

燃燒季刊

Combustion Quarterly

第二十一卷 第二期

中華民國一百零一年五月出版

Vol. 21, No.2

May 2012

目錄

CONTENTS

編輯札記	1
	陳建中、陳維新
汽油缸內直噴 V 型雙缸增程引擎之研發	2
	蔡欣倫
港灣污泥高溫燒坯製磚特性之研究	14
	施百鴻、蔣立中、陳盈霖、張益國
車輛廢氣重組產出富氫合成氣體之熱力學評估	23
	洪榮芳、尤富芃、邱韋丞、賴銘彬、賴維祥
工研院二氧化碳地質封存技術發展現況	38
	廖啟雯、董倫道、謝佩珊、李奕亨、田能全、陳文山、歐陽湘
台灣能源教育模型建構與教育推廣	50
	葉欣誠、陳建中、甯蜀光、梁明煌、陳翰
焚化爐操作與戴奧辛排放預測	63
	莊硯勛、陳鶴文、Sond Bunsan
徵稿說明	72

編輯札記

人類的文明始於「火」的使用，人類的未來也與「火」息息相關，如何減緩氣候變遷趨勢就存乎於對「火」的妥善使用，「火」是燃燒過程的表徵，所以如何提升燃燒效率、如何掌控熱能所造成的物質變化、如何避免污染物的生成、如何妥善處理燃燒行為的污染物以及如何教育民眾正確的使用能源等在在影響人類文明的延續，萬萬不可疏忽。本期共刊登六篇專業論文，分別來自大專院校、工研院等單位之研究成果，有高苑科技大學蔡欣倫教授對於引擎效能最佳化的追求；有輔英科技大學施百鴻教授等人及中臺科技大學關於如何應用高溫爐模擬磚窯廠之燒磚程序找出合適港灣污泥資材化方法的研究合作；有崑山科技大學及成功大學的整合團隊以碳氫燃料配合廢氣重組法(Exhaust gas reforming, EGR)，成功地研發如何改善汽、機車能源使用效率，最多約可改善28.7%的引擎熱效率，並降低二氧化碳排放，充分達到節能減碳的目的；工研院廖啟雯研究員等人對於燃燒衍生的溫室氣體排放問題，整合最新的地球物理科技，提昇對於溫室氣體封存場址之評估能力；台師大葉欣誠教授的「台灣能源教育模型」研發團隊則是分享了他們三年多來對於如何教育民眾聰明的節能減碳所做的努力，其中整合了互動式決策支援平台的節能減碳教育宣導模式，值得大家研究；最後是東海大學陳鶴文教授團隊以相關係數及因素分析之統計分析方法搜尋出影響焚化爐戴奧辛排放的重要操作變數，依序為：總空氣量>集塵袋出口之氧氣組成>爐頂溫度。

整體而言，這一期的內容相當豐富且題材多元，相信閱讀過程絕對是一場知的饗宴，也請本刊讀者繼續支持及踴躍投稿本季刊，共同推動燃燒與能源科技之研究交流。

副總編輯 陳建中

總編輯 陳維新

汽油缸內直噴 V 型雙缸增程引擎之研發

Design and Development of Gasoline Direct Injection V2-Range Extender Engine

蔡欣倫¹

Hsin-Luen Tsai

高苑科技大學電子工程系, 機械與自動化工程系&先進潔淨節能引擎開發與測試
服務中心

Department of Electronic Engineering, Department of Mechanical and Automation
Engineering, and Advanced Engine Research Center, Kao Yuan University

摘要

本文以實體單缸 500 c.c. GDI 引擎為基礎, 運用模擬分析技術設計一具水冷式 V 型雙缸(V2) 1000 c.c. 汽油缸內直噴增程引擎, 目標引擎能穩定 30 kW 功率輸出且 BSFC 可低於 230 g/kw-hr, 使用先前研究所做的點火正時最佳化所訂定出的隨轉速變化之點火正時角, V 型雙缸之點火正時時機相差 270 度, 並搭配最佳的燃油噴射正時, 在固定燃油當量比的操作條件下, 進行設計參數變化分析。研究發現改變缸徑衝程比對增程引擎之比燃油消耗率影響不顯著, 增加壓縮比雖可降低比燃油消耗率, 因成本考量及結構設計而不建議變更設計, 經過最佳化設計分析, 選定適當的進排氣門正時範圍, 可提供設計閥門正時機構系統, 研究發現此缸內直噴 V 型雙缸增程引擎運轉在節氣閥門全開、轉速 4000 RPM 時比燃油消耗率可低於 230 g/kW-hr、BMEP 可達 10 bar 且輸出功率可達 30 kW, 使此增程引擎在更省油的狀態下運轉, 以供發電機充電運用, 達到節能減碳的目的。

關鍵字：增程引擎、V 型雙缸、缸內直噴、壓縮比、缸徑衝程比、比燃油消耗率、功率

Abstract

The study is aimed to design a water-cooling Gasoline Direct Injection V2 range extender engine with 1000 c.c. displacement volume for the power output at 30 kW and BSFC under 230 g/kW-hr based on one single cylinder 500 c.c. GDI engine. The commercial one dimensional engine performance analysis code is employed to investigate the engine performances by changing design parameters which include the bore stroke ratio, compression and variable valve timings based on the optimal ignition timing map at various engine speeds and fuel injection timing. It was found that the effect of change in the bore stroke ratio is not obvious and the higher compression ratio leads to better BSFC, but is not good for cost consideration and

¹ 高苑科技大學電子工程系, 助理教授, E-mail: hsinluen@gmail.com

engine is to adopt the proper range of intake and exhaust valve timings and suggests the engine to be operated at wide open throttle and at constant engine speed of 4000 RPM to meet the design requirements (BSFC \leq 230 g/kW-hr, BMEP=10 bar and power output= 30 kW).

Keywords: Range Extender Engine, V2 Engine, Direct Injection, Compression Ratio, Bore Stroke Ratio, Brake Specific Fuel Consumption (BSFC), Power

一、前言

世界各國正積極發展電動車(EV)，但純電動車因電池續航力不足而里程受限，為解決車主之里程焦慮(range anxiety)及充電站不普及且充電非常耗時，插電式混合動力車(Plugin hybrid electric vehicle, PHEVs)及增程式電動車(Extended-Range EV, EREVs)應運而生，增程式電動車則主要使用電池電力驅動，而輔以汽油內燃機引擎發電進行充電而非驅動，待電池存量低於某限度時則進行充電，僅需透過加油則可增加行車里程，目前 GM 公司已經推出 Volt 車款上市，此種充電用內燃機引擎以一種模態或兩種模態最佳化運作輸出充電，稱之為增程式引擎(Range Extender Engine)，由於增程引擎均透過單模或多模式最佳化設計，因此可以滿足最低油耗，並將可符合歐美未來幾年之環保法規。

增程式引擎設計需求包含低噪聲振動(NVH)、足夠發電功率、低成本與維修費、低重量及高效率等，並且能在車體內有限空間安裝與驅動，一般需能產生 20~50kW 之功率方能作為發電用途，目前業界所發展的增程引擎包含轉子引擎(Rotary engine)、微渦輪(micro gas turbine)及 2~4 汽缸之內燃機引擎等，其中雙缸引擎可採對臥、V 型及直列式汽缸排列，GM 公司所採用 1.4L 四缸內燃機，FEV[1] 及 MAHLE 公司[2]發展 V 型雙缸增程引擎，採用 V 型可避免縱向震動，最佳化轉速設定在 4000 RPM，可達可接受噪聲振動標準，並可達功率 30 kW 及平均制動有效壓力 (Brake Mean Effective Pressure, BMEP) 10 bar 之目標。

增程引擎業界大都採用歧管噴油(Port Fuel Injection, PFI)方式噴油，現今引擎發展朝向採用缸內直噴(Gasoline Direct Injection, GDI)、進氣增壓及閥門控制等技術進行新引擎設計開發，汽油缸內直接噴射引擎具有甚多的潛力與優點，如：燃油經濟性佳、高扭力輸出及低污染等等，此些正面性的特性吸引著汽車與機車引擎業者致力於發展此項技術。學者使用引擎模擬軟體 GT-Suite [3,4]針對引擎噴射正時及點火正時進行最佳化模擬，並且透過引擎驗證性能輸出，可以確立其計算模型建立的可行性。

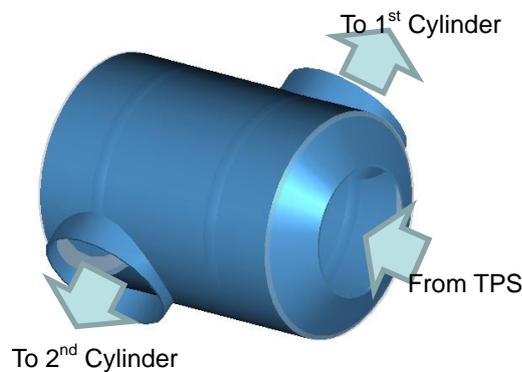
本研究將延續先前研究[3,4]進行汽油缸內直噴增程式引擎性能分析與設計，目標引擎輸出功率在 4000 RPM 可達 30 kW，並且比燃油消耗率(BSFC)可達

230 g/kW-hr。

二、增程引擎需求與設計

FEV 研究[1]發現市區用混合動力電動汽車採用串連式充電方式，充電需求約為 30 kW，因此本研究將以一具自行改裝的 500 c.c.單缸汽油缸內直噴 (Gasoline Direct Injection, GDI)實體引擎為基礎平台，在不更改原本內部幾何構型 (進氣型式與管道尺寸、閥門形狀)，採用商用引擎模擬軟體 GT-Suite [5]輔助分析與設計雙缸增程引擎，預計可單點或多點最佳化操作，使 BSFC 可低於 230 g/kW-hr，以滿足未來環保要求，該目標引擎可在 4000 RPM 輸出 30 kW，以滿足電池充電需求。本研究預計設計汽油缸內直噴雙缸發動機，總排氣量為 1000 c.c.，採用 V 型構型且兩缸夾角為 90 度，此構型具有較小震動之優點。

在雙缸引擎進氣設計及配氣方面上，引擎節氣閥門全開(Wide Open Throttle, WOT)，並採用集氣室(如圖一所示)集氣，此部分採用圓柱體，體積為總掃氣容積之 80%，約為 800 c.c.，具單一進氣、雙出口設計，尺寸為直徑(D)=80mm 及長度(L)=160mm，進氣管道配管與搭配 V 型雙缸所建構汽缸結構與幾何，此部分集氣量、配氣管路及出口直徑均可能影響各汽缸之容積效率，並有可能引起氣動噪音，在本研究尚不考慮集氣室尺寸對引擎性能之影響，採用目前設計進行後續分析。



圖一、集氣室實體幾何示意圖

先前研究[3,4]已經完成單缸 GDI 引擎之點火正時 DOE (Design of Experiment) 設計分析，將承繼此部分結果進行 V 型雙缸增程 GDI 引擎設計開發，引擎設計規格與參數如表一所示，設計參數包含缸徑衝程比(BSR, Bore Stroke Ratio)、壓縮比(CR, Compression Ratio)及改變進排氣閥門正時(Valve Timing)，本研究在不改變連桿長度下，本引擎的原本設計是屬於短衝程(BSR=1.228)，又因進氣門直徑較大，可縮小缸徑的範圍很小，所探討設計變數範圍會因缸徑實際設計考量而範圍受限，因此 BSR 所探討範圍(如表三)設定在 1.15~1.35 之間，而壓縮比範圍設定在 11.5~13.5，而進氣閥門正時範圍為 290°~350° ATDC Firing、排氣閥門正時範圍為 80°~120° ATDC Firing，進行引擎轉速範圍在 2000~ 6000 RPM 時 V 型

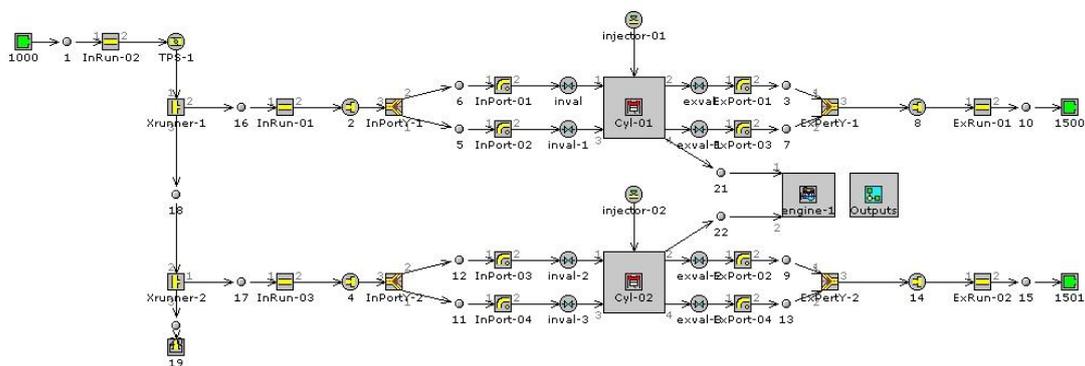
雙缸增程 GDI 引擎之性能，透過檢視進氣效率、功率輸出、BMEP 及 BSFC 之變化以找出最佳設計範圍及設計點。

表一、汽油缸內直噴 V2 增程引擎設計規格與參數

Engine Specifications	
Engine Type	2-Cylinder 4-Stroke Gasoline in 90 deg. V-arrangement
Displacement	2×498 c.c.
Bore*Stroke	92mm×75mm
Target Power	30 kW @ 4000 RPM
Fuel Injection System	Gasoline Direct Injection (GDI) w/ single hole Swirl Injector
Injection Timing	-230 (deg. ATDC)
Throttle Position	WOT

三、V2 引擎性能分析工具及方法

本文承繼先前所建立之單缸 GT 模型[3, 4]，配合實驗引擎所需，除去空氣濾清器及排氣尾管設置，並使用實際引擎所量測之各部件幾何形狀所建立，單缸分析模型已完成與實驗量測之容積效率驗證及缸內壓力變化之比較[3]，均與實驗引擎量測數據相當吻合，經最佳的油耗分析於噴射正時於-230° CA ATDC 噴油為最佳，並且可得最高的引擎輸出功，因此後續引擎計算分析則以-230° CA ATDC 為燃油噴射正時。根據 V2 增程引擎實體設計配置，建立出分析模型，圖二為 GT-Suite 所建立之 V2 增程引擎模型。分析所使用火焰模型及蒸發模型如下描述。



圖二、缸內直噴 V 型雙缸引擎 GT-Suite 分析模型架構圖

3.1 汽油之火焰速度模型

缸內火焰傳播速度為火焰傳入未燃氣的速率及燃燒時燃氣膨脹傳播速度，與

缸內壓力、溫度具絕對關係，為探討缸內混合燃氣火焰傳播速度之影響，本分析採用層流火焰速度經驗公式[6]，如下方程式：

$$S_L(\phi, T, P) = S_{L,ref}(\phi) \left(\frac{T_r}{T_{ref}} \right)^\alpha \left(\frac{P}{P_{ref}} \right)^\beta (1 - 2.5\psi) \quad (1)$$

$$S_{L,ref}(\phi) = Z \cdot W \cdot \phi^\eta \cdot \exp[-\xi(\phi - 1.075)^2]$$

其中參考壓力 Pref= 1 atm 及溫度 Tref= 300 K， ϕ 為缸內當量比、 ψ 為未燃區內殘餘燃氣之質量分率，相關參數如表二所列。

表二、層流火焰速度公式之相關經驗係數[6]

Fuel	C ₈ H ₁₈
Z	1
W (cm/s)	46.58
η	-0.326
ξ	4.48
α	1.56
β	-0.22

3.2 燃油蒸發模式

燃油蒸發是燃燒反應前很重要的過程，蒸發的過程速度也會影響到缸內壓力及溫度的變化。本文中採用 GT-Suite 進行引擎性能模擬，程式中所採用的蒸發率計算式，如下所示：

$$R_{evap} = \frac{4.16 \times RPM_{ref}}{CA50} \left(\frac{T}{T_{ref}} \right)^{TMPEXP} \left(\frac{RPM}{RPM_{ref}} \right)^{RPMEXP} \quad (2)$$

其中 CA50 為燃料蒸發 50% 所需的時間(曲軸角度)，本研究承繼先期研究結果，將 CA50 參數採用 120 度[4]，參考轉速(RPMref)、溫度(Tref)分別為 4000 RPM 及 600K，RPMEXP 及 TMPEXP 為其指數參數。

四、分析結果與討論

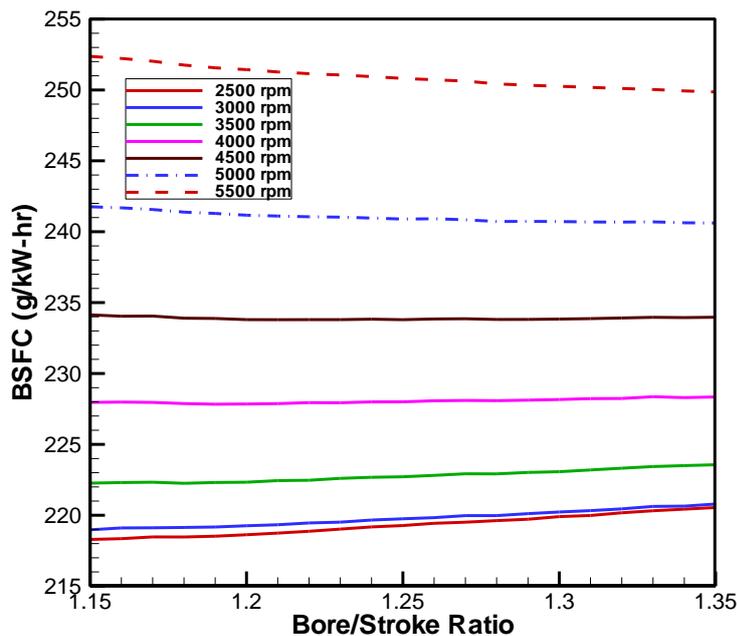
本文以一具水冷式 V 型雙缸(V2) 1000 c.c.缸內直噴汽油引擎為模擬分析主體，目標以設計一具穩定於 30 kW 輸出且 BSFC 可低於 230 g/kW-hr 的 GDI 增程引擎，使用先前研究所做的點火正時最佳化所訂定出的點火正時角(隨轉速變化)，V 型雙缸之點火正時時機相差 270 度，並搭配最佳的燃油噴射正時(-230° CA ATDC_Firing)，在固定燃油當量比(Phi=1.0)的操作條件下，進行設計參數變化分析，本研究採用的模擬條件如表三所示。

表三、缸內直噴 V2 增程引擎設計參數範圍

Design Parameters	
Intake Valve Timing	290°~350° CA ATDC Firing
Exhaust Valve Timing	80°~120° CA ATDC Firing
Bore / Stroke Ratio (BSR)	1.15~1.35
Compression Ratio (CR)	11.5~13.5
Engine Speed	2000 ~ 6000 RPM

4.1 缸徑衝程比及壓縮比之影響

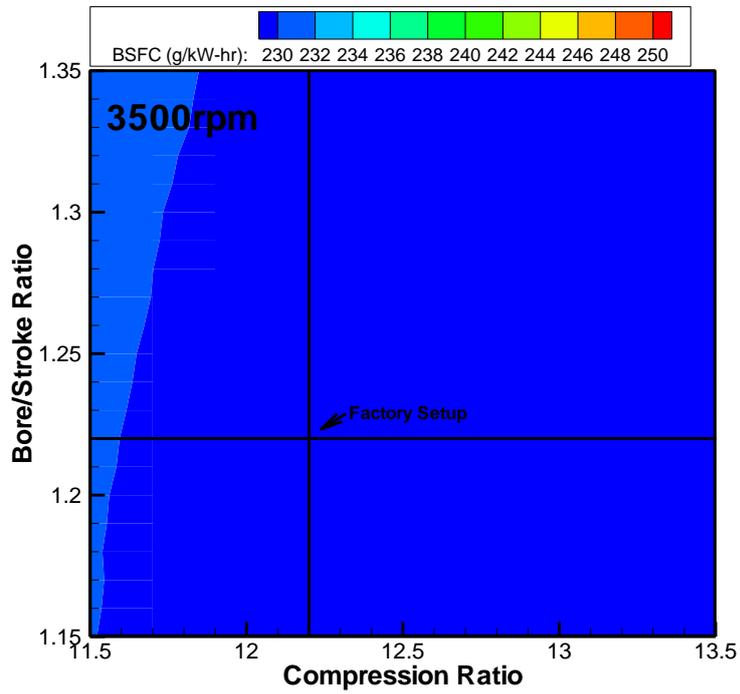
檢視在不同轉速下改變缸徑衝程比之分析結果（如圖三所示），對 BSFC 影響不大，僅在高 BSR 時會些微影響，觀察可知在轉速 4000 RPM（含）以下，可達到本文設定 BSFC 值的目標。後續將以 4000 RPM 為基準，比對 3500 RPM 及 4500 RPM 的性能數據以判斷可行性。



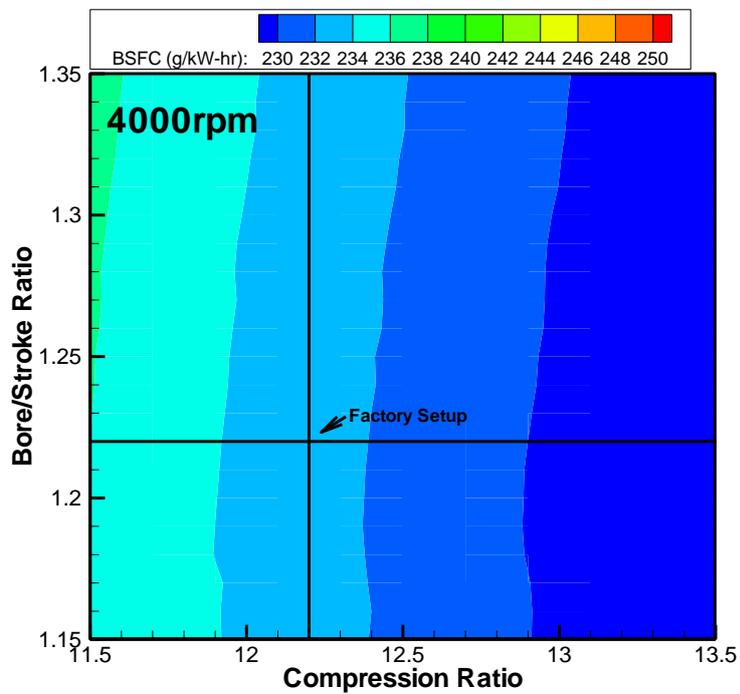
圖三、在不同轉速下改變缸徑衝程比之 BSFC 比較圖

接著探討改變壓縮比及缸徑衝程比對 BSFC 的影響，結果如圖四至圖六所示在不同轉速下之變化圖，可看出改變 BSR 比並不會對 BSFC 有明顯的影響，但在改變壓縮比時則可以看到 BSFC 會隨著壓縮比增加而降低，由於本文所採用實驗引擎之壓縮比已達 12.2，對汽油引擎來說已是偏高的設定值，因此若以增加引擎的壓縮比來改善 BSFC 的輸出值，則引擎成本也需相對的提高，也可造成不預期的爆震發生，實不是可考量的設計方向。探討 BSR 及壓縮比的參數分析結

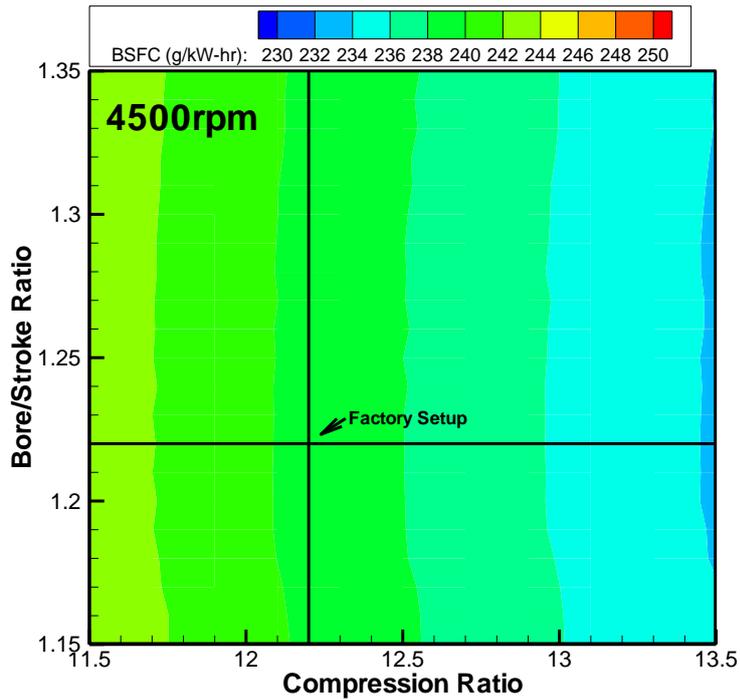
果，均無法取得一個最佳的改善方式，後續分析則採用原本引擎實體規格。



圖四、缸內直噴 V2 增程引擎在 3500 RPM 時改變 B/S 比及壓縮比之 BSFC 分佈圖



圖五、缸內直噴 V2 增程引擎在 4000 RPM 時改變 B/S 比及壓縮比之 BSFC 分佈圖

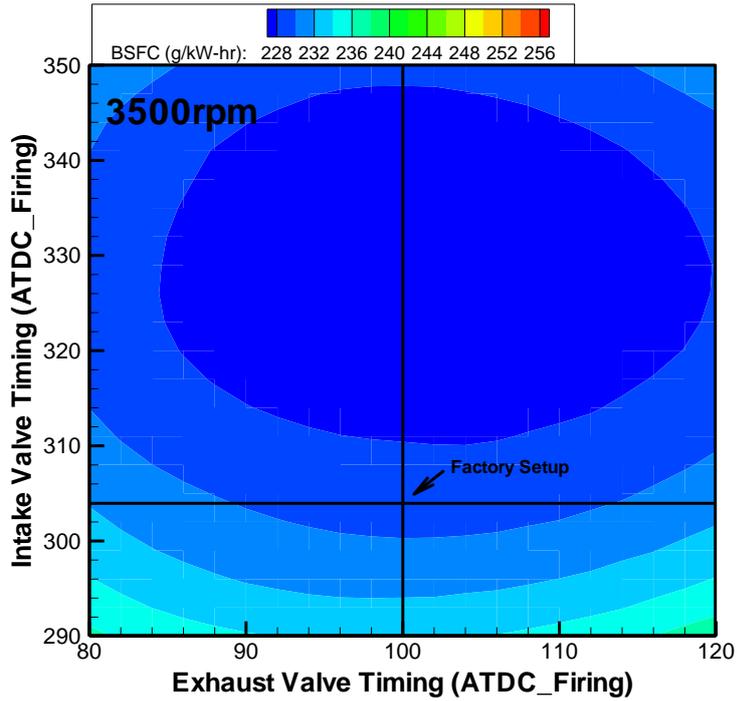


圖六、缸內直噴 V2 增程引擎在 4500 RPM 時改變 B/S 比及壓縮比後 BSFC 分佈圖

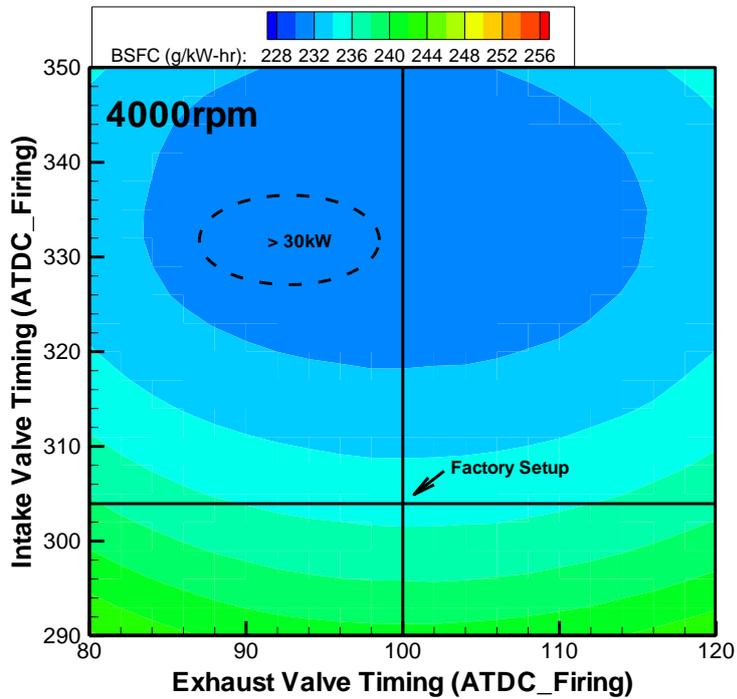
4.2 進排氣門正時之影響

適當控制進排氣正時將能掌握進氣效率而提高引擎性能，圖七為引擎於 3500 RPM 時探討改變進排氣門正時來推估降低 BSFC 的可能性，圖中可明顯看到原實驗機的排氣門正時設定值於在此轉速下最佳的設定點，若進氣門正時可以再些微的延後則可以取得最佳的 BSFC 值，整體看來 BSFC 值均可達到 230 g/kW-hr 的設計限制，但此一轉速下的所有操作點均無法達到 30 kW 的充電輸出需求，所以勢必要再將轉速提高。

圖八為在 4000 RPM 的 BSFC 分佈圖，有一部份操作區間可達到 220~230 g/kW-hr 左右，虛線範圍內為可達輸出功率 30 kW 之正時參數範圍，經對照到輸出功可達到 30 kW 輸出的範圍，需將進氣門正時延後至 335°~345° CA 左右、排氣正時調整為 90° CA，則可以達到本文對引擎輸出功目標且 BSFC 可以保持在 230 g/kW-hr。

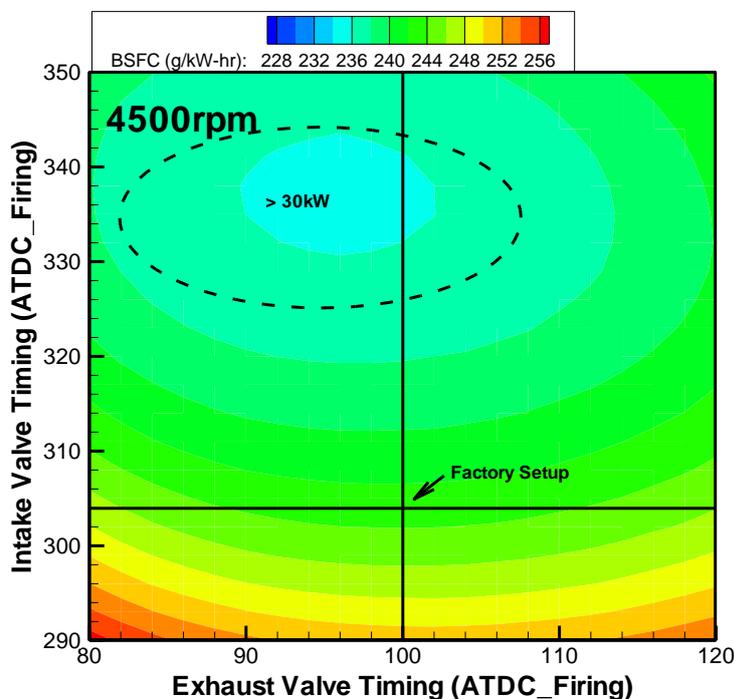


圖七、缸內直噴 V2 增程引擎在 3500 RPM 時改變進排氣門正時之 BSFC 分佈圖



圖八、缸內直噴 V2 增程引擎在 4000 RPM 時改變進排氣門正時之 BSFC 分佈圖

在較高的轉速下，圖九為引擎在 4500 RPM 時的 BSFC 分佈圖，虛線代表 30 kW 輸出的範圍也相對地較廣，乃因轉速較高，達到 30 kW 的範圍內所計算出的 BSFC 相對的提高，而使得 BSFC 值略高於目標值(230 g/kW-hr)。



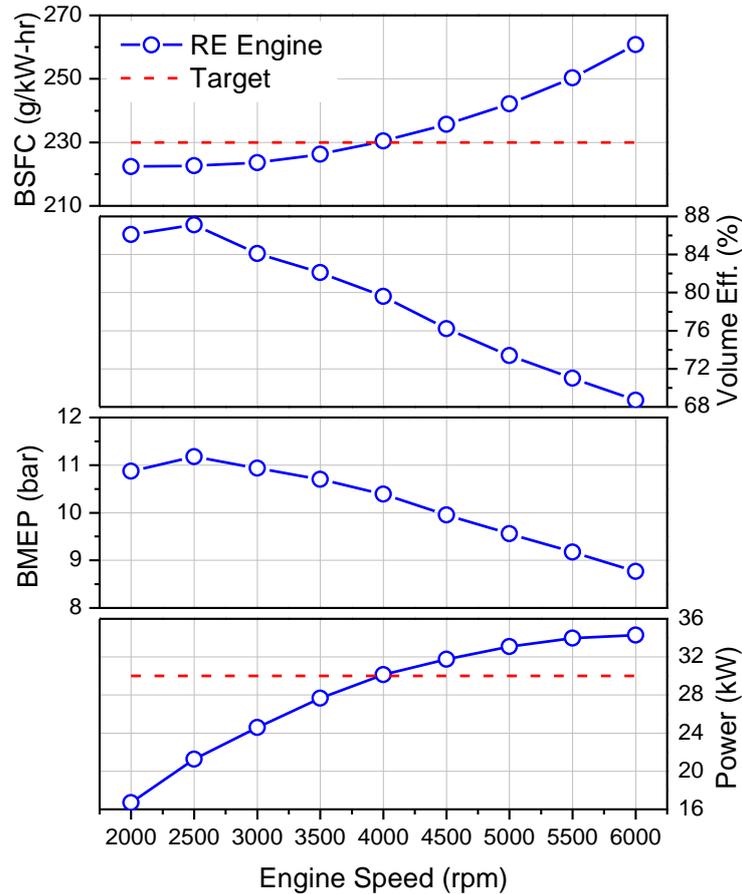
圖九、缸內直噴 V2 增程引擎在 4500 RPM 時改變進排氣門正時之 BSFC 分佈圖

4.3 最佳設計點

綜合以上設計參數變化結果討論，發現改變 CR 及 BSR 並不會對 BSFC 及輸出功率有太大的影響，雖有變化但考量到實際引擎改裝及耐用性而言，最直接的方式則是改變進、排氣門的開關角度，藉以達到本研究所預設的引擎功率輸出目標值。進、排氣門的開關角度的設定上則需參考圖八的 BSFC 變化圖，圖中所標定的 30 kW 範圍則可以滿足本研究所訂定的目標，且 BSFC 可以維持在 230 g/kW-hr，因此，本研究建議最佳化設計點可採用進氣門的正時調整到 326° ~ 336° CAATDC Firing 且排氣門正時也需調整到 86° ~ 98° CAATDC Firing，此閥門正時範圍則可以達到本次研究所設定的工作條件，並且此閥門開關策略在引擎實際改裝設計上較不複雜。

採用最佳化閥門開關控制範圍，進行不同轉速之性能分析，圖十為不同轉速下之 BSFC、進氣效率、BMEP 及功率輸出之比較。首先觀察 BSFC 的部份，在相同的進氣當量比下，較低的轉速可以獲得較佳的 BSFC 輸出，且在 4000 RPM 以下達本研究的預設目標(230 g/kW-hr)；再看到容積效率的部份，由於實體引擎本體為短衝程設計的問題，容積效率在 2500 RPM 時可以達到最大值，隨著轉速

升高而降低；引擎的 BMEP 輸出是伴隨著進氣量而決定，當有較佳的容積效率時，均可以得到較佳的 BMEP 輸出，表示在此操作點上有較好的缸內燃燒壓力，在 4000 RPM 時可達 10 bar；因本研究設定輸出功為 30 kW，觀察引擎輸出功率圖，顯示在 4000 RPM 時可以達得目標值，且隨著引擎轉速升高而提升，因考量到 BSFC 的目標限制，此增程 GDI 引擎的單點最佳化轉速應該設定在 4000 RPM。



圖十、缸內直噴 V2 增程引擎在最佳化設計點之不同引擎轉速操作之性能指標圖

五、結論

本研究運用 GT-Suite 引擎性能模擬軟體進行分析 V 型雙缸增程 GDI 引擎性能，並以設計 30 kW 為目標進行缸徑衝程比、壓縮比及進/排氣正時之變化分析，以便選定最佳化增程 GDI 引擎規格與相關設計參數，經分析結果可得下列幾項結論：

- (一)、改變缸徑衝程比對增程引擎之比燃油消耗率的變化較無明顯的關係，在改變壓縮比後，比燃油消耗率會隨著壓縮比增加而下降。
- (二)、在不同的轉速操作條件下，選定適當的進排氣門正時設計，可使增程引擎在更省油的狀態下運轉，達到節能減碳的目的。
- (三)、透過閥門正時變化分析找出閥門開啟關閉之最佳化區域，採用進氣門的正

時調整到 $326^{\circ}\sim 336^{\circ}$ CA ATDC Firing 且排氣門正時也需調整到 $86^{\circ}\sim 98^{\circ}$ CA ATDC Firing 之範圍，在轉速 4000 RPM 操作下可達 BSFC 低於 230 g/kW-hr，BMEP 可達 10 bar 且輸出功率可達 30 kW，以供發電機充電運用。

六、致謝

感謝經濟部一般型學界科技專案計畫編號: 100-EC-17-A-16-S1-169 之補助與華擎機械股份有限公司對於本專案之經費與技術支援，並感謝本中心同仁協助。

七、參考文獻

1. K. Wittek et. al, *V2-Range Extender Module with FEVcom- a Barely Noticeable Companion in Your Electric Vehicle*, 1st Aachen Colloquium China 2011.
2. B. Mahr, *Design and Development of the MAHLE Range Extender Engine*, 1st Aachen Colloquium China, 2011.
3. 張學斌、蔡欣倫，單缸缸內直噴汽油引擎點火正時之研究，中華民國第十六屆車輛工程學術研討會，2011年11月11日，台灣。
4. 蔡欣倫，缸內直噴汽油-乙醇引擎點火正時之研究，2012 中華民國燃燒學會第22屆學術研討會論文集，高苑科技大學，高雄，2012。
5. GT-Suite, *USER MANUAL*.
6. M. Sara, J. Y. Chen and A. C. Fernandez-Pello, *Fundamentals of Combustion Processes*, Springer, New York, 2011.

港灣污泥高溫燒坯製磚特性之研究

Reuse of Harbour Sediment by High Temperature Brick Sintering

施百鴻¹、蔣立中²、陳盈霖³

Pai-Haung Shih, Li-Choung Chiang, Ying-Lin Chen

輔英科技大學環境工程與科學系

Environmental Engineering and Science, Fooyin University

張益國⁴

Yi-Kuo Chang

中臺科技大學環境與安全衛生工程系

Department of Safety Health and Environmental Engineering, Central Taiwan

University of Sciences and Technology

摘要

本研究利用採集之天然黏土及港灣污泥，經過調配比例製作磚坯後，以高溫爐模擬磚窯廠之燒磚程序，探討合適港灣污泥添加比例範圍，以利後續資材化研究。燒結製磚試驗中，由於港灣污泥之組成與燒製紅磚原料組成相似，具取代紅磚原料之潛力。因此以不同比例添加結果試驗燒成體物化特性分析得知，10% - 90%之港灣污泥添加量皆符合【CNS 382 建築用普通磚】二等磚之規範。又由毒性溶出試驗結果得知，無論港灣污泥取代量之多寡，皆無重金屬溶出現象產生。綜合燒成體物化特性及毒性溶出試驗得知其具燒製磚坯可行性，後續可朝港灣污泥資材化方向邁進。

關鍵字：港灣污泥、燒結製磚

Abstract

Collected harbour sediment was blended with natural clay and sintered in elevated temperature for brick making. Appropriate replacement percentage of sediment was investigated for the future engineering application purpose. Basic characteristic of harbour sediment indicates that composition of sediment is similar to raw materials of red brick. Further experiments on physical-chemical characteristics of sintered bricks indicate that 10%-90% of replacement of harbour sediment could meet the 【CNS 382 Bricks for Building】 second grade red brick criteria. In addition, the toxicity characteristic leaching procedure results show that, regardless of the

¹ 輔英科技大學環境工程與科學系，副教授，E-mail: pl010@mail.fy.edu.tw

² 輔英科技大學環境工程與科學系，副教授

³ 輔英科技大學環境工程與科學系，碩士

⁴ 中臺科技大學環境與安全衛生工程系，助理教授

harbour sediment replacement percentage that there are no leaching phenomena of heavy metals from the sintered bricks. Combining the physical-chemical characteristics and toxicity characteristic leaching procedure results, harbour sediment is feasible for brick sintering, and the technique could provide as the follow-up resource recovery direction of harbour sediment.

Keywords: Harbour sediment, red brick, high temperature sintering

一、前言

台灣本島四面環海，有基隆、台中、高雄及花蓮等四個國際商港及其他大大小小的工業港、漁港等多達二百餘處。其中大部分重要港口都集中在台灣西海岸的砂土質海岸興建，臨近港區之河川及大小排水，其夾帶入海之土石、污染、漂砂等，極易隨潮流及波浪的作用，帶入港區水域造成淤積及水深不足等問題。因此，各港務單位為維持船舶進出便利及靠泊安全之需求，每年均須投入相當的費用，辦理港池及航道的疏浚工作。而每年因航道及迴船池維護浚深需要，產生之浚港底泥估計約在 200-300 萬立方公尺之間。目前國內部分港口針對浚港所挖出的污泥，係依商港法將其海拋於十二海浬外深達 200 公尺左右方式處理，由於該處理方式相當不經濟，且可能對於海洋生態造成二次污染，又浚港所挖出來的污泥，其性質接近於土壤，且一般也非屬於有害廢棄物，因此若能將其以再利用方式，應用於其他用途，不但可以有效解決龐大之浚港污泥量，創造經濟效益，同時也避免海拋對於海洋所造成對環境不良之影響。

根據 Lafhaj 等人[1]及 Chen 等人[2]的研究中得知，港灣污泥之粒徑分佈範圍為如 Table 1 所示，當中砂粒含量約在 7.8%-20.6% 間、粉粒含量約在 74.4%-82.8%，而黏粒則介於 4.96%-9.4% 間。而根據呂明儀[3]指出傳統燒製紅磚之原料中其含砂量以不超過 30% 最為合適，由此可看出港灣污泥具再利用為紅磚之潛力。另由 Lafhaj 等人[1]及 Hamer 等人[4]之研究中得知，港灣污泥之化學組成如 Table 2 所示，由表中得知港灣污泥之組成是以矽(54%-63%)、鋁(8.2%-11%)、鈣(1.8%-10.9%)及鐵(8.3%-14.3%)為主要成分，此性質與資材化材料性質相似，具發展資材化之前景。

另依 Chen 等人[2]對高雄港區六處底泥沉積物採樣結果發現，高雄港浚港污泥含些許金屬 (Hg、Pb、Cd、Cr、Cu、Zn)，其重金屬濃度分布關係如 Figure 1 所示。其中，Hg 為 0.1-8.5 mg/kg、Pb 為 9.5-470 mg/kg、Cd 為 0.1-6.8 mg/kg、Cr 為 0.2-900 mg/kg、Cu 為 5-946 mg/kg、Zn 為 52-1369 mg/kg，而 Cr、Cu、Zn 等三種金屬有略為偏高之現象，故若於後續欲進行再利用時需注意其金屬溶出之情形。

Table 1 Granular distribution of sediments

	Sand fraction (%)	Silt fraction (%)	Clay fraction (%)
Lafhaj et al.(2008)	20.61	74.43	4.96
Chen et al.(2007)	7.8	82.8	9.4

Table 2 Chemical composition of sediments

	Oxides (%)							
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅
Lafhaj et al.(2008)	54.33	8.22	10.89	14.27	1.72	0.68	1.49	3.49
Hamer et al.(2002)	63	11	1.8	8.3	0.9	1.9	1.6	—

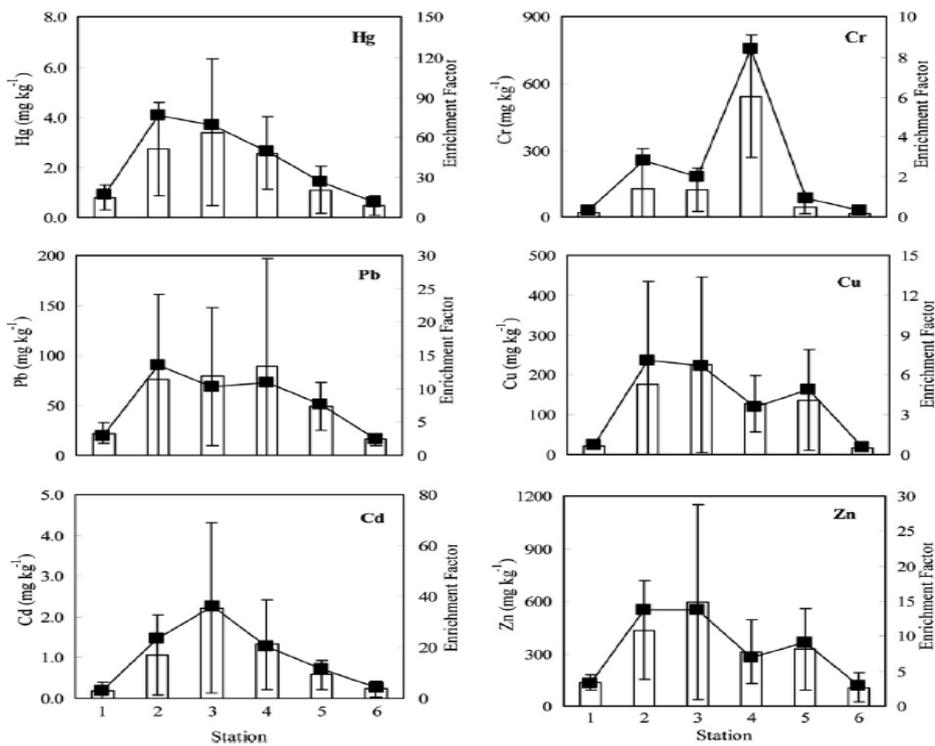


Figure 1 Concentration distribution of heavy metals in harbour sediment (Chen et al.(2007))

二、實驗方法

本研究以高溫爐模擬磚窯廠之燒磚程序，利用採集之天然黏土及港灣污泥，經過組成分析及調配比例製作磚坯後，以高溫爐進行燒製。燒成體依據【CNS 382

建築用普通磚】之規範進行燒失量、吸水率、收縮率及抗壓強度分析，並以毒性特性溶出試驗程序(TCLP)對磚坯進行試驗，評估港灣污泥資材化效益。

2.1 燒失量

成形試體燒結前後的重量損失即定義為燒失量。燒結過程的燒失量可作為陶瓷工業中一個產品品質的重要指標之參考。其計算式如式(1)：

$$\text{燒失量}(\%) = \left(\frac{W_0 - W_1}{W_0} \right) \times 100\% \quad (1)$$

其中， W_0 為燒結前乾燥試體重量(g)， W_1 為燒結後試體重量(g)

2.2 吸水率

燒成試體之吸水率是指進入試體開孔孔隙中之水重與試體重之比值。吸水率會直接影響試體的抗壓強度與試體密度。其方法為將燒成試體置於加熱之水槽內，使其沸騰三小時，然後置於室溫冷卻，再以富吸水性之乾布將試體表面水膜擦乾。其吸水率計算公式如式(2)所示：

$$\text{吸水率}(\%) = \left(\frac{W_A - W}{W} \right) \times 100\% \quad (2)$$

其中， W 為乾燥試體重量(g)， W_A 為面乾水飽和試體重量(g)

2.3 收縮率

當試體進行高溫燒結反應時，高溫狀態會使試體體積產生變化，在陶瓷工業上此種變化需要加以控制，收縮率為試體成形燒結前後之軸長改變率，其中正值為試體產生收縮現象，而負值為發生膨脹試體。燒結前後的試體軸長增加量及試體之維度變化率。其計算公式如式(3)所示：

$$\text{收縮率}(\%) = \left(\frac{L_0 - L_1}{L_0} \right) \times 100\% \quad (3)$$

其中， L_0 為試體燒結前之軸長(cm)， L_1 為試體燒結後之軸長(cm)

2.4 抗壓強度

抗壓強度為試體經過成形燒結後，單位斷面積所能承受之重量。試體抗壓強度為資源化之重要指標。為瞭解不同條件下，試體燒結前後之強度差異，故使用單軸抗壓試驗機測定燒結試體之抗壓強度。其試驗方法是將試體放置於單軸抗壓平台予以加壓，於試體破碎時讀取最大受力值，再除以試體截面積即可求得。

2.5 毒性特性溶出程序

依據 NIEA R201.13C，將樣品顆粒減小至直徑小於 1 mm，秤取固體 5.0 g，置於 500 ml 燒杯或錐形瓶中，加入 96.5 ml 之試劑水，蓋以錶玻璃，以磁石攪拌

器劇烈攪拌五分鐘，測量溶液之 pH 值並記錄之。若 $\text{pH} < 5.0$ ，則使用萃取液 A；若 $\text{pH} > 5.0$ ，則加入 3.5 ml 1.0N HCl，攪拌成均勻狀，蓋以錶玻璃，加熱至 50°C 並維持 10 分鐘，冷卻至室溫後，測量溶液之 pH 並記錄之，若 $\text{pH} < 5.0$ ，使用萃取液 A (pH 為 4.93 ± 0.05)，若 $\text{pH} > 5.0$ ，使用萃取液 B (pH 為 2.88 ± 0.05)。

以液固比 20:1 之比例，將樣品及萃取液裝入 PE 瓶中，以轉速為 30rpm 之旋轉裝置，旋轉萃取 18 ± 2 小時，後由過濾設備將其固液分離，收集萃取液，以感應耦合電漿發射光譜儀(ICP)測定萃取液之元素濃度，以判定試驗材料於燒結後是否達無害化指標。

三、燒結製磚特性變化

3.1 阿太堡試驗

黏土礦物在含有些許水分的情況下，可以重模而不破裂，此一凝聚特性乃因黏土顆粒四周吸附水所產生。而在含水率極低時，黏土行為類似固體。當含水率極高時，黏土即像液體般可流動。因此黏土之行為性可依含水率之高低劃分為固體、半固體、塑性體及液體四種狀態。塑性是黏土和大多數的陶瓷坯料最重要之特性，因為黏土在塑性體範圍內成型最容易。若黏土之含水率高於液性限度，成型雖容易但降伏強度很低；而含水率若低於塑性限度，則降伏強度較高，但不易成型且坯體可能產生較多裂痕。

由上述之理論可得知，欲將浚港底泥燒製磚坯，需先以阿太堡試驗(Atterberg Limit Test)分析浚港底泥及黏土之塑性限度(Plastic Limit)，並從中得到最合適之水分添加量，方可進行磚坯之製備。因此，本研究依據【CNS 5088 土壤塑性限度試驗】測出塑性限度試驗值，如 Figure 2 所示。由圖中可看出水分之添加量會隨著港灣污泥之取代量增加而增多，但在港灣污泥取代量達 80% 時，此時之含水量應已達飽和，因在取代至 90% 時，其含水率已開始有下降之趨勢。

經由該塑性限度試驗結果，對於後續製作磚坯時，水分之添加量有很大的幫助。因在現今製磚廠中並無一套水分添加量之特定公式或比例，僅由製磚師傅憑經驗來添加，此舉易影響紅磚燒結後優劣之比例。因此，後續若能將該方法套用於製磚流程中，定能提升製磚添加比例。

3.2 燒成體物化特性分析

3.2.1 燒失量

Figure 3 為燒結試體之燒失量變化。依據【CNS 382 建築用普通磚】之標準規範規定磚頭之燒失量須小於 15%，因此本研究將該值繪於圖中並以虛線表示，以利判定座落於該規範下之比例。從圖中可看出 10% 港灣污泥取代量之磚坯其燒失量為 5.7%，而隨著港灣污泥取代比例之增加，其燒失量也隨之增加，並於增加至 80% 之港灣污泥取代量時，超過【CNS 382 建築用普通磚】之規範。

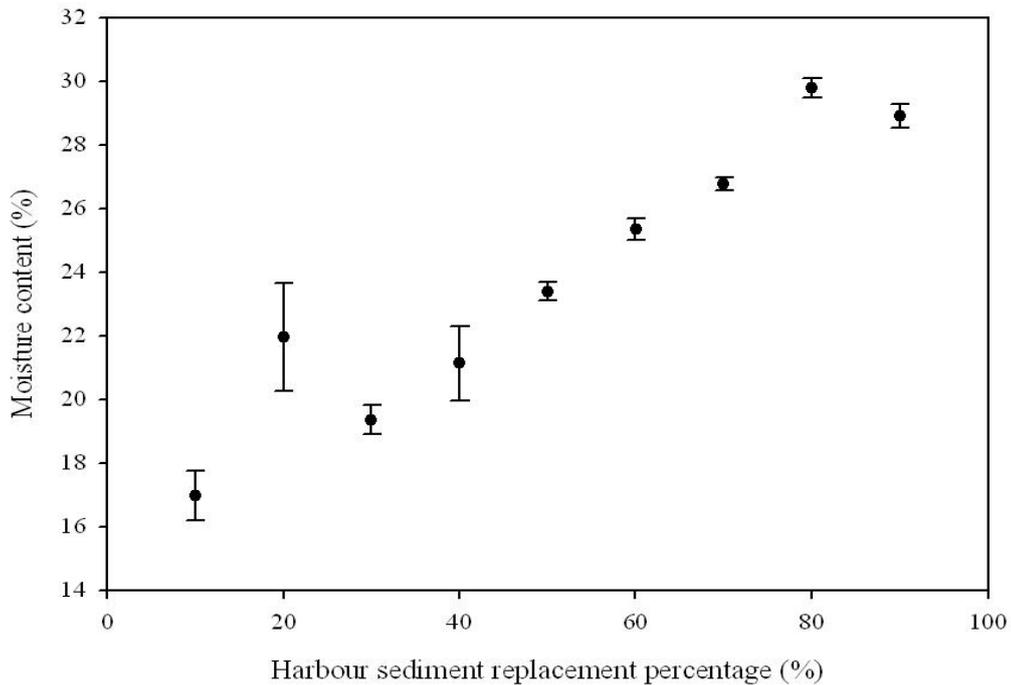


Figure 2 Plastic limit of harbour sediment

3.2.2 吸水率

Figure 4 為燒結試體之吸水率變化。依據【CNS 382 建築用普通磚】之標準規範規定磚頭之吸水率小於 15%，即符合一等磚之規範；若小於 19%，則符合二等磚之規範。因此本研究將該值繪於圖中並以虛線表示，以利判定座落於該規範下之比例。從圖中可看出 10% 港灣污泥取代量之磚坯其吸水率為 16.3%，而隨著港灣污泥取代比例之增加，其吸水率有隨之增加的趨勢出現，但於取代 60% 及 90% 時，有下降之現象產生。整體來看，不論港灣污泥取代量之多寡，其皆符合二等磚之規範。

3.2.3 抗壓強度

Figure 5 為燒結試體之抗壓強度變化。依據【CNS 382 建築用普通磚】之標準規範規定磚頭之抗壓強度大於 150 kg/cm²，即符合一等磚之規範；而大於 100 kg/cm²，則符合二等磚之規範；若只大於 70 kg/cm²，則為符合三等磚之規範。因此本研究將該值繪於圖中並以虛線表示，以利判定座落於該規範下之比例。從圖中可看出 10% 港灣污泥取代量之磚坯其抗壓強度為 121.5 kg/cm²，而在港灣污泥取代量為 20% 時，其抗壓強度降為 98 kg/cm²。又於港灣污泥取代量為 30% 時，抗壓強度上升至 119 kg/cm²。而在港灣污泥取代量為 40%-60% 時，其抗壓強度則落在 100 kg/cm² 左右。然而在港灣污泥取代量增加至 70% 時，其抗壓強度大幅下降至 80 kg/cm²，而在港灣污泥取代量增加至 80% 及 90% 時，其抗壓強度又升至 120 kg/cm² 及 107 kg/cm²。就整體來看，除港灣污泥取代量為 20% 及 70% 是落於三等磚之規範外，其餘比例皆符合二等磚之規範。

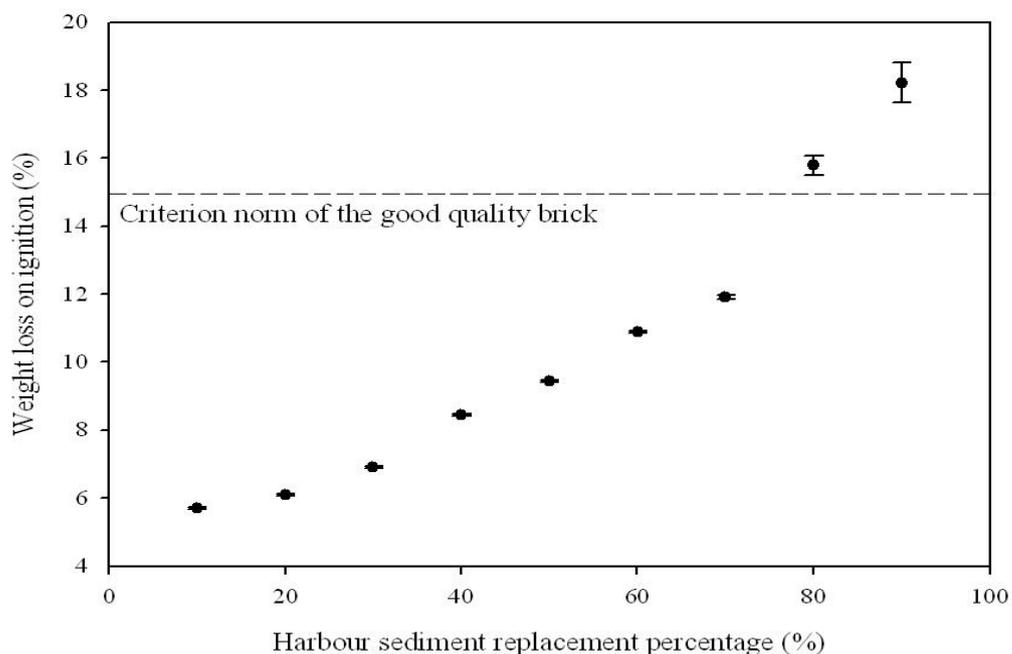


Figure 3 Weight loss on ignition with harbour sediment replacement

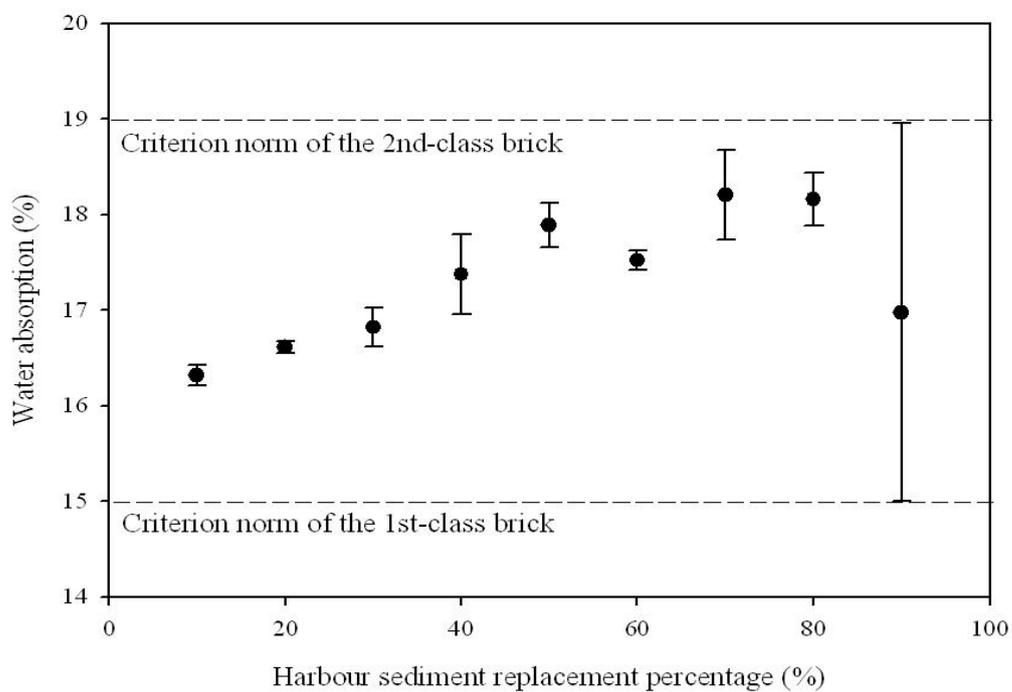


Figure 4 Water absorption with harbour sediment replacement

3.3 毒性特性溶出試験

本研究製作磚坯乃欲用於土建材料上，因此須對其進行毒性溶出試驗，以斷定其具無害化之特性。其結果如 Table 3 所示。由表中可得知，銅之溶出量有隨

底泥之添加量增加而微幅增加，但其溶出量很低，且距管制標準仍有一大段距離，而其餘之重金屬無論港灣污泥添加量之多寡，皆無金屬溶出之現象產生。

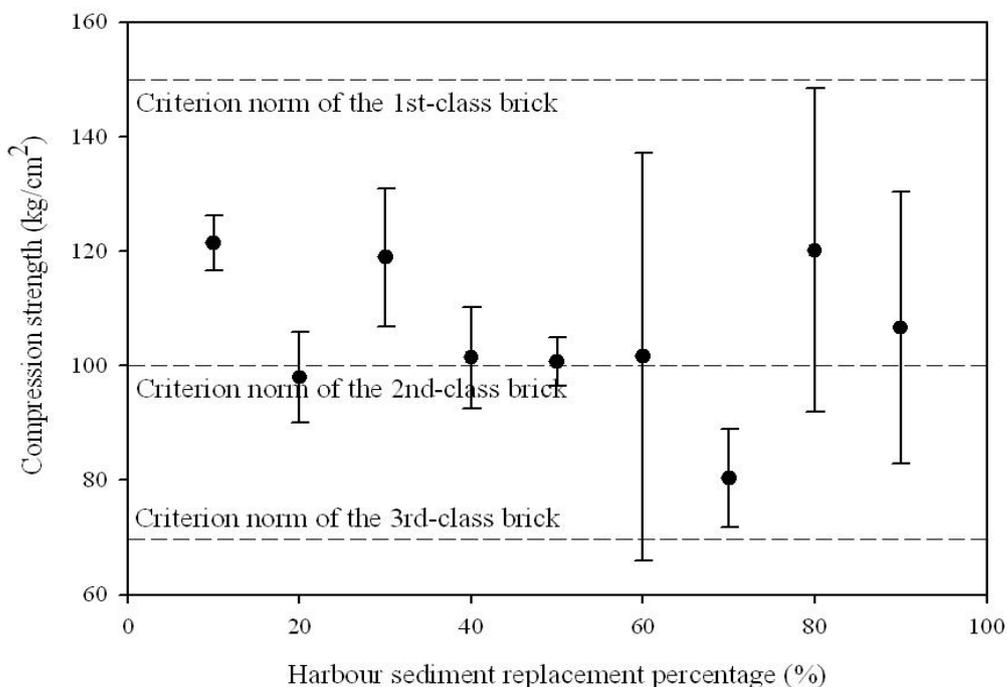


Figure 5 Compression strength with harbour sediment replacement

Table 3 TCLP data for brick with harbour sediment replacement

	Element (mg/L)					
	Cd	Cr	Cu	Pb	Zn	Ni
10% harbour sediments replacement	N.D.	N.D.	0.08	N.D.	N.D.	N.D.
20% harbour sediments replacement	N.D.	N.D.	0.08	N.D.	N.D.	N.D.
30% harbour sediments replacement	N.D.	N.D.	0.10	N.D.	N.D.	N.D.
40% harbour sediments replacement	N.D.	N.D.	0.12	N.D.	N.D.	N.D.
50% harbour sediments replacement	N.D.	N.D.	0.13	N.D.	N.D.	N.D.
60% harbour sediments replacement	N.D.	N.D.	0.14	N.D.	N.D.	N.D.
70% harbour sediments replacement	N.D.	N.D.	0.15	N.D.	N.D.	N.D.
80% harbour sediments replacement	N.D.	N.D.	0.16	N.D.	N.D.	N.D.
90% harbour sediments replacement	N.D.	N.D.	0.16	N.D.	N.D.	N.D.
Regulatory values	1	5	15	5	25	—

N.D. : Not Detected < 0.1 mg/L

四、結論

目前國內港口針對浚港所挖出的污泥，係依商港法將其海拋處理，由於該處理方式相當不經濟，且可能對於海洋生態造成二次污染，因此若能利用其基本特性優點將其以燒結製磚再利用，不但可以有效解決龐大之浚港污泥量，創造經濟效益；同時也避免海拋對於海洋所造成對環境不良之影響。本研究由阿太堡試驗（塑性限度）結果得之，水分之添加量會隨著港灣污泥之取代量增加而增多，並於港灣污泥取代量達 80% 時，其含水量達到飽和。由燒成體特性分析及毒性溶出試驗得知，10%-90% 之港灣污泥取代量皆符合【CNS 382 建築用普通磚】二等磚之規範。綜合以上結果，則可得添加 80% 港灣污泥應為後續工程應用最佳之取代比例。

五、參考文獻

1. Z. Lafhaj, M. Samara, F. Agostini, L. Boucard, F. Skoczylas, G. Depelsenaire, Polluted river sediments from the North region of France: Treatment with Novosol process and valorization in clay bricks, *Construction and Building Materials*, Vol.22, pp. 755-762, 2008.
2. C.W. Chen, C.M. Kao, C.F. Chen, C.D. Dong, Distribution and accumulation of heavy metals in the sediments of Kaohsiung Harbor, Taiwan, *Chemosphere*, Vol.66, pp. 1431-1440, 2007.
3. 呂明儀，紅磚性質與白華現象之研究，中原大學，碩士論文，1995。
4. K. Hamer, V. Karius, Brick production with dredged harbour sediments. An industrial-scale experiment, *Waste Management*, Vol.22, pp. 521-530, 2002.

車輛廢氣重組產出富氫合成氣體之熱力學評估

Thermodynamic prediction of hydrogen-rich gas production on exhaust gas reforming

洪榮芳¹、尤富芃²、邱韋丞³

Rong-Fang Horng, Fu-Pong Yo, Wei-Cheng Chiu

崑山科技大學機械工程系

Department of Mechanical Engineering, Kun Shan University, Tainan, Taiwan

賴銘彬⁴、賴維祥⁵

Ming-Pin Lai, Wei-Hsiang Lai

國立成功大學航空太空工程學系

Department of Aeronautics and Astronautics, National Cheng Kung University,
Tainan, Taiwan

摘要

本論文乃利用理論化學平衡計算來探討碳氫燃料配合廢氣重組法(Exhaust gas reforming, EGR)之產氫特性。廢氣重組法乃近年來相當新穎之構想，亦即利用燃燒過程廢氣排放中所含之水汽及二氧化碳與碳氫燃料進行重組反應。研究方法乃是利用吉伯士最小自由能(Minimum of Gibbs free energy)來進行理論平衡計算，以求解反應平衡組成及其熱力性質。研究內容主要分為二大部份，首先探討不同重組方式之產氫特性；再者，探討多種碳氫燃料配合 EGR 方式對於富氫合成氣體(H₂-rich syngas)產出的影響，並進行車載應用之可行性評估。研究目的為改善汽、機車能源使用效率，並降低二氧化碳排放為目標。分析結果指出，EGR 反應若能有效配合汽油引擎輔助摻燒，最多約可改善 28.7% 的引擎熱效率，並充分達到節能減碳的目的。

關鍵字：二氧化碳減量、廢氣重組、富氫合成氣體、熱力學分析、吉伯士最小自由能

Abstract

This study was to predict the reactions of exhaust gas reforming (EGR) with hydrocarbon fuels by chemical equilibrium theoretical calculation, and the characteristics of H₂-rich gas production were demonstrated. EGR is the new concept

¹ 崑山科技大學機械工程系，教授，E-mail: hfr733@mail.ksu.edu.tw

² 崑山科技大學機械工程系，碩士研究生

³ 崑山科技大學機械工程系，博士研究生

⁴ 國立成功大學航空太空工程學系，博士研究生

⁵ 國立成功大學航空太空工程學系，教授

drawn in recently. On the basis of this idea, the emitted gases (e.g., steam, carbon dioxide, etc) from combustion processing were reformed with the added hydrocarbon fuels. The methodology was using thermodynamic equilibrium based on a minimization of Gibbs free energy. As a result, the equilibrium composition was determined. This study covers two subjects. The first was to evaluate the characteristics of hydrogen production. The second was to confer the features of H₂-rich gas production with various hydrocarbons under EGR, and the feasibility on vehicle application was also considered. The aim of this study is to determine the parameters of octane reforming on hydrogen production. The results would be helpful to improve the fuel consumption and exhaust emission of vehicle. The predicted results showed that the engine thermal efficiency of 28.7% could be improved with the exhaust gas reforming. Consequently, the goal of energy saving and carbon reducing could be achieved.

Keywords: Carbon dioxide mitigation, exhaust gas reforming, H₂-rich syngas, thermodynamic analysis, minimum Gibbs free energy

一、前言

有鑑於全球能源逐漸匱乏，國際油價不斷上漲，如何有效節約能源並找尋新的替代能源來減少化石燃料的依賴，實為當前亟需解決的問題。或許短時間內所看到的只是石油、物價的上漲，但大量的使用化石燃料背後，隱藏著對環境有害之污染也隨之上升，況且近幾年溫室效應所帶來的衝擊遠大於我們所想像，所以此等議題已不容再忽視。溫室氣體種類居多，又以 CO₂ 為主要成份，而相關對策大致可分為 CO₂ 減量、回收、再利用與封存等。於 CO₂ 再利用方面，以往皆使用二氧化碳重組(Dry reforming)方式來合成高價值的化學與能源產品[1, 2]。此等反應於 1928 年由 Fisher 和 Tropsch 兩人率先開始研究[3]，而近幾年研究集中於價格便宜，且活性、選擇性與貴重金屬(Pt、Rh、Ru)相似之 Ni 觸媒來進行重組反應[4]。再者改良觸媒與擔體間的作用力，配合分散性效果佳之觸媒，以增加觸媒表面碳阻能力(Coke resistance ability)[5]，並控制重組反應之溫度，來避免觸媒燒結等[6]。此等重組方式有幾大優點，首先可以有效利用溫室氣體的碳源，除了具有經濟上的優勢外，亦能對溫室氣體減量有實質幫助。但缺點為重組過程為極強烈的吸熱反應，須消耗許多能量，且易於反應溫度不足處，使得燃料因裂解與一氧化碳歧化反應而造成碳析出現象，沉積於觸媒表面或被覆於金屬活性點，使得觸媒失去催化能力。而二氧化碳減量部份，直至目前解決方式還是以配

合替代燃料與提高能源使用效率來進行。替代燃料當中，包含了天然氣、液化石油氣與乙醇等低碳燃料，其所排放的 CO₂ 都比燃燒汽油來得少。其中 CO₂ 污染源部份，大致可分為定置型與移動型兩種，目前 CO₂ 若欲回收，則以定置型之工業及能源產業為主，主要是因為移動式載具所排放之 CO₂ 收集相對不易，且成效較差。近年來氫氣於內燃機使用或應用於廢氣處理方面是屬於一項非常熱門的技術。一方面可做為引擎輔助燃料來改善其熱效率，並可降低污染排放[7-9]。其中氫燃料優點極多，如單位熱值高，火焰淬熄距離(Quenching distance)較汽油小，且可燃極限範圍大，更易於使原引擎能達稀薄燃燒條件[10, 11]。氫氣有自燃溫度高且不易產生爆震的特性；且火焰傳播速度快與擴散係數高的優點，也因此改善了制動熱效率(Brake thermal efficiency, BTE)與貧油條件的循環變異[12]。此外，國際上研究廢氣重組產氫技術之主要團隊為英國伯明罕大學(The University of Birmingham)。主要乃配合廢氣再回收裝置供壓燃引擎(CI)與均質壓燃引擎(Homogeneous charge compression ignition, HCCI)燃燒室進行摻燒。此概念來自於排氣再循環系統，並與現有廢氣再循環系統整合，置於排氣管路內並分流部分廢氣(CO₂, H₂O, N₂ 與 UHC)導入重組單元，與預轉化之碳氫燃料(或原供油系統)進行重組反應。傳統之廢氣再循環(Exhaust gas recirculation, EGR)裝置雖可降低 NO_x 的排放，但會增加 Smoke 排放與微粒生成，進而影響引擎燃燒效率與馬力。若部分排放廢氣(10 - 20%)經由重組過程轉換成富氫氣體，再一同導回引擎燃燒室輔助摻燒，則有助於控制 NO_x 與 Smoke 排放，同時也可提高引擎熱效率與燃燒效率[13-15]。

綜觀上述，有鑑於移動式載具之 CO₂ 排放收集不易，故本研究以探討實車配合廢氣再重組的方式，添加適量燃料與引擎所排出的廢熱及廢氣(CO₂ 與 H₂O)重組成富氫氣體，以供引擎輔助燃燒之用，一方面可提高整體能源使用效率，又可有效降低引擎 CO₂ 的排放。此構想非常適合用於燃燒反應過程排放 CO₂ 之載具及熱機上，例如引擎(SI/CI)、氣渦輪機(GT)、燃燒爐以及燃料電池(FC)等。前三種可由廢氣重組產出的富氫氣體直接作為輔助燃料，提供稀薄燃燒之用。而燃料電池則可配合高溫燃料電池(SOFC/MCFC)排放之廢熱與未燃氣體，以預熱反應物種。所以在能源短缺、污染排放標準越嚴格的未來，廢氣重組應用於載具上直接產氫並降低 CO₂ 排放的方式，預料將成為能源應用方面的發展趨勢，有助於降低 CO₂ 排放量。

本研究利用熱力學評估方式來瞭解多元燃料轉換技術與不同輔助燃料對於重組反應之重組效率、碳形成與二氧化碳轉化等關係。並找出最適合的配對方式，以評估內燃機之熱效率與 CO₂ 減量效益，作為日後車載應用的參考，達到節能減碳的目的。

二、化學理論平衡分析

2.1 研究方法

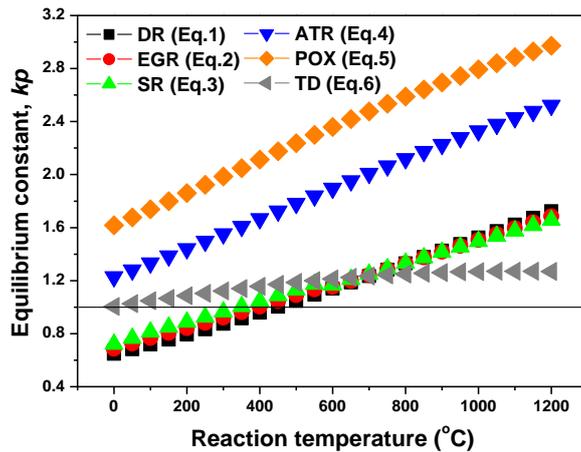
本研究乃是以吉伯士最小自由能來進行化學理論平衡計算。此方法乃用於計算非均勻系統中多組成的平衡成份，包括反應方程式、熱與物質平衡與組成等。理論平衡分析過程中，乃先求解重組反應平衡組成及其熱力性質，以預測產出結果來提供日後實車應用的參考。

2.2 參數設定

目前產氫方式相當多元，若須即時且快速產氫，莫過使用化石燃料重組製氫方式。優點為能量密度高、反應速率快，且不需複雜與昂貴的儲存設備，配合碳氫燃料即可立即提供氫氣來源。熱化學重組反應有若干種，大致概分為單一重組方式與混合重組方式。單一重組方式主要為水蒸氣重組法(Steam reforming, SR)、部份氧化法(Partial oxidation, POX)、二氧化碳重組法與熱裂解法(Thermal decomposition, TD)等。而混合重組方式則以自發熱重組法(Autothermal reforming, ATR)與廢氣重組法為主，此混合重組方式不但可有效產出富氫氣體，並可用來調配產物中助燃與阻燃比例。然而重組過程中化學反應機構相當複雜，副反應則包括順向與逆向水氣轉移反應(WGS/RWGS)、Boudouard 反應、水煤氣反應(Coal gasification, CG)等。因此，本研究也以主要的重組反應來做探討，並配合燃料選用來進行比較。燃料碳數由低至高依序為甲烷(Methane)、乙醇(Ethanol)、丙烷(Propane)、丁烷(Butane)、辛烷(Octane)及十六烷(Hexadecane)等六種。重組反應溫度設定為 0~1200 °C 之間，操作壓力為常壓。

2.3 化學平衡分析

本研究化學平衡分析可分為兩大部份，第一部份是利用辛烷配合各種重組方式來進行富氫合成氣體之產出特性研究，主要反應式與對應之反應焓(Enthalpy of reaction)如表一所示。第二部份則利用廢氣重組法來探討不同燃料的重組特性，Eq. (14)為 EGR (Exhaust gas reforming)理論反應式，而 Eq. (15)為 EGR 實際反應式。其中 a、b、d、e、f、g、h 及 j 分別為實際反應的平衡常數，y 為比例常數。由於 CO₂ 為完全燃燒後的產物，所以熱力性質非常相當穩定，因此以 CO₂ 為反應物將受熱力學所限制。但若能與其他具有較高吉伯士自由能的物種一起進行還原反應，在熱力學上較為可行。所以本研究也利用反應常數(Equilibrium constant, k_p)來了解不同重組方式於反應溫度下之自發性變化，如圖一所示。其中 $k_p > 1$ 代表整體反應較趨於化學平衡式右方，而 $k_p < 1$ 則相較易趨於左方，亦即所謂之逆反應。由圖亦可發現 Eq.(1)~Eq.(6)皆隨反應溫度提高而呈自發性反應。其中又以氧化反應之自發性較佳，DR、SR 與 EGR 等吸熱反應三者則差異不大。此外，自由能與反應常數之計算式分別如 Eq.(16)(17)所示。



圖一、不同重組反應(Eq.1-Eq.6)條件設定下，反應溫度對於反應常數之影響

表一 重組反應式及對應之反應焓值

Reaction	Chemical equation	Enthalpy of reaction (kJ/mol-NTP)	Formul a
Dry reforming	$C_8H_{18(g)} + 8CO_{2(g)} \rightarrow 16CO_{(g)} + 9H_{2(g)}$	1588.0	(1)
Exhaust gas reforming	$C_8H_{18(g)} + 3.764CO_{2(g)} + 4.235H_2O_{(g)} + 22.117N_{2(g)} \rightarrow 11.76CO_{(g)} + 13.23H_{2(g)} + 22.117N_{2(g)}$	1414.0	(2)
Steam reforming	$C_8H_{18(g)} + 8H_2O_{(g)} \rightarrow 8CO_{(g)} + 17H_{2(g)}$	1295.0	(3)
Auto thermal reforming	$C_8H_{18(g)} + 2.4CO_{2(g)} + 2.8(O_2 + 3.76N_2)_{(g)} \rightarrow 10.4CO_{(g)} + 9H_{2(g)} + 10.528N_{2(g)}$	~0	(4)
Partial oxidation	$C_8H_{18(g)} + 4(O_2 + 3.76N_2)_{(g)} \rightarrow 8CO_{(g)} + 9H_{2(g)} + 15.04N_{2(g)}$	-676.0	(5)
Thermal decomposition	$C_8H_{18(g)} \rightarrow 8C_{(s)} + 9H_{2(g)}$	209.0	(6)
Total oxidation	$C_8H_{18(g)} + 12.5(O_2 + 3.76N_2)_{(g)} \rightarrow 8CO_{(g)} + 9H_2O_{(g)} + 47N_{2(g)}$	-5116.0	(7)
Oxidation reaction	$C_{(s)} + O_{2(g)} \rightarrow CO_{2(g)}$	-393.5	(8)
Oxidation reaction	$C_{(s)} + 0.5O_{2(g)} \rightarrow CO_{(g)}$	-110.5	(9)
Water-gas shifting	$CO_{(g)} + H_2O_{(g)} \rightarrow CO_{2(g)} + H_{2(g)}$	-41.2	(10)
Reverse water-gas shifting	$CO_{2(g)} + H_{2(g)} \rightarrow CO_{(g)} + H_2O_{(g)}$	41.2	(11)
Boudouard reaction	$CO_{2(g)} + C_{(s)} \rightarrow 2CO_{(g)}$	172.5	(12)
Coal gasification	$C_{(s)} + H_2O_{(g)} \rightarrow CO_{(g)} + H_{2(g)}$	131.3	(13)

$$8CO_2 + 9H_2O + 47N_2 + xC_nH_mO_p \rightarrow \frac{18+mx}{2}H_2 + (8+nx)CO + 47N_2 \quad (14)$$

$$8CO_2 + 9H_2O + 47N_2 + xC_nH_mO_p \rightarrow y(aH_2 + bCO + dCO_2 + eO_2 + fCH_4 + gN_2) + hH_2O + jC \quad (15)$$

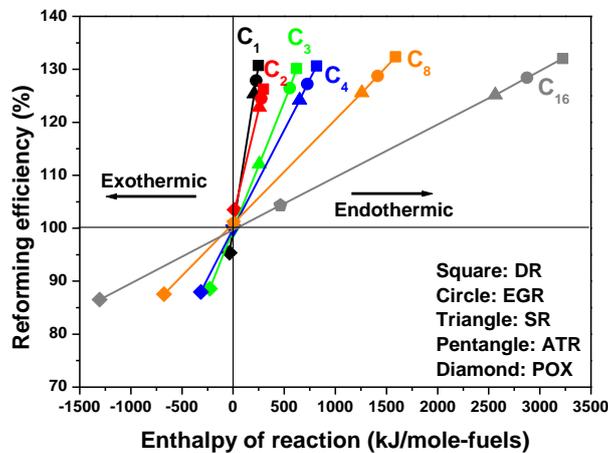
$$\Delta G = \sum_P n_e (\overline{g}_f^0 + \Delta \overline{g})_e - \sum_R n_i (\overline{g}_f^0 + \Delta \overline{g})_i \quad (16)$$

$$kp = \exp\left(\frac{-\Delta G^0}{R_u T}\right) \quad (17)$$

如圖二所示，為各種碳氫燃料配合不同重組方式下，反應焓與重組效率 (Reforming efficiency) 之相對關係比較。其中反應焓計算如 Eq.(18)，而重組效率如 Eq.(19)，此效率亦即重組過程中，反應物種理論所能完全轉換成 H₂ 與 CO 產物熱量的百分比，故為重組過程最重要的性能參數之一。本研究探討的碳氫燃料共分為六種，重組則以 DR、EGR、SR、ATR、POX 等方式來進行探討。橫軸部份大致可區分為吸熱(Endothermic)與放熱(Exothermic)反應兩區，由圖可清楚得知參數設定下，反應焓與重組效率的關係。上述五種重組方式只有 POX 為放熱反應，ATR 則為熱中性反應，可自行提供反應所需之熱量，其餘(DR、EGR、SR)皆為強烈的吸熱反應，須憑藉外部能量輸入才能進行重組反應。然而吸熱反應若能有效配合廢熱回收，則有機會將部分熱能轉換成化學能。

$$\Delta H = \sum_P n_e (\overline{h}_f^0 + \Delta \overline{h})_e - \sum_R n_i (\overline{h}_f^0 + \Delta \overline{h})_i \quad (18)$$

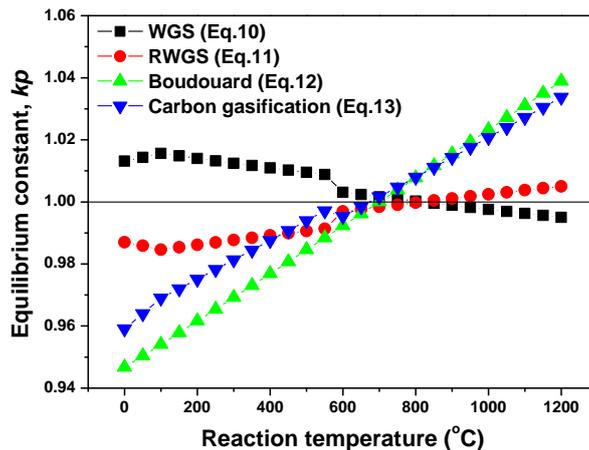
$$\eta_{ref} = \frac{\dot{m}_{H_2} LHV_{H_2} + \dot{m}_{CO} LHV_{CO}}{\dot{m}_{fuel} LHV_{fuel}} \quad (19)$$



圖二、碳氫燃料於不同重組條件設定下，反應焓對與重組效率的關係

2.4 相關副反應分析

有鑒於碳氫燃料於重組過程皆會有碳粒形成現象，尤其低溫且缺氧條件時。目前降低重組過程積碳的方式有下面幾種方式：提高燃料轉換效率；反應中添加適量水汽來轉移碳沉積；添加適量的氧氣；觸媒表面改質以降低積碳的發生。其中消除積碳如 Eq.(8)(9)。副反應的化學式如 Eq.(10)~(13)。副反應所對應之反應常數如圖三所示。



圖三、不同重組副反應(Eq.10~Eq.13)條件設定下，反應溫度對於反應常數之影響

三、結果與討論

3.1 重組方式的影響

此小節先以移動式車輛載具所採用之辛烷燃料來探討重組方式的特性比較。重組方式分為 DR、EGR、SR、ATR、POX、TD，並與完全燃燒的 TOX 來進行比較。如圖四(A)所示，為不同重組方式下，反應溫度對重組效率的影響。由圖可得知，反應溫度越高則能量轉換效率也會逐漸升高，反應溫度約於 400~800°C 間有很明顯的趨勢變化，反應溫度上升至 800°C 過後，重組效率則逐漸趨緩。在不同重組方式相較之下，以 DR、EGR 與 SR 等三者最佳，其次為 ATR、再者 POX，最差者為 TD，其中 TOX 則為完全燃燒。

如圖四(B)所示為不同重組方式下，反應溫度對碳平衡產出之比較。由圖可知，除了 TD 以外，所有重組方式皆會隨反應溫度越高而有效轉移，約於 800~900°C 之間可達完全轉化。其中 TD 方式乃藉由高溫來斷鍵，且無 O₂ 可進行氧化反應，以至於重組過程有大量的碳形成(Coke formation)。並可發現添加水蒸氣(SR)與適量空氣(POX)者，可有效降低碳形成。再者，重組過程 CO₂ 參與反應者(DR、EGR、ATR)，相較於無 CO₂ 參與反應者(SR、POX)，會有較多的碳形成現象。圖四(C)為不同重組方式下，反應溫度對 CO₂ 平衡產出之比較。由圖可得知 CO₂ 產出會隨反應溫度有先上升後下降的變化，各種重組方式都約於 500~600°C 之間發生轉折。主要推測此溫度區間存在 Bourduard 反應(Eq.12)，且隨反應溫度逐漸增加則促進正向反應進行，使得 CO₂ 易與 C 轉移成 CO，導致 CO 在此溫度區間過後即快速上升，整體變化趨勢可由圖五得知。此圖乃辛烷配合 EGR 重組下，溫度對於重組氣體產率的比較。圖中明顯得知 Bourduard 反應中三者的交互關係，並得知 C 與 H₂O 會轉移成大量的 H₂ 及 CO。再者，亦可由圖一及圖三之 Kp 值瞭解 EGR 反應的確約於 400~600°C 之間開始進行自發性反應。

綜觀上述，DR、EGR、SR 三者重組效率相對較佳，但各種重組方式都有其

優點與系統整合上的缺陷。其中 SR 與 DR 兩者雖然有較高的重組效率，但若與現有內燃機整合，卻有許多問題亟需克服。由理論分析可得知，DR 重組皆會有很嚴重的碳析出問題，因此於車載應用時，須將排氣中所含之水氣冷凝才可分離出 CO₂，所以冷凝中會浪費許多熱量，能量觀點來看並不適合。而 SR 優點極多，碳生成量也為所有重組方式最少，且重組過程 CO₂ 排放量較低，但車載應用時，須考慮水氣之供應方式，況且重組過程所需的水溶液會受到其體積與重量的限制而降低輔助燃料之能量密度，並增加系統之複雜度。有鑑於此，故本研究乃利用 EGR 方式來進一步探討，此方式不但涵蓋了 DR 與 SR 兩者的優點，而且兩重組反應之間所涵蓋的缺點皆於系統整合上相互消弭。其中重組過程所需之熱量以及 H₂O 與 CO₂ 氣體供應部份，皆可由排氣管所排出之熱氣與廢氣提供，如此一來更可利用其高重組效率且易於調控助燃與阻燃比例的特性，與引擎操作範圍做搭配。

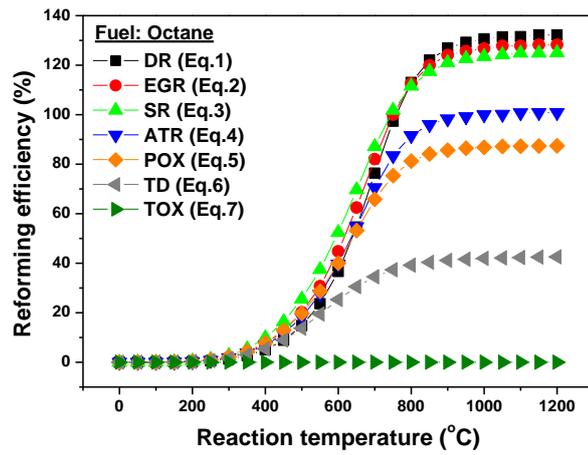
3.2 EGR 配合不同燃料的重組特性探討

接下來延續上一小節之結果，探討重組氣體溫度對於 EGR 重組效率、碳生成量、CO₂ 轉化效率與助燃及阻燃成分比例 (Assisting/Impeding ratio, A/I) 的影響。期望能藉此評估結果，對日後車載之替代燃料選用能有所幫助。如圖六所示，於不同碳氫燃料種類下，反應溫度對重組效率之影響。由圖可知 EGR 方式下，各種燃料種類之重組效率似乎沒有多大的差異，且燃料之性能曲線隨溫度變化幾乎重疊在一起。圖七為各種重組燃料對碳平衡產出的影響。明顯發現圖中變化趨勢相近，唯甲烷於低溫條件下，相對於各種碳氫燃料有碳形成偏低的現象，而乙醇的碳形成則為所有碳氫燃料中最高者。因此日後若欲以生質乙醇作為引擎輔助燃料，則需考慮碳析出等問題，可能須配合適量氧氣或水氣，以避免觸媒積碳而降低重組系統的穩定性與壽命。圖八為不同燃料種類下，重組反應溫度對 CO₂ 轉化效率之影響。CO₂ 轉化效率計算方式如 Eq.(20) 所示。圖中可發現碳氫燃料進行廢氣重組反應，CO₂ 轉化效率皆會隨反應溫度增加而有逐漸上升的變化，唯獨乙醇於低溫條件下會有負轉化現象。此外，乙醇欲獲得較高的 CO₂ 轉化效率，重組溫度須高於 750 °C 以上。

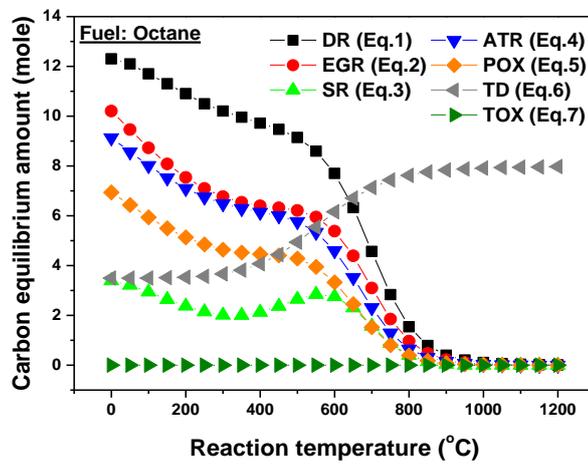
$$CO_2 \text{ conversion efficiency} = \frac{\text{moles of } CO_2 \text{ consumed}}{\text{moles of } CO_2 \text{ introduction}} \times 100\% \quad (20)$$

如圖九所示，為不同燃料種類對於助燃與阻燃成分比例之影響。其中助阻比定義如 Eq.(21) 所示，分子為助燃成份，分母為抑制燃燒之產物所組成，此比例乃富氫氣體做為引擎輔助燃料之重要指標。由圖可發現乙醇有相對較高之 A/I 範圍，約高於 C3 以上燃料兩倍，其次為甲烷。此分析結果也有助於與引擎各種操作條件做配合，以調配出有利於引擎熱效率及污染排放之組合。

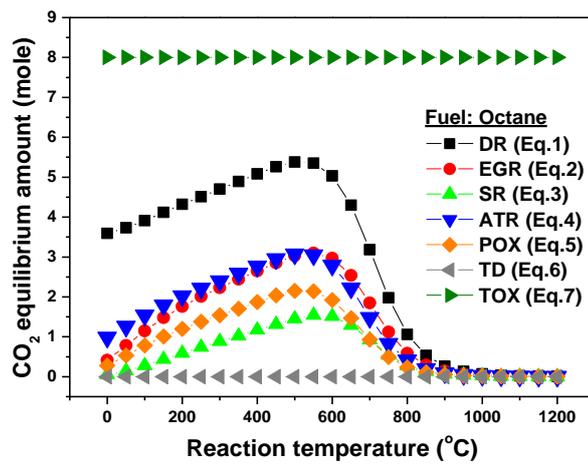
$$A/I \text{ ratio} = \frac{\text{moles of } (H_2 + CO)}{\text{moles of } (CO_2 + H_2O + N_2)} \quad (21)$$



(A) Reforming efficiency

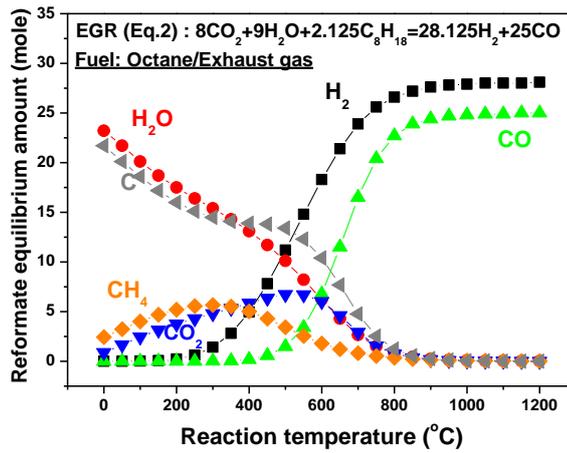


(B) Carbon equilibrium amount

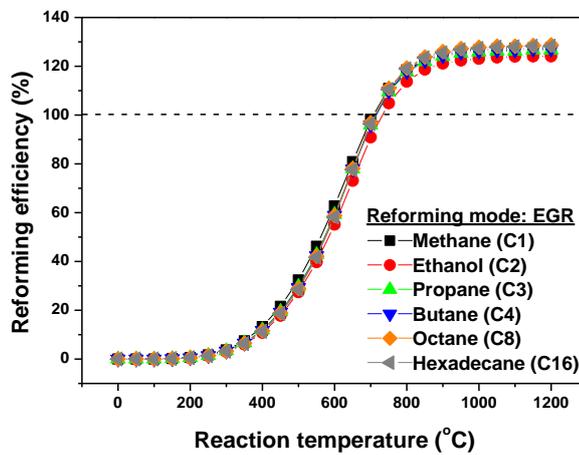


(C) CO₂ equilibrium amount

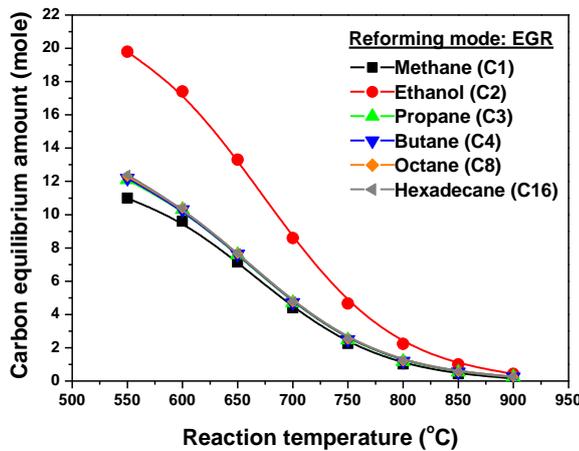
圖四、辛烷於不同重組反應條件設定下，反應溫度對於重組特性的影響



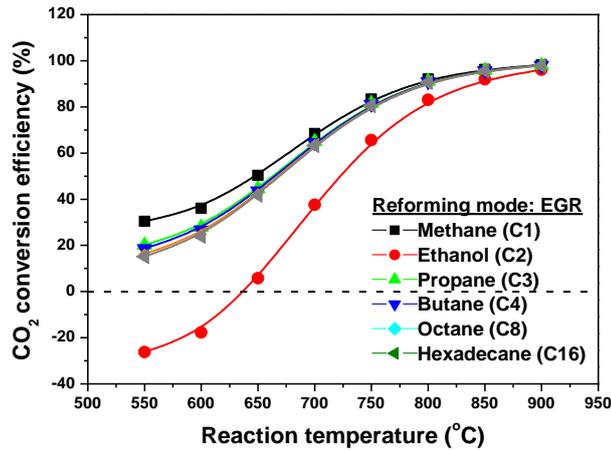
圖五、辛烷於 EGR 反應條件設定下，反應溫度對於重組氣體平衡產出的影響



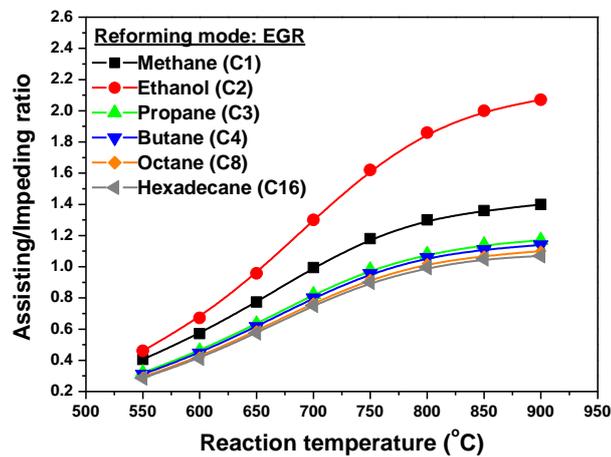
圖六、碳氫燃料於 EGR 反應條件設定下，反應溫度對於重組效率的影響



圖七、碳氫燃料於 EGR 反應條件設定下，反應溫度對於 Carbon 形成的影響



圖八、碳氫燃料於 EGR 反應條件設定下，反應溫度對於 CO₂ 轉化效率的影響



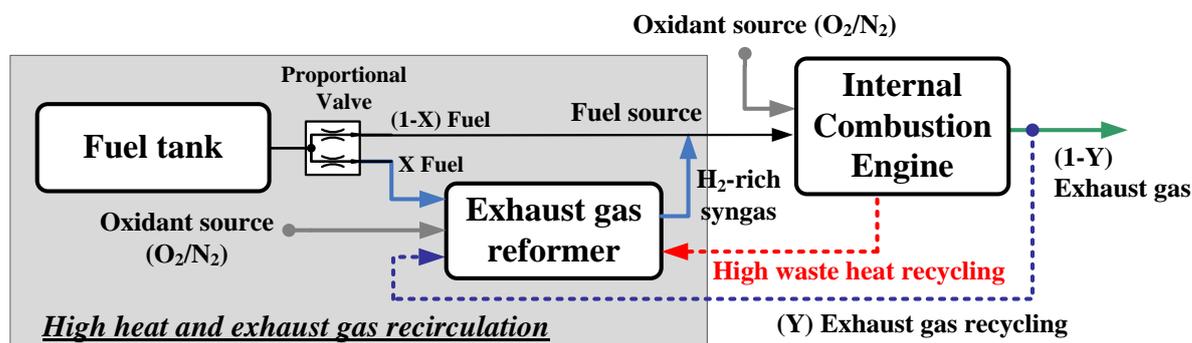
圖九、碳氫燃料於 EGR 反應條件設定下，反應溫度對於助燃及阻燃比例的影響

綜觀上述，燃料種類於廢氣重組方式下，彼此之間重組效率差異有限，且本研究參數設定之高碳數烷類燃料(C3~C16)對於碳析出、CO₂轉化與 A/I 比趨勢大致相似，唯獨低碳數之甲烷與乙醇兩者有不同的變化。所以日後於車載應用時，重組燃料的選用可針對不同進氣條件需求及引擎操作範圍作適當的調配。

3.3 EGR 技術應用於車輛載具節能減碳之可行性評估

接下來以辛烷為引擎燃料，來評估 EGR 技術於車載應用對於節能減排之可行性。EGR 系統概念示意如圖十所示，燃料經油箱以適當比例分流至引擎(1-X)與廢氣重組裝置(X)，重組裝置再回收適當比例的廢熱與廢氣(Y)來進行重組反應，最後將產出富氫氣體導入內燃機做為輔助燃料之用。操作參數規劃如表二所示，假設汽機車之原系統制動熱效率為 30%，評估不同參數設定，對於引擎效率的改善程度。參數設定共分為十一筆(No. A~K)，燃料分配比例乃依原供油系統

(1-X)與旁通至重組器的比例(X)來做調配。



圖十、EGR 系統操作概念示意圖

表二 廢氣重組於車載應用之操作參數

No.	Supplied Octane (mole Fraction)		Reactants (moles)			Products (moles)		Calculation results			
	Original Engine (1-X)	Reformer (X)	C ₈ H ₁₈	CO	H ₂	CO ₂	H ₂ O	LHV of fuels* (MJ/kg)	Overall thermal eff. (%)	Efficiency Improvement (%)	CO ₂ mitigation (%)
A	1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	8	9	44.88	30.00	0.00	0.00
B	0.90	0.10	0.90	1.18	1.32	8.38	9.42	46.12	30.86	2.87	2.87
C	0.80	0.20	0.80	2.35	2.65	8.75	9.85	47.35	31.72	5.74	5.74
D	0.70	0.30	0.70	3.53	3.97	9.13	10.27	48.59	32.58	8.61	8.61
E	0.60	0.40	0.60	4.70	5.29	9.50	10.70	49.83	33.44	11.48	11.48
F	0.50	0.50	0.50	5.88	6.62	9.88	11.12	51.07	34.31	14.35	14.35
G	0.40	0.60	0.40	7.06	7.94	10.26	11.54	52.31	35.17	17.22	17.22
H	0.30	0.70	0.30	8.23	9.26	10.63	11.96	53.54	36.03	20.09	20.09
I	0.20	0.80	0.20	9.41	10.58	11.01	12.38	54.78	36.89	22.96	22.96
J	0.10	0.90	0.10	10.58	11.91	11.38	12.81	56.02	37.75	25.83	25.83
K	0.00	1.00	0.00	11.76	13.23	11.76	13.23	57.26	38.61	28.70	28.70

引擎熱效率定義如 Eq.(22)，分母為總輸入之熱量，而分子為引擎所作的功，分母部份又可細分為燃料的輸入能量與排氣的回收熱量，亦可分別視為原供油系統與重組反應過後合成氣的輸入能量。其中導入引擎燃燒室中之反應物種主要為辛烷及不同 X 比例調配所獲得之富氫氣體能量為主，兩者關係會隨 X 比例越高則辛烷供給量越少，進而使輔助重組燃料比例逐漸提高。燃燒之後的產物並以等比例回收，因此可以維持原系統之 CO₂ 排放。並可由反應焓得知輔助燃料添加之放熱量，經換算後可將原本辛烷熱值 44.88 MJ/kg 提昇至辛烷與富氫氣體混合燃料之 57.26 MJ/kg。並於參數設定下，整體的引擎熱效率可改善 2.87~28.7 %

之間，所以若以相同的熱效率與功率輸出，則可減少進氣側之供油量，相對的降低 CO₂ 排放，減量效果亦可由原車的無改善至全部燃料均導入重組器的 28.70 %。因此 EGR 不但可大幅提高能源使用效率，並能有效降低 CO₂ 的排放。這些改善都是來自引擎排氣廢熱的有效回收利用，重組產出高熱值的富氫合成氣體所致。

$$\eta_{th} = \frac{\dot{W}_{total}}{\dot{Q}_m} = \frac{\dot{W}_{total}}{\dot{Q}_{fuel} + \dot{Q}_{exhaust}} = \frac{\dot{W}_{total}}{\dot{Q}_{original} + \dot{Q}_{reformer}} \quad (22)$$

四、結論

在本文中，高熱傳導性的圓柱被安裝在等溫加熱面上，進而造成複雜的混合對流熱傳，為了研究方便，Pr 為 0.71，Re 為 100，Gr 為 50,000 固定不變。

1. 由理論化學平衡得知，燃料之重組效率皆會隨反應溫度增加而逐漸升高，約在 400~800 °C 間有很明顯的變化，其中又以 DR、EGR 與 SR 等三者最佳，其次為 ATR、再者 POX，最差者為 TD。
2. 重組過程 CO₂ 參與反應者(DR、EGR、ATR)，皆會有明顯碳形成現象，但若適當添加水蒸氣與空氣，確實能有效降低碳形成。甲烷燃料於低溫條件時，相對於各種碳氫燃料有碳形成偏低的現象，而乙醇則為所有燃料中最高者。另外亦可發現乙醇有較高之 A/I 範圍，其次為甲烷。
3. 碳氫燃料於 EGR 反應條件設定下，CO₂ 轉化效率會隨反應溫度升高而增加。但若欲獲得較高的 CO₂ 轉化效率，重組溫度應高於 750 °C 以上。有鑒於一般內燃機約有 1/3 的熱量在排氣中釋放掉，且汽機車排氣管之環境溫度介於 400~800 °C 之間，所以相當適合用來提供廢氣重組所需的溫度，因此日後可直接以重組器配合排氣管，有效回收其熱量。
4. 經熱力評估得知，以辛烷為輔助燃料進行廢氣重組反應，可將原供油系統辛烷熱值有效提升。並於參數設定下，引擎熱效率可改善 2.87~28.7 % 之間。若以相同的熱效率與功率輸出，則可以相對降低 CO₂ 排放，以達到節能減碳的目的，這些改善都是來自引擎排氣廢熱的有效回收利用。
5. 利用廢氣重組技術整合於實車之構想，確實可有效利用引擎之廢氣與廢熱來提供重組反應所需熱量與反應物種。而此等能量回收的作法，並不受限於任何載具及車種，所以日後可直接應用於汽、柴油引擎、氣渦輪機、燃燒爐與高溫型燃料電池等，預期可提高能源使用效率，並降低系統的 CO₂ 排放。

五、參考文獻

1. F. Pompeo, N. N. Nichio, O. A. Ferretti, D. Resasco, Study of Ni Catalysts On Different Supports to Obtain Synthesis Gas, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 30 pp. 1399-1405, 2005.
2. J. S. Kang, D. H. Kim, S. D. Lee, S. I. Hong, D. J. Moon, Nickel-based Tri-reforming Catalyst For The Production of Synthesis Gas, *Catalysis Today*, Vol. 332, pp. 153-158, 2007.

3. V.F. Fischer, H. Tropsch, Conversion of methane into hydrogen and carbon monoxide. *Brennstoff Chemie*, Vol. 3, pp. 39-46, 1928.
4. C. Song, W. Pan, Tri-reforming of Methane: A Novel Concept for Catalytic Production of Industrially Useful Synthesis Gas With Desired H₂/CO ratios, *Catalysis Today*, Vol. 986, pp. 463-484, 2004.
5. Z. Hou, P. Chen, H. Fang, X. Zheng, T. Yashima, Production of Synthesis Gas Via Methane Reforming With CO₂ on Noble Metals and Small Amount of Noble-(Rh-) Promoted Ni Catalysts, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 31, pp. 555-561, 2006.
6. F. Pompeo, N. N. Nichio, M. M. V. M. Souza, D. V. Cesar, O. A. Ferretti, M. Schmal, Study of Ni and Pt Catalysts Supported on α -Al₂O₃ and ZrO₂ Applied in Methane Reforming With CO₂, *Catalysis Today*, Vol. 316, pp. 175-183, 2007.
7. S. Peucheret, M. L. Wyszynski, R. S. Lehrle, S. Golunski, H. Xu, Use of Catalytic Reforming to Aid Natural Gas HCCI Combustion in Engines: Experimental and Modelling Results of Open-Loop Fuel Reforming, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 30, pp. 1583-1594, 2005.
8. F. Ma, Y. Wang, H. Liu, Y. Li, J. Wang, S. Zhao, Experimental Study on Thermal Efficiency and Emission Characteristics of A Lean Burn Hydrogen Enriched Natural Gas Engine, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 32, pp. 5067-5075, 2007.
9. G. H. Choi, Y. J. Chung, S. B. Han, Performance and Emissions Characteristics of A Hydrogen Enriched LPG Internal Combustion Engine At 1400 rpm, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 30, pp. 77-82, 2005.
10. J. P. Frenillot, G. Cabot, M. Cazalens, B. Renou, M. A. Boukhalfa, Impact of H₂ Addition on Flame Stability and Pollutant Emissions For an Atmospheric kerosene/Air Swirled Flame of Laboratory Scaled Gas Turbine, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 34, pp. 3930-3944, 2009.
11. J. Burguburu, G. Cabot, B. Renou, A. Boukhalfa, M. Cazalens, Comparisons of the Impact of Reformer Gas and Hydrogen Enrichment on Flame Stability and Pollutant Emissions For A Kerosene/Air Swirled Flame With An Aeronautical Fuel Injector, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 36, pp. 6925-6936, 2011.
12. E. Porpatham, A. Ramesh, B. Nagalingam, Effect of Hydrogen Addition on The Performance of a Biogas Fuelled Spark Ignition Engine, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 32, pp. 2057-2065, 2007.
13. A. Tsolakis, A. Megaritis, Catalytic Exhaust Gas Fuel Reforming for Diesel Engines-Effects of Water Addition on Hydrogen Production and Fuel Conversion Efficiency, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol.29, pp. 1409-1419, 2004.
14. A. Tsolakis, A. Megaritis, Exhaust Gas Assisted Reforming of Rapeseed Methyl Ester for Reduced Exhaust Emissions of CI Engines, *Biomass and Bioenergy*, Vol.27, pp. 493-505, 2004.
15. C. S. Lau, D. Allen, A. Tsolakis, S. E. Golunski, M. L. Wyszynski, Biogas Upgrade to Syngas Through Thermochemical Recovery Using Exhaust Gas

Reforming, *Biomass and Bioenergy*, Vol.40 , pp. 86-95, 2012.

工研院二氧化碳地質封存技術發展現況

Recent development of carbon geosequestration technology in ITRI

廖啟雯¹、董倫道²、謝佩珊³、李奕亨⁴、田能全⁵、陳文山⁶、歐陽湘⁷
Chi-Wen Liao, Lun-Tao Tong, Pei-Shan Hsieh, Yi-Heng Li, Neng-Chuang Tien,
Wen-Shan Chen, Ouyang Shoung
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, Taiwan

摘要

二氧化碳捕獲與地質封存技術是我國溫室氣體減量關鍵技術之一，藉由封存評估、監測與模擬等核心技術之建立，我們期望協助及加速推動封存前導試驗及後續的大型示範運轉。本研究整合反射震測、大地電磁及微震監測，透過地球物理併合成像技術以及剪力波分離技術，提昇對於封存場址之地下構造形貌掌握程度。為瞭解二氧化碳注儲後的行為，本研究透過數值傳輸模擬技術預測大規模注儲時及注儲結束後二氧化碳團塊的移棲反應。本研究已架構評估、監測技術框架，提供注儲與監測策略擬定之重要依據。

關鍵字：二氧化碳、地質封存、併合成像、傳輸模擬

Abstract

Carbon dioxide capture and geosequestration is one of key greenhouse gas abatement technologies in Taiwan. To assist and accelerate the pilot-scale and large-scale demonstrations, ITRI has establish core techniques for site evaluation, monitoring, and numerical transport simulation for geosequestration in Taiwan. We have developed joint geophysical imaging and shear-wave splitting techniques to integrate seismic reflection, microseismic and magneto-telluric data that can reveal more detailed insights of underground geological structures in potential injection site. Numerical transport simulation technique is also developed to predict the behavior of

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

² 工業技術研究院綠能與環境研究所，正研究員

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

⁵ 工業技術研究院綠能與環境研究所，研究員

⁶ 工業技術研究院綠能與環境研究所，研究員

⁷ 工業技術研究院綠能與環境研究所，正研究員

carbon dioxide plume during and after large-scale injection. By implement these core technologies, we have constructed a framework for site evaluation and monitoring, which will provide a good basis for site planning and monitoring strategy.

Keywords: Carbon dioxide, geosequestration, joint geophysical imaging, transport simulation

一、前言

二氧化碳捕獲與封存技術是目前所知可大量降低二氧化碳排放量的有效方法之一，國際能源總署指出 2050 年其減碳貢獻占比可達 19% (IEA, 2010)，在 2011 年南非德班的 COP17 會議中也正式被列入清潔發展機制的選項之一。工業技術研究院自 2007 年積極佈局，捕獲技術部分以鈣循環捕獲二氧化碳技術為主要標的，於院區內興建一座 3 kWth 實驗廠，採用氣泡式流體化床與旋轉窯爐之組合，捕獲效率可達 98% 以上，為了加速相關技術的產業化，工研院與臺灣水泥公司共同合作推動 1.9 MWth 鈣循環捕獲二氧化碳示範廠，預計將於 2012 年完工開始試運轉。封存技術則以潛能評估、監測與安全驗證技術為技術發展標的，藉由技術整合與驗證加速建立本土化地質封存技術，期望建立二氧化碳捕獲封存之完整技術供應鏈，提供臺灣一個實用且有效的減碳方案。

工研院於 2007 - 2009 年間綜整臺灣西部地質資料，進行區域性地質封存潛能評估及最適場址篩選，整體篩選考量的條件包括：潛在封存系統地層的深度及厚度分布，搭配區域構造及穩定性進行綜合探討。根據調查評估結果顯示，臺灣西部深層地下鹽水層的穩定區塊分布在地質高區的附近(經濟部能源局，2009)。完成區域性評估後，工研院將研究主軸聚焦於場址尺度，進行更精細的技術發展、模式建立與數值模擬，針對未來封存場址建立調查評估程序，加速示範場址推動進程(經濟部能源局，2011，2012)。本文將就區域性評估技術發展階段之初步成果進行介紹。

二、封存場址評估與安全監測

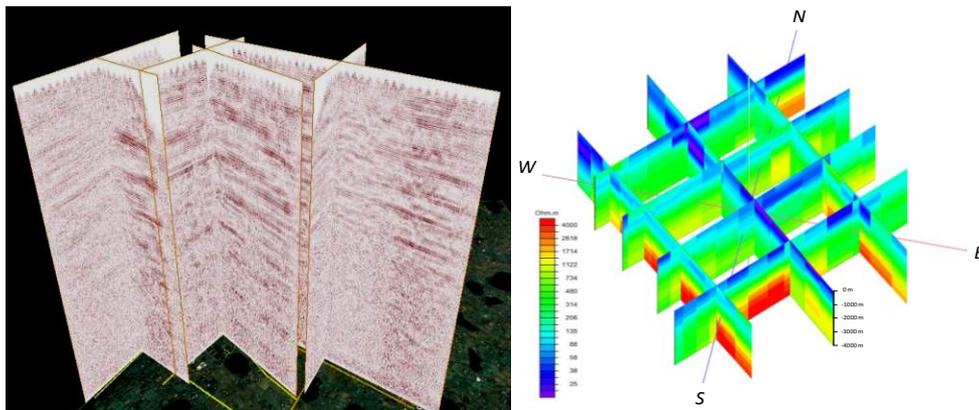
工研院針對場址評估所規劃之技術框架，係以反射震測及大地電磁探測為主，獲取場址尺度的地下地層與構造分布，作為二氧化碳注儲前的背景資訊，也就是所謂的基線資訊，再搭配鑽井資料建構地下地層結構，以及注儲場址的地質模型，並透過數值傳輸模擬模式。模擬二氧化碳團塊移棲行為與區域之封存潛能，提供注儲及運轉設計所需之基本參數。

二氧化碳封存的儲集層應為具有良好孔隙及滲透率的砂岩層，深度應大於 800 公尺，才能維持注入的二氧化碳保持在超臨界狀態，其上應覆蓋延展性良

好、質地緻密的頁岩層作為蓋岩，注入後的二氧化碳會侷限在蓋岩層之下向左右或向下移棲。儲集層與蓋岩層的搭配組成一個完整的地質封存系統，而關鍵儲集層及蓋岩層的深度與厚度便成為場址特性評估的重要資料。

圖一為本研究針對臺灣西北部觀音地區的潛在封存場址進行特性評估的成果，其中反射震測法是地球物理方法中解析度最高的方法之一，已普遍應用於油氣探勘，其原理在於地表震源往地下釋放震波，震波因地層界面反射返回地表，由設置於地表的受波器接收，經信號處理後，可描繪精細的地下構造。由反射震測法所獲得的地底影像，搭配場址周遭的鑽井資料，可以建構潛在封存場址的地層系統，其中蓋岩層為北臺灣分布廣闊的錦水頁岩，儲集層則為桂竹林層與南莊層，場址內的儲集層呈現水平連續，地層微向東南傾斜，且沒有貫穿蓋層的斷層或裂隙存在，具備良好的封存條件。

大地電磁法則是在地面上量測電場與磁場隨著時間變動的序列資料，用來分析地底下各個深度地層的電阻率分布，可用來推測地層的組成及流體的存在。根據大地電磁法所提供的資訊，可以分辨地底下砂岩質與頁岩質地層的差別，判斷深度 800 至 1000 公尺的低電阻層為蓋岩層，而電阻率適中的 1200 至 1600 公尺區間則為地質封存之儲集層。

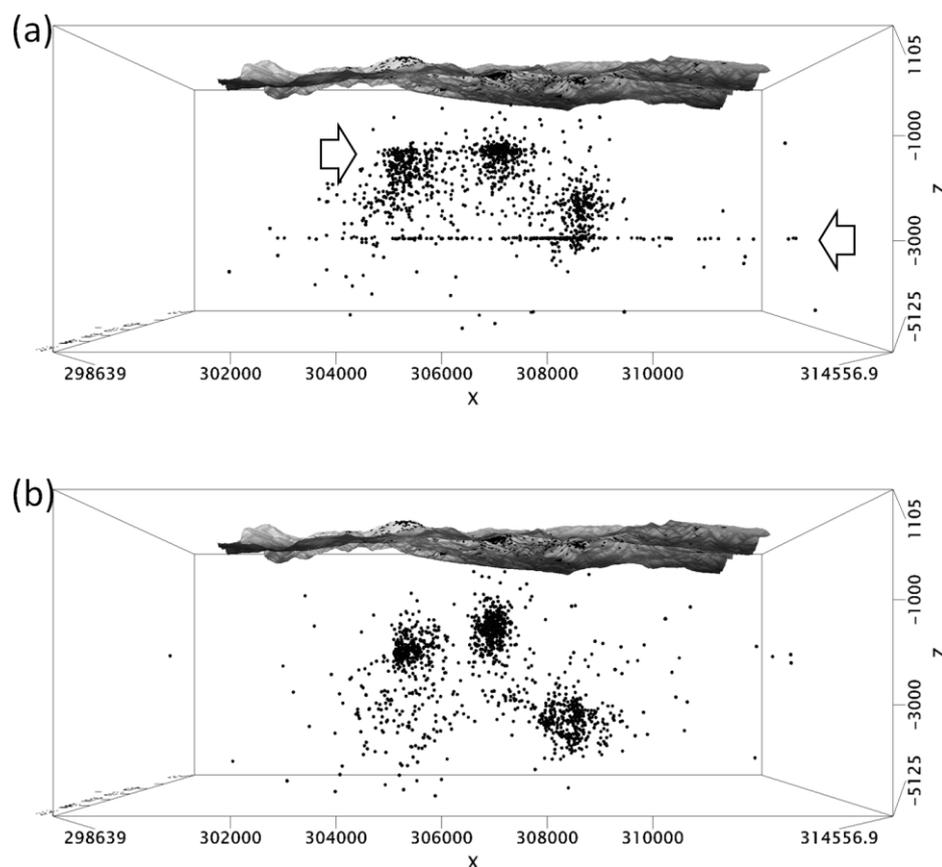


圖一、震測剖面(左)與電性地層(右)立屏圖

依據日本長岡小規模二氧化碳封存試驗場所獲得的成果，二氧化碳注入地層後會造成震波速度降低，而電阻率則升高，顯示透過分析地層震波速度及電阻率變化情形，可瞭解二氧化碳注入地層後的移棲行為(Kikuta et al., 2005, 董倫道與廖啟雯, 2009)。一般而言，反射震測法的優點在於對地質構造的解析力高，但對地層流體的解析較不敏感；而大地電磁探測對地層流體的敏感度較高，對構造的解析則不如震測法高。本研究投入地球物理併合成像技術發展，期望結合反射震測及大地電磁法之優點，嘗試進行量化分析。再者，二氧化碳注入量化數據與後續查核驗證取得二氧化碳減排交易許可息息相關，現有的反射震測及大地電磁法可追蹤二氧化碳團塊之移棲，但量化二氧化碳注儲量則有其限制，結合兩者或許可提供進一步的量化資訊。

由於國內尚無實場運作之二氧化碳地質封存場址，我們與中央研究院地球科學研究所合作，以大屯山地區之微震資料作為測試資料組。大屯山地區為火山後期活動區，因地熱活動頻繁引發顯著的微震活動，且地殼材料側向變化顯著，此特性與二氧化碳高壓注儲引發之微震叢集類似，故選擇微震紀錄較齊全的大屯山地區，做為地球物理併合成像及微震監測技術發展之測試對象。

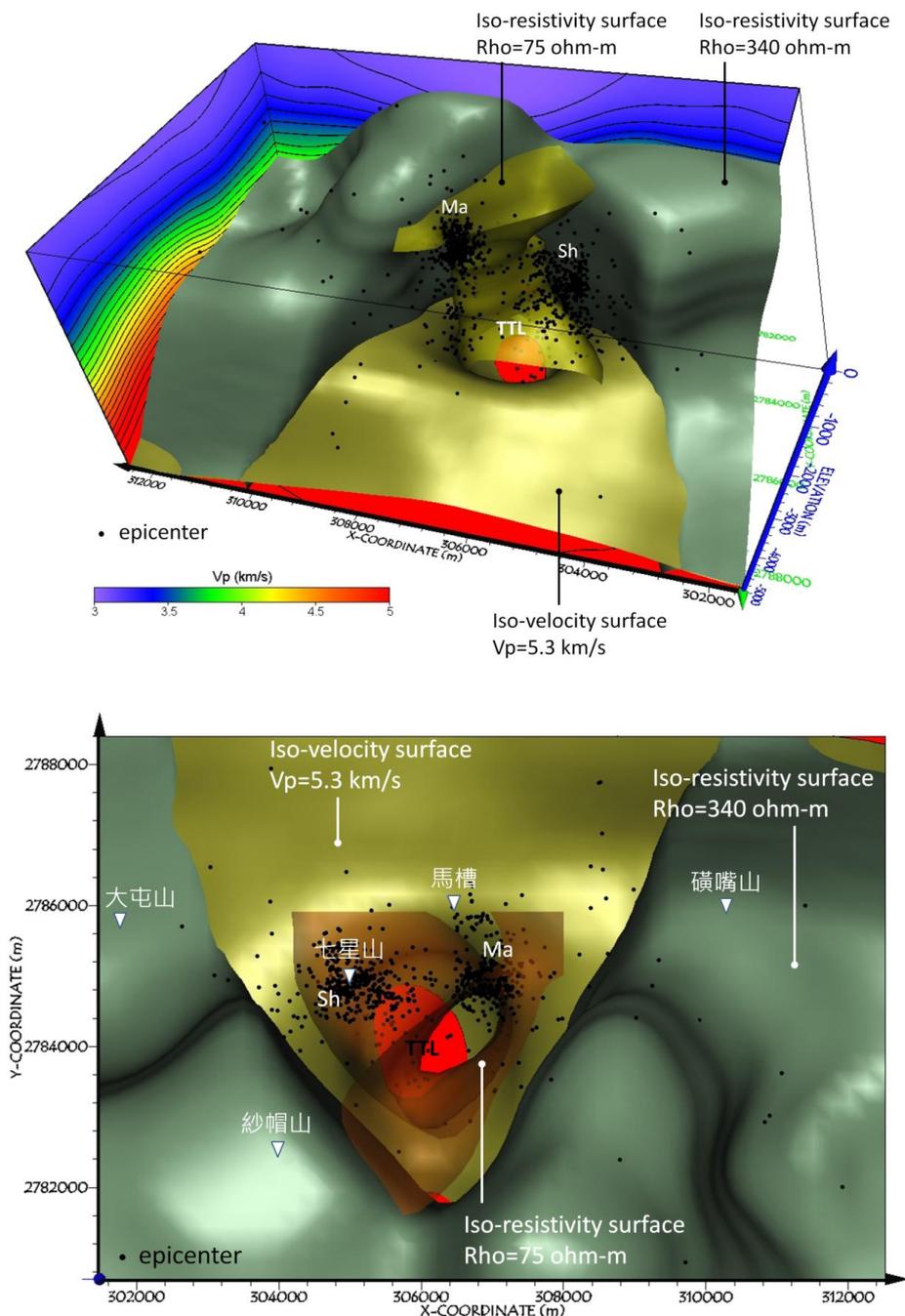
在地震定位技術部份，本研究採用雙差分層析成像(double-difference tomography)技術，結合雙差分定位與速度層析成像，利用絕對到時(absolute arrival time)與相對到時(differential arrival time)，在殘差極小化的條件之下，同時解算震央位置與速度模型(Zhang and Thurber, 2003, 2006)，並使用擬似彎曲波線追跡運算法(pseudo-bending raytracing algorithm)(Um and Thurber, 1987)，大幅縮短計算時間，提高地震定位的可靠性，並獲得合理的三維速度構造以進行併合逆推。圖二為本研究針對大屯山進行傳統地震定位方法與雙差分層析成像技術之比較結果，顯示透過三維速度模型的控制可顯著改善地震定位精度。



圖二、雙差分層析成像地震定位比較圖

上圖為傳統定位技術處理之震源位置，有明顯之線形假像，下圖則為雙差分層析成像處理之震源位置，透過三維速度模型的控制，定位精度有顯著改善。

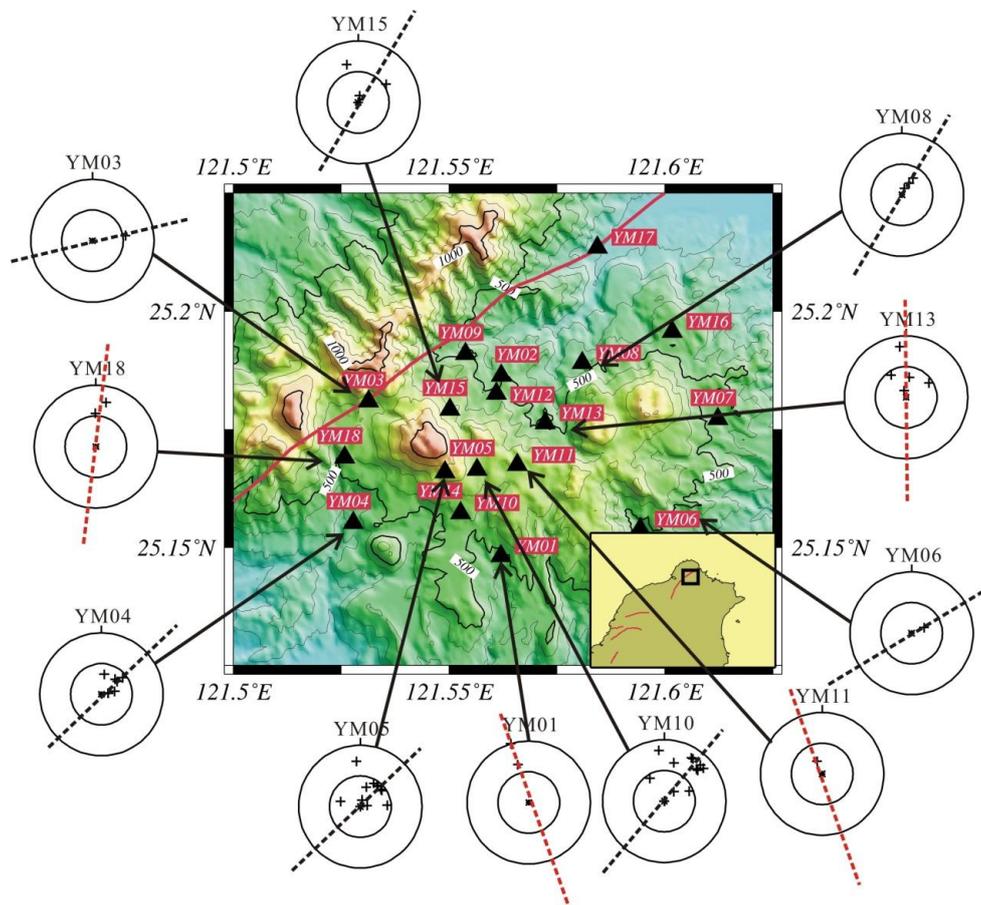
在地球物理併合成像技術部份，本研究採用速度層析成像與大地電磁的併合逆推技術，以併合微震及大地電磁探測資料為基礎，建立多參數及高解析度方法的併合逆推方法，目前已建立二維大地電磁資料與三維速度構造之併合逆推能力，圖三為大屯山地區地球物理併合逆推三維速度、電性構造與震央分布關係圖，分析結果顯示七星山東南側、馬槽西南方，有一管狀的低速與低電阻帶，研判為熱液向上移棲通道，而該區域內的三組地震叢集經併合逆推後其定位精度均獲得改善，重新分布於熱液與圍岩間的接觸帶上，顯示併合逆推技術可有效勾繪地下構造形貌，可望提高二氧化碳封存場址評估及監測能力。



圖三、大屯山地區地球物理併合逆推三維速度、電性構造與震央分布關係圖

上圖由西北向東南方向觀察，TTL 代表低電阻帶，也就是深部地層熱液的向上通道，Ma 及 Sh 代表地震叢集，Ma 位於馬槽南側，Sh 則與七星山一致，反應地下熱液活動情形，下圖為正視圖，顯示區域相對位置。

為了確保封存場址的安全性，研判是否具有潛在的斷層及裂隙也是潛在場址評估的重要工作項目，剪力波分離技術係利用地震波通過受不均勻應力或裂隙岩層時，因震波速度的異向性使剪力波產生極化現象，可用來評估場址是否存在潛在裂隙及其密度，進行場址完整性評估，此項技術在二氧化碳注儲時也可監控是否因壓力導致裂隙。圖四為本研究針對大屯山地區的微震剪力波分離之分析，結果顯示測試區域內有兩組主要破碎帶方向，東北—西南的破碎帶方向與區域性構造相關，而近南北方向的破碎帶方向(紅色虛線)則與區域性構造有所差異，屬於局部性異常區域，顯示微震剪力波分離確可為場址評估提供更細緻的構造解析力。



圖四、大屯山地區微震剪力波分離

黑色虛線為快波方向，反應局部構造特性，大部分局部構造為東北-西南向，與區域性方向一致，紅色虛線則表示快波方位角趨勢與本區其他各站有明顯差異。

三、封存傳輸模擬技術

將二氧化碳注入封存層中會產生許多複雜的複合反應，其影響因子包括流體特性、應力、化學變化以及熱傳輸等，由於現象過於複雜加上時間尺度的因素，在實驗室內模擬這些反應有其困難度，因此數值傳輸模擬技術在封存場址的調查、評估與監測上扮演相當重要的角色。國外發展數值傳輸模擬模式已行之有年，已有部分技術實際應用在二氧化碳注儲模擬，本研究採用 LBNL 發展的 TOUGH2 傳輸模擬模式進行本土模擬能力建立，並針對臺灣西北部濱海盆地，進行三維盆地尺度模型建置及深層地下鹽水層封存模擬，瞭解影響二氧化碳移棲之模型變數與機制。

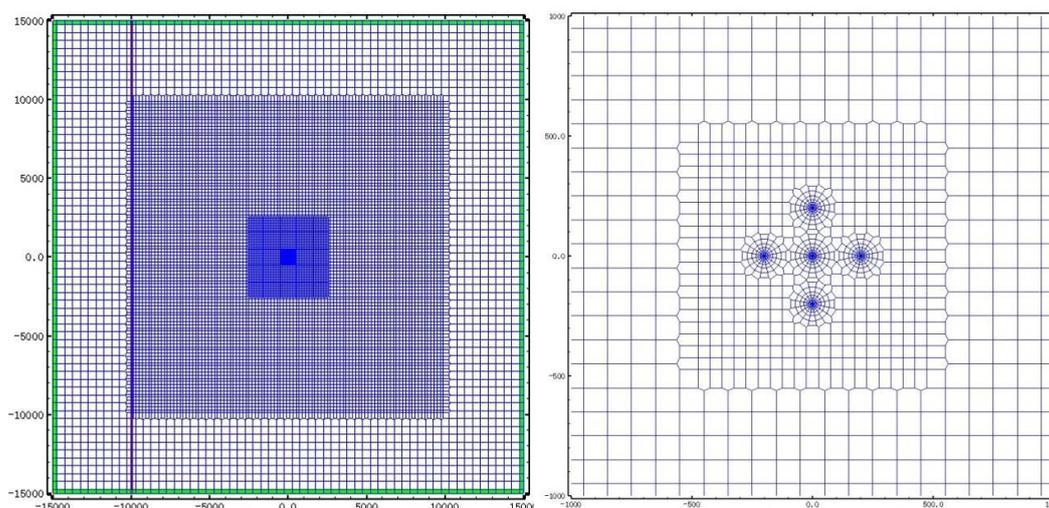
在地層模型設定上，包括低滲透率的區域性蓋岩層錦水頁岩(深度約 900-1000 公尺)，儲集層系統則由中滲透率桂竹林層砂岩(深度約 1000-1300 公尺)，以及中滲透率南莊層砂岩(深度約 1300-1500 公尺)所組成。利用上述地質架構，本研究建置一長寬各 30 公里，深度約 1.5 公里之數值模型，東西向地層傾斜 2 度，南北向則設為水平，注儲井位於模型中央，共計 5 口(見圖五)，總注儲量每年 1 百萬噸，注入於深度約 1300-1400 公尺左右之南莊層頂部上福基砂岩。為了瞭解區域性構造對於二氧化碳注儲的影響，在注儲井往西約 10 公里處，本研究設計一條虛擬的斷層構造，用來模擬斷層帶對於注儲系統的影響，其東西向分布約 100 公尺，南北向切過整個模擬區域。當斷層出現於砂岩層時，假設斷層帶之滲透率高於同層岩體一個數量級，若遇到頁岩則調降一個數量級，主要考量頁岩中斷層泥產生之可能性。

本研究所設定之注儲期間為 50 年，每年注入 100 萬噸二氧化碳，地層中的壓力會反應二氧化碳團塊的移棲行為以及整體封存系統的安全性，觀察注儲期間的壓力變化情形，壓力變化最大的位置隨著注儲時間向上延伸，顯示注入的二氧化碳因為浮力的關係，從南莊層頂部往錦水頁岩聚集，因為錦水頁岩滲透性低，垂直移棲受到阻礙，導致壓力逐漸攀升，在 20 年時，最大壓力變化為 0.65 MPa，約 30 年時達到最大壓力 1 MPa，並維持至注儲完畢的 50 年，最大壓力差值都沒有變化，表示二氧化碳雖然在垂直方向移棲受阻，造成壓力上升，但側向岩層提供另一個移棲管道，壓力獲得釋放，不再隨注儲量增加而上升(圖六)。

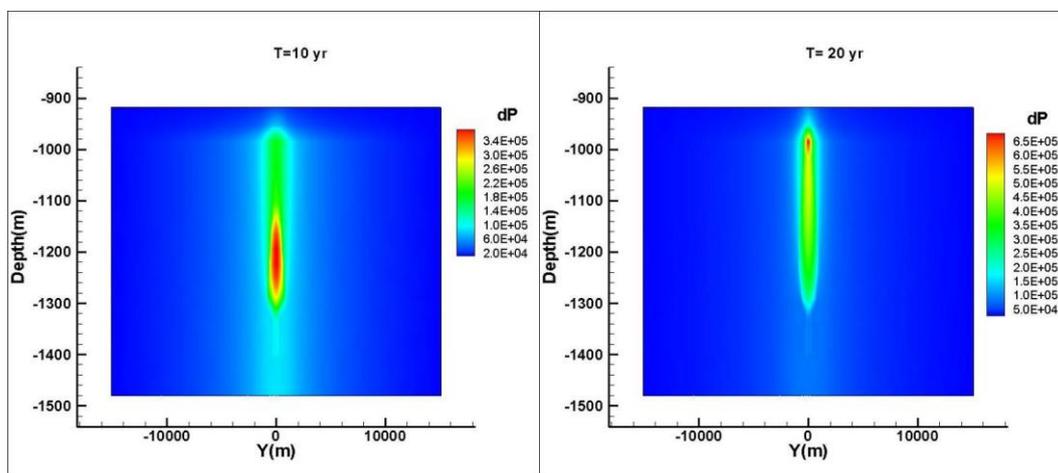
二氧化碳注入後因浮力的影響，氣相的二氧化碳由注儲點的向上移棲到桂竹林層的趨勢非常明顯，由圖七可以看出在 30 年時，由於地層傾斜緣故，二氧化碳團塊呈現不對稱狀，可作為未來監測策略擬定之參考。注儲停止後，大部分二氧化碳團塊都聚集在注儲點附近，注儲停止後 50 年，氣相二氧化碳已大部分移棲到桂竹林層(圖七)，由於浮力與地層傾斜關係，團塊基本上沿著錦水頁岩層底部往西運行，同時因溶解的關係，逐漸從氣相轉成液相，因此在儲集層的二氧化碳氣相飽和度隨時間不斷降低，顯示二氧化碳溶解封存機制扮演相當重要的角色，隨時間增加到 500 年，封存於液相的比例可達到約 60%(圖八、圖九)，對於封存的安全性有顯著地提升。

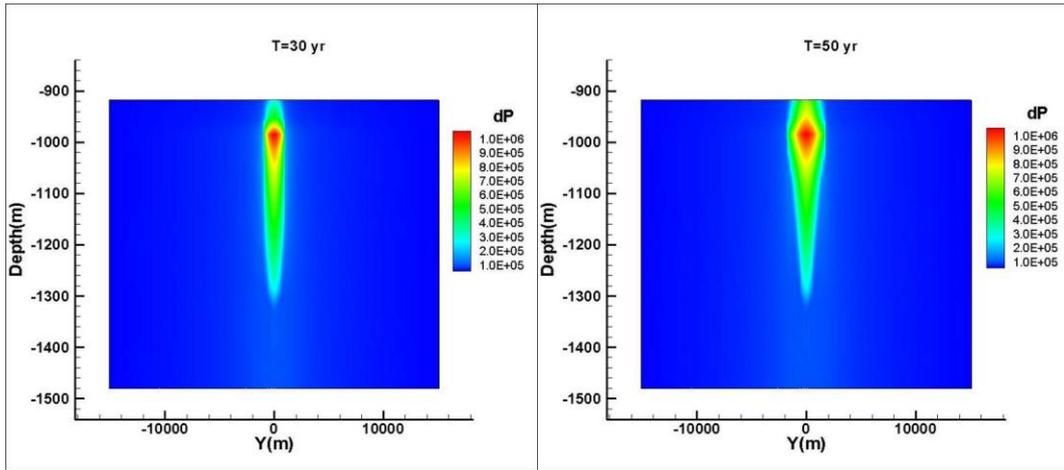
觀察錦水頁岩層內二氧化碳分布狀況時，則顯示錦水頁岩層及其斷層帶中的二氧化碳，皆以液相存在，由於液相二氧化碳比重大於孔隙水，因此推測錦水頁岩中的二氧化碳發生溶解現象。在 1000 年時，約有 2.3 百萬噸的二氧化碳分布在錦水頁岩層裡，約佔總注儲量 4.6%，斷層帶中則約有 1000 噸液相二氧化碳，僅佔總注儲量約 0.002%，顯示斷層帶中的頁岩及斷層泥提供了一定的封阻效果。

由上述成果總結，數值模擬模式可提供大型注儲計畫在注儲前對於注儲量的掌握，以及注儲期間二氧化碳團塊的移動模式，有助於注儲及監測策略的整體研擬，未來在前導試驗過程中所獲得的實測資料，將會回饋到數值模式中，以便掌握二氧化碳在地下封存層的可能傳輸行為。

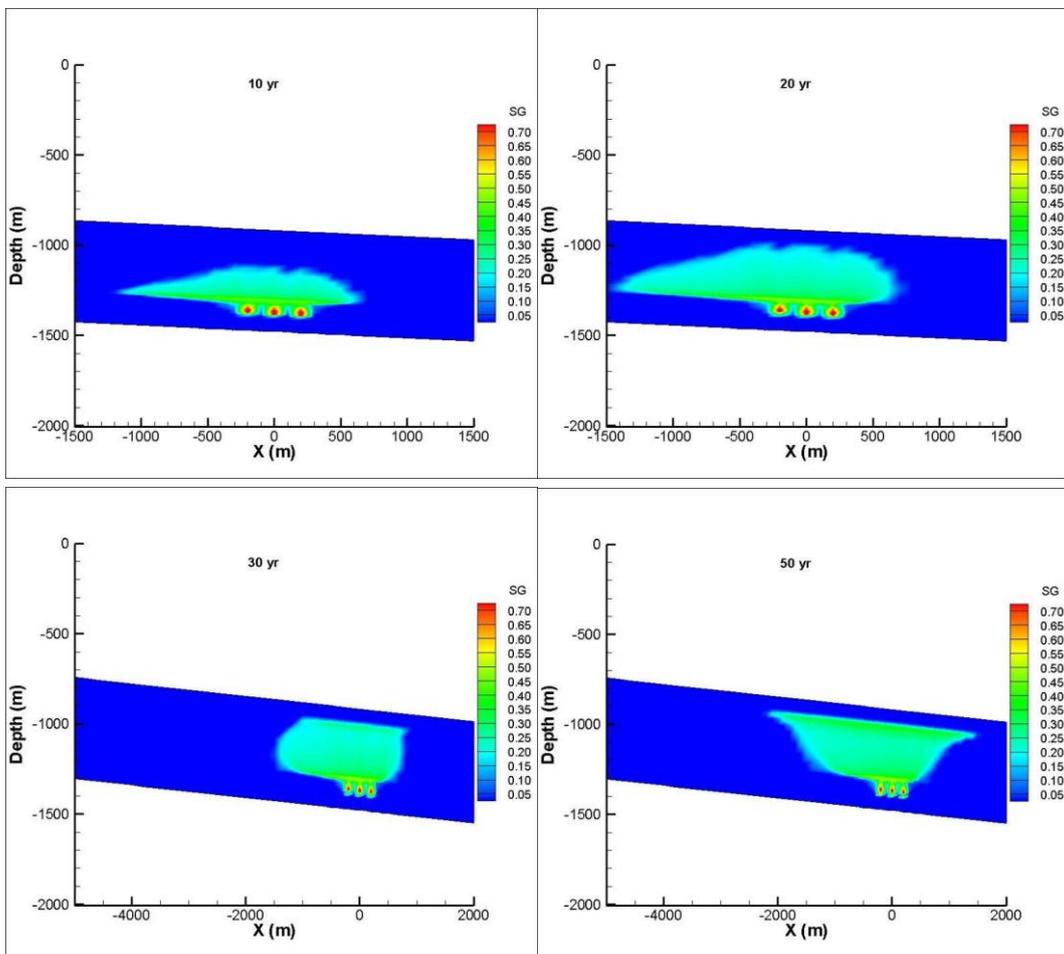


圖五、區域(左圖)及井孔(右圖)周圍數值模擬網格設計

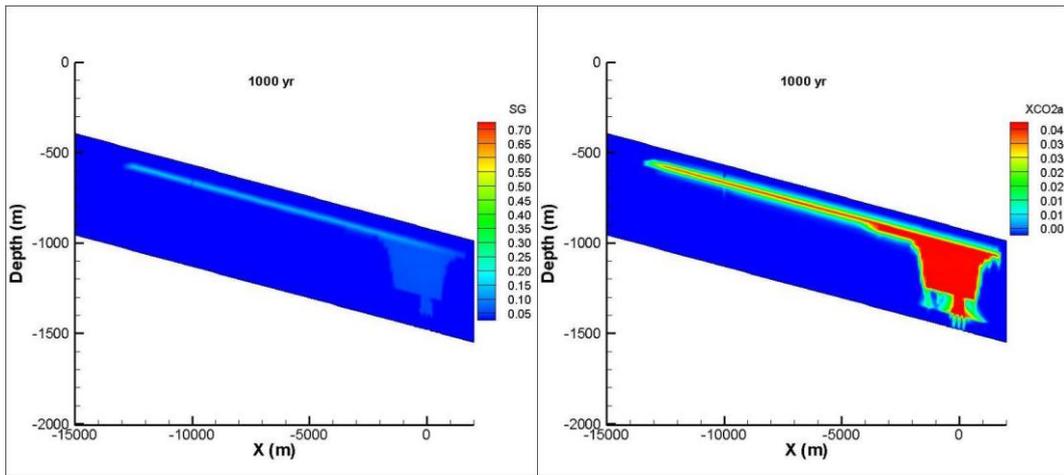




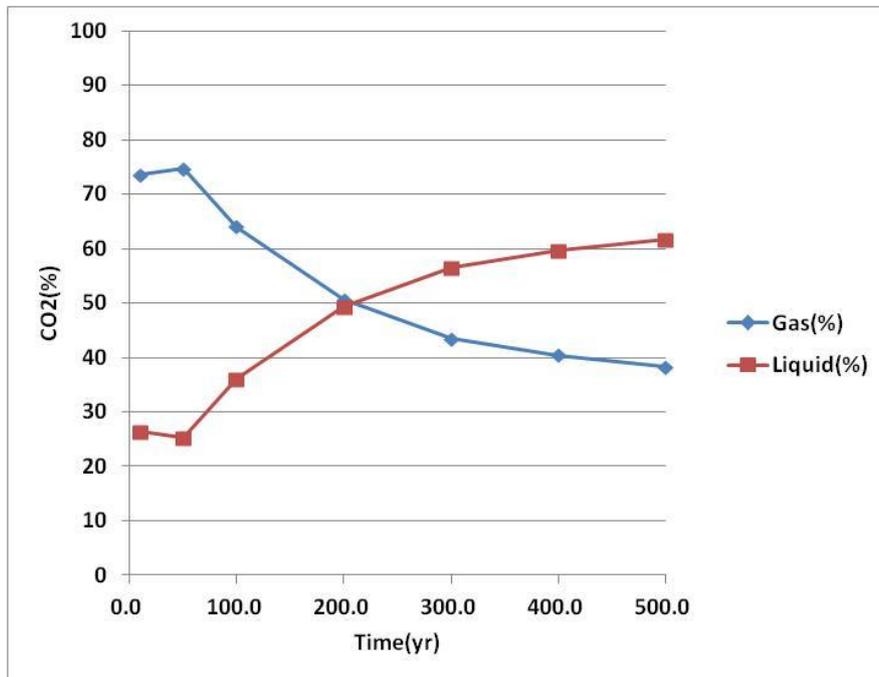
圖六、系統壓力差隨時間變化情形



圖七、氣相二氧化碳飽和度隨時間變化情形



圖八、氣相(左)與液相(右)二氧化碳飽和度於注儲停止 1,000 年後之比較



圖九、二氧化碳氣、液相質量所佔比例隨時間變化圖

四、未來展望

目前政府所規劃之二氧化碳排放減量目標，預計於 2020 年回到 2005 年排放量，於 2025 年回到 2000 年排放量，於 2011 年所公佈之新能源政策也明確宣示我國需發展前瞻能源、儲能、能源轉換、碳捕捉、封存及碳利用與節能技術，並適時應用推廣，開拓綠能產業新發展領域。但地質封存技術發展必須經過技術研發準備、評估及確認封存潛能、並由小規模試驗逐步放大至中大尺度 CCS 示範運轉操作驗證等步驟，現階段最重要的工作是推動二氧化碳地質封存前導試驗。

在經濟部 CCS 研發聯盟的框架下，主要規劃由臺灣中油公司與臺灣電力公司進行地質封存前導試驗，本研究所發展的地質封存關鍵技術，未來也將實際應

用於前導試驗中。藉由二氧化碳地質封存示範計畫，我們期望達成下列目的：(1) 展示二氧化碳可以透過完整的監測網路進行封存，作為與產官學界以及社會大眾的公開宣導管道及國際合作平台、(2) 透過數值模擬模式重現二氧化碳在深地層中的行為，改善並驗證數值模式的可信度、(3) 藉由本研究所研發之關鍵技術在示範計畫所獲得的經驗撰寫最佳實用準則，作為相關規範及法令制定的參考。

依照目前規劃進度(歐陽湘與廖啟雯，2010)，我國可望於 2012-2014 年間完成小規模地質封存前導試驗，搭配二氧化碳捕獲示範廠，建構我國二氧化碳捕獲與封存技術雛型，2016-2018 年則完成中尺度捕獲封存整合示範，在 2020-2025 年間逐步擴充至百萬噸級的減量需求，協助政府達成減量目標。

五、致謝

感謝經濟部能源局能源科技研究發展計畫提供經費，使得本論文得以順利完成。並感謝中央研究院地球科學研究所合作，提供微震資料。

六、參考文獻

1. IEA, *Energy Technology Perspectives 2010-Scenarios & Strategies to 2050*, 2010.
2. 經濟部能源局，二氧化碳再利用技術及地質封存潛能評估計畫(第三年度)，經濟部能源科技研究發展計畫 98 年度執行報告，工業技術研究院執行，2009。
3. 經濟部能源局，淨煤技術及二氧化碳捕獲封存技術發展計畫(第一年度)，經濟部能源科技研究發展計畫 99 年度執行報告，工業技術研究院執行，2010。
4. 經濟部能源局，淨煤技術及二氧化碳捕獲封存技術發展計畫(第二年度)，經濟部能源科技研究發展計畫 100 年度執行報告，工業技術研究院執行，2011。
5. K. Kikuta, S. Hongo, D. Tanase, T. Ohsumi, Field test of CO₂ injection in Nagaoka, Japan, *Proceedings of the 7th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies*, pp. 1367-1372, 2005.
6. 董倫道、廖啟雯，二氧化碳地質封存之監測技術，台電工程月刊，第 729 期，pp.82-90，2009。
7. H. Zhang and C. H. Thurber, Double-difference tomography: The method and its application to the Hayward fault, California, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol.93, No.5, pp. 1875-1889, 2003.
8. H. Zhang and C. Thurber, Development and applications of double-difference seismic tomography, *Pure and Applied Geophysics*, Vol.163, pp. 373-403, 2006.
9. J. Um and C. H. Thurber, A fast algorithm for two-point seismic ray tracing, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol.77, pp. 972-986, 1987.
10. 歐陽湘、廖啟雯，由二氧化碳減排談二氧化碳捕獲與封存技術發展，經濟

前瞻， pp. 87-92， 2010。

台灣能源教育模型建構與教育推廣

The Development and Educational Application of Taiwan Energy Educational Model

葉欣誠¹

Shin-Cheng Yeh

國立臺灣師範大學環境教育研究所

Graduate Institute of Environmental Education, National Taiwan Normal University,
Taiwan

陳建中²、陳翰⁵

Jeng-Chung Chen, Han Chen

輔英科技大學環境工程與科學系

Department of Environmental Engineering and Science, Fooyin University,
Kaohsiung, Taiwan

甯蜀光³

Shu-Kuang Ning

國立高雄大學土木與環境工程學系

Department of Civil and Environmental Engineering, National University of
Kaohsiung, Taiwan

梁明煌⁴

Ming-Hwang Liang

國立東華大學自然資源與環境學系

Department of Natural Resources and Environmental Studies, National Dong HWA
University, Hualien, Taiwan

摘要

我國在 2008 年中宣示二氧化碳的排放量到 2050 年時要減到 2000 年時排放量的一半，但是如何達成這樣的溫室減量目標，目前仍然缺乏明確的共識，有鑒於社會大眾對於能源供應與使用等資訊仍不甚瞭解，因此難以在一二個小時的教育宣導過程中對於溫室氣體減量作為進行理性思辨。本研究整合能源的供給、轉換、需求、使用與溫室氣體排放建立台灣能源教育模型，協助使用者瞭解能源使用策略與減碳目標間的可能關連。此外，本研究也建立了一個互動式的溝通介面，教育民眾如何進行「聰明的」節能減碳，民眾透過電腦模擬可以檢視自己想法的合理性。這是一個整合型的研究計畫成果，經由知識結構分析、能源系統分析、優化工具升級、情境設計與課程發展，我們終於完成一個可以支援溫室氣體減量教育的教學工具。

¹ 國立台灣師範大學環境教育研究所，教授

² 輔英科技大學環境工程與科學系，教授，E-mail: jcchen@mail.fy.edu.tw

³ 國立高雄大學土木與環境工程學系，副教授

⁴ 國立東華大學自然資源與環境學系，副教授

⁵ 輔英科技大學環境工程與科學系，研究生

關鍵字：能源模型、節能減碳、電腦模擬、決策支援

Abstract

In mid 2008, the government of Taiwan has announced its Green House Gas (GHGs) reduction targets and schedules as “By 2050, the annual GHGs emission level should be no larger than 50% of the level in 2000”. How this goal can be achieved? There is no common recognition about this issue right now. The fact is that people are generally short of the knowledge about energy supply and energy demand. In view of this, people would be not able to rationally think the way to mitigate GHGs emission during a one-or-two hour activity of education. This study developed a Taiwan Energy Educational Model (TEEM) in which energy supply, energy transfer, energy demand, energy utilization and the emission of GHGs are included. TEEM make the user easily understand the relationship between the strategy of energy utilization and the target of carbon reduction. Moreover this study also built up an interactive interface for negotiation among stakeholders with respect to energy policy. By using this interface, it will be easier to educate people how to implement tasks for energy conservation and carbon reduction (ECCR) “wisely”. People are able to check the feasibility what they proposed through computer simulation. Overall this is the outcome of an integrated research project. We finally develop an educational tool which is useful to the education of carbon reduction through a series of analyzing knowledge structure, analyzing energy system, upgrading optimization tool, designing scenario and developing curriculum.

Keywords: Energy model, carbon reduction, computer simulation, decision support

一、前言

全球暖化是全世界人類所共同面臨的最嚴重而全面的環境問題。自從工業革命以來，地表均溫在過去一百多年中，已經上升了攝氏 0.8 度，並且帶來了氣候異常、水資源匱乏、生態系崩潰等各種現象。政府於 2008 年訂定了溫室氣體減量目標(於 2016 年至 2020 年間回到 2008 年排放量;於 2025 年回到 2000 年排放量;於 2050 年回到 2000 年排放量的 50%)，並且將「節能減碳」列為國家重大施政方針。同時也宣示了諸多能源使用的目標。譬如，希望在 2025 年將上述高碳排放的發電比例降至 55% 以下、藉由技術改善與政策措施將能源密度降低 50%、能源效率每年可以改善 2%。這些目標該如何達成？這些目標的達成與前述的溫室氣體減量目標之間的關聯性為何？似乎並沒有明確的討論。社會大眾與

各級學校學生、教師對於能源供應與使用的基本資料若不甚瞭解，對於溫室氣體排放與全球暖化領域的基礎知識若不夠清楚，政府也難以藉由科學討論與民眾、學校或企業溝通。

一般民眾或學生對於全球暖化與節能減碳的概念上存有相當的錯誤認知，也就是一般說的迷思概念。Summers [1]設計了以七種領域為類別項目的問卷，包括生物多樣性、碳循環、全球暖化、臭氧層、能源、生命週期分析和永續性等項目，對小學教師及小學職前教師進行調查。在全球暖化項目中，受測者可以輕易了解到因燃燒化石燃料造成大氣中二氧化碳增加，可能造成全球暖化與氣候變遷等影響，並且需要採取預防措施防止；卻對於太陽和地球和空間之間能量交換、二氧化碳在全球暖化議題中的角色、以及對目前暖化是一種自然現象的可能性等的認識不足，或者具有不確定性。Papadimitriou [2]研究職前教師對溫室效應、氣候變遷及臭氧層耗竭等議題的看法，發現受測者本身相信氣候變遷正在進行中，卻不知如何正確採取行動以減緩氣候變化，且其普遍持有臭氧耗竭、酸雨和污染會造成氣候變遷等錯誤觀念。

因此，有必要建立一整合能源的供給、轉換、需求、使用與排放的決策支援系統模型，協助決策者瞭解能源使用策略與減碳目標間的可能關連，俾利衡諸各種國內外情勢與條件，進行能源的最佳化管理。Ingason [3]以能源供應成本最小化為目標，運用混合整數規劃最佳化模型進行冰島產氫發電廠最佳區位選址，其規劃結果除滿足國內能源需求外，尚可外銷歐洲其它國家，為新興能源開發提供一套有效的評選方法。另一方面，在各類型能源之配置規劃上，Iniyani [4]則以修正經濟數學模式(MEM)預測煤、石油及電力等傳統能源之需求，並以能源-經濟-環境模式(MPEEE)以環境作為限制，進行商用能源之最佳配置，其間的差距則由再生能源補足，並利用建立之數學模式，考量成本、效率、社會接受度、可靠性、潛勢等因子進行最佳利用分析。此外，加拿大 University of Regina 的 Prof. G. H. Huang (黃國和教授) 團隊亦發展出一套結合系統分析與環境經濟概念，考量能源供需、能源成本及環境衝擊的能源模型，以利能源決策者與能源使用者參考，並成功應用於加拿大安大略省 Waterloo 都會區能源政策之評估與推動[5]。近年來，以經濟考量為主的公共政策，開始受到質疑，越來越多的聲音要求公共政策除了考慮經濟及法律因素外，政策制定過程應重視實際問題的解決以及決策價值與倫理的釐清。

陳俊宏[6]認為如果將複雜公共問題過度簡化，人民只能在有限的選擇中做選擇，一個缺乏反思、沒有科學評量及整體利益思考的決策可能就此產生，這樣的民意模式具有高度的風險，容易導致人民對議題的誤解及排斥。以我國的國家能源政策為例，長久以來一直存在著爭論，由於能源配比或發電的能源種類與二

二氧化碳的排放量及發電成本有著密切的關係，一旦提高再生能源的配比來降低二氧化碳的排放量，電價勢必需要提高才能反映成本；如果增加核能發電配比，雖然可以降低二氧化碳的排放量，卻會增加民眾對於核能安全的疑慮；繼續使用燃煤發電，不僅無法達到我國的減碳目標，長期而言，也將國家能源安全暴露在一個供需失衡的風險中。因此，如何決定我國未來的能源配比非常重要，人民面對各種可能的選項必須理性思辨，有鑒於多數民眾對於能源供應與使用等資訊不甚瞭解，因此難以在一二個小時的節能減碳教育宣導過程中檢視自己想法的合理性，所以需要一個整合了能源供給、轉換、需求、使用與溫室氣體排放等知識的輔助決策工具。

美國 Climate Interactive 組織創造了一個能源決策模擬系統，系統中結合了氣候動力學及碳會計學等專業知識，讓使用者可以輕易地檢視自己的決策對大氣中的碳含量和溫度可能產生的影響，這是一個開放式、免付費的網路平台，美國國務院已經使用它來了解各種能源決策對氣候的影響，並開始應用在國際氣候談判上[7]。本研究團隊於 2010 年訪問加拿大黃國和教授研究團隊時得知他們以 C 語言進行能源模型核心程式的開發，可以經由互動式介面連結能源模型，大大地降低使用者的學習障礙。

根據以上的研究文獻，我們認為在節能減碳教育宣導上，需要一個整合了相關資訊的知識庫、需要一個可以模擬決策的計算器、需要一個互動式介面，從單機版的使用者介面到網路版的情境模擬平台，歷經兩年多的努力我們也完成一個可以支援溫室減量教育的教學工具，不僅可以透過電腦模擬讓民眾檢視自己想法的合理性，也可以讓民眾查詢節能減碳相關的專業知識，在節能教育宣導過程中，還可以做為意見溝通平台，進行各種節能減碳議題的討論，李家同認為現行的教育體制，老師拼命灌輸知識，學生沒時間思考，只有背誦，造成我國學生缺乏表達不同意見的勇氣，本研究認為在互動式能源模型的支援下，將有助於提升使用者在節能減碳議題上的思考深度，使用者也會因此比較有信心來表達出自己的看法，藉由互動式的雙向溝通，節能減碳的教育宣導工作將會更有效率，希望能讓我國在如何達成溫室減量目標的作法上早日達成共識。

二、研究方法

這是整合四校研究團隊的研究計畫，其中台師大團隊負責「國際節能減碳趨勢」、「全球暖化及節能減碳的知識結構分析」、「節能減碳的概念發展」等工作，高雄大學團隊負責「能源決策的限制條件」、「能源模型及成本函數」、「決策參數及情境分析」等工作，輔英科技大學團隊負責「LINDO API 優化程式開發」、「輔助決策介面設計」、「能源知識庫」等工作，東華大學團隊則是負責「課程發展」及「教學試驗」等工作。在此計畫中主要之研究方法如下：

2.1 知識結構分析

知識結構分析是教育界一項非常重要的分析工具，其主要概念便是探索並分類人類長期累積在腦中的知識。建構知識結構的工具，最為普遍的乃是概念構圖 (concept mapping)，就是將文本之文字、概念、背景知識等加以分類，以符號型式呈現在二向度的圖表中；藉由圖型呈現概念的方式，可以讓學習者建構或是重組其知識結構[8]。

2.2 系統分析

本研究藉由系統分析，對台灣之能源結構進行最佳化之分析，透過基本資料之蒐集，評估能源之供需現況與成長趨勢，再藉由能源教育模型之建立，考量能源開發成本、現有能源供需情況，並配合未來能源成長需求及溫室氣體減量等目標，評估最佳之能源配置方式，並進行相關之不確定性分析。透過各項情境之模擬，可使各層級之學習者充分了解在不同範疇、不同目標與不同限制之因素下，能源類型、經濟效益與環境品質間之競合關係，以培養學習者具備系統性及跨領域之思維，以符合當今社會所需。

2.3 LINDO API 優化求解

經過了多年的發展優化求解工具已經相當多元，常用的幾種為：LINDO，LINGO，GINO，GAMS，IMSL 等，這些商業軟體都具有容易開發的使用者介面以及適用於各種系統狀況的優化模組，其中以 LINDO 的使用最為普及，LINDO 有線性模型、混合整數模型、二次方程式模型、非線性模型、不確定性模型等優化模組，而且可以支援 Matlab、Basic、C++及 C.Net(C#)等語言。

目前具有視窗介面的單機版 LINDO 是學習決策分析及系統工程時普遍使用的工具，學習者不必具有程式開發能力，也不必具備決策優化的演算邏輯設計能力，只要具備系統分析能力，建立可描述系統中各變量特徵、關連及作用的數學式，再以簡單的 LINDO 語法編寫後，就可以交付 LINDO 內建的優化求解引擎，在特定目標方向上找出滿足各項限制條件的最佳組合。

因為 LINDO 語法相當接近一般的數學表達方式，大大降低系統模型的開發難度，而且隨著模型的複雜程度，LINDO 還有許多的優化模組可供選擇，經由標準化的模型建置及模組呼叫程序，模型開發人員可以快速地進行模型的升級與程式的校正編修，對於從事決策分析及系統工程的多數專家而言，LINDO 單機版已經可以滿足決策分析時的需求。

2.4 情境設計與課程發展

決策情境與能源模型連結相當困難，需要創意發想。先從簡單的價值澄清遊戲設計開始、再進階到公聽會法的角色扮演遊戲設計。每個教案會設計一位促進者或主持人，必須先經過台灣能源教育模型及其互動式介面的教育訓練，主持人先選定台灣能源教育模型可支援的主題，經過主題引導再由學生使用電腦模擬對

預設的選項去進行討論。

三、結果與討論

本研究內容可以歸納為四項核心任務，分別是能源教育模型本體的發展、節能減碳的概念發展、如何利用能源教育模型形成節能減碳共識以及產生理性的政策(如圖一)。

在發展能源教育模型本體的過程中，首先完成能源基本資料的建置，經環保署、台電、能源局、工研院及中油等單位的協助，找到各種能源成本、離尖峰的電力需求、基載發電模式、尖載發電模式、各部門之能源需求、各種能源的碳排放係數、能源直接利用與發電需求之比重等資料。然後開始在 LINDO 視窗下開始設計能源教育模型，初期設計目標設定在未來可支援能源教案之情境分析，我們經由文獻搜索發現到許多與全球暖化或全球變遷教育相關的網站，皆針對不同屬性的使用者設計資料或課程，所以也分別針對情境一：於 2011 年啟用核四發電；情境二：於 2016 年啟用核四發電，及情境三：於 2021 年啟用核四發電等三種情境下如何同時滿足能源成長需求，並至 2025 年溫室氣體排放量逐年降回到 2000 年標準進行最佳化分析[9]，這樣的情境分析結果可以做為課堂教學的案例。

在節能減碳的概念發展上，本研究團隊蒐集與整理分析相關文獻，萃取全球暖化、氣候變遷與子計畫一所建構的能源模型中的重要概念。經過多次小組會議，討論歸納出以 IPCC 角度為出發點之「全球暖化知識結構圖」及「能源模型之知識結構圖」，並且以教育為出發點完成「九年一貫、高中與大學學生之全球暖化與節能減碳素養結構圖」。

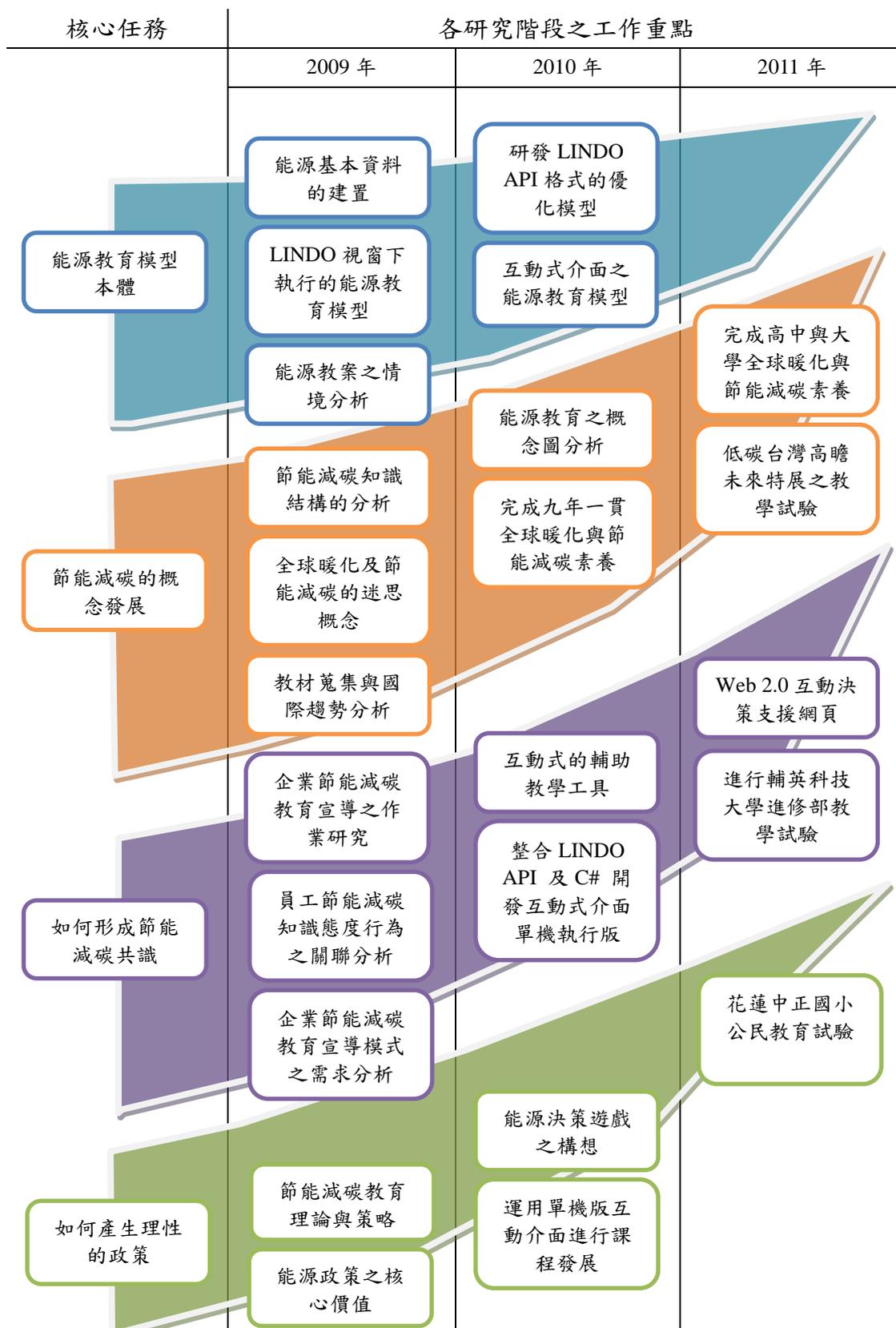
(1) 全球暖化知識結構需求

IPCC 報告書中，「全球暖化」的重要概念包括「科學事實」、「衝擊」、「調適」、「減緩」，「衝擊」會增加「脆弱度」，而「調適」是為了降低「脆弱度」。全球暖化所造成的衝擊包括了「氣候變遷」、「生態系改變」、「國際局勢改變」、「疾病風險增加」以及「環境品質惡化」；調適的方法包括了「教育」以及「政策」手段，「國土重新規劃」、「改變生活概念」、「城市基礎建設改變」都是可行的策略。減緩全球暖化趨勢的方法包括「提倡低碳新經濟」、「發展減碳科技」、「調整生活方式」、「國際合作」以及「節能減碳」。

(2) 能源模型之知識結構需求

台灣能源模型的基本假設為「能源供給」需滿足「能源需求」。其中，「能源供給」包括了「初級能源」、「次級能源」，以及由初級能源與次級能源轉換成的「電」。在層層地轉換與使用過程中，均會排放「溫室氣體」與「空氣污染物」。「全球暖化、氣候變遷與節能減碳」的素養可分為「知識」、「態度」與「行為意向、行動與技能」三方面。在知識面中，包括「背景知識」、「應用知識」、「環境行動策略與技能相關的知識」；態度面包括「對全球暖化問題的敏感度」、「對全球暖化議題的關切程度」、「關於全球暖化議題的價值觀」、「對於節能減碳行動的責任感」、「對於目前節能減碳推動方式的意見」、「對全球暖化與氣候變遷問題

的控制觀」；行為意向、行動與技能面包括「參與與抗暖化有關的活動」、「說服行動」、「消費者行動」、「生態管理」、「法律與政治行動」。



圖一、研究進程與能源模型的演進

基於「節能減碳的決策思維」、「能源模型之限制條件與決策目標」、「節能減碳之成本效益函數」、「能源模型之程式開發經驗」等研究需求，計畫成員一致認為有必要與加拿大 Regina 大學環境工程學院黃國和教授團隊交流學習，該團隊所發展出的能源模型，是一套結合系統分析與環境經濟概念，考量能源供需、能源成本及環境衝擊的能源模型，而且該模型目前已經在加拿大的安大略省、沙司喀朱萬省、安大略省 Waterloo 都會區、中國大陸北京市等不同尺度的區域有成功案例的執行經驗，他們的能源模型還有一項特色就是互動式的介面，要讓 LINDO 的優化引擎直接與互動式介面連結，必須將原來在 LINDO 視窗下作業的能源模型改為 LINDO API 格式的優化模型。

本計畫也試著探討如何利用能源教育模型去形成節能減碳共識以及產生理性的政策，在輔英科技大學附設醫院員工、輔英科技大學進修部學生及花蓮中正國小等單位進行的教學試驗，皆發現互動式的輔助決策工具不論在課程發展上或教育宣導過程中，對於提升學習者的學習意願都很有幫助。輔英科技大學進修部學生對於台灣的能源發展、能源與溫室氣體排放之間的關係、各項能源使用成本等，也都比未使用過互動式能源決策工具前更加了解。

本研究團隊參與自 100 年 3 月 21 日至 100 年 4 月 24 日的『低碳臺灣，高瞻未來，你能我也能特展』提供單機版互動式決策分析模組於中正紀念堂展示(如圖二)。希望經由展示的過程中，透過民眾的實際參與，讓民眾瞭解台灣的能源發展現況及能源基本的供需情形，理解作為最終能源使用者之節能減碳機會與效益，建立正確的節能觀念。



圖二、低碳臺灣，高瞻未來，你能我也能特展

3.1 台灣能源教育模型的演進

由於專業版台灣能源教育模型系統中的能源參數較為複雜，對於非系統分析的專業人員來說不易理解且接受度不佳，所以本研究將原本專業版台灣能源教育模型中的能源參數簡化，建立簡化版的台灣能源教育模型(如表一所示)，篩選與一般大眾較為相關的能源參數，如汽油、風力、核能等。另外，次級能源則是經

由初級能源透過轉換、提煉所產出，且與初級能源一樣作為燃料及發電之使用。

表一、專業版與簡化版之台灣能源教育模型能源參數對照表

	能源參數	專業版台灣能源教育模型	簡化版台灣能源教育模型
初級能源	煤		•
	原油		
	天然氣		•
	風力	•	•
	地熱	•	
	水力	•	•
	太陽能	•	•
	海洋能	•	
	生物質	•	•
	核能	•	•
	次級能源	LPG	•
LNG		•	
煉焦煤		•	
燃料煤		•	
無煙煤		•	
亞煙煤		•	
焦炭		•	
石油腦		•	
車用汽油		•	•
航空燃油		•	
燃料油		•	•
焦爐氣		•	
柴油		•	•
柏油		•	
轉爐氣		•	
潤滑油		•	
其他石油產品		•	
RDF		•	
生質酒精		•	
生質柴油		•	•

3.2 資訊系統特性及技術發展

由於專業版台灣能源教育模型是建構在 LINDO 視窗下所執行的單機版決策

工具，需具備系統分析之專業人員才能分析其結果，對於非專業的系統分析學習者較不友善，不易理解其決策結果之意義，所以本研究進而簡化專業版台灣能源教育模型之內容，以 LINDO API 線上優化決策支援技術，執行台灣能源教育模型的運算，再經由程式的開發，研發出可以反應能源結構、能源的成本差異及減碳貢獻的互動式決策分析模組。本研究後續也不斷地擴充互動式決策系統之功能，目前已開發至第三代網路版之互動式決策系統，系統功能發展如表二所示：

表二、各階段台灣能源教育模型資訊技術之功能比較

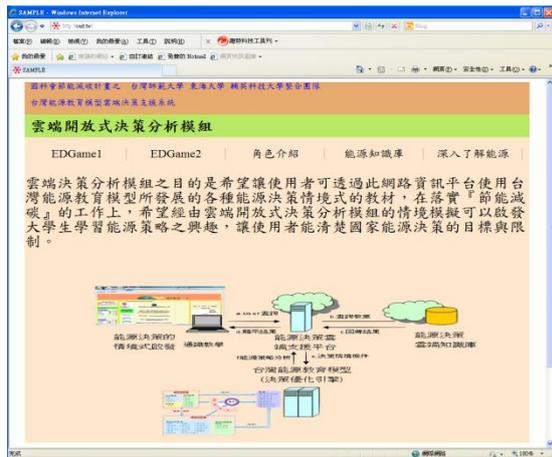
系統特性		LINDO 視窗執 行版	互動式 單機執 行版	第一代 網路版	第二代 網路版	第三代 網路版
使用者需熟悉 LINDO 軟體		●				
有互動式功能			●	●	●	●
有能源知識庫			●			●
系統 所 應 用 之 程 式 語 言	C#	●	●	●	●	●
	HTML			●	●	●
	ASP.NET			●	●	●
	CSS				●	●
	AJAX					●
	LINDO	●				
	LINDO API		●	●	●	●

3.3 介面的友善性

本研究透過互動式決策分析模組的開發(圖三)進行節能減碳教育推廣，經由情境設計，配合”角色扮演”的模擬式教學並提供能源相關知識，予學習者扮演身負使命的角色，在模擬過程中，學習者可自行設定參數值，輸入參數值後，由電腦自動根據線上能源模型的 LINDO API 優化程式運算，在畫面上顯示模擬的結果或現象，學習者無須了解能源模型內容中的複雜的限制式，這是一個互動式的決策支援系統，學習者彼此間可以互相觀摩討論，也可以將學生分成數個小組，運用分組討論合作學習方式，透過正反立場互換，使學生進入結構性爭論模式的流程，支援能源決策等衝突性高的議題教學。教學者也可以經由事先的情境規劃，讓學習者體驗參數值改變時結果如何跟著變化的情形，藉此讓學習者吸收教材提供的知識內容後，能反映其思考過程的想法、經驗，達到自行建構概念與知識。



單機版



Web2.0版

圖三、單機版及 Web2.0 版互動式能源決策分析模組

3.4 成效評估工具的發展

為了評估本能源決策模組是否可以當作溫室氣體減量教育宣導過程的輔助教學工具，本研究透過文獻蒐集與分析，以「全球暖化、氣候變遷與節能減碳素養」為標的，作為問卷設計之基礎，設計對象包括國小 1-3 年級、國小 4-6 年級、國中、高中以及大學之學生，開發兼顧較為完整的全球暖化、氣候變遷與節能減碳素養，亦考量與本整合型計畫成果的結合。表三(於附錄)為大學生節能減碳素養培養過程台灣能源教育模型可以支援的部份，仍有部份大學生應有之節能減碳素養非本能源決策模組可以支援，因此不列出，未來應該深化能源決策模組的功能，讓教學支援更為全面。

四、結論

台灣能源教育模型是建構在 LINDO 系統優化軟體上，可以應用在專業課程教學及政府之決策分析，但是系統中含有很多複雜的數學方程式及各項能源成本與溫室氣體排放係數之參數值，對於不熟悉系統優化軟體的學習者而言並不友善，甚至在決策分析結果還需要專業人員的整理後，才能以圖形等容易理解的方式呈現，較不容易達到教育宣導的效果。所以本研究以台灣能源教育模型為核心，透過程式的開發，研發出一套具互動式的決策分析模組，並透過知識結構的界定，以「全球暖化、氣候變遷與節能減碳的素養」為指標，發展自編問卷作為「全球暖化、氣候變遷與節能減碳素養」之「知識、態度與行為意向、行動與技能」的成效評估工具。此外，本研究也利用互動式決策分析模組進行產業、社會及學校等教育推廣活動，從教育推廣後的結果顯示，學習者經由互動式決策分析模組的學習具有一定之成效，互動式決策分析模組的情境模擬可以啟發學習者學習能源策略之興趣，讓學習者能清楚國家能源決策的目標與限制，進而提升國民的環境素養。

五、附錄

表三、台灣能源教育模型與大學生節能減碳素養之關聯性

	素養內涵	台灣能源教育模型可以支援的知識
知識	1. 大學生能解釋與全球暖化相關的應用知識之間的關係	(1) 全球溫室氣體排放量現況與減量情境 (2) 不同能源型式與溫室氣體排放量的對應關係 (化石燃料、再生能源、核能、生質燃料等) (3) 節能與減碳的關係
	2. 大學生能解釋與全球暖化相關的環境行動策略與技能相關的知識相互之間的關係	(1) 個人與國家節能機會與技巧 (2) 個人與國家減碳機會與技巧 (3) 溫室氣體排放量計算基本概念 (GWP、主要來源等) (4) 再生能源的價格與競爭力 (5) 公民參與相關知識
態度	1. 大學生能主動分析全球暖化的嚴重性與各種因應策略的必要性	(1) 是否認為全球暖化的確存在? (2) 是否認為全球暖化是人類活動造成的?
	2. 大學生能主動規劃與積極參與節能減碳行動	(1) 是否認為降低溫室氣體排放量是每一個人的責任? (2) 是否認為台灣對於全球暖化要負起責任? (3) 是否願意為了節能減碳犧牲生活的便利性或舒適度? (4) 是否願意向其他人宣導抗暖化與節能減碳的相關訊息?
	3. 大學生能主動關注與評價節能減碳推動方式	(1) 是否認為目前國內對於全球暖化與氣候變遷的教育是足夠的?
行為	1. 大學生能主動規劃與抗暖化有關的活動	(1) 參與與抗暖化相關的教育活動
	2. 大學生能說服其他民眾、政府單位或商業單位節能減碳	(1) 說服家人共同節能減碳與抗暖化 (2) 說服工作地點人員節能減碳 (3) 說服其他民眾、政府單位或商業單位節能減碳

六、參考文獻

1. M. Summers, C. Kruger, A. Childs, Understanding the science of environmental issues development of a subject knowledge guide for primary teacher education. *International Journal of Science Education*, Vol.23, No.1, pp. 33-53, 2001.
2. V. Papadimitriou, Prospective Primary Teachers' Understanding of Climate Change, Greenhouse Effect, and Ozone Layer Depletion. *Journal of Science Education & Technology*, Vol.13, No.2, pp. 299-307, 2004.

3. H. T. Ingason, H. P. Ingolfsson and P. Jensson, Optimizing site selection for hydrogen production in Iceland. *Hydrogen Energy*, Vol.33, pp. 3632-3643, 2008.
4. S. Iniyan, L. Suganthi and A. A. Samuel, Energy models for commercial energy prediction and substitution of renewable energy sources. *Energy Policy* Vol.34, pp. 2640-2653, 2006.
5. Y. P. Cai, G. H. Huang, Z. F. Yang, Q. G. Lin, B. Bass and Q. Tan, Development of an optimization model for energy systems planning in the Region of Waterloo. *International Journal of Energy Research*, doi: 10.1002/er.1407, 2008.
6. 陳俊宏，永續發展與民主：審議式民主理論初探，*東吳政治學報*，第九期，pp. 85-122，1998。
7. Climate Interactive, <http://forio.com/simulation/climate-development/index.htm>, 2010.
8. 江淑卿、郭生玉，不同學習過程的概念構圖策略對促進知識結構專家化與理解能力之效果研究，*師大學報：教育類*，第42期，pp. 1-16，2008。
9. 洪銘謙、甯蜀光、葉欣誠、周亞璇，核能電力投入時機對能源供應結構影響之評估，*燃燒季刊*，第十九卷，第二期，pp. 2-12，2010。

焚化爐操作與戴奧辛排放預測

Incinerator operation and dioxin emissions forecasting

莊硯勛¹、陳鶴文²

Yen-Hsun Chuang, Ho-Wen Chen

東海大學環境科學與工程學系

Department of Environmental Science and Engineering, Tunghai University
Sond Bunsan³

Center of Excellence for Environmental and Hazardous Waste Management,
Chulalongkorn University

摘要

台灣地小人稠垃圾製造量驚人，面對大量且難以處理的垃圾，興建掩埋場與焚化廠儼然已成為必要之趨勢。在台灣的政策下，提倡了以焚化為主、掩埋為輔的垃圾處理政策，在此政策下，垃圾量雖已有處理方法，但是相對的垃圾的消失也帶來給民眾更大的隱憂，因為在燃燒垃圾的同時，也帶來了傷害環境的物質，例如像戴奧辛還有一些有害重金屬。所以本研究將利用類神經網路進行預測及監控焚化爐煙道所排放出戴奧辛之生成。結果發現將焚化爐的參數及濃度進行主成分分析後，再經由倒傳遞類神經網路模式進行模擬，可以得到 R^2 為 0.9988 的高度相關值，使得焚化爐所排放出的戴奧辛之實測值與本研究利用類神經網路所模擬出的預測值可以做一個結合，進一步達到預測及監控之功能。

關鍵字：焚化爐、類神經網路、戴奧辛

Abstract

To settle the controversy of waste treatment and disposal, Taiwan government selected incineration as the major approach to deal with increasing garbage since 1991. Though incineration can reduce the volume of waste for final disposal, the public devoted much attention to the health concern about the toxin pollutants emitted from incinerators. This paper proposed a neural-network-based approach to predict the emission of dioxin during the operation of an incinerator for planning an efficient monitoring and control strategy.

Keywords: Dioxin, prediction model, Artificial Neural Network.

¹ 東海大學環境科學與工程學系，碩士研究生

² 東海大學環境科學與工程學系，副教授，E-mail: hwchen@thu.edu.tw

³ Center of Excellence for Environmental and Hazardous Waste Management, Chulalongkorn University，博士研究生

一、前言

台灣地小人稠，垃圾製造量驚人，面對大量且難以處理的垃圾，興建掩埋場與焚化廠儼然已成為必要之趨勢。根據行政院環保署民國 86 年的統計，台灣地區每人每日的垃圾產生量達 1.143 公斤，為解決日益嚴重的廢棄物處理與處置問題，行政院環保署於民國 80 年訂定「以焚化為主、掩埋為輔」的垃圾處理策略，甚至推動「一縣市一焚化爐」的垃圾焚化廠興建計劃，以期解決台灣地區所面臨的垃圾處理問題。截至民國 94 年底為止共規劃了 27 座焚化廠，其中運轉中 20 座，其餘 7 座則在施工及驗收中，除了上述的大型垃圾焚化廠外，尚有不同規模的事業與醫療廢棄物焚化爐正在運轉或規劃興建中，垃圾焚化爐密度以及世界人口密度高居世界第一。垃圾焚化爐在焚化過程中會排放戴奧辛與重金屬等有害物質，如鉻、鎘、鎳、鉛、與砷等金屬，還有會致癌的環境荷爾蒙戴奧辛類的物質。

戴奧辛於焚化過程中會因燃燒所逸散至大氣中之戴奧辛類化學物質，半衰期會因含氯數之不同而有很大的差別(1)。一般而言，低含氯數之戴奧辛類化學物質多為氣相存在或是易揮發為蒸氣(2)，因此易受光照射產生分解或與空氣中之煙自由基起化學反應，所以低氯數之戴奧辛類化合物半衰期較短。含高氯數之戴奧辛化學物質則較易吸附於空氣中之微粒，較不容易於自然環境中分解，而且可因微粒而進行長距離之移動(3)。隨空氣移動之戴奧辛類化學物質可能沉澱於土壤、水體及植物體中，也因此而進入食物鏈中，使人體曝露於戴奧辛的風險(4, 5)。

戴奧辛(dioxin)是兩個氧原子聯結一對苯環類化合物之統稱，因氯化物及鏈結位置之不同，戴奧辛總計有約 210 種不同的異構物，包括 75 種多氯二聯苯戴奧辛(polychlorinated dibenzo-p-dioxins, 簡稱 PCDDs)及 135 種多氯二聯苯呋喃(polychlorinated dibenzofurans, 簡稱 PCDFs)。其中以 2,3,7,8-四氯聯苯戴奧辛(2,3,7,8-TCDD)之毒性最強，其在土壤中之半衰期可達 12 年之久，有「世紀之毒」之稱，其急毒性是僅次於目前已知最毒之肉毒桿菌毒素(botulinum toxin)。針對垃圾焚化中所產生戴奧辛排放的問題，更成為民意代表及環保人士爭相質疑與探討的對象，且近年來政府對於環境品質要求日益嚴格，民眾對於環保問題也更加關切，因而對於焚化廠所排放污染物對周圍環境的影響特別關注。為減低民眾對於焚化廠所排放污染物之疑慮，確實有必要針對焚化廠煙道排放之多氯戴奧辛及多氯呋喃進行預測戴奧辛的生成及監測控制。

類神經網路是一種模仿生物神經系統的資訊處理系統，它利用大量簡單相連的人工神經元來模仿生物神經網路的能力。由於整個神經元的運作非常複雜，且目前還有許多未獲了解的地方，因此必須要做某種程度的簡化，以便將其為何具有資訊處理能力的關鍵結構萃取出來，使得「類神經元」(artificial neuron)能具有生物神經元相似的單獨處理資訊的能力類神經網路的組成單元能夠像真正的腦神經元一樣，具備資訊儲存等基本的能力，並且組織成如同腦神經系統一樣，具

有平行處理和分散儲存功能的構造，因此類神經網路可以高速且大量的進行計算，也同時擁有容錯的潛力所以當人們日漸瞭解腦神經的思考，以及學習的運作方式後，同時也希望電腦能模擬人類在資料上處理的能力，而在目前類神經的網路模式有很多種可以使用，可分為一般而言分為監督式、無監督式、聯想式及最適化應用網路等四類，而在目前各類神經網路模式中被應用得最廣而且最成功的模式是倒傳遞類神經網路模式且很多研究者也利用此模擬方式預測出污染趨勢(6)，所以本研究用監督式類神經網路中的倒傳遞類神經網路進行預測模擬焚化爐所排放之戴奧辛生成及監測控制。

二、研究方法

2.1 研究背景

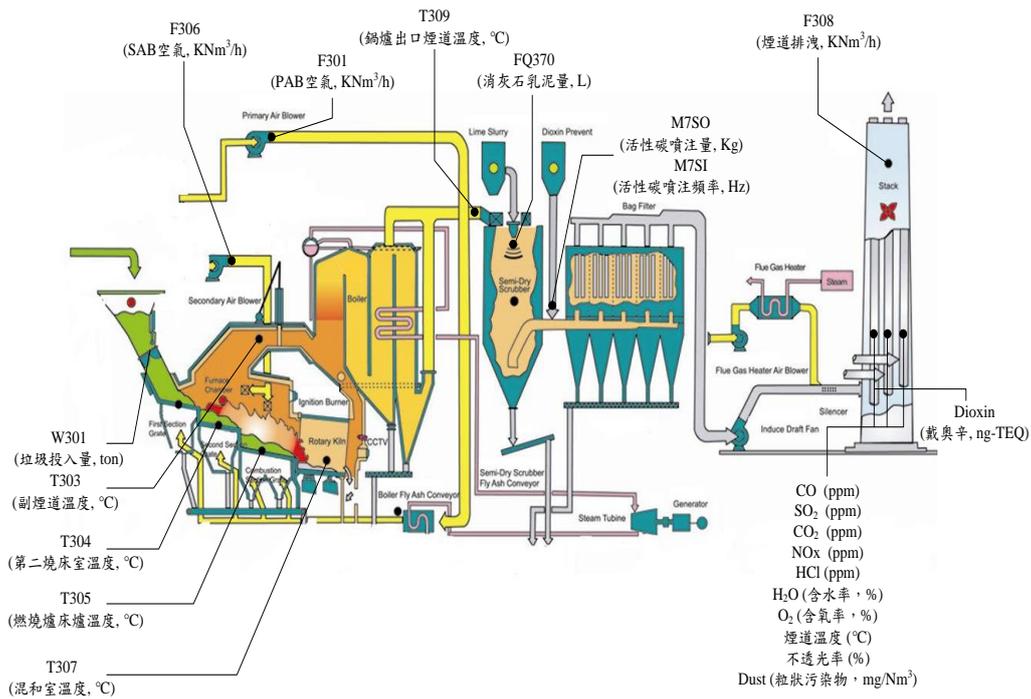
本研究以台中市垃圾焚化廠為例進行預測戴奧辛的生成及監測控制，台中市垃圾焚化廠為行政院八十年核定「台灣地區垃圾資源回收(焚化)廠興建工程計畫」二十一座大型焚化廠之一，由前台灣省政府環境保護處負責發包興建，於民國八十一年一月開工，八十四年五月竣工，並自八十四年十二月十二日起正式移交台中市政府接管，設計焚化處理量為 900 噸/日，用地面積為 4.4 公頃，總工程經費約新台幣 38 億元，為中部地區首座大型焚化廠。本研究將台中市垃圾焚化廠之垃圾處理流程剖析如圖一，將每一個參數進行編號，以利用所測到之物質或是其濃度與戴奧辛做其相關性及預測生成戴奧辛的關係。

2.2 遺漏值分析

遺漏值轉置當資料來源及範圍選定確認時，就必須將資料進行前處理之動作。遺漏值代表著在收集資料過程中可能有不完整的資料產生。一般連續監測數據資料，有可能因為儀器故障、人為操作及突發狀況等諸多因素，而導致監測數據資料不完整。然而，利用類神經網路模擬分析時，監測資料必需具有連續性且等時間間距。因此進行模式運算之前，本研究則先利用線性內插法進行資料補遺。

2.3 主成分分析

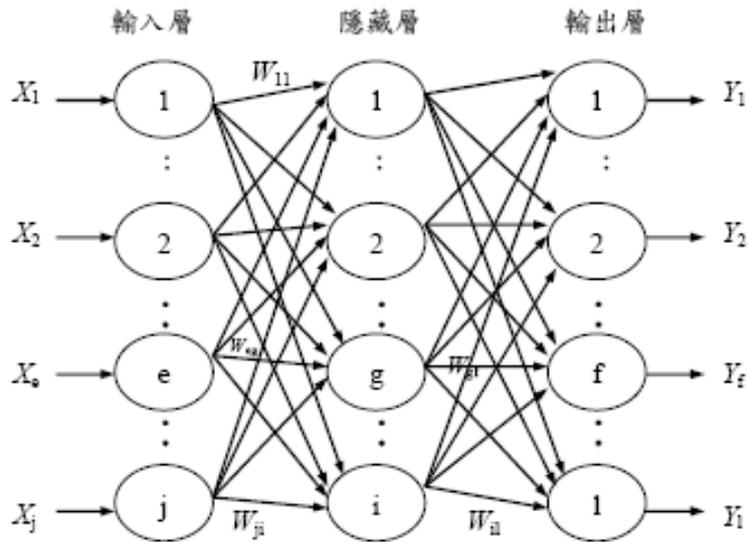
利用線性方程式將所有變項加以線性合併(linear combination)，計算所有變項共同解釋的變異量，此線性組合稱為主要成份。第一次線性組合建立後，計算出的第一個主成份估計，可以解釋全體變異量的最大部份。其所顯示的變異量即屬第一個主成份所分配，分離後所剩餘的變異量，經第二個的方程式的線性合併，可以抽離出第二個主成份，其所涵蓋的變異量即屬於第二個主成份的變異量。依此類推，剩餘的變異量愈來愈少，每一個成份的解釋量依序遞減，直到無法抽取共同變異量為止。一般保留解釋量較大的幾個成份，來代表原來所有的變項 (7)。



圖一、參數與焚化廠位置標示圖

2.4 倒傳遞類神經網路 (Back-Propagation Network, BPN)

倒傳遞網路是目前各類神經網路模式中被應用得最廣而且最成功的模式。倒傳遞類神經網路演算過程分為學習過程(learning process)及回想過程(recalling process)。其中學習過程包含兩個階段：順向傳遞(forward pass)與逆向傳遞(backward pass)。順向傳遞是從輸入層開始，傳至隱藏層而後至輸出層，一層一層向前傳遞並由非線性轉換函數計算各層處理單元的輸出值，直至網路的最後一層。逆向傳遞則是由輸出層向後傳遞，這一階段在於計算誤差及更新連接權重，其方法是將前層的誤差值向後傳遞(error back-propagation)，並以此為依據修改連接權重，計算該層的誤差，再將其往後傳遞，直到輸入層。此學習過程通常以一次一個訓練範例的方式進行，直到學習完所有的訓練範例，且達到網路收斂為止(圖二)(8)。回想過程則是網路依學習過程中所學習到之連接權重，以輸入向量輸入，推估輸出向量的過程，也稱為預測過程 (forecasting process)。倒傳遞神經網路的基本原理則是利用最陡坡降法(gradient steepest descent method)的觀念，將誤差函數予以最小化，同時倒傳遞網路因增加了隱藏層的學習，使得網路可表現輸入處理資料間的相互影響。類神經網路在學習過程中，為了避免資料的變動趨勢過大，影響模式之預測或診斷結果，通常會進行資料正規化處理(Normalization)。本研究類神經網路輸出層之轉換函數為雙彎曲轉換函數(Sigmoid Function)，而雙彎曲轉換函數具有一種特性，即當 x 趨近於正負無窮大時，輸出值會趨於 0 或 1，則輸出變數值域就為 $[0,1]$ 。



圖二、倒傳遞類神經網路架構

因此將資料的變動範圍集中在某個固定的區間之內，若資料未經正規化處理，將會使變數值較小的單元在網路影響力方面，遠低於變數值較大的單元，亦將會影響網路學習效果。本研究以線性映射法將數據尺度化，正規化公式如(1)式所示：

$$\text{Normalized Data} = \frac{D_{RAW} - D_{min}}{D_{max} - D_{min}} \quad (1)$$

其中: Normalized Data 為正規化後之數據; DRAW 為原始資料數據; Dmax 為原始數據中之最大值; Dmin 為原始數據中之最小值。

經過類神經網路訓練後所得之正規化後之輸出值，必須經過反正規化處理，才可以反應真實的尺度。反正規化公式如(2)式所示：

$$\text{Renormalized Data} = \left(\frac{D_{test} - T_{min}}{T_{max} - T_{min}} \right) \times (D_{max} - D_{min}) + D_{min} \quad (2)$$

其中: Renormalized Data 為反正規化後之數據; Dtest 為網路訓練後之數值; Tmax 為網路訓練後之最大值; Tmin 為網路訓練後之最小值。

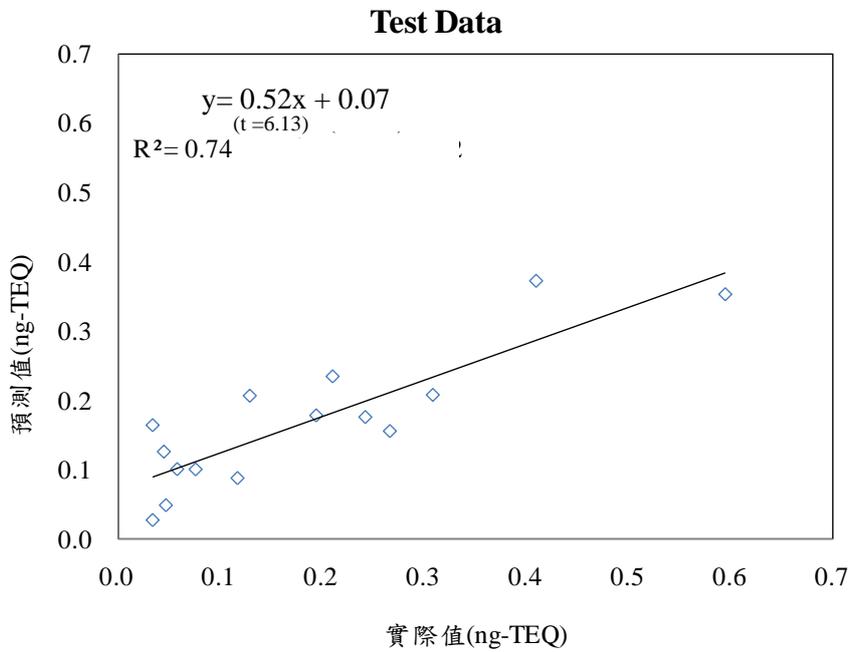
三、結果與討論

本研究將戴奧辛生成之類神經網路模式分成兩部分進行討論，第一部分為未分群之類神經網路模式，第二部分則是利用主成分分析的結果進行類神經網路模式。

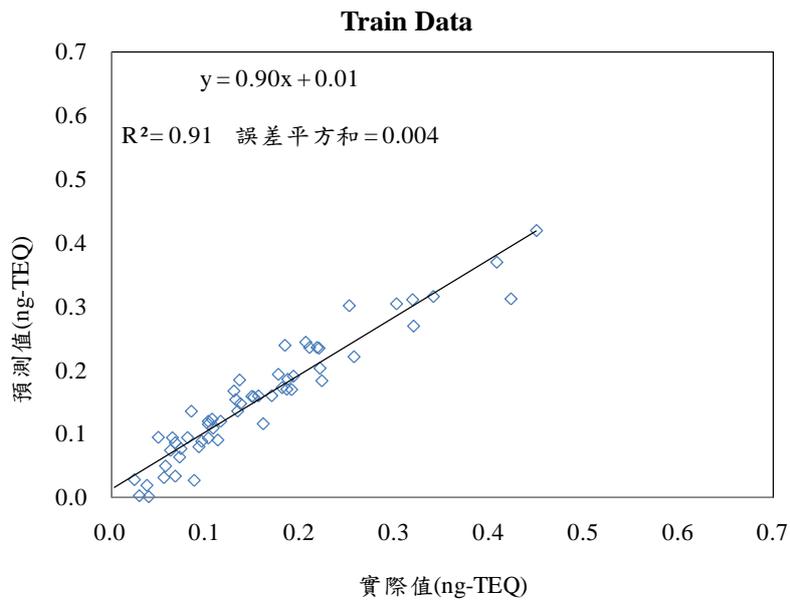
3.1 戴奧辛生成之類神經網路模式(未分群)

圖三所示，本研究將所有參數進行測試，發現實測值與預測值之 R^2 只在 0.74；但經過類神經網路模式的訓練之後(圖四)，發現實測值與預測值已有高度相關 ($R^2=0.91$)，但是有一些數值在經過類神經網路模式訓練過後還是有一些落

差，並無法完全預測出其實測值，代表在倒傳遞類神經網路中的邏輯需要從新作一修飾，所以本研究認為需將所有變數進行分群，將相關性高的分成一群，之後再進行類神經網路模式模擬。



圖三、全變數之最佳測試模擬結果



圖四、全變數之最佳訓練模擬結果

表一、變數特徵分析表

	成份 ¹						
	1	2	3	4	5	6	7
M7SO ²	.942	.218	.056	.077	-.029	.023	-.012
F308 ²	.938	-.026	.154	.041	.007	.076	.039
M7SI ²	.897	.169	.012	-.012	.084	.087	.105
T309 ²	.723	.122	-.083	-.310	-.193	-.278	.170
煙道溫度	.676	.026	-.037	-.203	-.415	-.365	-.110
O ₂	.426	.200	.341	-.326	-.245	-.162	.106
不透光率	.223	.907	-.064	.064	.104	-.025	-.192
Dust	.239	.902	-.079	.056	.106	-.035	-.208
SO ₂	-.486	.550	.055	.211	.025	.288	.337
T305 ²	.136	-.141	.879	.159	.109	-.110	-.060
T303 ²	.217	.117	.774	-.011	.242	-.045	-.316
T304 ²	-.172	.245	.649	.167	.000	-.465	.380
NO _x	-.130	-.301	.592	.222	-.112	.237	-.003
F301 ²	.177	.205	.177	.815	.140	-.014	-.080
T307 ²	-.220	.132	.211	.801	-.073	.067	.041
CO	.102	.432	.064	-.621	-.180	.314	-.030
H ₂ O	.078	.187	.114	-.011	.874	-.163	-.065
CO ₂	-.237	.001	.054	.137	.841	.194	-.077
HCl	-.233	-.044	-.065	.052	.021	.794	.010
W301 ²	.144	.129	-.015	-.146	.026	.256	.001
F306 ²	.120	-.285	-.045	-.108	-.049	-.260	.810
FQ370 ²	.157	-.111	-.183	.056	-.126	.444	.735

註 1: 萃取方法:主成分分析; 編號²: 請參考圖一

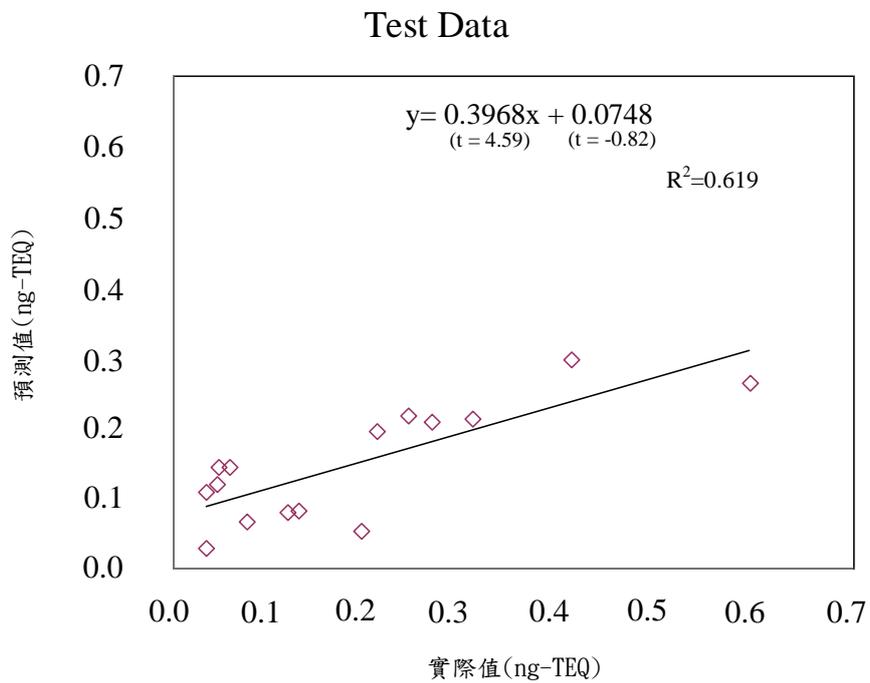
3.2 焚化爐變數特徵分析

根據 3.1 的結果顯示，在初步的測定中，無法將數據完整的進行預測及模擬所以有一些研究者利用主成分分析進行分群，再接著後續的倒傳遞類神經網路模式模擬(9)，所以本研究利用主成分分析進行變數整理如表一，據表一所示，成分一的成分有 M7SO、F308、M7SI、T309；成分二的成分有不透光率、Dust；成分三的成分有 T305 及 T303；成分四的成分有 F301 及 T307；成分五的成分有 H₂O 及 CO₂；成分六的成分有 HCl；成分七的成分有 F306。

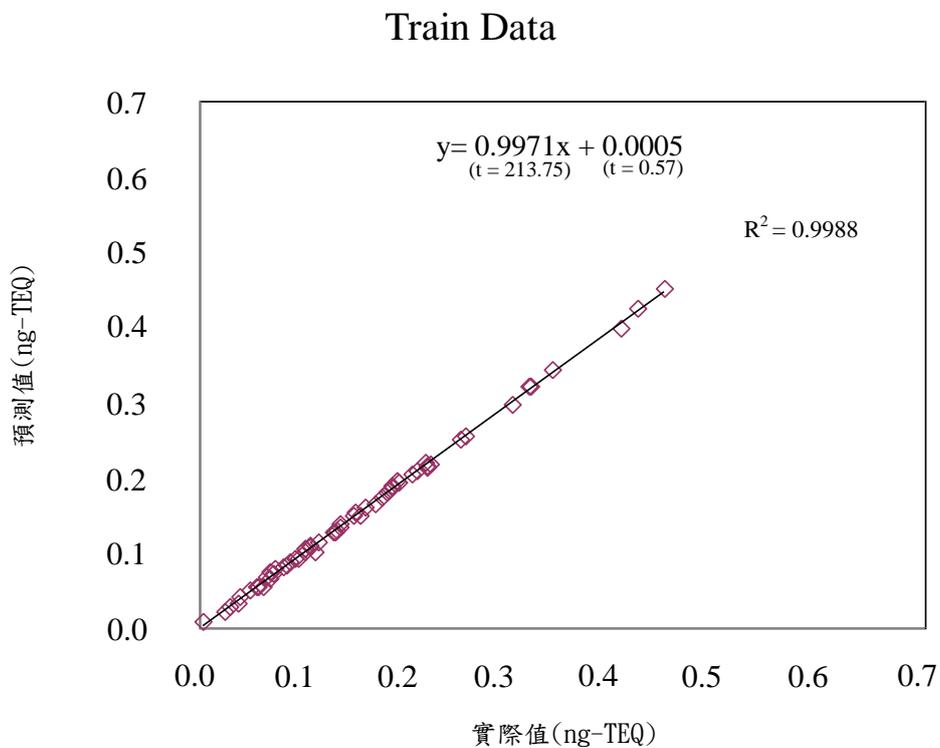
3.3 戴奧辛生成之類神經網路模式(分群後)

經過主成分分析後，本研究將所有變成 7 個主要成分，之後進行數據測試，圖五顯示，實測值與預測值之 R² 只有 0.619，比原本未分群的時候還要低，但是將分群後的變數進行倒傳遞類神經網路模擬，結果發現實測值與預測值之 R² 高達 0.9988(圖六)，代表將數據分群後再進行類神經網路模式模擬，模擬後的結果可以把實測值與預測值做一個準確評判，也就代表當垃圾投入量多少時，本研究

可利用此方法進行預測戴奧辛的生成量，並達到監測之效果。



圖五、篩選後變數之最佳測試模擬結果



圖六、篩選變數之最佳訓練模擬結果

四、結論

影響焚化爐戴奧辛排放之操作變數甚多，本研究以相關係數及因素分析之統計分析方法搜尋出較重要操作變數，之後利用類神經網路模擬焚化系統之模式，探討主要操作變數之最低的戴奧辛排放，其結論有三點分別，影響戴奧辛排放量之主要操作變數，依序為：總空氣量 > 集塵袋出口之氧氣組成 > 爐頂溫度；以總空氣量及集塵袋出口之氧氣組成模擬求得之最佳類神經網路焚化系統模式為 2-7-1；據此，反應曲面法運算求得最佳操作變數值為：總空氣量 30393. Nm³/h、集塵袋出口之氧氣組成 11.8 % 時，相對應之戴奧辛最低排放量 2.54 ng-TE/Nm³；以總空氣量、集塵袋出口之氧氣組成及爐頂溫度模擬求得之最佳類神經網路焚化系統模式為 3-3-1；由反應曲面法運算求得最佳操作變數值為：總空氣量 32237 Nm³/h、集塵袋出口之氧氣組成 12.98%、爐頂溫度 884°C，相對應之戴奧辛最低排放量 2.33 ng-TE/Nm³。

五、參考文獻

1. I. Fangmark, B. Stromberg, N. Berge, C. Rappe, The Influence of Fly-Ash Load and Particle-Size on the Formation of Pcdd, Pcdf, Pcbz and Pcb in a Pilot Incinerator, *Waste Management & Research*. Vol. 13, pp. 259-272, 1995.
2. 王琳麒，李文智，污染源及大氣中戴奧辛/呋喃之特徵，國立成功大學環境工程學系，博士論文，2003 年。
3. 黃彩斐，張木彬，焚化過程中溫度與氣流組成對戴奧辛生成之影響初探，國立中央大學環境工程研究所，碩士論文，1998 年。
4. 魏美華，李俊璋，焚化底渣處理業勞工多氯戴奧辛/呋喃/擬似戴奧辛多氯聯苯職業暴露與健康風險評估，國立成功大學環境醫學研究所，碩士論文，2006 年。
5. T.S. Shih, H.L. Chen, Y.L. Wu, Y.C. Lin, C.C. Lee, Exposure assessment of polychlorinated dibenzo-p-dioxins and dibenzofurans (PCDD/Fs) in temporary municipal-waste-incinerator maintenance workers before and after annual maintenance, *Chemosphere*, Vol. 64, pp. 1444-1449, 2006.
6. W.Z. Lu, W.J. Wang, X.K. Wang, S.H. Yan, J.C. Lam, Potential assessment of a neural network model with PCA/RBF approach for forecasting pollutant trends in Mong Kok urban air, Hong Kong, *Environmental Research*, Vol. 96, pp. 79-87, 2004.
7. I.T. Jolliffe, Principal Component Analysis, *Springer Series in Statistics*, 2002.
8. K.Y. Chen, Y.C. Shaw, Applying back propagation network to cold chain temperature monitoring, *Advanced Engineering Informatics*, Vol. 25, pp. 11-22, 2011.
9. X.W. Cao, H.L. Liu., N.Y. Chen, Classification of Cm I energy levels using PCA-BPN and PCA-NLM, *Chemical Physics*, Vol. 220, pp. 289-297, 1997.

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，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 2012.5

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：江鴻龍、侯順雄、陳建中、蔡建雄（依姓氏筆畫排列）

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

秘書：許耀文

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五月出版

局版台誌號第玖玖零捌號