

中華民國第 64 屆中小學科學展覽會

作品說明書

高級中等學校組 工程學(二)科

團隊合作獎

052401

陽光氫鬆產能

學校名稱：桃園市立觀音高級中等學校

作者： 高二 游智皓 高二 梁家恩 高二 蔣天翊	指導老師： 林仟弘 陳婉縈
---	-----------------------------

關鍵詞：氫能、淨零碳排、潔淨能源

摘要

本研究旨在製作一套利用太陽能為動力的電解水製氫裝置，探討影響製氫效率的因素，並進行裝置優化。首先，為減少歐姆過電位來提高能量轉換效能，我們創造雙層圓筒式電極以最小化兩極距離，並利用較便宜的碳材來確認此電極型態確實可順利運作後，再改電極為發泡鎳，以降低活化過電位。而濃度極化所造成的過電位，則是利用離子交換膜及外接馬達抽換電解液的方式克服。常溫下，鎳為電極，當 KOH 濃度為 35%、0.25A（1.8V），製氫的能量轉換率最佳，為 271.6L/kW · hr。

透過優化裝置的設計解決了早期漏液、補水等問題，且改良後裝置採共用電解液和可調節電極數量的設計，提高實用度。最後，建立 IoT 系統來控制抽換電解液的間隔時間，使裝置達自動化且增加效能。

壹、前言

一、研究動機

一直以來人們為獲取能量而燃燒大量化石燃料，對環境、生態、氣候都已造成不可回復的傷害，而為減緩、阻止這些損害，聯合國在 2015 年宣布了「2030 永續發展目標」（Sustainable Development Goals, SDGs），在這 2030 年前需努力的 17 項核心目標中，第 7 項便為「可負擔的潔淨能源」（張珍悅、徐勝一，2010）。甚至國際間還有一項更艱難的目標——「2050 年淨零碳排」（Net Zero），即全球人為排放的溫室氣體量扣掉人為移除的量後，使其值為零。可知開發、拓展「潔淨能源」是目前台灣及國際間都刻不容緩且竭力進行的任務。

氫氣被視為終極潔淨能源，是各國實現淨零碳排願景的重要戰略選項，國際能源署（International Energy Agency, IEA）指出若全球於 2050 年實現淨零碳排，預估氫能占全球整體能源供給比例將達 13%，全球的氫氣需求量增至目前的 6 倍，達 5.3 億噸，這大幅度增加的氫氣需求量預告著我們將進入氫能新時代。而行政院也預計於 2050 年讓氫能發電占總發電量的 9~12%（經濟部，2023）。因此，「製氫」是我們邁向潔淨能源、淨零碳排的第一步，我們計畫製作以再生能源來製氫的簡易裝置，藉由太陽能發電來提供製造氫氣所需要的能量，減少一般製備氫氣時所花費的大量電力、碳排放及環境成本。透過電解水產氫，我們能夠大幅降低原料成本，同時避免其他有污染性的副產物的產生，確保我們的裝置在運作時符合零

碳排放和低污染的要求。這樣的努力對於實現全球淨零碳排放的目標至關重要，儘管微弱，但也比什麼都不做來得好，我們相信星火終究是能燎原的。

二、研究目的

- （一）了解氫能種類、製備等相關過程。
- （二）製作一裝置，能以再生能源作為電力來源供電解水製氫。
- （三）探討不同濃度下 KOH 電解液及不同工作電流、溫度時，分別對裝置製氫的影響。
- （四）探討不同種類、型態的電極材料時，製氫效能為何，且找出最佳工作電流、溫度。
- （五）分析實驗數據，改良或佳化裝置。

三、文獻回顧

（一）氫能是什麼？

氫能是以氫氣作為能源存在的一種形式，它的能量是透過將氫氣利用在燃料電池中，將化學能轉換為電能，反應式為 $2\text{H}_{2(g)} + \text{O}_{2(g)} \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}_{(l)}$ 。這種轉換過程是相對溫和的氧化還原反應，不像劇烈的燃燒反應那樣危險。由於其唯一的產物是水，故氫能被認為是其中一種真正能夠達到國際 2050 淨零碳排目標的能源，具有高效能轉換的特性（林茂文，2022）。在全球氣候變遷的挑戰下，國際間將氫能視為未來能源轉型的關鍵，是最有潛力的潔淨能源之一。

（二）氫能的優勢

1、具儲存能源的功能：

各國以 2050 年淨零碳排為目標，如火如荼地發展再生能源，但再生能源於供應上具不穩定性，如太陽能、風能等，這些一次能源是大自然現象非人為可以控制的，在未來，再生能源佔發電比率會增加，對儲能的需求會越來越大，欲調節氫能轉換時所產生的水可以透過電解的方式再生成氫，資源循環使用，也可作為再生能源的補充，彌補再生能源間歇性和不穩定性的問題。例如，當太陽能和風能供應不足時，可使用

過剩的電力來生產氫，然後在需要時將其轉換回電能，從而實現能源的平衡和穩定供應。氫儲能時效性比其他儲能材料長，儲能是未來能源戰中，最受矚目的焦點之一。

2、高效率能源轉換、高能量密度：

氫能的利用需透過燃料電池運作，可直接從化學能轉換為電能，省略了繁雜的能量型式轉換步驟，也不需經過易損耗能量的熱能轉換形式，故與傳統火力、核能發電相比，能量轉換效率高（管衍德，2010）。又氫氣的分子量最小的氣體，故具有高能量密度的特點。氫氣透過氫燃料電池每公斤產生的能量，是石油的 3 倍、天然氣的 5 倍（唐可欣，2023）。

3、淨零碳排、低噪音、低汙染：

產物只有水，達到零碳排、低汙染的目的，具潔淨能源、綠能應有的特性。不會有像火力發電的溫室效應、酸雨問題及核能發電的核廢料困擾。且在轉換成電力的過程為靜態化學反應，無須動力引擎或機械，故不像傳統發電會有嚴重的噪音問題。

4、多應用性：

氫能的作用不僅發電，還可以應用於較為廣泛的領域，例如交通運輸（汽車、公共交通工具、船舶、飛機等）、工業用途（包括化工、製造業等）、暖通設施（如供暖和熱水），以及儲能系統等。多樣化的應用使氫能在各領域都有巨大的發展潛力。

（三）氫能的劣勢

1、安全性疑慮：

氫氣易燃，且具爆炸威脅性，有安全疑慮的問題，故儲存與輸送時皆需嚴密的外洩檢測技術與機制，是目前迫切待建立與發展的。由於氫能是一種新興的能源形式，公眾對其安全性、可靠性和經濟性尚存疑慮，影響其接受度和推廣程度。

2、高設備成本、極低溫的運送條件：

為高效率運輸氫氣，氫氣需以液態方式運輸，其在 -253°C 下方能完全液化（陳怡如，2022），連輸送全程都需維持此嚴苛的低溫環境並配有防爆裝置，且重複加壓液化，不僅耗能，轉換時還會損失部分氫氣，這些都使成本提高。又氫分子因尺寸極

小，可進入金屬晶體結構中，而脆化金屬，是為「氫脆」。故氫氣的運輸管線、儲存槽等周邊設備都需使用鋼材，使設備成本高（左峻德，2023）。

3、氫燃料電池的技術限制：

氫氣需藉由燃料電池來轉化成能量，但燃料電池除昂貴的白金電極外，高純度的需氫條件也是成本居高不下的原因之一，尚有功率低，不太適用於汽車等大功率輸出的缺點，其採用的質子交換膜技術僅能維持電池幾千小時的使用，壽命短（鐘金明，2020）。因此氫能崛起後，如何突破燃料電池發展的瓶頸也被上升為國家戰略領域。

（四）氫氣的製備與分類

1、氫氣的製備

（1）化學重組法：

重組反應是利用觸媒以化學方式將燃料中之氫原子取出產生氫氣，即利用化石燃料如天然氣（甲烷）與高溫水蒸氣進行化學斷鍵、重新排列反應，生成氫氣、一氧化碳、二氧化碳等氣體，再提取氫氣。此法製氫所需的能量比下述的電解法還少，是目前工業最常用的製氫方式。

（2）電解法：

藉由電解水進行氧化還原反應來生成氫氣，因水導電性較差，故須加電解質以提高導電效率，如氫氧化鉀。副產物為氧氣，無污染性，零碳排。若搭配再生能源作為電解的電力來源，可實現真正的綠能，且原料為水不只取得容易，更可持續性循環使用，有望在應對減緩氣候變遷、減少對化石燃料依賴、淨零碳排時扮演關鍵角色，實現我們對於「永續」的想像。各國將此製氫法列為重要潔淨能源目標。

2、氫氣的分類

雖然氫氣本身沒有顏色，但通常會以顏色來區別不同製備方式的氫，我們整理常見的各顏色氫氣資料，如表 1 所示。

表 1

製備各種類氫的方法和優、缺點分析

種類	製備法	性質與製程的能量來源	碳排放情形	優點	缺點
灰氫	化學重組	燃燒化石燃料	高碳排放量	易取得，技術成熟，目前最為常見的氫氣種類 低成本、產量大	高污染性、排碳量多、動力來源非再生能源
藍氫	化學重組	燃燒化石燃料後，經碳捕捉技術減少碳排放	經碳捕捉，可降低碳排放量	擁有灰氫的優點，且比灰氫更環保	藍氫雖經碳捕捉，但電力來源仍是非再生能源
褐氫	化學重組或電解法	燃燒煤	高碳排放量	易取得，技術成熟	污染性高
綠氫	電解法	再生能源	零碳排	零碳排，持續性產氫，日後氫能發展主力	成本高，難普及至工業
粉氫	電解法	核能	零碳排	核能可提供更多能源	核能具爭議性

來源：研究者自行整理

（五）國際與台灣的氫能發展

全球在淨零碳排的目標下，氫能因具儲能、零碳排、持續穩定輸出的優勢，被各國認為是當前能源轉型的關鍵角色，在未來，擁有越多潔淨能源的國家越有機會掌握世界話語權，因此各國都積極提前布局氫能發展，如日本砸下重金發展氫能產業鏈，預計在 2050 年將氫能占總電力的比率提高至 10%。

台灣在 2022 年已將氫能納入「淨零 12 項關鍵戰略」中的重點項目之一，由行政院建立「氫能推動小組」，從氫氣應用、供給、基礎設施上，布局、推動氫能措施，目標在 2050 年將氫能占總電力的比率由 1% 提升至 9~12%（經濟部，2023）。台灣目前的氫氣來源有 96% 以上屬於天然氣重組，因國內大多從國外進口的方式獲得天然氣（經濟部，2023），接收站與儲存槽量能有限，缺乏液氫船的運送基礎設施，且皆非「綠氫」。未來如何取得穩定綠氫來源，將是我國為未來發展氫能須突破的挑戰。

（六）過電位

電解水時，需使用比理論電壓 1.23V 更高的電壓才能發生電解，這種現象稱為過電位（overpotential）或極化現象（polarization）。以電位的觀點來看，就是電極偏離平衡電位，造成不可逆的能量損失稱之。極化的類型包括：控制電荷傳遞步驟的活性極化

(Activation Polarization, η_a)；由電解液的電阻或電極內部所產生之電位降，稱為歐姆極化 (Ohmic Polarization, η_o)；因濃度梯度存在而導致的濃度極化 (Concentration Polarization, η_c)。此整個電極反應受極化現象所造成的的能量損失可表示如下：
 $E_{lose} = \eta_a + \eta_o + \eta_c$ (黃雅君，2003)。

貳、研究設備及器材

一、研究設備

表 2

研究設備整理列表


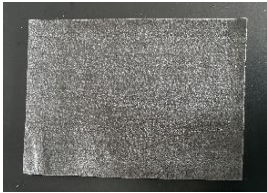
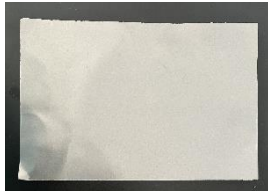

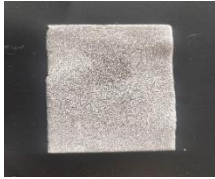
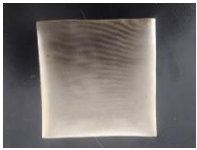
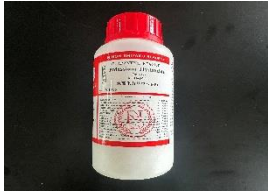


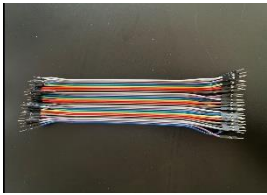






3D 建模機	超音波震盪機	直流電流供應器	三用電表
			
太陽能板	太陽能蓄電池	筆電	電子天平
			
電鑽機	熱熔膠槍	自動補水裝置	沉水馬達
			 流速 1000 L/hr、功率 8W

來源：研究者自行拍攝整理

二、實驗器材

表 3

實驗器材整理列表

碳棒	石墨氈	石墨板	石墨片
	 (厚度 3~5 mm)	 (厚度 1.05 ~ 0.13 mm)	 (厚度 32~40 μm)
發泡鎳	陰離子交換膜	氫氧化鉀	3D 列印 PLA 線材
 (110ppi, 厚度 1.6mm)	 (FAA-3-PK-75, 厚度 70~80 μm , 選擇性 94%~97%)		
鱷魚夾	電線	環氧樹脂 (AB 膠)	針筒
			
銅膠帶	銅片	水管剪	量筒
			

來源：研究者自行拍攝整理

參、研究過程或方法

一、研究方法

(一) 文獻分析法：

搜尋常用製備氫氣的方法，清楚各自的運作原理、效率、適用條件，分析和對比這些製備方法的優勢與局限，配合氫氣的種類，選擇最符合永續、減碳 的製程。

（二）設計研究法：

透過文獻分析法的製氫資料，深入探討並設計開發出一套製氫裝置，利用再生能源—太陽能來提供產氫所需的電力，以生成綠氫。

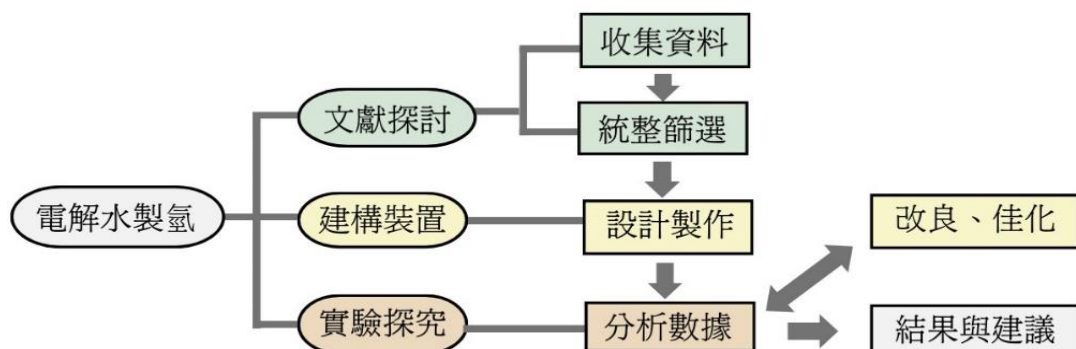
（三）實驗研究法：

運作電解水製氫裝置，進行實驗測試裝置的製氫效率，改良裝置以提高製氫效率並佳化裝置，再調整變因找到最佳的裝置工作參數後，分析實驗結果並提出改善的建議。

二、研究架構

圖 1

研究架構示意圖

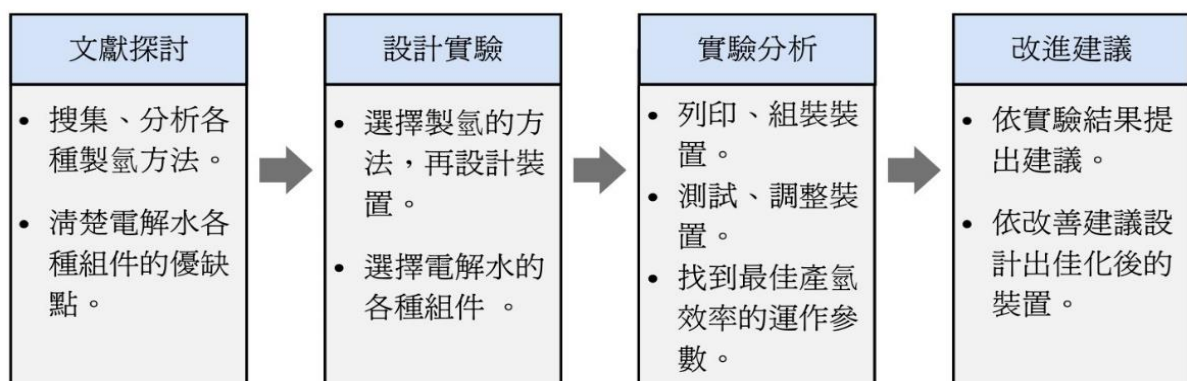


來源：研究者自行製作

三、研究流程

圖 2

研究流程示意圖



來源：研究者自行製作

肆、研究結果

一、製作並運行第一代電解水產氫裝置

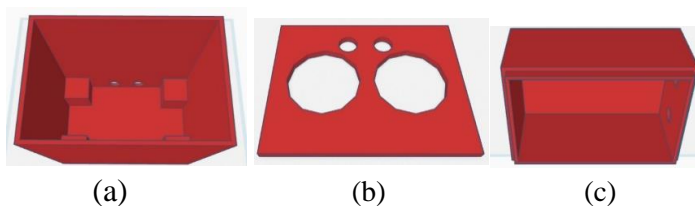
(一) 製作第一代製氫裝置

文獻探討後，為持續性、零碳排製氫，我們選擇電解水的方式執行，結合目前歐洲少部分國家有太陽能過剩的趨勢，我們決定使用再生能源—太陽能作為電力來源來製造「綠氫」，以氫能來解決未來可能常見無法儲存太陽能的問題。我們裝置內含外殼、電解槽、電極、電線、集氣瓶、集氣管、太陽能板、蓄電池等，我們以 ThinkCad 平台工具繪製 3D 圖來設計裝置的外殼，如圖 3 所示，圖中(a)為底層，(b)為中層，(c)為蓋子，因 3D 列印是一層一層堆疊列印，難以完全密合不漏水，需外加電解槽，以免電解液漏出，所以利用(a)圖中四個角落的矮柱來支撐外加電解槽，最底部為接電區，兩極電線再由底部兩小孔接出。(b)圖是中間層，兩大圓孔是用來固定兩極集氣瓶位置，分別暫時收集電解水產生的氫氣和氧氣，兩小圓孔則是集氣管通道，集氣管可由此拉出，再由(c)圖側邊圓孔拉出裝置外，以利集氫。組裝後的裝置如圖 4 所示。

將電線與氣體管線收整於外觀為立方體的裝置內，方正的裝置外型則是便於更多的相同立方體裝置如同積木般疊加，再利用銅膠帶導電來達串聯和並聯的效果，以增加製氫的效率，即使用者可視所需能量和環境條件來判斷須疊加多少數量的裝置，增加便利性。再安裝自動補水馬達，確保因電解反應而減少的水量隨時獲得補充，延長裝置的運作時間，最後，外接太陽能板和蓄電池，蓄電池可儲存白天過剩的轉換電能，穩定供電。

圖 3

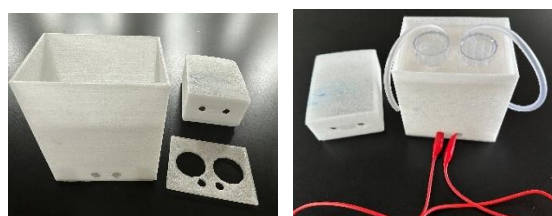
電解水製氫裝置 3D 列印圖



來源：研究者自行繪製

圖 4

初步電解水製氫裝置圖



來源：研究者自行拍攝

(二) 利用第一代製氫裝置測量電解水產氫的速率

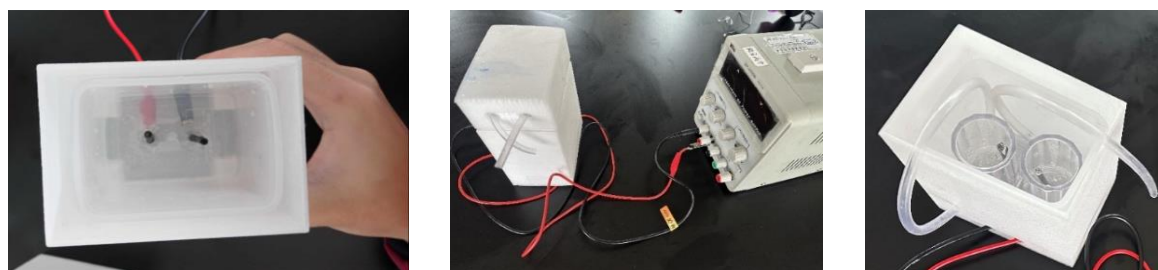
1、建立電解水裝置

電解水裝置中，因水導電性不足，故加入 KOH 增加電解液導電性，而陰、陽極皆

使用石墨棒作為電極，其為惰性電極，不會進行氧化還原反應，可耐鹼性環境，成本較低。我們選擇太陽能來做為電解水的電力來源，但於尋找裝置最佳運作參數與條件時，為供電穩定且須嘗試數種工作電流，我們先使用電源供應器來供電，如圖 5 所示。

圖 5

測量製氫速率的第一代實驗裝置圖



來源：研究者自行拍攝

2、不同濃度 KOH 電解液對製氫速率的影響

首先，我們探究 KOH 電解液濃度對製氫速率的影響，找出裝置最恰當的電解液濃度。在不同濃度 KOH 水溶液作為電解液時，以排水集氣法收集電解水陰極生成的氫氣，測量固定產氫體積時所需之時間，再由式子： $(\text{產氫體積}) \div (\text{集氣時間}) = (\text{製氫速率})$ ，將數據轉換成製氫速率（單位：mL/s），如表 4 所示。

表 4

不同濃度 KOH 電解液對製氫速率的影響

KOH _(aq) 濃度	收集 2 mL 氫氣所需之時間（單位：s）						平均製氫速率 ($\times 10^{-2}$ mL/s)
	第一次	第二次	第三次	第四次	第五次	平均	
5%	220.43	215.94	228.11	223.73	218.26	221.00	0.90
10%	90.19	88.34	85.96	89.77	86.55	88.16	2.27
15%	82.39	78.95	81.89	81.02	79.67	80.35	2.49
20%	38.81	42.07	39.69	40.21	41.71	40.96	4.88
25%	37.09	39.21	38.42	38.25	37.54	37.90	5.28
30%	26.09	25.81	27.47	25.75	27.16	26.46	7.56
35%	51.24	52.62	51.38	53.07	52.53	52.80	3.79
40%	63.71	60.54	64.40	62.83	61.87	62.35	0.90

來源：研究者自行製作

將表 4 中的「KOH 濃度」和「平均製氫速率」欄位繪製成關係圖，如圖 6 所示，可知當 KOH 濃度越大，製氫速率越高，當 KOH 重量百分比為 30% 時，製氫速率達最高值，接下來濃度繼續上升，製氫速率反而下降。離子為電解液的導電介質，藉其在水中移動來傳導電能，所以當強電解質 KOH 濃度越高，水中離子 (Na^+ 、 OH^-) 濃度越大，導電度越好，而在 KOH 重量百分比為 30% 時，推論水中離子濃度為最佳導電介質比例，即最適陰、陽離子間距，使製氫速率最高，為 $7.56 \times 10^{-2} \text{ mL/s}$ ，濃度大於 30% 後，則因陰、陽離子間距過近，反而使離子在移動時易受到相反電性離子的吸引，較難移動，導電效能變差，製氫速率變慢。因此，我們選擇重量百分比為 30% 的 KOH 水溶液作為製氫的電解液，以取得最快製氫速率。

圖 6

不同濃度 KOH 電解液對製氫速率的關係圖



來源：研究者自行繪製

3、不同工作電流對製氫速率的影響

我們將 30% 的 KOH 水溶液作為電解液，調整電源供應器的電流分別至指定安培數—1.0A、1.5A、2.0A、2.5A、3A，以排水集氣法收集陰極產生的氫氣，因為該實驗電流值較大，甚至達 3A，我們預計產氫速率較快，所以增加集氣體積由原本的 2 mL 增為 4 mL，即記錄生成的氫氣體積為 4 mL 時所需的時間，以減少計時秒數太少所帶來的誤差，而實驗時電源供應器自動調整的電壓值也將其記錄下來，數據如下表 5 所示。

表 5

不同工作電流對製氫速率的影響

電流 (A)	收集 4 mL 氫氣所需之時間 (單位: s)						平均 製氫速率 (mL/s)	電壓 (V)
	第一次	第二次	第三次	第四次	第五次	平均		
1.0	26.04	25.79	24.75	25.39	25.54	25.50	0.16	3.9
1.5	13.88	15.12	13.7	14.52	14.04	14.25	0.28	4.5
2.0	9.16	9.46	8.58	9.78	8.93	9.18	0.44	5.1
2.5	8.44	7.91	8.41	8.18	9.03	8.39	0.48	5.8
3.0	7.64	7.58	7.16	8.02	7.84	7.65	0.52	6.3

來源：研究者自行整理

表 6

不同工作電流時的各種參數整理表

電流 (A)	電壓 (V)	功率 (W)	平均製氫速率 (mL/s)	能量效率 (L/kW · hr)
1.0	3.9	3.9	0.16	144.8
1.5	4.5	6.8	0.28	149.7
2.0	5.1	10.2	0.44	153.8
2.5	5.8	14.5	0.48	118.3
3.0	6.3	18.9	0.52	99.6

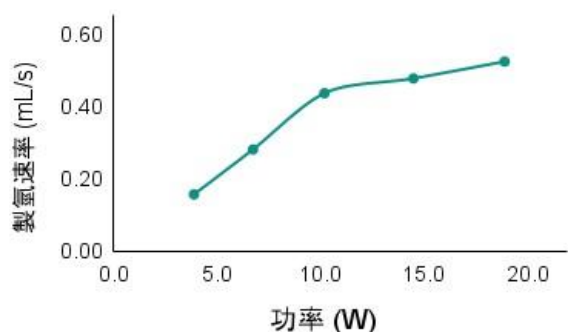
來源：研究者自行整理

由「 I (電流) \times V (電壓) = P (功率)」求得各工作電流下的功率，並以其對平均製氫速率作圖，如圖 7 所示。再由「平均製氫速率 (mL/s) \times 3600 (s/hr) = 平均製氫速率 (mL/hr)」轉換製氫速率單位，最後，藉式子「平均製氫速率 (mL/hr) \div 功率 (W) = 能量效率 (L/kW · hr)」，求出裝置各工作電流下的能量效率，即每度電可製備的氫氣公升數，數據整理如表 6 所示，將功率對能量效率作圖，如圖 8 所示。

由圖 7 可知，當功率越大時，製氫速率越快，與我們的認知相同。相反的，為順應「節能」的全球共識，我們應是以「能量使用效率」作為標準，來決定最適合的背景參數，所以我們整理計算出各工作電流下，「每度電可製備多少公升的氫氣」來作為決定能源效率高低的準則。由圖 8 可知，在電壓為 5.1V (電流為 2A) 時，能源效率最高，故初步製氫裝置的最適工作電壓為 5.1V。

圖 7

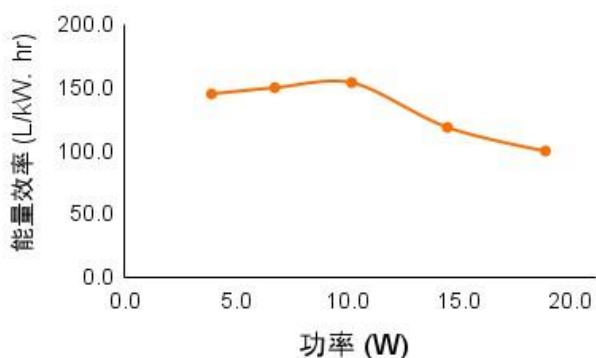
不同電流下的功率與製氫速率關係圖



來源：研究者自行繪製

圖 8

不同電流下的功率與能量效率關係圖



來源：研究者自行繪製

二、探討電極型態對製氫速率的影響

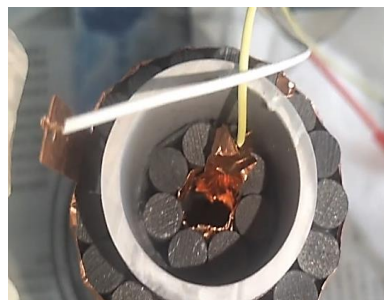
(一) 自創電極型態—圓筒雙層電極

電解水的理論電位差為 1.23 V，但實際實驗時，必須要使用大於 1.23V 的外接電壓源才能進行反應，此現象稱為過電位（over potential）。從表 6 可知，兩極間的電解液造成不小的電阻，此歐姆極化損耗部分能量，讓我們製氫效能稍不足。因此，欲得高能源使用效率及高製氫速度，如何拉近兩極電極的距離成為關鍵之一。

雖然使用金屬作為電極能降低過電位的電壓值，如不鏽鋼和白金電極，但為了降低實驗成本，我們選擇成本較低的石墨作為電極，來證實我們以縮小兩電極間的距離可減少歐姆極化所造成的過電位是否可行，我們變動了碳材電極型態與組件構造，尤其是電極部分更改碳棒為圓筒式結構來縮短兩極距離時，可改善兩極間電解液造成的歐姆極化現象，以 PVC 水管作為電極載體，內壁安置導電碳材為陰極，而外壁再建置陽極碳材，可有效縮短兩極距離，電阻減少，且生成的氫氣可由 PVC 管直接輸出。如圖 9 所示。

圖 9

圓筒內、外層電極電解裝置



來源：研究者自行繪製

(二) 不同電極碳材對製氫速率的影響

1、石墨板、石墨氈作為圓筒雙層電極

石墨板為片狀石墨堆疊而成，我們購入的厚度有 130、500、1050 μm 三款，其中厚度較厚的 500、1050 μm 兩款在捲成筒狀時便已裂開，無法進行實驗，撓性較差，如圖 10 所示。又厚度 130 μm 的石墨板雖可彎曲成圓筒狀，但放入水中後便立刻發生肉眼看的到的反應，如圖 11 所示。

至於石墨氈雖具純度高、耐高溫、耐腐蝕、導熱係數小等優點，但碳本身具強烈疏水性的性質，纖維狀的高接觸面積將更加提升碳的疏水性，除非進行特殊表面處理來克服，有少部分公司有販售這種特殊表面處理過較親水的石墨氈，甚至擁有技術專利權，價格昂貴，與我們「低成本製氫」的概念不符，而我們實際電解時確實如此，無法運行，且石墨氈在強鹼水溶液中會掉很多碳粉，混濁電解液，難以量測。故我們認為石墨板與石墨氈這兩種碳材皆不適合作為我們製氫系統的電極。

圖 10

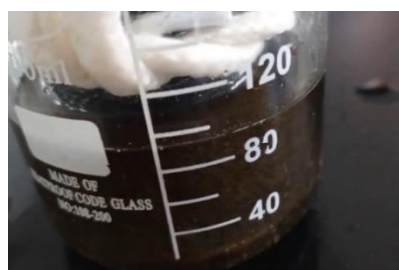
厚度 500 μm 石墨板彎曲時易斷裂



來源：研究者自行拍攝

圖 11

厚度 130 μm 石墨板入 $\text{KOH}_{(\text{aq})}$ 中，立刻反應



來源：研究者自行拍攝

2、排列碳棒作為圓筒雙層裝置的電極

以拆解使用完畢的市售乾電池碳棒作為電極，排列至針筒的內、外側管壁，如圖 12 所示。在不同電流下，測量自製圓筒雙層裝置的製氫速率，如表 7 所示。

圖 12

自製圓筒雙層電極裝置



來源：研究者自行拍攝

表 7

不同電流下，以排列碳棒作為圓筒雙層電極所量測的製氫速率

電流 (A)	收集 4 mL 氫氣所需之時間 (單位: s)						平均 製氫速率 (mL/s)	電壓 (V)
	第一次	第二次	第三次	第四次	第五次	平均		
1.0	32.12	38.1	35.67	37.85	34.29	35.61	0.11	4.1
1.5	18.92	17.01	18.61	17.52	19.38	18.29	0.22	4.9
2.0	13.76	12.72	10.58	11.79	13.91	12.55	0.32	5.2
2.5	9.89	10.29	11.81	11.87	9.76	10.72	0.37	5.7
3.0	8.55	9.94	9.84	7.37	8.81	8.90	0.45	7.1

來源：研究者自行整理

表 8

不同電流時，以排列碳棒作為圓筒雙層電極的各種參數整理表

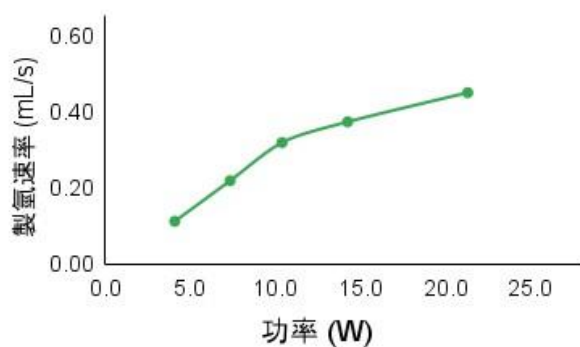
電流 (A)	電壓 (V)	功率 (W)	平均製氫速率 (mL/s)	能量效率 (L/kW · hr)
1.0	4.1	4.1	0.11	98.6
1.5	4.9	7.4	0.22	107.1
2.0	5.2	10.4	0.32	110.3
2.5	5.7	14.3	0.37	94.3
3.0	7.1	21.3	0.45	76.0

來源：研究者自行整理

將表 7 內數值做計算可得表 8，其計算方式同表 6，故不再贅述。用功率對平均製氫速率作圖，如圖 13 所示。並用不同電流下的功率對能量效率作圖，如圖 14 所示。

圖 13

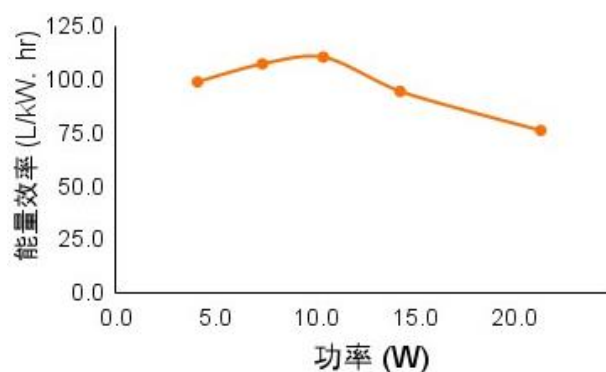
排列碳棒為圓筒雙層電極時，
功率與製氫速率的關係圖



來源：研究者自行繪製

圖 14

排列碳棒為圓筒雙層電極時，
功率與能量效率的關係圖



來源：研究者自行繪製

由圖 13、14 可知：

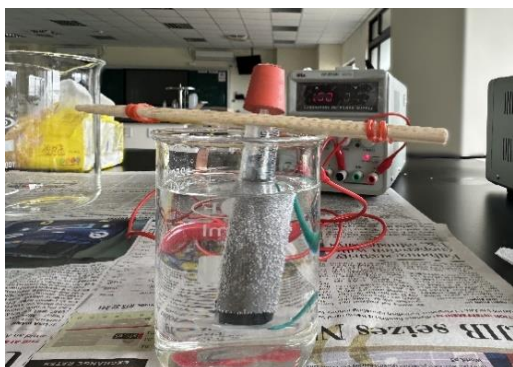
- (1) 電流增加時，製氫速率也增加。符合法拉第定律，電解產物的量與電量成正比。
- (2) 能量效率隨功率增加而下降。這是因為當電流越大時，濃度極化現象更顯著，造成的過電位不可逆損失也會越大，導致效率降低。

3、石墨紙作為圓筒雙層裝置的電極

因排列碳棒作為大面積的電極會有接觸不良的問題，所以我們嘗試一整片的石墨紙，厚度較先前的石墨片薄（厚度：石墨紙 $32\ \mu\text{m}$ ，石墨片 $500\ \mu\text{m}$ ），試圖避免破裂的現象再次發生，也向廠商確認過石墨紙的組成是純石墨無高分子黏著劑成分。進而用環氧樹脂以點塗的方式將石墨紙固定至針筒的內、外側管壁，如圖 15 所示。在不同電流下，測量石墨紙圓筒雙層裝置的製氫速率，如表 9 所示。

圖 15

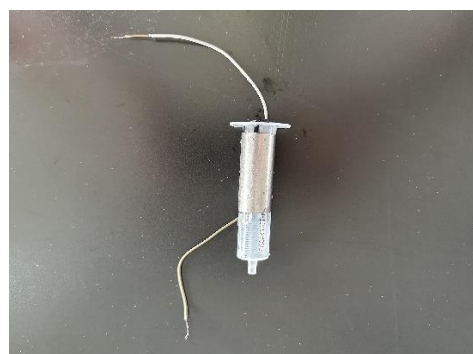
石墨紙圓筒雙層電極電解裝置



來源：研究者自行拍攝

圖 16

石墨紙電極在實驗後並沒被 KOH 侵蝕



來源：研究者自行拍攝

表 9

不同電流下，以石墨紙作為圓筒雙層電極所量測的製氫速率

電流 (A)	收集 4 mL 氫氣所需之時間（單位：s）						平均 製氫速率 (mL/s)	電壓 (V)
	第一次	第二次	第三次	第四次	第五次	平均		
1.0	33.79	32.41	34.49	31.77	31.44	32.78	0.12	4.7
1.5	11.76	11.52	10.68	12.39	11.42	11.55	0.35	5.1
2.0	8.59	7.27	7.66	8.34	6.89	7.75	0.52	6.3
2.5	6.55	6.30	7.29	6.51	7.17	6.76	0.59	7.2
3.0	6.58	6.54	6.12	5.98	6.24	6.29	0.64	7.9

來源：研究者自行整理

表 10

不同電流時，以石墨紙作為圓筒雙層電極的各種參數整理表

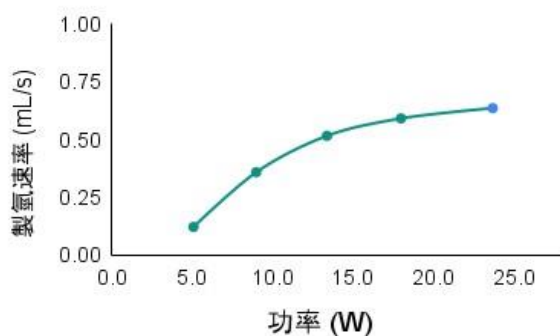
電流 (A)	電壓 (V)	功率 (W)	平均製氫速率 (mL/s)	能量效率 (L/kW · hr)
1.0	4.7	5.3	0.12	93.5
1.5	5.1	9.0	0.35	162.9
2.0	6.3	13.4	0.52	142.9
2.5	7.2	18.0	0.59	118.3
3.0	7.9	23.7	0.64	96.6

來源：研究者自行整理

將表 9 內數值做計算可得表 10，用功率對平均製氫速率作圖，如圖 17 所示。並用不同電流下的功率對能量效率作圖，如圖 18 所示。

圖 17

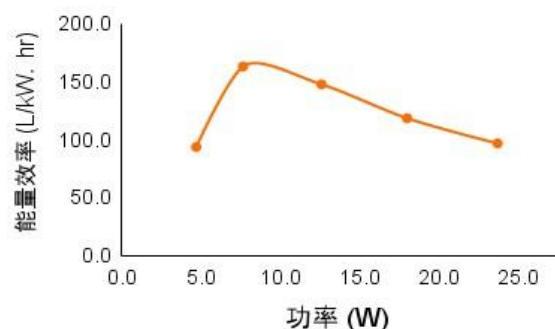
石墨紙為圓筒雙層電極時，
功率與製氫速率的關係圖



來源：研究者自行繪製

圖 18

石墨紙為圓筒雙層電極時，
功率與能量效率的關係圖



來源：研究者自行繪製

- (1) 線型與碳棒排列電極似，產氫速率隨電流增加而變快，表 9 可見，當電流從 1.0A 增加到 3.0A 時，速率從 0.12mL/s 增加到 0.64mL/s。這與法拉第定律相符。
- (2) 能量效率隨功率增加而後降低，這是因在較低功率時，提高功率可更有效利用輸入能量，但功率繼續增大時，濃度極化所造成的過電位亦增加，使效率下降。
- (3) 相比排列碳棒電極，石墨紙電極在相同功率下製氫速率更高，如在 15W 時，石墨紙電極的製氫速率約 0.55mL/s，而碳棒電極只有 0.36mL/s。我們推論原因有二：一是石墨紙電極表面是一整片塊材，而排列碳棒電極則是人為排列組裝，難免會有人為操作極限，有空隙產生，使碳棒電極間接觸不良，形成電阻。

三、改變電極種類對製氫速率的影響

（一）選擇發泡鎳作為圓筒雙層裝置的電極

當初在挑選電極進行效能測量時，我們考慮了石墨、不鏽鋼、鎳三種，因經費拮据，選擇成本最低的石墨，以累積電解實作經驗。甚至利用低成本石墨電極材料來確認我們發明的圓筒雙層電極確實有提高製氫效能之後，我們繼續嘗試下一種電極材料，以尋求更好的產氫效率，比較鎳和石墨、不鏽鋼時，發現有發泡結構的鎳電極更是有以下優勢：

- 1、發泡的多孔性結構能大大增加反應面積。
- 2、鎳本身有催化電解水的功用，能降低活化過電位。
- 3、可撓性比石墨紙佳，金屬的延展性使得發泡鎳在彎曲做成圓筒電極時，更不易破裂。
- 4、價格較不鏽鋼便宜。
- 5、導電性更勝石墨，且本身耐鹼能力佳。

因此，我們利用發泡鎳來降低過電位的主要來源—活化過電位，優化我們的製氫裝置。

（二）電流（功率）對發泡鎳電極的製氫效能影響

在不同工作電流下，測量發泡鎳雙層圓筒式電極的製氫速率，如表 11 所示。

表 11

在不同電流下，發泡鎳圓筒雙層電極的製氫速率

電流 (A)	收集 10 mL 氫氣所需之時間（單位：s）						平均 製氫速率 (mL/s)	電壓 (V)
	第一次	第二次	第三次	第四次	第五次	平均		
1.0	79.59	73.40	78.74	78.33	76.41	77.29	0.13	2.63
1.5	51.09	48.74	57.43	52.60	51.77	52.33	0.19	2.96
2.0	42.37	37.34	39.6	37.27	35.34	38.38	0.26	3.30
2.5	29.65	26.89	33.63	33.37	29.44	30.60	0.33	3.66
3.0	22.46	22.58	24.65	28.18	26.30	24.83	0.40	4.00

來源：研究者自行整理

表 12

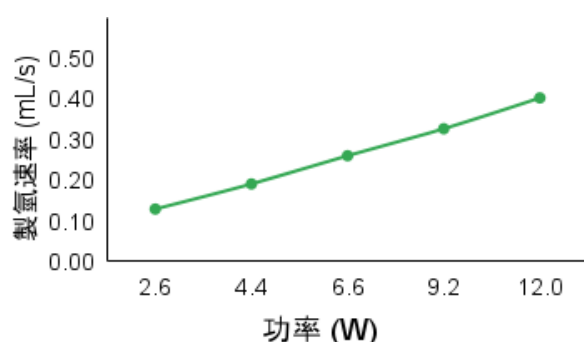
在不同電流下，以發泡鎳作為圓筒雙層電極的各種參數整理表

電流 (A)	電壓 (V)	功率 (W)	平均製氫速率 (mL/s)	能量效率 (L/kW · hr)
1.0	2.6	2.6	0.13	177.1
1.5	2.9	4.4	0.19	155.0
2.0	3.3	6.6	0.26	142.1
2.5	3.6	9.6	0.33	128.6
3.0	4	12.0	0.40	120.8

來源：研究者自行整理

圖 19

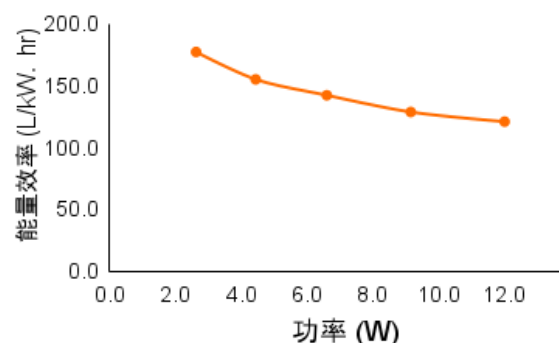
發泡鎳為圓筒雙層電極時，
功率與製氫速率的關係圖



來源：研究者自行繪製

圖 20

發泡鎳為圓筒雙層電極時，
功率與能量效率的關係圖



來源：研究者自行繪製

根據表 11、表 12，相同工作電流下，發泡鎳比起石墨紙有著更低的電壓，有效的降低了活化過電位。愈高電流雖可帶來愈高的平均製氫速率，但能量效率隨功率增加而下降。這是因為當電流愈大時，濃度極化過電位等不可逆損失也會越大，導致效率降低。

(三) 增加離子交換膜對電解水效能的影響

由表 6、表 10 知，單支石墨棒和圓筒雙層電極的製氫效能分別在 10.2W 和 9.0W 時答最大值，為 153.8 和 162.9 L/kW · hr，其實圓筒雙層電極的效益沒我們想像中樂觀，找尋改進的任何可能性，最後發現可能原因是，放電後，圓筒內、外累積的離子無法流通所致，因圓筒外側的正極半反應為 $4\text{OH}^-_{(\text{aq})} \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}_{(\text{l})} + \text{O}_{2(\text{g})} + 4\text{e}^-$ ，圓筒內側的負極半反應為 $4\text{H}_2\text{O}_{(\text{l})} + 4\text{e}^- \rightarrow 2\text{H}_{2(\text{g})} + 4\text{OH}^-_{(\text{aq})}$ ，若電解進行一段時間後，圓筒內的 OH^- 濃度太高，無法與外側互通的情況下，濃度極化致使不容忽視的過電位產生，製氫效能下降。

我們藉由陰離子交換膜解決此問題，讓我們發明的圓筒雙層電極效能大幅提升，且離子交換膜可阻止內外側氣態產物混合。為減少此濃度梯度造成的過電位，我們在測量時作為載體的針筒下方開洞，陰離子交換膜環繞至針筒外側，最後將發泡鎳套至內、外管壁，如圖 21 所示。在不同電流下，測量有膜的發泡鎳圓筒式雙層電極製氫速率，如表 13 所示。圖 22、23、24 有無交換膜對產氫效率的影響。

圖 21

安置陰離子交換膜於發泡鎳圓筒雙層電極



(a)針筒開洞示意圖 (b)套上離子交換膜 (c) 將發泡鎳套至內管壁 (d)整體裝置圖

來源：研究者自行拍攝

表 13

在不同電流下，加膜後發泡鎳圓筒雙層電極的製氫速率

電流 (A)	收集 10mL 氫氣所需之時間 (單位：s)						平均 製氫速率 (mL/s)	電壓 (V)
	第一次	第二次	第三次	第四次	第五次	平均		
1	91.28	90.74	86.87	83.86	80.39	86.63	0.12	2.1
1.5	50.06	50.41	52.95	51.30	51.68	51.28	0.20	2.3
2	37.56	45.68	42.79	42.62	42.51	42.23	0.24	2.4
2.5	32.69	33.11	31.4	35.74	34.99	33.59	0.30	2.6
3	27.88	31.44	30.93	30.99	31.19	30.49	0.33	2.7

來源：研究者自行製作

表 14

在不同電流下，安置陰離子交換膜的圓筒雙層發泡鎳電極的各種參數整理表

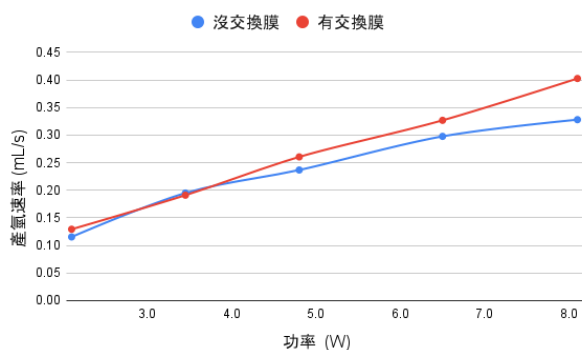
電流 (A)	電壓 (V)	功率 (W)	平均製氫速率 (mL/s)	能量效率 (L/kW · hr)
1	2.1	2.1	0.12	197.9
1.5	2.3	3.5	0.20	203.5
2	2.4	4.8	0.24	177.6
2.5	2.6	6.5	0.30	164.9
3	2.7	8.1	0.33	145.8

來源：研究者自行製作

由表 14 可見，加入離子交換膜後，電壓再次大幅下降，推測是有效的解決了濃度極化過電位所帶來的高額電阻。

圖 22

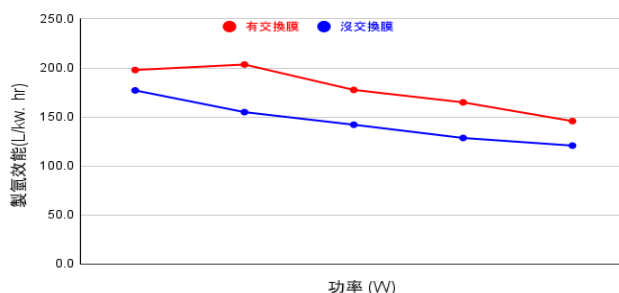
加交換膜前、後功率對製氫速率的影響



來源：研究者自行製作

圖 23

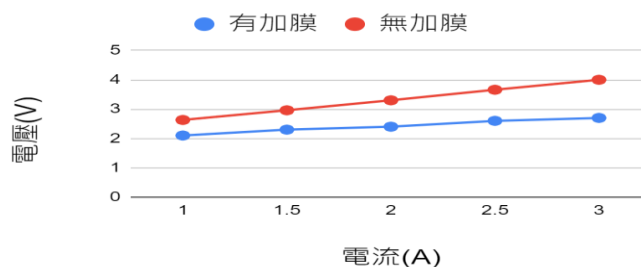
加交換膜前、後功率對能量效率的影響



來源：研究者自行製作

圖 24

有無加離子交換膜功率關係圖



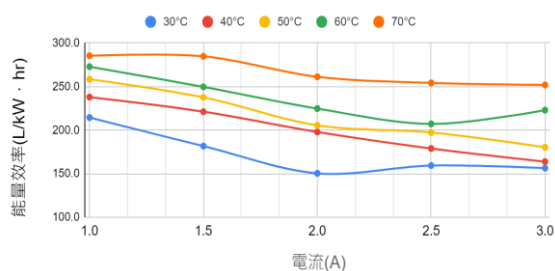
來源：研究者自行製作

(四) 泡鎳作為圓筒雙層裝置電極之溫度比較

水在高溫下，水分子的動能會增加，分子之間的碰撞頻率和能量也會增加，這使得水分子更容易被分解成氫氣和氧氣，所以我們想藉由改變溫度探討功率以及產氫速率的影響，我們的做法是將燒杯放入恆溫槽中調至適當的溫度，放入溫度計測量溶液中間和底部的溫度，我們做了 35% 的實驗對應溫度的實驗。

圖 25

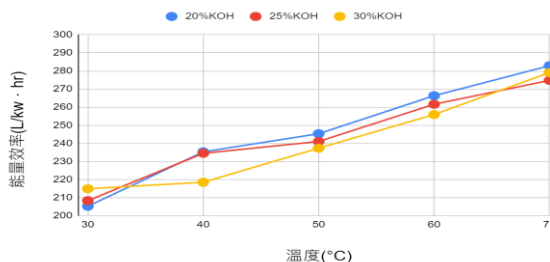
溫度與電解水能量效率關係圖



來源：研究者自行製作

圖 26

不同的 KOH 濃度對照不同溫度的能量效率關係圖



來源：研究者自行製作

四、改良製氫裝置

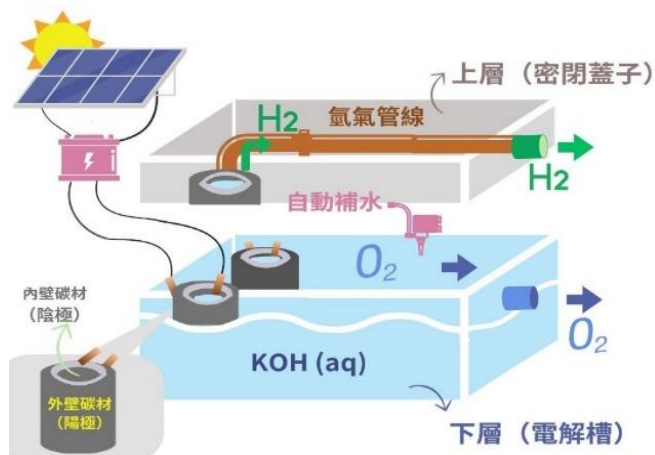
(一) 製作第二代製氫裝置—改善歐姆極化過電位

在最初的設計中，我們並沒有考慮到 3D 建模出來的模具可能導致的漏水問題，因此在第二版的模型中，我們加入了一個塑膠盒子，作為電解槽，並且我們想出了在第一版中沒思考過的填充電解液體方式，大致流程是以物聯網的機制，透過 webduino 套組中超聲波組件來偵測水位，並配備幫浦填水裝置，達自動化目的，但最終在測試製氫速度時，出現了製氫速度不足的問題，當時，我們雖直接利用了排水集氣法的方式來測得氫氣流速，但仍有產氫速度不夠快的疑慮，所以才變動了碳材電極型態與組件構造，改成圓筒式結構來縮短兩極距離，改善兩極間電解液造成的電阻問題，以 PVC 水管作為電極載體，內壁鋪上導電碳材是為陰極，而於水管外壁再建置陽極碳材，可有效縮短兩極距離，使電阻減少，製氫效能增加，且生成的氫氣可由中空 PVC 管輸出。

整體模型為兩層式，下層用於盛裝電解液、電極等組件，而上層為氫氣管線的接合及出口之處，氫氣將在此被運送至儲存容器中。下層電解槽能容納數組圓筒式 PVC 水管的複合電極，可依需氫量來調整 PVC 水管電解組的數量，如圖 27 所示。此外，電解液為所有電解組共用的前提下，補水難度下降許多，直接用市售水族箱的自動補水組件即可，不用再額外消耗電能。

圖 27

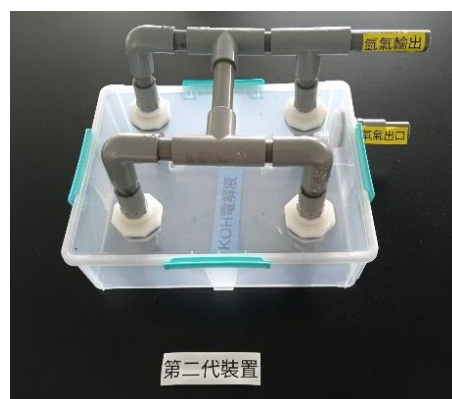
第二代製氫裝置設計示意圖



來源：研究者自行繪製

圖 28

第二代製氫裝置實品圖



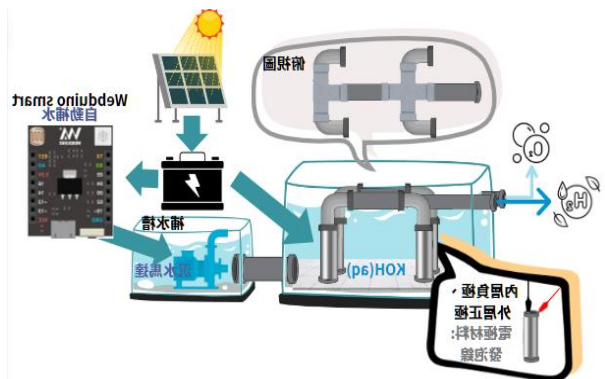
來源：研究者自行拍攝

(二) 第三代製氫裝置—降低活化過電位、濃度極化過電位

第三代製氫裝置原以不鏽鋼材質槽體為目標，以降低活化過電位，但因訂製費用過高，故裝置以厚塑膠盒為替代，組件則是利用 3D 列印來製作，保留第二代裝置優勢構思，同樣採取雙層圓筒式電極來降低歐姆極化所造成之過電壓，並延續方便補液的單一電解槽的設計，在電極附著之管壁上開洞，下半處為空洞處，上半處則為覆蓋處，空洞處使電解液能在此進行內外交換，覆蓋處則先用離子交換膜附著後，再套上發泡鎳電極，如圖 30 所示，圖中目前裝置為四根電極，可應使用需求增加電極數量和電解槽大小，達到高使用彈性的優點，且較第二代版本不同的是，第三代版本將輸氣管道設置在電解槽內部，並於長邊側頂部開兩個小洞，一為氫氣出口，另一為氧氣出口，電解槽相反長邊側底部位置開孔，連接 4 分水塔接頭，並利用外牙閥轉接 1/2PVC 水管連接至補水槽，利用連通管原理，使兩側水位保持一致且流通，補水槽側則放置抽水馬達，並進行電解液抽換作業，追求達到電解液流動的目的，以降低濃度極化現象所造成的過電位。馬達運作則搭配自行設計的 IoT 系統進行自動化運行，可依需求啟動不同產氫模式。

圖 29

第三代製氫裝置設計示意圖



來源：研究者自行繪製

圖 30

第三代製氫裝置電極拆解圖



來源：研究者自行拍攝

圖 31

第三代製氫裝置中 IoT 程式碼擷取圖



來源：研究者自行拍攝

圖 32

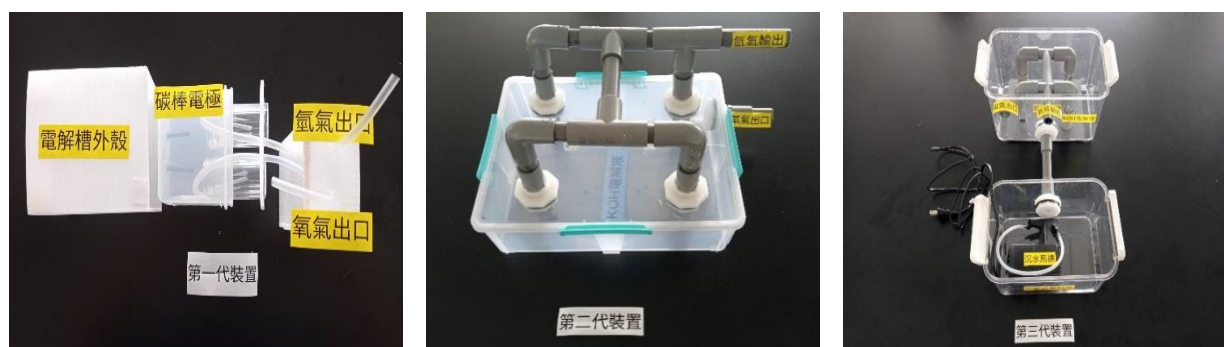
第三代裝置中 IoT 連結網站示意圖



來源：研究者自行製作

圖 33

第一代改良至第三代製氫裝置實物圖



(a) 第一代製氫裝置

(b) 第二代製氫裝置

(c) 第三代製氫裝置

來源：研究者自行拍攝

伍、討論

一、製作初步電解水產氫裝置

利用 3D 建模機成功製作出裝置，也能順利測得產氫速率，但發現 3D 列印線材 PLC 比文獻上的資料更不耐鹼，在強鹼為電解液的情況下，我們加了一塑膠耐鹼內襯，方能延長使用壽命。

二、利用初步電解水產氫裝置測量電解水製氫的速率

(一) 濃度 KOH 電解液對製氫速率的影響

- 1、KOH 電解液的濃度若適當上升，可有效的減低阻抗過電壓中的電解質阻抗所帶來的額外電壓，濃度過低會導致離子遷移速率降低，增加阻抗；濃度過高可能導致離子間相互作用增強，增加阻抗，除此之外濃度增加可以強化反應物的供應速率，可降低濃度極化過電壓。
- 2、濃度超過 30% 離子濃度太高，離子之間的靜電引力作用增強，限制了它們在溶液中的自由移動，降低了整體導電性。因此在 30% 的最佳濃度下，離子數量與離子運動性達到最佳平衡，導電性最佳，製氫速率也最快。故我們取此濃度做之後實驗電解液的濃度。

（二）不同工作電流對製氫速率的影響

1、根據圖 9，製氫速率隨著工作電流（功率）的增加而提高，這是因為更大的電流可以提供更多的電子，加速陰極還原反應的進行。然而，製氫反應的極限電流密度有一個上限，超過這個上限，反應速率幾乎不再提高，甚至會下降。

2、以製氫效能來看，圖 10 顯示，在較高電流（功率）時，每度電製備的氫氣量反而開始下降。我們推測可能的原因有如下幾點：

（1）推測因較高的工作電流會產生更多的熱量，導致電解液溫度升高，因此，雖製氫速率提高，但更多的電能轉化為熱能而非化學能，導致能量利用效率降低。

（2）極化效應：高電流會加劇電極極化，增加反應過電位，降低電流效率。

（3）泡沫影響：高速製氫會產生大量氣泡，阻礙離子傳遞，影響反應動力學。

因此，實驗結果反映出在製氫過程中，需要平衡反應動力學、熱效應和能量利用等多方面因素，以尋找最佳的工作條件。

3、在 2A（5.1V）時能量效率達最高峰，兼顧製氫速率和能量使用效率的最佳工作點。

三、電極型態對製氫速率的影響

我們透過改善電解裝置來提高製氫效率，從目前的實驗數據與結果告訴我們，必須考量電極材料、結構的優化、減小電極距離以降低過電壓所帶來的額外電阻、控制合適的功率，這些是提高製氫效率的關鍵因素。

（一）要克服電解時的過電位效應

實驗需要大於理論值 1.23V 的外加電壓，稱為過電位現象。需要更高的電壓去克服，而增加能耗。為減少歐姆過電位來提高能量轉換效能，我們創造雙層圓筒式電極以最小化兩極距離，並利用較便宜的碳材來確認此電極型態確實可順利運作後，再改電極為發泡鎳，以降低活化過電位。而濃度極化所造成的過電位，則是利用離子交換膜及外接馬達抽換電解液的方式克服。

（二）電極結構優化：

1、採用圓筒雙層結構，內外極分列可最大程度縮小電極距離，可有效降低歐姆過電壓，縮短兩極之間的距離，等同於減少了電解質的厚度，使離子在電解質中的傳輸路徑

變短，從而降低了總電阻，且減少傳輸路徑使離子能更快抵達電極表面，提升離子遷移率。

- 2、利用底部兩側管壁挖洞的 PVC 管作為電極載體，內外鋪設多孔發泡鎳為電極，且在兩極間發泡鎳鋪設離子交換膜，減低濃度極化過電壓，管狀中空結構可輸出生成氫氣。

（三）電極材料、型態結構的選擇

1、電極材料種類的選擇

金屬電極如不銹鋼、鉑可降低活化過電位，但成本高且在強鹼環境下耐受性差。其中，白金本身確實具有較好的化學穩定性和耐腐蝕性，可在酸性、中性和微鹼性溶液中使用，在濃鹼性環境下，白金也會發生一定程度的腐蝕，尤其是在富含氧化性離子的情況下。裝置中的電極必須在濃鹼電解質環境下長期使用時，所以除成本外，耐腐蝕性可能會成為一個需要考慮的因素，初期實驗因考量成本問題，所以並沒有使用效能更加優越的多孔發泡鎳，而是使用碳材作為初期實驗的電極材料。

2、電極碳材型態結構的選擇：

石墨板和石墨氈雖是導電碳材，但前者撓性差易開裂，後者疏水性強不適合水溶液系統，而石墨板則是進入電解液中後會立刻反應，推測的可能原因可能有兩點：

（1）石墨電極的純度不佳：

電極通常是碳素材料，但它並非完全純淨，有些市售石墨板或紙可能製程中有使用高分子黏著劑，使石墨纖維較為緊密、易成型，高分子在強鹼環境下立刻分解或水解。所以之後購入的石墨紙我們有先確認其為高溫處理製成的石墨紙，沒使用高分子作為黏著劑。

（2）氧化反應：

電解水的過程中，水分解為氫氣和氧氣。氧氣通常在陽極生成，而石墨電極常被用作陽極。在氧氣的存在下，石墨表面可能會發生氧化反應，形成氧化碳等物質，這些物質可能呈現黑色。

- 3、各種型態的碳材電極電解水實驗數據中，我們選擇石墨紙作為電極，原因如下：

- (1) 避免了石墨板因厚度撓性差異開裂的問題（石墨板厚度 1.05 mm，石墨紙厚度 32 μm ），也克服了石墨氈疏水性強不適合水溶液的性質。
- (2) 雖製氫速率隨功率增加而增加，在功率 23.7W（電流 3.0A 時到最高 0.64mL/s）這與電解理論相符，增加電流可提高反應速率，但我們以能量效率作為選擇工作電壓的依據，石墨紙在中等功率區間（9.0W~3.4W）時最高，約每度電生成氫氣 142~163L，（142~163L /kW·hr）。過高或過低的功率，能量效率會下降。
- (3) 與排列碳棒作電極相比，石墨紙電極在相同功率下製氫速率更高，能量效率也更佳。這是因為排列碳棒作電極時，常有人為排列擺放因素使碳棒接觸不良的問題，電流不甚穩定，且不好固定至管壁的技術問題，石墨紙作為整片電極，電阻小，也能更好地減小電極間距離，降低電阻。
- (4) 實驗後石墨紙電極未被強鹼侵蝕（圖 18），說明石墨紙在鹼溶液中穩定性高。

4、將石墨紙改為原先因經費不足而未採用的多孔發泡鎳作為電極材料，有以下優點：

- (1) 導電性：鎳本身有著極佳的導電性，意味著電子將更容易的在鎳表面進行傳導，且多孔結構進一步降低了電子傳輸的阻力，有助於減少電極的內部阻抗，並有效地降低阻抗過電壓。
- (2) 催化作用：鎳是一種優秀的氫氣生成催化劑。當透過發泡鎳電極通電時，它能夠更有效地催化水分解反應，從而提高產氫速率。
- (3) 多孔表面積：多孔發泡鎳具有高比的表面積，多孔結構提供了大量的活性表面，增大了電化學反應的接觸面積，同時也增加反應活性位點，從而提高了反應速率和效率且減低活化過電壓。

總體來說，因為鎳具有良好的導電性、催化性質、表面積，這些優點有效的降低因阻抗過電壓中的電極阻抗、活化過電壓以及質傳極化過電壓，所帶來的額外電阻。

（四）使用離子交換膜降低濃度極化過電壓

使用離子交換膜時，其主要功能之一是阻隔電子流。這點在電解水系統中尤重要。

- 1、阻隔電子流：在電解水過程中，電子通常會直接從陽極移動到陰極。這種電子的移動可以導致電解系統中的電子流電阻。當您在電解水實驗中使用離子交換膜時，這個膜會阻止電子直接從陽極流向陰極。相反，它只允許離子通過，這些離子是由水分解而成的，例如氫離子和氫氧根離子。

- 2、提高效率：通過阻隔電子流，離子交換膜幫助提高了電解系統的效率。因為電子不再直接通過，電解系統中的電子流阻抗降低了，這意味著更多的電能可以轉化為化學能，從而增加了水分解反應的速率。
- 3、降低能量損耗：由於電子流阻抗降低，因此您可以在相同的應用下使用較低的電壓。這可以降低能量損耗，同時保持所需的反應速率。
- 4、電極周遭的電解液會因為電解水反應而造成電解液離子濃度的降低，會使產氫效率的降低，因離子交換膜具有離子通透性、電子不透性，可使環繞式雙層電極內外的電解液進行離子交換，使用離子交換膜可以進一步改善電解水系統的效率 and 產物純度，同時減少能量損耗，可有效降低因濃度極化過電壓所帶來的高額電阻。

（五）電解液溫度對產氫效能的影響

在同電流且同樣濃度的電解液的條件下，範圍為 30 度～70 度，溫度愈高，能量效率愈高，但若考慮加熱電解液所需之能量，則未必，需視電解槽尺寸全方考量。

（六）產氫經過時間，製氫效能是否降低實驗

將電流控制在 1A、電解液濃度為 30%、溫度為攝氏 30 度，並在針筒頂部開一小洞，並利用排水集氣法，觀測產氫速率是否降低，但根據實驗數據顯示，產氫速率在短時間內呈現穩定，推測是因電流電壓較小原因，故在短時間內表現穩定，但若在高電流高電壓環境下，離子消耗速度提升，產氫速率下降愈快。

（七）流動性電解液對產氫效能的影響

流動性的電解液相對靜止的電解液，能帶來更好的產氫效能，原因如下：

- 1、質傳效應增強：若電解液流動，可以帶走經電解反應所產生在電極表面的氫氣，並可同時將新的水分子帶到電極表面。這樣可以防止在電極表面形成氫氣層，從而減少了產氫反應的擴散阻力，提高了製氫效能。
- 2、溫度控制：流動的電解液，有助於幫助電解槽維持在同樣的溫度，電解的過程中，電解水產氫的反應過程是一個放熱反應，容易造成電解槽局部溫度升高。流動的電解液能夠有效地帶走這些熱量，從而使電解槽的溫度維持統一，有利於提高產氫效能。
- 3、去除氣泡：電解過程中，氫氣會在陰極釋放，形成氣泡。如果電解液靜止不動，氣泡可能會在電極表面堆積，阻礙了新的水分子與電極的接觸，降低了製氫效能。而流動的電解液可以將氣泡有效地帶走，確保電極表面始終保持清潔，有利於製氫反應的持續進行。

我們使用幫浦，並搭配 IoT 系統，根據先前測量到的產氫效率降低時間點，作為幫浦運作時間點，將電解液抽出，並在透過幫浦送回，藉此達到電解液循環的目的。

(八) 改良電解水製氫裝置

1. 將電極改為圓筒式 PVC 管內外雙層結構，有效縮短兩電極距離，降低歐姆過電壓，提高製氫效率。
2. 使用離子交換膜有效的降低濃度極化過電壓帶來的高額電阻。
3. 採用共用電解液的設計，避免每組電極單獨補液的複雜性，直接使用市售自動機械式補水組件即可，節省裝置運作的電能。
4. 模型採兩層式設計，下層盛裝電解液及電極，上層為氫氣輸出端，可靈活調節電極數量應對不同需求。
5. 增加溫度調節器，進行電解槽溫度控制，避免因反應過程的放熱而造成裝置過熱問題，且可適當上升溫度可降低質傳極化過電壓以提升產氫速率。
6. 設置幫浦，進行電解液的抽換，使電解液達到流動的目的，有效的降低濃度極化過電壓以及阻抗過電壓，且可避免電極處因反應而產生的氣泡在電極表面堆積影響產氫效能。
7. 加設 IoT 裝置，使裝置能夠根據產氫效能降低的時間點進行電解液的抽換作業，且可讓使用者依照使用需求，自行改變產氫模式，使裝置在具有自動化的功能下，也同時具有高使用彈性的優點。

陸、結論

- 一、利用電解水製氫是一種潔淨且可持續性的製氫方式，有助於實現淨零碳排的目標。選擇適當的電解質濃度、工作電流和電極材料，對於提高製氫效率至關重要。
- 二、電極的材料和結構對製氫效率有重大影響。與其他碳材相比，石墨紙作為電極材料，在中等功率區間（9.0 W~13.4 W）時能量效率最高，約每度電生成氫氣 142~163 L/kW·hr。採用圓筒雙層結構可有效縮小電極距離，減小電阻，進而提高製氫效率。
- 三、多孔發泡鎳比起石墨紙，有更好的導電性，並且鎳本身有著很好的催化效果，減低了反應過程中的能耗，提高了產氫速率。
- 四、使用離子交換膜，因其具有離子通透性以及電子不透性，故能完美搭配本實驗的設計，圓筒式雙層環繞電極，內外部電解液可藉由離子交換膜進行離子交換，有效的解決了濃度極化過電壓將帶來的高額電阻，且離子交換可阻止內外部產物混合，固本實驗原先希望達到的收集純淨氫氣的目的也能夠達成。

五、使用幫浦使流動性保持流動性，可使電解液整體維持較統一的溫度，避免溫度不均的問題，且流動電解液可帶來新的水分子，填補電極旁消耗的水分子，也能夠帶走電極處產生的大量氣泡，避免氣泡阻礙電解液和電極的接觸。

六、本實驗通過系統性的探索和改良，開發出一種具有自動化、低成本和可擴展性的電解水製氫裝置，透過優化電解裝置的設計和電極結構，可有效解決初步電解水裝置的漏液、自動補水、製氫速率不足等問題，實現較完善的製氫系統。改良後的裝置採用共用電解液設計，可避免複雜的單獨補液步驟，並可靈活調節電極數量以應對不同能量需求，並搭配 IoT 裝置，使裝置具有多種產氫模式，為推動氫能利用和實現淨零碳排做出了積極的付出。

柒、參考文獻資料

左峻德（主編）（2023）。淨零之路氫能科技與策略：**H₂ + FC = Net Zero Future Power**。財團法人台灣經濟研究院。

林茂文（2022）。2050 淨零碳排下的氫能發展方向與挑戰。石油季刊，58（1），1-42。

唐可欣（2023 年 8 月 3 日）。氫能源是什麼？未來能源新趨勢，有望成為解決能源危機的新能源。風傳媒新聞網。<https://reurl.cc/nr29Gv>

陳怡如（2022 年 8 月 18 日）。打造氫能新經濟。今周刊新聞網。<https://reurl.cc/lg2EyQ>

張珍悅、徐勝一（2010）。永續發展教育脈絡探討：「聯合國永續發展教育十年計畫」之回顧。載於國立臺灣師範大學地理學系（主編）：地理研究（頁 1-26）。國立臺灣師範大學地理學系。

經濟部（2023 年 4 月 22 日）。臺灣 2050 淨零轉型「氫能」關鍵戰略行動計畫。行政院全球資訊網。<https://reurl.cc/YVb2N4>

管衍德（2010）。燃料電池技術。全華圖書。

鐘金明（2020）。綠色能源科技（第四版）。新文京開發出版有限公司。

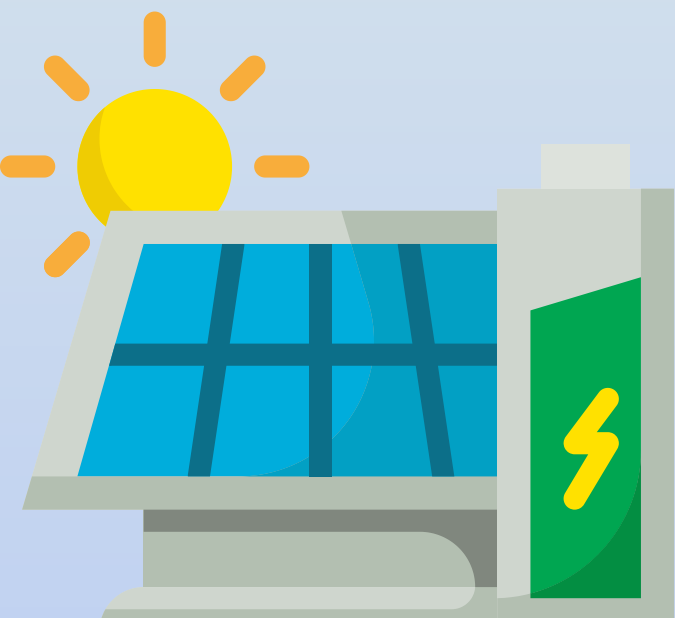
黃雅君（2003）。過渡金屬氧化物觸媒應用於鋅—空氣燃料電池陰極之研究〔出版之碩士論文〕。國立陽明交通大學。

【評語】 052401

本作品自行設計圓筒雙層電極結構電解水產氫裝置，電極選擇包括石墨、排列碳棒、石墨紙、發泡鎳，並增加離子交換膜，以 KOH 水溶液為電解質。操作變因包括電解質濃度、電流，電解液溫度等。實驗結果發現石墨紙作為電極材料，在中等功率區間（9.0 W~13.4 W）時能量效率最高，約每度電生成氫氣 142~163 L/kW·hr。第三代裝置，利用外接馬達抽換電解液，解決補水等問題，採用共用電解液與可調節電極數量，IoT 系統控制抽換電解液間隔時間，優化裝置達自動化且增加製氫效能，惟僅提出設計思路和預期效果，未提供具體的實驗數據和實際測試結果。作者宜標示電極距離及大小尺寸，並將實驗數據統計標準差，圖中呈現 error bar。建議未來進行較長電解產氫實驗時間，以獲得較可靠穩定的能量效率。電解水產氫為當前重要研究課題，文獻很多，作者宜與文獻的製氫能量轉換率比較。

作品簡報

陽光氫鬆產能



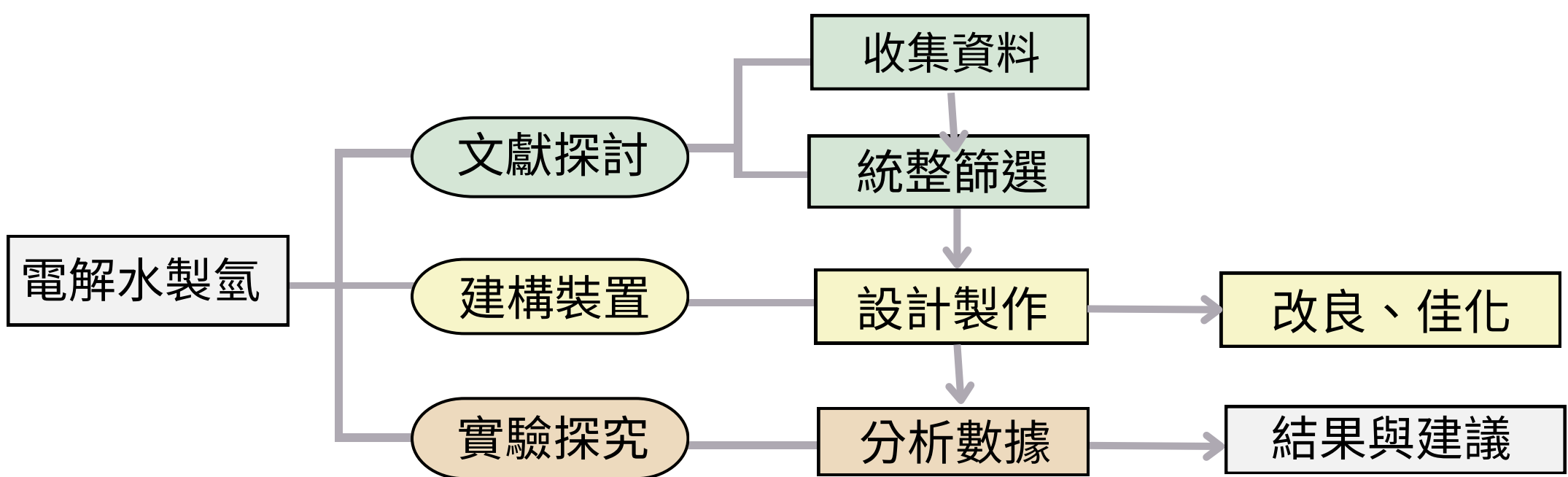
摘要

本研究因應國際趨勢，製作了一套利用太陽能為動力的電解水製氫裝置，氫能因具儲能功效，可平衡再生能源供應，因此我們認為氫能是未來能源轉型的關鍵之一，透過初步電解實驗，我們以降低過電位為首要目標，再以自創的「雙層圓筒式電極」最小化兩極距離，並探討不同工作環境、電極材料對製氫效率的影響，常溫下，以多孔鎳為電極，當KOH 濃度為35%、0.25A（1.8V），製氫的能量轉換率最佳，為271.6L/kW・hr。最後，建立IoT系統，可遠端控制，達自動化。

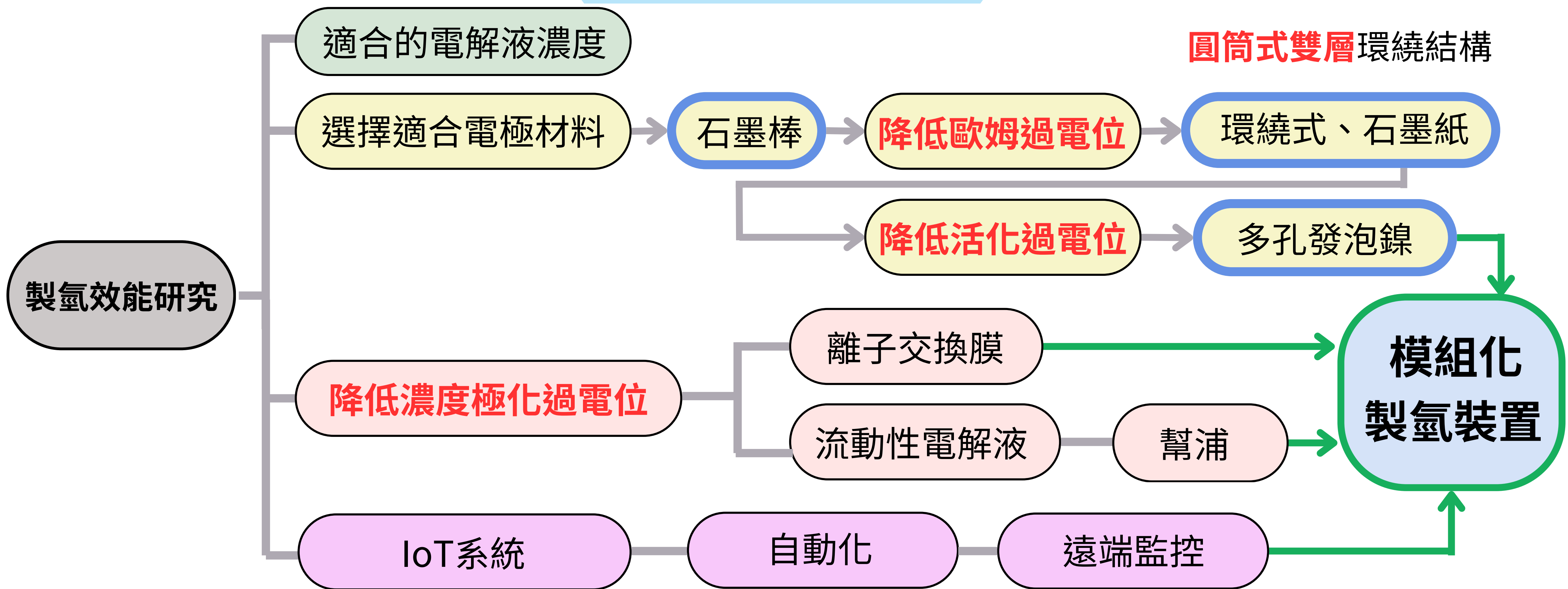
研究目的

- 一、製作利用電解水來產氫氣的裝置。
- 二、探討不同 KOH 電解液濃度、工作電流對裝置產氫速率及能量效率的影響。
- 三、探討不同電極材料與型態對裝置產氫速率及能量效率的影響。
- 四、依實驗結果建立具模組化、高效能的產氫裝置。

研究方法



研究架構



研究結果與討論

一、以石墨棒做為電極的製氫速率及能量效率

（一）實驗裝置

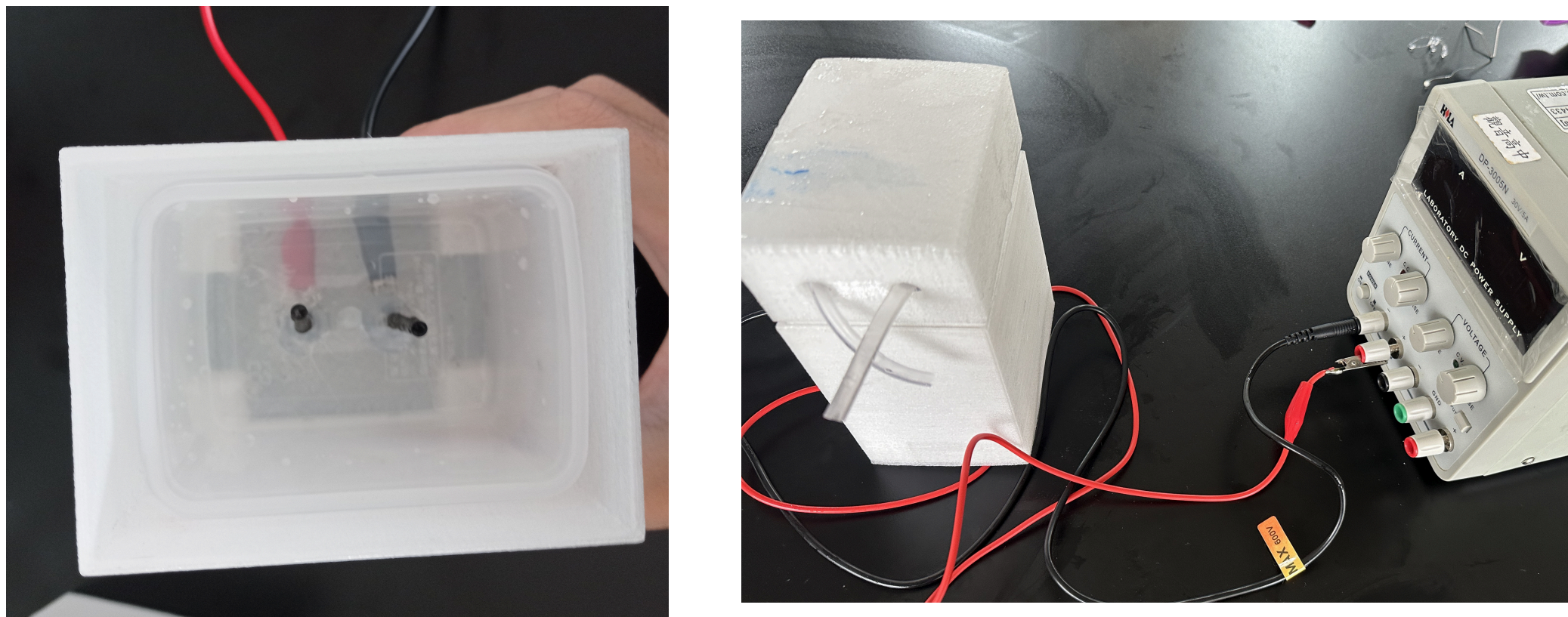


圖1、初步製氫的實驗裝置及電解槽內部結構

（二）不同電解液濃度對製氫速率的影響

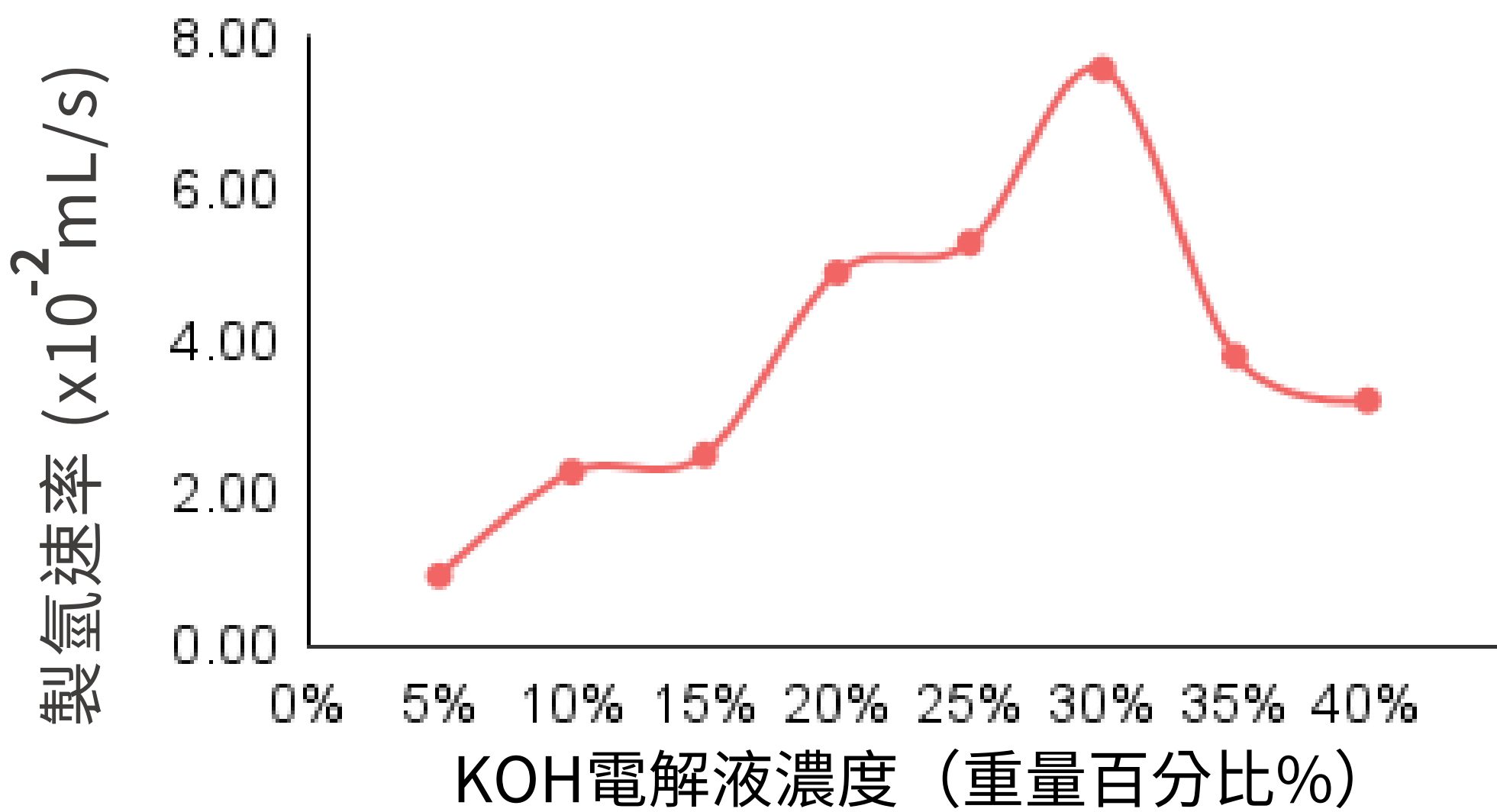


圖2、不同電流下的功率與能量效率關係圖

（三）不同工作電流對製氫速率及能量效率的影響

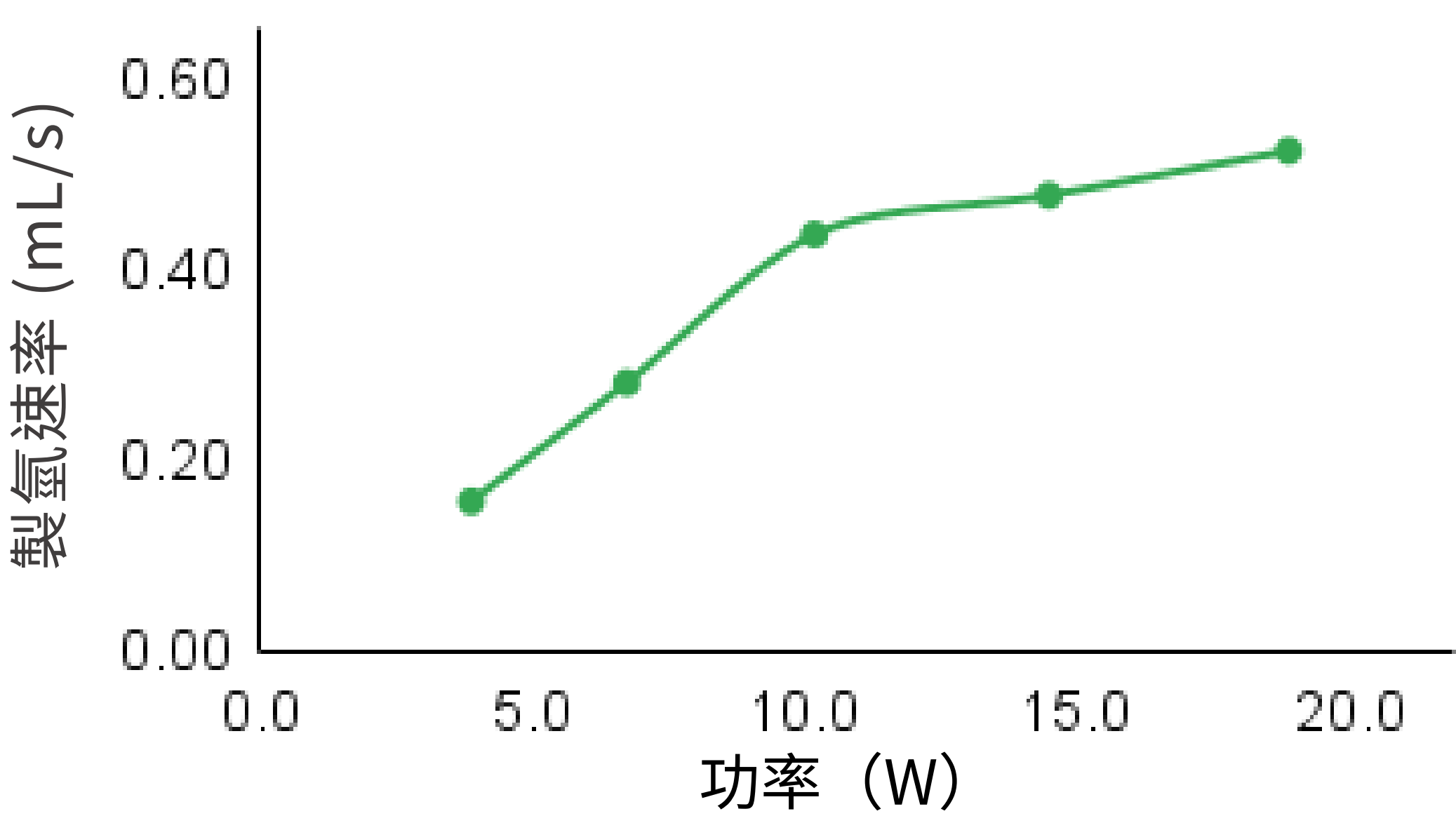


圖3、不同電流下的功率與製氫速率關係圖

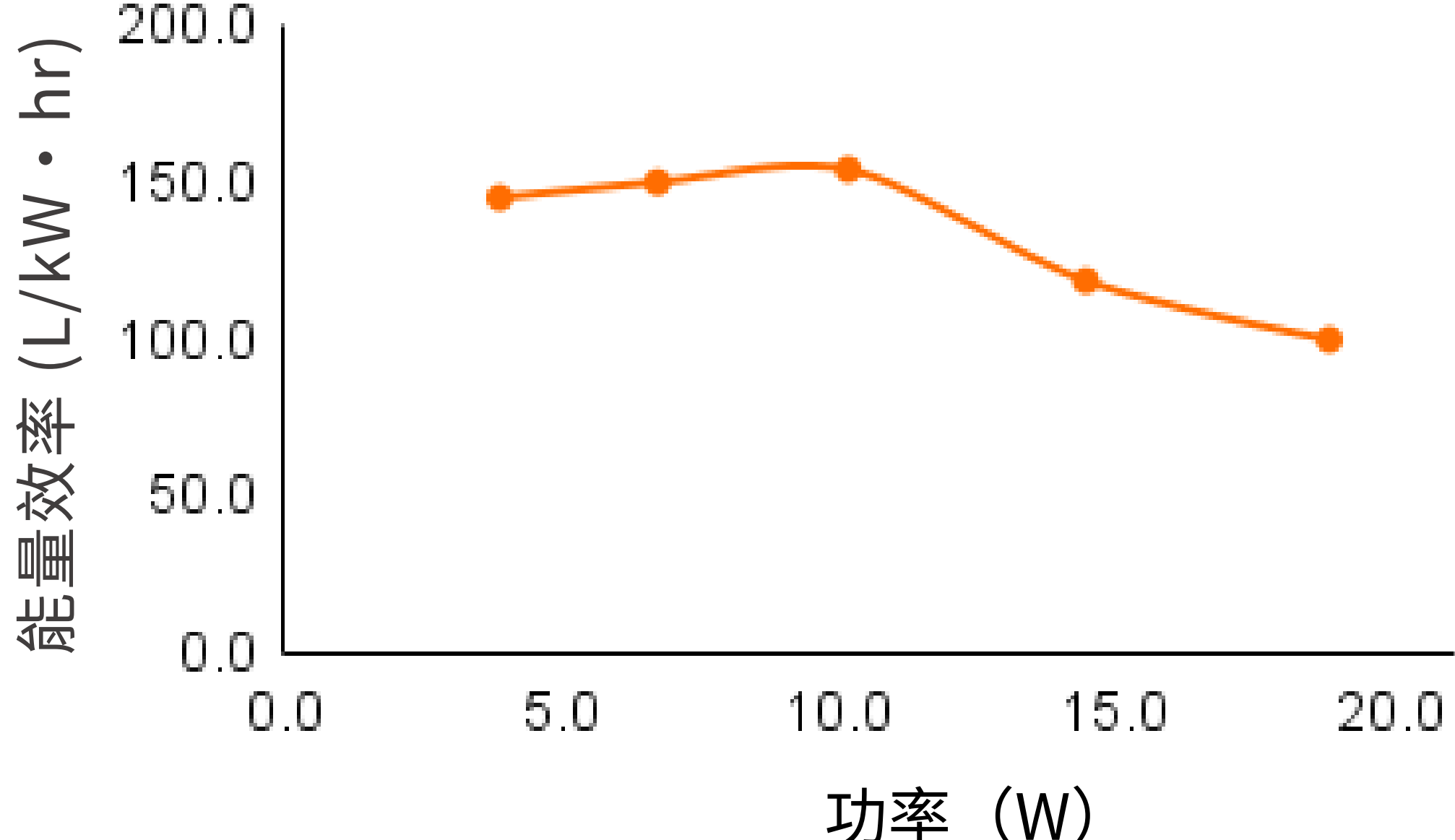
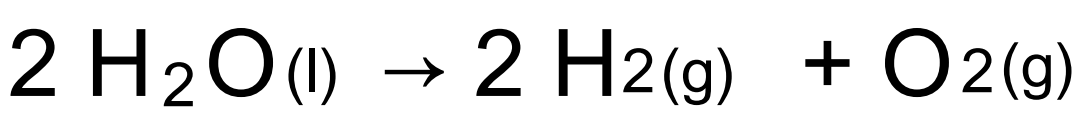


圖4、不同電流下的功率與能量效率關係圖

（四）探討過電位



$$\Delta E = 1.23\text{ V}$$

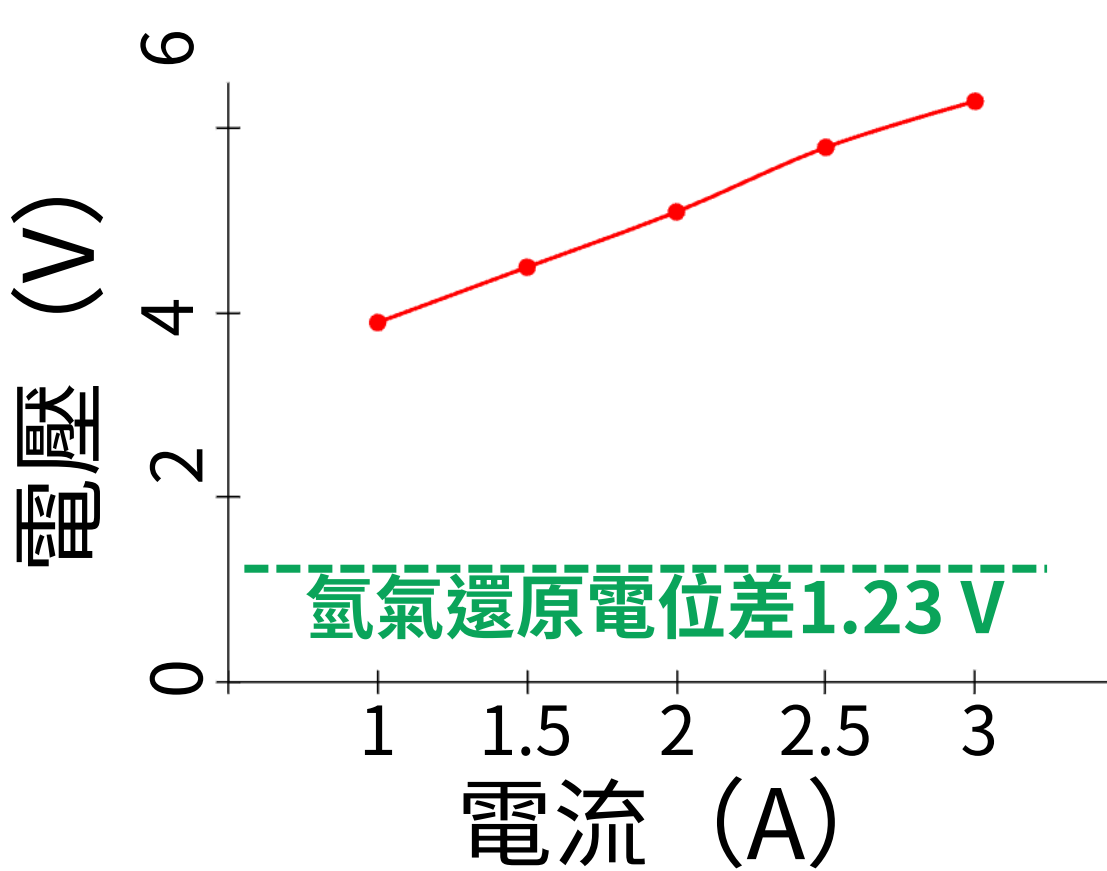
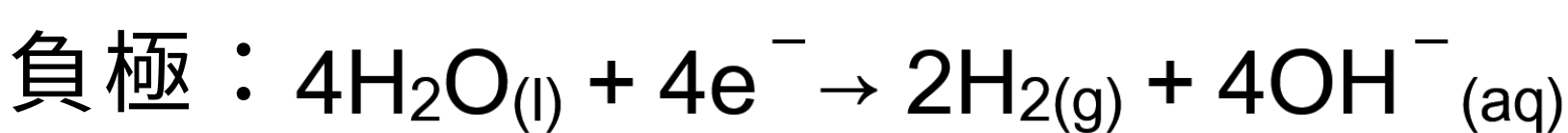
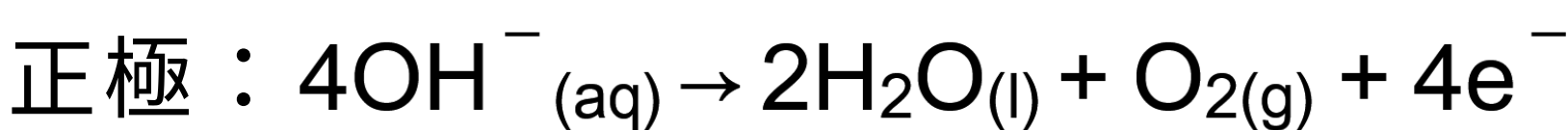


圖5、工作電壓和理論電壓

過電位的原因包括：

- 1、歐姆過電位
- 2、活性過電位
- 3、濃度過電位

二、降低過電位—圓筒式雙層環繞結構

(一) 失敗 ver.

(1)500μm石墨板




圖6、厚度500μm石墨板彎曲時易斷裂

(2)130μm石墨板

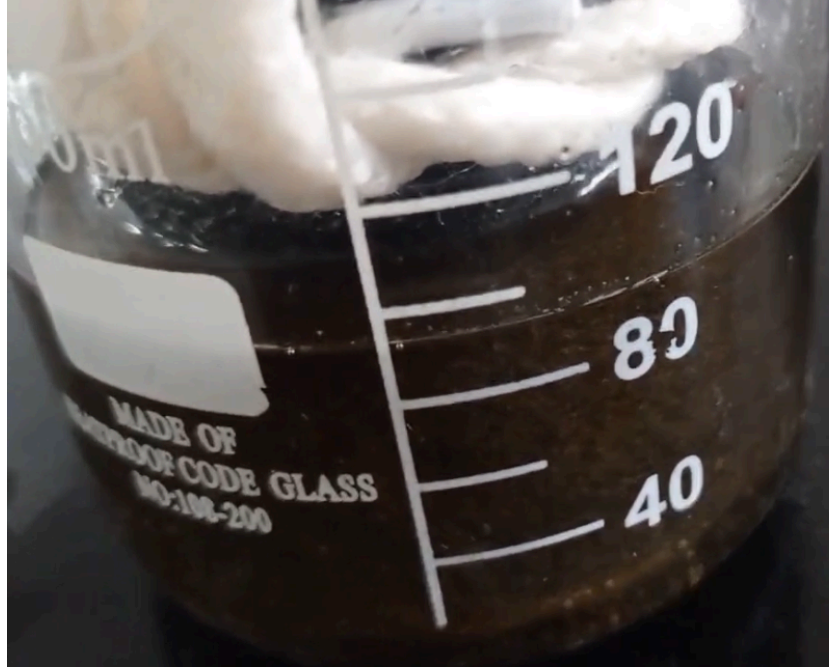


圖7、厚度130μm石墨板入電解液立刻反應

(3)石墨氈




圖8、石墨氈具強疏水性

失敗原因

- 1、厚石墨板具不可撓性。
- 2、純度稍低的石墨板無法存在於強鹼環境。
- 3、石墨氈具強烈疏水性，電阻大。

(二) 成功 ver.

(1)石墨紙

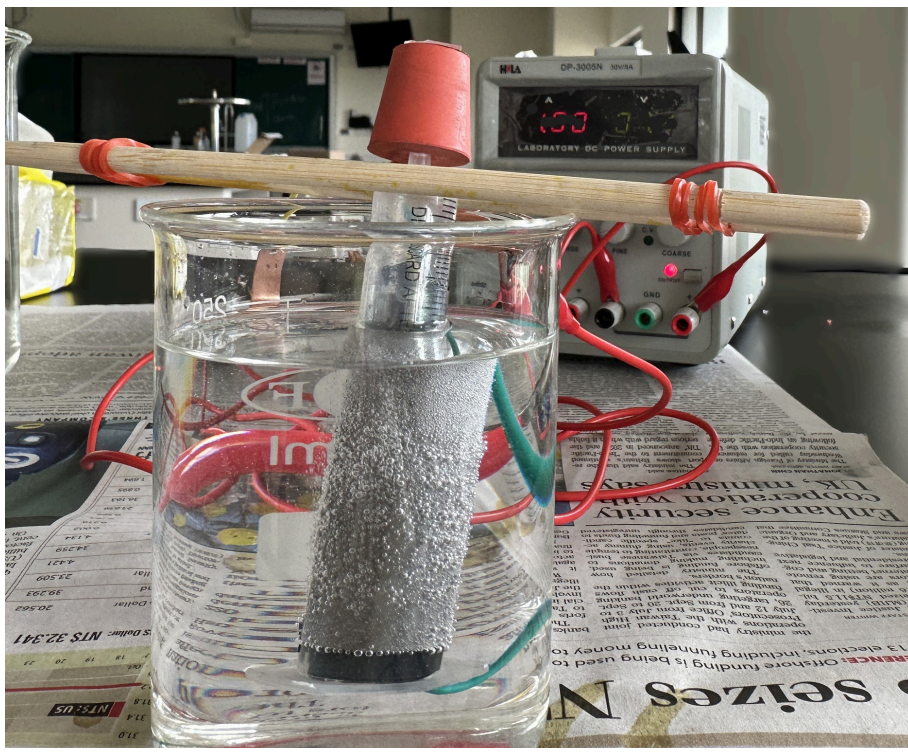


圖9、石墨紙圓筒雙層電極電解裝置

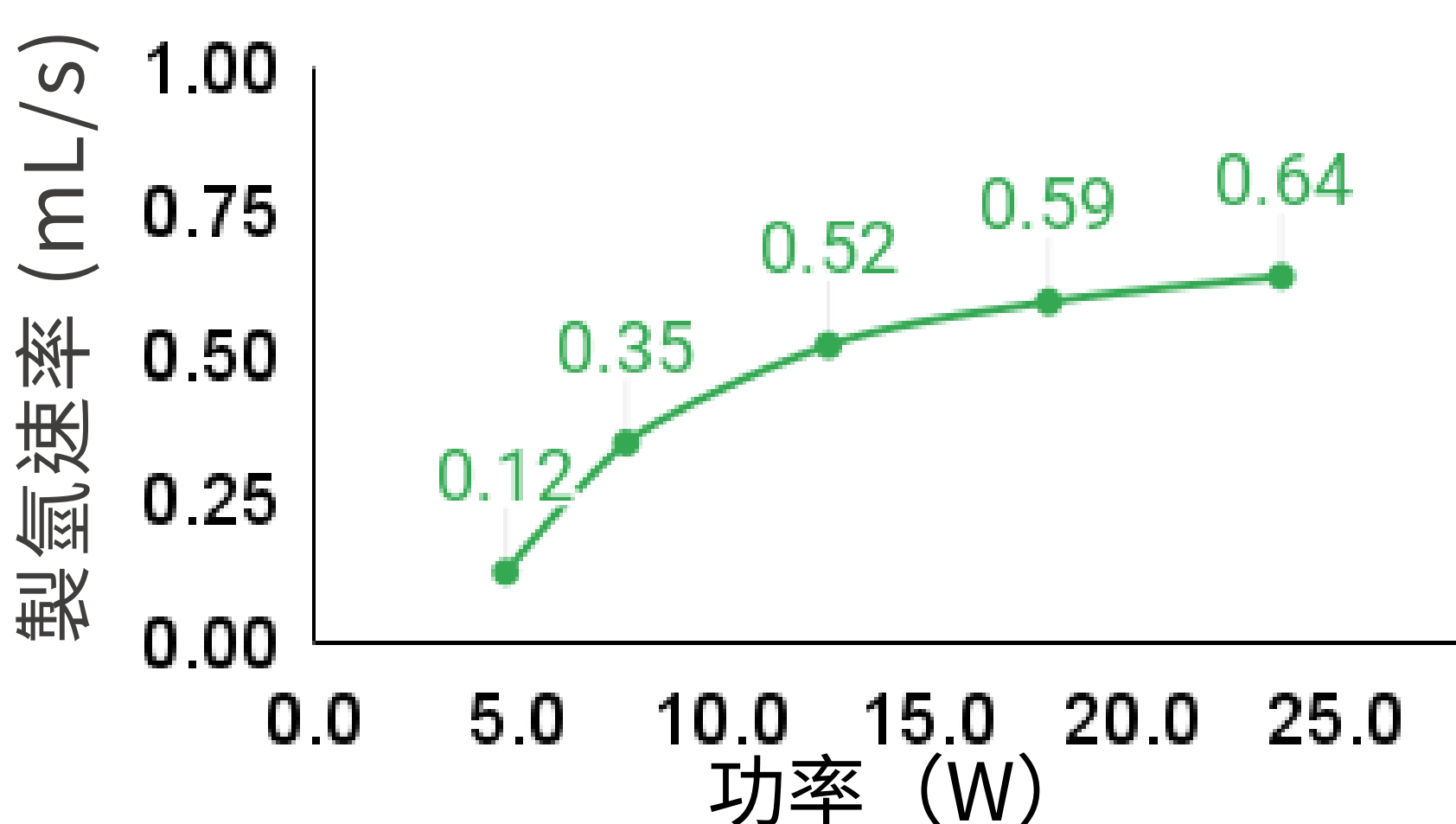


圖10、雙層石墨紙為電極時，功率與製氫速率的關係圖

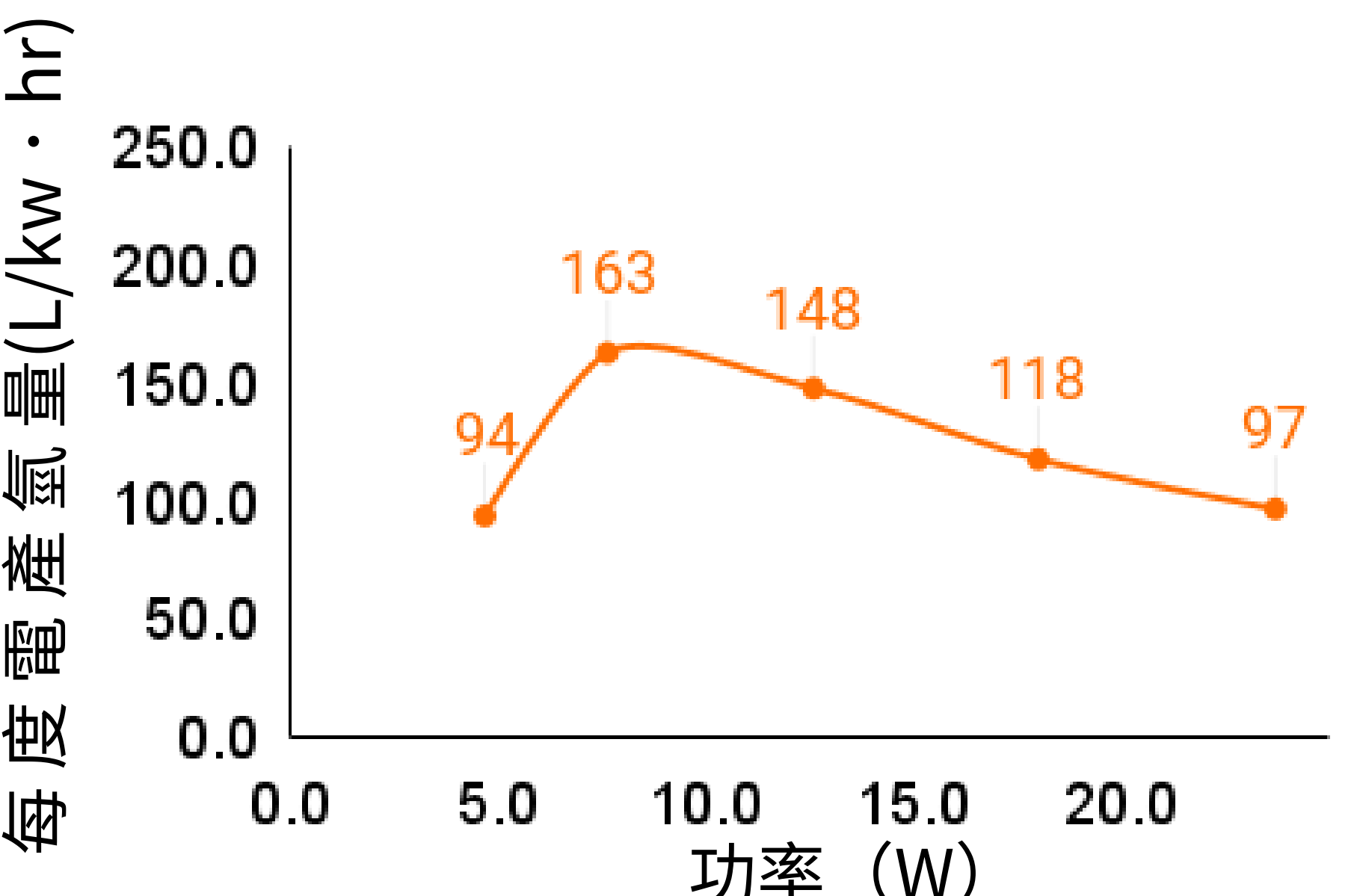


圖11、雙層石墨紙為電極時，功率與能量效率的關係圖

(2)多孔發泡鎳(降低活化過電位)




圖12、發泡鎳圓筒雙層電極

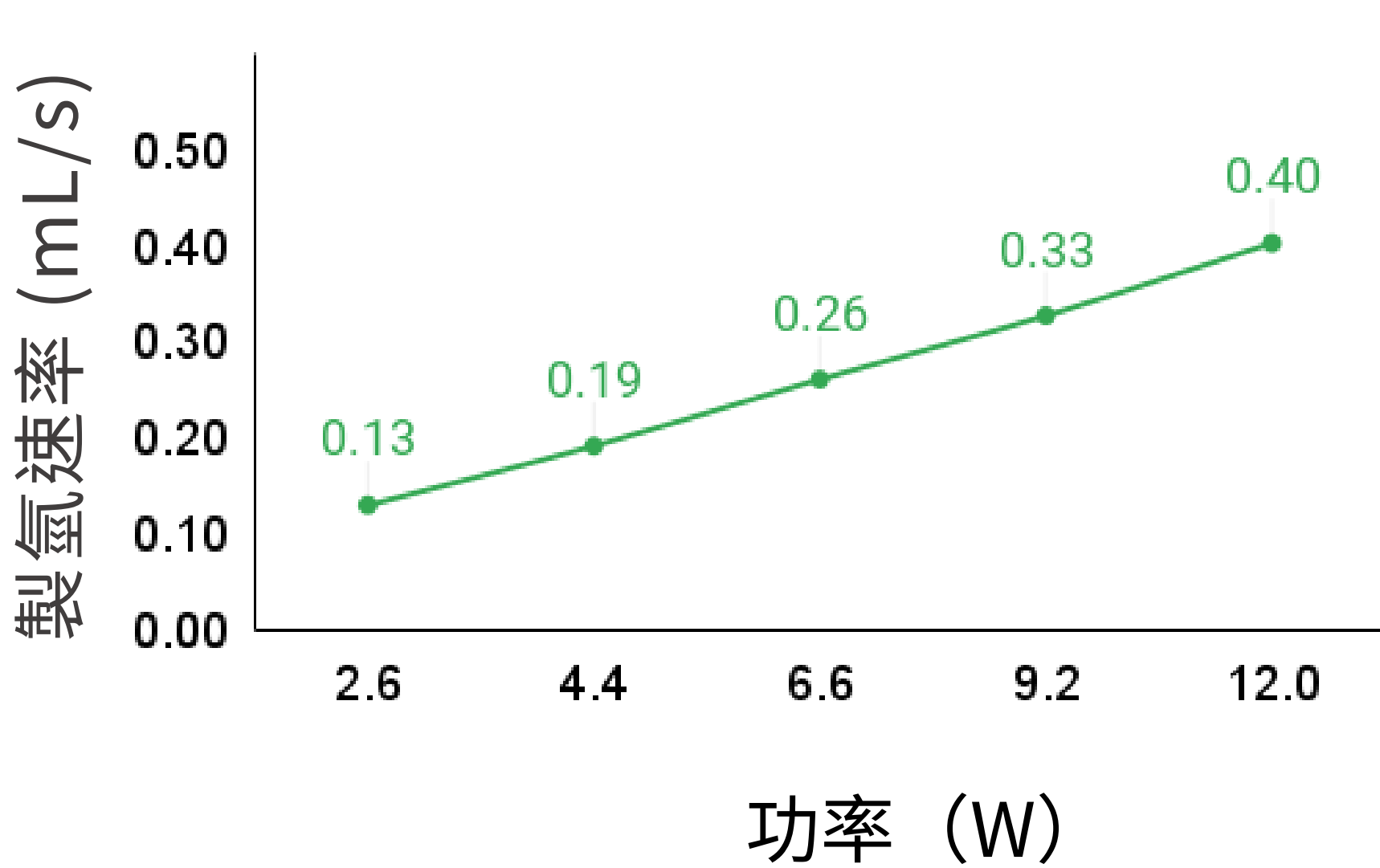


圖13、雙層發泡鎳為電極時，功率與製氫速率的關係圖

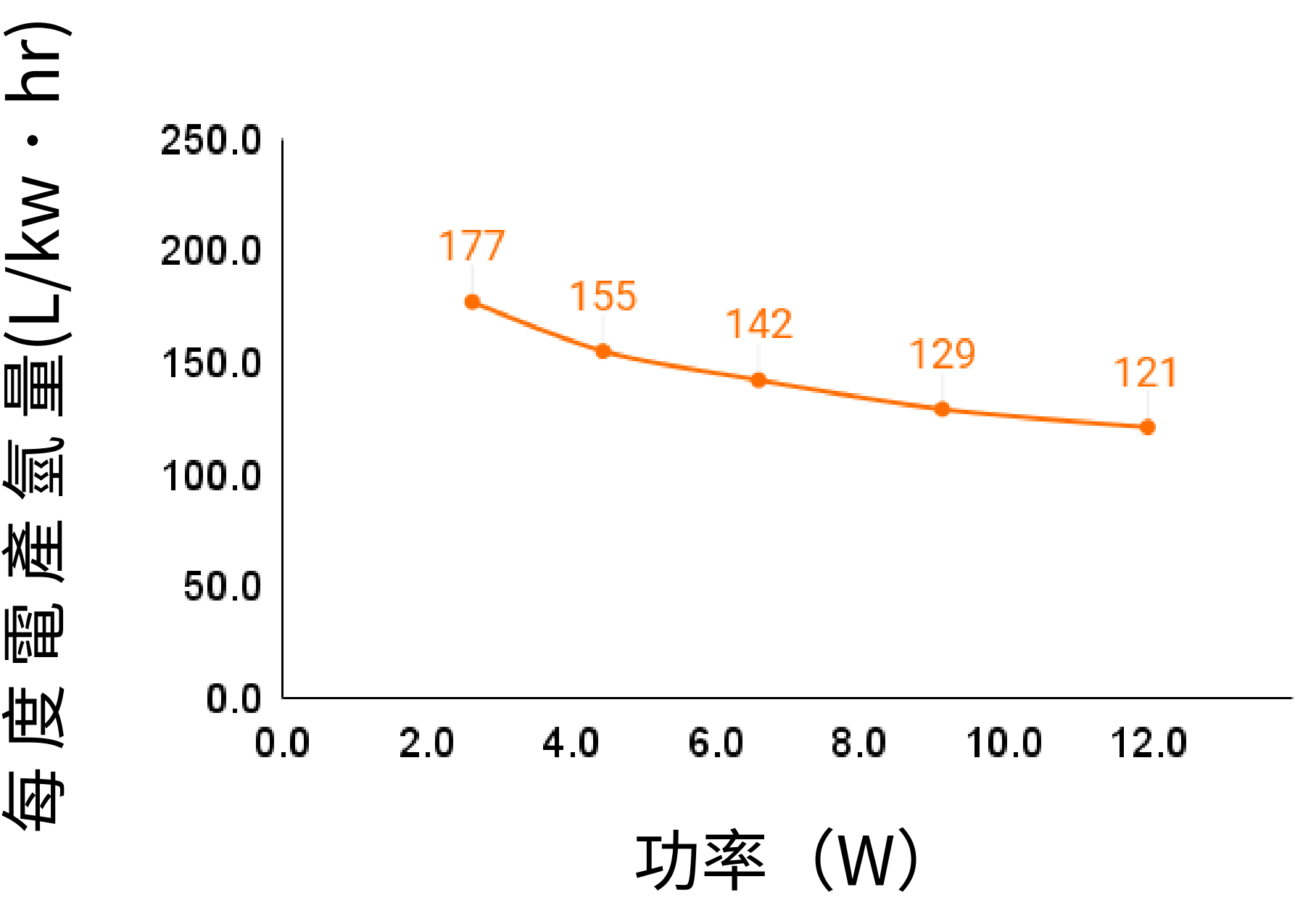


圖14、雙層發泡鎳為電極時，功率與能量效率的關係圖

三、離子交換膜對製氫速率的影響

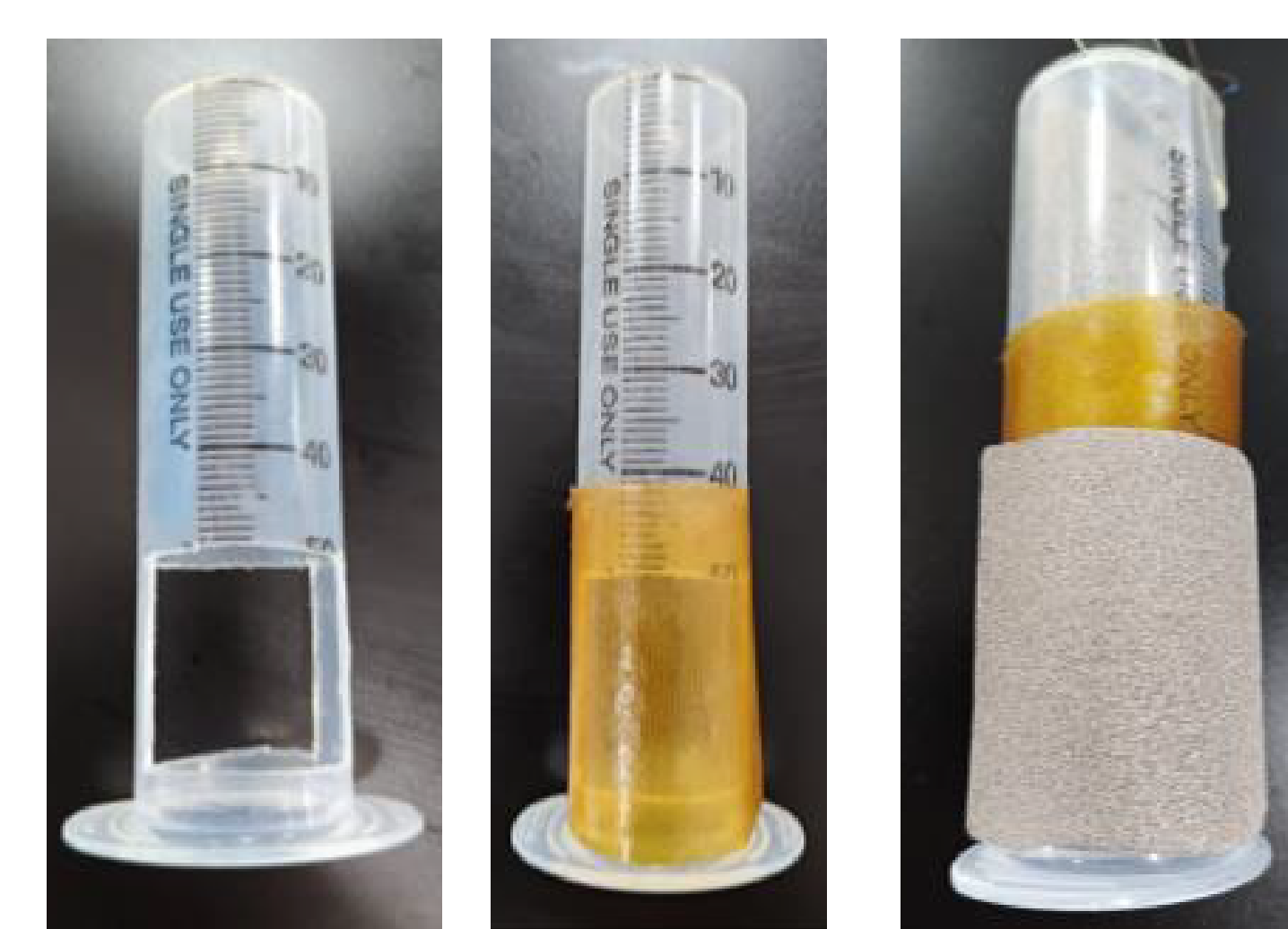


圖15、發泡鎳上離子交換膜圓筒雙層電極

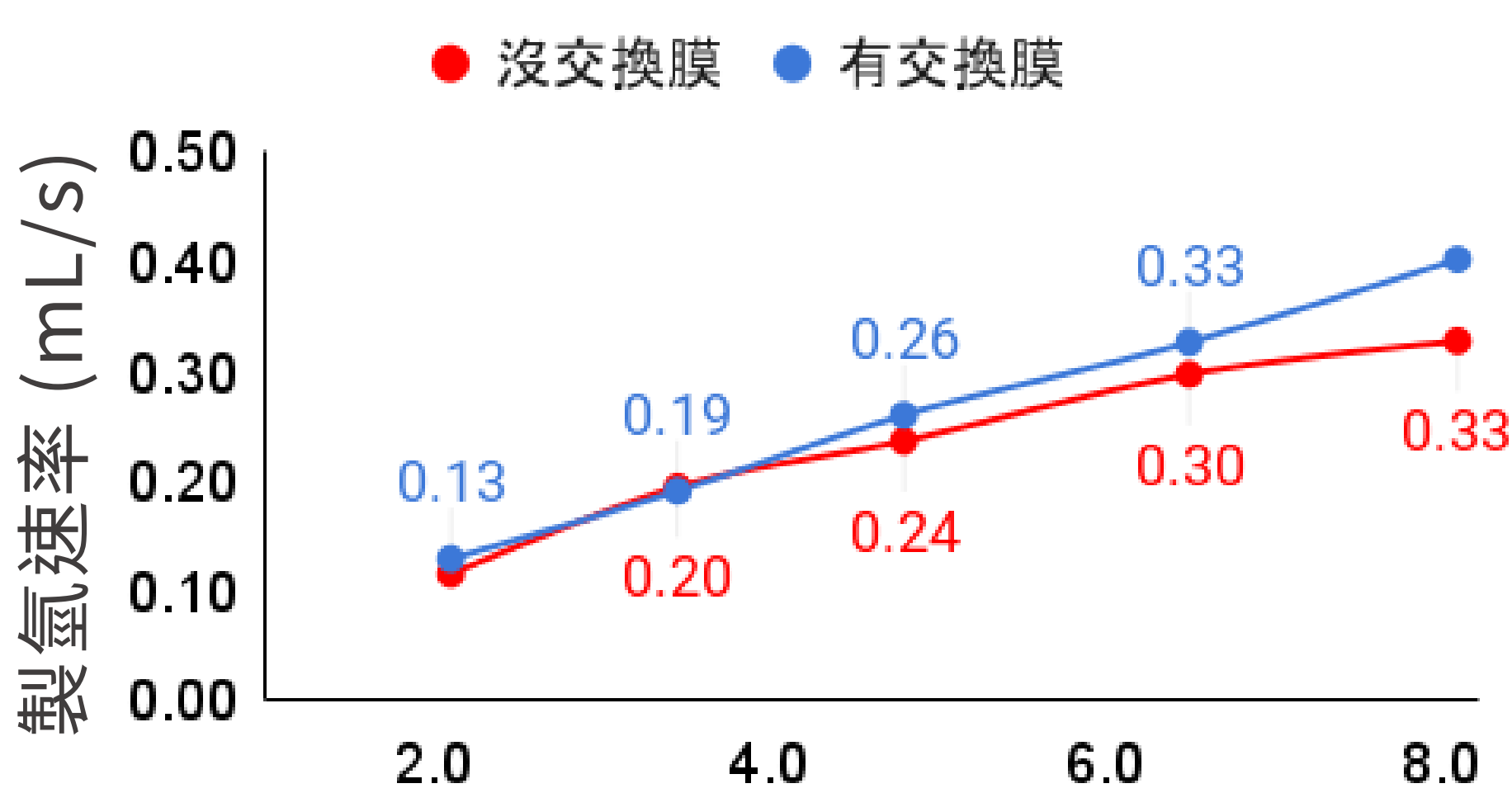


圖16、離子交換膜有無對製氫速率的影響關係圖

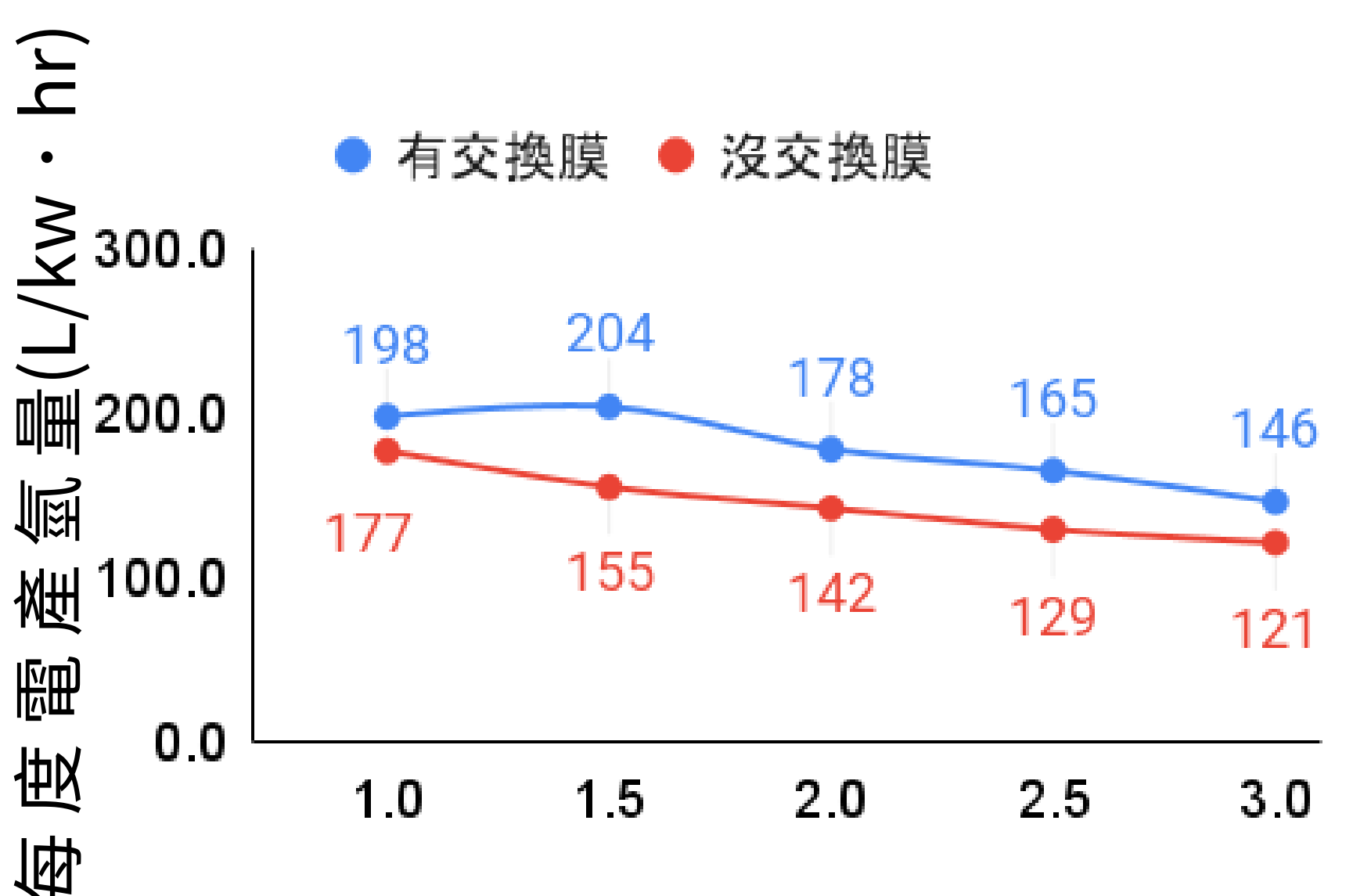


圖17、離子交換膜有無對能量效率的影響關係圖

四、不同工作溫度對能量效率的影響

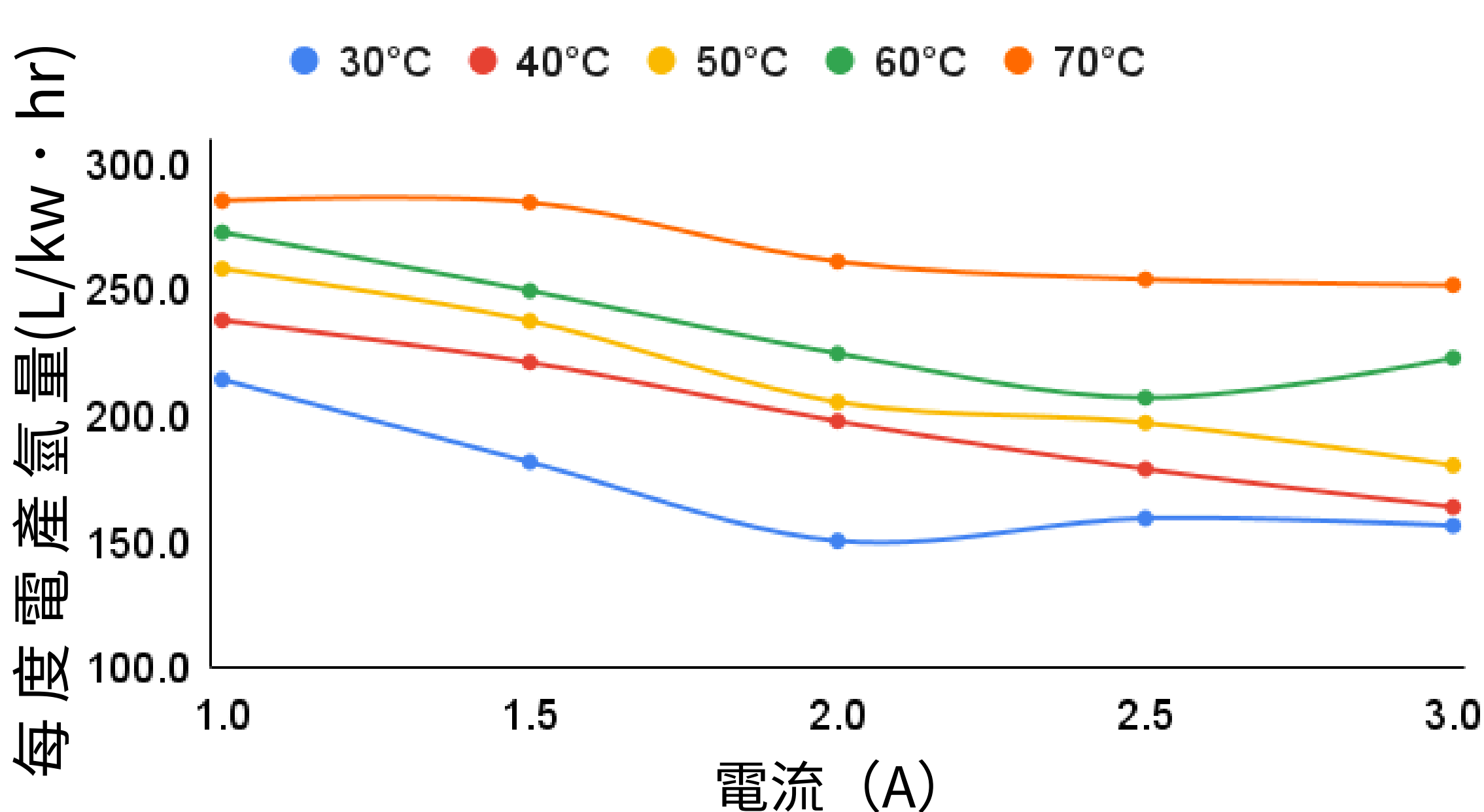


圖18、溫度與電解水能量效率關係圖

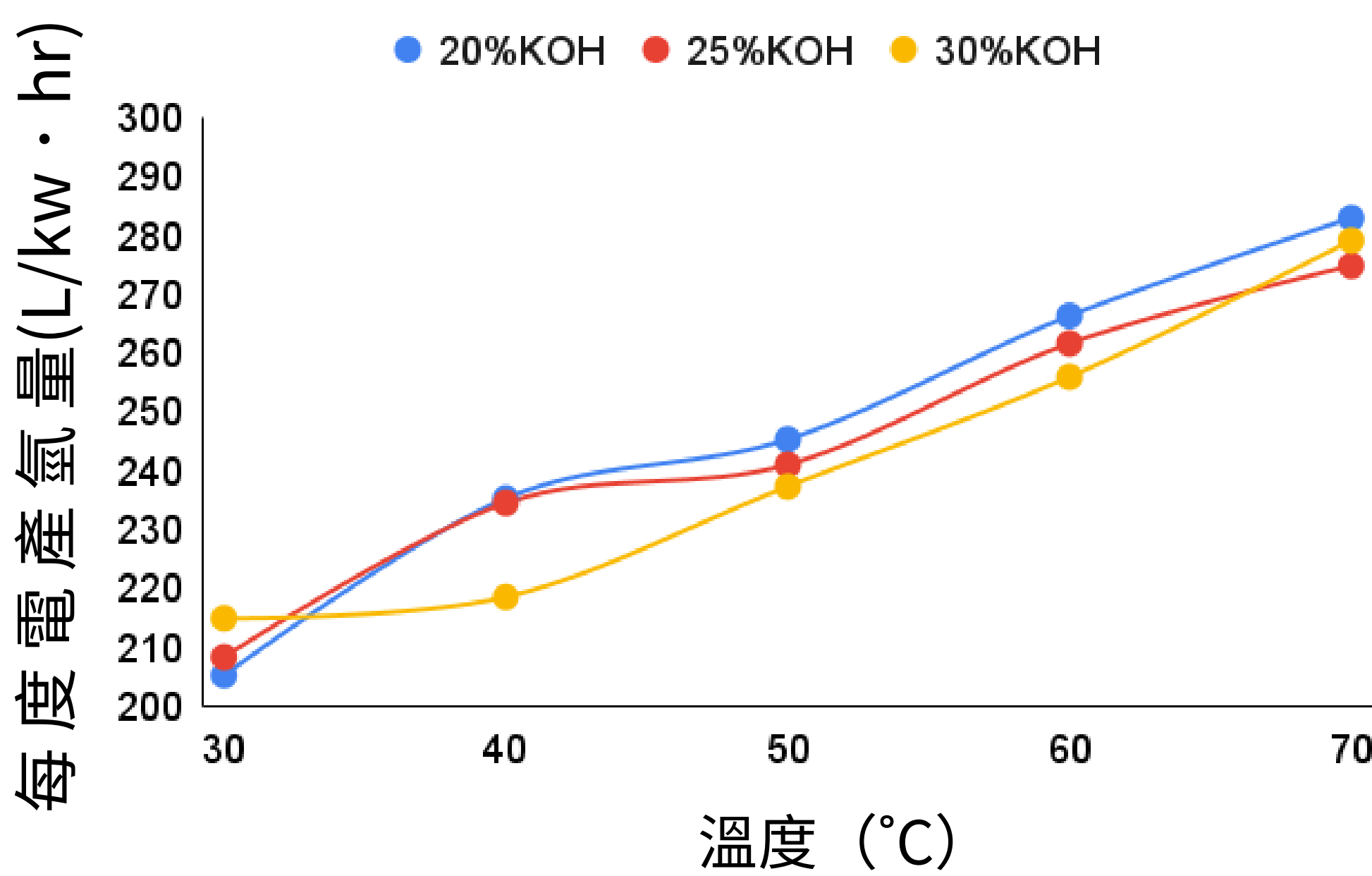


圖19、不同的KOH濃度對照不同溫度的能量效率關係圖

五、電極材料統整討論

(一) 不同電極材料的I-V curve比較 (二) 不同電極材料的能源轉換效率

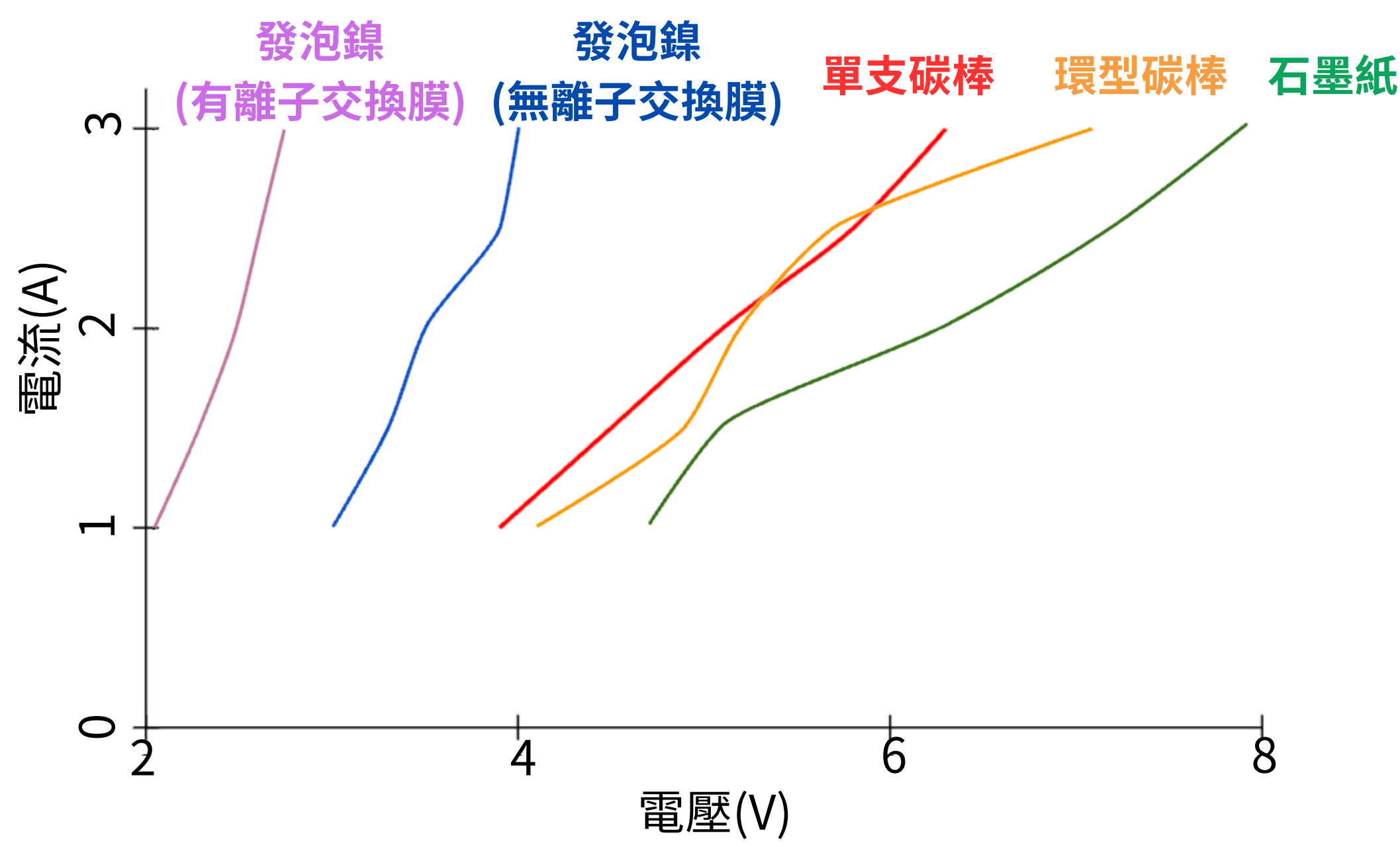


圖20、不同電極材料的 I-V curve

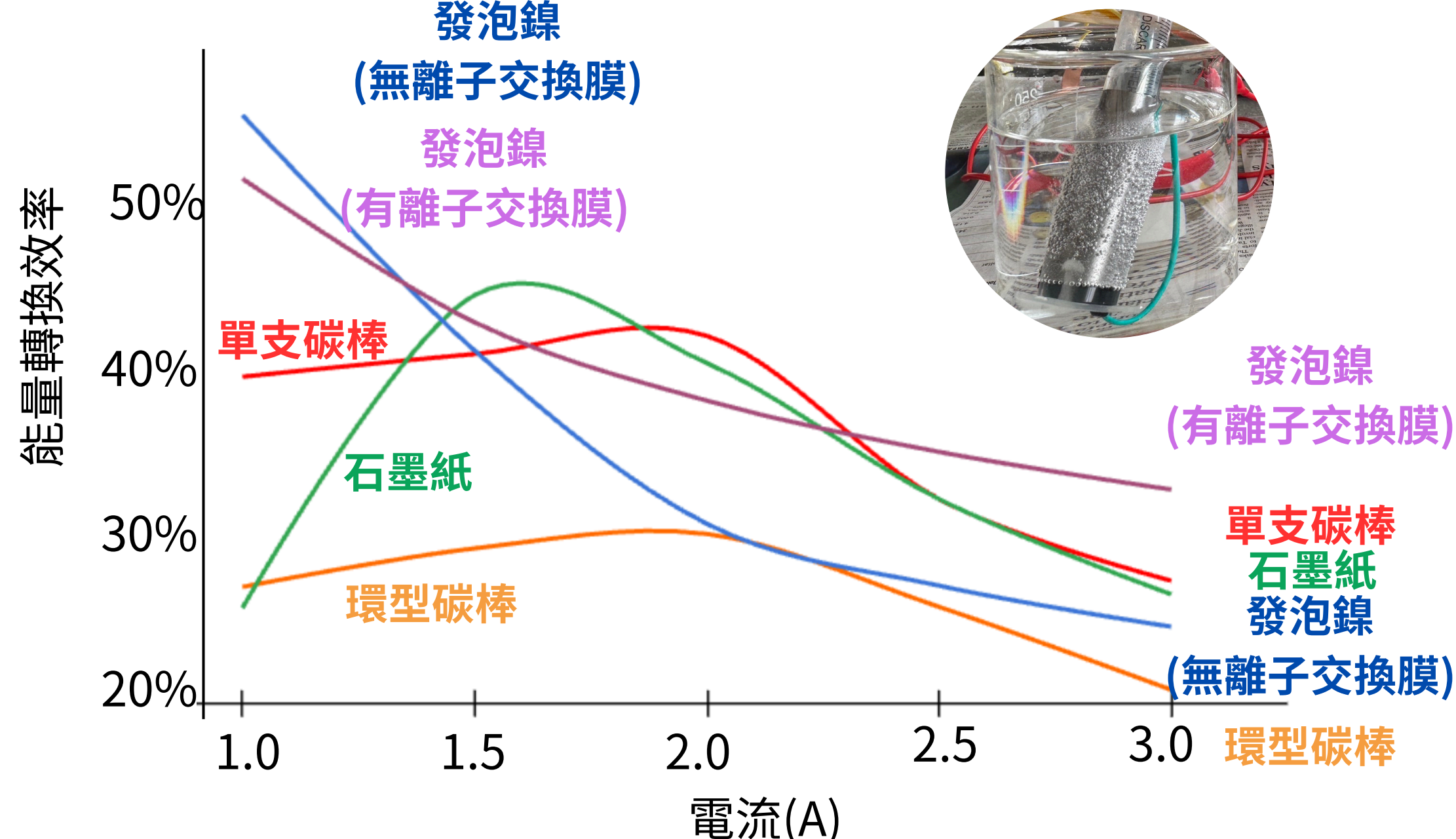
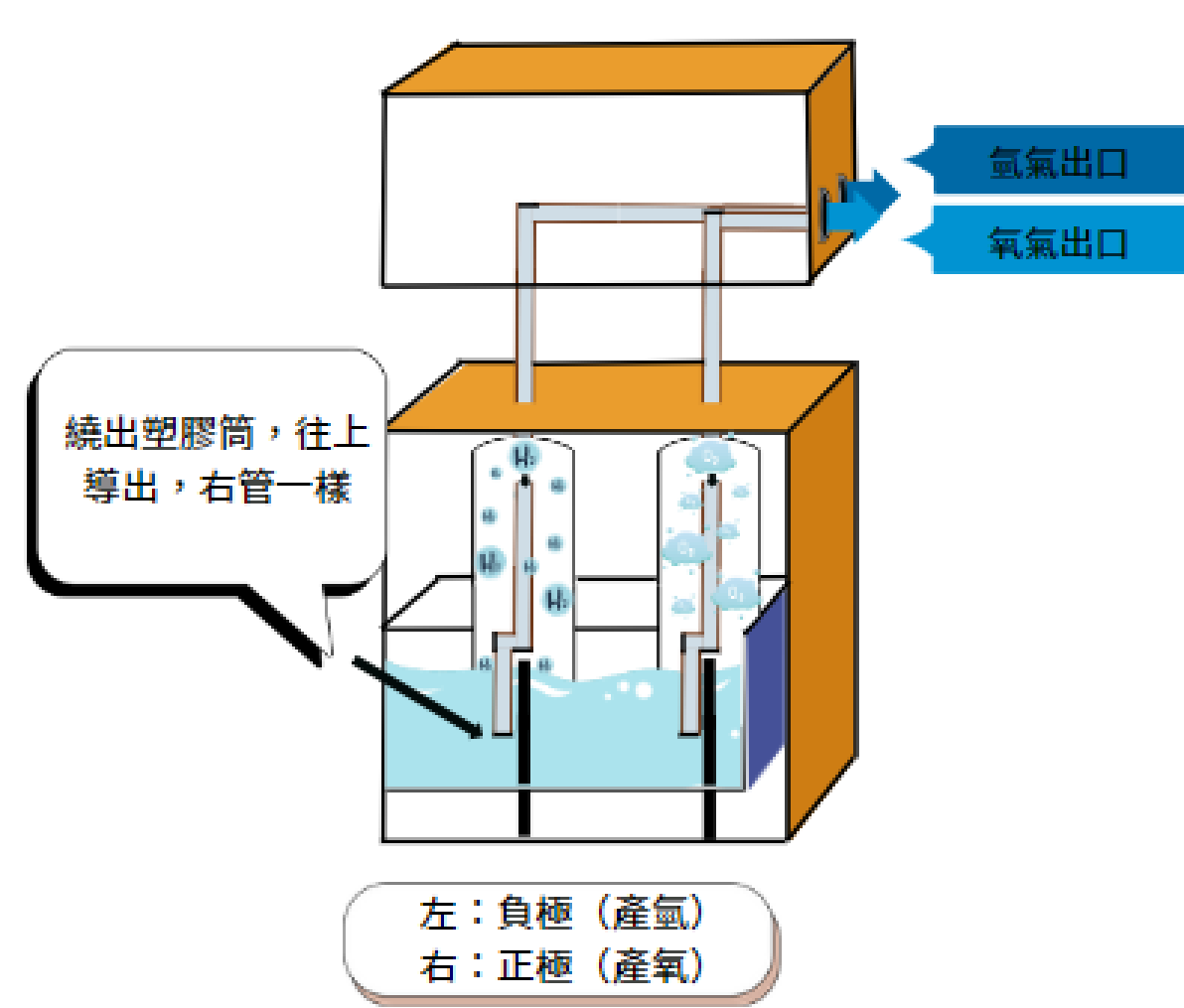


圖21、不同電極材料的能源轉換率

六、製氫裝置設計及演進

第一代 模組化



第二代 共用電解液

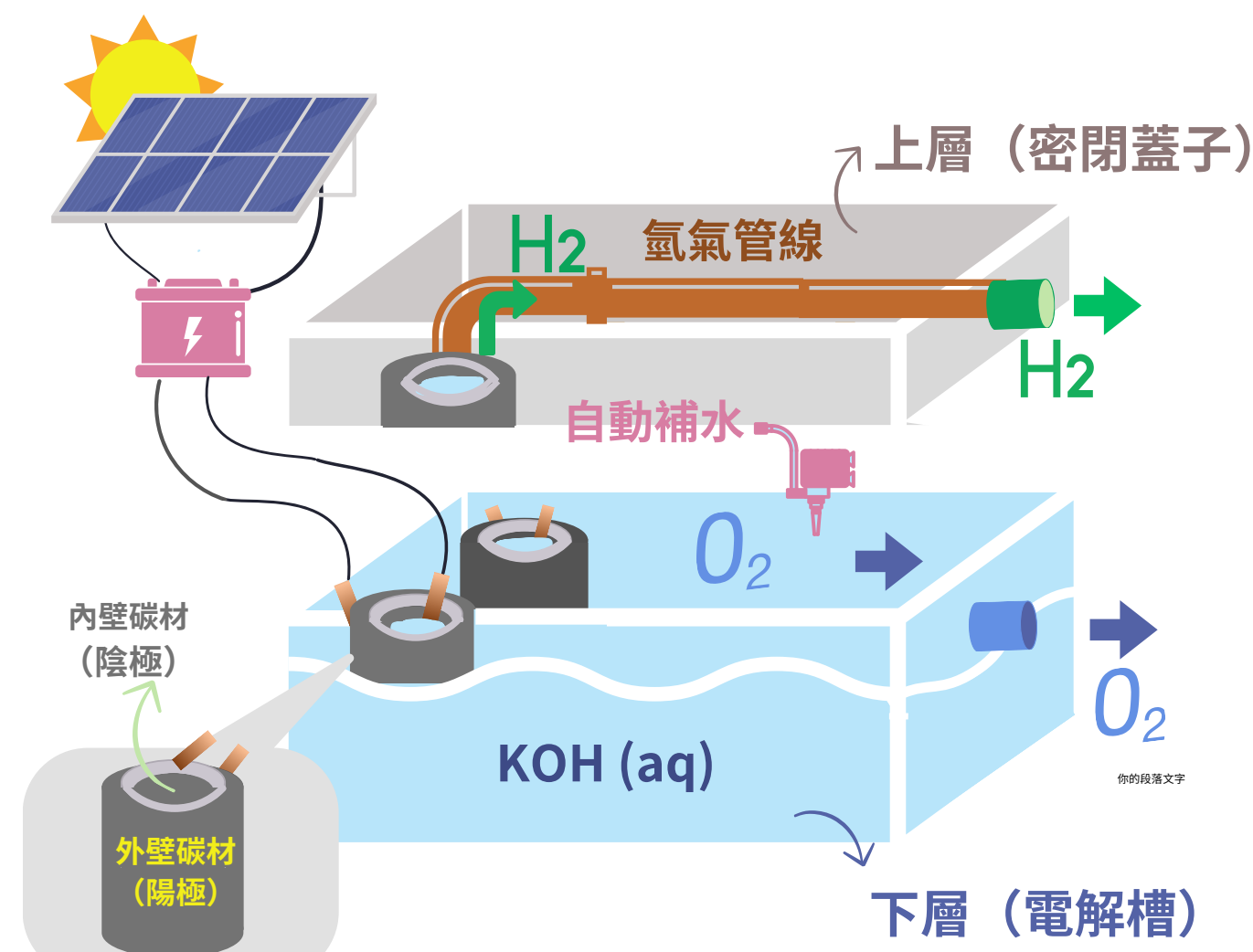
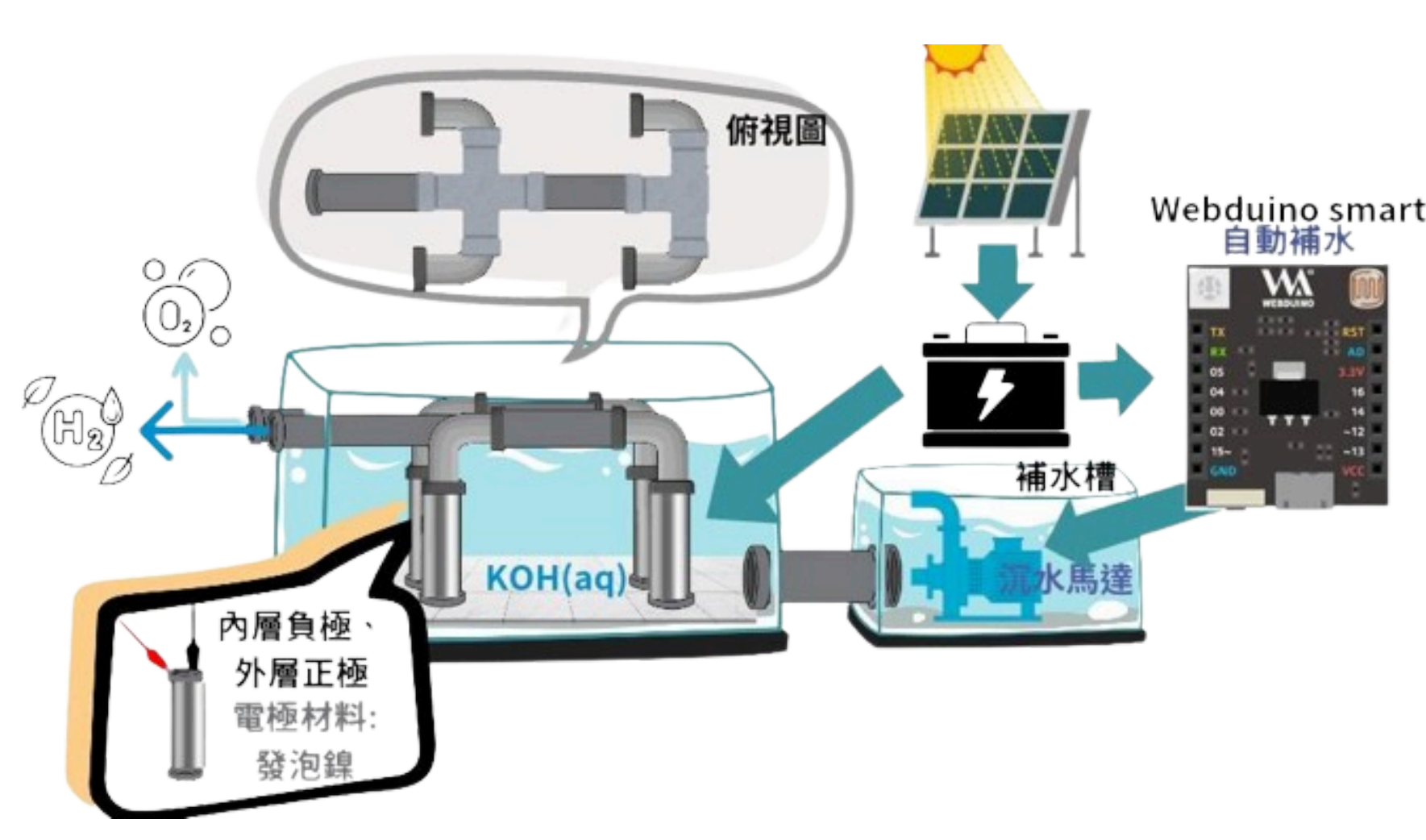


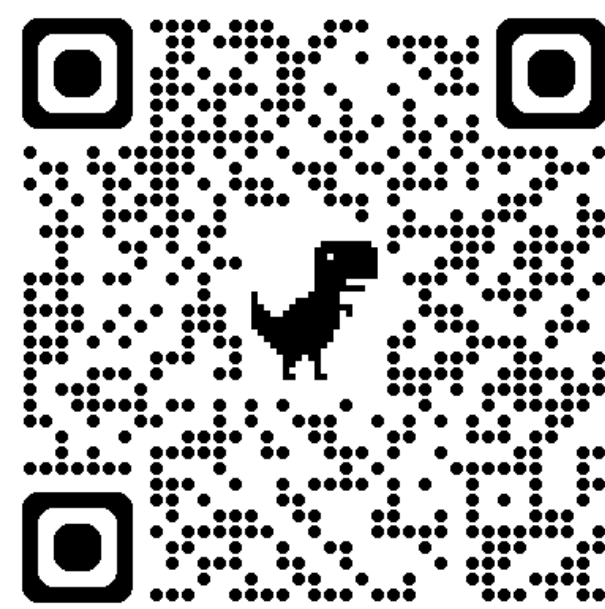
圖22、歷代裝置設計圖

第三代 流動性電解液 IoT遠端監控



IoT部分程式碼與連結

```
<body>
<div align="center">
<h2>水產氫IoT裝置</h2></div>
<div align="center" id="startButton">
<button id="sendBtn" onclick="send()">開始運行</button>
<br><br>
</div>
<div align="center" id="nowState" style="display: none;">
<h3>裝置狀態</h3>
<p style="display:inline;" id="dhtData">溫度:, 溼度:</p>
<br>
</div>
</body>
```



<https://guidephy.github.io/WGH>

未來展望

低成本、高普及

儲能、運用廣泛

綠氫 → 淨零碳排

結論

- 一、利用電解水製氫是一種潔淨、持續性的製氫方式。而選擇適當的電解質濃度、工作電流和電極材料，對於提高製氫效率至關重要。
- 二、相較其他碳材，石墨紙作為電極材料，在中等功率區間（9.0 W~13.4 W）時能量效率最高。
- 三、採用圓筒雙層結構可有效縮小電極距離，減小電阻，進而提高製氫效率。
- 四、與碳材相比，多孔發泡鎳因有更好的導電性，並具催化效果，故提高產氫能效。
- 五、使用離子交換膜與幫浦可有效的降低濃度極化過電位，且達分隔兩極產物及減少氣泡的效果。
- 六、本實驗通過系統性的探索和改良，開發出的電解裝置可有效解決一開始的漏液、自動補水、製氫速率不足等問題，並可藉調節電極數量以應對不同能量需求，搭配IoT裝置，達自動化，為推動氫能利用和實現淨零碳排做出了積極的付出。

參考文獻

- 鐘金明（2020）。綠色能源科技（第四版）。新文京開發出版有限公司。
- 林茂文（2022）。2050 淨零碳排下的氫能發展方向與挑戰。石油季刊，58（1），1-42。
- 經濟部（2023 年 4 月 22 日）。臺灣 2050 淨零轉型「氫能」關鍵戰略行動計畫。行政院全球資訊網。<https://reurl.cc/YVb2N4>
- 環境部（2023 年 8 月 25 日）。國家溫室氣體排放清冊。環境部資訊網。<https://reurl.cc/4j7DVL>
- 陳怡如（2022 年 8 月 18 日）。打造氫能新經濟。今周刊新聞網。<https://reurl.cc/lg2EyQ>。
- 本實驗所有圖皆由研究者自行拍攝或繪製。