

行政院原子能委員會
委託研究計畫研究報告

液流電池模組流場設計之最適化研究

Flow field optimization for an all-vanadium redox flow battery

計畫編號：NL1060524

受委託機關(構)：國立中正大學

計畫主持人：陳永松 副教授

聯絡電話：05-2720411x33309

E-mail address：imeysc@ccu.edu.tw

協同主持人：無

研究期程：中華民國 106 年 5 月至 106 年 12 月

研究經費：新臺幣 61.5 萬元

核研所聯絡人員：鄒函文

報告日期：106 年 12 月 1 日

目錄

中文摘要	1
ABSTRACT	2
壹、計畫緣起與目的	3
一、計畫緣起	3
二、文獻回顧	5
三、研究目的	16
貳、研究方法與過程	18
一、研究方法	18
二、單電池性能量測實驗	19
三、數學模型	24
參、主要發現與結論	29
一、無流道之電池性能	29
二、具指叉型流道之電池性能	31
三、歧路電流之模擬結果	35
四、幫浦耗能模型之建立	40
五、流道設計之最佳化評估	43
六、結論	50
肆、參考文獻	52

中文摘要

全鈳氧化還原液流電池是利用不同氧化態的鈳離子進行氧化還原反應來儲能。因為其充放電之轉換速度快、循環壽命長、功率及電容易可彈性設計等優點，因此是一極具潛力與太陽能及風能結合之儲能系統。在實用上，全鈳液流電池的反應面積大，因此需考量電解液在反應區域的濃度差異造成之濃度過電位及電解液在反應區的分配均勻性。前者可藉由在反應區域設計流道使入口電解液可快速流至出口處，以降低出口處的濃度過電位；後者可藉由設計分配流道以降低電解液在橫向分布的差異。

本研究設計了一石墨板可替換式的單電池，以量測不同流道設計對電池效率之影響，此單電池在高度方向長達20 cm，以代表實際應用的反應面積。此外，此單電池也可用於探討多孔性電極之流道設計對電池性能之影響。分配流道部分則探討不同流道設計尺寸對分歧電流、幫浦耗能的影響，並對流道設計參數進行最佳化。

關鍵詞：全鈳氧化還原液流電池、流道設計、分歧電流、石墨板、多孔性電極。

Abstract

All vanadium redox flow batteries (VRFBs) store energy by the redox reaction of vanadium ions with different oxidation states. They have advantages of quick switch between charging and discharging processes, long cycle life, flexible design on power and energy capacity; hence, they are promising candidates as energy storage systems for solar and wind power sources. In practical application, the active area of a VRFB is usually thousands of square centimeters. Accordingly, it is a challenge to improve the uniformities of redox reaction and electrolyte distribution within the VRFB. The former can be improved by flow channel design in the reaction area to deliver high concentration electrolyte toward the outlet area to reduce concentration overpotential; the latter can be improved by flow distributor design between the active area and manifold to reduce the lateral electrolyte concentration difference.

In this study, a single cell with an interchangeable graphite plates will be designed to study the effect of flow channel design on the efficiencies of a VRFB. The length of flow direction is 20 centimeter to represent the active area in practical application. In addition, the single cell can be used to investigate the effect of flow channel design in porous electrodes on the battery performance. The effect of flow distributor design on shunt current, pump power consumption will also be analyzed and discussed. The optimal design of flow distributor will be suggested.

Keywords: All-vanadium redox flow battery, flow channel design, shunt current, graphite plate, porous electrode

壹、計畫緣起與目的

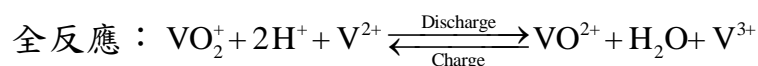
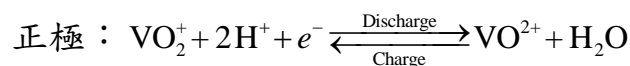
一、計畫緣起

為了加速產業轉型升級，政府的 5+2 產業政策中包含「亞洲矽谷」、「生技醫療」、「綠能科技」、「智慧機械」及「國防航太」等五大創新產業，外加「新農業」、「循環經濟」。其中綠能科技以「創能」、「儲能」、「節能」、「系統整合」為四大主軸，以「國際連結技術+市場」、「整合研發技術、人才」、「打造綠能科技創新產業生態系」為三大策略。為了達成 2025 非核家園之政策目標，在 2025 年的能源配比為：燃煤 30%、燃氣 50%、再生能源 20%。其中再生能源中太陽光電之發電量為 250 億度、風力發電為 140 億度。設置目標為太陽光電 20 GW、風力發電 4.2 GW [1]。

再生能源之穩定性受天候及使用端負載需求而影響，因此需要搭配一電網級儲能系統以穩定其輸出及平衡負載，以提高其實用性。電網級儲能系統有水庫抽水儲能、二次電池、超級電容、飛輪及氧化還原液流電池（Redox flow battery）等。在各種氧化還原液流電池中，全鈦氧化還原液流電池（以下簡稱全鈦液流電池）是最近各國許多研究單位積極投入研究之液流電池。其原理是利用不同價態的鈦離子溶液進行氧化還原反應以作為儲存或釋出能量。由於其正負極的電解液是分別儲存於電

池外部，因此自放電損耗極低；其電極的結構在氧化還原過程中不會發生變化，因此壽命較一般鉛酸電池長；此外，全鈦電池之操作及維護成本極低，因此近年來已和再生能源系統，如太陽能電池及風力發電機結合，作為平衡負載之用。

全鈦電池之正極和負極的電解液分別儲存於外部之儲存槽，再藉由供液幫浦分別輸入電池中，以做為充放電反應之用，其反應原理如下：



由於全鈦液流電池之工作電流密度低（40~100 mA cm⁻²），因此為了符合應用需求，反應面積需達數千平方公分，單一電池堆中串聯的電池數也需數十片，以與再生能源之電力系統結合。全鈦液流電池系統之效率與電池堆之設計參數及操作參數有關，而電解液在電池內部流動之均勻性及流動情形是設計電池堆之一重要考量。

傳統設計中，電解液在電池中的流道型式如圖 1 所示，電解液由下方之入口主流道進入單電池中的分配流道、流入反應區域、再由出口之分配流道流至上方之出口主流道。為了提高濃度分布之均勻性及增加質傳效應，已有許多設計在反應區域

中設計流道。這些流道不是影響電池堆的效率，也影響幫浦的耗能；此外，由入口或出口至反應區域的分配流道也是影響電解液在反應面積區域內分布之均勻性、歧路電流分布及供液幫浦耗能之重要參數。因此。如能了解這些流道設計對電池堆性能及幫浦耗能之影響，則有助於提升全鈳液流電池之系統運作效率。

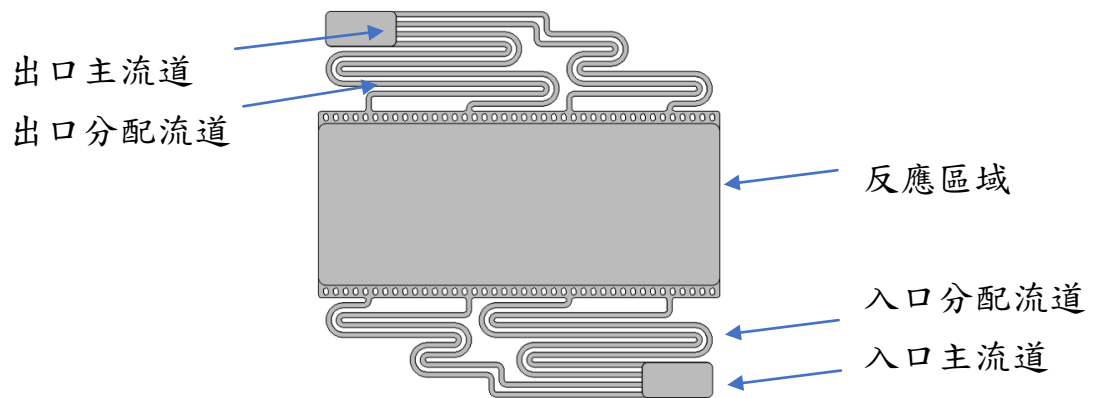


圖 1：電解液在電池中的流道示意圖。

二、文獻回顧

電池堆的流道設計可分成反應區域內的流道設計及入口或出口至反應區域的分配流道設計。反應區域的流道設計參數影響電解液的質傳效應及電池之性能；分配流道設計參數則影響電池堆的歧路電流及電解液進入反應區域的均勻性。而這兩者設計均會影響電解液在電池中的壓降，進而影響幫浦的耗能。

以下針對這兩種區域之流道設計對電池之影響進行文獻回顧：

(一) 反應區域之流道設計

雖然全釩液流電池的幾個研究已經提出使用具有流動通道的雙極板，類似於燃料電池的設計，但 Bhattarai 等人[2]提出了在多孔電極中使用流動通道作為替代方法。設計了一反應面積為 $10 \times 10 \text{ cm}^2$ ，具有流道的四種類型的電極：矩形開口通道（ROC）、交叉開口通道（IDD-OC）、又指圓形戳通通道（IDD-CPC）和交叉戳通圓形通道（CPCC），並且與不具有通道的常規電極進行比較，如圖 2 所示。由於流量分佈和泵浦功率減少的改善，IDD-OC 可以提高總體能量效率高達 2.7%；而由於流量分佈的改善，IDD-CPC 可以提高 2.5% 的總體能量效率。

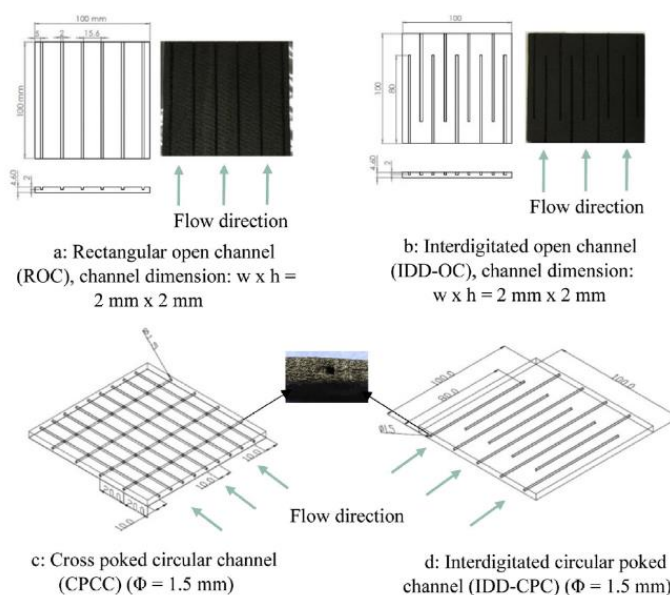


圖 2：Bhattarai 等人所提出的四種電極設計[2]。

Wei 等人[3]建立了具有流場結構的全鈇液流電池，並將碳奈米顆粒塗覆於幾何面積為 $1.8 \times 2.6 \text{ mm}^2$ 之石墨氈電極上。透過減少電極厚度、增加表面積和塗覆碳奈米顆粒改善電催化活性，以降低歐姆損失。這種新型結構使電池在高達 100 mA cm^{-2} 的電流密度下有高達 84.8% 的能量效率和 508 mWcm^{-2} 的峰值功率密度。

You 等人[4]開發了一個有效面積為 900 cm^2 的半電池的 3D 模型，如圖 3 所示，以探討流場的設計規則，並優化通道的數量和尺寸，以在壓降和電極中的電解質輸送速度之間達到平衡。其分別對幫浦耗能損失和大量輸送損失具有重要影響。除了平均速度的大小之外，在設計流場時還應注意速度分佈的均勻性，其由電極中的流阻與通道中的流阻的比率決定。適當厚度的流道可以改善速度分佈的均勻性。實驗中引入 9 個入口通道和 8 個出口通道可以將幫浦耗能損失減少至電池功率的 1%，且電極中的流速仍落在全鈇液流電池的典型設計範圍內。壓降則可以通過增加通道深度和寬度進一步減小，這使得在平均速度不變化的前提下使速度分佈的均勻性有顯著變化。在具有 $2 \times 3 \text{ mm}^2$ （深度×寬度）橫截面積的通道滿足採用低滲透性電極的電池的壓降和流速的要求。而對於使用高滲透率電極的電池，較少和深的流道會較有利。

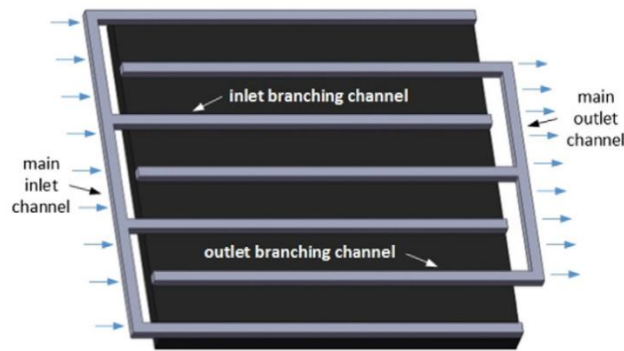


圖 3：You 等人開發之半電池 3D 模型[4]

為了提高液流電池的性能，必須降低諸如幫浦耗能和歐姆損耗的能量損失。這些損失多發生在碳氈電極處，因為高黏性電解液通過時易產生壓降，且碳氈的低纖維含量亦增加了電阻。因此，這些損失應該被最小化以提高電池的效率。Choe 等人[5]設計了波紋複合型式之雙極板（CCBP），如圖 4 所示。雙極板和多孔性電極間留有間隙，可以減少這些損失。其在實驗中，計算並比較每種操作條件的幫浦耗能和歐姆損失，並且確定最佳操作條件和設計。對於 1000 和 2000 A/m² 的操作電流密度，獲得電解液的最大能量密度所需的流速分別為 12 和 18 mm/s。基於這些結果，相對於碳氈的平均纖維容積比和 CCBP 的波紋的振幅，計算碳氈電極中的實際泵浦和歐姆損失。比較兩個損失的總和，從中選擇具有 1.2 mm 振幅的 5.6% 纖維容積比作為最佳設計。其可以在 1000 A/m² 的電流密度下將損失的總

和減少 18%，在 2000 A/m^2 下亦降低 15%。

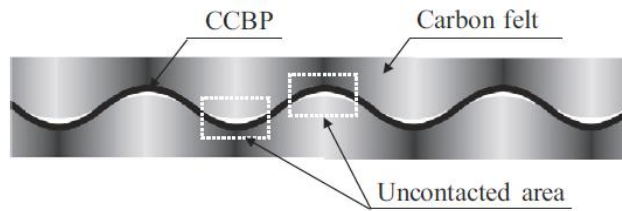


圖 4：CCBP 示意圖[5]

Zhou 等人[6]提出一個簡單和低成本的方法製造一個雙尺度多孔電極，即使用 KOH 活化碳紙的纖維，如圖 4 所示。碳紙的比表面積增加了 16 倍，但同時保持與原始碳紙電極相同的水壓滲透性。然後他們將雙尺度電極應用於電池，並且在 $200\text{-}400 \text{ mA cm}^{-2}$ 的電流密度下表現出 82% 至 88% 的能量效率。在其後的研 究中，Zhou 等人[7]進一步開發由 KOH 活化方法在碳纖維的表 面上產生奈米級孔隙，使表面積從 $2.39 \text{ m}^2\text{g}^{-1}$ 顯著增加至 $15.4 \text{ m}^2\text{g}^{-1}$ 。裝配有 KOH 活性碳布電極的電池在 400 mA cm^{-2} 的電流 密度下有 80.1% 的能量效率和 74.6% 的電解質利用率。

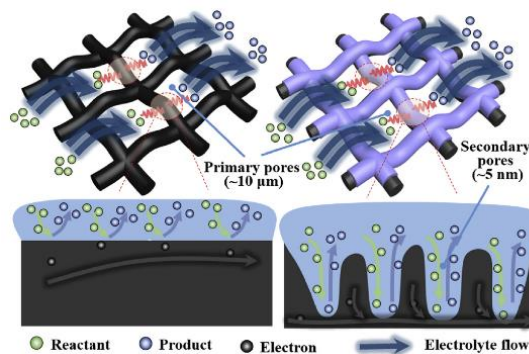


圖 5：Zhou 等人使用 KOH 活化方法蝕刻碳纖維表面示意圖[6]

Yin 等人[8]提出了具有指叉流動通道設計的電池的 3D 模型。在模型中建立了兩種不同的堆入口設計，分別為單入口和多入口，以研究電池操作期間的流體壓力、電位、電流密度和過電位的分佈，如圖 6 所示。並且就入口歧管的幾何形狀、電解質流速和通道尺寸來討論電池性能。對於單入口設計，電解液流場、電位、電流密度和過電位沿電解液的流動方向均勻分佈，電解液流量和通道尺寸不同；對於多入口設計，在低流速（ $stoich$ 小於 25）下，電解質的壓力在多孔電極的側入口中顯著下降，導致電解質流場和電池電位的不均勻分佈。在較高的電解液流量（ $stoich$ 大於 25）下，多孔電極的電位分佈變得均勻，且多孔電極的利用效率比單入口更高，以致於有更好的電池性能。

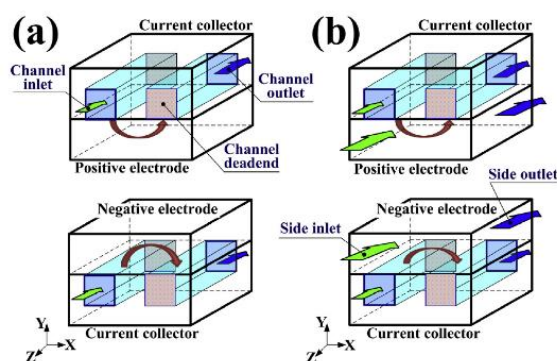


圖 6：Yin 等人提出的入口設計：(a)單入口設計；(b)多入口設計。[8]

Kee 等人[9]開發了一個數學模型，用於評估指叉型通道結構內，如圖 6 所示的流動均勻性和壓降，特別是在液流電池的情況下。統御方程式被投射在無因次變量中，得出一組特徵無因次參數組。統御方程式的系統在計算上求解，結果以圖形方式呈現。因為結果是一般的，底層模型本身不需要應用定量設計指南。然而，研究中提出並討論了重新創建模型所需的所有資訊。

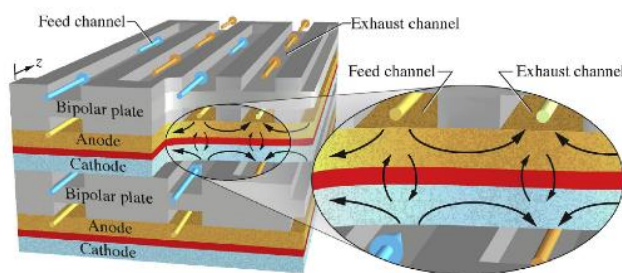


圖 7：叉指型氧化還原液流電池佈局的一些顯著特徵[9]。

Zheng 等人[10]建立一數學模型探討蜿蜒式、平行式、及指叉型流道設計，如圖 8 所示，對電解液在流速、濃度、及濃度過電位在電池中的空間分布及隨 SOC 的變化情形。其結果顯示，質傳過電位的變化特性在高 SOC 或高電流密度下更為明顯。

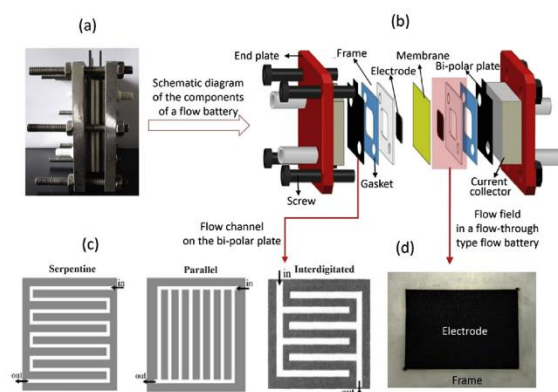


圖 8：Zheng 等人研究使用之電池設計[10]

Ke 等人[11]開發了一個二維數學模型，以研究在具有流場設計的液流電池中的多孔電極分層系統上的流動通道段中的流動模式和體積流量穿透率，以改進具有流場設計的液流電池的電化學性能。研究了兩種電池的多孔電極配置：(1)如圖 9(a)所示的無流場型式之傳統電池，電解液完全會流過多孔性電極；(2)如圖 9(b)所示之具有流場的電池，部分電解液會流過流道，部分流入較薄的電極。發現在理想塞流入口和理想拋物線流入口條件下，界面流動分佈是不同的，這是由於在電解液流動的開始和結束時在流道和多孔電極中的非線性壓力行為引起的。

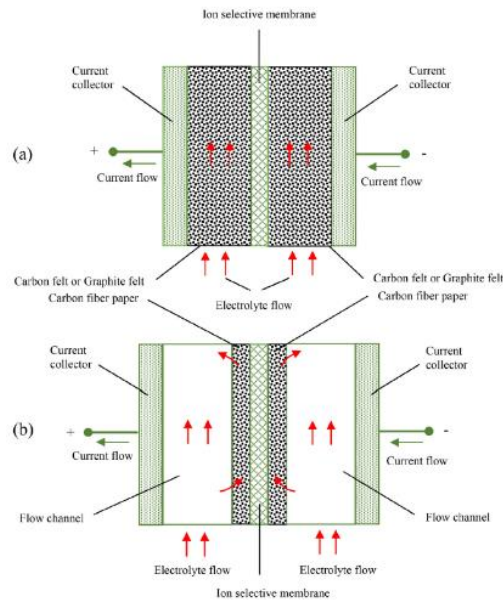


圖 9：RFB 的二維配置：(a)沒有流場的典型液流電池；(b)具有流場的液流電池[11]。

(二) 出入口區域之分配流道設計

分配流道之設計主要使電解液可均勻流入反應區及降低歧路電流的損耗。當流道越長或截面積越小時，等效電阻越大，則歧路電流越小；但是電解液流動的壓力降也越大，使得幫浦耗能增加。因此分配流道的設計需在歧路電流損失和幫浦耗能之間取得平衡。圖 10(a)顯示德國 Fraunhofer 研究所模擬電解液在全鈦電池中的流線分布[12]，由圖中可看到大部分的液體是以對角方向流動；而圖 10(b)則為美國太平洋西北國家實驗室模擬的結果[13]，可看到電解液分配已較均勻。這些研究中，並沒有分配流道設計與歧路電流及幫浦耗能作完整之分析。

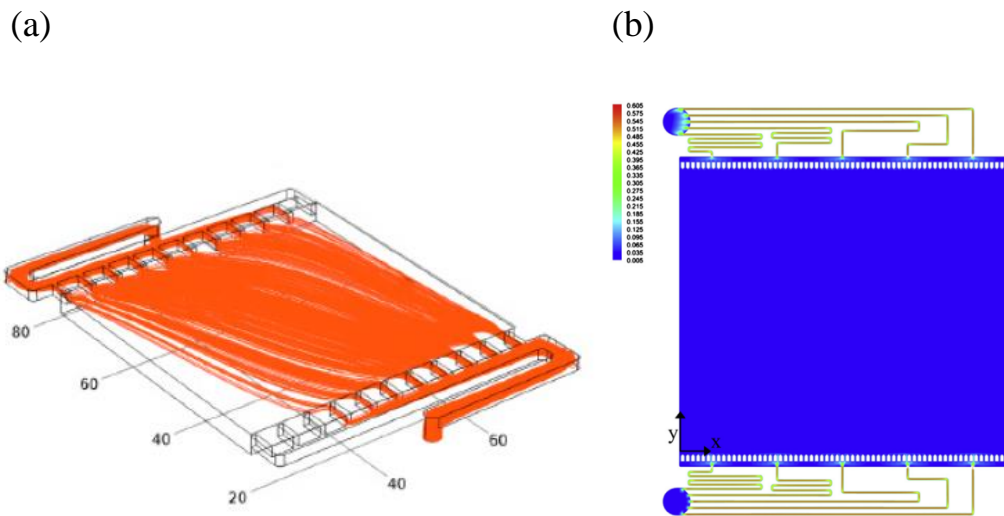


圖 10：(a)德國 Fraunhofer ICT 模擬電解液流線；(b)美國 PNNL 模擬電解液速度場。

Xing 等人[14]建立了一個電池堆中歧路電流的等效電路模型。模型中將反應區域和主流道之間的分配流道及各單電池間的主流道以等效電阻取代，再利用 Kirchhoff's 定律計算各流道的歧路電流。此方法中的電池性能方程式是假設電池的內阻抗為固定值進行計算，然而實際運作的電池性能會依操作電流密度及電解液濃度或流率改變。Yin 等人 [15]建立了一個 3D 之數學模型以探討電池之分支電流之分布及對庫倫效率之影響，如圖 11 所示，並利用一單電池及 5-cell 之短電堆進行實驗，如以驗證數學模型。其結果顯示，在外側電池的支路電流較中間電池的支路電流大，而實驗結果顯示庫倫效率約 73.1%，支路電流損失佔 22.6%，離子穿越膜之損失佔 4.3%。此高支路電流是由

於其分配流道之設計並未最佳化。其模擬結果與實驗結果相當吻合，但並未詳細解釋如何以實驗數據計算支路電流之分布。

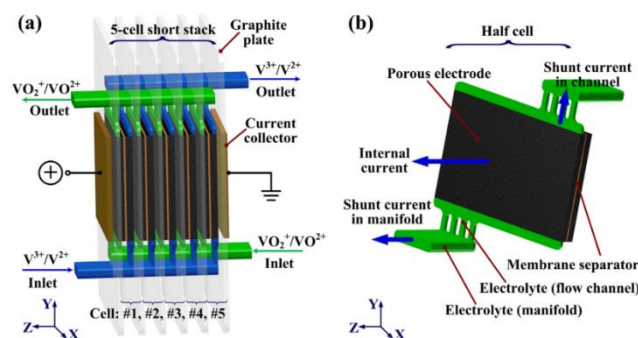


圖 11：(a) Yin 等人的電池堆模型；(b)半電池之細部結構[15]。

Ye 等人[16]建立了一數學模型探討多個電池堆系統中的歧路電流、幫浦耗能損失及權衡設計。模型中探討了各種設計參數，包含流道尺寸、主流道尺寸、電池堆數目等對整個系統效率的影響。Wei 等人[17]建立了一個數學模型以探討電池堆中的電解液在不同單電池中分佈情形，比較石墨板上分別無流道、單蛇蜓、雙蛇蜓設計造成之影響，如圖 12 所示。其中主流道孔徑越大，電解液在電池堆中分配至每一單電池的流率越不均勻。而在單蛇蜓流道中造成的壓力降最大。

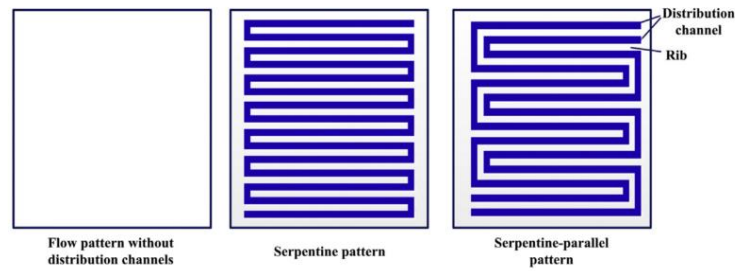


圖 12：Wei 的數學模型中模擬之不同流道型式[17]。

Fink [17]設計了一包含五個單電池的電池堆，並將電解液由外部管線分配至每一單電池。管線中的歧路電流則以非接觸式的電流感測試量測，如圖 13 所示。此外，Fink 也建立了一個數學模型來模擬的歧路電流，其模擬結果和實驗量測結果相當吻合。此模型探討了電池堆中電池數目對歧路電流分布及庫倫效率的影響。

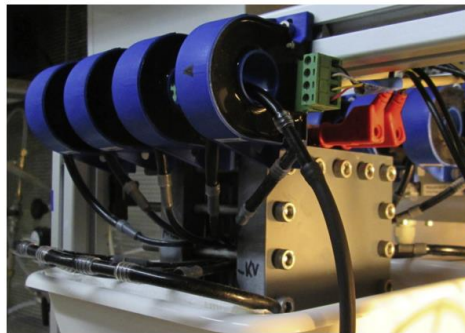


圖 13：Fink 量測歧路電流的實驗設計。

三、研究目的

由目前已發表之研究來看，在反應區的流道設計多以指叉式的效率為最佳；但是大部分研究仍著重於小面積之單電池，

尚未在大面積之電池上進行驗證。而在分配流道之研究方面，僅有少部分探討流道設計對電解液分配均勻性之影響；大部分則著重於歧路電流之分析。而將分配流道對歧路電流損失及幫浦耗能作一綜合探討之研究仍是非常有限的。因此，本研究計畫將針對反應區之流道形式及分配流道形式對效率之影響做一整合性之探討。

貳、研究方法與過程

一、研究方法

在圖 1 中的反應區加入流道設計是為了將部分高濃度的電解液藉由流道設計輸送入靠近出口處，以降低入口及出口電解液的濃度差異及電池反應的質傳過電位；分配流道設計則是為了使電解液可均勻的流入反應區及減少分歧電流，卻也使電解液流阻增加，因此分配流道的設計需在分歧電流及電解液壓力降之間找出一平衡設計。由於反應區域中的流道設計將直接影響電池的性能，因此在本研究計畫中，將設計一單電池以量測不同流道型式對電池性能之影響；而分配流道型式並不是影響電池反應之主要因素，且其設計繁多，歧路電流在多個單電池串聯之電池堆中才會造成影響，而且電池內部之歧路電流不易直接量測。在有限經費考量下，因此本研究計畫將分別探討反應區流道型式及出入口區流道型式對電池性能之影響。前者將以實驗方式進行電池性能量測，後者將利用一數學模型進行模擬。

實驗中量測之數據可供給數學模型進行驗證。實驗與模型之配合如圖 14 所示。實驗架設為探討反應區之流道設計對電池性能之影響，電池充放電儀量測電池在不同操作條件下之性能；電池之入口及出口處各安裝一個液體流量計，以量測電解液入口及

出口的壓力差，再配合流量計，則可以計算出幫浦所消耗的功率。在實驗中量得之壓力差可驗證數學模型中的模擬之電池內部壓力降；數學模型可計算分配流道及電池內部的壓力降造成損失，再配合模擬出的歧路電流損失，則可算出整個全釩液流電池之系統效率。

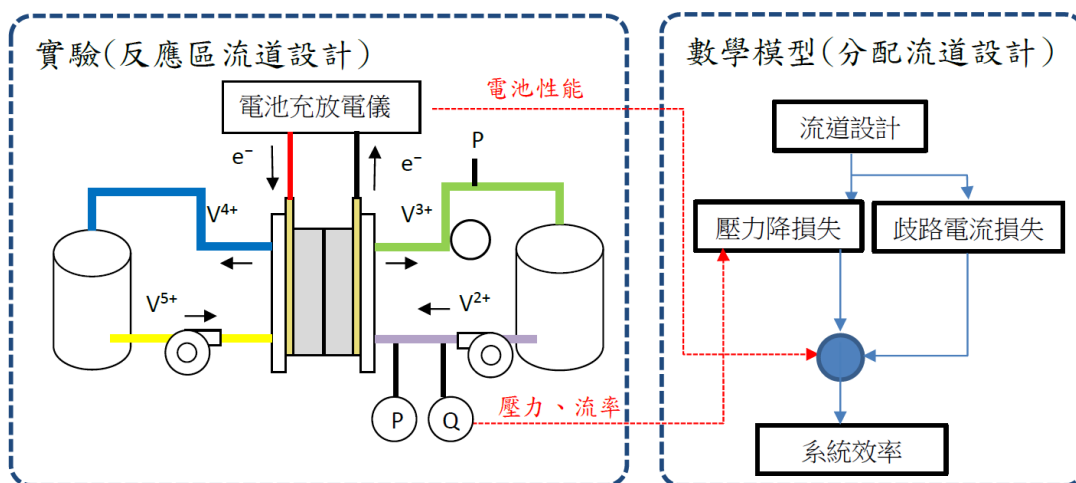


圖 14：本研究計畫中實驗與數學模型之搭配情形。

二、單電池性能量測實驗

在反應區的流道實驗中，假設分配流道可使電解液均勻流入反應區，而無橫向差異，只有流動方向之差異。因此，我們設計一長型的單電池，以代表整個反應區域，如圖 15 所示，其高度（即流動方向）至少為 18~20 cm，寬度為 6 cm，以代表大反應面積之電池，或可配合核能研究所的需求調整尺寸。而在實驗中，我們將採用不同流道型式的石墨板及有流道設計之石墨氈組

裝成單電池來量測其充放電性能曲線，並計算其庫倫效率、電壓效率及能量效率。

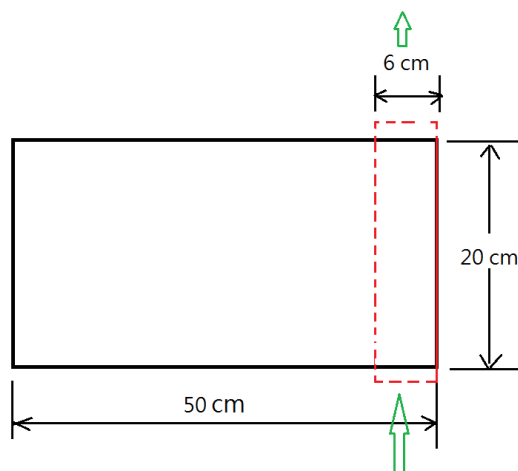


圖 15：本研究計畫中設計一單電池以代表實際電池中的部分反應區域。

由於流道設計的型式繁多，如針對每一種流道型式之石墨板製作一單電池，則將花費大量成本，單電池只使用一次也造成不必要的浪費。因此，為了節省實驗成本，本研究計畫的單電池零件中，其石墨板設計成可替換的型式。石墨板上的流道型式將採用指叉式並配合多種組合。在指叉式的流場中，入口流道和出口流道並不直接相通，需經由多孔性石墨氈電極。這是目前大部分論文都會採用的型式，但是部分電解液也會經由出口流道而離開反應區域，這部分的電解液並未參與反應，反而多消耗了流動的能量。因此效能的提升有限。

可替換石墨板如圖 16 所示。其中圖 16(a)與(b)為不同流道寬度及肋寬之示意圖，分別採用不同的流道寬度及肋條寬度。由於流道在橫向上為重覆排列，因此本研究利用一窄型區域來代表實際全反應面積。圖 16(d)為加工完成之石墨板。

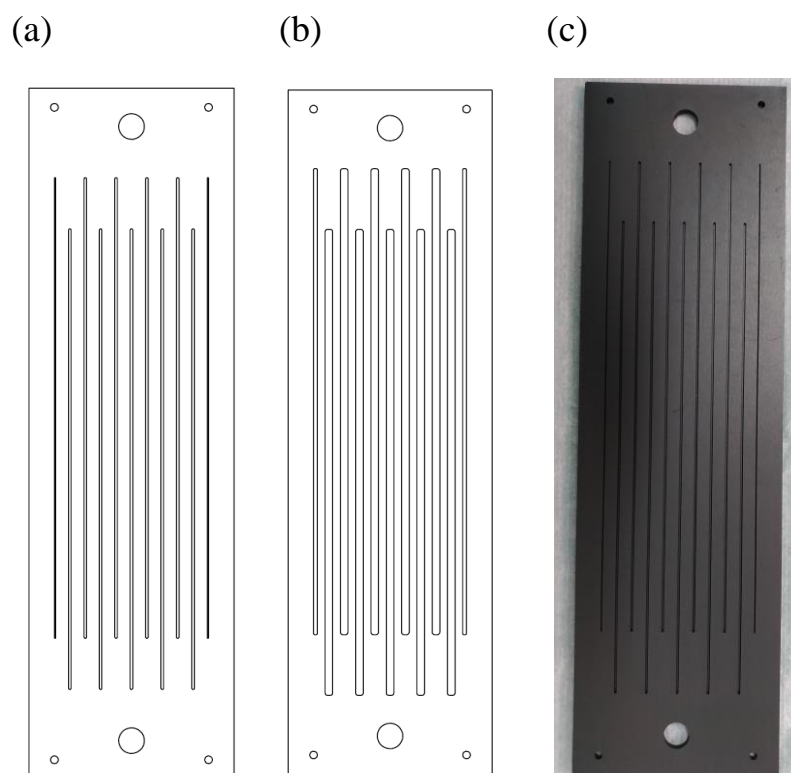


圖 16：指叉式流道設計。

實驗中設計的反應區域寬度為 60 mm，採用的石墨板厚度與實際使用時的厚度相同，為 3 mm，因此反應區域的流道無法太深。在本研究中固定深度為 1 mm，先探討不同流道及肋條寬度的組合對電池性能之影響，其組合如表 1 所示。設計上，以流道寬度為主，再配合不同的肋條寬度。流道寬度分別為 1, 3, 5 mm，若流道太寬，容易使石墨氈在組裝壓縮時凹陷到流道中，

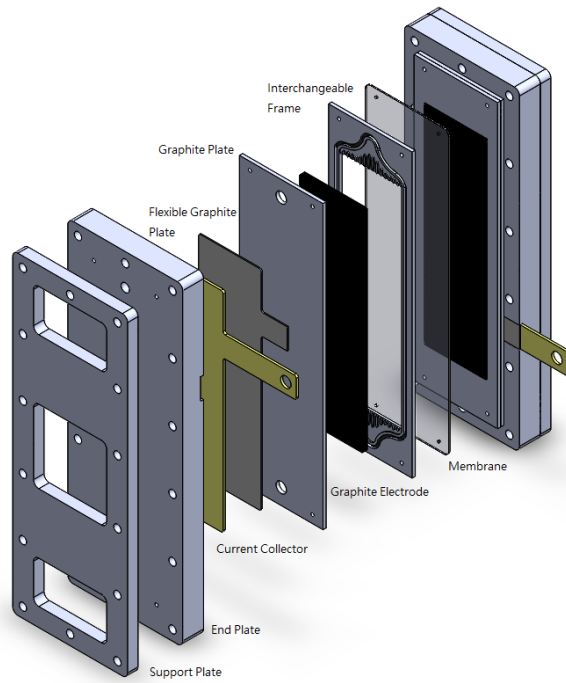
因此最大寬度只設計到 5 mm。

表 1：流道寬度及肋條寬度組合

流道寬度(mm)	肋條寬度(mm)
1	5
3	3
3	7
3	12
5	5
5	10

單電池結構之爆炸圖如圖 17(a)所示。其中隔離膜的兩側分別為正負極的絕緣框，絕緣框和石墨板接觸的面刻有扇型的分配流道，以使電解液可均勻的流入反應區域中。此外，可藉由使用不同厚度的絕緣框來控制壓縮後的石墨氈電極厚度，目前採用的壓縮後的石墨氈厚度為 3 mm。石墨板與鍍金板間以一柔性石墨片來降低接觸阻抗；外側再以 PVC 端板連接進出口接頭，以防止腐蝕；最外側再以鋁合金端板增加電池的強度。圖 17(b)及(c)為組裝完成之實際照片。

(a)



(b)



(c)



圖 17：(a)半單電池結構爆炸圖，其石墨板為可替換型式；(b)電池本體側視圖；(c)電池本體正視圖。

圖 18 為本研究計畫架設之電池性能量測系統。正負極電解液分別利用隔膜式幫浦(SMART digital DDA7.5-16AR-PVC/V/C, Grundfos, Denmark)在電池及電解液儲液瓶中循環。電池之性能則利用電池充放電機(PFX2021, Kikusui Electronics, Japan)進行充放電量測後，再計算各種效率。



圖 18：電池性能量測系統

三、數學模型

為了探討出入口至反應區的分配流道設計對電解液分

布均勻性的影響，本研究利用數學模型模擬電解液在各種分配流道設計中的分布情形、流速分布、壓力分布，並在歧路電流損失及幫浦耗能之間找出一最佳化之設計。核研所設計的流道型式如圖 19(a)所示。為了降低歧路電流損失及使電解液可均勻流入反應區域，採用漸縮式流道設計。另外，也分析傳統分配流道的設計，如圖 19(b)所示，採用蜿蜒型式降低歧路電流。傳統設計中以流道寬度及流道數組合，做為設計參數。表 2 顯示本研究中所設計之不同組合，其標示方式 W 代表流道寬度，N 代表流道數目。本計畫探討不同設計參數對電池性能之影響，並比較這兩種設計在歧路電流及幫浦功率消耗的差異。

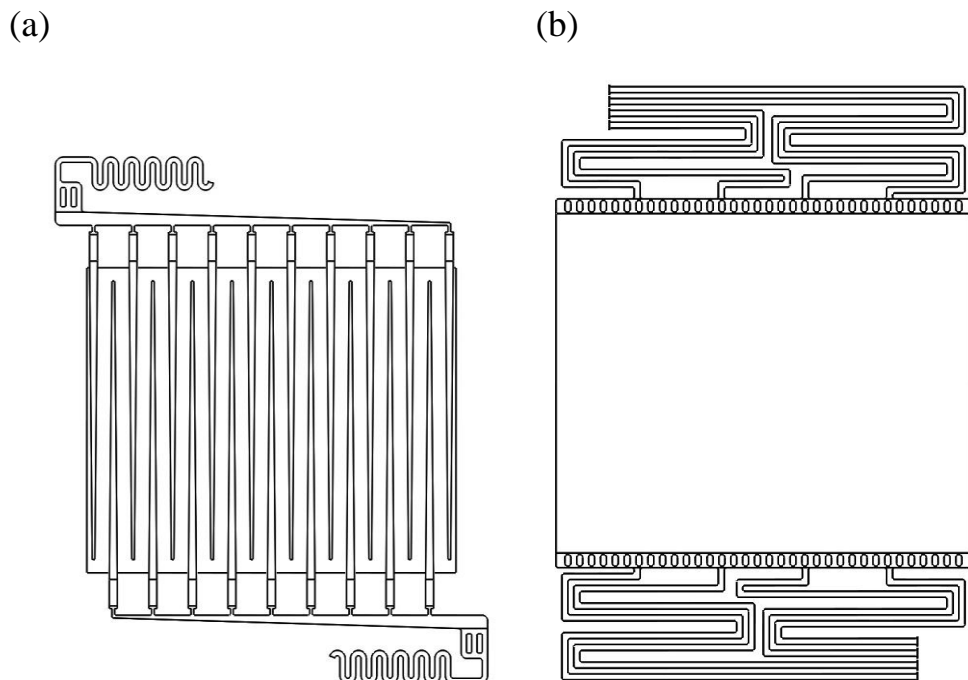


圖 19：本計畫比較之流道：(a) 核研所設計之分配流道型式；(b) 傳統之分配流道型式。

表 2：傳統流道寬度及肋條寬度組合

設計	流道寬度 (mm)	流道數
W1N2	1	2
W1N3	1	3
W1N4	1	4
W2N2	2	2
W2N3	2	3
W2N4	2	4
W4N2	4	2
W4N3	4	3
W4N4	4	4

每一條流道的等效電阻 R_c 可由其長度 L_c 、截面積 A_c 及導電率 σ 計算，

$$R_c = \frac{1}{\sigma} \frac{L_c}{A_c} \quad (1)$$

連接各單電池的主要流道之等效電阻也可藉由其幾何尺寸計算。由於實際的分配流道較為複雜，包含多條流道及進入反應區之次分配流道，因此本研究將採用商業軟體 COMSOL Multiphysics 計算其等效電阻值。計算出分配流道及主流道之等效電阻後，再利用前一年度已開發完成的歧路電流計算模型計算單電池中各單電池的歧路電流分布情形，及電池堆內部的總歧路電流損失。

已開發完成之電池堆之歧路電流等效電路如圖 20 所示。其

中各電流與電壓之關係式可以 Kirchhoff's 定律來表示。流過第 i 個單電池正極端的三個節點(a)、(b)、(c)的電流需分別滿足

$$I_i - I_{i-1} - 2I_{pc,i} - 2I_{nc,i} = 0 \quad (2)$$

$$I_{pc,i} + I_{pm,i} - I_{pm,i-1} = 0 \quad (3)$$

$$I_{nc,i} + I_{nm,i} - I_{nm,i-1} = 0 \quad (4)$$

此外單電池正、負極電解液回路之電壓需分別滿足

$$V_i - R_{pc} I_{pc,i} + R_{pm} I_{pm,i} + R_{pc} I_{pc,i+1} = 0 \quad (5)$$

$$V_i - R_{nc} I_{nc,i} + R_{nm} I_{nm,i} + R_{nc} I_{nc,i+1} = 0 \quad (6)$$

由於方程式中的電阻已先計算求出，再代入單電池的電壓和電流關係，可計算出各歧路電流的值。

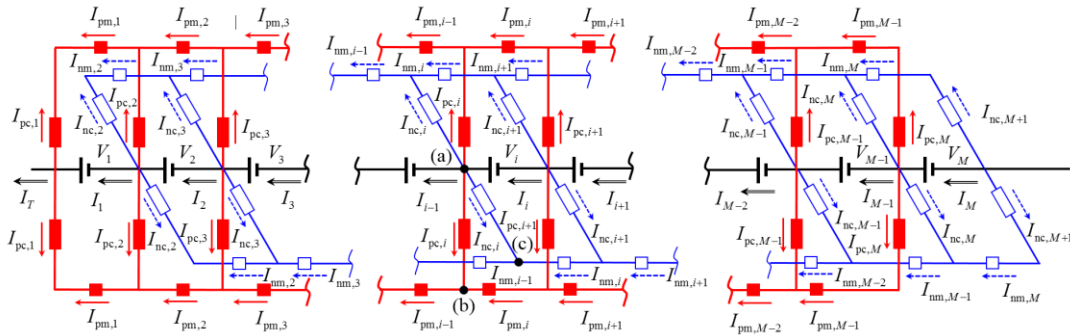


圖 20：電池堆中之分歧電流之等效電路圖。

電解液在單電池中流動時的壓力降也將利用 COMSOL Multiphysics 進行計算。電解液假設為不可壓縮的流體，其在分配流道區域之流動情形可以 Navier-Stokes 方程式及質量守恆方程式來描述：

$$\rho \left[\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} \right] = -\nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{v} + \mathbf{F} \quad (7)$$

$$\rho \nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (8)$$

多孔性電極的區域可以 Darcy's law 表示為

$$-\frac{\mu}{\kappa} \mathbf{v} = \nabla p \quad (9)$$

其中 κ 為多孔性電極的滲透率，可表示為：

$$\kappa = \frac{d_f^2}{16K} \frac{\varepsilon^3}{(1-\varepsilon)^2} \quad (10)$$

式中 d_f 為纖維直徑， K 為 Kozeny-Carman 常數， ε 為多孔性電極的孔隙率。

邊界條件則為：在入口處的速度為定值，可由指定的電解液流率及主歧管之面積求得。

$$v_{in} = \frac{Q}{A_m} \quad (11)$$

另外，在出口處的壓力則設為 0。

由模擬結果可以得出單電池在各種流場設計，包含反應區域之流場及分配流道，由入口和出口的壓力差 Δp_{Total} 。當電解液流率為 Q ，幫浦消耗的功率 P_{pump} 可由下式計算，

$$P_{pump} = \frac{Q \Delta p_{Total}}{\eta_{Pump}} \quad (12)$$

其中 η_{Pump} 為幫浦之效率。這部分的模擬結果可和單電池實驗中量測的壓力降進行驗證。

驗證後的數學模型，則用於模擬電池堆系統的各种流道設

計參數對電池性能之影響，並找出最佳之流道設計。

參、主要發現與結論

一、無流道之電池性能

(一)實驗流程

1. 電池規格：

實驗採用一反應面積為 120 cm^2 之單電池；其石墨氈厚度為 6.5 mm ；使用之隔離膜為 Dupont Nafion 117，厚度 $125 \text{ }\mu\text{m}$ 。

2. 操作條件：

石墨氈使用純硫酸浸泡以增加其親水性，並加溫至 60°C 並浸泡 12 h 。質子交換膜為 Nafion 117，亦以純硫酸浸泡加溫至 60°C 並浸泡 24 h 。兩者結束酸處理之過程後皆以去離子水漂洗後即可組裝進電池中。

實驗所用之電解液為自行調配，以 $2 \text{ M H}_2\text{SO}_4$ 溶解 $1.5 \text{ M VO}_2\text{SO}_4$ 並加入去離子水達實驗所需的量。正極與負極的電解液體積分別為 200 及 100 ml ，並使用泵浦以 50 ml min^{-1} 之流率進行循環，再以充放電儀將電池充至 1.71 V ，此時即可見正極之電解液呈黃色，而負極電解液為紫色。

將正極電解液取出 100 ml ，使正負極電解液槽容量相等，並將負極電解液槽充入氮氣保護防止電解液氧化。然後以 40 mA

cm^{-2} 之電流密度對電池進行循環充放電，待電池充放電穩定後，取 3 次循環之平均數值進行比較。

(二)實驗結果

為了對多種石墨板流道之設計進行比較，首先以無流道之石墨板進行測試來建立一比較之基準，此設計之反應面積為 120 cm^2 ，其初始充電電壓及初始放電電壓分別為 1.42 V 與 1.35 V ，其充放電循環圖及其效率如圖 21 及表 3 所示。

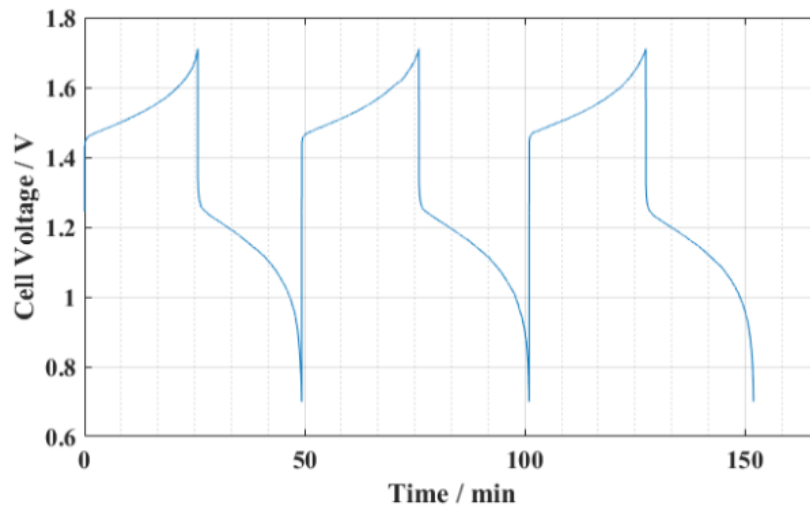


圖 21：無流道石墨板之充放電循環圖

表 3：無流道石墨板之電池效率

Cycle	VE(%)	CE(%)	EE(%)	DC(Ah)
1	71.2	98	69.8	2.02
2	71	95.9	68.1	1.98
3	70.7	96.1	67.9	1.95
avg	71	96.6	68.6	1.98

二、具指叉型流道之電池性能

(一) 流道 3 mm，肋條 3 mm

為簡化描述，以符號(x, y) 分別代表流道及肋條寬度分別為 x 及 y mm。與無流道之電池相比，石墨板中的流道有助於電解液更快流向出口，並使電解液在石墨氈內的濃度較為均勻，但也會使部分電解液直接經由出口流道流出而未參與反應。在此設計中，流道所占的面積為 54 cm²，占總反應面積的 45%，其初始充電電壓升高至 1.59 V 且初始放電電壓下降至 1.23 V，見圖 22，顯示出與無流道之設計相比，因在石墨氈中的電解液無法充份進行反應即流出反應區，因而有更多的電壓損失。且計算出之電池效率亦顯示出各項數據皆較無流道設計差，其效率見表 4。

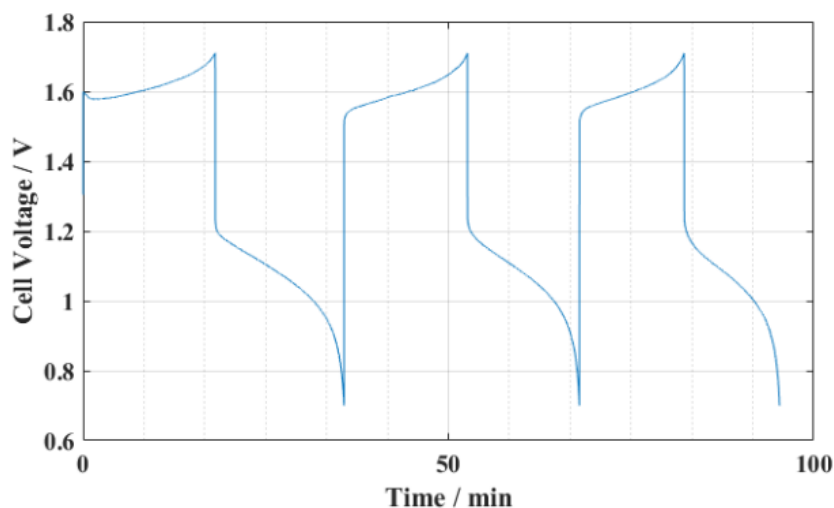


圖 22：(3, 3) 形式石墨板充放電循環圖

表 4：(3, 3) 形式石墨板之電池效率

Cycle	VE(%)	CE(%)	EE(%)	DC(Ah)
1	65.6	92.4	63.9	1.41
2	66.3	90.8	60.2	1.23
3	65.4	91	59.5	1.04
avg	65.8	91.4	61.2	1.23

(二) 流道 3 mm，肋條 7 mm

為了減少電解液的損失，在此設計中，減少了流道數並加寬了肋條寬度，使流道面積減為 32.4 cm^2 ，占比降為 27%。與(3, 3) 的流道形式相比，可見其初始充電電壓降至 1.48 V 且初始放電電壓上升至 1.3 V，可見有所改善，見圖 23。其電池效率亦較有所增加，電壓效率提升 2.1%，庫倫效率提升 6%，能量效率提升 4.9%，放電電容量亦提升了 0.19 Ah，詳見表 5。

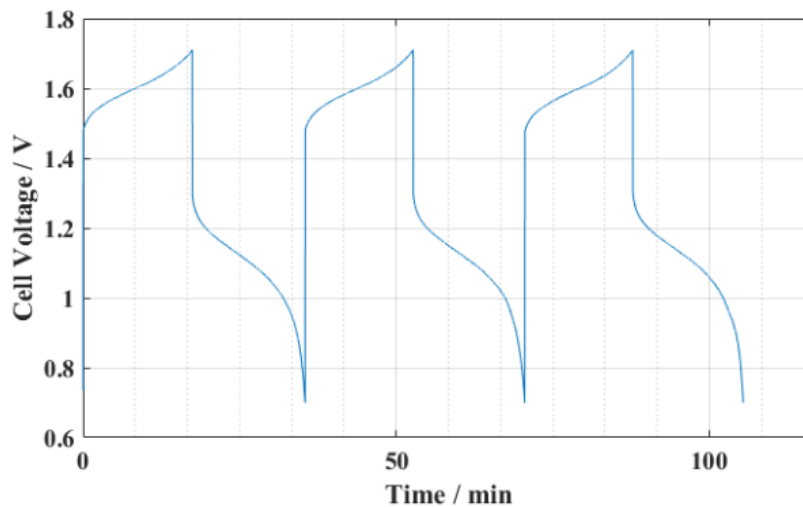


圖 23：(3, 7) 形式石墨板充放電循環圖

表 5：(3, 7) 形式石墨板之電池效率

Cycle	VE(%)	CE(%)	EE(%)	DC(Ah)
1	67.6	97.8	66.1	1.44
2	67.9	97.6	66.3	1.42
3	68.3	96.7	66	1.41
avg	67.9	97.4	66.1	1.42

(三) 流道 3 mm，肋條 12 mm

在此設計中，進一步降低了流道數目，使流道面積為 21.60 cm²，占比為 18%。其初始充電電壓小幅升高至 1.48 V 且初始放電電壓下降至 1.22 V，其電壓損失較 (3, 7) 形式略小，見圖 24。其電壓效率與 (3, 7) 形式相比微幅上升了 1.4%，但庫倫效率、能量效率與放電電容量有顯著的下降趨勢，分別減少 14.9%、8.9% 與 0.16 Ah，詳見表 6，與 (3, 3) 形式相比性能均有所下降，可見過多或過少的流道數均對電池性能有所影響。

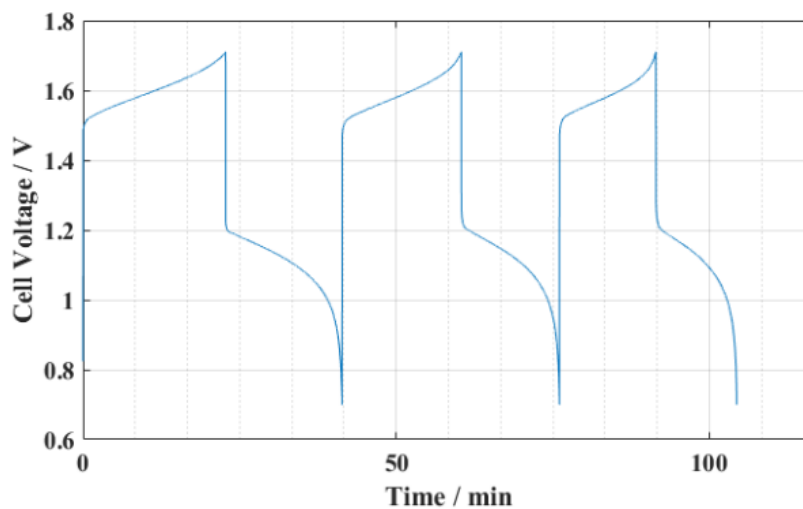


圖 24：(3, 12) 形式石墨板充放電循環圖

表 6：(3，12) 形式石墨板之電池效率

Cycle	VE(%)	CE(%)	EE(%)	DC(Ah)
1	68.6	81.6	56	1.49
2	69.5	82.2	57.2	1.25
3	69.7	83.8	58.4	1.03
avg	69.3	82.5	57.2	1.26

(四) 流道 5 mm，肋條 10 mm

在前三種設計中，可見 (3，7) 形式之石墨板有較佳的性能，故在此基礎之上，額外測試 (5，10) 形式之石墨板，其流道面積與 (3，7) 形式相比約略增加至 36 cm²，占比為 30%。其初始充電電壓僅 1.39 V 且初始放電電壓亦有 1.35 V，其電壓效率較其他設計有明顯改善，達到 81.5%，見圖 25。而庫倫效率與能量效率分別為 98.4% 和 80.4%。放電電容量為 1.74 Ah，雖較無流道設計的 1.98 Ah 略少，但仍比其他設計為多，詳見表 7。由此結果可得知，在 (3，7) 與 (5，10) 設計範圍間有最佳性能。

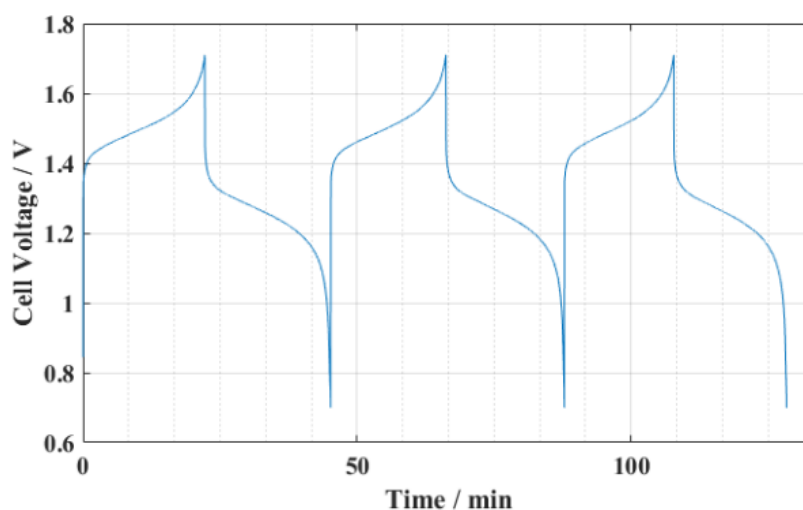


圖 25：(5，10) 形式石墨板充放電循環圖

表 7：(5，10) 形式石墨板之電池效率

Cycle	VE(%)	CE(%)	EE(%)	DC(Ah)
1	81.9	99	81	1.83
2	81.2	98	80.1	1.73
3	81.4	98.2	80	1.65
avg	81.5	98.4	80.4	1.74

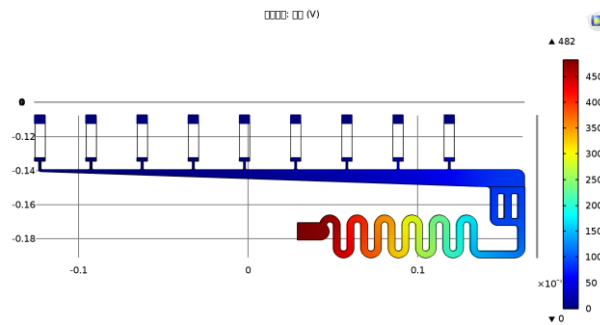
三、歧路電流之模擬結果

(一) 歧路電流之模擬。

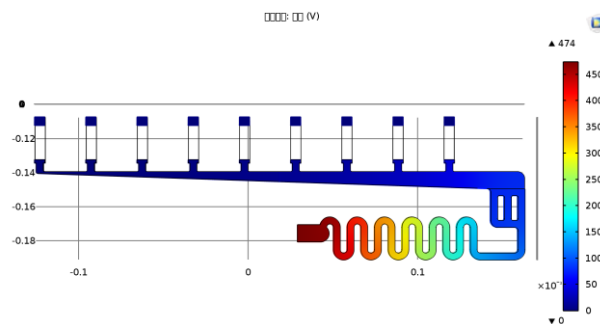
修改核研所之流道設計，將原 2 mm 之分配流道修改為 1 mm、4 mm 與 6 mm 並分別以 40 mA、60 mA 與 80 mA 之電流密度進行模擬。此電池之反應面積為 644 cm^2 ，故其操作分別為 25.74 A、38.64 A 與 51.52 A。其中，歧管內之電阻皆為 000Ω ，而從圖 26 中可得知流道內之等效電阻分別為 482Ω 、 474Ω 與

472 Ω 。

(a)



(b)



(c)

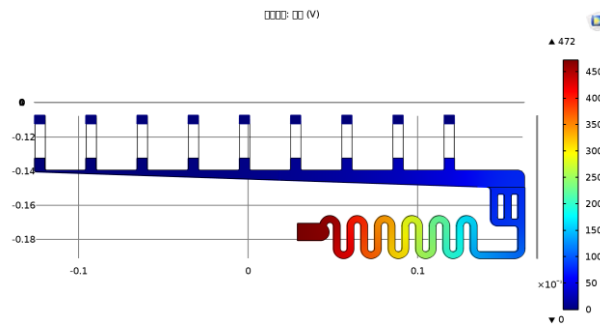
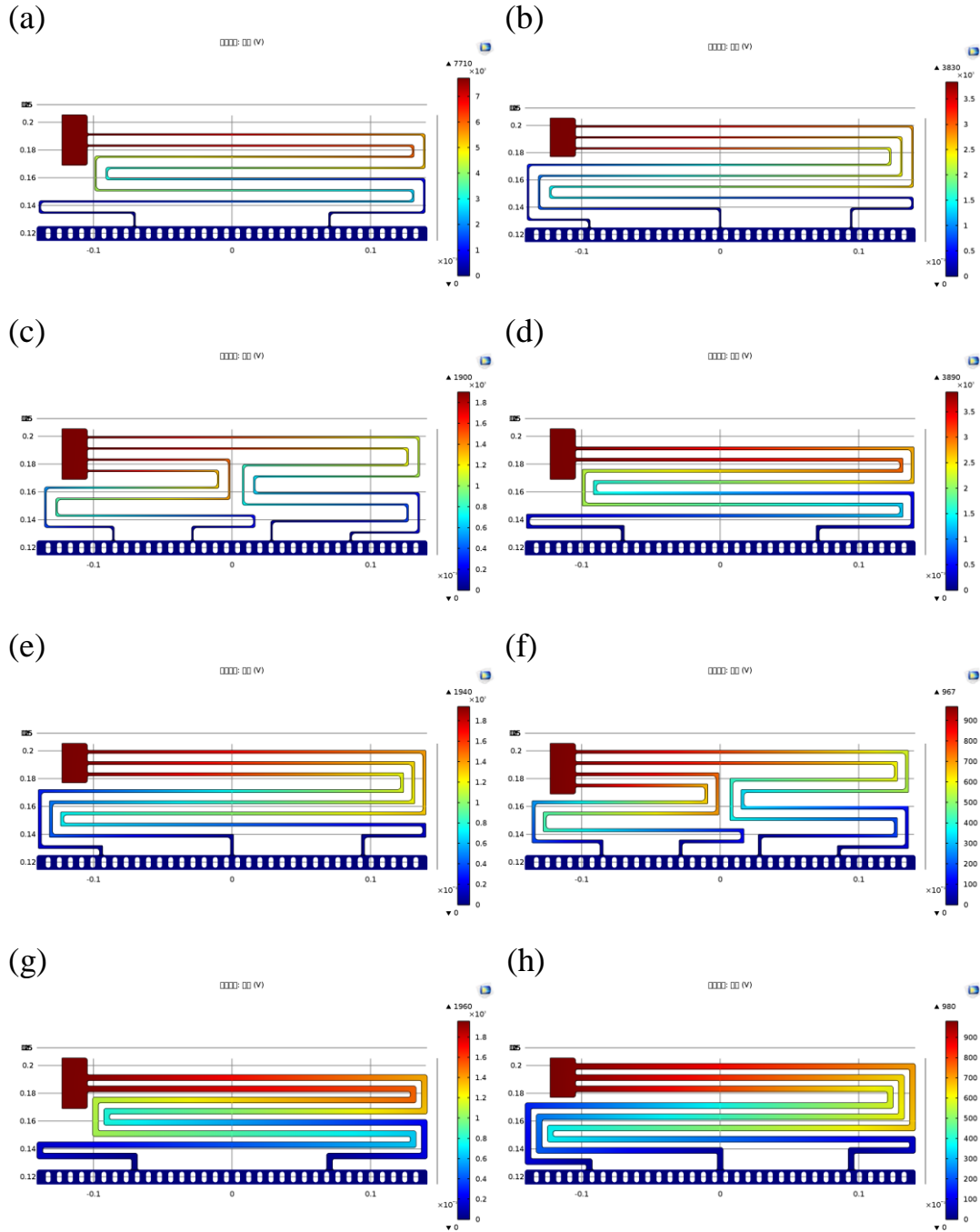


圖 26：不同流道寬度之等效電阻：(a)1 mm；(b)4 mm；(c)6 mm。

圖 27 則為傳統設計中的等效電阻的模擬結果。因其反應面積同核研所設計，故模擬所用的參數皆同。其等效電阻分別為 7710 Ω 、3830 Ω 、1900 Ω 、3890 Ω 、1940 Ω 、967 Ω 、1960 Ω 、980 Ω 與 492 Ω 。由於分配流道設計較複雜，因此所有設計是在固定出

入口位置的條件下來設計流道；因此，當流道寬度小，或流道數目少時，流道長度會較長。故等效電阻較大。



(i)

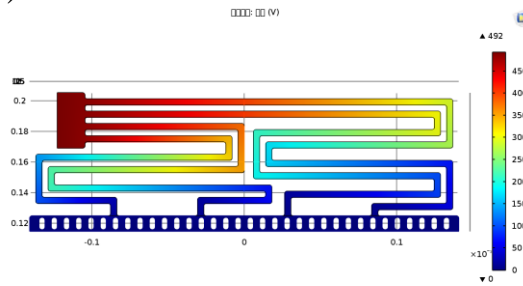
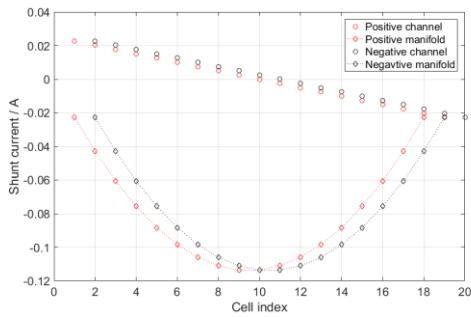


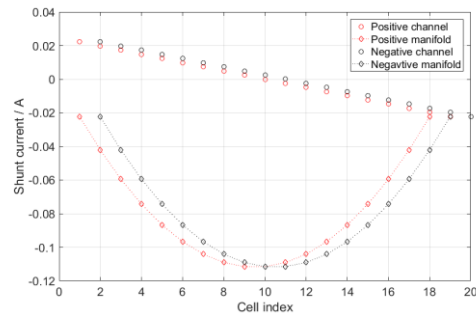
圖 27：傳統流道設計之等效電阻：(a)W1N2；(b)W1N3；(c)W1N4；
(d)W2N2；(e)W2N3；(f)W2N4；(g)W4N2；(h)W4N3；(i)W4N4。

圖 28 為模擬以核研所設計之分配流道組成 20-cell 之電池堆中，每一單電池在充放電時各種歧路電流的分布情形。由圖可看出其各種參數間沒有明顯變化。因為此設計中，流道寬度佔少部分區域，對整體等效電阻的影響極小。

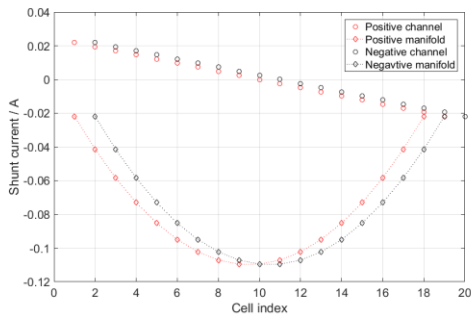
(a)



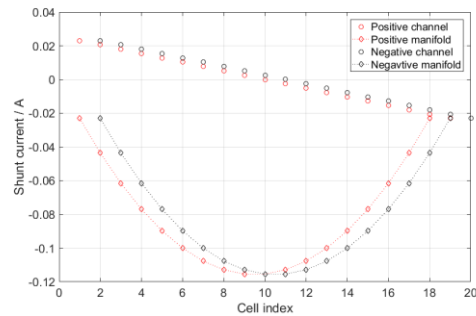
(b)



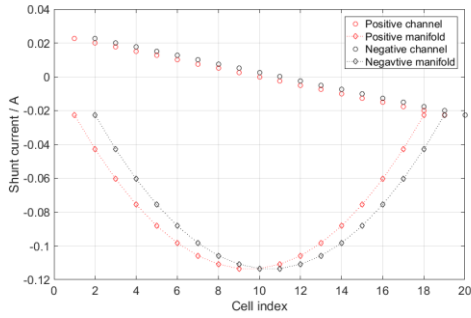
(c)



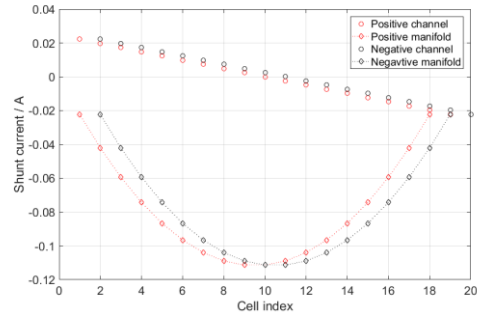
(d)



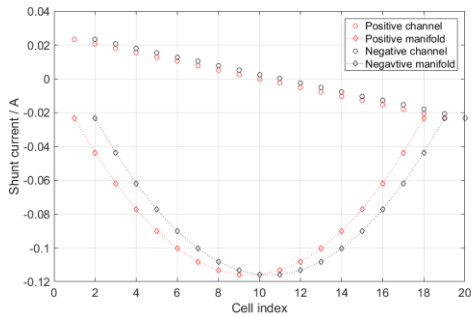
(e)



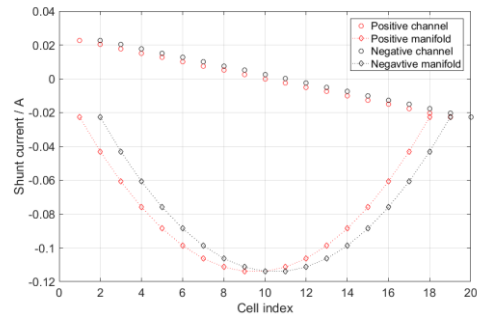
(f)



(g)



(h)



(i)

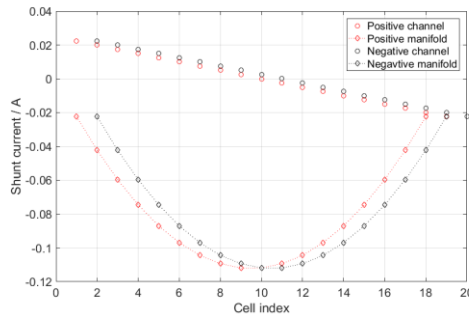


圖 28 : (a) 1 mm 分配流道於 40 mA (b) 1 mm 分配流道於 60 mA (c) 1 mm 分配流道於 80 mA (d) 4 mm 分配流道於 40 mA (e) 4 mm 分配流道於 60 mA (f) 4 mm 分配流道於 80 mA (g) 6 mm 分配流道於 40 mA (h) 6 mm 分配流道於 60 mA (i) 1 mm 分配流道於 80 mA。

四、幫浦耗能模型之建立

(一) 電解液流動時之壓力降

為了建立電解液流過單電池的壓降和電解液流率之關係，先利用 COMSOL Multiphysics 模擬電解液流率 560 ml min^{-1} 在各種分配流道寬度的設計之間所造成之壓力降。設計以核研所最終設計為基礎，將 2 mm 之分配流道修改為 1 mm 、 4 mm 及 6 mm 。圖 29 顯示當流率為 560 ml min^{-1} 時不同流道寬度下電解液的壓力分布，其入口壓力分別為 4170 Pa 、 3960 Pa 與 3920 Pa 。

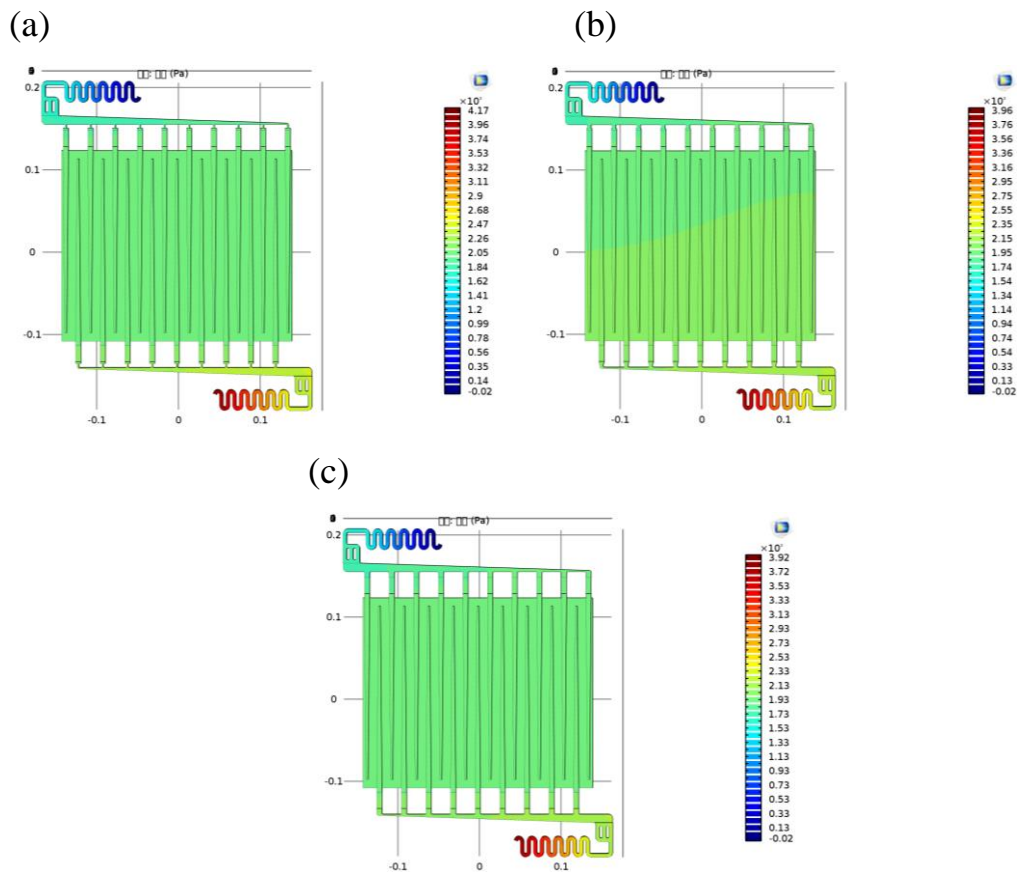
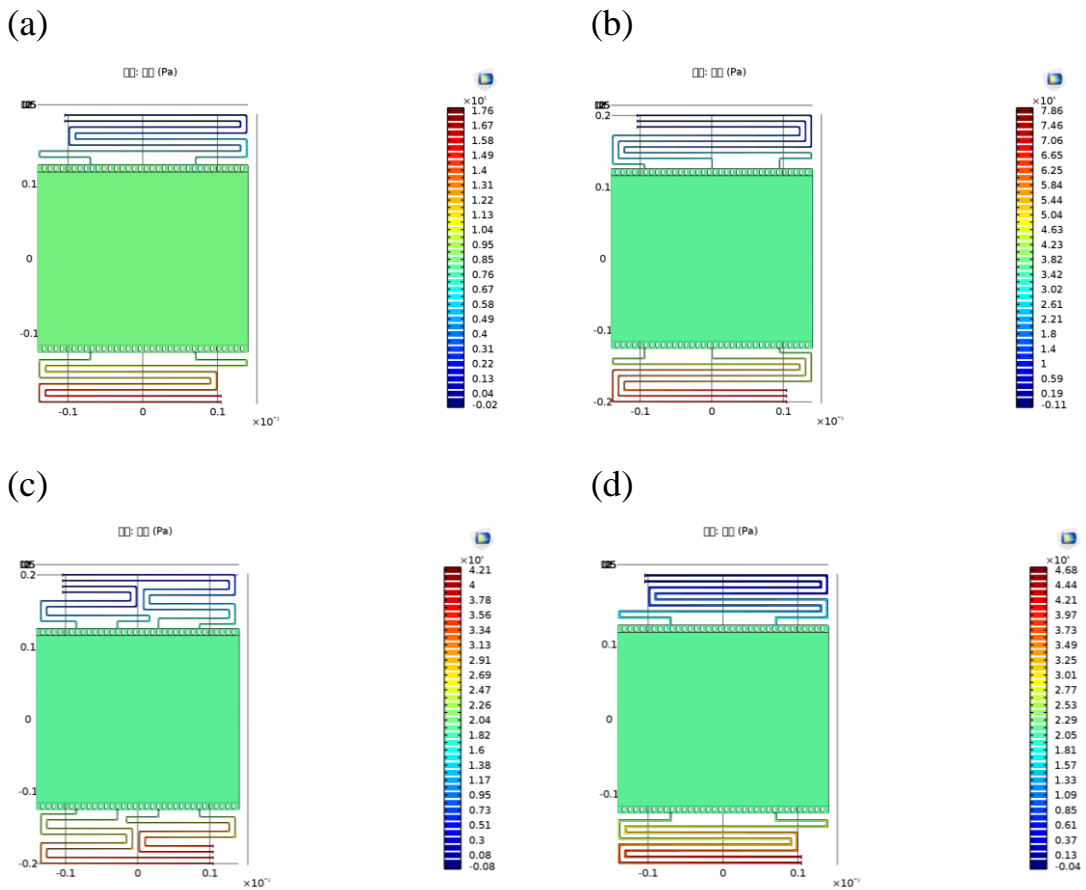


圖 29: 電解液流率為 560 ml min^{-1} 下之電解液壓力分布:(a) 1 mm ; (b) 4 mm ; (c) 6 mm 。

圖 30 為傳統流道中電解液在流率為 560 ml min^{-1} 時的壓力分布圖。其入口壓力分別為(a)176000 Pa、(b)78600 Pa、(c)42100 Pa、(d)46800 Pa、(e)20700 Pa、(f)11600 Pa、(g)14700 Pa、(h)6590 Pa 與(i)3650 Pa。由其結果可看出，入口壓力受流道截面積及長度之影響較大。截面積大時，電解液在入口的壓力也較小，可降低幫浦輸送電解液所需的功。



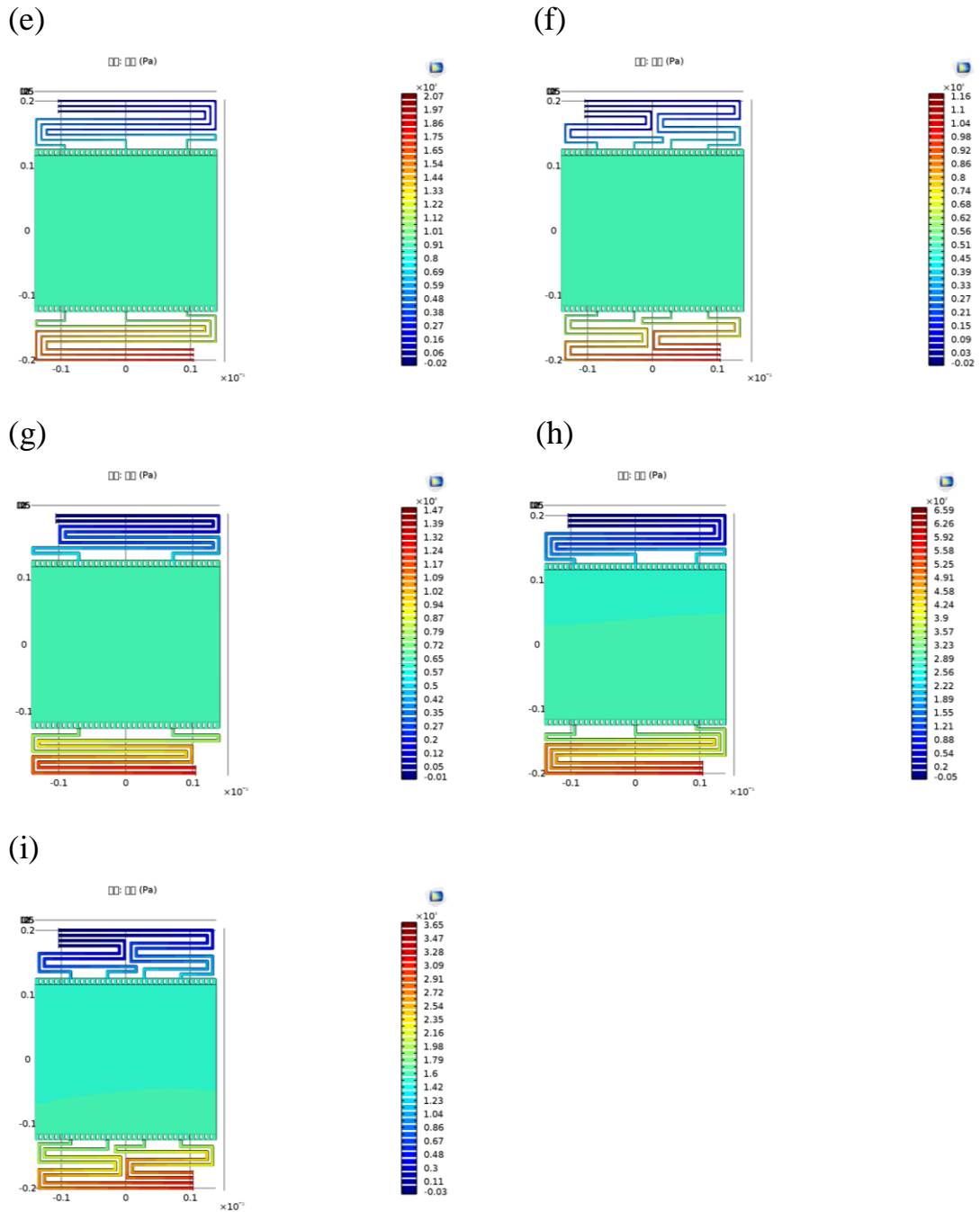


圖 30: 電解液流率為 560 ml min^{-1} 下之壓力分佈:(a)W1N2 ;
 (b)W1N3 ; (c)W1N4 ; (d)W2N2 ; (e)W2N3 ; (f)W2N4 ; (g)W4N2 ;
 (h)W4N3 ; (i)W4N4 。

五、流道設計之最佳化評估

在本研究中，全鈇電池內部的流道包含由主歧管至反應區的分配流道及反應區中的流道。反應區的流道的最佳化可藉由實驗結果獲得；分配流道的設計同時影響歧路電流損耗及幫浦耗能之損耗，當流道截面較小或流道長度較長時，流道中電解液的等效電阻較大，使得歧路電流較小；另一方面，電解液流動時的流阻較小，使得幫浦耗能較小。因此分配流道的設計需在歧路電流與幫浦耗能間取得一最適合之設計。淨輸出功率 P_{net} 可表示為

$$P_{net} = P_{total} - P_{shunt} - P_{pump} \quad (13)$$

P_{total} 為電池內部每一個單電池產生之功率總和，可由歧路模型中計算出每一單電池的電流及電壓計算而得。

$$P_{total} = \sum_M V_M I_M \quad (14)$$

P_{shunt} 及 P_{pump} 為分別為歧路電流造成之功率損失及幫浦的耗能損失，可分別由數學模型計算出來。電池堆輸出之功率可由電池之總電流及總電壓相乘而得，

$$P_{stack} = V_{stack} I_{stack} \quad (15)$$

分歧電流之損耗即為電池內部產生之總功率扣除電池堆之輸出功率，

$$P_{shunt} = P_{total} - P_{stack} \quad (16)$$

最後再建立不同的分配流道設計所產生的淨輸出功率，即可找出最適合的分配流道設計。圖 31 為核研所設計之流道在不同操作電流密度下，流道寬度對歧路電流耗損之影響。隨流道加寬，歧路電流損耗也隨之增加；而在低電流密度下其歧路電流耗損較高電流密度大，這是因為在較低電流密度時，電池的電壓較高，使得歧路電流也隨之增加。

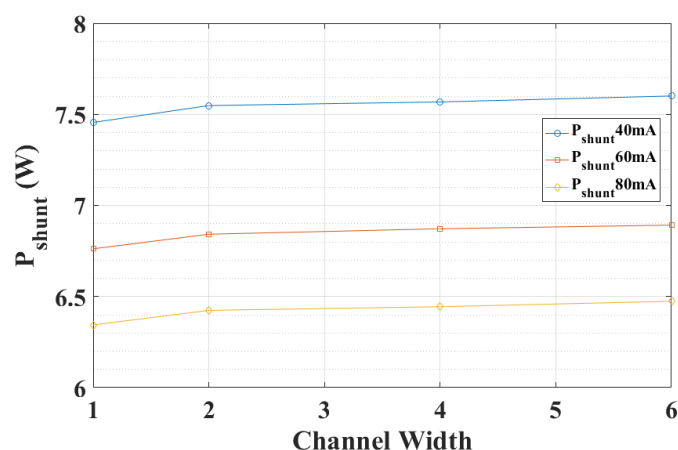


圖 31：核研所設計之流道在不同操作電流密度下之歧路電流耗損與流道寬度關係。

傳統分配流道型式之流道設計參數對歧路電流損耗之影響如圖 32 及圖 33 所示。由模擬結果可看出，歧路電流損耗隨流道數目或流道寬度增加而增加，因為等效電阻隨這兩者設計參數降低。在 60 mA cm^{-2} 之電流密度操作時，各設計皆有最低之歧路電流耗損。

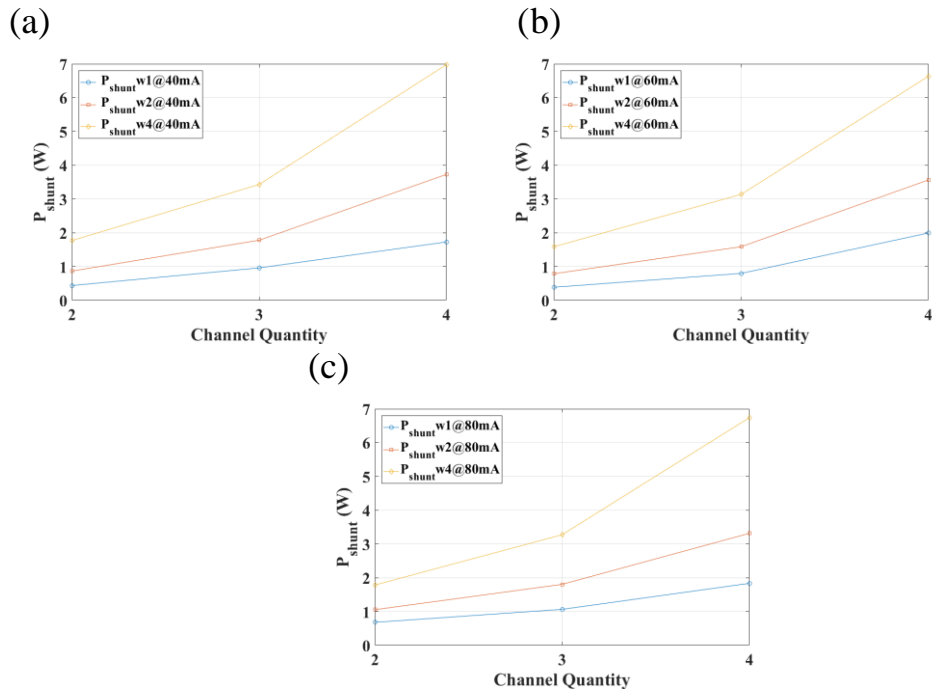


圖 32：傳統流設計中，流道數目在不同操作電流密度下之歧路電流耗損與流道寬度關係。(a) 40；(b) 60；(c) 80 mA cm⁻²。

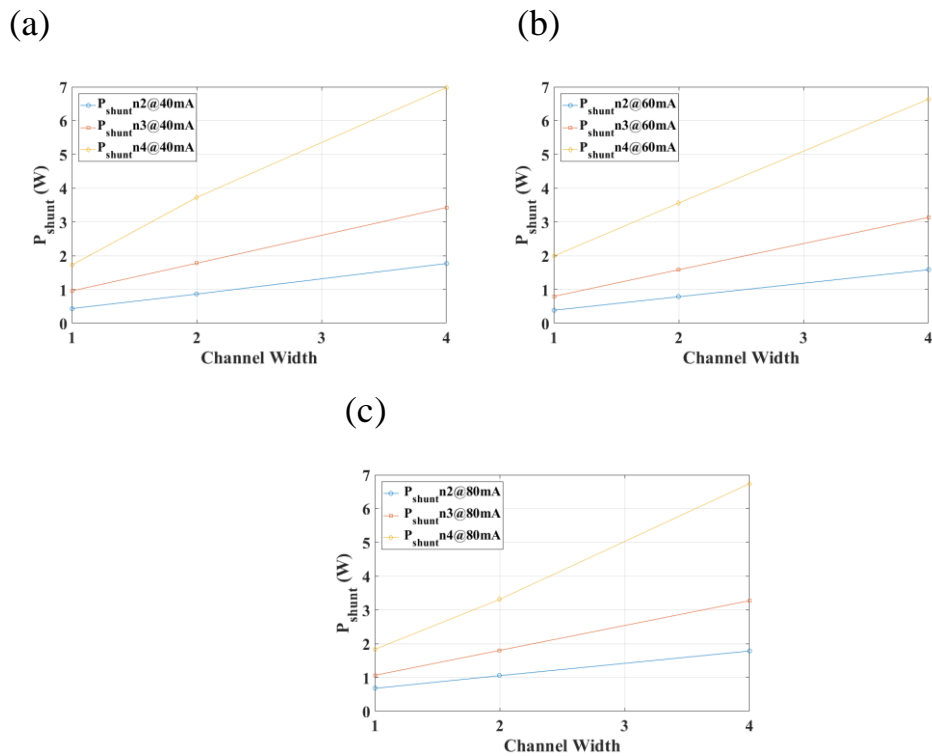


圖 33：傳統流設計中，流道寬度在不同操作電流密度下之歧路電流耗損與流道寬度關係。(a) 40；(b) 60；(c) 80 mA cm⁻²。

由圖 29 及圖 30 模擬出之電解液入口壓力，再利用方程式(12)計算幫浦消耗的功率。圖 34 顯示核研所設計之流場中，流道寬度對幫浦耗能損失之影響。由圖可見當流道寬度由 1 mm 增加至 2 mm 時，其幫浦耗能損失有相當程度之下降，而持續寬度即有線性下降的趨勢。

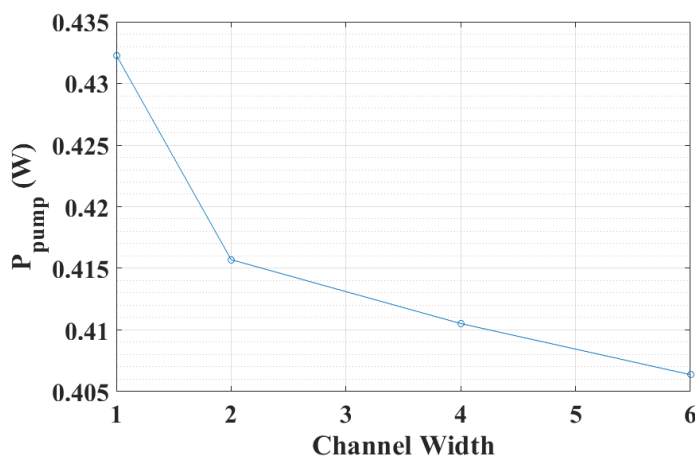


圖 34：核研所之流場設計中流道寬度對幫浦耗能損失之影響。

圖 35 顯示不同流道數及不同流道寬度對幫浦耗能損失的影響。圖 35 (a)可見當流道寬度由 1 mm 增加至 2 mm 時，其幫浦耗能損失大幅下降，而寬度增加至 4 mm 時，幫浦耗能損失更下降至 2 W 以下；而圖 35 (b)中可見當流道寬度為 4 mm 時，流道數目對幫浦耗能損失較無明顯之影響。

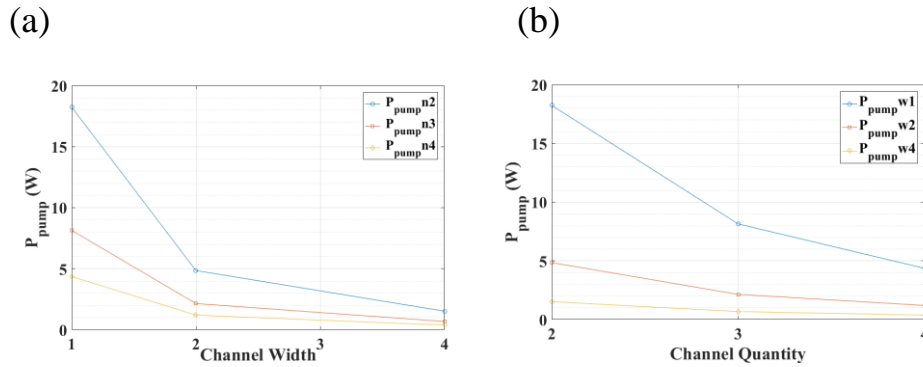


圖 35：傳統流道設計中流道參數對幫浦耗能損失之影響：(a)流道寬度；(b)流道數目。

表 8~表 10 則以核研所之流道設計模擬 19 cell 電池堆分別於 40 mA、60 mA 與 80 mA cm^{-2} 的電流密度下之電池功率、歧路電流損耗、幫浦損耗及淨輸出功率。由表中可看出，當流道寬度增加，歧路電流損失增加，而幫浦耗能損失減少。因兩者的變化量，因此在淨輸出功率上，僅有相當微小的差距。但是仍可看出，淨輸出功率隨流道寬度增加而增加。

表 8：核研所電池於電流密度 40 mA cm^{-2} 下之功率

流道寬	P_{total}	P_{shunt}	P_{pump}	P_{net}
1 mm	602.15	7.455614	0.43229	594.2621
2 mm	602.24	7.548188	0.415703	594.2761
4 mm	602.26	7.568188	0.41052	594.2813
6 mm	602.29	7.600762	0.406373	594.2829

表 9：核研所電池於電流密度 60 mA cm^{-2} 下之功率

流道寬	P_{total}	P_{shunt}	P_{pump}	P_{net}
1 mm	883.89	6.762	0.43229	876.6957
2 mm	883.97	6.842	0.415703	876.7123
4 mm	884	6.872	0.41052	876.7175
6 mm	884.02	6.892	0.406373	876.7216

表 10：核研所電池於電流密度 80 mA cm^{-2} 下之功率

流道寬	P_{total}	P_{shunt}	P_{pump}	P_{net}
1 mm	1155.24	6.344	0.43229	1148.464
2 mm	1155.32	6.424	0.415703	1148.48
4 mm	1155.34	6.444	0.41052	1148.485
6 mm	1155.37	6.474	0.406373	1148.49

表 11~表 13 則依序列出傳統設計中，不同流道尺寸組成的 19 cell 電池分別在 40 、 60 與 80 mA cm^{-2} 的電流密度下之各種功率損失，及淨輸出功率。由表中可得知，淨輸出功率在流道數目多或流道寬度大時，淨輸出功率也較高。因為歧路電流損失隨流道數目或流道寬度增加，但是幫浦耗能損失降低得更多，使得淨輸出較好。此外，在相同流道數的流道設計下，較寬之流道亦有較好的淨輸出功率；經綜合比較後，得以發現在這些設計中，流道寬度 4 mm 與 3 條流道的組合有最好的淨輸出功率與整體效率。

表 11：各種設計於電流密度 40mA cm^{-2} 下之功率

設計	P_{total}	P_{shunt}	P_{pump}	P_{net}
W1N2	595.378	0.43651	18.24533	576.6962
W1N3	595.81	0.9586	8.1482	586.7032
W1N4	596.67	1.725936	4.364367	590.5797
W2N2	595.79	0.863954	4.8516	590.0744
W2N3	596.63	1.7786	2.1459	592.7055
W2N4	598.32	3.726	1.202533	593.3915
W4N2	596.62	1.7686	1.5239	593.3275
W4N3	598.28	3.4286	0.683163	594.1682
W4N4	601.57	6.976	0.378383	594.2156

表 12：各種設計於電流密度 60mA cm^{-2} 下之功率

設計	P_{total}	P_{shunt}	P_{pump}	P_{net}
W1N2	877.9	0.3856	18.24533	859.2691
W1N3	878.31	0.7956	8.1482	869.3662
W1N4	879.12	1.992	4.364367	872.7636
W2N2	878.3	0.7856	4.8516	872.6628
W2N3	879.1	1.5856	2.1459	875.3685
W2N4	880.69	3.562	1.202533	875.9255
W4N2	879.1	1.5856	1.5239	875.9905
W4N3	880.65	3.1356	0.683163	876.8312
W4N4	883.76	6.632	0.378383	876.7496

表 13：各種設計於電流密度 80 mA cm^{-2} 下之功率

設計	P_{total}	P_{shunt}	P_{pump}	P_{net}
W1N2	1149.575	0.679	18.24533	1130.651
W1N3	1149.96	1.064	8.1482	1140.748
W1N4	1150.73	1.834	4.364367	1144.532
W2N2	1149.95	1.054	4.8516	1144.044
W2N3	1150.7	1.804	2.1459	1146.75
W2N4	1152.21	3.314	1.202533	1147.693
W4N2	1150.68	1.784	1.5239	1147.372
W4N3	1152.17	3.274	0.683163	1148.213
W4N4	1155.12	6.7392	0.378383	1148.002

如比較核研所之流道設計及傳統之流道設計對電池淨輸出功率的影響，可看到核研所的分配流道較短，使得歧路電流損耗高，但是幫浦耗能損失也較小，所以淨輸出功率較傳統之流道設計的電池高；傳統型式設計中，由於流道長度較長，對幫浦耗能損失比歧路電流損失有較顯著的影響。因此設計上以降低幫浦損耗為優先，即增加流道寬度及數量。

六、結論

全鈦氧化還原液流電池因為工作電密度小，因此在實用上反應面積需達到上千平方公分，也造成電解液濃度在電池中分布不均而影響電池性能。電解液在電池內部的均勻性及濃度差

異造成的電池性能影響，可藉由分配流道及反應區的流道設計加以改善。

本研究為了找出反應區域中的最佳化流道設計，設計了一反應面積達 120 cm^2 的單電池，並以 4 種不同流道寬度及肋條寬度的石墨板流道進行測試，並與無流道的石墨板設計進行比較。發現其中以流道寬度 5 mm，肋條寬度 10 mm 之流道設計有較好的電池性能，其平均電壓效率、庫倫效率與能量效率達到 81.5%、98.4% 與 80.4%，較無流道設計分別多出了 10.5%、1.8% 與 11.8%，有顯著的改善。

在分配流道設計中，利用數學模型比較核研所設計的流道與傳統型式之流道在歧路電流損失與泵浦耗能損失的影響。結果顯示核研所設計的流道有助於降低幫浦耗能損失，因此電池的淨輸出功率較傳統型式之流道設計高。而在傳統型式設計中，可藉由增加流道寬度及數目來大幅降低幫浦耗能損失，而增加淨輸出功率。

肆、參考文獻

- [1] 中華民國國家發展委員會業務報告：五大創新產業－綠能科技
產 業 推 動 方 案
[http://www.ndc.gov.tw/Content_List.aspx?n=9D024A4424DC36B9
&upn=6E972F5C30BF198F](http://www.ndc.gov.tw/Content_List.aspx?n=9D024A4424DC36B9&upn=6E972F5C30BF198F)
- [2] A. Bhattarai, N. Wai, R. Schweiss, A. Whitehead, T.M. Lim, H.H. Hng, “Advanced porous electrodes with flow channels for vanadium redox flow battery,” *Journal of Power Sources* 341 (2017) 83-90.
- [3] L. Wei, T.S. Zhao, G. Zhao, L. An, L. Zeng, “A high-performance carbon nanoparticle-decorated graphite felt electrode for vanadium redox flow batteries,” *Applied Energy* 176 (2016) 74-79.
- [4] X. You, Q. Ye, P. Cheng, “Scale-up of high power density redox flow batteries by introducing interdigitated flow fields,” *International Communications in Heat and Mass Transfer* 75 (2016) 7-12.
- [5] J. Choe, J. Kim, D.G. Lee, “Shape optimization of the corrugated composite bipolar plate (CCBP) for vanadium redox flow batteries (VRFBs),” *Composite Structures* 158 (2016) 333-339.
- [6] X.L. Zhou, Y.K. Zeng, X.B. Zhu, L. Wei, T.S. Zhao, “A

- high-performance dual-scale porous electrode for vanadium redox flow batteries,” *Journal of Power Sources* 325 (2016) 329-336.
- [7] X.L. Zhou, T.S. Zhao, Y.K. Zeng, L. An, L. Wei, “A highly permeable and enhanced surface area carbon-cloth electrode for vanadium redox flow batteries,” *Journal of Power Sources* 329 (2016) 247-254.
- [8] C. Yin, Y. Gao, S. Guo, H. Tang, “A coupled three dimensional model of vanadium redox flow battery for flow field designs,” *Energy* 74 (2014) 886-895
- [9] R.J. Kee, H. Zhu, “Distribution of incompressible flow within interdigitated channels and porous electrodes,” *Journal of Power Sources* 299 (2015) 509-518
- [10] Q. Zheng, F. Xing, X. Li, G. Ning, H. Zhang, “Flow field design and optimization based on the mass transport polarization regulation in a flow-through type vanadium flow battery,” *Journal of Power Sources* 324 (2016) 402-411
- [11] X. Ke, J.M. Prahla, J.I.D. Alexander, R.F. Savinell, “Mathematical Modeling of Electrolyte Flow in a Segment of Flow Channel over Porous Electrode Layered System in Vanadium Flow Battery with

Flow Field Design,” *Electrochimica Acta* 223 (2017) 124-134

[12]<http://www.ict.fraunhofer.de/>

[13]Kim S, Thomsen E, Xia G, Nie Z, Bao J, Recknagle K, Wang W, Viswanathan V, Luo Q, Wei X, Crawford A, Coffey G, Maupin G, Sprenkle V. 1 kw/1 kwh advanced vanadium redox flow battery utilizing mixed acid electrolytes. *Journal of Power Sources* 2013;237:300–309.

[14]F.Xing, H.Zhang, X.Ma, Shunt current loss of the vanadium redox flow battery, *J. Power Sources*. 196 (2011) 10753–10757. doi:10.1016/j.jpowsour.2011.08.033.

[15]C.Yin, S.Guo, H.Fang, J.Liu, Y.Li, H.Tang, Numerical and experimental studies of stack shunt current for vanadium redox flow battery, *Appl. Energy*. 151 (2015) 237–248.

[16]Q.Ye, J.Hu, P.Cheng, Z.Ma, Design trade-offs among shunt current, pumping loss and compactness in the piping system of a multi-stack vanadium flow battery, *J. Power Sources*. 296 (2015) 352–364.

[17]Z.We, J.Zhao, M.Skylas-Kazacos, B.Xiong, Dynamic thermal-hydraulic modeling and stack flow pattern analysis for all-vanadium redox flow battery, *J. Power Sources*. 260 (2014)

89–99.

- [18]H.Fink, M.Remy, Shunt currents in vanadium flow batteries: Measurement, modelling and implications for efficiency, *J. Power Sources*. 284 (2015) 547–553.