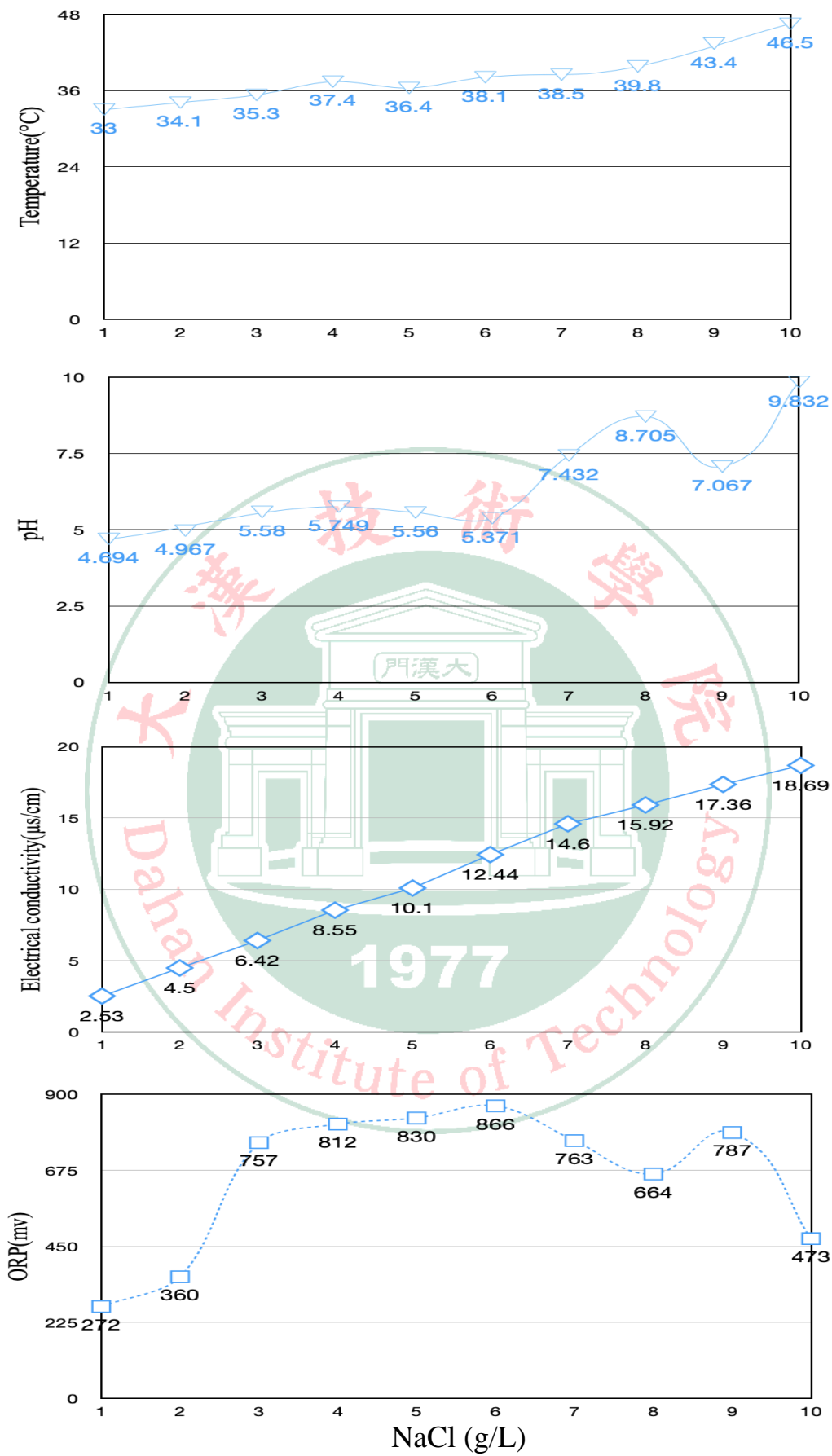


圖 4-1-2 連續通電 20 分鐘與不同濃度間的變化



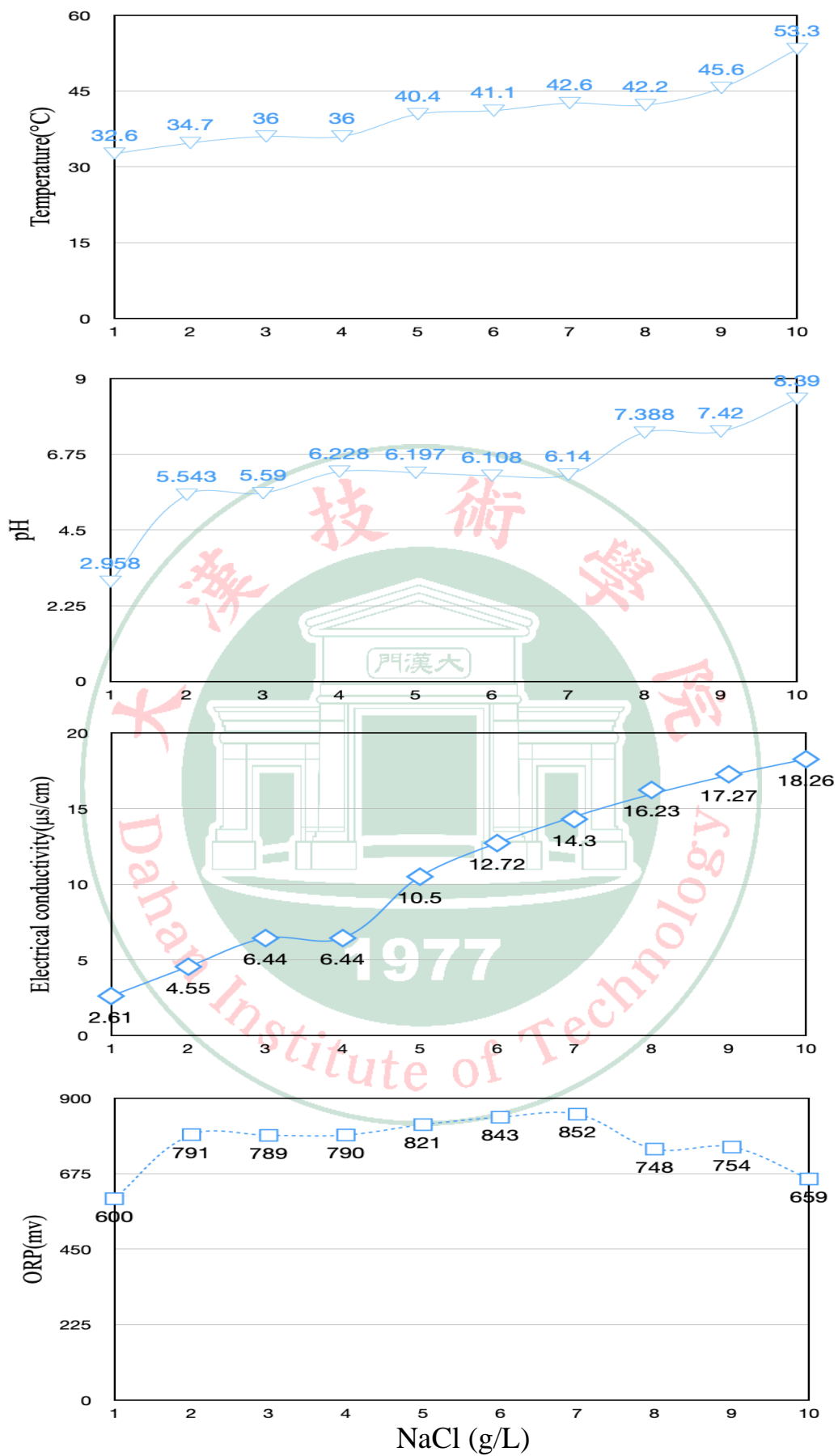


圖 4-1-3 連續通電 30 分鐘與不同濃度間的變化

結語：

- A. 溫度：與連續通電時間、濃度、電流密度成正比關係。
- B. pH 值：隨著連續通電時間拉長，濃度就越下降，而濃度低者為酸性；濃度高者為鹼性。
- C. 導電度：連續通電 10、20、30 分鐘測得結果，電流密度與連續通電時間無關係，與水中濃度電解質密度相關。
- D. 氧化還原電位：結果 1g/L、2g/L、8g/L、9g/L、10g/L NaCl(氯化鈉)不穩定，反觀 3~7 g/L NaCl(氯化鈉)效果為良好，得濃度越高效果並不理想。
- E. 因連續通電電解 30 分鐘，於中高溫狀態情形石墨電極板表面剝落嚴重，考量未來以此材質作為電極板，耗材損失利益、電解過程氧化還原電位差異導致實驗數據準性部分之虞，故不採用連續通電 30 分鐘。
- F. 符合電解質取得便利、當地居民所知原料，以乾基 95% 為 NaCl(氯化鈉)之食用鹽做為電解質；實驗室試驗 4-2 節後之實驗均使用食用鹽為電解質，以符合實地場所之需求。
- G. 4-1 節實驗中所使用反應槽為 300 毫升(高:12 公分、寬:10 公分、長:3 公分)，正負極石墨電極板(高:14 公分、寬:10 公分、厚度:0.2 公分)、極板間距:3 公分、石墨板單面與水接觸面積:10.95 平方公分。
- H. 4-2 節因應實地場所所需氧化電解液量龐大，故實驗中所使用反應槽為 10 公升(高:15 公分、寬:20 公分、長:50 公分)，石墨電極板(高:20 公分、寬:50 公分、厚度:0.5 公分)、極板間距:3 公分、石墨板單面與水接觸面積:27.386 平方公分。
- I. 已知 (H) 石墨板單面與水接觸面積較 (G) 多，致電流密度改變，加入石墨板數量參數考量。因反應槽中石墨電極板本身有電阻率因素、水中加入電解質有電流導通通電效果、電極板間因水中導電效果激發本身的通電效果，故以 4-3 實驗作為實際數據依據。

### 4-1-3 食用鹽與 NaCl(氯化鈉)分光光譜吸收值變化關係

電解液挑配濃度分別為：1-10g/L NaCl(氯化鈉)、1-10g/L 食用鹽電解液，於 300c.c 壓克力反應槽以石墨電極板間 10v(伏特)，直流電連續通電 10 分鐘，將電解氧化劑至於分光光度計(UV/Vis)，掃描波長 200-500nm 之吸收值，於特定波長 293nm 具顯著之吸收值結果得知如圖(4-1-4)。

- A. 濃度 1-10g/L NaCl(氯化鈉)電解液：藥劑純度單一，並無其他微量金屬離子激發，故以高濃度 10g/L NaCl(氯化鈉)，具有強氧化劑效果。
- B. 濃度 1-10g/L 食用鹽電解液：與 NaCl(氯化鈉)差異處，電解過程離子激發態 5g/L 食用鹽吸收值與 NaCl(氯化鈉)相當，且離子交換區達飽和狀態。

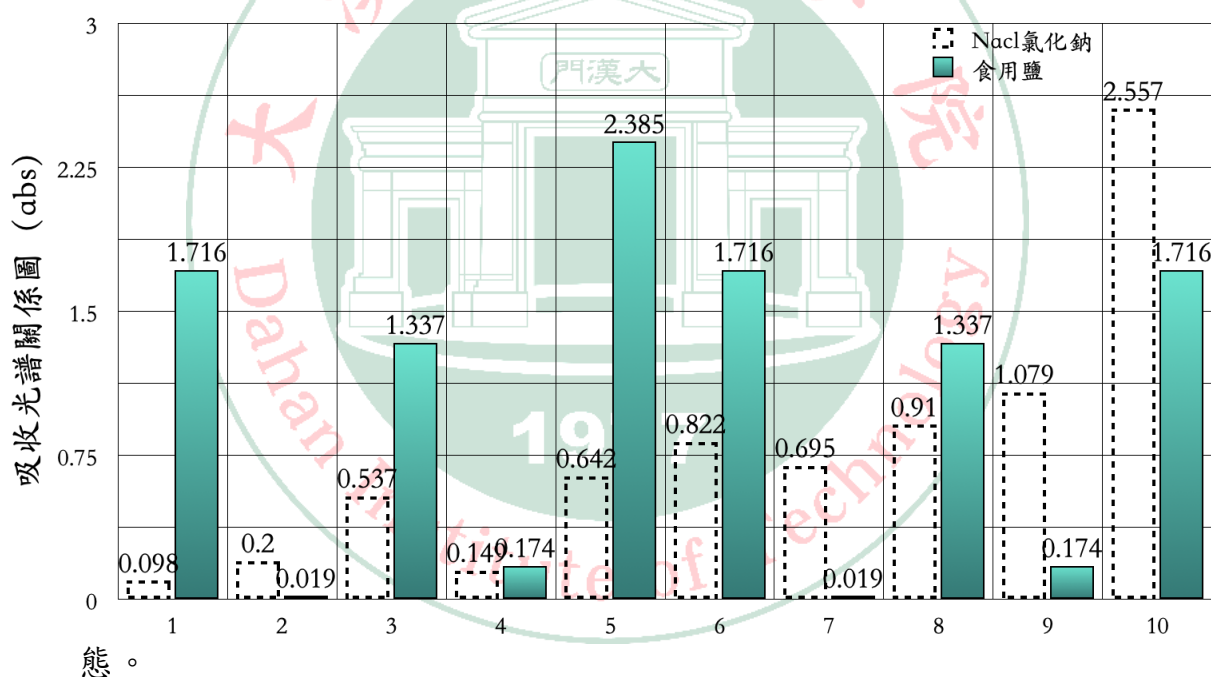


圖 4-1-4 1~10g/L NaCl(氯化鈉)與食用鹽電解液之吸收光譜關係圖(波長 293nm)

結語：

因應未來市售容易取得之便利性，而食用鹽含有乾基 95%NaCl(氯化鈉)，故檢測此二種不同電解值，以相同條件、方式、檢測作為關係比較，吸收值特定波長 293nm 所得結果二種不同電解質最高峰值甚為相同，可作為未來實地場所實驗之基本條件根據。

## 4-2 石墨電極板間數量、夾法的影響

### 4-2-1 石墨電極板數量、夾法選定

石墨板經由石墨粉模壓窯燒塑化成形，石墨粉剝落因素導致實驗電解過程造成電壓起伏不定、電流因水中干擾值，影響測定電壓壓降，因 4-1 節實驗中發現直流電連續通電 30 分鐘發現石墨粉剝落嚴重，效果不如預期，故本次實地場所實驗連續通電時間訂定為 10、20 分鐘。本章節研究所用石墨電極板為長:50 公分、寬:20 公分、厚度:0.5 公分，相較於 4-2 節實驗中所使用之石墨電極板體積來的龐大，石墨電極板電阻率受其影響，實驗以食用鹽二種差異性明顯之濃度 2g/L、5g/L，為選定最佳石墨電極板數量、電極頭夾法檢測大腸桿菌去除效果作為實地場所實驗之條件。

### 4-2-2 石墨電極板數量、夾法選定探討

以食用鹽進行不同濃度石墨電極板排列方式，石墨電極板間電壓 10v(伏特)通電時間 10、20 分鐘，所測得 pH、ORP、導電度、溫度值如 (圖 4-2-1、圖 4-2-2)。茲因『3-2-1 節 間接電化學法』中得知石墨電極板電阻率影響電極頭夾法，導致電源供應器供電電壓壓降，以水中電場效應極板間電壓差控制電壓，故 (Type B、Type D、Type G 不納入參數)。

本實驗以 (Type A、Type C、Type E、Type F) 作為石墨電極板數量、夾法選定為本章節探討。

#### A. 10 分鐘

5g/L 食用鹽，較為穩定，氧化還原電位值皆為相近，pH 濃度以 (Type E) 為弱酸，而其他排列方式為強酸性，擔憂未來實場化影響民生用水 pH 濃度值謂之重要依據。因食用鹽每公升添加濃度影響 pH 值的穩定性需確切掌握濃度比值以避免間接影響電化學氧化劑對大腸桿菌去除的成效如 (表 4-2-1)、(圖 4-2-1)。

## B. 20 分鐘

連續通電 20 分鐘後，二種不同濃度 pH 值皆為酸性，間接電化學氧化法若與原水混合稀釋倍率不足，有違反法定簡易自來水放流水標準之疑慮及危害用水品質，與連續通電 10 分鐘導電度有所差異，通電 20 分鐘平均比 10 分鐘多了 1 $\mu$ s/cm 電位如(表 4-2-2)、(圖 4-2-2)。

表 4-2-1 石墨電極板數量、夾法間連續通電 10 分鐘

| 檢測項目<br>排列方式 | pH    | ORP (mv) | 溫度(°C) | 導電度( $\mu$ s/cm) |
|--------------|-------|----------|--------|------------------|
| 2g           |       |          |        |                  |
| Type A       | 2.578 | 809.7    | 32.6   | 3.59             |
| Type C       | 1.997 | 818.8    | 34.6   | 5.67             |
| Type E       | 3.439 | 778      | 30.9   | 4.66             |
| Type F       | 5.430 | 552.8    | 32.8   | 3.82             |
| 5g           |       |          |        |                  |
| Type A       | 3     | 845.2    | 31.6   | 7.62             |
| Type C       | 1.8   | 889.2    | 33.5   | 11.89            |
| Type E       | 6.302 | 803      | 31.1   | 9.44             |
| Type F       | 2.5   | 861.3    | 32.8   | 11.94            |

表 4-2-2 石墨電極板數量、夾法間連續通電 20 分鐘

| 檢測項目<br>排列方式 | pH    | ORP (mv) | 溫度(°C) | 導電度( $\mu$ s/cm) |
|--------------|-------|----------|--------|------------------|
| 2g           |       |          |        |                  |
| Type A       | 4.967 | 360      | 34.1   | 4.75             |
| Type C       | 2.76  | 630.4    | 33.7   | 4.91             |
| Type E       | 2.400 | 804      | 32.6   | 4.94             |
| Type F       | 5.543 | 780      | 34.7   | 4.46             |
| 5g           |       |          |        |                  |
| Type A       | 2.7   | 839.3    | 33.6   | 9.83             |
| Type C       | 1.5   | 891.1    | 33.6   | 12.89            |
| Type E       | 3.021 | 860      | 34.4   | 10.9             |
| Type F       | 1.3   | 867.2    | 32.9   | 11.18            |

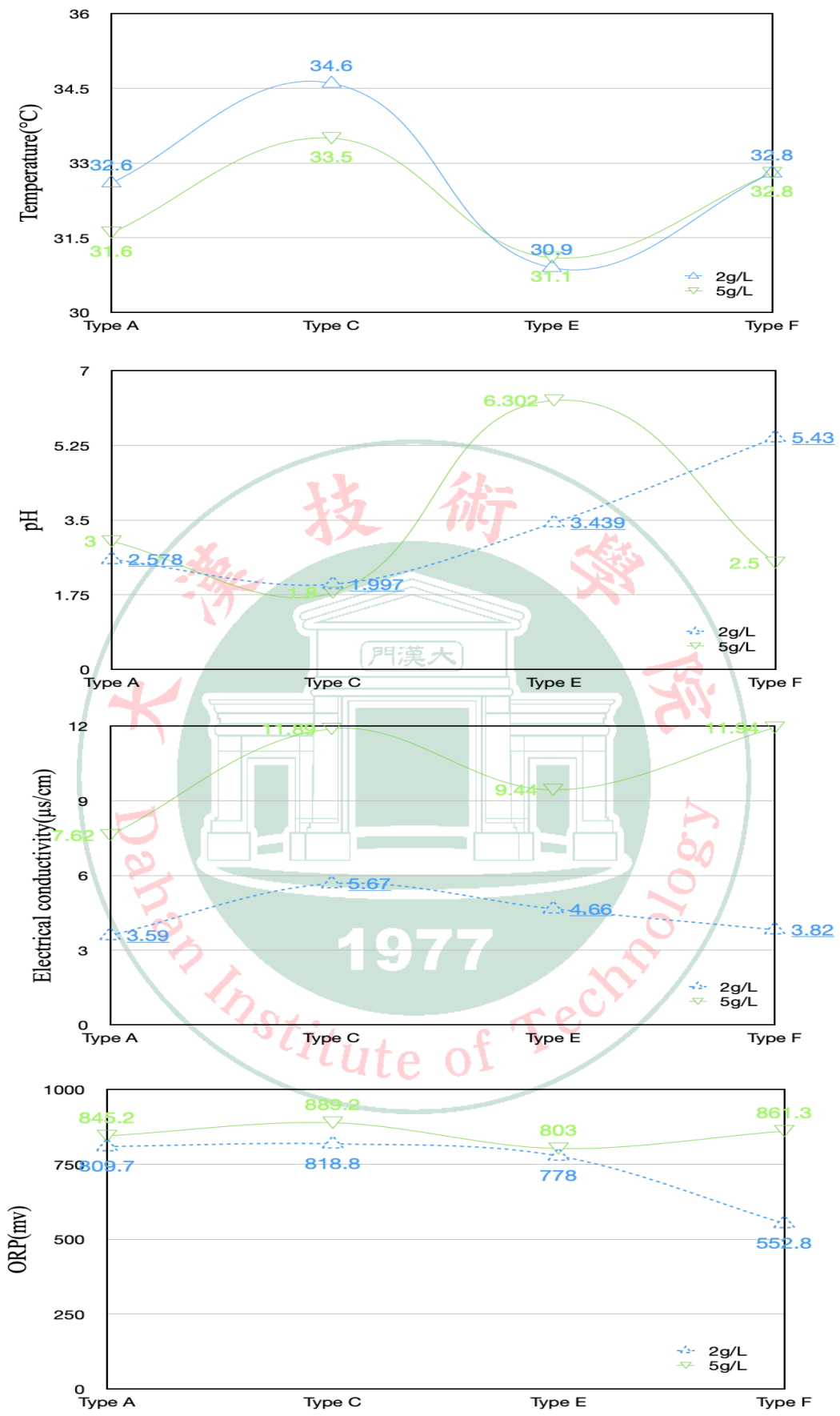


圖 4-2-1 連續通電 10 分鐘石墨電極板不同數量及夾法



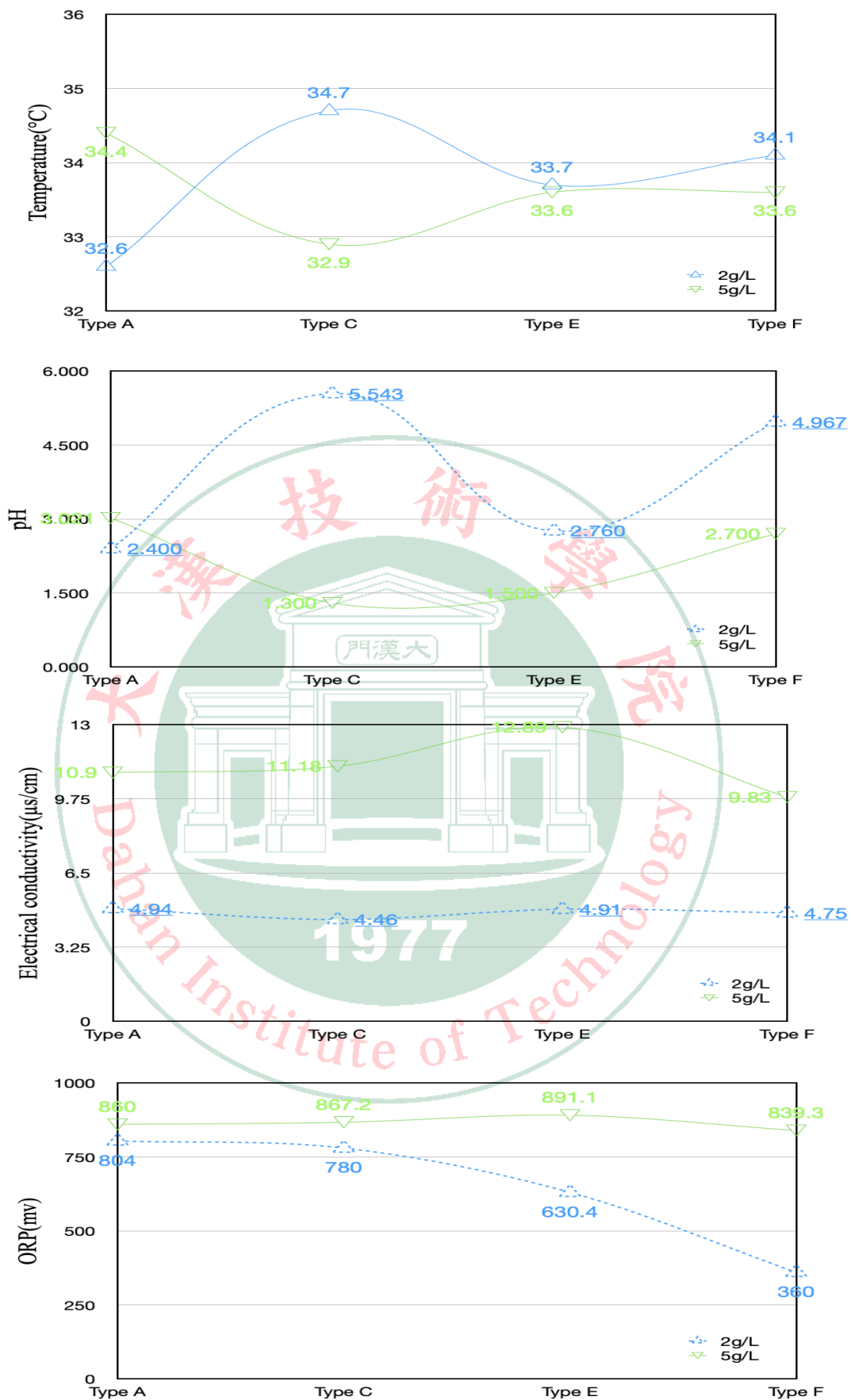


圖 4-2-2 連續通電 20 分鐘石墨電極板不同數量及夾法



結語：

以 4-2-2 節實驗結果得知，以(圖 3-2-2)不同夾法示意圖(Type E)之排列方式及夾法較為合適，從氧化還原電位做為參數值，所得數值穩定性佳，以(4-2-3 節) 大腸桿菌快篩做實際實驗作為依據，檢測石墨電極板排列方式對大腸桿菌去除效果，作為實地場所實驗所得重要條件之一。

#### 4-2-3 石墨電極板間差異性對大腸桿菌去除效果

##### A. 連續通電 10 分鐘電化學氧化劑對大腸桿菌去除效果

如圖(4-2-3)所示，由大腸桿菌快篩片檢驗效果，以 1:1000 大腸桿菌去除效果(1ml 電化學氧化劑：1000ml 山泉水)，原水(E.coli count)中大腸桿菌總菌落數含量為 5200CFU/100ml。其 5g/L 食用鹽電化學氧化劑唯(Type F)尚有大腸桿菌未完全去除；而 2g/L 食用鹽電化學氧化劑大腸桿菌(Type E)、(Type F)未完全去除，其於二種排列方式對大腸桿菌完全去除。

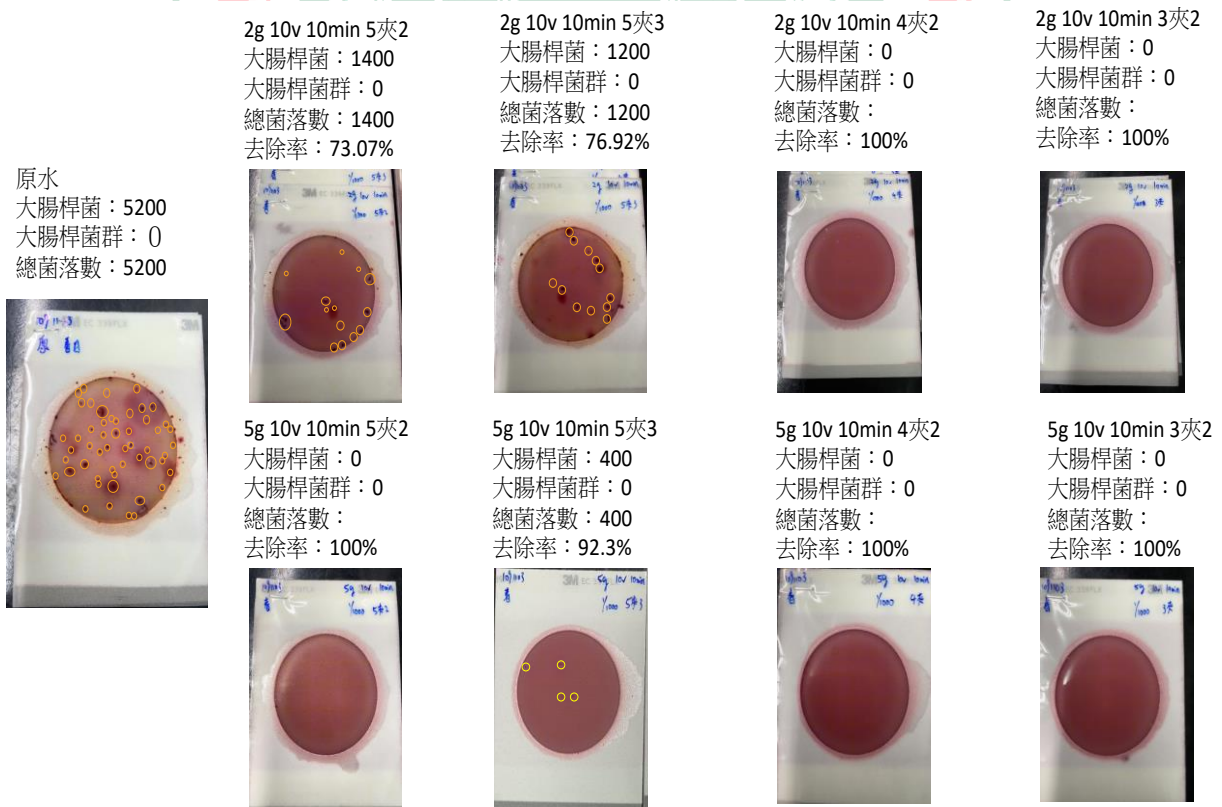


圖 4-2-3 石墨電極板間差異性連續通電 10 分鐘對大腸桿菌去除效果

B. 連續通電 20 分鐘電化學氧化劑對大腸桿菌去除效果

經直流電連續通電時間至 20 分鐘，其 5g/L 食用鹽電化學氧化劑 (Type A) 與通電時間 10 分鐘發生變異如(圖 4-2-4)，至有大腸桿菌未完全去除。避免實驗數據失真導致爾後實驗走向不確定性，然而以大腸桿菌總菌落數較多的溝渠水實施複查檢驗，以利本研究主軸之重要依據及條件。

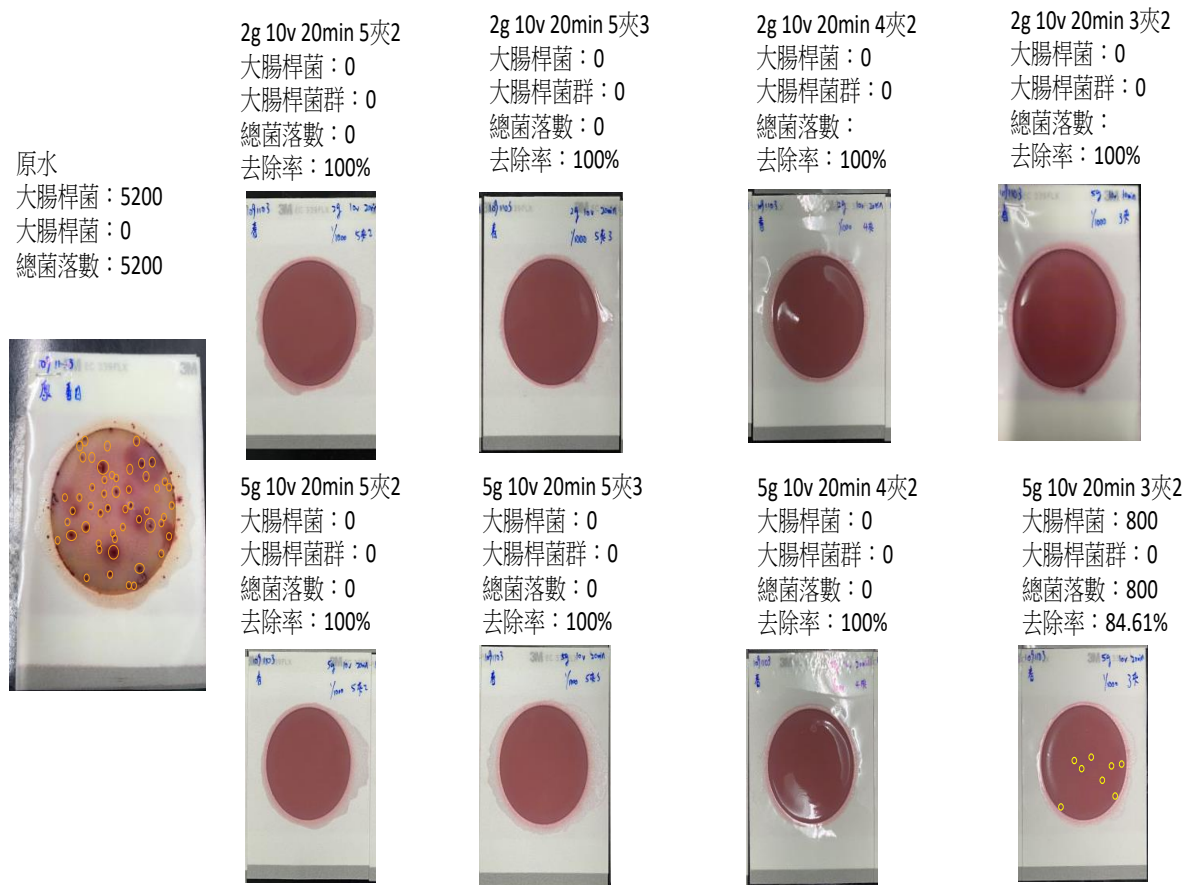


圖 4-2-4 石墨電極板間差異性連續通電 20 分鐘對大腸桿菌去除效果

C. 溝渠水電化學氧化劑對大腸桿菌去除效果

- (a) 主要目的為尋求最佳排列方式，本次試驗採取原水(E.coli count)地點與前者不同，採用溝渠水為複查實驗。此原水(E.coli count) 大腸桿菌

總菌落數含量為 8800CFU/100ml 與前者不同地方在於總菌落數中含有大腸桿菌群所干擾，而電化學氧化劑去除大腸桿菌群較為費力。

- (b) 經試驗結果以濃度較為穩定的 5g/L 食用鹽電化學氧化劑，結果顯示如(圖 4-2-5)(Type E)得以 1:1000(1ml 電化學氧化劑:1000ml 溝渠水)；相對於(Type F)、(Type C)、(Type A) 以 1:100(1ml 電化學氧化劑:100ml 溝渠水)即有大腸桿菌尚未去除。

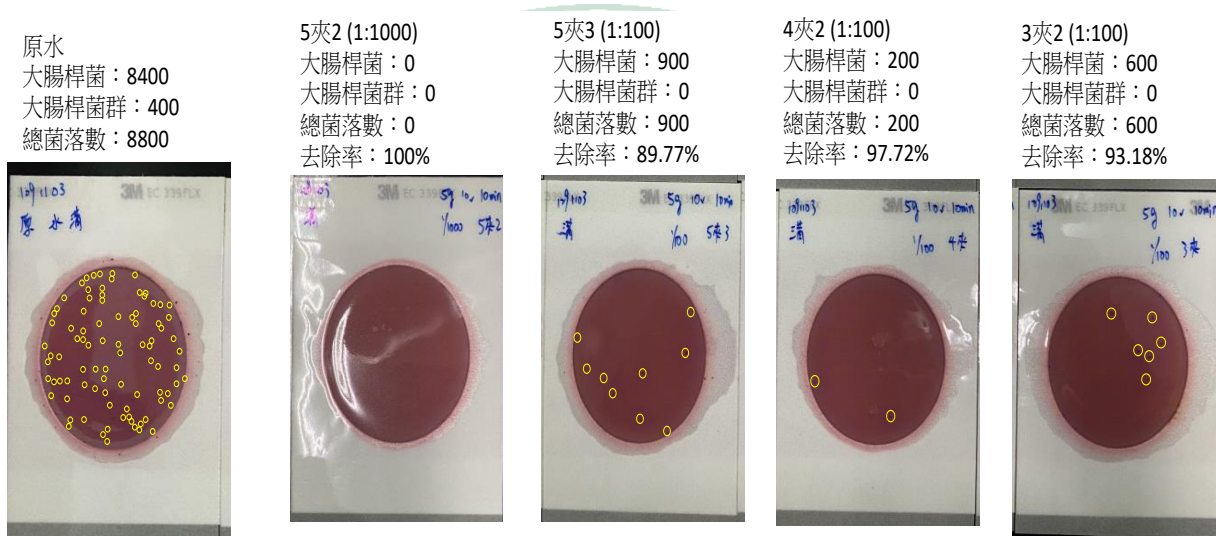


圖 4-2-5 溝渠水複查電化學氧化劑對大腸桿菌去除效果

結語：

- A. (4-2-2 節) 食用鹽與 NaCl(氯化鈉)分光光譜吸收值濃度差異性明顯之 2g/L、5g/L，於 (4-3-2 節) 實驗所得氧化還原電位(ORP)結果，(Type E) 排列方式穩定性佳，以濃度 5g/L 電化學氧化劑對大腸桿菌得以完全去除如(圖 4-2-6)。
- B. 本章節所用之濃度為差異性明顯之二種，最佳排列方式中並得知最佳濃度為何，於 (4-4 節) 實驗中所用之濃度為階段性明顯之四種濃度，從中選定最佳濃度，方可將此些條件帶入實地場所實驗條件之中。
- C. 總菌落數多寡影響電化學氧化劑對大腸桿菌去除率影響成正比關係，則大腸桿菌群的出現也需消耗較多滅菌能量。

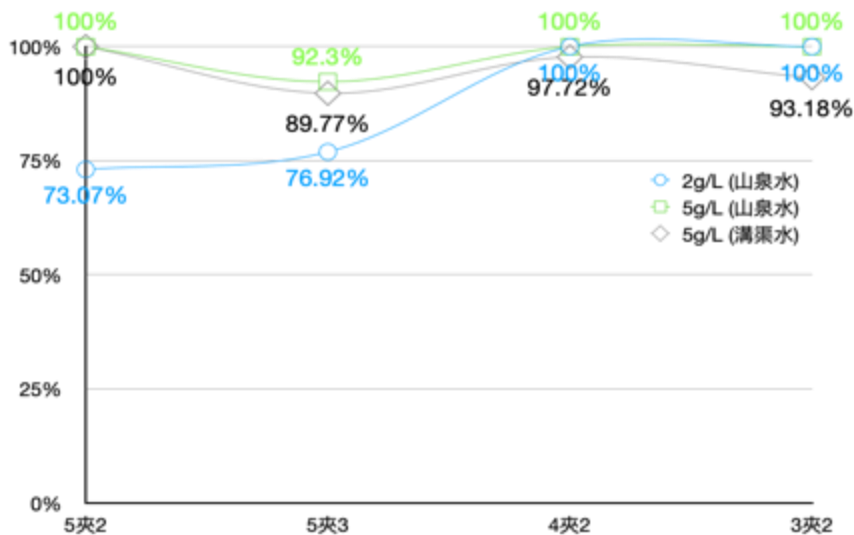


圖 4-2-6 電化學氧化劑 10 分鐘對大腸桿菌去除率

### 4-3 石墨電極板排列方式(Type E)與濃度關係

#### 4-3-1 四種濃度間 pH、ORP、導電度變化

本實驗以 4-2 節實驗數據中選定四種階段性明顯之濃度，如(表 4-3-1)所示；4-3 節試驗結果得最佳石墨電極板排列條件(Type E)，電極板間電壓差 10v(伏特)如(圖 4-3-1)。以各 2g/L、5g/L、8g/L、10/L 食用鹽電解液，連續通電時間為 10、20 分鐘，選定較佳 pH、ORP 氧化還原電位、導電度、餘氯及對大腸桿菌去除效果，既定實地場所實驗之重要條件。

表 4-3-1 石墨電極板排列方式(Type E) 四種濃度(食用鹽 pH、ORP、導電度、溫度)

| 檢驗項目<br>濃度 | pH     | ORP (mv) | 溫度 (°C) | 導電度(μs/cm) |
|------------|--------|----------|---------|------------|
| 10 分鐘      |        |          |         |            |
| 2g/L 食用鹽   | 3.439  | 778      | 30.9    | 4.66       |
| 5g/L 食用鹽   | 6.302  | 803      | 31.1    | 9.44       |
| 8g/L 食用鹽   | 7.079  | 729      | 32.6    | 14.15      |
| 10g/L 食用鹽  | 8.012  | 652      | 30.3    | 18.12      |
| 20 分鐘      |        |          |         |            |
| 2g/L 食用鹽   | 2.400  | 804      | 32.6    | 4.94       |
| 5g/L 食用鹽   | 3.021  | 860      | 34.4    | 10.9       |
| 8g/L 食用鹽   | 5.549  | 842      | 34.5    | 14.53      |
| 10g/L 食用鹽  | 11.462 | 229      | 31.7    | 18.50      |

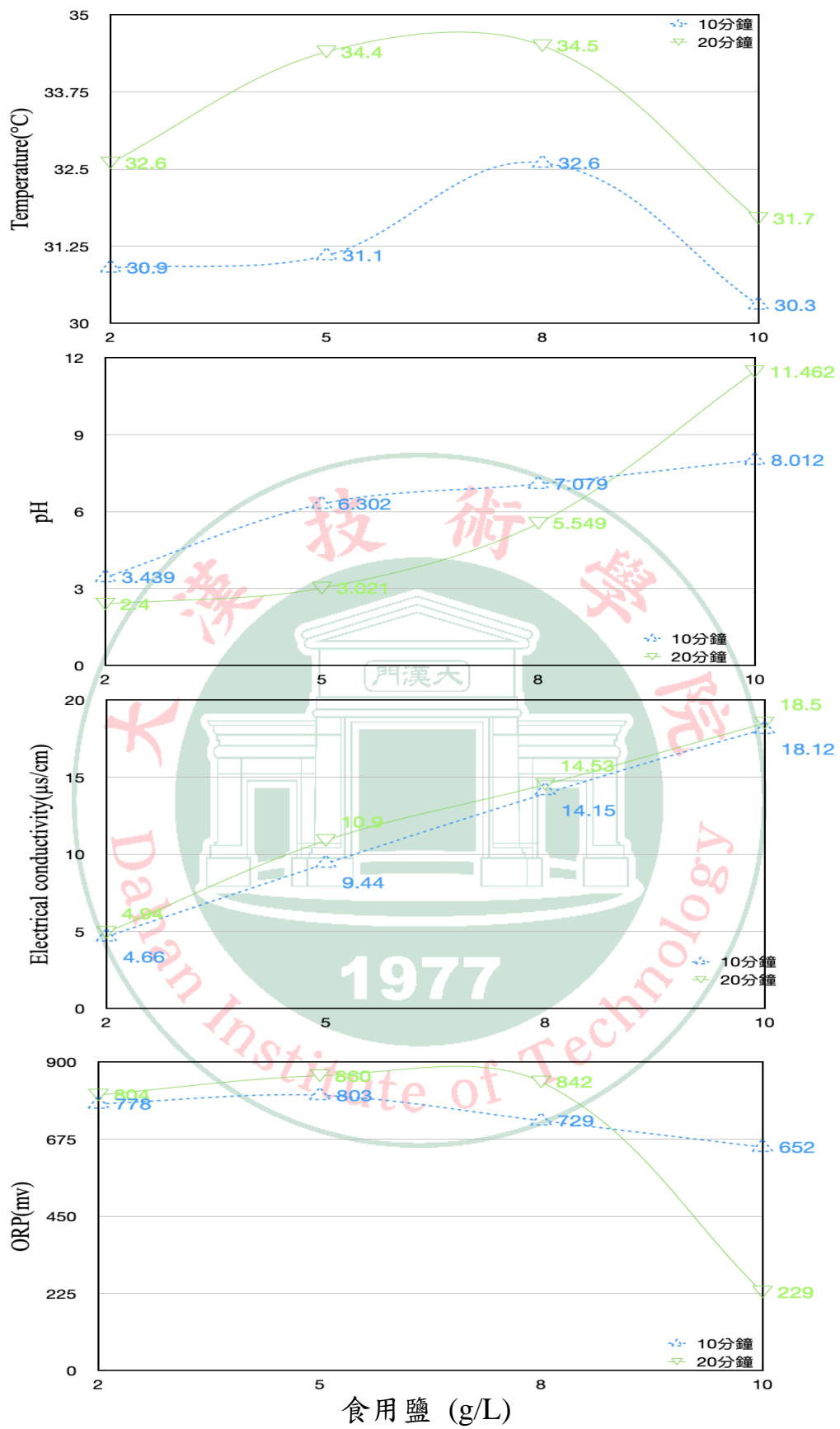
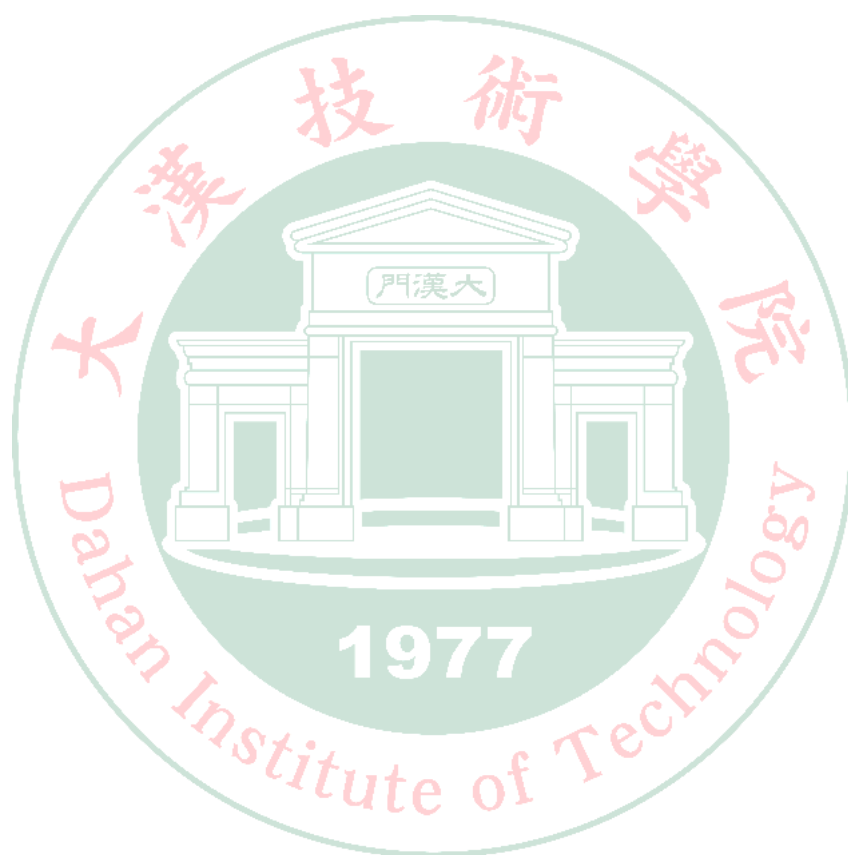


圖 4-3-1 石墨電極板排列方式(Type E)與濃度關係





#### 4-3-2 四種濃度間餘氯監測

以 4-3 節實驗數據中選定四種階段性明顯之濃度，餘氯連續監測以七日為限，檢測電化學氧化劑氯鹽衰退值，4-2 節試驗結果得最佳石墨電極板排列條件(Type E)，電極板間電壓差 10v(伏特)。

第一天氣鹽檢測電化學氧化劑以連續通電 20 分鐘 5g/L 食用鹽為最佳值 64.9mg/L，連續通電 10 分鐘 5g/L 食用鹽為次之 34.6mg/L；連續通電 10、20 分鐘 5g/L 食用鹽七日餘氯衰退較頗多，相較其他電化學氧化劑還是存在氯鹽並具備大腸桿菌滅菌效果。第七天氣鹽檢測，連續通電 10、20 分鐘 5g/L 食用鹽餘氯存值相差並不多，得以連續通電 10 分鐘 5g/L 衰退較為穩定。

| 餘氯量<br>濃度 g/L | 2021/3/5 | 2021/3/6 | 2021/3/7 | 2021/3/8 | 2021/3/9 | 2021/3/10 | 2021/3/11 |
|---------------|----------|----------|----------|----------|----------|-----------|-----------|
| 直流電連續通電 10 分鐘 |          |          |          |          |          |           |           |
| 2             | 4        | 3.5      | 3.3      | 3.1      | 3        | 2.8       | 2.6       |
| 5             | 34.6     | 34       | 26.6     | 22.8     | 19       | 15.2      | 12.2      |
| 8             | 0.5      | 0.2      | 0.1      | N.D.     | N.D.     | N.D.      | N.D.      |
| 10            | 0.3      | 0.2      | 0.1      | N.D.     | N.D.     | N.D.      | N.D.      |
| 直流電連續通電 20 分鐘 |          |          |          |          |          |           |           |
| 2             | 11.7     | 11.1     | 9.8      | 8.7      | 8        | 7.2       | 6.4       |
| 5             | 64.9     | 64.4     | 47.2     | 39.2     | 28       | 21        | 18.8      |
| 8             | 0.6      | 0.2      | 0.2      | 0.1      | N.D.     | N.D.      | N.D.      |
| 10            | 0.4      | 0.1      | 0.1      | 0.1      | N.D.     | N.D.      | N.D.      |

表 4-3-2 連續七日餘氯監測

結語：

- A. 由 (4-4-1 節) 氧化還原電位(ORP)得知結果，5g/L 測值為較佳，穩定性良好，條件可供實地場所實驗條件選定，電化學氧化劑於 (4-3-2 節) 餘氯監測，初次測得結果 10、20 分鐘均為 5g/L 效果最佳。
- B. 10、20 分鐘 5g/L 第七日 (D+7) 餘氯，對大腸桿菌具有相當的去除效果。
- C. 電化學氧化劑隔日 (D+1) 衰退率並不明顯，經第二日 (D+2) 衰退後均有明顯的差異性。而 8g/L、10g/L 電化學氧化劑氯鹽效果並不如期，得知濃度越高並無相對減菌效果。

表 4-3-3 餘氯監測衰退率

單位：%

| 時間<br>濃度(g/L) | 第 0 天 | 第一天   | 第二天   | 第三天   | 第四天   | 第五天   | 第六天   |
|---------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 直流電連續通電 10 分鐘 |       |       |       |       |       |       |       |
| 2             | 100   | 87.5  | 82.5  | 77.5  | 75    | 70    | 65    |
| 5             |       | 98.27 | 76.88 | 65.9  | 54.91 | 43.93 | 35.26 |
| 8             |       | 40    | 20    | N.D.  | N.D.  | N.D.  | N.D.  |
| 10            |       | 66.67 | 33.34 | N.D.  | N.D.  | N.D.  | N.D.  |
| 直流電連續通電 20 分鐘 |       |       |       |       |       |       |       |
| 2             | 100   | 94.87 | 83.76 | 74.36 | 68.38 | 61.54 | 54.7  |
| 5             |       | 99.23 | 72.73 | 60.4  | 43.14 | 32.36 | 28.98 |
| 8             |       | 33.34 | 33.34 | 16.67 | N.D.  | N.D.  | N.D.  |
| 10            |       | 25    | 25    | 25    | N.D.  | N.D.  | N.D.  |

### 4-3-3 四種濃度 10、20 分鐘對大腸桿菌去除效果

A. 大腸桿菌快篩片監測以石墨電極板排列條件(Type E)，電極板間電壓差 10v(伏特)連續通電 10、20 分鐘，四種不同濃度食用鹽電解液，以 1:1000 大腸桿菌去除效果(1ml 電化學氧化劑：1000ml 溝渠水)，對原水(E.coli count)大腸桿菌總菌落數含量為 5100CFU/100ml 去除如(圖 4-3-2)。

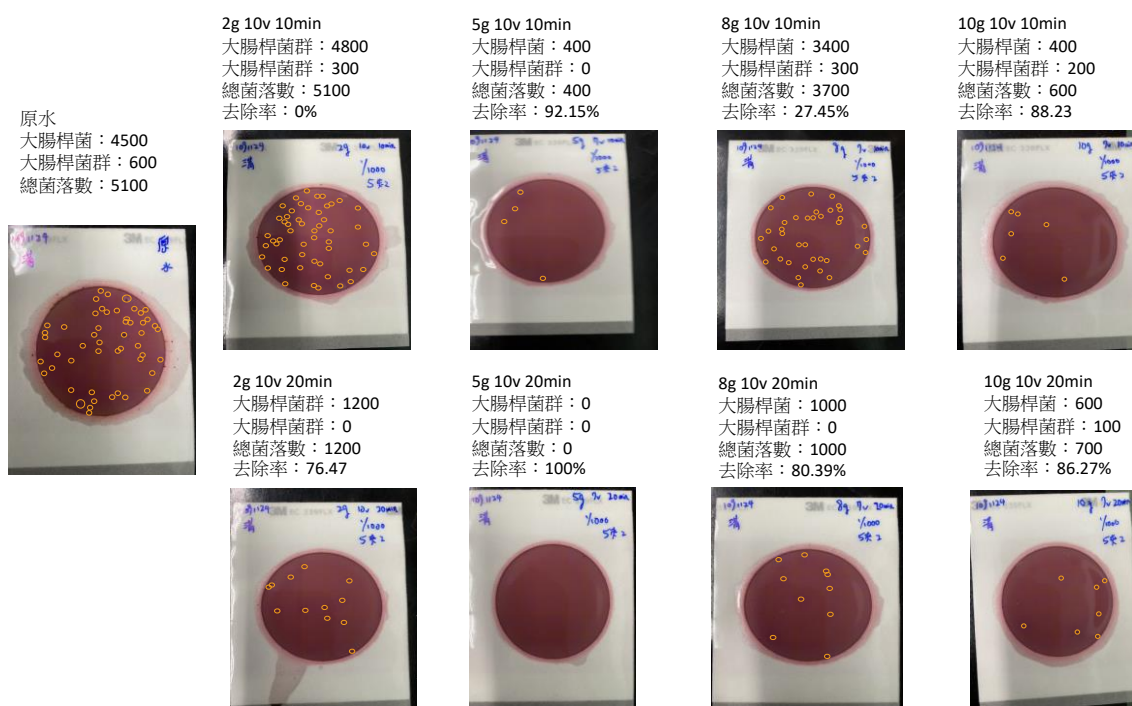


圖 4-3-2 四種不同度電解液對大腸桿菌去除效果

### B. 結語

- 如(圖 4-3-2)所示，本實驗無論連續通電時間 10、20 分鐘，最佳濃度為 5g/L 之濃度電解液，大腸桿菌去除率達 90% 以上；次為 10g/L 之濃度電解液，大腸桿菌去除率達 86% 以上。
- 以 (4-3-2 節) 四種濃度間餘氯監測結果得知，5g/L，10、20 分鐘第七日 (D+7) 餘氯:10 分鐘 12.2(mg/L)、20 分鐘 18.8(mg/L)；對應至 2g/L 第一日 (D+1) 餘氯:20 分鐘 11.7(mg/L)。如 5g/L 電化學氧化劑存放於陰涼處 7 日，其大腸桿菌去除率尚有 75% 以上滅菌效果。
- 對大腸桿菌去除率達 90% 以上之條件，尋求放大倍率效果探討。

### 4-3-4 稀釋倍率對大腸桿菌去除效果

4-2-3 節實驗結果得石墨電極板排列條件(Type E)，電極板間電壓差 10v(伏特)連續通電 10、20 分鐘，5g/L 之食用鹽電解液，大腸桿菌去除率達 90%以上。本實驗室模擬實地場所放大倍率試驗，稀釋倍率條件 1:1000、1:2000、1:3000、1:4000、1:5000 (電化學氧化劑 ml:山泉水 ml)對原水(E.coli count)大腸桿菌總菌落數含量為 6900CFU/100ml 去除如(圖 4-3-3)、(圖 4-3-4)，分別以 10、20 分鐘大腸桿菌去除效果探討。

A. 10 分鐘直流電連續通電 10 分鐘稀釋倍率所得結果稀釋倍率至 5000 倍，對大腸桿菌去效果達 81.16%。

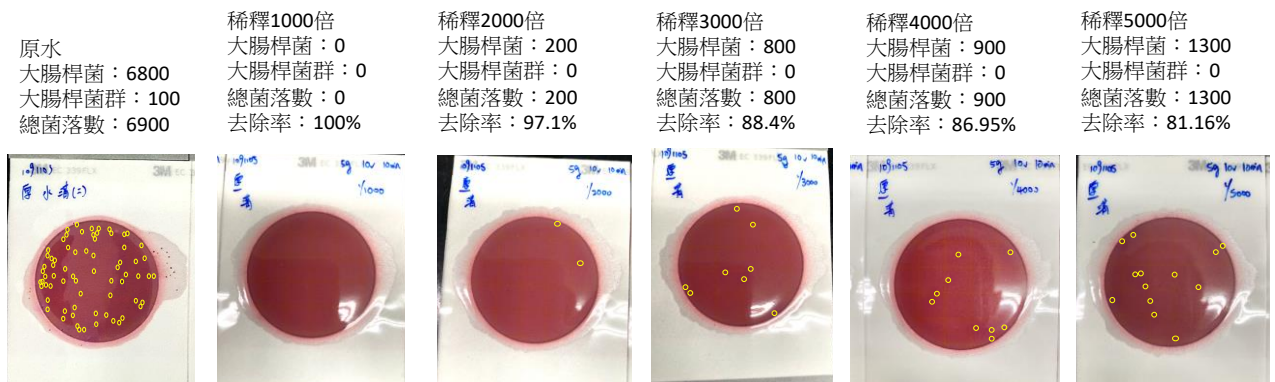
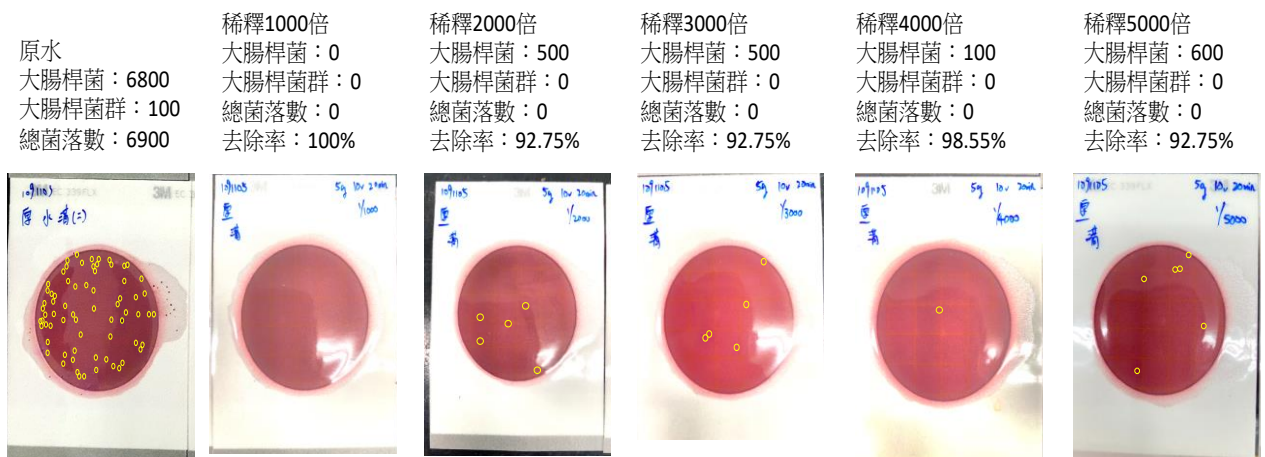


圖 4-3-3 直流電連續通電 10 分鐘稀釋倍率對大腸桿菌去除效果

B. 20 分鐘

直流電連續通電 20 分鐘稀釋倍率所得結果稀釋倍率至 5000 倍對大腸



桿菌去效果達 92.75% 以上。

圖 4-3-4 直流電連續通電 20 分鐘稀釋倍率對大腸桿菌去除效果

### C. 結語：

- (a) 4-3-3 節實驗中所用之溝渠水原水(E.coli count)中大腸桿菌總菌落數含量有 600CFU/100ml 大腸桿菌群及其他干擾質所干擾，最初所加入之氯與水中氨氮反應成結合有效氯，仍具偶消毒能力，但反應慢，故消毒效果較自由餘氯差，所導致消毒效果不比 4-3-4 節實驗中所用之山泉水原水(E.coli count)大腸桿菌去除效果好。
- (b) (1ml 電化學氧化劑：5000ml 山泉水) 連續通電 20 分鐘去除效果 92.75% 仍比 10 分鐘去除效果 81.16% 較佳。

## 4-4 實場實驗

### 4-4-1 實驗室模擬與實地場所差異性

4-3-4 節實驗所得結果，大腸桿菌效果達 80% 以上，成效良好。故將二種實驗室模擬實場模組至實地場所進行實驗，以(Type E)極版間電壓差 6、7v(伏特)連續通電 10、20 分鐘，電解液為原水 5g/L 食用鹽進行電解反應之電化學氧化劑，分別以水桶試驗、儲水塔試驗。

因應儲水塔以連續通電 10、20 分鐘電化學氧化劑對大腸桿菌消毒，分別以不同天進行實驗，因氣候變故及氣溫影響山泉水原水(E.coli count)有所落差，含容大腸桿菌、大腸桿菌群不一。

水溶液為原水，於電解過程中消耗電化學氧化劑成分，既使稀釋倍率為 1:10000(電化學氧化劑 L：山泉水 L)，對於儲水塔大腸桿菌去除率仍達 78% 以上。

### 4-4-2 米棧村大腸桿菌去除效果

儲水塔容積量為 100 噸之蓄水池。

A. 10 分鐘 (109 年 11 月 27 日)

圖 (4-4-1) 所示得得結果，原水 (E.coli count) 大腸桿菌總菌落數 4000CFU/100ml、無大腸桿菌群。

- (a) 水桶試驗稀釋 10000 倍：通電後電解液取 1ml 加入到 10L 的原水，為 10000 倍實驗，以 1:10000 (1ml 電化學氧化劑：10L 山泉水) 大腸桿菌去除率達 70%。
- (b) 水桶試驗稀釋 7500 倍：通電後電解液取 1ml 加入到 7.5L 的原水，為 7500 倍實驗，以 1:7500 (1ml 電化學氧化劑：7.5L 山泉水) 大腸桿菌去除率達 75%。
- (c) 儲水塔試驗：通電後電解液取 10L 加入到 100 噸的儲水槽，實驗以 1:10000(10L 電化學氧化劑:100T山泉水)大腸桿菌去除率達 82.5%。

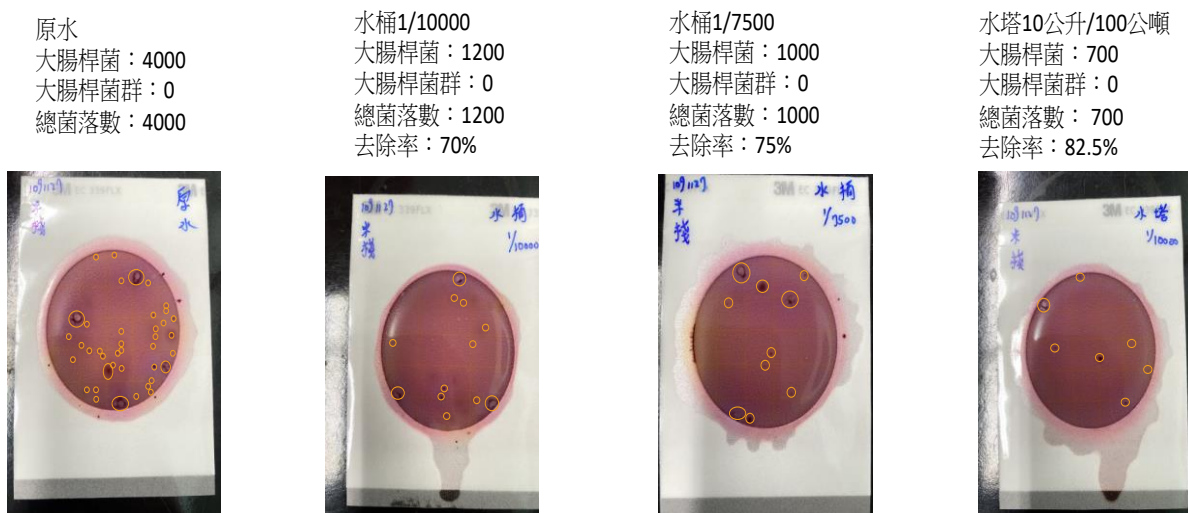


圖 4-4-1 壽豐鄉米棧村連續通通電 10 分鐘大腸桿菌去除效果

B. 20 分鐘 (110 年 3 月 14 日)

圖(4-4-2)所示得得結果，原水(E.coli count)大腸桿菌總菌落數 2100CFU/100ml、大腸桿菌群 300CFU/100ml。

- (a) 水桶試驗稀釋 10000 倍：通電後電解液取 1ml 加入到 10L 的原水，為 10000 倍實驗，以 1:10000 (1ml 電化學氧化劑：10L 山泉水) 大腸桿菌去除率達 95.23%。
- (b) 水桶試驗稀釋 7500 倍：通電後電解液取 1ml 加入到 7.5L 的原水，為 7500 倍實驗，以 1:7500 (1ml 電化學氧化劑：7.5L 山泉水) 大腸桿菌去除率達 1:7500 (1L 電化學氧化劑：7.5L 山泉水) 大腸桿菌去除率達 100%。
- (c) 儲水塔試驗：通電後電解液取 10L 加入到 100 噸的儲水槽，實驗以 1:10000 (10L 電化學氧化劑：100 T 山泉水) 大腸桿菌去除率達 80.95%。

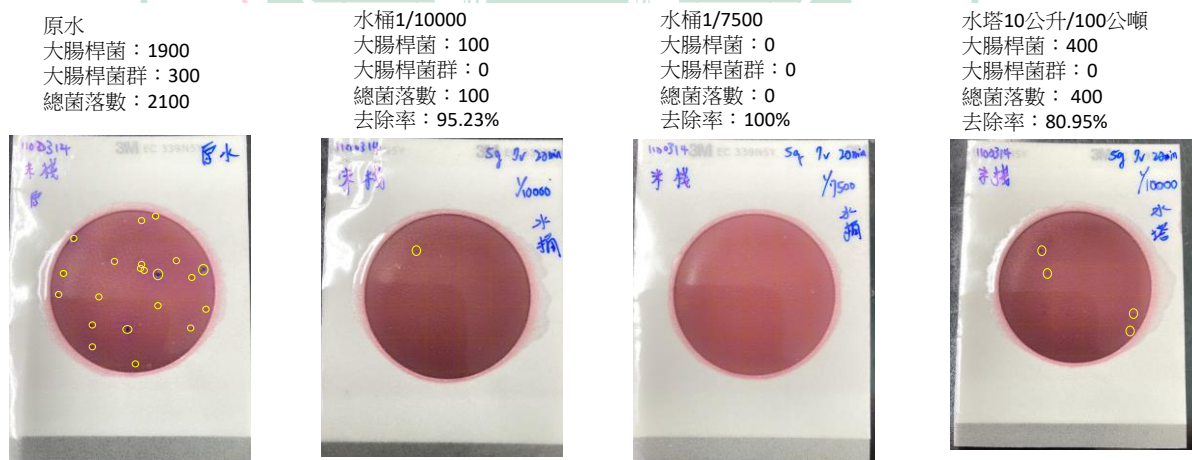


圖 4-4-2 壽豐鄉米棧村連續通通電 20 分鐘大腸桿菌去除效果

#### 4-4-3 春日村大腸桿菌去除效果

儲水塔容積量為 300 噸之蓄水池。

##### A. 10 分鐘 (109 年 11 月 16 日)

圖 (4-4-3) 所示得得結果，原水 (E.coli count) 大腸桿菌總菌落數 6400CFU/100ml、無大腸桿菌群。

- (a) 水桶試驗稀釋 10000 倍：通電後電解液取 1ml 加入到 10L 的原水，為 10000 倍實驗，以 1:10000 (1ml 電化學氧化劑：10L 山泉水) 大腸桿菌去除率達 93.75%。
- (b) 水桶試驗稀釋 7500 倍：通電後電解液取 1ml 加入到 7.5L 的原水，為 7500 倍實驗，以 1:7500 (1ml 電化學氧化劑：7.5L 山泉水) 大腸桿菌去除率達 100%。
- (c) 儲水塔試驗：通電後電解液取 30L 加入到 300 噸的儲水槽，實驗以 1:10000 (30L 電化學氧化劑：300 T 山泉水) 大腸桿菌去除率達 78.13%。

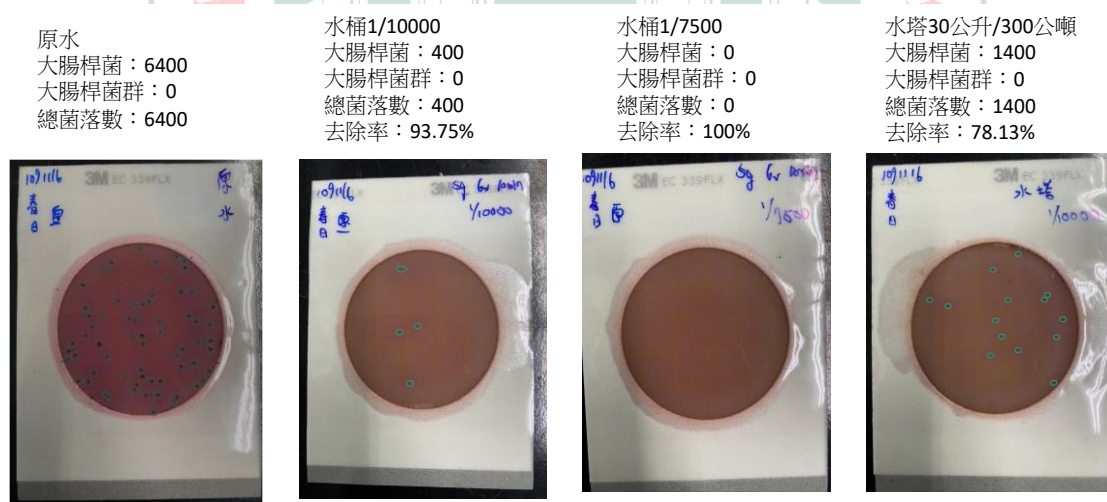


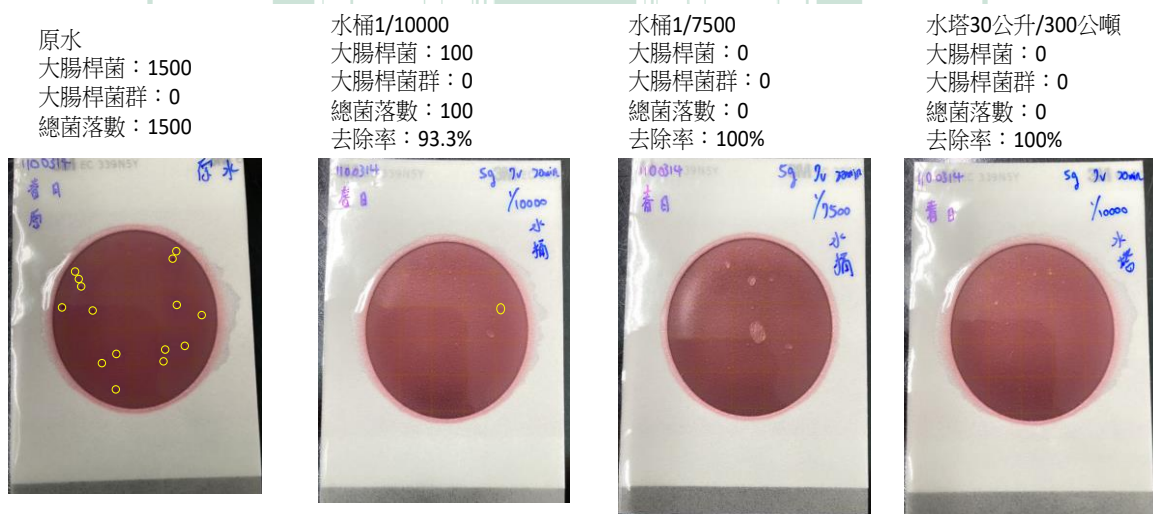
圖 4-4-3 玉里鎮春日村連續通通電 10 分鐘大腸桿菌去除效果



B. 20 分鐘 (110 年 3 月 14 日)

圖 (4-4-4) 所示得得結果，原水 (E.coli count) 大腸桿菌總菌落數 1500CFU/100ml、無大腸桿菌群。

- (a) 水桶試驗稀釋 10000 倍:通電後電解液取 1ml 加入到 10L 的原水，為 10000 倍實驗，以 1:10000 (1ml 電化學氧化劑: 10L 山泉水) 大腸桿菌去除率達 93.3%。
- (b) 水桶試驗稀釋 7500 倍:通電後電解液取 1ml 加入到 7.5L 的原水，為 7500 倍實驗，以 1:7500 (1ml 電化學氧化劑: 7.5L 山泉水) 大腸桿菌去除率達 1:7500 (1L 電化學氧化劑: 7.5L 山泉水) 大腸桿菌去除率達 100%。
- (c) 儲水塔試驗:通電後電解液取 30L 加入到 300 噸的儲水槽，實驗以 1:10000 (30L 電化學氧化劑: 300T 山泉水) 大腸桿菌去除率達



100%。

圖 4-4-4 玉里鎮春日村連續通通電 20 分鐘大腸桿菌去除效果

## 第五章結論與建議

### 5-1 結論

- (1) 在食用鹽與 NaCl(氯化鈉)電解後之電解液，以分光光譜儀吸收峰值(293nm)得吸收值結果得知，由於電解和離子化，食用鹽乾基 95%為 NaCl(氯化鈉) 及其他微金屬離子激發態，故不同濃度電解交換過程中造成水中離子濃度達平衡時至飽和區，不同濃度之 HOCl(次氯酸)含量有所影響。
- (2) 石墨電極板排列條件：(Type E)，極板間電壓 10v(伏特)，連續通電 10、20 分鐘，5g/L 之食用鹽電解液，(1ml 電化學氧化劑：1000ml 溝渠水) 得大腸桿菌殺菌率達 90% 以上。
- (3) 實驗時模擬放大 5000 倍率 (1ml 電化學氧化劑：5000ml 山泉水) 連續通電 20 分鐘大腸桿菌殺菌率可達 92.75% 去除率。
- (4) 以相同總電壓 30v(伏特)經實驗室模擬實場所使用蒸餾水水溶液，得石墨電極板間電壓差為 10v(伏特)；而實地場所使用簡易自來水水源(原水)水溶液，得石墨電極板間電壓差為 6、7v(伏特)。
- (5) 實地場所(壽豐鄉米棧、玉里鎮村日村)：直流電連續通電 10、20 分鐘儲水塔試驗：以 1:10000 (1ml 電化學氧化劑：10L 山泉水) 大腸桿菌去除率達 78.13% 以上。直流電連續通電 20 分鐘，水桶試驗以 1:10000 (1ml 電化學氧化劑：10L 山泉水) 大腸桿菌去除率達 93.3% 以上、1:7500 (1ml 電化學氧化劑：7.5L 山泉水) 大腸桿菌去除率達 100% 完全去除。

## 5-2 建議

- (1) 本實驗研究以電化學間接法(電化學直接法餘氯量間接)殺菌，實驗過程以原水(簡易自來水水源)作為電化學氧化劑之水溶液，加入食用鹽電解中得知：電解過程中已完全殺菌，且餘氯量高，尚有大腸桿菌殺菌效果，可供未來以電化學直接法殺菌探討。
- (2) 本研究以直流電總電壓為 30v(伏特)連續通電，可供未來太陽能板供電至不斷電系統持續實施供電，以利山區簡易自來水系統無供電之場所實施操作。
- (3) 石墨電極板為耗損鈍化材質，未來可以不鏽鋼材質、鈦金屬、氧化鈦、白金板試驗電化學氧化分解反應。



## 參考文獻

- [1] <https://www.dgbas.gov.tw/public/Data/06216654198HDY1K.pdf> 國情統計通報(第 102 號)，(修訂於 109 年 6 月)
- [2] 花蓮縣政府 108 年度原住民地區簡易自來水系統營運計畫，(108 年 9 月)
- [3] 自來水-全國法規資料庫  
<https://law.moj.gov.tw/LawClass/LawAll.aspx?pcode=J0110064>
- [4] 行政院環保署-地面水體及水質標準  
<https://oaout.epa.gov.tw/law/LawContent.aspx?id=FL015490>
- [5] 飲用水水質標準-全國法規資料庫  
<https://law.moj.gov.tw/LawClass/LawAll.aspx?pcode=o0040019>
- [6] 自來水工程設施標準-全國法規資料庫  
<https://law.moj.gov.tw/LawClass/LawAll.aspx?pcode=J0110064>
- [7] 蔡大勇，「化學法與電化學改善山區水質殺菌效果之研究」，大漢技術學院土木工程與環境資源管理系碩士班，碩士論文（2020）。
- [8] 無自來水地區供水改善計畫簡易自來水工程及系統營運補助申請及管考作業要點-經濟部水利署  
<https://law.moea.gov.tw/LawContent.aspx?id=FL084261>
- [9] 花蓮縣政府 109 年度原住民地區簡易自來水系統營運計畫，(109 年 11 月)
- [10] 飲用水連續供水設備使用及維護管理辦法  
<https://law.moj.gov.tw/LawClass/LawAll.aspx?PCode=O0040014>
- [11] 王少君，「[電混凝法處理分散性染料廢水](#)」，碩士論文，淡江大學水資源及環境工程學系研究所，臺北，（2011）
- [12] 王文成，「以電聚浮除法處理半導體廢水中之砷」，碩士論文，國立中興大學環境工程系，臺中，（2005）
- [13] D. Georgiou, P. Melidis, A. Aivasidis, “Use of a microbial sensor: inhibition effect of azo-reactive dyes on activated sludge” , Bio

- process and Biosystems Engineering, Vol. 25, pp. 79-83, (2002)
- [14]W. Rongcheng, Q. Jiuhui, “Removal of Azo Dye from Water by Magnetite Adsorption-Fenton Oxidation”, Water Environment Research, Vol. 76 (7), pp. 2637-2642, (2004).
- [15]夏平,「化學混凝法處理高色度染料廢水的研究」,湖州職業技術學院學報, 第4卷第4期, 第81-84頁, (2003)。
- [16]鄭曦,「高鐵絮凝劑的電合成及其在染料廢水處理中的應用」,福建師範大學學報, 第8卷第3期, 第54-57頁, (2002)。
- [17]姜鳳玲, ,「試論染色廢水的生物處理技術」, 蒙自師範高等專科學校學報, 第5卷第4期, 第28-31頁, (2003)。
- [18]樊毓新,周增炎,「染料廢水的處理方法現狀與發展前景」,環境保護, 第9卷, 第22-26頁, (2002)。
- [19]Aleboyeh, H. Aleboyeh, Y. Moussa, “Decolorization of Acid Blue 74 by ultraviolet/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>”, Environmental Chemistry Letters, Vol. 1(3), pp. 161-164, (2003).
- [20]T.H. Kim, C. Park, Y. Yang, S. Kim, “Comparison of disperse and reactive dye removals by chemical coagulation and Fenton oxidation”, Journal of Hazardous Materials. Vol. 112, pp. 95-103, (2004).
- [21]N. M. Mahmoodi, M. Arami, N. Y. Limaee, N. S. Tabrizi, “Decolorization and aromatic ring degradation kinetics of Direct Red 80 by UV oxidation in the presence of hydrogen peroxide utilization TiO<sub>2</sub> as a photocatalyst”, Chemical Engineering Journal, Vol. 112, pp. 191-196, (2005).
- [22]M. S. Secula, G. D. Suditu, I. Poulios, C. Cojocaru, I. Cretescu, “Response surface optimization of the photo-catalytic decolorization of a simulated dyestuff effluent”, Chemical Engineering Journal, Vol. 114, pp. 18-26, (2008) .
- [23]Aleboyeh, M. E. Olya, H. H. Aleboyeh, “Electrical energy determination for an azo dye decolorization and mineralization by UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> advanced oxidation process”, Chemical Engineering Journal, Vol. 162, pp. 518-524, (2008).

- [24] V. P. Santos, M. F. R. Pereira, P. C. Faria, J. J. M. Orfao, "Decolourisation of dye solution by oxidation with  $H_2O_2$  in the presence of modified activated carbons", *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 162, pp. 736-742, (2009).
- [25] H. Zhang, Y. Lv, F. Liu, D. Zhang, "Degradation of C.I. Acid Orange 7 by ultrasound enhanced ozonation in a rectangular air-lift reactor", *Chemical Engineering Journal*, Vol. 138, pp. 231-238, (2008).
- [26] J. Wu, H. Doan, S. Upreti, "Decolorization of aqueous textile reactive dye by ozone", *Chemical Engineering Journal*, Vol. 142, pp. 156-160, (2008).
- [27] H. L. Liu, Y. R. Chiou, "Optimal decolorization efficiency of Reactive Red 239 by UV/TiO<sub>2</sub> photocatalytic process coupled with response surface methodology", *Chemical Engineering Journal*, Vol. 112, pp. 173-179, (2005).
- [28] D. S. Kim, Y. S. Park, "Photocatalytic decolorization of rhodamine B by immobilized TiO<sub>2</sub> onto silicone sealant", *Chemical Engineering Journal*, Vol. 116, pp. 133-137, (2006).
- [29] W. Glaze, J. King, "Advanced Oxidation process: Test of a kinetics model for the oxidation of organic compounds with ozone and hydrogen peroxide in a semibatch reactor", *Industrial Engineering Chemistry Research*, Vol. 28, pp. 1580-1587, (1989).
- [30] L. Wojnarovits, T. Palfi, E. Takaacs, "Kinetics and mechanism of azo dye destruction in advanced oxidation processes", *Radiation Physics and Chemistry*, Vol. 76, pp. 1497-1501, (2007).
- [31] El-Assy, N.B., El-Wakeel, E.-S.I., Fattah, A.A.A., "The degradation of triazo dye chlorantine fast green BLL in aqueous solution by gamma radiation-III," *Applied Radiation and Isotopes*, Vol. 42, pp. 89-96, (1991).
- [32] 何志軒, 「以化學法與電化學氧化分解有機反應性染料之探討」博士論文, 淡江大學水資源及環境工程學系博士班, 臺北, (2001)。
- [33] 何志軒、楊禎祿, 「混合市售漂白水與有機染料RB-19之化學反應動力特性」, 大漢技術學院、大漢學報, 第22期, 花蓮, (2009)。
- [34] 何志軒、陳俊成、楊禎祿、劉士偉、黃信智, 「利用電化學產生氧化劑

- 方式氧化裂解有機反應性染料之特性」，大漢技術學院資源與環境學術研討會資料，花蓮，(2009)。
- [35]何志軒、陳俊成、楊禎祿，「利用次氯酸鈉氧化裂解有機反應性染料」，中華民國環境工程學會，廢水處理技術研討會資料，花蓮，(2008)。
- [36] 楊萬發教授譯，「水及廢水處理化學」，茂昌圖書有限公司第 177-206 頁，臺北，(2003)。
- [37]L. Wojna'rovits, T. Pa'lfi, E. Taka'cs, "Kinetics and mechanism of azo dye destruction in advanced oxidation processes", Radiation Physics and Chemistry, Vol. 76, pp. 1497-1501, (2007).
- [38]]H. L. Liu, Y. R. Chiou, "Optimal decolorization efficiency of Reactive Red 239 by UV/TiO<sub>2</sub> photocatalytic process coupled with response surface methodology", Chemical Engineering Journal, Vol. 112, pp. 173-179, (2005).
- [39]D. S. Kim, Y. S. Park, "Photocatalytic decolorization of rhodamine B by immobilized TiO<sub>2</sub> onto silicone sealant", Chemical Engineering Journal, Vol. 116, pp. 133-137, (2006).
- [40]安乃麟，「二氧化氯對黃埔湖戰備用水消毒效能之研究」，碩士論文，嘉南藥理大學環境系工程與科學研究所，臺南，(2014)
- [41]行政院還既保護署，<https://www.epa.gov.tw>。
- [42]張聖雄、陳建財，「廢水生物處理程序常見問題實務探討」，工業污染期刊，卷期 25:1=97 民 95.01，第 69-87 頁，(2006)。
- [43] 維基百科，<https://zh.wikipedia.org/zh-tw/氯化鈉>，(修訂於 2020 年 5 月)。
- [44]3M™ Petrifilm™ 大腸桿菌/大腸菌群快檢片 6404，微生物快速檢驗測試片手冊.pdf