

中華民國第 52 屆中小學科學展覽會 作品說明書

高中組 化學科

040201

酵中帶電－酵母菌燃料電池的初探

學校名稱：國立花蓮女子高級中學

作者： 高二 方偲庭 高二 陳宣愛 高二 楊舒惠	指導老師： 陳玉時
-----------------------------------	--------------

關鍵詞：酵母菌、燃料電池、最高電壓

摘要

本實驗主要探討酵母菌在不同變因下的發電狀況，實驗變因有：電極材質、裝置的封閉與否、緩衝溶液的酸鹼度、糖水濃度、酵母菌濃度、甲基藍、赤血鹽等。

為避免碳棒電阻消耗電壓，找出電阻相近的碳棒。又為解決碳棒表面易有殘留及碳纖維布電壓不穩的問題，選擇白金作為電極。由封閉與開放系統的測試得知酵母菌在缺氧環境下，發電狀況較差。緩衝溶液 pH=3 時可得較佳電壓。酵母菌克數在 5 克內，克數越多，所得電壓越高。在使用 2g 酵母菌乾粉時，0.4M 糖水濃度可得較佳結果。甲基藍對酵母菌電池未發揮電子梭作用；而赤血鹽雖可做為陰極電子接受者，但其效果會受到酸鹼環境和電極材質的影響；赤血鹽造成的電壓驟升包含導電度提高與電子傳導效率提升兩個原因。

壹、研究動機

在基礎化學課本中，我們認識了許多能源的開發與利用，其中電池的發展特別引起我們的興趣。偶然機會下在「高瞻自然科學教學資源平台」^[1]中看見微生物燃料電池，這種電池有環保無污染的特性，但電壓極低。因為養菌困難，所以想使用易取得的市售酵母菌乾粉，來製作可用的酵母菌燃料電池，並嘗試改變酵母菌燃料電池的操作條件，企圖增加電池的電壓。

貳、研究目的

- 一、以市售酵母菌乾粉做出微生物燃料電池
- 二、探討各項物質對酵母菌電池的影響

參、研究器材設備及試劑

一、器材

DataStudio 數據擷取軟體	碳棒	鱷魚夾	量筒
電壓檢測器(PASCO)	加熱攪拌器	U型管	pH計
白金絲	容量瓶	微量分注器	燒杯
碳纖維布（資洋股份有限公司）	透析袋(12000~14000Da)（VISKING）		

二、試劑

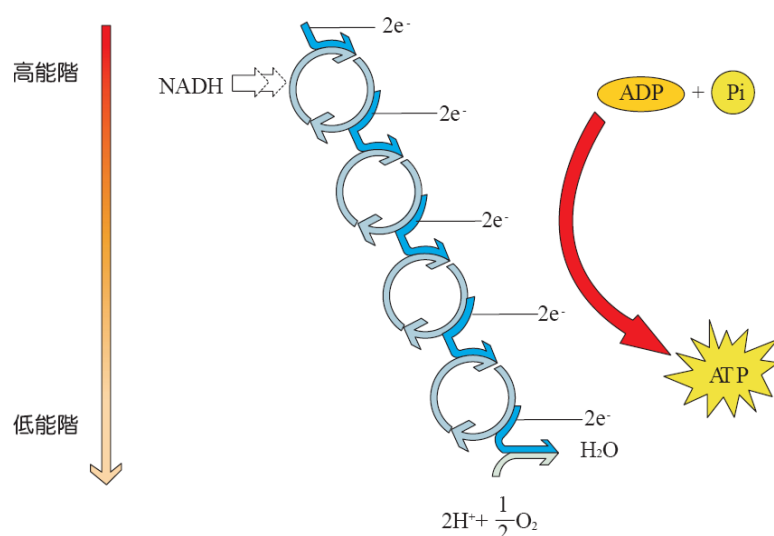
葡萄糖 $C_6H_{12}O_6$ （島田化學研究所）	乾粉酵母菌（安琪牌）
磷酸氫二鉀 K_2HPO_4 （方強企業有限公司）	磷酸二氫鉀 KH_2PO_4 （方強企業有限公司）
甲基藍 $C_{37}H_{27}N_3O_9S_3Na_2$ （島田化學研究所）	鐵氰化鉀 $K_3Fe(CN)_6$ （Ferak Laborat GmbH）

肆、研究過程或方法

一、原理

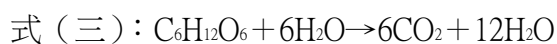
微生物燃料電池的運作是利用陽極周圍之微生物新陳代謝所產生之能量^[2]來發電，一般包含陽極槽、陰極槽兩個部份，兩槽之間隔一層質子交換膜。陽極槽以微生物、電極與養分為主，視發電微生物的生理機制而選擇加電子梭與否^[2]；陰極槽由電極與電子接受者組成，通常使用氧氣或鐵氰化鉀($K_3Fe(CN)_6$)作為電子最後的接受者。

當微生物行呼吸作用分解養份時，電子會從養份轉移到 $NADH^+$ ，此過程的能量流失非常少，而電子在電子傳遞鏈上傳遞時的能量流失也非常少^[3]，一步一步的反應使生物可以一次次地捕捉這些能量，引發化學滲透產生 ATP，如圖（一）。



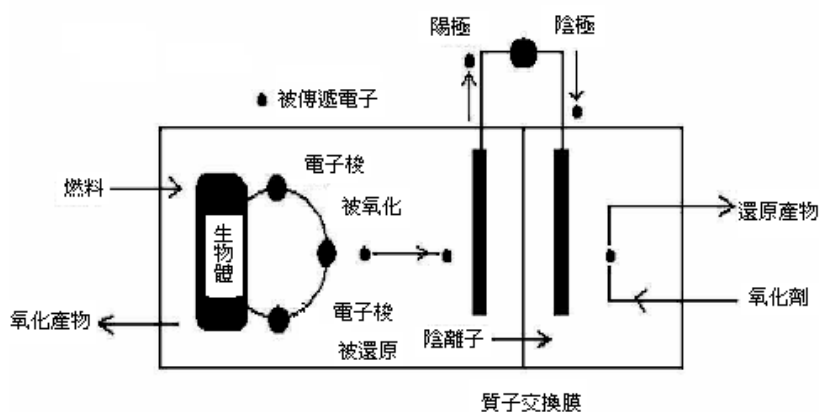
圖（一）：電子傳遞鏈

微生物燃料電池即是使微生物所處之陽極保持在氧氣缺乏的狀態，造成呼吸作用的電子傳遞鏈沒有足夠的接受者，迫使電子丟往電極經外電路到氧氣充足的陰極，與 H^+ 和氧氣形成水。若以葡萄糖做為養份，氧氣為最終電子接受者，則陽極的反應如式（一），陰極的反應如式（二），總反應為式（三）。



不同種類微生物發電時，電子由細胞膜傳到電極的難易程度也不一樣，一般來說大

致可分為以下三種：第一種是在陽極微生物與電極之間外加電子梭，協助電子導往電極，如圖（二），電子梭通常具有容易通過細胞壁、容易取得電子且不能成為微生物食物的條件^[4]，如甲基藍、中性紅等是常見的電子梭。第二種是微生物可利用本身細胞膜上的色素直接將電子傳遞到電極。第三種是微生物可自己製造電子梭，再藉自產電子梭將電子導出。

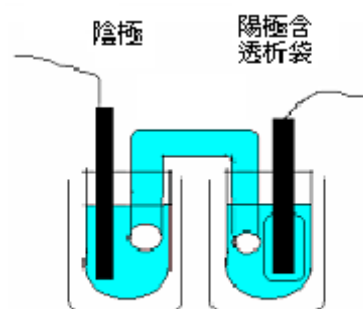


圖（二）：電子梭示意圖

二、實驗裝置

(一)密閉式

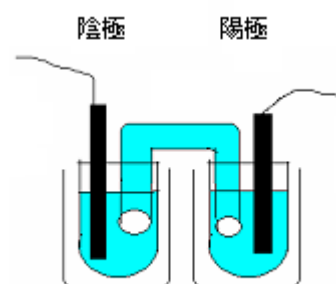
取二 50mL 燒杯作為兩極槽的底座，再取二直徑 3cm 的試管放入燒杯中當電極槽（以減少藥品的使用量），兩槽之間以填充緩衝溶液並用脫脂棉塞住的 U 型管連接，兩槽皆以 20mL 緩衝溶液為溶劑，各放入一支碳棒，陽極碳棒包在透析膜中，膜內裝 10mL 緩衝溶液，將整個透析袋泡在緩衝溶液中，外接導線至感應器。



圖（三）

(二)開放式

取二 50mL 燒杯作為兩極槽，兩槽之間以填充緩衝溶液並用脫脂棉塞住的 U 型管連接，兩槽皆以 20mL 緩衝溶液為溶劑，大抵與密閉式同，唯一不同處是並未使用透析袋。開放式的所有實驗即是更改兩槽溶液，其他條件相同。



圖（四）

(三)0.1M 磷酸緩衝溶液(pH=7.4)配法

1、取 0.0612mol 的 K_2HPO_4 (10.66g) 加上 0.0388mol 的 KH_2PO_4 (5.28g) 放入燒杯後，

加水溶解。

2、將其置於攪拌器上，用 pH 計測其 pH 值，並加入 KOH 或 HCl 調整 pH 至 7.4。

3、放入 1L 的容量瓶加水到刻度線即可得 0.1M 緩衝溶液，而後裝入罐中存放。

伍、研究結果與討論

一、開放式系統碳棒電阻的影響

原本我們以為相同長度、材質的碳棒電阻應該不會有太大的影響，但因查到的微生物燃料電池所能產生的電壓只約在 0.1V—0.2V 間^{[5]、[6]}，電壓值並不大，因此我們在兩槽皆為緩衝溶液的電池裝置中，固定陰極碳棒（編號 10 號），更換不同的陽極碳棒，測試碳棒電阻所造成的影響，結果如表（一）。

表（一）：碳棒電阻對電壓的影響

編號	1	2	3	4	5	6	7	8	9	11
電位差(V)	0.026	0.038	0.031	0.031	0.039	0.045	-0.013	0.046	0.051	0.001

由表（一）的結果顯示不同電阻的碳棒即會造成電壓，不同組合的碳棒造成的電壓也不一樣，差異最大甚至可達 0.05V，此為所查資料 0.2V 的四分之一，自然不能夠忽略。因此，往後的實驗我們均採用先測碳棒造成的電壓，選擇電位差小於 0.01V 的組合，之後再更換兩極物質偵測電池電壓，最後呈現則以二值之差作為電池電位差。

二、封閉式系統透析膜造成之介面電位(碳棒電極)

所謂封閉式系統即陽極包在透析膜中，此測試透析膜內外並無濃度差，僅作為實驗五的空白實驗，測試結果如下表（二）。

表（二）：封閉式系統透析膜造成之介面電位對電壓的影響

	1	2	3
電位差(V)	-0.001	-0.004	0.001

透析膜造成的介面電壓分別為-0.001V，-0.004V 和 0.001V，電壓差取自加膜前後之差，負值代表下降。取其電位差的絕對值皆在 0.001V—0.004V 的範圍內，與酵母菌電池平均 0.1—0.2V 差了近 100 倍，因此我們認為透析膜造成的介面電位應可忽略。

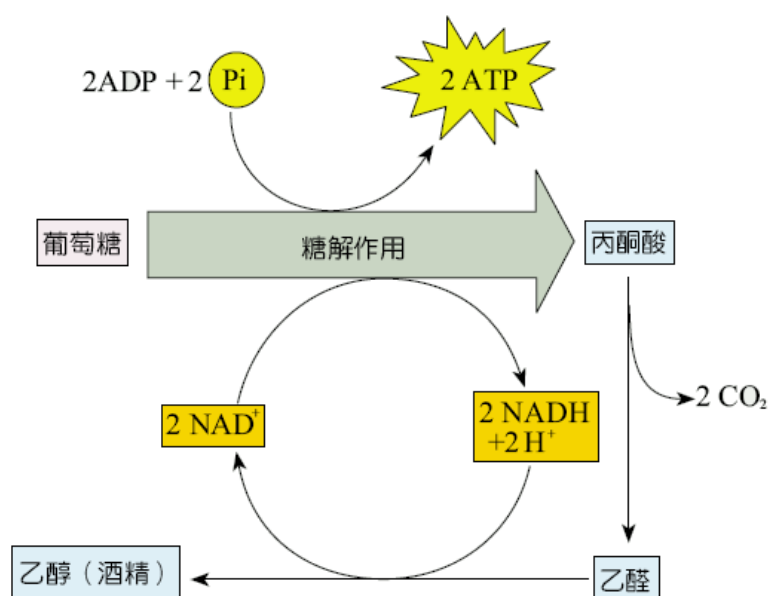
三、封閉式酵母菌電池(碳棒電極)

我們在「高瞻自然科學教學資源平台」查到，微生物燃料電池的陽極在無氧狀況下發電效果較好，同時，加裝透析袋還有防止養分透過鹽橋流至陰極，使陰極滋生他菌的可能。故此，我們設計了此實驗。酵母菌乾粉 1g 先加在 0.5M50mL 葡萄糖水中，放在攪拌器上攪拌 30 分鐘後，取 10mL 倒入透析袋，用橡皮筋綁緊；封閉透析袋時，盡量擠出空氣，稍微搖晃陽極使袋內溶液混合均勻，再放入直徑 4.5cm 試管中，使透析袋完全沒入緩衝溶液液面。測試結果如表（三）。

表（三）：封閉式酵母菌電池

	1	2	平均
電位差(V)	0.043	0.053	0.048

所得電壓差分別為 0.043V 和 0.053V，與查到的 0.1V–0.2V 相差甚多，猜想在封閉式裝置中，氧氣不足，酵母菌無法行有氧呼吸，而改行無氧呼吸，但由圖（五）可知，酵母菌行無氧呼吸時不涉及電子傳遞鏈，故電壓極低。而查到使用封閉系統的電池幾乎均使用厭氧菌，因此我們決定將裝置改為開放系統。



圖（五）：無氧呼吸原理

四、開放式系統葡萄糖對電壓的影響(碳棒電極)

雖然葡萄糖是分子化合物，為了解葡萄糖是否對電壓造成影響，我們在緩衝溶液電池裝置達穩定後測得碳棒電阻所造成的電壓 V_i ，於陽極加入 1.8 克的葡萄糖使其濃度為

0.5M，攪拌均勻後進行測試，放置 10 小時後得電壓 V_f ，結果如表（四）。

表（四）：葡萄糖對電壓的影響

	1	2	3	4	平均
V_i	0.007	-0.013	-0.001	0.035	
V_f	0.002	-0.024	-0.010	0.035	
電位差(V)	-0.005	-0.011	-0.009	0.000	0.0063

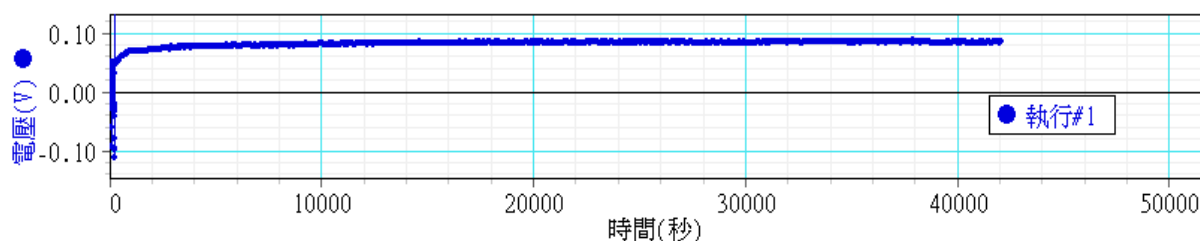
由表（四）的結果顯示葡萄糖不會對電壓造成太大影響(電位差 $<0.01V$)。另外，此實驗結果亦說明了葡萄糖溶液靜置於開放空間，即使有非酵母菌的微生物掉進去，所造成的電壓亦不足計。

五、開放式系統酵母菌對電壓的影響(碳棒電極)

我們從選修生物上冊課本中得知，酵母菌進行有氧呼吸時，粒線體的內膜上會發生電子傳遞的一連串反應以造成 H^+ 梯度，進而產生 ATP，微生物燃料電池即是藉著電子傳遞鏈上的電子來發電。我們以緩衝溶液為陰極，酵母菌(1g)緩衝溶液糖水(0.5M)為陽極，偵測酵母菌在糖水中進行有氧呼吸所造成的電壓，測試結果如圖（六）、表（五）。

表（五）：開放式系統酵母菌對電壓的影響

	日期	第一杯	第二杯	第三杯
電 位 差 (V)	2/29	0.059	0.119	0.132
	3/1	0.055	0.076	0.181
	非同日	0.100	0.140	0.067



圖（六）：開放式系統酵母菌對電壓的影響

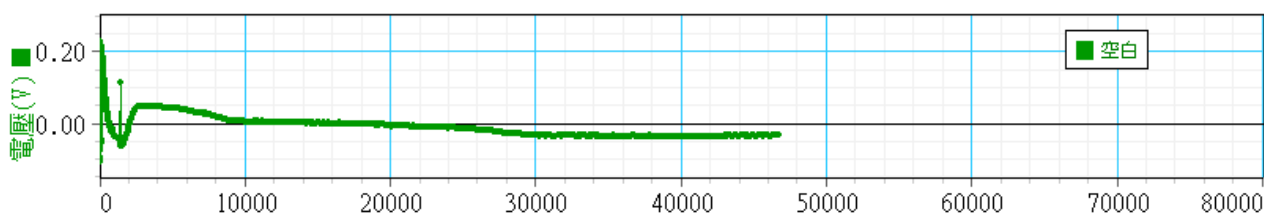
- 1、由表（五）結果顯示每次酵母菌乾粉克數及葡萄糖水濃度雖然都一樣，卻出現不同的電壓，而且就算是同一天偵測（溫度相同），結果也不盡相同，因此我們推測可能是因為每次取到的酵母菌乾粉活性不同所造成。

2、由圖（六）結果顯示出酵母菌可讓電壓緩慢上升，但上升至一定電壓後，曲線即會持平不動。我們原本推測酵母菌電池在一段時間後會因為養分不足或代謝廢物過多而死亡，使得電壓下降，但有一次我們讓酵母菌電池連續發電六天，仍未見電壓下降（此間並未更換菌液或增加養分）。推測是因為酵母菌燃料電池需要的菌數只需少量，而 1g 酵母菌中可活化菌數為過量，雖然電池放久了，酵母菌產生代謝廢物，造成部分酵母菌死亡，但溶液中所剩的酵母菌仍然含有維持一定電壓所需的菌數，故電壓仍能持平不下降。

六、電極種類的影響

在前述實驗中，我們發現雖然是同一天實驗，但電壓值卻從 0.055V–0.181V 不等，我們認為此等差異可能來自碳棒電阻消耗掉的電壓不同、相同克數的酵母菌活性不同、或是氣溫不同所致。

為了提高電池電壓，我們決定嘗試使用電阻較低的碳纖維布做實驗，但結果發現碳布的電阻雖較碳棒稍低（碳棒約 $1.99\Omega/8.5\text{ cm}$ ，碳布 $1.9\Omega/8.5\text{ cm}$ ），但纖維易疏散造成電壓不穩，如圖(七)，評估後捨棄不用。



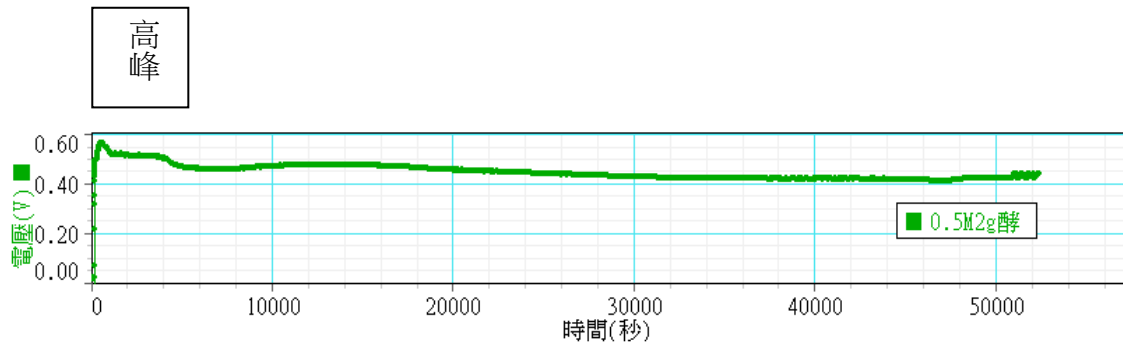
圖(七)：碳布電極空白電壓

輾轉借得白金絲作為電極，為了比較白金和碳棒的差異，我們將酵母菌的配法改為先全部加入大燒杯攪散，再吸所需體積依 S 型分裝成陽極後進行測試。

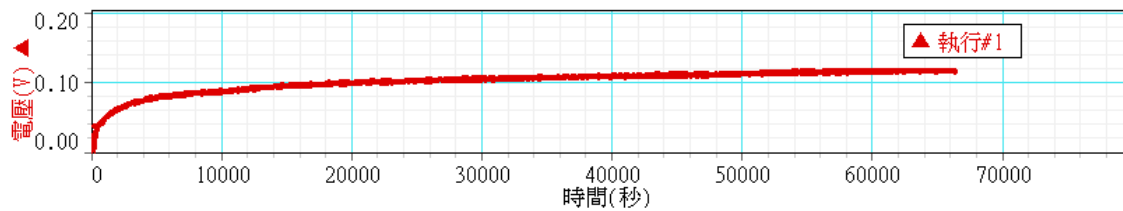
此次實驗陰極為 0.1M pH=7.4 的磷酸緩衝溶液 20mL，陽極為 0.5M 葡萄糖緩衝溶液 20mL 內含 2g 酵母菌，測試結果如表(六)、圖(八)、圖(九)。

表（六）：酵母菌電池白金電極與碳棒電極第十小時電壓差的比較

	第一杯	第二杯	第三杯	平均電壓差(V)
白金絲	0.431	0.400	0.401	0.411
碳棒	0.112	0.131	0.087	0.110



圖（八）：未加塑膠套白金酵母菌電池

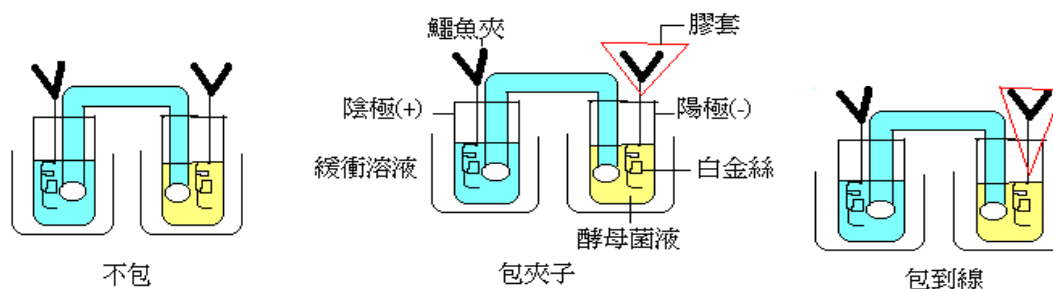


圖（九）：碳棒酵母菌電池

- 1、白金絲傳遞電子的效果比碳棒好很多，兩者平均電壓差了將近四倍。此外，由圖(八)、(九)碳棒電池與白金電池的比較，碳棒電池電壓幾乎重頭到尾只升不降；而白金電池則在一開始就出現一高峰，接著緩降，然後開始持平；整條曲線也出現許多以碳棒為電極的電池所沒有的小波動，但電壓始終高於碳棒電極的電池。
- 2、經過多次實驗之後，我們發現以白金為電極的酵母菌電池電壓曲線的再現性並不高，且常有突升緩降的現象，而此種變化似乎與酵母菌發泡的程度有關。因為當酵母菌泡沫湧升觸及鱷魚夾時，電壓驟升，一段時間後泡沫坍塌，電壓回復平穩，我們猜測可能是因為當泡沫觸及鐵夾，原先陽極白金的惰性電極角色被鐵取代，鐵即可釋出電子，也因此使電壓大大提升，碳棒則因長度相對較長而無此問題。為了確認白金電極與泡沫的關係，我們用塑膠片作了包覆差異的實驗。

七、加塑膠套酵母菌電池(白金電極)

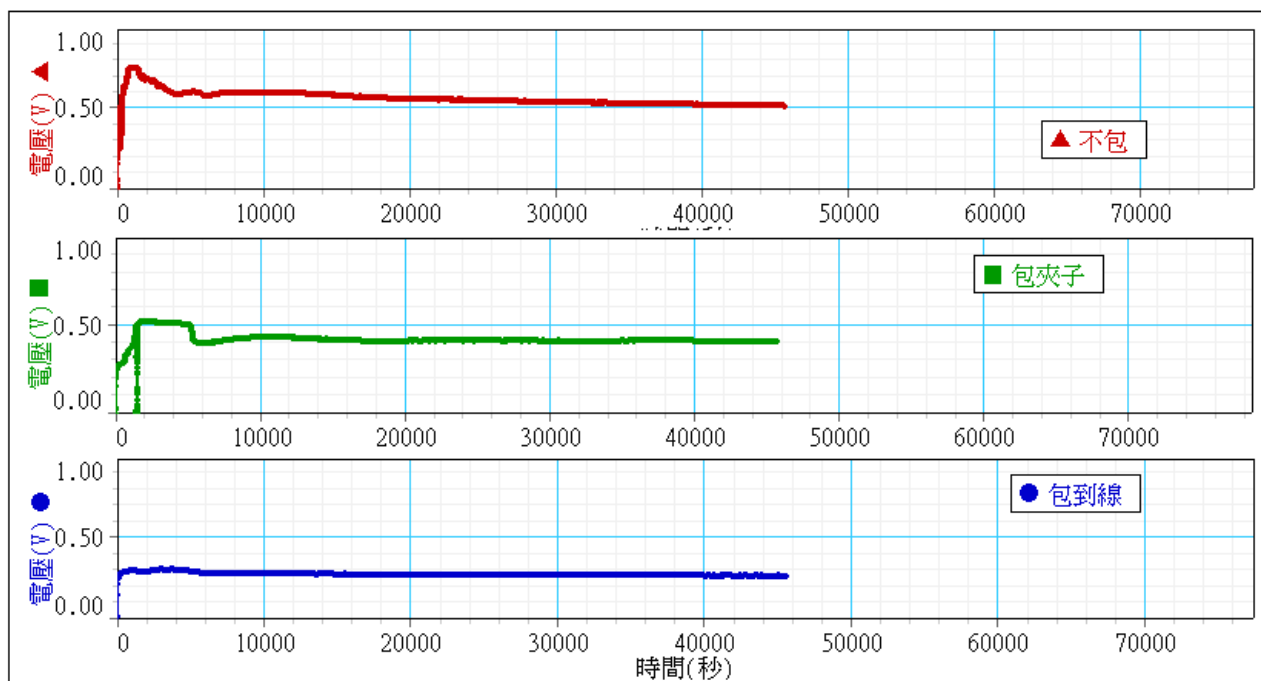
在此實驗中，我們在陽極電極上加裝塑膠套，如圖(十)，分別為不包、僅包夾子和包到電極上部，作為泡沫與電極接觸的差異。陽極酵母菌為同杯攪拌後取出，盡量使三杯活性相近，測試結果如圖(十一)、圖(十二)、表(七)。



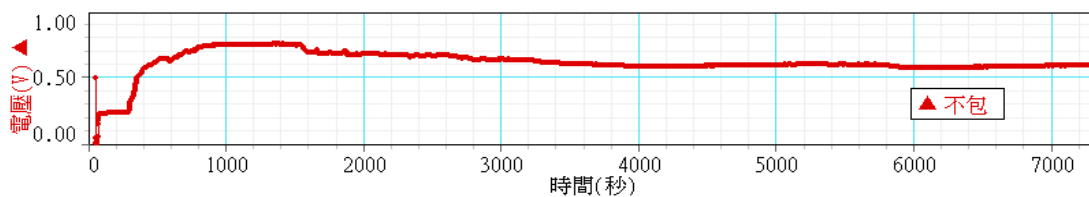
圖(十)：包膠套裝置示意圖

表(七)：不同包覆狀況的電壓

	前 5 分鐘的電壓 (無泡沫觸及)	泡沫湧起後最高電壓
不包	0.272	0.785
包夾子	0.294	0.531
包到線	0.289	



圖(十一)：不同包覆狀況的電壓曲線



圖(十二)：不包膠套電池前 7000 秒電壓

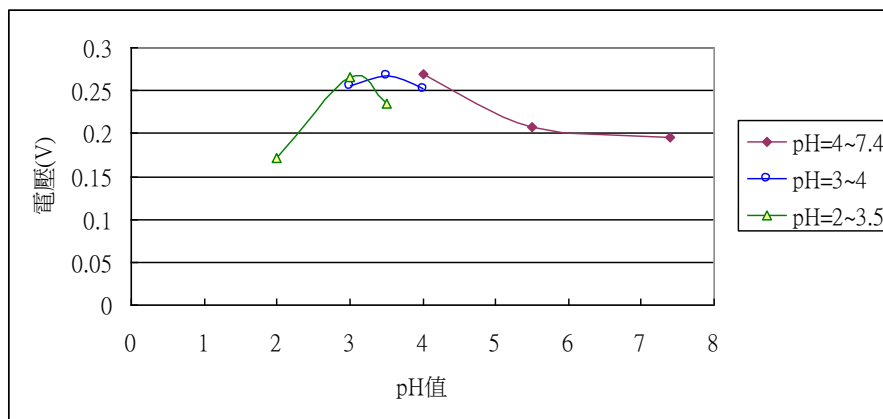
- 1、我們發現三組電池在組裝完畢後的前幾分鐘，均能形成一個平均電壓 0.279V 的平台，如圖（十二）中前 200 秒左右的電壓；隨著泡沫不斷湧升觸及鐵夾，不包膠套的電池對應到的電壓急遽升高達 0.785V，包夾子的電池在泡沫淹到夾子時並沒有直接劇升，延遲數分鐘後才出現高峰，我們認為這可能是包覆不夠緊密，泡沫過了一段時間後滲入所致，但同時包到線的電池卻依然維持平穩。
- 2、大約在 1000 秒之後，泡沫開始坍塌，夾子上附著的菌液逐漸乾掉，此時可以看到電壓下降，慢慢回復平穩，但並沒有降回驟升前的平台電壓，應是鐵夾仍潮濕持續丟電子的緣故。由此實驗我們得知，未包電極的電池所得第一高峰電壓並非酵母菌丟電子所造成，而是鐵夾在潮濕偏酸的环境下，氧化丟出電子之故，所以未來實驗將用膠片包覆陽極（包到線），以避免泡沫的干擾。

八、緩衝溶液酸鹼度對酵母菌電池的影響(白金電極)

在統整酵母菌生長相關文獻之後，我們發現酵母菌發酵會因不同品種而有不同的最佳狀況，大部分的文獻直接採用弱酸環境培養^[7-9]，然亦有資料指出酵母菌在 pH=2 至 pH=12 的情況下皆可存活，又以弱鹼環境較好^[10-11]。為了找出最適合本次使用酵母菌乾粉發電的環境，我們用不同酸鹼度的磷酸緩衝溶液作為溶劑，配成 0.2M 葡萄糖液，加入 2g 酵母進行測試，所得結果如表(八)。

表（八）：緩衝溶液酸鹼度對酵母菌電池的影響

	pH 值	2	3	3.5	4	5.5	7.4
第一次	電 壓 差 (V)				0.276	0.214	0.197
第二次					0.251	0.191	0.190
第三次					0.307	0.216	0.198
平均					0.270	0.207	0.195
第一次			0.249	0.263	0.249		
第二次			0.243	0.284	0.308		
第三次			0.276	0.254	0.198		
平均			0.256	0.267	0.252		
第一次			0.185	0.260	0.201		
第二次			0.157	0.266	0.266		
第三次			0.174	0.269	0.237		
平均			0.172	0.265	0.235		



圖（十三）：緩衝溶液酸鹼度對酵母菌電池的影響

由於未能找到恆溫槽控溫，因此我們只能用同一次（同時測試）的實驗結果比較，找出趨勢。若將三次結果平均之後做圖，得圖（十三），由圖可看出本次使用酵母菌乾粉偏好弱酸環境，在 pH=3 至 pH=3.5 的緩衝溶液中能得到相對高的電壓。

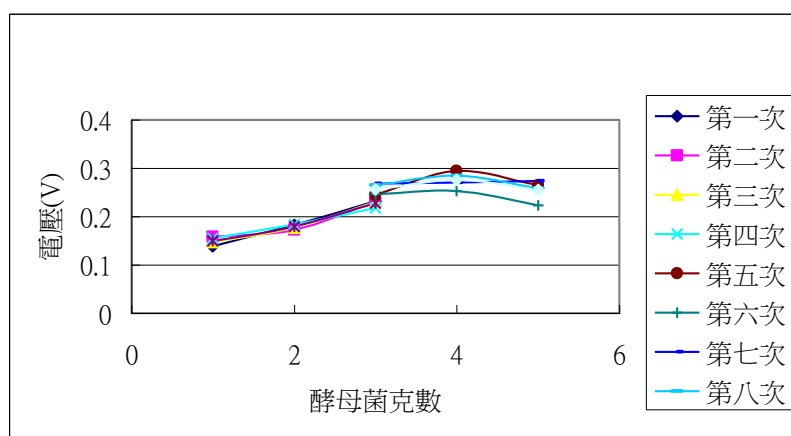
九、開放式系統酵母菌克數對電壓的影響(白金電極)

待緩衝溶液電池裝置達穩定後，於陽極加入 1.44 克的葡萄糖使其濃度為 0.4M，分

別加入 1g、2g、3g 或 3g、4g、5g 乾粉酵母，攪拌均勻後開始記錄電壓，測試結果如表（九）、圖（十四）。

表（九）：酵母菌克數對電壓的影響

V \ 克	1g	2g	3g	4g	5g
第一次	0.139	0.182	0.232		
第二次	0.158	0.173	0.231		
第三次	0.147	0.177	0.23		
第四次	0.155	0.183	0.218		
平均	0.150	0.179	0.228		
第五次			0.245	0.295	0.265
第六次			0.246	0.253	0.223
第七次			0.268	0.27	0.274
第八次			0.265	0.285	0.258
平均			0.256	0.276	0.255



圖（十四）：酵母菌克數對電壓的影響

- 1、在 pH=4.0、0.4M 葡萄糖的緩衝溶液中，加入 1~4g 乾粉酵母菌，所得電壓會隨著克數增加而增高；而 5g 酵母菌電池發電效果卻有下降趨勢，可能原因應是我們的陽極槽不夠大，5g 以上因克數太多以致溢出菌液較多，發電的總菌數反而減

少，於是電壓下降。

- 2、雖然此實驗顯示 4g 酵母菌所得電壓較大，但放入 3 克以上的酵母菌後發酵冒泡，溶液溢出情形嚴重，因此仍選用 2 克酵母作其他的測試。



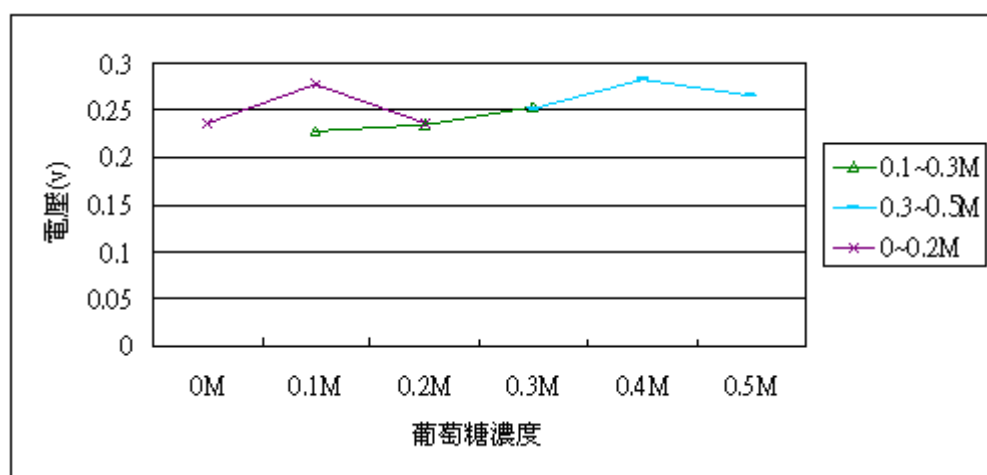
圖（十五）：0.4M 葡萄糖溶液加 5g 酵母菌發泡溢出的情形

十、開放系統葡萄糖濃度對酵母菌電池的影響(白金電極)

酵母菌發酵的程度會受到糖濃度的影響，當糖濃度在5%以下時，有促進發酵的效果，但超過5%則會抑制酵母菌的增長^[12]。我們改變陽極槽葡萄糖濃度，試圖找出2g酵母菌最適合的養分濃度，實驗結果如表(十)。

表（十）：葡萄糖濃度對 2g 酵母菌電池的影響

日期	0M	0.1M	0.2M	0.3M	0.4M	0.5M
3/31早		0.234	0.201	0.206		
4/1午		0.219	0.257	0.271		
4/1晚		0.233	0.245	0.286		
平均		0.229	0.234	0.254		
4/2晚-1				0.276	0.309	0.293
4/2晚-2				0.244	0.270	0.291
4/3晚-1				0.236	0.270	0.214
平均				0.252	0.283	0.266
4/7午-1	0.263	0.288	0.278			
4/7午-3	0.263	0.289	0.280			
4/7-晚	0.182	0.258	0.153			
平均	0.236	0.278	0.237			



圖（十六）：葡萄糖濃度對2g酵母菌電池的影響

- 1、將表（十）的結果平均後繪得圖（十六），因溫度、濕度及通風狀況的不同，因此僅能由圖中看出同一條曲線的電壓趨勢，三線之縱軸相對位置不可參考。
- 2、結果顯示，在葡萄糖濃度0.1M—0.4M（重量百分濃度約1.8%—7.2%）之間，酵母

菌發電效果會隨著糖濃度的增加而提昇，但相差不大，甚至0.1M和0.2M應算是差不多的（兩個趨勢線顛倒），且酵母菌在沒有外加糖份（僅有緩衝溶液）的狀況下仍能得到電壓（有發酵酸味，但味道較淡，且無泡沫）。

- 3、因為給酵母菌的糖量越多，發泡情形越嚴重，所以為了節省藥品及抑制發泡，我們以後的實驗將以 0.1M 葡萄糖緩衝溶液為實驗條件。

十一、開放式系統甲基藍的影響(碳棒電極)

(一) 甲基藍對電壓的影響

我們在論文^[13]中查到甲基藍對微生物燃料電池可以發揮電子梭的作用，「高瞻自然科學教學資源平台」^[1]中也提到要在酵母菌電池中加入甲基藍，但論文^[13]中又提到發酵型微生物不需要電子梭。為驗證在酵母菌電池添加甲基藍是否會有好的影響，故作此實驗。

在加入甲基藍前，我們先測試兩極皆緩衝溶液時造成的電壓，待緩衝溶液電池裝置達穩定後，於陽極溶液中添加 0.5 毫升 0.05M 的甲基藍溶液（為了不影響緩衝溶液濃度，因此甲基藍溶液用緩衝溶液配製），測試結果如表（十一）。

表（十一）：甲基藍對電壓的影響

全新碳棒	1	2	3	平均
電位差(V)	0.008	0.005	0.004	0.0056

結果顯示在無酵母菌時甲基藍對電壓的影響並不顯著，此符合甲基藍電子梭的特性，若無生物參與發電，即無電子梭功能可言。

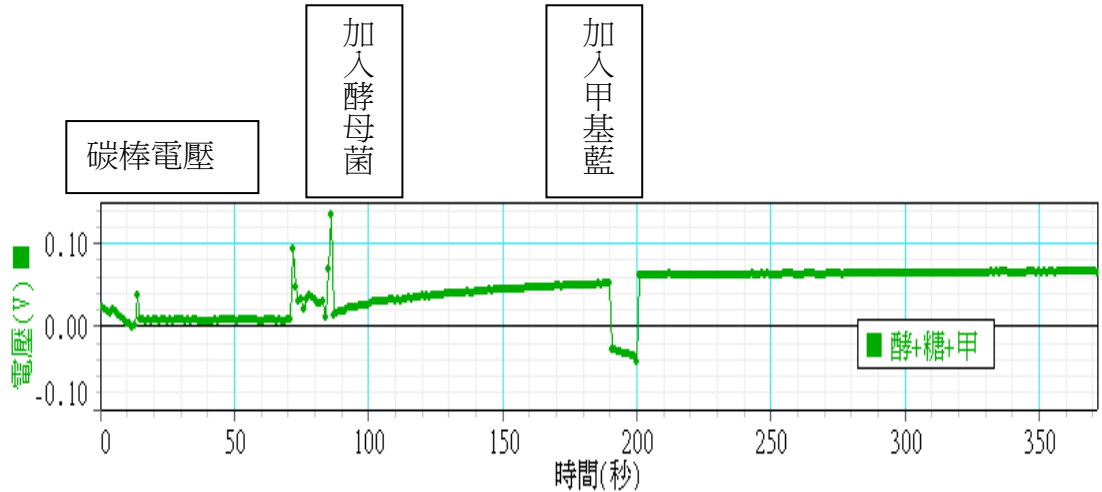
(二) 甲基藍對酵母菌電池的影響

1、發電初期即加入甲基藍

緩衝溶液電池裝置達穩定之後於陽極加入 1.8 克的葡萄糖使其濃度為 0.5M，攪拌均勻後再加入 1g 乾粉酵母，之後隨即添加 0.5mL 0.05M 的甲基藍緩衝溶液，使陽極甲基藍濃度約為 $1.25 \times 10^{-3} \text{M}$ ，稍微攪拌使溶液混合均勻（手動攪拌 10 圈），偵測產生的電位差，結果如表（十二）、圖（十七）。

表（十二）：甲基藍與酵母菌同時置入陽極

	第一次	第二次	第三次
電位差(甲+酵)	0.077	0.089	0.084



圖（十七）：發電初期加入甲基藍的情形

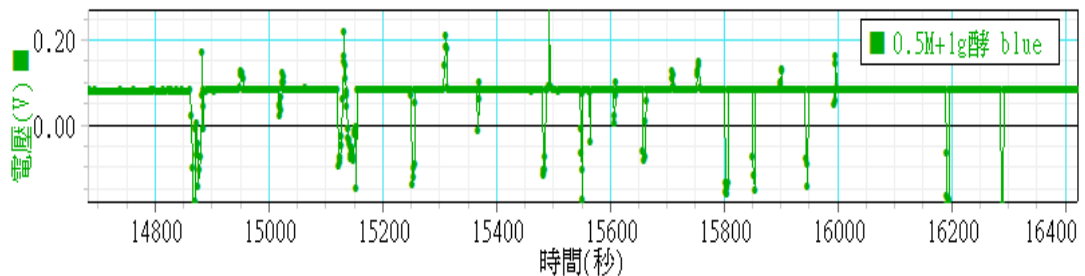
圖（十七）中，50 秒左右的平穩電壓為碳棒的電壓，約 100 秒後於陽極加入酵母菌液，200 秒時加入甲基藍。卻看不出甲基藍有何特別的影響。

2、電壓平穩後甲基藍對酵母電池的影響

待緩衝溶液電池裝置電壓達穩定後，將陽極更換為酵母菌緩衝溶液（1g 酵母/0.5M 葡萄糖緩衝液），待電壓達穩定後，逐次添加 0.02mL 0.05M 的甲基藍溶液，進行測試，結果如表（十三）、圖（十八）。

表(十三)：電壓平穩後甲基藍對酵母電池的影響

	第一次	第二次	第三次
V 酵 max	0.051	0.078	0.183
V 甲(第 22 管)	0.054	0.087	0.182
$\Delta V_{甲}(V_{甲}-V_{酵})$	0.003	0.009	-0.001



圖（十八）：電壓平穩後甲基藍對酵母電池電壓的影響

1、在酵母菌發電平穩的基礎下，逐滴加入 0.05M 0.02mL 的甲基藍，幾乎沒有造成影

響，即使滴了 22 次（電壓晃動點表示加入一次甲基藍溶液），陽極槽甲基藍濃度達 $1.1 \times 10^{-3} \text{ M}$ 電壓差只有約 0.005V，不見其功效。

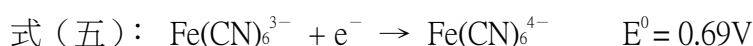
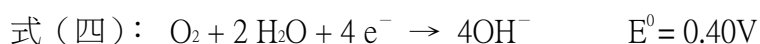
- 2、原本我們期望若甲基藍有發揮電子梭的功能，應在圖形上看到電壓瞬間升高或是曲線斜率變大的情形，但上述的二結果均未出現，表示在本系統中甲基藍並未發生電子梭的功能，驗證了發酵型微生物不需要電子梭。

十二、開放系統赤血鹽的影響(碳棒電極、pH=7.4)

(一) 赤血鹽對電壓的影響

1、原始空白測試

我們在文獻^[14]中查到氧氣和赤血鹽在酵母電池陰極槽可以作為電子最終的接受者，其個別的反應和還原電位如式（四）和式（五）。使用氧氣的好處是對自然和生物無害的特性，但論文中也提到使用赤血鹽的當電子接受者的微生物電池，其單位面積的產電功率較使用溶氧的電池高，亦即單位面積赤血鹽電池產生的電功率較高，所以我們選擇使用赤血鹽作為電子接受者，期望能得到較高的電位差。



待緩衝溶液電池裝置達穩定後，在 20mL 陰極溶液加入 0.1M 赤血鹽 1mL(在陰極溶液中為約 $5 \times 10^{-3} \text{ M}$)後進行測試（為了不影響緩衝溶液濃度，因此赤血鹽溶液用緩衝溶液配製），結果如表(十四)。

表(十四)：赤血鹽對電壓的影響

次數	1	2	3	4	平均
ΔV	0.100	0.089	0.093	0.095	0.094

- (1) 由表(十四)的結果顯示，赤血鹽加入前後的平均電壓差異約為 0.094V，造成電壓增加的原因可能為赤血鹽在陰極得電子，另外赤血鹽的加入使溶液的導電性增加，亦可能造成電壓上升。

- (2) 赤血鹽擴散均勻後，若用碳棒擾動赤血鹽溶液，電壓瞬間驟升，隨即緩降，我們推測這是因為陰極溶氧增加的關係，因為氧氣和赤血鹽都會搶電子，故

攪拌瞬間電壓突升，但隨即緩降至略同於上升前電壓。

2、補測空白測試

在後來「電壓平穩後赤血鹽對酵母電池影響」的實驗中，我們找出陰極赤血鹽最佳濃度為 $1.22 \times 10^{-2} \text{M}$ ，於是補作了此濃度的空白測試以茲比較。測試結果如表(十五)。

表(十五)：赤血鹽對電壓的影響

次數	1	2	3	4	平均
ΔV	0.148	0.108	0.142	0.134	0.133

由表(十五)中可以看出 $1.22 \times 10^{-2} \text{M}$ 的赤血鹽溶液即可造成平均 0.133V 的電壓。

(二) 赤血鹽對酵母菌電池的影響

1、赤血鹽與酵母菌分別同時加入陰、陽極

進行空白實驗，待緩衝溶液電池裝置達穩定後得 V_0 ；於陽極加入 1.8 克的葡萄糖使其濃度為 0.5M，攪拌均勻後再加入 1g 乾粉酵母，同時在陰極加入 0.1M 赤血鹽 1mL(在 20 mL 緩衝溶液中赤血鹽濃度約為 0.005M)，待電壓達穩定後偵測 V_f ，結果如表(十六)。

表(十六)：赤血鹽對酵母菌電池電壓的影響

	第一杯	第二杯	第三杯
V_0	0.076	0.048	0.024
V_f (穩定後)	0.224	0.228	0.219
ΔV	0.148	0.180	0.195

(1) 先前單純做赤血鹽對電壓的影響時，電壓會因為攪拌而驟升再緩降，為避免攪拌造成的誤差，此次實驗只在滴入赤血鹽後攪拌一次，控制在五圈內使赤血鹽分布均勻即任其自由擴散。

(2) 加入赤血鹽後，最大電壓和空白的電壓差普遍比沒加赤血鹽的酵母菌電池高許多，可見赤血鹽確實可以使電壓上升。

(3) 為了排除酵母菌活性不同造成的電壓上升誤記為赤血鹽的影響，我們在同
時加入的實驗後，利用「酵母菌達穩定電壓後再加入赤血鹽」做測試。

2、電壓平穩後赤血鹽對酵母電池的影響

陽極為 1g 乾粉酵母溶於 20mL 0.5M 糖水緩衝液，陰極只有緩衝溶液，攪拌
均勻後再加入 1g 乾粉酵母，待電壓穩定後(約 10 小時)，記錄平穩時電壓 V_i 。待
酵母菌電池電壓平穩後，在陰極逐次加入 0.1mL 0.5M 赤血鹽緩衝溶液，滴入後用
碳棒攪拌均勻(手動攪拌十圈)，重複實驗多次，直到滴加赤血鹽無法使電壓上升
為止，結果如表(十七)、圖(十九)、圖(二十)。

表 (十七) : 電壓平穩後赤血鹽對酵母電池的影響

	V_i	第一次	第二次	第三次	第四次	第五次	第六次 (V)	$V_f - V_i$
赤血鹽濃度 ($10^{-3}M$)	0	2.5	5	7.5	10	12.2	14.56	
第一杯	0.046	0.110	0.183	0.211	0.227	0.227	0.225	0.179
第二杯	0.134	0.214	0.245	0.260	0.273	0.279	0.281	0.147
第三杯	0.143	0.229	0.256	0.267	0.278	0.286	0.287	0.144

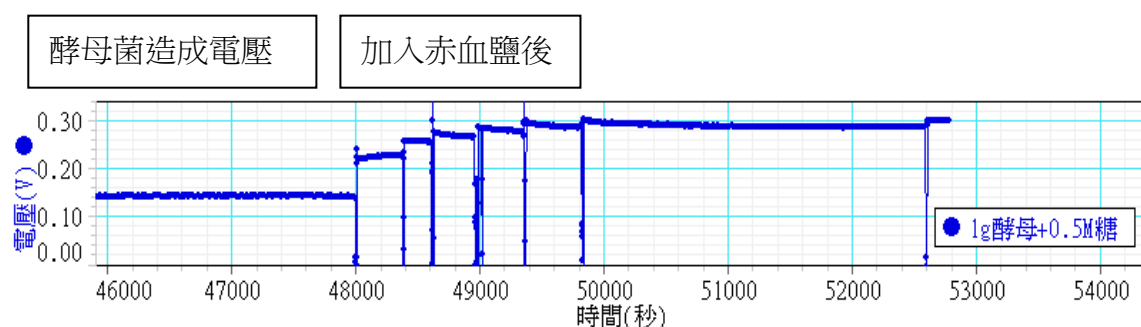
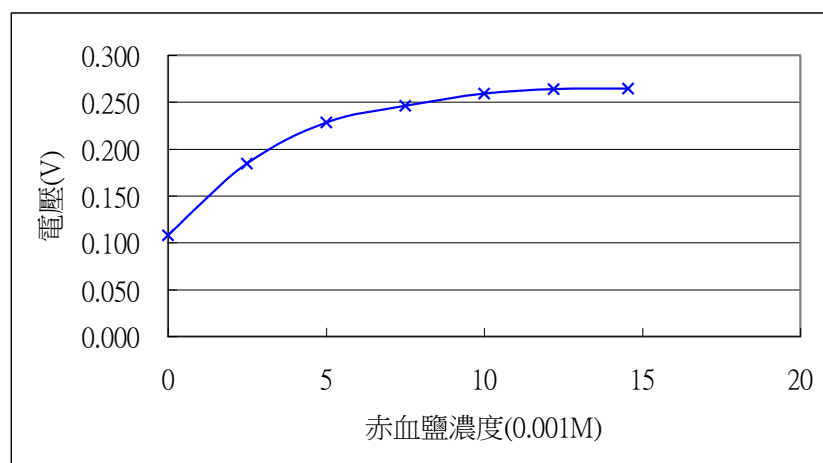


圖 (十九) : 逐次滴入赤血鹽的影響(圖中兩晃動間代表加入赤血鹽)



圖（二十）：電壓平穩後赤血鹽對酵母電池的影響

由圖(二十)來看，在赤血鹽濃度 $1.22 \times 10^{-2} \text{M}$ 以內，赤血鹽濃度越高，電壓值越大，但隨著陰極槽赤血鹽濃度的增加，再滴入赤血鹽的影響減少。

由表(十七)的結果顯示，赤血鹽對酵母菌電池所造成的電壓差平均約為 0.157V ，比 $1.22 \times 10^{-2} \text{M}$ 赤血鹽本身對電壓的影響平均值 0.133V （見表(十五)）高出了 0.024V ，由此可見在有添加赤血鹽的酵母電池中，赤血鹽和酵母菌並不只是各自作用而電壓相加，我們認為赤血鹽應該可以促使電子在轉移過程更為迅速順暢。

十三、赤血鹽溶液溶氧量的影響(碳棒電極)

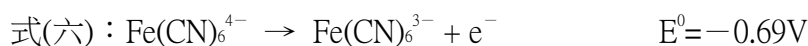
在赤血鹽對電壓的影響實驗中，我們發現在陰極碳棒擾動時，會有電壓升高的現象，我們推測此現象與陰極溶氧量有關，故設計以下實驗。實驗前先將 $1.22 \times 10^{-2} \text{M}$ 赤血鹽溶液分別灌氧、抽氣 15 分鐘，另一杯則保持原樣，將 2 克酵母菌置於 0.5M 緩衝糖液中活化 15 分鐘。在測定碳棒電壓後同時將陰極、陽極換成赤血鹽溶液及酵母菌溶液，然後開始測試，結果如表（十八）：

表（十八）：赤血鹽溶液溶氧量的影響

	灌氧 15 分鐘	原版	抽氣 15 分鐘
電壓 (V)	0.272	0.252	0.240
	0.247	0.237	0.229
	0.249	0.231	0.213

結果如表（十八），灌氧後所得電壓較高，與文獻^[14]中的敘述相符：當微生物

燃料電池赤血鹽濃度降低時，陰極接受電子的能力會下降，而還原後的亞鐵氰離子與水中正常溶氧反應氧化成三價鐵的能力因水中溶氧及低而變差（見式(六)~式(八)）。而在陰極打入充足氧氣，使得亞鐵氰化鉀氧化成鐵氰化鉀變得比較容易，恢復赤血鹽濃度，使得電子傳遞的效率增加，電壓升高。



十四、探討赤血鹽、導電度與酵母菌電池的關係(碳棒電極)

在「赤血鹽對酵母菌電池影響」的實驗中，我們發現在陰極加入赤血鹽可以造成電壓的大幅上升。為了確定加入赤血鹽的電壓上升是來自電池內部離子濃度增加，或是赤血鹽確實使電池電子傳導效率提升所致，我們設計了此實驗。我們本來想偵測加入赤血鹽前後緩衝溶液的導電度，但發現赤血鹽的離子濃度太高，導電度的偵測器無法感應，所以我們只能利用調整溶液的總離子濃度來控制導電度的差異。我們使離子濃度 B 組 = C 組 > A 組，如表（十九），陽極條件均為 2g 酵母溶於 20mL 緩衝糖水，測試結果如表(二十)。

表（十九）：陰極溶液成分表

全緩衝溶液(A)	氯化鉀(B)	赤血鹽(C)
20mL 緩衝溶液 +0.5mL 緩衝溶液	20mL 緩衝溶液 +0.5mL 1M 的 KCl 緩衝液	20mL 緩衝溶液 +0.5mL 0.5M 赤血鹽緩衝溶液

表（二十）：陰極電解質與酵母菌電池的關係

		全緩衝溶液(A)	氯化鉀(B)	赤血鹽(C)
電 壓 差 (V)	第一次	0.042	0.105	0.250
	第二次	0.067	0.114	0.217
	第三次	0.076	0.092	0.228
	平均	0.062	0.104	0.231

1、由表(二十)中電壓 B 組 > A 組，此結果與我們原先設想離子濃度愈高，電壓愈高的結果相同。

2、在 B 組與 C 組離子濃度相近的前提下，C 組比 B 組平均高 0.127V，由此我們可得知赤血鹽帶來的電壓遽升主要來自電子傳導效率提升，但仍有部份電壓差與電池內部導電度增加有關。

十五、赤血鹽對白金電極之酵母菌電池的影響(與 pH=7.4 之碳棒電極對照)

原本在陰極加入濃度為 $1.22 \times 10^{-2} \text{M}$ (pH=7.4) 的赤血鹽緩衝溶液，可以使碳棒酵母電池電壓升高平均 0.156V，但同樣濃度的赤血鹽 (pH=4.0) 加入白金酵母電池反而使電壓下降，如圖(二十一)(約 360 秒附近加入赤血鹽)，多次實驗結果亦然，為了釐清這個問題，我們作了以下的實驗。

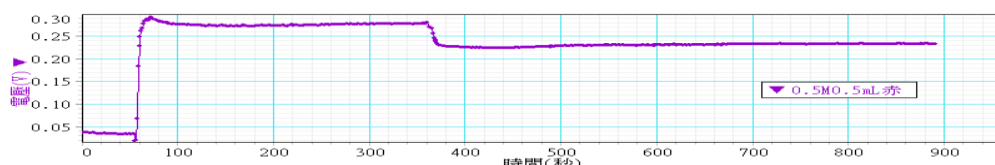


圖 (二十一)：赤血鹽對白金酵母電池的影響

實驗分為 pH=4.0 和 pH=7.4 兩種環境，每種環境又分為使用碳棒或白金當作電極，每次陽極均為 0.1M 葡萄糖緩衝溶液加入 2g 酵母菌，而陰極則在電壓平穩後分別加入 0.5M 0.5mL 的赤血鹽緩衝溶液，實驗結果如表(二十一)。

表 (二十一)：赤血鹽加入後對酵母菌電池造成的電壓變化

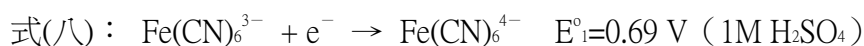
電極 \ pH 值	pH = 4.0	pH = 7.4
	$\Delta V(V)$	$\Delta V(V)$
白金	-0.038	+0.061
	-0.044	+0.084
	-0.043	+0.059
白金平均	-0.042	+0.068
碳棒	+0.028	+0.181
	+0.020	+0.145
	+0.037	+0.143
碳棒平均	+0.028	+0.156

由表(二十一)的結果可以發現：

(一)在碳棒電極系統中

1.無論其酸鹼環境，赤血鹽的存在均能使電壓提升，與所查得文獻^[14]相符，而提

升程度以 pH=7.4 時較高，顯示[H⁺]愈高，反而不利赤血鹽得電子。我們查了赤血鹽的還原電位發現下面兩種狀況^[16]：

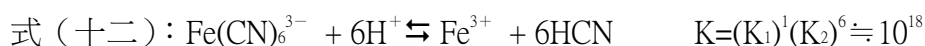


根據這二式推論，[H⁺]提高時，赤血鹽得電子能力增加，理應使電池電位增加較多，與實驗結果不相符。

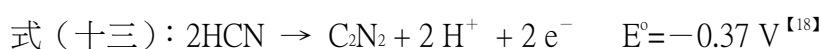
2. 我們考慮赤血鹽在酸性環境中可能發生的反應^[17]：



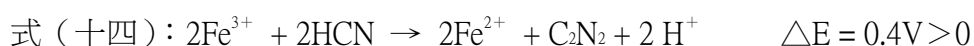
將上述兩式合併，得



在式(十二)中赤血鹽幾乎完全轉變為 Fe³⁺ (實驗觀察到 pH=4.0 的赤血鹽久置會變為棕褐色)。但 Fe³⁺ 得電子能力較赤血鹽強 (Fe³⁺ + e⁻ → Fe²⁺ E° = 0.77 V > 赤血鹽的 E° = 0.69 V)，理應使電壓增強更多才對。因此，我們尋找其它可能發生的反應：



雖然式(十三)中 HCN 不傾向丟電子，但 HCN 與 Fe³⁺ 混在同一溶液中，而

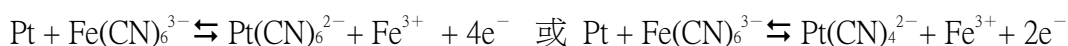


由此推測溶液中最後剩 C₂N₂ 可得電子 (E° = 0.37 V)，與赤血鹽得電子的 E° = 0.69 V 相比，顯然較弱。因此 pH=4.0 時，加入赤血鹽對電壓的影響較 pH=7.4 小。(目前正積極尋找偵測 C₂N₂ 的方法，以驗證此推論)

(二) 在白金電極系統中

依碳棒電極系統的結果，赤血鹽在 pH = 7.4 時，電壓提升的效果較好；而在白金電極系統時，亦是在 pH = 7.4 時上升較多，但赤血鹽對白金電極的電壓提升效果較碳棒電極時差很多，甚至在 pH = 4.0 時，出現使電壓下降的情形。

1. 原本我們懷疑白金是否會與赤血鹽發生如下反應：



但一直查不到此半反應的 E° 值，再加上分區比賽時，教授斬釘截鐵地告訴我們「不可能」，因此放棄此猜想。

2. 於是我們開始尋找陰極半電池中是否有任何可能放電子的雜質。查到純白金絲的純度約 99.95%，其中 0.05% 可能的雜質為銀 (Ag)、銻 (Rh)、鈦 (Ru)、鐵 (Os)。

我們將目標鎖定在較常見的銀上。

3. 在 pH = 7.4 時，赤血鹽在陰極中仍為 $\text{Fe}(\text{CN})_6^{3-}$ ，發揮正常的接電子功能；但此同時，考慮銀丟電子的半反應式(十五)，因 Ag^+ 受到 CN^- 配位的影響(式(十)、式(十六)、式(十七))而使銀的氧化電位變大，銀丟電子能力增強，抵銷酵母菌造成的電壓。然而整體而言，陰極仍以接電子的反應較明顯，故使電壓上升，但較碳棒小許多。



4. 在 pH = 4.0 時，如碳棒電極系統中所述，酸性環境下陰極以 C_2N_2 得電子為主，其得電子的能力比 $\text{Fe}(\text{CN})_6^{3-}$ 小，再加上剩餘的赤血鹽使銀丟電子能力增加，綜合作用下，使電池電壓不僅未提升反而下降。

5. 為了解銀在赤血鹽存在的環境下丟電子的狀況，我們將電極改為銀片，其餘實驗條件均與白金電極系統相同，待酵母電池電壓穩定後，加入 0.5M 0.5mL 的赤血鹽溶液，實驗結果如表(二十二)。

表 (二十二): 赤血鹽對銀電極酵母電池的影響

電極 \ pH 值	pH = 4.0 $\Delta V(\text{V})$	pH = 7.4 $\Delta V(\text{V})$
銀片	-0.044	-0.069
	-0.080	-0.096
	-0.077	-0.111
	-0.024	-0.042
	-0.065	-0.112
		-0.032
銀平均	-0.058	-0.077

由實驗結果發現，不論是 pH=4.0 或 7.4，在銀電極存在下，於陰極加入赤血鹽均使電壓下降，表示銀確實會造成陰極不易進行還原反應，藉此驗證第 3 點的推論。

另外我們在實驗中發現，使用銀電極的酵母電池需要較長的時間才能達到穩定電壓，加入赤血鹽後雖然均使電壓下降，但是下降程度差異頗大，或許又是銀片中其它金屬雜質所造成。

陸、結論

- 一、使用透析膜製造缺氧環境，電壓不升反降，證明酵母菌有氧呼吸時才有電子傳遞鏈。
- 二、緩衝溶液 pH=3 時，酵母菌電池電壓較高。
- 三、在 5 克以內，酵母菌克數越多，電壓越高，但發酵冒泡情形越嚴重，溶液會溢出，反而使發電效果下降。
- 四、在酵母菌電池中加入 0.4M 的葡萄糖能得到較高的電壓，但糖量越多，發酵冒泡情形越嚴重。
- 五、在本實驗中，酵母菌發電時，甲基藍並未擔任電子梭角色。
- 六、於含赤血鹽的碳棒陰極中灌入氧氣、抽氣和普通處理相比，灌氧 15 分鐘的電池電壓較高，而抽氣的電池電壓相對較低。
- 七、使用碳棒電極時，赤血鹽造成的電壓驟升包含導電度提高與電子傳導效率提升兩個原因，而且在 pH=4.0 的酸性環境下對電壓提升的效果較 pH=7.4 差。
- 八、使用白金電極時，赤血鹽在 pH=7.4 的環境中仍能提供微弱的電壓增高效果；但在 pH=4.0 時，因酸性環境與銀雜質的雙重影響，赤血鹽的加入反而使電壓下降。

柒、未來展望

- 一、找出 C_2N_2 的偵測方法，進一步驗證推論。
- 二、找出市售酵母菌乾粉添加物可能造成的電壓及影響。
- 三、赤血鹽有毒性，希望能將其替換為對環境無污染的物質。
- 四、觀測酵母菌電池的持久性。

捌、參考資料及其他

- 1、薛雨朋、葉名倉(民98)。簡易微生物燃料電池製作 (The Simple Microbial Fuel Cell)。高瞻自然科學教學資源平台。民國100年11月2日，取自：
<http://highscope.ch.ntu.edu.tw/wordpress/?p=3335>
- 2、余苑婷(民95)。操作條件對微生物燃料電池性能之影響。國立臺灣海洋大學河海工程學系碩士學位論文，臺北縣。
- 3、張恩愷(民97)。以藍菌結合聚苯胺/碳纖維電極開發光合作用/代謝生物燃料電池之研究。國立成功大學化學工程研究所碩士論文，台南縣。

- 4、王金玉(民96)。微生物燃料電池的原理。
- 5、何念萱、陳昕臨、張藍心、劉瑞臻(民96)。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高中組化學科作品說明書。臺中女子高級中學。
- 6、嗜甜發電廠。劉哲安、王冰、張維軒、黃亭諭(民 99)。中華民國第 50 屆中小學科學展覽會國中組化學科作品說明書。臺北縣私立南山高級中學(附設國中)
- 7、黃新展(民99)。甜高粱育種、病害防治及酒精醱酵研究。亞洲大學保健營養生技學系博碩士論文，台中市。
- 8、黃常恩(民100)。提升酵母菌之葡萄糖利用率以應用於高溫發酵生產酒精之研究。大同大學生物工程研究所碩士論文，台北市。
- 9、鄭伊芳(民 95)。嗜高溫放線菌木聚糖酶基因及人類芳香酶基因在嗜甲醇酵母菌中之表現。臺灣大學微生物與生化學研究所博士學位論文，台北市。
- 10、蔡月鳳、簡秋源(民 67)。兩種酵母菌型態之生理和發酵能力之研究。師大生物學報第十三期，第 1-8 頁。
- 11、楊淑惠、溫宏治(民 93)。不同酵母菌應用於金香葡萄釀酒之研究。中華農業研究(J. Agric. Res. China)第 51 卷第三期，第 56-72 頁。
- 12、徐華強、黃登訓、謝建一、顧德材 (民 96)實用麵包製作技術。中華穀類研究所。202-207 頁，臺北縣。
- 13、賴建甫(民 98)。底泥微生物燃料電池之建置及探討。逢甲大學環境工程與科學學系碩士論文，台中市。
- 14、許株綾(民 95)。探討操作參數影響高外電阻微生物燃料電池之績效。國立臺灣海洋大學河海工程學系碩士學位論文，臺北縣。
- 15、高敏修(民 99 年)。利用微生物燃料電池降解石油碳氫化合物及其產電能力研究。國立雲林科技大學環境與安全衛生工程系碩士班碩士論文，雲林縣。
- 16、葉名倉。高中選修化學下。南一版，p.137~138。
- 17、DARRELL D.EBBING .GENERAL CHEMISTRY ,third edition. Wayne State University.A-21
- 18、EDWARD J. KING(1989) , Qualitative Analysis and Electrolytic Solutions.Barnard College , Columbia University publishing. p610

【評語】 040201

本作品研究生物燃料電池具有環保的概念，惟研究中缺乏對溫度的控制，且電極雜質對電壓的影響與酵母菌的定量都宜再改善，以增加作品的參考價值。