

行政院原子能委員會
委託研究計畫研究報告

20kW 級微型渦輪發電系統實驗測試及 SOFC/GT 混成系統
配置參數分析研究

Testing of a 20kW Micro Turbine Power Generation System and
a Configuration Parametric Analysis for a SOFC/GT Hybrid System

計畫編號：992001INER044

受委託機關(構)：國立清華大學動力機械工程學系

計畫主持人：蔣小偉 教授

核研所聯絡人員：譚學怡

聯絡電話：0910-113-816

E-mail address：hwchiang@pme.nthu.edu.tw

報告日期：99 年 11 月 30 日

目 錄

目 錄.....	I
ABSTRACT.....	5
壹、計畫緣起與目的.....	7
一、計畫背景.....	7
二、國內外發展現況.....	9
(一)SOFC.....	9
(二)GT.....	10
(三)SOFC+GT.....	11
三、計畫目的.....	14
貳、研究方法與過程.....	15
一、50kW 及 100kW 級 SOFC/GT 級混成系統程式開發、參數分析與最佳化.....	15
(一)數學模型.....	15
(二)SOFC/GT 系統配置設定.....	26
二、SOFC/GT 機組改裝匹配規劃.....	27
(一)丙烷、氫氣燃料燃燒特性及引擎改裝文獻整理.....	27
(二)渦輪機組改裝匹配實驗規劃.....	27
參、主要發現與結論.....	31
一、50kW 及 100kW 級 SOFC/GT 級混成系統程式開發、參數分析與最佳化結果.....	31
(一)SOFC 程式驗證.....	31
(二)GT 程式驗證.....	34
(三)壓縮比參數分析.....	36
(四)熱交換效率參數分析.....	37
(五)溫度參數分析.....	39
(六)SOFC/GT 系統最佳化.....	41

二、SOFC/GT 機組改裝匹配規劃成果.....	44
(一)文獻整理結果.....	44
(二)燃燒筒點火測試.....	46
(三)引擎啟動測試.....	46
三、結論.....	49
肆、參考文獻.....	50

中文摘要

在固態氧化物燃料電池(SOFC)與微型氣渦輪發電系統(GT)的混成發電系統中，一般而言 SOFC 與 GT 的發電量比率約在 3:1~5:1 之間不等，因而以目前國內預計開發的 100kW SOFC/GT 混成發電系統實驗機組而言，GT 的獨立發電量需介於 20~30kW，然而，目前國內對於此規格的 GT 發電系統缺乏較完整的實驗測試數據，因而不論是對於混成系統數值分析模型的建立，或是混成系統的配置規劃上，均無法獲得較貼近真實情況的結果；而在針對 SOFC/GT 混成系統效能的模擬分析中，目前對於 GT 的參數輸入值，大多是以設計點下之結果為主，但由於 GT 在與 SOFC 結合後，其操作點往往已偏離設計點，包括壓縮機流量、轉速、渦輪進口溫度、輸出功率、效率等，因而其是否可如預期運轉無誤，將會是未來兩者匹配過程中較大的問題。

目前國內外已成熟運轉、商業化的微型氣渦輪機發電系統並不適用於 SOFC/GT 發電系統，改裝 GT 成適合 SOFC/GT 發電系統運轉的能力是必須首先發展之技術，因此本計畫，“20kW 級微型渦輪發電系統實驗測試及 SOFC/GT 混成系統配置參數分析研究，計畫編號:992001INER044” 將由國立清華大學動力機械工程學系之計畫參與人員許智能、黃武彬及林貞吟評估其技術可行性與提出系統配置之方案。

依據核能研究所設計之 SOFC 發電系統(BOP)，最佳化設計功率分別在 50kW 及 100kW，本研究主要欲提高其發電效率，並評估運轉條件及負載改變對發電效率之效應，使其發電效率達到 50~55%。此外，亦將配合商業化 GT 機組測試數據，將系統的配置分析擴展至

非設計點(Off-design)的模型計算，進行微型渦輪發電機組最佳運轉範圍下的 SOFC/GT 混成系統性能預測，則將可獲得更實用化之混成發電系統研究資料。

關鍵字詞：固態氧化物燃料電池、微型氣渦輪發電系統、混成發電系統

Abstract

For SOFC/GT hybrid systems, the power generation ratio between SOFC and GT is around 3 : 1 - 5 : 1, as the literature has shown. For the current 100kW SOFC/GT hybrid power system, GT will have the power capacity of 20 - 30kW. Since comprehensive experimental test data for this specific GT power generation system are needed, we will obtain results close to the real situation both in numerical analysis for the hybrid system model and in the hybrid system configuration design. As for the simulation analysis of the SOFC/GT hybrid system performance, the current parameter inputs for the GT are for design point only. Therefore, we need to develop the combination of GT and SOFC off-design point, including the compressor flow rate, rotational speed, turbine inlet temperature, output power, and efficiency.

Due to commercially available microturbine power generation system is not applicable for our SOFC/GT power systems, the design of packaging GT to the SOFC/GT power system must be developed. This project, “Testing of a 20kW Micro Turbine Power Generation System and a Configuration Parametric Analysis for a SOFC/GT Hybrid System, project number: 992001INER044” will be performed by Chih-Neng Hsu, Wu-Bin Huang, and Chen-Yin Lin to study the system configuration program.

Based on the SOFC power generation system (BOP) designed by the Nuclear Research Institute, the optimal design power points were found at 50kW and 100kW. This study is to improve its power generation efficiency using the proposed SOFC/GT system. The goal is that the power generation efficiency can reach 50 - 55%. In addition, we will have test data to extend the configuration analysis for off-design point model calculations, and to predict the optimal operating range for

the SOFC/GT hybrid system performance.

Keyword : Solid-Oxide Fuel Cell 、 Microturbine Generator 、 Hybrid
Generation System

壹、計畫緣起與目的

一、計畫背景

我國缺乏自產能源，超過 98% 的能源由國外進口，如何提高能源使用效率以節約能源，是一個非常重要的議題。尤其「京都議定書」已在民國 94 年 2 月 16 日生效，如何在使用能源時，減少二氧化碳的排放也是因應「京都議定書」必須面對的問題。全球目前主要能源來自石化燃料與燃煤，但石化燃料在燃燒後會產生大量的二氧化碳，造成全球暖化現象，使得極端氣候屢見不鮮，諸如洪水、乾旱及颶風等，嚴重威脅人類生命。再者，石化能源即將用罄，尋找新能源已成為世人必須嚴肅面對的課題，根據美國能源部能源計畫，新一代發電技術必須符合兩個特點：一、新的能量轉換方式，排除受爭議的核能發電，目前開發中的能源如太陽能、風力、地熱、潮汐等發電方式在氣候與地理上均受到限制，使其發電效率無法提升至符合大規模經濟效益；二、相較現存的發電技術必須具有更高優勢或潛力，如分散發電、大容量、高安全性、低氮化物與溫室氣體排放、低碳污染、能源可再生性等特點。符合以上特點，氫能源技術中的固態氧化物燃料電池結合氣渦輪機之混成發電系統，頗具潛力成為下世代的新能源發電技術；燃料電池廣義上是指不經過燃燒過程，直接將化學能轉換為電能，因為使用外來的燃料作為能量的裝置，所以燃料電池沒有電力衰竭的問題，只要適時補充燃料，便可持續產生電力；而且相較目前現有的發電方式，其產生的噪音及二氧化碳均非常低，是一種高效能且潔淨的新能源技術，也因此燃料電池被稱作二十一世紀新能源。

燃料電池(Fuel Cell)已有甚久之發展歷史，然而早期之燃料電池

因效率不彰與造價昂貴，故未能有廣泛的應用，近幾年來，因多項技術的突破，使得燃料電池的效率、可靠度不斷的提高，同時燃料電池之應用也越來越廣，舉凡大型發電廠、分散式發電廠、電動汽車動力源、小型可攜式電力等，都已有商用之產品或原型問世；使用燃料電池作為電力來源，具有低污染、高效率等優勢。而就低污染而言，若以氫氣與氧氣為燃料，其產物僅為乾淨的水；若是使用甲烷等碳氫燃料(需經除硫程序)，其產物也僅為水、二氧化碳與其他微乎其微的污染物；以效率而言，由於燃料電池之電力產生過程為電化學反應，不涉及燃燒反應，故燃料電池之發電效率比起傳統發電方式要高出許多；燃料電池發展至今，主要有質子薄膜型(PEMFC)、直接甲醇型(DMFC)、鹼性(AFC)、磷酸型(PAFC)、熔融碳酸鹽(MCFC)與固態氧化物型(SOFC)等形式，而目前研究主流則為 PEMFC、DMFC、與 SOFC 這三種類型。各型燃料電池均有其優缺點，其中 PEMFC 主要利用於中小型發電設施與交通工具電力源、其優點為啟動迅速，技術成熟，不過缺點為需使用純度極高之氫氣來作為燃料，然而目前氫氣之生產與儲存仍未有完美之解決方案。而近年來蓬勃發展的 DMFC，具有可直接利用液態甲醇之優點，一般皆看好其在 3C 產品上之應用，不過目前仍有能量密度低、效率不佳的問題，屬於高溫燃料電池類的 SOFC，主要優點為發電容量範圍大，故用途較為廣泛，且其具有高溫廢氣的特性，可回收並利用於二次發電使用，增加機組的整體效率，不過其缺點為製造不易與費用高昂。

SOFC 本身的效率已可以達 40%以上，此外其對燃料的要求亦較不嚴格，而其高溫的排氣則可以繼續為能源的使用，譬如與氣渦

輪 (GT) 機耦合，形成一混成發電系統，而使得整個系統的效率更高達 60%，甚至 70%。遠比現有的火力或核能電廠高出許多；這種混成的發電系統具有高的熱效率，產出相同電力所排放的 CO₂ 將可大大的減少(NO_x < 1 ppm, SO_x ≈ 0 ppm)，有助於溫室效應的緩解，由於 SOFC/GT 混成系統具有潛在的優越性，因此美國能源部將其 SOFC/GT 研發視為其 2001-2010 高效率引擎與渦輪之關鍵技術為積極研究；對於 SOFC/GT hybrid 發電系統目前國內各研究單位已有初步的研究工作，除了針對 SOFC 本體進行研究外，也積極針對微型渦輪發電機及其周邊配套系統進行研發。

二、國內外發展現況

(一)SOFC

固態氧化物燃料電池(Solid Oxide Fuel Cell, SOFC)是一種高溫型燃料電池，於 1937 年由瑞典科學家 Baur、Preis 團隊在 1000 °C 操作溫度下試驗成功，為目前已知效率最高的燃料電池，其構造分為管式與平板式兩種，相對於管式 SOFC，一般預測平板式 SOFC 能以更高密度模組化封裝方式產生更高的功率密度，並以較薄的固態電解質操作於較低的溫度範圍(700~800 °C)，有助提升 SOFC 材料與長期運轉之穩定度，降低材料製造門檻，減輕封裝洩漏問題，增加材料選擇性，平板式 SOFC 基本構造如圖 1-1 所示：

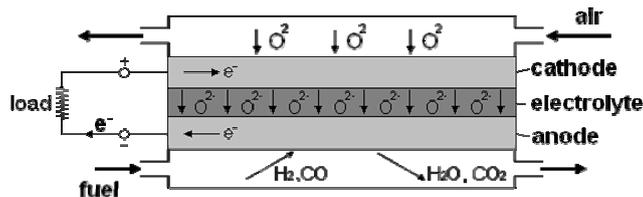


圖 1-1. 固態氧化物燃料電池

其固態電解質為氧離子導性之陶瓷物質，例如高溫立方晶向之安定氧化鋯(Yttria Stabilized Zirconia, YSZ)，操作溫度介於 700°C 至 1000°C，以氫氣作為主要燃料，來源可為天然的富氫物質如天然氣；或再生燃料，如生質酒精，經由 SOFC 內部高溫所引發之水汽重整反應(Steam Reforming)來產生氫氣，此獨特性可免去貴金屬觸媒以及儲氫容器的使用，並使 SOFC 對燃料差異具容忍性，解決以往發電熱機對應單一燃料之限制。由於 SOFC 發電乃將化學能直接轉換成電能，文獻預測其效率可達 50%，優於現今所有具經濟效益之發電技術，當 SOFC 結合氣渦輪機進行混成發電，其熱電合併(Cogeneration)效率最高有機會達 60%，相較其他處於開發階段中的發電技術深具開發潛力。

(二)GT

目前在國外已商業化之微型氣渦輪發電機組中，有美國的 Elliott (TA-45, 80KW)、Capstone (Model330,60KW,30 KW)、Ingersoll-Rand Energy Systems (IR Power Works 30~250kW)、Honeywell (Parallon 75 KW)等等。歐洲則有英國的 Bowman (TG50KW, TG80KW)及瑞典 Turbec (T100-100KW)。亞州則以日本 IHI 所研發之 Dynajet2.6KW 最為成功。在上述技術較為成熟之商業化產品中，以 Capstone Turbine 公司為目前諸多公司中，商業化生產之 Micro-Turbine 業績最好的一家，在 1998 年 12 月商業化生產之 Micro-Turbine Model 330 型(圖 1-2~1-3)，不論是單純作為分散式發電，亦或是與其它動力系統進行改裝複合發電，皆為全球最廣泛使用之機組。



圖 1-2. Model 330-30KW 系統實際配置圖

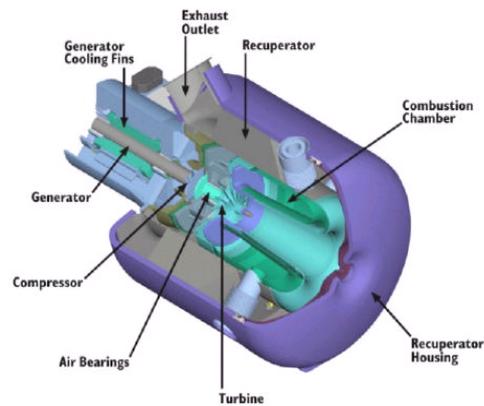


圖 1-3. C30 微型氣渦輪引擎構造圖

國內對於微型燃氣渦輪機發電系統的發展技術上起步較慢，且對於系統應用上的投資遠大於研究開發上，因而尚無成熟的產品推出，在過去漢翔公司曾經開發過 5MW 以上的燃氣及汽電共生發電系統，近年來該公司也開始著手與國內學術界、工研院、中科院合作研究 500kW 以下微型渦輪機發電系統，學術界方面以國立清華大學動機系在微型氣渦輪機發電系統的投入相當積極，且研究範圍以 2.6kW~300kW 微型氣渦輪機發電系統的開發、實驗及分析為主，國立成功大學航太則針對微型氣渦輪機發電系統的燃燒方面投入研究。

(三)SOFC+GT

目前世界上數個開發混成系統的 SOFC 製造商以美國、歐洲及

日本為主，如 GE(USA)、CFCL(Aus)、Rolls-Royce(UK)、Siemens-Westinghouse(USA)、SOFCo(USA)、Mitsubishi Heavy Industry(Japan)、Sulzer Hexis(Switzerland)等，皆處於研發及測試運轉階段，其中後兩者對於常壓型系統開發相當積極；而 2000 年 4 月，由 National Fuel Cell Research Center 與 Southern California Edison 等機構合力發展之 220kW 級 SOFC 與微渦輪引擎複合系統(圖 1-4)，可被視為 SOFC 發展的一個新的里程碑，該系統之 SOFC 為 Siemens-Westinghouse 專利生產之管式(tubular)SOFC，微渦輪引擎則由 Northern Research & Engineering Corporation 製造。在經過一年的實地測試後，證實其效率可達 60%，而未來則計劃將其擴展為 MW 等級之發電系統，屆時其效率預估可達 70%以上。

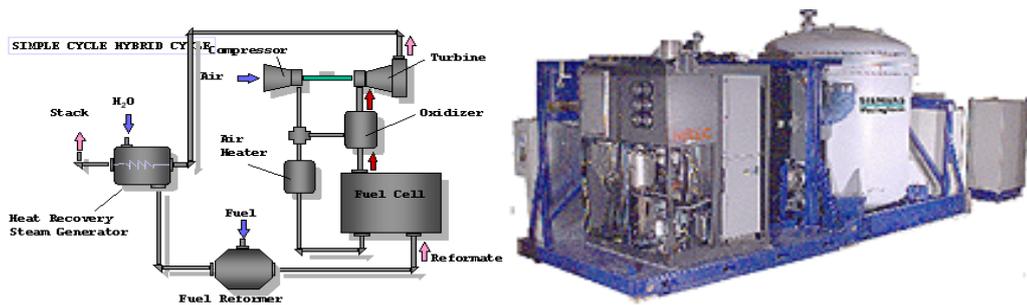


圖 1-4. Siemens-Westinghouse 220kW 發電系統
配置圖(左)及實體圖(右)

國內在相關的研究中則有，工研院能資所自 1988 年起接受能源會委託，進行燃料電池技術的開發已有十年歷史，以往著重於 PAFC 關鍵組件技術開發與系統整合，以及 200kW 示範電廠引進、實驗與展示，期間曾嘗試開發的技術，包括單電池研製與 100kW 模組之組裝、2kW 甲醇重組器與 5kW 甲烷重組器，利用自製重組器與進口 2kW 電池組拼聯發電等，近年來，能資所致力於 kW 級 PEMFC 的研發，目前已完成 1kW 及 3kW 示範系統之研製，並技術轉移給一

民間公司開發相關的商品；另外一方面，工研院材料所則致力於微型直接甲醇燃料電池之研發，以提供 3C 產品的電源，目前已完成可攜式電腦用的 DMFC；中國技術服務社觸媒研究中心在 1992~1996 年間，經由工研院能資所委託開發重組反應觸媒及 PAFC 電極用白金觸媒，雖有初步成果，但該中心已於 1997 年結束計畫；台電公司曾在 1987 年委託工研院能資所進行燃料電池在國內應用的可行性研究，其後與能資所合作進行試驗電廠的引進規劃、現場型機組應用在商業建築的可行性等計畫，並合作運轉 200kW 現場型機組。此座電廠由能源基金提供購置與安裝經費，台電提供場地、水電、燃料與分擔展示推廣費用，於 1995 年 5 月安裝於樹林電研所，並由該所與能資所技術人員共同進行實驗、維修與展示工作；原子能委員會核能研究所近年亦致力於 DMFC 與 SOFC 之研究，後者之研發方向為 SOFC/ μ GT 的分散型電源系統，擬提供其能源展示中心的一部份電力需求；國科會、能源局與工研院能資所曾提供或委託相關研究計畫給予各大學研究，包括台灣大學材料所進行燃料電池發展規劃；台灣大學機械系進行質子交換膜式燃料電池 (PEMFC) 的應用與研發；清華大學化工系研製 PAFC 與 SOFC 電極，動機系計算燃料電池熱傳、直接甲醇式、質子交換膜式及系統設計開發與實驗研究，工科系亦進行微型直接甲醇燃料電池的整合研究，經濟系進行經濟效益分析；成功大學化工系與管理系進行 MCFC 可行性研究；中正大學化工系與元智大學化工系進行 PAFC 白金觸媒、DMFC 合金觸媒研究與 PEMFC 電池性能模擬計算；元智大學燃料電池研究中心進行建立燃料電池測試系統及單位元件的物理、化學特性分析儀器、離子交換膜，MEA 的製作及製程、材料改進其性能之研究、

小型燃料電池單體及電池組 (200~500W) 的自製、設計及分析之能力，重點於空氣、水熱質傳、及濕度之管理以提高其性能，與工業界合作研發 Prototype 3~10 kW PEM Fuel Cell Stack 及 Reformer，應用於取代通訊，固網的備用電力系統，離散式家用電力發電系統，及電動機車動力源等。國內各研究單位、學校、研發中心都是以研究單項燃料電池之用途為主，研究主題以鹼性燃料電池 (AFC)、磷酸燃料電池 (PAFC)、熔融碳酸鹽燃料電池 (MCFC)、質子交換膜燃料電池 (PEMFC) 及直接甲醇燃料電池 (DMFC) 為主居多。而在 SOFC/GT 混成系統的研發上，行政院原子能委員會核能研究所、台灣清華大學能源與環境研究中心等研究單位，已進行數個跨院系領域的 SOFC 相關研究，未來計畫將朝向 SOFC/GT 混成發電示範電廠之評估與開發工作。

三、計畫目的

在 SOFC/GT 混成發電系統中，一般而言 SOFC 與 GT 的發電量比率約在 3:1 ~5:1 之間不等，而目前核研所所設計之 SOFC 發電系統(BOP)最佳化設計功率分別在 50kW 及 100kW，因此 GT 的獨立發電量須介於 20~30kW，因而本研究最主要的目的即在建構國內 100kW 等級之 SOFC/GT 混成發電系統的性能模擬預測以及更貼近實務層面的配置規劃，並進行混成系統在設計點及非設計點下之熱力模擬及參數分析，預測混成系統的性能並提供未來 SOFC/GT 機組改裝匹配的規劃參考。

目前已商業化的 GT 無法直接結合 SOFC，需進行 GT 之改裝，並建立 GT 改裝成適合 SOFC 系統運轉所需要之技術，評估 SOFC/GT 發電系統在功率 50kW 及 100kW 下最佳化 GT 之成本及運轉效能。

貳、研究方法與過程

一、50kW 及 100kW 級 SOFC/GT 級混成系統程式開發、參數分析與最佳化

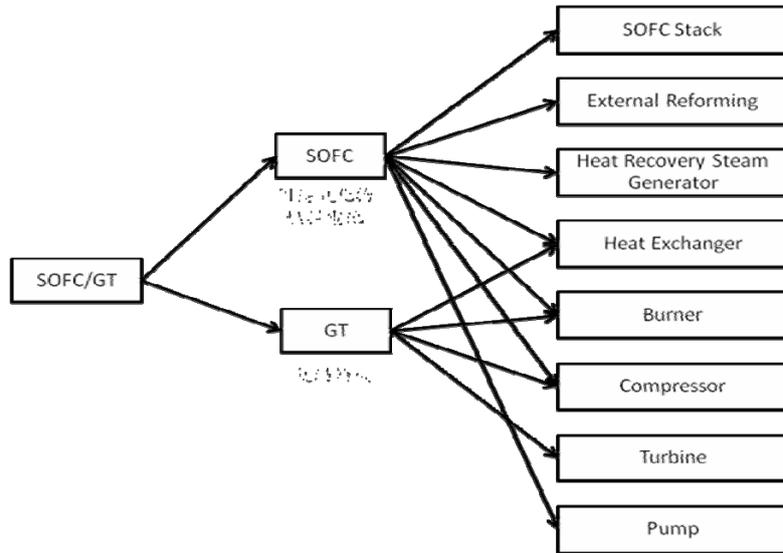


圖 2-1. SOFC/GT 混成系統程式結構

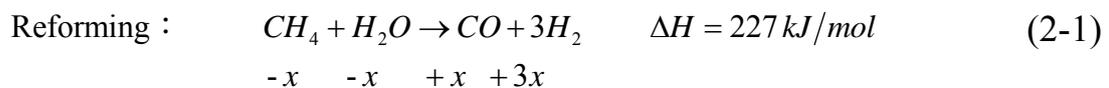
(一)數學模型

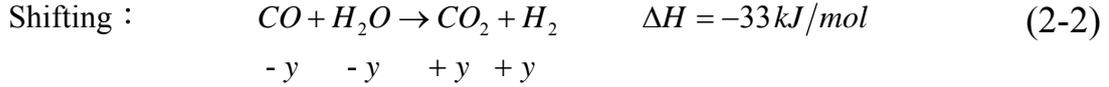
1.SOFC 電池堆(Stack)

SOFC 內部電化學主要為重整、轉移、氧化反應與極化損失，重整反應必須在高溫環境之下才能進行，經反應重組產生的可燃氣體接續進行轉移與氧化反應，以反應前後之總焓變化平衡作為計算條件，並從理論公式求得 Nernst 電壓扣除通過各材料及上述反應造成之極化電壓降得到真實操作電壓。

(1)SOFC 化學反應

SOFC 的化學反應式為式 2-1、2-2、2-3：





其中 x 、 y 、 z 分別代表參與反應的甲烷、一氧化碳及氫氣的反應莫耳流率。

流道內甲烷莫耳分率隨流道位置(L)的變化[1]：

$$CH_4(L) = CH_{4_in} \exp \left[-\frac{A_s P_{an}}{h_f n_{an}^{in}} k_0 \exp \left(-\frac{E_a}{RT_{SOFC}} \right) L \right] \quad (2-4)$$

其中 A_s 為流道截面積； h_f 為陽極流道高度； P_{an} 為陽極壓力； n_{an}^i 為陽極入口的總莫耳流率； k_0 為比例常數； E_a 為反應活化能 (82000J/mol)； $CH_4(L)$ 代表陽極內甲烷的莫耳分率隨流道的變化。

已知陽極產生的電子數為消耗氫氣的兩倍，因此參與電化學反應的氫氣莫耳流率(z)可由式 2-5 表示：

$$z = \frac{iwx}{2F} \quad (2-5)$$

其中 i 為電流密度； F 為法拉第常數(Farady Constant)； w 為流道寬度。

根據式 2-1 至 2-5 可求解出 x 、 z ，再依據 Bossel [24,25] 之研究 (表 2-1)，利用轉移反應(Shifting)之平衡常數(Kp_s)，可推得一元方程式(式 2-6)，求得 y 。

$$Kp_s = \frac{P_{H_2} \cdot P_{CO_2}}{P_{CO} \cdot P_{H_2O}} = 10^{AsT^4 + BsT^3 + CsT^2 + DsT + Es} \quad (2-6)$$

表 2-1. 重整反應與轉移反應平衡常數所使用之各項係數[24,25]

	Reforming	Shifting
A	$-2.6312e^{-11}$	$5.47e^{-12}$
B	$1.2406e^{-7}$	$-2.574e^{-8}$
C	$-2.2523e^{-4}$	$4.6374e^{-5}$
D	$1.95027e^{-1}$	$-3.9150e^{-2}$
E	-66.139488	13.209723

(2)理論電壓與過電位

假設 SOFC 將化學能轉換成電能之過程以可逆的方式完成，此可逆電位(Reversible Cell Potential)根據 Nernst 方程式，在燃料電池壓力操作範圍內，Gibbs 自由能可用反應氣體分壓取代，該理論電位為：

$$E_n = \frac{-\Delta G}{n_e F} = E_0 + \frac{RT_{SOFC}}{2F} \ln \frac{P_{H_2} P_{O_2}^{1/2}}{P_{H_2O}} \quad (2-7)$$

n_e 表一個反應物分子反應後所釋放的電子數，設電池堆內部燃料為氫氣，故 $n_e=2$ ， E_0 代表標準狀態下的電位，可由經驗式 2-9 求得：

$$E_0 = 0.021682[57.939 - T_{SOFC}(11.527 \times 10^{-3} + 0.6 \times 10^{-6} T_{SOFC})] \quad (2-8)$$

模擬電池堆之內部平均溫度 T_{SOFC} 估算法為：

$$T_{SOFC} = T_{SOFC}^i + \frac{T_{SOFC}^e - T_{SOFC}^i}{3} \quad (2-9)$$

根據熱力學第二定律，為使電極上的電化學反應持續進行，必須消耗部分由反應產生的能量以克服反應的阻力或障礙，因此真實輸出電壓必低於可逆電壓，此偏差稱作極化(Polarization)，該現象所

導致的總電壓降($\sum\zeta$)稱過電位(Over-potential)，故輸出電壓(E)可表示為：

$$E = E_n - \sum\zeta \quad (2-10)$$

SOFC 電化學反應的極化過電位主要可歸納為三項：(a)活化過電位 (Activation Over-potential)、(b) 歐姆過電位 (Ohm Over-potential)、(c)濃度過電位(Concentration Over-potential)。

A.活化過電位

電極表面開始進行電化學反應時，必需消耗部份的電位能以克服最低活化能，此過程稱作活化極化，所減少的電壓稱活化過電位(ζ_{act})，該電位可根據 Butler-Volmer 電極方程式導得：

$$i = i_0 \left[\exp\left(\beta \frac{F}{RT} \zeta_{act}\right) - \exp\left(- (1-\beta) \frac{F}{RT} \zeta_{act}\right) \right] \quad (2-11)$$

其中 i 為電流密度， i_0 為反應平衡下的可逆電流，或稱表面交換電流密度(Apparent Exchange Current Density)， β 為表徵電荷傳遞係數(Apparent Charge Transfer Coefficient)，其值來自 Butler-Volmer 電極方程式中的氧化/還原對稱因子[17]，該值通常採用實驗方式求得，約於 0.3~0.6 之間，本論文採用 $\beta=0.5$ ，是參考文獻[1]之數值。其 i_0 值亦採用文獻[13]經驗式取得：

$$i_{0,an} = \kappa_{an} \frac{RT}{2F} \exp\left(-\frac{E_{act,an}}{RT}\right) \quad (2-12)$$

$$i_{0,ca} = \kappa_{ca} \frac{RT}{4F} \exp\left(-\frac{E_{act,ca}}{RT}\right) \quad (2-13)$$

$i_{0,ca}$ 、 $i_{0,an}$ 分別代表陰陽極的表面交換電流密度， $\kappa_{ca}=\kappa_{an}=6.54 \times 10^{11} (\Omega^{-1} \text{m}^{-2})$ ， $E_{act,ca}$ 、 $E_{act,an}$ 為陰陽極活化能。

B. 歐姆過電位

歐姆損失來自離子通過電解質及電子流經電極之阻抗，其中前者比重大於後者，所消耗的電壓稱為歐姆過電位。對平板式 SOFC 而言，發生歐姆損失主要來自電解質層，其值會隨著材料的不同而有變更，本研究所選用之材料性質如表， δ 為材料厚度。

$$\zeta_{ohm} = I \cdot \sum_j R_j \quad (2-14)$$

$$R_j = \sigma_j \delta_j \quad (2-15)$$

Component	Material	Resistivity ($\Omega\cdot m$)
Anode	Ni/YSZ	$1/[(95 \times 10^6/T) \exp(-1150)/T]$
Electrolyte	YSZ	$1/[3.35 \times 10^4 \exp(-10300/T)]$
Cathode	LSM/YSZ	$1/[(42 \times 10^6/T) \exp(-1200)/T]$
Interconnect	Ni/Cr alloy	$1/[(9.3 \times 10^6/T) \exp(-1100)/T]$

表 2-2. 電池內部材料阻抗係數[1]

C. 濃度過電位

濃度極化的主要取決因素為：(A)反應物抵達反應面速率、(B)產物離開反應面速率。當電池在處於高電流密度狀態，燃料氣體必需通過多孔性擴散層，到達觸媒層與電解質介面處進行電化學反應，反應物在電極孔隙與電解質內擴散過程中造成燃料的濃度下降，此種濃度梯度所引發的電位損失稱濃度過電位。陽極濃度過電位使用 1-D model [18]，將陽極流道內平均氫氣分壓 $P_{H_2}^b$ 、水蒸汽分壓 $P_{H_2O}^b$ 、參與電化學反應的氫氣分壓 $P_{H_2}^r$ 與水蒸汽分壓 $P_{H_2O}^r$ ，分別代入 Nernst 方程式求得陽極端濃度過電位：

$$\zeta_{conc,an} = \frac{-RT}{2F} \ln \left| \frac{P_{H_2}^r P_{H_2O}^b}{P_{H_2}^b P_{H_2O}^r} \right| \quad (2-16)$$

陰極濃度過電位則使用一維微粒氣體模組(Dusty Gas Model, DGM) 19、20：

$$\zeta_{conc,ca} = \frac{-RT}{4F} \ln \left| \frac{P_{O_2}^r}{P_{O_2}^b} \right| \quad (2-17)$$

其中 $P_{O_2}^r$ 為陰極流道的平均氧氣分壓， $P_{O_2}^b$ 為參與反應的氧氣分壓。

綜合以上過電位損失，SOFC 操作電壓 E 為：

$$E = E_n - \zeta_{act,an} - \zeta_{act,ca} - \zeta_{ohm} - \zeta_{conc,an} - \zeta_{conc,ca} \quad (2-18)$$

2. 重組器(Reformer)

甲烷與水蒸汽之混合流體進入熱交換器預熱的過程中，在高溫環境下將會有部份的混合氣體進行甲烷/水汽重整反應(Reforming)(式 2-1)及水汽轉移反應(Shifting)(式 2-2)。

重整反應必須在足夠高的溫度下進行，其反應需要輸入熱能，屬於吸熱反應；而轉移反應則為放熱反應。重組器數學模型與 SOFC 電池堆類似，同樣以化學平衡常數(Equilibrium Constants, K_p)對 Bossel [24,25]研究之各項係數(

表 2-)的關係推導出數學方程式：

$$Kp_{-r} = \frac{P_{H_2}^3 \cdot P_{CO}}{P_{CH_4} \cdot P_{H_2O}} = 10^{ArT^4 + BrT^3 + CrT^2 + DrT + Er} \quad (2-19)$$

$$Kp_{-s} = \frac{P_{CO_2} \cdot P_{H_2}}{P_{CO} \cdot P_{H_2O}} = 10^{AsT^4 + BsT^3 + CsT^2 + DsT + Es} \quad (2-20)$$

其中 Kp_r 、 Kp_s 分別為重整反應與轉移反應之平衡常數， P 代表氣體之分壓，下標代表氣體之成分。

將甲烷消耗莫耳數(x)及一氧化碳消耗莫耳數(y)帶入方程式後可得一組非線性聯立方程組：

$$\begin{cases} Kp_{-r} = \frac{(3x+y)^3(x-y)}{(M_{CH_4}-x)(M_{H_2O}-x-y)} \left(\frac{P}{M_{tot}} \right)^2 \\ Kp_{-s} = \frac{(3x+y)(y)}{(x-y)(M_{H_2O}-x-y)} \end{cases} \quad (2-21)$$

其中 M_{CH_4} 為反應前之甲烷莫耳數、 M_{H_2O} 為反應前之水汽莫耳數、 M_{tot} 為反應後之總莫耳數、 P 為重組器內之壓力。利用牛頓法即可求得 x 、 y 值的數值解。

3. 廢熱回收鍋爐(HRSG)

本研究模擬 HRSG(Heat Recovery Steam Generator)流程，透過廢熱回收鍋爐擷取系統後段剩餘熱能加熱產生水蒸氣，所產生之水蒸汽導入混合器提供燃料重組所需，同時預防陽極積碳。以熱力分析而言，廢熱鍋爐亦是熱交換器的一種，熱交換過程包括：未飽和液態水加熱至飽和液態水及飽和液態水加至飽和水蒸汽所吸收的熱量 (\mathcal{Q}_{boiler})，其平衡表示式為：

$$\mathcal{Q}_{boiler} = m_{H_2O} \cdot C_{p,H_2O}(T - T_{sat}) + m_{H_2O} \cdot \Delta h_{fg} \quad (2-22)$$

其中，散逸至環境之熱損失 \mathcal{Q}_{loss} 假設為鍋爐熱端有效熱量的 5%，本模擬系統假設蒸汽鍋爐出口溫度 433K(160°C)，可利用的溫

度下限為 353K(80°C)，低於此溫度則無法利用。

4. 熱交換器(Heat Exchanger)

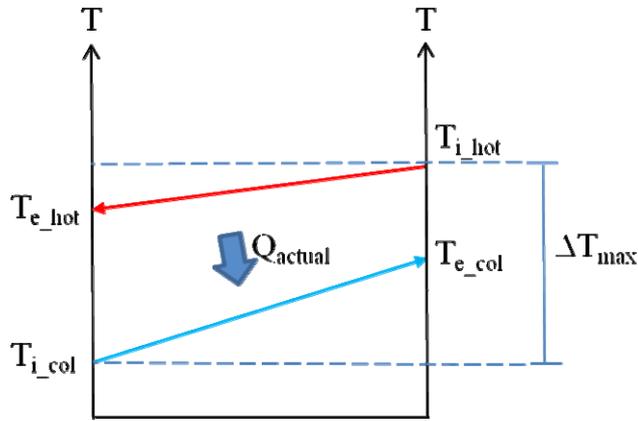


圖 2-2. 熱交換器示意圖

熱交換器的簡易示意圖如圖 2-2，其中進口溫度為已知條件，最大的溫度變化 ΔT_{\max} 即為進口溫度之差 ($\Delta T_{\max} = T_{hot}^i - T_{col}^i$)，理論上熱傳量最大為冷端可接收的熱與熱端可放出的熱兩者中較小的值，可表示成下式：

$$Q_{\max} = \min[C_{p_{hot}} m_{hot} \Delta T_{\max}, C_{p_{col}} m_{col} \Delta T_{\max}] \quad (2-23)$$

其中 C_p 為等壓比熱、 m 為質量流率、下標 hot 為熱端、下標 col 為冷端。

而實際熱傳量 Q_{actual} 可用下式表示之：

$$Q_{\text{actual}} = C_{p_{hot}} m_{hot} \Delta T_{hot} = C_{p_{col}} m_{col} \Delta T_{col} \quad (2-24)$$

當中的 ΔT_{hot} 、 ΔT_{col} 為冷、熱端之實際溫度差 ($\Delta T_{hot} = T_{hot}^i - T_{hot}^e$ 、 $\Delta T_{col} = T_{col}^e - T_{col}^i$)。

熱交換器之效率 (η_{HX}) 定義為實際熱傳量與理論最大熱傳量之比值：

$$\eta_{HX} = \frac{Q_{actual}}{Q_{max}} \quad (2-25)$$

代入熱傳量之定義可視情況簡化之，若 $Q_{max} = C_{p_{hot}} m_{hot} \Delta T_{max}$ ，

熱交換效率為：

$$\eta_{HX} = \frac{C_{p_{hot}} m_{hot} \Delta T_{hot}}{C_{p_{hot}} m_{hot} \Delta T_{max}} = \frac{T_{hot}^i - T_{hot}^e}{T_{hot}^i - T_{col}^i} \quad (2-26)$$

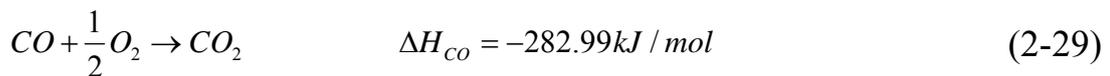
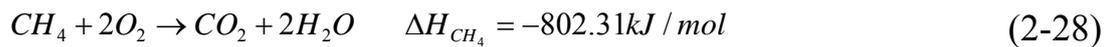
若 $Q_{max} = C_{p_{col}} m_{col} \Delta T_{max}$ ，熱交換效率為：

$$\eta_{HX} = \frac{C_{p_{col}} m_{col} \Delta T_{col}}{C_{p_{col}} m_{col} \Delta T_{max}} = \frac{T_{col}^e - T_{col}^i}{T_{hot}^i - T_{col}^i} \quad (2-27)$$

5. 燃燒室(Burner)

燃燒室位於電池堆或渦輪機之後，可視情況添加額外燃料進入燃燒室，提高燃燒室出口溫度(T_{burner}^e)。

燃燒反應係一放熱反應，若系統使用之燃料為甲烷，其參與燃燒之成份有 CH_4 、 CO 及 H_2 ，其燃燒反應式為：



其放出之熱量會加熱其他未參與反應之氣體(CO_2 、 H_2O 、 N_2 及燃燒反應未使用完之 O_2)，當反應達到能量平衡時的溫度即為燃燒室出口溫度。利用能量守恆作數值疊代計算可求得出口溫度：

$$\sum_j^{unb} H_{p,j}^e - \sum_k^{unb} H_{r,k}^i = \Delta H_{CH_4} + \Delta H_{CO} + \Delta H_{H_2} - \dot{Q}_{loss} \quad (2-31)$$

\mathcal{Q}_{loss} 表過程中有 5% 總反應放熱量散失， $\sum_j^{unb} H_{p,j}^e$ 、 $\sum_k^{unb} H_{r,k}^i$ 代表

進出口未參與燃燒反應的氣體總焓。

6. 壓縮機(Compressor)

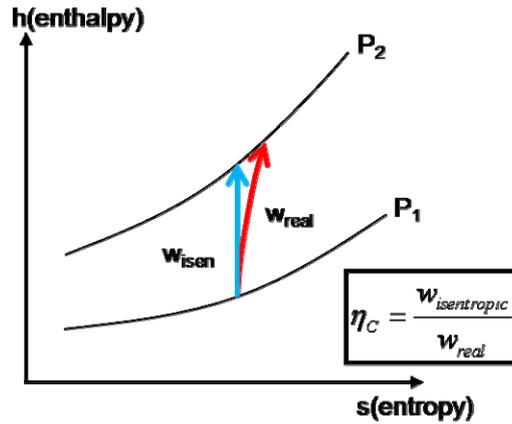


圖 2-3. 壓縮機 h-s 圖

假設壓縮機壓縮過程為等熵過程(圖 2-3)，理想氣體在等熵的過程中有 $Pv^k = \text{constant}$ 的關係，因此可得：

$$w_{isen} = \frac{kRT_1}{k-1} \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] \quad (2-32)$$

為符合程式模擬之真實性，壓縮機效率(η_c)定義為：

$$\eta_C = \frac{w_{isen}}{w_{real}} = \frac{h_{2s} - h_1}{h_2 - h_1} \quad (2-33)$$

等熵過程所求得之輸入功為理想化之功(w_{isen})， w_{isen} 需除壓縮機效率(η_c)才為實際上之輸入功(w_{real})。

根據熱力學對焓之定義可得實際輸入功：

$$w_{real} = h_2 - h_1 = C_p (T_2 - T_1) \quad (2-34)$$

因此壓縮機實際做功可表示成：

$$w_{real} = \frac{kRT_1}{(k-1)\eta_c} \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] = \frac{kR}{k-1} (T_2 - T_1) \quad (2-35)$$

若已知入口溫度(T_1)及壓縮比($r_p=P_2/P_1$)即可計算出真實出口溫度(T_2)：

$$T_2 = T_1 + \frac{T_1}{\eta_c} \left[r_p^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] \quad (2-36)$$

7. 渦輪機(Turbine)

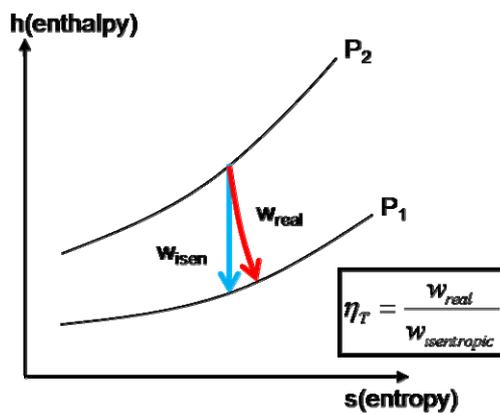


圖 2-4. 渦輪機 h-s 圖

因假設壓縮機與渦輪機為等熵過程，可利用可逆之特性(圖 2-4)使用同樣的方式導得數學方程式：

$$w_{real} = \frac{kRT_1\eta_T}{k-1} \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] = \frac{kR}{k-1} (T_2 - T_1) \quad (2-37)$$

其中 η_T 為渦輪機效率，渦輪機效率計算與壓縮機相反，分子為實際輸出功(w_{real})，分母為理論輸出功(w_{isen})：

$$\eta_T = \frac{W_{real}}{W_{isen}} \quad (2-38)$$

在已知進口溫度(T_1)及進出口壓力比($P_2/P_1=r_p$)的條件下可求得出口溫度(T_2)，然後可將 T_2 再帶回方程式式 2-37 得到實際輸出功 (W_{real})。

8. 幫浦(Pump)

液態水經由一幫浦輸送至鍋爐中，幫浦出口壓力 P_{pump}^e 及所需入功率 W_{pump}^i 的計算如下：

$$P_{pump}^e = r_p \cdot P_{pump}^i \quad (2-39)$$

$$W_{pump}^i = \frac{m_{H_2O} v (P_{pump}^e - P_{pump}^i)}{\eta_{pump}} \quad (2-40)$$

其中， v 為液態水的比容， r_p 為幫浦的壓縮比。預設幫浦效率 η_{pump} 為 80%，則 W_{pump}^i 可由(式 2-40)求得。

(二) SOFC/GT 系統配置設定

本研究中使用之模擬分析系統為清大及核研所共同開發之 SOFC/GT 混成熱力模擬系統，所撰寫之模擬分析系統採用模組化程式碼，各部件程式模組皆可獨立使用，其優點在於各模組可獨立進行正確性驗證比對，並可因應新系統配置而改變模擬架構，無需重新撰寫部件程式，提高系統程式碼的使用效率。程式中使用之 SOFC 及 SOFC/GT 系統理論模型基本假設如下：

1. 使用甲烷為燃料，空氣中的氧氣為氧化劑。
2. 燃料預熱過程中，10%的燃料參與外部重整反應。

3. 電流密度為定值，與流道位置變化無關。
4. 電池堆內部操作於平均溫度及壓力，忽略壓力損失。
5. 混成發電系統操作於穩態(steady)。
6. 流體性質為理想氣體。

SOFC/GT 之系統配置與參數設定將延續先前研究之加壓型系統配置(圖 2-5)，在此配置下由鍋爐(Boiler)排出之廢熱尚有 500K 的高溫，尚具有相當高的可利用熱能，且其排出之高溫氣體的組成也相當乾淨(CO_2 、 O_2 、 H_2O 、 N_2)。

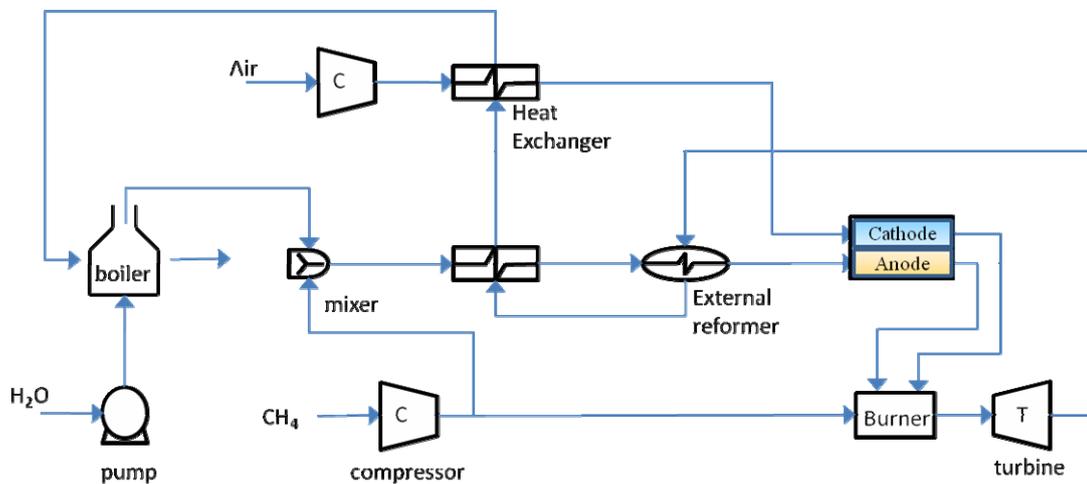


圖 2-5. SOFC/GT 加壓系統配置

二、SOFC/GT 機組改裝匹配規劃

本研究以微型渦輪噴射引擎作為測試載具，並以丙烷/氫氣作為燃料，進行引擎點火測試及改裝、燃氫性能測試與分析。

(一) 丙烷、氫氣燃料燃燒特性及引擎改裝文獻整理

1. 針對丙烷、氫氣燃料進行燃燒特性文獻整理，包含可燃極限、火燄溫度、點火能量、火焰速度等特性及燃丙烷/氫氣實驗測試結果。
2. 燃油引擎改裝成燃氣、燃氫引擎相關文獻整理。

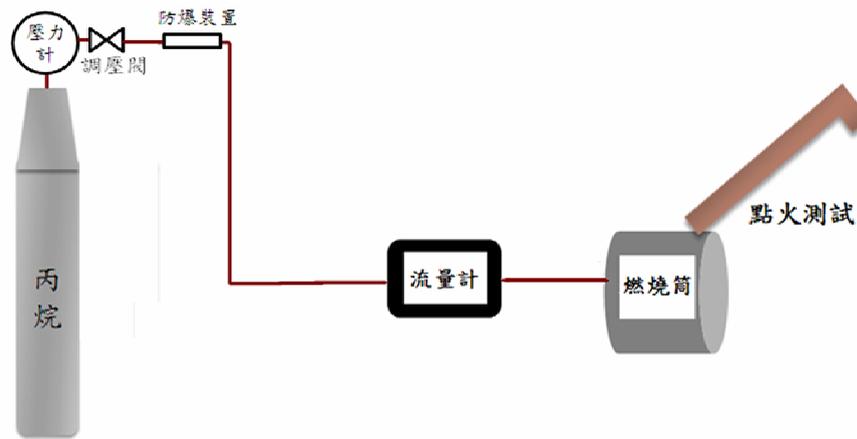


圖 2-7. 點火測試實驗裝置

2. 燃氣穩態性能測試

(1) 燃氣調配與系統進氣

本研究使用丙烷氣體及不同濃度的氫氣作為燃料，此次實驗使用的氣體為新大氣體製造的丙烷及氫氣，並利用氣體管線中外加的調壓閥調整所需氣體比例。

(2) 穩態測試

先架設引擎測試設備，如(圖 2-8)，用壓力計調整氫氣、丙烷至所需比例後，即可利用前述量測設備進行引擎穩態燃丙烷-氫氣性能量測。首先量測設計點轉速 135,000rpm 下引擎之推力、燃氣消耗率及尾管溫度，取得所需數據後繼續量測非設計點轉速 60,000~135,000rpm 間每隔 10,000rpm 各轉速下的上述各穩態性能參數。測試時，需使引擎在每個穩態轉速下穩定運轉 10~20 秒後再進行量測紀錄。

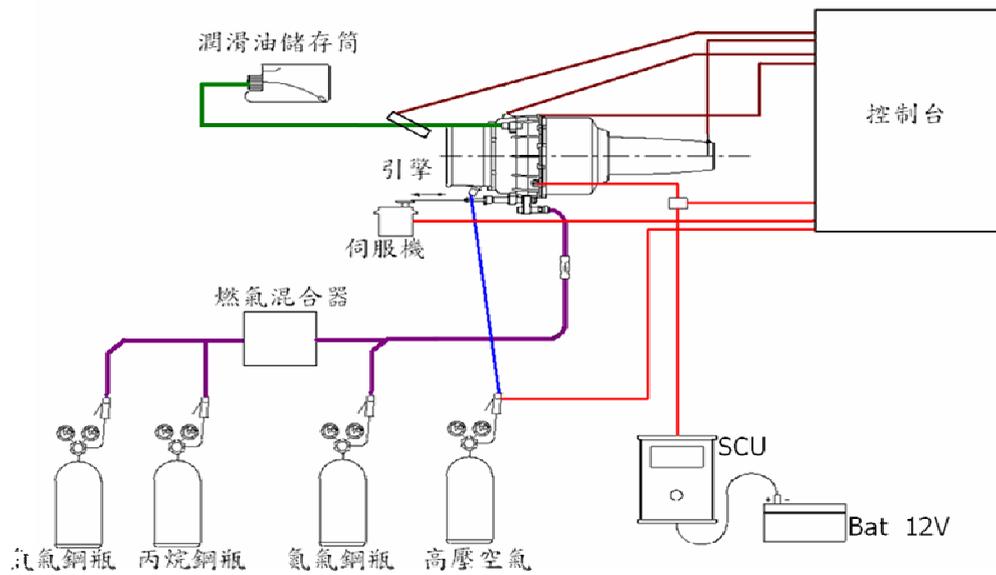


圖 2-8. 微型渦輪噴射引擎燃丙烷-氫氣測試設備全

(3)性能比較與分析

分析穩態測試的實驗量測結果，藉由實驗數據觀察不同燃氫比例對引擎性能參數的影響，並與引擎基線性能做比較，比較參數包含壓縮機轉速與推力之關係、壓縮機轉速與引擎尾管溫度之關係及壓縮機轉速與燃氣消耗率之關係，藉由以上性能比較得出不同氫氣比例對燃丙烷-氫氣引擎性能及燃氫對燃油引擎性能之影響。

參、主要發現與結論

一、50kW 及 100kW 級 SOFC/GT 級混成系統程式開發、參數分析與最佳化結果

本研究使用加壓型系統(圖 3-1)之 SOFC/GT 程式，進行模擬計算系統性能特性及最佳化配置分析。

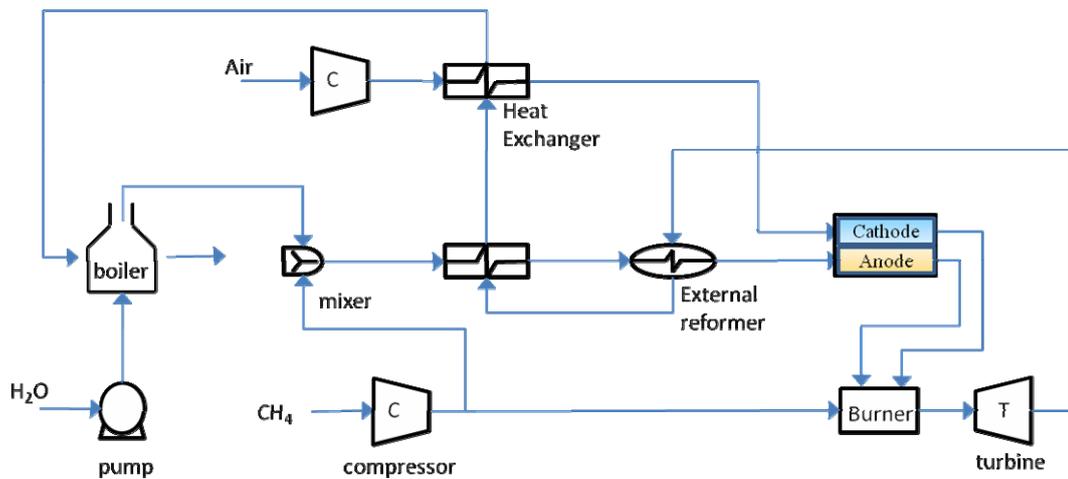


圖 3-1. SOFC/GT 加壓系統配置

因為目前只有 SOFC 之實驗數據，尚無 SOFC/GT 實驗數據可供參考，故 SOFC/GT 程式之驗證必須將 SOFC 及 GT 程式分開驗證其可靠性。

(一)SOFC 程式驗證

為防止 SOFC 電池堆內部溫差過大，控制氧氣利用率為 0.125，燃料使用率為 0.8，電池堆入口水/碳比維持在 3，操作電壓為 0.7 伏特，SOFC 系統模擬結果如表 3-1 及表 3-2，SOFC 發電量為 2.32kW，再扣除壓縮機及幫浦耗功後，整體總發電量為 1.79kW，總發電效率達 34.1%。

表 3-1. SOFC 程式各裝置進出口狀態模擬結果

裝置	流量(kg/s)	T _{in} (K)	T _{out} (K)	P _{in} (atm)	P _{out} (atm)
Pump	0.0004	300.0	300.0	1.00	1.25
Fuel Comp	0.0001	300.0	315.8	1.00	1.25
Air Comp	0.0145	300.0	330.2	1.00	1.25
Boiler Cold Side	0.0004	300.0	433.0	1.25	1.25
Mixer	0.0005	-	404.2	1.25	1.25
Air HX Cold Side	0.0145	330.2	1023.0	1.25	1.15
Fuel HX Cold Side	0.0005	404.2	1023.0	1.25	1.15
External Reformer	0.0005	1023.0	1023.0	1.15	1.15
SOFC	0.0150	1023.0	1145.0	1.15	1.15
After Burner	0.0150	1145.0	1212.0	1.15	1.12
Reformer HEX	0.0150	1212.0	1204.6	-	-
Fuel HX Hot Side	0.0150	1204.6	1164.7	-	-
Air HX Hot Side	0.0150	1164.7	511.4	-	-
Boiler Hot Side	0.0150	511.4	445.6	-	-

表 3-1 SOFC 程式功率及效率模擬結果

	Power/Heat (kW)	Efficiency (%)
Fuel LHV	5.2586	-
SOFC	2.3257	44.2
Electric	1.7918	34.1
Thermal	1.7865	34.0
BOP	3.2965	68.0

圖 3-2 為核能研究所提供之相關資料，在相同燃料流量與 SOFC 進口溫度的條件下，在 SOFC 發電量、SOFC 出口溫度及燃燒室出口溫度的結果皆相當符合(表 3-3)，效率方面，本研究未扣除壓縮機及幫浦的效率為 44.2%，與核能研究所提供的 44.3%也相當接近。

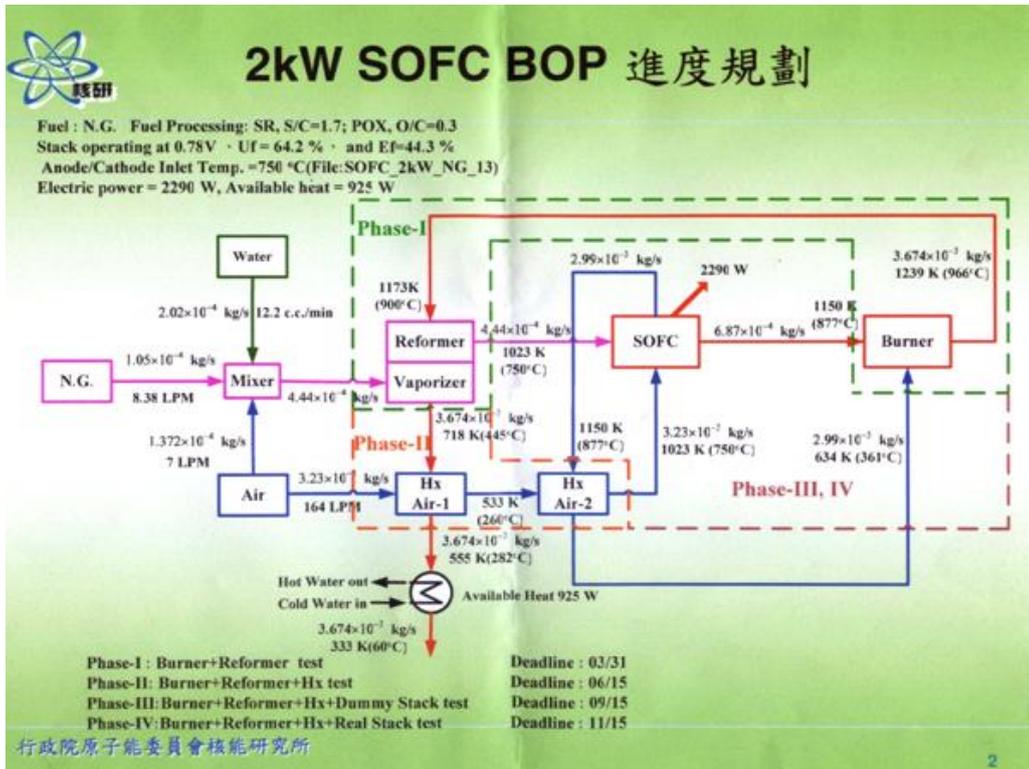


圖 3-2. 核能研究所 2kW SOFC BOP 進度規劃

表 3-2. SOFC 驗證比較

	本研究	核能研究所	Error
$P_{SOFC}(W)$	2325.7	2290	1.6%
$T_{i_SOFC}(K)$	1023	1023	-
$T_{e_SOFC}(K)$	1145	1150	0.4%
$T_{e_Burner}(K)$	1212	1239	2.2%
Efficiency (%)	44.2	44.3	0.2%

(二)GT 程式驗證

在 GT 程式驗證方面將使用 GasTurb9 這套以熱流力理論計算引擎性能參數的應用軟體，因本研究之 GT 模型使用甲烷為燃料，與 GasTurb9 軟體所設定之燃料種類相異，故在使用 GasTurb9 時，需先以柴油/甲烷熱值比(1.17)求得相同輸入熱量下的甲烷質量流率。表 3-4 及表 3-5 為本研究與 GasTurb9 之模擬結果比較，壓縮機與渦輪機之誤差皆相當小，因此壓縮機與渦輪機程式模組皆可信賴；推測渦輪機誤差較大之原因，壓縮機之工作流體皆為空氣，成份固定，因此程式執行結果相當符合(表 3-4)，而在渦輪機方面，因流體組成取決於燃料及其燃燒狀況，故誤差較壓縮機大(表 3-5)。

表 3-3. 壓縮機程式驗證比較

	GasTurb9	本研究	Error (%)
入口溫度(K)	288.15	288.15	—
入口壓力(kPa)	101.325	101.325	—
壓縮比(rp)	3	3	—
壓縮效率(%)	0.85	0.85	—
出口溫度(K)	412.59	412.29	0.07

表 3-4. 渦輪機驗證比較

	GasTurb9	本研究	Error (%)
入口溫度(K)	1404.29	1404.29	—
入口壓力(kPa)	294.856	294.856	—
壓力比(rp)	2.769	2.769	—
渦輪效率(%)	0.89	0.89	—
出口溫度(K)	1139.09	1151.44	1.08

以上即為 SOFC 及 GT 程式之驗證結果，SOFC 及 GT 程式模組皆可使用，可結合成 SOFC/GT 複合式發電系統，所使用之參數設定如表 3-8 所示，結果如表 3-6 及表 3-7 所示，SOFC 發電量為 23.1kW，氣渦輪機子系統供給所有附屬部件耗能後之發電量為 9.5kW，整體總發電量達 32.6kW，總發電效率達 49.4%。此結果顯示 SOFC 加裝 GT 系統總發電量由 34.1% 提升至 49.4%，增加了 15 個百分比，相當具有發展願景。

另外經由初步的模擬結果可知至少有 540K、37.6% 之高溫排氣可供吸收式冷凍或加熱使用。

表 3-6. SOFC/GT 加壓系統模擬結果[23]

裝置	流量(kg/s)	T _{in} (K)	T _{out} (K)	P _{in} (atm)	P _{out} (atm)
Pump	0.0029	300.0	300.0	1	2.8
Fuel Comp	0.0013	300.0	394.8	1	2.8
Air Comp	0.1191	300.0	455.5	1	2.8
Boiler Cold Side	0.0029	300.0	433.0	2.8	2.8
Mixer	0.0038	-	424.0	2.8	2.8
Air HX Cold Side	0.1191	455.5	1073.0	2.8	2.5760
Fuel HX Cold Side	0.0038	424.0	1073.0	2.8	2.5760
External Reformer	0.0038	1073.0	1073.0	2.5760	2.5760
SOFC	0.1229	1073.0	1222.0	2.5760	2.5760
After Burner	0.00046	1222.0	1429.8	2.5760	2.4987
Turbine	0.1234	1429.8	1231.9	2.4987	1.1185
Reformer HEX	0.1234	1231.9	1224.6	-	-
Fuel HX Hot Side	0.1234	1224.6	1182.6	-	-
Air HX Hot Side	0.1234	1182.6	604.4	-	-
Boiler Hot Side	0.1234	604.4	540.6	-	-

表 3-7. SOFC/GT 加壓系統功率及效率模擬結果

	Power/Heat(kW)	Efficiency(%)
Fuel LHV	66.0	-
GT	9.5	14.4%
SOFC	23.1	35.0%
Electric	32.6	49.4%
Thermal	24.9	37.6%
BOP	57.5	87.0%

(三) 壓縮比參數分析

壓縮比定義為壓縮機及幫浦出口壓力對入口壓力之比值，提高壓縮比能有效提升渦輪機之功率，但在電池堆入口溫度及熱交換效率固定的情況下，勢必要增加額外添加至燃燒室的燃料，以保持熱交換效率不變，結果如圖 3-4、圖 3-5 所示，圖 3-4 中的 Q_{fuel} 為總燃料的 LHV，在功率部分壓力增加對 SOFC 之影響並不顯著，而 GT 則會隨壓縮比的增加而上升；效率方面結果與文獻[26]一致，因為燃料的增加幅度比 GT 上升的幅度大，所以效率保持下降的趨勢。

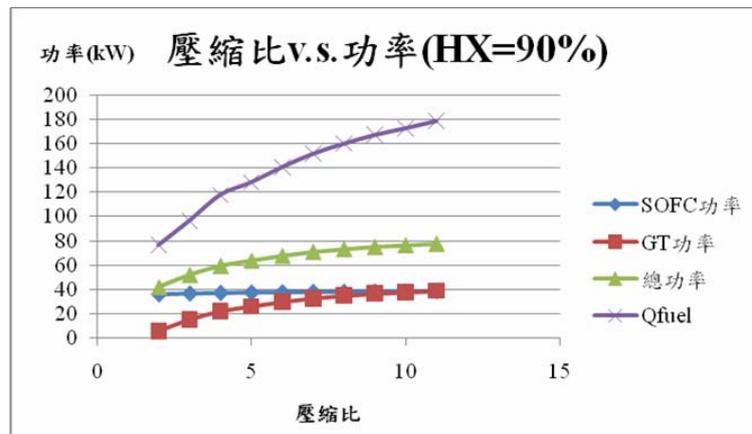


圖 3-4. 壓縮比對功率之影響

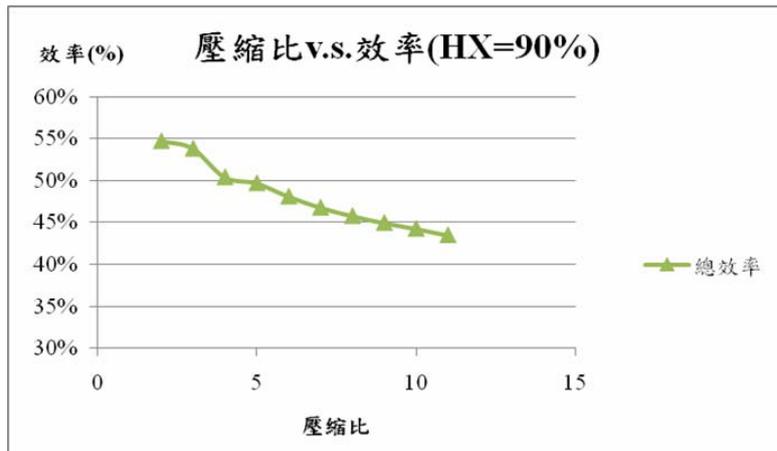


圖 3-5. 壓縮比對效率之影響

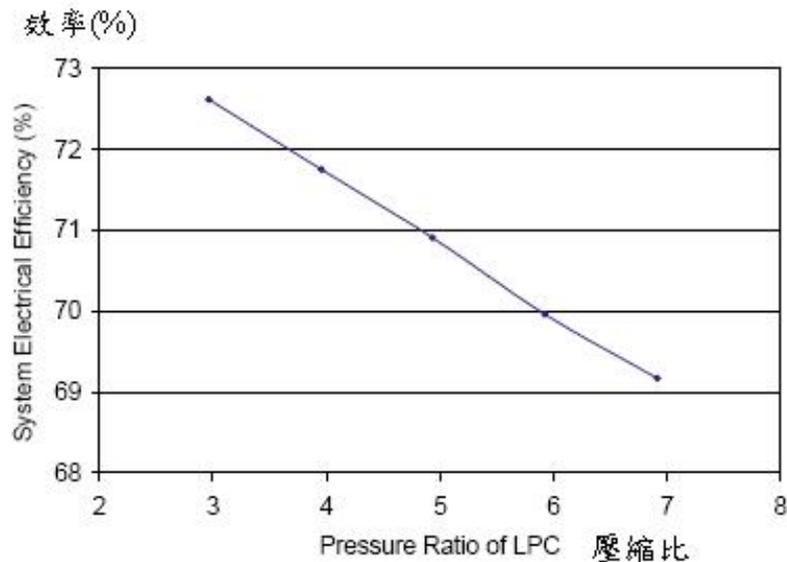


圖 3-6. 壓縮比對效率之影響參考資料[26]

(四)熱交換效率參數分析

SOFC 屬高溫型燃料電池，因此熱交換器在 SOFC 中是一重要元件，熱交換的效率越高所需的燃料就越少，但同樣的渦輪的流量也相對降低，造成功率輸出下降(圖 3-7)，效率方面熱交換效率越高電效率也越高，與文獻[27]之結果相符，效率隨壓縮比增加會先上升而後下降；另外模擬結果顯示若固定熱交換效率，發電效率最佳

的壓縮比會改變，如圖 3-10，當熱交換效率越高，發生效率最高的位置的壓縮比越低。

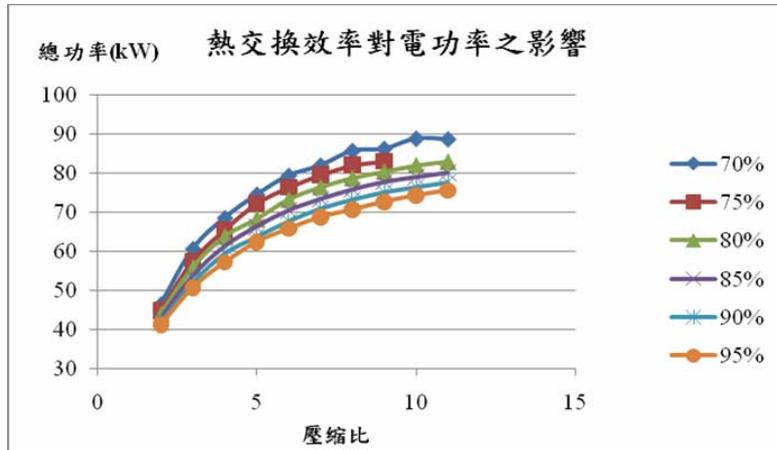


圖 3-7. 熱交換效率對功率之影響

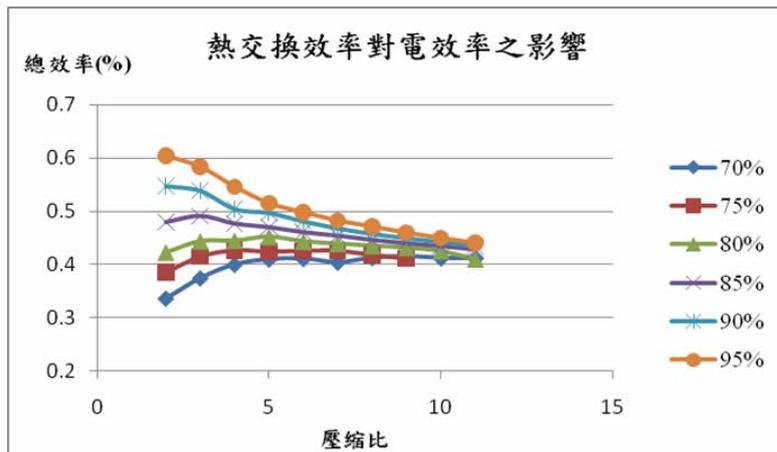


圖 3-8. 熱交換效率對效率之影響

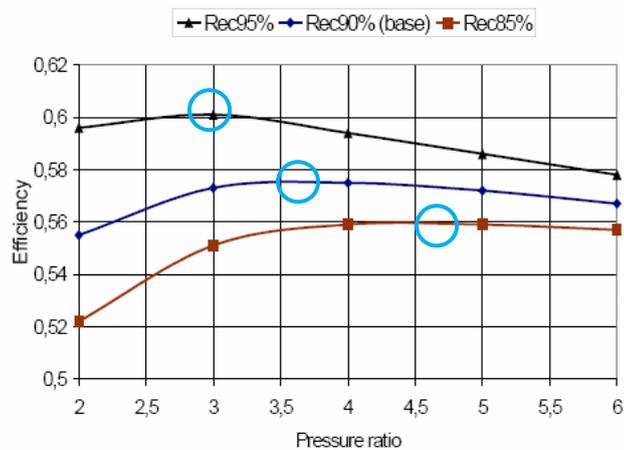


圖 3-9. 熱交換效率對效率之影響參考資料[27]

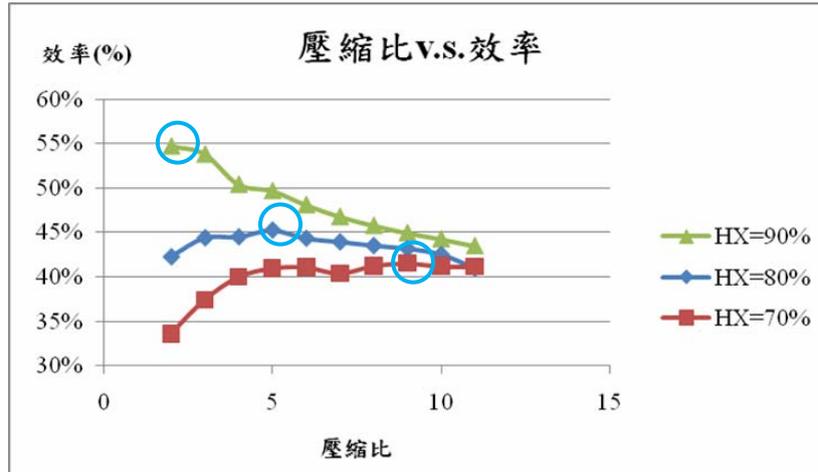


圖 3-10. 熱交換效率影響最佳壓縮比

(五)溫度參數分析

在高溫下運作，使得 SOFC 相較於其它燃料電池擁有最高的效率。然而，為了使固態氧化物燃料電池的實用性可以大大的提昇，目前國際間以降低操作溫度為主要的研究方向，溫度參數分析最主要的目的是在效率可接受的範圍內將操作溫度盡可能的降低；參數分析結果如圖 3-11、圖 3-12，電池堆進口溫度高於 1,100K 時 SOFC 功率即趨於穩定，而 GT 功率則隨溫度提升呈線性上升；就整體效率而言，溫度低於 1,078K 的效率表現不佳，高於 1,078K 後效率的變化也趨於穩定，最後在 1,278K 後效率又開始向下降低，此現象與文獻[28] (圖 3-13)相同，效率皆有先上升後下降的現象，但因為系統的配置有所不同，故只有特性相同，在數值上無法比較。

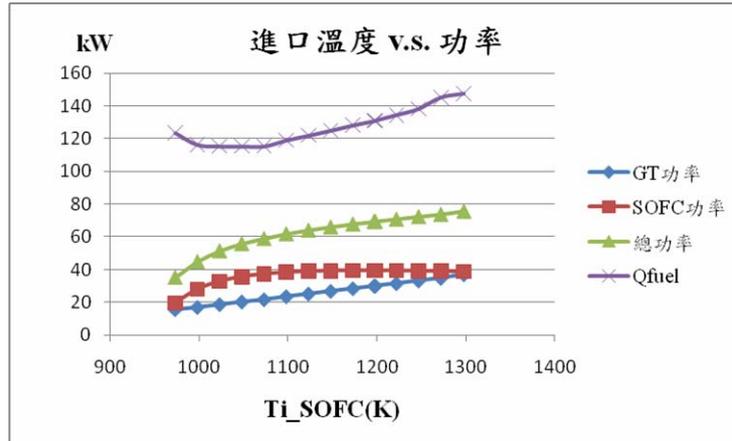


圖 3-11. 電池堆進口溫度對功率之影響

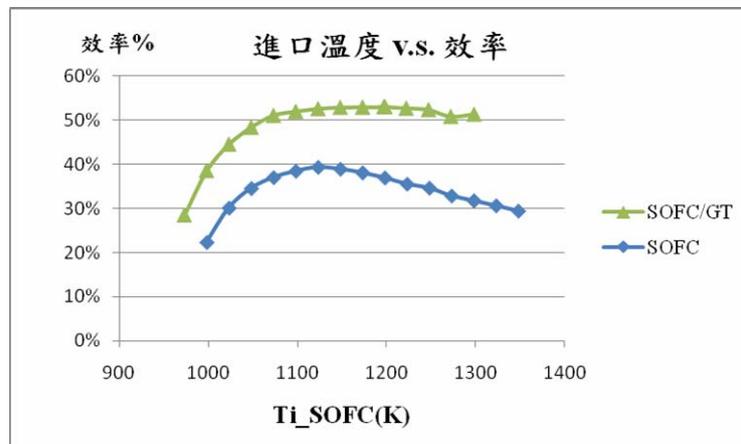


圖 3-12. 電池堆進口溫度對效率之影響

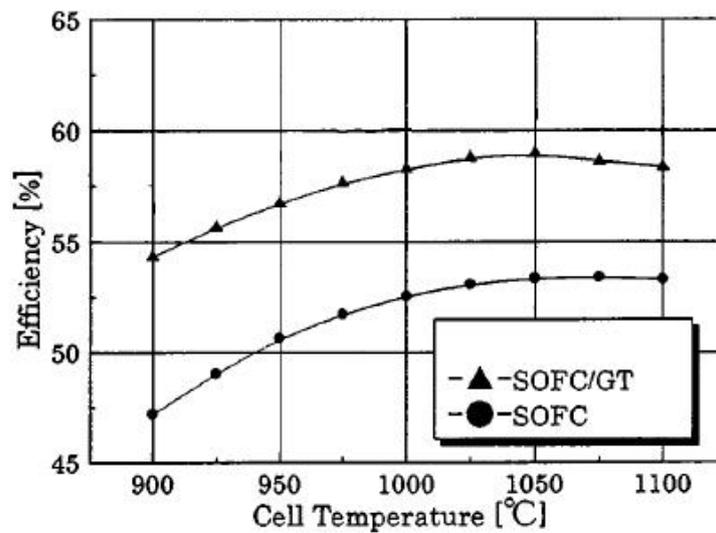


圖 3-13. 電池堆溫度對效率之影響參考資料[28]

(六)SOFC/GT 系統最佳化

利用壓縮比、熱交換效率及 SOFC 進口溫度之參數分析結果，電池堆內部最大溫差保持在 150°C，進行參數最佳化(表 3-8)之模擬，SOFC/GT 最佳化結果如表 3-9、表 3-10 及圖 3-13，GT 佔總發電量的 38%，SOFC 佔 62%，發電效率可達 52%，BOP 效率為 93.7%，最後排氣尚有 587.25K、99.35kW 的熱能。

參數項目	數值	參考來源
大氣壓力 (kPa)	101.325	實驗數據
室溫 (K)	300	實驗數據
相對溼度 (%)	60	研究設定
空氣質量流率 (kg/s)	0.119	實驗數據
空氣壓縮機效率	0.65	GasTurb9
燃料壓縮機效率	0.8	研究設定
幫浦效率	0.8	研究設定
壓縮比	2.8	實驗數據
熱交換器效率	0.9	文獻[26]
空氣熱交換冷端壓降 (%)	8	研究設定
渦輪機效率	0.81	GasTurb9
發電機效率	0.945	研究設定
燃料外重整比例	0.1	文獻[17]
電池堆燃料利用率	0.8	研究設定
電池堆氧氣利用率	0.125	研究設定
電流密度 (mA/cm ²)	800	研究設定
操作電壓 (V)	0.65~0.7	研究設定
電池堆入口溫度 (K)	1073	研究設定
電池堆內部溫升 (K)	100~200	研究設定
電池堆入口水/碳比	3.0	研究設定
電池堆壓降 (%)	3	研究設定

表 3-8. SOFC/GT 系統初始設定

表 3-9. SOFC/GT 最佳化參數模擬結果

裝置	流量(kg/s)	T _{in} (K)	T _{out} (K)	P _{in} (atm)	P _{out} (atm)
Pump	0.0094	300.0	300.0	1	4
Fuel Comp	0.0048	300.0	406.3	1	4
Air Comp	0.3780	300.0	519.8	1	4
Boiler Cold Side	0.0094	300.0	433.0	4	4
Mixer	0.0121	-	426.1	4	4
Air HX Cold Side	0.3780	519.8	1098.0	4	3.68
Fuel HX Cold Side	0.0121	426.1	1098.0	4	3.68
External Reformer	0.0121	1098.0	1098.0	3.68	3.68
SOFC	0.3901	1098.0	1256.0	3.68	3.68
After Burner	0.0020	1256.0	1503.5	3.68	3.57
Turbine	0.3921	1429.8	1231.9	3.57	1.12
Reformer HEX	0.3921	1231.9	1224.6	-	-
Fuel HX Hot Side	0.3921	1224.6	1182.6	-	-
Air HX Hot Side	0.3921	1182.6	604.4	-	-
Boiler Hot Side	0.0094	650.2	587.2	-	-

表 3-10. SOFC/GT 加壓系統功率及效率最佳化結果

	Power/Heat(kW)	Efficiency(%)
Fuel LHV	238.0	-
GT	47.2	19.8%
SOFC	76.5	32.2%
Electric	123.7	52.0%
Thermal	99.4	41.7%
BOP	223.1	93.7%

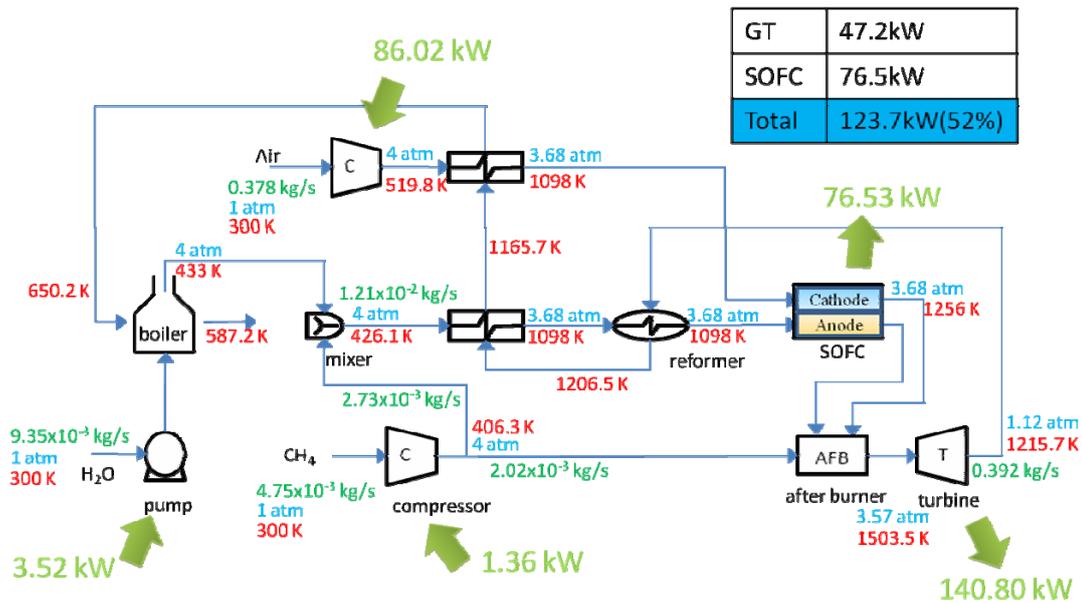


圖 3-13. SOFC/GT 最佳化參數模擬結果

二、SOFC/GT 機組改裝匹配規劃目前成果

(一)文獻整理

1.丙烷、氫氣燃料進行燃燒特性

丙烷、氫氣燃料燃燒特性文獻整理整理如表 3-11，氫氣無色、無味、無臭、無毒，由表中比較可發現，其密度低，需要大容器儲存；熱值高(LHV：119.96 MJ/kg)，約為丙烷三倍；點火能量低，可使引擎點火快速，但也可能造成引擎內部熱點及回火問題；可燃範圍廣，可使引擎操作在貧油狀態下燃燒，但若外洩可能造成燃燒或爆炸的情形；擴散係數高，可迅速和空氣混合，利於燃燒，但若有氫氣滲漏的情形發生，氫氣會快速散去，使危險程度被排除或降低；此外氫氣火焰速度快、滅燄距離小，難以熄滅。

表 3-11. 氫氣、丙烷火焰燃燒特性

安全特性	氫氣	丙烷
常溫 293.15K, 常壓 1atm 下密度 (kg/m ³)	0.0838	1.87
自燃溫度(K)	858	760
空氣中最小自燃能量(mJ)	0.02	0.26
空氣中火焰溫度(K)	2318	2385
空氣中爆炸速度(km/s)	2.0	1.85
爆炸壓力(bar)	14.70	18.25
常溫 293.15K, 常壓 1atm 下定壓比熱 (J/gK)	14.89	1.67
空氣中完全燃燒 化學劑量比(體積分率%)	29.53	4.03
最大熱容量(kJ/g)	141.86	50.41
空氣中可燃範圍(@1atm)	4-76%	2.2-9.5%
空氣中爆炸範圍(@1atm)	13-59%	3.1-7%
擴散係數(cm ² /sec) 1atm, Φ=1, @ room temperature	0.61	0.12
火焰速度(cm/s) 1atm, Φ=1, @ room temperature	210	44
滅燄距離(mm), Φ=1	0.64	2.0
空氣中延燒特性	往上	往下

2. 燃油引擎改裝成燃氣、燃氫引擎相關文獻整理

文獻[32]、[41]、[43]、[52]發現燃油引擎改裝成燃氣、燃氫引擎，燃燒系統為首先要改裝的部分，改裝重點主要在於燃燒室霧化器；燃燒時須注意，因燃氫對燃燒室及其他元件造成的衝擊力較其他燃料大。由文獻[53]、[54]發現，由於氫氣點火能量較低，故可能會造成某些燃油引擎燃燒室有過熱或甚至熱點的情形出現，進而影響燃燒室的可靠度(Durability)；此外，燃氫火焰較燃油靠近燃燒室上游部分，故霧化器可能會有超溫情形產生，也會影響其材料性質，而優點為燃氫燃燒室可設計較燃油燃燒室短，節省引擎空間及減少引擎重量。

(二)燃燒筒點火測試：

燃燒筒點火實驗中在 0.5 kg/cm^2 供氣條件下成功點燃丙烷，且可穩定維持燃燒，如(圖 3-14)。



圖 3-14. 燃燒筒點火測試結果

(三)引擎啟動測試：

燃氣供應量 0.5 kg/cm^2 ：無法成功點火，經檢查後發現火星塞並

無問題，如(圖 3-15)，然同樣供氣量下以點火器靠近燃氣出口可成功點火，且沒有燃燒不均勻的現象發生，如(圖 3-16)。

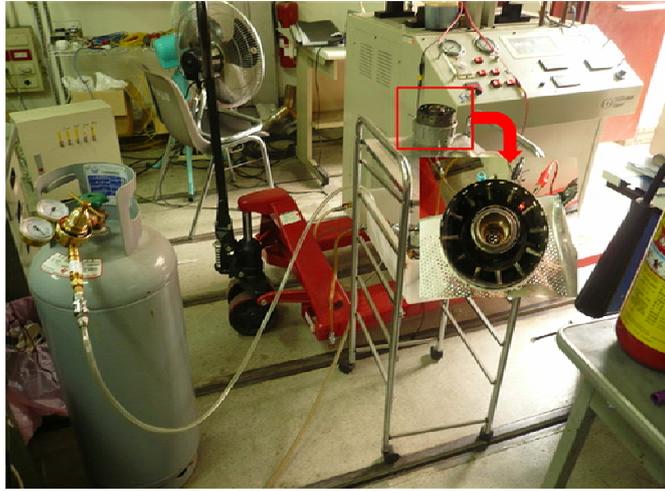


圖 3-15.燃氣供應量 0.5 kg/cm^2 點火測試



圖 3-16. 燃氣供應量 0.5 kg/cm^2 點火測試(點火器靠近燃氣出口)

由以上結果發現由於燃氣在火星塞處濃度不足，以致引擎無法成功點火，有三計畫解決方案：

1.增加火星塞長度：

增加火星塞長度，使火星塞往內伸至燃氣濃度充足處，預估增加 $1.0\sim 1.5 \text{ cm}$ ，即為點火器成功點火的位置。此方案須注意火星塞位

置，否則可能因火燄燃燒的高溫而損壞火星塞，且各模型飛機引擎火星塞有固定規格，替換不便，有實際上執行的困難。

2.增加燃氣濃度：

可考慮加大霧化噴嘴孔徑、數量，使燃氣出口量增加；此方案構想來自 JPX 燃丙烷引擎具有六顆霧化噴嘴，且孔徑皆較噴油嘴之孔徑大一倍。

3.繼續加大供氣壓力：

提供燃氣更高壓力，使火星塞處能有充足的燃氣量。此方案優點為暫時不需進行改裝，且可測得未改裝的引擎所需的最小點火供氣量；缺點是需注意燃氣供應量控制，一旦燃氣量太多可能會有爆炸的危險。此方案不需要改裝引擎，所以選擇先進行。

當供氣壓力增加到 0.8 kg/cm^2 後引擎尾端噴出火焰，成功點火，尾管溫度亦不斷上升，但卻沒有辦法產生推力，且渦輪沒辦法帶動壓縮機轉動，推測提供燃氣的熱值不足。繼續以 0.1 kg/cm^2 為單位增加供氣壓力，到供氣壓力 1.2 kg/cm^2 前引擎皆可成功點火，尾管溫度也不斷爬升，但是都沒辦法產生推力，且關掉高壓空氣氣源會引擎會有冒煙的情形產生，渦輪仍然無法帶動壓縮機轉動。當供氣壓力增加到 1.25 kg/cm^2 時，引擎尾端噴出爆炸火焰，隨即熄火。此現象表示在此壓力下燃氣濃度足以點燃，然而由於此時燃燒筒已累積至爆炸所需之燃氣濃度，點火後瞬間爆炸，消耗掉所需燃氣，無法延續此點火濃度，故無法成功啟動引擎。

嘗試先以較低供氣濃度點火再慢慢加大供氣壓力直到調壓閥最大供氣量 3 kg/cm^2 ，使其達到 526°C 的尾管排氣溫度再將高壓氣源關閉，此時壓縮機開始減速，表示在溫度下燃氣燃燒所產生的壓力

還是無法推動渦輪，也沒有推力的產生，且發現若不增加供氣量則引擎在尾管溫度 300~400°C 間就會自動熄火，推測可能此時燃燒作用旺盛，燃氣量來不及供應而造成引擎熄火。

由以上點火實驗結果發現在未改裝引擎條件下，引擎可成功點火，但各供氣壓力條件下皆因持續提供燃料的熱值不足以致於引擎沒辦法產生推力，渦輪也沒辦法產生足夠的做功能力及轉速帶動壓縮機使引擎自行運轉，甚至在高溫燃燒下可能因燃氣供量不足造成引擎熄火的情形，因此接下來將朝方案(二)著手，以加大霧化器孔徑，使燃氣持續供應量提升，總熱值隨之升高，以期能使引擎產生推力。

三、結論

本研究分為模擬與實驗兩部分，模擬部分完成固態氧化物燃料電池結合氣渦輪機混成系統性能分析及最佳化；實驗部分完成引擎改裝規劃及點火測試及初步改裝。依據上述結果，可得以下結論：

(一)壓縮比：提高壓縮比能有效提升渦輪機之功率，但也需增加額外添加至燃燒室的燃料，使得系統效率有最大值，而發生效率最大值的壓縮比與熱交換器效率成反比。

(二)熱交換器效率：熱交換器效率高可減少輸入的燃料，使得系統效率提升，但因系統流量降低造成輸出功率下降。

(三)電池堆進口溫度：若SOFC電池堆進口溫度低於800°C，則效率很低。

(四)在不改裝條件下，測試載具引擎在供氣壓力0.5~1.2 kg/cm²間皆可成功燃氣點火。

(五)增大霧化器孔徑後，進行引擎運轉測試及引擎燃氣/氫性能量測。

肆、參考文獻

1. 何明析，獨立運轉固態氧化物燃料電池/微渦輪機混成發電系統之概念設計，國立清華大學工程與系統科學學系碩士論文，中華民國 95 年 07 月。
2. 江宜哲，生質柴油微型渦輪機發電系統性能測試，國立清華大學動力機械工程學系碩士論文，中華民國 95 年 07 月。
3. F.S.Bhinder, Munzer S.Y. Edaid, Moh'd Yazid F. Mustafa, Raj .K. Calay, and Mohammed H. Kailani, "Parametric Study of The Combined Fuel Cell-Gas Turbine Power Plant," ASME IGTI TURBO EXPO : Power for Land, Sea, and Air, GT2006-90607, pp. 703-711, May 2006.
4. Kazuo Onda, Toru Iwanari, Nobuhiro Miyauchi, Kohei Ito, Tahiro Ohba, Yoshinori Sakaki, and Susumu Nagata, "Cycle Analysis of Combined Power Generation by Planar SOFC and Gas Turbine Considering Cell Temperature and Current Density Distributions," Journal of The Electrochemical Society, Vol.150, No.12, pp.A1569-A1576, 2003.
5. H Cohen, GFC Rogers, and HHH Saravanamuttoo, Gas Turbine Theory 4th, 1996.
6. Jack D. Mattingly, Elements of Gas Turbine Propulsion, McGraw-Hill, 1996.
7. 黃鎮江，燃料電池，全華科技圖書股份有限公司，2003。
8. 莊茂雍，熱回收式微形渦輪機發電系統之性能測試與比較，國立清華大學動力機械工程學系碩士論文，中華民國 94 年 07 月。
9. Stephen R. Turns "An Introduction to Combustion", McGraw-hill, 2000.

10. Hideyuki Uechi, Shinji Kimijima, Nobuhide Kasagi, "Cycle Analysis of Gas Turbine-Fuel Cell Hybrid Micro Generation System," International Joint Power Generation Conference, New Orleans, Louisiana, JPGC2001/PWR-19171, June 2001.
11. E. Achenbach, "Three-Dimensional and Time Dependent Simulation of a Planar Solid Oxide Fuel Cell Stack," Journal of Power Sources, Vol.49, pp.333-348, 1994.
12. K. Nishida, T. Takage, S. Kinoshita, T. Tsuji, "Performance Evaluation of Multi-Stage SOFC and Gas Turbine Combined Systems," ASME TURBO EXPO 2002, Amsterdam, The Netherlands, GT2002-30109, June 2002.
13. 陳中生、邱耀平、曾錦清、周世同、陳孝輝，平板狀 SOFC 電池元件之建立及模擬，INER-2495，核能研究所，中華民國 92 年 10 月。
14. 洪文堂、蔡禹擎、吳思翰、邱耀平，固態氧化物燃料電池 BOP 之規畫及熱氣測試平台之建置，第二十二屆機械工程研討會，中華民國 94 年 11 月。
15. Rainer Kurz, "Parameter Optimization on Combined Gas Turbine-Fuel Cell Power Plants," Solar Turbines Incorporated, San Diego, Vol.2, pp.268-273, November 2005.
16. D. A. Noren, M.A. Hoffman, "Clarifying the Butler-Volmer Equation and Relate Appromixmation for Calculating Activation Losses in Solid Oxide Fuel Cell Mdels," Journal of Power Sources, Vol. 152, pp.175-181, 2005.
17. P. Aguiar, C.S. Adjiman, N. P. Brandon, "Anode Supported Intermediate Temperature Direct Internal Reforming Solid Oxide Fuel Cell I : Model –Based Steady-State Performance," Journal of

- Power Sources, Vol. 138, pp120-136, 2004.
18. S.H. Chan, K.A. Khor, Z.T. Xia, "A Complete Polarization Model of a Solid Fuel Cell and Its Sensitivity to the Change of Cell Component Thickness," Journal of Power Sources, Vol. 93, pp.130-140, 2001.
 19. H. Yoshizumi, K. Takeishi, S. Kinoshita, "SOFC/MGT using Cheng Cycle for High Efficiency Micro-Cogeneration Systems," Proceeding of ISTP-16, PRAGUE, Czech Republic, 2005.
 20. T. Araki, T. Ohba, T. Ohba, S. Takezawa, K. Onda, Y. Sakaki, "Cycle Analysis of Planar SOFC Power Generation with Serial Connection of Low and High Temperature SOFCs," Journal of Power Sources, Vol. 158, pp.52-59. 2006.
 21. Rory Roberts, Jack Brouwer, Faryar Jabbari, Tobias Junker and Hossein Ghezel-Ayagh, "Control Design of an Atmospheric Solid Oxide Fuel Cell/Gas Turbine Hybrid System : Variable Versus Fixed Speed Gas Turbine Operation," Journal of Power Sources, Vol. 161, pp. 484-491. 2006.
 22. S.K. Park, K.S. Oh, T.S. Kim, "Analysis of the Design of a Pressurized SOFC Hybrid System Using a Fixed Gas Turbine Design," Journal of Power Sources, Vol.170, pp.130-139, June 2007.
 23. 簡敏修，固態氧化物燃料電池結合微型氣渦輪機混成配置研究，國立清華大學動力機械工程學系碩士論文，中華民國 96 年 07 月。
 24. A. F. Marssardo, F. Lubelli, "Internal Reforming Solid Oxide Fuel Cell-Gas Turbine Combined Cycles (IRSOFC-GT) : Part A—Cell Model and Cycle Thermodynamic Analysis," Journal of Engineering for Gas Turbine and Power, ASME, Vol.122, pp.27-35,

January 2000.

25. Bossel U.G., Final Report on SOFC Data Facts and Figures, Swiss Federal Office of Energy, Berne, 1992.
26. Yaofan Yi, Ashok D. Rao, Jacob Brouwer, G. Scott Samuelsen, "Analysis and Optimization of a Solid Oxide Fuel Cell and Intercooled Gas Turbine (SOFC-ICGT) Hybrid Cycle," Journal of Power Sources, Vol.132, pp.77-85, May 2004.
27. Jens Pålsson, Thermodynamic Modelling and Performance of Combined Solid Oxide Fuel Cell and Gas Turbine Systems, Lund University, Sweden, 2002.
28. Kazuo Onda, Toru Iwanari, Nobuhiro Miyauchi, Kohei Ito, Takahiro Ohba, Yoshinori Sakaki, and Susumu Nagata, "Cycle Analysis of Combined Power Generation by Planar SOFC and Gas Turbine Considering Cell Temperature and Current Density Distributions," Journal of The Electrochemical Society, Vol.150, No.12, pp.A1569-A1576, 2003.
29. Schreckling, K., "Strahl turbine für Flugmodelle im Selbstbau," Fachschriftenreihe im Verlag Technik and Handwerk, Germany, 1992.
30. Cherry, M., "Schreckling Gas Turbine," Radio Control Jet International, pp.46-47, Autumn, 1993.
31. Cherry, M., "Gas Flow," Radio Control Jet International, pp.19-27, Feb-Mar, 1995.
32. Wu-Chi, Ho and Hsiao-Wei, Chiang, "Development of A Micro-Turbojet Engine for R/C Model," The 37th Conference on Aeronautics and Astronautics, Taipei, R.O.C., pp.485-494, 1995.
33. Gerendas Miklos and Pfister Ralph, "Development of a very Small

- Aero-Engine,” 45th ASME International Gas Turbine and Aeroengine Technical Congress and Exposition, Munich, Germany, 2000-GT-0536, 8-11 May, 2000.
34. Franklin, Van Den Hout and Koullen, Jo, “A Tiny Turbojet for Model Aircraft,” Mechanical Engineering , Vol. 119 Issue 8, pp.66-69, August 1997.
 35. Schreckling Kurt and Thomas Keith, Gas Turbine Engines for Model Aircraft, Dec 6, 1994.
 36. 黃一民，超小型渦輪噴射引擎之性能研究，國立清華大學動力機械工程學系碩士論文，中華民國 91 年 7 月。
 37. JPX Zone industrial, JPX Jet Engine, Feb, 1993.
 38. SWB Turbines, S. W. B. 4 Model Aircraft Turbojet Engine, Engine Brochure, 1995.
 39. 三和電子機器株式會社, Sanwa J450 Gas Turbine Engine, 1995.
 40. Jianfan Wu, Phillip Brown, Ihor Diakunchak, Anil Gulati, Martin Lenze and Berthold Koestlin, “ADVANCED GAS TURBINE COMBUSTION SYSTEM DEVELOPMENT FOR HIGH HYDROGEN FUELS,” ASME Turbo Expo 2007: Power for Land, Sea and Air, Montreal, Canada, May14-17, 2007.
 41. Tim Bradley and Joseph Fadok, “ADVANCED HYDROGEN TURBINE DEVELOPMENT UPDATE,” ASME Turbo Expo 2009: Power for Land, Sea and Air, Orlando, Florida, USA, June 8-12, 2009.
 42. Stephen E. Veyo, Kevin P. Litzinger, Shailesh D. Vora and Wayne L. Lundberg, “STATUS OF PRESSURIZED SOFC/GAS TURBINE POWER SYSTEM DEVELOPMENT AT SIEMENS WESTINGHOUSE,” ASME TURBO EXPO 2002, Amsterdam,

The Netherlands, June 3-6, 2002.

43. 楊竣翔，低熱值燃料應用於環型微渦輪引擎之實驗分析與數值模擬，國立交通大學機械工程學系博士論文，中華民國98年11月。
44. Chen Dong, Qulan Zhou, Qinxin Zhao, Yaqing Zhang, Tongmo Xu and Shien Hui, “Experimental study on the laminar flame speed of hydrogen/carbon monoxide/air mixtures,” *Fuel*, Volume 88, Issue 10, October 2009, Pages 1858-1863.
45. Joe Van Gompel, “Avoiding fire and explosion risks with proper H₂ exhaust management,” *Solid State Technology*, February 2005.
46. Stephen R. Turns “An Introduction to Combustion”, McGraw-hill, (2000).
47. 台灣燃料電池資訊網, <http://www.tfci.org.tw/>
48. Jochen Ströhle and Tore Myhrvold, “An evaluation of detailed reaction mechanisms for hydrogen combustion under gas turbine conditions,” *International Journal of Hydrogen Energy*, Volume 32, Issue 1, January 2007, Pages 125-135.
49. Choudhuri, A. and Gollahalli, SR, “Combustion Characteristics Of Hydrogen-Propane Mixture,” *AIAA Journal of Propulsion and Power* 2003;19:220–5.
50. Wu, Y., Lu, Y., Al-Rahbi, I. S., and Kalghatgi, G. T., “Prediction of The Lift Off, Blowout and Blownoff Stability Limits Of Pure Hydrogen and Hydrogen/Hydrocarbon Mixture Jet Flames,” 3rd European Combustion Meeting ECM 2007.
51. Chenglong Tang, Zuohua Huang, Chun Jin, Jiajia He, Jinhua Wang, Xibin Wang and Haiyan Miao, “Laminar burning velocities and combustion characteristics of propane–hydrogen–air premixed

- flames,” International Journal of Hydrogen Energy, Volume 33, Issue 18, September 2008, Pages 4906-4914.
52. Tomczak, H-J, Benelli, G., Carrai, L. and Cecchini, D., “Investigation of a Gas Turbine Combustion System Fired With Mixtures of Natural Gas and Hydrogen,” IFRF Combustion Journal, Article Number 200207, December 2002.
 53. P. SAMPATH and F. SHUM, “Combustion Performance of Hydrogen in a Small Gas Turbine Combustor,” Hydrogen Energy, Vol. 10. No. 12. pp. 829-837, 1985.
 54. Dino Dini, “Modification of the Fuel Control System of a Gas Turbine Engine From Kerosene to Hydrogen,”
 55. Dipartimento di Energetica dell’Universita di Pisa Via Diotisalvi n. 2 - 56126 Pisa (Italy).
 56. Rivera, Gilbert D., Jr., “Turbochargers to small Turbojet Engines for Uninhabited Aerial Vehicles,” Naval Postgraduate School Master’s Thesis, June, 1998.
 57. W. C.,Ho, C. P., Liu, L. C., Weng, M. Y., Liu, and T. W., Wey, “Experimental Investigation of the Performance of a Miniature Gas Turbine Engine,” Accepted for publication in 12th National Conference on Mechanical Engineering, CSME, Chia-Yi, Taiwan, 1995.
 58. 黃武彬，固態氧化物燃料電池(SOFC)結合氣渦輪機(GT)應用於冷熱電聯產系統(CCHP)中之配置設計與性能分析，國立清華大學動力機械工程學系碩士論文，中華民國 99 年 07 月。