

# 第十四屆旺宏科學獎

## 成果報告書

參賽編號：SA14-312

作品名稱：嗜廢水者為「菌」解-高氨氮廢水於  
微生物電池的應用，及其裝置之探討

姓名：郭栢瑾

關鍵字：高氨氮廢水、微生物電池、專一性菌種

## 摘要

微生物燃料電池(MFC)具低汙染、低成本、高穩定等特性，其原理為微生物分解營養源釋出電子，由外電路以電能形式利用。若將**高氨氮**生活廢水作為其營養源，則兼具環保與經濟價值。

本研究先以高氨氮培養基仿效生活廢水之高氨氮環境，篩出合適**菌種**並作用於電池裝置，探討菌種、菌量、陰陽極面積大小、兩極間距、養分多寡/種類、環境明暗等變因之影響，進而改進裝置，並以高氨氮廢水取代培養基。本實驗由第一代之單槽式(single-chamber)，演變為第二代之雙槽(double-chamber)無膜式(membrane-less)，終發展出**材料取得容易、成本低、內電阻低、電壓穩定、可間歇式放電**之第三代微生物電池，**實用價值極高**。

## 壹、研究動機

隨著社會的高度發展，能源及環保議題廣受重視。目前普遍使用的化石燃料逐漸枯竭，火力及核能發電亦有汙染問題，急需尋找低汙染、低成本、高效率之替代能源。其中，高氨氮生活廢水的處理成本較高，故我們盼能**篩出專一菌種，應用於微生物燃料電池，以處理高氨氮生活廢水**。若能廣泛應用，將可同時解決**環境汙染**與**能源缺乏**問題。

## 貳、研究目的

- 一、 從廢水中篩選出適合於高氨氮環境中生存的菌種
- 二、 微生物因素對微生物電池的影響
  - (一) 菌種
  - (二) 菌量
  - (三) 養分多寡
  - (四) 養分種類
  - (五) 環境明暗
- 三、 電化學因素對微生物電池的影響
  - (一) 陰極面積
  - (二) 陽極面積
  - (三) 陰、陽極間隔距離
- 四、 探討以高氨氮廢水作為營養源之微生物電池的性能
- 五、 針對微生物燃料電池裝置之缺點進行改進(第一代→第二代→第三代)

## 參、研究設備及器材

### 一、器材

|                      |                |        |
|----------------------|----------------|--------|
| 雙側管錐形瓶(250ml)        | 矽膠塞            | 接種環    |
| 不鏽鋼網(250 目)          | 可變電阻           | 培養皿    |
| Silicon              | 電子天平           | 酒精燈    |
| 單蕊線(0.6mm)           | 矽膠管            | 玻璃推棒   |
| 燒杯                   | 指針式毫、微安培計      | 無菌操作台  |
| DataStudio 電壓檢測器     | 容量瓶(10/100mL)  | 滴定管    |
| 玻璃管(長 6cm)(直徑 0.3cm) | 三用電表           | 酸鹼度指示器 |
| 蠕動幫浦                 | 高壓滅菌鍋          | 磁石攪拌器  |
| 分度吸量管(25/10ml)       | 錐形瓶(250/500ml) | 沸石     |

### 二、藥品

|            |              |
|------------|--------------|
| 飽和 KCl 溶液  | 草酸鈉溶液 0.005M |
| 高氨氮培養基(註一) | 過錳酸根溶液 0.01M |
| 洋菜條/粉      | 硫酸溶液         |
| 甘胺酸        | 鹽酸           |
| 葡萄糖        |              |

註一：高氨氮培養基成分

|                    |        |                                 |      |                   |         |     |       |
|--------------------|--------|---------------------------------|------|-------------------|---------|-----|-------|
| NH <sub>4</sub> Cl | 1g/L   | K <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub> | 1g/L | FeCl <sub>3</sub> | 0.05g/L | 洋菜粉 | 20g/L |
| MgSO <sub>4</sub>  | 0.1g/L | KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> | 1g/L | CaCl <sub>2</sub> | 0.02g/L | LB  | 25g/L |

[註明] 液態培養基除洋菜粉不加，其餘成分皆同。

註二：電壓測量方式：先將裝置短路，再接上三用電表，待其電壓上升達穩定，記錄其數值。

註三：電流測量方式：將指針式毫/微安培計接上裝置，測量其**最大瞬間電流**。

## 肆、研究過程或方法

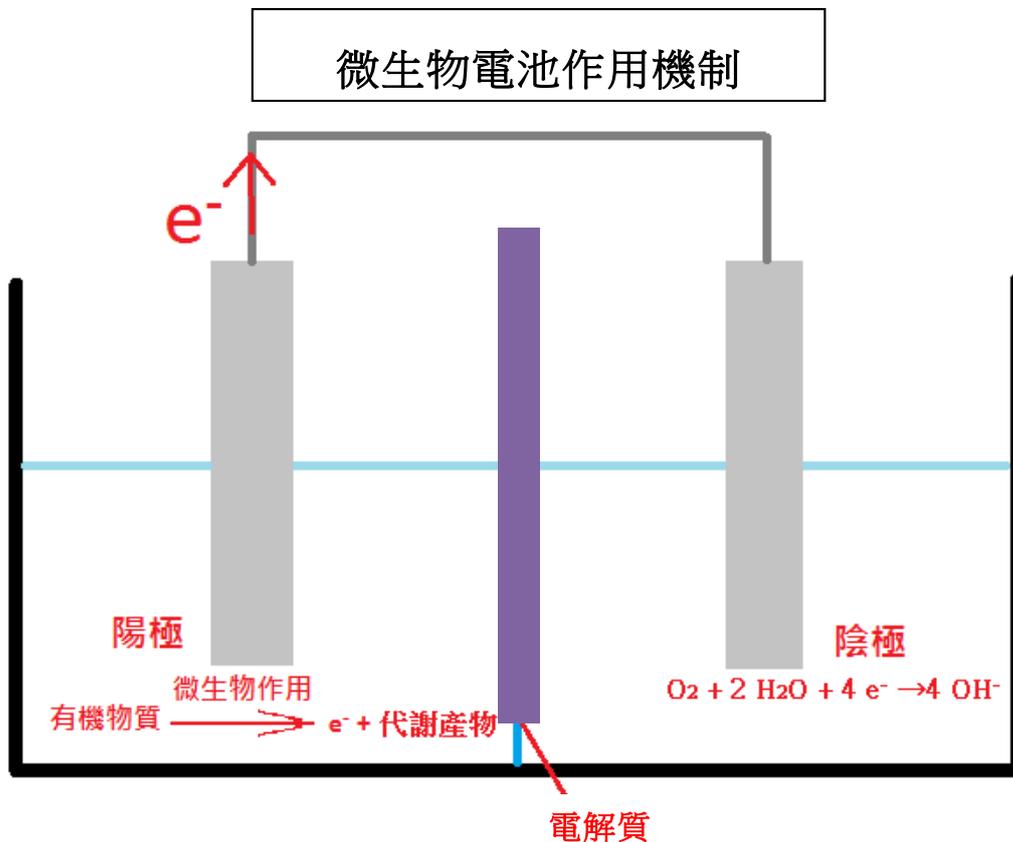
### 一、原理

典型雙槽式微生物燃料電池由陽極槽與陰極槽兩個槽體，與阻隔兩槽之質子交換膜所組成。微生物於陽極槽降解作為基質之有機物，有機物質進行氧化作用產生電子及分解代謝之產物。分解代謝所釋出之電子由電極接收，經外部電路傳至陰極槽，並由陰極槽之氧化劑進行還原作用，驅動電子流動而產生電能。

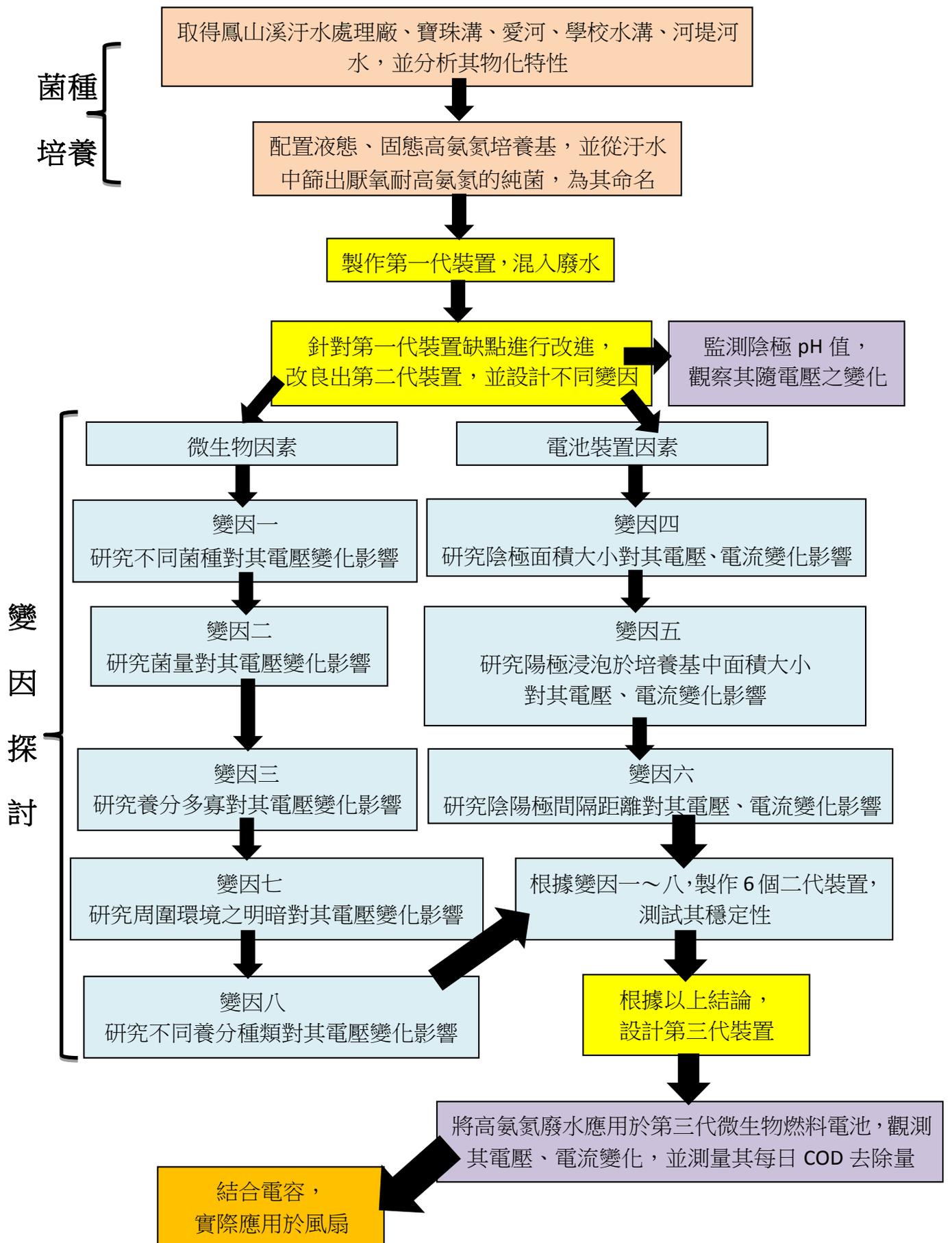
陽極：有機物質  $\xrightarrow{\text{微生物作用}}$   $e^- + \text{代謝產物}$

陰極： $O_2 + 2 H_2O + 4 e^- \rightarrow 4 OH^-$

本實驗考量成本及材料之普遍性，以溶有電解質之洋菜取代質子交換膜，陰極使用氧氣作為氧化劑，因其在自然環境中極為普遍、具較高之還原電位、持續性良好且還原產物乾淨、無汙染。



二、流程表



### 三、菌種的馴化

(一) 目的：從汗水中篩出能適應高氨氮環境的細菌，確保其於高氨氮廢水中為優勢菌種。

(二) 步驟：

1. 配置固態高氨氮培養基。
2. 放進高壓滅菌鍋，121°C 30 分鐘。
3. 待其冷卻，於無菌操作臺內倒入培養皿中，製得固態培養基。
4. 進行寶珠溝、鳳山溪污水處理廠、愛河、學校水溝、河堤所取得廢水的物化性質分析。
5. 將自寶珠溝、鳳山溪污水處理廠、愛河、學校水溝、河堤所取得的廢水稀釋 10000 倍，分別均勻塗抹於固態培養基上，置於室溫中厭氧培養。
6. 一週後，觀察細菌生長的型態與分布。
7. 以接種環沾取生長較佳的菌落，畫於新的固態培養基。
8. 一週後，重複步驟 6。
9. 將寶珠溝篩出的菌命名為 A；鳳山溪污水處理廠的菌命名為 B；愛河的菌命名為 C；學校水溝的菌命名為 D；河堤的菌命名為 E。
10. 分別將 A、B、C、D、E 其中一已畫菌培養基置入好氧環境中測試，觀察其生長情形。



寶珠溝



愛河



河堤



鳳山溪污水處理廠



學校水溝

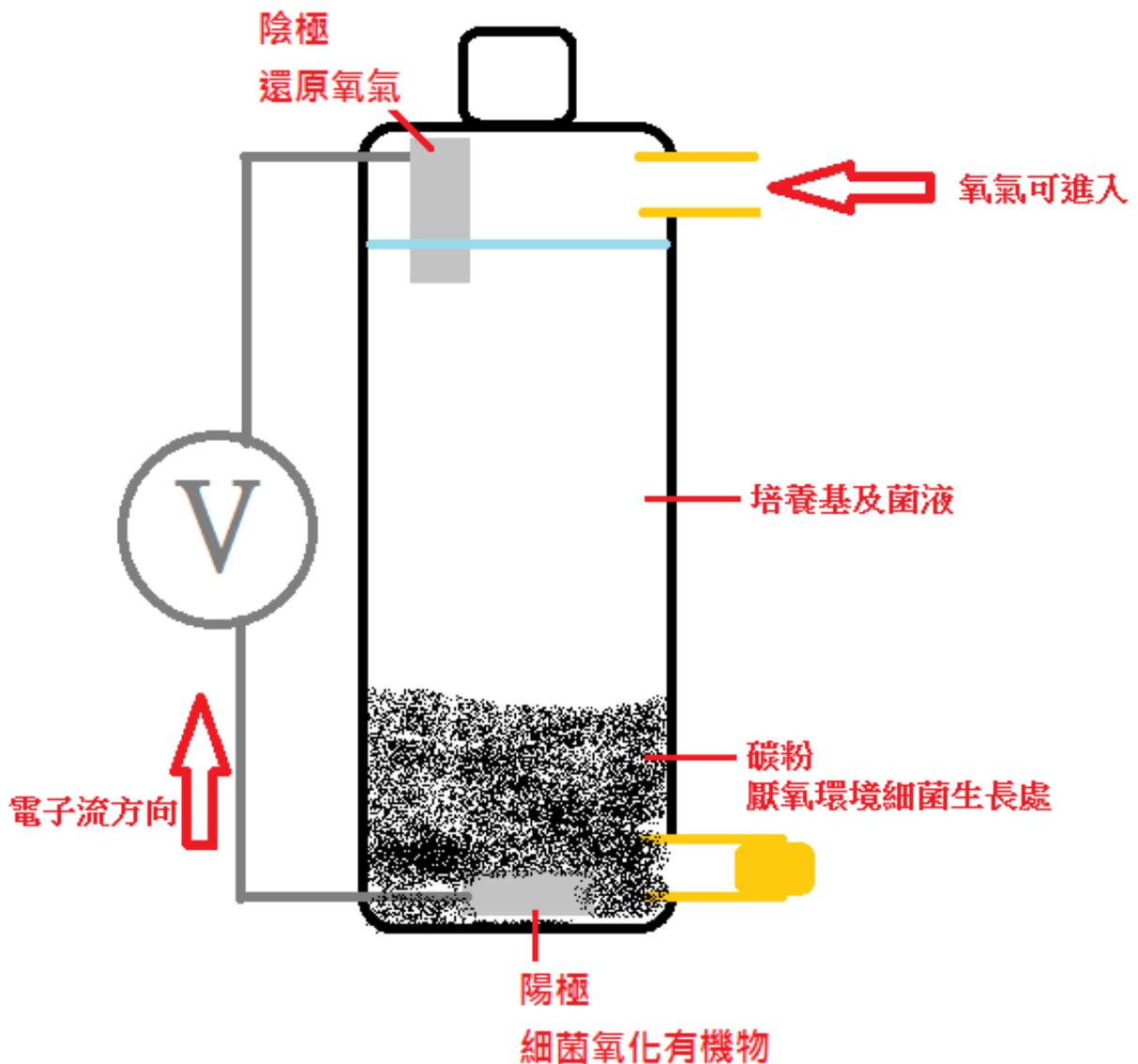
#### 四、第一代裝置製作

(一) 目的：嘗試藉由參考文獻資料，製作出一簡易單槽式微生物電池。

(二) 步驟：

1. 取一 600ml 寶特瓶。
2. 於上、下相隔約 15cm 分別放入碳棒作為陰、陽極，於瓶身穿孔拉出電線。
3. 於底層陽極倒入高約 8cm 的碳粉，以提供厭氧環境。
4. 倒入 500ml 液態培養基，混入 50ml 廢水提供菌種來源。
5. 觀察其一週電壓變化。

第一代裝置示意圖---單槽式結構



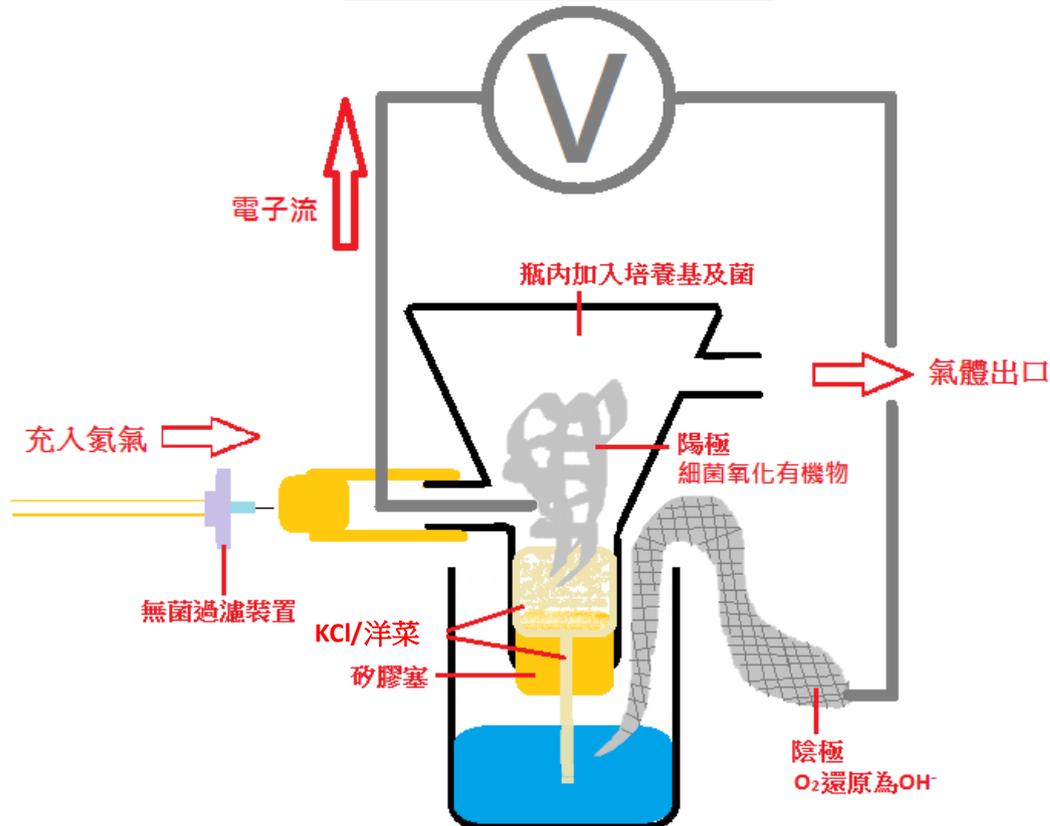
## 五、第二代裝置製作

(一) 目的：為了解決一代裝置如**雜菌過多**、**電阻過高**、**不完全厭氧**、**陰陽極分隔不完全**、以及**電壓不持久**等缺點，故改進為第二代裝置。

(二) 步驟：

1. 將矽膠塞打洞，穿入一細玻璃管。
2. 取一 250ml 雙側管錐形瓶，置入一球不鏽鋼網，作為陽極並拉出電線，以便測量電壓、電流。於管口塞入步驟 1.之矽膠塞，並將其倒置。
3. 將步驟 1-2 處理過之雙側管錐形瓶以及加入洋菜條之 KCl 溶液放入高壓滅菌鍋滅菌。
4. 待其稍微冷卻後將液態已溶入 KCl 的洋菜充滿管口約 2cm 及玻璃細管，等待洋菜凝固後由側管灌入液態高氮氮培養基，並種入細菌。(於無菌操作台進行)
5. 將其置入裝有 50ml KCl 溶液的 250ml 燒杯，並固定。於燒杯溶液上置入一片不鏽鋼網，作為陰極。最後通入氮氣以模擬厭氧環境。

第二代裝置示意圖



## 六、變因

| 基本實驗裝置控制變因 |       |                     |                      |                |
|------------|-------|---------------------|----------------------|----------------|
| 菌種         | 液態培養基 | 陰極面積                | 陽極面積                 | 陰陽極間隔距離        |
| A          | 150ml | 8x8 cm <sup>2</sup> | 5x30 cm <sup>2</sup> | 6cm 玻璃管+2cm 洋菜 |

註 1：操作變因因以下實驗而異

註 2：以下實驗裝置均已經高壓滅菌鍋滅菌

註 3：種菌方法

變因一、二：以接種環沾取培養基上之菌落，於液態培養基中均勻攪拌，以注射針筒吸取 5ml 之菌液，注入裝置中。

變因三-八：以注射針筒吸取 5ml 已生長飽和平衡之菌液，注入裝置中。(以比濁法計算飽和菌液菌數= $1.3526 \times 10^9$  個/ml)

#### 變因一：研究不同菌種對其電壓變化影響

(一)目的：於微生物電池中種入不同菌種，觀察其電壓變化，並與未加菌之對照組比較。

(二)步驟：

1. 製作 6 個二代裝置，分別編號為 A<sub>1</sub>、B<sub>1</sub>、C<sub>1</sub>、D<sub>1</sub>、E<sub>1</sub>、F<sub>1</sub>。
2. 於 A<sub>1</sub> 中種入菌 A；B<sub>1</sub> 中種入菌 B；C<sub>1</sub> 中種入菌 C；D<sub>1</sub> 中種入菌 D；E<sub>1</sub> 中種入 E 菌；F<sub>1</sub> 中則不種入菌。
3. 分別觀察其 1 週電壓變化。

#### 變因二：研究菌量對其電壓變化影響

(一)目的：以分光光度儀利用菌液生長所造成的吸光度變化分析其菌量變化曲線，觀察其對電壓變化之影響。

(二)步驟：

1. 製作一個二代裝置。
2. 以 5ml 針筒每日吸取 5ml 菌液，並以分光光度儀分析其吸光度，進而推測菌量的生長趨勢，觀察至曲線不再改變，即菌量生長達穩定為止。
3. 將每日菌量吸光度曲線與其電壓曲線變化作對照，探討其相關性。

#### 變因三：研究養分多寡對其電壓變化影響

(一)目的：給予細菌不同多寡的培養基，觀察其對電壓變化之影響。

(二)步驟：

1. 製作 3 個二代裝置，分別灌入 50、150、250ml 液態培養基，並種入菌 A。
2. 分別觀察其 10 天電壓變化。

#### 變因四：研究陰極面積大小對其電壓、電流變化影響

(一)目的：放置不同面積大小的不鏽鋼網作為陰極，觀察其對電壓變化。

(二)步驟：

1. 裁切面積大小分別為 5x5、8x8、10x10、15 x 15 (cm<sup>2</sup>)的不鏽鋼網作為陰極。
2. 選取一已達穩定電壓的微生物電池作為改變陰極面積的對象。
3. 依序換上 5x5、8x8、10x10、15 x 15 的陰極，觀察 4 小時後的電壓、電流變化。

**變因五：研究陽極浸泡於培養基中面積大小對其電壓、電流變化影響**

(一) 目的：不同面積大小的不鏽鋼網浸泡於培養基作為陽極，觀察其電壓變化。

(二) 步驟：

1. 裁切面積大小分別為 3x30、7x30(cm<sup>2</sup>)的不鏽鋼網作為陽極。
2. 製作二個二代裝置，分別置入 3x30、7x30 的不鏽鋼網作為陽極。
3. 分別觀察其 1 周電壓變化。

**變因六：研究陰、陽極間隔距離對其電壓、電流變化之影響。**

(一) 目的：縮短連接陰陽極之細玻璃管，拉近其距離，觀察電壓、電流之變化。

(二) 步驟：

1. 選取一已達穩定電壓的微生物電池。
2. 將其作為鹽橋之細玻璃管由 6cm 截短為 2cm，以縮短陰、陽極距離。
3. 觀察其 4 小時後電壓、電流變化。



細玻璃管截短後之裝置

**變因七：研究環境明暗對其電壓變化影響**

(一) 目的：改變裝置環境的明暗，觀察其對電壓變化之影響。

(二) 步驟：

1. 選取一已達穩定電壓的微生物電池作為改變環境明暗的對象。
2. 將其置於暗室中 5 天，觀測其電壓。
3. 再將其置於自然光線下 5 天並觀測其電壓。

**變因八：研究不同養分種類對其電壓變化之影響**

(一) 目的：使用不同養分作為細菌分解有機物之來源，觀察其對電壓變化之影響。

(二) 步驟：

1. 製作 3 個裝置，分別加入 150ml 液態培養基、10g/L 葡萄糖液及甘胺酸溶液。
2. 注入 5ml 已生長達飽和平衡的菌液。
3. 分別觀測其 1 週電壓變化。

**七、測試第二代裝置之穩定性**

| 控制變因 |       |                       |                      |                          |
|------|-------|-----------------------|----------------------|--------------------------|
| 菌種   | 液態培養基 | 陰極面積                  | 陽極面積                 | 陰陽極間隔距離                  |
| A    | 250ml | 10x10 cm <sup>2</sup> | 7x30 cm <sup>2</sup> | 2cm 玻璃管(直徑 0.3cm)+2cm 洋菜 |

(一) 目的：根據以上變因之結論，製作 6 個**最佳**二代裝置，觀測其電壓之穩定性。

(二) 步驟：

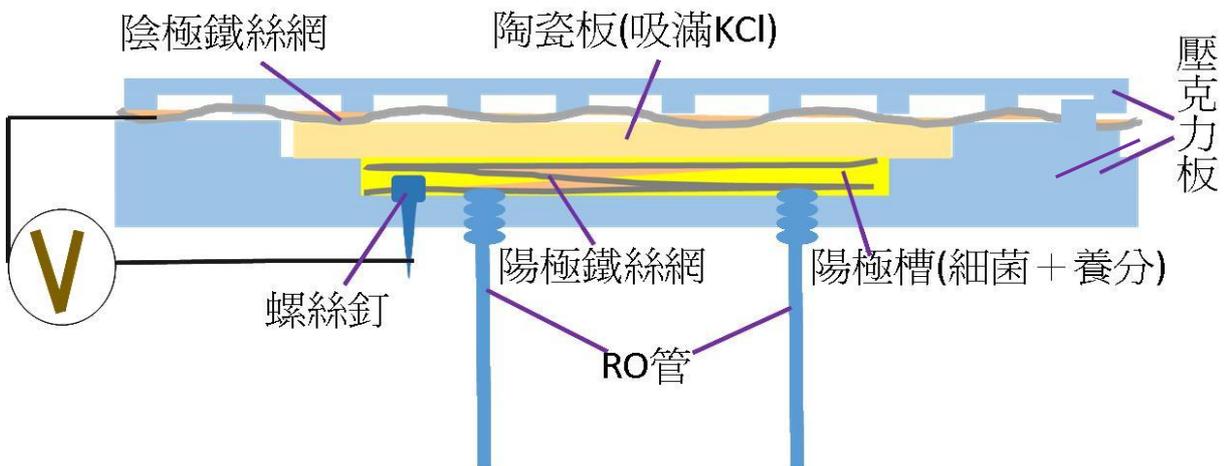
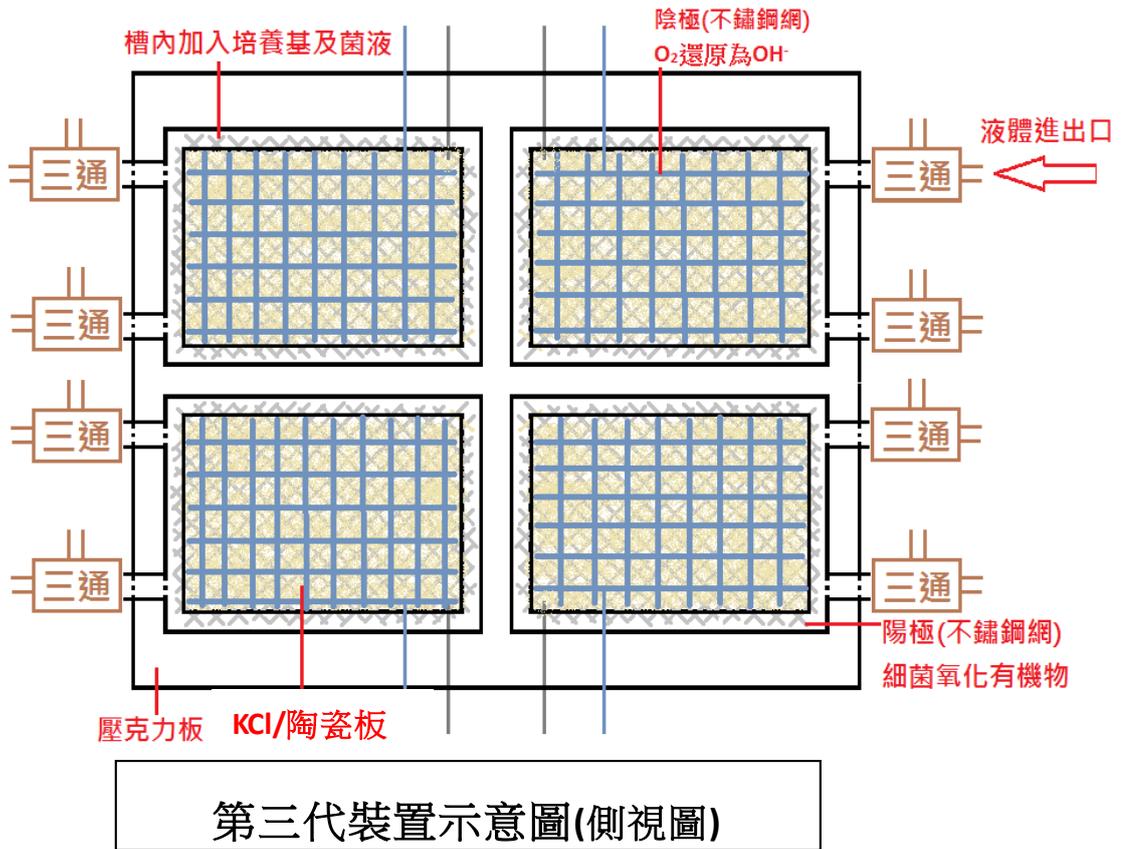
1. 製作 6 個裝置甲、乙、丙、丁、戊、己，且均符合上方表格之控制變因。
2. 觀測其持續放電 1 週電壓變化，並測定其達穩定時之功率密度。

## 八、第三代裝置製作

(一) 目的：製作一攜帶方便、牢固不易受外界干擾、內電阻低、陰陽極表面積大、成本低廉、更具應用價值之微生物電池。

(二) 步驟：

1. 將三塊切割完成之壓克力板依序相疊黏合，於側邊穿孔裝入三通閥。於其中兩槽內放入沸石，並將裁切好之不鏽鋼網摺疊放入作為陽極，穿孔拉出電線。
2. 將吸滿 KCl 溶液之陶瓷板覆蓋於陽極表面作為鹽橋，通入氮氣至槽內，並自三通閥灌入 150ml 已通氮氣之培養基及 2ml 菌液。
3. 於陶瓷板表面置入陰極，並保持其濕潤。
4. 觀測其一週電壓、電流變化。



- 九、將高氨氮廢水應用於第三代微生物電池，觀測其電壓、電流，並檢測每日 COD 去除量
- (一) 目的：為了確保其實用性，最終仍需以高氨氮廢水取代高氨氮培養基，因此我們於基本裝置中以高氨氮廢水取代培養基，觀測電壓、電流，並檢測 COD 每日去除量。
- (二) 步驟：
1. 製作一裝置，加入 150ml 鳳山溪汙水處理廠已經高壓滅菌處理之高氨氮廢水。
  2. 注入 5ml 已生長達飽和平衡的菌液。
  3. 使用蠕動幫浦以 0.5ml/min 穩定進流高氨氮廢水。
  4. 觀測其 7 天電壓、電流變化，並檢測其每日 COD 去除量。

十、將第三代微生物燃料電池結合電容，應用於風扇之間歇式發電

- (一) 將電量輸出至電容儲存，約 13 分鐘後充飽電容，電壓為 1.15V，  
充電連續輸出電流平均 0.215mA。
- (二) 以電容驅動風扇。

## 伍、研究結果

### 一、菌種的馴化

#### (一)寶珠溝及鳳山溪汙水處理廠的物化性質分析

|      | 寶珠溝    | 鳳山溪汙水處理廠   | 愛河     | 學校水溝   | 河堤     |
|------|--------|------------|--------|--------|--------|
| 溫度   | 20.3°C | 23.3°C     | 24°C   | 25°C   | 24°C   |
| 深度   | 0.6m   | 1m         | 1.1m   | 0.5m   | 2m     |
| 導電度  | 0.8ms  | 994umho/cm | 37.2ms | 2.09ms | 39.6ms |
| pH 值 | pH7.87 | pH7.94     | pH8.34 | pH8.48 | pH8.15 |

#### (二)篩菌過程及好氧環境生長測試



已畫第二次菌的 A、B、C、D、E 菌



稀釋廢水塗抹後所生長菌落



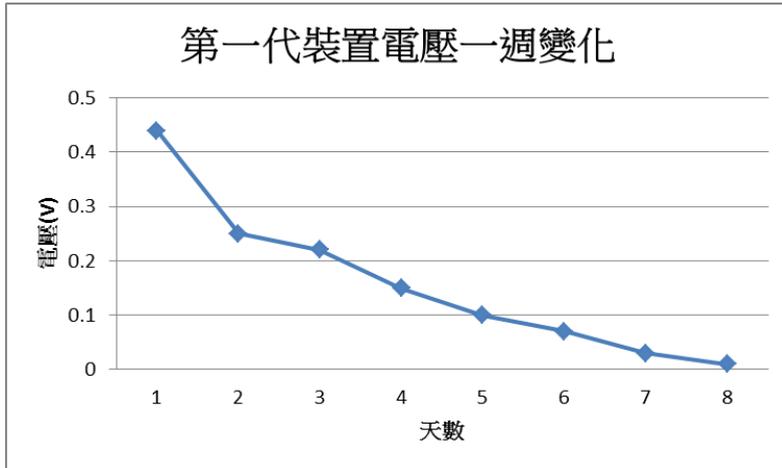
好氧環境中培養的 A、B、C、D、E 菌



厭氧環境中培養的 A、B、C、D、E 菌

1. 好氧環境中培養的 A、B、C、D 菌生長不如厭氧環境佳；厭氧環境則生長良好。
2. E 菌在好氧及厭氧環境中皆生長良好。

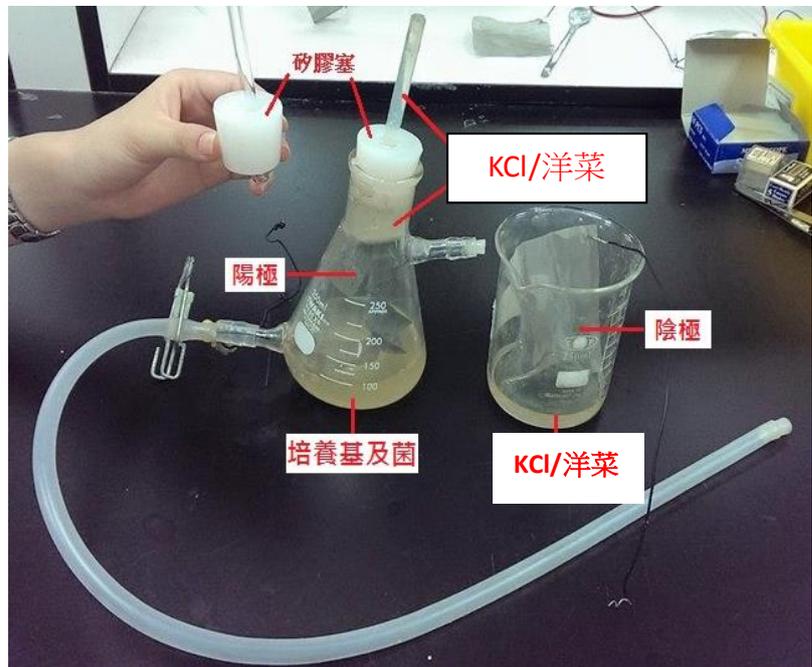
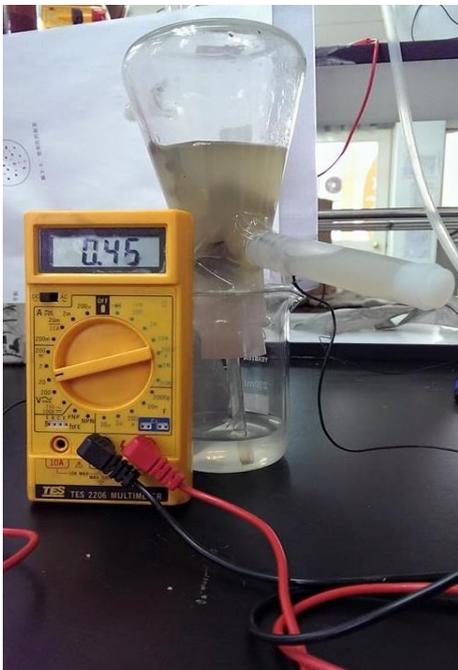
## 二、第一代裝置製作



第一代裝置

- (一) 一天後電壓相當高，然一小時後再測量已降低近 0.1V。
- (二) 提供菌的培養基養分雖多而充足，電壓無法維持穩定。
- (三) 一週後電壓已降至幾乎 0.0V。

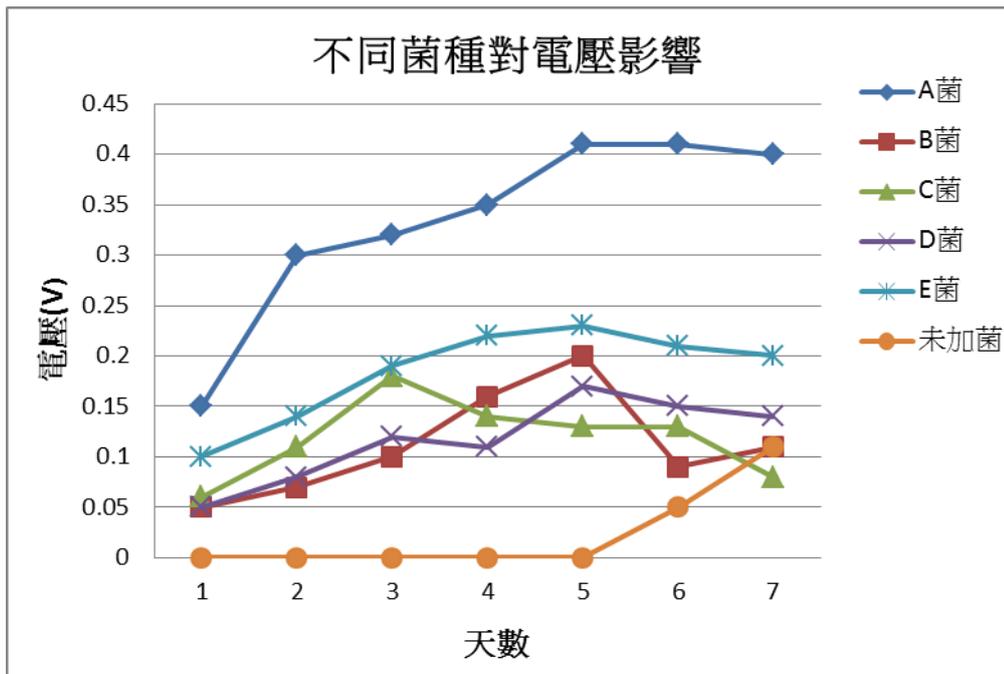
## 三、第二代裝置製作



第二代裝置及其分解圖

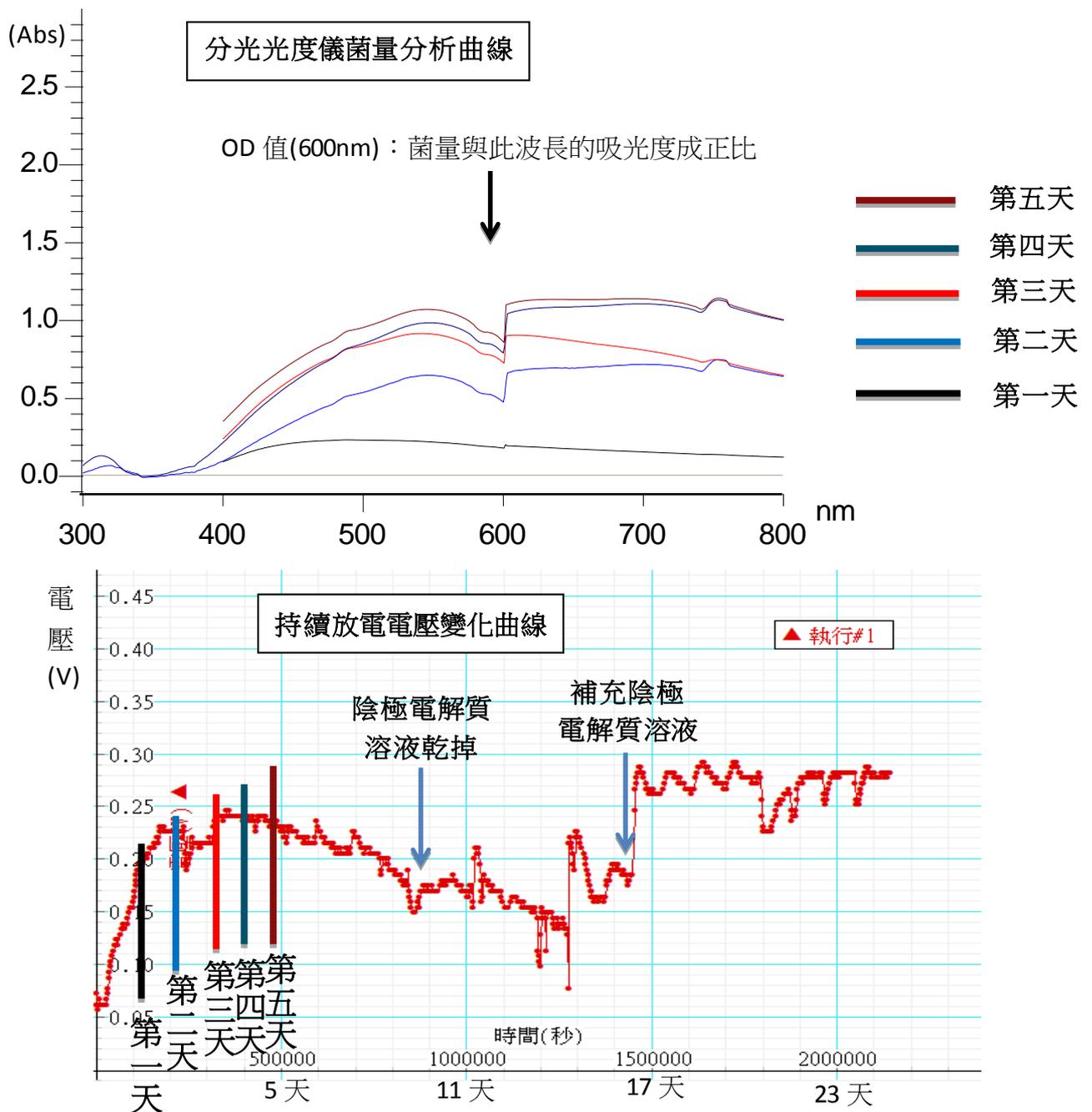
#### 四、變因

變因一：研究不同菌種對其電壓變化影響



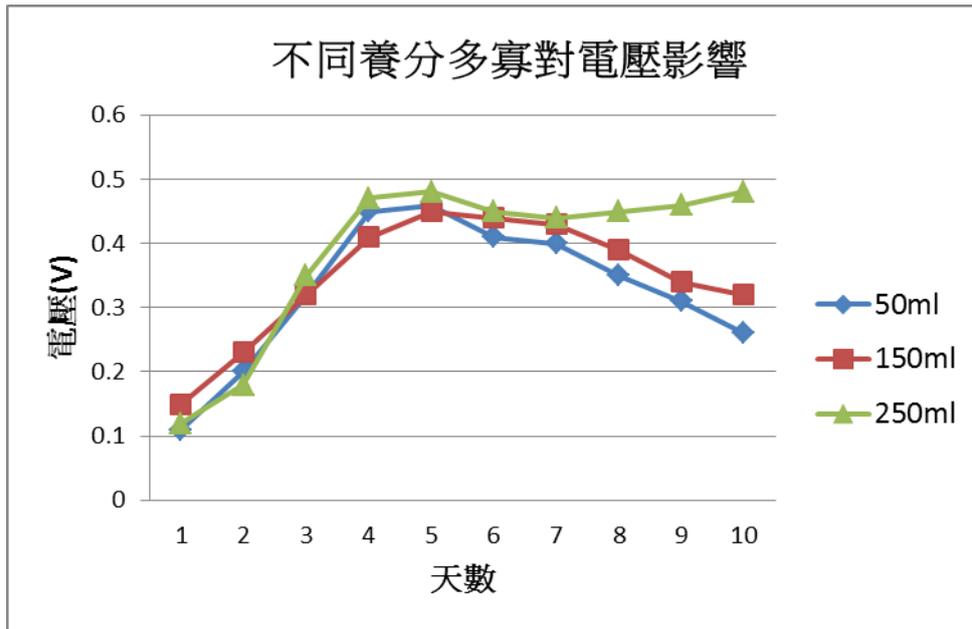
- (一) 種入菌 A 之微生物電池電壓明顯高於其他菌種。
- (二) 一週後，菌 A 之微生物電池電壓仍維持穩定，且高達 0.4V。
- (三) 未加菌之對照組則於前 5 天電壓皆保持 0.0V，之後 2 天略微上升。

## 變因二：研究菌量對其電壓變化影響



- (一) 由分光光度儀菌量分析曲線可得知：菌量的吸光度曲線隨時間增加而漸升，且上升幅度漸小，而至第五天已幾無變化，並意謂菌量生長已達飽和平衡。
- (二) 由電壓變化曲線可得知：此第二代裝置之電壓可持續且穩定地上升。但也觀察到：當陰極的電解質溶液乾掉時，電壓會漸降，當其被補充時，電壓又會持續上升直到達穩定。因此，須隨時保持陰極濕潤，避免影響數據的準確性。
- (三) 由以上兩張圖之曲線對照可得知：當菌量增加時，電壓亦隨之穩定上升。

變因三：研究**養分多寡**對其電壓變化影響



(一) 初始電壓相近，皆於約 4 天後達到高峰。

(二) 6 天後，加入 150ml、250ml 養分的裝置電壓皆有下降趨勢；250ml 者則維持穩定。

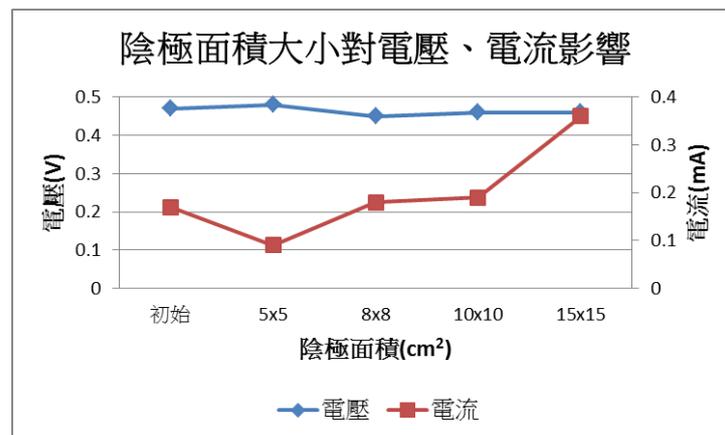
變因四：研究**陰極面積大小**對其電壓變化影響

(一) 陰極面積大小變大，電壓僅有細微變化。

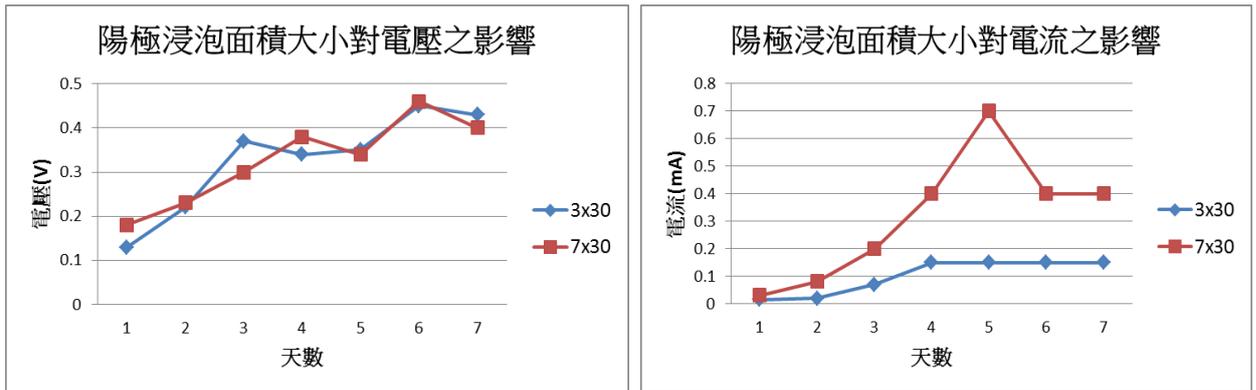
(二) 隨陰極面積大小變大，電流亦隨之上升，前後電流大小之差更高達 0.275mA。

陰極面積大小改變後 4 小時電壓變化

| 陰極面積大小(cm <sup>2</sup> ) | 4 小時後電壓(V) | 4 小時後電流(mA) |
|--------------------------|------------|-------------|
| 5x5                      | 0.48       | 0.085       |
| 8x8                      | 0.45       | 0.18        |
| 10x10                    | 0.46       | 0.19        |
| 15x15                    | 0.46       | 0.36        |



變因五：研究陽極浸泡於培養基中面積大小對其電壓變化影響



- (一) 陽極浸泡於培養基中面積大小對於電壓的影響並不顯著。
- (二) 陽極面積較大者，其電流高於面積較小者許多，兩者相差高達 0.55mA。

變因六：研究陰、陽極間隔距離對其電壓、電流變化之影響。

| 陰、陽極間隔距離(cm)      | 電壓(V) | 電流(mA) |
|-------------------|-------|--------|
| 8(洋菜 2cm+玻璃管 6cm) | 0.47  | 0.4    |
| 4(洋菜 2cm+玻璃管 4cm) | 0.47  | 0.7    |

- (一) 陰、陽極間隔距離由 8cm 截短為 4cm 後，電壓不變，但電流升高了 0.3mA。

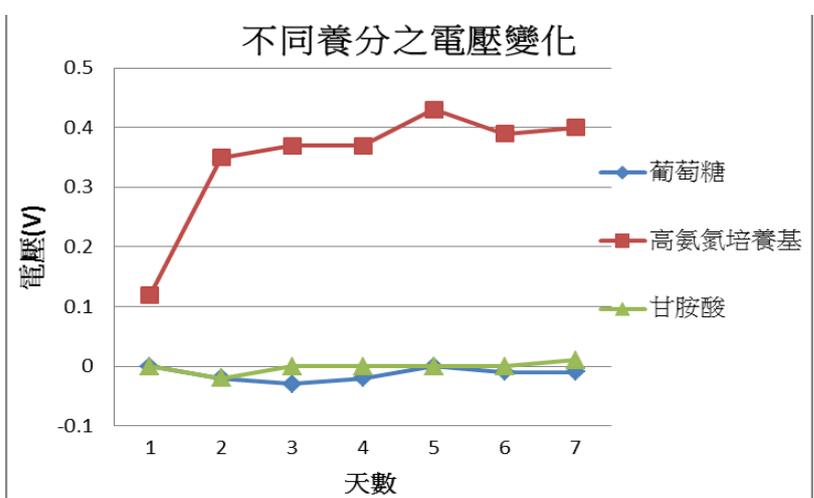
變因七：研究環境明暗對其電壓變化影響

|           | 環境黑暗 | 環境明亮 |
|-----------|------|------|
| 初始電壓(V)   | 0.3  | 0.29 |
| 5 天後電壓(V) | 0.29 | 0.31 |

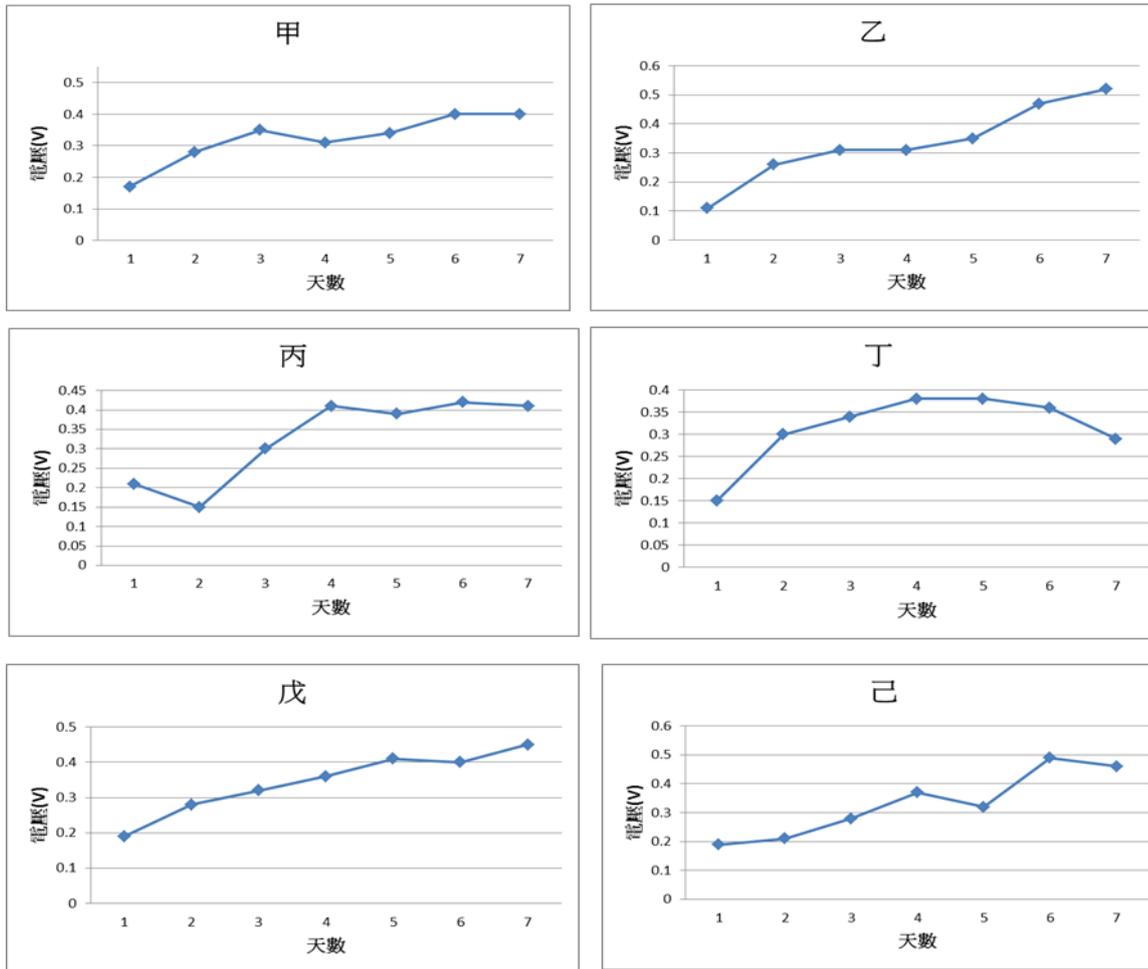
- (一) 環境黑暗與否之電壓變化極細微，並無影響。

變因八：研究不同養分種類對其電壓變化之影響

- (一) 使用培養基作為養分來源之微生物電池電壓明顯高於其他兩者。
- (二) 使用葡萄糖液與甘胺酸作為養分來源之微生物電池電壓趨近於零。



#### 四、測試第二代裝置之穩定性



- (一) 以上結果顯示，經改良後的第二代裝置電壓相當穩定，且幾乎均高達 0.4-0.5V。
- (二) 此 6 裝置連續放電二個月以上，仍有 0.4V 之電壓，顯示其發電能力佳。
- (三) 待其電壓達穩定後，測量其穩定功率密度。

|                                | 甲    | 乙    | 丙    | 丁    | 戊    | 己    |
|--------------------------------|------|------|------|------|------|------|
| 穩定功率密度<br>(mW/m <sup>2</sup> ) | 0.68 | 0.84 | 0.92 | 0.53 | 0.72 | 1.03 |

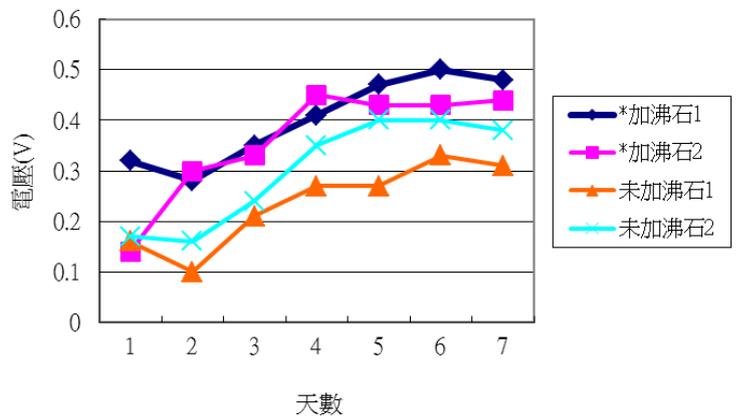
## 五、第三代裝置製作



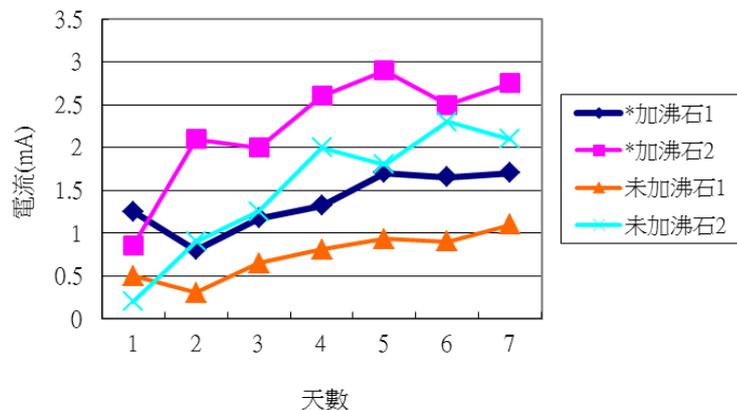
第三代微生物電池(側面、俯視、底面)

- (一) 加入沸石者電壓於第一天即升至  $0.32V$ ，較一、二代微生物電池迅速。
- (二) 電壓仍低而未達穩定前，電流已高達  $1.25mA$ ，最低亦有  $0.25mA$ ，相較於第一、二代裝置，突顯其內電阻之低。
- (三) 加入沸石者電壓穩定於約  $0.4-0.5V$ 。
- (四) 未加入沸石者電壓穩定於約  $0.3-0.4V$ 。
- (五) 電壓達穩定後電流皆達  $1-3mA$ ，最高可達  $2.9mA$ 。

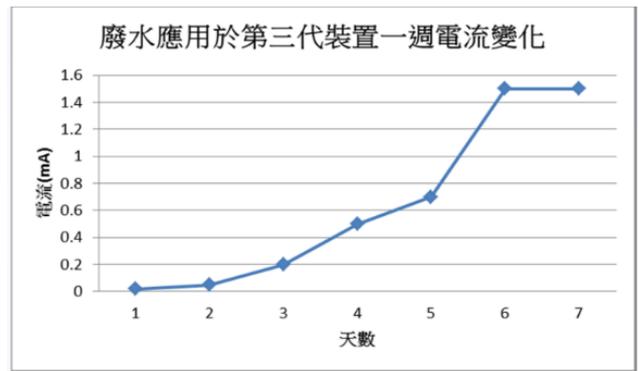
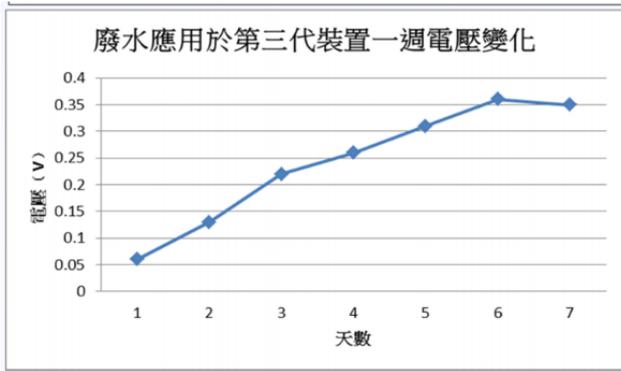
三代裝置4槽一週電壓變化



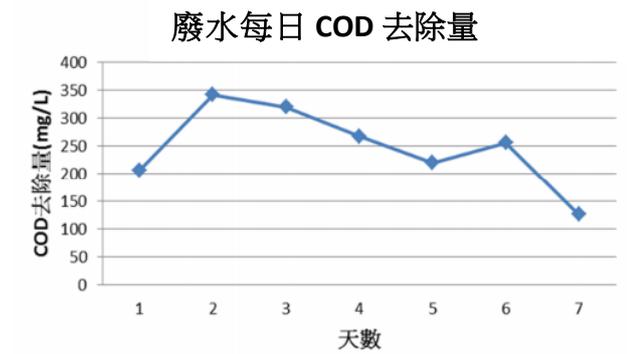
三代裝置4槽一週電流變化



六、將高氨氮廢水應用於第三代微生物電池

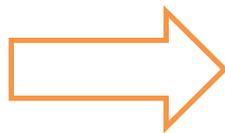


- (一) 隨高氨氮廢水不斷進流，電壓持續上升，約六天後達 0.35V 穩定電壓。
- (二) 電流亦穩定上升，高達 **1.5mA**，突顯第三代裝置效能佳，高氨氮廢水之可行性高。
- (三) 廢水每日 COD 去除量最高可達 342mg/L，七日 COD 總去除量約為 85%，廢水處理效果佳。

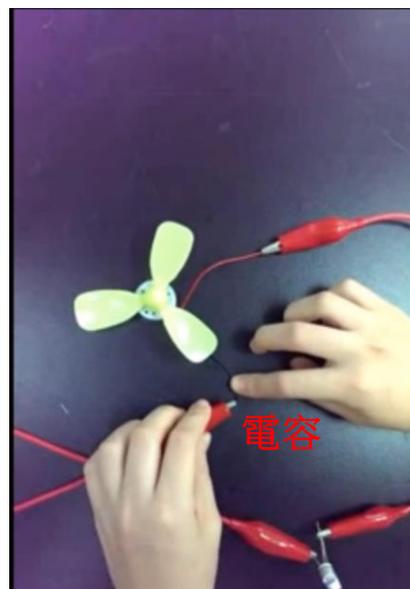


七、將第三代微生物燃料電池結合電容，應用於風扇之間歇式發電

將電量輸出至電容儲存



驅動風扇



## 陸、討論

### 一、菌種的馴化

- (一) 我們希望能將此系統應用於高氨氮廢水中，因此為了確保細菌能於高氨氮環境中生長，故以高氨氮培養基篩菌。
- (二) 因電池陽極應為厭氧環境以避免氧氣直接接收電子，故以厭氧環境篩菌，以確保其於厭氧環境中生長良好。
- (三) 為了了解其於好氧環境中是否能生存，故進行好氧環境的測試。結果顯示，A、B、C、D 菌於好氧環境中生長不如厭氧環境佳，E 菌則生長良好，故推斷 A、B、C、D 菌為耐氧厭氧菌，E 菌則為兼性厭氧菌。

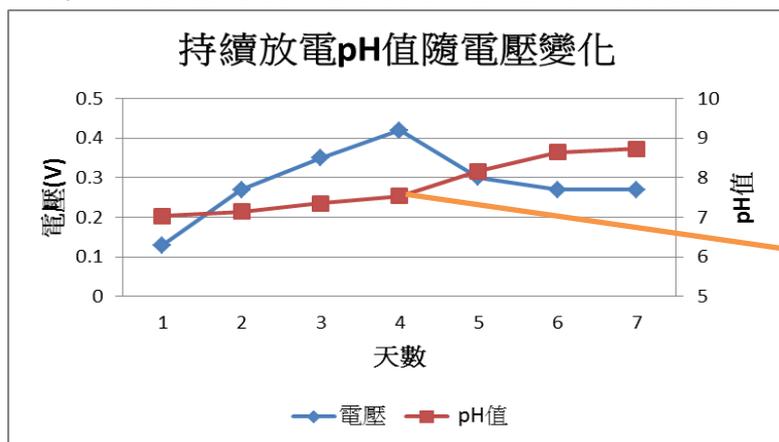
### 二、第一代裝置

- (一) 我們嘗試以生活中常見的素材來製作簡易裝置，因尚於嘗試階段而未種入純菌培養，僅以培養基作輔助養分、廢水中的雜菌作為菌種來源，電壓起初雖高(0.44V)，卻於 1 小時後便下降近 0.1V、8 天後電壓已趨於 0.0V，且電流為 0.0mA，應用價值甚低。
- (二) 根據裝置特性，討論其缺點為
  1. 寶特瓶材質不可放入高壓滅菌鍋滅菌，往後種入純菌後，可能因**雜菌過多**而增加實驗變因，影響實驗的準確性。
  2. 陰、陽極相距 15cm，間隔距離過大造成**內電阻過高**，影響電流輸出。
  3. 陽極雖加入碳粉，卻仍**無法保持其絕對厭氧**，氧氣可能直接接收電子，使細菌分解所釋出之電子無法進入外電路。
  4. **陰陽極分隔不完全**，易造成氧氣由陰極擴散至陽極造成短路，或部分細菌生長於陰極，分解其養分，所釋出之電子由氧氣接收，故降低陰極溶氧量，使陰極不易發生還原反應。
  5. 此系統為單槽式微生物電池，為使陰極維持溶氧量較高的狀態，須製作成體積較大的裝置，以隔絕氧氣滲透至陽極，並長期靜置以避免外界擾動，於**應用上不甚方便**。
  6. 綜合以上幾點原因，第一代裝置的**電壓無法維持穩定**。

### 三、第二代裝置

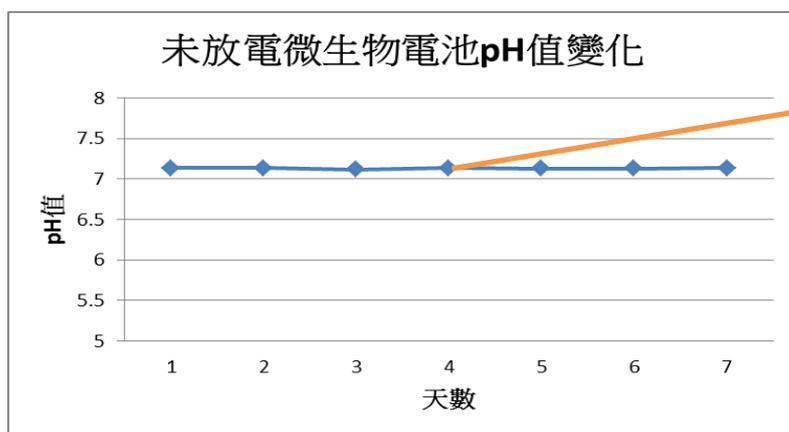
- (一) 此裝置乃利用實驗室常見素材，並針對第一代裝置的缺點進行改進，為雙槽式結構。
  1. 陽極端以雙側管錐形瓶取代寶特瓶，並使用矽膠管、矽膠塞、玻璃管，故可於任何實驗前先進行滅菌，**避免雜菌干擾**。
  2. 將陰、陽極距離縮短為 8cm，**降低內電阻，提升電流**。
  3. 於裝置種菌完成後通入氮氣，製造厭氧環境，不僅使細菌生長較佳，亦可避免氧氣於陽極直接接收電子，而發生短路。
  4. 利用固態鹽橋(即溶有 KCl 之洋菜)將陰、陽極分隔開，避免外界氧氣擴散至陽極，亦可避免細菌生長至陽極以外的地方。
  5. 因陰、陽極分隔完全，**不受外界擾動影響，應用價值高**。
- (二) 一般而言，電池所產電能隨電極表面積增加而提升，故以具**良導電性、生物適應性**(即微生物易附著於其表面)、**化學穩定性**及**表面積大**等優點之不鏽鋼網作電極材料。

(三) 理論上而言，陰極的機制為  $O_2 + 2 H_2O + 4 e^- \rightarrow 4 OH^-$ ，故陰極 pH 值應上升。以下為 pH 值隨電壓變化的曲線圖，檢測過程為持續接通，以確保其反應不間斷。



持續放電時，pH 值持續上升

若並未接通，則不進行反應，pH 值不變。



未放電時，pH 值幾乎不改變

為了證實此理論正確，我們於裝置庚、辛、壬陰極加入少許 HCl，使  $H^+$  與  $OH^-$  中和為  $H_2O$ ，促使上述反應向右進行，並觀測到其電壓、電流

|         | 裝置 庚         | 裝置 辛         | 裝置 壬         |
|---------|--------------|--------------|--------------|
| 加 HCl 前 | 0.3V/0.04mA  | 0.42V/0.15mA | 0.38V/0.09mA |
| 加 HCl 後 | 0.69V/0.95mA | 0.74V/1mA    | 0.88V/1.1mA  |

於數分鐘後皆大幅提升。



(四) 查閱微生物電池相關論文，多數微生物電池使用質子交換膜分隔陰、陽極，然質子交換膜成本相當高，故本裝置發展為無膜式 (membrane-less) 微生物燃料電池，使用溶有電解質的固態洋菜分隔陰、陽極，不僅材料便宜、易取得，且防止空氣滲透的效果極佳。

#### 四、變因

##### (一) 菌種

1. 觀察電壓變化，以菌 A 較高且穩定，經查閱文獻，其持續放電穩定電壓(約 0.4V) 與大部分參考文獻所測得結果相去不遠。故往後的裝置均以菌 A 為主力。
2. 未加菌對照組的電壓於後兩天略微上升，可能是因製作時空氣中的細菌難免會進入陽極槽內，於是我們於第 8 天再將其置入無菌操作臺中以紫外光照射 10min 進行殺菌，而後測量其電壓，即又下降至趨近於 0.0V。此證實微生物電池電壓的產生實來自於細菌的作用。
3. 我們推測，B、C、D、E 菌的輸出電壓不如菌 A 可能是因
  - (1) 其於高氨氮培養基中的生長能力較差
  - (2) 其生物膜較不易附著於不鏽鋼網上
  - (3) B、C、D、E 菌分解養分過程中，其電子傳遞鏈不易經由不鏽鋼網傳至外電路作功
4. 最後將菌 A 送菌種鑑定，經序列比對得知為 *Clostridium bifermentans*。

##### (二) 菌量

1. 根據文獻，利用分光光度儀以 600nm 的波長可測得菌液之 OD 值，而菌量會與其對該波長的吸光值成正比。
2. 菌量生長愈多，單位時間有機物分解量越大，對外作功愈大，故菌量與電壓成正相關。
3. 經過約 4 天觀測，吸光度曲線幾乎不再改變，即細菌生長達飽和平衡，電壓亦達穩定。

##### (三) 養份多寡

1. 以其初期電壓曲線而言，養份多寡並不造成影響。然養分較少時，電壓卻無法維持長期穩定，約一週後已有下降趨勢；養分較多者則至多可維持一個月以上。
2. 我們推測，這是因電池運作初期，所提供養分大於菌之需求量，故無論養分多寡，電壓皆能持續上升；而養分較少者在經過一週後養分已無法滿足菌之需求量，故電壓下降。

##### (四) 陰極面積

1. 陰極之反應機制仰賴氧氣於電極表面得到電子並還原為氫氧根，因此三相(氧氣、鹽橋、不鏽鋼網)接觸的面積尤為重要，而加大陰極面積即可增加三相接觸面積。
2. 實驗觀察，隨陰極面積加大，電壓變化不大，但電池輸出電流隨之提升，輸出功率增大，故我們判斷陰極在原設計中為放電機制的瓶頸。

##### (五) 陽極面積

1. 當陽極浸泡於培養基中的面積增加時，電壓幾無改變，電流則顯著提升。
2. 我們推測，當陽極浸泡面積較大時，生物膜附著於不鏽鋼網上之面積較大，釋出電子較多、電子亦較易由不鏽鋼網接收，故電流大幅提升。

## (六) 陰陽極間隔距離

1. 此微生物電池裝置以溶有 KCl 的洋菜做為鹽橋，亦可阻擋陰極的氧氣擴散至陽極，但推測其可能增加電池的內電阻，故嘗試縮短鹽橋觀測其變化。
2. 由數據可得知，電壓並未改變，電流卻提升至 0.7mA，証實當陰陽極間隔距離較短時，內電阻將變小，可提升電流。

## (七) 環境明暗

1. 根據文獻，某些特定細菌，如光合異營菌，需要光源才可生長，某些則否。為了更加了解此種細菌的特性，我們將其置於暗室中 5 天觀察其變化。結果顯示:環境的明暗並不影響其電壓，故推測菌 A 的生長並不受光源影響。
2. 基於其在黑暗中不受影響的特性，我們認為其應用範圍相當廣泛，如可將其應用於下水道等光源不足處，於夜間亦可正常發電。

## (八) 不同養分種類

1. 經過了高氨氮培養基的測試後，我們嘗試以葡萄糖、甘胺酸等生活中常見的養分測試其發電效果，然電壓皆趨近於 0.0V。
2. 我們推測，此菌 A 分解有機物的機制相當複雜，而難以於專一營養源正常運作。

## 五、第三代裝置

(一) 此裝置為綜合以上變因所得之最佳結果，並考量其實用性製作而成：

1. 單位裝置體積為  $15 \times 10 \times 3(\text{cm}^3)$ ，較一、二代電池平扁穩固，不易翻倒碰撞。
2. 其陰陽極間隔距離極小，僅約 0.5cm，為二代裝置之 1/16，內電阻極低。
3. 加入沸石，提供細菌充分生長空間、較快生長達飽和平衡，較快達到穩定電壓。
4. 陰、陽極表面積極大，可大幅提升電流。
5. 方便多單位裝置結合串聯，應用價值提升，並成功結合電容，以間歇式發電的方式，實際應用於驅動風扇。

## 六、將高氨氮廢水應用於第三代微生物電池

(一) 電壓於約 5 天後達 0.36V 之穩定電壓，並不遜於以培養基作為基質的微生物電池，且其電流高達 1.5mA，穩定功率密度達  $0.93(\text{mW}/\text{m}^2)$ 。

(二) 結果顯示以鳳山溪污水處理廠之廢水作為營養源可行性極高，廢水 COD 每日去除量最高可達 342mg/L，突顯其於污水處理方面之應用價值。廢水不僅成本低，發電效果佳，亦可同時進行污水處理，一舉多得，實用價值極高。

## 柒、結論

### 一、裝置方面

- (一) 第一代微生物燃料電池放置一天後的電壓即高達 0.44V，但僅 8 天即降至趨近 0.0V，顯示其電壓不持久之缺點。
- (二) 第二代微生物燃料電池針對第一代進行改進，電壓為緩緩上升，約 4-7 天後達穩定，且持續放電之穩定電壓可持續 2 個月以上，具可滅菌降低雜菌干擾、內電阻低、完全厭氧、陰陽極分隔完全、電極表面積大等優點。
- (三) 第三代微生物燃料電池不僅單位體積小、穩固、方便攜帶、電極表面積極大、成本更為低廉、電壓迅速達穩定，且電流大幅提升，各方面皆勝於第一、二代裝置，為一深具發展性及實用性之裝置，最高電壓達 0.5V，電流高達 2.9mA。

### 二、變因方面

- (一) 菌種以菌 A *Clostridium bifermentans* 較佳，可能原因為：其於高氨氮環境中生長能力較佳、生物膜附著穩固、於分解代謝過程較傾向於釋出電子。
- (二) 菌量成長達飽和平衡前，與電壓成正相關，可能是因菌量越多，單位時間營養源分解量越大，作功能力越大。
- (三) 養份多寡並不影響電壓高峰值，然養分越多其穩定電壓越持久，因養分供應較充足。
- (四) 陰極表面積增加，電流提升，因其三相接觸面積較大，氧氣還原作用易進行。
- (五) 陽極浸泡於培養基中面積增加，電壓略微提升，電流則顯著提升，主要是因：生物膜附著於不鏽鋼網上之面積較大，釋出電子較多、電子亦較易傳至外電路。
- (六) 陰陽極間隔距離並不影響電壓，卻大幅影響電流，主要是因其內電阻降低。
- (七) 環境的明暗並不影響電壓，可能是因菌 A 在黑暗環境仍可正常生長，維持電池運作。
- (八) 不同養分種類直接影響電壓，而養分種類應取決與細菌的分解代謝機制與對象。

### 三、以廢水為基質之微生物電池電壓高達 0.36V，電流達 1.5mA，並穩定於 0.35V。

|                          | 第一代   | 第二代        | 第三代(加沸石者)  |
|--------------------------|---|------------|--|
| 成本                       | 低(10 元)  | 高(427 元)   | 中(135 元)  |
| 可攜性                      | 低(需靜置不可擾動)  | 中(重心不穩易翻倒) | 高(扁平穩固)   |
| 達穩定所需時間                  | 無法穩定  | 長(4 天)     | 短(2 天)    |
| 功率密度(mW/m <sup>2</sup> ) | 0(無穩定電流)  | 1.03       | 4.1       |

## 捌、參考文獻

- 一、 何念萱等四人。微生物電力公司-微生物燃料電池之變因探討。(中華民國第四十七屆中小學科學展覽會)
- 二、 Bruce E. Logan。Microbial Fuel Cells meet Salinity Gradient Energy。
- 三、 王鑫(2008-10-31)。科學網---寫給 MFC 新手們。取自：  
<http://blog.sciencenet.cn/blog-56435-44856.html>
- 四、 中原大學生物環境工程學系環境生物科技研究室。廢水中的微生物。
- 五、 謝雨澄(民國 100)。以螺旋藻產氧作為陰極電子接受者之微生物燃料電池產電效率研究。第 6~35 頁。
- 六、 張萌萌等(民國 98)。染整廢水處理菌株應用於染料脫色及產電之可行性評估。
- 七、 科技部高瞻自然科學教學資源平台(民國 102)。小兵立大功~生物燃料電池原理及應用。取自：<http://highscope.ch.ntu.edu.tw/wordpress/?p=42863>
- 八、 海洋大學海洋生物研究所。細菌讓汗水也能發電-海大發表新菌株能處理污水也能發電。  
取自：<http://www.imb.ntou.edu.tw/shewanella%20sp.htm>
- 九、 張信堃(民國 100)。微生物燃料電池產電效能之研究-以活性污泥水解產物為基質。
- 十、 環保簡訊 / 第 19 期。沸石在廢水處理中的應用：( 二 ) 去除水中氨氮。
- 十一、 章育銘。稻殼電池。
- 十二、 孙永军等(2012)。在氧化沟中构建微生物燃料电池。

## 未來展望

- 一、由本實驗可知，將較專一的菌應用於微生物燃料電池是可行的，故盼可由更多來源之家庭汗水、海底淤泥、溪流河川等取得發電能力、適應特性更理想之菌種，以期未來能找出具**專一性**之發電菌種，共同依序分解成分複雜之污水。
- 二、陽極材料可配合使用菌種之特性做調整、加工，提供較完整的生長空間，使生物膜更為穩固；陰極則可加入氧氣**吸附能力較佳之材料**(例如：鉑粉)。
- 三、陰陽極分隔方面，未來可使用更薄之膜狀構造，以期再降低內電阻，提升輸出功率。
- 四、進流養分方面，未來可根據選定菌種之特性提供不同種類之廢水。
- 五、陰極可使用**緩衝溶液**維持較低之 pH 值，但仍需配合其材料的耐酸性。
- 六、本實驗之第三代裝置已達到縮小體積之目的，故未來可設計**可漂浮之微生物燃料電池板**，使其陰極於水面上暴氧，陽極則於水面下於相對較厭氧之環境分解有機廢水，未來**水面上之 LED 燈照明設備**可廣泛使用此系統。
- 七、陰極溶液由於氧氣被還原而成鹼性，故亦可通入大量廢氣中與 CO<sub>2</sub> 中和，**既能提高發電效率又可兼具廢氣處理之用**。