

行政院原子能委員會  
委託研究計畫研究報告

多孔性燃燒室應用在高溫觸媒燒結之系統可行性研究  
**Feasibility Study on Porous Media Combustor for High  
Temperature Catalyst Sintering**

計畫編號：992001INER050

受委託機關(構)：國立成功大學

計畫主持人：賴維祥 教授

核研所聯絡人員：趙裕 博士

聯絡電話：06-2757575 ext.63694

E-mail address：whlai@mail.ncku.edu.tw

報告日期：中華民國九十九年十一月三十日

## 目 錄

目 錄.....	I
表目錄.....	III
圖目錄.....	IV
中文摘要.....	VI
英文摘要.....	VIII
壹、計畫緣起與目的.....	1
一、計畫緣起.....	1
二、計畫目的.....	2
貳、研究方法與過程.....	3
一、多孔性介質燃燒室概論.....	3
二、文獻回顧.....	5
三、實驗規劃.....	8
四、實驗設備之建立與修改過程.....	10
(一)燃燒室建立與設計修改過程.....	10
(二)混合室設計.....	13
(三)整體實驗機台建立與修改過程.....	15
(四)多孔性介質選定.....	23
五、實驗參數設定與修正.....	25

六、實驗流程 .....	29
參、主要發現與結論 .....	30
一、介面氫燃燒特性探討 .....	30
二、觸媒煨燒過程 .....	36
肆、參考文獻 .....	39

## 表目錄

表 1 多孔性介質物性表.....	24
表 2 第一部分實驗之參數.....	26
表 3 第二部分實驗之參數.....	27
表 4 第三部分實驗之參數.....	27
表 5 煨燒實驗之實驗矩陣.....	28
表 6 煨燒實驗之參數表.....	28
表 7 三次實驗下之介面溫度量測值.....	31
表 8 三次實驗下之介面溫度量測值.....	32
表 9 三次實驗下之介面溫度量測值.....	34
表 10 煨燒實驗之參數表.....	37
表 11 各參數所對應之介面溫度值.....	37

## 圖目錄

圖 1 Axial temperature distribution varied with operating condition for porous setting .....	3
圖 2 Axial temperature distribution varied with operating condition for porous setting .....	3
圖 3 多孔性介質的熱傳機制.....	5
圖 4 左邊為表面燃燒型；右邊為內部燃燒型(Marbach, et al. 2005)..	8
圖 8 舊燃燒室 CATIA 設計圖 .....	10
圖 9 舊燃燒室加工成品圖(上視與正視圖).....	10
圖 10 磨去焊線.....	11
圖 12 新燃燒室加工成品圖 .....	12
圖 14 未加隔熱棉.....	12
圖 16 混合室爆炸圖 .....	13
圖 18 混合室內筒實體圖.....	14
圖 21 設備流程圖 .....	16
圖 23 混合區回火嚴重 .....	16
圖 25 設備流程圖 .....	17
圖 26 實驗平台圖 .....	17
圖 28 設備流程圖 .....	19

圖 30 煨燒盒分解圖 .....	19
圖 31 實驗設備流程示意圖 .....	21
圖 33 點火裝置修改前 .....	22
圖 35 抽風罩與風管 .....	22
圖 37 觸媒放置方法 .....	23
圖 39 觸媒煨燒後 .....	23
圖 41 左為 15 PPI；右為 30 PPI 之碳化矽多孔材 .....	24
圖 42 當氫氣濃度為 10.4 % 時，反應介面溫度之升溫曲線 .....	31
圖 43 不同氫氣濃度下之介面溫度分佈 .....	31
圖 44 相同氫氣濃度下，燃料流速對於介面溫度之分佈 .....	33
圖 45 相同燃氣流速下，氫氣濃度對於介面溫度之分佈 .....	34
圖 46 不同氫氣濃度下，各點反應溫度之升溫曲線 .....	35
圖 47 煨燒觸媒之升溫曲線 .....	38

## 中文摘要

本計畫係利用先前核研所委託學術界多孔性燃燒室火焰、燃料、出口溫度及輻射量之控制等專業知識及研究成果，由於本燃燒室在第二段可提供一穩定，均勻之可控制溫度環境，故可將其技術巧妙地轉換應用於對觸媒燒結(Sintering)製程。

本研究利用多孔性燃燒室建立合適的觸媒燒結環境，藉由均勻之可控制溫度環境，探討燒結溫度對生質氣體重組觸媒之影響，進行一系列之研究工作，包括將多孔性燃燒室出口的溫度作穩定的控制、利用多孔性燃燒室建立合適的觸媒燒結環境、系統之整合測試、生質氣體重組觸媒開發測試、觸媒結構鑑定等。由於需要一穩定的火焰面用以煨燒觸媒，故需先探討預煨燒處的溫度分佈狀況，煨燒處選定在堇青石和碳化矽多孔材的介面處，初步實驗遂以氫氣做為燃料，探討多孔性介質燃燒室之介面氫燃燒特性。多孔性介質燃燒室之特性，主要受到四大因素所影響，分別為不同材質之多孔性介質選用、多孔性介質之排列配置、多孔性介質之CPSI (cells per square inch)與PPI (pores per inch)值和燃氣進料參數。

實驗結果顯示在氫氣體積百分比濃度為10.4%時，在不同多孔性介質之介面處可得到一溫度值為800 °C，較均勻且穩定供熱的火焰

面，此外，在此相同的氫氣濃度條件下，增加混合燃氣之流速至82.0 cm/s以內，對於溫度值和介面溫度分佈之均勻性皆無明顯的影響，然而在相同的混合燃氣之流速之下，改變氫氣體積百分比濃度，則有可能發生回火或是後燃現象，均視為較不理想的參數條件。

由初步實驗結果可得，在一定當量比下可得到均勻溫度面，但溫度值已高達800 °C，為了降低溫度值至條件所需之650 °C，先改變下游多孔材為熱傳導係數且比熱值較高之碳化矽，並降低氫氣濃度。實驗結果可得，在氫氣體積百分比濃度為9.2%時，可得到一穩定且溫度值在650 °C的溫度面，相較於初步實驗在相同燃料濃度下已經均勻許多，最後以此條件持溫四小時煨燒觸媒，成品交由核研所做化性鑑定。



## **Abstract**

This project is a continuous effort on the specialized knowledge and research results in INER, including porous media burner flames, fuels, outlet temperature, quantitative control of radiation, which is utilized innovatively to a new area of the sintering technique of catalyst carrier preparation. The porous burner can offer the stable and uniform environment of controllable temperature in the second section of burner which can be applied to the procedure of catalyst sintering. Therefore, the importance of catalyst and its related preparation process is obvious.

This research applies porous media burner to build adequate environment for catalyst sintering. By means of stable and controllable temperature environment, researchers look into the impact on catalysts for recombination biogas that sintering temperature. The goal of this program will be the extension of the application of porous burner for catalysts sintering, so that it could improve the problem of poor catalyst sintering resulting from uneven temperature control currently.

Because of the requirement of the stable flame surface to calcine catalyst, temperature distribution of calcine zone needs to be investigated first. The interface of cordierite and silicon carbide is the chosen zone. In this initial research, hydrogen is taken as fuel along the investigation of the interface combustion of porous media burner. In general, it has the ability to stabilize flame and to increase the combustion efficiency by recirculating heat from the combustion zone to preheat zone. The characteristics of porous media burner are affected by the material of porous media, the arrangement of porous media, the CPSI and PPI of

porous media and Hydrogen concentration.

Results show that the uniform and stable flame surface with temperature 800 °C could be observed when the hydrogen concentration is 10.4%. In the same condition, the uniformity and interface temperature distribution are insensitive when the fuel gas velocity increased, but the uniformity and interface temperature distribution are sensitive when the hydrogen concentration increased or decreased. However, the flashback and after-burn might occurs as well as the changed of hydrogen concentration.

Follow the results of the initial research, the uniform and stable flame surface with temperature 800 °C could be observed when the hydrogen concentration is 10.4%. For the lower stable flame surface with temperature 650 °C, reduce hydrogen concentration and change the downstream porous medium to silicon carbide with high conductivity and heat capacity. Results show that the stable flame surface with temperature 650 °C could be observed when the hydrogen concentration is 9.2%. Compare with the initial research at similar concentration, it is more uniform. Finally, keeping the temperature to calcine catalyst for four hours with this condition is necessary.

## 壹、計畫緣起與目的

### 一、計畫緣起

觸媒在工業上運用之範圍相當廣泛，單就觸媒重組氣體反應器中，即可用至 biogas 的重組產氫，所產出之富氫氣可導入 SOFC 和使用在其他研究領域上，極具開發條件。而在許多製程中，相同成份的觸媒材料會因不同製成團隊和不同製成時間點而有穩定性不佳的情形，且其燒結溫度不均更是不穩定性的一大來源。此外觸媒在反應上所需之量通常較小，不易少量購買取得；且若大量購買，保存上則會存在立即性的問題。以學理來說，燒結結果會因生胚是否均勻磨散而消去粉末粒子團聚情形而影響，許許多多看似簡單的小條件均影響著成果，若能一致由此一相同的技術傳承，勢必在產出觸媒材料性質的穩定性上給予強大的奧援。

若能將多孔性介質燃燒室之知識成果與技術，用以建立合適的觸媒燒結環境，不但可以改良傳統觸媒製程穩定性不佳之問題，亦可得到適量且較理想的觸媒成品，配合 INER 分析儀器的輔助，再由實驗研究成果探討評估，假以時日若可行性堪用甚至極佳，將可對往後研究給予突破性的助益。

## 二、計畫目的

近年來本實驗室以氫氣作為燃料，觀察氫氣在多孔性介質燃燒室之燃燒特性。根據其研究結果發現，若下游區使用較大孔徑的多孔性介質可加速整體燃燒室趨向穩定，並且火焰燃燒可較穩定的發生在下游區。然而多孔性燃燒室之穩定流速範圍隨著當量比的增加而增加；並且發現當當量比超過某一特定值時，穩定速度範圍會有一急劇的增加。

根據此專業知識與研究基礎，以多孔性燃燒室良好的燃燒特性進一步延伸至觸媒燒結領域。試圖以此創新之系統製程，提供更理想之觸媒燒結環境，首先主要聚焦在由氫氧燃燒給予一穩駐供熱之火焰面直接熱傳導至觸媒擔體，燃燒室近似無溫度梯度之截面，可改進傳統高溫爐燒結溫度不均之問題；藉由進料控制迅速給予觸媒擔體準確之燒結溫度、升溫速率和持溫時間，可改進傳統高溫爐在升溫與持溫控制上之延遲。而在能源耗損方面，多孔性介質燃燒室僅需通入燃氣，點火器點火並控制特定實驗經驗參數，即可達到燒結所需之條件，相較於傳統高溫爐來說較為節省能源；其所排出之尾氣和燃燒室散出的熱量在熱回收方面也可有需多應用，綜合以上相對於傳統高溫爐，在節約能源和資源兩大方面，有實質之躍進。

## 貳、研究方法與過程

### 一、多孔性介質燃燒室概論

多孔性介質燃燒室之特性，可由Luan【1】的研究得知，Luan以氫氣作為燃料，觀察氫氣在多孔性介質燃燒室之燃燒特性。其燃燒室同樣採用兩段式多孔性材料之設計，前段為堇青石；後段為碳化矽。其研究參數包括氣體流率、氫氣濃度和不同的多孔材孔隙大小；其量測的參數包括燃燒室的壓力降、溫度隨時間之變化、軸向徑向隨位置之溫度變化、貧油燃燒極限及穩定流速範圍。根據其研究結果發現，若下游區使用較大孔徑的多孔性介質可加速整體燃燒室趨向穩定，並且火焰燃燒可較穩定的發生在下游區。然而多孔性燃燒室之穩定流速範圍隨著當量比的增加而增加；並且發現當當量比超過某一特定值時，穩定速度範圍會有一急劇的增加。

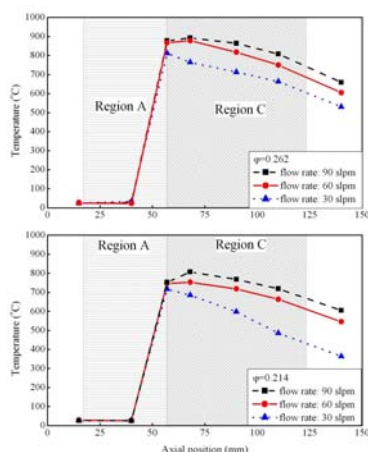


圖 1 軸向溫度分佈(操作條件-多孔材料設定 30-30)

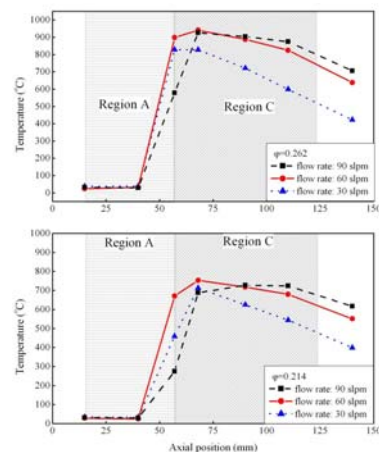


圖 2 軸向溫度分佈(操作條件-多孔材料設定 30-10)

接著由 Chang【2】的研究發現，多孔性介質燃燒室之燃燒效率，比傳統燃燒爐來的高，火焰溫度及穩定度也有顯著的提升，且貧油極限較傳統燃燒爐來的低，另外，在污染物排放方面，一氧化碳和氮氧化物的排放量也相當的低，以上優點都是因為多孔性介質的關係，其具有相當良好的熱傳特性、相當大的表面積、且固體的熱傳特性較佳。

燃燒火焰在多孔性介質燃燒室內部的移動情況，亦可由 Chang【2】的研究發現，當燃料只有甲烷時，火焰會受到氣體流速的影響而往爐體下游移動，此時因為火焰位置比較靠近爐體的出口，熱能容易散失至爐體外面。但是，一旦加入氫氣參與反應，由於氫的燃燒特性乃是向上游燃燒且反應進行十分迅速，因此火焰位置會漸漸受到氫氣的影響而往爐體上游移動，此時火焰產生的能量不容易藉由熱傳導、熱對流和熱輻射的方式傳至爐體的出口，意即能量不容易散失出去。整體而言多孔性介質燃燒室之優點主要關注以下三項：1.更高的火焰溫度。2.更低的貧油極限。3.更好的火焰穩定度。

多孔性介質燃燒室之熱傳機制，可經由Wood等人【3】的研究了解，其熱傳機制如圖3所示，主要包括了兩大熱傳機制，第一：固體與固體之間的熱輻射和熱傳導，分別為火焰燃燒區之高溫多孔性

介質和高溫之燃燒室管壁，前者可將熱能經由熱輻射熱傳至燃燒室上游處預熱燃氣；後者可將熱能經由熱傳導傳遞至燃燒室上游處。

第二：氣體對固體和固體對氣體的熱對流傳遞，分別為火焰燃燒區內高溫氣體對低溫燃燒室管壁的熱對流和預熱區高溫燃燒室管壁對低溫氣體的熱對流。

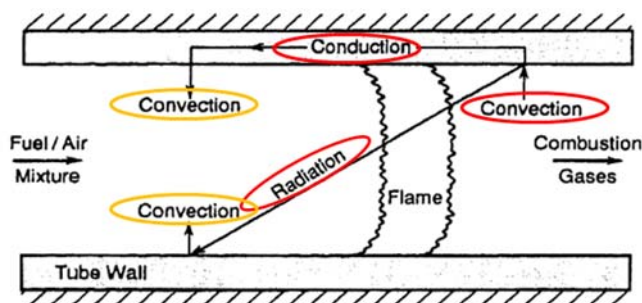


圖 3 多孔性介質的熱傳機制

## 二、文獻回顧

國內研究現況：

本實驗室在多孔性介質燃燒室與氫氣燃燒範疇內已有一定程度之經驗技術與成果【1】【4】，然而將多孔性介質燃燒室運用至觸媒燒結領域，此舉在國內外皆為創新之系統製程，並無其他團隊在此領域給予前例參考，故勢必存在較大發展空間和可探討比較之範圍，想當然爾亦存在較多不確定性。

以下列出國內與本計畫相關之研究：

首先在燒結方面，微波燒結與傳統燒結的比較研究，在國立成功大學化學工程研究所鍾賢龍教授團隊已有長久的研究，結果發現氮化鋁材料在傳統高溫爐由外向內加熱不如微波加熱由內向外加熱來的好【5】【6】。

其次再多孔性介質燃燒方面，國立中正大學機械工程研究所張文馨教授團隊，發現在一個平衡條件之下，火焰速度僅有一特定值；多孔材堆疊高度與火焰速度大致呈現反比；多孔性介質加熱爐可供低於絕熱火焰溫度之燃燒溫度、較寬廣之火焰範圍、和較高之燃氣預熱溫度【7】。

國立中央大學機械工程研究所曾重仁教授團隊，得到以下幾點結論【2】【8】：

1. 多孔性陶瓷介質燃燒爐可以有效降低 CO 及 NO<sub>x</sub> 排放量。
2. 在燃燒爐中間預留一個間隙可以使火焰更加容易穩定在爐內，所以燃燒可以往更低當量的方向延伸，穩定極限也比無間隙時大。
3. 火焰溫度會隨著火焰燃燒速度與當量比增加而增加。
4. 間隙過小燃燒爐之結構即會趨近於無間隙燃燒爐，所以燃燒現象也會趨近於無間隙燃燒爐。間隙過大，則當火焰位於間隙時，其熱量不易藉由熱傳導傳至上游區預熱未燃氣。



國外研究概況：

將具有高熱傳導係數的固態多孔性介質直接置入燃燒室最早是被Takeno及Sato【9】提出。發現藉由多孔性介質將能量至前火焰區傳遞後火焰區，可達到預熱效果，且流率增加、固體氣體間的熱傳遞係數降低，都可使預熱效果更為明顯；另外，多孔性介質也如「駐焰器(Flame Holder)」，對火焰的穩定度有提高的效果。

根據 Diamantis【10】，Marbach & Agrawal【11】，多孔性介質燃燒是可由火焰穩定的位置分為兩種類型：內部燃燒(Interior Combustion)、表面燃燒(Surface Combustion)。

隱沒燃燒及表面燃燒兩種類型燃燒室各自有不同特色：隱沒燃燒型之火焰速度比自由火焰慢，不過其最大優點為擁有高的熱輻射效應；表面燃燒型之多孔性介質材料選用很重要，利用適當的材料特性可達到較高的熱輻射量及較廣的火焰穩定範圍。

除此之外，兩者之火焰發生的位置也不盡相同，隱沒型燃燒室火焰穩定位置發生在燃燒室內部兩種不同介質之介面附近；表面型燃燒室火焰穩定位置發生在燃燒室出口附近，其燃燒室示意圖如下圖 4 所示：

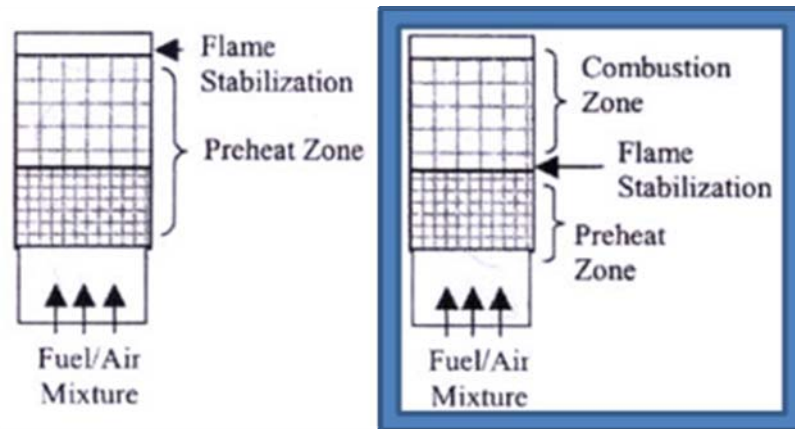


圖 4 左邊為表面燃燒型；右邊為內部燃燒型(Marbach, *et al.* 2005)

貧油燃燒透過對火燄溫度控制以減少污染物排放，又以單獨燃燒氫氣而言，更可以達到污染物的零排放。Tseng【12】第一個提出混和氫氣與甲烷於多孔性介質燃燒室中作反應，其發現加入越多氫氣會增加其火焰速度。

S.K. Alavandi 及 A.K. Agrawal【13】研究將氫氣、一氧化碳與甲烷混和燃燒於兩段多孔性介質燃燒室在貧油燃燒的條件下，其研究發現在  $\text{CH}_4$  加入氫氣、一氧化碳混和燃燒可有效降低污染物排放，尤其是在越高溫度時加入氫氣與一氧化碳燃燒，其降低污染物排放之效果越明顯。

### 三、實驗規劃

整體來說，主要實驗分為三個部份，第一部分實驗將燃燒區簡化成僅由堇青石(200 CPSI)和氧化鋁多孔性介質(10 PPI)進行實驗，主要探討火焰面的均勻程度，而第一部分實驗亦分為三個階段，首

先以五組不同當量比進行實驗，可得到五組介面溫度值；接著選擇其中一組較均勻的參數下去探討在相同當量比之下，不同流速對火焰面均勻程度的影響；最後再探討在相同流速下，不同當量比對火焰面均勻程度的影響。以這三個實驗的結果，可歸納出更具代表性的現象，簡化實驗中的未知數，以釐清現象之特性。

第二部分將改變下游多孔性介質的材質和 PPI 值，分別以 15、30 PPI 氧化鋁、氧化鋯與碳化矽進行實驗，氧化鋯材質因其不同的製程選用上有所兩種，經由第二階段實驗預期可以得到最適當的多孔性介質的搭配，此外在火焰穩定後，將嘗試加入氮氣，希望藉由氮氣將部分熱能帶離火焰面，使得火焰溫度可降至大約 650 °C。

第三部分將下游多孔性介質挖一凹槽，供以置入觸媒煨燒，而不置入煨燒盒，主要考量是不希望再加其他材質進入燃燒室，避免增加不必要的變因和改變溫度場的分佈。

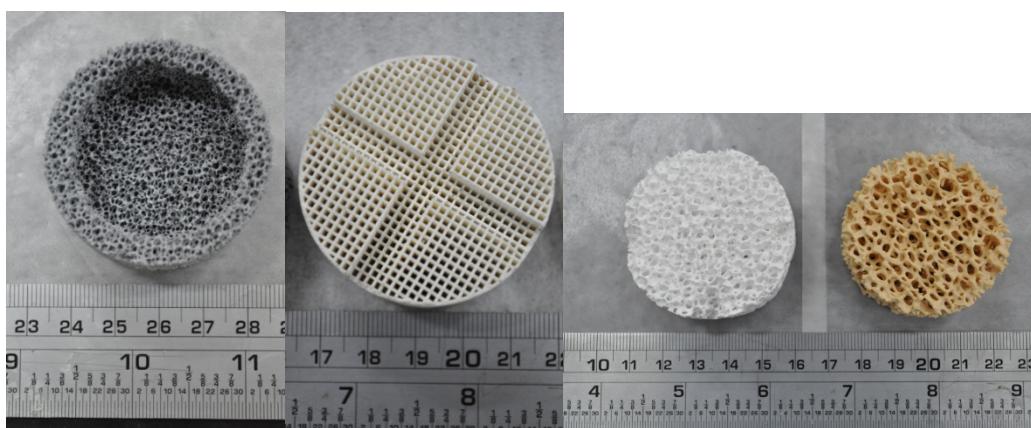


圖 5 煨燒用凹槽 圖 6 堇青石 圖 7 左為氧化鋁；右為氧化鋯

#### 四、實驗設備之建立與修改過程

##### (一)燃燒室建立與設計修改過程

燃燒室最初之設計圖如圖 8 所示，圖中黃色圓管為焊接在管壁的內牙管，為了鎖附安裝熱電偶之 1/8 轉 1/16 tube fitting 管件，此設計可避免氣體洩漏的問題，另外設計上預留了九個溫度量測點，其中有兩個截面均有三個量測站位，量測煨燒區上下兩側的溫度，此兩截面間即為煨燒區，其餘靠近管口為火星塞焊固定多孔性介質螺絲的位置，加工成品如圖 9 所示，燃燒室之材料為不鏽鋼 304，1/8 轉 1/16 tube fitting 為不鏽鋼 316。

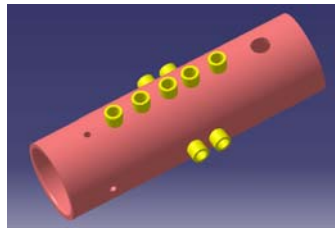


圖 8 舊燃燒室 CATIA 設計圖

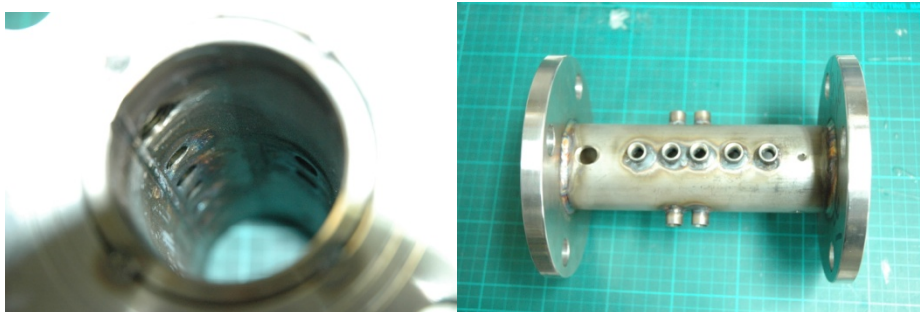


圖 9 舊燃燒室加工成品圖(上視與正視圖)

燃燒室加工後有兩大改良，第一，由於購買的不銹鋼材為有接縫的不銹鋼，在管內會有一凸起之焊線，厚度大約為 2mm，會對於內部 SiC 多孔材(陶瓷過濾網)和 Cordierite (蜂窩陶瓷) 之放置產生問題，故使用手動磨輪將內管壁磨成近似於平滑的圓型，如下圖 10 所示。



圖 10 磨去焊線



圖 11 管件除去內環窄處

第二，由於 Tube Fitting 管件之設計上，為了避免連接之管路太深入，會在管件中間處設計環狀窄處使管路無法通過整個管件，選擇相對應的鑽頭加工(1.7mm)除去環狀窄處，使得 T/C 可藉由 Tube Fitting 穿入燃燒區內量測溫度，如圖 11 所示。

期中查訪之後，為了簡化並改善燃燒室而設計新燃燒室，設計上將溫度量測站位點集中在煨燒區，使用無接縫不銹鋼管並降低高度，其餘大都與最初設計相同，如下圖 12、13 所示。

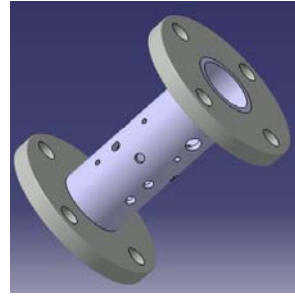


圖 12 新燃燒室加工成品圖 圖 13 新燃燒室 CATIA 設計圖

為了避免火焰熱傳至外界，造成熱損失，故將燃燒室外壁包上一層約兩公分厚的隔熱棉，並且分別以耐溫 500 °C 和 180 °C 之隔熱帶將隔熱棉纏繞固定(如圖 14、15)，藉以降低燃燒熱損失量，亦可避免燃燒室煨燒區內之不同位置因熱損失量不同，造成溫度不均勻的現象。



圖 14 未加隔熱棉

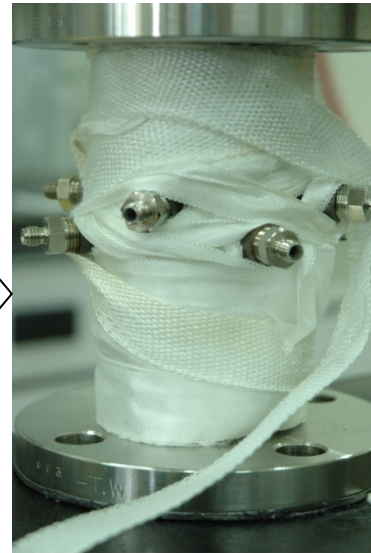
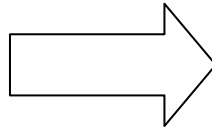


圖 15 已加隔熱棉

最終因將煨燒區與下游多孔性介質結合，因此溫度量測上可簡化至量測單一介面即可，遂將一截面及計畫上不必用到的溫度量測管件，以 plug 管件鎖附，避免氣體洩漏。

## (二)混合室設計

引入類似渦輪引擎混合室的設計，分為內筒與外筒，一般來說渦輪引擎是燃油與氣體共同進入燃燒室混合點燃。在此運用其氣體進氣之技術，簡而言之，空氣進入外筒內部，部分由內筒頂部以渦旋方式進入內筒內部；另一部份由內筒側面進入並且回衝，然而氫氣直接進入內筒內部與空氣混合。內、外筒之間夾有石墨石棉墊片以供氣密。外筒、內筒之設計圖和實體圖如下(圖 16~19)：

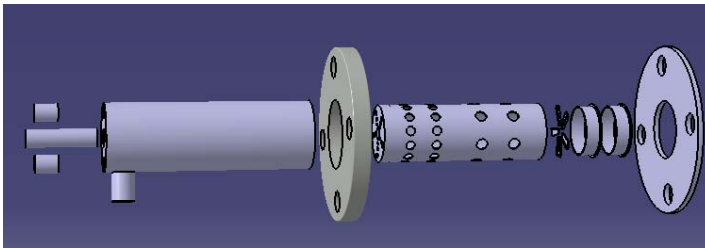


圖 16 混合室爆炸圖

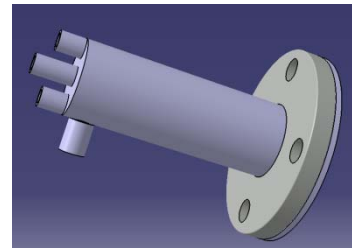


圖 17 混合室組合圖

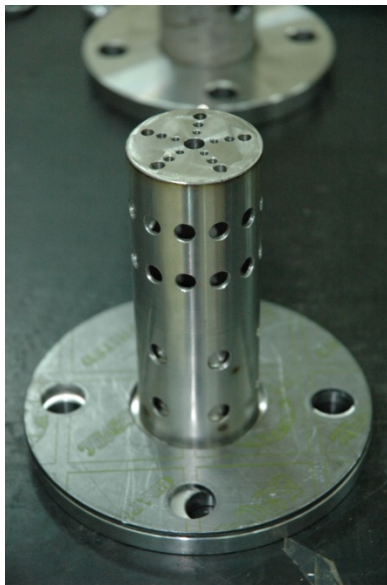


圖 18 混合室內筒實體圖

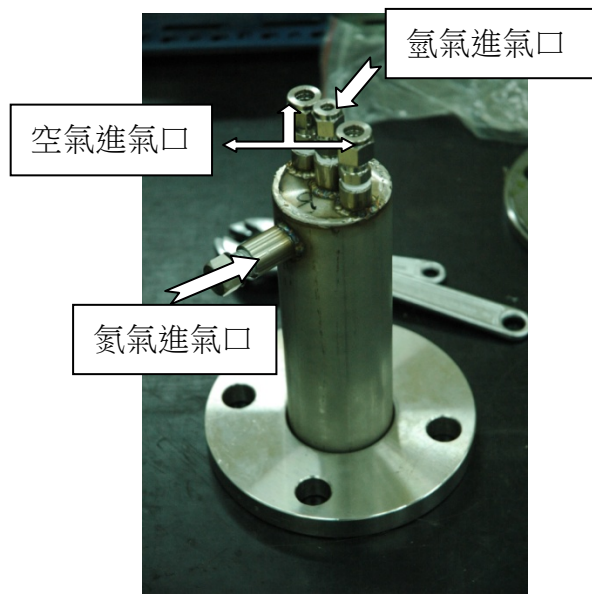
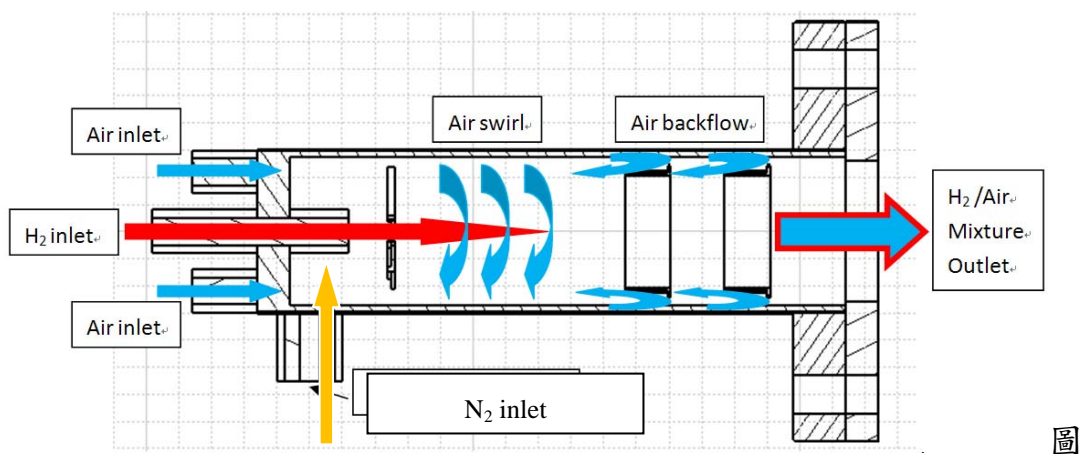


圖 19 混合室外筒實體圖

混合室內部流場示意圖如下圖 20 所示，由圖可明顯看出混合室內部流場流動的狀態，另外在管壁靠近進氣口頂側預留一氮氣入口，其流動狀態為氮氣通入混合室中，會先撞擊中心之氫氣管，產生亂流渦旋後再與後方管壁接觸，最後由管壁以近似切線方向出發向下游流動。



20 混合室內部流場和設計示意圖



### (三)整體實驗機台建立與修改過程

實驗機台的建立和修改可粗分為五個階段，第一階段為最初始試驗，第二階段為期中查訪前改善，第三階段為期中查訪後改善，第四階段為初始實驗，最後一個階段為煨燒實驗。

首先初始試驗時期，主要以達成燃燒反應為目標，此時的實驗機台較為簡略，設備流程圖如圖 21、實際機台如圖 22 所示。此時尚存在以下問題：

- 1.空氣與氫氣共同通入防爆箱，會造成防爆箱混合出口有一氣流不穩定且兩種氣體會有互相干擾流動的現象。
- 2.燃燒反應與背壓過大造成水氣凝結，影響燃氣進料。
- 3.燃燒極為不穩定與火焰回火(如圖 23)嚴重。
- 4.為了保護 MFC 所加入液氣分離系統之血清瓶，瓶蓋白色軟塞無法承受空壓機之壓力(約 6~7 bar) (如圖 24)。
- 5.用在氫氣之流量計，流量範圍是 0~50L，儀器存在 F.S.=1.5%之誤差，使得溫度面存在約 100 °C 之微擾變化。

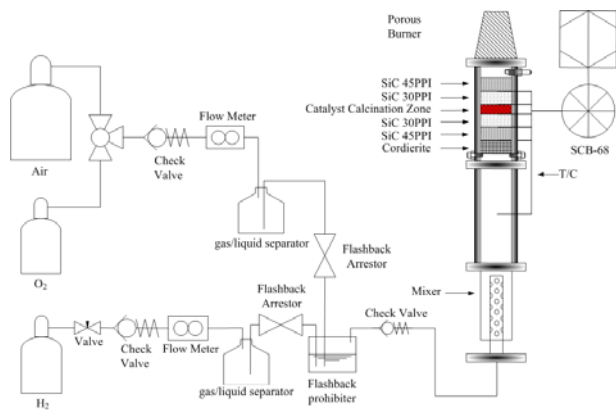


圖 21 設備流程圖

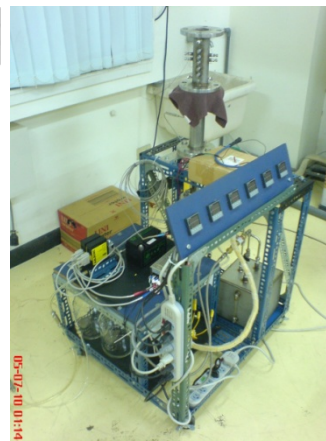


圖 22 實驗平台圖

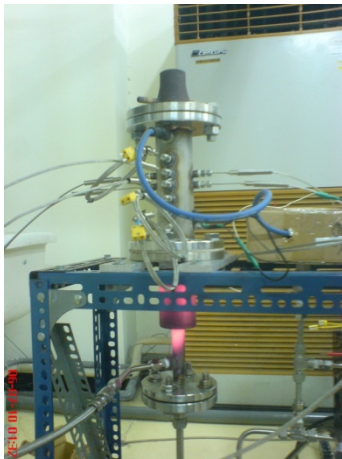


圖 23 混合區回火嚴重



圖 24 液氣分離系統

6. 管線彎角處造成壓損和流道不順。

7. 空氣進氣流量過大(70 lpm)，使得空壓機必需時常做動，做動瞬間流量會有不穩定的現象。

第二階段為期中查訪前改善時期，為了改善第一階段的問題，調整實驗機台配置，設備流程圖如圖 25 所示，圖 26 與 27 為實際機台圖。

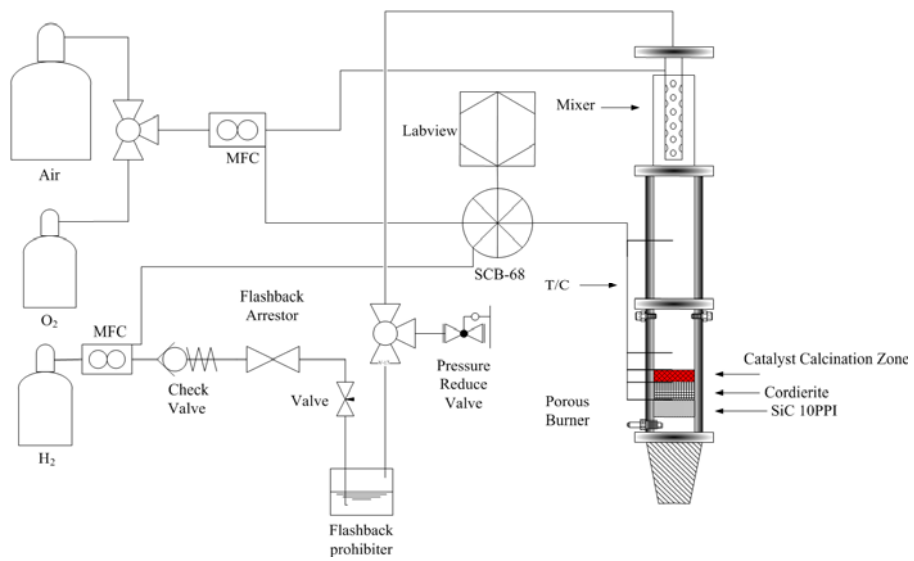


圖 25 設備流程圖

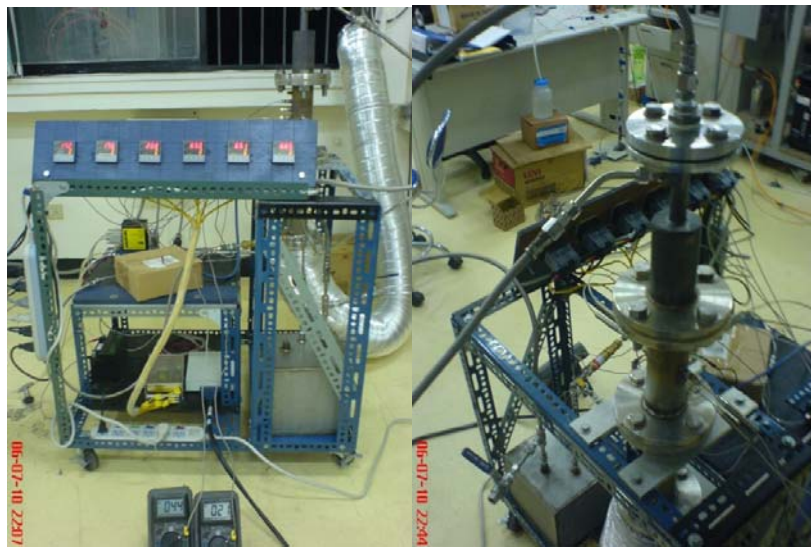


圖 26 實驗平台圖

圖 27 燃燒室

主要修改下列項目

1. 將燃燒器進料和出口部分互換，改由上端進氣燃燒；下端尾氣排出（如圖 27）。直觀的認為由上往下可以減低水氣凝結的問題，加上學

長做重組器的經驗，結果造成正面的影響。

- 2.簡化燃燒室 SiC 多孔材和 Cordierite 的擺設，以達成控制火焰面為第一階段性目標。將以單層 SiC 多孔材和 Cordierite 創造出介面，上游為 Cordierite 下游為 SiC 多孔材，若兩者皆能發揮其效果(SiC 多孔材：預熱燃氣與燃燒更完全增加效率。Cordierite 整流與防止回火)，再考慮其他的搭配設計。
- 3.防爆箱改回原本設計，僅讓氫氣進入防爆箱，簡化非必要的設計來增加燃氣進氣的穩定度。
- 4.移除液氣分離系統，由防爆箱上游的球(針)閥做動，來抑制水氣往 MFC 方向移動。
- 5.簡化連接進入混合區的管路，使得燃氣進氣較為平順。
- 6.將空氣之 MFC 上游球閥前再加上調壓閥，減緩不穩定的波動。

第三階段為期中查訪後改善時期，設備流程圖與實際機台圖，如圖 28、29 所示。然而主要修改部分如下。

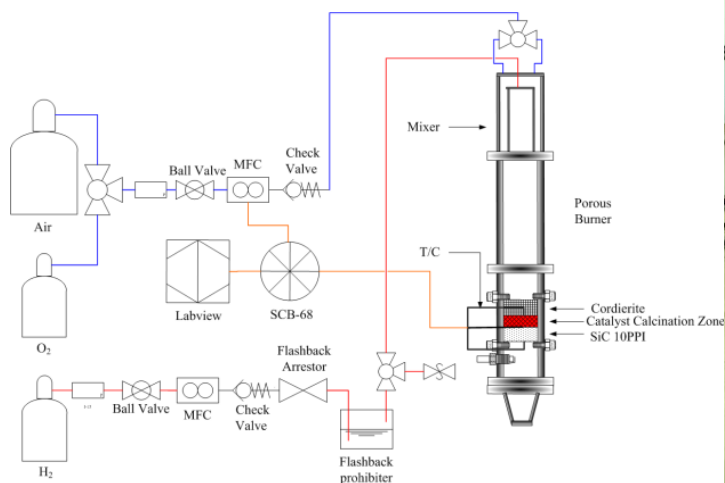


圖 28 設備流程圖



圖 29 實驗平台圖

1. 修改燃燒室設計並加工
2. 修改混合室設計並加工
3. 設計加工煨燒盒

分成上下兩個不鏽鋼圓框組成，中間卡住不銹鋼網，組合時因上框內壁為正公差，下框外壁為負公差，可做一緊配並卡住一端不銹鋼網，如下圖 30 所示。

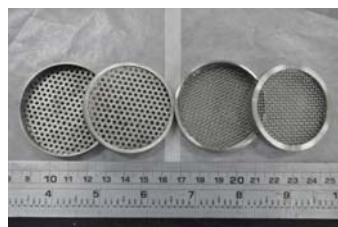


圖 30 煨燒盒分解圖

- 4 提供更穩定的燃氣進料

空氣方面，在 MFC 上游加上調壓閥，提供更穩定的進氣；下游

加上逆止閥，避免波動回衝。氫氣方面，新購入東京計裝 0~10L/min 流量控制器(誤差 F.S=1%)，在 MFC 上游加上調壓閥。並整理管線，避免不必要的彎管處與配合適當的管件，加上調壓閥、球閥與洩壓閥，以提供穩定的燃氣進料。

#### 5.溫度擷取系統建立

完成從錶頭再傳輸訊號，到電腦擷取卡做資料擷取，這段的連接處理，結果獲得數值仍然存在一定量的微擾現象，但在可以接受的範圍之內。重新設計表頭面板，以壓克力材料設計製作。T/C 改用 D=3.2mm，可避免過於氧化和增加強度與耐熱度。

第四階段為初始實驗時期，研究之實驗設備，建立一個多孔性介質燃燒室之系統，圖 31 為實驗設備流程圖，實驗設備由三部分構成，分別為進氣段、混合段與燃燒段。進氣段主要由氫氣氣瓶、空壓機、調壓閥、流量控制器、逆止閥、防爆逆止閥與防爆箱所構成；混合段由內、外管與內管壁之擋板所構成；燃燒段由多孔性介質材料、溫度擷取系統與點火系統所構成。此外，燃燒室外部以隔熱棉和隔熱帶包覆管壁，用以避免熱能經由燃燒室管壁傳至外界。溫度擷取系統由 NI 數據擷取卡、資料擷取盒、溫度顯示器和 Labview 程式所組成。點火系統包括火星塞、高壓線和點火線圈。然而燃燒之

高溫尾氣則由尾管排出，再經由風管連至抽風罩排至外界。

溫度量測屬於相當重要的部分，以K-type T/C量測燃燒室內三個區段的溫度，第一區段為由燃燒室上游空管，可量測得知進氣溫度，此溫度值也是判斷回火與否的依據。第二區段為燃燒室內多孔性介質之介面量測，可得知其溫度分佈情形，並可進一步判斷火焰是否穩定燃燒。第三區段為燃燒室下游之尾管量測，可得知尾氣溫度，此溫度亦為判斷火焰後燃與否的依據。其中燃燒室內之溫度分佈量測點示意圖，如圖32所示，在介面處取 $T_1$ 到 $T_4$ ，四個不同深度的量測點進行量測，軸向深度距離管內中心分別為0、8、16mm，每支T/C之夾角為 $90^\circ$ ，由此可知此介面之溫度分佈，此外量測入口溫度與出口溫度之T/C，均伸入管內中心處量測。

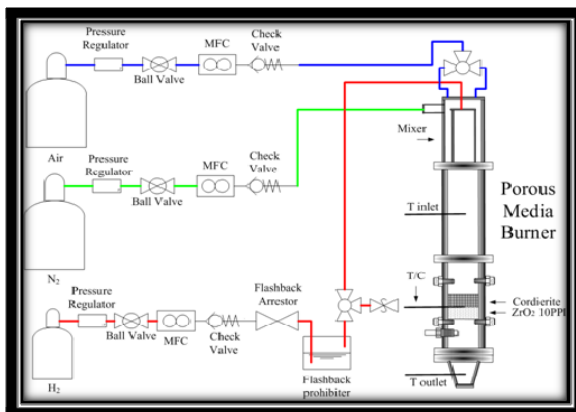


圖31 實驗設備流程示意圖

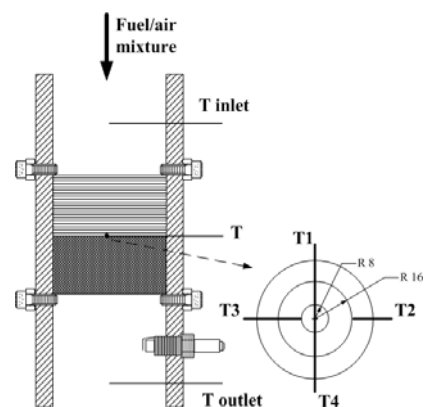


圖32 溫度量測位置示意圖

機台修改上主要包括兩項：

### 1. 點火系統重新設置

將舊的點火裝置複製、重置與改良，以供點火系統達到長時間穩定做動，確保不會因持續使用而燒壞，如圖 33、圖 34 所示。

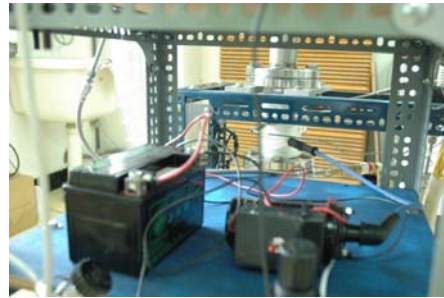
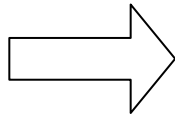


圖 33 點火裝置修改前

圖 34 點火裝置修改後

## 2.排氣風管設置

排風設備在更換抽氣馬達之後，經過煙霧測試，可順利將廢氣往外界排放。實驗進行時，經由排氣風管可將尾氣順利導出，如圖 35、圖 36 所示。



圖 35 抽風罩與風管



圖 36 風管位置設置

最後為煨燒觸媒時期，此時設備流程圖與第四階段大致上相同，主要將觸媒置入碳化矽多孔材凹槽內，如圖 37 所示，不再加入



煨燒盒，用以減少實驗變因，溫度量測站位圖如圖 39 所示，經過 650°C 且持溫四小時，實際煨燒完之觸媒如圖 39、40 所示，目前仍需做物性與化性分析。



圖 37 觸媒放置方法

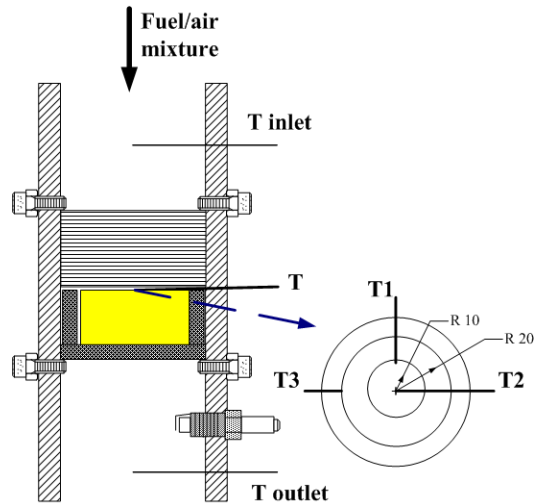


圖 38 溫度量測站位圖



圖 39 觸媒煨燒後



圖 40 保存罐

#### (四)多孔性介質選定

多孔性介質種類包含堇青石、碳化矽、氧化鋁與氧化鋯，均為

直徑 50 mm，高度 22 mm，物性如下表，堇青石有 100、200 CPSI 可選用，然而其他三種多孔材有 15、30 PPI，初始實驗之前選用 200 CPSI 堇青石搭配 15 PPI 氧化鋁，然而煨燒實驗是在更低氫氣濃度下做實驗，故上游選用 200 CPSI 堇青石而下游選用較高熱傳導係數的 30 PPI 碳化矽(如圖 41 所示)，用以增加火焰面的均勻性。

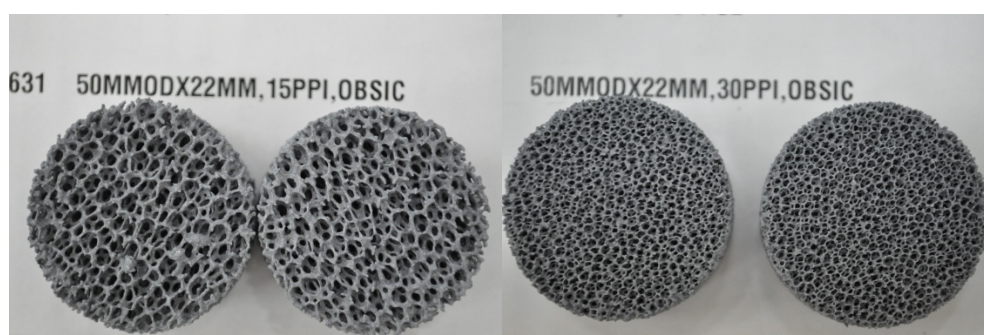


圖 41 左為 15 PPI；右為 30 PPI 之碳化矽多孔材

表 1 多孔性介質物性表

	<b>Cordierite</b>	<b>ZrO<sub>2</sub></b>	<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>SiC</b>
Porosity	0.46	0.85	0.85	0.85
Max. usage temperature (°C)	1600	1800	1700	1600
Conductivity (W/m-K)	1.8	4~5	20-40	20-50

## 五、實驗參數設定與修正

實驗參數設定上分為兩個部份，第一為初始實驗之參數設定，第二為煨燒實驗之參數設定。

初始實驗以找出均勻的火焰面為目標，實驗參數設定上分為三個部分，首先改變氫氣濃度，找出此溫度所對應的相關參數值，接著以此參數為基準進行擴展，探討在相同的氫氣濃度意即相同的當量比下，燃氣流速對於介面溫度分佈的影響，最後探討在相同的燃氣流速下，不同的氫氣濃度對於介面溫度分佈的影響。

初始實驗三部份之參數設定如下：

### 1.不同氫氣濃度下之介面溫度分佈

表2為此部分實驗所選定之參數，參數設定上以氫氣進氣量為3 lpm為固定值，進而改變空氣之進氣量為26、27、28、29、30 lpm，其氫氣濃度分別為9.1、9.4、9.7、10、10.4%，此五組之當量比在0.23到0.27之間。

### 2.相同氫氣濃度下不同燃氣流速對於介面溫度分佈的影響

表3為此部分實驗所選定之參數，由第一部分實驗可得知，氫氣流量在3 lpm與空氣流量在26 lpm時，可在多孔性介質之介面處得到一均勻且穩定的溫度分佈，其溫度值約為800 °C。故以此參數條件進

行擴展，改變氫氣流量為2、2.5、3、3.5、4、5 lpm，在相同氫氣濃度10.4%下，所對應之空氣流量分別為17.3、21.7、26.0、30.3、34.7、43.3 lpm，此時燃氣流速分別為32.8、41.0、49.2、57.4、65.6、82.0 cm/s。此外氫氣流量為5 lpm與空氣流量為43.3 lpm之參數，是為了得知燃氣流速再度向上提升之後，對於介面溫度分佈的影響。

### 3.相同燃氣流速下不同氫氣濃度對於介面溫度分佈的影響

表4為此部分實驗所選定之參數，氫氣流量在3 lpm與空氣流量在26 lpm時，可在多孔性介質之介面處得到一均勻且穩定的溫度分佈，其溫度值約為800 °C。故以此參數條件進行擴展，改變氫氣濃度為9.7、10.0、10.4、10.7、11.0%，在相同燃氣流速之下，所分別對應之空氣流量為26.2、26.1、26.0、25.9、25.8 lpm，然而氫氣流量分別為2.8、2.9、3.0、3.1、3.2 lpm。

表 2 第一部分實驗之參數

組別	一	二	三	四	五
H <sub>2</sub> flow rate(LPM)	3	3	3	3	3
Air flow rate(LPM)	30	29	28	27	26
H <sub>2</sub> concentration(%)	9.1	9.4	9.7	10	10.4

表 3 第二部分實驗之參數

組別	一	二	三	四	五	六
H <sub>2</sub> flow rate(LPM)	2	2.5	3	3.5	4	5
Air flow rate(LPM)	17.3	21.7	26	30.3	34.7	43.3
Fuel/gas velocity(cm/s)	32.8	41.0	49.2	57.4	65.6	82.0
H <sub>2</sub> concentration(%)	10.4	10.4	10.4	10.4	10.4	10.4
F/A Ratio	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008
Lambda	3.7	3.7	3.7	3.7	3.7	3.7

表 4 第三部分實驗之參數

組別	一	二	三	四	五
H <sub>2</sub> flow rate(LPM)	2.8	2.9	3	3.1	3.2
Air flow rate(LPM)	26.2	26.1	26.0	25.9	25.8
H <sub>2</sub> concentration(%)	9.7	10	10.4	10.7	11.0
F/A Ratio	0.0072	0.0075	0.0078	0.0081	0.0084
Lambda	4.02	3.87	3.73	3.59	3.45

然而第二階段煨燒實驗之參數設定由初始實驗之結果修正，設定氫氣體積百分比濃度範圍在 8.4~10.1%，實驗矩陣如下表 5 所示，矩陣內空格為所對應的氫氣濃度值。相關參數值如表 6 所示。

表 5 煨燒實驗之實驗矩陣

<b>H2 flow rate</b>	2.8	3	3.2
	<b>Air flow rate</b>		
28.5	<b>8.9</b>	<b>9.5</b>	<b>10.1</b>
29.5	<b>8.7</b>	<b>9.2</b>	<b>9.8</b>
30.5	<b>8.4</b>	<b>9.0</b>	<b>9.5</b>

表 6 煨燒實驗之參數表

組別	一	二	三	四	五
氫氣流量(LPM)	2.8	2.8	2.8	3	3
空氣流量(LPM)	28.5	29.5	30.5	28.5	29.5
氫氣濃度(%)	8.95	8.67	8.41	9.52	9.23
F/A Ratio	0.0067	0.0064	0.0062	0.0071	0.0069
組別	六	七	八	九	
氫氣流量(LPM)	3	3.2	3.2	3.2	
空氣流量(LPM)	30.5	28.5	29.5	30.5	
氫氣濃度(%)	8.96	10.10	9.79	9.50	
F/A Ratio	0.0067	0.0071	0.0073	0.0076	

## 六、實驗流程

初始實驗與煨燒實驗之實驗流程大致上相同，初始實驗之流程為：

通入空氣(X L/min) → 待氣流穩定約一分鐘後 → 點火裝置 ON → 再通入氫氣(Y L/min) → 待燃燒區溫度上升至攝氏三百度後 → 點火裝置 OFF → 等待界面溫度值穩定後(不再有升溫與降溫的現象，若無回火約需兩個小時) → 關閉氫氣氣源 → 增加通入空氣流量(99 L/min) → 冷卻至常溫。

煨燒實驗之實驗流程為：

通入空氣(X L/min) → 待氣流穩定約一分鐘後 → 點火裝置 ON → 再通入氫氣(Y L/min) → 待燃燒區溫度上升至攝氏三百度後 → 點火裝置 OFF → 持溫四小時後 → 關閉氫氣氣源 → 通入氮氣流量(50 L/min) → 增加通入空氣流量(50 L/min) → 待介面溫度下降至 200 °C 後 → 關閉空氣氣源 → 冷卻至常溫。

## 參、主要發現與結論

### 一、介面氫燃燒特性探討

由初始實驗可獲得以下實驗結果，並整理出初步成果，提供煨燒實驗良好的參考，初始實驗結果如下：

#### 1.不同氫氣濃度下之介面溫度分佈

氫燃燒的溫度場受到氫氣濃度的改變有一相當顯著的影響，由表 7 之數據可直接得知(表中介面溫度一、二、三，為三次實驗分別之結果)，在第一到四組參數下，介面溫度分佈相當不均勻；然而在第五組參數條件下，可得到一均勻的介面溫度分佈，亦可達到預期中  $800^{\circ}\text{C}$  之溫度值，四個溫度點的升溫曲線如圖 42 所示，圖中顯示四個溫度點需要一定的持溫時間才能呈現均勻火焰面的情況，且由圖中後半部曲線的趨勢可能知，在此條件下，火焰面相當穩定。再由圖 43 之趨勢可推估，當氫氣濃度較高時，換句換說，就是在較高當量比之下，介面溫度量測所得之溫度值，相對之下較為均勻；然而在氫氣濃度低於 10.4% 時，介面溫度分佈相當不均勻，甚至出現約  $400^{\circ}\text{C}$  的差異值；並且介面溫度值隨著氫氣濃度的下降而降低。

此外在，當火焰處於欲回火卻被堇青石阻絕火焰傳遞時，介面溫度最為均勻，主要因為堇青石熱傳導係數和孔隙率相對於氧化鋁



多孔性介質來說，兩項都是相對的低，使得火焰得以控制在堇青石下游，但若是氫氣濃度過高，在不改變研究中多孔性介質配置下，會有回火的情形。

表 7 三次實驗下之介面溫度量測值

組別	一	二	三	四	五					
介面溫度一(°C)	670.4	319.3	710.6	344.7	760.1	354.5	787.8	390.1	799.9	791.1
介面溫度二(°C)	488.9	436.2	436.4	481.5	494.9	567.3	658.8	607.3	796.7	789.2
介面溫度三(°C)	595.1	269.3	644.4	313.0	725.8	350.3	760.5	362.0	799.4	791.0
介面溫度四(°C)	449.3	351.8	393.4	379.6	463.6	459.5	513.5	595.1	799.6	789.0
介面溫度五(°C)	598.2	272.4	696.4	327.4	749.1	349.5	777.2	376.0	790.2	789.5
介面溫度六(°C)	366.0	349.4	417.3	405.0	481.4	546.2	687.7	606.5	781.1	780.6

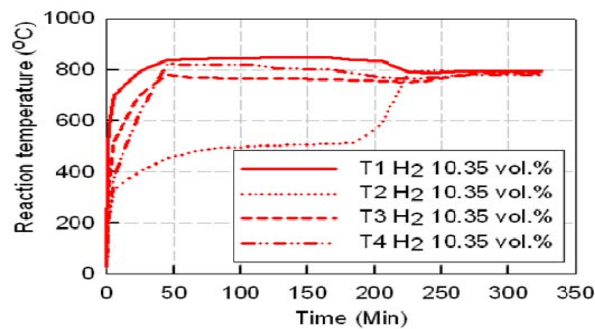


圖 42 當氫氣濃度為 10.4 % 時，反應介面溫度之升溫曲線

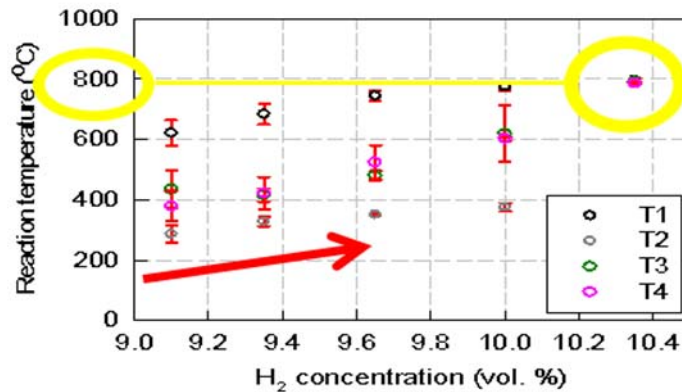


圖 43 不同氫氣濃度下之介面溫度分佈

## 2.相同氫氣濃度下不同燃氣流速對於介面溫度分佈的影響

由第一階段的實驗結果可得知，第五組參數所得之介面溫度分佈最為均勻，故以第五組參數為基準，在相同之  $\phi = 0.27$  和氫氣比例 10.4% 下，改變燃氣之流速，實驗所得之介面溫度量測值如表 8 所示，各參數條件下之溫度分佈如圖 44 所示，實驗結果發現在相同氫氣濃度下，增加流速對於介面溫度分佈之均勻程度、量測所得之數值和火焰穩定性不會造成太明顯的影響；然而在相同氫氣濃度下，降低流速即造成介面溫度分佈相當不均勻，亦可由圖 44 之溫度分佈之趨勢清楚瞭解。此外，火焰溫度值隨著燃氣流速降低而降低。

最後，由表 3-8 之第六組數據可得知，若是流速增大到 65.6 cm/s 之上，會造成介面溫度分佈趨向不均勻，但火焰溫度值隨著流速增加而增加。

表 8 三次實驗下之介面溫度量測值

組別	一		二		三		四		五		六	
介面 溫度一(°C)	748.8	451.4	828.8	501.5	799.9	791.1	810.9	810.8	816.0	801.0	830.2	799.5
介面 溫度二(°C)	612.2	589.4	770.6	828.2	796.7	789.2	801.2	795.3	817.3	805.4	832.8	831.8
介面 溫度三(°C)	725.5	425.2	833.0	459.5	799.4	791.0	790.5	766.2	794.2	770.4	831.8	796.7
	492.1	585.1	770.4	821.7	799.6	789.0	753.0	759.3	784.6	777.2	830.5	831.6
	730.2	427.6	787.4	447.6	790.2	789.5	793.9	790.4	808.7	797.9		
	501.3	534.3	704.0	628.9	781.1	780.6	777.9	771.4	797.4	786.6		

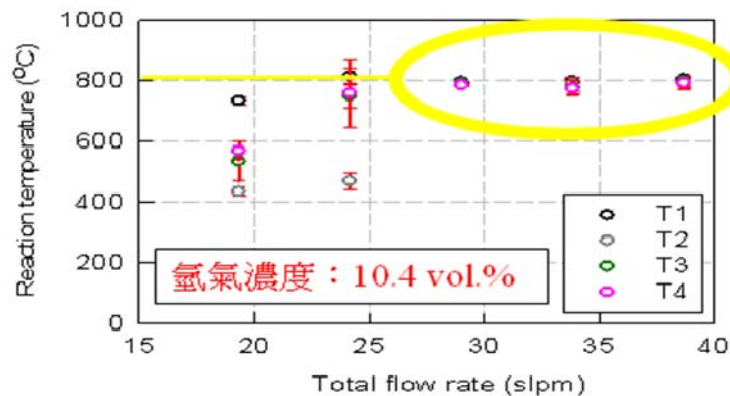


圖 44 相同氫氣濃度下，燃料流速對於介面溫度之分佈

### 3.相同燃氣流速下不同氫氣濃度對於介面溫度分佈的影響

由第二階段實驗可得知，在相同氫氣濃度下，改變混合燃氣之流速，會對介面溫度分佈造成影響，因此第三階段實驗目的在於探討在相同混合燃氣之流速下，不同氫氣濃度對於介面溫度分佈的影響，相同由第一階段實驗之第五組參數為基準，固定燃氣混合之流速為 49.2cm/s，改變氫氣濃度進行實驗，此外，氫氣濃度之參數改變間距較小，乃因若改變幅度過大時，氫氣濃度會大幅增減，以至於出現迅速回火或是持續後燃的現象，導致火焰無法穩定在燃燒區內，例如：氫氣<8.6%時，會有持續後燃現象；氫氣>12.1%時，會有迅速回火現象，由圖 45 與表 9 之實驗結果可得，在相同流速下，氫氣濃度越高，所得到的介面溫度分佈越是均勻，且氫氣濃度高到 10.4%之後，才會有此情況，若是溫度值在氫氣濃度高到 11%之內，不會有太大的差異。

由上述之後燃和回火現象進一步探討，考慮介面火焰的穩定性，如圖 46 可得知第四組和第五組參數的升溫曲線，由此升溫曲線可清楚發現，兩者分別在實驗進行大約 2300 和 3400 秒時升溫曲線有一驟降，即出現回火的現象，此較差的穩定性會使多孔性介質燃燒室在應用上受到限制，因此綜合第二與第三階段實驗，燃燒室在應用上來說，改變燃氣流速較改變氫氣濃度有利的多。

表 9 三次實驗下之介面溫度量測值

組別	一	二	三	四	五					
介面	709.2	323.0	787.5	391.9	799.9	791.1	789.0	788.6	791.6	789.0
溫度一(°C)	450.5	532.3	579.6	604.7	796.7	789.2	781.1	778.6	782.1	779.9
介面	745.1	342.7	793.0	412.6	799.4	791.0	798.7	790.6	798.8	790.3
溫度二(°C)	481.0	595.4	673.0	707.2	799.6	789.0	784.5	784.4	781.2	784.1
介面	751.7	357.8	791.3	410.1	790.2	789.5	805.5	796.0	791.5	787.8
溫度三(°C)	479.5	441.7	704.4	619.2	781.1	780.6	801.1	795.3	784.6	784.1

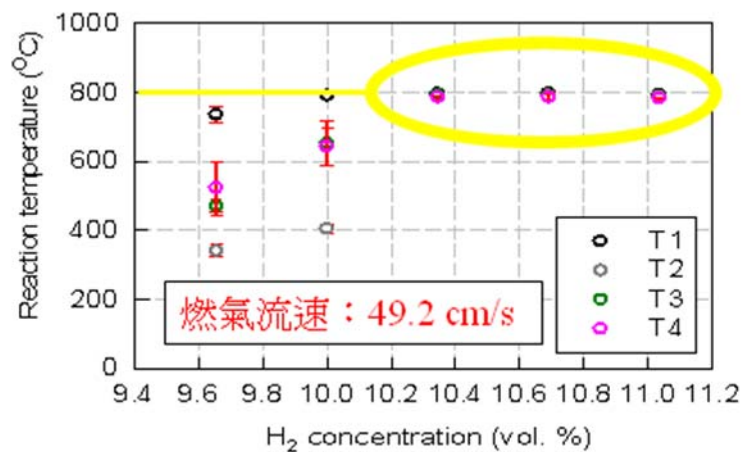


圖 45 相同燃氣流速下，氫氣濃度對於介面溫度之分佈

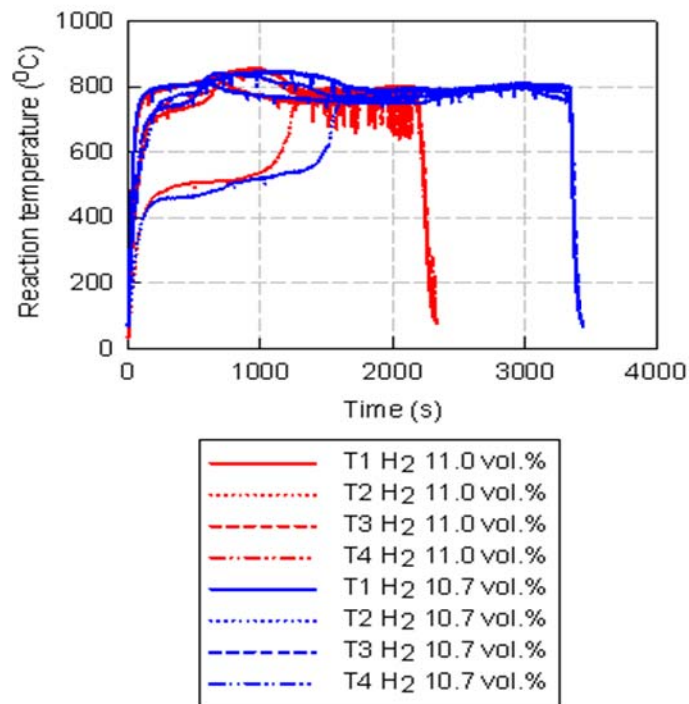


圖 46 不同氫氣濃度下，各點反應溫度之升溫曲線

初步實驗探討不同多孔性介質之介面溫度分佈情況，透過改變氫氣濃度與燃氣流速之兩大變因進行實驗，經由實驗結果可得到以下結論：

1. 在氫氣與空氣進氣流量分別為3 lpm與26 lpm時，可得到一均勻的介面溫度分佈，並達到預期中800 °C之溫度值，此外火焰面相當穩定。
2. 當氫氣濃度較高時，換句話說，就是在較高當量比之下，介面溫度量測所得之溫度值，相對之下較為均勻；然而在氫氣濃度低於10.4%時，介面溫度分佈相當不均勻，甚至出現約400 °C的差異

值；並且介面溫度值隨著氫氣濃度的下降而降低。

3. 以相同之 $\phi = 0.27$ 和氫氣濃度10.4%，增加流速對於介面溫度分佈之均勻程度、量測所得之數值和火焰穩定性不會造成太明顯的影響；然而在相同氫氣濃度下，降低流速即造成介面溫度分佈相當不均勻。
4. 若是燃氣混合之流速增大至65.6 cm/s之上，會造成介面溫度分佈趨向不均勻，但溫度值隨著流速增加而增加。
5. 固定燃氣混合之流速為49.2 cm/s，氫氣濃度在10.4%~11%之間時，所得到的介面溫度分佈相當均勻，且溫度值不會有太大的差異。
6. 以燃燒室在應用上來說，改變燃氣流速較改變氫氣濃度有利的多。

## 二、觸媒煨燒過程

觸媒煨燒實驗按照參數設定之矩陣進行，共有九組參數，每組相關參數如下表 10 所示，然而各組參數所對應的介面溫度值如表 11 所示，由結果可得第五組為最適合進行觸媒煨燒的參數值，溫度平均值大約在 650 °C，且相對於初始實驗之結果，介面溫度值已經均勻許多，考慮到火焰面有個輪廓，在控制介面火焰的條件下很難在不同深度獲得一均勻的火焰面，已經用最適當的多孔性介質進行實

驗，遂以平均溫度做為參考指標。

最後以第五組之參數值進行四小時觸媒煨燒實驗，所量測得的升溫曲線，如圖 47 所示。

表 10 煨燒實驗之參數表

組別	一	二	三	四	五
氫氣流量(LPM)	2.8	2.8	2.8	3	3
空氣流量(LPM)	28.5	29.5	30.5	28.5	29.5
氫氣濃度(%)	8.95	8.67	8.41	9.52	9.23
F/A Ratio	0.0067	0.0064	0.0062	0.0071	0.0069
組別	六	七	八	九	
氫氣流量(LPM)	3	3.2	3.2	3.2	
空氣流量(LPM)	30.5	28.5	29.5	30.5	
氫氣濃度(%)	8.96	10.10	9.79	9.50	
F/A Ratio	0.0067	0.0071	0.0073	0.0076	

表 11 各參數所對應之介面溫度值

組別		一	二	三	四	五	六	七	八	九
介面 溫度 值 (°C)	T1	575	508	431	721	669	567	738	712	668
	T2	602	535	469	737	679	624	789	750	692
	T3	515	475	386	661	609	559	703	676	647

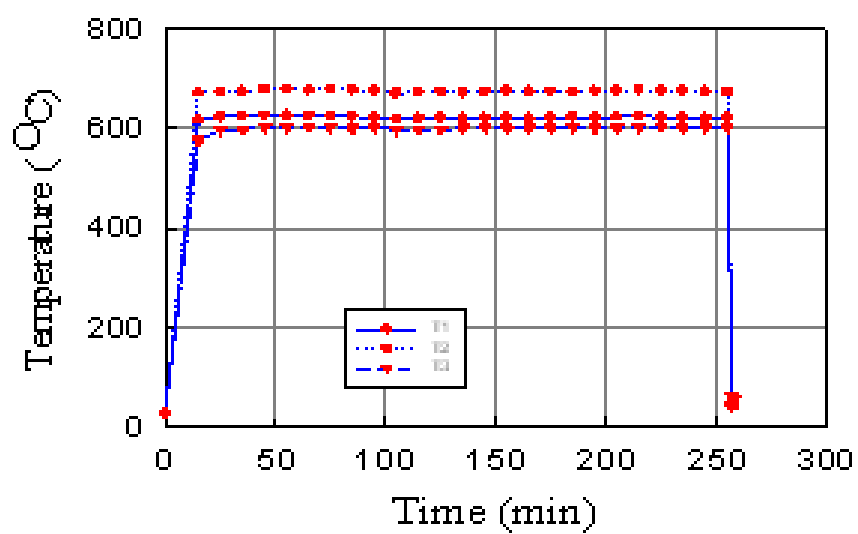


圖 47 煅燒觸媒之升溫曲線



#### 肆、參考文獻

- 【1】 樂晏昌，“氫氣在多孔性介質燃燒室之燃燒特性研究”，國立成功大學航空太空工程學系 碩士論文，2009。
- 【2】 張宏禾，“觸媒對多孔性介質爐之預混燃燒現象之影響”，國立中央大學機械工程研究所 碩士論文，2003。
- 【3】 Wood Susie, Harris Andrew T., “Porous Burners for Lean-burn Applications,” *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 34, pp.667–684, 2008.
- 【4】 張柏雄，“多孔性介質應用於固態氧化物燃料電池尾氣續燃器設計之模擬研究”，國立成功大學航空太空工程學系 碩士論文，2008。
- 【5】 陳宏嘉，“燃燒合成法氮化鋁材料之傳統燒結與微波燒結研究”，國立成功大學化學工程研究所 碩士論文，2002。
- 【6】 林瑞明，“氮化鋁陶瓷材料之微波燒結與傳統燒結研究”，國立成功大學化學工程研究所 碩士論文，2003。
- 【7】 劉嘉峰，“多孔性燃燒加熱爐燃燒現象研究”，國立中正大學機械工程研究所 博士論文，2005。
- 【8】 李家欣，“多孔性陶瓷介質燃燒爐結構對燃燒現象之影響”，國立中央大學機械工程研究所 碩士論文，2000
- 【9】 Takeno, T., and Sato, k., “An Excess Enthalpy Flame Theory,” *Combustion Science and Technology*, Vol. 20, pp.73-84, 1979.
- 【10】 Diamantis, D. J., Mastorakos, E., and Goussis, D., A., “Simulation of Premixed Combustion in Porous in Porous Media,” *Combustion Theory and Modelling*, Vol. 6, pp.383-411, 2002.

- 【11】 Marbach, T. L., and Agrawal, A. K., “Experimental Study off Surface and Interior Combustion Using Composite Porous Inert Media,” *ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, Vol. 127, pp.307-313, 2005.
- 【12】 Teng C., “Effect of hydrogen addition on methane combustion in a porous medium burner,” *International Journal Hydrogen Energy*, Vol. 27, .pp.699-707, 2002.
- 【13】 Alavandi S. K., Agrawal A. K., “Experimental study of combustion of hydrogen-syngas/methane fuel mixtures in a porous burner,” *International Journal Hydrogen Energy*, Vol. 33, pp.1407-1415, 2008.