

# 125 工業污染防治

## 空污防制

閥件揮發性有機物動態逸散模式探討	張寶鴻、王振華、張一岑、樊國恕	1
溴化甲烷於檢疫與裝運前處理之排放管控技術與策略研究	連振安	11

## 溫室氣體

我國產業溫室氣體排放申報與運用標竿工具做為減量績效 認可機制之探討	簡慧貞、劉家介	31
中孔徑矽基吸附材製程放大及二氧化碳捕獲效率研究	李秀霞、黃志峰、王厚傳、陳旺、徐恆文	61

## 廢水處理

生物薄膜反應器在工業廢水處理與回收的應用 - 台灣近 十二年來的發展經驗	倪辰華、林俊德	81
---	---------	----

## 廢棄物資源化

電漿熔融焚化爐灰渣副產物製作功能性陶瓷之研究	楊昇府、陳慶庭、莊誌銘、張鈞量、蔡俊煌、莊謝宗揚、黃振興	97
------------------------	------------------------------	----

## 本期專題：綠色技術與新新能源發展

台灣之生物氫產儲與燃料電池應用技術發展路徑模式	朱正永、駱安亞、許瓊文、張保隆、林秋裕	117
先進生質燃料技術與產業化趨勢分析	謝志強	133
台灣能源管理系統產業概況	王怡臻、蔡家緯、魏榮宗	149



## 空污防制

# 閥件揮發性有機物動態逸散模式探討

張寶鴻\*\*\*、王振華\*\*、張一岑\*、樊國恕\*

## 摘要

閥件是石油與化學工業製程中使用最多的元件，其逸散排放量也最多，約佔總排放量的 58.2%。由於閥件結構會隨著時間劣化而腐蝕，因此其逸散排放量會逐年增加；然而，過去對於逸散率估算方法如平均排放係數、漏/不漏排放係數、相關方程式、特定相關方程式、層次排放係數法，以及現地測試之圍封試驗方法如真空法與吹拂法等皆未考慮時間劣化、閥件尺寸、操作壓力、流體密度與管理系統因子等影響，因此仍有改善的空間，值得深入探討。

本研究探討圍封實驗所得數據與估算方法及操作參數之關係，然後以液體洩漏源模式為基礎，結合美國石油協會以風險為導向之檢查手冊 API 581 中所提出的時間劣化觀念，將時間劣化、閥件尺寸、操作壓力、流體密度等因子納入考量，以建立隨時間改變的動態逸散模式。研究結果顯示，圍封實驗所得的逸散率與操作壓力、流體密度等參數並無任何關聯，而本研究所發展之閥件動態逸散模式所預測的逸散速率，則呈逐年遞增趨勢。當閥件使用年數到第 7 年時，其遞增曲線會有明顯上升趨勢，可作為閥件維修保養之參考依據。

【關鍵字】揮發性有機物、逸散率、圍封試驗

\*國立高雄第一科技大學環境與安全衛生工程系碩士

\*\*國立高雄第一科技大學環境與安全衛生工程系副教授

\*\*\*國立高雄第一科技大學環境與安全衛生工程系教授

## 一、前　言

美國環保署指出，石油與化學相關產業可能產生之逸散源可歸類為(1)閥；(2)法蘭；(3)釋壓閥；(4)製程排洩口；(5)開口管線；(6)幫浦；(7)壓縮機；(8)取樣連接裝置；(9)攪拌器等 9 大類<sup>[1,2]</sup>。由於數量繁多，如欲量測所有設備元件的排放量，必須消耗大量人力與資源，將大幅增加企業的負擔；因此，如何推估與預測逸散排放量一直是空氣污染研究者的重要課題。

1980 年代，美國環保署以有機氣體分析儀在 24 家石油學化工廠中進行設備元件洩漏檢測。由於設備元件周圍的揮發性有機物的濃度直接與元件逸散率有關，因此只要找出元件圍封實驗所得的排放率與周圍濃度的相關方程式後，只需將所量測的周圍濃度套入此相關方程式，即可推估出元件的排放率。美國環保署與化學品製造公會經由「相關方程式」，又發展出「平均排放係數」、「漏/不漏排放係數」與「層次排放係數」等推估方法<sup>[1,2,3]</sup>，以供業者參考。「平均排放係數」係經由「相關方程式」分別求得個別元件（將檢測濃度代入相關方程式可得逸散率）之算術平均逸散率。將檢測逸散濃度分別依照濃度區間分類，再分別計算該濃度區間內之算術平均逸散率，即可分別得到漏/不漏排放係數(檢測濃度分為  $\geq 10,000 \text{ ppm}$  與  $< 10,000 \text{ ppm}$ )與層次排放係數( $< 1,000 \text{ ppm}$ 、 $1,000 \text{ ppm} - 10,000 \text{ ppm}$  與  $\geq 10,000 \text{ ppm}$ )。

美國環保署所發展的「平均排放係數法」、「漏/不漏排放係數法」、「層次排放係數法」與「相關方程式法」等 4 種方法，不僅在國際上為產業界所採用，而且也是我國環保署所規定的標準方法，也已應用於國內石油與石化工業製程逸散性污染源的測試與估算上<sup>[4,5]</sup>。趙君平等首先針對國內石化工廠內 410 個閥、法蘭、泵浦 等設備元件進行圍封實驗，求得其檢測濃度及質量排放率數據外，再由數據推導相關方程式，最後與美國環保署 SOCMI 相關方程式比較。他們發現所推導的相關方程式不僅與美國環保署 SOCMI 相關方程式差異很大，而且兩族群的信賴區間並不重疊。所推導出的平均排放係數遠低於 SOCMI 平均排放係數，兩者間差異介於 6~29 倍之間；因此，美國環保署 SOCMI 排放係數，可能並不適用於國內石化工廠設備元件揮發性有機物排放量推估<sup>[6]</sup>。

由於設備元件皆會隨著時間腐蝕或劣化，因此其逸散率會隨著時間而增加，但過去環保業界所發展出的逸散率估算方法皆未考量這些影響因子，無法有效反映此動態趨勢，仍值得深入探討。

本研究首先整理某煉油廠過去從事圍封試驗之逸散率數據，探討圍封實驗所得的逸散率與操作壓力、流體密度等操作參數的關係；然後應用美國石油協會所公布的以風險為導向之檢查手冊《API 581》所提出的設備劣化觀念<sup>[7]</sup>，發展出閥件的時間動態逸散模式；最後再與常用的推估模式所計算出的逸散率比較。閥類元件是石油與化學製程使用最多的元件，其逸散排放量約佔總排放量的 58.2%<sup>[8]</sup>，因此列為本研究首要探討的對象。

## 二、研究方法

## 2.1 逸散率計算

閥類元件的格蘭(Gland)密封會隨著時間而劣化，造成格蘭與閥體、格蘭與閥桿之間的間隙變大，無法有效密封而導致經過閥件的流體逸散至大氣之中。因此只要能準確的推估密封劣化的機制，再輔以液體洩漏模式，即可計算出閥件的逸散率。

### 2.1.1 減薄損壞因子之計算

美國石油協會(America Petroleum Institute, API)所發展的以風險為導向之檢查手冊 AP581 中所建議的設備隨時間劣化推估方法，已普遍為石油與石化界所接受；因此，可應用於密封的劣化之推估上。

因此，閥件的減薄損壞因子可由下列公式顯示<sup>[7]</sup>：

$$D_f^{thin} = \frac{D_{fb}^{thin} \cdot F_{IP} \cdot F_{DL} \cdot F_{WD} \cdot F_{AM} \cdot F_{SM}}{F_{OM}} \dots \quad (1)$$

公式(1)中， $D_f^{thin}$ 、 $D_{fb}^{thin}$ 、 $F_{IP}$ 、 $F_{DL}$ 、 $F_{WD}$ 、 $F_{AM}$ 、 $F_{SM}$  與  $F_{OM}$  分別為減薄損壞因子、基礎減薄損壞因子、混合點調整因子、死角調整因子、焊接結構調整因子、維修調整因子、沉積調整因子與線上監控調整因子。這些因子的計算可由 API

#### 4 閥件揮發性有機物動態逸散模式探討

<sup>581</sup> 中所建議的方法求得。

### 2.1.2 精密度面積閾值

閥件內的流體是由閥件密封中一個或數個微小且難以察覺的間隙所逸散出來的，此間隙面積為製造時未能察覺的失誤所造成的，可以應用製造精密度的最小閾值，或由實際逸散實驗中求得。黃信夫曾以一個 5 公分直徑的圓周為例，探討人類肉眼所能查覺的最小面積。他發現肉眼無法分辨四十邊形與圓形面積的變化。當兩者之間的面積小於一個半徑為  $0.09\text{ mm}$  的圓周時，人類即無法分辨<sup>[9]</sup>。現代機械製造的精密度早已超過肉眼所能分辨的大小，正四十邊形已不足以滿足計算逸散所需之精確度；然而；黃信夫所使用的方法仍然可以用來估算此面積。假設精密度的閾值與費馬數(Fermat Number=257)所建立正 257 邊形與一個 1 公分為直徑的圓形面積的差異有關，則此面積差異的直徑( $=3.736 \times 10^{-4}\text{ mm}$ )可以作為精密度初步估算基準值。

### 2.1.3 流體動態逸散模式

$$Q_m^{FE} = A_{\text{Joint}} A_{\text{percentage}}^{FE} F_{MS} D_f^{\text{thin}} C_0 \sqrt{2\rho g_o P_g} \dots \quad (2)$$

(2)式中  $Q_m^{FE}$ 、 $A_{Joint}$ 、 $A_{percentage}^{FE}$ 、 $F_{MS}$ 、 $D_f^{thin}$ 、 $\rho$ 、 $C_0$ 、 $g_c$  與  $P_g$  分別為逸散質量流率(kg/s)、該閥件大小之接縫面積 ( $m^2$ )、等效作用逸散面積對於該接縫面積之百分比(無因次)、管理系統因子；本閥件時間動態逸散模式取 1 為計算值(無因次)、減薄破壞因子(無因次)、液體密度( $kg/m^3$ )、流出係數、重力常數( $m\cdot kg/N\cdot s^2$ )與操作壓力、錶壓( $Newton/m^2$ )。

### 三、結果與討論

### 3.1 圍封實驗逸散數據與現場濃度關係

某煉油廠過去曾進行過 1,253 個輕質液閥閥件的圍封實驗，其濃度範圍介於 101~250.000 ppm 之間，閥件所屬的製程類別如表 1 所示。

表 1 個別工場之製程分類表

製程別		啓用年月	是否有逸散率 年數變化趨勢	後續研究、分析 選定之製程別
蒸餾	第九蒸餾	1976/09	○	✓
	第十蒸餾	1980/09		✓
	第十一蒸餾	1995/05		✓
重油脫硫	第一 重油脫硫	1986/05	○	✓
	第三 重油脫硫	1993/11		✓
煤組製程	第五煤組	1993/09	× (僅差1個月)	×
	第六煤組	1993/10		×
異戊烷 分離製程	異戊烷分離	1980/12	×	×
氫氣製程	第二氫氣	1990/05	×	×
重油裂解製程	重油裂解	1991/06	×	×
油氣純化製程	油氣純化	1993/08	×	×
烯烴轉化製程	烯烴轉化	1995/12	×	×
異構化製程	第一異構化	1995/05	×	×
柴油加氫 脫硫製程	第九柴油 加氫脫硫	2002/04	×	×
正烷烴製程	正烷烴	2004/05	×	×

圍封實驗所測得逸散率的對數與檢測濃度的對數為線性關係<sup>[10]</sup>。

$$\log Q = -7.1548 + 1.0011 \log C \quad (R^2 = 0.906) \dots \quad (3)$$

公式(3)中， $Q$  與  $C$  為每小時逸散質量 (kg/hr)與實際檢測濃度(ppm)。 $R^2$  為迴歸決定係數。由於迴歸決定係數( $R^2$ )為 0.906，顯示兩者有顯著相關。

### 3.2 圍封實驗數據與閥內流體密度、操作條件的關係

由啓用年月中可以清楚發現，表 1 僅有蒸餾製程與重油脫硫製程數據有其逸散率年數變化趨勢，因此僅針對蒸餾製程與重油脫硫進行探討與分析。蒸餾製程之閥件數目總計為 66 顆，有效閥件（指含有該閥件更進一步之閥件資訊，例如：

## 6 閥件揮發性有機物動態逸散模式探討

閥件大小、操作壓力、操作溫度與流體密度等參數資訊) 數目為 31 顆；重油脫硫之閥件數目總計為 9 顆，有效閥件數目為 9 顆；合計上述閥件數目為 75 顆，有效閥件數目為 40 顆。

由於表 2 中所列的相關係數( $R^2$ )皆低，可清楚得知蒸餾與重油脫硫製程的閥件圍封試驗數據與閥件大小尺寸、閥內流體與操作條件如壓力、溫度等沒有任何顯著相關性。

**表 2 蒸餾與重油脫硫製程閥件之圍封試驗數據與各參數之相關性總表**

製程別	系列別	分析參數別	相關性( $R^2$ )	是否相關
蒸餾製程	不分系列	閥件大小	0.0281	×
		操作壓力的平方根	0.0016	×
		操作溫度	0.0514	×
		流體密度的平方根	0.0187	×
		流體密度與操作壓力的平方根	$9 \times 10^{-8}$	×
	天然氣系列	閥件大小	0.0010	×
		操作壓力的平方根	0.0067	×
		操作溫度	0.2014	×
		流體密度的平方根	-	×
		流體密度與操作壓力的平方根	0.0067	×
	戊烷系列	閥件大小	$3 \times 10^{-5}$	×
		操作壓力的平方根	0.0057	×
		操作溫度	0.0504	×
		流體密度的平方根	-	×
		流體密度與操作壓力的平方根	0.0057	×
	石油腦系列	閥件大小	0.0269	×
		操作壓力的平方根	0.0029	×
		操作溫度	0.0379	×
		流體密度的平方根	-	×
		流體密度與操作壓力的平方根	0.0154	×
重油脫硫製程	石油腦系列	閥件大小	0.3059	×
		操作壓力的平方根	0.2752	×
		操作溫度	0.1431	×
		流體密度的平方根	-	×
		流體密度與操作壓力的平方根	0.0716	×

### 3.3 精密度面積閾值

由於圍封實驗數據與閥件大小、操作條件無關，無法應用圍封數據估算精密度面積閾值；因此，只能與美國環保署所發表的估算方法所得的逸散率比較，以決定最適範圍。圖 1 列出以 T 474-01 閥為例，本研究所計算出的數值與平均排放係數、漏/不漏排放係數、層次排放係數法等逸散率估算值比較。

T474-01 閥件已使用年 17 年、操作壓力為  $5.5 \text{ kg/cm}^2$ 、流體密度為  $474 \text{ kg/m}^3$ 。依其製程參數建立之各間接估算法與直接量測法所得之逸散率由大至小排序分別為：平均排放係數( $1.09 \times 10^{-2} \text{ kg/hr}$ )、漏/不漏排放係數( $1.70 \times 10^{-3} \text{ kg/hr}$ )、閥件時間動態逸散模式預測逸散率( $1.01 \times 10^{-3} \text{ kg/hr}$ )、真實圍封試驗逸散率( $3.15 \times 10^{-4} \text{ kg/hr}$ )與層次排放係數( $2.80 \times 10^{-4} \text{ kg/hr}$ )。其對數值分別為 -1.96、-2.77、-2.99、-3.50 與 -3.55。

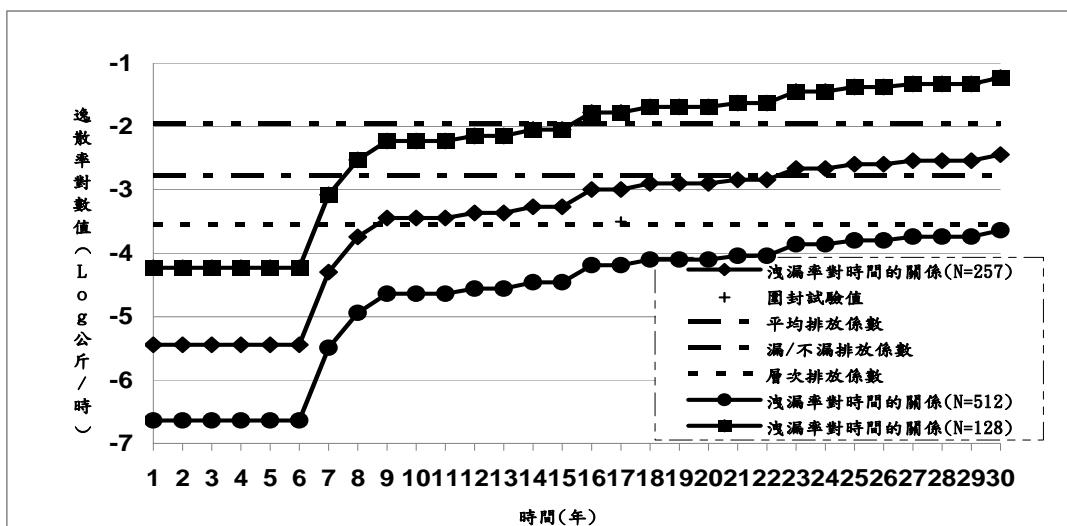


圖 1 正 n 邊形之破孔閾值與預測趨勢之關係(以 T474-01 為例)

平均排放係數、漏/不漏排放係數與層次排放係數均與時間無關。以正 128、256 或 512 邊形與 1 公分直徑的圓周面積之差作為精密度閾值時，逸散率隨時間的變化可分為 3 個階段：

## 8 閥件揮發性有機物動態逸散模式探討

(1) 0-6 年：幾乎沒有變化

(2) 6-9 年：逸散率對數值與時間呈線性關係

公式(4)中， $Q$  與  $t$  分別為每小時逸散質量 (公斤/時)與使用時間(年)； $a$  為逸散率對數值斜率( $d\log Q/dt$ )約為 0.64，遠大於其他兩個階段； $b$  為迴歸常數，其數值與精密度閾值有關。以正 128、256 或 512 邊形與 1 公分直徑的圓周面積之差作為精密度閾值時， $b$  值分別為-7.881、-9.041 與-10.231，決定常數 ( $R^2$ ) 皆為 0.945。第 9 年的逸散率約為第 6 年的 84 倍左右；

(3) 9-30 年：逸散率對數值與時間亦呈線性關係，逸散率對數值斜率約為 0.05，  
b 值分別為 -2.754，-4.008 與 -5.168，決定常數 ( $R^2$ ) 皆為 0.970。第 9 年  
至第 30 年間，逸散率僅增加 12 倍左右。

在各階段的預測值與時間的迴歸公式與決定係數。由於以正 257 邊形與 1 公分直徑圓周面積差異作為精密度面積閾值時，預測值多落在漏/不漏排放係數與圍封試驗值之區域範圍內，較正 128 邊形、正 512 邊形之預測趨勢適當；因此，可作為精密度面積閾值的初步估算。

由於對其餘所有的閥件逸散率的估算值與圍封皆與 T474-01 類似，其數據則不在此贅述。

## 四、結語

本研究提出一個以洩漏模式為基礎閥件時間動態逸散模式，不僅考量了閥件操作壓力、流體密度、閥件尺寸等，並導入 API 581 所建議的劣化因子。以正 257 邊形與 1 公分直徑圓周面積差異作為精密度面積閾值時，預測值多落在漏/不漏排放係數與圍封試驗值之區域範圍內；因此，可作為精密度面積閾值的初步估算。

此模式所預測的某煉油廠蒸餾與重油脫硫製程中數十個閥件的逸散率，預測逸散率可分為三個階段，前 6 年的逸散率不變；第 7 年至的 9 年，變化最大，第 9 年的逸散率約為第 6 年的 84 倍；第 10 年後，則緩慢上升；第 9 年至第 30 年間，逸散率僅增加 12 倍左右。

以正 257 邊形與 1 公分直徑圓周面積差異作為精密度面積閾值僅為測試本模式所計算所得數據時之權宜假設。未來將選擇代表性的閥件，在實驗室的控制條件下進行圍封實驗，以取得實際精密度面積閾值，以作為估算該類閥件逸散率之參考值。

## 誌謝

本文作者在此謹向慧群環境科技股份有限公司工程師之協助與指導表達最大的謝意。

## 參考資料

1. USEPA, Protocol for Equipment Leak Emission Estimates. United States Environmental Protection Agency, Washington, DC., 1995.
2. USEPA, Preferred and Alternative Methods for Estimating Fugitive emissions from equipment leaks, United States Environmental Protection Agency, Washington D.C, 1996.
3. CMA, Guidance for Estimating Fugitive Emissions. Chemical Manufacturers Association , Washington, D.C., 1987.
4. 曾文興，石油與化學工業區逸散污染源臭味排放特性及影響，國立臺灣大學環境工程研究所碩士論文，1997。
5. 高雄市政府環境保護局，88 年度固定污染源逸散性 VOC 加強管制計畫(儲槽、製程元件)，1999。
6. 趙君平、孫觀豐，石化工業設備元件排放量推估方法適用性探討，第四屆台灣環境資源永續發展研討會論文集，D-82—D-91，2002。
7. American Petroleum Institute, Risk-Based Inspection Technology, Recommended Practice 581, 2nd ed., 2008.
8. Edwards, W.C.,Quan, R., VOC Emissions from Major Organic Chemical Plants in Canada, The 84TH Annual Meeting and Exhibition of the Air & Waste Management Association, Vancouver, Canada, 1991.

## **10 開件揮發性有機物動態逸散模式探討**

9. 黃信夫，人對基本幾何形狀面積知覺的研究，碩士論文，工業設計系研究所，國立雲林科技大學斗六市，2004。
10. 慧群，某煉油工廠設被元件洩漏率檢測暨排放係數，慧群環境科技，2009。

# 溴化甲烷於檢疫與裝運前處理之排放 管控技術與策略研究

連振安\*

## 摘要

依循蒙特婁議定書管制進程，自 1995 年起世界各國展開削減破壞臭氧層物質溴化甲烷的工作，於 2005 年起溴化甲烷除關鍵用途豁免外，僅限使用於檢疫與裝運前處理用途。因應前述用途之熏蒸處理若未經妥善的管控，仍將造成大量的溴化甲烷排放，除破壞臭氧層外，並可能導致接觸的民眾與勞工發生傷害。本研究蒐集分析溴化甲烷熏蒸作業的方式，研擬可行的排放管控技術與策略面建議，勞安與工安應著重之措施，以及溴化甲烷之末端廢棄處理等議題，評析其施作條件與優缺點，以作為未來國內推動溴化甲烷管制作為參考。

【關鍵字】溴化甲烷、蒙特婁議定書、破壞臭氧層物質

---

\*工業技術研究院綠能與環境研究所 副研究員

## 一、前　言

溴化甲烷為蒙特婁議定書列管化學物質之一，目前允許的溴化甲烷用途包括依據議定書 IX/6 決議的關鍵用途豁免(Critical Use Exemptions)與依據 Article 2H、及 VII/5(c)、XI/13(7) 決議的檢疫與裝運前處理(Quarantine and Preshipment Exemptions, 簡稱 QPS)。針對已開發國家的管制規範，溴化甲烷消費量自 2005 年起應削減為零，但基於防治國際間貿易造成之疫病蟲害傳播，在尚無經濟可行之廣泛替代品與替代技術之前，檢疫和裝運前處理等兩種用途乃被許可使用。我國一向遵循蒙特婁議定書管制規範，目前僅允許 QPS 用途使用溴化甲烷。目前出口貨物所使用的木質包裝材依據國際植物保護公約(IPPC)於 2009 年公告的國際植物防疫檢疫措施標準第 15 號文件「國際貿易之木質包裝材管制準則」(ISPM-15)要求需經熱處理或溴化甲烷燻蒸處理，以防止有害生物於國際間傳播。我國經防檢局(行政院農業委員會動植物防疫檢疫局)的輔導與推廣下，近年來大多業者已採用熱處理設施，然仍有部分廠商持續使用溴化甲烷。

我國國內使用溴化甲烷於 QPS 用途之操作方式與使用用途主要區分為下列 4 種：

1. 防檢局所設置之燻蒸倉庫/櫃，由防檢局自行操作或委外操作，使用 100% 的 50 公斤桶裝溴化甲烷進行檢疫燻蒸。
2. 民間廠商於各通關口岸設置且經防檢局核准之燻蒸櫃，使用 100% 的 50 公斤桶裝溴化甲烷進行檢疫或裝運前處理燻蒸。
3. 民間廠商自行設置且經防檢局核准之燻蒸櫃，主要以數罐 98% 的 0.68 公斤(1.5 磅)罐裝溴化甲烷用於 ISPM-15 要求之木質包裝材燻蒸作業。
4. 民間廠商接受業者委託為配合國內外貿易商要求之燻蒸作業，主要使用數罐 98% 的 0.68 公斤罐裝溴化甲烷於貨櫃直接投藥燻蒸，此部份所燻蒸處理的商品種類較多且雜。

國際上對於貨櫃物品之溴化甲烷燻蒸規定依照不同暴露時間，設定貨櫃中不同的應殘餘溴化甲烷濃度，以確保燻蒸作業能夠成功。以木質包裝材為例，依據 ISPM-15 的要求，經過 24 小時的燻蒸後，殘餘濃度應為 50%(如 21°C 或以上，初始劑量 48g/m<sup>3</sup>，24 小

時後的殘餘劑量為  $24\text{g/m}^3$ )。但在實務操作上，常因熏蒸設施(如貨櫃)的密封性不佳，致使殘餘劑量低於規定濃度，因此業者會以更高的投藥濃度進行熏蒸，以確保最終的熏蒸效果，反而造成更多的溴化甲烷排放到大氣中。目前除具活性碳吸附裝置的熏蒸設施外，絕大部分熏蒸後殘餘的溴化甲烷皆直接排放至大氣中，有的熏蒸設施甚至安裝強制排氣設備。因此為保護臭氧層，應妥善規劃處理殘餘的溴化甲烷，避免其排放到大氣中，包括以活性碳吸附再做後端處理，或是以回存設施回收後再次回用到次一批商品的熏蒸用途。而吸附處理溴化甲烷的飽和活性碳如何銷毀處理，或是經活化處理後再重新使用，其相關的技術與成本分析也是應探討的重要環節。

溴化甲烷排放管控的重要性在於其在大氣中平均僅有 0.7 年的生命半衰期有關，遠較其他 ODS 的生命半衰周期為短，故若能在地面對流層中先行對溴化甲烷的排放進行管理與控制，將能夠馬上減緩平流層與臭氧層中的溴化甲烷濃度，進而降低對臭氧層的破壞性。這部分的管控成果在 2007 年的 UNEP 科學評估小組(SAP)報告<sup>[1]</sup>中就曾提及近年溴化甲烷的大幅減量使用的成效超過原本預期，2010 年的臭氧層破壞科學評估報告<sup>[2]</sup>也指出，目前對流層中的溴濃度已經自 1998 年的高峰值有所下降，以及平流層中的溴濃度不再增加，並且呈現微幅下降趨勢。圖 1<sup>[3]</sup>顯示溴化甲烷在大氣中的濃度，自然環境下之背景值約在 5.5~6ppt 左右，但人為開始使用後，高峰值增至約 8.5ppt 左右，其中 QPS 用途的排放量估計約在 1.2ppt 左右。

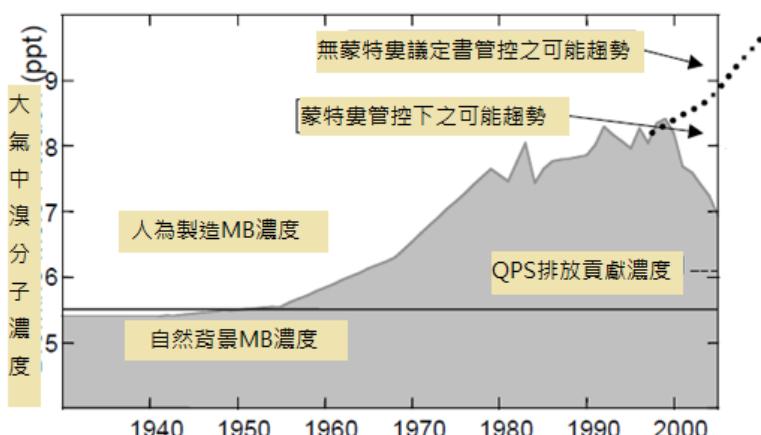


圖 1 近年大氣中溴化甲烷濃度變化圖

## 二、溴化甲烷 QPS 排放管控策略

溴化甲烷於 QPS 煙蒸過程中排放主要有兩種管道，一種是煙蒸處理過程中的排放；另外一種是貨物運抵目的地時，貨櫃開啓將殘餘的溴化甲烷直接曝氣排放，兩種管道皆可能對勞工造成危害。QPS 煙蒸處理過程的排放控制因為大多位於煙蒸櫃中進行煙蒸，範圍受到侷限，因此管控的方式可以針對煙蒸地點的管理與煙蒸櫃設施的設置標準進行管控。針對第二種的貨櫃曝氣洩漏，應採回收後回用或銷毀的方式，以減少其排放。

蒙特婁議定書針對溴化甲烷於 QPS 用途，在議定書決議文 VII/5(c)、XI/13(7) 與 XX/6 中均敦促各締約方減少煙蒸使用量，並藉由防堵措施與再生回收的方式減少溴化甲烷的排放。目前已經有多種商業化的再生回收設備應用在煙蒸設備上，絕大多數的系統是採用活性碳做為溴化甲烷的吸收劑，部分的設備設計則是採循環利用與再捕捉技術，或是額外增加系統設計以現場即時破壞回收的溴化甲烷，達到排放減量的目的。增加溴化甲烷銷毀的步驟不僅是避免臭氧層遭到破壞，也是保障勞工安全與維護地方空氣品質。部分國家或地區因為缺乏法令上的強制要求，煙蒸處理公司不見得願意對煙蒸廢氣回收設備進行投資。

### 2.1 煙蒸櫃/煙蒸倉庫操作管理

溴化甲烷煙蒸櫃的設置就是在提高效率與減少藥劑用量的原則下，利用一種封閉式的處理設施進行煙蒸。如果櫃中使用過的溴化甲烷能夠再捕捉或是銷毀破壞，就能夠減少不當的排放。以澳洲為例，煙蒸櫃的製造與設置由具備煙蒸氣體防護設計專長的公司建置，並需由各州郡政府審查核發氣密度測試認證後啓用。例如南澳洲州政府規定煙蒸櫃必須由具證照的煙蒸業者開具 6 個月內合格有效的氣密度測試認證(Gas Retention Test Certificate)。另外，煙蒸操作業者應定期檢查煙蒸櫃與當中的設備，包括燈具、監測儀器與氣體採樣管等，以確保有效的運作，並避免損壞情事發生。澳洲檢疫檢查服務處(Australian Quarantine and Inspection Service, AQIS)規定煙蒸櫃的硬體應檢測項目<sup>[4]</sup>包括：監測管線、輸送管線、風扇、抗閃燃加熱器(若有需要安裝)；而壓力(氣密度)測試每年最少應檢測 2 次，常態性設備維護每年至少 1 次。特別的是 AQIS 要求每次煙蒸處理時應使用有色煙霧進行煙蒸櫃門密封性檢測。氣密度測試中關注的可能洩漏點包括：關門處、

聯外導管、供氣管線與採樣管線連接處。而針對新設立的熏蒸櫃於執行溴化甲烷熏蒸測試之前建議先使用有色煙霧先進行洩漏測試。測試完成，經回收處理後的最終溴化甲烷濃度應在 5ppm 以下。

我國針對熏蒸櫃設置管理，針對為符合 ISPM-15 規定而取得戳章之廠商設置之熏蒸櫃，應依據我國「木質包裝材委託檢疫熏蒸及熱處理管理要點」<sup>[5]</sup>，此規定係 93 年公告，於 101 年 1 月 12 日修正，如表 1 所示。而目前民間廠商多數於貨櫃直接投藥的貨櫃，尚未有特定的規範管制，僅有勞工安全方面的相關規範，以避免勞工受溴化甲烷的危害。

**表 1 我國木質包裝材熏蒸櫃設置要點**

(一) 熏蒸櫃之設置地點：

1. 交通方便、空氣流通。
2. 周圍 15 公尺(若為熏蒸倉庫則為 30 公尺)內無住家、學校、機關、醫院、牧場等。
3. 四周應有固定柵欄或圍籬，明顯區隔作業區域。

(二) 熏蒸櫃之設置條件：

1. 具備可從熏蒸櫃外投藥之安全投藥系統。
2. 熏蒸櫃內須裝有氣體循環、抽風及排氣等設備。
3. 具備 3 處(對角上、中、下)可供自熏蒸櫃外檢測熏蒸藥劑濃度或測試櫃內壓力之防漏檢測孔。
4. 具備測定熏蒸櫃內溫度之裝置。
5. 具備廢氣處理設備。
6. 熏蒸櫃氣密度測試結果須符合下列任一條件：
  - (1) 以每立方公尺投入溴化甲烷 10 克，48 小時後，熏蒸櫃內藥劑濃度應保持原濃度之百分之 70 以上。
  - (2) 以空氣加壓於熏蒸櫃內，計算櫃內壓力自 25 毫米水柱壓力降至 2.5 毫米水柱壓力所需時間，必須達 22 秒以上。

(三) 安全防護設備及其要求事項：

1. 應備有急救藥品、緊急沖洗設備或特約醫院。
2. 應備有具過濾溴化甲烷隔離式全面型防毒面具及毒氣外洩測定器。
3. 應備有消防設備。
4. 應備有明顯之警告標示牌。

5.應僱有高中(職)以上畢業並經防檢局訓練合格之技術員一位。

防檢局轄區分局對於轄區內認可之檢疫處理設施及作業，除了實施定期抽查，其中對於木質包裝材的燻蒸處理，要求如下的操作方式：

- 1.木質材料堆疊量不得超過櫃體 80%容積量。
- 2.不得處理厚度或直徑超過 20 公分之木質材料。
- 3.連續堆疊時，處理材料每 20 公分須採適當間隔。
- 4.處理時以照相或錄影方式記錄處理日期、木質包裝材堆疊方式、溫度、溴化甲烷使用數量、櫃體上鎖、投藥及章戳標示，其紀錄應保存一年供查驗。

## 2.2 設立溴化甲烷回收處理設備

絕大多數的溴化甲烷採用活性碳吸附法進行捕捉，溫度越低則活性碳的吸附能力越佳，常溫下的活性碳吸附能力約為活性碳重量的 5~10%，如果能夠將溫度降至 10°C，則最高的吸附能力可達活性碳重量的 30%。濕度也會影響活性碳的吸附能力，濕度越高則吸附能力越為低落。國際上開發的系統主要有 Nordiko、TIGG、Desclean 等公司研發者。針對固定式燻蒸櫃系統，國內業者大多依照防檢局設置規定而裝設活性碳過濾設備(如圖 2)。針對非固定式的貨櫃投藥，國內目前並無溴化甲烷的移動式回收設備，進口報關業者接收貨櫃後，大多直接開櫃進行排氣。國際目前另有以沸石(Zeolite)利用其高孔隙率做為活性碳替代者，可能因成本的關係，目前並未有商業模組出現，僅有少數的測試模型。



圖 2 國內固定式燻蒸櫃活性碳吸附裝置

溴化甲烷的回收/去除程度，可以去除效率(Destruction and Removal Efficiency, DRE)表示，其公式如圖 3 表示。R1 表示被活性碳吸附的溴化甲烷濃度；R2 表示經系統吸附後殘存在櫃中的濃度；R3 表示被燻蒸處理目標物本身所吸附的溴化甲烷濃度；R4 表示被回收吸附系統轉變的溴化甲烷或是系統本身漏失的溴化甲烷；M2 表示在吸附系統啓動前所有存在於櫃中的溴化甲烷氣體濃度。目前不管是一般的貨櫃燻蒸或是專屬燻蒸櫃燻蒸，2006 年 UNEP 之 TEAP 報告<sup>[6]</sup>的建議規格中指出，回收設備的工作濃度應約在 10~100g/m<sup>3</sup> 的範圍內，而經吸附後的排放濃度應低於最低勞工可容忍濃度(約 0.004 g/m<sup>3</sup>)，其溴化甲烷去除率 DRE 應超過 99.9%。

$$DRE = R1 * 100 / M2 = (M2 - R2 - R3 - R4) * 100 / M2,$$

圖 3 溴化甲烷去除率公式

我國目前並未規定以吸附溴化甲烷的活性碳吸附裝置的標準規格，若參考美國農業部的動植物檢疫局(USDA APHIS)之 2009 年對溴化甲烷活性碳吸附裝置的標準規格<sup>[7]</sup>，可作為我國未來相關規定的參考(如表 2)。

表 2 美國溴化甲烷活性碳吸附裝置標準規格

- 1.活性碳吸附裝置係不同的密閉燻蒸設施(包含移動式的貨櫃與固定式的燻蒸櫃)。
- 2.應於適當的空氣流通管路上安裝溴化甲烷濃度感應器。
- 3.設備應能處理表列的溴化甲烷濃度與作業溫度。
- 4.確保所有未經處理的排氣處於負壓環境內(意即就算發生洩漏，環境的空氣會進入此系統，而不是系統的氣體洩漏至大氣中)。
- 5.設備必須緊閉且防洩漏，包括所有的閥門、管路與筒罐。
- 6.提供的溴化甲烷吸附能力最低應達 1 磅 MB/10 磅活性碳(10%)，雖然活性碳的數量決定吸附設備的回收能力，但設計不良的設備，其回收力往往僅 1 磅 MB/20-25 磅活性碳(4~5%)。

## 18 溴化甲烷於檢疫與裝運前處理之排放管控技術與策略研究

- 7.換氣頻率每小時應進行 4 至 15 次。
- 8.提供系統氣體流量與壓力的監測設備。
- 9.設備提供者應提供現場安裝、訓練與後勤技術幫助。
- 10.設備達到的溴化甲烷排放減少量至少應達 80%。
- 11.溴化甲烷熏蒸與曝氣時間需要符合植物保護與檢疫處理手冊(PPQ treatment manual)所要求的時間。
- 12.設備排放至大氣的溴化甲烷濃度不應超過 500ppm，廠商應提供溴化甲烷排放濃度能力證明文件。

### 2.3 建立溴化甲烷熏蒸作業安全範圍

我國目前相關法令大多未明確規定溴化甲烷熏蒸作業時應建立安全熏蒸作業範圍，我國僅在防檢局要求的「木質包裝材委託檢疫熏蒸及熱處理管理要點」中將熏蒸櫃的安全範圍半徑要求為 15 公尺，較澳洲規定的 6 公尺和紐西蘭的 10 公尺寬鬆。

澳洲 AQIS 目前則要求熏蒸設施或地點需要劃分安全區域予未受保護的工作人員。另外，至少 3 公尺的範圍內應設為覆蓋式熏蒸風險區域(天幕熏蒸)，6 公尺的範圍為密閉式(熏蒸櫃)熏蒸的風險區域，並應設立警示標誌。區域內應淨空任何無保護措施的工作人員。保護措施是指穿戴呼吸器，且熏蒸時應禁止任何無保護措施的人員進入風險區域。同時，呼吸器應配備正確的濾毒罐以防護溴化甲烷。針對熏蒸完後的溴化甲烷排氣，AQIS 要求排氣應參考工作區域閾限值(Threshold Limit Value, TLV) 5ppm 的要求。因為下列原因，操作者也需要注意貨櫃排氣要達到低於 TLV-5ppm 的標準可能會超過 48 小時：

- 1.在 40 呎的貨櫃中進行熏蒸；
- 2.貨物包裝過密或具吸附性；
- 3.貨物周邊的空隙低於 350mm。

因此，排氣至少應 30 分鐘後才檢測其殘餘氣體濃度，低於 5ppm 才可宣告其屬於安全；若高於 5ppm，則必須持續曝氣或以回收設備進行回收，達到 5ppm 以下，人員始得進入作業。而法規也要求量測風險區域的溴化甲烷偵測儀需能檢測 1~100 ppm v/v 的濃度範圍。

紐西蘭溴化甲烷熏蒸主要是用於港口區域的 QPS 用途，且木材出口業者常於港口區

域直接對原木實施出口前木材燻蒸處理。紐西蘭政府為減少這種不當的排放，決定實施嚴格的使用與監控管制。紐西蘭環境風險管理局(New Zealand's Environmental Risk management Authority, ERMA)經評估溴化甲烷 QPS 使用之控管後，對於人類健康及環境等間接影響，建立嚴格管理規範<sup>[8]</sup>，包括：於 2020 年前燻蒸設施需設置溴化甲烷再捕獲的設備、訂定溴化甲烷非職業人員 24 小時(0.333ppm)及 1 小時(1ppm)的暴露極限值、需提交燻蒸設施周界溴化甲烷的濃度報告、以及依據溴化甲烷的使用量實施 10~100 公尺燻蒸緩衝安全區域等。紐西蘭 ERMA 考量到人員暴露於溴化甲烷之建康安全問題，設定溴化甲烷可容許暴露限制(Tolerable exposure limits, TELs)。長期溴化甲烷容許暴露限制值為  $TEL_{air} = 0.0013 \text{ ppm (0.005 mg/m}^3\text{)}$ ，1 小時與 24 小時的容許暴露值如下所示：

1.  $TEL_{air}$  (長期，年平均) : 0.0013 ppm (0.005 mg/m<sup>3</sup>)
2.  $TEL_{air}$  (24 小時) : 0.333 ppm (1.3 mg/m<sup>3</sup>)
3.  $TEL_{air}$  (1 小時) : 1 ppm (3.9 mg/m<sup>3</sup>)

為確保施工作員的健康安全，紐西蘭設置之最小緩衝區域範圍的規範如表 3。規定該緩衝區域應符合  $TEL_{air}$ (1 小時)的暴露濃度限制，但燻蒸地點具有認可的溴化甲烷回收捕捉技術則不受此限。而於土壤燻蒸外的敏感區域實施溴化甲烷 QPS 燻蒸時，其最小安全緩衝區域為半徑 25 公尺，而此敏感區域為一般大眾合法活動，包括學校、遊樂場、幼兒中心、監獄、醫院或長期照護中心等無法自行疏散的區域。其中貨櫃燻蒸的最小緩衝區域半徑為 25 公尺(總體積 77 立方公尺或以上)或 10 公尺(總體積 77 立方公尺以下)。然若以標準貨櫃的體積來看，20 英呎的標準貨櫃容積為 33.2 立方公尺，40 英呎的標準貨櫃容量為 67.8 立方公尺，因此緩衝區域半徑僅需 10 公尺。據此，建議我國應比照國內外相關規定，建立適當的燻蒸作業安全範圍，以確保有足夠的緩衝區域。

表 3 紐西蘭不同燻蒸用途的最小緩衝區域半徑

用途	最小緩衝區域半徑(公尺)
船艙內燻蒸 (於持續 24 小時，燻蒸 1,000 公斤或以上的溴化甲烷者)	100
船艙內燻蒸 (於持續 24 小時，燻蒸 1,000 公斤以下的溴化甲烷者)	50
帳幕燻蒸	50
貨櫃燻蒸(總體積 77 立方公尺或以上，持續燻蒸 60 分鐘者)	25
貨櫃燻蒸(總體積 77 立方公尺以下，持續燻蒸 60 分鐘者)	10

## 2.4 制訂溴化甲烷燻蒸允許暴露濃度

溴化甲烷一旦排放，因為無色無味，在操作環境附近的人員容易暴露於毒害的風險之中。我國在「特定化學物質危害預防標準」第 46 條第 12 項規定中，要求該條前項各場所空氣中溴化甲烷之濃度，應不超過 15ppm 或  $60\text{mg}/\text{m}^3$  規定值，一旦超過其值時，應禁止勞工進入各該場所。

國際上也有相關的嚴格規定，紐西蘭 ERMA 規定施用每小時 7 公斤(含)以上的溴化甲烷進行燻蒸者，在最小緩衝區域之下風邊界處其空氣連續 15 分鐘內的監測濃度不得超過 0.05 ppm。施用每小時 7 公斤以下的溴化甲烷進行燻蒸者，其最小緩衝區域之下風邊界處空氣連續 3 分鐘內的監測濃度不得超過 0.05 ppm。當日空氣監測資料、燻蒸資訊，氣候資料皆應詳實記載。而燻蒸行為需要定期申報，若燻蒸地點每年燻蒸超過 500 公斤用量者，需提出關於空氣品質監測的年度報告。同時要求燻蒸操作需在 24 小時前知會相關單位，並在操作區域外圍設立燻蒸警告標語，並且禁止貨櫃在運送途中進行燻蒸。

美國目前的溴化甲烷作業環境暴露標準除了聯邦標準外，也依照各州自身要求而有不同。表 4 為聯邦政府<sup>[9]</sup>與加州州政府<sup>[10]</sup>對於溴化甲烷的暴露標準。例如加州就規定 8 小時的工作日或是 40 小時工作週的時間加權平均濃度不得超過 1 ppm (TWA)，而聯邦政府則無此規定。而短時間單一事件的最高暴露濃度則一致為 20 ppm。美國政府職業衛生工作者協會(ACGIH)的最高閾限值則是規定為 1 ppm (TWA)，廠商在其產品標籤上的建議值則是 5ppm。

表 4 美國溴化甲烷作業環境暴露限值(溴化甲烷 1ppm 約為  $3.9\text{ mg}/\text{m}^3$ )

	加州與 OSHA	聯邦與 OSHA	廠商標籤建議值	ACGIH
容許暴露限值 (一般--PEL)	1 ppm TWA	N.A.	5 ppm	1 ppm TWA (最高閾限值 TLV)
短期最高暴露值 (PEL-Ceiling)	20 ppm	20 ppm		

TWA 表示 8 小時工作日與 40 小時工作週的時間加權平均濃度  
OSHA 為美國勞工部職業安全衛生管理局(Occupational Safety and Health Administration)  
ACGIH 為美國政府職業衛生工作者協會(American Conference of Governmental Industrial Hygienists)

### 三、溴化甲烷操作之勞安與工安課題

#### 3.1 溴化甲烷職業性傷害案例與其認定標準

溴化甲烷是一種中樞神經系統抑制物，吸入過量的溴化甲烷可能引起頭痛、噁心、嘔吐等症狀，嚴重者可能導致痙攣、腦部、肝臟、肺臟、腎臟受損。1958 年的時候，澳洲昆士蘭省有 7 名工人在無防護的狀況下，發生溴化甲烷中毒。2002 年時，2 名木工在處理完成燻蒸僅 10 小時的木材時，發生頭痛、暈眩、呆滯、盜汗，並住院 4 天的案例<sup>[11]</sup>。2005 年導致 5 名紐西蘭 Nelson 港口的碼頭工人因長期吸入溴化甲烷導致死亡，並指出患者出現嚴重的運動神經元疾病(motor neuron disease)<sup>[12]</sup>。

溴化甲烷在人體的急性神經毒性的臨床症狀<sup>[13]</sup>上面，一般可分為 3 期：(1)前兆期(Premoritory stage)：嘔吐、頭痛、步態不穩、暈眩、視力障礙；(2)大腦刺激期(Cerebral irritation stage)：痙攣(Jerkiness)、顫抖、譫妄、急躁(Acute mania)；(3)回復期(Recovery stage)：幻覺、呆滯(Apathy)、失憶(Amnesia)、失語症(Aphasia)、統合不良(Incoordination)、虛弱無力等。

在肺臟毒性的臨床症狀上，輕者有呼吸道刺激、氣促、胸悶，嚴重者會漸進成呼吸衰竭、肺水腫、肺炎而致死之情形。皮膚接觸則有刺激性，有紅斑、風疹塊(Urticarial rash)、水泡(Blister)及色素沈著(Hyperpigmentation)現象，尤多見於潮濕皮膚或有皺摺之處，如腋窩、鼠蹊(Groin)及腹部，接觸時立即有麻、冷、癢、痛感，皮膚可見紅腫現象，水泡可能在數小時後出現<sup>[14]</sup>。對於肝臟的毒性，主要是導致肝功能(ALT、AST 指數)及黃疸(Bilirubin)升高。在腎臟毒性上面，會導致腎皮質(Renal cortex)有壞死之情形。對於眼睛則會造成視力減退、複視(Diplopia)、流淚、協調失常及視野暗點(Scotoma)等視神經退化的現象。溴化甲烷目前並無解毒劑(antidote)，大多以緩解中毒症狀的支持性療法(supportive treatment)處理，例如以食入少量活性碳的方式吸附進入胃腸道之溴化甲烷。以苯重氮基鹽(benzodiazepine)及巴比妥鹽治療抽搐，而呼吸衰竭者可使用呼吸器，另外亦有使用乙醯胱胺酸(acetyl cysteine)及 BAL(British Antilewisite)者，但療效尚未確定。

澳洲昆士蘭省的職場衛生與安全之溴化甲烷健康監督指南(Methyl Bromide

health surveillance guidelines --- Workplace Health and Safety Queensland)規定中<sup>[15]</sup>將溴化甲烷的暴露標準(Australia NOHSC ES (TWA))訂為 5ppm (約= 19 mg/m<sup>3</sup> Skin)，並制定勞工的生物性職業暴露標準(Biological occupational exposure levels, BOEL)，這項標準係以血液中的溴離子濃度做為判定是否為溴化甲烷中毒的依據，尿液的檢測值則作為參考數值。其血液中溴離子 BOEL 標準為 20mg/L (約等於 0.25 mmol/L, 溴原子量 MW=79.9)。尿液中溴離子 BOEL 建議值則為 15.4mg/L，超過標準建議值者應在一週內再次複驗。一般溴化甲烷中毒患者的血液中溴濃度大約為 46~130 mg/L(= 575~1627 μmol/L)，醫學報告建議將血液中溴濃度超過 50mg/L(=626 μmol/L)的患者直接視為遭到潛在有害環境暴露。

依據我國「職業災害勞工保護法」規定，勞工疑有職業疾病，應經醫師診斷，勞工或雇主對職業疾病診斷有異議，得向直轄市、縣(市)主管機關申請認定，直轄市、縣(市)主管機關，或勞工保險局對職業疾病之認定有疑義或認有必要時，得向中央主管機關申請鑑定。我國「職業疾病認定參考指引」<sup>[16]</sup>中對職業性溴化甲烷疾病的認定基準，區分為主要基準與輔助基準兩項，如表 5。該指引中將血液與尿液中的溴離子濃度同步列為輔助認定標準，且較澳洲標準嚴格。根據說明，正常人血清中溴離子濃度不會超過 4mg/L，血清中溴離子測定應用於評估有症狀的病患，而不能作為慢性暴露的例行監測。目前我國溴化甲烷的最高容許暴露濃度(為不得使一般勞工有任何時間超過此濃度之暴露，以防勞工不可忍受之刺激或生理病變者)係依照「勞工作業環境空氣中有害物容許濃度標準」<sup>[17]</sup>為 5ppm 或 19mg/m<sup>3</sup>，溴化甲烷因半衰期短暫而不容易被偵測到，以頂空採樣/氣相層析法(Headspace Gas Chromatography)可測出各生物檢體中之溴化甲烷並加以定量。在我國的「勞工保險條例第 34 條(職業傷害補償費)<sup>[18]</sup>」之「勞工保險職業病種類附表」中屬於第二類第 2 項，職業病名稱為「溴化甲烷中毒及其續發症」，其適用的職業範圍為「使用、處理、製造溴化甲烷或暴露於其蒸氣之工作場所」。顯見我國已將因施用溴化甲烷導致職業疾病發生的可能性列為勞工保護的項目之中，並且依法提供職業性疾病患者傷病與醫療給付。

表 5 職業性溴化甲烷疾病主要與輔助認定基準

主要認定基準	有職業暴露史：由工作場所物質安全資料表(MSDS)，或工作所使用之化學物品清單加以確認。
	臨床症狀：眼睛、皮膚、呼吸道之刺激，嚴重者可見肺水腫、出血及肺衰竭；周邊神經病變及精神異常，視力或聽力障礙，嚴重時發生昏迷及死亡。
	合理排除其他可能的原因。
輔助認定基準	同場所工作的同事也有類似疾病。
	臨床檢驗診斷：測定血清及尿中之溴離子濃度(正常血中溴離子濃度為<4mg/L)。

### 3.2 溴化甲烷燻蒸作業的勞工安全衛生規定

行政院勞工委員會的「勞工安全衛生法」第 5 條第 7 項明定雇主應對含毒性物質提供必要的安全衛生設備為母法；在其子法「特定化學物質危害預防標準」中，將溴化甲烷列為特定化學物質當中的丙類第一種物質(指具有毒性及易腐蝕而造成漏洩之危害性)。該法除了列舉勞工安全衛生管理方面的管理依據，在第 46 條的特殊作業管理中(其中 1 至 7 項為燻蒸櫃、倉庫等之作業規範，8 至 11 項為帳幕、輪船、穀倉等作業規範，第 12 項為作業環境空氣中溴化甲烷濃度安全規範)，將溴化甲烷燻蒸作業的勞工安全衛生規定規範節錄 1 至 7 項如下表 6。

表 6 特定化學物質危害預防標準中溴化甲烷操作相關規定

第 46 條 雇主僱用勞工使用氟化氫或溴甲烷（以下簡稱溴甲烷等）等從事燻蒸作業時，應依下列規定：
一、供燻蒸之倉庫、貨櫃、船艙等場所（以下簡稱燻蒸作業場所。）空氣中溴甲烷等濃度之測定，應可於各該場所外操作者。
二、投藥應於燻蒸作業場所外實施。但從事燻蒸作業之勞工佩戴適當之輸氣管面罩、空氣呼吸器或隔離式防毒面罩（以下簡稱輸氣防護具）者，不在此限。
三、應檢點有否自燻蒸作業場所溴甲烷等之漏洩。
四、實施前款檢點發現異常時，應即糊縫或採取必要措施。

- 五、應禁止勞工進入燻蒸作業場所，並將其意旨揭示於顯明易見之處。但為確認燻蒸效果，使勞工佩戴輸氣防護具且配置監視人監視時，得使作業勞工進入燻蒸作業場所。
- 六、必須開啓燻蒸作業場所之門扉或艙蓋等時，為防止自該場所流出之溴甲烷等致勞工遭受污染，應確認風向等必要措施。
- 七、倉庫燻蒸作業或貨櫃燻蒸作業，應依下列規定：
- (一)倉庫或貨櫃燻蒸場所應予糊縫，以防止溴甲烷等之漏洩。
- (二)投藥開始前應確認糊縫已完整，且勞工均已自燻蒸場所退出。
- (三)在倉庫內實施局部性燻蒸作業時，同倉庫內之非燻蒸場所亦應禁止非從事作業勞工進入，且將其意旨揭示於顯明易見之處。
- (四)倉庫或貨櫃等燻蒸場所於燻蒸終止開啓門扉等之後，使勞工進入該場所或使勞工進入同一倉庫未曾實施局部性燻蒸之場所時，應在事前測定該倉庫或貨櫃之燻蒸場所或未曾燻蒸之場所空氣中氯化氫或溴甲烷之濃度；未曾燻蒸場所之測定，應於該場所外操作。

勞工在現場作業環境的個人保護措施亦為重要，常有勞工因嫌穿戴麻煩而未將防護衣與呼吸器戴上，導致操作人員暴露在溴化甲烷的接觸環境中，增加罹病的風險。在「特定化學物質危害預防標準」第 46 條的特殊作業管理中，規定從事燻蒸作業之勞工應佩戴適當之輸氣管面罩、空氣呼吸器或隔離式防毒面罩，才能進行作業。為避免勞工不當暴露在溴化甲烷的環境中，正確的投藥操作方式應由燻蒸操作人員穿著防護衣、手套、隔離靴、具有機化學品濾毒功能的防毒面具後，再進入作業環境中進行燻蒸作業。在該法規第 12 項規定中，要求該條前項場所空氣中溴化甲烷之濃度，超過  $15\text{ppm}$  或  $60\text{mg}/\text{m}^3$  規定值(其值係於溫度攝氏 25 度、1 氣壓下每立方公尺空氣中該物質所佔有之重量或容積。)時，應禁止勞工進入各該場所。並規定雇主使從事燻蒸作業以外之勞工於燻蒸作業場所或鄰近該場所之居住室等作業時，應依下列規定。但可明確確定該勞工等不致遭受溴甲烷等污染時，不在此限。

1. 應測定各該場所空氣中溴化甲烷之濃度。
2. 實施前款測定結果，各該場所空氣中溴甲烷之濃度超過規定時，應即禁止勞工進入各該場所。

另外依據該管理辦法的第 37 條，雇主使勞工從事特定化學物質之作業時，應於作業場所指定現場主管擔任特定化學物質作業－主管實際從事監督作業。同時雇主應使前項作業主管執行下列規定事項：

1. 預防從事作業之勞工遭受污染或吸入該物質。
2. 決定作業方法並指揮勞工作業。
3. 保存每月檢點局部排氣裝置及其他預防勞工健康危害之裝置一次以上之紀錄。
4. 監督勞工確實使用防護具。

依據目前的規範，針對目前一般民間業者使用的貨櫃在使用溴化甲烷燻蒸作業方面，並未規範燻蒸安全範圍與排氣過濾設施之活性碳後續處理。

然而目前法律並未設定貨櫃燻蒸的安全範圍，建議一般貨櫃燻蒸應至少比照我國燻蒸櫃的安全範圍設定，半徑 15 公尺內避免住家、學校、機關、醫院、牧場等。同時應設立警告標誌，避免不知情者誤入燻蒸作業場所中。燻蒸完畢後的空罐應置入鋪設活性碳的集裝箱或是密封袋中將餘氣吸收後再以廢棄物的方式處理。而為了避免不當逸散，應於燻蒸完畢後再行移動所燻蒸的貨櫃至碼頭或是貨櫃場。

### 3.3 強化溴化甲烷操作之工安訓練

除了設施安全與現場作業勞工安全外，溴化甲烷燻蒸處理人員對溴化甲烷氣體外洩災害發生及搶救應變能力亦為重要。依照「特定化學物質危害預防標準」第 37 條，雇主使勞工從事特定化學物質之作業時，應於作業場所指定現場主管擔任特定化學物質作業主管實際從事監督作業。因此，依據「勞工安全衛生教育訓練規則」第 11 條，從事特定化學物質作業主管應接受有害作業主管之安全衛生教育訓練共計 18 小時，並取得作業主管證照，每三年需回訓一次。內容包括特定化學物質作業勞工安全衛生相關法規(2 小時)、特定化學物質危害預防標準(3 小時)、特定化學物質之主要用途及毒性(2 小時)、特定化學物質之漏洩預防及作業環境改善與安全衛生防護具(3 小時)、特定化學物質之測定(2 小時)、特定化學物質作業危害及

急救(1 小時)、通風換氣裝置及其維護(3 小時)、特定化學物質作業安全衛生管理與執行(2 小時)。

另外，溴化甲烷在體積達 11.5~12.5% v/v 的濃度範圍下具有可燃與可爆性，因此操作人員應提升防火、救災及救護技能，建議定期舉辦工安消防演練，以防範未然。應實施項目包括溴化甲烷氣體外洩災害發生實境模擬，針對災害發生的原因與防範、通報流程及搶救應變等措施進行演練。

## 四、溴化甲烷末端處理以抑制不當排放

因蒙特婁議定書列管化學物質被排除在毒性化學物質管理辦法之外，亦非公告的有害事業廢棄物，因此目前已吸附溴化甲烷的廢棄活性碳，僅可依照「廢棄物清理法」進行處理，歸類在「一般廢棄物」或是「一般事業廢棄物」之中。建議日後的廢活性碳處理應依據廢棄物清理法，由合格的執行機關負責清除，並作適當之處理，或者是指定回收後統一處理。而未來如何妥善處理其廢棄物，將是重要的課題。溴化甲烷經活性碳吸附後之可行的處理方式，包括以 UNEP 認可的 ODS 銷毀方法進行銷毀；以硫代硫酸鹽類溶液進行活性碳洗滌去除；衛生掩埋場掩埋；去除活性碳中的溴化甲烷後重新使用。

### 4.1 溴化甲烷氣體直接銷毀

溴化甲烷銷毀與其他大多的 ODS 不同之處在於其截至蒙特婁議定書第二十三次締約方大會(MOP-23)為止，溴化甲烷的銷毀技術仍為評估中的狀態(其他 ODS 核可之銷毀程序係依照 XV/9、XXII/10、XXIII/12 修正)。另外部份締約方於 2006 年 TEAP 報告中依照 XVII/11 決議提供可行的溴化甲烷捕捉技術以供參考。

溴化甲烷早期曾當作滅火藥劑使用，但是很快就因為其毒性對人體造成威脅而被淘汰，如果在狹窄空間，所佔體積達 11.5~12.5% v/v 的話，溴化甲烷是具有可燃性與爆炸性的。這一項特性曾經在 MOP-15 時被用來評估溴化甲烷的銷毀技術。以類似海龍藥劑的銷毀方式，讓溴化甲烷可經水泥窯(cement kilns)來進行銷毀，但

是到目前為止並未獲得蒙特婁議定書的批准。

目前 TEAP 報告中可行的直接銷毀方式包括：

1. 經活性碳或沸石吸附後，添加生石灰(quicklime)，經 400~500°C 高溫產生無機鹽類而被分解，分解率可達 99.99%。
2. 經由旋轉窯以 820~1,600°C 高溫，在燃燒室停留數秒，則可以有效的破壞液體或氣體的溴化甲烷。
3. 以流體化床焚化爐(Fluidized bed incinerators)以 450~980°C 高溫，經較長的燃燒時間也可破壞溴化甲烷<sup>[19]</sup>。

前述技術仍需 TEAP 進一步評估可行性，供締約方大會中討論決議後作為正式認可的銷毀技術。

## 4.2 硫代硫酸鹽類洗滌法

目前國際上開發中的方式是讓溴化甲烷與親核子(nucleophiles)反應，以產生溴離子與甲基產物(methylated products)，例如讓溴化甲烷與臭氧、硫礦、氮氣、硫代硫酸納水溶液反應。

目前較有實證的方式係以洗滌槽的方式分解溴化甲烷，其原理是讓燙蒸完的溴化甲烷氣體經過硫代硫酸鹽溶液(thiosulphate solution)分解(化學式如下所示： $\text{CH}_3\text{Br} + \text{S}_2\text{O}_3^{2-} \rightarrow \text{CH}_3\text{S}_2\text{O}_3^- + \text{Br}^-$ )，再經過不相容的有機胺類(amines)溶液(有的系統無此步驟)將有機與無機物質分離後由排氣口排出。另外，部份系統的設計<sup>[20]</sup>則是將已吸附溴化甲烷的活性碳經硫代硫酸鹽水溶液分解，再經過熱空氣使得活性碳再生可重複利用。

## 4.3 活性碳垃圾掩埋處理

直接將吸附使用後的活性碳以廢棄物的方式掩埋也是常見的處理方式，利用掩埋場的活性分解環境，讓溴化甲烷自然分解，自然水解的方式非常的緩慢，其反應式如下所示( $\text{CH}_3\text{Br} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CH}_3\text{OH} + \text{H}^+ + \text{Br}^-$ )<sup>[21]</sup>，溴化甲烷亦會與有機物質中的活性親核子反應，或是經由細菌反應而分解( $\text{CH}_3\text{Br} + \text{OH}^- \rightarrow \text{CH}_3\text{OH} + \text{Br}^-$ )<sup>[22]</sup>。

#### 4.4 回收並回用活性碳中的溴化甲烷

經吸附使用後的活性碳亦可藉由熱空氣、加壓、震盪方式將已吸附的溴化甲烷重新釋放出來，TEAP 2010 年報告中指出重新釋放後的溴化甲烷有 95% 可以再次使用，但其風險是溴化甲烷與活性碳在高溫下是可燃的，過濾用的氣體建議採用氮氣而非一般的空氣。電熱式加熱法也可以採同樣原理將已吸附的溴化甲烷釋放出來，報告<sup>[23]</sup>中認為使用活性碳纖維吸附後再回收的效果較使用顆粒狀活性碳的效果為佳。然這些回收的溴化甲烷遭遇到的問題就是「純度是否符合再次使用的標準」。

溴化甲烷目前除 CUN 豁免外，僅限用於檢疫與裝運前處理，為達一定的燻蒸劑量要求，這些回收的溴化甲烷較難獲得原供應廠商的認可。因此，目前大多仍以原生的溴化甲烷進行燻蒸施作。另外考量的因素是設置這些回收設備的成本高昂，回收一公斤的溴化甲烷的成本往往遠高於直接購買一公斤原生新品溴化甲烷，外加目前蒙特婁議定書對於檢疫與裝運前處理的溴化甲烷用量並未制定上限，在供貨無虞、缺乏獎勵措施與法規要求的狀況下，就顯得回收再利用的方式不具經濟效益。

### 五、結論與建議

我國目前使用溴化甲烷於檢疫與裝運前處理之設施包含 8 座民間的燻蒸櫃(截至 102 年 2 月 1 日資料)<sup>[24]</sup>；防檢局位於基隆港、桃園航空站(新竹分局所轄)、台中港、高雄港等口岸之燻蒸倉庫或燻蒸處理中心。非定點的溴化甲烷燻蒸則主要為民間業者對貨櫃出口前的檢疫或裝運前處理。對於固定排放源，建議強化燻蒸櫃或燻蒸倉庫的管理措施，對於氣密度的測試則建議可用有色煙霧，輔以高壓空氣進行，避免使用溴化甲烷導致不必要的排放。同時應對各種排放源要求設立溴化甲烷回收設備，訂立安全作業範圍規範。對於移動源的排放，著重的管控要點在於設立充足的作業安全作業範圍，並切實執行勞工安全的相關法令，以確保施工作人員的身心健康與周遭環境民眾的安全。

因溴化甲烷係屬蒙特婁議定書列管化學物質，被排除在毒性化學物質管理辦法之外，亦非公告的有害事業廢棄物，因此目前已吸附溴化甲烷的廢棄活性碳，僅

可依照「廢棄物清理法」進行處理，歸類在「一般廢棄物」或是「一般事業廢棄物」之中。未來如何在可控制的成本範圍內妥善處理相關的廢棄物，將是我國應面對的環境課題之一。

## 致謝

本研究工作承蒙行政院環境保護署 101 年度「蒙特婁議定書管制物質削減與含氟溴物質庫排放管控方案研擬與宣導專案工作計畫」支持，特致謝忱。

## 參考文獻

1. Scientific Assessment Panel Report, 2007 WMO, UNEP
2. Science Assessment of Ozone Depletion: 2010 report, UNEP
3. MBTOC Assessment Report 2010, UNEP
4. AQIS MB Standard Version 1.7 Nov. 2011
5. 木質包裝材委託檢疫燻蒸及熱處理管理要點，防檢局，101 年。
6. MBTOC Assessment Report 2006, TEAP, UNEP
7. Methyl Bromide Quarantine and Preshipment Interim National Management Strategy Submission by USA October 30, 2009
8. MBTOC Assessment Report 2010, UNEP
9. 美國聯邦政府作業環境溴化甲烷暴露濃度規定  
[http://www.osha.gov/dts/chemicalsampling/data/CH\\_251900.html](http://www.osha.gov/dts/chemicalsampling/data/CH_251900.html)
10. 美國加州州政府作業環境溴化甲烷暴露濃度規定  
<http://www.cdpr.ca.gov/docs/emon/pubs/tac/metbrom.htm>
11. 澳洲勞工溴化甲烷職業傷害報告  
<http://www.deir.qld.gov.au/workplace/resources/pdfs/ddp-methylbromideguide.pdf>
12. 紐西蘭勞工溴化甲烷職業傷害報告  
[http://www.munz.org.nz/wp-content/uploads/2009/07/maritime\\_april\\_2005.pdf](http://www.munz.org.nz/wp-content/uploads/2009/07/maritime_april_2005.pdf)

### 30 溴化甲烷於檢疫與裝運前處理之排放管控技術與策略研究

- 13.溴化甲烷中毒臨床症狀 <http://www.pcc.vghttps.gov.tw/old/docms/30502.htm>
- 14.溴化甲烷中毒症狀分析 <http://www.fao.org/wairdocs/X5007E/X5007e01.htm>
- 15.Methyl Bromide health surveillance guidelines - Workplace Health and Safety  
Queensland  
<http://www.deir.qld.gov.au/workplace/resources/pdfs/ddp-methylbromideguide.pdf>
- 16.職業疾病認定參考指引職業性溴化甲烷疾病認定基準  
[http://www.cla.gov.tw/cgi-bin/siteMaker/SM\\_themePro?page=4cd0dcf8&theme=inside05&OnPreview=0&status=audit&break=3](http://www.cla.gov.tw/cgi-bin/siteMaker/SM_themePro?page=4cd0dcf8&theme=inside05&OnPreview=0&status=audit&break=3)
- 17.勞工作業環境空氣中有害物容許濃度標準  
<http://www.iosh.gov.tw/Law/LawPublish.aspx?LID=77#File>
- 18.勞工保險條例第 34 條(職業傷害補償費)  
<http://laws.cla.gov.tw/Chi/FLAW/FLAWDAT01.asp?lsid=FL014980>
- 19.[http://www.chem.unep.ch/irptc/sids/OECDSIDS/Methyl\\_bromide.pdf](http://www.chem.unep.ch/irptc/sids/OECDSIDS/Methyl_bromide.pdf)
- 20.Gan, J; Yates, S.R.; Becker, O. and D. Wang. (1998). Surface Amendment of Fertilizer Ammonium Thiosulfate to Reduce Methyl Bromide Emission from Soil. Environ. Sci. Technol., 32(16):2438-2441
- 21.Gan J., Anderson M.A., Yates M.V., Spencer W.F. and Yates S.R. (1995). Sampling and Stability of Methyl Bromide on Activated Charcoal. J. Agr. Food Chem. 43: 1361-1367.
- 22.Hancock T.L.C., Costello A.M., Lidstrom M.E. and Ormelund R.S. (1998). Strain IMB-1, a novel bacterium for the removal of methyl bromide in fumigated agricultural soils. Appl. Environ. Microbiol. 64: 2899-2905.
- 23.Sullivan P.D., Rood M.J., Dombrowski K.D. and Hay K.J. (2004). Capture of organic vapors using adsorption and electrothermal regeneration. J. Environ. Eng. 130: 258-266.
- 24.農委會防檢局燻蒸或熱處理合格廠商名單  
[http://www.baphiq.gov.tw/admin/upload/twgov\\_file\\_201302011630005.pdf](http://www.baphiq.gov.tw/admin/upload/twgov_file_201302011630005.pdf)

## 溫室氣體

# 我國產業溫室氣體排放申報與運用標竿 工具做為減量績效認可機制之探討

簡慧貞\*、劉家介\*\*

## 摘要

為呼應國際環保政策趨勢，以降低未來國際管制手段對我國所可能帶來之潛在衝擊，行政院環保署自 93 年起即積極推動溫室氣體減量工作，並於 95 年 9 月提出《溫室氣體減量法(草案)》，期以此做為我國溫室氣體管理制度之主要法源依據。惟《溫室氣體減量法（草案）》目前仍在立法院審議階段，然為協助產業建構減量能力、以降低未來管制所可能面臨的衝擊，我國現階段的政策方向，一方面為協助產業進行自願減量，另一方面則是以《溫減法》做為管理依歸，進行相關執行配套制度之規劃設計。在上述的背景下，我國溫室氣體管理架構主要包含「產業排放申報管理制度」、「以標竿工具做為基礎的自願減量認可與獎勵機制」，及「減量成效確認之查驗證管理制度」等實質策略做法，本文主要就國際相關做法、我國對應制度之設計與應用及國際制度與我國現階段做法比較分析等面向進行闡述。

【關鍵字】排放量申報、先期專案、抵換專案、排放強度、查驗管理

\*行政院環境保護署參事兼溫減管理室 執行秘書

\*\*環科工程顧問股份有限公司 組長

## 一、前　言

溫室氣體已成為國際上最受注視的環保議題，目前國際間唯一具備法律力的京都議定書已於 94 年 5 月生效，世界各國亦相繼於環境政策中納入氣候變遷因應策略。聯合國氣候變遷綱要公約秘書長克莉絲汀娜・菲格雷斯(Christiana Figueres)指出，公約雖扮演匯集全球氣候決策之平台，然並非各國減量決策的驅動力來源；更於 102 年 1 月「全球環境均衡立法組織網」(Global Legislators' Organisation, GLOBE)第三次成果發表會議表示，各國針對溫室氣體制度之內國法化趨勢乃是新全球氣候協定之關鍵。各國境內減量決策的最大動機乃始於永續、穩健及具有競爭力的資源利用。我國雖不是京都議定書之正式簽署國，但呼應國際環保政策趨勢，以降低未來國際管制手段對我國所可能帶來之潛在衝擊，我國環保署自 93 年起即積極推動溫室氣體減量相關事宜，並於 95 年 9 月提出《溫室氣體減量法(草案)》(以下簡稱《溫減法》)，期以此做為我國溫室氣體管理制度之主要法源依據。

《溫減法》目前仍在立法院審議階段，然為協助產業建構減量能力、以降低未來管制所可能面臨的衝擊，我國現階段的政策方向，一方面為協助產業進行自願減量，另一方面則是以《溫減法》做為管理依歸，進行相關執行配套制度之規劃設計。

依我國經濟部能源局 2012 年的統計資料顯示，各部門燃料燃燒排放之二氧化碳(carbon dioxide, CO<sub>2</sub>)以能源部門及工業部門為主要排放來源(約佔 80% 以上)。在管理效率原則之下，環保署以能源及工業部門為溫室氣體自願減量優先推動對象，期於《溫減法(草案)》尚未正式通過前，協助產業建構溫室氣體管理能力。環保署目前推動產業自願減量的管理方案，區分為先期專案(early action program)及抵換專案(offset program)兩種，其中先期專案屬組織型減量方式，以整體排放總量與指標性產品(或原物料)數量所計算的「排放強度」(emission intensity)為基礎，與環保署所訂定的行業別公告排放強度進行比較，以認定專案減量績效。在此專案之下，產業得以透過環保署所規範的申請程序取得減量額度(credits)。在制度設計原理上，這些額度不但可以做為產業用來抵扣自己的排放量，亦能在指定的額度市場來進行買賣。從這個角度而言，這些減量額度具有經濟價值，一方面可以做為降低減量成

本的工具，一方面亦可做為增加收入的資產，亦即透過前述標竿工具之管理方式，預期能提供產業做為及早執行自願減量之誘因。

在相關管理配套制度之設計上，精確掌握現有不同排放源之排放情形與具體數據資料，乃是後續研擬各項溫室氣體管制策略之基本核心要素。業者對於排放資料的提供通常較為抗拒，若沒有強制性的執法基礎，則不易推動此一工作。就我國目前的現況而言，在《溫減法》尚未正式通過前，主管機關尚無可依循之法源基礎推動相關管理措施。為克服目前因缺乏法源基礎所帶來的工作障礙，環保署在參考國際作法與我國實際排放情形後，評估現階段採先將溫室氣體納入《空氣污染防治法》(以下簡稱《空污法》)，利用現有空污管理架構及管制作法來進行溫室氣體排放資料申報與管理，以做為後續銜接《溫減法》前之管制規範。

本文分別就產業排放、減量認可及查驗機制等 3 個主題進行探討。在各主題的論述邏輯上，先簡要說明國際相關做法、而後介紹我國對應制度之設計與應用，最後再針對國際制度與我國現階段做法進行比較分析。

## 二、效能標準與標竿管理工具之國際做法與我國應用

### 2.1 效能標準與標竿管理工具之國際應用

繼 1992 年聯合國氣候變遷綱要公約 (United Nations Framework Convention on Climate Change，UNFCCC) 及 2008 年實施的京都議定書(Kyoto Protocol，KP)，國際各國和地方均致力於溫室氣體管理，並藉由政策工具(如總量管制)、經濟工具(碳稅或能源稅)、技術工具(減量技術)和市場機制工具(如排放交易)等面向發展相關管理策略及賞罰機制，以投入全球溫室氣體減量之努力。除了上述的管理工具之外，國際間亦透過溫室氣體排放效能之形式，建立一指標性標準(所謂效能標準或標竿值)供產業部門參照或遵循，進而達成溫室氣體管理目的，該作法已在國際間有相當的進展，乃氣候政策規劃之利器。

「效能標準」及「標竿值」是國際間應用於部門別或工廠(場)層級之污染物、能源與溫室氣體管理手段，其包含以強制或自願推行之於國家、地區或企業方案，

### 34 我國產業溫室氣體排放申報與運用標竿工具做為減量績效認可機制之探討

並藉此強化減量策略之公信和公正性，落實「可量化、可報告及可查證」(measurable、reportable and verifiable，MRV)原則。效能標準及標竿值之應用面向除可做為產業達成自願性減量協議、揭露排放量登錄平台資訊、績效表現稽核依據，以及企業相互比較之指標，亦可做為達成能源績效改善或溫室氣體減量目標之政策工具。以清潔空氣政策中心(center for clean air policy，CCAP)所提倡的「部門別減量機制」(Sectoral Mechanism)為例，乃規劃建立與溫室氣體排放相關產業之標竿值，以協助改善溫室氣體排放之效能。而美國環境保護署(U.S. EPA)則是將透過效能標準規範新設電廠排放水準；華盛頓州則針對工業部門研究溫室氣體排放標竿值之應用；而加州總量管制及歐盟第三期排放交易機制亦採標竿值，做為核發排放源免費額度之認定依據。

依據美國華盛頓州委託工業門溫室氣體標竿值研究，亦指出州級與聯邦所利用之管理策略可歸納為三大應用目的，包含：1. 做為「自願性績效目標」(voluntary performance goals)、2. 配合總量管制與排放交易機制實施之下的「法規強制執行目標」(regulation of GHG emissions through a cap-and-trade program)，以及 3. 「強制性溫室氣體績效標準」(regulatory GHG performance standards)，以標竿值之形式展現。

效能標準、標竿值之訂定係涉及相關產業和目的事業主管機關之共同參與和協商，並與各產業產能利用特殊性、減量技術之可行性和成本有緊密的關聯。排放標準訂定之高度與扮演位階亦影響產業發展及減量成效，均為國際政策推行重要考量點。國際標竿值之訂定原則彙整如表 1 所示。

表 1 國際排放標準或標竿值研訂原則

研訂原則	說明
精簡化、透明化和標準化 (simplicity, transparency and standardisation)	<ul style="list-style-type: none"> <li>●效能標準或標竿數值認定方式：應精簡易懂，且引用最少計算參數為原則</li> <li>●引用之數據來源：降低產業別下各廠差異度，並確保數據參採來源之完整性和一致性</li> <li>●公式設計：清楚明確，並可經第三方重複驗證</li> </ul>
技術可行性及政策可接受性 (technical feasibility and political acceptability)	<ul style="list-style-type: none"> <li>●考量政府和產業實務操作可能面臨之議題，確保執行效能標準管制或標竿值訂定之可行性</li> </ul>
可查證(verifiability)	<ul style="list-style-type: none"> <li>●效能標準或標竿值研訂過程所參採產業提供之參數和數據，可經第三查證單位進行查核確認</li> </ul>
產業下各廠提報資訊之一致性 (consistency with plants' circumstances)	<ul style="list-style-type: none"> <li>●確保產業下各廠提報資訊過程之一致性，以避免業者提供資料過於籠統，亦避免過於繁瑣降低產業配合意願</li> </ul>
避免產生負面管制效應，導致產業停滯於最易執行之減量選項 (minimized perverse incentives and “gaming” opportunities with respect to realizing least cost mitigation options)	<ul style="list-style-type: none"> <li>●效能標準或標竿值認定方式應避免導致產業因應作法與減量目的抵觸，包含關廠、特定產品製程之優勢、特意增產或減產之優勢、碳洩漏(工廠搬遷它地)以及刻意調整製程或設備免除排放量計算</li> </ul>
確保最佳技術採行誘因 (incentives for best practice)	<ul style="list-style-type: none"> <li>●應促進產業選用最佳可行技術</li> </ul>
明確性 (certainty)	<ul style="list-style-type: none"> <li>●效能標準或標竿值研訂方向明確，強化政策決心與產業信心度</li> </ul>

資料來源：Entec UK 和 NERA(2005)

## 2.2 標竿管理工具之我國應用：先期專案

先期專案為溫室氣體減量專案之一種，其是指自民國 89 年 1 月 1 日起至《溫減法》施行前，排放源之排放強度優於環保署之公告排放強度，且其執行減量實績經查驗機構查證及環保署審查通過核發減量額度之專案。先期專案可視為一種組織型的減量方式，減量績效之計算，乃是基於整體運作單位排放量與指標性產品生產量關係所計算之排放強度為基礎，並進而與環保署所公告的行業別排放強度進行比較，以做為是否得以取得減量額度之評斷。當特定業者的排放強度優於公告排放強

### 36 我國產業溫室氣體排放申報與運用標竿工具做為減量績效認可機制之探討

度時，則業者可取得減量額度以做為其排放控制績效相對較佳之獎勵，如圖 1 所示。

先期專案及抵換專案之法源依據《行政院環境保護署溫室氣體先期專案暨抵換專案推動原則》於民國 99 年發布並於 101 年修正，目的為鼓勵業者過往配合政府政策執行節能減量行動，因此先期專案得以回溯至過往(始自民國 89 年)，且為區別推動原則發布前後業者減量成效，因此先期專案的機制設計上，則依時間階段性的不同訂定不同的公告排放強度。第一階段適用於民國 89 年至 99 年底所完成之績效；而民國 100 年後之減量績效，則屬第二階段。表 2 為各業別之排放強度，環保署已於 100 年 6 月 30 日公告「鋼鐵業」、「水泥業」、「電力業」、「半導體業」及「薄膜電晶體液晶顯示器業」等 5 項行業之溫室氣體公告排放強度。換言之，目前能夠以先期專案取得減量額度者，為前述 5 大產業。

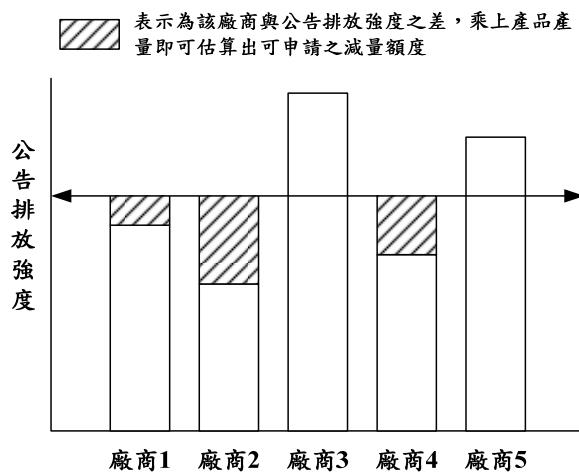


圖 1 先期專案示意圖

另依環保署民國 101 年 7 月修正發布的《溫室氣體先期暨抵換專案推動原則》第 19 點，第一階段所申請的先期專案減量額度，自核發日起 3 年後，即不得用於環境影響評估案件開發單位溫室氣體減量承諾之抵換。亦即第一階段所申請之減量額度，若要用於環評承諾之抵換，則必須於 3 年之內抵換完畢；3 年後，只能用於自願性的碳中和等用途。但該條文中亦附加但書，若減量額度已提供指定環境影響

評估開發案件之溫室氣體減量承諾抵換之用途者，不在此限。這個但書也為先期專案申請者提供了一個減量額度使用之彈性，並於實務上達到活絡國內碳市場之目的，對未來可能實施的排放交易制度奠定基礎。

表 2 環保署 5 大業別公告排放強度

行業別/製程別		指標性產品		第一階段公告排放強度建議值	第二階段公告排放強度建議值	
					既有排放源	新設排放源
鋼鐵業	一貫式	鋼胚		2.17	2.05	1.9
	電弧爐	碳鋼鋼胚		0.455	0.426	0.376
		不鏽鋼鋼胚		0.492	0.476	0.42
	軋鋼	H 型鋼		0.184	0.169	0.155
	製程	不銹鋼熱軋鋼捲(板)		0.145	0.143	0.14
水泥業		熟料		0.917	0.855	0.821
液晶顯示器	5 世代以下玻璃基板			0.312	0.089	0.043
	5.5 世代以上玻璃基板			0.064	0.048	0.039
半導體業	6 吋以下晶圓			1.44	1.069	0.902
	8 吋晶圓			1.894	1.321	0.891
	12 吋晶圓代工			1.326	0.973	0.642
	12 吋晶圓 DRAM			0.97	0.52	0.426
	電力業	汽力機組	88 年前	燃煤	0.882	0.868
				燃油	0.739	0.729
				燃氣	0.561	0.545
		複循環機組	88 年後	燃煤	0.835	0.823
			88 年前	燃油	0.672	無燃油改燃氣
				燃氣	0.424	0.414
			88 年後	燃氣	0.38	0.373

資料來源：整理自環保署(2012)

### 三、溫室氣體排放申報管理之國際做法 與我國相關制度設計

#### 3.1 國際制度案例

目前國際採用透過法規推動溫室氣體強制申報(Mandatory Greenhouse Gas Reporting Rule)做為管制做法者包含美國、歐盟、英國、加拿大與澳洲，以下針對各國制度進行簡要說明。

##### 1.美國

該國溫室氣體申報制度發展起源於《國會整合撥款法》(Consolidated Appropriations Act)要求美國環保署(以下簡稱 U.S. EPA)限期規劃溫室氣體盤查申報制度，促使 U.S. EPA 在 2009 年 10 月發布「排放量申報規範」(Mandatory Greenhouse Gas Reporting Rule)，並於同年 12 月生效。原規定 2011 年 3 月 31 日為首年度之截止申報日，然礙於相關配套建置時間，故展延為 9 月 30 日截止。該申報規範係屬於《空氣清淨法》(Clean Air Act，以下簡稱 CAA)下之溫室氣體管制規範架構。其主要目標在強制大型溫室氣體排放源及供應商進行溫室氣體申報作業，以做為未來法規訂定之參考。

排放量申報規範之主要目標，是期望透過此規範掌握美國各行業上游產品(upstream production)與下游直接溫室氣體排放源(downstream direct emitters)排放資料，並要求大型溫室氣體排放源及燃料供應商必須蒐集正確與即時的排放資訊，以做為未來相關法規政策訂定的參考。涵蓋之申報對象包含石油煉製業、石化工廠、化石燃料供應商、工業用溫室氣體製造商、汽車及引擎製造商及工廠內有鍋爐、加熱器等燃燒設施等行業。美國環保署亦進一步分批(2010 年及 2011 年)公告申報對象及適用條件：2010 年申報對象需開始進行該年度溫室氣體申報作業資料蒐集，並於隔年 2011 年進行申報；2011 年申報對象需則於隔年 2012 年進行申報。

根據 U.S. EPA 溫室氣體申報規則，要求申報對象包含，要求申報對象包含大型排放源及燃料供應商，依管制門檻條件分成 4 項，如表 3 所示。

表 3 美國溫室氣體申報對象之分類原則

申報對象		申報門檻
工業部門之排放源	特定業別全數納管	包括發電(受酸雨計畫管制對象)、石油煉製、石化、水泥、硝酸製造、石灰製造、磷酸製造等 17 種業別，不限排放量規模，無申報門檻。
	一定規模以上之業別	鋼鐵製造、鐵合金製造、紙漿及紙製造、玻璃製造等 7 種業別，其排放量達 25,000 公噸 CO <sub>2</sub> e/年者。
	其他固定燃燒源	屬上述兩類，使用燃料最大總輸入熱值大於等於 30 MMBtu/hr，且排放量大於 25,000 公噸 CO <sub>2</sub> e/年之固定燃燒源者。
燃料供應商	其他製造商及供應商	供應化石燃料(煤、石油、天然氣)及工業氣體(含氟溫室氣體、N <sub>2</sub> O、二氧化碳)之製造商及供應商，亦包括進出口產品，其產品本身未來可能產生之排放量達 25,000 噸 CO <sub>2</sub> e/年以上者

註 1:MMBtu(million British thermal units)英熱單位, 1 英熱單位/時(Btu/hr)=0.293071 瓦(W)

資料來源：US. EPA(2012b)。

美國已於 2011 年 9 月完成 2010 年溫室氣體排放量申報作業，申報家數共有 6,700 家(直接排放源計有 6,208 家、製造商及供應業計有 604 家)，申報之直接排放源中，以電力業(2,324 百萬公噸 CO<sub>2</sub>e)為排放大宗，再者為煉油業(183 百萬公噸 CO<sub>2</sub>e)，申報對象中，排放總量超過 700 百萬公噸 CO<sub>2</sub>e 之工廠有 100 家，其中，96 家電力業、2 鋼鐵廠、2 家煉油廠。

## 2.歐盟

依據歐洲議會和理事會 2003/87/EC 指令，歐盟於 2004 年 1 月 29 日制訂「溫室氣體監測和申報指引規定」(guidelines for the monitoring and reporting of greenhouse gas emissions, MRG)，以做為歐盟溫室氣體排放交易制度下，規劃各國管轄排放源之溫室氣體排放量核配作業之基礎，其後於 2007 年發布修正版(MRG 2007)；在「溫室氣體監測和申報指引規定」(MRG)中明確說明如何對該裝置的二氧化碳排放進行監測和報告，包括對燃料和材料流的監控、對計量設備的描述(地點、技術、不確定性)、對排放測量系統的詳細描述、監測及報告的質量保證和質量控制，與數據收集和排放計算流程等內容。

在 2003/87/EC 中規定納入 EU-ETS 管制的產業與排放源主要分為「能源活動」、「鐵系金屬生產與加工」、「礦產工業」、「其他活動」等 4 個面向，如表 4 所示，受到管制之產業包括煉油業、能源業、治煉業、鋼鐵業、水泥業、陶

## 40 我國產業溫室氣體排放申報與運用標竿工具做為減量績效認可機制之探討

瓷業、玻璃業與造紙業等約 12,000 處排放源，其所涵蓋之排量約占全歐盟總排放量 45%。

表 4 EU-ETS 納入管制的活動

<b>1.能能源活動：</b>
1.1 燃燒排放源的活動，其熱輸入功率超過 20 百萬瓦。(排除有害或都市廢棄物處理排放源)。
1.2 礦油煉製活動。
1.3 焦碳爐活動。
<b>2.鐵系金屬生產與加工</b>
2.1 金屬礦石(包括硫化物礦石)煅燒與燒結排放源的活動。
2.2 製造生鐵或鋼鐵(原生或二次熔煉)排放源的活動，含連續鑄造，產能每小時超過 2.5 公噸。
<b>3.礦產工業</b>
3.1 生產水泥熟料旋轉窯排放源的活動，日產能超過 500 公噸。
3.2 生產石灰旋轉窯或其它加熱爐排放源的活動，日產能超過 50 公噸。
3.3 生產玻璃或玻璃纖維排放源的活動，日熔製量超過 20 公噸。
3.4 生產陶瓷產品(含屋瓦、磚塊、耐火磚、瓷磚、陶瓷器)燒烤窯排放源的活動，其中(i)窯日產能超過 75 公噸；或(ii)窯容積超過 4 立方公尺，而且設定密度每立方公尺超過 300 公斤。
<b>4.其他活動</b>
4.1 由伐木或其他纖維物質來生產紙漿工廠的活動。
4.2 生產紙類產品工廠的活動，日產能超過 20 公噸。

資料來源：European Commission(2003)。

### 3.英國

英國承諾於 2025 年減少二氧化碳排放量至 1990 年的 20-30%。該國境內主要排放源已受制於 3 個現行相關溫室氣體申報制度：歐盟排放交易機制下，要求總量納管對象之 CO<sub>2</sub> 申報規定、該國「能效碳減量承諾」(CRC (Carbon Reduction Commitment) Energy Efficiency Scheme)方案列管對象之用電 CO<sub>2</sub> 申報規定，以及參與「氣候變遷協議」(Climate Change Agreements，CCA)之業者其能耗使用資料申報規定。該 3 種申報規定係提供總量管制或自願減量績效認定之配套，進而

要求遭列管的排放源或參與業者提報排放資料。

除前述制度外，該國 2008 年《氣候變遷法》(Climate Change Act)第 85 條規定主管機關需於 2012 年 4 月 6 日前進一步要求公司申報溫室氣體排放量(包含 CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O、SF<sub>6</sub>、HFCs、PFCs)，乃獨立於前述溫室氣體管理機制之申報制度。有鑑於此，環境食品暨農村事務部(The Department for Environment, Food and Rural Affairs，簡稱 DEFRA)，係為該法案之相關主管機關，則先行問卷調查、提供初版的《溫室氣體排放申報規定(草案)》(The Greenhouse Gas Emissions (Directors' Reports) Regulations 2013)，以及後續修正作業。根據現階段該草案內容，凡於該國證交所共計超過 1,100 家的上市公司，須申報其營運活動涉及之直接排放(範疇 1)、能源間接排放(範疇 2)以及排放強度比(intensity ratio，係每單位產出或產值之 CO<sub>2e</sub> 排放)，並依公司結算年度為每年申報期間。

該國須申報之公司可參採 DEFRA 提供之盤查指引及能源及氣候變遷部 (Department of Energy and Climate Change Change，DECC)發布的年度排放係數值，亦可採用「世界資源研究院」(World Resource Institute，簡稱 WRI)及「世界企業永續發展協會」(World Business Council for Sustainable Development，簡稱 WBCSD)共同開發的《溫室氣體盤查議定書倡議》(GHG Protocol)、「國際標準組織」(International Organization for Standardization，簡稱 ISO)發布的《ISO14064-1》標準與「氣候碳揭露標準委員會」(Climate Standards Disclosure Board)所訂定的《氣候變遷申報框架》(Climate Change Reporting Framework)。英國政府沒有硬性規定使用政府訂定之盤查計算方法，但申報業者須以揭露所採行的量化方式，確保資訊透明化。DEFRA 將於 2016 年進一步決定是否擴大申報對象，並於該申報制度推行第 5 年進行政策檢討。

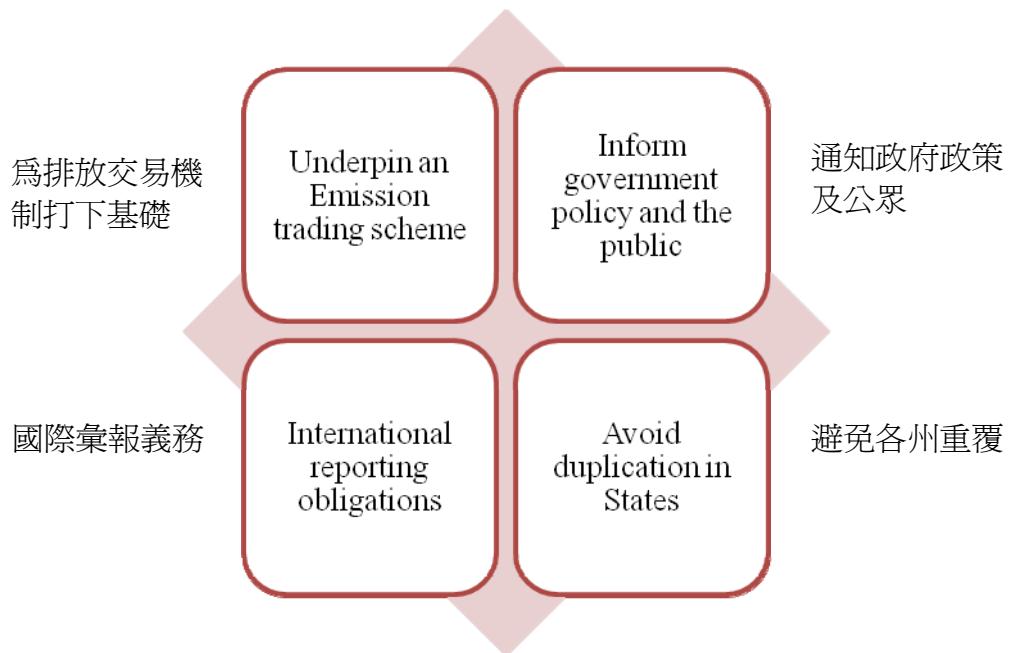
表 5 英國現行溫室氣體申報制度對照表

制度名稱	特 性	期 程	納管/參與對象	溫室氣體 申報內容	查驗規定
歐盟排放交易機制	針對歐盟境內設施之總量管制與排放交易機制	第一期 (2005-2007) 第二期 (2008-2012) 第三期 (2013-2020)	大型能耗排放源(如鋼鐵、造紙等)	CO <sub>2</sub> 排放量	第三方 查驗機構
能效碳減量承諾	針對英國境內大型公私場所(如超商和醫院)之申報與交易機制	第一期 (2010/4-2012/3) 第二期 (2013/4 起)	所有裝設‘半小時’計量電錶的公司	CO <sub>2</sub> 排放量	第二方 環境署 抽樣稽核
氣候變遷協議	產業達成自設減量目標，搭配氣候變遷稅之稅額減免獎勵	2002、2004、 2006、2008、2010 及 2013 年起簡化作法	與政府達成自願減量 協議之高耗能產業或 公協會	能耗量(並轉為 CO <sub>2</sub> 排放)	公協會及目的事業主管機關審查
強制申報規定	針對主要上市公司強制申報	預計 2013/4 或 2013/10	倫敦證交所主 市場掛牌公司	範疇一與 範疇二之 6 大京都 溫室氣體 排放量	由現行會計 稽核機制審 查

資料來源：UK House of Parliament(2013)。

#### 4. 澳洲

澳洲「國家溫室氣體及能源申報法」(National Greenhouse and Energy Reporting Act, NGER Act)於 2008 年 7 月 1 日生效，並依據該法案之授權，完成建置「國家溫室氣體及能源申報系統」(National Greenhouse and Energy Reporting System, NGERS)。澳洲「國家溫室氣體及能源申報法」目標主要有「為排放交易機制打下基礎」、「通知政府政策及公眾」、「國際彙報義務」及「避免各州重覆」等 4 大面向，如圖 2 所示。



資料來源：行政院環保署(2012a)

圖 2 澳洲「國家溫室氣體及能源申報法」目標

依據「國家溫室氣體及能源申報法」規定，如企業每年之總溫室氣體排放量或是能源消耗超過一定門檻，該企業就必須彙整溫室氣體排放量、能源產生量及能源使用量等相關資料(需經第三者查證)，以符合法令規定的年度申報要求。應申報對象初期 2008 及 2009 年規定企業年總溫室氣體排放量達 125,000 噸 CO<sub>2</sub>e，或是總能源消耗(或製造)量超過 500 兆焦耳者；2009 及 2010 年則規定為排放量達 87,500 噸 CO<sub>2</sub>e，或是總能源消耗(或製造)量超過 350 兆焦耳者；未來將要求排放量達 50,000 噸 CO<sub>2</sub>e，或是總能源消耗(或製造)量超過 200 兆焦耳者，循序漸進來達到納管達全國總排放量 70% 之目標。此外，若是企業所屬設施，其個別溫室氣體排放量超過 25,000 噸 CO<sub>2</sub>e，或消耗(或製造)100 兆焦耳以上的能源，也必須個別申報排放資料。

「國家溫室氣體及能源申報法」規定企業每年的排放量於次年 8 月 31 日完成登錄，次年 10 月 31 日完成報告，隔年 2 月 28 日完成公佈，此外法令亦規劃

查核審計制度以覆核企業所提之溫室氣體及能源申報資料之正確性，澳洲政府溫室氣體審計制度包括「違規審計」(Non-compliance Audits)及「抽查審計」(Spot Audits)兩種型式，前者為當監管機構有合理依據懷疑註冊企業未滿足或正在違反其義務時進行，相關查核費用由企業承擔，而後者則可在未懷疑違規審計時進行，相關費用則由監管機構承擔；透過兩種型式之審計制度，來確保公告之國家溫室氣體排放量及能源資料之正確性。

### 5.加拿大

加拿大減量目標為 2020 年減少溫室氣體排放量 17%(相較於 2005 年排放水平)，並在 2050 年減量達 60-70%(相較於 2006 年排放水平)。該國溫室氣體盤查與申報制度源自 2004 年，加國環境部係引用 1999 年《加拿大環境保護條款》(Canadian Environmental Protection Act, 1999)第 46 條“環境資訊蒐集”為「溫室氣體申報方案」(GHG Reporting Program, GHGRP)推動法源，並定期每年於《加拿大公報》(Canada Gazette)公告相關施行細則，其包含強制規定年排放量(直接排放)達 10 萬公噸 CO<sub>2</sub>e 門檻以上之排放源須進行溫室氣體(包括 CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O、SF<sub>6</sub>、HFCs、PFCs)線上申報、申報項目及應採用之量化係數值。該申報門檻已於 2009 年下修為 5 萬公噸 CO<sub>2</sub>e，低於 5 萬公噸 CO<sub>2</sub>e 之工廠則可自願申報。該申報方案可協助加國政府掌握工業溫室氣體排放情形，其申報包含化石燃燒之電力供應業、石油煉製、紙漿造紙、鋼鐵、鐵礦石微粒化(iron ore pelletizing)、冶煉及精煉、水泥、石灰、碳酸鉀(potash)、化學品和肥料等產業，約占該國總排放量 34%。該國申報方案無強制性查驗規定，乃由申報業者以切結聲明所提供之資訊為真實、準確及完整，並由環保部審查。若無據實申報者則依循加拿大環境保護法相關懲處規定辦理。

### 6.中國(上海)

2012 年 8 月 16 日上海市政府召開上海市碳排放交易試點工作啟動大會，將 200 家企業納入試點範圍。據悉，2013 年下半年至 2014 年上半年，是上海市全面推進試點工作的關鍵時期。下一階段，上海市將加快制定上海碳排放交易管理辦法等規章制度，力圖建構一個具有相容性、開放性和良好示範效應的碳排放交易市場，成為中國碳交易市場之試行開端。

上海近期已製定《上海市人民政府關於開展碳排放交易試點工作的實施意見》(以下簡稱實施意見)，根據實施意見內容，上海市參加試點的對象為鋼鐵、石化、化工、非鐵金屬、電力、建材、紡織、造紙、橡膠、化纖等工業行業，且其二氧化碳年排放量達 2 萬噸以上的重點排放企業，以及航空、港口、機場、鐵路、商業、賓館、金融等非工業行業，且其二氧化碳年排放量達一萬噸以上的重點排放企業。對於上述範圍外，試點期間二氧化碳年排放量達到一萬噸及以上的其他單位須履行碳排放報告制度。

上海市參加試點的企業 200 家、報告企業 600 多家，上海市交易標的主要是二氧化碳排放配額。上海市將對試點企業的初始碳排放配額免費分配，試點企業應按規定展開自身年度碳排放監測和報告，並接受第三方機構的查核。

### 3.2 我國溫室氣體排放申報制度介紹

因《溫減法》於民國 95 年經行政院送立法院審查至今已歷經三屆立委任期，仍尚未完成立法工作，其中最主要的兩大爭議點為：減量目標是否應明訂於《溫減法》條文與各界對於排放交易制度的看法分歧。儘管如此，環保署於此期間對於建構國內溫室氣體減量管理能力之相關工作推動並未停止，仍積極推動自願性盤查登錄及先期減量相關制度，惟非屬強制性申報制度，仍有產業排放量資料掌握不完整及登錄資料不正確等問題，由於溫室氣體管理首要工作即為掌握基線排放情形，為解決此一問題，環保署參考美國以清空法進行管制之做法，在《溫減法》未立法通過前，將溫室氣體納入管理，以循序推動溫室氣體管制作業，未來待《溫減法》通過後，即可銜接後續之相關管制措施，加速減量工作之推動。以下簡要說明目前的相關制度做法。

#### 3.2.1 公告 6 種溫室氣體為空氣污染物

溫室氣體導致全球暖化效應及氣候變遷，間接衝擊、改變及妨害生活環境，符合空污法第 2 條第 1 款空氣污染物規定，且參採國際上以既有法規進行溫室氣體管理制度精神，環保署依據空氣污染防治法施行細則第 2 條第 6 款規定，公告二氧化碳、甲烷、氧化亞氮、氫氟碳化物、六氟化硫及全氟化碳等 6 種溫室氣體為空氣污染物，明確法令管理機制。

### 3.2.2 推動溫室氣體強制申報作業

申報管理之目的係為掌握我國溫室氣體排放量基線資料，以做為推動溫室氣體減量及管理之基礎。環保署自 99 年 9 月著手研析美國以清淨空氣法管理溫室氣體排放之作法，並評估以我國空污法將溫室氣體納入管制之可行性，並自(100)年 5 月起陸續辦理專家諮詢、研商說明會議、預告、公聽會與發布等法制作業。現環保署已分別於 101 年 12 月 20 日發布《溫室氣體排放量申報管理辦法》，並於 101 年 12 月 25 日公告《公私場所應申報溫室氣體排放量之固定污染源》，開啓我國溫室氣體排放量強制申報機制，相關規定說明如下：

#### 1.適用對象

第一批公私場所應申報溫室氣體排放量之固定污染源：首先以能源密集及主要耗能產業等大規模排放源為主，包含電力、鋼鐵、水泥、煉油、石化(烯烴)、光電及半導體等 6 大行業；另將全廠(場)化石燃料燃燒產生溫室氣體年排放量達 100 萬公噸 CO<sub>2</sub>e 之排放源納入，前述對象自 102 年 1 月 1 日起施行。

第二批公私場所應申報溫室氣體排放量之固定污染源：參採國際作法以化石燃料燃燒產生溫室氣體年排放量達 2.5 萬公噸 CO<sub>2</sub>e 者為申報對象，前述對象自 103 年 1 月 1 日起施行。

#### 2.申報方式：

主要規定透過網路進行申報，應申報頻率及內容如下：

##### (1)季上傳

於每季(4、7、10 及隔年 1 月底前)進行主要排放源之溫室氣體排放量相關活動數據填報。

##### (2)年申報

於隔年 1 月底前進行主要排放源之溫室氣體排放量相關之活動數據彙總。

##### (3)盤查及查證

於隔年 8 月底前完成全廠之盤查、查證及登錄作業。

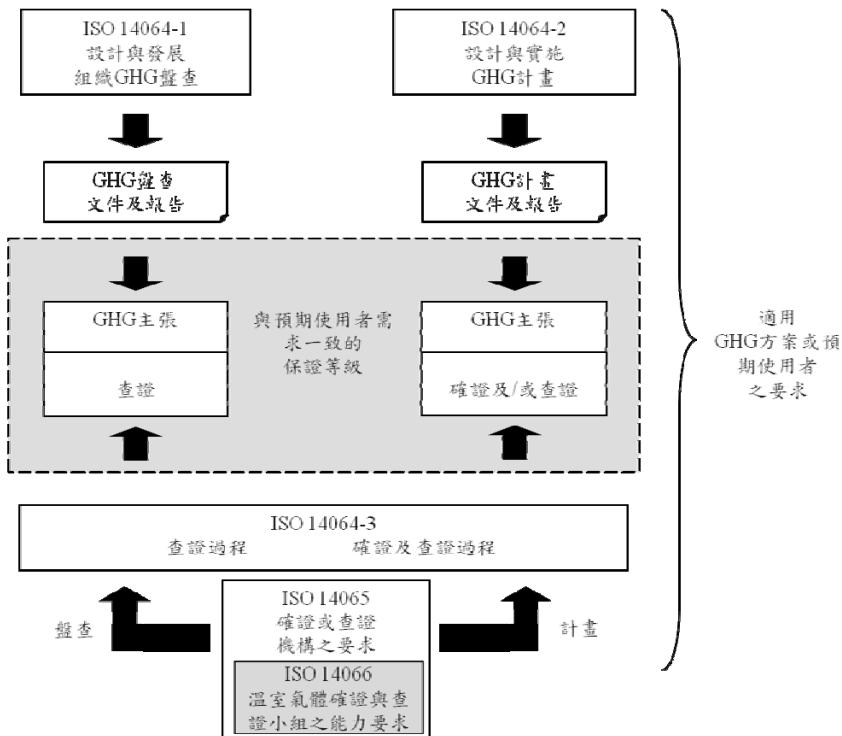
## 四、溫室氣體查驗管理之國際做法 與我國相關制度設計

### 4.1 國際查驗管理做法

目前國際推動溫室氣體排放量或減量績效查驗管理作業較有經驗者包含聯合國清潔發展組織、英國、德國、美國、加拿大、日本、韓國、澳洲，大多國家係基於國際標準組織規範下執行，以下針對國際標準組織規範與前述國家作法，進行簡要彙整分析說明。

#### 4.1.1 國際標準組織(ISO)之溫室氣體查驗標準發展

國際標準組織(ISO)為協助國家、產業及企業建立透明之溫室氣體管理系統，並協助引導各方做法具備原則性相符之特性，故自 1998 年起積極研討環境管理系統標準應用於氣候變遷相關議題之可行性，於 2006 年公告 ISO 14064 系列及 ISO 14065 標準，作為規範組織及專案層級溫室氣體量化、報告、確證、查證之準則。並於 2007 年及 2008 年公告 ISO 14065 及 ISO 14066 標準，以作為查驗機構認證及查驗小組成員能力資格要求之管理準則，據此逐步建立國際標準規範。目前我國經濟部標準檢驗局發布之 CNS 14064 標準即為 ISO 14064 中文版，CNS14064 共有 3 部，其關聯性如圖 3 所示。



資料來源：經濟部標準檢驗局，CNS14064

圖 3 溫室氣體 ISO 國際標準系列之關聯性

#### 4.1.2 國際溫室氣體查驗管理做法

##### 1. 溫室氣體查驗標準

許多國際組織、跨國方案及國家因 ISO 標準具有彈性、中立且能與其他方案相容等特性，有利國際溫室氣體減量機制合作推動，故陸續採用前述 ISO 規範作為認查驗管理之準則。如國際認證論壇(International Accreditation Forum, IAF)應用 ISO 14065 及 ISO14066 作為其會員認證作業準則，歐盟排放交易體系(EU ETS)、聯合國清潔發展組織(CDM)、自願減量標準(Voluntary Carbon Standard, VCS)、北美氣候登錄方案(The Climate Registry, TCR)、芝加哥氣候交易所(Chicago Climate Exchange, CCX)、氣候行動儲備方案(Climate Action Reserve, CAR)、加拿大、中國、日本、韓國等均於排放量盤查及專案層級計畫中採行 ISO14064-1

標準及 ISO 14064-2 標準。

## 2. 國際查驗機構認證管理做法

國際查驗機構認證管理作業做法分為兩類：主管機關直接認證查驗機構(如 CDM、澳洲)，或主管機關委託認證機構協助管理並直接採信認證管理結果(如德國、加拿大、中國、英國、日本)。

### (1) 主管機關直接認證查驗機構

常見於主管機關同時作為查驗機構認證作業執行者及相關方案管理者之情形，如聯合國清潔發展組織(CDM)或澳洲國家溫室氣體和能源申報方案(NGER)。其主管機關之運作方式，見圖 4。

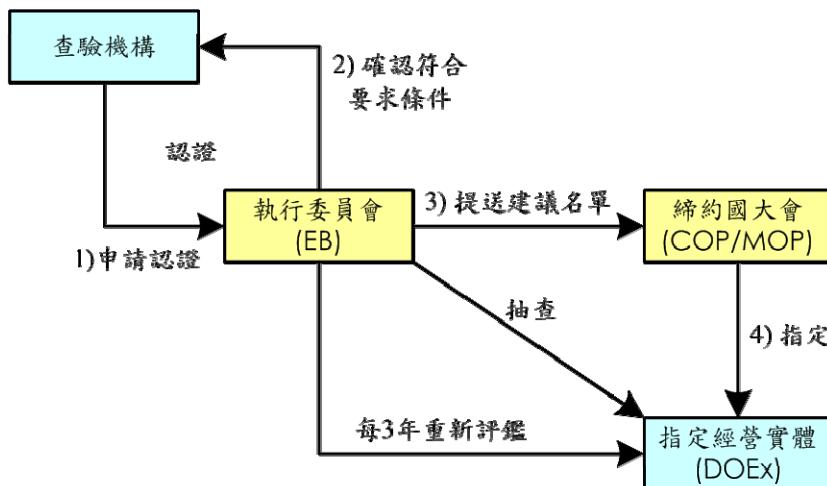


圖 4 主管機關直接執行查驗機構認證管理運作方式(以 CDM 為例)

### (2) 主管機關委託認證機構協助管理並直接採信認證管理結果

國際上多數國家政府或方案採行將查驗機構之認證管理作業，交由認證機構執行之。目前常見之認證執行授權方式有二：法規授權或委託授權。授權管理之運作方式，見圖 5。

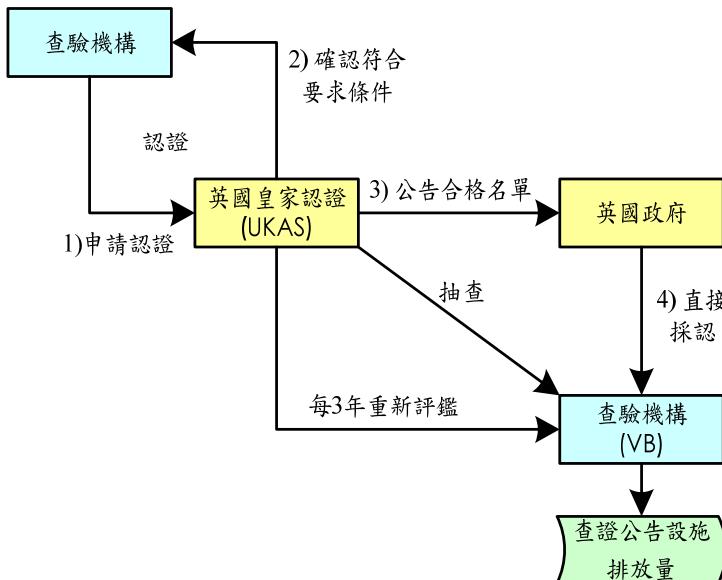


圖 5 主管機關委託認證機構協助管理運作方式(以英國為例)

法規授權多適用於該國家已為認查驗管理作業，訂立法律，據以授權國家認證單位執行所有國家認證方案，如德國、加拿大、中國。

委託授權則多適用於該國家或該方案未設立認證單位時，以簽訂合作協議或直接採認認證結果等兩種方式，據以委託認證機構協助執行查驗機構認證管理作業，如英國、美國、日本。

由於近年來國際認證組織(如 IAF)積極建置認證機構管理制度，並推動國際多邊相互承認協議簽訂作業，以達成多國認證結果互認之終極目標，不僅吸引許多認證機關加入，國際認證組織認可及簽訂多邊相互承認協議亦為委託授權時重要條件要求之一，如英國。

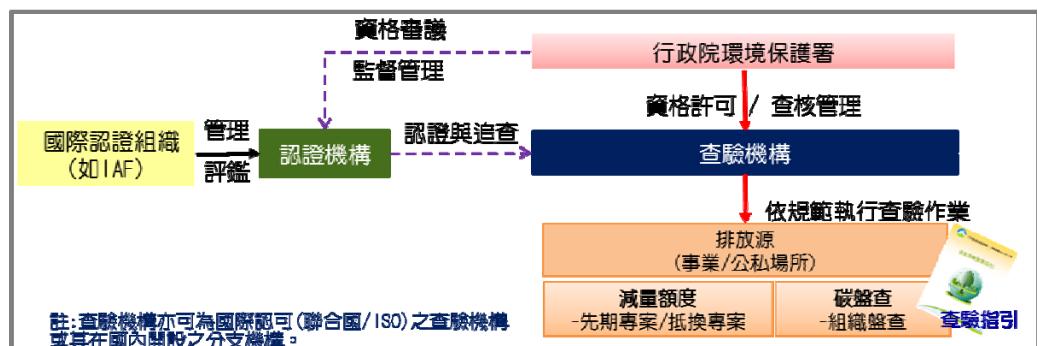
### 3. 國際查驗機構及查驗人員管理做法

目前國際上主管機關之查驗管理作法有二：一是管理查驗機構，由查驗機構負責查驗人員管理；二為同時管理查驗機構及查驗人員。前項為目前國際常見作法，將查驗人員管理交由各查驗機構獨立管理，如英國、日本、加拿大；後項則多為該國家已具備查驗管理法或方案查驗法，直接訂立查驗機構及查驗人員管理

條文，據以分別明定查驗機構管理職責與查驗人員資格及責任歸屬，如德國、澳洲。

## 4.2 我國溫室氣體查驗管理做法

為與國際接軌，我國參用常見之國際做法，導入國際認證論壇(IAF)之認證系統及 ISO 國際標準，據以建立溫室氣體查驗結果與國際互認接軌之基礎。並因應國內需求，建置我國查驗管理機制及編撰溫室氣體查驗指引(以下簡稱查驗指引)，作為國內溫室氣體查驗作業執行之技術規範指導工具。我國溫室氣體查驗管理機制及認查驗作業說明，見圖 6 及表 6。



資料來源：本研究整理

圖 6 我國溫室氣體查驗管理機制

表 6 我國認查驗作業說明

認查驗名詞	定義
認證 Accreditation	主管機關或認證機構(如 TAF)對溫室氣體查驗機構之認可程序，證明其有能力執行溫室氣體確證或查證作業。
查證 Verification	溫室氣體排放源之排放量或減量數據，經查驗機構依系統化、文件化及獨立性等評估方式，進行書面及現場稽核之作業。
確證 Validation	針對專案型減量專案(即環保署抵換專案)之規劃內容，經查驗機構依系統化、文件化及獨立性等評估方式，進行書面及現場稽核之作業。

資料來源：行政院環境保護署，溫室氣體查驗指引

考量國內溫室氣體查驗管理作業仍於發展階段，環保署於溫室氣體減量法施行前，審議委託身為 IAF 會員之財團法人全國認證基金會(TAF)，協助環保署進行溫室氣體查驗機構資格審查及管理作業之同時，並統籌透過每年定期執行認查驗機構之監督查核作業，掌握國內認查驗管理與業務執行品質之情形，據以持續推動國內查驗管理作業品質提升作業。

目前我國要求各溫室氣體查驗機構，除需符合 ISO 14065 及 ISO 14066 之查驗作業程序與查驗人員能力資格要求外，應同時符合環保署對查驗人員之設置要求及查驗人員資格訓練與在職訓練要求。在查驗作業方面，我國要求國內自願性盤查、排放量申報及減量專案，除需符合 ISO 14064-1 或 ISO14064-2 標準外(視其為組織層級或專案層級之查驗作業)，亦需符合國內技術規範與報告文件要求，相關規範均列示於環保署公告之查驗指引。

## 五、各國制度重點項目之彙整比較

### 5.1 效能標準與標竿值之各國應用面向比較

在效能標準及標竿值管理工具之實務應用上，國際案例做法主要可歸納為三大應用面向，包含：1.「溫室氣體排放之量測依據」(measurement protocol, MP)、2.「供效能標準引用之參考值」(performance indicator, PI)，以及 3.「技術建議參考」(technology guides, TG)，例如最佳可行技術的引用(best available technology, BAT)。以上述 3 大應用面向做為歸納準則，則國際上的應用可彙整如表 7 所示。

不同於以標竿值做為管制之依循標準，我國現階段於標竿值之應用上，主要是以鼓勵產業自願減量做為政策目標，而標竿值(公告排放強度)則做為核發減量額度以做為獎勵誘因之門檻標準，具有正向管理之積極意義。然而，此一管理工具事實上可隨階段性任務而調整其應用方向。舉例而言，目前我國主要處於《溫減法》正式實施前的協助產業調整階段，因此標竿管理工具之使用，主要朝向做為提供自願減量誘因之機制設計基礎。進而，隨著管理進程的推進，當溫室氣體管理制度朝向總量管制方向成熟邁進時，則標竿管理工具可進一步調整做為營運單位之排放或技

術標準，以達政策目標。

表 7 現階段國際間效能標準及標竿值應用面向和原則

國際間主要溫室氣體管理機制或方案	應用面向(MP/PI/TG)
我國之溫室氣體先期專案(Early Action)	自願減量獎勵額度核發之依據(PI)
溫室氣體盤查議定倡議 (Greenhouse Gas Protocol Initiative)	排放量測依據(MP)
歐盟排放交易機制之排放監測與報告規範 (Monitoring and Reporting Guidelines)	排放量測依據(MP)
歐盟第一期、第二期排放交易機制下，部分會員國擬定國家核配計畫(NAPs)之額度核配依據	排放量測依據(MP)
歐盟第三期排放交易機制(ETS Phase III)標竿值之額度核配依據	溫室氣體排放效能指標(PI)
國際水泥永續聯盟 (CSI, Cement Sustainability Initiative)	排放量測依據(MP) 工廠層級之排放效能指標(PI)，現階段規劃中
歐盟整合性污染預防與控制局 (EIPCCB, European Integrated Pollution Prevention and Control Bureau)	提供 BAT 最佳可行技術之參考依據(TG)
國際能源總署(IEA) 溫室氣體研發計畫(Greenhouse Gas R&D Programme)	提供技術參考依據(TG)
亞太地區清潔發展與氣候夥伴關係 (APP, Asia Pacific Partnership)	水泥業及鋼鐵業規劃制定標竿值(PI)
加拿大產業節約能源計畫 (IPEC, Industry Program for Energy Conservation)	鋼鐵及鋁業研擬全國或區域標竿值(PI)
比利時法蘭德斯省能效標竿值約定 (Flanders Benchmarking Covenants)	與國際鋼鐵產業工廠之比較依據(PI)
荷蘭標竿值規範	與國際水泥和鋼鐵比較依據(PI)
英國氣候變遷協議(CCA, Climate Change Agreements)	水泥和鋼鐵業各廠排放績效之展現(PI)
美國產業能源之星、能源效率指標(EPI, Energy Performance Indicator)	技術參考依據(TG)； 各廠排放能效比較(PI)
美國環保署氣候領導計畫(Climate Leaders Program)	一般性自廠或產業部門排放能效比較(PI)
美國環保署電力部門排放標準	新設電廠強制效能標準(TG)
美國能源部 1605b 自願性溫室氣體盤查登錄	各廠排放能效資訊揭露(PI)
加州總量管制和排放機制	核配依據(PI)

資料來源：修正彙整自 CCAP(2008)

## 5.2 排放量申報制度之比較

綜合上述制度資料後，有關我國與各國或區域之溫室氣體排放量申報目的、法源依據及申報之對象、內容、時間及方式之比較彙整如表 8。

法源基礎為排放申報管制工作之執行依據，彙整上述 5 國與我國的制度資料，在法源基礎上大致有 2 種做法，第一種為以既有法規進行修正而引用之，例如美國、歐盟、加拿大及我國即屬於此一類別。第二種為另立專法來做為排放申報管制做法之依據，如澳洲及英國即屬此類。

在具體的管制做法上，除歐盟外，各國申報氣體種類均涵蓋京都協定中所有 6 種溫室氣體為須申報內容，申報範疇則可見採範疇一或是同時要求範疇一與範疇二之分歧作法，而申報對象則以特定業別或達一定門檻以上者為主。在申報頻率上，主要多採年申報，且申報期限約為 3~6 個月，而查驗機制有涵蓋第一方業者自我驗證、第二方主管機關審核及第三方查驗機構查驗三種作法，並視各國對數據準確準確度要求程度的不同，亦可分有驗證、審核、稽核或查驗等不同深度。

對照各國推動溫室氣體排放申報之作法，我國在申報對象之納管方式，為降低對產業之衝擊，採分批進行，優先指定 6 大主要耗能產業及年排放量 100 萬公噸 CO<sub>2</sub>e 之排放源為第一批之申報對象(預估為 108 家)；第二批申報對象則要求年排放量 2.5 萬噸 CO<sub>2</sub>e 以上之排放源需進行申報，預估將有 132 家。在申報頻率方面，則依循我國傳統空氣污染物排放申報頻率，採季上傳、年申報之方式；另考量後續銜接《溫減法》相關溫室氣體管制工作之需求，在申報範疇別的部分則涵蓋範疇 1 及範疇 2，要求申報資料需經第三者查證。

## 5.3 溫室氣體查驗管理制度之比較

綜合上述國際查驗管理制度資訊，有關我國與各國或方案之溫室氣體認證管理、查驗機構及查驗人員管理準則之比較彙整如表 9。

各國或方案認證作業與管理視其法源依據及認證機構而定。我國則於溫減法實施前，採用主管機關以函文委託財團法人全國認證基金會(TAF)協助執行查驗機構資格認可作業，併用主管機關直接認證查驗機構之作法，以資格認可函文規範管理查驗機構及其人員作業。目前環保署已極積著手進行溫減法實施前，以空污法管制

之法源訂定作業，可望未來以法源授權下進行認查驗機構及人員管理作業。

**表 8 我國與各國及區域溫室氣體排放申報制度彙整比較：**

**法源、實施時間與目的**

國家 項目	台灣	美國		歐盟	加拿大	澳洲	英國	中國上海
制度/ 方案名稱	溫室氣體排放量 申報管理辦法	強制溫室氣體 申報方案 Greenhouse Gas Reporting Program (GHGRP)		溫室氣體監測 和申報指引規 定 (MRG 2007)	溫室氣體申報 方案 Greenhouse Gas Emissions Reporting Program (GHGRP)	國家溫室氣體 和能源 申報 方 案 National Greenhouse Gas Emissions and Energy Reporting Program(NGE R)	溫室氣體申報 規則(草案)The draft Greenhouse Gas Emissions (Directors' Reports) Regulation 2013	“十二五”控制 溫室氣體排放 工作方案)以及 (國家發展改革 委辦公廳關於 開展碳排放權 交易試點工作 的通知)
法源依據	空氣污染防治法	清空法 (Clean Air Act)	整 合 搬 款 法 (Cons olidate d Appro priatio ns Act 2008)	EU ETS 指令 (Directive 2003/87/EC)	加拿大環境保 護法 (CEPA 1999)	國家溫室氣體 和能源申報法 (NGER 2007)	氣候變遷法 (the Climate Change Act 2008) 及公司 法 (the Companies Act 2006)	國家“十二五” 規劃綱要
條文依據	第 21 條	s.11 紀 錄、查 驗、監 s.208 資 訊蒐集	H.R.2 764-2 85“建 置申 報規 定”	Article14 建置 完整、一致、 透明且準確溫 室氣體監測和 申報量	s.46“環境資訊 蒐集”	Article 3“溫室 氣體排放資訊 蒐集和掌握”	氣候變遷法： s.85 公司法： s.416(4)&s.129 2(1)申報內容	上海市人民政 府關於本市開 展碳排放交易 試點工作的實 施意見 <sup>7</sup>
實施時間	2013 年	2011 年		2005 年	2004 年	2008 年	2013 年 4 月或 10 月	2013 年
政策目的	產業排放基線資 料之建立	後續氣候變遷 關法規訂定基 礎		總量管制	溫室氣體排放 資訊管理	整合各省排放 量資料，做為 後續總量管制 基礎	擴大溫室氣體 申報對 <sup>[1]</sup>	碳排放交易
申報氣體	京都 6 種 GHG	京都 6 種 GHG <sup>[2]</sup>	CO <sub>2</sub> <sup>[3]</sup>	京都 6 種 GHG	京都 6 種 GHG	京都 6 種 GHG	京都 6 種 GHG	CO <sub>2</sub>
申報層級	廠	廠(facility)	設施 (installation)	廠	廠或企業	企業	廠或企業	

表 8 我國與各國及區域溫室氣體排放申報制度彙整比較：  
法源、實施時間與目的(續)

國家 項目	台灣	美國	歐盟	加拿大	澳洲	英國	中國上海
申報範疇別	範疇一及範疇二	範疇一(固定燃燒源及製程)	範疇一	範疇一	範疇一及二	範疇一、二及 排放強度 (intensity ratio <sup>[5]</sup> )	
申報對象 (門檻)	<p><input type="checkbox"/> 第一批：電力、鋼鐵、水泥、煉油、光電半導體等 6 個特定業別與全廠(場)化石燃料燃燒產生溫室氣體年排放量達 100 萬公噸 CO<sub>2</sub>e 之排放源</p> <p><input type="checkbox"/> 第二批：全廠(場)化石燃料燃燒產生溫室氣體年排放量達 2.5 萬公噸 CO<sub>2</sub>e 之排放源</p>	<p><input type="checkbox"/> 特定業別全數納管(包含發電業、石化、水泥等)，共計 21 類業別</p> <p><input type="checkbox"/> 一定規模之業別(包含玻璃業及鋼鐵業等)，共計 13 類業別，且年排放量達 2.5 萬噸 CO<sub>2</sub>e 以上固定燃燒源</p> <p><input type="checkbox"/> 燃料總額定輸入熱值達 30MMBtu/hr<sup>41</sup>，及排放量達 2.5 萬噸 CO<sub>2</sub>e 以上</p> <p><input type="checkbox"/> 提供燃料之可能排放量達 2.5 萬噸 CO<sub>2</sub>e 以上之供應商</p>	<p><input type="checkbox"/> 工業部門之主要排放源達一定門檻之特定業別與設施(燃燒設施、生鐵或鋼鐵製造、鐵金屬業、水泥熟料旋轉窯、玻璃製造)</p>	<p><input type="checkbox"/> 年直接排放量(不含範疇二)達 5 萬公噸 CO<sub>2</sub>e 以上之排放源</p>	<p><input type="checkbox"/> 排放量達一定門檻之特定業別 -企業年排放量達 2.5 萬噸 CO<sub>2</sub>e 以上或年產能/耗能達 100TJ 以上 -單一排放設施年排放量達 12.5 萬噸 CO<sub>2</sub>e 以上或年產能/耗能達 500TJ 以上(年產能/耗能之門檻值逐年遞減)</p>	<p><input type="checkbox"/> 倫敦證交所主市場(Main Market)掛牌上櫃的公司</p>	<p><input type="checkbox"/> 鋼鐵、石化、化工、有色、電力、建材、紡織、造紙、橡膠、化纖等工業行業，且 2010-2011 年中任何一年二氧化氮排放量達 2 萬噸以上(包括直接排放和間接排放)的重點排放企業</p> <p><input type="checkbox"/> 航空、港口、機場、鐵路、商業、賓館、金融等非工業行業，且 2010 年-2011 年中任何一年二氧化氮排放量達 1 萬噸以上的重點排放企業，應當納入試點範圍。</p> <p><input type="checkbox"/> 2012-2015 年中，二氧化氮年排放量達 1 萬噸以上的其他企業，在試點期間實行碳排放報告制度，為下一階段擴大試點範圍做好準備。</p>

表 8 我國與各國及區域溫室氣體排放申報制度彙整比較：  
法源、實施時間與目的(續)

國家 項目	台灣	美國	歐盟	加拿大	澳洲	英國	中國上海
申報頻率	季上傳及年申報(1/1~12/31)	年申報(1/1~12/31)	年申報(1/1~12/31)	年申報(1/1~12/31)	年申報(7/1~隔年6/30)	年申報(下列公司結算年度 <sup>[6]</sup> ：1/1~12/31、4/1~隔年3/30或10/1~隔年9/30)	2013 年 3 月 15 日前提交企業 2012 年碳排放狀況報告
查驗規定	強制查驗(每年 8 月底前完成查證作業並上傳)	業者自我驗證切結(self-certification)後申報，並由州政府查證	第三者查驗後申報	業者自我驗證切結(self-certification)後申報，環境部審查	第三者稽核(GHG and energy audits)後申報	無(僅由現行財務稽核員審核數據一致性)	第三方查核
預計納管規模	預估納管範疇—燃料燃燒之 80% 以上	工業部門總排放量 80%	全歐盟總排放量 45%	全國總排放量 34%	全國總排放量 70%	至少 1,100 家主要上市公司	上海市參加試點的企業 200 家、報告企業 600 多家

註 1：英國境內現行已有三個溫室氣體相關申報制度：歐盟排放交易機制下要求之 CO<sub>2</sub> 申報、CRC Energy Efficiency 能效碳減量承諾方案之用電 CO<sub>2</sub> 申報、CCA 協議之能源申報。

註 2：除 HFCs、PFCs、N<sub>2</sub>O 額外列管電子製造業之氟氣體(如 NF<sub>3</sub> 等)

註 3：第三期(2013-2020)排放交易機制增加工業 N<sub>2</sub>O 製程排放和鋁業 PFCs 製程排放

註 4：美國申報作業中，門檻所引用之單位「MMBu/hr」係採以 Roman numeral system，“M”是指 10<sup>3</sup>，因易與 International System (SI) 之 mega (M) 混淆，因此採用「 MM」表示 10<sup>6</sup>

註 5：排放強度比(intensity ratio)，係以單位產出或產值為分母

註 6：Guidance on mandatory reporting requirements for quoted companies, Carbon Footprint

註 7：上海市人民政府關於本市開展碳排放交易試點工作的實施意見，  
<http://www.shanghai.gov.cn/shanghai/node2314/node2319/node12344/u26ai32789.html>

資料來源：本研究整理

## 58 我國產業溫室氣體排放申報與運用標準工具做為減量績效認可機制之探討

表 9 我國與國際溫室氣體查驗管理制度彙整比較：認證管理、查驗機構及人員管理

國家/組織	CDM	澳洲	德國	英國	美國	加拿大	中國		日本	韓國	臺灣
方案	CDM	國家溫室氣體和能源申報法(NGER)	德國溫室氣體排放交易方案	英國溫室氣體排放交易方案	VCS、CAR CCX、TCR	抵換專案(Offset Program)	熊貓標準	—	JVETS J-VER	KVER	組織盤查 排放量申報減量專案
認證機構	執行委員會之認證小組(AT)	清淨能源管理單位(Clean Energy Regulator)	德國國家環境認證機構(DAU)	英國皇家認證機構(UKAS)	美國國家標準協會(ANSI)	加拿大標準協會(SCC)	熊貓標準協會之秘書處	中國合格評定國家認可委員會(CNAS)	日本認證協會(JAB)	韓國知識經濟部認證委員會(MKE AC)	財團法人全國認證基金會(TAF)
認證機構屬性	常設單位(方案單位)	常設單位(方案單位)	常設單位(國家機構)	民間機構	民間機構	常設單位(國家機構)	常設單位(國家機構)	常設單位(國家機構)	民間機構(財團法人)	常設單位(方案單位)	民間機構(財團法人)
認證授權方式	—	—	法規授權	委託授權(政府合作協議)	委託授權(方案合作協議)	法規授權	法規授權	法規授權	委託授權(政府直接採認認證結果)	—	委託授權(函文認可)
查驗管理對象	查驗機構	查驗機構 查驗人員	查驗機構 查驗人員	查驗機構	查驗機構	查驗機構	查驗機構	查驗機構	查驗機構	查驗機構	查驗機構 查驗人員
查驗機構認證準則	CDM 標準	ISO14065 ISO 14064-3 NGER 標準	環境查核法(UGA)	ISO/IEC 14065 EN45011	GHG-PL-702 ISO 14065 ISO 14064-3 IAF MD6:2009	ISO 14065 IAF MD6:2009 09 CAN-P-1520	CDM 標準	計畫採行 ISO 14065	JAB GR200 ISO 14065 ISO 14064-3 IAF MD6:2009	ISO14065 ISO14064 CDM 標準 自訂準則	ISO14065 ISO 14064-3 IAF MD6:2009
方案認證準則	CDM 標準	NGER 稽核指引(Audit Determination Handbook)	德國稽核人員指引(Guidelines for Verifiers)	ISO/IEC Guide 65 EN45001 EA-6/01, EA-6/03	ISO 14064-1 ISO 14064-2 ISO 14064-3 各方案自訂規範	ISO 14064-1 ISO 14064-2 ISO 14064-3 ISO 14064-2 ISO 14064-3 ISO 14064-3	ISO 14064-2 ISO 14064-3 ISO 14064-3 ISO 14066:2 011 各方案自訂規範	—	ISO14064-1 ISO14064-2 ISO14064-3 ISO14066:2 011 各方案自訂規範	ISO 14064-2 ISO 14064-3 方案自訂規範	ISO 14064-2 ISO 14064-3 方案自訂規範

資料來源：DEHSt, 2012; ANSI, 2012; American Carbon Registry, 2012; Pacific Carbon Trust, 2012; Voluntary Carbon Standard, 2012; UKAS, CIS 5 : UKAS Guidance for Application of ISO/IEC Guide 65 (EN45011), EA-6/01 and EA-6/03, for verification of greenhouse gas emission for the purpose of the UK's various emissions accounting and trading schemes, 2006.11; JVETS, 2012, 4CJ, 2012; Panda Standard, 2012; SCC, 2012; The Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety, Announcement of the revised Environmental Audit Act (UAG) 4 September 2002 (non-official version, with last changes in 2004), Translation of the German Environmental Audit Act of 16 August 2002 ; Clean Energy Regulator, Audit Determination Handbook, April 2012 ; 本研究整理。

## 六、結語

政策引導產業及早自願減量，是降低產業未來面對強制管制時所遭受衝擊的重要做法，因此，環保署已先將標竿管理工具，納入先期專案中之認定基準中，以鼓勵業者提早減量，而惟隨著溫室氣體管制工具與配套日趨成熟，預期標竿管理工具可進一步做為後續直接管理之用。此外，鑑於《溫減法》尚在立法院審議中，為早日啟動我國溫室氣體減量及管理工作，環保署已參考國際作法將二氧化碳等 6 種溫室氣體公告為空氣污染物，並優先推行強制申報工作，藉以精確掌握溫室氣體排放資料，未來如《溫減法》仍無法通過，環保署將參酌《溫減法》之架構及精神，並引用空污法相關規定，來推動包括：認查驗機構管理、減量及額度管理機制、排放標準訂定及總量管制等工作，以利於國內相關溫室氣體管理工作得以銜接，同時呼應國際趨勢，展現台灣氣候變遷法制內國化之決心與成效。

## 參考資料

- 1.行政院環境保護署，2011。「推動溫室氣體認查驗機構管理與監督機制專案計畫」。委託單位：行政院環境保護署，執行單位：環科顧問公司。
- 2.行政院環境保護署，2012a。「排放彙報及核證制度-〈國家溫室氣體以及能源彙報法〉」，專題報告於氣候變化決策者專題討論會，6月28日，台北市：行政院環保署。
- 3.行政院環境保護署，2012b。「推動我國溫室氣體可量測、可報告即可查驗之管理制度計畫」。委託單位：行政院環境保護署，執行單位：環科顧問公司。
- 4.Carbon Footprint Ltd. 2013, ‘Guidance on mandatory reporting requirements for quoted companies, Carbon Footprint’,  
[http://www.carbonfootprint.com/docs/guidance\\_on\\_mandatory\\_reporting\\_requirements\\_jan\\_13.pdf](http://www.carbonfootprint.com/docs/guidance_on_mandatory_reporting_requirements_jan_13.pdf).
- 5.DEFRA, 2012. ‘Consultation on greenhouse gas emissions reporting draft regulations for quoted companies(2012)’，available at:

## 60 我國產業溫室氣體排放申報與運用標準工具做為減量績效認可機制之探討

- http://www.defra.gov.uk/consult/files/consult-ghg-regulations-document1.pdf.
- 6.DEFRA, 2012. ‘Leading businesses to disclose greenhouse gas emissions’, available at: http://www.defra.gov.uk/news/2012/06/20/greenhouse-gas-reporting/
- 7.DEFRA, 2013. ‘The Greenhouse Gas Emissions (Directors’ Reports) Regulations 2013’,available at :http://www.defra.gov.uk/consult/files/consult-ghg-regulations-20131.pdf.
- 8.House of Representative, 2007. ‘Consolidated Appropriations Act of 2008’, One Hundred Tenth Congress of the United States of America, available at: http://www.gpo.gov/fdsys/pkg/BILLS-110hr2764enr/pdf/BILLS-110hr2764enr.pdf.
- 9.UK House of Parliament 2013, PostNote, no. 428, Jan. 2013,  
http://www.parliament.uk/briefing-papers/POST-PN-428.pdf.
- 10.U.S. EPA, 2010. ‘2010 Data Publication Fact Sheet’, available at:  
http://www.epa.gov/ghgreporting/documents/pdf/2010/2010data-factsheet.pdf.
- 11.U.S. EPA, 2011. ‘PSD and Title V Permitting Guidance for Greenhouse Gases’, available at: http://www.epa.gov/nsr/ghgdocs/ghgpermittingguidance.pdf.
- 12.U.S. EPA, 2012a. ‘Fact Sheet – summary of the tools and background on permitting for GHGs’, available at:  
http://www.epa.gov/nsr/ghgdocs/ghgpermittingtoolsfs.pdf.
- 13.US. EPA, 2012b.’Greenhouse gas reporting program’, available at:  
http://www.epa.gov/ghgreporting/index.html

# 中孔徑矽基吸附材製程放大及二氧化碳 捕獲效率研究

李秀霞\*\*\*、黃志峰\*\*、王厚傳\*\*\*、陳旺\*\*\*\*、徐恆文\*

## 摘要

以噴霧乾燥法(spray-drying process)製備中孔徑矽基吸附材(mesoporous silica particles, 簡稱 MSP)，比傳統的水熱法及凝膠合成法快速，並可大幅降低製造成本。本研究自行設計與建構一套噴霧乾燥實驗模組製備 MSP，產能達 100g/hr。MSP 具有高比面積、均一孔洞等特性，其比表面積可達  $1,000\text{ m}^2/\text{g}$  以上，平均孔徑 2.4nm。其中，以噴霧乾燥塔造粒溫度( $T_1$ )  $200^\circ\text{C}$  及噴嘴壓縮空氣霧化壓力(Pa)  $4\text{kg}/\text{cm}^2$  所製備之 MSP，對  $\text{CO}_2$  有較好的吸附效果，且形成的球體結構完整。

將 MSP 以 N-[3-(trimethoxysilyl)propyl]ethylenediamine (EDA)進行表面改質，在吸附溫度  $60^\circ\text{C}$ 、脫附溫度  $130^\circ\text{C}$  的條件下，持續進行 100 次循環吸脫附實驗後，其吸附指標仍可達 89.98%。以  $15\%\text{CO}_2$  為測試濃度，在 0%含水率下，MSP(EDA)的吸附量可維持  $62.85\text{ mg/g}$ ；當增加 10%含水率時，則 MSP(EDA)的吸附量提升至  $73.15\text{mg/g}$ ；顯見水氣對吸附量的提升有正面的效果。

【關鍵字】噴霧乾燥、中孔徑矽基吸附材、表面改質、 $\text{CO}_2$

\*工業技術研究院綠能與環境研究所 正工程師兼副組長

\*\*工業技術研究院綠能與環境研究所 資深研究員

\*\*\*工業技術研究院綠能與環境研究所 研究員

\*\*\*\*工業技術研究院綠能與環境研究所 副工程師

## 一、前　言

因應全球氣候變遷議題，各國專家學者不斷的開發新技術，以捕獲日益增加的 CO<sub>2</sub> 排放量。其中，以有機醇胺水溶液(如 MEA, DEA, MDEA 等)作為 CO<sub>2</sub> 吸收劑的化學吸收法，為目前較成熟且可行之技術，然而此項技術卻有溶劑容易耗損、設備腐蝕及脫附耗能過高等缺點<sup>[1]</sup>。而利用固體吸附劑吸附 CO<sub>2</sub> 是近年崛起的技術，除了能有效克服以上的缺點，還具有質傳速率快、操作簡單、低能耗等優點。因此，開發新興固體吸附材提升 CO<sub>2</sub> 的吸附效能，是目前被廣為研究開發的課題。

近年來，中孔徑(2-50nm)固體吸附材廣泛的被開發，並應用於 CO<sub>2</sub> 捕捉之研究。文獻中曾使用的中孔洞材質包括氧化鋁(Alumina)、氧化鋯(Zirconia)、二氧化鈦(Titania)、氧化鉭(Tantalum Oxide)、氧化錳(Manganese Oxide)及二氧化矽(Silica)等，其中以矽基(Silica)的孔洞結構最佳，常見的中孔矽基材包括 MCM-41、MCM-48、SBA-15、SBA-16 及 KIT-6 等<sup>[2-10]</sup>。矽基(Silica)中孔徑吸附材具備高度有序的中孔徑孔道、孔隙體積高和均勻的孔隙大小等優勢，成為捕捉 CO<sub>2</sub> 的新興固體吸附劑，且其表面富含高濃度矽烷醇基(Silanol, SiOH)，可藉由表面處理技術(如 N-[3-(trimethoxysilyl)propyl]ethylenediamine, EDA)增加吸附 CO<sub>2</sub> 的反應位置，吸附後之吸附材亦可利用溫和方式進行脫附循環再生使用。由於中孔徑吸附材具備質傳速率快、操作簡單、低能耗及可反覆再生利用等優點，使其具有實廠應用的潛力。

而噴霧乾燥法(spray-drying process)<sup>[11]</sup>為氣膠程序(aerosol process)的一種，此方法比傳統的水熱法及凝膠合成法快速，可大幅降低製造成本，並可連續生產，具有量產潛力。本研究團隊已經證實 MSP 經由表面改質技術，嫁接胺官能基，對 CO<sub>2</sub> 有良好的吸附效果，為提升 MSP 於實廠的應用價值，本研究團隊自行設計建置一套實驗模組級(bench-scale)的噴霧乾燥系統，除探討最佳量產條件外，同時，評估生產製備之 MSP 在改質後對 CO<sub>2</sub> 的捕獲效益，並模擬實廠煙氣中含水率對 MSP 的吸附效能影響，以及測試其反覆吸脫附之再生回復率，期將 MSP 予以商業應用化。

## 二、實驗方法與設備

### 2.1 砂基材的製備方法

#### 1. 製備 MSP 機台設備

工研院自行設計建置 MSP 噴霧乾燥實驗模組(bench scale, 100 g/hr)，係採用噴霧乾燥流程，設備單元包括：送風機、電熱式加熱器、二流體噴嘴、氣膠乾燥塔、產品回收設備(旋風集塵器、袋式集塵器)與引風機等，經 HEPA 處理後之潔淨空氣作為輸送氣體，如圖 1 所示。本研究係探討噴霧乾燥塔的造粒溫度( $T_1$ )和前驅液霧化的噴嘴壓縮空氣壓力( $P_a$ )對 MSP 的特性影響，並藉由物性分析、 $\text{CO}_2$ 吸附效率測試等，調整噴霧氣膠造粒系統的最佳操作條件。MSP 樣品製備條件如表 1 所示。

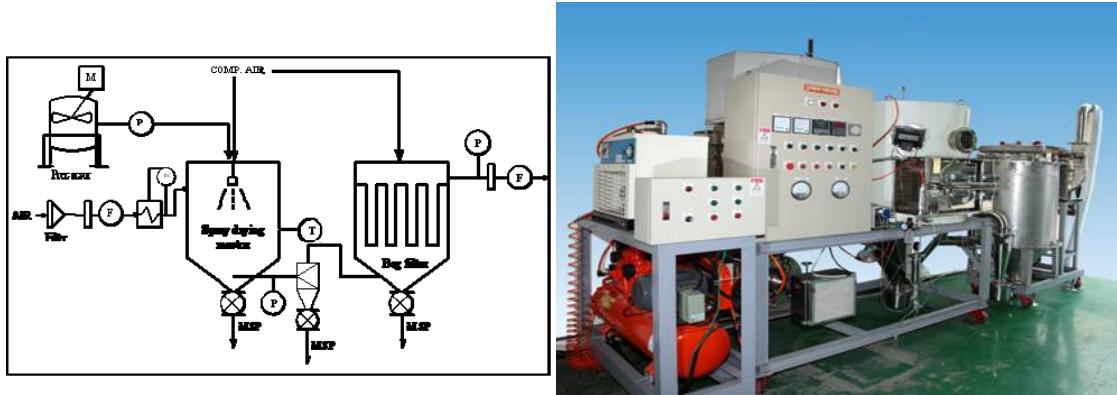


圖 1 MSP 噴霧乾燥流程(左)與實驗模組(右)(Bench scale , 100g/hr)

表 1 MSP 製備條件規劃

參數	噴霧乾燥塔		噴嘴壓縮空氣 壓力 $P_a$ (kg/cm <sup>2</sup> )	配方 進料量(%)
	乾燥溫度 $T_1$ (°C)	壓差 $P_1$ (mmH <sub>2</sub> O)		
條件	150、200、250	-10	5、4、3、2	50

## 2.MSP 配製方法

以四乙氧基矽烷(Tetraethoxysilane, TEOS)為矽源，十六烷基三甲基溴化銨(Cetyltrimethylammonium bromide, CTAB)為界面活性劑，將特定比例之 CTAB/TEOS 於酒精(95%)及去離子水中均勻混合，再將配製好的溶液以二流體噴嘴霧化，於高溫乾燥塔中發生氣膠自我聚集排列(aerosol-assisted self-assembly)，形成的微粒分別由旋風集塵器及袋式集塵器等單元收集，再將收集的 MSP 置於高溫爐中，在 550 °C 高溫下煅燒 4 小時，即可得到最後的成品。

## 2.2 矽基材的特性分析

MSP 之物化特性分析與所使用的儀器包括：(1).比表面積、孔洞體積及孔徑分布：使用 Micromeritics ASAP 2020 volumetric sorption analyzer (Norcross, GA, USA)，於 77K 進行 N<sub>2</sub> 吸/脫附實驗。比表面積使用 BET (Brunauer-Emmett-Teller) 公式量測，孔洞分布則以 BJH (Barrett-Joyner-Halenda)方法計算獲得。(2).吸附劑的孔洞排列：X 射線繞射分析儀(X-ray diffraction, XRD, Mac Science, Co. Ltd, Japan)。(3).表面觀察：掃描式電子顯微鏡(Scanning electron microscope, SEM)。(4).熱穩定性：熱重分析儀(Thermal gravimetric analysis, TGA i1000, Instrument specialists incorporated, Twin Lakes, WI, USA)。

## 2.3 二氧化碳吸附效率測試

### 1.CO<sub>2</sub>吸附實驗設備

CO<sub>2</sub>吸附效率測試實驗裝置如圖 2 所示。係採用 15% CO<sub>2</sub>氣體鋼瓶為測試氣體來源，利用質量控制器(mass flow controller, MFC) (Model 247C, MKS Instrument Inc., Massachusetts, USA)控制鋼瓶輸出的氣體流量，並以轉閥控制氣體先行進入前置管，將測試氣體預熱至所需之測試溫度(60°C)，並將氣體流量控制在約 0.1±0.005 lpm，再將達測試溫度(60°C)之氣體由上而下流經實驗管柱，進行吸附反應，最後將出流口接至 CO<sub>2</sub> 分析儀 (SB-2000 Gas Analyser, Analytical Development Company (ADC), UK)分析出流口之氣體濃度。本研究所使用之吸附管柱是以不鏽鋼製成，為一內徑 1.55 cm 總長 15 cm 的不鏽鋼管柱，管柱內之上下兩端都有不鏽鋼濾板，整個吸附管柱置於可控溫之高溫爐

內，吸附管柱內填充  $3 \pm 0.02$  g 經改質後之吸附材。

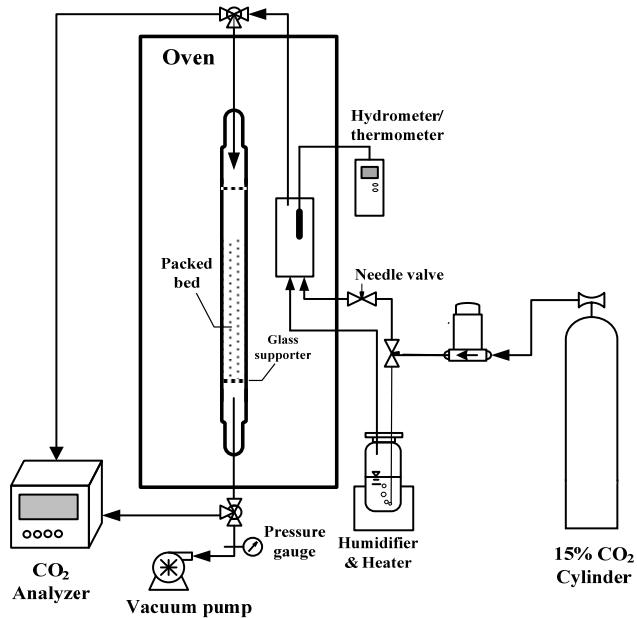


圖 2 CO<sub>2</sub> 吸附實驗流程圖(吸附管柱實驗)

## 2. CO<sub>2</sub> 吸附容量

吸附實驗係以恆溫控制之管柱連續流方式進行，由  $\text{CO}_2$  出流氣體濃度對時間作圖可得 S 型曲線，稱為貫穿曲線(圖 3)。吸附容量計算是利用實驗監測所得進流濃度( $C_{in}$ )與出流濃度( $C_{eff}$ )之差，與氣流流量  $Q$  之乘積，對時間  $t$  進行積分求得，積分計算如式 2.1 所示：

$$q = \frac{1}{m} \int_0^{t_e} Q \cdot (C_{in} - C_{eff}) dt \quad \dots \dots \dots \quad (2.1)$$

式中， $q$ ：平衡吸附量( $\text{mg/g}$ )， $Q$ ：進流氣流流量( $\text{l/min}$ )， $C_{in}$ ：進流氣流濃度( $\text{mg/l}$ )， $C_{eff}$ ：出流氣流濃度( $\text{mg/l}$ )， $m$ ：吸附材填充量( $\text{g}$ )； $t$ ：反應時間( $\text{min}$ )。

於再生循環吸脫附實驗中，為了進一步瞭解吸附材的再生回復率，針對再生後的吸附材吸附量與第一次的吸附量做比較，可得吸附指標(adsorption index, AI)如式 2.2 所示，藉以評估吸附材的再生回復率。

式中,  $q_1$ : 第一次吸附量(mg/g),  $q_n$ : 第 n 次吸附量(mg/g)。

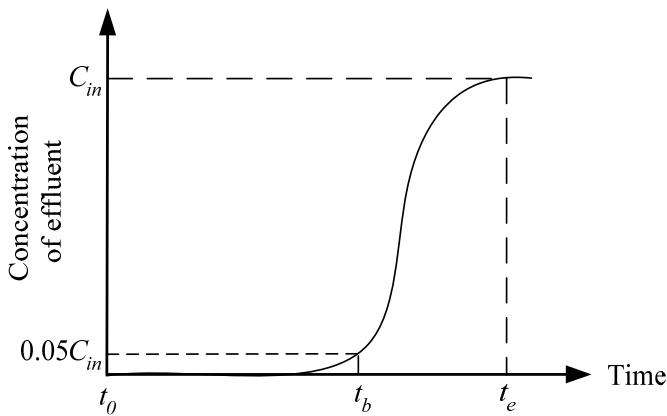


圖 3 貫穿曲線

### 3. 脫附實驗

本研究採用熱/低壓脫附方法進行再生試程之測試。當吸附材達飽和吸附之後，便無法再進行 CO<sub>2</sub> 之吸附，因此必須將吸附材脫附再生使用。而熱/低壓脫附方法是結合加熱與降低壓力兩種方式達到脫附效果，其利用加熱(130 °C)使鍵結不穩定，並在試程中抽真空達 0.145 atm 的低壓狀態下，通入空氣流量  $0.08 \pm 0.0005$  lpm，使被吸附的 CO<sub>2</sub> 與吸附材產生分離，達到脫附之目的。

### 三、結果與討論

### 3.1 矽基材的物理特性分析

#### 1.比表面積與平均孔徑測定(BET)

MSP 之比表面積及平均孔徑如表 2 所示，目前實驗模組系統所生產之中孔徑矽基吸附材之比表面積均可突破  $1,000\text{m}^2/\text{g}$ ，且孔洞大小維持在  $2.4\text{nm}$ 。

圖 4 為 MSP 於 77K 之氮氣等溫吸附曲線，MSP 對於 N<sub>2</sub> 具有較佳的吸附能力，根據 IUPAC 分類<sup>[12]</sup>，此等溫吸附曲線屬於 Type IV 之形式，為中孔性物質(mesoporous)之吸附型態。於相對壓力值(P/Po)低時(0.2~0.3)，氮氣吸附量增加，曲線明顯上升，表示易於第一層吸附，為單層延伸至多層分子吸附，具有雙層吸附。MSP 對氮氣吸脫附量皆維持水平，幾乎重疊，顯示此吸附材孔洞分佈較為均勻。

而不同噴嘴壓縮空氣壓力(P<sub>a</sub>)所製備的 MSP 之比表面積、孔洞大小及氮氣等溫吸脫附曲線均相近，顯見噴嘴壓縮空氣壓力(P<sub>a</sub>)對 MSP 的結構沒有影響，但會影響顆粒的大小，如圖 5 所示，隨著噴嘴霧化壓力的增加，MSP 平均粒徑變小，但當霧化壓力低於 2kg/cm<sup>2</sup> 時，霧化效果不佳，會有白色結晶物凝結在噴嘴周圍，並凝結成水滴，而無法乾燥。而當噴霧乾燥溫度為 150°C 時，亦會於霧化噴嘴周圍發生白色結晶凝結物現象。另外，由表 2 結果顯示，噴霧乾燥溫度(T<sub>1</sub>)分別在 250°C 及 150°C 時，其製備的 MSP 比表面積、孔體積及孔洞大小均略微降低，推測其為降低吸附材對 CO<sub>2</sub> 吸附效能的影響因素，由後續 MSP 對 CO<sub>2</sub> 吸附容量測試結果即可得知。

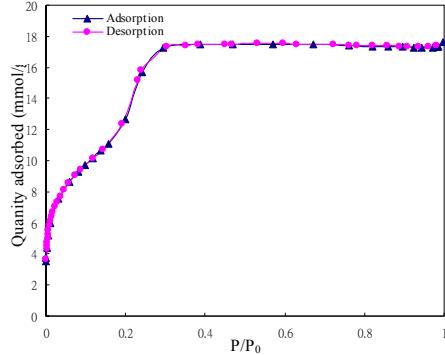
表 2 MSP 之比表面積、孔體積及平均孔徑分析

樣品 編號	溫度 T <sub>1</sub> (°C)	流量 Q <sub>a</sub> (NL/min)	壓力 P <sub>a</sub> (kg/cm <sup>2</sup> )	S <sub>BET</sub> <sup>a</sup> (m <sup>2</sup> /g)	V <sub>P</sub> <sup>b</sup> (cm <sup>3</sup> /g)	d <sub>BJH</sub> <sup>c</sup> (nm)
Sample1	200±0.5	12.7	5	992.7	0.79	2.42
Sample2	200±0.5	11.7	4	1,013.8	0.81	2.43
Sample3	200±0.5	9.7	3	1,027.6	0.80	2.46
Sample4	200±0.5	8.5	2	1,028.5	0.83	2.48
Sample5	250±0.5	12.7	5	919.6	0.35	1.97
Sample6	150±0.5	12.7	5	948.4	0.54	2.06

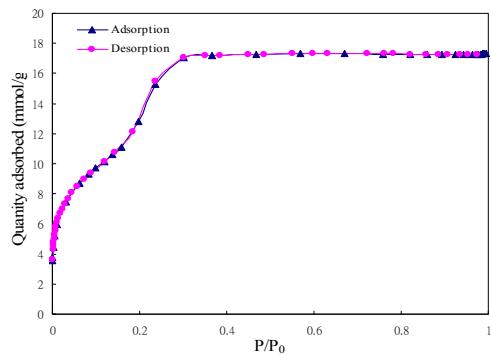
[註] : <sup>a</sup>BET specific surface area. <sup>b</sup>Pore volume. <sup>c</sup>Pore diameter calculated by BJH

## 68 中孔徑矽基吸附材製程放大及二氧化碳捕獲效率研究

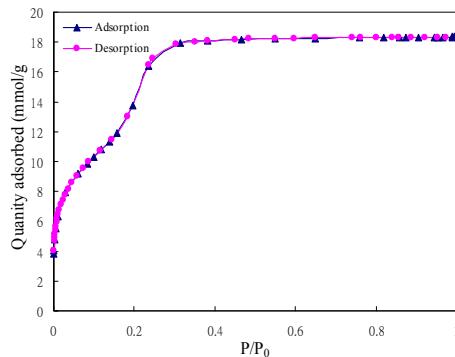
Sample1



Sample2



Sample3



Sample4

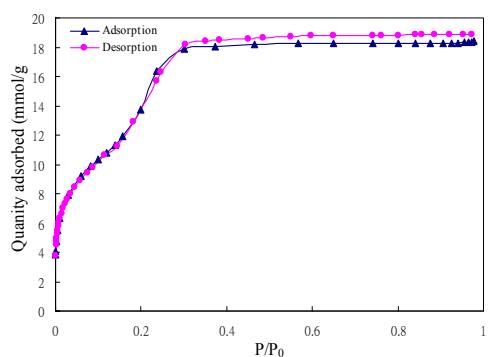


圖 4 MSP 之氮氣等溫吸脫附曲線

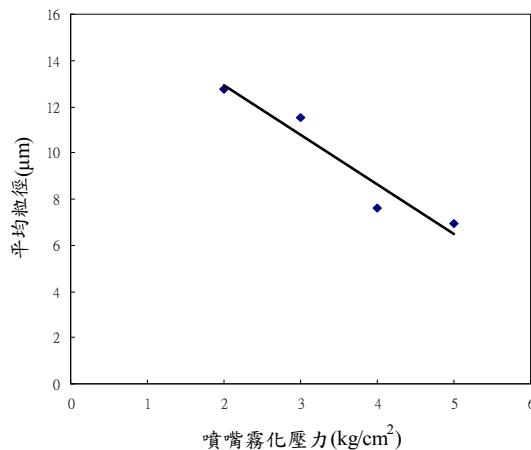


圖 5 噴嘴霧化壓力與 MSP 平均粒徑關係圖

## 2.光繞射分析(XRD)

圖 6 為 MSP 之 X 光繞射分析圖譜，圖譜分析指出 MSP 繞射角在  $2\theta = 2.8 \sim 3.0^\circ$  的位置具有明顯繞射波峰出現，係為(100)方位之光譜，對照文獻，這些特徵波峰代表 MSP 的孔洞呈現具有規則的六角晶型排列，其與 MCM-41 相似<sup>[13-14]</sup>。由圖顯示不同的霧化壓力所製備之 MSP 孔洞排列相同，顯示霧化壓力並不影響孔洞的排列組合。

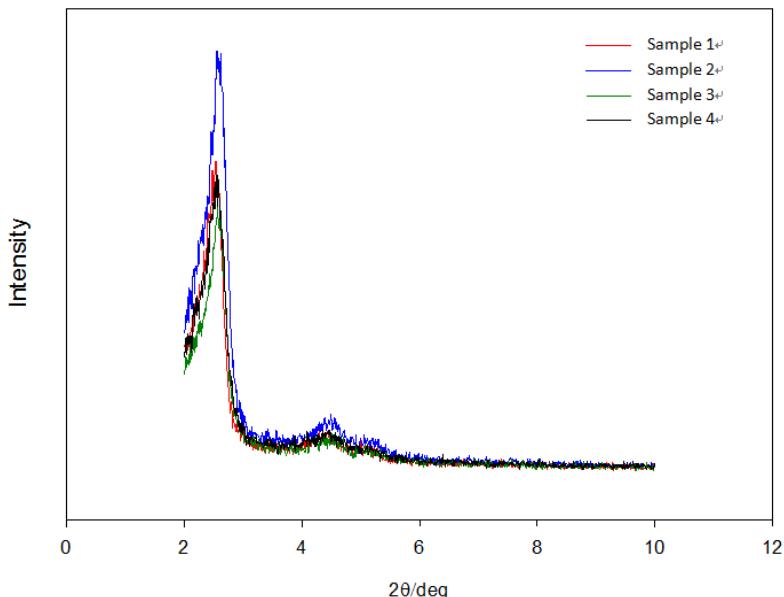


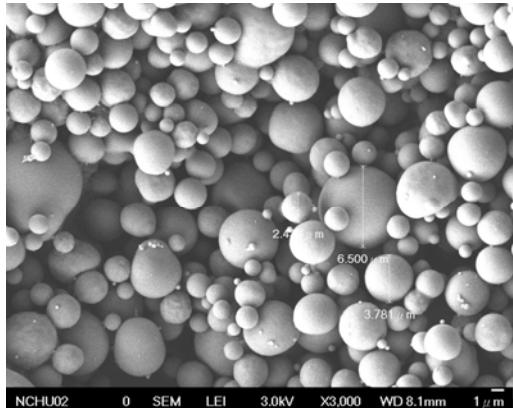
圖 6 MSP 之 XRD 圖譜

## 3.掃描式電子顯微鏡(SEM)

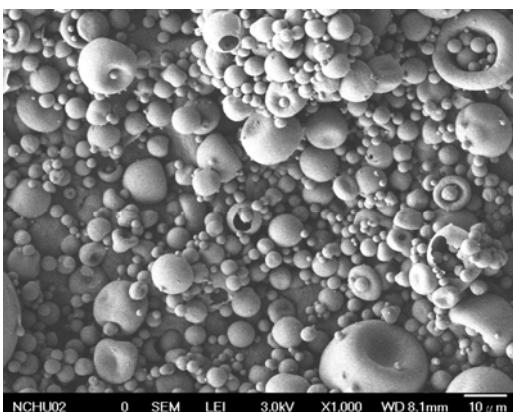
圖 7 為 MSP 之 SEM 表面外觀圖，顯示 MSP 的外觀呈圓球狀。但是當製備條件中的霧化壓力( $P_a$ )低於  $3\text{kg}/\text{cm}^2$ ，或造粒溫度提升至  $250^\circ\text{C}$  時，所製備之 MSP 表面外觀會形成甜甜圈、破裂或不規則的形狀，推測此為降低  $\text{CO}_2$  吸附容量之因素。另外，由於二流體噴嘴是利用壓縮空氣高速流動的原理，使液體變微粒化，故其所霧化的粒徑分佈較廣，使得所製備之 MSP 粒徑分佈也較廣，如圖 8 所示。

## 70 中孔徑矽基吸附材製程放大及二氧化碳捕獲效率研究

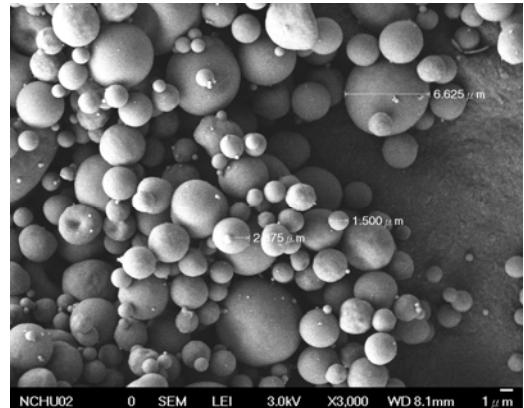
Sample1 ( $T_1=200^\circ\text{C}$ 、 $P_a=5\text{kg}/\text{cm}^2$ )



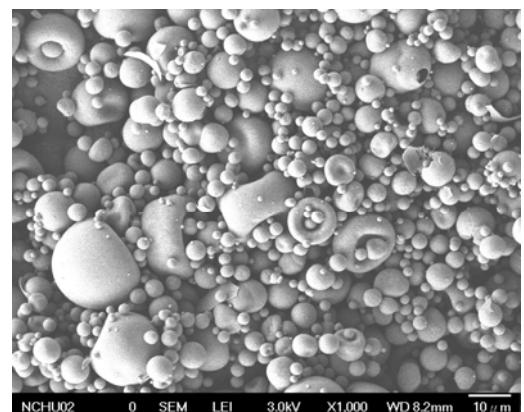
Sample3( $T_1=200^\circ\text{C}$ 、 $P_a=3\text{kg}/\text{cm}^2$ )



Sample2(  $T_1=200^\circ\text{C}$ 、 $P_a=4\text{kg}/\text{cm}^2$ )



Sample4( $T_1=200^\circ\text{C}$ 、 $P_a=2\text{kg}/\text{cm}^2$ )



Sample5(  $T_1=250^\circ\text{C}$ 、 $P_a=5\text{kg}/\text{cm}^2$ )

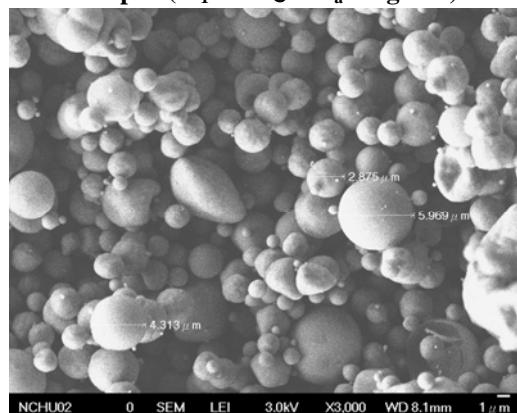


圖 7 MSP 之 SEM 表面外觀圖

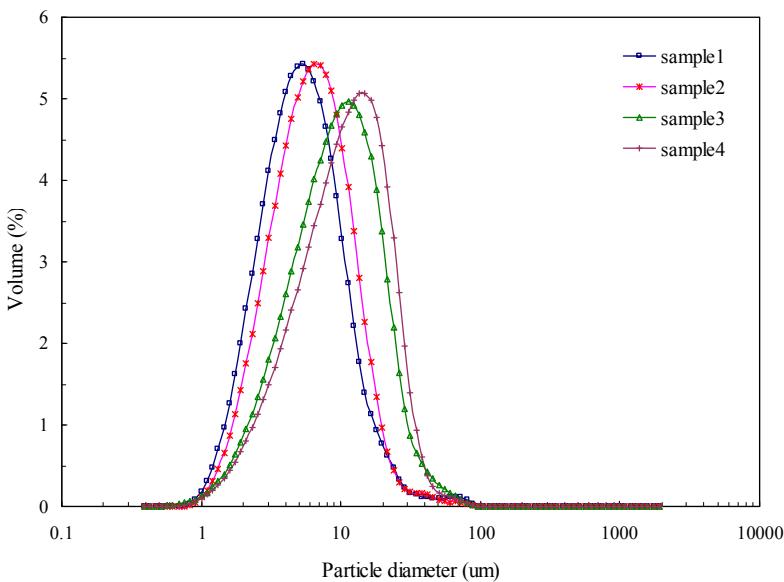


圖 8 MSP 的粒徑分佈圖

#### 4.二氧化碳吸附容量比較

在  $60^{\circ}\text{C}$ 、 $15\%\text{CO}_2$ 、含水率  $0\%$ 的操作條件下，將未改質 MSP 進行  $\text{CO}_2$  的吸附效率測試，結果發現以噴霧乾燥塔造粒溫度( $T_1$ )  $200^{\circ}\text{C}$  及噴嘴壓縮空氣霧化壓力( $\text{Pa}$ )  $4\text{kg}/\text{cm}^2$  所製備之 MSP，有比較好的吸附效果，如表 3 所示，而後續進行循環吸脫附測試之 MSP，即以此條件製備。

表 3 MSP 製備條件及  $\text{CO}_2$  吸附效率

樣品 編號	噴霧乾燥塔		噴嘴壓縮空氣		$\text{CO}_2^*$ 吸附量 ( $\text{mg}/\text{g}$ )
	乾燥溫度 $T_1(\text{ }^{\circ}\text{C})$	出口溫度 $T_2(\text{ }^{\circ}\text{C})$	流量 $Q_a$ ( $\text{NL}/\text{min}$ )	壓力 $P_a$ ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ )	
Sample1	$200 \pm 0.5$	120	12.7	5	2.76
Sample2	$200 \pm 0.5$	120	11.2	4	10.87
Sample3	$200 \pm 0.5$	120	9.7	3	2.65
Sample4	$200 \pm 0.5$	120	8.5	2	4.49
Sample5	$250 \pm 0.5$	151	12.7	5	1.56
Sample6	$150 \pm 0.5$	98	12.7	5	1.58

[註]：“\*\*”測試條件： $T=60^{\circ}\text{C}$ 、 $\text{CO}_2=15\%$ 、含水率= $0\%$ ， $Q=0.1 \pm 0.005 \text{ lpm}$

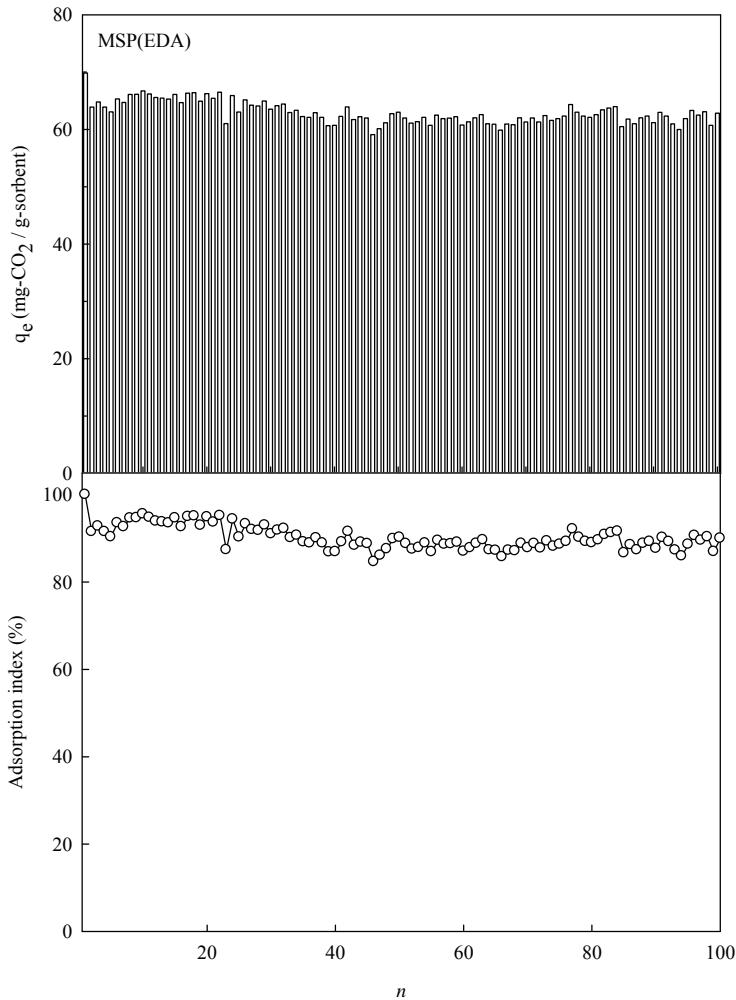
### 3.2 矽基材對 CO<sub>2</sub> 循環吸脫附效率測試

為確認 MSP 對 CO<sub>2</sub> 循環吸脫附的持久性，以及水氣對 MSP 吸附特性的影響，本研究以 EDA 進行 MSP 表面改質，所得樣品以 MSP(EDA)表示。由於電廠的煙道氣中除了 CO<sub>2</sub> 之外，亦含有約 8-10%水氣，依據過去研究文獻指出，水氣對吸附材捕捉 CO<sub>2</sub> 效率造成影響<sup>[15]</sup>；而部分的吸附材在含有水氣之情況下，其 CO<sub>2</sub> 吸附量會有明顯提升，並於循環吸脫附試程中維持高於無水氣系統之 CO<sub>2</sub> 總吸附量<sup>[16]</sup>。因此，本研究分別在乾式(0%含水率)及濕式(10%含水率)環境下，以吸附溫度 60°C 及脫附溫度 130°C 的操作條件，進行對 CO<sub>2</sub> 反覆吸脫附 100 次的吸附效率測試，用以瞭解水氣對 MSP(EDA)吸附效能的影響，以及確認 MSP(EDA)的再生利用率。

#### 3.2.1 乾式(0%含水率)循環吸脫附效率測試

##### 1. MSP(EDA)100 次乾式循環吸脫附試驗

圖 9 為 MSP(EDA)乾式循環吸脫附試驗之吸附量及吸附指標。由圖顯示，在第二次循環測試中，MSP(EDA)吸附量有明顯降低的現象，由最初的 69.85 mg/g 降至 63.91 mg/g，其吸附指標為 91.5%，推測可能為 MSP(EDA)與 CO<sub>2</sub> 產生無法被脫附的化學鍵結所致。而文獻也提到，亦有可能形成 carboxylate/carbamic 物種，而佔據了吸附 CO<sub>2</sub> 的胺基(NH<sub>2</sub>/NH)位置<sup>[17]</sup>，因而再生後的吸附量減少。當循環再生次數為 20 次時，MSP(EDA)之吸附量為 66.27 mg/g，而吸附指標仍可維持 94.87%，之後的循環吸附量趨於穩定，當 MSP(EDA)於此循環熱/低壓脫附條件下，持續進行再生吸脫附達 100 次後，吸附量仍可維持在 62.85 mg/g，其吸附指標為 89.98 %，顯示出 MSP(EDA)於此熱/低壓脫附條件下，仍可保持其捕捉 CO<sub>2</sub> 的能力。



(CO<sub>2</sub>=15%、T<sub>a</sub>=60°C、T<sub>d</sub>=130°C、H<sub>2</sub>O=0%、P<sub>d</sub>=0.145 atm)

**圖 9 MSP(EDA)乾式循環吸脫附之吸附量及吸附指標**

## 2.MSP(EDA)經乾式循環吸脫附前後之 TGA 分析

當 MSP(EDA)經過 100 次乾式循環吸脫附測試之後，利用熱重損失對 MSP(EDA)進行分析，用以了解嫁接於 MSP 表面的胺基是否受吸脫附的操作程序而有所影響。圖 10 為 MSP(EDA)循環吸脫附前後的 TGA 分析圖，由圖中可明顯發現，MSP(EDA)在循環吸脫附前後的熱重損失結果相同。顯見，在經

過 100 次乾式循環吸脫附後的 MSP(EDA)，仍保有一定的吸附效果。整體而言，各吸附材於 600°C 高溫下，重量損失大約為 20%。而在溫度 100°C 內，有第一波較明顯的重量損失，推測其為吸附材內水分蒸散所造成的損失，此損失直到 210°C 仍呈穩定狀態。而在 210°C 至 600°C 間可再發現第二波明顯重量損失，其可能為表面胺官能基的損失所造成。由圖顯示，在經過反覆吸脫附 100 次之後的 MSP(EDA)表面仍保有一定的胺基，故對於 CO<sub>2</sub> 依然保有其捕捉效能。

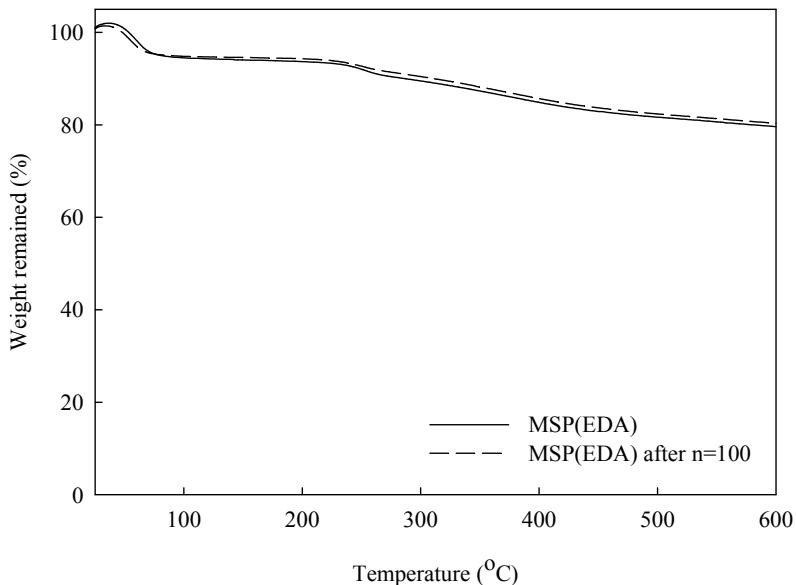


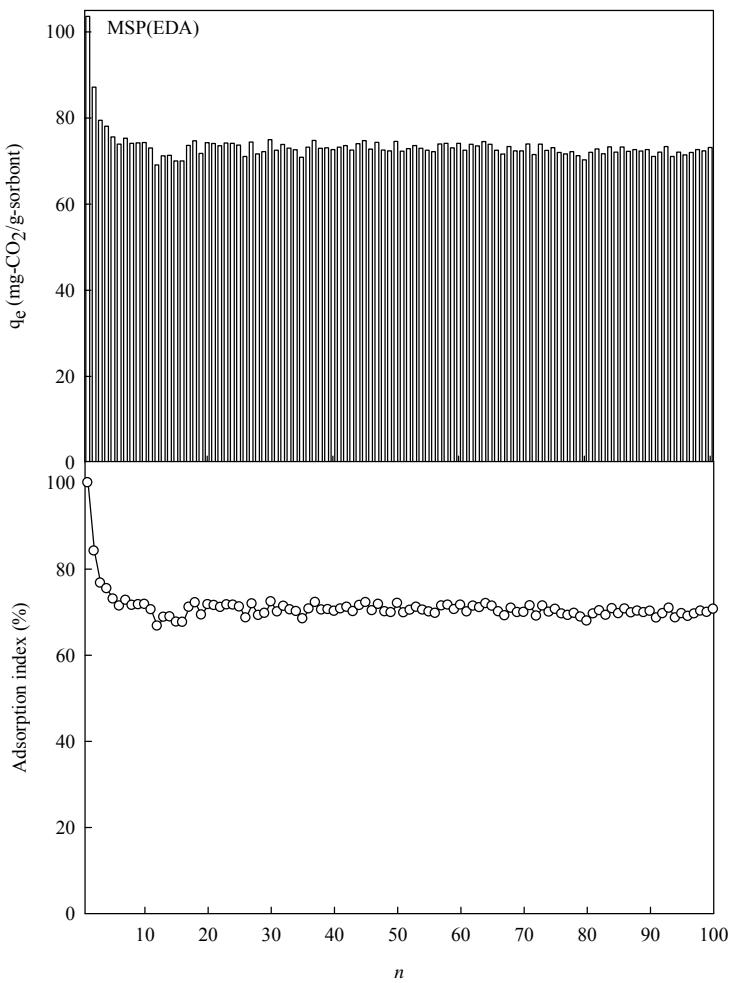
圖 10 MSP(EDA)乾式循環吸脫附前後之 TGA 分析圖

### 3.2.2 濕式(10%含水率)之循環吸脫附效率測試

#### 1. MSP(EDA)100 次濕式循環吸脫附試驗

圖 11 為 MSP(EDA)於 10%含水率環境系統下，進行濕式循環吸脫附再生循環試程測試結果。結果顯示，當進流氣體中增加了 10%水氣後，其吸附量均較乾式系統來的高，尤其是第一次的吸附量可高達 103.61 mg/g，但其吸附量並無穩定維持，當第二次進行吸附時，吸附量下降至 87.16 mg/g，而第三次吸附量更下降至 79.46 mg/g，較第一次吸附量整整少了 24.15 mg/g。此結果顯

示，在含水氣的環境下，可明顯提升 MSP(EDA)對  $\text{CO}_2$  的吸附效率，但水氣的存在，卻導致  $\text{CO}_2$  較不易完全由吸附材中脫附，進而影響吸附材對於  $\text{CO}_2$  之捕捉效率，當再生循環次數達 100 次時，其吸附量可穩定維持於 73.15 mg/g 左右。



( $\text{CO}_2=15\%$ 、 $T_a=60^\circ\text{C}$ 、 $T_d=130^\circ\text{C}$ 、 $\text{H}_2\text{O}=10\%$ 、 $P_d=0.145 \text{ atm}$ )

圖 11 MSP(EDA)濕式循環吸脫附之吸附量及吸附指標

## 2. MSP(EDA)經濕式循環吸脫附前後之 TGA 分析

圖 12 為 MSP(EDA)於 10%含水率環境下，經循環吸脫附 100 次後之熱重損失分析圖，用以了解嫁接於吸附材表面的胺基，是否因水氣的存在而有所影響。由圖中可知，MSP(EDA)經濕式循環吸脫附 100 次後，於不同溫度下之主要損失範圍，可分兩個階段，第一個損失範圍( $<110^{\circ}\text{C}$ )，是由表面水氣及溶劑揮發所致；第二個損失範圍( $210\text{-}600^{\circ}\text{C}$ )中，主要為 EDA 中胺官能基  $\text{NH}_2$  及 C-H 鍵之損失。由圖可知，MSP(EDA)於濕式循環吸脫附前後的 TGA 分析結果無太大的改變，顯示改質劑的胺基仍存在於各吸附材的表面。故於本實驗中，MSP(EDA)對於  $\text{CO}_2$  依然保有其捕捉效能，顯示其材料在循環吸附程序中有良好的穩定性。

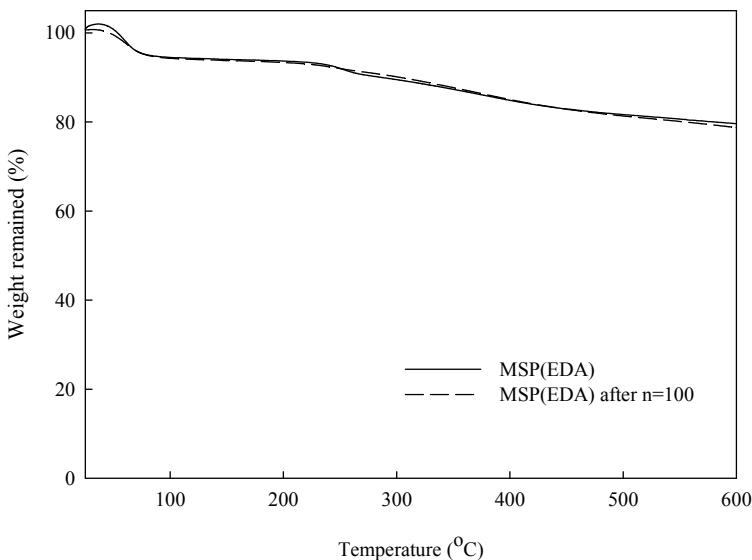


圖 12 MSP(EDA)濕式循環吸脫附前後之 TGA 分析圖

### 3.2.3 有無水氣環境之循環吸脫附效率差異

表 4 為 MSP(EDA)吸附效率測試的操作參數、吸附量及吸附指標。由平衡吸附量( $q_e$ )顯示，相較於乾式循環吸附系統，MSP(EDA)於 10%含水率循環吸脫附系統中有較高的吸附量，平均約多出 11 mg/g 的吸附量，表示水氣對吸附量的提升有正面的效果。

由圖 10 及圖 12 熱重損失分析(TGA)圖顯示，無論是否含有 10%水氣，在經過循環吸脫附 100 次後，MSP(EDA)的熱重損失，於不同溫度下之主要兩個階段損失範圍，並無太大的差異，代表改質劑的胺基應存在於吸附材的表面，且對 CO<sub>2</sub> 仍然保有捕捉效能。

$\text{CO}_2$  吸附容量受含水率影響，主要有兩種可能的反應機制，可說明  $\text{CO}_2$  吸附量隨含水率之增加而提昇，第一種可能為水分子吸附在吸附材表面，同時  $\text{CO}_2$  溶解於表面水分子中。第二種可能為  $\text{CO}_2$  和表面胺基反應形成氨基甲酸酯後，氨基甲酸酯再與  $\text{CO}_2$  和  $\text{H}_2\text{O}$  反應形成重碳酸鹽( $\text{HCO}_3^-$ ) (如式 3.1)，或者是胺基直接與  $\text{CO}_2$  和  $\text{H}_2\text{O}$  反應形成重碳酸鹽( $\text{HCO}_3^-$ )，其反應如式 3.2-3.4 所示<sup>[18]</sup>。

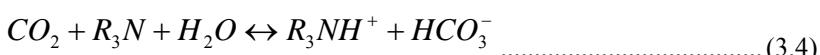
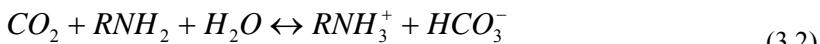
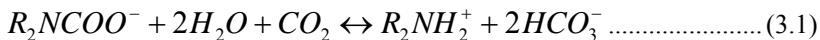


表 4、MSP(EDA)吸脫附效率測試之操作參數、吸附量及吸附指標

	CO <sub>2</sub> (%)	<i>q<sub>e</sub></i> (mg/g)	<i>q<sub>e</sub></i> (100) (mg/g)	AI(100) (%)	<i>T<sub>a</sub></i> (°C)	<i>t<sub>a</sub></i> (min)	<i>T<sub>d</sub></i> (°C)	<i>t<sub>d</sub></i> (min)
MSP(EDA)	15	69.85	62.85	89.98	60	30	130	30
MSP(EDA)@ 10 vol% H <sub>2</sub> O	15	103.61	73.15	79.95	60	30	130	30

### 3.3 建立 MSP 噴霧乾燥實驗模廠(pilot scale , 1kg/hr)

工研院除了設計建造產能 100g/hr 的 MSP 噴霧乾燥實驗模組(bench scale)外，在確認製備所得之 MSP 物性與 CO<sub>2</sub> 吸附容量後，為提升 MSP 的產能及商業應用價值，完成建造規模達 1kg/hr 噴霧乾燥實驗模廠(pilot scale)。因 MSP 噴霧乾燥實驗模組(bench scale, 100 g/hr)的霧化器，係採用二流體噴嘴型式，粉體產品有粒徑分布不均的現象，評估後續將影響造粒效果與 CO<sub>2</sub> 吸附量。因此，將霧化器改採轉盤型式，將使粉體產品的粒徑更為均一。圖 13 為 MSP 噴霧乾燥實驗模廠(pilot scale, 1kg/hr)實體設備圖。



圖 13 MSP 噴霧乾燥實驗模廠(pilot scale , 1kg/hr)

#### 四、結論

本研究自行設計建造的 MSP 噴霧乾燥實驗模組(bench scale , 100g/hr)，已經證實能製備高比表面積( $>1,000\text{ m}^2/\text{g}$ )、孔徑分布窄之中孔徑吸附材。其中，以噴霧乾燥塔造粒溫度( $T_1$ )  $200^\circ\text{C}$  及噴嘴壓縮空氣霧化壓力( $P_a$ )  $4\text{kg}/\text{cm}^2$  所製備之 MSP，對  $\text{CO}_2$  有較好的吸附效果，且形成的球體結構完整。另外，以 EDA 進行 MSP 表面改質，能有效提昇 MSP 對  $\text{CO}_2$  的吸附容量，且經 100 次循環吸脫附實驗後，在乾式操作條件下，MSP(EDA)的吸附量仍可維持  $62.85\text{ mg/g}$ ，吸附指標為  $89.98\%$ ；而在濕式(10%含水率)條件下，MSP(EDA)的吸附量為  $73.15\text{ mg/g}$ ，吸附指標為  $70.6\%$ ；顯見水氣對吸附量的提升有正面的效果。

本研究團隊完成建置產能為  $1\text{kg}/\text{hr}$  的 MSP 噴霧乾燥實驗模廠(pilot scale)，將量產規模由  $100\text{ g}/\text{hr}$  提升到  $1\text{kg}/\text{hr}$ ，期將 MSP 予以商業化。

## 誌謝

感謝經濟部能源局提供經費進行本項研究，同時感謝國立中興大學盧重興教授及交通大學白曉綾教授之指導。

## 參考資料

1. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Special report on carbon dioxide capture and storage. <http://www.ipcc.ch/activity/srccs/index.htm>, 2005.
2. Son, W. J., Choi, J. S., and Ahn, W. S., “Adsorptive removal of carbon dioxide using polyethyleneimine-loaded mesoporous silica materials”, *Micropor. Mesopor. Mater.*, 113, 31-40, 2008.
3. Huang, H. Y. and Yang, R. T., “Amine-grafted MCM-48 and silica xerogel as superior sorbents for acidic gas removal from natural gas”, *Ind. Eng. Chem. Res.*, 42, 2427-2433, 2003.
4. Serna-Guerrero, R., Dana, E, and Sayari, A., “New insight into the interactions of CO<sub>2</sub> with amine-functionalized silica”, *Ing. Eng. Chem. Res.*, 47, 9406-9412, 2008.
5. Hiyoshi, N., Yogo, K., and Yashima, T., “Adsorption characteristics of carbon dioxide on organically functionalized SBA-15”, *Micropor. Mesopor. Mater.*, 84, 357-365, 2005.
6. Hicks, J. C., Drese, J. H., Fauth, D. J., Gary, M. L., Qi, G., and Jones, C. W., “Designing adsorbents for CO<sub>2</sub> capture from flue gas-hyperbranched minosilicas capable of capture CO<sub>2</sub> reversibly”, *J. Am. Chem. Soc.*, 130, 2902-2903, 2008.
7. Franchi, R.S., Harlick, P. J. E. and Sayari, A., “Applications of pore-expanded mesoporous silica. 2. Development of a high-capacity, water-tolerant adsorbent for CO<sub>2</sub>”, *Ind. Eng. Chem. Res.*, 44, 8007-8013, 2005.
8. Yue, M. B., Sun, L. B., Cao, Y., Wang Y., Wang, Z. J., Yu, Q. and Zhu, J. H., “Promoting the CO<sub>2</sub> adsorption in the amine-containing SBA-15 by hydroxyl group”, *Micropor. Mesopor. Mater.*, 114, 74-81, 2008.

## 80 中孔徑矽基吸附材製程放大及二氧化碳捕獲效率研究

- 9.Yue, M. B., Sun, L. B., Cao, Y. C., Wang, Y., Wang, Z. J., and Zhu, J. H., “Efficient CO<sub>2</sub> capture derived from as-synthesized MCM-41 modified with amine” , Chem. Eur. J., 14, 3442-3451, 2008.
- 10.Gary, M. L., Champagne, K. J., Fauth, D., Baltrus, J. P., and Pennline, H., “Performance of immobilized tertiary amine solid sorbents for the capture of carbon dioxide” , Int. J. Greenhouse Gas Control, 2, 3-8, 2008.
- 11.Lu, Y., Fan, H., Stump, A., Ward, T. L., Rieker, T., and Brinker, C. J., “Aerosol-assisted self-assembly of mesostructured spherical nanoparticles” , Nature, 398, 223-226, 1999.
- 12.Gregg, S. J. and Sing, K.S. W., “Adsorption, surface area, and porosity” , Academic Press, 1982.
- 13.Fan, H., Swol, F. V., Lu, Y. and Brinker, C. J. “Multiphased assembly of nanoporous silica particles” Journal of Non-Crystalline Solids” , 285, 71-78, 2001.
- 14.Bore, M. T., Rathod S. B., Ward, T. L. and Datye, A. K. “Hexagonal mesostructure in powders produced by evaporation-induced self-assembly of aerosols from aqueous tetraethoxysilane solutions” , Langmuir, 19, 256-264, 2003.
- 15.Bergen, F. V., Spiers, C., Floor, G. and Bots, P., “Strain development in unconfined coals exposed to CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> and Ar: Effect of moisture” , International Journal of Coal Geology, 77, 43-53, 2009.
- 16.Sayari, A. and Belmabkhout, Y., “Stabilization of Amine-Containing CO<sub>2</sub> Adsorbents: Dramatic Effect of Water Vapor” , Journal of the American Chemical Society, 132, 6312-6314, 2010.
- 17.Tanthana, J. and Chuang, S. S. C., “In situ infrared study of the role of PEG in stabilizing silica-supported amines for CO<sub>2</sub> capture” , ChemSusChem, 3, 957-964, 2010.
- 18.Xu, X. C, Song, C.S., Miller, B.G. and Scaroni, A. W., “Influence of moisture on CO<sub>2</sub> separation from gas mixture by a nanoporous adsorbent based on polyethylenimine -modified molecular sieve MCM-41” , Industrial & Engineering Chemistry Research, 44, 8113-8119, 2005b.

## 廢水處理

# 生物薄膜反應器在工業廢水處理與回收的應用-台灣近十二年來的發展經驗

倪辰華\*、林俊德\*\*

## 摘要

本文介紹生物薄膜反應器(Membrane bioreactor)在台灣工業廢水處理與回收再利用的成功經驗，從 2000 年第一套沉浸式生物薄膜反應器(submerged MBR)的運轉開始，MBR 已經在台灣各工業廢水處理與回用中扮演非常重要角色。已經有超過數十套 MBR 系統在各工業中應用，包含液晶面板、偏光板、晶圓半導體、煉油、化工等製造與工業區廢水處理廠。在液晶面板製造業，結合逆滲透(RO)與高級氧化(AOP)的整合流程，達成了廢水高回收率(大於 88%)的目的，可完全取代自來水並回用於生產製程。另外結合厭氣(anaerobic)生物反應器的整合流程，達成高濃度有機廢液處理排放的嚴格要求，並創造節能與降低委外處理費用的優越經濟效益。

本文同時介紹台灣最大的石化廢水 MBR 系統於高鹽度廢水處理的應用，除了穩定符合廢水排放要求外，MBR 節省了廢水設施設置空間與大量使用藥劑的費用，增進了人員操作的便利性並節省了操作人力。最後介紹近 12 年來 MBR 操作運轉的經驗，說明 MBR 系統操作面臨的主要問題，簡述薄膜壓力上昇、無機積垢、薄膜清洗、生物堵塞控制、薄膜通量設計等問題與解決方法。相信這些成功的經驗，可作為未來產業應用 MBR 技術的重要參考。

【關鍵字】 MBR

\*數字科技顧問有限公司 總經理

\*\*國立交通大學防災與水環境資源研究中心 助理研究員

## 一、前　　言

生物薄膜反應器(Membrane bioreactor; MBR)為整合生物單元與薄膜分離單元的創新技術。技術的特點不僅保留了傳統生物處理單元對廢水中有機物去除之優點，容許於高污泥濃度(MLSS)條件下操作，可承受高污染負荷變化，突破傳統生物系統的瓶頸。同時結合薄膜單元進行絕對有效之固液分離，同時達成高純淨處理水質、回收再利用、節省空間、污泥量減量與自動化操作等優點。除此之外，MBR亦能提昇氨氮之硝化(nitrification)作用，完全截留微生物在處理槽中，提供更好的處理水水質。同時操作於較長的污泥齡(SRT)，可防止低污泥增殖率微生物，如硝化菌因水力沖刷而流失，因此 MBR 在較短之水力停留時間(HRT)下，能提昇硝化作用與複雜有機物之去除效率。

近十年來生物薄膜反應器的快速發展已經成為目前全球最受矚目的水/廢水處理技術之一，並已逐步取代其它技術。MBR 技術應用的範圍廣大，目前已普遍應用於都市污水與各類型工業廢水之處理與回收再利用。本文主要介紹台灣生物薄膜反應器在工業廢水處理與回收再利用的成功經驗。從 2000 年第一套沉浸式 MBR 的運轉開始，生物薄膜反應器已經在台灣各工業廢水處理與回用中扮演非常重要角色。已經有超過數十套 MBR 系統在各工業中應用，包含液晶面板、偏光板、晶圓半導體、煉油、化工等製造與工業區廢水處理廠。

在液晶面板製造業中，結合逆滲透與高級氧化的整合流程，達成了廢水高回收率(大於 88%)的目的，可完全取代自來水並回用於生產製程。結合厭氣生物反應器的整合流程，達成高濃度有機廢液處理排放的嚴格要求，並創造節能與節省委外處理費用的優越經濟效益。本文說明台灣最大的煉油與化工廢水系統的應用，除了穩定符合廢水排放要求外，節省大量使用藥劑的費用與節省操作的人力。最後簡述近 12 年來 MBR 操作運轉的經驗，包含薄膜壓力上昇、無機積垢、薄膜清洗、生物堵塞控制、薄膜通量設計等問題與解決方法。期盼這些成功的經驗，可作為未來產業應用 MBR 技術的重要參考。

## 二、MBR 在工業廢水的應用與發展

1995 年台灣最早的 MBR 系統應用於製藥廢水處理，當時使用的是壓力式管狀 MBR 系統。2000 年第一套生物薄膜反應器(SMBR)開始運轉後，MBR 即陸續在台灣各工業廢水處理與回用中扮演非常重要角色。表 1 為台灣工業廢水處理與回用 MBR 整合系統應用一覽表。

表 1 台灣工業廢水處理與回用 MBR 整合系統實廠應用一覽表

No.	工業類型	處理容量(CMD)	Commissioning Date	應用程序
1	TFT-LCD(3.5G)	1,270	Dec., 2000	MBR + RO for reclamation
2	PDP	800	Jan., 2002	MBR + RO for reclamation
3	Polarizer	600	Mar., 2004	MBR for discharge
4	TFT-LCD(4.5& 5G)	5,000	Apr., 2004	Anaerobic + MBR + RO + AOP's for reclamation
5	Polarizer	600	Apr., 2005	MBR + RO for reclamation
6	Polarizer	200	Apr., 2005	Anaerobic + MBR for discharge
7	TFT-LCD(6G)	11,250(phase I) 11,250(phase 2)	Jun., 2005 Apr., 2007	MBR + RO + AOP's for reclamation
8	TFT-LCD(6G)	1,500	Jun., 2005	Anaerobic + MBR for discharge
9	TFT-LCD(6G)	6,000	Jul., 2005	MBR + RO + AOP's for reclamation
10	Color Filter(6G)	1,600	Aug., 2005	MBR for discharge
11	Petro-chemical	10,000(phase I) 10,000(phase 2)	Oct., 2005 Jun., 2006	MBR for discharge
12	Microelectronics	600	Apr., 2005	MBR + RO for reclamation
13	TFT-LCD(5G)	2,000	Nov., 2007	MBR + RO for reclamation
		2,800	Mar., 2008	MBR + RO for reclamation
		4,00	Mar., 2009	MBR + RO for reclamation

表 1 台灣工業廢水處理與回用 MBR 整合系統實廠應用一覽表(續)

No.	工業類型	處理容量(CMD)	Commissioning Date	應用程序
14	TFT-LCD(6G)	2,000	Jan., 2008	MBR + RO for reclamation
		2,000	Jul., 2009	MBR + RO for reclamation
		2,000	Jan., 2010	MBR + RO for reclamation
		2,600	Sep., 2011	MBR + RO for reclamation
15	TFT-LCD(7.5G)	13,200	Jul., 2009	MBR + RO +AC for reclamation
16	Microelectronics	50	Jul., 2009	MBR for discharge
17	Microelectronics	200	Jul., 2009	MBR for discharge
18	Petro-chemical	5,000	Oct., 2009	MBR for Reclamation
19	Microelectronics	1,200	Dec., 2009	MBR + RO for reclamation
20	TFT-LCD(8.5G)	15,000	Mar., 2011	MBR + RO +AC for reclamation
21	TFT-LCD(4G)	2,500	Dec, 2011	MBR + RO for reclamation
22	TFT-LCD(3.5G)	1,920	May., 2011	MBR + RO for reclamation
23	Industrial Park	3,000	Jun., 2012	MBR for discharge

註 : G : generation of manufacturing

RO : reverse osmosis

AOP's: advanced oxidation processes

## 2.1 技術應用的開發與驗證

1997 年後，隨著台灣液晶面板(Thin Film Transistor-Liquid Crystal Display; TFT-LCD)製造工廠的設立，產生含有大量有機溶劑的廢水，包含顯影劑(Tetramethyl Ammonium Hydroxide (TMAH;  $(CH_3)_4NOH$ )、剝離液(Dimethyl Sulphoxide;  $(CH_3)_2SO$ )、Ethanolamine (MEA;  $C_2H_5ONH_2$ )、清洗溶劑(Isopropyl Alcohol;  $CH_3CHOCH_3$ )等，相關廢水水質特性請參考表 2。此類有機溶劑廢水具有高氮、硫化物等生物抑制與難分解特性，傳統廢水處理不易符合排放法規，所以 MBR，技術開始被進行一系列的功能性評估與測試。1999 年經過國立交通大學長達 1 年的實驗室與模型廠試驗，MBR 技術被驗證是一種具有高效率有機物分解與硝化脫氮能力的技術，同時處理後的水質優良，能回收於製造廠內再利用。

表 2 液晶面板製造有機廢水特性

Item	Stripper	Developer	Rinse	Average value
Component	(CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> SO (DMSO)	(CH <sub>3</sub> ) <sub>4</sub> NOH (TMAH)	CH <sub>3</sub> CHOOCCH <sub>3</sub> (IPA)	----
	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> ONH <sub>2</sub> (MEA)			
pH	9~11	10~13	4~10	10~11
SS (mg/L)	<10	<10	<10	<10
COD (mg/L)	800~2,000	100~600	500~3,700	800~2,000
TKN (mg/L)	70~200	60~90	90~240	100~200
NH <sub>3</sub> -N (mg/L)	0~15	2~15	0.1~10	2
NOx-N (mg/L)	0.1~0.4	0.0~0.3	0.1~1.3	0.2

圖 1 國立交通大學於 1999 建立國內第一套 MBR/RO (0.5 m<sup>3</sup>/day)模型測試機

台灣第一套沉浸式 MBR 系統於 2000 年正式運轉操作，並應用於液晶面板製造的有機廢水處理。該廠處理能力為 1,270 m<sup>3</sup>/day，使用 6 組 Zenon ZW-500a 超濾薄膜，可分別達到 COD(96%)、TOC(97%)、TKN(92%)與 BOD(97%)的去除功能。實廠經過半年的操作後，確認處理水質可穩定的使濁度小於 0.1 NTU 與 SDI 小於 2，可直接再進入逆滲透(RO)系統回用。於 2001 年，一套可達 75% 回收率的 RO 系統被規劃與設立，並回收 MBR 系統的過濾水。RO 系統採用 2 階段設計，平均通量小於 20 L/m<sup>2</sup>/hr，系統具有可選擇的自動循環藥洗(CIP)功能。RO 系統的處理水 TOC 小於 2 mg/L，導電度小於 100 μS/cm，可回收作為冷卻水塔的補充用水。此為台灣的第一套 MBR/RO 系統，並用於工業廢水處理與回收。



圖 2 台灣第一套 MBR/RO (1,270 CMD) 實廠(水回收率達 75%)

## 2.2 高水回收率與高有機濃度廢水處理的技術整合

2001 年後，由於光電產業在台灣快速的發展，大尺寸面板製造廠陸續設立。由於大尺寸面板製造需要非常大量的用水，在政府新建的供水系統來不及建造情況下，新設立的面板廠除了需符合嚴格廢水排放要求外，另需符合 85% 的製程用水回收率的要求。於是尋求一種有效穩定處理並可達廢水高回收率的系統是非常急迫的。由於 MBR 與 RO 的整合技術在 2000 年時已得到實廠的驗證，所以開始被廣泛的應用。

2001~2005 年間，MBR 技術應用的挑戰在於須兼具穩定操作與達成極高的水回收率(85~90%)，以符合快速建廠的目的與政府水回收政策的要求。這對於使用傳統生物二級與回收程序是無法達成的。為了提高水回用的比率，必須將廢水回收於生產製程使用。由於玻璃基板與電晶體製造過程使用大量的用水清洗，回收水必須達成更嚴格的回用水質要求( $TOC < 0.5 \text{ mg/L}$ )，才不會影響電晶體製造的品質。

2004 年開始，MBR、RO 與、AOP 程序開始被整合應用於 4.5&5 代面板製造有機廢水處理。將 MBR/RO 的過濾產水經過臭氧/雙氧水( $O_3/H_2O_2$ )系統，可將  $TOC$  從  $2 \text{ mg/L}$  降解至小於  $1 \text{ mg/L}$ ，處理後水質較自來水質為佳，逐步取代自來水作為製程用水的補水來源。於 2004 年間，一套每日處理  $5,000 \text{ m}^3/\text{d}$  的 MBR

(Zenon ZW-500C, 440 組) 與 RO 系統開始運轉，RO 系統回收率可達 80%以上。該廠 MBR 系統之 COD 進流體積負荷變化大( $0.45\sim1.5 \text{ kg/m}^3$ )，污泥操作濃度為 $8,000\sim10,000\text{mg/l}$ ，污泥停留時間(SRT)為 45 天以上，COD 去除率可穩定達 97%以上，TN 去除率可達 72%以上。污泥增生系數約為 $0.2\text{kg-SS/kg-COD}$ ，廢棄污泥產生量較傳統活性污泥減少 1/2 以上。



圖 3 MBR/RO 處理廠( $5,000 \text{ m}^3/\text{day}$ ,水回收率 80%)

2005 年間，MBR/RO/UV+H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>整合程序被應用於台灣第一座 6 代面板製造廠有機廢水處理與回用(處理流程請參考圖 4)。該廠 MBR 的處理能力為 22,500 CMD，分成 4 列操作，使用 GE ZW-500d 共 1,536 組中空絲超濾薄膜。RO 系統共有 8 套，每套處理能力為每日 $2,820 \text{ m}^3$ ，採用 3 階段設計，平均通量為 $19 \text{ L/m}^2/\text{hr}$ ，水回收率可達 88%以上，總計每日可回收水超過 $20,500 \text{ m}^3$ 以上。RO 設備採用全自動藥洗循環系統，可減少在藥洗過程中因為繁雜的閥件切換所需的人員操作。UV 燈管使用 Aquafine SCD-400，使用超過 4,000 支燈管。進流水 TOC 濃度約 $70\sim150\text{mg/L}$ ，MBR 處理水的 TOC 約 $5\sim10 \text{ mg/L}$ ，最終處理水的 TOC 值小於 $0.5 \text{ mg/L}$ (參考圖 5)，水質非常優良可完全取代自來水源作為製程超純水用水的補水水源。

MBR 的回復清洗(Recovery cleaning)頻率大約 4 個月，RO 的線上藥洗(CIP)頻率大約 1.5~2 個月。藉由完善的操作與管理，MBR 超濾薄膜已經從 2005 年運轉至今。RO 薄膜從 2005 年運轉至今，僅更換約 1/2，平均使用壽命超過 4 年以上。該

廠是目前台灣最大規模的 MBR/RO 廢水處理回收廠，每年節省水費超過 8,000 萬元台幣。由於該廠的成功運轉、優異的節水績效與經濟效益，MBR/RO 的組合流程已成為台灣面板製造廠廢水處理回收的標準處理流程及全球光電廢水回收的最佳可行技術(Best Available Technology)。

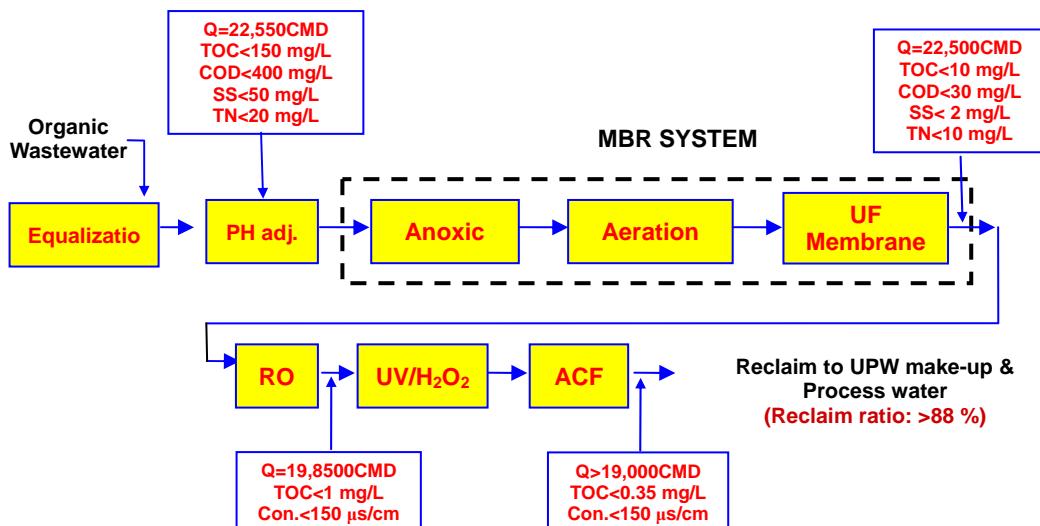


圖 4 六代液晶面板 MBR/RO/AOP 有機廢水處理廠( $22,500\text{ m}^3/\text{day}$ )流程圖

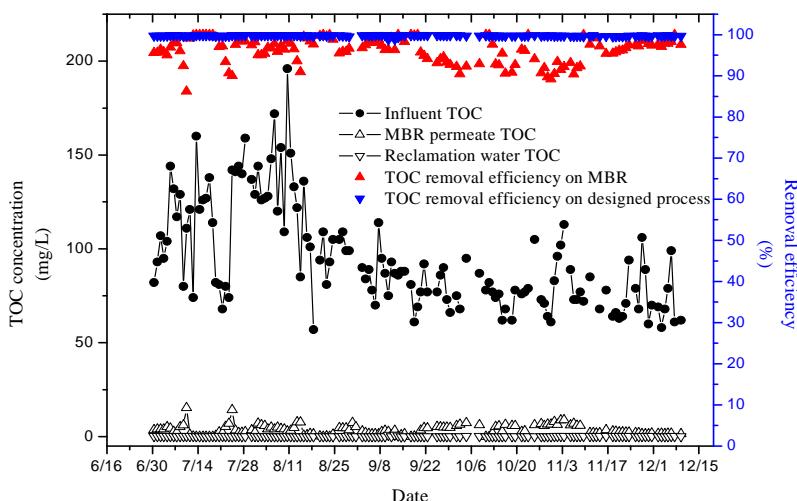


圖 5  $22,500\text{ m}^3/\text{day}$  MBR/RO/AOP 廢水處理回收廠的有機物去除效能



圖 6 台灣最大規模 MBR/RO/AOP 處理廠( $22,500\text{ m}^3/\text{day}$ , 水回收率 88%以上)

除了達成高水回收率的挑戰外，如何將工廠內產生的高濃度顯影、剝離與有機廢液與 RO 系統高回收率產生的高濃度廢水進行妥善的處理亦成為廢水處理的另一個挑戰。於 2006 年間，台灣第一套每日  $1,500\text{ m}^3/\text{d}$  整合厭氣與生物薄膜(Anaerobic / MBR)流程被成功的開發與運轉。利用厭氣處理的較高生物耐毒性、高有機負荷、低污泥產生與低耗能的優點再結合生物薄膜的優點，達成處理高有機濃度廢水，符合廢水排放要求的目的。高濃度進流廢水 COD 達  $5,000\sim10,000\text{ mg/L}$ ，處理後 COD 可小於  $80\text{ mg/l}$ 。除了解決廢水排放問題，同時節省了工廠每日數十噸高濃度廢液委外清除的高額費用，創造極為優越的經濟效益。



圖 7 台灣第一套 UASB/MBR( $1,500\text{ m}^3/\text{day}$ )高濃度有機廢水處理廠

## 2.3 煉油與化工廢水的應用

2006 年台灣第一套也是當時亞洲最大的煉油及化工廢水 MBR 處理廠開始運轉(處理流程請參考圖 8)。該廠處理能力為每日  $20,000\text{m}^3$ ，分為 4 列操作，使用 Zenon ZW-500d 膜組，共 1,536 組。廢水主要來源為 Acrylonitrile (AN), Epichlorohydrin (ECH), Vinylchloride (VCM), Methyl methacrylate (MMA) 製造廢水與石化煉油廢水，其中含有大量的有機成份與化工原料製造過程產生的氯離子。典型的進流廢水水質分別為 COD  $1,000\sim2,000\text{ mg/L}$ 、氯離子  $12,000\sim16,000\text{ mg/L}$  與導電度大於  $35,000\text{ us/cm}$ 。由於廢水中含大量的氯離子，使得傳統活性污泥上浮而無法有效沉降，導致放流水懸浮固體過高，無法符合排放要求，操作者必須在活性污泥池中添加大量的高分子凝集劑，以增進污泥的沉降性，但往往效果有限。而於後續使用砂過濾處理，卻又常常造成砂層堵塞無法有效清理的困擾。增設 MBR 系統後，處理的放流水可穩定保持在  $80\text{ mg/L}$  以下(參考圖 10)，懸浮固體也能保持於  $20\text{ mg/L}$  以下。除了穩定符合廢水排放要求外，毋需添加高分子凝集劑與砂過濾操作，大量節省使用藥劑的費用。MBR 也節省了廢水設施設置空間，增進了人員操作的便利性與節省操作人力。雖然石化廢水的組成較為複雜，但是藉由完善的操作與管理，MBR 超濾薄膜從 2006 年運轉至 2012 年，使用壽命超過 6 年。

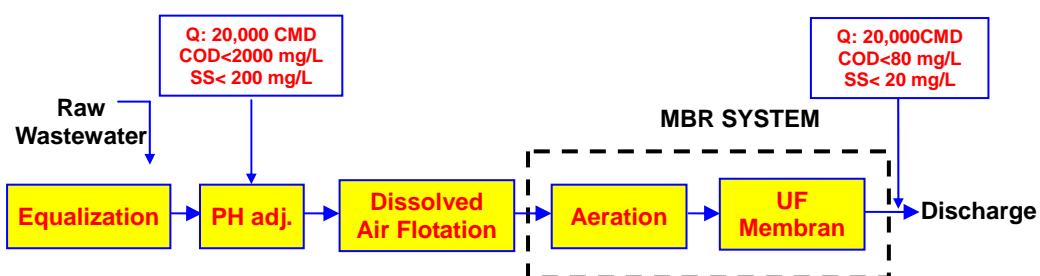
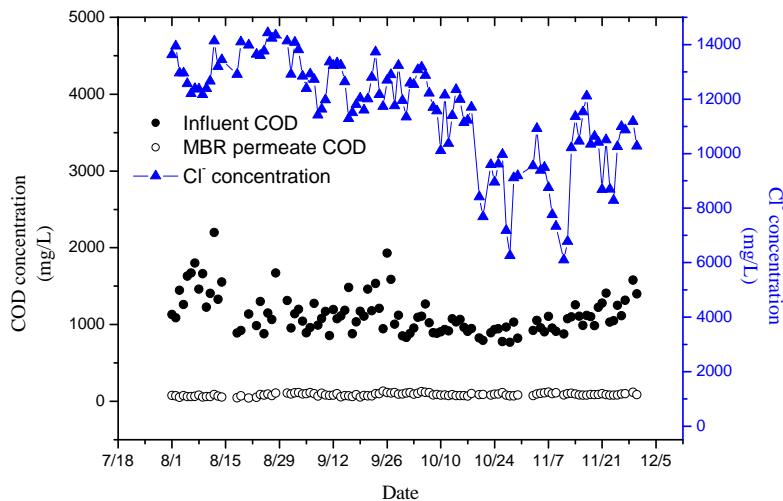


圖 8 台灣第一套煉油及化工業廢水 MBR 處理廠( $22,500\text{ m}^3/\text{day}$ )流程圖

圖 9 台灣最大煉油及化工業廢水 MBR 處理廠(22,500 m<sup>3</sup>/day)圖 10 20,000 m<sup>3</sup>/day 煉油及化工業廢水處理廠的有機物去除效能

### 三、MBR 操作問題與解決方法

目前 MBR 系統運轉最重要的是要建立一能達成長期穩定操作的管理方法。對於廢水中可能直接或間接造成薄膜積垢或堵塞的潛在物質應予以瞭解，並採取適當的清洗或管理措施。以下就針對 MBR 系統常見的異常狀況與建議作一討論。

#### 3.1 薄膜透膜壓力的上昇

薄膜透膜壓力的上昇是 MBR 操作最常發生的問題。一般而言，薄膜透膜壓

力上昇代表著薄膜正面臨著積垢(Scaling)或生物堵塞(Fouling)的問題。由於往往工業廢水成份複雜，且含有許多直接或間接造成薄膜積垢或堵塞的潛在物質。例如，廢水中因添加氯化鐵而產生鐵離子。僅管只含有數個 mg/L 的鐵離子，經過兩個星期的運轉，鐵離子因曝氣產生的鐵氧化物會包覆在薄膜表面，形成橘紅色的積垢，造成透膜壓力由 20kpa 上昇至 50kpa，以一般檸檬酸無法有效洗淨。經採取薄膜於實驗室分析與測試後，最後使用特殊複合配方浸泡 12 小時之藥洗程序，薄膜表面才回復為正常白色(請參考圖 11)。經過掃描式電子顯微鏡(Scanning Electron Microscope, SEM) 與 X 光射線能量散佈分析儀(Energy Dispersive X-ray Spectrometer, EDS)進行元素分析，確定薄膜表面的無機性元素包含鐵、矽、鋁等可有效去除，實際操作薄膜透膜壓力及膜通量也回復了正常。

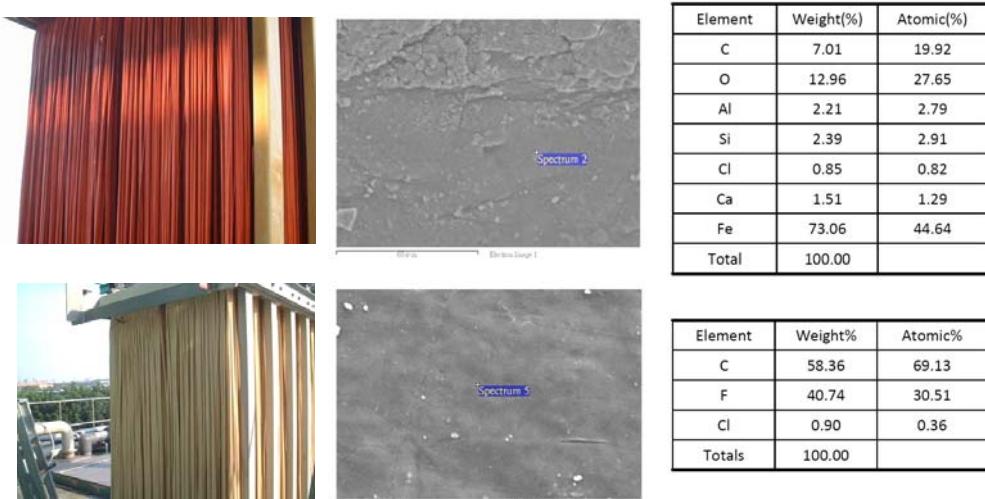


圖 11 堵塞薄膜藥洗前後與經掃描式電子顯微鏡(SEM) 與 X 光射線能量散佈(EDS)進行元素分析比較圖。(上) 薄膜表面因鐵化合物沈積呈現橘紅色積垢。(下) 薄膜經藥洗後，表面回復正常白色。

如果廢水中排放對生物產生毒性的物質，微生物會發生異常並產生胞外聚合物。若無進行適當控制，微生物持續惡化會使得生物池內胞外聚合物不斷增加，當累積至一定濃度後，會使的薄膜透膜壓力在很短的時間(1~2 天)內快速增加而達到藥洗需求。由於整個池內已經充滿了高黏性的生物胞外聚合物，立刻進行藥洗

是無法解決薄膜生物堵塞的問題。有經驗的操作者可藉由過濾(Filtration)與逆洗(Backpulse)的透水率(Permeability)差異，輔以污泥過濾性測試(TTF)，確認此薄膜透膜壓力的上升是由不正常生物操作所造成。儘速查出生物異常操作的主要原因並予調整，同時輔以生物營養物質的添加(如葡萄糖)，快速恢復微生物正常操作，才能有效的降低薄膜操作壓力。

正確的分析出薄膜堵塞的原因是 MBR 操作管理很重要的一部分。如果錯誤的判斷會讓操作者不斷地進行無效的藥洗，太過頻繁的藥洗會造成薄膜的損壞與壽命減少，增加藥劑費用並浪費了時間與人力。工業廢水的 MBR 系統應該具有液位、流量、壓力、水質等線上偵測設施，並且隨時監控薄膜透水率(Permeability)的變化，以掌握薄膜的現況，並適當採取緊急應變措施。

### 3.2 適當的薄膜通量的設計

針對 MBR 應用於工業廢水的設計與都市污水處理有極大的不同，主要的原因是兩者廢(污)水的流量與水質特性差異很大。一般而言，工業廢水的生物毒性成份常常會造成生物異常與胞外聚合物的產生。同時工廠因為多為 24 小時連續生產，所以工業廢水處理設備必需不間斷地處理所產生的廢水。對於長期連續不間斷運轉的薄膜而言，長期處在壓力負荷的情況下，減少了鬆弛(Relax)的機會。若薄膜通量太高，將導至較高的透膜壓力(TMP)，增加藥洗頻率，減少薄膜的壽命。建議於 MBR 於工業之應用，操作通量應不大於該薄膜臨界通量(Critical flux)的 60%，一般中空絲膜平均通量應設計於 20LMH 以下。

### 3.3 MBR 薄膜或管線洩漏對逆滲透薄膜系統的衝擊

沈浸式薄膜可能因自身材料老化或被水中異物割傷而產生破損。沈浸式薄膜與抽水及鼓風管組有許多接口，通常使用快速接頭或法藍銜接。長期的操作也可能因材質老化或鏽蝕而產生洩漏。薄膜或管線洩漏均會造成池內生物污泥於過濾液中流出。僅管是輕微的洩漏，處理水中懸浮固體(SS)濃度低於 2 mg/L，遠小於放流水標準，但是污泥指標指數值(SDI<sub>15</sub>)已過高無法測得。若以 MBR 處理水作為逆滲透系統之飼水，將造成 RO 前段保安過濾器快速阻塞。保安過濾器濾心更換頻率大增（由原來的 30~45 天降低為 2~3 天需更換一次濾心），逆滲透藥洗頻

率增加（由原來的 45~60 天降低為 14~30 天藥洗一次），不僅影響逆滲透系統的操作穩定性與薄膜壽命，更大幅增加逆滲透系統之操作運轉成本。建議廢水於進入 MBR 系統前應設置過濾器(小於 2mm)以防止異物進入。如果欲進入逆滲透處理回收，仍應設置保安過濾器保護。MBR 處理水應設置線上濁度計偵測以監控 MBR 系統的洩漏。

#### 四、結論

在放流水法令趨向嚴格及水資源需求日漸增加的環境下，MBR 能提供優越品質的放流水水質並增加水回收再利用的優越經濟效益。台灣在過去十餘年來應用生物薄膜反應器於工業廢水處理已經累積了許多成功案例與操作經驗，相信這些成功與重要的經驗，可作為未來產業應用 MBR 技術的重要參考。

#### 參考資料

- 1.C. H. Ni, Justin C.-T. Lin, Industrial Wastewater Reclamation for Sustainable Development – Integration of Membrane Bio-reactor Process, Applied Mechanics and Materials Vols. 260-261, pp 715-720., 2013.
- 2.Ni, F., Lin, J. C.-T., Fouling and Cleaning of Membrane Bioreactor in Petrochemical Industry Wastewater, IWA conference, 6<sup>th</sup> Specialist Conference on Membrane Technology, 3<sup>rd</sup> -7<sup>th</sup> October 2011, Aachen, Germany
- 3.C.H. Ni, C.H. Chen, H.C. Chen, and Y.C. Lin , Development of MBR Technology in Industrial Wastewater Treatment and Reclamation in Taiwan- with Case Studies,The 4th IWA International Membranes Conference Membranes for Water and Wastewater Treatment ,15<sup>th</sup> -17<sup>th</sup> May, Harrogate, UK., 2007.
- 4.T. K. Chen, C. H. Ni, Y. C. Chan and M.C. Lu , MBR/RO/Ozone Processes for TFT-LCD Industrial Wastewater Treatment and Recycling, Water Sci. & Tech.,

- 51(6-7), pp411 -419., 2005.
- 5.T.K.Chen, J.N.Chen, C.H.Ni, G.T.Lin and C.Y.Chang, Application of membrane bioreactor system for opto-electronic industrial wastewater treatment - A pilot study, Water Sci. & Tech., 48(8), 195-202., 2003.
- 6.T.K.Chen, C.H.Ni, J.N.Chen and J.Lin, High-Strength Nitrogen Removal of Opto-Electronic Industrial Wastewater in Membrane Bioreactor –A Pilot Study, Water Sci. & Tech., 48(1), 191-198., 2003.
- 7.P. Cote , H. Buisson. and M. Praderie ,Immersed membranes activated sludge process applied to the Treatment of the municipal wastewater. Water Sci. Technol.,38(4-5), 437-442., 1998.
- 8.S.Nakatsuka, I.Nakate and T.Miyano, Drinking water treatment by using ultrafiltration hollow fiber membrane, Desalination, 106 ,51-61., 2001.
- 9.S.Judd and C.Judd, The MBR book: principles and applications of membrane bioreactors for water and wastewater treatment, Oxford, Elsevier., 2006.
- 10.倪振鴻、陳治欣、陳重男、陳廷光，沉浸式生物薄膜技術於光電業廢水處理與回收之應用。環保月刊，第二卷第 8 期，pp87~92，2008。
- 11.倪振鴻、陳廷光、陳治欣、陳重男，國內首座沈浸式生物薄膜程序廠處理 TFT-LCD 有機廢水回收再利用之長期操作經驗，2003 產業環保工程實務技術研討會論文集，台北，11. 27，2003。
- 12.陳廷光、倪振鴻、陳重男，生物薄膜與逆滲透程序應用於 TFT-LCD 製程廢水處理與回收再利用，工業污染防治季刊，第 89 期，pp 125~141，2004。
- 13.游惠宋、周珊瑚、張盛欽、彭淑惠、倪振鴻、張岳永、吳政和，厭氧-好氧薄膜處理技術應用於偏光版製程廢水案例研究，產業環保工程實務技術論文集，p314-324，2004。
- 14.游惠宋，薄膜生物處理技術於廢水處理之應用，中工高雄會刊，第 17 卷，第 2 期，pp 62~68。



## 廢棄物資源化

# 電漿熔融焚化爐灰渣副產物製作功能性 陶瓷之研究

楊昇府\*、陳慶庭\*、莊誌銘\*、張鈞量\*、蔡俊煌\*、莊謝宗揚\*、黃振興\*

## 摘要

核能研究所運用高溫電漿熔融技術，處理都市垃圾焚化爐灰渣，其高溫熔漿經水淬冷卻而產生水淬熔岩，為電漿熔融處理都市垃圾焚化爐灰渣的副產物。由於水淬熔岩對於環境無害，為增加資源循環再利用，減少天然資源開採對環境造成衝擊與碳排放，因此早期研究將之作為替代原物料，開發可應用於建材上的資源化產品及材料。為了更進一步提升水淬熔岩的經濟價值，減少電漿熔融處理廢棄物成本，本研究以水淬熔岩為原料來製作功能性陶瓷，應用於陶瓷散熱片。實驗中分別將水淬熔岩與碳化矽和氧化鋁均勻混合並加入適當黏結劑後，使用壓力成型機加壓成型，再分別以 1,100°C 和 1,200°C 高溫燒結得到陶瓷散熱片。藉由不同比例的水淬熔岩添加量，探討功能性陶瓷材料的物理性質、機械強度、電性與熱性，以評估水淬熔岩適當添加比例和可能應用範疇。

【關鍵字】電漿熔融、焚化爐灰渣、水淬熔岩、功能性陶瓷

\*行政院原子能委員會核能研究所 研究員

## 一、前　言

近年來，由於台灣生活水準提高，消費型態的改變，伴隨產生的都市垃圾亦日益遽增。目前，都市垃圾處理方式係以焚化處理為主，依據環保署的統計，在民國 100 年，全國共有 24 座大型焚化爐運轉，平均每年產生約 130 萬公噸之焚化爐灰渣，其中包括約 1 百萬公噸底灰與 30 萬公噸飛灰。因此，都市垃圾焚化處理雖具有減量化的優點，但是其後卻仍有大量焚化爐灰渣需待解決。

核能研究所運用電漿玻璃化技術來處理都市垃圾焚化爐灰渣，焚化爐灰渣經高溫熔融後，液態熔漿再由水淬槽冷卻而產生水淬熔岩。水淬熔岩為一玻璃化之物質，其主要成份為  $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$  系之無機成份所組成，由於其對於環境無害，近年來，本研究團隊根據水淬熔岩的特性，將之充分利用而開發為透水磚<sup>[1]</sup>、道路級配<sup>[2]</sup>、瀝青混凝土<sup>[3]</sup>、熔岩纖維<sup>[4-5]</sup>、纖維水泥增強材料<sup>[5-6]</sup>和多孔性材料<sup>[7]</sup>等應用研究，以達到廢棄物資源再利用之目的，並同時解決廢棄物處置的問題。為提昇水淬熔岩應用深度與廣度，本文呈現最近核能研究所再以水淬熔岩為原料，分別添加碳化矽( $\text{SiC}$ )與氧化鋁( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )來製造功能性陶瓷，應用於陶瓷散熱片的研究。

隨著科技的迅速發展，電子產品之尺寸變得越來越小，這也使得電子產品運作時所需的散熱系統更趨重要。傳統金屬鰭式散熱單元由於體積較大，相對於小尺寸或輕薄短小的電子產品，此種鰭式散熱方式已不能符合需求，因此導致散熱片必須朝向體積小和性能佳的趨勢。而陶瓷散熱片主要應用範疇為電腦主機板北橋晶片或南橋晶片、數位電視盒(機上盒或 MOD)、發光二極體(LED)燈座及 SKYPE 網路電話等。

由於水淬熔岩具有資源化而製作成陶瓷散熱片之潛力，乃選擇水淬熔岩為原料，經添加不同比例的碳化矽與氧化鋁，再探討其製作功能性陶瓷，應用於陶瓷散熱片之可行性，在實驗過程中。各種配方燒結後之試體，均量測其物理、化學、熱和電等特性，以評估水淬熔岩適當添加比例和可能應用範疇<sup>[8-13]</sup>。

## 二、陶瓷散熱片研製之實驗方法

實驗使用之水淬熔岩，係選取台灣北部某都市垃圾焚化爐灰渣，利用核能研究所實驗型電漿熔融爐，將之電漿熔融後再經水淬而成之副產物。水淬熔岩主要化學組成如表 1 所示，主要成份由  $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$  之無機成份所構成。另外，焚化爐灰渣水淬熔岩毒性特性溶出程序(TCLP)之有毒重金屬檢測結果，如表 2 所示。

陶瓷散熱片之研製之實驗步驟如圖 1 所示，簡述如下：

1. 水淬熔岩以球磨機研磨 5 分鐘後之粒徑分佈  $d_{10}$  為  $16 \mu\text{m}$ 、 $d_{50}$  為  $51 \mu\text{m}$ 、 $d_{90}$  為  $104 \mu\text{m}$ ，平均粒徑有明顯降低，研磨 10 分鐘後之粒徑分佈  $d_{10}$  為  $7.1 \mu\text{m}$ 、 $d_{50}$  約為  $32.5 \mu\text{m}$ 、 $d_{90}$  約為  $75.2 \mu\text{m}$ ，如圖 2 所示。球磨 10 分鐘後的水淬熔岩粉末可和配合原料(氧化鋁和碳化矽)試調製成穩定之陶瓷漿料，以利後續試體成型。
2. 氧化鋁粉末之粒徑分佈經分析後，可得  $d_{10}$  為  $1.8 \mu\text{m}$ 、 $d_{50}$  為  $5.6 \mu\text{m}$ 、 $d_{90}$  為  $23.2 \mu\text{m}$ ，如圖 3 所示；碳化矽粉末之粒徑分佈  $d_{10}$  為  $7.4 \mu\text{m}$ 、 $d_{50}$  為  $27.1 \mu\text{m}$ 、 $d_{90}$  為  $58.5 \mu\text{m}$ ，如圖 4 所示。
3. 將水淬熔岩以 20wt%、30wt%、40wt%、50wt% 的比例與碳化矽或氧化鋁粉末均勻混合。
4. 添加黏結劑混合後，經加壓成型。
5. 碳化矽複合陶瓷以  $1,100^\circ\text{C}$  進行燒結，而氧化鋁複合陶瓷以  $1,200^\circ\text{C}$  進行燒結。
6. 燒結後陶瓷試體作性質測試(物理性質、電性、熱性質)。

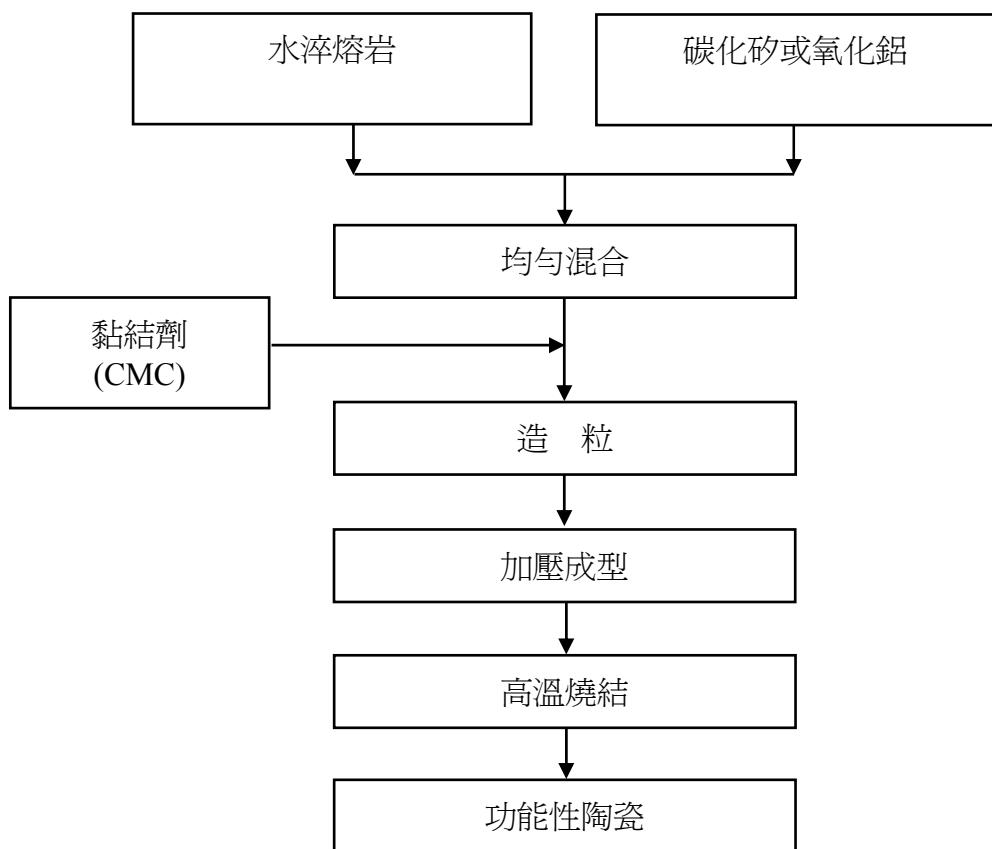


圖 1 功能性陶瓷之實驗流程圖

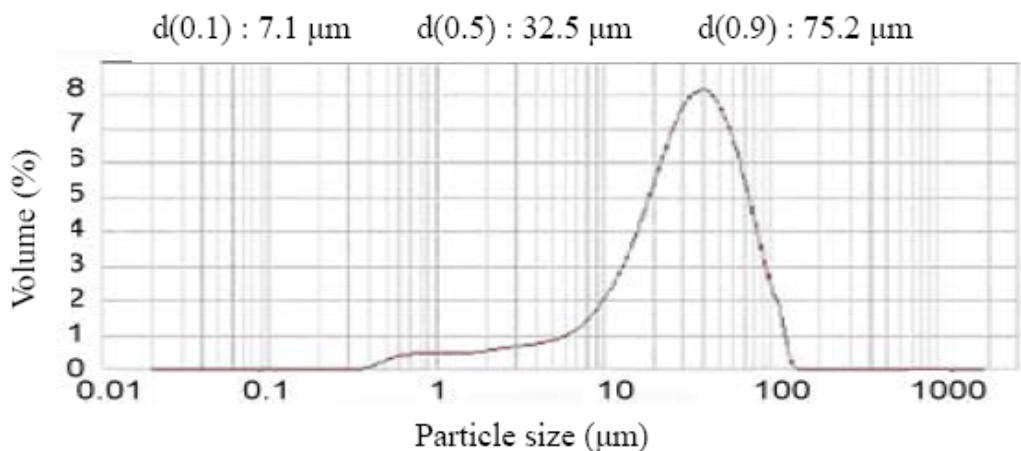


圖 2 水淬熔岩經球磨 10 分鐘後之粒徑分佈

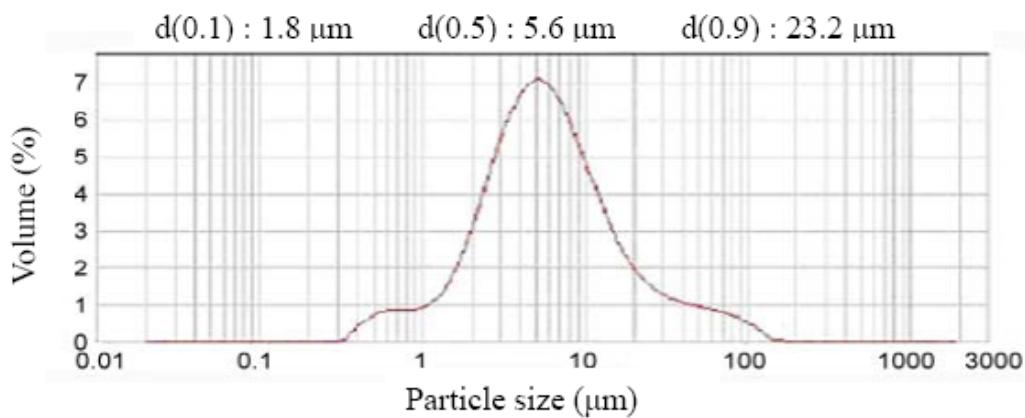


圖 3 氧化鋁粉末之粒徑分佈

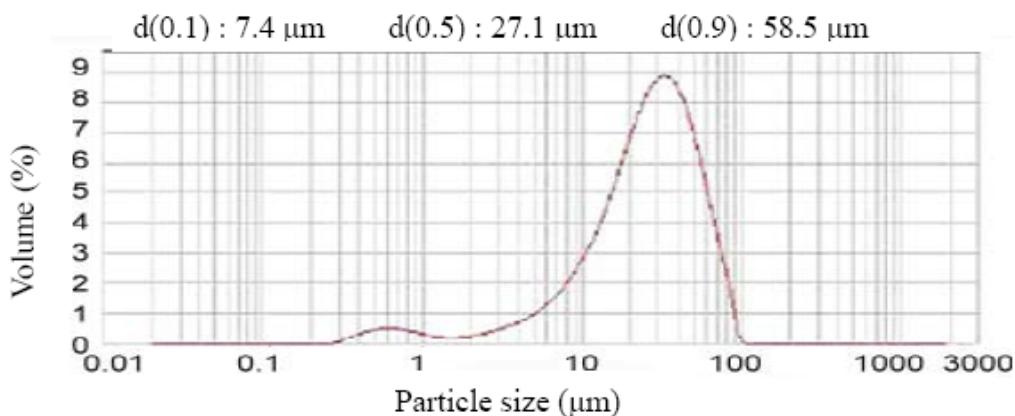


圖 4 碳化矽粉末之粒徑分佈

表 1 水淬熔岩主要化學組成

化學組成	wt.%
CaO	33.20
SiO <sub>2</sub>	19.30
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	11.62
MgO	2.00
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7.96
Na <sub>2</sub> O	2.73

表 2 水淬熔岩毒性特性溶出程序分析結果

溶出離子	水淬熔岩溶出量	TCLP 限值
Se (mg/L)	<0.01	1.0
Pb (mg/L)	<0.01	5.0
Cd (mg/L)	<0.01	1.0
Cr (mg/L)	0.05	5.0
Cu (mg/L)	0.39	15.0
Hg (mg/L)	<0.05	0.2
As (mg/L)	<0.01	5.0
Cr <sup>6+</sup> (mg/L)	<0.01	2.5
Ba (mg/L)	0.25	100.0

### 三、結果與討論

#### 3.1 水淬熔岩/碳化矽複合陶瓷研製

##### 3.1.1 基本物性分析

由水淬熔岩添加比例與體密度和吸水率之關係圖如圖 5 所示，其吸水率從 37.5% 到 27.5%，略有往下降的趨勢，由此可以推得吸水率係隨著水淬熔岩添加比例的增加而減少。而吸水率小的成品在實際應用上，將不易發生因滲水與受到熱脹冷縮而導致材料表面之龜裂、材料機械強度變弱及使用安全性等問題。

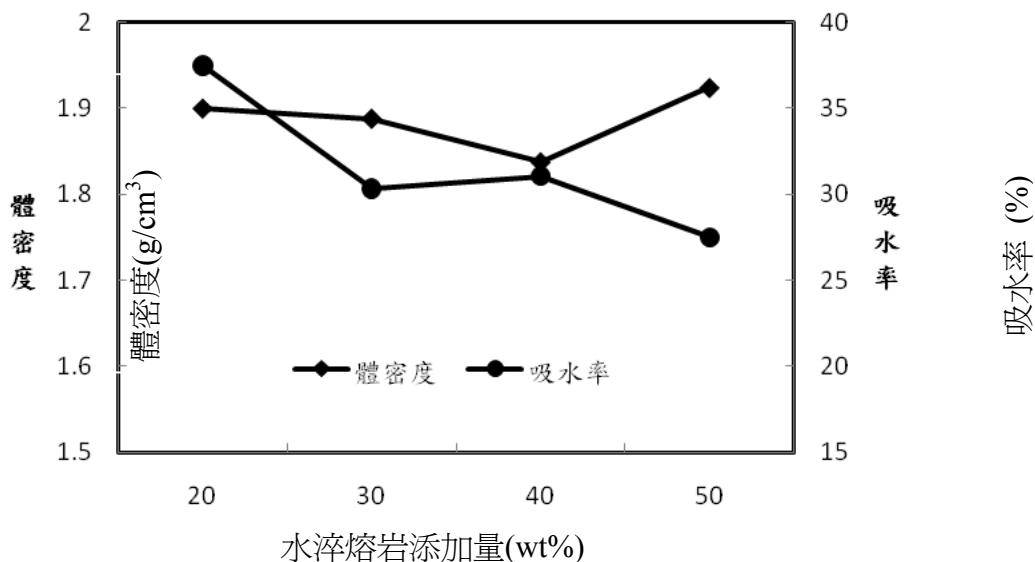


圖 5 水淬熔岩添加量與體密度和吸水率之關係圖

### 3.1.2. 電性分析

陶瓷材料一般為絕緣體和具有低介電損失係數，我們針對所研究的陶瓷散熱片進行基本的電性分析。市售某廠商陶瓷散熱片的表面電阻  $1.42 \times 10^4 \Omega$ ，體積固有電阻為  $26.3\Omega$ 。由表 3 可以得知本實驗隨著水淬熔岩添加量的增加，表面電阻在水淬熔岩含量 50wt% 時高出 20 倍，而體積電阻卻減少 8 倍，其原因是水淬熔岩含有少量雜質，在燒結過程中有熔融及分布不均的現象，然其陶瓷試體的表面電阻與體積電阻均具有絕緣性質。

表 3 水淬熔岩添加量與電性關係

水淬熔岩添加量(wt%)	體積固有電阻( $\Omega\text{cm}$ )	崩潰電壓(V)	表面電阻( $\Omega\text{cm}$ )
20	$1.61 \times 10^9$	440	$1.89 \times 10^{10}$
30	$8.95 \times 10^9$	1,050	$3.43 \times 10^{11}$
40	$1.94 \times 10^9$	2,010	$2.52 \times 10^{11}$
50	$2.18 \times 10^8$	3,300	$4.10 \times 10^{11}$

### 3.1.3. 热性質分析

水淬熔岩添加量對熱性質的分析如圖 6 所示，我們可以發現隨著水淬熔岩添加量的增加，熱擴散係數和熱傳導係數有上升的趨勢。

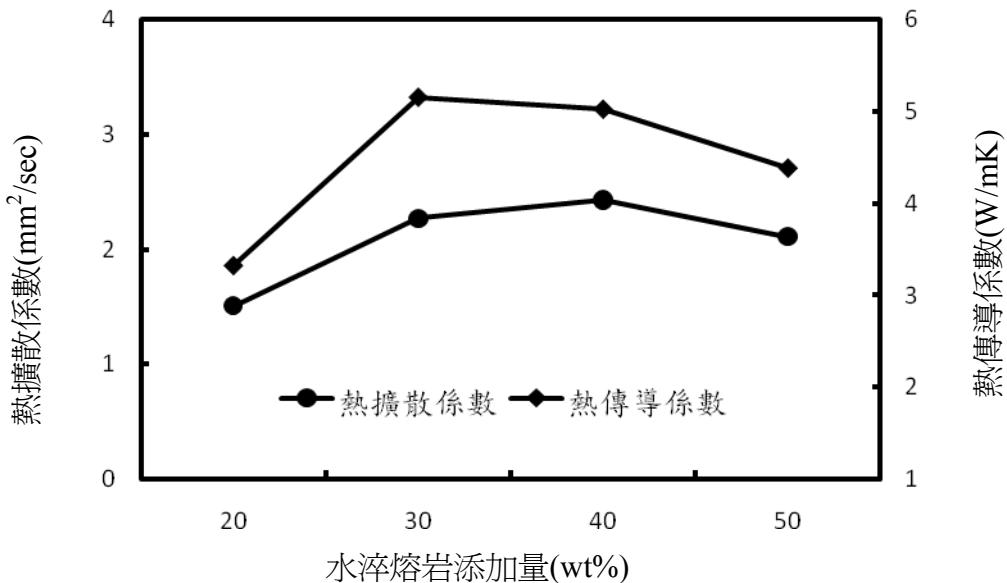


圖 6 水淬熔岩添加量與熱傳導和熱擴散係數之關係圖

### 3.1.4. SEM 分析

針對水淬熔岩與碳化矽複合材料做微結構觀察，來了解水淬熔岩添加量增加對複合材料微結構所產生的變化為何，並針對 5,000 倍、10,000 倍及 50,000 倍的放大倍率做觀察。

圖 7 係添加 50wt%水淬熔岩試體的 SEM 觀察，可以看見部份晶形與文獻上純碳化矽所製成的陶瓷試體相似，然水淬熔岩除 CaO-SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 之無機成份外，尚存在其它成份如 Na<sub>2</sub>O，因此可能在高溫燒結上發生熔融現象，使得分佈不均勻。另外，所顯示之 10,000 倍與 50,000 倍 SEM 圖，可以觀察到更為完整的晶形。

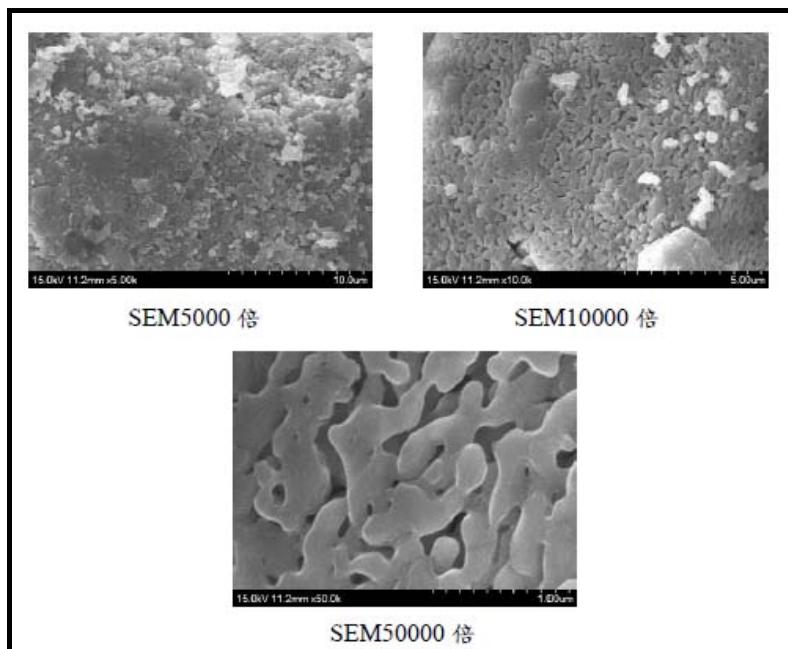


圖 7 50wt%的水淬熔岩 SEM

### 3.1.5. 機械強度分析

由圖 8 得知水淬熔岩/碳化矽陶瓷的抗彎強度，隨著水淬熔岩含量增加而隨之增加，其原因可能為孔隙率下降，試體較為密實，使得抗彎強度相對提高。

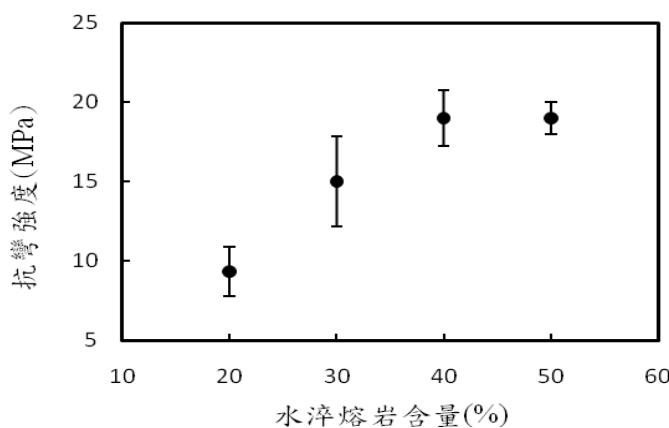


圖 8 抗彎強度與水淬熔岩含量關係圖

### 3.2 水淬熔岩/氧化鋁複合陶瓷研製

#### 3.2.1. 基本物性分析

由圖 9 水淬熔岩添加比例與體密度和吸水率之關係圖中，發現吸水率從 21.13% 到 29.89%，並且有往上的趨勢，可以推得吸水率隨著水淬熔岩比例增加而增加。此外，吸水率小者不易發生因滲水加上受到熱脹冷縮所導致材料表面龜裂、材料機械強度變弱、影響使用安全性及可靠度等問題，由此實驗數據推得可以避免上述之問題。

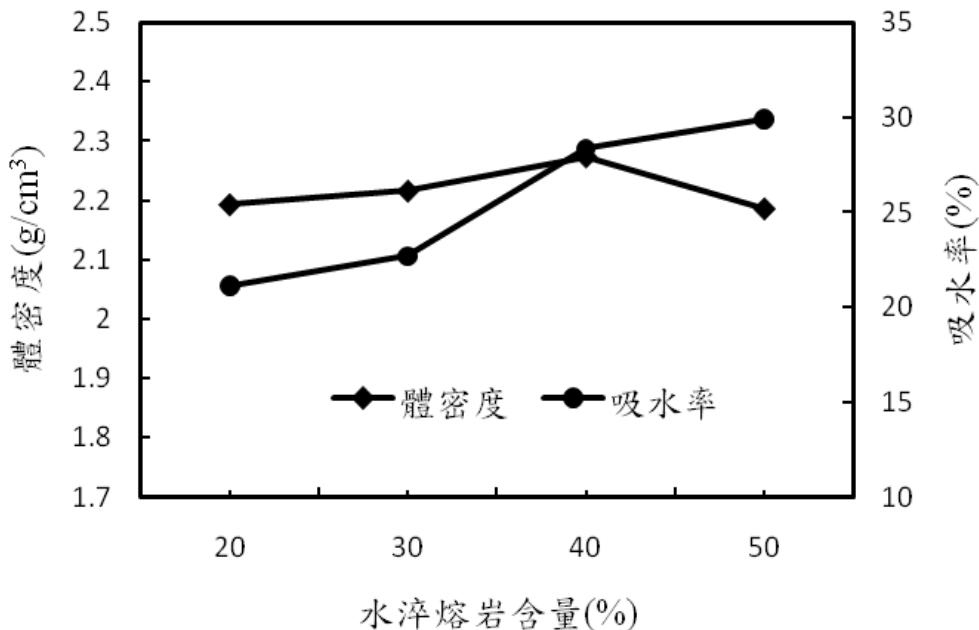


圖 9 水淬熔岩添加比例與體密度和吸水率之關係圖

#### 3.2.2. 電性分析

由表 4 可以得知本實驗的表面電阻與體積電阻均相當高，具有良好的絕緣性質。此外，隨著水淬熔岩含量的增加，體積電阻在水淬熔岩添加量 50wt% 時比 20wt% 添加量高出許多，顯示出水淬熔岩添加量使得複合陶瓷材料電阻增加，相

較於市售陶瓷散熱片的表面電阻為  $1.42 \times 10^4 \Omega\text{cm}$ ，體積固有電阻為  $26.3 \Omega\text{cm}$ 。複合陶瓷具有更好的絕緣性質，同樣保留著陶瓷基板不需要另外製作介電層的優勢。

**表 4 水淬熔岩添加量與電性關係**

水淬熔岩添加量 (wt%)	體積固有電阻 ( $\Omega\text{cm}$ )	崩潰電壓 (V)	表面電阻( $\Omega\text{cm}$ )
20	$3.03 \times 10^{11}$	8,440	$2.27 \times 10^{12}$
30	$2.76 \times 10^{10}$	7,940	$2.16 \times 10^{12}$
40%	$2.99 \times 10^{12}$	7,050	$7.07 \times 10^{13}$
50%	$3.78 \times 10^{12}$	10,400	$9.81 \times 10^{13}$

### 3.2.3. 熱性質分析

本研究使用雷射熱擴散分析儀來測量複合陶瓷的熱傳導性質，由實驗數據得知，熱擴散係數和熱傳導係數量測值個別分布在  $1.7 \sim 1.8 \text{ mm}^2/\text{sec}$  和  $4 \sim 5 \text{ W/mK}$  間。此外，由圖 10 我們可以發現隨著水淬熔岩添加量的增加，熱擴散係數和熱傳導係數有下降的趨勢，推測其原因是由於水淬熔岩的化學成份多，有熔點較低的氧化鈉等物質因高溫燒結時造成熔融狀態，使得熱傳導的路徑被破壞而導致熱傳導係數下降；另一可能的原因，是隨著水淬熔岩增加，而導致試體並非單一相材料，因此增加微觀裂縫的機率，這也導致熱傳導係數的下降<sup>[13]</sup>。為了獲得適當熱傳導係數和維持較佳的散熱能力，添加氧化鋁來提高水淬熔岩/氧化鋁複合陶瓷材料熱傳導性質，由實驗結果可知，藉由規劃的配比和製程，所製得之陶瓷試體，與市售陶瓷散熱片試體相當，而相較於目前市售的介電層材料(絕緣性、低熱傳導係數)而言，本研究所製得之陶瓷試體具有良好的熱傳導特性，因此可以將水淬熔岩當成資源化材料和氧化鋁燒結來製作成陶瓷散熱基板。

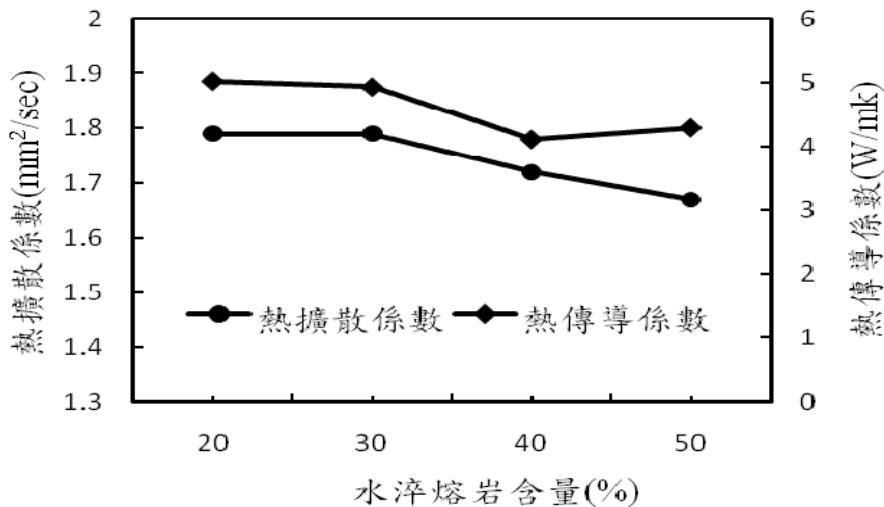


圖 10 水淬熔岩添加比例與熱傳導係數和熱擴散係數之關係圖

### 3.2.4. SEM 分析

本研究針對水淬熔岩與氧化鋁複合材料做微結構觀察，來了解水淬熔岩含量增加對複合材料微結構所產生的變化為何，並針對 100 倍、200 倍、500 倍及 1,000 倍的放大倍率來做觀察和探討。

綜合以上 SEM 觀察，經過高溫燒結的複合陶瓷具有明顯的結晶性質，然而隨著水淬熔岩添加量的增加，孔洞以及熔融現象也隨之增加，推論是因為水淬熔岩化學成份較多，熔點較低的化合物易於燒結過程中出現熔融現象，使得分佈不均勻。

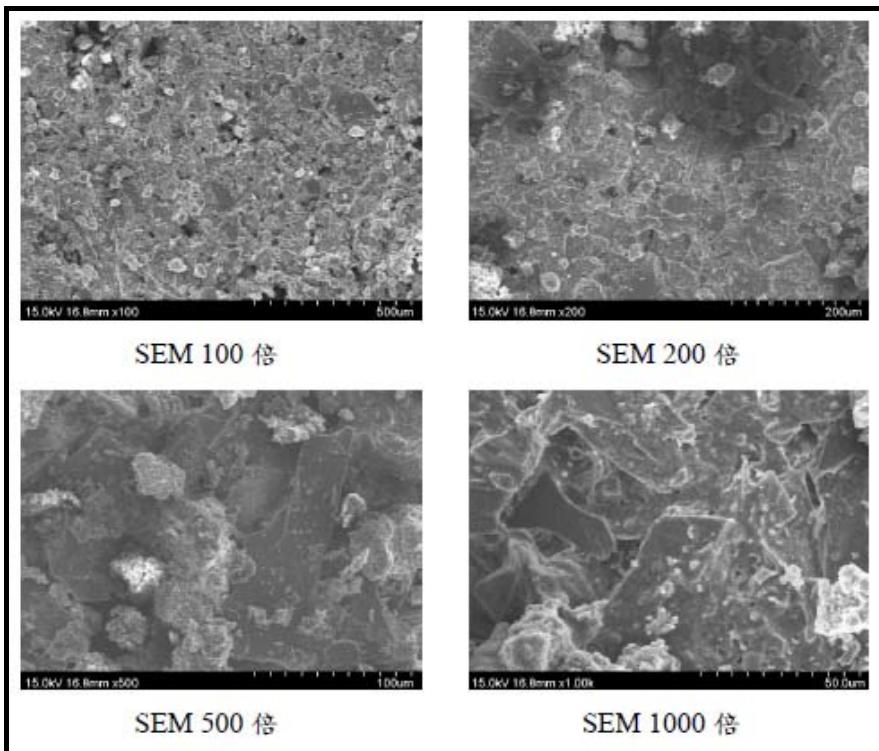


圖 11 水淬熔岩含量 50% 的 SEM 圖

### 3.2.5. 機械強度分析

使用 CNS12701 測試方法來測試陶瓷試體抗彎強度，由圖 9 可以發現陶瓷試體抗彎強度介於 200 到 300MPa 間，相較於抗彎強度介於 100 到 200MPa 之間的高強度碳化矽陶瓷<sup>[8]</sup>，本研究開發的陶瓷試體具有較佳的抗彎強度。此外，試體的抗彎強度，隨著水淬熔岩含量增加而隨之增加，其原因可能為孔隙率下降，試體較為密實，使得抗彎強度相對提高。在圖 12 中之抗彎強度，其標準差也隨著水淬熔岩增加而上升，可能因素為陶瓷試體中的雜質會隨著水淬熔岩添加量而變多，因而導致可靠度的不穩定現象。

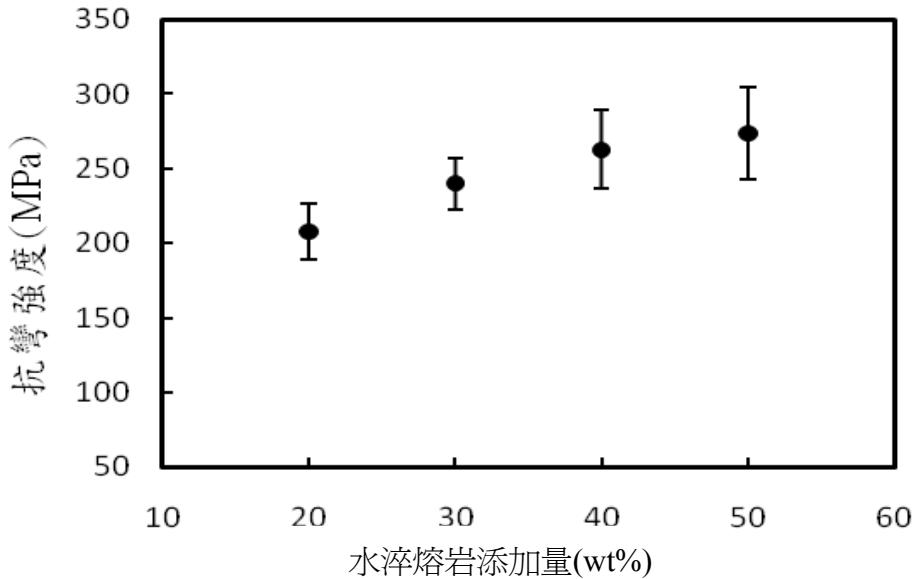


圖 12 抗彎強度與水淬熔岩含量關係圖

#### 四、結論

本研究以焚化爐灰渣熔融處理後之水淬熔岩產物為原料，可製作為陶瓷散熱片，除將廢棄物資源化再利用替代原物料外，同時亦可減少焚化爐灰渣掩埋對環境造成之衝擊，以及避免廢棄物的處置問題。陶瓷散熱片研究之實驗過程中，針對不同比例的水淬熔岩/碳化矽和水淬熔岩/氧化鋁原料，經球磨機均勻混料，加壓成型，並分別以 1,100°C 與 1,200°C 高溫燒結，成功製得陶瓷散熱片材料。陶瓷材料經過物理性質與熱性質分析，得悉隨著水淬熔岩添加量的增加，其體密度、真密度和含水率等物理性質並沒有顯著的變化，而熱擴散性質的差異也不大，然機械性質隨著水淬熔岩含量增加而隨之增加，其原因可能為孔隙率下降，試體較為密實，使得抗彎強度相對提高。

另分別以碳化矽和氧化鋁與水淬熔岩進行混料燒結所得到的陶瓷散熱片進行比較時，其電性和熱性質差異不大；而在機械強度上，可以發現添加氧化鋁的陶瓷

散熱片的抗彎強度比添加碳化矽的陶瓷散熱片的抗彎強度高了將近十倍，由本研究中可以推得將氧化鋁比起碳化矽更適合與水淬熔岩混料燒結製成陶瓷散熱片。由實驗數據並考量再利用量，建議當水淬熔岩添加量為 50 wt% 應為最佳添加比例。但在試體燒結製程中，其他參數的適合操作條件選擇，包含加壓成型壓力、燒結時的升溫速率、高溫燒結的溫度以及持溫時間，仍有待未來更多的實驗以求繼續探討。

## 參考資料

1. Yang, S. F., Chiu, W. T., Wang, T. M., Lee, W. C., Chen, C. L. and Tzeng, C. C., Asphalt concrete and permeable brick produced from incineration ash using thermal plasma technology, *Journal of Environmental Engineering and Management*, Vol. 19, pp. 227-232., 2009.
2. 楊昇府、邱文通、王多美、陳靖良、曾錦清，電漿熔融水淬熔岩應用於道路工程材料之研究，2006 清潔生產暨永續發展研討會，第 B10-1~B10-11 頁，台北市，2006。
3. 楊昇府、邱文通、王多美、陳靖良、曾錦清，電漿熔岩試做彩色排水瀝青混凝土之研究，2006 廢棄物處理技術研討會，台中市，2006。
4. 楊昇府、王多美、李文成、孫金星，以焚化爐灰渣及其熔岩產物為原料製作纖維棉之研究，2007 清潔生產暨永續發展研討會，台北市，2007。
5. Yang, S. F., Wang, T. M., Lee, W. C., Sun, K. S. and Tzeng, C. C., Man-made vitreous fiber produced from incinerator ash using the thermal plasma technique and application as reinforcement in concrete, *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 182, pp. 191-196., 2010.
6. 楊昇府、王多美、李文成、孫金星、陳靖良、曾錦清，以自製熔岩纖維增強水泥試體抗壓強度之研究，2008 廢棄物處理技術研討會，台北市，2008。
7. 楊昇府、邱文通、王多美、李文成、陳靖良、曾錦清，以電漿熔岩試做多孔性

## 112 電漿熔融焚化爐灰渣副產物製作功能性陶瓷之研究

- 輕質熔岩板材之研究，2007 廢棄物處理技術研討會，高雄市，2007。
- 8.Chi, W., Jiang, D., Huang, Z., Tan, S., Sintering behavior of porous SiC ceramics, Ceramics International 30, pp.869–874., 2004.
- 9.She, J.H., Yang, J-F., Kondo, N., Ohji, T., and Kanzaki, S., High-Strength Porous Silicon Carbide Ceramics by an Oxidation-Bonding Technique, Journal of the American Ceramic Society, Vol. 85, No.11, pp.2852-2854., 2002.
- 10.Zhu, S., Ding, S., Xi, H., Wang, R., Low-temperature fabrication of porous SiC ceramics by preceramic polymer reaction bonding, Materials Letters 59, pp.595–597., 2005.
- 11.Herzog, A., Thünemann, M., Vogt, U., Beffort, O., Novel application of ceramic precursors for the fabrication of composites, Journal of the European Ceramic Society 25, pp.187–192., 2005.
- 12.Fayette, S., Smith, D. S., Smith, A., Martin, C., Infuence of grain size on the thermal conductivity of tin oxide ceramics, Journal of the European Ceramic Society, 20, pp.297-302., 2000.
- 13.Nettleship, I., Application of porous ceramics, Key Engineering Materials, Vols. 122-124, pp.305-324., 1996.
- 14.Sylvain Fayette, David. S. Smith, Agnes Smith, Christian Martin, Influence of grain size on the thermal conductivity of tin oxide ceramics, Journal of the European Ceramic Society, Vol.20, pp. 297-302., 2000.

## 本期專題：綠能技術與新興能源發展

專題編輯委員 申永順及郭勝隆

申永順

學歷：國立台灣工業技術學院化學工程系學士

國立台灣工業技術學院化學工程研究所碩士

國立台灣科技大學化學工程研究所博士

經歷：大葉大學環境工程學系副教授

經濟部產業發展諮詢委員會諮詢委員

台灣永續能源研究基金會企業永續發展委員會主任委員

台灣環境管理協會常務理事

現任：馬偕醫學院全人教育中心副教授兼總務長

郭勝隆

學歷：國立台灣科技大學 化學工程所 博士

經歷：財團法人中國技術服務社 能源技術中心

財團法人中國技術服務社 工業污染防治技術服務團

現任：國立勤益科技大學 化工與材料工程系 教授

### 專題介紹

氣候變遷對人類所帶來的重大挑戰，已成為 21 世紀各國努力的共同方向，近年來節能減碳亦成為我國施政的重要方向。行政院於 97 年 6 月 5 日世界環境日通過「永續能源政策綱領」，揭示永續能源發展應兼顧「能源安全」、「經濟發展」與「環境保護」，以滿足未來世代發展的需要。此外，該政策綱領並說明台灣自然資源不足、環境承載有限，永續能源政策應將有限資源作有「效率」的使用，開發對環境友善的「潔淨」能源，與確保「穩定」的能源供應，以創造跨世代能源、環保與經濟三贏願景。

我國政府於 101 年 10 月公布之「能源發展綱領」中第七條「低碳施政與法制配

套」之第六款及第七款，分別宣示「訂定國家能源科技發展策略，積極擴張新及再生能源、節能減碳等相關能源科技研發能量。」及「推動綠色能源產業發展，帶動綠色成長與促進綠色就業」二項與綠色能源相關之重要政策。本期即呼應前述之政策方向，特以「綠能技術與新興能源發展」為主題，期拋磚引玉喚起國內各界對綠色能源與相關產業發展之重視。

本期專題首先刊載由逢甲大學化工系朱正永助理教授兼綠色能源發展中心組長等人撰述之「台灣之生物氫產儲與燃料電池應用技術發展路徑模式」。相較於其他傳統能源，氫氣為高能量密度及低環境污染的氣體，可自再生能源轉製，直接由內燃機轉換供給車輛動能或由燃料電池轉換成電能，為因應全球氣候變遷甚具發展潛力之綠色二次能源，目前全球各國正積極探討綠色氫能特性、儲存、發電、技術發展模式等關鍵議題。逢甲大學近年來在該校林秋裕講座教授兼綠色能源發展中心主任所領導團隊之積極研發與推廣下績效斐然，其所研發綠色氫能技術中之生物氫能(biohydrogen)技術研究成果，在國際間聲譽卓著。該文評估生物氫能發電應用的潛力、優缺點及發展趨勢，可作為日後技術改進與國家能源政策推動的參考。

生質燃料過去近十年來，在永續發展、能源自主及與農糧作物競合爭議等趨勢下，在全球各地快速成長，產值規模陡升，但在產業快速擴充的同時，如何在環保、經濟及安全等因素考量下，持續發展與使用先進之生質燃料技術與推動產業化發展，殊為重要。本次專題邀請專精此議題發展的工研院產經中心資深研究員謝志強經理，以「先進生質燃料技術與產業化趨勢分析」為題，介紹全球生質燃料市場概況與趨勢，並分析先進生質燃料技術與產業化動態，最後提出先進生質燃料發展趨勢展望及未來產業面對的挑戰，可提供政府及業者參考。

能源管理系統為實現能源需求端管理的重要工具，隨著全球節能減碳的風潮興起，能源管理系統相關產業近年來其數量及產值已明顯增加；加之全球能源管理系統產業即將朝向企業及產品功能整合之發展趨勢，如何在國內快速有效推動能源管理系統相關之新興產業，為政府及業界宜積極思考之議題，俾利於此未來節能減碳產業新興領域及商機上謀求發展。本期專題邀請財團法人資訊工業策進會產業情報研究所王怡臻產業分析師等人以「台灣能源管理系統產業概況」為題，為讀者介紹我國能源管理系統產業概況、廠商動態及因應方式，提供廠商投入能源管理系統相

關產業領域之參考。

綜觀之，本專題之整體論述可顯示綠能技術、新興能源及能源管理系統等市場相當具有潛力，唯綠能技術與新興能源之發展與推動，需要整合產官學研各領域之政策訂定、技術研發及市場管理等要素配合，始能盡其功。我國廠商可盱衡國內外綠能技術與新興能源之發展趨勢，善用政府輔導資源及自身優勢，與學研界建立更緊密之合作夥伴關係，在綠能技術、新興能源及能源管理系統等領域提早佈局，以掌握國內及國際市場發展脈動，在經濟發展與環境保護的潮流中，善盡企業社會責任。

本專題編輯同仁對於前述三文各作者之熱心撰述與解說，謹致由衷感謝。



# 台灣之生物氫產儲與燃料電池應用技術 發展路徑模式

朱正永\*、駱安亞\*\*、許瓊文\*\*\*、張保隆\*\*\*\*、林秋裕\*\*\*\*\*

## 摘要

溫室效應與氣候異常已嚴重影響人類生活環境，且化石能源耗竭與飆漲的能源價格衝擊全球經濟體系，故許多國家積極尋找代替能源並研發在生產及消費過程皆能降低排放二氧化碳之商品。氫氣可經燃料電池轉換成電能而只以水為產物，對於解決全球氣候變遷問題有極大之幫助，是極具未來性的綠色能源載體，乃有「氫經濟(hydrogen economy)」之說。本文透過生物產氫技術、儲氫技術、生物氫燃料電池技術與台灣氫能技術發展模式等章節，以摘要方式介紹，期能讓業界與國人瞭解「生物氫能發電展示系統」，作為產業掌握國際綠色氫能研發與脈動之依據，並提供我國未來綠色能源社會的建議。

【關鍵字】生物氫、儲氫、燃料電池、暗酵解、綠色氫能

---

\*逢甲大學化工系助理教授兼綠色能源發展中心 組長

\*\*逢甲大學材料系助理教授兼綠色能源發展中心 專案經理

\*\*\*逢甲大學企管系講座教授 兼校長

\*\*\*\*逢甲大學科技管理研究所 副教授

\*\*\*\*\*逢甲大學講座教授兼綠色能源發展中心 中心主任

## 一、前　　言

台灣由於天然資源及能源蘊藏貧乏，能源進口依存度頗高，致使能源安全度相對偏低。石油、煤炭與天然氣為目前國內能源需求的主要能源種類，但其使用皆是公認的氣候異常的元兇。因此尋找乾淨、無污染、安全、可靠及穩定的能源供應、確保能源的永續發展與減輕對環境氣候的影響等，已成為國際能源發展潮流。氫氣是高能量密度的氣體，熱能值約為 122 兆焦耳/公斤，可直接由內燃機轉換供給車輛動能，也可以經由燃料電池轉換成電能；使用過程之副產物僅有水而無其他污染物，對於解決全球氣候變遷問題將有極大之幫助，是極具未來性的綠色能源載體。許多科學家預言 21 世紀將是「氫」能源的世紀，故有「氫經濟 (hydrogen economy)」之說。氫能可自再生能源轉製，被各國視為最具提升國家能源安全、減少溫室效應氣體排放、減少空氣污染及提升能源使用效率潛力之二次能源。「綠色氫能(green hydrogen energy)」則指來自綠色技術、非糧食料源以及廢棄物再利用產製的氫能，有別於目前產自石油尾氣或非綠色電能產製的氫能。美國、日本、歐盟及其他先進國家已分別提出氫經濟願景，並大舉投入氫能科技研發逐步達成轉換至氫經濟之目標。發展氫經濟，除了可有效解決能源問題外，還可建立研發與製造生產的產業鏈，可跨入擁有龐大商機的綠色產業，因此世界各國莫不大舉投入。

此外，再生能源、替代能源的開發、或是環保污染與溫室效應問題之解決，積極研發綠色氫能源是重要且深具經濟效益前景的。但是，綠色氫能源技術之研發尚屬嬰兒期，需要解決的問題包含綠色氫能特性、儲存、發電、技術發展模式等等。目前我國綠色氫能技術中的生物氫能(biohydrogen)技術研究領先國際，透過本文評估生物氫能發電應用的潛力與優缺點，可作為日後技術改進與國家能源政策推動的參考。

## 二、生物產氫技術

氫之產製，有來自傳統化石燃料者，亦有屬於綠色來源者；有利解決全球氣候變遷問題的氫，當以綠色氫能源為首選。「綠色氫能」指來自綠色技術、非糧食

料源以及廢棄物再利用產製的氫能，「生物氫能」即為其中之一。「生物氫能源」為「生質能源」的一種，是指以生物方法產製而可作為能源載具的氫氣。生物法產氫乃是藉厭氧菌、光合菌等之生物降解與生物轉換作用將有機物轉化為「生質氫能」，是種完全符合環保概念、經濟效益與資源回收的能源產製方式。

國內生質氫能源之大規模研發，肇始於經濟部能源局在 2000-2004 年補助高雄第一科技大學以啤酒廠廢麥粕及酵母等固態廢棄物產製氫氣，為「潔淨生質能源研究發展計畫」；在 2005-2008 年補助逢甲大學開發高速率生物產氫技術，產氢速率世界第一，並構築 400 L 示範模場<sup>[1]</sup>；2009-2012 則利用該模場開發複合式生質能(氫、甲烷、丁醇與藻類)生產技術<sup>[2]</sup>。工業技術研究院(ITRI)也曾以有機水與廢棄物產氫，並發展 5 公噸以上規模之反應槽。成功大學鄭幸雄教授也利用廚餘醱酵產氫。中興大學李季眉教授與成功大學張嘉修教授等人則均曾成功的研發光醱酵產氫。

將廢棄物/廢水以厭氧醱酵法產製生物氫氣或甲烷，是種既可解決廢棄物/廢水處理問題也可產製清潔能源的技術；把廢水、廚餘或食品廢棄物等物快速的轉化為屬於再生性的生物氫氣，稱為綠色氫產製法。以這種程序產製的再生氫氣供應燃料電池車之用，則是為「全綠色能源車」，產生動力的過程只會產生水(無其他污染物)，有別於現階段電動車用電力是來自化石燃料發電之市電。逢甲大學校內已設置一座「綠色氫加氣站」，並利用「氫能燃料電池汽車」進行實際路測應用(圖 1)。

逢甲大學自 1998 年即開始運用行政院國科會之補助做基礎研發，自 2005 年起則運用經濟部能源局與逢甲大學之經費組成「生物氫能研究團隊」，而後持續運用經濟部能源局「生質能科技研究中心」與國科會國際合作處支持的「亞太經合會(APEC) 先進生質氫能技術研究中心」開發生物氫能的相關技術。前述「綠色氫加氣站」是以逢甲領先世界的連續式厭氧醱酵技術所產之生物氫，灌入類似小瓦斯罐之儲氫瓶後，再裝於燃料電池汽車(fuel cell car)作為燃料，實際展示了生物產氫、儲氫、用氫之未來再生氫能應用情境，未來目標是把這種氫能源技術商業化，作為分散式「綠色氫能源供應站」之基石。



圖 1 逢甲大學綠色氫加氣站與生質氫能車

### 三、儲氫技術

經過 30 多年的努力，文獻<sup>[3]</sup>顯示目前燃料電池研究已有長足進步與成果，但是與其搭配的供氫系統尚有極大的進步空間，其中包括氫的生產、運送與儲存。氫氣儲存可分為壓縮儲氣、液化儲氫、金屬氫化物儲氫及吸附氫等 4 種方式，但從安全性、成本、未來實際應用和發展的可能性考量，利用金屬氫化物來儲存或作為運輸方式是較為理想的，但其技術成熟度尚相對落後於其他技術(表 1<sup>[4]</sup>)。此外，儲氫系統既需考慮儲氫材料、殼重、幾何形狀，也需考量操作溫度與壓力等環境都會影響吸、放氫的效能。因此，儲氫材料之製備、儲氫合金容器之輕量化設計及儲氫合金容器之效能分析等 3 部份就非常重要。

#### 1. 儲氫材料之製備

由於元素鎂的熔點(922 K)與沸點(1,380 K)低於鎳的熔點(1,726 K)，故鎂的高蒸氣壓問題使其不易以傳統合金方法製備鎂基合金或其氫化物。機械合金法是藉反覆的冷焊、脆裂與擴散，常被用來製備許多穩定與介穩材料<sup>[5]</sup>，利用此法製備儲氫合金則相當有效。以機械合金法製備 Mg<sub>2</sub>Ni 合金時，可得奈米級粉末，此有利於氫化反應之速率<sup>[6]</sup>。Mg<sub>2</sub>Ni 基儲氫合金的改質常添加第三元素(如 Cu, V, Fe,

Cr, Co 等取代 Ni)、添加觸媒(如 Ag、Ti 等)、氧化物(如  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CeO}_2$  等)、碳或奈米碳管或是製備複合儲氫合金材料(如  $\text{Mg}_2\text{Ni}-\text{LaNi}_5$  系統,  $\text{Mg}_2\text{Ni}-\text{FeTi}$  系統等)，但在實際應用上仍有努力與突破的空間。

表 1 氢的儲存媒介與其重量及體積關係<sup>[4]</sup>

Material	H-atoms per $\text{cm}^3$ ( $\times 10^{22}$ )	% of weight that is hydrogen
$\text{H}_2$ gas, 200 bar (2850 psi)	0.99	100
$\text{H}_2$ liquid, 20 K (-253 °C)	4.2	100
$\text{H}_2$ solid, 4.2 K (-269 °C)	5.3	100
$\text{MgH}_2$	6.5	7.6
$\text{Mg}_2\text{NiH}_4$	5.9	3.6
$\text{FeTiH}_2$	6.0	1.89
$\text{LaNi}_5\text{H}_6$	5.5	1.37

## 2. 儲氫合金容器輕量化之設計

隨著燃料電池(fuel cell, FC)的興起，移動式氫氣儲存瓶對容器重量、體積和儲氫密度的要求更高，傳統的鋼製金屬壓力容器已不合要求。輕質高壓儲氫容器技術是隨著複合材料發展的新興技術，高性能複合材料有高比強度、高比模量等特點，可以提高儲氫壓力而同時大幅降低容器重量，從而提高儲氫密度。高壓儲氫容器分 4 類：I 型(全金屬氣瓶)、II 型(金屬內膽/纖維環向纏繞瓶)、III 型(金屬內膽/纖維全纏繞瓶)及 IV 型(非金屬之高分子內膽/纖維全纏繞瓶)。I 和 II 型瓶之質重/體積比值較大，難以滿足單位質量儲氫密度的要求，不適用於車載供氫系統；III 與 IV 型為目前主流，但是仍未能達美國能源部之標準。

如前所述，利用金屬氫化物來儲存氫或作為運輸用較為理想，但技術成熟度尚相對落後，且此類固態儲氫材料之單位質量儲氫密度比較低，多數僅為 1.5~3%；因此開發輕質非金屬之儲氫容器，例如碳纖維複合材料於固態儲氫容器系統製程之技術，將有助於提升此類容器的儲氫質量密度。

### 3. 儲氫合金容器效能之分析

目前使用的金屬儲氫方法是將金屬磨成粉末狀並填充於容器內以增加接觸面積，此容器內部可視為多孔隙(porous)材料。吸氫與放氫分別為放熱與吸熱的化學反應，當氫氣流動時會改變容器體內溫度與壓力分佈，亦影響氫吸附的局部速率及熱質傳問題，因此熱質傳設計與熱控制相當重要。若能提供諸如交通運輸或3C產品等在能量密度、重量與體積限制及安全性較好的儲氫方式，將能加速綠能使用時代的來臨。

## 四、生物氫燃料電池技術

### 1. 燃料電池的結構與生物氫燃料電池特性

燃料電池(FC)是小型發電機，氫燃料電池(HFC)則須以氫作為燃料；氫之純度越高則電能轉換效率愈高，目前HFC要求氫之純度須達99.99%。一般厭氧醣酵製得未純化之生物氫濃度為35~45%，需經純化程序方可達到市售FC要求的純度。然而，若能改組或重新設計FC的關鍵材料而降低氫氣之純度需求，或許能達生物氫燃料電池運作之最經濟方案。

燃料電池的關鍵材料包括雙極版、氣體擴散層、陰極觸媒、陽極觸媒與電解質隔膜等5項，其中由陰極觸媒、陽極觸媒與電解質隔膜所構成之膜電極組(Membrane electrode assembly, MEA)更是燃料電池的心臟，是將化學能轉為電能的關鍵。燃料電池的種類繁多，不同類型的燃料電池其操作溫度也異，從室溫到1,000°C都有，因此這些材料的選用也大為不同。本文以大家熟知的質子交換膜燃料電池(Proton exchange membrane fuel cell, PEMFC)為例，介紹燃料電池的基本結構及其運作所需之次系統。

MEA是由陰極觸媒、陽極觸媒以及質子交換膜所組成的複合結構。陽極觸媒負責將燃料( $H_2$ )轉換為質子( $H^+$ )與電子( $e^-$ )，其中質子透過質子傳導膜傳遞到陰極；陰極觸媒則將氧氣、質子、電子再次合而為一。介於陰、陽電及之間的質子

交換膜是具備質子傳導能力的絕緣高分子薄膜，杜邦公司於 1996 年所開發的聚全氟磺酸膜(Nafion)是目前最廣泛被採用的質子交換膜材料。所謂的膜電極組即是被陰、陽極觸媒夾著之 Nafion 薄膜所形成的三明治結構；在此三明治結構以外的便是陰、陽極氣體擴散層以及雙極版。雙極板具有導流與收集電流兩項主要功能，又稱為流場板（flow field plates）或集電器（current collectors）。以性質來講，石墨雖然是最佳的雙極版材料，然其機械性質較差作為雙極版將過於厚重，此缺點限制了燃料電池的實用性。圖 2 顯示通常石墨雙極板超過燃料電池一半的重量<sup>[7]</sup>；其體積也大，覆碳塑膠板、覆碳金屬板等都是為了改善石墨雙極版的替代材料。原則上，這些材料都必需具有阻氣、導電、散熱、以及抗蝕等基本特性。

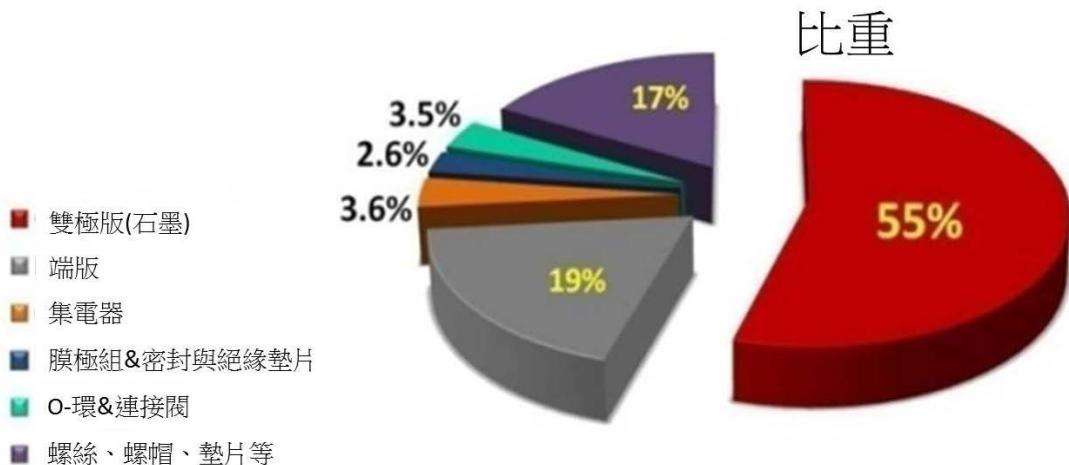


圖 2 質子交換膜燃料電池之個關鍵零組件所占比重<sup>[7]</sup>。

以工作原理來講，陰、陽極觸媒是燃料電池性能的關鍵因素，而白金是電極觸媒的必要組成；因此，電極觸媒便佔燃料電池成本的一半以上<sup>[8]</sup>。為了使單位重量的白金發揮最大的功效，燃料電池之觸媒材料通常是將白金奈米顆粒均勻分散於高比表面積的碳擔體；換句話說，減少白金用量即是降低成本的根本方法。然而，並不是所有觸媒粒子都具備發電效能，它必須同時接觸到質子交換膜、燃料(或氧化劑)以及碳擔體，如此方能傳導質子、接觸燃料(或氧化劑)以及傳導電

子，這才是具備活性的觸媒。因此觸媒材料的改良在燃料電池的發展中佔有極重要的角色。

以上介紹組成燃料電池之膜極組、氣體擴散層、雙極版等關鍵材料，若要組裝成燃料電池堆則還需搭配適當的封裝材料，例如端版、密封與絕緣墊片等。端板是燃料電池堆兩端最外側的元件，是反應氣體與冷卻劑進出燃料電池的門戶，以及固定燃料電池堆之多層結構。以適當之扭力將端板上之螺桿與螺絲鎖緊便可固定燃料電池之多層結構，再配合適當的密封與絕緣墊片則可避免燃料洩漏與漏電等問題。端板材質須具備良好機械性質、質輕、絕緣等特性。

考慮燃料電池的工作條件，要發揮燃料電池的最大效能需要搭配適合之水管理與散熱技術。在 PEMFC 中，陰極的電化學反應會產生液態水，且質子在高分子膜內之傳遞亦需要借助水。然而，若缺乏適當的水管理，將使得燃料電池內水的產生與消耗失去平衡，結果會造成膜脫水或電極水氾濫，兩者皆會破壞三相介面或氣體/質子之傳導通道，進而使燃料電池失活；因此，水管理對燃料電池的性能具有關鍵性的影響。此外，在燃料電池中有將近一半的化學能會以熱的方式散逸。而溫度與水管理又是息息相關，為了維持燃料電池堆在穩定的溫度、濕度、輸出功率下工作，必須為燃料電池量身訂做氫氣供應次系統、空氣供應次系統、電力調控次系統以及控制系統等控制裝置。

簡單來講，燃料電池之主要構造為陽極觸媒、質子交換膜以及陰極觸媒所組成的膜極組。其中，白金為電極觸媒之活性中心。在燃料電池的運作中陽極觸媒、質子交換膜以及陰極觸媒分別負責分解燃料、傳遞質子與結合質子、電子、氧氣，並且發電。另一方面，在生質氫氣當中含有大量的有機酸，若用於燃料電池之燃料則容易造成陽極電極觸媒之失活。基於過去對燃料電池觸媒材料之研究，發現高度分散於 CMK-3 型中孔碳之 Pt 觸媒將具備較佳之抗失活能力<sup>[9,10]</sup>。一般來講，所謂的失活通常被稱之為一氧化碳毒化。然而，事實上所有含碳之物質(例如：有機酸、烷類、醇類…等)都會造成燃料電池觸媒之毒化。所謂一氧化碳毒化乃因一氧化碳是多種含碳物質中對 FC 最具毒化能力的物質。由以上 FC 關鍵材料與結構之分析，適合較低氫純度需求的所謂生物氫級的燃料電池也已經被開發出來了，目前之氫純度只需 80%。國內目前生物氫燃料電池產業鏈如圖 3 所示。

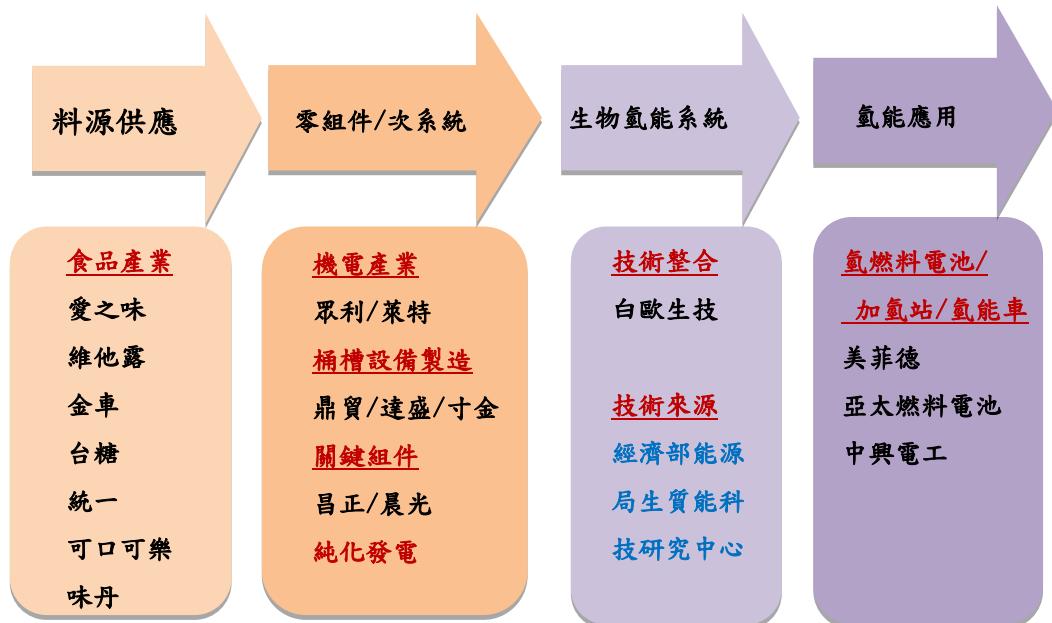


圖 3 國內目前生物氫燃料電池產業鏈

## 2. 全球燃料電池投資、應用現況與展望

近十年來由於燃料電池之技術不斷地進步，成本不斷地降低，其前景也愈加被看好；因此，世界各國皆陸續投資燃料電池及其周邊技術之開發。舉例而言，表 2 列舉了近十年來世界各國投資於燃料電池產業之總金額(前十名)，其中美國、英國與加拿大所投入之研究經費便已超過 12 億美元。另一方面，近年來已有愈來愈多企業採取燃料電池發電系統作為其設備或數據中心之電力來源，例如 Apple, eBay, Coca-Cola, and Walmart 等 86 家大型企業，其中 AT&T、Apple 以及 eBay 已分別購置了 17 MW、4.8 MW 與 6 MW 的燃料電池發電站，為目前全美前五大燃料電池使用者<sup>[11]</sup>。此外，燃料電池亦已廣泛應用於堆高機動力來源與電訊備用電源等，例如全美已有超過 40 家企業採用燃料電池驅動之堆高機，總量亦超過 3,400 多輛<sup>[11, 12]</sup>。

除了上述企業與工廠營運所需之電力來源，交通工具可說是未來燃料電池的最重要市場。根據美國能源部(DOE)的調查顯示，交通用之燃料電池成本已逐年

降低，目前之成本是 2002 年時的 20%<sup>[13]</sup>。成本的大幅降低意味著市場利潤與可行性將會顯著提升。

表 2 各國企業於 2000 至 2011 年間投資於氫能與燃料電池之金額<sup>[11]</sup>

Top Ten Countries with Highest Levels of Private Investment in Fuel Cells	
Country	Total all VC and PE Investment (millions USD)
US	815.0
UK	320.5
Canada	154.0
Germany	98.1
South Africa	57.1
Singapore	50.0
Australia	46.5
Sweden	33.2
Switzerland	31.1
Netherlands	29.1
Subtotal (Top 10)	\$ 1,634.6

美國 DOE 於 2012 年 7 月發表的燃料電池技術之市場報告(2011 Fuel cell technologies market report)中，選擇了全球前七大燃料電池公司作為探討燃料電池發展的指標，這 7 家公司在 2011 年投資於研發燃料電池的經費就高達 46,953,000 美金<sup>[13]</sup>。

表 3 是這 7 家公司近三年來投入之成本以及收入報表<sup>[13]</sup>，顯示這些公司在燃料電池投入的成本(cost of revenue)雖然逐年增加，但整體收入(gross revenues)尚少於投入額，然而其差距則顯著地逐年減小。以經濟學的角度觀之，目前燃料電池產業的整體收入已經與成本形成第一次交叉，也就是說燃料電池產業即將成熟並且獲利。進一步來講，燃料電池的成本目前已穩定且顯著地下降，而美國 DOE 更預期在 2017 年成本將降至目前的 60%左右<sup>[13]</sup>。以上數據均反映出燃料電池是一個新興產業，並可預期此產業的盈利狀況將會不斷改善，具有相當之發展

潛力。

表 3 目前世界上主要燃料電池公司之成本與利潤<sup>[11]</sup>

Gross Revenues and Cost of Revenue for Select Public Fuel Cell Companies (Thousand USD except where noted)						
North American Companies	2011		2010		2009	
	Gross Revenues	Cost of Revenue	Gross Revenues	Cost of Revenue	Gross Revenues	Cost of Revenue
Ballard Power Systems	76,009	62,124	65,019	54,887	46,722	40,795
FuelCell Energy <sup>1</sup>	122,570	135,180	69,777	88,430	88,016	188,027
Hydrogenics Corp.	23,832	18,344	20,930	15,504	18,841	15,113
Plug Power	27,626	36,901	19,473	29,482	12,293	19,680
TOTALS (USD)	250,037	252,550	175,199	188,303	165,872	193,615
Other Companies						
Ceramic Fuel Cells Ltd <sup>2,3</sup>	3,681	29,142	2,033	21,940	1,679	48,667
Ceres Power <sup>2,4</sup>	692	17,702	786	14,543	952	10,734
SFC Energy AG <sup>5</sup>	15,425	10,056	13,330	9,288	11,687	8,493
1 Year ends October 31; 2 Year ends June; 3 \$ AUS Thousands; 4 £ Thousands; 5 € Thousands						

整體來講，自從 1950 年代的太空計畫開始，燃料電池技術開始受到重視，1960 年代以後燃料電池的相關技術即開始蓬勃發展，尤其在最近的十年間，隨著技術的成熟，小至行動電話大至發電站皆已可利用燃料電池供電，然而各種燃料電池的觸媒活性、成本與壽命之提升仍然是燃料電池廣泛被應用的重要基礎。此外，仍須致力於製氫、儲氫、輸氫、氫安全等基礎建設之研究與相關政策的擬定，方能做為建設氫經濟或氫能社會之基礎。

## 五、台灣生物氫能技術發展模式

台灣從 1998 年開始規劃進行「厭氧生物產氫」技術的學術、基礎與應用研究。

到目前為止，已經在菌種篩選與培養、各類生質物、生質廢棄物進行醣酵產氫之可行性研究、各種程序操作參數對醣酵產氫效能之研究、以及建立小型產氫系統方面獲得重要成果。台灣生物氫能技術發展模式路徑圖如圖 4 所示，茲就技術、產品、應用、市場分述如下：

1. 技術：主要分為菌種篩選與培育、產氫原料、產氫程序設計與操作參數控制。

(1) 優勢菌種篩選與培育：在醣酵產氫過程中，菌種對於產氫量有極大的影響。例如 Clostridia 菌屬為目前已知產氫菌中產氫能力較佳的菌種。Clostridia 菌屬普遍存在於農業廢棄物、都市下水污泥、垃圾掩埋場等環境中，可分解葡萄糖、蔗糖、糖蜜、纖維素、澱粉與有機廢棄物等各類的碳水化合物而產生氫氣。在生質物醣酵產氫技術產業化過程中，為了提高產氫量、降低產氫成本，必須依據生質物原料類型來選擇適當的菌種，此過程必須仰賴有效的篩選技術，才能找出優勢菌種。此外，因為產氫菌的生命期是有限的，所以在確定優勢菌種後須透過培育技術來持續繁殖菌種，才能建立大規模的產氫。台灣目前已從本地的多種污泥、廢水中找到具有高產氫能力的菌種，也以混菌提高產氫量，以及研發適合連續式反應器操作之高產氫速率固定化細胞技術，藉由固定化產氫菌群來提升產氫速率。

(2) 測試各類生質物與生質廢棄物作為產氫原料：已嘗試使用多種生質物作為醣酵產氫原料，包括葡萄糖、澱粉、樹薯粉、蔗糖、木糖、纖維素，以及含糖廢水、有機污泥、工業廢水、固體生質廢棄物、家庭廚餘等。這些研究包括依據原料類型來確認適當的產氫菌種，以及尋找合適、低成本的原料前處理(例如水解)方法。

(3) 產氫程序設計與操作參數控制：為了提高產氫率與產氫速度，除了需要搭配優勢產氫菌與原料外，另一個重要技術是控制產氫過程中的重要環境參數，包括原料濃度、pH 值、溫度、水力停留時間、硫酸鹽含量等。而適當的反應槽設計也可以有效提高產氫量。

2. 產品：主要分為應用於不同料源的優勢菌種、醣酵產氫系統。

- (1) 應用於不同料源的優勢菌種：逢甲大學團隊透過其掌握的優勢菌種篩選與培育技術，可獲得大量優勢菌種用來進行規模化的氫氣生產；這些菌種在適當的儲存環境可以保存數年。
- (2) 酸酵產氫系統：逢甲大學團隊已研發出以蔗糖為料源、容量 400 L 的酸酵產氫系統原型，具有 15 L/L/h 的產氫能力。此系統包括原料槽、混合系統、酸酵槽、氣/液分離器與自動控制系統。此系統已經過長期運轉測試，具有良好的可靠度，各種操作參數也已確認，可以作為建造商品化產品的原型。逢甲大學團隊也依據飲料廠商需求，配合既有的含糖廢水處理系統設計酸酵槽容量 10 m<sup>3</sup>、產氫速度 18 L/L/d，H<sub>2</sub> 年產量可達到 63,000 m<sup>3</sup> 的產氫系統。

3. 應用：主要分為生質物廢水處理系統、商業化氫氣生產、家庭/社區生質廢棄物處理。

- (1) 提高生質物廢水處理系統經濟效益：傳統的廢水處理流程大致包含調勻槽與活性污泥法等。像食品業、飲料業、農業與畜牧業等會產生大量高濃度有機廢水的產業，可結合酸酵產氫系統，透過厭氧消化技術產出 H<sub>2</sub>、CO<sub>2</sub> 與 CH<sub>4</sub>。所以生質物酸酵產氫系統的主要應用情境之一，是協助提高現有廢水處理系統價值。例如，原已設置廢水處理設備的含糖飲料生產廠，如果在原有廢水處理設備基礎上，新增生質原料前處理、暗酸酵產氫，以及氣體分離、純化等設備，就能利用含糖有機廢水來產氫及其它副產物；這樣可以使原有廢水處理系統的經濟價值獲得提升。

- (2) 分散式商業化氫氣生產：發展生質物酸酵產氫技術的主要關鍵是找出低成本、低環境衝擊的可規模化產氫方案。因此，未來最期望的應用方式是能使用生質廢棄物作為料源，再透過酸酵產氫系統來產氫。其應用情境是假設廠商以固/液態生質廢棄物作為料源，經過前處理(破碎、水解、混合)後，再以暗酸酵方法生產氫及 CO<sub>2</sub>；產氫後的液態代謝產物再經過 CH<sub>4</sub> 酸酵生產 CH<sub>4</sub>，氫氣與甲烷則可經純化與儲存而外送或採現地廠內燃燒或發電使用；CO<sub>2</sub> 則可轉售。

- (3) 家庭、社區生質廢棄物處理：生質物酸酵產氫技術的另一種可行性極高的應用是處理家庭、社區生質廢棄物，這樣可以降低對傳統廢棄物處理系統(例如目前台灣以垃圾車，定點、定時搜集家庭垃圾及廚餘，再轉送地區垃圾掩埋場或焚化爐的處理方式)的依賴。將生質廢棄物處理過程所生產的 H<sub>2</sub>、CO<sub>2</sub> 等加以

利用，則可降低系統建構與操作成本；例如  $\text{CO}_2$  可以轉售， $\text{H}_2$  可以發電或轉售。相對於大型工業用系統，家庭、社區用生質物醣酵產氫系統架構較簡單，可以使用現有的原型系統來開發進一步的產品。

4.市場：主要分為有機污泥/廢水處理設備、商用(中、大型)氫氣製造設備、家用(小型)氫氣製造設備。

(1)有機污泥、廢水處理設備應用市場：基於環保法規要求，各種工業製程所產生的污泥與廢水必須經過處理達到法規標準後才能掩埋或排放。因此廠商必須投資許多經費來建構污泥、廢水處理系統。如果在處理過程中將富含碳氫化合物的有機污泥、廢水做為料源來生產  $\text{H}_2$ 、 $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$  等副產物，可讓廠商的處理設備產生額外的收益。

(2)商用(中、大型)氫氣製造設備應用市場：台灣及全球各地已有許多廠商研發出商品化或極接近商品化的燃料電池應用產品，例如可攜式燃料電池發電機、各種燃料電池交通工具(如機車、輕型車、巴士、堆高機)、家用燃料電池電-熱複合系統、燃料電池備份電力系統等。當這些以氫氣為能源的應用產品使用量開始增加時，氫氣需求量也會隨著提高。以生質物產氫具有環保與可永續發展的優點，所以未來使用中型醣酵產氫系統進行分散式產氫，以及使用大型醣酵產氫系統進行中央式產氫，都是建立台灣地區氫氣生產與供應體系時非常重要的產氫技術選擇方案。

(3)家用(小型)氫氣製造設備應用市場：除了中、大型商業產氫應用市場，以廚餘與其他家庭生質廢棄物為料源的小型醣酵產氫系統，也是未來擁有發展潛力的應用市場。家庭或社區使用的小型系統可以協助處理生質廢棄物，產出的氫氣也可以用在氫能燃燒爐與家用燃料電池電-熱複合系統。

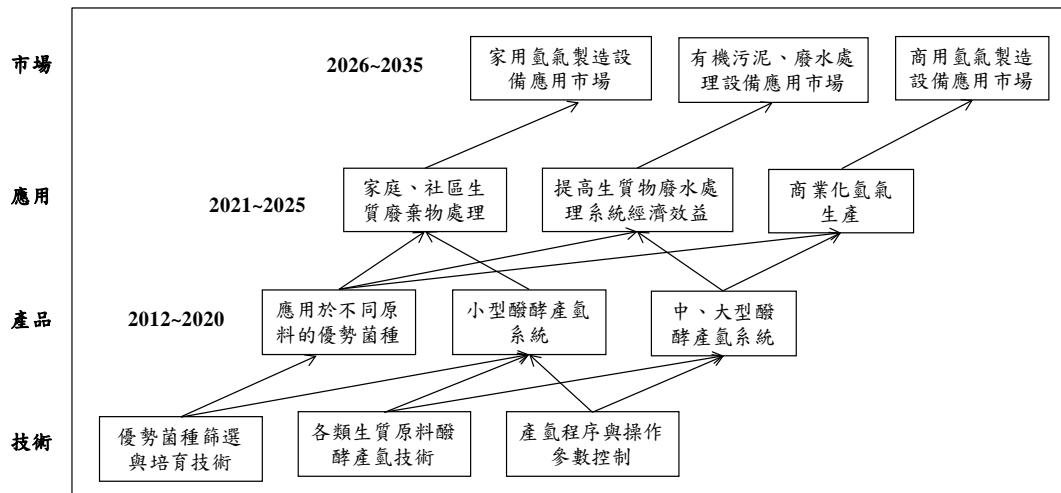


圖 4 台灣生質物醣酵產氫技術應用路徑規劃

## 六、結語

生質物醣酵產氫技術是台灣在產氫技術研究領域中的重要項目之一。台灣學界從 1998 年開始投入研究，迄今已在這方面獲得許多重要研究成果；已掌握的重要技術包括產氫優勢菌種篩選與培育、各種料源的醣酵產氫程序與控制參數、噸級產氫設施與操作技術、純化技術與生物氫級之燃料電池技術。依此建構一個技術路徑圖規劃模型，再以次級資料蒐集與分析，確認台灣生質物醣酵產氫技術在目前的發展階段，並以技術、產品、應用、市場間的聯結形成技術路徑圖。該路徑圖顯示 2012~2020 年為「培植期」，此時需開發出產氫優勢菌種，以及商品化的小型與中、大型醣酵產氫系統；2021~2025 年為「應用—市場轉換期」，此階段須進行產品應用推廣，包括提高生質物廢水處理系統經濟效益，利用中、大型醣酵產氫系統生產商業化氫氣，以及使用小型醣酵產氫系統處理家庭、社區生質廢棄物；2026~2035 年為「成長期」，此時有機污泥、廢水處理設備應用市場，商用氫氣製造設備應用市場，以及家用氫氣製造設備應用市場將形成較具規模的應用。此技術路徑規劃可以提供擬定我國生質物醣酵產氫技術長期發展規劃的參考。

## 七、參考資料

- 1.逢甲大學，能源科技研究中心推動計畫-厭氧生物氫能技術研究發展計畫(4/4)，經濟部能源科技研究發展計畫 97 年度執行報告。(2008)。
- 2.逢甲大學，能源科技研究中心推動計畫-生質能科技研究中心(4/4)，經濟部能源科技研究發展計畫 101 年度執行報告。(2012)。
- 3.Momirlan M. and Veziroglu T., Renewable and Sustainable Energy Reviews, 219-231, (1999).
- 4.曲新生，陳發林，氫能技術，五南，(2006).
- 5.廖世傑，工業材料 190, 147,(2002).
- 6.Orimo S., MajerG, Fukunaga T., Züttel A., Schlapbach L., Fujii H., Applied Physics Letters, 75, 3093-3095, (1999).
- 7.Yeetsorn, R., M.W. Fowler, C. Tzoganakis, A Review of Thermoplastic Composites for Bipolar Plate Materials in PEM Fuel Cells. Nanocomposites with Unique Properties and Applications in Medicine and Industry. 2011.
- 8.Bozbag, S.E. and C. Erkey, Supercritical fluids in fuel cell research and development. The Journal of Supercritical Fluids, 2012. 62(0): p. 1-31.
- 9.Lo, A.Y., C.T. Hung, Y. Yu, C.T. Kuo, S.B. Liu, Syntheses of carbon porous materials with varied pore sizes and their performances as catalyst supports during methanol oxidation reaction, Applied Energy, 100, pp. 66 – 74, (2012)
- 10.Liu, S.H., R.F. Lu, S.J. Huang, A.Y. Lo, S.H. Chien, S.B. Liu, Controlled synthesis of highly dispersed platinum nanoparticles in ordered mesoporous carbons, Chem Commun, 32, pp. 3435 – 3437, (2006)
- 11.Breakthrough Technologies Institute, *The Business Case for Fuel Cells 2012*. U.S. DOE, (2012).
- 12.Breakthrough Technologies Institute, *State of the states: Fuel cells in America 2012*. U.S. DOE, (2012).
- 13.Breakthrough Technologies Institute, *2011 Fuel Cell Market Report*, U.S. DOE, (2012).

# 先進生質燃料技術與產業化趨勢分析

謝志強\*

## 摘要

生質燃料在全球永續發展、能源自主與帶動農村經濟等訴求下近十年快速成長，全球產值已達 830 億美元規模。然而產業快速成長背後卻引發與民爭食與糧爭地等議題，部分國家也表態有限度的發展傳統以農糧作物為原料的傳統生質燃料，並持續加強使用非良原料的先進生質燃料技術與產業化發展。本文首先介紹全球生質燃料市場概況與趨勢，其次分析先進生質燃料技術與產業化動態，最後提出先進生質燃料發展趨勢展望，以提供業者決策參考。

【關鍵字】生質燃料、市場、技術、產業、纖維素、藻類、生物反應器

---

\*工研院產經中心 資深研究員/經理

## 一、前　　言

在全球綠色能源應用發展趨勢中，生質燃料已成為全球市場規模僅次於太陽光電的第二大綠色能源產業，2012 年產值達 830 億美元。然而在產業快速成長的背後，卻隱含著大量糧食作物與耕地或雨林被用來生產生質燃料的爭議性問題，這個問題已使得中國與歐盟等國家訴求生質燃料非糧化發展，例如中國大陸直接表態不支持使用食用性原料產製生質燃料、歐盟開始討論要設定使用食用性原料產製生質燃料在交通運輸減碳目標的上限，這個趨勢進而加速先進生質燃料技術產業化的發展。

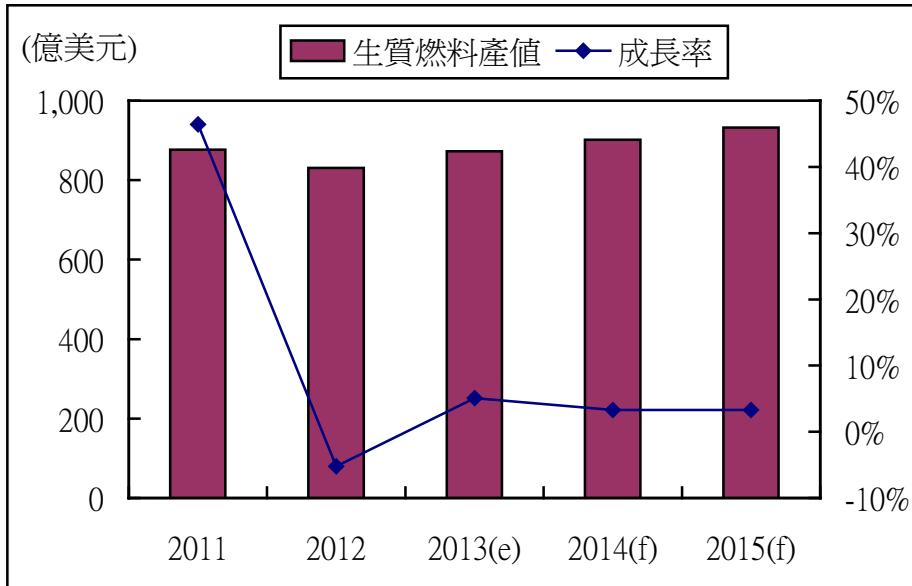
## 二、生質燃料市場概況

如圖 1 所示，2012 全球生燃料市場規模約達 831 億美元，較 2011 年下滑 5.2%，為生質燃料近十年大規模產業化發展以來第二次出現負成長，儘管此次跌幅較 2009 年 18.1% 來得緩和，但卻是首次出現產量的實際衰退。

造成產值下滑的主因在於氣候異常導致高價原料削減獲利，加上部分優惠政策退因素所影響；尤其占全球生質燃料產量 5 成以上的美國，因為年中遭遇乾旱、酒精稅務優惠終止，以及出口因反傾銷受阻等因素，加上 2011 年的大量庫存去化，導致部分廠商減產因應，生質柴油與生質酒精產量雙雙下滑。

兩個次產業同時下滑的情形也發生在全球第二大市場歐盟，該地區受到高價原料、重複計算(double counting)機制擴大以及阿根廷與印尼等進口產品的競爭所影響，產量也出現負成長。在上述負面限制因素下，儘管歐美等主要國家持續提昇政策目標用量，但仍無法挽救市場的衰退。

由市場發展趨勢可見，全球生質燃料成長已逐漸趨緩，歸結其原因在於以傳統食用性料源生產已接近瓶頸，未來生質燃料產業與市場規模要再大幅成長，使用非糧原料的技術與產品將扮演關鍵性角色，因此後續章節針對先進生質燃料技術、產業化概況以及未來趨勢做進一步的解析。



資料來源：工研院 IEK 整理(2013/06)

圖 1 2011~2015 全球生質燃料市場規模趨勢

### 三、先進生質燃料技術概論

在傳統以澱粉、糖、食用油脂為原料產製的第一代生質燃料受到與民爭食和與糧爭地爭議後，生質燃料技術已朝向先進生質燃料發展。所謂先進生質燃料在國際上的定義，一般泛指使用非糧原料來產製的生質燃料，主要包含：1. 使用農、林、都市廢棄物、非糧能源作物如麻瘋樹、柳枝稷等原料透過纖維素水解、發酵、氣化、費雪托普合成、生物合成等轉化技術產製的第二代生質燃料。2. 利用非耕地養殖之藻類生物質為原料產製的第三代生質燃料。3. 以微生物本身為生物反應器直接產製的第四代生質燃料。其範疇、優缺點比較與代表性廠商彙整如表 1。

第一代生質燃料技術發展成熟，且價格具競爭力，但卻有與民爭糧、與糧爭

地和原料價格波動性高等問題，和地域性發展現制，例如東南亞棕櫚油產製之生質柴油因冷濾點較低，可能無法適用於歐盟寒冷的天氣之問題；第二、三、四代的先進生質燃料雖可突破料源限制，但其技術都處於發展階段，具有生產成本不具價格競爭力，且資本需求較第一代生質燃料高缺點。

表 1 各世代生質燃料範疇、優缺點比較與代表性廠商

	範疇	優點	缺點	代表性廠商
第一代	泛指由主要耕地作物產製之生質燃料，如生質柴油與生質酒精 主要技術包含轉酯化、酵素發酵等	技術成熟穩定 在原料價格較低時，具有與化石燃料競爭之能力	有與民爭糧，與糧爭地爭議 原料價格波動性高 具地域發展限制	ADM、POET
第二代	泛指使用非糧食原料產製之生質燃料，如纖維素酒精、麻瘋樹為原料之生質柴油、合成生質柴油 主要技術包含纖維素水解、發酵，氣化，費雪托普合成，生物合成等	原料種類與數量較第一代生質燃料廣泛 較無糧食爭議問題	技術未達商業化之程度，成本高 資本需求較第一代生質燃料高	Bluefire Renewable DuPont Gevo Mascoma Verenium Dynamotive Kior Enerkem INEOS Bio
第三代	泛指使用非耕地之原料，製造過程需破壞生物質結構的生質燃料，如藻類生質燃料 主要技術包含藻類基因改質、大量生產技術、採收與藻油萃取等	具有單位面積產量高的優勢 具有吸收大量二氧化碳之減量效益	大規模養殖與採收 萃取技術尚未成熟 資本需求較第一代生質燃料高	OriginOil Solazyme Sapphire Energy
第四代	泛指使用非耕地來產製原料，製造過程無需破壞生物質結構，以微生物本身為生物反應器直接產製之生質燃料 主要技術為基因工程技術	產地較不受限制 較無生物多樣性衝擊問題	技術尚在研發階段，具商業化時程仍遠	Amyris LS9 Joule Unlimited Algenol LanzaTech

資料來源：工研院 IEK 整理(2013/06)

## 1.第二代生質燃料

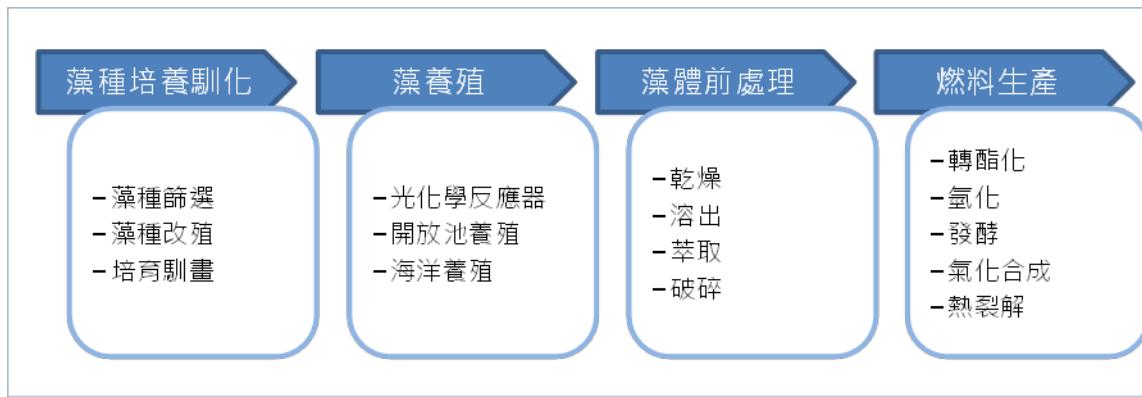
目前第二代生質燃料技術，主要可以分為生物化學技術、熱化學技術以及生物化學與熱化學技術整合型三大類。生物化學轉化技術泛指應用微生物發酵、微生物轉化之生產技術。熱化學轉化技術泛指應用高熱的方式裂解(pyrolysis)液化或氣化(gasification)方式將生物質裂解生成裂解油(pyrolysis oil)或合成氣(syngas)。裂解油和合成氣可用於直接燃燒，增加熱電共效能，合成氣也可以作為原料，經化學合成反應生產二甲基醚(Dimethyl Ether, DME)、甲醇、乙醇、合成柴油等生質液態燃料。

## 2.第三代生質燃料

藻類生質燃料意指使用藻類生物質作為原料，經加工後生產生質燃料。由於藻類具有快速繁殖、單位土地面積產量大的優勢與並非人類主食等特性，與第一代的玉米、甘蔗生產的生質酒精以及大豆、菜籽油生產的生質柴油相較，具有不衝擊糧食供應與較佳的環境永續性，因此在非糧料源與永續性生質能源發展趨勢下，成為受關注的產品。

目前藻類生質燃料仍處於發展階段，尚未有主導性技術出現，因此各個廠商在技術與產品發展上有所差異，但概略來說藻類生質能源生產製程主要包含藻種培養馴化、養殖、前處理與燃料生產。由於各生產階段的核心技術有所差異，例如藻種培養馴化主要仰賴生物科技、藻類養殖核心則為水產養殖、前處理與燃料生產則偏重於化工技術，因此投入的廠商多著重於特定生產技術的研發，較少廠商投入整體製程的發展。

就產品而言，目前廠商投入開發的產品包含生質柴油、可再生柴油、航空用油、生質酒精、生質原油以及其他生質化學品等。



資料來源：工研院 IEK 整理(2013/06)

圖 1 藻類生質能源製程簡介

### 3.第四代生質燃料

本文所定義的第四代生質燃料是以微生物本身作為反應器的本體，將糖、一氧化碳或二氧化碳等原料透過微生物本身的代謝途徑，直接產製生質燃料與化學品。該世代生質燃料具有較低成本料源(可使用工廠的廢氣為原料)、降低藻類油脂萃取成本(微生物直接將產品分泌到介質中)等優勢。在此世代的技術中，生物科技扮演重要的角色。

## 四、先進生質燃料產業發展概況

根據主要廠商所公布的現有、建設中與規劃中的產能統計，2012 年全球先進生質燃料產能約達 2.3 億公升，較 2011 年成長將近 1.6 倍，其中 52% 位居於美國，37% 位居於歐洲。若在現有廠商公布的建廠計畫具體落實的樂觀情境下，估計 2015 年全球先進生質燃料產能將達到 12.8 億公升，其中美國產能占 7 成以上，為全球最主要的發展地區。

## 4.1 主要國家發展概況

### 1.美國

美國先進生質燃料產業發展主要推動力在於 2007 年能源獨立與安全法案 (Energy Independence & Security Act of 2007, EISA)，該法案中設定纖維素生質燃料達到 160 億加侖(606 億公升)的目標。美國能源局 EPA 則於每年修訂的 Renewable Fuel Standard (RFS) 中訂定年度目標用量。儘管美國設定了遠大的目標，但近幾年由於技術商業化進程不如預期，EPA 多次下調 RFS 中纖維素生質燃料的目標用量。

2012 年美國先進生質燃料產能約達 1.2 億公升，但根據 EPA 的統計，該年度的產量僅約 8 萬公升，不及 RFS 當年 3,200 萬公升目標的千分之三。

### 2.歐盟

歐盟先進生質燃料產業發展主要推動力在於 Renewable Energy Directive (RED) 法案，該法案中針對非糧原料產製的生質燃料給予 double counting。另外歐盟也正在評估對於農糧作物產製的生質燃料設定 5% 的上限門檻。2012 年歐盟先進生質燃料的產能估計達 0.9 億公升。

## 4.2 主要廠商發展動態

以下針對全球主要先進生質燃料廠商的主要技術，與近一年發展動態與商業化時程，依照各世代技術做進一步的介紹：

### 1.第二代生質燃料廠商

第二代生質燃料廠商依其技術類別主要可分為使用熱化學技術的 Dynamotive、Kior、Enerkem，和使用生物發酵技術的 Bluefire Renewable、DuPont、Gevo、Mascoma、Verenium，以及結合熱化學與生物發酵技術的 INEOS Bio。這些廠商所使用的技術、近一年發展動態與商業化發展時程彙整如表 2。

這些廠商在公司背景、技術與產品上都有不同的優勢，例如 Mascoma 的 CBP 技術具有製程整和簡化的優勢；Enerkem 與 Verenium 則吸引較多資金投入；Gevo 的生質丁醇單位體積具有較高熱質，且可作為化學原料等，是目前第二代生質燃

料廠商中較具發展潛力的主要廠商。

在商業化發展進程中，Gevo、Mascoma、Verenium、INEOS Bio、Kior 等廠商有商業化示範場或商業化生產，且有商業化產品販售實績，除了技術開發外，由廠商的動態也可以發現，廠商已經開始往上下游佈局，尋找相關的策略夥伴。

表 2 第二代生質燃料代表性廠商技術與動態

公司名稱 (國家)	主要技術	近一年動態與商業化時程
Bluefire Renewable (美國)	•濃酸水解製程 (Concentrated Acid Hydrolysis)	•2012 年 2 月與韓國石化企業 GS Caltex 簽訂專業服務協議，建造纖維素糖廠 •日本 JGC 公司使用該公司技術於 Izumi 設有一座生質精煉廠先導廠
DuPont (美國)	•水解酵素與發酵技術 •5 碳糖發酵產製酒精之 Z. mobilis 酵素與發酵技術	•2012 年 11 月位於 Iowa 年產能 3 千萬加侖之纖維素酒精廠動土，規劃將於 2014 年年中完工 •2012 年 5 月與工程公司 Fagen 簽約，將於 Iowa 設立纖維素酒精廠
Gevo (美國)	•生質丁醇發酵菌株技術 •Gevo Integrated Fermentation Technology (GIFT™) •純化分離技術，提高丁醇產率	•2012 年 7 月該公司燃料應用於美國空軍試航 •2012 年 7 月 25 萬加侖的商業化生產廠開始產製生質丁醇 •2012 年 6 月與馬來西亞政府與生技公司簽訂合作協議，規劃設立纖維素丁醇廠 •2012 年 5 月與 Land O'Lakes Purina Feed 合作，開發生質丁醇飼料副產品 •2012 年 5 月與 VP Racing Fuels 合作，開發生質丁醇燃料摻配產品
Mascoma (美國)	•Consolidated Bioprocessing (CBP) 技術 •酵素技術	•2012 年 6 月與發酵產品公司 Lallemand Ethanol Technology 簽訂合作協議，將該公司生質酒精酵素產品以 TransFerm 品牌行銷 •2012 年 1 月發布該公司生質酒精酵素產品 Drop-In MGT 酵素商業化策略，包含與石化廠 Valero 商業化生產與供應協議以及與 Lallemand 和 ICM 進行 MGT 商業化生產
Verenium (美國)	•前處理、五六碳糖發酵等酵素生產技術	•2012 年 7 月獲得 EPA 授權，銷售其纖維素酵素產品 •2012 年 1 月發表該公司第二項發酵產品 Pyrolase，將應用於油礦探勘場域污染處理 •2012 年 1 月與同意 Tate&Lyle 使用該公司酵素技術於創新之食物添加劑產品

表 2 第二代生質燃料代表性廠商技術與動態(續)

公司名稱 (國家)	主要技術	近一年動態與商業化時程
INEOS Bio (美國)	•氣化技術 •合成氣發酵產製乙醇技術 •生物催化技術	•2012 年 10 月合資公司 INEOS New Planet BioEnergy 開始生物質發電 •2012 年 8 月 Florida 廠獲得先進生質燃料產銷許可 •Florida 廠設施完工，纖維素酒精年產能 8 百萬加侖，另可產製 6MW 電能
Dynamotive (加拿大)	•快速熱裂解(Fast Pyrolysis)技術 •熱裂解油產製車用燃料油 (Biomass into GasOil)技術	•2012 年 7 月與 IFPEN, Axens 合作開發生質油商業化製程技術 •2012 年 2 月與馬來西亞廠商 Genting Bio-Oil 延長合作備忘錄，發展東南亞生質油市場
Kior (美國)	•流體催化裂解技術 (Biomass Fluid Catalytic Cracking, BFCC)	•2013 年 3 月首批纖維素生質柴油出貨 •2012 年 7 月與 8 月分別獲得美國 EPA 可再生汽油與可再生柴油產品登記 •在美國 Texas 設有一座先導場與示範場，另在 Missicicpi 設有一座年產能 13 百萬加侖商業化生產廠
Enerkem (加拿大)	•氣泡式流體化床 (Bubbling Fluidized Bed)氣化技術 •合成氣淨化技術 •催化合成技術	•2013 年 5 月發布將在加拿大政府支持下進行新的廢棄物產製生質燃料的研發計畫 •2012 年 2 月位於加拿大 Quebec 的示範場完工，並於同年 6 月投產 •於加拿大 Quebec 設有一座 5 百萬公升示範場；另於加拿大 Alberta、Quebec 與美國 Mississippi 分別有一座 38 百萬公升商業化廠興建中與開發中

資料來源：工研院 IEK 整理(2013/06)

## 2. 第三代生質燃料廠商

儘管 1970 年代美國即投入資源進行藻類生質能源技術研發，但藻類生質能源產業化的發展目前仍處於萌芽期的初期階段，技術不確定性仍高，目前投入的廠商多限於實驗室、先導廠或示範廠的小規模驗證，並未有大規模的生產與銷售。

表 3 彙整目前藻類生質燃料發展最受矚目的 OriginOil, Solazyme 與 Sapphire Energy 等 3 家廠商的主要技術與近一年動態和商業化時程。這三家廠商在藻類生質燃料的布局各有差異，Solazyme 與 Sapphire Energy 採取垂直布局方式，從藻

種篩選開始到藻油生產皆有涉入，OriginOil 則由垂直布局改變到聚焦於收獲與萃取技術。由於藻類生質能源在前處理製程上需要耗費大量的能源，因此節能技術的開發有助於降低生產成本，使其能提早滲透市場，有鑑於此，OriginOil 將重心放在於後端低耗能藻收獲與藻油萃取系統的開發與販售，並將技術擴大到具有市場潛力的油氣探勘廢水處理，在成長緩慢的藻類生質燃料事業外另尋出路，但其處理規模是否能再持續擴大將是主要考驗。

在商業化進展上 Solazyme 與 Sapphire Energy 較其他藻類生質燃料廠商為快速，相較於 Sapphire Energy 專注於藻油產量的擴大，Solazyme 的布局更加具有彈性。Solazyme 的藻類生質燃料已進行小量的生產，且獲得政府部會、航空業者與軍方合約，並在生質化學品、化妝品、保健食品等不同產量、價格與應用的市場上布局，更透過與巴西與製糖大廠 Bunge 合作之布局設廠，鞏固上游料源之供應，由於藻類生質燃料屬於大宗物資，具有量大價低之特性，要達到具成競爭力之規模，估計最少還需要 10 年以上，Solazyme 在化妝品、保健食品的布局可使公司先期獲利並吸引資金投入，更有助於藻類生質燃料商業化之持續發展。

表 3 第三代先進生質燃料代表性廠商技術與動態

公司名稱	主要技術	近一年動態與商業化時程
OriginOil (美國)	<ul style="list-style-type: none"> <li>•藻收獲、脫水與萃取技術</li> <li>•光反應器技術</li> <li>•擁有一項技術專利以及 30 多項申請中專利</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•2012 年 10 月與油氣產業之水處理商 Preal H2O 簽訂 CLEAN-FRACTM 技術 OEMs 授權協議</li> <li>•2012 年 9 月藻採收技術獲得澳洲專利</li> <li>•2012 年 8 月於日本的合作夥伴 Research Institute of Tsukuba Bio-tech 獲得日本農林漁業部補助，將設置一座廠來驗證產製生質燃料與污染土壤復育的可行性</li> <li>•2012 年 7 月美國能源部國家實驗室採購兩套 Algae ApplianceTM 設備</li> <li>•2012 年 7 月成立油氣業務部門</li> <li>•2012 年 7 月銷售第一套藻採收設備 Algae ApplianceTM 予法國廠商 Ennesys</li> <li>•2012 年 5 月與微藻養殖技術開發商 Algasol Renewable 簽訂合作意向書</li> <li>•2012 年 3 月與藻類生產商 Aquaviridis 簽訂商業合作協議，協助該公司在墨西哥開發藻類生產廠</li> </ul>

表 3 第三代先進生質燃料代表性廠商技術與動態(續)

公司名稱	主要技術	近一年動態與商業化時程
Solazyme (美國)	<ul style="list-style-type: none"> <li>•以微藻產製可再生油脂</li> <li>•專利異養(heterotrophic)微藻，可在無光環境中發酵醣類生長</li> <li>•藻類篩選技術</li> <li>•藻類馴養、基因改殖技術</li> <li>•擁有四項技術專利以及 150 多項申請中專利</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•2012 年 8 月燃料產品 Soladiesel® 獲得美國 EPA 註冊許可，可以於市場銷售</li> <li>•2012 年 6 月宣布，位於伊利諾州，Peoria 第一座整合生質精煉廠啓用，開始產製藻油，年產能 2 百萬公升</li> <li>•2012 年 5 月與 Dow 簽訂全球商業採購協議，與聯合開發協議，加速生物基介電絕緣液商業化開發</li> <li>•2012 年 4 月與 Bunge 合資在巴西設立藻油生產公司 Solazyme Bunge Produtos Renováveis Ltda，規劃年產能 10 萬公噸</li> <li>•2012 年 3 月美國海軍在艦隊與舷外發動機成功測試由藻油生產的生質燃料 SoladieselHRD-76®</li> <li>•Solzyme 與 Roquette 合資公司 Solazyme Roquette Nutritional 與 Roquette 簽訂歐洲獨家銷售協議，銷售藻類食品添加劑</li> <li>•2012 年 1 月 Maersk Line 貨運船隻成功測試由藻油生產的生質燃料 Soladiesel®</li> <li>•2012 年 1 月宣布該公司保養品品牌 Algenist</li> </ul>
Sapphire Energy (美國)	<ul style="list-style-type: none"> <li>•藻篩選與改殖專利技術</li> <li>•藻油溶劑萃取專利技術</li> <li>•藻類生物質分解酵素與生質燃料生產專利技術</li> <li>•生物質催化裂解專利技術</li> <li>•擁有 240 多項專利技術</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•2012 年 11 月與 Institute for Systems Biology (ISB)策略合作，進行學術研究與藻類生質能源研發</li> <li>•位於紐約州的先導廠開始生產</li> <li>•2012 年 8 月完成第一期 Green Crude Farm 設施，2014 年綠色原油年產能 1.5 百萬加侖</li> <li>•2012 年 4 月完成第三輪共計 1.44 億美元募資</li> <li>•2012 年 2 月與 Earthrise Nutritionals(日本 Dainippon Ink &amp; Chemicals, DIC 子公司)簽訂授權協議，Sapphire Energy 獲得授權使用 Earthrise Nutritionals 的 spirulina 藻種來進行生質能源開發</li> </ul>

資料來源：工研院 IEK 整理(2013/06)

### 3.第四代生質燃料廠商

第四代生質燃料以微生物本身作為反應器本體，透過微生物代謝途徑直接產生生質燃料與化學品，為有效解決能源作物與民爭食與糧爭地的關鍵技術，表 4 彙整目前第四代生質燃料發展最受矚目的 LanzaTech、Joule Unlimited、LS9、Amyris、Algenol 等 5 家廠商的主要技術與近一年動態和商業化時程。

表 4 第四代先進生質燃料代表性廠商技術與動態

公司名稱	主要技術	近一年動態與商業化時程
LanzaTech (紐西蘭)	<ul style="list-style-type: none"> <li>•氣體發酵技術</li> <li>•基因工程、合成生物技術</li> <li>•專有發酵菌株組合</li> <li>•擁有 4 項專利與 120 多項申請中專利</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•2012 年 11 月與寶鋼合資子公司 Shanghai Baosteel Lanzatech New Energy 10 萬加侖酒精商業示範廠成功投產，並規劃在 2013 年投入商業化生產廠</li> <li>•2012 年 10 月與馬來西亞國營石油公司 Petronas 簽訂合作開發協議，共同開發以 CO 與天然氣產製醋酸</li> <li>•2012 年 10 月 Western Technology Investment 投資 LanzaTech 1,500 萬美元</li> <li>•2012 年 8 月與 Nylon 製造大廠 Invista 簽訂合作開發協議，共同開發以 CO 產製丁二烯與其他生質材料，規劃在 2016 年商轉</li> <li>2012 年 3 月與 New Zealand Steel 簽訂協議，延長雙方 2008 年開始的先導廠合作計畫</li> <li>•2012 年 1 月第三輪增資，共募資 5,580 萬美元，投資者包含馬來西亞國營石油公司 Petronas, Dialog Group 投資 LanzaTech</li> </ul>
Joule Unlimited (美國)	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Helioculture™ 技術平台與 SolarConverter® 生產系統</li> <li>•擁有 19 項專利以及 130 多項申請中專利</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•2012 年 9 月與汽車大廠 Audi 行程策略夥伴，加速生質燃料產品商業化發展</li> <li>•2012 年 9 月宣布興第一座位建在新墨西哥州的 SunSprings™ 示範廠</li> <li>•2012 年 1 月第三輪增資，共募資 7,000 萬美元</li> </ul>
LS9 (美國)	<ul style="list-style-type: none"> <li>•基因工程、合成生物技術</li> <li>•Watchmaker 自動化生物工程技術</li> <li>•生物催化技術</li> <li>•擁有 10 多項專利與數十項申請中專利</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•2012 年 9 月宣布位於佛羅里達的示範廠運轉成功，生產第一批脂肪醇(Fatty Alcohol)產品，該廠年產能約 7.5 萬加侖</li> <li>•2012 年 6 月位於佛羅里達的示範廠正式起啓用</li> <li>•2012 年 5 月獲得 Florida Opportunity Fund 450 萬美元投資</li> </ul>
Amyris (美國)	<ul style="list-style-type: none"> <li>•基因工程、合成生物技術</li> <li>•擁有 66 項專利與數 279 項申請中專利</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•2012 年 7 月修訂與 Total 的技術合作協議，未來三年將投入 8,200 萬美元作為 Biofene 產品開發</li> <li>•2012 年 6 月 Azul Brazilian Airlines 使用 Amyris 航空燃料試航</li> <li>•2012 年 6 月獲得美國國防部 DARPA 800 萬美元合約</li> <li>•2012 年 5 月與 Volkswagen 合作測試 Amyris 生產之生質燃料</li> </ul>

資料來源：工研院 IEK 整理(2013/06)

這些第四代生質燃料廠商大多利用基因工程與合成生物技術，量身訂製出具有特定基因與代謝途徑的生物工廠，藉此合成與產製特定產品。對於產品線布局較廣的廠商如 LanzaTech、LS9、Amyris 等廠商，快速篩選、評估和宜微生物，將有利於廠商持續評估與開發新的應用產品，LS9 的 Watchmaker 整合性自動化生物工程技術，即可協助該公司達成此一目的。而在這些廠商的經營獲利模式中，所掌握的專用的微生物菌株或藻種也將是持續獲利的來源。

目前第四代生質燃料廠商的商業化進程仍以先導廠或示範廠為主要，儘管 LanzaTech 中國大陸寶鋼合資公司已規劃在 2013 年開始興建商業化廠，第四代生質燃料商業化仍需要大筆資金的投入與時間的等待，除了技術放大所需面臨的挑戰外，這些經過基因工程改殖的微生物對於生態環境可能造成的影響仍有疑慮，且受到政府嚴格的管控。

## 五、先進生質燃料趨勢展望

### 1. 先進生質燃料第一波商業化熱潮預期在 2012~2015 年間

由目前廠商發展情況來看，預期先進生質燃料商業化熱潮將於 2012~2015 年間發生。這段期間商業化的技術將以目前發展較為成熟的熱化學與生物化學技術為主。但儘管有機會在 2012~2015 年間掀起先進生質燃料商業風潮，但產品價格恐仍不具競爭力。以使用玉米桿等廢棄物為原料的 POET 為例，POET 在 2010 年宣布纖維素酒精生產成本已降到每加侖 2.35 美元，並預期在 2013 年開始商業化運轉後可再降到每加侖 2 美元。若以目前汽油價格加侖 2.7 美元及汽油和酒精的熱值比來計算，纖維素酒精成本需要降到每加侖 1.8 美元才有競爭力，意味著先進生質燃料仍須靠政策補助或碳交易制度與 RINs (Renewable Identification Numbers)制度來提高價格競爭力。

POET 使用成熟之玉米產業為根基的模式，與其他需要發展特殊能源作物耕作體系或生物質原料供應鏈體系的先進生質燃料技術相較，已經是成本上較具可行性的技術，如此可概略推論，此一世代的技術在成本競爭力上仍嫌不足，新技

術仍有發展需求，而 Agrivida, Syngenta, Solazyme, LS9, Amyris 等廠商透過基因工程技術來降低生產成本，是未來可能的解決方案。

## 2. 藻類生質燃料商業化發展仍面臨術、資金與環保等多重挑戰

藻類生質燃料在節能減碳趨勢下市場需求商機無限，市場已俱備等待產品的進入，然而藻類生質能源產業發展仍有三項主要挑戰：

第一，在於技術方面，現階段生產技術多為試驗室、先導廠或示範廠，在製程放大上面臨無法達到預期生產效率的問題，此外製程能源耗用量大，生產成本高，無法與取代產品競爭。

第二，在資金方面，由於藻類要應用於大宗的能源與燃料上，低成本為重要的關鍵，因此儘管藻類養殖技術發展多年，且在營養食品的應用上市場成熟，但距離能源的商業化應用仍有大幅的差距，需要持續資金投入研發，降低生產成本才有機會滲透市場。近幾年全球經濟環境低落，市場資金保守，已使多家投入廠商退出，目前仍在的廠商以獲得政府補助的廠商發展較為快速，因此未來藻類生質能源能否跨越發展初期的鴻溝，還須倚賴政府與民間資金的持續投入。現階段投入藻類生質能源資源最多的美國政府經過多年的等待，尚未得到具體的商業化產出，未來在頁岩氣等新能源的開發後，是否會像 1970 年代石油危機結束後，相關計畫被束之高閣，將會是影響藻類生質能源是否再度泡沫化的關鍵。

第三，現階段藻類篩選技術導入基因改殖，未來藻類的大規模生產是否會對於生態環境造成影響仍有很大的未知數，也成為部分團體反對該產業發展的論述根據。

## 3. 基因工程、合成生物等生物科技為第四代生質燃料技術基底

在第四代生質燃料發展中，基因工程、合成生物等生物科技扮演關鍵性角色，多數廠商都具有微生物菌株或藻種篩選、培育與改殖的基本能力，以利其快速篩選並培育出合適的生物反應器，並不斷提升反應效率，藉由生物工程技術導入料源生產，藉以降低製造成本。

除了製程技術外，目前已有廠商由原料端著手，以生物工程技術來解決成本問題。例如 Agrivida 與 Syngenta 採取基因改質的方式生產專用之能源作物，藉以降低生產成本，可能是未來降低生產成本的關鍵技術。

由 Syngenta 所開發，專為生質燃料所開發的基改玉米品種 Enogen 於 2010 年取得美國農業部的種植許可，並已正式商業種植。Syngenta 在這個基改玉米中添加酵素基因，在製程上可以減少酵素的投入，藉以降低酒精生產成本。Agrivida 則進一步的將這個概念擴大到能源作物，藉由生物工程技術將細胞壁分解的酵素基因植入能源作物中，使植物生產過程中同時生產分解酵素，藉此降低酵素使用成本，並進一步降低製程成本。

相似的，Solazyme 則是將基因工程應用於藻類上，開發出含油量高達 80% 以上的微藻，這個微藻養殖的方式與其他藉由光合作用的方式不同，是在無光環境的發酵槽中，以糖為養分來養殖，再進一步生產燃料、化學品與營養品。

相對於上述 3 家廠商由原料端著手，LS9 與 Amyris 則將生物工程技術應用在產品生產端，以微生物作為活體工廠 (Living Factory)的概念來產製生質燃料與生質化學品，朝向整體性的生質精煉產業來發展。

在美國 RFS2 的目標下，纖維素生質燃料需求將由 2015 年的 30 億加侖逐步在 2020 年達到 105 億加侖，屆時這些以生物工程為核心的新一代的先進生質燃料技術將扮演在量與價上滿足此一目標的關鍵。但在實際商業化與擴散，仍須資金的投入與時間的等待。

## 六、結論

全球生質燃料市場需求預期仍由歐美政策所驅動，在上游農作物原料供給趨於穩定的前提下，產量可望恢復成長，但稅務優惠終止、double counting 等挑戰依舊存在，加上歐盟可能對主要出口國阿根廷與印尼採取反傾銷措施，預期成長有限。短中期而言，農作物價格因生質燃料與新興國家糧食需求成長而趨緊，預料在供給與存貨吃緊情況下，價格容易受到經濟情勢、匯率、氣候等因素變動大幅波動。由於原料價格上漲與原料來源限制，未來幾年傳統生質燃料市場成長將逐漸趨緩，先進生質燃料儘管已接近商業化運轉，但預期短期內擴充幅度有限。

生質燃料產業在短短十年內已由成長期邁入成熟期，未來產業面對的挑戰包含：1.高價原料降低與化石燃料的價格競爭力，並加深與民爭食的負面形象；2.傳

統食用性原料已接近發展瓶頸，政府可能推出相關政策來限制用量，新料源開發也將受到永續性發展的限制；3.油砂與頁岩氣技術的突破與商業化的開發，對於生質燃料帶來衝擊。可以預期的是，生質燃料產業與市場規模在未突破料源限制的前提下已難再大規模擴張，而且還須面對油砂與頁岩氣等新化石能源的挑戰。

在此嚴峻的挑戰下，生質燃料是否還有持續發展的空間？由過往生質燃料發展的 3 點訴求：1.較低的溫室氣體排放、2.能源供給的自主性與多樣化、3.帶動農村經濟的發展，來省思，生質燃料仍然有存在的機會，但預期以農糧為原料的傳統生質燃料將逐漸減縮，非糧作物、纖維素酒精、藻類生質能源等先進生質燃料則將需要證實其成本可與頁岩氣來競爭，並持續吸引資金投入的高度挑戰。

# 台灣能源管理系統產業概況

王怡臻\*、蔡家緯\*\*、魏榮宗\*\*\*

## 摘要

基於電力系統升級與節約能源的需求，當前世界各國智慧電網的建置正如火如荼的展開。除了電力供給和輸配端的積極改善，與能源使用端的連結與配合也日益受到重視，而能源管理系統便是為實現需求端管理的重要工具，許多廠商看到未來的節能減碳商機，開始投入此一產業力圖發展。本文探討台灣的能源管理系統產業概況、廠商動態，做為台灣廠商投入能源管理系統產業的參考。

【關鍵字】能源管理系統、節約能源、節能減碳

---

\*財團法人資訊工業策進會產業情報研究所 產業分析師

\*\*財團法人資訊工業策進會智慧網通系統研究所 正工程師

\*\*\*元智大學電機工程學系 教授

## 一、全球及台灣能源管理系統產值

全球節能減碳的風潮興起，能源資訊相關產業數量隨之增加，進而相關產業產值亦不斷推升。特別是當前大力推動的智慧電網，其基礎建設的佈建為目前最重要的工作，因而帶動相關產業成長。隨著電網基礎建設發展，終端用戶相關應用產品與服務的產值亦開始有向上攀升的趨勢。據 Pike Research 和美國 NAESCO 資料顯示，2012 年全球能源管理系統的產值達 21.6 億美元，預估至 2016 年將達 38 億美元規模，年複合成長率將近 14%。

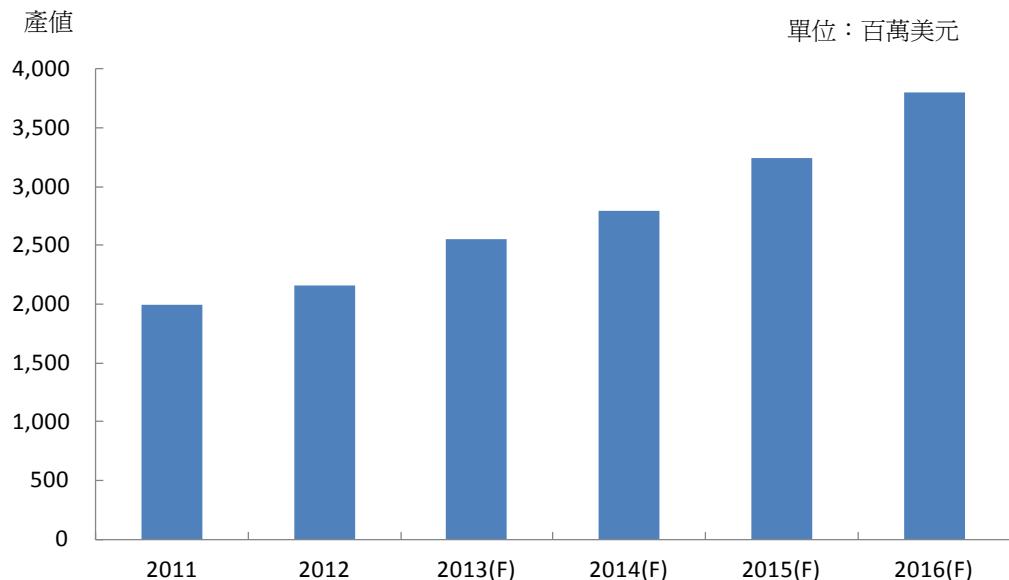


圖 1 2012 年全球能源管理系統產值

依據經濟部工業局統計資料顯示，2010 年台灣智慧電網相關產業總產值為 256.6 億，且以內銷為主，約占 90%，外銷僅約 10%。智慧電網所涵蓋之產業範疇，包括先進配電自動化系統(DAS)、智慧電錶系統(AMI)、智慧家電系統、電動車智慧充電系統、能源管理系統(EMS)之中，能源管理系統產值佔第三，產值達 64 億元。

而據經濟部能源局統計指出，2011 年台灣的能源資通訊產業產值達 125 億元，預估至 2015 年產值將達 500 億元。能源資通訊產業概分為三大領域，分別為輸配電自動化系統、智慧電錶系統以及能源管理系統，至 2011 年 1~8 月產值以能源管理系統為最高，達 62 億元，其次是輸配電自動化系統，為 23 億元。

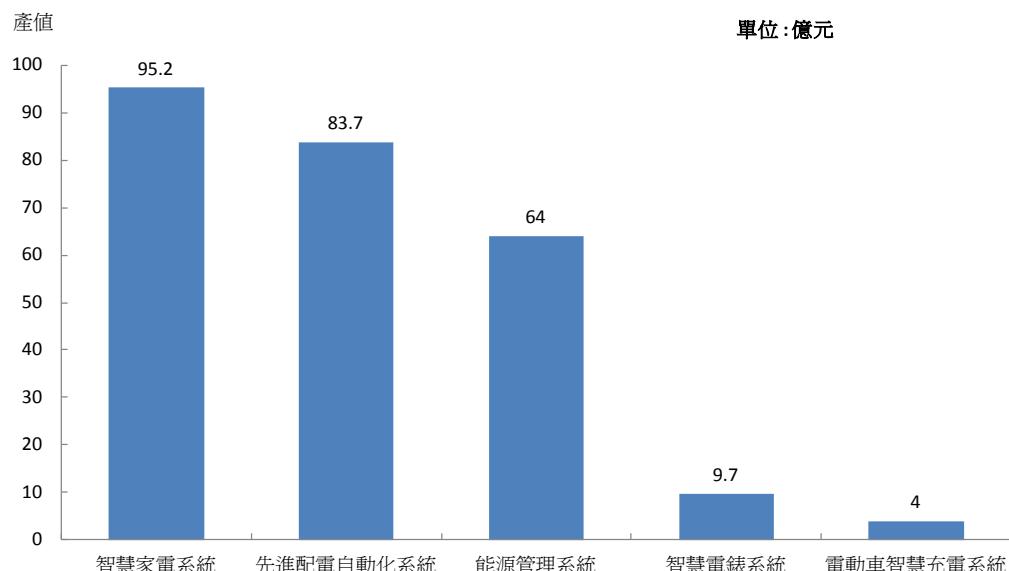


圖 2 2010 年台灣智慧電網相關產業產值

## 二、全球與台灣能源管理系統產業概況

### 1. 整體概況

目前世界各國在智慧電網的推動上，首要任務在於先進讀錶(AMI)基礎建設的建立，而未來 AMI 的發展重點，是和消費者端的應用結合，例如家庭能源顯示器、家庭能源網路、智慧家電等能源管理相關系統，以促進能源使用者的節能效果。然而終端用戶相關應用產品與服務，需待電網基礎建設完善後才有著力的焦點，再加上消費者關心的資訊安全、使用成本的問題尚待解決，預估需要 3~5

年的時間才會蓬勃發展。然著眼於未來的商機，電力供給端欲進入應用端之市場，開始與消費端合作開發，建立起智慧電網上下游的合作體系。例如電力公司以及智慧電錶大廠均與 HEMS 廠商合作開發產品整合技術。

## 2.建築能源管理系統

建築能源管理系統(Building Energy Management System, BEMS)前幾大廠商為 Johnson Controls、Honeywell、Siemens、Schneider Electric 等。這些廠商主要強項在於 BEMS 相關的軟硬體、系統控制及通訊協定設備的開發能力。此外，專業化能源管理的廠商，例如 Ecova 和 Pacific Controls，則主要開發服務導向的新技術。再者，IT 廠商，例如 HP、IBM，亦均利用其本身既有之資訊技術的優勢，投入能源管理的市場。而家電系統廠商，例如大金、日立、Panasonic、富士通、東芝等，則藉由其在空調變頻及控制的技術，提供與 BEMS 連結的相關服務。

由於近年來能源管理系統的功能開始獨立於其他硬體設備，功能也益趨多元，為提供更完善的能源管理服務，許多大型公司便紛紛開始透過購併小型而創新的公司或產品來拓展其產品線；或者為強化系統軟體能力而購併系統軟體廠商，以發展成為全功能的能源管理服務商。併購項目包括能源採購管理、需量反應管理、賬單管理和節能技術等。

## 3.家庭能源管理系統

投入家庭能源管理系統(Home Energy Management System, HEMS)的廠商來自相當多元的產業，可分為幾大類。第一類為家電大廠，如 Panasonic、東芝、三菱電機、海爾等，推出可整合家電設備之 HEMS 相關產品及服務。第二類為能源管理系統及自動偵測控制軟硬體相關設備廠商，例如 Freescale、Renesas Electronics、MMB 等等。第三類為電信或系統整合商，多是在本身核心業務外提供能源管理系統的加值應用，例如東日本 NTT 的 FLET'S、Control 4 等。第四類為建商，如積水房屋、三澤住宅、Toyota Home，皆推出相容於其建物的能源管理系統。另外還有消費性電子、汽車等廠商，例如京瓷、SHARP、三菱汽車等，均推出相關能源管理系統產品。

若針對銷售之設備產品範疇來劃分，HEMS 的供應商大致可分為兩大類，一類是純 HEMS 供應商，另一類則是家庭自動化方案(Home Automation)業者。後

者是提供智慧家庭整體解決方案的廠商，而 HEMS 為其中一種功能。第一類的 HEMS 業者，提供之產品類別又分為兩大類，第一類是簡單的智慧軟體分析平台，透過與電廠合作，並利用社群平台提供加值服務，例如美國的 OPOWER 公司。第二類是具有監控功能之能源管理系統，包括溫度控制器，生產廠商如 Nest、EcoFactor、ecobee 等公司；也包括智慧插座或其他感測器，生產廠商如 Alertme、Talking plug 以及 NTT FLET's 所提供的 Miruene 系統。

至於家庭自動化方案業者，其提供智慧家庭整體方案系統，整合居家安全監控、影音娛樂、節能、居家照護等功能，例如日本 Panasonic 推出的 Lfinity 系統。目前由於家庭自動化方案業者將 HEMS 做為整體產品解決方案的功能之一來供應，可提供完整的家庭智慧化方案，不需再額外加裝能源管理專用設備，因此雖然純粹 HEMS 的供應商有更高的能源管理專業，但仍面臨來自完整家庭自動化方案業者的強大競爭威脅。

### 三、台灣能源管理系統產業概況

#### 1. 整體概況

台灣的能源管理系統廠商並不多，且規模較小，尚在萌芽階段。除極少部分做單純軟硬體設備販賣外，大部分是由能源管理服務業(Energy Service Company, ESCO)的廠商，兼營設備銷售。由於此領域之關鍵技術由國際大廠掌握，門檻較高，故台灣市場主要多為國際大廠所主導，如 Microsoft、Google、Johnson Controls、Honeywell、Siemens、ABB 等，國內廠商則因規模小，加上未能主導通訊標準規格，尚無法與國際大廠競爭。

#### 2. 產業鏈概況

能源管理系統從上游到下游之產業鏈包括零組件、模組、軟硬體設備、服務等區塊。其上下游產業分別為晶片、感測器/控制器、電力量表、資訊設備/通訊模組、自動化&嵌入式設備、圖控軟體、系統整合服務、能源管理服務等。

##### (1) 上游感測與控制系統廠商

系統感測與控制是系統自動化的兩項重要元件，藉由感測技術可以瞭解系統目前運作狀況，並據以適當地運用控制技術，使設備維持最佳的運作狀況。節能相關的感測器包括燈光感測器、溫濕度感測器、環境感知器、智慧插座等。目前能源監控應用產品多由國外大廠主導規格技術發展並掌握專利，如 Banner、Intel、Freescale、Jetlun、ST Microelectronics、CentraLite、NETGEAR 等。不過，台灣在資通訊產業有深厚的基礎，因反應快、彈性佳、成本低，在全球資通訊產業鏈上已為許多大廠之策略夥伴，占有一席之地。若未來要跨足能源資通訊設備具有優勢，在感測器、控制器、網通設備等各方面亦具有優良之製造能力。台灣生產感測器與控制器的廠商包括永宏、研華、泓格、向陽、士林電機、玖鼎、康舒、台科電、七泰等；而電力監控設備廠商則包括祥正、信可、亞力、柏翔等。

### (2) 中游通訊模組及軟體廠商

中游部分包含資訊設備/通訊模組、圖控軟體。資訊設備是指用以連結各項用電設備及供用電兩端之通訊網路，AT&T、Verizon、Comcast 等服務供應商近來均積極推動相關的家庭網路服務業務；而台灣廠商則包括研華、泓格、四零四、向陽、永宏、士林電機、合勤、茂發、友訊等，均提供能源管理相關的資訊設備。圖控軟體是指提供監視、控制及資料蒐集等功能之設備，台灣相關廠商包括研華、柏眾網控（Broadwin Technology）、柏翔、智恆、資策會、精誠資訊、神腦系統、鼎新系統等。由於當前國際大型之軟體業者，掌握關鍵技術並且主導規格標準，因此台灣軟體市場仍由外商主導。

### (3) 下游系統整合及服務廠商

下游部分則包含整合及服務。系統整合是指將建築物內之各種不同的應用子系統，如門禁控制、消防與安全警報、能源監控、公共設施管理等，加以連結整合，使建物內之訊息流通共享，促進操作方便性、避免資源浪費。由於國際大型系統整合業者具有整合多項系統之能力，故台灣市場仍由其主導；而台灣大多數系統整合商是以國際大廠開發之既有軟體平台提供客製化的服務，只有少數幾家廠商具備自行開發軟體的能力。台灣的系統整合商包括宜碩、中興保全、中華電信、中興電工、新鼎系統、遵宇科技、友電企業、弘富寬頻科技、

宗亞資訊工業、豐譽電信事業、台灣數位工程等公司。

能源管理服務是指協助客戶進行能源管理軟硬體設備安裝、提供客戶查詢能  
源資訊的平台、提供能源管理相關建議的服務。台灣現有許多 ESCO 廠商可代理  
國外設備並提供能源管理診斷與建議，規模均不大；相較於國際 IT 廠商的資訊  
核心能力，台灣 ESCO 廠商具有機電相關專業，精於提供小型客製化的服務，因  
而與國際 IT 廠商各擅勝場。台灣能源管理服務廠商包括中華電信、中興保全、  
全家便利商店、工研院、中興電工、新鼎系統、巨路國際、漢唐集成、台灣松下、  
英太智慧、東洲能源及 ESCO 廠商等。



圖 3 能源管理系統產業鏈與相關廠商

## 四、結論與建議

全球能源管理系統產業將走向企業及產品功能整合。能源管理系統為新興產業，為更快速進入市場，許多大型公司透過購併其他企業，例如軟體或能源公司，以補其產品或服務之不足，因此能源管理系統產業未來將走向垂直整合的局面。此外，專業家庭能源管理系統之廠商將面臨來自提供完整智慧化解決方案廠商之威脅，因為相對於其他智慧家庭產品，消費者對能源管理系統接受度較低，而完整解決方案的提供將能源管理系統包含其中，並提供更多附加價值，因而消費者採購意願較高。因此未來專業能源管理系統廠商將走向與智慧化產品供應商整合，以提供完整解決方案為主的趨勢。

台灣廠商可善用自身優勢，參與標準制定，採取結盟策略。台灣廠商在硬體設備方面，可利用過往累積的資通訊技術的深厚基礎以及善用國際產業鏈的地位，更進一步研發高精密度且具成本優勢之能源管理相關零組件及通訊模組以進入國際市場。在軟體方面，台灣廠商可利用高度的彈性能力，開發與國外系統平台相容之軟體，強化客製化能力，以獲取利基市場，例如數量較小、需要符合多重需求的家庭市場。此外，由於台灣標準制定以國際標準為基礎，因此台灣廠商研發能源管理相關產品時應積極參與國內標準制訂，以順利掌握國內及國際市場。再者，國內廠商規模較小，可由較大的廠商或集團領頭，與其他相關廠商進行策略結盟，以形成完整體系；並在國際化規格成形前，優先建立統一平台，形成互通性標準，以促進國內能源管理產業的發展。

## 致謝

本文承蒙國科會 NSC102-3113-P-155-001 國家型能源科技計畫經費補助，特此致謝。