

先進船舶電力-質子交換膜 燃料電池設計製備與性能分析之研究

夏曉文* 吳聖儒* 余威龍** 楊福正**†

* 國防大學理工學院 動力及系統工程學系

** 國防大學理工學院 國防科學研究所

關鍵詞：先進船舶電力、質子交換膜燃料電池、設計製備、性能分析

摘 要

本文主要探討燃料電池在船舶電力上之應用，以及針對質子交換膜燃料電池(PEMFC, Proton Exchange Membrane Fuel Cell)進行實驗研究，並建立其設計、製備與性能分析之能量。以燃料電池測試台進行相關之性能測試時，實驗控制參數包括電池溫度、相對飽和溫度、背壓以及燃料(H_2 、 O_2)質量流率等。實驗結果經與現行文獻資料比對，在各組不同之參數條件下，相關性能曲線均相當吻合。實驗研究亦發現，在 H_2 及 O_2 的消耗量上可得到最佳比例，且控制燃料電池溫度及加濕氣體溫度與增加進氣(H_2 、 O_2)的背壓均具有提昇電池性能的效果。本研究除完整地建立質子交換膜燃料電池設計、製備、性能測試與分析能量外，其結果亦有助於國內先進船舶電力設計之發展。

前 言

燃料電池的發展隨著科技水準的進步以及替代能源的需求下，益發顯示出其重要性。由產業分析顯見自1995年至2000年世界市場的年成長率為15.2%，而2000年至2005年世界市場的年成長率則大幅增加至28.4%[1]。由於燃料電池操作特性的優勢，即適合不同溫度範圍及功率大小，故以其做為動力源，實可滿足各項應用之需求[2]。

以往燃料電池的研發工作集中於磷酸型(PAFC, Phosphate Fuel Cell)、熔融碳酸鹽型(MCFC, Melt Carbonate Fuel Cell)與固態氧化物型(SOFC, Solid Oxide Fuel Cell)等，但近來質子交換膜(PEMFC, Proton Exchange Membrane Fuel Cell)已廣被重視而成重點開發技術之一。由於PEMFC使用濕潤化Nafion高分子膜作為電解質層，因此操作溫度必須控制在 100°C 以下，此種低溫條件使電極中的白金觸媒對CO的抵抗力減弱，造成燃料氣體中的CO濃度需要嚴格的限制。然而Nafion膜的質子傳輸效率極佳，因而可提高電池的電流密度，再加上低溫與非腐蝕的特性，使得此種電池具有重量輕、體積小、啟動快與機組材料選擇性大等各項優點。

燃料電池應用於船舶方面，美國能源部(DOE)、國防部(海軍)以及海事組織曾就其技術層面與使用層面提出研究，指出燃料電池在技術層面的優點有高效率、低排放物、具靜音、易安裝、可汽電共生、模組化、組裝時間短、燃料使用具彈性、局部負載應用具效率及易操作與維護等十項，而缺點有成本高、 CO_2 排放、特殊用材料問題、燃料置放問題、燃料供應問題、使用壽期短及維護頻率高六項，至於使用層面包括靜音操作應用、動力設定改變應用、水下載具應用、商用運輸船舶推進、艦艇推進、船艦輔助動力及雷達與海洋資料記錄傳輸裝備動力等七大類[3,4]，由此可深入瞭解燃料電池在船舶應用上之實際效益與研究課題。

在燃料電池高成本的問題中，影響其總成本之因素包括技術研發、製造與建置、運轉與維護及更換頻率(燃料成本)，故如能降低單項成本，將使燃料電池在船艦應用上更競爭優勢，而在燃料電池不斷進步的發展中，此一可能性已有明顯達成之趨勢。另對於軍事用途艦艇而言，由於燃料電池在運轉上具有靜音之重要特徵，因此除成本考量外，實為一較為理想的動力源。

† 責任作者(g970403@ccit.edu.tw)

此外，燃料電池在做為船艦用推進主機上，其效率、重量與體積等系統特徵分析如表1[5]，其中計算各型燃料電池的體積部份，是加上50 %的封裝體積。如以船艦性能最重要的酬載因素而言，即單位功率的重量與體積考量，則由表1可得知質子交換膜燃料電池(PEMFC)將最具有優勢。

英國造船工程師學會(RINA, The Royal Institution of Naval Architects)於2002年第七屆潛艇研討會中，由Dams[6]等撰文討論世界先進國家在燃料電池商用與軍用上的最新發展，其中對於船艦部份，質子交換膜燃料電池的分析最為廣泛，而德國212A型潛艇在最大運轉溫度為80℃時，其效率可高達65%。

燃料電池是將燃料和氧化劑的化學能直接轉換成電能裝置，此系統的燃料為氫氣，主要來源為液態氫、金屬儲氫和甲醇重整等；氧化劑則為儲存於低溫容器中的液態氧，其原理恰與水的電解作用相反，亦即將氫氣與氧氣冷燃燒(cold combustion)後產生電流。燃料電池的研發早在1950 年代末期即已開始，但僅將成果初步運用於小型非軍事潛水載具，一直到1980 年代各國開始投入大量人力及物力進行軍事上的研發，其最主要的原因在於此系統產生的電流為直流電，故系統本身不再需要配備交/直流轉換器，可有效降低的系統支援設備的需求。此外，由於燃料電池產生電能時不會有任何噪音，可大幅提昇潛艇在水中的隱密性。

美國海軍曾規劃以質子交換膜燃料電池作為5,000噸級驅逐艦以及2,000噸級護衛艦之動力系統[7]，其中操作壓力可達6 atm，該研究除對燃料電池應用於船艦設計的衝擊加以分析外，亦從燃料電池的機動性、存活性、可用性與環境影響等方面來進行軍事用途的有效性評估。

早在1964年，德國Allis-Chalmers公司就將其製造的燃料電池安裝在Electric Boat Company的單人水下研究船[8]做為船舶動力系統，後續亦多用於短程的交通船及運輸船[9]，直至2003年，德國在質子交換膜燃料電池的發展技術已相當成熟，並應用到軍事潛艇，其中U212採用9組34千瓦PEMFC，而U214則採用2組120千瓦PEMFC，作為絕氣推進系統之用，以發揮燃料電池在運轉時靜音匿蹤之優異性能。PEMFC用於日用電力系統的發展自2000年英國RV Triton研究船應用1,000~2,000千瓦輸出功率[10]及加拿大海軍應用40~400千瓦輸出功率開啓，至2005年蘇俄的677潛艇[11]及德國的U31潛艇均已將PEMFC使用於推進及日用電力系統中，上述相關之應用分析如表2。

質子交換膜燃料電池相關的實驗研究，1998年Yi與Nguyen[12]探討長流道燃料電池模型，其中包括電

表1 燃料電池做為船艦用主機之分析表[5]

項次	推進主機型式	效率(%)	重量(kg/kW)	體積(cm ³ /kW)
1.	質子交換膜燃料電池	39~42	2.72~5.40	5380 ~ 8495
2.	固態氧化物燃料電池(板式)	42~60	4.36~6.13	7929~22937
3.	固態氧化物燃料電池(管式)	45~60	9.08~13.62	16990~33980
4.	熔融碳酸鹽燃料電池	40~55	18.16~27.24	27751~59465
5.	磷酸燃料電池	38~42	13.62~20.88	26335~42475
6.	柴油主機	31	14.26	24352
7.	發電機	26	12.21	26618

表2 PEM燃料電池應用於船舶統計分析表[8~11]

國 家	船 型	年 份	輸出功率	用途
德國	單人水下研究船	1964	750 W	推進系統
德國	Hydra短程交通船	2000	5 kW	推進系統
德國	短程交通船	2000	10 kW	推進系統
德國	212潛艇	2003	34 kW	推進、日用電力系統
德國	214潛艇	2004	120 kW	推進、日用電力系統
德國、挪威	大型渡輪	2004	2 MW (總輸出)	日用電力系統
德國	U31	2005	--	推進、日用電力系統
荷蘭	小型渡輪	2004	400 kW	推進系統
英國	RV Triton研究船	2000~	1~2 MW (總輸出)	日用電力系統
義大利	交通船	1998	40 kW	推進系統
美國	紐約~波士頓運輸船	1998~	5,440 Kw (總輸出)	推進、日用電力系統
美國海軍、緝私艦、DD51	海岸防衛隊	2004~	500 kW	日用電力系統
加拿大海軍	--	2000~	40~400 kW	日用電力系統
蘇俄	677潛艇	2005	--	推進、日用電力系統

池系統總壓力與系統溫度對電池性能的影響。Eikerling [13]等對質子交換膜燃料電池的觸媒層進行研究，並針對氧氣擴散現象以及化學反應生成電流現象加以討論。1999年Singh[14] 等對於質子交換膜燃料電池的質傳輸送現象則發展出一套二維的理論模型，其主要內容在於瞭解燃料電池中的質傳步驟，以期能達成改善熱與水管理之目的。

2000年Jordan[15,16]等經由實驗提出氣體擴散層內部碳的形態對於性能的影響，分別利用 Vulcan

XC-72R與Acetylene Black來比較對性能之影響，兩者差異在於表面積不同與氣孔的分佈。此外，Choi[17]等研究在薄膜處來自於陽極與陰極所提供水的分佈現象，並探討當陰極加濕狀態對於薄膜處水分佈的情形，然而在薄膜處水的移動方式包含了由電位梯度所造成的電滲透效應與濃度梯度所造成之逆擴散效應兩種。該研究認為影響薄膜內水傳輸現象與陽極、陰極水通量的變化有相關。

2001年Dohle[18]等研究分析PEM 燃料電池陰極側沿著氣體流道其氧氣消耗量對於電壓損失之影響性。指出反應級數與流道長度對於電池性能皆有一定性之影響，隨著反應級數增加，其進口電流亦隨之增加，但對整體電池性能而言則減少，而極限電流密度則無影響。

自2002年起，日本自動車研究所(JARI, Japan Automobile Research Institute)的田中達夫(Tatsuo Tanaka)[19]等對燃料電池堆性能試驗法提出研究與討論，並建立標準實驗規範，讓汽車廠商和電池堆製造商之間均能獲得一致的認同。另為重覆測定電流－電壓特性，必須規定暖機條件和平均電池電壓誤差在 $\pm 1\%$ 以內。該所橋正好行[20]等亦針對不同材料的燃料電池結構元件和組成條件，作一系列對電池性能的影響與研究，該研究並對市面上的燃料電池進行測試，且詳細記載過程中所有的要因和相關事項，以及測試評估不同的材料及加工方法，進一步瞭解其對燃料電池性能的影響程度。由實驗結果得知燃料電池的性能，會因不同的電池材料、加工及組裝過程而有所不同，有關分析PEM燃料電池性能影響因子之魚骨圖如圖1所示。

另Kong[21]研究將氣體擴散層作熱處理與酸化處理中，不同孔徑分佈對於燃料電池質量傳輸限制的影響，認為在氣體擴散層中，孔隙度大小分佈比例相較於氣體擴散層總孔隙度來的重要，且對於燃料電池性能影響較嚴重。

2003年Heli[22]等人曾對904L、316L及317L及349TM不鏽鋼等雙極板材料進行介面阻抗實驗，結果證實以349TM不鏽鋼取代石墨板可得到最佳的性能發揮。該實驗中發現，即使採用相同的膜電極組(MEA, Membrane Electrolyte Assembly)，在未活化完全時，其性能也不相同；另外，在不同材質的石墨，如緻密型石墨與複合石墨，以及不同的組裝過程，其接觸阻抗也都有明顯的差異。在阻抗的彙整部份，有MEA的阻抗、碳紙厚度、碳紙和雙極板的接觸能力等，結果證明厚度也是影響阻抗的主要原因；另外藉由碳紙和雙極板之間的接觸壓力，可推算出電池所需螺栓數量、大小、扭力及雙極板材料等來獲得最佳的接觸阻抗；從實際使用電錶量測，發現增加螺栓扭力，阻抗會減少，但若將螺栓扭力超過一定程度時，將會造成碳紙破損。

Li[23-24]等利用理論分析與實驗測試來探討陰極表面氧氣濃度藉由自然對流質傳供應之限制，並研究在不同陰極表面位置對於PEM燃料電池性能之影響。Yoon[25]等曾探討流場與膜電極組之設計，對於PEM燃料電池電流與溫度隨氣體分佈之變化，實驗結果發現，加濕溫度超過31 $^{\circ}\text{C}$ 時，在電池末端部分因反應所產生累積的水造成流道阻塞，電流密度明顯下降，因此認為，當燃料為空氣時，增加觸媒層與擴散層之孔隙度及減少其厚度，將可以改善因氣體擴散所造成電流極限現象產生；然而過高的加濕溫度也會造

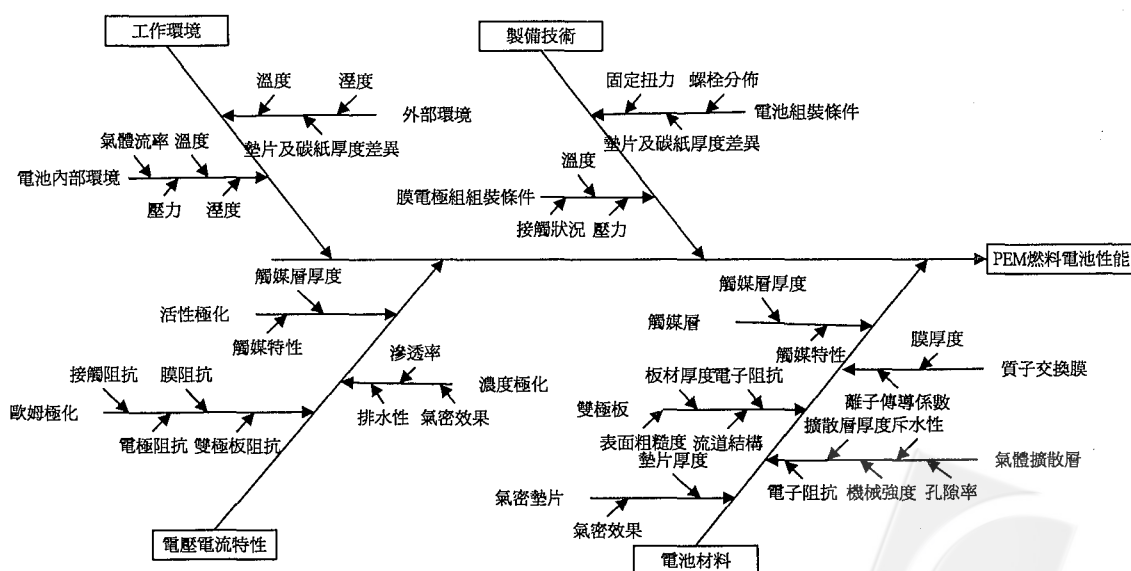


圖1 PEM燃料電池性能魚骨圖[20]

成流道與擴散層因水無法有效移除而阻塞，因此適當的加濕對於電池性能才有正面之影響。

Kumar[26]等研究流道尺寸與流道形狀(半球形、三角形與矩形)對於PEM 燃料電池流場分佈及電池性能之影響。分析結果發現半球形與三角形流道其陽極側壓損皆遠大於一般矩形流道，但相對於其陽極側之氫氣消耗率較大，電池性能相對提昇。

由以上文獻回顧得知，在現階段質子交換膜燃料電池中，實驗部分絕大多數探討燃料電池內部構件種類對於燃料電池性能之影響；而在流道設計部分，絕大多數皆以數值模擬分析為主，且在不同設計條件下，其最佳操作條件也相對不同。在燃料電池逐漸量產運用之際，相關設計及檢測標準程序之建立當刻不容緩，本研究將以雙蛇型流道設計之燃料電池為實驗對象，並從設計、製備著手，且進行一系列實驗操作參數探討，完整地建立測試分析能量，期能有助於PEM燃料電池在船舶電力應用上之設計參考。

理論分析

1. 操作原理

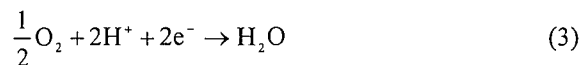
PEM燃料電池是通入氫氣與氧氣再利用電解水的逆反應產生電能的一種直接能量轉換裝置，此裝置能將化學能直接轉換為電能，未涉及卡諾循環的限制，故發電效率遠較傳統內燃機為高[27]，只要在持續供應燃料的情況下，可連續不斷電。PEM燃料電池的發電原理：當陽極端的氫氣進入電池內部後，在質子交換膜中經白金觸媒的催化被分解成氫離子與電子，電子由陽極端集電板經陰極端集電板回到陰極；而陰極端氧氣則與穿透膜電極組而來的氫離子及集電板上的電子反應形成水，故僅需在陰陽極分別持續供給氧氣和氫氣，電能的產生便能穩定而持續。各項反應方程式如下：

(1) 陽極端(Anode)：



$$\begin{aligned} \text{H}_2 \text{ 使用量} &= \frac{In}{2F} \text{ moles/s} \\ &= 1.05 \times 10^{-8} \times \frac{P_e}{V_c} \text{ kg/s} \end{aligned} \quad (2)$$

(2) 陰極端(Cathode)：



$$\begin{aligned} \text{O}_2 \text{ 使用量} &= \frac{In}{4F} \text{ moles/s} \\ &= 8.29 \times 10^{-8} \times \frac{P_e}{V_c} \text{ kg/s} \end{aligned} \quad (4)$$

(3) 總反應式(Overall Reaction)：



$$\text{H}_2\text{O 生成量} = 9.34 \times 10^{-8} \times \frac{P_e}{V_c} \text{ kg/s} \quad (6)$$

反應方程式中， I 為電流， n 為莫耳分率， F 為法拉第常數(96487庫侖)， P_e 為燃料氣體壓力， V_c 為燃料氣體體積。

2. 極化現象

由於燃料電池有活化極化(activation polarization)損失、燃料跨越(cross over)及內部電流、歐姆極化(ohmic polarization)損失、質傳或濃度極化(concentration polarization)損失等四個主要的不可逆性，所以造成了電壓降[2]。一般而言，典型燃料電池的極化曲線可以分為域活化極化、歐姆極化及濃度極化區域三個特徵區，而電壓與電流密度的關係曲線可由明顯的斜率變化，來區分這三個區域，且每一個區域內影響的因素皆不同，各區域特徵分述如下。

2.1 活化極化區域

在該區域，MEA輸出低電流密度時，受過電位影響，導致MEA在無電流輸出時的電壓無法到達理論值，且輸出小電流密度時，電壓呈快速下降的現象，其影響的原因有觸媒材料，觸媒層結構最佳化，疏水性及MEA製備程序等技術。

2.2 歐姆極化區域

該區域的損失，主要是來自於離子與電子轉移時，受到內電阻的影響，可由下列關係式表示之：

$$R = R_{im} + R_e + R_{ec} \quad (7)$$

上式中 R_{im} 為交換膜的離子電阻， R_e 為交換膜與電極的離子接觸電阻與電極中的內電阻， R_{ec} 則為反應式與電極的接觸電阻、反應式本身材料的內電阻和外部負載電阻。在此區域中，電池的阻抗則改由歐姆過電位來主導，電壓和電流密度會呈線性關係[27]，而影響的成因有：薄膜溼度、厚度、MEA、墊片、集電板、端板材料結構設計，壓力分布最佳化以降低接觸阻抗。

2.3 濃度極化區域

在該區域中，輸出的電流密度最高，這是由於電化學反應在此劇烈的發生，需要的反應氣體分子數量也較高，但反應氣體、離子的傳輸受到質傳限制(mass transfer limitation)，來不及提供作用層反應所需的分子數量，使得mea輸出的電壓下降，影響輸出的功率[28]。

3. 流量計算

燃料電池在放電時，需要足夠的燃料，以下就產生1安培的電流，所需消耗之氫氣與氧氣最小體積流量，分別計算如后：

由公式(1)中可得知，每莫耳氫分子可釋放兩莫耳的電子，而每安培電流即代表每秒鐘所含的單位庫倫電量，亦即1安培=1庫倫/秒，且1莫耳電子含有96,487庫倫，則當燃料電池反應時，每莫耳的氫氣，在陽極端會釋放出二個電子，所以，要產生一安培的電流時，其氫氣流量可由下列計算式求得：

$$\dot{V}_{H_2} = (1A) \left(\frac{1 \text{ cc/sec}}{1A} \right) \left(\frac{1 \text{ mole } e^-}{96487C} \right) \left(\frac{1g \text{ mole } H_2}{2 \text{ mole } e^-} \right) \left(\frac{60 \text{ sec}}{1 \text{ min}} \right) = 6.964 \frac{\text{cc}}{\text{min}} \tag{8}$$

其中，1 mole = 22,400 cc (0℃、1 atm下之理想氣體)。所以體積流率大約需要7cc/min的氫氣，才能產生1安培的電流；換算為氫氣質量消耗率為：

$$\dot{m}_{H_2} = \left(3.109 \times 10^{-4} \frac{g \text{ mole}}{\text{min}} \right) \left(\frac{2.0158 \text{ g}}{1 \text{ g mole } H_2} \right) = 6.267 \times 10^{-4} \frac{g}{\text{min}} \tag{9}$$

由公式(5)得知，氧氣所需莫耳數為氫氣之半，故每安培氧氣所需燃料量約為3.5 cc/min。然而在本文實驗中，氣體實際量測的操作溫度範圍在50~80℃，故每莫耳氣體體積運算如后：

$$PV = nRT \tag{10}$$

其中， $P=1 \text{ atm}$ ， $R=0.082$ ， $T=0、25、50、60、70$ 及 80°C 時，1莫耳所得體積流率如表3，故室溫下(25℃)每安培每分鐘所需氫氣流量約7.58 cc/min。因氧氣所需為氫氣之半，所以氧氣流量約為3.8 cc/min。

4. 電池堆設計

燃料電池為產生較大功率的輸出，可考慮單電池的串接，即以電池堆(stack)方式來達成，至於量測使用單電池的尺寸大小或電池堆的組合層數，其相關之分析討論如下。

假設燃料電池測試系統的電子負載功率為 L_e ，可控制最低電壓為 V_{min} ，操作電壓為 V_{ope} ，電池堆串接層數為 n ，且若不考慮阻抗損失，則理想可測試能量(電流 I)為：

$$I = L_e / (V_{min} + nV_{ope}) \tag{11}$$

如以本文實驗中的燃料電池測試系統為例，其可控制電壓為3~60V、電流為0~60 A，功率最大可達300 W。若實驗中之操作電壓為0.6V，電流密度為1.2 A/cm²，單電池作用面積為5×5 cm²，則產生電流量為1.2×25=30 A，而電池堆應可串接11層進行量測，此外，並可依據上述基本資料，著手進行電池堆的初步設計。

表3 不同溫度之體積流率

溫度(°C/K)	0/273	25/298	50/323	60/333	70/343	80/353
n	1	1	1	1	1	1
$P \text{ (atm)}$	1	1	1	1	1	1
$V \text{ (L)}$	22.40	24.5	26.50	27.32	28.14	28.96
$\dot{V}_{H_2} \text{ (cc/min)}$	6.96	7.61	8.24	8.49	8.75	9.00
$\dot{V}_{O_2} \text{ (cc/min)}$	3.48	3.80	4.12	4.25	4.37	4.50
$\dot{V}_{Air} \text{ (cc/min)}$	17.41	19.00	20.60	21.23	21.87	22.51

表4 PEM燃料電池製備材料分析表

品名	規格	功能或用途說明
正負極板	燃料電池之極板為 POCO 公司所生產的高緻密石墨板，其大小為 100 cm ² ，厚度為 12.8 mm，流道加工面積為 25cm ² ，陰極與陽極流道寬度、肋條寬度及流道深度皆為 1 mm。	作為導電與導熱傳輸路徑外，所加工之流道還提供陽極與陰極氣體燃料傳輸至膜電極組反應之路徑。
集電板	使用具高導電性材質之紅銅金屬做為集電板，集電板表面需做鍍金處理，集電板大小為 100 cm ² ，厚度為 2 mm。	主要功能在於收集燃料電池經電化學反應後所產生之電子，在集電板表面需做鍍金處理，其目的為增加集電板表面之導電性及減少集電板與雙極板之間的接觸阻抗。
端板	鋁合金 7075，端板表面做陽極處理，其大小為 100 cm ² ，厚度為 17 mm (每一個端板包含一組氣體進出孔與 8 個螺柱孔)。	在加工過程中，端板表面需做陽極處理，目的在於使端板具有絕緣效果。
氣密墊片	氣密墊片為 GORE-TEX 所生產的 SG05 XL-J 系列，其氣密墊片材質為 Teflon，大小為 100 cm ² 。	增加電池內部氣體燃料傳輸之氣密性與各導電材料間之絕緣效果，以避免燃料電池運作時因漏氣與漏電造成能量損失。
膜電極組	觸媒層尺寸大小為 25 cm ² ，反應作用面積為 25 cm ² ；在氣體擴散層部分，使用 GORE-TEX 公司所生產的碳布材料，其大小為 25 cm ² ，厚度約為 0.5 mm。	支撐結構與氣體傳輸媒介。

電池之製備

1. 電池設計

在本文中，研究製備的燃料電池材料與規格分析如表4，而製備過程，包括從初步構想、應用3D繪圖軟體設計、到製備完成，以及進行測試之流程詳如圖2。

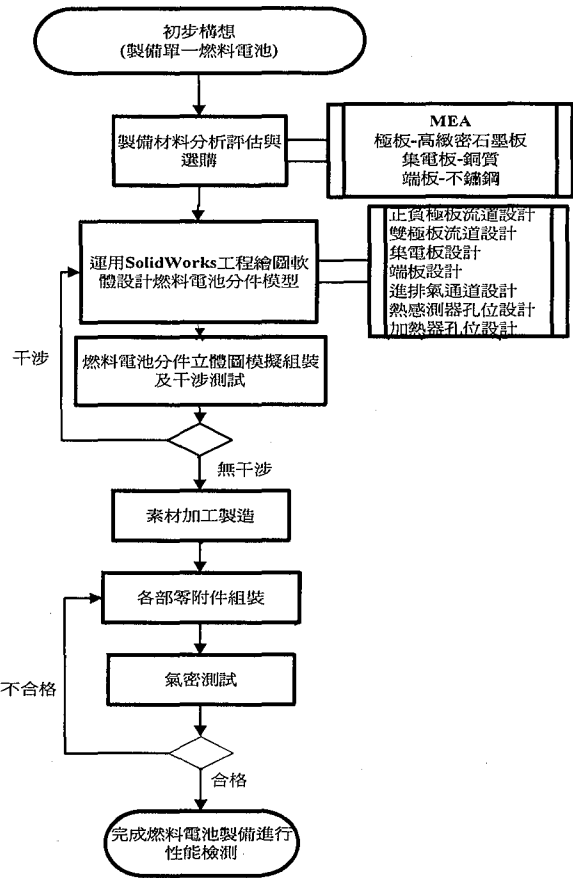


圖2 燃料電池設計流程圖

1.1 初步構想

製備雙蛇型流道燃料電池，並量測燃料電池在各種參數條件下之性能，供研究分析之用。

1.2 工程設計

燃料電池工程模型設計採用之軟體為SolidWorks 3D繪圖軟體，其設計要點如下：

- a. 正、負極電極板模型圖：採雙蛇型流道，共八個固定螺栓孔，工程圖如圖3所示。
- b. 集電板模型圖：除固定螺孔外並設計電子負載固定孔。
- c. 端板模型圖：除固定螺孔外並設計熱感測器偵測孔及加熱器孔。

1.3 分件模擬組裝測試

- a. 電池元件立體圖模擬組裝：先不考慮MEA的部份，將所有設計完成之元件(正負極板、集電板及端板)，繪製組裝完成後之組合圖如圖4。
- b. 爆炸圖檢測：檢查各元件相關位置，在實體組合後之適切性。
- c. 干涉測試：將設計之各元件組合，並進行干涉檢查。

經上述各項初步檢查確認均無誤後，則可進行各元件加工製造。

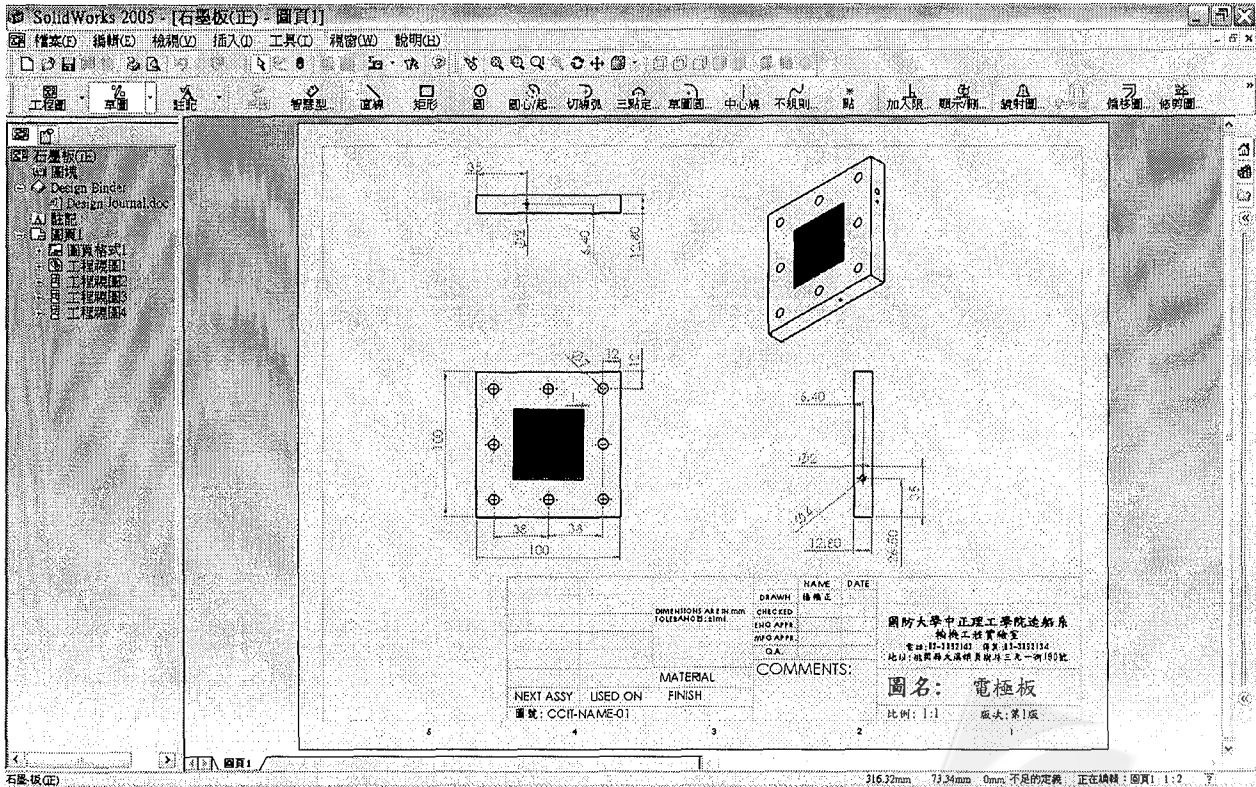


圖3 電極板設計工程圖

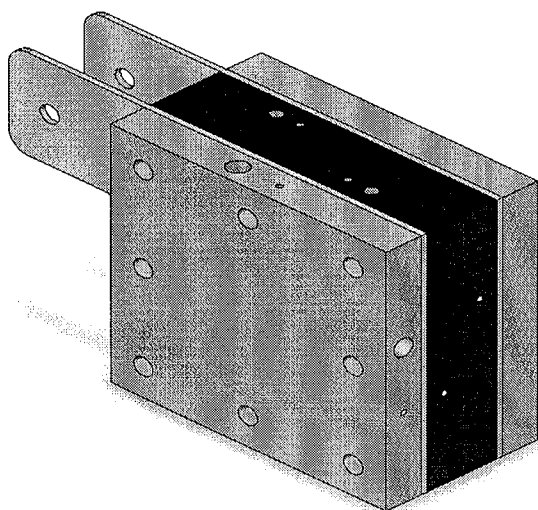


圖4 電池設計組合圖(不含MEA及固定螺栓)

2. 組裝步驟

- (1) 將第一塊端板先穿過四枝隻長螺絲，作定位。
- (2) 將第一塊電極板放置定位。
- (3) 將第一片氣密垫片覆蓋於石墨板上。
- (4) 置入第一塊集電板。
- (5) 放入第一片碳布。
- (6) 將第一片MEA依陰陽極面放至定位。
- (7) 將第二片氣密垫片覆蓋於石墨板上。
- (8) 放入第二片碳布。
- (9) 再將第二塊電極板放置定位。
- (10) 置入第二塊集電板。
- (11) 放入另一端板，依所需磅數鎖緊。
- (12) 完成組裝，氣密測試及開始測試。
- (13) 在組裝完成之後，必須執行氣密測試，以確保組裝完成之燃料電池無跨越現象。

實驗系統與量測

1. 實驗設備

本研究所使用之實驗測試機台主要包含氣體供應系統、流量控制系統、溫度控制系統、增濕系統及電子負載系統等五大部分，實驗設備系統示意如圖5。此測試系統設備測試之最大功率為300 W，最大電流上限為60 A，最大電壓上限為50 V，其測試溫度範圍從25~95 °C，測試氣體包含氫氣/氧氣、氫氣/空氣兩種不同陰極入口氣體；本實驗測試系統設備可應用於測試燃料電池與電池堆。

2. 實驗量測

配合本實驗，建立標準測試程序(SOP)，俾供後續使用者遵循操作，並可確保實驗設備之安全及實驗結果之準確。本實驗是針對流量、溫度、壓力等參數進行實驗量測，步驟如后：

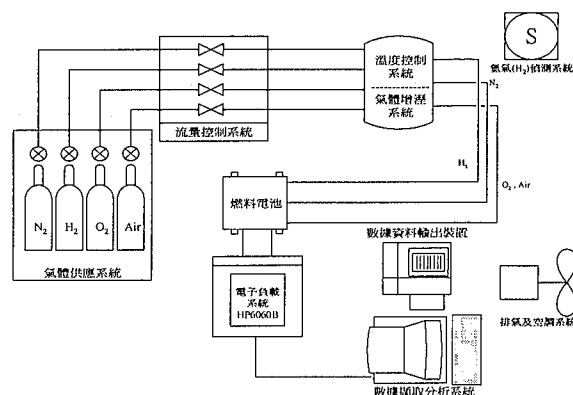


圖5 實驗設備系統示意圖

- (1) 啟動電腦後，打開氫、氧、氮等鋼瓶之閥門，並調整氣體出口壓力，接著開啓機台之電源，將電線與量測線插入適當位置，反應氣體之管路分別導入待測電池的陽極與陰極，檢查增濕瓶水位是否充足。
- (2) 以氮氣還淨(purge)15~20分鐘，清除燃料電池中殘餘的氫氣及氧氣。
- (3) 啟動燃料電池測試系統硬體及軟體設備，設定燃料電池的作用面積、電池數目及入口反應氣體流量，設定系統軟體電池操作電壓值或電流值後，即可供應反應氣體與負載。
- (4) 將陰、陽極氣體入口閥門切換成氫氣、氧氣(空氣)，並調整燃料電池的溫度及加濕溫度。依實驗設計設定相關測試參數，俟參數穩定後，即可開始量測電池性能曲線的相關實驗數據。
- (5) 如需量測背壓，可關閉下方之出口閥，調整燃料電池之背壓參數。
- (6) 按照不同的測試條件，可重複步驟3~5，以進行電池性能測試。
- (7) 在完成性能測試後，依程序關機，並再度以氮氣還淨15~20 分鐘。

結果與討論

本文之研究除完整地建立質子交換膜燃料電池設計、備製及性能測試標準程序，並以氣體流量、溫度及壓力等參數進行分析研究，獲得之最佳參數條件可提供船艦電力系統未來在設計上之參考。

在燃料電池的電化學反應中，愈高的操作溫度，有利於提高電化學反應速度和質子在電解質膜內的傳遞速度，也能夠增進觸媒的活化；同樣地，較高的溫度，也會使得交換膜脫水乾化，使得燃料電池的性能下降；因此，燃料電池的內部溫度不能高於100 °C，所以一般的操作溫度為50 ~ 60 °C；相反地，當燃料電池的操作溫度較低時，會有過多的水聚集而易造成泛水，亦會造成性能下降。

表5 實驗驗證之各組參數分析表

實驗組別	陽極流量或計量比	陰極流量或計量比	燃料電池溫度(°C)	加濕氣體溫度(°C)	背壓(kg/cm ²)	備考
A	400 (cc/min)	700 (cc/min)	50	50	0	定流空氣
B	1.5	2	60	60	3	氧氣

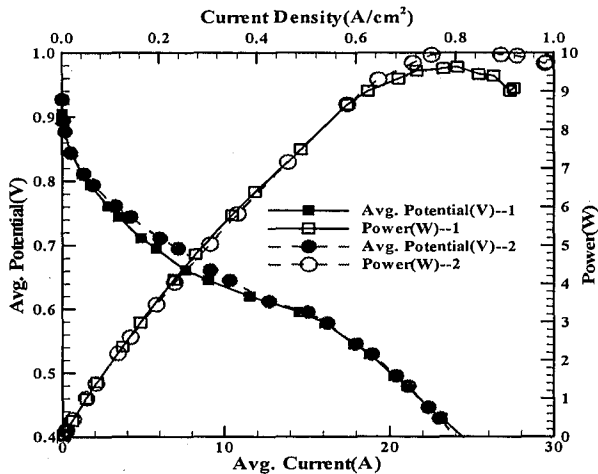
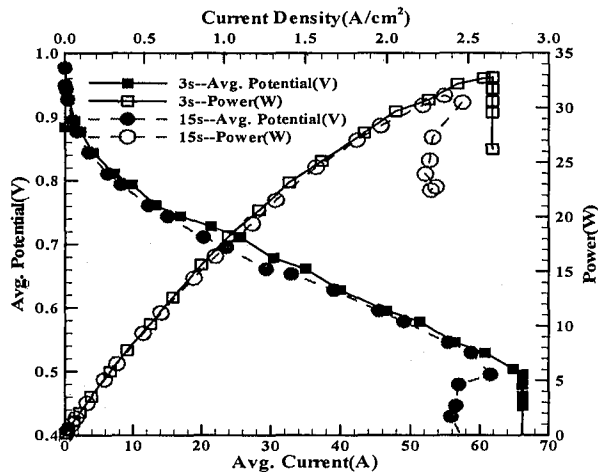


圖6 相同參數下二次重覆實驗比較圖(陽極流量400 cc/min、陰極流量700 cc/min、燃料電池及加濕氣體溫度均為50°C)

圖7 延遲時間3秒與15秒之實驗比較圖(陽極計量比1.5、陰極計量比2、燃料電池及加濕氣體溫度60°C、背壓3 kg/cm²)

因此適當的水、熱管理顯得非常重要，不僅能夠改善燃料電池性能，更能夠增進其耐久度，最佳的操作溫度大約在50~60°C，並且要均勻的分佈，避免產生局部的熱點(hot spots)[29]。

1. 實驗驗證

為確保實驗數據之準確性與可信度進行實驗驗證，相關實驗操作條件如表5所示。

(1) 相同參數下之重覆性

為瞭解燃料電池之性能穩定與否，其實驗必須有一定的重覆性，為在相同操作參數下(實驗組別A)的比較，重覆二次量測實驗，由圖6中可以看出二次實驗的結果幾乎一致。

2. 延遲時間

在設定燃料電池操作參數後，由於測試機台資料擷取及燃料電池本身反應，在短時間內尚未達到平衡，為了解在不同延遲時間(Delay Time)下，量測數據是否穩定可信，及避免浪費不必要之量測時間，分別做了延遲時間3秒及15秒，由圖7中(實驗組別B)發現延遲時間3秒及15秒時，極化曲線趨近於吻合，但延遲時間15秒時的曲線較延遲時間3秒平滑，亦即採用延遲時間3秒的極化曲線較不穩定，採用延遲時間15秒可獲得較準確、可信的資料，並省下許多實驗時間，所以本實驗採用延遲時間15秒為最佳擷取時間。

2. 性能分析

在質子交換膜裡，陽極氫與陰極的氧或空氣流量，直接關係著燃料電池性能的優劣，隨著負載的增加，其電池內部所需供應的氣體燃料也跟著增加。高電流密度時，會增加燃料耗用率，平均電池電壓會快速降低。此種現象，在電流密度愈高時，更加明顯，而電流密度增加，因陰極端生成的水量也會增加，發生冷凝的水份阻塞流道，進而導致反應氣體、水蒸氣的流向變得有遲滯現象；此時，電池的功率也會降低。

理論上，對於質子交換膜燃料電池內部溫度與陰極入口加濕溫度高低皆對燃料傳輸上有所影響。因此，在質子交換膜燃料電池中，適當的電池溫度與陰極加濕溫度有助於提高氣體燃料在觸媒層參與電化學反應之速率，並提升離子在質子交換膜中傳輸速率、增加其導電性，從而促使燃料電池性能提升。然而，過高的電池溫度與過低的加濕溫度，則易導致降低電化學反應速率及減少離子在質子交換膜中傳輸量，過高時將嚴重毀損質子交換膜。

除了流量與溫度外，還有壓力也會對燃料電池性能造成影響，一般而言，壓力如果增加，電池的性能也會提升。改變陽極與陰極之背壓，探討背壓的變化對質子交換膜燃料電池電壓和輸出功率的變化情況，在實驗過程中應避免兩側壓差過大造成質子交換膜結構受損產生跨越的現象。以下為使用氧為燃料下，針對不同流量、溫度與背壓作探討，不同操作條件綜整如表6。

表6 燃料電池之各組參數分析表

實驗組別	陽極計量比	陰極計量比	燃料電池溫度(℃)	加濕氣體溫度(℃)	背壓(kg/cm ²)
A	1	1~2.5	50	50	0
B	1.5	1~2.5	50	50	0
C	2	1~2.5	50	50	0
D	1.5	2	50~80	50~80	0
E	1.5	2	50~80	50	0
F	1.5	2	50	60~80	0
G	1.5	2	60	80	0~3

表7 燃料電池陽極計量比1時，不同陰極流量之性能表

溫度(℃)	計量比(H ₂ :O ₂)	電壓(V)	電流(A)	電流密度(A/cm ²)	功率(W)	誤差(%)
50	1:1	0.661	11.71	0.47	7.7	基準值
50	1:1.5	0.595	21.09	0.84	12.6	64
50	1:2	0.545	24.61	0.98	13.41	74
50	1:2.5	0.545	25.78	1.03	14	81

2.1 陰極流量之影響

首先將溫度定為50℃時，設定陽極之流量計量比為1，陰極之流量計量比由1~2.5，相關之性能曲線如圖8，從不同的陰極流量比中可以看出其極化曲線隨計量比增加而有相當明顯的提升，圖中性能曲線以計量比1:2.5時功率最佳，如表7。在0.545V時電流為25.78 A，電流密度為1.03，則功率為14W；當計量比為1:2時，在0.545V時電流為24.61A，電流密度為0.98 mA/cm²則功率為13.41W；當計量比為1:1.5時，在0.595V時電流為21.09A，電流密度為0.84mA/cm²則功率為12.6W；當計量比為1:1時，在0.661V時電流為11.71A，電流密度為0.47mA/cm²則功率為7.7W，當計量比為1:1上升到1:1.5時，功率上升64%；計量比持續上升到1:2時，功率上升74%；最後計量比上升到1:2.5時，功率則上升81 %。另由圖8中，可明顯看出實驗曲線有遲滯效應產生，此乃是實驗操作設定性能量測係由開路電壓(0.95V)到最最小電壓(0.4V)來回四次各取平均值的結果，此遲滯現象可表示燃料電池在該操作環境下電壓增加或減少之穩定性良窳。

由表7可得知，當陰極的氧氣濃度比不足時，無法完全消耗氫氣，性能曲線明顯下降，但隨著氧氣濃度的增加，性能曲線雖有明顯上升，但上升的幅度隨濃度的增加而較不明顯。

當固定溫度為50℃時，接著將陽極之流量計量比調整到1.5，調整陰極之流量計量比由1到2.5，其性能曲線如圖9，從圖中可明顯看出其性能比前述條件之性能較佳。且不同的陰極流量比中，其極化曲線隨陰極計量比增加而並無顯著的變化，即性能差異不大。

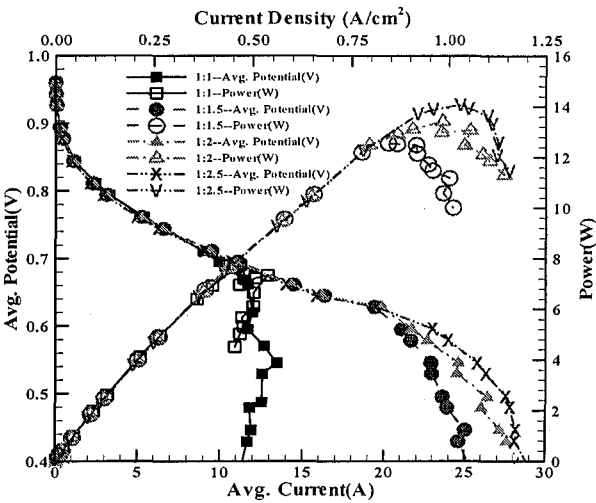


圖8 陽極計量比為1時，不同陰極計量比之性能曲線圖

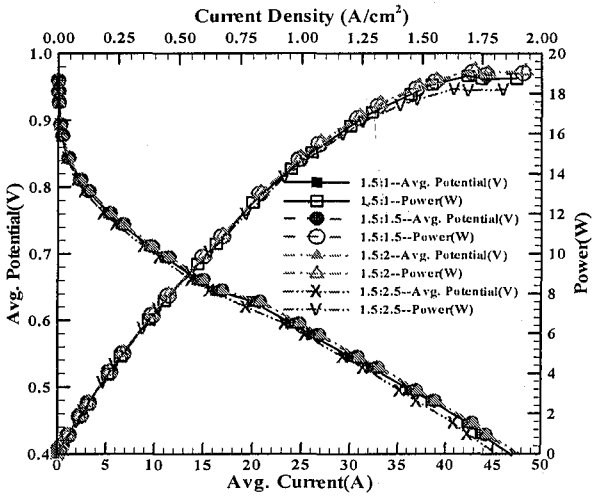


圖9 陽極計量比為1.5時，不同陰極計量比之性能曲線圖

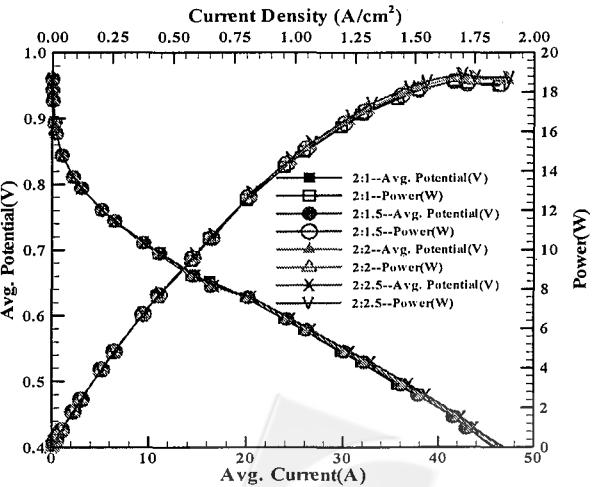


圖10 陽極計量比為2時，不同陰極計量比之性能曲線圖

表8 燃料電池陽極計量比為1.5時，不同陰極流量之性能表

溫度 (°C)	計量比 (H ₂ :O ₂)	電壓 (V)	電流 (A)	電流密度 (A/cm ²)	功率 (W)	誤差 (%)
50	1.5:1	0.45	42.29	1.69	18.86	基準值
50	1.5:1.5	0.43	44.43	1.78	19	+0.74
50	1.5:2	0.43	44.65	1.79	19.15	+1.5
50	1.5:2.5	0.43	42.51	1.70	18.24	-3.3

表9 燃料電池陽極計量比為2時，不同陰極流量之性能表

溫度 (°C)	計量比 (H ₂ :O ₂)	電壓 (V)	電流 (A)	電流密度 (A/cm ²)	功率 (W)	誤差 (%)
50	2:1	0.45	41.64	1.67	18.57	基準值
50	2:1.5	0.45	41.57	1.66	18.54	0
50	2:2	0.45	42.14	1.69	18.8	+1.2
50	2:2.5	0.45	42.44	1.70	18.93	+1.9

表10 燃料電池最佳計量比之性能表

溫度 (°C)	計量比 (H ₂ :O ₂)	電壓 (V)	電流 (A)	電流密度 (A/cm ²)	功率 (W)	誤差 (%)
50	1:2.5	0.545	25.78	1.03	14	基準值
50	1.5:2	0.43	44.65	1.79	19.15	+36.8
50	2:2.5	0.45	42.44	1.70	18.93	+35.2

表8說明在此條件下性能曲線以計量比1.5:2時功率最佳，在0.43V時電流為44.65A，電流密度為1.79 A/cm²，則功率為19.15W；當計量比為1.5:1.5時，在0.43V時電流為44.43A，電流密度為1.78A/cm²則功率為19W；當計量比為1.5:1時，在0.45V時電流為42.29 A，電流密度為1.69A/cm²則功率為18.86W；當計量比為1.5:2.5時，在0.43V時電流為42.51A，電流密度為1.7 A/cm²則功率為18.24 W，當計量比為1.5:1上升到1.5:1.5時，功率上升0.74 %；計量比持續上升到1.5:2時，功率上升1.5 %；最後計量比上升到1.5:2.5時，功率則反而下降3.3 %。

由前述各項實驗數據可知，在此條件之下，當陽極計量比為1.5，陰極的計量比為2時，性能曲線最佳，過多的陰極氧氣反而造成性能下降。分析可能原因為，在一大氣壓之情形下因反應所需燃料增加，造成燃料電池溫度上升較快，使MEA中之水份加速蒸發為水蒸氣，造成燃料電池內部濕度下降，並將電池內水份快速移除使MEA加速乾化，致使性能反而降低。

在溫度為50°C時，將陽極之流量計量比增加到2，調整陰極之流量計量比由1到2.5之性能曲線如圖10，從不同的陰極流量比中可以看出其極化曲線相當接近，表9說明性能曲線在計量比2:1的條件下，在

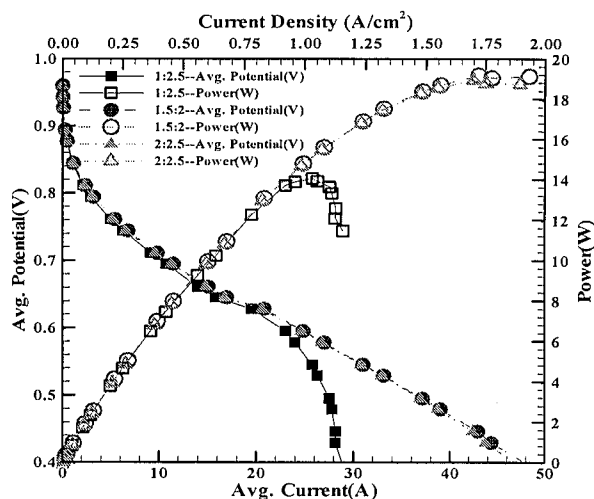


圖11 最佳計量比性能曲線圖

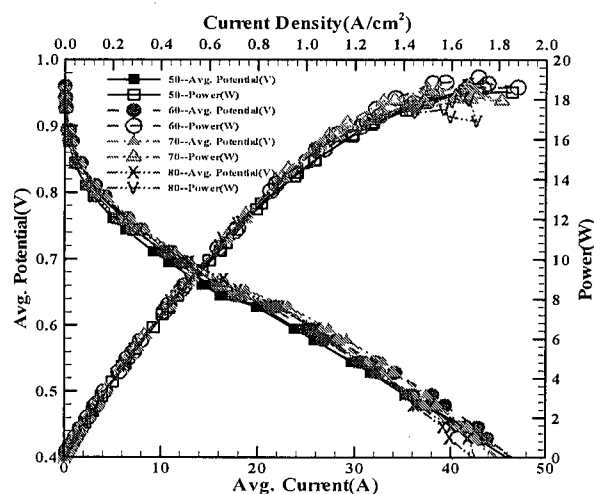


圖12 同時增加燃料電池及加濕氣體溫度之性能曲線圖

0.45V時電流為41.64A，電流密度為1.67A/cm²，則功率為18.57W；當計量比為2:1.5時，0.45V電流為41.57A，電流密度為1.66A/cm²則功率為18.54W；當計量比為2:2時，在0.45V電流為42.14A，電流密度為1.69A/cm²則功率為18.8W；當計量比為2:2.5時，在0.45V時電流為42.44A，電流密度為1.7 A/cm²則功率為18.93W，當計量比為2:1上升到2:1.5時，功率幾乎沒有明顯變化；計量比持續上升到2:2時，功率上升1.2 %；最後計量比上升到2:2.5時，功率則上升1.9 %。由此可知，在此條件之下，最佳的計量比為2:2.5，但性能都相差不多，卻在燃料的使用上，陰極的氧氣增加了2.5倍。

從不同的陽極計量比1、1.5、2這三組數據中，選擇性能最好的計量比來比較，最佳之計量分析如圖11，其中計量比為1:2.5時，性能明顯不如1.5:2和2:2.5，由11圖中，並可看出氫與氧計量比在1:2.5時其實

表11 同時增加燃料電池及加濕氣體溫度之性能表

溫度 (°C)	計量比 (H ₂ :O ₂)	電壓 (V)	電流 (A)	電流密度 (A/cm ²)	功率 (W)	誤差 (%)
50	1.5:2	0.45	41.37	1.65	18.45	基準值
60	1.5:2	0.45	42.86	1.71	19.12	+3.6
70	1.5:2	0.45	41.81	1.67	18.65	+0.1
80	1.5:2	0.43	41.85	1.67	17.95	-2.7

表12 增加燃料電池溫度之性能表

溫度 (°C)	計量比 (H ₂ :O ₂)	電壓 (V)	電流 (A)	電流密度 (A/cm ²)	功率 (W)	誤差 (%)
50	1.5:2	0.45	41.37	1.65	18.45	基準值
60	1.5:2	0.45	42.33	1.69	18.88	+2.3
70	1.5:2	0.45	41.31	1.65	18.42	-0.16
80	1.5:2	0.45	37.74	1.51	16.83	-8.8

表13 改變加濕氣體溫度之性能表

溫度 (°C)	計量比 (H ₂ :O ₂)	電壓 (V)	電流 (A)	電流密度 (A/cm ²)	功率 (W)	誤差 (%)
60	1.5:2	0.43	42.32	1.69	18.15	基準值
70	1.5:2	0.43	43.59	1.74	18.70	+3.0
80	1.5:2	0.43	45.77	1.83	19.64	+8.2

表14 燃料電池增加背壓0~3 kg/cm²之性能表

背壓 (kg/cm ²)	溫度 (°C)	計量比 (H ₂ :O ₂)	電壓 (V)	電流 (A)	電流密度 (A/cm ²)	功率 (W)	誤差 (%)
0	80-60-80	1.5:2	0.4	49.0	2.0	21.0	基準值
1	80-60-80	1.5:2	0.4	59.4	2.4	26.5	+26.2
2	80-60-80	1.5:2	0.4	66.2	2.6	28.4	+35.2
3	80-60-80	1.5:2	0.49	59.45	2.38	28.95	+38

驗曲線會有遲滯效應產生，此遲滯現象表示燃料電池在該此條件下電壓增加或減少之穩定性不理想。主要是因為反應的氣體不足所導致，而計量比較大的2:2.5性能並不比1.5:2來的好，這是因為過多的氣體電化學反應劇烈，燃料電池溫度上升，會帶走MEA的水份。另在性能提升方面，計量比1:2.5到1.5:2，功率上升36.8%，而計量比1:2.5到2:2.5，功率則上升35.2%，故在燃料電池的計量比選擇上，採用1.5:2不僅性能最好，燃料的使用也較節省，綜整如表10。

2.2 溫度之影響

影響燃料電池的操作條件，除了前述的流量外，還有溫度對燃料電池性能之影響，溫度參數又包含了燃料電池本身的溫度與加濕氣體的進口溫度，本節將針對燃料電池中不同的溫度參數進行實驗，並依實驗結果分別討論。

a. 同時增加燃料電池及加濕氣體溫度：從前述的實驗可以得知燃料電池的最佳計量比為1.5:2，如同時改變燃料電池及加濕氣體溫度，其範圍為50~80°C，則相關結果顯示於表11與圖12。若以50°C為基準，在溫度為60°C時，功率上升3.6%；溫度為70°C時，功率僅上升0.1%；而溫度為80°C時，功率則下降2.7%。功率下降的可能原因為燃料電池的溫度在70°C以上時，隨著入口加濕溫度增加，雖然提高了加濕溫度，其氣體燃料攜帶水至PEM膜處的能力增加，增加離子在質子交換膜中傳輸速率及膜的導電性；但燃料電池池內部因電池溫度之提升，電池內的飽和蒸氣壓會上升，膜內水份會減少，使得PEM膜乾化程度較為嚴重，導致離子在薄膜內傳輸阻抗增加，以致於電池性能隨著電池溫度的增加而遞減，故同時加溫燃料電池與加濕氣體溫度下的最佳參數為60°C。

b. 增加燃料電池溫度：據上述結果顯示，燃料電池性能在初期會隨溫度增高而上升，但在高於60°C時，性能則開始有下降的趨勢，為了解燃料電池的性能是隨電池內部溫度還是加濕氣體溫度的改變而有較大的影響，可由圖13看出。

如表12所示，當溫度超過60°C時，功率開始下降，溫度為70°C時，功率下降約0.16%；而溫度為80°C時，功率則下降達8.8%。由此可知，燃料電池內部的溫度，會直接影響質子交換膜的濕度，當溫度超過60°C時，交換膜中之水份蒸發加速，導致交換膜變乾、濕度降低致使性能開始下降。

在溫度低於60°C時之性能不會發生此種現象，因為電池內之溫度較低，使MEA膜內所蒸發之水份與反應生成之水份接近，因此膜內之濕度並未減少所形成之結果。

c. 增加加濕氣體溫度：可固定燃料電池溫度於最佳性能溫度60°C，改變加濕氣體進口溫度，其結果如圖14所示，由該圖可以明顯的看出，當加濕氣體溫度增加時，燃料電池的效率也隨之提昇，其相關實驗數據綜整於表13內，當溫度上升為70°C時，功率增加3%；而當溫度上升至80°C時，功率則增加8.2%；所以，當加濕氣體溫度升高時，所含水份增加，同時增加質子交換膜之質傳效率，故整體性能有明顯之提昇。

2.3 背壓之影響

圖15所示為背壓對電池性能之影響，從該圖中可看出當電池溫度為50°C、加濕氣體進口溫度為80°C時，以背壓3kg/cm²的性能最佳，其次是2kg/cm²，未增加背壓的性能最差，但未增加背壓到背壓為1kg/cm²之間功率提升的幅度最大，但背壓愈大，功率

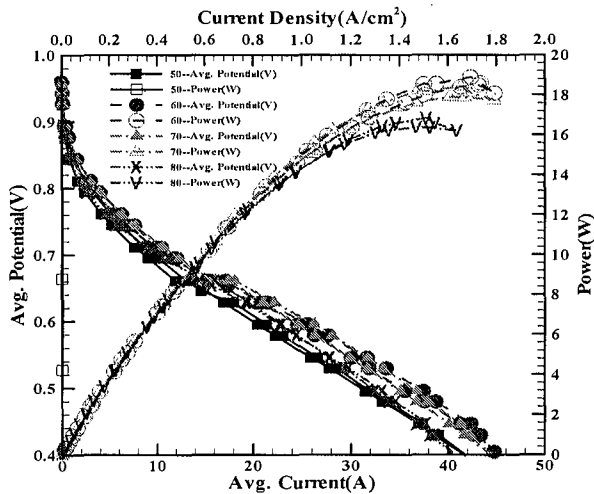


圖13 增加燃料電池溫度之性能曲線圖

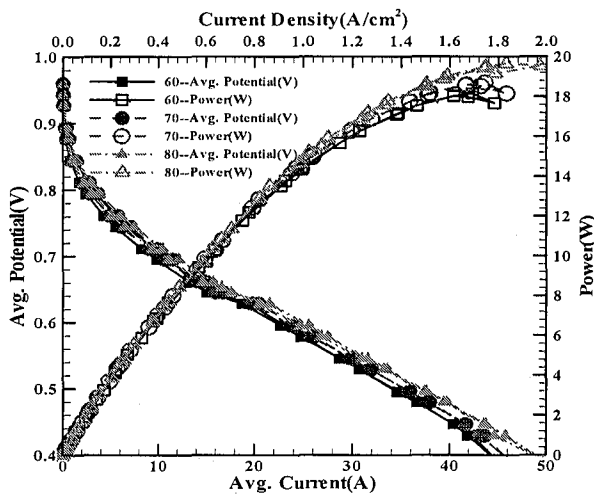


圖14 燃料電池改變加濕氣體溫度之性能曲線圖

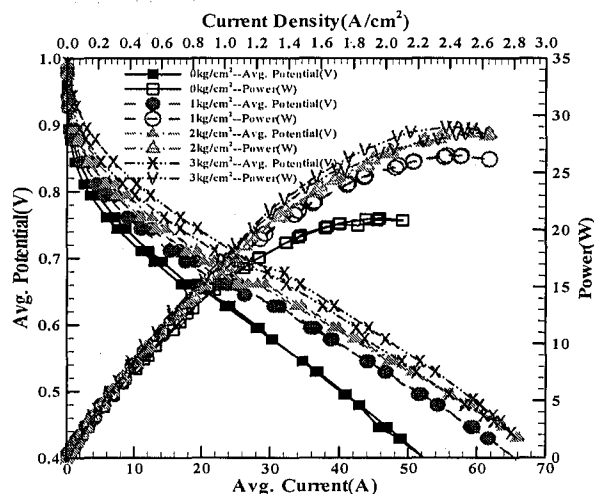


圖15 增加背壓之性能曲線圖

上升的幅度則愈有限，綜整數據如表14所示。分析可能原因，當電池溫度高溫時，水份極不易留在MEA中，增加流場背壓能讓水份強迫留於MEA中，促使

電池內部水蒸氣提升，相對濕度因此增加，使MEA濕潤度得以維持。雖然燃料電池增加背壓會使電池性能提高，但過大的壓力會使燃料電池中的MEA受損，且在進行實驗時，必須避免陽極與陰極之間的壓力差異太大。

上述表7至表14中，誤差 = $100 \times (\text{改變之功率} - \text{基準值功率}) \div \text{基準值功率}$ 。

結 論

本文旨在探討燃料電池在船舶電力上之應用，以及建立PEM燃料電池設計、製備、測試及性能分析之基本能量，俾供國內未來船艦運用燃料電池作為電力或推進系統之參考，綜合研究結果與建議分述如后：

1. 分析燃料電池技術層面與使用層面之特徵，以及其在實際船舶電力與推進上運用之功率範圍。
2. 完成質子交換膜燃料電池的設計與製備，並建立測試機台之實驗程序，以及分析各項操作參數對PEM燃料電池的性能影響，本實驗研究所測試之燃料電池在功率方面，以燃料電池溫度60°C、加濕溫度80°C及背壓3kg/cm²時可展現最佳性能。
3. 從實驗結果中可以得知，電池性能提昇與燃料消耗必須取得一個平衡，所以依其性能曲線來分析相關結果，將有助於取得燃料電池最佳之計量比。
4. 由本實驗結果得知，燃料電池之最佳操作溫度為60°C，如溫度過高，則濕潤不足會導致交換膜乾化，需藉由調整加濕氣體溫度與燃料電池本身溫度來達到最佳之性能。
5. 根據實驗結果分析指出，質子交換膜燃料電池性能隨著壓力增加而逐漸升高，其變化的幅度隨著壓力上升而逐漸減緩；因此，升高壓力雖有助於提升燃料電池的性能，但仍需注意燃料電池的結構強度，避免因壓差過大而損壞電池內部構件。
6. 後續研究的方向可再延伸至小型電池堆的設計製備與性能分析，以及操作參數之影響，讓質子交換膜燃料電池在國內船舶的應用上更具有實用性。

誌 謝

本研究承國科會一般型研究計畫NSC 95-2221-E-606-039之補助，以及工研院能環所燃料電池研究室之實驗協助，特此致謝。

參 考 文 獻

1. 宋齊有，燃料電池系統簡介，燃料電池技術推廣訓練班，行政院勞工委員會職業訓練局（2002）。
2. Larminie, J. and A. Dicks, *Fuel Cell Systems: Explained*, John Wiley & Sons, LTD (2002).

3. <http://www.wws.princeton.edu/cgi-bin/byteserv.prl/~ota/disk/1986/8612/861204.PDF>
4. <http://www.wws.princeton.edu/cgi-bin/byteserv.prl/~ota/disk/1986/8612/861205.PDF>
5. Allen, S., E. Ashey, D. Gore, J. Woerner and M. Cervi, "Marine Applications of Fuel Cell," *Naval Engineers Journal*, Vol.110, No.1, pp.93-06 (1998).
6. Dams, B., P.R. Hayter and S.C. Moore, "Progress in the Commercialisation of Fuel Cell Systems-An Update," *2002 International Symposium on Naval Submarines*, RINA, London, pp.137-145 (2002).
7. Goubault, P., M. Greenberg, T. Heidenreich and J. Woerner, "Fuel Cell Power Plants for Surface Fleet Application," *Naval Engineers Journal*, Vol.106, No.3, pp.59-76 (1994).
8. Gunter S., "Fuel Cells Going On-Board," *Journal of Power Sources*, Vol.86, pp.61-67 (2000).
9. FCSHIP G3RD-CT-2002-00823 DTR-4.5-LBST-05.2004 REV.2
10. Vancouver, B.C., "PEM Fuel Cell System Evaluation For Naval Surface Ship Applications," 34th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference, August 1-5 1999, Canada (1999).
11. 陳生平, "德國潛艦發展回顧分享", 第九屆軍艦工程研討會 (2001)。
12. Yi, J.S. and T.V. Nguyen, "An Along-the-Channel Model for Proton Exchange Membrane Fuel Cells," *J. Electrochem. Soc.*, Vol.145, No. 4, pp. 1149-1159(1998).
13. Eikerling, M. and A.A. Kornyshev, "Modelling the Performance of the Cathode Catalyst Layer of Polymer Electrolyte Fuel Cells," *J. Electroanalytical Chemistry*, Vol.453, pp.89-106 (1998).
14. Singh, D., D.M. Lu and N. Djilali, "A Two-Dimensional Analysis of Mass Transport in Proton Exchange Membrane Fuel Cells," *Int. J. of Engineering Science*, Vol.37, pp. 431-452 (1999).
15. Jordan, L.R., S A.K. hukla, T. Behrsing, N.R. Avery, B.C. Muddle and M. Forsyth, "Effect of Diffusion-Layer Morphology on the Performance of Polymer Electrolyte Fuel Cells Operating at Atmospheric Pressure," *Journal of Applied Electrochemistry*, Vol.30, pp.641-646 (2000).
16. Jordan, L.R., A.K. Shukla, T. Behrsing, N.R. Avery, B.C. Muddle and M. Forsyth, "Diffusion Layer Parameters Influencing Optimal Fuel Cell Performance," *Journal of Power Sources*, Vol.86, pp.250-254 (2000).
17. Choi, H.K., H.D. Peck, S.C. Kim and R.D. Shin, "Water Transport in Polymer Membranes for PEMFC," *Journal of Power Sources*, Vol.86, pp.197-201 (2000).
18. Dohle, H., A.A. Kornyshev, A.A. Kulikovskiy, J. Mergel and D. Stolten, "The Current Voltage Plot of PEM Fuel Cell with Long Feed Channels," *Electrochemistry Communication*, Vol.3, pp.73-80 (2001).
19. 田中達夫、大塚賢司、田上久雄、親川兼俊, "燃料電池堆性能實驗法討論", *JARI自動車研究期刊*, 第26卷, 第6號, 第269-272頁, 2004年6月。
20. 橋正好行、沼田智昭、守谷憲造、渡邊正五, "材料性能評估用於JARI 標準電池之開發", *JARI自動車研究期刊*, 第24卷, 第10號, 第455-458頁, 2002年10月。
21. Kong, C.S., D.Y. Kim, H.K. Lee, Y.G. Shul and T.H. Lee, "Influence of Pore-Size Distribution of Diffusion Layer on Mass-Transport Problems of Proton Exchange Membrane Fuel Cells," *Journal of Power Sources*, Vol. 108, pp.185-191 (2002).
22. Heli, W., A.S. Mary and A.T. John, "Stainless Steel as Bipolar Plate Material for Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells" *J. Power Sources*, Vol.115, pp.243-251 (2003).
23. Li, P.W., T. Zhang, Q.M. Wang, L. Schaefer and M.K. Chyu, "The Performance of PEM Fuel Cells Fed with Oxygen through the Free-Convection Mode," *J. Power Sources*, Vol.114, pp.63-69 (2003).
24. Li, P.W., L. Schaefer, Q.M. Wang, T. Zhang and M.K. Chyu, "Multi-Gas Transportation Electrochemical Performance of a Polymer Electrolyte Fuel Cell with Complex Flow Channels," *Journal of Power Sources*, Vol. 115, pp.90-100 (2003).
25. Yoon, Y.G., W.Y. Lee, T.H. Yang, G.G. Park and C.S. Kim, "Current Distribution in a Single Cell of PEMFC," *Journal of Power Sources*, Vol.118, pp.193-199 (2003).
26. Kumar, A. and R.G. Reddy, "Effect of Channel Dimensions and Shape in the Flow-Field Distributor on the Performance of Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells," *Journal of Power Sources*, Vol.113, pp.11-18 (2003).
27. 黃鎮江, *燃料電池*, 全華出版社, 台北 (2003)。
28. 呂俊逸, "質子交換膜燃料電池研究—MEA 的製造和性能分析", 碩士論文, 國立中山大學機械工程研究所, 高雄 (2003)。
29. 黃鎮江, "燃料電池模擬與檢測技術-質子交換膜燃料電池非等溫模型", 台灣氫能與燃料電池系列講座, 台灣氫能與燃料電池學會 (2006)。

ADVANCED SHIPS ELECTRIC POWER—STUDY ON THE DESIGN PRACTICE AND PERFORMANCE ANALYSIS OF THE PROTON EXCHANGE MEMBRANE FUEL CELL

S.W. Shiah* S.J. Wu* W.L. Yu** and F.C. Yang**

** Department of Power Vehicle and Systems Engineering, Chung Cheng Institute of Technology, National Defense University, Taiwan*

*** Graduate School of Defense Science, Chung Cheng Institute of Technology, National Defense University, Taiwan*

Keywords: Advanced Ship Electric Power, Proton Exchange Membrane Fuel Cell, Design Practice, Performance Analysis

ABSTRACT

The application of proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) on ship electric power is first discussed in this paper, and then the design work and performance analysis of PEMFC is also investigated experimentally. During tests are executed, the considered operating parameters include cell temperature, relative saturation temperature, back pressure, and the fuel (H_2 , O_2) flow rates. Comparing current results with previous literature for different cases, the performance curves are matched well. According to the result of the experiments, the consumptions of H_2 and O_2 are agreed with the ideal ratio. Meanwhile, to change the temperature of fuel cell and the humidification, and to increase the back pressure of inlet flow is helpful to improve the cell performance. The above study not only completely establishes the design, testing, and analysis capacity for PEMFC, but also benefits to the development of advanced electric power design on ship in domestic.

(Manuscript received May 1, 2007,
Accepted for publication Aug. 6, 2007)

