

700 W中溫型固態燃料電池之爐體熱效益改善研究

張祐誠¹ 韋文誠^{2*} 黃馨儀³

摘要

固態氧化物燃料電池(SOFC)提供具有發展潛力的清潔能源，其電池系統(含燃料氣化及重整)都需在中、高溫(>500°C)操作，因此前完成之研究(李坤翔，2020)組製中溫爐(簡稱F01及F01⁺)可用於加熱及維持700 W中溫型固態燃料電池需在650°C~800°C間正常操作，然而前數據顯示操作期間電池組加熱成本高居所有成本因素的第一位，佔67.5%，熱效益不佳，使發電不具經濟效益。因此本研究提出新中溫爐設計，結合氣化與重整功能，並實際組裝兩種中溫爐體(簡稱F02及F02⁺)，進行測試，期望降低爐體持溫時之熱散失。數據顯示，新製爐體(F02)之熱散失功率(kW)與溫度(°C)的關係為 $P=0.0011T-P(x)$ ，其中 $P(F02)=0.247$ ，兩種F02爐之熱散失功率明顯小於前組(李坤翔，2020)製之F01爐體，在操作的溫度區間其熱散失功率可減少一半，在800°C持溫時，熱散失功率由原先F01⁺之1,000 W降低至F02⁺之500 W，因此發電成本也由9.58 (NT\$/kWh)減少至5.15 (NT\$/kWh)，加熱持溫成本佔總成本比例也由67.5%降至43.1%。700 W SOFC電池堆若在F02中升溫至650°C，持溫1小時所需的熱量為1.22 MJ。

關鍵詞：固態燃料電池，爐體，熱效益，成本分析

1. 導 論

燃料電池(fuel cells, FCs)是一種以化學反應的方式將小分子氣體燃料(例如氫氣)的能量轉為電能的裝置，精確的名稱應該稱為「化學發電機」(韋文誠，2013)。這種裝置的結構和我們所知的二次電池(battery)相似，具有陰陽電極及電解質，但是使用燃料發電，因此就俗稱「燃料電池」。

固態燃料電池(Solid oxide fuel cells, SOFC)屬一種燃料電池，SOFC和其他FC的差別之處

(韋文誠，2013)：(1)使用全離子型氧化物為重要組件；(2)開機時間長，加熱至目標溫度一般需要三小時以上。但最近的快速升溫技術已經可以將首次開機縮短到10分鐘，就可在650°C操作；(3)可以接受氣體燃料，或是將液體(或固體)燃料氣化，形成合成氣(syngas)，再通入SOFC中使用；(4)燃料雜質的影響低，SOFC可以忍受較高的雜質，例如碳源(CO及CH_x)及硫化物。

以使用液體燃料的直接甲醇燃料電池(Direct methanol fuel cells, DMFC)機組為例，在

¹國立台灣大學材料科學與工程學系暨研究所 碩士研究生

²國立台灣大學材料科學與工程學系暨研究所 教授

³逢甲大學會計學系 副教授

*通訊作者，電話：02-33661317，電郵：wjwei@ntu.edu.tw

收到日期: 2022年08月16日

修正日期: 2022年12月07日

接受日期: 2022年12月23日

甲醇氣化後，DMFC因為陽極使用奈米白金顆粒，此催化金屬會直接將氫分子催化，轉換成 H^+ 離子，再予以使用，但DMFC對氫氣純度要求非常高，若燃氣中有多於50 ppm CO，白金容易被毒化，失去效能，而SOFC不含鉑金，催化劑採用奈米鎳或銅顆粒，有其成本及長時間使用的優勢(韋文誠，2013)。

另一因素是維持系統高溫，才能進行燃料氣化及重整，例如液態氨(Afif *et al.*, 2016)作為燃料，或是直接將含碳之燃料利用FC的高溫廢熱進行氣化(Chandran, 2015)都需要再 $500^{\circ}C$ 以上，才具有效益。另外，木質燃料的重整操作(Wei *et al.*, 2017)，或是燃氣蒸發與重整(Jahnke *et al.*, 2021；Tallgren *et al.*, 2015)，相關氣化及重整過程也是在 $600\sim 1,000^{\circ}C$ 才會有效地進行。

目前全球已有多家公司提供商用定置型、百萬瓦級SOFC作為電力供應之用，小型SOFC則尚在發展中，Kaupp and Goss (1981)曾對於小型氣化爐(<50 kW)連結渦輪發電引擎，尋求

不同氣化爐設計對於產氣效率之分析，但對重要的隔熱設計及選用之材料卻無任何資訊予以報導。因此，小型SOFC發展需面對的工程改善，建立合乎競爭力的成本為一項重要挑戰。另外，因為SOFC系統在高溫操作首要克服熱散失的問題，因此SOFC朝向中溫($500^{\circ}C < 800^{\circ}C$)方向發展，為近期研究(Kawakami, 2008；Yang *et al.*, 2020)的一重要方向。

為了瞭解SOFC發電成本，Huang *et al.* (2020)等人採用成本會計中的作業基礎成本(Activity-based costing)制(劉靖瑜與李寶秀，2017；黃榮堯等，2005)估算700 W SOFC的製造及操作成本。此方法是以各項製造作業活動為基礎，分析各項製造SOFC組件活動的成本動因，藉由對成本動因的管理，包括碳權及碳交易(碳費)對成本之影響(郭博堯，2022)，以找出低附加價值之步驟，予以改善或消除。

我們曾提出中小型SOFC發電之適當流程，若使用液體燃料，如圖1所示。甲醇經由幫

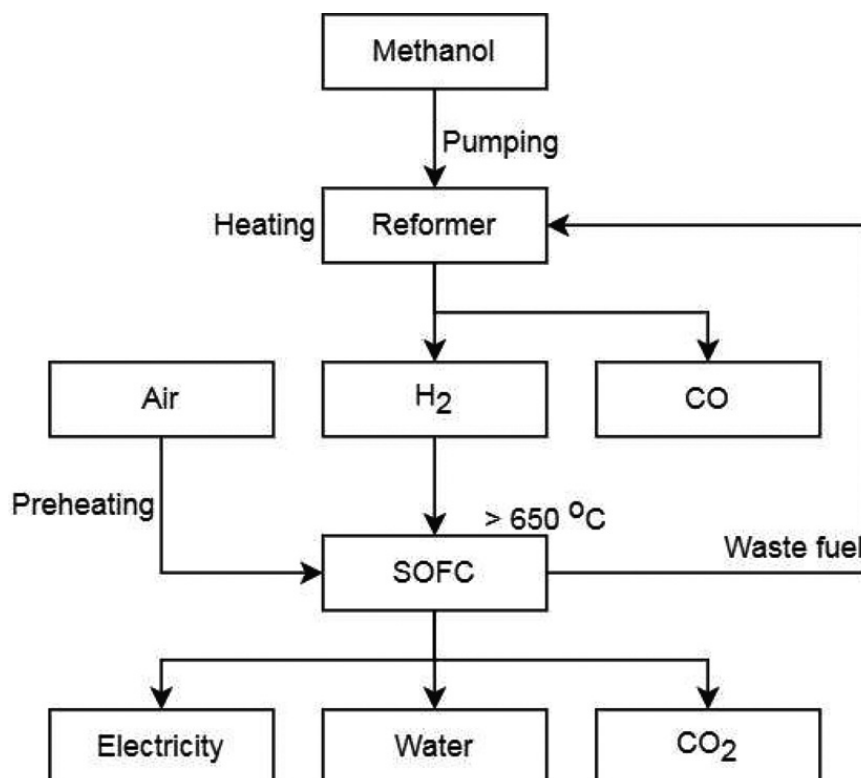


圖1 以甲醇進行SOFC發電的簡易流程圖

浦輸送至重整器，重整器內的催化劑會幫助甲醇蒸發，重整為氫氣及一氧化碳，接著分子燃料(氫氣、一氧化碳)與空氣中的氧氣進入處於中溫狀態的SOFC中，反應產生電力，放出二氧化碳及水，多餘之殘留燃料回收後可用於維持爐體的溫度，或用於蒸發新加入之甲醇之用，進行熱回收。本研究將甲醇SOFC發電成本依照成本項目分成燃料成本、運轉成本、折舊費用，整理如表1之第二欄所示。

李坤翔(2020)參考兩項成本wiki資料。進行初步成本運算，使用F01，發電操作時的甲醇、800°C運轉、設備折舊，啟動四項成本的估算，項目的成本動因(cost driver)為原料數量，機器小時數與操作溫度，如表1中第一、二欄所示；SOFC、氣化器及幫浦之折舊費用的成本動因則為各自使用的機器小時數；而啟動時升溫成本的成本動因則為開機頻率及操作溫度。其中維持800°C運轉，爐體產生廢熱之成本占比最高，占整體發電成本的71.7%，其中維持SOFC發電所需800°C環境的持溫成本，即電熱絲加熱占比67.5%，顯見此項目在運轉成本上有優化空間，因此本期計畫進行兩步驟的精進，包括

將爐體縮小，改變隔熱材及位置，期望有助於改善持溫成本。

前估算之甲醇SOFC發電的成本(NT\$9.58/kWh)遠高於目前台電的火力發電平均成本(NT\$2.50/kWh)，不具商業化的可行性(Huang *et al.*, 2020)。以大型焚化爐進行經濟效益之評估(Chen and Wang, 2017)為參考，對於熱效益或發電效率之初步推算，都以現狀之資料進行運算，並未考慮將能源裝置進行絕熱改善(Mason, 2016)，本研究則期望因為進行爐體的改善，展現熱效率之提高，據此進行其中最為消耗操作成本之項目，透過縮小爐體尺寸、選擇爐體隔熱材料等措施來降低成本、提升其商業化、規模化之可能性。

2. 實驗步驟

2.1 中溫爐組裝

選用光和耐火公司(苗栗)產製之ICM-100耐火泥，在木製樺接模具內逐步澆鑄需要之組件，包括爐底、爐壁及上蓋(如圖2(a))。此外，

表1 使用甲醇(李坤翔，2020)及三種加熱爐之700 W固態燃料電池組之發電成本分布表

Item	Details for the power generation	Cost of F01, NT\$/kWh,	Cost of F02, NT\$/kWh	Cost of F02 ⁺ , NT\$/kWh
Direct cost (Fuel)	methanol	1.25	1.25	1.25
Operation set at 800°C	Pump operation	0.07	0.07	0.07
	Electric heating board	6.47 (67.5%)	3.24 (52.5%)	2.22 (43.1%)
	catalyst	0.33	0.33	0.33
Depreciation of equipment	gasifier	0.90	0.76	0.76
	pump	0.34	0.34	0.34
	SOFC stack	0.17	0.17	0.17
Heated once* ²	Heating to 800°C	0.05	0.01	0.01
Total cost (NT\$)		9.58	6.17	5.15

*1 Reference: The power generation cost (2015 version) reported by TaiPower is categorized into combustion of petro, coal, or NG to be NT\$ 4.35, 1.22, and 2.68/kWh, respectively.

*2 The cost is based on 600 hr/cycle.

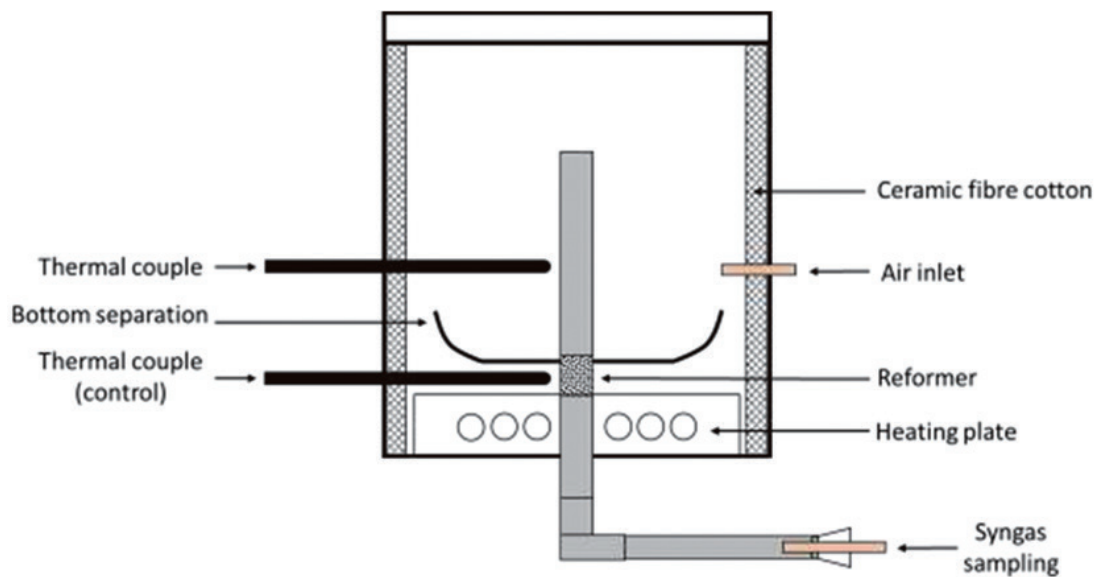
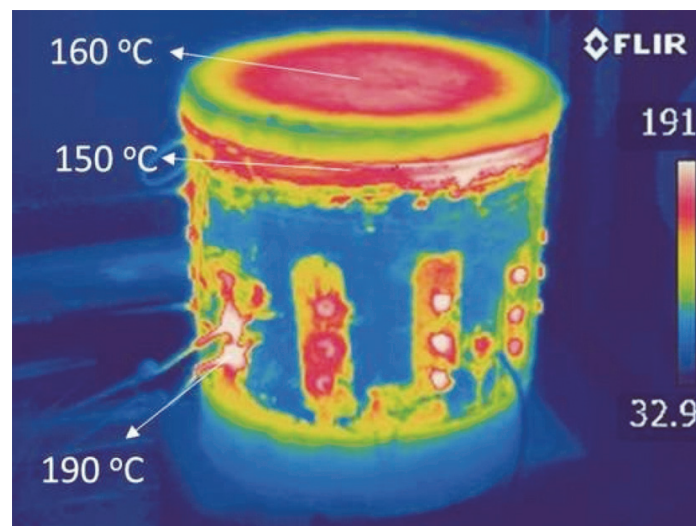
圖2(a) 筒狀F01⁺爐體的示意圖

圖2(b) 該爐體設定在650°C時之外觀紅外線熱影像照片

使用凹型上蓋及耐火棉內襯加強隔熱，並以鎳鉻絲加熱板(110 V，800 W，陵勝公司製品)作為熱源，F02的製作由爐底模具組裝開始，接著組裝增加邊緣結構的不鏽鋼網，並在爐底澆鑄時埋置其內，等待爐底完全乾燥後，爐壁及爐蓋的模具再予組裝。澆鑄料的攪拌及澆鑄包括脫模等步驟，爐體及爐蓋完成後須細修，以確保其能完全密合，以阻止熱能散失，成本計算以基本薪資168元/小時計算，人工成本為2,310元，合計爐具之總成本為23,447元。此組裝出適合用於700 W SOFC操作之中溫爐，以下

稱F02。

2.2 中溫爐加熱及熱散失量測

將組裝出之F02與電力監測器連接，設定不同的溫度(500、600、650、700、800°C)並以10°C/min的速率升溫，持溫1小時，過程中每隔10分鐘紀錄一次爐內溫度、設定溫度及計算耗用電能。量測F02爐在運作過程中所消耗的電能，換算為功率(W)，在持溫穩定後，消耗的功率可以被視為熱散失功率，因此可得出一熱散失功率與溫度之關係。

2.3 SOFC電池堆吸熱測試

F02爐為加熱SOFC電池組而設計，故須衡量SOFC電池組各個零件之吸熱能力。因此，選用一顆SOFC電池堆(700 W，SOFCMAN Co., 寧波)，置於爐底，並以 $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 的升溫速率加熱至 650°C 或 800°C ，並持溫1小時，測量其消耗功率與時間之關係，再進行與無放入SOFC電池堆之爐體加熱實驗結果比較。兩者分別積分後，相減，即可得出SOFC電池堆所吸收的熱量，依此類推，可以獲得各個零件的吸熱能力。

3. 實驗結果

3.1 F01⁺ 爐體測試

前李坤翔(2020)設計之爐體以不鏽鋼爐體作為模具，以耐火泥澆鑄而成之圓筒狀爐體，稱為F01。經計算以F01為爐體的SOFC發電成本，與目前主流燒煤發電方式不具經濟可行性，因此將F01改善，添加陶瓷纖維隔熱層，稱為F01⁺。

圖2(a)為F01⁺的設計圖，爐體內新增一面積為 $2,035\text{ cm}^2$ 陶瓷纖維耐火綿層，用以增強隔熱能力，並留一空氣入口，用來控制燃料氣化時的自熱反應(autothermal reaction)。爐內設有兩組熱電偶，其中之一連接至溫度控制器，另一根用於監測燃料之溫度。圖2(b)為F01⁺爐體在

650°C 持溫時的紅外線熱成像圖，上蓋中心溫度為 160°C ，上蓋接合處溫度為 150°C ，接線處溫度為 190°C ，爐體隔熱尚有改善空間。

在許多SOFC氣化爐的專利中，皆不包含氣化器(evaporator)及重整器(reformer) (Mason, 2016)。氣化器與重整器與SOFC主體分離會使重整器需要額外的熱源才能運作，造成能源的浪費。前後三個爐體詳細的體積、表面積、使用的高氧化鋁質耐火棉面積如表2所示。

F01⁺中溫爐使用1,600 W的加熱板作為熱源，在 $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 的升溫速率下，其溫度表現如圖3(a)所示，設定溫度與爐內測量溫度相符，表示在此升溫速率下，1,600 W的加熱板適用於F01⁺。圖3(b)為F01⁺爐體在 $500\sim 800^{\circ}\text{C}$ 間持溫1 h的消耗功率與溫度的關係，此熱散失功率曲線可以用來衡量爐體的保溫能力。在 800°C 時F01⁺的熱散失功率為1,000 W，相較於F01減少了600 W，在隔熱方面有明顯的改善。

3.2 F02爐體測試

改善之爐體F02之示意圖如圖4所示，其目的為設計出適合用於SOFC操作之中溫爐。F02相較於F01，將爐身整體尺寸縮小，由 $7,040\text{ cm}^2$ 減少至 $3,200\text{ cm}^2$ ，其改善的重點是透過減少爐體表面積的方式來降低熱散失，並設計一凹型上蓋與爐體緊密嵌合，減少上蓋密合處的熱散失。另使用800 W加熱板作為F02中溫爐之熱源，進行升溫測試，在 $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 的升溫速率

表2 加熱爐體之表面積，內容量及包覆陶瓷纖維之面積一覽表

	F01 (李坤翔，2020)	F01 ⁺	F02	F02 ⁺
Outer Surface area (cm^2)	7040	7040	3200	3200
Inner volume (cm^3)	45360	45360	12190	12190
Ceramic fiber cotton (cm^2)		2035		690
Remarks		Improve insulation	Size reduction	Improve insulation

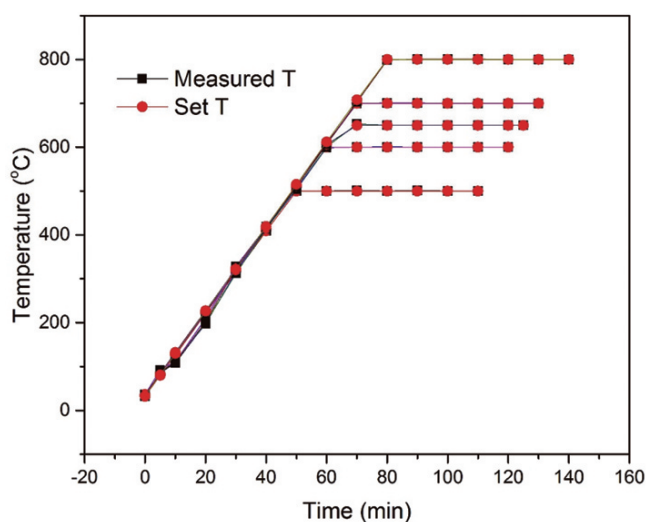


圖3(a) F01⁺爐體以10°C min⁻¹的升溫速率，升溫至500~800°C獲得的溫度

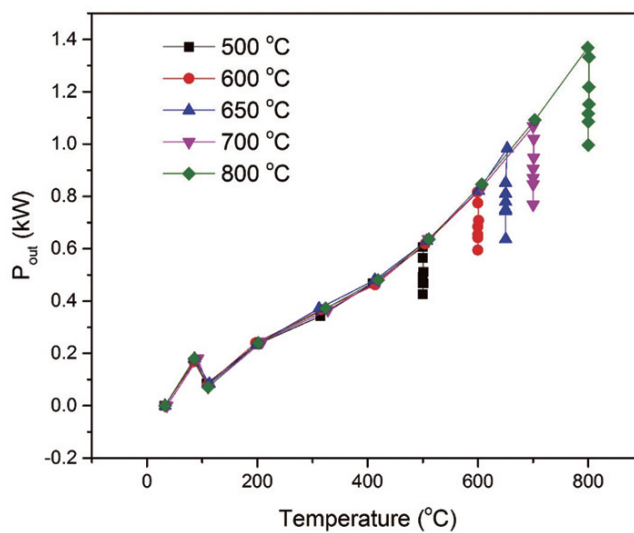


圖3(b) F01⁺爐體以10°C min⁻¹的升溫速率，升溫至500~800°C獲得的功率散失對溫度之曲線圖

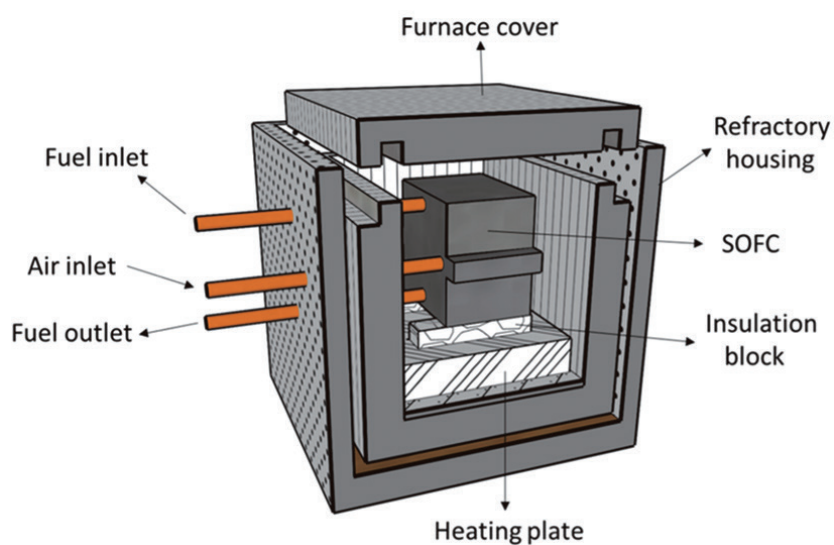


圖4 內裝有700 W SOFC發電組、隔熱材、加熱板、燃料及空氣管線之F02爐體之示意圖

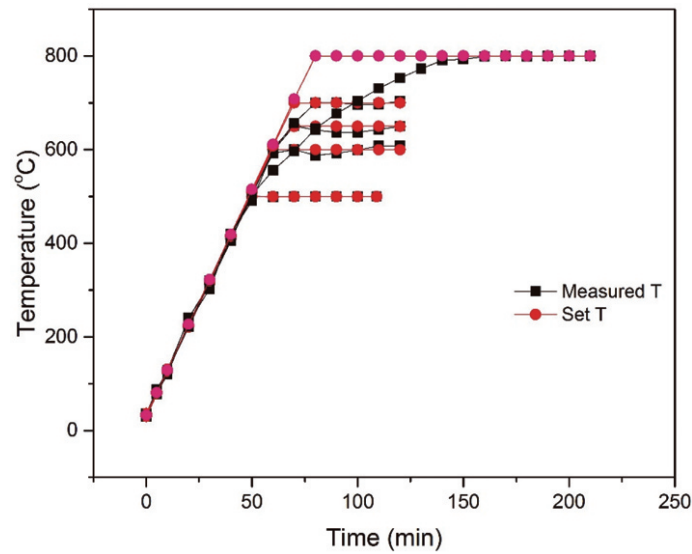


圖5 以 $10^{\circ}\text{C min}^{-1}$ 升溫速率升溫到500~800°C的F02爐體的溫度曲線以及設定溫度曲線

下，其溫度表現如圖5所示。在700°C以上時，爐內測量溫度(measured T)開始跟不上設定溫度(set T)，當設定為800°C時，共需要130分鐘才能加熱至設定溫度，此時間約為原設定時間的1.8倍，表示在 10°C/min 的升溫速率下，F02需要更大功率的熱源，才能在700~800°C之間順利加熱。

該爐體上表面溫度是透過K-type熱電偶直接接觸並覆上耐火棉進行測量。爐內溫度、爐體上表面溫度與時間的關係如圖6所示，當

在800°C持溫1小時，爐體上表面溫度最終達440°C，溫度明顯過高，熱散失嚴重。圖7為F02之輸出功率對溫度的關係，後文會將其與F01及F01⁺中溫爐做比較。數據顯示F02之爐體熱散失遠小於F01及F01⁺。在800°C時F02的熱散失功率為600 W，相較於F01及F01⁺分別減少了1,000 W及400 W，顯示減少爐體表面積對於降低熱散失卓有成效。

因F02中溫爐除供氣化及重整之用，也為加熱SOFC電池組而設計，故須衡量SOFC電池

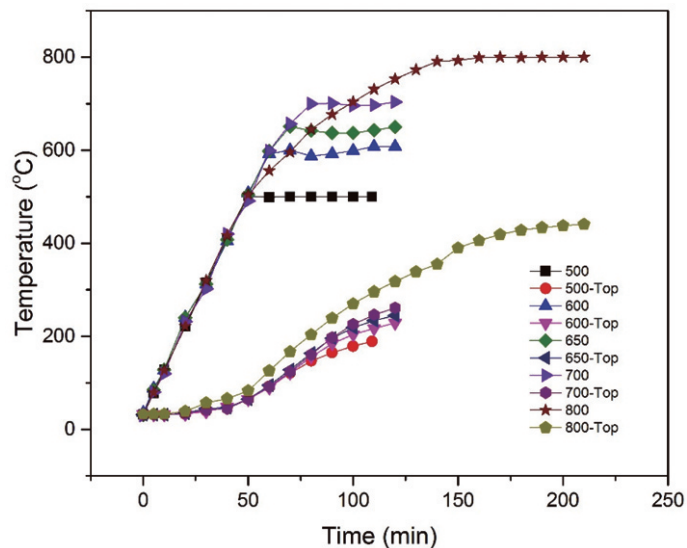


圖6 以 $10^{\circ}\text{C min}^{-1}$ 升溫速率升溫到500~800°C的F02爐體溫度曲線以及爐體表面之溫度

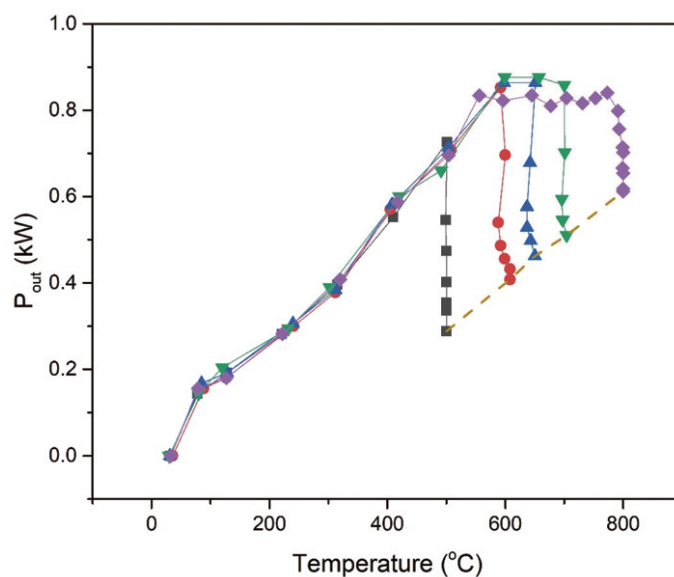


圖7 以 $10^{\circ}\text{C min}^{-1}$ 升溫速率升溫到500~800°C的F02爐體之功率輸入與溫度之關係圖

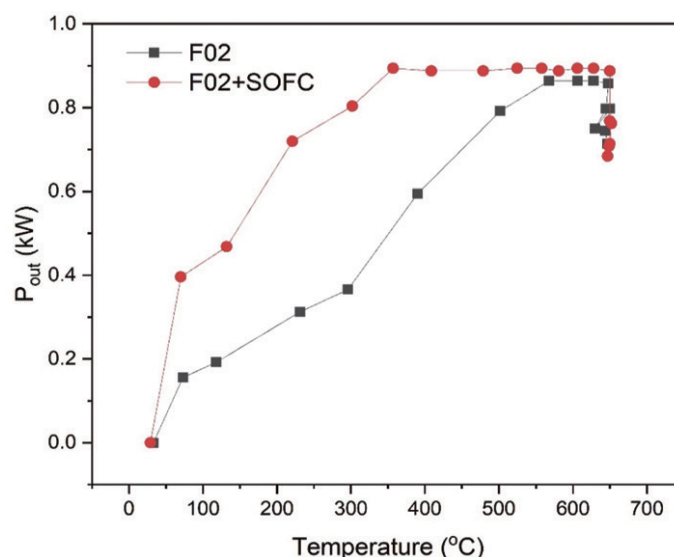


圖8 以 $10^{\circ}\text{C min}^{-1}$ 升溫速率升溫到650°C的F02爐體及置入SOFC之功率輸入與溫度之關係曲線

組的吸熱能力，測試結果如圖8所示。加熱初期須吸收更多的能量用於加熱SOFC及爐壁；而在持溫階段，因為爐體之表面積固定，無論有無SOFC，維持運作所消耗的功率皆相近。以爐體輸出功率對時間作圖，曲線下面積($W \cdot t$)即為裝置升溫所吸收之能量，與未放入SOFC電池堆之結果比較，兩者面積差值即為SOFC電池堆所吸收之能量，因此對兩曲線進行積分並相減，結果顯示SOFC電池組在升溫過程中吸收了約1.22

MJ的能量。

圖9為F02爐體在650°C持溫時的紅外線熱成像圖，爐壁溫度達140°C，上蓋溫度為170°C，預留進出氣口之爐壁溫度達210°C，可看出高溫處皆為爐壁中心及接縫處，且上蓋及鑽孔面溫度較高。上蓋密合處也有熱散失。若要加强隔熱可以考慮以下幾種作法，其一是更換熱傳導率更低的耐火泥¹，其二是在四周爐壁加裝陶瓷纖維耐火棉，以增強隔熱。

¹ 目前所使用之ICM-100耐火泥熱傳導率在600°C下為 $0.24 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

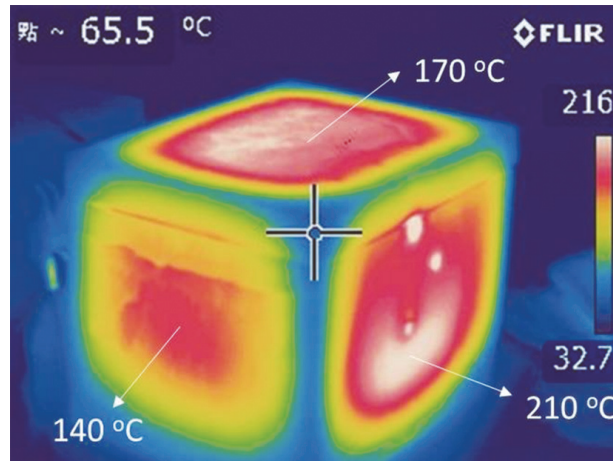


圖9 F02爐體達到650°C時的外表紅外線熱像照片

3.3 F02⁺爐體測試

本研究期望能更進一步地降低F02爐體熱散失，期望SOFC電池組發電能更具經濟效益，因此在內部覆蓋上面積為690 cm²之陶瓷纖維耐火棉，以增強隔熱性能。圖10(a)為F02⁺爐體升溫時的溫度曲線，爐內雖只使用800 W加熱器，但溫度可以完全跟上設定之目標溫度，顯示新增的隔熱層有確實發揮作用。圖10(b)為F02⁺爐體在500~800°C間持溫1 h的消耗功率與溫度的關係。

各代爐體的熱散失功率與溫度的關係整

合在圖11，可看出F02⁺的隔熱性能優於F02，在800°C時的熱散失功率為550 W，相較於F02約減少了50 W。兩個新製爐體之熱散失功率(P, kW)與溫度(T, °C)的關係中斜率相近，約為0.0011，可以下式表示之：

$$P = 0.0011T - P(x) \quad (1)$$

其中T為設定溫度(°C)，x為爐體代號，F02爐體的 $P(x) = 0.247$ ，而F02⁺的 $P(F02^+) = 0.327$ 。

圖12為F02⁺爐體在650°C下外表面的紅外線熱成像圖，F02⁺的上蓋中心溫度只有160°C，正面溫度達200°C，側面溫度達100°C，相較

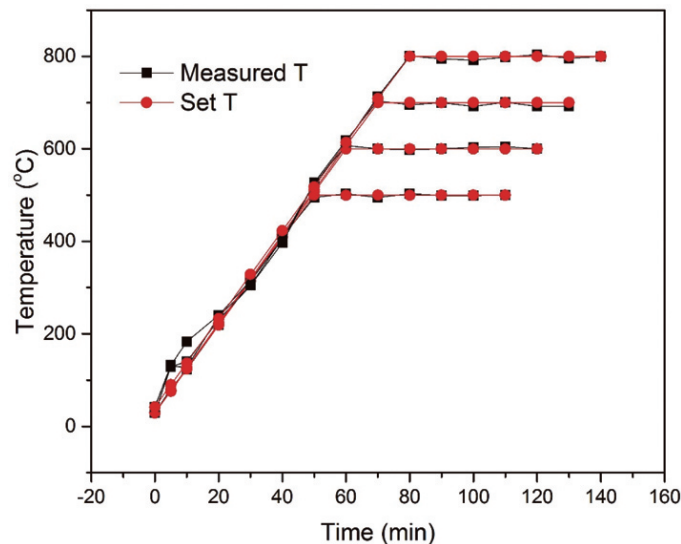


圖10(a) F02⁺爐體以10°C min⁻¹的升溫速率，升溫至500~800°C獲得的溫度

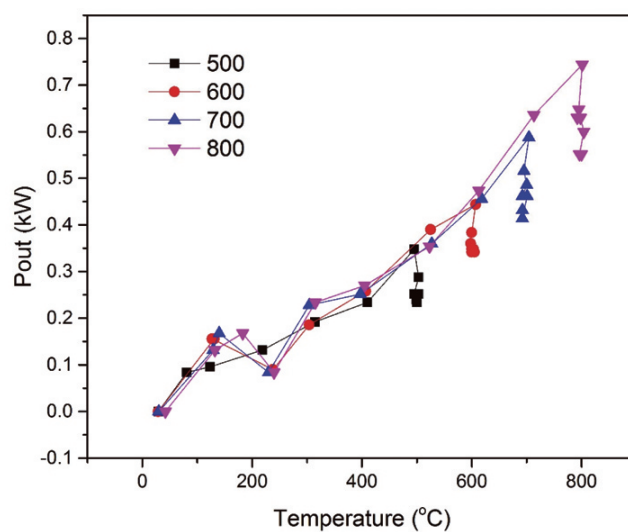


圖10(b) F02⁺爐體以10°C min⁻¹的升溫速率，升溫至500~800°C獲得的功率新對於溫度之曲線圖

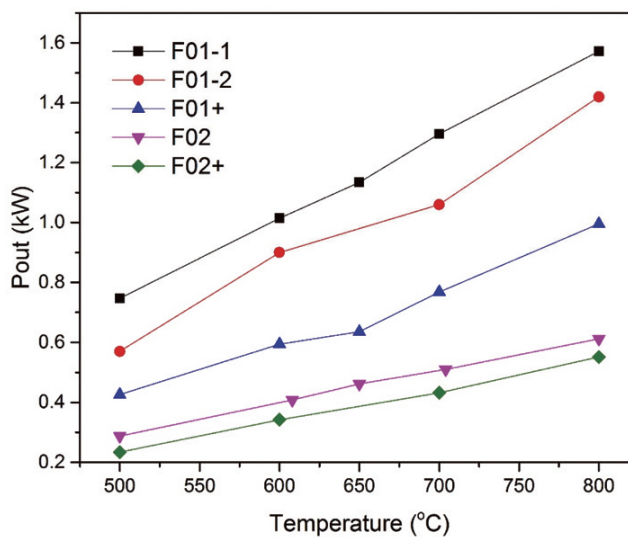


圖11 F01-1, F01-2, F01⁺, F02 and F02⁺爐子以10°C min⁻¹升溫速率升溫到500~800°C的功率輸入與溫度的關係曲線圖，其中F01-1及F01⁺使用1,600 W加熱板，裝置在底部；F01-2則使用兩片800 W加熱板，裝置在兩側；F02 and F02⁺則使用一個800 W加熱板，裝置在底部。(其中F01-1及F01-2數據由李坤翔(2020)提供)

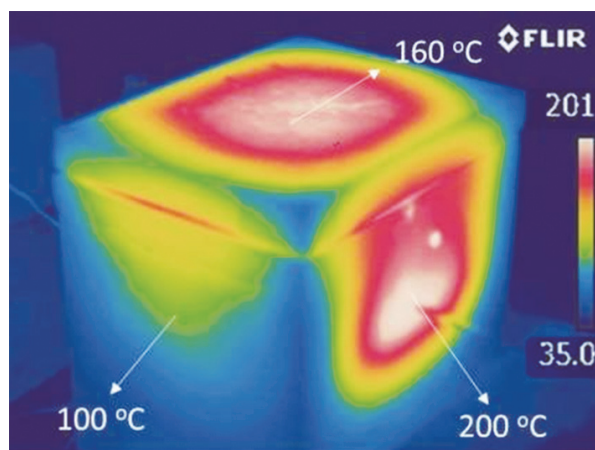


圖12 F02⁺爐體達到650°C時的外表紅外線熱像照片

F02而言，F02⁺上蓋及正面部分的溫度均下降約10°C，側面更是降低了40°C。顯示陶瓷隔熱層有效減少熱散失。

4. 討 論

為了提供700 W SOFC運轉時所需的中溫環境，本研究重新設計爐體，採用兩種方式，一是降低爐體的體積，因此散熱面積大幅減少；二是改善隔熱，除了可以減少熱散失。新設計之F02藉由降低爐體體積來達到更佳的热效益，不僅減少了熱散失，也減少了中溫爐的持溫操作成本；而F02⁺爐體更藉由加裝高溫隔熱氈，使得熱散失功率在F02的基礎下又下降了50 W，且透過紅外線熱成像圖更可觀察到側壁及爐頂溫度有明顯下降。

表1是採用作業基礎成本制(Activity-based costing)算得之成本分布，其中F02爐體操作成

本佔比最大的加熱板操作成本能由NT\$6.47/kWh降低為NT\$3.24/kWh，此外，在表中倒數第二列，其啟動之耗用電力也僅佔有0.01/kWh，因此總成本也能可以降低至NT\$6.17/kWh，使得此發電方式更具經濟效益。

新設計的中溫爐F02⁺，其成本估計如表3最右邊一欄所示。其中含成型模具之爐體總體成本變動不明顯^{*1}；F02成本相較於F01之成本26,436元，減少了約11.3%，減少部分主要來自於自製上蓋、節省的配件成本以及省去耐火泥過篩的人工成本。

總成本分析時需考慮設備的折舊，對於中溫爐來說，耐火泥製成的爐體有較長的使用壽命(預計60,000小時)，折舊應可忽略。因此，中溫爐的設備折舊費用只考慮其中的電子設備，也就是溫控器及加熱板，將其使用壽命訂為5年，並以此進行成本分攤。

表3 F02爐體組裝之成本分析

Item	Material	Price (NT\$)	Process	Working hours
Furnace	Mold	3500	Assembly of furnace bottom mold	0:10
	ICM-100 Refractory clay	448	Assembly of stainless steel mesh	3:00
			Mixing and casting	0:15
	Stainless steel mesh	189	Demolding	0:10
Assembly	Temperature controller	13500	Assemblies of furnace wall and cover mold	1:30
			Mixing and casting	0:40
			Demolding	3:00
	Heating plate	3500	Trimming	3:00
			Integration	2:00
Subtotal		21137		13:45 (2310)
Total (NT\$)			23447	

¹ 見張祐誠碩士論文(1/2023)，耐火原料成本為4,137元，其餘配件為溫控器及加熱板成本為17,000元，加上勞務成本小計為21,137元。

5. 結 論

F02⁺爐體在800°C持溫達穩定時，加熱板所消耗的功率可視為熱散失功率，F02熱散失功率(P)與溫度(T)的關係為 $P = 0.0011T - P(x)$ ，明顯優於前所製之F01。

700 W SOFC電池堆在升溫至650°C並持溫1小時所吸收的熱量為1.22 MJ。透過紅外線熱成像圖，可清楚看到高溫處主要集中於各爐壁中心處，接縫及進行鑽孔處理之爐壁溫度較高。

透過分析F02爐體的原料及流程中所需的人力，計算出整體建置成本為23,447元，此成本相較於F01之成本26,436元，減少了約11.3%，減少部分主要來自於自製上蓋節省的配件成本以及省去耐火泥過篩的人工成本。此外，F02⁺爐體可採用較低功率之800 W加熱板維持環境溫度，發電成本中占比最大的加熱板持溫(操作)成本能因此降低至NT\$3.24/kW，總發電成本也能因此降低至NT\$6.35/kW，熱操作成本佔比降至50%以內，使得此種發電方式更具經濟效益。

致 謝

本研究透過申請國科會計畫(MOST109-2221-E002-121)，得以進行部分之研究。此外，也感謝幾位專家之指導，中鋼劉世賢博士及逢甲會計系翁慈青教授，不勝感激。

參考文獻

李坤翔，2020。液態酒精燃料應用於中溫SOFC之研究，國立台灣大學材料科學與工程研究所。

韋文誠，2013。固態燃料電池技術，高立出版，台灣。

郭博堯，2022。台灣主要出口國碳交易市場之發展，中技社通訊，夏季(2)，9-11。

黃榮堯、許維庭、何坤憲和余昌漢，2005。廢棄混凝土再生利用成本效益分析之研究，建築學報(53)，95-114。

劉靖瑜與林寶秀，2017。臺灣立面綠化系統之成本效益分析，建築學報(101)，99-106。

Activity-based costing. Retrieved on February, 2021, from https://en.wikipedia.org/wiki/Activity-based_costing.

Afif, A., N. Radenahmad, Q. Cheok, S. Shams, J. H. Kim and A. K. Azad, 2016. Ammonia-fed fuel cells: a comprehensive review. Renewable and Sustainable Energy Review 60, pp. 822-35.

Chandran, R, 2015. Gasifier having integrated fuel cell power generation system. US patent 8968433, 3/3/2015.

Chen, Y.-C. and C.-T. Wang, 2017. Municipal solid waste (MSW) incineration's potential contribution to electricity production and economic revenue in Taiwan. J. Taiwan Energy, 4[1] 93-106.

Cost accounting. Retrieved on February, 2021, from https://en.wikipedia.org/wiki/Cost_accounting.

Huang, H. Y., C. Y. Huang, K. H. Lee, Y. C. Chang and W. C. J. Wei, 2020. Feasibility analysis for power generation from a lab-made intermediate temperature-solid oxide fuel cell using liquid alcohol fuels. Innov. Energy & Research 9[5], 1000239.

Jahnke, F. C., M. Lambrech, P. Patel, M. Farooque and C.-Y. Yuh, 2021. Reformer-electrolyzer-purifier (REP) assembly for hydrogen production, systems incorporating same and

- method of producing hydrogen. US Patent 10,892,507.
- Kaupp, A. and J. R. Goss, 1981. State of the art report for small scale (to 50 kW) gas producer – engine system. DOA, US, cont. 53-319R-O-141.
- Kawakami, A, 2008. Advances in Solid Oxide Fuel Cells II: Ceramic Engineering and Science Proceedings 27[4], pp. 3-12.
- Mason, J, 2016. Hybrid fixed-kinetic bed gasifier for fuel flexible gasification. US Patent 9453170.
- Tallgren J., O. Thomann, M. Halinen, O. Himanen and J. Kiviaho, 2015. Development of a fuel feeder for a solid oxide fuel cell test station. Intern. J. Energy Research, 39, 2031-2041, DOI:10.1002/er.3437.
- Wei, W.-C J., U.-H. Cheong, K.-Y. Cheng and C.-Y. Chang, 2017. Gasification and syngas reforming of lignin biomasses in Taiwan for SOFC applications. J. Taiwan Energy 4, pp. 77-92.
- Yang G.-M., C. Su, H.-G. Shi, Y.-L. Zhu, Y.-F. Song, W. Zhou, Z.-P. Shao, 2020. Toward reducing the operation temperature of solid oxide fuel cells: Our past 15 years of efforts in cathode development. Energy & Fuels 34[12], pp. 15169-15194.

Improvement on Heat Benefit of Furnaces for Heating A 700 W Medium-Temperature Solid Oxide Fuel Cell

Yu-Cheng Chang¹ Wen-Chung Wei^{2*} Hsin-Yi Huang³

ABSTRACT

Solid oxide fuel cell (SOFC) is a clean energy source potentially for clean electric energy development, of which needs to operate at medium to high temperature ($>500^{\circ}\text{C}$). Our previous works (Lee, 2020) assembled two furnaces (abbreviated as F01 and F01⁺) for heating and maintaining 700 W medium-temperature (M-) SOFC stacks between $650^{\circ}\text{C}\sim 800^{\circ}\text{C}$. During the operation of the SOFC stack, the cost was the highest among all cost factors, accounting for 67.5%, and the thermal efficiency was improvable, so the power generation is economically viable. Therefore, this study proposed a new design that the furnace combined gasification and reforming function, and two medium-temperature furnaces were assembled (abbreviated as F02 and F02⁺) for testing. The data show that the relationship of power dissipation (in kW scale) of F02 furnace to the temperature ($^{\circ}\text{C}$) is $P = 0.0011T - P(x)$, where $P(x)$ of F02 furnace is 0.247. The power dissipation of the two F02 furnaces is significantly improved about one time better and smaller than that of the F01 furnaces (Lee, 2020). When holding at 800°C , the power dissipation is reduced from 1,000 W of F01⁺ to 500 W of F02⁺. As a result, the cost of power generation has been reduced from 9.58 (NT\$/kWh) to 5.15 (NT\$/kWh), and the proportion of heating and holding cost to total cost is reduced from 67.5% to 43.1%. The heat required to hold the temperature of a 700 W SOFC stack in F02 is 1.22 MJ if heated to 650°C .

Keywords: solid oxide fuel cell, furnace, heat benefit, cost analysis.

¹ Master, Dept. Materials Sci. Eng., National Taiwan University.

² Professor, Dept. Materials Sci. Eng., National Taiwan University.

³ Associated Professor, Dept. Accounting, Feng Chia University.

*Corresponding Author, Phone: +886-2-33661317, E-mail: wjwei@ntu.edu.tw

Received Date: August 16, 2022

Revised Date: December 07, 2022

Accepted Date: December 23, 2022