

燃 燒 季 刊

Combustion Quarterly

第二十一卷 第四期 中華民國一百零一年十一月出版

Vol. 21, No.4

November 2012

目 錄

CONTENTS

編輯札記	2
侯順雄、陳維新	
「氣候變遷與節能減碳」專題討論會後報導	4
歐正章	
區域冷暖房(DHC)供應系統技術簡介	7
范光錢	
光學影像感測技術應用於工業燃燒系統之回顧	23
徐振凱、鄭儀誠、劉子吉	
富氧燃燒技術各產業應用現況	37
吳國光、張育誠、焦鴻文	
利用鈹作為熱電模組之擴散阻障層研究	51
陳奕瑞、葉建弦、林俊凱、林育立、趙文軒	
甲醇重組器的觸媒燃燒系統之研究	62
陳政群、呂志興、金順志、林育立	
化學迴圈技術-二氧化碳捕獲之機會與挑戰	75
彭鏡禹、徐恆文	

應用雷射影像法於柴油/生質柴油噴注之瞬時量測	88
------------------------	----

吳志勇、顧詠元、陳正暉、陳坤禾、楊授印

徵稿說明	101
------	-----

編輯札記

「燃燒季刊」是我國燃燒/能源領域的代表性刊物，也成功地扮演著實務應用及學術理論交流之平臺，廣受產官學研相關領域專業人士之重視。本期共刊登八篇專業論文，分別來自大專院校、工業技術研究院和中國鋼鐵公司等單位之研究成果。中國鋼鐵公司歐正章專業工程師發表之「氣候變遷與節能減碳」專題討論會後報導，鼓勵大家將綠生活(Green Life)落實於日常生活上，並希望在綠色生活中加入綠能、綠建築、綠色環保、綠色採購，達成五個綠的目標，且此次大會議程安排，充份展現「氣候變遷與節能減碳」主題特色，講題中介紹相關新能源(綠能)技術，提供與會人員共同瞭解臺灣產業界共同所面臨的挑戰與發展機會；工業技術研究院綠能與環境研究所范光錢研究員簡介說明區域冷暖房(DHC)供應系統可藉由區域能源整合利用及維持冷暖氣系統高效率運轉，以顯著提升整體能源效率，相較傳統各別獨立系統，可提升整體能源效率達25%~35%，減少54%的CO₂排放；工業技術研究院綠能與環境研究所徐振凱、鄭儀誠、劉子吉研究員回顧分析基於光學感測技術在工業燃燒系統之研究文獻，其中包含了基於火焰影像之燃燒系統安全性監控、以火焰影像結合製程資訊之分析、預測與優化操作、以火焰影像計算溫度場分佈與燃燒熱值評估等四個主題；工業技術研究院綠能與環境研究所吳國光、張育誠、焦鴻文研究員發表了「富氧燃燒技術各產業應用現況」，針對微富氧燃燒技術之應用推廣產業別之特性與需求性，進行分析探討，文中提及基本上除發電業外，其餘產業皆有機會應用富氧燃燒；工業技術研究院綠能與環境研究所陳奕瑞、葉建弦、林俊凱、林育立研究員和材料與化工研究所趙文軒研究員之研究團隊共同發表「利用鉬作為熱電模組之擴散阻障層研究」，結果顯示鉬和鎳層可以有效阻擋銅和錫原子進入熱電晶粒，然而卻導致熱電晶粒之電導率略為下降，且熱電晶粒和銅電極間之熱阻導致溫差變大，因此在相同的端部溫度下導致等效的Seebeck係數變小；工業技術研究院綠能與環境研究所陳政群、呂志興、金順志、林育立研究員利用高活性的甲醇燃燒觸媒(Pt/Al₂O₃)，在室溫環境可以催化甲醇水溶液進行燃燒，不需要額外的電加熱系統，平板式微流道甲醇燃燒器，從室溫起燃只要2-3分鐘，燃燒區的最高溫可以達到350°C，甲醇的燃燒效率超過99.9%以上，燃燒的最終產物為二氧化碳與水氣；工業技術研究院綠能與環境研究所彭鏡禹研究員、徐恆文正工程師發表「化學迴圈技術—二氧化碳捕獲之機會與挑戰」，文中說明化學迴圈技術之原理，國際較先進的化學迴圈技術發展現況，並探討我國未來發展之機會與挑戰；高苑科技大學吳志勇教授探討柴油(D100)與不同混合比例之生質柴油在不同壓力環境下之噴霧特徵，其結果可以用為未來使用生質燃料時，引擎性能變異原因之參考。

整體而言，本期內容涵蓋氣候變遷與節能減碳、富氧燃燒技術、區域冷暖房供應系統、光學感測技術在工業燃燒系統之應用、熱電模組研究、甲醇重組器的觸媒燃燒系統、生質柴油等多元題材，內容相當精彩且多元化，閱讀過程絕對是一場知識的饗宴，也請本刊讀者繼續支持及踴躍投稿本期刊，共同推動燃燒與能

源科技之知識分享及研究交流。

副總編輯 侯順雄

總編輯 陳維新

「氣候變遷與節能減碳」專題討論會候報導

2012.10.23

歐正章¹

Jenq-Jang Ou

中國鋼鐵公司

China Steel Corporation, Kaohsiung, Taiwan

中華民國燃燒學會與中國鑛冶工程學會、行政院環保署、經濟部中央地調所、中國鋼鐵公司、工業技術研究院綠能與環境研究所、台灣中油公司等共同於民國 101 年 10 月 19 日在中國鋼鐵公司鋼鐵研究發展處集會堂完成舉辦「氣候變遷與節能減碳」專題討論會，希望藉此探討全球綠色潮流下台灣面臨的機會與挑戰。當天與會人員包含中國鑛冶工程學會朱秋龍理事長、環保署張子敬副署長、中鴻公司陳玉松董事長、中鋼公司工程部門許文都副總經理等，連同外賓及本公司各單位同仁共有一百三十餘人參加。

專題討論會由本會理事，中國鋼鐵公司能源環境事務推動辦公室張西龍助理副總擔任主席，張理事致詞時鼓勵與會人員將綠生活(Green Life)落實於日常生活上，並希望在綠色生活中加入綠能、綠建築、綠色環保、綠色採購，達成五個綠的目標。張理事並說明此次課程安排，充份展現「氣候變遷與節能減碳」主題特色，課程中介紹相關新能源(綠能)技術，提供與會人員共同瞭解臺灣產業界共同所面臨的挑戰與發展機會。

接著中國鑛冶工程學會朱秋龍理事長致詞，他表示現今世界各國政府與產業間都非常關注氣候變遷、節能減碳與環境保護等議題，根據聯合國統計，雖然臺灣是個小島國家，但 2010 年臺灣燃料燃燒二氧化碳排放量高達 270 百萬噸，占全球的 0.89%，排行全世界第 20 名，而每人年均二氧化碳排放量為 11.66 噸，更是排行全世界第 19 名。臺灣大部份的能源需仰賴進口，減輕這方面的經濟與環保負擔是政府責無旁貸的責任，因此，如何協助企業轉型、各種新能源的開發、節能減排與降低環境衝擊，這些都是我們政府現在正在積極努力的方向。

在張西龍理事一一介紹上午專題討論會之議題與主講人後，首先由環保署張子敬副署長發表「氣候變遷的挑戰與因應」，接著由臺灣棕櫚地熱能公司董雲樵執行董事發表「深層地熱開發對我國能源之影響」、工研院劉振邦副所長發表「綠能對臺灣產業轉型之機會與挑戰」等議題。

下午討論會由中鋼公司技術部門蔡松釗助理副總主持，他表示臺灣能源依賴率高達 99.4%，因此，自主能源與新興能源的開發是刻不容緩的事，今天的議題

¹ 中國鋼鐵公司，專業工程師，E-mail: 110122@mail.csc.com.tw

著重介紹新興能源的開發，相信與會人員都能獲益良多。接著由核能所林立夫博士發表「我國淨煤發展模式之探討」、台灣中油公司陳大麟副所長發表「非傳統油氣資源之生產開發現況」、中央地調所鐘三雄科長發表「甲烷冰之技術開發及應用潛力」、成功大學林大惠教授發表「綠色潮流下離岸風電之機會與挑戰」。最後，學會朱秋龍理事長特別感謝中鋼公司承辦此次活動；所有參加人員並對於參加本次專題討論會咸認收穫豐碩，所獲心得足為未來推動節能減碳工作之重要參考。

會議照片：



張西龍理事主持專題討論會



環保署張子敬副署長發表「氣候變遷的挑戰與因應」



專題討論會場一隅

區域冷暖房(DHC)供應系統技術簡介

District heating and cooling (DHC) supply system technology

范光錢¹

Frank Fan

工業技術研究院綠能與環境研究所

Green Energy & Environment Research Laboratories, Industrial Technology Research Institute

摘要

區域冷暖房(DHC)供應系統是藉由區域能源整合利用及維持冷暖氣系統高效率運轉，以顯著提升整體能源效率。相較傳統各別獨立系統，可提升整體能源效率達25%~35%，減少54%的CO₂排放，此外，亦可減緩城市熱島效應(heat island effect)等。在國外已有超過40年的應用並有非常成功的案例，於2006年，僅在日本就有超過150套DHC系統及84家合格營運公司，其中，超過74%的DHC系統皆以燃燒天然氣及電力為主要的動力源，所產生的冰水、熱水或蒸汽主要以供給當地的飯店與商業大樓等。韓國與日本為了鼓勵業者建置DHC，所有DHC系統使用之天然氣價格分別僅為市價之39%與55%，以創造建置與使用之誘因。推動DHC的成功關鍵因素是需有完善之法規及其配套措施，例如，日本的「熱供給事業法」規定，新建物樓板面積超過10,000平方米者，其空調系統必須採用DHC系統，用以達成整體節能減碳的目的。

關鍵字：區域冷暖房系統、能源效率、熱島效應

Abstract

District heating and cooling system has significantly to improve overall energy efficiency by through regional energy integration and to maintain high efficiency of heating and cooling systems. Comparing with the individual cooling or heating system, DHC may increase 25%~35% overall energy efficiency, decrease 54% CO₂ emission and reduce city's heat island effect. There are brilliant systems for over 40 years in the foreign areas. In 2006, there are 150 DHC systems and 84 qualified companies in Japan. 75% of the qualified DHC systems use nature gas and electric power as the energy source. They supply ice water, hot water or steam to the local restaurants and commercial buildings.

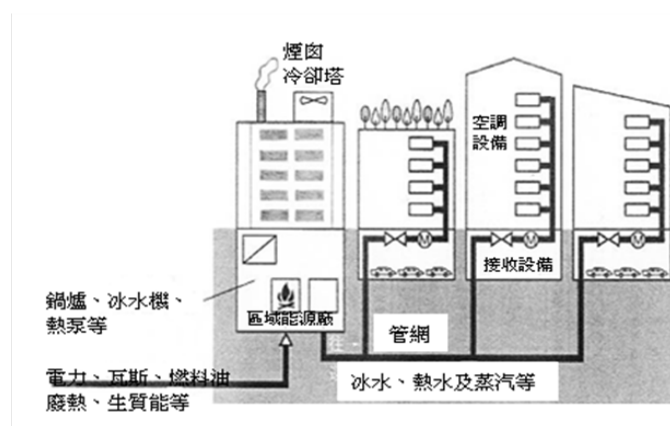
¹ 工業技術研究院綠能與環境研究所，研究員，E-mail: kcfan@itri.org.tw

In order to encourage the industries to establish DHC systems in Korea and Japan, all DHC systems use gas prices as the market price of 39% and 55% to create incentives to build and use. Promote the DHC key success factors were the need to improve the regulations and its supporting measures. For example, Japan's "Heat Supply Business Act" stipulates that new floor area of more than 10,000 square meters, air conditioning systems must be in DHC system, to reach an overall objective of energy saving and carbon reduction.

Keywords: District heating and cooling system, energy efficiency, heat island effect

一、前言

透過區域能源整合利用及維持冷暖氣系統高效率運轉，具有顯著的節能成效，有效提升能源效率[1]。DHC(District heating and cooling)區域冷暖房供應系統技術即是一成功應用的例子，在國外已發展非常成熟，在寒帶地區，一般僅為DHS(District heating system)區域暖房供應系統，例如丹麥、中國大陸東北地區、日本北海道等，而在熱帶地區，則僅為DCS(District cooling system)區域冷房供應系統，例如新加坡等。DHC系統在國外成功的關鍵因素是有國家的發展政策、合理的能源價格策略、配套管理法規與投資獎勵辦法。圖一是DHC系統的剖面示意圖，提供冷能與熱能的能源廠即位於該區域之中心或附近大樓的地下層用以隔絕噪音及避免占用黃金地段，其產製之冰水、熱水或蒸汽等即由分佈在地下之管網輸送至附近之各大樓。在日本，除了北海道較寒冷區域，其它區域80%以上之DHC系統是供應商業、旅館或辦公大樓使用，甚少的比例提供給住家。



圖一、DHC 系統的剖面示意圖

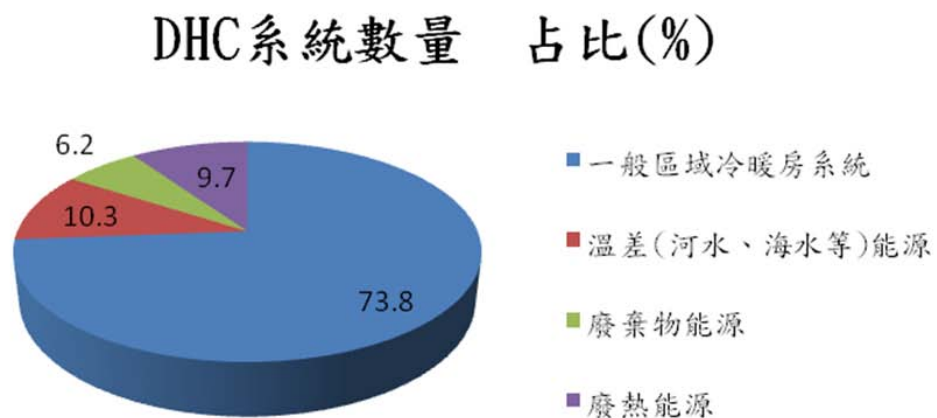
在國外已有超過 40 年的應用並有非常成功的案例，於 2006 年，僅在日本就有超過 150 套 DHC 系統及 84 家合格營運公司[2]，其整體成效如下：

1. 相較傳統各別獨立系統，可提升整體能源效率達 25%~35%
2. 減少 CO₂ 排放，較傳統系統減少 54% 排放，減緩氣候變遷
3. 減緩城市熱島效應(heat island effect)
4. 防止二次公害
5. 降低硬體設置與營運成本
6. 市容美觀兼具防火

二、DHC 技術類型與主導趨勢

DHC 系統技術並無固定形式，完全依據該區域之能源特性與環境狀況而有多種組合，以達最佳的系統效率。以日本的應用為例[2]，超過 74% 的 DHC 系統皆以天然氣及電力為主要的動力源，其產生的冰水、熱水或蒸汽主要以供給公司、飯店、商業大樓等為主，其主導類型如下，而數量占比如圖二。

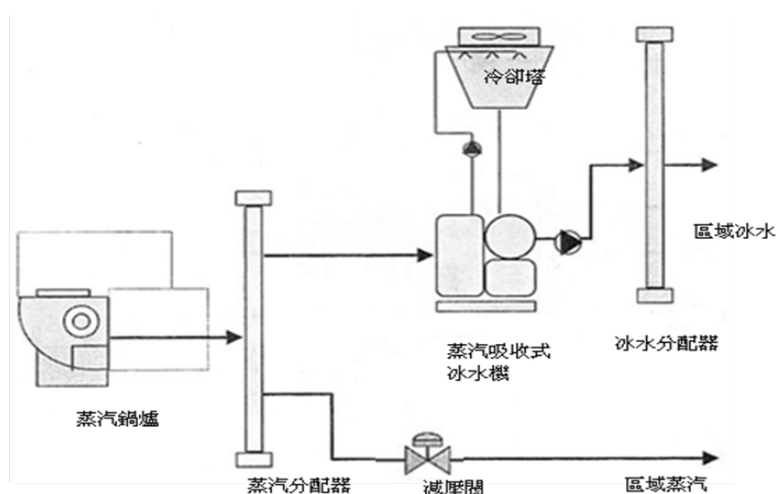
1. 燃氣鍋爐+蒸汽吸收式冰水機(冰水、熱水或蒸汽)
2. 電動離心冰水機+儲熱槽+燃氣鍋爐(冰水、熱水或蒸汽)
3. 電動離心冰水機+儲熱槽(冰水)
4. 空冷式電動熱泵+儲熱槽(冰水、熱水)
5. 廢熱回收式電動熱泵+儲熱槽(冰水、熱水)
6. 溫差(河水、海水)、廢棄物及廢熱等能源+吸收式熱泵(冰水、熱水)



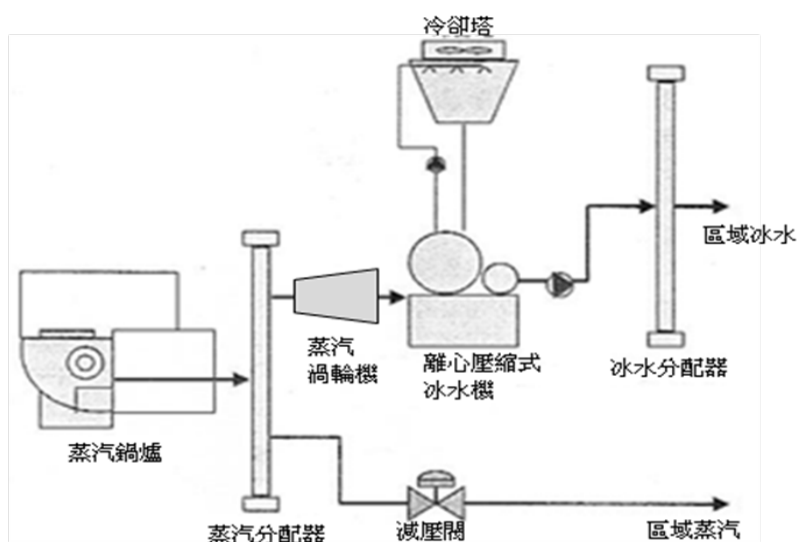
圖二、日本 DHC 系統類型占比

如圖二所示，一般型區域冷暖房系統仍是目前日本之主流，其系統類型如圖

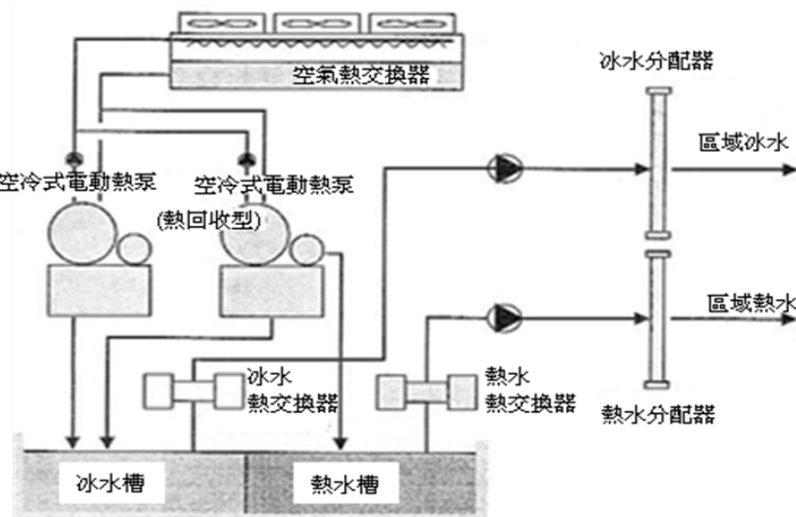
三至圖六所示。在寒帶地區例如丹麥，則有以地熱為主要熱源之一，井深約 2 公里之地熱水溫約可達 40~70°C，在丹麥已有約 2 萬套小型熱泵用來擷取地熱供應暖房，其平均 COP 值約 3，年產熱量約 2PJ [3]。在日本，由於其氣候因素，在都市區域夏天需提供冷氣，冬天提供暖器或蒸汽，因此，其 DHC 系統大多以蒸汽鍋爐搭配吸收式冰水機，也些機組將蒸汽藉由汽渦輪機之軸功直接帶動離心式冰水機，以提升其 COP 值。以河水或海水溫差、廢棄物及廢熱等能源之 DHC 系統均位在較郊區之位置。韓國與日本為了鼓勵業者建置 DHC，所有 DHC 系統使用之天然氣價格分別僅為市價之 39%與 55%，以創造建置與使用之誘因。



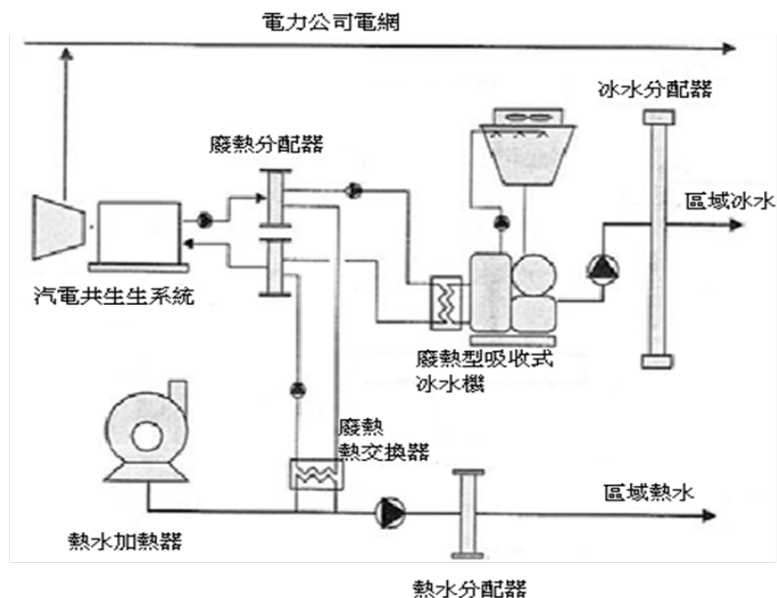
圖三、燃氣鍋爐+蒸汽吸收式冰水機



圖四、燃氣鍋爐+渦輪驅動離心壓縮冰水機



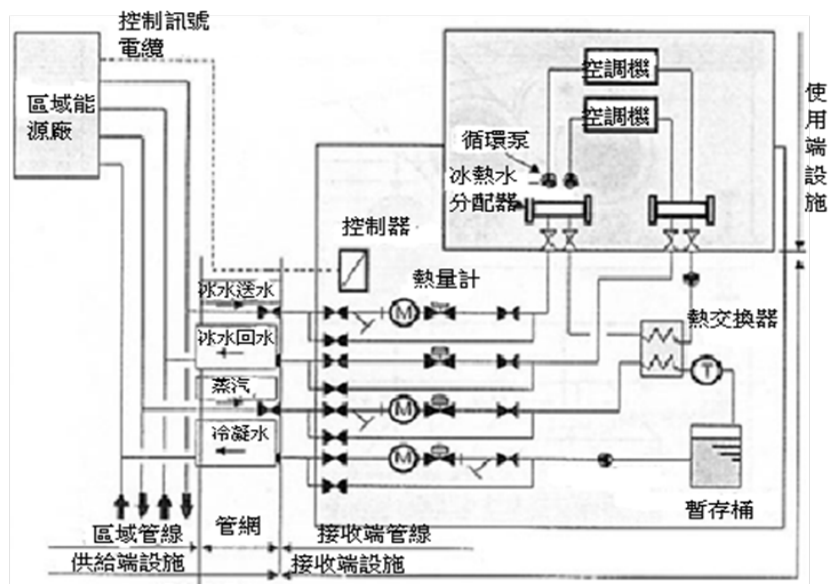
圖五、熱回收空冷式電動熱泵+儲熱槽



圖六、汽電共生系統+廢熱式吸收冰水機+熱水加熱器

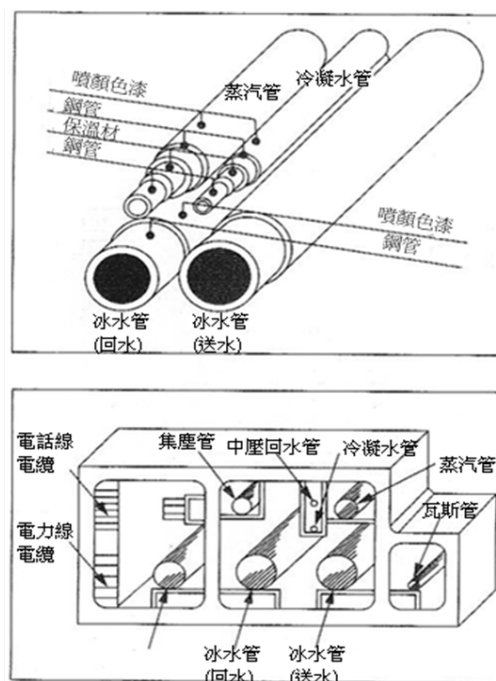
三、冷暖流體輸送管線方式

區域能源廠設廠位置都設在供給區域之中心，此可減少鋪設管線網絡之成本。對管線網絡鋪設之熱損、成本等分析已有專用分析軟體，例如丹麥的 Logestor [4]與日本的 Osaka Gas [5]。區域能源廠所產製之冰水、熱水或蒸汽之輸送方式如圖七所示。區域管網之鋪設由 DHC 營運的公司負責完成，而各大樓使用端之管線則由各大樓自行規劃，依共同之管線規格架設完成，使用端各用戶依據該戶之熱量計所顯示之使用熱量，依費率繳交費用。



圖七、DHC 管線網絡示意

圖八為 DHC 管線保溫及顏色標示與管溝示意，這些鋪設完成的管線安全，皆受到法令保護，以日本「熱供給事業法」為例，蓄意破壞或改裝這些管線將受到 2 年以內之監牢處罰或 50 萬日圓以下之罰鍰。[6]

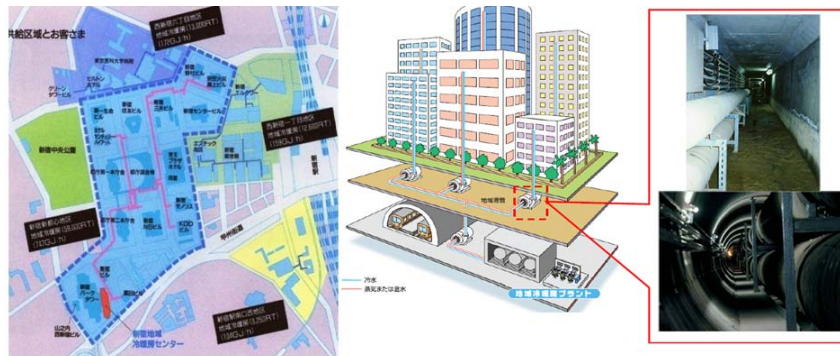


圖八、DHC 管線保溫及顏色標示(上圖)與管溝示意(下圖)

四、國外成功案例

4.1.日本新宿新都心[2]

日本新宿新都心供應區域包括區域內 11 棟超高大樓及週邊 3 棟建築物，合計總樓地板面積約為 150 公頃，為日本規模最大的區域冷暖房系統。如圖九。表一為其設施規格及營運情形，日本的收費標準每個 DHC 系統都不一樣，主要因素為地理位置、供給密集度及能源類型成本考量。



圖九、日本新宿新都心之 DHC 系統及其共用管溝

表一、日本新宿新都心設施規格及營運情形

能源廠主要設備

能源廠面積(m ²)	16,574
加熱能力(MJ/h)	621,210
冷卻能力(MJ/h)	746,875
鍋爐容量(MJ/h)	601,536
冰水機(MJ/h)	746,875
發電量(kW)	8,500
廢熱利用量(MJ/h)	42,698

2010 年收費標準

熱 流 體	基本費	流動費
冰 水	~4,186MJ/h，411日 圓/MJ/h	2.59 日 圓 /MJ
	4,186~83,72MJ/h，360日 圓/MJ/h	
	8,372~ MJ/h，321日 圓/MJ/h	
蒸 汽	~2t/h，558,731日 圓/t/h	3,680 日 圓/t
	2~4 t/h，395,471日 圓/t/h	
	4~ t/h，174,235日 圓/t/h	

2010 年營運情形

總供 應面 積 (千m ²)	供應管線長 (m)			使用燃料量		銷售熱量(GJ)		營業額 (百萬日圓)		冰水 (℃)	蒸汽 (Mpa)
	冰水	蒸汽	冷凝水	瓦斯 (千度)	電力 (千度)	冰水	蒸汽	冰水	蒸汽		
2,466	7,124	3,696	3,204	3,404	32,030	855,127	554,575	4,705	1,423	4	0.84 ~ 1.18

4.2. 日本東京臨海 DHC 系統[2]

東京臨海 DHC 系統位於海邊，充分運用附近垃圾焚化廠之熱能做為提供區域冷暖房之能源。此系統之區域總面積達 305 公頃，提供冷暖房之總樓板面積為

220.4 公頃，有 3 個能源廠提供區域冷暖房，總管線長度達 32 公里。東京臨海 DHC 系統的每平方米的樓板面積其熱負荷密度為 85W，平均熱單價為 6.07 日圓/MJ，以 2010 年之營運績效可推估該系統之回收期約為 11 年，表二與表三為其成本與營運情形。

表二、東京臨海 DHC 系統成本及營運情形

事業許可時間：1994/3/2
供給開始時間：1996/10/1

單位：百萬日圓

成本	單價
單位樓板面積設置成本	6,250 日圓/m ²
單位樓板面積營運成本	2,270 日圓/m ²

能源廠成本		營運成本		營業額	獲利	回收年限
能源設備	13,004	產製熱能	4,475	6,351	1,226	11.2 年
熱輸送設備	727	營運	190			
業務設備	35	管理	348			
小計	13,766	小計	5,013			



總樓板面積：2,204 千m²



總區域面積：3,050 千m²

表三、東京臨海 DHC 系統設施規格、費率與銷售情形

能源廠主要設備

能源廠面積(m ²)	27,949
加熱能力(MJ/h)	603,172
冷卻能力(MJ/h)	672,163
鍋爐容量(MJ/h)	568,400
冰水機(MJ/h)	646,851 (51,337RT)
蓄熱槽(冰水)	1,569m ³ (342,945MJ)
蓄熱槽(溫水)	16,350m ³ (400,856MJ)

2010 年收費標準

熱流體	基本費	流動費率
冰水	438 日圓/MJ/h	2.82 日圓/MJ
溫水	376.72 日圓/t/h	2.27 日圓/MJ

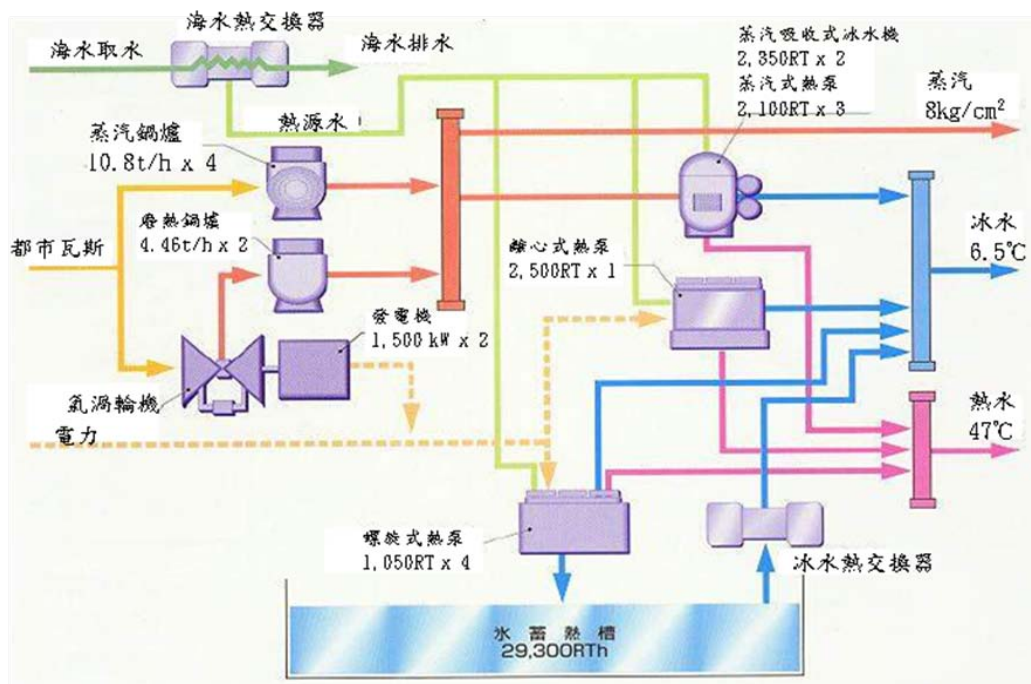
系統特徵	數值
熱負荷密度	85 W/m ² (樓板面積)
平均熱單價	6.07 日圓/MJ

2010 年營運情形

供應管線長 (m)			使用燃料量			銷售熱量(GJ)		營業額 (百萬日圓)		冰水 (°C) (0.53- 0.69Mpa)	溫水 (°C) (0.54- 0.73Mpa)
冰水	溫水	總長	瓦斯 (千度)	電力 (千度)	廢熱 (GJ)	冰水	溫水	冰水	溫水		
15,790	16,066	31,856	8,230	62,182	244,222	717,357	328,069	4,626	1,720	7	80

4.3.日本大阪南港之 DHC 系統[7]

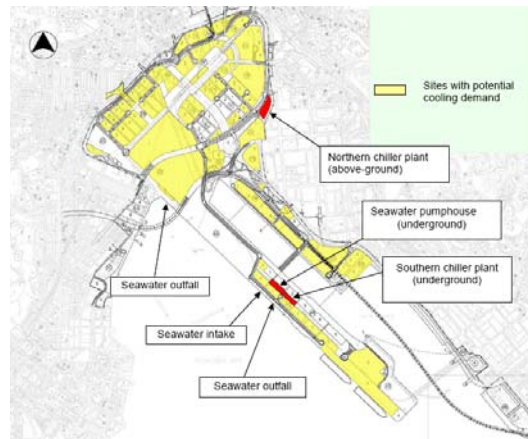
如圖十所示，大阪南港 DHC 系統由大板臨海熱供公司營運，總供給區域面積為 21 公頃，總樓板面積為 75 公頃，2010 年之總銷售熱能達 203,821GJ，銷售經額大約為 13 億日圓。此 DHC 系統之特徵為熱供給密集度高，管線鋪設與維護成本較低，熱損失較小。



圖十、日本大阪南港之 DHC 系統示意圖

4.4.香港舊啟德機場商圈開發計畫之 DCS[8]

投資金額約 70 億台幣，冷凍噸數為 81000RT，供應樓板面積達 173 萬 m^2 ，預估節源效率(相較傳統方法)約達 20~35%。香港正在展開一些有關區域能源站的可行性研究，發現有 15 個區域極具潛力發展區域製冷。至 2020 年，每年可節約 190,000MWh 的能量，並可以減少二氧化碳排放量約 116,000 噸。香港中華煤氣有限公司正在積極參與香港區域能源站的調查研究工作，並將為籌建香港地區區域能源廠投入人力和物力。區域位置如圖十一。



圖十一、香港舊啟德機場商圍開發計畫之 DCS

4.5.新加坡 Marina Bay 完成 DCS 與 CST 之工程實例[7]

新加坡已完成共同服務管道網絡(CST)與區域冷卻系統，其服務 Marina Bay 之內城市新建住宅區。此系統可供應長距 20 公里之管道及 320 公頃面積之區域。目前完成的距離有 3 公里，耗值 1 億 3 千 7 百萬美元，24 小時空調供應高達 12,000 住戶，預估將節省 15% 以上之能源效益，這是新加坡政府成功推動首次實行的大規模區域能源系統，如圖 12 所示。



圖十二、新加坡 Marina Bay 完成之 DCS 系統

4.6.美國德州休士頓 BNC 辦公大樓中央空調系統轉換成 DCS 案例[7]

該棟建築為 15 層樓辦公大樓，空調供應時間:平日 5:00am~6:00pm，週六 5:00am~2:00pm，資料中心則全天候供應。設置兩部 Trane 340RT 離心式冰機，夏月間風冷卻負載時，運轉百分比為 75%。由於機組老舊，新設 Central Plant 估計花費超過 560,000USD，將既有建築空調系統轉換成區域冷房系統(DCS)估計

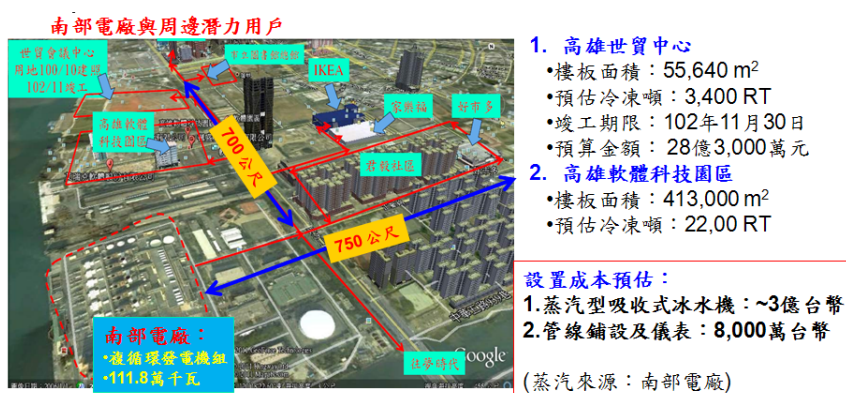
設置總成本為 239,058USD，相較之下節省成本約 50%以上，且經運轉一年後，計算節省運轉成本約 84,000USD。此案例是該建物之附近有現成之 DHC 系統。

4.7.高雄第一科技大學區域冷房系統[7]

這是我國首座區域冷房系統，共包含教學行政大樓、服務學群大樓、工學群大樓及工學群教學實驗大樓等四棟建築物。由於該校為單純的教學單位，且以冷房為主，幾無熱水供應之需求，因此，區域冷房規劃為以電動式空調主機，配合儲冰槽作為主熱源系統，並選取 40%儲冷率進行規劃，達到空調主機設備減量 20%之效益。各大樓利用離峰時間用電製冰，白天使用節省電費 30 萬元/月。獲 2010 行政院節能特優獎。

4.8.我國具潛力之區域冷房系統-南部電廠 DCS 系統[7]

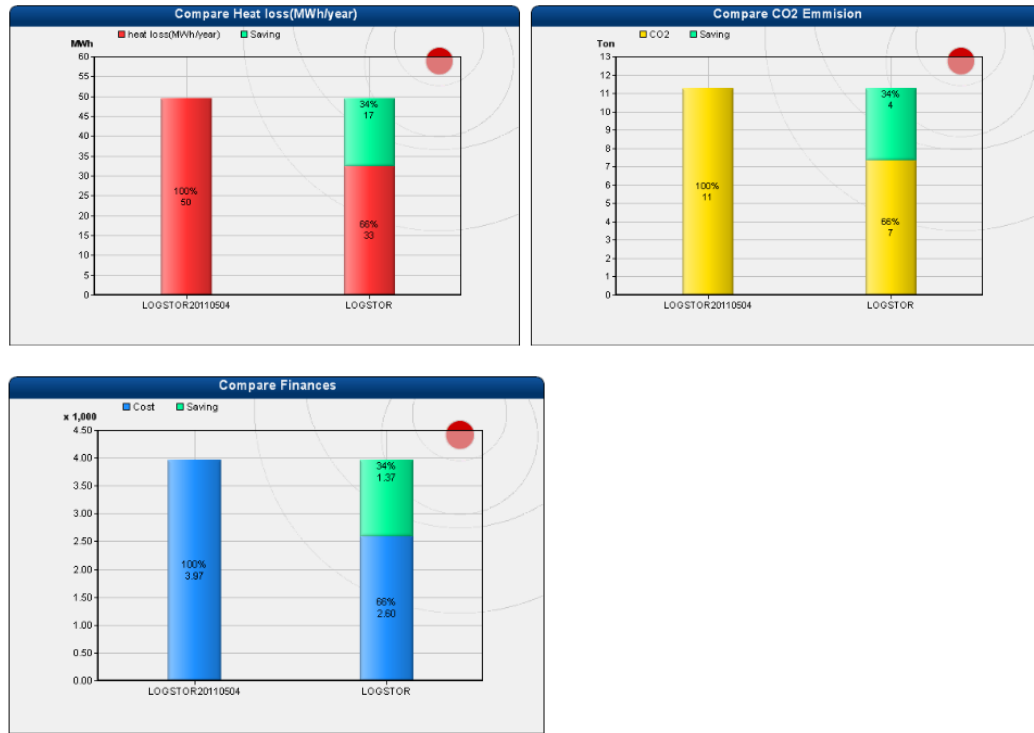
南部電廠 DHC 系統，臨近有高雄世貿中心與高雄軟體科技園區，總樓板面積達 47 公頃，約估總冷凍噸數約 25,400RT，與南部電廠距離僅約 750 米。可充分運用南部電廠之複循環氣渦輪機組之廢熱或抽取部分汽渦輪機之蒸汽來提供給吸收式冰水機以提供冷能給附近之大樓用戶。如圖十三所示。



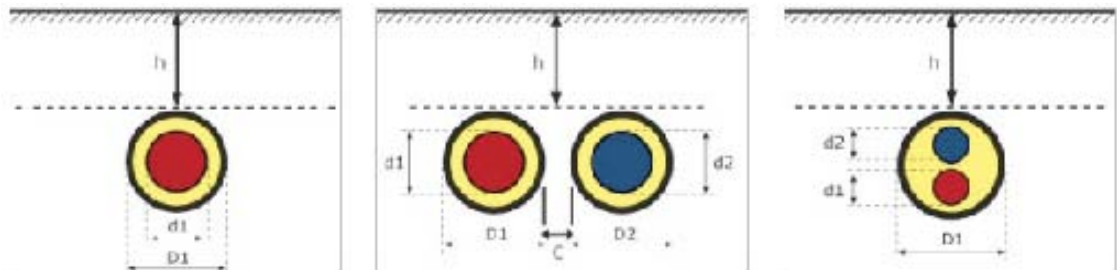
圖十三、南部電廠 DCS 系統

南部電廠 DHC 系統管線以 Logestor 分析如圖十四所示。

(a)Logestor 管線分析軟體



(b)Logestor 管線分析之結果—熱損失、CO₂ 排放與成本

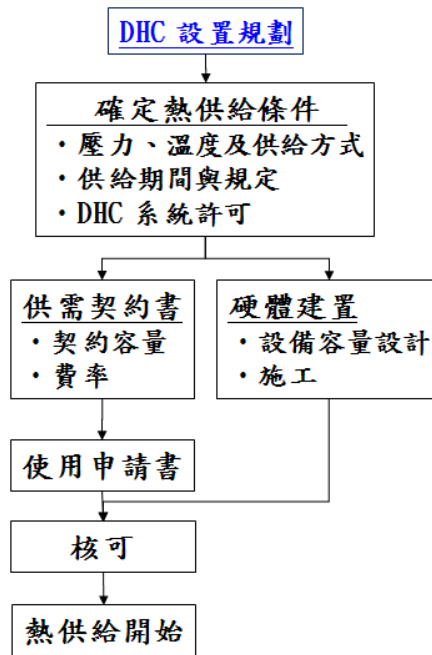


(c)管線型式與鋪設方式

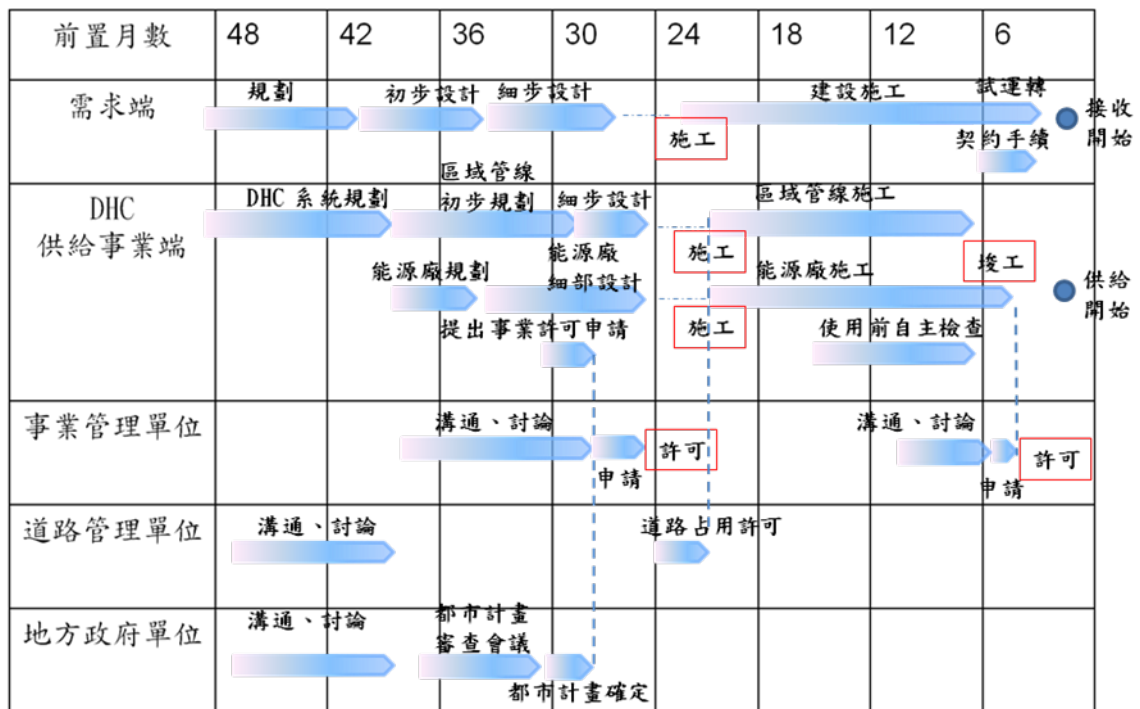
圖十四、Logestor 管線損失與成本分析

五、DHC 系統之相關配套法令(以日本為例)

日本熱供給事業法是促使日本 DHC 系統成功的關鍵因素，其有完整且嚴密的相關法令配套措施，使日本的大都市商業大樓看不到零亂架設的空調設備，卻又享有高品質且高效能的空調系統，DHC 系統是代表這個國家的科技進步象徵。圖十五至十七為日本 DHC 系統之設置程序與規劃要件。



圖十五、日本 DHC 系統之設置程序

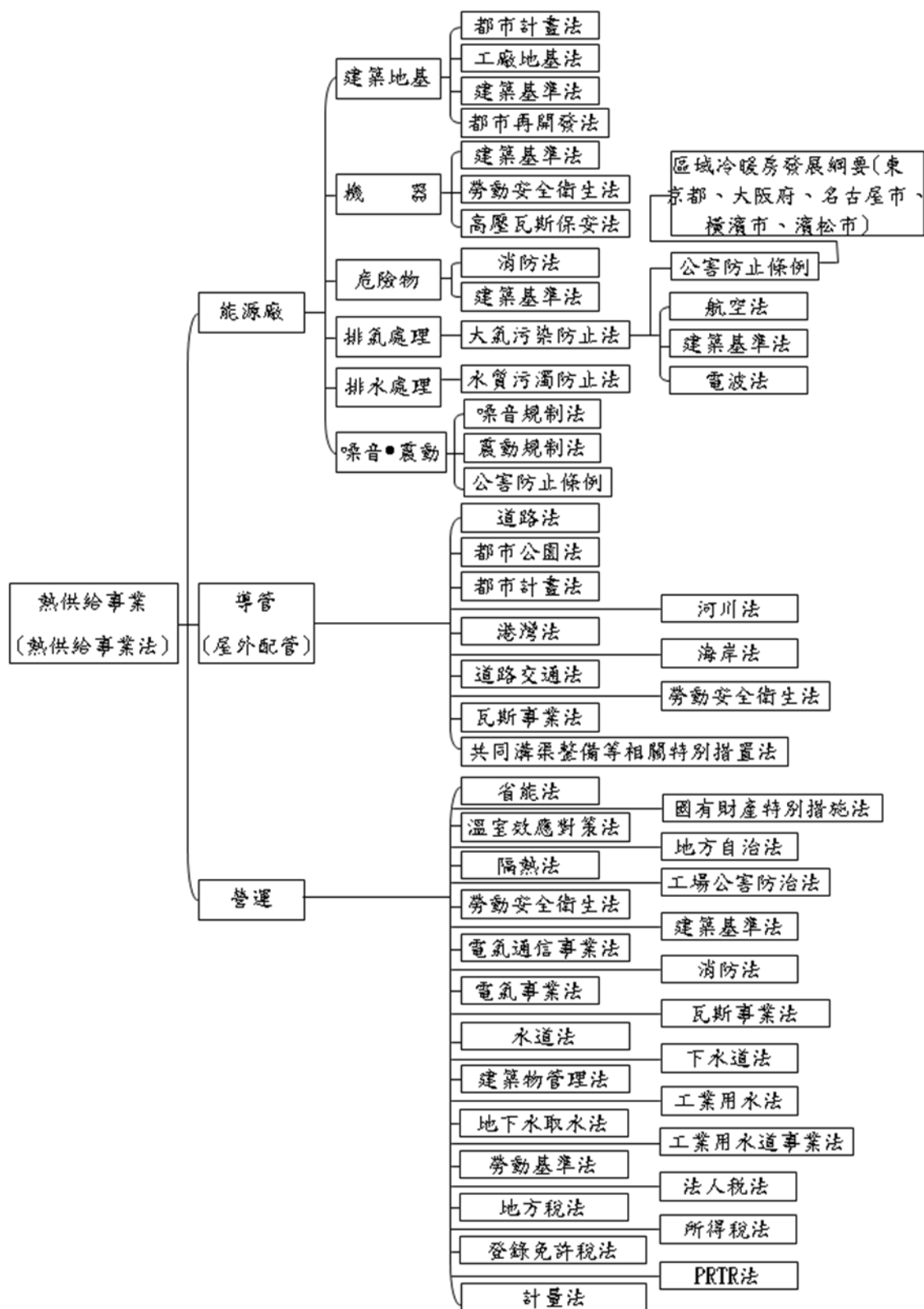


圖十六、日本 DHC 系統設置與相關單位之配合

- **最大熱負荷**：使用端在某時段之最大熱量。依此設計DHC之設備容量並確定各個用戶之契約容量
- **同時使用率**：
$$\frac{\text{DHC 供應的熱量(MJ)}}{\text{各建物的最大熱負荷總計(MJ)}}$$
- **熱負荷密度**：
$$\frac{\text{最大熱負荷總計(MJ)}}{\text{供給樓板面積(m}^2\text{)}}$$
- **區域熱需求密度**：
$$\frac{\text{最大熱負荷總計(MJ)}}{\text{供給區域面積(m}^2\text{)}}$$
- **平均負荷率**：
$$\frac{\text{最大熱負荷運轉時間(h)}}{\text{年運轉時間(h)}}$$
- **平均熱單價**：
$$\frac{\text{年總熱銷售金額(元)}}{\text{年總銷售熱量(MJ)}}$$

圖十七、DHC 系統設置之評估要件

日本熱供給事業法規定，新建物樓板面積超過 10,000 平方米者，其空調系統必須採用 DHC 系統，用以達成整體節能減碳的目的。圖十八為日本熱供給事業法相關之配套法令。



圖十八、與日本熱供給事業法相關之配套法令

六、我國推展 DHC 可能遭遇困難與發展建議

6.1.我國推展 DHC 可能遭遇困難

- (1).由於無相關強制法令規定，電價又便宜，冷暖房終端使用者將各自視需要，自行安裝冷暖房系統設備，無法達到整體大規模的節能減碳。
- (2).DHC 投資與營運成本高，政府若無獎勵(Ex.投資租稅抵減等)優惠(Ex.能源價格優惠)措施，DHC 系統難以推行。
- (3).DHC 系統設備建置、營運、共用管線系統及終端用戶管線與儀表需有相關法定規範與保護，以避免紛爭。

6.2.短中長期推動作法建議

6.2.1 短期(環境建置)(3 年內)

- (a)制定「區域熱供給廠或中心」發展政策，明定區域能源整合的作法與目標。
- (b)調整國家能源價格與價格聯動策略及投資獎勵與能源價格優惠措施。
- (c)成立「區域熱供給廠或中心事業協會」，促進形成產業鏈與技術交流。

6.2.2 中期(技術發展)(5 年內)

- (a)制定「區域熱供給廠或中心管理法」，規範設置能源中心之資格條件、硬體建置、營運、系統維護與規範設建物樓板面積達一定數時，需裝設區域冷暖房系統(DHC)。
- (b)先從工業區、醫院、學校及經貿、文化中心等開始示範，再商業、辦公及住家大樓。

6.2.3 長期(永續經營)(10 年內)

- (a)新設的或選擇合適的工業區、垃圾焚化廠、電廠與 DHC「冷熱電聯產化」--提供區域蒸汽、冷房、暖房、電力或海水淡化等，發揮最大的節能減碳績效。
- (b)合理反應各項能源價格，以價制量，才能大幅提升能源效率。

七、參考文獻

1. 王茂榮，DHC 區域冷暖房，*電機月刊*，第 5 期，pp.187-190，1996.
2. *熱供給事業便覽*，社團法人日本熱供給事業協會，平成 22 年版。
3. A. Mahler and J. Magtengaard, Country Update Report for Denmark, *World Geothermal Congress*, 2010.
4. <http://www.logstor.com/showpage.php?pageid=5589600>
5. http://www.ibpsa.org/proceedings/BS1999/BS99_PA-13.pdf
6. *熱供給事業法*，日本資源能源廳公益事業部，2004 年 9 月。
7. 楊冠雄，*區域冷熱系統應用規劃分析*，2011 年 4 月 1 日。
8. L. Council, *District cooling system at the Kai Tak development*, Hong Kong, Dec 15, 2008.

光學影像感測技術應用於工業燃燒系統之回顧

Optical image sensing with application to industrial combustion systems: a review

徐振凱¹、鄭儀誠²、劉子吉³

Chen-Kai Hsu, Yi-Cheng Cheng, Tzu-Chi Liu

工業技術研究院綠能與環境研究所

Green Energy & Environment Research Laboratories Industrial Technology Research
Institute

摘要

燃燒鍋爐在工業生產製造過程中為重要的製程設備，主要提供其所需的熱源與蒸汽等，在燃燒系統的操作上需多方地考量鍋爐的安全性、經濟與環保等因素，但目前多數的燃燒爐所裝置之感測資訊，如溫度、壓力與流量等，僅能描述鍋爐之部份系統狀態，如爐膛中燃燒的火焰狀態則無法透過上述之感測設備而獲得之，好的火焰形態可有效的提升燃燒效率與滿足製程所需溫度，然而火焰狀態目前仍需經驗豐富的人員進行觀察與調整，由於近年來光學感測技術的迅速發展，已有許多研究文獻將光學感測技術應用於燃燒系統領域，因此本文彙整了基於光學感測技術在工業燃燒系統之研究文獻，其中包含下列主題：(1)基於火焰影像之燃燒系統安全性監控；(2)以火焰影像結合製程資訊之分析、預測與優化操作；(3)以火焰影像計算溫度場分佈與燃燒熱值評估。

關鍵字：燃燒系統、火焰影像、火焰監控、溫度場

Abstract

Industrial combustion furnaces are important equipments for chemical and manufacturing plants. These utility systems provide heat and steam in production process. It is necessary to consider safety, economy and environment issues at the same time when operating combustion system. Temperature, pressure, and flow rate measured from classical sensors can only obtain partial information of combustion system, but flame states have to be observed and manipulated by experienced operator. In recent years, optical image sensing technologies are drastically in progress and applied to industrial furnaces. The targets of novel control systems are

¹ 工業技術研究院綠能與環境研究所，副研究員，E-mail: ChenKai@itri.org.tw

² 工業技術研究院綠能與環境研究所，研究員

³ 工業技術研究院綠能與環境研究所，研究員

to sense the flame state to control the furnace automatically. The purpose of this paper is to collect and describe the research results of this application field, which includes the following topics:(1) safety monitoring of the flame for combustion systems; (2) analysis, forecasting and optimization of combustion systems by using flame images and process information; (3) temperature field distribution and combustion efficiency assessments by using VIS images.

Keywords: Combustion system, flame image, flame monitoring, temperature field

一、前言

工業爐在鋼鐵、造紙、化工及傳統產業為製程重要設備，主要提供後端製程所需熱源與蒸汽，其中燃料成本佔最大比例的設備運轉支出，而且燃燒過程中會生成溫室氣體(如:CO₂)以及環境污染氣體(如:NO_x)；因此在節省燃料成本與環境保護目標下，為提升更高的燃燒操作效率，需獲得更多的燃燒系統資訊達到監測診斷與控制目的，本文先描述目前常見燃燒系統之量測與操作方法，如下[1-7]：

1. 利用多點式熱電偶(thermocouples)溫度感測器進行火焰與爐溫的量測：透過溫度感測器判斷火焰燃燒情形以及燃燒穩定情況，但此量測方法容易受到外來的干擾，如遭受到未燃燒炭的粉末覆蓋；此外量測之爐壁溫度無法表示真正火焰周圍的燃燒溫度，甚至會因於高溫環境下的影響導致溫度感測器衰竭，使得數據失去原來的精確性。
2. 利用紫外線光(Ultraviolet, UV)和紅外線光(Infrared, IR)量測火焰狀況與溫度：此方法比傳統溫度量測方法直接且能擷取更精確數據，但仍受限於部分的有效感測區域，無法獲得整個爐膛之燃燒資訊。
3. 利用氣體分析儀器監控鍋爐燃燒效率：此方法為目前最普遍的方法，工程師通常會觀察排氣口之氧濃度感測數據，作為評斷燃燒空氣是否恰當之依據，然而一般氧濃度氣體分析儀均安裝在煙囪通道口附近，實際應用會有量測資訊嚴重落後(time delay)的情形發生，而且氣體分析儀有成本和保養維護之問題，使得操作人員進行燃燒空氣調整之工作變得不容易。
4. 資深操作員直接從火焰觀察評估燃燒狀態：老師傅能根據以往操作經驗以及仔細觀察火焰燃燒的顏色變化，能判斷燃燒狀況之優劣，其中觀察的範圍有火焰內心、火焰內心與外圍交界、火焰外圍，以及爐壁周圍等。但是操作員必需經歷多年的經驗累積，才能具備精準的判斷能力。

上述之感測方法只能取部份相關燃燒資訊，或燃燒狀態還需由經驗豐富之操作人員進行調整，近年來因光學感測技術的迅速發展，已有許多應用案例將光學

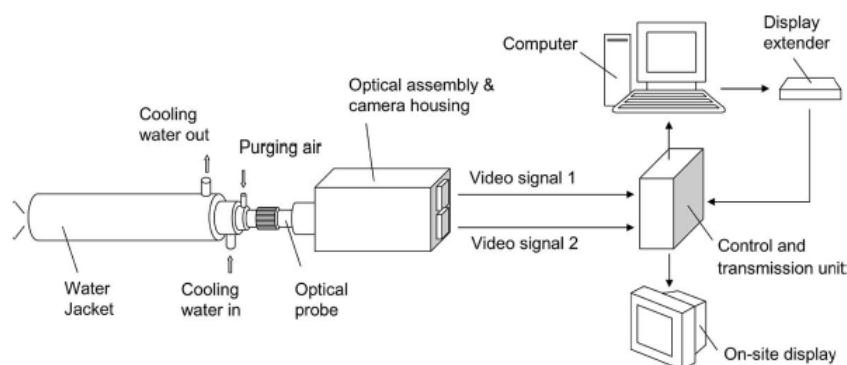
感測技術於燃燒監控系統，例如將火焰圖像轉換為影像特徵，可應用於燃燒系統之穩定性監控、模型預測與優化操作，或是根據光學波段所擷取強度進行溫度場之建構。

因此本文整理近十年國內外燃燒影像相關文獻，並區分為三個應用章節；(1)以火焰影像討論燃燒操作過程之穩定性，包括火焰狀態分類與火焰監控；(2)萃取火焰影像資訊結合製程參數之應用，如鍋爐系統之尾氣濃度的監控與預測；(3)火焰影像溫度分佈計算與燃燒熱值評估分析。

二、火焰影像應用於燃燒穩定性分析

火焰之穩定性對於燃燒行為而言，相當重要，過往均由具經驗之工程師透過肉眼觀察、判斷燃燒狀況，在攝影機技術較為成熟後，透過影像分析方式取代工程師之肉眼，可進行即時、長期之監控工作。

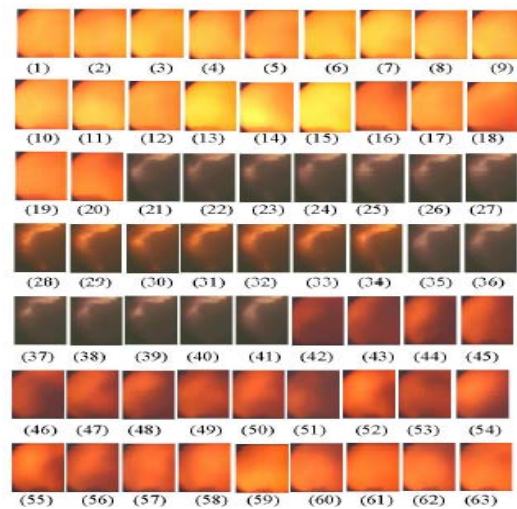
於 Gang L,u, Yong Yan [8]的研究中，光學攝影機用來拍攝石化燃料之火焰(fossil fuel fired flame)，攝影機系統架構如圖一所示。透過此系統能即時獲得火焰影像，並取得影像幾何資訊特徵，如：火焰根部距離、火焰面積與火焰擴散角度等，Gang 等人的研究中將擷取的火焰特徵與燃燒過程進行分析比對，結果驗證火焰影像特徵資訊具備足夠的資訊來呈現燃燒過程變化。於研究中，同時以統計相關性、靈敏度分析方法，找出那些火焰特徵對於燃燒系統為重要的影響因子，有助於後續火焰影像特徵監視系統的建置。



圖一、火焰影像擷取系統架構圖[8]

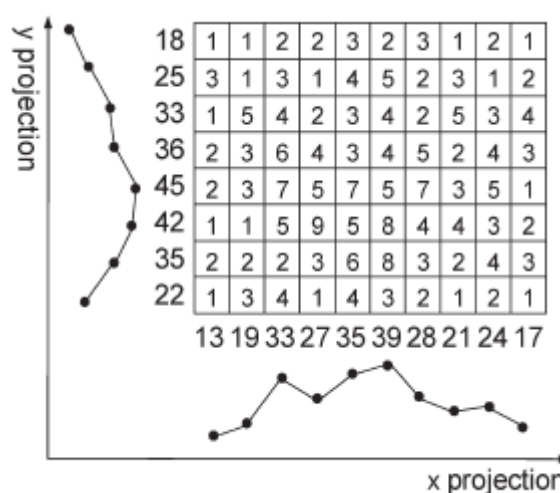
Pu Han, Xin Zhang [9]擷取鍋爐系統中，各種狀態之連續火焰影像，如圖二所示，Pu 等人先將 RGB 影像轉為灰階影像，並以灰階影像進行火焰區域分類，若火焰影像之灰階值大於 73，即判定為火焰燃燒區域，當完成火焰區域識別後再以火焰區域進行火焰特徵計算。於此論文研究中，透過火焰影像作為燃燒狀態之識別，於研究中採用隱藏馬可夫模型(Hidden Markov Model, HMM)建立火焰燃

燒狀態分類模型。文中陳述其測試結果能正確地識別火焰穩定、火焰不穩定以及熄火等狀況。



圖二、各種狀態下火焰影像[9]

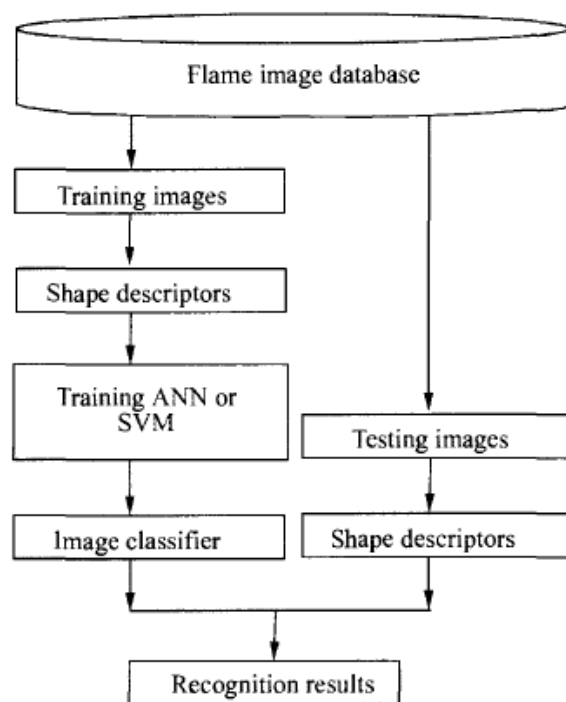
Hyeon Bae, Sungshin kim [10]等人說明目前許多火焰感測技術如 UV、VIS、IR 火焰偵測器獲得的燃燒資訊量有限，因此提出以 RGB 可見光攝影機感測火焰影像，以增加傳統火焰檢測器之不足。論文中關於火焰影像處理之方法，係先將 RGB 火焰影像轉為灰階影像，並以投影的方式計算影像特徵值，如圖三所示，將圖三中 x 與 y 方向的投影量(projection)，當作每張影像的特徵曲線，研究中採用類神經網路(Neural network, NN)方法，藉由輸入各種狀態之火焰特徵，建立燃燒火焰識別模型。論文之實際案例中，說明其收集了電廠鍋爐數據進行系統分析與驗證，判斷目前燃燒機的狀態與火焰狀況。



圖三、以投影方式取得影像特徵[10]

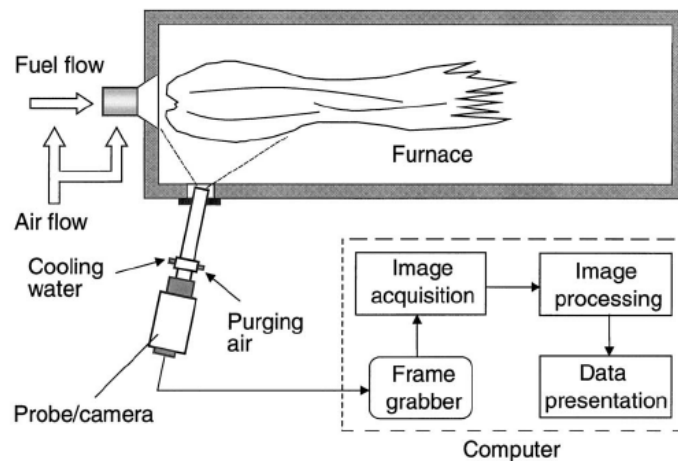
Zhang Hong-Liang 與 Zou Zhong [11]之論文中指出工業用旋轉窯不容易進行製程監控，主要原因在於爐內高溫環境且具有腐蝕性，因此於其研究中利用可見

光攝影機拍攝旋轉窯(rotary kiln)內的各種狀態燃燒影像，並且擷取火焰形狀當作火焰影像特徵，以分析窯內燃燒狀況。於監控系統的建構上，應用了類神經網路(Artificial neural network, ANN)與支援向量機(Support Vector Machine, SVM)兩種模型建構方法，如圖四所示為 ANN 與 SVM 兩種方法之模型建立與驗證流程圖。此論文中最後比較兩種火焰識別分類模型之誤差性能，結果說明 SVM 有較佳的分類結果。



圖四、ANN 與 SVM 建置流程圖[11]

Y. Yan 與 G. Lu [12]則嘗試將火焰影像擷取系統應用在大型的燃煤系統(pulverized coal flames)中，如圖五所示，其於研究中將收集的各種粉煤燃燒影像轉化為色彩特徵與幾何特徵，色彩特徵包含有：火焰亮度、火焰明亮均勻度等，而幾何火焰特徵則包含有：火焰面積比例、火焰區域中心點位置、發火點與燃燒機距離，以及火焰的擴張角度等。研究中發現特定的幾種火焰特徵與燃燒系統操作參數間有著明顯的關係，如：燃燒負載量、燃煤流量與燃煤種類有關，最後研究中根據這些特徵，可建立燃煤監控模型系統。

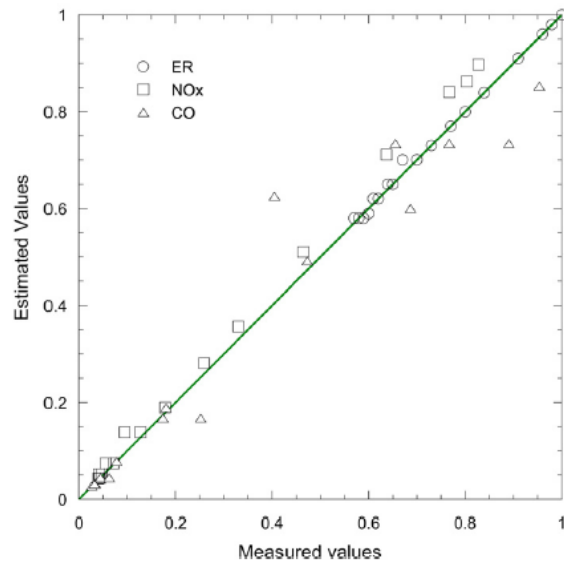


圖五、火焰影像應用於燃煤系統示意圖[12]

以上文獻所提出的方以，都是透過光學攝影機擷取火焰影像，並將之應用在各種燃燒系統中。透過文獻討論，每篇文獻的概念與作法相似：第一步先以光學攝影機收集火燄影像資訊；再藉由影像分析技術進行火焰特徵與燃燒狀態之間的分析比對；最後，再利用各類模型建構方法，建立監控模型或火焰狀態分類模型，以達到火焰監控目的。

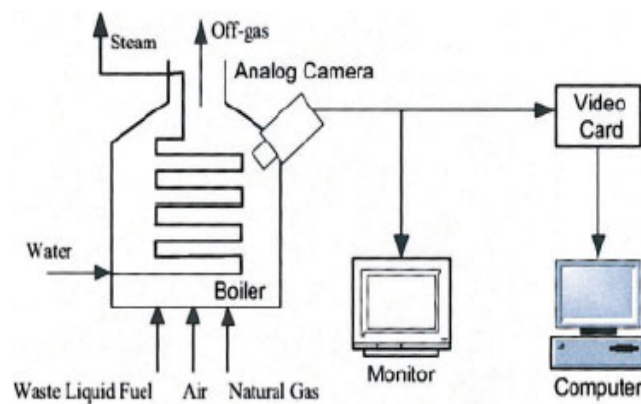
三、火焰影像應用於製程資訊整合

火焰影像轉換為特徵後，可作為監控之應用，再結合製程資訊，將可為整體系統提供操作上之建議。R. Hernamadez 與 J. Ballester [13]從燃燒系統中擷取火焰影像特徵，所擷取之特徵包含有：火焰區域亮度密度、火焰區域面積百分比，以及火焰長度與邊長等。研究中同時收集系統相關尾氣 CO、NO_x 濃度資訊；接著運用類神經網路(ANN)中的自組織映射演算方法，以及主成分分析(Principal Component Analysis, PCA)方法(或稱 Cepstral analysis)，建立尾氣濃度預測模型，從論文結果中分析發現 Cepstral analysis 的模型預測能力較 ANN 效果佳，因為 Cepstral 為 supervise 學習方法，其在建立模型時有誤差項可作為修正模型的參數，圖六為 Cepstral 模型所分析測量與預測圖。



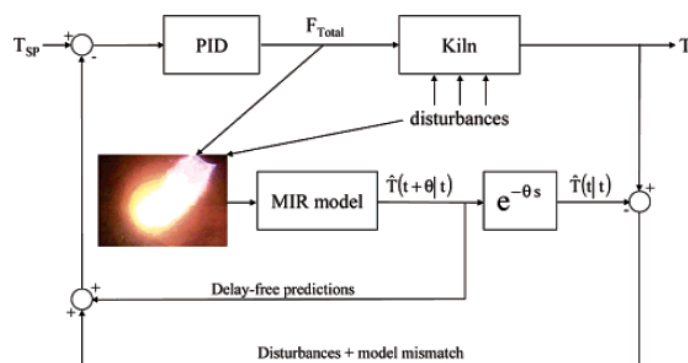
圖六、Cepstral 模型下測量-預測分析圖[13]

圖七為 Honglu Yu, MacGregor [14]所開發之即時影像監控與預測系統，其應用對象為鍋爐系統，此影像與監測系統即時以光學攝影機(CCD camera)擷取爐內之火焰影像。由於火焰影像容易有較大的擾動，如：閃爍等，因此研究中提出以多變量影像分析方法(Multivariable Image Analysis, MIA)計算火焰特徵，並以移動平均(Moving Average, MA)的方式增加火焰影像特徵的穩定性。Honglu 在實際應用案例中，分別以單一及混合燃料進行測試，將其操作在不同的燃料流量下，結合火焰影像特徵與尾氣濃度(NO_x 、 SO_x)濃度、鍋爐蒸汽量等，以建立迴歸模型。回歸模型建構完成後，只需擷取爐內火焰影像，即時監視尾氣濃度及蒸汽量變化，達到即時監控。



圖七、影像感測系統應用於鍋爐系統[14]

G. Szatuvanyi, C. Duchesne [15]同樣以 MIA 方法擷取旋轉窯的火焰影像特徵，利用擷取出來的火焰影像特徵建立窯內的溫度模型，其運用了類神經網路與部分最小平方方法(Partial Least Square, PLS)，以建立各種不同時間序列下的溫度模型，其研究結果運用在窯爐溫度系統及產品品質的穩定性操作，控制架構系統如圖八所示。



圖八、影像感測系統應用於旋轉窯窯內溫度控制[15]

上述文獻主要探討以影像的方式建立燃燒系統的迴歸預測模型，建立輸入變數以及反應變數間的關係。當模型建構完成之後，只需將一筆新的火焰影像特徵輸入至模型中，便可預估出新的反應變數，讓工程師輕易瞭解內部的燃燒狀況，此外可將預估之燃燒資訊回傳至燃燒控制系統作為操作訊號。

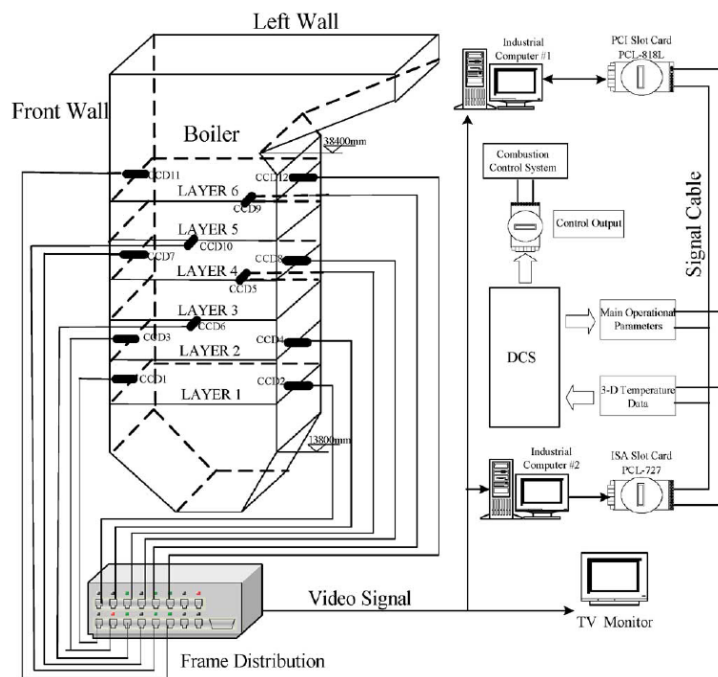
四、火焰影像應用於燃燒溫度場與熱值評估

燃燒火焰溫度場的分佈計算在量測原理上可以分為基於光學、聲學和影像等技術，本文技術回顧是以基於影像的溫度場建構技術為主，在硬體上，影像的來源可以是來自於可見光、近紅外光或紅外光 CCD，其中利用數位式的可見光攝影機逐漸成為潮流，另外在計算方法上，也根據利用不同數量的頻率資訊，可以區分為單色、雙色和全色法。針對一般性的燃燒系統，常見採用的解決方案是利用雙色法(two-color method)並搭配可見光攝影機，可以簡化測溫的光學系統，降低設備成本使該系統便於推廣應用。

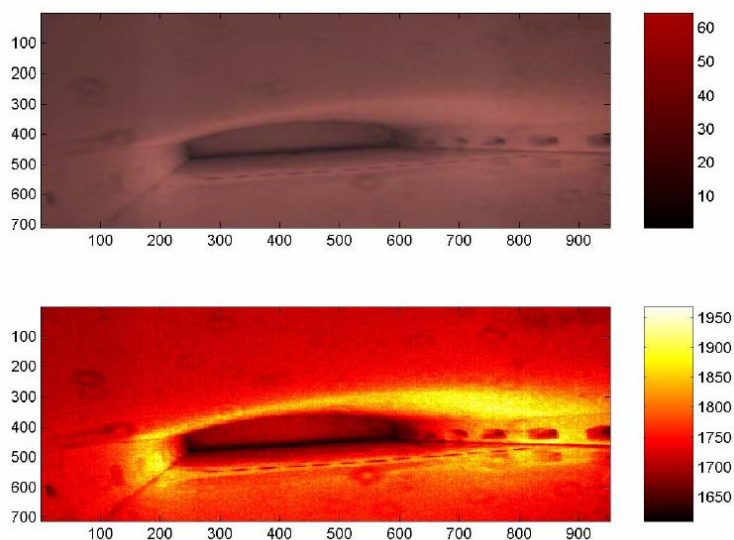
華中科技大學的周環春教授[16-18]已經有十數年的溫度場研究與應用經驗，從早期的二維溫度計算延伸至利用多部可見光攝影機的三維溫度計算，並利用相同的技術來計算出火焰的輻射圖像，以此作為改善鍋爐主蒸汽溫度控制性能的研究，所產出之技術也衍生出一家創新公司九州三維公司。周環春等人以圖九之大型火力發電廠為實例，在每一燃燒層安裝多台高溫攝影機，並建立爐內三維

溫度場圖像，提供爐內燃燒溫度資訊以優化鍋爐系統操作。

密蘇里大學的 S. Keyvan 教授[19,20]利用單一可見光攝影機來建立溫度場，其特點是可以將實際空間上的物件透過影像校正的方式對應至影像上的像素區域並算出該區域之溫度分佈與平均溫度等資訊，如圖十之內容所示，此開發出技術也促成一家公司的成立；英國 Kent 大學的楊勇教授(Yong Yan)與 Gang Lu 博士也開發基於可見光攝影機之三維溫度場量測技術。



圖九、燃燒爐內 3-D 溫度場之建置圖[18]

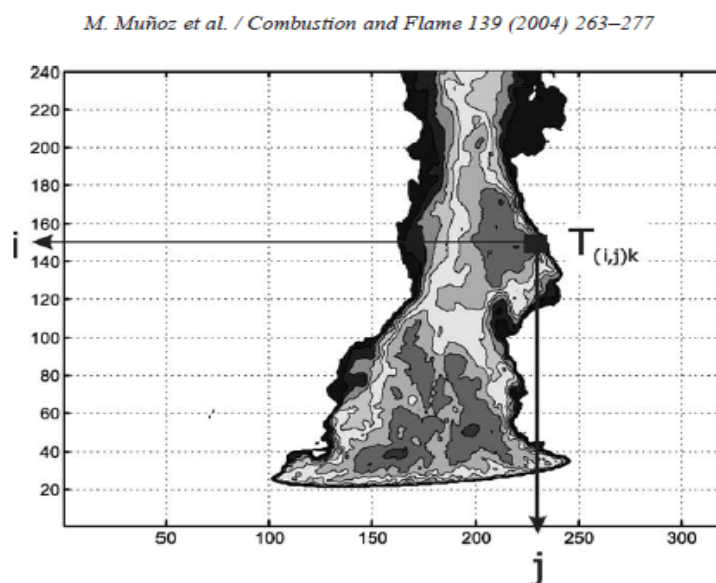


圖十、窯爐內佈影像：(上)一般影像；(下)溫度分佈影像[20]

目前應用火焰影像於燃燒熱值計算之相關文獻較少，通常以影像溫度分佈進行熱值評估，M. Munoz 與 J. Arnaldos [21]之研究中使用一般可見光與紅外光攝影機(IR camera)擷取火焰影像，藉由可見光攝影機分析火焰影像形狀(shape)，而紅外光攝影機則用以計算火焰溫度分佈，接著將每一影像像素點之溫度值帶入公式 1 中，可獲得輻射強度分佈(emissive power)影像圖。研究中藉由連續收集之火焰輻射強度影像計算影像等高線圖(contour)，再進一步推估火焰之輻射熱量(radiated heat)，以建立影像中火焰輻射強度與輻射熱之間的關係。

$$E_{i,j} = \varepsilon \sigma T_{i,j}^4 \quad \text{公式 1}$$

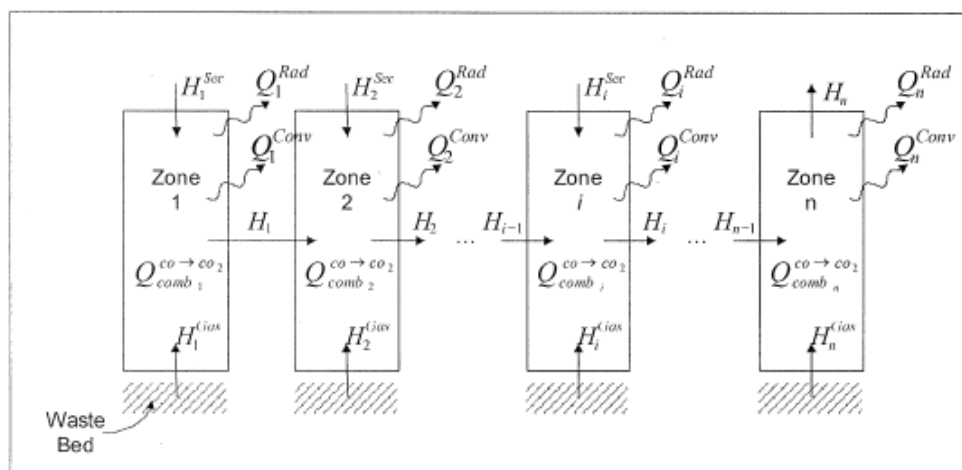
此外，M. Munoz 與 J. Arnaldos 的研究中指出，輻射強度計算與燃燒火焰外觀、溫度分佈有密切的關係，在以往的實驗過程或者燃燒模型理論推導中，常常會遇到物理參數不易給定的問題，因為火焰容易受到外界擾動(turbulent)，且精確度確認不易。此研究論文提出直接由火焰影像擷取溫度物理量，並直接從每一像素中進行輻射強度之計算。圖十一所示為論文中提出之火焰影像轉換溫度分佈圖。



圖十一、紅外線火焰影像轉換溫度分佈影像[21]

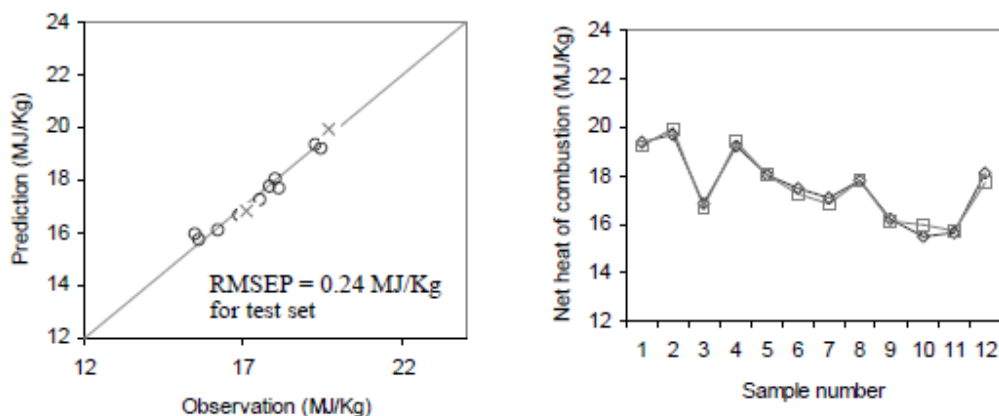
D. Manca, M. Rovaglio [22]之研究中指出，傳統燃燒室測量方法仍有改善空間，如熱電偶溫度測量沒辦法獲得整個燃燒溫度資訊，且容易發生錯誤(misleading)，因此需要更適切可應用於燃燒室(combustion chambers)之感測技術，以確實了解燃燒室內的燃燒狀況。因此，Manca, M. Rovaglio 的研究中，在燃燒室外圍設置紅外線熱影像攝影機，用以擷取燃燒室內的溫度分佈狀態。透過

將燃燒室空間區分為數個子空間(zonal)的方式，依據總能量平衡，計算各個子空間中之燃燒物理之相關參數，如：enthalpy balance 等(圖十二所示即為其示意圖)，並且用以建立子空間中，輻射能量與溫度之間的關係模型。Manca, M. Rovaglio 之研究中亦指出，如果可以取得整個燃燒室空間之爐壁輻射能量、溫度等資訊，對於後續的優化控制操作，將有很大的助益，例如：為燃燒系統之操作建立一個新的燃燒效率(combustion efficiency)之指標。



圖十二、各子空間下 enthalpy 平衡示意圖[17]

Honglu Yu, John MacGregor [23]的研究中，同樣應用可見光攝影機，以 MIA 影像分析技術，將即時影像應用在製程系統的品質控制(Quality control)、即時產品品質預測分析上。於其研究中，同時以燃燒影像進行燃燒爐之熱值預測分析，用以協助工程人員了解整體鍋爐效率狀況，論文中指出在單一種燃料物質或多種以上燃料物質之熱值計算上，均可透過回歸方式建立模型。Honglu Yu, John MacGregor 的研究中，共擷取九種火焰影像特徵，作為預測鍋爐內的燃燒熱值之參數。圖十三所示為 Honglu Yu, John MacGregor 之研究中，以影像特徵進行鍋爐熱值預測之結果圖。



圖十三、以影像特徵進行鍋爐熱值預測結果圖[23]

五、結論與未來發展

本文主要搜集火焰燃燒影像應用之相關文獻，將彙整結果依據應用領域分為三大類：(1)運用火焰影像進行燃燒操作過程中，火焰穩定監控之研究，包括火焰狀態分類與火焰監控之應用；(2)藉由取得燃燒火焰影像資訊，同時結合製程參數達到監控與預測目的之應用；(3)運用火焰影像進行爐內溫度分佈計算與熱值評估。

結合燃燒影像技術之應用研究，已有許多市場相關產品開發，如影像監控有 Honeywell 的 RO-NE Vision 火焰影像監視系統，能監測溫度 1800°C 之燃燒爐內之情況；燃燒影像之控制與優化操作以德國 Powitec 的 PiT Navigator 產品為技術領先指標，溫度場應用之商業軟體則有 Powitec 與大陸九州三維燃燒科技公司持續開發，尤其是九州公司更是開發了三維燃燒溫度廠建構之技術，能提供更多的燃燒溫度分佈資訊。前述之軟體在多數測試案例中證實能獲得燃燒資訊或效率之提升，但是在燃燒效率估測上較少有商品化技術，尤其是多燃燒機情況下，更需能即時提供燃燒效率資訊之感測方法。由此，利用燃燒影像進行燃燒效率、燃燒去除率等分析方法有待繼續技術突破與商品化。

六、致謝

本文承經濟部能源局(101-D0309)贊助完成，謹此致謝。

七、參考文獻

1. S. Keyvan, R. Rossow, C. Romero, L. Xianchang, Comparison between visible and near-IR flame spectra from natural gas-fired furnace for blackbody temperature measurements, *Fuel*, Vol.83, pp.1175-1181, 2004.
2. C. Duchesne, A. Desbiens, G. Szatvanyi, Rotary kiln product quality forecasting based on flame image, *ADCHEM*, April, 2006.

3. K. Imoto and M. Sumi, Inner pressure control method in optical fiber perform fabrication by vapor-phase axial deposition, *Technol.*, Vol.6, No.4, pp.574-581, April, 1988.
4. D. Bolliger, P. Malcovati, A. Haberli, H. Baltes, P. Sarro, F. Maloberti, Integrated ultraviolet sensor system with on-chip 1 G Ω transimpedance amplifier, *IEEE Int. Solid-State Circuits Conf.*, pp.328-329, San Francisco, Feb., 1996.
5. H. Yamagishi, J. Yamaguchi, Fire flame detection algorithm using a color camera, in *Proc. Int. Symp. Micromechatronics and Human Science*, pp.255-259, Nagoya, Japan, 1999.
6. C. Kranz, A new flame detection method for two channels infrared flame detectors, in *Proc. Institute Electrical and Electronics Engineers 29th Annu. Int. Carnahan Conf. Security Technology*, pp.209-213, Sanderstead, U.K., 1995
7. Z. Djuric, K. Radulovic, N. Trbojevic, and A. Lazic, Silicon resonant cavity enhanced UV flame detector, in *Proc. 23rd Int. Conf.*, pp.239-242, Microelectronics (MIEL), Niš, Yugoslavia, May pp.12-15, 2002.
8. G. Lu, Y. Yan, and M. Col, A Digital Imaging Based Multifunctional Flame Monitoring System, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol.53 No.4, Aug, 2004.
9. P. Han, X. Zhang, C. Zhen, B. Wang, Boiler Flame Image Classification Based on Hidden Markov Model, *IEEE ISIE*, Montreal, Quebec, Canada, July pp.9-12, 2006.
10. B. Hyeon and K. Sungshin, Flame Detection for the Steam Boiler Using Neural Networks and Image Information in the Ulsan Steam Power Generation Plant, *IEEE Transactions on industrial electronics*, Vol.53, No.1, February 2006.
11. H. L. Zhang, Z. Zou, J. Li, X. Chen, Flame image recognition of alumina rotary kiln by artificial neural network and support vector machine methods, *J.Cent. South Univ. Technol.* Vol.15, pp.39-43, 2008.
12. Y. Yan, G. Lu, M. Colechin, Monitoring and characterisation of pulverised coal flames using digital imaging techniques, *Fuel*, Vol.81, pp.647-656, 2002.
13. R. Hernandez, J. Ballester, Flame imaging as a diagnostic tool for industrial combustion, *Combustion and Flame*, 2008.
14. H. Yu and F. M. John, Monitoring Flames in an Industrial Boiler Using Multivariate Image Analysis, *AIChE*, Vol.50, No.7, July 2004.
15. G. Szatvanyi, C. Duchesne, Multivariate Image Analysis of Flames for Product Quality and Combustion Control in Rotary Kilns, *Industrial and Engineering Chemistry Research(I&EC)*, *Ind. Eng. Chem Res.*, Vol.45, pp.4076-4715, 2006.
16. H. C. Zhou, C. Lou, Q. Cheng, Experimental investigations on visualization of three-dimensional temperature distributions in a large-scale pulverized-coal-fired furnace, *Proceedings of the combustion institute*, Vol.30, pp.1699-1706, 2005.
17. C. Lou and H. C. Zhou, Deduction of the two-dimensional distribution of temperature in a cross section of a boiler furnace from images of flame radiation, *Combustion and Flame*, Vol.143, pp.97-105, 2005.
18. Z. Luo and H. C. Zhou, A combustion-monitoring system with 3-D temperature

reconstruction based on flame-image processing technique, *Instrumentation and Measurement*, Vol.56, No.5, Oct.7, 2007.

19. C. Romero, X. Li, S. Keyvan, R. Rossow, Spectrometer-based combustion monitoring for flame stoichiometry and temperature control, *Applied thermal engineering*, Vol.25, pp.659-676, 2005.
20. D. Li, Thermal image analysis using calibrated video imaging, *Thesis of University of Missouri*, May, 2006.
21. M. Muñoz, J. Arnaldos, J. Casal, E. Planas, Analysis of the geometric and radiative characteristics of hydrocarbon pool fires, *Combustion and Flame*, Vol.139, pp.263-277, 2004.
22. D. Manca, M. Rovaglio, Infrared Thermographic Image Processing for the Operation and Control of Heterogeneous Combustion Chambers, *Combustion and Flame*, pp.277-297, 2002.
23. H. Yu and J. MacGregor, Development of vision-based inferential sensors for process monitoring and control, *McMaster University(degree Doctor of Philosophy)*, April, 2003.

富氧燃燒技術各產業應用現況

Applicable status of oxygen-enriched combustion for industries

吳國光¹、張育誠²、焦鴻文³

Kuo-Kuang Wu, Yu-Cheng Chang, Hon-Wen Chiao

工業技術研究院綠能與環境研究所

Green Energy & Environment Research Laboratories, Industrial Technology Research Institute

摘要

本研究依據與用戶端或製造商現場訪談的結果，並佐以相關文獻，針對微富氧燃燒技術之應用推廣產業別之特性與需求性，進行分析探討，產業別包括廢棄物處理業、鋼鐵業、玻璃業、發電業、冶煉業、陶瓷水泥業、食品化工業。考量廠商意願、氧氣成本、技術適用性、節能效益、經濟效益之綜合效益，基本上除發電業外，其餘產業皆有機會應用富氧燃燒。

關鍵字：富氧燃燒、產業、節能、效益

Abstract

This article introduces the applicable status of oxygen-enriched combustion for industries based on the results of the interviews with the users or manufacturers and referring related references. The industries include waste disposal, iron and steel, glass, power plant, smelting, ceramic and cement, food and chemical industries. According to desire, oxygen cost, technical suitability, energy and economical benefits, all industries are opportunities for applying oxygen-enriched combustion except power plant.

Keywords: Oxygen-enriched combustion, industry, energy saving, benefits

¹ 工業技術研究院綠能與環境研究所，研究員，E-mail: kkwu@itri.org.tw

² 工業技術研究院綠能與環境研究所，研究員

³ 工業技術研究院綠能與環境研究所，研究員

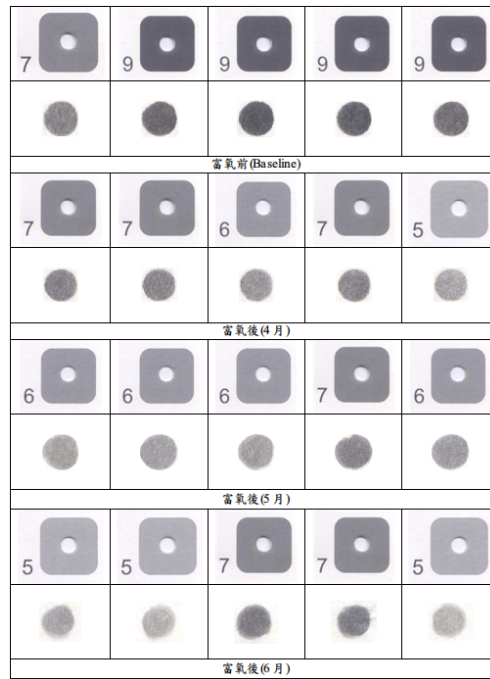
一、前言

富氧燃燒技術是一種從過去到現在仍在持續發展的節能技術，美國能源局 (US Department of Energy) 針對富氧燃燒技術所進行的研究指出[1]，富氧燃燒技術具有提升能源使用效率、提高火燄溫度、降低空氣過剩係數、加速燃燒速度、降低污染排放、減少燃燒排氣量、改善爐內溫度穩定性與熱傳效果等優點。為了瞭解各產業對富氧燃燒技術的應用現況，我們依據與用戶端或製造商現場訪談的結果，並佐以相關文獻，針對微富氧燃燒技術之應用推廣產業別之特性與需求性，進行分析探討，拜訪廠家共計 34 家產業別，包括廢棄物處理業、鋼鐵業、玻璃業、發電業、冶煉業、陶瓷水泥業、食品化工業。

二、富氧燃燒技術各產業應用現況

2.1 廢棄物處理業

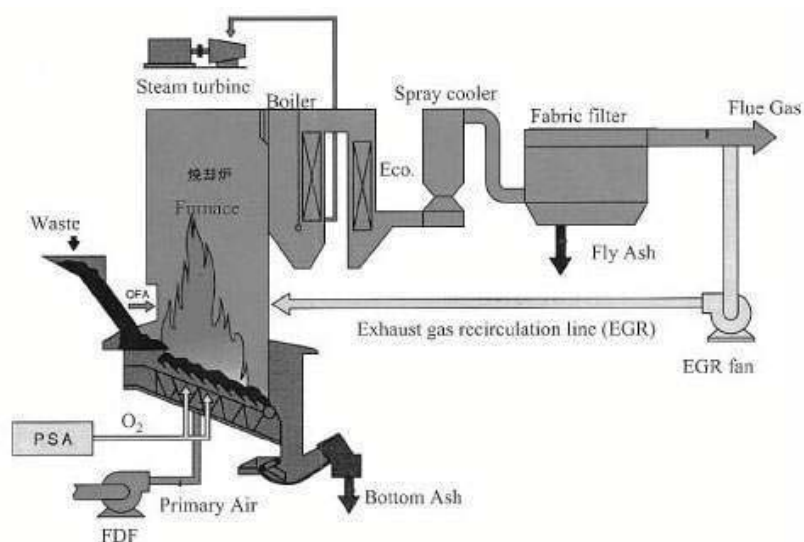
在廢棄物處理業方面，富氧燃燒技術的應用載具主要是焚化爐，由於焚化爐的燃料主要包括家庭廢棄物、事業廢棄物、醫療廢棄物等非傳統化石燃料，這些燃料具有成分複雜、熱值偏低、燃燒後易產生有毒氣體、爐內易產生結焦、燃燒狀況不穩定等特性，因此常需要輔助燃料的加入，以提升爐溫，穩定燃燒狀況、避免爐內結焦、同時將有毒氣體裂解。若透過富氧燃燒技術的介入，可降低輔助燃料的需求(甚至不需要輔助燃料)，就可達到上述的結果。如此一來，除可有效提升每日的處理量、節省輔助燃料費、降低空氣污染，並提高衍生的附加價值(產生製程用蒸汽或發電)。工研院將富氧燃燒技術應用於造紙廠之外燃式廢木材蒸汽鍋爐，就是屬於這方面的應用。採用富氧燃燒後，除了煙氣的不透光率可從 90%降低至 70%以下外(如圖一所示)，節能效果也達到 48.6%，投資回收年限為 4.2 個月[2]。另外我們也訪問了信鼎、水美工程及三新等公司，對於富氧燃燒技術應用於該公司的焚化爐上，具有相當的興趣及意願來使用，特別是在污染防制方面，節能反而不是重點。



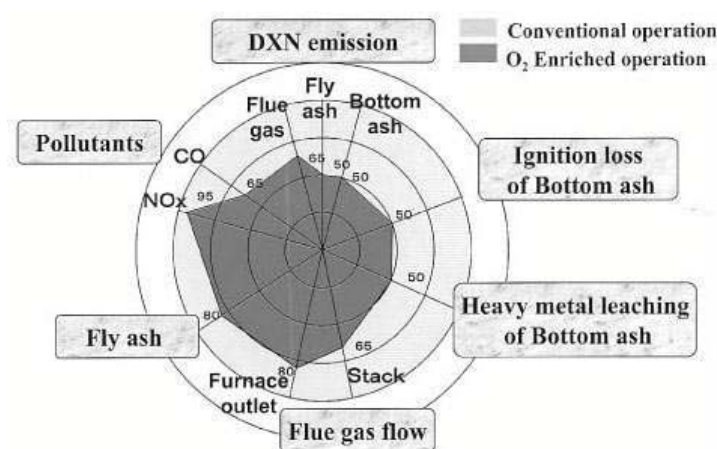
圖一、富氧前及富氧後之排煙黑度

在相關研究文獻方面，黃崧弼曾針對富氧燃燒應用於焚化爐進行實驗探討，實驗於 $0.8\text{m} \times 0.4\text{m} \times 4.8\text{m}$ 之先導型渦旋式流體化床焚化爐中進行，以聚苯乙烯為進料物，一次風風量、二次風風量與純氧體積流率為操作參數，針對爐出口煙氣中氣態污染物及苯進行檢測，並觀察爐內燃燒情形，實驗結果顯示，富氧燃燒技術可確實提高燃燒溫度與破壞苯環結構物[3]。Chen 等人將富氧燃燒與煙氣回流(O_2/FGR)技術，應用於廢棄物焚化處理[4]。其主要研究廢棄物燃燒特性、最佳操作條件以及污染物之生成控制，藉由不同氧氣濃度、煙氣回流率、燃燒爐床、進料組成進行測試。實驗結果顯示，使用 O_2/FGR 技術後燃燒效率有明顯的改善，並且 CO_2 的濃度可藉由煙氣回流率來控制。此外，隨著煙氣回流率增加，可增加重金屬於砂床或集塵器中之分布比例，減少氣相重金屬的排放。Lacava 等人探討富氧燃燒對高含水量垃圾焚化的影響[5]。研究結果指出，採用富氧燃燒後，可提高燃料利用率，並降低經由爐壁散失至外界的熱量，整體的焚化率可提高 50%。日本三菱公司將富氧燃燒技術實際應用於三菱馬丁鏈條式焚化爐(Mitsubishi-Martin stoker type incinerator)[6]，富氧濃度為 27%，整體系統如圖二所示。實際運轉結果顯示(圖三)，當焚化爐採用富氧燃燒後，燃燒溫度可提升 $100\text{-}200^\circ\text{C}$ ；對於底灰中重金屬析出(heavy metal leaching)、底灰中燒失量(reduction of ignition loss)、戴奧辛排放(DXN emission)等，相較於傳統燃燒，皆可產生明顯的減量效果；此外，對於煙氣中的戴奧辛及 CO 的減量，富氧燃燒也有相當好的效果。郭家佑將富氧燃燒施行於總高 4.6m、乾舷區內徑 0.75m、燃燒室底面積 $0.8\text{m} \times 0.4\text{m}$ 之渦旋式流體化床焚化爐中，混燒甲苯及煤炭以模擬焚化處理含苯環結構之有害事業廢棄物。研究結果顯示，採用富氧燃燒後可提高系統之燃燒溫度與苯環結構物破壞率；焚化爐出口苯排放濃度會隨著床溫及二次風氧

含量上升而下降，甲苯苯環結構去除效率則會隨著床溫及二次風氧含量上升而上升[7]。整體而言，富氧燃燒技術應用於廢棄物處理業具有相當不錯的應用潛力，除了有節能效果外，特別是在空污防治方面更是具有優勢，加上氧氣濃度不需太高就有不錯的效果，在氧氣成本的負擔上相對較低。



圖二、日本三菱鏈條式焚化爐[6]



圖三、富氧燃燒系統與傳統燃燒操作差異分析[6]

2.2 鋼鐵業

在鋼鐵業方面，富氧燃燒技術的應用載具主要是加熱爐、均熱爐、盛鋼桶、鍛造爐、電弧爐，這些載具的基本特性就是爐內及排氣溫度高，而富氧燃燒的節能特性就是排氣溫度越高，節能效果越明顯，加上煉鋼製程中原本就有大量的氧氣需求，因此工廠本身具有氧氣自產或外購議價能力，故氧氣成本相對較低，對於富氧燃燒技術的應用，可說是極佳的施做產業。在廠商的意願方面，我們訪問了中鋼、榮剛、燁聯、南隆、強新、官田等公司，對於富氧燃燒技術應用於該公司的燃燒爐上，也具有相當的興趣及意願來使用，目前強新工業已將富氧燃燒技

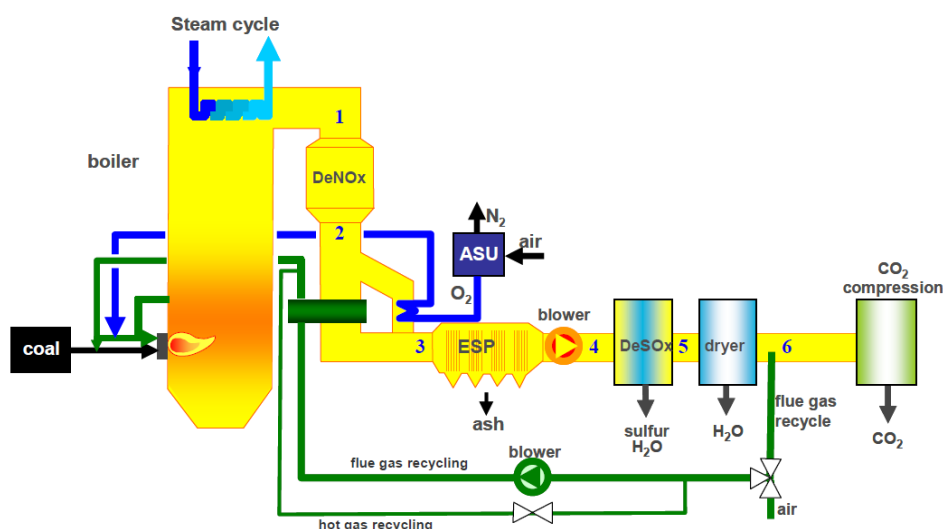
術應用於熱處理爐上，初步性能測試結果顯示已有不錯的節能效果。

在相關研究文獻方面，Edward 的研究團隊利用鋼鐵業所用之 400kW 燃燒爐進行富氧燃燒試驗，研究結果顯示在爐溫維持在 1100°C 條件下，氧氣富化率為 0% 時，所需要的燃料供應率大約為 325~365kW 之間，而當氧氣富化率提升至 100% 時，燃料供應率則減少至 200~220kW 之間，燃料使用量大約可節省 40%~45% [8]。Hamzeh 及 Mohammad 則針對推進式加熱爐(Pusher Type Reheating Furnace)分別以三組不同位置之燃燒器(soak, top, bottom burner)進行富氧燃燒加熱試驗[9]，氧氣濃度分別為 21%、30%、40%、50%及 60%。試驗結果顯示，對於污染排放方面，隨著氧氣含量增加，NO 排放逐漸降低，當氧氣含量由 21% 增加至 60% 時，則每噸鋼材所產出的 NO 由 5.9kg 減少至 1.34kg，NO 消滅率約 77%。此外，在能源消耗方面，當氧氣含量為 60% 時，每噸鋼材燃料消耗量可由 1.29GJ (21% O₂)降低至 1.059GJ，換言之，加熱爐每年連續運轉 340 天，大約可節省下 $5.9 \times 10^6 \text{m}^3$ 之氣體燃料。國內中鋼本身有製氧工廠，氧氣來源並不缺乏，為了提高煉鐵高爐內的燃燒效率，搭配氧氣富化將氧氣注入爐體內幫助燃燒。大致來說，氧氣富化率 1%，鐵水可增產約 3%，目前中鋼四座高爐氧氣富化率約介於 2%~4% [10]。此外，中鋼也將富氧燃燒用於盛鋼桶快速加熱，縮短加熱時間。整體而言，富氧燃燒技術應用於鋼鐵業具有相當不錯的應用潛力，節能效果高，加上氧氣成本較低(不管是自產或外購)，使得投資回收年限可縮短。

2.3 發電業

在發電業方面，富氧燃燒技術的應用載具主要是火力蒸汽發電鍋爐，目前電廠大多數是採用火力蒸汽鍋爐來發電，2010 台電公司發電量中火力發電就佔了 69.8%(燃油+燃煤+燃氣)[11]。其中煤在化石燃料中，算是最不好燒的燃料之一，加上發電廠所產生的 CO₂ 在全國總 CO₂ 排放量佔比極高，因此如何將發電廠所排放的 CO₂ 減量，目前是全球政府關注的焦點。富氧燃燒是未來三大 CO₂ 捕捉技術之一[12](此三大技術分別為：燃燒後(post combustion)、燃燒前(pre combustion)與富氧燃燒(oxy-fuel combustion))。其中富氧燃燒具有易於舊廠改建、煙氣中 CO₂ 濃度高與捕獲成本低等優勢，因而在近期獲得美國能源部(DOE)的高度重視。目前國際間於火力發電鍋爐所施行的富氧燃燒方式是所謂的 O₂/CO₂ 燃燒，如圖四所示。其技術內涵主要是將空氣中的氧氣分離出來和回流煙氣中的 CO₂ 加以混合，形成 O₂/CO₂ 混合氣再送入燃燒室，這樣做的好處是可降低氧氣需求量(在 O₂/CO₂ 混合氣中，O₂ 約佔 30%左右)，亦即降低氧氣成本，加上 NO_x 的排放量極低，同時煙氣中只含有水氣及 CO₂，因此只要將水氣冷凝下來，就可以得到高純度的 CO₂，大幅降低捕獲成本，採用此技術可達到近乎廢氣零排放。在廠商的意願方面，我們訪問了和平電力、星元電力、長生電力等公司，對於富氧燃燒技術應用於該公司的發電鍋爐上，多持保留意見，主要是在初期投資成本及未來的經濟效益上有所疑慮。因此國內施行此一技術仍有許多困難點需要克服：1. 初期建置成本極高：主要需要建置氧氣工廠，設備成本加上土

地成本，龐大的資金需求是一大挑戰。2. 運轉成本高：主要是製氧成本，雖然目前製氧技術已有顯著的提升，製氧成本也不斷下降，但以現在的技術，還是無法具有明顯的經濟效益。3. 現有電廠改裝意願不高：廠區已無土地可提供建置氧氣工廠，目前不具有經濟效益，加上技術尚在發展階段，這些都使業者不敢貿然投入。



圖四、O₂/CO₂ 燃燒示意圖[13]

在相關研究文獻方面，美國 Argonne National Laboratory (ANL)利用 3MW 的鍋爐進行富氧燃燒運轉操作特性試驗，作為以後 full scale 設計時的參考基準，試驗結果顯示，採用濕煙氣回流(wet recycle)時，氧氣濃度為 23.8%即可達到和使用空氣時的熱傳效果，若是採用乾煙氣回流(dry recycle)，則氧氣濃度必須達 27%才有和使用空氣時相同熱傳效果，另外在操作特性上也未發現有特別困難之處[14]。國際火焰基金會(International Flame Research Foundation, IFRF)則是將原有之 2.5MW 粉煤鍋爐改裝，以進行富氧燃燒試驗，他們的研究結果發現，煙氣回流的最佳比例為 61%，此一數值是決定於燃煤的種類以及燃燒設備形式，並非定值；另外他們也發現採用富氧燃燒時，NO₂ 的排放量有明顯的降低[15]。Kiga 以及他的研究團隊利用 1.2MW 的燃燒爐進行 O₂/CO₂ 燃燒之火焰特性研究，他們的研究顯示，採用 O₂/CO₂ 燃燒時，氧氣濃度應盡可能的提高，以達到和使用空氣助燃時的加熱效果，過低的氧氣濃度會造成火焰不穩定以及產生黑煙，飛灰未燃碳(Loss On Ignition, LOI)的比例也會增加，但若是在燃燒器中央利用氧氣噴槍注入純氧，則可增加火焰穩定性，同時 LOI 值也會有顯著下降[16-19]。此外，Horbaniuc 等人將富氧燃燒技術運用在超臨界蒸汽鍋爐(supercritical steam boiler)上，研究結果指出使用富氧燃燒技術可以讓燃氣溫度提升，提高鍋爐熱交換器中溫度的差異，使鍋爐所需的熱交換面積可以縮小，鍋爐效率大約可增加 2%~5% [20]。在 full scale 規模的研究方面，美國 ALSTOM 集團進行傳統空氣燃燒與富氧燃燒之比較分析。他們採用 450MW 之燃煤鍋爐，研究結果顯示，在相同的燃

燒量下，鍋爐效率可由傳統空氣燃燒的 88.13% 提昇至富氧燃燒的 90.47%，另外可增加輻射熱傳，幅度介於 6%-13%，但對流熱傳會降低，下降幅度介於 1%-8%，整廠熱效率則由 35% 降低至 23%，主要原因仍是在空氣分離及 CO₂ 壓縮液化時的能量消耗，但仍比傳統空氣燃燒加裝胺吸收法進行 CO₂ 回收來的高[21]。此外，Alstom 公司於 2008 年宣佈全球首例採用富氧燃燒技術的示範電廠-德國黑泵電廠(Schwarze Pumpe)正式投入運行，該示範電廠建於德國勃蘭登堡州，是 Alstom 公司與 Vattenfall 公司合作的成果，該電廠的試驗計畫之第一階段燃料是使用褐煤，第二階段則主要使用煙煤。試驗結果可作為新建電廠及現有電廠改造，在傳熱、燃燒效率、排放、動態特性、電廠設計、性能、成本和經濟效益等方面的重要資料[22]。日本 IHI 重工(Ishikawajima-Harima Heavy Industries Co.)採用 1000MW 之超臨界粉煤鍋爐進行富氧燃燒試驗，其氧氣來源為採用深冷分離法的氧氣工廠，其研究指出，採用富氧燃燒時鍋爐體積可再縮小，同時不需要 NO_x 及 SO_x 去除裝置，在不考量 CO₂ 壓縮及液化的情況下，97.5% 的氧氣濃度是最佳的操作濃度；另外，若考量空氣分離及 CO₂ 壓縮時的能量消耗，則效率約損失 9%，但在建置成本以及運轉成本上仍比標準粉煤鍋爐搭配胺吸收法(amine absorption)進行 CO₂ 回收來的低[23]，瑞典 Chalmers 大學利用 865MWe 的發電鍋爐所進行的實驗也顯示類似的結果[24]。整體而言，富氧燃燒技術應用於發電業主要是著眼於 CO₂ 捕捉，在節能及經濟效益上不具明顯的效益，加上投資成本高，除非未來有相關法令(廠商非做不可，如徵碳稅)或商業模式(廠商有利可圖，如碳權)的施行，否則富氧燃燒技術要應用於發電業具有很高的難度。

2.4 玻璃業

在玻璃業方面，富氧燃燒技術的應用載具主要是玻璃熔解爐、窯爐等，其中以玻璃熔解爐最適合做為應用載具。玻璃熔解爐的主要特性是需要極高溫，一般玻璃熔融溫度約為 1400~1600°C，加上玻璃熔解爐熔融玻璃的方式是將玻璃碎料(小塊狀、粉末狀)於玻璃液面上方投料，利用位於玻璃液面上方的燃燒器將懸浮在玻璃熔融液面上的碎料融化，爐體底部電極則是做為保溫加熱用，防止熔融的玻璃固化。傳統燃燒要達到玻璃熔解爐所要求的高溫要消耗極多的燃料，因此燃料成本極大，而富氧燃燒就可解決此一問題。在玻璃熔解爐可採用的富氧燃燒技術為氧氣槍，可在燃燒區上方或側邊加裝氧氣槍方式將氧氣引入玻璃熔解爐內，使靠近玻璃液面附近形成一層富氧層，提升火焰溫度，將玻璃碎料熔解，由於我們的目的是要將玻璃碎料熔解，故只要將玻璃液面附近的溫度提高即可，不需將整個燃燒室都升溫至玻璃熔解溫度，此作法的好處是可減少氧氣的使用量，就達到我們所需要的高溫，加上玻璃液面上方溫度增加，提高溫度梯度，可增加液面上方對玻璃液面的熱輻射和熱對流，提升熱傳效果，加快融解速率，增加玻璃產能。另一方面，由於只有玻璃液面上方附近的溫度增加，爐頂和爐壁的溫度相對較低，使耐火磚不易受損，因此對於延長爐體的使用年限也有幫助。在廠商的意願方面，我們拜訪厚生玻璃苗栗廠、台灣玻璃，實際於現場現勘與訪談後，廠家

本身皆對富氧燃燒技術深感興趣，並表示該技術對於玻璃產業具有相當助益，願意嘗試使用。

在相關研究文獻方面，全美玻璃業已有 12%採用純氧燃燒[25]，其節能量及污染防制效果也相當明顯，以美國 DOE 所贊助之研究指出[26]，日產量達 70 噸之玻璃廠採用純氧燃燒後，可減少天然氣使用量 10%~20%，NO_x 減量更達 90%。此外，大陸中國科學院大連物理化學研究所和北京玻璃集團合作，開發出局部增氧與梯度燃燒等富氧技術應用於玻璃池爐，所採用之富氧空氣量約為二次風量的 1%左右，而進風量和引風量均下降了 1/4~1/2 左右，同時玻璃質量以及利用率均有明顯的提高，延長池爐的壽命，並改善火焰結構，減少煙氣排放量，節能、增產和環保效益顯著[27]。中國秦皇島玻璃工業研究設計院進行玻璃窯爐富氧燃燒實驗，試驗窯是日產 25 噸之單元窯，實際用於燃燒的助燃氣體含氧量為 23%，在油閥門及風管開度不變的情況下，固定生熟料的比例及加料量，玻璃液產量在採用富氧燃燒情況下有明顯增加[28]。北京玻璃總廠將富氧燃燒應用在一座熔化面積為 37m² 的馬蹄焰窯上，與之前相比，採用富氧燃燒後火焰短亮，輻射能力增強，料化速度快，同時節油 10% [28]。本溪玻璃廠採用含氧量在 27%~28%之富氧燃燒，爐內溫度比未加富氧時提高 80°C，節油率為 14%~15% [28]。整體而言，富氧燃燒技術應用於玻璃業具有相當不錯的應用潛力，除了節能效果高，並可增加玻璃產量，加上氧氣成本較低(採用氧氣槍)，使得投資回收年限可縮短。

2.5 冶煉業

在冶煉業(煉銅、煉鋁等非鐵礦物熔煉)方面，富氧燃燒技術的應用載具主要是熔融爐、冶煉爐等，這些載具的基本特性就是爐內及排氣溫度高，而採用富氧燃燒可提高火焰溫度，且排氣溫度越高，節能效果越明顯，加上採用富氧燃燒後可增加產品產量，在經濟效益上有相當大的助益。在廠商的意願方面，我們拜訪慈陽科技、中鋼鋁業等公司，實際於現場現勘與訪談後，廠家本身皆對富氧燃燒技術深感興趣，慈陽科技並表示該技術對於公司生產氧化鋅具有相當助益，願意嘗試使用。

在相關研究文獻方面，Kennecott Utah Copper 公司為美國前十大銅生產商，銅年產量約 32 噸，該公司將煉銅陽極爐(anode furnace)由空氣燃燒改造為富氧燃燒後，節能率可達 50~60%，同時也降低氮氧化物的排放 [29]。美國的賓夕半尼珍珠岩廠和美國 Airco 氣體工業公司開發的富氧系統，使珍珠岩的產量提高 18%，並節省天然氣用量 12% [30]。大陸煙台冶煉廠的密閉鼓風爐採用 22.7%富氧空氣煉銅，與空氣熔煉比較，床能率和粗銅產量分別提高了 10%和 19%，煙氣中 SO₂ 濃度增加，排煙量降低，並減少煙氣後處理系統的負載[31]。貴溪冶煉廠在該廠閃速熔煉爐採用 34.5%富氧煉銅後，每日處理量由 1076 噸提升至 1436 噸，耗油量降低 50%，煙氣中 SO₂ 濃度由 8.06%提高至 10.75% [32]。日本東予冶煉廠將富氧燃燒應用於該廠轉爐，富氧濃度為 26%，粗銅產量由富氧前每爐次 130 噸，富氧後提升至每爐次 180 噸，每爐次的作業時間由富氧前的 11 小時縮

短至富氧後的 8 小時，該廠的閃速熔煉爐則是採用 40% 的富氧，富氧後冰銅的產量提高 30%，產品單位耗油量降低 50% 以上[33]。安徽銅陵第二冶煉廠在該廠之密閉鼓風爐上改用 28% 的富氧空氣後，床能率提高 45%，產能增加 55%，脫硫率由 35-45% 增加至 55-60% [34]。河南豫光金鉛集團將富氧燃燒應用該廠之鉛鼓風爐，氧氣濃度約在 24.3-25% 之間，採用富氧燃燒後，鉛鼓風爐爐況更加穩定，同時粗鉛產量提高 6.66%，煙氣溫度下降了 150~200°C [35]。雲南銅業將富氧燃燒應用於粗銅吹煉轉爐，富氧濃度為 25%，採用富氧燃燒後，每爐製程平均縮短 80min，單爐產量平均提高 6.4 噸[36]。北方銅業侯馬冶煉廠將富氧燃燒用於銅吹煉爐，其氧氣濃度介於 25-27% 之間，採用富氧吹煉後，噴槍的噴濺明顯減弱，爐膛負壓更易控制，爐口、噴槍口、噴槍中上部結渣明顯減少且比過去易於清除，同時粗銅產量由每爐 38 噸提升至 50-60 噸[37]。白銀紅鷺銅業公司將富氧燃燒應用於轉爐吹煉，採用 24% 的氧氣濃度，富氧後轉爐吹煉升溫時間縮短，爐膛內結焦的情況明顯減少，轉爐產能提升 33.3%，每年可節省成本約 400 萬人民幣左右[38]。美國 WOLVERINE 銅冶煉廠，採用 29% 富氧濃度的微富氧燃燒，可節省燃料 30% 以上[39]。整體而言，富氧燃燒技術應用於冶煉業具有相當不錯的應用潛力，除了節能效果高，並可增加產量，提高經濟效益，使得投資回收年限可大幅縮短。

2.6 陶瓷水泥業

在陶瓷水泥業方面，富氧燃燒技術的應用載具主要是水泥窯爐，水泥廠在使用替代燃料或者低熱值燃料，以及在協同處理廢棄物時，可能造成燃燒不穩定、燃燒溫度偏低、火焰偏長且燃燒不完全、操作參數波動、生產控制不易等問題，造成熟料品質下降和替代燃料替代量及廢棄物處理量的下降。在廠商的意願方面，我們拜訪冠軍磁磚、台灣水泥、光和耐火等公司，實際於現場現勘與訪談後，廠家本身皆認同富氧燃燒技術對於該公司的產品生產有助益，但對於採用富氧燃燒技術後，對爐內的溫度分佈是否會有影響則提出疑慮，若能保證溫度分佈不致有大幅變化，則願意嘗試使用。

在相關研究文獻方面，日本大阪瓦斯和松下電器曾合作將富氧燃燒應用於陶瓷燒成爐，在氧濃度 26% 之情況下，節能率可達 24% 以上[40]。意達陶瓷有限公司利用富氧膜產生 25% 富氧空氣於陶瓷燒成爐助燃，每年可減少耗煤 3000 多噸，降低生產成本達 300 多萬元[41]。朱慶霞等人將微富氧燃燒應用於梭式窯，氧氣濃度採用 28%，性能測試結果顯示，節能率可達 26.6%，同時產品良率由 87% 提升至 92% [42]。程金樹等人利用 4m³ 之輥道窯進行微富氧燃燒試驗，燃料為柴油，研究結果顯示，當氧氣濃度為 24% 時，柴油的耗用量可減少 33.3%，但 NO_x 濃度有明顯增加的趨勢[43]。上海焦化廠將 4m³ 水泥窯改造成富氧助燃，同時改用高熱值煤混摻部分低熱值煤，氧氣濃度為 30%，試驗結果顯示，除供熱量和完全使用高熱值煤相當外，生產熟料也由原先 38t/hr 上升到 48t/hr，產量提高 10t/hr [44]。煙臺海洋水泥有限公司將富氧助燃技術應用於水泥回轉爐窯，氧氣

濃度為 30%，在不增加燃料的前提下，爐窯火焰溫度提高 180°C，節能率可達 10%-20% [45]。北京新北水水泥公司和在水泥回轉窯進行窯頭和窯尾富氧燃燒，試驗結果顯示，採用富氧燃燒後可以提高工業廢棄物的處理能力，同時減少窯尾結焦現象，延長水泥窯摻燒工業廢棄物的連續作業時間[46]。整體而言，富氧燃燒技術對於陶瓷水泥業有應用潛力，但國內業者的態度則較為保留。

2.7 食品化工業

在食品化工業方面，富氧燃燒技術的應用載具主要是工業鍋爐，包括蒸汽鍋爐、熱媒鍋爐、貫流式鍋爐等各式工業用鍋爐。在廠商的意願方面，我們拜訪港香蘭應用生技、三皇生物科技、台精化學、台灣聚合化學、臺鍍科技、金長榮國際實業、國精化學、展頌、力鵬、力麗、東鹼、勝一化工、三福化工、達邦蛋白、中油，實際於現場現勘與訪談後，大多數廠家對於富氧燃燒技術都有興趣，其中工研院已在港香蘭應用生技、臺鍍科技、展頌股份有限公司應用微富氧燃燒技術，載具分別為煙管式瓦斯蒸汽鍋爐、貫流式重油蒸汽鍋爐、重油熱媒鍋爐。長期測試結果顯示，港香蘭應用生技、臺鍍科技、展頌股份有限公司三家公司應用微富氧燃燒後之節能率(已扣除製氧所增加之用電量)分別可達 9.40%、19.8%及 8.74%，投資回收年限分別為 2.70 年、1.04 年及 1.11 年[47-49]。另外，金長榮國際實業、達邦蛋白等公司已規劃將微富氧燃燒技術應用於該廠之乾燥爐及熱媒鍋爐上。

在相關研究文獻方面，在 Mohammed 的研究中[50]，他們採用熱水鍋爐進行微富氧燃燒實驗，研究結果顯示，當使用氧氣濃度為 26%時，熱水鍋爐可降低 77.2%的一氧化碳排放。中國大陸江蘇阜寧化肥廠則是將富氧燃燒應用於 20t/hr 燃煤鍋爐，節能率可達 11%以上[40]。大連油脂化學廠 30 噸燃油鍋爐採用富氧燃燒，配置 300-350Nm³/h 富氧量，可節約燃油 8.25% [51]；大陸南洋油田 4 噸燃煤鍋爐採用富氧燃燒後，平均可節煤 29.74%，同時熱效率及蒸汽壓力分別提高 15.59%及 39% [51]。黑龍江華潤酒精工藝有限公司之拋煤機爐採用富氧燃燒後，在鍋爐負荷 45t/hr 狀態下，節煤率達到 10.14%，半年收回成本[52]。中鋁公司河南分公司熱力廠 6 號鍋爐應用局部富氧助燃技術後，有效解決爐膛結焦和高溫腐蝕問題，並提高了低負荷不投油穩燃能力，飛灰未燃碳(LOI)降低 1.1%，鍋爐熱效率提高 2.5%以上，同時 NO_x 排放量降低 20% [53]。嘉興嘉愛斯熱電有限公司將微富氧燃燒應用於 65t/hr 拋煤鏈條鍋爐，性能測試結果顯示，鍋爐熱效率可提高 3%~6%，飛灰含碳量由 39.4%降至 24.1%[54]。整體而言，微富氧燃燒技術應用於食品化工業雖具有一定的應用潛力，但節能效益差異極大，主要和應用載具本身的操作狀態、載具型式、使用燃料以及負載有關，以燃料品質越低，負載變動大，載具本身效率較低(如貫流式鍋爐)，節能效果越好。

三、結論

本研究針對微富氧燃燒技術之應用推廣產業別之特性與需求性，進行分析探

討，主要依據與用戶端或製造商現場訪談的結果，並佐以相關文獻。拜訪產業含括廢棄物處理業、鋼鐵業、玻璃業、發電業、冶煉業、陶瓷水泥業、食品化工業。考量廠商意願、氧氣成本、技術適用性、節能效益、經濟效益之綜合效益，基本上除發電業外，其餘產業皆有機會應用富氧燃燒，發電業除非有相關法令政策或經濟模式配合，否則並不適用。

四、致謝

本研究計畫承經濟部能源局提供研究經費，謹此致謝。

五、參考文獻

1. http://www1.eere.energy.gov/industry/bestpractices/pdfs/oxygen_enriched_combustion_process_htgts3.pdf
2. 吳國光、張育誠、焦鴻文、范國富、高以仁，微富氧燃燒技術應用於外燃式蒸汽鍋爐，*中國機械工程學會第二十八屆全國學術研討會論文集*，中國機械工程學會，A13-001，民國100年12月。
3. 黃崧弼，聚苯乙烯於渦旋式流體化床焚化爐富氧焚化之研究，*國立中原大學碩士論文*，化學工程研究所，民國95年。
4. J. C. Chen and J. S. Huang, Partitioning characteristics and particle size distributions of heavy metals in the O₂/RFG waste incineration system, *Journal of Hazardous Materials*, Vol.172, pp.826-832, 2009.
5. P. T. Lacava, J. A. Carvalho, A. P. Pimenta and M. A. Ferreira, Thermal analysis of an enriched flame incinerator for aqueous residues, *Energy*, Vol.31, pp.528-545, 2006.
6. http://www.gec.jp/JSIM_DATA/WASTE/WASTE_3/html/Doc_434.html
7. 郭家佑，富氧燃燒對甲苯破壞去除效率之影響，*國立中原大學碩士論文*，化學工程研究所，民國98年。
8. W. G. Edward, J. P. David and B. Eric, Development of an oxygen-enriched furnace system for reduced CO₂ and NO_x emissions for the steel industry, *DOE report*, No. DE-FC07-97ID13554, 2003.
9. S. Y. Luo, B. Xiao, Z. Q. Hu, S. M. Liu and Y. W. Guan, Experimental study on oxygen-enriched combustion of biomass micro fuel, *Energy*, Vol.34, pp.1880-1884, 2009.
10. 黃俊英、陳得發，*中鋼公司生產管理的關鍵成功因素之探討*，國立中山大學企業管理研究所，民國91年。
11. http://www.moeaboe.gov.tw/Download/opengovinfo/Plan/all/energy_mthreport/main/files/10/03/
12. T. F. Wall, Combustion processes for carbon capture, *Proceedings of the combustion Institute*, Vol.31, pp.31-47, 2007.

13. K. D. Tigges, F. Klauke, C. Bergins, K. Busekrus, J. Niesbach, M. Ehmann, B. Vollmer, T. Buddenberg, W. Song and K. Allan, Oxyfuel combustion retrofit for existing power stations-Bringing "Capture Ready" to Reality, *Power plant air pollutant control "Mega" symposium*, 2008.
14. J. C. Molburg, R. D. Doctor, and NFSP. Brockmeier, CO₂ capture from PC boilers with O₂-firing, *Eighteenth annual international Pittsburgh coal conference*, 2001.
15. D. M. Woycenko, W. L. van de Kamp, and P. A. Roberts, Combustion of pulverized coal in a mixture of oxygen and recycled flue gas, *1995 APG research program*, 1995.
16. T. Kiga and T. Miura, *Advanced coal combustion*, Nova Science Publishers Inc, 2001.
17. K. Kimura, K. Omata, T. Kiga, S. Takano and S. Shikisima, Characteristics of pulverized coal combustion in O₂/CO₂ mixtures for CO₂ recovery, *Energy Conversion Management*, Vol.36, pp.805-808, 1995.
18. S. Takano, T. Kiga, Y. Endo, S. Miyamae and K. Suzuki, CO₂ recovery from PCF power plant with O₂/CO₂ combustion process, *IHI Engineering Review*, Vol.28, pp.160-164, 1995.
19. T. Nozaki, S. Takano, T. Kiga, K. Omata and K. Kimura, Analysis of the flame formed during oxidation of pulverised coal by an O₂-CO₂ mixture, *Energy*, Vol.22, pp.199-205, 1997.
20. H. Bogdan, M. Ovidiu, D. Gheorghe and C. Olivier, Oxygen-enriched combustion in supercritical steam boilers, *Energy*, Vol.29, pp.427-448, 2004.
21. N. Y. Nsakala, J. Marion, C. Bozzuto, G. Liljedahl, M. Palkes, D. Vogel, Engineering feasibility of CO₂ capture on an existing us coal-fired power plant, *First national conference on carbon sequestration*, 2001.
22. <http://www.alstom.com/home/news/index.EN.php?languageId=EN&dir=/home/news/>
23. M. Okawa, N. Kimura, T. Kiga, S. Takano, K. Arai and M. Kato, Trial design for a CO₂ recovery power plant by burning pulverized coal in O₂/CO₂, *Energy Conversion Management*, Vol.38, pp.S123-S127, 1997.
24. K. Anderssen, H. Birkestad, P. Maksinen, F. Johnsson, L. Stromberg and A. Lyngfelt, An 865MWe lignite-fired power plant with CO₂ capture-a technical feasibility study, *Greenhouse Gas Control Technol*, 2003.
25. H. Yamazaki, The status of oxy-fuel technology in the glass industry, *IFRF Totem 17*, 2000.
26. G. B. Tuson, H. Kobayashi, M. J. Campbell, Oxygen enriched combustion system performance study phase II-100 percent oxygen enriched combustion in

regenerative glass meters, *DOE report*, No.DE-FCO7-88ID12833, 1994.

27. 馬得沛, 富氧燃燒-節能新技術, *設備管理與維修*, 第100期, pp.26-30, 1993。
28. <http://bbs.boli.cn/viewthread.php?tid=20781>
29. <http://www1.eere.energy.gov/industry/bestpractices/pdfs/kennecott.pdf>
30. http://emis.erl.itri.org.tw/_upload/_admin/techbook/35/file/工業爐節能手冊.pdf
31. 遲兆祥, 小型煉銅密閉鼓風爐高塊率、低濃度富氧空氣熔煉的實踐, *有色金屬*, 第1期, pp.1-2, 1993。
32. 白猛、袁則平, 貴溪冶煉廠閃速熔煉富氧技術改造工程的實施與完善, *世界有色金屬*, 第9期, pp.16-20, 1997。
33. 張蘭芝, 富氧在國外閃速熔煉的實績及國內煉銅工藝改造的設想, *江西有色金屬*, 第1期, pp.38-42, 1988。
34. 鐘義凡、銅陵第二冶煉廠富氧煉銅 $3200 \text{ Nm}^3/\text{h}$ 氧氣站設計, *湖南有色金屬*, 第6期, pp.34-37, 1997。
35. 王健、原和平、白會平、段金東、樊粉麗、段景堂、張雲雷、鄧戰平、姚現軍、程利軍、翟靈帥、王高升、張迎軍、牛文軍、王國平, *鉛鼓風爐富氧熔煉工藝*, 中國國家科技成果 No.TF812 450.40, 2003。
36. 楊毓和、何藹平, 煉銅轉爐富氧熔煉研究, *有色冶金節能*, 第1期, pp.16-19, 1999。
37. 裴明傑、溫燕銘、林榮躍, 奧斯麥特吹煉爐富氧吹煉的工業試驗, *中國有色冶金*, 第1期, pp.18-21, 2006。
38. 胡忠東, 轉爐富氧吹煉設計及生產實踐, *甘肅冶金*, 第1期, pp.16-19, 2009。
39. 程金樹, 鄧臻祿, 何峰, 李詩文, 富氧燃燒在陶瓷輥道窯中的應用分析, *建材世界*, 第3期, pp.92-95, 2010。
40. 陳勇、王從厚、吳鳴, *氣體膜分離技術與應用*, 化學工業出版社, 北京, 2004。
41. <http://www.isp.cas.cn/html/Dir/2003/12/14/7968.htm>
42. 朱慶霞, 馮青, 汪和平, 宮小龍, 富氧燃燒在陶瓷窯爐中的應用及經濟效益分析, *中國陶瓷*, 第2期, pp.6-9, 2010。
43. 程金樹、鄧臻祿、何峰、李詩文, 陶瓷輥道窯柴油富氧燃燒特性的研究, 2010全國玻璃技術交流研討會, pp.170-173, 2010。
44. 計虎掌, 富氧空氣助燃煤矸石生產水泥技術經濟分析, *四川水泥*, 第3期, pp.2-4, 1996。
45. 中國技術市場報, 2011.04.08。
46. 李鐵冰、任曉雪, 富氧燃燒在水泥窯協同處理工業廢棄物中的應用, *中國水泥*, 第4期, pp.49-51, 2010。
47. 吳國光、焦鴻文、張育誠, 微富氧燃燒示範應用-港香蘭應用生技, *工研院研究報告*, 報告編號: 55-3-A1-0264-01, 2012。
48. 吳國光、焦鴻文、張育誠、何建德、黃冠霖, 微富氧燃燒應用於 1.8t/hr 貫流式蒸汽鍋爐之節能與經濟效益, *石油季刊*, 第48期, pp.33-44, 2012。

49. 吳國光、焦鴻文、張育誠，微富氧燃燒示範應用-展頌股份有限公司，*工研院研究報告*，報告編號：55-3-A1-0266-01，2012。
50. Mohammed F.M.A., Oxygen enriched combustion of high emission fuels, *Faculty of Graduate Studies*, An-Najah National University, 2008.
51. <http://www.ynmine.com/News/ArticleShow.aspx?ID=8366&ClassId=131>
52. <http://www.hbzhan.com/article/show/524.html>
53. 張家元、周子民、陽紹偉、陳喬平，煤粉鍋爐膜法富氧局部助燃技術開發及應用，*熱能動力工程*，第4期，pp.391-394，2007。
54. 俞保雲、郭永濤、應隆颿、林煒、倪德芬，膜法富氧局部增氧助燃技術及其在拋煤機鍋爐中的應用，*熱力發電*，第2期，pp.49-51，2006。

利用鈮作為熱電模組之擴散阻障層研究

A Study of Tantalum Barrier Layer Effects in Thermoelectric module

陳奕瑞¹、葉建弦²、林俊凱³、林育立⁴

Yi-Ray Chen, Chien-Hsuan Yeh, Chun-Kai Lin, Yu-Li Lin

工業技術研究院綠能與環境研究所

Green Energy and Environment Research Laboratory, Industrial Technology Research Institute

趙文軒⁵

Wen-Hsuan Chao

工業技術研究院材料與化工研究所

Material and Chemical Research Laboratories, Industrial Technology Research Institute

摘要

擴散阻障層對於熱電模組的可靠性和使用壽命具有很大的影響，因此本研究利用噴砂處理熱電材料表面，以增加熱電材料和阻障層間之附著力，再依續濺鍍鈮(Ta)和鎳(Ni)於熱電材料表面。以鎳作為焊料與熱電晶粒之黏著層，將熱電晶粒焊接於銅電極後再進行 200°C 真空退火 1 小時。並量測在焊接和退火過程之熱電性能變化，其中包括電導率和 Seebeck 係數，由 EDS 的結果顯示鈮和鎳層可以有效阻擋銅和錫原子進入熱電晶粒。然而卻導致熱電晶粒之電導率略為下降。此外，熱電晶粒和銅電極間之熱阻導致溫差變大，因此在相同的端部溫度下導致等效的 Seebeck 係數變小。

關鍵字：熱電模組、擴散阻障層、碲化鉍

Abstract

Diffusion barrier layer plays an important role to influence the reliability and life time of thermoelectric module. In this study, sandblast pretreated the surface of TE material to increase adhesive force between TE material and barrier layer. Tantalum (Ta) and Nickel (Ni) were sputtered to TE material in order. The nickel was used as the adhesion layer between Sn-Ag-Cu solder and TE legs. TE legs were

¹ 工業技術研究院綠能與環境研究所，研究員，E-mail: chenyiray@itri.org.tw

² 工業技術研究院綠能與環境研究所，研究員

³ 工業技術研究院綠能與環境研究所，研究員

⁴ 工業技術研究院綠能與環境研究所，資深研究員兼室經理

⁵ 工業技術研究院材料與化工研究所，研究員

soldered with copper (Cu) electrode and annealed at 200°C for 1 hours in vacuum. This investigation measured the TE performance, including electrical conductivity and Seebeck coefficient, during soldered and annealed processes. The EDS analyzer had shown that TE legs with Ta and Ni layer could prohibit Cu and tin (Sn) atom into Bi₂Te₃ alloys. Therefore, the electrical conductivity was slightly different in TE material during these processes. Nevertheless, due to heat resistance between interfaces induced the temperature difference between TE leg and Cu electrode, the effective Seebeck coefficient was reduced at the same extremity temperature.

Keywords: Thermoelectric modular, diffusion barrier, bismuth telluride

一、前言

熱電材料碲化鉍(Bi₂Te₃)具有優異的熱電特性，廣泛用於製作製冷晶片[1]。在製冷晶片中，銅(Cu)導線具有優異導電性，因此常被用來作為電極材料，而具有低熔點之錫鉍合金(Sn₅₇Bi₄₃)則用來作為焊料。電極材料與焊料在晶片通入電流使用時會藉由擴散作用進入熱電材料中，導致模組性能的衰退，因此尋找適當的擴散阻障層是維持熱電模組效能的關鍵技術。在室溫下，Cu 在 Bi₂Te₃ 中擴散速度非常快，甚至會產生 Cu₂Te 化合物[2]，因而改變熱電材料的載子濃度。另一方面，由 Sn₅₇Bi₄₃ 擴散出的 Sn 會使熱電材料(Bi₂(Te,Se)₃)的熱電力下降[3]。為了避免 Sn(焊料)與 Cu(電極)擴散進入 Bi₂Te₃，在商用的熱電晶片中通常利用 3 到 5nm 的鎳(Ni)層作為擴散障礙層。此外，Y. C. Lan 等人進行 Ni 與 Sn₄₂Bi₅₈ 焊料擴散實驗結果顯示 P-type 熱電材料在焊接的過程中 Ni 的擴散深度為 100nm，而在 N-type 熱電材料中 Ni 的擴散深度卻高達 4μm [4](如圖一所示)。然而，T. Kacsich 等人的研究結果亦顯示，在 200°C 環境下數小時後，Ni 層並未能有效防止 Cu 與 Bi₂Te₃ 間的交互擴散[5]。並提出多晶金屬薄膜並不適宜用來作為擴散阻障層，而以金屬作為阻障層具有導電、導熱性佳的優點。此外，應用 Ta-Si-N 作為阻障層的表現十分優異，以 20nm Ta-Si-N 薄膜作為阻障層的 Bi₂Te₃/Cu 電極的接面，在經過 250°C、50 小時和 350°C、1 小時的熱處理後仍能維持完整性。同時更建議以二元與三元薄膜 TiN、Ti-Si-N 與 W-Si-N 等的擴散障礙層，而常用的擴散阻障層包含三大類分別為：

金屬元素：Ta，Ti，Ni，Pd，Cr，Pt，Au，Ag，

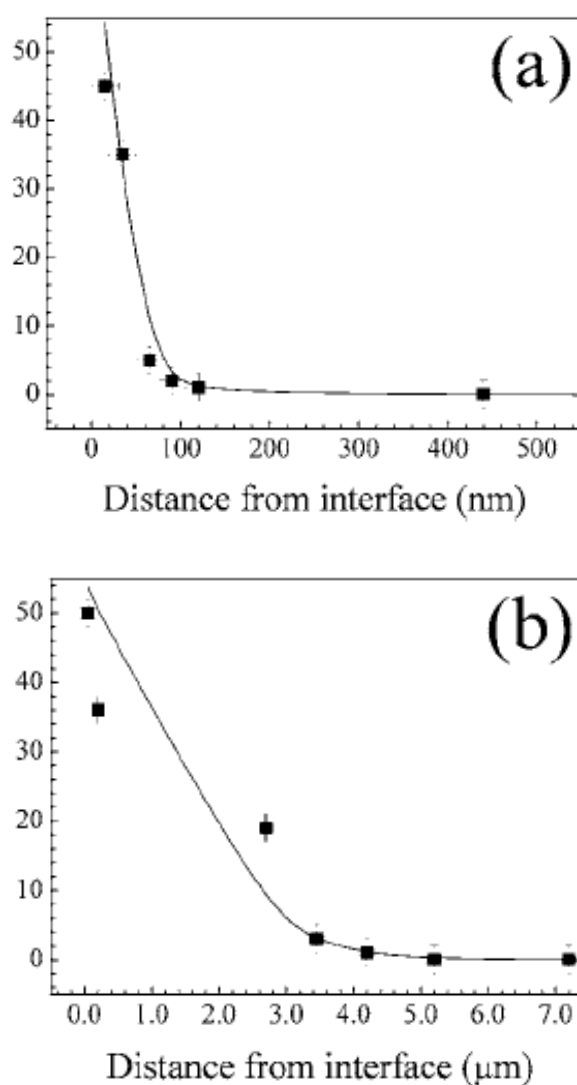
金屬氮化物：TaN，TiN，Ta-N-Si，

多層金屬層：Ti/Au，Au/Cr，Ni-7%V。

然而，這些研究大多只對材料的擴散效應進行研究，並未針對熱電材料之特性(導

電性與 Seebeck 係數)進行量測，因此本研究特地針對熱電材料之特性變化進行討論，以確認其熱電性質是否受到影響。

常用的無鉛焊料則包含：Sn-Cu，Sn-Ag，Sn-Zn，Sn-Ag-Bi，Sn-Ag-Cu 等系列，而本研究中所採用的鐸料為 Sn-Ag-Cu 焊料。藉由選擇不同的擴散障礙層(依據其與熱電材料(Bi_2Te_3)之晶格常數及熱膨係數)進行研究，找出適用的擴散阻障層。本研究選擇純金屬 Ta(鉭)作為擴散阻障層研究對象，進行 N-type 及 P-type 之熱電材料與錫膏及銅片之接合研究。



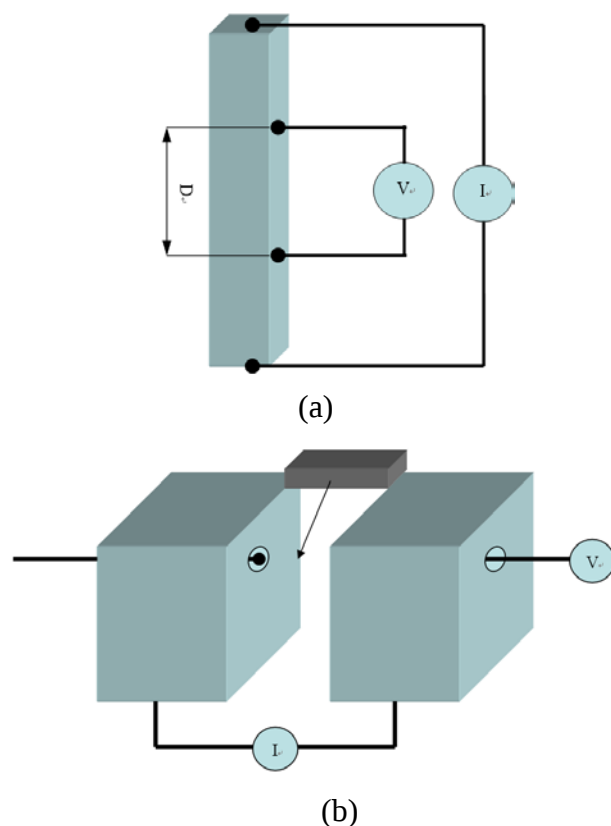
圖一、在焊接過程中 Ni 在熱電材料中的擴散深度，(a)P-type 熱電材料；(b)N-type 熱電材料[4]。

二、實驗方法

本研究中所使用之熱電材料為利用球磨製程與火花電漿放電燒結(SPS)製作之塊材，其中 N-type 為 $\text{Bi}_2\text{Te}_3\text{-xSex}$ 與 P-type 為 $\text{Bi}_{0.5}\text{Sb}_{1.5}\text{Te}_3$ ，進行鍍膜之熱電材

料與電極銅片焊接對於熱電特性影響之研究，為避免焊錫與銅片在焊接的過程中擴散進入熱電材料中，而造成熱電材料特性降低，因此需在熱電材料表面製造擴散阻障層，並降低介面所造成的電阻與熱阻使整體的效率得到提升。

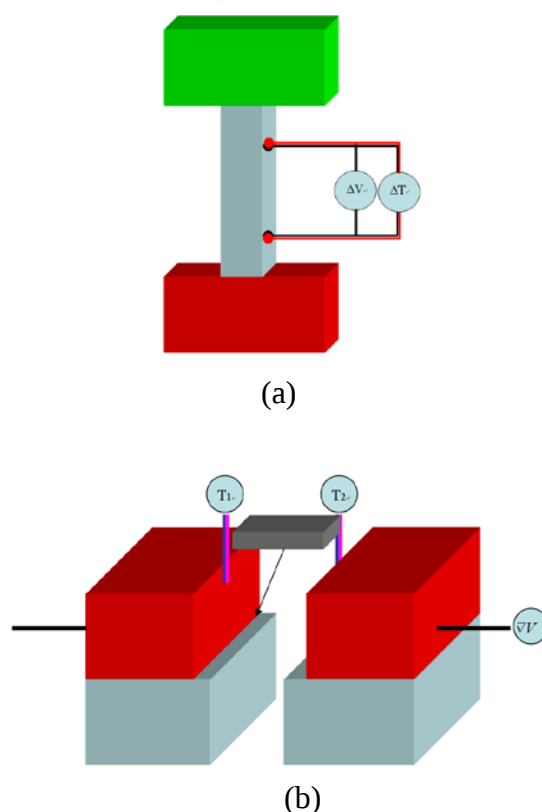
而在導電係數量測方面，一般採用所謂的四點探針量測方式，這種方法常被應用在量測微小電阻的材料上，由於量測時外側的兩探針提供固定之電流源(I)，再藉由內側兩個點量取電位差(V)(如圖二(a)所示)，並量測內側兩探針之距離(L)與試片之截面積(A)，最後代入 $R=V/I$ 算出電阻，再藉由 $R=\rho L/A$ 計算出導電率 $\sigma=1/\rho$ 。利用這種方法可以將接觸電阻之效應減到最小，以提高量測之準確度。但內側兩探針所量測電位差之區域僅為熱電材質本身之電位差，而不含兩端鍍層之電位差，因此無法量測到熱電材料焊接前與焊接後對導電係數之影響。所以本研究自行建構一套量測裝置來進行焊接對導電係數影響之量測，自製導電係數量測之裝置示意圖如圖二(b)所示，其導電率之量測方式是分別將兩導線連接至試片兩端的銅塊上，並施加一固定之電流源(I)，使形成一個均勻分布之電流，且在已鑽孔之銅塊中穿入銅導線，鑽孔之孔徑必須小於試片的 $1/3$ 以下，將兩銅塊上各接一導線連接至 nano-Voltmeter 上以量測兩端之電位差(V)，再藉由 $R=\rho L/A$ 便可以求出導電率 $\sigma=1/\rho$ 。



圖二、導電係數量測之電路配置示意圖，(a)商用機台；(b)自製量測設備。

在 Seebeck 係數量測方面，通常將試片兩端藉由夾製具進行夾持，接著在一端以電熱絲進行加熱使試片產生溫差，再利用兩根熱電偶(其中熱電偶之金屬材

質分別為康銅與銅)接觸試片側面進行兩點溫度之量測，以得到這兩點之溫差(ΔT)，在量完溫度之後接著選取兩熱電偶之銅導線部分進行電位差(ΔV)之量測(如圖三(a)所示)，最後將量測到的溫差與電位差代入 $S = \Delta V / \Delta T$ 就可以算出 Seebeck 係數。由上述可以發現量測的位置在試片中間的部分，而鍍層的位置卻是在試片的兩端。因此，量測到的熱電特性為熱電材料本身的 Seebeck 係數(不包含鍍層)，無法量測出焊接前與焊接後之熱電特性變化，所以本研究自行開發一套量測裝置來進行焊接對 Seebeck 係數影響之量測。自製 Seebeck 係數量測之裝置示意圖如圖三(b)所示，將試片夾置於兩銅塊間，再將其中一銅塊以加熱管方式進行加熱使熱電材料產生溫差，並在銅塊上連接兩熱電偶以監測試片兩端之溫差，並盡量將熱電偶固定在靠近試片兩端的銅塊上。接著，由兩銅塊上各接一導線連接至 nano-Voltmeter 上，以監測溫度變化所產生的 Seebeck 電壓之大小，但由於銅塊處於兩個不同的溫度下，因此量測到的電位差(ΔV)必須先扣除銅導線在不同溫度下所造成之 Seebeck 電壓，最後代入 $S = \Delta V / \Delta T$ 便可以計算出試片之 Seebeck 係數。確認完量測方式的正確性後，必須在進行濺鍍前先對熱電晶粒進行導電率與 Seebeck 係數之量測，以作為與焊接後晶粒熱電特性變化之比較。



圖三、Seebeck 係數量測之電路配置示意圖，(a)商用機台；(b)自製量測設備。

在先前的研究中已探討過具擴散阻障層與不具擴散阻障層之熱電晶粒在焊接過程中 Cu 與 Sn 之擴散現象比較。焊接後利用 EDS 觀察也確認了不具擴散阻障層的試片都有擴散的現象存在，其結果顯示試片不具阻障層時比具阻障層的

Seebeck 係數變化更為顯著。此外，在焊接後熱電材料和擴散阻障層間之附著力不足，因此會出現剝離之現象。為了要增加薄膜表面之附著性，因此在進行濺鍍之前會先進行噴砂使表面粗化，接著將 3mm × 3mm × 6mm 之柱狀熱電材料 (N-type 及 P-type) 先以酒精擦拭，並在 Ta 及 Ni 鍍膜前，先 Presputter 10min，減少界面氧化物雜質影響，然後將玻璃基板置於一夾具上，再將柱狀熱電材料黏於玻璃基板放入真空腔體抽真空，待真空達到 5×10^{-6} torr 時開始進行濺鍍鍍膜，先鍍完一邊再以相同的方式濺鍍另外一邊。而濺鍍之擴散阻障層 (Ta) 的膜厚如表一所示，表中 DBST 代表 P-type 材料之試片，而 A 代表 N-type 材料之試片。Cathode 尺寸為 3in 直徑的磁控濺鍍槍，濺鍍功率為 DC 200W，系統氬氣流量均為 10sccm，濺鍍壓力控制於 10mtorr。製程溫度控制在室溫，鍍膜時間均為 40min，靶材與基板之工作距離為 9.5cm，薄膜使用表面粗度輪廓儀量測厚度的結果，膜厚變化在 0.92~1.16μm 之間。在此實驗中，將使用濺鍍功率及濺鍍時間來調控擴散阻障層 (Ta) 之厚度，研究具有阻障效果之條件。

在製作完擴散障礙層 (Ta) 後，進行熱電晶粒與銅片之焊接，在焊接過程中發現擴散阻障層 (Ta) 與錫膏及銅片之接合特性極差，因此在擴散障礙層 (Ta) 上面再鍍製一層潤濕層 (Ni)，藉以增加錫膏與擴散阻障層 (Ta) 間之附著性。潤濕層 (Ni) 之製程步驟如下：將 3mm × 3mm × 6mm 之柱狀熱電材料 (N-type 及 P-type) 黏於玻璃基板上，放入真空腔體抽真空，待真空達到 5×10^{-6} torr 時，開始進行濺鍍潤濕層 (Ni)，完成整個鍍膜過程再取出。

表一、試片之鍍膜厚度表。

Serial number	Ta (nm)	Ni (nm)
DBST3-1	0	1000
DBST3-2	500	300
DBST3-3	1000	300
A03-1	0	1000
A03-2	500	300
A03-3	1000	300

三、結果與討論

在完成濺鍍後，利用 Sn-Ag-Cu 焊料來進行銅片與熱電材料之焊接，焊接溫度為 220~230°C 持溫 2 分鐘，在此實驗中，並依據上面之量測架構分別量測導電

率與 Seebeck 係數。接著進行在 200°C 下回火 1 小時，以確保擴散阻礙層即使在較長的時間焊接下也可以防止焊錫與銅進入熱電晶粒中。

分別在焊接前、焊接後與退火後對試片進行導電率之量測，導電率量測之結果如表二所示。在鍍 Ni 的晶粒(DBST-3#1 與 A03#1)部份導電率變化量在 1~2%，而在鍍 Ni/Ta 的晶粒(DBST-3#2，A03#2，DBST-3#3 與 A03#3)部份除了 A03#3 外，其餘的 3 個試片導電率均有下降的趨勢(約下降 3~7%)，因此發現鍍 Ni/Ta 確實比較容易造成導電率的下降，也顯示出 TE 與擴散障礙層間的界面影響其熱電性質之表現，而使得熱電性質有所影響。但在經過 200°C 退火 1 小時後卻發現 P-type 材料導電率均出現下降的趨勢，而 N-type 材料卻維持不變甚至於有小幅度的增加，因此造成這個現象可能的原因有兩種：(1)在退火的過程中 P-type 材料與鍍膜部分產生空孔或裂縫；(2)熱電材料的組成或微結構受到改變，所以導致 P-type 材料出現導電率下降的趨勢。

表二、熱電晶粒導電率量測。

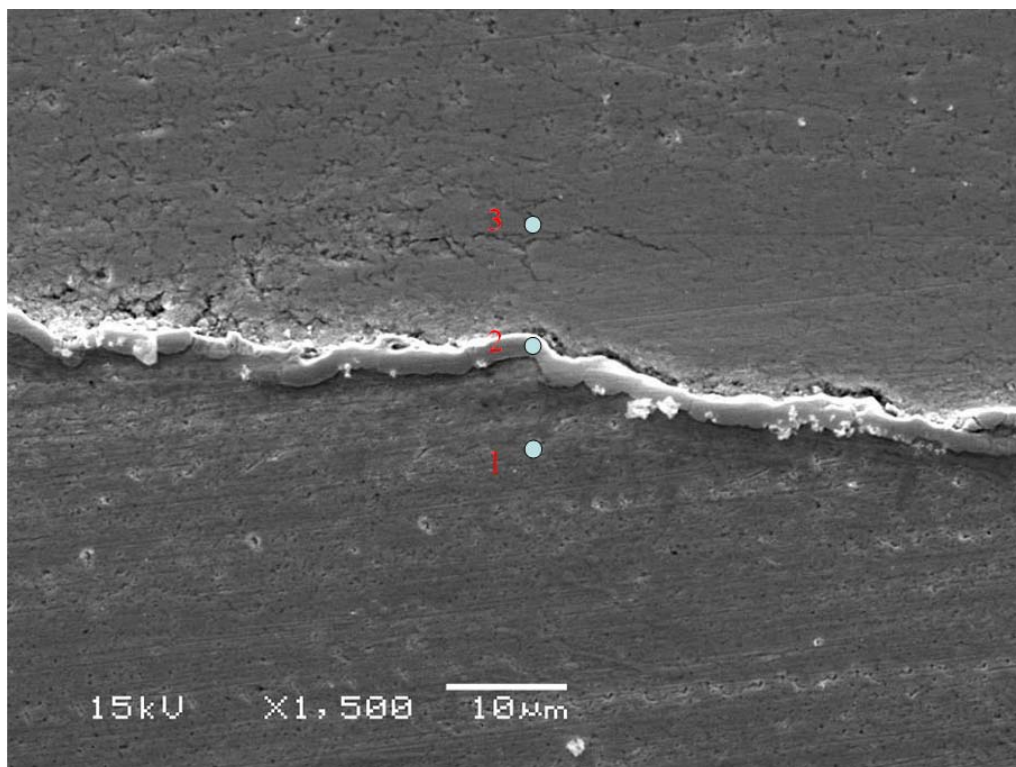
導電率 (S/cm)			
編號	鍍膜前	焊接後	退火後
DBST3-1	744.48	741.54	726.67
DBST3-2	750.28	730.77	
DBST3-3	782.14	734.46	718.57
A03-1	1026.98	1010.38	1010.29
A03-2	969.01	968.77	
A03-3	989.95	987.72	992.53

分別在鍍膜前、焊接後與退火後對試片進行 Seebeck 係數之量測，Seebeck 係數量測之結果如表三所示，焊接後試片之 Seebeck 係數變化下降約 10~20V/K，而且下降的幅度都十分接近，這主要是因為增加鍍膜、焊接層與銅電極後，導致熱阻變大使得晶粒的溫差變小，所以導致 Seebeck 係數的下降。經過 200°C 退火 1 小時後發現在鍍 Ni 的晶粒部份，DBST-3#1 與 A03#1 試片之 Seebeck 係數有略為升高之趨勢。此外，在鍍 Ni/Ta 的晶粒部份，DBST-3#3 與 A03#3 卻出現持續縮小之趨勢。

表三、熱電晶粒 Seebeck 係數量測。

Seebeck 係數 ($\mu\text{V/K}$)			
編號	鍍膜前	焊接後	退火後
DBST3-1	215.92	194.14	197.77
DBST3-2	217.64	193.60	
DBST3-3	216.13	196.03	185.31
A03-1	140.49	132.96	136.56
A03-2	152.93	148.30	
A03-3	147.94	132.93	123.22

對 DBST-3#3 試片進行 SEM 觀察(如圖四所示)與 EDS 之分析(如表四所示)，由圖四中可以發現 Ta 鍍膜完整的覆蓋在熱電材料表面，但在熱電材料與 Ta 間卻出現了一些空孔，由表四中之資訊顯示 P-type 晶粒鍍 Ni/Ta 的試片可以有效的阻擋 Sn 與 Cu 的擴散，但仍有 Te 由晶粒擴散到焊料中，這也可以確定熱電材料的成份已經受到改變，因此導致退火後導電率與 Seebeck 係數的衰退。

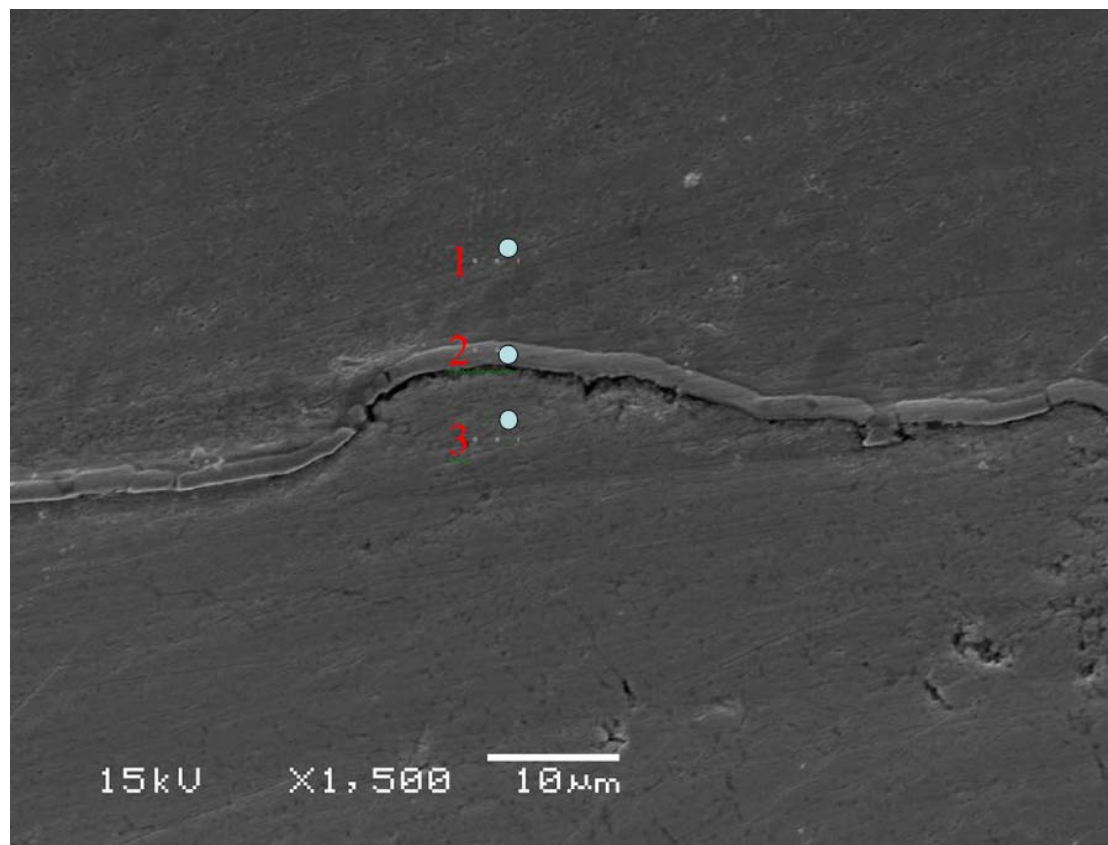


圖四、DBST-3#3 之 SEM 相片。

表四、DBST-3#3 試片 EDS 成分分析之結果。

Element	1	2	3
Al		4.94	
Cu		4.43	
Sn	97.77	3.35	
Sb		9.08	31.34
Te	2.23	20.48	60.86
Ta		54.47	
Bi		3.24	7.80

對 A03#3 試片進行 SEM 觀察(如圖五所示)與 EDS 之分析(如表五所示)，由圖五中可以發現 Ta 鍍膜完整覆蓋在熱電材料表面，且熱電材料部分空孔較不明顯，由表五中之資訊顯示 N-type 晶粒鍍 Ni/Ta 的試片可以有效的阻擋 Sn 與 Cu 的擴散。由上面之結果可以發現不論是 N-type 或是 P-type 鍍 Ni/Ta 的試片可以有效的阻擋 Sn 與 Cu 的擴散，但在 Seebeck 係數部分卻也會造成衰退之現象。



圖五、A03#3 之 SEM 相片。

表五、A03#3 試片 EDS 成分分析之結果。

Element	1	2	3
Ta		90.12	
Cu		3.85	
Sn	100.00	3.32	
Se			8.44
Te			48.53
Ni		3.72	
Bi			43.03

四、結論

本研究利用 Ta 與 Ni 鍍膜作為熱電晶粒之擴散阻障層，並進行其熱電特性變化之研究，擴散阻障層對於熱電模組的可靠度與壽命具有密切的關係，將 Ta 與 Ni 鍍在熱電晶粒上確實可以有效的阻擋 Cu 與 Sn 的擴散，但在熱電特性的量測部分卻發現焊接前後導電率均有下降的趨勢，而退火後卻發現 P-type 材料導電率仍持續下降，而 N-type 材料卻維持不變，這可能是 P-type 晶粒在退火過程由於 Te 析出而出現空孔所致。而 Seebeck 係數部份，焊接後試片之 Seebeck 係數變化下降之幅度都十分接近，主要是因為鍍膜與焊接層導致熱阻變大使得熱電晶粒的溫差變小，而導致 Seebeck 係數的下降。

五、結論

感謝經濟部能源局經費支持，使得本研究得以順利完成。

六、參考文獻

1. A. Majumdar, Thermoelectricity in semiconductor nanostructures, *Science*, Vol. 303, pp. 777-778, 2004.
2. E. Kolawa, J. S. Chen, J. S. Reid, P. J. Pokela, and M.-A. Nicolet, Tantalum-Based diffusion barrier in Si/Cu VLSI metallizations, *J. Appl. Phys.*, Vol. 70, pp. 1369-1373, 1991.
3. I. V Gasenkova. and T. E. Svechnikova, Structural and Transport Properties of Sn-Doped $\text{Bi}_2\text{Te}_{3-x}\text{Se}_x$ Single Crystals, *Inorg. Mater.*, Vol. 40, pp. 570-575, 2004.
4. Y. C. Lan, D. Z. Wang, G. Chen, and Z. F. Ren, Diffusion of nickel and tin in p-type $(\text{Bi,Sb})_2\text{Te}_3$ and n-type $\text{Bi}_2(\text{Te,Se})_3$ thermoelectric materials, *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 92, pp. 101910-1-3, 2008.

5. T. Kacsich, E. Kolawa, J. P. Fleurial, T. Caillat and M.-A. Nicolet, Films of Ni-7 at% V, Pd, Pt and Ta-Si-N as diffusion barriers for copper on Bi₂Te₃, *J. Phys. D*, Vol. 31, pp. 2406-2411, 1998.

甲醇重組器的觸媒燃燒系統之研究

Development of methanol processor combined with catalytic combustor for methanol steam reforming

陳政群¹、呂志興²、金順志³、林育立⁴

Cheng-Chun Chen, Chih-Hsing Leu, Shun-Chih King, Yu-Li Lin

工業技術研究院綠能與環境研究所

Green Energy and Environment Research Laboratories, Industrial Technology
Research Institute, Hsinchu, Taiwan

摘要

甲醇蒸汽重組反應是吸熱反應，必須額外提供熱源，直接使用甲醇燃燒觸媒方式供熱，比起採用電加熱方式，不但提升能源效率，還可以簡化系統設計。本研究利用高活性的甲醇燃燒觸媒(Pt/Al₂O₃)，在室溫環境可以催化甲醇水溶液進行燃燒，不需要額外的電加熱系統。平板式微流道甲醇燃燒器，從室溫起燃只要2-3分鐘，燃燒區的最高溫可以達到350°C，甲醇的燃燒效率超過99.9%以上，燃燒的最終產物為二氧化碳與水氣。

關鍵字：甲醇蒸汽重組、觸媒燃燒、甲醇重組

Abstract

The methanol steam reforming (SRM) system must be heated because the SRM reaction is endothermic. In this regard, using catalytic combustors as the heating device is a better choice than using electrical heaters. We have successfully demonstrated that it is possible to obtain acceptable start-up times for a methanol reformer without utilising electrical energy to heat the components of the system. The temperature of the micro-channel plate of the catalyst bed was over 350°C (local maximum temperature) after start-up of 2-3min. Both conditions showed greater than 99.9% methanol conversion to H₂O and CO₂. This implies that degradation of Pt/Al₂O₃ was insignificant during the experiment.

Keywords: Methanol steam reforming, catalytic combustor, methanol processor

¹ 工業技術研究院綠能與環境研究所，研究員，E-mail: charliechen@itri.org.tw

² 工業技術研究院綠能與環境研究所，資深研究員

³ 工業技術研究院綠能與環境研究所，研究員

⁴ 工業技術研究院綠能與環境研究所，資深研究員兼室經理

一、前言

1.1 燃料電池

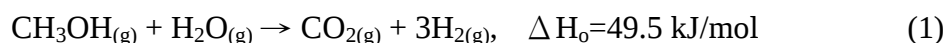
燃料電池(Fuel Cell)可以將化學能直接轉換成電能，不受卡諾循環的限制，具有零污染、高效率、低噪音、低振動的優點，適合取代高污染與低效率的傳統引擎。近年來歐、美、日先進國家都將燃料電池研發列為重點科技之一。

氫氣是燃料電池的主要燃料，使用純氫(高壓鋼瓶、液態氫氣或儲氫罐)會有儲存、攜帶與安全的問題，目前加氫站尚未完全普及，燃料電池的發展將大幅受到限制。使用碳氫化合物(甲醇、乙醇、汽油、柴油、甲烷、天然氣、液化石油氣…)作為供氫的來源[1]，在體積、重量、能量密度與方便性，都比純氫佔優勢。

1.2 甲醇重組產氫

碳氫化合物經過重組反應會產生富氫氣體(hydrogen-rich stream)，其中氫氣的濃度約 30-75%，另外含有二氧化碳、氮氣、水氣與少量的一氧化碳。甲醇與其他燃料相較之下，具有燃料品質高、重組反應溫度(280°C)低，且在常溫下為液體易於儲存等特性，安全性比純氫高，所以甲醇適合當重組器的燃料。

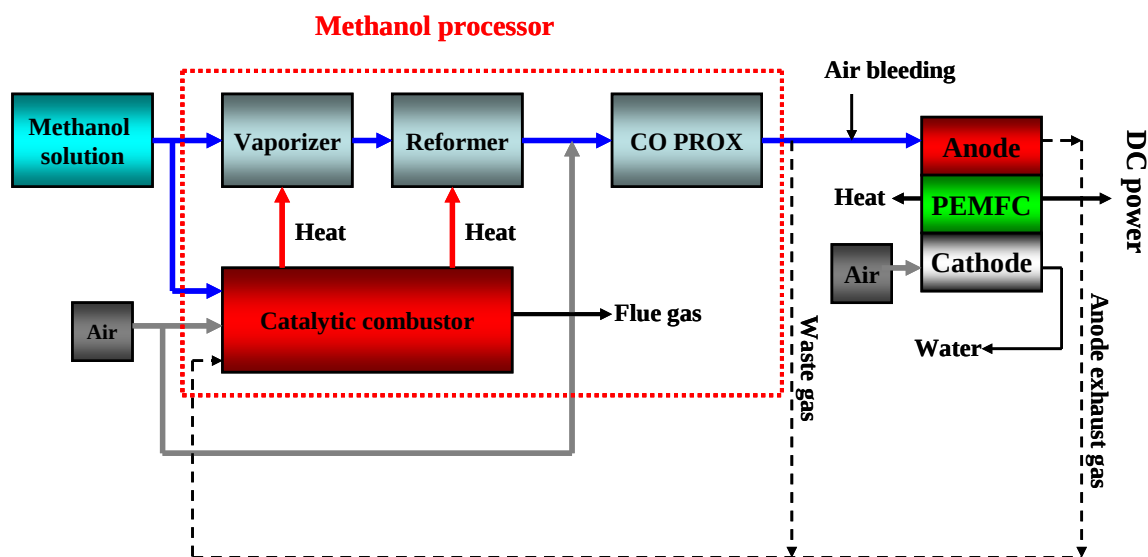
甲醇重組產氫的方式有四種：(1)甲醇直接分解(methanol decomposition, MD) (2)甲醇蒸汽重組(steam reforming of methanol, SRM) (3)甲醇部份氧化重組(partial oxidation of methanol, POM) (4)甲醇氧化蒸汽重組(oxidative steam reforming of methanol, OSRM)又稱甲醇自發熱重組(autothermal reforming, ART) [1]。這四種產氫方式，以甲醇蒸汽重組反應(Eq.1)產氫量最高(75%)，相對增加燃料電池的效率，但是 SRM 是吸熱反應需要額外的熱源。



1.3 甲醇重組器

重組器的主要功用是將碳氫化合物轉換成氫氣，以提供燃料電池所需的氫氣。一般甲醇蒸汽重組器的主要單元有：燃料預熱單元、甲醇重組單元、觸媒燃燒單元與 CO 去除單元，如圖一所示[1]。甲醇觸媒燃燒器是提供熱源給甲醇水溶液汽化與蒸汽重組反應，產生的富氫氣體中會含有少量(約 1-2%)的 CO，須經 CO 純化器，去除富氫氣體中的 CO 至 10ppm 以下，才可以給燃料電池使用[2]。

好的重組器必需具備：啟動反應時間短(<20 分鐘)、能源密度高、氫氣濃度高(>70%)、CO 濃度低(<10ppm)、反應溫度低(<280°C)、體積小與重量輕等條件[3]。



圖一、甲醇重組器與燃料電池系統示意圖[1]

1.4 甲醇觸媒燃燒反應

因為甲醇蒸汽重組反應(SRM)是吸熱反應，需要提供熱源，常見的供熱方式有：(1)電加熱方式、(2)火星點火與(3)燃燒觸媒。用電加熱方式是最簡單的方法，但是過度的使用電熱，會造成甲醇重組器與燃料電池系統效率大幅降低。用火星點火方式，要小心燃料的迴火問題。利用化學能來供應熱，直接以甲醇當燃料進行燃燒反應，可以得到最佳的能源利用率，甚至不需要電熱系統，簡化系統的設計。

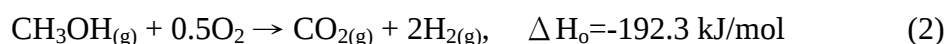
甲醇重組反應文獻資料中使用電加熱有：日本 Casio 公司 Kawamura 等人 2005 年發表晶圓平板式微流道甲醇重組器，利用薄膜加熱器(thin film heaters) [4] 提供反應所需的熱。韓國 KIER 的 Park 等人 2004 年發表不銹鋼的平板式微流道甲醇重組器，使用電熱供給重組所需熱源[5]。韓國延世大學 Shin 等人 2006 年發表陶瓷平板式微流道甲醇重組器，利用電加熱棒(heating rods)供給重組的熱源[6]。在文獻資料中使用觸媒燃燒供熱，燃料有很多種選擇：氫氣[7]、甲烷、丙烷、丁烷、甲醇[1]。Norton 與 Vlachos 等人發表氫氣可以與 Pt 觸媒產生自燃反應[7]。

1.5 甲醇觸媒燃燒的反應機制探討

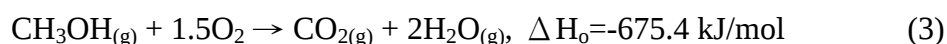
甲醇當燃燒燃料的相關研究比較少，甲醇的燃點將近 470°C，甲醇燃燒觸媒大部份以 Pt 觸媒為主，Haruta 等人研究甲醇燃燒反應，Pt/Al₂O₃ 觸媒的反應溫度約 100°C [8]，台大化工吳紀聖教授的研究也得到類似的結果，使用 Pt/BN 觸媒，發現可以在室溫環境下進行甲醇觸媒燃燒[9]。Lindstrom 與 Pettersson 研究發表，

甲醇 Pt 與 Pd 觸媒進行燃燒反應，燃燒反應器內部尺寸為 36mm，材質 316SUS，氣體的空間流速(GHSV)20000，燃料與空氣比 5 [10]。Hu 等人發表甲醇與空氣混合，不需要額外的電源下，Pt 奈米觸媒(50-700nm)可以在室溫環境下自燃[11]，甲醇與空氣燃燒的溫度超過 600°C。甲醇的部份氧化反應(0.5O₂)與氧化反應(1.5O₂)反應式如下所示(Eq.2)與(Eq.3)：

甲醇部份氧化反應：



甲醇氧化反應：



甲醇的燃燒(氧化)反應理論氧氣量為 1.5 莫耳，一般文獻資料都添加過量的氧氣至 1.8 莫耳以上。商業化的甲醇重組器的燃燒空氣不易控制，一般空氣幫浦都以全開方式供應燃燒的空氣量。

1.6 研究目的與結果

本研究探討甲醇蒸汽重組器的觸媒燃燒系統的在室溫的起燃情形，改變不同甲醇水溶液濃度、on-off 方式啟動觸媒燃燒器。自製的燃燒觸媒(Pt/Al₂O₃)，不需要額外電熱系統，在室溫環境下甲醇與空氣可以起燃燒(氧化)反應，同時提升甲醇燃燒觸媒的耐久性。

二、實驗方法與步驟

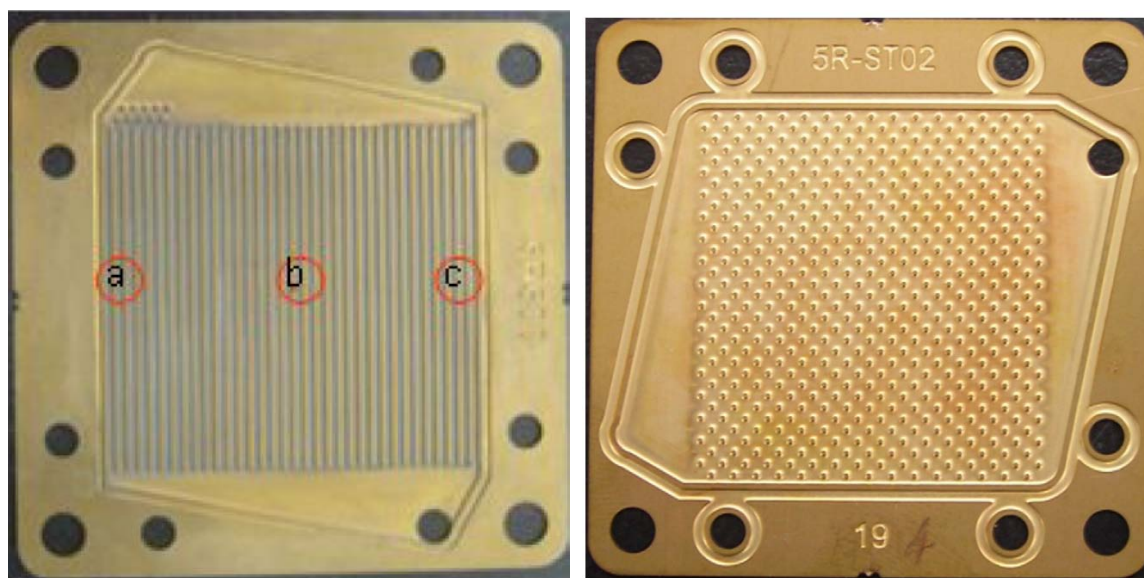
2.1 燃燒觸媒的製備與材料

本研究的 Pt/Al₂O₃ 觸媒燃燒製備方式參考文獻資料[12,13]，有塗佈在微流道與 Al₂O₃ 顆粒上，燃燒觸媒顆粒大小有 2mm 與 4-6mm。使用的甲醇(Merck, HPLC 級，>99.9%)，利用去離子水配置不同濃度的甲醇水溶液，再使用甲醇進料幫浦(BT-100M, Longer)控制甲醇的燃燒與重組的量，空氣流量使用質量流量控制器(mass flow controller, MFC, Alicat Scientific)，最終的氣體組成使用氣相層析儀(gas chromatography, Agilent 6890N)與(non-dispersive infrared, NDIR, NGA-2000, Rosemount)分析 CO, CO₂, H₂, CH₄ 等氣體的組成變化。

2.2 觸媒燃燒器製作

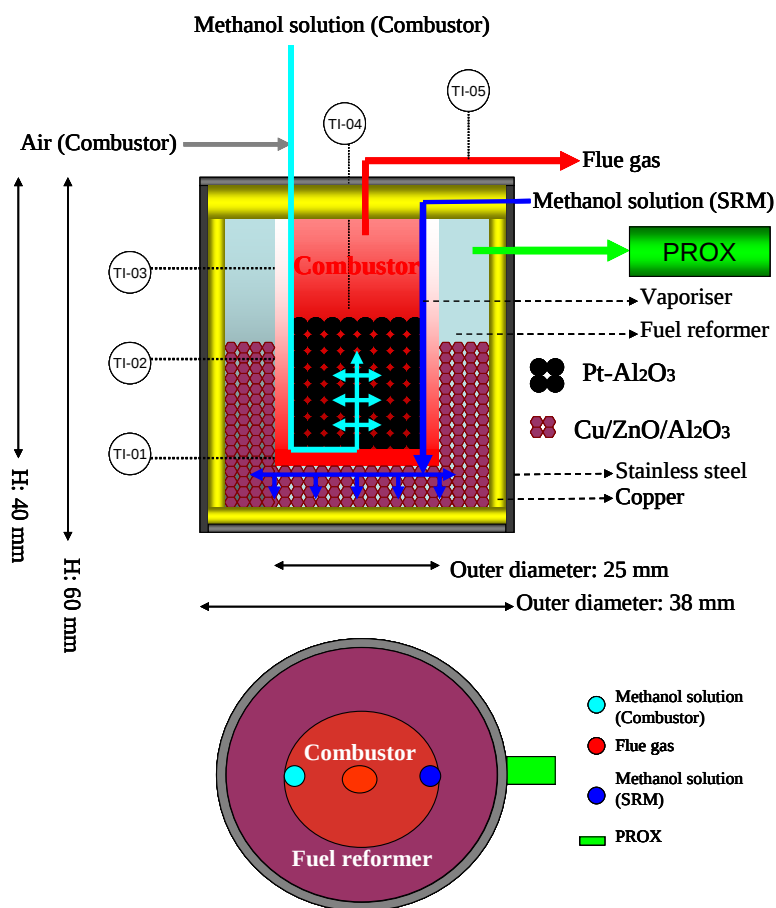
平板式微流道板使用 316SUS 為底材，以化學蝕刻方法製作微流道，微流道

板設計尺寸參數為 50mm × 50mm × 0.5mm (流道 31mm 長 × 33mm 寬)，微流道尺寸設計參數為 0.50mm 寬 × 0.25mm 深 × 0.50mm 脊寬，如圖二所示。以光學顯微鏡量測實際尺寸參數[12,13]。



圖二、不同設計的燃燒微流道板

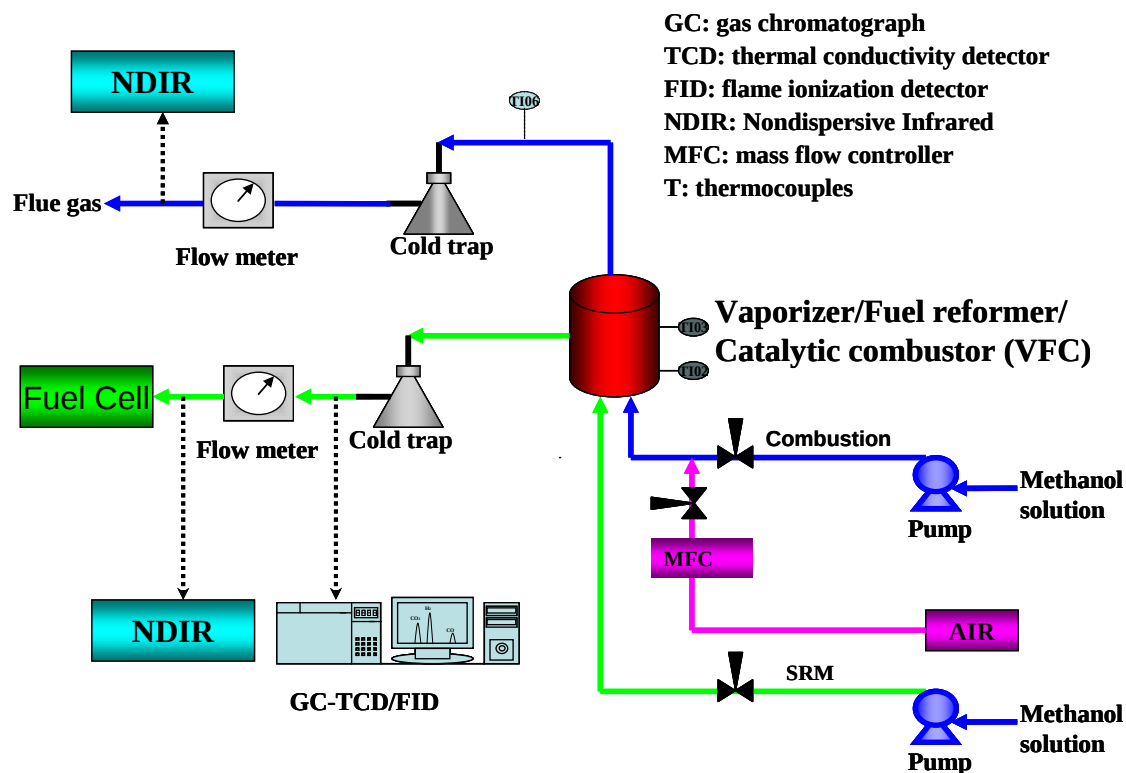
本研究有平版式微流道反應器(圖二)與同心圓的填充床反應器(圖三)，圖三為甲醇重組與觸媒燃燒系統，尺寸大小外徑 38mm 高度 60mm 體積為 68cm³，最內層填充甲醇重組的銅鋅觸媒(Cu/ZnO/Al₂O₃)，外層填充甲醇燃燒觸媒(Pt/Al₂O₃)[1]。甲醇燃燒區有 1 支(TI04)溫度計記錄燃燒的溫度，重組區有 3 支(TI01-TI03)溫度計記錄重組區上中下的溫度變化情形。



圖三、甲醇重組與觸媒燃燒系統示意圖

2.3 實驗裝置

圖四為甲醇重組與觸媒燃燒系統實驗裝置，實驗的操作流程：先起動空氣幫浦，利用質量流量控制器 MFC(mass flow controller, Alicat Scientific)控制所需的空氣量，空氣先通入反應器，等 1 分鐘後確認管線是否正確，再啟動甲醇燃燒幫浦，觀察燃燒的溫度是否有快速上升，同時觀察 NDIR(non-dispersive infrared, NGA-2000, Rosemount)燃燒的廢氣組成變化(CO_2 、 CO 與 VOCs)，約等 10 分鐘後重組區的溫度到達 200°C 時再啟動重組的甲醇幫浦，就會馬上產生富氫氣體，要分析富氫氣體組成前，要使用冷卻裝置去除富氫氣體中的水份，必免水份干擾分析的結果，氣相層析儀 GC (gas chromatography, Agilent 6890N)與可以分析 CO 、 CO_2 、 H_2 、 CH_4 等氣體，記錄產氣量與氣體的組成變成情形。

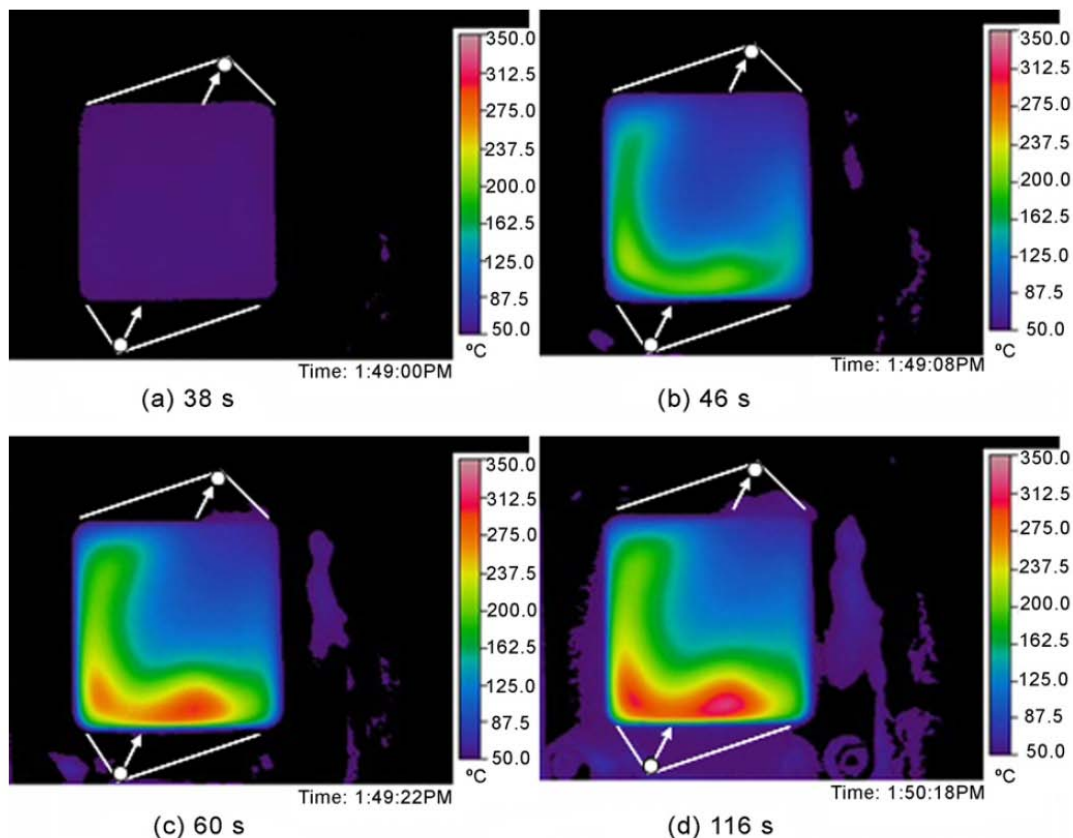


圖四、甲醇重組與觸媒燃燒實驗裝置系統

三、結果與討論

3.1 平板式微流道燃燒器

使用紅外線影像儀可以幫助了解燃燒觸媒床的溫度分佈情形，設計最佳化的微流道，藉以提升燃燒觸媒的使用效率，避免不必要的能源浪費。圖五為平板式觸媒燃燒器甲醇燃燒情形：(a)38 秒甲醇尚未與空氣反應，平板的溫度 $<50^{\circ}\text{C}$ ，在(b)46 秒時甲醇與空氣在燃燒觸媒表面進行氧化反應，甲醇的燃燒反應熱都集中在前端，反應溫度約 200°C ，(c)60 秒時甲醇燃燒的反應溫度已超過 300°C 以上，(d)116 秒時前端的反應溫度 $>350^{\circ}\text{C}$ ，平板後面的溫度約 100°C 左右，表示反應器的溫度尚未達到平衡狀態。紅外線 IR(infrared)影像圖可以證明燃燒觸媒 ($\text{Pt}/\text{Al}_2\text{O}_3$) 可以在室溫起燃。圖五可以了解甲醇觸媒燃燒的反應熱都集中在前端，如何分散局部高溫是反應器設計的 know-how。觸媒燃燒器的溫度僅供參考，燃燒觸媒的溫度會隨觸媒的活性衰退而位移，建議監測燃燒廢氣組成的來協助判斷燃燒觸媒的效果。



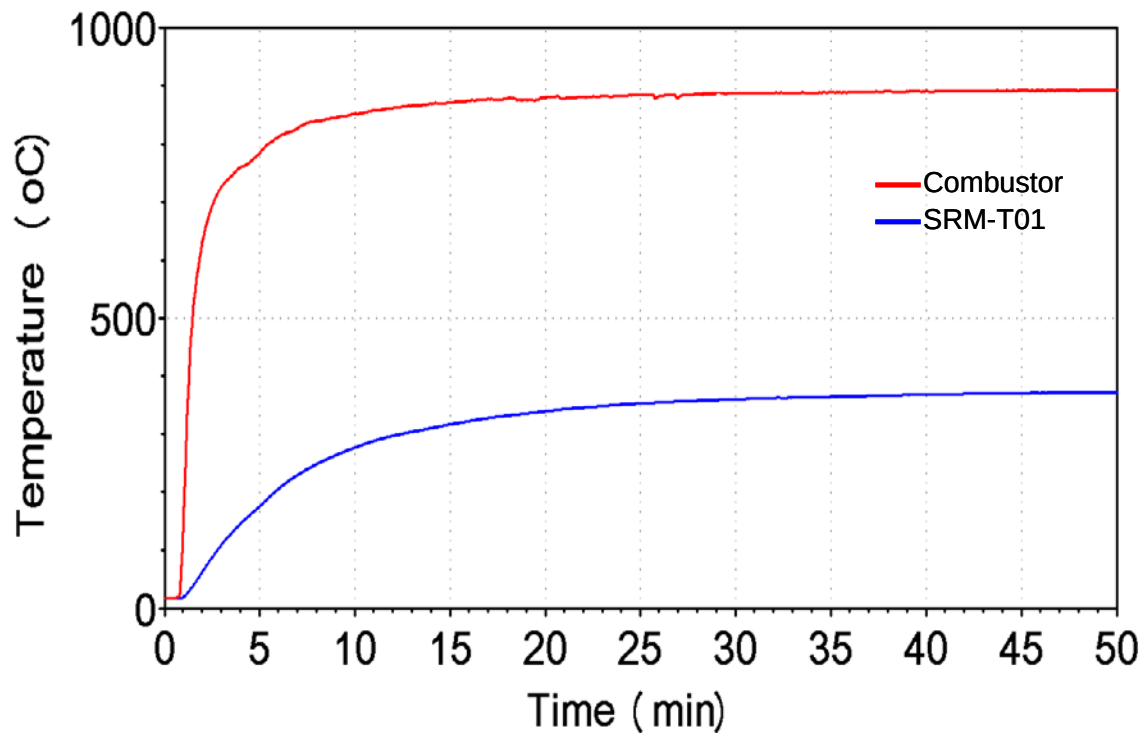
圖五、甲醇在微流道觸媒床燃燒的紅外線影像圖

3.2 燃燒與重組溫度分佈

在文獻中燃燒觸媒常用 Pt 觸媒，並不是 Pt 觸媒就可以再室溫的條件下起燃，自製的 $\text{Pt}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 燃燒觸媒，最初再 90°C 附近為起燃溫度[13]，與文獻資料[8,9]相符合， $\text{Pt}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 觸媒需經過活化處理，才可以降至室溫起燃[12,13]。

圖六為重組燃燒同心圓填充床反應器，反應前的第 0-1 分鐘先通入空氣，先記錄反應器的反應溫度，在第 1 分鐘後開始通入 99.9% 甲醇溶液與空氣進行甲醇燃燒(氧化)反應，在第 2 分鐘時，反應溫度從室溫快速升至 670°C 只要 1 分鐘，填充床的 $\text{Pt}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 燃燒觸媒可以室溫起燃。當燃燒甲醇進料 13 分鐘後燃燒區溫度已快速近達到平衡的溫度 870°C 。證明本究的 $\text{Pt}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 燃燒觸媒可以在室溫環境下可以自燃，不需要額外的電熱。優於文獻[14] Won 等人的研究，他們在反應前先用電熱加熱至 120°C ，再通入甲醇溶液進行甲醇燃燒反應。2009 年 Kolb 等人發表甲醇微流道反應器，在最初的起動時也有設計電熱加熱設備，只使用在最初的起動時間[15]。

重組區的反應溫度在第 12 分鐘已達 300°C ，表示甲醇重器在 15 分鐘內可以產生富氫氣體。重組區空床時 30 分鐘可以達到熱平衡。



圖六、燃料觸媒區與甲醇重組區溫度變化情形

操作條件：Pt/Al₂O₃ 觸媒、觸媒量 5.0 克、99.9% 甲醇進料量 15 ml h⁻¹、燃燒空氣量 75 L h⁻¹、空間流速(GHSV)7560 h⁻¹。

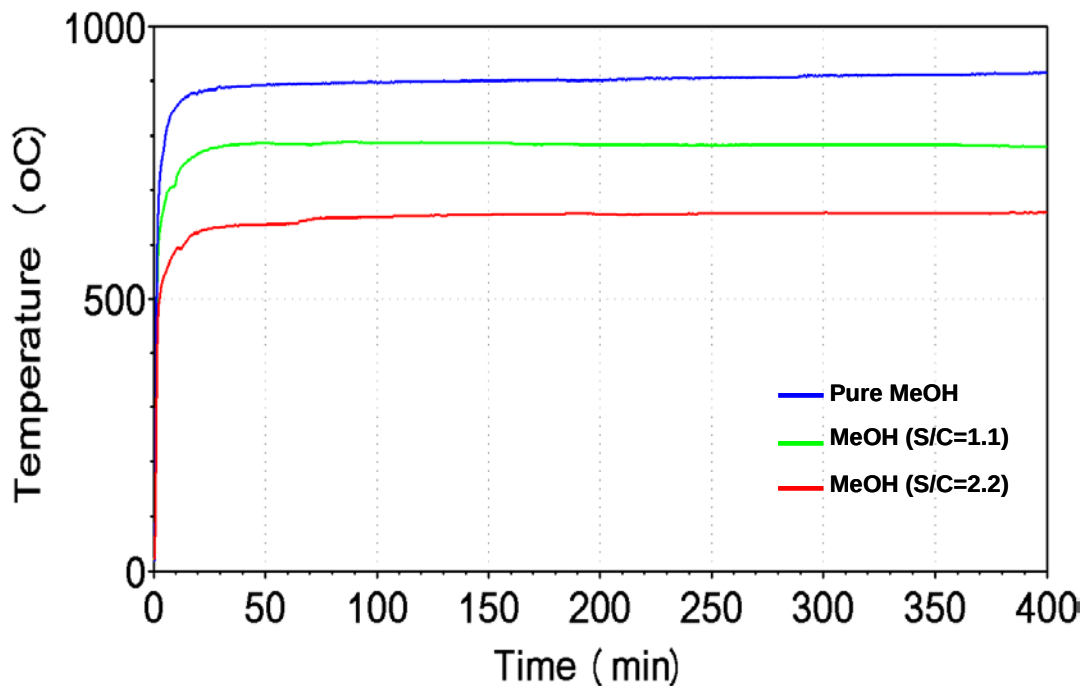
3.3 比較不同甲醇水溶液的燃燒情形

圖六已證明本研究 Pt/Al₂O₃ 燃燒觸媒可以在室溫環境下甲醇可以起燃，不需要額外的電熱設備。進而探討不同甲醇水溶液對室溫起燃的影響，使用甲醇 100Vd.%、67Vd.%(S/C=1.1)及 50Vd.%(S/C=2.2)三種條件，經實驗證明甲醇水溶液從 50-100%都可以在室溫環境下起燃。在文獻資料[1,5,6,12]甲醇重組反應的濃度一般控制在 50-67%(S/C 1.0-2.2)。甲醇蒸汽重組反應的理論甲醇濃度為 67%，為了防止重組觸媒(Cu/ZnO/Al₂O₃)產生積碳情形，都會添加過量的水，文獻中最低甲醇濃度為 50%。因為添加過多的水會造成能源的浪費，甲醇濃度低於 50% 以下就不進行研究探討。圖七比較三種不同甲醇濃度，甲醇濃度愈高(99.9%)燃燒的溫度相對愈高(900°C)，甲醇濃度愈低(50%)燃燒溫度愈低(650°C)，觸媒燃燒區的反應溫度不可以太高(900°C)，否則會造成燃燒觸媒的 Pt 剝落，新鮮的燃燒觸媒外觀是黑色，當燃燒的反應溫度太高(>900°C)，燃燒觸媒的外觀會變成白色，表示 Pt 已剝落所以造成燃燒觸媒的活性衰退，需要更換新的觸媒。Pt/Al₂O₃ 燃燒觸媒的操作溫度建議，控制在 600-800°C 之間為較佳操作溫度。另外，燃燒觸媒在長時間的使用後會活性會衰退，造成燃燒溫度的位移(類似活性碳的吸附情形)，可以從最高燃燒溫度位置來判斷燃燒觸媒的活性，是否要更換燃燒觸媒

的參考依據。

甲醇重組器有 2 個反應單元(重組單元與燃燒單元)需要甲醇進料反應，如果兩者都使用同一種甲醇濃度，可以大幅降低重組器的體積與重量。燃燒觸媒的甲醇水溶液添加少量水可以防止燃燒觸媒的表面積碳，也可以增加燃燒觸媒的壽命與增加燃燒溫度較穩定。商業的甲醇重組器的甲醇濃度一般建議在 65% 左右，所以重組單元與燃燒單元可以使用相同濃度的甲醇水溶液。

甲醇與乙醇及丙酮進行混燒，甲醇(64.7°C)的沸點、乙醇(78.4°C)的沸點與丙酮(56.5°C)的沸點都很低。Pt/Al₂O₃ 燃燒觸媒在室溫的條件下乙醇與丙酮都無法室溫起燃，乙醇可以與甲醇進行混合進料就可以在室溫條件下起燃，燃燒的溫度為甲醇與乙醇的平均值，甲醇與乙醇混合後再添加水份可以減少燃燒觸媒的積碳。丙酮與甲醇進行混合進料也可以在室溫條件下起燃，但是幾分鐘後 Pt/Al₂O₃ 燃燒觸媒馬上失活(積碳)，主因是丙酮的化學鍵。丙酮會造成燃燒觸媒的表面積碳，所以甲醇與丙酮不適合混合進料燃燒，丙酮很容易造成燃燒觸媒的表面積碳。



圖七、改變不同甲醇水溶液燃燒溫度變化情形

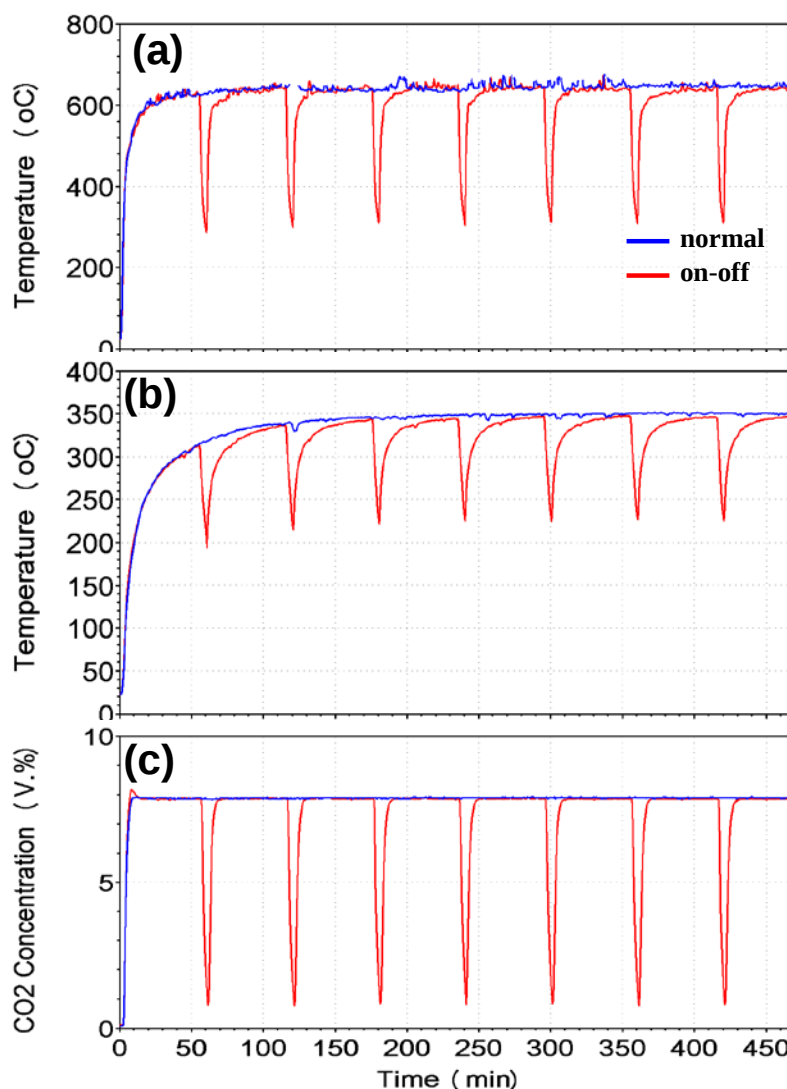
操作條件：Pt/Al₂O₃ 觸媒，觸媒量 5.0 克，甲醇水溶液濃度 99.9%、67%、50%，
甲醇溶液進料量 15 ml h⁻¹、燃燒空氣量 75 L h⁻¹、空氣流速(GHSV)7560 h⁻¹。

3.4 On-off 測試

甲醇重組器為配合使用者的隨意開關條件，必須進行燃燒觸媒的 On-off 測試，每一個循環時間為 60 分鐘，先進料 55 分鐘，再停止進料 5 分鐘，再一直循

環下去。圖八經過 8 次的 On-off 循環 Pt/Al₂O₃ 燃燒觸媒仍未有活性衰退的情形，只要空氣與甲醇水溶液混合就可以再起燃。(a)燃燒的溫度維持在 650°C (b)重組的溫度維持在 350°C (c)為排放廢氣的二氧化碳濃度維持 8%。燃燒廢氣經(GC 及 NDIR)分析後，甲醇的轉化率 >99.9%以上，燃燒的氣體組成為氮氣、二氧化碳、水氣等。

燃燒觸媒要先通入空氣，再隔一段時間(約 1 分鐘)後再添加甲醇水溶液可以防止燃燒觸媒的暫時失活，萬一燃燒觸媒無法點燃，可以使用氮氣(或空氣先清洗)燃燒室，等幾分鐘後，再重新啟動燃燒系統。燃燒空氣使用的空氣需要藉由空氣幫浦，一般的空氣幫浦輸出壓力都很小，造成空氣量很難控制，設備有備壓的問題，所以空氣量無法成線性控制，所以空氣量都選用全開方式，不控制空氣的流量，目前商業化的重組器也不控制空氣的流量。



圖八、燃燒觸媒的 ON-OFF 測試 (a)燃燒溫度 (b)重組溫度 (c)CO₂ 排放濃度
 操作條件：Pt/Al₂O₃ 觸媒，觸媒量 6.0 克，甲醇水溶液濃度 67%，甲醇溶液進料
 量 15 ml h⁻¹、燃燒空氣量 75 L h⁻¹、空氣流速(GHSV)7580 h⁻¹。

四、結論與建議

本研究甲醇燃燒觸媒($\text{Pt}/\text{Al}_2\text{O}_3$)可以室溫起燃，不需要額外的電加熱系統，可以減少系統的體積。觸媒的燃燒溫度太高會造成($\text{Pt}/\text{Al}_2\text{O}_3$)觸媒的剝落，造成觸媒永久性的失效。建議燃燒區的操作溫度不要超過 800°C 。開開始燃燒觸媒的熱都集中在前面，等觸媒的活性衰退才會往後段位移，燃燒觸媒的溫度下降表示觸媒活性逐漸失活。改變不同甲醇水溶液(50-99.9%)，重組與燃燒可以共用相同濃度的甲醇水溶液(67%)，不需要 2 種甲醇水溶液。乙醇與丙酮的沸點都低，在 $\text{Pt}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 燃燒觸媒系統無法室溫起燃，乙醇與丙酮混合甲醇就可以室溫起燃，燃燒溫度是兩者的平均值，丙酮的沸點比甲醇低 8°C ，但是丙酮的燃燒很容易造成燃燒觸媒的積碳。甲醇重組器因有觸媒燃燒單元，不建議再室內使用，建議戶外使用。甲醇與空氣的燃燒莫耳比的理論值是 1.5 莫耳，一般操作都要過量的空氣控制在 1.8 莫耳以上，甲醇的燃燒溫度僅供參考，要以排放的 CO_2 濃度為主。燃料電池的氫氣使用效率約 80%，未反應掉的氫氣，可以回收給燃燒觸媒單元使用，回收廢氫要小心氫氣的回火問題，需要小心設計。

五、致謝

本研究計畫承經濟部能源局的經費支持，能源局計畫編號 101-D0211『氫能技術研究發展與示範計畫(4/4)』，使本計畫得以順利進行，謹此致謝。

六、參考文獻

1. C. C. Chen, M. S. Jeng, C. H. Leu, C. C. Yang, Y. L. Lin, S. C. King, S. Y. Wu, Low-level CO in hydrogen-rich gas supplied by a methanol processor for PEMFCs, *Chemical Engineering Science*, Vol.66, pp.5095-5106, 2011.
2. 陳政群、呂志興、金順志、馬先正、林育立、楊昌中、吳石乙，燃料電池重組器微量 CO 分析技術之研究，第六屆全國氫能與燃料電池學術研討會，宜蘭大學，AH181，2011 年 10 月。
3. 陳政群、陳明德、薛康琳、吳石乙、黃家銘、曾善訓、宋隆裕、顏貽乙，微小型甲醇蒸汽重組器設計與製造，第一屆全國氫能與燃料電池學術研討會，日月潭，pp.598-606，2006 年 11 月。
4. Y. Kawamura, N. Ogura, T. Yahata, K. Yamamoto, T. Terazaki, T. Yamamoto, A. Igarashi, Multi-layered microreactor system with methanol reformer for small PEMFC, *Journal of Chemical Engineering of Japan*, Vol.38, pp.854-858, 2005.
5. G. G. Park, D. J. Seo, S. H. Park, Y. G. Yoon, C. S. Kim, W. L. Yoon, Development of microchannel methanol steam reformer, *Chemical Engineering Journal*, Vol.101, pp.87-92, 2004.
6. Y. Shin, O. Kim, J. C. Hong, J. H. Oh, W. J. Kim, S. Haam, C. H. Chung, The development of micro-fuel processor using low temperature co-fired ceramic

- (LTCC), *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol.31, pp.1925-1933, 2006.
7. D. G. Norton and D. G. Vlachos, Hydrogen assisted self-ignition of propane/air mixtures in catalytic microburners, *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol.30, pp.2473-2480, 2005.
 8. M. Haruta, A. Ueda, S. Tsubota, R. M. Torres Sanchez, Low-temperature Catalytic Combustion of Methanol and its Decomposed Derivatives over Supported Gold Catalysts, *Catalysis Today*, pp.443-447, 1996.
 9. J. C. S. Wu, Y. C. Fan, C. A. Lin, Deep Oxidation of Methanol Using a Novel Pt/Boron Nitride Catalyst, *Ind. Eng. Chem. Res.*, Vol.42, pp.3225-3229, 2003.
 10. B. Lindstrom, L. J. Pettersson, Catalytic oxidation of liquid methanol as a heat source for an automotive reformer, *Chemical Engineering Technology*, Vol.26, pp.473-478, 2003.
 11. Z. Hu, V. Boiadjev, T. Thundat, Nanocatalytic spontaneous ignition and self-supporting room-temperature combustion, *Energy & Fuels*, Vol.19, pp.855-858, 2005.
 12. C. H. Leu, S. C. King, C. C. Chen, J. M. Huang, S. S. Tzeng, I. H. Liu, W. C. Chang, Investigation of the packed bed and the micro-channel bed for methanol catalytic combustion over Pt/Al₂O₃ catalysts, *Applied Catalysis A: General*, Vol.383, pp.43-48, 2010.
 13. 呂志興、陳政群、黃家銘、曾善訓、劉毅宏、金順志，微型重組器之燃燒器開發，第三屆全國氫能與燃料電池學術研討會論文集，台南大學，HY012，2008年11月。
 14. J. Y. Won, H. K. Jun, M. K. Jeon, S. I. Woo, Performance of microchannel reactor combined with combustor for methanol steam reforming, *Catalysis Today*, Vol.111, pp.158-163, 2006.
 15. G. Kolb, K. P. Schelhaas, M. Wichert, J. Burfeid, C. Hebke, G. Bandlamudi, Development of a micro-structured methanol fuel processor coupled to a high-temperature proton exchange membrane fuel cell, *Chemical Engineering Technology*, Vol.32, pp.1739-1747, 2009.

化學迴圈技術-二氧化碳捕獲之機會與挑戰

Chemical Looping Technology – Opportunity and Challenge of CO₂ Capture

彭鏡禹¹、徐恆文²

Ching-Yu Peng, Heng-Wen Hsu

工業技術研究院綠能與環境研究所

Green Energy and Environment Laboratories, Industrial Technology Research Institute

摘要

CO₂ 排放造成氣候變遷之影響，已成為全球關注之焦點。在各種排放源中，火力發電廠所占比例相當高，如能將電廠煙氣之二氧化碳加以捕獲，將可有效達成減量目標，符合京都議定書規範。因此世界各國莫不積極投入二氧化碳捕獲技術之研發，目前發展中之各類技術例如化學吸收、物理吸附、薄膜分離、純氧燃燒等，理論上均是可行的，然而設備成本高及能源耗損量大，是亟需努力克服之瓶頸。

化學迴圈乃新興的技術，由於兼具高能源效率、低污染排放及低成本二氧化碳捕獲之特性，因此美國能源部評估其為最前瞻的能源系統與二氧化碳捕獲技術，未來有極大應用潛力可以解決二氧化碳排放之問題。本文將說明化學迴圈技術之原理，國際較先進的化學迴圈技術發展現況，並探討我國未來發展之機會與挑戰。

關鍵字：化學迴圈、二氧化碳捕獲、能源效率

Abstract

CO₂ emission is the major cause of Climate change, which is becoming an issue of global concern. There are many emission resources; nevertheless, power plant makes the most contribution. If it is possible to capture CO₂ from the power plant flue gas, that will be much helpful to satisfy the target of Kyoto protocol in order to reduce green house gas emission. Therefore, most of the countries are doing their best effort to develop CO₂ capture technologies. In principle, current under developing technologies such as absorption, membrane and Oxy combustion are feasible, however, extensive increased system cost and energy consumption will be the bottleneck of the technologies.

¹ 工業技術研究院綠能與環境研究所，研究員，E-mail: gene@itri.org.tw

² 工業技術研究院綠能與環境研究所，正工程師

Chemical Looping has the advantages of high energy efficiency, low pollutant emission and low cost of CO₂ capture. The US DOE evaluates chemical looping to be the most advanced energy system and CO₂ capture technology. It has very good potential to result the CO₂ problem in the future. In this paper, principle of chemical looping and the international development status will be discussed. The challenges and opportunities to development chemical looping in Taiwan will also be explored.

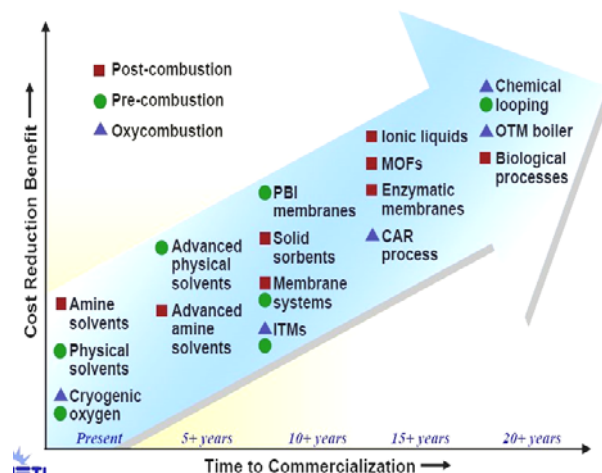
Keywords: Chemical looping, CO₂ capture, energy efficiency

一、前言

根據聯合國政府間氣候變遷小組(IPCC)2007 年各種情境分析報告之預測，如無法有效控制溫室氣體排放，除了可能造成全球暖化、氣候變遷，並將衍生水源、食物短缺、海岸侵蝕及生態破壞，進而造成物種之滅絕[1]。面對此嚴峻之挑戰，世界各國莫不積極發展各種對策與技術，以降低二氧化碳之排放。相關之減排對策包括：發展節能技術提升能源效率、採用低碳燃料及將所排放之二氧化碳捕獲封存。前兩項對策雖然可行，但減排效益有其極限，必須再藉助二氧化碳捕獲與封存技術才能機會有效達成減排目標。

目前全球的能源主要仍依賴化石能源供應，因此在全球各種二氧化碳排放源中，火力發電廠佔 40%以上之比例[2]。我國由於天然資源缺乏，對化石能源依賴更甚。根據經濟部能源局統計各分類部門，2010 年能源部門即佔總量的 65%以上[3] (不包括電力消費排放)。原本期待核能技術能減輕部分二氧化碳排放量，但日本 311 大地震造成之核污染問題，各國均引以為鑑，未來可能逐步調整依賴核能發電之策略，短期內對火力發電廠的供應比重恐怕難以降低，甚至還會增加。因此，我國要達成降低二氧化碳排放量目標，將發電廠煙氣中之二氧化碳捕獲並加以封存，是最有效的辦法。

目前國際積極發展中之各類二氧化碳捕獲技術相當多，例如化學吸收、物理吸附、薄膜分離、純氧燃燒等，理論上均是可行的，然而設備成本及能源耗損量相當高，技術應用於二氧化碳捕獲，將會大幅增加發電成本，是目前亟需努力克服之瓶頸。新興的技術中，化學迴圈技術兼具高能源效率、低污染排放及低成本二氧化碳捕獲之特性，圖一分析各種二氧化碳捕獲技術之成本效益，化學迴圈是所有技術中成本最低者，因此美國能源部評估其為最前瞻的二氧化碳捕獲技術[4]。



圖一、美國能源部對各種二氧化碳捕獲技術之成本效益評估[4]

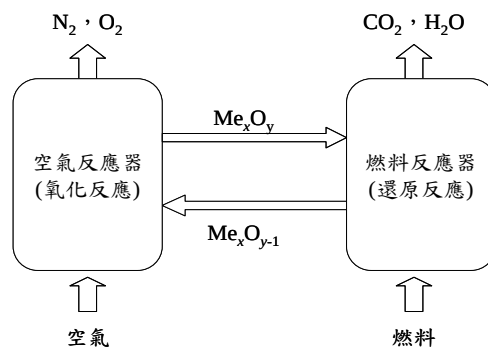
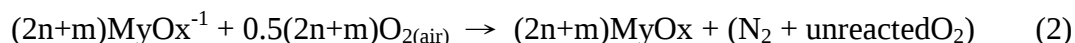
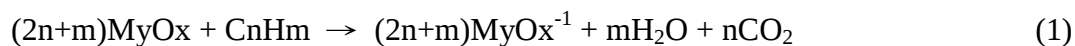
以下將說明化學迴圈技術之原理，國際較先進的化學迴圈技術發展現況，並對我國未來發展之機會與挑戰進行探討。

二、化學迴圈原理

傳統的燃燒技術，乃利用空氣與燃料混合燃燒來產生能源，由於空氣主要成分為氮氣，燃燒後主要產物為二氧化碳及水會與大量氮氣混合在一起。因此一般燃燒後之煙氣所含二氧化碳濃度偏低，約僅 10-15%，如要捕獲並封存這些低濃度的二氧化碳，需消耗相當的設備成本及能源。此外經高溫燃燒，煙氣會產生大量的氮氧化物(NO_x)，處理成本也相當高。近年來積極發展的純氧燃燒技術，在燃燒前將空氣中之氮氣及氧氣進行分離，提供高純度氧氣供燃燒所需，因此可獲得二氧化碳濃度相當高之煙氣。但是氮氣及氧氣分離設備之成本及耗能相當高，約佔發電系統之 23-37% [5]，因此在應用上，必須慎重考量純化氧氣所對應的成本問題。

有別於傳統燃燒技術，化學迴圈技術的燃燒機制類似純氧燃燒，如圖二所示，將金屬氧化物與燃料混合，使金屬氧化物在燃料反應器內進行還原反應，釋出氧氣給燃料燃燒，其反應如方程式(1)所示。由於反應器內沒有氮氣，且通常反應溫度小於 1000°C，因此燃燒產物主要為高濃度的二氧化碳及水蒸汽，且不易生成氮氧化物，氣體經過冷凝即可取得高純度二氧化碳。將被還原的金屬輸送至空氣反應器利用空氣提供氧氣，使金屬進行氧化反應而回復到金屬氧化物形式，其反應如方程式(2)所示。如此，金屬氧化物可在兩反應器間循環進行還原與氧化的迴圈反應。反應器根據金屬的反應機制，與燃料反應時進行還原反應，稱為燃料反應器或還原反應器；與空氣混合時進行氧化反應，稱為空氣反應器或氧化反應器。由於金屬氧化物在整個迴圈內扮演攜氧者之角色，一般稱其為載氧

體(Oxygen Carrier)。



圖二、化學迴圈技術原理架構圖

合併方程式(1)及(2)，如方程式(3)所示，等於傳統空氣助燃的反應：



傳統燃燒與化學迴圈技術兩者相比較，燃燒熱是相同的。但由於化學迴圈技術燃燒燃料時，沒有大量氮氣的影響，因此燃燒效率較高。如表一所示，根據美國俄亥俄州立大學(Ohio State University OSU)所發展技術之效率分析，化學迴圈技術相較於傳統燃燒或煤氣氣化技術，其能源效率高出許多。此外，所產生的煙氣可以自然分離出高純度二氧化碳，且不易產生氮氧化物，因此煙氣處理所需耗費的能源及成本遠較其他技術低非常多。

表一、OSU 化學迴圈技術與其他燃燒技術能源效率模擬分析

	煤炭氣化 (IGCC)	燃氣化學 迴圈燃燒 (SCL)	煤炭化學 迴圈燃燒 (CDCL)	IGCC 燃 氣轉氫氣	SCL 產氫	CDCL 產氫
煤進料率(Ton/hr)	132.9	132.9	132.9	132.9	132.9	132.9
碳捕獲率(%)	90	100	100	90	100	100
氫氣產率(Ton/hr)	0	0	0	14.4	15.6	20.0
電力產率(MW)	321	365	435	2.1	26	3
能源效率(%)	32.1	36.5	43.5	57.8	64.1	79.0

註 1：能源系統以 1000MWth 為基準

註 2：IGCC 燃氣利用高溫水煤氣反應(Water Gas Shift Reaction)轉化為氫氣

註 3：化學迴圈利用高溫水蒸汽使還原金屬氧化產生氫氣

由於具有上述優點，使化學迴圈技術極具潛力，可視為高效率能源系統與二氧化碳捕獲之新機會，未來新建的能源系統，極可能扮演非常重要之角色。近年來國際間投入化學迴圈技術之研發者越來越多，研究重點主要集中在三個方向：(1)載氧體開發(2)反應系統設計與應用研究，將分別進行說明。

三、載氧體研究開發

近十年來，國外陸續已有約 40 個研究單位投入化學迴圈技術研發，除了少數有發展化學迴圈系統設備技術外，大多數主要著重在載氧體之開發。

載氧體之供氧能力、效率與耗用成本，是影響成本與技術競爭力極為重要之一環，因此國際各界之研發，往往著重如何在選擇與發展各種材質的載氧體配方，以提升載氧體攜氧量、機械強度、燃料轉化率、重複使用次數，並致力於降低製造成本。國際上最常使用，各種適合作為載氧元素特性分析如表二，茲說明如下：

表二、各種載氧元素特性分析

元素	載氧體	還原態	機械強度	最高供氧量%	技術成熟度	價格	蘊藏量
Ca	CaSO ₄	CaS	差	47.0	低	低	+++++
Mn	Mn ₃ O ₄	MnO	中	7.0	中	高	++
Fe	Fe ₂ O ₃	Fe ₃ O ₄	優	3.3	中	低	+++++
Fe	Fe ₂ O ₃	FeO	優	10.0			
Fe	Fe ₂ O ₃	Fe	優	30.1			
Ni	NiO	Ni	中	21.4	高	極高	+
Cu	CuO	Cu	中	20.1	高	高	++

目前國際載氧體研究主要發展方向說明如下：

3.1 氧化鎳 NiO：

- (一) 反應活性最大，視系統設計條件，理論最高供氧量 24% [6]。
- (二) 為目前最多研發投入者選用之載氧體原料。
- (三) 價格高、蘊藏量少、廢棄物對環境不友善，是其發展之主要瓶頸。

3.2 三氧化二鐵 Fe₂O₃：

- (一) 反應活性中等，視反應轉化程度而定，還原態可以為 Fe₃O₄、FeO 及 Fe 對應的理論最高供氧量分別為 3.3%、10.0%及 30.1%。
- (二) 鐵系載氧體具有機械强度高，價格低、蘊藏量豐之優點，研發者逐漸增加，

有取代氧化鎳成為發展主流之趨勢。

3.3 氧化銅 CuO：

- (一) 理論最高攜氧量 20.1%，反應活性高。
- (二) 價格高、蘊藏量少、廢棄物對環境不友善。
- (三) 氧化銅熔點偏低，不適合高溫反應。

3.4 硫酸鈣 CaSO₄：

- (一) 優點：價格最低、蘊藏量最豐、攜氧量極高(47%)。
- (二) 缺點：(I) 900°C 以下反應活性較差，提高溫度可加快反應速率。但高溫時硫原子容易釋出，CaS 還原態不易形成，造成硫排放污染及氧化還原反應迴圈之破壞。(II) 機械強度最差，磨耗率高。

由於上述缺點，硫酸鈣雖然是攜氧量最高之載氧原料，較少被採用作為研發材料。

3.5 上述載氧體混合添加劑，提高加成果效。

(一) 反應促進劑之添加

單一載氧材料受其物質特性影響而有所限制。因此有很多研究探討混合添加劑，以提高其加成果效。例如便宜的氧化鐵反應速率較慢，但添加少量昂貴的氧化鎳後，可提升其反應效率到接近採用純氧化鎳之效果[7-9]。然而添加氧化鎳於氧化鐵中，雖然可以提升反應效率，但由於氧化鎳使用後屬於有害廢棄物，使得原本無害的氧化鐵因摻配氧化鎳而帶來後續廢棄物處理之困擾。因此添加劑之選擇必須慎重考量各種利弊得失。

(二) 惰性載體之使用

惰性載體並不參與氧化還原反應，主要功能在於提供良好的反應結構、增加機械強度與高溫抗燒結團聚之能力，以便提高載氧體之反應效率、降低磨耗及活性成分之衰退，增加載氧體可氧化還原之次數。目前常用的惰性載體包括：Al₂O₃、SiO₂、MgO、NiAl₂O₃、MgAl₂O₄、TiO₂、ZrO₂、YSZ 等。其中，MgAl₂O₄ [6、10、11]最常被採用，探討之文獻也最多。惰性載體之使用雖然可以提升載氧體之性能，但使用過多則會降低真正參與反應的載氧體之比例，目前文獻常見的惰性載體摻配比例大約在 40~60%之間[6]，因此混合物之實際供氧量將比載氧體原料之理論供氧量減少約 50%。

除了採用合成材料方法配置載氧體，由於加工成本偏高，因此尋找與測試各種價格低廉、礦產豐富且具有良好載氧體性質之原料礦石也是國際研究努力的方向之一[12-14]。

國內目前相關之研究以工業技術研究院及台灣科技大學較為積極，所開發之載氧體以鐵系載氧體為主。

四、反應系統設計與應用研究

化學迴圈反應系統設計，主要考量著重於：

1. 燃料與載氧體之間能有良好的接觸，同時考量多相反應動力，以達到理想的反應效率。
2. 載氧體在反應器間之循環及輸送控制需要分明而且順暢。
3. 反應器間具備良好的氣密性，避免彼此產生之氣體混合摻雜，降低二氧化碳的捕獲濃度。
4. 簡化系統複雜度，降低系統之成本與操作困難度。

世界各國相繼研發了各種不同形式之反應系統，表三摘要說明了幾個國際較重要研發單位之反應系統發展現況。

表三、國際重要化學迴圈研發單位反應系統發展現況

化學迴圈 技術	奧地利 Vienna 大學	中國 東南大學	挪威 BIGCO ₂	西班牙 CSIC	瑞典 Chalmers 大學	美國 OSU
載氧體	Ni 系	Ca 系、Ni 系、Fe 系等	Ni 系、Co 系、Fe 系、La 系	Cu 系、Ni 系、Fe 系等	Ni 系、Fe 系、Mn 系等	Fe 系
進料	H ₂ 、CH ₄	CH ₄ 、煤、松木屑	天然氣	甲烷、合成氣	天然氣、合成氣、煤、石油焦	合成氣、煤、生質物
反應器	流化床	流化床	旋轉式	流化床	流化床	移動床
規模 kWth	120	10	100	10	10	25 (註 1)
CO ₂ 捕獲 率 %	>98%	>98%	>98%	>98%	>98%	>99%

註 1：OSU 250kWth 實廠示範系統建造中

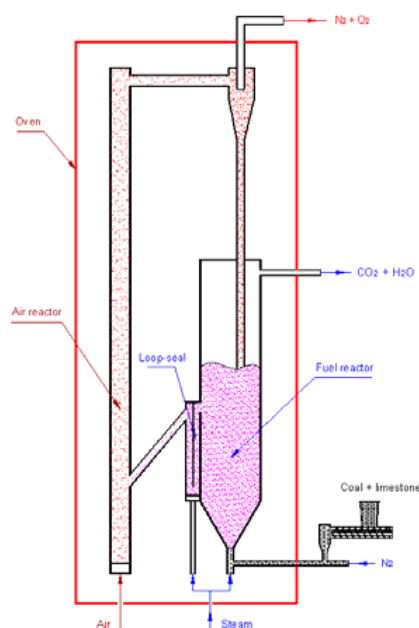
4.1 流體化床反應器

如圖三所示為中國東南大學開發的串行流體化床系統，由兩個流體化床串聯，分別負責燃料與空氣兩反應器之功能。由於流體化床技術成熟度高，具有良好的熱傳導與混合性，因此國際上大多數研發機構均採用流體化床技術進行測試

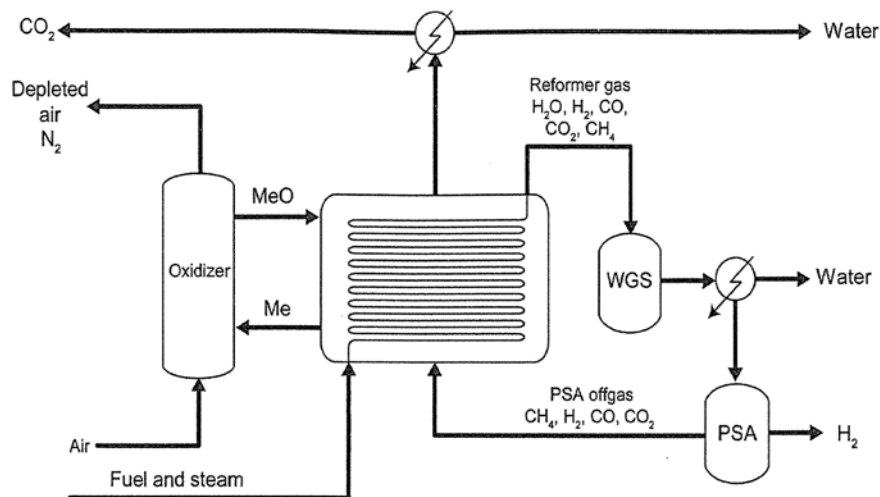
研發，目前發展中之技術系統規模從 10kWth 至 100kWth 不等。研發努力的方向主要是改善載氧體與設備間之磨耗、二氧化碳收集端如何避免被其他氣體混合稀釋、提升系統之流體化性能及能源耗用量之降低。

除了二氧化碳捕獲，化學迴圈流體化床的應用還可以有很多衍生的應用，如圖四所示瑞典 Chalmers 大學提出的程序，將燃料、水蒸汽及載氧體一起導入燃料反應器，使其發生如同重組器之作用(Reformer)，產生甲烷、一氧化碳、二氧化碳、水蒸汽等成分，再將這些氣體導入高溫水煤氣反應器，即可產生蒸汽。被還原的載氧體則被導入空氣氧化器氧化，而形成一個可以產氫之化學迴圈系統。

然而，由於流體化床採用載氧體與氣體同向流動(cocurrent flow)的方式，載氧體出口端的二氧化碳濃度偏高，將影響載氧體之還原能力。以三氧化二鐵為例，在流體化床內反應，其終極還原態只能成為理論最高供氧量 3.3% 的 Fe_3O_4 ，而無法成為還原態供氧量更高的 FeO (10.0%) 及 Fe (30.1%)。因此，如採用鐵係合成材料的載氧體，且以流體化床為反應系統，其載氧體單位質量供氧量將 < 2%。此將大幅增加反應系統內載氧體之負載量、設備體積及相關的硬體與操作成本。



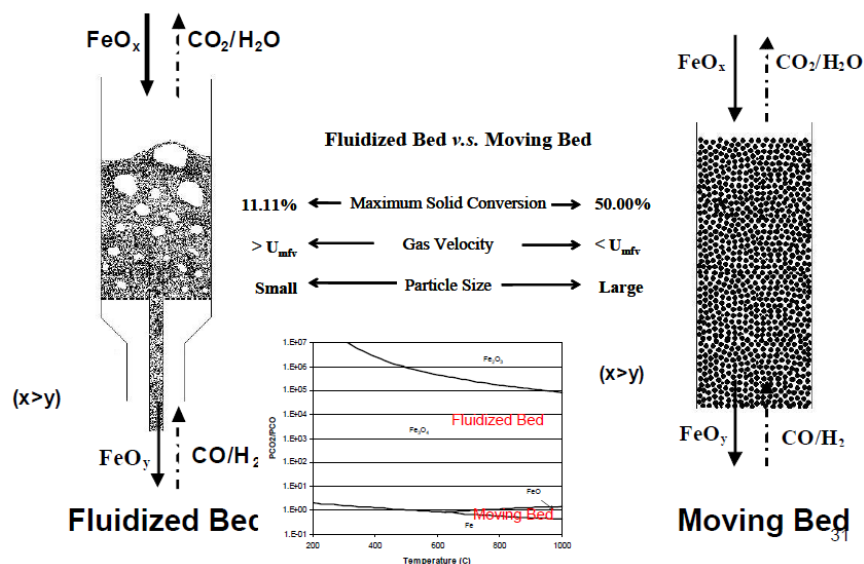
圖三、中國東南大學串行流體化床化學迴圈系統示意圖[15]



圖四、瑞典 Chalmers 大學之流體化床化學迴圈產氫系統示意圖[16]

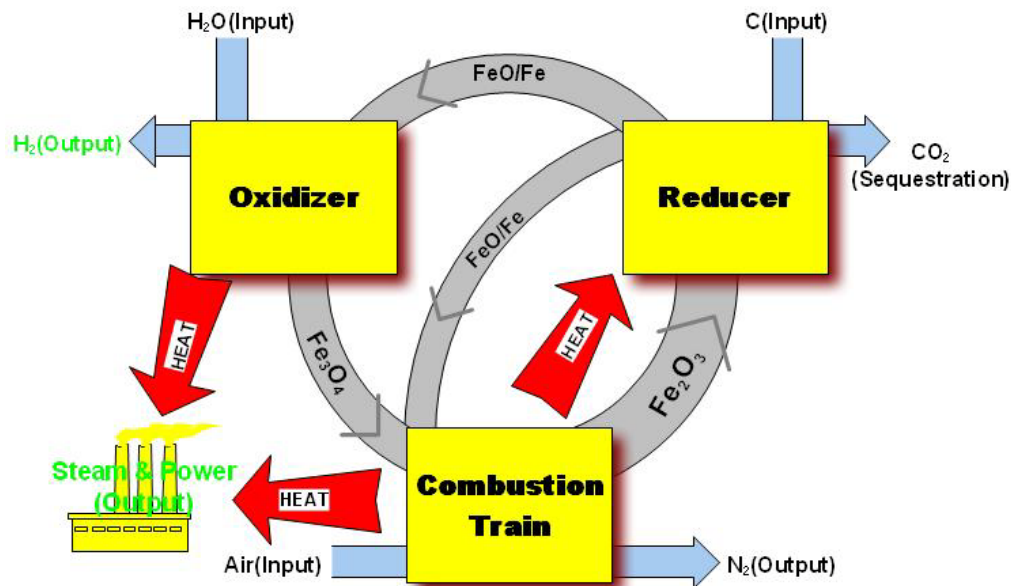
4.2 移動床反應器

OSU 提出的移動床反應器構想，採用載氧體與氣體逆向流動(counter current flow)的方式，如圖五所示，載氧體出口端的二氧化碳濃度最低，因此可令載氧體之還原極大化。以三氧化二鐵為例，在移動床內反應，如提供足夠的滯留時間，其終極還原態可以成為更高階的 FeO (10.0%) 甚至 Fe (30.1%)。因此，如採用移動床為反應系統，將有效提升載氧體單位質量之供氧量。此將大幅降低反應系統內載氧體之負載量及系統相關成本。



圖五、流體化床與移動床氣體分壓影響系統氧化還原能力比較分析[17]

由於採用移動床做為反應器可以將氧化鐵做更高階的還原，如方程式(4)、(5)所示，還原態金屬與水蒸汽反應可以進一步產生氫氣。



圖六、OSU 三反應器化學迴圈系統示意圖[17]

有別於傳統化學迴圈僅有燃料與空氣兩個反應器，OSU 進一步發展為三個反應器之系統，如圖六所示，在燃料與空氣兩個反應器之間增加一道部分氧化器 (Oxidizer)，令高度還原態的 FeO 及 Fe 與水蒸汽反應來生產氫氣。系統操作可以保持彈性，如要盡量生產氫氣，則讓載氧體進行三反應器之迴圈。如要全部發電，則可越過部分氧化器，僅進行傳統的燃料與空氣兩反應器迴圈。

利用移動床反應器的優勢是可以提升反應之轉化率同時可以利用簡單的程序進一步生產氫氣，同時大幅降低系統的負載率與相關成本。然而，移動床技術成熟度較低，熱傳導及反應物混合效果較差，未來仍需投入很多的努力進行最佳化系統設計與操控技術研發。

五、結論與討論

5.1 反應器技術

分析應用流體化床及移動床於化學迴圈系統優劣點如表四：

表四、應用流體化床及移動床於化學迴圈系統優劣點之比較

	流體化床	移動床
技術成熟度	高(設備規模放大較容易)	中等
熱傳導效果	優	中等
反應物混合效果	優	中等
反應物轉化率	劣	優
載氧體負載量	劣(1MWth 系統>14ton/hr)	優(1MWth 系統<3ton/hr)
系統大型化可行性	劣(高負載量系統可能過於龐大)	中等(需更成熟移動床技術)
系統操作動力成本	劣(高載氧體負載量)	優
系統體積及成本	劣(高載氧體負載量)	優
適用固體燃料	劣	優
能否低成本產氫	劣(程序較複雜)	優
與灰份分離難易程度	難(載氧體粒徑小)	易(載氧體粒徑大)
系統降載率	優	劣

根據表四分析結果，過大的系統載氧體負載量可能造成流體化床技術發展之瓶頸。移動床之應用較有機會，但需要持續努力於反應器最佳化設計研發，提升反應物之混合效果與反應效率。

5.2 載氧體後續應用發展之挑戰：

為符合實務性的應用需求，我國載氧體研發方向必須深入探討載氧體在環境複雜的實廠使用時，可能遭遇到問題的解決方案，例如可能造成載氧體高溫燒結或活性物質團聚、未完全燃燒之碳可能包覆載氧體表面、燃料內含之酸性物質可能對載氧體產生的影響等因素而使載氧體失去活性。在商業化發展階段，則以降低載氧體成本、原料蘊藏量是否足夠及足夠的使用壽命等考量為優先。因此還有很多挑戰需要面對與要持續努力。

目前工業技術研究院已逐漸投入資源，發展化學迴圈技術，反應系統選擇以移動床為主軸、載氧體則以鐵系載氧體為主。

由於兼具高能源效率、低污染排放及低成本二氧化碳捕獲之特性，一旦發展成功，將有機會成為未來主流的能源與二氧化碳捕獲系統。近年來，世界越來越多國家開始投入資源發展化學迴圈技術。建議我國各界亦應積極投入，合作發展，掌握擁有先進的主流綠能技術之機會。

六、致謝

本研究承蒙經濟部能源局資助「淨煤技術及二氧化碳捕獲封存技術發展計

畫」，方能完成本文，謹此致謝。

七、參考文獻

1. http://en.wikipedia.org/wiki/IPCC_Fourth_Assessment_Report
2. R. Carapellucci and A. Milazzo, Membrane system for CO₂ capture and their integration with gas turbine plants, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineering Part A: Journal of Power and Energy*, Vd.217, pp.505-517, 2003.
3. 經濟部能源局，我國燃料燃燒 CO₂ 排放統計與分析，100 年 6 月。
4. J. D. Figueroa, T. Fout, S. Plasynski, H. McIlvried, R. D. Srivastava, Advances in CO₂ capture technology-The U.S. Department of Energy's Carbon Sequestration Program, *International Journal of Greenhouse Gas Control*, Vd.2, pp.9-20, 2008.
5. L. C. Elwell and W. S. Grant, Technology options for capturing CO₂-Special Reports, *Power*, Vd.150 No.8, 2006.
6. M. M. Hossain and H. I. de Lasa, Chemical-looping combustion (CLC) for inherent CO₂ separations-a review, *Chemical Engineering Science*, Vd.63, pp.4433-4451, 2008.
7. S. R. Son and S. D. Kim, Chemical-Looping Combustion with NiO and Fe₂O₃ in a Thermobalance and Circulating Fluidized Bed Reactor with Double Loops, *Ind. Eng. Chem. Res.*, Vol.45, pp.2689-2696, 2006.
8. M. Johansson, T. Mattisson, A. Lyngfelt, Creating a Synergy Effect by Using Mixed Oxides of Iron- and Nickel Oxides in the Combustion of Methane in a Chemical-Looping Combustion Reactor, *Energy & Fuels*, Vd.20, pp.2399-2407, 2006.
9. M. Ryden, M. Johansson, E. Cleverstam, A. Lyngfelt, T. Mattisson, Ilmenite with addition of NiO as oxygen carrier for chemical-looping combustion, *Fuel*, Vd.89, pp.3523-3533, 2010.
10. Q. Zafar, T. Mattisson, B. Gevert, Redox Investigation of Some Oxides of Transition-State Metals Ni, Cu, Fe, and Mn Supported on SiO₂ and MgAl₂O₄, *Energy & Fuels*, Vd.20, pp.34-44, 2006.
11. M. Johansson, T. Mattisson, A. Lyngfelt, Investigation of Fe₂O₃ with MgAl₂O₄ for Chemical-Looping Combustion, *Ind. Eng. Chem. Res.*, Vd.43, pp.6978-6987, 2004.
12. A. Cuadrat, A. Abad, J. Adánez, L.F. de Diego, F. García-Labiano, P. Gayán, Behavior of ilmenite as oxygen carrier in chemical-looping combustion, *Fuel Processing Technology*, Vd.94, pp.101-112, 2012.
13. H. Leion, A. Lyngfelt, M. Johansson, E. Jerndal, T. Mattisson, The use of ilmenite as an oxygen carrier in chemical-looping combustion, *chemical*

- engineering research and design*, Vol.86, pp.1017-1026, 2008.
14. H. Tian and Q. Guo, Investigation into the Behavior of Reductive Decomposition of Calcium Sulfate by Carbon Monoxide in Chemical-Looping Combustion, *Ind. Eng. Chem. Res.*, Vol.48, pp.5624-5632, 2009.
 15. L. H. Shen, J. H. Wu, J. Xiao, Q. Song, R. Xiao, Chemical looping Combustion of Biomass in a 10kWth Reactor with Iron Oxides an Oxygen Carrier, *Energy & Fuels*, Vol. 23, pp.2498-2505, 2009.
 16. M. Ryden and A. Lyngfelt, Using Steam Reforming to Produce Hydrogen with Carbon Dioxide Capture by Chemical Looping Combustion, *International Journal of Hydrogen energy*, Vol.31, No.10, pp.1271-1283, 2006.
 17. L. S. Fan, Chemical Looping Systems for Fossil Energy Conversions, *AIChE and John Willey & Son*, 2010.

應用雷射影像法於柴油/生質柴油噴注之瞬時量測

Laser Imaging Technique for the Characterization of Diesel/Bio-diesel Injection

吳志勇¹

Chih-Yung Wu

高苑科技大學光電科學與工程系兼先進潔淨節能引擎研發與測試服務中心

Department of Electro-Optical Science and Engineering & Advanced Engine

Research Center, Kao Yuan University

顧詠元²

Yong-Yuan Ku

財團法人車輛研究測試中心

Automotive Research and Testing Center

陳正暉³、陳坤禾⁴

Cheng-Wei Chen, Kun-Ho Chen

高苑科技大學先進潔淨節能引擎研發與測試服務中心

Advanced Engine Research Center, Kao Yuan University

楊授印⁵

Shou-Yin Yang

國立虎尾科技大學動力機械系

Department of Mechanical and Mechanical-Electronic, National Formosa University

摘要

本研究以探討柴油與不同混合比例之生質柴油在不同壓力環境下之噴霧特徵為主要的目的，柴油噴嘴裝置是一個由日本電裝株式會社製造且使用於日野柴油發動機的柴油噴嘴，該噴嘴安裝於環境模擬艙中進行試驗以模擬柴油引擎中壓縮行程的暫態過程，而該環境模擬艙可以模擬 1-30bar 的高壓環境。環境模擬艙配備有雷射光學進出口之耐壓視窗，藉由雷射時間的準確操控可以用來分析噴霧延遲、噴霧速度、噴霧張角以及滲透深度等重要噴霧資訊，其中噴霧速度使用數位影像處理進行影像邊緣強化搭配數位化雷射顆粒影像測速法進行速度分析，相關的結果可以用為未來使用生質燃料時，引擎性能變異原因之參考。

關鍵字：生質柴油、雷射診測、數位化粒子影像測速、噴霧

¹ 高苑科技大學光電科學與工程系，助理教授，E-mail: chihyungwu@gmail.com

² 財團法人車輛研究測試中心，工程師

³ 高苑科技大學先進潔淨節能引擎研發與測試服務中心，工程師

⁴ 高苑科技大學先進潔淨節能引擎研發與測試服務中心，工程師

⁵ 國立虎尾科技大學動力機械系，助理教授

Abstract

The objective of this study is to analyze the spray characteristics of injectors using diesel/bio-diesel based on the spray pattern and performance of the injectors in a pressure chamber which can simulate environment from 1 to 30 bar. The experiments are conducted using a 7-holes injector manufactured by Denso for J08C diesel engine of Hino. The fuel is injected into the pressure chamber and is measured using laser-based imaging technique. Based on results, the fuel spray becomes narrow in shape due to enhanced drag force. With increasing chamber pressure, the spray velocity and the tip penetration depth are decreased. Moreover, the spray characteristics B5 and B8 are similar to those of D100. The measured spray characteristics in environments of different pressures can suitably provide bases for diesel engine modifications and feasibility verification for bio-diesel application.

Keywords: Bio-diesel, laser diagnostics, PIV, spray

一、前言

生質能是指能夠利用生質物，經過轉換而獲得可以使用的能源，例如：電力與各種動力系統燃料。根據國際能源總署(International Energy Agency, IEA)[1]的資料指出，生質能為全球第四大能源，並供應全球將近 10%的能源需求。在 1973 年出現石油危機後，許多依賴進口石油的高度工業化國家開始尋找石油的替代能源，例如：生質能、太陽能、風能，以及水力發電等技術，但是遭遇工程技術的瓶頸、自然環境的限制，及各種基礎建設所造成的問題，經過多年的開發，但是迄今使用範圍與比例相當有限。近年來世界經濟普遍發展，許多開發中國家能源需求急劇成長，使得石油需求量大增，並造成價格的急遽上揚。另外一方面，在環保標準日益嚴苛的情況下，使用化石燃料的政策正受到嚴重的考驗。據 IEA(International Energy Agency, IEA)統計資料指出，台灣於 2007 年約有 11,558ktoe(in thousand tonnes of oil equivalent on a net calorific value basis)為運輸消耗的石化燃料，為全國整體能源消耗大宗之一，當中運輸用的柴油消耗約佔整體運輸能源消耗的 32%。行政院經濟部能源局資料顯示[2]，2008 年國內石油總需要量為 49912.5 千公秉油當量，若按使用部門加以區分，各部門所占的百分率為運輸部門占 34%，工業部門占 53.06%農業部門占 1.13%，服務部門占 2.83%，非能源部門占 5.82%，其中在特定油品的消費上，又以工業燃料油為最大宗，其次為車用汽油及柴油。交通運輸(內燃機燃燒)所消耗的化石燃料，和產生之二氧化碳分別占全國能源消耗及溫室氣體排放的大宗；全國二氧化碳成長速度較快的

部門是運輸部門，1990 年二氧化碳直接排放為 19,422 百萬公噸，到 2007 年長至 35,761 百萬公噸，增加了 1.84 倍，同期間機動車輛數由 1,005 萬輛增加為 2,071 萬輛，增加了 1.06 倍，分析其排放成長主因為公路運輸的柴油與車用汽油為最大宗。就 2007 年而言，無鉛車用汽油占運輸部門能源最終需求量的 63.2%，柴油占 32.1%，但較 2006 年分別僅微幅上升 0.5%及 0.2%[2]。惟有尋找與現有設備相容之再生燃料，並且發展潔淨燃燒排放設備，才能符合節能、環保及永續能源之要求。因此發展車輛替代燃料，為台灣發展車輛工業及溫室氣體減量所迫切需要的。

以柴油方面來說，根據 2010 年能源產業技術白皮書[3]的資料指出，2008 年全球生質柴油產量約為 1,610 萬公秉，較 2007 年增加了 52%，其中歐洲佔 55%，而德國是生質柴油發展最成功的國家，產量為 317.5 萬公秉，位居全球首位；美國是歐洲以外的主要發展國家，產量達 265 萬公秉，已成為全球第二大生產國[4]。現階段商業化的生質柴油製程係以化學觸媒的鹼製程為主，在料源方面，歐洲主要以菜籽油為主，美國為大豆油，日本則以廢食用油為原料，目前已有詳細的引擎測試分析、環境生態影響及油品保存運輸研究，且歐美各國均有生質柴油加油站。在這一方面，我國已經建立廢食用油轉換為生質柴油之技術，並且已經全面供應 B2 生質柴油。然而使用生質燃料於柴油引擎中並非完全沒有缺點，例如：熱值略低、凝固點比石化柴油高而容易雲化、微生物孳生、與潤滑油產生交聯影響等問題，但是在噴嘴裂化上卻尚無很確切的研究顯示其對噴嘴的影響，這些影響包含腐蝕、積碳，以及磨損等，這些效應都會直接影響到噴霧的功能與特性。不僅如此，在基礎燃燒特性上更缺乏完整且系統性的評估，這些相關的資訊更是許多從事內燃引擎研究工作者所需要的資料庫。

以食物作物為來料源的第一代生質燃料，因有與糧食競爭的疑慮，所以其可行性與道德風險需要進一步的考量。非糧料生質柴油的種類包括來自：廢棄食用油回收、蓖麻籽、麻瘋樹甚至是來自於藻類，廢棄食用油回收因來源穩定度不足，且廢棄食用油尚有作為肥皂之用途，因此產量不大，另外兩個較具有潛力的則是蓖麻油以及麻瘋樹油，這兩種油類因本身分別具有蓖麻毒素以及麻瘋樹毒蛋白，所以使用上必須考慮燃燒不完全可能殘留的毒性。藻類部份雖然產油量很高，但在基因工程、養料供應等技術仍然相當的昂貴，因此仍在積極開發中。使用以糧料為基礎的生質柴油會讓許多原本生產食品的農地改種植經濟作物，很可能造成糧價上漲，威脅貧窮人口；如果因燃料需求而開墾新的農地則會破壞生態，所造成的二氧化碳排放則是一個不環保且不具道德的措施。

有鑑於此，本研究以非糧之廢食用油生質柴油作為燃料並應用於車輛系統所造成的影響為主要的研究目標，此為本研究之緣起。本研究擬以生質柴油引擎噴

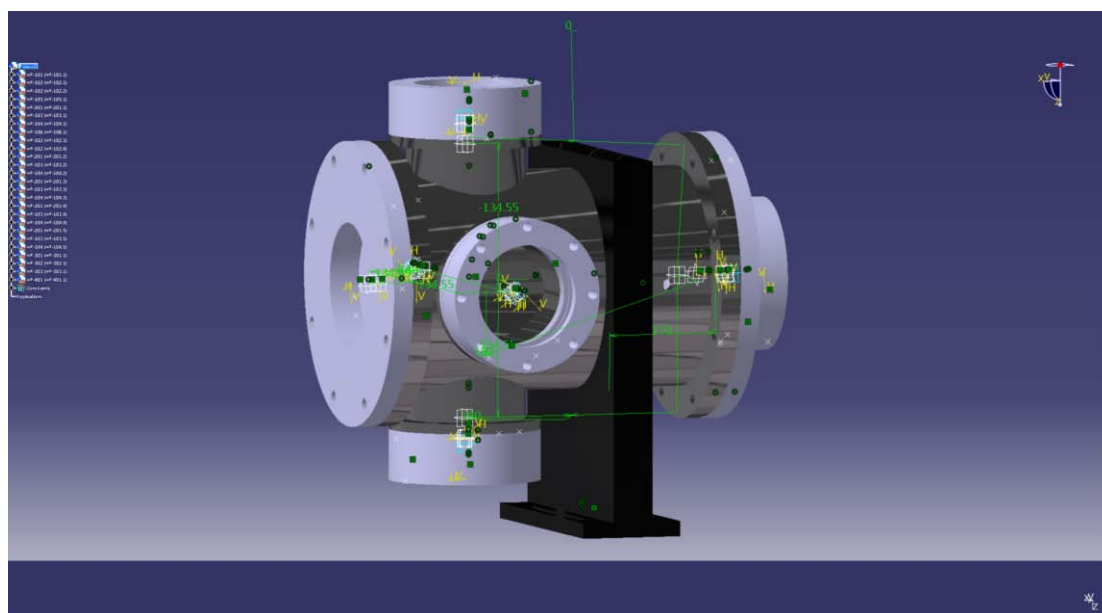
油嘴噴霧特性分析研究為主要的主题，燃料擇定為 D100(不含任何轉酯化生質燃料)、B5 與 B8 柴油，並且以雷射光學輔助噴霧實驗量測方式建立生質柴油的噴嘴特性分析與評估提供未來應用於運輸工具的深厚基礎。

二、研究方法

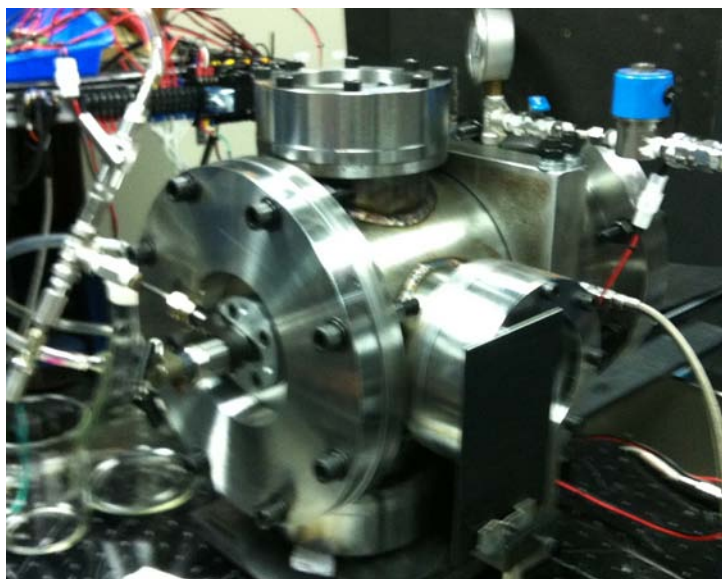
過去本研究團隊已經建立成熟的雷射噴霧診測技術，然而相關設施原係為汽油缸內直噴與歧管噴射所設計[5]，因此需要進行局部的修改。大部份針對柴油噴霧的研究大多仍使用氙氣燈作為光源，再搭配高速攝影機進行拍攝。本研究係採用雷射進行相關噴射時間的掌控，對於攝影來說可以取得較為清晰的影像。

2.1 環境壓力模擬艙

柴油缸內直噴噴嘴直接安裝於內燃引擎的燃燒室內，而且會針對不同的負載情況進行不同時間點的燃料噴射，所以燃料噴注時引擎汽缸內的壓力就會造成燃料噴嘴特性的改變。為了確認噴嘴的噴霧特性，必須針對靜態與動態分別進行相關的測試，在靜態方面係採用壓力艙的方式進行壓力環境的建立。壓力艙的建立必須掌握數項原則：(1)涵蓋內燃引擎燃燒試壓力的操作範圍；(2)俱備光學進出口視窗；(3)具有值入視流用顆粒之裝置；(4)俱備廢液排出的功能與掃氣閥；(5)前述的額外配件均必須能夠承受操作時的壓力。本高壓艙的設計係使用達梭系統(Dassault Systemes)公司的 CATIA 軟體進行各部零件的設計，其組立與實際本體分別如圖一與圖二所示。



圖一、壓力模擬艙之設計組立圖

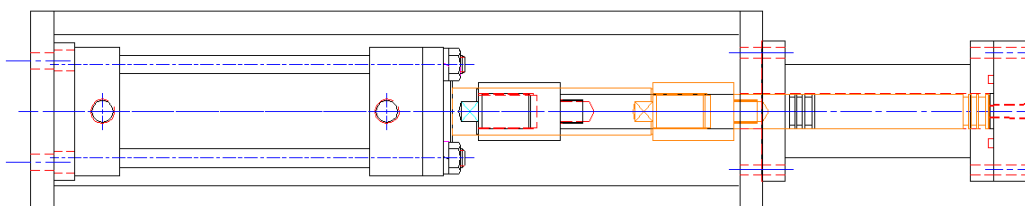


圖二、配備石英光學視窗之環境模擬艙

本研究所使用之壓力艙設計之安全係數為 5，由於壓力艙之操作仍然具有風險，因此所有試驗均採取無人操作狀態並使用遠端監控進行系統操作，操作人員僅需透過實驗室外電腦的單一按鍵操作即可完成壓力艙充壓至指定壓力、噴霧、雷射啟動與攝影、降壓、掃氣清潔等一貫作業。

2.2 高壓燃料供應

燃料的供應模擬柴油車輛於怠速運轉下之壓力，因此需要將燃料加壓至 300bar，為了獲得穩定的壓力，本研究使用壓力缸並且透過直徑比轉換將油壓壓力放大 3 倍使燃料壓力升壓至 300bar，相關設備如圖三所示。



圖三、液壓壓力倍力裝置

2.3 雷射與光學系統

目前應用於定性視流以及數位化粒子影像測速技術所使用的雷射光源為美國 NewWave 公司生產之 Solo III-15 雷射，該雷射系統是專供粒子影像測速儀之照明專用雷射，如圖 4 所示，雷射頭中含有雙管鈹鎂石 榴石雷射，並且由雙套閃光燈以及控制電路所激發，雷射之能量為 50mJ/pulse，每一管雷射擁有獨立的觸

的配置方式，因此在噴霧定義上並沒有影響，唯有影響的是在於噴嘴原點座標定義以及多孔噴嘴的量測方式。

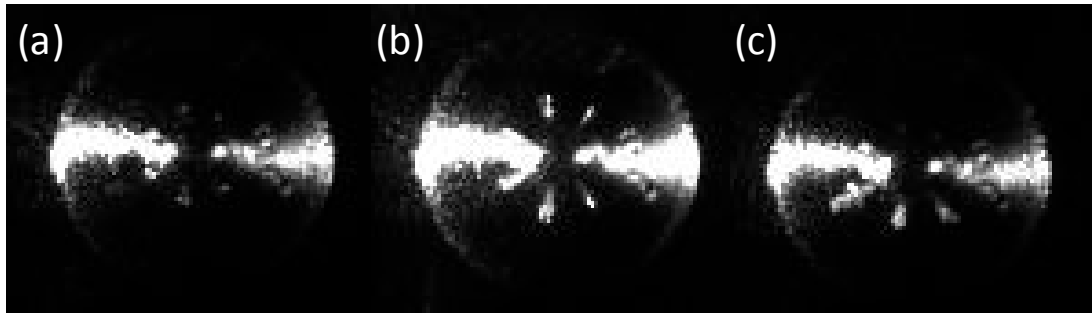
PIV 粒子影像測速[8、9]的基礎原理是利用顆粒或者液滴在空間中受到雷射光照明後所產生的米散射(Mie scattering)，米散射是一種彈性散射過程，當粒子直徑與入射光波長的比值遠小於 1 ($d/\lambda \ll 1$)時稱之為芮利散射(Rayleigh scattering)，當前述的比值非遠小於 1 時則稱之為米散射。米散射的強度與粒子的尺寸有很大的關係，其強度為直徑的平方成正比。懸殊的噴霧尺度將會造成粒子散射光的極大差異，當雷射能量設定較高以觀察微細顆粒時，較大的粒子所產生的散射光強度很容易使 CCD 上被投影的像素(pixel)飽和(saturated)，除此之外飽和區的像素(pixel)也容易產生電子溢出而產生影像暈染(blooming)，所以大顆粒區域的曝光與大顆粒的實際尺度都會造成較大的誤差。雖然較大的顆粒會有前述的問題，不過在速度量測上並不會造成影響，因為速度的分析是根基於影像中所擷取審視窗(interrogation window)中的交叉關連分析(cross-correlation)統計而得。對於缸內直噴引擎用燃油噴嘴噴霧而言，由於噴霧上游處之燃油為液膜型態，因此使用以粒子影像測速方法量測該處較無意義，而本研究是使用該技術量測噴霧下游處之速度分佈，且噴霧之液滴速度以粒子影像測速技術來量測屬直接量測，意即量測到的數據即為噴霧之液滴速度，而該速度特徵將可作為內燃引擎燃燒室與活塞頂設計之基礎。影像分析系統在軟體上是以 Matlab 為開發平台的程式，該程式自從開發以來以經歷 7-8 年的修改，並且成功的應用於燃燒場中速度的分析與處理[10-12]，透過 Matlab 開發更可以快速的建立訊號處理的數學模型並且可以快速方便地轉換成效率較高的 C/C++ 語言程式。影像取得後必須針對影像的特性進行前處理，前處理完成後進行影像分割以成為審視窗，在訊號處理上主要使用交叉關連分析加以處理，並進行後續處理的工作。

三、結果與討論

3.1 噴射延遲與噴霧外型

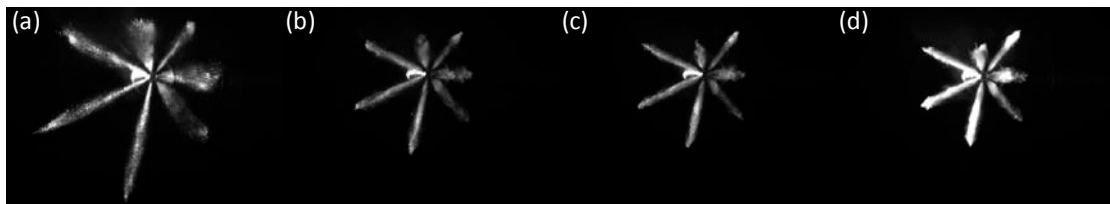
如圖五所示為當啟動訊號給與噴嘴後，經過 $560 \mu s$ 使用雷射脈衝光源照明所攝得之影像，由此圖可以看出燃料甫離開噴嘴口。當啟動訊號給予後 $560 \mu s$ 以後燃料開始自噴嘴孔噴出，而此時間即為噴嘴系統之延遲時間，此延遲時間為噴嘴系統特性，與驅動電路訊號延遲與噴嘴機構延遲有關，同一個噴嘴同一個驅動電路的條件下，噴嘴的延遲時間是固定的，但是約略會受到燃料壓力以及環境壓力之影響，由於本研究燃料壓力與環境壓力之落差甚大，經過多次試驗認定噴射延遲之時間無論是何種燃料均趨近於常數 $560 \mu s$ 。若定義噴嘴驅動訊號為原點($0 \mu s$)，往後發生現象之時機均加註 SOI，代表噴霧啟動(start of injection)，以

客觀地釐清現象發生的時間點。



圖五、常壓下噴霧延遲時間之判定:啟動訊號送出後經過(a) 550 μ s ; (b) 560 μ s ; (c) 570 μ s 之後所攝得之影像

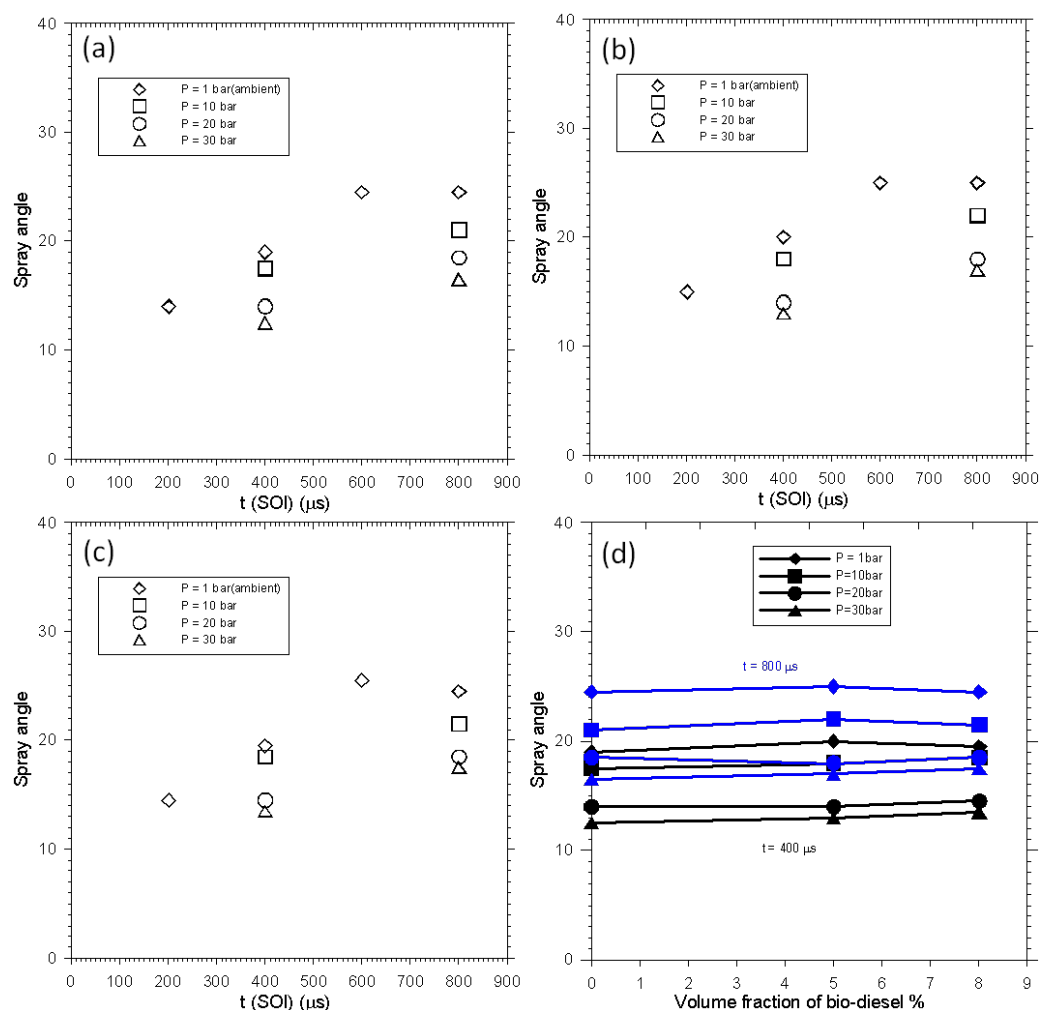
當環境壓力上升時，噴霧的型態會產生改變，其中最明顯的就是擴張角度會縮小而且滲透深度會變淺，由於環境壓力上升後，周圍空氣的密度上昇導至噴霧不易張開，使得噴霧液滴的空間密度上升，此一現象可以由噴霧液滴的米散射 (Mie scattering)強度發現，如圖六所示。



圖六、在(a)1bar(常壓) ; (b)10 bar ; (c) 20 bar ; (d) 30bar 於 400 μ s(SOI)所攝得 D100 燃料之噴射狀況

3.2 噴霧張角

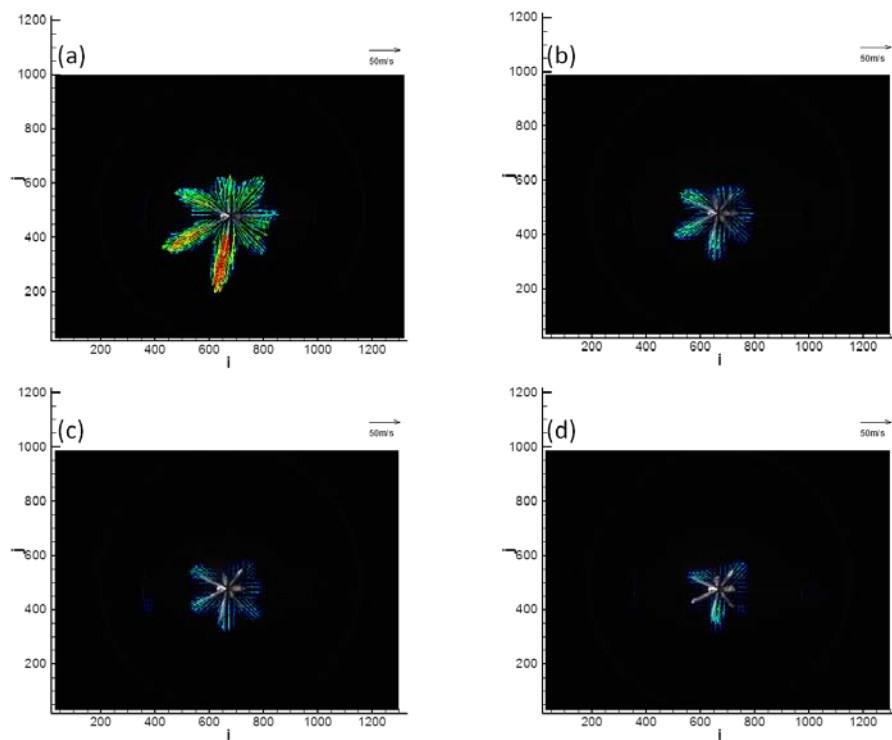
為了進一步釐清生質柴油的混摻在不同壓力下對於噴霧特徵之影響，本研究使用數位影像分析技術分析各種噴霧之特徵，由於多孔式噴嘴會因為產品之特性以及製造之精確度使得每支噴嘴之噴孔性能約略有所不同。如圖七所示為不同燃料於不同時間所量得之噴霧張角，當環境壓力上升時，噴霧張角有被抑制的現象。對於混摻有生質燃料的噴霧而言噴霧張角並不會因為濃度的因素而有明顯的變異。



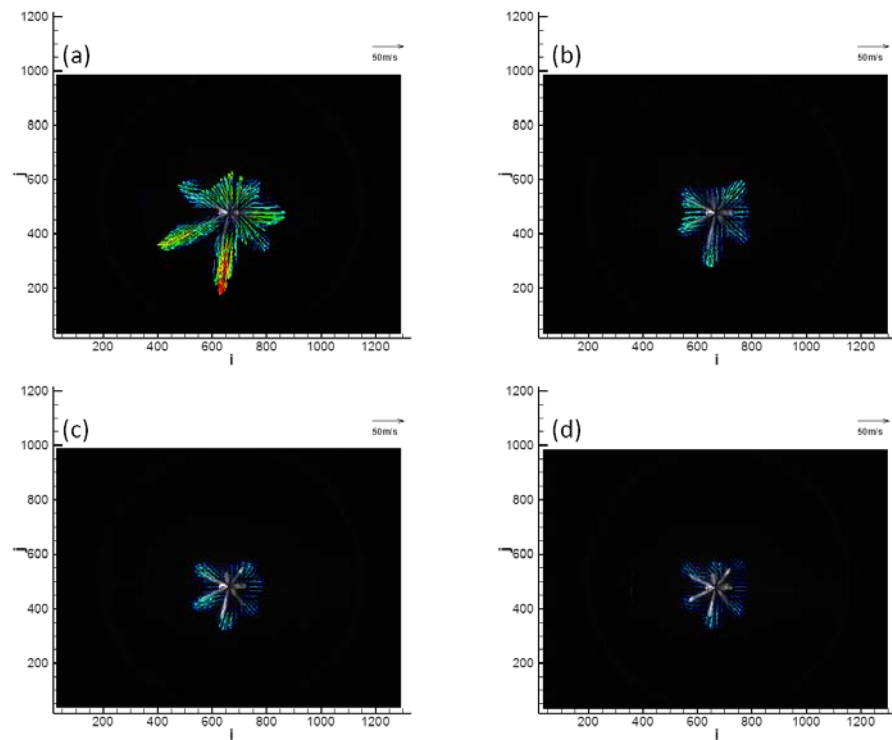
圖七、(a) D100；(b) B5；(c) B8 於不同時間之噴霧張角；(d)在不同壓力下分別於 400 以及 800 μs 之噴霧張角變化

3.3 噴射速度與滲透深度

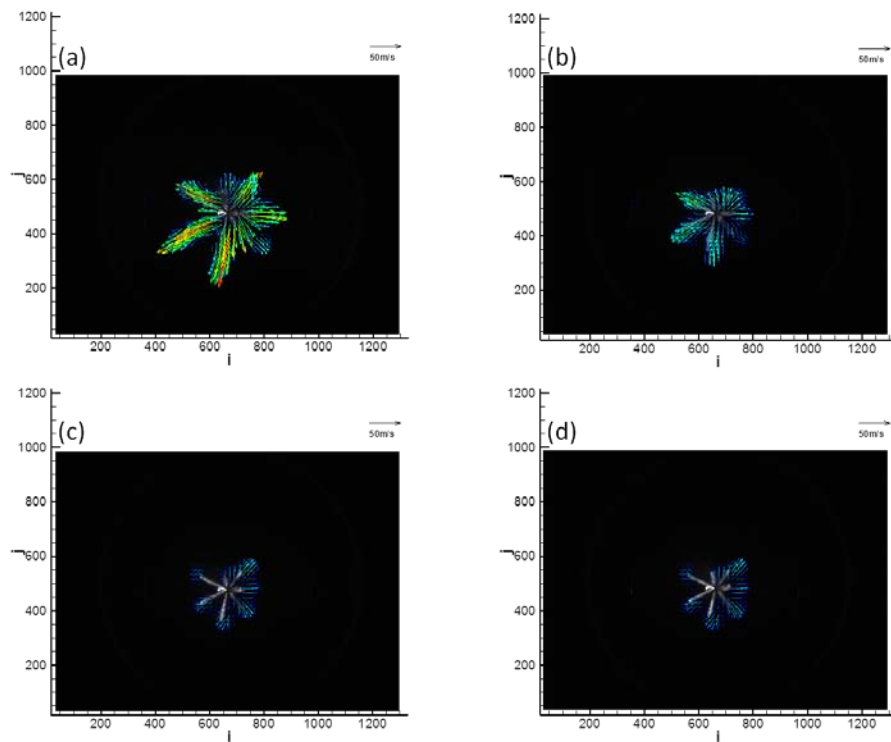
噴霧的噴射速度使用數位化粒子影像測速技術測得，如圖八、圖九與圖十分別表示為 D100、B5 與 B8 柴油分別在 1、10、20，與 30bar 環境下以及時間為 400 μs (SOI)的噴霧速度分析，圖中可以發現當環境壓力越高時，噴霧的噴射速度越慢，其主要原因與壓力上升後周圍氣體密度上升產生阻力所致，至於燃料中含有生質燃料實則影響不大。為了釐清燃料中生質燃料濃度對於噴射速度之影響，使用滲透深度來進行解析則較為清楚，圖十一所示為三種燃料於不同時間之噴霧滲透深度，從圖中的資訊可以清楚看到，當環境壓力上升時，滲透深度隨著壓力上升而變淺，至於燃料的成份則影響不大。



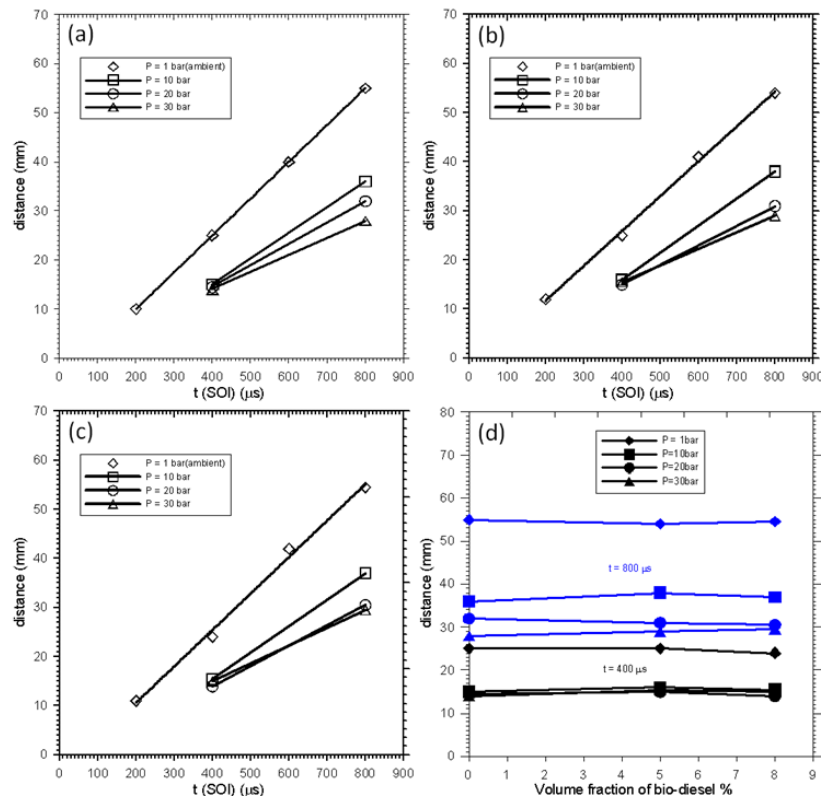
圖八、D100 柴油分別在 1、10、20，與 30bar 環境下以及時間為 400 μ s(SOI)的噴霧速度分析



圖九、B5 柴油分別在 1、10、20，與 30bar 環境下以及時間為 400 μ s(SOI)的噴霧速度分析



圖十、B8 柴油分別在 1、10、20，與 30bar 環境下以及時間為 400 μ s(SOI)的噴霧速度分析



圖十一、(a) D100；(b) B5；(c) B8 於不同時間之噴霧滲透深度；(d)在不同壓力下分別於 400 以及 800 μ s 之噴霧滲透深度變化

四、結論

本研究應用雷射診測影像技術進行生質柴油與石化柴油混合燃料於高壓環境中噴射之噴霧特徵探討，燃料使用的種類是 D100、B5 與 B8，而環境則模擬常壓、10bar、20bar 以及 30bar，並且解析噴嘴之噴霧延遲、噴霧張角、滲透深度、噴霧速度等重要資訊。結果顯示：當固定燃料壓力時，環境壓力上升的情況下會導致噴霧張角減小、滲透深度變淺而且噴霧速度也有明顯的下降，結果資料也顯示出，燃料中混有 5%與 8%之生質柴油對於噴霧特徵並無明顯之影響，因此可以預計，當柴油引擎使用 B5 與 B8 燃料時，燃料噴嘴之特性在相同噴嘴與時空下並不會受到影響。

五、致謝

本研究承蒙經濟部能源局 101 年度「非糧料源生質柴油車輛適用性影響研究與推廣」計畫贊助，計畫編號 101-D0114，始得完成，謹此致謝。

六、參考文獻

1. 國際能源總署, <http://www.iea.org>
2. 行政院經濟部能源局, <http://www.moeaboe.gov.tw>
3. 2010 年能源產業技術白皮書，經濟部能源局。
4. Biofuels Platform. 2008. Available at <http://www.biofuels-platform.ch/en/home/> Accessed 13 July 2009.
5. 吳志勇，陳坤禾，陳正暉，謝逸霖，趙怡欽，應用數位化粒子影像測速於車輛汽油噴注之瞬時量測，*燃燒季刊*, Vol.19, pp.23-35, 2010.
6. O. A. Kuti, J. Zhu, K. Nishida, X. Wang, Z. Huang, Characterization of spray and combustion processes of biodiesel fuel injected by diesel engine common rail system, *Fuel* (in press), <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2012.05.014>.
7. *Gasoline Fuel Injector Spray Measurement and Characterization*, SAE J2715, 2007.
8. C. Y. Wu, Y. C. Chao, T. S. Cheng, C. P. Chen, C. T. Ho, Effects of CO Addition on The Characteristics of Laminar Premixed CH₄/air Opposed-Jet Flames, *Combustion and Flame*, Vol.156, No.2, pp.362-373, 2009.
9. K. Okamoto, S. Nishio, T. Saga, T. Kobayashi, Standard Images for Particle-Image Velocimetry, *Measurement Science and Technology*, Vol.11, No. 6, pp.685-691, 2000.
10. C. Y. Wu, *Dissertation for Ph.D.*, Institute of Aeronautics and Astronautics, National Cheng Kung University, Taiwan, 2003.
11. Y. H. Li, C. Y. Wu, B. C. Chen, Y. C. Chao, Measurements of High Luminosity

Flame Structure by A Shuttered PIV System, *Measurement Science and Technology*, Vol.19, pp.1-11, 2008.

徵稿說明

下列專欄，歡迎大家耕耘：

1. 專題研究--分為五大方向，分別為「能源發展與應用」、「動力設施與燃燒」、「防火與消防」、「燃燒科技發展」、「空污控制與生物效應」。
2. 燃燒科技交流--燃燒應用技術、新技術或新產品介紹、疑難討論與經驗交流、國內外相關研究機構介紹、國內外相關學會、機構、團體之動態等，相關研討會論文摘要或全文、燃燒現象照片等。
3. 燃燒論壇--開放討論基本燃燒現象、基本燃燒原理及燃燒詞彙定義等。
4. 即時資訊--政府相關政策、國內外相關科技資訊、研討會或相關活動訊息等即時之動態資訊。能源委員會、環保署、國科會、消防署等相關機構委託執行計畫之研究成果介紹等。
5. 其他--讀者意見迴響交流與燃燒相關之其他任何訊息或稿件。

來稿請寄本會【[電子信箱](#)】或

【700 台南市中西區樹林街2段33號，國立臺南綠色能源科技學系 陳維新教授
收 e-mail：vwhchen@gmail.com；Tel：（06）2605031】

投稿須知

1. 文字：稿件應以中文或英文撰寫，中文文字之字型應為標楷體字，英文文字字型應為Times New Rome。
2. 題目：應力求簡潔且能充分表達論文之重要概念，請附中、英文題目各一式，英文題目請附於中文題目之後。
3. 作者：請附上中、英文之作者姓名、服務單位及職稱。作者之服務單位及職稱請以附註之方式書寫同一頁之末端，若作者為兩個人以上者，請以不同之符號標示之。
4. 摘要：以簡明扼要之方式表達論文之內容。無論以中文或英文撰寫，一律附上500 字以內之中、英文摘要各一份。英文摘要請置於中文摘要之後。
5. 字型大小：題目以16pt 黑體字，摘要、前言、文章內容之標題請以14pt 黑體字，作者介紹及文章內容以12pt 標楷體字書寫之。
6. 關鍵字：中英對照關鍵字，最多以5 個為限。
7. 圖表說明：圖說與表說應統一使用中文或英文，圖標題應在圖之下方；表標題應在表之上方。

8. 參考文獻：（列於正文之後，書寫時請依於文章中出現之先後順序排列）
Combustion Quarterly Vol. 52 17 No. 2 May 2008
- (1) 書籍：作者，書名，出版社，出版地，頁數，年。
中文如：柯清水，*石油化學概論*，正文書局，臺北，pp. 183-191，1992。
英文如：K. Owen and T. Coley, *Automotive Fuel Reference Book*, 2nd ed.,
Society of Automotive Engineers, pp. 551-587, 1997.
- (2) 期刊論文：作者，篇名，期刊名稱，卷期，頁數，年。
中文如：葉江榮，鍋爐高溫腐蝕，*台電工程月刊*，第276期，pp. 10-18，
1979。
英文如：J. T. Kummer, Catalysts for Automobile Emission Control, *Progress
in Energy and Combustion Science*, Vol. 6, pp. 177-199, 1981.
- (3) 研討會：作者，篇名，研討會論文集，出版者，頁數，年月或年。
中文如：萬皓鵬，汽電共生系統效率提升技術，*2002 汽電共生系統技術
研討會論文集*，經濟部能源委員會，pp. 84-91，91年4月。
英文如：C. K. Law, Dynamics of Stretched Flames, *Twenty-Second
Symposium (International) on Combustion*, The Combustion
Institute, pp. 1381-1402, 1988.

燃燒季刊 2012.11

發行單位：中華民國燃燒學會

發行人：施聖洋

總編輯：陳維新

副總編輯：江金龍、江鴻龍、侯順雄、蔡建雄（依姓氏筆畫排列）

編輯：石心怡、朱力民、吳志勇、吳明勳、吳耿東、洪榮芳、
姜庭隆、郭振坤、黃俊賢、陳建中、梁智創、楊授印、
楊進丁、管衍德、趙裕、蔡欣倫、劉昭忠、劉國基、
蘇崇輝（依姓氏筆畫排列）

秘書：黃信閔

發行地址：32001桃園縣中壢市中大路300號
國立中央大學工學院能源研究中心

電話：(03) 4267354 ; 4267391

中華民國八十一年十二月創刊

中華民國一百零一年十一月出版

局版台誌號第玖玖零捌號