

一 般


台灣電力股份有限公司 104 年度

研究計畫 546-2415-0301

固態氧化物燃料電池多層電池堆研製及其
測試系統建置
完成報告

台灣電力股份有限公司

中華民國 104 年 12 月



本報告書僅供
政府機關參考
請勿轉載

固態氧化物燃料電池多層電池堆研製及 其測試系統建置

完成報告

研究方式：委託研究

執行期間：103年01月01日至104年12月31日

計畫主持人：李文台、鐘國濱教授

研究人員：吳成有、張書維、高一誠、馮恆之、劉良將、阮春圓、
黃超偉、蕭凱中

執行單位：台電綜合研究所、元智大學

中文摘要

固態氧化物燃料電池 (SOFC) 比起其他種類的燃料電池具有更多優點，像是可使用燃料種類多，以及擁有最高的能量利用效率。而當 SOFC 發電量在 1-100 kW 時，可作為獨立運作之分散式發電系統，且減少中央供電系統在電力輸送過程中之能源損耗。美國能源部於數年前開始要求產官學進行中溫(600~800°C)固態氧化物燃料電池相關技術之開發以落實 USD\$400/kW 之低成本發電目標。本計畫以 SOFC 性能評估能力之建置與國際技術發展現況之掌握為主，希望在國際技術達成熟時能適時引進，為公司創造大之利潤為目標，而在未來微電網系統與再生能源作緊密之結合或與 IGFC 系統進行整合之應用為長程目標。

鑒於先前研究基礎，本計畫『固態氧化物燃料電池多層電池堆研製及其測試系統建置』持續相關技術之發展。技術發展與期末成果如下：

(一) 平板式陽極支撐型 SOFC 單元電池研製：

1.1 小尺寸鈕扣圓形電池(直徑~ 3 cm)研製與測試($306 \text{ mW/cm}^2 > 300 \text{ mW/cm}^2$)：若陰極進料為空氣，性能最佳為 251 mW/cm^2 ，若是採用氧氣取代空氣，因為擴散限制問題減緩，則性能可到達 306 mW/cm^2 。

1.2 標準 SOFC 單元電池($5 \times 5 \text{ cm}^2$)研製與測試($106 \text{ mW/cm}^2 > 100 \text{ mW/cm}^2$)：藉由自製銀網取代以往之黃金片，因為接觸阻抗之大幅降低，性能得以突破 100 mW/cm^2 。

(二) 研製 $5 \times 5 \text{ cm}^2$ 平板式 SOFC 多層電池堆關鍵技術：

2.1 連接極之研製 ($0.035 \Omega \text{ cm}^2 < 0.05 \Omega \text{ cm}^2$): 藉由氧化物塗層 LSM 之使用，不鏽鋼連接極之阻值不因高溫長時間運作而上升。

2.2 密封材料之選用：相較於單一材料之使用，高溫密封膠與陶瓷材料(電池)之優良接合性，搭配雲母使用將可產生最佳之氣密效果。

2.3 平板式 SOFC 多層電池組技術 (16.1 W/6 cell): 藉由燃料直接噴入陽極表面之創新設計，電池組性能明顯改善而達預定目標。

2.4 固態氧化物燃料電池測試系統之建立：本計畫開放式電池測試系統免除傳統測試驗證系統之複雜性與不易自行維修等特點。

本計畫項目已達成預期技術目標。另外，發表兩篇 SCI 論文與五篇國際會議論文，以及完成一份專利初稿亦已達成計畫預定目標。

關鍵字：固態氧化物燃料電池、連接極、密封材料、電池堆、測試系統

Abstract

Solid oxide fuel cells (SOFC) exhibit many advantages compared to other fuel cells such as: various gaseous fuel can be utilized and the energy efficiency is the highest one. For those SOFC with capacity upon to 1~100kW can be treated as distributed power generators. This distributed power application reduced the energy loss during transmission power from conventional centralized power stations. The US Department of Energy has made a target of reducing the cost of intermediate temperature (600 ~ 800oC) solid oxide fuel cell of USD 400/ kW. The purpose of this project is building a testing platform which can be used for evaluating the performance of SOFC and acquiring international information on SOFC development. By collecting newest international information, the company can introduce SOFC at right time and benefit to the company. For long term, integration of micro-grid for renewable generations, IGFC and others can provide sustainable power to the country.

Due to the current basis of this research, the project “Development of multi-layer stack technology and establishment of evaluation system for solid oxide fuel cell” is proposed. Development and final achievements of each sub-technology is summarized as follows:

A. R&D of anode supported cell :

a.1 R&D of anode supported cell with small size (button cell, D = 3 cm): $306 \text{ mW/cm}^2 > 300 \text{ mW/cm}^2$;

a.2 R&D of anode supported cell with regular size (area = 5 * 5 cm²): $106 \text{ mW/cm}^2 > 100 \text{ mW/cm}^2$;

B. R&D of key technology for multi-layer stack :

b.1 R&D of interconnector: $0.035 \Omega \text{ cm}^2 < 0.05 \Omega \text{ cm}^2$;

b.2 R&D of sealing materials

b.3 R&D of planar short stack: 16 W/6 cell

b.4 Development of evaluation system for solid oxide fuel cell

The targets of all sub-technologies of this project were successfully achieved. In addition, two SCI papers and five conference papers have been published and one patent draft was submitted to Taiwan Power Corporation.

Key words: Solid Oxide Fuel Cells (SOFCs), Interconnector, Sealing Material, Stack, Evaluation System

目錄

中文摘要.....	II
Abstract.....	IV
目錄.....	VI
圖目錄.....	IX
表目錄.....	XII
第一章 前言.....	1
1.1 計畫背景.....	1
1.2 SOFC 材料元件.....	3
1.2.1 固態電解質材料.....	3
1.2.2 陰極材料.....	7
1.2.3 陽極材料.....	8
1.2.4 電池構型-陽極支撐電池.....	8
1.3 平板型 SOFC 電池組.....	11
1.4 計畫目標.....	15
第二章 平板式陽極支撐型 SOFC 單元電池研製(項目一).....	18
2.1 小尺寸圓形鈕扣電池(D ~ 3 cm)研製與測試.....	18
2.1.1 (鈕扣)電池夾具設計.....	18
2.1.2 (鈕扣)陽極支撐型電池.....	20
2.1.3 密封材料.....	20
2.1.4 (鈕扣)陽極支撐型電池之研究方法.....	22

2.1.5 結果與討論-陽極支撐型電池製作	23
2.1.6 結果與討論-密封材料選用	29
2.1.7 結果與討論-活化研究	32
2.1.8 結果與討論-陰極材料對電池性能研究	34
2.2 標準 SOFC 單元電池(5×5 cm ²)研製與測試	35
2.2.1 大面積陽極支撐型電池實驗設備與方法	35
2.2.2 結果與討論-自製大面積陽極支撐型電池之燒結最佳化	36
2.2.3 結果與討論-良率、產率	41
2.3 大面積電解質支撐型電池實驗設備與方法	44
2.3.1 大面積電解質支撐型電池製作流程	44
2.3.2 大面積電解質支撐型電池實驗設備	47
2.3.3 結果與討論-大面積電解質支撐型電池性質與最佳化	50
2.4 SOFC 單元電池技術評估	55
2.4.1 自製電池與各國電池性能量測結果	55
2.4.2 自製電池與各國電池性能量測討論	57
第三章 研製 5 × 5 cm ² 平板式 SOFC 短電池堆關鍵技術(項目二)	59
3.1 連接極之研製	59
3.1.1 連接極之製作方法	59
3.1.2 塗層對連接極阻值之影響	60
3.2 密封材料之選用	64
3.3 平板式 SOFC 短電池堆技術	65

3.3.1 電池組設計	65
3.3.2 平板式電池組 II 設計、修改與性能量測	66
3.3.3 結果與討論-平板式電池組(II)性能量測	77
3.3.4 結果與討論-極電網與密封材料改善	80
3.4 平板式電池組技術 (III).....	83
3.4.1 多電池組性能驗證.....	83
3.4.2 平板式電池堆組技術 (III+)-燃料進口分流模擬與改善.....	86
3.4.3 平板式電池堆組技術 (III+)-六電池組性能組驗證.....	87
3.5 固態氧化物燃料電池測試系統之建立.....	88
3.5.1 開放式電池測試系統之操作步驟.....	89
3.5.2 流量控制器模組之驗證.....	90
3.5.3 電子負載模組之驗證.....	91
第四章 總結論.....	94
第五章 參考文獻.....	95
附件一 論文專利.....	97
附件二 鈕扣型電池測試夾具組裝操作說明.....	100
附件三 平板型電池測試夾具組裝操作說明.....	110
附件四 電池堆電池測試夾具統操作說明.....	122

圖目錄

圖一、SOFC 電池反應示意圖.....	3
圖二、液態電解質與固態電解質接觸差異.....	4
圖三、氧化鈣粉末.....	5
圖四、氧化鈹粉末.....	5
圖五、氧化鋇(左); 氧化鎂(右).....	6
圖六、電解質離子導性與溫度間之關係.....	6
圖七、LSCF 顯微結構圖.....	8
圖八、電解質支撐電池式(左); 陽極支撐電池(右).....	10
圖九、陽極支撐電池: 鈕扣型(左); 正規型(右).....	10
圖十、平板型 SOFC 電池組:(左)爆炸圖;(右)實體圖.....	12
圖十一、SOFC 連結極種類.....	16
圖十二、密封材料的選擇.....	17
圖十三、(鈕扣)電池夾具結構圖.....	19
圖十四、自製(鈕扣)電池夾具.....	19
圖十五、雲母片(上); 陶瓷環(下).....	22
圖十六、(左)陽極與電解質共燒流程; (右)陰極燒結流程.....	22
圖十七、(左)高溫泡棉; (右)高溫磚.....	24
圖十八、高溫磚、高溫泡棉、電解質/陽極三者於高溫燒結中之相對位置.....	25
圖十九、傳統與改良製備之陽極支撐型電池平整度比較.....	25
圖二十、4 層與 3 層陽極電池之活化達穩定所需時間.....	33
圖二十一、自製電池於不同夾具獲得之性能比.....	34

圖二十二、不同陰極材料對電池長時間發電影響(0.6V 定電壓).....	35
圖二十三、平整度與變形率定義	36
圖二十四、電池平整度不佳致組裝過程發生破裂.....	37
圖二十五、良率曲線	42
圖二十六、溫水均壓機.....	47
圖二十七、熱壓機.....	47
圖二十八、真空封口機.....	48
圖二十九、手動網印機.....	48
圖三十、 中溫脫脂爐	49
圖三十一、高溫燒結爐.....	50
圖三十二、經(a)溫水均壓法與(b)熱壓法疊壓，經高溫燒結過後電解質	52
圖三十三、電解質經熱壓法(HP)與溫水均壓法(WIP)疊壓之變形率.....	52
圖三十四、電解質經熱壓法(HP)與溫水均壓法(WIP)疊壓帶所得之平整度.....	53
圖三十五、翹曲率量測方式	54
圖三十六、電解質經熱壓法(HP)與溫水均壓法(WIP)疊壓帶所得之翹曲	54
圖三十七、經電池最佳化參數調整(a)前(b)後之電解質支撐 SOFC 單元電池.....	55
圖三十八、各國商購 SOFC 陽極支撐型單元電池.....	56
圖三十九、自製單元電池與各國電池性能量測曲線.....	57
圖四十、 310s 不鏽鋼及塗覆陰極膏 (LSM、LSCF) 之阻抗圖	61
圖四十一、上：黃金導線與黃金集電片 (本計畫)；下：白金導線與白金集電網	63

圖四十二、平板式電池組 II 之零組件	66
圖四十三、棋盤式流道	69
圖四十四、柵狀流道	70
圖四十五、平板式電池組 II 之凹槽加絕緣陶瓷環設計	70
圖四十六、平板式電池組 II 之障礙製作以達分流效果	71
圖四十七、燃料進出管件:(左) D=6.5mm;(右) D=2.5mm.....	72
圖四十八、燃料進出管之預熱機制	73
圖四十九、相同系統溫度下三種不同入口溫度對性能表現的影響.....	74
圖五十、 黃金導線與金屬集電網結合	75
圖五十一、左:雲母片(一);右:雲母片(二).....	75
圖五十二、以雲母片(一)、(二)將電池夾合防漏	76
圖五十三、彈簧及延長管(組)	76
圖五十四、平板式電池組 II 外形結構	77
圖五十五、平板式電池組(I)之堆疊成效.....	78
圖五十六、平板式電池組 I 之三電池組性能.....	79
圖五十七、平板式電池組 II 之三電池組性能	79
圖五十八、集電網改善 (自行商購銀線後編織之銀網)	80
圖五十九、密封材料改善 (雲母 + 866)	81
圖六十、密封材料改善 (雲母 + 866+ ESL 密封膠)	81
圖六十一、燃料(Fuel)/氧化劑(Oxidant)垂直導流進入電極.....	82
圖六十二、平板式電池組 II (+)-單電池特性	82

圖六十三、平板式電池組III (組裝流程).....	83
圖六十四、平板式電池堆組技術 III(左:設計藍圖 ; 右:實際電池組).....	84
圖六十五、平板式電池堆組技術 III之雙電池測試.....	85
圖六十六、平板式電池堆組技術 III之六電池測試.....	86
圖六十七、平板式電池堆組技術 III 之燃料分布模擬圖.....	87
圖六十八、平板式電池堆組技術 III 之六電池性性能.....	88
圖六十九、固態氧化物燃料電池測試系統.....	89
圖七十、 電腦系統即時監控記錄開啟後使用畫面.....	90
圖七十一、流量控制器模組外觀.....	91
圖七十二、流量測試.....	92
圖七十三、電子負載模組.....	93

表目錄

表一、各種燃料電池與傳統動力比較.....	2
表二、主流 SOFC 開發商之技術分析.....	9
表三、密封材料與策略使用分析.....	14
表四、文獻常見之密封材料特性.....	21
表五、不同重量對不同陽極層數電池之平整度的影響(自製 I).....	26
表六、不同重量對不同陽極層數電池之平整度的影響(自製 II).....	27
表七、不同重量對不同陽極層數電池之平整度的影響(自製 III).....	28
表八、自製與商購的陽極支撐型電池平整度比較.....	29
表九、各種密封材料進行測漏實驗結果(單獨或搭配後).....	31
表十、先裁切後熱壓與燒結.....	38
表十一、先熱壓後裁切與燒結.....	39
表十二、上方壓重對電池平整度與變形率之影響.....	40
表十三、最佳化壓重參數.....	41
表十四、本計畫產出電池與商購之比較.....	43
表十五、生產電池所需時間.....	43
表十六、SOFC 電解質支撐型電解質製作流程.....	45
表十七、SOFC 電解質支撐型單元電池製作流程.....	46
表十八、溫水均壓參數.....	51
表十九、310s 不鏽鋼裸材及塗覆 LSM 與 LSCF 之於高溫長時間下之阻值.....	62
表二十、本計畫產出與文獻之阻值比較.....	62

表二十一、設計平板型 SOFC 電池組重點/目標.....	67
表二十二、平板式電池組 I 與 II 之差異	68
表二十三、平板式電池組 II(+)-五電池組特性.....	83
表二十四、平板式電池組 III(+)-單電池特性.....	84

第一章 前言

1.1 計畫背景 (含國內外進展)

為解決石化能源短缺與暖化問題，各國積極投入新能源之開發。各種新能源中，燃料電池因不受季節與地域性發電之限制，且具備可模組化之各種發電應用而備受關注與投入。低溫型質子交換膜燃料電池 (Proton Exchange Membrane Fuel Cell, PEMFC)，受限於質子交換膜於高濕度下運作特性，電池操作溫度 70~180°C，需採用貴金屬鉑為催化電極，導致效率受限(40~70%)且價格昂貴。反之，高溫型之固態氧化物燃料電池 (Solid Oxide Fuel Cell, SOFC) 因操作溫度於 600~1000°C 且電極中不含貴金屬，發電效率佳(50~80%) 且具價格競爭力(表一)。日本政府為厲行節能減碳政策，於 2002 年開始啟動家用示範型燃料電池計畫。歷經多年示範補助經驗後，於 2009 推出 ENE-FARM 燃料電池商業化計畫(投入之廠商包括東京瓦斯、大阪瓦斯、東邦瓦斯、西部瓦斯、新日本石油和 Astomos Energy 六家營運商)，且以 PEMFC 技術為主軸。隨著 SOFC 亦邁入商業化階段，稱為 ENE-FARM Type S，二者於家用熱電系統之應用市場之競逐將進入白熱化階段，其中之實證運轉數據更值得產學研參考。實證資料顯示，PEMFC 與 SOFC 家用燃料電池系統的發電效率分別為 38%與 46.5%，SOFC 之優異性獲得進一步證實。再者，PEMFC 與 SOFC 家用燃料電池系統之售價分別為 320(2010 年)與 275 萬日圓(2012 年)，顯示高溫 SOFC 於家用市場之應用兼具性能與價格優勢。

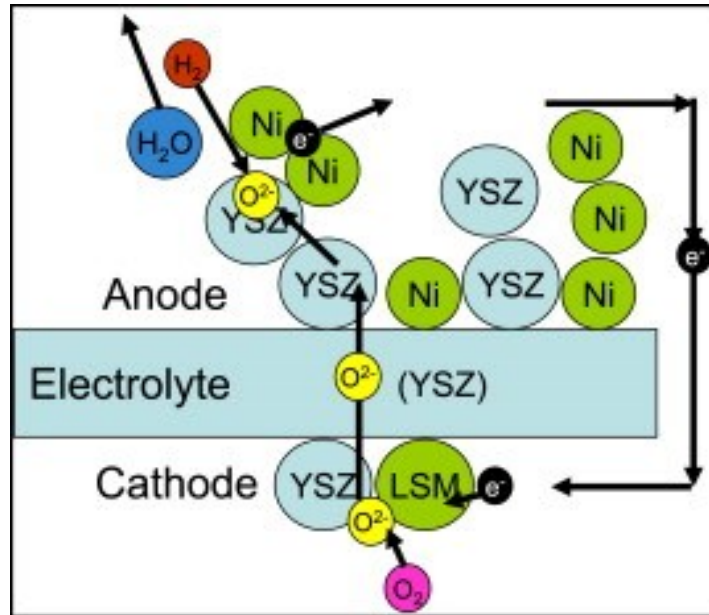
表一、各種燃料電池與傳統動力比較

	PEM	PAFC	MCFC	SOFC	Micro-GT	Diesel Engine	Stirling Engine
Electrical efficiency using natural gas (net AC/LHV), %	35	40	45-50	45-50^a	30	35	30
Performance degradation, %/1000 hrs	>1	0.44	0.60	<0.10	0.20	0.20	na
Emissions using natural gas:							
NO _x , g/MWh	<20	<10	<10	<10	300	700	200
SO _x , g/MWh	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	1	1	1
Noise, dBA @ 10 m	<60	60	65	65	65	80-90	60
Water consumption, gal/MWh	0	90	88	0	0	0	0
Total fuel efficiency using natural gas (net AC/LHV), %	35	65	70	80-85	~75	~78	~77



1.2 SOFC 材料元件

SOFC(圖一)之基本結構與一般電化學電池相似，可分為陽極(Anode)、陰極(Cathode)及電解質(Electrolyte)，均由固態氧化物組成[1]，具有耐高溫，可長時間操作，維修容易等優點。每一組件所使用之材料、結構與性質將於以下簡介。



圖一、SOFC 電池反應示意圖。

1.2.1 固態電解質材料

不同於液態電解質(圖二左)具滲漏、揮發、腐蝕等問題，SOFC 電解質為具有高離子導電性之固態導體，亦稱為固態電解質(圖二右)，為 SOFC 元件中，最為核心之元件，其性質直接影響 SOFC 電池操作溫度及轉化效率，並且決定所搭配使用之電極材料。電解質材料必須具備適當的機械強度、高緻密性、在還原及氧化氣氛下具備良好的穩定性。

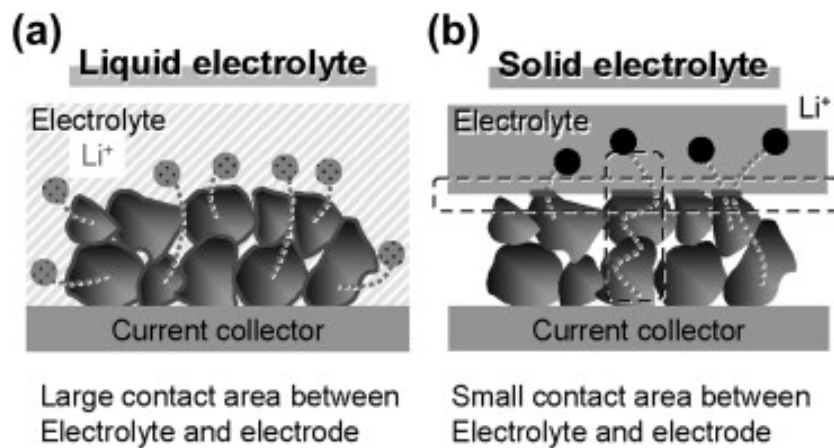


FIGURE 1. Illustration of electrode–electrolyte contact of (a) liquid electrolyte and (b) solid electrolyte.

圖二、液態電解質與固態電解質接觸差異。

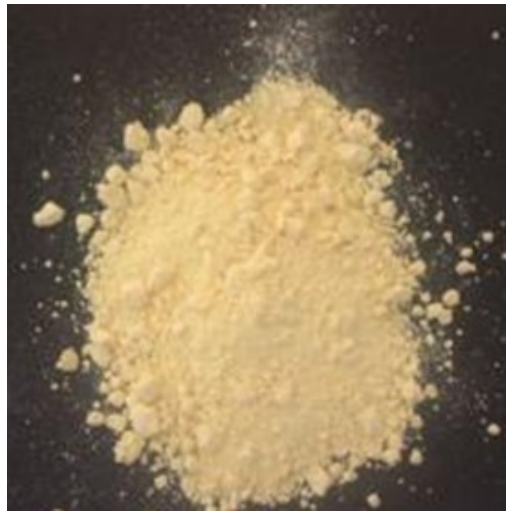
常用的固態電解質材料多為螢石結構(fluorite)，其結構為單位晶格中，陽離子佔據面心立方位置，而陰極子佔據四面體位置，藉由不同價數陽離子的摻雜，為了維持電荷平衡，因此在材料結構中形成氧空位，氧離子可藉由氧空位移動，可提升其氧離子導性[1]。

(a) 氧化鋯系電解質

安定化氧化鋯為目前被廣泛用於固態電解質之材料[2]，其結構即為螢石結構，材料在還原及氧化氣氛下均具備良好的穩定性。氧化鋯在室溫下為單斜晶系(monoclinic)結構，加熱至 $1170\text{ }^{\circ}\text{C}$ 會轉變成正方晶系(tetragonal)結構，在 $2370\text{ }^{\circ}\text{C}$ 會轉變成立方晶系(cubic)結構，熔點為 $2680\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。立方晶系氧化鋯，其晶格常數較大，使氧離子較容易傳遞，因此藉由適當的摻雜(如 Y_2O_3 , CaO , ScO_2 等)，使氧化鋯從室溫至熔點，皆維持立方晶系結構，可提升其離子導電性，其中氧化釔安定氧化鋯(yttrium-stabilized zirconia, YSZ)，已被廣泛應用 SOFC 之電解質。但其操作溫度需高於 $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，目前研究趨勢多朝以降低 SOFC 操作溫度為主。

(b) 氧化鈰系電解質

氧化鈰(圖三)相較於氧化鋯具有穩定的晶體結構，因此藉由適當的摻雜(如 Sm_2O_3 , Gd_2O_3 等)，可明顯提升離子導性，並降低活化能，使電池操作溫度降低。但氧化鈰在還原氣氛下， Ce^{4+} 會還原成 Ce^{3+} ，使得電解質產生電子導性，造成電池開路電壓及性能下降，目前研究提出以保護層來避免氧化鈰還原。



圖三、氧化鈰粉末

(c) 氧化鈮系電解質[3]

立方晶系氧化鈮(圖四)為目前發現離子導性最高之材料，其離子導性導自於材料本身具 25 mol% 的氧空位，但其操作溫度範圍僅介於 729-825 °C 之間，並且於還原氣氛下容易還原成金屬鈮，因此於應用上，仍有許多問題必須克服。



圖四、氧化鈮粉末

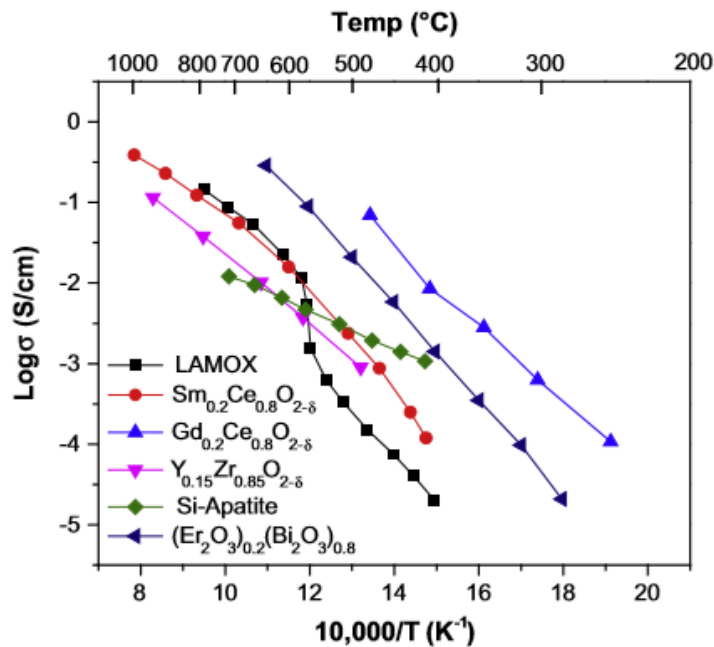
(d) 鎂酸釷系電解質

鎂酸釷因具高的離子導性，因此也被廣泛應用於固態電解質上[4]，其中以摻雜氧化鋇(圖五左)與氧化鎂(圖五右)之 $\text{La}_{0.9}\text{Sr}_{0.1}\text{Ga}_{0.8}\text{Mg}_{0.2}\text{O}_{3-\delta}$ ，最被為廣泛應用，但其易與陽極中的金屬鎳產生 LaNiO_3 雜相，使得電池性能下降及在 800°C 還原氣氛下，鎂酸釷會有相分解的情況產生，在實際應用上仍有待克服。



圖五、氧化鋇(左)；氧化鎂(右)

有關氧化鋯、氧化鈾與氧化鈹之離子導性與溫度間之關係如圖六所示。

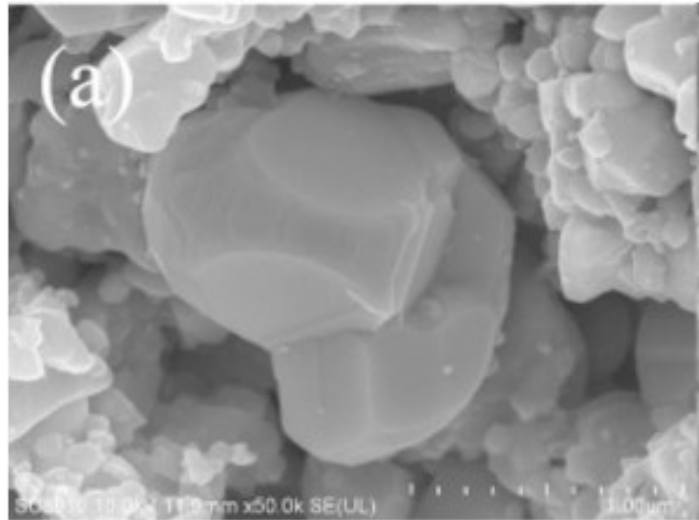


圖六、電解質離子導性與溫度間之關係

1.2.2 陰極材料

陰極材料必須具備適當的離子及電子導性，對氧必須有高催化能力，並在氧化氣氛下，具有高穩定性，因此金屬材料並不適合使用。

傳統 SOFC 使用安定氧化鋯為電解質，操作溫度通常在 1000 °C 以上，多使用鋇摻雜錳酸鋇($\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_{3-\delta}$)為陰極材料，但鋇摻雜錳酸鋇僅具電子導性，因此若降低 SOFC 操作溫度，錳酸鋇性能明顯下降，因此目前研究朝向陰極材料同時具備離子及電子導性發展。目前陰極大多使用複合陰極，於鋇摻雜錳酸鋇材料中添加具高離子導性之電解質材料，如此可使陰極具備部分離子導性。使用複合陰極為提升電極性能重要方向之一，將所製備之電極材料與電解質材料混合，形成複合陰極，不僅可使陰極部分離子導性提升，並且增加電解質、電極與氣體三相界面反應的面積，更可以有效降低陰極層的熱膨脹係數，使其可附著於電解質材料上。陰極另一研發方向為開發出混合離子、電子導體之材料。目前常見的混合導體有 $\text{Ln}_{1-x}\text{Sr}_x\text{Co}_{1-y}\text{Fe}_y\text{O}_{3-\delta}$ ($\text{Ln} = \text{La, Sm, Nd, Gd, Dy}$; LSCF) [5]、 $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{Ni}_{1-y}\text{Fe}_y\text{O}_{3-\delta}$ (LSNF)及 $\text{LaNi}_{1-y}\text{Co}_y\text{O}_{3-\delta}$ (LNC)。LSCF(圖七)陰極材料中，若 Co 比例較高，具有高離子及電子導性，但其熱膨脹係數與常用電解質材料，如安定化氧化鋯、摻雜氧化鈣等材料差異過大，導致陰極材料不易燒結於電解質表面，在多次熱循環下，會導致陰極剝落，使電池性能下降。若 Fe 比例較高，可降低其熱膨脹係數，但導電率會明顯下降。目前許多研究仍針對 LSCF 最佳比例，進行探討。此外，混合導體 LSCF 面臨到最大問題為，與氧化鋯系電解質產生反應，生成 $\text{La}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ 和 SrZrO_3 等雜相，其為電的不良導體，長時間使用陰極性能逐漸下降，目前解決方案以批覆保護層為主要方向。



圖七、LSCF 顯微結構圖

1.2.3. 陽極材料

陽極材料必須具備高的電子導性、催化能力及在還原氣氛下具有良好的穩定性。傳統 SOFC 使用貴金屬作為陽極材料，但利用貴金屬作為電極，在成本上不符合經濟效益。因此目前 SOFC 研究，開發出使用具催化能力之金屬，例如 Ni，作為陽極材料，但金屬鎳熱膨脹係數較大，電解質不易燒結陽極上，因此目前研究多添加 30~40 wt% 電解質材料，形成陶金材料，以降低陽極之熱膨脹係數，並且因添加具高氧離子導性之電解質材料，使陽極具有部分傳導離子之能力。

1.2.4. 電池構型-陽極支撐電池

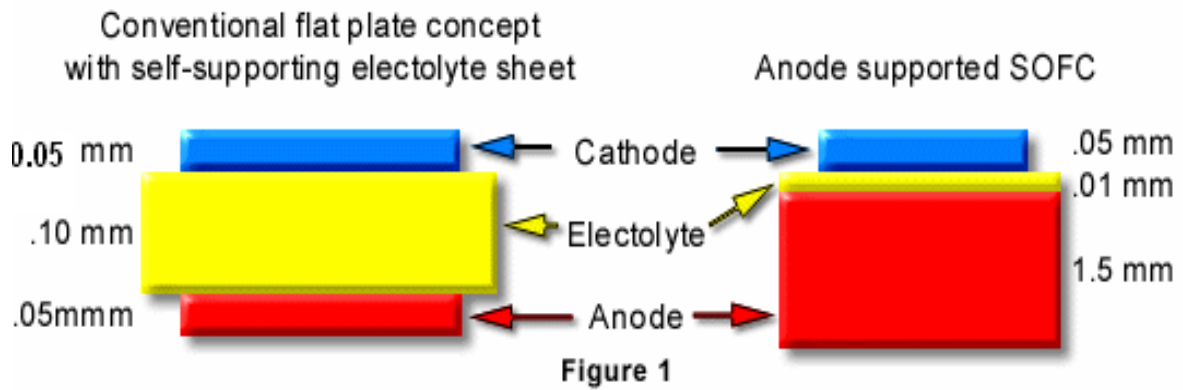
SOFC 電池由陰極/電解質/陽極等三元件堆疊並燒結製成，大致分為平版(planar)與管狀(tubular)兩種構型，而此二種構形更關係後續之電池堆形態、系統組成與操作溫度，表二顯示為多數 SOFC 開發商以主流材料 Ni/YSZ(陽極)為基材並搭配 LSM(陰極)、YSZ(電解質)且以平面堆疊後再經高溫燒結完成，稱為平板型陽極支撐電池適於中溫操作，另一類為平版型電解質支撐電池式於高溫操作(圖八)。陽極支撐電池發電性能與三元件之材料用量、製備及燒結製程

與發電前之活化方式/機制相關。依據尺寸大小，(陽極支撐)電池可分為鈕扣型(button cell)與正規型(regular cell)(圖九)，前者尺寸小有利於分析三元材料(各自)對 SOFC 發電特性之影響，後者尺寸大乃用為電池堆製作用，二者間具有高度互補特性。以上述之陽極為支撐材料(厚度~500 μm)，往上堆疊出電解質(20 μm)與陰極 (~50 μm)並進行高溫燒結，所得即為固態氧化物燃料電池之關鍵元件-陽極支撐電池。

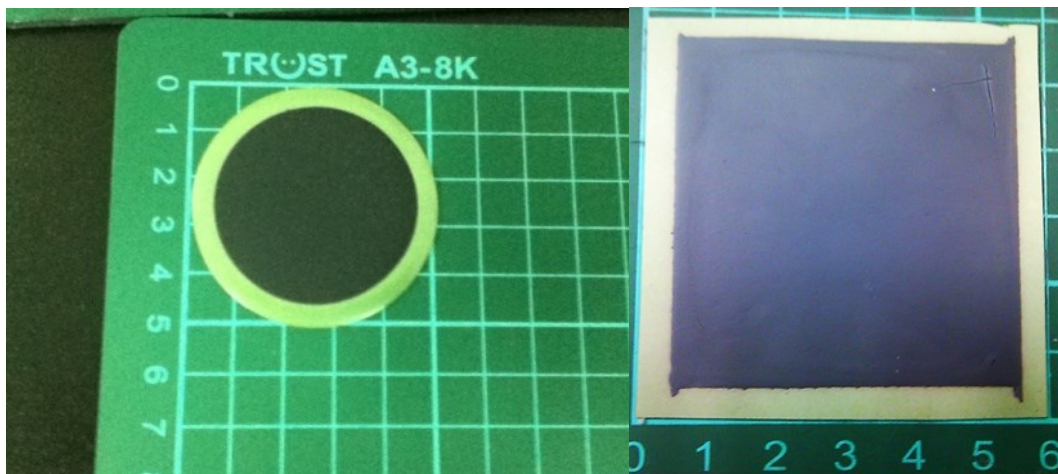
表二、主流 SOFC 開發商之技術分析

Developer 公司	Temp./ $^{\circ}\text{C}$ 溫度	Electrolyte 電解質	Anode 陽極	Cathode 陰極	Design 電池支撐/構形	Interconnect 連接極	Performance (mW/cm^2)/ Stack no.
Bloom Energy	600-900 $^{\circ}\text{C}$	YSZ	Ni-YSZ	LSM	Anode supported/ planar	Metal	25W/1cell
Sunfire	860 $^{\circ}\text{C}$	YSZ	Ni-YSZ	LSM	electrolyte-supported cells	ferritic bipolar plates	850W/1Stack
INER (Taiwan)	700-850 $^{\circ}\text{C}$	-	-	-	Anode supported/ planar	Ceramic	0.51 W/ cm^2
YZU	750-800	YSZ	Ni-YSZ	LSM	Anode supported/ planar(陽極支撐/平 版)	stainless steel	50mW / cm^2
Ceres power	500—650	CGO	Ni-CGO	LSCF-CGO	Metal supported planar(金屬支撐/平 版)	Ferritic steel	0.7 W/ cm^2
CFCL	750	YSZ	Ni-YSZ	LSM	Anode supported/ planar(陽極支撐/平 版)	Coated ferritic steel	0.4 W/ cm^2
Delphi	750	YSZ	Ni-YSZ	LSCF	Anode supported/ planar	Coated ferritic steel	0.723W/ cm^2 (old) 1.0W/ cm^2 (new)
Kyocera	750	YSZ	Ni-YSZ	LSCF	Anode supported flat tubular (陽極支撐/ 管狀)	Metallic	10 W/Cell
Mitsubishi materials	600—800	LSGMC	Ni-SDC	SSC	Electrolyte supported planar (電 解質支撐/平版)	Ferritic steel	-
Topsoe fuel cells	750—850	YSZ	Ni-YSZ	Ni-LSM	Anode supported/ planar	Coated ferritic steel	1.5 W/Cell
Versa power	750	YSZ	Ni-YSZ	LSM-YSZ	Anode supported/ planar	Uncoated ferritic steel	0.66W/ cm^2

Single Cell Structure



圖八、電解質支撐電池式(左)；陽極支撐電池(右)



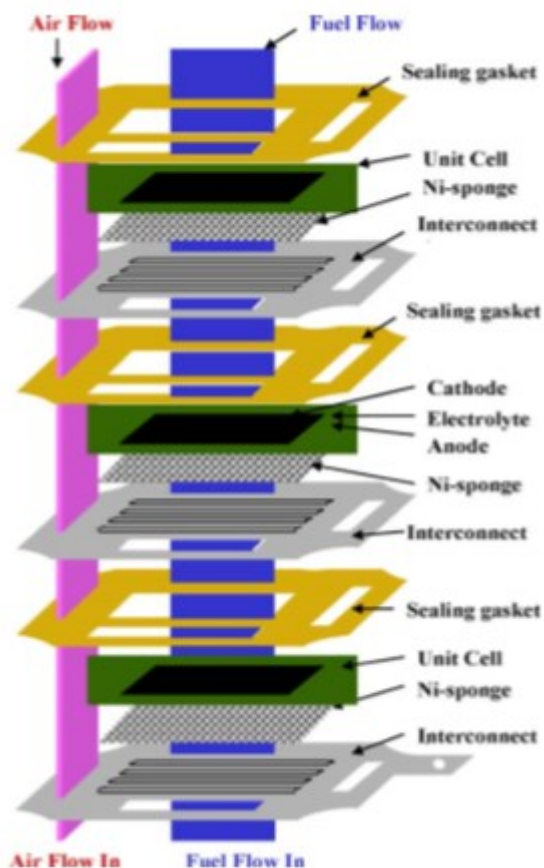
圖九、陽極支撐電池:鈕扣型(左)；正規型(右)

(綠色：陽極；黑色：陰極)

1.3. 平板型 SOFC 電池組

在平板型 SOFC 中，電池的組成是以各元件(電解質-Electrolyte、陰極-Cathode、陽極-Anode)之平板結構組裝而成，並以藉由連接極串聯而成[6]，圖十為平板型 SOFC 電池組。平板型 SOFC 電池組如其他燃料電池結構一般須被設計達到電化學性能，且則需熱管理與健全的機械結構等要素，以達到動力產生應用的操作要求。以下針對電池組裝必要條件進行討論[7]：

- (a) 電導特性：此意謂著電池堆的設計必須儘可能降低歐姆阻抗(含接觸阻抗)，因此在各組件中的電流路徑(尤其是低導電度之組件，如電解質)須設計成越短薄越佳。要有很好的電的接點以及在各組件中有足夠的接觸面積，電流收集器須設計成能夠在促進電流傳遞與流動。
- (b) 電化學性能：此意指電池組設計必須提供完整的開路電壓與最小的極化損失。因此任何明顯的氣體外漏(或交叉漏損)以及短路均須盡量避免。燃料與氧化劑必須不光是單獨地集中於每個電池的面積，而且需擴散至電池堆中的每個電池，且氣體必須能夠很快地到達反應部位以降低電化學反應質傳極限。
- (c) 熱管理：此意謂著電池堆設計必須於操作過程中提供電池堆所需的升溫/降溫以及更均勻之溫度分佈，且允許電池堆中可能的最高溫度梯度。
- (d) 健全之機械結構：此意謂任何平板型 SOFC 設計需於組裝與操作過程中均擁有適當的機械強度。因此機械與熱的應力必須維持最小值，以防止在電池堆在不同之操作過程中，各組件間產生爆裂，分層或分離現象(例如未達設計溫度梯度、瞬間的功率轉變致熱的衝擊、移動與震動負載下之機械負載)。



圖十、平板型 SOFC 電池組:(左)爆炸圖;(右)實體圖

(e) 連接極(暨流場)：在平板型 SOFC 組的燃料(Fuel)和氧化劑(Oxidant)可以被安排成交叉流(Cross-flow)，同向流(Co-flow)，或反向流 [8]。所挑選的特定流道結構對於在電池堆當中的溫度與電流分佈有很大的影響，端看確切的電池堆設計。不同流動型態能被執行於不同的流道結構，包括 Z 型流道 (Z-flow)，蛇行流道 (Serpentine-flow)。流場被使用於平板型 SOFC，用來增加氣體分佈的均勻性並且促進每個電池間的熱質傳。另外，流場通常被設計成具有足夠的壓降以順利經過電池，藉以促進流體在電池堆內的均勻性。雖然某些平板型設計在電極裡包含著流場，但流場一般設計為連接極的一部份。因為在電路上流場連接著連接極與電極，接觸面積(流場與電極間)必須在設計上考慮過，以降低接觸阻抗。

做為連接極之材料，必需具備高的電子導電度，低的離子導電度低的氣體穿透性，在工作溫度及氣氛下材質之穩定性。依 SOFC 操作溫度之高低可選擇陶瓷或金屬材質，陶瓷材料以釩鉻氧化物(LaCrO_3)為主，而金屬材質則以肥粒鐵(ferritic steel)最具有潛力。肥粒鐵材料具備適當之導電度、熱膨脹係數、廉價等特質，主要是用於 800°C 以下之操作溫度，然材料中之鉻(Cr)元素易氧化成氧化鉻且揮發後沉積於陰極表面並發生反應而降低陰極性能，且界面氧化層將導致電阻上昇。

(f) 氣體分流：任何電池堆設計必須包括對於安排氣體的路線，從一般供給點到每個電池以及移除未反應的氣體與反應產物。氣體歧管可分類為外部或內部。外部歧管個別從電池堆中的電池或連接極建構。內部氣體歧管則被設計成電池或連接極的一部份。視設計而定，氣體歧管通常需要密封(sealing)來防止氣體漏損或交叉跨越。歧管的密封墊須為絕緣體，以防止電池間電的短路。歧管原則上必須設計成具有低壓降(與個別電池壓降有關)以提供均勻流體分佈於電池堆。

(g) 密封材料 (sealing)：一個優良的密封材料必需具備與連接極及電解質間之良好的結合性(bonding)、合適之熱膨脹係數、良好之相容性及工作溫度及氣氛下材質之穩定度。一般對高溫操作之環境均採用玻璃或玻璃陶瓷之材料做為密封材料，例如氧化鋁／氧化矽的玻璃陶瓷(alumina/silicate glass ceramic)， $\text{SrO-La}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-B}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ ，及 $\text{BaO-CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ 等混合物[9]；除了不具重複使用特性之玻璃陶瓷外，具延展性之金箔及天然雲母(mica)也都是採用對象。根據文獻收集搭配實務經驗所得結果，密封材料使用策略分析(表三)與尺寸間之相容性有關。

表三、密封材料與策略使用分析

				
<p>使用材料</p>	<p>玻璃環 or 玻璃粉末</p>	<p>雲母片+ 高溫密封膠</p>	<p>氧化鋁纖維+ 陶瓷醬料</p>	<p>可塑性金屬</p>
<p>熱膨脹係數</p>	<p>依成分而有所不 同</p>	<p>$6.9 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$</p>	<p>$9.6 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$</p>	<p>依材料而有所不同</p>
<p>成本</p>	<p>N/A</p>	<p>$100 \times 100 \times 0.25 \text{mm}^3$ 10 張\$55/ 475ml\$295</p>	<p>$100 \times 100 \times 1 \text{mm}^3$ 5 張 \$ 55/ 50ml\$27.5</p>	<p>N/A</p>
<p>氣密性</p>	<p>×</p>	<p>×</p>	<p>○</p>	<p>○</p>
<p>熱穩定性</p>	<p>×</p>	<p>○</p>	<p>○</p>	<p>○</p>
<p>化學穩定性</p>	<p>×</p>	<p>○</p>	<p>○</p>	<p>×</p>
<p>不導電性</p>	<p>○</p>	<p>○</p>	<p>○</p>	<p>×</p>

綜合上述發展分析，本研究擬針對 SOFC 之電池 (上)、電池組 (中)、發電系統 (下游)之關鍵零組件技術進行相關發展。說明如下：

1.4 計畫目標

本研究包含以下兩項主要內容及技術目標。

(一) 平板式陽極支撐型 SOFC 單元電池研製：

1.1 小尺寸鈕扣圓形電池(直徑~ 3 cm)研製與測試：整合商購元件(陰極塗料、電解質薄帶與陽極薄帶)，研製出直徑約 3 cm 之 SOFC 單元電池(button cell)，發電功率為 300 mW/cm^2 以上(800°C)。技術發展過程中所累積之陰極用料最佳化、活化方式(開路或閉路)與測試條件等重要成果，將提供後續(1.2)標準 SOFC 單元電池改良之應用。

1.2 標準 SOFC 單元電池($5 \times 5 \text{ cm}^2$)研製與測試：整合商購元件(陰極塗料、電解質薄帶與陽極薄帶)，依據上述 1.1 成果研製面積 $5 \times 5 \text{ cm}^2$ 之 SOFC 單元電池，高溫燒結成品之良率 $>75\%$ 、平整度 $<100\%$ 、變形率 $<5\%$ ，發電功率需 100 mW/cm^2 以上(800°C)。技術發展過程中所累積之單電池組裝流程建立與測試數據等重要成果，將提供後續(二)SOFC 多層電池堆之應用。

(二) 研製 $5 \times 5 \text{ cm}^2$ 平板式 SOFC 多層電池堆關鍵技術：

2.1 連接極之研製: 連接極(圖十一)為銜接單元電池之重要元件，須具備平價、易加工與低阻抗等特質。一般作法以不銹鋼表面改質或特殊合金鋼材為主，二者皆為本計畫之發展重點。不銹鋼表面改質以複合導電材料塗層(LaSrMnO, 或 LaSrCoFeO)高溫燒結附著以達抗高溫氧化與低表面阻抗 ($< 0.05 \Omega \cdot \text{cm}^2$)，特殊合金鋼材以 Cofer 22 APU

加工製作而成。測試分析包括高溫前後之材料阻抗變化與表面元素(暨粗糙度)分析。

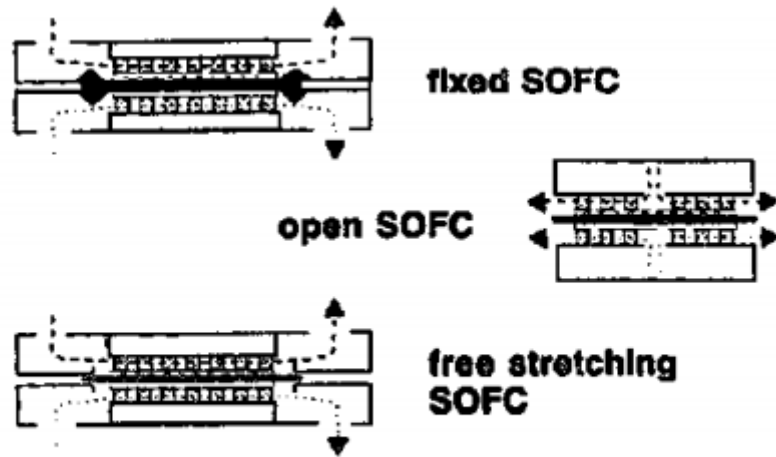


Fig. 3. Interconnectors of a planar SOFC.

圖十一、SOFC 連結極種類

2.2 密封材料之選用：密封材料為影響電池（組）發電過程中燃料利用率之重要元件(圖十二)，須具備耐高溫、高氣密性等特質。一般分為一次性材料(玻璃砂、陶瓷膏)與多次性材料(雲母、 Al_2O_3 或 ZrO_2 等陶瓷纖維、其他)，本計畫將探討一次與多次材料兩種搭配之氣密成效。測試分析包括高溫前後之結構變化(裂化程度)與氣密效果(含材料形變)。

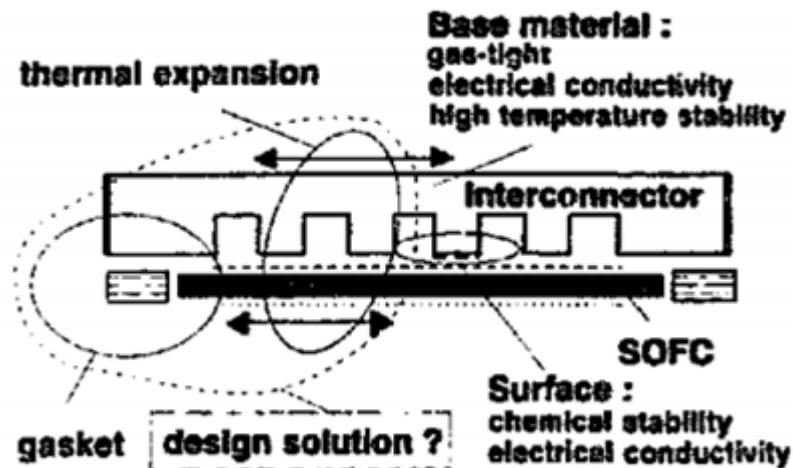


Fig. 2. Design parameters of a SOFC interconnector.

圖十二、密封材料的選擇。

2.3 平板式 SOFC 短電池堆技術: 整合 1.2、2.1、2.2 之成果，且依據各關鍵元件之相容性設計製作 5~10 層 $5 \times 5 \text{ cm}^2$ 平板式 SOFC 電池堆，電池堆發電量約為 15~50 W。本成果將提供未來建構百瓦電池堆技術之基礎。

2.4 以 2.3 之短電池堆成果為核心，搭配空氣(/氫氣)進料裝置/管件/閥件、電壓電流輸出線路與顯示器設計製作 15~50 W 固態氧化物燃料電池測試系統。本成果可擴充為未來建構(次)kW 級 SOFC 系統之基礎

第二章 平板式陽極支撐型 SOFC 單元電池研製

2.1 小尺寸圓形鈕扣電池(D ~ 3 cm)研製與測試

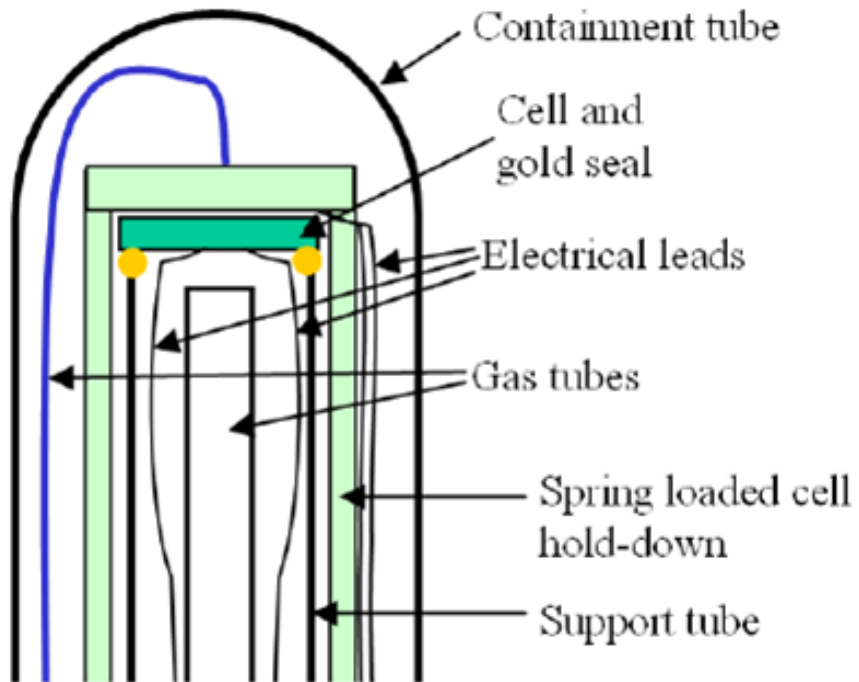
本節採用鈕扣電池作為實驗的主幹，密封材料原本採用玻璃環，但漏氣與電力損耗之問題仍難以改善。多種材料嘗試後，目前暫定使用雲母搭配高溫密封膠，而集電部分使用黃金集電片。此種鈕扣型電池有以下幾種優點：

- (a).**電池夾具設計簡化**：利用不鏽鋼管當作電池結構主要的支撐結構，燃料以及空氣直接從管子通過，簡化了電池設計。
- (b).**電池夾具組裝方便性**：因為沒有連接極，所以在組裝電池時不需要做固定或上鎖螺絲的動作，僅需在電池夾具鋼管接合處做好密封即可，可簡化單電池組裝上的難度。
- (c).**電池夾具費用低**：基於上述兩點原因，故可減少電池夾具設計與材料上的成本花費。

2.1.1 (鈕扣) 電池夾具設計

計畫主持人研究室自製電池夾具，主要參考日本廠商所設計的鈕扣型的電池夾具，其主體為陶瓷/石英結構、集電網為白金材料，如圖十三所示。本計畫所第一代、第二代、第三代自製鈕扣型電池夾具主體為歷屆研究改良而成，如圖十四所示。設計方向主要以電池設計簡化、方便性以及低成本為目標。

第二代(鈕扣型)電池夾具的左右二支鋼管為氫氣燃料流通通道，氫氣進口處之管線拉長以求燃料預熱效果;中間部分為電池放置部分，使用高溫密封材料作密封;電池上方通空氣燃料，集電片使用黃金材料;夾具主體結構使用不鏽鋼 304s 材質。第三代(鈕扣型)電池夾具以第二代為基礎，拉長入口氣體管線為改進重點，以提升預熱效果。



圖十三、(鈕扣)電池夾具結構示意圖



圖十四、自製(鈕扣)電池夾具(左：第一代、中：第二代、右：第三代)

2.1.2 (鈕扣)陽極支撐型鈕扣電池

本計畫所研究之電池皆為陽極支撐型，組成元件包含四種主要成分，其材料源自於 ESL Corp (USA)。陽極為多孔氧化鎳/氧化釷安定氧化鋯複合陶瓷薄帶(NiO/YSZ tape)，電解質為氧化釷安定氧化鋯陶瓷薄帶(8mol% YSZ tape)，陰極為鑰鑰鈷鐵氧漿料(lanthanum strontium cobalt iron oxides, $\text{La}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{Fe}_{0.8}\text{Co}_{0.2}\text{O}_x$ LSCF)、鑰鑰錳氧漿料(Sr-doped LaMnO_3 , LSM)與鑰鑰錳氧加氧化釷添加氧化鋯漿料($(\text{La}_{0.8}\text{Sr}_{0.2})_{0.98}\text{MnO}_{3-x}/8\text{YSZ}$, LSM-YSZ:50%-50%)。此外亦從 FCM Corp (USA)商購了添加 GDC 的陰極材料，分別為鑰鑰錳氧加氧化釷摻雜氧化鈣漿料(LSM-GDC: 50%-50%)以及鑰鑰鈷鐵氧加氧化釷摻雜氧化鈣漿料(LSCF-GDC: 50%-50%)。

2.1.3 密封材料

高溫密封技術，一直是制約固態氧化物燃料電池(SOFC)成功與否的關鍵因素。即使在不計成本的情況之下，使用許多不同材料和方式解決了短時間氣密性的問題，然尚需兼具長期穩定性與好熱循環特性。各種密封材料之優缺點如下，而特性整理如表四所示：

(a) 金屬材料:

優點:韌性好、密封強度高以及熱穩定性佳

缺點:需要做絕緣處理、易高溫氧化、文獻上研究較少

(b) 玻璃及玻璃陶瓷:

優點:密封較簡單、成本低、文獻上研究較多。

缺點:長時間處於高溫下仍可能因析晶和應力造成龜裂、某些玻璃成分甚至會毒化氧氣極。

表四、文獻常見之密封材料特性

材料	玻璃環 or 玻璃粉末	雲母片	氧化鋁纖維
熱膨脹係數	依成分而有所 不同	$6.9 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$	$9.6 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$
密度	同上	2.7-2.9 (g/cm ³)	3.95 (g/cm ³)
熔點	同上	1260~1290°C	2,072 °C
沸點	同上	1600°C↑	2,977 °C
導電性	絕緣	絕緣	絕緣

(c) 雲母(圖十四):

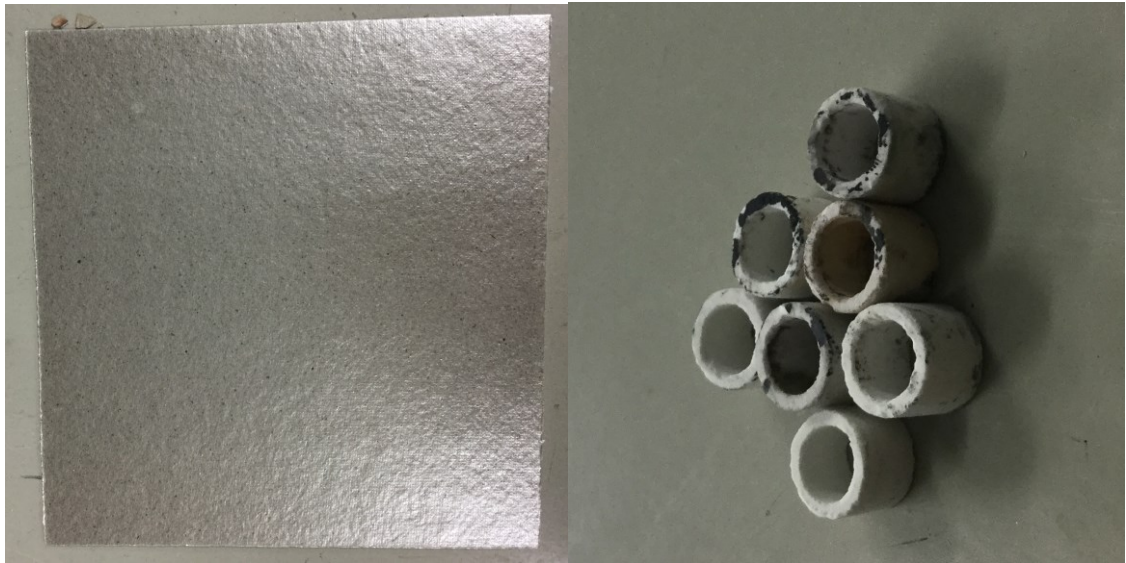
優點:比較沒有熱膨脹係數相容性之問題

缺點:單獨使用的時候密封效果不理想，需與其他密封材料配合，才能達到較好的密封效果。

(d) 陶瓷纖維材料(圖十五):

優點:化學相容性佳、熱穩定性佳和易於電堆組裝。

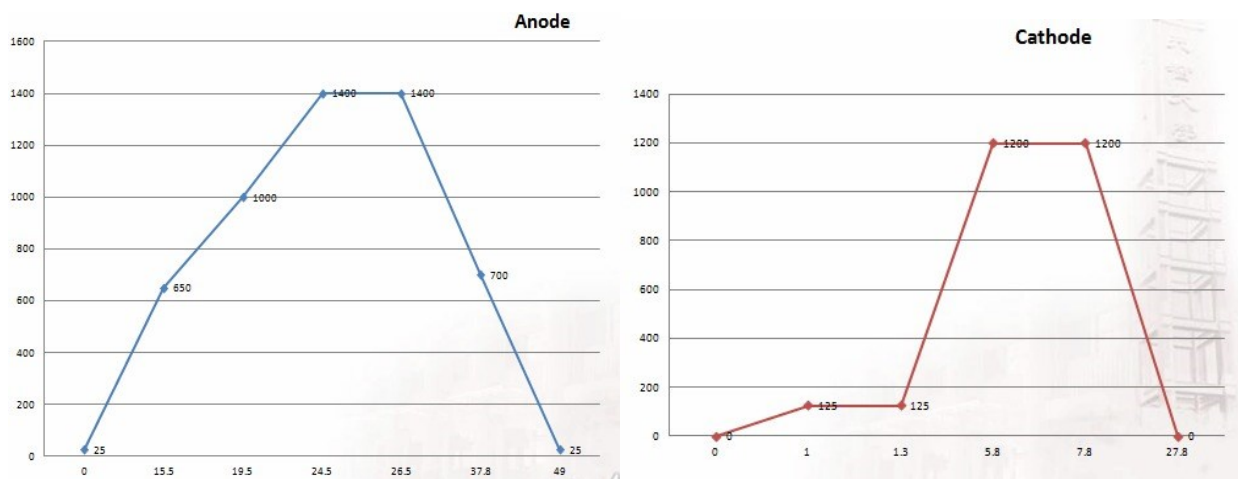
缺點:材料有孔隙，氣密性不及雲母。



圖十五、雲母片(左);陶瓷環(右)

2.1.4 (鈕扣) 陽極支撐型電池之研究方法

(鈕扣) 電池製備流程，將商購之陽極與電解質經試算燒結收縮率後，使其堆疊後，再經由自動精密型熱壓拉擠成型機進行熱壓過程，此步驟能使兩種材料增加附著力。將熱壓成型過後的膜材置入高溫燒結爐，設定程控升溫在空氣氣氛內進行高溫燒結工作(圖十六左)。燒結完成後進行陰極塗覆並燒結(圖十六右)，此為電池製備，再透過活化工作將陽極之氧化鎳還原成金屬鎳。



圖十六、(左)陽極與電解質共燒流程;(右)陰極燒結流程

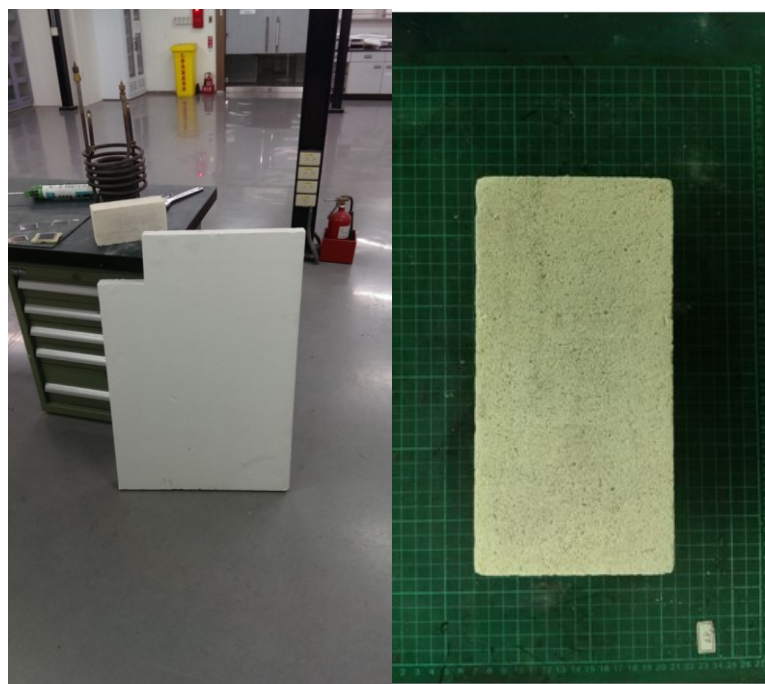
性能測試部份，使用 URSOFC 測試設備(泰新能源公司)中 Agilent U3606A 直流電源供應器，測量電池即時的直流電壓與相對的電流密度。實驗進行前將電池放入高溫爐中升溫至電池溫度 800°C，進行電池實驗並擷取性能數據。

實驗規劃如下：

- (a) 第一階段(陽極支撐層電池製作):本實驗室之陽極支撐層電池均多採 4 層陽極支撐層為主。本計畫除 4 層外，亦分別製作 3 層與 2 層陽極支撐層，並找出燒結製程中最合適之壓重物與最佳之壓重參數。
- (b) 第二階段(密封材料選用):針對多種密封材料進行比較，並使用浮球流量計觀察在室溫與 800°C 下之漏氣量多寡，以選定漏氣量最少之材料組合。
- (c) 第三階段(活化研究):電池性能測試之前需先進行活化，即將陽極中之氧化鎳還原成金屬鎳。活化不完全將會嚴重影響電池之性能表現，故本實驗將在不同的溫度下活化，並觀測不同陽極層數之電池活化時間與性能趨勢。
- (d) 第四階段(陰極材料對電池性能研究):將自製燒結完成之電池完全活化後，在相同參數下進行電池模式放電實驗測試，並觀察不同陰極材料會對電池性能有何影響。

2.1.5 結果與討論-陽極支撐層型電池製作

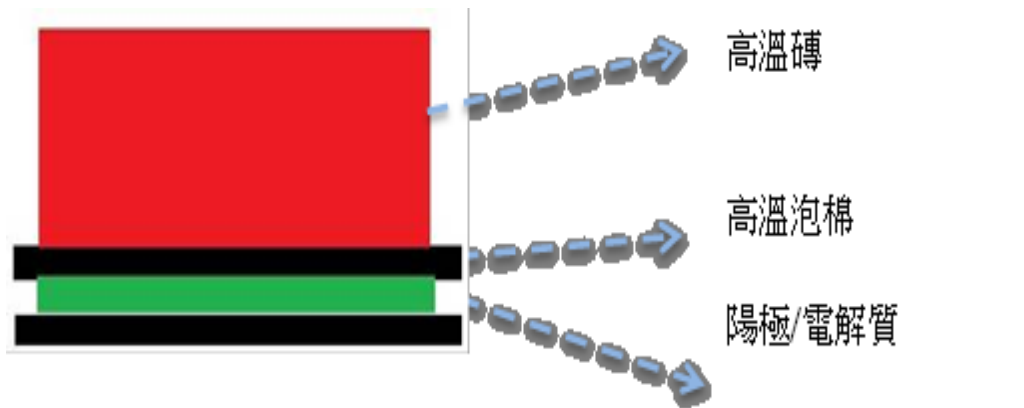
電解質/陽極之高溫共同燒結工作在製備電池占有極為重要之一環。除了要求成品外表美觀好看，電池燒結後的平整度與變形率(方法詳 2.2 節)，將會直接影響進行後續陰極塗佈以及組裝電池時搭配密封材料密封的困難度。經過實驗燒結後發現使用高溫泡棉作為夾層(圖十六)，並在上方使用高溫磚壓重之效果最佳(圖十七)。上述三者於高溫燒結中之相對位置如圖十八所示。



圖十七、高溫泡棉(左); 高溫磚 (右)

燒結結果如圖十九，明顯看出傳統燒結方式(左、中)與改良燒結方式(右)後所燒結出的電池平整度差別，使用高溫泡棉壓板與上方重物(高溫磚)的配合燒結出來的電池平整度較傳統優良。原因為高溫泡棉除了耐高溫透氣，並非一堅硬體，如此可提供空間令電解質/陽極在燒結過程中自由收縮，減少膜材變形或基材位移的程度。明瞭上方物體對電池平整度之大致影響後，接著使用不同的重量進行實驗，如此可掌握上方物體重量與平整度的進一步關係，從表五、表六、表七可觀察出不同物體重量分別對不同陽極層數之電池平整度的影響。其中，4層陽極之電池的最佳壓重參數約為 180mg，最佳平整度約為 13%;3層陽極之電池的最佳壓重參數約為 150mg，最佳平整度約為 18%;而 2層陽極之電池的最佳壓重參數約為 120mg，最佳平整度約為 27%。上述結果發現隨層數降低所需之壓重逐步下降。再者，以上各種層數分別以最佳壓重參數值做為基準點，物體過重與過輕平整度皆會逐漸變差。

最後將自製燒結的電池與商購電池作平整度比較，從表八中可觀察出自製與商購的平整度差異。相較於 E 公司(USA)與 N 公司(CHINA)，本計畫所衍生之電池已不遜色於國際知名公司所販售商品。



圖十八、高溫磚、高溫泡棉、電解質/陽極三者於高溫燒結中之相對位置



圖十九、傳統與改良製備之陽極支撐型電池平整度比較

(左：無壓重、中：氧化鋯板壓重、右：高溫泡棉+高溫磚)

表五、不同重量對不同陽極層數電池之平整度的影響(自製 I)

陽極層數/厚度 (μm)	電池厚度(μm)	上方壓重 (g)	燒結面積(cm^2)	平整度(%)
4 層/580 μm	650 μm	150	6.6 cm^2 (圓)	31~36%
4 層/580 μm	650 μm	165	6.6 cm^2 (圓)	27~31%
<u>4 層/580μm</u>	<u>650μm</u>	<u>180</u>	<u>6.6cm^2(圓)</u>	<u>10~15%</u>
4 層/580 μm	650 μm	195	6.6 cm^2 (圓)	34~37%
4 層/580 μm	650 μm	210	6.6 cm^2 (圓)	46~49%
4 層/580 μm	650 μm	225	6.6 cm^2 (圓)	51~54%
4 層/580 μm	650 μm	240	6.6 cm^2 (圓)	62~67%

表六、不同重量對不同陽極層數電池之平整度的影響(自製 II)

陽極層數/厚度(μm)	電池厚度(μm)	上方壓重(g)	燒結面積(cm^2)	平整度(%)
3 層/435 μm	505 μm	105	6.6 cm^2 (圓)	98~110%
3 層/435 μm	505 μm	120	6.6 cm^2 (圓)	58~65%
3 層/435 μm	505 μm	135	6.6 cm^2 (圓)	45~50%
<u>3 層/435μm</u>	<u>505μm</u>	<u>150</u>	<u>6.6cm^2(圓)</u>	<u>17~20%</u>
3 層/435 μm	505 μm	165	6.6 cm^2 (圓)	27~33%
3 層/435 μm	505 μm	180	6.6 cm^2 (圓)	39~47%
3 層/435 μm	505 μm	195	6.6 cm^2 (圓)	56~65%
3 層/435 μm	505 μm	210	6.6 cm^2 (圓)	79~90%

表七、不同重量對不同陽極層數電池之平整度的影響(自製 III)

陽極層數/厚度(μm)	電池厚度(μm)	上方壓重 (g)	燒結面積 (cm^2)	平整度(%)
2層/290 μm	360 μm	90	6.6 cm^2 (圓)	100~115%
2層/290 μm	360 μm	105	6.6 cm^2 (圓)	54~63%
<u>2層/290μm</u>	<u>360μm</u>	<u>120</u>	<u>6.6cm^2(圓)</u>	<u>27~30%</u>
2層/290 μm	360 μm	135	6.6 cm^2 (圓)	44~50%
2層/290 μm	360 μm	150	6.6 cm^2 (圓)	63~69%
2層/290 μm	360 μm	165	6.6 cm^2 (圓)	81~88%
2層/290 μm	360 μm	180	6.6 cm^2 (圓)	94~109%

表八、自製(I, II)與商購 (E, N)的陽極支撐型電池平整度比較

來源	陽極/電解質厚度 (μm)	電池厚度(μm)	(燒結後)電池厚度(平整度 %)
自製 I	580	650	$\sim 750\mu\text{m}(<15\%)$
E 公司(USA)	N/A	650	$\sim 1200\mu\text{m}(\sim 100\%)$
自製 II	435	505	$\sim 650\mu\text{m}(<18\%)$
N 公司 (CHINA)	400	450	$\sim 600\mu\text{m}(<34\%)$

2.1.6 結果與討論-密封材料選用

將各種密封材料單獨或搭配後與自製電池置入電池夾具進行組裝，升溫至操作溫度 800°C ，於入口端通入特定流量之氣體並以浮球式流量計於出口端觀察氣體流出之情況(漏氣=通入流量-出口流量)。由表九紀錄漏氣狀況並比較各種密封材料(一種或兩種搭配)之密封能力。其中可以發現 Permatex 高溫密封膠與 GL-1280 高溫密封膠雖然已被使用在本實驗室大面積陽極支撐型電池上，搭配較低之操作溫度(約為 650°C 左右)。當這使用這兩種高溫膠密封膠升溫至 800°C 時其密封能力便迅速下滑，降到常溫時拆開觀察，發現其與電池之接合處鬆散，輕輕一剝極可脫落，推斷為其在 800°C 高溫下熱膨脹係數與電池差異過大而脫離。反觀，ESL 高溫密封膠在 800°C 高溫下之表現則相對較為優良，且降到常溫下拆開觀察可發現其與電池之接合緊密，由此可知 ESL 高溫密封膠其與陶瓷材料(電池)之接合性相當優良，若在搭配雲母使用可達最佳之效果。

文獻上常用之氧化鋁纖維(FCM)，推測此材料是需要從設計電池夾具起開始精算以配合使用，因此在本實驗之電池夾具當中較不理想。密封材料 Thermiculite 866 理由亦同，且其容錯率又更低。

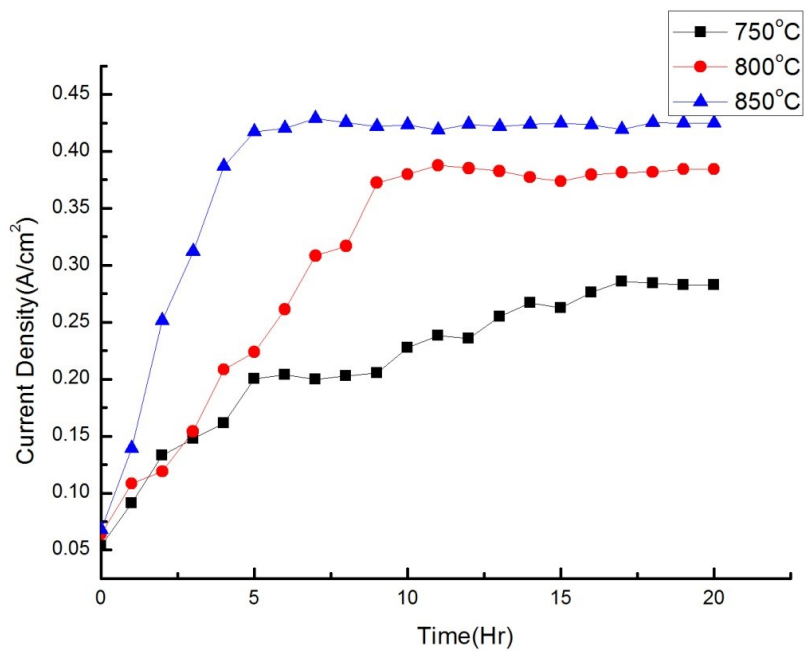
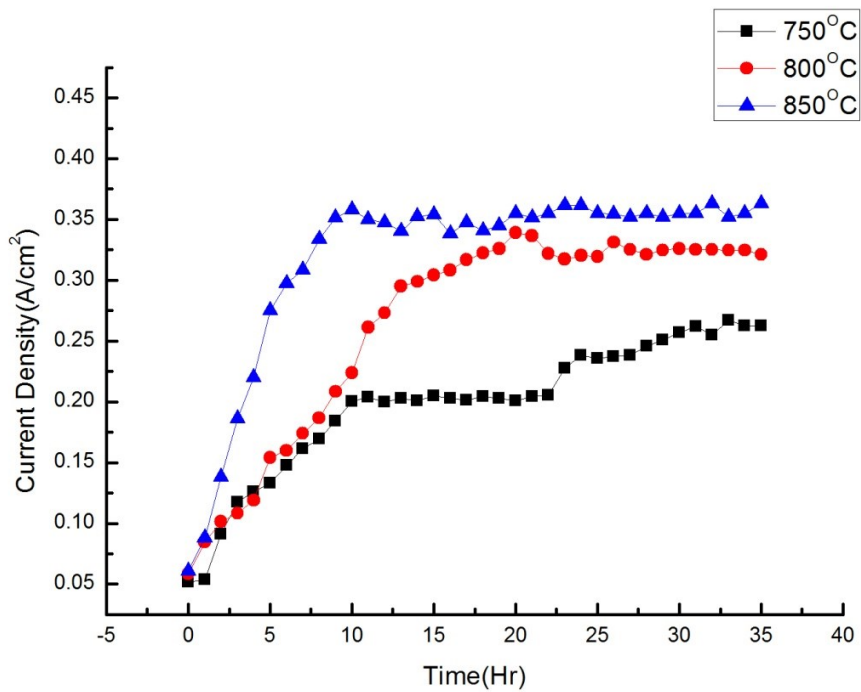
表九、各種密封材料進行測漏實驗結果(單獨或搭配後)

密封材料	測試氣體	測試溫度	氣體流量	結果(漏氣量)
A.1 Permatex (高溫密封膠)	H ₂	800°C	200cc/min	170~180cc/min
A.2 Permatex (高溫密封膠)與雲母	H ₂	800°C	200c/min	150~160cc/min
B.1 GL-1280 (高溫密封膠)	H ₂	800°C	200cc/min	180~190cc/min
B.2 GL-1280 (高溫密封膠)與雲母	H ₂	800°C	200cc/min	170~180cc/min
C.1 ESL (高溫密封膠)	H ₂	800°C	200cc/min	50~60cc/min
C.2 <u>ESL</u> (<u>高溫密封膠</u>)與雲母	<u>H₂</u>	<u>800°C</u>	<u>200cc/min</u>	<u>0~10cc/min</u>
D. FCM 氧化鋁纖維、膠	H ₂	800°C	200cc/min	90~100 cc/min
E. Thermiculite 866	H ₂	800°C	200cc/min	190~200cc/min

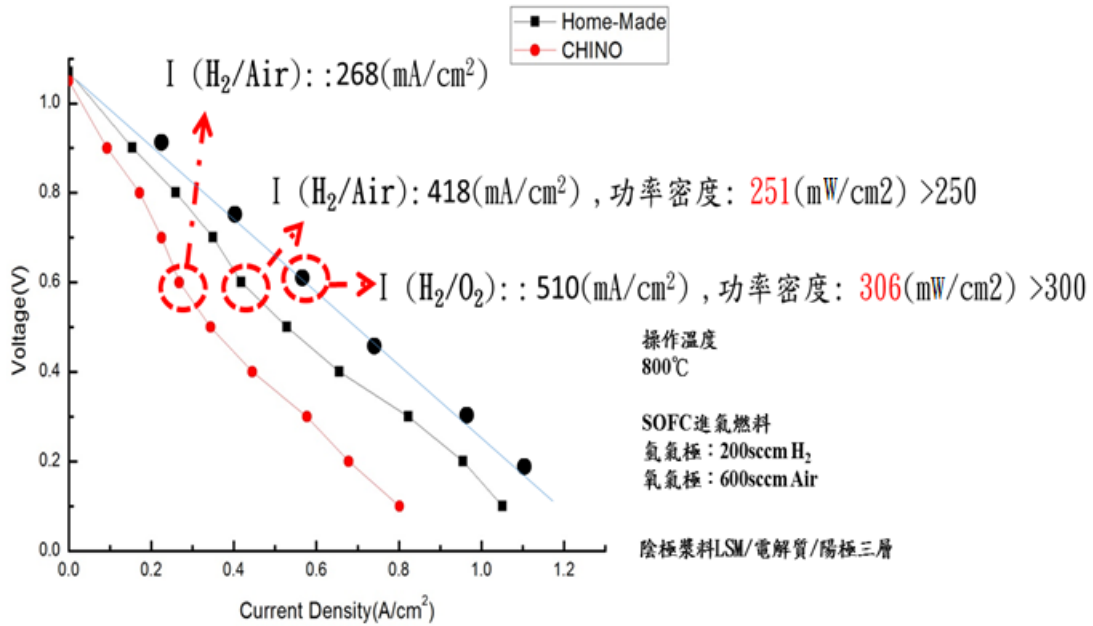
2.1.7 結果與討論-活化研究

本計畫使用之陽極材料皆為多孔氧化鎳-氧化鈮安定氧化鋯複合陶瓷薄帶 (NiO/YSZ tape)，在量測性能之前需將氧化鎳還原成金屬鎳，若活化不完全會導致陽極端之電導電率不佳，進而影響性能。本實驗長時間固定電壓於 0.6V，測量電池在溫度 750°C、800°C、850°C 下所呈現之性能趨勢。如圖二十(左)所示，含 4 層陽極之電池在 850°C 與 10 小時後、在 800°C 與 20 小時後、在 750°C 與 30 小時後，電流密度就逐漸趨於穩定狀態，故推斷其為各個溫度之最佳活化時間。此外，含 3 層、2 層陽極之電池進行活化測試，以求驗證減少陽極層數是否對活化時間減少與性能提升有顯著效果。結果如圖二十(右)所示，活化時間的部份，當陽極層數減少為 3 層後，在 850°C 與 5 小時後、在 800°C 與 10 小時後、在 750°C 與 15 小時後，電流密度就逐漸趨於穩定狀態，活化時間將近減少一半(相對於 4 層陽極層)。800°C 下，含 4 層陽極的電池性能由 0.339 A/cm² 提升至含 3 層陽極電池的 0.389 A/cm²(提升幅度約為 15%)。由此可見減少陽極層數對性能提升確實有實質上的幫助，原因為縮短電子傳導路徑。然而，2 層陽極電池之電流密度僅約 0.250 A/cm² 左右，明顯低於 3、4 層氫氣極之電池許多，原因可能為陽極層中之金屬鎳不足以催化大量之氫氣而致低電流/性能。

以上實驗之陰極進料皆採空氣，其最佳性能為 251 mW/cm² 的標準(超越期中目標 250 mW/cm²)，若是採用氧氣取代空氣進料則性能可進一步到達 306 mW/cm² 的標準(超越期末目標 300 mW/cm²) (圖二十一)，且自製夾具的表現優於商購夾具 (Japan)。



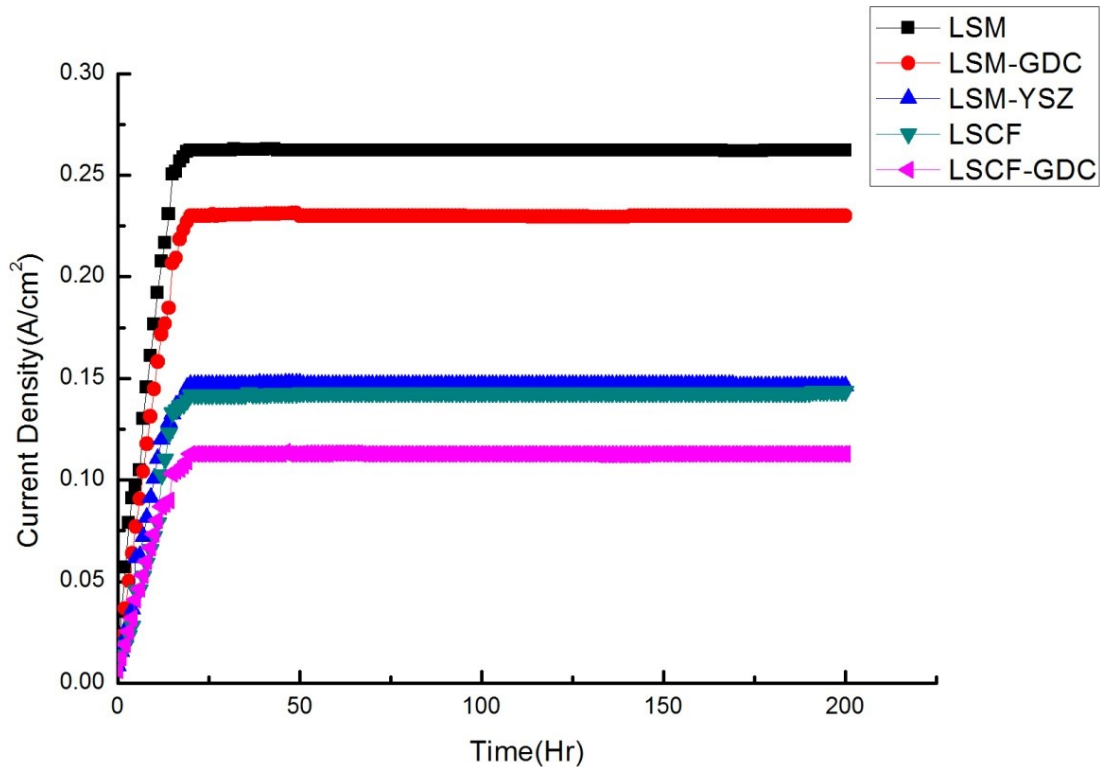
圖二十、4層(上)與3層(下)陽極電池之活化達穩定所需時間(0.6V 定電壓)



圖二十一、自製電池於不同夾具獲得之性能比較

2.1.8 結果與討論-陰極材料對電池性能研究

本節實驗主要研究重點在於固定陽極層數(4層)且電解質(1層)前提下，不同陰極材料對電池長時間發電能力之影響。研究條件設定在溫度 750°C、定電壓 0.6V、另電池進行放電 200 小時，觀察含不同陰極材料之電池性能變化趨勢。結果如圖二十二所示，LSM、LSM-GDC、LSM-YSZ 與 LSCF、LSCF-GDC 等五種陰極之電池在活化穩定後(約 30 小時)且連續放電 200 小時，性能皆趨於穩定狀態，並無明顯衰退跡象。電池含 LSM 料之陰極均明顯優於電池含 LSCF 之陰極。現有 SOFC 發電技術已能持續運轉數千小時，含不同陰極材料對電池性能並無衰退徵兆實屬正常現象。



圖二十二、不同陰極材料對電池長時間發電影響(定電壓 0.6V)

2.2 標準 SOFC 單元電池(5x5 cm²)研製與測試

2.2.1 大面積陽極支撐型電池研究過程與方法

本實驗目的為提升自製大面積陽極支撐型電池之燒結品質與平板式電池組性能為目標，並分為兩個部份進行探討。在大面積陽極支撐型電池製備上，進行平整度與變形率之最佳化，以降低後續平板式電池組之組裝困難度。本節工作重點如下：

- (a). 第一階段:比較兩種不同陽極支撐層製備方法探討平整度與變形率之關係。
- (b). 第二階段:調整自製陽極支撐層藉由燒結時之上方壓重，找尋最佳平整度與變形率搭配之壓重範圍。
- (c). 第三階段:針對自製陽極支撐層之最佳平整度與變形率搭配之上方壓重範

圍，找尋最佳平整度與變形率之上方壓重。此上方壓重物之重量即為選定之最佳參數。

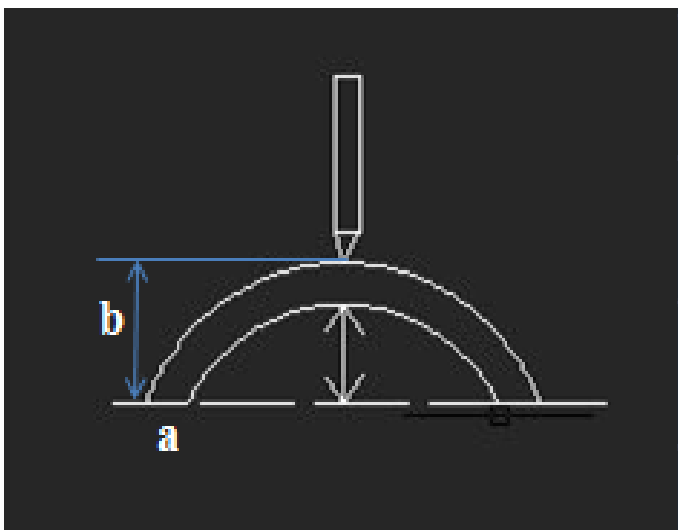
(d). 變形率與平整度定義（圖二十三）：

平整度定義(μ):

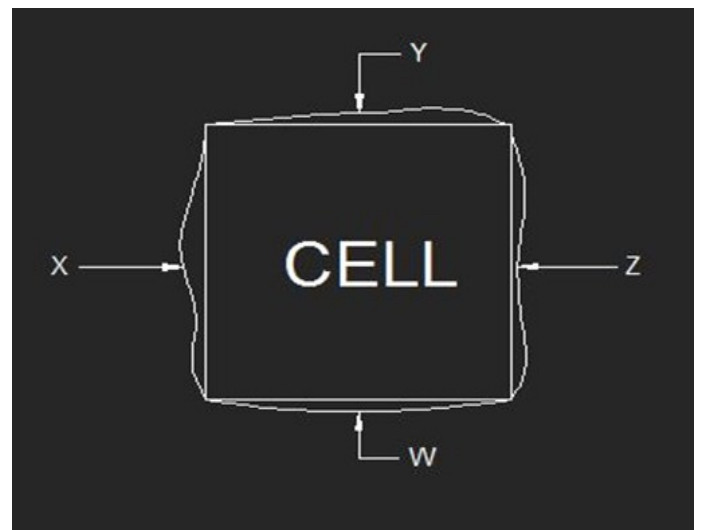
$$\frac{\text{電池整體變形高度} - \text{電池量測厚度}}{\text{電池測量厚度}}$$

變形率定義(ϕ):

$$\frac{\text{斜線部分總面積}}{\text{電池面積}}$$



$$\mu = \frac{b-a}{a} \times 100\%$$



$$\phi = \frac{X+Y+Z+W}{\text{total weight}} \times 100\%$$

圖二十三、平整度(μ)與變形率(ψ)定義

2.2.2 結果與討論-自製大面積陽極支撐型電池之燒結最佳化

高溫燒結為製備大面積陽極支撐層/電解質中為相當重要一個環結，因陽極層與電解質層之收縮率不同，導致燒結時陽極支撐層翹曲之平整度不佳。其

中，平整度不僅會影響陽極支撐型電池放置電池夾具中的密合度，亦會成為陽極支撐型電池能否與集電網擁有良好接觸的關鍵。若陽極支撐型電池平整度過大則會使平板式電池組組裝變得困難，再者陽極支撐型電池亦會在組裝過程中發生破裂(圖二十四)。

平整度與變形率的改善，可由陽極支撐層/電解質共同燒結過程中，藉由調整燒結時上方壓重物的重量控制，對陽極支撐層/電解質收縮進行控制。因此洽當的上方壓重可使陽極支撐型電池獲得最佳之平整度與變形率。




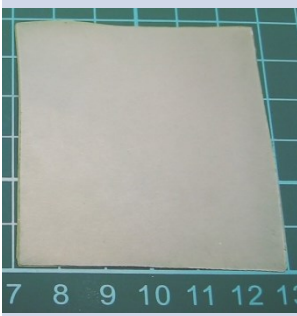
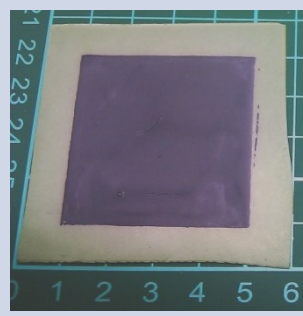
圖二十四、電池平整度不佳致組裝過程發生破裂

(a) 膜材前置作業對電池燒結品質之影響

本實驗使用陽極與電解質商購膜材之燒結收縮率，原材料 $7.1*7.1\text{cm}^2$ 燒結後將收縮至 $6*6\text{cm}^2$ ，為使陽極支撐型電池能成功放置平板式電池組中，因此選定 $7*7\text{cm}^2$ 作為裁切膜材之尺寸。在製備陽極支撐層中發現直接將膜材裁切至 $7*7\text{cm}^2$ ，因手工裁切之關係，每片膜材皆有些微尺寸上之差異，導致膜材堆疊中無法完全對齊，因此燒結完成之變形率表現不盡理想。結果顯示，在上方壓重 $16\text{g}/\text{cm}^2$ ，其平整度與變形率分別為 91% 與 $.31\%$ ；上方壓重 $18\text{g}/\text{cm}^2$ ，其平整


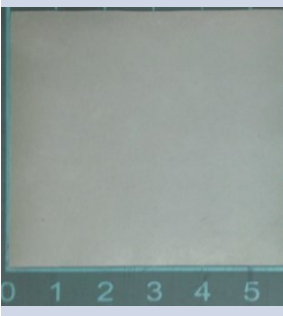

度與變形率分別為 89%與 2.5%；上方壓重 20g/cm²，其平整度與變形率分別為 84%與 3.34%(表十)。當陽極支撐層電池變形率超過 1.5%時，將導致電池組裝之難度提升。

表十、先裁切後熱壓與燒結

上方壓重(g/cm ²)	16g/cm ²	18g/cm ²	20/cm ²
實體照片			
變形率	3.31%	2.5%	3.34%
平整度(%)	91%	89%	84%
燒結面積(cm ²)	6*6	6*6	6*6
備註	裁切 7*7 cm ² →熱壓→燒結		

若將製程改為膜材裁切 8*8cm²後進行熱壓，再將熱壓後膜材裁切至 7*7cm²後進行燒結。此方法可確保胚片形狀達到所設定之正確尺寸方正，以確保各胚片之品質穩定。結果顯示，上方壓重 16g/cm²，其平整度與變形率分別為 117%與 1.81%；上方壓重 18g/cm²，其平整度與變形率分別為 113%與 1.79%；上方壓重 20g/cm²，其平整度為平整度與變形率分別為 105%與 0.91%(表十一)，胚片燒結後之變形率明顯得到改善。本做法已較前者獲得更加之效果。

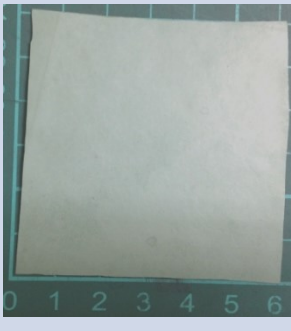
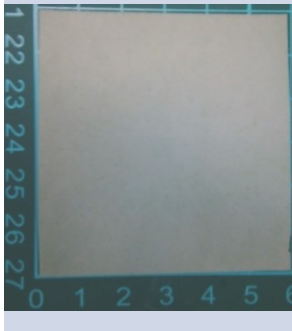

表十一、先熱壓後裁切與燒結

上方壓重 (g/cm ²)	16g/cm ²	18g/cm ²	20/cm ²
實體照片			
變形率	1.81%	1.79%	0.91%
平整度(%)	117%	113%	105%
燒結面積(cm ²)	6*6	6*6	6*6
備註	裁切 8*8 cm ² →熱壓→再裁切至 7*7 cm ² →燒結		

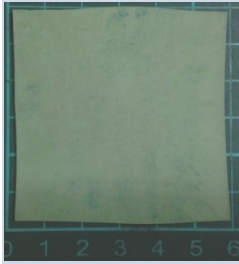
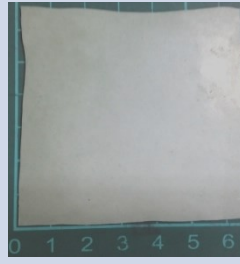

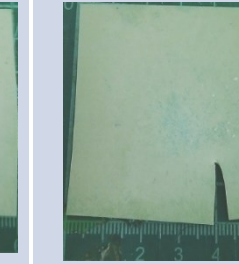
(b) 上方壓重(重量)對電池燒結品質之影響

為探討燒結時之上方壓物重量與電池燒結品質之關係，因此選定數個不同上方壓重物來進行對照與探討。實驗規劃以上方壓重物重量 10 g/cm² 開始以每 5 g/cm² 向上增加重量，觀察重量對陽極支撐層之平整度之影響。結果如表十二，上方壓重 10g/cm²，其平整度與變形率分別為 152%與 2.5%；上方壓重 15g/cm²，其平整度與變形率分別為為 121%與 1.9%；上方壓重 20g/cm²，其平整度與變形率分別為 105%與 0.91%；上方壓重 25g/cm²，其平整度與變形率分別為 90%與 4.7%；上方壓重 30g/cm²，其平整度與變形率分別為 90%與 7.3%；上方壓重 35g/cm² 下其平整度與變形率分別為 88%與 2.1%(電解質層發生崩裂)；上方壓重 40g/cm² 下，平整度 85%(陽極支撐層發生破裂(表十二)。由實驗結果顯示，雖然平整度的表現隨著上方壓重的增加逐漸變佳，但變形率卻從上方壓重為 20 g/cm² 開始變差。

表十二、上方壓重對電池平整度與變形率之影響

上方壓重 (g/ cm ²)	10g/cm ²	15g/cm ²	20/cm ²
實體照片			
變形率	2.5%	1.9%	0.91%
平整度(%)	152%	121%	105%
燒結面積(cm ²)	6*6	6*6	6*6

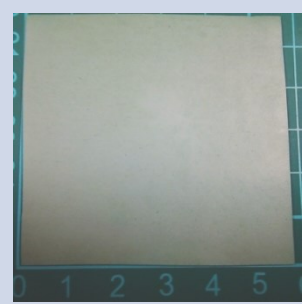
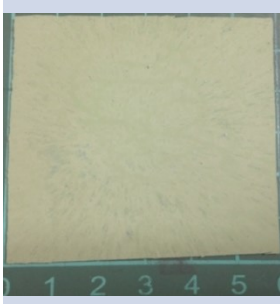
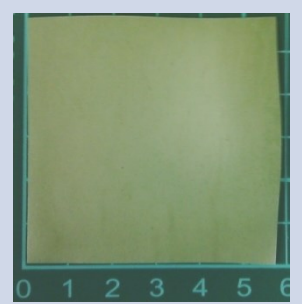
表十二、上方壓重對平整度與變形率之影響(續)

上方壓物 (g/ cm ²)	25g/cm ²	30g/cm ²	35/cm ²	40/cm ²
實體照片				
變形率	4.7%	7.3%	2.1%	破裂
平整度(%)	90%	90%	88%	88%
燒結面積(cm ²)	6*6	6*6	6*6	6*6

(c) 最佳之上方壓重搭配

本節研究乃針對表十二之研究結果，試圖於上方壓重 20~25g/cm² 找一最佳壓重參數，實驗結果如表十三。上方壓重 20g/cm²，平整度與變形率分別為 105%與 0.91%；上方壓重 22g/cm²，其平整度與變形率分別為 100%與 1.89%；上方壓重為 24g/cm²，其平整度與變形率分別為 93%與 3.83%。實驗結果顯示，上方壓重對平整度之影響性不大(93~105%); 上方壓重 20g/cm² 之變形率表現明顯優於其他對照組。故本實驗以上方壓重 20g/cm² 作為日後燒結陽極支撐層電池之製作參數。

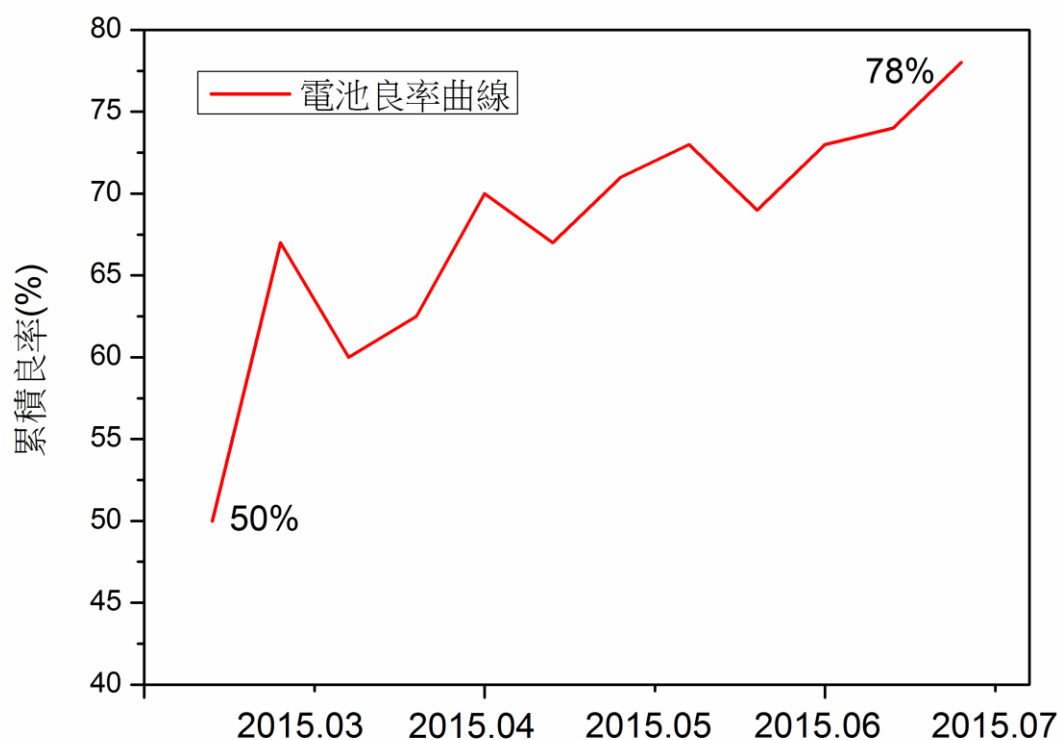
表十三、最佳化壓重參數

上方壓重物 (g/ cm ²)	20g/cm ²	22g/cm ²	24/cm ²
實體照片			
變形率	0.91%	1.89%	3.83%
平整度(%)	105%	100%	93%
燒結面積(cm ²)	6*6	6*6	6*6

2.2.3 結果與討論-良率、產率

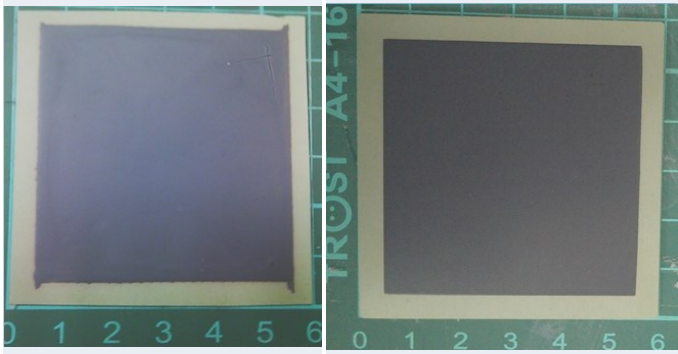
除燒結品質之要求外，本計畫更重視研究人員於電池製作過程的再現性(即良率)。良率之定義為產品數量(產率)當中，合乎品質標準/規範的比重(其中之品質標準/規範: 平整度<100%與變形率<5%)。如圖二十五所示，於 2015/3/06 至

2015/06/06 期間製作約二十片電池，良率由開初始之 0.5 緩慢上升至 0.78 (>0.75)，證實本計畫開發之製程與研究人員之穩定性在水準之上。除內部製程管控外，本計畫產出之電池與商購(N 公司,中國)比較如表十四。結果顯示，2 層陽極支撐電池之品質皆不符合規範(平整度低); 3 層電池之平整度大幅提升; 4 層電池之品質已符合規範且與商購電池互有領先。另外，單電池性能約為 100 mW/cm² (3D 設計)與 178 mW/cm² (2D 設計)，已逾計畫目標 100 mW/cm² (詳 3.3.3 節)。除燒結品質之良率管控外，本計畫亦掌握每片電池燒結製作所需之時間，藉以估算每周之產率。如表十五所示，製作一片電池總計需耗費 73 小時，以每周六個工作天計算，一周約可生產 1.5 片。



圖二十五、良率曲線

表十四、本計畫產出電池與商購之比較

	變形率(%)	平整度(%)
自製電池	3.85	22.72
商購電池	N/A	28.20
實體圖		

表十五、電池生產流程

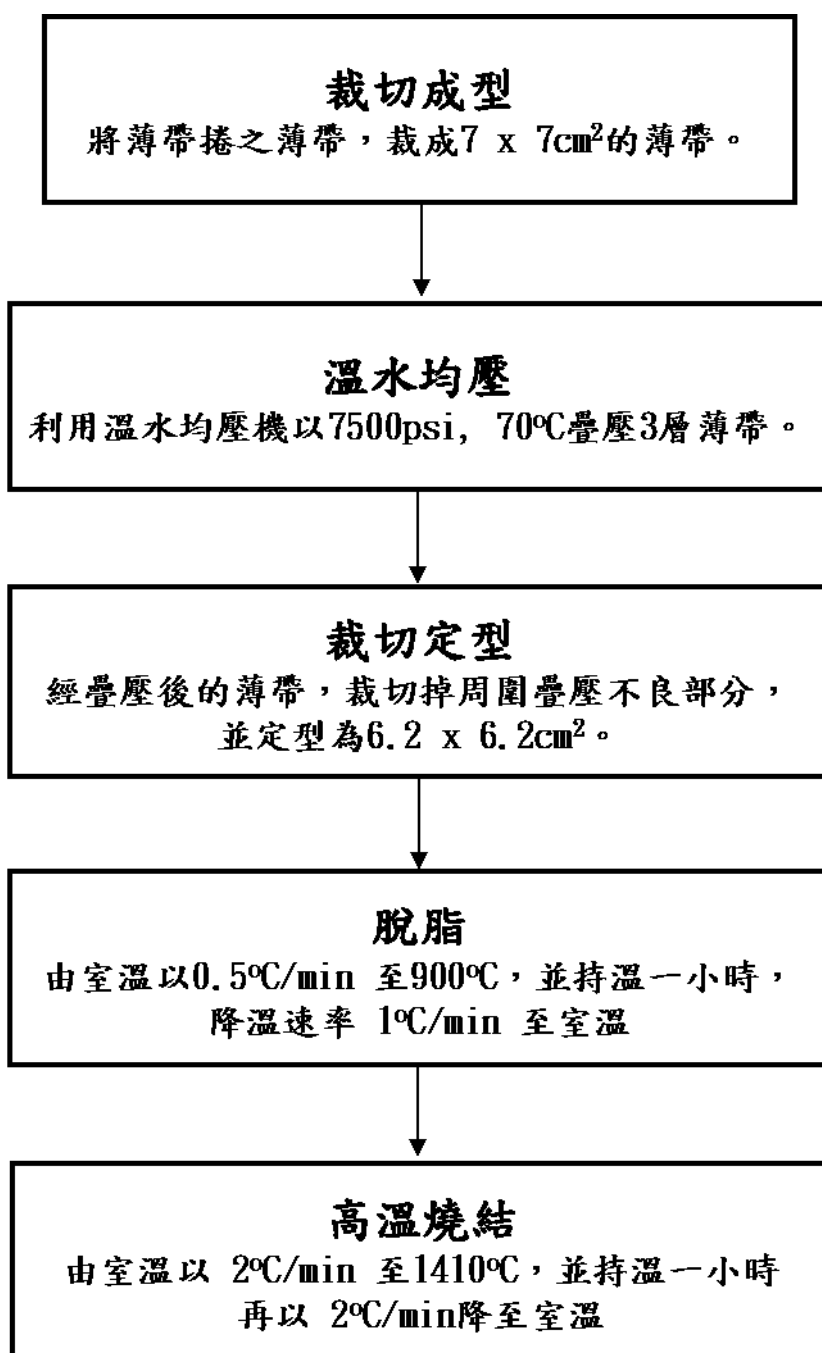
流程	最高溫度(°C)	時間
1. 切割模材	25	30 min
2. 熱壓	75	20 min
3. 陽極/電解質	25→1400	30 hr 20 min
4. 冷卻 時間	1400→25	14 hr
5. 陰極	25→1200	7 hr 50 min
6. 冷卻 時間	1200→25	20 hr

2.3.1 大面積電解質支撐型電池製作流程

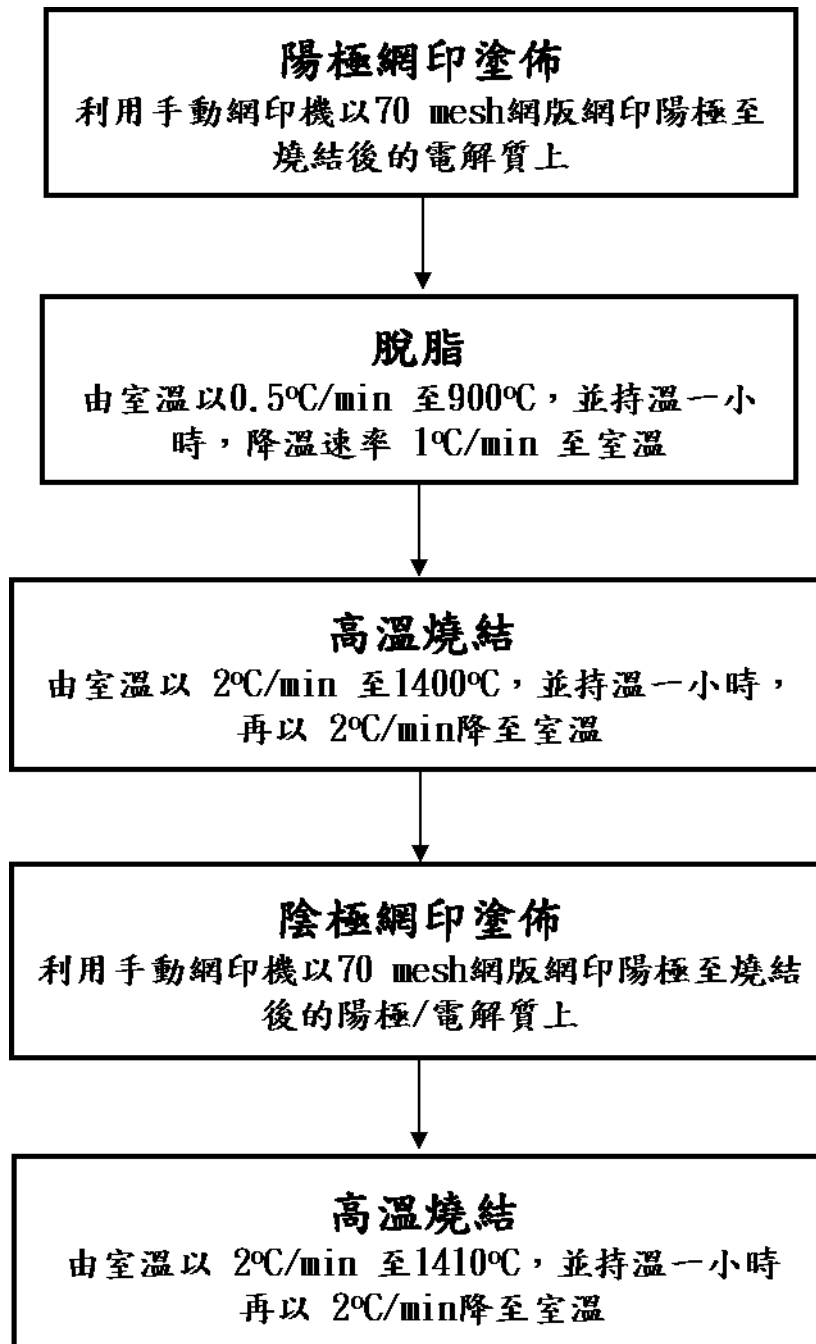
若以支撐 SOFC 電池強度來分類，分別有電解質支撐型、陽極支撐型、陰極支撐型與連接極支撐型各種型態。而現今分別以電解質支撐型與陽極支撐型為市場主流，電解質支撐型的電池，電池強度普遍較高，耐久度也較好，但由於電解質厚度為導致阻抗的重要來源之一，因此若以電解質支撐型的 SOFC 單元電池，普遍需要較高的操作溫度，來降低電解質曾所造成的阻抗值；而陽極支撐型的 SOFC 單元電池，顧名思義則是以陽極作為電池的支撐體，此種型態的電池電解質厚度可減至極薄至幾個 μm ，因此電解質所產生的阻抗能降至最低，使得此種型態的電池可以在相對較低的溫度下進行操作，但由於目前商用的 SOFC 陽極材料，普遍為 Ni/YSZ，但由於在陰陽極材料，需同時具備多孔性質，使觸媒面積增加，但孔隙度與強度不可同時兼得，並且陽極材料 Ni/YSZ 在長時間的操作下，可能會有結構逐漸鬆散，以及若陽極燃料使用含有碳含量的氣體造成碳沉積等因素，都會造成電池強度大幅降低。因此不管是電解質支撐型與陽極支撐型電池均有使用限制，因此本研究會同時對兩種常見型態的電池作為研究。

電解質支撐型 SOFC 單元電池：本研究採用 ESL (ElectroScience Laboratory, USA) 所生產的薄帶 (ESL-42401)，來做為電解質支撐型 SOFC 單元電池的電解質材料，並分別以裁切成型、薄帶堆疊、溫水均壓、脫脂與高溫燒結的步驟，完成緻密 SOFC 電解質層。陽極材料則採用 FCM (Fuel Cell Material, USA) 所生產的陽極膏體 (SKU: 231004)，再分別以網版網印、脫脂與高溫燒結，將陽極材料網印到電解質載體上。最後因極材料則採用 FCM (Fuel Cell Material, USA) 所生產的陰極膏體 (SKU: 232103)，以網版網印、脫脂與高溫燒結，將陰極材料網印到電解質與陽極載體上，即可完成電解質支撐型 SOFC 單元電池。詳細製作流程如表 16 與表 17：

表十六、SOFC 電解質支撐型電解質製作流程



表十七、SOFC 電解質支撐型單元電池製作流程



2.3.2 大面積電解質支撐型電池實驗設備

溫水均壓機

本實驗所使用之薄帶均壓工具為溫水均壓機(宏棋 CH-860, TW)，圖二十六，本研究利用溫水均壓機取代熱壓機(CARVER, USA)，圖二十七，用來疊壓三層電解質薄帶，而電解質薄帶放入溫水均壓機前，需先利用真空封口機(DZ-260, TW)，圖二十八，進行真空封口，防止水壓機內的水浸濕薄帶。而由於溫水均壓機能夠得到均勻方向的壓力，以及均勻的溫度分布，因此當電解質層燒結過程後，能夠得到較低的變形率。



圖二十六、溫水均壓機



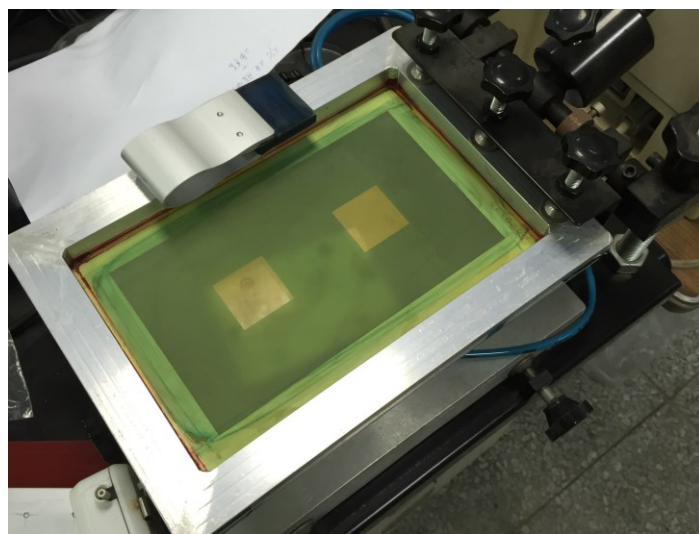
圖二十七、熱壓機



圖二十八、真空封口機

手動網印機

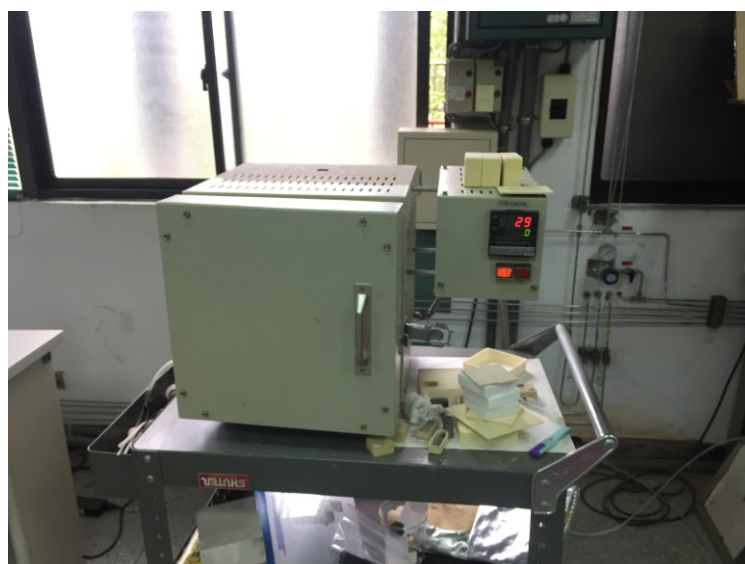
當完成 SOFC 電解質層後，須利用網印塗佈方法，分別將陰陽極網印至電解質上，不同網目的網板以及電極膏體的黏度材料，均會影響網印塗佈上電極的厚度，本研究利用手動網印機，如圖二十九，並以網目 70 mesh 的網版，網印陽及與陰極材料，利用刮刀來回各網印電極膏一次，後經脫脂與高溫燒結後，得到厚度約 20um 的電極層。



圖二十九、手動網印機

中溫脫脂爐

脫脂過程在於將材料原本所含的高分子溶劑，經過加溫去除，若升溫速度過快，則可能會導致溶劑揮發太快，使得材料產生過多之孔洞甚至裂縫，因此在脫脂過程需盡量以較慢的升溫速度進行，而大部分的高分子溶劑可在 650°C 左右燒除完畢。而本研究所使用的中溫脫脂爐(堯富 1200C, TW)如圖三十，本研究之脫脂條件均為，以升溫速度 $0.5^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 由室溫升至 900°C ，並在 900°C 下持溫1小時，再以 $2^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 降到室溫。



圖三十、中溫脫脂爐

高溫燒結爐

高溫燒結用途在於將材料燒結緻密，由於電解質層需要相當高的密度，避免電池陰陽極兩端的燃料產生混合而降低發電效率，也需要電解質層所提供之強度。因此適當的燒結條件對電解質層的影響很大，本研究所使用的高溫燒結爐(Lindberg/Blue M, USA)，如圖三十一，所使用之燒結條件為，以升溫速度 $2^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 由室溫升到 1410°C ，並持溫一小時後，再以 $3^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 降到室溫。



圖三十一、高溫燒結爐

2.3.3 結果與討論-大面積電解質支撐型電池性質與最佳化

為了使電池在構成電池堆時，較容易封裝、堆疊以及製作，電池的變形率、平整度與翹曲率等，都是需要被納入考量的因素。因此本章節會對這些因素作探討。

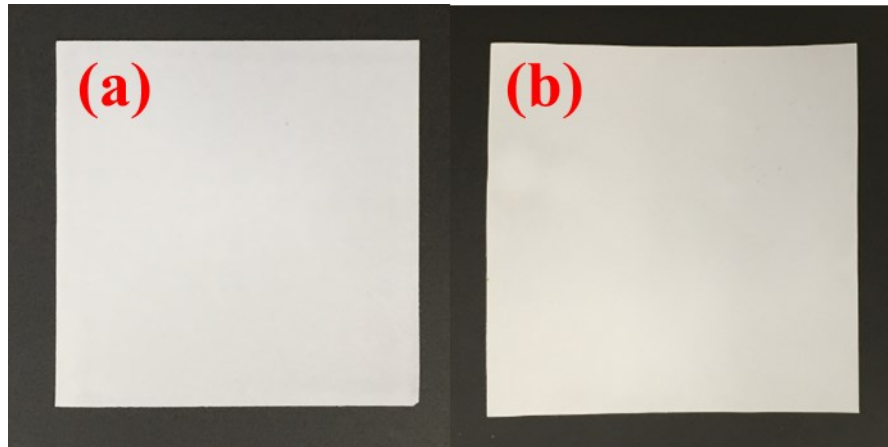
(一) 變形率提升：

為了降低電池的變形率，在於薄帶疊壓的部分，本研究採用溫水均壓法取代傳統的熱壓法，使均勻壓力疊壓薄帶，減少薄帶在疊壓過程所產生的殘留應力，本研究所使用之水壓機在上述已提及，詳細疊壓參數與時間如表十八

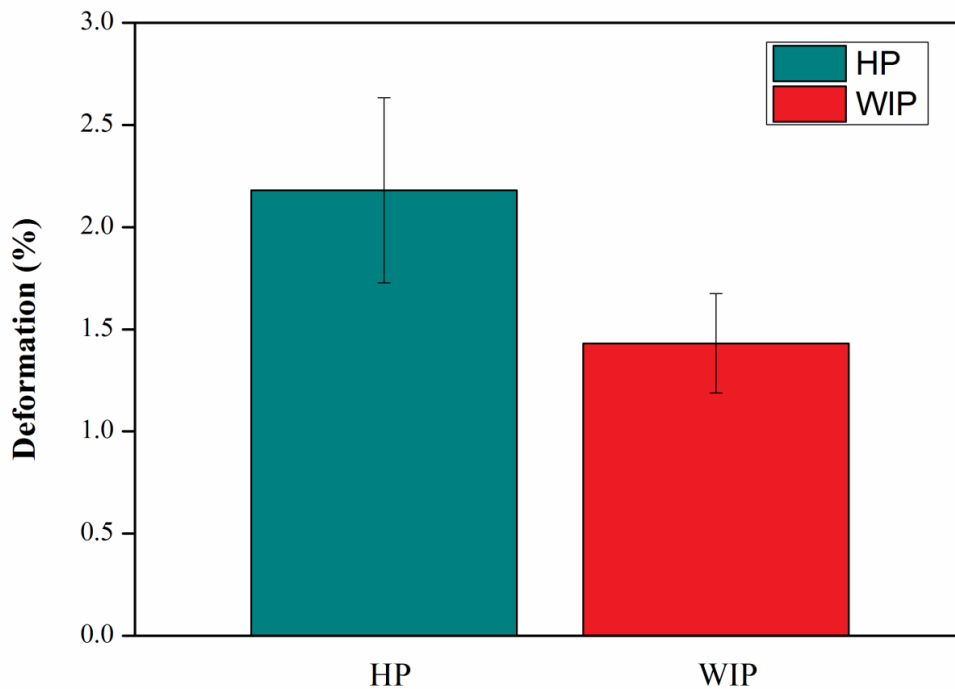
表十八、溫水均壓參數

壓力(psi)	時間(sec)	溫度(°C)
200	5	70
400	5	70
800	5	70
1600	10	70
3200	10	70
6000	20	70
7500	15	70
7500	60	70
6000	20	70
4000	20	70
2000	10	70
1000	10	70
500	5	70
100	5	70
0	0	70

分別使用溫水均壓法與傳統熱壓製程所製成的電解質如圖三十二，可明顯由圖中看出經溫水均壓製程的電解質具有較低的變形率，根據使用影像計算軟體 Image J，分別計算兩種製程的變形率，統計結果如圖三十三，可看出由溫水均壓法所疊壓的電解質具有約 1.45%的變形率，明顯較低於經熱壓法所疊壓的電解質 2.25%。



圖三十二、經(a)溫水均壓法與(b)熱壓法疊壓，經高溫燒結過後電解質



圖三十三、電解質經熱壓法(HP)與溫水均壓法(WIP)疊壓之變形率

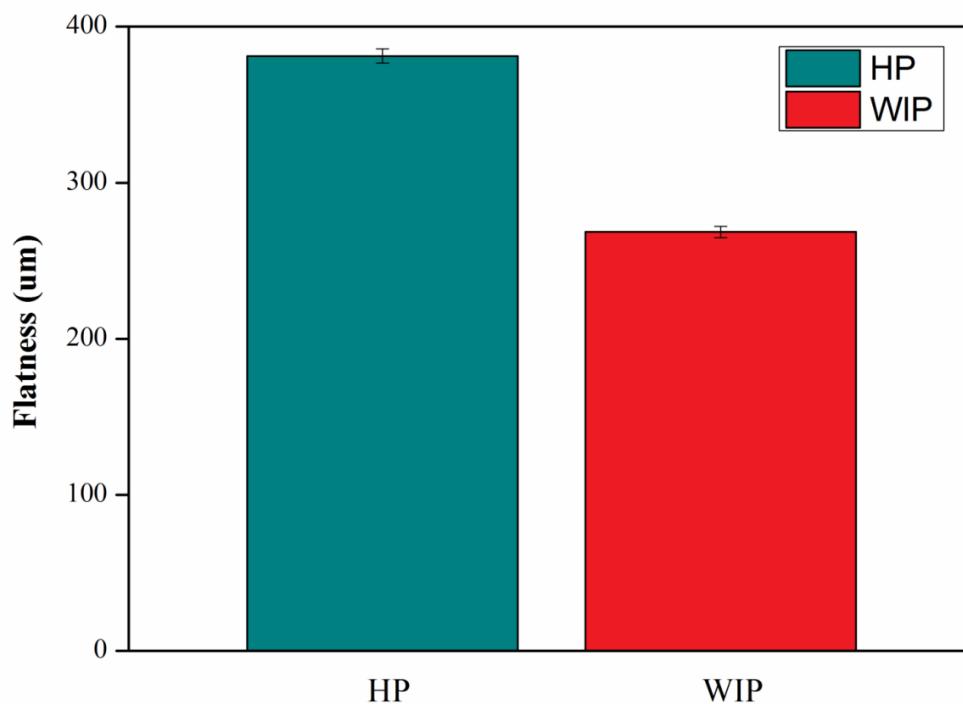
(二) 平整度提升：

平整度量測方式，本研究利用 Olympus DSX 500，作為平整度量測工具，而計算方式採取電解質 9 個位置內，每個位置內各取 5 組表面高低差，平均而得平整度(Flatness)。

為了提升表面平整度，本研究一樣採取在疊壓薄帶時，已溫水均壓法

取代傳統熱壓法，而參數同表十八，平整度結果如圖三十四，而平整度值越低表示表面平整度較平，而平整度值較高則表示表面平整較歧曲。

由圖三十四可看出利用溫水均壓法所製成的電解質，具有較佳的平整度 270um，而使用熱壓法製成的電解質，得到較差的平整度(380um)。



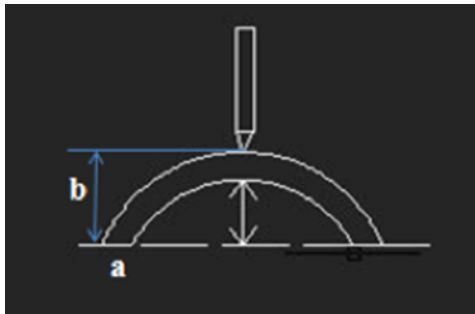
圖三十四、電解質經熱壓法(HP)與溫水均壓法(WIP)疊壓帶所得之平整度

(三) 翹曲率降低：

變形率的好壞決定了是否能直接放入電池堆的指標之一，因此本研究一樣採取在疊壓薄帶時，已溫水均壓法取代傳統熱壓法，而參數同表十八，平整度量測方式如圖三十五，量測結果如圖三十六，而翹曲值率低表示電池較為平整，而平整度值較高則表示表面平整較歧曲。由結果得知，利用溫水均壓法疊壓薄帶，能降低電池約 50%的翹曲率。

但不論是利用溫水均壓法或熱壓法疊壓薄帶，得到的翹曲率都無法足以使

電池放入電池堆作為測試，因此本研界當電池再進行高溫燒結時，也在電池上方加入荷重氧化鋁板，使電池達到幾乎 0% 的翹曲率。

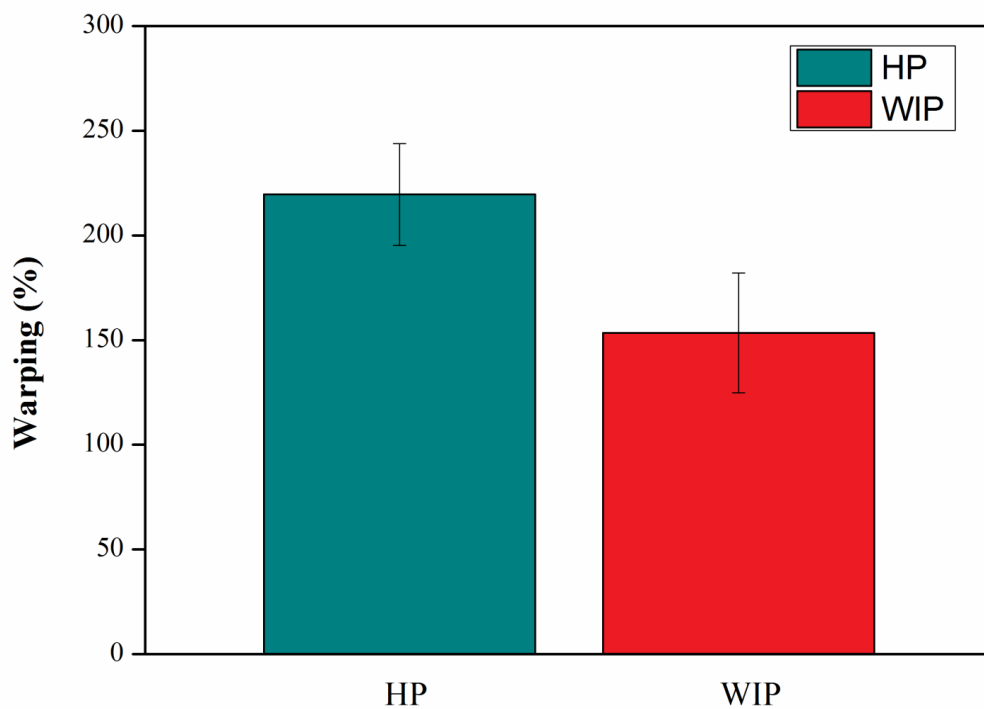


$$\text{Warping (z)}(\%) = \frac{b-a}{a} \times 100$$

a : Thickness of the sample

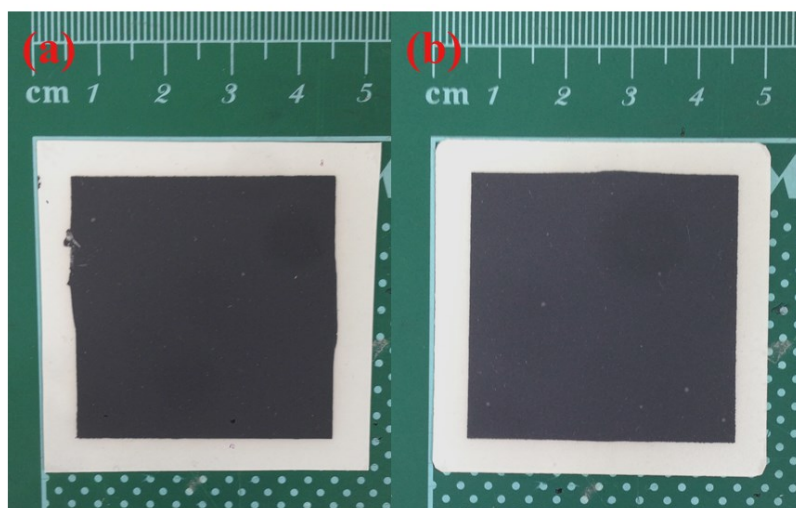
b : Highest point of the sample

圖三十五、翹曲率量測方式



圖三十六、電解質經熱壓法(HP)與溫水均壓法(WIP)疊壓帶所得之翹曲率

經電池最佳化參數調整前後，所製成之電解質支撐 SOFC 單元電池如圖三十七。

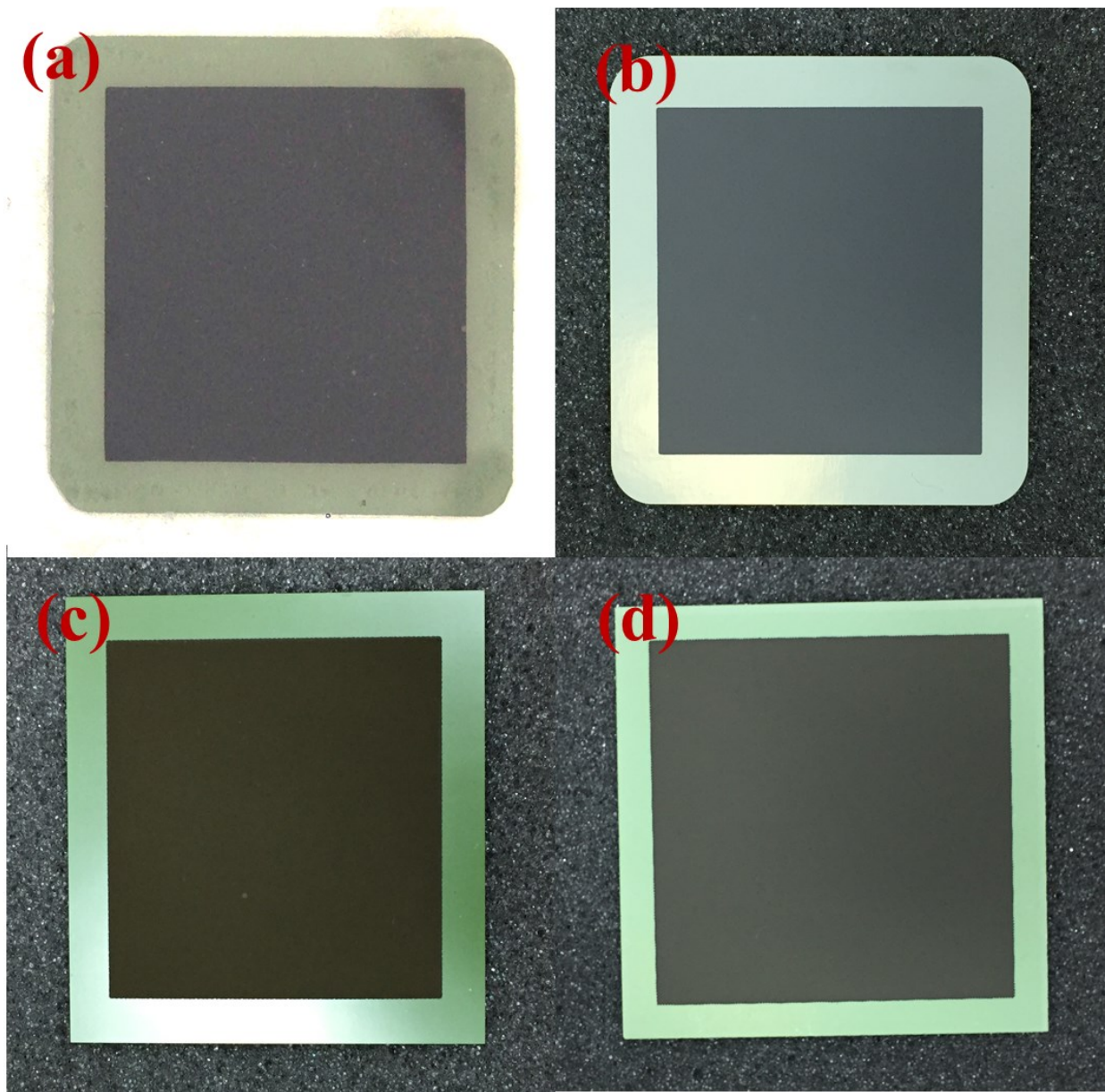


圖三十七、經電池最佳化參數調整 (a)前 (b)後 之電解質支撐 SOFC 單元電池

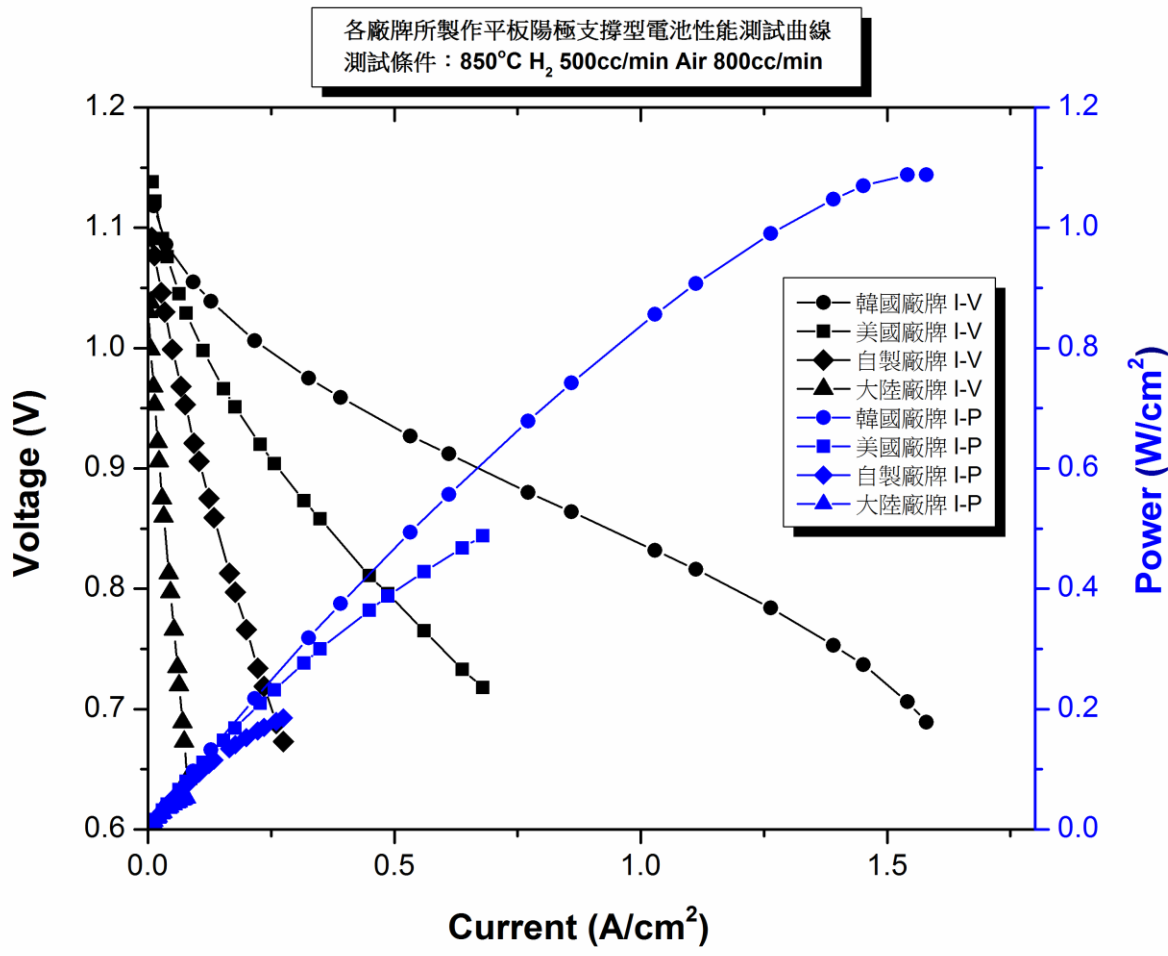
2.4 SOFC 單元電池技術評估

2.4.1 自製電池與各國電池性能量測結果

本研究為評估自主電池製作技術水平，同時也對各國 SOFC 單元電池以相同測試平台與條件，進行性能量測分析，由於目前市面上已陽極支撐型電池為主流，因此在評估各國電池技術時，皆採取陽極支撐型電池作為比較，結果如圖三十九分別為對美國廠牌、韓國廠牌、大陸廠牌與自製電池之性能量測結果，量測條件為在 850°C 下，陽極氣體為氫氣 $500\text{cc}/\text{min}$ ，陰極氣體為 $800\text{cc}/\text{min}$ 下，進行性能量測試。由結果得知，韓國廠牌所製作電池具有最高之性能，最高可達 $1.15\text{W}/\text{cm}^2$ ，其次為美國廠牌 $0.5\text{W}/\text{cm}^2$ ，而本研究自製的電池約為 $0.2\text{W}/\text{cm}^2$ ，而大陸廠牌電池性能約為 $0.1\text{W}/\text{cm}^2$ 。



圖三十八、各國商購 SOFC 陽極支撐型單元電池 (a)自製 (b)美國廠牌 (c)韓國廠牌 (d) 中國廠牌



圖三十九、自製單元電池與各國電池性能量測曲線

2.4.2 自製電池與各國電池性能量測討論

由上述測試結果顯示，本研究所自製電池距離市面上商購電池之性能，仍有改進空間。本研究對於自製電池之變形率、翹曲率、表面平整度與外觀部分，皆已能與商售電池匹敵，但仍有許多地方尚待改善，以下會對自製電池性能再提升方向做分析：

(1) 電極厚度影響：

相對於各國市售電池電極厚度，本研究自製電池之陰極厚度(~30 um)皆較其他市售電池來的薄(~50 um)，可能導致觸媒面積較少，而使氧氣轉換為氧離

子速率降低，使得性能較差。另外在電解質部分，由於本研究是利用薄帶堆疊法製程，電解質層也為利用薄帶堆疊，導致在製作過程中，電解質層可能並非完全均勻緻密，而使得有些位置破損，導致性能測試時，陽極與陰極燃料氣體互相混合，降低氣體傳換效率導致性能較差。

因此在未來電池製程中，可改變網版目數，使網印陰極面積增厚，改善電極厚度。電解質薄帶可再多堆疊一層薄帶，略為增加電解質層厚度，但可確保完全隔離陰陽極氣體。

(2) 孔隙率影響：

雖然在巨觀下本研究所自製電池與商購電池皆已相當接近，但微結構仍然有些微不同，因此位會朝向添加部分造孔劑於陰陽極材料中，並在調整脫脂與燒結曲線，已取得最佳之電池孔隙率，增進電極觸媒面積。

(3) 塗層改善：

本研究自製電池之電池層結構與材料分別為(陽極 | 電解質 | 陰極)，材料為(Ni/YSZ | YSZ | LSM/YSZ)，但根據一些文獻與研究得知，在陰極與電解質層之間，若塗上一層 GDC(gadolinium doped ceria)材料，可有效增進離子導電率，以增進電池性能。因此在未來可同樣利用網版網印法，先塗上 GDC 材料進行高溫燒結，在塗上陰極材料，則可提升電池性能。

第三章 研製5×5 cm²平板式SOFC短電池堆關鍵技術

3.1 連接極之研製

3.1.1 連接極之製作方法

平板式電池組中，連接極的作用為串聯各個（陽極支撐）電池，使之串聯成為電池堆以提升整體之輸出功率。再者，需將陽極端燃料與陰極端空氣隔離，避免燃料與空氣混合燃燒致使發電效能低落。因此，連接極須具備(1)良好的導電性；(2)於高溫氧化與還原氣氛下，能保持尺寸結構、化學組成的穩定性；(3)有足夠的氣密性，避免燃料與空氣混合燃燒；(4)熱膨脹係數與電極相匹配，以降低熱應力之形成；(5)良好的抗氧化、硫化、碳化及潛變能力；(6)易加工成型，具低成本製作潛力。

金屬材質具有易加工成型，具低成本製作潛力，而成為應用於固態氧化物燃料電池連接極之選用材料。然在高溫環境與長時間放電運作下，金屬表面易與空氣形成氧化物，造成電阻值大幅上升致使電池性能下降。因此，目前文獻中多以高活性元素如 Y、La、Ce、Hf、Co 等作為金屬表面之塗層，以降低氧化物之生成速率，並可防止金屬（不鏽鋼）中之 Cr 析出，造成陰極之毒化。

本計畫以不鏽鋼 310s 作為連接極之基材，並以 LSM(或 LSCF)塗覆於不鏽鋼 310s 表面，爾後進行乾燥與燒結。在 800°C 空氣氣氛與長時間之測試，觀察塗層處理對於 310s 不鏽鋼連接極之阻值影響。

實驗流程如下：

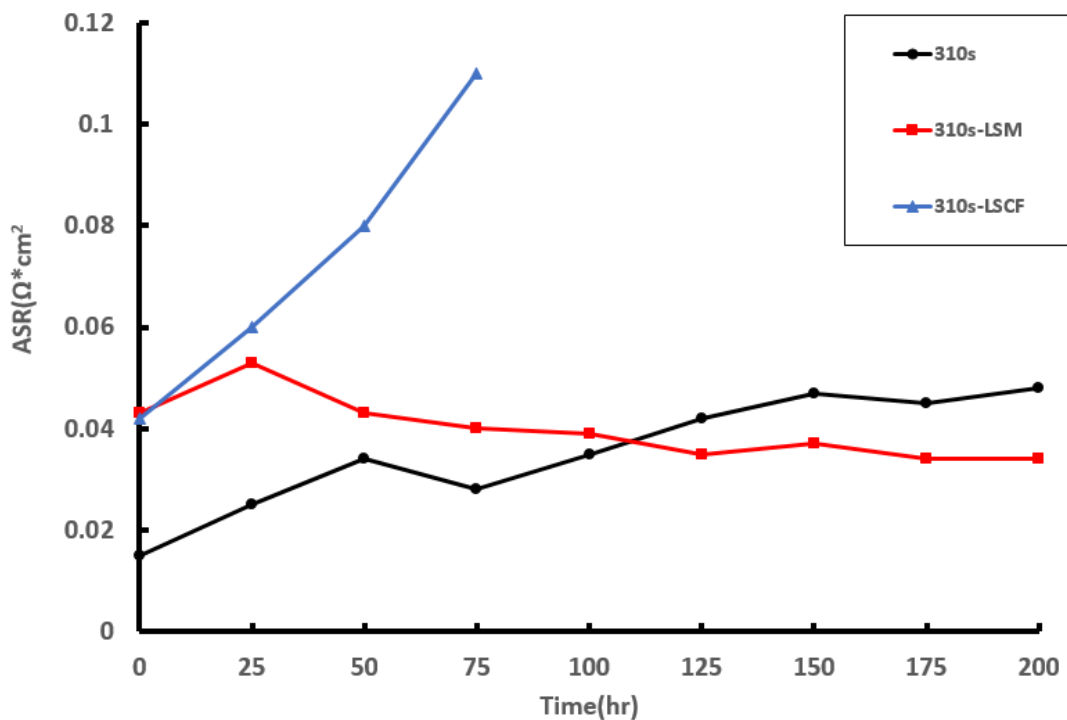
- (a). 取得 30mm*30mm*3mm 之 310s 不鏽鋼試片，以拋光砂輪機去除表面汙漬及氧化物，確保表面平整。
- (b). 將試片浸於丙酮溶液中，並以超音波震盪機震盪 20 分鐘，清洗殘留於表面之油污。

- (c). 將 LSM(或 LSCF)塗料以 $35.2\text{mg}/\text{cm}^2$ 塗覆試片表面，並放置烘箱中設定 125°C 持溫 1 小時，使塗料中之有機溶劑揮發。
- (d). 將烘乾後之試片置於高溫爐內，於氮氣氣氛中以 $1^\circ\text{C}/\text{min}$ 之升溫速率升溫至 800°C ，並持溫 1 小時進行燒結。
- (e). 將燒結完成之試片置於高溫爐中，以白金導線於試片上下兩面作為接觸，並於上方以高溫磚施于壓重，並在空氣氣氛中升溫至 800°C ，以 U3606A 數位萬用電錶，量測白金導線之電阻值讀數。
- (f). 以 24 小時為一循環，進行高溫長時間氧化阻值量測，後將電阻值乘於電極接觸面積即為 Area-Specific-Resistance (ASR)，並進行比較。

3.1.2 塗層對連接極阻值之影響

不鏽鋼 310s 作為連接極之基材，並以 LSM(或 LSCF)塗覆於不鏽鋼 310s 表面，爾後進行乾燥與燒結。在 800°C 空氣氣氛與長時間(216 小時)之測試，觀察塗層處理對於 310s 不鏽鋼連接極之阻值影響，其結果如圖四十。圖中觀察得知有塗覆 LSM 之 310s 不鏽鋼試片在初始之 ASR 值為 $0.0464\Omega\cdot\text{cm}^2$ ，相較於裸材之 $0.0154\Omega\cdot\text{cm}^2$ 高出了 $0.031\Omega\cdot\text{cm}^2$ ；隨著氧化時間的增加，有塗覆 LSM 之 310s 不鏽鋼試片於 120 小時，其 ASR 值下降至 $0.0352\Omega\cdot\text{cm}^2$ ，並趨於穩定。未做表面處理之裸材（310s 不鏽鋼試片），其 ASR 值由 $0.0154\Omega\cdot\text{cm}^2$ 之初始值經過 144 小時上升至 $0.0448\Omega\cdot\text{cm}^2$ 。塗覆 LSCF 則產生較高之阻值(如表十九)。可能原因為大量 Cr 由內部析出，並於試片表面形成 Cr_2O_3 氧化皮膜，隨著氧化皮膜厚度持續增加，阻值也隨之上升。綜觀實驗結果，於 310s 不鏽鋼表面進行 LSM 之塗層塗覆，確實有助於減少其表面氧化物之生成速率。進一步將文獻發表之連接極與鍍層之阻值分析（表二十），本計畫之最佳結果與文獻之數值互有領先。

於集電網方面，目前本實驗室採用單點焊接黃金片；商購陶瓷夾具與中央單電池的作法，皆採用多點焊接白金網。白金熔點約 1700°C，高於黃金熔點約 1064°C；相較之下，白金具高於操作溫度特性並具良好導電性與材料相容性，再採取多點接觸後導出電流，預期有相當幅度之性能輸出(圖四十一)。



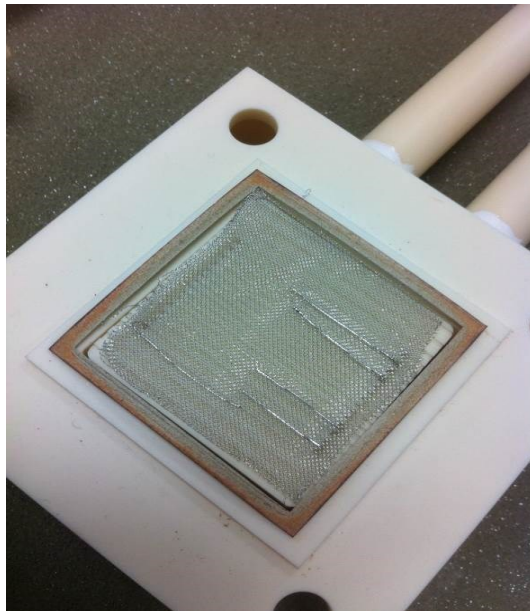
圖四十、310s 不鏽鋼及塗覆陰極膏 (LSM、LSCF) 之阻抗圖

表十九、310s不鏽鋼裸材及塗覆LSM或LSCF於高溫長時間下之阻值

連接極材料	經高溫長時間(216hr)後阻抗
310s不鏽鋼	0.0452 $\Omega \cdot \text{cm}^2$
塗覆LSM	0.0343 $\Omega \cdot \text{cm}^2$
塗覆LSCF	> 0.1 $\Omega \cdot \text{cm}^2$ (100 hr)

表二十、本計畫產出與文獻之阻值比較

	基材	鍍層	操作溫度	氧化時間	阻抗 ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)
Dalian National Laboratory for Clean Energy -Ding Rong Ou 等 (2013)	430 不鏽鋼	MnCo	800°C	1000Hr	0.006
Pacific Northwest National Laboratory- J.W. Stevenson 等 (2013)	441 不鏽鋼	MnCo	800°C	8844Hr	0.075
Shahid Bahonar University of Kerman- Hadi Ebrahimifar 等 (2011)	430 不鏽鋼	Co	800°C	200Hr	0.0097
Shanghai Institute of Ceramics-Yanjie Xu 等 (2010)	Crofer 22 APU	CuMnCo	800°C	553Hr	0.01648
National Dong Hwa University-Chun-Lin Chu 等 (2008)	Crofer 22 APU	LSM	800°C	1500Hr	0.035
本計畫(2014)	310S 不鏽鋼	LSM	800°C	216Hr	0.0343



圖四十一、上：黃金導線與黃金集電片（本計畫）；下：白金導線與白金集電網

3.2 密封材料之選用

將各種密封材料單獨或搭配後與自製電池置入電池夾具進行組裝，升溫至操作溫度 800°C，於入口端通入特定流量之氣體並以浮球式流量計於出口端觀察氣體流出之情況(漏氣=通入流量-出口流量)。由表九紀錄漏氣狀況並比較各種密封材料(一種或兩種搭配)之密封能力。其中可以發現 Permatex 高溫密封膠與 GL-1280 高溫密封膠雖然已被使用在本實驗室大面積陽極支撐型電池上，搭配較低之操作溫度(約為 650°C 左右)。當這使用這兩種高溫膠密封膠升溫至 800°C 時其密封能力便迅速下滑，降到常溫時拆開觀察，發現其與電池之接合處鬆散，輕輕一剝極可脫落，推斷為其在 800°C 高溫下熱膨脹係數與電池差異過大而脫離。反觀，ESL 高溫密封膠在 800°C 高溫下之表現則相對較為優良，且降到常溫下拆開觀察可發現其與電池之接合緊密，由此可知 ESL 高溫密封膠其與陶瓷材料(電池)之接合性相當優良，若在搭配雲母使用可達最佳之效果。文獻上常用之氧化鋁纖維(FCM)，推測此材料是需要從設計電池夾具起開始精算以配合使用，因此在本實驗之電池夾具當中較不理想。密封材料 Thermiculite 866 理由亦同，且其容錯率又更低。

3.3 平板式 SOFC 短電池堆技術

3.3.1 電池組設計

(平板式) 固態氧化物燃料電池之高效率已獲證實，因此運用於中大型發電站上已成趨勢。固態氧化物燃料電池的發電量取決於電池組之規格，而電池組中最重要之零件即電池(單元)，因此電池片品質的好壞與否將直接且顯著的影響電池組之性能表現。本計畫採用除自製陽極支撐型燃料電池，且為使電池組擁有更高的發電量，因此製造大面積之陽極極支撐型燃料電池。再者，因應自製電池之有限產能，本計畫同時採購國外商購電池以因應電池組所需大量之電池。

隨著電池尺寸的增大，其燒結製備過程收縮是否規則均一，或因陽極與電解質收縮率之不同產生翹曲，都將直接影響電池組裝之困難度。因此本計畫在陽極/電解質共同燒結時，藉由燒結參數調整以提高平整度與降低變形率(參見 2.2.2 節)。另外針對平版型電池組進行許多改善，如提昇金線導電率、流道分流、及搭配連結極塗層期望達到電池堆有效性能提升。

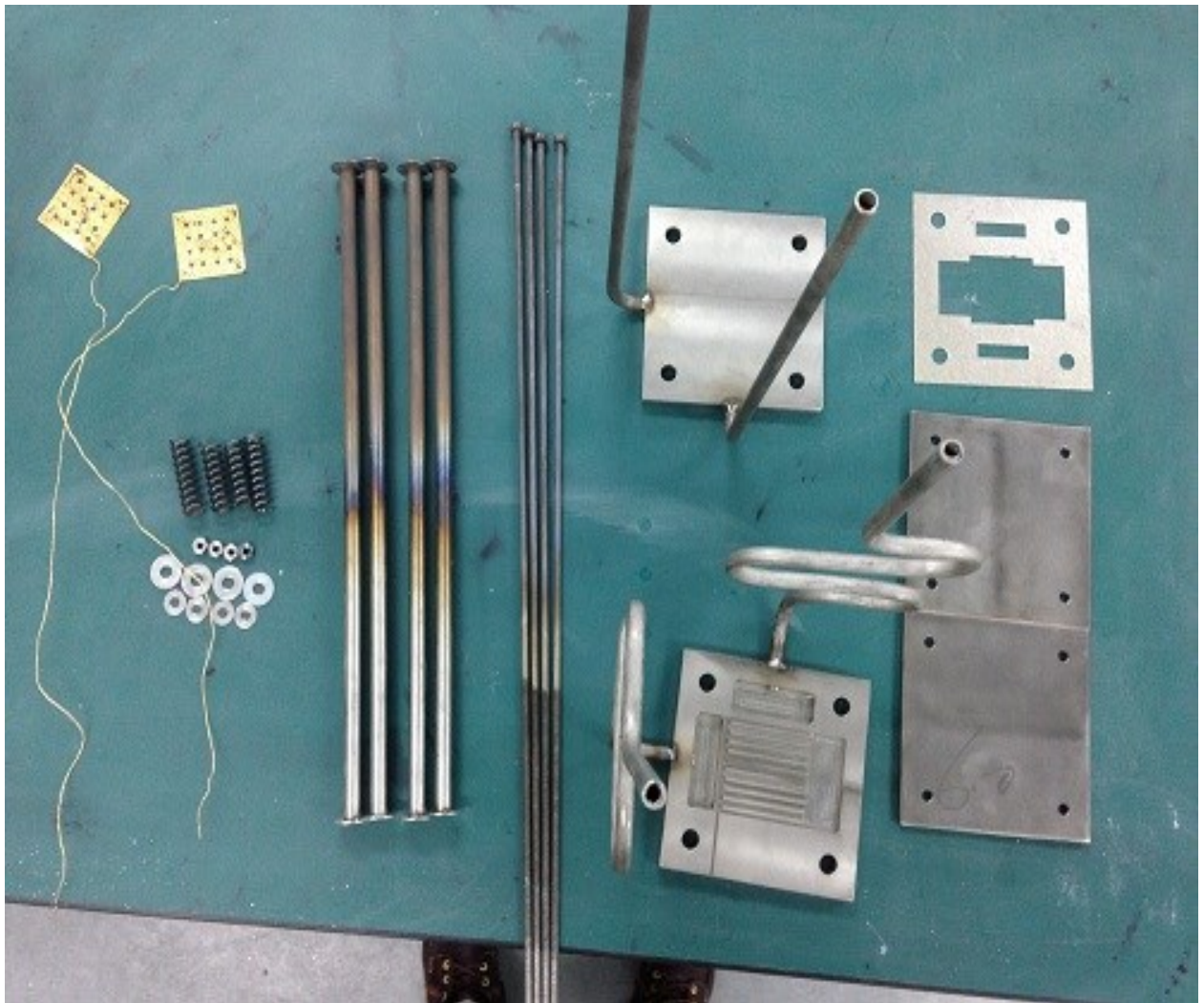
本計畫針對先前之平板式電池組 I 進行結構修改，改進的項目包含單極板材質、流道型式、燃料進出管道加大、燃料預熱、減少電流路徑、氫氣極支撐型電池密封方式及電池組鎖合方式，獲得平板式電池組 II。平板式電池組 II 之零組件如圖四十二，包含：

- (a).端板(陽極端、陰極端)
- (b).連接板
- (c).耐高溫密封膠(一次性材料)
- (d).耐高溫密封材料-雲母片(多次性材料)
- (e).不鏽鋼定位螺桿組

(f).彈簧組

(g).防短路裝置

(h).金屬導電片、金屬導線



圖四十二、平板式電池組 II 之零組件

3.3.2 平板式電池組 II 設計、改進與性能量測

本計畫針對先前之平板式電池組 I 進行結構修改，藉結構設計之改善，進期提升電池組的性能輸出。經過修改後所製造出的新一代電池組稱之為平板式電池組 II。修改重點如表二十一，改進項目如表二十二。

表二十一、平板型 SOFC 電池組設計重點/目標

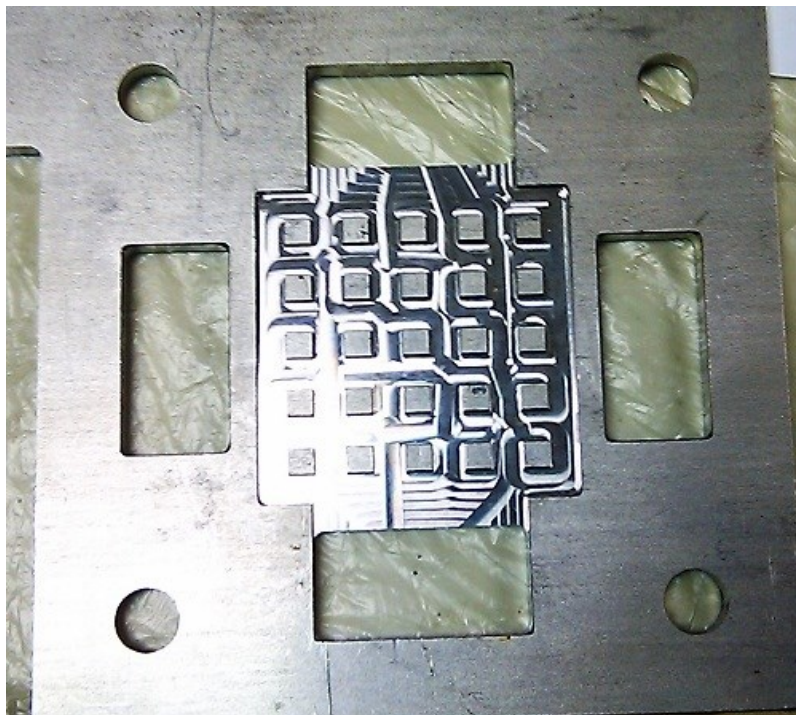
	性能條件	設計目標
電傳導效率	最小的歐姆損失	縮短電流路徑
		良好的電接觸與足夠的接觸面積
		金線良好接觸與單一旦簡短的電流路徑
電化學效率	最大的開路電壓	減少氣體損漏或內漏
	低極化損失	無電的短路現象
		氣體均勻分佈在每個電池體與電池堆之間
熱管理	燃料預熱	氣體容易進入反應部位
	溫度分佈均勻	電池內部溫度不致降低
機械/結構健全	容許電池堆中有可能的最大溫度梯度	適當氣體流動的結構
		足夠應付熱應力
	關於組裝與操作管理的機械強度	減少機械應力

表二十二、平板式電池組 I 與 II 之差異

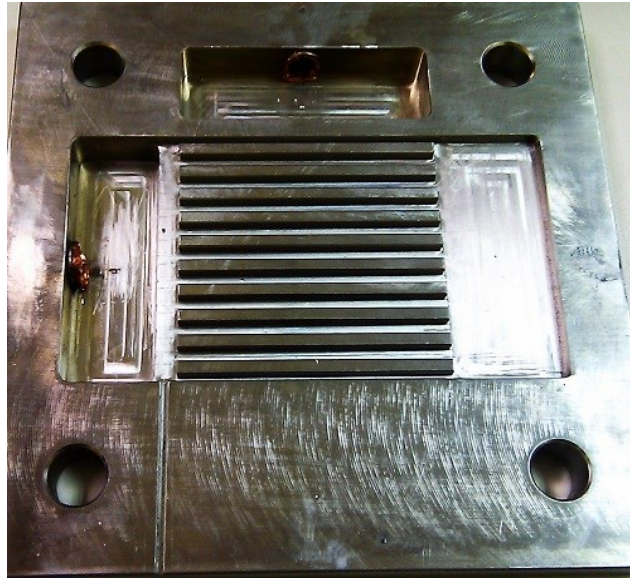
	平板式電池組 I	平板式電池組 II (本研究)	功能、原因
1. 單極板材質	不鏽鋼430s 不鏽鋼310s	不鏽鋼310s	310s含Ni,Cr量最高， 抗氧化最佳 ，降低氧化脫屑，使表面平整
2. 流道型式	棋盤式流道 柵狀流道	柵狀流道	柵狀流道具 導流 功效，使各電池間燃料均勻
3. 燃料進出管口徑	2.5mm	6.5mm	更大口徑使燃料進出更 順暢
4. 燃料預熱	無	與燃料進、出氣管整合，總長 80cm 以上	預熱 防止燃料進入電池組瞬間膨脹傷害電池，並防止電池降溫
5. 氫氣極支撐電池密封方式	電池直接放置雲母片，並塗附高溫密封膠	電池以2片不同規格雲母片將其夾於其中，並塗附高溫密封膠	改善 內漏 問題，但同時須解決雲母片膨脹及金網厚度問題
6. 電池組鎖合方式	僅以不鏽鋼塊於上方壓重	加入 彈簧組 ，以扭力板手鎖合	增加力矩及 壓重 ，減少漏氣

平板式電池組 II 主要改善內容說明如下:

- (a) 單極板材質:由平板式電池組 I 之不鏽鋼 430s 更改為平板式電池組 II 之不鏽鋼 310s。因不鏽鋼 310s 之 Ni 與 Cr 含量為眾不鏽鋼中最高，因此耐熱與抗氧化表現最佳，藉以改善不鏽鋼 430s 嚴重氧化產生之脫屑而導致表面不平整產生漏氣。
- (b) 流道型式:由平板式電池組 I 之棋盤式流道如圖四十三，更改為平板式電池組 II 之柵狀流道如圖四十四。因柵狀流道在燃料流經時具有導流效應，能夠使燃料流通更為順暢。相較於棋盤式流道，其燃料則會在流道中會產生渦流。由於日本廠牌之電池設計亦選用柵狀流道，因此柵狀流道應是較佳的選擇。

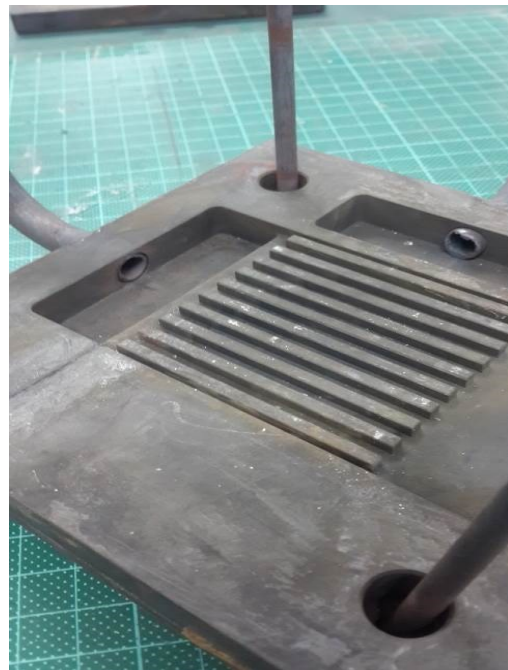
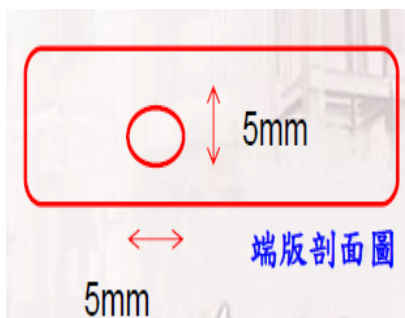


圖四十三、棋盤式流道



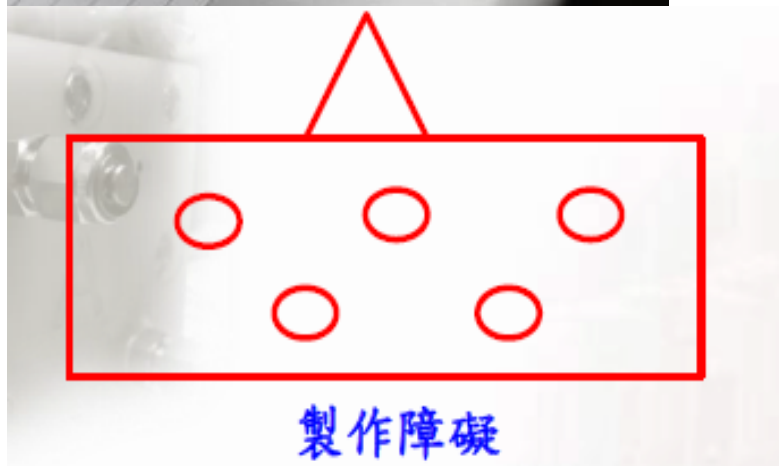
圖四十四、柵狀流道

(c)絕緣部分設計:因平板式單電池組 I 僅以密封膠隔絕黃金導線和端版。本計畫之電池組 II 乃於端版中製作凹槽並加入陶瓷環進行阻絕黃金導線和端版(如圖四十五), 達理想之電子絕緣效果。



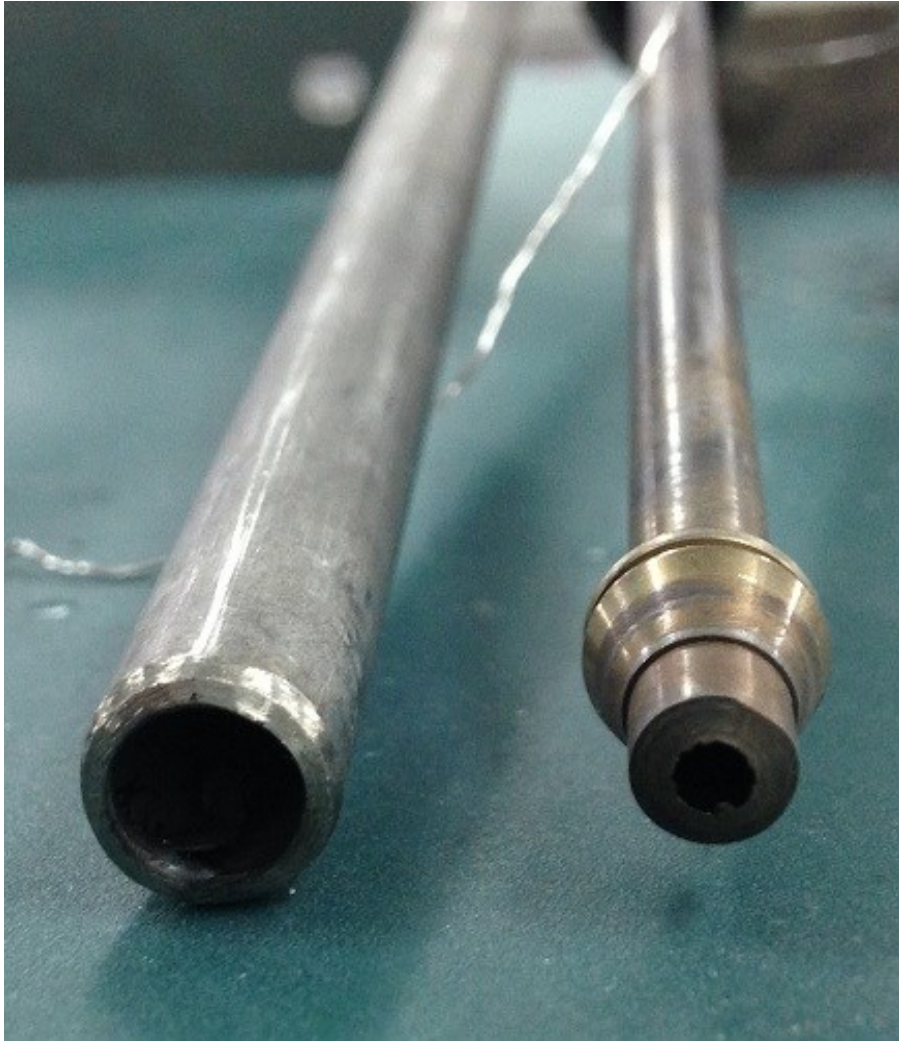
圖四十五、平板式電池組II之凹槽加絕緣陶瓷環設計

(d) 氣體分流:藉由進氣管中燃料進氣口部分之障礙製作，以利較佳之氣體分流 (圖四十六)。單電池實驗中性能雖相差無幾，然進行三電池實驗有明顯性能提升。



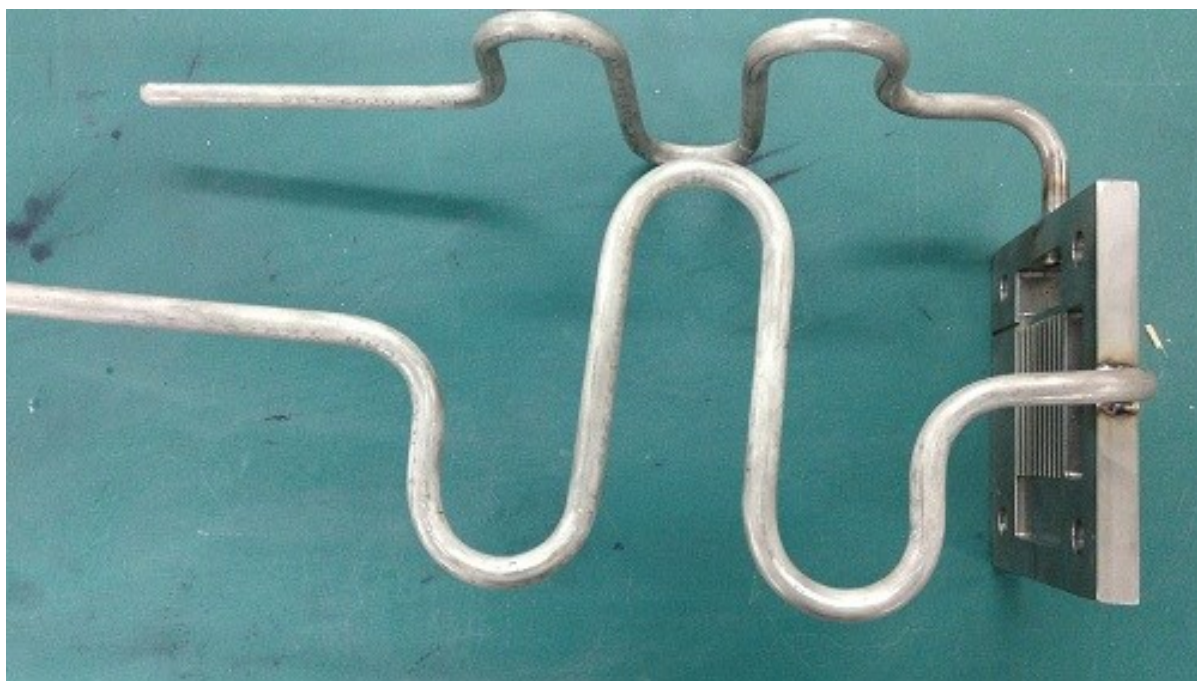
圖四十六、平板式電池組II之入口障礙製作以達分流效果

(e) 燃料進出管口徑:由平板式電池組 I 之 2.5mm 增加至平板式電池組 II 之 6.5mm 如圖四十七。藉由更大之燃料進出管道，使燃料進出電池組中更為順暢，避免壓力累積導致電池組之漏氣。



圖四十七、燃料進出管件:(左) $D=6.5\text{mm}$;(右) $D=2.5\text{mm}$

- (f) **管線預熱機制:**在平板式電池組 II 增加燃料預熱機制，其燃料預熱整合於進氣管道中如圖四十八，整段管線長度為 100cm。燃料預熱作法可避免低溫燃料/氧化劑流經電池時，導致電池溫度下降而降低性能，並可避免高溫燃料於電池組中瞬間局部降溫，導致電池溫度不均而碎裂。
- (g) **氣體預熱於電池性能表現之影響:**在國外的期刊論文中已有模擬研究[10]發現在相同的工作溫度下燃料氣體的入口溫度對於電池性能有個顯著的影響(圖四十九)。



圖四十八、燃料進入之預熱機制

Table 4 – Operating parameters for comprehensive studies.					
	Air [sccm]	CH ₄ [sccm]	System temp. [°C]	Inlet temp. [°C]	SCR
Result 1	2930	190	650, 750, 850	750	2
Result 2	2930	190	750	650, 750, 850	2
Stoichiometry number of fuel			1.3	Voltage [V]	0.7
Stoichiometry number of air			3.0	Active area [cm ²]	25

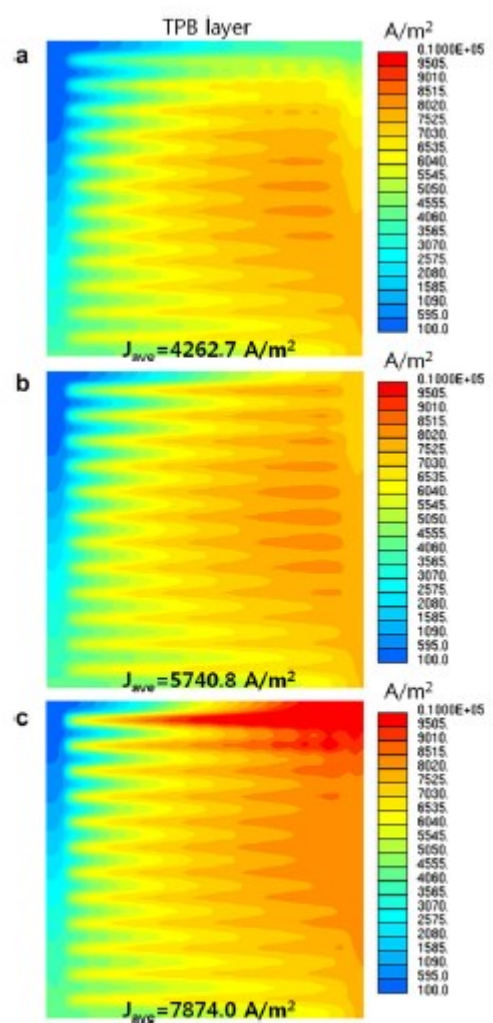


Fig. 20 – Total current density distributions, (a) inlet temperature = 650 °C, (b) inlet temperature = 750 °C, (c) inlet temperature = 850 °C.

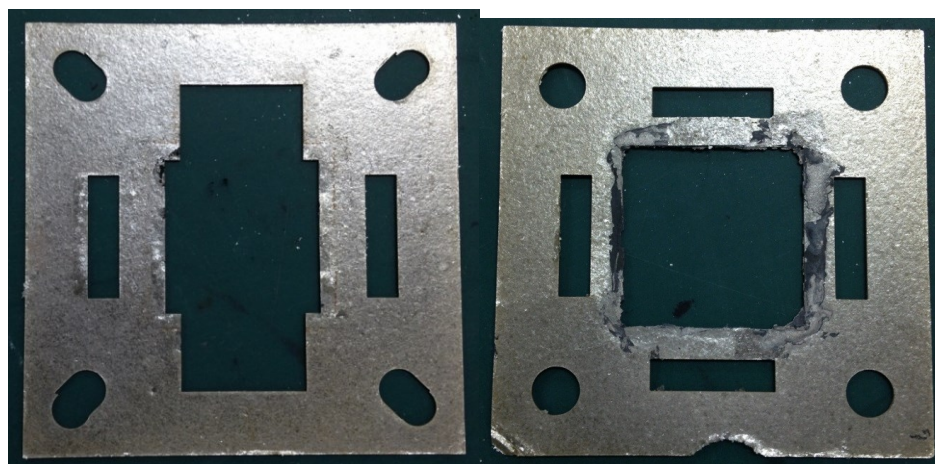
圖四十九、相同系統溫度下三種不同入口溫度對性能表現的影響
 (平均電流密度從 650 度至 850 度上升了 3611.3 A/m^2)

(h) 集電裝置:在平板式電池組 II 中，將黃金集電片與黃金導線結合如圖五十，使電池產生之電力由黃金集電片收集後，經黃金導線連接至燃料電池測試機台，藉以改善平板式電池組 I 中，電力由集電片傳輸至單極板，再經由與單極板連接之黃金導線傳輸至燃料電池測試系統。此作法可減少氫電池產生之電力流經兩個高阻抗界面(單極版與黃金集電片/黃金導線)造成之損失。



圖五十、黃金導線與黃金集電片結合

(i) 在平板式電池組 I 中，電池僅放置於單一雲母片中，並塗覆高溫密封膠進行密封，此法並不能有效將燃料與氧化劑完全隔離，仍可能發生內漏導致性能下降。在平板式電池組 II 中將製作 2 種不同規格之雲母片(一)與雲母片(二)(圖五十一)，將電池放置於雲母片(二)中，並於電池邊緣塗覆高溫密封膠，上下再以雲母片(一)夾合如圖五十二。此法可大幅降低燃料與氧化劑間之內漏可能性。



圖五十一、左:雲母片(一);右:雲母片(二)



圖五十二、以雲母片(一)、(二)將電池夾合防漏

- (j) 平板式電池組 II 中，使用不鏽鋼定位螺桿組配合彈簧組與彈簧延伸管如圖五十三，並以扭力扳手對電池組施于鎖合力矩(5kgf - cm)，將有效改善平板式電池組 I 之漏氣問題。



圖五十三、彈簧及延長管(組)

(k) 平板式電池組 II 整體結構如圖五十四



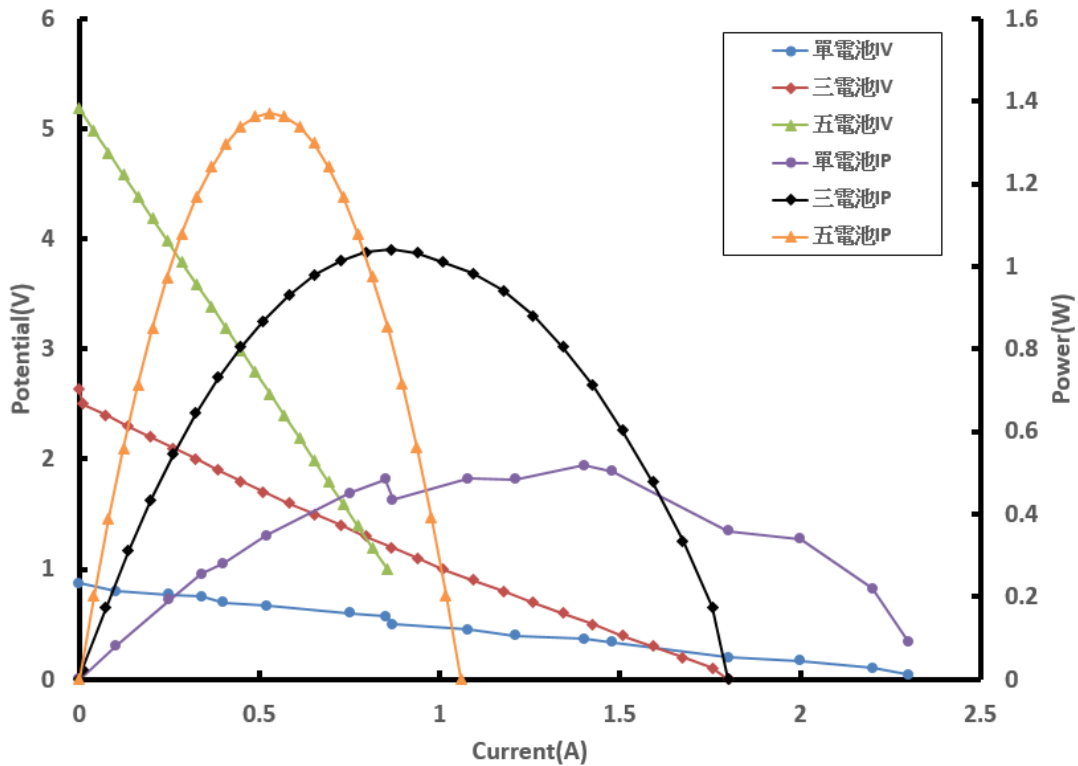
圖五十四、平板式電池組 II 外形結構

3.3.3 結果與討論—平板式電池組(II)性能量測

選擇平板式電池組進行研究與開發，不外乎取其電池間可以最短距離堆疊方式進行串聯，求得更大功率之輸出，並且相較其他型式(如管狀)之電池組擁有最佳之體積功率密度。因此本實驗將對平板式電池組 II 進行多電池之堆疊，藉由更大功率之輸出，並與平板式電池組 I 進行比較。

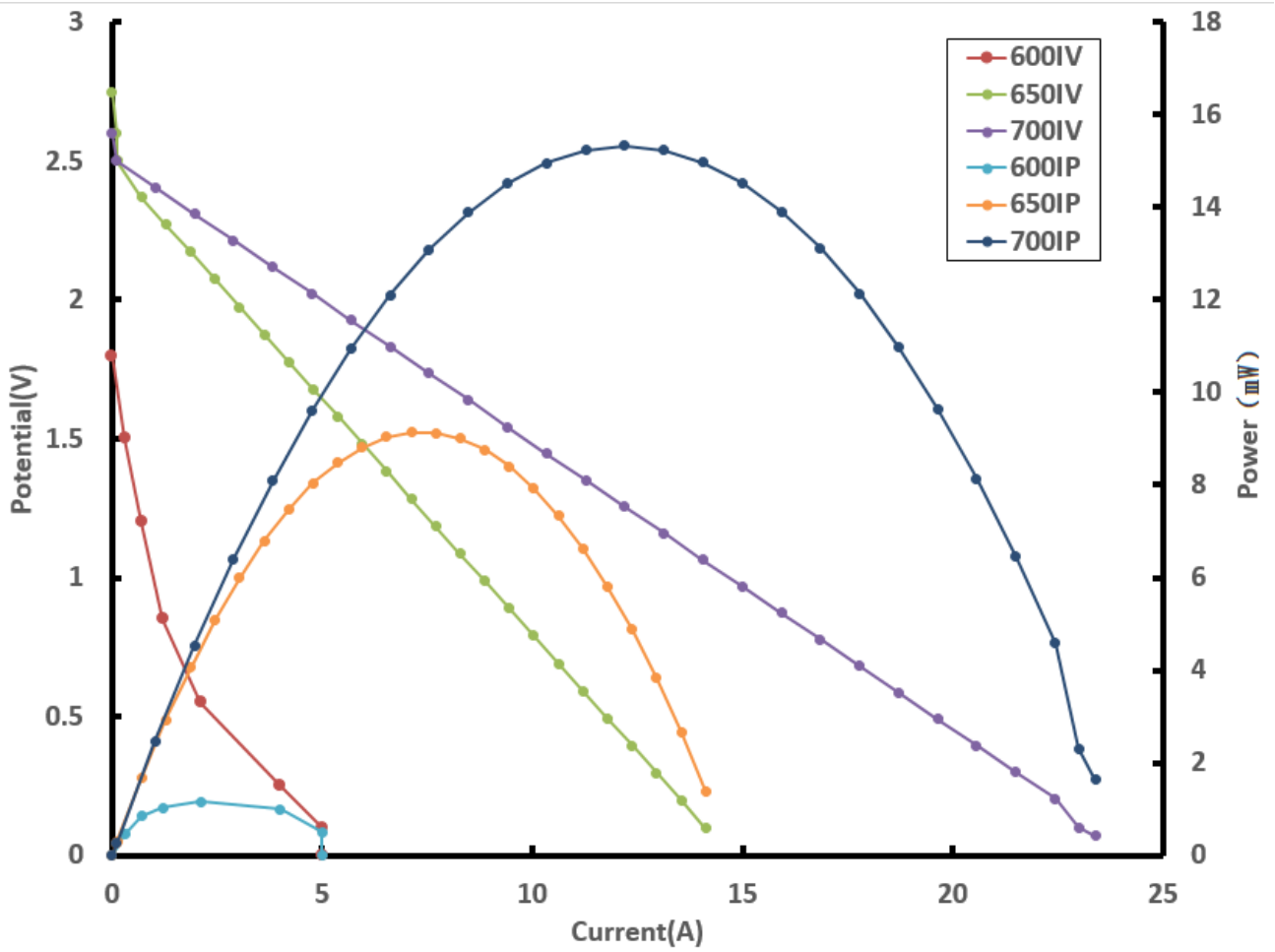
電池組串聯成功與否，可經由電壓與功率輸出兩關鍵指標觀察得知。藉由平板式電池組 I 進行單電池、三電池、與五電池之性能量測如圖五十五。在單電池實驗中，開路電壓為 0.87V，最大功率為 0.48W (0.019 W/cm^2)；三電池堆開路電壓為 2.632V，最大功率為 1W (0.013 W/cm^2)；五電池堆中，開路電壓達 5.181V，最大功率達 1.45W (0.012 W/cm^2)。結果顯示，本計畫先前設計研製之

平板式電池組(I)確實透過堆疊，將電壓達到累加效果，然單位面積之發電功率則由 0.019 W/cm^2 降低至 0.012 W/cm^2 ，意味電池組技術尚有提升之空間。

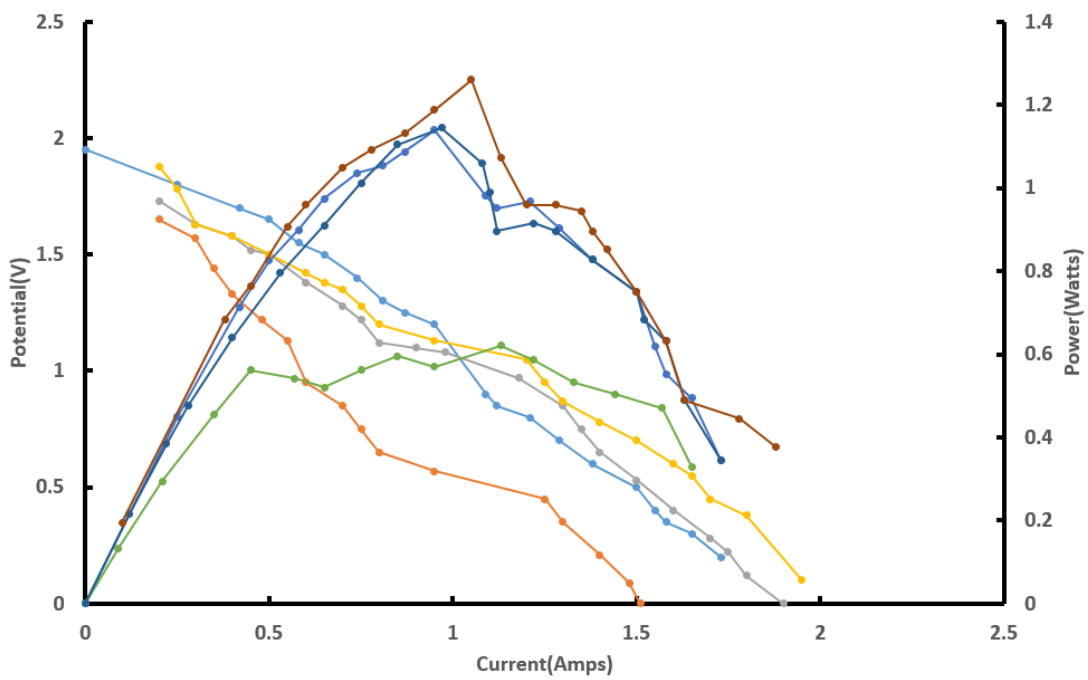


圖五十五、平板式電池組(I)之之堆疊成效

為提升平板式電池組(I)之發電功率，本計畫投入平板式電池組(II)之開發並選擇三電池進行堆疊測試，且與平板式電池組 I 進行比較(圖五十六)。在操作溫度為 600°C 、 650°C 及 700°C ，氫氣流量 900 sccm 、空氣流量 1200 sccm ，彈簧組鎖合力矩為 5 kgf/cm 。由 I-V 性能圖中得知(圖五十七)，平板式電池組(II)於 700°C 時，開路電壓為 2.732V ，於 650°C 時，開路電壓為 2.61V ；由 I-P 性能圖中發現，平板式電池組(I)操作溫度為 700°C 時，其最大功率密度為 12.5 mW/cm^2 ；而平板式電池組(II)操作溫度為 700°C 中大功率密度為 16.0 mW/cm^2 ($1.2 \text{ W}/75 \text{ cm}^2$)，較第 I 代性能提升 33%，顯示相關之改善措施(表二十三)已初見成效，然距離理想之技術水平 100 mW/cm^2 尚有明顯之改善空間。



圖五十六、平板式電池組 I 之三電池組性能

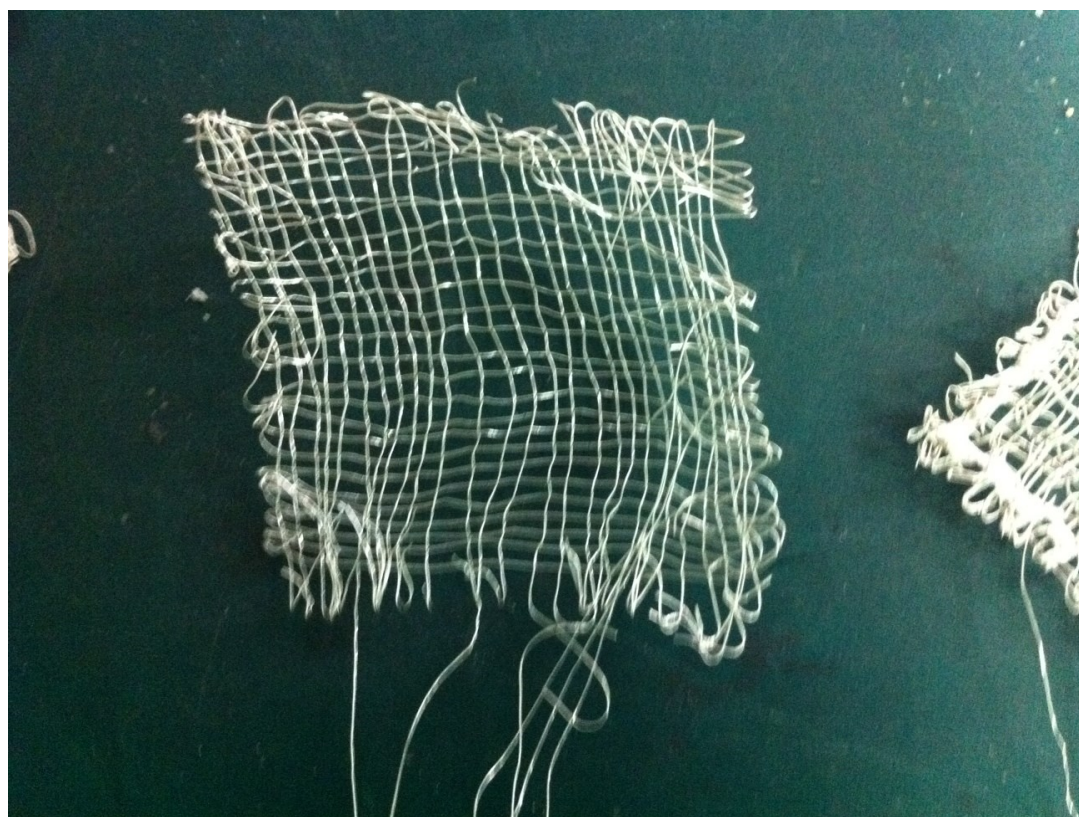


圖五十七、平板式電池組 II 之三電池組性能

3.3.4 結果與討論-集電網與密封材料改善

經過數次實驗後，發現集電網的接觸阻抗問題為改善性能之關鍵指標，因此換掉過於厚硬且接觸阻抗甚大的黃金導電片，改用自行商購銀線後編織之銀網集電（圖五十八）；密封材料則從單純使用雲母片，改成雲母片與可自行裁切之866互相搭配(圖五十九)；密封膠則從GL-1280密封膠改為ESL密封膠(圖六十)；流道導流由平行流經電極表面改為垂直進入電極表面(圖六十一)，本計畫將此作法定義為平板式電池組II(+)

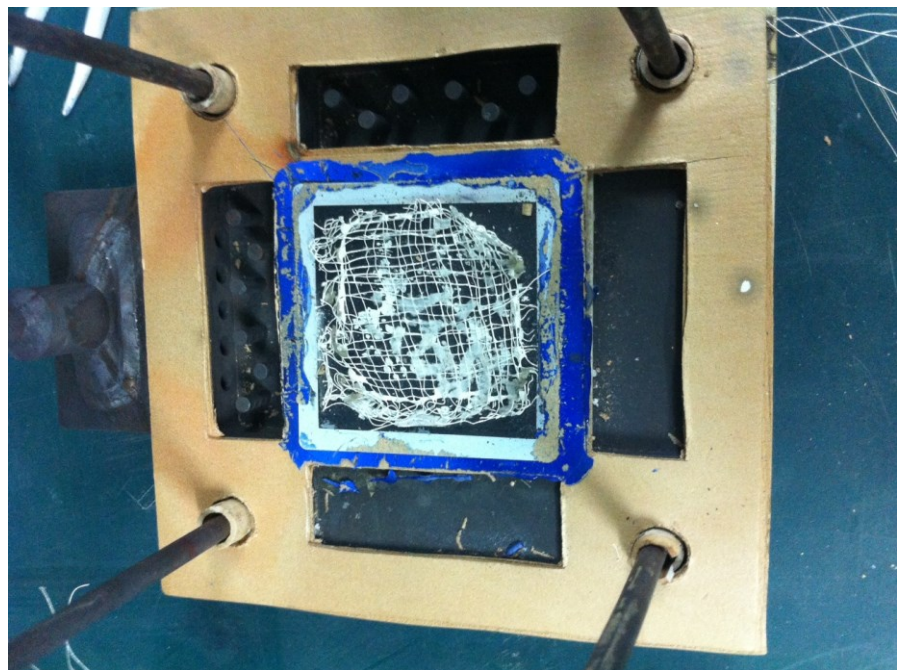
實驗結果如圖六十二所示，平板式電池組II(+)-單電池已達2.46 W (~100 mW/cm²)，性能獲得大幅提升。將平板式電池組II(+)-進一步堆疊至五電池組，電壓可達4.55 V而性能僅有5.8 W，原因為雙極板過厚致使電池碎裂外，各個電池不易獲得足夠燃料/氧化劑為性能不如預期主因。



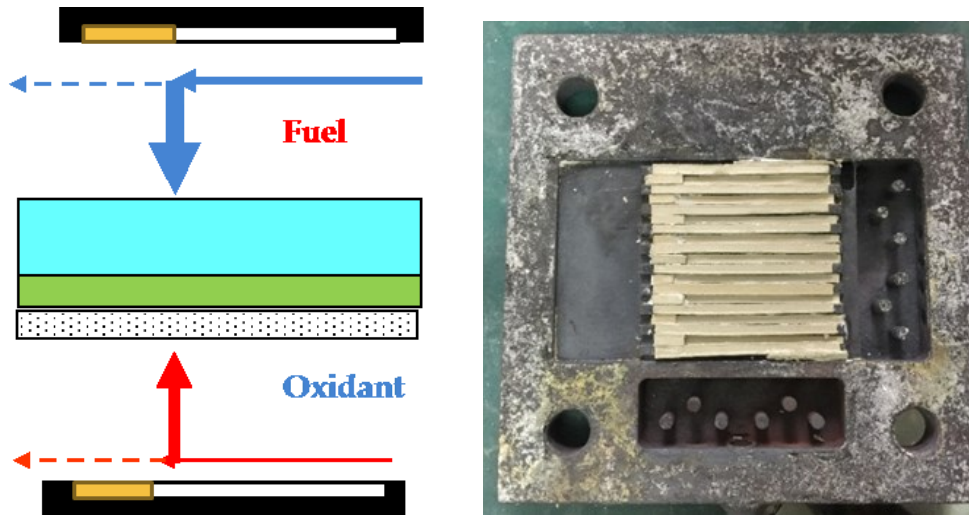
圖五十八、集電網改善（自行商購銀線後編織之銀網）



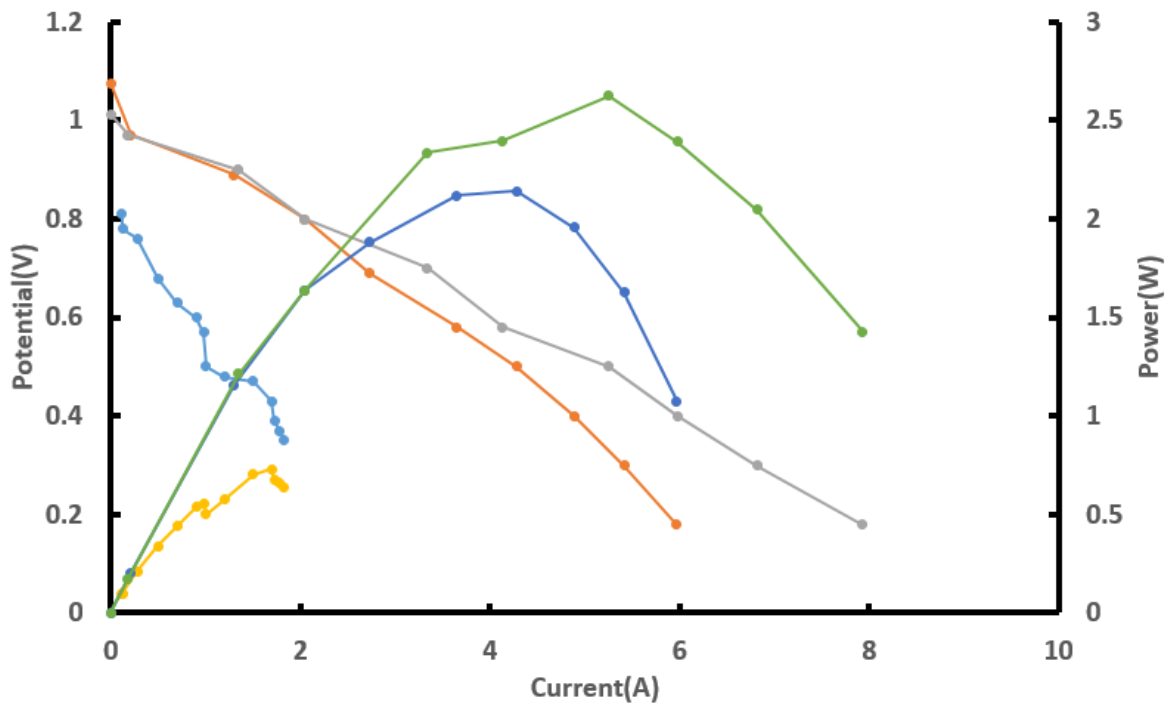
圖五十九、密封材料改善（雲母 + 866）



圖六十、密封材料改善（雲母 + 866 + ESL密封膠）



圖六十一、燃料(Fuel)/氧化劑(Oxidant)垂直導流進入電極



圖六十二、平板式電池組II(+)-單電池特性

表二十三、平板式電池組II(+)-五電池組特性

Parameters	Measurements
Cell Number	5 Cells (3D)
Operating Temperature	750-850 Degree Celsius
Heating time	15 Hours
Activating Time	8 Hours
Constant Voltage	2.09 Volts
Fuel Inflow	3000 cc/min
Oxidant Inflow	3000 cc/min
Maximum OCP	4.55 Volts
Maximum Power	5.816 Watts
Maximum Power Density	46.64 mW/cm Squared
Maximum Current Density	10.23 mA/cm Squared

3.4. 平板式電池堆組技術 (III)

3.4.1 多電池組性能驗證

鑒於鈕扣電池之高發電功率特性($> 200 \text{ mW/cm}^2$)，本計畫將鈕扣電池之測試模組放大為 25cm^2 (平板式電池堆組技術 III) (圖六十三)，以分析此結構下之電池性能。如表二十四所示，移除性能過高(Test 3)與過低(Test 2)測試結果，本新型設計具有 $3\text{-}5 \text{ W/cell}$ 之性能潛力，歸納主因為燃料與氧化劑直達電極表面，另一原因為無傳統雙極版之使用因此減少阻抗發生與電池被壓碎之缺點。

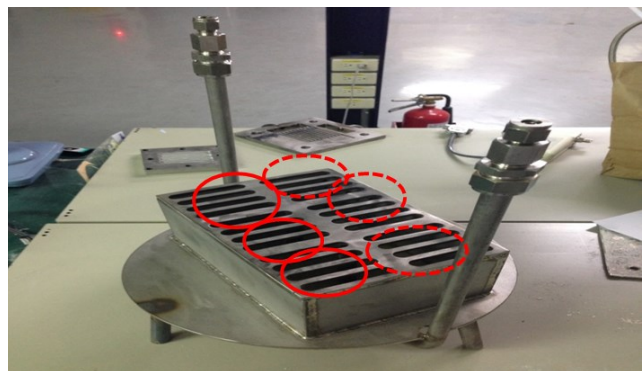
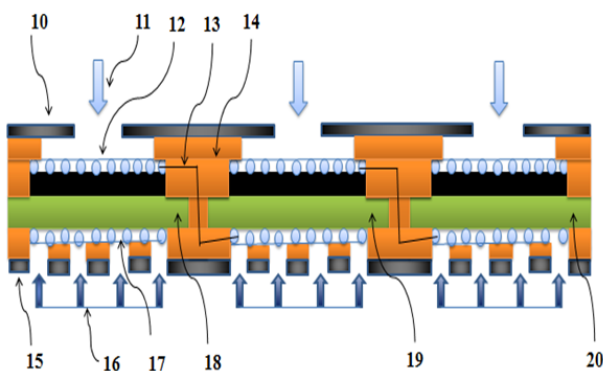


圖六十三、平板式電池組III (組裝流程)

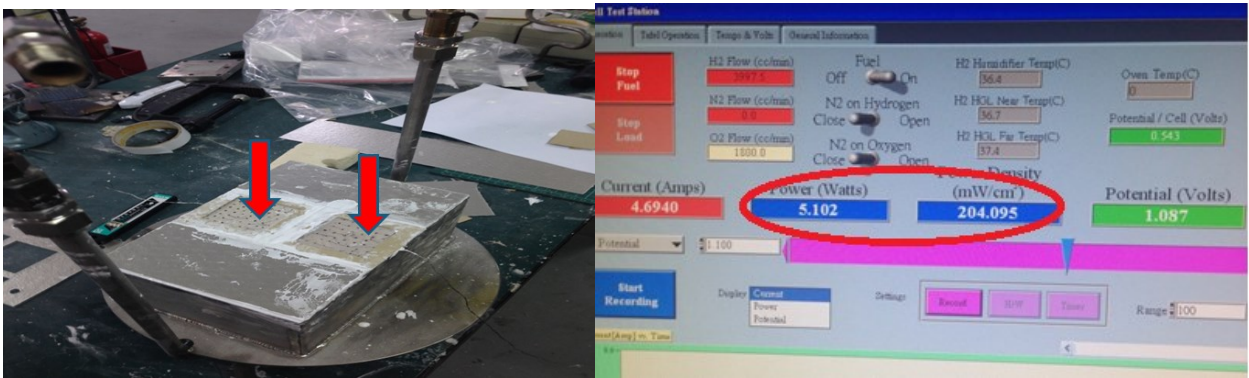
表二十四、平板式電池組III(+)-單電池特性

Number of Test	Test Machine	Flow Rate (cc/min)	Temperature (°C)	Number of Scan	Power (W)
1	A	Max. H ₂ : 800 Max. O ₂ : 1400	850°C	100	6.63
2	A	Max. H ₂ : 800 Max. O ₂ : 1400	850°C	1000	1.914
3	B	Max. H ₂ : 500 Max. O ₂ : 600	850°C	100	11.256
4	B	Max. H ₂ : 500 Max. O ₂ : 600	850°C	1000	3.51
5	B	Max. H ₂ : 500 Max. O ₂ : 600	850°C	1000	2.654

鑒於平板式電池堆組技術 III 高性能潛力致易達成 15-50 W/6-10 cell 之計畫目標，因此本計畫嘗試將平板式電池堆組技術 III 之設計放大為六電池組(圖六十四)，並進行多次電池組裝測試。如圖六十五為置入雙電池之測試結果，於 700°C 操作溫度下，開路電壓 2.15V 且性能達 5.102 W (204 mW/cm²)，明顯高於平板式電池堆組技術 II 且逼近鈕扣電池之性能，初步證實本設計已能克服電池組 II 所面臨之問題 (一、燃料與氧化劑無法有效直達電極表面；二、傳統雙極版增加阻抗與電池壓碎)。

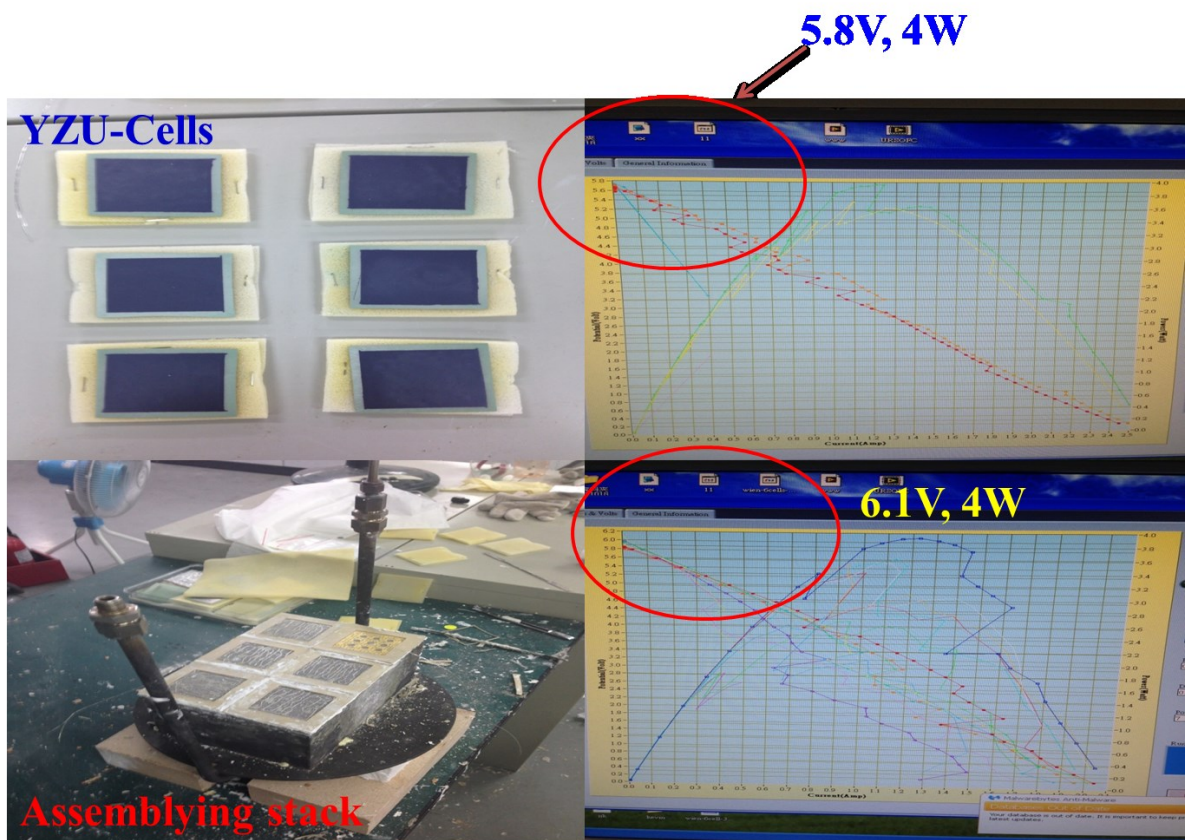


圖六十四、平板式電池堆組技術 III (左: 設計藍圖；右: 實際電池組)



圖六十五、平板式電池堆組技術 III 之雙電池測試

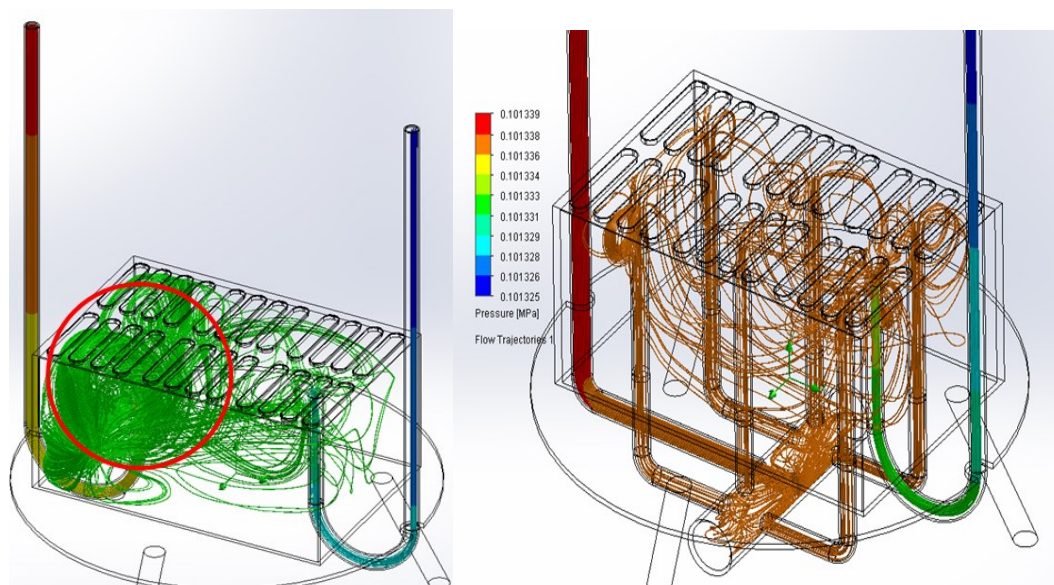
本計畫進一步將平板式電池堆組技術 III 之置入六電池(自製)並進行兩次電池組裝測試。如圖六十六所示，於700°C操作溫度下，開路電壓可達5.8V與6.1V然性能僅有達4 W (0.026 mW/cm²)，明顯低於單電池與雙電池之性能，初步歸因於本設計所面臨問題為燃料與氧化劑僅能直達部分電池之電極表面，並無法擴及所有電池表面。



圖六十六、平板式電池堆組技術 III之六電池測試

3.4.2 平板式電池堆組技術 (III+) -燃料進口分流模擬與改善

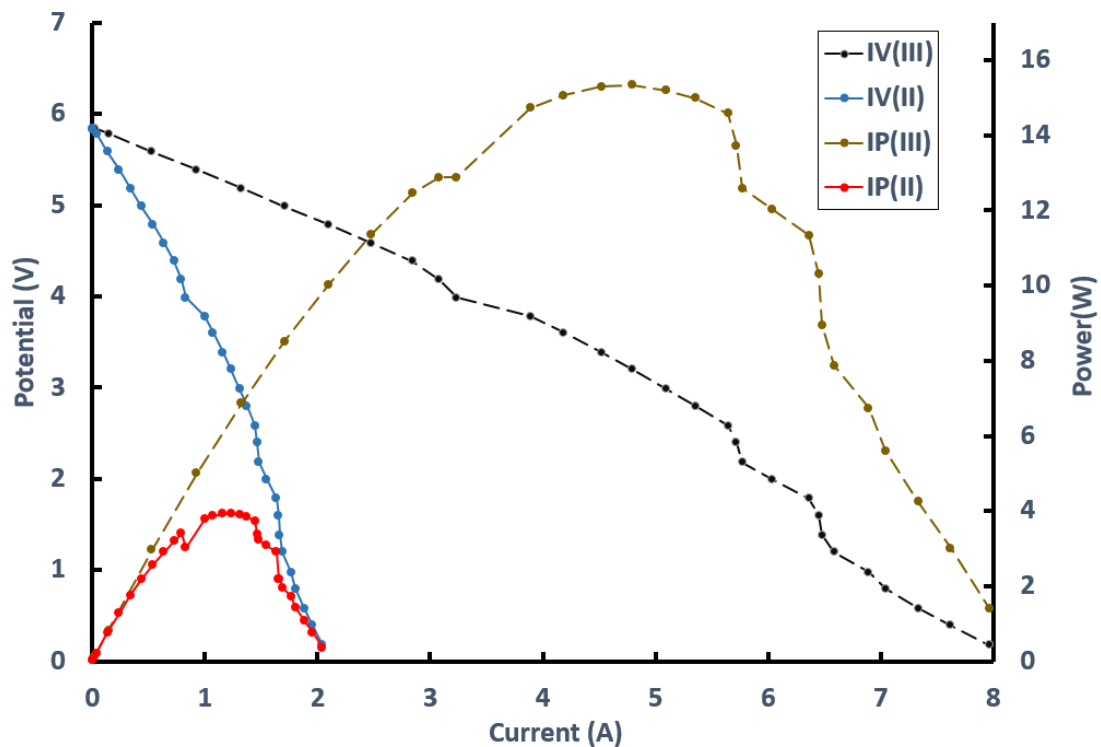
平板式電池堆組技術 III 之原始燃料進口設計中，採取單一燃料進口，利用氣體擴散至整個陽極端燃料室來平均給予電池燃料。然因實驗中使用的氣體流量都不足以產生足夠的壓力，以至於燃料供給於多個電池時將無法均勻分配，且多集中於出口處(圖六十七左)。本計畫因此於燃料進口做了變更，由原本的單一入口靠擴散方式改為六個入口平均分配燃料氣體給予電池，且在燃料模擬分布實驗中上有明顯的改善(圖六十七右)，改良設計後之電池命名為平板式電池堆組 III+。



圖六十七、平板式電池堆組技術 III 之燃料分布模擬圖(左:改善前；右：改善後)

3.4.3 平板式電池堆組技術 (III+) -六電池組性能驗證

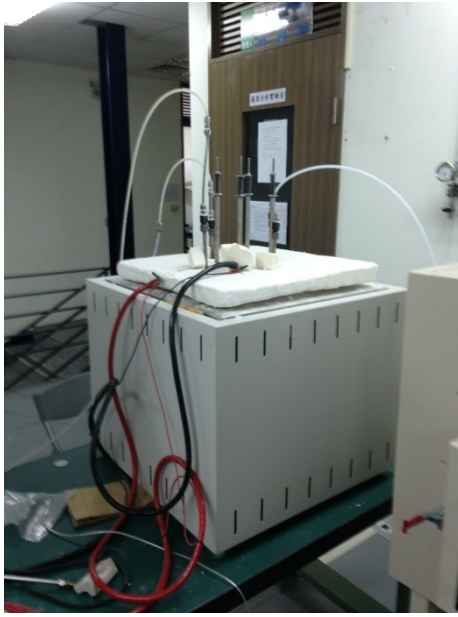
根據分流理論，本計畫將六電池(自製)置入平板式電池堆組技術 III+之置入進行電池組裝測試。如圖六十八所示，於700°C操作溫度下，燃料分布改善前後之開路電壓約為6.0V，且性能分別為9.1W與達16.1 W，改善後之性能優於改善前77%，初步證實燃料/氧化劑無法均到達電池電極表面之問題已獲得改善，並達計畫目標(15-50 W/6-10 cell)。



圖六十八、平板式電池堆組技術 III 之六電池性性能(IV/IP:改善前；
IV(NEW)/IP(NEW)：改善後)

3.5 固態氧化物燃料電池測試系統之建立

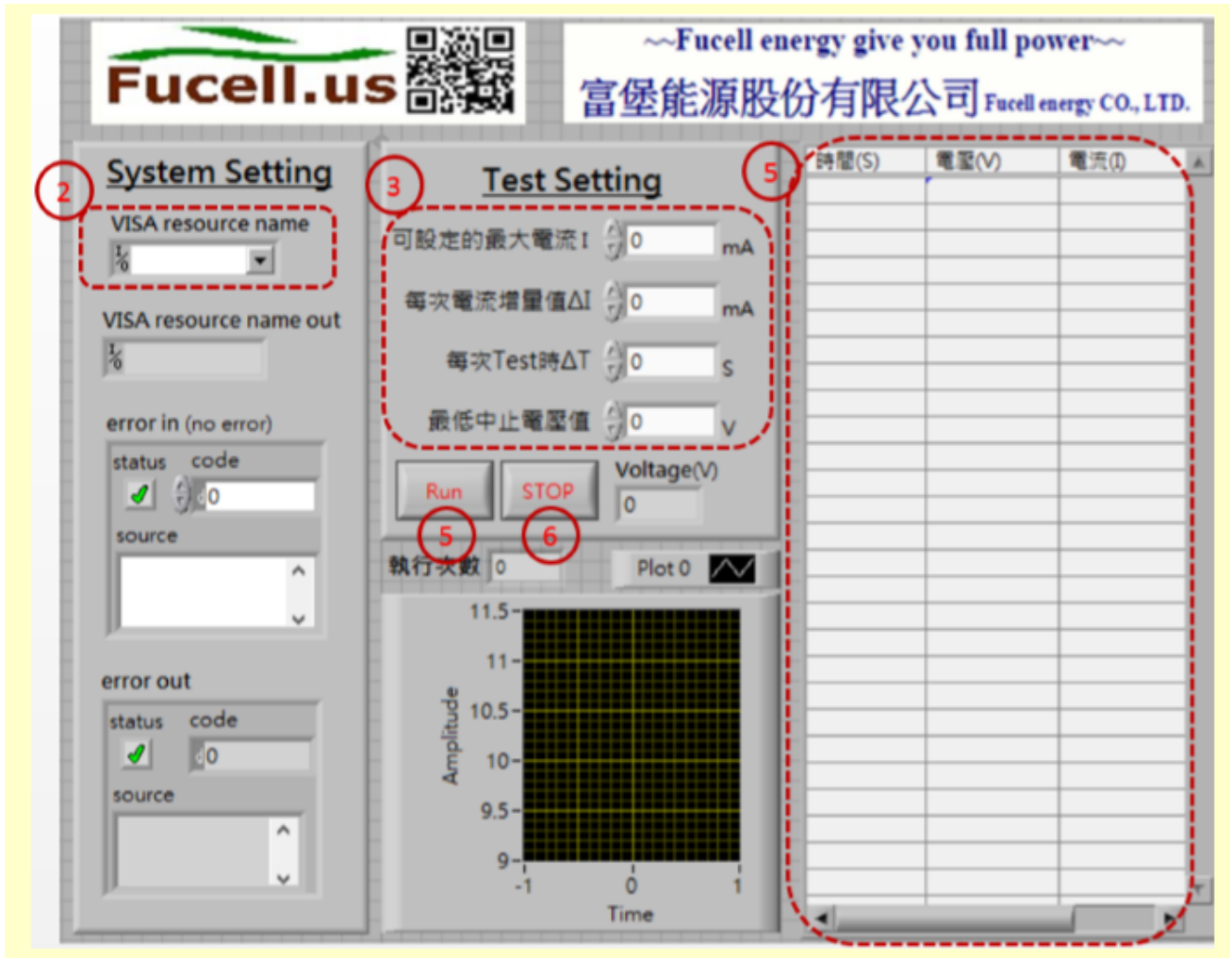
本節以 3.3 之短電池堆成果為核心，搭配 a. 空氣(/氫氣)進料裝置、b. 電壓電流負載與 c. 電腦系統即時監測等設計製作 15~50 W 固態氧化物燃料電池測試系統。本成果可擴充為未來建構(次)kW 級 SOFC 系統之基礎。如圖六十九所示，本系統分為兩大部分：(1)電池組暨高溫爐；(2)開放電池測試系統。鑒於目前國內外測試驗證系統之複雜性與不易自行維修等特點，開放電池測試系統包含之三部分(a. 流量控制器模組、b. 電流電壓電子負載模組、與 c. 電腦系統即時監測記錄)，除 a. 流量控制器模組為根據系統所需選配適當流量計外，b 與 c 皆為市面成熟技術，可靠度方面並無疑慮。



圖六十九、固態氧化物燃料電池測試系統:(左)
電池組暨高溫爐;(右)開放式電池測試系統

3.5.1 開放式電池測試系統之操作步驟

1. 打開電腦系統即時監控記錄，點選 FUCELL TEST SYSTEM (開啟後圖七十)
2. 於 VISA resource name 下拉按鈕內選擇 USB Port 對應編號
3. 設定想測試的最大電流量與每次電流增量值 ΔI / 增量測試的時間 ΔT 以及最低終止電壓值。(系統會由 0mA 依每次電流增量值與測試時間增加到最大電流設定值: 若測試期間電壓小於最低終止電壓值，則系統會停止測試)
4. 設定 a. 流量控制模組 H₂ 及 Air 的流量 (外接實體手動控制, 詳 3.5.2)
5. 執行 Run 測試，相關的數據會自動列表紀錄
6. 若要結束則按壓 STOP 來停止測試



圖七十、電腦系統即時監控記錄開啟後使用畫面

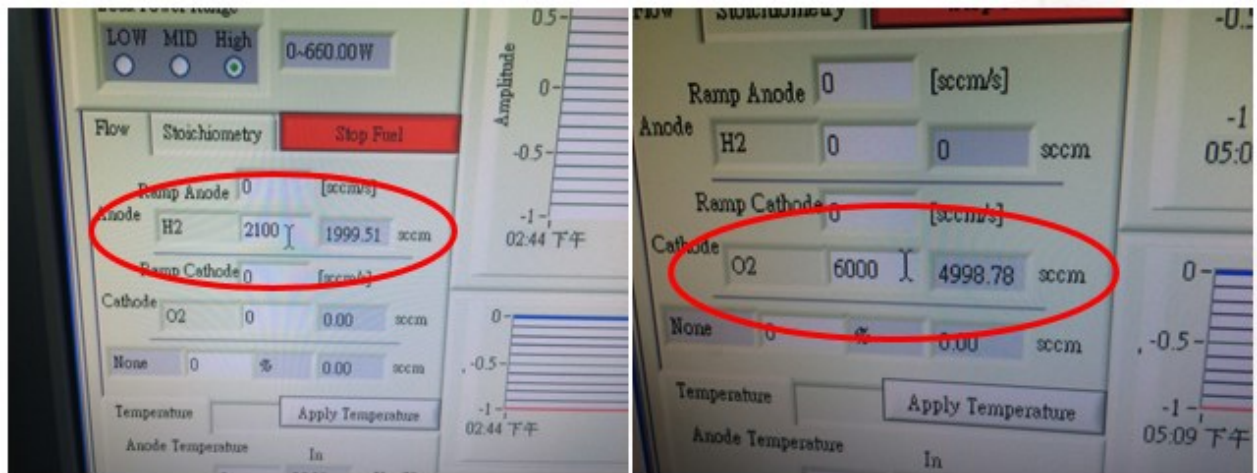
3.5.2 流量控制器模組之驗證

本流量控制器模組的每個浮子下方均有一個旋鈕，與水龍頭方向相同，當逆時針轉開時，流量變大，順時針旋緊流量變少，至於目前的流量就直接看浮子所在的位置所顯示的流量即可



圖七十一、流量控制器模組外觀

本電腦系統即時監控記錄非常簡單易用，流量的部分單純用手動浮球流量調整器調整流量。為瞭解 a. 流量控制器模組之最大流量是否與其標示相吻合，本研究透過排水集氣法測試得知：氫氣最大出氣量為 2000sccm，氧氣最大出氣量為 5000sccm，與標示之流量吻合。作法如下：氣體流量檢測實驗，使用器材水箱及十公升水桶，在流量 5000sccm 時在約兩分零三秒時將容器灌滿，證實實際出口流量相當正確。



圖七十二、流量測試

3.5.3 電子負載模組之驗證

本研究採用的電子負載為 Prodigit、規格為 電壓 0~60V、電流: 0~60A、功率: 0~300W (圖五十九)。本組已經整合了 USB 連線模組 可直接連線到隨機的筆記型電腦上。(本電子負載本身的使用方法 可參考原廠說明書)



圖七十三、電子負載模組

第四章 總結論

本計畫『固態氧化物燃料電池多層電池堆研製及其測試系統建置』，已完成之技術/指標如下：

(一) 平板式陽極支撐型 SOFC 單元電池研製：

- 1.1 完成小尺寸鈕扣圓形電池(直徑~ 3 cm)研製與測試:燒結品質已達國際水準，若陰極進料為空氣，性能最佳為 251 mW/cm^2 ，若是採用氧氣取代空氣，因為擴散限制問題減緩，則性能可到達 306 mW/cm^2 。
- 1.2 完成標準 SOFC 單元電池($5 \times 5 \text{ cm}^2$)研製與測試：燒結品質已達國際水準，藉由自製銀網取代以往之黃金片，因為接觸阻抗之大幅降低，性能得以突破 100 mW/cm^2 。

(二) 研製 $5 \times 5 \text{ cm}^2$ 平板式 SOFC 多層電池堆關鍵技術：

- 2.1 完成連接極之研製: 藉由氧化物塗層 LSM 之使用，不鏽鋼連接極之阻值不因高溫長時間運作而上升，且阻值低於 $0.04 \text{ } \Omega \text{ cm}^2$ ($<0.05 \text{ } \Omega \text{ cm}^2$)。
- 2.2 完成密封材料之選用: 完成多種材料之測試分析評估。相較於單一材料之使用，高溫密封膠與陶瓷材料(電池)之優良接合性，搭配雲母使用將可產生最佳之氣密效果。
- 2.3 完成平板式 SOFC 多層電池堆技術: 藉由燃料直接噴入陽極表面之創新設計，電池組性能明顯改善而達預定目標(達 16.1 W/6cell)
- 2.4 完成固態氧化物燃料電池測試系統之建立：本計畫開放式電池測試系統免除傳統測試驗證系統之複雜性與不易自行維修等特點。

本計畫產生之成果，台電與元智大學共同發表二篇 SCI 期刊論文、五篇國際會議論文並提出一份專利文稿(附件一)，除完成相關技術指標項目外，可作為本公司對於 SOFC 關鍵元件的技術布局。。

第五章 參考文獻

1. D.A. Medvedev , J.G. Lyagaeva , E.V. Gorbova , A.K. Demin, P. Tsiakaras, Advanced materials for SOFC application: Strategies for the development of highly conductive and stable solid oxide proton electrolytes, (2015).
2. N. Q. Minh, Ceramic fuel cells, Journal of the American Ceramic Society, **76**, pp. 563-588 (1993).
3. Shaofei He , Shiru Le , Lili Guan , Tao Liu , Kening Sun, Bismuth and niobium co-doped barium cobalt oxide as a promising cathode material for intermediate temperature solid oxide fuel cells(2015).
4. V. Thangadurai and W. Weppner, Studies on electrical properties of $\text{La}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{Mg}_{0.2}\text{O}_{2.80}$ (LSGM) and LSGM-SrSn_{1-x}Fe_xO₃ (x = 0.8; 0.9) composites and their chemical reactivity, Electrochimica Acta, **50**, pp. 1871-1877 (2005).
5. H. Y. Tu, Y. Takeda, N. Imanishi and O. Yamamoto, Ln_{0.4}Sr_{0.6}Co_{0.8}Fe_{0.2}O_{3-δ} (Ln=La, Pr, Nd, Sm, Gd) for the electrode in solid oxide fuel cells, Solid State Ionics, **117**, pp. 277-281 (1999).
6. T. L. Wen, D. Wang, M. Chen, H. Tu, Z. Lu, Z. Zhang, H. Nie and W. Huang, Material research for planar SOFC stack, Solid State Ionics, **148**, pp. 513-519 (2002).
7. W. Winkler, J. Koeppen. Design and operation of interconnectors for solid oxide fuel cell stacks, Journal of Power Sources (1999).
8. S. C. Singhal and K. Kendall, High temperature solid oxide fuel cells: fundamentals, design and applications, Elsevier Ltd, (2003).
9. N. Lahl, D. Bahadur, K. Singh, L. Singheiser, and K. Hilpert, Chemical interactions between aluminosilicate base sealants and the components on the anode side of solid oxide fuel cells, Journal of The Electrochemical Society, **149**, pp. A607-A614 (2002).
10. Joonguen Park , Peiwen Li , Joongmyeon Bae, Analysis of chemical,

electrochemical reactions and thermo-fluid flow in methane-feed internal reforming SOFCs:Part II-temperature effect. International Journal of Hydrogen Energy(2012).

附件一

SCI期刊論文

1. Guo-Bin Jung, Li-Hsing Fang, Cheng-You Lin, Jyun-Wei Yu, Shih-Hung Chan, Win-Tai Lee, Shu-Wei Chang, I-Cheng Kao, “Electrochemical Performance and Long-Term Durability of a Reversible Solid Oxide Fuel Cell,” *International Journal of Electrochemical Science*, Vol. 10, pp. 9089-9104 (2015) (SCI impact factor 1.50, Rank 21 of 28 in Electrochemistry)
2. Guo-Bin Jung, Li-Hsing Fang, Min-Jay Chiou, Xuan-Vien Nguyen, Ay Su, Win-Tai Lee, Shu-Wei Chang, I-Cheng Kao, Jyun-Wei Yu, “Effects of Pretreatment Methods on Electrodes and SOFC Performance”, *Energies*, Vol. 7, pp. 3922-3933 (2014) (SCI impact factor 1.602, Rank 43 of 82 in Energy & Fuels)

國際會議論文

1. Guo-Bin Jung, Li-Hsing Fang, Cheng-You Lin, Xuan-Vien Nguyen, Wilson Chao-Wei Huang, Kai-Jung Hsiao, Win-Tai Lee, Shu-Wei Chang, I-Cheng Kao “Study of Reversible Solid Oxide Fuel Cell with Different Oxygen Electrode Materials,” 2015 APEC Conference and Short-term Training Course on Promoting Innovative and High Value-added Bio-product Production Technologies for Sustainable Development & 2015 Asia Biohydrogen and Biorefinery Symposium, pp. na – na, 2015/09
2. Xuan-Vien Nguyen, Guo-Bin Jung, Wilson Chao-Wei Huang, Kai-Jung Hsiao, Win-Tai Lee, Shu-Wei Chang, I-Cheng Kao “Design and Fabrication of 2D SOFC Stack with Planar 5cm×5cm Anode-Supported Cells,” 2015 APEC Conference and Short-term Training Course on Promoting Innovative and High Value-added Bio-product Production Technologies for Sustainable Development & 2015 Asia Biohydrogen and Biorefinery Symposium, pp. na – na, 2015/09

3. Xuan-Vien Nguyen, Guo-Bin Jung, Wilson Chao-Wei Huang, Kai-Jung Hsiao, Win-Tai Lee, Shu-Wei Chang, I-Cheng Kao “Effects of Firing Temperatures and Compressive Loads on Anode-Supported Electrolyte and Cathode Surfaces of Anode-supported Cells for Solid Oxide Fuel Cell,” 2015 APEC Conference and Short-term Training Course on Promoting Innovative and High Value-added Bio-product Production Technologies for Sustainable Development & 2015 Asia Biohydrogen and Biorefinery Symposium, pp. na – na, 2015/09
4. Xuan-Vien Nguyen, Guo-Bin Jung, Wilson Chao-Wei Huang, Kai-Jung Hsiao, Win-Tai Lee, Shu-Wei Chang, I-Cheng Kao “Study of Sealants for SOFC,” 2015 APEC Conference and Short-term Training Course on Promoting Innovative and High Value-added Bio-product Production Technologies for Sustainable Development & 2015 Asia Biohydrogen and Biorefinery Symposium, pp. na – na, 2015/09
5. Wilson Chao-Wei Huang, Guo-Bin Jung, Xuan-Vien Nguyen, Kai-Jung Hsiao, Win-Tai Lee, Shu-Wei Chang, I-Cheng Kao “The Impact of the Contact Area of Current Collectors, Coatings of Interconnects and Flow Field Design of the Apparatus on the Performance of Solid Oxide Fuel Cells,” 2015 APEC Conference and Short-term Training Course on Promoting Innovative and High Value-added Bio-product Production Technologies for Sustainable Development & 2015 Asia Biohydrogen and Biorefinery Symposium, pp. na – na, 2015/09

專利初稿：固態氧化物燃料電池之連接板

【發明摘要】

【中文發明名稱】 固態氧化物燃料電池之連接板

【英文發明名稱】 INTERCONNECT FOR SOLID OXIDE FUEL CELL

【中文】

一種固態氧化物燃料電池之連接板，該連接板之至少其中一側包含有至少一進氣口，設於該連接板之一側端，至少一排氣口，設於連接板之另一側端，介於該進氣口與該排氣口之間之該連接板定義一流道區，複數個分流壁，具有一壁高並且分別設於流道區中，該複數個分流壁係相互平行排列，該些分流壁之間定義出複數個氣體通道，而該氣體通道具有一流道寬，以及至少一導流肋，分別設於至少一氣體通道中，而氣體通道中係配置有至少一導流肋，其中導流肋係具有一配置長度與一配置高度，該配置長度係小於該分流壁之長度，該配置高度與該分流壁的壁高之間具有一高度比例，該高度比例係為壁高：配置高度=1：0.1~0.9，而該導流肋係設於鄰近該進氣口或該排氣口之該氣體通道中。

【英文】

An interconnect for solid oxide fuel cell is disclosure,

附件二 鈕扣型電池測試夾具組裝操作說明

SOFC鈕扣型測試平台零件對照圖



- ①陶瓷外管 ②陶瓷內管 ③陰極空氣進氣管 ④陰極熱電偶 ⑤陽極集電線網
⑥陽極熱電偶 ⑦陰極熱電偶(備份) ⑧陰極集電線 ⑨石英外套管 ⑩金屬固定外鎖
⑪金屬固定內鎖 ⑫塑膠放置架 ⑬陰極流道板(一個備用) ⑭陶瓷分線器
⑮陽極流道板 ⑯陰極集電網 ⑰固定用白金線

1

夾具清潔須知與耗材尺寸

前言：

整個平台可拆除外部氣體管線，再拿出來拆裝，或不拆氣體管線，直接原位拆裝皆可。

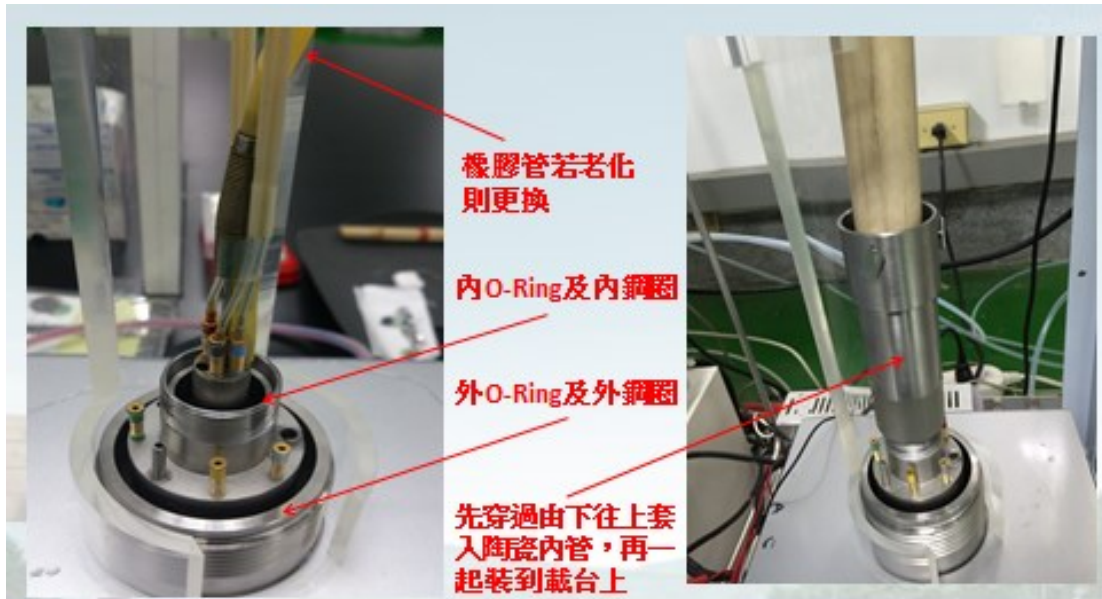
需清潔部分：

- (1)外陶瓷管可能有玻璃環殘留(可能黏在管內周圍)，利用砂紙磨掉。
- (2)內管上放置玻璃圈位置，可能有玻璃環殘留，利用砂紙或拋光機磨掉。
- (3)載台內兩個O-ring-分別封閉內管與外館-需清潔並在塗上一點真空膠。
- (4)用吹球吹掉載台內掉落之玻璃圈碎屑若內有水則擦乾。
- (5)外罩石英玻璃用酒精擦拭清潔。

密封用玻璃圈尺寸：

外徑：24.11mm
內徑：20.30mm
厚度：0.78mm

2

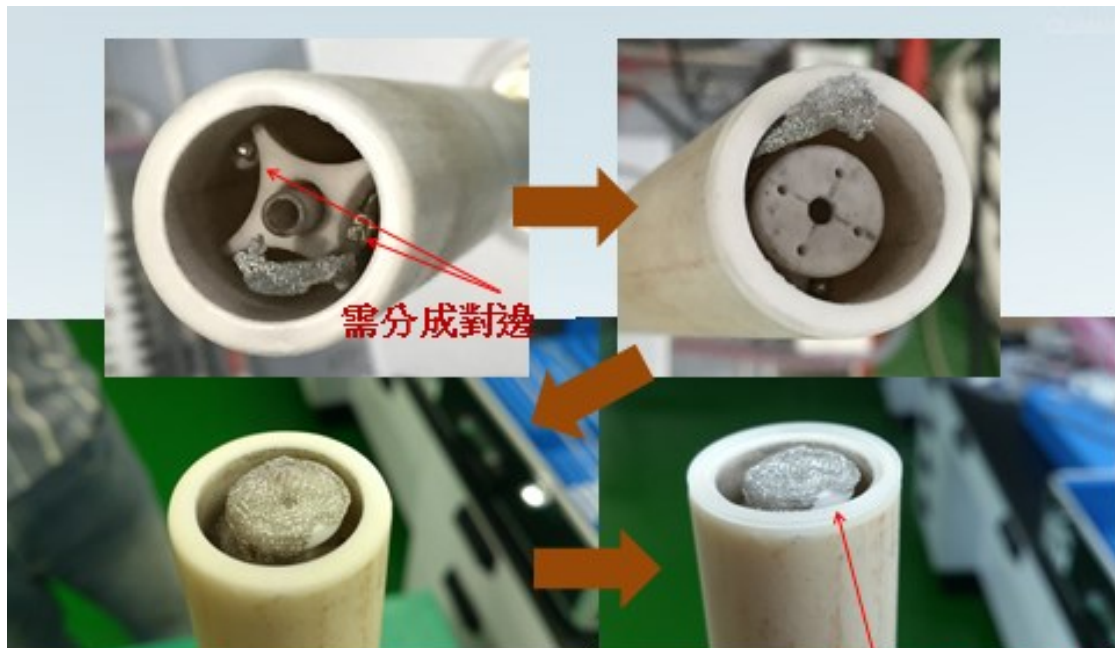


最內層構造(陽極端)-陽極集電線、氫氣進氣管與陽極熱電偶，如圖：

- (1)先組裝內外O-ring(塗真空膠)及內外鋼圈。
- (2)裝上陽極集電線 與陽極熱電偶 氫氣進氣管(通常不會拆)-若老舊則更換套管即可。
- (3)套上內陶瓷管並鎖上，如圖：

Note：由於管上與不鏽鋼連接位置，快乾膠會過厚導致無法以正常拆裝順序裝上，因此建議先將金屬鎖管套上在裝到載台上。

3

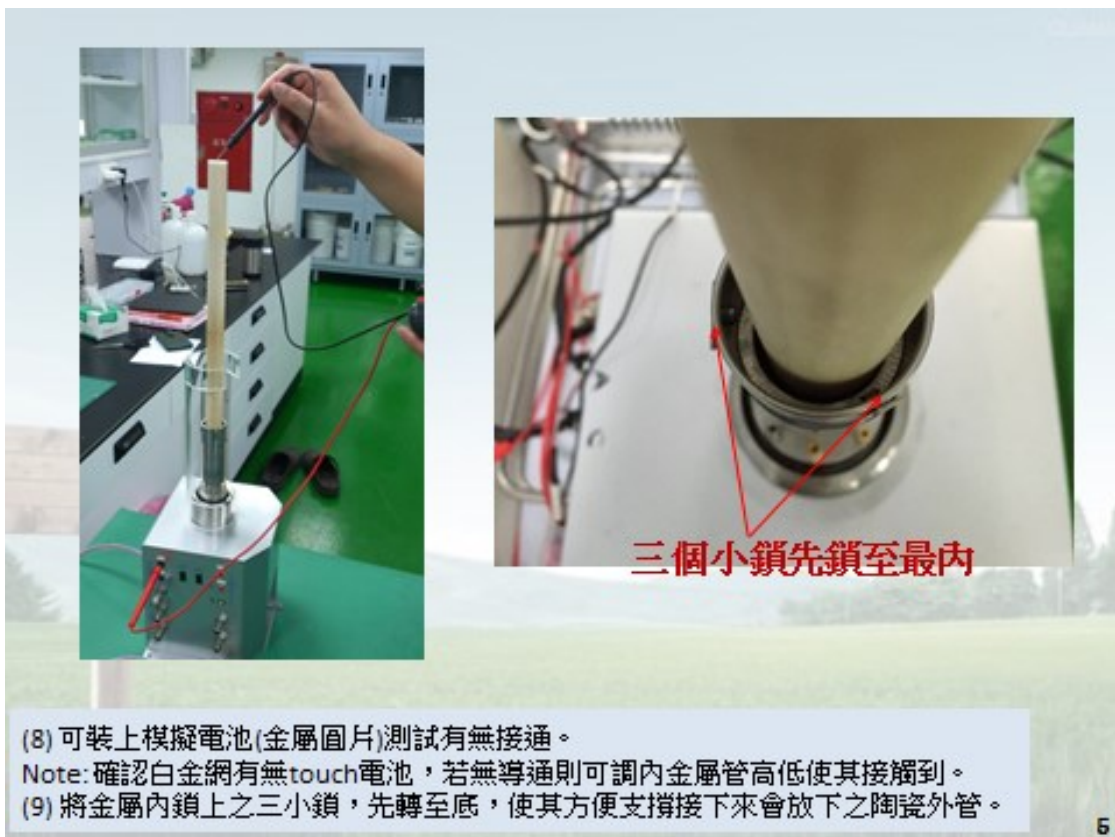
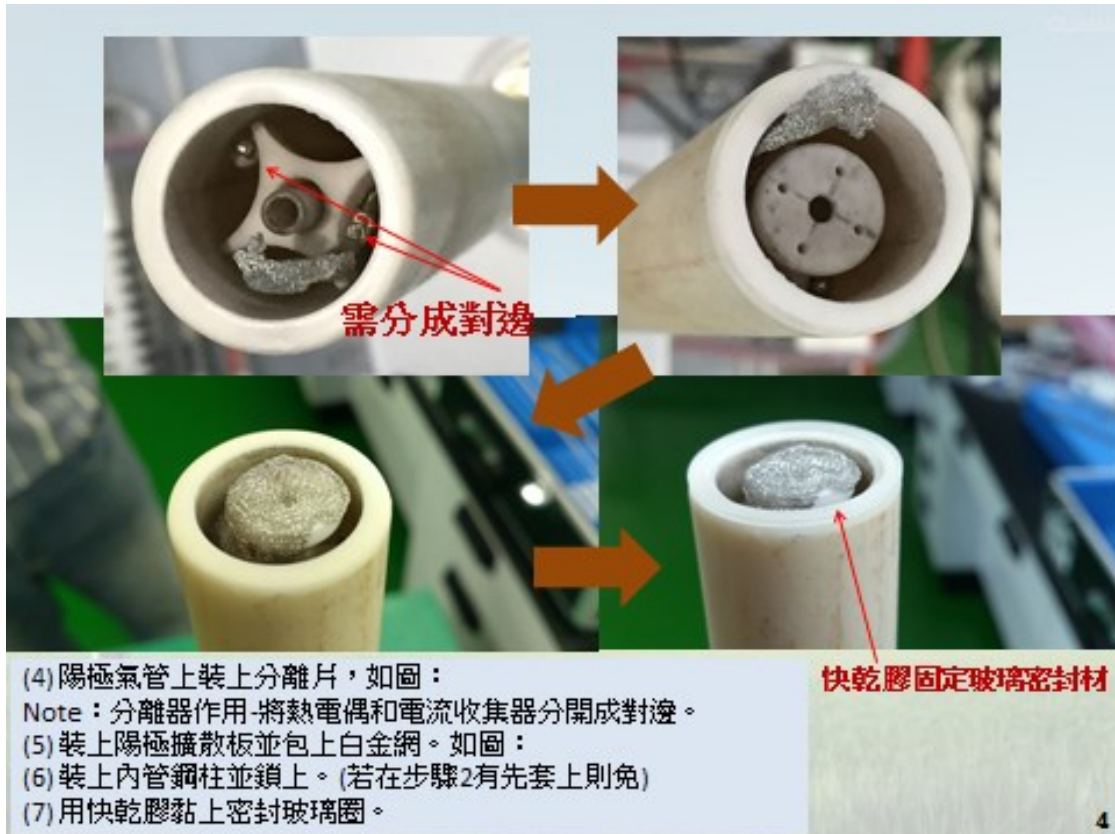


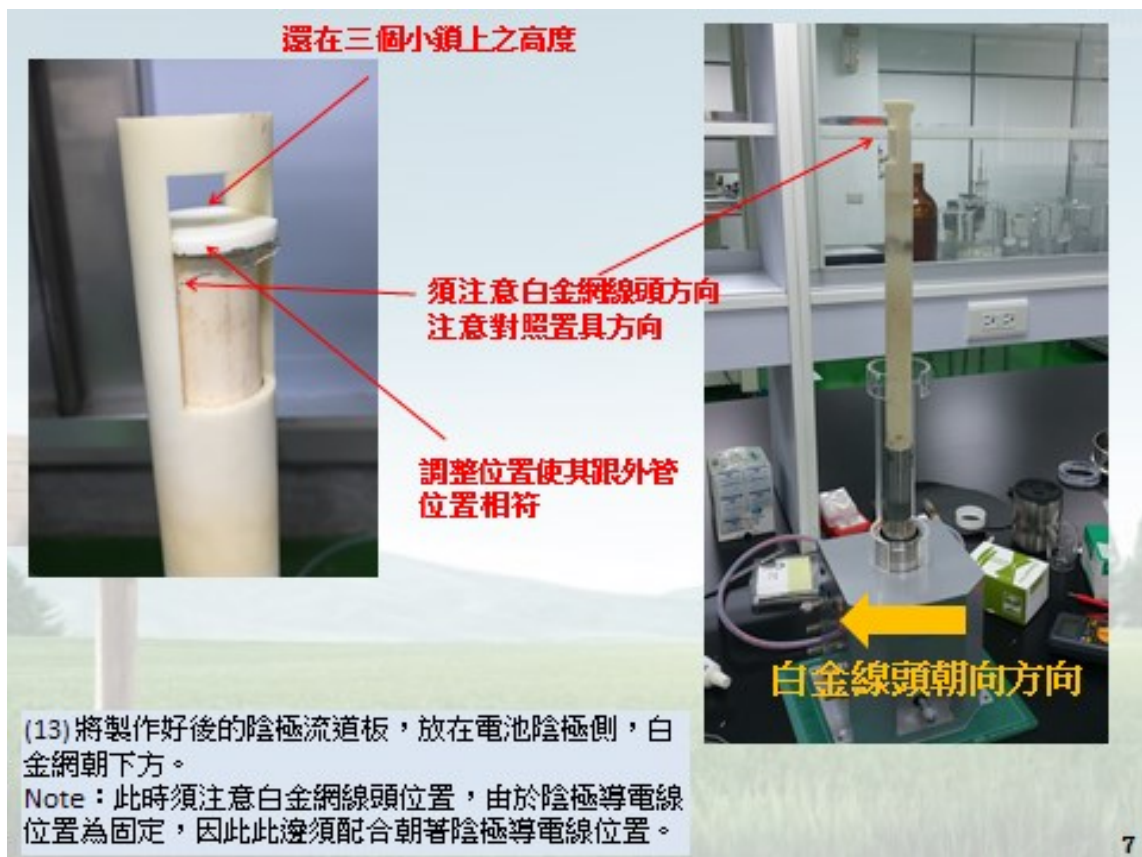
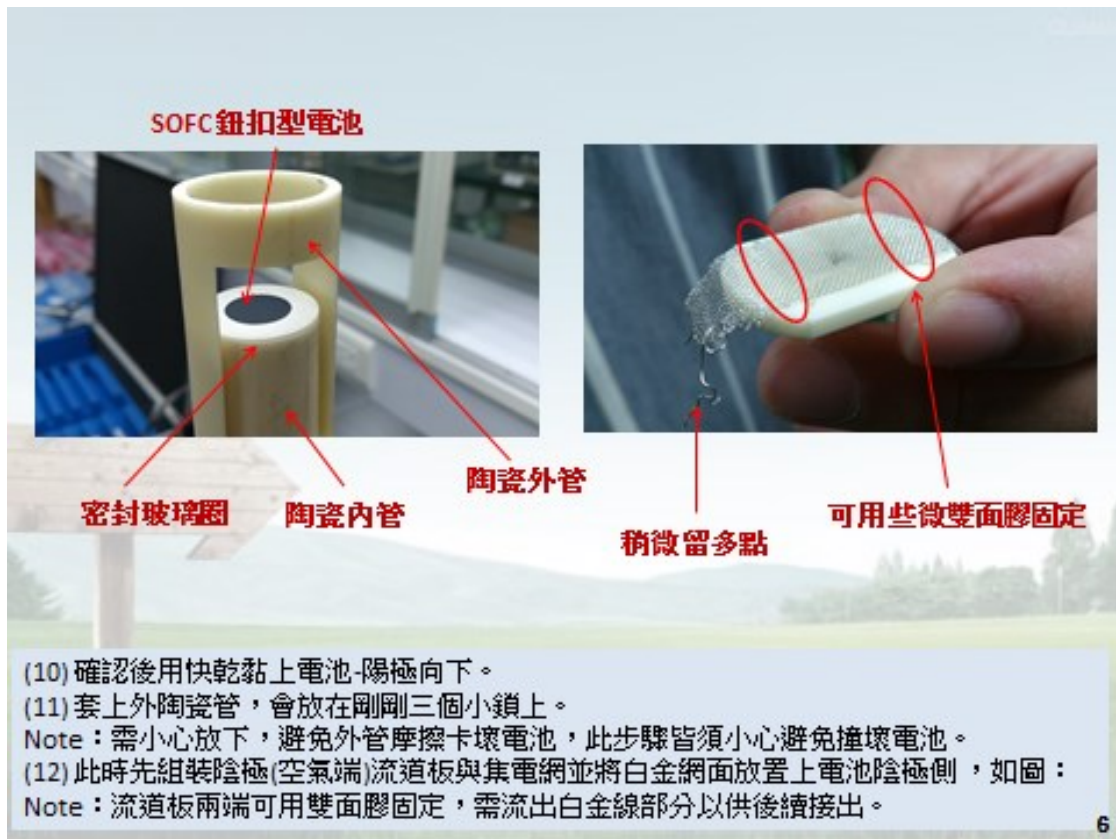
(4)陽極氣管上裝上分離片，如圖：

Note：分離器作用 將熱電偶和電流收集器分開成對邊。

- (5)裝上陽極擴散板並包上白金網。如圖：
- (6)裝上內管鋼柱並鎖上。(若在步驟2有先套上則免)
- (7)用快乾膠黏上密封玻璃圈。

4





降下後之高度

調整位置時，需稍微將外管抬起，再移動流道板位置

(14) 確認後扶住陶瓷外管，並鬆開三個小鎖，慢慢放下陶瓷外管，使其降到底，稍微調整陰極流道板與外陶瓷管位置，使其相符。
 Note：移動陰極流道板時，需稍微拿起來移動，避免磨到電池的陰極。
 (15) 鎖上金屬管並鎖上三個小鎖使其稍微頂到外陶瓷管。
 Note：勿鎖太緊，由於到時玻璃圈融化會使外管下降，若三個小鎖鎖太緊，會使其外管無法下降，到時會使得導電網與電池無接觸到。

8

陰極導電線

陰極參考電極(可接可不接)

陰極熱電偶

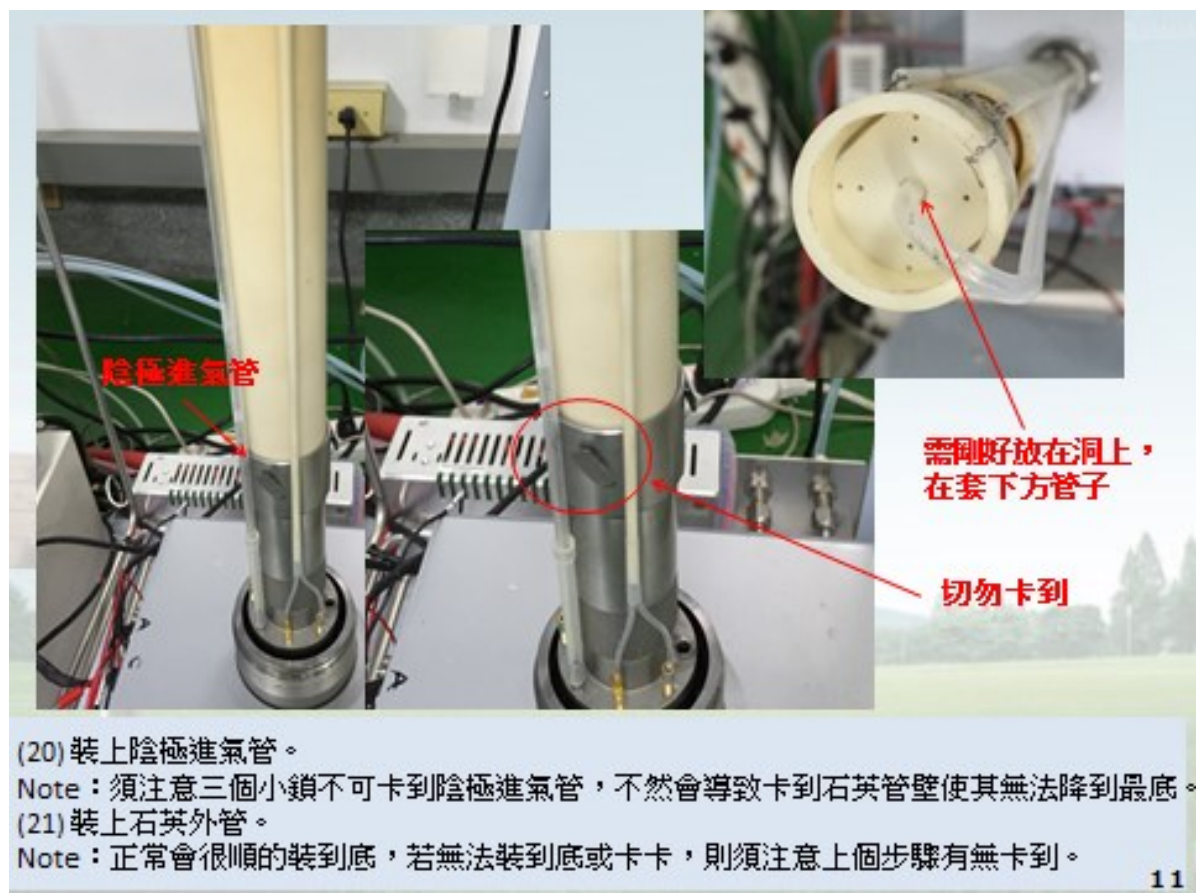
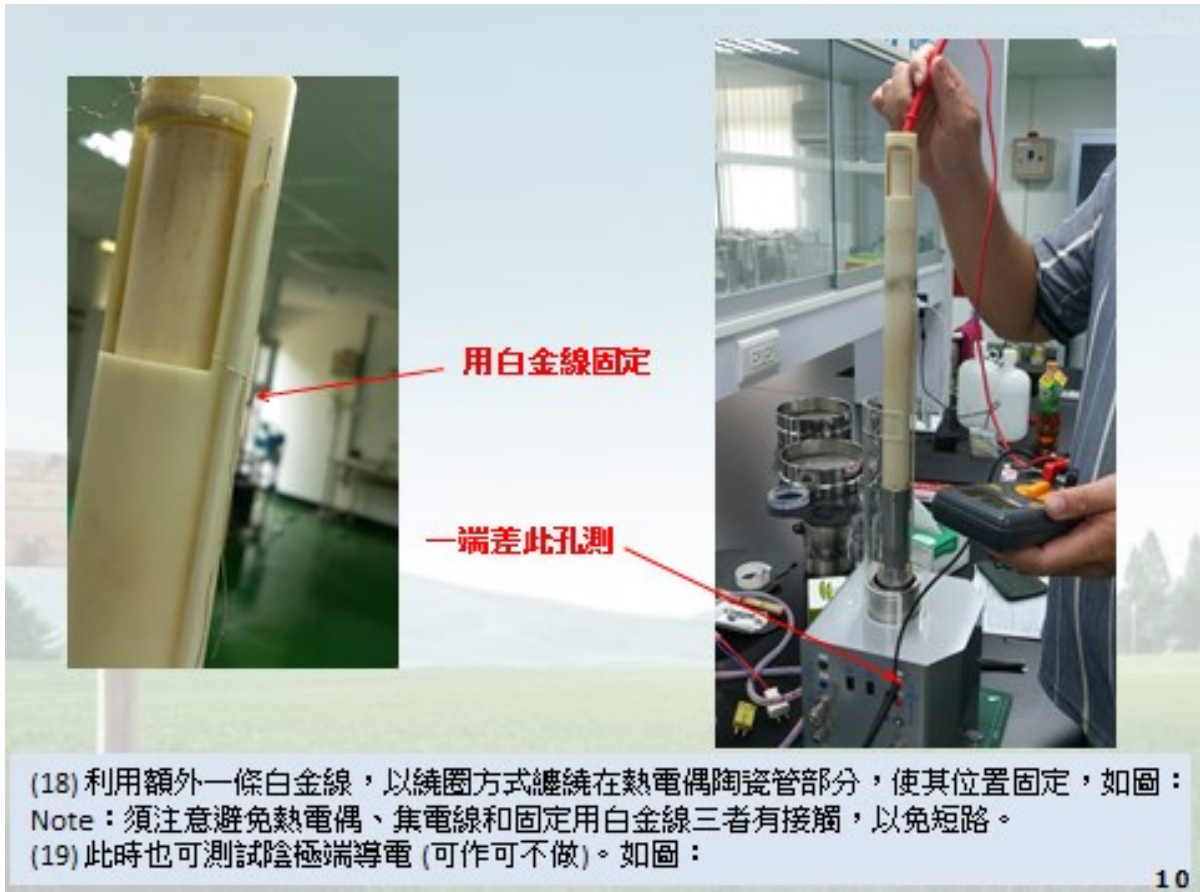
陰極出氣口

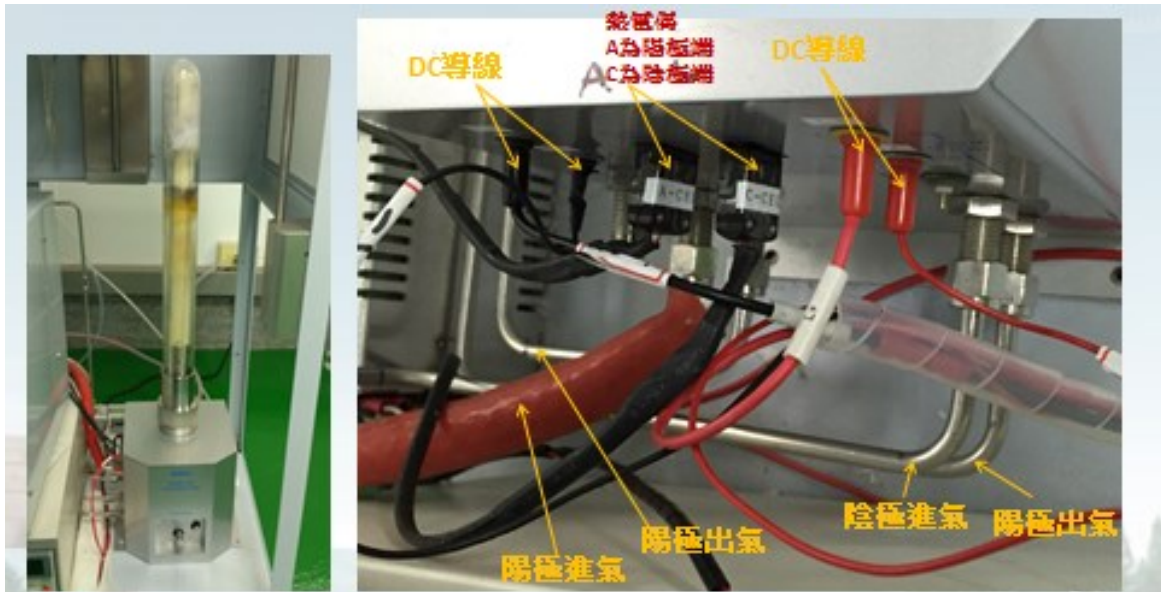
可凹掛在上方固定

可用纏繞方式

陰極部分：含陰極導電線、熱電偶與陰極進氣管，如圖：
 (16) 用鉗子將陰極熱電偶和集電線接上(下方接觸有顏色標記)。
 (17) 將陰極集電線與白金網拉出之線連結，建議已纏繞方式使兩者相接。
 Note：接完可稍微將多出之白金線網向上固定，如圖：

9





(22) 鎖上金屬外鎖。

Note：勿鎖到最緊，避免鎖壞掉。

(23) 將置具小心的放到鐵櫃內(若本來即在櫃內組裝則免)，並接上：

(一) 陰極陽極端之進氣端與出氣端。

(二) 陰陽極熱電偶。

(三) 陰陽極DC導線。

Note：陰極及陽極及其正負號需接正確，AC時正負相反也可。

12



(24) 放下高溫爐，並調整爐內熱電偶位置，避免撞到

Note：熱電偶位置一根在爐內下方，一根在中間，高溫爐正常需降到底，若無法獲卡卡則調整熱電偶位置。

(25) 在高溫爐上方將空隙鋪上高溫棉。

(26) 關上防護罩門，並放上抽氣罩。

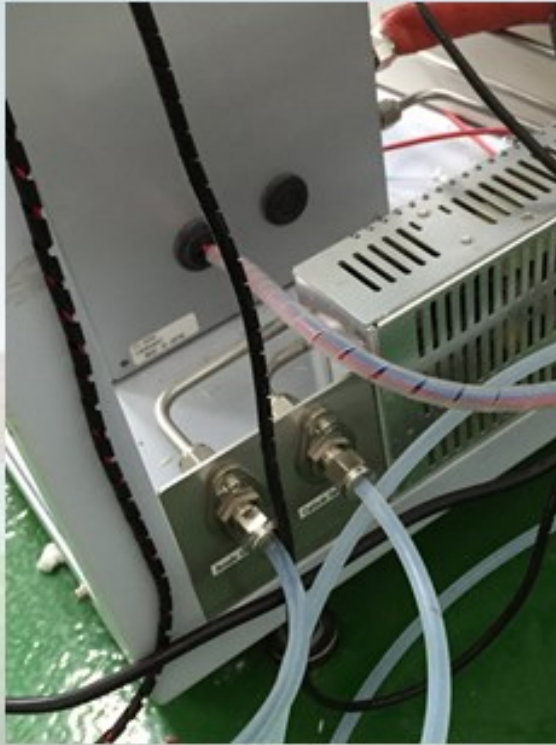
(27) 切記加熱時需按下加熱開關才會加熱。

程式設定完後，記得按加熱開關



13

附件-外部管路接線圖



空氣出口接線(可排至大氣)

氫氣出口接線(需拉管排到室外)

14

附件-外部管路接線圖



空氣入口接線(由控制台拉線過來)

氫氣入口接線(直接從控制台接過來)

15

附件-外部管路接線圖

側面管線圖



附件-外部管路接線圖





18



19

附件三 平板型電池測試夾具組裝操作說明

材料規格

集電體

陽極用，發泡鎳，100x150 厚度 0.6mm

陰極用，白金網，50x40 厚度 0.12mm

陰極用，銀網，40x40 厚度 0.15mm

集電線

電流用，Pt ϕ 1.0，長度400mm

電流用，Pt ϕ 0.5，長度400mm

電壓用，Pt ϕ 0.3，長度400mm

熱電偶，R-type， ϕ 0.5mm 長度400mm

注意事項

- (1) 量測之電池切勿比夾具還大(意思即盡量尺寸=5x5CM²)，且電池平整度盡量為0%。
- (2) 夾具升降溫速度盡量小於1oC/min，且勿超過2oC/min
- (3) 框狀密封材料每次都需更換，雙孔型約可使用2,3次。

夾具之清潔

- (1) 集電線若有沾附發泡鎳或LSM，可用砂紙略為磨除掉。
- (2) 若夾具或流道板有太多發泡鎳等粉末沾黏，可用水沖掉，並在放入烘箱烘乾即可。

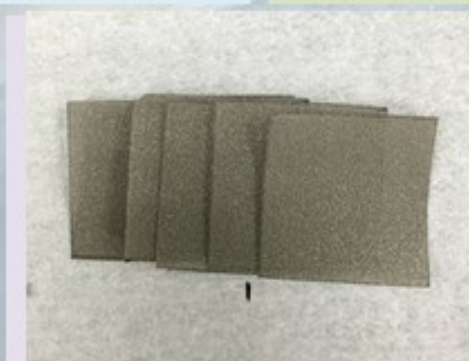
集電網準備



(1) 陽極集電網-發泡鎳
若有發泡銀用於陰極，裁法相同。



(2) 裁成約4x4cm大小，以及能裝在密封材內(符合電極面積)。



(3) 裁剪完成如圖



密封材料之製作

分別有兩種，一種為框形，一種為雙孔型，後續有詳細圖型。

剪裁Thermal 866至適當大小，再利用小型沖床裁壓。

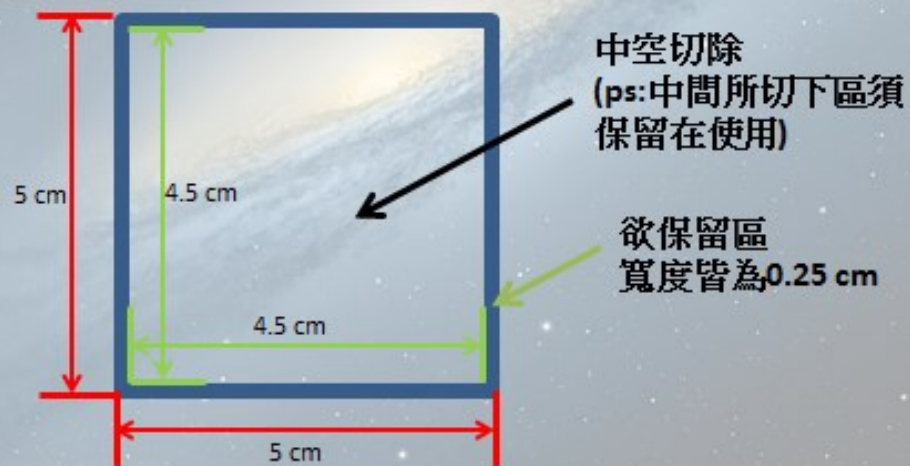
Note:有兩種模具，裁完框形的後，中間剩下之正方形可用來再製作雙孔型密封材料。

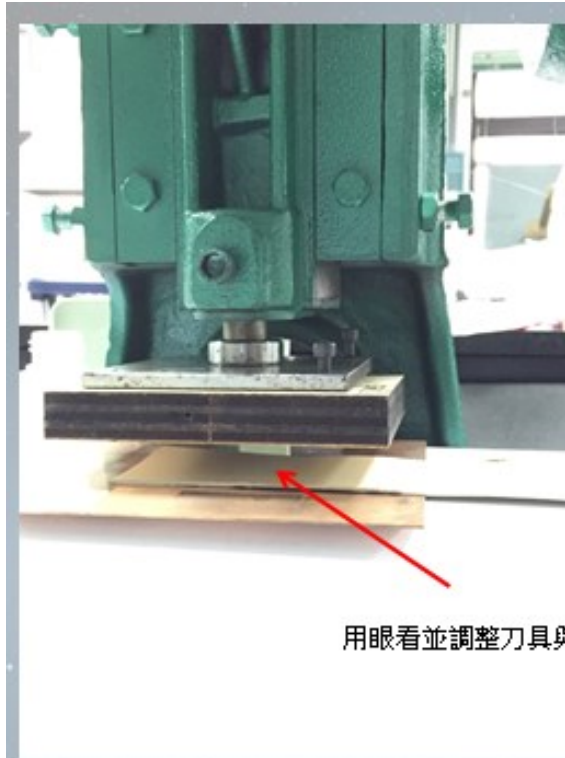
Note:底部需墊高，且下方墊物須小心選用，避免模具上之刀具損壞。



框形密封材料規格

正方外框





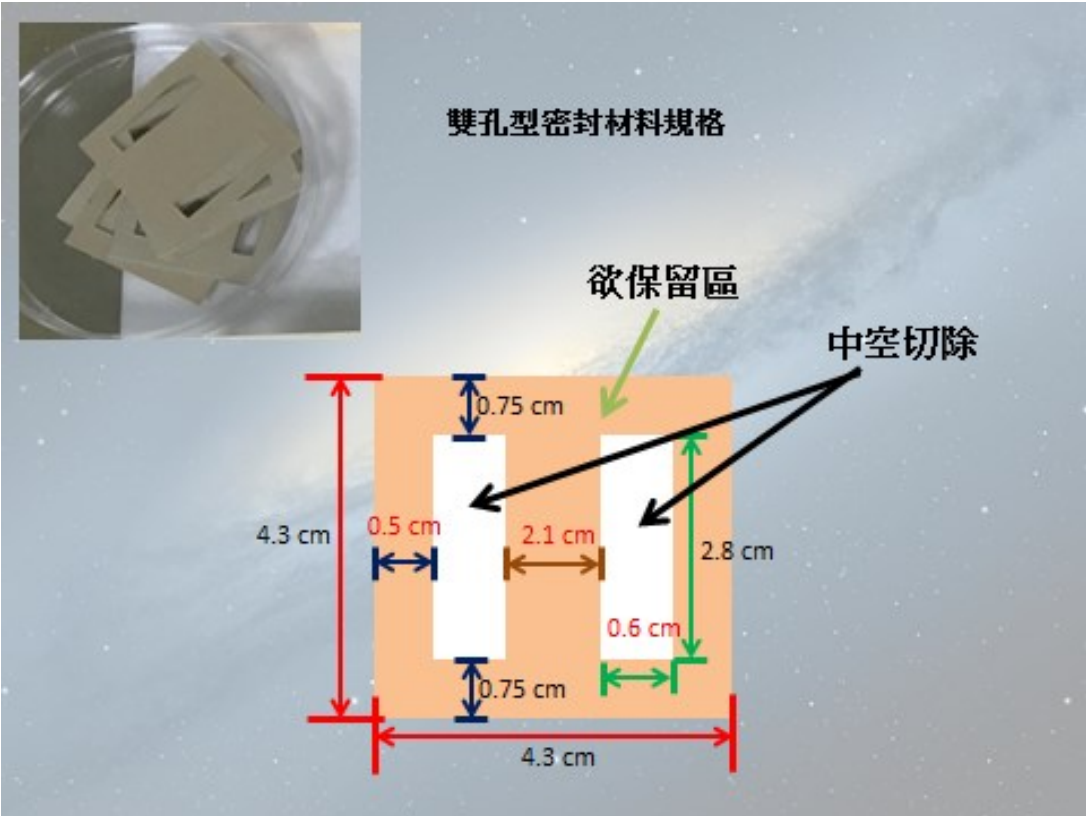
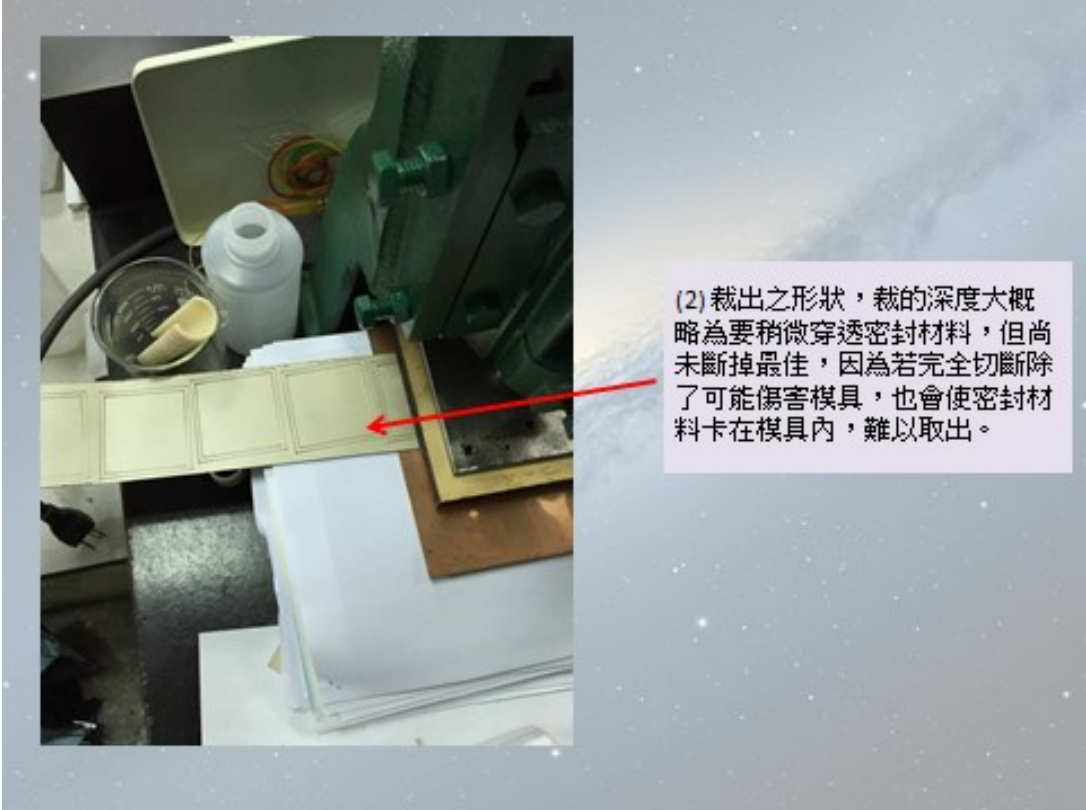
用眼看並調整刀具與密封材料之位置

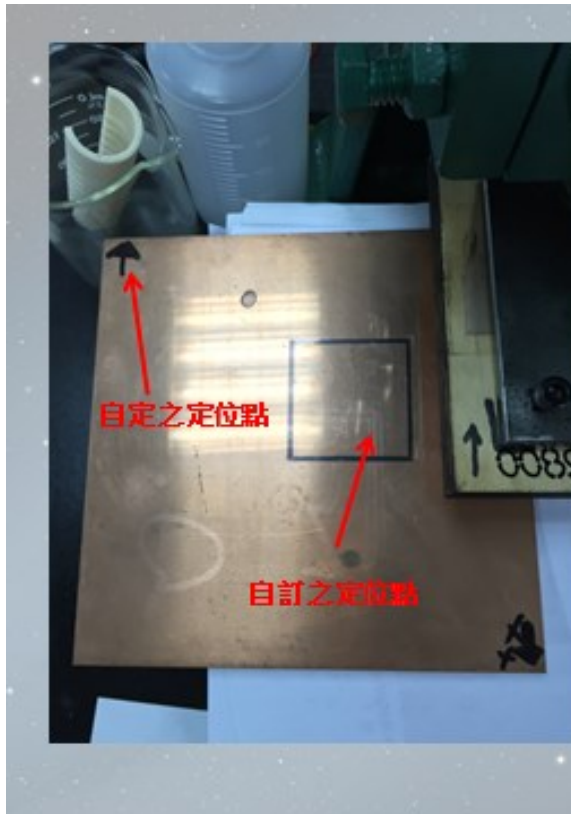
製作流程:

1. 稍微調整刀具與密封材料位置，慢慢下壓，不用一次用力切斷，可慢慢小壓擠下，使模具形狀出來。
Note: 盡量不要將密封材料直接切斷-會使得模具壞掉，因此稍微押出模具形狀，再利用美工刀裁掉。



一開始的密封材料可裁成長條狀，以方便沖模製作。

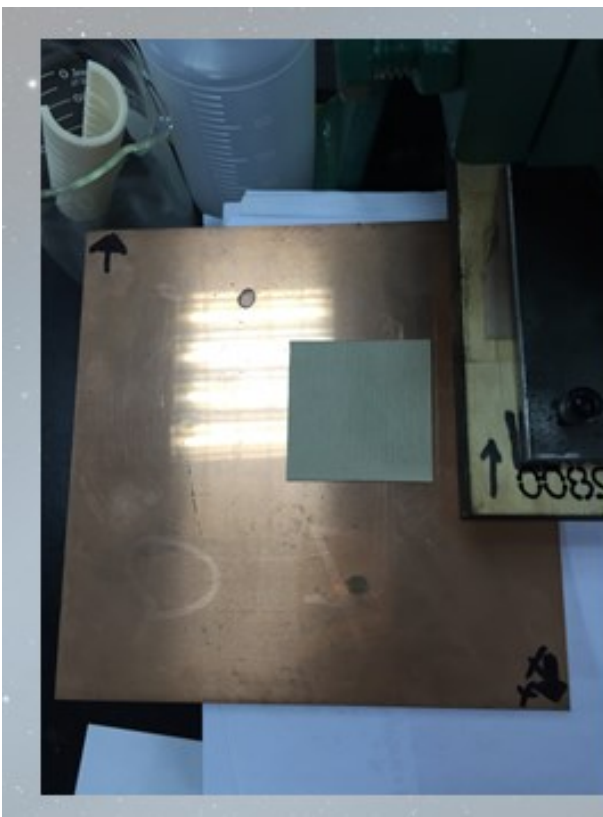




(3) 通常會取裁完框形所剩下之材料，再進行加工製作成雙孔型材料，但記得刀模具也需更換成雙孔型。

(4) 但由於經框形裁剪後的密封材料大小，與刀模具大小相近，因此不容易定位，所以自行找出刀模具與沖床之位置，自訂溢出定位點，以方便來做剪裁。

(5) 此先裁與銅板一樣大的密封材料，放入刀模，在定位出沖床位置、銅板、密封材料三者之相對位置，並已麥克筆劃出定位，若有其他方法可再自行採用，建議一次多做一些。



(6) 將密封材料放到方框內，進行裁切。





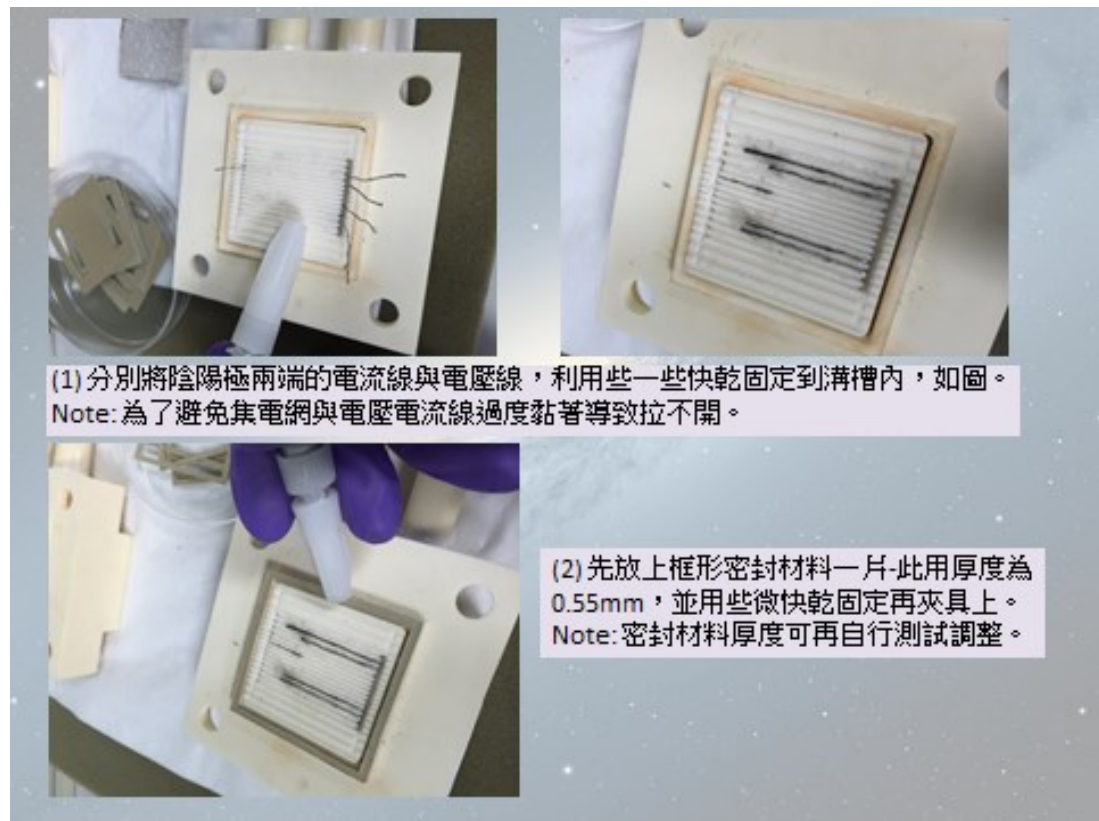
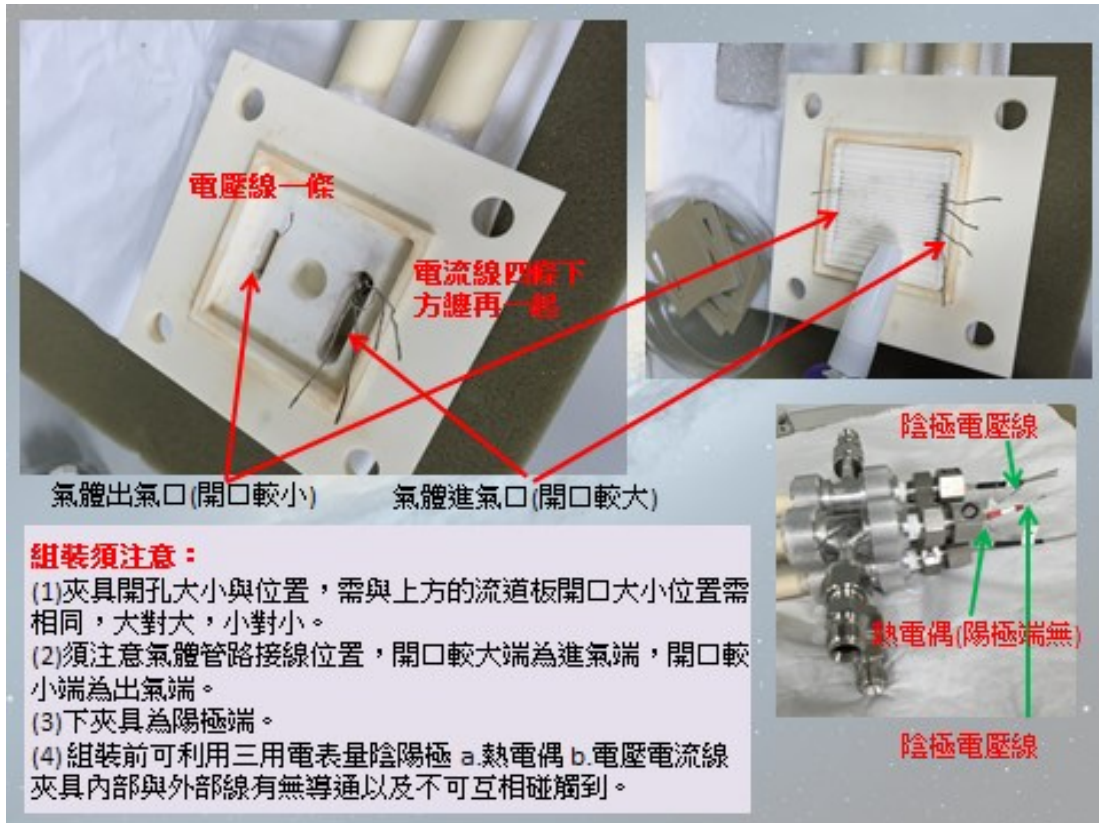
(7) 切法之深度同上述之框形材料。

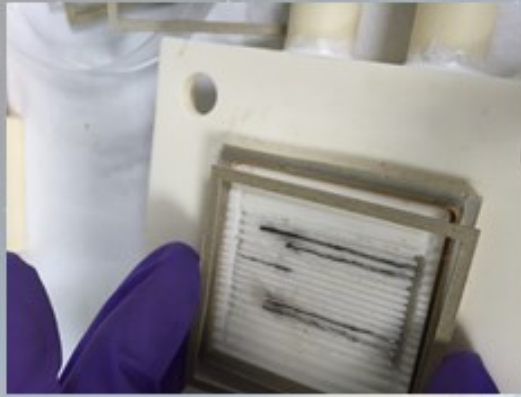
(8) 經沖床裁切下來的密封材料，最後再以美工刀沿軌跡切出形狀即完成。

Note: 密封材料即易斷裂，須小心剪裁與拿取。

夾具之組裝所需工具一覽圖

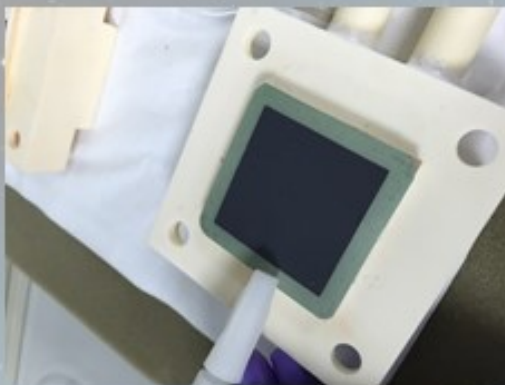
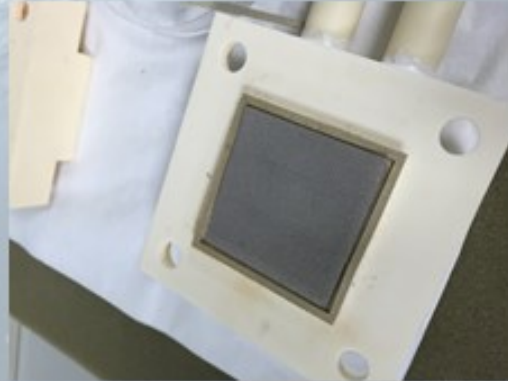






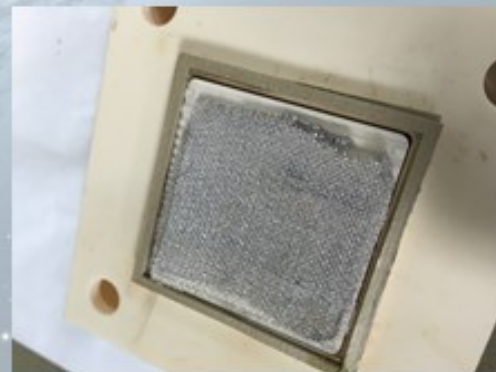
(3) 再放上一片框形密封材料-此也用 0.55mm)，所以共兩層密封材料，並也用些微快乾固定彼此。
Note: 總密封材料厚度可再自行調整。

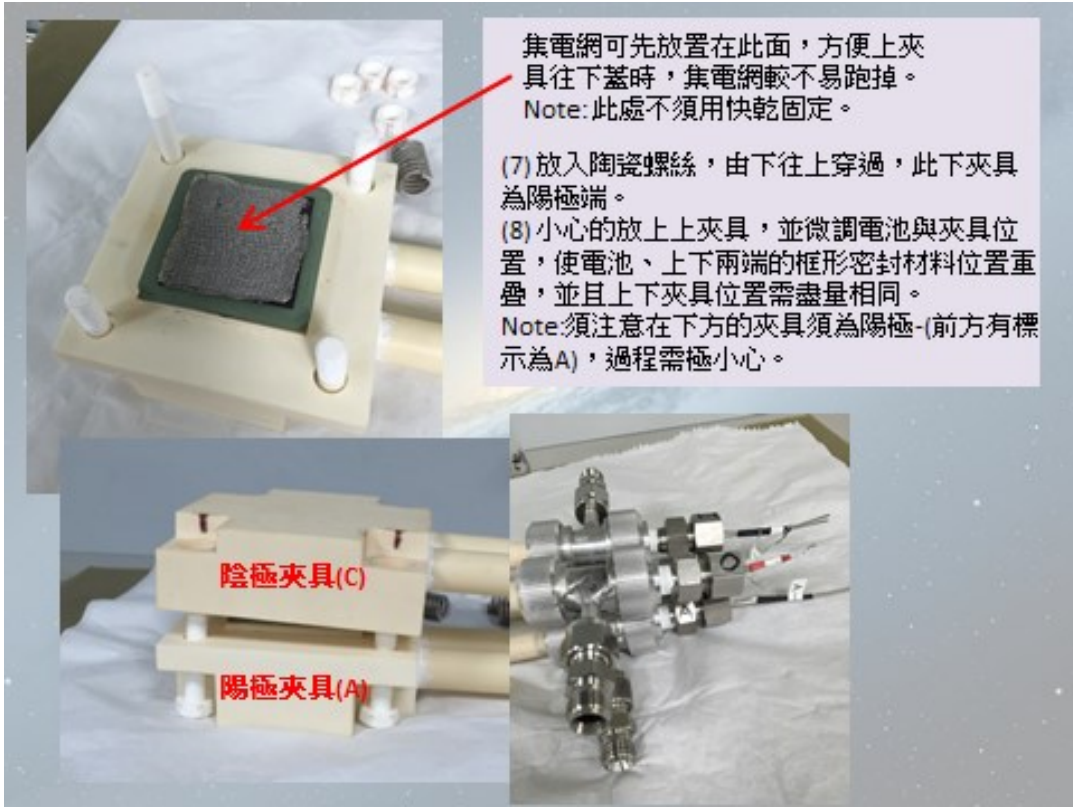
(4) 放上陽極集電網一片-此用發泡鎳。
Note: 不可超出框型密封材料範圍。



(5) 放上單元電池，並用些微快乾固定電池與密封材料之間。
Note: 須注意陰極陽極上下位置，下端為陽極端夾具，因此電池陽極端朝下。

(6) 陰極端:
即同上夾具製備，放置兩層密封材料(0.55mmx2)，同陽極端，但集電網部分由發泡鎳改為白金集電網+銀網。





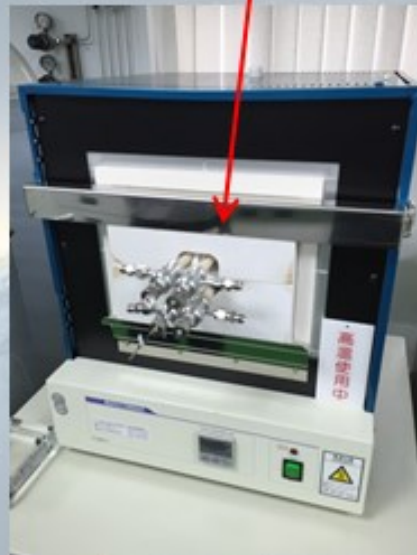
夾具完成圖



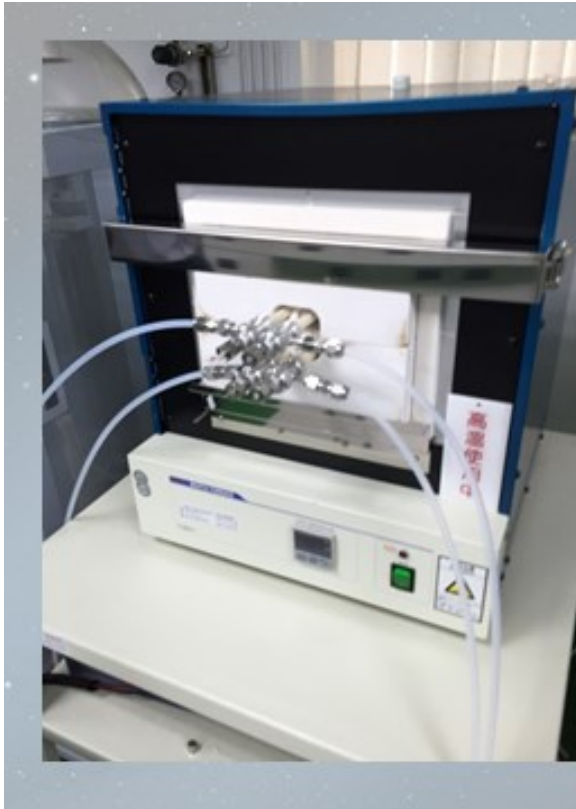
並在此處利用高溫棉塞滿爐子開孔處



安全閥



- (12) 夾具小心放入高溫爐中。
- (13) 裝上安全閥。



(14) 裝上氣體管線，並且更改後面管路

夾具氫氣出氣口
(氫氣出口再接到濾溼罐再接尾氣偵測箱氫氣入口)

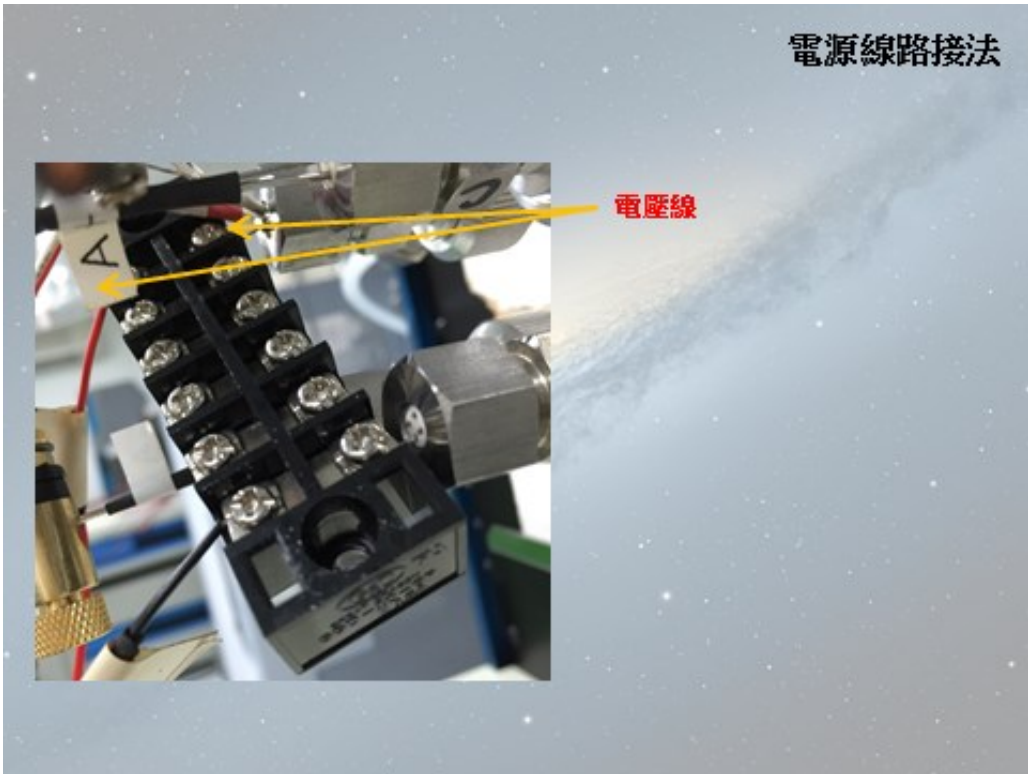
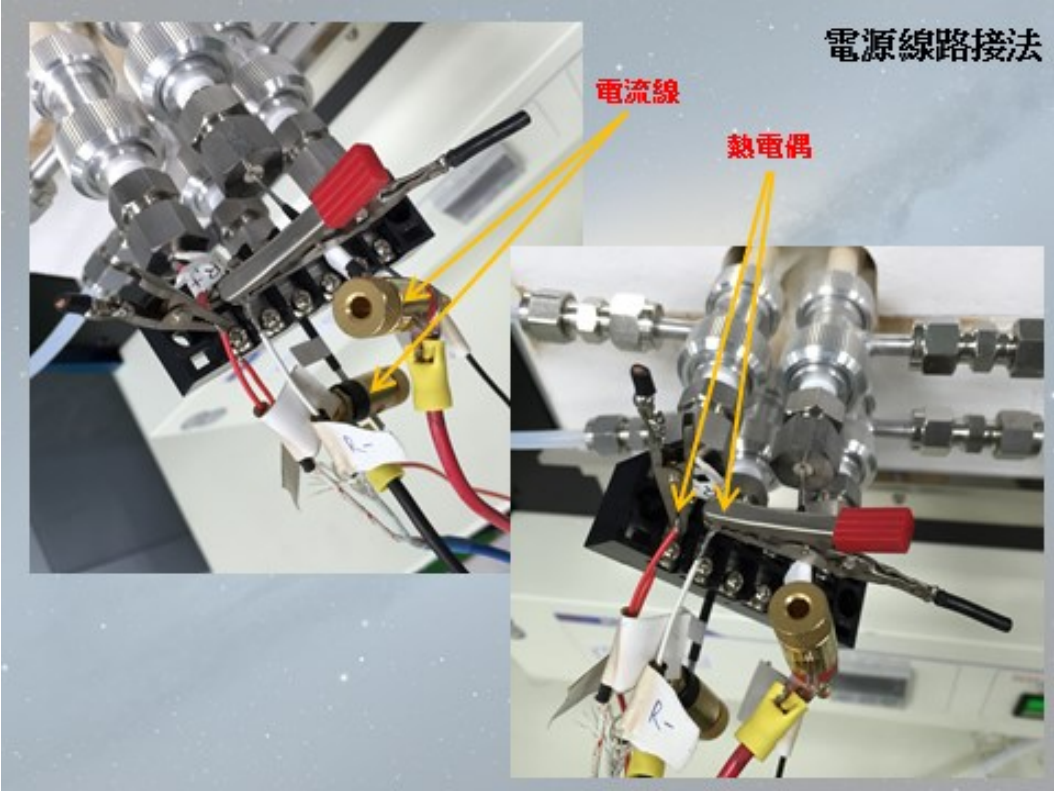
氣體線路接法

夾具空氣出氣口
(空氣出口再接到尾氣偵測箱空氣入口)

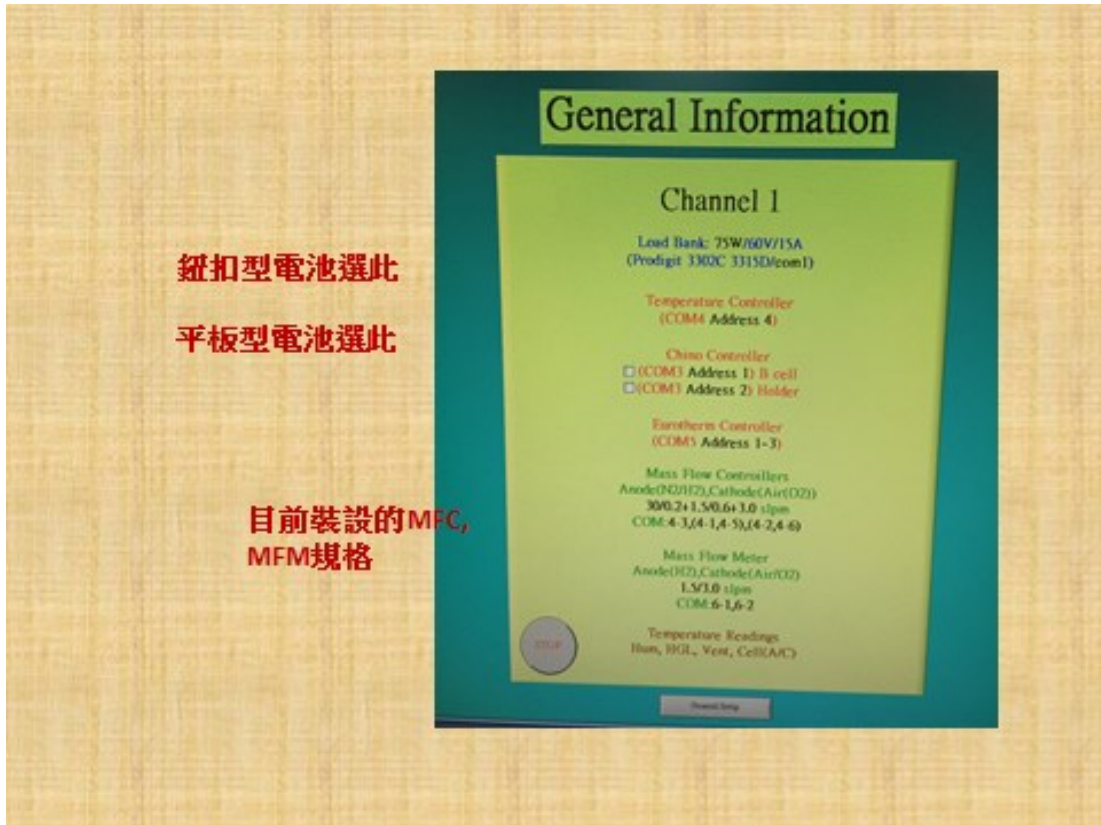
夾具空氣進氣口

夾具氫氣進氣口

濾溼罐



附件四 電池堆電池測試夾具統操作說明



鈕扣型電池選此

平板型電池選此

目前裝設的MFC,
MFM規格



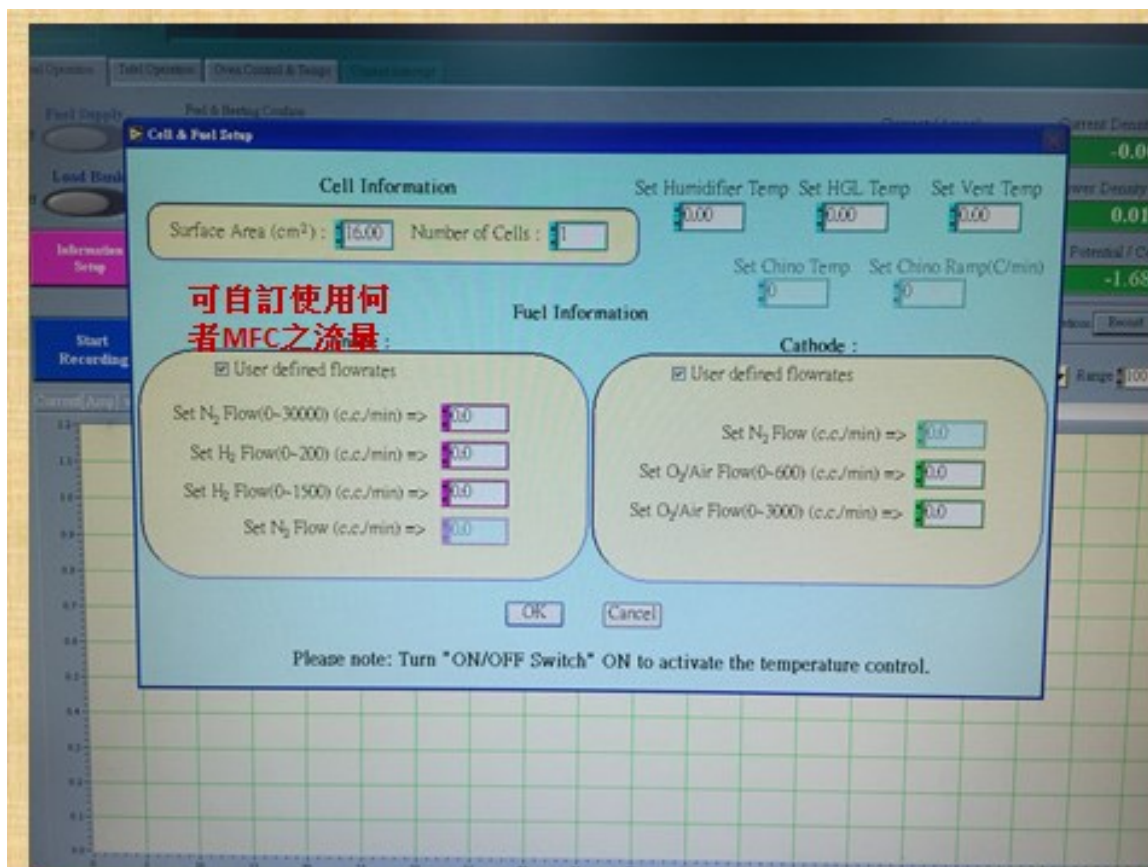
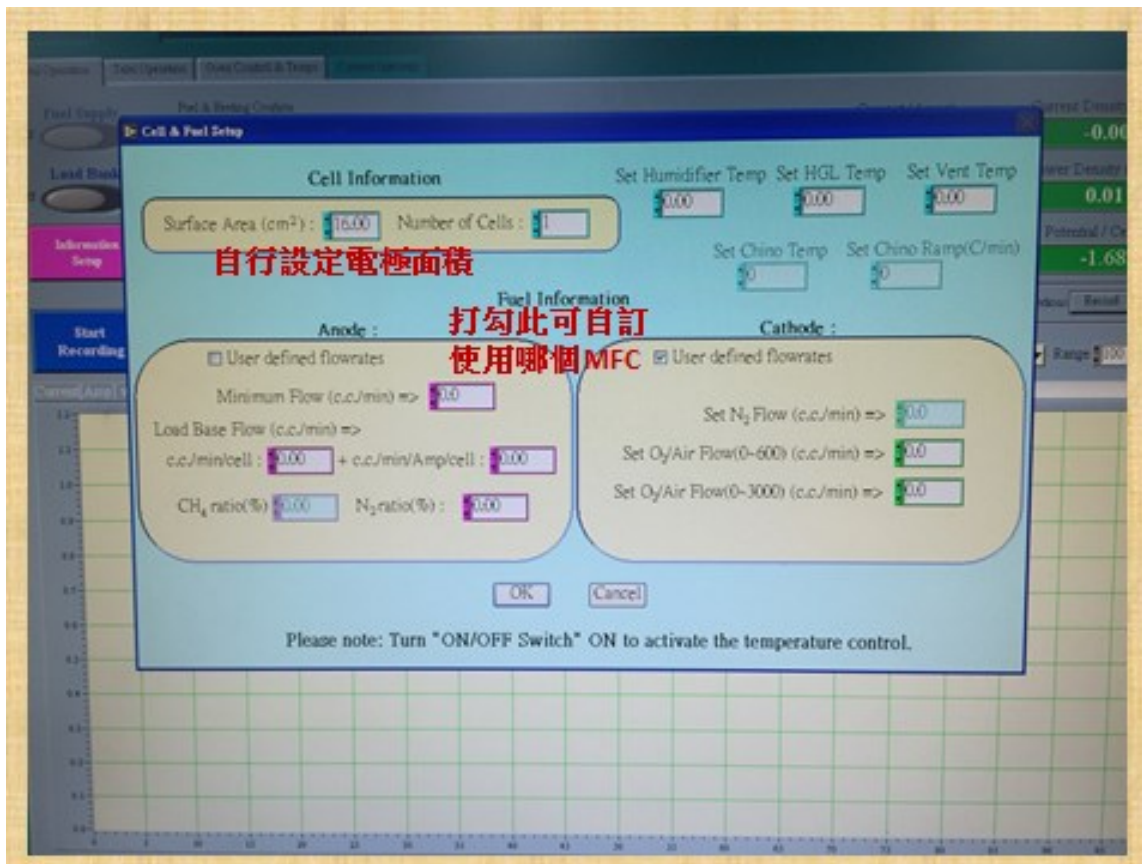
氣體流量控制

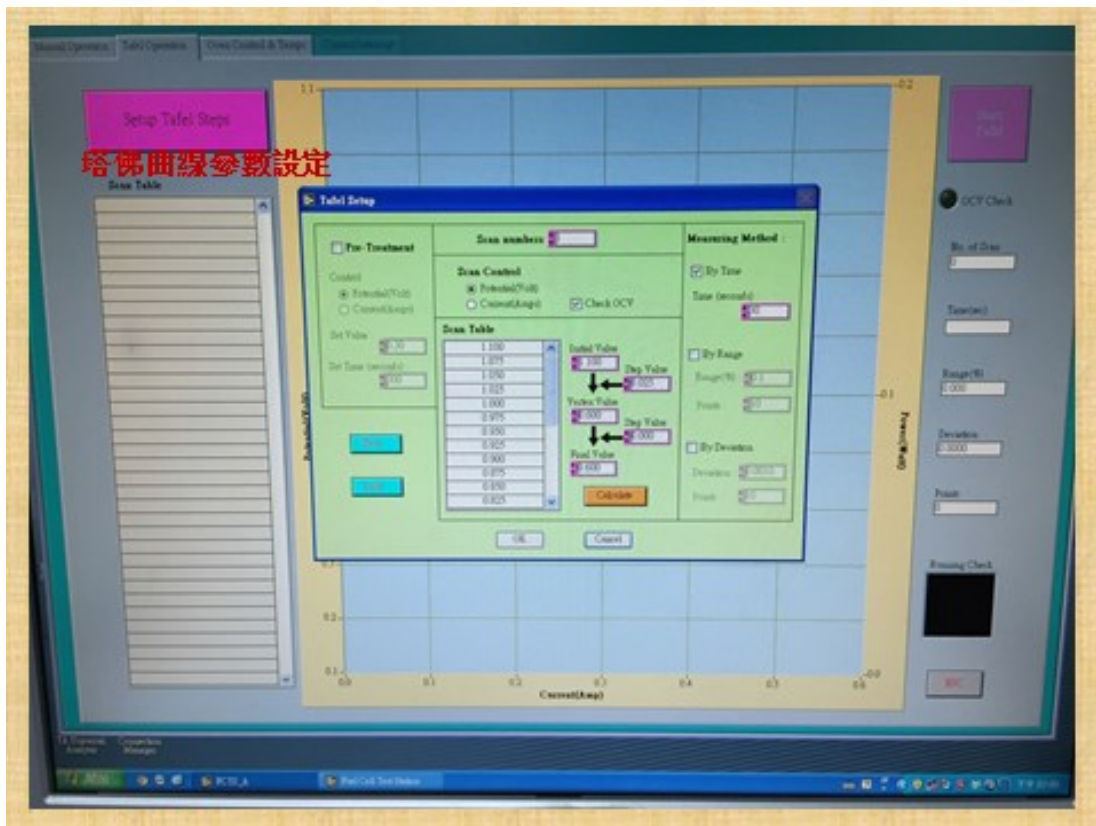
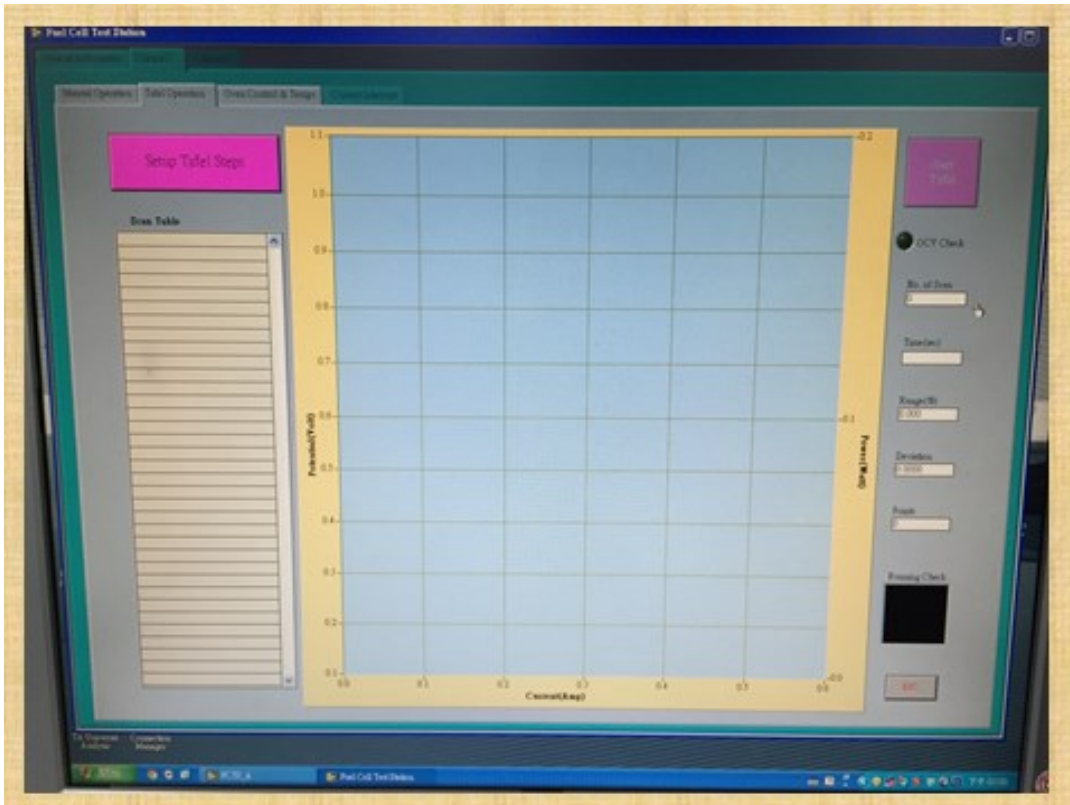
出口氣體紀錄開關

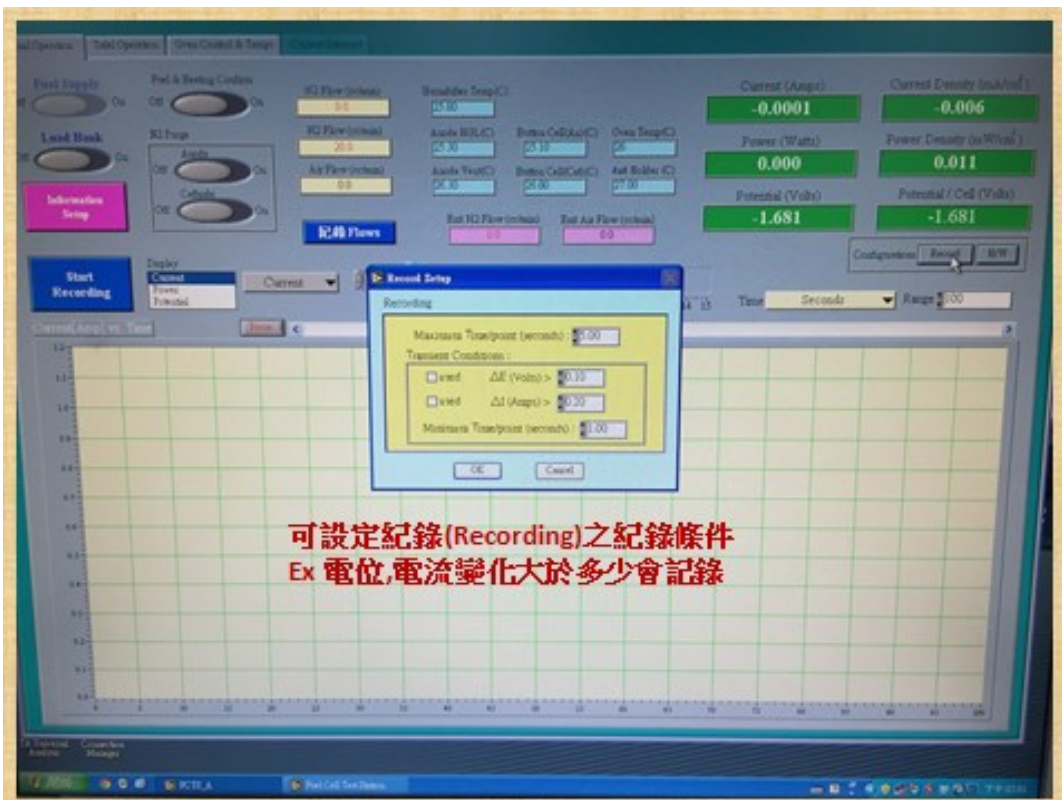
電壓電流電位紀錄開關

I,V,P紀錄設定

電壓電流電位紀錄表







AC設定

