專業．效率．主動．創新

經濟部工業局
台北市信義路三段41-3號
電話：(02)2754-1255
傳真：(02)2704-3753
網址：www.moeaidb.gov.tw

經濟部工業局廣告

ISBN 978-986-05-3852-6
9 789860 538526 00500
GPN：1010601724
定 價：500元

綠色技術與工程實務研討會

106年
論 文 集

經濟部工業局 編印

經濟部

綠色技術與工程實務研討會

106年
論 文 集

經濟部工業局 編印

序

永續發展的重要性，在國內外各界早已形成共識，在綠色發展的過程中，產業除持續推動環境保護、節能減碳、水資源再利用等議題外，更必須思考如何提高資源使用效率，減少廢棄物產生，以邁向循環經濟的時代。經濟部工業局(以下簡稱本局)身為工業主管機關，深知工業發展在國家經濟發展中占有舉足輕重的角色，亦為帶動國民生活水準的重要指標。但隨著經濟成長的提升，民眾對環境品質的要求也日益提高，因此，在提升產業發展的同時，保持高品質的生活環境，更是產業永續發展的重要課題。本局除積極協助推動產業發展外，並透過產業綠色技術提升的各項輔導、宣導與推廣作為，協助產業推動相關污染防治技術等措施，以因應國際環保趨勢及提升產業競爭力，達到企業永續發展之目標。

為提供產、官、學、研各界之經驗與環保技術交流平台，本局自 1990 年起開始辦理綠色技術與工程實務相關研討會，彙整無數寶貴經驗，以實際的工程技術相互切磋，促進學術、技術的經驗與交流，在工廠提升綠色技術與污染防治能力方面有直接的貢獻。本年度辦理之「106 年綠色技術與工程實務研討會」，以「空氣品質管理類」、「資源利用與循環經濟類」、「產業節水及水資源再生處理類」、「綠色科技與環境管理類」為主軸，廣納各界之實務經驗，藉以提升國內產業綠色與環保技術，並擴展工業污染防治之成果與績效。

本研討會共收錄 42 篇論文，包含簡報發表 30 篇、海報發表 12 篇，期提供業界因應國際環保趨勢、提升綠色技術及廠內污染防治管理知能，並落實擴散推廣，為業界追求持續改善與企業永續發展提供寶貴的知識與技術傳承。對提供論文之先進，能毫無藏私地將推動環保技術及工程實務經驗與心得提供各界分享，在此致上由衷謝忱。

最後，感謝負責研討會籌備工作之執行單位－財團法人台灣產業服務基金會、論文審查委員及本局相關同仁，由於大家辛勞的投入，方能使本研討會順利舉辦及本論文集如期付梓。

經濟部工業局 謹誌

中華民國 106 年 11 月

目　錄

論文簡報發表議程1—空氣品質管理類

1-1 產業溫室氣體減量之應用低碳燃料技術
何皇智、林延彥、林育群 ----------1-1

1-2 以微氣相層析技術監測工業區中有害空氣污染物
劉文治、張翰青、郭子豪、王禮鵬、周宗冠 ---------- 1-15

1-3 以轉化速率解析衍生性氣膠之貢獻及管制策略
吳宗德、吳義林 ---------- 1-25

1-4 我國產業溫室氣體自願減量現況探討
陳裕民、王登楷 ---------- 1-43

1-5 熱水鍋爐汰換改造熱泵熱水系統
陳建枋---------- 1-57

1-6 利用無人飛機驗證臨近國道五號頭城交流道空氣品質空間分布模式模擬結果
游　昕、張章堂 ---------- 1-67

1-7 K-OMS-2 奈米桿狀材料應用於連續式光催化反應系統處理 VOCs 之研究
黎　龔、林雅雯、呂英杰、蔡靜宜、謝哲隆 ---------- 1-77

論文簡報發表議程2—綠色科技與環境管理類

2-1 利用 HFMEA 降低醫院環境危險性作業之風險
蕭水樹、Nhatthien Nnguyen、陳孝行----------2-1

2-2 應用交聯式流體化床運行化學迴圈程序於溶劑處理
張世翰、張晏銓、顧　洋、郭俞麟、李豪業、黃文慶、曾堯宣---------- 2-21

2-3 電子業面對氣候變遷風險之調適行動-以南部某汽車電子控制設備商為例
張銘城、林群燁、王登楷 ---------- 2-35

2-4 再生水廠能源管理與節能應用
何宗洋、施武陽 ---------- 2-49

2-5 電磁鋼片絕緣塗膜之無鉻高性能化
彭剛勇---------- 2-65

2-6 零耗氣-70°C 壓縮熱回收式乾燥機
黃志豪、邱秉岳 ---------- 2-77

2-7 熱水鍋爐系統管理面面觀
吳柏毅、謝志新、李清諒 ---------- 2-87

2-8 實測電梯電力回生裝置及其節能效益分析
林昆郁、練光祐、陳宗逸 ---------- 2-99

2-9 綠色厭氧生物技術處理高濃度釀酒廢水與再生能源應用
林郁仲、倪辰華、陳長祺 ----------2-111

論文簡報發表議程3—產業節水及水資源再生處理類

3-1 產業用水管理及水回收利用措施評析
李晨瑜、黃育德、黃欣栩、朱敬平、鍾裕仁 ----------3-1

3-2 超純水系統 RO 節能與節水改善
賴柏誌、于家驊、楊炳章 ---------- 3-15

3-3 陶瓷平板 MBR 膜技術應用於豆漿豆腐食品製造廠廢水全量回收之實廠案例探討
李岳翰、廖泰康、藍常睿、林正祥 ---------- 3-31

3-4 機械式蒸氣再壓縮蒸發系統(MVR)在肥料工場之實務與應用
賴彥穎、謝政璋、邵豪華 ---------- 3-41

3-5 Local Scrubber 廢水回收系統節能/節廢改善實例
盧彭潭、黃俊評、林志南、黃冠哲 ---------- 3-47

3-6 中鋼廢水純化場 UF 膜阻塞問題分析及改善
蘇育俊、劉婉如、林炅勳、蕭融澤 ---------- 3-69

3-7 科學工業園區污水處理廠放流水回收再利用模型廠試驗效能評估
張玄芳、廖宗銘、倪辰華、林俊德 ---------- 3-81

論文簡報發表議程4—資源利用與循環經濟類

4-1 工業廢棄物循環式流體化床(IWCFB)灰渣燒製再生骨材應用於控制性低強度回填材料(CLSM)之研發
林凱隆、周士鈞、羅康維、鄭大偉 ----------4-1

4-2 污泥灰渣應用於控制性低強度材料之工程特性研究
鄭煜愷、陳昭旭、高長義 ---------- 4-17

4-3 污泥取代黏土製磚燒結條件之研究
林毓舜、陳昭旭、翁振源 ---------- 4-31

4-4 以「金屬濕式提鍊技術」回收表面處理業高濃度重金屬廢液之應用
廖學賢、葉　旭、陳盛宗、李偉智、毛致中 ---------- 4-43

4-5 CNC 廢鐵粉屑回爐再生之高值化產品應用
林啟明、何長慶、江謝立恆、凌宇康、吳威德 ---------- 4-53

4-6 煉鋼爐石應用於綠色建材資源化之研究
賈佳蓉、李震輝、柯明賢 ---------- 4-65

4-7 廢氫氟酸回收再利用技術的可行性評估
吳和生---------- 4-77

海報發表

1. 自動排水器與空壓系統節能
葉慶得 ----------P-1

2. 應用適應性控制估測高壓電池系統之絕緣電阻
袁文璞、江益賢、施武陽 ---------- P-17

3. 增進土壤品質之不同長期肥培管理制度的評估
蕭乃瑜、陳仁炫 ---------- P-25

4. 廢熱驅動型除溼乾燥空調機組(LDAC)
蕭敬倫、王志吉 ---------- P-29

5. 澳洲高效節能的生物廢水處理創新技術–高糖食品廠污水處理案例分析
Steve Gluck、Akheel Soltan、呂欣倫 ---------- P39

6. 簡易型除水棒
張逢源、黃滿美 ---------- P-53

7. 處理含氟廢水的導電度分析與比較—處理 1Kg 50%HF 氟酸為基礎
廖明輝 ---------- P-59

8. 新穎低碳環境除氮節能技術
張鎮南、黃啟裕、陳威廷、賴冠佑 ---------- P-65

9. 有機廢棄物免堆處理系統
李信宏、邱淑靜、李宥徵、柯秀靜 ---------- P-73

10. 電漿熔渣應用於混凝土磚資源化之研究
姜智釗、賈佳蓉、湯凱卉、賴怡潔、柯明賢 ---------- P-83

11. 回收動力電池電能管理模組開發與測試
朱雅筠、袁文璞、江益賢、施武陽 ---------- P-97

12. 煉鋼爐碴再利用於膠結材料水化特性之研究
曾雅玟、陳昭旭、葉平堯 ----------P-105

議程1-空氣品質管理類

1-1 產業溫室氣體減量之應用低碳燃料技術

何皇智、林延彥、林育群

1-2 以微氣相層析技術監測工業區中有害空氣污染物

劉文治、張翰青、郭子豪、王禮鵬、周宗冠

1-3 以轉化速率解析衍生性氣膠之貢獻及管制策略

吳宗德、吳義林

1-4 我國產業溫室氣體自願減量現況探討

陳裕民、王登楷

1-5 熱水鍋爐汰換改造熱泵熱水系統

陳建枋

1-6 利用無人飛機驗證臨近國道五號頭城交流道空氣品質空間分布模式模擬結果

游　昕、張章堂

1-7 K-OMS-2 奈米桿狀材料應用於連續式光催化反應系統處理 VOCs 之研究

黎　龔、林雅雯、呂英杰、蔡靜宜、謝哲隆

產業溫室氣體減量之應用低碳燃料技術

何皇智*、林延彥**、林育群***

摘　要

節能減碳以降低溫室氣體排放與減少能源使用，已逐漸成為一種普世價值，國際間更訂定全球性的「氣候變化綱要公約」與「京都議定書」規範各國溫室氣體排放。在此議題下，臺灣產業如何減少溫室氣體的排放、應用低碳燃料技術及提升能源使用效率是重要關鍵。

本文以產業溫室氣體減量之應用低碳燃料技術為主題，探討產業加熱設備鍋爐，以天然氣取代燃油燃料技術進行分析探討，其內容包含以天然氣燃料替代燃油之技術可行性評估、經濟效益分析、能源技術服務業(ESCO)商業模式及案例說明等。

若企業採行低碳燃料技術，其溫室氣體減量比例約可達 27.6%，其能源使用成本(包含燃料與附屬設備等合計)約可下降 12.9%。若產業全面採行後，以 105 年國內工業部門燃料油使用量約 1,442.3 千公秉油當量換算，每年可減少約 124 萬公噸 CO_2 排放，相當可觀。

再者，隨著政府環保法規針對粒狀物排放更為嚴謹及碳交易法規持續推動，以天然氣取代燃油燃料之趨勢在未來會更加地活躍。

【關鍵詞】低碳燃料、溫室氣體減量

---

*財團法人台灣綠色生產力基金會　副理

**財團法人台灣綠色生產力基金會　副執行長

***財團法人台灣綠色生產力基金會　工程師

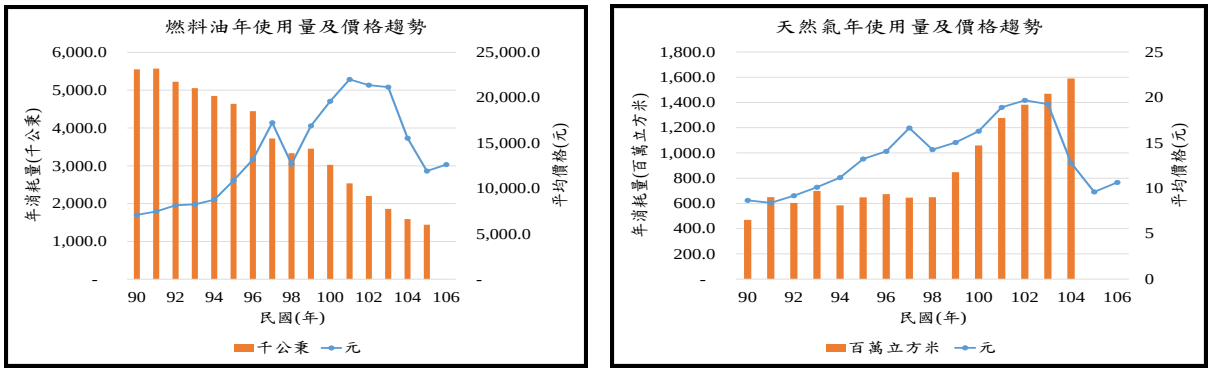
一、背景與現況

節能減碳以降低溫室氣體排放及減少能源使用，已成為一種普世價值，國際間更訂定全球性的「氣候變化綱要公約」與「京都議定書」，規範各國溫室氣體排放。臺灣進口能源依存度 97.7%，在此潮流下，如何減少對化石燃料的依賴、降低能源消費，達到最有效能源運用，提升能源使用效率及擴增再生能源使用是重要關鍵。105 年國內燃料油消費(扣除發電及汽電共生)，總消耗量為 1,950.1 千公秉燃料油(含能源部門自用)，其中工業部門用量為 1,442.3 千公秉，占 74.0%為最大宗，其次是服務業及運輸業，如表 1 國內燃料油消費占比。

表 1　國內燃料油消費占比

105 年	國內燃料油消費(扣除發電及汽電共生)					
	合計	能源部門自用	能源消費			
			工業	運輸	農業	服務
燃料油(千公秉)	1,950.1	61.6	1,442.3	97.4	30.1	318.7
占比(%)	100.0	3.2	74.0	5.0	1.5	16.3

國內工業部門燃料油使用量從 90 年的 5,053.4 千公秉，下降至 105 年的 1,442.3 千公秉油當量，一方面是這 12 年間，燃料油價格由每公秉 7,900 元，最高上漲至 22,013 元，漲幅達 3.1 倍，而 106 年(1~10 月)燃料油每公秉平均價格 12,625.9 元，迫使用戶尋求替代燃料及提高能源使用效率之節能方法。近年來環保意識逐漸抬頭，企業除了節省能源費用外，也因應降低二氧化碳排放量，善盡社會責任，因此天然氣需求自 90 年起持續上漲，104 年工業部門天然氣總消費量為 1,590.3(10^6 m^3)一直創新高，如圖 1 燃料油與天然氣年使用量及價格趨勢。隨著政府環保法規針對粒狀物排放更為嚴謹及碳交易法規持續推動，燃料油轉用天然氣之趨勢在未來會更加地活躍。



資料來源：經濟部能源局公佈能源平衡表

圖 1　燃料油與天然氣年使用量及價格趨勢(工業部門)

二、以天然氣燃料替代燃油之技術可行性評估

過去幾年因環保因素及永續經營理念抬頭,不少用戶陸續轉用天然氣鍋爐，透過廠商不斷累積成功經驗及設備技術提升，轉用天然氣技術已成熟。燃油轉用天然氣鍋爐之最主要目的在於有效降低燃料之成本及兼具節能環保之特性，在轉用燃料過程中，通常為「僅更改燃燒機系統」及「整座鍋爐汰換為天然氣鍋爐」等兩種範疇。

燃料轉換前應優先考量鍋爐結構設計及現場操作安全性評估，原則如：原鍋爐的設備元件須完好，給水系統和送、引風系統必須基本完整，以最不影響現場供熱及製程為設計準則，並且需符合安全相關法規等。

在符合安全性考量後，再考量技術可行性的部份。燃油鍋爐與燃氣鍋爐最大的差異點在於其燃燒器，因所燃燒的燃料不同，其火焰的特性與爐內管路的設計有些微的不同，且燃燒溫度亦有差異，因此歸納考量的評估因子如下所示：

1. 爐膛溫度：燃油鍋爐轉用天然氣鍋爐時，因其爐膛內燃燒完全，較少未燃碳黑粒子導致爐膛輻射換熱能力下降，且燃燒氣體中含有大量的水蒸氣吸收熱量使其爐膛出口排氣溫度上升，加重對流區材料熱傳負載，因此，轉用天然氣應考量對流區段金屬材料強度，避免溫度過高造成管線損壞。
2. 通風條件：因天然氣屬易燃燃料，燃氣鍋爐房內換氣量應列為考量原因，其換氣量中不包括鍋爐燃燒用氣量，轉用燃料時需考量現有鍋爐房通風性，當自然通風不足時，應設有機械通風裝置以確保換氣量，並加裝一氧化碳或天然氣洩漏偵測儀器，以符合相關鍋爐房設置規定。
3. 鍋爐防爆區規劃評估：燃氣鍋爐相對與燃煤、燃油鍋爐其防爆性要求較高，天然氣的爆炸濃度限度為 5~15%，因此轉用天然氣應考量防爆區或是防爆門的規劃。
4. 裝設熱回收設備評估：天然氣鍋爐相較燃料油鍋爐除了可減少附屬設施耗能外，尾氣熱回收潛力亦高於燃油鍋爐，燃料油鍋爐尾氣易發生低溫腐蝕現象，天然氣則不會有此問題，但裝設熱回收裝置需評估場地設置空間、熱回收裝置型式(節煤器或空氣預熱器等)、裝置容量大小及是否適用雙燃料系統等。
5. 燃燒機選用：部分轉用天然氣鍋爐仍採用原有的燃油燃燒機，有些燃燒機過於老化，自動化程度不高，沒有燃氣高壓控制器或反應不

靈敏，必須考量既有設備安全性。另外配合爐體型式及長度，燃氣燃燒機的選用亦須納入考量評估，避免因火焰長度過長而造成鍋爐爐體損害。

三、經濟效益分析

國內目前致力減少碳排放並鼓勵使用潔淨能源，天然氣為目前最受重視的潔淨能源之一。統計 90~106 年燃料油及天然氣(2)價格如圖 2，分析燃料油淨熱值轉換為天然氣淨熱值所需燃料費用，計算基礎如表 2 所示。

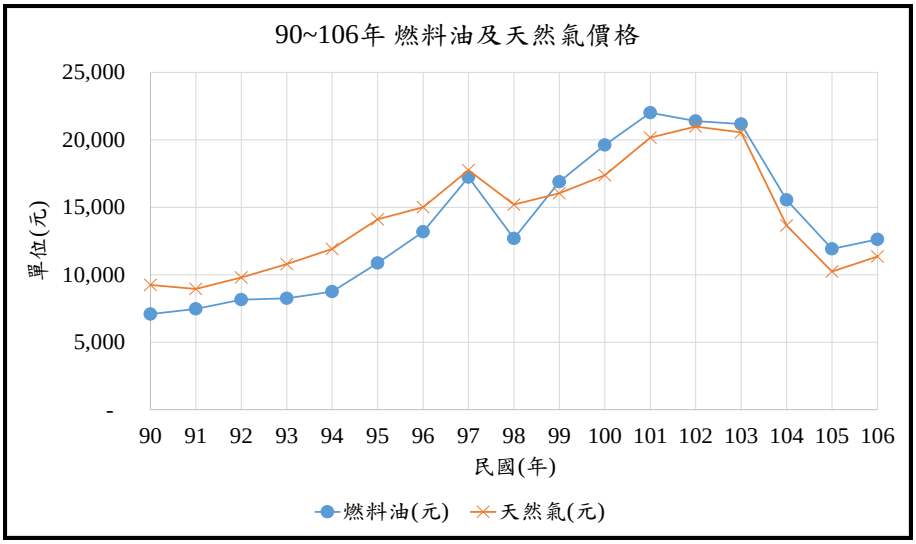


圖 2　90~106 年燃料油及天然氣價格

表 2　燃料油與天然氣計算基礎表

燃料種類	燃料油(公秉)	天然氣(2)(立方米)
每月用量	1	985.5
淨熱值(kcal/公升)	9,600	9,000
鍋爐效率	0.85	0.92
燃料運費(元/公秉)	150	0
貨物稅(元/公秉)	110	0

於 103 年開始天然氣價格持續下降，天然氣價格已低於燃料價格，整體從 103~106 年可以看出天然氣(2)價格仍低於燃料油，以結果來看，已有誘因出現，後續針對燃料油及天然氣成本分析說明如下：

1.燃料油及天然氣價格分析

以 1 公秉燃料油產生之淨熱值推估天然氣(2)之使用量，分別計算轉換為天然氣後之燃料成本差異(含燃料油貨物稅、運費)，統計 90~106 年 10 月燃料油及天然氣單位成本用量，如圖 3 所示。

(1)價格比較：由 90~98 年間燃料油及天然氣平均費用差異比較可以看出，平均燃料油牌價皆低於天然氣，因此在燃料費用相比較下，使用天然氣成本相較於燃料油高，於 99 年開始至 106 年 10 月，天然氣平均成本相較於燃料油平均成本低 1,350 元(不含燃料油貨物稅及運費)；因此在燃料費用相比較下，若將燃料油貨物稅及運費含在成本內，以 106 年 1~10 月平均成本，每公秉燃料油轉換為天然氣可節省 1,531 元。

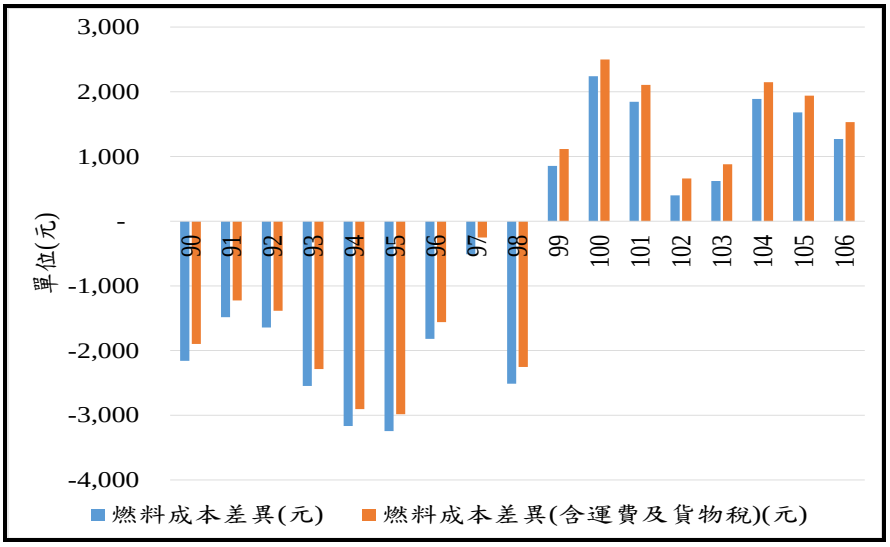


圖 3　燃料油與天然氣燃料成本差異統計

(2)淨熱值比較：燃料油與天然氣燃料淨熱值成本進行比較，102~103 年間天然氣的每單位熱值成本皆高於燃料油，於 104 年其天然氣燃料每單位熱值成本低於燃料油，燃料油每單位熱值成本 1.62 元/kcal，天然氣為 1.52 元/kcal，至 106 年 10 月，可發現天然氣發熱成本皆低於燃料油，如圖 4 所示。

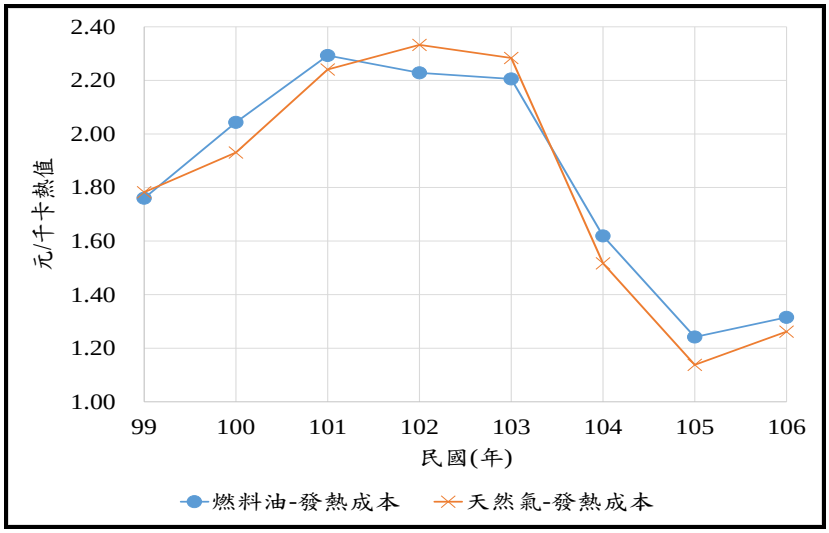


圖 4　燃料油與天然氣燃料每單位熱值成本比較

2.器具效率提升之成本效益

以 1 公秉燃料油產生之淨熱值為基準推算天然氣之使用量，而以轉換為天然氣鍋爐後，鍋爐效率提升 7%(含設備熱回收設備)，計算可節省之成本費用。

(1)由圖 5 可清楚得知 96 年以前，轉換後天然氣鍋爐燃氣費用全年度仍較燃料油高，在燃料費用相比較下，平均燃料油成本多出 1,472 元；若含貨物稅及運費，則天然氣較燃料油成本多出 1,167 元。

(2)若在燃料費用相比較下，若將燃料油貨物稅及運費含在成本內，以 99 年以後年平均牌價計算，每公秉燃料油轉換為天然氣平均可節省 2,850 元，在推動上已顯現出汰換誘因。

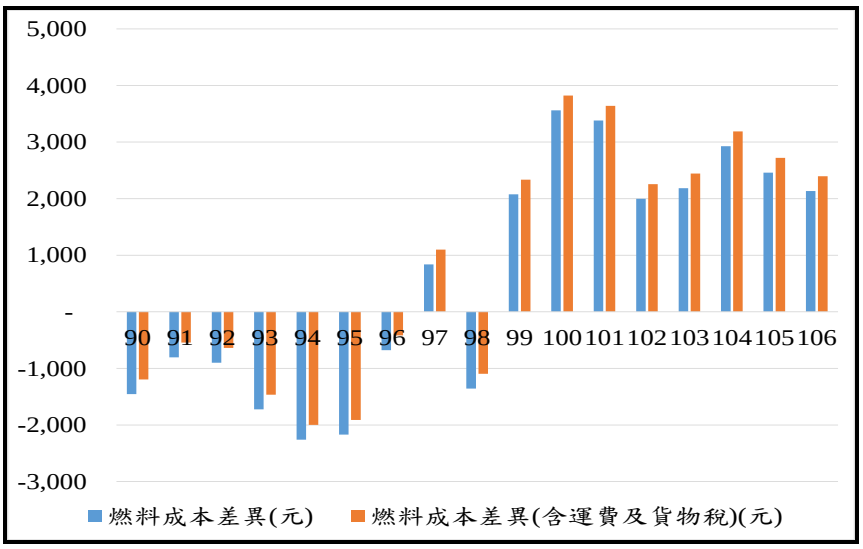


圖 5　轉換為天然氣之燃料成本差異比較

3.成本價差分析

以 106 年 1~10 月低硫燃料油及天然氣平均牌價為基礎，以 1 公升燃料油轉換天然氣比較燃料油及天然氣成本費用，分別比較牌價價差之結果，如圖 6。計算基準以每月使用燃料油 60 公秉燃料油，價格為 12,626 元/公秉為假設條件，並依燃料油熱值 9,600kcal/公升、天然氣熱值 9,000kcal/m^3 轉換為相同熱值，鍋爐效率提升 7%；運費以 150 元/公秉；貨物稅以 110 元/公秉估算；附屬設備耗電費用為 15,000 元/月；設備投資費用以 140 萬元估算。每月使用燃料油費用約為 78.8 萬元，並依照每度天然氣與每公升燃料油價差 0 元至 3 元分析其回收年限，如下表 3：

(1)若單能源使用轉換時，不考慮其效率提升，天然氣每立方米價格與燃料油每公升價格應差異 0.4 元以上，其能源成本才有節省。

(2)若考慮轉換後效率提升 7%，天然氣每立方米價格與燃料油每公升價格應差異-0.8 元以上，其能源成本相對較為節省。

(3)對應上述分析燃料油與天然氣燃料成本差異，專案若需經濟效益，其天然氣每立方米價格與燃料油每公升價格應差異 2.2 元以上，每公秉燃料油約可節省 2,014 元，(每月節省能源費用 120,896 元/60 公秉=2,014 元/公秉)，可以在 1 年內回收。

表 3　燃料油轉用天然氣燃料成本與價差分析

計算基準：
1.每月使用燃料油 60 公秉燃料油，以相同熱值轉用天然氣約為 59,130 m^3。
2.燃料油熱值 9,600kcal/公升、天然氣熱值 9,000kcal/m^3 轉換為相同熱值。
3.鍋爐效率提升 7%；運費以 150 元/公秉；貨物稅以 110 元/公秉估算。
4.附屬設備耗電費用為 15,000 元/月；設備投資費用以 140 萬元估算。

燃料油牌價	元/公秉	12,626					
每公升燃料價差	元	0	0.3	0.4	1	2.2	3
天然氣牌價	元/m^3	12.626	12.326	12.226	11.626	10.426	9.626
改善前每月能源費用	元/月	788,160					
改善後每月能源費用	元/月	808,064.0	788,864.0	782,464.0	744,064.0	667,264.0	616,064.0
每月節省能源費用	元/月	-19,904	-704	5,696	44,096	120,896	172,096
年節省能源費用	元/年	-238,848	-8,448	68,352	529,152	1,450,752	2,065,152
回收年限	年	無回收	無回收	20.5	2.6	1.0	0.7

註：
· 改善前能源費用為 60×12,626+60×150+60×110+15,000=788,160 元。
· 60 公秉相同熱值轉用天然氣計算為 60×9,600×0.85÷0.92÷9,000×1,000=59,130 m^3。
· 改善後能源費用為：天然氣用量×天然氣牌價。
· 回收年限為：設備投資費用÷年節省能源費用。

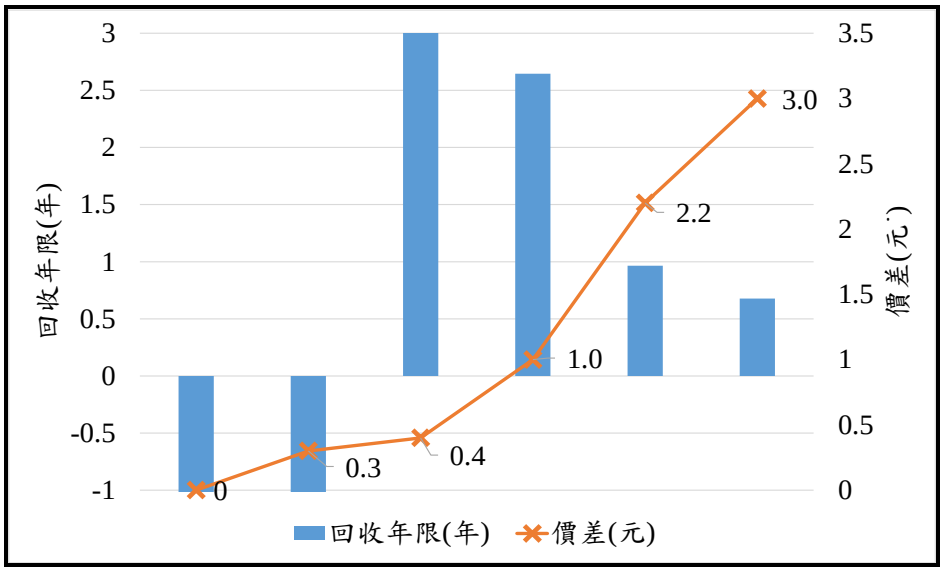


圖 6　燃料油與天然氣燃料成本價差比較圖

4.敏感度分析

分析燃料油轉用天然氣鍋爐影響投資報酬率及回收年限因子，包含附屬設備費用、運費、鍋爐效率提升、投資設備費用、管線費用及燃料油與天然氣之價差，其計算之初設條件如下表 4。並以該表數據調整鍋爐效率提升與每公升燃料油與每度天然氣價差作敏感度分析。

表 4　初設條件

年用油量	燃料油熱值	燃料油鍋爐效率	天然氣熱值	天然氣鍋爐效率	鍋爐效率差異	燃料油單價	天然氣單價	燃料價差
kL	kcal/L	-	kcal/m^3	-	-	元/L	元/m^3	元
1,000	9,600	85.0%	9,000	92.0%	7.0%	12.63	11.60	1.03
附屬設備節能費用	運費	貨物稅	轉用天然氣用量	年節省燃料費用	年節省總能源費用	設備投資費用	管線費用	回收年限
萬元/年	萬元/年	萬元/年	m^3/年	萬元/年	萬元/年	萬元/年	萬元/年	年
18	15	11	985,507	119.4	163.4	140	0	0.9

備註：燃料單價參考 106 年 1~10 月之平均單價計算；低硫燃料油(0.5%)為 12.65 元/L，天然氣(NG2)為 11.6 元/m^3。

(4)以未考慮天然氣管線費用，雙變數變動對用戶報酬率敏感度分析如下表 5 所示。

表 5　雙變數變動對用戶報酬率敏感度分析(未考慮天然氣管線費用)

			每公升燃料油與每度天然氣價差						
	變動率		300%	200%	100%	0%	-100%	-200%	-300%
		變動值	4.10	3.08	2.05	1.03	0.00	-1.03	-2.05
鍋爐效率提升(%)	180%	19.60	2684.8%	2264.3%	1843.9%	1423.5%	1003.1%	582.7%	162.2%
	120%	15.40	2538.7%	2100.7%	1662.7%	1224.7%	786.7%	348.6%	-89.4%
	60%	11.20	2379.8%	1922.7%	1465.6%	1008.5%	551.3%	94.2%	-362.9%
	0%	7.00	2206.5%	1728.5%	1250.5%	772.5%	294.5%	-183.5%	-661.5%
	-60%	2.80	2016.6%	1515.7%	1014.9%	514.0%	13.1%	-487.7%	-988.6%
	-120%	-1.40	1807.6%	1281.6%	755.5%	229.5%	-296.5%	-822.6%	-1348.6%
	-180%	-5.60	1576.5%	1022.6%	468.8%	-85.1%	-639.0%	-1192.8%	-1746.7%

(5)以考慮天然氣管線費用(以 360 萬估計)，雙變數變動對用戶報酬率敏感度分析如下表 6 所示。

表 6　雙變數變動對用戶報酬率敏感度分析(考慮天然氣管線費用)

			每公升燃料油與每度天然氣價差						
	變動率		300%	200%	100%	0%	-100%	-200%	-300%
		變動值	4.10	3.08	2.05	1.03	0.00	-1.03	-2.05
鍋爐效率提升(%)	180%	19.60	751.7%	634.0%	516.3%	398.6%	280.9%	163.1%	45.4%
	120%	15.40	710.8%	588.2%	465.5%	342.9%	220.3%	97.6%	-25.0%
	60%	11.20	666.4%	538.4%	410.4%	282.4%	154.4%	26.4%	-101.6%
	0%	7.00	617.8%	484.0%	350.1%	216.3%	82.5%	-51.4%	-185.2%
	-60%	2.80	564.6%	424.4%	284.2%	143.9%	3.7%	-136.6%	-276.8%
	-120%	-1.40	506.1%	358.8%	211.5%	64.3%	-83.0%	-230.3%	-377.6%
	-180%	-5.60	441.4%	286.3%	131.3%	-23.8%	-178.9%	-334.0%	-489.1%

(6)分析結果顯示，效率提升在-120%或價差在-100%範圍以內，對用戶端均有不錯的報酬率。

四、能源技術服務業(ESCO)商業模式

ESCO 業者與業主在執行節能改善專案過程中，係藉由 ESCO 節能績效保證型契約來進行整個專案計畫，以自償性投資方式將未來因設備現代化、設備改良等節能措施所節省下來的能源費用，作為節能改善專案的初期投資成本。

節能績效保證型契約是讓業主透過未來節能改善專案所獲得的節能量，支付目前的節能改善專案所需要之初期投資成本。專案執行中，業主可與 ESCO 共同分享節能收益，而在專案結束後，所有的節能收益都將歸業主所有，績效保證型契約節能改善專案之節能收益示意圖如圖 7 所示。

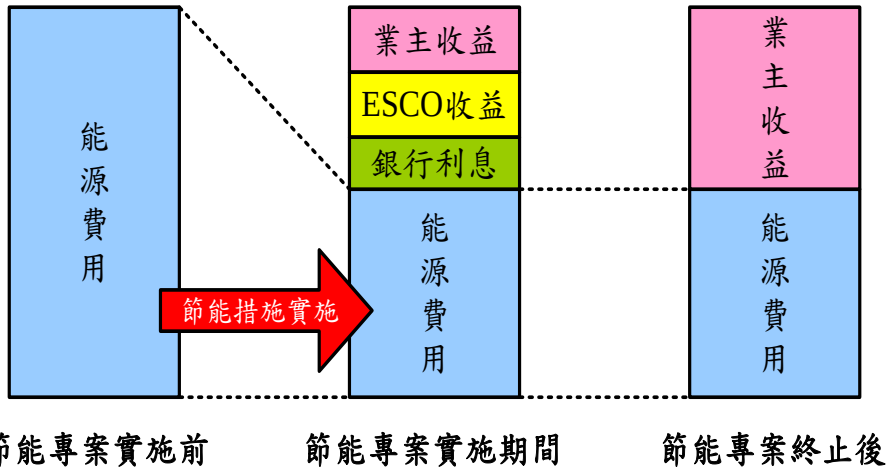


圖 7　節能績效保證型契約之節能收益示意圖

節能績效保證模式共分為三種類型，分別為節能效益分享型、節能量保證型與能源服務託管型，以下將分別針對此三種模式說明：

1.節能效益分享型

節能效益分享型之績效保證模式係指在進行節能改善專案時，由 ESCO 提供專案所需要的資金以及全過程的服務，且在 ESCO 節能績效保證契約內容需規定專案的節能指標、量測與驗證方式以及基準線之訂定。於契約期間內，ESCO 與業主按照契約約定分享節能收益；契約結束後，專案之設備和節能收益全部歸業主所有，不論是在節能改善專案實施過程中或實施之後，業主的資金流都始終是正的，如圖 8 所示。

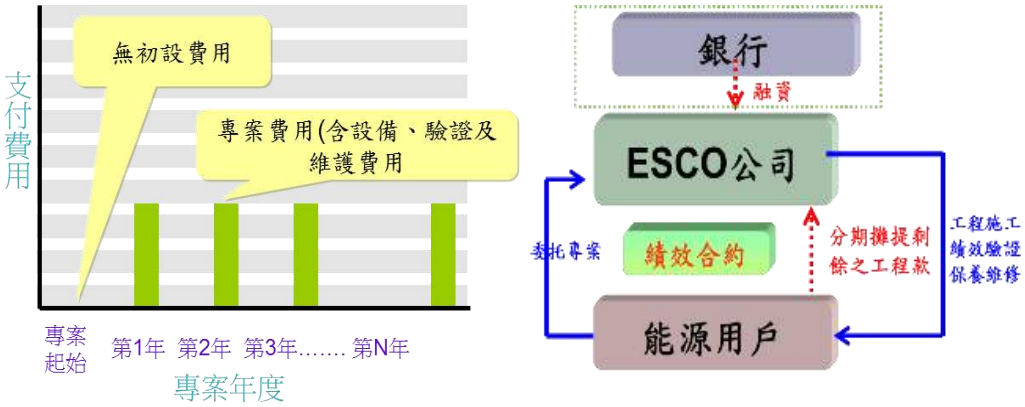


圖 8　節能效益分享型商業模式示意圖

2.節能量保證型

節能量保證型則是進行節能改善專案時，業主提供全部或部分的資金，而由 ESCO 提供全過程的服務，並於 ESCO 節能績效保證契約內容規

定專案的節能指標、量測與驗證方式以及基準線之訂定。若專案沒有達到承諾的節能量時，須由 ESCO 賠付全部未達到的節能量經濟損失，如圖 9。

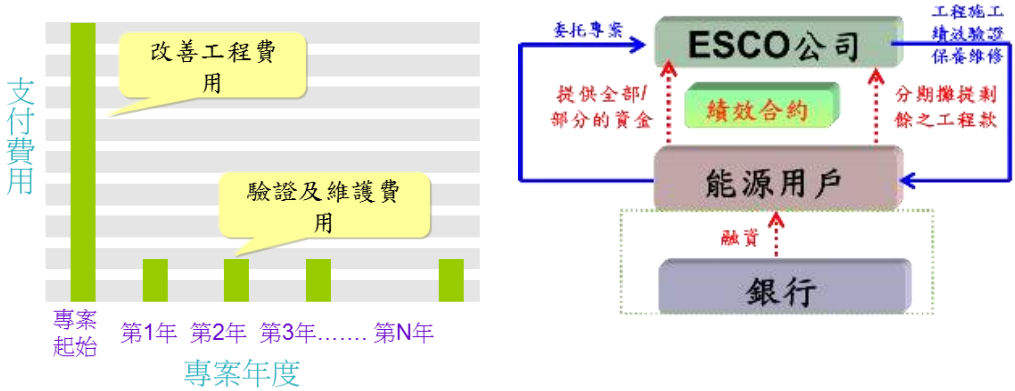


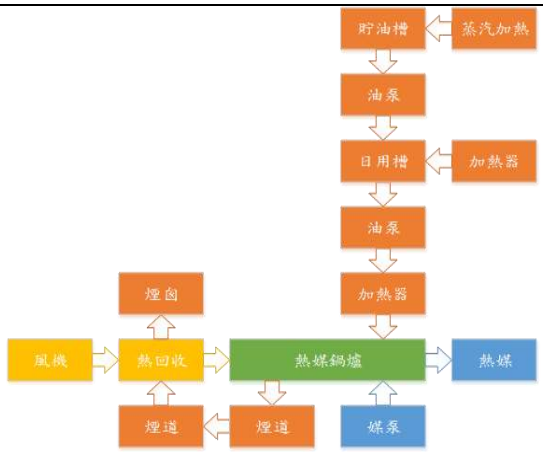
圖 9　節能量保證型商業模式示意圖

3.能源服務託管型

能源服務託管型之績效保證型模式是 ESCO 按契約約定的能源服務性能指標，自行籌備資金為業主管理、改善能源系統以及承包能源費用，除了於契約內容需明訂能源服務性能指標之外，亦需規定量測與驗證方式與基準線之訂定，並且在專案無法達到指標時，ESCO 需按契約內容給予賠償。在能源服務託管型的模式中，ESCO 的經濟效益來自於能源費用的節省量，業主的經濟效益則是來自於能源費用的減少。

五、案　例

改善項目	燃油鍋爐進行燃燒機更換與使用天然氣燃料
設備概述	1.熱媒鍋爐裝置容量為 700Mcal/h，改善前燃料使用重油，全年用量約 610 公秉。 2.燃料油為保持流動性，需於日用槽、貯存槽以電熱方式加熱至 100~120℃，再由油泵浦泵送至燃燒機進行霧化燃燒，估計為 32 kW。

鍋爐系統示意圖	
效率分析	1.於爐體出口處煙道量測成分組成，包含 O_2(%)、CO_2(%)、CO(ppm)等成分及煙道氣排放溫度，據以計算熱損失及分析節能潛力。 2.鍋爐效率(熱損失法)：燃燒熱損 0.5%、爐壁熱損 4.4%、排氣熱損 13.7%，鍋爐效率 81.4%。 3.燃料油轉用天然氣，僅就燃燒機進行更換，約可提生鍋爐燃燒效率 1~2%。
經濟效益分析	1.燃料油 787 萬元、燃油貨物稅 6.7 萬元、燃油運費 9.2 萬元、燃油附屬設備 67.7 萬元、天然氣 632.5 萬元。 2.節省費用約 238.1 萬元。 3.改善設備投資約 70 萬元，回收年限：0.3 年。
減碳效益分析	1.若燃料油全部改換為天然氣後，在相同熱值下可減量 524.6 公噸 CO_2。 2.改為天然氣燃燒機設備，約可提升燃燒效率 2%，約可再減量 38 公噸 CO_2。 3.節省鍋爐附屬設備之用電量，約可減少溫室氣體排放 143 公噸 CO_2。

六、結　論

隨著政府環保法規針對粒狀物排放更為嚴謹及碳交易法規持續推動，以天然氣取代燃油燃料之趨勢在未來會更加地活躍。若企業採行低碳燃料技術技術，其溫室氣體減量比例約可達 27.6%，其能源使用成本(包含燃料與附屬設備等合計)約可下降 12.9%。若產業全面採行後，以 105 年國內工業部門燃料油使用量約 1,442.3 千公秉油當量換算，每年可減少約 124 萬公噸 CO_2

排放，相當可觀。

若以燃料單價參考 106 年 1~10 月之平均單價計算；低硫燃料油(0.5%)為 12.65 元/L，天然氣(NG2)為 11.6 元/m^3，重油鍋爐效率 85%，天然氣鍋爐效率 92%，透過敏感度分析結果顯示，鍋爐效率提升在-120%或價差在-100%範圍以內，對用戶端均有不錯的報酬率。

故以目前轉換為天然氣鍋爐之投資金額約可於 1 年內回收，對於用戶端已有汰換改善誘因，若含管線費用則為回收年會拉長至 3 年以上，未來可結合 ESCO 廠商於管線費用做先期投資，可降低能源用戶的資金壓力。

最後，考量轉用天然氣推廣特性，管線為主要障礙，未來推廣模式可採聚落方式進行，因此將產業鍋爐資料庫之能源用戶進行位置建檔，配合中油管線鋪設，以工業區內用戶為第一階段推廣對象，第二階段為距離管線較近之零散用戶，第三階段為管線較普及後擴散推廣對象。

七、參考文獻

1. 闕小穎，「針對燃油鍋爐改造成燃氣鍋爐安全經濟運行的探討」，科技論壇，103 年。
2. 李政道，「鍋爐蒸氣系統節能及實例」，工研院。
3. 燃油燃氣鍋爐房設計手冊第 2 版，機械工業出版社，101 年。
4. 燃油燃氣鍋爐房設計手冊，北京機械工業出版社，101 年。
5. 鐘嘉祺，燃煤固定污染源排放空氣污染物及其防制設備操作技術之比較—以桃園縣為例，100 年。
6. 中技社節能技術發展中心，蒸汽鍋爐高效率作業技術手冊，89 年。
7. 經濟部，廢熱回收節能管理手冊。
8. 經濟部能源局網站，http://www.moeaboe.gov.tw。

以微氣相層析技術監測工業區中有害空氣污染物

劉文治*、張翰青**、郭子豪***、王禮鵬****、周宗冠*****

摘　要

石化工業發展為台灣經濟重要來源，產業鏈從上至下均製造或使用許多揮發性有機物(Volatile Organic Compounds, VOC)，部份 VOC 具毒性，統稱為有害空氣污染物 HAPs (Hazardous Air Pollutants, HAPs)，製程區或儲存區(儲槽)一旦發生管線或閥件洩漏，情節輕者造成廠商成本損失，嚴重洩漏會擴散至住宅區，造成居民健康危害與影響生活品質。

現行製程區與元件 VOC 洩漏偵測方法為手持式設備(Portable FID、PID)、紅外線顯像儀、紅外光遙測等監控方法，這些方法需要耗費大量人力操作與維護，簡易型手持設備價格雖然便宜，但常造成誤判而導致重大災情擴散；紅外光遙測方法對於未知 VOC 可定性量測，但仍受限於偵測極限與水氣干擾、定量失準等因素。本篇研究使用微氣相層析技術，以固定式機櫃與移動監測車量測製程區與周界空氣污染物濃度，一旦測得高濃度可立即示警，通知廠務人員抵達現地，除了節省時間成本之外，單筆量測數據成本也較傳統方法低(價格約為傳統方法之 1/10)。本篇研究成果簡述如下：

1. 自動化製程控管：全自動運轉監測，測得高濃度可立即源頭查漏，節省原物料耗損。
2. 節省人力與經費：架設完畢後自動傳輸資料至資料庫內，不需人工計算數據。
3. 提昇企業形象：建立廠區內 VOC 或 HAPs 背景濃度與高值濃度資料庫，自我管控製程區洩漏擴散，提昇企業形象與增進環保意識。

【關鍵詞】微氣相層析、揮發性有機物、製程洩漏、移動量測

---

*創控科技股份有限公司　專案經理

**環興科技股份有限公司　工程師

***環興科技股份有限公司　計畫主任

****創控科技股份有限公司　總經理

*****創控科技股份有限公司　資深副總經理/研發長

一、前　言

工業發展為台灣經濟成長主要動力，在蓬勃開展同時伴隨許多污染議題產生，諸多污染中以空氣污染問題最受眾人關注，因傳輸流佈速度快，散佈範圍廣泛之特性為現今最棘手之議題之一。台灣更由於地狹人稠，工業區緊鄰住宅，廠區排放之異味、惡臭空氣與毒性化學物質常被周遭居民陳情抗議，若能在不影響居民生活品質前提下提昇工廠產能，對台灣整體經濟發展將是一大邁進，因此，欲改善空污問題，必然需對污染物質徹底了解與調查，方能從源頭徹底改善。

工業區空氣污染中以揮發性有機物(Volatile Organic Compound, VOC)為主要污染物質，部份揮發性有機物具有高毒性者，如氯乙烯、丁二烯與苯系物等，統稱為有害空氣污染物(Hazardous Air Pollutants, HAPs)。HAPs 除了影響環境空氣品質之外，對人體會產生直接毒性危害，甚至部份物質已公告確認為致癌物，因此，在創造經濟發展同時，也需注意高度工業排放污染物造成環境空氣與人民之健康危害。

工業區空氣污染中以石化產業造成環境影響衝擊為最，石化產業供應鏈分為上、中、下游三個製程階段，上游產業原物料以石油、天然氣為主，經過煉製處理，可製成原物料乙烯、丙烯、丁二烯、芳香烴等有機物產品；中游製造公司則將上述原物料藉由酯化、聚合等製程提供給下游公司，產品如聚氯乙烯、聚乙烯、苯乙烯、環氧乙烷等；下游公司接受聚合物或酯化物則加工為最終產品，直接供應出口或供應內需。由此可見石化產業為龐大供應鏈，舉凡從原物料、加工用品、製程產品與使用溶劑，無一項不需要用到或製造 VOC，當中任一環節若發生工安意外、管線與元件洩漏，逸散到環境大氣中就會造成空氣污染，除了可能產生人體直接危害之外，VOC 會和氮氧化物($NO_X = NO + NO_2$)在光照之下產生光化學反應，間接產生對人體危害之近地表臭氧(Ozone, O_3)，刺激氣喘、呼吸道敏感之民眾，若是有心血管疾病之長者與嬰幼兒亦需特別注意空氣品質。國外研究指出 VOC 亦為細懸浮微粒($PM_{2.5}$)之前驅物(Precursor)。

二、現行工業區洩漏偵測技術

圖 1 為現有廠區內氣體洩漏量測設備整理，手持式設備常使用攜帶式火焰離子偵測器(Flame Ionization Detector, FID)、光離子偵測器(Photo Ionization Detector)與紅外光氣體顯像儀(GasFind IR)，前兩項主要量測總碳氫化合物與總有機化合物，可快速以半定量方式獲得推估氣體濃度，無法分辨何種 VOC，且容易受水氣、溫度等干擾；紅外光氣體顯像儀為 IR (Infrared)原理，當有 VOC 氣體洩漏時，會吸收紅外光波長，在顯影時可藉由顏色成像不同看出洩漏源，雖然無法準確得知 VOC 洩漏成份，但可做為洩漏快篩工具，雨天時無法使用，若為水氣洩漏亦會被誤判成 VOC，需現場人工輔助判斷。

紅外光遙測為製程洩漏最常使用之設備，儀器價格較貴(約 500-600 萬)，但對於高濃度製程 VOC 洩漏有良好定性效果，可判定未知污染物。濃度定量部份因紅外光方法檢量線非一次式且無法頻繁使用標氣校正，定量效果相對較差。因水氣會吸收紅外光，下雨天或是雨季時無法使用。儀器架設與濃度輸出需人工設置與分析，目前無法做到全自動匯入數據庫。

空氣盒子為價格便宜，可廣泛設置之簡易微型感測器，可量測細懸浮微粒 $PM_{2.5}$、溫度與濕度，感測器使用壽命約 1-6 個月不等。雖然可即時提供細懸浮微粒濃度，但精準度較差(< ±50%)，若是搭配可偵測總氣體濃度之感測器價格將非常高，目前在台灣部份區域已初步佈建，但仍屬於研究階段，尚無法實際應用於洩漏量測方法。

本篇研究使用 MiTAP 氣體分析儀主要針對廠區內製程區或周界已知氣體測項做連續偵測，架設完畢與開機後儀器全自動運行，根據廠區內製程區使用 VOC 數量與項目作客製化增設，約可量測 15-30 項 VOC，分析時間約 15-30 分鐘，測畢儀器立即顯示濃度值，搭配內部或外部網路可連線至資料庫或雲端裝置，不需人工換算數據，真正達到實時、自動化控制與遠端監控量測。儀器可設定自動觸發採樣裝置，當未儀器測得未知物信號時可觸發開啟採樣罐立即採集周界空氣，平衡 3 分鐘後閥件自動關閉並透過傳輸信號示警廠務人員，待人員抵達現場後可將採樣罐帶回實驗室以精密儀器分析。

廠區內氣體洩漏量測		量測污染物	數據取得	HAPs測項	特點
	手持式設備 (Portable FID or PID)	總VOC濃度	即時	無	1.便攜式，可即時獲得測值 2.無個別VOC定性定量資訊 3.無法執行自動監測
	紅外光氣體顯像 (GasFind IR)	無	1個月	極少	1.可現場顯影洩漏源 2.無VOC定性定量資訊 3.雨天無法使用 4.水氣洩漏易致誤判
	紅外光遙測儀 (OP-FTIR)	100多項個別VOC污染物	需人工換算數據	有	1.可對未知物定性，定量不佳 2.專人架設與維護 3.雨天無法使用 4.人工處理數據
	空氣盒子 (簡易感測器)	懸浮微粒、溫度、濕度	即時	無	1.價格低，精準度較差 2.數據供參考用 3.需頻繁調校與更換sensor(效能易衰退)
	MiTAP (個別VOC量測)	15-30項VOC	15-30分鐘自動顯示	有	1.針對已知VOC量測，搭配觸發採樣可分析未知物 2.支援遠端連線確認狀態 3.測量自動顯示數據

圖 1　現有廠區內氣體洩漏量測設備整理

三、儀器與設備簡介

本研究中使用 VOC 分析儀為台灣精密儀器製造商創控科技股份有限公司(Tricorntech Corporation, Taiwan)獨家研發生產，產品型號為 MiTAP (Miniaturized Total Analysis Platform) P310，該分析儀為一可攜式微型氣相層析儀，主機重量僅 8.5 公斤，除了可設置於固定式監測站內進行長時間連續偵測外，可攜式設計也適合裝設於移動平台上進行監測，如一般家庭用房車、休旅車等，儀器體積在外部裝置與重量均已達到輕量化設計概念，毋須額外打造大型監測車。MiTAP 的低耗電設計讓儀器可經由車用充電 12V 轉換 110V 而運轉，讓移動監測作業更多元化。

MiTAP 基本模組架構如圖 2 所示，儀器外部體積僅為 188 mm × 253 mm × 345 mm (W × H × D)。儀器內部元件採高精密模組化設計，包含了自動採樣模組(Front-end module)、微型氣相層析模組(Micro-GC module)與偵檢器陣列模組(Detector Array module)：

1. 自動採樣模組：包含微型採樣器及自填充濃縮元件，結合快速精準的熱脫附系統，以達到 sub-ppb 級的偵測下限。
2. 微型氣相層析模組：包含了 ULTM (Ultra Low Thermal Mass) 管柱，結合專利的高精準溫度控制電路及邏輯，相對於傳統大型氣相層析儀之烘箱具有更佳之精確及穩定度，因此 MiTAP 之層析分離效能優於傳統氣

象層析儀之毛細管柱，且能縮減氣體分析時間。

3. 檢測器陣列模組：結合了多種不同類型的 VOC 微型感測器組合，例如奈米材料塗佈型的化學阻抗感測器、奈米材料塗佈型的共振式化學感測器、半導體式化學感測器、電化學感測器與游離式感測器等；亦可搭配傳統偵測器，如火焰游離偵測器、光游離偵測器等...，藉由檢測器陣列或搭配傳統偵測器特性對不同官能基 VOC 物質之高度選擇性可避免環境空氣之基質干擾，達到最佳的偵測效果。

4. 控制系統：包含微電腦控制系統，維持自動化運作與內部閥件作動機制。軟體計算包含檢量線參數內置，檢測器陣列模組獲得之信號可代入檢量線公式，內插計算出濃度並且顯示於儀器面板上，相較於傳統氣相層析法需要大量人工處理圖譜換算濃度，MiTAP 從運轉乃至於數據呈現一體自動分析，節省人力操作需求，達到實時全自動 VOC 量測呈現。

本篇研究中 MiTAP 所使用之自動採樣模組裝置採用商業化吸附材料，做為微量 VOC 氣體濃縮裝置，氣體採樣體積為 50-400 mL/min (視濃度範圍可客製化微調)，樣品採集完畢後模組會快速升溫，將待測物熱脫附至微型氣相層析模組中分離，最後進入檢測器陣列與檢量線計算呈現濃度值。表 1 為本次 MiTAP VOC 監測表單，針對石化工業主要產生與使用之 HAPs 作連續量測，除了可執行製程端控管之外，也可座高濃度污染物示警，避免 HAPs 外洩造成居民陳情事件產生。

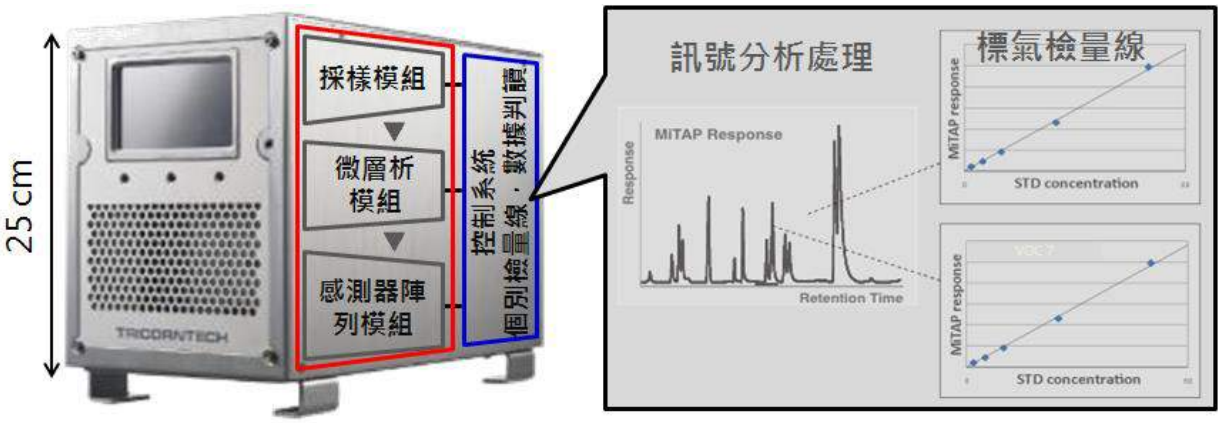


圖 2　MiTAP VOC 分析儀內部組件與架構

表 1　石化工業區 MiTAP VOC 監測表單

VOC 種類	中文名稱	英文名稱	固定污染源 HAPs 納管項目	HAPs 小時濃度規範(ppbv)
Non-Methane Hydrocarbon (NMHCs) 非甲烷碳氫化合物	丙烯	Propylene	-	-
	正己烷	n-Hexane	-	-
	丁二烯	1,3-Butadiene	V	100
	苯	Benzene	V	20
	甲苯	Toluene	V	2000
	乙苯	Ethylbenzene	V	2000
	鄰二甲苯	o-Xylene	V	2000
	間與對二甲苯	m,p-Xylene	V	
	苯乙烯	Styrene	V	1000
Oxygenated VOCs 含氧揮發性有機物	丙酮	Acetone	-	-
	丁酮	Methyl Ethyl Ketone (2-Butanone)	-	-
	乙酸乙酯	Ethyl Acetate	-	-
Chlorinated VOCs 含氯揮發性有機物	氯乙烯	Vinyl Chloride	V	20
	三氯乙烯	Trichloroethylene	V	1000
	四氯乙烯	Tetrachloroethylene	V	1000
	1,2-二氯苯	1,2-Dichlorobenzene	-	-
	1,4-二氯苯	1,4-Dichlorobenzene	V	1500

創控公司提供兩種量測方式，其一為固定式機櫃，可固定地點連續監測；對於無法架設固定測站之地點可使用移動監測車搭配量測，對於兩種量測方式簡述如下：

1.固定式機櫃

圖 3 為創控固定式機櫃，外部尺寸為 90×120×50 (寬×高×深,公分)，內部可置放一台 MiTAP 主機、電力供應裝置(含不斷電設備與穩壓裝置)與溫控系統(可降溫、增溫)，兼具防水、防落塵設計，充分因應台灣潮濕且炎熱氣候型態，與一般現行空氣品質監測站或光化學監測站站房相比體積已大幅縮小(機櫃體積約為現行測站 1/40)，對於廠區內廣佈設置十分方便，且不影響人員與車輛進出。

圖 3　固定式機櫃外觀

2.移動式監測車

圖 4 為創控設計移動監測車外觀與內部儀器擺設圖，有別與現行空氣品質監測車需打造三噸半卡車或貨車，MiTAP 因其體積小、低耗電、耐震與測畢立即顯示濃度測值，適合置放於一般房車或休旅車行李箱。電源供應方式可以使用電瓶或是車用充電器 12V 轉 110V 供電，唯使用車用充電器時車子引擎必須保持運轉狀態。

車頂支架配備一組氣象站，可提供現場風速、風向、溫度與濕度等氣象資訊，組裝完畢後之氣象站離地面約 3 公尺。空氣採樣管連接車內儀器，延伸至氣象站支架頂部，前端裝設一懸浮微粒濾頭，可去除粒徑 5μm 以上之落塵與微粒。

圖 4　移動監測車(a)外觀與(b)內部儀器擺設圖

四、結果與討論

MiTAP 固定式機櫃與移動監測車可搭配設置，固定式機櫃目的為長期、連續觀察 VOC 與 HAPs 濃度排放與變化，可設置於製程區或儲槽區等高度洩漏源周邊，在監測高濃度事件同時記錄背景濃度資訊；移動監測車可視為機動巡檢與緊急事故處理之應變方法，對於廠區內或周遭環境不適合架設固定式機櫃時，移動車可抵達現地進行量測，不受地形、電力之影響，提昇量測之靈活度，以下簡述儀器之優勢與成果：

1.自動化製程控管：

圖 5 為移動監測車現場實測照片，車上裝載 MiTAP 設備與氣象裝置，可隨著盛行風向移動到下風處量測製程區污染洩漏，圖 6 為現場丙烯、丁二烯數據，在上午 11 點左右測得丁二烯相對高濃度 42 ppbv，顯示於特定時間點之製程可能存在逸散洩漏，搭配風速風向資訊可得知污染物由南面製程區而來。丙烯於上午 09:40 左右測得 10 ppbv 的微量濃度，可能來源為東南方之製程區。

藉由 VOC 實時量測可獲得即時污染物濃度資訊，且可藉由車載配置電腦與網路數據連線遠端將數據傳輸至資料中心，即時掌握廠區內濃度情形，一旦測得高濃度示警代表製程區洩漏時，即時通報廠務人員處理，控管原物料損失，真正幫助業者達到成本管控。

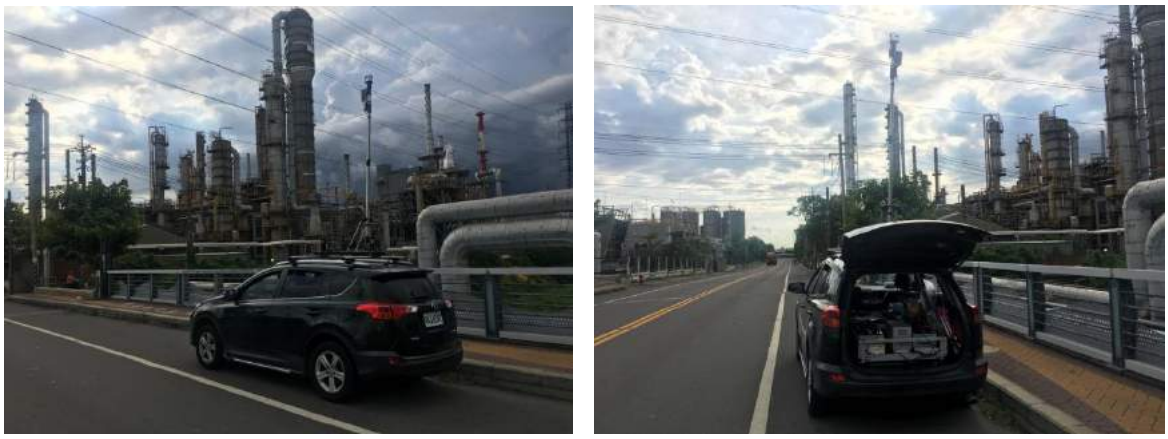


圖 5　移動監測車現場實測照片

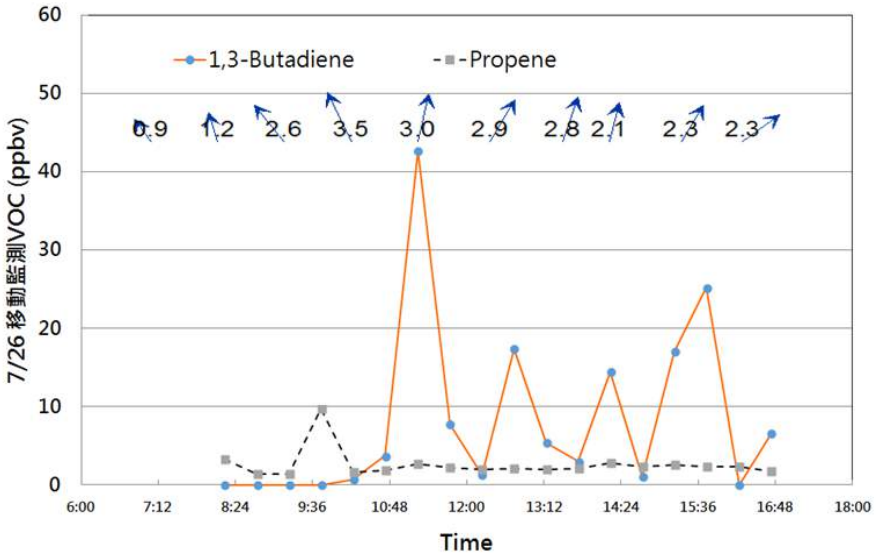


圖 6　移動監測車現場 VOC 數據丙烯、丁二烯

2.節省人力與經費：

現行量測方法均需大量人力維護與數據分析，以紅外光遙測為例，儀器為主要開支，再加上人工分析數據與維護，成本昂貴。

若以現行標準方法人工採樣搭配離線實驗室氣相層析質譜儀分析(GC-MS)無法達到連續監測功能，儀器設備與人工採樣，分析成本亦相對高昂，單筆數據分析費用約為新台幣 10000-14000 圓不等，僅能審慎使用，要確認確保採樣必定能採集污染物非常困難，故不適合做為製程區管控之間測方法。

MiTAP 分析儀為全自動化運行設計，固定式機櫃輕巧靈活，不佔空間，用電量精簡，適合置放於環境惡劣之製程區連續監測。數據可藉由有線內部網路或遠端 Wifi 傳輸至辦公室，人員不需前往現場，達到真正遠端、實時污染物監控。可大幅節省人力與建置成本，平均單筆量測數據費用未達 GC-MS 分析費用之 1/10，幫助業主大幅節省儀器建置與人力費用。

3.提昇企業形象：

台灣近年工業區空氣污染事件頻傳，秋、冬兩季大氣擴散條件不佳，導致空氣品質下降，居民陳情抗議事件屢見不鮮，演變成業者一居民對立，業者常宥限於量測成本昂貴與現有技術而無法提供連續監測；居民常因空氣品質變差而反應，很難在其中取一平衡。

創控產品提供相對低價之分析量測技術，除了可提供廠商自我管控數據之外，也可證明自身排放結果，當民眾陳情時，可藉由量測數據提出控管證明，提昇企業形象，在經濟成長同時做好污染管控。

五、結　論

本篇研究以國內研發微型氣相層析技術偵測石化工業區有害空氣污染物，除了可以固定測站型式定點監測之外，可根據製程排放清單、產品與原物料表單，以移動量測方式針對疑似排放工廠作廠區巡檢，執行工廠污染溯源。

環保署已於 106 年 9 月 29 日預告「固定污染源有害空氣污染物排放標準」草案，業者可自主改善以降低標準草案之衝擊。針對污染溯源結果進行改善，可以降低原物料排放之損失。持續改善作為可保障工業區內、外人員健康風險，以提高業者之形象，一舉數得。

以轉化速率解析衍生性氣膠之貢獻及管制策略

吳宗德*、吳義林**

摘　要

衍生性氣膠之主要成份例如硫酸鹽、硝酸鹽等，其形成與光化學反應有密切關係，因此本研究之目的在於探討衍生性氣膠之形成速率。本研究於 2014 年 2 月 12 日至 2 月 21 日在善化、安南、台南、左營、仁武、大寮、小港、屏東及潮州總計 9 個測站同時進行細懸浮微粒之周界採樣，分析其水溶性離子，並以逆軌跡模式模擬氣團之行經路徑，挑選案例並計算出兩測站行徑間衍生性氣膠之生成量，以傳輸時間推估其轉化速率，解析排放源對受體之影響；研究結果顯示氮轉化速率與硫轉化速率分別為 0.56%/hr 與 2.38%/hr。

本研究亦分析全台環保署 2013 年 $PM_{2.5}$ 手動採樣之樣品，探討其時間趨勢及空間分布之季節變化，並解析衍生性氣膠之貢獻，結果顯示，$PM_{2.5}$ 平均增量 32μg/m^3，在衍生性氣膠的部分，硝酸鹽平均增量 9.3μg/m^3，大於硫酸鹽 7.1μg/m^3。另由 NO_x 轉化成 NO_3^- 之每小時生成量大於由 SO_2 轉化成 SO_4^{2-} 之每小時生成量。雖然硫轉化速率較大，但因大氣中 $PM_{2.5}$ 前驅物 NO_x 之濃度較大，使得 NO_3^- 每小時生成量較多。故於管制策略上，建議以 NO_x 優先管制，才能有較大的效益。

【關鍵詞】衍生性氣膠、硫酸鹽、硝酸鹽、轉化速率、境外傳輸

---

*財團法人台灣產業服務基金會　工程師

**國立成功大學環境工程學系　教授

一、前　言

細懸浮微粒係指懸浮在空氣中，氣動粒徑小於等於 2.5 微米的微粒($PM_{2.5}$)，包括原生性與衍生性細懸浮微粒，尤其衍生性的貢獻比例遠大於原生性，衍生性細懸浮微粒是 SO_2、NOx、VOCs 與 NH_3 等氣態前驅物在大氣中經過複雜化學反應形成，其反應過程包括氣相光化學反應、液相反應與氣固相反應與不同反應物間之競合作用等，此外，由於其粒徑極小，易隨呼吸進入人體，對健康造成影響。

由於大氣中之 $PM_{2.5}$ 濃度與二次衍生污染物之生成及光化學煙霧之發生有密切之關係，係造成二次衍生物大量產生之主因，其在陽光的照射下產生光化學煙霧，均使得 $PM_{2.5}$ 之濃度居高不下，這些氣膠對人體健康、動植物生長及建築物都能造成傷害。為因應日益惡化之空氣品質，並達到空氣品質標準，實有必要對 $PM_{2.5}$ 之主要成份、衍生性氣膠成份、前驅物質及轉化速率做進一步研究。

二、 研究架構與方法

1.研究架構

本研究核心工作分為兩部份，第一部份為台灣地區 $PM_{2.5}$ 濃度及其水溶性成份時空分布之解析;本研究彙整環保署 2013 年自動/手動測站 $PM_{2.5}$ 濃度數據，分析手動採樣之水溶性離子成份，並繪製時空分布圖進行解析，第二部份於高屏地區全年污染最為嚴重冬季期間，以 URG 之旋風集塵器進行 $PM_{2.5}$ 之手動採樣，分析 $PM_{2.5}$ 濃度及水溶性離子成份並結合環保署測站監測資料，利用逆軌跡以及 surfer 等模式推估軌跡線，計算衍生性氣膠之轉化速率，進而解析轉化之衍生性氣膠之貢獻及管制策略。圖 1 為本研究架構圖。

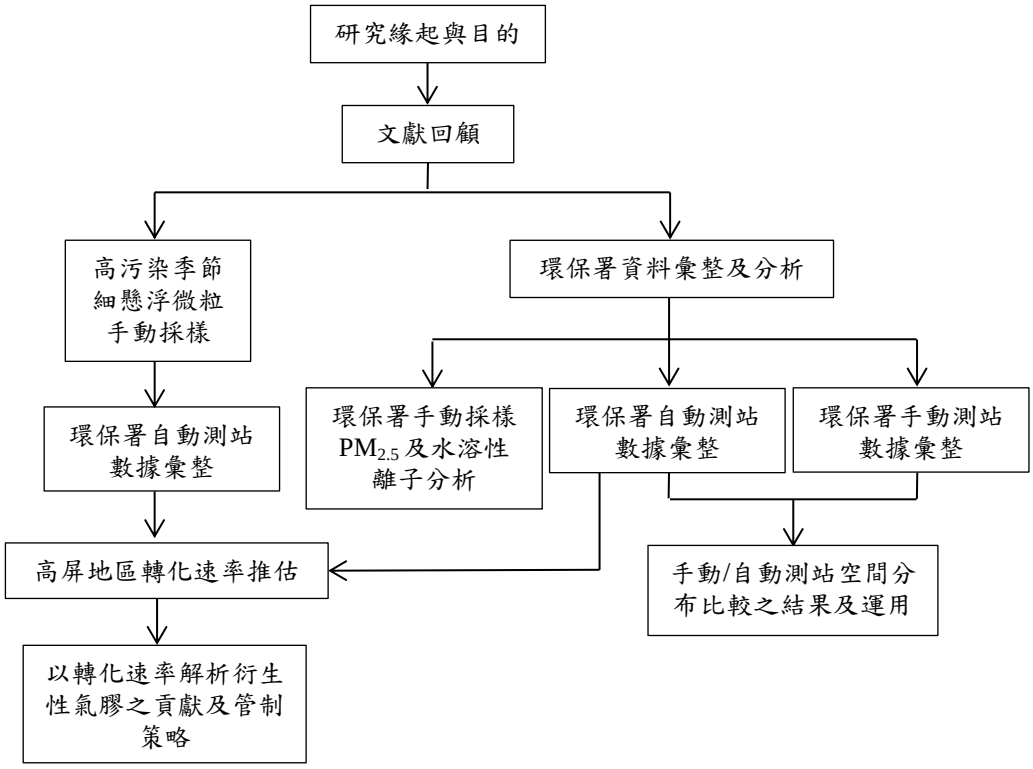


圖 1　研究架構圖

2.採樣時程

根據南高屏地區各空氣品質測站之月濃度趨勢變化分析，春、秋及冬 3 季為南部細懸浮微粒高污染的季節，因此本研究於高屏地區進行密集性採樣，採樣項目為周界大氣細懸浮微粒，另考量分析儀器之偵測極限，故於 103 年 2 月 12 日至 2 月 21 日以 6 小時為區間進行採樣。

3.採樣地點概況

為方便取得各種污染物與氣象條件資訊，本研究於環保署一般空氣品質監測站旁進行採樣，由於大氣光化反應為一連續性反應，於設置採樣站時應將測站分為上風測站、中間測站及下風測站，各採樣地點的相關位置及風花圖如圖 2 所示，由圖中可知採樣期間風向大致北風居多，符合本次採樣之設計。

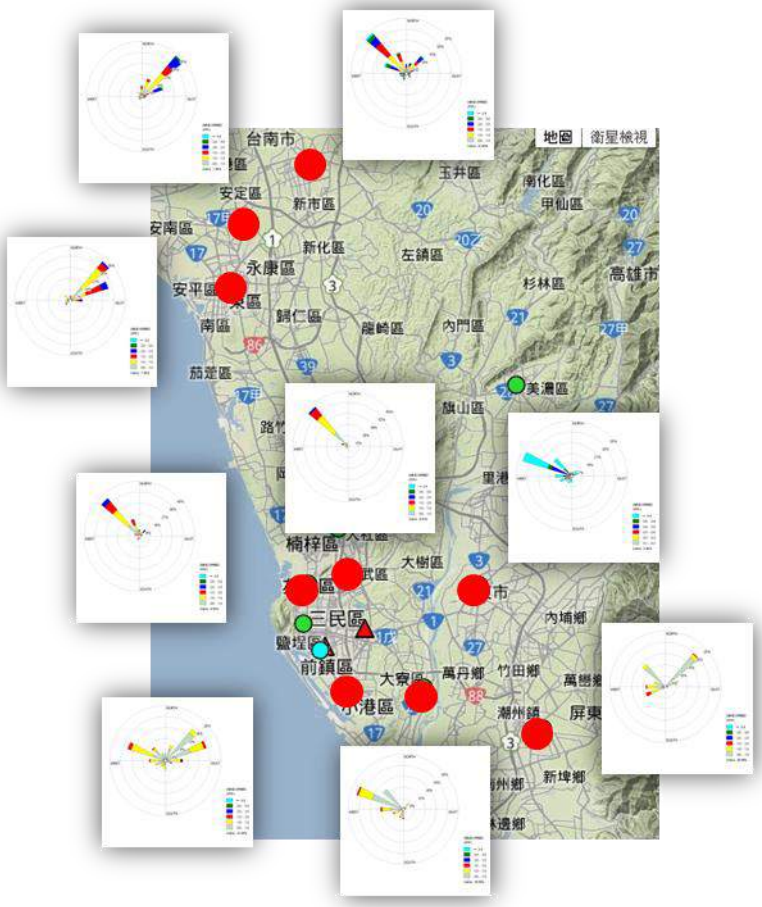


圖 2 各採樣點之相關位置及風花圖

4.採樣與分析方法

本研究使用之採樣與分析方法中分成 $PM_{2.5}$ 質量濃度分析及水溶性離子濃度分析 2 個部分，以下分別說明之。

本研究使用 URG 公司生產之旋風分離器(Cyclone)連結濾紙匣(Filter pack)進行大氣中 $PM_{2.5}$ 採樣。旋風分離器係以 Aluminum 材質製造，內部塗以 Teflon 層之錐狀圓筒，周界大氣由採樣口沿切線方向進入錐狀圓筒，利用離心力與重力之平衡，大於目標粒徑之懸浮微粒將掉入下方之集塵區而被篩除，其餘則隨氣流向上由濾紙匣收集。$PM_{2.5}$ 質量濃度之計算方法如下式：

$$C_{PM} = \frac{\text{後重} - \text{前重}\,(\mu g)}{\text{總採樣氣體體積}\,(m^3)}$$

本研究以離子層析儀分別分析氣膠水溶性陽離子(Na^+、NH_4^+、K^+、Mg^{2+}、Ca^{2+})及陰離子(Cl^-、NO_3^-、SO_4^{2-})。陽離子之抑制管柱為 CSRS-300 4mm，分離管柱為 CS12A。流洗液採用 20mM MSA。陰離子之抑制管柱採 ASRS-300 4mm，分離管柱為 AS9HC，流洗液採 9mM Na_2CO_3。

5.推估衍生性成份生成速率

為了推估逆軌跡線上衍生性成份生成速率，首先定義氣團軌跡通過測站之分析方法；繪製 $PM_{2.5}$ 各成份之等濃度圖(包括 K^+、SO_4^{2-}、NO_3^-、SO_2、NOx，並以內插的方式得知下風測站之軌跡線通過各軌跡位置之濃度。選取各時段各條軌跡線第 6 小時之軌跡線位置，第 6 小時之軌跡線位置以前一採樣時段之成份濃度進行空間內插，並計算傳輸期間形成之衍生性氣膠濃度，進而推估形成速率。

衍生性氣膠轉化機制相當複雜，以二氧化硫為例，反應機制就包含光化學反應、氣相反應及液相反應，為簡化計算，相關文獻一般皆假設衍生性氣膠形成速率之基本假設為「轉化反應為一階反應」，轉化速率公式如下：

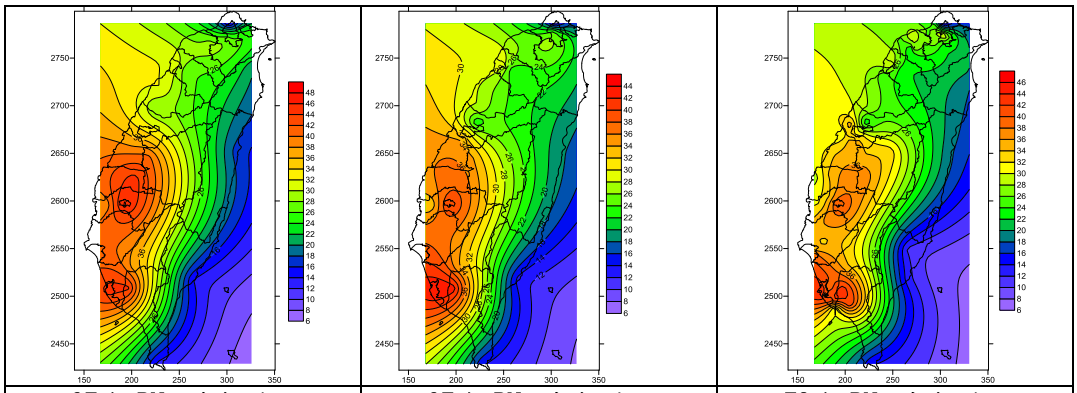
$$R = \frac{ln(1-f)}{-t}$$

其中 R 為轉化速率、f 為轉化率（為衍生性氣膠在氣膠與氣相前驅物合計中所佔之比例），t 為時間。

三、 $PM_{2.5}$ 及水溶性離子時空分布

1.手動/自動測站空間分布比較

$PM_{2.5}$ 之監測方法分為「手動監測」及「自動監測」二種，為解析自動及手動監測之差異，本研究彙整 2013 年除了離島以外的 27 個手動測站及 73 個自動測站（扣除離島監測站）$PM_{2.5}$ 濃度值，以年平均值計算並繪製空間分布圖，為求在同一基準下進行比較，另從 73 個自動測站中挑選與手動測站同站之 27 個自動測站，並同樣以年平均值繪製空間分布圖，圖 3 為自動/手動 $PM_{2.5}$ 濃度空間分布圖，由圖中可知，全台 $PM_{2.5}$ 濃度較高之區域集中在中部及高屏空品區，整體而言濃度由西向東遞減，由北往南遞增，另外由 27 個與 73 個自動測站顯示之分布稍有不同。



27 個 $PM_{2.5}$ 手動測站 濃度空間分布	27 個 $PM_{2.5}$ 自動測站 濃度空間分布	73 個 $PM_{2.5}$ 自動測站 濃度空間分布

圖 3 自動/手動 $PM_{2.5}$ 濃度空間分布

縱使 $PM_{2.5}$ 自動及手動測站濃度空間分布相似度高，然仍有些許差異，表 1 為本島 27 個手動測站與自動測站之 $PM_{2.5}$ 年平均濃度，由表中可知，以豐原站為例，手動監測較自動監測高 8.3μg/m^3，斗六站手動監測則較自動監測高 7.4μg/m^3，可見各站自動及手動監測數據間存在不可忽視之差異，縱然平均值僅差 2μg/m^3，然各站之差異隨著時間及地點仍相當顯著，故環保署每年皆會製作該年度全國細懸浮微粒自動監測站回歸式，俾利換算自動及手動監測結果。

表 1 自動/手動測站之 $PM_{2.5}$ 年平均濃度(μg/m^3)

測站	自動監測	手動監測	測站	自動監測	手動監測
士林站	25.0	22.6	斗六站	37.2	44.6
汐止站	22.9	25.8	台南站	39.3	40.4
板橋站	26.8	27.8	朴子站	32.1	38.3
桃園站	25.7	28.7	新營站	36.6	41.5
基隆站	18.4	24.0	嘉義站	40.4	46.5
萬華站	25.8	26.5	前金站	43.7	44.5
三義站	27.9	27.9	屏東站	42.9	44.4
竹東站	22.8	26.3	美濃站	34.4	37.3
苗栗站	26.8	31.9	宜蘭站	20.8	20.4
新竹站	30.1	31.3	台東站	13.1	14.0
忠明站	30.2	34.4	花蓮站	18.4	17.1
南投站	34.0	40.7	恆春站	14.2	13.5
彰化站	34.4	36.6	陽明站	12.3	13.1
豐原	22.5	30.8	平均	28.1	30.8

手動儀器與自動監測儀器之 $PM_{2.5}$ 質量濃度比對結果顯示，手動儀器之測值與自動監測儀器之測值兩者之間存在明顯差異，主要是受到硫酸銨與硝酸銨等吸濕物質會吸收水分，以及裝備之除濕系統時，量測硝酸銨會有低估的現象所影響。但若在環境之相對濕度介於硫酸銨與硝酸銨之潮解點之間，且硝酸鹽濃度較低之條件下，則手動儀器與自動監測儀器之測值則無明顯差異存在(郭正傑，2007)。

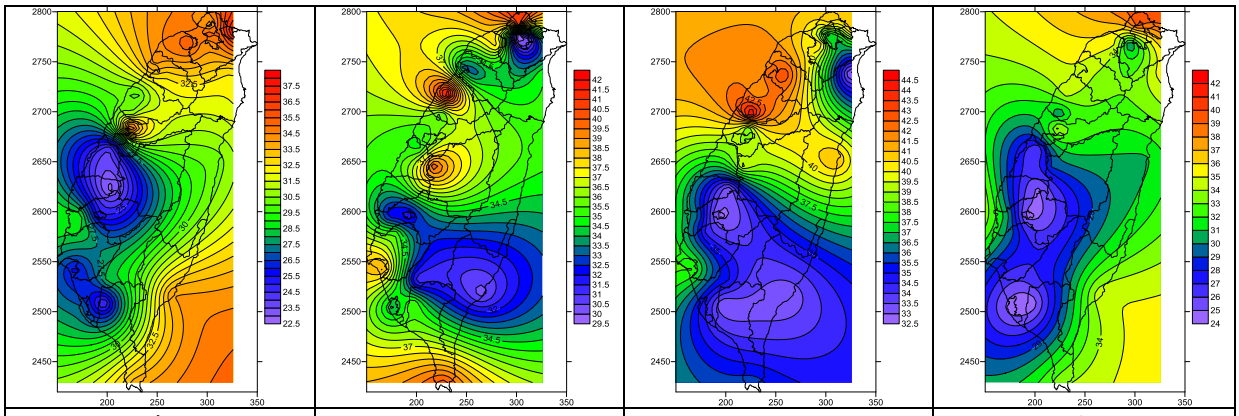
依 27 個手動採樣結果，將硝酸鹽濃度空間分布繪製如圖 6，由圖中可知硝酸鹽濃度以中部至高屏空品區較高，受硝酸鹽低估之影響較大，建議爾後若有相關研究計畫於該區域進行自手動採樣數據之換算，應建置該地點之自動監測站回歸式，俾利換算自動及手動監測結果，或參考最近之環保署一般測站之回歸式進行換算；而東部空品區及北部空品區硝酸鹽之濃度相對較低，若於該區域監測時，環境之相對溼度介於硫酸銨與硝酸銨之潮解點之間，自手動採樣數據差異並不大，擇一採樣即可，預計可節省人力、物力成本。

2.水溶性硫酸鹽與硝酸鹽離子之時空分布

本節則探討 2013 年 $PM_{2.5}$ 中水溶性離子成份比例之時間趨勢以及空間分布，由於 NO_3^-、SO_4^{2-} 主要受到人為活動之影響，故本節探討此兩種之水溶性離子。

(1)硫酸鹽時空分布

硫酸鹽成份比例之時空分布如圖 4 所示。春季硫酸鹽之成分比例以中部空品區及高屏空品區為最低,較高的比例則發生在北部及台東、恆春等地，夏季之空間分布各地皆不相同，整體而言，北部、中部及台東等地相較於周遭所佔之成份比例較低，而比例較高之區域則出現在竹苗空品區，秋季時，硫酸鹽成份比例較高的地區亦位於竹苗空品區，花蓮相較於周遭有較高之成份比例，中部以南的地區及宜蘭空品區，相較於其他地區其成份比例皆較低，冬季時節之空間分布則與春季較為相似，硫酸鹽成份比例較低的部分為中部空品區以及高屏空品區。

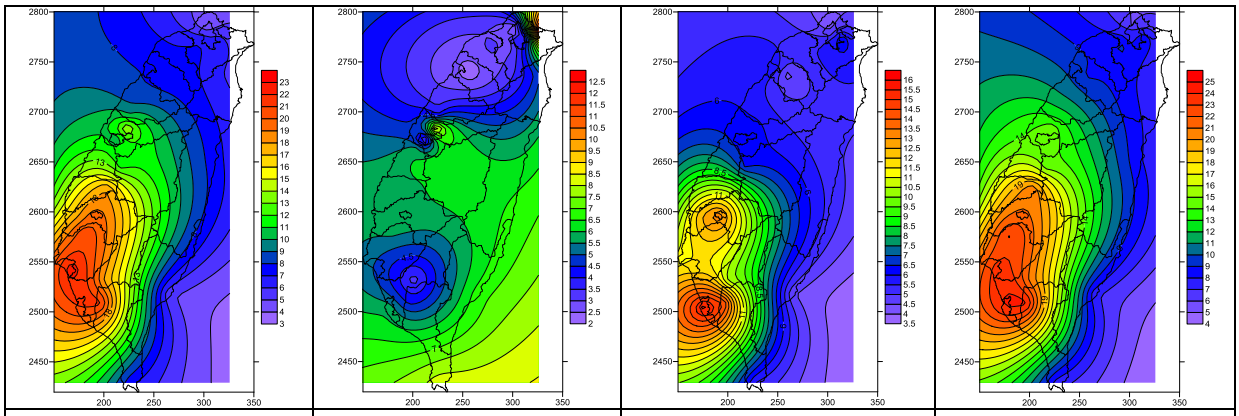


春	夏	秋	冬

圖 4 台灣各季硫酸鹽比例空間分布

(2)硝酸鹽時空分布

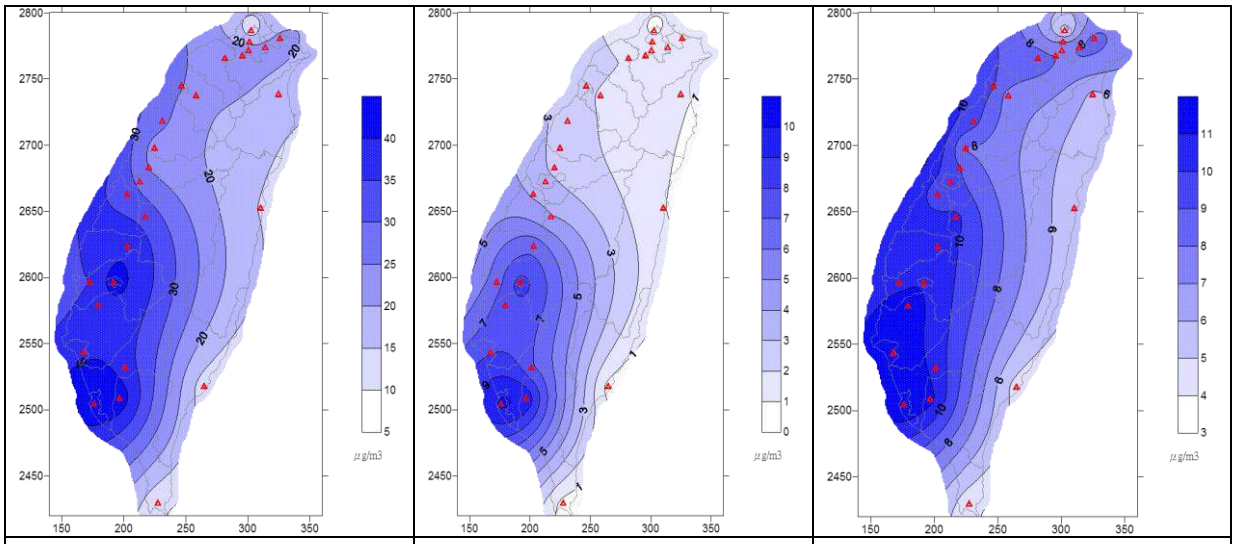
硝酸鹽成份比例之時空分布如圖 5 所示，春季時比例較高之區域位於中部空品區及高屏空品區，其餘地區由此區域向外遞減，夏季則明顯較春季不同，原本比例較高之高屏空品區驟減為最低比例之區域，此外中部以北之硝酸鹽成份比例較低，秋季時節，則與冬季期間之空間分布圖相當相似，硝酸鹽成份比例最高之區域皆出現在高屏空品區，中部空品區之硝酸鹽相較於周遭亦有較高之成份比例。



春	夏	秋	冬

圖 5 台灣各季硝酸鹽比例空間分布

為探討境內衍生性氣膠增量之影響，本研究將 2013 年手動監測數據以北風時段做篩選，並以陽明測站作為背景值，將各測站濃度扣除陽明測站之採樣數據，可得境內 $PM_{2.5}$ 增量空間分布圖，如圖 6 所示，由圖中可知無論在 $PM_{2.5}$、硝酸鹽及硫酸鹽，增量情形皆以高屏空品區較高，其次為中部空品區。整體而言 $PM_{2.5}$ 平均增量 32 $\mu g/m^3$，其中硝酸鹽平均增量 9.3 $\mu g/m^3$，大於硫酸鹽 7.1 $\mu g/m^3$。



$PM_{2.5}$	硝酸鹽	硫酸鹽
平均增量：32μg/m^3	平均增量：9.3μg/m^3	平均增量：7.1μg/m^3

圖 6　北風時年平均濃度增量分布圖

四、 衍生性氣膠貢獻分析

1.轉化速率推估結果

本研究於 2014 年 02 月 12 日至 02 月 21 日於善化測站、安南測站、台南測站、左營測站、仁武測站、大寮測站、小港測站、屏東測站以及潮州測站進行細懸浮微粒手動採樣，分析項目包括 $PM_{2.5}$ 質量濃度與水溶性離子成份分析。除外，本研究亦引用環保署一般空氣品質測站之氣狀污染物與氣象資料等監測數據，俾利計算衍生性氣膠之轉化速率。

由於模擬之軌跡線並不會剛好通過測站，因此必須對空間進行內插，以計算轉化速率；本研究於採樣區域內繪製 $PM_{2.5}$ 各成份之等濃度圖(包括 K+、SO_4^{2-}、NO_3^-、SO_2、NOx、NMHC 以及 SOC)，並以內插的方式得知軌跡線通過各軌跡位置之濃度。選取各時段各條軌跡線第 6 小時之軌跡線位置，第 6 小時之軌跡線位置以前一採樣時段之成份濃度進行空間內插。由傳輸時間 6 小時之空間內插之轉化結果，整體而言，此研究期間內氮轉化速率與硫轉化速率平均值分別為 0.56%/hr 與 2.38%/hr。

2.以轉化速率探討管制策略

本研究彙整 2016 年各測站 SO_2 及 NOx 之年平均值，如表 5，將周界濃度以平均轉化速率，計算出衍生性 $PM_{2.5}$ 每 10 小時生成量，如表 6。可發現整體而言由 NOx 轉化成 NO_3^- 之每小時生成量大於由 SO_2 轉化成 SO_4^{2-} 之每小時生成量。雖然硫轉化速率較大，但因大氣中 $PM_{2.5}$ 前驅物 NOx

之濃度較大，使得 NO_3^-每小時生成量較多。

另於本研究第 3 章探討境內衍生性氣膠之增量情形也發現，硝酸鹽之境內增量大於硫酸鹽之增量。

環保署(2013)計畫中亦有相同之推估結果，該計畫以三維網格模式模擬分析台灣不同空品區點源、線源及面源之 SO_2、NOx 與 NMHC 等前驅物對細懸浮微粒濃度之影響，其結果顯示各類排放源前驅物對細懸浮微粒之貢獻比例以 NOx 及線源較多，故應列為優先管制對象。

故結合本研究 2 部分之研究結果及環保署 2013 年之計畫，建議於管制策略上，建議北部地區 $PM_{2.5}$前驅物管制應以 NOx 為優先管制對象，南部地區則同步管制 SO_2及 NOx，才能有較大的效益。

表 5　2016 年各測站 SO_2及 NOx 之年平均值

空品區	測站	SO_2(ppb)	NOx(ppb)	空品區	測站	SO_2(ppb)	NOx(ppb)
北部	基隆	2.47	14.52	中部	豐原	2.67	12.48
	汐止	3.37	24.80		沙鹿	2.75	16.90
	萬里	2.56	7.69		大里	2.63	22.92
	新店	2.26	18.26		忠明	2.47	23.09
	土城	2.72	24.29		西屯	2.66	19.93
	板橋	3.61	28.41		彰化	3.30	16.96
	新莊	3.57	26.14		線西	3.90	14.59
	菜寮	2.90	25.56		二林	3.64	11.99
	林口	2.74	18.04		南投	2.43	18.84
	淡水	2.34	14.38		竹山	2.76	13.79
	士林	2.57	18.47		埔里	1.76	12.84
	中山	2.88	36.33	雲嘉南	斗六	3.05	17.15
	萬華	2.77	30.83		崙背	2.81	12.19
	古亭	2.45	25.50		新港	2.69	12.41
	松山	2.80	28.09		朴子	2.93	12.30
	大同	3.64	68.87		臺西	3.33	10.39
	桃園	4.91	21.83		嘉義	3.14	15.83
	大園	3.53	19.48		新營	2.76	14.94
	觀音	4.04	14.25		善化	2.89	13.99
	平鎮	3.09	19.93		安南	2.83	15.22
	龍潭	2.45	16.46		臺南	3.07	16.90
	陽明	1.83	3.86		麥寮	2.94	11.98
	三重	3.43	94.93	高屏	美濃	1.68	8.90
	中壢	3.59	46.42		橋頭	3.27	18.14
	永和	2.51	34.01		仁武	4.26	21.81

空品區	測站	SO_2(ppb)	NOx(ppb)	空品區	測站	SO_2(ppb)	NOx(ppb)
竹苗	湖口	3.12	14.33		鳳山	4.43	23.09
	竹東	1.99	12.02		大寮	6.75	21.78
	新竹	2.48	18.59		林園	4.55	15.98
	頭份	2.61	16.62		楠梓	3.37	20.90
	苗栗	2.71	17.76		左營	3.82	19.63
	三義	2.05	10.64		前金	4.06	19.56
宜蘭	宜蘭	1.91	8.22		前鎮	4.99	24.91
	冬山	2.33	13.14		小港	7.58	29.53
花東	臺東	1.29	7.76		屏東	2.66	15.76
	花蓮	1.72	9.18		潮州	2.57	11.99
	關山	1.16	5.49		恆春	1.19	4.06
					復興	5.21	28.32

表 6　SO_4^{2-}及 NO_3^-每 10 小時生成量(μg/m^3-hr)

空品區	測站	SO_2->SO_4^{2-} (μg/m^3-hr)	NOx->NO_3^- (μg/m^3-hr)	空品區	測站	SO_2->SO_4^{2-} (μg/m^3-hr)	NOx->NO_3^- (μg/m^3-hr)
北部	基隆	2.05	2.00	中部	豐原	2.22	1.72
	汐止	2.80	3.42		沙鹿	2.28	2.33
	萬里	2.12	1.06		大里	2.18	3.16
	新店	1.88	2.52		忠明	2.05	3.18
	土城	2.26	3.35		西屯	2.21	2.75
	板橋	3.00	3.92		彰化	2.74	2.34
	新莊	2.96	3.60		線西	3.24	2.01
	菜寮	2.41	3.52		二林	3.02	1.65
	林口	2.27	2.49		南投	2.02	2.60
	淡水	1.94	1.98		竹山	2.29	1.90
	士林	2.13	2.55		埔里	1.46	1.77
	中山	2.39	5.01	雲嘉南	斗六	2.53	2.36
	萬華	2.30	4.25		崙背	2.33	1.68
	古亭	2.03	3.51		新港	2.23	1.71
	松山	2.32	3.87		朴子	2.43	1.70
	大同	3.02	9.49		臺西	2.76	1.43
	桃園	4.07	3.01		嘉義	2.61	2.18
	大園	2.93	2.68		新營	2.29	2.06
	觀音	3.35	1.96		善化	2.40	1.93
	平鎮	2.56	2.75		安南	2.35	2.10
	龍潭	2.03	2.27		臺南	2.55	2.33
	陽明	1.52	0.53		麥寮	2.44	1.65

空品區	測站	SO_2->SO_4^{2-} (μg/m^3-hr)	NOx->NO_3^- (μg/m^3-hr)	空品區	測站	SO_2->SO_4^{2-} (μg/m^3-hr)	NOx->NO_3^- (μg/m^3-hr)
	三重	2.85	13.08	高屏	美濃	1.39	1.23
	中壢	2.98	6.40		橋頭	2.71	2.50
	永和	2.08	4.69		仁武	3.54	3.01
竹苗	湖口	2.59	1.97		鳳山	3.68	3.18
	竹東	1.65	1.66		大寮	5.60	3.00
	新竹	2.06	2.56		林園	3.78	2.20
	頭份	2.17	2.29		楠梓	2.80	2.88
	苗栗	2.25	2.45		左營	3.17	2.71
	三義	1.70	1.47		前金	3.37	2.70
宜蘭	宜蘭	1.59	1.13		前鎮	4.14	3.43
	冬山	1.93	1.81		小港	6.29	4.07
花東	臺東	1.07	1.07		屏東	2.21	2.17
	花蓮	1.43	1.27		潮州	2.13	1.65
	關山	0.96	0.76		恆春	0.99	0.56
					復興	4.32	3.9

五、 結論

1. $PM_{2.5}$ 自動及手動測站濃度空間分布相似度高，惟測值仍存在顯著差異，主要是硫酸銨與硝酸銨等吸濕物質會吸收水分，若環境之相對溼度介於硫酸銨與硝酸銨之潮解點之間，自手動採樣數據差異並不大，擇一即可，預計可節省人力、物力成本。

2. 硫酸鹽在春、秋及冬季於中部空品區及高屏空品區之成份比例較低，夏季時則為中部及台東地區之比例較低，其餘地區空間分布並未有明顯之季節變化；硝酸鹽於全台皆有夏季低、冬季高之趨勢，變化幅度最大之區域為中部、雲嘉南及高屏空品區。

3. 本研究以逆軌跡模式模擬氣團之行經路徑，挑選案例並計算出兩測站行徑間衍生性氣膠之生成量，以傳輸時間推估其轉化速率，研究結果顯示平均硫轉化速率與氮轉化速率分別為 2.38%/ hr 與 0.56%/ hr。

4. 境內 $PM_{2.5}$ 平均增量為 32 μ g/m^3，其中硝酸鹽平均增量 9.3 μ g/m^3，大於硫酸鹽 7.1 μ g/m^3；另 NO_x 轉化成 NO_3^- 之每小時生成量大於由 SO_2 轉化成 SO_4^{2-} 之每小時生成量。雖然硫轉化速率較大，但因大氣中 $PM_{2.5}$ 前驅物 NO_x 之濃度較大，使得 NO_3^- 每小時生成量較多。故於管制策略上，建議以 NO_x 優先管制，才能有較大的效益。

六、參考文獻

1. Alkezweeny, A. J., & Powell, D. C. (1977), Estimation of transformation rate of SO2 to SO4 from atmospheric concentration data. Atmospheric Environment (1967), 11(2): p179-182.
2. Cass, G. R. (1981), Sulfate air quality control strategy design. Atmospheric Environment (1967), 15(7): p1227-1249.
3. Chen Z., Zhang Y., Wang Y., Zhuang Y., Sakamoto K., Kimijima K., Suzuki T.,Uchiyama M., & Hashimoto Y.et al (1990), An estimate of the conversion rates of sulfur dioxide to sulfate and nitrite to nitric acid plus nitrate for the evaluation of air pollution in beijing china, Journal of Environmental Sciences, 2(1): p41-48.
4. Chang, T. Y. (1979), Estimate of the conversion rate of SO2 to SO2 from the da vinci flight data. Atmospheric Environment (1967), 13(12): p1663-1664.
5. Charron, A., Harrison, R.M. (2003), Primary particle formation from vehicle emissions during exhaust dilution in the roadside atmosphere. Atmospheric Environment, 37(29): p4109-4119.
6. Calvert, J., & Stockwell, W. (1983), Mechanism and rates of the gas phase oxidations of sulfur dioxide and the nitrogen oxides in the atmosphere. In (Edited Editor), Book Mechanism and rates of the gas phase oxidations of sulfur dioxide and the nitrogen oxides in the atmosphere, Ohio State Univ, Columbus (USA), Dept. of Chemistry, City.
7. Chu, S.H. (2004), PM2.5 episodes as observed in the speciation trends network. Atmospheric Environment, 38: p5237-5246.
8. Charron, A., Harrison, R.M. (2003), Primary particle formation from vehicle emissions during exhaust dilution in the roadside atmosphere. Atmospheric Environment, 37: p4109-4119.
9. Chen, K. S., Lin, C. F., & Chou, Y. M. (2001), Determination of source contributions to ambient PM2.5 in Kaohsiung, Taiwan, using a receptor model. Journal of the Air & Waste Management Association, 51(4): p489-498.
10. Forrest, J., & Newman, L. (1977), Further-Studies on Oxidation of Sulfur-Dioxide in Coal-Fired Power-Plant Plumes. Atmospheric Environment, 11(5): p465-474. doi: Doi 10.1016/0004-6981(77)90009-9.

11. Forrest, J., Schwartz, S. E., & Newman, L. (1979), Conversion of sulfur dioxide to sulfate during the da vinci flights. Atmospheric Environment (1967), 13(1): p157-167.
12. Fang G.C., Chang C.N., Wu Y.S., Fu P P.C., Yang C.J., Chen C.D., & Chang S.C. (2002), Chang Ambient suspended particulate matters and related chemical species study in central Taiwan, Taichung during 1998–2001, Atmospheric Environment, 36: p1921-1928.
13. Fang, G.C., Wu, Y.S., Chen, J.C., Rau, J.Y., Huang, S.H., & Lin, C.K. (2006), Concentrations of ambient air particulates (TSP, PM(2.5) and PM(2.5-10)) and ionic species at offshore areas near Taiwan Strait. J Hazard Mater, 132: p269-276.
14. Gillani, N. V., Kohli, S., & Wilson, W. E. (1981), Gas-to-particle conversion of sulfur in power plant plumes—I. Parametrization of the conversion rate for dry, moderately polluted ambient conditions. Atmospheric Environment (1967), 15(10–11): p2293-2313.
15. Gillani, N. V., Meagher J. F., Valente R. J.,. Imhoff R. E, Tanner R. L., & Luria M. (1998), Relative production of ozone and nitrates in urban and rural power plant plumes: 1. Composite results based on data from 10 field measurement days, J. Geophys. Res., 103(D17): p22593–22615.
16. Grosjean, D., & Friedlander, S. K. (1975), Gas-Particle Distribution Factors for Organic and Other Pollutants in the Los Angeles Atmosphere. Journal of the Air Pollution Control Association, 25(10); p1038-1044.
17. Hegg, D. A., & Hobbs, P. V. (1980), Measurements of gas-to-particle conversion in the plumes from five coal-fired electric power plants. Atmospheric Environment (1967), 14(1): p99-116.
18. Horng, C. L., & Cheng, M. T. (2008), Characterization of PM2.5 and conversion rate of sulfur dioxide to sulfate in inland areas of Taiwan. Journal of Environmental Engineering and Science, 7(3): p175-182.
19. Hildemann, L.M., Markowski, G.R., & Cass, G.R. (1991), Chemical composition of emissions from urban sources of fine organic aerosol. Environ. Sci. Technol., 25: p744-759.
20. Harrison, R.& Miller, S. (1999), The contribution of clinical directors to the strategic capability of the organization. British Journal of Management, 10(1): p23-39.

21. Hinds, W.C. (1999), Aerosol Technology : Properties, Behaviour and Measurement of Airborne Particles. John Wiley & Sons, New York.
22. ICRP(1994), ICRP publication 66: human respiratory tract model for radiological protection. A Report of a task group of the International Commission on Radiological Protection. Annals of the ICRP 24 (1-3): p1-480.
23. Khoder, M. I. (2002), Atmospheric conversion of sulfur dioxide to particulate sulfate and nitrogen dioxide to particulate nitrate and gaseous nitric acid in an urban area. Chemosphere, 49(6): p675-684.
24. Kulmala, M., Suni, T., Lehtinen, K.E.J., Dal Maso, M., Boy, M., Reissell, A., Rannik, U., Aalto, P., Keronen, P., Hakola, H., Back, J.B., Hoffmann, T., Vesala, T., & Hari, P. (2004), A new feedback mechanism linking forests, aerosols, and climate. Atmospheric Chemistry and Physics, 4: p557-562.
25. Kulmala, M., Vehkamaki, H., Petaja, T., Dal Maso, M., Lauri, A., Kerminen, V.M., Birmili W., & McMurry, P.H. (2004), Formation and growth rates of ultrafine atmospheric particles: a review of observations. Journal of Aerosol Science, 35(2): p143-176.
26. Kadowaki, S. (1986), On the nature of atmospheric oxidation processes of sulfur dioxide to sulfate and of nitrogen dioxide to nitrate on the basis of diurnal variations of sulfate nitrate and other pollutants in an urban area. Environmental Science and Technology 20(12): p1249-1253.
27. Kumar, P., Fennell, P., & Britter, R. (2008), Effect of wind direction and speed on the dispersion of nucleation and accumulation mode particles in an urban street canyon. Science of the Total Environment, 402: p82-94.
28. Kumar, P., Fennell, P., & Britter, R. (2008). Measurements of particles in the 5-1000 nm range close to road level in an urban street canyon. Science of the Total Environment, 390: p437-447.
29. Kumar, P., Fennell, P., Langley, D., & Britter, R. (2008), Pseudo-simultaneous measurements for the vertical variation of coarse, fine and ultra fine particles in an urban street canyon. Atmospheric Environment, 42: p4304-4319.
30. Kumar, P., Robins, A., Vardoulakis, S., & Britter, R. (2010), A review of the characteristics of nanoparticles in the urban atmosphere and the

prospects for developing regulatory controls. Atmospheric Environment, 44(39): p5035-5052.

31. Lin, J.J. (2002), Characterization of the major chemical species in PM2.5 in the Kaohsiung City, Taiwan. Atmospheric Environment, 36: p1911-1920.
32. Lin, J. J., & Tai, H. S. (2001), Concentrations and distributions of carbonaceous species in ambient particles in Kaohsiung City, Taiwan. Atmospheric Environment, 35(15): p2627-2636.
33. Lin, Y. C., & Cheng, M. T. (2007), Evaluation of formation rates of NO2 to gaseous and particulate nitrate in the urban atmosphere. Atmospheric Environment, 41(9): p1903-1910.
34. Lusis, M. A., Anlauf, K. G., Barrie, L. A., & Wiebe, H. A. (1978), Plume chemistry studies at a northern alberta power plant. Atmospheric Environment (1967), 12(12): p2429-2437.
35. Meagher, J. F., Stockburger, L., Bailey, E. M., & Huff, O. (1978), The oxidation of sulfur dioxide to sulfate aerosols in the plume of a coal-fired power plant. Atmospheric Environment (1967), 12(11): p2197-2203.
36. Ohta, S., & Okita, T. (1990), A chemical characterization of atmospheric aerosol in Sapporo. Atmospheric Environment. Part A. General Topics, 24: p815-822.
37. Pilinis, C., & Seinfeld, J.H. (1988), Development and Evaluation of an Eulerian Photochemical Gas Aerosol Model. Atmospheric Environment, 22(9): p1985-2001.
38. Roberts, P. T., & Friedlander, S. K. (1975), Conversion of SO2 to sulfur particulate in the Los Angeles atmosphere. Environ Health Perspect, 10: p103-108.
39. Ronneau, C., & Snappejacob, N. (1978), Atmospheric Transport and Transformation Rate of Sulfur-Dioxide. Atmospheric Environment, 12(6-7): p1517-1521.
40. Sasaki, K., Kurita, H., Carmichael, G. R., Chang, Y. S., Murano, K., & Ueda, H. (1988), Behavior of Sulfate, Nitrate and Other Pollutants in the Long-Range Transport of Air-Pollution. Atmospheric Environment, 22(7): p1301-1308.
41. Seinfeld, J.H. (1986), Atmospheric chemistry and physics of air pollution. Wiley, New York.

42. Seinfeld, J.H., & Pandis, S.N. (2006), Atmospheric Chemistry and Physics - From Air Pollution to Climate Change. John Wiley & Sons, New york.
43. Seinfeld, J.H., & Pandis, S.N.(1998), Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change. J. Wiley, New York.
44. Tsai, Y. I., & Chen, C. L. (2006), Characterization of Asian dust storm and non-Asian dust storm PM2.5 aerosol in southern Taiwan. Atmospheric Environment, 40(25): p4734-4750.
45. Tsai, Y. I., & Kuo, S. C.(2005), PM2.5 aerosol water content and chemical composition in a metropolitan and a coastal area in southern Taiwan. Atmospheric Environment, 39 (27): p4827-4839.
46. Tsai, Y. I., & Cheng M. T. (1999), Visibility and aerosol chemical compositions near the coastal area in Central Taiwan. The Science of the Total Environment 231: p37-51.
47. Turpin, B.J., Huntzicker, J.J., & Adams, K.M. (1990). Intercomparison of photoacoustic and thermal-optical methods for the measurement of atmospheric elemental carbon. Atmospheric Environment. Part A. General Topics, 24: p1831-1835.
48. Turpin, B.J., Huntzicker, J.J., Larson, S.M., & Cass, G.R. (1991), Los-Angeles Summer Midday Particulate Carbon - Primary and Secondary Aerosol. Environmental Science & Technology, 25(10): p1788-1793.
49. Watson, J.G., Chow, J.C., Lowenthal, D.H., Kreisberg, N.M., Hering, S.V., & Stolzenburg, M.R. (2006). Variations of nanoparticle concentrations at the Fresno Supersite. Science of the Total Environment, 358(1-3): p178-187.
50. Wang, W. C., Chen, K. S., Chen, S. J., Lin, C. C., Tsai, J. H., Lai, C. H., & Wang, S. K.(2008), Characteristics and receptor modeling of atmospheric PM2.5 at urban and rural sites in Pingtung, Taiwan. Aerosol and Air Quality Research, 8 (2): 112-129.
51. Wu, Y. S., Fang, G. C., Fu, P. P. C., & Yang, C. J.(2002), The measurements of ambient particulates (TSP, PM2.5, PM2.5-10), chemical component concentration variation, and mutagenicity study during 1998-2001 in central Taiwan. Journal of Environmental Science and Health Part C-Environmental Carcinogenesis & Ecotoxicology Reviews, 20 (1): p45-59.

52. Yuan, C. S., Sau, C. C., Chen, M. C., Huang, M. H.,Chang, S. W., Lin, Y. C., & Lee, C. G.(2004), Mass concentration and size-resolved chemical composition of atmospheric aerosols sampled at the Pescadores Islands during Asian dust storm periods in the years of 2001 and 2002. Terrestrial Atmospheric and Oceanic Sciences, 15 (5): p857-879.
53. Zak, B. D. (1981). Lagrangian measurements of sulfur dioxide to sulfate conversion rates. Atmospheric Environment (1967), 15(12): p2583-2591.
54. 王證權(2001)，亞洲氣膠特性實驗-台灣北海岸春季氣膠化學特性，國立中央大學環境工程研究所碩士論文。
55. 王昌世(2010)，中部空品區二氧化硫與氮氧化物的傳輸與污染成因分析，東海大學環境科學與工程學系碩士論文。
56. 吳義林等(2001)，衍生性氣膠與其前驅物之相關性研究，行政院環境保護署專案計畫，EPA-90-FA17-03-90B025。
57. 郭正傑(2007)，南部懸浮微粒超級測站之自動監測儀器與手動方法之比對，國立成功大學環境工程學系碩士論文。
58. 陳宏瑋(2015)，亞洲長程傳輸事件台灣大氣戴奧辛傳輸特性及來源解析，國立陽明大學環境與職業衛生研究所碩士論文。

我國產業溫室氣體自願減量現況探討

陳裕民*、王登楷**

摘　要

「巴黎氣候協定」已於 2016 年 11 月生效，協定為 2020 年後全球應建立氣候變遷具體行動。而為響應溫室氣體減量此全球議題，我國除在 104 年 7 月公布並實施溫室氣體減量及管理法，以積極面對溫室氣體減量挑戰外，更早於 2005 年在經濟部的號召下，由全國工業總會、鋼鐵業、石化業、造紙業、水泥業、人纖業、棉布印染業、絲綢印染業、複合材料業、半導體業及液晶顯示器業等 11 大產業公協會率其所屬會員廠商，共同推動溫室氣體自願減量工作。在經濟部工業局與產業共同努力下，自 2006 年至 2016 年間參與溫室氣體自願減量廠商，總計投入新台幣 477 億元推動減量工作，共計執行 9,121 件減量措施，減少溫室氣體排放達 1,113 萬公噸 CO_2e，相當於節省能源 321 萬公秉油當量的斐然成效。

爰此，本文擬依歷年自願減量工作推動情形，彙整製造業廠商推動減量之重點與成果，並進一步分析工業部門減碳潛力與機會，以增進各界對於產業溫室氣體自願減量推動實務之瞭解，及作為未來相關策略研訂之參考。

【關鍵詞】溫室氣體、自願減量

---

*財團法人台灣綠色生產力基金會　工程師

**財團法人台灣綠色生產力基金會　經理

一、前　言

為因應國際減碳趨勢，善盡地球村公民責任，我國早於京都議定書生效年(2005 年)，即在經濟部的號召下，由全國工業總會、鋼鐵業、石化業、造紙業、水泥業、人纖業、棉布印染業、絲綢印染業、複合材料業、半導體業及液晶顯示器業等 11 大產業公協會率其所屬會員廠商，共同推動溫室氣體自願減量工作。

隨後，為協助產業因應我國 2010 年成立行政院節能減碳推動會，所擬定國家節能減碳總計畫及其設定之「2020 年回到 2005 年排放量，於 2025 年回到 2000 年排放量」減碳目標、「溫室氣體減量及管理法(2015 年 7 月 1 日公告施行)」明訂的國家長期減量目標「2050 年溫室氣體排放量降為 2005 年排放量 50%以下」，及呼應巴黎協定所提出的「2030 年溫室氣體排放量降為 2005 年排放量再減 20%」國家減量承諾目標。

因此，經濟部工業局持續整合政府與產業資源，攜手共同面對國內外越趨嚴峻的溫室氣體減量壓力，並推動我國溫室氣體減量迄今。

二、產業溫室氣體自願減量機制

為提高各界對產業溫室氣體自願減量績效之可信度與公信力，經濟部工業局在兼顧「公開透明、正確性、一致性、可比較性與完整性」等原則下，建立符合可量測、可報告與可查證等要求的「產業溫室氣體自願減量查核指引(以下簡稱查核指引)」，使國內執行溫室氣體自願減量之廠商、查核單位等得以遵循。

每年廠商所提報之年度溫室氣體自願減量績效，查訪執行時程與流程如圖 1 所示，並分別進行說明。

1.減量績效提報

自願參與溫室氣體減量推動廠商，每年於 3 月上旬，至「工業局產業溫室氣體自願減量資訊平台(以下簡稱資訊平台)」，填報年度溫室氣體自願減量績效與溫室氣體減量計畫，提報內容包括：(1)年度溫室氣體排放清冊、產量與產值；(2)年度能源使用量，包括電力、燃料煤、燃料油等能源耗用；(3)年度減量績效，包括減量措施、投資金額、節能效益、投資金額攤提時間與能源節約量等；(4)年度減量計畫，包括預計執行之減量措施、預定執行減量措施之起迄時間與預估之節省能源類別與節省能源

量等。

圖 1　自願減量績效查訪執行流程

2.減量績效書面審查

各廠商提報之減量績效報告書將由經工業局認可的查訪人員進行書面查核，主要核對廠商提報資料之完整性，並確認減量措施、減量績效計算方法、減量數據之合理性與正確性。

3.減量績效現場查訪

完成各廠減量績效書面審查後，查訪人員即於每年 4 月至 8 月間，依據「查核指引」第五章要求赴工廠進行現場查訪作業，確認重點包括：

(1)確認減量績效提報年度。

(2)確認減量措施名稱、空間與時間邊界。

(3)確認量化溫室氣體減量措施之監督量測方法(質量平衡、儀器量測或推估計算)。

(4)確認量化活動數據計算結果。

(5)確認相關數據佐證資料(會議紀錄、節約能源提案、工程或採購合約、檢測數據等)。

(6)確認作業現場資料與紀錄(如操作紀錄、領用紀錄等)。

(7)確認排放減量計算引用之能源排放係數等相關計算因子。

(8)確認減量措施投資金額、投資攤提期間、投資效益等。

4.減量績效修正

查訪人員於完成現場查訪後，依規定格式撰寫現場查訪報告書，內容包括：(1)計畫說明、保密權責、(2)廠商基本資料、(3)主要耗能設備資料、(4)能源使用量、(5)溫室氣體排放量、(6)書面審查結果、(7)現場查訪結果(包括減量措施、減量績效、減量投資金額與節能效益等)、(8)申請抵換專案之評估建議等。同時，查訪人員依報告書內容至「資訊平台」修正自願減量廠商減量績效，並通知廠商於接獲現場查訪報告書後，至「資訊平台」進行確認。

5.專家諮詢會確認與績優廠商遴選

年度查訪結果彙整後，復以提送專家諮詢會確認上年度減量績效，並針對減量績優之廠商進行遴選及表揚，彰顯廠商減量努力成效。

三、產業溫室氣體自願減量績效

在經濟部工業局、各產業公協會及各廠商的共同努力下，參與溫室氣體自願減量廠商於 2006 年至 2016 年，總計已投入新台幣 477 億元推動減量工作，共計執行 9,121 件減量措施，創造溫室氣體排放減量達 1,113 萬公噸 CO_2e 的減碳績效。

進一步分析歷年產業推動的減量措施與溫室氣體自願減量，發現我國廠商所推動減量措施件數自 95 年僅推動 290 件減量 38.4 萬公噸 CO_2e，逐年攀升至 105 年推動 1,345 件減量 91.1 萬公噸 CO_2e，顯示出我國產業界對減少溫室氣體排放量的不懈努力與減碳成效，如圖 2 所示。分析此 11 年措施件數與減碳績效資料發現，96 年度平均每件措施數貢獻減碳量約在 1,300 公噸 CO_2e，但至 105 年度平均每件措施數貢獻減碳量僅 700 公噸 CO_2e，即減量措施平均減碳貢獻呈現逐漸下滑的趨勢，表示廠商減碳工作越趨困難。

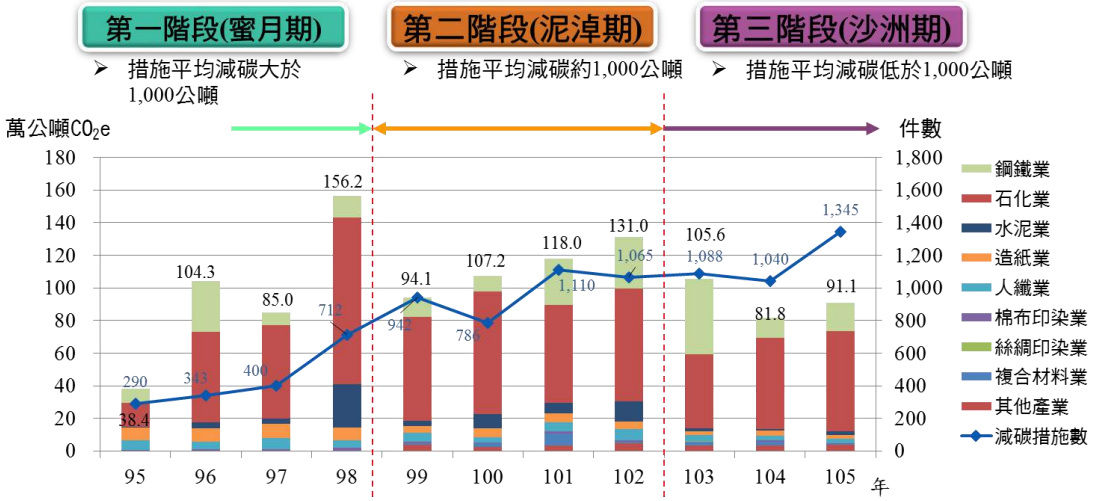


圖 2　溫室氣體自願減量措施數與減碳量趨勢圖

1.105 年度減量績效分析

參與自願減量廠商 105 年度共計執行 1,345 件減量措施，累計減量績效約 91.1 萬公噸 CO_2e，總計投資新台幣 55.6 億元，並可節省能源費用約新台幣 38.0 億元。105 年度減量績效主要來自鋼鐵業與石化業，減碳量共計達 78.5 萬公噸 CO_2e，占整體減碳量 86.2%，故針對鋼鐵業與石化業進行減量績效分析，說明如下：

(1)鋼鐵業

105 年度鋼鐵業共投入 10.2 億元，推動溫室氣體減量措施 217 件，並減少 17.2 萬公噸 CO_2e 排放量。以下分別說明鋼鐵業減量措施與績效、投資金額與節省能源成本概況。

A.減量措施與績效

鋼鐵業 105 年度推動的減量措施總計 217 件，依節能類別[1]分類發現，執行減量措施最多的類別為「製程」，其次為「馬達」及「照明」，執行措施數分別為 72 件、61 件及 42 件，合計占鋼鐵業年度執行減量措施的 80.6%。

105 年度鋼鐵業減量績效合計為 17.2 萬公噸 CO_2e，依節能類別分析主要貢獻來自於「製程」，占鋼鐵業減量績效的 75.6%。而針對「製程」減量績效，進一步依節能方法[2]分類深入分析，發現最主要

[1]節能類別分類：製程、空調、空壓機、照明、馬達、電力系統、鍋爐、汽電共生系統、蒸氣系統、電梯與其他。

[2]節能方法分類：能源管理、汰舊換新、設備改善、保養維修、可停電力、廢棄物利用、熱回收、水回收、新設或增設、其他節能措施、非能源燃燒。

減量績效乃是由「能源管理」改善所貢獻，占「製程」改善的 86.1%，如圖 3 所示。經瞭解，此「能源管理」減量貢獻主要來自於「一貫煉鋼製程的高爐，藉由調整投入燃料配比與分布等管理方式，降低單位產品能耗」減量措施。

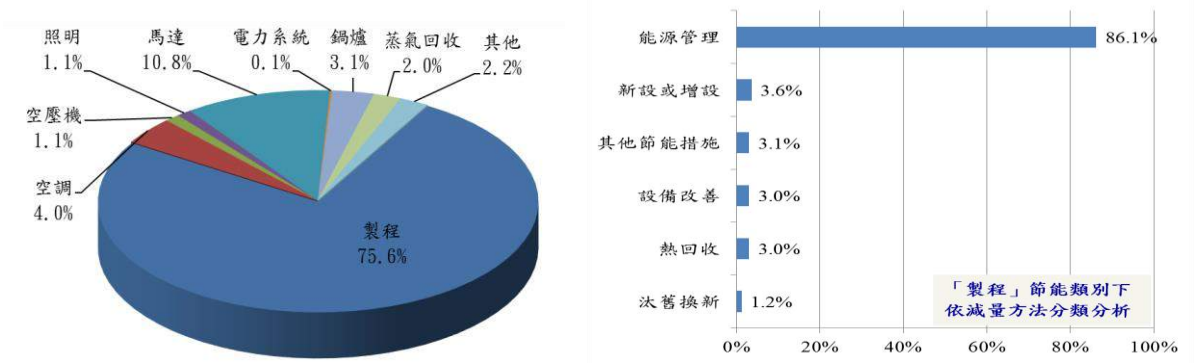


圖 3　鋼鐵業 105 年度減量績效分析

B.投資金額

鋼鐵業 105 年度共計投資約 10.2 億新台幣推動自願減量工作，投資金額主要集中於「製程」節能類別，占鋼鐵業整體投資金額 75.0%，其次為「馬達(占 10.8%)」，如圖 4 所示。為瞭解鋼鐵業減碳費用支出，進一步依節能方法分類深入分析「製程」投資金額，發現製程改善項目中，以「設備改善(占 55.9%)」花費金額最高，究其原因乃因設備購置的固定成本較高，導致投資金額集中。

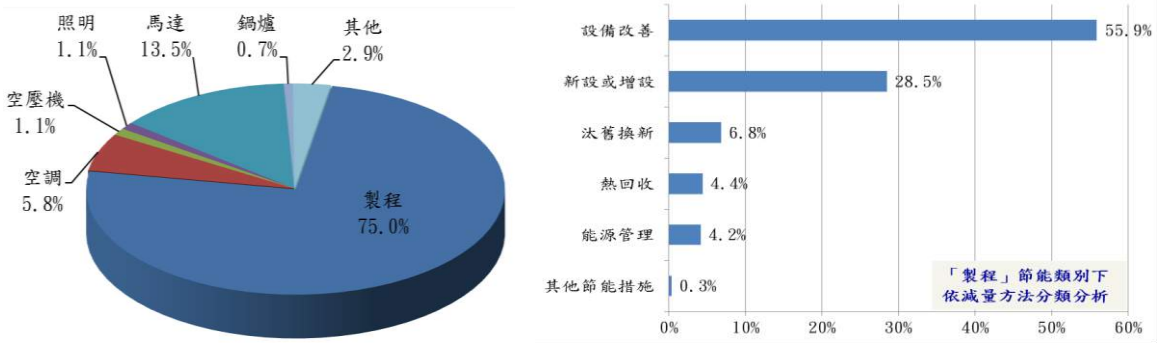


圖 4　鋼鐵業 105 年度投資金額分析

C.節省能源成本

鋼鐵業的 105 年度節省能源費用總計約新台幣 7.1 億元，依節能類別分類方式分析，以「製程」分類的貢獻最為顯著，達整體鋼鐵業效益的 73.4%。針對「製程」節省能源費用再依節能方法分類進一步分析，發現因「能源管理」而衍生的節省能源費用最高，達 73.5%，

如圖 5 所示。

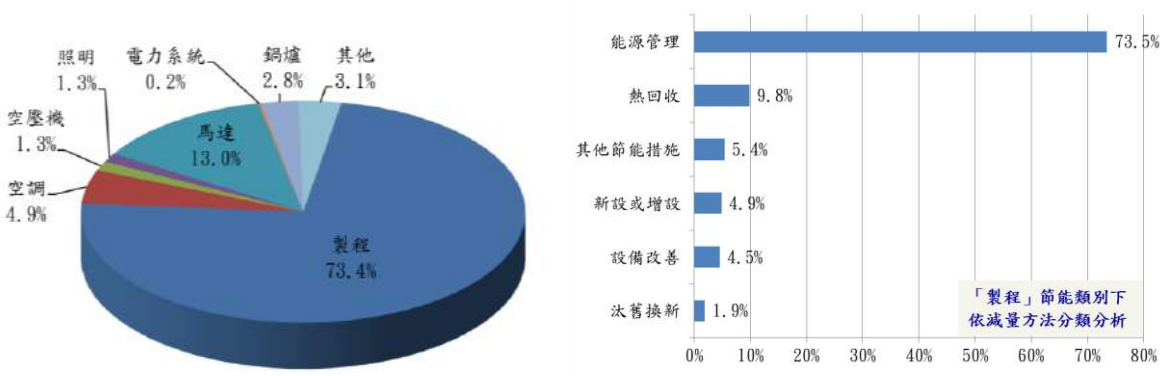


圖 5　鋼鐵業 105 年度節省能源成本分析

(2)石化業

105 年度石化業共投入 30.0 億元，推動溫室氣體減量措施 389 件，並減少 61.3 萬公噸 CO_2e 排放量。以下分別說明石化業減量措施與績效、投資金額與節省能源成本概況。

A.減量措施與績效

石化業 105 年度推動的減量措施總計 389 件，依節能類別分類發現，其中屬「製程」項目的減量措施數最多，計 147 件，占石化業 105 年度推動減量措施的 37.8%，其次為「馬達」改善，共執行 117 件減量措施(占 30.1%)，占石化業執行減量措施的 67.9%。

105 年度石化業減量績效合計為 61.3 萬公噸 CO_2e，依節能類別分析主要貢獻來自於「製程」，占石化業減量績效的 68.6%。而針對「製程」減量績效，進一步依節能方法分類深入分析，發現減量績效分別分布於新設或增設(占 29.1%)」、「汰舊換新(占 22.7%)」、「能源管理(占 20.0%)」及「設備改善(占 18.6%)」，如圖 6 所示。

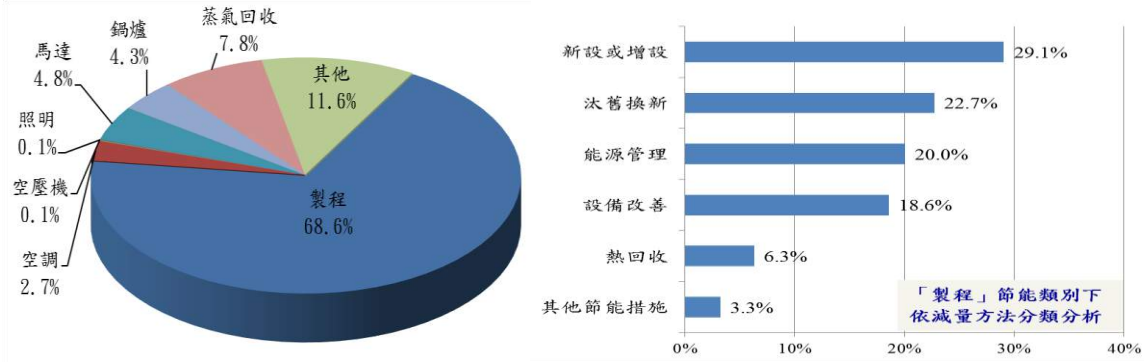


圖 6　石化業 105 年度減量績效分析

B.投資金額

石化業 105 年度共計投資約 30.0 億新台幣推動自願減量工作，投資金額主要集中於「製程」節能類別，占石化業整體投資金額 84.3%，如圖 7 所示。為瞭解石化業減碳費用支出，進一步依節能方法分類分析「製程」投資金額，發現投資金額主要集中在「汰舊換新(占 43.1%)」、「新設或增設(占 26.5%)」與「熱回收(占 15.6%)」。究其原因乃是「汰舊換新」與「新設或增設」皆涉及採買新設備，故需投入較多的資金，而「熱回收」類的減量措施，則須針對工廠內輸熱管線進行新增或既有管線進行改善，因此投入費用亦不斐。

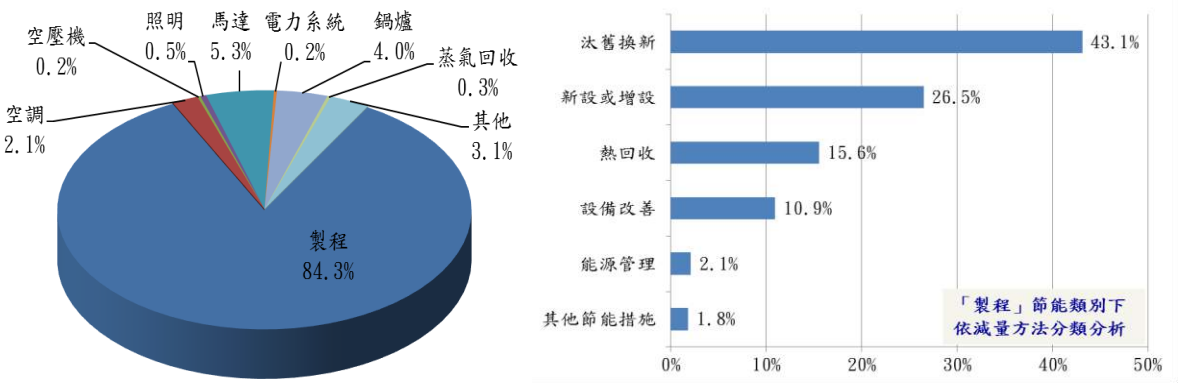


圖 7　石化業 105 年度投資金額分析

C.節省能源成本

石化業的 105 年度節省能源費用總計約新台幣 24.6 億元，依節能類別分類方式分析，以「製程」分類的貢獻最為顯著，達整體石化業效益的 82.8%。針對「製程」節省能源費用再依節能方法分類進一步分析，發現因「能源管理」而衍生的節省能源費用最高，達 38.8%，如圖 8 所示。

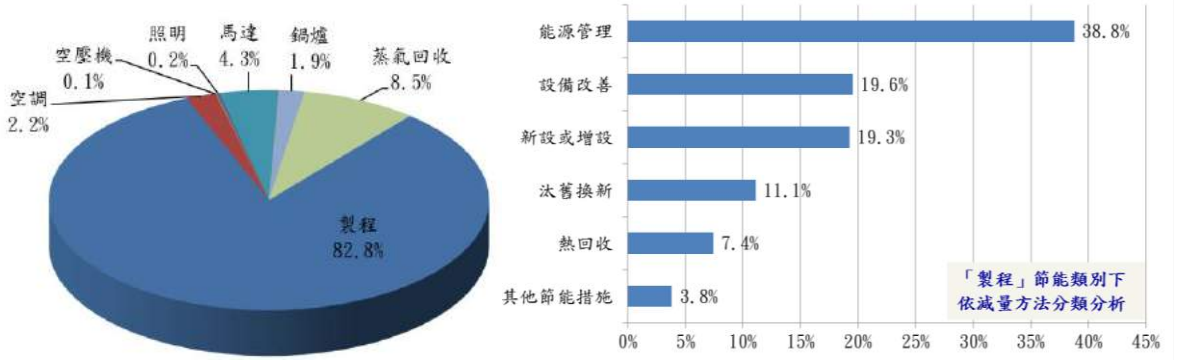


圖 8　石化業 105 年度節省能源成本

2.近五年(101 年至 105 年)減量績效分析

參與自願減量協議的廠商近五年共計執行 5,648 件減量措施，累計減量績效 527.6 萬公噸 CO_2e，總計投資新台幣 306.6 億元，並可節省能源費用新台幣 253.7 億元。近五年減量績效主要來自鋼鐵業與石化業，減碳量共計達 427.6 萬公噸 CO_2e，占整體減碳量 81.0%，故針對鋼鐵業與石化業進行減量績效分析，說明如下：

(1)鋼鐵業

近五年鋼鐵業共投入 82.9 億元，推動溫室氣體減量措施 953 件，並減少 135.9 萬公噸 CO_2e 排放量。以下分別說明鋼鐵業減量措施與績效、投資金額與節省能源成本概況。

A.減量措施與績效

鋼鐵業近五年推動的減量措施總計 953 件，依節能類別[3]分類發現，累計執行減量措施最多的類別為「製程」，其次為「照明」及「馬達」，累計執行措施數分別為 334 件、236 件及 175 件，占鋼鐵業近五年執行減量措施的 78.2%。

近五年鋼鐵業減量績效合計為 135.9 萬公噸 CO_2e，依節能類別分析發現，鋼鐵業減量績效主要來自於「製程」改善貢獻，占鋼鐵業減量績效的 75.3%。進一步針對「製程」減量績效以節能方法分類探討，發現最減量貢獻集中於「能源管理」改善，占「製程」改善的 68.0%，如圖 9 所示。分析主要減量貢獻係來自一貫煉鋼製程中，數個高爐提升能源效能之成果。

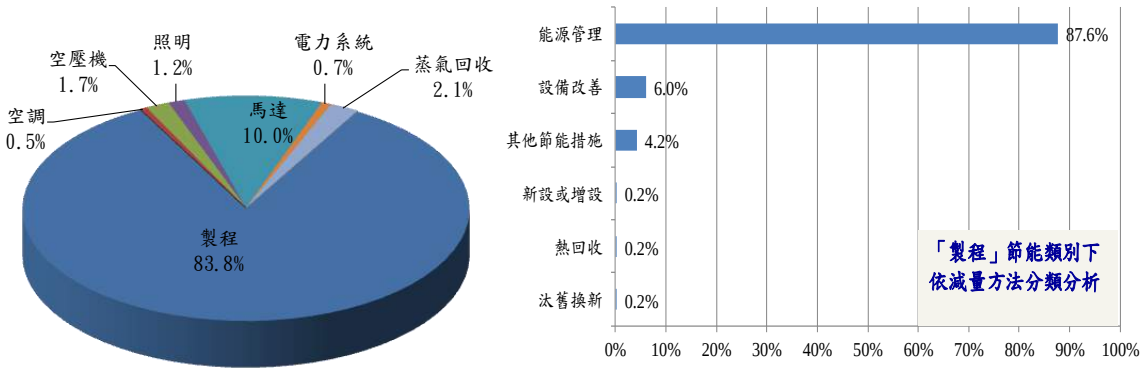


圖 9　鋼鐵業近五年減量績效分析

[3]節能類別分類：製程、空調、空壓機、照明、馬達、電力系統、鍋爐、汽電共生系統、蒸氣系統、電梯與其他。

B.投資金額

鋼鐵業近五年總投入推動減碳之金額約為新台幣 82.9 億元，投資金額主要集中於「製程」改善，占鋼鐵業整體投資金額 50.3%，其次為「鍋爐(占 18.4%)」，如圖 10 所示。針對「製程」改善依節能方法分類進行深入分析，發現資金主要用於「汰舊換新」與「設備改善」，兩者共計占「製程」改善投資金額 72.5%，主要為設備購置的固定成本較高，導致投資金額集中。

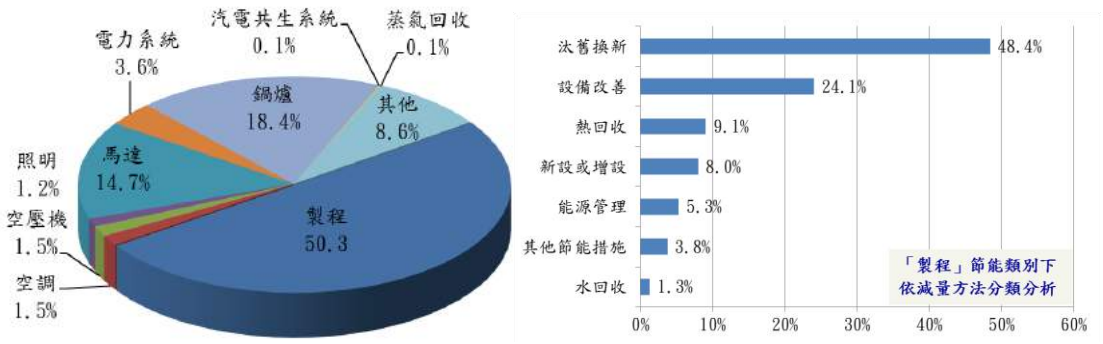


圖 10　鋼鐵業近五年投資金額分析

C.節省能源成本

鋼鐵業近五年節省能源費用總計約新台幣 59.6 億元，依節能類別分類方式分析，主要貢獻係來自於「製程」改善，占近五年投資效益 76.0%。針對「製程」改善依節能方法進一步分析，又以「能源管理」所產生的投資效益最高，占「製程」改善的 58.9%，如圖 11 所示。

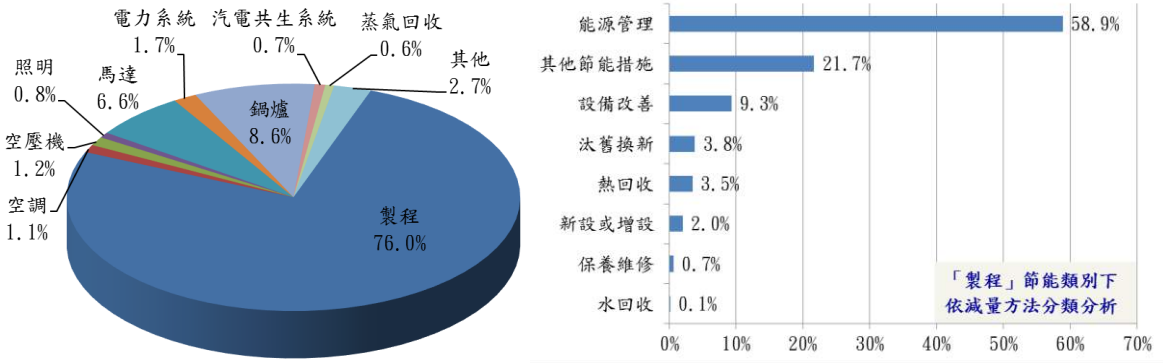


圖 11　鋼鐵業近五年節省能源成本分析

(2)石化業

石化業近五年總計共投入 115.9 億元，推動溫室氣體減量措施 1,426 件，並減少 291.7 萬公噸 CO_2e 排放量。以下分別說明石化業近五年減

量措施與績效、投資金額與節省能源成本現況。

A.減量措施與績效

石化業近五年推動的減量措施總計 1,426 件，依節能類別分類發現，近五年累計執行減量措施最多的類別為「製程」，累計執行措施數為 698 件，占石化業近五年累計執行減量措施的 48.9%。而近五年石化業減量績效合計為 291.7 萬公噸 CO_2e，經分析發現主要貢獻來源為「製程」改善，占石化業近五年減量績效的 65.6%。深入分析「製程」的節能方法發現，減量績效並未如鋼鐵業般顯著集中於特定的節能方法，而是分布於「能源管理(占 32.9%)」、「設備改善(占 24.9%)」及「汰舊換新(占 14.0%)」，如圖 12 所示。

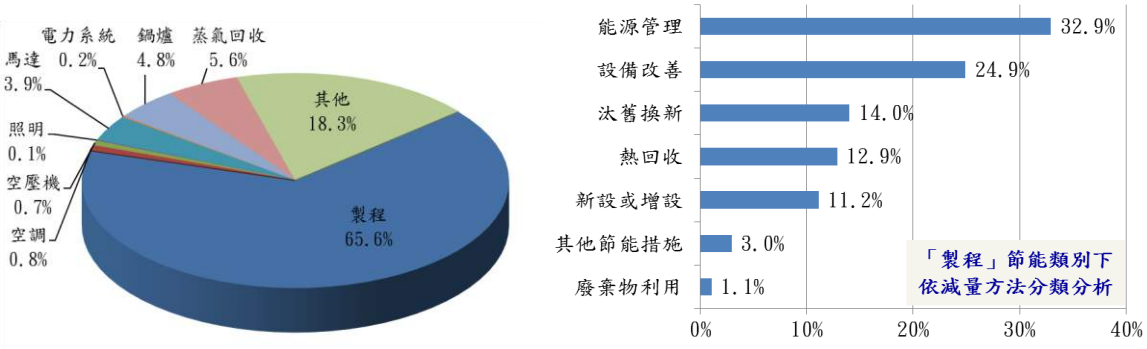


圖 12　石化業近五年減量績效分析

B.投資金額

石化業近五年投入推動溫室氣體減量金額總計為新台幣 115.9 億元，投資金額主要集中於「製程」改善，占石化業整體投資金額 82.3%，如圖 13 所示。針對「製程」改善依節能方法分類進行深入分析，主要資金主要用於「汰舊換新」、「設備改善」與「新設或增設」等改善措施，共計占「製程」改善投資金額 71.4%。

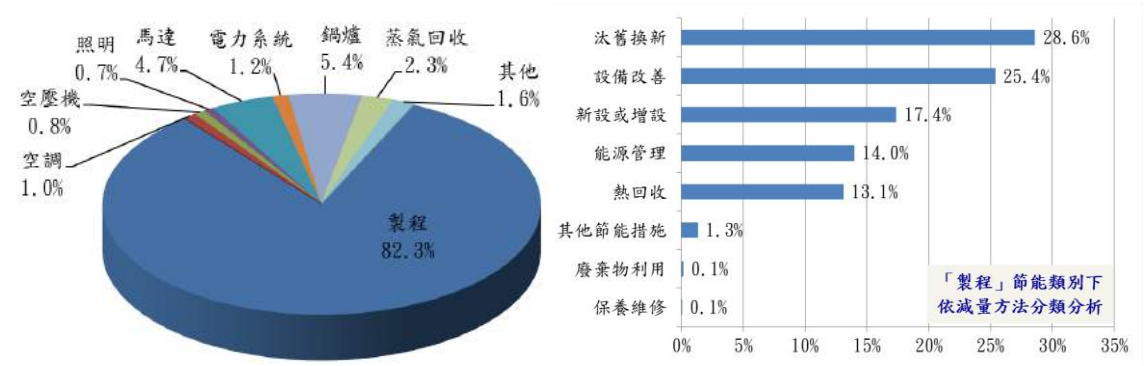


圖 13　石化業近五年投資金額分析

C.節省能源成本

近五年石化業因推動自主性溫室氣體減量工作，節省的能源費用總計約 124.6 億元，依節能類別分析，主要效益來自於「製程」改善，占近五年總投資效益的 80.9%，針對「製程」改善依節能方法進一步分析，以「能源管理」所節省的能源費用最高，占「製程」投資效益的 40.0%，其次為「設備改善(占 19.8%)」與「汰舊換新(占 16.4%)」，如圖 14 所示。

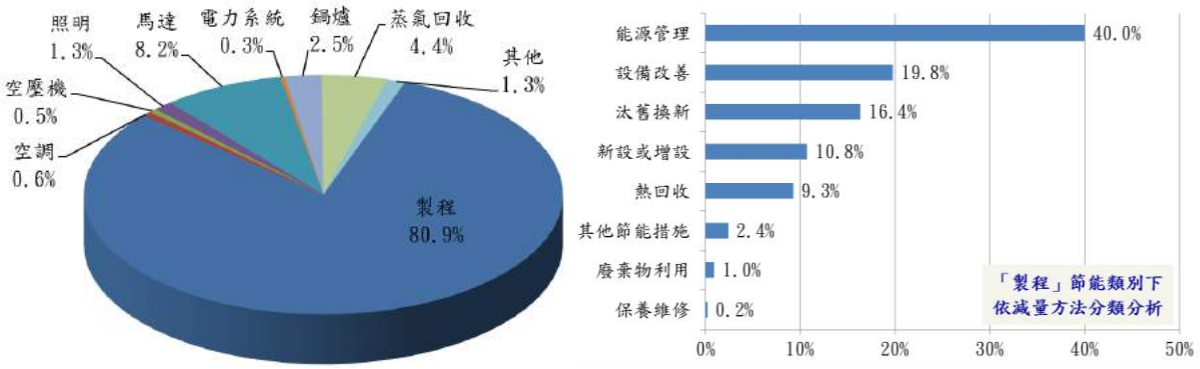


圖 14　石化業近五年節省能源成本分析

四、工業部門減碳潛力與機會

本文針對鋼鐵業與石化業，研析歷年溫室氣體減量執行成果，探討減量績效顯著與節省能源成本顯著之減量措施，供有意自主推動溫室氣體減量之廠商參考。

1.鋼鐵業

鋼鐵業具顯著減量績效或節省能源成本之減量措施，主要為採用低碳燃料、熱回收與設備改善。

(1)減量績效顯著之減量措施

分析鋼鐵業具商業可行性、普遍性且減量績效顯著之減量措施，主要為採用低碳燃料、熱回收與設備改善，各類減量措施之投資金額、節省能源成本、回收年限與 CO_2e 減量績效彙整如表 1 所示。

表 1　鋼鐵業減量績效顯著之減量措施

節能項目與減量措施		減量投資金額(千元)	節省能源成本(千元)	回收年限(年)	CO_2e 減量(公噸)
採用低碳燃料	預熱器、鍋爐燃料由低硫燃料油改為天然氣	6,000~99,000	9,000~110,000	0.4~2	2,900~20,600
熱回收	廢熱回收再利用	4,500~619,000	4,300~332,000	0.6~5	4,500~48,000
設備更新	1.鍋爐爐體更新 2.熱交換器更新	16,000~82,000	16,000~57,000	0.7~3	3,800~24,000

(2)節省能源成本顯著之減量措施

篩選鋼鐵業具商業可行性、普遍性且節省能源成本顯著之減量措施，主要為採用低碳燃料、設備改善與設備管理，各類減量措施之投資金額、節省能源成本、回收年限與 CO_2e 減量績效彙整如表 2 所示。

表 2　鋼鐵業節省能源成本顯著之減量措施

節能項目與減量措施		減量投資金額(千元)	節省能源成本(千元)	回收年限(年)	CO_2e 減量(公噸)
採用低碳燃料	預熱器、鍋爐燃料由低硫燃料油改為天然氣	6,000~99,000	9,000~110,000	0.4~2	2,900~20,600
設備改善	泵浦改善與更換	2,600~48,000	2,600~104,000	0.4~2	1,700~16,000
	加熱爐汰換	1,500~3,000	7,000~17,000	0.6~5	800~3,000
設備管理	1.提高加熱爐爐溫 2.加熱爐爐內鋼胚間隙管理 3.依成品尺寸改善加熱爐作業標準	100~1,400	10,000~27,000	1 年以下	2,600~4,000

2.石化業

分析石化業具顯著減量績效或節省能源成本，且具商業可行性與普遍性之減量措施，皆為餘熱回收。彙整石化業餘熱回收減量措施之投資金額、節省能源成本、回收年限與 CO_2e 減量績效如表 3 所示。

表 3　石化業減量績效顯著與節省能源成本顯著之減量措施

節能項目與減量措施		減量投資金額(千元)	節省能源成本(千元)	回收年限(年)	CO_2e 減量(公噸)
餘熱回收	增設熱交換器	5,000~35,000	8,000~36,000	1~7	1,500~11,000
	廢熱回收	7,000~30,000	1,800~20,000	1.5~4	3,500~14,000
	冷凝水熱能回收	11,000~25,000	10,000~91,000	0.8~2	3,500~18,000

五、結　語

2006 年至 2016 年間，在政府、各產業公協會及各廠商的共同努力下，我國製造業已創造溫室氣體減量 1,113 萬公噸 CO_2e 的佳績。但面對「溫室氣體減量及管理法」所明訂的國家長期減量目標「2050 年溫室氣體排放量降為 2005 年排放量 50%以下」，以及 2015 年巴黎第 21 屆全球氣候大會(COP21)，我國承諾的「2030 年溫室氣體排放量降為 2005 年排放量再減 20%」減量目標，後續製造業仍面對極為嚴峻的減碳挑戰。

但有時危機亦是轉機的開始，嚴峻的減碳環境亦可促使企業重新審視導入高價但高效能的設備、高效率的生產技術之必要性，及早以提升生產效率、降低產品單耗與排放強度之綠色生產方式，拔升企業競爭力以永續經營。

除冀望我國企業積極面對減碳挑戰外，政府亦應依「溫室氣體減量及管理法」第 22 條，盡速推動合理且具誘因之效能標準獎勵機制，開創除抵換專案外的碳額度申請途徑，加速落實減碳有價化，以實質獎勵促使廠商持續推動減量工作。但在未能依法促使廠商積極自主落實溫室氣體減量工作期間，建議仍應持續協助產業推動溫室氣體自願減量，導引產業提升能源使用效率、降低產品或製程溫室氣體排放強度等方式，增加產業競爭力並達成我國長期減量目標。

六、參考資料

1. 103-105 年度產業溫室氣體管理與調適計畫期末報告，經濟部工業局。

熱水鍋爐汰換改造熱泵熱水系統

陳建枋*

摘 要

本案為建立空氣污染防治設施之示範成功案例，經汰換原重油鍋爐系統改造高效率熱泵熱水系統。鍋爐熱水系統之使用及操作維護程序複雜且瑣碎，潛藏工安發生機率與故障時間難以掌握；為使能源效率提升及處理空氣汙染防治達到預期效果，建立一套適合人員日常生活使用及符合環保法規之熱水系統。

政府近期所公布空氣污染防制具體措施，為積極改善國內旅宿業、醫療社會福利機構及學校使用之鍋爐及加熱設備於燃燒過程所產生之空氣污染物所造成之影響，行政院環境保護署依據空氣污染防制法授權，提供補助經費鼓勵包括：旅宿業、醫療社會福利機構及學校，改造或汰換燃油鍋爐，改用低污染性氣體燃料、太陽能或電能之加熱設備，訂定「改造或汰換旅宿業醫療社會福利機構學校燃油鍋爐補助辦法。

本工程案從導入至今系統仍維持正常運轉中，從各項具體數據中得知預期的各項目標均已達成，具體預期系統汰換之目標如，燃油式鍋爐改為電能熱泵系統之運轉直接能源成本大幅降低、空氣品質及環境品質大幅提升、運轉噪音大幅降低、系統維護成本降低、環境污染大幅降低、潛在公共安全降低...等，顯示熱泵系統導入後之成效遠超過預期目標。業者也從原 700 人次之使用全棟建築物，又再將 1,600 人次所使用的燃油式鍋爐一併汰換改造為熱泵系統，目前台塑集團所屬之學校單位已經全面將鍋爐系統改造為高效率之熱泵熱水系統。

現階段因政府之極力推動，預期業界也將會全力投入配合實施，惟完整系統除了汰換高效率之製熱熱泵系統外，另需建立空氣品質與能源管理系統之資料分析管理機制；然而，若是在熱水系統裡再增加節能績效及碳排放計算機制系統或數據資料蒐集，則將會使人員更瞭解熱水使用及減碳措施處理之成效；在未建立空氣品質與能源管理系統之業者，更需要建立自評系統，以便適時採取相關能源使用之資料蒐集，也可以因應熱水使用系統之異常狀況，並將熱水處理相關減碳紀錄以數據資料轉換排放交易機制(Emission Trading Schemes, ETS)或能源管理系統(Energy Management System, EMS)文件方式保存下來，以為往後之碳權交易或後續能源管理資料評估之參考依據。

【關鍵詞】熱泵系統、空氣污染防治設施、空氣品質環境管理系統碳權交易、能源監控管理

---

*啟源節能科技股份有限公司 總經理

一、前　言

傳統熱水系統多以鍋爐設備為主，近年由於環保意識抬頭，全球各地興起節能減碳之具體化行動，台灣近年來節能科技之整合技術也日趨逐漸成熟，其中又以熱能轉換之節能技術被大量應用在民生場所，成果最為顯著也最為有效率，利用「太陽能與空氣源熱泵」之熱水系統，在台灣主要住商之場所被廣泛採用；而許多大型能源用戶，例如：學校、醫院、飯店、部隊營舍、監獄等許多大量熱水需求之能源用戶，最主要導入之場所如人員沐浴及溫水游泳池之應用最為普遍，導入後之節能減碳成果最顯著也最為有成效。然而，工業熱水鍋爐之應用，仍有非常大的改善空間，也是最能夠達到各式能源效率指標之務實作法。

二、熱泵熱水系統建置及執行現況

1.熱泵熱水系統說明

熱水系統所設計，以「節能」、「環保減碳」及「安全」的積極思想，達到對環境保護之理念，並提供個案一個有效能之節能管理系統，能夠具體落實在本案；系統導入前業主提出主要可分為三個具體目標，簡述如下：

(1)節能(降低運轉之能源成本)：為能源管理系統之最高目標。其具體做法在提供熱水同時須配合環境政策、環境目標、並且有效提升COP能源效率，降低熱水提供之運轉成本。

(2)環保減碳(無有害物質之空污排放)：熱水製造過程不能產生對空氣品質有害之物質如(細懸浮微粒$PM_{2.5}$)排放，並符合環保法規所規定(空氣品質指標AQI)等規定。

(3)安全(無明火作業之工安要求)：其目的為讓每個基層作業人員能安全執行工作，降低人員操作之意外發生。

2.熱泵熱水系統執行現況

由於政府及民間之大力推動，國內投入熱泵熱水系統之廠家數逐年增加；截至 106 年 9 月底止，通過加入「台灣熱泵協會」之廠家數為 46 家；其中不乏國際大型及上市公司如日立公司、瑞智精密、高力熱處理、善騰太陽能、啟源節能科技等，顯現熱泵產業已經逐漸形成，且已被市場及各業界所接受。

依據各式熱水系統進行能源成本比較，如圖 1 及圖 2 進行說明之；顯現其主要驅使業主導入熱泵系統之主要因素，是熱泵系統能大幅降低企業之熱水運轉成本。

加熱方式	電熱管	液化瓦斯	柴油鍋爐	天然瓦斯	熱泵
熱量需求(kcal)	35,000	35,000	35,000	35,000	35,000
單位能源之產熱（Kcal/度）能源局頒佈標準	774	7,425	6,600	6,750	3,010
耗能	45度	4.7Kg	5.3L	5.2度	11.6度
能源單價	2.6元/度	25元/Kg	11元/L	12.8元/度	2.6元/度
能源費用(元/日)	**117**	**117**	**58.3**	**67**	**31**
安全性能	電熱管老化、有漏電潛在危險	有漏氣中毒、火災、爆炸等危險	有漏油、火災、爆炸等危險存在	有漏氣中毒、火災、爆炸等危險	費用最低安全性可靠無污染

(1,000公升冷水由20℃加熱至55℃成為熱水，需要35,000仟卡/Kcal之熱值)

圖 1 各式熱水系統比較說明

以大量熱水需求之能源用戶來說，開源與節流是企業生存之必要條件，熱水運轉過程中，直接能源成本的差異是顯而易見，而在熱水系統操作維護的成本考量，熱泵系統又可以降低操作人員大量工作負擔，綜觀以上各優點，是近年來熱泵熱水系統普遍大幅成長的主要原因，以下圖表能夠詳細說明，其各式熱水之能源成本差異之比較分析：

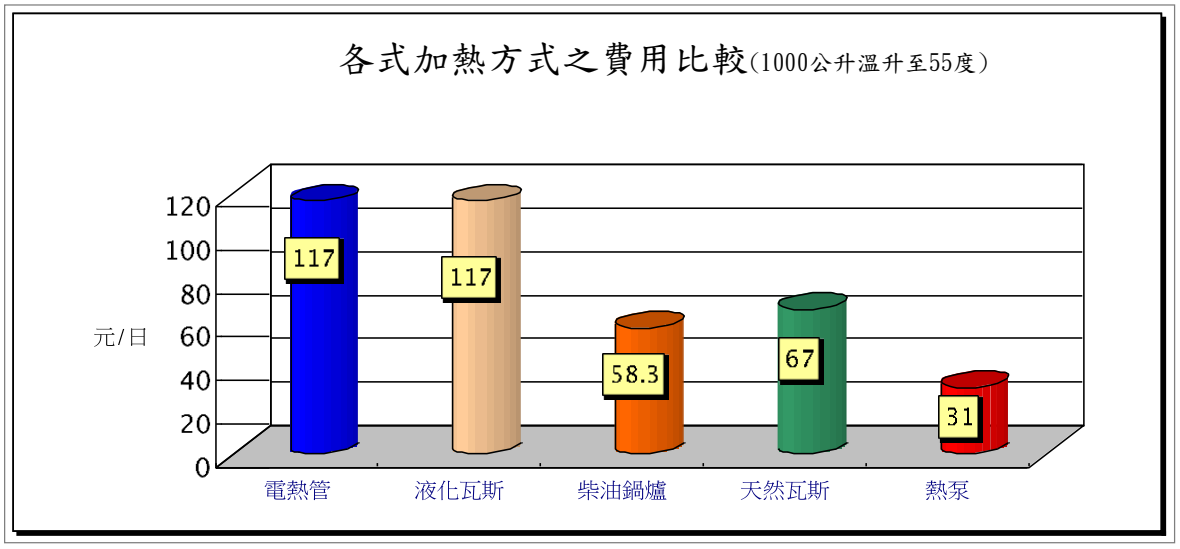


圖 2 各式熱水系統能源成本費用比較

三、鍋爐系統操作維護注意事項與常見缺失

鍋爐種類及其污染強度，與製熱過程及產品種類息息相關。一般熱水依據熱能轉換方法不同可簡易區分為燃油式、燃氣式。由於鍋爐熱水處理之原理、設計不同，所因應之操作維護技術亦異，且各式鍋爐常發生之異常狀況及維護作業方法亦頗為危險，因此建置熱水鍋爐廠操作維護系統時有其必要性。茲簡述電能式熱泵熱水與鍋爐廠熱水系統於表 1，詳細之製熱過程及操作維護比較相關資料。

表 1 熱泵與鍋爐熱水系統

【熱泵】系統	【鍋爐】系統
空氣熱能、電能	燃氣式或燃油式
循環加熱速度較慢	加熱速度快
節能、低污染	耗能、高污染
循環方式加熱，不會有水垢之情形。以潔淨能源之方式制熱故無需煙囪排放，環保無汙染。機房場所相對潔淨易整理。	鍋爐有鍋垢附著，排放爐水白濁，煙囪排氣溫度偏高，浪費能源，每年需要酸洗去除水垢，造成二次污染。
使用不銹鋼材質之儲熱桶，無鐵銹紅濁之現象，長期使用下沒有產生危害人體物質。	爐水排放紅濁，有鐵銹沈積物，檢視鍋爐本體有孔蝕(Pitting)或腐蝕情形。長期使用易產生對人體有害物質。
系統可自動輪流運轉調配設定，無需擔心系統停車之問題，僅需固定時間檢修維護。	鍋爐已知有鍋垢附著，造成浪費燃料或鍋爐處於不良操作狀況，但因生產而無法停車酸洗。
如同空調設備，僅需固定時間清洗及維護，固定管銷維護成本低。	需要固定人力編制以進行維護，固定管銷維護成本高。
初期設置成本高，運轉成本低。	初期設置成本低，運轉成本高。

四、熱泵系統導入前後對照

1.案件背景說明

案件名稱：長庚科大學生宿舍	
房數	176間（全棟）
每間使用人數（人）	4（人）
總使用人數約	700(人)
每人平均使用水量（公升）	80（公升）
總使用水量（公升）	56,000（公升）
溫升溫度△T=(20~55℃)	夏天35℃ 冬天45℃

圖3 案址:長庚科技大學(庚勤樓)學生宿舍

本案以台塑集團所屬之長庚科技大學，原熱水鍋爐汰換為熱泵熱水系統之前後對照。如(圖 4)導入前、(圖 5)導入後之對照。

圖4 熱泵系統未導入前 **圖5 熱泵系統導入後**

2.長庚科技大學熱泵系統之儲熱桶建置前後對照 (圖片:長庚科技大學宿舍)

圖6 儲存熱水保溫桶建置(前) **圖7 儲存熱水保溫桶建置(後)**

3.智能數位化遠端管理作業系統

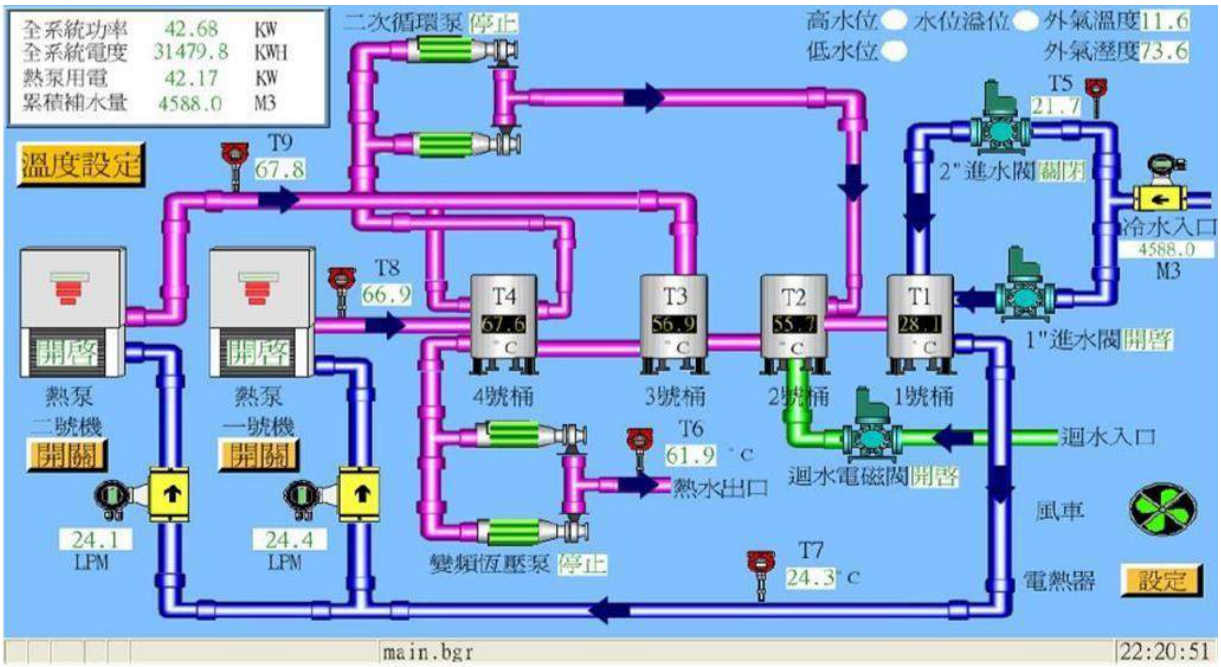


圖8 熱泵系統遠端控制系統(畫面提供:啟源節能科技)

4.熱泵系統其他應用說明

一般熱泵系統應用在溫水游泳池之流程如下圖 9。

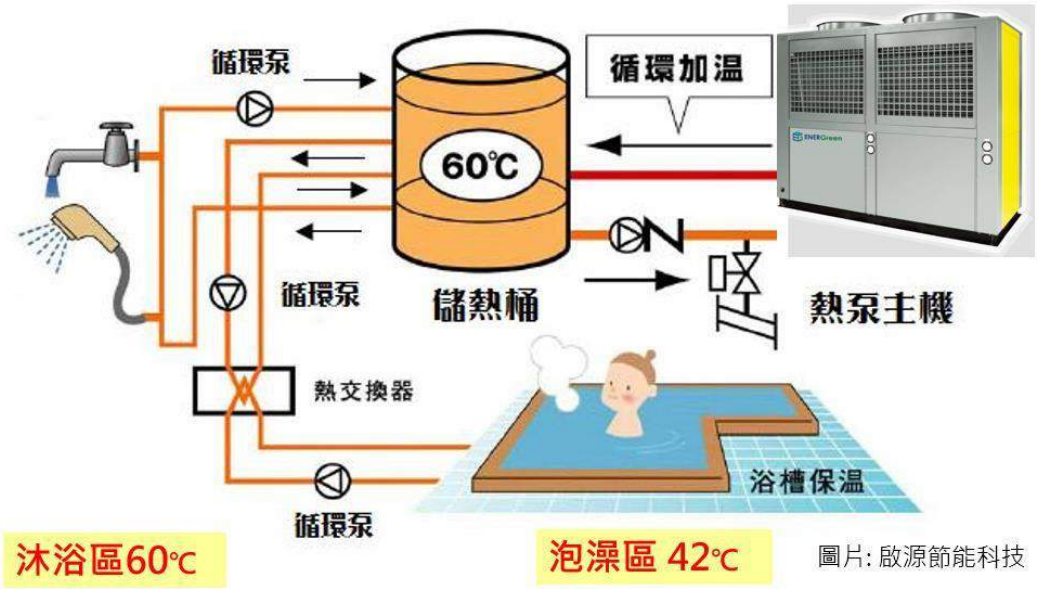


圖9　熱泵系統應用在溫水游泳池之流程

而一般住宅，導入熱泵熱水器也逐漸被普遍採用，許多國外用戶不僅利用熱泵來提供熱水，部分的熱水也應用在提供暖房，在許多歐洲及日本庭用戶，也將熱泵製造之熱水應用在地板採暖，提供全屋的暖房效果，圖三為一般住宅用戶使用熱泵系統之示意圖：

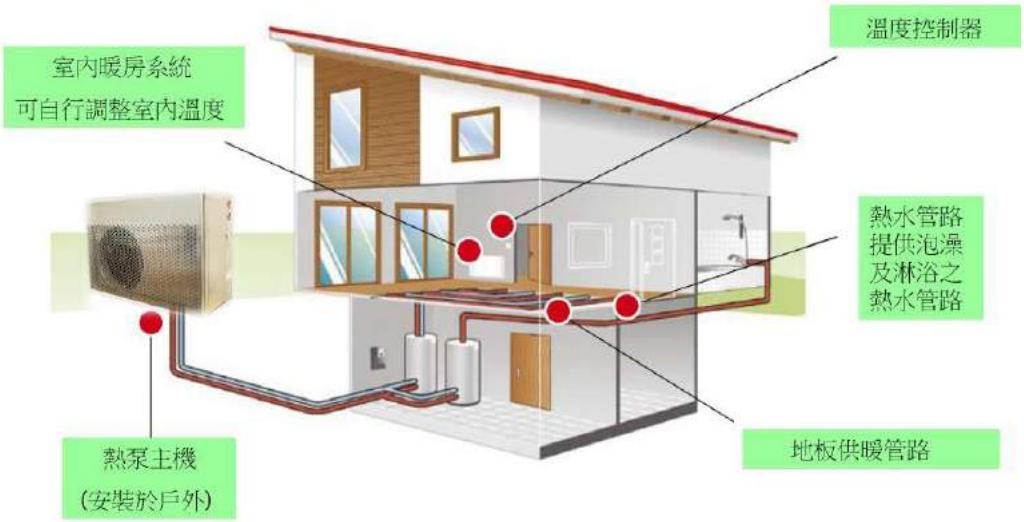


圖10　全戶熱水應用 (圖片:啟源節能科技)

5.其他熱泵實際安裝案例

圖11 1,600人學生宿舍

圖12 導入(前):燃油式鍋爐系統

圖13 導入(後):熱泵熱水系統

五、結　論

如何建立一套有效率之熱泵熱水系統，不僅是要選擇高效率熱水設備外，且需要有一套智能數位化遠端操作系統，提供專業人員進行系統觀測及控制管理。熱泵系統建置後，若能讓專業人員不斷的進行調節控管與系統定期維護作業，將使操作人員能更瞭解熱水使用狀況，適時採取相對應之關調節措施，因應熱水系統之異常狀況排除，並將熱水系統相關操作技術及紀錄以文件方式保存，以為操作及經驗之參考依據，才是一個成功且完整有效率的成功案例。

本案例以燃油式鍋爐汰換為電能式熱泵熱水系統，符合當今政府所積極推動之能源轉型政策，並符合世界各國所制定的潔淨環保指標，作為一個世界公民，我們也不應置身事外，期待有更多學者專家重視此一節能技術，也讓更多企業在產業發展過程中，逐漸降低對化石能源的依賴，朝向一個低汙染的熱能轉換發展

技術。

還給我們下一代的孩子一個潔淨生存空間，你我一樣責無旁貸，只要能夠發揮一些小小正向的影響力，世界就會因此而改變。支持能源局「能源廣淨」政策，也支持工業局「綠色工廠」推動計畫，熱水請支持採用熱泵熱水系統。

利用無人飛機驗證臨近國道五號頭城交流道空氣品質空間分布模式模擬結果

游 昕*、張章堂**

摘 要

隨著宜蘭觀光快速發展，車輛之排氣已成為最主要的污染來源之一。

雪山隧道是台北到宜蘭最便捷道路，為了確保模擬真實性，於連接頭城交流道總長度 2 公里範圍進行數值模擬，使用加州線源分散模型(California Line Source Dispersion Model, CALINE4)軟體模擬移動源交通空氣污染物於頭城交流道暴露的濃度。研究假日塞車時間和平日交通狀況之間的空氣質量差異。此外，為了得到三維方向污染物分布情況，本研究利用無人機(Unmanned Air Vehicle , UAV)搭載氣體感測器，進行頭城交流道空氣品質監測。本研究首先收集台灣中央氣象局的地面氣象數據、地面和探空數據，車輛的排放率由中華民國行政院環境保護署國內全國性排放清冊 Taiwan Emission Data System (TEDS9.0)估計。為了評估預測濃度，使用高量採樣器進行驗證，根據不同類型的道路和空氣污染物排放率，設定模型參數和氣象條件，以評估污染物的增量影響，及預測時間和空間變化的空氣品質，本研究亦探討高峰時段或週末的交通量和污染物排放及濃度分布。雪山隧道出口假日污染物濃度 $PM_{2.5}$ 及溫度分別為 0.003 ~ 0.008 ppm, 7.5 ~ 15 ppm, 1.5 ~ 2.5 ppm , 40 ~ 80 μg/m3 及 40 ~ 45 度，平日濃度分別為 0.002 ~ 0.003 ppm, 3.4 ~ 9 ppm, 0.7 ~ 1.8 ppm, 40 ~ 60 μg/m3 及 30 ~ 35 度。利用無人飛機驗證模擬得知，垂直高度為 9, 7.0, 5.0 與 3.0 公尺時，假日 $PM_{2.5}$ 濃度分別為 45 ~ 48，30 ~ 35，25 ~ 30 與與 48 ~ 50 μg/m^3 ,平日 $PM_{2.5}$ 濃度則分別為 40 ~ 45, 25 ~ 30, 15 ~ 20, 45 ~ 48 與 45 ~ 50 μg/m^3。

【關鍵詞】線源模擬、計算流體力學、高速公路、無人飛機

*國立宜蘭大學 環境工程系 研究生

**國立宜蘭大學 環境工程系 教授

一、前　言

都市空氣汙染暴露率與人類健康有密不可分的關係,(Brugha and Grigg, 2014)[1]。近年來宜蘭車輛逐漸增多，假日交通雍塞最為頻繁，此研究針對塞車及未塞車時段空間分布分析,懸浮微粒是非常危險且容易影響健康的汙染物(Meena et al., 2016) [2]. 因此，利用無人飛機監測即時懸浮微粒濃度變化,做為交通及環保單位於高速公路大客車及汽車車輛數之控管及其排放改善參考，以降低宜蘭縣因機動車輛排放所造成之污染物濃度。

二、研究方法

1.研究架構

本研究架構是依據 CALINE4 模式模擬方法設計，首先，使用 GOOGLE MAP 的座標系統，設定該模擬道路的座標中心點、敏感點與受體點座標，再經由交通 部收集國道五號車流量及各種車輛排放係數，包括不同(車速、車種、油品)之排 放係數，及比較 CALINE4 模擬為使用高斯擴散計算之線源模擬，在不同(風向、風速、穩定度、混合層高度)的大氣條件下，比較模擬之濃度變化，最後，分析 模擬結果並得到人體暴露於 $PM_{2.5}$ 污染物的濃度。

2.研究區域

以國道五號出口沿著蔣渭水公路做為模擬起始點，往後延伸 10 公里做模擬，以宜蘭市為研究區域，收集國道五號排放量、交通流量，利用 CALINE4 將頭城收費站設為敏感點，再細分為 126 個受體點，在 200m × 200m 網格區域內進行車輛排放空氣汙染空間分布模擬，如下圖 1 所示，以礁溪觀光景點設為敏感點，在路段蔣渭水公路向左、右邊分別擴展 1 公里，橘色星星為模擬的中心點，藍色點為模擬受體點比較每個受體點分成每月不同擴散量，此地圖來自[4]GOOGLE MAP。

圖1　模擬受體點

3.模擬資料

本研究首先收集台灣中央氣象局宜蘭及礁溪測站地面氣象數據、花蓮測站探空數據，車輛的排放率由中華民國行政院環境保護署國內全國性排放清冊 Taiwan Emission Data System (TEDS9.0)估計，車流量資料來自交通部資料庫及台灣高速公路容量管制，不確定性已被估計約為+/- 5%，頭城交流道有電子收費系統(ETC)，記錄並統計從雪隧進出的大小客車輛。

4.研究模式

Caline4 是美國加州運輸部所發展針對公路車輛污染物濃度評估的高斯擴散模式。其對於線源的處理採取等量有限線源(Equivalent Finite Line Source)的分段方式，分別計算每一元素對受體的貢獻量最後再進行加總。可應用於評估公路興建或區域開發所引進交通污染排放，以作為空氣污染評估、管理與決策之依據[3]。

使用者界面共分為控制、排放、受點、氣象、背景輸出等單元，並結合一般檔案管理的功能，用已建立 Caline4 模式輸入資料，使用者只要由左至又的順序逐項完成各個單元的建立，即可輕鬆進行 Caline4 模式模擬，且轉出資料可與 Surfer12 繪圖軟體結合，使用者可使用模式模擬產生之繪圖資料輸出檔，配合地圖檔產生等濃度曲線圖此繪圖資料亦可經功能選單、修改圖形內部設定，以產生更符合使用者實際需求之等濃度圖。

5.模擬驗證

為了驗證模式模擬與國道五號排放量真實性，利用氣體分析儀及高量採樣器於頭城交流道鄰近 1 公尺處進行採樣，如圖 2 所示。分析實測與模擬值得差異，並利用統計方法將最大影響空氣品質之天氣因素進行比擬。此外，為了得到三維方向污染物分布情況，本研究利用無人機搭載傳感器進行國道五號尖峰小時的車流量監測，如圖 3 所示，即時監測交流道附近區域濃度與電腦模式計算之空間分布進行數據比較，飛行航點與模式模擬網格相同，利用 GPS 設定飛機飛行軌跡，各點監測時間為 20 秒，傳感器最快偵測時間為 3 秒得到 1 比濃度數據，並利用 WIFI 連接網路，數據自動傳輸回到手機及電腦，如訊號不佳，則使用記憶卡或 3G 網卡連接至雲端數據平台。

圖 2　頭城交流道實測位置

圖 3　無人飛機搭載傳感器

三、結果與討論

1.濃度分布

經由 CALINE4 模擬出的濃度空間分布，懸浮微粒在不同高度呈現濃度變化，其中，$PM_{2.5}$ 最大濃度分布在，雪山隧道出口高度為 9 公尺，最大濃度為 74μg/m^3 如圖 4(a)所示及頭城交流道出口處於地面為 90μg/m^3，如圖 4(d)所示，高度 7 公尺及 5 公尺濃度沒有太大變化，最大濃度是都是 64μg/m^3 但在位置分布不同，與塞車位置有很大的關係，高度 3 公尺因接近地面濃度開始變大為 74μg/m^3，如圖 4 所示(c)。

2.無人飛機監測

為了得到立體空間濃度，利用無人機垂釣傳感器監測汙染濃度做垂直空氣品質監測，為了避免無人機螺旋槳影響監測數據，將監測傳感器與無人機連接用線連接，並用遙控器控制垂釣長度，如圖 4 所示，垂釣長度越長，監測數據越接近環保署測站數值。垂釣長度 1.5 公尺時，$PM_{2.5}$ 濃度為 26 μg/m^3，跟測站相關係數為 0.85。因此，垂釣長度越短，相關係數越低。

利用無人飛機監測得到 $PM_{2.5}$ 三維濃度分布狀態，舉出假日及非假日晚上作為比較，在平日晚間監測 9, 7, 5, 3,及 1.5 公尺得到以下數: 35 ~ 45、35 ~ 40、 25 ~ 30、 25 ~ 30 及 40 ~ 50μg/m^3，如圖 6 所示。

此外，假日的分布濃度分別為為 45 ~ 55、45 ~ 48、30 ~ 35、20 ~ 25、35 ~ 40 μg/m^3。由此可知平日的濃度會比假日濃度低 10~15μg/m^3，如圖 7 所示。

在高度分布上，在雪山隧道出口最易堆積濃度，3 ~ 5 公尺的濃度分布是差不多的，在 1.5 公尺的濃度是最高的，粒狀物沉降所致。

圖 4　傳感器垂釣長度

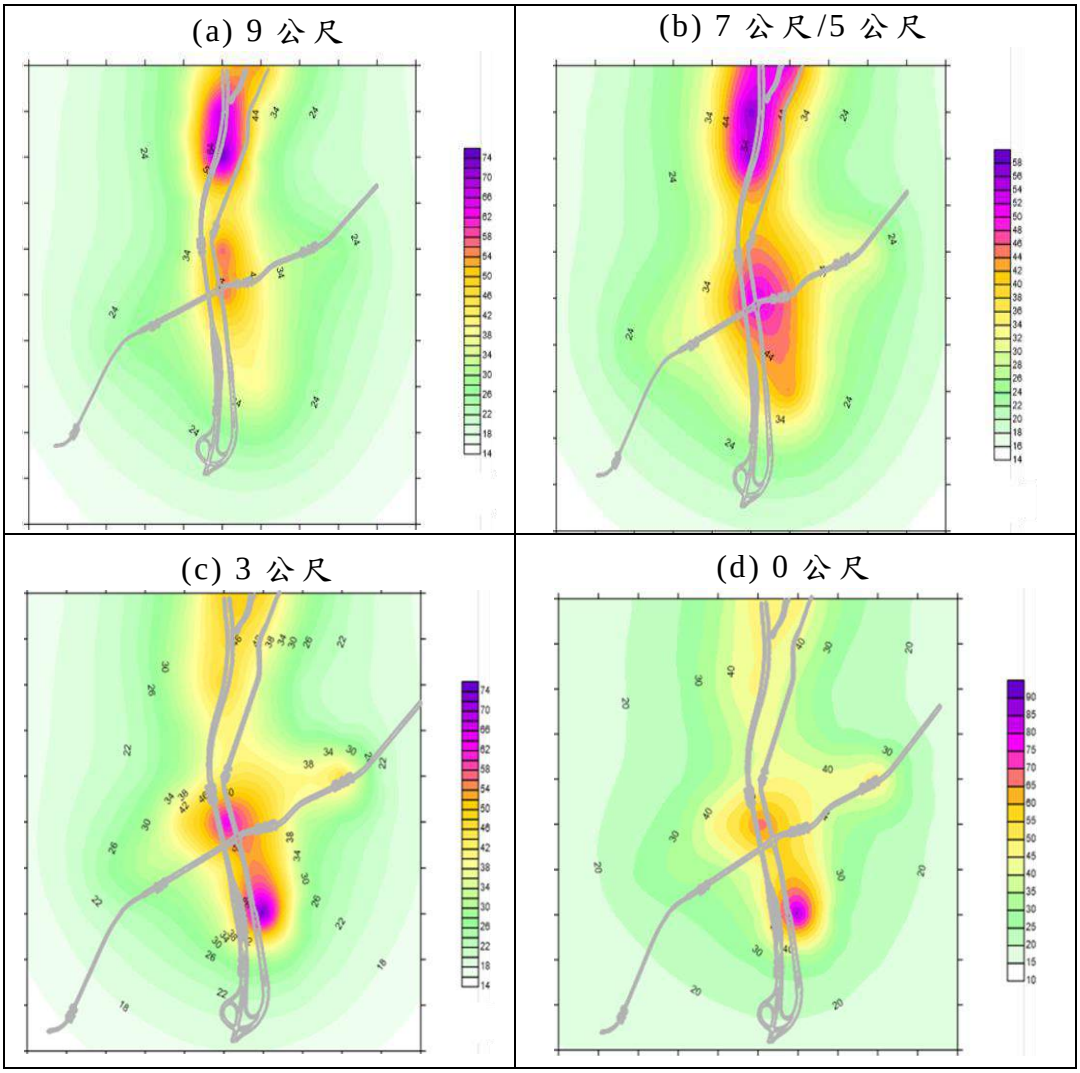


圖 5　模擬不同高度粒狀物之空間分布

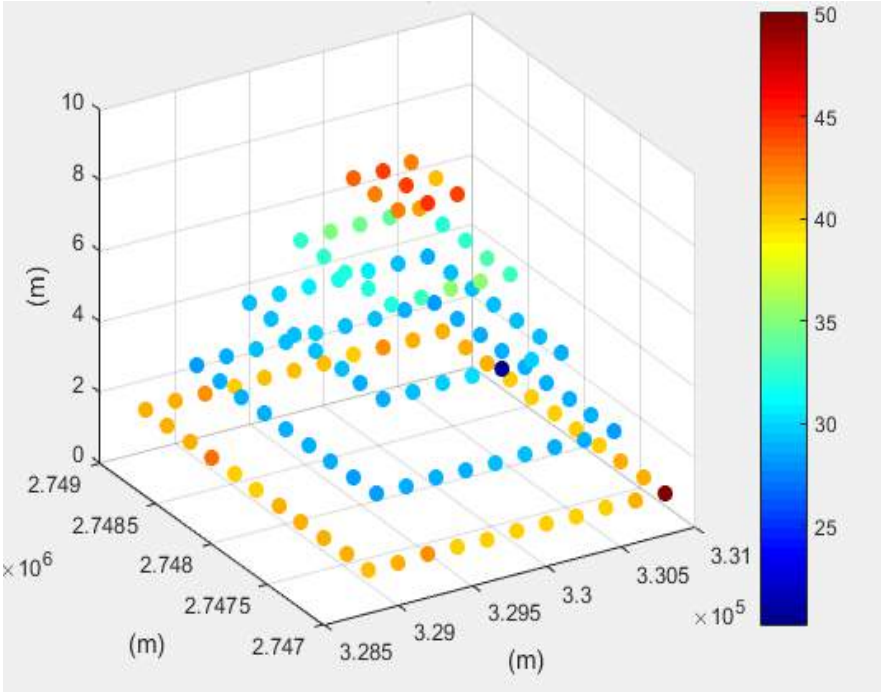


圖 6　平日夜晚 $PM_{2.5}$ 空間分布

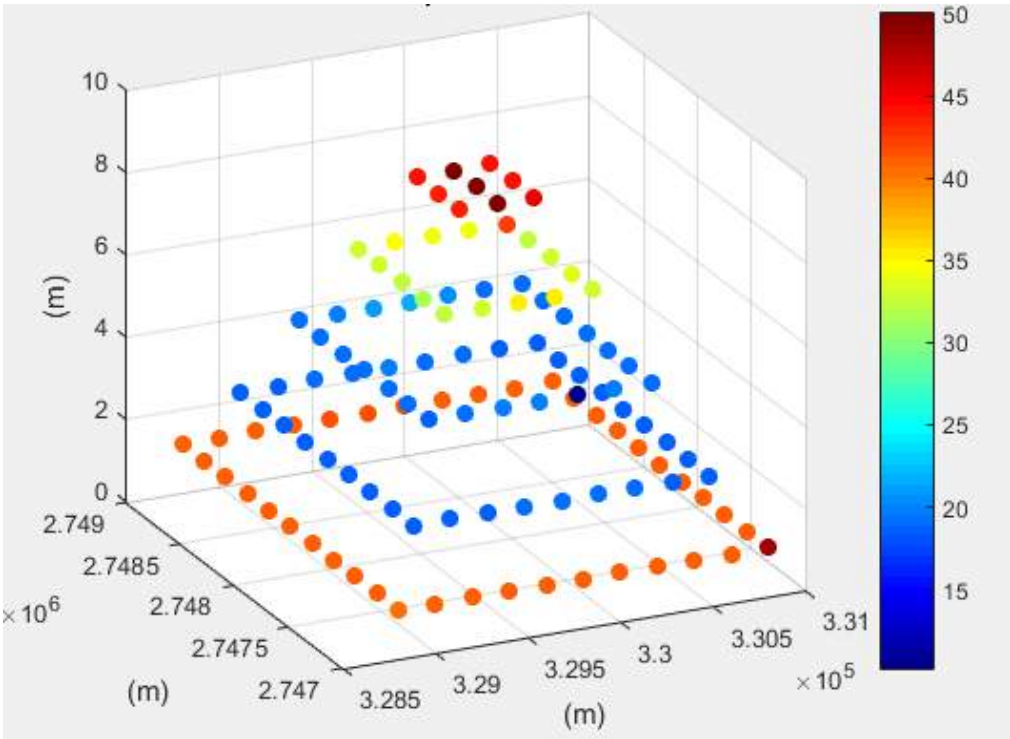


圖 7　假日夜晚 $PM_{2.5}$ 空間分布

3.數據比較

經由實測與模擬的比較顯示，頭城交流道 $PM_{2.5}$ 濃度於凌晨最低，並有兩個峰值，分別為上下班及間早上 8 點及晚上 6 點，模擬濃度顯示為 90 到 110μg/m^3，實測最大濃度出現在中午 12 點及下午 2~3 點，濃度為 55~68μg/m^3 兩者監測數據於上下班尖峰時段的標準差範圍很大，代表此時污染物濃度不穩定，但兩者濃度變化趨勢相同。

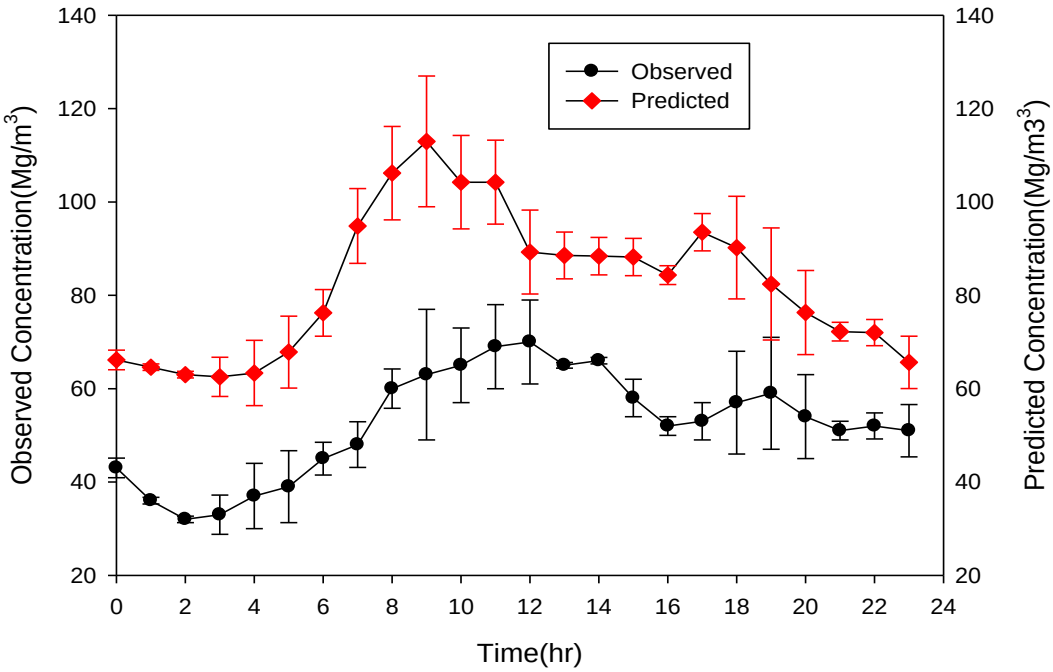


圖 8 模擬與實測比較圖

為了避免垂直監測受到氣象條件影響，利用地面及無人機垂釣氣象儀器，並經過多次飛行測試裝載氣象儀器 Flight(F)與地面氣象測站 Ground(G)相比得到氣象因子影響監測的相關性，氣象條件與垂釣高度相關係數最大的是濕度(r^2=0.852) 大於大氣壓力(r^2=0.835)大於溫度(r^2=0.775)。

表 1 氣象因子與濃度關係

氣象條件(F/G)	濕度	溫度	大氣壓力	垂釣高度
濕度	0.802	-	-	0.852
溫度	-	-	-	0.775
大氣壓力	-	-	0.053	0.835

四、結　論

雪山隧道出口假日污染物濃度 $PM_{2.5}$ 及溫度分別為 40 ~ 80 μg/m^3 及 40 ~ 45 度，平日濃度分別為 40 ~ 60 μg/m^3 及 30 ~ 35 度。利用無人飛機驗證模擬得知，垂直高度為 9, 7.0, 5.0 與 3.0 公尺時，假日 $PM_{2.5}$ 濃度分別為 45 ~ 48，30 ~ 35，25 ~ 30 與與 48 ~ 50 μg/m^3，平日 $PM_{2.5}$ 濃度則分別為 40 ~ 45，25 ~ 30，15 ~ 20，45 ~ 48 與 45 ~ 50 μg/m^3。無人飛機與傳感器距離 1.5 公尺為最佳監測垂釣長度，氣象條件與垂釣高度相關係數最大的是濕度 (r^2=0.852) 大於大氣壓力 (r^2=0.835) 大於溫度 (r^2=0.775)。

五、參考文獻

1. Brugha, R., Grigg, J. (2014). Urban air pollution and respiratory infections. Paediatr. Respir. Rev. 15, pp. 194-199.
2. Cakmak, S., Hebbern, C., Cakmak, J.D., Vanos, J. (2016). The modifying effect of socioeconomic status on the relationship between traffic, air pollution and respiratory health in elementary school children. J. Environ. Manag. 177, pp. 1-8.
3. Meena, M., Meena, B.S., Chandrawat, U., Rani, A.(2016). Seasonal variation of selected metals in particulate matter at an industrial City Kota, India. Aerosol Air. Qual. Res. 16, pp. 990-999.
4. GOOGLE MAP

K-OMS-2 奈米桿狀材料應用於連續式光催化反應系統處理 VOCs 之研究

黎　龔*、林雅雯**、呂英杰**、蔡靜宜*、謝哲隆***

摘　要

工業工廠製程中常因反應管線洩漏或燃燒不完全造成揮發性有機物(VOCs)的排放逸散，其除對人體健康造成危害外，亦是大氣臭氧汙染物的前驅物來源之一。同時其亦為室內空氣汙染物的主要物種。本研究係製備低溫錳化合物微奈米桿狀材料，探討其光催化 VOCs 反應之效益。首先製備錳礦晶型化合物八面體分子篩(OMS-2)，再於表面植入金屬鉀離子形成鉀錳礦晶型化合物八面體分子篩(K-OMS-2)，製作光電化學太陽能電池(PECSC)測試其光電特性、氣狀 VOCs 污染物(以甲苯為代表)光催化及建立相關性討論。催化觸媒載體使用氧化鋁(Al_2O_3)，於光催化連續流反應系統下降解飽和濃度甲苯氣體。研究結果顯示，K-OMS-2/SBA-15 製作的 PECSC (SKOPECSC)相較於 OMS-2/SBA-15(SOPECSC)及 SBA-15(SPECSC)對紫外光有特殊之吸光特性。測試甲苯光催化反應時，K-OMS-2/Al_2O_3 觸媒於 WLED 下，測試不同空間流速(SV)，其值在 633 hr^{-1}，可達到最佳去除效率(η) 87.00%。在 633 hr^{-1} 下，不同光源之連續式反應測試，於紫外線發光二極體(UVLED)照射時其去 η 可達 93.86 %。再測試於不同溫度觸媒鍛燒下，得知最適化鍛燒溫度為 523 K，1,245 ppmv 初始濃度下，其平均 η 為 95.01 %。同時由相關特性分析結果得知，於此鍛燒溫度下，其吸光及孔洞結構皆有明顯上升，證明光轉電效益及觸媒特性與光催化條件有直接相關性。處理飽和甲苯最適化條件為連續式光催化反應系統操作下，最有效觸媒為 K-OMS-2/Al_2O_3，光源為 UVLED、空間流速 633 hr^{-1}、鍛燒溫度 523 K，飽和連續流甲苯去除率最高達 95.01%，可明顯符合排放標準，證明此系統的高度應用性。

【關鍵詞】微奈米桿狀材料、鉀錳礦八面體分子篩、中孔洞、光電化學太陽能電池、連續式光催化

---

*國立宜蘭大學環境工程系(所) 碩士

**國立宜蘭大學環境工程系(所) 碩士生

***國立宜蘭大學環境工程系(所) 特聘教授

一、前　言

根據 2014 年世界衛生組織報告指出，2012 年全球有 700 萬人死亡原因與空氣污染相關。隨著工商業發展迅速，工廠運作過程排放大量揮發性有機氣體(VOCs)於大氣中，如苯(Benzene)、甲苯(Toluene)、乙苯(Ethylbenzene)及二甲苯(Xylene)等 BETX，主要用於塑膠、輪胎工業、印刷廠及各種化工廠之溶劑與黏著劑，常引起作業環境與週遭空氣品質惡化，進而影響工廠員工及附近居民健康。

光催化是一種常見用於去除空氣污染物之催化方法，觸媒利用光能進行催化反應之催化劑稱為光觸媒，因本身不會因參與反應而被消耗，能持續驅動催化反應，經過光照射下，得以激發產生電子電洞對，與水及氧氣進行化學反應，產生氫氧自由基，進而分解各種揮發性有機物(Volatile organic compounds, VOCs)。分子篩(Molecular sieve)是充滿許多小孔洞的材料，具有精確和均勻尺寸。這些孔洞足以阻止大分子，同時允許限定孔隙之小分子通過。常見的分子篩例如乾燥劑、活性炭和矽膠等。根據理論與應用化學國際聯合會(International Union of Pure and Applied Chemistry, IUPAC)將多孔性材料依照孔洞直徑大小分成三類，微孔(Micropores)、中孔(Mesopores)、大孔(Macropores)，而中孔分子篩之孔洞大小介於 2 至 50 nm，其優點是具有高比表面積、均一性的孔洞分布及具有應用於催化和分離技術領域。例如 MCM-41、HMS 及 SBA-15。

文獻指出微奈米桿狀材料－鉀錳礦晶型化合物八面體分子篩(Cryptomelanetype manganese oxide-based octahedral molecular sieve, K-OMS-2)對於催化活性有極大的效益，使 K-OMS-2 應用在催化氧化技術上被廣泛研究。某些陽離子如 Li^+, K^+, Na^+等，可進入到 K-OMS-2 的隧道中，調整其化學和物理性質。摻雜不同 K^+濃度至 OMS-2 後，找出最適當之摻配劑量，對於催化活性具有極大影響力[1]。文獻指出，利用 K-OMS-2 植入 TiO_2 上形成 K-OMS-2/TiO_2，並使用 UV 燈管進行光催化降解甲苯，結果顯示比商用 TiO_2 效果較好，主要原因為可在觸媒表面形成 OH 官能基協助甲苯的吸附與分解，因此 K-OMS-2 亦可被視為是一種分子篩型光觸媒[2]。

光電材料(Photoelectric material, PEM)是藉由光化學效應將光能轉換成電能的材料，而這個現象稱之為光伏效應(Photovoltaic effect, PVE)，有研究指出“金屬鈰(Ce)植入 N、S 光觸媒的 10Ce/TNST 較非金屬光觸媒更能產生優異之電能特性[3]。”因此，本研究目的在於測試微奈米桿狀材料之光電特性，並將其做為太陽能電池探討其光電轉換率以及鉀金屬元素對產電效率之

影響，另外找出微奈米桿狀材料最適化光催化操作條件，並模擬以光催化系統去除工廠空氣污染物之效益。

二、研究方法

1.反應設備

(1)光催化反應系統：本研究設備光熱催化反應系統為一階段光催化處理設備，如圖 1 所示。實驗使用之光源為 T8 燈管型紫外線發光二極體(UVLED)、T8 燈管型白光發光二極體(WLED) (色溫 5,600~6,300 K)以及 T8 燈管型藍光發光二極體(BLED)，測量照明箱於不同位置之光源強度，其光源特性經由校正後可得平均光照度如表 1 所示，校正公式如下：

$$I=((r_1i_1+r_1i_2+r_1i_3)/3+(r_2i_1+r_2i_2+r_2i_3)/3)/2$$

其中 I：平均光照度(Lux)

r_i：與光源之相對距離(cm)

i_i：在距離 r_i 下之光照度(Lux)。

(2)光電特性分析設備：為測試光電轉化效益，本研究使用循環伏安儀進行光電化學太陽能電池(PECSC)之光電特性測試，可用於測試開路電流、閉路電壓及最大輸出功率等產電特性，組裝完成之 PECSC 置於光源下，光源特性如表 2 所示。

表 1　Characteristics of light sources for photodegradation.

Light sources	Viewing angle	Power (W)	WL rage (nm)	Illumination (Lux)
WLED[a]	120°	17	300~700	13,520
UVLED[b]	90°	17	380~390	129
BLED[c]	120°	17	465-475	1,399

a: White visible light emitting of T8 type. b: Ultraviolet emitting diode of T8 type. c: Blue light emitting diode of T8 type.

表 2　Characteristics of light sources for PECSC.

Light sources	Viewing angle	Power (W)	WL rage (nm)	Light intensity (W/m^2)	Illumination (L_{UX})
WLED[a]	120°	2.04~2.4	300~700	2.2	480
UVL[b]	120°	12~13	365	0.6	20
UVLED[c]	120°	0.02	374~392	1.1	7

a: White light emitting diode bar; b: Ultraviolet lamp; c: Ultraviolet emitting diode.

2.製備

(1)甲苯(toluene)：本研究使用甲苯作為目標空氣污染物，配製方法為以穩定氣流攜帶飽和甲苯蒸氣進入混合槽混合均勻反應後，隨後進入連續式反應器進行光催化反應。

(2)OMS 觸媒製備：取適量 $MnSO_4 \cdot H_2O$、$(NH_4)_2S_2O_8$ g 和 $(NH_4)_2SO_4$ g 加入 D.I water 中，將其溶解配置成 OMS-2 混合液後置入鐵氟龍內鍋中，於高溫爐持溫 393K 20 小時。將形成之產物置於紅外燈下烘乾，最後將乾燥後之固體以研缽研磨，即完成 OMS-2。

(3)K-OMS-2 觸媒之製備：取適量 KNO_3、$MnSO_4 \cdot H_2O$、$(NH_4)_2S_2O_8$ g 和 $(NH_4)_2SO_4$ g 加入 D.I water 中，將其溶解配置成 K-OMS-2，於高溫爐持溫 393K 20 小時。將形成之產物置於紅外燈下烘乾，即完成 K-OMS-2。

(4)批覆觸媒(K-OMS-2/Al_2O_3)之製備：取適量 K-OMS-2 及 Al_2O_3 於酒精中，以磁石攪拌器加熱攪拌浸泡後，置於烘箱中乾燥，即完成 K-OMS-2/Al_2O_3 觸媒批覆。

(5)光化學太陽能電池(PECSC)之製備：取兩片導電玻璃作為基板，取適量之觸媒均勻噴塗於玻璃基板之導電面上，以高溫爐 723K 煅燒 20 分鐘，取另一導電玻璃，將導電面對於蠟燭之燭火，使之形成均勻的導電碳膜，將其組裝後，在電極中滴入電解液。將組裝完成之 PECSC 置於光源下，並將兩邊電極連接上循環伏安儀，開啟光源並進行電壓與電流之測量。

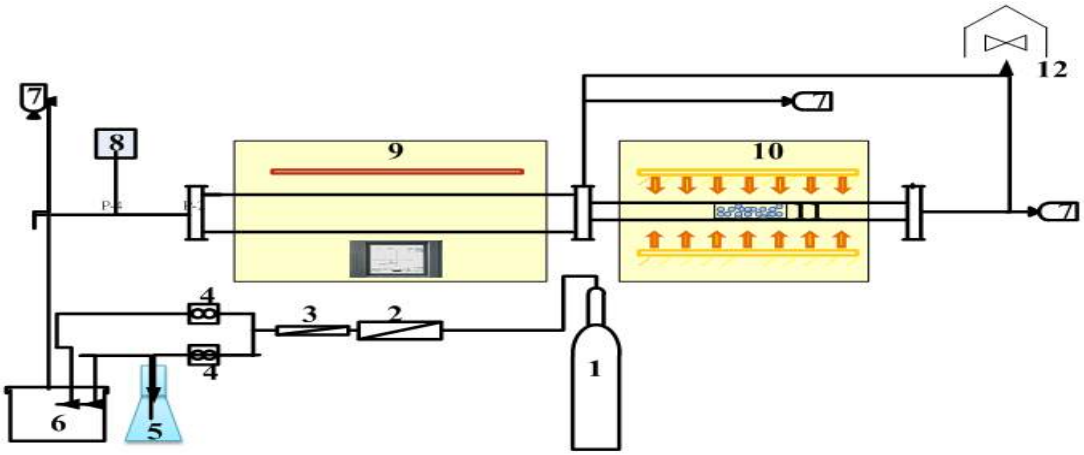


圖 1　Schematic of the hybrid system of the thermal and photo-degradation reactors. Component. 1. Air cylinder. 2. Moisture removing trap. 3. HC removing trap. 4. Mass flow controller. 5. Toluene liquid erlenmeyer flask. 6. Mixing box. 7. Sample output apparatus. 8. Thermometer. 9. Muffle furnace. 10. Light source. 11. Catalyst bed. 12. Fume Hood.

3.觸媒特性分析

合成後之各種觸媒分別以 EA、EDS、BET、FG-SEM、LaB_6-TEM、XRD、XPS、FT-IR 及 UV-Vis 進行觸媒表面及感光熱特性研究。

三、結果與討論

1.觸媒分析結果

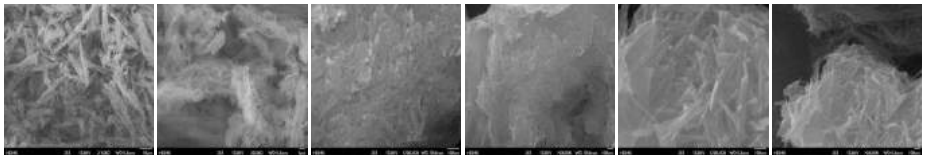
(1)元素分析儀(EA)及能量散射光譜儀(EDS)：分析分析結果如表 3 所示，K-OMS-2 較 OMS-2 增加了 K、O 及 Mn，批覆 K 後，O 由 61.16 升高至 62.24 %，S 由 7.76 降低至 3.3 %，而 Mn 由 20.2 提升至 27.7 %。K-OMS-2 經鍛燒後，可知隨著鍛燒溫度增加，O 會先下降後上升，減少約 21~26 %，S 及 K %會隨著溫度增加分別上升 6.48~15.11 %及 4.14~8.52 %，Mn 則是會先上升後下降，鍛燒 423 及 523 K 之 K-OMS-2，Mn 分別增加 9.42 及 5.47 %，鍛燒 623 K 的 K-OMS-2，Mn 則下降 0.92 %，單看 K 及 Mn 之變動可得知當鍛燒溫度為 423 K 及 523 K 時，K 及 Mn 皆有提升，而 523 K 較 423 K 的 K 含量高。

表 3　EA and EDS analyses of OMS-2 and K-OMS-2[a]

Sample	EA[b]		EDS[c]			
	C	H	O	S	K	Mn
OMS-2	0.11	2.80	61.16	7.76	-	20.20
K-OMS-2	0.08	1.30	62.24	3.30	2.55	27.70
K-OMS-2[d]	0.09	2.18	36.50	9.81	6.69	37.12
K-OMS-2[e]	0.09	0.86	40.37	13.71	9.18	33.17
K-OMS-2[f]	0.09	0.53	41.34	18.44	11.07	26.78

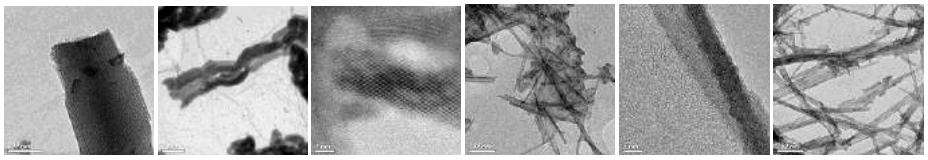
a: Unit: wt. %；b: Accuracy: ± 0.1 %, precision: ± 0.2 %；c: 200 kV；d: calcination at 423 K；e: calcination at 523 K；f: calcination at 623 K.

(2)熱場發射掃描式電子顯微鏡(FG-SEM)及游離發射穿透式電子顯微鏡(LaB_6-TEM)分析：由圖 2(a)、(b)及圖 3(a)、(b)中 SBA-15 載體掃描圖像，可看出其排列方式為條列狀之排列形式，而圖 2(a)出現明顯之細毛現象。從圖 2(c)~(f)圖像可看出 K-OMS-2 之桿狀型態明顯於 OMS-2，而圖 3(c)~(f)圖像顯示 OMS-2 與 K-OMS-2 樣品特徵，為均勻纖維狀之微奈米桿狀形態，由此證明錳礦晶型觸媒與 SBA-15 的結構相異之處[1,4]。圖 3(d)OMS-2 纖維的平均長度是 100~200nm，而圖 3(f)中 K-OMS-2 纖維的平均長度大於 200 nm，纖維連續性較高。



(a)SBA-15 (5,000x). (b) SBA-15 (1,000x). (c) OMS-2 (100,000x). (d) OMS-2 (50,000x). (e) K-OMS-2 (100,000x). (f) K-OMS-2 (50,000x).

圖 2　Photos of SEM analysis.



(a) SBA-15 (29,000x). (b) SBA-15 (5,000x). (c) OMS-2 (590,000x). (d) OMS-2 (38,000x). (e) K-OMS-2 (590,000x). (f) K-OMS-2 (38,000x).

圖 3　Photos of TEM analysis.

(3)X 光粉末繞射儀(XRD)分析：分析結果如圖 4 所示。與粉末繞射標準

聯合委員會(Joint Committee on Powder Diffraction Standard, JCPDS)及國際繞射中心(International Centre for Diffraction Data, ICDD)的資料庫比對，圖 4(a)為 SBA-15 繞射圖譜，因其為中孔結構材料，故於 2θ= 15°~30°有一寬大之波峰。而 OMS-2 (圖 4(b))、K-OMS-2 (圖 4(c)) 顯示的圖譜與鉀錳礦合成材料 $K_{1.49}(NH_4)_{0.51}Mn_2(SO_4)_3$ 亦有相同之波峰，OMS-2 及 K-OMS-2 在 25°~30°處出現一明顯 peak，與軟錳礦 Pyrolusite MnO_2 晶相相符[5]。

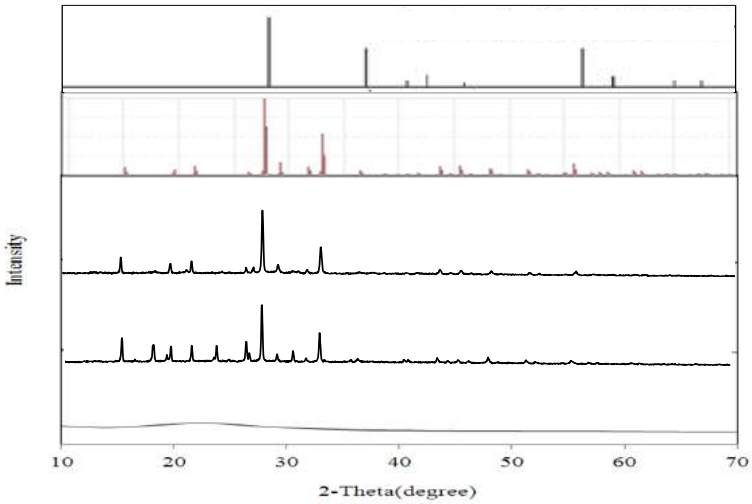


圖 4　XRD pictures of (a) SBA-15, (b) OMS-2, (c) K-OMS-2.

(4)X 光電子能譜儀(XPS)分析：因製作 PECSC 時需以 SBA-15 作為基載承載觸媒，因此亦同時進行 SBA-15 分析。圖 5(a)全圖譜中可得知 SBA-15 出現 Si 與 O 峰值，其結合能出現在 110.55 及 540.10 ev，與文獻[6]指出的位置相近，可證明本研究所使用之 SBA-15 為 SiO_2 之結構。圖 5(b)及(c)全圖譜中顯示 OMS-2 及 K-OMS-2 之 S、C、N、O、Mn 峰值，K-OMS-2 另外含有 K 峰值，$Mn2p_{2/3}$ 結合能出現在 641.9 及 642.5 ev，分別是 Mn^{3+} 及 Mn^{4+}。S2p 的光譜顯示 S 在 168.65 ev，而 166.5~169 ev 是金屬硫酸鹽，可能是 Mn-S 或 Mn-K 之鍵結，N1s 光譜顯示 N 在 401.5 ev，K2p 峰值出現於 292.8 及 295.65 ev，可推斷本研究合成之 OMS-2、K-OMS-2 含有 S、C、N、O 及 Mn，且 K-OMS-2 含有 K 元素，與文獻相符。

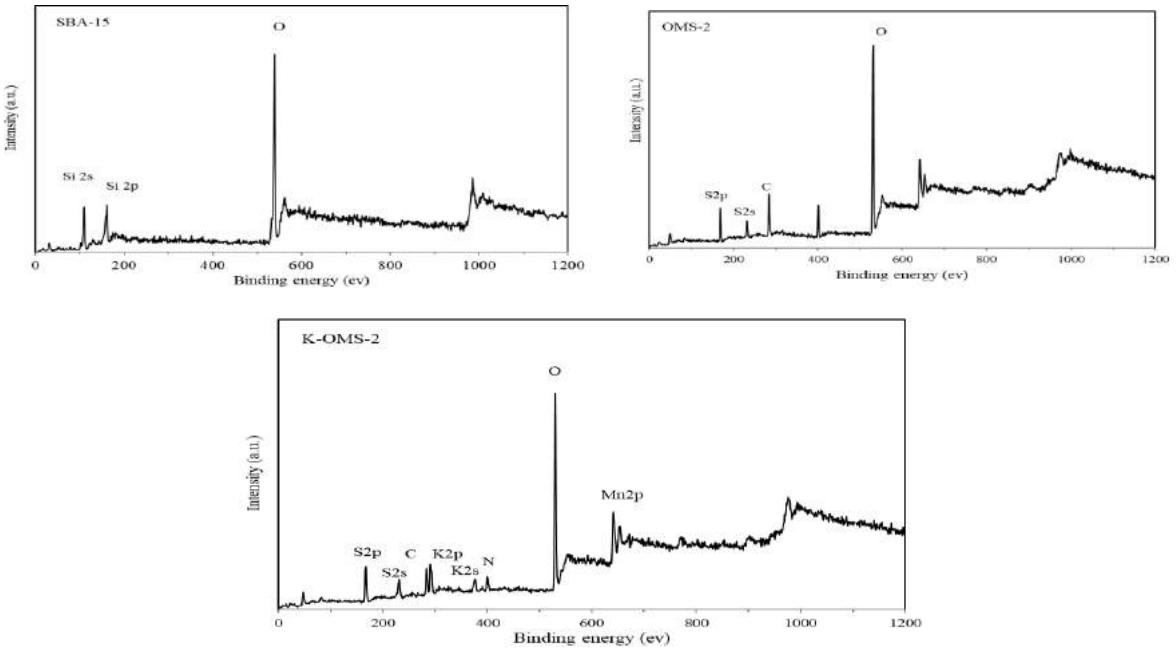


圖 5　XRD pictures of (a) SBA-15, (b) OMS-2, (c) K-OMS-2.

(5)紅外線光譜儀(FT-IR)分析：由 FT-IR 圖譜(圖 6)可得知 SBA-15 出現 Primary aliphatic alcohols ($R-CH_2-OH$)雙鍵鍵結，羥基(-OH)基團的化合物根據附接到氧結合碳以外的碳原子數，分別為 primary、secondary 或 tertiary。Primary aliphatic alcohols 含有極性-OH 基團，由於該氫鍵醇的沸點比具有相同數目的碳原子相應的烷烴高，使得在冷凝相分子間的氫鍵鍵結。OMS-2 峰為 Kaolin clays/alumino silicates(高嶺土/鋁矽酸鹽)及-OH 鍵結。K-OMS-2 除 Kaolin clays/ alumino silicates 官能基之外，亦增加 Para substituted aromatic hydrocarbon(對位取代芳睛)官能基。K-OMS-2 鍛燒至 523 K 後，較原先增加 Aliphatic hydrocarbon 脂族基團，烴(化合物組成的 C 及 H)分為芳香族及脂族化合物兩類，經 EA 及 EDS 特性分析可知當 K-OMS-2 鍛燒 523 K 後 C 及 H 會提升，推測為導致脂族基團出現之原因，而此基團最重要的振動模式是 C-H 和 -CH，直接連接到脂族基團的原子導致標準頻率顯著變化，具有較高之電負性，尤其是鄰近的原子位置會轉移到更高的頻率。

(6)紫外可見光光譜儀(UV-Vis)分析：根據 Liua 等人[6]指出，在 K-OMS-2 具有顯著的吸收值在約 400 nm 區域，與本研究 UV-Vis 分析結果進行比對，如圖 7 所示，可知 K-OMS-2 及 OMS-2 在紫外光及可見光出現優異的吸收區域，吸光值優於 SBA-15，而 K-OMS-2 大於 500 nm 之吸光值較 OMS-2 低，最佳吸光值約在 350~500 nm，為紫外光至可見光之間，

K-OMS-2 經鍛燒後吸光值略微提升。錳鉀礦之吸收區域為不同錳價態的重疊，即錳鉀礦晶體中之 Mn^{2+}、Mn^{3+} Mn^{4+}，約 250nm 波段是由 O_2 與 Mn^{2+}間之電荷轉移造成，約 300 nm 連接 Mn^{4+}且連續吸收依靠 $O_2 \rightarrow Mn^{3+}$電荷轉移及 d-d 轉變成 d^4 電子組態[8,9]。

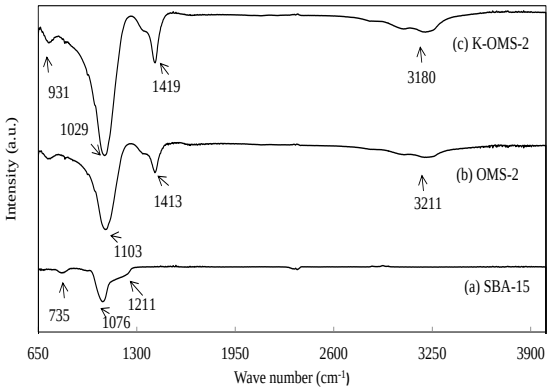


圖 6 FT-IR spectra of (a)SBA-15, (b)OMS-2 and (c)K-OMS-2.

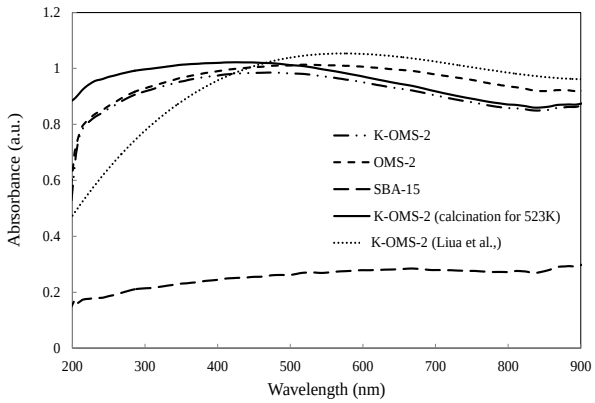


圖 7 UV-Vis absorption spectra of SBA-15, OMS-2 and K-OMS-2.

(7)微光致螢光(Micro-PL)光譜儀分析：本研究發現以不同溫度 423、523 及 623 K 鍛燒 K-OMS-2/Al_2O_3 後，光催化甲苯效果不同，因此以微光致螢光(Micro-PL)分析觸媒結構之影響，圖 8 及 9 在 495 nm^{-1} 出現之峰值為圖譜裡最高，從圖 8 可得知發光強度為 K-OMS-2 > SBA-15 > OMS-2，由峰值的半高寬來看，半高寬越小代表樣品中受雜質和缺陷影響較小，結晶較理想，因此 OMS-2 發光強度較弱但結晶卻較佳。圖 9 中不同鍛燒溫度之 K-OMS-2，結晶理想度最佳為 K-OMS-2(523K 鍛燒)，發光強度則反之，不過不同鍛燒溫度下 K-OMS-2 其發光強度皆在一定水平之上。由圖 s 8 及 9 可得知觸媒在 415 及 526 nm^{-1} 出現的峰值為 Mn-O 晶格的伸縮震動，代表 2×2 的孔洞隧道結構，以及八面體平行移動所產生的外部震動[10-12]，其中當發光的中心離子為 Mn^{2+}或 Mn^{4+}，其對應之躍遷為 3d [13]。

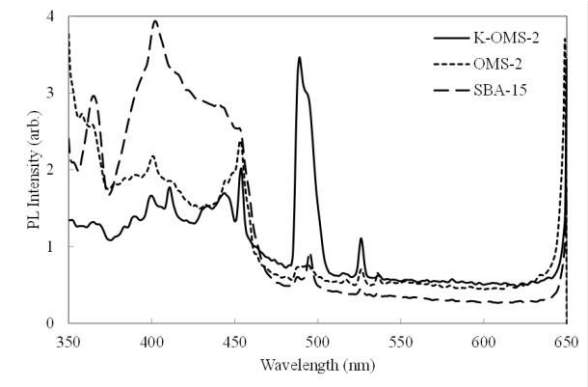


圖 8　Raman spectra of K-OMS-2, OMS-2 and SBA-15.

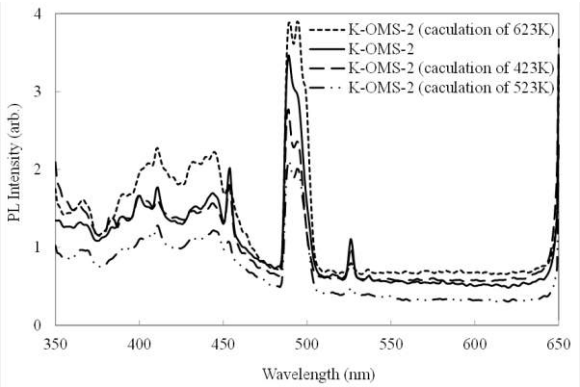


圖 9　Raman spectra of K-OMS-2 calculation at different temperature.

(8)比表面積及孔隙度測定儀(BET)分析：以 BET 分析判斷鍛燒溫度對於觸媒孔隙結構之影響，如表 4 所示，K-OMS-2/Al_2O_3 比表面積大小為 523 K>423 K>623 K，分別是 279.78、270.78 及 265.43 m^2/g，可得知鍛燒 523 K 下 K-OMS-2/Al_2O_3 觸媒其 BET 最大，推斷不同的鍛燒溫度會造成觸媒 K-OMS-2/Al_2O_3 孔洞的變化，進而影響表面積之大小，當鍛燒溫度低時不足以增加觸媒表面積，而鍛燒溫度較高時表面積又會因而變得更低。

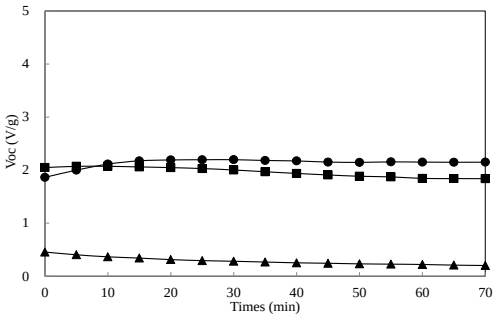
表 4　BET surface analysis and pore size of K-OMS-2/Al_2O_3 of calcination at different temperature.

Sample	BET Surface Area (m^2/g)	Langmuir Surface Area (m^2/g)
K-OMS-2 / Al_2O_3 (calcination at 423 K)	270.78	339.24
K-OMS-2 / Al_2O_3 (calcination at 523 K)	279.78	378.55
K-OMS-2 / Al_2O_3 (calcination at 623 K)	265.43	360.49

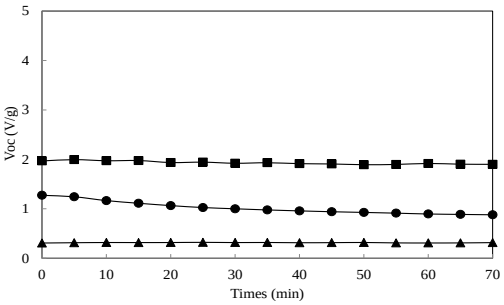
2.光化學太陽能電池

(1)分子篩觸媒對於光產電之影響：利用循環伏安儀測試 PECSC 於 WLED、UVLED 及 UVL 光源下照射 70 分鐘，測試 Voc 之穩定性，分析結果顯示於圖 10 所示，可知無論在何種光源照射下，SPECSC 的 Voc 介於 1.5~2 V/g 間，SOPECSC 的 Voc 介於 0.3~1 V/g 之間，兩者之 Voc 變動幅度不大。相較之下，SKOPECSC 介於 1.2~4V/g 之間，明顯看出添加 K-OMS-2 後之 PECSC 其光敏性較高，而添加 OMS-2 對於 Voc 產值較無幫助。依

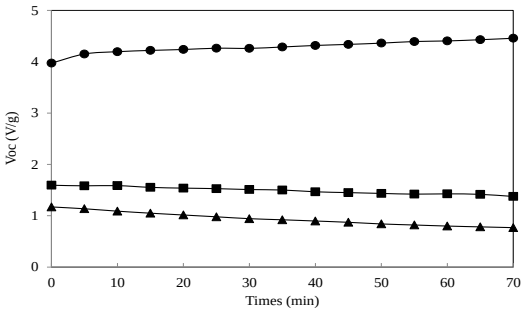
TEM 分析可知，OMS-2 纖維的平均長度是 100~200 nm，K-OMS-2 纖維的平均長度大於 200 nm，其纖維連續性較高，可推斷為 SKOPECSC 較 SOPECSC 光產電效果較佳之因素。從 UV-vis 圖譜可發現 K-OMS2 光吸收強度明顯高於 OMS-2 及 SBA-15，亦可獲得證明。



(a) WLED



(b) UVLED



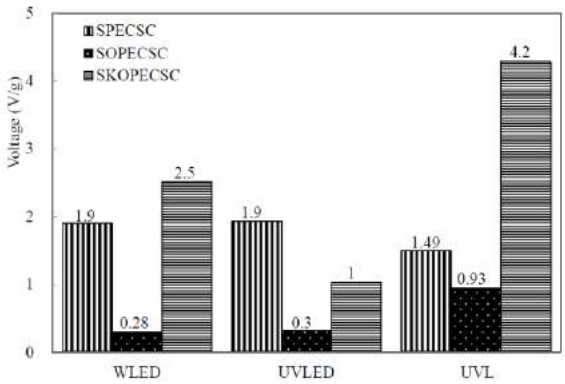
(c) UVL

圖 10　Open-circuited output voltage (Voc) per unit mass vs. irradiation times at different PECSC. ●: SKOPECSC, ■: SPECSC, ▲: SOPECSC.

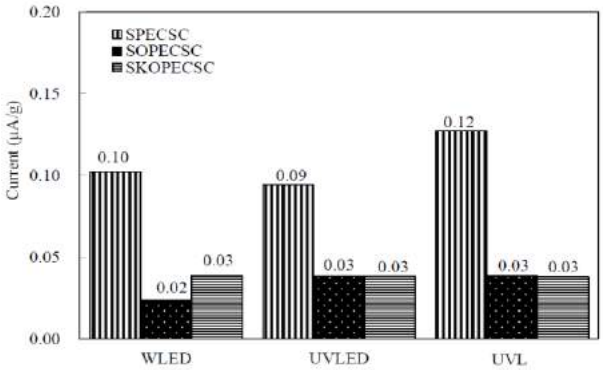
(2)不同光源下 PECSC 平均開路電壓及閉路電流特性分析：由圖 11(a)可知，SKOPECSC，在 WLED 及 UVL 燈源下對 Voc 產值增加皆有幫助，SOPECSC，不論在 WLED、UVLED 及 UVL 光下，產值相對於 SPECSC 有減少之趨勢，故添加 K-OMS-2 於 SPECSC 中較 OMS-2 有提升 Voc 產值之效益。而 PECSC 於不同光源下 Voc 產值之標準差，SPECSC、SOPECSC 及 SKOPECSC 分別為 0.24、0.36、1.63，由此可知，SPECSC 及 SOPECSC 之 Voc 於不同光源下的影響並不明顯，而 SKOPECSC 會因光源變化造成 Voc 明顯差異。

閉路電流(Isc) 係由 PECSC 於不同光源下照射 70 分鐘之平均 Isc，分析結果顯示於圖 11(b)。SPECSC、SOPECSC 及 SKOPECSC 於不同光源下之 Isc 皆為 SPECSC 產值最佳，於 WLED、UVLED、UVL 光源下分別達到 0.10、0.09 及 0.12 μA/g。SOPECSC 則為 0.02、0.03 及 0.03 μA/g，

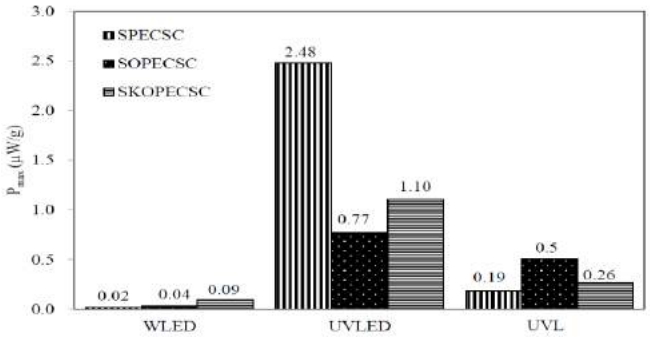
SKOPECSC 則皆為 0.03 μA/g。而 PECSC 於不同光源下 Isc 產值之標準差，SPECSC 為 0.01，SOPECSC 及 SKOPECSC 皆小於 0.01，由此可知，不同光源對於 SPECSC、SOPECSC 及 SKOPECSC 之 Isc 影響並不顯著。(3)PECSC 最大輸出功率特性分析：圖 11(c)顯示 PECSC 在 WLED 燈源下 Pmax 依序為 SKOPECSC(0.14μW/g) > SOPECSC (0.08μW/g)> SPECSC (0.001μW/g)；UVLED 燈源下為 SPECSC (0.07μW/g) > SKOPECSC (0.03 μW/g) > SOPECSC (0.02μW/g)；而 UVL 燈源下則是 SOPECSC (0.04μW/g) > SKOPECSC (0.02μW/g) > SPECSC (0.01μW/g)。不同 PECSC 在三種光源的照射下，平均最大功率分別為 SKOPECSC (0.06μW/g) > SOMPECSC (0.04μW/g) > SPECSC (0.02μW/g)。可知 K-OMS-2 觸媒在 WLED 照射下最大輸出功率(Pmax)達到最佳產值，顯示 K-OMS-2 對可見光有特殊之吸收特性。楊氏[3]以含 Ce 光觸媒製作 10Ce PECSC 於不同光照度之 WLED 照射下，發現光源強度越強，Pmax 會隨之增加。故 K-OMS-2 觸媒可能因 WLED 照度較大，使得產電效果較佳。



(a) Voc



(b) Isc



(c) Pmax

圖 11　The Voc, Isc and Pmax derived from the irradiation of WLED, UVLED and UVL. Pmax value is modified at the same illumination.

3.光催化降解甲苯

(1)光熱催化設備系統穩定時間測試：測試結果如圖 12 所示。可得知通入甲苯氣體 30~50 分鐘後濃度趨於平穩，故本研究往後之實驗取反應 35 分鐘後之數據做為比較基礎。

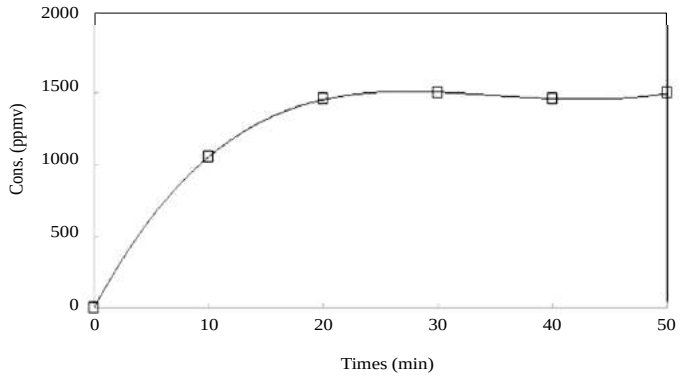


圖 12　S 表 test on the photodegradation system.

(2)不同空間流速下之降解效率(η)：當 SV 為 633、1,030 及 2,026 hr^{-1} 時，以 WLED 做為光源照射 K-OMS-2/Al_2O_3 觸媒，結果如圖 13 所示。SV 為 2,026 hr^{-1} 時，甲苯去除率(η)介於 45.29 %，相較於其他空間流速，降解效果低且效率有逐漸下降之趨勢。SV 為 1,030 hr^{-1} 時，去除率介於 80.31 %，隨後有小幅下降之趨勢。而 SV 在 633 hr^{-1} 情況下，能保持最佳之去除效率，維持 87.00 %，因此，此階段篩選出最適化空間流速為 SV 在 633 hr^{-1}。

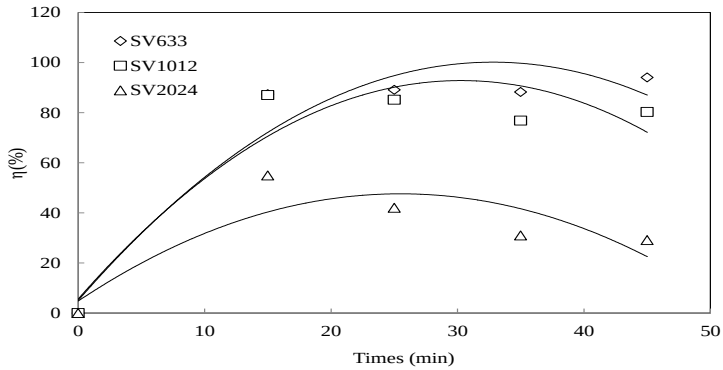


圖 13　Photodegradation removal efficiency of toluene using K-OMS-2/Al_2O_3 catalyst at various space velocities under WLED. Co = 1,200 ppmv, SV = 2,026, 1,030 and 633 hr^{-1}, K-OMS-2: 1 wt.%, SV: space velocity. ◇= 633 hr^{-1}, □= 1,030 hr^{-1}, Δ=2,026 hr^{-1}.

(3)不同光源照射下之催化反應：鑒於未來 LED 燈源將會取代傳統燈管照明的趨勢，故本研究選用 WLED、UVLED 及 BLED 三種 LED 燈管作為光源，圖 14 可知，當實驗條件 SV 為 633 hr^{-1} 時，其 η 分別為 UVLED >WLED> BLED，測試出最適化光源為 UVLED，其 η 平均值為 93.86 %。而 WLED 及 BLED 平均值約為 87.00 及 79.78%。此結果與圖 11(c)結果一致。顯示較高 Pmax 將導致 η 隨之升高。此外以三種光源在無觸媒情況下進行光催化甲苯進行比較，可得知無觸媒時，WLED 去除率平均值為 3.97 %，BLED 為 5.05 %，UVLED 的平均值為 8.68 %。綜合以上結果可知，UVLED 光源下 K-OMS-2 觸媒去除效率較好，可能原因為 UV 波長介於 380~390 nm，而 K-OMS-2 觸媒最佳吸光值約在 350~500 nm 間，證明最佳吸光波長影響去除率非常明顯。

(4)不同鍛燒溫度之催化反應：如圖 15 所示，當操作條件 SV 為 633 hr^{-1}，甲苯飽和濃度 1245ppmv 下，以 UVLED 作為光源照射測試出最適化鍛燒溫度為 523 K，其平均值為 95.01 %，而 423 及 523 K 平均值分別為 89.73 及 92.75 %。由此可知 K-OMS-2/Al_2O_3 觸媒經鍛燒 523 K 後與無鍛燒的 93.86%比較催化能力會提升 1.15 %，但差異不大，顯示鍛燒溫度非為關鍵影響因素。於此鍛燒溫度下之觸媒經由 UV-vis 分析，得知其於 UV 波段之吸光值提升，推測因吸光值增加進而影響觸媒催化能力上升。又以 BET 分析可得知鍛燒溫度為 523 K 之 K-OMS-2/ Al_2O_3 觸媒其表面積最大，故使觸媒反應面積提高。

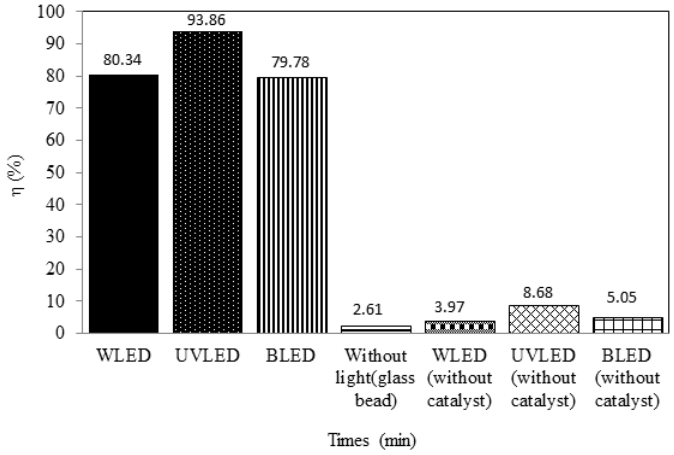


圖 14 The average photodegradation efficiency of toluene. K-OMS-2/Al_2O_3: Co: 1319 (UVLED), 764 (BLED), 1290 (WLED) ppmv. Non-catalyst Co:1421 (UVLED), 1365 (BLED), 1172 (WLED), 1403 (Blank) ppmv. SV =633 hr^{-1}, K-OMS-2: 1 wt.%, SV: space velocity.

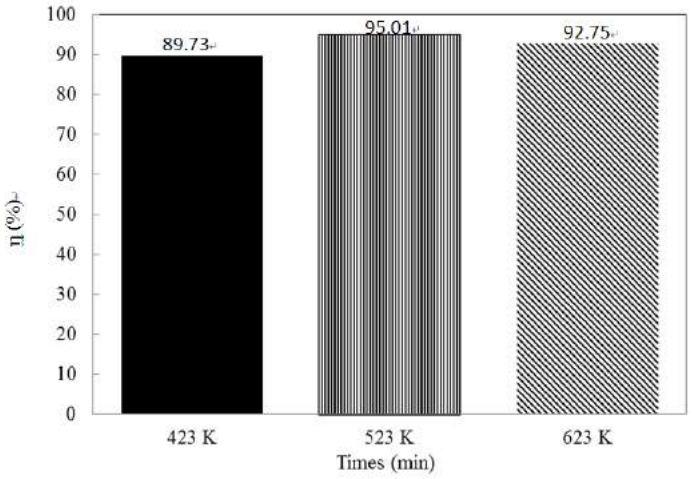


圖 15　The average photodegradation efficiency of toluene using K-OMS-2/Al_2O_3 at UVLED. Co: 1390 (423K), 1245 (523K), 1446 (623K) ppmv. SV =633 hr^{-1}, K-OMS-2: 1 wt.%, SV: space velocity.

四、結　論

工業及室內逸散 VOCs 的排放其除對人體健康造成危害外，亦是大氣臭氧汙染物的前驅物來源之一。本研究係製備低溫錳礦晶型化合物八面體分子篩(OMS-2)，再於表面植入金屬鉀離子形成鉀錳礦晶型化合物八面體分子篩(K-OMS-2)的微奈米桿狀材料，探討其光轉電效益及於連續式光催化處理 VOCs 反應及光電效應。光電效應以製作光電化學太陽能電池(PECSC)測試其光電特性。氣狀 VOCs 污染物(以甲苯為代表)建立連續式光催化反應系統，催化觸媒載體使用氧化鋁(Al_2O_3)，於光催化連續流反應系統下降解飽和濃度甲苯氣體，測試反應效益及建立光催化與光電效益之相關性。研究結果顯示，光轉電效益及觸媒特性與光催化條件有直接相關性。且歸納出 K-OMS-2/Al_2O_3 觸媒於連續式光催化反應系統處理甲苯之最適化條件為 UVLED、SV 633 hr^{-1}、鍛燒溫度 523 K 時，飽和連續流甲苯去除率最高達 95.01%。可明顯符合排放標準。

五、參考文獻

1. Li, Y., Hou, J., Liu, L., Lv, H., Zhao, X., “Tuning the K+ concentration in the tunnel of OMS-2 nanorods leads to a significant enhancement of the catalytic activity for benzene oxidation,” Environ. Sci. Technol., 47 (23),

13730–13736 (2013).
2. Jothiramalingam, R., Wang, M. K., “Synthesis, characterization and photocatalytic activity of porous manganese oxide doped titania for toluene decomposition,” J. Hazard. Mater., 147 (1-2), 562–569, 2007.
3. 楊詠婷，「鈰、氮、硫共摻雜二氧化鈦光觸媒其光電轉化及催化特性研究」，國立宜蘭大學碩士論文，2013。
4. Özacar, M., Poyraz, A. S., Genuino, H. C., Kuo, C. H., Meng, Y., Suib, S. L., “Influence of silver on the catalytic properties of the cryptomelane and Ag-hollandite types manganese oxides OMS-2 in the low-temperature CO oxidation,” Appl. Catal. A: Gen., 462–463, 64-74, 2013.
5. Phuoc, H. H., Seong, C. L., Jieun, K., Doohwan, L., Hee, C.W., “Properties of a manganese oxide octahedral molecular sieve (OMS-2) for adsorptive desulfurization of fuel gas for fuel cell applications,” Fuel Process. Technol., 131, 238-246, 2015.
6. Lu, Q., Wang, Z., Li, J., Wang, P., Ye, X., “Structure and photoluminescent properties of ZnO encapsulated in mesoporous silica SBA-15 fabricated by two-solvent strategy,” Nanoscale Res. Lett., 4, 646–654, 2009.
7. Liua, G., Liaob, S., Zhua, D., Cuia, J., Wenbing., “Solid-phase photocatalytic degradation of polyethylene film with manganese oxide OMS-2 solid state,” Sciences, 13, 1, 88–94, 2011.
8. Baldi, M., Milella, F., Gallardo-Amores, J. M., Busca, G., “A study of Mn–Ti oxide powders and their behavior in propane oxidation catalysis,” J. Hazard. Mater., 8, 11, 2525-2531, 1998.
9. Yu, C., Zhu, M., Q, Chen, J., Shen, Y. Y., Zhao, J., Tang, Y., Chen, X. Z., “Solvent-free oxidation of cyclohexene over catalysts Au/OMS-2 and Au/La-OMS-2 with molecular oxygen,” Original Res. Art. Chin. J. Catal., 29 (11), 1127-1132, 2008.
10. Shanthakumar, S., Edward, K, N., Steven, L, S., “OMS-2 catalyzed oxidation of tetralin: A comparative study of microwave and conventional heating under open vessel conditions,” Appl. Catal. A: Gen., 348(2), 214-220, 2008.
11. Chen, S., Yang, L., Chen, D., Jiang, Z, J., Ding, D., Liu, M., “Phase evolution of an alpha MnO2-based electrode for pseudo-capacitors probed

by in operando Raman spectroscopy," Nano Energy, 9, 161-167, 2014.
12. Man, V. T., An, Th. Ha., Phung, M. L. L., "Nanoflake manganese oxide and nickel-manganese oxidesynthesized by electrodeposition for electrochemical capacitor," J. Nanomater., ID 609273, 2015.
13. 陳玉鴻，「光激發螢光(Photo-Luminescence, PL)的用途、原理及量測技術」，工業技術研究院報告，2014。

議程2-綠色科技與環境管理類

2-1 利用 HFMEA 降低醫院環境危險性作業之風險

蕭水樹、Nhatthien Nnguyen、陳孝行

2-2 應用交聯式流體化床運行化學迴圈程序於溶劑處理

張世翰、張晏銓、顧　洋、郭俞麟、李豪業、黃文慶、曾堯宣

2-3 電子業面對氣候變遷風險之調適行動-以南部某汽車電子控制設備商為例

張銘城、林群燁、王登楷

2-4 再生水廠能源管理與節能應用

何宗洋、施武陽

2-5 電磁鋼片絕緣塗膜之無鉻高性能化

彭剛勇

2-6 零耗氣-70°C 壓縮熱回收式乾燥機

黃志豪、邱秉岳

2-7 熱水鍋爐系統管理面面觀

吳柏毅、謝志新、李清諒

2-8 實測電梯電力回生裝置及其節能效益分析

林昆郁、練光祐、陳宗逸

2-9 綠色厭氧生物技術處理高濃度釀酒廢水與再生能源應用

林郁仲、倪辰華、陳長祺

利用 HFMEA 降低醫院環境危險性作業之風險

蕭水樹*、Nhatthien Nnguyen **、陳孝行***

摘　要

醫療院所內有多種環境危險性作業場所如(1)發電機醫療設備維護保養、(2)退伍軍人菌消毒作業、(3)廢水場廢水處理作業、(4)水池清洗作業(侷限空間)、(5)負壓隔離病房、(6)鍋爐操作等，這些環境作業，隱含多種危險因子，依據新北市勞檢處進行勞動檢查調查，2014~2016 年因為環境管理不慎引起危害及環境問題每年逐漸增加，擬藉由 HFMEA 方法提前預防及降低醫院環境作業危害風險。

決定 FMEA 分析層次，一般分析層次區分為系統、模組、組件及零件，實際分析作業進行時可依系統的大小或複雜性酌予擴大或縮減。有關分析選擇方法有下列幾項：(l)風險優先數法(RPN)、(2)失效模式(HFMEA)、(3)危害風險指數分析。

以 HFMEA 方法提出各種不同分析，40 項失效模式 34 項可能原因危害指數(嚴重度和發生率)的總分為 136 分風險評估評估結果，經過 HFMEA 分析後降為危害類 15 項，其中三級有 4 項、二級有 3 項、一級有 8 項，大大減低環境高風險因子，提前預防發生環境發險並改善，若醫療院所發生危害必然造成環境汙染風險，藉由此方法找出失效模式風險之優先次序，可根據現行管制方式，研擬失效之偵測方法及謀求補救措施，以作為醫院預防失效或改進設計與工程弱點之行動參考及預警作用，減少環境汙染發生。

【關鍵詞】失效模式效應分析、品管改善手法、廢水處理污染防治設施

---

*亞東紀念醫院　組長

**台北科技大學　博士生

***台北科技大學　教授

一、前　言

北部某醫學中心從 2014~2016 分析全院各種保養危險作業之環境安全探討分析,研討如何降低含有各別錯縱複雜不同環境危險性作業如機電設備維護保養作業、 退伍軍人菌消毒作業、 廢水場廢水處理作業、廢棄物處理作業、水池清洗作業等，依照風險評估及危害分析發現，廢水處理場作業就佔有三種危害性作業場所，分別為侷限空間作業、二氧化氯處理作業及廢水處理作業，故而選擇廢水處理場當成本次風險危害預防改善之標的，廢水處理系統之操作維護程序複雜且瑣碎，難以掌握，為使處理達到預警效果，本次研究利用 HFEMA 降低環境危害風險，建立一套系統化制度之醫院環境危險性作業預警系統，以避免發生危害事件，達到災害預防及環境永續之目的。

二、HFMEA 與 FMEA 之差別與其醫療之應用

1.FMEA is ...，可靠度

FMEA 手法最初是用來改善產品的可靠性[1,5]，McKinney(1991)強調需及早應用 FMEA 在系統層次目前其應用跨越整個產品的生命週期,從產品規劃到設計、製造、建造以及使用等階段，用以提高產品或系統的可靠性、維護性和安全性[2]。技術方面 FMEA 為一種預防性技術，它是結合技術與經驗的分析方法，為了排除產品、製程或計畫過程中潛在的失效，在設計確定之前先尋求失效的可能原因或失效的可能性，在失效真正發生之前，設法防止或減少其發生機率，以提高產品良率[3,8]。黃靜蓮(2001)提出可以避免耗費不必要的時間與成本[10]。分析現有系統(流程)或將建立之系統(流程)哪裡會出錯一旦出錯會有多糟，系統引起錯誤的根本原因可能是什麼?哪裡需要修正以避免事故發生估計可降低失敗的機率或可減少傷害的程度、選定改善行動、追蹤分析執行成成果、進入 PDCA 改善循環程序之改善參考。

FMEA 之 PDCA 分析循環流程有以下幾項重點：

(1)FMEA 之 Design (設計)以設計人員為核心項目，運用設計的改變來消除/控制失敗的發生率(不良率) ，或減少嚴重度。

(2)FMEA 之 Process (流程)以製造(執行)人員為核心，減少流程之錯誤。

(3)透過找出製程中的潛在問題並採取必要行動予以消除/控制或減少損害。

2.HFMEA is…減少流程發生率

Healthcare FMEA 源自 FMEA 概念，由 VA National Center for Patient Safety (NCPs)所研發，最初用於協助醫療院所建立完善的病人安全管理系統，包含組織、體制及技術面的運作，使醫院經營符合評鑑要求，達到病人安全的目標。不同醫院針對同一主題討論，只有 17%失效模式相同，其危害指數與改善方案也不同[4]後來醫療體系將 FMEA 三維的風險分析如圖 1，簡化為二維決策方案。FMEA 三維分別為：發生率、嚴重度、偵測度；HFMEA 二維為：發生率、嚴重度，透過決策樹分析決定採取改善行動的優先順序，減少決策執行錯誤，步驟越多的流程出錯的機會越高，100 個步驟錯誤率 63%[11]。

圖 1　FMEA 三維風險分析範例(來源：馬偕醫院楊宗憲醫師)

進行 HFMEA 的理由，主要為醫療機構研究顯示，發生警訊事件顯示該事件會危及病人安全之行為，醫療管理內部異常事件報告顯示經常發生或高嚴重度較高，經由外部的資料顯示該事件經常發生或高嚴重度之統計資料，另外，醫療安全系統欲導入一個新系統或新流程之行為會使用 HFMEA 手法預防病人安全事件之發生。HFMEA 常使用的工具，有 HFMEA 工作表、危害指數矩陣(hazard scoring matrix)、風險分析(嚴重度、發生率)

及決策樹等工具。然而，HFMEA 成功的關鍵則為：領導者是否支持，選擇合適的高風險流程(聚焦)，持續不斷的改善，有效率的資訊管理，充分訓練、高品質的 HFMEA 使用人員。

HFMEA 管理機制則為，圖 2：

(1)有效的管制措施：建立標準化書面品質，系統有效的改善及防呆機制

(2)落實標準化必須隨時更新(Updated)

(3)矯正必須徹底執行：依嚴重性、關鍵性決定，否則可能遺漏潛在問題(發生率極低) 之改善。

(4)引用 Process FMEA，以流程分析為出發點，著重於流程進行中相關的各類因素探討。

圖 2 HFMEA 執行步驟(來源：亞東醫院品管中心)

三、 廢水處理系統操作維護風險危害預防個案探討

1.定義主題：(Define the HFMEA Topic)

從環境風險指標中篩選出最大風險值，廢水場處理作業共分為四大種類風險，進行風險評估評估(表 1)，於廢水場內可能發生之危害即有 15 項，其中三級有 4 項、二級有 3 項、一級有 8 項，在一個作業場所內的危害因子，其中危害因子包含了 3 項高風險因子(表 2)，這 3 項風險若發生，輕則造成人員長久職業病問題、重則死亡。

改善小組於會議中討論造成廢水場環境危險作業，將影響因子分成四大主要作業問題，針對各主要問題進行現場資料蒐集與故障模式的建立，並確保資料蒐集的完成性、利於後續資料彙整和資料分析風險說明如下：

A. 廢水場作業風險：本院廢水作業共有三處，舊院區 B4 廢水場、二期院區 B4 廢水場及亞東會館 B3 廢水場，此三處之作業內容也不盡相同，舊院區不僅作業類別及設備居多，其設備年資也最高，使用時間越久的設備越容易出現異常及安全風險。

表 1　廢水場高風險區危害分析

作業地區/內容	廢水處理作業	水池清洗作業	退伍軍人菌消毒	機電維護保養
舊院區廢水場	V	V	V	V
二期院區廢水場	V			V
亞東會館廢水場	V	V		

B. 汙泥貯槽風險：本院廢水處理流程如下，廢水處理經過粗細篩、沉澱、過濾及 UV 燈消毒等多道手續才可將廢水排至外面，其中需添加化學品如氯碇才能有效進行消毒，只要是需要接觸到化學品，就有可能有影響人員健康的風險存在。在汙泥清運作業，因汙泥為院內多種物質組成，在混和的過程中易產生硫化氫，硫化氫屬急毒性 2 級之化學物質，若超過 10ppm 即有致命的危險，雖給予此作業之人員配帶相關防護具即有一定的防護力，但未考量到硫化氫也屬易燃氣體 1 級，對於防範火災尚未有相關防護設備。

C. 消毒作業風險：本院退伍軍人菌消毒作業是以次氯酸鈉加氯化氫混合而成，而二氧化氯本身即為多種危害物質，以 GHS 標示分類危害即有 6 種危害存在，具有相當高的風險性，二氧化氯本身也屬於易燃氣體 1 級之化學物質，雖於洩漏之情況才有可能發生火災，但若發生洩漏又發生火災，可能造成救援困難及人員風險問題產生。

D. 水池清洗風險：廢水場作業場所內有地下水池清洗作業共有二處，舊院區廢水場及亞東會館廢水場，地下水池清洗作業屬局限空間作業，作業時可能發生缺氧之危害，現地下水池清洗作業多由外包廠商施作，進入水池前須先以通風設備進行換氣，目前外包商施工由醫學工

程處與勞安處共同進行監督，併避免其他廠商誤入，也於各處張貼局限空間標示。

表 2　高風險區危害分析

高風險作業	危害分析
二氧化氯消毒作業(退伍軍人菌消毒用)	中毒危害(人員不適)
水槽清洗作業	缺氧作業(局限空間)
汙泥清除作業(硫化氫)	中毒危害(人員不適)

2.組成 HFMEA 專案團隊及分工

組長	單位	姓名	職稱	分工
	工務處	蕭 00	組長	專案負責
組員	單位	姓名	職稱	工作分配
	工務處	張 00	專員	聯絡開會
	醫學工程處	張 00	組長	聯絡開會
	勞安處	鍾 00	事務員	進度追蹤
	總務處	林 00	組長	文書作業
	總務處	王 00	事務員	危害分析
	護理部	任 00	副主任	繪流程圖
	護理部	賴 00	護理長	資料蒐集
	稽核處	黃 00	專員	資料分析

3.全院環境風險流程圖轉化為 HFMEA 表格(部分截取)

原因分類時採用 4M1E(man, material, machine, method, environment)的模式，如下段說明之設備、使用行為、空間環境、流程及方法等因素，並具體描述可能失效原因。繪製所要分析的目標流程，並將每一步驟畫上編號，對於複雜流程先分為幾個次流程，再將次流程展開，討論是否合理，流程是否正確性與完整性，展開之流程圖依據風險程度表 3 編排流程圖再轉成 HFMEA 表格(表 4)。決定流程的類型，所有專案人員利用魚骨圖、名目團體法、腦力激盪法等品管手法決定流程起點與終點如圖 3。

表 3　高風險區危害分析

其他在同一空間的作業		設備名稱	化學物質	可能危害
鼓風機房		鼓風機		噪音 夾捲傷
工作人孔蓋		工作人孔蓋	無	墜落
	水塔	地下水池		缺氧 感電(洗水塔的時候) 墜落
		揚水泵 (設備老舊)		夾捲傷 滑倒
辦公室內外電盤		電盤		感電(維修時) 活電作業(備機)
消防設備	灑水系統(?)	馬達 配電盤		夾捲傷 感電
風管		排風管		撞傷
B4-B5樓梯		樓梯(太陡)		滑倒

廢水場	流程	設備名稱	化學物質	可能危害	人員操作
	粗篩機		臭氧	化學毒害	
	細篩機				
	調整池				
	厭氧水解池(生物池)			墜落	
	好氧水解池(生物池)				
	沉澱池				
	中間水池				
	沙濾桶				
	UV消毒設備		氯碇	化學毒害 UV傷害	
	放流池				
	汙泥貯槽		硫化氫	化學毒害	
	汙泥脫水機		polymer	滑倒	
	脫水汙泥棄運		硫化氫	化學毒害	有

二期廢水場 鼓風機房	設備名稱 鼓風機	化學物質	可能危害 噪音

亞東會館 水塔清洗作業	設備名稱 地下水池	化學物質	可能危害 缺氧作業

表 4　運用 HFMEA 表格

	B	C	D	E	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q
1					風險計分			決策樹分析							
2	主流程	次流程	失效模式	造成失效的潛在原因	嚴重度	發生率	危害風險指數	該失效是否造成系統相當大的危害	該項是否為流程中的關鍵弱點	是否已有有效控制措施	若缺乏控制措施是否也能明顯看出失效	進行矯正？	不需再進行矯正之理由	行動(排除.控制.或減災)	建議改善措施
24	設備問題	管理機制	1.使用規範未臻完善		3	3	9	Y	→	Y	→	Stop	增加罰扣機制		
25			2.未依規定操作不當	用電知識不足	4	4	16	Y	→	N	N	Yes		控制	
26			3.未落實查核機制		3	2	6	N	N	→	→	Stop			
27	人為問題	人員管理	1.教育訓練不足		3	3	9	Y	→	Y	→	Stop	定期舉辦教育訓練、宣導及張貼使用規範		
28			2.異常時未即時通報	人員危機意識不足	3	3	9	Y	→	N	N	Yes		控制	
29	環境問題	不可控制因素	1.災害裂化（因災害造成設備機能和安全性降低，如水災設備泡水）		4	1	4	Y	→	N	N	Stop	天災為不可抗因素		

	B	C	D	E
1				
2	主系統	次系統	失效模式	造成失效的潛在原因
24	設備問題	管理機制	1.使用規範未臻完善	
25			2.未依規定操作不當	用電知識不足
26			3.未落實查核機制	
27	人為問題	人員管理	1.教育訓練不足	
28			2.異常時未即時通報	人員危機意識不足
29	空間環境	不可控制因素	1.災害裂化（因災害造成設備機能和安全性降低，如水災設備泡水）	

將流程圖轉換至 HFMEA 表格若在後面步驟中討論時有修改到流程，須同步修正流程圖內容並利用決策樹決定是否使用流程圖

圖 3　HFMEA 主流程類型

依據主流程圖因素再編寫入次流程內容上面，並且依失效模式及造成失效的主要原因、次要原因經過專案組員利用腦力激盪法或魚骨圖方式分別討論，找出失效的影響並找出失效原因。

4.危害分析(Conduct a Hazard Analysis)[9] [10]

(1)效應分析：各故障模式之要因依據各項屬性，中的「推定發生原因」，推斷其問題發生的原因即可提出適當的解決對策進行問題的改善。將各要因所依據屬性分類累加其「致命度」(參見註 1)，致命度數值高的就是解決問題的重點。彙整各表之要因屬性，將失效風險係數，依頻率、嚴重度權重、風險、效益及影響範圍等列入表內。

(2)要因屬性以廢水場問題為最嚴重。

致命度數值=(影響度權重)×(發生頻率權重)。

(3)計算危害指數

(4)運用決策樹分析

列出每一個次流程或步驟的所有可能的失效模式(possible/potential failure mode)決定每一個失效模式的嚴重度(severity)和發生率(probability)，並計算危害指數(Hazard score)運用決策樹(Decision Tree) (圖 4)，決定是否採取行動列出決定採取行動的失效模式的可能原因決定每一個可能原因的危害指數運用決策樹決定是否採取行動。

(5)決定風險評估風險等級、發生頻率、影響範圍

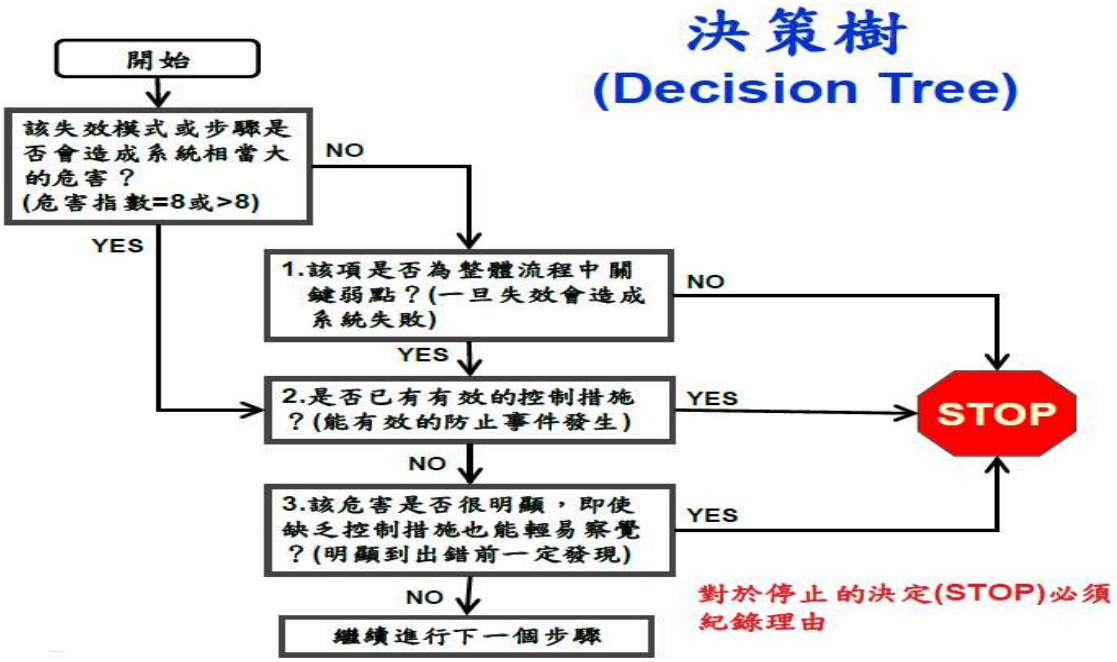


圖 4　決策樹分析(來源：亞東醫院品管中心)

表 5　風險評估等級說明(來源：亞東醫院品管中心)

風險等級	重大風險	高度風險	中度風險	低度風險	輕微風險
風險分級	5	4	3	2	1
風險控制	應立即預防或強制性改善	應管制危害發生，備有相對應應變措施或管制程序，並加強檢查、查核及督導作業	應加強檢查、查核及督導作業管控風險	作業人員應適當警覺，各級單位需加強稽查	可接受不需特別稽核

表 6　嚴重度分級基準

等級		人員傷亡	危害影響範圍
S4	重大	造成一人以上死亡、三人以上受傷、或是暴露於無法復原之職業病或致癌的環境中	大量危害物質洩漏;危害影響範圍擴及院外,對環境及公眾健康有立即及持續衝擊
S3	高度	造成永久失能或可復原之職業病的災害	中量危害物質洩漏;危害影響範圍除院內外，對環境及公眾健康有暫時性衝擊
S2	中度	須就醫，且造成工時損失之災害	少量危害物質洩漏;危害影響限於院內局部區域
S1	輕度	僅須急救處理，或就醫，但未造成工時損失之災害	微量危害物質洩漏;危害影響限於局部區域附近，或無明顯危害

表 7　可能性分級基準(來源：亞東醫院品管中心)

等級		預期危害事件發生之可能性	防護設施之完整性及有效性
P4	即可能	每月 1 次（含）以上；在活動或服務之生命週期內可能會發生 5 次以上	未設置必要的防護設施，或所設置之防護設施並無法發揮其功能
P3	較有可能	每半年 1 次;在活動或服務之生命週期內可能會發生 2 至 5 次以上	僅設置部分必要的防護設施，或對已設置之防護設施，未定期維護保養或監督查核
P2	有可能	每 1 年 1 次；在活動或服務之生命週期內可能會發生 1 次	已設置必要的防護設施，且有定期維護保養或監督查核使其維持在可用狀態

表 8　發生頻率與影響範圍(來源：亞東醫院品管中心)

發生頻率（F）：依目前產生或排放的頻率及時間予以評分

頻率（F）	分數
每日或連續操作	5
每月可能發生	4
每年可能發生	3
每五年可能發生	2
五年以上可能發生	1

影響範圍（A）：依產生或排放時對環境造成影響的範圍予以評分

影響範圍（A）	分數
院區外	5
院內大面積（如：D 區）	3

表 9　環境考量面查檢表(上)與環境衝擊鑑別表(下)(部分截取)

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
部門編號	區域/活動	時間 (p、c、f)	狀況 (n、a、e)	環境考量面說明(含頻率、種類、量...等)	環境衝擊面說明	環境衝擊	效益 +/-	發生頻率(F)	影響範圍(A)	結果嚴重性(S)	風險 R1=(F+A)×S	數量/濃度
工務處1	廢水場	c	e	污水下水道系統之專責人員，應為全職工作，目前僅1人負責，無專業代理人，若休假期間廢水廠發生問題時可能造成環境危害	設備異常	水質污染	-	3	5	6	90	次
工務處2	廢水場	f	e	主管機關通知限期改善期間內，應維持既有設施正常操作，採行減少、停止生產或服務作業量，或改善廢（污）水（前）處理設施等措施，並不得超過主管機關據以通知限期改善之操作參數，且其他操作參數亦應符合正常範圍；違反者，按次處罰。 前項改善措施，必須拆除既有設施，方能繼續施工者，應向核發機關辦理變更登記後，始得為之。	設備異常	水質污染	-	3	5	6	90	次
工務處3	廢水場	c	a,e	廢水場水質處理	生物死亡	水質不良	—	3	5	8	64	ppm
工務處4	廢水場	c	a	生物曝氣系統氣體脫落	生物氣體脫落	生物死亡脫落	-	3	5	8	64	次

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
部門編號	區域/活動	時間 (p、c、f)	狀況 (n、a、e)	環境考量面說明(含頻率、種類、量...等)	環境衝擊面說明	環境衝擊	效益 +/-	發生頻率 (F)	可偵測性 (A)	結果嚴重性 (S)	風險 R1= (F+A)×S	數量/濃度	備註
650	廢水場	c	a	砂濾筒SS水質超過放流水標準	水質SS異常，放流水排放影響環境生態	廢水場超過水質標準	-	1	5	8	48	25ppm	
650	廢水場	c	a	馬達和泵設備故障	馬達故障急診停車場B2P淹水	廢水場功能喪失無法抽水	-	3	3	6	36	次	
650	廢水場	c	a	生物池SS異常，放流水排放影響環境生態	生物處理生物死亡	放流水超過標準	-	2	5	6	42	30mg/L	
650	廢水場	c	a	新集中池細篩機故障B2P淹水	馬達故障	淹水	-	2	3	3	18	次	
650	廢水場	c	a	通風排氣不良	排氣故障	產生臭氣	-	3	3	6	36	次	
650	廢水場	c	a	廢水場水質處理	生物系統死亡或中毒	水質超過標準	-	1	5	6	36	100ppm	

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1							評估風險		
2	部門代號	作業/流程名稱	狀態 (例行/非例行	時間 (現在/過去/	危害辨識及後果(危害可能造成後果之情境描述)	現有防護設施或控制措施	嚴重度	可能性	風險等級
658	工務01	發電機測試	例行	現在	曝露噪音偏高之作業環境造成聽力受損	配戴耳塞	S1	P1	1
659	工務02	天花板上作業	非例行	現在	尖銳物未移除手部碰撞刺傷	配戴手套	S1	P1	1
660	工務03	化學製劑需週期性添加作業	例行	現在	添加時未配戴防護具，造成人員受鹼性化學製劑灼傷	配戴面罩手套	S1	P2	2
661	工務04	發電機測試	例行	現在	曝露，噪音偏高之工作環境，造成人員聽力受損	配戴耳塞	S1	P1	1
662	工務05	設備維護作業	緊急	現在	更換流量表，不慎造成割傷	配戴手套	S1	P1	1
663	工務06	空調保養	例行	現在	更換皮帶時卸下安全保護裝製，未配戴手套，造成捲傷	配戴手套及使用正確工具/教育訓練	S2	P1	2
664	工務07	新增電線或電氣設備	例行	現在	採光照明不良作業場所造成觸電	1.輔助照明 2.使用絕緣手套	S2	P1	2
665	工務08	疏通排水勾到尖銳物	例行	現在	疏通勾到尖銳物，手部被尖銳物扎傷	配戴手套及使用工具夾	S1	P1	1
666	工務09	更換池內零件	例行	現在	排氣通風不良，缺氧造成人員不適	設置抽風設備	S1	P1	1
667	工務10	天花板上維修作業	例行	現在	尖銳物未注意導致頭部碰撞受傷	配戴安全帽	S1	P2	2

表 10　2014 年廢水處理場失效風險係數綜合表彙整(部分截取)

A	B	C	D	E	F	I	J	K	L
代碼編號	環境考量面簡述	風險顯著性 R1=(F+A)×	處理排	朱芳紫主任	魏明利主任	加權後優先處理排序說明	數量/濃度	管制方式(填寫程序或工作規範編號)	列入目標標的(填寫目標編號)
工務處1	污水下水道系統之專責人員，應為全職工作，目前僅1人負責，無專業代理人，若休假期間廢水廠發生問題時可能造成環境危害	90	1	W3	W1	3	次	廢水處理管理辦法 W0650-02-002/9	工務處_環境方案1
工務處2	主管機關通知限期改善期間內，應維持既有設施正常操作，採行減少、停止生產或服務作業量，或改善廢（污）水（前）處理設施等措施，並不得超過主管機關據以通知限期改善之操作參數，且其他操作參數亦應符合正常範圍；違反者，按次處罰。 前項改善措施，必須拆除既有設施，方能繼續施工者，應向核發機關辦理變更登記後，始得為之。	90	2	W2	W1	2	次	廢水處理管理辦法 W0650-02-007	工務處_環境方案2
工務處3	水質不良	64	6	W3	W1	1	ppm	廢水處理管理辦法 W0650-02-002	工務處_環境方案2
工務處4	生物死亡脫落	64	7		W1	4	次		工務處_環境方案2
工務處5	空氣污染	60	9	W3	W1	6	次		工務處_環境方案4

表 10-1　2014 年廢水處理場失效風險係數綜合表彙整(部分截取)

CF 部門代號	作業/流程名稱	危害辨識及後果(危害可能造成後果之情境描述)	現有防護設施或控制措施	評估風險		
				嚴重度	可能性	風險等級
工務 12	更換池內零件	排氣通風不良，缺氧造成人員不適	設置抽風設備	S1	P1	1
工務 17	排氣系統查檢維修時	查檢維修時可能接觸傳染性疾病	1.配戴一般外科口罩 2.使用 N95 口罩	S1	P1	1
工務 23	修理馬達設備作業	修理設備不當造成感電	1.查檢前使用三用電表測試 2.維修前斷電標示	S1	P1	1
工務 24	廢水場巡檢	進水量變大地面淹水，跌倒滑倒造成人員受傷	1.液位感知/防護具 2.cctv 監控	S1	P3	3

組成團隊將失效模式表格，將環境查檢表與鑑別表依照表格中的定義(如表 5~8)，彙整填入不斷簡化，找出目標(表 9)，以便不同人員在反應問題影響程度時能有依據可循如，經流程化簡製作成失效風險綜合表(表 10)，同時增進資料匯整的正確性與一致性，然後依據各小組收集到的資料加以彙整，並建立主要問題之全院之故障模式表(如表

10-1)，接著依據風險指數超過 8 以上之風險模式進行失效模式與效應分析(如表 11)。

5.行動與量測

針對造成失效模式的原因，決定行動策略，排除(elimianate)、控制(control)、減災(mitigate)；經流程圖討論與分析總共列出 40 項失效模式、34 項可能原因，計算危害指數的總分為 136 分，評分標準以 8 分為上限，超過 8 分者納入改善項目中，其中 2-6-1 及 2-6-2 現行雖然查核機制，但尚未有相關程序，及查核標準，故一併列入改善項目中，如表 10 說明。

表 11　廢水處理場環境風險之失效模式與風險評估(部分截取)

流程編號	失效模式	造成失效的潛在原因	風險計分		
			嚴重度	發生率	風險指數
1-1-1	維修時人員發生感電危險	馬達故障	1	1	1
1-2-1	維修時人員發生感電危險	馬達故障	1	1	1
1-3-1	維修時人員發生感電危險	馬達故障	1	1	1
1-4-1	維修時人員發生感電危險	馬達故障	1	1	1
1-5-1	維修時人員發生感電危險	馬達故障	1	1	1
1-5-2	產生大量噪音導致人員聽力受損	鼓風機未加裝防音設施	3	4	12
1-6-1	維修時人員發生感電危險	馬達故障	1	1	1
1-7-1	維修時人員發生感電危險	馬達故障	1	1	1
1-8-1	人員遭受廢水汙泥感染	桶槽破損	2	1	2
1-8-2	換砂時人員發生缺氧危害	未依規定進行通風	4	1	4
1-8-3	換砂時人員發生感電危害	通風設備或照明燈具未依規定加裝漏電斷路器	1	1	1
1-9-1	護罩破損		1	1	1
1-9-2	人員直接接觸氯碇	未依照 SOP 作業	1	4	4

流程編號	失效模式	造成失效的潛在原因	風險計分		
			嚴重度	發生率	風險指數
1-10-1	人員中毒	1-10-1-1 清運汙泥時，未事先進行通風換氣	4	1	4
1-10-1	人員中毒	1-10-1-2 未使用偵測器偵測空氣組成即進入局限中空間作業	4	1	4
1-10-2	人員缺氧危害	1-10-2-1 清運汙泥時，未事先進行通風換氣	4	1	4
1-11-1	設備故障		1	1	1
1-11-2	設備磨耗裂化		1	1	1
1-12-1	硫化氫中毒	1-12-1-1 排風機故障	4	4	16
1-13-1	設備磨耗裂化臭氧外洩		1	3	3
2-1-1	設備異常二氧化氯洩漏人員不適	2-1-1-1 管路破裂	3	4	12
2-1-2	二氧化氯洩漏引起火災	2-1-2-1 未裝設防爆燈具	4	1	4
2-1-3	人員接觸次氯酸鈉或氯化氫	控制器故障，持續混合藥劑造成次氯酸鈉或氯化氫溢出	1	1	1
2-2-1	人員直接接觸二氧化氯	2-2-1-1 二氧化氯管路洩漏	3	4	12
2-3-1	停止換氣造成人員不適	2-3-1-1 皮帶斷裂	1	4	4
2-4-1	人員直接接觸腐蝕性化學品	2-4-1-1 未配戴防護具	1	4	4
2-5-1	人員接觸二氧化氯不適	2-5-1-1 偵測器故障	3	1	3
2-6-1	未落實查核機制		4	2	8
2-6-2	作業規範未完善		4	2	8
3-1-1	傳維修保養後未將護罩罩回，導致人員夾傷	3-1-2-1 傳動軸護罩未罩	2	3	6
3-2-1	人員感電	3-2-1-1 潮濕處未加裝漏電斷路器	1	4	4
		3-2-1-2 作業時未依照 SOP 作業	1	2	2
3-3-1	人員跌倒	3-3-1-1 地面管線雜亂、有多處開孔	1	1	1

流程編號	失效模式	造成失效的潛在原因	風險計分		
			嚴重度	發生率	風險指數
3-3-2	人員撞傷	3-3-2-1 空間不足導致風管過低	1	4	4
3-3-3	人員墜落	3-3-3-1 未將吊裝孔蓋回	2	1	2
4-1-1	人員缺氧	4-1-1-1 進入前未先換氣	4	1	4
4-1-2	人員墜落	4-1-2-1 未使用上下設施	2	1	2
4-1-3	人員感電	4-1-3-1 未加裝漏電斷路器	1	1	1
4-1-4	人員跌倒	4-1-4-1 未穿著防滑鞋	1	1	1
4-1-5	人員撞傷流血	4-1-5-1 未配戴安全帽	1	1	1
4-2-1	未落實查核機制		1	1	1
4-2-2	作業規範未完善		1	1	1

6.確認改善行動

依風險計分表挑選完害風險指數超過 8 之欲改善項目(表 11)，進行改善措施完成主體 HFMEA 主體表格(表 12)及風險計分改善前後比較表(表 13)。

表 12　失效原因及改善措施

失效模式	造成失效的潛在原因	危害風險指數	建議改善措施
1-5-2 產生大量噪音導致人員聽力受損	1-5-2-1 鼓風機未加裝防音設施	12	增設隔音設備或加裝吸音棉
1-12-1 硫化氫中毒	1-12-1-1 排風機故障	16	1.建立汰舊機制 2.增設防護具
2-1-1 設備異常二氧化氯洩漏人員不適	2-1-1-1 管路破裂	12	加入程序書，建立稽查文件
2-2-1 人員直接接觸二氧化氯	2-2-1-1 二氧化氯管路洩漏	12	防護具穿戴教育訓量及演習
2-6-1 未落實查核機制	---	..	建立稽查文件及查核標準
2-6-2 作業規範未完善	---	..	管理辦法修正與檢討

表 13　失效原因及可能原因風險計分改善前後比較表

流程編號	失效模式	造成失效的潛在原因	風險計分					
			嚴重度		發生率		風險指數	
			前	後	前	後	前	後
1-5-2	人員噪音 及聽力	消音設備未加以防護	3	3	4	2	12	6
1-12-1	硫化氫中毒	鼓風機異常	4	4	4	2	16	8
2-1-1	異常二氧化氯洩漏	管路破裂	3	3	4	2	12	6
2-2-2	槽體管路洩漏	洩漏問題接觸	3	2	4	2	12	4
4-2-1	查核機制		1	1	1	1	1	1
4-2-2	作業規範		1	1	1	1	1	1

7.改善評核

依據表 12 失效原因及改善措施說明如下：

(1)鼓風機噪音：作業場所環境測定(鼓風機室)噪音音量 90dB 以上，張貼噪音告示並設置耳塞供進出人員佩戴使用，防止工作人員聽力損傷。耳塞 NRR 值為 29，可降低 11dB，佩戴耳塞後作業人員接受之噪音值 80dB，低於健康危害曝露值 85dB。

(2)硫化氫問題：厭氧環境中，厭氧性細菌分解有機物質中的碳會生成無色無味甲烷，可能釋放硫化氫氣體，比重大容易具積於低窪處，人員進入通風不良之侷限空間內容義發生中毒現象。經過危害風險評估可以採用侷限空間防護標準、準備防護具及通風及賜用氣體檢測，或工程改善方式加以預防。

(3)二氧化氯防護：二氧化氯設備除本身裝設有氣體及液體洩漏感應偵測器，發生氣體液體洩漏時可自動停止二氧化氯設備運轉自我保護外，自來水中增設二氧化氯偵測器，可以連接到中控室及雲端系統通知相關人員，做到災害預警通報之目的。

(3)緊急應變演習：預防二氧化氯洩漏事件，須經常舉辦防護演習，穿戴防護衣及防護具，以桌上演習及實體演習為主，使相關維護人員熟悉應變作業。

四、結論與展望

廢水場各項相關作業含有大大小小、錯縱複雜及輕重不同的危害因子，本研究利用 HFMEA 品管方法分析廢水場作業中之風險，包括廢水場功能與設備規格、預定作業環境、操作管理環境，可藉由 HFMEA 方法提出改善，40 項失效模式 34 項可能原因危害指數(嚴重度和發生率)的總分為 136 分風險評估評估結果，經過 HFMEA 分析後降為危害類 15 項，其中三級有 4 項、二級有 3 項、一級有 8 項，經改善後下降 28 分，共下降 21%，大大減低環境高風險因子，提前預防發生環境發險並改善可能發生之危害而預先防範，制定標準作業與防護機制，始作業場所人員更安全、設備使用增加壽命也更安全及更有效率。

未來展望部分，HFMEA 是一種預應式防患於未然的管理工具；HFMEA 為預應式風險管理手法。 HFMEA 是將 FMEA 的作法簡化為更易操作，可分別作為關鍵流程與意外事件時之分析工具；HFMEA 可適用於新硬體與新流程的設計，亦可運用於原有流程的檢視及改善，使用 HFMEA 風險管理可以促進作業安全提升產品與服務品質提供預警式的預防手段。

五、參考文獻

1. 醫療機構品質與病安管理：「理念與實務」，醫療品質季刊，98 年 6 月
2. 醫策會 HFMEA 相關簡報：石崇良、廖熏香
3. 病人安全管理與風險管理實務導引，許國敏
4. DeRosier J, et al. Using health care Failure Mode and Effect Analysis： the VA National Center for Patient Safety’s prospective risk analysis system. The Joint Commission Journal on Quality Improvememt. 2002 May;28(5)：248-67, 209.
5. 小野寺勝重，實踐 FMEA 手法，中衛發展中心，台北 (2001)。
6. 林正明，實用 QC 手法應用手冊(上下冊)，超越企管顧問公司，台北 (1994)。
7. Berwick D.M. Physicians as leaders in improving health care： a new series in Annals of Internal Medicine. Ann Intern Med. 1998 Feb 15;128(4)：289-92.
8. 黃靜蓮、楊長林，「以失效模式與效應分析建構 TQM 服務品質系統模式」，中國工業工程學會九十年 度年會暨學術研討會論文集，

CIIE2001-0402 (2001)。
9. 蔡明修、何賜寬，「高壓鍋爐之可靠度分析」，中華民國品質學會第 36 屆年會暨第 6 屆全國品質管理 研討會論文集，557-570 (2000)。
10. 鄭清河編，品管七大手法，復文書局，台南 (1987)。
11. Kmenta, S. and Ishii, K.,“ADVANCED FMEA BEHAVIOR MODELING FOR CONCURRENT DESIGN OF PRODUCTS AND CONTROLS, ”ASME Design Engineering Technical Conferences (1998).

應用交聯式流體化床運行化學迴圈程序於溶劑處理

張世翰*、張晏銓*、顧洋**、郭俞麟****、李豪業***、黃文慶*****、曾堯宣***

摘　要

化學迴路程序為一新穎的燃燒系統，具有高效燃燒與分離二氧化碳的功能，其反應器系統的設計、載氧體流體化以及其與燃料接觸時間，均會影響反應效率。本研究以澳洲鐵礦石為載氧體，以實場廢液異丙醇與實場廢液石刻後殘留物消除劑為燃料，於 $1kW_{th}$ 之交聯式流體化床進行化學迴路程序。藉由改變載氧體運行量、燃料反應器、空氣反應器與密封迴路的氣體流量，在不同的溫度下進行化學迴路程序燃燒，同步量測各反應器內壓力分佈、提升管的壓力差以估算固體循環速率，並分析燃燒後尾氣的組成。此系統中空氣反應器為流化床形式，燃料反應器端為鼓泡床形式，載氧體在兩者間穩定運行以達到較高 CO_2 選擇率。

實驗結果顯示，氧化反應器空氣流量為 4.5 L/min 與封閉迴路氮氣流量為 3.5L/min 時，燃料反應器分以液體流量 1 mL/min 搭配氮氣流量 5 L/min，以及液體流量 4.5 mL/min 搭配氮氣流量 1 L/min 為最佳參數。影響操作程序的關鍵為液體的完全汽化，其原因為若氣流量的不足無法進行流體化導致載氧體深度還原引起燒結現象，最終系統堵塞。廢液轉化率達 100%且 CO_2 選擇率與純度可高於 80%。載氧體的磨耗特性顯示，天然鐵礦適合運用在交聯式流體化床，在 5 小時的運行中，磨損量為 0.83 wt%，顯示其適用於液體為燃料之化學迴路程序。

【關鍵詞】化學迴圈程序、交聯式流體化床、有機溶劑廢液

---

*國立臺灣科技大學化學工程系　碩士生

**國立臺灣科技大學化學工程系　講座教授

***國立臺灣科技大學化學工程系　副教授

****國立臺灣科技大學機械工程系　教授

*****龍定旺科技股份有限公司　總經理

一、前　言

由於全球電子資訊業蓬勃發展及政府大力提倡高科技工業，國內半導體製造業已然成為我國電子產業之龍頭，其中晶圓製造業、封裝業及導線架產業和光電業中的 LCD 及 LED 製造業所使用之化學物質及有機溶劑最多。因此也相對產生大量的廢棄物。依據環保署事業廢棄物管制中心 98 年推估資料顯示，國內目前廢溶劑之年產量約為 15 萬噸，其中屬一般性廢溶劑為 88,313 噸/年，屬於有害性廢溶劑則為 65,324 噸/年。目前半導體及光電產業的主要污染物可分為毒性及有機廢氣、廢溶劑及廢水。國內目前廢液處理之方式有：委託或共同清除、廠內自行處理、再利用、境外處理。

九十年四月二日政府公布「水泥窯」可作為有機廢溶劑處理的技術之一，營業項目包含易燃性廢溶劑、廢潤滑油、廢污泥、去光阻液、蝕刻廢液及其他有機及無機廢液等，但是目前水泥窯處理方式有缺點（磚窯品質低、排氣中含污染物廢氣），多家廠商不願意再承接處理，含水量高的廢液不易處理，導致處理費用升高。目前實場廢液異丙醇(Isopropanol, IPA)廢液處理費用：5-20NTD/kg，實場廢液蝕刻後殘留物消除劑(EKC)廢液處理費用：40-50 NTD/kg。

二、研究方法

本研究將配置不同含水率異丙醇(IPA, Isopropanol)液體及與實場廢液(IPA 與 EKC)兩部份來討論，利用澳洲天然鐵礦作為載氧體，於交聯式流體化床中進行實驗，分析尾氣、觀察載氧體的流動性質與系統中的壓力變化。

於配置的 IPA 為液體燃料之實驗中，先以半套式流體化床不加入載氧體，只通入氮氣為 carrier gas 的情況下，進行 IPA 的熱裂解再分析其尾氣。

於交聯式流體化床的部份，以降低燃料反應器的氮氣流量、增加 IPA 的流量來達成提高廢液燃料的處理量，並調整空氣反應器與密封迴路的流量找出穩定運行的參數，在反應器可長時間流體化運行的情況下，接著探討如何提高二氧化碳的純度與轉化率，完成良好的化學迴圈燃燒程序。

反應器系統為交聯式流體化床系統，主要是由燃料反應器、空氣反應器、密封迴路及旋風分離器所構成，反應器的材質為不鏽鋼 310。

其中，燃料反應器、空氣反應器及密封迴路的底部皆由法蘭焊接，其進氣口採用耐溫多孔板(材質為二氧化鋯，可耐溫到 2,715℃) 鑲在法蘭上，使氣體進料能均勻分佈。

氮氣產生機至質量流量控制器(MFC, Mass Flow Controller)控制氮氣流量進入密封迴路內。氮氣鋼瓶至質量流量控制器控制氮氣流量後進入長1600mm 的 1/4 吋不銹鋼管，並與液體燃料由液體流量控制幫浦(Liquid Controller Pump, LC Pump)控制液體流量下並聯，其不銹鋼管外包覆著功率400W 的加熱帶，其溫度可達 300℃來當預熱區先行汽化，管內氮氣為 carrier gas 混著汽化後的液體進入燃料反應器內使載氧體 bubbling 並與之進行還原反應。利用空壓機連接矽酸鈉填充的除濕罐，將乾空氣送至 88 L 的儲氣筒，調整各部位的浮子流量計，將乾空氣透過送至質量流量控制器控制流量後進入空氣反應器的底部使載氧體於空氣反應器內達成流體化現象。

整個反應器置於高溫爐內，藉由 K 型熱電偶溫度偵測棒，插入置空氣反應器和燃料反應器內測量反應器內部溫度，以利於調整反應器與高溫爐間的溫度來達到預設溫度。藉由微差壓傳送器，觀察反應器內部壓力分佈情形來觀察反應器內部載氧體的流化情形。載氧體使用澳洲天然鐵礦，其材料的粒徑為 0.297-0.177 mm，填料體積約為 1.3-1.6 L (2.64-3.28 kg)。升溫過程以空氣反應器通空氣進行升溫，燃料反應器及密封迴路通氮氣進行升溫，使用 MFC 控制氣體進氣，等待反應器溫度穩定至 850℃後，由側邊的進料斗分批倒入 3 kg 載氧體，系統穩定後，密封迴路持續通入氮氣，燃料反應器則改通燃料。兩反應器之尾氣用採氣袋採集，使用 NDIR、GC 與 GC-MS 進行分析，確認反應器的運行狀況。設備示意圖如圖 1 所示。

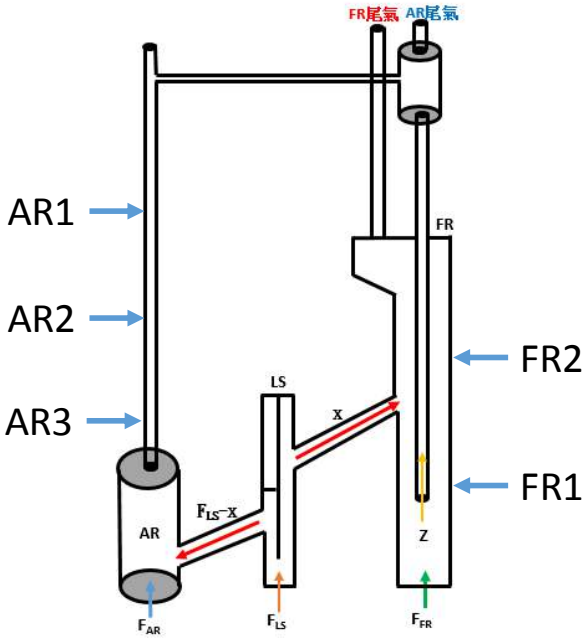


圖 1　化學迴圈反應系統示意

三、結果與討論

不同的溫度分別為 850℃、900℃以及 950℃下進行實驗，提升溫度的目的為增加 CO_2 轉化率。

由於氣體在高溫下可視為理想器體的緣故，所以根據理想器體方程式來換算氣體從系統溫度 850℃、900℃與 950℃之間設定的氣體流量，以確保三者間的流量相同而不造成實驗誤差。

在實廠廢液 IPA 的部分，廢液速率以 4.5 mL/min 運行，由圖 2 與 4 可知，FR 內 CO_2 出口濃度、選擇率和純度在 900℃下是最高的甚至可高達近乎 40%、70%和 60%左右，其原因可能為進料為高流量的緣故，有更多的含碳量可以反應成 CO_2，且因 FR 底端散熱包覆效果不足，溫度不夠導致實場廢液 IPA 是慢慢汽化至 FR 內再快速與載氧體反應(原因後續壓力值會有解釋)，鼓泡式流體化的氣泡變小、滯留時間增加、反應性提高，所以 CO_2 出口濃度提高許多，不過因為 H_2 比 CO 容易與載氧體反應，使得 H_2 出口濃度相較起來會比較低；但由於溫度 950℃的氣流速變快導致 FR 內滯留時間變短，造成載氧體還原性變差而有機成分熱裂解效果增加，所以 CO_2 出口濃度、選擇率和純度在 900℃下是最高而不是 950℃。

在 AR 內可以看到 O_2 出口濃度幾乎接近於 0，可見高流量的情況下，實場廢液 IPA 的耗氧量非常可觀，此事更可以應證說實場廢液 IPA 速率以 4.5 mL/min 運行是此系統的最大上限依據，也發現亦可利用 AR 的 O_2 出口濃度作為判斷載氧體於交聯式流體化床下與溶液之間的耗氧和釋氧情形以及是否有流體化的因素之一，亦即如果在此次實驗流體化情形有成功，則 O_2 出口濃度應該幾乎趨近於 0，反之若流體化失敗，則 O_2 出口濃度應接近大氣下的 O_2 濃度。

關於 H_2 和 CO_2 出口濃度如同低流量實場廢液 IPA 的情況一樣，CO 與 CH_4 由 FR 的料退串混上至 AR 出口端的過程中熱裂解以及與 H_2O 最終都反應成 H_2 和 CO_2 。

關於壓力圖的部分，由圖 5-7，可觀察出一個特別的狀況，FR1 的壓力值明顯變得低於 AR1 壓力值，原因為原本在低流量實場廢液 IPA 的情形下，因為低流量的緣故廢液容易被汽化加上 FR 內的惰性載氣流量有 5 L/min 所以也非常快速的將汽化後的廢液帶入 FR 內，氣體與載氧體碰撞激烈且迅速導致 FR 壓力值總是大於 AR；然而，在此高流量實場廢液 IPA 的情形下，因為高流量的緣故，廢液難以被汽化而且 FR 內的惰性載氣流量僅有 1 L/min，再加上 FR 佈風口下端基於反應器設計的限制並沒有鑲入加熱爐體

內，導致汽化後的廢液凝結在佈風口下端後再慢慢地受熱汽化，再由低流量的惰性載氣至 FR 內(拆反應器時，因為可以從佈風口下端發現有積碳的情形發生，所以更能判定大部分汽化後的廢液凝結至此)，氣體與載氧體碰撞緩和而使 FR 壓力值低於 AR 壓力值。

雖然還是會有些許的積碳情形發生，而且卸料後經由 EDX 分析發現載氧體表面有仍 1%的 C，不過整體而言還是能流體化且非常的穩定沒有卡管的情形發生，且壓力值仍然在預期範圍之內。

表 1　實場廢液 IPA 高流量下流量設定

系統溫度℃	FR/LS/AR (L/min) 25℃	廢液流量 (mL/min) 25℃	廢液流量 (L/min) 系統溫度	功率(W)
850	1 / 3.5 / 4.5	4.5	28.4	1186
900	0.96 / 3.35 / 4.31		29.7	
950	0.92 / 3.22 / 4.14		30.96	

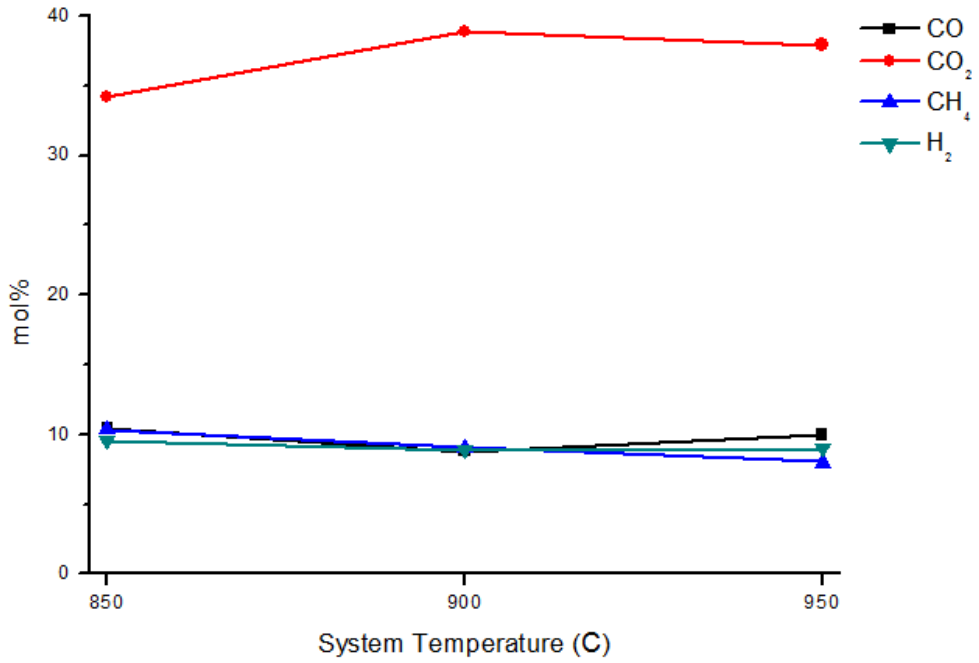


圖 2　FR 內高流量實場廢液 IPA 不同溫度尾氣分析

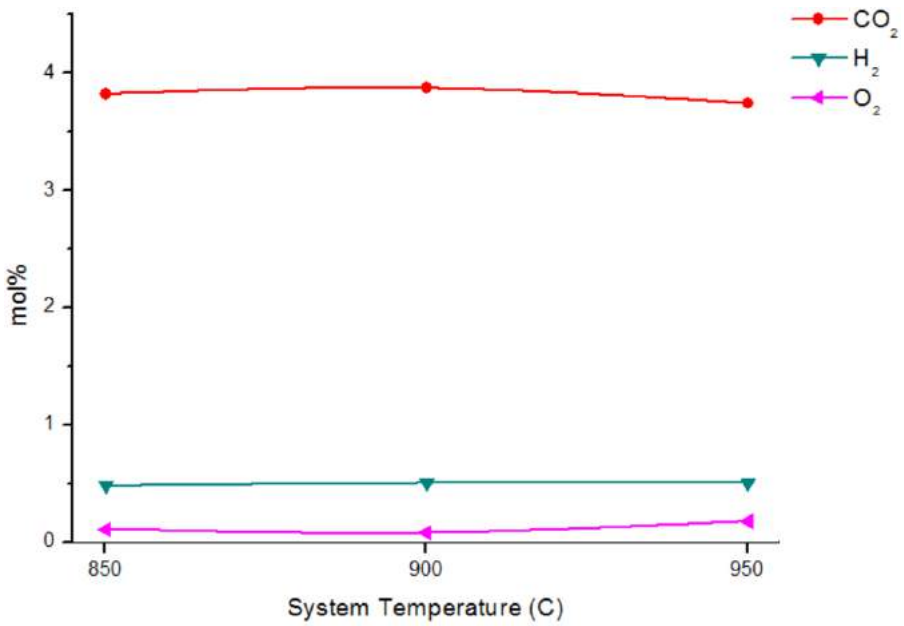


圖 3　AR 內高流量實場廢液 IPA 不同溫度尾氣分析

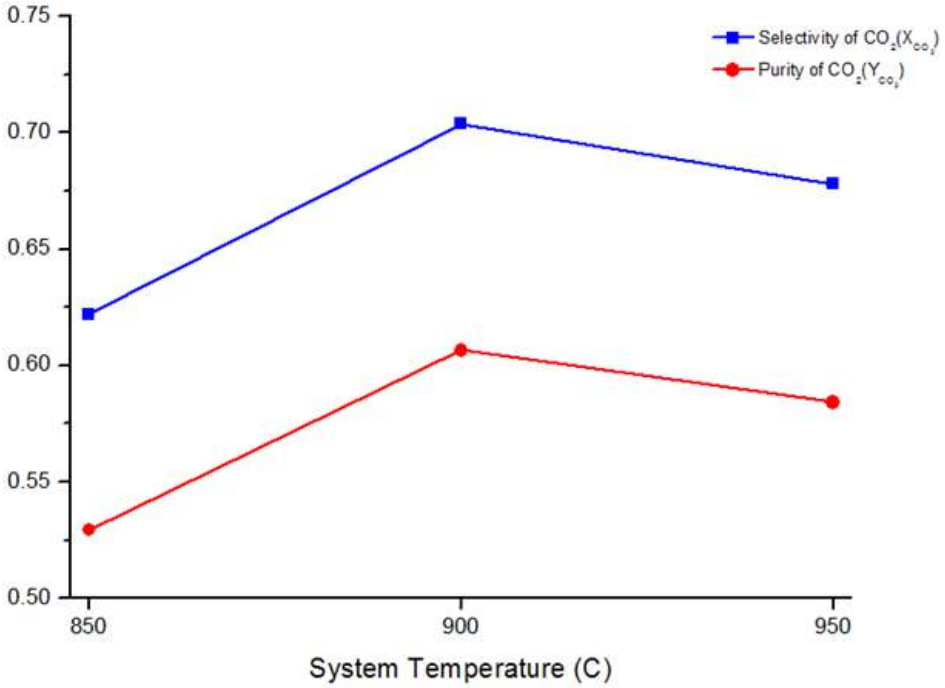


圖 4　高流量實場廢液 IPA 不同溫度 CO_2 純度與選擇率關係

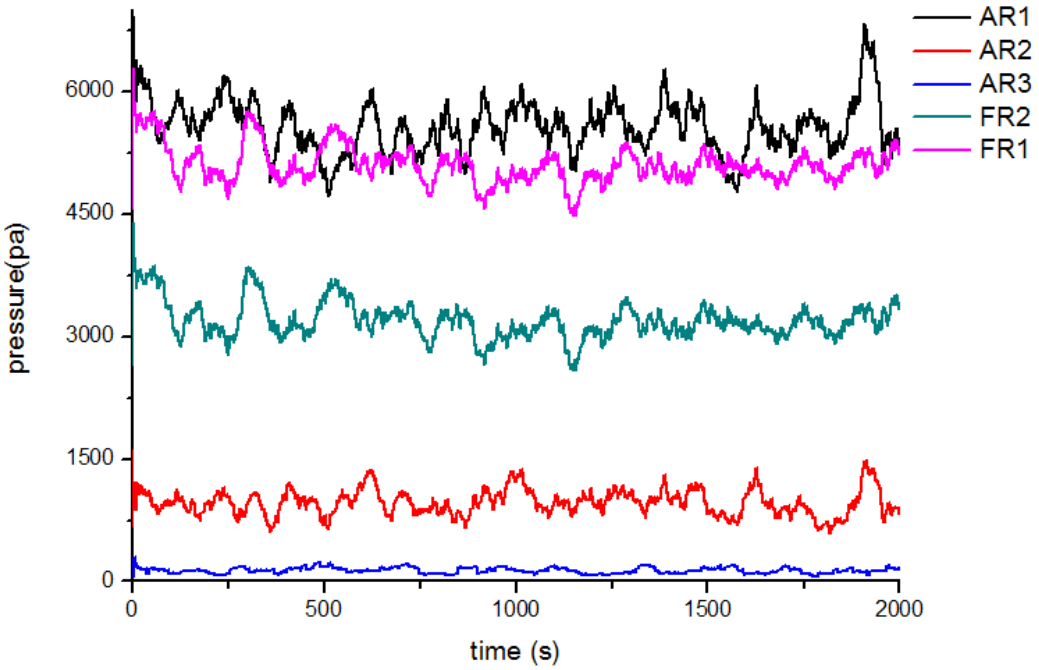


圖 5　交聯式流體化床-壓力值趨勢, IPA4.5 FR5 LS3.5 AR4.5 850℃

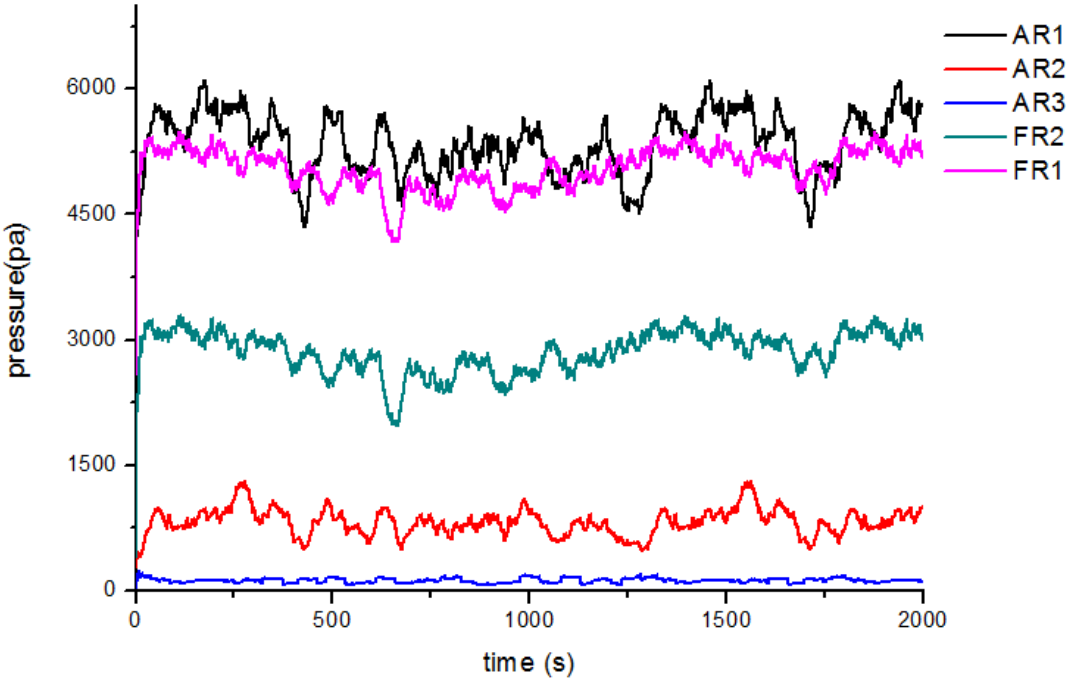


圖 6　交聯式流體化床-壓力值趨勢, IPA4.5 FR4.8 LS3.35 AR4.31 900℃

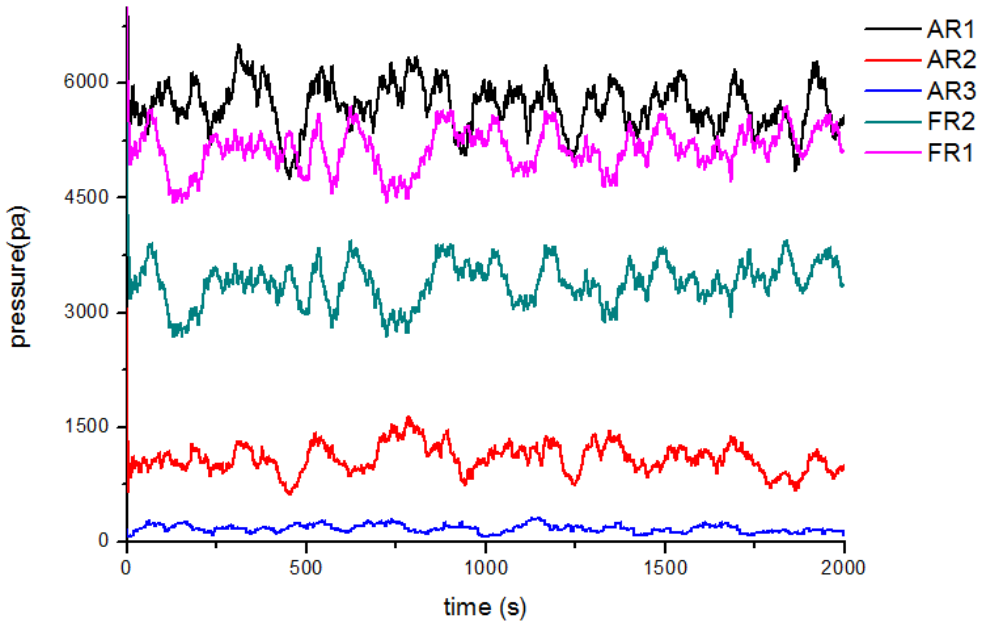


圖 7　交聯式流體化床-壓力值趨勢, IPA4.5 FR4.6 LS3.22 AR4.14 950℃

在實場廢液 EKC 的部分，由圖 8 可知，FR 的出口濃度以 CH_4 為例，一樣也是隨著溫度的上升，增加熱裂解的效果而使其出口濃度下降且溫度在 900℃-950℃比 850℃-900℃熱裂解效果大幅顯著許多，900℃對於 CH_4 來說是一個轉折點溫度，雖然被稀釋過後的實場廢液 EKC 含水率高達 80%，其含碳濃度低於實場廢液 IPA，不過在燃料高流量進料的情況下仍然有許多的碳氫化合物需要被熱裂解，但是到了 950℃幾乎都沒有 CH_4 出口濃度，可見熱裂解效果非常良好，所以在此亦能應證溫度越高對於 CH_4 的熱裂解效果越好，適合 CH_4 與載氧體反應。

關於 H_2 出口濃度的部分，可以發現 CH_4 在 950℃時幾乎都被熱裂解完全，因此產生高濃度的 H_2，但如同前幾節所說，滯留時間的不足、反應器的設計與載氧體的反應性不足，仍然有許多部份的 H_2 無法被反應完全，因此可以發現 950℃時的 H_2 出口濃度比 900℃時來的高。

關於 CO 出口濃度的部分，如同前幾張所說，CO 的出口濃度受限於 CO_2 的生成、實場廢液 EKC 濃度與 CH_4 的熱裂解等三要素；可以發現 CO 出口濃度趨勢幾乎與 CH_4 雷同，不過在溫度 900℃-950℃比 850℃-900℃得出口濃度明顯低很多，一般而言會考慮到溫度越高有利於有機化合物(實場廢液 EKC 與 CH_4)的熱裂解而產生更多的 CO，不過因為溫度越高有利於 CO 與鐵系載氧體的反應性，促使大量的 CO 氧化成 CO_2，且溫度到了 950℃因為 CH_4 的濃度極低，無法熱裂解產生多餘的 CO 所以大部分的反應為 CO_2 的生成大於 CH_4 的熱裂解，甚至其出口濃度低於 H_2；基於上述所言，CO_2 的出口濃

度則隨著溫度升高而提高，由 CO 與 CO_2 之間與溫度的關係亦可推論在 900℃後反應性急速提升且溫度越高，甚至到 950℃對整體的反應越好。

AR 的出口濃度由圖 9 可知，基於上述所言因為實場廢液 EKC 含水率由 38%被稀釋至 80%的緣故，有機化合物含碳量大幅降低，則促使 O_2 需求量也大幅減少亦使 AR 的 O_2 出口濃度大幅提升，不過因為實場廢液 EKC 在燃料高流量進料的情況下與低流量相較起來含碳量多，所需 O_2 量也較多，所以 AR 的 O_2 出口濃度較低大約 8%-10%區間左右，溫度的升高使 AR 段的還原態載氧體耗氧加劇，O_2 出口濃度隨之下降，不過也可得知此次實驗成功流體化運行。

至於 CO_2 與 H_2 的產生也跟前幾張敘述相同，CO 與 CH_4 由 FR 的料退串混至 AR 出口端的過程中熱裂解以及與 H_2O 最終都反應成 H_2 和 CO_2，不過本實驗與實場廢液 IPA 相較起來，AR 內 O_2、CO_2 與 H_2 的出口濃度都明顯較低，乃因於稀釋後實場廢液 EKC 的含碳量較低的緣故。

關於 CO_2 選擇率與純度的部分，由圖 10 可知，一樣 CO_2 選擇率也是隨著溫度的提升而升高，不過特別的事情是 CO_2 選擇率隨溫度的上升幅度非常的大，可以發現溫度 850℃下選擇率由原本 52%到了 950℃下選擇率可高達約 80%左右，在高流量的情況下選擇率還可以這麼高甚至高於前一節的實場廢液 IPA，可見溫度效應對於實場廢液 EKC 影響甚大，這個結果更能再次映證實場廢液 EKC 容易與載氧體反應，不過很難燃燒、不產生積碳，所以若已達成流體化的條件下，處理實場廢液 EKC 的重點為燃燒為主，反應為輔，反應溫度適合越高越好；而 CO_2 純度可發現，隨著溫度升高而提高與選擇率趨勢成正比，上升幅度也很大，原因為實場廢液 EKC 為慢慢汽化快速與載氧體反應，產生高濃度的 CO_2 與低濃度的 H_2，所以本實驗 CO_2 純度亦與選擇率成正比且又因前面溫度效應的敘述所影響，其 CO_2 純度隨著溫度的上升幅度也極大。

關於壓力值趨勢的部分，如圖 11-13 所示，圖形波動起伏不大、顆粒之間碰撞不多、系統內沒有堵塞，其趨勢就像 plug flow 般的很順暢達成流體化為 Smooth Fludization，不過最後都有達成流體化且系統內沒有堵塞的情發生，特別的情形為 FR1 的部分，可以發現其壓力值略低於 AR1，此說明了 FR 內的底端部分流體化運行沒有 AR 底端還來的旺盛，理論上當高流量實場廢液 EKC 的 FR 內部氣體流量遠大於燃料低流量進料的情形時，其 FR 內的壓力值應該要比較大，但實際上卻不然，估計跟前一節所敘述的液體慢慢汽化有關，因為最後在佈風板的表面和進料口的部分依舊可以發現有些微的碳粒，說明了慢慢汽化造成積碳的情形發生；壓力值的趨勢是判斷內部流

體化情形最直接的根據，整體而言壓力值的部分都符合表 所敘述的壓力跳動區間內，所以都成功達成了流體化條件，況且最後將載氧體卸料的時候，可以發現 AR 部分的載氧體依舊是氧化態的紅色，LS 部分則是有還原態與氧化態的黑色與紅色，FR 的部分則都是還原態的黑色，此也證明了系統內有流體化。

表 2　實場廢液 EKC 高流量下流量設定

系統溫度℃	FR/LS/AR (L/min) 25℃	廢液流量 (mL/min) 25℃	廢液流量 (L/min) 系統溫度	量測功率 (W)
850	1 / 3.5 / 4.5	4.5	24.84	473
900	0.96 / 3.35 / 4.31		25.97	
950	0.92 / 3.22 / 4.14		27.05	

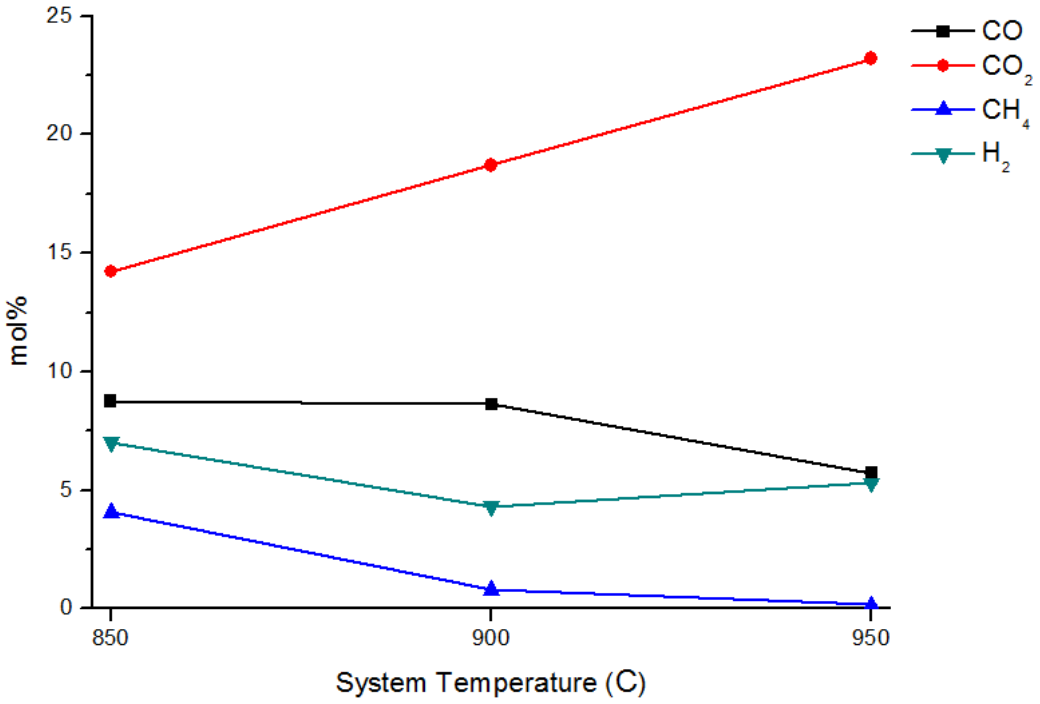


圖 8　FR 內高流量實場廢液 EKC 不同溫度尾氣分析

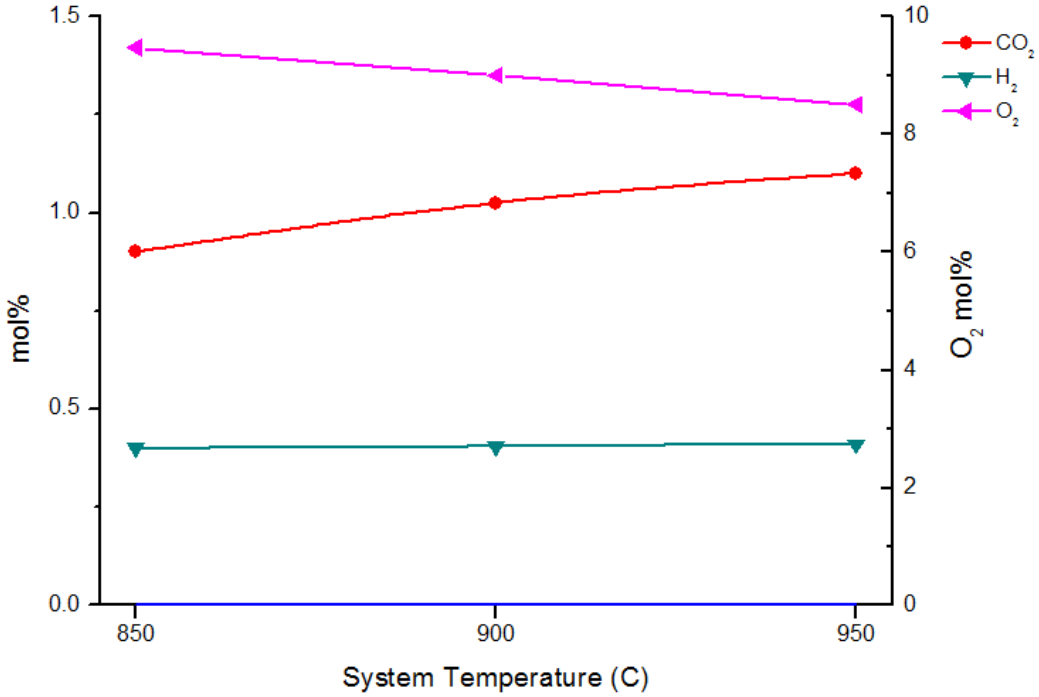


圖 9　AR 內高流量實場廢液 EKC 不同溫度尾氣分析

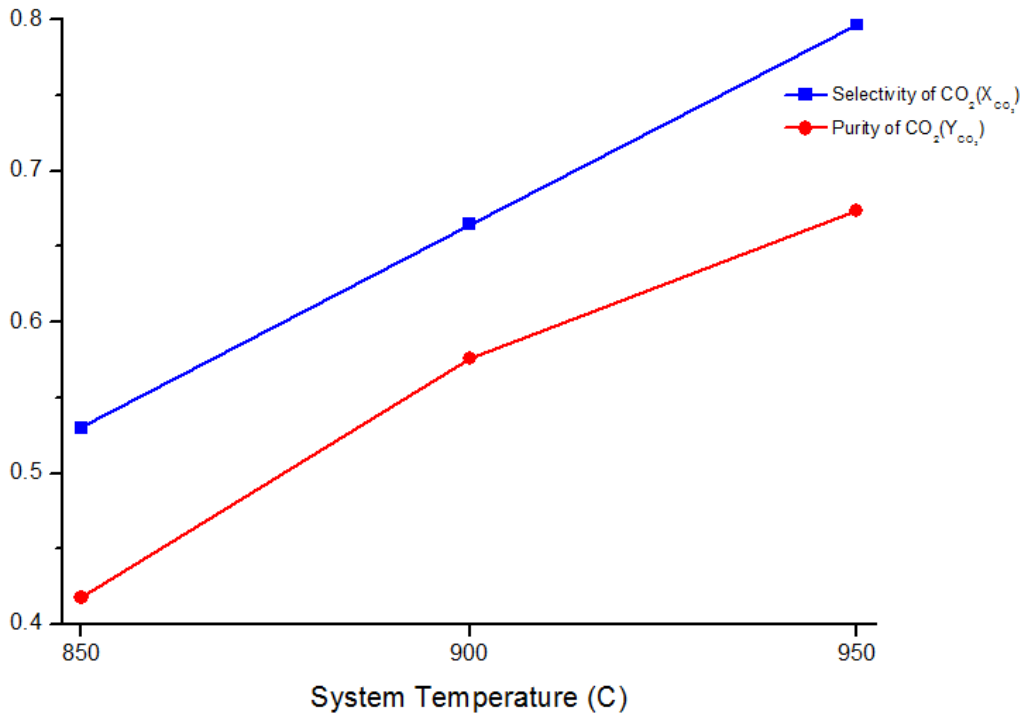


圖 10　高流量實場廢液 EKC 不同溫度 CO_2 純度與選擇率關係

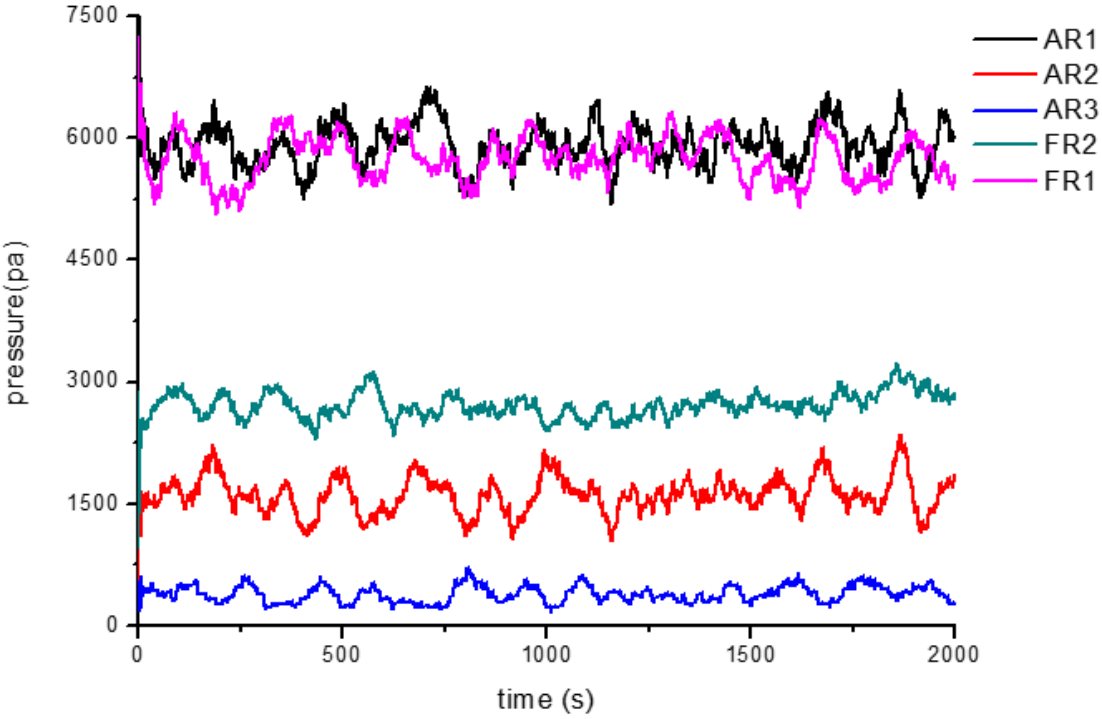


圖 11　交聯式流體化床-壓力值趨勢, EKC4.5 FR1 LS3.5 AR4.5 850℃

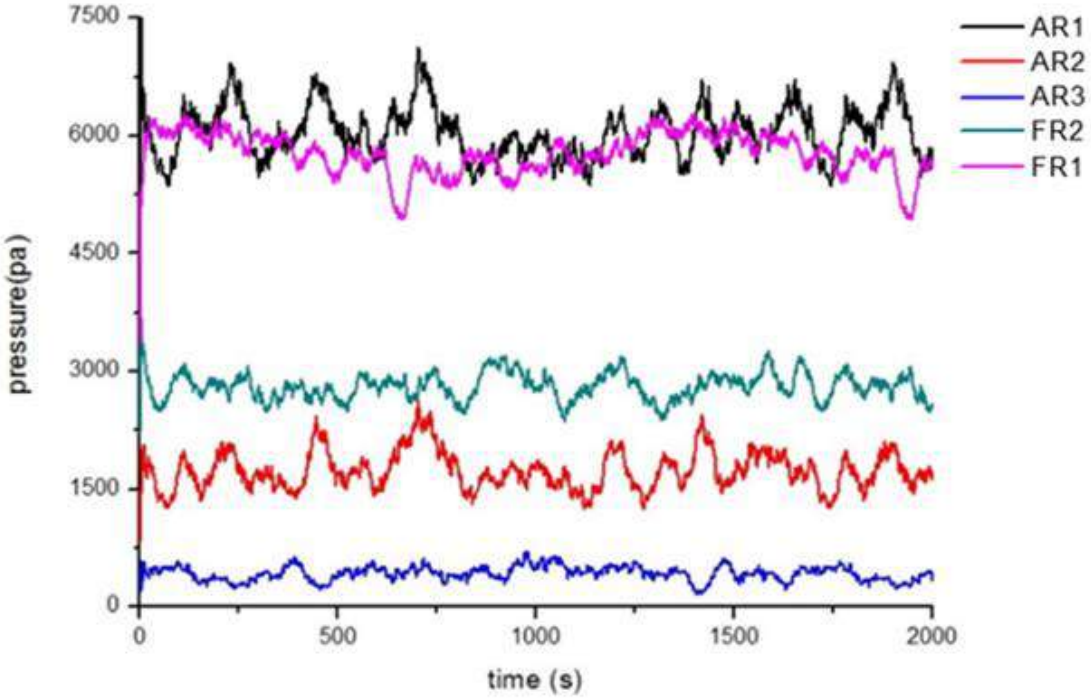


圖 12　交聯式流體化床-壓力值趨勢, EKC4.5 FR1 LS3.35 AR4.31 900℃

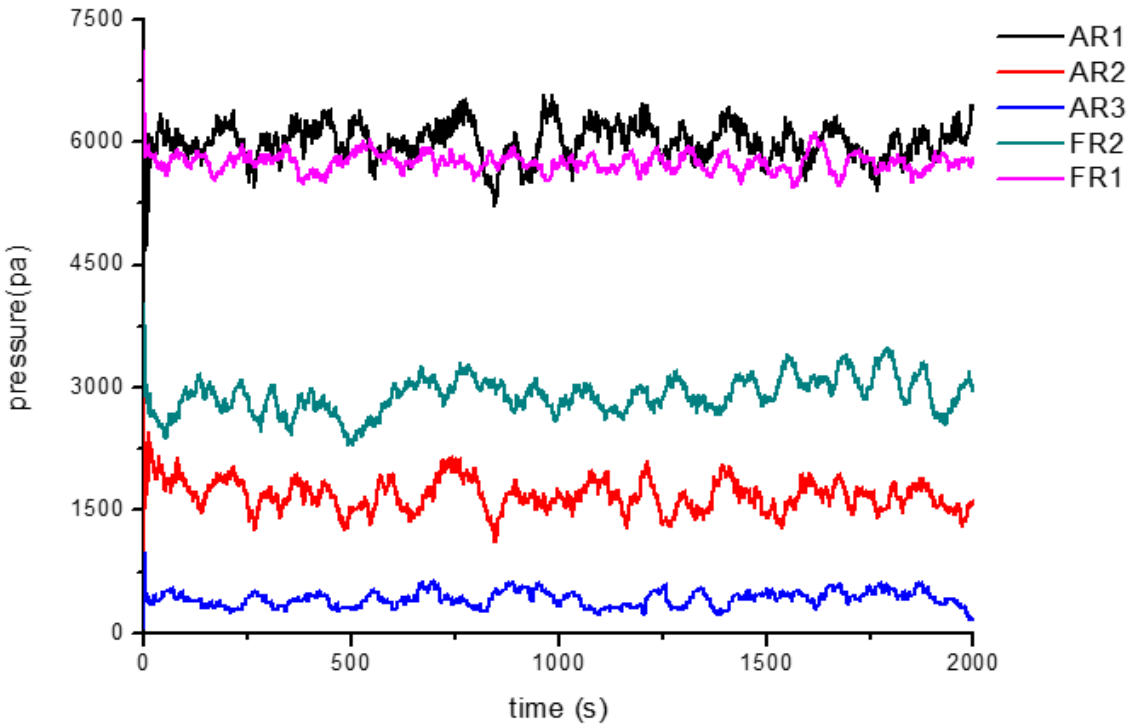


圖 13　交聯式流體化床-壓力值趨勢, EKC4.5 FR1 LS3.22 AR4.14 950℃

四、結　論

因應市場需求，本研究主要以實場廢液 IPA 與 EKC 為燃料於交聯式流體化床進行化學迴圈燃燒程序，篩選用粒徑 0.177-0.297mm 的 2.7-3kg 的澳洲天然鐵礦為載氧體運行，可降低載氧體製造成本，透過系統優化操作之方式提升氣體燃料轉化能力。結論一一列表如下:

1. 以實場廢液 IPA 為燃料進行化學迴圈燃燒程序，其 CO_2 選擇率以及純度可達 70%與 60%。
2. 以實場廢液 EKC 為燃料進行化學迴圈燃燒程序，其 CO_2 選擇率以及純度可達 80%與 65%。
3. 汽化後的實場廢液在 FR 內多半為進行熱裂解，少部分進行氧化反應。
4. 因為有 FR 內為大量的氣泡型態產生，快速上升至 FR 上方不易與載氧體進行反應。
5. 因為廢液汽化不完全，在本系統下仍然需要 N_2 為媒介進行流體化。
6. 一直以來 FR 內的氣體都會經由料腿串混至 AR 出口端，估計是旋風分離器的隔絕有限。

7. FR 底端總會有一些載氧體無法被流化，最終至 FeO 或 Fe，估計是佈風板的設計以及幾何形狀影響流體化的運行關係。
8. 液體燃料以高流量的情況下，其流體化情形並沒有如同氣體燃料流體化順暢，其情形可能與預熱溫度與保溫效果不足導致液體慢慢汽化有關。
9. 以實場廢液 IPA 為燃料，其 AR 的氧氣值區趨近於 0，若加大 AR 空氣流量，也不會改善，最後會造成 FR 內堵塞，無法流體化因而系統卡住，估計是反應器整體的設計上限。
10. 實驗室級的旋風分離器只適合小流量流體化操作，若加大流量 FR 內會產生 Slugging，最後卡管無法流體化。

五、參考文獻

1. C. Dong, X. Liu, W. Qin, Q. Lu, X. Wang, S. Shi, and Y. Yang, "Deep reduction behavior of iron oxide and its effect on direct CO oxidation," *Applied Surface Science,* vol. 258, no. 7, pp. 2562-2569, 2012.
2. J. Zieliński, I. Zglinicka, L. Znak, and Z. Kaszkur, "Reduction of Fe2O3 with hydrogen," *Applied Catalysis A: General,* vol. 381, no. 1-2, pp. 191-196, 2010.
3. O. Nordness, L. Han, Z. Zhou, and G. M. Bollas, "High-Pressure Chemical-Looping of Methane and Synthesis Gas with Ni and Cu Oxygen Carriers," *Energy & Fuels,* vol. 30, no. 1, pp. 504-514, 2016.
4. Deepak Kulkarni, Israel E. Wachs, "Isopropanol oxidation by pure metal oxide catalysts number of active surface sites and turnover frequencies."
5. J. Bedia, J. M. Rosas, D. Vera, J. Rodríguez-Mirasol, and T. Cordero, "Isopropanol decomposition on carbon based acid and basic catalysts," *Catalysis Today,* vol. 158, no. 1-2, pp. 89-96, 2010.
6. P.-C. Chiu, Y. Ku, H.-C. Wu, Y.-L. Kuo, and Y.-H. Tseng, "Spent Isopropanol Solution as Possible Liquid Fuel for Moving Bed Reactor in Chemical Looping Combustion," *Energy & Fuels,* vol. 28, no. 1, pp. 657-665, 2014.

電子業面對氣候變遷風險之調適行動-以南部某汽車電子控制設備商為例

張銘城*、林群燁*、王登楷**

摘　要

近年來，氣候變遷對人們威脅愈顯加劇，不僅威脅生命與資產安全，更影響企業生產運作、原物料成品輸送，為現今企業永續經營所必須面對的課題。為降低氣候變遷所帶來衝擊，企業必須檢視所面對的氣候風險，評估其潛在危害，進而採取相對應的「調適」行動計畫，提升受災與復原能力，以降低氣候變遷之威脅。

本研究以南部某汽車電子控制設備商為例，協助成立調適管理小組，採 TaiCCAT 支援決策系統六大步驟與 ISO 31000 風險管理標準建立調適管理程序，並定期檢視修正。透過此套機制進行風險辨識與分析，考量產業特性與地理區位後，掌握主要潛在風險為「淹水」一項，並盤點出包含製程設備、變電站等 9 項設施屬高風險項目，發生機率高且受損程度大，可能造成設備故障損壞、嚴重甚至中斷生產數月，對企業帶來莫大損失，因此列為優先改善項目，並規劃所對應的調適行動，以「執行性」、「經濟性」、「有效性」三面向進行評估，作為廠商可採行之調適行動方案。

【關鍵詞】風險分析、危害度、脆弱度、暴露度、調適行動計畫

---

*財團法人台灣綠色生產力基金會　工程師

**財團法人台灣綠色生產力基金會　經理

一、前　言

氣候變遷帶來影響是不分國界的，近年臺灣降雨呈現時空分布不均，在單位時間降雨強度愈來愈大而帶來水患，降雨時間過於集中某些時節而引發缺水問題，洪旱現象愈為分明下，大幅威脅人們生命與財產的安全，產業亦可能受災害直接衝擊或供應鏈中斷，以致無法正常營運。

為降低產業受氣候變遷衝擊造成營運中斷而蒙受損失，本研究協助產業進行氣候變遷風險評估、針對高風險項目加以因應，擬訂相關調適行動計畫降低風險，而能永續經營。

本研究以台灣南部地區某汽車電子控制設備商為評估對象，產品包含車身控制系統、引擎管理系統、全車電子產品控制模組等，主要出口供國際一線車廠使用，產品具高附加價值，因此相當關注其營運風險。

二、執行方法

本研究以台灣 TaiCCAT 支援決策系統為依據，並參酌 ISO 31000 風險管理系統之風險分析架構，建構本研究調適管理程序，其說明如下。

2011 年國科會提出氣候變遷調適科技整合研究計畫，推出「臺灣氣候變遷調適科技知識平台」，將國內外調適研究成果轉化為實際應用工具，供各使用者瞭解而能採取調適作為以因應氣候變遷衝擊。其主要應用工具為「TaiCCAT 支援決策系統(Taiwan integrated research program on Climate Change Adaptation Technology)」，藉由六大步驟協助使用者制定合宜的調適行動計畫，其步驟如圖 1 所示。

由於調適議題牽涉廣泛且複雜，「TaiCCAT 支援決策系統」從使用者角度設計六大執行步驟，以循環式流程檢視成效，能讓各使用者(包含一般民眾)可簡易操作為其特色，然而部分步驟略為簡化，廠商無法明確掌握操作方式，因此本研究與廠商溝通後，依廠商實際需求進行調整。本研究確認廠商地理環境、生產模式、設備位置、營運狀況，以「TaiCCAT 支援決策系統」為依據進行調整，設計適用於產業之調適管理程序，其對照表如表 1 所示，並說明如下。

資料來源：台灣氣候變遷調適科技知識平台

圖 1　「TaiCCAT 支援決策系統」六大步驟

表 1　本研究風險架構與 TaiCCAT 支援決策系統對照

TaiCCAT 支援決策系統	本研究調適管理程序架構
1.界定問題與設定目標	1.組織建立與目標設定
2.評估與分析現況風險	2.風險評估
3.評估與分析未來風險	
4.界定與評估調適選項	3.調適行動計畫擬定與可行性評估
5.規劃與執行調適路徑	4.調適行動計畫執行
6.監測與修正調適路徑	5.監測與修正

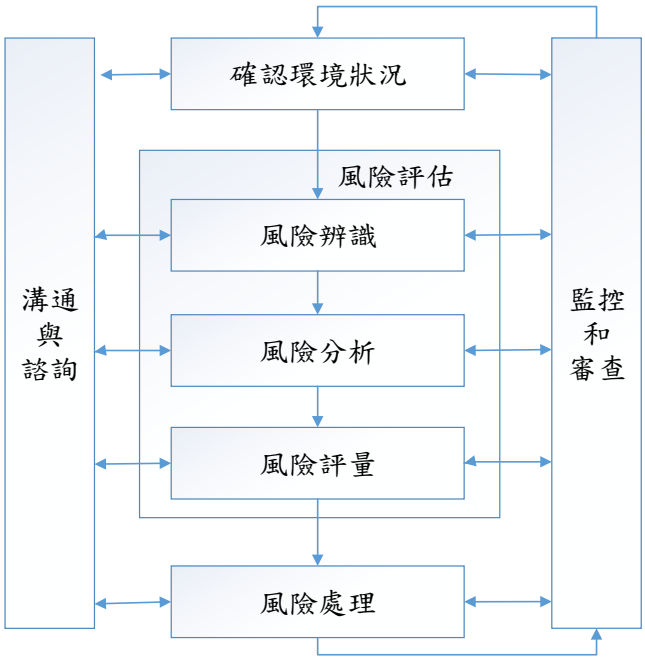
1.組織建立與目標設定

調適管理小組成立是廠商正視氣候變遷衝擊之首要工作，目標是找出高風險項目以降低營運中斷風險，因此透過管理高層出面宣示執行風險評估、調適管理之承諾，各部門需跨部門溝通且提供所需人力、資源、技術等。成立調適管理小組後，須對廠區所處環境區域與關鍵設備進行調查，包含地勢、水文等區位環境、製程設備分布、原物料及產品供應鏈運送路線等。

2.風險評估

本研究參酌 ISO 31000 風險管理系統之風險分析架構(如圖 2 所示)，

將風險評估主要分為風險辨識、風險分析及風險處理三階段。氣候風險因子包含淹水、乾旱、高溫等數十項，透過風險辨識篩選出會對廠商有顯著影響的氣候因子，再投入資源進行風險分析，以上需瞭解過去氣候災害衝擊與未來氣候變遷潛勢，作為風險辨識之參考依據，並進行後續風險分析。



資料來源：彭金玉(2009)

圖 2　ISO 31000 風險管理流程架構

本計畫以政府間氣候變遷專門委員會(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)於 2012 年推出 SREX 報告與 2014 年第五次評估報告(AR5)對於風險評估定義，將風險(Risk)歸納為危害度(Hazard)、脆弱度(Vulnerability)及暴露度(Exposure)之乘積，如圖 3 所示。危害度為氣候變遷導致之氣候特性變化衝擊、脆弱度為系統面臨氣候變遷危害所造成的影響程度、暴露度為災害可能影響的對象，以敏感度與回復期進行考量。

圖 3　風險計算公式

TaiCCAT 對敏感度定義為暴露於威脅下的範圍與大小，其影響可能為直接或是間接性，即廠區營運受到氣候變遷衝擊之直/間接影響程度。本研究為確切掌握各類天然災害潛勢所影響範圍與程度，分別從資產、製程、人員、供應鏈及財務等 5 類衝擊面向進行探討，其面向說明如表 2 所示。TaiCCAT 對回復力定義為在組織遭遇氣候變遷負面衝擊下可消弭程度，以及衝擊後可回復至系統原有功能能力，本計畫與廠商溝通後，以回復至基本營運所需時間進行衡量，以利廠商理解以進行後續評估，所以本計畫以回復期取代回復力一詞。

表 2　敏感度面向定義說明

敏感度面向	定義說明
資產	1.指有形的硬體設備受損程度，如建物及附屬設施、設備機台、運輸工具等 2.資產設備修復至原營運水準所需之費用
製程	天災影響產品生產中斷或產量降低
人員	人員安全或人力管理調整，包含人員因天災受傷情形及人力調度情形
供應鏈	指原物料供應與產品銷售之物流、維生管線(自來水、電力)等
財務	1.產品與原料降級造成的損失 2.為因應災害增加的用水、用電或用人，使得製造成本上升

透過風險矩陣方式呈現風險分析結果，其結構是整併危害-脆弱度矩陣與脆弱度矩陣。危害-脆弱度矩陣是呈現氣候變遷物理面衝擊，對危害度與脆弱度各設定準則給予分數，其乘積為風險矩陣橫軸；暴露度矩陣是呈現氣候變遷衝擊對廠商影響程度，將其敏感度、回復期各設定準則給予分數，其乘積可作為風險矩陣縱軸，如圖 4 所示。

風險矩陣愈靠近右上角部分表示風險程度愈嚴重，與左下角則愈輕微，依嚴重程度分為極低風險(VL)至極高風險(VH)五類，將各關鍵設備受氣候變遷衝擊之風險程度以風險矩陣呈現，可讓廠商易於理解所面對之風險程度，並考量在有限資源下，針對高風險項目優先擬定調適行動計畫因應，各類風險程度所進行相關因應說明如表 3 所示。

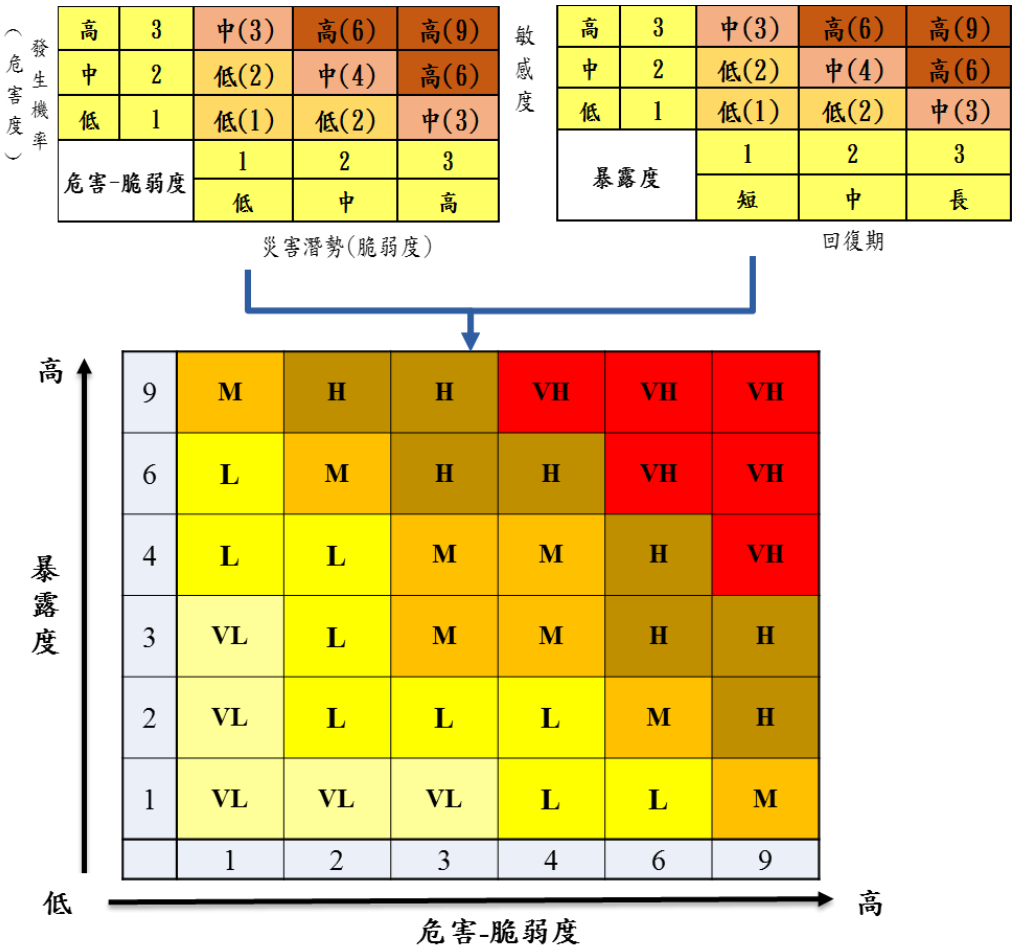


圖 4　風險矩陣圖

表 3　各類風險因應建議

風險程度	因應建議
極高 風險(VH)	❖發生機率極高且受損程度極大 ❖最優先處理，應立即投入資源進行改善
高度 風險(H)	❖發生機率高且受損程度大 ❖次優先處理，需訂定計畫安排改善
中度 風險(M)	❖發生機率中等且受損程度中等 ❖擬定相關行動計畫，基於預算等考量可逐步改善，並由相關部門持續監控
低度 風險(L)	❖發生機率與受損程度不高 ❖可暫不處理，但要確保現有防護措施之有效性
極低 風險(VL)	❖發生機率極低且受損程度極低 ❖可不處理，需定期確認評估環境是否有所變化

3.調適行動計畫擬定與可行性評估

廠商在現有時間限制與可運用資源考量下，可針對極高風險與高度風險項目優先提出調適行動計畫，以降低未來氣候衝擊的損失。對所提出各項行動計畫，可由「執行性」、「經濟效益」及「有效性」進行可行性評估，其說明可參閱表 4，以初步瞭解各方案執行之難易，確認其執行之優先順序。

表 4　調適行動計畫可行性評估定義說明

	低	高
執行性	不易發揮及執行，發展性較小	容易發揮及執行，具發展性
經濟效益	具有較低的成本，包括執行、營運及維護成本	具有較高的成本，包括執行、營運及維護成本
有效性	解決風險潛力低或未知	解決風險潛力高

4.調適行動計畫執行

完成各行動計畫可行性評估後，管理階層應將具高執行性之調適行動計畫納入後續公司營運規劃，編列預算、整合相關資源、與相關部門溝通利於後續執行，以降低氣候變遷衝擊並減輕產業所面對的風險。

5.監測與修正

每年須定期檢視調適行動計畫執行成效，掌握其執行進度，若已完成，則進行評估原有風險是否有所降低，後續則持續監測；若尚未完成或成效不佳，評估是否還需相關資源投入，確認所遭遇的困難並提出改善，以進行調整修正。另外，對於中度風險以下的項目雖未提出調適行動計畫進行改善，亦須定期監測掌握其狀況。

三、風險分析

本研究以台灣南部地區某汽車電子控制設備商為對象，由於產品具高附加價值，主要出口供國際一線車廠使用，因此相當關注其營運風險，所執行調適管理程序說明如下：

1.組織建立與目標設定

廠商成立調適管理小組，將調適管理列為企業營運管理目標之一，展現對氣候變遷風險評估與調適管理之重視，以降低營運風險。調適管理小組由廠長擔任調適管理代表，以利組織內部有效推動，包含跨部門整合與

溝通，提供人力、物力、技術等相關資源；執行祕書則為調適管理小組內部維繫溝通、評估之負責人，亦是對外聯絡窗口；各單位為推動小組成員，須配合執行祕書執行各類風險評估與調適行動計畫擬定。

成立調適管理小組後，進行廠區地理區位檢視與關鍵設備調查。廠區座落於台灣南部某加工區內，距海岸線約 5km，海拔高度約 24 公尺，北有溪流由東向西彎流，旁有國道一號交流道，交通便利。廠區主要製程設備、資訊機房位於 1 樓，機台離地面約 20 公分高；倉儲區存放則依貨架高低不同；變電站則位於地下室，並無相關抽水設備；緊急發電設備僅有消防用途之發電機。並調查廠區排水系統設置、避雷設備分布、原物料及產品供應鏈運送路線，確認每個影響廠區營運之環節皆納入評估。

2.風險評估

風險評估包含風險辨識、風險分析及風險處理三大部分，如下說明：

(1)風險辨識：

過去曾發生過的氣候災害，未來仍有可能再度發生，又氣候變遷日趨嚴重，廠區過去未曾發生過的氣候災害，未來可能帶來威脅，因此需瞭解廠區過去遭遇災害，並掌握未來災害發生潛勢資訊。

經初步評估，廠區周遭無山坡地且距海岸一段距離、製程上不需用水、不需海水冷卻、不受低溫影響等，因此可初步篩除坡地災害、供水中斷(濁度過高)、海(水)溫上升、寒流、海岸侵蝕與臨海地區淹沒等六項風險類別。

再對廠商之資產/製程/生產設備與維生管線類別進行評估，其重點設備或營運活動可能受淹水、乾旱、高溫、鹽害腐蝕、雷擊及強風等衝擊，衝擊影響整理於表 5，以作為後續分析對象。

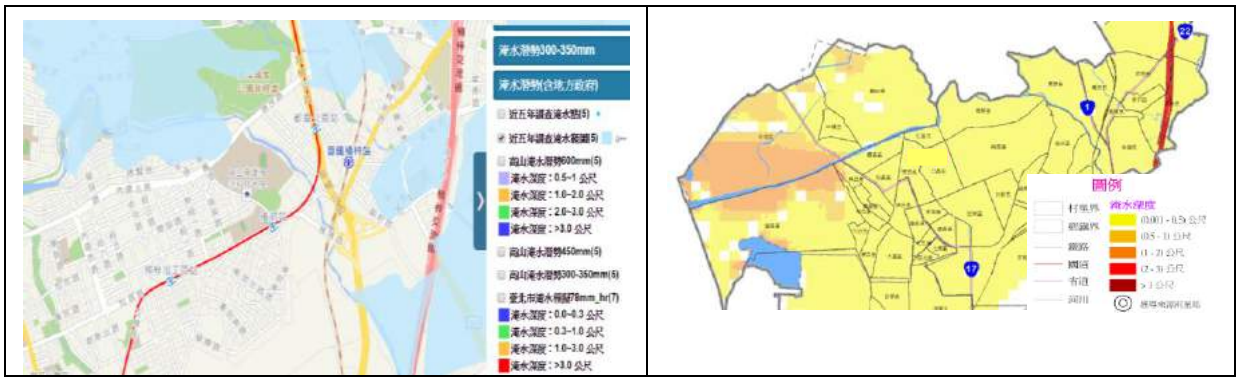
表 5　辨識氣候衝擊風險所影響重點設備或活動表

分類項目	重點設備或活動	降雨強度變化		氣溫上升			強風
		淹水	乾旱	高溫	鹽害腐蝕	雷擊	
資產/製程/生產設備	A 處理設備	✓	✘	✓	✘	✘	✘
	B 加熱設備	✓	✘	✓	✘	✘	✘
	C 處理設備	✓	✘	✓	✘	✘	✘
	原物料存放區	✓	✘	✘	✘	✘	✘
	空調設備	✓	✓	✓	✘	✘	✘
	資訊機房	✓	✘	✘	✘	✓	✘
維生管線	電力供給(含變電站)	✓	✘	✘	✓	✓	✓
	供水系統	✘	✓	✘	✘	✘	✘
	交通運輸	✓	✘	✘	✘	✘	✘

(2)風險分析

風險定義為危害度、脆弱度及暴露度之乘積，本研究將危害度、脆弱度及暴露度皆予以準則設定，而能將風險量化，讓廠商可進行比較。所評估的風險類別包含淹水、乾旱、高溫、鹽害腐蝕、雷擊及強風等六項，由表 5 可知淹水所影響設備、活動最為廣泛，因此以淹水為範例進行風險評估說明。

首先，調查過去歷史淹水紀錄，並取得不同降雨量下之淹水潛勢圖作後續情資判斷。依國家災害防救科技中心調查，廠商所在區位一帶過去五年並無淹水紀錄，然而周遭區域如園區大門、火車站周遭皆有淹水紀錄發生。經濟部水利署利用此區域之氣象站降雨資訊進行模擬，可得到此區域於 100 年重現期下始有淹水潛勢，深度可達 0.5 公尺，如圖 5 所示。



資料來源：國家災害防救科技中心災害潛勢地圖網站、經濟部水利署防災資訊服務網

圖 5　歷史淹水調查(左圖)與 100 年重現期下淹水潛勢(右圖)

調適管理小組掌握以上圖資資訊，將氣候變遷可能危害這抽象的概念可透過圖資「具象化」呈現，讓小組成員能在此情境下明確討論，以設定危害度、脆弱度及暴露度之分級準則。以淹水脆弱度為例，參考氣象局於 104 年 9 月所頒訂的雨量分級標準，依日降雨量規模可分為豪雨(200mm~350mm)、大豪雨(350mm~500mm)及超大豪雨(超過500mm)三類作為脆弱度之分級標準；危害度與暴露度部份，調適管理小組依上述圖資，共同討論不同發生機率下應展開何種管理機制，以及設備資產之在不同影響程度下之因應，而訂出對應之分級標準。

完成分級後即可評估目前廠商可能受災影響，再以淹水脆弱度為例說明給分方式，依廠區周遭氣象站近年資料，年平均雨量為1,724.3mm，藉由農委會推出水土保持技術規範之降雨強度公式進行推估，在 100 年重現期下，日降雨量約為 467mm，對照脆弱度分級標準屬大豪雨等級，脆弱度為中度等級，分級給 2 分。

需注意的是，危害度與脆弱度之分級標準需依不同氣候因子進行調整，包含考量此災害發生頻率、發生規模程度是可量化說明，讓廠商人員可明確給予評分，而暴露度部分是對廠商重點設備或活動之衝擊，所以適用於各氣候因子。

(3) 風險評量

將各重點設備或活動之風險分析結果以風險矩陣方式呈現，如圖 6 所示，各衝擊項目對照其風險程度與因應方法整理於表 6。分析結果並無極高風險項目，有 9 項高度風險皆為淹水所致，在 A 處理設備、C 處理設備、B 加熱設備、資訊機房及變電站於資產與製程兩面向受到影響，建議廠商應優先處理。

其餘影響項目為高溫、乾旱等氣候因子，多歸類於低度風險與極低度風險兩類，考量發生機率低且受損程度不大，在資源有限下，僅需定期檢視，確認環境是否有所變化即可。

高 (受損程度)						
9	M	H 1,2,3,4,5,6, 10,11,12	H	VH	VH	VH
6	L	M	H	H	VH	VH
4	L	L	M	M	H	VH
3	VL	L 7	M	M	H	H
2	VL	L 13,14,22	L	L	M	H
1	VL	VL 8,9,19,20, 21,23,24	VL 15,16,25, 26	L 17,18	L	M
	1	2	3	4	6	9

低 危害度(發生機率) 高

圖 6　風險矩陣結果

表 6　風險分析結果一覽

風險程度	受衝擊項目	因應方法
極高風險 (VH)	無	發生機率極高且受損程度極大 最優先處理，應立即投入資源改善
高度風險 (H)	1：淹水/資產-A 處理設備 2：淹水/製程-A 處理設備 3：淹水/資產-B 加熱設備 4：淹水/製程-B 加熱設備 5：淹水/資產-C 處理設備 6：淹水/製程-C 處理設備 10：淹水/資產-資訊機房 11：淹水/資產-電力設施(變電站) 12：淹水/製程-電力設施(變電站)	發生機率高且受損程度大 次優先處理，擬訂計畫規劃處理
中度風險 (M)	無	發生機率中等且受損程度中等 提升相關行動計畫，由相關部門持續監控
低度風險 (L)	7：淹水/資產-原物料存放區 13：淹水/維生管線-交通運輸(產品銷售) 14：淹水/維生管線-交通運輸(原物料) 17：高溫/製程-生產設備 18：高溫/財務-空調設備 22：落雷/資產-維護-資訊機房	發生機率低且受損程度低 依一般作業方式處理
極低度風險 (VL)	8：淹水/財務-原物料存放區 9：淹水/資產-空調設備 15：乾旱/人員-空調設備 16：乾旱/供應鏈-用水-供水設備 19：落雷/資產-電力設施(變電站) 20：落雷/製程-電力設施(變電站) 21：落雷/製程-生產設備 22：落雷/資產-資訊機房 23：鹽害/製程-生產設備 24：鹽害/製程-資訊機房 25：強風/製程-生產設備 26：強風/製程-資訊機房	發生機率極低且受損程度極低 可不處理，需定期確認評估環境是否有所變化

四、調適行動計畫擬定與執行檢視

為避免營運中斷風險,廠商針對高風險項目擬定調適行動計畫以降低風險，對於所提出之計畫進行可行性評估，對具有可行性之計畫優先執行，後續加以檢視其執行成效。

1.調適行動計畫擬定與可行性評估

廠商考量在資源有限下，對高度風險項目列為優先改善項目，並提出多項調適行動計畫，製程設備部分,「門口設置防水閘門」最具可行性;「機台、原料堆放處墊高」在執行上有相當難度，因機台設備若有所移動可能影響良率，需進行調整與校正才能恢復;「廠區內外整體排水系統改善」牽涉廠區外路權、水權單位之整合，可能需政府單位進行協調，而非單家廠商可處理，且需投入大筆資金，因此非優先執行項目。

資訊機房可採「備援系統」,其執行性與有效性高，但需投入大筆資金於設備購置與維運，經濟效益較低。由於變電站設置於地下室，短期不太可能遷移，而「門口設置防水閘門」與「設置抽水機」投資資金相對不高，為最可行之方式。各調適行動計畫之說明與可行性評估內容整理於表 7。

表 7　調適行動計畫可行性評估

編號	氣候因子	受衝擊項目	衝擊說明	調適行動計畫	可行性評估		
					執行性	經濟效益	有效性
1 2 3 4 5 6	淹水	A 處理設備 B 加熱設備 C 處理設備	機台生鏽 電器短路 泥土或異物附著	1F 所有門口設置防水閘門	高	高	高
				機台、原料堆放處墊高	低	高	高
				廠區內外整體排水系統改善	低	低	高
1 0	淹水	資訊機房	設備無法運作	備援系統	高	低	高
1 1 1 2	淹水	電力設施(變電站)	地下室淹水,造成全廠停電	1F 所有門口設置防水閘門	高	高	高
				設置抽水機	高	高	高
				廠區內外整體排水系統改善	低	低	高

2.調適行動計畫執行與檢視

廠商完成調適行動計畫可行性分析後，將針對具可行性項目提出相關提案，包含經費規劃、資源運用、執行單位、執行期程等等，再由調適管

理代表核定，甚至需提報至總公司進一步確認，而能列為下一年度執行計畫。

未來需定期檢視調適行動計畫執行成果，確認計畫執行後風險是否可有效降低，可降至何種等級，若能有效降低風險，仍需持續納入監測機制中，若無法有效降低風險，則需修正原行動方案或另提其他行動方案進行改善。除此之外，評估其他尚未執行之調適行動計畫是否可克服原評估執行困難處，若能克服則納為後續推動改善之重點。

由於氣候變遷模擬目前仍有技術侷限、資訊不確定性，隨著未來技術突破，資訊更新，建議每 5 年至少進行 1 次風險評估，或廠區環境、生產製程所有改變時應進行評估，以降低極端氣候可能造成的潛在風險。

五、結論與建議

氣候變遷已為明確事實，其衝擊影響愈為嚴重，為降低氣候變遷導致營運中斷風險，企業莫不重視調適管理這項課題，然而企業普遍不知該如何著手進行評估與因應，因此透過此評估案例，望能提供給產業一評估典範，讓產業不僅致力於減緩外，更能重視調適管理。

本計畫輔導廠商成立調適管理小組，展現對調適管理的重視，並著手評估氣候變遷之營運風險，透過風險辨識、風險分析及風險處理等流程，掌握淹水為主要風險項目，據此提出「裝設防水閘門」等多項調適行動計畫，透過可行性分析供管理階層進行評估。

調適管理需納入企業管理一環，以下建議供企業進行執行評估之參考：

1. 調適管理是決策的一部份，透過風險矩陣所得風險評估、調適行動計畫可行性分析等資訊，提供給管理階層在資源有限下，瞭解各調適行動方案之差異，以決定執行之優先順序。
2. 風險評估具不確定性，調適管理小組需掌握此性質以進行評估。
3. 氣候變遷模擬目前仍有技術侷限與不確定性，隨著未來技術突破，資訊更新而調整，建議每 5 年至少進行 1 次風險評估，或廠區環境、生產製程所有改變時應進行評估。

六、參考文獻

1. 行政院經濟建設委員會(2012)。國家氣候變遷調適政策綱領。

2. 行政院農委會(2014)。水土保持技術規範。
3. 彭金玉(2009)。企業風險管理的指引-ISO 31000(風險管理系統)。環境與管理研究，10，1，19-31。
4. IPCC, (2012), Special Report-Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation (SREX).
5. IPCC,(2014),Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability, Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of theIntergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press.
6. 國家災害防救科技中心災害潛勢地圖網站 https://dmap.ncdr.nat.gov.tw/
7. 經濟部水利署防災資訊服務網 http://fhy.wra.gov.tw/fhy/
8. 臺灣氣候變遷調適科技知識平台 http://taiccat.ncu.edu.tw/intro/super_pages.php?ID=intro0

再生水廠能源管理與節能應用

何宗洋*、施武陽**

摘　要

鑒於台灣整體的水資源有限，再加上降雨分布不均，水資源便顯得格外珍貴，將水資源有效利用與開創新興水源便是發展重點。水資源回收中心能夠提供穩定的水量與潔淨的水源，但其運行的高耗能卻成為現在所面臨的一大問題。在部分淨水的程序中，耗能巨大且使用效率不佳，研究重點在如何有效的利用能源，改善水資源回收中心之能源效率，並成立資料庫將相關數據匯入，作為未來相關規劃設計之參考。

如何達到有效能源利用與節能，分成三個重點「分析耗能」、「能源監測」、「節能對策」。依據水資源回收中心的污水性質及能耗表現，並對水資源回收中心的處理流程進行耗能監測系統的安裝，該監測系統會將各淨水程序耗能數據傳回終端，再依據耗能監測的結果進行分析，鑑別出重大能源使用區域，依照現行及未來規劃可行之水再生流程進一步訂定出能源對策。

參考國內外相關的成功案例，分析目標水廠特色與相關條件，並經過可行性評估後，將水資源回收中心內可以利用的資源類別、使用成本、可能發展之替代能源分別說明，並模擬將這些技術引進水資源回收中心後可能出現的情況，探討其是否達到預計之效益與功能需求，與成功案例作法相互比較，找出水資源回收中心之改善空間。

【關鍵詞】能源管理與節能、耗能分析、能源監測系統、環境管理系統

---

*中原大學環境工程學系　學生

**中原大學環境工程學系　助理教授

一、前　言

台灣因為地形與氣候的因素，水資源顯得格外珍貴，故發展新興水源的需求也愈來愈大，因此都市污水處理再生成了這方面的明日之星。但都市污水再利用即是以電換水，污水在處理淨化的流程中耗能十分巨大，該如何解決這一項問題，是我們改善都市污水再生廠的重要議題。

為了實現對水資源回收中心的能源效率改善，我們以「分析耗能」、「能源監測」、「節能對策」這三個項目做為重點，發展出更有效的能源利用，同時也建立水廠耗能資料庫，以系統化統整各項再生能源之建置，並開發電能儲存相關技術，進而將再生能源及電能管理整合應用於水資源回收中心。

二、 文獻回顧

根據調查國內的水資源回收中心處理每噸污水所需耗能，我們也對具有再生能源潛力的水資源回收中心進行調查，再考慮其處理耗能與再生能源發展技術後，選出台北迪化污水處理廠、桃園龜山污水處理廠、桃園北區水資源回收中心、新竹客雅水資源回收中心、台中福田水資源回收中心及台南安平污水處理廠等六廠，再依據調查結果顯示出各廠耗能、再生能源潛勢的大小與能源自給率。

1.水資源回收中心耗能情形

根據各水資源回收中心用電量的盤查情形，可以得到水資源回收中心處理水量及總用電度數，將年度總耗能除以處理水量得到每座處理場的單位耗能。桃園北區的處理水量是該廠從 105 年 1 月至 5 月實際處理進流水量平均僅 2,135CMD，與第一期設計水量差異甚大，因此暫不列入計算。

表 2.1　各污水處理廠單位耗能分析

水資源回收中心	設計水量 (CMD)	處理水量 (CMD)	2016 總耗能 (kWh)	單位耗能
迪化	500000	434349	23382265	53.83
桃北	200000	2135	X	X
龜山	27000	26143	3886301	148.66
福田	297600	76000	6095701	80.21
客雅	130000	22073	2177068	98.63
安平	132000	151925	8512309	56.03

2.各廠再生能源發展潛力

針對不同地區的水資源回收中心進行各項再生能源潛勢分析，主要以風力、太陽能、微水力、生質能為主，將這些可再生能源導入水資源回收中心淨水流程中，評估整體效益是否提升。

(1)水資源回收中心再生能源潛力

根據對六座水資源回收中心的盤查結果，並依照所在位置不同的環境特性，將微水力、風能、太陽能與生質能再生能源之參數，計算出可產生再生能源潛勢，如表 2.2 所示。

表 2.2　再生能源潛勢分析表

水資源回收中心	可產生再生能源 (kwh)	區域特性
台北迪化污水處理廠	2175 kW	處理量越大，產生沼氣量也大，因此生質能占再生能源潛勢五成。20%廠房面積使用太陽能板。
桃園龜山污水處理廠	188 kW	出水量較少，設備老舊，再生能源潛勢太陽能與生質能為主要來源。
桃園北區水資源回收中心	1856 kW	目前處理水量較少，生質能產量偏低,廠區面積廣太陽能發電量為最高。
台中福田水資源回收中心	339 kW	再生能源潛勢以生質能為主，風速及微水力微弱。
新竹客雅水資源回收中心	2169 kW	位處海邊地勢偏遠，風能強勁且面積廣大，風能與太陽能潛勢大。
台南安平污水處理廠	1480 kW	處理水量為六廠中第二多，未來有潛力發展為低耗能污水處理廠。

(2)各水資源回收中心再生能源潛勢自給率分析

水資源回收中心再生能源潛勢自給率的定義即為再生能源潛勢佔全廠的總耗能的比例，我們將從表 2.1 與表 2.2 來計算出各水資源回收中心的再生能源自給率。

自給率在 14%到 130%，差距甚大，主要原因為處理水量的多寡造成的，目前處理水量不多的桃北、客雅與處理水量與設計水量的安平廠相較，耗能較少、因此自給率相對較高。

表 2.3　再生能源潛勢自給率分析表

水資源回收中心	總耗能(kW)	廢熱(kW)	可再生能源(kW)	再生能源自給率
迪化	23,382,265	0	13,345,770	50%
龜山	3,886,301	6,175,800	537,334	14%
桃北	2,630,349	1,798,109	1,863,911	71%
福田	6,095,701	1,328,484	2,293,805	38%
客雅	2,177,068	0	2,822,642	130%
安平	8,512,309	2,553,926	3,269,845	38%

三、水廠分析耗能與電能監測

本計畫宗主在於提高水資源回收中心總體的能源自給率，能源自給率即為再生能源潛勢佔全廠的總耗能的比例。提升自給率的方式，不外乎是增加自身的再生能源供給與降低整體的能源消耗，另外透過電能監測系統輔助來了解廠區中能源流向，更有效的達成提高自給率的目標。

1.各水資源回收中心耗能比較

評估六廠產水類型及流程，各廠的產水類型如下，臺北迪化污水處理廠、新竹客雅水資源回收中心和臺中福田水資源回收中心採砂濾法；桃園北區水資源回收中心採 MBR；臺南安平水資回收中心目前採二級活性污泥法，未來污水處理廠規劃則擬採 UF+RO；桃園龜山污水處理廠採二級生物處理法，各廠再生水處理耗能如表 3.1。

表 3.1　各水廠再生水處理程序及耗能

水資源回收中心	再生水處理程序	CMD	kWh/m^3	再生水年耗能(kWh)
迪化	砂濾	450,000	0.1475	24,226,875
龜山	50%UF+50%RO	10,000	0.3	1,095,000
桃園	MBR	52,053	0.5	9,499,673
福田	砂濾	131,000	0.1475	7,052,713
客雅	30%UF+70%RO	15,000	0.38	2,080,500
安平	30%UF+70%RO	60,000	0.605	13,249,500

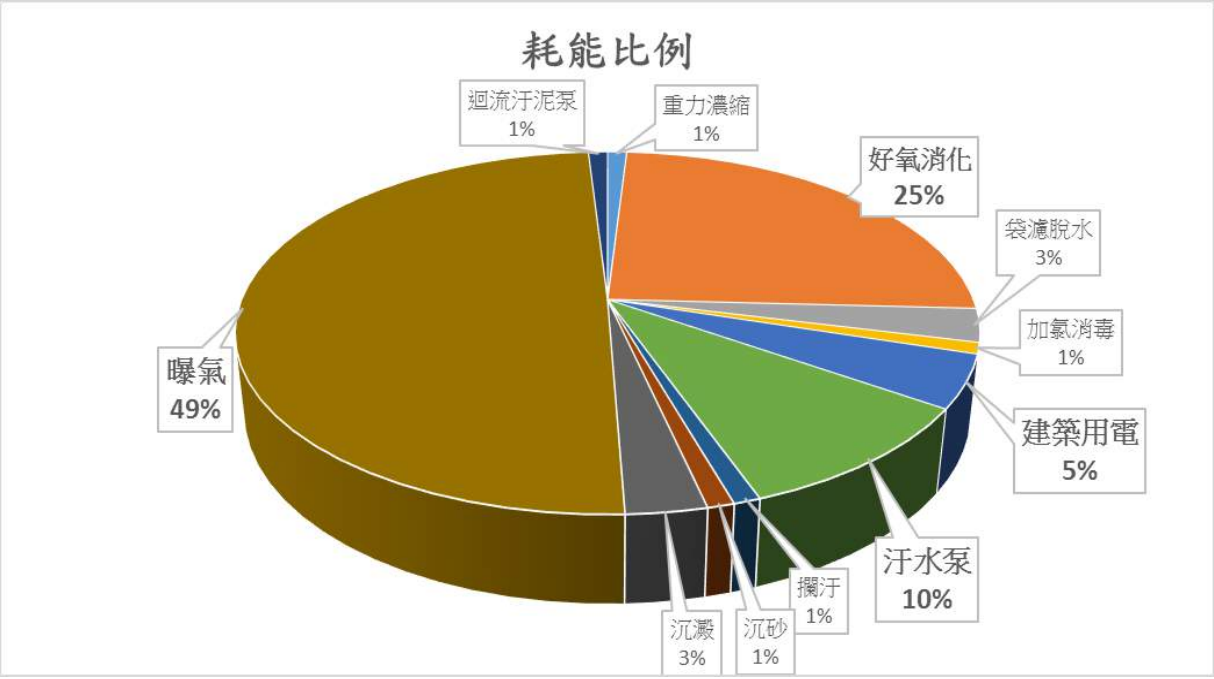


圖 3.1　水資源回收中心各流程耗能比例

2.電能監測模組佈放

一般來說典型的污水處理程序分為:一級處理、二級處理、三級處理與污泥處理，根據水資源回收中心各處理單元能耗的情況，針對高耗能設施進行耗能監測，清楚瞭解水資源回收中心整體的耗能分布，另一方面監測系統也有助於快速找出設備異常點，協助維修工作進行。將蒐集的資料成立耗能資料庫並結合智能管理模式，提升水資源回收中心管理方面效能及降低營運成本。

圖 3.2 中的設備是使用於電能監測模組中的電錶集中器，此裝置是結合網頁操作介面、電力管理、電力資料收集、資料記錄及遠端警報通知等功能的智慧型 Web-based 電力管理集中器。再配合圖 3.3 的電能監測模組佈放示意圖，來對水資源回收中心的用電情形進行監測管理與紀錄。

而 WinPAC 可以利用 3G 網絡，從現場數據或分組數據收集回傳、且能用來連接不同設備，建構出各種應用的控制系統。

圖 3.2　電能監測知電錶集中器與 WinPAC

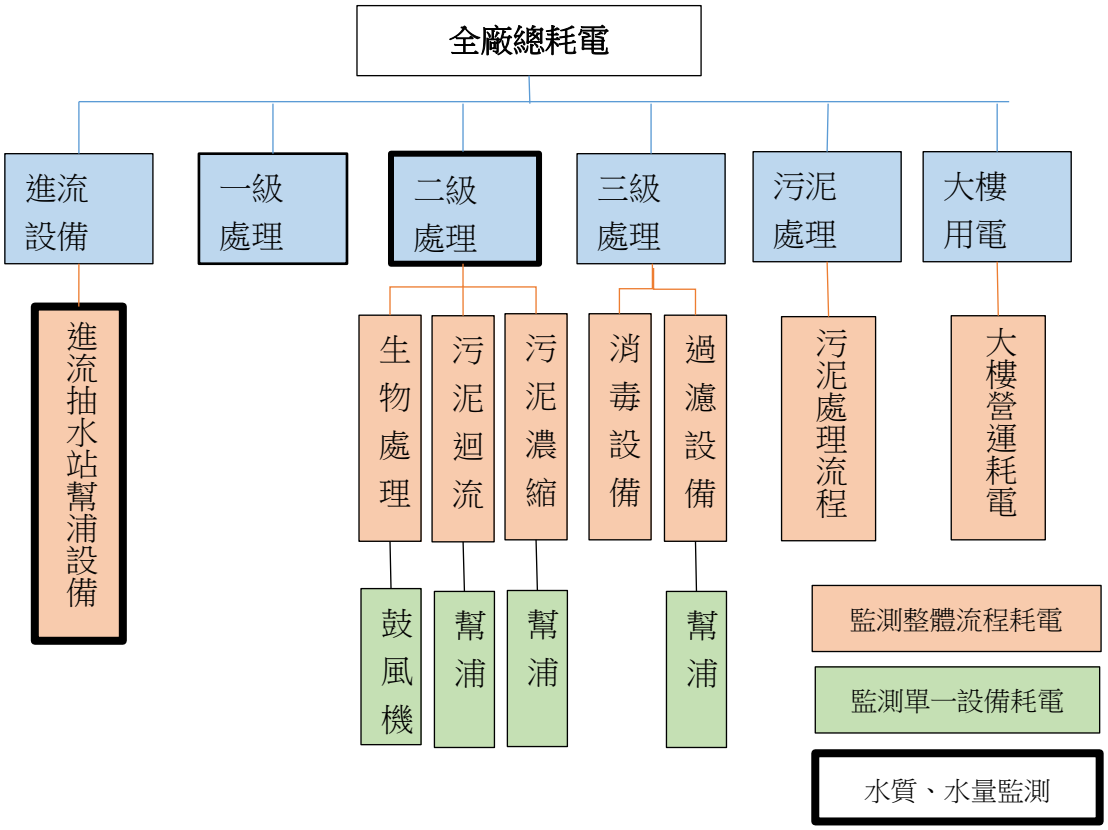


圖 3.3　電能監測模組佈放位置及監測示意圖

3.再生能源生產效率

再生能源的產生效率，會隨著每日的氣候、時段等因素而有所差異，由圖 3.4、3.5 中可以看見，再生能源比重最高與產量最穩定的能源是生質能，幾乎是 24 小時都能穩定生產，而其他種類的再生能源則受到相當大的限制，再生能源的產量主要集中在中午時段，夜間時段僅有生質能仍持續運轉，而其他再生能源幾乎沒有產能，從這點可以看出再生能源電力供應的不穩定與時段性的差異。

為了穩定再生能源電力供給，我們預計採用電池儲存盈餘之電力，將其補充至夜間等能源不足之時段，如圖 4.2。

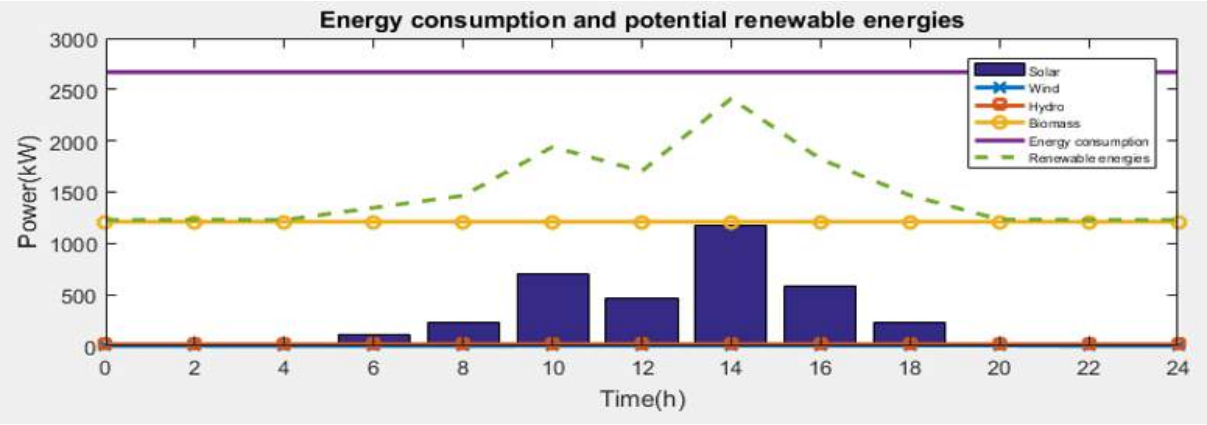


圖 3.4　再生能源生產時刻關係圖

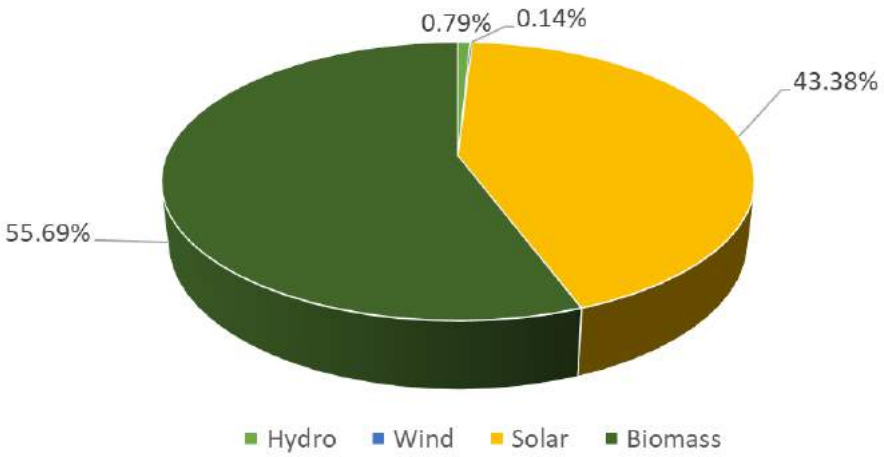


圖 3.5　各再生能源所佔總再生能源比例

4.電能量測架構

以下是使用 WinPAC 為主的電能量測架構，如圖 3.7，各監測模組數據會傳回 WinPAC，WinPAC 再將其監測資料上傳至監控軟體與資料庫中，透過 WinPAC 的監控軟體與現場操作介面，亦可以達到對設備的控制。

場內的監測裝置安裝如下圖 3.6。

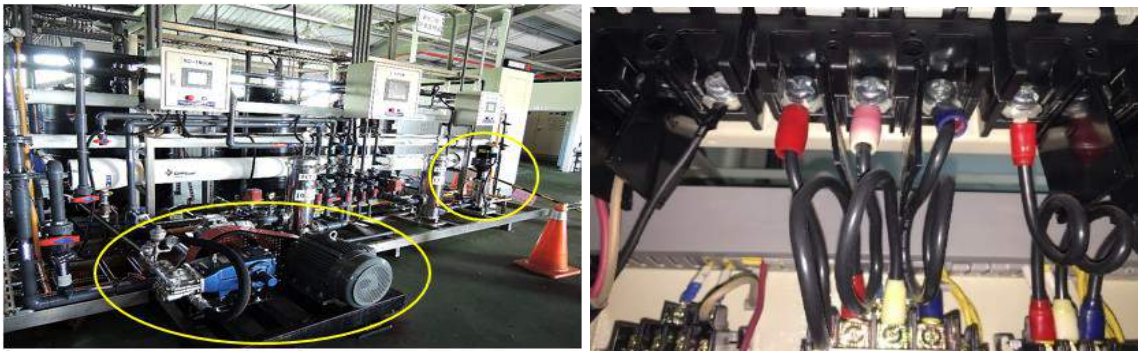


圖 3.6　RO 裝置進流泵 (左)、三項電源(右)的監測設備安裝

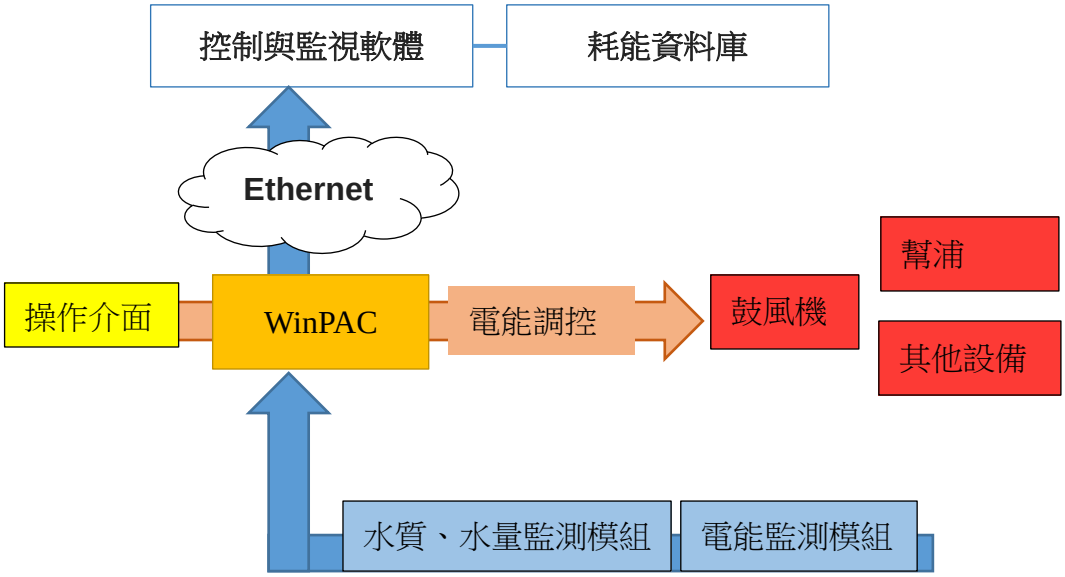


圖 3.7　電能量測架構

四、節能策略

綜合以上第三章的水資源回收中心耗能、能源效率提升及電能監控的資料，擬定出一份對水資源回收中心的能源對策。策略擬定的架構為確認水資源回收中心總耗能，能夠輸入使用的能源種類，淨水流程各設施能源使用效

率及再生電能的離尖峰調控。

1.提升水資源回收中心能源效率策略之制定

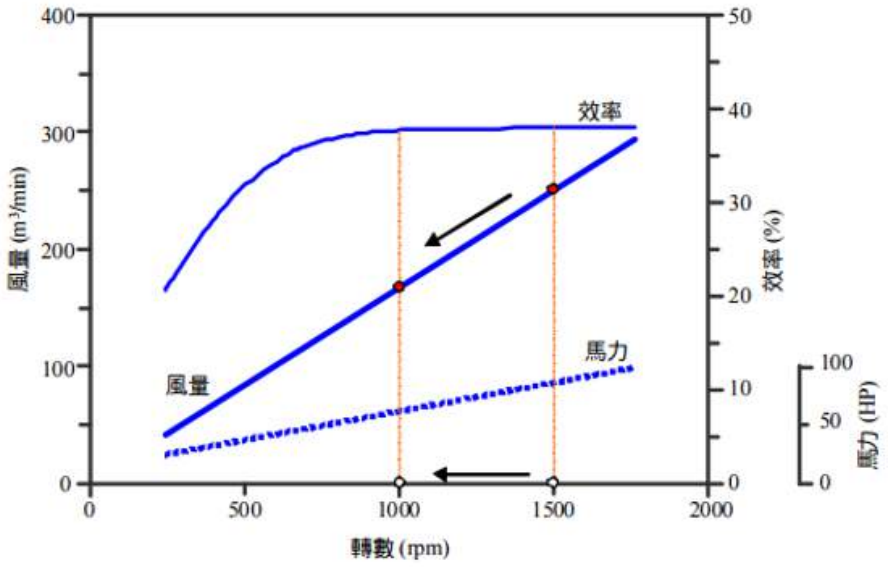
確認計畫六廠各廠的單元耗能情況後，為了提升其整體水資源回收中心設備能源的使用效率，計畫兩項節能政策:強化設施運轉各程序的效率、導入電能儲存系統進行電能管理，將再生能源與電能管理整合，以達到節能、造能、能源自己的循環經濟目標。

(1)強化設施運轉各程序的效率

由於主要探討的六座水資源回收中心其處理程序皆已有規劃，要以程序設備選擇的方式進行節能的可行性較低，因此在不更變程序設備的情況下，提升設備效率降低耗電量為優先。

鼓風機送風系統耗電量約全廠的 50%，為水資源回收中心耗能的關鍵位置，打氣量控制是關鍵所在，水處理流程中所需打氣量會因水質、水量或處理程序而有所不同，因此打氣量應隨之改變，因此改善鼓風機效率從馬達轉速改善是較為經濟有效的方法。如圖 4.1 所示。

幫浦的耗能佔整廠耗能約 10-20%。改善幫浦重點在於功率，幫浦的抽水功率隨著進水水量的增減，調整幫浦轉速，幫浦與揚程性能曲線移動，取得適當的揚程與流量的運轉點，使進流水能夠更均勻地進入處理設施中，對幫浦的調控得當，除了可以提升使用效率外，亦可提升幫浦及設備的使用壽命。



資料來源: 內政部營建署污水處理廠節能計畫期末成果報告書

圖 4.1-1　具變頻功能之鼓風機設備效率

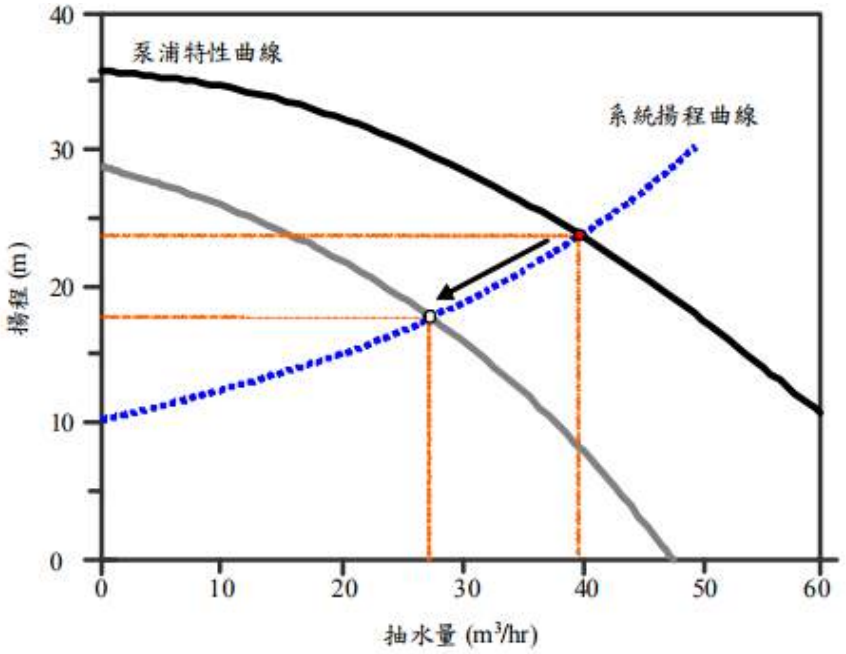


圖 4.1-2　幫浦變頻控制特性曲線變化

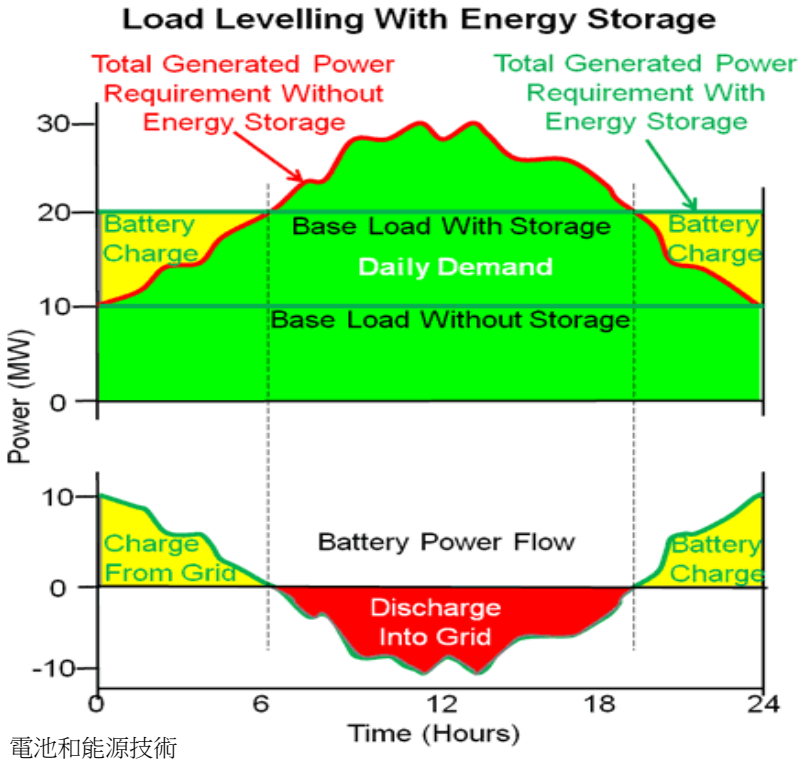
(2)導入電能儲存系統進行電能管理

風力發電、太陽能發電、小水力發電、生質能與汽電共生之再生能源能資源整合、達到電力最佳化需求，導入儲能系統進行電力儲存與電力穩定，可掌握水資源回收中心離峰尖峰電力需求與供給之平衡。

再生能源最大的問題便是發電量不穩，為了避免不穩定的電壓對設備造成損害，電池即是一切關鍵所在，再生能源部分直接引入處理設備中使用，其餘再生能源便導入電池中儲存，因應各時段不同的能源消耗，使得電網電力供給成穩定狀態。

關鍵電池的選擇，我們選用成本只有 1/3~1/4 的被汰換二次鋰電池，原因除了它整合容易外，在電池完全報廢前，電池仍具有 80%的儲電容量可以使用，應用於區域電網上有助提高能源使用效率。此外透過電能儲存系統整合開發測試平台量測電池組工作電流與電壓和溫度，以觀測器歸納出內電阻值，並利用資料庫計算得到對應壽命值。

圖 3.4 與圖 4.2 掌握再生能源尖峰時段的產電儲存至電池中，以補充離峰時段電力需求，穩定區域電網的供電。



資料來源: 電池和能源技術
http://www.mpoweruk.com/grid_storage.htm

圖 4.2 再生能源電池離尖峰充放電情形

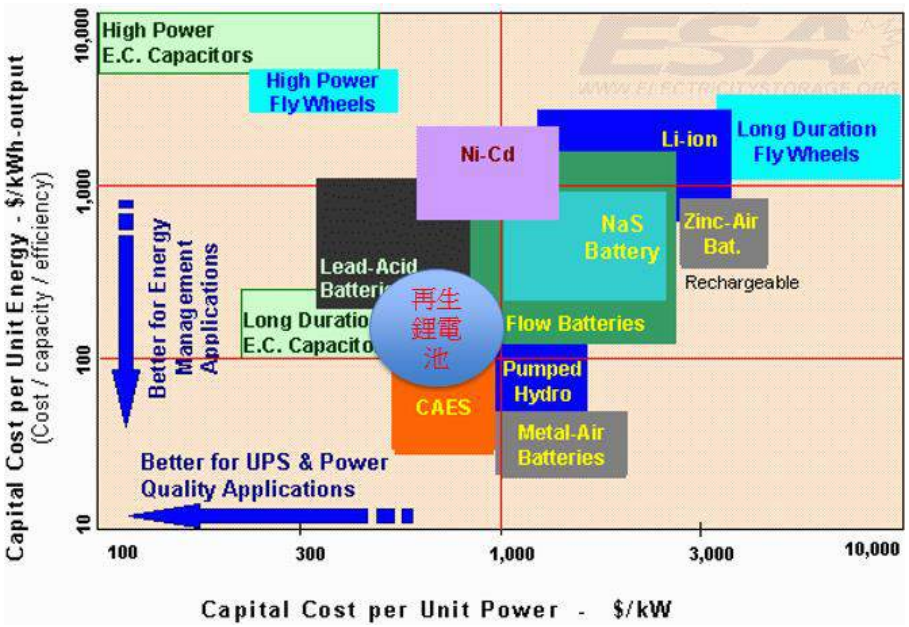
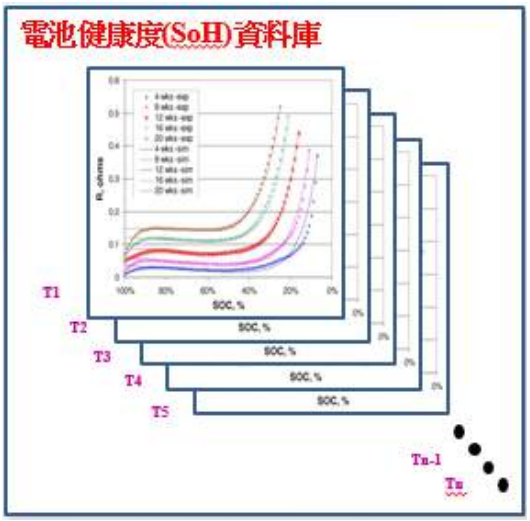


圖 4.3 各類型電池特性比較



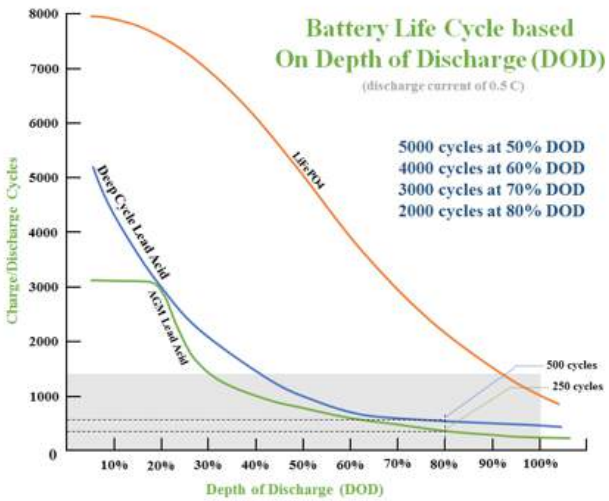


圖 4.4　電池循環壽命參數計算及延長電池循環壽命

2.再生能源與市電調控策略

從圖 3.4 也可以發現能源需求量與再生能源供應量的差距，為了水廠的運行市電的引入是必須的，水資源回收中心能源的調控，對應不同時刻的水質、處理耗能、再生能源產率及市電使用等設為參數，找出整體污水處理流程最合適的節能策略。

如圖 4.5 所示水資源回收中心將進流水處理至放流水或再生水的能源關係，依照不同時刻的進流水水質水量及圖 3.4 再生能源的生產效益，做出不同的配置方法。

我們將水質水量、處理總耗能及再生能源供應量作為輸入的參數，計算出最適當的能源輸入比例。例如:上午時段，進流水水質乾淨，處理總耗能較低，且再生能源的產量較小，調控方法為以再生能源為輔，降低市電的輸入量，以節省市電消耗;中午時段，水質差水量大，處理耗能需求量高，但再生能源產量最為豐沛，因此調控策略以再生能源輸入為主，市電為輔;夜間時段，水質差水量大，處理耗能需求量高，但再生能源產率低，因此將日間再生能源生產的盈餘儲存下來至夜間使用，降低市電的使用量。

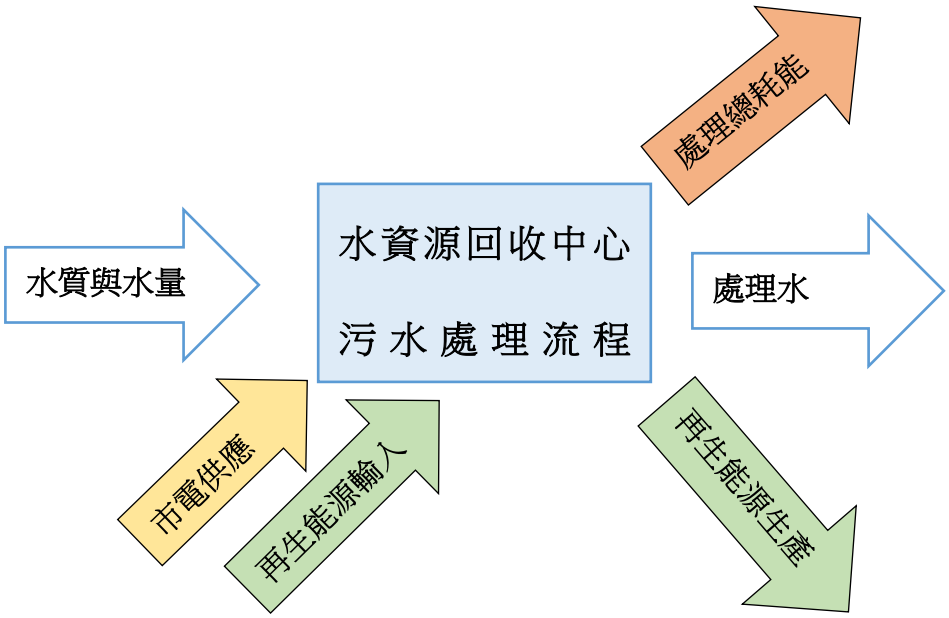


圖 4.5　水資源回收中心能源輸入與輸出示意圖

3.成本效益分析

儲能系統與電能管理系統的建立，使水資源回收中心的再生儲能與水處理效率更有效，透過這些管理系統的建立能夠為水資源回收中心帶來的經濟效應如下圖 4.6 所示。

由圖 4.6 可以看出由販售再生能源與離尖峰時段調控這兩項每年的得到的效益十分豐潤，儘管架設儲能電池設備成本高，粗略估計 5 年即可回本，舉例來說耗能最大的兩個水資源回收中心，迪化與安平，迪化廠可得總效益(售電加上離尖峰調控)約 6 千萬，所需再生電池成本為 2.5 億台幣，安平廠效益(售電加上離尖峰調控)約 1.7 千萬，所需成本為 9.3 千萬，成本回收時間僅需 5 年，且還有尚未列入計算之效益收入。

再生電池成本(每度)	4000元	尖峰時間	7-22點
生質能	3.92	電價差平均	1.5
太陽能	4.67	離峰儲電時間	7小時

廠名	Total Energy Consumption	Renewable Energies	再生能源自給率	售電收入(萬元)	離尖峰調控效益(萬元)	需儲電電池(kWh)	成本(萬元)
迪化	23382265	11718800	50%	$5,039	$1,023	64061	$25,624
龜山	3886301	524813	14%	$226	$170	10647	$4,259
桃北	2630349	1863911	71%	$801	$115	7206	$2,883
福田	6095701	1696606	28%	$730	$267	16701	$6,680
客雅	2177068	2822642	130%	$1,214	$95	5965	$2,386
安平	8512309	3269845	38%	$1,406	$372	23321	$9,329

圖 4.6　販售再生能源與離尖峰調控成本分析

五、結　論

如何將水資源回收中心能源自給率提升，有系統的降低整體耗能與提升再生能源的使用是關鍵所在，因應每座不同的水資源回收中心周遭自然地理環境、處理水質與處理流程，發展再生能源的潛勢與應對策略也不相同，例如迪化污水處理廠與桃園北區污水處理廠在處理水質水量和地理條件下，再生能源供應種類與再生水製造流程也不同，儘管模擬了一套對水資源回收中心的節能策略，也會因為不同水資源回收中心不同環境，而有不一樣的成效，因此瞭解計畫目標水資源回收中心處理流程能源消耗與其再生能源潛勢，為整廠計畫中重要的一環。

調查再生能源潛勢時，結果顯示能源潛勢集中在特定時段，且變動相當大。為了提供水資源回收中心耗能所需，利用電力儲存系統來調控離尖峰時期的電力差異問題，使電能在各時段分配平均及穩定電力輸出。若搭配成本較低廉的再生電池與調控離尖峰時段電費差異的成本效益，預期能夠帶來不少的產業價值。

透過對污水處理與再生水處理流程的耗能監控設備，蒐集各處理單元的單元耗電量，並系統化的結合再生能源的使用，達到水資源回收中心的節能與能源自給最佳化的目標。同時將各水資源回收中心的單元耗能資料，整合並建立耗能資料庫，以作為未來相關計畫施行時的設計參考與改善方針。

六、參考文獻

1. 污(廢)水與廢熱之能資源整合盤查及研析，經濟部水利署，105 年 12 月。
2. 污水處理廠節能計畫期末成果報告書，內政部營建署，100 年 5 月。
3. 回收大型電動車用鋰離子電池應用於穩定再生能源以及吸收夜間電力，施武陽，106 年 10 月。

電磁鋼片絕緣塗膜之無鉻高性能化

彭剛勇*

摘　要

電磁鋼片(Electrical Steel，簡稱 ES)是具有特殊電磁特性的鐵矽合金，為馬達、發電機、壓縮機、變壓器…等機電設備的核心，對其能量轉換效率影響甚大。電磁鋼片的表面必須塗覆能賦予：電氣絕緣性、耐蝕性、加工性..等功能之保護膜，以確保電磁鋼片組件的機電設備之運作效能。

目前，電磁鋼片的絕緣塗膜雖仍以含鉻(Cr^{+3})塗膜系統為主，但因其塗液組成必須使用鉻酸(為 Cr^{+6} 六價鉻，具有致癌性)，故電磁鋼片塗膜的無鉻化已是企業環保責任與產品永續發展之必須。有鑑於此，中鋼於 2007 年率全球業界之先開發出「塗膜無鉻化」之電磁鋼片。近期並已研發完成「絕緣性」、「耐蝕性」、「附著性」、「低溫固化性」…等方面更加精進的高性能「第二代無鉻塗膜」，對生產端與使用端均可因此而收環保、節能、高效之益。

本文將此高性能第二代無鉻塗膜、與兩種參考塗膜(常規的含鉻塗膜、以及第一代無鉻塗膜)進行比較，並由：塗膜微結構、電化學分析、烘烤條件…等物理與化學特性之差異，探討第二代無鉻塗膜具有較其他兩者更高性能之原因。由於第二代無鉻塗膜的整體性能優異，除一般機電應用外，亦能滿足要求低能耗之高端產品。因此，第二代無鉻塗膜可增加台灣電磁鋼片相關產品的國際競爭力、與促進綠色無鉻塗膜技術的普及與標準化。

【關鍵詞】無鉻、塗料、塗膜、絕緣、腐蝕、電磁鋼片

---

*中國鋼鐵股份有限公司　研究員

一、前　言

電磁鋼片(Electrical Steel，簡稱 ES)是具有特殊電磁特性之鐵矽合金，又稱矽鋼片、電氣鋼片(日)、或電工鋼片(中國大陸)。電磁鋼片是變壓器、馬達、發電機、壓縮機等設備的核心材料，使能量可在電、磁、機械等形式間進行設計所需之轉換，從而使設備發揮應有的功能。

此能量轉換的效率由許多因素所決定。以馬達為例，係由兩大類能量損耗所組成：「機械損失」(轉子摩擦損失 Friction loss、轉子風阻損失 Windage loss)、以及「電磁損失」(繞線銅損 Copper loss 與電磁鋼片鐵損 Iron loss)。其中第二類佔總能量損耗之比率可達一半以上[1]，是影響機電效率的最主要因素。

電磁鋼片本身之鐵損可說是決定設備機電效率最重要之本質因子。鐵損可分為：磁滯損失(Hysteresis loss P_H)、渦流損失(Eddy current loss P_E)[2]。其中，P_H 與電磁鋼片的電磁特性以及微結構(晶粒大小)有關；而 P_E 則與 ES 底材的厚度平方(t^2)成正比、而與電磁鋼片的電阻率(σ)成反比。因此，電磁鋼片都是以鋼捲薄片的方式產出與使用，並且電磁鋼捲表面都塗覆了可以增加阻抗的絕緣層[3,4]。

除了提供層間阻抗以外，絕緣層另一項重要之功能是保護電磁鋼片底材，阻隔水氣、氧氣、鹽分等腐蝕因子之侵蝕，以賦予其防鏽性。因此，目前各鋼廠 ES 鋼捲產品的表面處理，大多是以具有「耐蝕」與「絕緣」效果之塗料於高速輥塗線塗覆、再於連續烘烤爐中完成塗料的乾燥固化。

含鉻塗膜是電磁鋼片最廣被採用之絕緣技術，雖然其防鏽性能優越，但因其塗液含致癌性的六價鉻原料(鉻酸)(但六價鉻塗料經烘烤固化後會變為的三價鉻塗膜，故含鉻塗膜之成品是安全的)，近年已被法令(RoHS、REACH…等)規範[5,6]，嚴格管制其製造、使用、與產品銷售，其廢液也必須需經過特殊的處理，以避免六價鉻進入環境造成人體與生物的毒害。

因電磁鋼片塗料往綠色環保之方向發展無鉻技術已為必須，中鋼於 2007 年率先推出第一代無鉻塗膜 C6N8-1。為滿足市場對電磁鋼片塗膜性能精進之需求，中鋼於 2013 年再開發完成「絕緣性」、「耐蝕性」、「附著性」..等特性均更為優異的第二代無鉻塗膜 C6N8-2。

本文比較了第一代無鉻塗膜 C6N8-1 與第二代無鉻塗膜 C6N8-2，並以含鉻塗膜 C628 作為參考基準，由塗膜微結構、電化學特性、烘烤條件…等物理與化學特性之差異，解析第二代無鉻塗膜 C6N8-2 能成為環保、節能、高效綠色技術之原因。

二、塗膜性能之測試

本文中各塗膜試片之底材為 50CS1300 規格之電磁鋼片，各塗膜之平均膜厚約為 0.7μm。塗膜鋼片各項關鍵性能之測試方法列於表一，分別詳述於後。

表 1　電磁鋼片塗膜性能之測試方式

塗膜特性	測試條件或方法
鹽霧耐蝕性	ASTM B-117 35℃ 5% $NaCl_{(aq)}$、1~2 mL/hr、5hr
電絕緣性	JIS C-2550
附著性	彎曲後浸泡於 5% $CuSO_4$ 水溶液 10 秒
極化曲線分析	-0.25V ~ +0.60 V (vs E_{Corr})， 1 mV/sec

1.鹽霧耐蝕性

依 ASTM B-117 的標準測試條件進行中性鹽霧測試：係將適當裁切後之 50CS1300 塗膜鋼片樣本(久儲品)以膠帶封邊，再置於鹽霧試驗機(Salt Spray Tester，SST：溫度 35℃，噴霧量 1～2 mL/hr，溶液 NaCl 濃度 5%)中測試 5 小時。取出後沖洗吹乾，比較其繡蝕狀況(紅鏽面積百分率)。

2.電化學耐蝕性(極化曲線)

使用 ACM Field Machine 電化學分析儀，採標準的三電極方式進行動電位掃瞄：工作電極為待測試片(塗膜鋼片或裸片，均為 50CS1300)、反電極為白金片、參考電極則為 Ag/AgCl-3M KCl，電極液為 3.5% NaCl 水溶液。待測試片(塗膜鋼片樣本為久儲品)暴露於電解液的面積為 1.0cm^2，除裸片是直接掃瞄測試外，塗膜鋼片樣本均會先於開路狀況下靜置 15 分鐘以後，才開始進行極化掃瞄。每次掃瞄前均會先測試決定其腐蝕電位(corrosion potential E_{Corr})後，再由相對於腐蝕電位的 -0.25V 開始掃瞄至 +0.60 V，掃瞄速度為 1 mV/s。

3.塗膜橫截面分析

將塗膜鋼片樣本裁切為 1cm^2 後，先於表層蒸鍍白金保護層，再以雙束聚焦鎵離子束(DB-FIB：dual-beam focused Ga ion beams，FEI Nova-200 NanoLab Compatible，成大微奈米中心)在表面刻出凹槽，最後以 65,000 倍 SEM 對凹槽切面進行觀測。

4.電絕緣性(層間電流測試)

以符合 JIS C-2550 標準之層間電流儀對 10cm x 30cm 之塗膜鋼片進行量測，再由所測得之電流平均值(I)透過下式計算其層間阻抗。

$$R_s = 10\left[\frac{1}{I} - 1\right] \qquad \ldots\ldots (3)$$

5.附著性(彎曲測試)

將分切為適當大小之塗膜鋼片先彎曲 180 度(彎曲直徑 6, 4, 2 mm)，再浸入 5% $CuSO_4$ 水溶液十秒鐘，取出沖洗吹乾後檢視紅鏽之程度(若塗膜或界面有破損，則溶液中的銅離子可接觸到底材表面而將鐵氧化、本身並被還原成元素銅而析出)。

6.烘烤條件需求評估：最高板溫(Peak Metal Temperature：PMT)

於實驗室以 3 號塗覆輥製作 C6N8-1 與 C6N8-2 兩塗料之 50CS1300 濕膜試片，再立即放入熱風恆溫烤漆烘箱 50 秒後取出(分別測試四種爐溫條件：280、300、320、340℃；對應之 PMT 分別為 268、285、305、322℃)。

將各爐溫所得之塗膜試片裁切為適當大小並以膠帶封邊後，立即以上述之中性鹽霧測試比較其膜面耐蝕性。此外，兩塗膜各條件亦均有另一組先經高溫高濕處理以加速劣化(50℃、相對濕度 98%、兩小時)後之試片，也同批進行鹽霧測試。能使塗膜試片充分發揮其性能之最低 PMT，即為該塗膜所需之最低烘烤條件。

三、結果與討論

1.膜面耐蝕性

圖 1 是 C628、C6N8-1 與 C6N8-2 的 50CS1300 塗膜試片經過鹽霧測試(5hrs)後之外觀。C6N8-1 無鉻塗膜試片的鏽蝕相當明顯，C628 含鉻塗膜試片則呈現輕微鏽蝕。相較之下，C6N8-2 雖然是無鉻塗膜，但是在相同的鹽霧測試後卻沒有出現任何的鏽蝕，其鹽霧耐蝕性是三者中最好的。

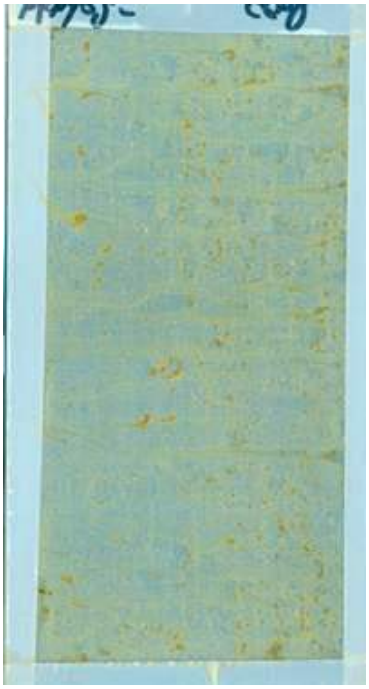
含鉻塗膜 **C628**	第一代無鉻塗膜 **C6N8-1**	第二代無鉻塗膜 **C6N8-2**
		

圖 1　C628、C6N8-1 與 C6N8-2 塗膜鋼片經五小時鹽霧測試後外觀之掃瞄圖

2.電化學耐蝕性

圖 2 是 C628、C6N8-1 與 C6N8-2 塗膜試片、以及 50CS1300 電磁鋼片裸材的極化曲線圖。圖二中各極化曲線最小電流密度發生之電位，即為其「腐蝕電位(corrosion potential, E_{Corr})」。而各極化曲線下半部的還原段內插至其腐蝕電位處之電流密度，則為其「腐蝕電流密度(corrosion current density, I_{Corr})」。若將腐蝕電流密度為零時定義為防蝕效率 100%、腐蝕電流密度與裸材相同時定義為防蝕效率 0%，則可計算出各塗膜試片相對於裸材的防蝕效率(anti-corrosion efficiency, η)。

由圖 2 中的各極化曲線，計算可得 C628、C6N8-1 與 C6N8-2 塗膜試片、以及 50CS1300 裸材的 E_{Corr}、I_{Corr}、與 η，列於表 2。

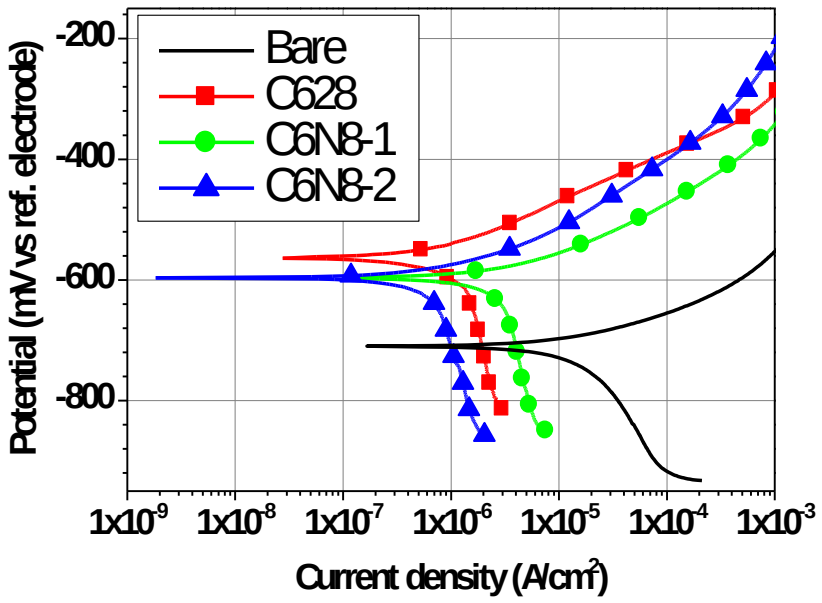


圖 2　電磁鋼片裸材、以及 C628、C6N8-1 與 C6N8-2 塗膜鋼片之極化曲線

表 2　C628、C6N8-1 與 C6N8-2 塗膜鋼片、以及裸材之電化學參數(取自圖 2)

	塗膜鋼片			50CS1300 裸材
	C628	C6N8-1	C6N8-2	
腐蝕電位 E_{Corr} (mV)	-565	-595	-595	-710
腐蝕電流密度 I_{Corr} (μA/cm^2)	1.1	2.7	0.7	17.5
防蝕效率 η (%)*	94	85	96	定義為 0
*塗膜試片防蝕效率 η = [1 − 塗膜試片 I_{Corr} / 裸材 I_{Corr}] ×100%				

比較表 2 的 E_{Corr} 腐蝕電位數據，顯示「熱力學」上防蝕性最好的塗膜還是含鉻型的 C628(-565mV 為三塗膜中最高者)，而兩種無鉻塗膜 C6N8-1 與 C6N8-2 在熱力學上的防蝕性相當(均為-595mV)，雖遜於含鉻塗膜，但相較於裸材(約-710mV)，在熱力學上均仍有抑制腐蝕之明顯效果。

但若由表 2 的 I_{Corr} 腐蝕電流密度來看，「動力學」上 C628 含鉻塗膜雖明顯優於第一代無鉻塗膜 C6N8-1，但三種塗膜中耐蝕性最好的卻是 C6N8-2 第二代無鉻塗膜(僅 0.7μA/cm^2 為最小者)，亦即 C6N8-2 會是三種塗膜鋼片中鏽蝕速度最慢(最晚出現鏽點)者。

由以上 C628、C6N8-1 與 C6N8-2 塗膜試片於鹽霧耐蝕性與電化學特性之測試結果，雖無鉻塗膜技術在第一代 C6N8-1 時的確遜於傳統的含鉻

塗膜技術(如 C628)，但無鉻塗膜技術於第二代 C6N8-2 已獲大幅改進，其耐蝕性與電化學特性不但明顯優於舊有的第一代無鉻塗膜 C6N8-1，甚至較以防鏽性能見長的含鉻塗膜 C628 更佳。

3.塗膜橫截面

圖 3 是 C628、C6N8-1 與 C6N8-2 塗膜試片以 DB-FIB 切出凹槽後，其橫截面的 65,000 倍電子顯微鏡掃瞄圖。各圖中最上方者為進行 DB-FIB 離子束切口前所蒸鍍的白金保護層，最下方者為 ES 底材。各圖中具有程度不一孔隙度的中間層即為塗膜本身之橫截面。

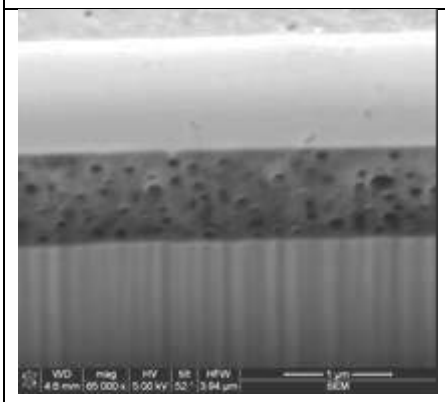
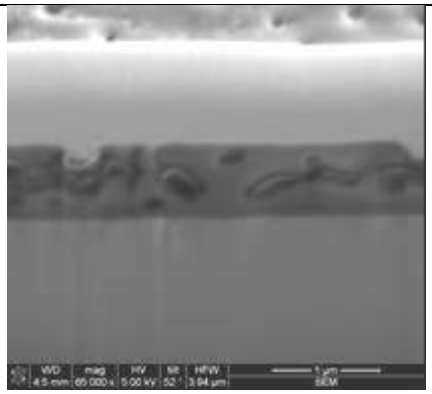
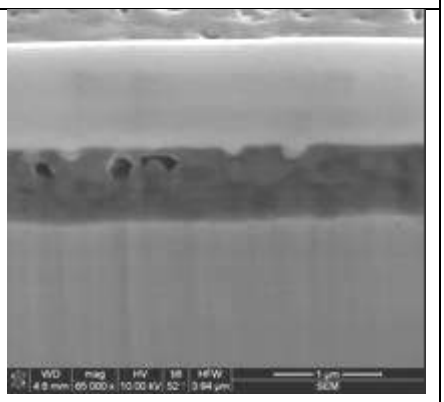
含鉻塗膜 C628	第一代無鉻塗膜 C6N8-1	第二代無鉻塗膜 C6N8-2
		

圖 3　C628、C6N8-1 與 C6N8-2 塗膜鋼片橫截面的 SEM 掃瞄圖(65000×)

含鉻塗膜 C628 之橫截面有許多圓形、均勻散佈的小孔洞。然這些孔洞尺寸很小，無法在塗膜內形成連續的通道。第一代無鉻塗膜 C6N8-1 之橫截面則有形狀不規則的大型孔洞，且這些孔洞形成了尺度與塗膜厚度相當甚至更大的連續空腔。反觀第二代無鉻塗膜 C6N8-2，雖然其橫截面也有孔洞，但尺寸不大、數量也很少，故無法形成連續通道。

由圖 3 各塗膜試片的橫截面比較，顯然第二代無鉻塗膜 C6N8-2 的塗膜結構是三種塗膜中最為密實的，故其隔絕腐蝕因子之能力也是三種塗膜中最強者。這也是 C628、C6N8-1 與 C6N8-2 塗膜試片於鹽霧耐蝕性(圖 1)、以及電化學耐蝕性(圖 2、表 2)出現差異的主要原因之一。

4.絕緣性

各塗膜電磁鋼片(膜厚~0.7μm)於 JIS-C-2550 標準下進行絕緣性測試所得到的典型測值列於表 3。第一代無鉻塗膜 C6N8-1 與含鉻塗膜 C628 的層間阻抗相當，一般可達 10Ωcm^2/sheet 以上。

因第二代無鉻塗膜 C6N8-2 的塗膜結構最為緻密，且其塗膜材質的極

性更低，使得其層間阻抗可在 20 Ωcm^2/sheet 以上(厚度 0.9μm 的塗膜，更可達 50~150 Ωcm^2/sheet)，絕緣性明顯優於含鉻塗膜 C628 與第一代無鉻塗膜 C6N8-1。因此第二代無鉻塗膜 C6N8-2 不但可用於一般產品，其電絕緣性亦足可滿足講究節能高效的高端機電應用，其泛用性較含鉻塗膜 C628 與第一代無鉻塗膜 C6N8-1 兩者更佳。

表 3　C628、C6N8-1 與 C6N8-2 塗膜鋼片典型之絕緣性

	含鉻塗膜 C628	第一代無鉻塗膜 C6N8-1	第二代無鉻塗膜 C6N8-2
層間電流 (A)	≦0.5	≦0.5	≦0.3
層間阻抗 R_s (Ωcm^2/sheet)	≧10	≧10	≧20

5.附著性

電磁鋼片在成為機電產品的關鍵核心組件之前，必須將其塗膜鋼捲進行分條、衝片、組裝等加工。這些製程均牽涉到鋼片的裁剪或變形，會對底材與其上的塗膜施加應力，並造成微觀上的應變、甚至破壞。因此，塗膜對底材的附著能力亦是實務上相當重要的特性。

圖 4 為各塗膜試片先經彎曲(彎曲直徑 6~2mm)再浸於硫酸銅溶液後的外觀。硫酸銅溶液中的銅離子可作為氧化加速劑，當塗膜因鋼片加工變形而影響對底材的附著性時，銅離子會滲入塗膜與界面的破裂處，並將底材的鐵氧化，而本身還原成銅。因此，若塗膜附著性越好，則經此測試處理後的紅褐色沈積會越少。

對於含鉻塗膜 C628 而言，其試片經 6 mm 直徑的彎曲，即呈現全面紅褐色沈積。相較之下，第一代無鉻塗膜 C6N8-1 的試片於相同狀況下，其銅沈積顏色較淺，顯示 C6N8-1 塗膜對底材的附著性較 C628 塗膜略佳。當彎曲直徑降為 4 mm 時，C6N8-1 試片彎曲處的紅褐色沈積物更為顯著。於最小彎曲測試直徑 2 mm 時，C6N8-1 試片彎曲處也呈現了全面性的紅褐色沈積物。

反觀第二代無鉻塗膜 C6N8-2，在彎曲直徑 6 mm 時，浸泡硫酸銅溶液後仍不會於彎曲處出現任何銅侵蝕之現象，表示在此變形條件下塗膜仍堅牢的附著於底材，無論是界面上或是塗膜本身都不會因此產生足以破壞塗膜附著之缺陷。此外，即使是以最小的 2 mm 直徑進行彎曲，C6N8-2 塗膜鋼片也僅顯示很輕微的紅褐色沈積，其完好程度甚至也遠優於以 6 mm 彎曲之 C628 與 C6N8-1 樣本。

圖 4 的結果顯示各塗膜對電磁鋼片底材的附著性：C6N8-2 第二代無鉻塗膜明顯優於含鉻塗膜 C628 與第一代無鉻塗膜 C6N8-1。

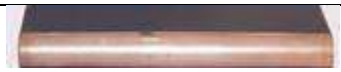
		含鉻塗膜 C628	第一代無鉻塗膜 C6N8-1	第二代無鉻塗膜 C6N8-2
彎曲	6mm			
	4mm			
	2mm			

圖 4　C628、C6N8-1 與 C6N8-2 塗膜鋼片之彎曲附著性

6.最低烘烤條件(Peak Metal Temperature：PMT)

鋼片塗覆塗料後，必須經過高溫烘烤以乾燥塗液、並使塗膜中的組份相互反應而交聯固化。為使塗膜能充分發揮其性能，各塗膜均有其所需的最低烘烤溫度，此條件通常以鋼片在烘烤時需到達的最高板溫(PMT)來表示。若濕膜鋼片於烘烤時未到達所需的 PMT，則塗膜會因固化不完全而出現性能變差之狀況。

圖 5 是第一代無鉻塗膜 C6N8-1、與第二代無鉻塗膜 C6N8-2 於各烘烤條件(爐溫：280、300、320、340℃；對應之 PMT 分別為：268、285、305、322℃)下之試片，於製備後立即測試鹽霧耐蝕性之結果。此外，同批亦另有一組相同烘烤條件之試片先以兩小時 50℃相對濕度 98%的高溫高濕(High Temperature & Humidity，HTH)來加速塗膜劣化，再進行鹽霧測試。

由圖 5 可知：第一代無鉻塗膜 C6N8-1 最適的 PMT 約在 320℃以上，低於此烘烤條件所得的 C6N8-1 塗膜試片，在高溫高濕加速劣化後的耐蝕性會明顯變差。反觀第二代無鉻塗膜 C6N8-2，於高溫高濕加速劣化後，其 PMT=285℃之塗膜試片耐蝕性並無變化、而其 PMT=268℃之塗膜試片耐蝕性亦僅出現極為輕微的影響。因此，第二代無鉻塗膜 C6N8-2 所需之最低 PMT 應在 268~285℃之間。

由圖 5 所示之測試結果，第二代無鉻塗膜 C6N8-2 理想之 PMT 下限較第一代無鉻塗膜 C6N8-1 明顯低了約 35~50℃。這代表在實際生產時，無鉻塗膜電磁鋼捲於塗覆室後方的烘烤爐區溫度需求，可因改用新的塗料技術(以 C6N8-2 取代 C6N8-1)而大幅降低。

因此，C6N8-2 的塗料本身不但因無鉻而有環保之效果、優異之塗膜性能也有助於其終端機電產品的效能提升，在鋼捲生產端更可因烘烤爐溫

的降低而有節能與間接減碳之效果，可說是一舉三得的綠色技術。

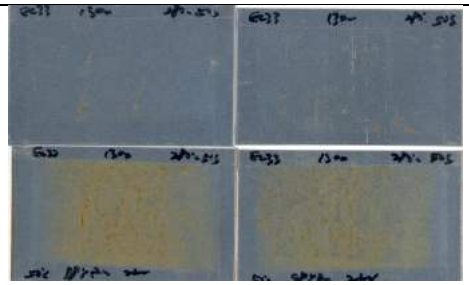
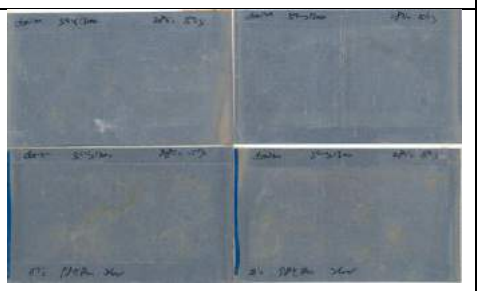
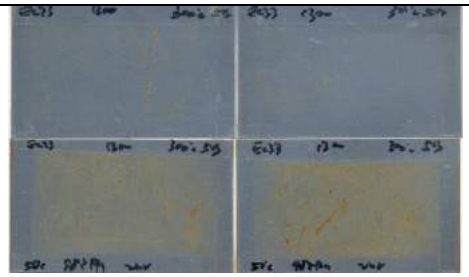
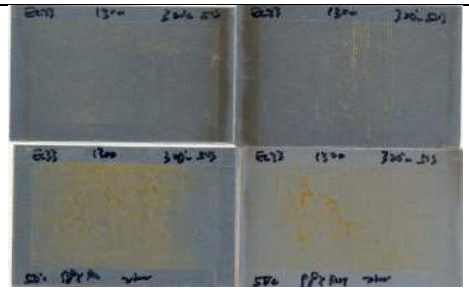
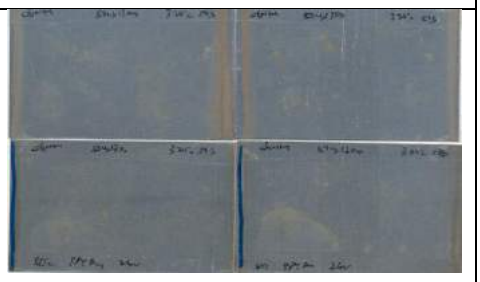
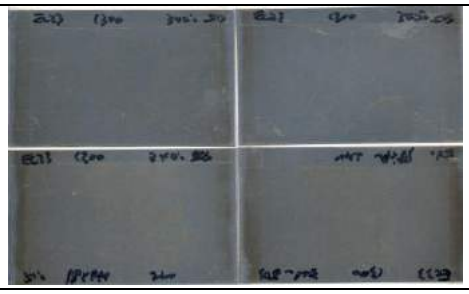
爐溫/板溫(℃)	HTH處理	第一代無鉻塗膜 C6N8-1	第二代無鉻塗膜 C6N8-2
280 / 268	前		
	後		
300 / 285	前		
	後		
320 / 305	前		
	後		
340 / 322	前		
	後		

圖 5　不同烘烤條件下的 C6N8-1 與 C6N8-2 塗膜鋼片於高溫高濕(HTH 處理)加速劣化前、後之鹽霧測試結果

四、結　論

因為含鉻塗膜具有優良的防蝕特性，長久以來是電磁鋼片絕緣塗膜的主流技術。雖然含鉻塗膜之成品為安全的三價鉻，但其塗液含有具致癌性的六價鉻原料，故對環境生態與人體健康而言均非理想的選擇。因此，綠色環保

之無鉻化技術已成為電磁鋼片塗膜發展之必須。

「第二代無鉻塗膜 C6N8-2」是為滿足市場對電磁鋼片高性能絕緣塗膜需求所研發的新型無鉻技術：其塗層結構緻密，具有優異的「耐蝕性」、「電絕緣性」、「底材附著性」，其性能不但大幅超越了舊有的無鉻技術(第一代無鉻塗膜 C6N8-1)、甚至也優於已被廣為使用的含鉻技術(含鉻塗膜 C628)。

由於 C6N8-2 的塗膜性能優異，有助於電磁鋼片塗膜無鉻技術的普及、與產品價值之差異化，使環境保護與市場推展能並行不悖。此外，C6N8-2 所需的「烘烤溫度」明顯低於舊有的 C6N8-1 無鉻技術，對無鉻塗膜鋼捲之生產亦有節能與減碳之效果。故第二代無鉻塗膜 C6N8-2 在生產與使用端均為兼具環保、節能、高效的綠色技術。

五、參考文獻

1. T.E. Yang, “Specification, Quality Control and Application of Electrical Steel” in Technical Seminar of Electrical Steel 2015, New Delhi & Pune, India, Jun 23,25, 2015.
2. F.G. Hanejko, G.W. Ellis, T.J. Hale: “Application of High Performance Material Processing-Electromagnetic Products” in PM2TEC’98 International Conference on Powder Metallurgy and Particulate Materials, Las Vegas, USA, May 31 – June 4, 1998.
3. M. Lindenmo, A. Coombs, D. Snell, J. Magn. Magn. Mater., 2000, 215-216 (2000) 79.
4. ASTM A 976:03 Standard Classification of Insulating Coatings by Composition, Relative Insulating Ability and Application.
5. Directive 2002/95/EC Of The European Parliament And Of The Council Of 27 January 2003 On The Restriction Of The Use Of Certain Hazardous Substances In Electrical And Electronic Equipment (RoHS).
6. Directive 2002/96/EC Of The European Parliament And Of The Council Of 27 January 2003 On Waste Electrical And Electronic Equipment (WEEE).

零耗氣-70°C 壓縮熱回收式乾燥機

黃志豪*、邱秉岳**

摘　要

目前業界中對於壓縮空氣之露點達到 ISO8573-1 規範第 1~3 級(露點-70°C，-40°C 及-20°C) 大多採用吸附式乾燥機，其中仍有大部份的產業使用無熱吸附式的乾燥系統(再生時壓縮空氣損耗量約 15%-30%)，或是使用外部鼓風機加熱式，採用鼓風機吸引環境空氣加熱，屏除無熱式乾燥機採用高能耗之壓縮空氣再生。冷卻時採用壓縮空氣冷卻，冷卻時需損耗壓縮空氣量約 2%-3%，或者採用水冷式密閉循環冷卻，冷卻時無壓縮空氣損耗。

特別是需要極低之壓縮空氣露點，ISO8573-1 一級-70°C 時，無論採用哪一種吸附式乾燥機，為達到-70°C 的要求，一般均需要降低進入吸附式乾燥機的含水量，於系統配置上，吸附式乾燥機前端需配置冷凍式乾燥機或採用冰水用於空壓機的後部冷卻器，以降低進入吸附式乾燥機的水份和溫度，同時吸附式乾燥機內部需充填一定比例之分子篩作為吸附劑，使得吸附式乾燥機得以達到露點-70°C 的要求。對產業影響如下：

1. 取代無熱吸附式乾燥機：藉由推廣零耗氣-70°C 壓縮熱回收式乾燥機之技術，可將國內目前仍使用無熱吸附式乾燥機之生產工廠之空壓機使用電力降低 15~30%。
2. 取代外部鼓風機加熱吸附式乾燥機：以國內某石化廠投資越南設立鋼鐵廠為例，該鋼鐵廠總使用壓縮空量風量 45,000 m^3/h，出口壓力露點需求-40°C，設計 3 台吸附式乾燥機，每台乾燥機處理量 15,000 m^3/h，若採用外部鼓風機加熱式乾燥機則每小時平均耗能約 150KW, 採用零耗氣壓縮熱回收式乾燥機之每小時平均耗能僅約 50KW，以每度電平均電費 2.8 元計算，一年可節省電費 150KW-50KW x 2.8 元/kWh x 24 hr.x365 天 x3 台=NT$7,358,400 元
3. 市場應用：雖然本技術為外國技術，但國內尚無相同之設備製造廠商，由於此設備對於空壓系統整體節能成效卓著，值得廣泛推廣，可促進國內產業技術升級，改善現有使用無熱及加熱吸附式乾燥機之用戶，大氣量之用戶之節能改善成效更為顯著。

【關鍵詞】ISO8573-1 規範、零耗氣壓縮熱回收、空壓系統節能、產業技術升級。

---

*貝克歐科技有限公司　總經理

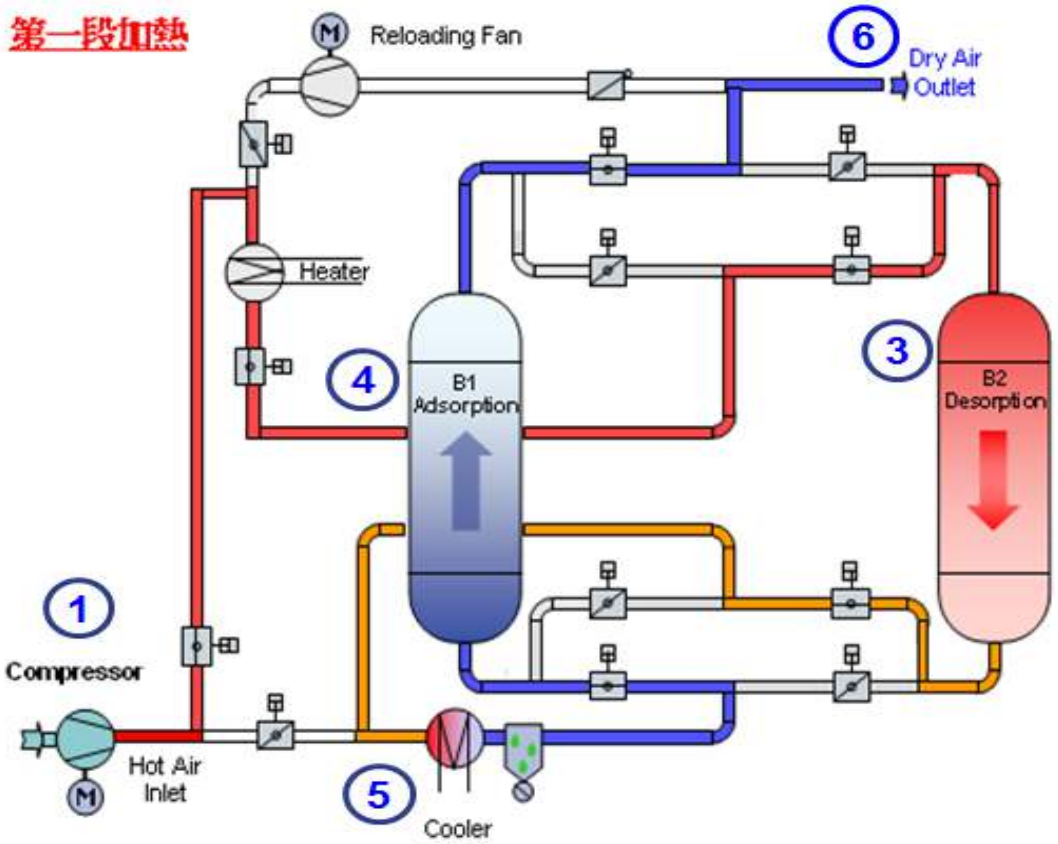
**貝克歐科技有限公司　業務經理

一、技術說明

空壓機在壓縮空氣的過程中，會產生高熱，兩段壓縮無油螺旋式空壓機的出口溫度，在後部冷卻器之前溫度可達 160°C~180°C，三段壓縮無油離心式空壓機在後部冷卻器之前溫度可達 100°C~120°C，因此空壓機必須配置後部冷卻器，將壓縮後的高溫壓縮空氣冷卻，然而外部加熱吸附式乾燥機在脫附的過程中，又必須將空氣加熱至 180°C~210°C，將吸附劑內之水份去除，因此整體乾燥機作動流程，一方面需要用到空壓機後部冷卻器的冷能冷卻，另一方面又要用到外部鼓風機加熱乾燥機的電能加熱，使用零耗氣-70°C 壓縮熱回收式乾燥機則充份利用壓縮後的高溫空氣作為熱源，減少乾燥機本身再生所需的電能，達到雙重節省的目的。

零耗氣-70°C 壓縮熱回收式乾燥機的工作原理，流程如下：

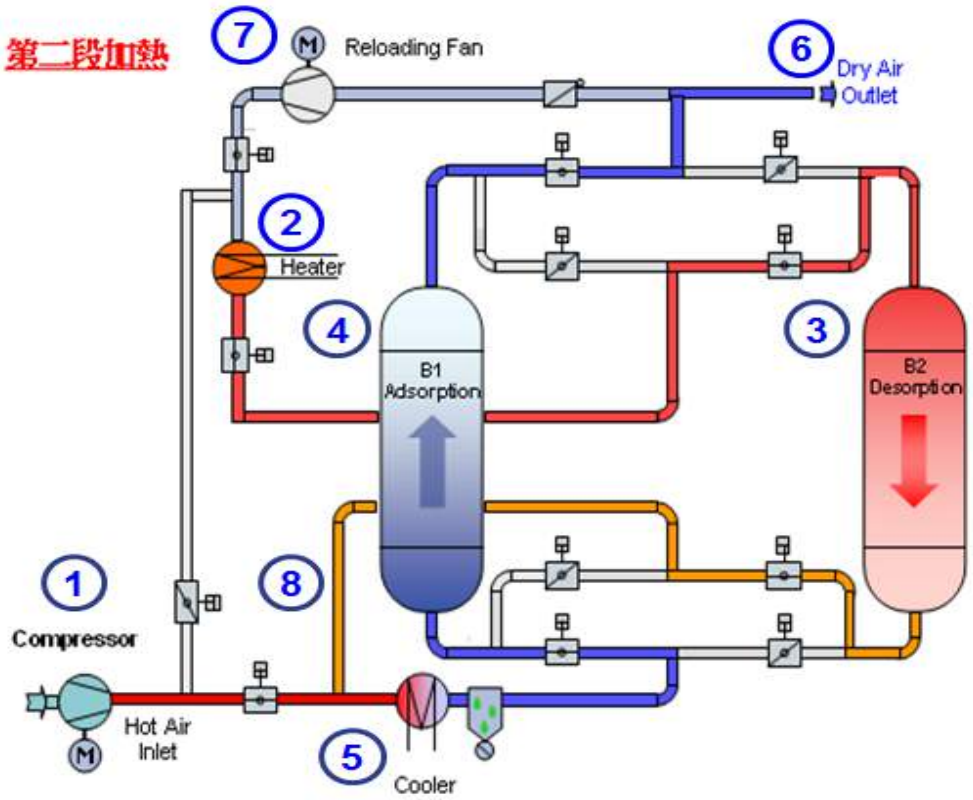
1.第一階段：空壓機廢熱加熱行程



利用空壓機壓縮後所產生的廢熱，100°C-180°C 於空壓機的後部冷卻器之前①引出，進入 B2 桶槽③加熱再生，加熱後之熱空氣再進入中間冷卻器⑤冷卻，冷卻後之壓縮空氣進入 B1 桶槽 ④吸附，乾燥後之壓縮空氣

由出口⑥供應至現場使用，整個再生加熱的過程中，主要使用空壓機的廢熱作為熱源，同時不會排放浪費任何壓縮空氣，由於使用空壓機的廢熱全量加熱，此階段加熱所需的時間僅需約 60 分鐘，根據空壓機廢熱溫度條件，內建之電加熱器可依需要開啟，一般搭配兩段式無油空壓機，由於廢熱溫度極高 160°C~180°C，再生時不需要使用電加熱器。

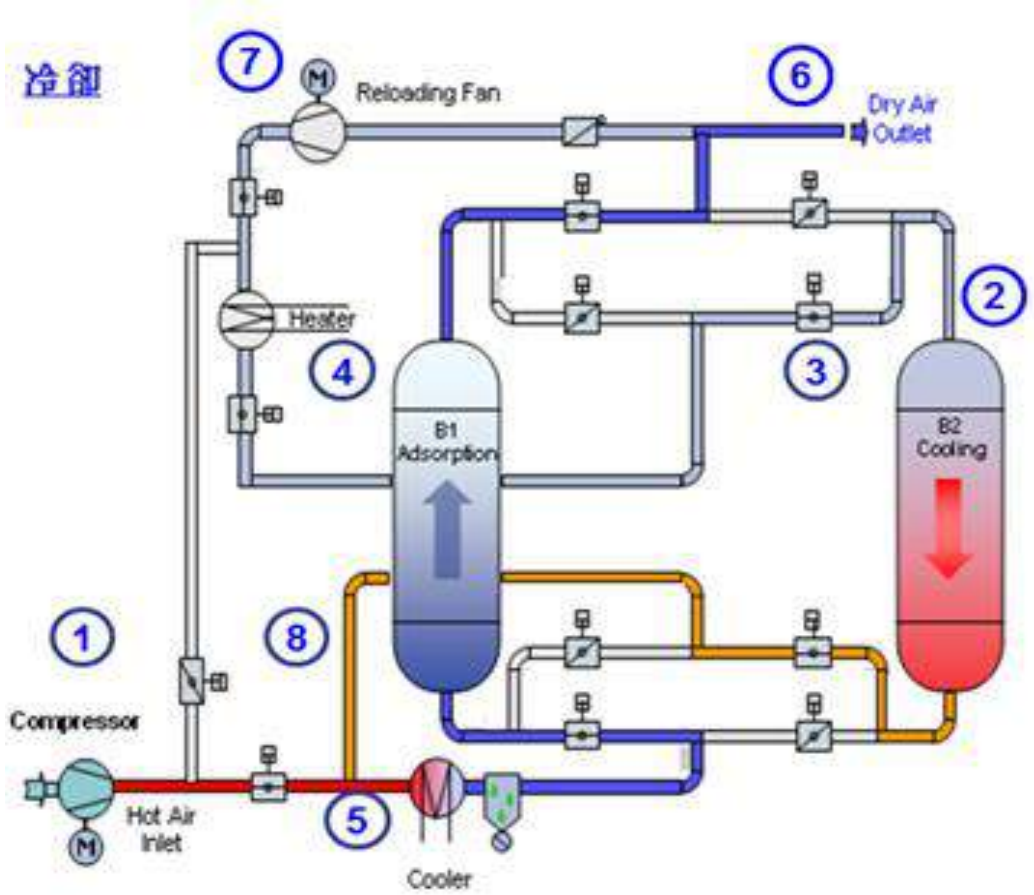
2.第二階段 ： 二次乾燥空氣加熱行程



基於空壓機廢熱的溫度不同及出口壓力露點的需求，通常-40°C 的乾燥空氣出口壓力露點需求，搭配兩段式無油式空壓機，可不需要進行乾燥機的第二段加熱，直接跳入下一行程，進行冷卻。

當乾燥空氣出口壓力露點需求-70°C 或空壓機廢熱溫度較低，可進行第二階段加熱行程。進行第二段加熱時，以增壓機⑦回抽出口小量乾燥壓縮空氣⑥，經過加熱器②增溫，再進入 B2 桶槽③再加熱再生，經過第二階段加熱後的吸附劑，由於使用非常乾燥的空氣再加熱，可將吸附劑內的水份幾乎完全去除，達到最佳的吸附能力，加熱後的熱空氣⑧，再與入口之空壓機高溫壓縮空氣匯流，引入中間冷卻器⑤冷卻，冷卻後之壓縮空氣進入 B1 桶槽④吸附、乾燥後之壓縮空氣由出口⑥供應至現場使用，整個二段加熱過程中不會排放任何壓縮空氣。

3.第三階段：冷卻行程



進行冷卻行程時，關閉加熱器，以增壓機⑦回抽出口小量乾燥壓縮空氣⑥，進入 B2 桶槽②進行冷卻，冷卻後出口的熱空氣⑧，再與入口之高溫壓縮空氣匯流，引入中間冷卻器⑤冷卻，冷卻後之壓縮空氣進入 B1 桶槽④吸附，乾燥後之壓縮空氣由出口⑥供應至現場使用，整個冷卻過程中使用乾燥之壓空氣進行密閉循環，不會排放壓縮空氣。

二、零耗氣-70℃壓縮熱回收式乾燥機優勢及低能耗

1.充分利用空壓機廢熱能：

空壓機在壓縮的過程中所產生的高溫廢熱作為乾燥機再生加熱的熱源，有別於傳統無熱式或外部鼓風機加熱式乾燥機，必須先將空壓機產生的廢熱，用額外的冷能降溫，再進入吸附式乾燥機吸附。再生的時候，再使用外加電熱器加熱空氣至 185°C~210°C。如此一來將多產生二次能耗。

2.整體空壓系統壓損較低：

除壓縮熱回收乾燥機系統以外，其他型式吸附式乾燥機系統，空壓機均需配置後部冷卻器及前置過濾器(如下圖 1 所示)，由於壓縮空氣於未乾燥之前，經過前置過濾器一般多為飽和濕空氣，經過過濾器內部的纖維材質時會被吸收於膨脹而導致過濾器之壓差上昇，因此在整體系統配置上無熱及外部加熱式乾燥機系統之整體壓損較零耗氣-70°C 壓縮熱回收式乾燥機為大。

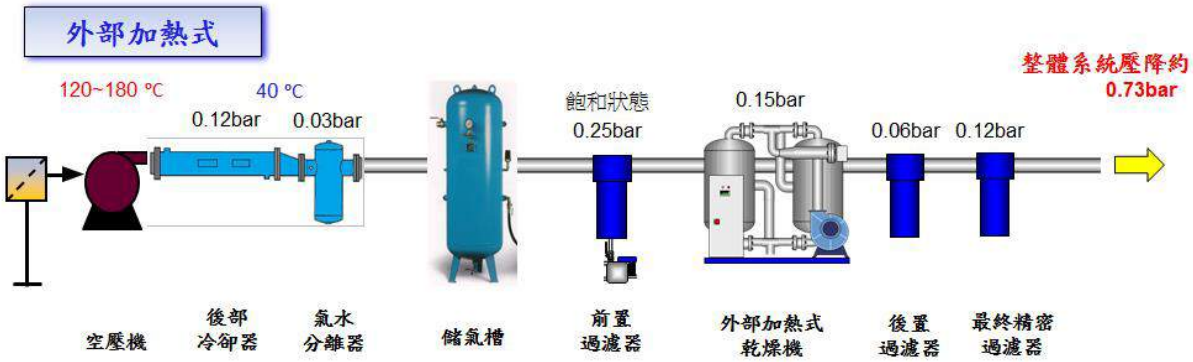


圖 1　空壓機均需配置後部冷卻器及前置過濾器

零耗氣-70°C 壓縮熱回收式乾燥機之系統配置(如下圖 2 所示)，不需要空壓機的後部冷卻器及前置過濾器(一般作用為去除壓縮空氣中的微粒及油份，用以保護吸附劑)，整體配置比較外部加熱式乾燥機系統，約可減少約 0.3bar 的壓損，空壓機每多出力 1 bar 壓力，約需要多出 8%的電費，因此採用零耗氣-70°C 壓縮熱回收式乾燥機，可以節省空壓機因整體壓差損失而產生的電費約 2.4%。

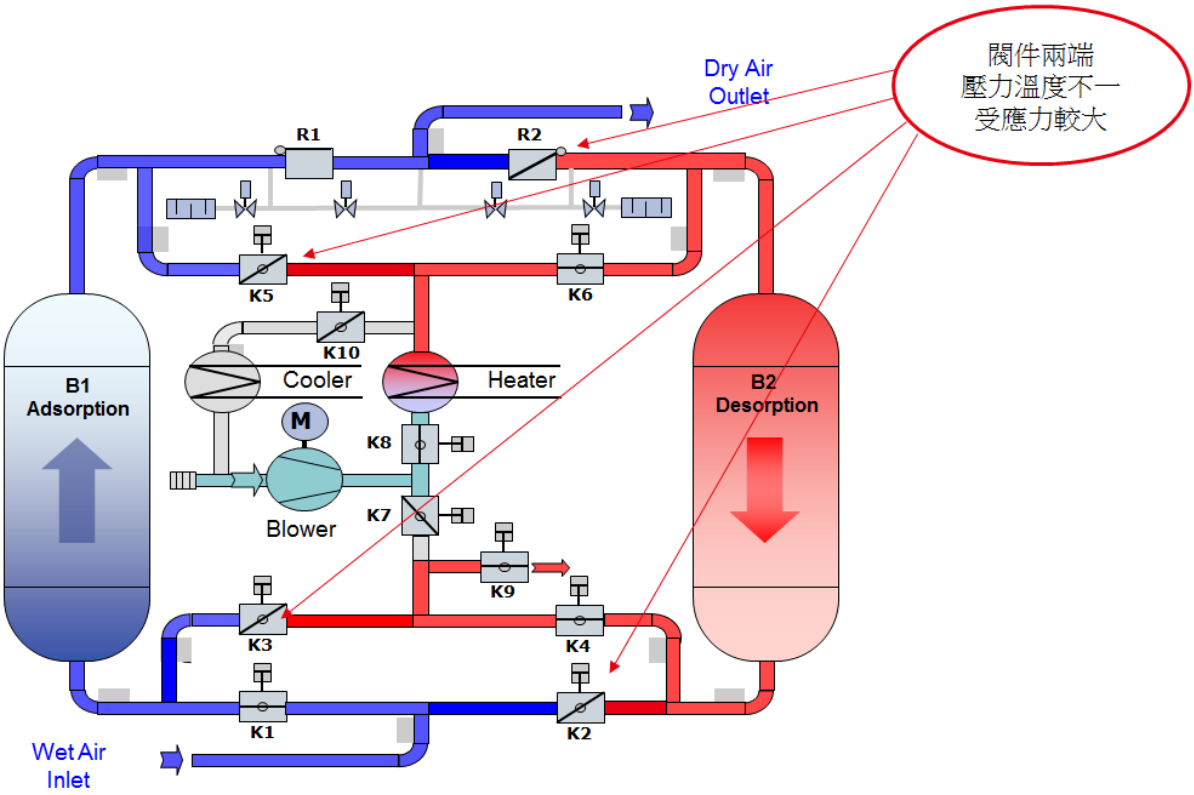
圖 2　零耗氣-70°C 壓縮熱回收式乾燥機之系統配置

3.再生所需耗能較低：

一般無熱式或外部加熱式乾燥機系統若需達到-70°C 壓力露點，必須充填一定比例之分子篩，然而因分子篩之再生溫度非常高，一般加熱溫度需要到達 195°C~210°C，因此所需之再生耗能較高，零耗氣-70°C 壓縮熱回收式乾燥機充填 100%之防水型矽膠，因矽膠之再生特性，導熱性高，再生溫度低所需之加熱溫度僅 155°C，即可做到-70°C 壓力露點。

4.運轉耗材壽命較長、系統穩定度較高：

零耗氣-70°C 壓縮熱回收式乾燥機運轉時壓縮空氣的運行是一條龍的模式，無論是再生桶槽或是吸附桶槽均全時保持於壓力狀態，再生時不需要洩放桶槽壓力，因此整體設備的應力影響較小。



Desorption Phase

外部鼓風機加熱式乾燥機再生時必須洩放桶槽壓力，切換閥件於吸附端處於高壓低溫狀態，於再生端處於低壓高溫狀態，受應力影響較大，運轉壽命較短。

零耗氣-70°C 壓縮熱回收式乾燥機運作時無須洩壓，因此系統沒有配置連接至大氣之管路閥件，無熱式及外部鼓風機乾燥機系統必須配置再生洩壓閥及管路，當閥件故障洩漏時，可能造成系統瞬間壓降，影響生產。

零耗氣-70°C 壓縮熱回收式乾燥機沒有前置過濾器，可以節省操作成

本，吸附劑使用防水型矽膠其使用壽命可達 10 年以上，較一般無熱式或外部加熱式乾燥機所使用之活性氧化鋁或分子篩壽命只有 3-5 年，運轉成本較低。

5.節省整體空壓系統所需冷能：

為使吸附式乾燥機能達到-70°C 露點之需求，一般進入吸附式乾燥機的壓縮空氣溫度不可高於 20°C~30°C，或者於前端增設冷凍式乾燥機，若是採用降低入口的壓縮空氣溫度的方式，則前端的冷卻器必須使用 16°C~22°C 的冰水作為冷卻水(或是使用更低溫度的冰水)，此冰水所需之耗能比外部鼓風機加熱式乾燥機本身再生所需之耗能為高，若是採用前置冷凍式乾燥機，則需額外之冷媒壓縮機耗能，並增加設備故障率及維護成本，且經過冷凍式乾燥機的壓縮空氣相對溼度一般低於 30%，雖然降低了吸附式乾燥機入口空氣的溫度但相對濕度亦隨之降低，由於低相對濕度時活性氧化鋁的吸附能力不到原本的⅓ (與 100%相對溼度比較時)，因此所需耗能亦相對提高。

零耗氣-70°C 壓縮熱回收式乾燥機由於使用節能型矽膠作為吸附劑，且第二階段的加熱再生過程中使用出口的乾燥壓縮空氣作為二次加熱的氣源，由於出口的乾燥壓縮空氣濕度非常的低，經過二次加熱後，幾乎去除吸附桶槽頂部吸附劑內的水分，此一結果使得乾燥機吸附時得以容許較高的進口溫度，在進氣溫度 37°C 範圍內均可達到出口壓力露點的需求，因此採用零耗氣-70°C 壓縮熱回收式乾燥機可以使用 32°C 冷卻水，節省冰水能耗。

三、可行性評估

1.技術可行性評估：

(1)發展階段：目前國內多家電子廠，台塑企業集團，中油均有許多已採用零耗氣壓縮熱回收吸附式乾燥機。

(2)適用於國內所有吸附式乾燥機需求之產業。例如： 電子產業、光電產業、石化產業、鋼鐵產業、紡織產業、造紙產業、食品產業、醫療生技產業等。

(3)推廣可行性：技術成熟，需求殷切且廣泛。

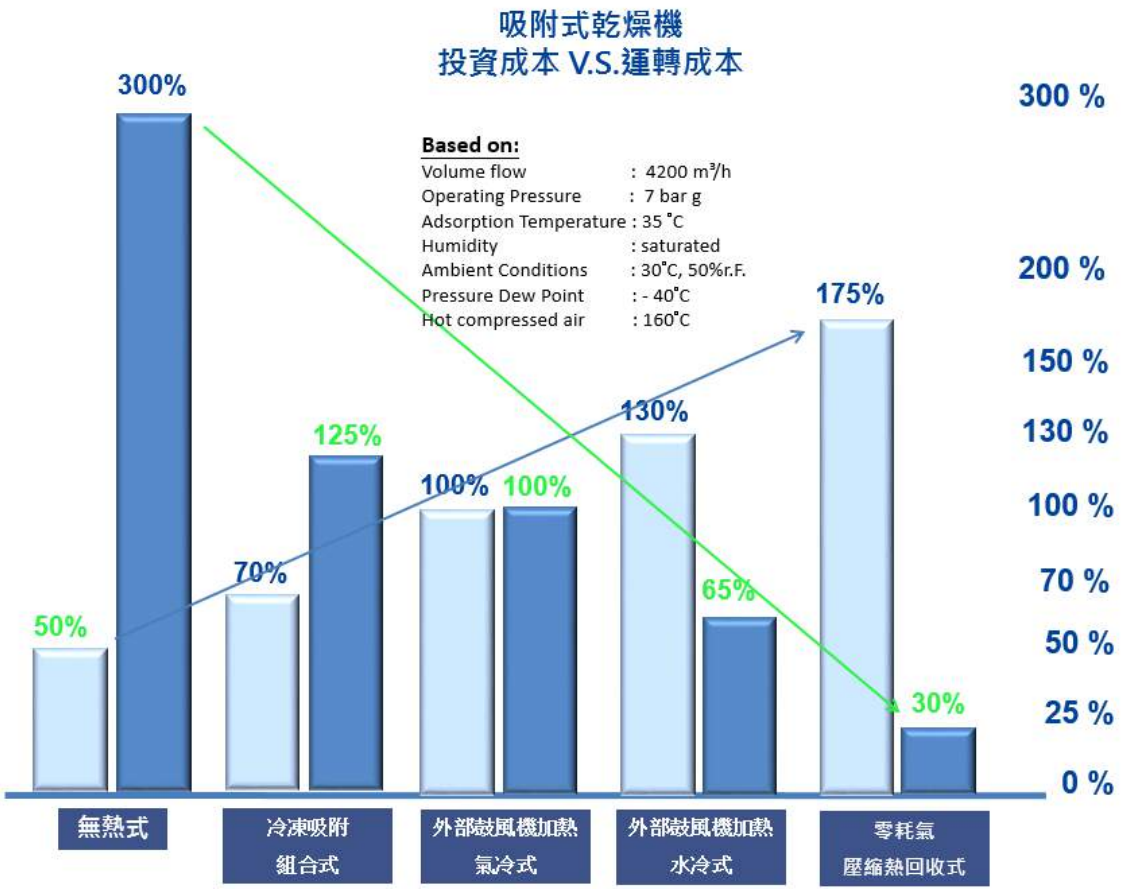
2.環境可行性評估：

(1)物料和能源：減少使用整體空壓系統冷能，低耗電量，耗材壽命長能提高工廠能源利用，達到減廢與節能之目的。

(2)是否產生污染介質的移轉：否。同時再生的過程中完全密閉，不與環境空氣接觸，完全不受環境影響及污染，不同於一般鼓風機加熱再生式乾燥機，必需吸入環境空氣加熱，增加壓縮空氣污染的因子，影響壓縮空氣品質。

3.經濟可行性評估：

(1)投資：零耗氣-70°C 壓縮熱回收式乾燥機之投資成本依據處理風量之不同而異，但操作運轉成本相對較低，其購置與運轉比較約如下。



(2)責任成本：無環境風險與負債。

(3)效益：依據台化工務部之報告，經濟效益比較，預估回收年限 2.78 年。

四、SWOT 分析

1.Strength：

(1)零耗氣-70°C 壓縮熱回收式乾燥機，有別於傳統壓縮熱回收式乾燥機系統，是唯一能到處理後乾燥空氣壓力露點-70°C 的壓縮熱回收機型。

(2)充分利用空壓機壓縮後產生之廢熱作為乾燥機加熱的熱源，同時減少冷能的使用(雖然壓縮熱回收乾燥機亦需要冷卻器使用冷能，但再生加熱期間，主要空壓廢熱已被吸附劑吸收，所需冷能比使用外部鼓風機加熱式乾燥機，使用空壓機後部冷卻器，需全時將高溫壓縮空氣冷卻為低。)若搭配二段式壓縮無油螺旋空壓機，處理量 1,000KW 以下，乾燥機之平均耗能-40°C 露點時，平均耗電量僅約 2KW.

(3)機的前置過濾器和熱排氣管路，可以減少空壓系統整體壓損及運轉成本。

(4)使用節能型防水型矽膠作為吸附劑，再生能耗較低，同體積之吸附水量較分子篩高 50%以上，使用壽命長達 10 年，比活性氧化鋁或分子篩一般為 3-5 年為佳。

(5)系統全時於壓力下操作，完全不與環境空氣接觸，操作不受環境影響，無汙染空氣及吸附劑的問題，系統穩定性高。

(6)使用零耗氣-70°C 壓縮熱回收式乾燥機，空壓系統可以使用一般 32°C 冷卻水，可以節省大量之冰機耗能，也是目前所有空壓系統中，在沒有搭配冷凍式乾燥機的情況之下，空壓系統能使用 32°C 冷卻水，吸附式乾燥機唯一能達到處理後乾燥壓縮空氣壓力露點-70°C 的機型。

2.Weakness：

(1)須搭配無油式空壓機使用，有油式空壓機不適用。

(2)購置成本較外部鼓風機加熱式高。

3.Opportunity：

(1)零耗氣-70°C 壓縮熱回收式乾燥機為最新研發之吸附式乾燥機-70°C 壓力露點的新技術，在業界需求露點-70°C 的製程需求下，除了無熱式、外部鼓風機加熱式之外的新選擇，雖然初期購置成本較高，但系統設備運轉低，一般投資約 2~3 年即可回收。

(2)目前世界趨勢發展綠色能源，減少石化能源的使用，使得發電成本，

與日俱增，壓縮空氣的乾燥技術也需要突破，發展及使用更潔淨的技術因應世界新趨勢。

4.Threat：

(1)政府無訂定針對壓縮空氣系統吸附式乾燥機相關能耗標準，亦無第三公證單位可提供認證，使用者於購買設備時無依據可參考，只能依業者自行提供相關參數做為依據。

(2)業界目前有一些廠商誇大數據或以能源轉換方式，降低吸附式乾燥機的能耗，例如使用冰水冷卻吸附式乾燥機的入口空氣溫度，雖降低乾燥機單機的耗能，但忽略冰水的成本，又冷凍吸附組合式乾燥機可回收冷媒系統的部分蒸發熱，但忽略冷媒壓縮機的耗電、整體乾燥機系統的壓損及再生吹掃空氣(purge air)的損耗。

(3)由於政府無訂定吸附式乾燥機能耗標準，部分使用者購買設備時皆以價格為優先考量，而忽略能耗及操作運轉成本。

(4)對於先進綠能及清潔生產相關技術設備，政府偶有專案補助獎勵措施，但在相關技術未能全面普及之前，該獎勵措施即終止，無法有效達到全面持續推廣之目的。

(5)國內充斥著低價的仿冒品，卻打著熱回收的旗號，號稱可節能減碳，實質上卻忽略了系統整體壓損、能源轉嫁，使用大量冰水或者增加額外設備的能耗。

五、技術來源

1.貝克歐科技成立於 1982 年，總部設於德國 NEUSS(諾宜斯市)，主要技術專注於壓縮空氣後處理系統，BEKO 研發、製造及銷售優質、可靠的產品及提供相應的服務。此產品及服務主要是用來優化使用者現有的設備、系統及工廠，目的就是讓客戶獲得更好的效能及更高的可靠性，同時還要達到節約能源、降低污染及改善工作條件的目的。

2.BEKO TECHNOLOGIES 於 2009 年 2 月 18 日取得-70°C 壓縮熱回收吸附式乾燥機的歐洲發明專利，專利號碼 EP2024056B1。

熱水鍋爐系統管理面面觀

吳柏毅*、謝志新**、李清諒***

摘　要

半導體晶圓廠中，熱水鍋爐系統提供 HOT DI 及純水系統樹脂再生等熱循環需求，為生產端第一線資源，常時供應高溫熱水，為提升系統穩定度並考量燃料備援，首創以電熱鍋爐結合瓦斯鍋爐雙燃料熱水鍋爐系統併聯運轉。

然而鍋爐為高壓高溫風險設備，災害事故時有所聞，故除節能運轉之外，安全及維護管理更顯重要。本文不僅呈現節能改善成果，另以工程實務角度分享鍋爐特殊風險狀況，由運轉安全與節能環保兩大主軸說明雙燃料熱水鍋爐系統之管理經驗，包括電盤保護、煙管腐蝕、提昇鍋爐效率及節費最適化等，深入追究並研擬精進作為，盼能作為各界鍋爐安全環保運轉上之參考。

【關鍵詞】熱水鍋爐系統、工程實務、安全環保

---

*華邦電子股份有限公司廠務處　工程師

**華邦電子股份有限公司廠務處　資深工程師

***華邦電子股份有限公司廠務處　副經理

一、熱水鍋爐系統背景說明

半導體廠因熱純水製程需求，需設置熱水鍋爐系統，熱水鍋爐依據運轉型式，大多採電熱與瓦斯兩種燃料型式，本廠為 2004 年建置，由於當時電力價格低廉，因此設計初期為純電熱鍋爐供應，後續產能擴充時，考量天然氣碳排放較低，且價格具變動性如圖 1 所示，且時逢價格調降，為新增備援及燃料調配機制，選用增設瓦斯煙管式鍋爐與電熱鍋爐併聯運轉。

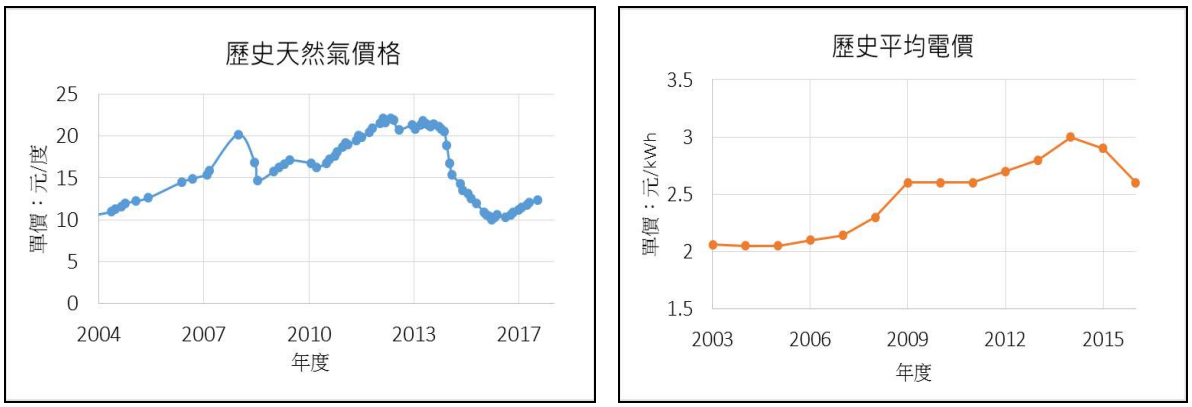


圖 1　歷史平均電價、天然氣價格(資料來源：台電、中國石油)

1.熱水鍋爐介紹

(1)電熱鍋爐

燃料源自電力，為優質鋼製成的儲水容器，利用電熱絲將容器內的儲水加熱，產生高溫熱水供應，具體積小，加減載速度快、低維運成本及無環境汙染等優勢，惟因電力需求大，需另建置專屬電力站獨立供電，增加整體初設費用。

(2)瓦斯鍋爐(煙管式)

燃料為天然氣，煙管式鍋爐儲水量大，操作壓力較水管式鍋爐低，符合設計需求，燃氣由煙管內通過，管外繞以水，進而熱交換產生熱水，燃燒氣體經由爐筒內煙管，一直到煙室再通往煙囪。優勢為燃料費用及二氧化碳排放係數較低，但具瓦斯洩漏及爆炸之風險，故需增設隔間牆、通風換氣設備及 NG 及 LPG 氣體偵測器，並定期針對空氣汙染源 NO_X 濃度(標準<150ppm)做固定污染源申報。兩種鍋爐設置及運轉優缺點比較如表 1。

表 1　電熱鍋爐與瓦斯鍋爐設置及運轉優缺點

項次	項目	電熱鍋爐	瓦斯煙管鍋爐
1	設備構造	簡單	複雜
2	體積及佔地面積	$5m^2$	$50m^2$
3	設置煙囪	無	需要
4	熱傳效率	99%	90~92%
5	加減載速度	快	慢
6	設備操作	簡單	複雜
7	維護保養	簡單	複雜
8	瓦斯洩漏與氣爆風險	無	有
9	維護成本	低	高
10	製造容量單位成本	中	容量越大越低
11	電力或瓦斯管線設置成本	高	低
12	空氣汙染管制	無	有
13	運轉成本	隨燃料時價變動	

2.雙燃料熱水鍋爐系統

鍋爐系統設計時為使系統單純化，通常選用單一系統，同廠區增設時也不會改變其原有模式。半導體製程技術中，需 24 小時提供 HOT DI 進行溼式製程技術及去除晶圓殘留物等；MB&2B3T 純水再生也需大量熱量加快陰陽離子遷移速度以提升再生效率，再生期間瞬間熱交換需求量大，因此熱水系統除具備穩定特性之外，也需具備短時間加熱之裕度，本廠熱水系統架構如圖 2 所示。

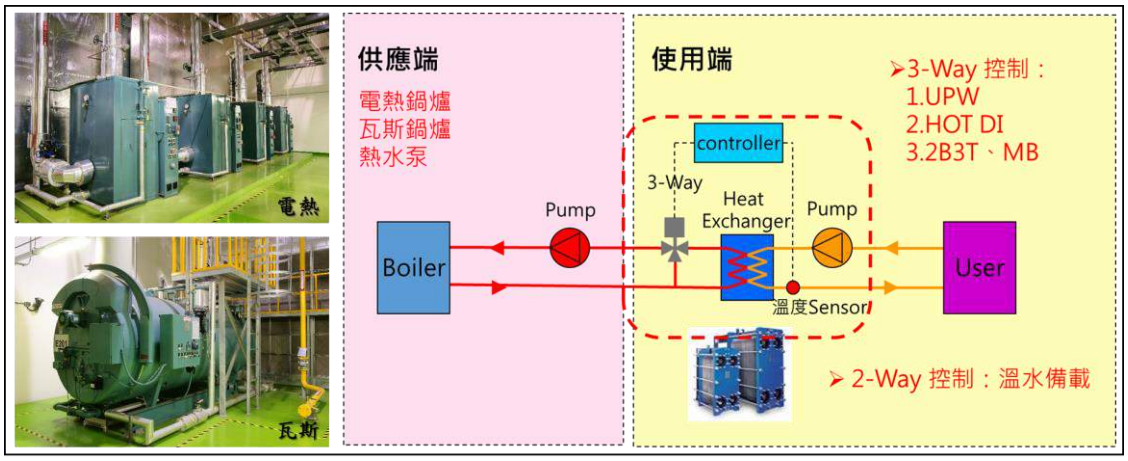


圖 2　熱水鍋爐系統架構

3.鍋爐安全與環保

鍋爐屬於危險性設備，雖然鍋爐製造技術悠久且成熟，但實際上仍需重視其使用安全，除操作人員需具國家技術士證照之外，設備本體、加熱器及週邊皆需符合原廠規格，雖說如此，在運轉維護上仍出現許多特殊狀況，會同原廠深入剖析其引發原因，並著手進行鍋爐安全性改善。然而節能環保為時代潮流，除了節省燃料節省成本支出之外，提升鍋爐效率及降低環保衝擊，更是企業永續之重要目標。

二、熱水鍋爐系統精進

本廠鍋爐運轉經驗中，深刻體認運轉安全與節能環保是最重要課題，本章節將詳述電熱鍋爐與瓦斯鍋爐曾遭遇之異常風險，分析發生原因及後續改善對策；另外，在鍋爐運轉年限當中，其燃料成本約佔總費用 99%、設備初置成本及維護費用僅佔 1%，因此，如何在供應無虞的前提下，增加鍋爐效率及減少燃料費用達成節能環保目標，一併於此章節說明。

1.鍋爐運轉安全精進

鍋爐為危險性設備，不可忽視其運轉風險，以下將分別對電熱鍋爐及瓦斯鍋爐，分享異常改善之工程經驗。

(1)電熱鍋爐安全改善

電熱鍋爐容量為 1,500kW，經調查應為園區單台最大容量，也因此市面上並無適用之無熔絲開關，因此另需配置 ACB 電盤獨立供電。在建置初期曾發生負載側接地導致設備跳脫，弧光短路造成部份保險絲座與底板毀損如圖 3 所示，雖有備援機制未影響熱水系統供應，但美國原廠鍋爐設備安全亮起紅燈，為首要改善之目標。

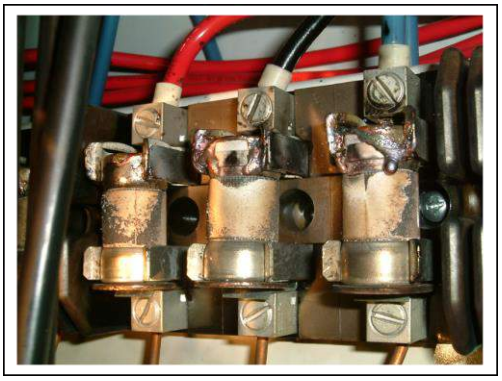


圖 3　電熱鍋爐動力盤短路故障

會同原廠與機電顧問現勘，受損之保險絲皆於上方熔接且大多為尖端處高溫灼傷，下方底板有灼傷但無熔化情形，根據 ACB (Air Circuit Breaker)訊號判讀在 0.2 sec 內通過 20,000A，推判為短路情形。經調查及 IR 熱顯像量測後發現，主因為盤體內溫度過高，致使電線、保險絲等組件因長期處於 60℃高溫環境絕緣保護能力降低如圖 4，符合產生弧光之條件，由於電弧是極高溫之空氣柱游離所變成的導電體，隨後造成電源相間短路之火花情形。

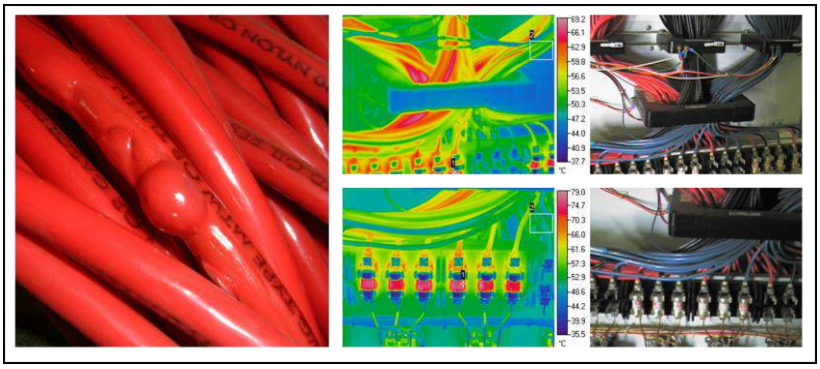


圖 4　電纜絕緣劣化與盤體 IR 拍攝

(2)瓦斯煙管鍋爐安全改善

瓦斯煙管鍋爐曾發生火側煙管滲水現象，爐膛內也有積水水漬，首要將滲水煙管以氬銲盲封並進行爐體內部檢查，發現水側煙管外部有異常結垢情形，由於系統為 RO 水密閉系統，且有管控防蝕防垢劑及脫氧劑濃度，去除含氧量並抑制腐蝕效果，理論不應結垢，因此懷疑結垢物為造成煙管滲水原因，採樣熱水、補充 RO 水及附著管路之結垢物進行化驗，顯示熱水及水源水質皆正常，僅沉積物分析氧化鐵佔 86.5%，氧化銅佔 0.65%如圖 5 所示。

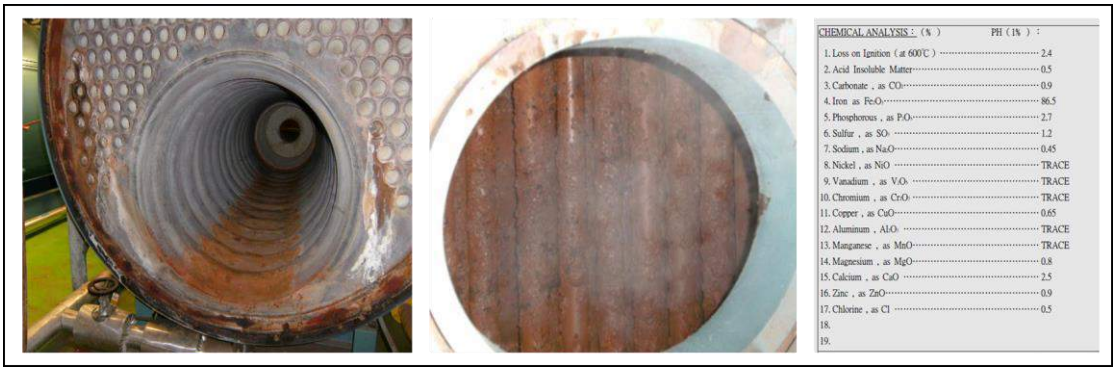


圖 5　爐膛積水與煙管結垢物分析

研判少量銅份附著在碳鋼管壁上導致流電腐蝕現象，由於熱水泵葉輪材質為銅，拆解發現葉輪受高溫及孔蝕現象(Cavitation)影響如圖 6 所示，銅離子大量釋出，帶著銅離子的熱水進入鍋爐因容積變大流速變慢，比重較大的銅離子沉積附著在煙管上緣腐蝕，而下層無明顯腐蝕，確認為流電腐蝕造成滲水現象。

圖 6　金屬電位不同造成流電腐蝕、葉輪孔蝕現象

2.鍋爐節能環保手法

鍋爐為高耗能設備，因此提昇鍋爐效率減少能源消耗其節能效益不容小覷，可透過工程管理手法有效節能，減少對環境衝擊，以下將細述之。

(1)瓦斯鍋爐設備節能

燃燒氣體經由煙管，由前面爐膛流向後面又折回煙管，稱為二迴路煙道鍋爐，可於高溫燃氣排放至煙囪處，增設燃氣回收門可提昇整體鍋爐燃燒效率如圖 7，回收部份高溫廢氣進行二次燃燒，氮氧化物(NOx)濃度由原 135ppm 降至 46ppm，有效降低廢氣氮氧化物(NOx)濃度約六成，同時預熱空氣進而提昇整體燃燒效率。氮氧化物(NOx)主要是在燃燒過程空氣中氮(N_2)與氧(O_2)反應而生成。氮氧化物是 NO、NO_2、N_2O、N_2O_3、N_2O_4、N_2O_5 等的總稱，其中 NO 占 90%，NO_2 占 5%-10%，NOx 是造成大氣污染的主要來源，易對人體眼睛及呼吸系統產生刺激，造成過敏、氣管炎、肺炎、肺充血及肺水腫。二氧化氮在大氣中若經光合作用和碳氫化合物反應產生臭氧(O_3)、過氧硝酸乙醯酯(PAN)或硝酸，則對健康之負面影響更嚴重。

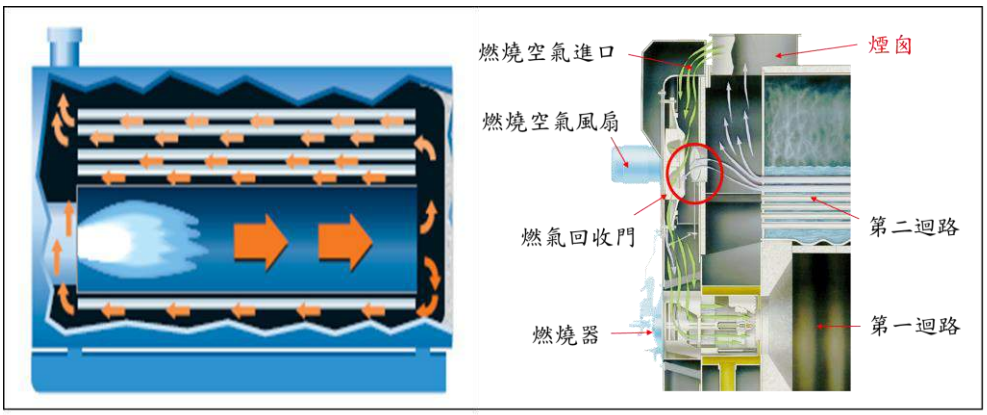


圖 7　二迴路瓦斯煙管鍋爐增設燃氣回收裝置

可選用高效率萊福煙管(Rifled)，其煙管內部為螺紋狀，螺紋狀萊福線可提高邊界區域(Boundary Area)之擾流度，對於煙管內壁產生清洗作用，高擾流度將延遲燃氣在鍋爐內部時間，進而提昇熱傳效率。另外，燃氣比調整也相當重要，理想的鍋爐過剩空氣量，於高負載時，其排氣含氧量應在 3-5%之間，過多的空氣量造成一部份熱能為空氣所帶走，但空氣量不足則造成燃燒不完全造成黑煙等問題，因此，需定期檢測煙囪尾氣，確保燃氣比調整在最適值。

(2)雙燃料鍋爐節能環保運轉

雙燃料鍋爐併聯運轉，因燃料來源成本不同，若妥善調整應具節費空間，因電費單價隨時間浮動，如離峰時間使用儲冰式冰水主機，可推論離峰時使用電熱鍋爐也應具節費效益，藉此調整尖離峰時段電熱鍋爐與瓦斯鍋爐的運轉模式，降低電力契約容量節省基本電費，並減少燃料費用支出，降低整體運轉費用。

三、熱水鍋爐系統改善成效

在發掘異常原因後，研擬改善對策落實執行，其改善成效皆相當良好，大幅增長鍋爐使用安全與其技術觀念，以下將逐一說明。

1.電熱鍋爐安全改善成果

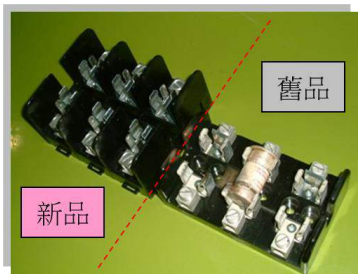
瞭解電熱鍋爐短路故障為許多原因綜合造成，因此，綜合釐清異常原因後，與美國原廠探討改善措施逐一進行問題排除，改善完成後其運轉狀況良好，未再發生異常現象，改善後彙整如圖 8。

A.檢討原廠保險絲座設計，選用增設隔板之底座(避免保險絲相間弧光短路)

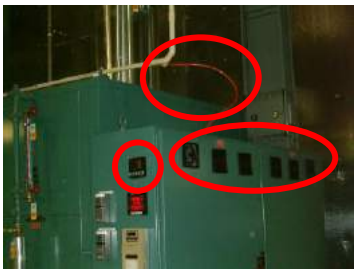
B.降低動力盤體溫度，增設散熱風扇由原 4 組增為 12 組。

C.ACB 的 IR 由 2,000A→1,750A 保護靈敏度提昇，使 GFI 異常動作時 ACB 同步跳脫

D.增設動力盤溫度感測器、VESDA。



改用增設隔板之底座，避免保險絲相間弧光短路



增設散熱風扇、溫度感測器與 VESDA 極早期偵測

ACB 的 IR 由 2,000A→1,750A 保護靈敏度提昇。

圖 8　電熱鍋爐改善措施示意

2.瓦斯鍋爐安全改善成果

瞭解煙管穿孔狀況後，瞭解主因是葉輪銅離子釋出造成流電腐蝕，因此，綜合釐清異常原因後，探討將水泵葉輪更換為不鏽鋼 304 材質，另添加銅腐蝕抑制劑並調提高脫氧劑濃度，定期於鍋爐底部排水減少腐蝕物沉積，改善完成後運轉狀況良好，未再發生異常現象，改善後彙整如圖 9 所示。

水泵葉輪更換為 304 不鏽鋼

添加銅腐蝕抑制劑及脫氧劑

圖 9　瓦斯鍋爐改善措施示意

3.雙燃料鍋爐節能環保成效

電熱鍋爐與瓦斯鍋爐的調動模式，運用實驗設計及 ANOVA 手法分析，調配鍋爐最佳運轉參數，排除人員設備及物料因素，將電熱鍋爐設定

溫度、電熱鍋爐設定溫差及瓦斯鍋爐設定溫度作為實驗因子如表 2，並將節能重要指標瓦斯用量及耗電量列為反應變數如表 3，以 Minitab 軟體做實驗規劃及結果分析，求得各因子間相互作用的貢獻度，找出顯著因子並對其做好管制，並於反應變數分析互相矛盾的顯著因子間，做較為有利的選擇，最終執行瓦斯鍋爐與電熱鍋爐實際調整測試。

表 2　選定實驗因子

項目	製程因子	製程範圍
A	電熱鍋爐設定溫度(℃)	85℃~82℃
B	電熱鍋爐設定溫差(℃)	6℃~3℃
C	瓦斯鍋爐設定溫度(℃)	90℃~88℃

表 3　反應變數篩選表

反應變數	單位	變數特性	是否可計量	是否可精確衡量	是否與製程因子有關	是否為物理特性	是否為核心機能
瓦斯用量	m^3/hr	望小	✔	✔	✔	✔	✔
耗電量	kW	望小	✔	✔	✔	✔	✔

分析燃料熱能單價如表 4，依熱能單價分析燃料成本，瓦斯燃料成本較低為較好選擇，但電費為浮動機制離峰用電每度僅 1.18 元，若該時段轉移負載至電熱應可達最低運轉費用，另以燃料 CO_2 排放係數而言，每度電(熱值 860kcal)產生 0.529 公斤 CO_2，每度瓦斯(天然氣二：熱值 9,900kcal)產生 2.09 公斤 CO_2，若瓦斯換算為等同 1 度電之熱值僅產生 0.2 公斤 CO_2，較具環保效益。

表 4　鍋爐燃料成本分析(2017/10)

項目	電力				瓦斯
燃料熱值	860kcal/kWh				9,900kcal/m^3
鍋爐效率(%)	99				90
實際熱值	851kcal/kWh				8,910kcal/m^3
燃料單價(元/kWh)	年均	尖峰	半尖峰	離峰	12.38 元/m^3
	2.30	4.38	2.66	1.18	
熱能單價(元/Mcal)	2.70	5.15	3.13	1.38	1.39
CO_2 碳排放 (2016 年)	0.529kgCO2/kWh				2.09kg CO2/m^3

因此，為兼顧節費與環保，尖峰時間由瓦斯鍋爐做為主要負載，離峰時間轉移負載至電熱鍋爐，搭配冰機系統電力需求減少尖峰契約容量，離峰使用瓦斯降低 CO_2 排放量，然而最適運轉參數經 DOE 分析如圖 10 所示。調整參數後實測尖峰契約容量約可降低 2,000kW、基本電費即可節省約 520 萬元/年；雖現行燃料費用因產能擴充而增加(40k→49k)，但若在負載條件相同下，根據產能擴充前實驗結果，約能節省 3%燃料成本，以燃料費用 8,000 萬元/年計算約節省 240 萬元/年；併聯瓦斯鍋爐後 CO_2 排放量也較純電熱約可降低約 7,000 公噸/年，等同約 18 座大安森林公園年固碳量。惟系統運轉切換上將增加誤操作風險及降低系統穩定度，且此計算需依據現行燃料價格為基礎，電價及瓦斯價格受石油能源價格波動，若未來能源價格變化則運轉參數也須隨之調整，但其操作概念大致不變。

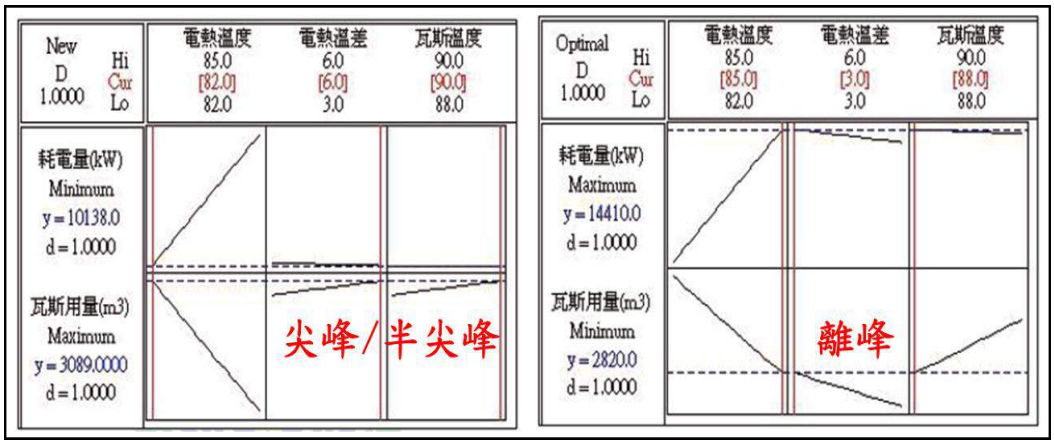


圖 10　尖離峰時間鍋爐最佳運轉配方

四、結　論

經前述維運經驗，技術相當成熟的鍋爐系統，仍會依據運轉環境、附屬設備及初始設計上，影響使用壽命及風險異常，惟有不斷的深究探討並改善精進，方能將安全性再提昇一層次。在環保節能議題，增進鍋爐效率的工程設備通常 ROI 較短，建議可優先改善，鍋爐負載切換配方兼具節費與環保，降低契約容量即可節省基本電費約 520 萬元/年，CO_2 排放量較純電熱供應約可降低 7,000 公噸/年，等同約 18 座大安森林公園年固碳量。但往往隨著產能需求、環境溫度及能源價格等外在因素改變，都會造成操作模式與實際節費數值變動，因此必須隨之調整方能維持其效益。

展望未來，可將高溫熱泵配合瓦斯鍋爐列入設計規劃，由於熱泵不同於

傳統電熱製造熱量而是搬運熱量，同時產出低溫冰水，整體碳排放量將大幅低於現今鍋爐設備，若能再結合工業 4.0 概念，收集產能、氣候及能源價格等外在數據自動優化調節，節能效益應更能彰顯。

五、參考文獻

1. 以實驗設計法做半導體廠鍋爐熱水供應系統節費之研究，謝志新，2010。
2. 即熱式熱泵在工業的節能方案手策，能源局。
3. 鍋爐效率提昇，李政道、張義源、林杏秋，工研院能環所。
4. 鍋爐系統節能管理，李凱，經濟部能源局/工研院能資所，2004。
5. 百大實地能源查核報告，經濟部能源局/工研院能資所，2003。

實測電梯電力回生裝置及其節能效益分析

林昆郁*、練光祐**、陳宗逸***

摘　要

本研究主要針對現行既有建物所使用之電梯於裝設電力回生裝置後，對電梯耗能效率影響及其回生電量占比分析，並在實驗中架設電力分析儀監測記錄設備；主要目的為了解既有電梯裝設電力回生裝置後之耗能變化與分析探討。電梯電力回生裝置乃是運用電梯運轉特性及電梯車廂與平衡配重之重量差，將機械動能和位能轉化為電能，並回送至大樓電力系統供其他耗電設備使用，以達至節電效果。其馬達運作與發電機原理相似，馬達將電能轉換為動能，發電機則是動能轉換為電能，利用電梯車廂搭乘人數之重量與平衡配重之重量差，及電梯上行及下行之動能，將機械動能和位能轉化為電能：當電梯上下移動時，電梯車廂內搭乘人數之重量低於平衡配重時，利用機械式運轉重量差原理減少馬達電能輸出，將機械式運轉的動能轉化為電能並回饋於電力回生裝置內，提供其他設備使用。

【關鍵詞】電梯、電力回生、節電率、配重

---

*國立台北科技大學　研究生

**國立台北科技大學　教授

***財團法人台灣綠色生產力基金會　經理

一、前　言

台灣因地狹人稠，隨處可見大樓林立，又因各建築特性及營業需求，故大量使用電梯設備供人員及貨物於上下樓層進出，促使電梯耗費電量甚為可觀。近來節能產品隨著科技進步，無論在品質、技術、控制、設計上已大幅提升效率。特別地如電梯產業而言，新世代綠色環保永磁式馬達電梯(內含電力回生裝置)，節能達 40%以上。

現行馬達制動電能剎車回生技術，無論在回生電力品質與設備穩定度上皆有重大的進步，且節能效果十分顯著，其業已登錄於行政院公共工程委員會新技術及新工法工程案例中[6]。在改善設備的投資金額與回收年限逐年遞減之利基下，無論新舊辦公大樓或百貨業者，都值得針對電梯節省用電及提升效率方案加以重視。許多改善工程實例評估分析，皆證實加設電力回生裝置可節省電梯電費達 10~40%不等的效益。如永續典範企業獎得主台灣電力公司亦對其總部大樓內電梯進行加裝電力回生裝置，經實測其節電效益可達 20~25%。如國內各大企業均能仿效施行，預期將可大幅降低國內電梯耗電，舒緩我國供電吃緊之壓力。簡言之，藉由相關製造商提供節能電梯產品，並鼓勵消費者以省能新產品取代傳統電梯設備，將可以達到節約能源效益及保護環境之最終目的。

二、國內電梯用電分佈概況

依據內政部營建署建築物升降設備安全檢查統計資料，103 年國內建築物升降設備共計約 16 萬台。由經濟部能源局住商查核申報之歷年用電分布比例統計(如下圖 1 所示)，可知電梯耗電占比中，以辦公大樓、政府機關最高；百貨公司、複合式商場及量販店次之(因建築特性及營業需求)。

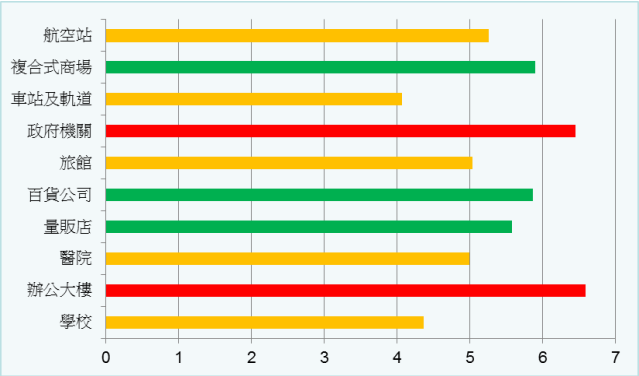


圖 1　依建築分類能源大用戶用電分佈比例(%)統計

又依經濟部能源局住商大用戶 104 年統計資料，電梯(含電扶梯)用電占建築整體用電平均約 4.54%(約 6.8 億度電)，僅次於空調、照明及事務設備用電。如圖 2 所示，可知提高電梯能效，減少電梯用電極為重要。

根據住商部門對於未來電力回生裝置滲透率推估以及電梯電力回生裝置之實測節能率以節電回生率平均約為 21%估算，若我國住商用戶之電梯均能逐步裝設此一裝置，以年增率 8.33%推估年節電約可達 1.7 億度，相當於減少 228 座大安森林公園 1 年的碳吸附量[4]。

另僅針對能源住商大用戶做電梯電力回生裝置經濟效益模擬分析得知，目前此項設備適用於電梯使用頻率較高的建築類型，過去在電價為 2.802 元/度時不具經濟效益，但若以 104 年的平均電價 2.9331 元/度而言，已具回收具效益(採用保守估計模式，以辦公大樓使用時數為例)[5]。

建築物 用途分類	空調設備	照明設備	冷凍冷藏設備	事務設備	送排風設備	給水污水設備	電梯設備	其它設備
學校	45.72	26.38	3.42	8.34	2.58	3.64	3.73	6.18
辦公大樓	48.3	20.51	1.13	9.46	4.39	3.22	6.76	6.23
醫院	49.65	17.88	4.12	6.41	5.46	3.53	5.28	7.67
量販店	40.04	20.64	17.13	3.04	4.41	3.29	5.96	5.47
百貨公司	44.6	28.23	4.3	4.8	4.6	3.22	5.47	4.79
旅館	46.19	21.03	7.29	3.65	4.73	4.82	5.51	6.78
政府機關	43.08	18.63	1.7	9.24	4.43	3.91	6.69	12.31
車站及軌道	19.12	7.28	0.33	1.87	3.27	1.82	3.62	62.68
電信網路機房	37.87	7.98	0.07	5.77	1.18	1.27	1.72	44.15
研究機構	42.97	13.05	7.32	6.8	4.09	2.94	1.63	21.21
展覽館	52.28	20.58	1.8	6.66	2.92	2.85	2.69	10.22
複合式商場	40.67	28.06	3.71	2.44	3.89	4.54	7.12	9.58
航空站	47.14	28.21	0.96	5.88	9.14	2.64	2.8	3.23
平均	**42.89**	**19.88**	**4.10**	**5.72**	**4.24**	**3.21**	**4.54**	**15.42**

圖 2　非生產性質能源大用戶用電分布平均統計

三、電梯電力回生原理概要介紹

一般人常把電梯供搭乘用的車廂(裝載人、物的車廂室部份)稱為電梯；但電梯整體上應包含數十種類機械與電機物件，其為複雜且精密的電機控制元件和機械構件組成。電梯的運行原理為定滑輪，一側是乘客(Passenger)搭乘的車廂側，另外一側是掛鐵塊的配重側，鐵塊配重側的重量用以下方式決定：

配重側總重量＝(車廂側空車重量＋車廂側滿載重量)/2

舉例而言，假設車廂空車時本身淨重是 500 公斤、最大限重 800 公斤，則配重側總重必須是(500+1,300)/2 = 900 公斤。這麼訂的好處是可以極小化捲揚機的最大負荷。如上述可讓捲揚機的最大負荷從 1,300 公斤變小為 400 公斤。

目前的電梯大部份都是採用捲揚機槽輪和鋼索之間的磨擦來做驅動牽引。牽引式電梯係依靠鋼索把車廂和配重做吊掛式結合，再分別由專用導軌引導其垂直升降。捲揚機和控制電路類的機器室，通常設置在升降通道的最上端處。因建築結構的關係而設置在升降通道下方側面的也有；電梯機器室之控制器是以活動電纜和車廂相連接。

而現行市售電梯多採用三相感應電動機馬達為其再生煞車系統最主要的控制設備，目前最常用的是鼠籠式交流感應馬達，主要優點是易於操作及維護，其常用控制方法的是「VVVF(變壓變頻式)」，來控制馬達的轉矩與速度，主要控制元件為絕緣柵雙極電晶體(Insulated Gate Bipolar Transistor, IGBT)。而本研究所針對量測分析之重點-再生煞車所產生再生電力，此一技術其實在日常生活中我們均有所接觸。如國內鐵路列車使用電阻式煞車，將其再生電力消耗(電梯原理亦同如此)，惟臺灣桃園機場捷運系統於沿線設有 2 處逆變器變電站，以有效運用再生電力，其動作原理如下：

當有一車輛因煞車而產生再生能源時，可將其再生能源經過逆變器(直流轉交流)，回流至牽引動力變電站(TSS)，以統籌分配給其他所需之電力，若附近有其他行駛中的車輛時，亦將同時供應其再生電力，如下圖 3 所示[1]。如同上述列車再生煞車般電梯控制系統中，馬達驅動的運轉過程，分為例行運轉與回生運轉，在例行運轉時，馬達負載為重載，需做功即為電動機(motor)模式；在回生運轉時，馬達為輕負載，成為發電機(generator)模式，此時馬達會產生回生電力，放電至變頻器的直流匯流排上。現今之電梯系統中，對於此回生電力均經由制動單元(braking unit)與回生制動電阻(braking resistor)的作用，將此電能轉換成熱能消耗，造成能源的耗損浪費。

而電梯電力回生裝置剛好解決了上述的困境，使用絕緣閘雙極性電晶體開關元件(IGBT)建構的電壓源轉換器之三相輸入端，串接一電感電路架構，相當於一個逆變器，不同的是其輸入為交流，輸出為直流，且因位於電源進線側，故被稱為前端。此系統的優點包括，具有可控式直流電壓、單位功因、雙向電力潮流控制、三相交流端近似弦波與低諧波失真等。且不需開啟冷氣機冷卻機房，只需小型通風機即可，更可節約冷氣機耗電。

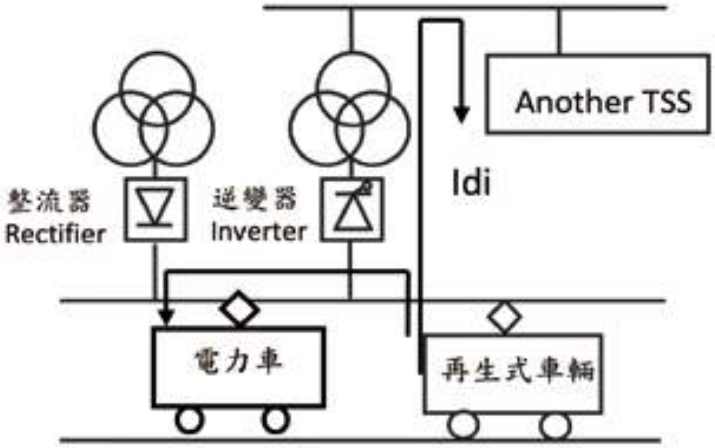


圖 3　車輛煞車產生再生能源供應示意

如前述介紹，電梯的原理為定滑輪，一側是乘客搭乘的車廂側，另外一側是配重塊。配重塊的重量是以車廂側空車重量加上滿載重量後，除以 2；這樣訂的好處是可以極小化捲揚機的最大負荷。在這樣配置的情況下，如果以電梯往上或往下為橫軸，馬達出力或受力為縱軸，則電梯運行的情況可劃分為四種狀況，即圖 4 所示的電梯運行四象限，簡單說明如下：

1. 象限一(電動機模式)：此是車廂重載並由低樓層往高樓層移動，馬達出力拉車廂上升，會消耗電力。
2. 象限二(發電機模式)：此是車廂重載並由高樓層往低樓層移動，馬達必須抗拒來自車廂的重力牽引，以發電機模式將載重的重力位能差轉為電能輸出。
3. 象限三(電動機模式)：此是車廂輕載並由高樓層往低樓層移動，馬達出力拉配重塊上升，以使車廂往下。
4. 象限四(發電機模式)：此是車廂輕載並由低樓層往高樓層移動，馬達必須抗拒來自配重塊的重力牽引，以發電機模式將配重塊與輕載車廂的重力位能差轉為電能輸出。

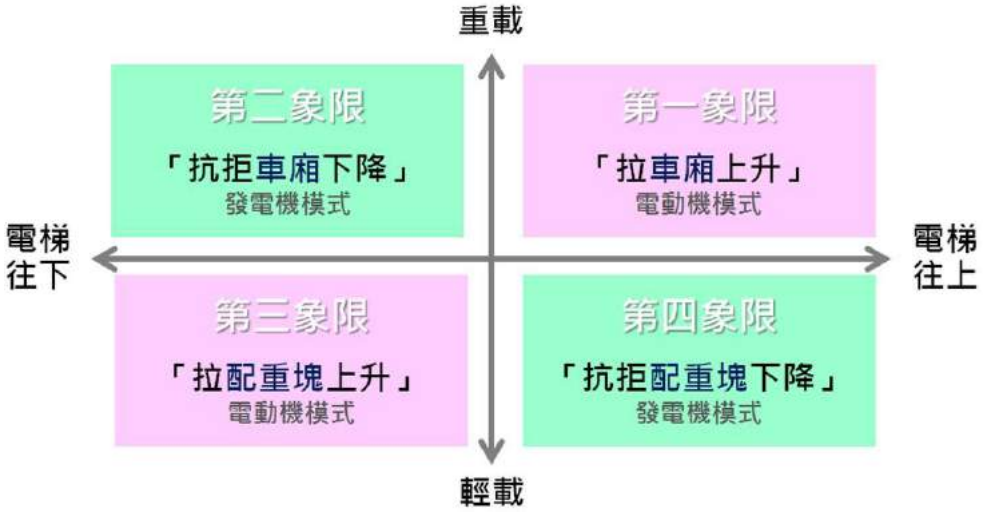


圖 4　電梯運行四象限示意

因此電梯控制系統中，馬達驅動的運轉過程，分為例行運轉與回生運轉。在例行運轉時，馬達為電動機模式對系統出力做功；在回生運轉時，馬達為發電機(generator)模式，此時馬達轉子受力矩轉動形成感應電動勢產生電流。具有電力回生功能的電梯系統將此電流併入變頻器的直流迴路。無安裝電力回生裝置的電梯控制系統則直接導引此感應產生之電流至低阻抗的大電阻，此電能就轉成熱能消耗掉，造成能源的耗損浪費。

無電力回生裝置的交流變頻器驅動馬達，還會在啟動瞬間，工作在發電機模式時，直流迴路電壓會因瞬間能量突波衝擊過大而超過所設定的直流電壓準位，致使直流迴路電容燒燬。因此傳統上以並聯方式安裝高瓦數的煞車電阻，以吸收過多的感應電能。此法可解決能量突波的問題，但效率差且將增加額外硬體費用與空間。

主動式電源回生系統有效操作在直流鏈電壓瞬間回升衝擊，將多餘能量經 IGBT 切換回饋到市電端。此法不需外加煞車電阻，即可有效解決負載能量回升的問題。

由於電梯升降定位所產生的重力位能差，經由「鋼纜、轉矩=>馬達=>變頻器=>煞車電阻」的過程所消耗，可知整個系統負載能量變化由重力位能轉為電能後，經由煞車電阻以熱能方式消耗掉。此時若未安裝此一裝置則無法將回生能量轉成有效再生功率。

安裝電力回生裝置後，電梯升降所產生的重力位能差經由該裝置及電抗回到市電網絡，路徑為「鋼纜、轉矩=>馬達=>變頻器=>回生裝置(電能)=>市電」。此時，回生能量被轉為有效再生功率如圖 5[2]。

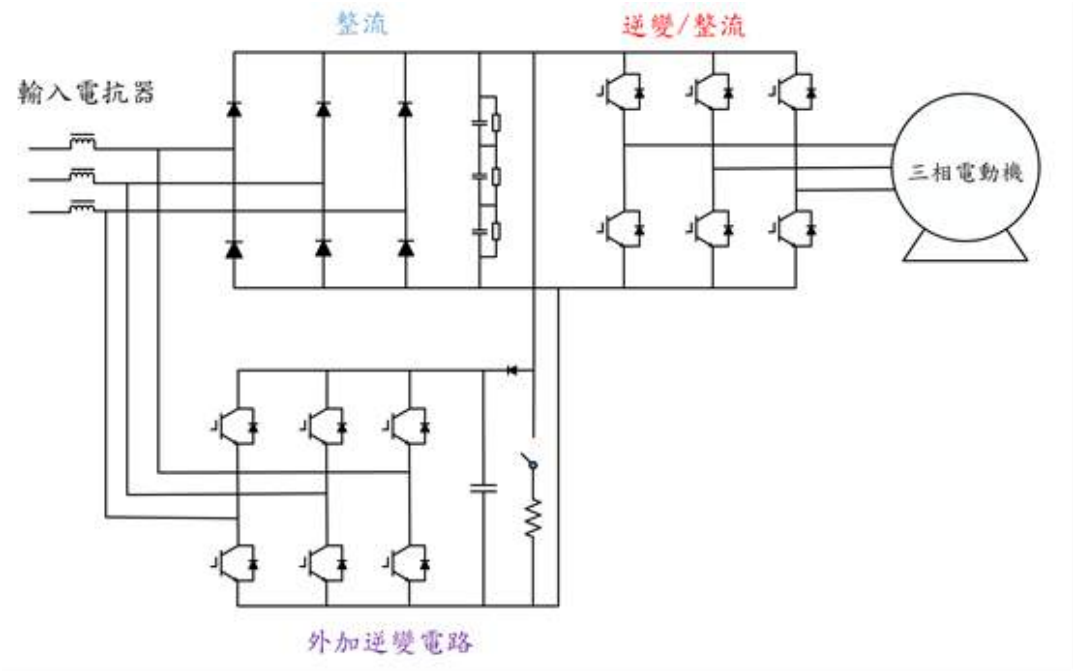


圖 5　二象限變頻器示意圖

交流電動機需透過交流電源驅動，而市電雖為交流，但其電壓及頻率均為固定，故無法調控電動機的轉速及轉矩。變頻器(Inverter, 或稱作逆變器)的主要功能即為同時控制其輸出的交流電壓大小與頻率。因此目前交流電動機皆採用變頻器做為驅動方式。變頻器係將固定電壓與頻率的市電，首先經過整流後，再將此直流電源轉換為可變電壓與頻率的交流輸出以驅動交流電動機，藉此可調控電動機的轉速或轉矩。其中，直流電源轉換為可變交流輸出，一般是藉由脈波寬度調變(Pulse-Width Modulation, PWM)技術予以實現。

普通的變頻器大都採用二極體整流橋將交流電轉化成直流，然後採用 IGBT 逆變技術將直流轉化成電壓及頻率皆可調控的交流電，控制交流電動機。

這種變頻器只能工作在電動狀態，所以稱之為二象限變頻器。由於二象限變頻器採用二極體整流橋，無法實現能量的雙向流動，所以沒有辦法將負載端的機械能量經發電機模式產生的電能，循原來的電路反饋至電源端。

如果採用 IGBT 功率模組直接替代原整流橋的二極體元件，或是以新增的 IGBT 功率模組作成整流橋與原 IGBT 逆變器並聯(但方向相反)，配合使用高速度、高運算能力的 DSP 產生 PWM 控制脈衝，則可以實現能量的雙向流動，可以將電動機回饋產生的能量反饋到電網，達到徹底的節能效果[3]。

四、電梯電力回生裝置實測

為深入了解電梯電力回生裝置之節能效益，故特至楊梅電梯試驗塔進行配重差之比較實驗(如圖 6)。經使用電力分析儀進行現場量測及節能效益計算、驗證與記錄等工作，並就加裝電力回生裝置之電梯系統，進行運轉參數量測及回生電能之同步量測；現場電力掛表量測示意如圖 7，並採用電力分析儀於電源端實際量測記錄耗能與回生電力之變化情形。

圖 6　現場使用鉛塊改變電梯配重

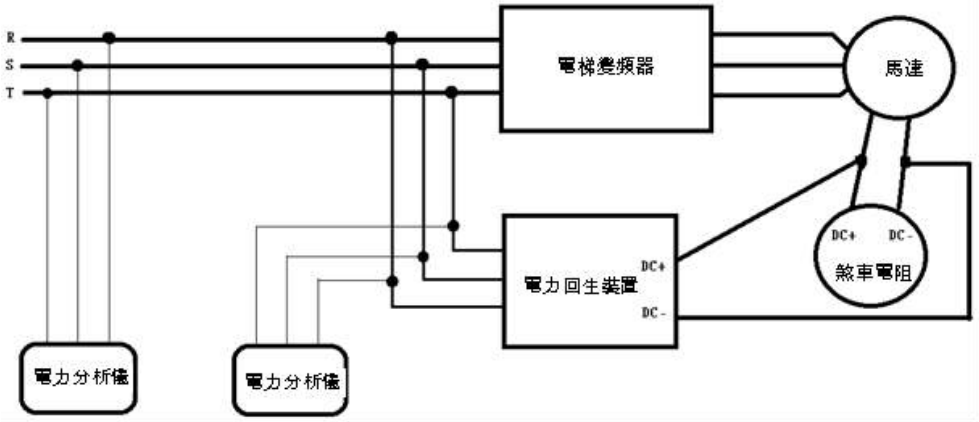


圖 7　現場實際量測示意圖

於裝設有電能回生裝置之電梯試驗塔進行量測情形與結果如表 1 所示，該電梯採定速 105m/min 運轉，量測結果發現回生電能依不同設定行程之距離與載重，而有明顯差異。由實測結果顯示，該電能回生裝置於車廂載重 0%及 100%時，回生電能比最高，約可達電梯耗能之 46~47%。然若車廂載重越接近電梯額定配重(約車廂載重 50%)，其回生電能比則明顯越低，僅約 8.97%(配重差接近 0%時，車廂載重與配重塊之間的重力位能差較小，故馬達產生之回生電能小)。觀察可以發現在車廂載重差 25%、50%、75%時，

其淨消耗電能(即消耗電能減去回生電能)非常接近，可知在這比較常態運轉的情況下，電梯控制系統的電能轉位能及位能轉電能的轉換效率是較為一致的，相較之下，當車廂載重 0%及 100%時，其轉換效率相對較低。

表 1　電梯耗能與回生電能測試結果一覽表

車廂載重	與配重重量差	設定行程 / 電能	18m (4~8F)	27m (4~10F)	36m (4~12F)	平均電能 (Wh)	回生電能比 (%)
0%	-50%	消耗	44.5	65.5	86.3	65.43	46.2
		回生	19.9	30.1	40.7	30.23	
25%	-25%	消耗	25.6	37.4	49.3	37.43	24.13
		回生	6.6	8.9	11.6	9.03	
50%	0%	消耗	22.2	32.6	42.2	32.33	8.97
		回生	2.8	2.9	3	2.90	
75%	+25%	消耗	33.7	49.2	64.5	49.13	35.07
		回生	12.2	17.3	22.2	17.23	
100%	+50%	消耗	54.9	81.2	106.3	80.80	47.61
		回生	25.8	38.5	51.1	38.47	

註:每種行程及狀態各運行 3 次，取 3 次測試值之平均值為代表數值。

五、各建築類型電梯裝置電力回生實測

若以最接近實際效果之量測方式進行(與 VDI 4707&ISO 25745 規範所述之空車電梯能效量測認證方式不同)，直接採用進行為期 1 星期實際量測與記錄，量測情形如表 2[4]。由實測數種類型場所實測結果可知，在不影響其原有之電梯使用及運行下，若能進行電力回生裝置增設工程，所產生之節能效益將可達 10~40%，在抑低電梯用電量方面有相當大之效益。

圖 8　電梯回生電量與原始耗電實際量測

表 2　電梯電力回生裝置回生率及相關因素統計

類型	電梯速度(m/min)	載重限制(kg)	回生率(%)
辦公大樓	105	1350	26.8
觀光旅館	120	1150	25.78
社區住宅	105	700	10
大專院校	90	1000	20.4
百貨公司	120	1350	30.44
集合住宅	60	700	22.5
資訊機房	90	1000	13
政府機關	120	1350	28.5
商辦中心	120	1350	39.73
區域醫院	90	1000	11.18

六、回生電能尖峰時段節能潛力

依上列各建築類型取樣結果得知，其尖離峰使用頻率與回饋電量之回生率成正比關係，即電梯系統使用率越高者，其節能潛力越佳；以上述案例尖峰實測平均值推估，約可有效抑低我國之電梯尖峰須量用電達九千餘瓩 (如圖 9)，等同抑低了台中新光三越百貨尖峰用電。

圖 9　各建築類型電梯電力回生裝置尖離峰節能率比較

七、結　論

由前述介紹可了解隨近代省電又環保之電梯技術發展，現在市面上最熱門節能產品電梯電力回生裝置，加上智慧節能控制及永磁馬達應用，整體可節約電梯用電達 40%以上。台灣目前電梯用電占建築整體用電約 4~6%，未來若綠色節能電梯、電力回生裝置及控制設備大量生產，價格降低及配合政府相關政策推動，其投資回收年限應可望降至 3~5 年內。

統計我國非生產性質行業(包含服務業、政府機關及學校)能源查核用戶(契約容量超過 800kW 者)約 1,432 筆，總用電量約達 151.76 億度電，總電費 483.84 億元，平均每度電約 3.18 元。若日後加強重點推廣能源大用戶採行綠色電梯節能，以電梯占 4.54%計，預估全面推動增設電力回生裝置或汰舊換新型節能電梯提高普及率至 50%以上，則可獲得可觀的電梯節約用電約 0.85 億度電，約 2.7 億元。由各用戶節約能源使用成本降低，可提升經營利潤，加強市場競爭力，對國家整體節約能源及抑低二氧化碳目標之推動上，將會有具體貢獻。

八、參考文獻

1. 交通部高速鐵路工程局，*高速鐵路簡訊月刊BOHSR NEWSLETTER*，2014年。
2. Lian, K. Y., Hung, C. Y., Chiu, C. S., & Liu, P. (2005). Induction motor control with friction compensation: an approach of virtual-desired-variable synthesis. *IEEE transactions on power electronics*, 20(5), 1066-1074.
3. Lian, K. Y., Chiang, C. H., & Tu, H. W. (2007). LMI-based sensorless control of permanent-magnet synchronous motors. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 54(5), 2769-2778.。
4. 能效提升之回顧與展望，財團法人中技社產業，2015 年。
5. 財團法人台灣綠色生產力基金會，李秀娟、陳玉嬋，2016 年。
6. 台灣電力股份有限公司營建處，李文強課長，2016 年。

綠色厭氧生物技術處理高濃度釀酒廢水與再生能源應用

林郁仲* 、倪辰華**、陳長祺***

摘　要

威士忌釀酒製程包括發芽、磨麥、糖化、發酵、蒸餾、熟成、調配、及裝瓶等八個生產步驟。完成蒸餾程序後，蒸餾器內的酒糟及清洗廢水則排至廢水系統進行廢水處理。由於酒糟廢水具有高有機負荷及厭氧生物分解性，多數酒廠均會採用厭氧系統處理高濃度酒糟廢水，以節省廢水廠土地成本及廢水操作成本。本案採用全球最先進的厭氧生物處理技術(ECO-ECSB^{TM}, External Circulation Sludge Bed)處理酒糟廢水，並再利用厭氧系統所產生的再生能源(生物沼氣)，提供所需的熱能至自身的厭氧系統，維持厭氧微生物最適生長溫度。本案中的 ECO-ECSB^{TM} 系統設計體積負荷為 18.4 Kg-COD/m^3-day，處理每日 300 噸，有機負荷達 9,000 Kg-COD/day 的廢水。

系統啟動迄今已操作 290 天以上，由於酒廠實際產能變化，操作期間平均進流水 COD 濃度為 9,289 mg/L(1,090 mg/L ~ 33,180 mg/L)，平均處理水量為 216 CMD(0 ~ 389 CMD)。雖然每日實際廢水進流水量及 COD 濃度變化甚巨，但 ECO-ECSB^{TM} 仍維持 95 %以上的 COD 去除效能。ECO-ECSB^{TM} 的穩定 COD 去除效能，也同時產生穩定且高品質的生物沼氣。操作期間，平均每日生物沼氣產量為 1,168 m^3/day(729 m^3/day~3,466 m^3/day)，其甲烷的含量為 75 % ~ 79 %。部分的生物沼氣則提供至鍋爐，產生熱水至既有的厭氧系統及新增設的 ECO-ECSB^{TM}，維持厭氧微生物的最適溫度。

ECO-ECSB^{TM} 採用外循環的設計，有效回收處理水的生物鹼度，並維持系統的 pH 操作條件，操作期間 ECO-ECSB^{TM} 並無使用液鹼，提升原水的 pH 至操作條件，大幅減少液鹼的操作成本及碳足跡貢獻。而全新的雙層三相分離器設計，有助於完善的固體、液體、及氣體的分離，大幅降低厭氧污泥流失的問題，進而增加未來顆粒厭氧污泥提供的能力。此外，藉由 ECO-ECSB^{TM} 的特別水力構造設計，當實際 COD 操作負荷低於設計負荷時，ECO-ECSB^{TM} 亦可增加操作水量，藉以增加系統的操作彈性。由操作數據明顯發現，即便增加進水量至 389 CMD(大於設計值 300CMD)，ECO-ECSB^{TM} 的 COD 去除能力不受影響。

ECO-ECSB^{TM} 為目前最先進的厭氧處理技術，不僅可提高有機負荷的設計條件(10 ~ 35 Kg-COD/m^3-day)，大幅降低用地需求，節省土地支出成本。高效能雙層三相分離器設計，有效減少厭氧顆粒化污泥流失。除此之外， ECO-ECSB^{TM} 也提供了操作彈性、COD 去除率穩定性高；密閉系統設計，無臭味逸散，且有效收集生物沼氣，以利綠色能源再利用，而且簡約內部構件設計，操作維護容易，降低人力需求負荷。

【關鍵詞】高效能厭氧生物處理技術、釀酒廢水、ECO-ECSB、再生能源

---

*環鼎國際股份有限公司　協理
**數宇科技顧問有限公司　副總經理
***環鼎國際股份有限公司　專案經理

一、前　言

威士忌釀酒所需原料僅有三項：大麥、水、及酵母，釀酒製程包括發芽(Malting)、磨麥(Milling)、糖化(Mashing)、發酵(Fermentation)、蒸餾(Distillation)、熟成(Maturating)、調配(Blending)、及裝瓶(Bottling)等八個生產步驟[1]。浸泡後的大麥，在發芽的程序中的酵素，會將大麥內的澱粉轉換成糖。再藉由熱水與麥芽混合一起，溶解所有麥芽裡的糖分，進行糖化程序。經過糖化後，酵母添加到發酵槽體，進行發酵程序，將糖轉化成酒精。經過發酵後的酒汁，其酒精含量約為 8 %，由於酒精具有比水低的沸點，一般酒廠會經由兩道蒸餾程序，萃取酒汁中的酒精後，將其存放於橡木桶進行熟成。蒸餾程序中，第一道蒸餾器內殘餘的酒汁(pot ale)與第二道蒸餾器內的殘餘酒汁(spent lee)混合後，為本研究中所稱的酒糟廢水。一般而言，第一道殘留酒汁的 COD 濃度為 60,000 mg/L 至 70,000 mg/L，而第二道酒汁的 COD 濃度為 3,000 mg/L 至 5,000 mg/L，混合後的酒糟廢水 COD 濃度為 20,000 mg/L ~ 35,000 mg/L[2]。圖 1 為威士忌釀酒製程及酒糟廢水來源示意圖。由於酒糟廢水具有高有機負荷及厭氧生物分解性，多數酒廠均會採用厭氧系統處理高濃度酒糟廢水，以節省廢水廠土地成本及廢水操作成本。本案採用全球最先進的厭氧生物處理技術(ECO-ECSB^{TM}, External Circulation Sludge Bed)處理噶瑪蘭酒廠(Kavalan)的酒糟及部分清洗廢水，並再利用厭氧系統所產生的再生能源(生物沼氣)，提供所需的熱能至自身的厭氧系統，維持厭氧微生物最適生長溫度。本 ECO-ECSB^{TM} 系統設計體積負荷為 18.4 Kg-COD/m^3-day，處理每日 300 噸，有機負荷達 9,000 Kg-COD/day 的廢水。

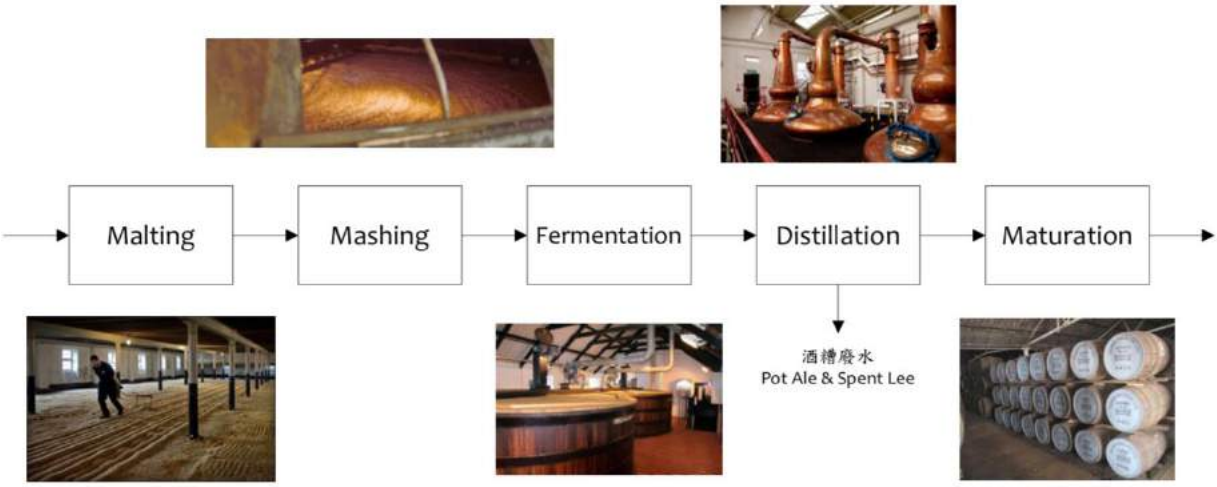


圖 1　威士忌釀酒程序

二、厭氧生物代謝及 ECO-ECSB™

有機物厭氧生物分解基本上是一連串複雜的反應，主要是由一群生理特性互異之微生物，彼此互相依賴形成共生生態系(syntrophic ecosystem)所共同完成的分解過成，而主要過程是在厭氧的環境下，將複雜的高分子量有機物轉化為甲烷及二氧化碳等最終產物，並由轉換過成中獲得足以提供生存及生長的能量(energy source)來源及碳源(carbon source)。厭氧分解過程依其產物的形成主要可分為不同階段，分別為水解、酸化、醋酸形成及甲烷化四階段，如圖 2 所示：

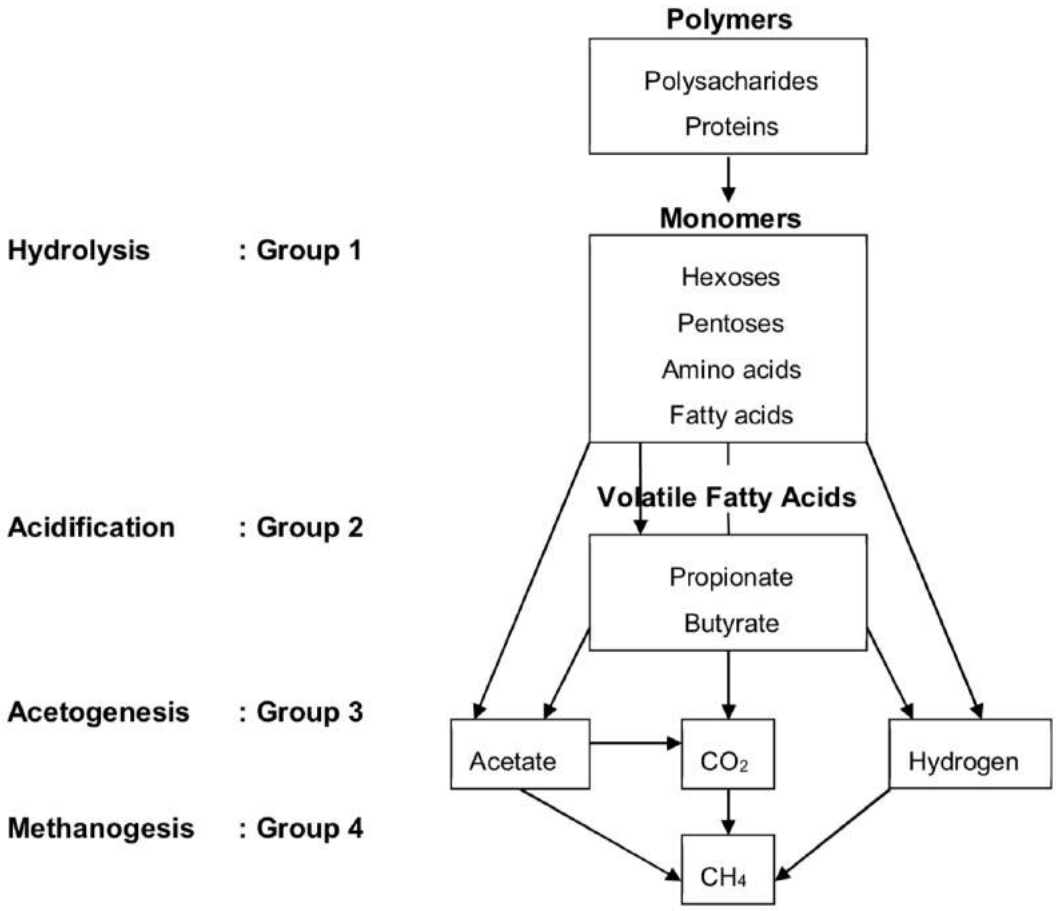


圖 2　厭氧生物代謝過程

1.水解酸化階段：

有機物在水解酸化過程中，首先經水解菌(hydrolytic bacteria)加水分解有機物成水溶性小分子，物質經由酸生成菌(acid-froming bacteria)發酵分解成乙醇、乳酸或丙酸、丁酸等揮發酸。水解酸化過成中水解菌胞外酵素分泌常受到 pH 及溫度等環境因子影響，但常因為易分解有機物負荷增

加而造成反應槽酸敗，致使甲烷化受到抑制。

2.醋酸形成：

水解酸化後產物再經由產氫醋酸生成菌(hydrogen-producing acetogenic bacteria)分解，生成產物主要為氫氣及醋酸。水解酸化產物需要在較低氫分壓下才能被分解，以熱力學角度而言，氫氣之分壓需小於10^{-4}atm。因此醋酸形成過成中需要氫利用菌配合，不斷將產生的氫氣利用，才能持續轉化為醋酸，產氫醋酸生成菌與氫利用菌彼此緊密共生活性，已被視為厭氧分解是否能順利分解之主要關鍵因素。若水中含有硫酸鹽時，則硫還原菌則可利用水解酸化產物，進行硫還原反應，此過程將不受氫分壓之影響，因此有利於硫還原菌與產氫醋酸菌對於基質之競爭。

3.甲烷化過程：

經過水解酸化及醋酸形成階段後產生之產物主要以氫氣、二氧化碳及醋酸為主，而在甲烷化期間甲烷菌擔任厭氧分解的最後步驟，將醋酸或氫氣/二氧化碳轉化為甲烷，因此甲烷化是整個厭氧生物分解反應成敗的關鍵。厭氧反應槽的酸敗經常是由於甲烷化受到抑制之結果。

圖 3 為 ECO-ECSB^{TM} 系統的簡圖，ECO-ECSB^{TM} COD 體積設計負荷為 10~35 Kg-COD/m^3-day，採用雙層三相分離器設計，可提高系統內液體上升流速至 5 m/hr，並且有效保留厭氧顆粒污泥於系統內，避免污泥流失。ECO-ECSB^{TM} 為一外循環的高效率厭氧生物處理技術，外循環方式可有效控制污水與顆粒污泥的充分混合，降低高濃度進水對生物的抑制性衝擊，並且有效回收再利用厭氧生物代謝所產生的生物鹼度，減少液鹼消耗，降低系統單元操作成本。ECO-ECSB^{TM} 的桶槽採用密閉桶槽設計，完全消弭臭味溢散及硫化氫腐蝕的操作風險。反應器內沒有複雜的內部構件或旋轉設備，降低設備投資成本。除此之外，ECO-ECSB^{TM} 的專利沼氣收集管線設計，可於操作運轉下，進行三相分離器及底部佈水管系統是否結垢阻塞檢查，若發現有結垢阻塞，可直接藉由系統本身沼氣進行三相分離器清潔，或由槽外直接進行底部佈水管系統清潔，無需進行系統停車、清槽、及人員入槽進行檢視維護，大幅降低了日後現場操作人員維護負荷。

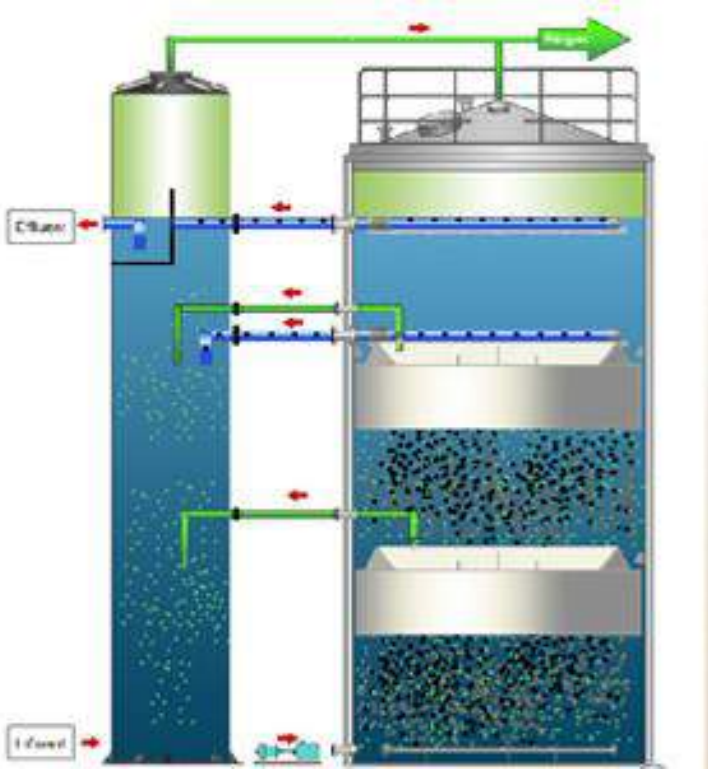


圖 3　ECO-ECSB^{TM} 系統

三、酒糟廢水及 ECO-ECSB^{TM} 設計

表 1 為金車噶瑪蘭酒廠的酒糟廢水的水質條件，酒糟及清洗廢水每日平均排水量為 300 m^3/day，COD 濃度為 30,000 mg/L。表 2 為 ECO-ECSB^{TM} 的基本設計及操作參數，因應 9,000 Kg-COD/day 的操作負荷，ECO-ECSB^{TM} 的厭氧反應槽直徑為 6.55 m，桶槽高度為 15.9 m，有效體積為 490 m^3，COD 體積負荷為 18.4 Kg-COD/m^3-day，ECO-ECSB^{TM} 的操作循環水量為 170 m^3/hr，故槽內的上升流速為 5.05 m/hr。估算生物沼氣產氣量為 166 Nm^3/hr，其中甲烷的含量為 75 %。

表 1　酒糟廢水水質條件

項目	單位	設計條件
處理水量	m^3/day	≤ 300
pH	---	≤ 6.5
Temp	℃	30 ~ 40
COD	mg/L	≤ 30,000

表 2　ECO-ECSB™ 系統設計

項目	單位	設計條件
COD 設計負荷	Kg-COD/day	≤ 9,000
ECSB 反應槽尺寸	m	ø 6.55 m x 15.9 mH
ECSB 反應槽體積	m^3	490
ECSB COD 體積負荷	Kg-COD/m^3-day	≤ 18.4
ECSB 進流水流量	m^3/hr	170
ECSB 上升流速	m/hr	≤ 5.05
生物沼氣甲烷含量	%	75
生物沼氣產氣量	Nm^3/hr	≤ 166

四、ECO-ECSB™ 操作處理成效

1.COD 去除效能

ECO-ECSB™ 系統於 2017-12-22 正式啟動操作至今已超過 290 天。圖 4、圖 5、及圖 5 為 ECO-ECSB™ 系統啟動後至 2017-10-11 的每日操作水量、COD 操作負荷、及進流水 COD、出流水 COD、與 COD 去除率。系統操作初期前三個月(90 天內)為系統啟動及污泥適應階段，於污泥適應階段期間，每日操作水量逐步提高至設計水量 300 m^3/day，COD 操作負荷也隨之提高至 4,000 Kg-COD/day，這段期間進流水 COD 濃度介於 5,000 mg/L 至 15,000 mg/L，ECSB 出流水的 COD 濃度均可低於 800 mg/L 以下，COD 去除率均平穩的維持於 90 % ~ 95 %。

啟動及污泥適應階段後(91 天後)，ECO-ECSB™ 仍維持穩定的 COD 去除效能。由於清洗廢水水量增加，ECO-ECSB™ 於系統啟動 110 天後，每日處理水量超過原始設計水量 300 m3/day。雖操作水量超過設計水量，COD 的去除效能亦維持於 95 %以上。

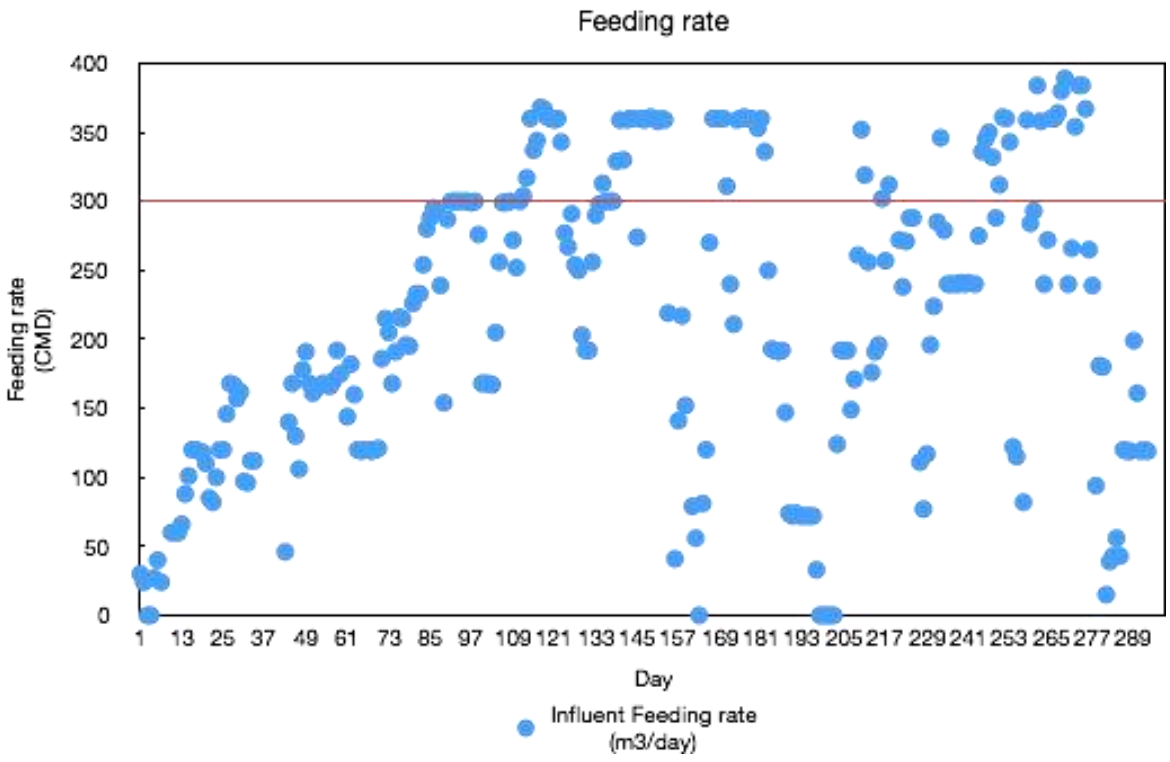


圖 4　ECO-ECSB^{TM} 每日操作水量

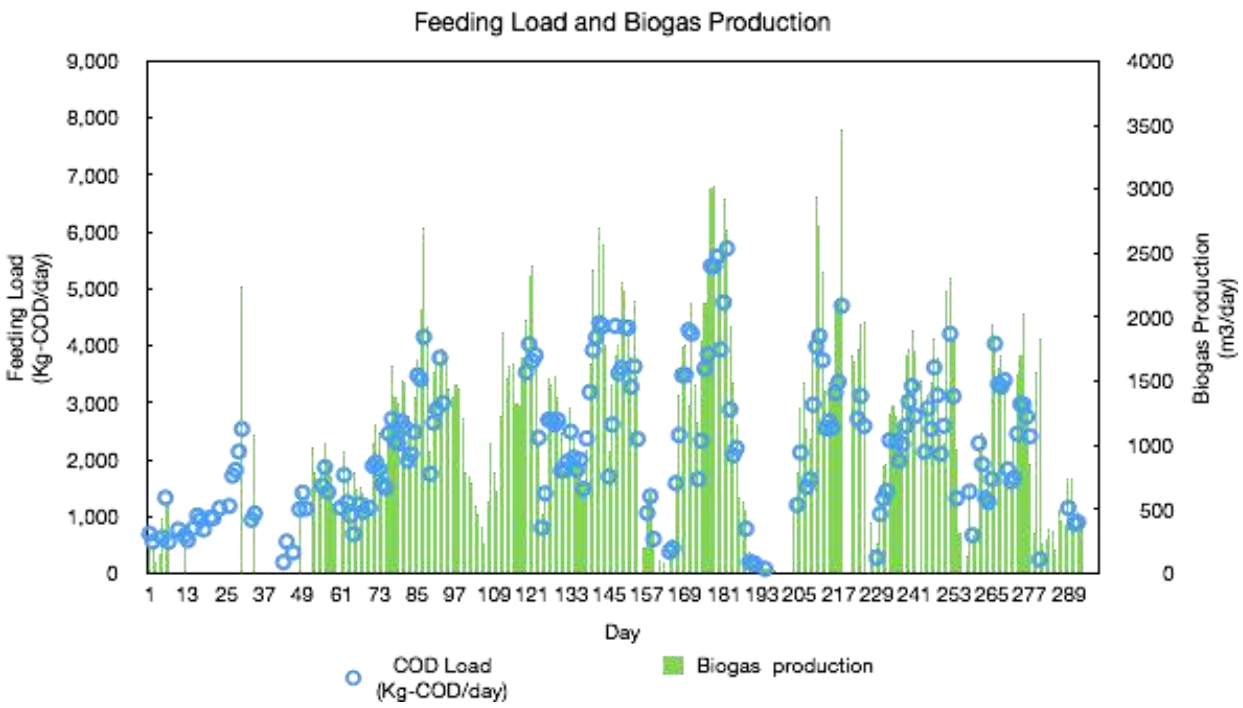


圖 5　ECO-ECSBTM 每日 COD 操作負荷

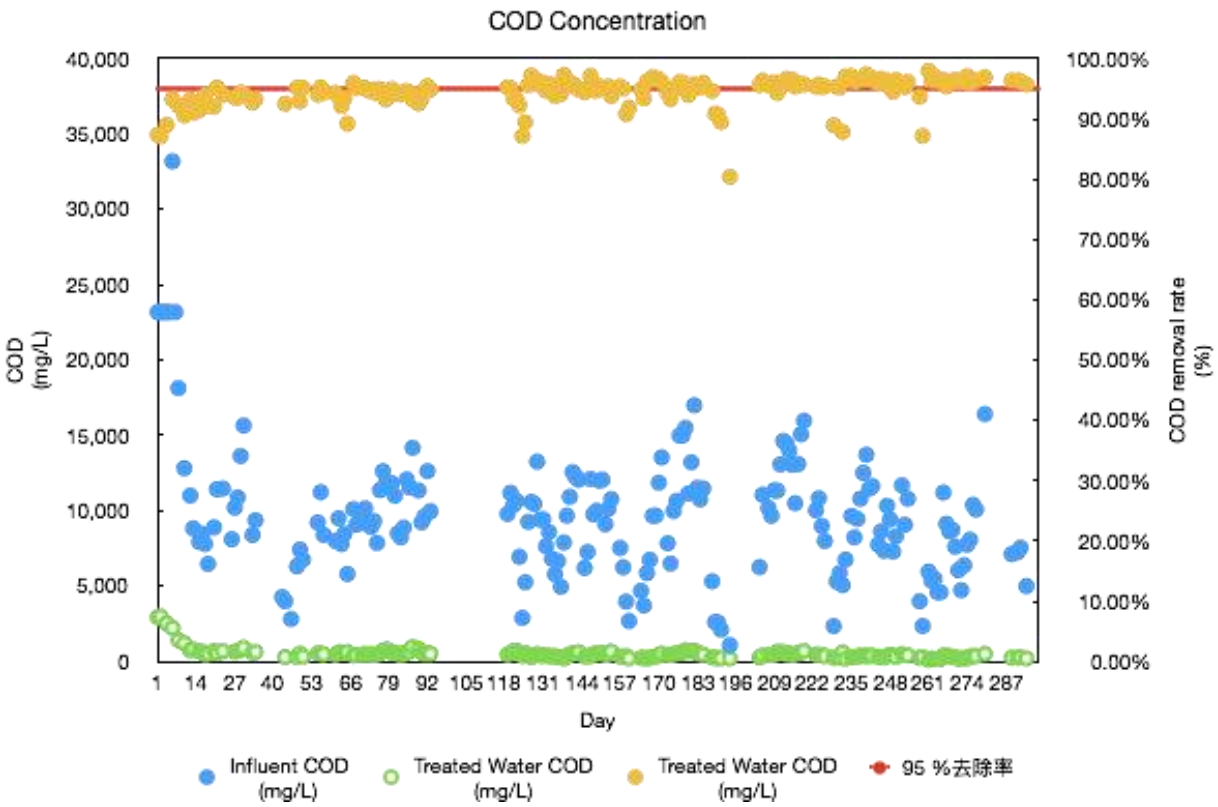


圖 6　ECO-ECSBTM COD 去除效能

自 110 天至 294 天(2017-10-11)，ECO-ECSB^{TM} 維持 360 m^3/day 以上的操作水量，最高每日處理水量為 384 m^3/day，每日進流水 COD 濃度變化仍介於 5,000 mg/L 至 16,000 mg/L 之間，最高每日 COD 處理負荷也至 5,500 Kg-COD/day 以上，但並未影響 ECO-ECSB^{TM} 的 COD 處理效率，這段期間，ECO-ECSB^{TM} 出流水平均 COD 濃度為 401.8 mg/L，最高 COD 濃度為 745 mg/L，最低 COD 濃度為 122 mg/L。COD 平均去除率為 95.08 %，COD 最高去除率可達 97.95 %，COD 最低去除率為 80.39 %。COD 去除率會於 95 %大多是因為釀酒製程並未排放酒糟廢水，致使進流水 COD 濃度降低，影響 COD 去除率的計算。就以第 194 天的操作數據而言，當日的進流水 COD 濃度僅 1,090 mg/L，出流水 COD 濃度為 213.8 mg/L，造成 COD 去除效能僅有 80.39 %。由於 ECO-ECSB^{TM} 的穩定且可靠的去除效能，更提供下游的好氧處理單元的穩定操作條件，避免水質變化造成好氧系統的操作衝擊，影響放流水的排放水質。

2.生物沼氣產氣量

理論上，去除 1 公斤的 COD 可產生 0.35 Nm^3 的甲烷，若生物沼氣中的甲烷含量為 75 %，則去除 1 公斤的 COD 可產生 0.5 Nm^3 的生物沼氣。若以每日去除 8,000 Kg-COD 的厭氧系統，則每日可產生 4,000 Nm^3 的生

物沼氣。圖 5 提供了操作期間，ECO-ECSB^{TM} 的每日沼氣產氣量。操作期間，平均每日沼氣產氣量為 1,169 m^3，最大沼氣產氣量為 3,466 m^3。操作期間，沼氣中的甲烷含量均高於 75 %，圖 7 為 2017-5-11 的沼氣流量計所量測的沼氣流量及沼氣中的甲烷含量，其 ECO-ECSBTM 的沼氣流量為 88.73 m^3/hr，甲烷含量為 77.86 %。

圖 7　生物沼氣中甲烷含量

厭氧系統所產生的生物沼氣為一種綠色的再生能源，可提供為鍋爐燃料，或提供給沼氣引擎(Combined Heat and Power Engine, CHP)轉換成電能及熱能。Kavalan 酒廠位於宜蘭，為了避免冬天的低溫造成厭氧系統的操作溫度低於 25 度，ECO-ECSB^{TM} 所產生的部分生物沼氣，會提供至熱水鍋爐產生熱水，所產生的熱水用以提供熱至 ECO-ECSB^{TM} 及原有的 EGSB 系統，提高並維持擬定的操作溫度。圖 8 為本案的沼氣再利用架構圖。生物沼氣經過 H_2S 洗滌塔去除沼氣中的 H_2S 後，部分的沼氣為熱水鍋爐的燃燒燃料，所產生的熱水，藉由熱交換器將其所含的熱量加熱 ECO-ECSB^{TM} 及既有的 EGSB 操作溫度。圖 9 為操作期間進流水的水溫及 ECO-ECSB^{TM} 的系統操作溫度。操作天數第 40 天至第 100 天為 2017 年的 2 月至 4 月，由於寒流造成氣溫較低，進流水水溫會低於 25 度。厭氧污泥的生物活性於 35 度時為 100 %，溫度每降 10 度，其生物活性會降低 50 %。因本案有將產生的生物沼氣再利用，用以維持厭氧系統的操作溫度，ECO-ECSB^{TM} 於操作期間內，均可維持操作溫度於 30 度以上，穩定 95 %

的 COD 去除效能。生物沼氣再利用，不僅可以維持系統的操作穩定度，更可節省鍋爐的燃料費，降低操作成本，更減少碳足跡的排放。

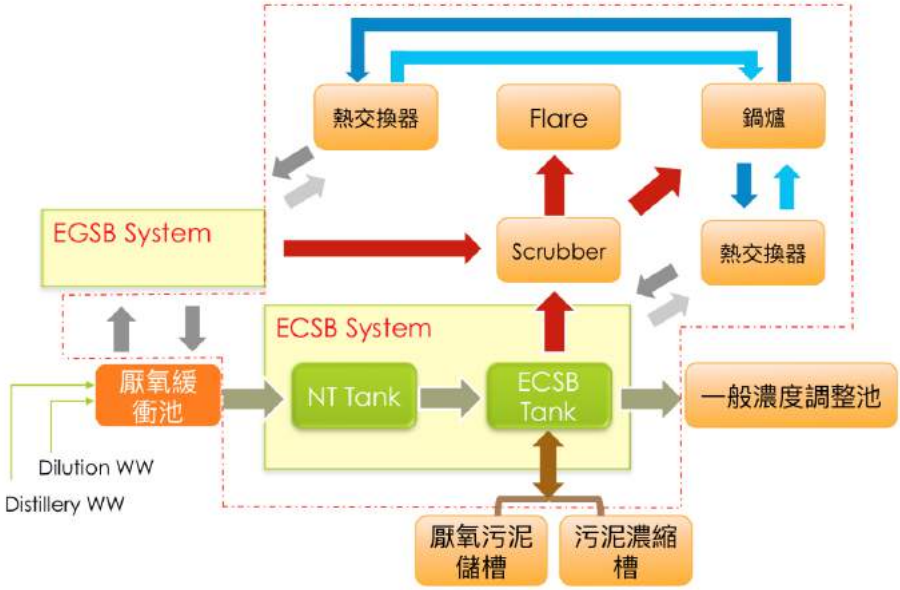


圖 8　生物沼氣再利用

若以每立方米天然氣的單價 12 NTD/m^3 計算，一立方的沼氣所含熱焓約等於 75 %的天然氣熱焓，每日回收 4,000 立方米的沼氣亦可節省天然氣的操作成本 36,000 NTD/day。

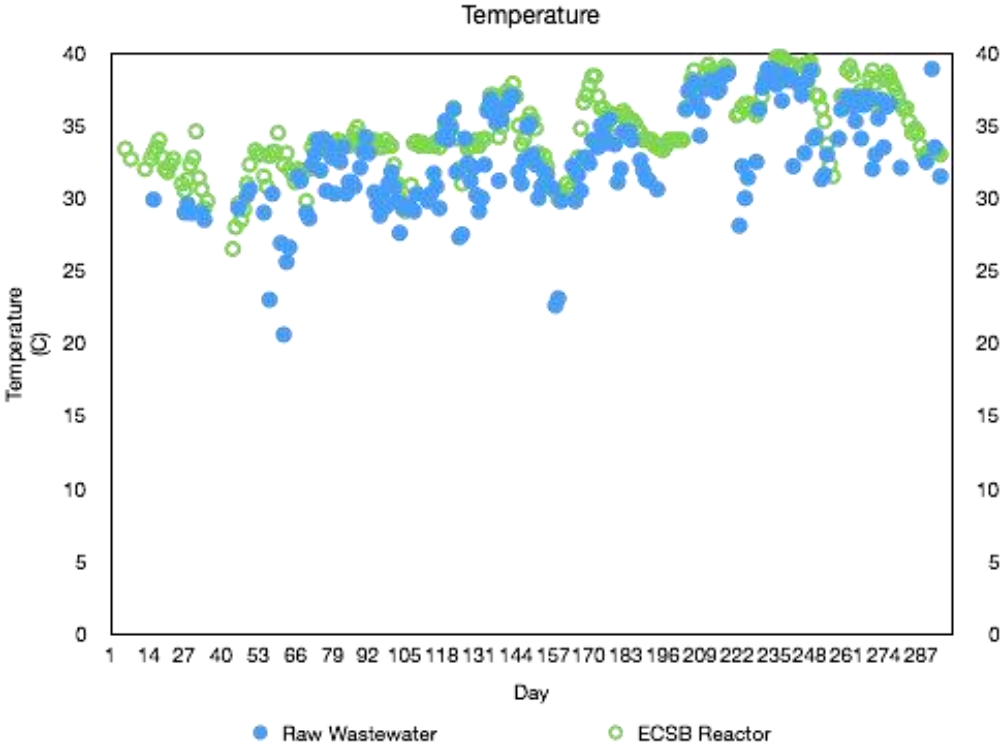


圖 9　進流水溫度及 ECO-ECSBTM 的操作溫度

3.生物鹼度回收

圖 10 為進流水的 pH、進流水鹼度濃度、ECO-ECSB^{TM} 系統操作 pH、及 ECO-ECSB^{TM} 處理水的鹼度濃度。操作期間中，進流水 pH 介於 5 ~ 7 之間，由於進流水 pH 大多低於 6.5，故所含的鹼度也較低，其平均鹼度濃度為 5.18 meq/L。廢水經由 ECO-ECSB^{TM} 進行厭氧生物代謝後，廢水中的 COD 除了轉化為甲烷外，生物沼氣亦有 20 %至 30 %的二氧化碳，二氧化碳溶於水形成碳酸後，便會提高出流水的鹼度，操作期間，ECO-ECSB^{TM} 出流水鹼度濃度為 23.6 meq/L 至 85.6 meq/L，平均鹼度濃度為 52.8 meq/L。 由於部分處理水會回流與進流水混合，回流水的鹼度則可重新平衡混合水的 pH。ECO-ECSB^{TM} 雖有設計液鹼的加藥系統，但由於回流水的鹼度回收，於過去 290 天的操作期間，ECO-ECSB^{TM} 大多藉由回收的鹼度，維持系統操作的 pH 條件(6.8 ~ 7.2)。也由於鹼度的回收，業主不僅節省了藥品費，降低操作成本，也減少液鹼使用的碳足跡排放。

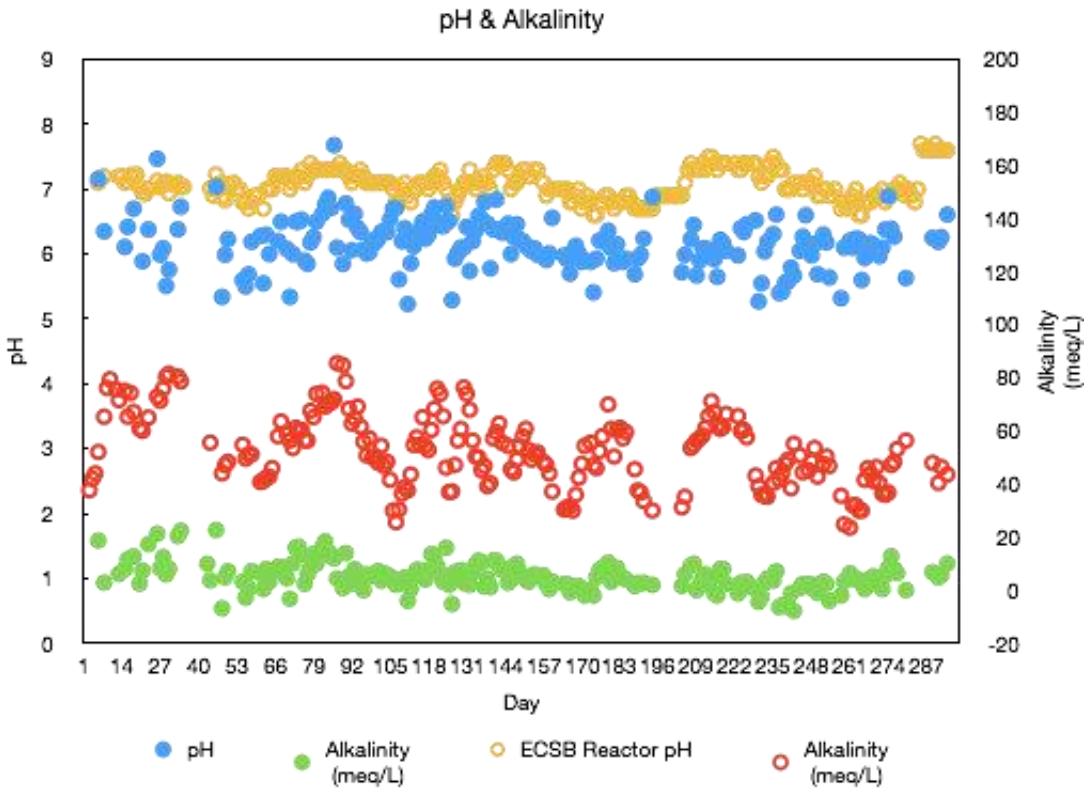


圖 10　進流水 pH 及鹼度、ECSB 操作 pH、及出流水鹼度

4.顆粒污泥流失

厭氧污泥增生係數本就較好氧污泥增生係數小，理論上，去除 1 公斤的 COD 平均約可產生 0.02 公斤的厭氧污泥。由於厭氧污泥低污泥增生係數，與好氧生物系統相較，厭氧生物系統的污泥棄置費可大幅減少，降低

廢水系統作成本。但也因厭氧污泥增生係數低，若厭氧系統的厭氧污泥流失率過高，也會造成厭氧系統操作不可逆的負面影響。因此厭氧系統的三相分離器則扮演了厭氧系統是否成熟的關鍵因素。

ECO-ECSB^{TM} 高效率厭氧系統採用了雙層三相分離器的設計，不僅可大幅提高系統內上升流速的限制，減小用地需求，更可有效地保留厭氧顆粒污泥於系統內部。除此之外，由於 ECO-ECSB^{TM} 的特殊設計，系統回流水管線與出流水管線間的上升流速會降至 1 m/hr 以下，其可有助於保留新生成的厭氧顆粒污泥，進而增加系統內的顆粒污泥總量。圖 11 為 ECO-ECSBTM 出流水的污泥沈降測試(Imhoff test)，正常操作條件下，5 分鐘後的污泥沈降須小於 3 mL/1,000 mL。圖 12 為操作期間，ECO-ECSB^{TM} 的污泥沈降測試結果，於過去的 290 天操作，ECO-ECSB^{TM} 出流水污泥沈降均小於 2.5 mL/1,000 mL，顯示操作期間，ECO-ECSB^{TM} 並無污泥流失的問題，此結果也可以說明為何過去 290 天的操作期間，ECO-ECSB^{TM} 均可維持 95 %穩定的 COD 去除效率。

圖 11　ECO-ECSB^{TM} 污泥沉降測試

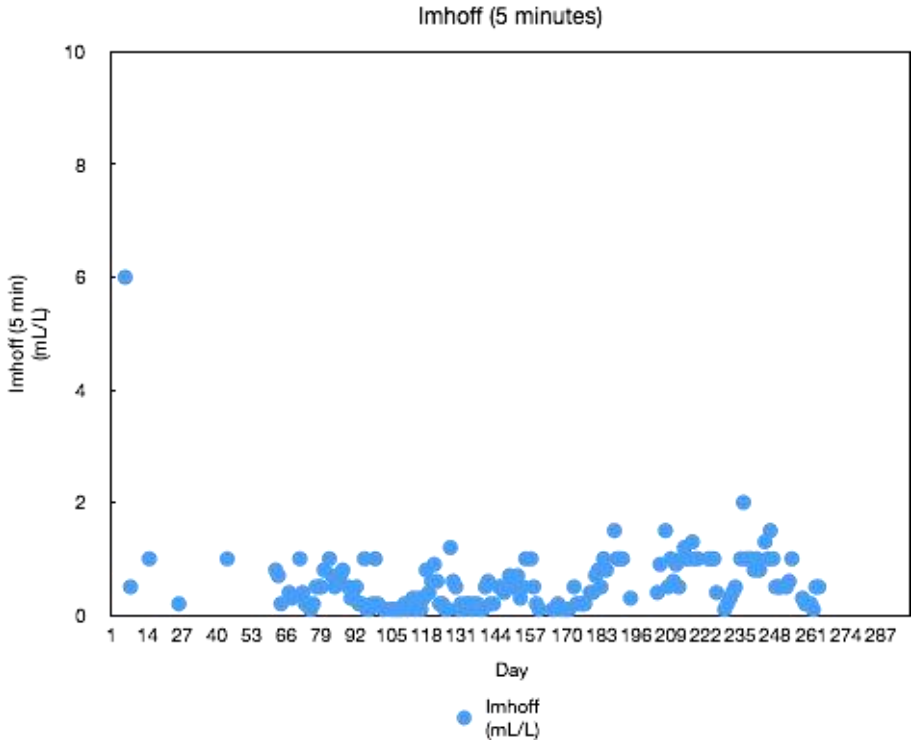


圖 12　ECO-ECSB^{TM} 出流水 Imhoff 5 分鐘污泥沉降結果

表 12 為 2017-6-27 所進行的 ECO-ECSB^{TM} 系統內污泥採樣分析，本案的厭氧系統共計有 9 個採樣點，第一個採樣點位於 1 m 處，第九個採樣點位於 9 m 處，每公尺均設有污泥採樣點，用以分析不同斷面的污泥濃度，進而估算系統內的總顆粒化有機污泥。系統啟動初期，共計植入了 3,500 Kg 至 4,000 Kg 的厭氧顆粒污泥，於 2017-6-27 的採樣分析估算，ECO-ECSB^{TM} 內約有 6,200 Kg 的厭氧顆粒有機污泥，系統內共計增加了 2,200 Kg 至 2,700 Kg 的厭氧顆粒污泥。自系統啟動操作至 2017-6-27，系桶已連續運轉了 190 天，COD 去除量為 274,000 Kg 以上。若以污泥增生係數 0.02 Kg-MLVSS/Kg-COD 估算，並假設所增生的厭氧污泥中的 40 % 為厭氧顆粒污泥，ECO-ECSB^{TM} 於連續 190 天的操作，理論上應增加了 2,200 Kg 的厭氧顆粒污泥，此估算與 2017-6-27 的污泥採樣分析結果比較相符。

表 3　ECO-ECSB^{TM} 污泥採樣分析

項目	Sampling point								
	1 m	2 m	3 m	4 m	5 m	6 m	7 m	8 m	9 m
VS (mg/L)	**72,787**	**51,317**	**56,332**	**693**	**665**	**510**	**553**	**521**	**502**

五、結　論

ECO-ECSB^{TM} 為全球最新穎且獨特的專利厭氧系統技術，除了融合了原有外循環的技術優點，更採用了雙層三相分離器的設計概念，也同時考量操作期間，簡化所需進行的系統檢測方法，及維護時的阻塞解決方法。系統啟動迄今已連續操作 290 天以上，操作期間平均進流水 COD 濃度為 9,289 mg/L (1,090 mg/L ~ 33,180 mg/L)，平均處理水量為 216 CMD (0 ~ 389 CMD)。雖每日實際廢水進流水量及 COD 濃度變化甚巨，但 ECO-ECSB^{TM} 仍維持 95 %以上的 COD 去除效能。

ECO-ECSB^{TM} 的穩定 COD 去除效能，同時產生穩定且高品質的生物沼氣。操作期間，平均每日生物沼氣產量為 1,168 m^3/day (729 m^3/day ~ 3,466 m^3/day)，其甲烷的含量為 75 % ~ 79 %。生物沼氣可提供鍋爐燃料，產生熱水並提供熱能至既有的厭氧系統及新增設的 ECO-ECSB^{TM}，維持厭氧微生物的最適溫度，減少燃料的使用，降低碳足跡貢獻。ECO-ECSB^{TM} 採用外循環的設計，有效回收處理水的生物鹼度，大幅減少液鹼的操作成本及碳足跡貢獻。全新的雙層三相分離器設計，有助於完善的固體、液體、及氣體的分離，大幅降低厭氧污泥流失的問題，進而增加未來顆粒厭氧污泥提供的能力。

ECO-ECSB^{TM} 的外循環設計方式也增加了系統的操作彈性，當實際 COD 操作負荷低於設計負荷時，由於 ECO-ECSB^{TM} 內部的水力設計條件，可適度增加增加系統的操作彈性，增加進流水量。即便增加 30 %的設計操作水量(389 CMD，大於設計值 300CMD)，ECO-ECSB^{TM} 的 COD 去除能力不受影響。

ECO-ECSB^{TM} 為目前最先進的厭氧處理技術，不僅為高有機負荷的設計條件，可大幅降低用地需求，節省土地支出成本。高效能雙層三相分離器設計，有效減少厭氧顆粒化污泥流失。除此之外， ECO-ECSB^{TM} 也提供了操作彈性、COD 去除率穩定性高；密閉系統設計，無臭味逸散，且有效收集生物沼氣，以利綠色能源再利用，而且簡約內部構件設計，操作維護容易，降低人力需求負荷。

六、參考文獻

1. Graham, J., Peter, B., Walker, G., Wardlaw, A., and Campbell, E., Characterisation of the pot ale profile from a malt whisky distillery,

Distilled spirits, 2012.
2. Meadows, S., Anaerobic digestion and resource use within the scotch whisky & UK beer industries, Master Thesis, 2015

七、致　謝

感謝金車噶瑪蘭酒廠的莊智仁課長、賴漢輝組長、及林銘士組長，於系統操作期間所提供的操作記錄與水質分析協助。也感謝宜蘭大學環境工程學系陳文興副教授協助水質及污泥分析。

議程3-產業節水及水資源再生處理類

3-1 產業用水管理及水回收利用措施評析
李晨瑜、黃育德、黃欣栩、朱敬平、鍾裕仁

3-2 超純水系統 RO 節能與節水改善
賴柏誌、于家驊、楊炳章

3-3 陶瓷平板 MBR 膜技術應用於豆漿豆腐食品製造廠廢水全量回收之實廠案例探討
李岳翰、廖泰康、藍常睿、林正祥

3-4 機械式蒸氣再壓縮蒸發系統(MVR)在肥料工場之實務與應用
賴彥穎、謝政璋、邵豪華

3-5 Local Scrubber 廢水回收系統節能/節廢改善實例
盧彭潭、黃俊評、林志南、黃冠哲

3-6 中鋼廢水純化場 UF 膜阻塞問題分析及改善
蘇育俊、劉婉如、林炅勳、蕭融澤

3-7 科學工業園區污水處理廠放流水回收再利用模型廠試驗效能評估
張玄芳、廖宗銘、倪辰華、林俊德

產業用水管理及水回收利用措施評析

李晨瑜*、黃育德**、黃欣栩***、朱敬平****、鍾裕仁*****

摘　要

面臨全球暖化氣候變遷的衝擊，近年來我國旱澇事件頻傳，傳統水資源的管理與運用面臨挑戰，水資源供應具有一定之風險，對於用水殷切、缺水忍耐度低的產業生產而言，每減一分用水即少一分風險，唯有推行節約用水及提倡水再生利用，方能達到永續生產及水資源有效利用之目標。本研究以新竹科學工業園區內的高科技廠商為調查對象，歸納多數高科技廠商採用之水回收利用行為，以純水系統排水回收以及製程排水回收為主，究其原因，主要考量水量大，且經適當的分流管理，水質相對穩定，可減輕再處理利用之負荷，並消弭生產部門之使用疑慮，常用的再生處理單元包括活性碳、超過濾、逆滲透等；其次則為次級用水系統的排水回收，如冷卻水塔或廢氣洗滌塔排放水之循環再利用，常用處理單元為砂濾、多層過濾；而放流水因含有多種污染物質，即使經過再生處理，多作為次級用水使用。

【關鍵詞】產業用水管理、工業用水回收率、水再生利用

---

*財團法人中興工程顧問社　助理研究員

**財團法人中興工程顧問社　副研究員

***財團法人中興工程顧問社　正研究員兼組長

****財團法人中興工程顧問社　副主任

*****財團法人中興工程顧問社　主任

一、前　言

取用無虞的水資源為高科技產業穩定生產的關鍵之一，惟因全球暖化氣候變遷，近年來我國旱災事件頻傳，2015 年因 2014 年秋冬降雨創歷史新低，導致該年四月全臺逾半數縣市進入限水階段，各項用水之供應岌岌可危，直至 5 月數波梅雨鋒面降雨帶來豐沛雨量，嚴峻水情方得趨緩；2017 年 2 月新竹地區也因為 2016 年暖冬降雨不如預期的影響，實施第一階段限水，新竹科學工業園區隨即成立旱災應變小組，通知園區廠商，加強辦理用水管控及各項節水措施，並協調從石門水庫調撥水源因應。

我國由於適合的水庫壩址難尋，加上環保意識日漸高漲，新水庫之興建實屬困難，傳統水資源開發受限。於發展新興水源方面，即使經濟部水利署已於民國 104 年底公布再生水資源發展條例，擴增再生水作為我國重要水資源之一環，以促進水資源永續利用，惟再生水的推動，現階段仍屬個案媒合，對於製程需一定用水規模之高科技產業而言，每減一分用水即少一分風險，需加強推行節約用水及提升水資源利用效率，以因應前述挑戰。本研究首先說明高科技產業主管機關之用水管理規定，列舉數項典型廠內水回收再利用措施，並歸納高科技產業常用之水回收處理再利用技術。

二、高科技產業用水管理

位於科技部轄下科學工業園區的事業，需依科技部科學工業園區管理局「科學工業園區水電輔導管理辦法」規定，定期提送用水計畫書給管理局審核，並使用園區發布之用水平衡圖格式作為內部管控，以新竹科學工業園區為例，現階段施行之用水平衡圖可分為三種，分別為無製程用水版、有製程用水版及光電業例外版，以圖 1 現行使用之製程用水版[1]為例，平衡圖中將各類排水回收再利用方面分為各類排水回收再利用方面可分為純水系統排水之 c1 及 c2 回收利用水量、製程系統排水之 c3 及 c4 回收利用水量、廢氣洗滌塔之 c5 回收利用水量、冷卻水塔系統之 c6 回收利用水量及製程機台內循環利用水量 c7 等。

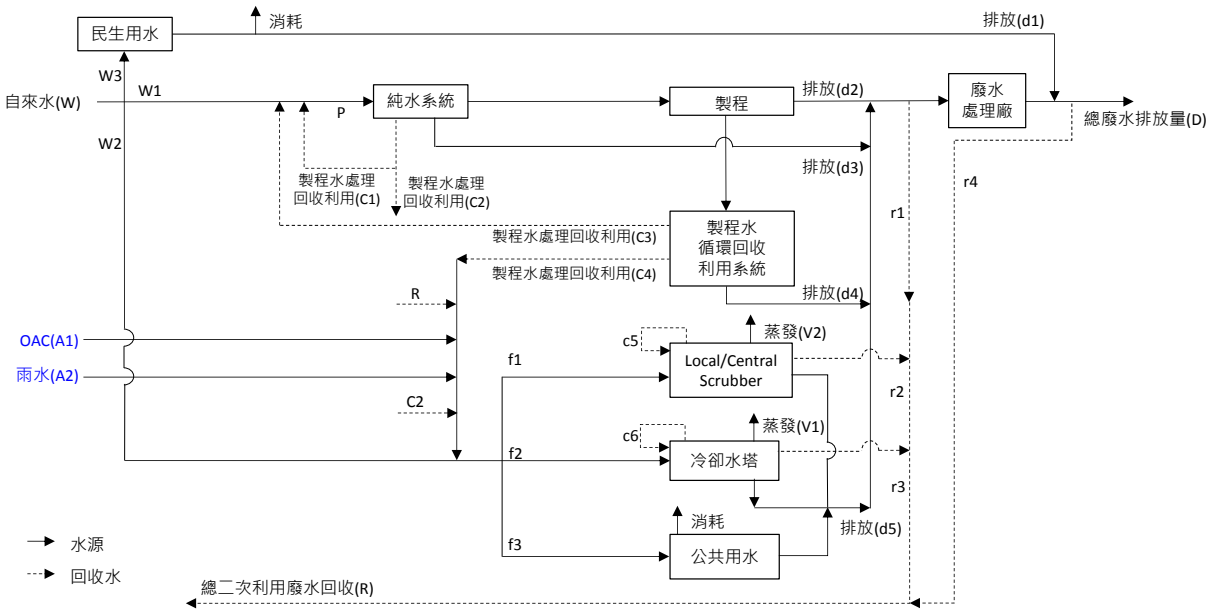


圖 1　科技部新竹科學工業園區用水平衡圖(R7 版)

此外，因園區開發時之用水回收環評承諾事項，其回收率指標包含製程回收率(RP)及全廠回收率(RT)，並考量各時期廠房之設備系統老舊、既有空間不足無法擴增設備等問題，新竹科學工業園區管理局依據園區廠商建廠時間，針對製程回收率及全廠回收率訂定三階段標準，如表 1 所示，其中製程回收率僅計算純水系統與製程系統之回收與循環利用水量，全廠回收率則計算包含廠內次級系統用水回收利用量，兩種回收率計算方式如下：

1.製程回收率(RP)

=(純水系統回收量+製程排水回收量+製程機台內循環量)÷(純水系統進流量+製程機台內循環量)× 100%　　(式 1)

2.全廠回收率(RT)

=(開發水源量+製程用水回收量+次級用水回收量+廢水回收量)÷(自來水總用水量+開發水源量+製程用水回收量+次級用水回收量+廢水回收量-蒸發水量)× 100%　　(式 2)

表 1　新竹科學工業園區廠商回收率標準

園區別	園區對象	製程回收率	全廠回收率	其他指標
新竹園區	民國 83 年前建廠之廠商	>50%	>30%	全廠排放率<80%
	民國 83 年至 88 年建廠之廠商	>70%	>50%	全廠排放率<80%
	民國 88 年後建廠之廠商	>85%	>60%	全廠排放率<70%
竹南園區	以純水為製程用水之廠商 (不含生技工廠)	>85%	>60%	--
龍潭園區	1. 友達光電 2. 半導體製造業及光電業等新設廠商	>85%	>75%	--
	通訊、精密機械、生物科技、電腦周邊等新設廠，且製程用水量達 100 CMD 以上者	>40%	--	--
	其他半導體製造業及光電業既設廠商，且製程用水量達 100 CMD 以上者	>60%	--	--
銅鑼園區	半導體及光電產業廠商	>85%	--	--
	半導體及光電產業之研發型工廠，其純水系統需水量達 100 CMD 以上者	>50%	--	--
	其他產業(通訊、微機電、生物科技、電腦及周邊產業等)其製程需水量達 100 CMD 以上者	>40%	--	--
	冷卻用水回收率達 70%以上者	--	--	生活用水回收率或降低用水量需達 35%
生醫園區	園區廠商	--	--	噴灌及建築物雨水回收再利用率為 10%
宜蘭園區	研發產業中組裝、測試可量產之進駐廠商，且製程用水量達 100 CMD 以上者	70%	--	--

三、高科技產業水回收措施概況

因高科技產業多屬高耗水產業，為達用水穩定及前述回收率標準之要求，高科技廠商採行之節水及水回收措施相當多元，透過增加替代水源使用量、提升各類排水回收量、調整冷卻水塔循環水濃縮倍數及廢氣洗滌塔用水循環次數，同時減少自來水用水量之方式，以提升全廠回收率；而提升製程回收率之關鍵點則主要為增加純水系統及製程排水回收量；茲將高科技廠商，其採行之水回收再利用措施分類說明如下。

1.純水系統排水回收再利用

由於高科技產業對於製程產品之要求，皆有設置純水系統，去除原水中之總溶解固體物、導電度等物質，產出純水以作為製程產品清洗之用，典型之純水製程處理程序如圖 2 所示，組成單元可包含活性碳、多層過濾塔、超過濾膜及逆滲透膜等，純水系統可能產生之廢水包含 RO 濃縮排放水、反洗及再生廢水等，可經回收系統回至純水系統再利用或導入次級用水系統使用，茲將其可採用之回收水源及再生利用方式彙整如下。

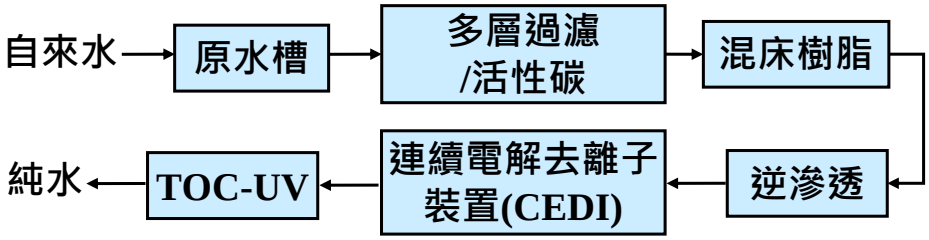


圖 2　純水系統流程圖

(1)活性碳、多層過濾塔反洗廢水：

為維持產水品質及穩定系統，需定期進行反洗，產生之大量廢水，多含高濃度懸浮固體物及高濁度(數百 NTU)，雖可直接迴流至原水池再利用，但可能造成固體物質之累積，故可經沉澱、過濾去除水中懸浮微粒後回收至純水系統原水池再利用，或供次級用水補水使用。

(2)離子交換與混床樹脂之再生廢水：

離子交換與混床樹脂需使用化學藥品進行再生，再生初期之廢水濃度與濁度過高不利回收，可收集後期之再生廢水導入純水系統原水池中，或作為多層過濾塔反洗用水；另再生完成後，需進行樹脂床置換(Displacement)及潤洗(Rinse)步驟，並確認再生後水質，置換/潤洗用水亦可回收再利用。

(3)RO 濃縮排放水：

因原水已經陰/陽離子交換樹脂處理，故 RO 濃縮排放水中並不含鈣、鎂等會造成結垢之物質，可將此股水導入次級用水系統再利用；若規劃回收至純水系統使用，則以導電度小於 1,000 μS/cm 之濃排水較具有回收效益，可經過濾、RO 或 EDI 等單元再生處理後回收至原水池，避免影響純水系統產水品質；而中後段純水系統之 RO 濃排水，則可直接迴流到純水系統原水池補水。

(4)CEDI 濃縮水回收：

連續電解去離子(Continuous Electrodeionization, CEDI)系統，多應用於 RO 裝置後，為結合電透析及離子交換技術，CEDI 裝置將離子交換樹脂填充於陰/陽離子交換膜之間形成 EDI 單元，並用網狀物隔開，形成濃淡水室，裝置兩端設置陰/陽電極，在直流電的推動下，水中之陰陽離子分別穿過陰陽離子交換膜進入到濃水室而去除，而通過濃水室的水將離子帶出系統，成為濃水，部份 EDI 濃縮水可導入前處理系統進行回收再利用[2]。

(5)純水系統線上分析儀器採樣水回收：

線上分析採樣用水，通常不需處理即可回收導入純水系統原水池中再利用[2]。

2.製程排放水回收

製程用水係指製程中原料或半成品進行物理作用或化學反應所需之水，亦包含與生產有關之清洗用水，考量高科技產業之用水特性，製程用水約占整廠用水量之 8 成，為主要用水點，產業可依據製程廢水不同成份與濃度作適當分流，再依各類廢水，決定回收用途與處理程序，為提升回收率之關鍵要素，回收用途包含作為純水系統進流或於次級用水系統中再利用，圖 3 為一典型之製程分流方式及其採行之處理程序與回收用途，茲將製程排水回收方式，依據其污染特性分類彙整如下。

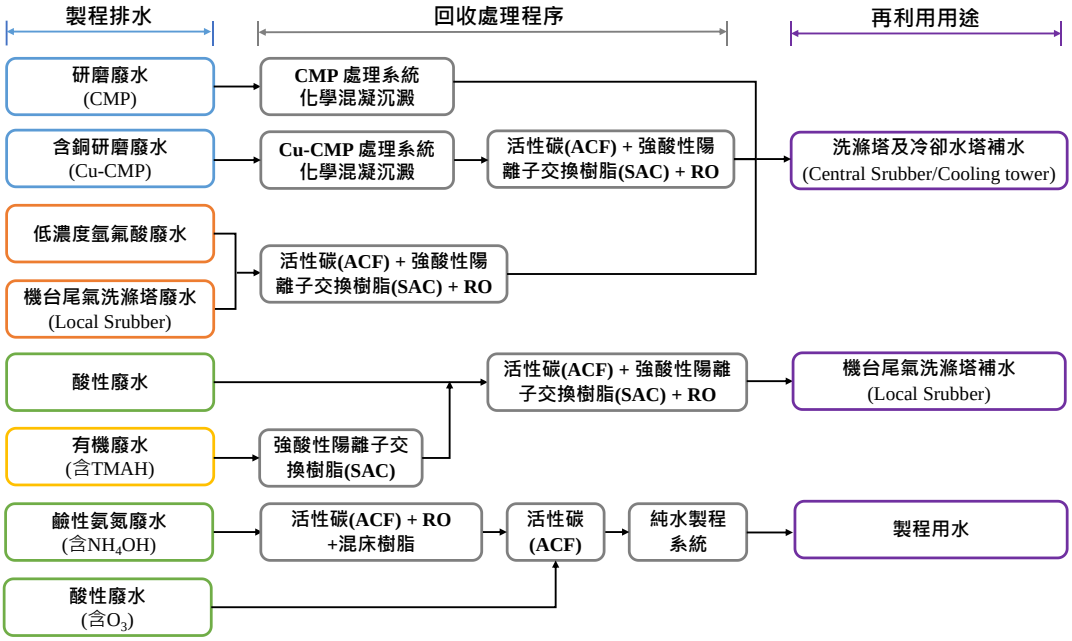


圖 3　製程排水分流回收處理圖

(1)研磨(CMP)廢水

CMP 廢水中包含來自於研磨液(Slurry)、晶圓本身之各種無機及有機污染物質，大部分的無機物質係以氧化物存在，主要的非溶解性無機物來自研磨液的砥粒(如 SiO_2、Al_2O_3 及 CeO_2)，及在研磨時從晶圓本身而來的無機物質(如金屬、金屬氧化物及低介電材料等)；溶解性的無機物質包含溶解性矽酸鹽與氧化劑。CMP 廢水中之有機物包含界面活性劑、金屬錯合劑、分散劑及腐蝕抑制劑等。而為移除在晶圓表面的上述物質，需要使用大量超純水於 CMP 後續清洗程序。

研磨廢水中之砥粒及剝落物較微小且可呈奈米級，不易以一般過濾去除，且廢水成分複雜，以混凝沉澱處理去除效率較低，考量加入之酸鹼藥劑與混凝劑等使其導電度偏高，且水中仍可能含有矽酸鹽類、金屬離子及微粒等，回收用途有限，多數廠家為搭配薄膜程序處理並回收 CMP 廢水至純水製程系統或次級用水系統，如為含銅研磨廢水，則可經強陽離子交換樹脂吸附銅離子後再進行薄膜程序，另利用硫酸進行樹脂脫附，回收銅離子；除前述程序外，亦逐漸有廠商採用電解混凝法(Electrocoagulation)搭配薄膜程序進行處理。

(2)後段清洗水：

可針對製程中晶片清洗水進行分流，以收集後段較低污染之廢水導入純水製程系統再利用，而因回收水水質對製程影響較大，需視各回收系統處理能力而訂定回收限值。

(3)酸鹼廢水：

不含有機物之低濃度酸鹼廢水可作為廢氣洗滌塔補水或用於調整廢水調勻池之 pH 值，或經中和及過濾後供次級系統使用。

(4)有機廢水：

一般而言，TOC 濃度低於 3 mg/L 之有機製程廢水較具有回收效益，惟因製程有機廢水中之藥品多屬難降解物質，需經活性碳、離子交換、RO 等高級處理單元後再利用[3]。

(5)含氟廢水：

來自於蝕刻及清洗製程中之含氟廢水，pH 介於 2~5 之間，多採高、低濃度分流，其傳統處理方法為先以鈣鹽(石灰、氯化鈣等)將氟離子固定，繼而經過傳統混凝沉澱程序以達固液分離，亦有使用流體化床結晶槽進行處理，其餘方法包含離子交換法、吸附法、沉澱浮除及逆滲

透法等[4]。

高濃度(>1%)含氟廢水多為委外處理，較易進行廠內，回收再利用為低濃度含氟廢水，可經活性碳、離子交換樹脂及二段 RO 處理後，供次級系統使用。

而如為低濃度含氟廢水，可經活性碳及二段 RO 處理後回收至次級用水使用，經 RO 提濃之廢液，可先經薄膜脫氣法(Membrane De-gasifier, MD)，去除氨氮後再至氫氟酸處理系統處理氟。

(6)含氮廢水：

含氮廢水為高科技廠商主要之製程廢水之一，來源為由於顯影、蝕刻、清洗等製程使用之含氮原物料，如四甲基氫氧化銨(Tetramethylazanium hydroxide, TMAH)、乙醇胺(Monoethanolamine, MEA)、N-甲基吡咯烷酮(N-Methyl-2-pyrrolidone, NMP)、氟化銨、硝酸及氨水等，然因應科學工業園區專用污水下水道系統之氨氮放流水標準愈加嚴格，自民國 106 年 1 月 1 日起管制限值為 30 mg/L，故各園區管理局亦針對園區廠商之氨氮納管標準進行加嚴，廢水中氨氮之削減議題愈加受到重視。

含氮廢水回收部分，針對高濃度氨氮廢水，可採行 Membrane De-gasifier (MD)硫酸銨法，藉由 MD 脫氣膜分離廢水中氨氮(NH_3)後轉製成硫酸銨$(NH_4)_2SO_4$，再由再利用廠商製成工業氨水或硫酸銨粉末再使用；較低濃度之氨氮廢水，則可先經 RO 提濃後再採行 MD 脫氣法，RO 產水並可運用於次級用水補水。

如為含氮有機廢水，亦有廠商採行生物處理去除廢水中之氨氮，如以無氧／好氧程序搭配薄膜生物反應器(MBR)進行過濾，再經薄膜 UF 及 RO 程序處理，或以 Anammox 法搭配薄膜程序，可將產水回收至純水系統或次級系統使用，如圖 4 所示。

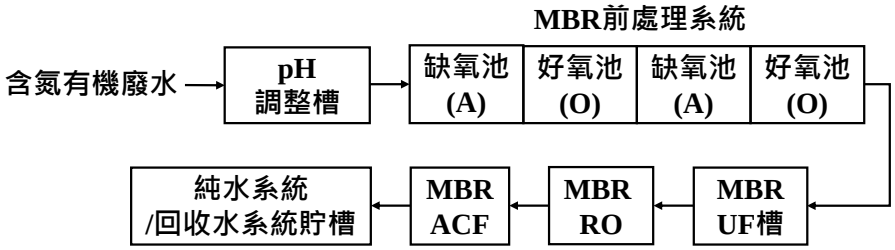


圖 4　含氮有機廢水回收再利用流程

3.次級用水系統排水：

機台廢氣洗滌塔用於處理製程排放廢氣，排水性質 pH 偏酸且可能含有氟離子，需經適當處理設施如活性碳及 RO 後循環使用；冷卻用水係指為吸收或轉移製程設備或製品多餘熱量，維持正常溫度下所需用水，冷卻用水與標的物完成熱交換平衡後進入冷卻水塔中，藉由水的蒸發逸散達到降溫目的，惟因持續之蒸發及逸散，導致水中鹽類持續被濃縮，為避免產生結垢(鈣、鎂離子、二氧化矽等鹽垢物質)及腐蝕(硫酸鹽、氯離子等)等以影響冷卻水塔運作效能，廠商採行之措施為進行導電度監控，冷卻循環用水達一定導電度後即進行排放，而為強化水質以增加循環次數，同時避免冷卻用水於循環過程中因固體物產生結垢進而阻塞，冷卻用水可經化學加藥、過濾或除鹽程序(如離子交換樹脂、薄膜過濾及倒極式電透析法等)後循環使用。

四、高科技業常用之水回收技術綜整

除考量各類用途之關切水質項目(表 2)外，高科技產業依回收水源特性採行之處理技術亦有不同，茲將高科技產業常用之水回收處理技術彙整說明於表 3，如欲將冷卻水塔排水循環再利用，除過濾外，為避免水中鹽垢物質(鈣、鎂及 SiO_2)及鹽類物質(硫酸鹽及氯離子)造成設備結垢及腐蝕，亦需進行 EDR、離子交換樹脂及薄膜過濾等除鹽程序，茲將表 3 中之技術簡要說明如後。

表 2　高科技產業關切水質項目

用水標的	水質項目	對製程產品之潛在風險
製程用水	鹽類	無機性鹽類易沉積於晶圓表面，影響電路形成，造成產品短路
	導電度	易造成產品短路，一般水質要求小於 50 uS/cm
	硬度	鈣、鎂等離子會沉積於晶圓表面，易造成產品短路
	懸浮固體/總有機碳	水中顆粒性物質會於晶圓/面板表面形成結瘤，增加表面粗糙度，增加不良率，一般需去除大於 10 um 以上之顆粒；而有機物的存在，將促進水中微生物之孳生，嚴重時會造成產品短路
	重金屬	改變電路電阻，使產品發生電路故障；Ⅲ族及 V 族元素會使半導體特性惡化
冷卻用水	氯離子	濃度增加時，可能造成腐蝕
	硬度	濃度或溫度增加時，可能形成水垢
	鹼度	可能轉換成 CO_2 造成腐蝕

用水標的	水質項目	對製程產品之潛在風險
	硫酸鹽	能與陽離子(鈣、鎂)形成水垢
	矽離子	形成水垢
	懸浮固體	沈積而附著於冷卻水塔內部形成結垢
	微生物	形成微生物層或黏膠狀物質，結垢以致造成管線阻塞，

表 3　高科技產業常用之水回收處理技術綜整

回收水源		廢水性質	處理技術	再利用用途
純水系統排水	反洗水	SS	過濾、混凝沉澱	製程原水、次級用水
	濃排水	SS	直接使用	製程原水、次級用水
製程排水	研磨廢水	SS、SiO_2、金屬離子	混凝沉澱、過濾、薄膜過濾、電解混凝法、強陽樹脂吸附(含銅研磨廢水)	製程原水、冷卻用水
	氟系廢水	氟離子、重金屬	化學混凝、流體化床結晶法	製程原水、次級用水
	酸鹼廢水	酸、鹼	➢活性碳、離子交換、RO ➢直接使用	➢製程原水、次級用水 ➢廢氣洗滌水、廢水調勻池調整 pH
	有機含氮廢水	高濃度有機氮、氨氮	缺氧槽+MBR+RO、RO+MD 脫氣、Annamox+薄膜程序	製程原水、次級用水
冷卻水塔排水		鈣、鎂離子、二氧化矽、硫酸鹽、氯離子等	過濾+除鹽設備如 EDR、離子交換樹脂、UF/NF/RO 等	冷卻水塔循環補水
洗滌塔排水		SS、鹽類	砂濾、離子交換樹脂、UF/NF/RO 等	洗滌塔循環補水
放流水回收再利用		鹽類、微量有機物、SS	砂濾、薄膜過濾、活性碳、消毒	冷卻用水、生活雜用水、澆灌用水

1.一般過濾(去除粒徑大於 10μm 之顆粒)

(1)砂濾/多層濾料(MMF)：使流體通過 50～80cm 深的砂層 (石英砂或無煙煤) 藉以移除 50～100 μm 以上之雜質顆粒，可分為上流式、下流式及側流式等，依濾料可分成單層濾料與多層濾料(MMF)等型式。

(2)活性碳過濾：活性碳係由木材及煤炭等原料，經脫水碳化及活化等過程，把原料中非碳成份去除，形成多孔性的碳化物質，可藉活性碳的

吸附作用去除水中懸浮固體物及有機物，並達脫色除臭之效果，其形式包含粉末狀、顆粒狀及纖維狀。

2.精密過濾(去除粒徑小於 10μm 之顆粒)

(1)微/超濾：屬表面過濾，可去除水中微細膠體離子，經超過濾膜處理後之產水可直接導入逆滲透膜等除鹽單元；微過濾膜孔徑約 1~10 μm，超過濾膜之孔徑則約小於 100 nm，可去除分子量為數萬以上之大分子。

(2)薄膜生物反應器(MBR)：為結合傳統活性污泥法與薄膜技術而成，藉由薄膜阻攔，可提高生物處理單元內污泥濃度，提升處理效能，並經微/超濾膜之過濾去除產水中之懸浮固體，具備處理水質佳、操作彈性大、占地小、污泥量少等優勢。

3.除鹽

(1)逆滲透(Reverse Osmosis, RO)：逆滲透膜孔徑小於 0.1 nm，僅容許水分子通過，可將離子與溶解性物質阻截於濃縮側，形成濃排水排出，從而取得低硬度／導電度／溶解性有機物之產水除鹽率可達 99%。

(2)倒極式電透析(Electrodialysis Reversal, EDR)：採用陰、陽離子交換膜多層交替，使陽離子與陰離子分別移往陰極與陽極，而可得到淡水，較適宜處理 TDS 小於 5,000 mg/L 之原水，其形式包含電透析(Electrodialysis, ED)、電去離子 (Electro-Deionization, EDI)及倒極電透析 (Electrodialysis Reversal, EDR)，其中倒極電透析為週期性地改變電極極性，電極極性於一段時間後可互換，藉以自動清洗離子交換膜表面結垢，惟除鹽效率不如逆滲透膜。

(3)離子交換：液相中的離子與固相(樹脂)中離子間互相交換，而達到除鹽效果，為避免再生頻率過高，較適宜處理 TDS 小於 500 mg/L 之原水，故不適合處理放流水，依交換特性可分為陽離子樹脂(去除懸浮顆粒、有機物、以及正電荷離子，進行水質軟化)及陰離子樹脂(去除帶負電荷之無機鹽類)。

4.除碳脫硝

無氧/好氧生物程序(A/O process)為利用進流水中有機物作為脫氮時之碳源，氨氮於好氧槽中進行氧化成硝酸鹽氮，並由好氧槽迴流含硝酸鹽氮之混和液至無氧槽進行脫氮作用，以達到生物除氮之效果。

5.脫氣膜(Membrane De-gasifier, MD)硫酸銨法

將廢水調整至高 pH 值之條件下，使氨氮以氨氣形式存在並與空氣接

觸，自水中移除後通過脫氣膜，氨氣並可以硫酸結合成硫酸銨加以回收，可產製工業氨水或硫酸銨粉末再利用;MD 脫氣法之優點包含投資成本低、效果穩定及占地面積小，惟需額外加入硫酸溶液進行反應，且產物硫酸銨之去化亦為問題之一。

6.混凝

(1)化學混凝：利用混凝使廢水中固體物去穩定化而相互凝聚，再透過慢速攪拌促使膠羽碰撞集結成大膠羽，最後由重力沉降去除，常用混凝劑依性質可分為無機性、二價鐵、硫酸銅、高分子混凝劑及多元氯化鋁等。

(2)電解混凝：原理為由陽極釋出之陽離子(如 Fe^{2+})，形成混凝劑($Fe(OH)_4^-$ 及 $Fe(OH)_3$)以破壞污染物之表面電性，去除其穩定性之狀態後聚集形成膠羽，並沉降至槽底底部形成污泥，可同時去除廢水中之研磨砥粒、氧化劑及金屬離子。一般來說，電解混凝之優點包含設備簡易，通常不需添加其他化學藥劑，產出污泥量較傳統混凝沉澱少，較無二次污染問題，惟其電費成本較高且水力停留時間較長，於廢水處理上較為耗時，且因陰極還原反應中會釋出氫氧離子(OH^-)，造成導電度及總鹼度上升[5]。

7.流體化床結晶法

流體化床結晶處理技術為利用 0.2-0.5mm 矽砂擔體在結晶槽中作為結晶核種，欲處理之廢水及添加藥劑係由該反應槽之底部進入並向上流動，而該反應槽外接有一迴流水迴路，用以調整進流水過飽和度及擔體上流速度，使欲處理的氟離子於矽砂擔體表面形成穩態氟化鈣結晶體，當晶體粒徑達 1-2mm 後沉降排出槽外。

而因擔體沉降性佳，故不需另進行固液分離、脫水等程序，且由於結晶具有脫水性及高純度之特性，使其晶體含水率小於 10%，有價元素表面純度可達 95%以上，同時具有廢棄物減量與資源化之優點[6]。

五、結　論

因產品製程需求，我國高科技產業多屬高耗水產業，以永續產業及綠色製程之觀點，水資源之使用應逐漸加強節流及回收，相較於經濟部水利署之規定，管理局考量產業用水特性，乃對其管轄之園區廠商訂定更為嚴格的回收率標準。對於高科技產業而言，製程用水約占整廠用水之 8 成，提升製程

排水回收再利用率及降低製程用水需求為其主要之節水潛力點，惟隨製程技術越加進步及精密，對於製程純水水質之潔淨度要求將日趨嚴格，高科技產業多採處理水質較佳之水再生處理技術如薄膜處理、離子交換等，而為降低處理成本及提高處理設備之產水效率，將製程所產生不同水質特性及濃度之排放水分別收集及處理再生，提升機台分流效能應為首要目標，有助於提升回收率，於達成水資源有效利用之同時，兼顧投資相關處理設備之經濟效益。

六、參考文獻

1. 新竹科學工業園區管理局，科學工業園區水電輔導管理辦法，93 年 12 月。
2. 金光祖、張佩琳，高科技製程有機廢水以 UV/Ozone 技術回收再利用之研究，91 年。
3. 黃俞昌，科學園區節約用水之努力與做法，節水季刊第 37 期，第 15-21 頁，94 年。
4. 黃淑芬，氟系廢水中加鈣去氟之顆粒形成影響因子研究，碩士論文，國立交通大學環境工程研究所，96 年 7 月。
5. 柯宏杰，以電解混凝法處理化學機械研磨廢水-影響因子及反應機制，碩士論文，國立交通大學環境工程研究所，94 年。
6. 林君翰、鄭景隆、謝政宏、陳元峰、林宗煌，流體化床結晶技術應用於處理半導體氟酸系廢水之實例探討，產業綠色技術論文研討會論文集，第 233-243 頁，96 年。

超純水系統 RO 節能與節水改善

賴柏誌*、于家驊**、楊炳章***

摘 要

在超純水系統中，RO 是一個不可或缺的單元，利用加壓過濾的原理去除水中的離子、總有機碳、二氧化矽…等等。工業用的 RO 產水量相當大，目前廠內單套 RO 產水量約 70 CMH，過濾段數為兩段(Two-Pass RO)，產水率約 80%，是超純水系統中造水率最低的單元。為克服兩階段 RO 之滲透壓，必須利用高壓泵施加 20 kg/cm^2 以上的壓力於 RO 進水端，以達到需求之水量及水質，然而既有的高壓泵運轉效率低，且相當耗能，單套運轉一天用電約 2640 kWh，使 RO 也成為超純水系統中最耗電的單元。

廠務自 106 年 1 月起，進行新設置 3 套 RO 節能與節水的改善評估，首先利用 DOE 手法進行 2 因子 3 水準實驗，提升既有 RO 膜的造水率，但無法達到預期之目標。因此進一步從 RO 模組設計的探討以及各段水量和水質的數據蒐集與分析，搭配原廠軟體評估 RO 最適化段數，最後定案將新設置 RO 的過濾段數修改為一段(One-Pass RO)，在不影響系統水質情況下，減少濃縮水排放及增加造水率，並將新設置 RO 的高壓泵從無軸封泵更改為立式離心泵，搭配變頻器降低運轉頻率，達到省電與節水的效益。

改善後，3 套 RO 的高壓泵一天共可省電約 3,168 kWh，以一年持續運轉的條件下，共可省電約 1,150,000 kWh；而 3 套 One-Pass RO 一天共可省水約 540 噸，一年將可省下約 200,000 噸的水，且每 5 年還可減少 144 支廢棄的 RO 膜，並藉由此次新設置 RO 的改善案達到節能、節水與節廢之目的。

【關鍵詞】超純水系統、Two-Pass RO、One-Pass RO、變頻器

---

*華邦電子廠務工程處純水課 工程師

**華邦電子廠務工程處純水課 高級工程師

***華邦電子廠務工程處純水課 副經理

一、前　言

台灣因為地形的關係，河川坡陡流長，大部分雨水皆流入大海，降雨量也持續減少，水資源匱乏，使台灣名列全球第十八大缺水國；而近年來因氣候變遷，夏天氣溫及用電量屢破歷史紀錄，尖峰時段供電吃緊，節約用電迫在眉睫。

節能與節水是政府重要的政策，也是華邦電子所秉持的理念，本公司持續推動各項節能措施，以降低能源使用，並針對用水量訂定改善計畫，檢討執行成效，讓每一滴水發揮最大功用。

二、背景說明

RO (Reverse Osmosis)是超純水系統中之重要單元，利用加壓過濾去除水中離子和總有機碳(TOC)並藉由濃縮水排出，能初步提升水的純度，以利於後續單元進一步純化。目前廠內單套 RO 產水量約 70 CMH，過濾段數為兩段(Two-Pass RO)，產水率約 80%，是超純水系統中造水率最低的單元；而在統計用電量時發現單套 RO 的日用電量約 4200 kWh，也是超純水系統中最耗電的單元，如圖 1。

本廠超純水系統目前共有 8 套 RO，因應產能擴充，用水量需求變大，將新設置 3 套，廠務也藉此於 106 年 1 月成立專案小組，以鍥而不捨的精神進行 RO 節能與節水的改善評估。

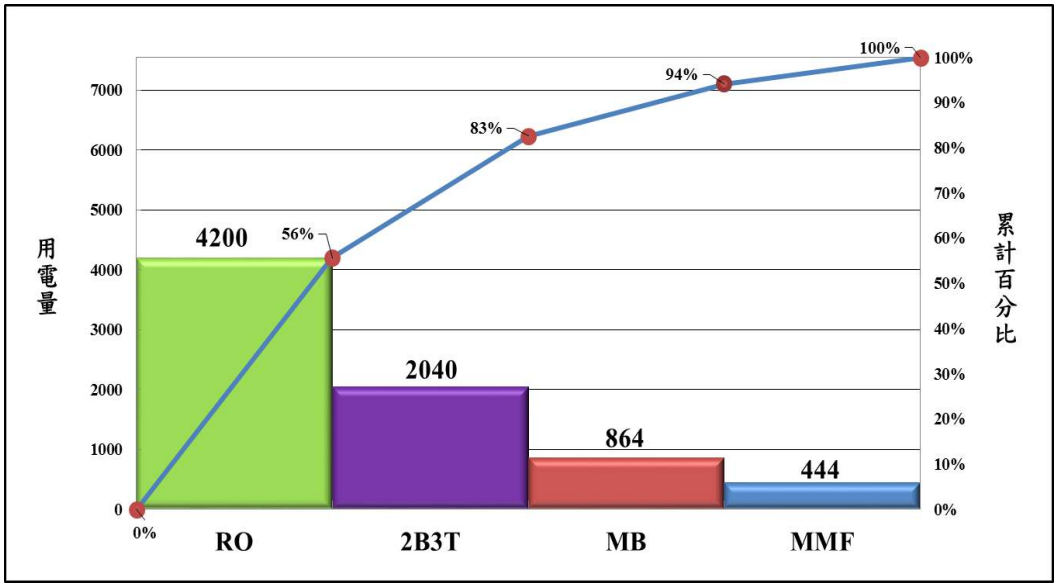


圖 1 超純水系統前段處理單元每日用電量(kWh)

三、現況分析

1.RO 流程介紹

本廠 8 套 RO 過濾段數皆為兩段(Two-Pass RO)，水源來自去離子水池，經紫外光(UV)殺菌及過濾器(Filter)攔截微粒後，接著由高壓泵施加 20 kg/cm^2 以上的壓力於 RO 進水端，經由兩階段過濾後將水送至 RO 水池儲存。第一段過濾產生的濃縮水會到再生水池供其他單元再生和反洗使用，而第二段過濾的濃縮水會回到去離子水池進行再一次的處理，如圖 2。

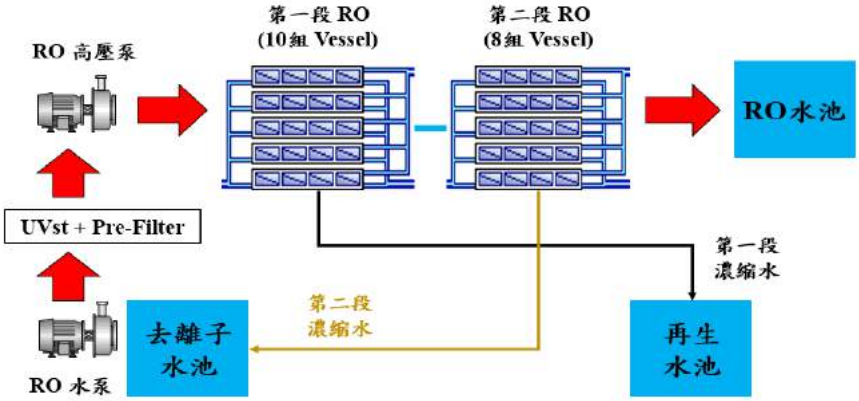


圖 2 RO 流程圖

2.影響RO產水率的因素

欲提升 RO 的產水率，必須先找出影響產水率的因素。以層別法進行分析，初步調查發現原因未明的層別因子有水溫別、壓力別與酸鹼別，將再做進一步的探討，如表 1。

表 1 層別分析表

4W1H			現況		現況調查
類別	層別項次	層別因子	原明	原未明	
What	1	水溫別		V	水溫是否影響產水率
	2	壓力別		V	施加於 RO 的壓力是否影響產水率
	3	儀器別	V		產水流量計是否有誤差 →(無誤差)
	4	酸鹼別		V	水之酸鹼度是否影響產水率
Who	5	人員別	V		產水率是否有人員操作上的差異 →(無差異)
Where	6	位置別	V		RO 設置位置是否影響產水率 →(無影響)
When	7	時間別	V		產水率是否有時間上的差異 →(無差異)

(1)水溫別

由 RO 膜原廠提供的溫度修正係數曲線圖發現，當溫度為 25℃時，TCF=1，溫度每上升 1 度，單位膜產水量增加約 3 %，由此可以推斷水溫對於產水率有影響，如圖 3。

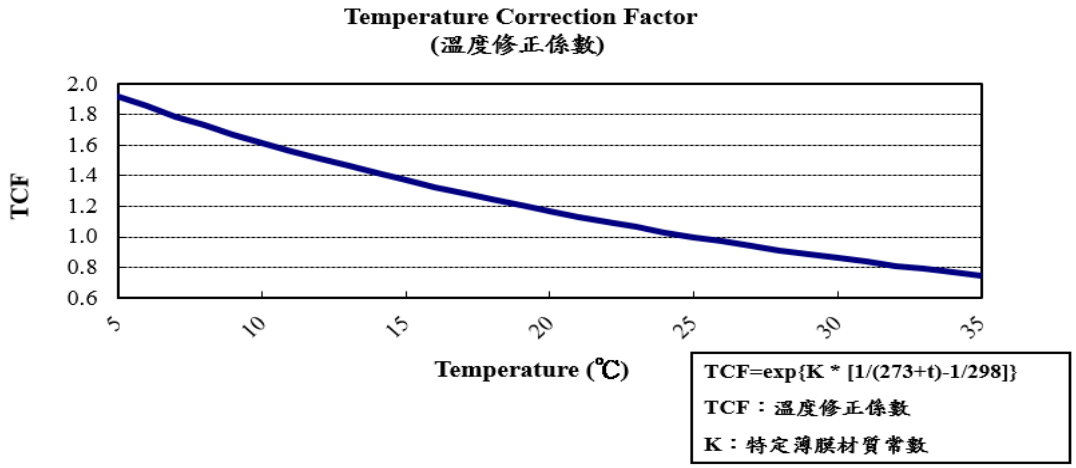


圖 3 溫度修正係數曲線圖

(2)壓力別

藉由文獻收集可以得知不同型號的 RO 膜，其壓力與產水量皆呈正相關[1]，施加於 RO 膜的壓力越大，產水量也會提升，由此可以推斷壓力對於產水率有影響，如圖 4。

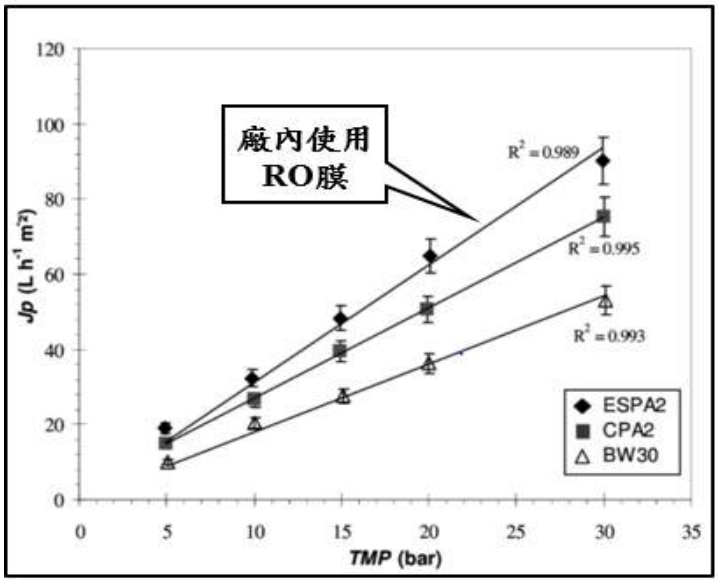


圖 4 壓力與產水量關係圖

(3)酸鹼別

藉由監控系統歷史曲線觀察 pH 值的變化與產水量的關係，推斷酸鹼度對於產水率無影響，如圖 5。

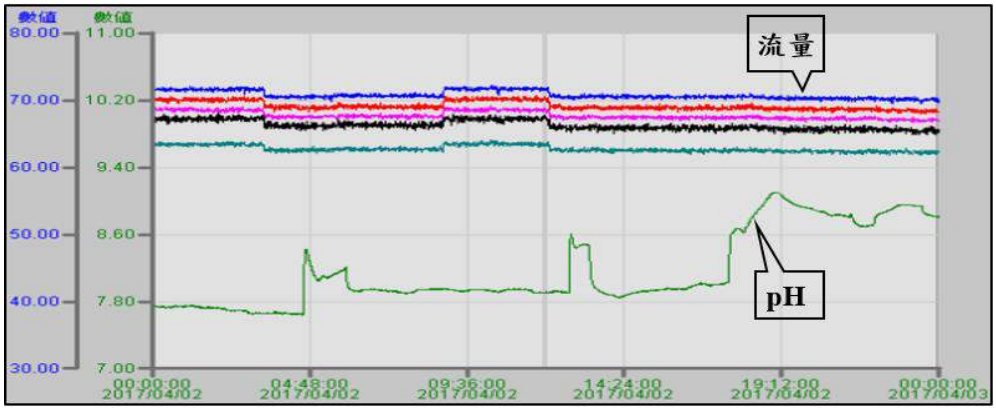


圖 5　pH 值與產水量關係圖

經層別分析後發現，水溫越高與施加於 RO 入口端的壓力越大，產水率皆會上升，所以本專案小組將從這兩項層別因子著手擬訂提升產水率的方案。

3.造成 RO 耗電量高的因素

欲降低用電量必須先找出造成 RO 耗電的原因，以人、機、物、法、環五個要因畫出魚骨圖，經過討論，去除不適合的因子後，將從 RO 的高壓泵去做探討，如圖 6。

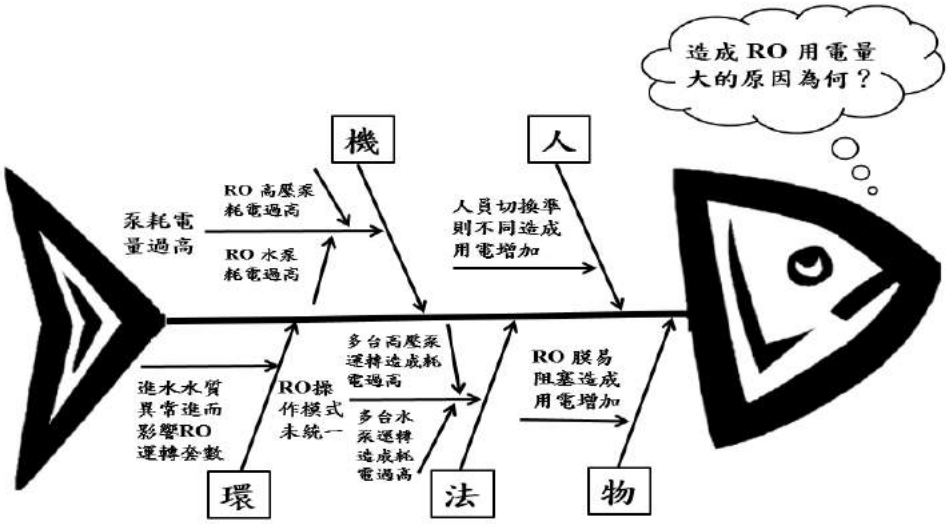


圖 6　魚骨圖

本廠既有 RO 高壓泵為罐頭式無軸封泵，因無軸封設計，能防洩漏、抗汙染，於高純度流體、危險化學液體輸送上應用廣泛，然而其轉子密封於泵浦結

構內，且須有部分內循環水提供軸心及軸套縫隙處流動，因此效率無法達到傳統離心泵的效能，如圖 7。

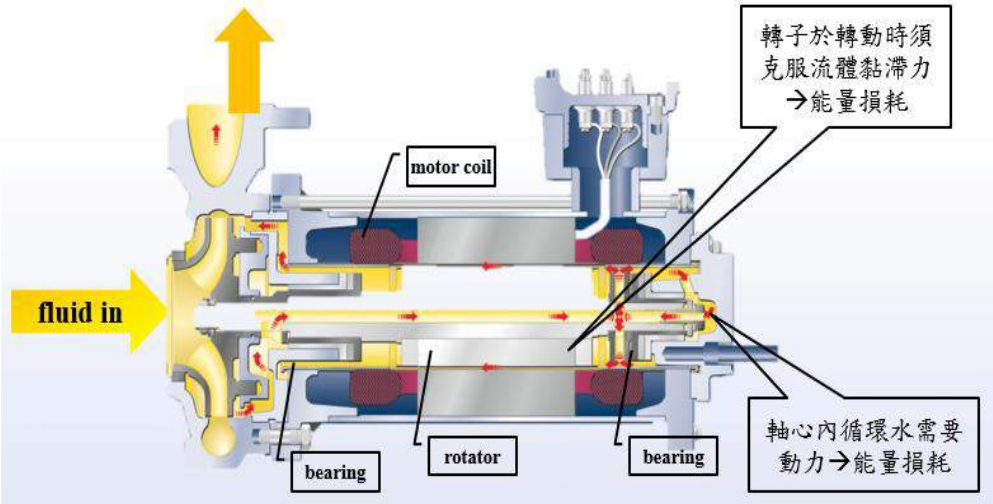


圖 7　無軸封泵

四、對策擬訂與實施

1.提升 RO 產水率方案一

規劃 DOE (Design of Experiment)手法[2]進行 2 因子 3 水準實驗，影響因子為溫度與壓力，共進行 3^2 次+中心實驗 4 次，合計 13 次實驗，每組實驗時間為一天，觀察 RO 產水出口阻值(SPEC：Resistivity > 1 MΩ.cm)，找出能提升產水率且符合水質要求之最適化溫度與壓力，表 2 為 DOE 實驗因子設定表，表 3 為 DOE 實驗參數表。

表 2　DOE 實驗因子設定表

影響因子	水準			可控制性
	-1	0	+1	
溫度 (°C)	23.5 °C	24 °C	24.5 °C	√
壓力 (kg/cm^2)	20.5 kg/cm^2	21 kg/cm^2	21.5 kg/cm^2	√

表 3　DOE 實驗參數表

實驗順序	溫度 (°C)	壓力(kg/cm^2)
1	23.5	21
2	24	21.5
3	24	21
4	24.5	21
5	24	21
6	24	21
7	23.5	21.5
8	24	20.5
9	24.5	21.5
10	24	21
11	24	21
12	23.5	20.5
13	24.5	20.5

反應變數設定有兩項，RO 產水率望大，需達到 90%；RO 出口阻值亦望大，須大於 1 MΩ.CM，如表 4。

表 4　DOE 反應變數篩選表

反應變數	是否為計量值	是否與影響因子有關係	是否為物理特性	反應變數特性	Target
RO 產水率 (%)	√	√	√	望大	90%
RO 出口阻值 (MΩ.cm)	√	√	√	望大	>1 MΩ.cm

2.提升 RO 產水率方案一效果確認與討論

本次 DOE 共進行 13 組實驗，表 5 為各組實驗結果。

表 5　DOE 實驗結果表

標準順序	實驗順序	溫度 (°C)	壓力 (kg/cm^2)	RO 產水率 (%)	RO 出口阻值 (MΩ.cm)
5	1	23.5	21	82.5	1.9
8	2	24	21.5	83.5	1.6
10	3	24	21	83.2	1.5
6	4	24.5	21	83.6	1.1
11	5	24	21	82.9	1.7
9	6	24	21	83.4	1.5
3	7	23.5	21.5	83	2.1
7	8	24	20.5	82.2	1.6
4	9	24.5	21.5	84.1	1.2
13	10	24	21	82.7	1.9
12	11	24	21	83	1.7
1	12	23.5	20.5	81.7	2.2
2	13	24.5	20.5	83	1.2

由實驗分析圖可得知，當溫度越高以及施加壓力越大，RO 產水率皆會上升，如圖 8；從阻值與壓力、溫度的分析圖可以發現，溫度越高會影響 RO 產水出口阻值，所以水溫不能設定過高，而壓力對於產水阻值則無顯著相關性，如圖 9。

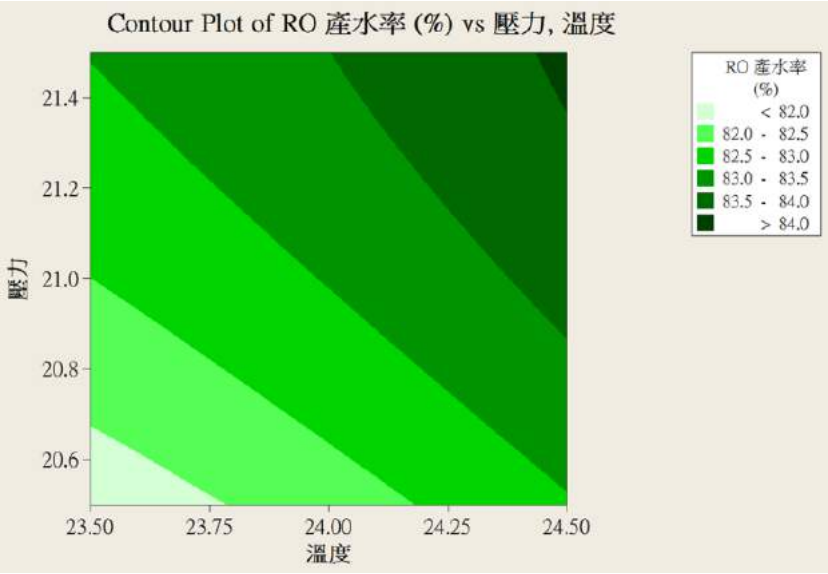


圖 8　DOE 實驗分析圖(產水率)

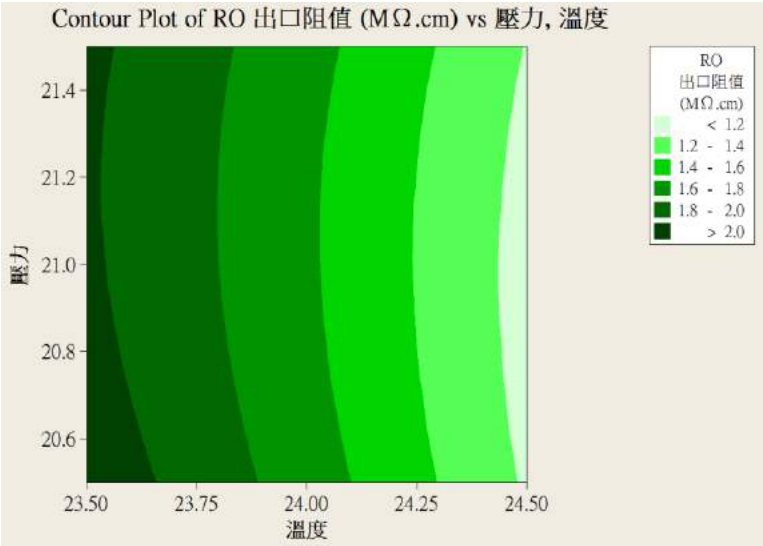


圖 9　DOE 實驗分析圖(阻值)

由最佳反應圖可得知，最適化設定參數為溫度 24.2℃，壓力 21.5 kg/cm^2，產水率可達 83.7%，出口阻值 1.5 MΩ.cm，符合水質要求 (SPEC：Resistivity > 1 MΩ.cm)，如圖 10。

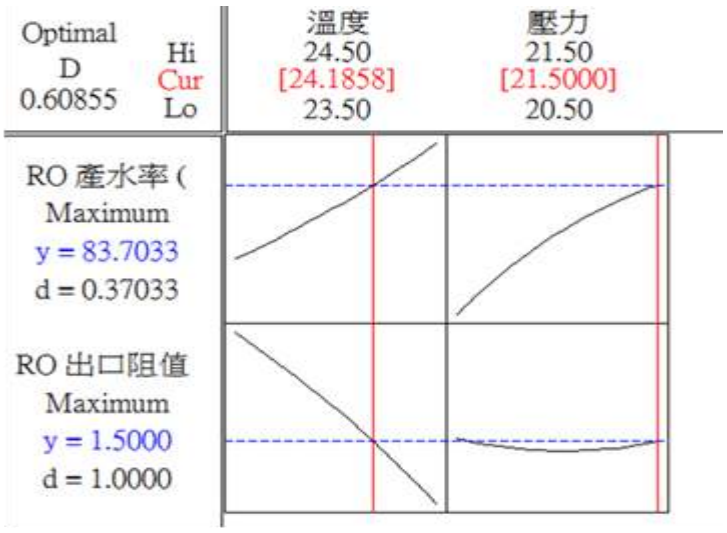


圖 10　最佳反應圖

然而經由提升溫度與壓力，RO 產水率上升約 3.7%，並未能達到本專案小組所設定之目標，故擬訂提升產水率之第二方案。

3.提升 RO 產水率方案二

跳脫框架思考，回歸 RO 模組設計。目前既有 8 套 RO 過濾段數皆為兩段(Two-Pass RO)，利用兩階段的過濾達到更好的去除效率，但同時也會有兩段的濃縮水產出而降低了產水率。本專案小組藉由各段水量和水質的數據收集與分析，搭配原廠軟體評估將新設置 3 套 RO 過濾段數修改為一段(One-Pass RO)

的可行性，減少濃縮水的排放，提升 RO 的造水率，達到節水的效益。

(1)數據收集與分析

以 1 套即將更換膜組的 Two-Pass RO (RO-B) 做為新設置 3 套 RO (RO-I、J、K) 的參考組，利用觀察其第一段的產水水質(每小時記錄一次產水阻值與 TOC，共觀察 5 天) 來評估新設置 3 套 One-Pass RO 的去除效果，並確認是否能在不影響超純水系統水質的情況下與既有 8 套 RO (RO-A~G) 結合。

A 水質監控

- Resistivity：每日記錄 24 次取平均值，共 5 天。(SPEC：Resistivity > 1 MΩ.cm)
- BTOC：每日記錄 24 次取平均值，共 5 天。(SPEC：TOC < 10 ppb)

B 分析儀器

- Resistivity：FOXBORO 873RS。
- TOC：SIEVERS M800。

藉由觀察 Two-Pass RO(RO-B) 的第一段水質結果可得知，RO 第一段出口 TOC 較高，五天平均約 9.2 ppb (SPEC：TOC < 10 ppb)；阻值則符合水質要求，五天平均約 2.4 MΩ.cm (SPEC：Resistivity > 1 MΩ.cm)，如表 6。

表 6 Two-Pass RO (RO-B) 第一段水質結果表

項目	RO 入口 TOC (ppb)	RO-B 第一段出口 TOC (ppb)	RO-B 第一段出口阻值 (MΩ.cm)
第一天	25.8	9.5	2.4
第二天	20.7	9.4	2.7
第三天	22.6	8.9	2.2
第四天	26.9	9.5	2.2
第五天	19.7	8.7	2.5
平均	23.1	9.2	2.4

藉由觀察既有 8 套 Two-Pass RO (RO-A~G) 出口的水質結果，經由兩階段的過濾，去除效果較好，五天平均 TOC 約 5.2 ppb，阻值約 2.7 MΩ.cm，如表 7。

表 7　Two-Pass RO (RO-A~G) 出口水質結果表

項目	RO 入口 TOC (ppb)	RO-A~G 出口 TOC (ppb)	RO-A~G 出口阻值 (MΩ.cm)
第一天	25.8	5.4	2.6
第二天	20.7	4.8	2.9
第三天	22.6	5.1	2.6
第四天	26.9	5.7	2.8
第五天	19.7	4.8	2.8
平均	23.1	5.2	2.7

將 RO-B 第一段出口水質做為新設置 3 套 RO (RO-I、J、K) 的參考組，與既有 8 套 RO 結合，本專案小組評估將新設置 RO 過濾段數修改為一段 (One-Pass RO) 為可實行之方案，11 套 RO 出口 TOC 約 6.3 ppb (SPEC：TOC < 10 ppb)，阻值約 2.6 MΩ.cm (SPEC：Resistivity > 1 MΩ.cm)，如表 8。

表8　RO-A~K 出口水質結果表 (評估值)

項目	RO 入口 TOC (ppb)	RO-A~K 出口 TOC (ppb)	RO-A~K 出口阻值 (MΩ.cm)
第一天	25.8	6.5	2.5
第二天	20.7	6.1	2.8
第三天	22.6	6.1	2.5
第四天	26.9	6.7	2.6
第五天	19.7	5.9	2.7
平均	23.1	6.3	2.6

(2)原廠軟體評估

利用原廠 (NITTO) RO 設計軟體評估 One-Pass RO 產水水質，將 RO 系統的原水取樣送至本廠實驗室分析，並將分析結果(陰、陽離子濃度)依序輸入軟體中，如圖 11。

圖 11　RO 設計軟體 (輸入原水水質)

接著分別輸入 RO 產水率(90%)、RO 膜更換時間(5 年)、RO 膜型號(ESPA2)、RO 膜數量(6 支)、Vessel 數量(10 組)與過濾段數(1 段)，如圖 12。

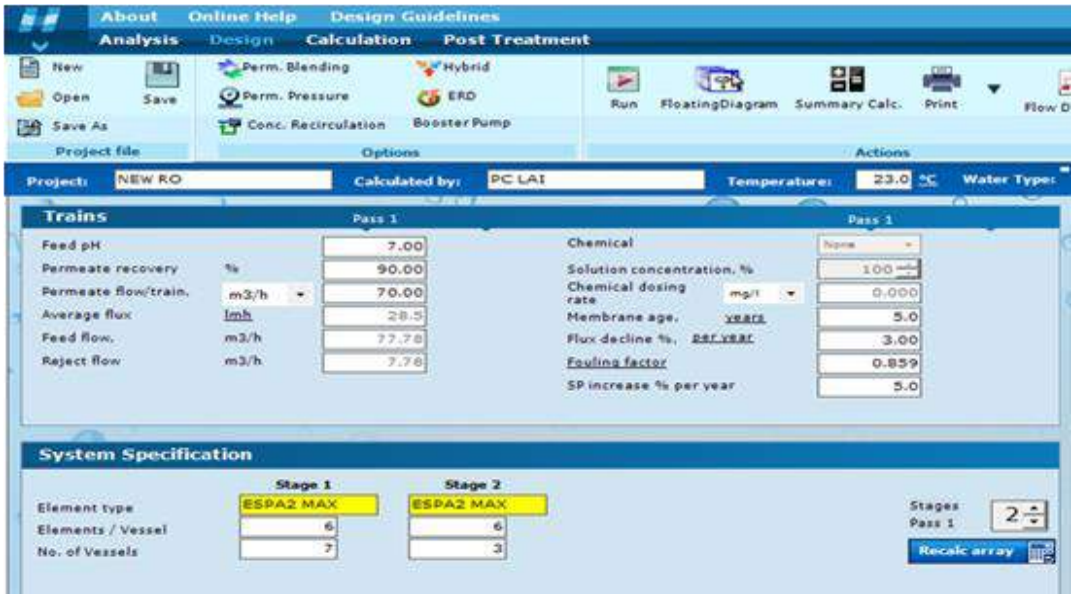


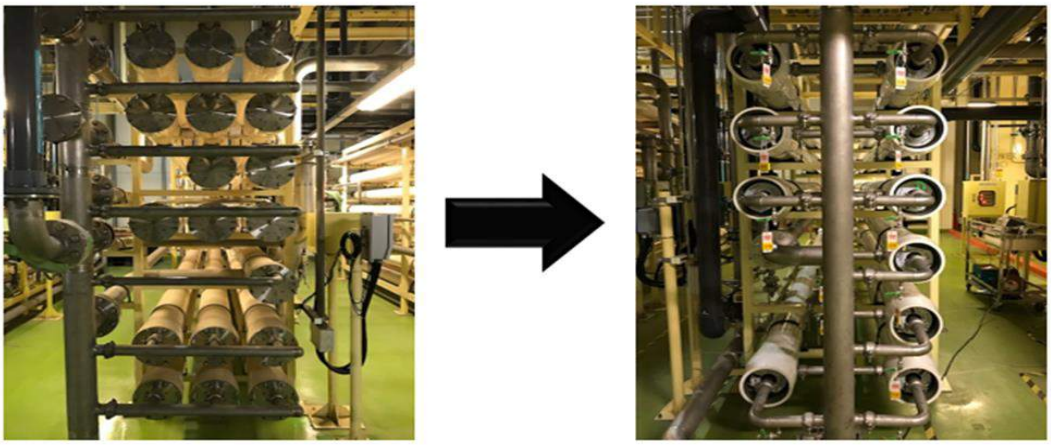
圖 12　RO 設計軟體 (輸入各項設定參數)

由原廠軟體模擬結果可得知 One-Pass RO 對於水中各項離子的去除率皆符合超純水系統水質要求，TDS 為 0.42 ppm，換算成導電度為 0.656 µS/cm，阻值約等於 1.5 MΩ.cm，如圖 13，而藉由以上各項評估結果，本專案小組定案將新設置 3 套 RO 的過濾段數修改為一段。

圖 13　設計軟體(設計結果)

4.提升 RO 產水率方案二效果確認與討論

改善後，單套 RO 過濾段數由兩段修改為一段，Vessel 數量由 18 組減為 10 組，省去第二段濃縮水的排放，約 7.5 CMH，如圖 14。



改善前 (過濾段數二段，共 10+8 支膜管)　　改善後 (過濾段數一段，共 10 支膜管)

圖 14　RO 改善前與改善後比較圖

5.降低 RO 高壓泵耗電量

規劃將既有的罐頭式無軸封泵改為立式高效率泵浦，並搭配變頻器降低運轉頻率，達到節能功效，表 9 為換機優缺點分析評分表。

表 9　換機評分表

方案	既有無軸封泵，不換機		更換成一般離心泵	
	優缺	評分	優缺	評分
運轉效率	低，約 46%	2	高，約 65%	4
運轉耗電	極高，110 kw	2	高，75 kw	4
節能認證	無	1	IE3 認證	3
保養或建置費用	極高，約 220 萬元	2	高，約 160 萬元	3
平均每 2 年保養費用	約 44 萬元	2	約 20 萬元	4
運轉穩定性	高	5	略低於無軸封泵	4
維護料件交期	長，平均約 3 個月	2	短，約 2~3 週	3
搭配變頻器可行性	無法搭配	2	可搭變頻器	3
總評	總分：18		總分：28，較佳方案	

6.降低 RO 高壓泵耗電量效果確認與討論

One-Pass RO 過濾段數只有一段，與 Two-Pass RO 相比，高壓泵只須施加約 10 kg/cm^2 左右的壓力(Two-Pass RO 約 20 kg/cm^2)，因此可利用變頻器調降高壓泵運轉頻率(60Hz → 40Hz)，改善後，單台高壓泵每日可節省約 40%的耗電量，約 1056 kWh，如圖 15。

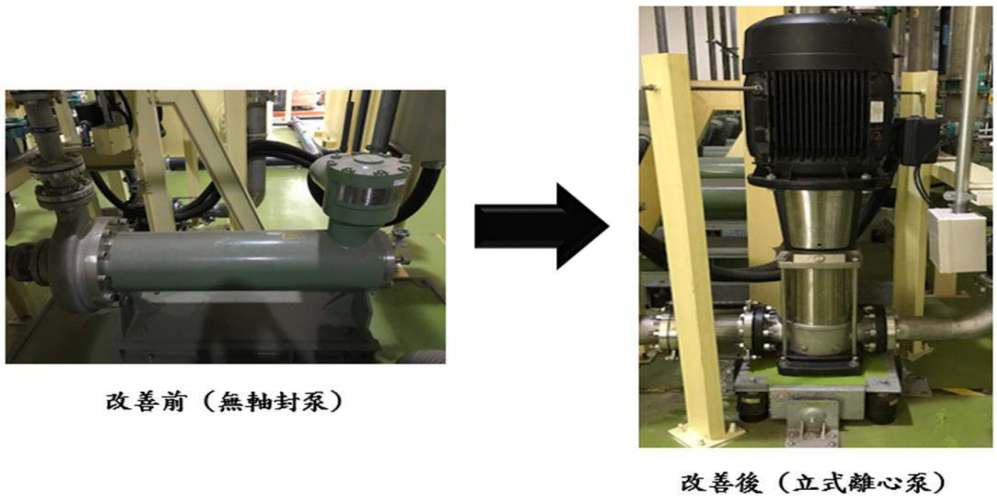


圖 15　RO 高壓泵改善前與改善後比較圖

7.新設置 RO 效益分析

(1)節能：改善後單台高壓泵日用電量下降約 40% (約 1,056 kWh)，單套 RO 日用電量由 4200 kWh 下降至 3144 kWh，而以一年持續運轉的條件下，3 套新設置 RO 共可省電約 1,150,000 kWh (電費約 NTD 2,870,000)。

(2)節水：改善後單套 One-Pass RO 可省去第二段濃縮水的排放，約 7.5 CMH，而以一年持續運轉的條件下，3 套新設置 RO 共可省水約 200,000 噸 (水費約 NTD 2,400,000)。

(3)節廢：新設置 RO Vessel 數量比既有 RO 少 8 組，每組 Vessel 有 6 支 RO 膜，而本廠 RO 膜為 5 年更換一次(一支 RO 膜約 NTD 20,000)，換算下來每 5 年可節省約 NTD 2,880,000。

五、結　論

本改善案針對超純水系統前處理單元用電量及產水率進行分析，並選定 RO 為首要節能與節水的改善目標。在節能的部分，以魚骨圖找出造成 RO 耗電量大的主要原因為高壓泵；而在節水方面，以層別法分析影響 RO 產水率的因素，接著利用 DOE 手法找出能提升產水率之最適化溫度與壓力，雖然未達到預期之目標，但本專案小組秉持著破釜沉舟的決心，跳脫框架思考，從 RO 的運轉模式切入，經過一連串水質統計與觀察，並搭配原廠提供的設計軟體，最後成功將 RO 的過濾段數修改為一段，減少濃縮水排放，降低 RO 入口端壓力及高壓泵運轉頻率，且每 5 年可減少 144 支廢棄 RO 膜，並藉由此改善案達到節能、節水與節廢之效益。

本專案小組落實華邦「擔當、創新、群效」之企業文化，持續提升廠務技能，並由上到下推動節能與節水改善案，積極配合政府節能減碳政策，以達到環境資源永續利用，企業經濟永續經營之目的。

六、參考文獻

1. Claire Fargues et al, “ Adsorption of small organic fROm beet distillery condensates on reverse-osmosis membranes：Consequences on the pROcess performances ” , HAL-00862459 , 2013 .
2. 唐麗英，實驗設計講義，交通大學工業工程與管理學系/唐麗英 教授編寫，2008。

陶瓷平板 MBR 膜技術應用於豆漿豆腐食品製造廠廢水全量回收之實廠案例探討

李岳翰*、廖泰康**、藍常睿**、林正祥***

摘　要

MBR(membrane bioreactor, MBR)為薄膜生物反應器，是將薄膜放置於活性污泥曝氣槽中，因此可大幅減少土地面積之需求，放流水亦可直接回收再利用。由於現今水資源缺乏及相關環保法令之要求，再加上 MBR 技術已趨於穩定，因此 MBR 技術已漸成為現行水回收再利用之重要技術。

現今 MBR 技術應用範圍已相當廣泛，包含生活污水及部分工業廢水等之高級處理與水回收已有相當好之處理效果，但因實場廢水水質水量變異大，此變異對各種不同之 MBR 處理後廢水水質之影響甚鉅，故有必要再深入探討 MBR 用於實場廢水處理之適用性。本研究係以陶瓷薄膜生物反應器(Ceramics Membrane Bioreactor, CMBR)處理豆漿豆腐食品製造廠廢水中之污染物質，CMBR 有別於傳統 MBR，具有抗高溫、抗油污及耐酸鹼等特性，較能處理有機膜無法處理之廢水。

由於此食品廠廢水含不少油脂及鈣含量，原使用日本製之有機平板膜，因油脂問題及無法有效逆洗導致膜片經常阻塞，洗膜時還須用手工方式逐片海棉刷洗，維護管理極不容易。經置換為陶瓷平板 CMBR 後已克服了油脂及膜片經常阻塞問題，目前已正常運轉中。本文即介紹此陶瓷平板 MBR 膜設計參數與實際操作印證之相關經驗，以供各界參考。

【關鍵詞】陶瓷平板 MBR 膜、豆漿豆腐食品廢水、實廠案例、水回收

---

*祥泰綠色科技有限公司　經理

**祥泰綠色科技有限公司　工程師

***祥泰綠色科技有限公司　環工技師

一、前　言

MBR 薄膜生物反應器應用範圍已相當廣泛，於生活污水及部分工業廢水等之高級處理與水回收已有相當好之處理效果，本文即介紹此陶瓷平板 MBR 膜應用於豆漿豆腐食品製造廠廢水全量回收之實廠案例探討，以供各界參考。

二、MBR 之原理與發展

MBR 為結合膜分離技術與生物處理技術之廢水處理系統。主要利用浸漬於好氧生物池內膜分離設備反應槽內之活性污泥,可取代終沉池並兼具過濾作用。因此系統內活性污泥(MLSS)濃度及污泥齡(SRT)將因薄膜的攔阻而大大提高，體積負荷可提高至 2~3kg/m^3.d，相對水力停留時間(HRT)可大為減少，而難分解的有機物在 MBR 池中亦可不斷反應而降解。與傳統的生物處理方法相比，具有高體積負荷、抗衝擊負荷能力強、出水水質穩定、占地面積小、排泥周期長、可自動化控制等優點。

MBR 由於佔地面積小、高效率，以及膜成本有逐年降低之趨勢，預測未來將有更大的市場競爭力，更為各界所採用 MBR 之特點歸納如下：

- 出水水質品質高，出水中無固體物質存在。
- 系統可過濾細菌，後消毒加藥劑量可降至最低。
- 污泥齡長，與其他好氧處理技術比較，污泥產生量少。
- 污泥濃度高，反應池體積可大幅縮小，佔地面積少。
- 可快速馴化出降解難生物分解之微生物，提高系統穩定性
- 具有處理高污染濃度廢水之能力。

一般 MBR 膜之孔隙約介於 0.04 至 1.0μm,由如圖 1 膜分離孔隙表所示,顯示 MBR 可過濾掉細菌及大分子範圍之顆粒。

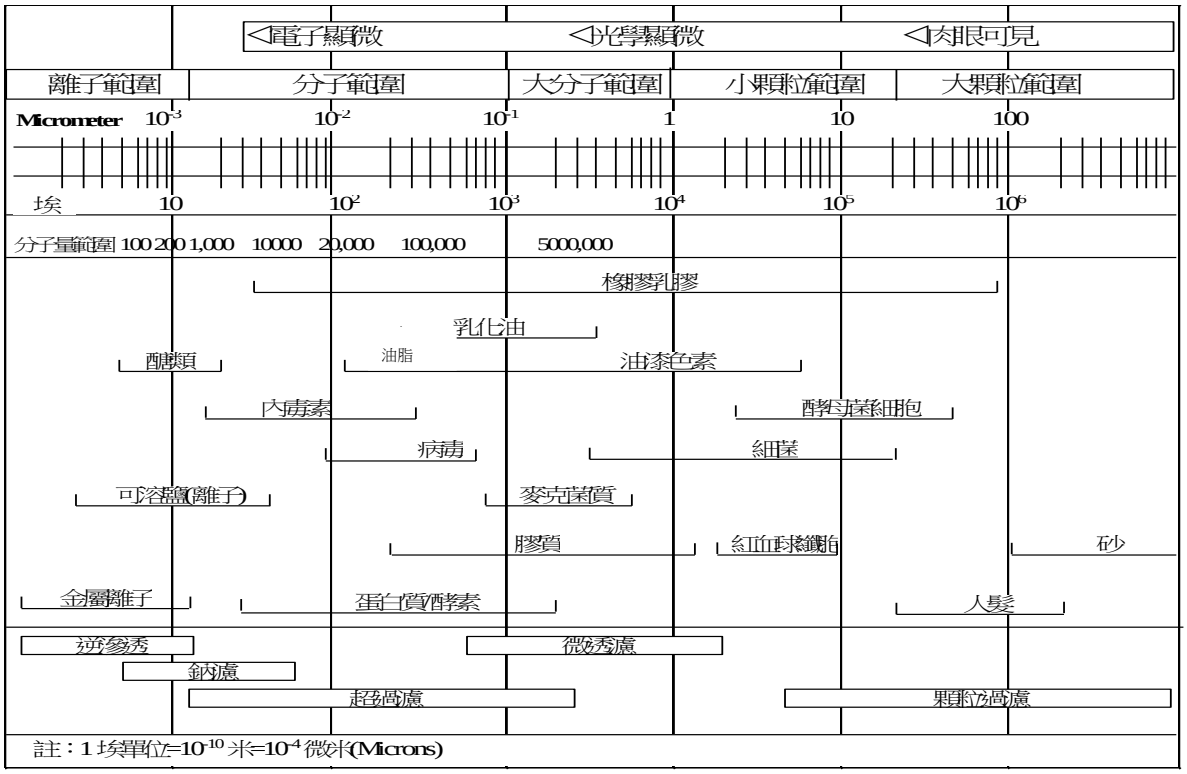


圖 1　膜分離孔隙表

MBR 反應槽內薄膜最主要的功能為過濾機制，操作者可利用透膜壓力為驅動力，將固體顆粒攔截於薄膜表面，使水分子通過薄膜，達到水質淨化作用。故其過濾效果僅和薄膜機制有關，而與沉澱作用無關，且薄膜本身具有選擇性，可分離特定物質，具半滲透性(semipermeability)。利用薄膜分離廢水中的固體顆粒時，需給於一適當的驅動力，此驅動力可為壓力差(pressure gradient, ΔP)、親和力、電荷、濃度差(concentration gradient)及化學性質等。一般用於污水處理之驅動力方式為壓力驅動式，其優點是處理過後的放流水中無雜質，且可濃縮污泥濃度，此方式屬於單純的物理分離程序，故對於被分離的物質而言，其本身之化學及生物性質並不會改變。

三、陶瓷平板 MBR 之介紹

陶瓷平板 MBR 膜為新進之薄膜技術，表層材料由緻密之 2 次高溫陶瓷燒結而成，使之具備耐高溫(80℃)、加強抗污耐污(強酸鹼)性、可為高壓噴槍噴洗表面及使用壽命長(可保固 7 至 10 年以上)之特性。膜的孔徑為 0.1 微米(μm)，連細菌也可被攔阻；更因不再倚賴生物污泥的沉降性，故無須提供額外空間設置生物沈澱池，使得陶瓷平板 MBR 膜之出水 SS 為＜1 mg/L，

以新加坡實際案例，此單元之出水可直接搭配逆滲透膜(RO)的使用，其出流水能達到所有回收再利用水的水質標準，大幅提高水資源再利用之價值。

國內目前也已使用過不同之 MBR，如中空絲膜(PVDF 材質)、平板膜(PVDF、PE 材質)等，茲分析比較分析如下表 1~3：

表 1　陶瓷平板 MBR 膜與有機膜之特性比較

膜型式	中空絲膜	平板膜	
材質	合成樹脂 (PVDF)	合成樹脂 (PVDF、PE)	陶瓷
膜總表面積	＋＋	＋	＋
耐酸鹼及 耐強氧化劑	＋	＋	＋＋
耐溫性	＋ (50℃以上容易 出現問題)	＋ (50℃以上容易 出現問題)	＋＋＋ (可達 80℃)
除油能力	＋	＋	＋＋
壽命、保固年限	3 至 5 年	5 至 7 年	10～15 年
過濾性能	＋＋	＋＋	＋＋
阻塞狀況	膜管接縫及內 緣位置容易 阻塞及斷絲	逆洗壓力小 阻塞容易	有逆洗壓力 不易阻塞
回收再利用	不易回收利用	不易回收利用	可回收再利用

備註：＋號越多，顯示功能越佳

表 2　陶瓷平板 MBR 膜與有機膜之清洗特性比較

	高分子中空絲膜	高分子平板膜	陶瓷平板膜
空氣擾動清洗	邊緣不易清洗	可使用	可使用
逆洗	可使用(<0.7kg)	效果不佳	可使用並加壓(1kg)
線上藥品清洗	可使用	效果不佳	可使用
高壓水噴槍清洗	無法使用	無法使用	可使用

表 3　日本 MBR 水回收案例 成本效益分析

規格	中空絲膜	平板膜	陶瓷平板膜
孔隙(μm)	0.1	0.4	0.1
材質	PVDF	PVDF	Ceramic
模型式	MF	MF	MF
膜表面積	25m^2/模組	0.8m^2/平板	0.5m^2/平板
標準通量Flux	0.4m^3/m^2-day	0.4m^3/m^2-day	0.8m^3/m^2-day
設計通量	82	79	100
初設成本(%)	190	260	100
操作成本/年(%)	120	140	100
總成本/10年(%)	120	140	100

備註：本案例是以工業廢水回收實際處理量: 120 m^3/day 作比較基礎
資料來源：2015 日本明電舍資料

四、豆漿豆腐食品製造廠實廠案例探討

1.MBR 處理技術應用於豆漿豆腐食品製造廠廢水

國內某豆漿豆腐食品製造廠原使用 PVDF 基材之平板膜進行 MBR 系統處理，但因基材因素導致逆洗操作壓力較小之限制，使膜片易產生積垢狀況，又因為豆漿豆腐食品製造廠，故水中之油脂成分較高，進而影響 MBR 系統之處理，而後亦全面更新為陶瓷平板 MBR 膜進行廢水處理，因此而改善了原先頻繁之維護頻率並也大幅降低維護所添加藥劑費用，其中維護頻率由每周至少一次減少至最多可一個月藥洗一次，且單次維護時間由原本兩天縮短至兩小時，大幅縮短維護所須人時與藥劑成本。

2.陶瓷平板 MBR 膜特性

原操作使用 PVDF 材質之平板膜系統，因無法於逆洗階段額外施加壓力進行反沖洗，故表面堵塞狀況隨時間增加而大幅上升，操作通量亦隨堵塞程度逐漸下降，為一浮動狀態，此狀況需要人力定期監控與維護，消耗較多人力與藥劑成本，且因維護時間攏長，往往維護過程必須停止廢水處理程序。

然而該食品廠更換為陶瓷式平板 MBR 膜後，則使人力、藥劑成本及整體處理水量有效提升，其最大差異為陶瓷式平板膜具較大耐壓特性，可於逆系程序中加入適當壓力，有效增加反沖洗成效，大幅降低薄膜堵塞速度，實廠操作經驗得知與過去舊式平板膜相比下，陶瓷式可穩定維持較低之膜壓差程度(ΔTMP<0.1kPa)與穩定之通量，如此不僅有較大效率之水處理量並能減少維護頻率，又經該食品廠操作經驗，陶瓷式 MBR 膜藥洗頻率可延長至一月一次，藥劑成本約為原舊式平板膜之 23%，操作之人力時間成本更為舊式平板膜之 50%以下。

3.廢水處理流程

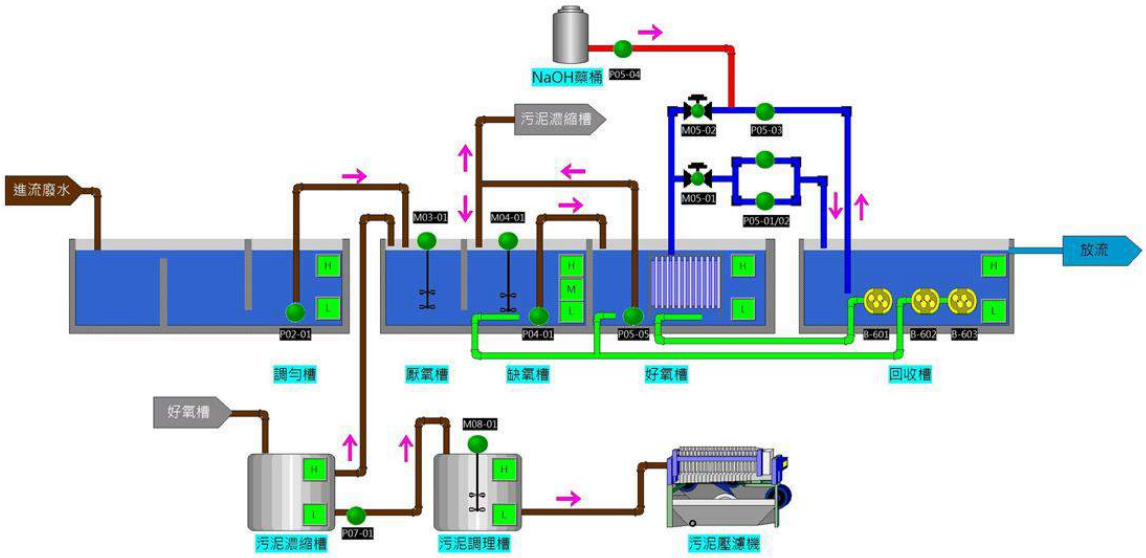


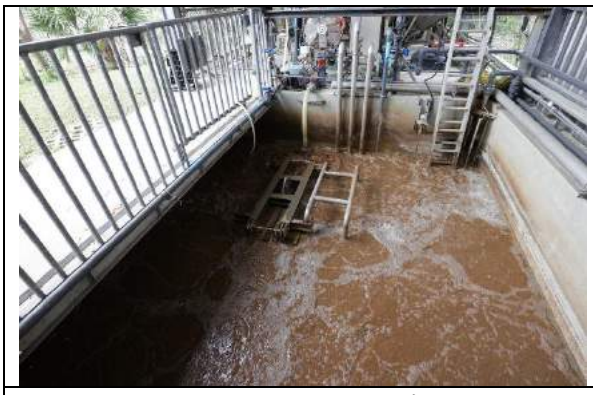
圖 2　豆漿豆腐食品製造廠廢水處理流程

該廠廢水 COD 約 2,500mg/L，為將高濃度進流廢水先經過厭氧池去池大部分 BOD，以降低總 COD 對微生物活性造成抑制，最後進入好氧 MBR 生物池時再快速地將殘餘 COD 降解完成，又因 MBR 膜孔隙約 0.1μm，有效全面攔阻池中 SS 甚至細菌於系統中，且由於新型之陶瓷 MBR 可使用較高水壓進行反沖洗程序，具不易阻塞、抗油且維護容易之優勢，故於該廠 MBR 槽內之污泥濃度甚至已達約 9,000mg/L 環境下亦能正常進行運作，使進流水 COD 可快速降解至約 20mg/L 以下，降解率約 98-99%。

4.水質處理結果與回收狀況

經由 MBR 處理後之水樣 COD 降至 20mg/L 以下，SS 幾乎可完全去除，相關水質數據如表 4 所示。過濾後之出流水儲存於放流池中，池水清

晰可見底，如圖 3 及圖 4 所示，且槽水完全回收至生產線做為地面清洗、澆灌等用水，有效節省水資源消耗及成本支出。



陶瓷 MBR 池運轉外觀

過濾水池外觀

圖 3　豆漿豆腐食品製造廠 MBR 槽及過濾水槽現況

圖 4　原水、MBR 進水及 MBR 出水之色度差異

表 4　豆漿豆腐食品製造廠污水處理及水回收處理成效表

水質檢測項目	處理水成效	
	原水	處理後出流水
pH	6.82	6.87
COD(mg/L)	1269	20
BOD(mg/L)	1199	0.45
SS(mg/L)	572	＜1
Oil & Grease	50.04	＜0.05

5.微生物菌相分析狀況

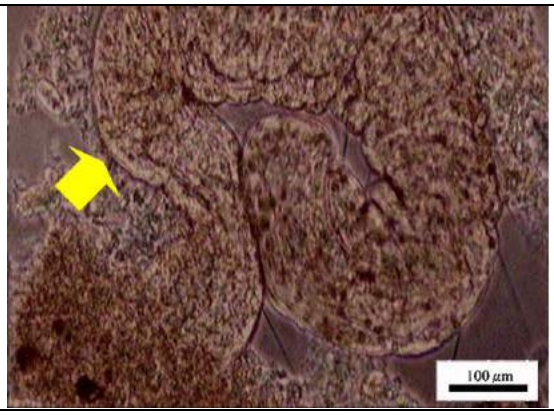
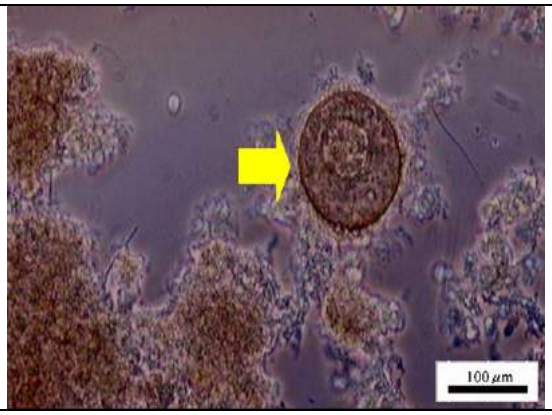
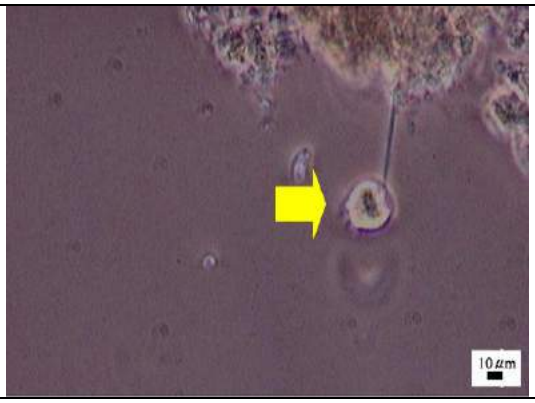
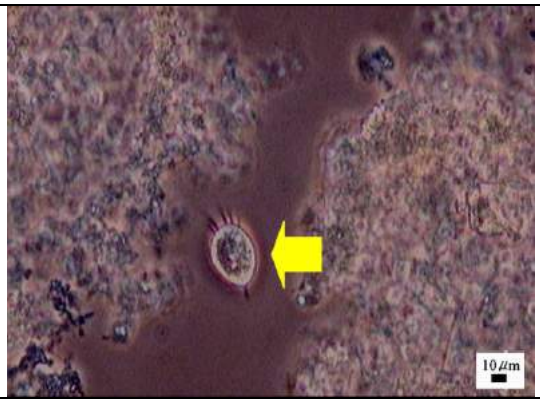
	
箭頭為後生動物之紅斑剽體蟲，活性良好，為食物鏈之頂端指標性微生物，顯示此生物膜食物鏈很長且完整。 100X	箭頭為蕈頂蟲，為生物處理單元功能良好之指標微生物。 100X
	
箭頭為鐘形蟲，為生物處理單元功能良好之指標微生物。 200X	箭頭為楯纖蟲，顯示水質BOD很低，但是污泥停留時間長。 200X

圖 5　MBR 槽內之顯微相

五、結　論

1. 陶瓷平板 MBR 膜自開發到大型污水處理與回收場之運轉，已屆 8 年，目前已累積 80 幾個案例，在工業界之使用更有其優勢，國內工業區及難度較高之工業廢水處理與回收，是有參考應用之價值。

2. 目前在台灣共有五間工廠正運作中，均設有遠端監控及水體顯微診斷功能，將可藉此確實掌握此陶瓷平板 MBR 之設計與使用各項參數，以提升國內此方面之技術，期盼各界也能參考應用。

3. 本文介紹之食品工廠廢水經由陶瓷平板 MBR 取代舊式樹脂式平板 MBR 後，維護頻率大幅降低而降低操作成本，COD 降解率亦達近 99%，目前

也已達全回收之功效。

六、參考文獻

1. 廢水處理單元設計及異常對策參考手冊(2006 年更新版)，經濟部工業局，95 年 12 月。
2. 活性污泥膜濾法(MBR)技術與應用，台灣水環境再生協會，98 年 8 月。
3. 明電舍 Meiden 株式會社 2015 July 所提供資料。

機械式蒸氣再壓縮蒸發系統(MVR)
在肥料工場之實務與應用

賴彥穎*、謝政璋**、邵豪華***

摘　要

肥料工場生產常使用液氨(NH_3)或硝酸(HNO_3)作為產品中氮的主要來源，然而反應溫度或其他條件的差異會造成氮成分部分逸散於製程廢氣中。為使肥料工場煙囪排氣能達到廢氣排放標準，工場使用大量洗滌水於廢氣處理系統中吸附粉塵及化學物質。雖然現況可以符合肥料生產與污染物排放標準等目標，但是一方面氮原料之逸散損失造成肥料生產成本提高，另一方面也造成洗滌廢水量增加，進而增加廢水處理系統之負荷。

本公司於硝磷基複合肥料工場建置一套機械式蒸氣再壓縮蒸發系統(Mechanical Vapor Recompression System, MVR)，進而處理廢氣處理系統之洗滌廢水。MVR 系統是利用蒸發器中加熱料液後產生的二次蒸汽，經由壓縮機增加二次蒸汽之溫度、壓力與熱焓值，再送到蒸發器的加熱室作為加熱蒸汽，與料液做熱交換，最後蒸汽冷凝為水回收，而料液汽化持續產生二次蒸汽，同時使料液濃縮。希望工場能藉由 MVR 系統減少廢水量的生成，並回收高氮(NO^{3-}-N,NH^{4+}-N)含量之濃縮洗滌液至原生產製程，以達到減廢與提高產品競爭力之目的。

【關鍵詞】機械式蒸氣再壓縮蒸發系統、MVR、廢水回收、肥料

---

*台灣肥料股份有限公司台中廠技術組方工課　工程師

**台灣肥料股份有限公司台中廠技術組方工課　課長

***台灣肥料股份有限公司台中廠技術組　組長

一、前　言

硝磷基複合肥料的氮成分同時具有銨態氮(NH_4^+-N)及硝態氮(NO_3^--N)兩種，使得此種肥料相較一般錏磷基肥料能更快的釋放肥效。然而在生產過程當中使用之液氨(NH_3)或硝酸(HNO_3)等原料，在反應未達穩定狀態時，容易轉化為氨氣(NH_3)及氮氧化物氣體(NOx)等廢氣。為使廢氣排放能符合環保法規，工場建置一套廢氣洗滌系統，但卻造成高濃度的氨態氮及硝態氮洗滌水產生。環保理念勢在必行，必須建立一套適當的洗滌水回收系統，將這些能源與資源回收再利用。

二、機械式蒸氣再壓縮蒸發系統(MVR)介紹

高濃度的含氮廢水現已有許多技術能夠處理，主要分為以下三種 1.化學處理技術－如沉澱結晶法、氣提與蒸餾技術、離子交換法與電解濃縮法等；2.觸媒氧化處理技術與 3.生物處理技術－如硝化脫氮、厭氧氨氧化菌法等。在考慮含氮廢水條件(如溫度、流量、濃度、pH 值等)、工場環境與處理後產物之利用方式之後，本工場最後決定建置機械式蒸氣再壓縮蒸發系統(Mechanical Vapor Recompression System, MVR)來進行含氮廢水的處理。

傳統的單效蒸發器(Single Effect Evaporator)是直接將液體進行加熱蒸發，一部分能取得濃縮液，然而另一部份產生的二次蒸汽並無再次利用，直接送去冷凝器進行冷凝回收，此為最基本的蒸發方式(圖 1)。

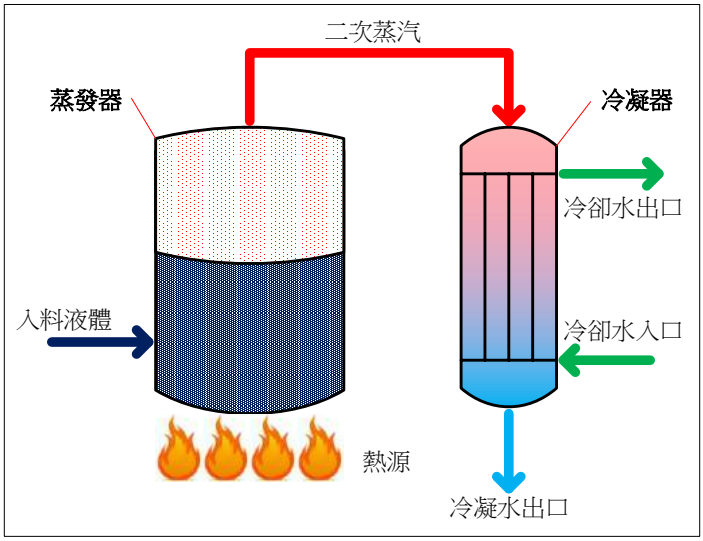


圖 1　單效蒸發法

技術持續改善後，也發展出了多效蒸發法(Multiple Effect Evaporator)，此技術是由多個單效蒸發器組成的系統，液體能透過加熱進行濃縮，而因加熱產生的二次蒸汽會持續引入下一個蒸發器進行加熱，熱交換後則冷凝成蒸餾水進行回收，也因為蒸汽熱能可以多次利用，所以被稱作多效蒸發法(圖2)。

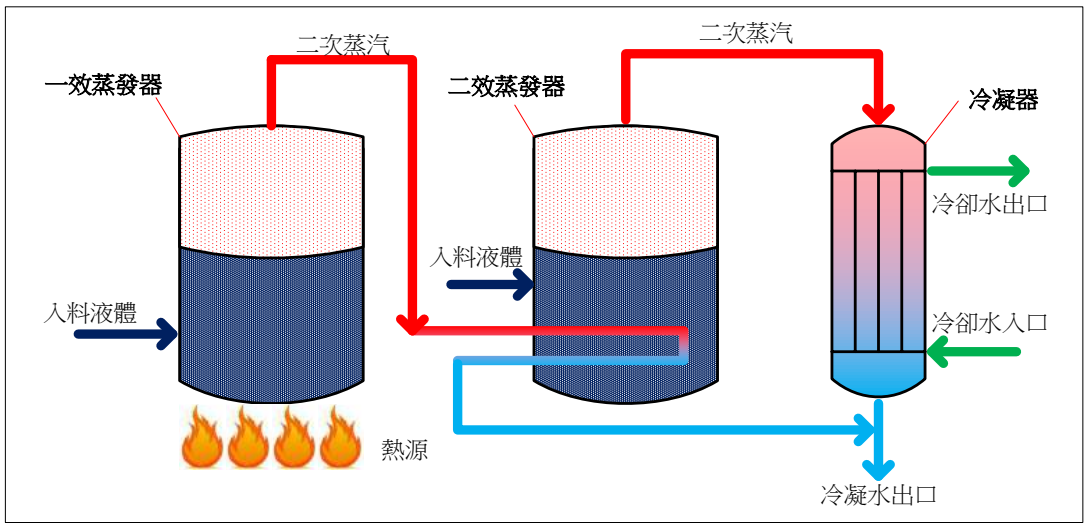


圖 2　多效蒸發法

機械式蒸氣再壓縮蒸發系統(圖 3)則是近期發展出來的技術，最早於 19 世紀就有人提出這個概念，此技術在 1970 年第一次石油危機時因節能趨勢而得以迅速發展，現在技術已經非常純熟。MVR 的主要原理為透過一台壓縮機，一來能降低液體的壓力與沸點，使二次蒸汽於低溫下就能產生；二來將二次蒸汽壓縮，增加二次蒸汽的熱焓值，最後透過熱交換器加熱入料液體，能大幅減少蒸發所濃縮過程中的能量需求，經計算過後，其經濟效益甚至為多效蒸發法的 10 至 30 效不等。上述三種蒸發法之優缺點比較亦如表 1 所述，整體而言，MVR 能在較小的能耗量下得到更好的蒸發效果。

表 1　各蒸發法之優缺點比較

項目	單效蒸發法	多效蒸發法	機械式蒸氣再壓縮蒸發系統
優點	設備成本較低。	提高二次蒸汽的利用率。	1. 佔地面積小。 2. 能耗較低。 3. 設備成本較少。 4. 低溫蒸發，不會破壞熱敏感之物質。
缺點	二次蒸汽之潛熱沒有被利用。	1.效數越高，設備成本越高。 2.每一效都有沸點上升或傳熱溫度差損失，因此生產能力小於單效蒸發法。	1. 蒸發強度不高。 2. 循環量大，能耗因此提高。

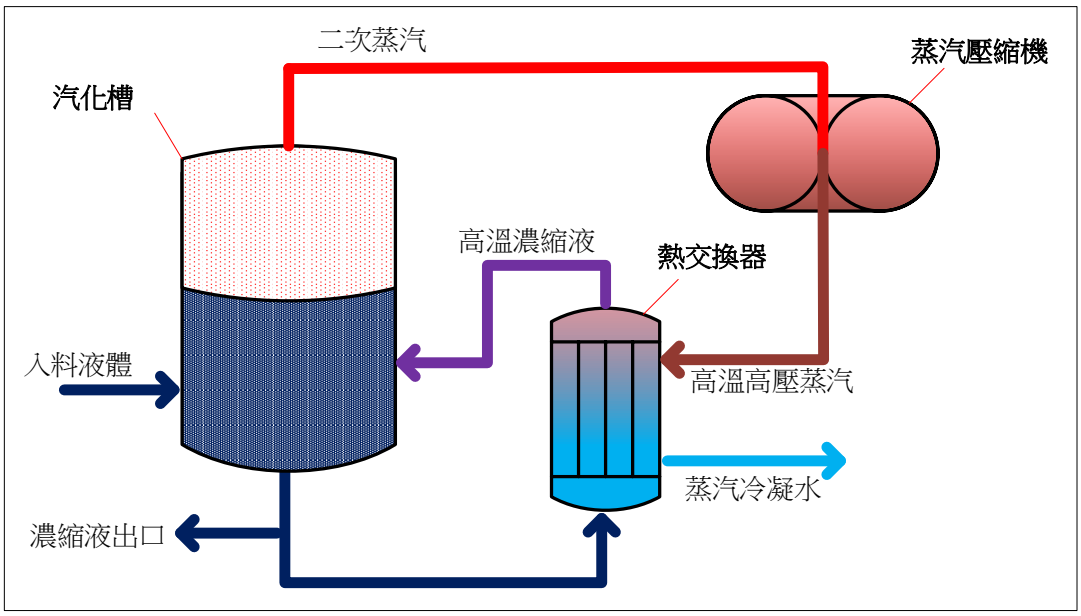


圖 3　機械式蒸氣再壓縮蒸發系統

三、MVR 於肥料工場之設計

本廠經評估過後，決定採用新型之機械式蒸氣再壓縮蒸發系統進行硝磷基複合肥料工場之廢氣洗滌系統洗滌水回收。本系統於 106 年 10 月建置完成，工期約 90 天。建置面積 12M×5.5M，且系統方位配合出入料管線流向進行配置。MVR 系統與主要設備標示於圖 4。

圖 4　MVR 系統實際圖面

1.MVR 系統流程說明:

高濃度含氮廢水自肥料工場經由管線輸送，做為 MVR 系統之入料液體，再透過進料泵浦將緩衝槽內之入料液體打入汽化槽。蒸汽壓縮機維持汽化槽內低壓，並將汽化槽內因閃沸(Flash)現象造成的二次蒸汽抽出增壓。高溫高壓蒸氣於再沸器內將汽化槽循環液持續加熱，提高循環液閃沸之效果。達到穩定後汽化槽底部濃縮液即經由濃縮液排液泵浦輸送回肥料工場內做製程回收使用。於再沸器之二次蒸汽做完熱交換後再利用冷卻水將二次蒸汽完全冷凝為冷凝水，最後透過冷凝水泵浦與公用管線送至廢水處理場處理。

在 MVR 系統啟動初期未達穩定狀態時，會先啟用真空泵浦將汽化槽內的壓力降低，並由外界提供蒸汽於再沸器加熱循環液。接著關閉真空泵浦與減少蒸汽來源，並開啟蒸汽壓縮機。待製程達到穩定後，即啟動凝水泵浦與排液泵浦將兩產物持續送出。

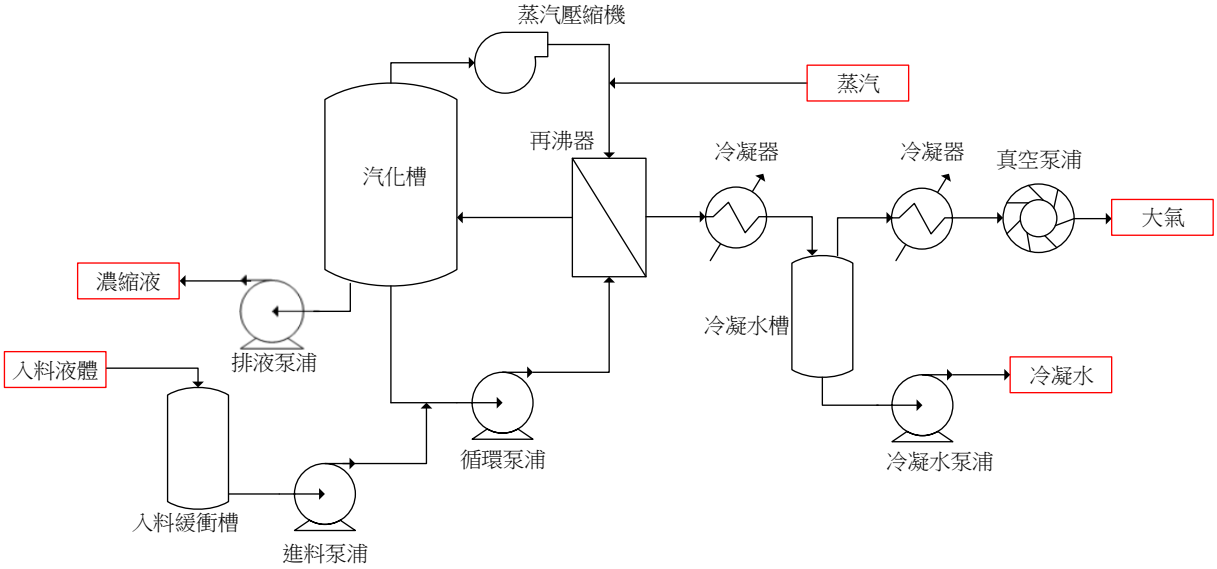


圖 5　MVR 系統流程圖

2.MVR 系統出入口物料參數:

MVR 系統處理高濃度含氮廢水前後參數如表 2 所示。系統入料量為 3,000Kg/h，且為使系統達較佳之處理效率，蒸發量/入料量之比值需大於 0.5。汽化槽操作壓力為 0.6 Kg/cm^{2}A 時，水之蒸發溫度約為 85℃。透過蒸氣壓縮機加壓之二次蒸汽將汽化槽內之入料液加熱至 110℃。最後濃縮液濃度可提升將近一倍，濃縮液溫度 110℃；二次蒸汽經熱交換與冷凝器冷凝過後，溫度降至 45℃，且總氮濃度將小於 80ppm。

表 2　MVR 系統出入口物料參數

項次	項目	數值	單位
1 處理量		3000	Kg/h
2 蒸發量		>1500	Kg/h
3 進料組成	<氨氮濃度> <硝氮濃度>	10000-30000 1000-3000	ppm ppm
4 進料溫度		80-90	℃
5 蒸發溫度		85	℃
6 操作壓力		0.6	Kg/cm^2A
項次	項目	數值	單位
濃縮液			
流量		1500	Kg/h
溫度		110	℃
組成	<氨氮濃度> <硝氮濃度>	19900-59900 1990-5990	ppm ppm
蒸汽冷凝水			
流量		1500	Kg/h
溫度		45	℃
組成	<總氮濃度>	<80	ppm

四、結　論

MVR 系統之導入使肥料工場產出的廢氣洗滌水能回收至製程內，洗滌水中的氨氮與硝氮可再轉化成肥料中的氮成分。另一方面，原本需要輸送到廢水處理廠處理之高濃度廢水，變成總氮濃度不超過 80ppm 之含氮廢水，廢水處理廠之負荷得以降低。應用此新型態綠色技術於肥料工業實務中，不僅讓原本損耗的原料成本能再回收利用，也大幅減少了環境負擔。此系統於 106 年 10 月建置完成，本廠後續將進行試車與驗收工作，以期能達到預定成果。

Local Scrubber 廢水回收系統節能/節廢改善實例

盧彭潭*、黃俊評**、林志南***、黃冠哲***

摘　要

水資源的有效利用是產業發展之重要因素，其對用水的需求隨著工業的持續發展而不斷增加，因此如何有效節省用水達成水資源使用最佳化，成為企業追求永續發展的重要目標之一。機台附屬洗滌塔(Local Scrubber)於科技業應用上非常廣泛，特別於半導體量產過程中需要使用大量水源去做洗滌，一般以製程回收水作為主要水源。洗滌塔廢水收集及其他水源進行再回收處理時，可能對回收系統發生結垢，長菌以及其他問題，須改善操作條件，增加其運轉成本。

本案例為半導體業之 local Scrubber 用水運轉成本於 105 年異常增加，原先成本卻由 105 年 12.68 元/噸上升至 106 年的 13.21 元/噸，隨著用水量增加，改善異常恢復正常成本來越急迫。為改善異常狀況，經由層別法以及 80/20 原則進行分析現況及異常問題分類；與系統設計資料與現況比較，分時段統計耗材使用量，結合實務操作面及文獻知識，找出異常原因改善；佐以部分因子實驗之實驗計劃法(Design of Experiment, DOE)-反應曲面法，找出異常真因並求得 RO 清洗之操作方法與參數，成功解決克服問題，節能/節費降低成本同時達成水資源回收再利用之目的。

【關鍵詞】廢水回收、local scrubber、80/20 原則、實驗計劃法、反應曲面法

---

*華邦電子 300mm 廠務處廢水課　副理

**華邦電子 300mm 廠務處廢水課　高級工程師

***華邦電子 300mm 廠務處廢水課　副工程師

一、前　言

水資源的有效利用是產業發展之重要因素，產業用水需求隨著工業持續發展不斷增加，如何有效節省水資源、達到工業用水的有效利用，便成為企業降低對水資源依賴及追求永續發展之重要指標。在半導體廠，軟水(Soft water，SW)作為在 Sub-FAB 的附屬機台 local Scrubber 用水使用(如圖 1-1 所示)。其功能為做為各種 Local Scrubber 的清洗水或是冷卻循環水。當軟水供應水質異常時，例如長期管路結垢，出水量不足導致附屬機台當機時，會鎖住生產機台，影響產能，故各半導體廠對於製程用軟水上有些規範要求(水質，水量，溫度，供應壓力等)。軟水定義依照不同國家並不一致，通常以鈣鎂離子構成的硬度作為指標(as CaCO3，mg/L) [1]。軟水水質介於自來水到超純水之間。

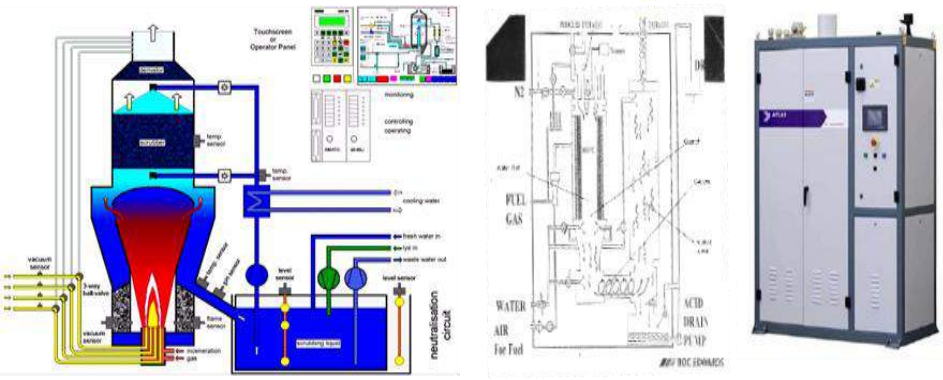


圖 1-1　Local Scrubber 使用軟水及設備構造圖

製程產能提升，對軟水需求增加，軟水的使用量已從 105 年 Q1 的每日 893 噸，增加到 106 年 Q1 的每日用量 990 噸(如圖 1-2 所示)，隨之相關軟水製水費用逐漸增加，原先成本卻由 105 年 12.68 元/噸上升至 106 年的 13.21 元/噸，為回復到原先水準，達 cost down 目標(降 4%)，故成立團隊進行改善。

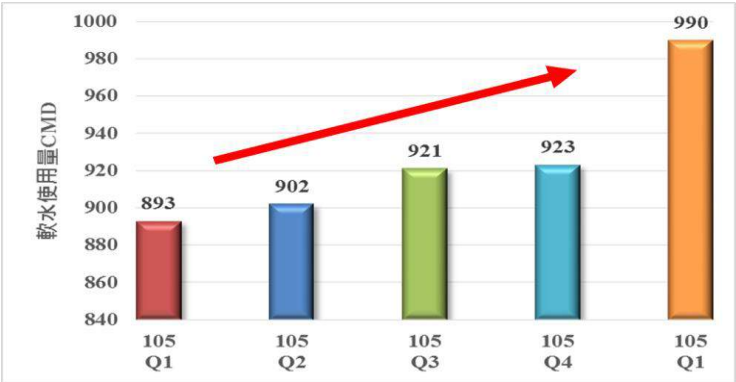


圖 1-2　軟水使用量直方圖

二、Local Scrubber 廢水回收系統簡介

1. Local Scrubber 廢水回收系統介紹

洗滌塔廢水回收系統(以下簡稱回收系統)原水依來源可區分為 4 塊(如圖 3-1 所示)。主要水源為 Sub-Fab 收集到的洗滌塔排水(如圖 3-2 所示)，經過纖維塔及 25μ 濾袋過濾，儲存於過濾水暫存桶。再經過 5μ 濾袋及 RO 後，RO 產水進軟水原水槽。其次為純水系統再生廢水及外氣空調箱冷凝水之排水，上述三股水源不足時，將會補自來水充當原水使用。

最後回收系統暫存水經過 5μ 濾心，再過一段 RO 後產水提供 Local Scrubber 使用，為避免長菌問題，故在軟水原水桶及軟水收集桶添加漂白水維持餘氯，軟水原水經過 RO 處理可符合前述廠內製程軟水需求。

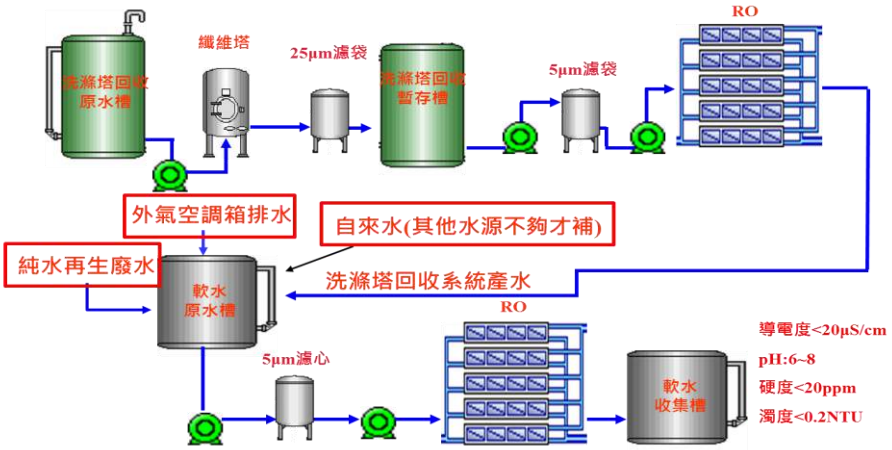


圖 2-1　洗滌塔回收系統流程圖

2.現況層別分析：

(1)回收系統運轉成本分類：

軟水以電力、耗材、設備 PM、化學品成本進行分類繪製成柏拉圖(如圖 2-2 所示)。找出去年 2015 資料整理得到每噸產水：運轉成本 13.21 元/噸，其中電力、耗材成本各佔 46%、43%成本為最大宗，以 80/20 原則，先探討電力及耗材運轉成本。

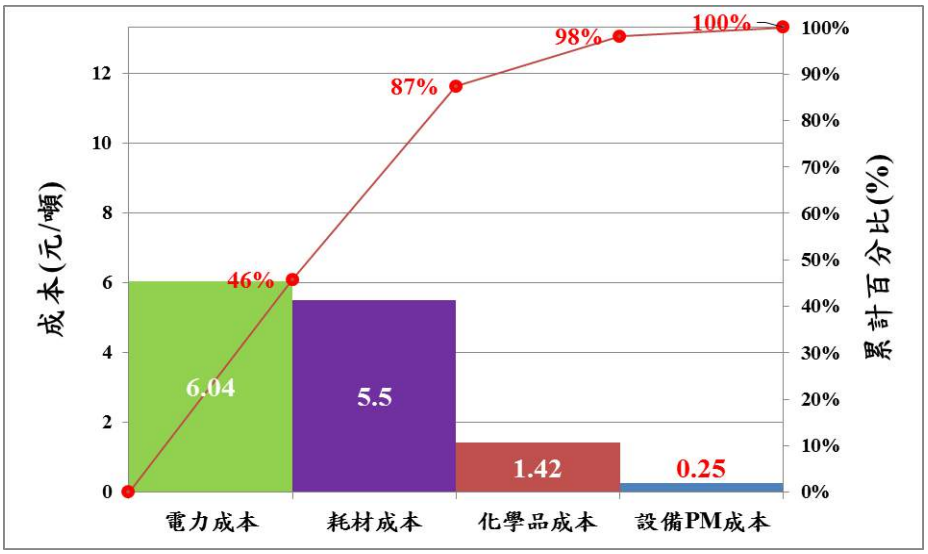


圖 2-2　回收系統運轉各類別成本柏拉圖

(2)電力成本分析：

電力成本分析，列出回收系統電力使用點調查(如表 2-1 所示)，並與原廠提供之 PUMP 性能曲線[2]比較(如圖 2-3 所示)，找出最佳運轉點和現況做比對。

表 2-1　電力使用設備調查表

項目	運轉流量平均值	最佳運轉點
運轉點調查	軟水原水 PUMP：35CMH	?
	軟水高壓 PUMP：20CMH	?
	pH 調勻槽攪拌機：68RPM	?
	外氣空調箱冷凝水 暫存桶 PUMP：20CMH	?
	洗滌塔回收原水 PUMP：30CMH	?
	洗滌塔回收暫存槽 PUMP：35CMH	?
	洗滌塔回收高壓 PUMP：20CMH	?
	pH 調勻槽攪拌機：68RPM	?

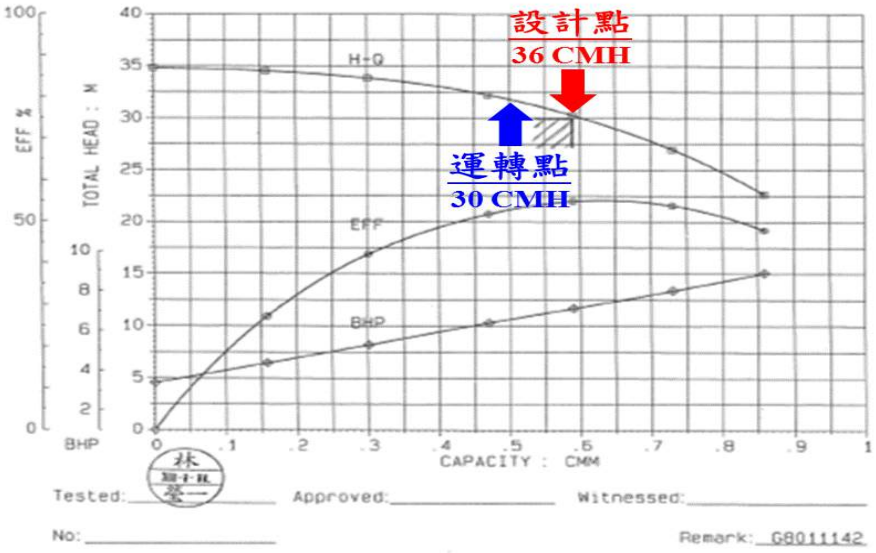


圖 2-3　PUMP 性能曲線

比對後發現，洗滌塔回收原水 PUMP 運轉平均值僅 30CMH，與原設計流量有明顯差異(如表 2-2 所示)，洗滌塔回收原水 PUMP 未在設計運轉點，現況不明。

表 2-2　運轉點調查表

項目	運轉流量平均值	設計流量	是否有差異	備註
運轉點調查	軟水原水 PUMP：35CMH	35CMH	無	
	軟水高壓 PUMP：20CMH	20CMH	無	
	pH 調勻槽攪拌機：68RPM	68RPM	無	
	外氣空調箱冷凝水暫存桶 PUMP：20CMH	20CMH	無	
	洗滌塔回收原水 PUMP：30CMH	35~45CMH	有	現況未明
	洗滌塔回收暫存槽 PUMP：35CMH	35CMH	無	
	洗滌塔回收高壓 PUMP：20CMH	20CMH	無	
	pH 調勻槽攪拌機：68RPM	68RPM	無	

(3)耗材成本分析：

各類耗材成本以柏拉圖分析(如圖 2-3 所示)，軟水 RO 膜更換、軟水 5μm 濾心及洗滌塔回收水 RO 膜更換佔耗材成本 89%，根據 80/20

原則，貢獻>80%前三項優先分析，因為確保水質 RO 膜為定期更換，成本無法減少，故從軟水 5μm 濾心進行調查。

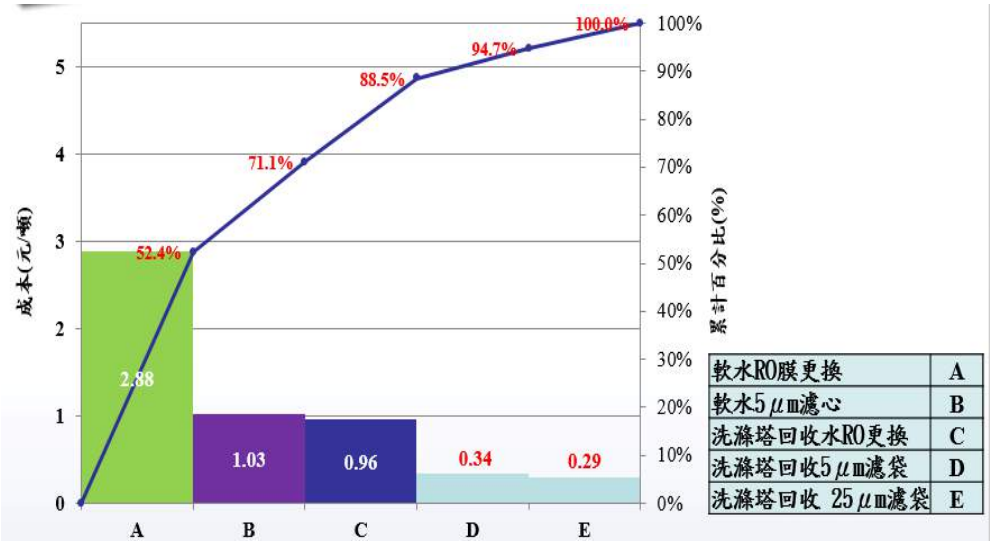


圖 2-4　各類耗材成本柏拉圖分析

軟水 5μm 濾心使用現況調查，發現濾心有黑色不明阻塞物(如圖 2-5 所示)，會同純水課同仁確定為活性碳，此活性碳來源現況不明。

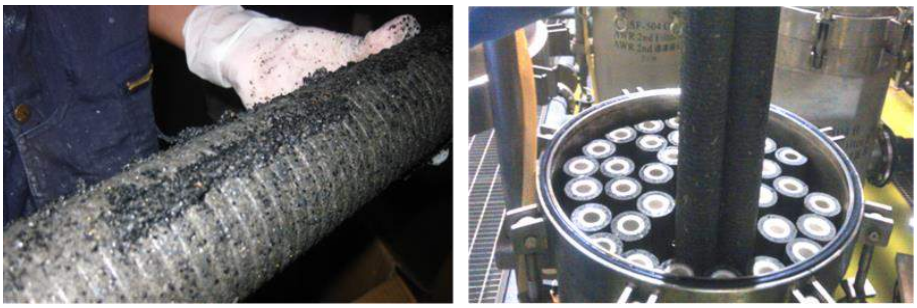


圖 2-5　拆下的濾心阻塞物外觀圖
(黑色：活性碳，白色黏稠反光絲狀物：生物膜)

並以時間別進行觀察，發現在冬季時軟水 5μm 濾心更換明顯減少，軟水 5μm 濾心使用有季節差異(如圖 2-5)，非冬季時段濾心表面還有生物膜，此現況不明。

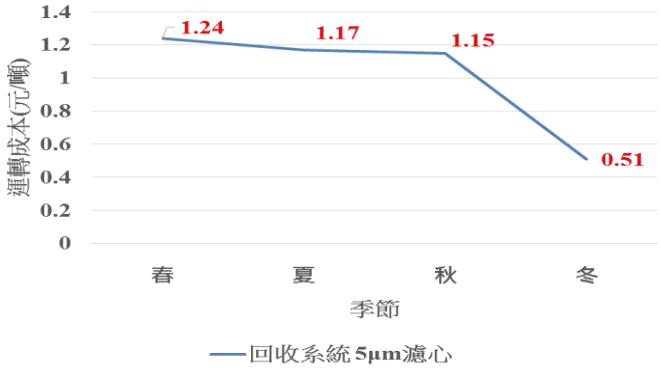


圖 2-6　回收系統5μm濾心成本推移圖

現況結論：經由現況分析後發現，異常且現況未明者有下列三項：(如表 2-3 所示)

表 2-3　現況分析總表

現況分析總表						
現況		現況結論	異常原因			
已明	未明	現況已明者直接寫下，未明者待後續要因分析	異常	差距	短處	共同
	V	洗滌塔回收原水PUMP流量未在設計運轉點		V		
	V	水中有活性碳，來源不明	V			
	V	軟水回收系統5μm濾心使用有季節差異，且非冬季時段表面有生物膜			V	
V		每噸產水成本：13.21元，電力/耗材成本各佔46%，43%成本最大宗，化學品及PM成本佔12%。				

三、處理改善介紹

1.差距原因分析：

魚骨圖分析，尋找為何洗滌塔回收原水 PUMP 流量未在設計運轉點上：

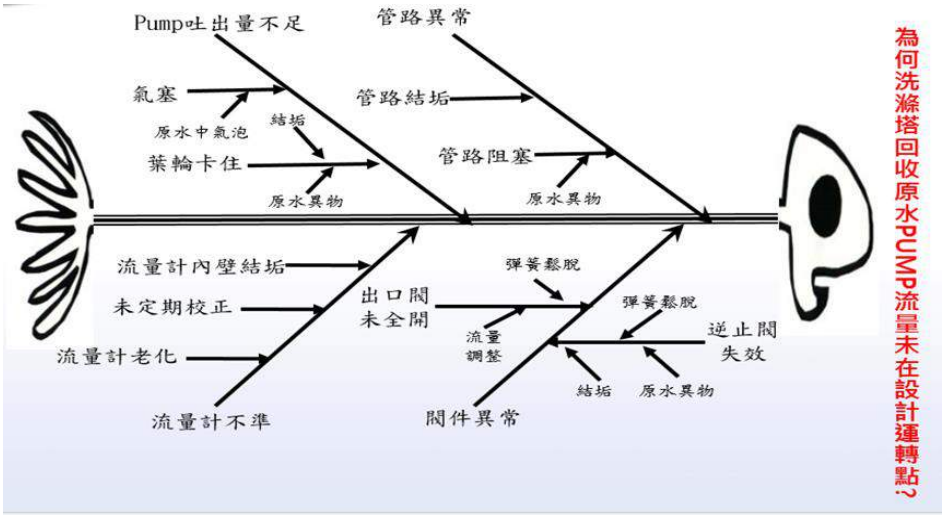


圖 3-1　為何洗滌塔回收原水 PUMP 流量未在設計運轉點特性要因圖

2.異常原因分析：

現況分析未明處，腦力激盪及討論，以純水再生水及自來水兩方面進行探討。

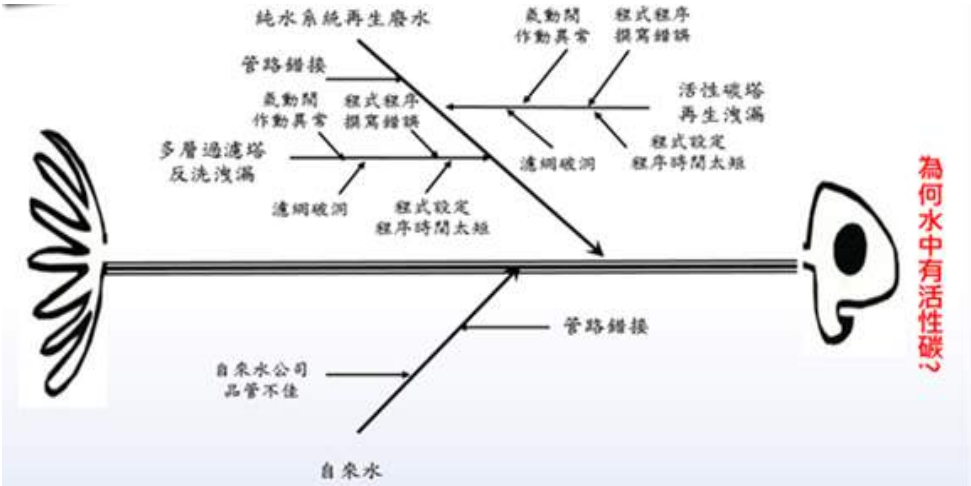


圖 3-1　為何水中有活性碳特性要因圖

3.短處原因分析：

由前面現況分析後未明處，以人，機，物，法，環五方面進行探討。

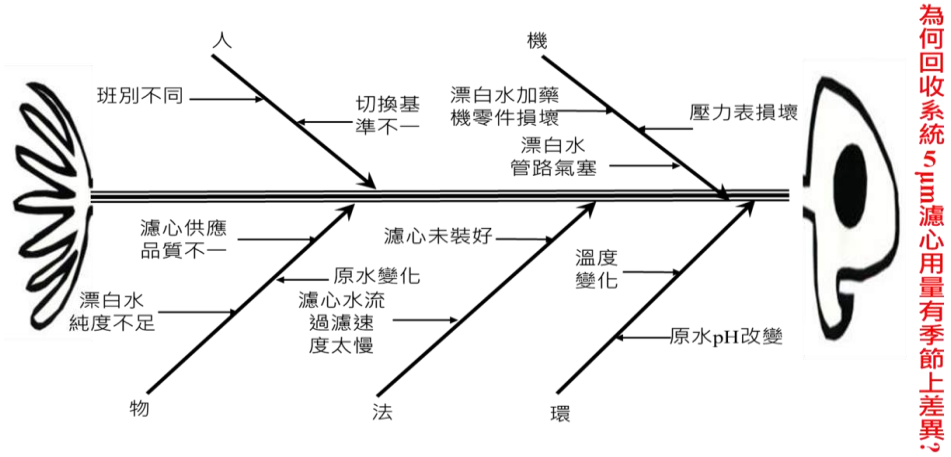


圖 3-2　為何回收系統 5μm 濾心使用有季節性差異特性要因圖

4.真因驗證：

(1)為何洗滌塔回收原水 PUMP 流量未在設計運轉點?

經討論驗證後，只剩下一個要因待釐清查證，閥件異常：流量調整導致出口閥未全開。洗滌塔回收 PUMP 是否因後段單元(纖維塔)需求而調整限流?(如表 3-1 所示)

表 3-1　為何洗滌塔回收原水 PUMP 流量未在設計運轉點要因分析摘要表

大要因	小要因	驗證方式及說明	難易度	影響性	可行性	負責人
PUMP吐出量不足	原水中氣泡導致氣塞	採樣觀察	Y	▿	○	林志南
	原水異物導致葉輪卡住	拆解檢查	Y	▲	○	林志南
	結垢導致葉輪卡住	拆解檢查	Y	▲	○	林志南
流量計不準	流量計內壁結垢	拆解檢查	Y	▿	○	黃俊評
	未定期校正	檢視校正報告	Y	▿	○	黃俊評
	流量計老化	拆解檢查	Y	▿	○	黃俊評
管路異常	管路結垢	拆解檢查	Y	▿	○	盧彭潭
	原水異物導致管路阻塞	拆解檢查	Y	▿	○	盧彭潭
閥件異常	流量調整導致出口閥未全開	檢視後段纖維塔流量設定	Y	▲	○	周俊杰
	彈簧鬆脫導致出口閥未全開	拆解檢查	Y	▿	○	周俊杰
	彈簧鬆脫導致逆止閥失效	拆解檢查	Y	▿	○	周俊杰
	原水異物導致逆止閥失效	拆解檢查	Y	▿	○	周俊杰
	結垢導致逆止閥失效	拆解檢查	Y	▿	○	周俊杰

正常

Y:容易，N:困難，　▲:強相關　▿:弱相關　○:可行　●:不可行

原廠纖維塔反洗設定建議，流量 30CMH 防止濾材受損。比較其他廠牌纖維塔有反洗限流閥，但現場纖維塔則無(如圖 3-4 所示)，故調整出口閥限制流量為 PUMP 流量未在運轉點真因，真因已明。

圖 3-4　纖維塔比較圖

(2)為何水中有活性碳?

為何水中有活性碳要因分析摘要表(表 3-2)，組員驗證後，剩下兩個要因待釐清查證，為活性碳塔及多層過濾塔再生或反洗時程序時間過短是否會大量洩漏活性碳?

表 3-2　為何水中有活性碳要因分析摘要表

大要因	小要因	驗證方式及說明	難易度	影響性	可行性	負責人
自來水	管路錯接	觀察	Y	▽	○	陳宏林
	自來水公司品管不佳	比對觀察	正常	▽	○	陳宏林
純水系統再生廢水	管路錯接	檢查	Y	▲	○	陳宏林
	程式程序錯誤導致活性碳塔再生洩漏	再生觀察	正常	▲	○	陳宏林
	氣動閥作動異常導致活性碳塔再生洩漏	再生觀察	Y	▲	○	陳宏林
	程式設定程序時間過短導致活性碳塔再生洩漏	取樣觀察	Y	▲	○	陳宏林
	濾網破洞導致多層過濾塔反洗洩漏	濾網檢查	正常	▲	○	陳宏林
	程式程序錯誤導致多層過濾塔反洗洩漏	反洗觀察	Y	▲	○	陳宏林
	氣動閥作動異常導致多層過濾塔反洗洩漏	反洗觀察	正常	▲	○	陳宏林
	程式設定程序時間過短導致多層過濾塔反洗洩漏	取樣檢查	Y	▲	○	陳宏林
	濾網破洞導致多層過濾塔反洗洩漏	濾網檢查	正常	▲	○	陳宏林

Y:容易，N:困難，▲:強相關 ▽:弱相關 ○:可行 ●:不可行

多層過濾塔反洗在 WATER DRAIN1 階段排放至軟水系統，取樣發現沒有活性碳，故非真因。活性碳塔反洗的 RINSE 階段排放至軟水系統，經取樣發現前 5min 內仍有大量活性碳，真因已明(如圖 3-5)。

圖 3-5　多層過濾塔與活性碳塔反洗階段取樣比較圖

(3)為何回收系統 5μm 濾心用量有季節上差異?

驗證方式經組員討論及專業經驗判斷下所訂定。經驗證，只剩下一個要因待釐清查證，各股原水比例變化是否會影響濾心使用?

表 3-1　為何軟水回收系統 5μm 濾心用量有季節上差異要因分析摘要表

要因分析摘要表						
大要因	小要因	驗證方式及說明	難易度	影響性	可行性	負責人
人	切換基準不一	切換濾心時，請系統工程師一同確認	Y	▲	○	黃俊評
機	漂白水加藥機零件損壞	現場檢視	Y	▽	○	賴建廷
	漂白水管路氣塞	每日加藥使用量比對，現場加藥管檢查	Y	▲	○	賴建廷
	壓力表損壞	壓力表比對	Y	▽	○	賴建廷
物	濾心供應品質不一	表面檢查(目視)及濾心厚度抽檢	Y	▲	○	黃俊評
	漂白水純度不足	進料時pH/比重比對，均符合SPEC	Y	▲	○	黃冠哲
	原水變化	統計各股水原水量資料比對，是否有季節性周期因素影響濾心使用	Y	▲	○	盧彰潭
法	濾心沒裝好	裝濾心時，系統工程師確認裝濾心手法	Y	▽	○	黃俊評
	濾心水流過濾速度太慢	經調查出水量和濾心設計通量計算流速正常	Y	▽	○	黃俊評
環	水溫變化	水溫量測，約10~25℃，四季無明顯差異	Y	▽	○	林孟杰
	原水pH改變	舊抄表資料比對，pH控制在6~7.5之間	Y	▽	○	林孟杰
Y:容易，N:困難， ▲:強相關 ▽:弱相關 ○:可行 ●:不可行						

正常

調查四季原水各股水量比例有明顯變化(圖 3-6)，外氣空調箱排水含大量菌落數(表 3-4)，其他股原水則測不出。外氣空調箱排水有時會有生物膜阻塞須通管。再調查餘氣，僅自來水原水含餘氣 0.3~0.5mg/L，其他股原水無。查自來水公司網頁：餘氣 0.3~0.8mg/L 抑制微生物，但現況軟水收集槽餘氣加藥控制計算僅控制在 0.1 mg/L。

組員推論：外氣空調箱冷凝排水多(相對自來水補水量少)季節+餘

氯控制 0.1 mg/L→(春夏秋季)無法有效抑制濾心表面微生物生長(長生物膜)→濾心快速阻塞導致用量上升。故原水變化為濾心季節用量差異真因，真因已明。

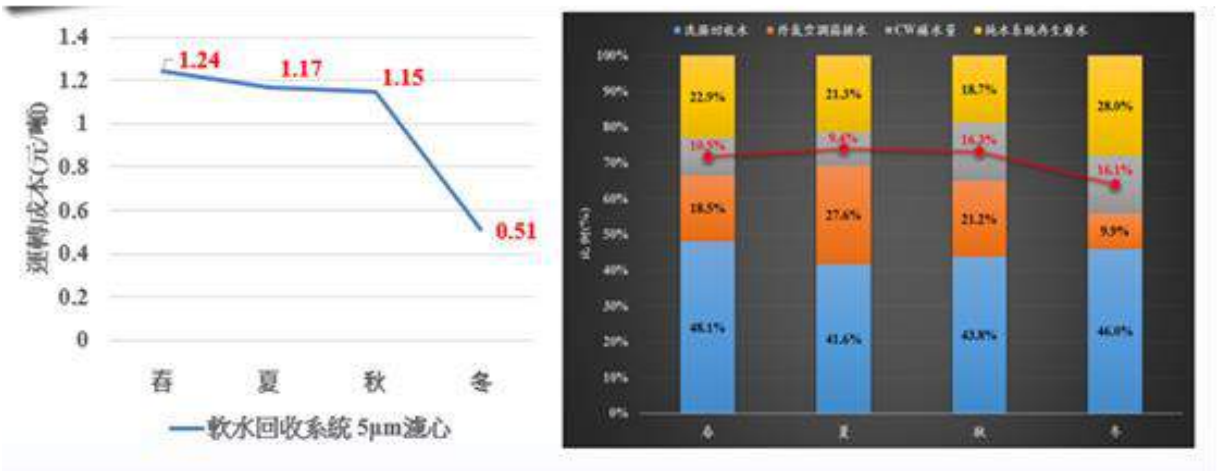


圖 1-6　四季軟水 5μm 濾心成本推移圖及原水各股水補水比例直方圖

表 3-4　原水及回收系統原水槽菌落數比較表

	菌落數 (CFU/mL)	菌落數 (CFU/mL)	菌落數 (CFU/mL)
洗滌回收水	<1	<1	<1
外氣空調箱排水	500~1000	258	372
CW補水	<1	<1	<1
純水系統再生廢水	<1	<1	<1
軟水收集桶	122	153	234

5.對策擬定與實施：

(1)洗滌塔回收 PUMP 限流改善之對策評估及實施

由真因驗證得知纖維塔反洗有流量之限制，針對流量限制提出下列三個方案進行評估比較(如表 3-5 所示)，經組員討論後選擇方案三進行改善。

表 3-5　洗滌塔回收 PUMP 限流改善之對策評估比較表

對策方案	費用	優/缺點	選擇
方案一： 原水PUMP出口閥全開，纖維塔面前管加裝反洗限流閥	4.5萬	1.增加進流量，減少原水PUMP運轉時間 2.可彈性調整反洗進流量 3.改管時需停機	
方案二： 原水PUMP出口閥全開，加裝反洗PUMP與進流PUMP分開	15萬	1.增加進流量，減少原水PUMP運轉時間 2.增加PUMP壽命，彈性調整反洗進流量 3.改管時需停機 4.費用較高	
方案三： 原水PUMP出口閥全開，纖維塔反洗氣動閥加裝調整螺絲	500元	1.增加進流量，減少原水PUMP運轉時間 2.可彈性調整反洗進流量 3.改善時系統不需停機	V

(2)活性碳塔反洗水含活性碳之對策評估及實施：

原舊設定中 REST 時間僅 5min，RINSE 切換管路排水時，管路仍有大量殘留活性碳，故將 REST 時間加長 5min，REST 時間由原本之 5min→10min(如圖 3-7)。管路水量僅 10 噸/天，不影響軟水系統產水。

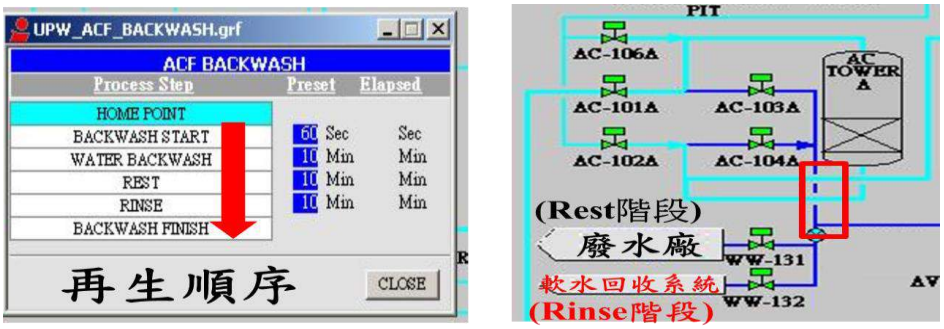


圖 3-7　ACF 再生程序

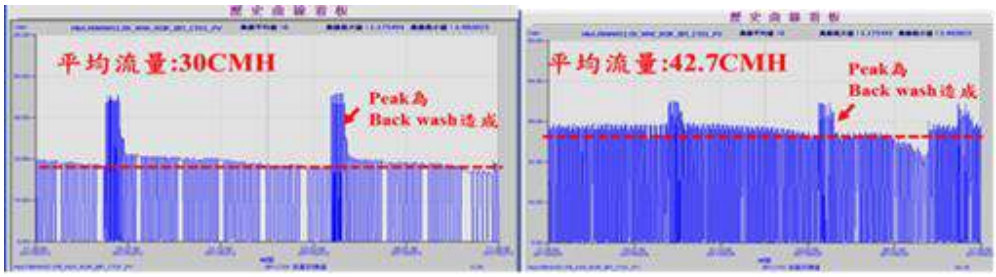
(3)軟水系統 5μm 濾心非冬季時段長生物膜之改善：

針對軟水系統 5μm 濾心非冬季時段長生物膜，進行討論提出以下對策：以調整漂白水加藥量做為預防改善。搜尋相關資料發現，當餘氯控制在 0.3~0.8mg/L 時，有良好的微生物抑制效果，故將現況漂白水餘氯加藥值 0.1mg/L→調整至 0.3mg/L(省藥)。

6.效果確認：

(1)洗滌塔回收 PUMP 限流改善效果確認

纖維塔加裝調整螺絲後，原水 PUMP 出口全開，經改善後流量由原來 30CMH→43CMH，計算可節能 14%，每噸可節省 0.06 元。(如圖 3-8 所示)

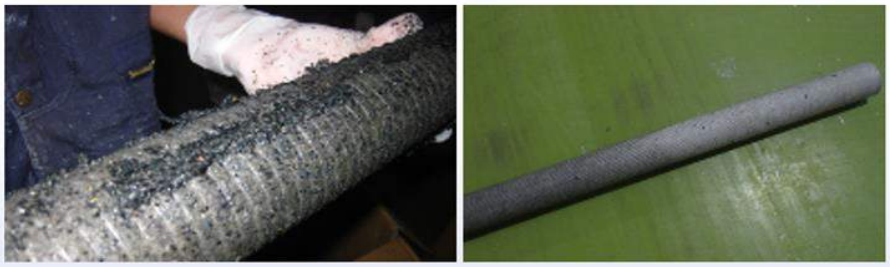


改善前　　改善後

圖 3-8　洗滌塔回收 PUMP 限流改善前後 PUMP 流量比較圖

(2)活性碳塔反洗水含活性碳之改善效果確認

對策進行實施後，其效果確認：活性碳再生時 REST 時間由 5min→10min 後，活性碳阻塞有顯著改善(如圖 3-9)。更換週期由原本之 3→14 天。



改善前　　改善後

圖 3-9　軟水 5μm 濾心改善前後比較圖

(3)軟水系統 5μm 濾心非冬季時段長生物膜之改善效果確認

對策進行實施後，效果確認如下：調整漂白水加藥量後，餘氯 0.1mg/L→0.3mg/L，觀察更換濾心發現無生物膜滋長(如圖 3-10)，更換週期由原本之 3 天→14 天，經計算濾心費用每噸可節省 0.28 元；但因漂白水用量增加，每噸成本亦隨之增加 0.1 元，扣除漂白水增加之費用，淨效益為 0.18 元/噸。

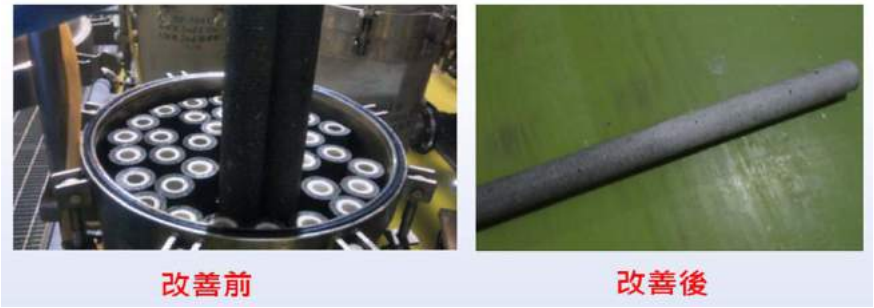


圖 3-10　濾心非冬季時段長生物膜之改善前後比較圖

7.改善總效果確認：

經由分析總成本： 80/20 原則進行改善後，電力成本由原先 6.04 元/噸→5.98 元/噸，耗材成本由 5.5 元/噸→5.22 元/噸，軟水運轉總成本由 13.21 元/噸→12.97 元/噸，僅降 1.8%未達到預設目標值 4%。未達目標，故再針對 80/20 剩下的 20 部分再分析檢討改善。

8.現況再分析：

化學品/PM 成本進行現況再分析。探討化學品/PM 成本，其中 RO 清洗佔 48.5%，漂白水佔 36.5%，因漂白水加藥量和濾心長菌相關，故漂白水不列入改善。洗滌塔回收系統原水桶/PUMP 結垢處理，為新冒出之 PM 項目，且結垢原因不明。故依 80/20 原則對 RO 清洗及洗滌塔回收系統原水桶/PUMP 結垢處理進行現況再分析。(如圖 3-11)。

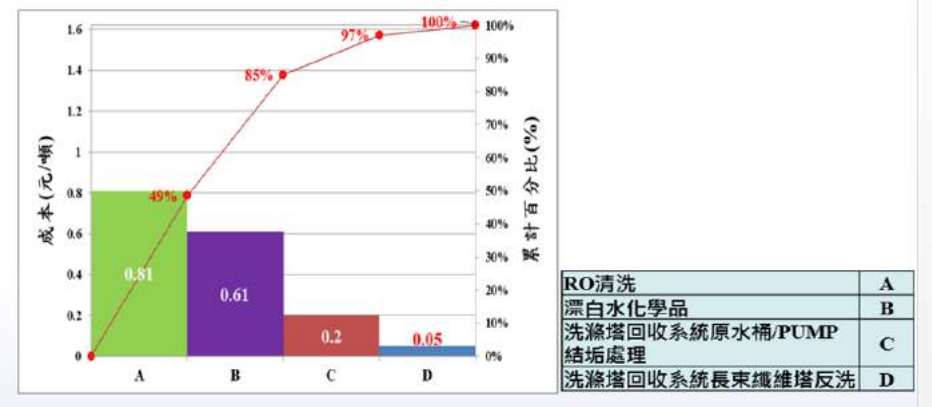


圖 3-11　化學品/PM 成本柏拉圖

(1)RO 清洗：

現況清洗頻率為一週清洗三次，原廠 RO 清洗建議為：產水量減少 10%或壓差達 1kg/cm^2 以上時再進行清洗，比對清洗現況及原廠建議後，常發現壓差及產水未達清洗標準即清洗，有過度清洗情況。

(2)洗滌塔回收系統原水桶/PUMP 結垢：

從現況觀察，原水桶及 PUMP 結垢情況，水質檢驗結垢物發現主要成分為鈣鹽(圖 3-12)，因工廠端製程需求改變所造成，工廠單位無法改善，故從處理端 PM 進行改善。

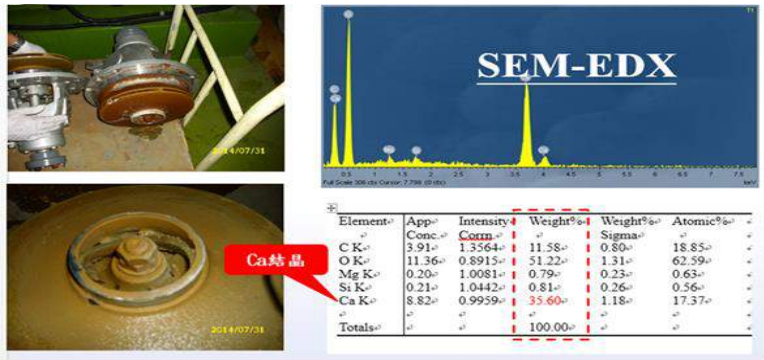


圖 3-12　PUMP 結垢物成分分析圖

9.對策再擬定與實施(方策展開)：

(1)反魚骨圖找尋出如何改善 RO 清洗週期之方法。(如圖 3-13 所示)。

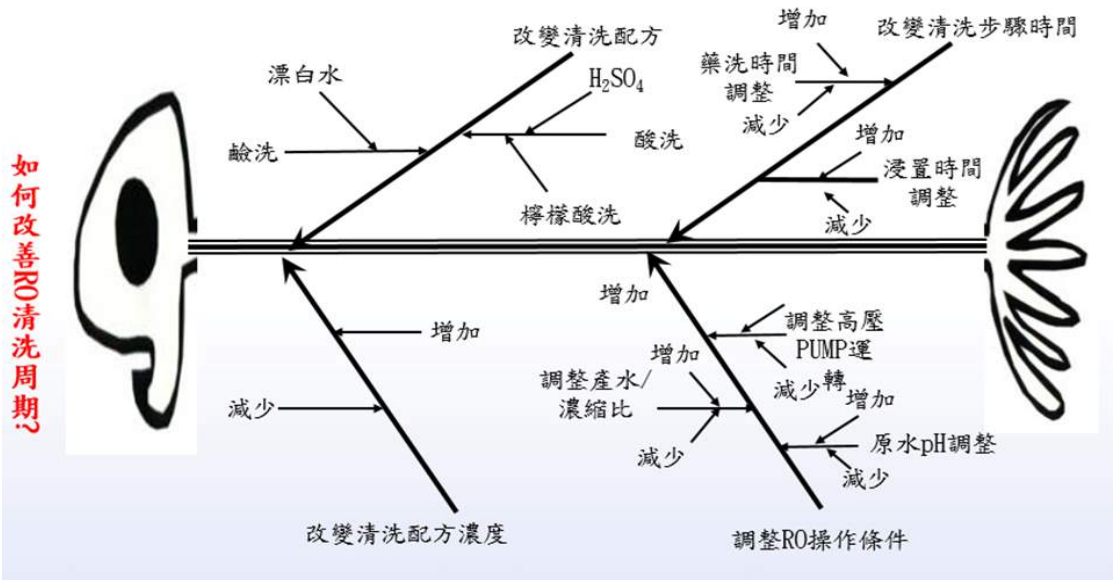


圖 3-13　如何改善 RO 清洗週期可行方案展開

(2)反魚骨圖找尋出如何處理洗滌塔回收原水桶/PUMP 結垢。(如圖 3-14 所示)。

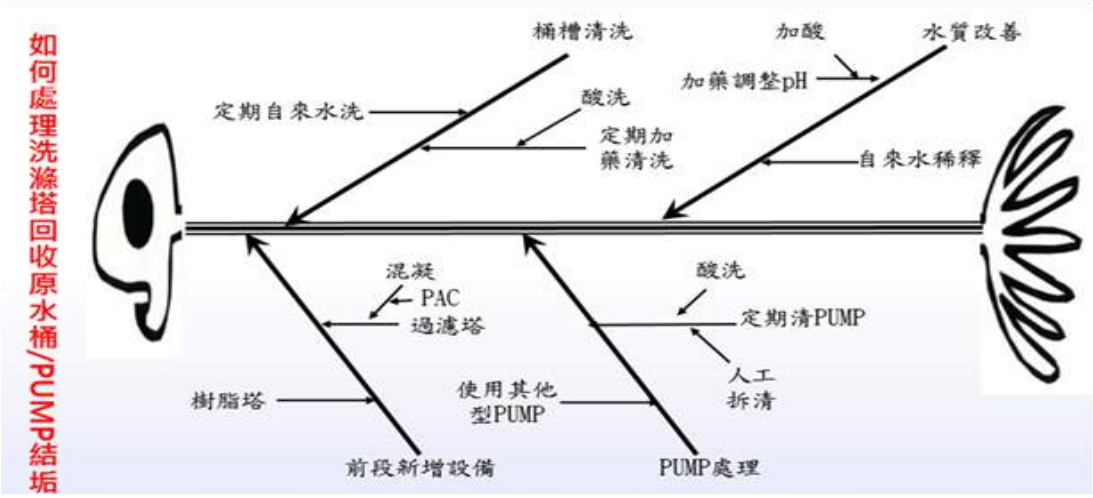


圖 3-14　如何處理洗滌塔回收原水桶/PUMP 結垢可行方案展開

10.對策擬定與實施(最適策評估)：

(1)如何改善 RO 清洗週期：

改善方案進行評估：RO 操作條件現已最佳化，不列為探討(如表 3-6)。因子有交互作用，擴大現有清洗條件區間 DOE[3-5]，實驗因子/水準/反應變數如表 3-7 所示。實驗結果分析如圖 3-15。結果顯示：影響壓差上升率顯著因子僅有清洗週期，各因子對產水量均不顯著。分析現有清洗配方，只要浸置時間延長為 40min，清洗週期改為 1 週 1 次，對壓差/產水量上無明顯影響。

表 3-6　改善 RO 清洗週期對策方案比較表

改善點	對策	評價項目			得分	選用
		可行性	急迫性	便利性		
改善 RO 清洗週期	改變清洗配方	5	3	4	12	V
	改變清洗步驟時間	5	3	4	12	V
	改變清洗配方濃度	5	3	4	12	V
	調整 RO 操作條件	1	2	4	7	

表 3-7　RO 清洗 DOE 24-1 實驗表

	因子				反應變數1:望小	反應變數2:望大
	清洗週期(天)A	浸置時間(min)B	酸洗濃度(%)C	鹼洗濃度(%)D	壓差上升率(kg/cm2-Day)	產水量(CMD)
水準	1	10	2	2	0.09	350
	10	10	2	0.5	0.13	378
	1	60	2	0.5	0.09	400
	1	10	0.5	0.5	0.1	360
	10	60	2	2	0.11	355
	10	60	0.5	0.5	0.13	370
	1	60	0.5	2	0.095	385
	10	10	0.5	2	0.125	300
現況	2~3天	30min	1%	1%	0.12	365

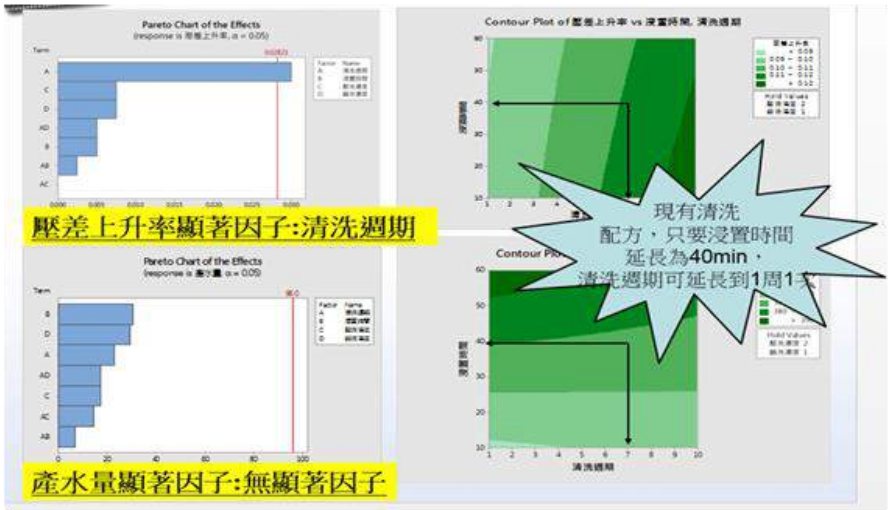


圖 3-15　DOE 實驗結果分析圖

(2)如何處理洗滌塔回收原水桶/PUMP 結垢

反魚骨圖所列出之改善方案進行評估，討論評分後，選擇得分 11 以上的對策進行實施，參考文獻後[3]，實施對策為加酸調整 pH 至 pH 5(如表 3-7 所示)。

表 3-7　處理洗滌塔回收原水桶/PUMP 結垢對策方案比較表

內容	對策分類	對策	評價項目			得分	選用
			可行性	急迫性	便利性		
處理洗滌塔回收原水桶/PUMP結垢	前段新增設備	樹脂塔	1	1	5	7	
		過濾塔(加PAC)	1	1	3	5	
	水質改善	加酸調整pH	5	4	3	12	V
		自來水稀釋	2	2	1	5	
	桶槽清洗	自來水洗	2	3	2	7	
		定期加酸清洗	5	4	1	10	
	PUMP處理	使用其他型PUMP	4	3	2	9	
		定期酸洗PUMP	5	4	1	10	
		人工拆清PUMP	5	4	1	9	

得分≥11分採用

11.效果再確認：

(1)改善 RO 清洗週期效果確認

經改善清洗週期由原本之 1 週 3 次延長至 1 週清洗 1 次，RO 產水量/壓差仍可維持正常，如圖 3-16 所示。成本計算清洗頻率每週 3 次→1 次，每噸成本減少 0.54 元。

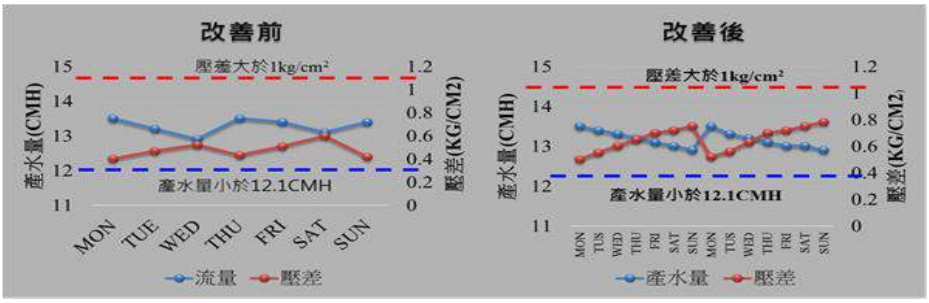


圖 3-16 改善前後 RO 壓差產水量對照圖

(2)處理洗滌塔回收原水桶/PUMP 結垢效果確認

TANK/PUMP/管路經 pH 調整為 5，流量維持 30 天正常，不需請人工拆清(如圖 3-17)，但原水加藥費用 0.2 元/噸，無節省費用。

改善前　　改善後(調整後1個月觀察)

圖 3-17　洗滌塔回收 PUMP 結垢酸洗前後比較

12.改善總效果再確認總結：

經效果再確認後化學品/PM 成本由 1.67 元/噸→1.23 元/噸，軟水運轉總成本由 13.21 元/噸→12.43 元/噸，最終改善效果降 5.9%>預設目標值 4%，對策總結如表 3-9。對策結果比較表如圖 3-24。

表 3-9　對策總結

內容	問題點	對策	再現性確認	再現性效果
降低回收系統運轉成本	洗滌塔回收水原水PUMP流量未達當初設定點	後段纖維塔安裝氣動閥調整螺絲	洗滌塔回收水原水PUMP原水平均流量41~42.7CMH	V
	濾心更換頻率從14天/次降到3天/次， 恢復原先水準	調整活性塔塔再生時REST時間 調整漂白水加藥量改善冬季外生物膜阻塞濾心	無活性碳阻塞， 春季濾心表面無長生物膜 更換頻率：平均3天/次延長到14天/次，恢復原先水準	V
	延長RO清洗週期	舊清洗配方不變，浸置時間延長至40min	RO上升壓差<0.8kg/cm^2，產水量降低約5%，可每週清洗一次，符合SPEC要求	V
	處理洗滌塔回收原水TANK/PUMP結垢	調整原水pH到5	流量30天正常，不需請人工拆洗清TANK/PUMP。	V

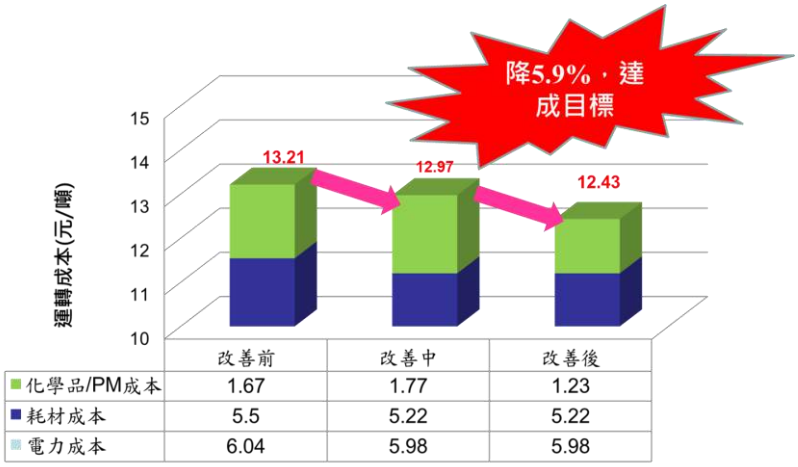


圖 3-18　改善總效果比較表

四、結論與建議

本案例以系統性的手法及 80/20 原則分析解決問題。電力成本(46%)雖占最大宗，然其他成本改善上較具有效益。系統操作除平時簡易異常排除外，應從整個系統面及時段進行探討，是否有改善的可能性。在現況分析過

程及尋找最佳操作模式過程可說是煞費苦心,最後將後段纖維塔安裝氣動閥調整螺絲、調整活性塔再生時 REST 時間，調整漂白水加藥量改善冬季外生物膜阻塞濾心，恢復濾心正常使用週期、以 DOE 實驗設計法成功延長 RO 清洗週期、製程廢水回收系統原水 pH 由 9 調高至 5 來改善拆清及處理 PM 時間,不僅節能減廢外,也讓系統能更穩定的運轉,降低值班人員心智負荷。未來仍有下列二點須持續改善：

1.是否有辦法避免洗滌塔回收 Tank/PUMP coating 的產生。

2.濾心/濾袋更換是否可更改成自動清洗裝置，以節省更換人力成本。

前述內容,期能提供業界回收系統的改善及異常處理參考。台灣水資源有限，需要每個人共同來維護，讓我們一起努力留乾淨的生活空間給後代子孫。

五、參考文獻

1. 蔡騰龍，工業水處理，正文書局，2001。
2. 駱尚廉，楊萬發，自來水工程，茂昌圖書有限公司，2000。
3. 顏登通，高科技廠務，全華圖書股份有限公司，2006。
4. 唐麗英，實驗設計法(DOE)講義，交大工業工程與管理學系/唐麗英 教授編寫，2008。
5. 王春和，工業實驗設計講義，中正理工學院/王春和 教授編寫，2008。
6. 彭定國、吳鴻錚、鄭大興，MINITAB 統計分析與應用，新文京開發出版(股)公司，2006。

中鋼廢水純化場 UF 膜阻塞問題分析及改善

蘇育俊*、劉婉如**、林炅勳***、蕭融澤****

摘　要

中鋼工業廢水純化場自 2009 年 10 月啟用，為全球第一個鋼鐵廠以雙膜法(UF/RO)及交換樹脂將廢水製成再生水，提供中鋼動力工廠鍋爐所需之超純水，每天設計產水量為 1 萬 3,500 公噸。但超過濾膜(ultrafiltration, UF)在使用約 3 年後阻塞現象急遽惡化，除了需降低操作流量(從原先 350 CMH 降至 270 CMH)，每天尚須化學清洗以降低透膜壓差，導致產水量下降。為減緩 UF 膜嚴重阻塞的問題，本研究透過阻塞物分析及單膜絲試驗，鑑定造成 UF 膜阻塞的主要積垢物，並透過薄膜清洗及前處理去除薄膜及廢水中的積垢物，以減緩 UF 膜的積垢速率。

從阻塞物成份分析結果顯示，積垢物主要以無機性為主，占 55.12%，為鐵、鈣、鋁、錳等無機化合物所造成。單膜絲試驗的阻抗分析結果顯示，UF 膜的阻抗中以不可恢復性積垢所造成的阻抗比例最高，佔總阻抗的 46.44%，主要為鐵、錳氧化物所貢獻，再來則依序分別為：無機物所造成的不可逆性積垢，佔總阻抗的 29.66%；有機物所造成的不可逆性積垢，佔總阻抗的 10.35%；可逆性積垢所造成的阻抗，占總阻抗的 10.33%；薄膜本身的阻抗則僅占總阻抗的 3.22%。以薄膜廠商建議的 NaOCl 搭配檸檬酸進行 UF 膜清洗，透膜壓差恢復率不佳且清洗後壓差上升快速。倘若以草酸取代檸檬酸則可將透膜壓差由-49.6kpa 降至-11.6kpa，清洗後的 UF 膜運轉時數則可從原先的 21.1 小時提高至 154.1 小時，遠優於檸檬酸清洗的效果。此外，高效錳砂過濾器的模場測試結果顯示，高效錳砂過濾器可有效將 UF 進流廢水中的鐵及錳離子降低至<0.1mg/L，可減少廢水中的鐵、錳積垢物對 UF 膜所造成的阻塞問題。

【關鍵詞】雙膜法、超過濾、膜阻塞、水回收

---

*中鋼新材料研究發展處　工程師

**中鋼新材料研究發展處　工程師

***中鋼公共設施處　課長

****中鋼公共設施處　股長

一、前　言

中鋼為一貫作業煉鋼廠，無論煉鐵、煉鋼或軋鋼皆須使用大量的水，以滿足冷卻、除銹、潤滑或洗塵等不同用途。103 年中鋼每日的自來水補充量約達 12.6 萬噸，佔鳳山水庫工業用水總供給量的約 42%，為確保水資源的有效利用，使水資源永續發展，中鋼透過提高冷卻水系統濃縮倍數、雨水回收、廢水回收再利用等措施，成功將製程用水回收率提高至 98.3%，每噸粗鋼耗水量降至 5.02 噸，遠低於全球鋼廠平均的 28.6 噸水/噸粗鋼[1]。

中鋼工業廢水純化場自 2009 年 10 月啟用，為全球第一個鋼鐵廠將廢水純化後，回收再利用供動力場鍋爐使用，每天設計產水量為 1 萬 3,500 公噸。但工業廢水純化場的 UF 膜在經過三年的操作後，阻塞情況急遽惡化，除了須降低操作流量(從原先 350 CMH 降至 270 CMH)因應外，每天尚須化學清洗以降低透膜壓差，導致產水量下降。因此，鑑定出廢水中主要造成 UF 膜阻塞的積垢物，並針對該積垢物進行適當的前處理或化學清洗等措施，為降低 UF 膜阻塞最重要之課題。

目前文獻中少有針對一貫作業煉鋼廠的廢水進行薄膜積垢的成因探討。Choi 等人以 pilot cale 的 UF/RO 雙膜法模組處理鋼鐵業廢水，他們發現藻類及細菌所造成的生物性積垢為造成 UF 膜阻塞的主要原因[2]。前述研究的測試期間僅 16 天，可能無法代表實場於長期操作下的結果。此外，一貫作業煉鋼廠的廢水性質複雜，會產生多股不同特性的廢水，因此有必要針對實場於長期操作下的UF膜進行積垢物分析，以提出最佳之UF膜阻塞改善策略。本研究的目的即為分析造成中鋼工業廢水純化場 UF 膜嚴重阻塞的積垢物，並針對該積垢物所造成的 UF 膜阻塞提出改善措施。

為分析造成 UF 膜阻塞的主要積垢物，本研究自中鋼工業廢水純化場剪下操作 5 年後的 UF 膜，於實驗室進行積垢物分析。積垢物的型態及元素組成以 SEM/EDX (scanning electron microscope/energy dispersive spectrometer) 進行觀察及分析。積垢物中的有機與無機比例則以 LOI (loss on ignition)進行量化分析。UF 膜的阻抗分析則是將現場剪下之 UF 膜固定於實驗室的單膜絲模組中，利用 resistance-in-series model 進行阻抗分析。

二、材料與方法

1.中鋼工業廢水純化場 UF 單元

中鋼工業廢水純化場的主要處理單元包括：UF、RO 及離子交換樹脂，處理流程如圖 1。工業廢水純化場所使用之 UF 膜為美國 GE 的 ZeedWeed 500D 中空纖維模組，該 UF 膜的材質為 PVDF (polyvinylidene fluoride)，平均孔徑為 0.04μm。工業廢水純化場的 UF 處理單元中共有 3 套 UF 薄膜槽，每個薄膜槽各有 5 個 cassettes，每個 Cassette 有 64 片膜組，共計 960 片膜組。UF 膜為固定通量操作，操作通量為 30 L/m^2hr，每操作 15 分鐘則會停止 1 分鐘，以減緩薄膜積垢。

UF 每週會進行一次的 M-clean (maintenance clean)，所使用的清洗藥劑為 100mg/L 的 NaOCl 及 2,000mg/L 的檸檬酸。若 UF 膜的透膜壓差超過 -40 kpa，則會進行 R-clean (Recovery clean)以回復透膜壓差，R-clean 所使用的清洗藥劑為 250 mg/L 的 NaOCl 及 2,000 mg/L 的檸檬酸。

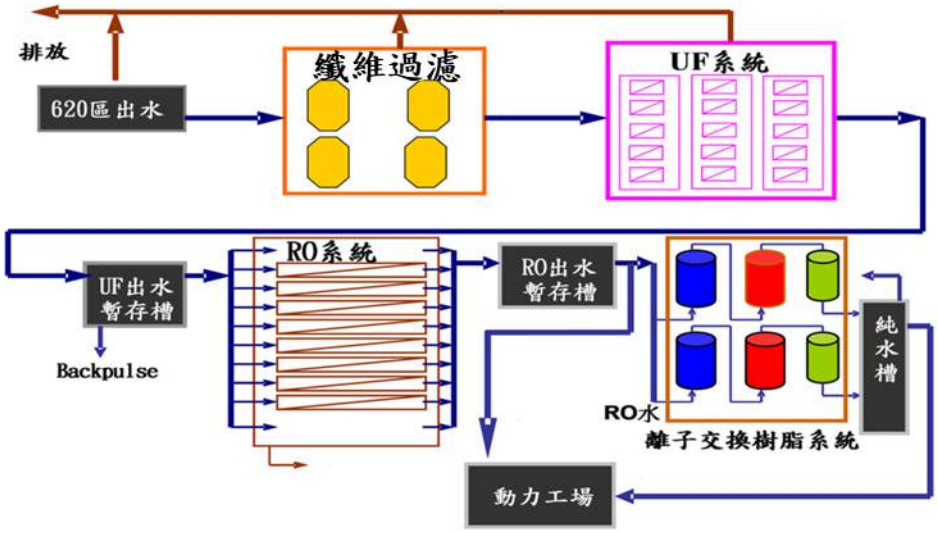


圖 1　中鋼工業廢水純化場處理流程

2.UF 積垢物分析

UF 膜表面積垢物的型態觀察及元素組成以 SEM/EDX 進行分析。UF 膜孔洞內的積垢物觀察及分析則是先將 UF 膜以液態氮冷凍後，再以解剖刀將 UF 膜切割，並以 SEM/EDX 觀察 UF 膜的橫切面。

UF 膜積垢中有機與無機性積垢物的比例，則是以超音波震盪的方式將 UF 膜上的積垢物清洗下，再以 LOI 進行量化分析。LOI 的計算公式如

下：LOI = (Weight (Dry) − Weight (550 °C)) / Weight (Dry))。

3.UF 膜阻抗分析

為進一步分析 UF 膜的阻抗，於實驗室的中空纖維單膜絲模組中以 resistance-in-series model 來對不同阻抗進行量化分析。Resistance-in-series model 根據 Darcy's law 求得阻抗值：

$$\text{Darcy's law：} J = \frac{\Delta P}{\mu R}$$

J：通量($m^3/m^2/s$)，ΔP：透膜壓差(Pa)，R：阻抗(m^{-1})，μ：滲透液黏度(Pa•S))

並將阻抗值(R)進一步分成薄膜本身所造成的阻抗(R_m)、可逆性積垢所造成的阻抗(可用物理清洗去除，R_r)、不可逆性積垢所造成的阻抗(可用化學清洗去除，R_{ir})及不可恢復性積垢所造成的阻抗(無法去除之積垢，R_{ic})四個部分 ($R=R_m+R_r+R_{ir}+R_{ic}$) [3]。做法為：(1)首先利用乾淨、未使用過的 UF 膜進行純水過濾，即可得到 R_m；(2)接著過濾廢水，則可得到 $R_m+R_r+R_{ir}+R_{ic}$；(3)隨後利用物理性反洗，將可逆性積垢物移除，再以純水進行過濾，則可得到 $R_m+R_{ir}+R_{ic}$；(4)最後再利用化學清洗的方式將不可逆性積垢移除，再以純水進行過濾，則可得到 R_m+R_{ir}。藉由上述四個步驟可分別求得 R_m, R_r, R_{ir} 及 R_{ic}。

三、結果與討論

1. UF 膜積垢物分析

以超音波震盪的方式將積垢物自 UF 膜上洗下後，再以 550℃的溫度進行 LOI 分析，結果如圖 2 所示。UF 膜上的積垢物中有 44.88%為有機性積垢物；而無機性積垢物的部分則占了 55.12%，顯示 UF 膜的積垢物主要以無機性為主。

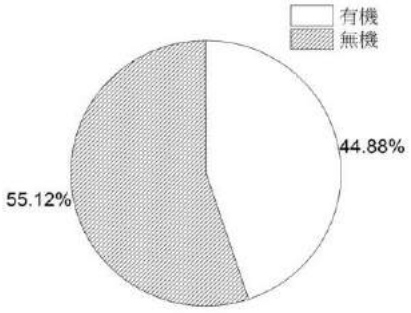


圖 2　UF 膜中的有機性及無機性積垢物所佔的比例

圖 3(a)及(b)分別為中鋼工業廢水純化場的 UF 膜表面及橫切面 SEM 圖。從圖 3(a) 可觀察到 UF 膜表面被一層緻密的積垢物濾餅層阻塞，導致 UF 膜透膜壓差的上升。進一步以 EDX 分析 UF 膜表面積垢物的元素組成，發現除了 C、F 為本身 UF 膜的 PVDF 材質所貢獻外，元素組成比重分別為：O > Fe > Ca > Al > Cl > Mn > Mg > Zn，如表 1 所示。由於 UF 膜表面薄膜表面的積垢物一般認為是較易被物理性清洗(例如反洗)所移除，亦即為所謂的可逆性積垢物，該種積垢物雖會造成薄膜透膜壓差的上升，但在經過物理清洗後即可恢復原本的透膜壓差。惟阻塞於薄膜孔洞內的積垢物(不可逆性性積垢物)，較難以物理清洗方式去除，須靠化學清洗的方式，部分不可逆性積垢物甚至連化學清洗也無法去除(不可恢復性積垢物)，導致化學清洗後的薄膜透膜壓差恢復率不佳且上升快速。因此，為鑑定 UF 膜孔洞內的積垢物，以 EDX 分析圖 2(b)中的過濾層部分，UF 膜橫切面的過濾層元素分析結果和 UF 膜表面相似，僅比表面積垢物多出 S 及 Si 元素，如表 1。

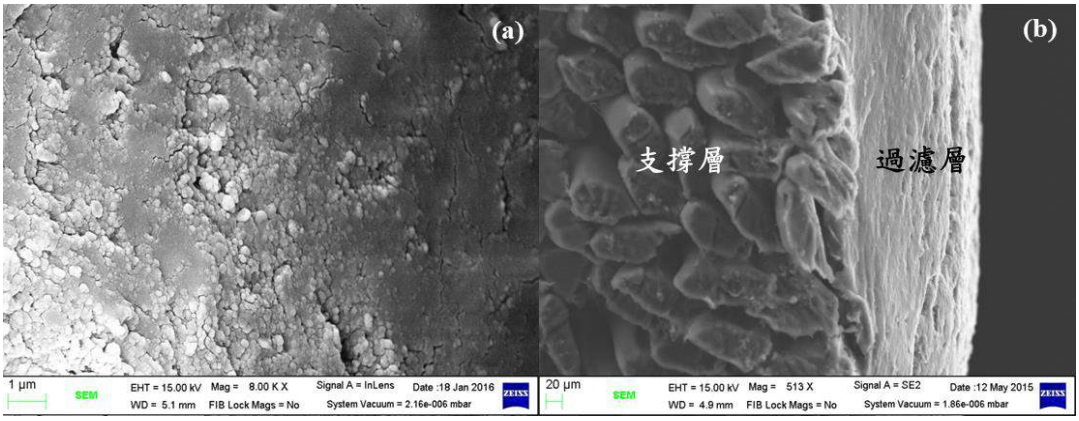


圖 3　UF 膜阻塞後的 SEM 圖：(a)表面，(b)橫切面

表 1　UF 膜阻塞後的 EDX 元素分析結果

元素	Atomic % (表面)	Atomic % (橫切面)
C	38.62	-
O	26.24	35.99
F	19.95	2.96
Mg	0.27	1.83
Al	1.46	3.84
Si	-	2.83
S	-	1.96
Cl	1.42	3.64
Ca	2.34	11.27
Mn	0.80	1.81
Fe	8.73	31.54
Zn	0.17	0.45

進一步將自現場取回之阻塞 UF 膜，以 250mg/L NaOCl 搭配 2,000mg/L citric acid 的方式進行化學清洗後(模擬現場 R-clean)，再以 SEM/EDX 進行分析，結果如圖 4 及表 2。比較圖 3(a)與圖 4，可發現化學清洗可有效移除 UF 膜表面的積垢層，清洗後 UF 膜表面元素除了 C 及 F 外，僅剩 O、Ca 及 Fe。然而 UF 膜孔洞內的積垢物則尚殘留高量的 Fe 及少量的 Mn，表示化學清洗仍無法有效去除 UF 膜孔洞內的 Fe 及 Mn，故鐵、錳氧化物為造成 UF 膜不可恢復性積垢的積垢物。

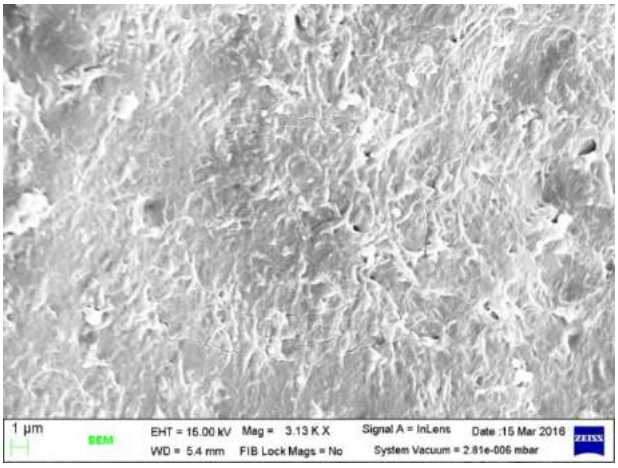


圖 4　經化學清洗後的 UF 膜表面 SEM 圖

表 2　經化學清洗後的 UF 膜表面 EDX 元素分析結果

元素	Atomic % (表面)	Atomic % (橫切面)
C	47.68	36.09
O	15.52	8.08
F	32.24	5.54
Ca	2.69	-
Mn	-	0.99
Fe	1.87	49.30

為了瞭解鐵、錳氧化物在 UF 膜孔洞中的阻塞情況，將經化學清洗後的 UF 膜進行橫切面的元素 mapping，結果如圖 5 所示。從鐵及錳的元素分佈圖可以發現，鐵及錳元素均勻的分佈於薄膜孔洞內，表示鐵及錳已完全將 UF 膜中的孔洞阻塞，即使利用化學清洗也無法去除。故在 UF 膜中，無機性的錳、鐵氧化物積垢物為造成工業廢水純化廠 UF 膜嚴重阻塞且不可恢復之積垢。

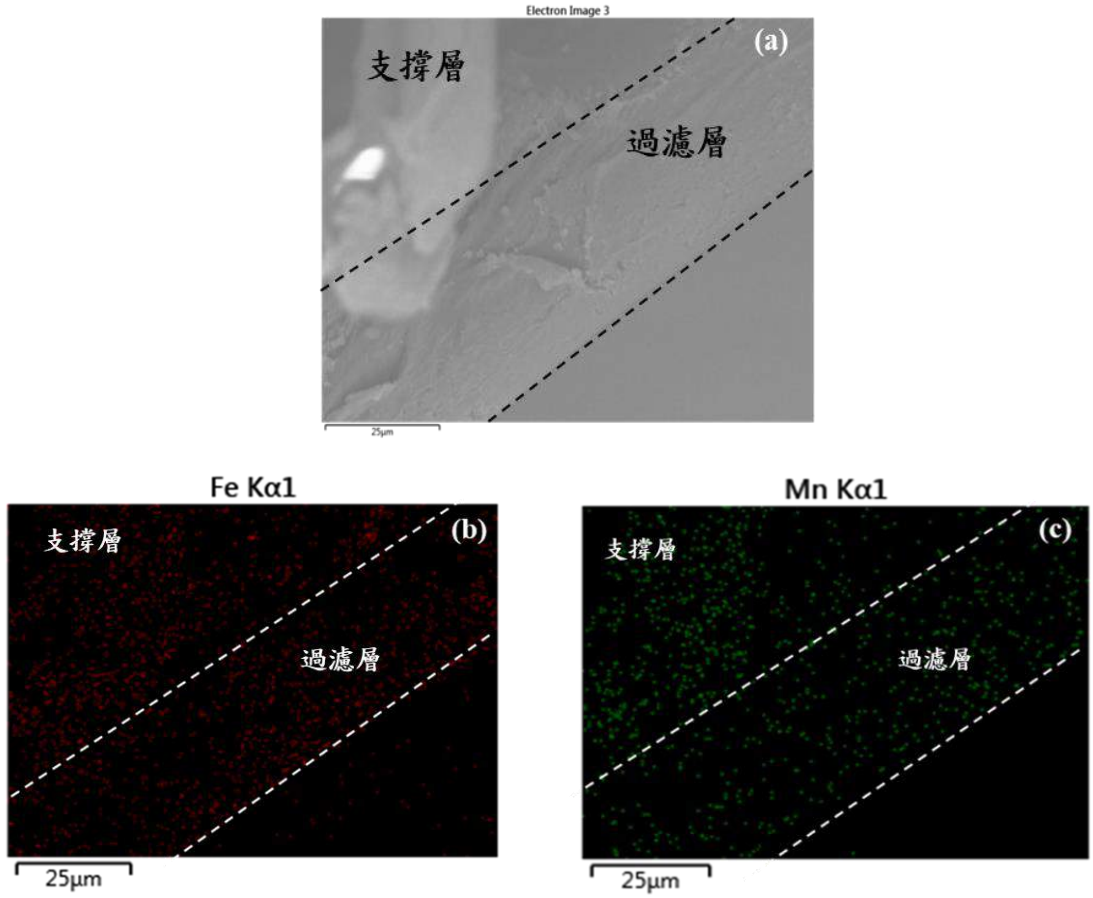


圖 5　經化學清洗後的 UF 膜(a)橫切面 SEM 圖、(b)鐵元素分佈圖及(c)錳元素分佈圖

2.UF 膜阻抗分析

為了對各種阻塞物進行量化分析，以單膜絲模組進行 UF 膜的阻抗分析，結果如圖 6。從圖 6 可知，UF 膜中最大的阻抗為不可恢復性積垢所造成的阻抗，佔總阻抗的 46.44%，從前述結果得知，造成此不可恢復性積垢的阻抗主要為鐵、錳氧化物所貢獻，依序分別為無機物所造成的不可逆性積垢，佔總阻抗的 29.66%；有機物所造成的不可逆性積垢，佔總阻抗的 10.35%；可逆性積垢所造成的阻抗，占總阻抗 10.33%；薄膜本身的阻抗僅占總阻抗的 3.22%。

對應現場的 UF 膜操作效能，因 UF 中有高達 46.44%的阻抗為鐵、錳氧化物所造成的不可恢復性積垢，故導致現場 UF 膜即使經化學清洗後，透膜壓差仍快速上升，需每天進行 R-clean。後續須設法移除 UF 膜上的錳、鐵氧化物並降低進流水中的鐵、錳離子，以回復 UF 膜的操作效能並降低 UF 膜的阻塞速率。

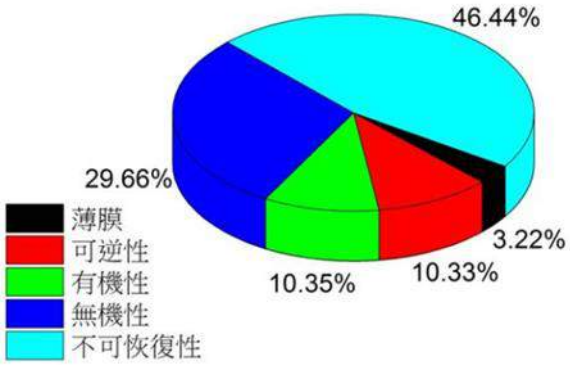


圖 6　UF 膜的阻抗分析

3.UF 膜化學清洗優化

現場以 GE 建議的 250mg/L NaOCl 及 2,000mg/L 的檸檬酸進行 UF R-clean，但此清洗藥劑配方對於造成不可恢復性積垢的鐵、錳氧化物去除效果不佳，導致透膜壓差恢復率不佳且清洗後壓差上升速率快速。從文獻得知，對於薄膜中的鐵、錳等無機性積垢物的清洗，以草酸的效果較佳[4]。實驗室以單膜絲模組進行 UF 膜清洗測試，同樣顯示以草酸取代原先使用的檸檬酸，可明顯的加強去除阻塞於 UF 膜中的鐵、錳氧化物。故選擇工業廢水純化場膜阻塞較嚴重的 A 列 UF 槽，以 250 mg/L 的 NaOCl 及 2,000mg/L 的草酸進行實場清洗測試。清洗前、後的 UF 膜照片如圖 7 所示，圖 7(a)及(b)為 UF 膜未經化學清洗前的圖片，UF 膜表面呈現紅棕色的情況；圖 7(c)及(d)為經化學清洗後的 UF 膜圖片，UF 膜恢復成原本的米白色外觀。

表 3 為比較草酸及檸檬酸酸洗藥劑清洗 UF 膜後的效能。以 250mg/L 的 NaOCl 搭配 2,000mg/L 的檸檬酸進行 UF 膜清洗，可將清洗前的透膜壓差由-39.9 kpa 降至-18.0 kpa，清洗後的 UF 膜經 21.1 小時操作後，便又回復至清洗前的透膜壓差。若以 250 mg/L 的 NaOCl 搭配 2,000 mg/L 的草酸進行 UF 膜清洗，則可將清洗前的透膜壓差由-49.6 kpa 降至-11.6kpa，清洗後的 UF 膜運轉時數則可大幅提高至 154.1 小時。以草酸取代廠商建議的檸檬酸做為酸清洗藥劑，不僅可提高透膜壓差恢復率並可延長 UF 膜的運轉時數。

圖 7　以 250 mg/L NaOCl 及 2,000 mg/L 草酸清洗 UF 膜前、後的外觀：(a)、(b)清洗前，(c)、(d)化學清洗後

表 3　以檸檬酸及草酸酸洗藥劑清洗 UF 膜後的效能比較

酸洗藥劑	清洗前壓差(kpa)	清洗後壓差(kpa)	平均運轉時數(hr)
檸檬酸	-39.9	-18.0	21.1
草酸	-49.6	-11.6	154.1

4.高效錳砂過濾器去除水中鐵、錳

綜上所述，進流水中的鐵、錳為造成中鋼工業廢水純化場 UF 膜嚴重阻塞的主因，雖然以 NaOCl 搭配草酸的清洗方式可有效去除阻塞於 UF 膜中的鐵、錳氧化物，但進流水中的薄膜積垢物若未能去除，薄膜阻塞問題將持續對工業廢水純化場的 UF 膜造成困擾。

鐵、錳離子為鋼鐵業廢水中不可避免之物質，為降低其對 UF 膜的阻塞，須於 UF 單元前設置一有效的前處理單元。文獻顯示，去除水中鐵、錳常見的方法有曝氣法、氯化法及接處氧化法[5]，工業廢水純化場的 UF 膜為沉浸、曝氣的方式操作，故曝氣法顯然對去除水中鐵、錳的效果不佳。

此外，廢水進入工業廢水純化場前亦會添加漂白水，以抑制 UF 膜的生物性積垢，但因進流水中的氨氮濃度偏高，會消耗所添加的有效餘氯，故對於水中鐵、錳的氧化去除效果也不佳。因此，於實場裝設一 pilot scale 的高效錳砂過濾器，以測試鐵、錳的去除效能。所測試之高效濾材表面被覆 10%之二氧化錳，並有高過濾表面積，可透過二氧化錳氧化水中溶解態之二價鐵離子與錳離子，形成鐵、錳氧化物固體物，再透過濾床濾除，達到移除水中鐵、錳之功效。

高效錳砂濾材的去除鐵、錳效果如表 4 所示。在模場試驗期間，工業廢水純化場進流水的鐵濃度介於 0.18~4.52mg/L，普遍高於原廠建議的< 0.1mg/L；而錳濃度則是介於< 0.1 ~ 0.25mg/L 之間，亦普遍高於原廠建議的< 0.1mg/L。進流廢水經過高效錳砂過濾器後，出流水中的鐵濃度則是介於 0.55 至< 0.1mg/L，若進流廢水中的鐵濃度低於 2 mg/L，高效錳砂過濾器可將鐵濃度降至< 0.1mg/L；在去除錳方面，高效錳砂過濾器可將出流水中的錳濃度降至符合原廠建議的< 0.1mg/L。根據過去四年的歷史數據鐵濃度小於 2 ppm 之頻率為 90.4%，故，以高效錳砂過濾器作為 UF 單元的前處理，可有效將進流廢水中的鐵、錳降至符合原廠建議的< 0.1mg/L，以減緩 UF 膜的積垢速率。

表 3　高效錳砂過濾器去除鐵、錳的效能

採樣點	進流鐵(mg/L)	出流鐵(mg/L)	進流錳(mg/L)	出流錳(mg/L)
1	0.5	<0.1	0.13	<0.1
2	3.83	0.21	0.12	<0.1
3	0.18	<0.1	<0.1	<0.1
4	0.67	<0.1	0.11	<0.1
5	1.02	<0.1	0.25	<0.1
6	4.52	0.55	<0.1	<0.1

四、結　論

研究結果顯示，中鋼工業廢水純化場 UF 膜阻塞嚴重的積垢物，主要為無機性的鐵、鈣、鋁、錳等化合物所造成，佔 55.12%。阻塞的 UF 膜經化學清洗後，仍無法移除 UF 膜孔洞內的鐵、錳積垢物，代表鐵、錳氧化物為不可恢復性的積垢物。從單膜絲的阻抗分析結果顯示，UF 膜最主要的阻抗為不可恢復性積垢所造成的阻抗，佔總阻抗的 46.44%，主要為鐵、錳氧化

物所貢獻，依序分別為無機物所造成的不可逆性積垢，佔總阻抗的 29.66%；有機物所造成的不可逆性積垢，佔總阻抗的 10.35%；可逆性積垢所造成的阻抗，占總阻抗 10.33%；薄膜本身的阻抗僅占總阻抗的 3.22%。

以 UF 廠商建議的 NaOCl 搭配檸檬酸進行 UF 膜清洗，可將清洗前的透膜壓差由-39.9kpa 降至-18.0kpa，清洗後的 UF 膜經 21.1 小時操作後，便需再進行化學清洗。若以 NaOCl 搭配草酸進行 UF 膜清洗，則可將清洗前的透膜壓差由-49.6kpa 降至-11.6kpa，清洗後的 UF 膜運轉時數則可大幅提高至 154.1 小時才需再進行化學清洗。

為去除進流廢水中的鐵、錳積垢物，以高效錳砂過濾器進行模場試驗。試驗結果顯示，高效錳砂過濾器可將進流廢水中的鐵，由 0.18~4.52mg/L 處理至 0.55 ~ < 0.1mg/L 之間；在去除錳方面，高效錳砂過濾器則可將進流廢水中的錳，由< 0.1~0.25mg/L 處理至< 0.1mg/L。故，以高效錳砂過濾器作為 UF 單元的前處理，可有效降低進流廢水中的鐵、錳積垢物，以減緩 UF 膜的積垢速率。

五、參考文獻

1. World Steel Association (2011) “Water management in the steel industry.”.
2. Choi, S. K., Yi, H., Moon, J., Sung, Y. and Hang, S. (2015) “Fouling characteristics of UF and RO membranes for reclamation of the wastewater from iron and steel industry.” Int. J. Environ. Sci., 5(4), 709-716.
3. Park, H. D., Chang, I. S. and Lee, K. J. (2015) “Principles of membrane bioreactors for wastewater treatment.” Taylor & Francis group, Boca Raton, FL, 151-154.
4. Mosaferi, F., Delijani, F. and Koshky, F. E. (2010) “Investigation on the cleaning agent in a RO Hollow fine-fiber module.” World Appl. Sci. J., 11(2), 124-126.
5. 王耀賢 (2000),「前氧化結合截流式微過濾處理含鐵錳地下水之研究」，國立交通大學環境工程研究所碩士論文。

科學工業園區污水處理廠放流水回收再利用模型廠試驗效能評估

張玄芳*、廖宗銘**、倪辰華***、林俊德****

摘　要

本研究以中部科學工業園區提供之污水處理廠放流水為回收試驗，進行作為再生水使用的可行性評估。本研究中建置一套沉浸式微濾膜(Submerged Microfiltration; SMF)與逆滲透(Reverse Osmosis; RO)處理系統。本模廠 SMF 單元採用 30m^2 沉浸式中空絲微濾膜，每日可過濾產水 15~20 噸，回收率可達 95%以上。RO 單元使用節能抗垢薄膜，採用 2 段 4040 模組 2:1 排列，每日可產水 4~13 噸，回收率 60~75%。

模廠測試期間監測污水廠放流水水質，酸鹼值(6.5~6.8)、COD(17.2~80mg/L)、TOC(3.4~12.7 mg/L)、SS(1.7~5.9 mg/L)、濁度(1.7~12.7NTU)、總硬度(309~377mg/Las $CaCO_3$)、鹼度(50~85mg/L as $CaCO_3$)、SiO_2(15.1~17.4 mg/L)與氟離子(4.85~5.34mg/L)。另外，由於廠內多為收集高科技產業排放水，所以廢水中含亦高量的導電度(3,820~4,520μs-cm)、硫酸根(1,050~1,368 mg/L)與正磷酸根(84~129 mg/L)。經過 SMF 處理後 SS 為 2 mg/L(偵測極限)以下，濁度保持 0.5NTU 以下。再經 RO 過濾的再生水 COD 平均值< 5mg/L，TOC 平均值<0.25mg/L，導電度< 160μs-cm，總硬度< 1mg/L as $CaCO_3$，SiO_2<1 mg/L，正磷酸根<1 mg/L 及氟離子< 0.8 mg/L。由分析結果可知，回收水中各重要項目水質均低於自來水質標準，驗證本系統對各項水質去除效能的優越性。此外，操作期間 SMF 槽內的排放廢水水質 COD 與 SS 分別為 40~103 mg/L 與 10.9~50.5 mg/L，建議可排回廢水廠調勻池再處理。RO 回收率<70%下，濃排水水質 pH、COD、SS、NO_3-N 與 F^-均可符合排放標準。

連續 70 天的操作，SMF 操作透膜壓力(TMP)均介於 5kPa~7kPa 之間，均未達須進行回復藥洗(Recovery clean)40kPa 壓力值，顯示 SMF 可維持穩定運作。RO 模組於測試期間分三個不同回收率操作，分別為 70~75%、65~70%與 60%。結果發現 RO 以 60%回收率操作穩定為最佳。RO 產水量可穩定維持在 11 CMD，操作壓力保持在 735~805 kPa。藉由本模型廠的實際測試驗證，污水廠排放水經 SMF/RO 處理之再生水水質較自來水為優良，可取代自來水，作為工廠冷卻水塔補水或工業用水的水源無虞。使用 SMF+單級式(One Pass)方案，單位成本(含操作與設置成本)約為 19.73 元/噸。另使用 SMF+二級式(Two Pass) RO，其回收水可達一般純水，單位成本(含操作與設置成本)約為 23.26 元/噸。

【關鍵詞】科學工業園區放流水、沉浸式微濾膜、逆滲透膜、回收再利用

---

*山林水環境工程股份有限公司 專員

**山林水環境工程股份有限公司　執行副總經理

***數宇科技顧問有限公司 副總經理

****逢甲大學環境工程與科學系 副教授

一、前　言

中部科學工業園區開發建設工程於民國九十二年七月起展開，配合產業未來整體發展需要，提供高科技產業優質之環境，鼓勵研究發展及製造高科技工業產品，進而帶動科技產業技術提昇，促進中部地區產業之升級。台中園區主要以光電、精密機械與半導體產業為主。各工廠產生的廢水經自行處理符合納管標準後，再排入園區專用下水系統納入園區污水處理廠處理。污水處理廠目前日處理量約為 88,000 m^3，廢水處理程序採三級過濾處理流程，放流水質符合較國家放流水標準更為嚴格之環評標準。

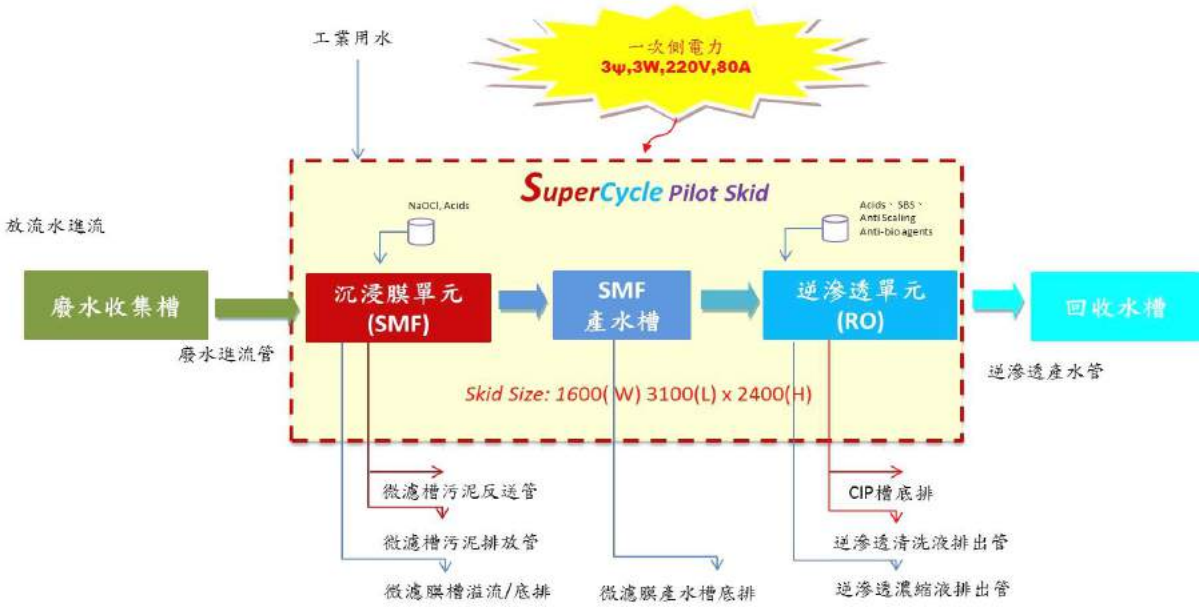
本研究以中部科學工業園區提供之污水處理廠放流水為回收試驗，進行作為再生水使用的可行性評估，該污水處理廠進行接收廢水來源主要為工廠製程廢水、冷卻水排水與生活污水，經初級、二級生物與三級過濾處理後排放。依據該污水廠廢水來源特性，如欲以其放流水作為回收水源，因其水中含有工廠冷卻水塔排水，通常具高硬度、高電導度、高鹼度、二氧化矽與磷酸鹽類等，需要化學前處理如混凝浮除以去除部分硬度、二氧化矽與磷酸鹽。後續使用薄膜技術時則需要大量添加抑垢與抑菌藥劑，導致操作成本過高而較無經濟效益[1]。水中如含有經生物二級處理之放流水，常因排入廢水化學物質變異，生物系統處理異常，污泥上浮流出，導致二級放流水含有大量生物懸浮物、微細生物污泥膠體(1~10 micron)與有機物，造成後段 RO 薄膜生物膜與有機物的堵塞[2]。如使用三級過濾程序，平均過濾孔隙僅 50~200 micron，對逆滲透(RO)薄膜無法達到真正保護作用[2]。一般廢水回收收流程均採微濾/超濾(micro/ultra- filtration)與逆滲透(Reverse Osmosis)的雙薄膜法，藉以去除廢水中微細膠體、溶解性離子與微量污染物質，達成水質淨化之目的。

若使用傳統管壓式微濾/超濾薄膜(Pressurised micro/ultra- filtration membrane)，產水水質雖然良好，但因侷限於薄膜外殼構造有限空間，對於懸浮顆粒則有極高的進水濃度限制。對於懸浮物(SS)瞬間的濃度突增，會造成管壓式微濾/超濾薄膜膜壓升高、清洗頻率增加、回收率下降與薄膜壽命減少等問題。沉浸式微濾膜(Submerged Microfiltration; SMF)為一新型的薄膜過濾系統，因採用將微濾薄膜置於開放水槽內，懸浮固體不易堆疊累積，薄膜直接以負壓吸允的方式，將廢水透過薄膜過濾，達成生物與微細膠體顆粒去除的目的。具有可承受高生物懸浮顆粒負荷(懸浮物大於數百毫克/升)、操作穩定性高、薄膜堵塞清洗容易、高水回收率、薄膜壽命長等優點[1]。

依目前各工業區皆面臨缺水壓力下，有效的廢水回收再利用將為有助於協助產業達到永續發展的重要方法。本研究採用沉浸式微濾膜(SMF)/逆滲透(RO)流程，針對本園區污水廠放流水進行現場模型廠(Pilot Plant)測試，作為再生水使用的可行性評估，同時進行每日產生 10,000 m^3/天再生水方案的經濟性評估。

二、測試方法

模廠測試設備本研究中利用套裝化的沉浸式微濾膜(SMF)與逆滲透(RO)廢水回收系統(SuperCycle™-SMRS)為主要設備。圖 1 為本模型廠測試設備流程與構造圖。本模廠 SMF 單元，採用 30 m^2 沉浸式中空絲(Hollow filber)微過濾膜，過濾平均孔徑為 0.4 micron，每日可過濾產水 15~20 噸。SMF 操作控制採用過濾/休止/廢棄污泥模式，每一周全自動進行 1~2 次維護性藥洗，SMF 回收率測試範圍為 85 ~ 95%。RO 單元使用節能抗垢薄膜，採用 2 段 4040 模組 2:1 排列，每日可產水 4~13 噸，回收率 60~75%。本模廠主要配備有全程水質流量監控、薄膜自動前加藥、自動清洗/藥洗控制系統、PLC 全自動控制與人機介面(HMI)操作等功能。整個系統為套裝化規劃，並安裝於一移動式鋼架上便利設備運輸。所需的廢水進/出系統的管道接口均預留於鋼架上，便利現場的快速施工銜接與運轉。



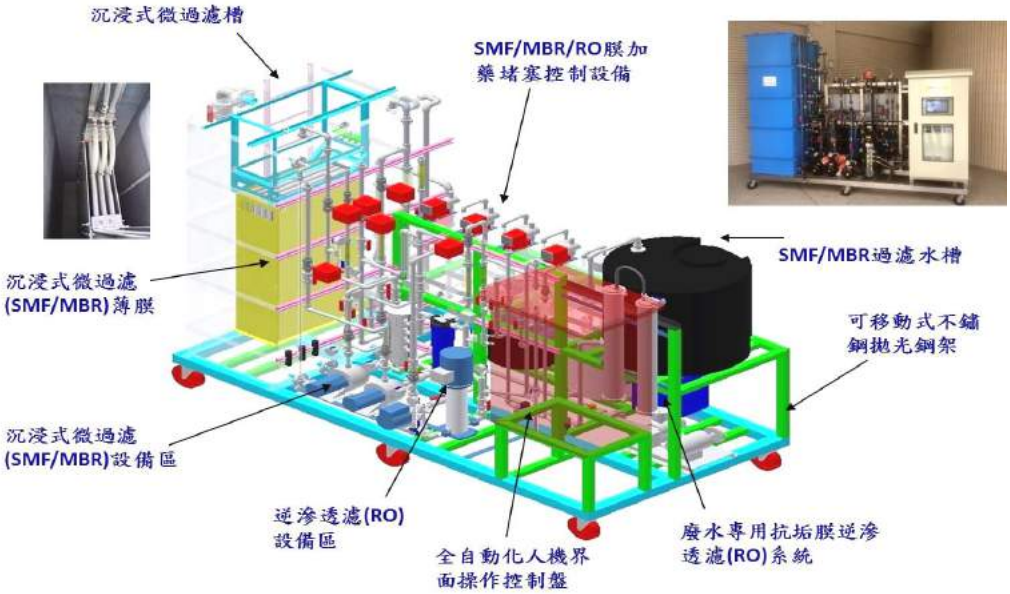


圖 1　沉浸式微濾膜(SMF)與逆滲透(RO)廢水回收系統

三、結果與討論

1.進流水水質分析

表 1 為進流水水質分析結果，測試採樣期間為 70 天。表中並顯示各項水質的最大、最小與平均值。目前本廠放流水分析水質，pH: 6.5 ~ 6.8，COD:17.2 ~ 80 mg/L、TOC:3.4~12.7 mg/L，SS:1.7~5.9 mg/L、濁度:1.7~12.7 NTU，總硬度:309~377 mg/L as $CaCO_3$，鹼度: 50~85mg/L as $CaCO_3$、鐵:<0.65 mg/L、錳:< 0.15 mg/L。另外，由於進流水主要為光電與半導體產業工廠製程與冷卻水排水，廢水中含高導電度(3,820~4,520 μs/cm)、高硫酸根(1,050 ~ 1,368 mg/L)與正磷酸根(84 ~ 129 mg/L)、SiO_2 (15.1~17.4mg/L)與氟離子(4.85~5.34 mg/L)。

表 1　進流水水質分析表

	項目	項目	進流水質 (Min.~Max.)	平均值 (Ave.)
1	pH		6.5 ~ 6.8	6.7
2	COD	mg/L	17.2 ~ 80.0	35.8
3	TOC	mg/L	3.4~12.7	4.5
4	SS	mg/L	1.7 ~ 5.9	3.5
5	濁度	NTU	1.7~12.7	3.4
6	溫度	˚C	20.6~27.8	25.6
7	M-鹼度	mg/L as $CaCO_3$	50 ~ 85	65
8	總硬度	mg/L as $CaCO_3$	309.7 ~ 377.3	350
9	導電度	μs/cm	3,820 ~ 4,520	4,100
10	總鐵	mg/L	0.4 ~ 0.65	0.52
11	錳	mg/L	0.13~0.15	0.14
12	氯離子	mg/L	848 ~ 1,290	921
13	硫酸根	mg/L	1,050 ~1,368	1,120
14	SiO_2	mg/L	15.1 ~ 17.4	16.2
15	正磷酸	mg/L	84.9 ~ 129	96.5
16	硝酸氮	mg/L	14.3 ~ 16.3	15.1
17	氟離子	mg/L	4.85~5.34	5.01

2.處理後再生水水質分析

表 2 為各單元各項目水質去除效能分析。由表中可看出各項水質實際處理後均遠低於自來水質標準，故能夠取代作為工業用水無虞，也驗證本系統對各項水質去除效能的優越性。

表 2　各單元各項目水質去除效能分析

項目	單位	本廠放流水 (平均值)	SMF 產水 (平均值)	RO 產水 (平均值)	自來水參考水質
pH		6.7	6.9	6.1	6~9
COD	mg/L	35.8	30.3	< 5	<5
TOC	mg/L	4.5	0.63	0.25	< 2
SS	mg/L	3.5	< 2	<1	< 5
濁度	NTU	3.4	0.5	0.2	< 5
溫度	˚C	25.6	26.1	26.7	15~35
M-鹼度	mg/L as $CaCO_3$	65	---	10	< 200
總硬度	mg/L as $CaCO_3$	350.3	---	0.2	< 300
導電度	μs/cm	4,100	---	160	< 450

總鐵	mg/L	0.52	---	0.02	<1
錳	mg/L	0.14	---	0.02	< 0.5
氯離子	mg/L	921	---	35	< 50
硫酸根	mg/L	1,120	---	<5	<100
SiO_2	mg/L	16.1	---	0.78	< 5
正磷酸	mg/L	96.5	---	0.8	< 1
硝酸氮	mg/L	15.1	---	3.88	---
氟離子	mg/L	5.1	---	0.8	---

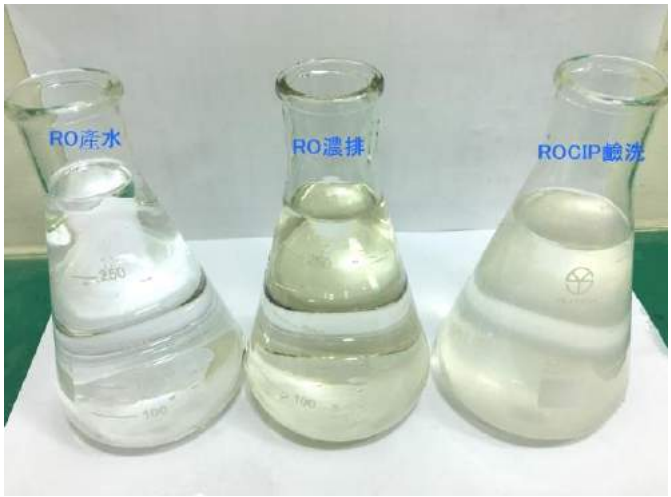


圖 2　各單元處理水樣照片

表 3 為 SMF 底排廢水與 RO 濃縮液廢水水質分析結果。由表中可知，SMF 槽內的排放廢水水質 COD 與 SS 超過排放標準。建議可排回廢水廠調勻池再處理。另外、RO 濃排水水質，pH、COD、SS、NO_3-N 均可符合排放標準，在 RO 回收率< 70%下，氟離子可符合<15 mg/L 的排放標準。

表 3　SMF 底排廢水與 RO 濃縮液廢水水質分析

項目	單位	SMF 廢水	RO 濃排廢水
pH		6.9~7.7	6.1~7.1
COD	mg/L	40.7~103	23.5~70.5
TOC	mg/L	14.1~18.2	10.1~13.0
SS	mg/L	10.9~50.5	2~3.1
濁度	NTU	10.9~105	0.18~0.86
溫度	˚C	21.4~28.6	20.4~30.1
導電度	μs/cm	3,750~4,530	4,200~14,000
總鐵	mg/L	0.71~2.41	0.8~1.29
錳	mg/L	0.13~0.2	0.24~0.56
氯離子	mg/L	327~1,055	1,740~3,950
硫酸根	mg/L	790~1,140	2,250~3,900
SiO_2	mg/L	15.1~18.1	6.5~33
正磷酸	mg/L	84.9~123	105~383
硝酸氮	mg/L	14~17	15~45
氟離子	mg/L	---	5.2~14.4

(1)導電度

圖 3 為各處理程序導電度的變化。模廠測試期間，進流水導電度介於 3,800~4,500 μs/cm。SMF 對於導電度並無去除效能，其主要是扮演生物膠體與懸浮物去除功能，保護下游 RO 模組。於 3 月 15 日起啟動 RO 系統，RO 模組對去除效能均可達 96 %以上， RO 最終產水部分均能有效達 200 μS/cm 以下，RO 產水水質較自來水的導電度為佳，其可作為冷卻水塔的補充用水無虞。

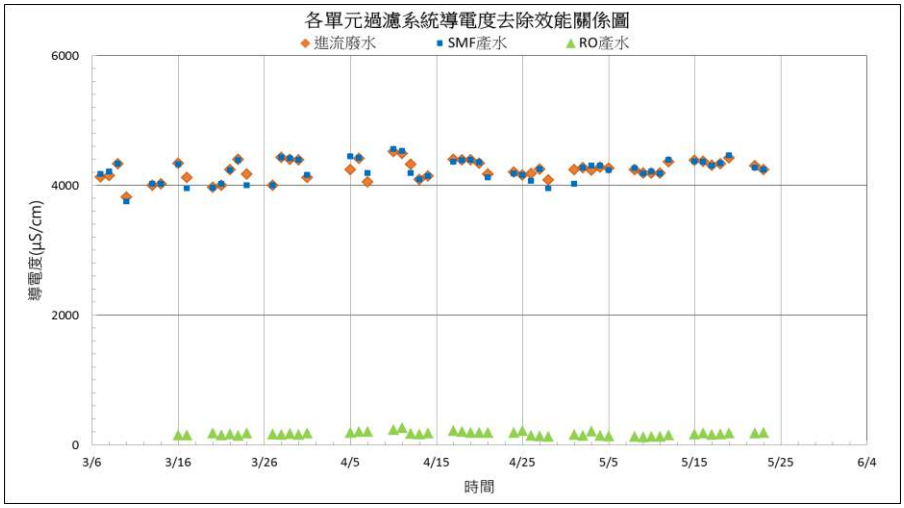


圖 3　各單元處理導電度變化圖

(2)COD 與 TOC

圖 4 為 SMF 及 RO 模組於測試期間的 COD 變化圖。SMF 進流水的 COD 濃度變化介於 17.2~80 mg/L 之間。但於 4 月 26 日水質異常稍高濃度高達約 80 mg/L。SMF 為物理性過濾，但對於 COD 仍有部分去除率，去除率平均為 18.5%，其最大值為 58%。RO 膜組對進流水 COD 去除效能。RO 系統能有效降低 COD，最終再生水 COD 值均< 5mg/L (偵測極限)，去除率為 60~90%。

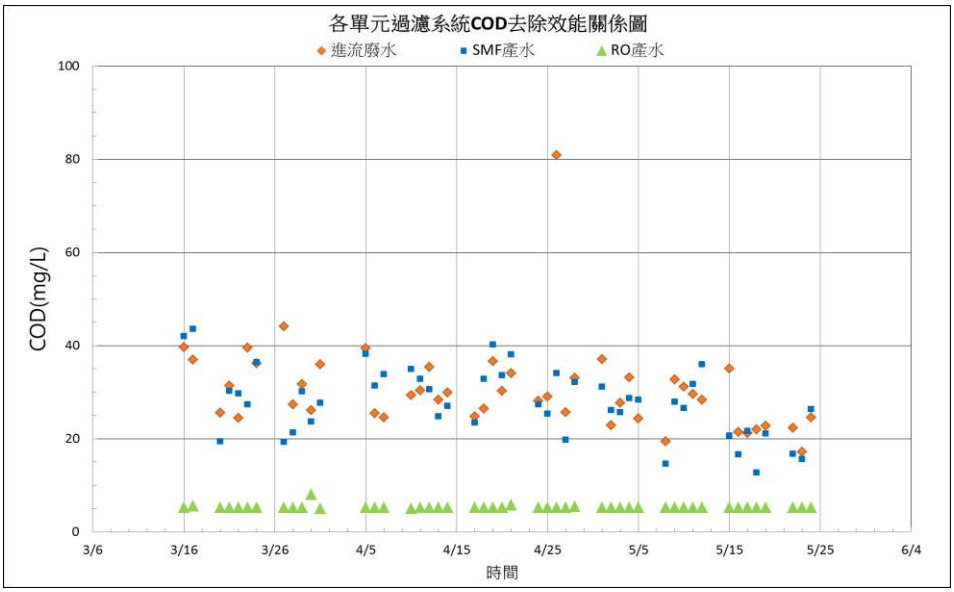


圖 4 各單元處理 COD 變化圖

表 4 是操作期間委外進行 TOC 水質分析結果。進流水 TOC 介於 5.7~5.8 mg/L。SMF 對 TOC 雖無去除率，但 RO 產水 TOC<0.8mg/L，整體去除率達 86%以上。

表 4 TOC 水質分析表

送樣日期	樣品名稱	TOC 濃度 (mg/L)
106.03.06	SMF 原水	5.87
	SMF 產水	6.20
106.04.18	SMF 產水	5.11
	RO 產水	0.74
	SMF 濃排	18.16
	RO 濃排	10.10
106.05.04	SMF 原水	5.77
	SMF 槽底水	14.05
	SMF 產水	5.65
106.05.23	SMF 原水	6.03
	SMF 產水	6.11
	RO 產水	0.78
	RO 濃排	12.98

(3)總硬度

總硬度主要代表水中鈣與鎂含量，可能與其他離子形成沉澱物(結垢物)，故為水中重要指標之一。測試期間進流水總硬度介於 320~380 mg/L (as $CaCO_3$)，平均濃度為 350 mg/L。再生水總硬度僅為 0.04~0.57 mg/L，證明 RO 對硬度有極佳的去除率，回收水遠較自來水為佳。

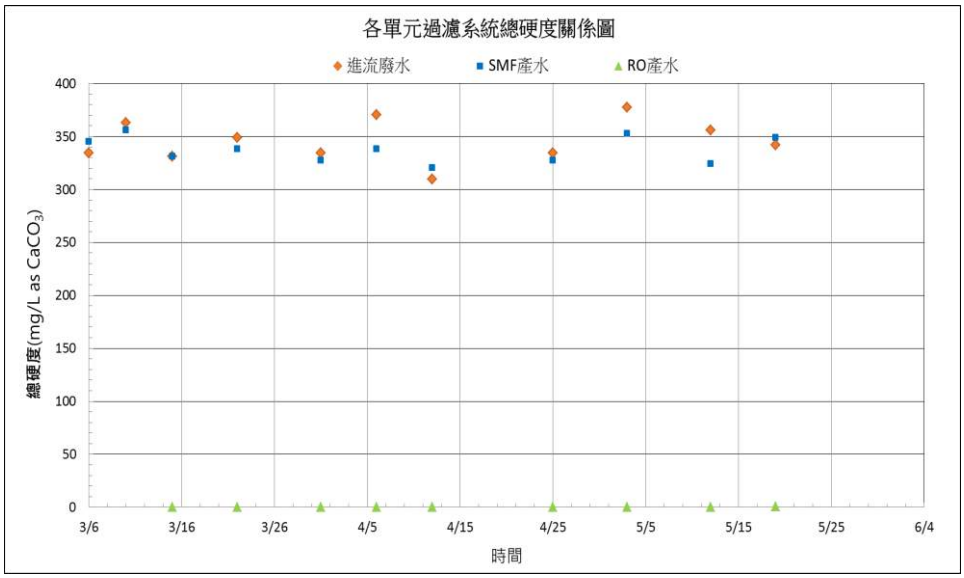


圖 5　各單元處理總硬度變化圖

(4)二氧化矽

二氧化矽容易產生薄膜不可逆阻塞，進流水平均進流濃度為 15 mg/L，再生水 SiO_2 值均小於 1 mg/L。

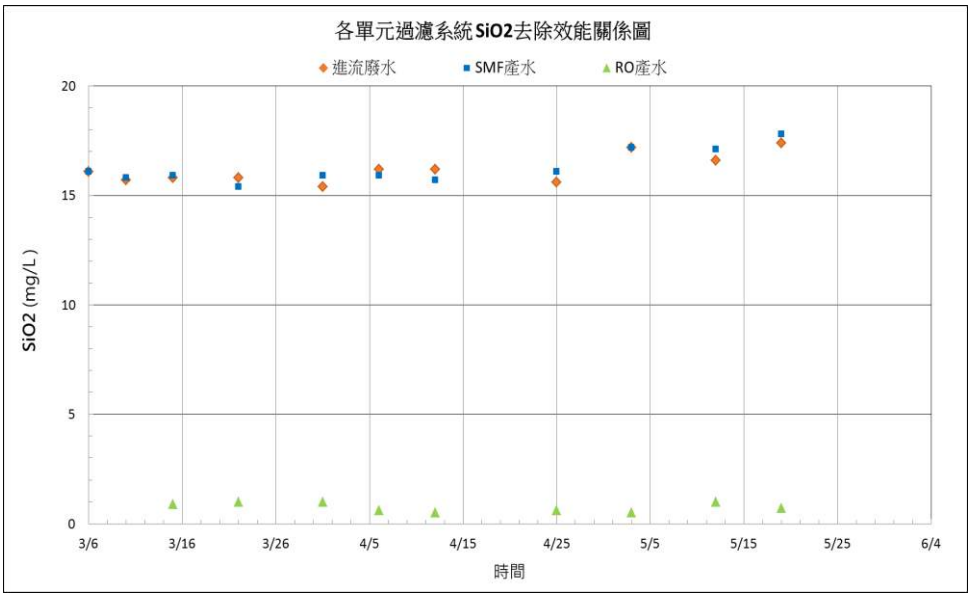


圖 6　各單元處理 SiO_2 變化圖

3.各單元操作穩定性分析

(1)SMF 模組操作流量與壓力

SMF 模組操作自 106 年 3 月 6 日至 106 年 5 月 12 日共計約 10 周，設定操作瞬間流量為 16.7 LPM，換算操作通量約為 30 LMH。圖 7 為操作期間 SMF 瞬間運轉流量。從圖中顯示 SMF 均可穩定運轉。

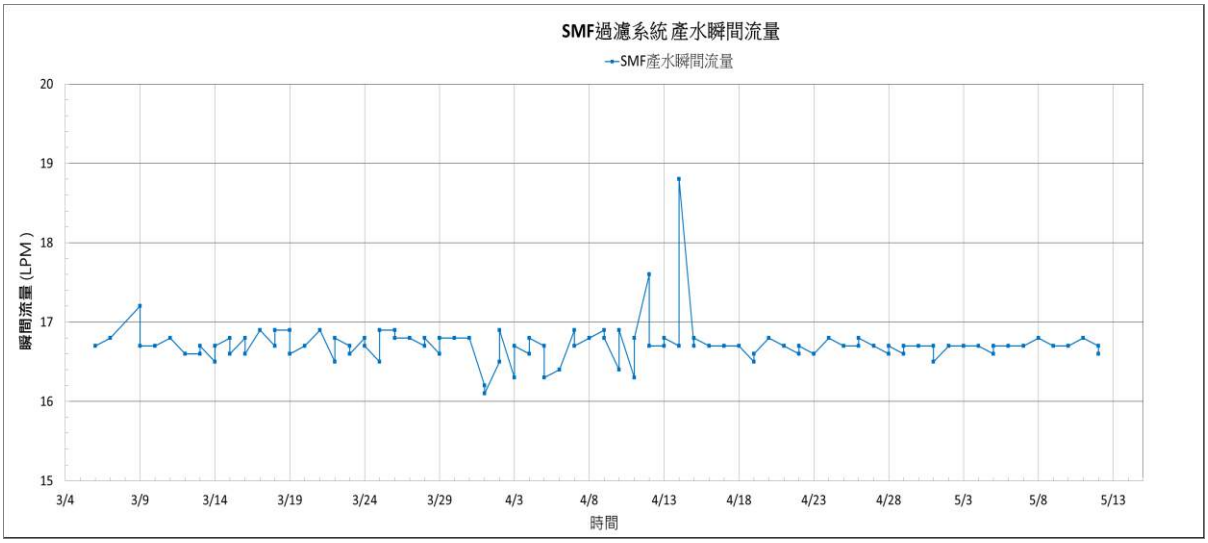


圖 7 SMF 模組產水瞬間流量

圖 8 為操作期間 SMF 每日產水流量。3 月 5 日~3 月 14 日僅有 SMF 操作，每日可穩定產水約 20 CMD。3 月 15 日後因 RO 啟動，由於 RO 產水量較小(5~7 CMD)，因而連動 SMF 的產水量降低。於 4 月 13 日後，解除 RO 產水量與 SMF 的連動控制關係後，SMF 每日均可穩定產水達 20 CMD。

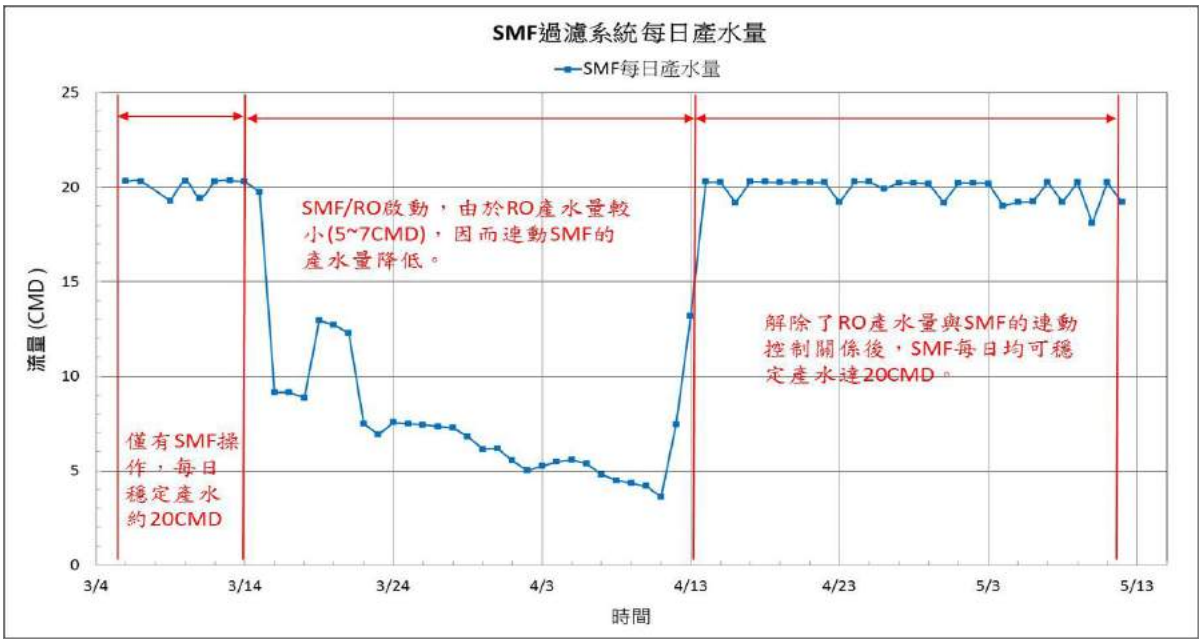


圖 8　SMF 模組每日產水流量

圖 9 為 SMF 吸允壓力與透膜壓力(TMP)的變化圖。操作設定為每 7 分鐘過濾(Filtration)，休止(Relax) 1 分鐘。另外每周進行維護清洗(MC) 1 次，每次進行 30~40 分鐘。操作期間 SMF 的操作透膜壓力(TMP)均介於 5~17 kPa 之間，均未達須進行回復藥洗(Recovery clean)的 40 kPa 設定壓力，顯示 SMF 模組的操作可藉由一般正常的「休止(Relax)」及「維護清洗(MC)」操作程序，維持穩定 SMF 模組的運作。於 4 月 23 日~4 月 28 日發現水質有異，SMF 透膜壓上升較快速至 17 kpa，但藉由維護清洗(MC)將透膜壓降低至 5 kpa，使 SMF 的 TMP 恢復至原始狀態，可有效清洗減緩薄膜堵塞。操作期間均無需使用高濃度的回復藥洗程序(Recovery Clean)。模廠 SMF 可自動進行維護清洗(MC)，頻率為每周 1~2 次。由圖 9 操作透膜壓力變化趨勢，預估 SMF 系統回復藥洗(RC)頻率為 3~5 個月。

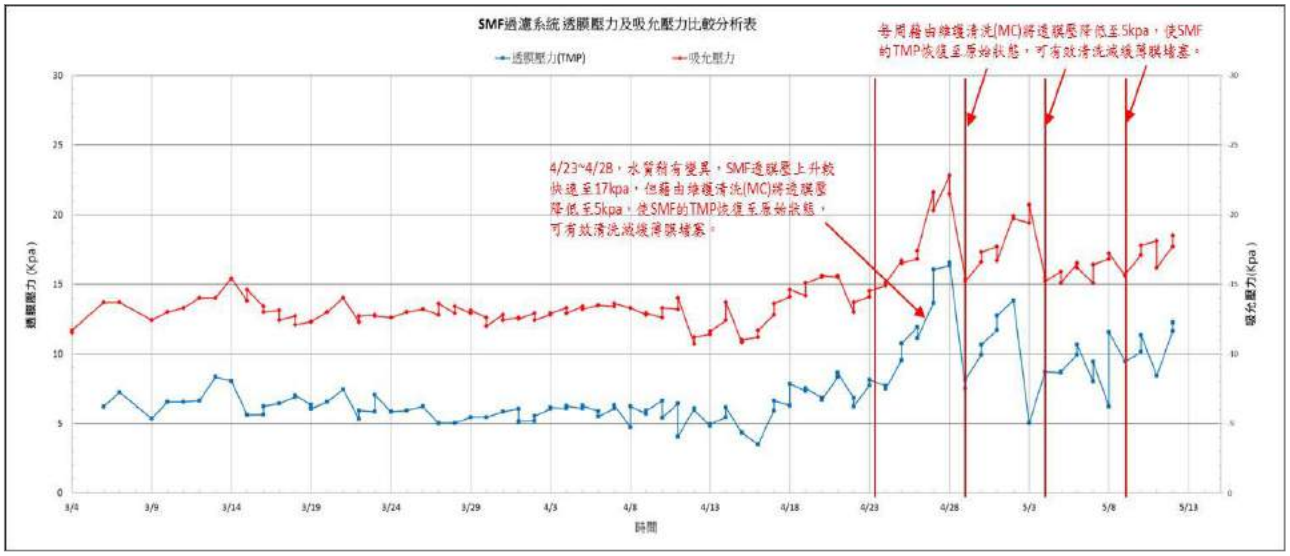


圖 9　SMF 吸允壓力與透膜壓力(TMP)的變化圖

(2)RO 模組操作流量與壓力

圖 10 與圖 11 為 RO 模組於測試期間中的瞬間操作流量與每日產水量變化。RO 模組操作自 2017/3/15 至 2017/5/12 共約 8 周，共分三階段操作。3 月 15 日~4 月 12 日操作回收率約在 70~75%，4 月 12 日~4 月 25 日操作回收率約在 60~70%，4 月 25 日~5 月 12 日操作回收率在 60%。由圖中可發現，在第一階段回收率>70%時，儘管仍持續添加抑垢與抑菌劑，RO 產水瞬間流量仍從 7 LPM 逐步降低，經過 3 周運轉後降低到 3LPM。每日產水量由 13CMD 降至 4CMD。經過執行線上 CIP 藥洗後，RO 薄膜通量可回復，驗證 CIP 藥洗可有效去除薄膜堵塞回復通量。第二階段操作回收率 60~70%時，仍發現 RO 經過 2 周運轉後，產水流量仍從 7 LPM 逐步降低到 4 LPM，每日產水量由 12 CMD 降至 6.2 CMD。再使用線上 CIP 藥洗後，RO 薄膜通量仍可回復初始通量。第三階段操再降至回收率 60%操作。同時確保操作過程中持續添加抑垢與抑菌劑，發現 RO 經過 3 周運轉後，產水流量可保持 6 LPM 穩定操作，產水量穩定維持 11 CMD。

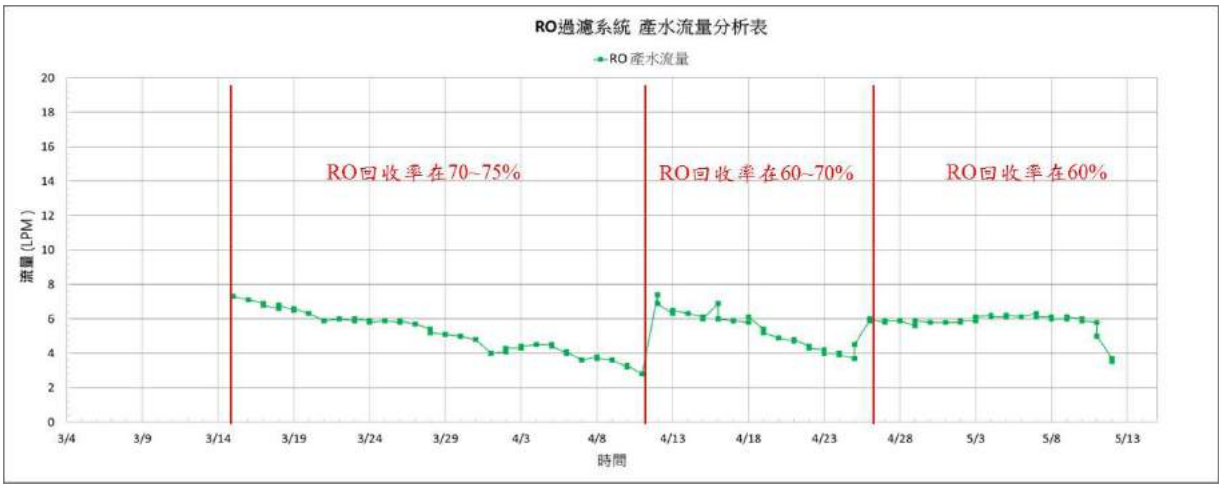


圖 10　RO 模組產水瞬間流量變化圖

圖 11　RO 模組每日產水流量變化圖

圖 12 為 RO 模組於測試期間中膜操作壓力與壓差變化。圖中顯示第一階段回收率於 70%時，RO 進水操作壓力約為 1,078Kpa(11 kg/cm^2)。回收率提升至 75%時，RO 進水操作壓力提高至 1,372kPa(14 kg/cm^2)。第二階段回收率為 60~70%時，RO 進水操作壓力約 784~980(8~10 kg/cm^2)。第三階段固定回收率於 60%時，RO 進水操作壓力僅為 686~847(7~8kg/cm^2)。由於本廠進流水屬於導電度(3,800~4,500μs/cm)較高，高回收率(>65%)操作下，將造成 RO 薄膜快速堵塞，每周需進行 CIP 清洗，無法穩定操作。故本研究建議最佳操作回收率為 60%，需輔以抑垢、抑菌添加，將可達穩定操作。清洗頻率預估每 3~5 周進行 CIP 清洗一次即可。

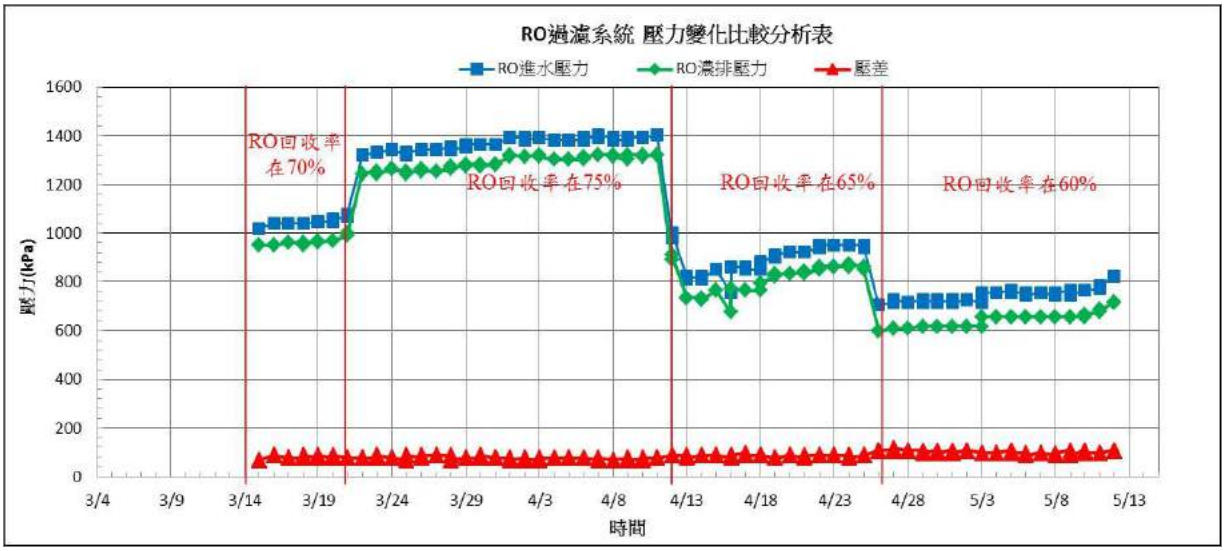


圖 12　RO 模組操作壓力與壓差變化

4.回收 10,000 噸廢水之經濟效益性評估

(1)實廠再生水廠處理流程規劃

圖 13 為本研究初步規劃未來再生水廠實廠再生水廠處理流程。針對實廠之經濟性流程評估採用兩方案流程進行，方案一為 SMF+單級(One pass)RO，產生回收水質優於自來水等級，可作為冷卻水補水與一般製程用水補水。另外，方案二採用 SMF+二級(Two pass)RO。由於單級(One pass)RO 產水水質優良，後段再新增一級 RO，可在有限成本增加下，達成初級純水水質，可作為一般純水等級、超純水補水與高級製程用水，提高回收水經濟效益。

表 5 顯示單級(One Pass)或二級(Two pass)RO 兩種方案的預估回收水質，其中單級 RO 處理水導電度可小於 300 μS/cm，可完全取代工業用水作為冷卻水塔補水與或製程純水的進水源。另再考慮增設第二級(Two pass)RO，主要的目的為將單級 RO 的回收水再進一步純化為純水水質，導電度可小於 15 μS/cm，可直接作為高級製程純水或超純水補充水。此外，由於單級 RO 產水導電度低(<300 μS/cm)，二級 RO 處理回收率可提高至 90%以上。二級 RO 產生的濃排水水質優良，也可再排回 SMF 單元前重複再使用，不浪費水源。預計進流二級放流水之進流 16,000 噸/天，每日可回收 10,000 噸，總回收率可達 60%以上。

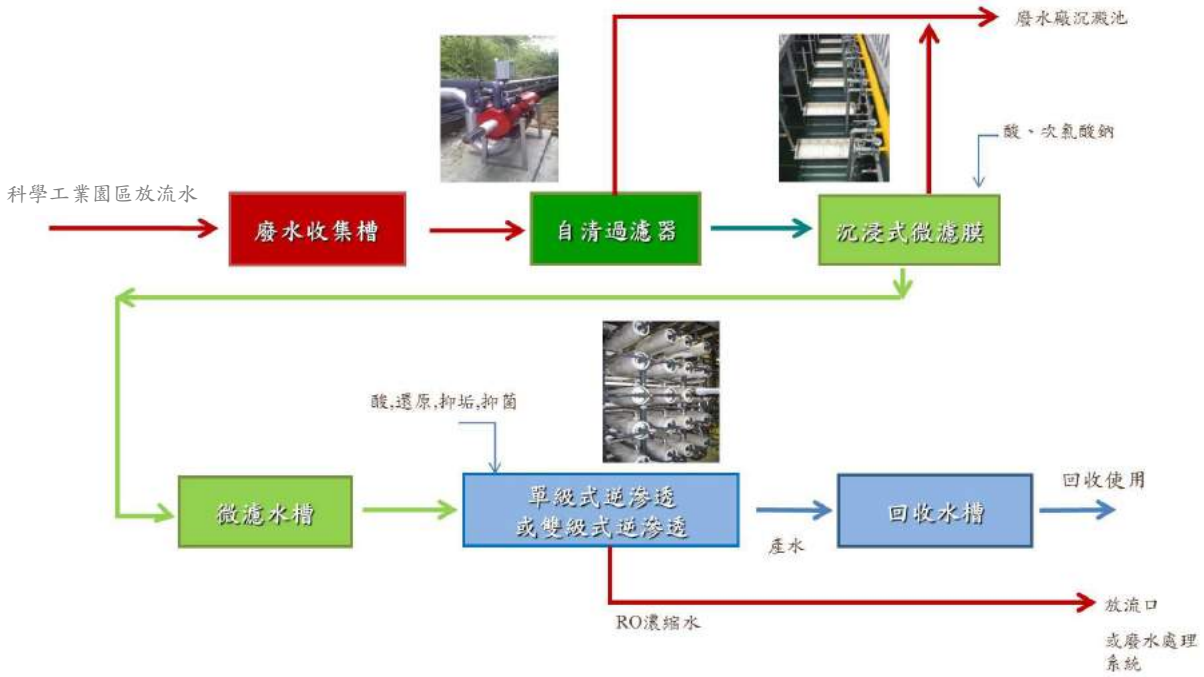


圖 13　實廠再生水廠處理流程圖

表 5　採用單級/二級 RO 兩種方案之回收水質

項目	單位	進流 廢水	方案一 SMF+ RO(One pass)	方案二 SMF+RO(Two pass)
進水量	CMD	16,000	10,000	10,000
pH	---	6.5~7.2	5.5~6.5	5.5~6.5
COD	mg/L	< 80	< 10	< 2
TOC	mg/L	< 40	< 10	< 1
SS	mg/L	< 30	< 1	--
導電度	mg/L as CaCO3	< 4,500	< 300	< 15
總固含量	mg/L	< 3,000	< 200	< 10
M-鹼度	mg/L	< 100	< 10	< 1
鈣離子	mg/L	< 300	< 5	< 1
總鐵	mg/L	< 1	< 0.1	< 0.05
錳	mg/L	< 0.5	< 0.1	< 0.05
氯鹽	mg/L	< 500	< 35	< 5
二氧化矽	mg/L	< 25	< 1	< 0.5
總磷酸鹽	mg/L	< 1	< 0.5	< 0.1
硫酸鹽	mg/L	< 1,000	< 50	< 1

(2)經濟效益性評估

表 6 為各方案之操作成本與設置成本預估表。評估依據為進流水 16,000 CMD，產水 10,000 CMD，回收率約為 60%規劃。操作費用分別考慮電力、藥品與耗材費用。設備費用以 15 年攤提，每年操作 360 天/年為基準。包含土木工程、設備基礎與機電設備工程。

由表 6 可知道，方案一使用 SMF+單級(One Pass) RO，其回收水質為自來水等級。可作為冷卻水塔補水與一般製程用水，單位成本(含操作與設置成本)約為 19.73 元/噸。方案二使用 SMF+二級(Two Pass) RO，其回收水可達一般純水，可作為高階製程用水及超純水之補充水源，單位成本(含操作與設置成本)約為 23.26 元/噸。

表 7 為各方案再生水回收使用用途與節省效益說明。方案一中使用 SMF+單級式(One Pass) RO，導電度已低於 150 μS/cm，其回收水質為自來水等級。如作為冷卻塔補水，提高濃縮倍數，減少用水量與排放量。另作為純水處理水源，減少樹脂再生頻率，增加樹脂壽命，降低再生酸鹼藥液使用與排放廢水，可節省大量操作費用。回收後節省自來水水費 (11.5~15 NTD/m^3)，並可減少工業區污水處理費繳納(15~30 NTD/m^3)。節省總效益可達 11.5~45 NTD/m^3。

方案二使用 SMF+二級(Two Pass) RO，導電度可小於 15 μS/cm，其回收水可近似純水，除了節省自來水水費、減少工業區污水處理費繳納、如作為高階製程用水及超純水之補充水源，將可減少現有純水系統操作，或大量降低超純水系統之操作成本。節省總效益最大可達 75 NTD/m^3。

表 6　再生水廠實廠經濟性評估表

項目	方案一	方案二	說明
	SMF+ One Pass RO	**SMF+ Two Pass RO**	
進水量(CMD)	16,000	16,000	科學工業園區放流水
回收率(%)	60	60	
回收水量(CMD)	10,000	10,000	
回收水等級/ 使用用途	近似自來水等級 / 冷卻水補水、 一般製程用水	一般純水等級/ 高級製程用水、 鍋爐補充水	
單位操作費(NTD/m^3)	**12.7**	**15.3**	
電力(NTD/m^3)	4.5	6.1	電力費以 2.2 NTD/kwh 計
藥品(NTD/m^3)	3.0	3.4	包含酸鹼、抑垢、抑菌、還原、薄膜清洗等藥劑
耗材(NTD/m^3)	5.2	5.8	包含 SMF、RO 薄膜、濾心等耗材
單位設置費用 (NTD/ m^3)	**7.03**	**7.96**	分 15 年攤提，360 天/年。包含土木槽體、設備基礎與機電設備工程。
單位總成本 (NTD/ m^3)	**19.73**	**23.26**	單位操作費+單位設置費

說明:

1.操作費用包含電力、藥品、薄膜等耗材更換等費用，但不包含人力費。

2.設置費用含土木、機電系統設備。但不含再生水廠外輸送系統，土地租用，利息等。

3.再生水廠用地需求預估為 30m x 60 m。

表 7　兩方案可節省費用說明表

項目	方案一	方案二
	SMF+ One Pass RO	**SMF+ Two Pass RO**
可節省費用 項目	1. 作為冷卻塔補水，提高濃縮倍數，減少用水量與排放量。 2. 作為純水處理水源，減少樹脂再生頻率，增加樹脂壽命，降低再生酸鹼藥液使用與排放廢水，可節省大量操作費用。 3. 節省自來水費 (11.5~15 NTD/m^3) 4. 減少工業區污水處理費繳納(15~30 NTD/m^3)	1. 作為冷卻塔補水，提高濃縮倍數，減少用水量與排放量 2. 作為純水處理水源，減少樹脂再生頻率，增加樹脂壽命，降低再生酸鹼藥液使用與排放廢水，可節省大量操作費用。 3. 節省工業用水費 (11.5~15 NTD/m^3) 4. 減少工業區污水處理費繳納(15~30 NTD/m^3) 5. 取代或降低純水系統之操作(20~30 NTD/m^3)
節省費用 (NTD/m^3)	**11.5 ~ 45**	**11.5 ~ 75**

四、結論

本研究利用套裝化沉浸式微濾膜 (SMF)與逆滲透(RO)廢水回收系統，針對中部科學工業園區台中園區污水處理廠放流水進行現場模型廠(Pilot Plant)測試，並進行廢水回收之效能與經濟性評估，已成功驗證其回收水水質較一般工業用水優良，可取代工業用水無虞。本研究進一步以每日處理16,000 噸廢水，回收 10,000 噸廢水之再生水實廠進行模擬評估，使用 SMF+單級(One Pass)方案，其回收水質導電度較自來水值為佳。可作為冷卻水塔補水，並可增加濃縮倍數，節省冷卻塔補充水量，單位成本(含操作與設置成本)約為 19.73 元/噸。另使用 SMF+二級(Two Pass) RO，其回收水可達一般純水等級，可作為製程用水及超純水之補充水源，取代或降低原純水系統運轉操作成本，單位成本(含操作與設置成本)約 23.26 元/噸。

五、致謝

本研究計畫承蒙科技部中部科學工業園區管理局全力支持與資源協助，方能順利進行且完成，特此致上感謝之意。

六、參考文獻

1. 倪辰華、林郁仲、王仕忠、林俊德，「以沉浸式微濾/逆滲透薄膜回收石化業二級生物放流水之效能與經濟性評估」，經濟部工業局，pp 3-1~16，綠色技術與工程實務研討會論文集，105 年 11 月。
2. 倪辰華、林俊德，「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」，工業污染防治， 125 期， 103 年 6 月。
3. 倪辰華、林俊德，「中部科學工業園區台中園區污水處理廠再生水處理模型廠測試報告」，106 年 8 月。
4. 朱敬平、「工業區廢水廠放流水再生為工業用水之可行性探討」，財團法人中興工程顧問社環境工程研究中心，100 年 9 月。
5. 朱敬平，林哲昌，吳勇興，鍾裕仁，業區綜合廢水處理廠放流水再生程序之選擇與成 本評估，中興工程，第九十六期，67-74，95 年。
6. 歐陽嶠暉，「水再生利用推動回顧與前瞻」，永續產業發展雙月刊，No.50，

99 年。
7. 歐陽嶠暉，「國內外再生水應用於產業之介紹」，永續產業發展季刊，No.57，100 年。
8. 莊順興，「廢水回收再利用評估」，推動新生水援成功案例分享研討會，中技社，100 年。
9. 莊順興、張添晉、游勝傑、呂嘉敏、顏佳慧、歐陽嶠暉，「高科技園區廢水二級處理放流水回收再利用之研究」，第十三屆下水道與水環境再生研討會論文集，臺北市，92 年。
10. 林承緯、莊瑞鑫，「工業廢水回收再利用效益評估：以石化工業中游廠為例」，桃園市大學校院產業環保技術服務團，環保簡訊 / 第 17 期，101 年 12 月。

議程4-資源利用與循環經濟類

4-1 工業廢棄物循環式流體化床(IWCFB)灰渣燒製再生骨材應用於控制性低強度回填材料(CLSM)之研發

林凱隆、周士鈞、羅康維、鄭大偉

4-2 污泥灰渣應用於控制性低強度材料之工程特性研究

鄭煜愷、陳昭旭、高長義

4-3 污泥取代黏土製磚燒結條件之研究

林毓舜、陳昭旭、翁振源

4-4 以「金屬濕式提鍊技術」回收表面處理業高濃度重金屬廢液之應用

廖學賢、葉　旭、陳盛宗、李偉智、毛致中

4-5 CNC 廢鐵粉屑回爐再生之高值化產品應用

林啟明、何長慶、江謝立恆、凌宇康、吳威德

4-6 煉鋼爐石應用於綠色建材資源化之研究

賈佳蓉、李震輝、柯明賢

4-7 廢氫氟酸回收再利用技術的可行性評估

吳和生

工業廢棄物循環式流體化床(IWCFB)灰渣燒製再生骨材應用於控制性低強度回填材料(CLSM)之研發

林凱隆*、周士鈞**、羅康維***、鄭大偉****

摘　要

循環式流體化床(Circulating Fluidized Bed, CFB)燃燒技術為近二十年發展的一種新型燃燒發電技術，具有燃料適應性廣、低污染及燃燒效率高等特點。流體化床鍋爐中可進行兩種或多種不同廢棄物和燃料共同混燒，而經由靜電集塵器設備所收集之微粒稱為 CFB 飛灰。CFB 飛灰具有顆粒細小、水化反應速率快與高石膏含量等特性。國外對於 CFB 飛灰研究與應用已具相當之成果、經驗與案例，如水泥製程、新型建材應用、道路基底層、工程填方材料及土壤改良應用等。此外，國外研發取代傳統回填材料之新型水泥材料，具有縮短工期及降低成本之優點，以減少施工對交通流暢之影響並提升填方工程之品質，稱之為控制性低強度材料(Controlled Low Strength Material, CLSM)。本研究係針對流體化床焚化爐所產生之飛灰等材料取代黏土原料，以燒結溫度為 850℃燒製成磚體後，予以破碎作為環保骨材，再以水固比為 0.25、水灰比為 2，拌製成 CLSM，含 10%CFB 飛灰之環保骨材其乾搗單位重為 966 kg/m^3；添加量 10%CFB 飛灰之環保骨材其吸水率為 18.18%；而添加 CFB 飛灰所燒製環保骨材空隙率亦合乎規範。添加 FA 環保骨材之 CLSM 其超音波速值在 1,480-2,510 m/s 之間，CLSM 超音波波速值則有較低的趨勢，本研究之實驗結果與文獻相當。所拌製之混凝土其 28 天之抗壓強度< 90 kgf/cm^2 及坍度為 15-20 cm，皆符合 ASTM D483 CLSM 之規範。故 CFB 飛灰燒製環保骨材將具有應用於 CLSM 之潛力，並符合零廢棄、零掩埋及資源化之目標。

【關鍵詞】循環式流體化床、資源化、CLSM、環保骨材

---

*國立宜蘭大學環境工程系　教授

**祐燊綠建材股份有限公司　技術長

***國立台北科技大學工程學院工程科技　博士生

****國立台北科技大學資源工程研究所　教授

一、前　言

循環型社會之建構成為當今重要之時代課題，尤其在廢棄物處理回收利用方面，亦以達到「零排放」及「資源化」為最終之目標。而循環式流體化床 (Circulating Fluidized Bed, CFB)燃燒技術為近二十年發展的一種新燃燒發電技術，具有燃料適應性廣、低污染及燃燒效率高等特點。流體化床焚化爐中可進行兩種或多種不同物質的混燒，因此可同時利用廢棄物和燃料作為進料[1]，常見的混燒燃料，包括農業廢棄物、建築廢棄物、污泥、廢輪胎等。而由流體化床焚化爐中之廢氣經靜電集塵設備所收集之微粒，稱為飛灰(Fly Ash)；焚化後落在爐床上之較大固體粒子，稱為底灰(Bottom Ash)。CFB 飛灰具有顆粒細小、水化反應速率快與高石膏含量等特性。過去國外主要針對於燃煤飛灰研究與應用已具相當之成果、經驗與案例，如水泥製程、新型建材應用、道路基底層、工程填方材料及土壤改良應用等。近年來 CFB 飛灰處置方式大多以掩埋處置為主，易造成環境之負荷，故需進一步研擬再利用對策。

另外，近年來管線地下化已發展成熟，道路管道開挖頻率提升，然而施工回填工程的不完善，即予以回填之路面龜裂與下陷等情況不斷，不僅有礙市容觀瞻甚至危害到人民行車安全之虞[2]。因此國外研發取代傳統回填材料之新型水泥材料，具有縮短工期及降低成本之優點，以減少施工對交通流暢之影響並提升填方工程之品質，稱之為控制性低強度材料(Controlled Low Strength Material, CLSM)。本研究係以某一資源回收廠之工業廢棄物循環式流體化床焚化爐，經靜電集塵器設備所收集之微粒，稱為飛灰(Fly Ash)。因飛灰主成分以 SiO_2、Al_2O_3 及 CaO 等為主，具取代部分部分黏土之潛力。有鑑於此，本研究係回收工業廢棄物循環式流體化床焚化爐飛灰燒結再資源化之技術，以因應實際之要求及解決龐大數量工業廢棄物循環式流體化床焚化爐飛灰之處理處置問題。本研究首先以工業廢棄物循環式流體化床焚化爐飛灰為主要取代原料，並變化取代量(10%、20%及 30%)與黏土進行混拌後燒製成磚後經破碎後做為環保骨材，並以固定水灰比為 2、水固比為 0.25 之設計配比，以環保骨材(0%, 10%, 20%, 40%)取代天然骨材，探討環保骨材與水泥混拌之 CLSM 其工作性、機械特性及微觀結構。

二、循環式流化床焚化爐飛灰來源與特性

因循環式流體化床焚化爐焚化爐混燒燃料種類不同如漿紙污泥、廢輪胎等，其產生的混燒飛灰(CFBFA)，會有不同的化學成分。循環式流體化床焚化爐一般會使用石灰石(Limestone)作為脫硫劑，且為了提高脫硫效率，故會不斷加入石灰石並同產生幾乎等量的固體反應物，此固體反應物中主要成分為石灰石($CaCO_3$)固硫後產生的 $CaSO_4$、未與 SO_2 反應完全的 $CaCO_3$ 與脫硫劑殘留下來的 CaO。

循環式流體化床焚化爐混和燃燒廢棄物與燃料後所產生的混燒飛灰，其與一般燃煤發電所產生的粉煤飛灰化學性質具有差異性，主要是由於 CFFA 具有較高的鈣含量(CaO)與三氧化硫含量(SO_3)，表 1 為粉煤飛灰(PCFA)與混燒飛灰的化學性質比較。

表 1　粉煤飛灰(PCFA)與混合飛灰(CFBFA)化學成分比較

燃燒技術 / 氧化物 (wt.%)	粉煤飛灰	CFB飛灰
SiO_2	52.00	26.40
Al_2O_3	24.50	13.90
TiO_2	-	0.69
Fe_2O_3	4.70	3.73
CaO	11.50	37.8
MgO	1.30	2.36
Na_2O	1.98	-
K_2O	-	0.54
SO_3	0.30	12.90
Others	3.72	0.26

資料來源：蔡孟原，2010；黃暉淇，2008

混燒飛灰(CFBFA)特性具有 CaO 含量高、SO_3 含量高及玻璃體少等特性，茲分述如下：

1.CaO 含量高

為使循環式流體化床焚化爐燃燒時的脫硫率達到規定的數值，一般設計鈣硫莫爾比大於 2:1，導致其副產物中含有大量未與二氧化硫(SO_2)反應的氧化鈣(CaO)。氧化鈣(CaO)的水化反應時間通常與水泥中的物質反應時間不一致，因此氧化鈣(CaO)含量過高時，可能會造成體積膨脹現象，致

使混凝土體積穩定性較差。

2.SO_3含量高

CFBFA 中的石膏($CaSO_4$)成分是由二氧化硫(SO_2)與氧化鈣(CaO)反應形成的。循環式流體化床混合燃燒技術中脫硫率為重要的評估指標，而脫硫率愈高勢必造成其混合燃燒後副產物中含有愈多的三氧化硫(SO_3)含量較高的情況下，將造成體積膨脹現象產生，導致混凝土體積穩定性較差。

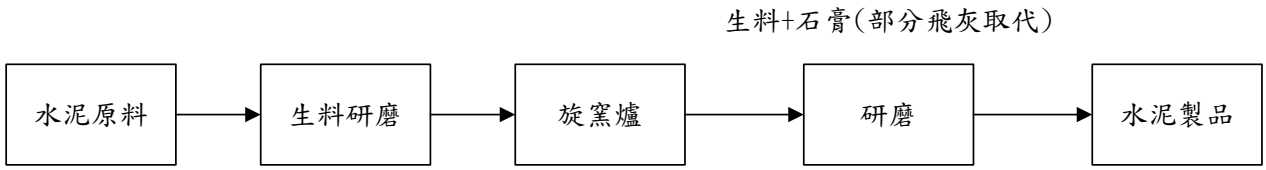
3.玻璃體少

由於循環式流體化床焚化爐燃燒溫度較低(約 800℃- 900℃)，導致其混合燃燒後的副產物中大部分的礦物成分未達到熔點沒有形成玻璃體，與粉煤飛灰相較下其活性較差。

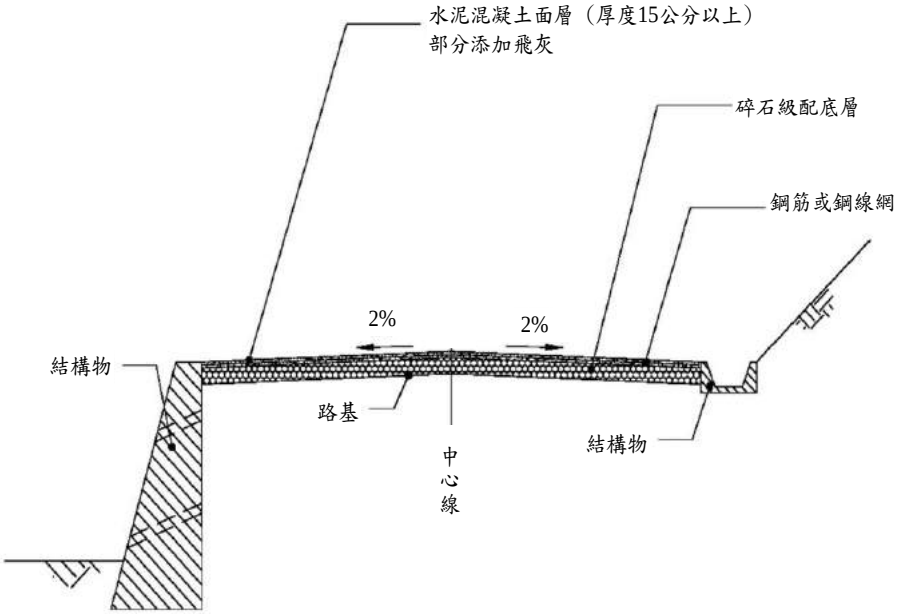
三、循環式流化床焚化爐飛灰資源化技術

CFB 飛灰具有低強度的特性，可利用於強度要求不高的相關土木營造材料或產品，例如園藝花圃、路基填土工程等；在美國已經將 CFB 飛灰用在農業上，用以改良酸性土壤或用於一般防火石膏板上；CFB 飛灰與軟質粘性土壤攪拌混合後，產生硝化反應、氫氧離子分解及化學反應等，此一連串的反應過程將因吸水、膨脹、放熱、離子交換、膠結及碳酸化等作用，改變土壤物理及化學性質，使土壤之構造改變、強度增加、含水量與壓縮性降低，而達到改良土壤之目的。目前開發 CFB 飛灰之多種用途，其各種用途如下[3-6]：

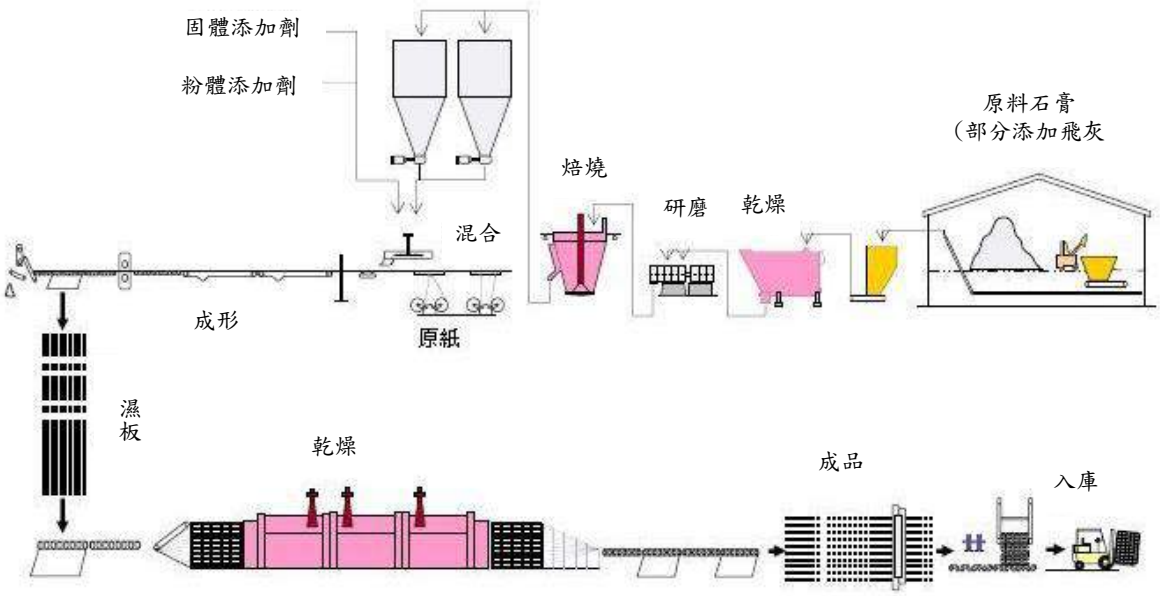
1.水泥製造時添加之緩凝劑－取代部分天然石膏。



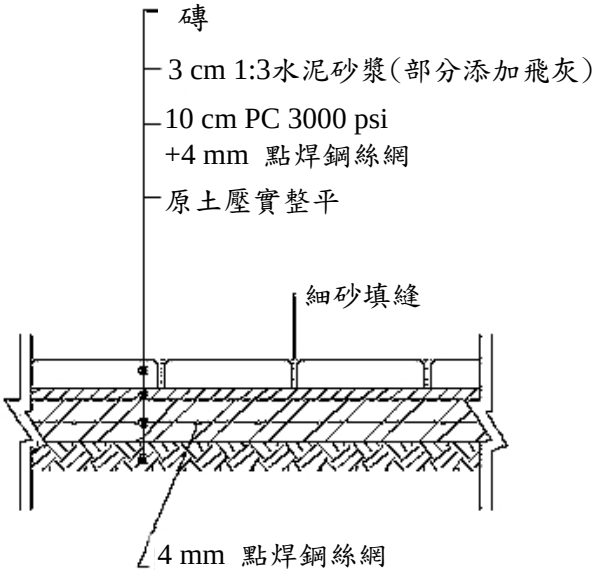
2.道路路基填土工程。



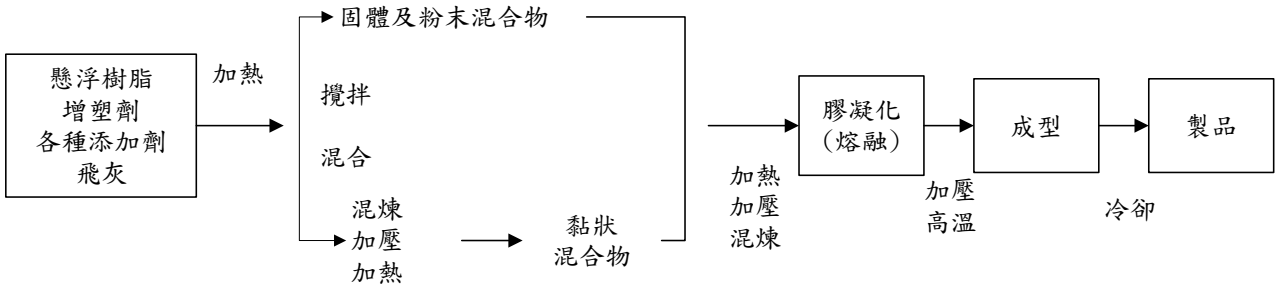
3.一般建築用石膏板。



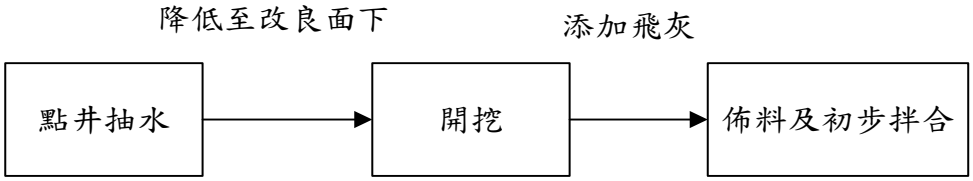
4.低強度水泥混凝土製品(如花圃、人行磚、一般用磚、植草磚)。



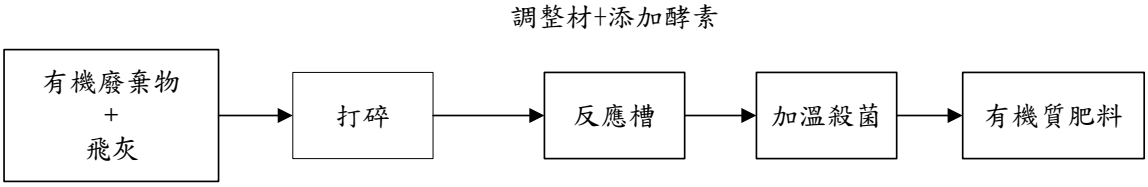
5.高分子材料之填充劑(PP、PVC、ABS...) 。



6.軟弱粘性土壤地盤固化土質改良。



7.土壤改良劑－改善酸化問題增加營養鹽。



四、實驗材料與方法

本研究探討工業廢棄物循環式流體化床焚化爐飛灰燒結再資源化之方法，以因應實際之要求及解決龐大數量工業廢棄物循環式流體化床焚化爐飛灰之處理處置問題。本研究利用工業廢棄物循環式流體化床焚化爐飛灰及黏土燒製再生粒料。再將再生粒料取代一般級配後之 CLSM 粗粒料，拌製成 CLSM 試體，以了解其工程性質，進而提供使用再生粒料之可行性及實廠化之參考。

1.實驗原理

燒結(Sintering)定義為粉末間加熱至坯體內接近主要成分的熔點時，粉末間會以各種擴散方式促使顆粒間互相緊密黏在一起，達到堅固化、緻密化、再結晶化及結合等過程，以產生高強度之燒結體，其原理如圖 1 所示。

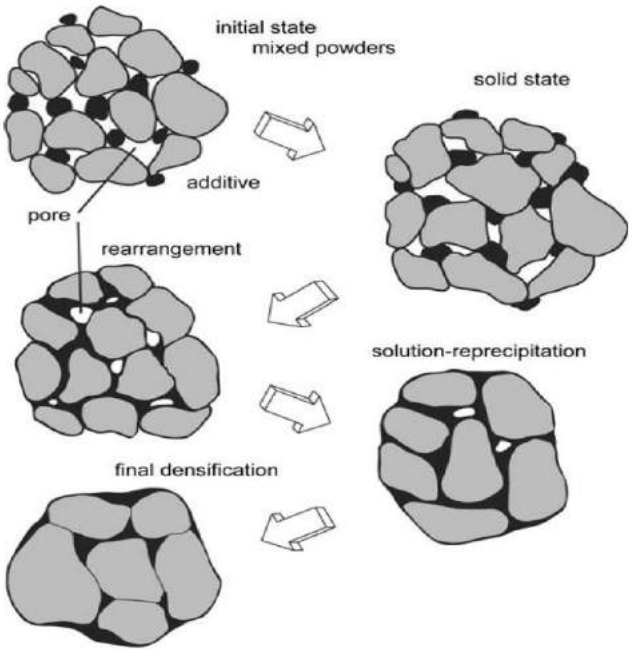


圖 1　燒結原理[7]

2.實驗材料

(1)CFB 飛灰：為循環式流體化床焚化爐混燒工業廢棄物所產生之飛灰，藉由靜電集塵器吸附所得之灰稱之為飛灰，簡稱 CFB 飛灰。

(2)粗骨材：本研究採用蘭陽溪出產之粗粒料，符合 CNS486 及 CNS487 之規範值，最大粒徑為 19 mm。

(3)細骨材：本研究採用蘭陽溪出產之細粒料，符合 ASTM C33 之規範值，細度模數為 2.82。

(4)水泥：本研究所採用之水泥為台灣水泥公司生產之普通卜特蘭第 I 型水泥符合 CNS 61 之水泥規格。

(5)拌合水：本研究以自來水為拌和水，符合 CNS 3090 混凝土用水相關規定。

3.實驗方法

實驗流程如下：

(1)CFB 飛灰及黏土採樣基本性質分析。

(2)將 CFB 飛灰與黏土經加壓成形後，經高溫爐進行燒結，如圖 2 所示。

(3)燒結體再以破碎等方式，控制粒徑大小，製備再生粒料(以#4 號篩之粒徑，用以取代 CLSM 之粗骨材)。

(4)再生粒料之基本特性(乾搗單位重、吸水率、空隙率、洛杉磯磨耗率及比重)。

(5)再生粒料取代一般 CLSM 之粗骨材，並選定水固比為 0.25、水灰比為 2，灌製 CLSM 試體，並分析其工程特性，如圖 3 所示。

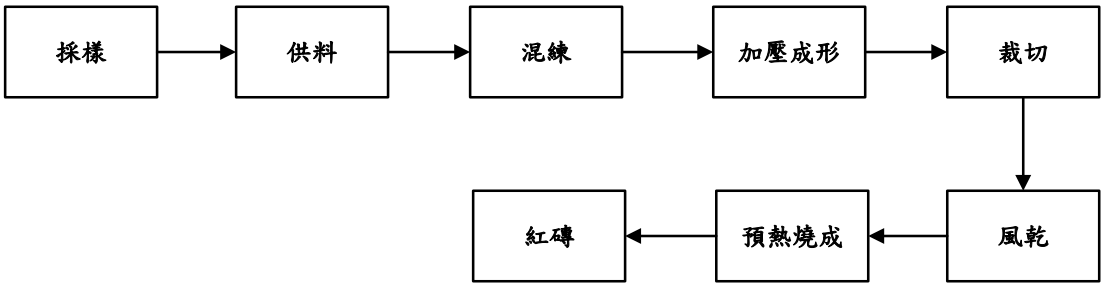


圖 2　紅磚生產流程

圖 3　環保骨材

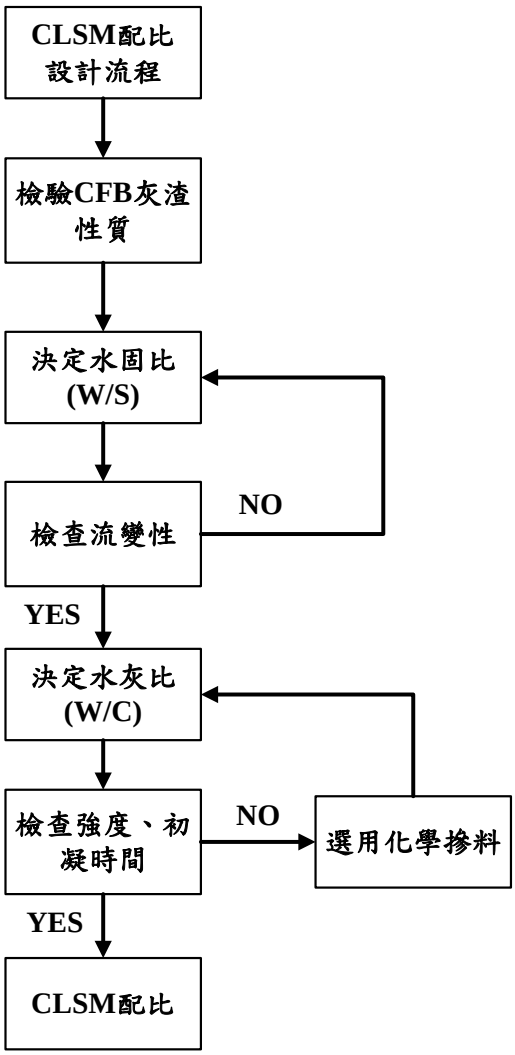


圖 4　CLSM 試拌配比設計法流程圖

本研究之試驗分為兩部份，首先將 CFB 飛灰(取代量為 10%、20%及 30%)與黏土均勻混合後，燒製成紅磚。再將紅磚破碎後，對其進行篩分析，採用#4 號篩之粒徑，用以取代標準 CLSM 之粗骨材，並設定水灰比為 0.45，

製作成 5cm(Ø)×10cm(H)之圓柱試體，於齡期為 7、14 及 28 天時，分別進行抗壓強度試驗，藉以與一般 CLSM 試體進行比較，以探討環保骨材應用於 CLSM 對力學性質之影響。

五、結果與討論

1.基本材料特性

表 2 為本實驗所採用之材料之基本性質。材料之基本性質分析包括 pH 值測定、三成分分析及燒失量。在 pH 值方面，黏土之 pH 值為 7.24，呈中性；CFB 飛灰之 pH 值為 7.73，呈中性。在三成分與燒失量等實驗得知，黏土之水份為 21.18%；CFB 飛灰之水份為 1.70%；而黏土之灰份為 73.12%，CFB 飛灰為 97.63%；在可燃份方面，CFB 飛灰之可燃份分別為 0.67%。

表 2　材料基本性質分析結果

Sample	pH (1:20)	Moisture (%)	Ash (%)	Combustibility (%)	LOI (%)
Clay	7.24	21.18	73.12	5.70	8.68
CFB Fly Ash	7.73	1.70	97.63	0.67	4.42

表 3 為材料之化學組成。表中顯示，黏土主要以 SiO_2 成分居多，為 66.6%，Al_2O_3 次之為 20.5%；CFB 飛灰主要以 SiO_2 及 Al_2O_3 為主，分別為 48.1%及 21.9%，後續具有取代部分黏土之潛力。

表 3　材料之化學組成

Sample	SiO_2 (%)	Al_2O_3 (%)	Fe_2O_3 (%)	CaO (%)	SO_3 (%)	Na_2O (%)	K_2O (%)
Clay	66.6	20.5	5.9	0.2	0.7	2.5	3.5
CFB Fly Ash	48.1	21.9	6.4	6.3	7.1	3.1	0.9

本實驗原料之重金屬檢測主要以 Pb、Cr、Cr^{6+}、Cu、Cd、As、Hg、Se 及 Ba 等九大重金屬為主。表 4 為原料之九大重金屬試驗結果。由表 4 得知，黏土中之重金屬以 Ba 含量為最多(1,000mg/kg)，Pb 為 145mg/kg 次之，而 Cu、Cr 等重金屬含量分別為 33 mg/kg 及 40 mg/kg。CFB 飛灰之

Ba 含量最高，其濃度為 1,536 mg/kg，Cu 為 5,534 mg/kg 次之，而 Pb、Cd 等重金屬含量分別為 482 mg/kg 及 10 mg/kg，根據行政院環保署「毒性化學物質管理」中所提到，環境土壤中的 Ba 含量背景值為 100-3,000 mg/kg [8]，因此本實驗所使用之原料並未高於環境背景值對環境無危害。此外，TCLP 之分析結果顯示，各種金屬均符合法規值，具再利用之潛力。

表 4　原料之重金屬總量及溶出試驗結果

樣品	As	Hg	Cr^{6+}	Cr^{**}	Cu	Cd^{***}	Pb	Ba	Se
Total Metal (mg/kg)									
Clay	N.D.	N.D.	N.D.	40.40	33.30	N.D.	145.20	1000.00	N.D.
CFB Fly Ash	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	553.57	9.52	482.14	1535.71	N.D.
TCLP (mg/L)									
Clay	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.14	N.D.	0.04	1.00	N.D.
CFB Fly Ash	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	1.31	0.12	0.02	1.30	N.D.
法規值	5.00	0.20	2.50	5.00	15.00	1.00	5.00	100.00	1.00

*Cu 之偵測極限<0.020 mg/Kg ;**Cr 之偵測極限<0.016 mg/Kg;***Cd 之偵測極限<0.014 mg/Kg ;***Ni 之偵測極限<0.014 mg/Kg

2.環保骨材之基本特性

表 5 為本研究所使用環保骨材的基本特性，本研究使用之河砂乾搗單位重為 1,548 kg/m^3，與文獻相符。另外，含 10%CFB 飛灰之環保骨材其乾搗單位重為 966 kg/m^3，隨著 CFB 飛灰添加量增至 30%時之環保骨材其乾搗單位重則為 967 kg/m^3，由此可知乾搗單位重隨 CFB 飛灰添加量呈現正相關；而使用 CFB 飛灰製成之環保骨材其吸水率，呈大幅上升的趨勢，添加量 10%CFB 飛灰之環保骨材其吸水率為 18.18%；而添加量 30%CFB 飛灰之環保骨材其吸水率為 20.12%。添加 CFB 飛灰所燒製環保骨材空隙率亦合乎規範。

表 5　環保骨材基本性質

	乾搗單位重 (Kg/m^3)	吸水率 (%)	空隙率 (%)	洛杉磯磨耗率(%)	比重 (SSD)
河砂	1548	1.44	42.53	22.5	2.65
純黏土骨材	967	17.09	50.97	42.86	1.98
FA10 環保骨材	966	18.18	51.03	68.75	1.98
FA20 環保骨材	967	19.10	50.73	78.57	1.97
FA30 環保骨材	967	20.12	49.70	76.56	1.93

3.CLSM 之坍度

CLSM 坍度試驗，可判定其工作度是否合乎工程品質的要求。因工作度不佳的情形下，CLSM 將難保有其原來的形態，將發生潰裂、分離等現象。當輕質 CLSM 拌合時，若 CLSM 坍度過低，會使施工不良而造成很多的弊端；當坍度過高時，則會使得施工出現泌水、析離、輕質粒料上浮等問題，故當坍度過高或過低時，都會使 CLSM 產生不良之影響。為避免輕質 CLSM 之硬固及耐久性質受其工作度影響。本研究使各 CLSM 配比避免泌水、析離及輕粒料上浮等異常現象，故各組 CLSM 之工作性如表 6 所示。由 FA10 環保骨材之坍度可觀察到隨著環保骨材取代量增加至 40%其坍度有逐漸增加之現象，是由其 FA10 環保骨材之孔隙率較大所致，當添加較多之 FA10 會導致其 CLSM 漿體有過多之孔隙使得水分得以流動而造成其坍度增加。

FA30 環保骨材之坍度試驗結果顯示，當取代量由 10%增加至 40%其坍度由 19 cm 下降至 15 cm,是由於 FA30 之環保骨材其吸水率較高所致，當 FA30 環保骨材取代量增加時受到其骨材吸水率較高的影響，進而使得其 CLSM 中的需水量受到 FA30 環保骨材吸收而導致其坍度值隨著取代量的增加而有下降的現象發生。

表 6　CFB 飛灰環保骨材 CLSM 之坍度試驗

Sample	環保骨材取代量(%)	坍度(cm)
OPC	0	2.0
FA10 環保骨材	10	12.0
	20	14.5
	40	16.0
FA20 環保骨材	10	13.0
	20	17.5
	40	12.0
FA30 環保骨材	10	19.0
	20	17.5
	40	15.0

4.CLSM 之超音波試驗

CLSM 係由粗、細骨材與膠結料所組合而成之非均質複合材料，因此內部存在著界面與缺陷。超音波速的檢測係屬於非破壞性檢測，評估 CLSM 內部之均勻性與緻密性超音波速有時被用來檢核結構中 CLSM 的品質，當超音波速大於 4 km/s 判定為品質良好，小於 3 km/s 則為品質不良[9]。

添加 FA 環保骨材之 CLSM 其超音波速值在 1,480-2,510 m/s 之間；各齡期之超音波波速值雖接近，但可看出超音波波速隨著養護齡期越長，其波速越快當齡期為 28 天後，則試驗值增加較為平緩。另根據翟慰宗(2011)研究指出，紅磚之超音波速約為 1,880 m/s，低於天然骨材，故再生粗骨材取代量越大時，CLSM 超音波波速值則有較低的趨勢[10]，故本研究之實驗結果與文獻相當。

表 7　環保骨材之 CLSM 之超音波速值

樣品	骨材取代量 (%)	超音波速值 (m/s)			速值百分比(%) (以全天然骨材 28 天之速值作基準)	
		7 天	14 天	28 天	14 天	28 天
河砂	100	2120	2150	2480	87.00	100.00
FA10 環保骨材	10	2100	2220	2510	89.51	101.21
	20	1820	2100	2320	84.68	93.55
	40	1810	2060	2270	83.06	91.53
FA20 環保骨材	10	1980	2060	2220	83.06	89.52
	20	1780	2010	2180	81.05	87.90
	40	1520	1640	1860	66.13	75.00
FA30 環保骨材	10	1480	1490	1650	60.08	66.53
	20	1580	1720	1750	69.35	70.56
	40	1770	1900	1940	76.61	78.23

5.CLSM 之強度指標

本研究嘗試以強度指標量化方式，加以評估環保骨材替代天然骨材之強度貢獻。而強度指標(R)是指由 R = f /q。其中 f 為 CLSM 抗壓強度和 q 是天然粗骨材的所佔之比例。Rn 代表天然粗骨材強度貢獻，因此具體定義與天然骨材混凝土的強度比如下式所示：

Rr = Rb-Rn(Rb 表示單位天然骨材強度的貢獻)

Rn = Rb (q = 100%)，Rr 是環保骨材對強度貢獻量

具體的強度比【K】，可以被定義為：K= Rb/Rn ；當 k 大於時，為強度降低，小於天然骨材。此外，骨材貢獻強度為 P，P=100(Rr/Rb)，表示環保骨材總量對於 CLSM 的強度貢獻和被定義為取代天然骨材時具一個積極貢獻度。

CFB 飛灰環保骨材之混凝土其抗壓強度在 14 及 28 天測試的具體定義指標的結果如表 8 所示。當添加 10%、20%及 40%之 FA10 環保骨材時對強度貢獻量 P28 為 24.40、24.77 及 32.87；以添加 10%、20%及 40%之 FA20 環保骨材其強度貢獻量 P28 為-4.89、21.31 及-28.60；以添加 10%、20%及

40%之 FA30 環保骨材其環保骨材對強度貢獻量 P56 為-116.63、-72.43 及 14.00。而從骨材強度貢獻 P28 來看，可發現以配比 FA10A40、FA20A20 及 FA30A40 之 P 值分別為 32.87、21.31 及 14.00，顯示其骨材強度貢獻較佳。

表 8　環保骨材之混凝土其比強度分析

Series	q	R_b	R_r	K	P_{14}	P_{28}
OPC	100	0.03	0.00	1.00	0.00	0.00
FA10A10	90	0.04	0.01	1.27	21.19	24.40
FA10A20	80	0.03	0.01	1.01	0.77	24.77
FA10A40	60	0.04	0.01	1.43	29.93	32.87
FA20A10	90	0.03	-0.01	0.93	-7.57	-4.89
FA20A20	80	0.04	0.01	1.25	20.28	21.31
FA20A40	60	0.03	-0.01	0.97	-3.00	-28.60
FA30A10	90	0.02	-0.01	0.59	-68.84	-116.63
FA30A20	80	0.02	-0.01	0.72	-38.22	-72.43
FA30A40	60	0.59	0.12	1.27	20.98	25.64

六、結　論

1. CFB 飛灰主要以 SiO_2 及 Al_2O_3 為主，後續具有取代部分黏土之潛力。
2. 含 10%CFB 飛灰之環保骨材其乾搗單位重為 966 kg/m^3；添加量 10%CFB 飛灰之環保骨材其吸水率為 18.18%；而添加 CFB 飛灰所燒製環保骨材空隙率亦合乎規範。
3. 添加 FA 環保骨材之 CLSM 其超音波速值在 1,480-2,510 m/s 之間，CLSM 超音波波速值則有較低的趨勢，本研究之實驗結果與文獻相當。
4. 當齡期為 28 天時，骨材強度之 P 值為 14-33，顯示其骨材強度貢獻較佳。
5. 本實驗所燒製之環保骨材所灌製 CLSM，皆相符 ASTM D483 CLSM 之規定(齡期 28 天之抗壓強度< 90 kgf/cm^2 及坍度為 15-20cm)，後續具有再利用作為環保骨材之潛力。

七、參考文獻

1. 蔡孟原，循環式流體化床鍋爐，科學發展，第 450 期，第 26-32 頁，2010。
2. 陳俊升，廢液晶玻璃應用於控制性低強度混凝土 (CLSM)配比及特性之研究，國立高雄應用科技大學土木工程與防災科技研究所碩士論文，2008。
3. Wu, Y.H., Huang, R., Tsai, J.C., Lin, W.T., Utilizing residues of CFB co-combustion of coal, sludge and TDF as an alkali activator in eco-binder. Construction and Building Materials, Vol. 80, pp.69-75, 2015.
4. 吳宗恆，利用上流式反應器移除都市垃圾焚化爐底渣氯鹽之研究，朝陽科技大學環境工程與管理系碩士論文，2011。
5. 朱學德，添加循環式流體化床混燒飛灰及粉煤飛灰對於水泥質複合材料性能影響之研究，國立臺灣海洋大學河海工程學系碩士論文，2015。
6. 朱尚文，循環流化床固硫灰特性及做水泥混和材應用的研究，中國建築材料科學研究總院碩士論文，2011。
7. Randall M., German P.S., Seong J.P., Review: liquid phase sintering, Journal of Materials Science, Vol. 44, pp.1-39, 2009.
8. 行政院環保署，焚化底渣再生粒料應用於控制性低強度回填材料(CLSM)使用手冊，2015。
9. Hobbs D.W., Alkali-Silica Reaction in Concrete, Thomas Telford, London, 1998.
10. 翟慰宗，磚類再生粒料混凝土高溫受熱後對抗壓強度與超音波速之影響，中原大學土木工程研究所碩士論文，2011。
11. Rao, A., Jha, K.N., Misra, S., Use of aggregates from recycled construction and demolition waste in concrete. Resources, Conservation and Recycling ,Vol.50, No.1, pp.71-81 , 2007.
12. 雷揚中，焚化爐底渣應用於道路工程之研究，國立中央大學土木工程研究所碩士論文，2004。
13. 林凱隆、林忠逸、湯奕華，工業區及印刷電路板業廢水污泥灰燒結製磚之研究，中華民國環境保護學會學刊，第二十八卷，第二期，第 35-144 頁，2005。
14. 黃兆龍，混凝土性質與行為，詹氏書局出版，台北市，1997。
15. 黃暉淇，循環式流化床燃燒飛灰運用於水泥質複合材料之機裡與特性研究，國立臺灣海洋大學材料工程研究所碩士論文，2008。
16. 經濟部標準檢驗局，中華民國國家標準-普通磚(CNS 382 R2002)，2007。

污泥灰渣應用於控制性低強度材料之工程特性研究

鄭煜愷*、陳昭旭**、高長義***

摘　要

本研究進行污泥灰渣應用於控制性低強度材料(Controlled-Low-Strength- Materials, CLSM)之工程特性研究。研究方向分為污泥灰渣基本特性分析以及污泥灰渣應用於 CLSM 之工程特性分析兩部分進行。本研究採用污泥灰渣試樣進行基本特性分析，主要針對物性與化性進行分析；CLSM 工程特性分析則主要針對其坍度與坍流度試驗(工作性)、初凝時間與終凝時間試驗(可續行施工性)以及抗壓強度試驗(再開挖性)，加上決定 CLSM 品質之乾縮性試驗，並結合污泥灰渣基本特性進行後續之討論。

本研究 CLSM 樣品以污泥灰渣替代細粒料部分 0%、5%、10%、15%以及 20%來進行工程特性試驗，抗壓齡期為 1 天、3 天、7 天和 28 天；乾縮性則分別以 1 天、3 天、7 天來測量圓柱高度及直徑。研究結果顯示，本研究取樣之污泥灰渣試樣化性部分發現污泥灰渣含有具卜作嵐成分以及易造成凝結延緩的鋅(Zn)成分；試樣皆含有較高吸水率，對於需高流動性之 CLSM 的水膠比會產生誤差，並影響其工程特性。工程特性方面，本研究之 CLSM 流動性方面以污泥灰渣替代量 15%為最佳；凝結時間試驗以替代量 15%為最佳；抗壓強度試驗則以替代量 20%為最佳；乾縮性則變化率極小不明顯，品質尚稱良好；綜合以上可得到本研究污泥灰渣在替代量 15%時，應用於 CLSM 為最佳可行性。

【關鍵詞】污泥灰渣、CLSM、工程特性

---

*國立成功大學資源工程學系　研究生

**國立成功大學資源工程學系　教授

***國立成功大學資源工程學系　碩士

一、前　言

在電子業、製造業、營建業等產業蓬勃發展的同時，也帶來了許多的廢棄物。由於污泥夾帶大量水分導致體積龐大且成分複雜，如何有效的處理污泥實為一棘手的課題。現行的污泥處理多以減少體積為主要目的，不同來源的污泥也須搭配不同的處理方式(固化處理、焚化處理、熱處理等)，目前在台灣多以焚化處理與熱處理兩種方式進行污泥處理，而處理後多以掩埋作為最終處置方式。但由於近年來掩埋場址多趨於飽和、符合掩埋條件之新廠址難尋及環保意識抬頭等緣故，也應思考處理後之污泥灰渣作為工程材料之可行性，藉由資源化再利用的方式來達到廢棄物減量之目的。

根據美國混凝土協會(ACI)[2]的定義，低強度控制性材料(CLSM)為一種具備自充填性(self-compacting)的新興回填用材料。CLSM 的材料組成類似於混凝土，一般而言由水泥、水、粗細粒料等組成，並可透過加入卜作嵐材料或其他化學添加劑改善其性質[3]。CLSM 可廣泛應用於管線埋設回填、路基整修及鋪面底層等工程，由於在工程使用上的要求多以工作性及在開挖性為主，相較於對強度要求較高的一般混凝土材料，CLSM 在材料選用及配比設計上的標準較為寬鬆。CLSM 所用之粒料可為混凝土用粒料、開挖土石方或是再生粒料，且前人研究已證實可利用廢棄物做為製備 CLSM 之材料。本研究利用污泥灰渣，以不同比例替代細粒料製備 CLSM。藉由基本特性分析、工程特性分析及成本分析，探討污泥灰渣取代天然砂作為細粒料應用於 CLSM 材料之可行性。

台灣在 CLSM 的應用上以管溝回填為最常見方式，經濟部工業局於 2006 年所修訂之「經濟部工業局所屬工業區服務中心辦理申請挖掘道路埋設管線作業要點」中表示，由於目前國內各種管線如自來水、下水道、電信、電力、石油、天然氣等皆是維繫民生之中重要網路，卻因開挖施工中的交通衝擊、環境污染、噪音製造等幾無任何控管，尤其管線設置、回填施工後，難以夯實的問題引致之沉陷與孔洞，更是造成路面無法保證其平整度的元兇，對於完工後管線維護亦造成沉重之負擔，形成嚴重資源浪費，因而推行 CLSM 之廣泛運用。在縣市方面，台北市最早進行 CLSM 於管溝回填工程的推廣，台北市政府於民國 89 年 7 月 12 日招集 54 個管線業管單位舉行座談，決議於民國 90 年管溝施工全面使用 CLSM 於回填工法上，並於當年 12 月修訂完成 CLSM 材料施工規範，因此目前台北市已全數使用 CLSM 於管線回填上(林志棟，2014)。高雄市在合併前之縣市皆已大部分使用 CLSM 於管線回填上，但因回復管線方式不同，於縣市合併後須修正新條例使其呈一致性，

除此之外，高雄市政府在 CLSM 應用上有明確表示 CLSM 不適用於瓦斯、天然氣管線，因有車輛輾壓管線破裂瓦斯外洩之顧慮(高雄市道路平整專案，2015)。除了台北市與高雄市以外，其餘各縣市並無明確制定 CLSM 之相關應用條例，惟部分管溝回填工程已陸續使用 CLSM 作為材料進行施工。

除了縣市政府對於 CLSM 使用的推廣外，個別產業公司也針對於 CLSM 作為管線回填材料進行計畫工程，包括台電直接利用焚化底渣之 CLSM 作為電力管溝回填材料，所得之工程特性為 3 天抗壓強度 38.7kg/cm^2、7 天抗壓強度 57.4kg/cm^2(行政院環保署計畫成果報告摘要，2011)；此外，台灣自來水公司在採用 CLSM 作為自來水管線回填材料時，要求 28 天抗壓強度為 20~50 kg/cm^2 之間，以達到最佳再開挖性，對於坍度等工作性以及水膠比等配比方面，則依據現地坡度的不同而有不同的配比(台灣自來水股份有限公司，2008)。

二、研究方法與材料

1.研究材料與流程

本研究以南部某污泥處理廠所取得產業來源之污泥灰渣，並進行基本特性分析，接著將污泥灰渣取代 CLSM 中之細粒料部分，並進行初步配比設計。以不同比例之污泥灰渣取代細粒料，並搭配水泥、飛灰與水淬爐石粉之使用製作成高流動性、高坍度的控制性低強度材料 CLSM 樣品，並於工作性、凝結時間以及再開挖性上進行試驗分析。

在研究分析上分為兩個主軸，首先以不同產業來源與不同替代比例之污泥灰渣進行基本特性的比較以及與工程特性的關聯性；第二，找出不符合 CLSM 工作性與再開挖性之配比，並於 CLSM 各組成材料上進行配比設計的分析，找出符合 CLSM 工作性、凝結時間與再開挖性的改善方式，以提出污泥灰渣取代 CLSM 材料的適用性。

本研究進行文獻蒐集及整理，擬定研究內容及方法後，參考現有規範標準，進行相關試驗，研究流程如圖 1 所示。

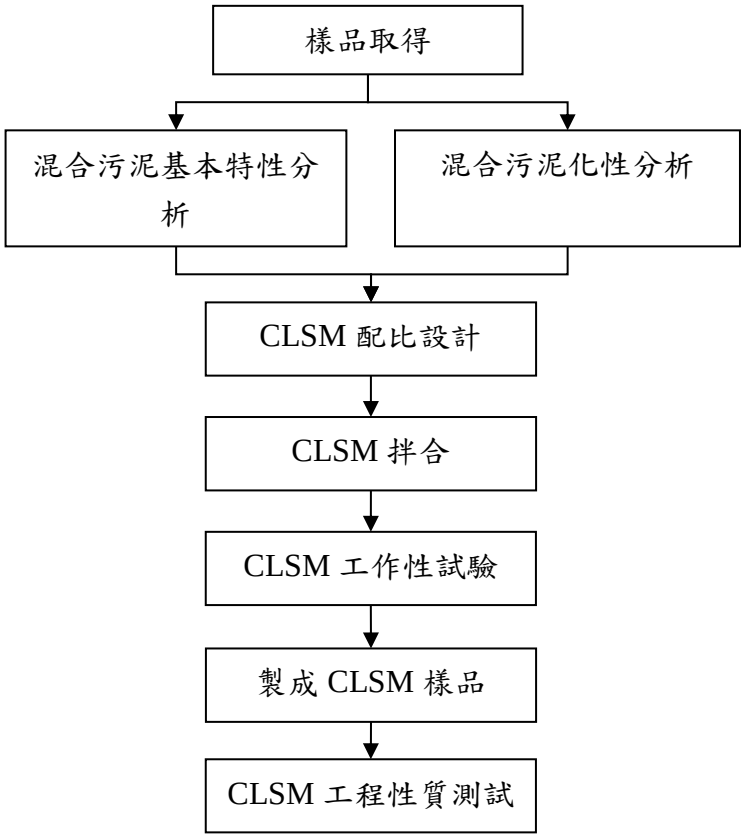


圖 1　研究流程

2.基本特性試驗語化性試驗

本研究目的在於研究一般污泥處理廠所產出之污泥灰渣資源化再利用可行性，由於一般處理廠所收取之污泥來源甚廣，故所產出之污泥灰渣多為混合性污泥灰渣。因此本研究自南部某污泥處理廠取得四組不同時間點產出之污泥灰渣，分別製備 CLSM 進行後續實驗。於 CLSM 製備前先進行基本物性及化性試驗，以了解做為細粒料之污泥灰渣及天然砂的基本特性，供後續配比設計參考。試驗內容包含：比重試驗、吸水率試驗、篩分析試驗、XRD 分析、XRF 分析。

3.配比設計和試體製備

本研究製備 CLSM 之材料為 I 型波特蘭水泥、焚化飛灰、天然骨材(粗粒料)、天然砂(細粒料)及污泥灰渣(細粒料)。由於 CLSM 中仍具有水泥等容易產生水化作用之材料，為防止水化過程中釋出氫氧化鈣($Ca(OH)_2$)，製備完成之試體應置於含有飽和氫氧化鈣溶液之水槽中，達到試驗所需齡期方可取出。

不同於一般高強度混凝土對強度的需求，CLSM 應具有高流動性及自充填性(self-compacting)，其製備時之水膠比(W/B)須高於一般混凝土，亦即所需之拌合水較多，因此極有可能產生泌水現象。本研究中以焚化飛灰及水淬爐石粉等卜作嵐材料取代市售化學添加劑，用於改善泌水性及流動性，並節省部分成本[3]。

由於 CLSM 對工作性的重視，本研究在設計上朝低強度高工作度的方向進行，並參考美國混凝土協會(ACI)[2]及潘昌林[6]等人之建議進行配比設計。配比設計流程如下圖 2：

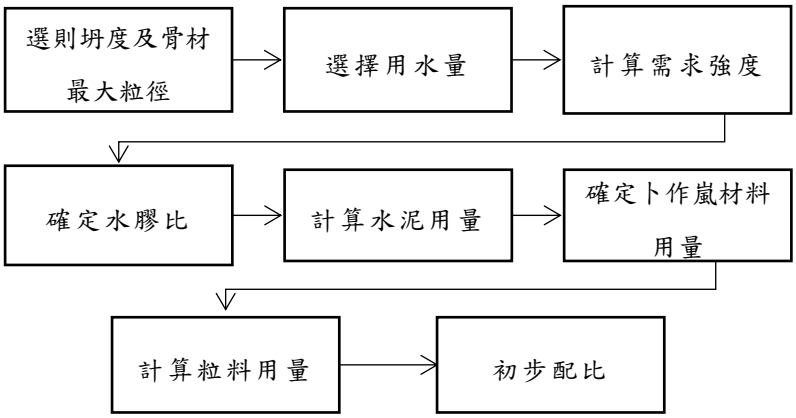


圖 2　配比設計流程圖

下表 1 為污泥灰渣替代天然砂作為細粒料製備 CLSM 之配比，CLSM-S00 為不使用污泥灰渣替代天然砂之對照組試體。以 CLSM-AXX 為例，A 表示所使用之污泥灰渣，XX 則是替代天然砂之比例(ex：A05 及表示以灰渣替代 5%的天然砂作為細粒料)。

表 1　本研究所使用製備 CLSM 之配比(以對照組及灰渣 A 為例)

編號	材料用量(kg/m^3)						
	水膠比(1.23)			粗粒料		細粒料	
	水	水泥	飛灰	水淬爐石粉	石　子	天然砂	污泥灰渣
CLSM-S00	263	85	53	75	200	744	0
CLSM-A05	263	85	53	75	200	707	37
CLSM-A10	263	85	53	75	200	670	74
CLSM-A15	263	85	53	75	200	633	111
CLSM-A20	263	85	53	75	200	596	148

4.工程特性試驗

CLSM 與一般混凝土之差異在於較為重視工作性、凝結時間與可續行開挖性。針對上述的工程特性需求，本研究將以坍度試驗、坍流度試驗與凝結試驗求得新拌 CLSM 之坍度、坍流度與初、終凝時間。在硬固 CLSM 的部分，則在試體達到試驗齡期後，自養護水槽中取出，並量測試體之乾縮量及進行抗壓強度試驗。各試驗內容簡述如下：

(1)坍度、坍流度(工作性)試驗

坍度與坍流度為評估 CLSM 工作性及自充填性之重要指標[5]，本研究參照 CNS 1176[7]、等規範進行試驗，如圖 3 所示。不同污泥灰渣替代比例製備之 CLSM 之坍度與坍流度損失率計算公式如式(1)：

0 分鐘坍(流)度-45 分鐘坍(流)度/0 分鐘坍(流)度 (1)

(2)凝結時間(可續行施工性)試驗

CLSM 的凝結試驗參照 CNS 786[8]之規範，並以費開式儀進行量測。凝結試驗共分兩部分，第一部分為初凝時間，代表的是 CLSM 不能再進行搗實或澆置的時間(許鍇麟，2002)，也代表已達可進行後續施工之強度[4]。終凝時間則代表 CLSM 之硬固時間。

(3)乾縮試驗

CLSM 為一種不具收縮性之材料[6]，但水化作用後水分喪失會令孔隙量減少而造成 CLSM 體積減少，因此在澆置試體實會產生乾縮現象。乾縮量視游離水的多寡而定(侯昌辰，2010)，就長期而言 CLSM 並不會產生自體收縮。本試驗使用精度 0.05mm 之游標尺量測試體灌製後 1、3、7 天的乾縮量。

(4)抗壓強度(再開挖性)試驗

依據 CNS 1232[9]的規範，製備長徑比為 1:2 之圓柱試體(高 10cm、直徑 5cm)。灌製好的 CLSM 試體靜置 24 小時後拆模，並置入含有飽和氫氧化鈉溶液之水槽中養護。待試體達所需的養護齡期後，再以 MTS 材料試驗機進行抗壓試驗，由抗壓試驗之結果評估本研究 CLSM 之可續行開挖性。

圖 3　CLSM 之坍度與坍流度測量

三、試驗結果與討論

1.基本特性試驗結果

天然砂及污泥灰渣基本物性試驗數據如表 2 所示。表 2 中可看出污泥灰渣之比重與天然砂的差異不大，吸水率則皆大於天然砂。若粒料在拌和初期過度吸水，會導致拌和水量減少以及顆粒表面潤滑作用降低，影響 CLSM 之流動性，增加施工之困難度。

表 2　CLSM 用細粒料基本物性試驗結果

材料	天然砂	灰渣
比重	2.58	2.70
含水率(%)	6.23	3.33
吸水率(%)	3.07	20.34
細度模數	2.94	3.33

細粒料基本化性部分為 XRF、XRD 分析。XRF 分析結果顯示，四組污泥灰渣之成份皆以鐵(Fe)、鈣(Ca)、矽(Ca)、鋁(Al)為主。XRD 分析結果則顯示，污泥灰渣含有氧化鐵(Fe_2O_3)、矽酸二鈣(Ca_2SiO_4)及矽酸鋁鈣($CaAl_2Si_2O_8$)等成份，皆可能對 CLSM 之工程性質造成影響。

2.工程特性試驗結果

(1)坍度、坍流度(工作性)試驗結果

CLSM 之工作性以流動性為指標，本研究在 CLSM 拌合完成當下及 45 分鐘後分別進行坍度、坍流度試驗。在新拌 CLSM 方面，使用天然砂和污泥灰渣無明顯差異，但在經過 45 分鐘後，使用污泥灰渣拌和之 CLSM 坍度明顯下降。由於污泥灰渣之吸水率遠大於天然砂，會使 CLSM 拌和過程中的實際用水量下降，且在 45 分鐘的這段靜置期中，污泥灰

渣仍會持續吸水，進而影響 CLSM 之工作性。

坍度、坍流度試驗結果顯示，當污泥灰渣替代比例升高時，坍度與坍流度會下降，且坍損率提高。參照交通部公路工程施工規範[10]、台北市政府工務局施工規範等規範[11]，僅污泥灰渣 A15%、20%替代量拌和之 CLSM 未達 40cm 之坍留度規範，但考量若提升污泥灰渣替代比例會在 45 分鐘後引起較高之坍損並降低工作性，故在流動性部份建議之污泥灰渣最佳替代比例為 5%~10%。坍度、坍流試驗及坍損率如下圖 4 所示。

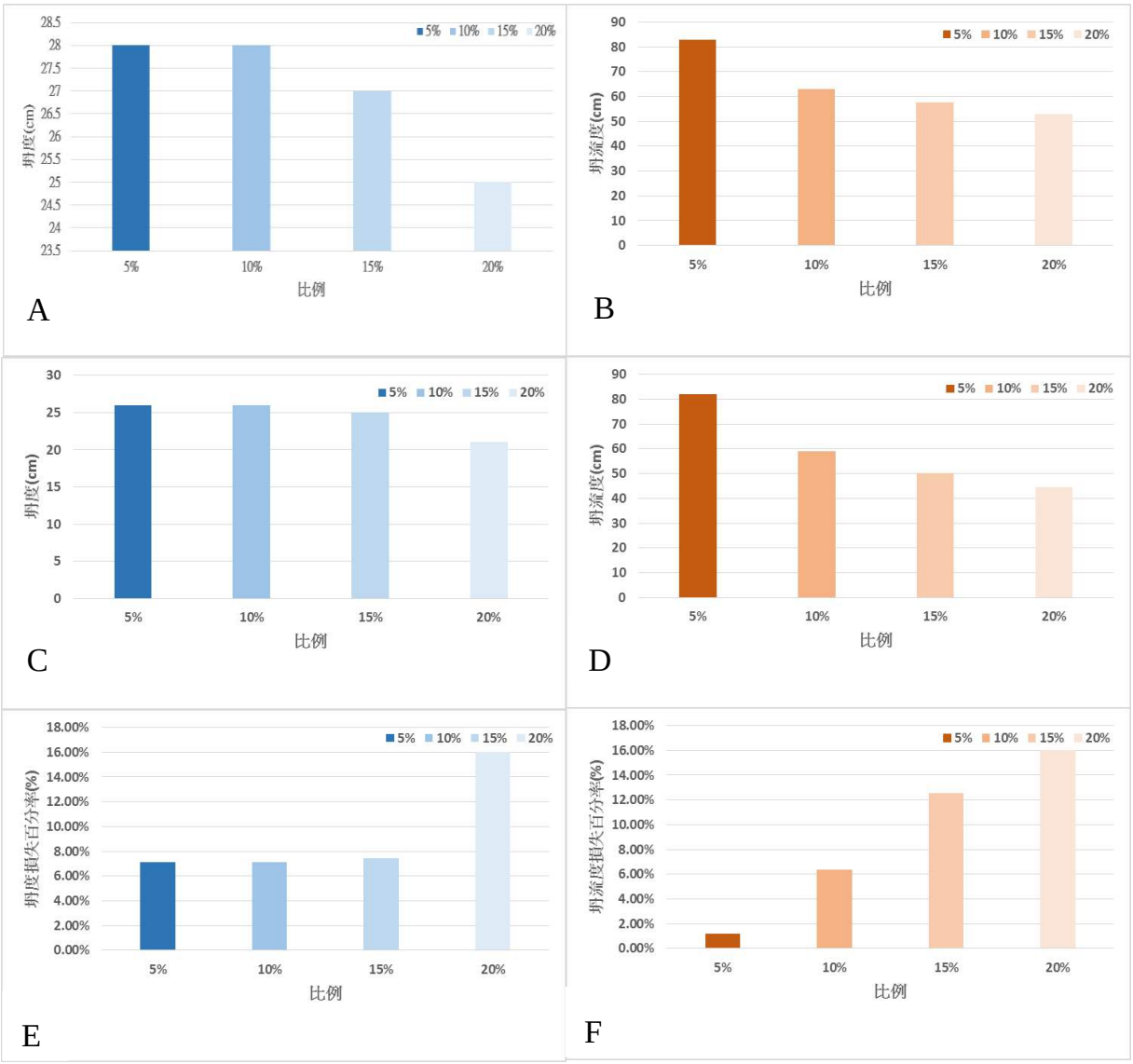


圖 4　CLSM 坍度、坍流度試驗結果(A 為坍度 0 分鐘、B 為坍流度 0 分鐘、C 為坍度 45 分鐘、D 為坍流度 45 分鐘、E 為坍度損失率、F 為坍流度損失率)

(2)凝結時間(可續行施工性)試驗結果

拌和 CLSM 時，為達到所要求的工作度，通常用水量較高，也使得凝結時間拉長。本研究以高吸水率之污泥灰渣取代天然砂做為拌和 CLSM之細粒料，期能縮短凝結時間。不同污泥灰渣替代比例製備 CLSM 所需之初凝、終凝時間如下圖 5。

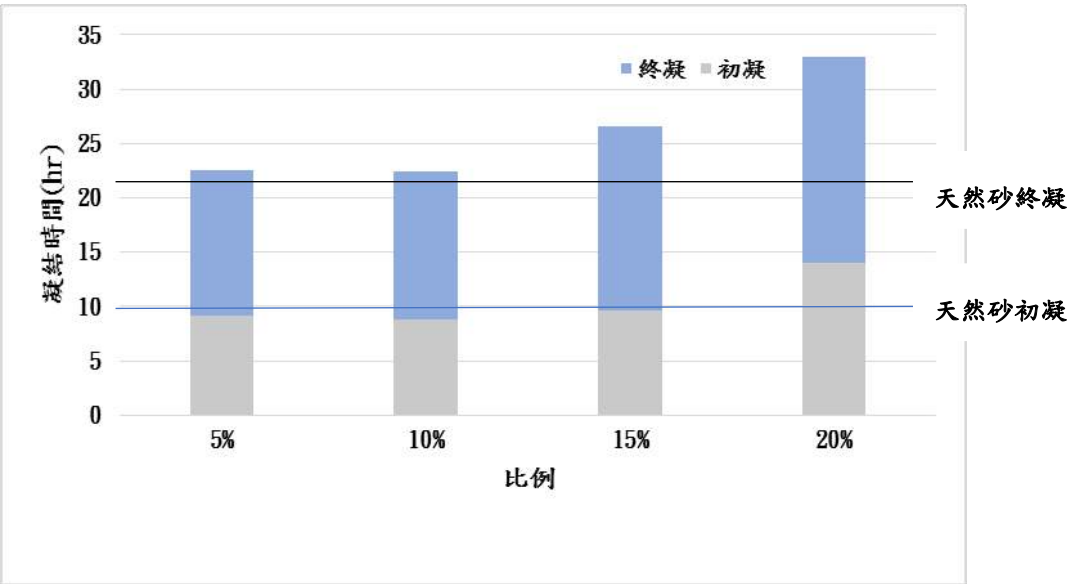


圖 5　污泥灰渣不同替代比例製備 CLSM 之初凝、終凝時間

對照國內各施工規範[10,11,12-14]及本研究之初凝、終凝時間，結果顯示，當污泥灰渣替代天然砂之比例達 20%時，所製備之 CLSM 無法在規範之 24 小時內達到終凝。致使本研究之 CLSM 凝結時間普遍較長之原因，除原料中之卜作嵐材料(飛灰、水淬爐石粉)有緩凝之效果外，前人研究亦指出過量的鋅(Zn)元素(0.15%以上，本研究所使用之污泥灰渣最低含鋅量為 1.17%)也可能讓 CLSM 凝結過慢甚至無法凝結[12]。

可續行施工性方面，本研究各試樣之 5%、10%及 15%替代比例製備之皆達 10 小時內初凝之標準，5%及 10%替代比例則可達成 24 時內完成終凝之標準。綜合上述結果，在凝結時間方面，建議使用之污泥灰渣替代比例為 5%~10%。

(3)乾縮試驗結果

本研究製備之 CLSM 硬固試體為高 10cm、直徑 5cm 之圓柱試體，而設計上容許之乾縮量為 2.1~1.0cm/m 以下。以試體直徑方向之收縮為例，由圖 6 可看出，在選定的 1、3、7 天齡期時，乾縮之現象並不明顯，整體而言，本研究之乾縮值仍在容許範圍內。

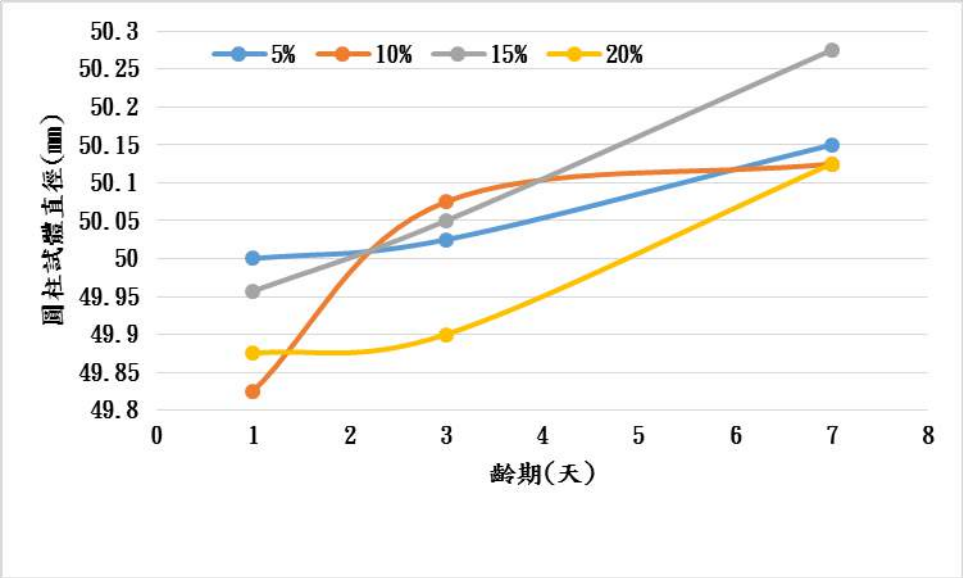


圖 6　污泥灰渣不同替代比例製備 CLSM 直徑方向乾縮量

(4)抗壓強度(再開挖性)試驗結果

抗壓強度試驗結果顯示，提高污泥灰渣的替代比例，抗壓強度會隨之下降。試樣的細度模數為 3.33，由此推論試樣較大之細度模數可能是導致其抗壓強度較高的原因之一。而污泥灰渣試樣所含之水化矽鋁酸鈣($CaAl_2Si_2O_8$)以及矽酸二鈣(Ca_2SiO_4)亦可能是導致試樣之抗壓強度較高的另一種原因，其中，彭麗圓等人(2012)證實水化矽鋁酸鈣($CaAl_2Si_2O_8$)膠結物有利於提高固體之抗壓強度(彭麗圓等人，2012)；而矽酸二鈣(Ca_2SiO_4)則與水泥中所含之矽酸二鈣(Ca_2SiO_4)成分相同，與水反應會產生水化作用，形成鈣矽酸鹽水合物(C-S-H)(胡秀蘭等人，2004)，同樣為致使試樣抗壓強度較高的原因之一。

本研究所有配比之整體抗壓強度偏高，會增加再開挖之難度(經濟部水利署施工規範[12]要求再開挖用之 CLSM 28 天抗壓強度為 20~50 kgf/cm^2)。各施工規範對 CLSM 之 28 天抗壓強度規範並不一致，在此取行政院公共工程委員會施工綱要[10]之 90 kgf/cm^2 及美國混凝土協會[2]要求之 84 kgf/cm^2 為準，各試體 28 天齡期抗壓試驗結果顯示，污泥灰渣替代細粒料之最適配比為 10%~20%。本研究 CLSM 之各齡期抗壓強度如下圖 7。

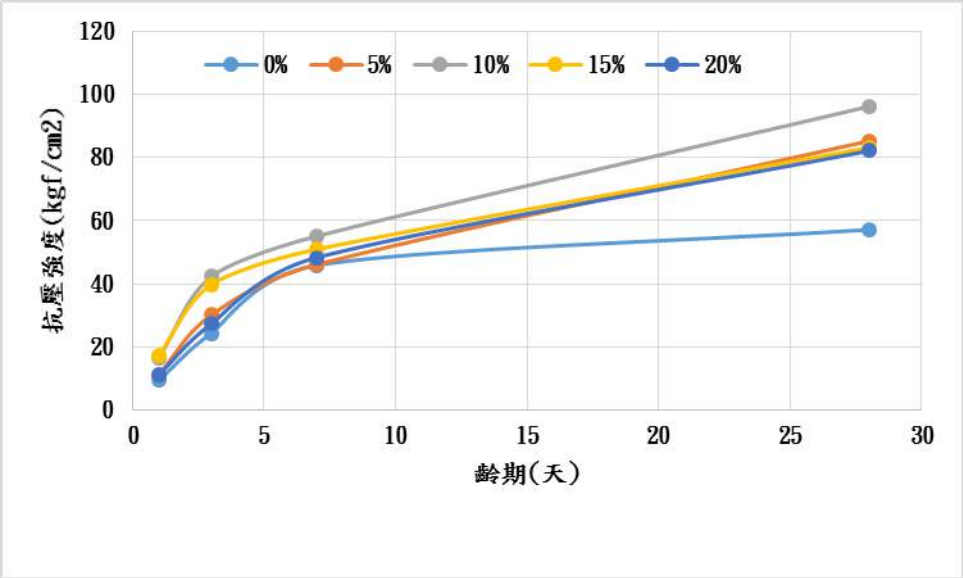


圖 7　不同替代比製備 CLSM 之各齡期強度

四、結論與建議

本研究為使用污泥灰渣再利用於 CLSM 之可行性研究，研究中僅討論隨機取得之污泥灰渣，以不同比例取代天然砂作為細粒料製備 CLSM，並透過工作性、凝結時間及抗壓強度評估其可行性及最適配比，結果簡述如下。

1.結論

(1)工作性：由於污泥灰渣之高吸水率，做為細粒料加入 CLSM 中會有降低流動性之可能，且替代量越多，流動性越差。本研究之各配比中皆符合要求。然而考量到污泥灰渣替代比例達 20%時之高坍損率，在工作性方面建議之最是替代量為 5%、10%、15%、20%。

(2)凝結時間：本研究所量測之凝結時間分別為初凝時間及終凝時間，以初凝時間評估本研究製備之 CLSM 在工程上的可續行施工性，終凝時間則用於和國內各施工規範比較，並做為 CLSM 可行性評估參考。初凝時間以 5%、10%、15%替代量時具有最佳可續行施工性；終凝時間則是在 5%、10%、15%替代量時符合 24 小時達到終凝之規範。

(3)抗壓強度：本研究各污泥灰渣試樣再利用於 CLSM 之抗壓強度普遍偏高，但隨著污泥灰渣替代比例提高，抗壓強度有逐漸下降之趨勢。本研究之淤抗壓強度之污泥灰渣最適替代量為 15%、20%。

2.建議

本研究所用之污泥灰渣本身具有較高之吸水性且質地鬆散，會對拌合過程中之實際用水量、CLSM 之工作性造成相當之影響。污泥灰渣之高溪水率會使 CLSM 之實際水膠比產生誤差，而使較低替代比例時試體抗壓強度提高，但隨替代比例逐漸上升，抗壓強度隨之下降，此時污泥灰渣直地鬆散之特性較為明顯。若欲提升污泥灰渣資源化再利用於相關材料之價值，上述兩種特性間的關係值得作為後續探討方向。

本研究發現污泥灰渣中可能含有卜作嵐材料之成份，對工作性、凝結時間及晚期抗壓強度等均有造成影響之可能，建議後續的研究方向可單獨針對污泥灰渣內所含有之卜作嵐成份進行研究，並探討其對污泥灰渣資源化再利用之影響。

五、參考文獻

1. 行政院環境保護署，「污泥處理現況檢討及因應策略」，行政院環境保護署，台北，103 年。
2. ACI，Controlled Low Strength Materials (CLAM) ，229R-94， pp.229 R-1-229， R-13.
3. 台灣營建研究院，「控制性低強度材料餘土木工程應用之研究成果」報告書，內政部營建署委託計劃，91 年。
4. 王聖堯，焚化底渣師篩污泥再利用作為控制性低強度材料之研究，國立成功大學資源工程學系碩士論文，99 年。
5. 廖政彥，底灰、淤泥、剩餘土方應用於 CLSM 之可行性研究，台灣大學土木工程研究所碩士論文，96 年。
6. 潘昌林(2002)，高性能回填材料 CLSM 產制，台灣營建研究院，新北市，91 年。
7. 經濟部標準檢驗局，CNS1176 混凝土坍度試驗法，中華民國國家標準。
8. 經濟部標準檢驗局，CNS786 水硬性水泥凝結時間檢驗法，中華民國國家標準。
9. 經濟部標準檢驗局，CNS1232 混凝土圓柱試體抗壓強度檢驗法，中華民國國家標準。
10. 行政院公共工程委員會，行政院公共工程委員會施工綱要規範，第 03377 章：控制性低強度回填材料，台北，102 年。

11. 台北市政府，台北市政府工務局施工規範第 03377 章：控制性低強度回填材料，台北，99 年。
12. Cheeseman， C. R.， Asavapisit， S. and Knight， J. Effect of Uniaxially Pressing Ordinary Portland Cement Paste Containing Metal Hydroxides on Porosity， Density， and Leaching， Cement and Concrete Research， 27，1639-1653， 1998.
13. 經濟部水利署，經濟部水利署施工規範第 03377 章：控制性低強度回填材料，102。
14. 交通部台灣區國道新建工程局，施工技術規範，97 年。
15. 高雄市政府，高雄市政府工務局施工規範第 03377 章：控制性低強度回填材料，高雄，97 年。

污泥取代黏土製磚燒結條件之研究

林毓舜*、陳昭旭**、翁振源***

摘　要

隨著台灣經濟蓬勃發展，事業廢棄物產量漸增，如何兼顧環保與開發是當前重要課題；污泥為常見的事業廢棄物，台灣每年都產出大量污泥，然大部分仍採掩埋方式處理，對環境造成危害，本研究利用污泥作為原料製備磚塊，期許能達到污泥減量再利用之結果。

研究分為兩個階段，首先進行以篩分析、比重與吸水率等試驗分析污泥之物理特性、以及 XRD 與 XRF 等分析污泥之化學特性，第二階段討論污泥製磚需要的燒結條件及其特性。以不同燒結溫度 900℃、1000℃、1050℃、1100℃，與不同燒結時間 1 小時、3 小時分析對磚工程特性之影響，製成磚之成品則根據我國 CNS 規範測試其抗壓強度與吸水率。

實驗結果顯示，以 10%污泥量取代黏土製備磚之成品符合 CNS 規範，燒結溫度過高會造成磚體膨脹變形，由於污泥成分不穩定，燒結時間不宜過久。未來若要提高污泥取代量，可以嘗試加入其他助熔劑增強燒結之效果。

【關鍵詞】污泥、燒結磚、工程特性、資源化

---

*國立成功大學　資源工程學系　研究生

**國立成功大學　資源工程學系　教授

***國立成功大學　資源工程學系　碩士

一、前　言

台灣經濟發展之同時，忽略對自然環境之重視，導致廢棄物之增加，影響生活之品質，污泥為事業廢棄物之一，根據行政院環境保護署於 2015 年統計資料，污泥之產出總量占事業廢棄物之 14.58%，世界各國的污泥總量亦有日益增加的趨勢，因此污泥處理成為一個重要的議題。污泥的處理方式可分為掩埋處理、熱處理、物理處理、生物處理與焚化處理共五種。掩埋處理為最簡易的處理方法。然而大部分的污泥含有重金屬，以掩埋處理的方式導致土壤與地下水之污染，對環境產生衝擊。臺灣面積狹小，能提供掩埋空間有限，故資源化處理污泥為最良好的方式。

污泥經熱處理後，除去其含有之水分，可以減少運送成本。然而本研究認為僅以熱處理，並非為最完善處理方式，無益於環境之改善，因此本研究以污泥為材料，針對污泥特性進行分析，依照不同燒結條件，製作數塊燒結磚，並經由實驗得知各燒結磚工程特性後，依據燒結磚品質之相關規範，評估各燒結磚之品質，探討其實用性。

二、研究材料與方法

為探討污泥資源化製磚之可行性，使用污泥與黏土，製成燒結磚做為實驗試體，經由實驗得出各燒結磚之工程特性後，依據燒結磚品質規範，評估各燒結磚之品質。實驗流程分為兩個階段：污泥之物理與化學分析、燒結條件與燒結磚工程特性的關係。污泥之物理分析之實驗項目分別為篩分析、比重、與吸水率實驗，化學分析之實驗項目為 XRD 與 XRF 實驗。於燒結條件與燒結磚之工程特性之關聯實驗中，首先以升溫與降溫時間皆為 28 小時，且燒結時間為 3 小時之燒結條件下，分別探討以燒結溫度個別為 900℃、1,000℃、1,050℃、1,100℃之製成的燒結磚工程特性，並決定適當之燒結溫度。接續以適當之燒結溫度、固定的升溫與降溫時間之燒結條件下，探討縮短燒結時間對燒結磚工程特性之影響。實驗用污泥為南部某污泥處理廠之廢棄物，皆經過溫度約 800℃至 900℃之熱處理，所以幾乎無任何有機物與水分存在黏土來源則為南部某磚窯廠。於實驗前，確保水分已完全去除，將污泥與黏土放置於烘箱中，以 105℃烘乾，直至重量達恆重。使用拌和機均勻拌和污泥與黏土後，緩緩倒入水並持續拌和之，至污泥、黏土與水皆被均勻拌和。將已拌合之土壤放入模具中，每放入一層土，使用夯實錘搗實土壤，排出土中空氣。每塊磚塊時放入之土壤層數為 5 層，每層之搗實次數為 40

次。接續以 140 kgf/cm^{2}之壓力壓密土壤，使磚塊成型。完成之磚坯於陰涼處，並使用電風扇風乾磚坯，風乾時間約為 2 天。接著置於烘箱中，以 70 ℃烘乾 2 天。磚坯之含水量約至 1%至 2%時即可放入窯爐進行燒結作業。若於磚坯之含水量高之情況下進行燒結，容易導致磚塊破損。完成乾燥作業後，將磚坯放入高溫爐中，以本研究設定之燒結條件下進行燒結。

三、污泥基本特性分析

1.篩分析

於粒徑分布曲線得知，本研究取得之污泥通過 4 號篩(粒徑 4.75mm)之百分比為 97.40 %，幾乎完全為細粒料。而污泥中砂的百分比為 92.48 %，而粉土與黏土百分比為 4.92 %，可知本研究所用污泥含有大量的砂。本研究以污泥粒徑分布曲線與黃安斌[5]所譯之《大地工程原理》內容進行對照，污泥近似於優良級配。圖 1 為污泥之粒徑分布曲線。

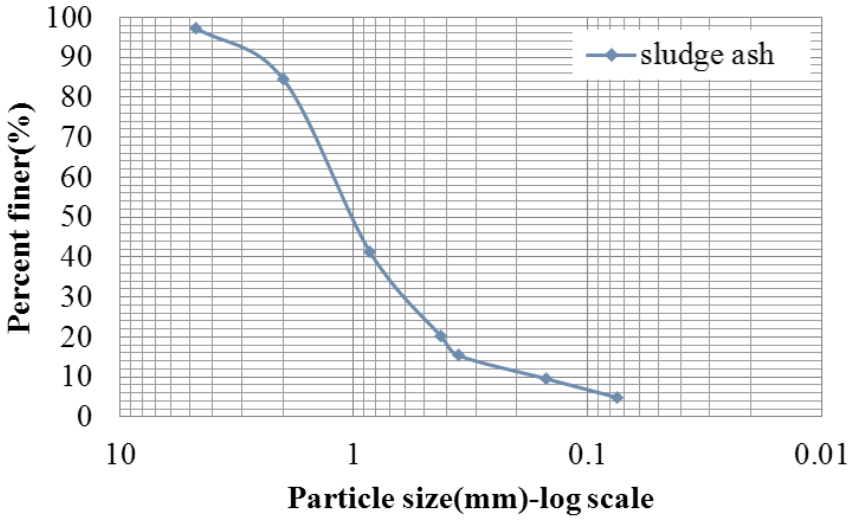


圖 1　污泥粒徑分布曲線

2.比重與吸水率

吸水率與孔隙有關，孔隙越多，吸水率越大，於熱處理中被去除或分解的水分和有機物則影響比重，表 1 為污泥之比重與吸水率。

表 1　污泥之比重與吸水率之結果

	比重	吸水率(%)
污泥	2.27	24.30

3.XRF 與 XRD 分析

從分析結果得知，其中 Fe 為含量最高之元素，其次為 Ca，Si 之含量略高於 Al，重金屬(Cr、Ni、Co、Cu、Zn)總含量約於 5 %以下。於 XRD 之分析結果中，污泥含有氧化鐵(Fe_3O_4與 Fe_2O_3)之成分。於污泥中高含量的 Fe，其原因可能源於污水處理過程中加入 Fe 含量高之絮凝劑。表 2 為 XRF 分析結果，圖 2 為污泥之 XRD 分析結果。

表 2　污泥 XRF 之分析結果(單位：%)

污泥	Fe	Ca	Si	Al	P	S	Zn	Cr
	32.30	12.97	6.67	6.63	2.07	1.60	2.10	0.90
	Ni	Mn	Co	Cu	Ti			
	0.50	0.20	0.10	0.10	0.10			

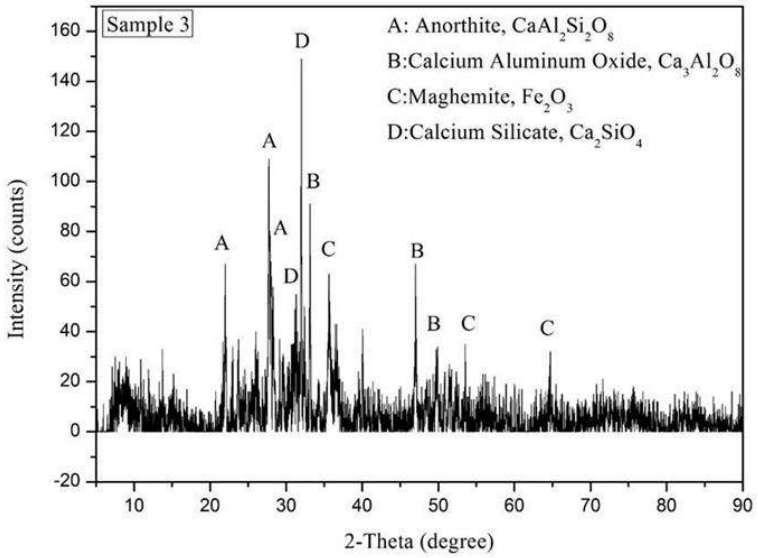


圖 2　污泥之 XRD 分析結果

四、燒結溫度對磚工程特性之影響

1.抗壓強度

圖 3 為燒結溫度與抗壓強度關係圖，於 900℃、1,000℃、1,050℃、1,100℃ 之燒結溫度中，純黏土燒結磚抗壓強度為 24.98 MPa、27.59 MPa、28.48 MPa、32.88 MPa。污泥之燒結磚抗壓強度於 900℃、1,000℃、1,050℃之燒結溫度為 24.78 MPa、32.43 MPa 22.146 MPa，於 1,100℃時發生燒結磚外型之膨脹。膨脹變形之燒結磚不進行抗壓強度試驗。

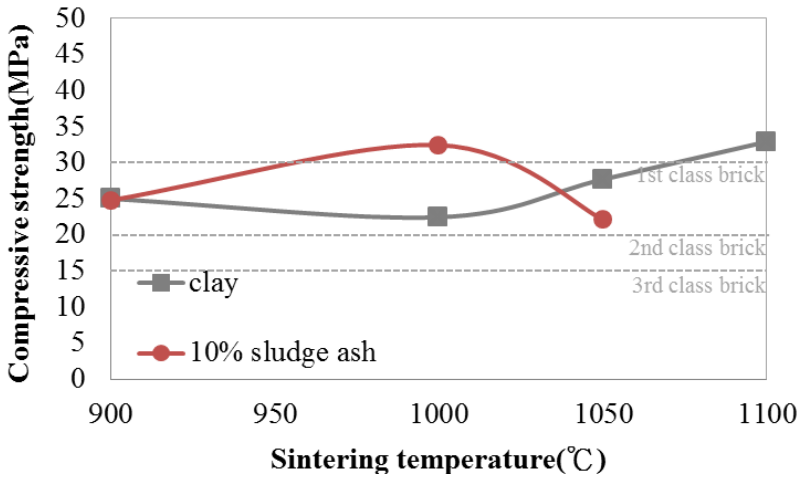


圖 3　燒結溫度與抗壓強度關係圖

本研究之實驗結果與 Lin 與 Weng[15]、Eliche-Quesada[11]、Demira[10]之結果相比，皆具有燒結溫度上升，燒結磚抗壓強度提高之趨勢。根據 Karaman[13]之研究記載，燒結磚於燒結溫度達至 1,000℃以上時，其內部之黏土礦物發生相態轉換，即從固態轉變為液態時，隔絕燒結磚內部之開放式孔隙，並產生玻璃化之現象，且燒結溫度之上升亦提高燒結磚之密度，優化其內部結構，使燒結磚承受更高之強度。

2.吸水率

圖 4 為燒結溫度與吸水率關係圖，於燒結溫度為 900℃之實驗結果中，純黏土燒結磚與污泥燒結磚之吸水率分別為 17.94 % 與 15.67 %，僅有純黏土燒結磚尚符合 3 等磚之標準，當燒結溫度提高至 1,000℃時，純黏土燒結磚與污泥燒結磚之吸水率個別變為 8.03 % 與 5.10 %，已達 CNS 規範標準。

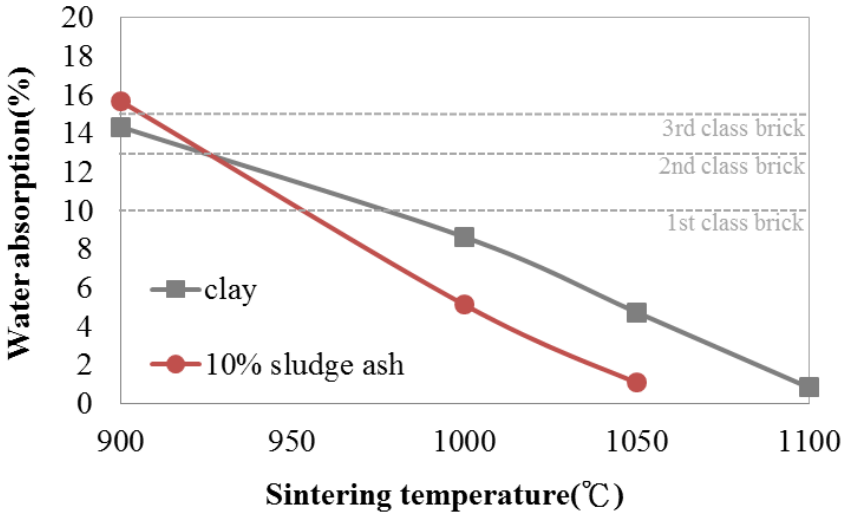


圖 4　燒結溫度與吸水率關係圖

同抗壓強度，燒結磚之吸水率與燒結磚中之孔隙有關，當燒結磚浸入於清水時，水從燒結磚之外層，經由孔隙滲入磚體內部[13]，於 24 小時直到其內部達到飽和狀態。以 900℃之燒結溫度燒成之燒結磚，除純黏土燒結磚外，污泥燒結磚均未達至 CNS 要求，顯示其內部尚含有較多之孔隙，當溫度提高至 1,000℃以上時，燒結磚之吸水率明顯下降，代表燒結溫度增加可以降低燒結磚之孔隙率，減少進入燒結磚內部之水量，故吸水率減少。

3.體積收縮率

圖 5 為燒結溫度與體積收縮率關係圖，於 900℃之燒結溫度中，純黏土燒結磚與污泥燒結磚之體積收縮率分別為 2.67 % 與 2.31 %。於該燒結溫度下，各類燒結磚之體積收縮率皆相近，顯示燒結過程中，燒結磚之體積變化量小。當燒結溫度提升至 1,000℃時，純黏土燒結磚與污泥燒結磚之體積收縮率則變為 14.55 % 與 15.86 %，體積收縮率皆大於 10 %。

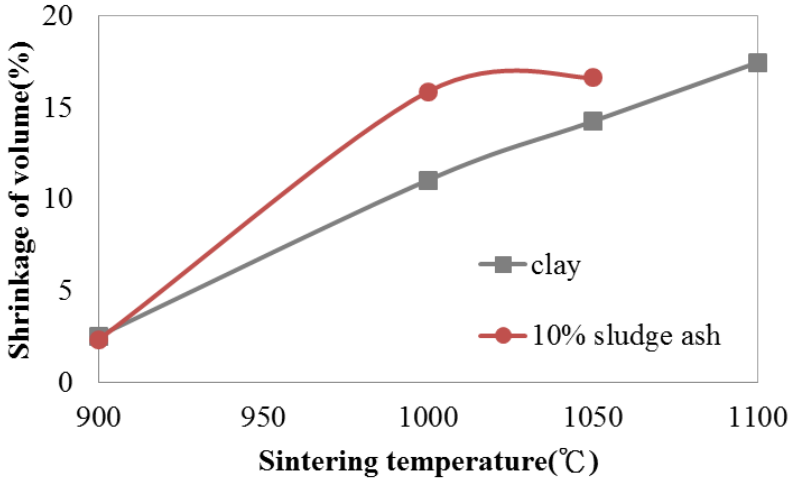


圖 5　燒結溫度與體積收縮率關係圖

探討燒結溫度與抗壓強度、吸水率之關聯中，已知燒結磚內部孔隙數量多寡主導抗壓強度與吸水率數值之高低。燒結磚坯經過風乾與烘乾之過程中，水分從內部向外逸散，內部產生孔隙，於高溫之燒結過程中，孔隙逐漸縮小，燒結磚之內部產生緻密化之現象，使燒結磚之體積變小。

4.燒失量

圖 6 為燒結溫度與燒失量關係圖，依據實驗結果，燒結溫度為 900℃之純黏土燒結磚與污泥燒結磚，其燒失量分別為 7.25 % 與 6.50 %，燒結溫度為 1,000℃時之燒失量分別為 7.52 % 與 6.63 %，於 1,050℃，其燒失量為 6.80 %與 6.56 %，於 1,100℃之燒結溫度中純黏土磚燒失量 6.81 %。

而污泥燒結磚於 1,100℃之燒結溫度產生膨脹變形，故無燒失量之數據。

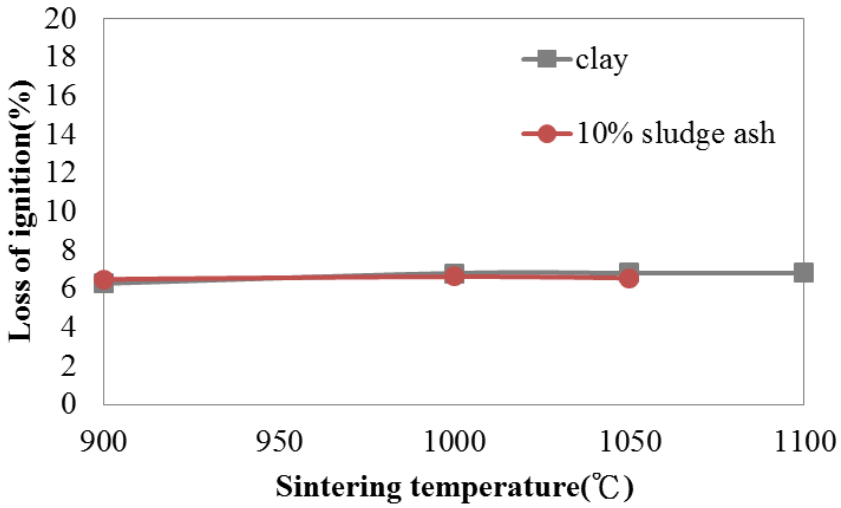


圖 6　燒結溫度與燒失量關係圖

燒失量為污泥與黏土中之有機物，於高溫時分解，使燒結磚於燒結前與燒結後產生質量變化。由於污泥已經過溫度為 800℃至 900℃之熱處理，燒結磚於燒結溫度為 900℃之燒失量，大部分可能源自於黏土中之有機物與無機物於燃燒被分解，黏土中之有機物質於溫度為 800℃時，則會燃燒並被分解[13]。燒結溫度從 900℃與 1,000℃時，各類燒結磚之燒失量略為提高，其原因可能為污泥與黏土中之無機物質，燃燒後分解出氣體，產生質量損失。

五、燒結時間對燒結磚工程特性之影響

由於在燒結溫度與燒結磚工程特性之關係試驗中，得出燒結溫度於 1,000℃為最適合的溫度，綜合來說燒結磚品質最佳。本研究欲探討燒結時間與燒結磚工程特性之關聯，設定之燒結時間為 3 小時與 1 小時，燒結溫度為 1,000℃。

1.抗壓強度

燒結時間 1 小時與 3 小時，純黏土燒結磚之抗壓強度為 46.31 MPa 與 22.42 MPa，污泥燒結磚為 28.17MPa 與 32.43MPa。所有試體皆符合 2 等磚之標準，純黏土燒結磚縮短燒結時間後，其抗壓強度達至 1 等磚之標準。然而污泥燒結磚之抗壓強度，於縮短燒結時間後，其抗壓強度略為降低，圖 7 為燒結時間與抗壓強度。

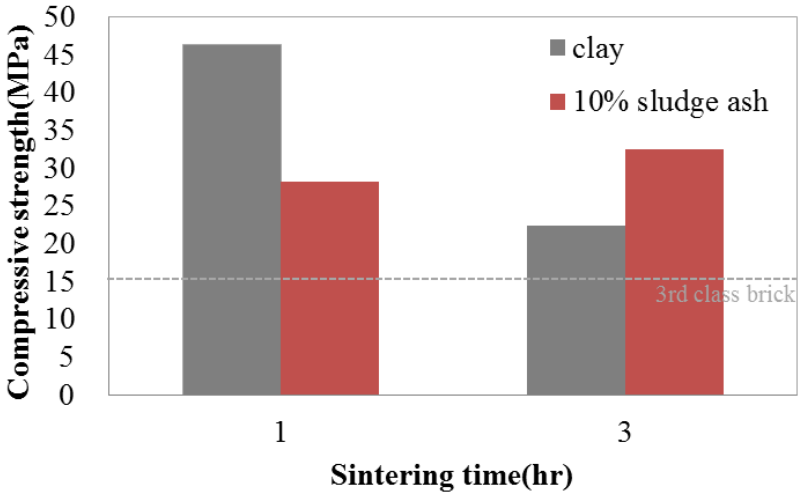


圖 7　燒結時間與抗壓強度關係圖(燒結溫度=1,000℃)

2.吸水率

升溫與降溫時間皆為 28 小時，燒結溫度為 1,000℃之條件下，於燒結時間為 1 小時與 3 小時，純黏土燒結磚吸水率為 7.35 %與 8.62 %，污泥燒結磚吸水率為 6.17 %與 5.10 %。兩種燒結時間下之吸水率皆符合 CNS 之 1 種磚標準。Karaman[13]曾研究燒結溫度與燒結時間對燒結磚吸水率之影響，經過實驗，發現增加燒結溫度時，吸水率產生下降之趨勢，然而於特定之燒結溫度下，若僅延長燒結時間時，吸水率並無任何變化。本研究將實驗結果與 Karaman[13]進行對照，顯示吸水率非因為燒結溫度而產生顯著之變化。

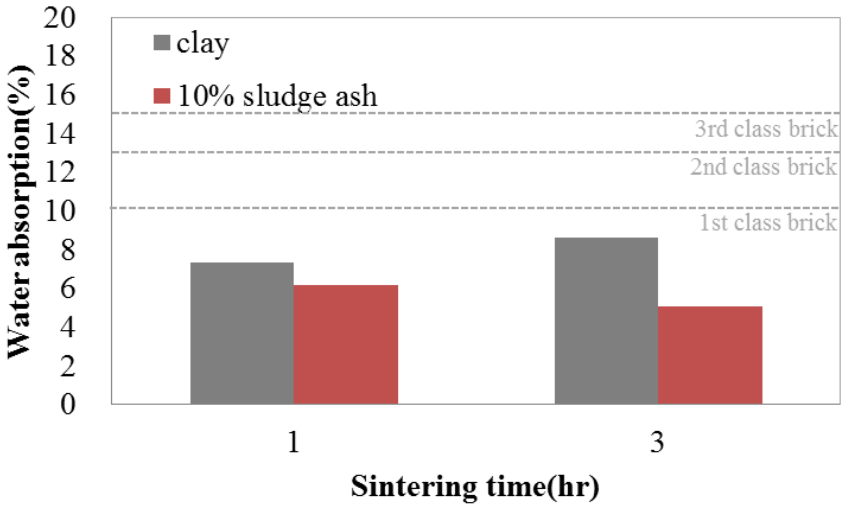


圖 8　燒結時間與吸水率關係圖(燒結溫度=1,000℃)

3.體積收縮率

從實驗結果得知，於燒結時間為 1 小時與 3 小時之間，純黏土燒結磚體積收縮率為 13.44 %與 11.03 %，污泥燒結磚體積收縮率為 13.62 %與 15.86 %。Karaman[13]之研究結果記載固定燒結溫度，並調整燒結時間，對於燒結磚之收縮程度無任何變化。本研究結果與 Karaman[13]之研究幾近符合，並從此可得知燒結時間之變化，影響燒結磚之體積變化量微小。圖 9 為燒結時間與體積變化率。

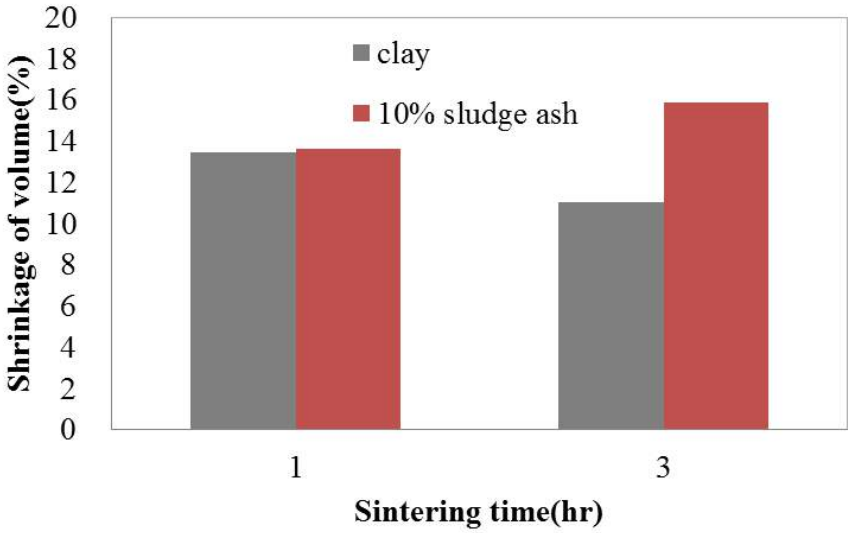


圖 9　燒結時間與體積收縮率關係圖(燒結溫度=1,000℃)

4.燒失量

圖 10 燒結時間與燒失量關係圖(燒結溫度=1,000℃)，於燒結時間為 1 小時與 3 小時，純黏土燒結磚燒失量為 7.19 %與 6.81 %，污泥燒結磚燒失量為 6.36 %與 6.63 %。Karaman[13]之研究指出，燒結磚之燒失量於燒結溫度之變化中，其趨勢為燒結溫度愈高，燒失量增加，然而固定燒結溫度，僅調整燒結時間，燒失量無明顯之上升或下降之趨勢，故燒結時間與燒失量之間並無任何關聯。由於本研究之燒失量結果與 Karaman[13]之研究相近，故可以得知調整燒結時間對燒結磚之燒失量之改變，縮短燒結時間不會造成於燒結時大幅度之質量損失。

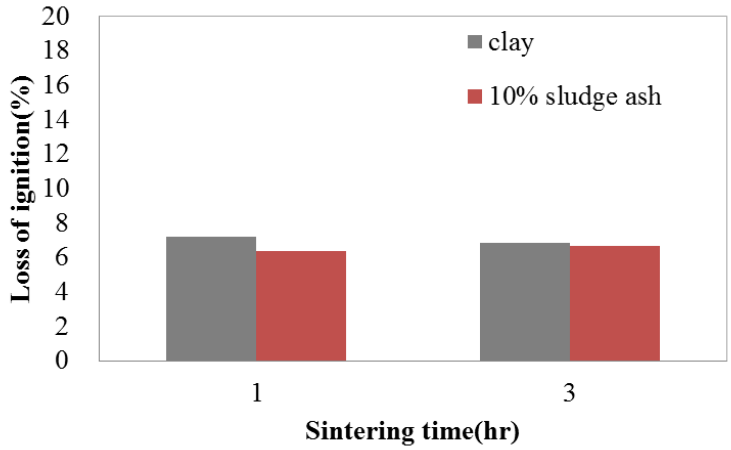


圖 10　燒結時間與燒失量關係圖(燒結溫度=1,000℃)

六、結論與建議

於燒結溫度與燒結磚工程特性之探討中，提高燒結溫度時，各燒結磚抗壓強度與體積收縮率增加，吸水率減少，燒失量略為增加。1,000℃以上之燒結溫度能改善燒結磚整體之品質，然而對污泥燒結磚而言，過高之燒結溫度容易引起膨脹變形。於特定之燒結溫度，燒結時間與燒結磚工程特性之關聯中，除抗壓強度會產生變化外，吸水率、體積收縮率與燒失量均不受影響。

於燒結磚製作流程中，燒結溫度為 900℃至 1,200℃，本研究設定之燒結溫度為 900℃、1,000℃、1,100℃，結果顯示提高燒結溫度有助於改善燒結磚品質，然而持續提高溫度，反而產生燒結磚膨脹變形之現象。若欲以增加燒結溫度為提升燒結磚品質之方式，必須先處理膨脹變形之情況。若僅以達到 CNS 最低標準為目的，設定燒結溫度至 1,000℃即可。縮短燒結時間能減少燒結時的能源耗損，亦較符合經濟，且相較於一般之磚窯廠之製作流程，能於短時間內產出大量之燒結磚，另外由於污泥成分不穩定，燒結時間不宜過久。至於未來若要提高污泥取代量，可以嘗試加入其他助熔劑增強燒結之效果。

七、參考文獻

1. 行政院環境保護署，「污泥處理現況檢討及因應策略」，行政院環境保護署，103 年。
2. 行政院環境保護署，「100 年度有害事業廢棄物戴奧辛及重金屬管制之

調查與評估專案研究計畫」，100 年。
3. 高健，「利用城市污水污泥制行道磚的工藝技術研究」，西北農林科技大學環境工程研究所碩士論文，104 年。
4. 高長義，「經熱處理之污泥再利用於 CLSM 材料之可行性研究」，國立成功大學資源工學系碩士論文，104 年。
5. 黃安斌，大地工程原理，台北：東華書局，87 年。
6. 經濟部標準檢驗局，「CNS382 R2002 普通磚」，96 年 01 月 17 日修訂，現行標準。
7. 陳見財、陳志銘、莊敏芳，污泥處理技術彙編，台北：經濟部工業局，93 年。
8. 陳炯立，「含重金屬污泥燒製磚材資源化研究」，國立台北科技大學材料及資源工程系碩士論文，92 年。
9. 章裕民、張榮興，污泥焚化處理，載於陳見財主編污泥處理技術彙編，台北：經濟部工業局，88 年。
10. Demira, I., & Orhanb, M. “Reuse of waste bricks in the production line,” Building and Environment, 38 (12) pp.1451–1455, 92 年。
11. Eliche-Quesada, D., Corpas-Iglesias, F. A., Pérez-Villarejo, L., & Iglesias-Godino, F. J. “Recycling of sawdust, spent earth from oil filtration, compost and marble residues for brick manufacturing,” Construction and Building Materials, 34 pp.275–284, 101 年。
12. Eliche-Quesada, D., Cunha, R. A. D., Corpas-Iglesias, F. A. “Effect of sludge from oil refining industry or sludge from pomace oil extraction industry addition to clay ceramics,” Applied Clay Science, 114 pp.202–211, 104 年。
13. Karaman, S., Ersahin, S., & Gunel, H. “Firing temperature and firing time influence on mechanical and physical properties of clay bricks,” Journel of Scientific & Industrial Research ,65 pp.153-159, 95 年。
14. Lin, K. L. “Feasibility study of using brick made from municipal solid waste incinerator fly ash slag,” Journal of Hazardous Materials, 137 (3) pp.1810–1816, 95 年。
15. Lin, D. F., & Weng, C. H. “Use of Sewage Sludge Ash as Brick Material,” Journal of Environmental Engineering, 127 (10) pp.922–927, 90 年。
16. The Brick of Association. “Manufacturing of Brick,” TECHNICAL NOTES on brick construction, pp.1-7, 95 年

以「金屬濕式提鍊技術」回收表面處理業高濃度重金屬廢液之應用

廖學賢*、葉旭**、陳盛宗***、李偉智****、毛致中*****

摘　要

表面處理業所使用的化學電鍍製程之廢液含有數千 ppm 之高濃度重金屬含量，而傳統處理高濃度重金屬的方式是以化學沉澱法為主，處理時需加數種化學藥品作調整及化學沉澱反應，其所產生汙泥的處理費用昂貴；且在化學電鍍製程的廢液中常伴隨著一些物質如還原劑、螯合劑、pH 調整劑、安定劑及添加劑等，尤其是螯合劑的存在導致重金屬離子無法完全形成氫氧化物沉澱去除，處理後溶液仍殘留螯合化的重金屬離子，導致重金屬殘留量偏高。

翰金科技(Hydroionic EnviroTec)使用「金屬濕式提鍊技術」(Hydrometallurgical process)處理化學電鍍製程所產生的廢液，以期達到其重金屬排放符合放流水標準、無重金屬污泥產生及金屬資源循環利用之目標。本技術首先於電鍍廠設置「前端程序」(Equalys^{TM})，從高濃度廢液中捕捉目標重金屬；實廠運行結果顯示，廢液中目標重金屬濃度約在 3,000~7,000 ppm 左右，處理後溶液之目標重金屬濃度穩定控制在 1 mg/L 以下，符合放流水標準，若客戶端願意接受則可將此溶液送入軟水系統後再重複使用。

吸附飽和後之離子交換樹脂於核心程序中進行目標重金屬之濃縮，透過本項專利技術，以鎳為例，再生液(從離子交換樹脂中萃取出之重金屬剝離溶液)之鎳濃度穩定地保持在 50,000 ppm (5%) 以上，並利用特殊設計之結晶槽析出高純度六水硫酸鎳產品，純度可穩定於 99.99%以上，其餘各個金屬雜質成分皆低於 5 ppm (Na < 20 ppm)，可作為各類工業使用。

「金屬濕式提鍊技術」可在不產生有害污泥的前提下，有效去除化學電鍍製程廢液中的重金屬，以及回收金屬原物料製成高純度金屬化合物產品，其處理後的溶液可符合無重金屬放流水標準，在處理表面處理業之重金屬廢液上具有高度應用潛力，並可達到處理後液體及重金屬兩者皆可重複使用之目標。

【關鍵詞】高濃度重金屬廢液、化學電鍍、高純度六水硫酸鎳、重金屬回收

---

*翰金科技　董事長

**翰金科技　總經理

***翰金科技　協理

****翰金科技　副理

*****翰金科技　工程師

一、化學鍍廢液簡介

目前各種工業程序常以鍍鎳製程進行表面處理，如金屬表面處理、電鍍業、光電業以及印刷電路板業，皆為鍍鎳製程運用的實例。在表面處理業與電鍍業製造過程中，使用重金屬鹽類作為金屬沉積之來源，會造成大量重金屬廢液產生。近年來由於化學電鍍製程所得到的電鍍層具有穩定性高、耐腐蝕性佳、高拋光性及高硬度等特性，導致化學電鍍製程在表面處理程序方面被廣泛使用，然而，化學電鍍製程所產生的廢液，通常含有數千 ppm 的重金屬離子，且含有大量螯合劑，如檸檬酸、酒石酸及次磷酸鈉等，故廢液中含有較多的重金屬螯合物，而這些螯合物性質相當穩定，無法以沉澱法將重金屬完全形成氫氧化物去除，導致處理後的水溶業仍殘留螯合化的重金屬離子，使得排放水之重金屬離子濃度偏高。

處理含鎳廢水最常採用的方法為化學沉澱法，此方法流程如圖 1 所示：於廢水中加入鹼片調整 pH 值至 10、加入除鎳劑去除鎳離子、再加入聚合氯化鋁 PAC 及聚丙乙烯醯胺 PAM 等混凝劑提升捕集效率，使廢水中重金屬離子與鹼片形成氫氧化物而沉澱，惟此舉將產生處理費用昂貴且不易再利用之有害污泥(目前每噸委外清運費用超過 1 萬元)，且隨工廠每日鍍件不同，帶至清洗水槽中的鍍液量亦有異，造成鍍程清洗水中重金屬濃度波動，使液鹼與混凝劑等加藥劑量難以掌握，間接影響重金屬去除處理效率；此外，受限於空間，各種鍍程廢水往往混合後送入化學混凝槽，因每種重金屬最適混凝 pH 不盡相同，在加藥策略未配合當日廢水特性調整的操作方式下，重金屬去除效率經常不彰，而無法達到放流水標準。因此目前重金屬廢液處理已朝著金屬資源化回收的方向發展，不僅解決廢液處理問題，而且可製造具有回收價值之金屬產品，達到資源化回收之目的。

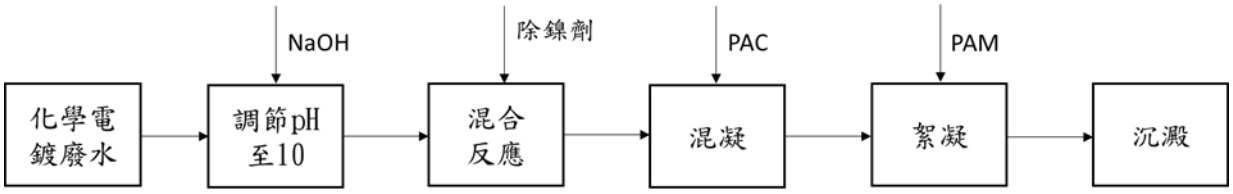


圖 1　以化學沉澱法處理含鎳廢水的流程圖

本報告探討使用翰金科技(Hydroionic EnviroTec)「金屬濕式提鍊技術」(Hydrometallurgical process) 處理高濃度鎳含量的化學電鍍廢液之效果，以期達到「重金屬排放符合放流水限值」、「無重金屬污泥產生」與「金屬資源循環利用」之三重目標。

二、『金屬濕式提鍊技術』製程介紹

「金屬濕式提鍊技術」包含以下三項程序：

1.前端程序 (Front-end process，或稱 Equalys™)

Equalys™ 主要功能為吸附捕捉目標重金屬；在客戶端設置適當之離子交換樹脂系統模組，吸附廢液中的重金屬，其中鎳、銅、鋅等係以陽離子交換樹脂吸附，六價鉻因係以鉻酸型式存在，將以陰離子交換樹脂吸附之。離子交換樹脂前端依客戶水質另設適當預處理單元，包括氰化物氧化與懸浮固體過濾(圖 2)。經系統處理後，產水水質已符放流水標準，且符合一般製程使用需求，建議可回收送至軟水系統，處理後供廠內使用。圖 3 為實際於電鍍廠內安裝情形，電鍍廠可用空間經常十分狹隘，Equalys™ 係以離子交換樹脂塔為主體，占地小並可依現地狀況調整，具有彈性。

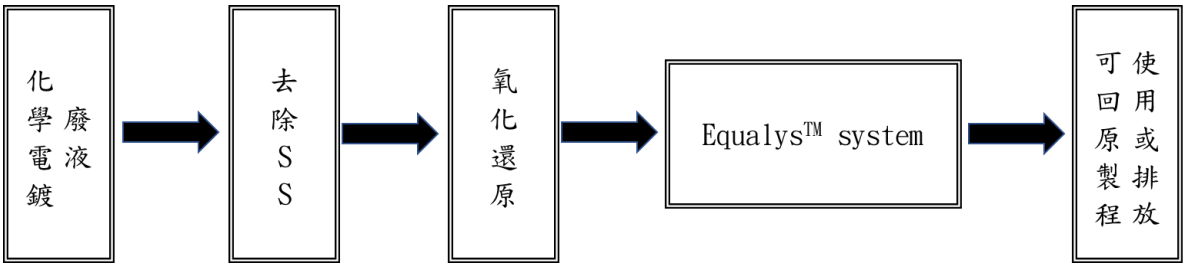


圖 2　前端程序 Equalys™ 示意圖

圖 3　Equalys™ 於電鍍廠安裝實際狀況

2.核心程序 (Core process)

本階段主要功能為濃縮目標重金屬；從客戶端收回已飽和吸附重金屬的離子交換樹脂，將樹脂進行再生(Regeneration)後，將會產生出含多種高濃度重金屬的剝離溶液(Stripped solution)，而再生完畢之樹脂則歸還客戶端。核心程序中包含了數個專利模組，特定樹脂以吸附某一預設的重金屬；樹脂對於預設的目標重金屬具有高親和力，遠高於其它重金屬，因此能在混有多種重金屬的剝離溶液中，選擇性地捕捉單一金屬。剝離溶液接續導入數個串聯的吸附模組，分別進行不同重金屬之捕捉；最後各樹脂可再加以脫附再生，預期可產出含高濃度單一金屬的最終段剝離溶液(圖 4)。

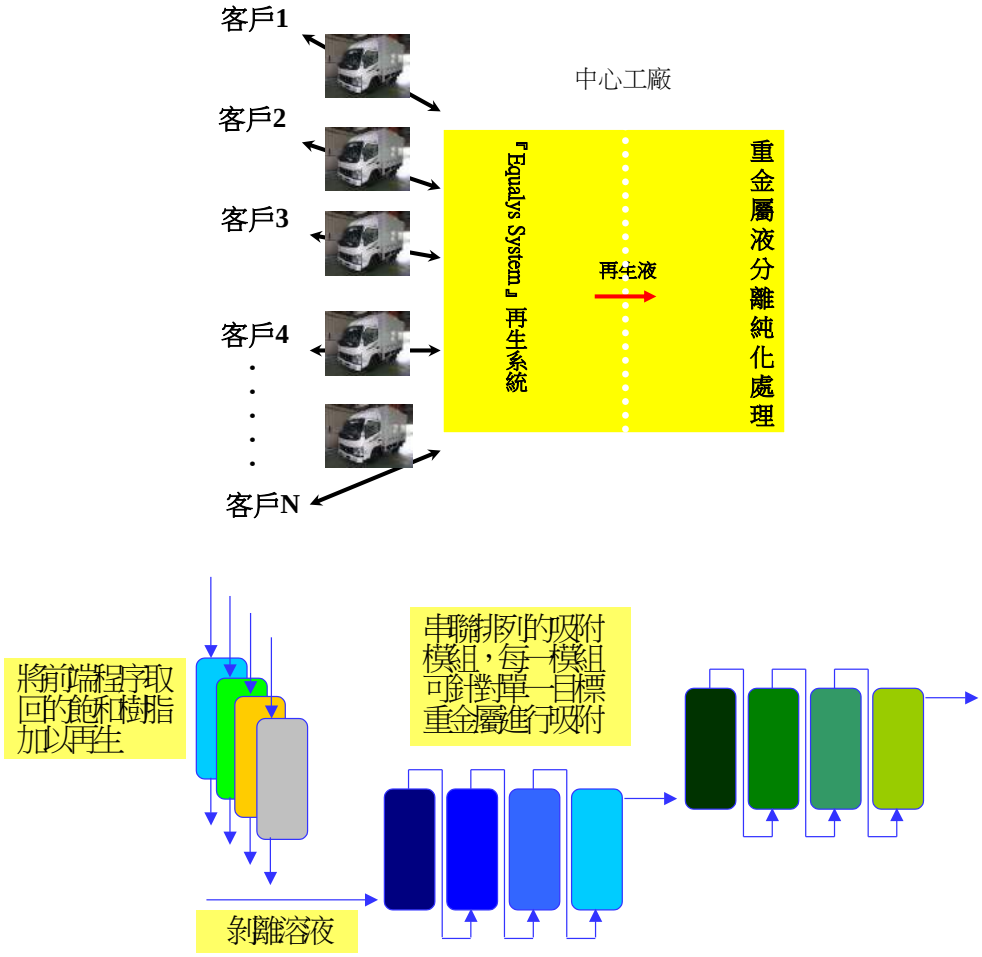


圖 4　核心程序示意圖

3.產製程序(Production process)

本階段主要功能為後端純化，從核心程序產出之高濃度剝離溶液，預期僅含單一重金屬，其濃度甚高，可直接導入專利結晶設備，使其中的重金屬鹽類有效結晶析出；經乾燥與包裝後可作為各類用途；而剩下的水份因仍含有一定濃度重金屬，將再導回前端核心程序，持續進行目標重金屬之捕捉(圖 5)。

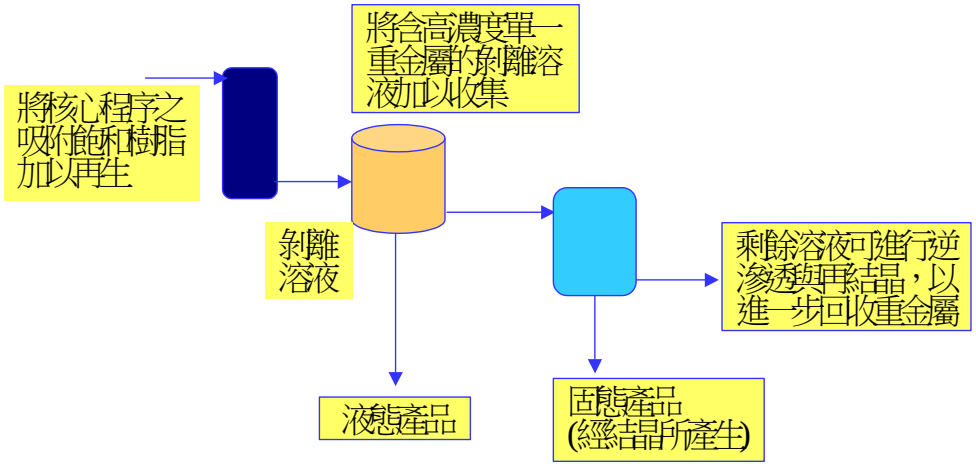


圖 5　產製程序示意圖

由以上三個處理程序可得知，一方面可幫客戶進行水質中重金屬離子的去除，另一方面可將客戶端所收集的重金屬離子進行產品化處理，再將該重金屬產品販售給有需求的客戶，達到重金屬循環使用的目標(圖 6)。

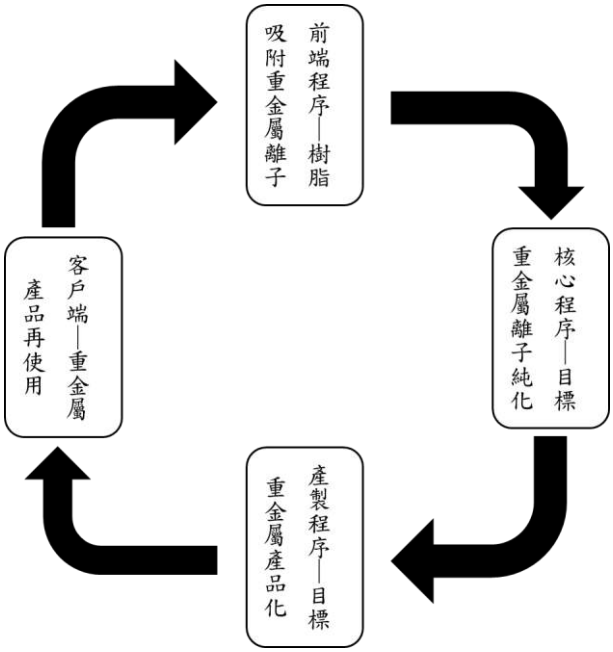


圖 6　重金屬循環再利用的示意圖

三、實廠測試結果與討論

前述核心程序及產製程序目前已於南崗工業區設置實廠，並且已有重金屬產品產出；而前端程序已經放置於多家電鍍廠化學電鍍製程上運行多年，然而，這些電鍍廠處理的廢水大都是製程清洗水，重金屬濃度介於數十至數百 ppm 不等，且清洗水內的添加劑濃度極低，相對上比較好處理；對於高濃度的鎳含量及含有較高濃度的 COD 之廢液，目前已有幾個實廠案例，其中一家已穩定運行一年多的時間，處理後的廢液之鎳濃度皆低於 1 ppm，其實地設置 Equalys^{TM} 設施如圖 3 照片所示，Equalys^{TM} 離子交換樹脂採五支離子交換樹脂串聯而成，可就第五支離子交換樹脂處理水進行檢驗，以評估貫穿點。

有鑑於國內目前以鍍鎳製程最為常見，且鎳離子於電鍍廢水中最適混凝 pH 值一般超過 11，所需加鹼量最多，此外其放流水標準限值又僅 1 ppm，是為電鍍業放流水欲符合限值最具挑戰之重金屬項目。圖 7 為整理實廠長期測試(約 12 個月)客戶端含鎳廢液之去除效果，廢液月產量約 6~8 m^3，表 1 列出相關數值(廢液 Ni 濃度、處理後水 Ni 濃度與去除率)。結果顯示，經過 Equalys^{TM} 系統處理後的水中鎳濃度均可低於 1 ppm，化學電鍍廢液鎳濃度介於 3000 至 7,000 ppm 之間，去除率最低為 99.96%，最高可達 99.999%。

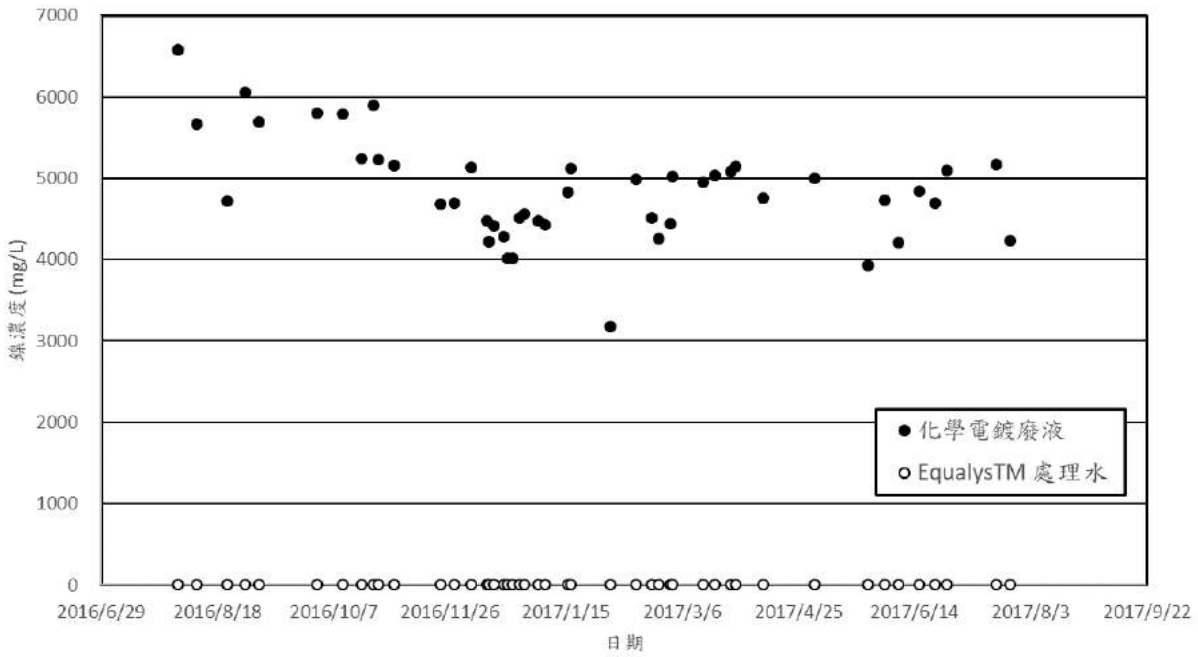


圖 7　Equalys^{TM} 系統於實際電鍍廠之測試結果

表 1　Equalys™ 系統於實際電鍍廠之測試數據

日期	化學電鍍廢液(mg Ni/L)	Equalys™ 處理水(mg Ni/L)	去除率 (%)
2016/8/1	6579	0.46	99.99
2016/8/9	5668	0.53	99.99
2016/8/22	4717	0.40	99.99
2016/8/30	6054	0.04	99.99
2016/9/5	5685	0.16	99.99
2016/9/30	5796	0.55	99.99
2016/10/11	5789	0.15	99.99
2016/10/19	5240	0.16	99.99
2016/10/24	5894	0.06	99.99
2016/10/26	5227	0.16	99.99
2016/11/2	5158	0.96	99.99
2016/11/22	4683	0.07	99.99
2016/11/28	4695	0.55	99.99
2016/12/5	5135	0.10	99.99
2016/12/12	4471	0.15	99.99
2016/12/13	4226	0.08	99.99
2016/12/15	4419	0.13	99.99
2016/12/19	4278	0.07	99.99
2016/12/21	4016	0.14	99.99
2016/12/23	4013	0.05	99.99
2016/12/26	4511	0.18	99.99
2016/12/28	4559	0.20	99.99
2017/1/3	4475	0.06	99.99
2017/1/6	4421	0.36	99.99
2017/1/16	4832	0.15	99.99
2017/1/17	5120	0.09	99.99
2017/2/3	3182	0.54	99.98
2017/2/14	4991	0.95	99.98
2017/2/21	4518	0.33	99.99
2017/2/24	4257	0.26	99.99
2017/3/1	4434	0.10	99.99
2017/3/2	5026	0.17	99.99
2017/3/15	4953	0.13	99.99
2017/3/20	5032	0.10	99.99

日期	化學電鍍廢液(mg Ni/L)	Equalys™ 處理水(mg Ni/L)	去除率 (%)
2017/3/27	5088	0.98	99.98
2017/3/29	5147	0.19	99.99
2017/4/10	4753	0.31	99.99
2017/5/2	5002	0.44	99.99
2017/5/25	3923	0.35	99.99
2017/6/1	4728	0.10	99.99
2017/6/7	4212	0.09	99.99
2017/6/16	4839	0.42	99.99
2017/6/23	4690	0.31	99.99
2017/6/28	5094	0.52	99.99
2017/7/19	5169	0.40	99.99
2017/7/25	4233	0.33	99.99

前端程序所使用的重金屬吸附樹脂達到飽和後，離子交換樹脂由貨車攜回中央工廠，以強酸(如硫酸)再生後，產生含高濃度重金屬的剝離溶液(Stripped solution)，再導入管柱中以模擬核心程序吸附模組進行處理。剝離溶液含高濃度重金屬，使模組中所裝填之樹脂迅速飽和，透過專利製程對飽和樹脂進行再生，形成最終段的剝離溶液，目標金屬會在此過程中再濃縮，其濃度與純度明顯提高許多。

透過本項專利技術，以前述測試之鎳為例，可穩定將再生液(從離子交換樹脂中萃出之重金屬剝離溶液)中之鎳濃度保持在 50,000 ppm(5%)以上，配合專用結晶槽及結晶條件產出六水硫酸鎳產品，純度可穩定於 99.99%以上，其餘各個金屬雜質成分皆低於 5 ppm (Na < 20 ppm)，與市售品相當，可作為各類工業使用，產品品質如表 2 所示。

表 2　六水硫酸鎳產品的純度資料

	(%wt.)	其他金屬雜質含量 (ppm)					
	Ni	Cu	Fe	Ca	Mg	Na	Zn
翰金六水硫酸鎳	22.42	< 2	< 2	< 2	< 2	4.26	2.31
市售品	22.79	< 2	< 2	< 2	4.88	< 2	< 2

然而，化學電鍍廢液除了重金屬離子以外，還含有其他添加劑，例如螯合劑、還原劑、pH 調整劑等，這些添加劑在廢液處理程序是以 COD 作為指標(以實廠例子來看，COD 數值約數萬左右)，目前本製程僅處理重金屬離子，

處理後的廢液仍具有較高的 COD 數值，未來可以透過濃縮方式提高廢液的 COD 及減少廢液量，而這些高 COD 的廢液由於不含重金屬離子，可以直接進行生物處理程序降低 COD，且生物處理程序所產生的沼氣可以用來發電或當燃料使用，達到資源化利用的目的，因此，將重金屬及 COD 皆處理過的廢液才能達到放流水的標準。

四、結　論

「金屬濕式提鍊技術」包括前端程序(Equalys^{TM})、核心程序與結晶單元，可在不產生有害污泥的前提下，去除化學電鍍廢液中的重金屬離子，並可有效濃縮回收目前價格日益提高的金屬原物料及製成市售產品，如此一來，可減少金屬原物料的消耗，達到金屬循環再利用的目標，其中核心程序已通過加拿大、美國、台灣等多國專利申請；目前測試顯示，針對最難處理之鎳離子，其出流水可作為廠內回用，在處理化學電鍍廢液上具有高度應用潛力，且回收鎳離子後製成產品再販售給電鍍廠或其他的鎳使用者，達到處理後液體及重金屬兩者皆可重複使用之目標。

CNC 廢鐵粉屑回爐再生之高值化產品應用

林啟明*、何長慶**、江謝立恆***、凌宇康****、吳威德*****

摘　要

金屬材料經不同的精密加工製程後，如：銑床、車床、切削與車削等，會產生許多不同尺寸的金屬切屑，當尺寸小於 3mm 以下時，其應用性受到極大限制，主要原因是以廢鋼應用於電弧爐熔煉時，尺寸過小很容易被吸塵設備吸走，而導致損失率太大，失去其應用價值。本研究利用 EDS-XRF 對細小的金屬切屑進行化學成份分析得知，其雜質含量很低，如：P<0.02wt%與 S<0.02%等，比一般普通等級廢鋼之 P<0.03wt%與 S<0.04wt%還低，因此若可以開發出快速節能之造塊方法進行小尺寸 CNC 廢鐵粉屑造塊並評估其鐵回收率，而再利用於電弧爐粗煉當廢鋼使用，則不僅可以節能減廢，還可以為電弧爐煉鋼業者節省煉鋼成本。

本研究所開發之 CNC 廢鐵塊產品尺寸為直徑 7.3±0.3 cm 與高為 3.5~5.5 cm，經真空週波爐測試 10 爐次之鐵回收率得知，其鐵回收率高達 93%以上，品質相當優良。本研究也利用大氣週波爐進行 2 爐次之鐵回收率試驗，此試驗方法為電爐鋼廠評估廢鐵品質的標準試驗方法，結果得知其回收率亦可達 84%以上，符合高品質廢鋼使用。本研究也已到台灣大型電爐鋼廠進行 CNC 廢鐵塊產品添加試驗，其添加量約為總廢鋼量的 10%，測試結果顯示效能皆相當優異，為具備高再利用價值的廢鐵產品。

【關鍵詞】CNC 廢鐵粉屑、快速節能造塊方法、再生廢鐵原料回爐、鐵回收率

---

*國立中興大學金屬研發中心 博士後研究員

**嘉德技術開發股份有限公司 董事長

***詠泰環保科技有限公司 總經理

****皓勝工業股份有限公司 總經理

*****國立中興大學材料科學與工程研究所 終身特聘教授

一、前　言

鋼鐵工業屬於技術、資本與能源密集之產業，也就是說為高投資、低報酬與高耗能之產業，且為高污染之產業，但因其產業關聯度極高，與汽車業、航太業、建築業、造船業、機械業、電機業與國防工業等有密切關係，為各行各業發展所不能欠缺的基礎，因此鋼鐵工業有「工業之母」的稱號。根據 WORLDSTEEL ASSOCIATION 針對 2015 年世界鋼鐵粗鋼生產量數據統計[1]顯示，年產能高達 1621 百萬噸，已連續三年突破 1600 百萬噸的產能，其中台灣中鋼公司的產能為 14.82 百萬噸，排名世界第 23 名，顯示台灣鋼鐵業在世界上的重要性。

粗鋼種類包含扁鋼胚、大鋼胚、小鋼胚與鋼錠等半成品，必須再透過後端工具機的高精度加工製程，使其產品可應用到更高附加價值的場合中，如：汽車與航太等零組件，也因為加工的必要性造就台灣在工具機上的蓬勃發展，根據台灣區工具機暨零組件工業同業公會整理數據[2]顯示，2016 全年工具機累計出口金額高達 28.97 億美元，其中主力產品為金屬切削工具機、綜合加工機與車床等，而這些工具機對金屬進行加工時皆會產生適量的廢棄金屬粉屑，若可以對廢棄金屬粉屑結塊改質，並再利用回電爐冶煉製造出粗鋼，再透過不同類型工具機進行加工，產生高精度與高單價的產品，以循環經濟理念為導向，達到降低廢棄物產生量，並提高產品的附加價值。

金屬材料經不同的工具機加工製程處理後，其過程會產生許多不同尺寸的金屬粉屑，當尺寸小於 3mm 以下時，其應用性受到相當大之限制，主要是因為以廢鋼應用於電弧爐熔煉時，因尺寸太小很容易被吸塵設備吸走，而導致損失率太大，失去其應用價值。然而細小的金屬粉屑擁有低雜質含量的特性，如：P<0.02wt%與 S<0.02%等，比一般廢鋼 P<0.03wt%與 S<0.04wt%低，因此若可以將其造塊再利用於電弧爐粗煉當廢鋼使用，則不僅可以節能減廢，還可以為電弧爐煉鋼業者降低在脫磷與脫硫過程的造渣劑使用量與縮短脫磷與脫硫的時間，而達到造渣與電力的雙重節能目標。

本計畫之 CNC 廢鐵粉屑再生循環經濟理念如圖 1 所示，將 CNC 加工後的廢鐵粉屑利用快速節能方法進行結塊，然後直接以高品質規格的廢鋼加入電弧爐進行冶煉，產生出來的粗鋼胚再進行 CNC 加工成高單價產品進行應用，之後再將產生的廢鐵粉屑再造塊再回爐，而達到無廢棄物之循環再利用程序。

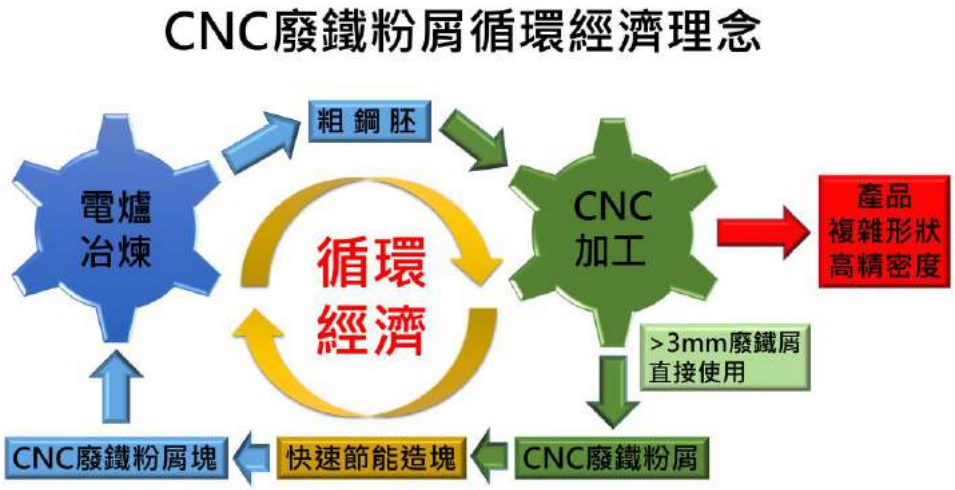


圖 1　本計畫之 CNC 廢鐵粉屑再生循環經濟理圖

二、電弧爐冶煉的重要性與廢鋼波動問題

根據金屬工業研究發展中心的 2016 鋼鐵年鑑總論篇[3]中提及 2015 年台灣粗鋼產量為 2,139 萬公噸，在全球排名第 12 名，占全球產量的 1.32%，自給率達 87.0%，其中高爐粗鋼占總粗鋼產量的 62.3%，電爐生產占 37.7%。而由圖 2 的台灣鋼鐵廠特性說明圖可知，目前台灣電弧爐鋼鐵廠共有 17 家，其中 13 家為生產碳鋼與條鋼，3 家為生產不銹鋼，1 家為生產合金鋼，顯示電弧爐產業在台灣占有舉足輕重的地位。

台灣鋼鐵業以在地型鋼鐵廠之電爐煉鋼為大宗，其煉鋼過程分為廢鋼熔化期、氧化期之粗煉脫磷與還原期之精煉脫硫等三階段，其中廢鋼的純淨度與價格將影響造渣成本與粗鋼成本的高低，若可以開創出低成本、高純淨度與高鐵回收率的廢鐵原料，則可以為電弧爐業者解決廢鋼波動與造渣技術的問題，並在粗煉脫磷與精煉脫硫製程中，降低造渣劑的使用量，而達到節能減廢的目的。

廢鋼波動問題為電弧爐業者帶來相當大的困擾，隨著國際鋼價的浮動連帶也影響到廢鋼的價格，由圖 3 的台灣豐興鋼鐵公司收廢鋼價格走勢圖顯示在 2008/11 與 2015/10 廢鋼價格觸底僅剩 4000 元/噸，顯示所生產之鋼筋與型鋼等產品之價格亦觸底，導致電弧爐業者在這段期間生產皆不符合成本，但在 2010/4~2014/09 這段期中廢鋼價格來到穩定的高峰，顯示所生產之鋼筋與型鋼等產品之價格亦相當高，因此若可以在此期間找到可替代高單價廢鋼之低單價廢鐵原料產品，則可以為電弧爐業者帶來相當可觀的利潤。本研

究希望將價格低廉且低雜質元素含量之廢棄金屬粉屑，利用快速節能之造塊方法，形成尺寸為直徑 5.5±0.3 cm；高為 2.5±0.3 cm 之高品質廢鐵塊，來取代高雜質含量之廢鋼而應用於電弧爐粗煉製程上，來縮短煉鋼時間，進而降低煉鋼成本。

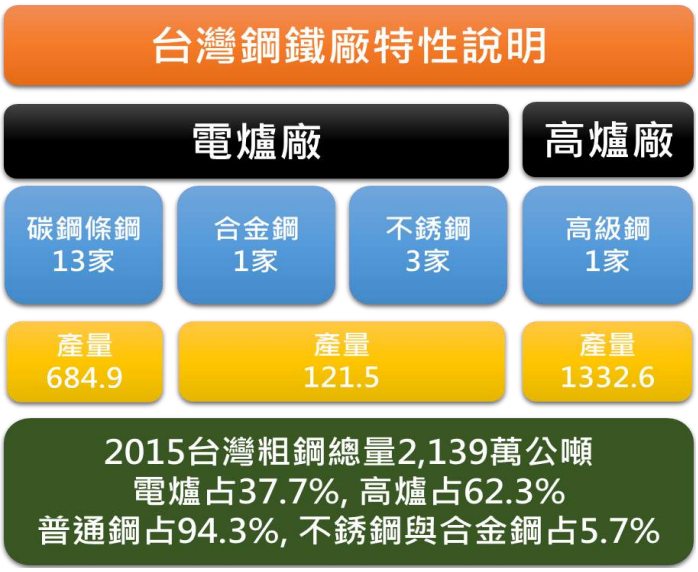


圖 2　台灣鋼鐵廠特性說明圖

圖 3　台灣豐興鋼鐵公司收廢鋼價格走勢圖

三、CNC 廢鐵粉屑再生開發方法與流程

1.CNC 廢鐵粉屑來源

本研究進行廢棄金屬分類與處理之流程如圖 4 所示，本研究從各大廠商在銑床、車床、切削與車削等金屬加工製程中產生的廢鐵粉屑進行回收與分類，透過磁選設備將≦3mm 之 CNC 廢鐵粉屑磁選出來，然後透過快速節能之造塊方法將其造塊，並與>3mm 的廢棄金屬一起回爐，達到 CNC 廢棄金屬 100%回爐去化。

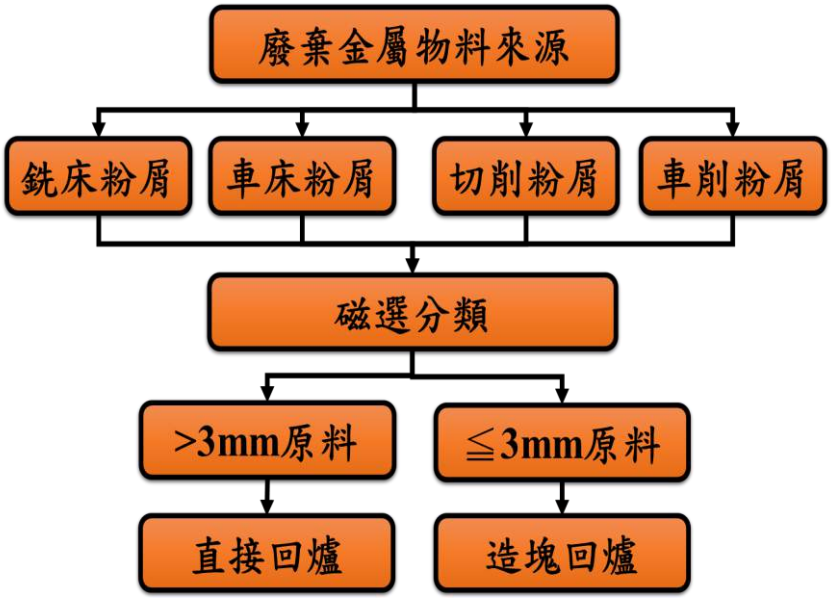


圖 4　廢棄金屬分類與處理之流程圖

2.快速節能之造塊方法

本研究之快速節能造塊方法開發流程圖如圖 5 所示。由圖中可知主要透過黏著劑的種類與壓力調整來找出最佳的造塊方法，其黏著劑種類包含澱粉、皂土、消石灰與水泥等 4 種，其比例為黏結劑 2%，水 3~5%，混拌約 10 分鐘後，再送至壓球機進行壓球，而壓力控制分為低壓(100Kg/cm^2)、中壓與高壓等 3 種。最終透過成形性的好壞來評估結塊效果，找出低成本之快速節能造塊方法。

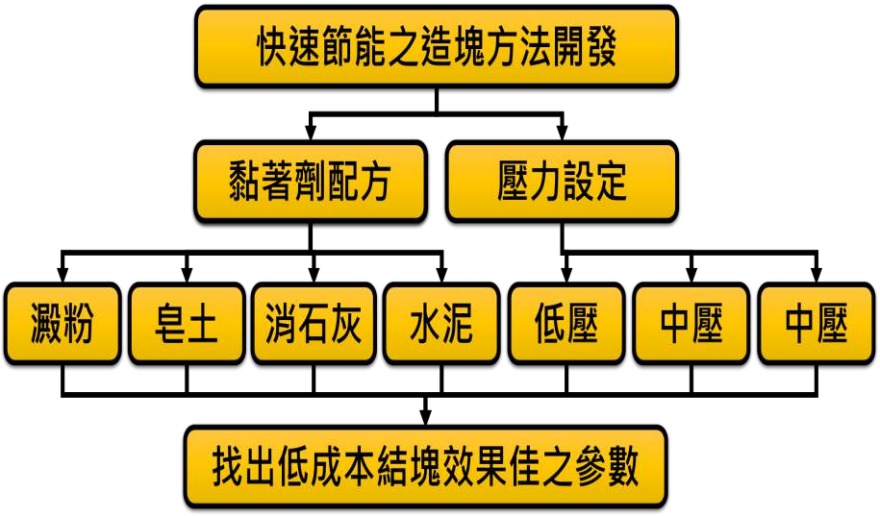


圖 5　快速節能之塊方法開發流程圖

3.CNC 廢鐵塊之鐵回收率測試

本研究利用二種方式進行 CNC 廢鐵粉屑的鐵回收率測試。第一種方式為真空熔煉測試法，此方法主要是測試 CNC 廢鐵粉屑中含有多少切削油比例。首先將廢鐵塊秤重，確定初始重量後，再放入真空週波爐進行加熱，在加熱至廢鐵塊熔化的過程中，爐內會保持壓力值為 600~650torr 左右，以防止鋼水氧化，之後當廢鐵塊完全液化為鋼液後，會持溫 10~15 分鐘，確保全部廢鐵塊完全液化均勻，接著關閉電源進行爐冷，最後將合金鐵進行秤重，然後透過[(初始重量-液化後重量)/初始重量]×100%，即可計算出鐵回收率，之後再將液化凝固之合金鐵以火光放電光譜分析儀進行化學成份定量分析，了解其雜質含量。

第二種測試方法為電弧爐鋼鐵廠測試廢鐵回收率的標準方法，此方法可測試 CNC 廢鐵粉屑中含有多少切削油與液化鐵氧化損失總率。首先將 100%純鐵塊與廢鐵塊秤重，確定初始重量後，再放入大氣週波爐進行加熱，加熱至完全液化為鋼液後，會持溫 10~15 分鐘，確保全部廢鐵塊完全液化均勻，接著將鋼液導入盛鋼桶內，待冷卻為室溫之鋼錠後再秤重，然後透過[(初始重量-液化後重量)/初始重量] ×100%，即可計算出鐵回收率。

四、CNC 廢鐵塊回爐成果說明

1.快速節能造塊方法開發

本研究選用常見且便宜之澱粉、皂土、消石灰及水泥等 4 種原料來當黏著劑，其比例配方為黏結劑 2%與水 3~5%，並利用工業用可量產之低壓(100Kg/cm^2)造塊設備進行造塊，其不同黏著劑之結塊效果如圖 6 所示，由圖中可知結塊後成形效果最佳為皂土，最差為消石灰，其成形率比較為皂土＞澱粉＝水泥＞消石灰，但即使是使用皂土進行結塊，其成形性還是相當不良，約成形率不到 50%，由此得知在低壓下使用這 4 種黏著劑對廢鐵粉結塊造粒之效果均不理想。

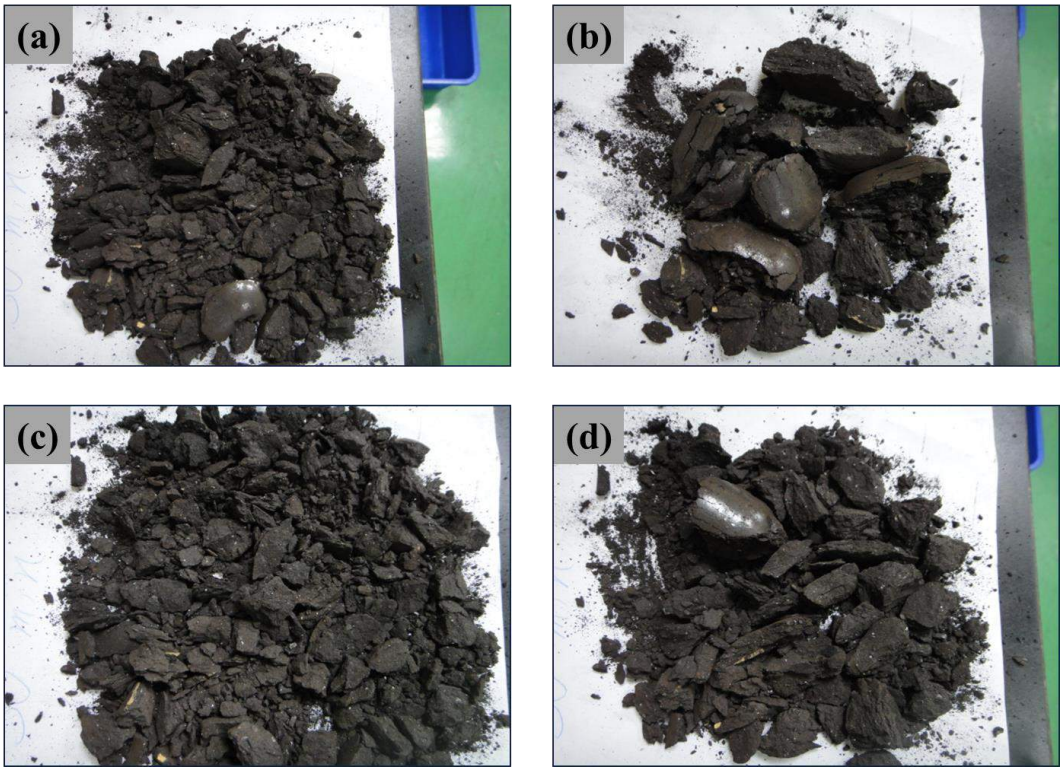


圖 6　不同黏著劑經工業用可量產之低壓(100 Kg/cm^2)造塊設備造塊後之成形性照片：(a)澱粉；(b)皂土；(c)消石灰；(d)水泥

本研究得知針對廢鐵粉屑進行結塊，其最大影響因素為壓力，因此本研究設計 3 種不同壓力進行 100%廢鐵粉屑結塊之成形性測試，其結果如圖 7 所示，由圖中可知隨著壓力的增加則成形性亦隨之增加，且若以高壓進行結塊則成形性相當優良，可達到 100%的成形率。本研究亦針對高壓成型結塊技術進行產能與成本評估，其結果如表 1 所示，就產能的計算結果得知每分鐘約可造出 2.5 公斤的廢鐵塊，以每天運轉 12 小時計算則產

量約為 1.8 公噸/天。由表 1 的成本計算得知若要生產出可用之廢鐵塊，則總成本約為 3,580 元/噸，相較廢鋼價格便宜許多，具有取代廢鋼當冶煉之鐵來源之原料。

圖 7　不同壓力下之結塊效果：(a)低壓；(b)中壓；(c)高壓

表 1　CNC 廢鐵塊之成本

項目	名稱	總計 (元/公噸)
1.原料費	廢鐵粉	2,000
2.設備使用費	成形結塊設備	395
3.設備維護費	結塊設備	59.3
4.行政費用	人事費	824.1
	運費	175
	電費	126
合計		3,579.4

1. 原料費的廢鐵粉回收進來每噸約 2,000 元。
2. 設備使用費以兩台新品的成形結塊設備計算，兩台儀器 2,438,000 元、假設可以使用 6 年、1 年運做 300 天、1 天 12 個小時、每 1 公噸結塊需花 3.5 小時。
   2438000/(6×300×12)(元/小時) ×3.5(小時/噸) = 395 元/公噸
3. 設備維護費在結塊設備的部分，預估大約佔設備使用費的 15%左右， 所以把第 2 項得到的 395*0.15 = 59.3 元/公噸
4. 行政費用又分成人事費、運費和電費三個部分，
   行政費用人事費的部分，26.1 + 290 +508 = 824.1 元/公噸
   A.廢鐵粉儲存至工廠: 1(人) ×145(元/小時×人) ×0.18(小時/噸) = 26.1 元/公噸
   B.廢鐵粉分類: 2(人) ×145(元/小時×人) ×1(小時/噸) = 290 元/公噸
   C.廢鐵粉結塊: 1(人) ×145(元/小時×人) ×3.5(小時/噸) = 508 元/公噸
   行政費用運費的部分，3500(元/卡車) ×1/20(噸/卡車) = 175 元/公噸
   行政費用電費的部分，廢鐵粉結塊 21(度/噸) ×6(元/度) = 126 元/公噸

總結成本: 2000+ 395+ 59.3 +824.1 +175 +126 = 3579.4 元/公噸

2.CNC 廢鐵塊之鐵回收率試驗

本研究已利用真空週波爐進行 CNC 廢鐵塊之切削油比例計算，其試驗過程中之照片如圖 8 所示，本研究利用圖 8 之方法總共測試 10 爐次，並取平均來得知 CNC 廢鐵塊之切削油比例，其結果如表 2 所示，由表中可知平均金屬回收率高達 93.7%，顯示 CNC 廢鐵塊中含約 7%的切削油。

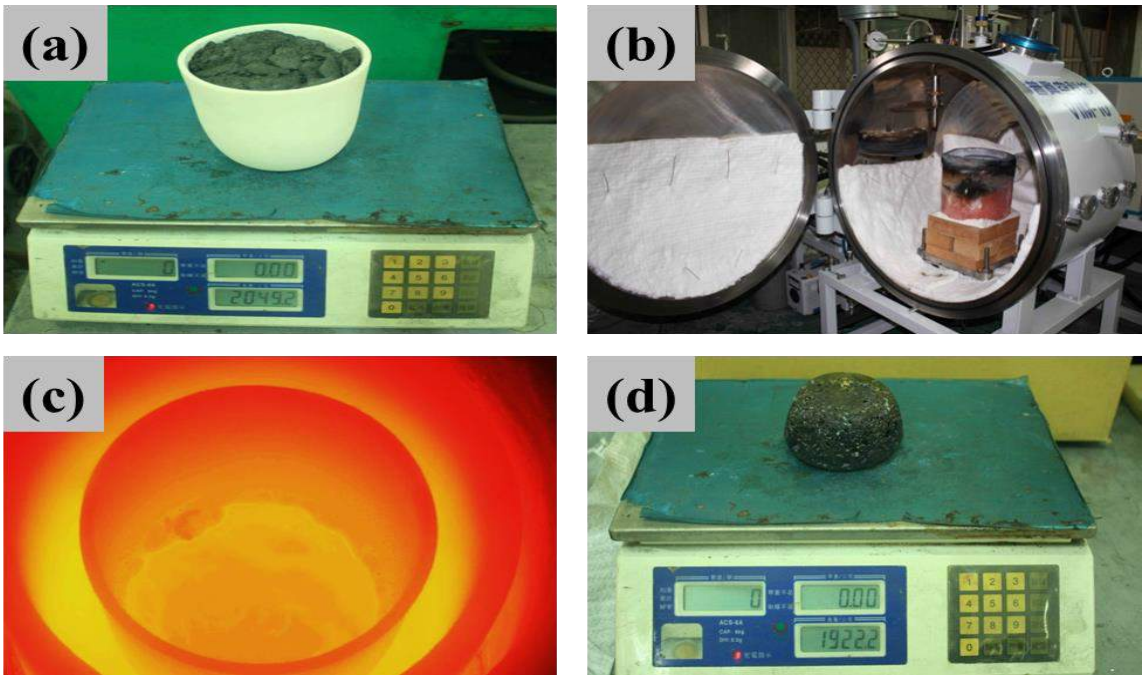


圖 8　真空週波爐測試 CNC 廢鐵塊之切削油比例方法：(a)量測初始重量；(b)放入真空週波爐內；(c)加熱狀態；(d)量測液化鋼水凝固後重量

表 2　CNC 廢鐵塊之含切削油比例計算

爐次	廢鐵塊原始重量(克)	後來的重量(克)	損失的重量(克)	金屬鐵回收率%
1	3344.5	3110.8	233.7	93.0%
2	3339.7	3135.6	204.1	93.8%
3	3329.0	3090.8	238.2	92.8%
4	3270.2	3081.8	188.4	94.2%
5	3168.6	2971.4	197.2	93.7%
6	2188.8	2049.2	139.6	93.6%
7	2066.8	1937.0	129.8	93.7%
8	2049.2	1922.2	127.0	93.8%
9	2020.2	1902.8	117.4	94.1%
10	2002.2	1883.6	118.6	94.0%
平均				93.7%

本研究亦將凝固後之鋼錠使用火光放電光譜分析儀進行成份定量分析其結果如表 3 所示，每一組鋼錠之數據皆為分析 5 次後的平均值，由表中之成份平均數據顯示其 P 與 S 的成份含量約為 0.014wt%，含量與傳統廢鋼相比來得低很多，相當具有取代廢鋼回爐的潛力。

表 3　鋼錠之化學成份定量分析結果

組別	成分(wt%)										金屬鐵之回收率%
	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	Al	
1	0.122	0.022	0.106	0.015	0.013	0.086	0.070	1.254	0.072	0.0034	93.0%
2	0.484	0.204	0.282	0.015	0.017	0.086	0.061	1.278	0.139	0.0030	93.8%
3	0.146	0.021	0.107	0.017	0.014	0.087	0.069	1.238	0.078	0.0036	92.8%
4	0.507	0.197	0.285	0.016	0.015	0.081	0.070	1.377	0.140	0.0160	94.2%
5	0.114	0.023	0.103	0.014	0.013	0.086	0.068	1.206	0.071	0.0026	93.7%
6	0.141	0.022	0.102	0.013	0.011	0.083	0.063	1.177	0.072	0.0055	93.6%
7	0.484	0.201	0.271	0.011	0.011	0.087	0.057	1.198	0.120	0.0460	93.7%
8	0.524	0.234	0.287	0.012	0.014	0.084	0.059	1.260	0.137	0.2410	93.8%
9	0.131	0.021	0.103	0.016	0.017	0.086	0.067	1.232	0.077	0.0045	94.1%
10	0.480	0.203	0.278	0.012	0.013	0.086	0.060	1.248	0.132	0.0640	94.0%
平均	0.313	0.114	0.192	0.014	0.013	0.085	0.064	1.246	0.103	0.0380	93.7%

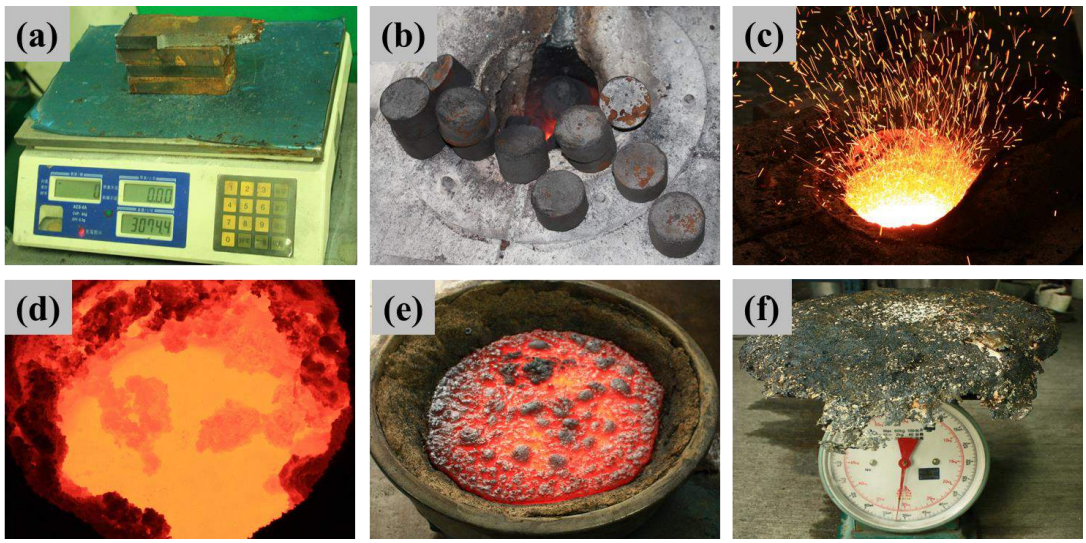


圖 9　大氣週波爐測試 CNC 廢鐵塊之切削油與液化鐵氧化損失總率方法：(a)量測初始重量；(b)放入大氣週波爐內；(c)加熱過程狀態；(d) 完全液化狀態；(e)出鋼後凝固過程狀態；(f)量測液化鋼水凝固後重量

本研究亦利用大氣週波爐進行 CNC 廢鐵塊之切削油與液化鐵氧化損失總率評估，其試驗過程中之照片如圖 9 所示，而測試之結果如表 4 所示，由表中可以得知其回收率可達 83.76%，與不同等級之傳統廢鋼回收率比較顯示，可歸類為中等級之廢鋼使用，而價格上又比傳統廢鋼便宜且不受國際廢鋼價格波動，具有相當優異之廢鋼回爐條件。本研究亦到台灣電弧爐鋼鐵廠實際進行 CNC 廢鐵塊回爐試驗，其結果如表 5 所示，由表中可知總共測試 4 爐次，且 CNC 廢鐵塊添加量為廢鋼投入總重的 4~10%，其測試結果顯示鐵回收率為 87~100%，且最終鋼液之 P 與 S 皆可達產品要求，且冶煉過程中不會增加任何電力成本，但可以降低廢鋼原物料成本，為相當具有取代廢鋼回爐的潛力。

表 4　模擬實際電爐煉鋼之 CNC 廢鐵塊的鐵回收率試驗結果

項次	100%鐵塊 (Kg)	廢鐵塊 (Kg)	熔煉後總重 (Kg)	實際回收重 (Kg)	回收率 %
1	3.070	34.26	32.20	29.13	85.03
2	16.71	17.81	31.20	14.49	81.36
平均	9.89	26.04	31.70	21.81	83.76

表 5　CNC 廢鐵塊之現場大爐測試結果

說明	第一爐	第二爐	第三爐	第四爐
廢鋼投入量	120.6 噸	107.0 噸	126.2 噸	126.3 噸
廢鐵塊投入量	11.1 噸(9.2%)	10.3 噸(9.6%)	5.1 噸(4.0%)	4.9 噸(3.9%)
鋼胚出鋼量	116.9 噸 (96.9%)	107.4 噸 (100.4%)	109.9 噸 (87.1%)	114.4 噸 (90.6%)
最終鋼品之 P 與 S 含量	P = 0.008% S = 0.011%	P = 0.010% S = 0.008%	P = 0.010% S = 0.007%	P = 0.010% S = 0.008%

五、結　論

如何找出低成本、價格穩定且可當電爐廢鋼來源使用之再生原料，為一項艱難與重要之任務與課題。本研究結合中興大學-金屬研發中心、嘉德公司、詠泰公司與皓勝公司等之專長，共同開發 CNC 廢鐵塊回爐再生技術。研究結果顯示廢鐵粉屑進行結塊時，其最大影響因素為壓力，且在高壓下可達 100%成形率，其總成本約為 3,580 元/噸，相較廢鋼價格便宜許多。利用真空週波爐進行 CNC 廢鐵塊之切削油比例計算結果顯示約含 7%的切削油，而鋼錠之 P 與 S 的成份含量約為 0.014wt%，含量與傳統廢鋼相比來得低很多。利用大氣週波爐進行 CNC 廢鐵塊之切削油與液化鐵氧化損失總率評估結果顯示其合金鐵回收率可達 83.76%，與不同等級之傳統廢鋼回收率比較顯示，可歸類為中等級之廢鋼使用，而價格上又比傳統廢鋼便宜且不受國際廢鋼價格波動，具有相當優異之廢鋼回爐條件。由台灣電弧爐鋼鐵廠實際進行 CNC 廢鐵塊回爐試驗結果顯示鐵回收率為 87~100%，且最終鋼液之 P 與 S 皆可達產品要求，且冶煉過程中不會增加任何電力成本，但可以降低廢鋼原物料成本，為相當具有取代廢鋼回爐的潛力。

六、 參考文獻

1. 埃德温.巴松，世界鋼鐵統計數據 2016，世界鋼鐵協會.
2. 2016 年 1-12 月台灣工具機出口速報，台灣區工具機暨零組件工業同業公會.
3. 陳建任，2016 鋼鐵年鑑-總篇論，經濟部技術處產業技術知識服務計畫.

煉鋼爐石應用於綠色建材資源化之研究

賈佳蓉*、李震輝*、柯明賢**

摘　要

鋼鐵業在煉鋼過程所產生的鐵鋼爐石產量龐大，包括一貫作業煉鋼過程產生的高爐石、脫硫渣及轉爐石，以及電弧爐煉鋼過程產生的電弧爐爐碴等。水淬高爐石經研磨後具有高活性，可在鈣基活化劑的激發下產生膠結性，適合作為膠結材料之原料。由於脫硫渣具高 pH 值且化學成分與水泥熟料相近，利用脫硫渣之高鹼性及高 CaO 含量之特性與水淬高爐石粉結合，亦適合作為膠結材料之原料。而電弧爐氧化碴之物化性質適合作為建築材料中級配粒料之應用，惟在煉鋼過程中，為去除鋼液中的雜質常加入過量的石灰，導致電弧爐氧化碴含有微量的游離氧化鈣，而游離氧化鈣的膨脹特性使其在應用受到限制，影響電弧爐氧化碴後續資材化之利用價值。因此，若能將脫硫渣、水淬高爐石粉及鈣基活化劑等合成綠色膠結材取代水泥，並進一步結合電弧爐氧化碴粒料製作綠色砂漿，期將煉鋼爐石資源化應用於綠色建材。

本研究首先分析水淬高爐石粉、電弧爐氧化碴與脫硫渣之基本物化特性，而後以脫硫渣、鈣基活化劑及水淬高爐石粉等合成綠色膠結材料，探討鈣基活化劑中脫硫渣不同含量對膠結材料性質之影響。接著，以最適配比之膠結材料結合電弧爐氧化碴粒料產製砂漿，探討不同養護條件對砂漿特性之影響。由研究結果可以發現，以脫硫渣取代 20%之鈣基活化劑，所合成的膠結材料於飽和石灰水養護 28 天後之抗壓強度為 18.7 MPa，再以膠結材料與電弧爐氧化碴粒料比 1：2.75 製成砂漿，於飽和石灰水養護 28 天後之抗壓強度為 27.01 MPa。綜合以上研究結果顯示，以煉鋼爐石產製綠色膠結材料及砂漿具有資材化之潛勢。

【關鍵詞】煉鋼爐石、水淬高爐石粉、綠色膠結材料、綠色砂漿

---

*國立台北科技大學資源工程所　研究生

**國立台北科技大學資源工程所　副教授

一、前　言

1.研究緣起

近年來隨著經濟的蓬勃發展，營建工程及公共建設不斷擴增，使得鋼鐵與水泥的需求也與日俱增。其中鋼鐵業在煉鋼過程中伴隨著大量之煉鋼爐石產生，早期煉鋼爐石被視為廢棄物進行海拋或土地掩埋，未能將煉鋼爐石逕行有效之資源化，實為資源的浪費。煉鋼爐石資源化不但可以達到廢棄物減量及零廢棄，亦可達到資源循環再利用之終極目標。

鋼鐵業在煉鋼過程所產生的鐵鋼爐石產量龐大，包括一貫作業煉鋼過程產生的高爐石、脫硫渣及轉爐石，以及電弧爐煉鋼過程產生的電弧爐爐碴等。水淬高爐石經研磨後具有高活性，可在鈣基活化劑的激發下產生膠結性，適合作為膠結材料之原料。由於脫硫渣具高 pH 值且化學成分與水泥熟料相近，利用脫硫渣之高鹼性及高 CaO 含量之特性與水淬高爐石粉結合，亦適合作為膠結材料之原料。而電弧爐氧化碴之物化性質適合作為建築材料中級配粒料之應用，惟在煉鋼過程中，為去除鋼液中的雜質常加入過量的石灰，導致電弧爐氧化碴含有微量的游離氧化鈣，而游離氧化鈣的膨脹特性使其在應用受到限制，影響電弧爐氧化碴後續資材化之利用價值。因此，若能將脫硫渣結合鈣基活化劑與水淬高爐石粉合成可取代水泥之綠色膠結材料，並進一步結合電弧爐氧化碴粒料製作綠色砂漿，應具有技術、經濟與環境上之可行性。

郭文田等人以水淬爐石與脫硫渣粉為膠結材料、脫硫渣為骨材，產製無卜特蘭水泥之高流動性低強度材料(CLSM)。結果顯示以脫硫渣骨材取代天然骨材之砂漿，抗壓強度隨水淬爐石用量減少而降低，顯示水淬爐石為主要強度來源。脫硫渣骨材因磨損率達 40%，取代天然骨材後抗壓強度降低[5]。

綜合以上所述，將脫硫渣結合鈣基活化劑與水淬高爐石粉並以電弧爐氧化碴為粒料，產製膠結材料及砂漿等綠色建材，不僅可以減輕水泥的開發，亦可提昇煉鋼爐石再利用之技術層次。因此，本研究以不同比例之脫硫渣結合鈣基活化劑與水淬高爐石粉合成膠結材料，進行膠結材料之特性分析，以評析脫硫渣作為綠色膠結材料之可行性及最適配比，進一步結合電弧爐氧化碴粒料產製砂漿，進行砂漿之特性分析，以評析電弧爐氧化碴作為綠色砂漿之可行性，以達到煉鋼爐石作為綠色建材之資材化目標。

2.研究目的

本研究首先分析水淬高爐石粉、脫硫渣及電弧爐氧化碴等之基本物化特性，接著，以脫硫渣、鈣基活化劑及水淬高爐石粉合成綠色膠結材料，探討脫硫渣添加比對膠結材料性質之影響。再以最適配比之膠結材料結合電弧爐氧化碴產製砂漿，探討於不同養護條件下其抗壓強度之變化，以評估以煉鋼爐石合成綠色砂漿之可行性。茲將主要研究目的分述如后。

(1)針對水淬高爐石粉、脫硫渣及電弧爐氧化碴進行基本特性分析，包括物理特性、化學特性等，以瞭解前述鐵鋼爐石之基本特性，作為評析煉鋼爐石作為膠結材料及砂漿可行性之參考依據。

(2)將脫硫渣結合鈣基活化劑及水淬高爐石粉產製綠色膠結材料，探討膠結材料之工作性、力學特性、物理特性，評估脫硫渣結合鈣基活化劑及水淬高爐石粉作為綠色膠結材料之可行性及最適配比。

(3)以最適配比所合成之膠結材料與電弧爐氧化碴粒料作為骨材合成砂漿，探討其工作性、力學特性、物理特性，評估上述最適配比之膠結材料結合電弧爐氧化碴粒料合成綠色砂漿之可行性。

二、實驗方法、材料及設備

1.實驗流程

本研究共分為三階段進行探討，研究流程如圖 1 所示。第一階段先針對水淬高爐石粉、脫硫渣及電弧爐氧化碴進行基本特性分析，以瞭解鐵鋼爐石之基本特性，並依上述之分析結果評析煉鋼爐石作為膠結材料及砂漿之參考依據。

第二階段探討鈣基活化劑中不同含量之脫硫渣，結合水淬高爐石粉製成膠結材料，由工作性(管流度、初/終凝時間)、抗壓強度、物理特性之變化，評估煉鋼爐石作為膠結材料之可行性及最適配比。

第三階段以最適配比所合成之膠結材料與電弧爐氧化碴粒料合成砂漿，探討其對於稠度、凝結時間、抗壓強度及物理特性，評估上述最適配比之膠結材料結合電弧爐氧化碴粒料合成砂漿之可行性。

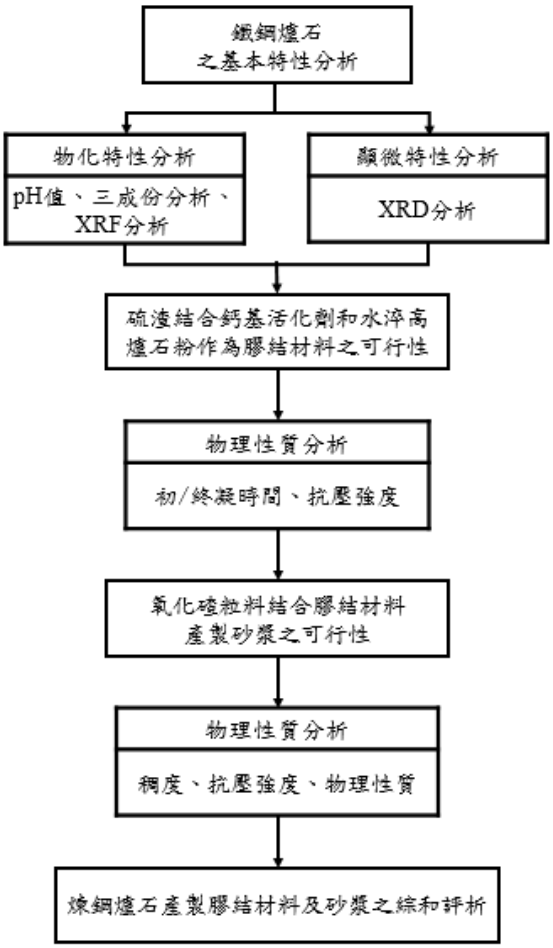


圖 1　研究流程圖

2.實驗材料及設備

本研究所使用之材料為脫硫渣、電弧爐氧化碴、水淬高爐石粉、氫氧化鈣及天然砂石，脫硫渣及電弧爐氧化碴產自中部某煉鋼廠，水淬高爐石粉則使用中聯資源股份有限公司之 S6000 水淬高爐石粉。

本研究所採用之脫硫渣及電弧爐氧化碴，均先經過烘箱乾燥 24 hr 去除水份後進行篩分，脫硫渣粒徑範圍在 < 0.150 mm 作為合成膠結材料使用，電弧爐氧化碴粒徑範圍在 0.15 mm ~ 4.75 mm 作為粒料使用。

3.膠結材料、砂漿之合成

本階段以脫硫渣結合鈣基活化劑及水淬高爐石粉製成膠結材料，探討鈣基活化劑中脫硫渣不同取代量對膠結材料性質之影響。接著以添加 20 % 脫硫渣之膠結材料結合電弧爐氧化碴產製砂漿，以骨膠比 2.75 及砂漿稠度控制在 75 ± 3 mm 進行配製，故砂漿拌合用水量則依控制砂漿稠度而有所調整。灌鑄後之試體放置於室溫下 24 hr 後進行脫模，接著將試體置於飽和石灰水中養護，並養護至特定齡期後進行試驗，藉以評析煉鋼爐石作

為膠結材料及砂漿之可行性及最適參數。煉鋼爐石合成膠結材料與砂漿之配比如表 1 所示。

表 1　膠結材料與砂漿之配比

編號	膠結材			骨材 (g)
	鈣基活化劑		GGBFS (g)	
	脫硫渣 (g)	氫氧化鈣 (g)		
B-0%	0	200	800	0
B-20%	40	160	800	0
B-100%	200	0	800	0
M-20%	40	160	800	2750
B 為膠結材料、M 為砂漿、數字為鈣基活化劑取代比例				

三、結果與討論

1.鐵鋼爐石之特性分析

水淬高爐石粉、脫硫渣及電弧爐氧化碴之三成份及 pH 值如表 2 所示，由表中分析結果顯示鐵鋼爐石均為經過高溫冶煉後之副產物，故水淬高爐石粉、脫硫渣及電弧爐氧化碴之水份及可燃份較低，主要均以灰分為主。而在 pH 值分析結果可看出，脫硫渣及電弧爐氧化碴 pH 值分別為 11.20 及 11.10，皆屬高鹼性，其高鹼性主要係因為煉鋼爐石中含有部分游離氧化鈣及氫氧化鈣等成分造成。

表 2　鐵鋼爐石之三成份及 pH 值分析

	水份(%)	灰份(%)	可燃份(%)	pH 值
水淬高爐石粉	0.25	99.5	0.25	9.21
脫硫渣	1.49	94.75	3.76	11.20
電弧爐氧化碴	1.93	97.11	0.96	11.10

由表 3 分析結果顯示水淬高爐石粉主要化學成分以 CaO、SiO_2 及 Al_2O_3 為主，而脫硫渣及電弧爐氧化碴之化學組成主要以 CaO、SiO_2、Al_2O_3 及 Fe_2O_3 為主。

表 3　鐵鋼爐石之化學組成分析

Element (%)	CaO	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MnO_2	SO_3	TiO_2	Cr_2O_3	P_2O_5	ZnO
水淬高爐石粉	52.4	30.8	13.6	0.4	0.6	1.7	0.8	-	-	-
脫硫渣	55.5	13.0	6.0	18.2	2.0	4.2	0.5	0.4	-	-
電弧爐氧化碴	31.6	11.6	7.9	32.8	4.3	1.0	0.5	0.7	0.9	0.1

為了瞭解水淬高爐石粉、脫硫渣及電弧爐氧化碴之顯微特性，本研究進一步進行顯微特性分析，利用 X 光繞射分析進行結晶相之分析，以瞭解其晶相組成，分析結果如圖 2 所示。圖 2 (a)為水淬高爐石粉之 X 光繞射分析結果，由圖中顯示水淬高爐石粉主要以非晶質結構存在，因水淬高爐石為水淬急速冷卻下所形成，尚未結晶之玻璃相因此大量生成。圖 2 (b)為脫硫渣之 X 光繞射分析結果，由圖中顯示脫硫渣主要以 Portlandite [$Ca(OH)_2$]晶相存在，顯示脫硫渣具有作為鈣基活化劑之潛勢。圖 2 (c)為電弧爐氧化碴之 X 光繞射分析結果，由圖中顯示電弧爐氧化碴主要以 Calcite [$CaCO_3$]、Calcium Silicate [Ca_3SiO_5]、Wustite [FeO]、Quartz Low [SiO_2]、Magnesioferrite [Mg-Fe_2O_3]及 Magnesia [MgO]等晶相存在。

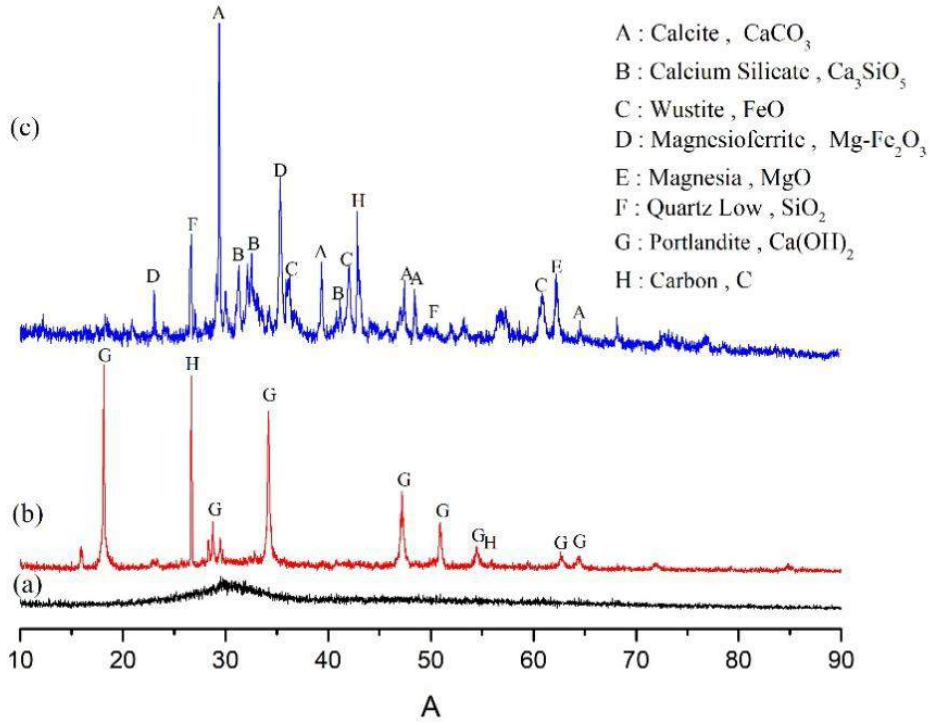


圖 2　(a)水粹高爐石粉(b)脫硫渣(c)電弧爐氧化渣之 XRD 分析圖

Lam 等人研究指出 EAF 爐碴可能含有游離 CaO，當游離 CaO 轉變 $Ca(OH)_2$ 時，其體積變成其原始尺寸的兩倍，進而導致破裂和劣化的產生[2]。故本研究參照 CNS 15311【粒料受水和作用之潛在膨脹試驗法】，量測電弧爐氧化碴夯實密級配粒料之潛在性體積膨脹性，電弧爐氧化碴之膨脹趨勢圖如圖 3 所示，由圖中顯示電弧爐氧化碴之 7 天膨脹值為 0.207 ± 0.022 %，低於 CNS 15311 所規範之膨脹量最大值不得 ＞0.5 %，顯示出電弧爐氧化碴並無潛在之膨脹性。

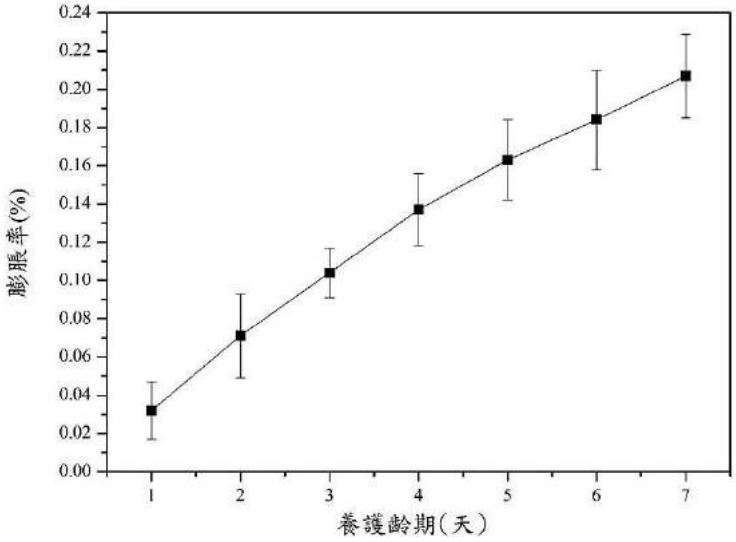


圖 3　電弧爐氧化碴經 CNS15311 試驗之膨脹趨勢圖

2.膠結材料之特性分析

(1)工作特性分析

本研究針對不同脫硫渣含量之膠結材料進行初/終凝時間影響之探討，初/終凝時間之測試係參考 CNS 786/R3032，以費開氏針之針入度作為初/終凝時間之判定，測試結果如圖 4 所示，由圖中可以發現當脫硫渣取代比增加時，初/終凝時間亦隨之增加，顯示添加脫硫渣對於膠結材料會有緩凝之現象發生，也有許多研究指出，當水泥中的礦物摻合料取代比增加時，其凝結時間也隨之增加[1,3]。

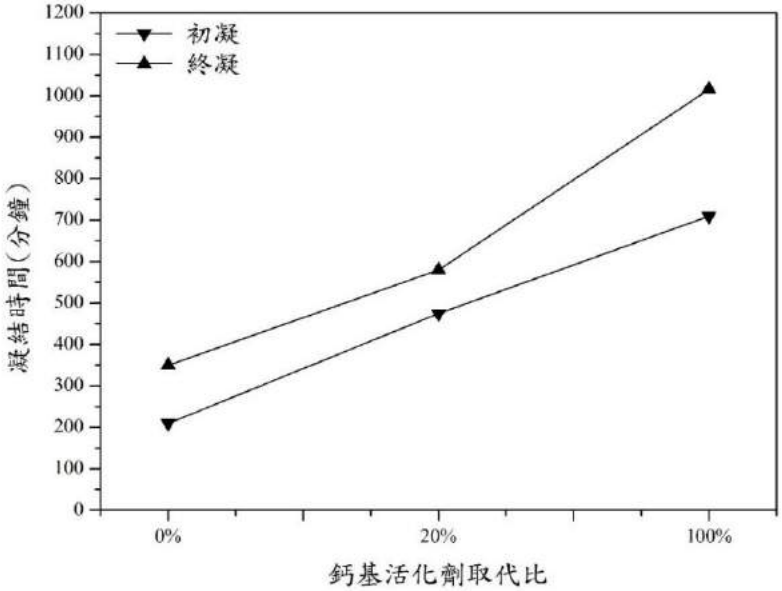


圖 4　鈣基活化劑中脫硫渣不同含量之初/終凝時間

(2)機械特性

圖 5 及 6 為不同脫硫渣添加量之膠結材料，於不同養護條件下之抗壓強度變化趨勢，由圖中可知在大氣養護膠結材料之抗壓強度明顯隨養護時間而降低,其主要原因為在大氣中養護之試體內水分易散失，而無法有效進行水化作用，導致膠結材料之抗壓強度先成長而後下降。

膠結材料於飽和石灰水養護之抗壓強度，隨著齡期的增加有著穩定的強度發展，在齡期 1 天時，由於未添加脫硫渣的膠結材料反應較快，因此有著最高之抗壓強度，而添加脫硫渣之組別有緩凝現象的產生，抑制了水淬高爐石粉的水化，因此強度發展較低。且隨著脫硫渣含量的增加，鈣基活化劑的鹼度逐漸下降，抗壓強度也逐漸遞減。由齡期 28 天之抗壓強度可明顯看出，脫硫渣含量增加至 100% 時，由於鹼度的降低導致膠結材料水化反應較差，使得其 28 天抗壓強度有下降之現象。另外，膠結材料外觀如圖 7 所示，由膠結材料之外觀來看，當長時間與大氣接觸後試體有開裂的現象發生，而飽和石灰水養護之膠結材料其結構則較為緻密。

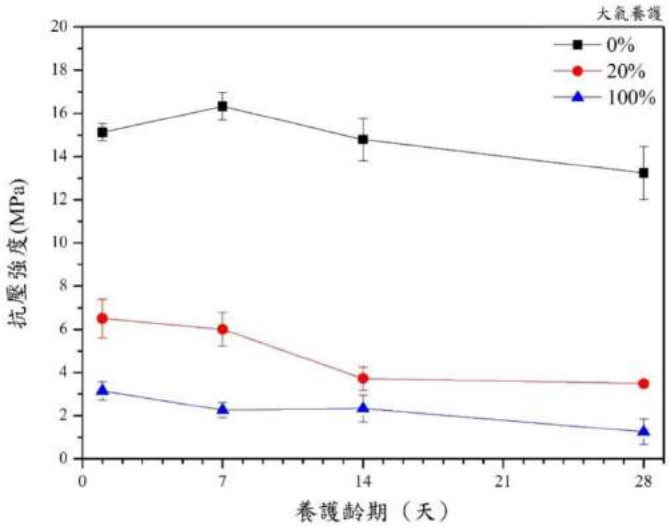


圖 5　膠結材料於大氣養護 28 天之抗壓強度圖

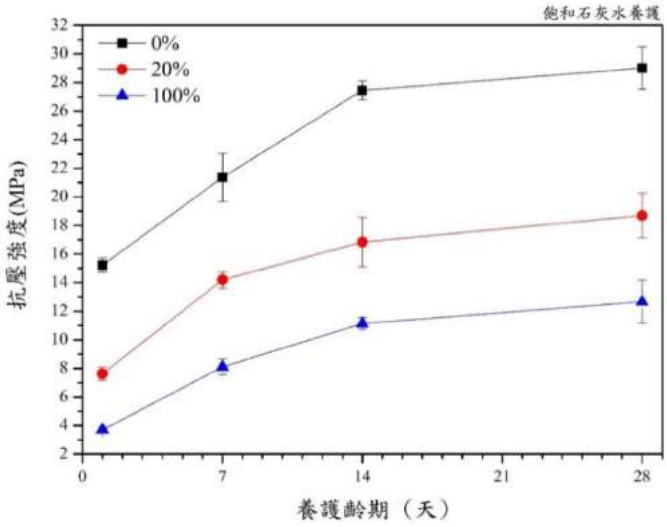


圖 6　膠結材料於飽和石灰水養護 28 天之抗壓強度圖

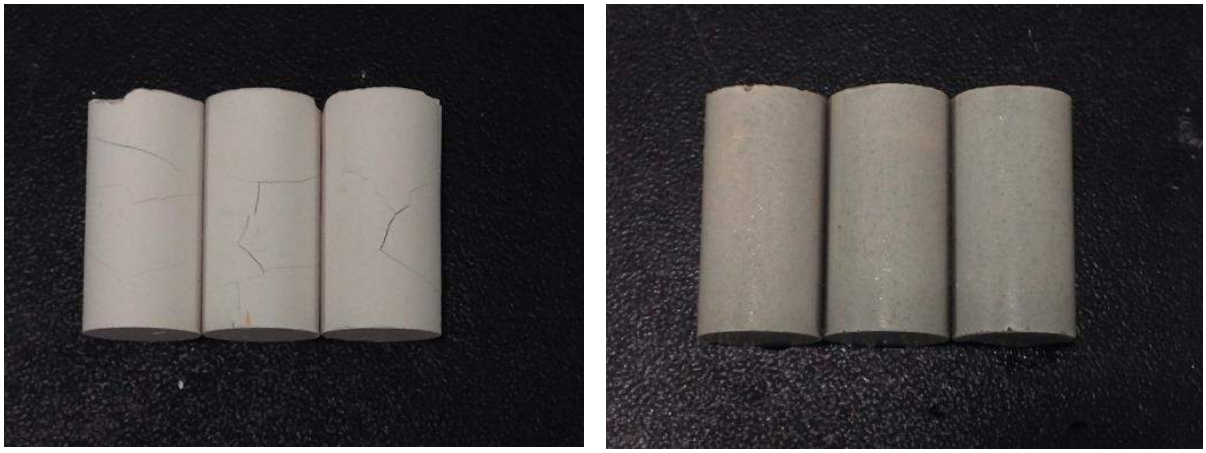


圖 7　不同養護條件下膠結材料外觀

3..砂漿之特性分析

一般而言，砂漿及混凝土強度隨著水膠比降低而提高，而工作性則隨著水膠比提高而增加[4]。又若稠度降低、工作性不佳時，則不易振搗密實而容易出現蜂窩或孔洞，以導致混凝土強度降低。故本研究將 3.2 節中最適配比之膠結材料與電弧爐氧化碴(1:2.75)合成之砂漿稠度控制在 75 ± 3 mm 內，而此時煉鋼爐石砂漿之凝結時間約在 154 min。

(1)機械特性

圖 8 為煉鋼爐石砂漿在大氣及飽和石灰水等不同養護條件下抗壓強度之時間變化趨勢，由圖中顯示煉鋼爐石砂漿之抗壓強度隨著齡期的增加有著穩定發展之趨勢。而大氣養護之抗壓強度明顯比飽和石灰水養護低，大氣養護之砂漿其 28 天之抗壓強度為 19.36 MPa，飽和石灰水養護之砂漿其 28 天之抗壓強度為 27.01 MPa，相差約 8 MPa。這可能是因為砂漿試體在大氣養護下其內部水分易散失，使膠結材料無法有效進行水化作用，導致砂漿抗壓強度較低，而於飽和石灰水養護之砂漿試體其結構則較為緻密。

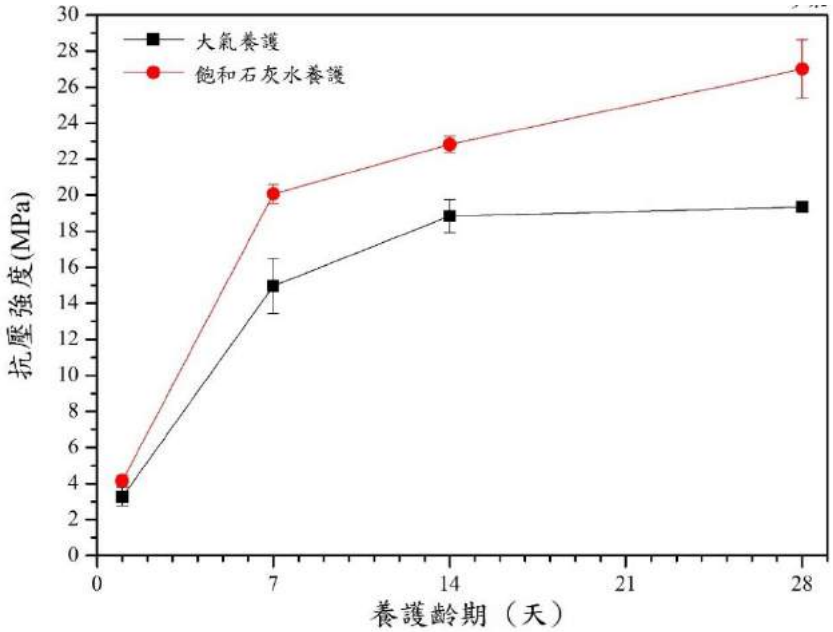


圖 8　砂漿於不同養護下之抗壓強度圖

另外，煉鋼爐石砂漿在大氣及飽和石灰水等不同養護條件下養護 28 天之物理特性如表 4 所示，由表 4 之砂漿物理特性可以看出，在飽和石灰水中養護之砂漿因其結構則較為緻密，故其體密度、孔隙率及吸水率皆比在大氣中養護之砂漿低。

表 4　煉鋼爐石砂漿養護 28 天之物理性質

養護條件	體密度(g/cm^3)	孔隙率(%)	吸水率(%)
大氣	2.39	26.83	10.93
飽和石灰水	2.45	23.25	9.71

四、結　論

1. 脫硫渣主要以氫氧化鈣晶相存在,顯示脫硫渣具有結合鈣基活化劑及水淬高爐石粉合成膠結材料之之潛勢。
2. 電弧爐氧化碴經 CNS 15311【粒料受水和作用之潛在膨脹試驗法】試驗，顯示其膨脹值為 0.207 ± 0.022 %，低於 CNS 15311 所規範之膨脹量最大值不得 ＞0.5 %，顯示出電弧爐氧化碴並無潛在之膨脹性。
3. 添加脫硫渣結合鈣基活化劑及水淬高爐石粉合成膠結材料,膠結材料之凝結時間會隨著脫硫渣添加量增加而延長,顯示添加脫硫渣會使得膠結材料產生明顯的緩凝現象。
4. 由煉鋼爐石膠結材料及砂漿之抗壓強度變化趨勢顯示，在大氣中養護 28 天之抗壓強度明顯較在飽和石灰水中養護為低,主要係因為在大氣中養護之試體內水分易散失，而使得膠結材料無法有效進行水化作用所致。
5. 以脫硫渣取代鈣基活化劑 20%與水淬高爐石粉合成之膠結材料，其於飽和石灰水中養護 28 天之抗壓強度為 18.7MPa，而再以電弧爐氧化碴為細粒料合成砂漿於飽和石灰水中養護 28 天，其試體之抗壓強度可達 27.01 MPa。
6. 綜合以上研究結果顯示,以脫硫渣結合鈣基活化劑及水淬高爐石粉合成綠色膠結材料，再以電弧爐氧化碴為細粒料合成綠色砂漿，為脫硫渣與電弧爐氧化碴等煉鋼爐石資材化之可行技術。

五、參考文獻

1. Alhozaimy, A., Al-Negheimish, A., Alawad, O. A., Jaafar, M. S., Noorzaei, J. , “Binary and ternary effects of ground dune sand and blast furnace slag on the compressive strength of mortar,” Cement and Concrete Composites,

Vol. 34, No.6, 2012, pp. 734-738.

2. Lam, M. N. T., Jaritngam, S., Le, D. H. , “ Roller-compacted concrete pavement made of Electric Arc Furnace slag aggregate: Mix design and mechanical properties,“ Construction and Building Materials, Vol. 154, 2017 , pp. 482-495.
3. Zhao, H., Sun, W., Wu, X., Gao, B., “The properties of the self-compacting concrete with fly ash and ground granulated blast furnace slag mineral admixtures,” Journal of Cleaner Production, Vol. 95, 2015, pp. 66-74.
4. 黃兆龍，混凝土性質與行為，詹氏書局，2003。
5. 郭文田、翁明偉，利用脫硫渣與水淬爐石產製無卜特蘭水泥控制性低強度材料，國立高雄應用科技大學土木工程系，中正嶺學報第三十八卷第一期，2009。

廢氫氟酸回收再利用技術的可行性評估

吳和生*

摘　要

電子元件製造業於晶片製程對表面的污染極為敏感，製程中必須維持乾淨的晶片表面，不潔的表面將可能影響薄膜的沈積與微影等製程良率外，也會影響產量和性能，故不論矽晶體或高階矽積體電路，維持晶片表面乾淨之重要性逐漸增加。移除晶片表面的細微污染物，一般是以氫氟酸浸泡進行清洗，惟長時間的浸泡，細微雜質將會逐漸增加，在影響品質與良率前，進行氫氟酸的汰換。

廢氫氟酸廢棄排放，如濃度過高，在廢水處理時會造成處理系統負荷過高。因此，需將此類氫氟酸廢液單獨儲存進行再利用行為。廢氫氟酸再利用技術可分成二部份，(1)提高氫氟酸濃度，技術可分為(a)直接由廢氫氟酸提取高濃度氫氟酸。(b)加入純氫氟酸提濃原氫氟酸廢液濃度，此類產品可用於不銹鋼酸洗劑。(2)氫氟酸反應成氟化鈣，一般產業氫氟酸廢液處理系統是以鈣鹽(如 $CaCO_3$、$CaCl_2$ 和 $Ca(OH)_2$)沈澱法以去除廢水之氟離子，形成氟化鈣污泥。氟化鈣污泥通常以掩埋方式處理，由於氟化鈣具有降低礦物相燒結熔點之特性，可使用作為鋼鐵、陶瓷、玻璃、煉铝等工業之助熔劑。

本研究評估將針對上述廢氫氟酸再利用技術進行評估，透過 ASPEN 軟體單元的建立，物質物理化學性質的分析以及質量與能量平衡，並能提供相關數據以增進氫氟酸的再利用，提供相關事業單位處理的依據。

【關鍵詞】氫氟酸、氟化鈣、晶片製程、再利用技術

---

*元智大學化學工程與材料科學學系　教授

電子元件製造業於晶片製程中必須維持乾淨的晶片表面以利進行下一程序，由於電子元件對表面汙染極為敏感，除可能影響薄膜沉積為影等製程良率外，也會影響產量和性能，故不論晶體或高階系積體電路，維持晶片表面乾淨之重要性逐次遞增。在移除晶片表面的細微汙染物，其中包含離子金屬不純物、有機汙染物、以及反應所生成物如 B_2O_3/P_2O_5 等，以達到元件品質及可靠度;由於氫氟酸主要做清洗這些不純物，其中所含之雜質會逐漸累積，為確保製程之良率及保障產品之性能，故事業單位會定期進行浸泡清洗槽中氫氟酸清除處理。氫氟酸又名無水氟化氫，沸點 19.5°C，是一種無色透明液體，有強烈刺激性氣味，劇毒並有強烈的腐蝕性，可溶解玻璃，在半導體製程適合做浸蝕、清洗、刻劃標記晶片、除去含氧雜質。其解離方程式為：

$$HF \rightarrow H^+ + F^- \qquad Ka = 4.6 \times 10^{-4} \qquad (1)$$

在 pH 小於 2 時幾乎是以[HF]的型態存在於水溶液中，隨著 pH 升高，$[F^-]$的比例升高，在 pH 大於 5 後則在水溶液中幾乎以$[F^-]$的型態存在[1]。

一、氫氟酸廢液產出來源製程

半導體產品包含晶片、積體電路、二極體、電晶體...等, 每年含氟污染量在 2,000 噸以上，使用氫氟酸清洗的產業可能(1)二極體製造業，場內於晶片製程中，附磷硼及磷硼擴散製程均在高溫超過 1,200°C 的操作溫度反應，晶片與晶片會黏在一起，故需要經過高純度的氫氟酸在長時間的浸泡下，移除晶片表面的細微汙染物，其生產製造流程圖 1(a)所示。(2)半導體製造業，如圖 1(b)所示。由於氫氟酸對二氧化矽的蝕刻速率相當高，在製程上很難控制，因此在實際應用上都是使用稀釋後的氫氟酸溶液，或是添加氟化銨作為緩衝劑的混合液，來進行二氧化矽的蝕刻。氟化銨的加入可避免氟化物離子的消耗，以保持穩定的蝕刻速率。而無添加緩衝劑氫氟酸蝕刻溶液常造成光阻的剝離。典型的緩衝氧化矽蝕刻液(Buffer Oxide Etcher)(體積比 6：1 之氟化銨(40%)與氫氟酸(49%).

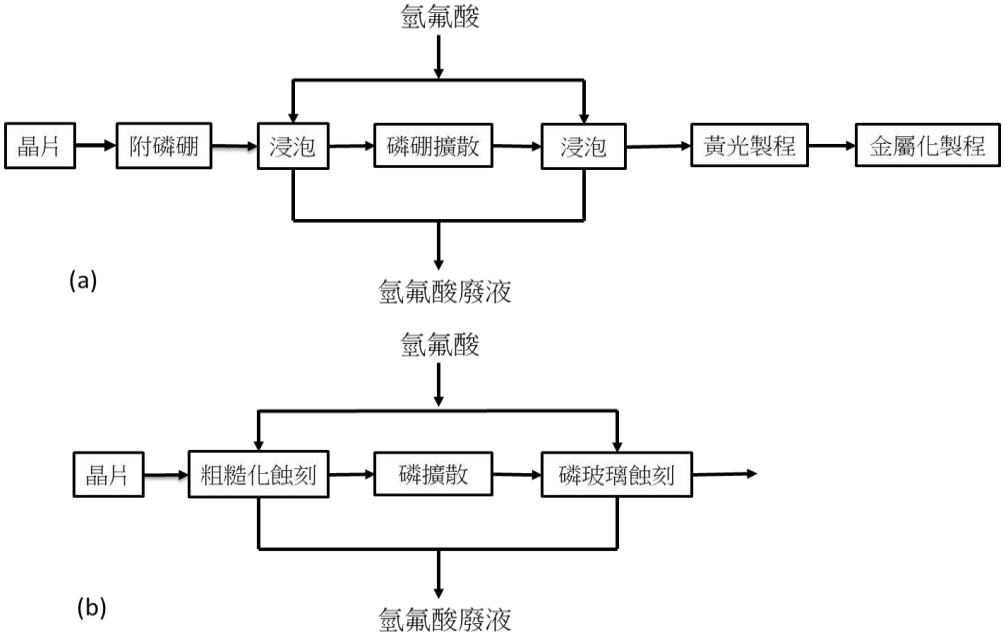


圖 1　(a)二極體(b)半導體之生產製程與氫氟酸廢液之來源

氫氟酸的所用主要是能夠溶解很多其他酸都不能溶解的二氧化矽玻璃以及絕大多數無機氧化物。二氧化矽反應式如下：

$$SiO_2 + 6HF \rightarrow H_2SiF_6 + 2H_2O \quad (2)$$

以上反應分兩步進行：

$$SiO_2 + 4HF \rightarrow SiF4 \uparrow + 2H_2O \quad (3)$$

SiF_4 易溶於水，與 HF 續反應：

$$SiF_4 + 2HF \rightarrow H_2SiF_6 \quad (4)$$

因此在廢水溶液也會含少量的 H_2SiF_6。

二、再利用技術

因廢氫氟酸排廢量太大，若直接排入廢水廠處理會造成放流水氟離子過高及 pH 值過低；因此在工廠內主要處理方式分成兩種方式回收系統收集廢氫氟酸，分別收集「中濃度」(> 6%)及「高濃度」(> 24 %)廢氫氟酸。另一方案則將低濃度廢氫氟酸(< 6%)進入污水前處理轉化成氟化鈣污泥[2,3]，如相關積體電路產業已建立氫氟酸廢水結晶處理整合回收技術[4]。

1.提高氫氟酸濃度，技術可分為(a)直接由廢氫氟酸提取高濃度氫氟酸。(b)

加入純氫氟酸提濃原氫氟酸廢液濃度，此類產品可用於不銹鋼酸洗劑。

2. 氫氟酸反應成氟化鈣，一般產業氫氟酸廢液處理系統是以鈣鹽(如 $CaCO_3$、$CaCl_2$ 和 $Ca(OH)_2$)沈澱法以去除廢水之氟離子，形成氟化鈣污泥。氟化鈣污泥通常以掩埋方式處理，由於氟化鈣具有降低礦物相燒結熔點之特性，可使用作為鋼鐵、陶瓷、玻璃、煉铝等工業之助熔劑。

3. 高濃度廢氫氟酸可形成冰晶石(Na_3AlF_6)，其反應為：

$$3Na^+ + Al^{3+} + 6F^- \rightarrow Na_3AlF_6 \quad (5)$$

冰晶石水中溶解度 0.04175g/L[5,6]。

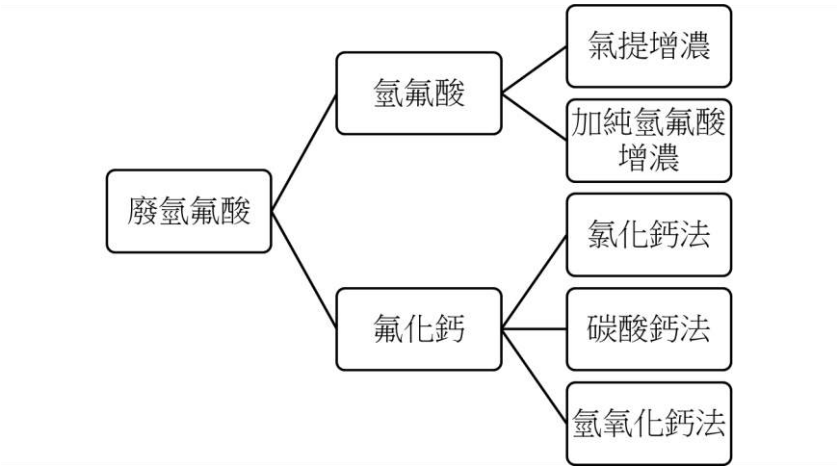


圖 2　處理廢氫氟酸之不同方法關係圖

三、技術可行性評估

本可行性評估是以美國 AspenTech 公司之 Aspen Plus 軟體進行模擬，Aspen Plus 是大型通用流程類比軟體。化工、石化、煉油等過程具實質參考。本研究所使用的熱力學使用 ELECNREL 模式，在系統中考慮兩平衡式：

$$HF + H_2O \rightleftharpoons F^- + H_3O^+ \quad (6)$$

$$2H_2O \rightleftharpoons OH^- + H_3O^+ \quad (7)$$

1.提高高濃度氫氟酸濃度

(1)直接由廢氫氟酸提取高濃度氫氟酸。

由於氫氟酸沸點 19.5 ^{o}C，水的沸點為 100 ^{o}C，兩者沸點相差應可利用熱能分離兩化合物。此部份模式以一個加熱器(heater)以調控溫度，閃蒸罐(Flash)做為氣液平衡。進料物流假設 24%氫氟酸水溶液(HF：1,200 kg/h，H_2O：3,800 kg/h)，進料溫度 25 ^{o}C，物流 S1 可得氣相之氫氟酸濃度，如圖 3 所示：

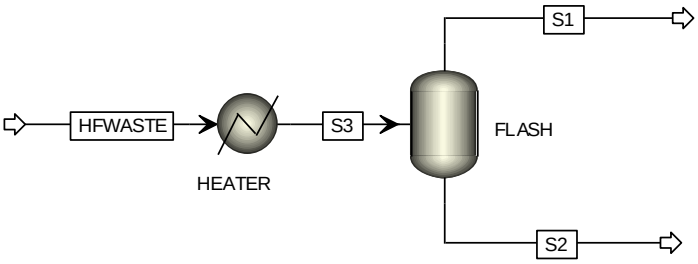


圖 3　利用熱能提升氫氟酸濃度製程模式

由摸擬結果如圖 4 所示，當操作溫度低 98 ^{o}C 時，在物流 S1 之氣相無發現有氫氟酸的濃度，在高於 98 ^{o}C 後約有 5%氫氟酸濃度，而後到 108°C 達到 24%氫氟酸濃度，包含所有的水都汽化了。

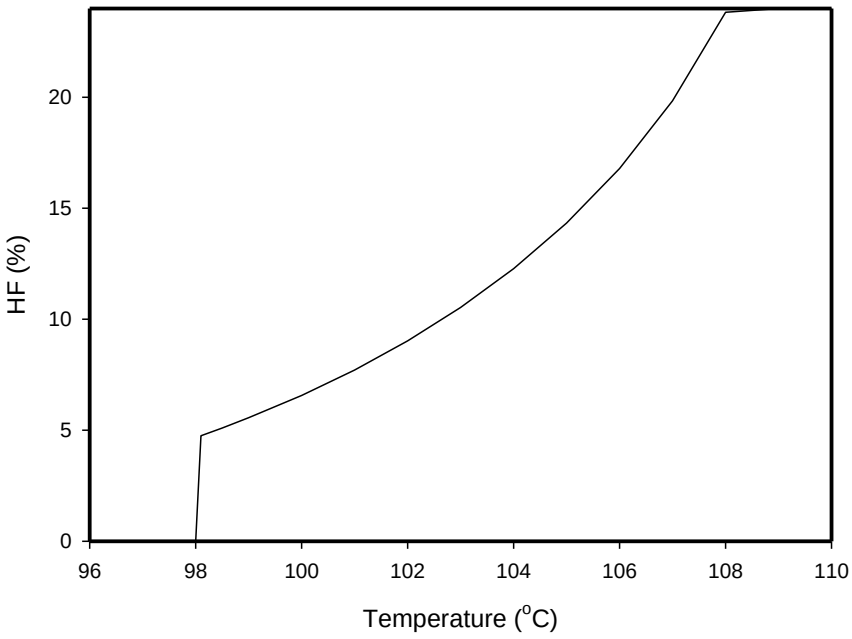


圖 4　利用熱能提升氫氟酸濃度製程模式

由於氫氟酸中的氫原子和氟原子間氫鍵結合的能力相對較強，使得氫氟酸並不是很容易脫離水溶液，因而要利用加熱和蒸餾方法是不可行，除非能有破氫鍵的能力的可能性。

(2)加入純氫氟酸提濃原氫氟酸廢液濃度

除去不鏽鋼表面的含氧雜質的「浸酸」過程需用到氫氟酸，一般稱為不銹鋼酸洗劑，此類工業用酸洗劑可由此類回收氫氟酸供應，又因要降低運送之體積，節省運輸成本，需增濃氫氟酸的濃度。此模式以一個調整槽(B1)以調控溫度，進料物流氫氟酸廢液(HFWASTE)設24%氫氟酸水溶液(HF：1,200 kg/h，H_2O：3,800 kg/h)，進料溫度 25 ^oC，另物流為無水純氫氟酸(HF)流量為 2600 kg/h，將製得物流 PRODUCT 之氫氟酸濃度 50%，如圖 5 所示

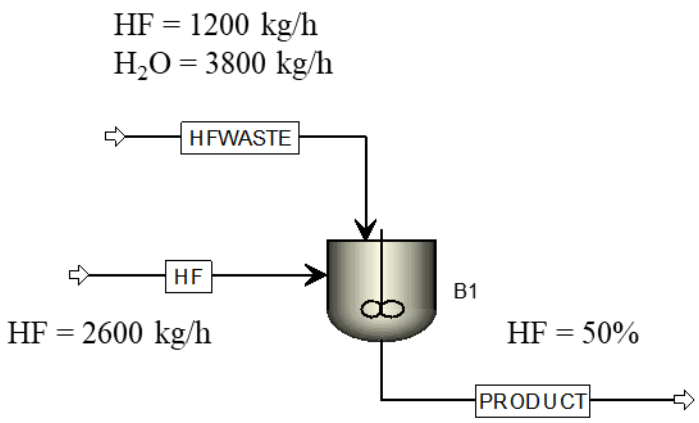


圖 5　加入純氫氟酸提升氫氟酸濃度製程模式

此模式是可行，惟其因氫氟酸加水是放熱反應如無控制溫度，在絕熱系統操作下，出口溫度將達 105 ^oC 則液體將會氣化，氫氟酸將有外洩問題，需要利用冷水進行交換以控制調整槽溫度。舉例如操作在 25 ^oC 需移出熱為 866.48 kcal/h，平均加 1kg 氫氟酸產生 333 卡。如 50 ^oC 需移出熱為 725.097 kcal/h，如用 25 ^oC 冷水需要 29 kg/h 進行熱交換。

2. 中低濃度氫氟酸反應成氟化鈣，氟化鈣污泥於鋼鐵業為煉鋼之助熔劑，降低爐渣之熔點幫助鋼鐵提早熔化提高爐渣之流動性，使爐渣易與金屬分離並減少電能的浪費，同時在煉鋼時還能促進鋼之脫硫及脫磷，故可做為助熔劑。當氟化鈣污泥也可用做水泥生料之再利用，經氟化鈣加入對水泥燒成過程可下降 50-100 ^oC，故可做為水泥製造中的礦化劑。一般產業氫氟酸廢液處理系統是以鈣鹽(如碳酸鈣 $CaCO_3$、氯化鈣 $CaCl_2$ 和氫氧化鈣

$Ca(OH)_2$)沈澱法以去除廢水之氟離子，形成氟化鈣污泥。氟化鈣可用於加工製成助熔劑或工業級螢石原料。

其反應式分別為：

$$2HF + CaCO_3 \rightarrow CaF_2 + CO_2 + H_2O \quad (8)$$

$$2HF + CaCl_2 + 2NaOH \rightarrow CaF_2 + 2NaCl + 2H_2O \quad (9)$$

$$2HF + Ca(OH)_2 \rightarrow CaF_2 + 2H_2O \quad (10)$$

因氟化鈣的水的溶解度低，如式 11 所示溶度積值[7]，故形成氟化鈣後幾乎都會沉澱。

$$CaF_2 \rightarrow Ca^{2+} + 2F^- \qquad Ksp = 5.3x10^{-9} \quad (11)$$

$$CaCO_3 \rightarrow Ca^{2+} + CO_3^{2-} \qquad Ksp = 3.9x10^{-9} \quad (12)$$

$$CaCl_2 \rightarrow Ca^{2+} + 2Cl^- \qquad Ksp = 1210 \quad (13)$$

$$Ca(OH)_2 \rightarrow Ca^{2+} + 2OH^- \qquad Ksp = 5.5x10^{-6} \quad (14)$$

因高濃度氫氟酸亦可選擇第(1)部份提升濃度再利用，故此部份以中濃度氫氟酸為例。此模式以一個結晶槽(CRYSTAL)調控溫度，進料物流氫氟酸廢液(HFWASTE)，設 6%氫氟酸水溶液(HF：600 kg/h，H_2O：9,400 kg/h)進料，進料溫度 25 ^oC．依式(8)氫氟酸與碳酸鈣莫耳比為 2，可計算碳酸鈣計量進料為 1,500 kg/h，由於碳酸鈣 Ksp 小，不容易溶在水，故碳酸鈣以重量 1:4 的回收水(溫度為 35 ^oC)進行混合形成碳酸鈣漿液以利泵輸送，將製得物流 CAF 之氟化鈣濃度為 50%設定為產品規格，氟化鈣理論流量 1,170 kg/h@6%，如圖 6 所示

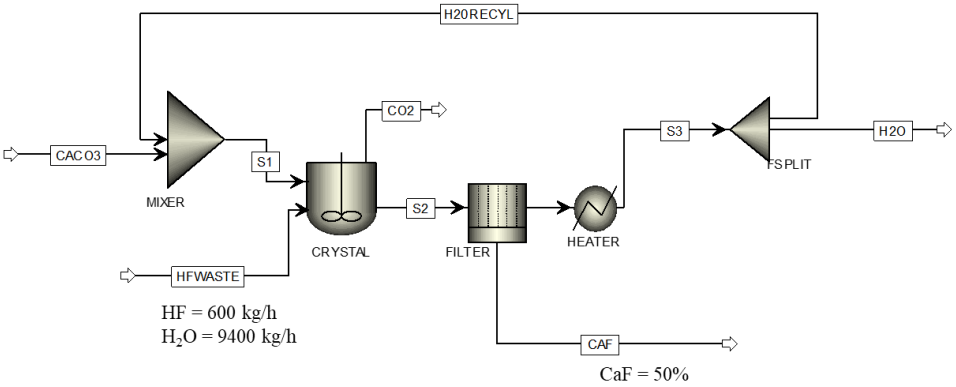


圖 6　加入純氫氟酸提升氫氟酸濃度製程模式

表 1 為各方法生成氟化鈣之差異比較，碳酸鈣依計量比例產生二氧化碳 461 kg/h，結晶槽出口溫度為 60 ^{o}C，如果碳酸鈣增加 10%過量(150kg/h)進料，因碳酸鈣為 Ksp@60 ^{o}C = 1.73×10^{-8}. 氟化鈣 Ksp@60 ^{o}C = 8×10^{-10} 則在固體物流 CAF 出料固體量含碳酸鈣 124 kg/h，如表 2 所示，由表 2 可知固體物流出料的各成份分佈，故可見氟化鈣量不變，因為了使得反應完全，使用過量的碳酸鈣，實際操作溶液之 pH 值會控制在 7~9 之間，確認所有 HF 被反應完全。因碳酸鈣在冶金工業中，主要用於助溶劑，故氟化鈣含過量的碳酸鈣應用在助溶劑是有益的。

表 1　生成氟化鈣各方法的差異

方法	分子量	使用量 (kg/h)	Ca/F 重量比	Ca/F 莫耳比	$CO_{2(g)}$ (kg/h)	出口溫度 ^{o}C	NaCl (kg/h)
$CaCO_3$	100	1650	2.75	0.55	461	60	0
$CaCl_2$ (NaOH)	111 (40)	1830 (1320)	3.05	0.55	0	64	102.4
$Ca(OH)_2$	74	1221	2.03	0.55	0	79	0

半導體產業中，多使用氯化鈣溶液進行高生物毒性的氫氟酸的脫氟處理，將含氫氟酸的毒性廢液轉為一般酸鹼性廢液和氟化鈣沉積物[8]。氯化鈣的加料和氟化鈣的結晶在文獻已有討論[1,9]，因氯化鈣會加氫氧化鈉(或鈣)進行酸鹼中和，中和反應熱會使得溫度上升到 93 ^{o}C 再冷却至 35 ^{o}C 再進結晶槽以防結晶槽操作溫度過高產生氣體。如以計量處理 6%氫氟酸，則氫氟酸將會有反應不完全的問題，所以氯化鈣需加過量處理，如果以過量 10%執行模擬，表 1 所示，在固體成份會含有氯化鈣 102 kg/h，相對氟化鈣流量 1,169kg/h，約有含 8.7%。第三方法為氫氧化鈣法，此法沒有其他副產物問題，可完全反應，惟價格略高。

表 2　三種方法在對 6%氫氟酸進料之固體出口物流之各化合物流量

$CaCO_3$(kg/h)	$CaCl_2$(kg/h)		$Ca(OH)_2$(kg/h)		
總流量	2589	總流量	2544	總流量	2340
H_2O	1258	H_2O	1064	H_2O	1165
HF	3.17E-06	HF	1.05E-12	HF	2.78E-12
CAF_2	0	CAF_2	0	CAF_2	0
$CACO_3$	0	$CACl_2$	0	$CAOH_2$	0
CA^{++}	1.23963	CA^{++}	0.442718	CA^{++}	1.148745
$CAOH^+$	2.39E-07	$CAOH^+$	0.13313	$CAOH^+$	1.91E+00
H_3O^+	0.000514	H_3O^+	7.02E-11	H_3O^+	1.30E-10
F^-	0.0118	F^-	0.0564	F^-	0.0150
CAF_2(S)	1170	CAF_2(S)	1169	CAF_2(S)	1170
$CACO_3$(S)	124	$CACI_2$(S)	102	$CAOH_2$(S)	0
OH^-	2.07E-07	OH^-	0.409	OH^-	1.52
HCO_3^-	3.73	HCL	9.82E-24		
CO_3^{--}	4.30E-05	NA^+	81.2		
CO_2	31.3	NAOH(S)	0		
		NACL(S)	0		
		NAF(S)	0		
		NAOH	0		
		CL-	125		

三種方法如以鈣鹽原料過量 10%進料所生成固體總量排序為 $CaCO_3$ > $CaCl_2$ > $Ca(OH)_2$。碳酸鈣法得氟化鈣再利用量最大。副產物部份氫氧化鈣幾乎溶於水，碳酸鈣會產生二氧化碳，約每生產 1kg 氟化鈣會生產二氧化碳 0.42 kg (=(461+31.3)/1170)比例非常高，對回收再利用氟化鈣卻產生另一個對全球暖化的物質，對廢棄物減量而言貢獻有限。氯化鈣法則由氟化鈣中含有氯化鈣約 8.7%，對特定產業可能需要注意，如果應用在金屬業，可能需要考慮氯離子是否會存在最後的產品，以避免腐蝕問題。就進料量之用量排序為 $CaCl_2$ >$CaCO_3$ > $Ca(OH)_2$，氯化鈣法的進料固體量(含氫氧化鈉)幾乎兩倍於其他方法。從數據得鈣鹽以 $Ca(OH)_2$ 似乎比較好，但過去比較少被使用，如式(14)，溶解度也很

低，惟如果可利用反應後的較高的回收水將可以增加其溶解量，避免阻塞等輸送問題。如在污水槽通常會氫氧化鈣混合氯化鈣使用，除可進行酸鹼中和外，$Ca(OH)_2$ 較 $CaCl_2$ 產生膠羽重，污泥易於沈降。

事實上由於製程的複雜度日益增高，設備端排放之 HF 廢水往往還含有 SO_4^{2-}、PO_4^{3-} …等，對鈣鹽的使用量產生干擾且需增加其加藥量[9,10]。廠廢液因製程調整不同，廢液混酸成份亦不相同，經研究結果顯示，廢液中含有硫酸、二氧化矽成份，反應後會降低污泥中有效氟化鈣濃度[10]。一般鈣鹽加料 Ca/F 莫耳比控制 0.8~1 之間。謝政宏研究探討磷酸與硫酸與氫氟酸競爭鈣鹽的影響，在實驗中發現氯化鈣的加藥量為 2 倍的理論加藥量便可達到放流標準，最佳操作條件為 Ca/F = 1 及 pH 5，使污泥產生量最少[1]。

四、結　論

利用 ASPEN 軟體計算可模擬廢氫氟酸回收利用，純粹提取增加氫氟酸濃度以蒸餾技術應不可能，加入純的氫氟酸增濃氫氟酸濃度再用在其他工業是可行的。在將廢氫氟酸轉化成氟化鈣開發副產品供做工業之助熔劑，提昇資源循環利用，此部份可行有三種方法各有其優缺點，以產業的應用端決定使用的方法。

五、參考文獻

1. 謝政宏. 晶圓廠含氟廢水加藥模式之探討 國立交通大學, 台灣, 2006.
2. 謝政育; 蔡宗晃; 黃子璋; 蔡庭玉 化學品廢液回收減廢效益提升分析, http://www.asip.org.tw/userfiles/file/2011/Hsinchu/20112013-1.pdf.
3. Toyoda, A.; Taira, T., A New Method for Treating FluorineWastewater to Reduce Sludge and Running Costs. *IEEE TRANSACTIONS ON SEMICONDUCTOR MANUFACTURING* 2000, *13* (3), 305-309.
4. 李茂松; 廖啟鐘; 張王冠; 邵信; 倪慎如; 李天菴 In *積體電路產業氫氟酸廢水結晶處理整合回收技術* 產業環保工程實務技術研討會論文集, 1998.
5. Jiang, K.; Zhou, K.; Yang, Y.; Du, H., A pilot-scale study of cryolite precipitation from high fluoride-containing wastewater in a reaction-separation integrated reactor. *Journal of Environmental Sciences* 2013, *25* (7), 1331-1337.
6. Chen, J.-Y.; Lin, C.-W.; Lin, P.-H.; Li, C.-W.; Liang, Y.-M.; Liu, J.-C.; Chen, S.-S., Fluoride recovery from spent fluoride etching solution through crystallization of Na3AlF6 (synthetic

cryolite). *Separation and Purification Technology* 2014, *137* (Supplement C), 53-58.

7. Yan, N.; Yuan, Y.; Dykeman, R.; Kou, Y.; Dyson, P. J., Hydrodeoxygenation of Lignin-Derived Phenols into Alkanes by Using Nanoparticle Catalysts Combined with Brønsted Acidic Ionic Liquids. *Angewandte Chemie International Edition* 2010, *49* (32), 5549-5553.
8. Warmadewanthi, B.; Liu, J. C., Selective separation of phosphate and fluoride from semiconductor wastewater. *Water Science and Technology* 2009, *59* (10), 2047-2053.
9. 賴明孝; 呂仁明; 連上舜, 半導體廠氫氟廢水 CaCl2 加藥模式建立及減量之應用. *http://www.sinotech.org.tw/eerc-ctr/news/asip2016/01.files/article/wa06.pdf*.
10. 楊學明.高濃度氫氟酸廢液回收製備氟化鈣之研究-以結晶矽太陽能電池廠為例. 國立中央大學, 台灣, 2015.

海報發表

1. 自動排水器與空壓系統節能
   葉慶得

2. 應用適應性控制估測高壓電池系統之絕緣電阻
   袁文璞、江益賢、施武陽

3. 增進土壤品質之不同長期肥培管理制度的評估
   蕭乃瑜、陳仁炫

4. 廢熱驅動型除溼乾燥空調機組(LDAC)
   蕭敬倫、王志吉

5. 澳洲高效節能的生物廢水處理創新技術–高糖食品廠污水處理案例分析
   Steve Gluck、Akheel Soltan、呂欣倫

6. 簡易型除水棒
   張逢源、黃滿美

7. 處理含氟廢水的導電度分析與比較—處理 1Kg 50%HF 氟酸為基礎
   廖明輝

8. 新穎低碳環境除氮節能技術
   張鎮南、黃啟裕、陳威廷、賴冠佑

9. 有機廢棄物免堆處理系統
   李信宏、邱淑靜、李宥徵、柯秀靜

10. 電漿熔渣應用於混凝土磚資源化之研究
    姜智釗、賈佳蓉、湯凱卉、賴怡潔、柯明賢

11. 回收動力電池電能管理模組開發與測試
    朱雅筠、袁文璞、江益賢、施武陽

12. 煉鋼爐碴再利用於膠結材料水化特性之研究
    曾雅玟、陳昭旭、葉平堯

自動排水器與空壓系統節能

葉慶得*

摘　要

溫室氣體中的二氧化碳是地球暖化的元兇之一，發電過程會產生二氧化碳的排放，所以減少用電即有助於「溫室氣體」的減量。

空壓機(air compressor)系統運用於產業界非常普遍，幾乎與水、電一樣不可或缺，但其為高耗能、低效率的生財設備，卻鮮少受到關注。由於工廠電費成本內包含許多機械設備及照明燈具的費用，致使能源成本高占其總運轉成本約 80%的空壓機系統，被大部份使用者忽略了。

自動排水器乃空壓系統不可或缺的設備。但由於空壓系統之冷凝水中含有鐵屑、油泥，傳統排水器無法完美運作，長久以來一直是空壓系統中最弱的一環，導致昂貴的壓縮空氣不知不覺的浪費，甚且降低壓縮空氣品質影響產線運作，故提高空壓機系統能源效率，最簡單易於成功的首要條件，即是安裝具備「節能、效率、可靠、安全」之自動排水器。

節能不只攸關產業本身的生產成本與競爭力，減少「溫室氣體」的排放，對於人類生存環境的改善，亦有實質的貢獻。

【關鍵詞】空壓機、空壓機節能、自動排水器、球閥型無耗氣自動排水器

---

*能揚興業有限公司　總經理

一、前　言

溫室氣體中的二氧化碳是地球暖化的元兇之一，發電過程會產生二氧化碳的排放，所以減少用電即有助於「溫室氣體」的減量。

空壓機(air compressor)系統運用於產業界非常普遍，幾乎與水、電一樣不可或缺，但其為高耗能、低效率的生財設備，卻鮮少受到關注。由於工廠電費成本內包含許多機械設備及照明燈具的費用，致使能源成本高占其總運轉成本約 80%的空壓機系統，被大部份使用者忽略了。

空壓機吸取環境空氣，經過加壓產生壓縮空氣。而台灣地處亞熱帶，環境中之溼氣居高不下，故壓縮空氣中含有大量水蒸汽，在適當條件之下即產生危害氣動設備之冷凝水。

空壓系統之冷凝水，以「自動排水器」即可將之排出。所以「自動排水器」乃空壓系統不可或缺的設備。但由於空壓系統之冷凝水中含有鐵屑、油泥，傳統之「自動排水器」無法完美運作，長久以來一直是空壓設備中最弱的一環，導致昂貴的壓縮空氣不知不覺的浪費，甚且降低壓縮空氣品質、影響產線運作。故若欲提高空壓機系統能源效率，最簡單且易於成功之要務，即是安裝具備「節能、效率、可靠、安全」之自動排水器。

「節能」不只攸關產業本身的生產成本與競爭力，減少「溫室氣體」的排放，對於人類生存環境的改善，亦有實質的貢獻。

二、不只是冷凝水

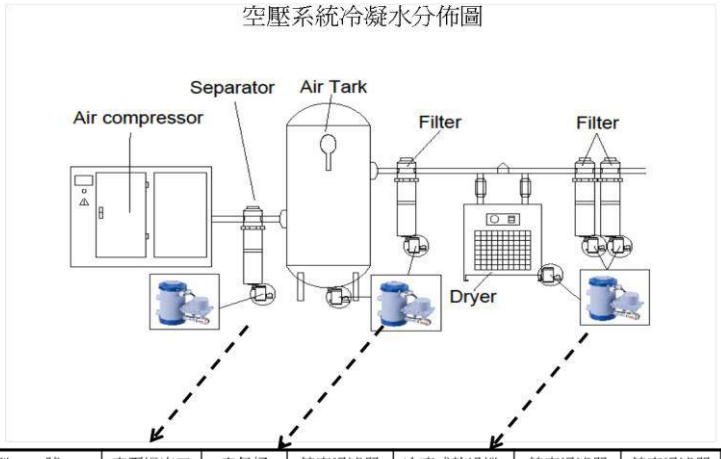
空壓機吸取環境空氣加以壓縮，製造壓縮空氣以供工廠之用。環境空氣中含有許多水蒸汽，經空壓機壓縮之後，空氣體積變小、密度增加，經過冷卻之後，其溫度降低，水蒸汽呈過飽和狀態，若干水汽凝結成為液態水。

環境空氣含有許多不明、甚或有毒的物質。工業區附近的環境空氣中，這些雜質的濃度更高，經過壓縮之後，其濃度亦隨之增高。由於壓縮過程的高溫作用，部份有害物質會溶解于冷凝水中，使其 PH 值偏低，成為具有腐蝕性的液體。

三、冷凝水芳蹤何處?

工廠內空壓機的流程，一般為:空壓機-汽水分離器-儲氣桶-初級過濾器-冷凍式乾燥機-精密過濾器。(如圖 1)

空壓機壓縮過程中一般不會產生冷凝水(設計不當或溫控閥失效時除外)，但經冷卻後，只要壓縮空氣溫度低於壓力露點，本來以氣體狀態存在的水蒸汽即凝結為液態水。下圖乃空壓系統在一般運轉工態下的冷凝水分佈。



型　號	空壓機出口	空氣桶	精密過濾器	冷凍式乾燥機	精密過濾器 1μ	精密過濾器 0.01μ	合　計
冷凝水量	18.43			4.97			
百分比	77%			20%			97%

資料來源:能揚空壓公司(www.super-air.com.tw)

圖1　空壓系統與冷凝水分佈

四、為何儲「氣」桶化身為儲「水」桶？

若空壓機之冷卻器功能正常，壓縮空氣中之水蒸汽，於冷卻器出口端大部份已凝結成液態水，此處若安裝一個高效能氣水分離器及自動排水器，空壓機吸入的水分，約有 80%可以去除。但空壓機製造廠基於成本考量，只有少部份廠商、少數機種，安裝上述除水設備。有些則使用簡易的裝置，而大部分空壓機製造商均無此設計。所以空壓系統中之大部分冷凝水就往下游移動，系統中的儲氣桶因而累積了大量的冷凝水。

工廠內實際使用時，使用者常自行於儲氣桶下方裝設一個自動排水器，但因濕度高，儲氣桶極易生銹，故常見儲氣桶下方的自動排水器堵塞，使儲『氣』桶變成儲『水』桶。又或者使用者不信任自動排水器，直接打開儲氣桶下方之球閥，以微開的方式排水，但實際上，排掉的卻是昂貴的能源—壓縮空氣。

五、產品不良、設備故障的主因—冷凝水

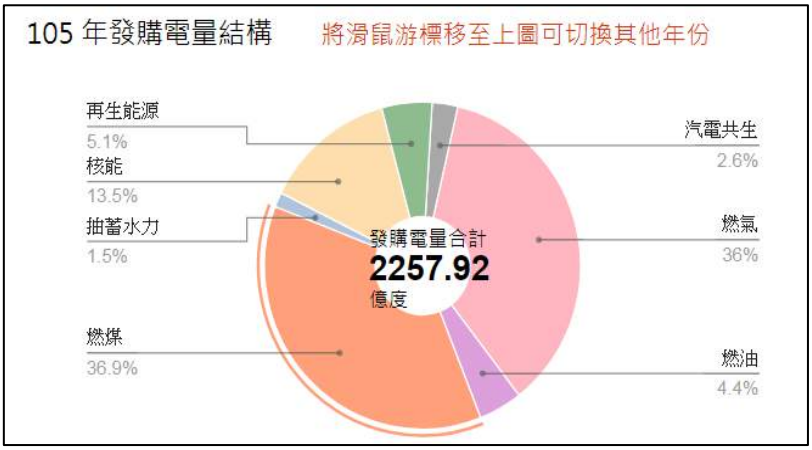
空壓系統未安裝或安裝功能不佳的自動排水器，使用者得以花費較低的初購成本。但運作時，壓縮空氣含水分太高，容易使儲氣桶、氣動設備生銹、故障，電磁閥線圈燒毀、塗料無法被覆、粉體結塊無法輸送、濾芯堵塞、冷凍式乾燥機效能不佳、離心機葉片損壞---等。可以說，氣動設備的故障原因，90%以上是因壓縮空氣中的水分所引起。使用者為了節省極低的自動排水器費用，卻付出更多的維修成本，甚至產品不良、延期交貨、商譽損害等慘痛的損失，可謂因小失大！

六、漏氣，漏掉的是企業的競爭力

現代化的工廠幾乎均使用空壓機，其運用於產業界非常普遍，空壓機停擺，幾乎與停水、停電一樣，將使生產線癱瘓。但由於空氣無所不在，取之不盡、用之不竭，且工廠電費內包含許多機械設備及照明燈具的費用，致使能源成本極其昂貴的壓縮空氣，被大部份使用者忽略了。

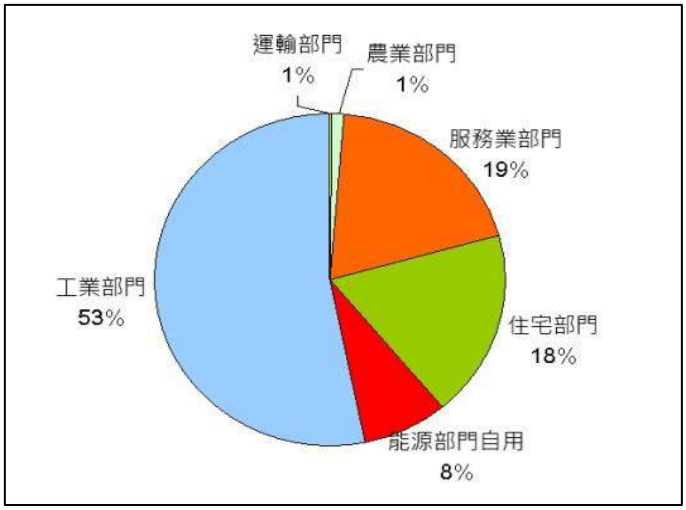
壓縮空氣的能源轉換率非常低，約只 25%而已，所以壓縮空氣是工廠內最昂貴的能源。根據美國能源部資料顯示，未經能源查核並實施節能改善的空壓機系統，大約有 20%~30%的洩漏量。

2016 年台灣用電量約為達 2258 億度(圖 2)，工業用電量占全國用電量的 53%(圖 3)。一般馬達用電量約占工業用電之 70%，而空壓機用電約占馬達用電之 18%(圖 4)，故約略可計算空壓機系統一年的用電量為 150 億 kWh(2258 億度×53%×70%×18%)，若以美國能源部的洩漏估算資料(圖 5)計算，全台灣空壓機系統之洩漏損失將達 37.5 億度(150 億 kWh×25%)，電費以新台幣 3 元/度計，則洩漏損失將約達 112.5 億新台幣，至為可觀!



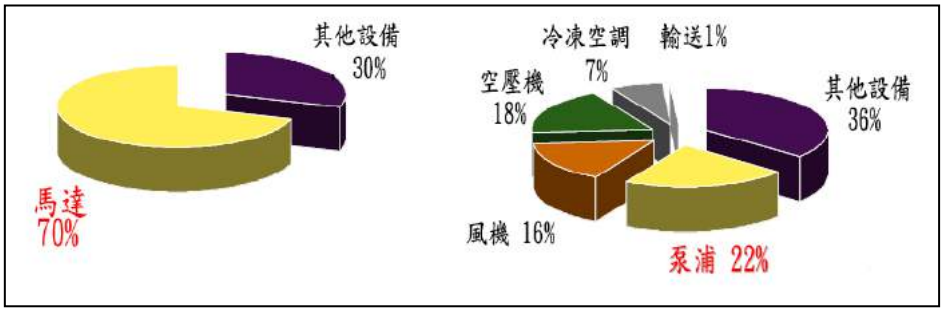
資料來源:台灣電力公司網站

圖 2　2017 台電發購電量結構圖



資料來源: 低碳生活報導網站

圖 3　2014 台電發購電量結構圖



資料來源: 工研院

圖 4　各種設備工業用電百分比

Minimize Compressed Air Leaks

Leaks are a significant source of wasted energy in a compressed air system, often wasting as much as 20%-30% of the compressor's output. Compressed air leaks can also contribute to problems with system operations, including:

- Fluctuating system pressure, which can cause air tools and other air-operated equipment to function less efficiently, possibly affecting production
- Excess compressor capacity, resulting in higher than necessary costs
- Decreased service life and increased maintenance of supply equipment (including the compressor package) due to unnecessary cycling and increased run time.

資料來源:美國能源部網站

圖 5　空壓系統的洩漏

七、明顯的洩漏

離心式空壓機各級冷卻器排水、無熱式吸附式乾燥機、渦流製冷器、手動洩水閥、自動排水器的洩漏均屬明顯的洩漏。使用者明知其洩漏嚴重，卻礙於既有設備、技術或經費限制，或對壓縮空氣價值的錯誤認知，任由昂貴的壓縮空氣浪費於無形。其中又以儲氣桶下方排水閥及離心式空壓機中間段冷卻器之錯誤排水方式最嚴重。一般均會加大球閥開度排放冷凝水，以換取離心式空壓機安全運轉或較高品質之壓縮空氣。但以此方式排放冷凝水時，大量昂貴之壓縮空氣也隨著冷凝水排出。空壓機不斷的耗能製造壓縮空氣，又不斷的從手動洩水閥消失於大氣之中，錯誤的操作模式，使空壓機耗能比過高，壓縮空氣的單位成本增加。

顯見，壓縮空氣中的冷凝水，不僅使氣動設備無法順利運作，影響生產作業、交期延宕，並墊高企業成本，減低競爭力。

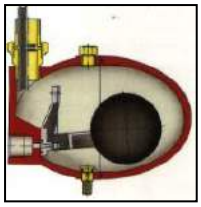
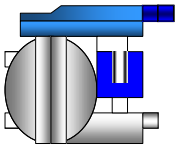
八、傳統排水器的限制

理論上，空壓系統內之冷凝水，以自動排水器即可將此水分排除。但傳統之自動排水器，不論機械浮球式或電子式(計時器+電磁閥)或電子液位控制之自動排水器，均有許多結構上缺陷。例如:電磁閥式的排水通道直徑小且通道彎彎曲曲，極易堵塞。電磁閥膜片容易破裂。機械式有則許多零件泡于冷凝水中、單次排水量小，動作頻繁、短時間內就可能堵塞等(請參考表一、排水器優缺點分析表)。導致傳統自動排水器可靠度低、故障頻仍，使

用者信賴度極低。

空壓機系統洩漏點極多，其中「自動排水器」是空壓系統最小卻影響深遠的附屬設備，使用者明知有漏氣之憾，長期以來卻無適當的設備得以替代!

表1　排水器優缺點分析表

	無耗氣式			耗氣式	
排水器型式	電容液位控制		浮球液位控制	時間控制	人工排放
	液位感知 +**不銹鋼球閥**	液位感知 +**電磁閥**			
					
優點	◆不銹鋼水槽及球閥 ◆孔徑 10ψ ◆直線排水 ◆雜質與水一同排出 ◆不易堵塞 ◆不需 Y 型過濾器 ◆維修保養需求少 ◆動作次數累計功能		◆不需電源 ◆低投資成本	◆低投資成本	◆不需電源
	◆依水量決定排放時機 ◆不浪費壓縮空氣 ◆有故障顯示 ◆提供幹接點,可遠端監視。				
缺點	◆需外接電源 ◆專業技術高 ◆初期投資成本稍高	◆需外接電源 ◆專業技術高 ◆初期投資成本較高 ◆膜片破損風險 ◆內部孔徑較小 ◆通道轉彎多 ◆較易堵塞	◆水槽內動作 ◆零件多 ◆易受污染 ◆動作不良無故障顯示 ◆安全性較低 ◆需經常定期巡檢 ◆維護成本高 ◆極易堵塞	◆噪音大 ◆無故障顯示,安全性較低 ◆大量浪費壓縮空氣易受污染作動不良 ◆需經常定期巡檢 ◆極易堵塞 ◆維護成本高	

九、空壓系統「自動排水器」應具備的性能

空壓系統對於工業的重要性與日俱增，自動排水器是聯結空壓系統各設備間不可或缺的環節，是故，空壓系統之自動排水器必需具備下列功能：

1. 節能：只排水、不排氣。壓縮空氣是工廠內最昂貴的能源。只排水、不排氣，是自動排水器最基本的要求。
2. 效率：單次排水量大，動作頻率低，使用壽命才能延長。
3. 可靠：儲水槽內無活動零件，因冷凝水極髒並具腐蝕性，水槽內無

活動元件，可降低故障率，提升可靠度。

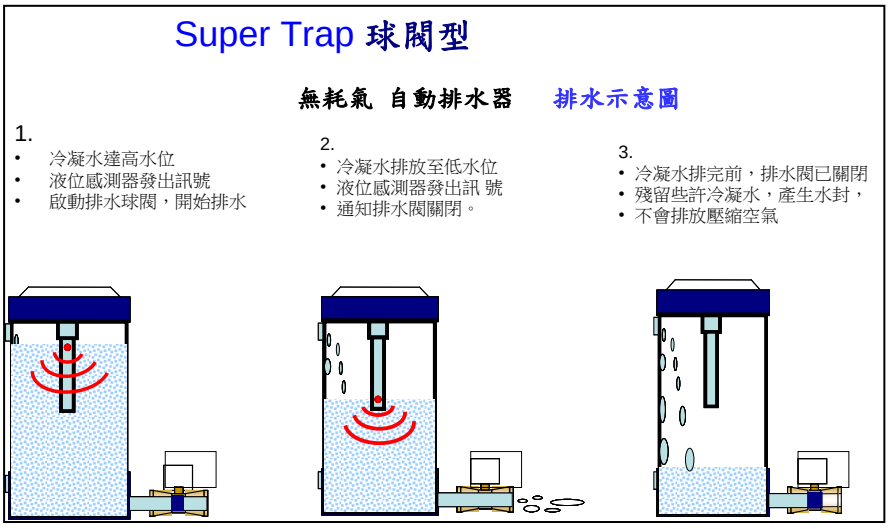
4. 安全：自動排水器是空壓系統中最微小的配件。但影響整體空壓系統的運轉與應用品質。故其是否正常運作，應具「遠端監視」及「功能確認」巡檢功能，保障空壓系統之安全運轉。

十、球閥型液位控制自動排水器的原理(圖六)

由於空壓系統之冷凝水多寡，隨環境因素而改變，唯有以「液位感測」的方式決定排放時機，方可達到只排水、不排氣的節能要求。而以球閥作為排水主體，其孔徑大、直線形排水通道最不易堵塞。但其旋轉角度定位及轉速控制技術難度較高。是目前市場上最新的冷凝水排放技術。

球閥型無耗氣自動排水器，以液位感測器偵測水位，決定排水時機，其動作原理如下:

1. 當冷凝水滴入儲水槽內而達高水位時，液位感測器發出訊號，電動球閥打開排水。
2. 當冷凝水被排出，水位漸降而至感測器低水位時，感測器再次發出訊號，電動球閥關閉。
3. 冷凝水並未完全排乾，留下些許冷凝水形成水封，壓縮空氣不會隨冷凝水排放，達到只排水、不排氣的節能效果。



資料來源: 能揚空壓公司(www.super-air.com.tw)

圖 6　球閥型無耗氣自動排水器動作

十一、如何選用「無耗氣自動排水器」?

一般機械性浮球排水器或計時型排水器，大部分均只有一個型號，長久以來養成使用者誤以為:「一個自動排水器可以適用所有大小不同空壓系統」的誤認。

液位控制之無耗氣自動排水器，以液位感應決定是否排放，故除了前述之節能、效率、可靠、安全必需具備外，排水器的選擇需考慮:

1. 環境溫度
2. 環境濕度
3. 空壓機的流量
4. 壓縮空氣壓力
5. 壓縮空氣溫度

由於上述五個變素會改變冷凝水的多寡，影響排水器的選型。一般使用者常為了節省費用，選用較小的排水器。但選用過小之排水器，除了排水器動作頻率提高，使用壽命縮短外，亦有可能超載而無法正常運作，導致冷凝水往下游移動的現象。所以購置任何排水器前，必需計算自動排水器裝置點的冷凝水量，選用大小適當的自動排水器。

油潤滑空壓機系統因冷凝水中含有少量潤滑油，故其冷凝水 ph 值約為中性，自動排水器一般為鋁合金已符所需。但無油式空壓機，冷凝水沒有機油的中和，環境中的二氧化碳、有害物質，均可能溶解于冷凝水中。故使用於無油式空壓機系統之自動排水器，應選用不銹鋼製品，以免自動排水器組件的腐蝕物堵住排水口，或銹蝕損壞而影響排水功能。

表 2　各種排水器比較表

各種排水器性能比較

能揚空壓
www.super-air.com.tw

		Super Trap@				
節能	無耗氣節能設計	標準設計	標準設計	會消耗壓縮空氣	標準設計	
效率	單次排水量	較大	較小	較小	較小	?
可靠性	儲水槽內部設計	無活動零件	無活動零件	活動零件繁多故障高@	活動零件繁多故障高	無儲水槽
	儲水槽材質	不鏽鋼	鋁製品，**銹蝕物**堵塞排水閥風險	鋁製品，**銹蝕物**堵塞排水閥風險	鑄鐵，**銹蝕物**堵塞排水閥風險	無儲水槽
	排水流程	簡單	簡單	繁複，易故障	繁複，易故障	簡單
	動作壓力	0 ~ 16 bar	0.8 ~ 16 bar	?	?	?
	排水主體及元件	½" 球閥,不銹鋼球	電磁閥膜片	½" 球閥,不銹鋼球	浮球閥組	電磁閥
	排水通道直徑	10mmψ	3 ~ 5 mm	? mmψ	?	1.5~3 mm
	排水通道暢通度	高，成一直線	低，彎彎曲曲	高，成一直線	低，彎彎曲曲	低，彎彎曲曲
安全性	堵塞時自動除污	Yes,	Yes,	無此設計	無此設計	無此設計
	無電時自動緊急排水	Yes,Option	無此設計	無此設計	無此設計	無此設計
	氣塞時自動僅計排水	Yes, Option	不可能	Yes	無此設計	無此設計
	警示功能	Yes, 可外接訊號	Yes, 可外接訊號	無此設計	無此設計	無此設計

十二、如何確認「無耗氣自動排水器」的功能正常?

自動排水器的重要性已如前述，每一個空壓機系統或多或少，也均裝設有自動排水器。但自動排水器功能是否正常，除了自動偵測水位之報警功能外，具備「累計作動次數」功能(如圖 7)，方便使用者定期巡檢，排除傳統排水器問題發生、嚴重損失後才被發現，為時已晚之憾，可提升使用者採用無耗氣自動排水器意願。

資料來源:能揚空壓公司(www.super-air.com.tw)

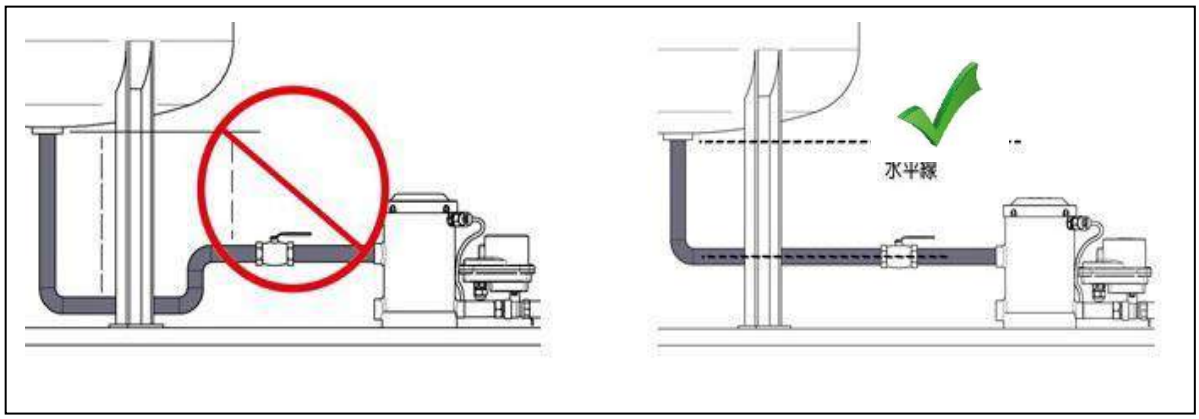
圖 7　計數功能自動排水器

十三、如何安裝無耗氣自動排水器?

1.注意「氣鎖」(Air lock)的問題

計時型自動排水器依設定之時間，決定是否開啟排水器排水。當其開啟時，系統壓力高於環境之大氣壓力，故無論其裝置點高於排水口，或排水管路彎曲、遠近，均不致影響其排放，因為高壓往低壓作用是不變的物理現象。

而任何型式的『無耗氣』自動排水器，裝置於空壓系統時，除了剛安裝完成後，第一次開啟排水閥門時，空壓系統對無耗氣排水器有高壓對低壓的現象外，其餘時間排水器與空壓設備連成一體，其間並無壓差現象。故若排水器入口高於空壓系統排水口，即產生「氣鎖」現象(圖 8)，冷凝水就無法流入排水器。當此狀況發生時，液位感測器即無法偵測到高水位，自動排水器即無法作動，使用者常以為產品瑕疵所致。



資料來源:能揚空壓公司(www.super-air.com.tw)

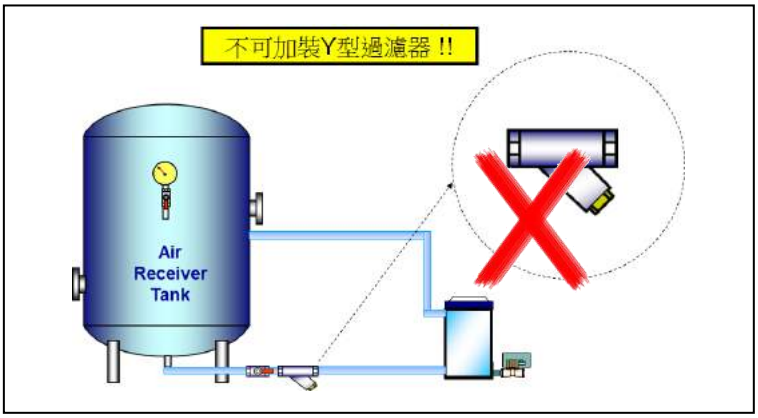
圖 8　無耗氣自動排水器的安裝方式

2.『無耗氣』自動排水器，『不可』加裝 Y 型過濾器(strainer)

傳統自動排水器因排水管道彎彎曲曲且通道極小，冷凝水中的雜質極易堵住而無法排水，導致嚴重損失。故有許多使用者在自動排水器之前加裝「Y 型過濾器(strainer)」以保護自動排水器。但如此裝置憑添許多維護工作，一段時日之後人員疏於清潔，常見冷凝水無法排出累積於系統之中，造成更大的傷害。

3.Y 型過濾器的傷害

Y 型過濾器不僅增加維護人員保養負擔，堵住時更摧毀電　子液位控制之「堵塞保護」功能。液位控制之自動排水器，超過設定時間(約 30~90 秒)若仍處於高水位，排水器即判定「堵塞」，排水器立刻發出警報。因 Y 型過濾器網目較小，裝於系統中，一定比排水器先「堵塞」，此時液位控制之排水器無冷凝水流入，堵塞警報系統無法察覺。大量冷凝水累積無人發現，嚴重的傷害必定造成!!



資料來源:能揚空壓公司(www.super-air.com.tw)

圖 9　無耗氣自動排水器不可加裝 Y 型過濾器

十四、無耗氣自動排水器的節能案例

單台螺旋式空壓機之變頻及排水器改善：本案為系統改善之先期可行性評估測試。廠內分為十個生產工廠。螺旋式空壓機有 100HP 及 50HP 共 22 台，為測試空壓機節能改善之效益，先選一台 100HP 傳統螺旋式空壓機為先期試驗，測試其效果以做為廠內全面推廣依據。

1.量測紀錄

(1)由施工者記錄改善前狀態，並測量空壓機單機效率及運轉耗能。

表 3　改善前使用狀態

名目功率 kW	名目流量 M^3/min	控制模式	運轉壓力 bar	每年運轉時數 (h)	電費成本 (NT$/kWh)
75	13.6	空/重車	6~7.5	8,000	2.5

(2)該廠為訂單生產，業主為確認改善效益，特選產品規格統一，空壓機耗能狀態幾乎全年不變之工廠，記錄一年該機之耗電狀態。

2.節能潛力計算

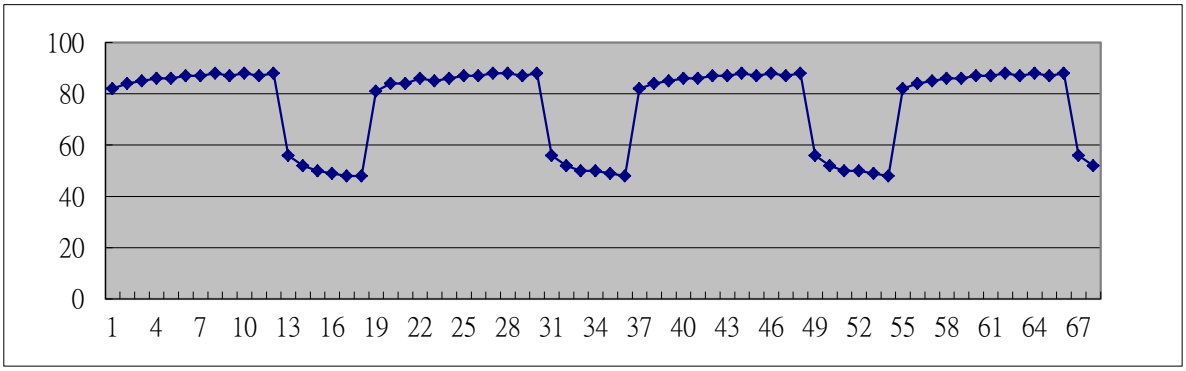
(1)單機耗能與運轉耗能(如圖 10)，由施工單位測量該空壓機之單機耗能比紀錄如下：

表 4　空壓機單機耗能量測記錄表

名目功率 kW	名目流量 M^3/min	量測壓力 bar	實測耗能 kW	實測流量 M^3/min	全載耗能比 kWh/m^3
75	13.6	7.5	87.5	13.1	0.112

資料來源: 能揚空壓公司(www.super-air.com.tw)

(2)運轉耗能量測(改善前) 運轉耗能曲線圖



資料來源: 能揚空壓公司(www.super-air.com.tw)

圖 10　空壓機運轉耗能曲線圖

3.改善施工

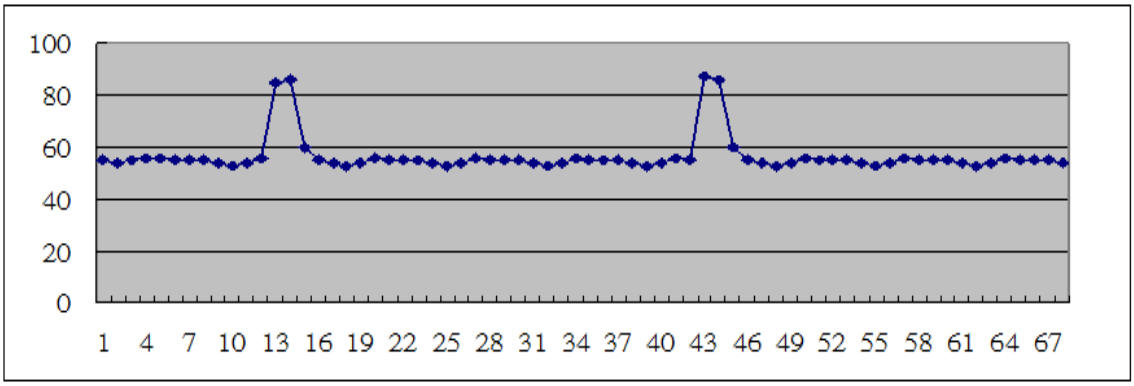
4.再量測

(1)原來運轉之 75Kw 空壓機加裝變頻節能控制盤。

(2)加裝變頻控制後量測運轉耗能 (如圖 11)發現(圖 11)中之耗能凸波為計時型排水器造成。

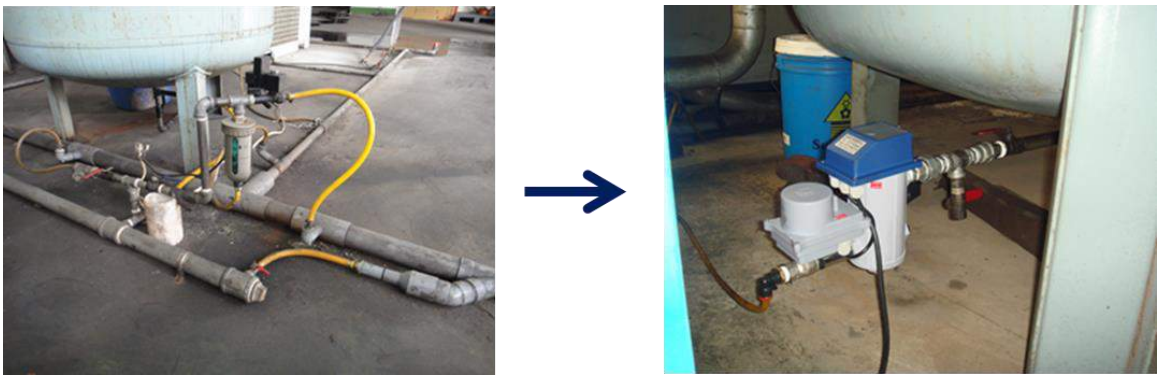
(3)汰換計時型排水器為球閥型無耗氣自動排水器。(如圖 12)

(4)再量測運轉耗能。(如圖 13)



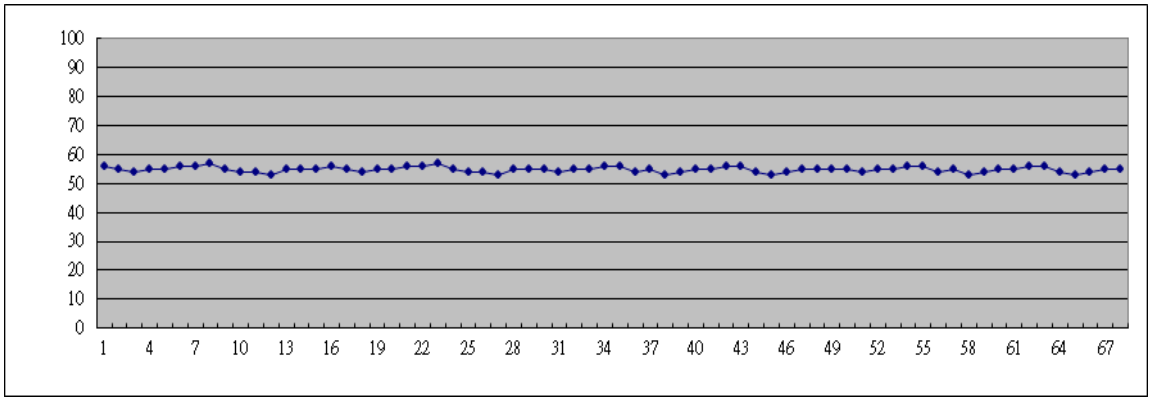
資料來源: 能揚空壓公司(www.super-air.com.tw)

圖 11　空壓機運轉耗能曲線圖



資料來源: 能揚空壓公司(www.super-air.com.tw)

圖 12　球閥型無耗氣自動排水器



資料來源: 能揚空壓公司(www.super-air.com.tw)

圖 13　改善排水器後空壓機運轉耗能曲線圖

5.成果報告

	控制方式	自動排水器型式	耗電量	改善效益
改善前	空/重車	計時器+電磁閥	75 kWh	
改善(1)	變頻控制	計時器+電磁閥	57 kWh	(75-57)/75=23%
改善(2)	變頻控制	球閥型無耗氣自動排水器	55 kWh	(57-55)/57=3.6%
改善成果				26.6%

表 5　SuperTrap 球閥型無耗氣自動排水器的回收年限

	自動排水器型式	耗電量	改善效益
改善前	計時器+電磁閥	57 kWh	
改善後	球閥型無耗氣 自動排水器	55 kWh	(57-55)/57=3.5%
投資費用	NT$15,000		
節省電費			(57-55)8000H*2.5 =40,000(NT$)
回收年限			0.4 年

十五、結　論

由以上個案例的呈現可以發現，一般人認為些微的漏氣無關緊要，但 24 小時經年累月的洩漏，其累積的損失卻極為驚人。

使用者因傳統排水器的價格印象,較高價的無耗氣自動排水器尚無法普及。但其價格成本相對於昂貴的壓縮空氣成本，其實只是九牛一毛而已!

提高空壓機系統能源效率，不只攸關產業本身的生產成本與競爭力。當企業競爭日趨嚴峻、營收微利化後，產業除了必需不斷創新、降低成本，以提升競爭力爭取市場外，更需以符合環保要求之綠色生產方式，提高能源效率、降低溫室氣體排放量，減少產業因經濟活動對地球環境的污染，善盡地球公民的義務。

應用適應性控制估測高壓電池系統之絕緣電阻

袁文璞*、江益賢**、施武陽***

摘　要

按照法規高壓電力系統必須與殼體保持適度的絕緣阻抗值，以防止人員接觸殼體時造成觸電風險，而絕緣阻抗與初始電氣設計、材料老化、天候、以及振動碰撞有關，為了確保配備高壓電池組的電動車輛的電氣安全，在電池組進行充放電及驅動時，對該阻抗不斷的進行連續性的監測，是非常重要的，以實現人員與機具之間的安全。

目前絕緣阻抗的估測技術皆藉由輸入低電壓或電流於高電壓迴路中，藉由所連接 RC 電路所造成的波形變化來計算絕緣阻抗值，然而由於機殼之間存在著雜散電容與負載之高頻諧波影響，對於高壓電及兩端的絕緣阻抗值無法進行準確的估算，因此較不精準，且容易失去功用。因此本研究採用以 Lyapunov 為基底較完整的電路模型，並使用新開發的自主適應性估測系統，可有效的排除雜散電容效應與僅能在系統運作時估測大電路負端與機殼之絕緣阻抗之缺點。

現今能提供針對高壓動力電池與充電系統使用之絕緣阻抗監測裝置的廠商非常少，且單價也相當高，因此開發此項產品有很大的利基，再者，目前在電動車行駛與充電安全上，國際法規在絕緣阻抗的監測上也列為基本必備的功能，故可視為在發展電動車相關電力裝置之必備技術。

【關鍵詞】絕緣阻抗、Lyapunov、雜散電容效應

---

*中原大學環境工程所　研究生

**舜鵬科技研發部資深工程師

***中原大學環境工程學系助理教授

一、研究背景

高壓電力系統必須與殼體保持適度的絕緣阻抗值，以防止人員接觸殼體時造成觸電風險，而絕緣阻抗與初始電氣設計、材料老化、天候、以及振動碰撞有關，因此必須隨時對該阻抗其進行監測，以確保人員與機具之安全。

目前能提供針對電動車電力與充電系統使用之絕緣阻抗監測裝置的廠商非常少，且單價也相當昂貴，因此在開發此項產品具有很大的利基。再者，目前在電動車行駛與充電安全上，國際法規在絕緣阻抗的監測上也列為基本必備的功能，故可視為在發展電動車相關電力裝置之必備技術。

二、研究目的

目前絕緣阻抗的估測技術皆藉由輸入低電壓或電流於高電壓迴路中，藉由所連結 RC 電路所造成的波形變化來計算絕緣租抗值，然而由於機殼之間存在著雜散電容與負載之高頻諧波影響，對於高壓電極兩端的絕緣阻抗值無法進行準確估算，因此較不精準，而且容易失去功用。因此本研究採用較完整之電路模型，並使用適應性估測方法進行估測，可排除雜散電容效應與僅在系統運作時估測大電路負端與機殼之絕緣阻抗之缺點。

三、文獻回顧

表 1　分析比較前案與本研究的功能、手段及效果差異

比較項目	PUES	Panasonic	本案
技術手段	■ 應用定電流偵測之電壓波型推估絕緣電阻 ■ 主要靠電容提高精度,體積大 ■ 量測電壓範圍受限於電容大小(<420V)	■ 量測解析度較低 ■ 電路中使用開關數多成本高，無電容由電路進行估測 ■ 對應 20A～400A 電流以及最大電壓 600V	■ 利用低壓雜訊電壓注入高壓系統以對高壓迴路絕緣阻抗進行估測 ■ 考慮雜散電容對參數估測影響，因此精確度與信賴度高
達成功效	量測電路較為簡單且解析度高	具有主動控制與判斷絕緣電阻	絕緣阻抗監測
解決問題	動態絕緣安全偵測	動態絕緣安全偵測	動態絕緣安全偵測

四、研究方法

以電動車高壓直流系統為例，如圖 1，高壓電力迴路包含驅動馬達裝置、電池組、以及車載充電器，此電力迴路在設計上必須與各機殼隔離以獲得非常高的絕緣阻抗，在此以假想的 R_N 和 R_P 分別代表著該電力迴路負極和正極端與機殼的絕緣阻值，而電力迴路與機殼之間也同時存在著雜散電容 C_P 與 C_N 分別於正極與負極端。

本發明之絕緣監測裝置產生一寬頻低壓雜訊訊號通過電阻 R 由高壓電力迴路負極端注入，量測負極端與接地之電壓差 v_N，以及讀取電池管理系統透過 CAN 傳輸之電池電壓量測訊號 v_B，進行 R_N 和 R_P 估測，估測結果可直接顯示於裝置螢幕或燈號警示，或以 CAN 傳輸至其他高壓電力裝置以判斷是否繼續執行工作之依據。

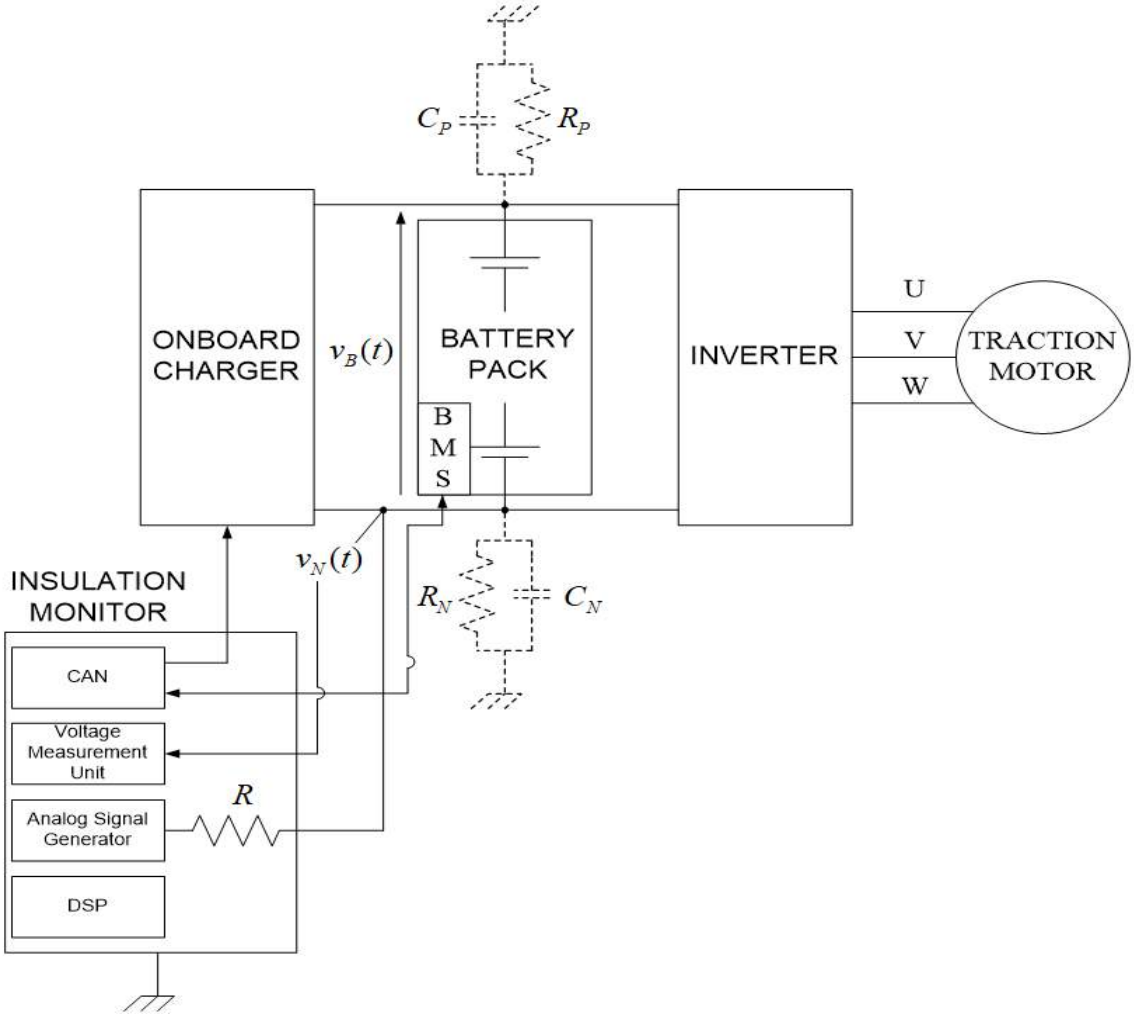


圖 1 電動車高壓系統架構與絕緣阻抗監測裝置連接與信號傳遞示意圖

1.等效電路(Equivalent Circuit)

將圖 1 轉為可進行分析之等效電路如圖 2 所示。絕緣阻抗監測裝置對高壓系統注入一寬頻雜訊低壓訊號 v_g，經由電路分析可得到以下的關係。

$$\dot{v}_N=-\left(\frac{1}{R_N}+\frac{1}{R}+\frac{1}{R_P}\right)\frac{1}{C_N+C_P}v_N+\frac{1}{R(C_N+C_P)}v_g-\frac{1}{R_P(C_N+C_P)}v_B-\frac{C_P}{C_N+C_P}\dot{v}_B \tag{1}$$

定義

$$\theta^T=\begin{bmatrix}\theta_1 & \theta_2 & \theta_3 & \theta_4\end{bmatrix}^T=\begin{bmatrix}\frac{1}{C_N+C_p}\left(\frac{1}{R}+\frac{1}{R_N}+\frac{1}{R_P}\right) & \frac{1}{R(C_N+C_p)} & \frac{1}{R_P(C_N+C_p)} & \frac{C_P}{C_N+C_p}\end{bmatrix}$$

$$X^T=\begin{bmatrix}-v_N & v_g & -v_B & -\dot{v}_B\end{bmatrix}$$

則(1)可寫成

$$\dot{v}_N=X^T\theta \tag{2}$$

估測模型可表示為

$$\hat{\dot{v}}_N=\begin{bmatrix}-\hat{v}_N & v_g & -v_B & -\dot{v}_B\end{bmatrix}\hat{\theta} \tag{3}$$

根據參數 $\hat{\theta}$估測結果可計算絕緣阻抗值 R_N和 R_P如下：

$$\hat{R}_P=\frac{\hat{\theta}_2}{\hat{\theta}_3}R \tag{4}$$

$$\hat{R}_N=\frac{1}{\left(\frac{\hat{\theta}_1}{\hat{\theta}_2}-1\right)\frac{1}{R}-\frac{1}{\hat{R}_P}} \tag{5}$$

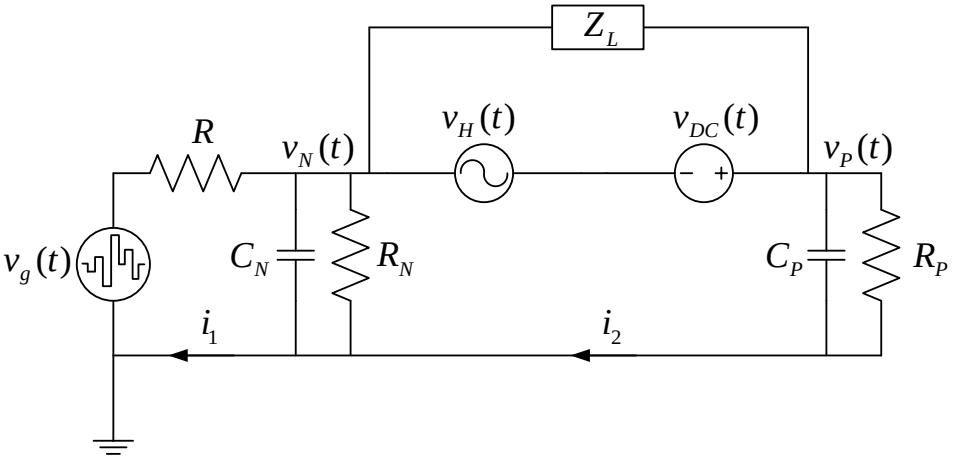


圖 2 絕緣阻抗監測系統之等效電路圖

2.參數估計流程圖(Flow Chart of Parameter Estimation)

絕緣阻抗估測之流程如圖 3。估測裝置量測 v_{N_RAW} 並接收電池管理系統藉由 CAN 傳輸過來之電池組電壓訊號 v_{B_RAW}，將兩組訊號經由一低通過濾波器將高頻雜訊濾除後得到 v_N 與 v_B，加上自身產生之低壓雜訊訊號 v_g 進行系統參數估測 $\hat{\theta}$，參數估測結果用來計算絕緣電阻值 $\hat{R}_N$ 和 $\hat{R}_P$。

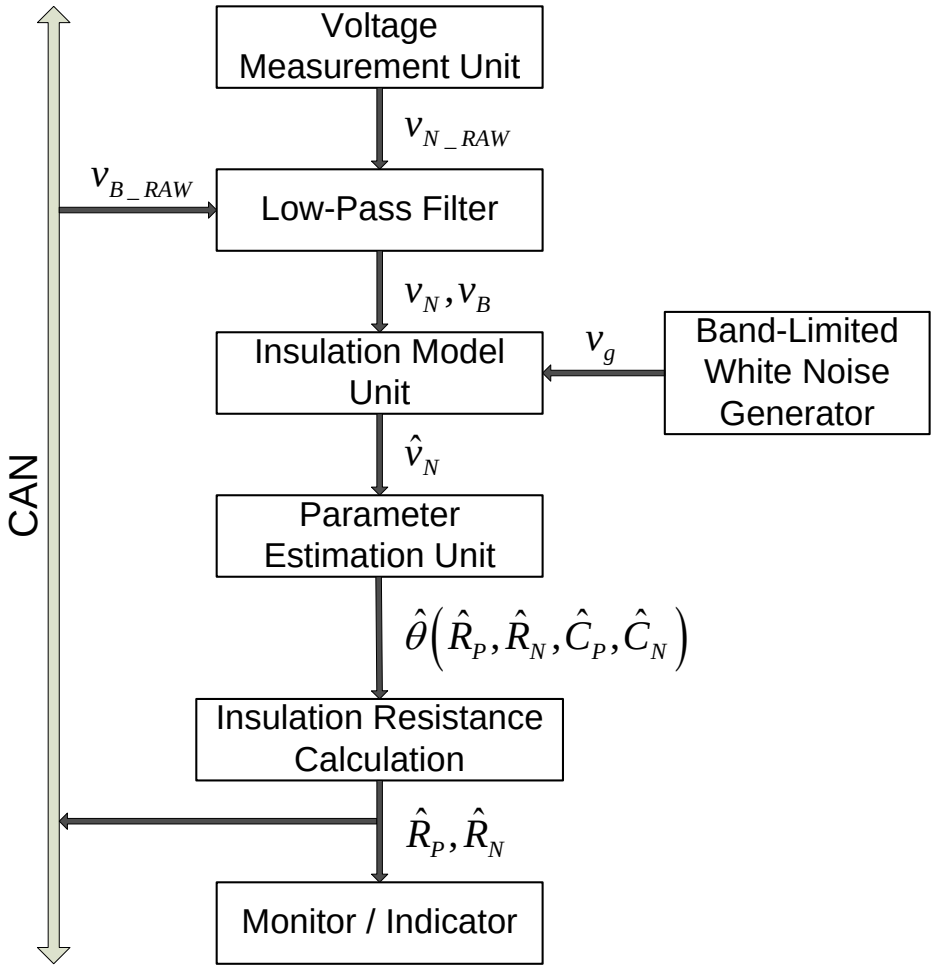


圖 3 絕緣阻抗估測流程

3.模擬結果

根據圖 2 的等效電路，設定以下的模擬參數值：

$$v_B = 350\text{V}, \text{R}_P = 600\text{k}\Omega, \text{C}_P = 0.3\mu\text{F}, \text{R}_N = 500\text{k}\Omega, \text{C}_N = 0.2\mu\text{F}$$

估測結果如圖 4 所示，經由任意給定之參數初始值，約 10 秒內可逼近實際值

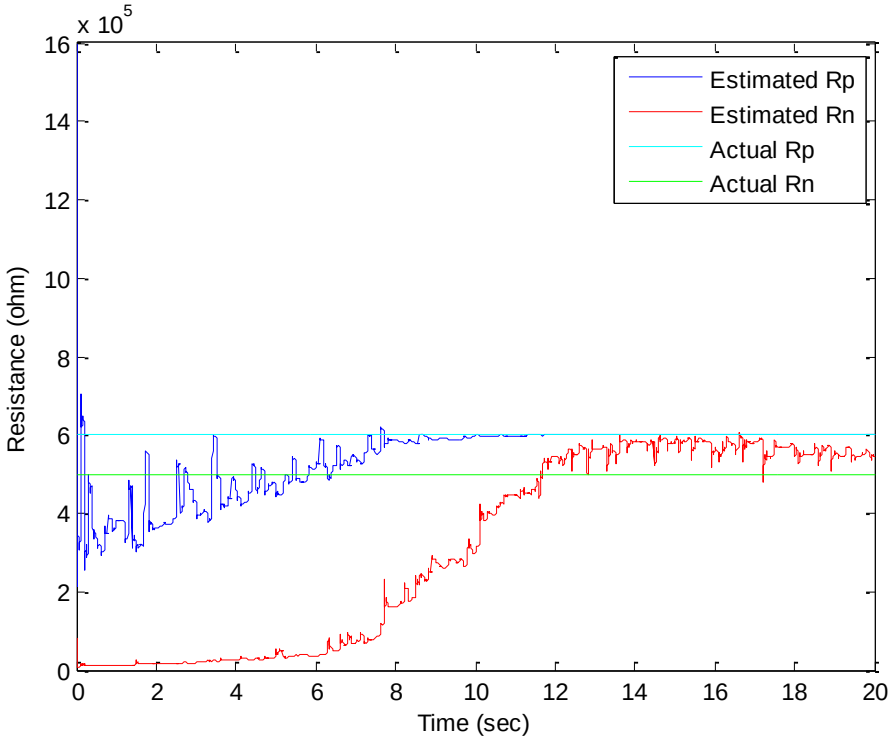


圖 4 絕緣電阻估測狀態

五、結　論

由上述模擬實驗證明，本發明所提供之絕緣阻抗估測裝置及估測方法確實可以達到隨時對高壓電力系統絕緣阻抗進行監測之功效，且估測精確度與信賴度高。其原因在於，當電池正極端產生絕緣阻抗劣化時，會使得該負極端與接地間之電壓(v_N)瞬間產生很大的變動，造成參數估測也隨之產生變動。也由於該負極端與接地間之電壓 v_N 會隨著正極端絕緣阻抗之變化而變動，因此，於估測絕緣阻抗時，必須同時考慮雜散電容與電池正負二極短路對估測系統之影響，同時，必須對正負二極絕緣阻抗同時進行估測，方能精確估測絕緣阻抗數值，而本研究所提供之絕緣阻抗估測裝置及估測方法，由於採用完整之電路模型，並使用適應性估測方法進行估測，因此可排除雜散

電容效應，且避免習知絕緣阻抗估測僅能在系統運作時估測大電路負端與機殼之絕緣阻抗之缺點。

將本研究應用於持續估測高壓電力系統正負極端與接地之絕緣阻抗值，可達到絕緣劣化與失效預測，以及降低漏電流造成系統元件損壞與人員觸電防治之目的，提高被監測系統之安全性。此外，本研究所提供之絕緣阻抗估測裝置無大型電容，體積小，耐壓與適用範圍廣。尤其將本研究應用於動車電力與充電系統，可提升電動車行駛與充電安全，符合國際法規在絕緣阻抗的監測規範，係發展電動車相關電力裝置之必備技術。

六、誌　謝

感謝水利署 MOEAWRA1060474 計畫。

七、參考文獻

1. Chiang, Y.H., W.Y. Sean, and J.C. Ke, Online estimation of internal resistance and open-circuit voltage of lithium-ion batteries in electric vehicles. Journal of Power Sources, 2011. 196(8): p. 3921-3932.
2. Yoshio, M., R.J. Brodd, and A. Kozawa, Lithium-ion batteries. Vol. 1. 2009: Springer.
3. Reddy, K.S. and S. Jayachandran, Investigations on design and construction of a square guarded hot plate (SGHP) apparatus for thermal conductivity measurement of insulation materials. International Journal of Thermal Sciences, 2017. 120(Supplement C): p. 136-147.
4. Beutelschiess, Klaus, and Karl-Heinz Landenberger. "Apparatus and method of monitoring insulation of a DC network that is electrically insulated with respect to the ground potential of a device." U.S. Patent No. 6,864,688. 8 Mar. 2005.
5. Meyer, Thomas J. "System for monitoring the insulation quality of step graded insulated high voltage apparatus." U.S. Patent No. 5,471,144. 28 Nov. 1995.
6. Grubic, Stefan, et al. "A survey on testing and monitoring methods for stator insulation systems of low-voltage induction machines focusing on turn insulation problems." *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 55.12 (2008): 4127-4136.
7. Meyer, Thomas J. "Insulation monitoring system for insulated high voltage apparatus." U.S. Patent No. 5,652,521. 29 Jul. 1997.

增進土壤品質之不同長期肥培管理制度的評估

蕭乃瑜*、陳仁炫**

摘　要

土壤品質的良窳攸關環境品質的好壞，進而影響農業的用續發展。長期採行不同的肥培管理對土壤品質的影響亦不同。本研究選擇行政院農業委員會農業試驗所之 35 號試驗田，評估七種處理〔無施肥處理(N.F.)、傳統化學肥料處理(C.F.)、堆肥處理(S.C.)、堆肥+ 1/3 N 處理(S.C.+1/3 N)、堆肥+ 2/3 N 處理(S.C.+ 2/3N)、綠肥+1/3N 處理(G.M.+1/3N)和泥炭+1/3N 處理(Peat +1/3 N)〕經長期使用於水旱輪作系統下對土壤品質之影響。此試驗田自 1995 年開始進行，曾於 2007 年進行一次土壤品質評估，本研究於 2015 年再次進行土壤品質評估，比較二十年來土壤性質的改變及土壤品質指標分析，以評估各處理對土壤品質的影響優劣。結果顯示，有機質肥料的施用對土壤性質的增進效應較施用化學肥力者佳，惟影響程度會因有機質肥料的成分特性而異。其中又以長期施用禽畜糞堆肥和泥炭處理的土壤品質較施用綠肥或化學肥料處理者佳。

【關鍵詞】土壤品質、土壤品質指數、最小資料組、輪作系統、化學肥料、有機質肥料、長期試驗。

---

*中興大學土壤環境科學系　碩士生

**中興大學土壤環境科學系　榮譽教師

一、前　言

長達數十年的實驗結果顯示，集約化農業生產系統會造成土壤衰竭及生產率逐漸下降(Manna et al., 2005)，故此使用有機肥和作物殘體來維持土壤品質的效益越來越受到重視。土壤品質評估需要有需藉由組合多個土壤性質為土壤品質指標，再整合指標為土壤品質指數，可更準確地呈現土壤品質量的狀況，且可用於評估土壤和作物管理制度之永續性。

二、永續農業之施用有機質肥料

1.不同有機質肥料之特性及對環境之影響

維持或增進土壤有機質含量正是農地永續經營管理的重要關鍵，土壤有機質除可為作物營養要素之儲藏庫外，亦具有影響土壤物理、化學及生物性之重要功能。有機資材的種類甚多元且特性互異，施用至土壤後的貢獻程度不同，誠需長期試驗，以評估不同有機資材對土壤品質的影響。

(1)豬糞堆肥：豬糞尿含氮、磷、鉀及鈣等要素、堆積醱酵後即可成為含有多種植物必需養分的有機質肥料，故可作為維持土壤肥力之有效資源，當作氮肥之來源。

(2)綠肥：直接將新鮮的綠色植物翻犁到土壤中，以供應植物生長所需養分的皆可稱之為綠肥。

(3)泥炭：一般指在溼地自然形成的部分分解的有機質。含有多量的腐植酸，且含有黃酸及腐植膠，有機質含量高，為穩定性高及不易分解的土壤改良劑。

2.土壤品質與永續農業

土壤品質指數就是一種決策工具，可以有效地將環境中各種的訊息整合，協助建立管理目標之決策(Karlen, et al., 1994)。

農業永續與否受環境品質、社會生存能力及經濟永續性所左右，而環境品質則由土壤、空氣和水品質則所建構，且土壤品質由土壤物理、化學和生物性所決定(圖 1)。

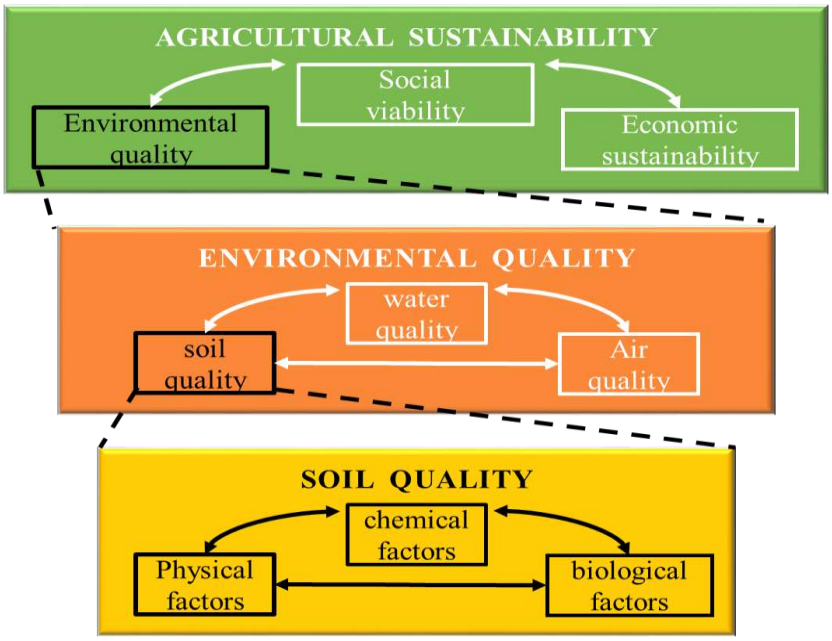


Figure 1. Hierarchical relationship of soil quality to agricultural sustainability (Andrews, 2001)

圖 1　永續農業生態系統架構與土壤品質

三、結論

本試驗結合 19 項選定之土壤品質指標，進行各處理之土壤品質指數的評比。結果顯示，一般而言，長期施用不同有機及化學肥料並配合水旱輪作制度之兩種作物採收後的土壤品質指數，施用有機質肥料之處理者均高於 N.F.之及 C.F.處理者，但經過八年後再次評估土壤品質，確實發現土壤品質已有所變化，在 2007 年以 S.C. 及 S.C. +1/3 N 處理為較佳，而 2015 年則是以施用 Peat 及 S.C.之處理為較佳。

四、參考文獻

1.黃文欣，2008，長期施用有機及化學肥料在水稻-玉米輪作系統下對土壤品質之影響，國立中興大學土壤環境科學系碩士論文，臺中市。

2.Andrews, S.S. and C.R. Carroll. 2001. Designing a soil quality assessment tool for sustainable agroecosystem management. Ecol. Appl. 11: 1573-1585.

3.Karlen, D.L., N.C. Wollenhaupt, D.C. Erbach, E.C. Berry, J.B. Swan, N.S. Eash, et al. 1994. Crop residue effects on soil quality following 10-years of no-till corn. Soil Tillage Res. 31: 149-167.

4. Manna, M.C., A. Swarup, R.H. Wanjari, H.N. Ravankar, B. Mishra, M.N. Saha, et al. 2005. Long-term effect of fertilizer and manure application on soil organic carbon storage, soil quality and yield sustainability under sub-humid and semi-arid tropical India. Field Crops Research 93: 264-280.

廢熱驅動型除溼乾燥空調機組(LDAC)

蕭敬倫*、王志吉**

摘　要

濕度控制與乾燥技術數百年來擔負食物保存與製作品質使命,而隨著全球電子消費品及工商業高速發展,除濕與乾燥製程已是製程與環境舒適度最不可或缺的重要技術之一，廣泛應用於電子、化工、鋼鐵、造紙、糧食品、紡織、塑膠、生技製藥、醫療及綠建築產業，根據統計法國、英國、瑞典、美國及中國等國家,因為製程所需投入除濕乾燥能耗約佔該國總工業能耗的10~15%不等，而近年隨商業發展，除濕能耗，甚至佔建築空調能耗 30~60%，顯示了該技術節能發展已是產業綠色轉型的重要關鍵。

1930 年代第一個透過近常溫廢熱驅動的液態除濕控制技術專利面市，此外，隨著 1990 年賓州大學 Dr. Muuma 的溫濕度獨立分控技術提倡普及，使得除濕與乾燥製程在上述的高耗能困擾得以大量改善，改善幅度高達 30~70%，為低能耗、高精確濕度控制開啟新頁，然而回顧 40 年來，這些關鍵技術仍掌握於歐美日等國家，國內主要仰賴產品與技術輸入，但造價驚人、交期長、產業設計應用不彈性，也未能自主開發，使減緩了該節能技術推廣普及，甚是可惜！

因此，本公司於 2010 年正式代理引入美國產品，隨後，透過國外參訪學習及多個專案積累應用設計與推廣經驗，於 2013 年耗資陸百萬投入自主開發，後續並與台北科技大學潔淨技術研發中心合作，以優化本產品性能，建立設計數據庫，2015 年通過經濟部能源局能源科技專案計畫審核與取得開發補助，正式自主規模生產，廢熱型液態除溼空調機相較冷凝式空調節省 30~70%，相較固態吸附除濕機至少 40~80%，不需過冷供風，造成結露風險，無冷媒洩漏或溶液攜出風險，同時，鹽溶液具備殺菌、吸附臭味及移除粉塵性能，產品生命週期達 30 年，透過國產化，本技術售價僅國外產品 60%，可降低客戶交易成本及產程邊際成本，搭配自主智慧控制系統，更可為工業 4.0 時代的製造業與服務業綠色轉型，產生極大戰略助益。

【關鍵詞】液態除溼、蒸氣分壓、廢熱驅動

---

*創唯股份有限公司　技術部副理

**創唯股份有限公司　總經理

一、前　言

濕度控制與乾燥技術數百年來擔負食物保存與製作品質使命,而隨著全球電子消費品及工商業高速發展,除濕與乾燥製程已是製程與環境舒適度最不可或缺的重要技術之一，廣泛應用於電子、化工、鋼鐵、造紙、糧食品、紡織、塑膠、生技製藥、醫療及綠建築產業，在 Dr. Willis Carrier 1911 年發明空調以來，更擔負上述產業製程良率提升與擴增產能使命，甚至舒適環境建立任務，根據統計法國、英國、瑞典、美國及中國等國家，因為製程所需投入除濕乾燥能耗約佔該國總工業能耗的 10~15%不等，而近年隨商業發展，除濕能耗，甚至佔建築空調能耗 30~60%，顯示了該技術節能發展已是產業綠色轉型的重要關鍵。

常見的傳統機械式空調或吸附式除濕技術,以往受限於機械冷凝除濕法效率低或固態吸附式技術仰賴動輒 140 度以上高再生溫度因素，十分耗能，然而除濕或乾燥為何會耗能？每千克空氣的水蒸汽含量不過幾十克,這是由於水的蒸發潛熱很高所造成,尤其在亞熱帶氣候特徵下的台灣或赤道氣候附近的地區，能耗貢獻更是顯著，而在除濕乾燥需求條件下，傳統技術常以溫濕度同步處理的手段，更造成二次能源的浪費，使除濕與乾燥製程需求形成了能耗的主要來源。

1930 年代第一個透過近常溫廢熱驅動的液態除濕控制技術專利面市，此外，隨著 1990 年賓州大學 Dr. Muuma 的溫濕度獨立分控技術提倡普及，使得除濕與乾燥製程在上述的高耗能困擾得以大量改善，改善幅度高達 30~70%，為低能耗、高精確濕度控制開啟新頁，然而回顧 40 年來，這些關鍵技術仍掌握於歐美日等國家，國內主要仰賴產品與技術輸入，但造價驚人、交期長、產業設計應用不彈性，也未能自主開發，使減緩了該節能技術推廣普及，甚是可惜！

因此，本公司在多次考察美日產業動態後，於 2010 年正式代理引入美國產品，隨後，透過國外參訪學習及多個專案積累應用設計與推廣經驗，於 2013 年耗資陸百萬投入自主開發，後續並與台北科技大學潔淨技術研發中心合作，以優化本產品性能，建立設計數據庫，2015 年通過經濟部能源局能源科技專案計畫審核與取得開發補助，正式自主規模生產，目前本公司已取得專利二項(日本、台灣、中國)，並榮獲第 17 屆金峰獎傑出商品殊榮，更受邀新加坡 BEX Asia 論壇進行專題講演，期待為國內產業轉型發展做出貢獻。

二、技術簡介

鹽是天然的保存劑也是天然吸收劑，而常見於除濕技術應用的鹽類，包含氯化鈣、氯化鋰、溴化鋰及乙二醇，這些鹽類皆具有無毒、穩定的特性，而鹽經過水的稀釋，產生了鹽溶液，透過拉午耳定律我們得知鹽溶液濃度與蒸汽壓的反比關係，也確定鹽溶液溫度與蒸汽壓的正比關係，所以透過控制鹽溶液與空氣間的蒸汽分壓(控制除溼與再生的溶液溫度)，即能達成高效除溼吸水或再生脫水性能，本再生技術不需要沸騰蒸發，不需要低露點冷凝，因此搭配 12℃以上冷水及 60 度以上廢熱水源，即可進行除溼與再生循環，此外，鹽溶液搬運的不僅是熱能，更是化學能，優異的蓄能能力，驅動著吸水與脫水行程，使得空氣中的水汽(潛熱)被大量且有效移除，而處理後的乾燥空氣，僅剩顯熱需要簡易控制，因而可以輕鬆達成溫濕分控技術，傳統冷凝技術極限約為 8 g/KgDA，出口空氣相對達飽和狀態，本技術濕度可輕鬆達 2g/KgDA，出口空氣相對濕度可控 20~90%RH，乾燥氣候下，還可自動切換為加濕模式。

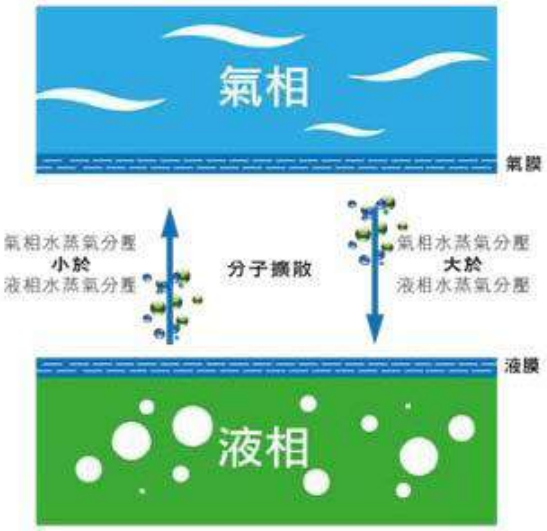


圖 1　水分子擴散原理

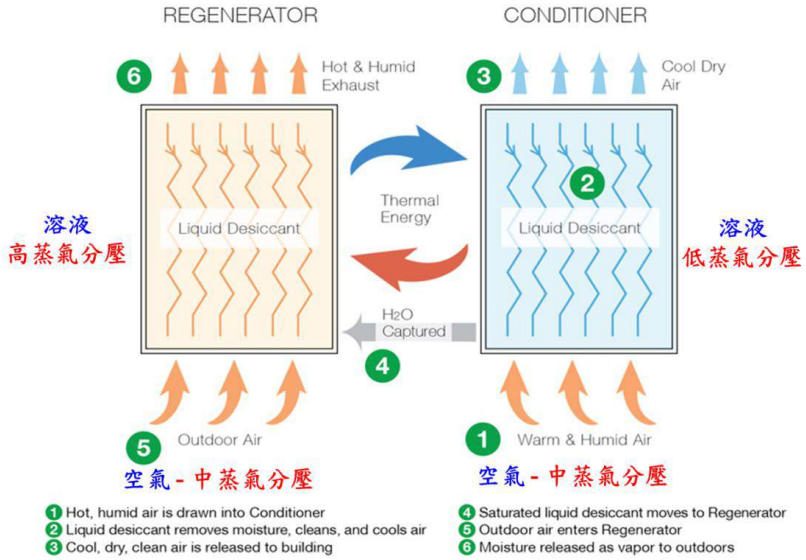


圖 2　液態除溼設備架構圖(自行繪製)

透過一工作介質也就是除濕溶液(Desiccants)，利用上述的原理，便可完成移除空氣中水分的效果。當除濕溶液表面的水蒸氣分壓低於空氣的水蒸氣分壓，水分子由分壓高的空氣往分壓低的除濕溶液擴散而被除濕溶液吸收時，便是除濕的過程，達到了空氣除濕的目的。可是，當除濕溶液吸收的水分越來越多時，其表面的水蒸氣分壓也會跟著升高。當除濕溶液表面的水蒸氣分壓與空氣的水蒸氣分壓相同時，此時，由於兩者間不存在水蒸氣分壓的差異而達到平衡的狀態。由此可知，除濕溶液水分含量的多寡(除濕溶液的濃度)會影響其水蒸氣分壓的高低。

除此之外，影響除濕溶液表面的水蒸氣分壓的因子還有溶液的溫度。圖3顯示了不同濃度氯化鋰水溶液對應溫度的蒸氣分壓。因此，當除濕溶液的水分含量增加或是溫度增加時，其表面的水蒸氣分壓也會跟著增加；反之，則水蒸氣分壓則會降低。

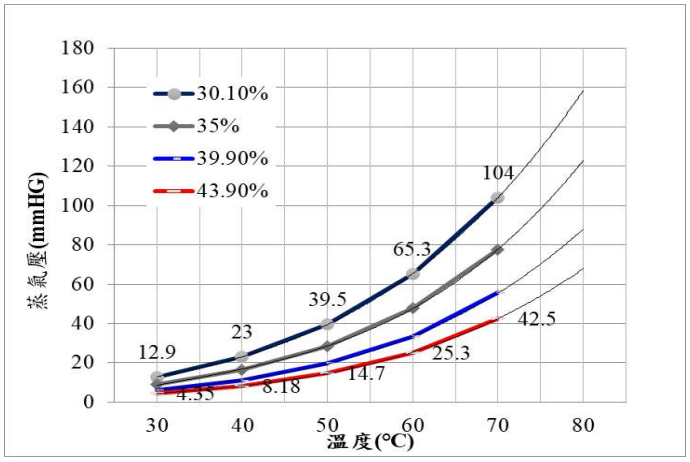


圖 3　不同濃度氯化鋰水溶液對應溫度的蒸氣分壓[1]

利用水蒸氣分壓的差異、溫度與水分含量對除濕溶液表面水蒸氣分壓的影響，便可以使除濕溶液對空氣進行除濕及脫濕再生過程，進而形成一個循環而成為一個完整的溶液除濕空調系統。

圖 4 說明了除濕溶液吸濕及脫濕再生的過程及相關的溫度、水分含量的變化。在 1-2 的吸濕過程中，除了水份自空氣轉移至除濕溶液外，水份凝結時所產生的凝結熱同時會傳遞至除濕溶液中，造成除濕溶液的含水量及溫度的上升使得水蒸氣分壓增加而降低除濕能力。因此，便需進行再生以恢復其除濕能力。2-3 為脫濕再生過程，此過程必須對除濕溶液加熱升溫，使其表面的水蒸氣分壓提高後，通以再生空氣使除濕溶液之水分轉移至空氣中，完成脫濕再生。此時，除濕溶液的水分含量以降低，但仍處於高溫狀態，因此必須予以降溫，使其表面的水蒸氣分壓降低以達到可以進行吸濕的狀態，也就是 3-1 降溫過程。如此，便形成一個完整的溶液除濕空調的循環。

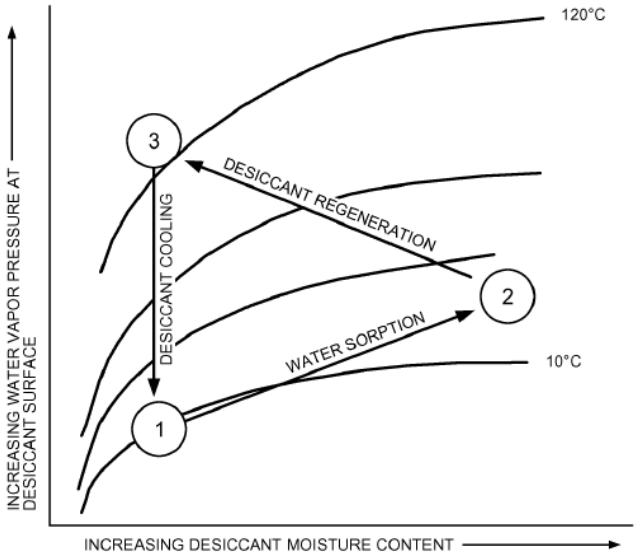


圖 4　液態除溼之吸濕與脫濕再生過程

利用上述原理，將除濕溶液對空氣除濕過程及再生脫濕過程整合起來，便可成為一完整的系統。圖 5 為一基本液態除溼系統架構。外氣或回風通過除濕段(Absorber Column)與低溫高濃度之溶液接觸，空氣中的水分及其凝結潛熱傳遞至溶液中。因此，空氣被除濕降溫供應至現場，而低溫高濃度溶液則因吸收了空氣中的水分及凝結潛熱而成為中溫低濃度溶液並流向再生段(Regeneration Column)。中溫低濃度溶液經加熱成為高溫低濃度溶液後，經由再生段與再生空氣接觸，同時將水分與熱傳遞至再生空氣中，而成為中溫高濃度溶液並流回除濕段。中溫高濃度之溶液經降溫後，再次進入除濕段，而形成一個完整的循環。

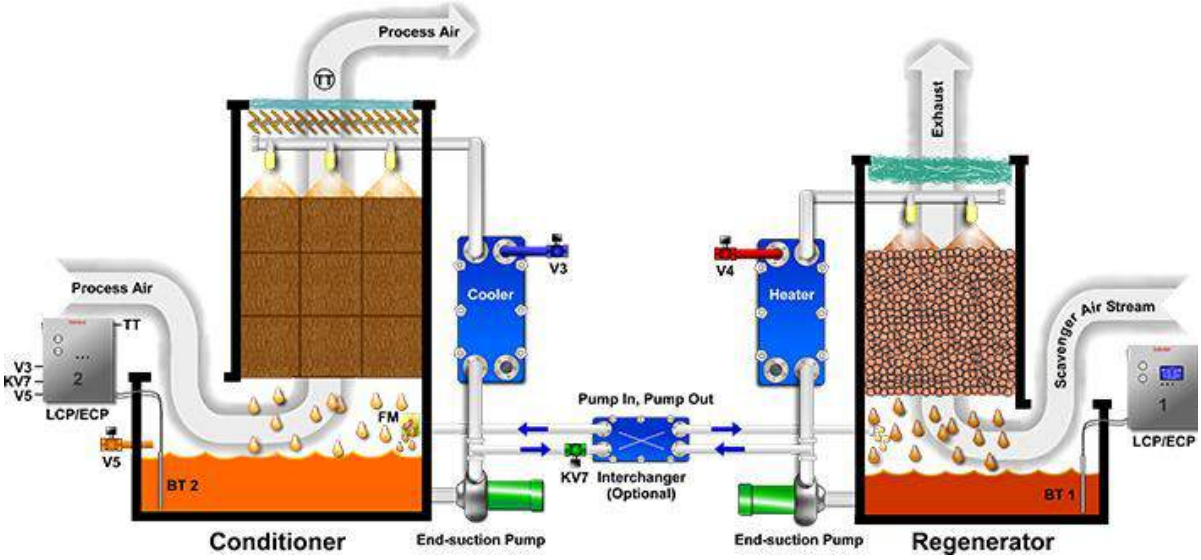


圖 5　基本液態除濕系統架構(系統架構由美國 Kathabar 公司提供)

三、除溼乾燥空調機組節能潛力與應用

由圖 5 系統架構可知，液態除濕空調系統中，主要的能耗有下列幾項：

a.驅使空氣與溶液流動的風車與泵浦

b.再生所需加熱(本項可採 70℃以上廢熱熱源，如熱泵、空壓機、製程排氣、鍋爐廢熱、蒸汽冷凝水等)

c.除濕所需的冷卻(可採 12~18℃冷水源，高溫型冰水主機、熱泵等)

一般而言，風車與泵浦的能耗比例會略低於 10%，而再生的加熱量與除濕的冷卻量約略為 1：1。實際上的能耗比例，則依外氣條件、設計的出風溫濕度規格、設計風量及設備的規劃而定。此外，若有多餘冷、熱源可以與此系統搭配，則可以大幅提升此系統的使用效率。下面將討論幾種提升系統運轉效率的方式。

利用除濕段與再生段的高低溫度差及中間節效熱交換器(Economizer)的應用，可以將再生完成溶液的熱拿來作為再生前溶液的預熱，同時，達到再生完成溶液降溫預冷的功能。如此，不需過度依賴外來能源，利用自身的能源交換來減少冷卻與加熱量，達到節省能源與提升系統效率。

由於再生段的加熱與除濕段的冷卻是同時發生的，因此熱泵的應用可以將除濕段的熱轉移至再生段，達到除濕段降溫與再生段升溫的功能。

此外，若與傳統空調搭配，由傳統空調系統處理空氣的預冷降溫，由溶液除濕空調系統處理潛熱除濕的部分，則可發揮兩種系統的長處，而成為一個有效率的空調系統。同時，由於傳統空調系統不需再提供低溫條件來進行除濕而得到更好的運轉效率。圖 7 提供一個簡單的示意圖，若傳統空調系統的冰水出水溫度為 5℃方能達到環境溫濕度的規格，則在搭配溶液除濕空調系統的狀況下，冰水出水溫度可以提升至約 15℃。如此，可提升冰水主機 COP 性能係數至少 20%，使整體空調系統的效率可以大幅的提升，同時，也可以降低溶液除濕空調系統的負擔，而達到整個空調系統性能的最佳化組合。

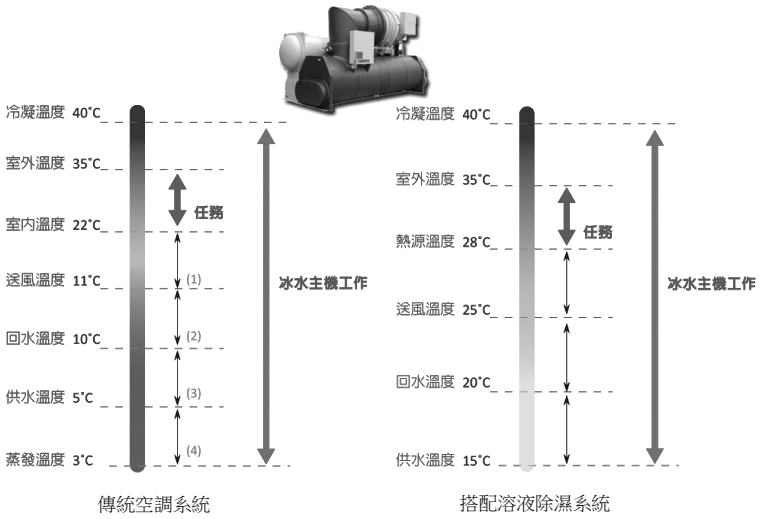


圖 6　傳統空調系統中，冰水主機工作範圍與效率關係

利用太陽能系統來作為再生段的熱源亦是個有效的節能方式。圖 7 為利用太陽能系統作為再生段熱源的應用架構。

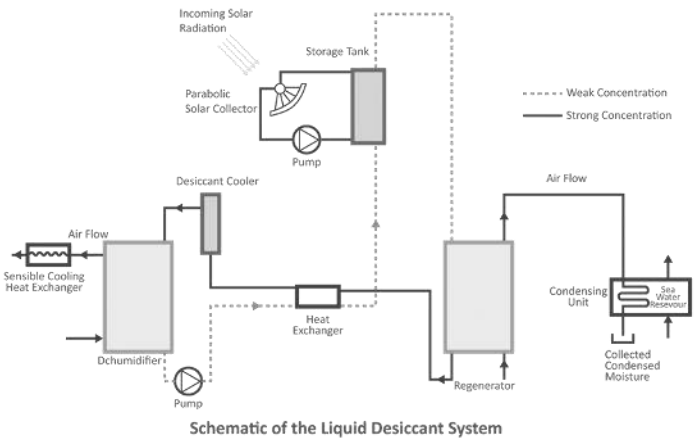


圖 7　液態除濕空調系統搭配太陽能系統架構圖

利用既有的廢熱作為再生段的熱源，除了可以省去再生段的加熱費用外，同時也可以省去廢熱處理的費用，這是對於溶液除濕空調系統最有效益的。此外，由於排氣系統所排出的氣體通常是經過處理過的室內空氣，若能選擇合適的排氣系統所排出的廢氣做為再生段所需的再生空氣，也可以大幅的降低再生段所需的加熱量，有效的提升系統效率。

2015 年與台北科技大學潔淨技術研發中心合作，主要進行數值模擬與建立數據化設計資料庫，使簡化選型及確認理論與實務產品性能的可靠度，甚至最佳化通道數據，通過經濟部能源局能源科技專案計畫審核與取得開發補助也獲得相當豐富的成果。所開發的樣品機搭配廢熱進行全熱回收，減少溶液除濕系統的能源消耗。以除濕風量 5,000CMH，在入口溫度 27.5 ℃、濕度 97.3 %，出口溫度 19.3 ℃、濕度 71.6 %，進行降溫除溼，除濕量可達 79.83 kg/hr、COP 達到 6 以上。在汙染物去除效率測試以吸收液吸收採樣空氣內之待測離子，再以離子層析儀(I.C.)檢測。(採樣時間:120 分鐘;採樣流量:1500ml/min)。結果顯示出 SO42-離子的移除率為 89.7%；NH4+離子的移除率為 88.7%。

圖 8　液態除濕空調系統樣品機

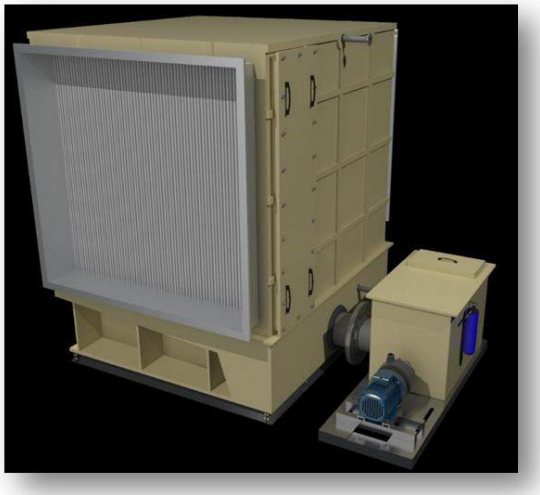


圖 9　新一代廢熱驅動除溼乾燥機組

另液態除濕空調系統的運作方式是將除濕溶液利用類似水洗的方式直接與空氣作接觸，因此，可以有效的去除空氣中的粉塵微粒，對於粉塵粒徑大於 5 micro 以上的微粒，其去除效率可達到 80%，因此，可以延長終端空氣濾網的壽命，降低維護成本，甚至依據應用狀況，有機會可以免裝特殊效率型濾網，而溶液透過系統的過濾淨化裝置，可持續維持高效能，其壽命經實驗證明可逾 96,000 小時，不需添加或更換。

此外，而 ASHRAE Handbook 中也提到，相關研究證實，溶液除濕系統的溶液除了對於空氣中的水分有吸附功能外，由於吸附溶液具有同時吸附(Co-sorption)作用，因此，對於空氣中的有機氣體、微生物、碳氫化合物及異味等，也有去除與抑制的效果。

由於傳統空調系統依靠使空氣通過冷卻盤管對空氣進行降溫除濕，也因此，導致冷卻盤管成為潮濕表面且會產生冷凝水。當空調系統停止運轉後，潮濕處就成了黴菌繁殖的最好場所，而這些黴菌便藉著空調系統散佈到整個環境中，造成室內空氣品質不良。也由於經過冷卻盤管後，空氣為低溫且濕度是接近飽和的，稍有設計或運作不當便造成結露滴水的現象發生。這些現象在溶液除濕空調系統中，都是不會發生的。因為，溶液除濕空調系統不是藉由降溫的方式來除濕，因此，沒有低溫結露的狀況發生，也就不會有適合黴菌生長的場所及結露滴水的現象。

四、結論

廢熱型液態除溼空調機相較冷凝式空調節省 30~70%，相較固態吸附除濕機至少 40~80%，不需過冷供風，造成結露風險，無冷媒洩漏或溶液攜出風險，同時，鹽溶液具備殺菌、吸附臭味及移除粉塵性能，產品生命週期達 30 年，透過國產化，本技術售價僅國外產品 60%，可降低客戶交易成本及產程邊際成本，搭配自主智慧控制系統，更可為工業 4.0 時代的製造業與服務業綠色轉型，產生極大戰略助益。

1.應用範圍為：

(1)需要溫溼度控制的相關產業。例如：醫院、原料倉儲、文物保存、藥廠、紡織廠、造紙廠。

(2)需要引入外氣且有溫溼度控制的產業。例如：醫院、電子廠、藥廠、生技廠。

2.應用實蹟：

菱生精密工業股份有限公司、中國醫藥大學附設醫院、中國化學製藥股份有限公司、國立台南藝術大學、南光化學製藥股份有限公司、東海大學、杏輝藥品工業股份有限公司、台灣國際航電股份有限公司。

五、參考文獻

1.林麒峰，「除溼劑新配方之蒸氣壓研究」，私立中原大學化學工程學系碩士學位論文，91 年 6 月。

2.ASHRAE. ASHRAE Handbook Fundamentals, 2005。

3.中國建築工業出版社。溫濕度獨立控制空調系統, 2006。

4.John Dieckmann, Kurt W. Roth and James Brodrick. 2004. “Liquid Desiccant Air Conditioners.” AEHRAE Journal.

5.Lowenstein, A. and D. Novosel. 1995. “The seasonal performance of a liquid-desiccant air conditioner.” ASHRAE Transactions 101(1):679–686.

6. A.Lowenstein, S. Slayzak and E. Kozubal “A Zero Carryover Liquid-Desiccant Air Conditioner for Solar Applications” NREL/CP-550-39798 July 2006.

澳洲高效節能的生物廢水處理創新技術–
高糖食品廠污水處理案例分析

Steve Gluck*、Akheel Soltan**、呂欣倫***

摘　要

生產食品飲料過程中，常會產生高 BOD 含量的廢水，此類廢水處理成本高昂，尤其高耗電與浮動的原水濃度與水量，一直是工廠廢水管理的難題，BioGill 生物反應器應用於一知名跨國糖果點心公司澳大利亞廠，處理該產線含糖最高的廢水，系統設計原水 COD 平均濃度 2,000 mg/L，處理後 COD 排放量平均低於 400 mg/L、BOD 平均低於 100 mg/L，處理後之廢水由中央污水網排放，大幅減少 BOD 排放、達成該跨國公司所期望實踐的社會責任理念，並同時減低排汙費。

該跨國公司在增設 BioGill 生物反應器後被認可為永續環保工廠，同時也成為澳大利亞食品業永續發展優勢計劃中，新威爾士州內第一家獲得金獎的企業，該澳洲廠也成為該企業年度企業社會責任報告的研究範例，本技術已經在美國，中國大陸、日本，印度和泰國等市場與領先的跨國企業合作，並擁有多家政府和業界領導者的推薦，從分散污水處理廠、食品和飲料加工廠至水產養殖業等業者，皆大獲好評。

【關鍵詞】生物膜、廢水處理、降低 BOD、工業廢水、永續節能、高密度微生物、澳洲技術

---

* Steve Gluck - Technical Advisor, BioGill North America

** Akheel Soltan - Divisional Manager of Engineering

***BioGill Asia Pte Ltd 呂欣倫 亞洲區經理 翻譯彙整

一、前　言

台灣食品產業高達 5,000~6,000 家，內需與出口需求連年攀升，也因此展開大量的食品廢水處理問題，食品飲料加工時產生的廢水常含有高濃度的生化需氧量(Biological Oxygen Demand, BOD)和總懸浮物(Total Suspended Solids, TSS)，BOD 濃度越高時，處理成本也會相對昂貴，面對環境資源短缺、日漸嚴格的政府法規與不斷提高的排汙費用，如何能在有限空間內快速又節能的降低 BOD、COD 及生物可分解物質等，一直是業界所面臨的挑戰。

澳洲 BioGill 生物反應器由澳大利亞政府在其核科學技術組織(Australian Nuclear Science and Technology Organisation,ANSTO)的實驗室開發，該設備置於地面，特殊的奈米陶瓷載體能與微生物形成強力鍵結，進而將微生物大量且高密度保留於系統之中，因此單位面積處理效率高，且衝擊負荷後 24~48 小時內可復原處理效能，又因獨特的垂掛設計，不須使用曝氣機便能進行好氧反應，可使好氧與厭氧反應能於同時發生，簡化廢水處理過程，提供了高效節能的水處理解決方案。

本案將 BioGill 生物反應器應用於跨國糖果點心公司，處理該廠高濃度含糖廢水，以達降低排汙費與改善環境之目標，當地政府要求各業者遵守新南威爾州(NSW)廢水排放量的法規準則(NSW Government 2009)，該準則標準如以下表 1 所示。

表 1　新南威爾州之汙水排放法規

參數	排放限值
流量	每日可排放的最高水量(kL/h 或 L/s)是依據汙水排管的可容納量而訂。排水量大的工廠，需提供一個調節池, 以便排除汙水處理廠的負荷。
BOD_5 與總懸浮物	排放限值為 300 mg/L。但若該處理系統具有足夠的處理能力和無臭味排水時，非經常性小水量濃度高達 600 mg/L 或是更高的情況，屬可允許範圍。
COD	不超過 BOD_5 的三倍以上，但該指標僅供參考，以避免排放過多不可生物降解的物質。
總可溶解性固體	最高可排放限值為 4,000 mg/L。然而，該限值可能會依據現有的廢水處理選項而降低，且將受到其質量負荷的限制。
溫度	小於 38℃
pH	7.0 ~ 9.0
動植物油脂	若排放量少於該處理系統所設計容量的 10 %，低於 100 mg/L。若排放量高於該處理系統所設計容量的 10 %，低於 50 mg/L。
洗滌劑	所有工業洗滌劑都須是生物可分解的，對於排水量大的工廠，則可能限制 50 mg/L 的排放限值。
色度	若廢水稀釋至跟生活汙水當量一樣，則該排放廢水必須無色透明。
放射性物質	該排放必須符合輻射控制措施 (Radiation Control Act, 1990)。

根據以上排放限值規定，對於該客戶來說，若沒有現場廢水處理的情況下，其年度排水費用可超過 125,000 澳元(95,000 美元)。

易於操作和維護、以及滿足不同負載的能力是客戶的關鍵選擇標準，且客戶希望在最長兩年內獲得投資回報率，為了證明此概念，BioGill 在正式安裝前，亦於現場先設立一個小的示範廠。

二、方　法

1.技術原理

BioGill 技術是一種置於地面，而非浸入水中的生物反應器，以奈米陶瓷載體組成核心處理元件，最小單台模組稱為生物濾塔，為微生物提供良好的附著環境，其奈米陶瓷載體(簡稱“陶瓷載體”)垂掛於頂部掛桿並串聯排列，創造水氣分流空間，所形成的環狀內部空間被稱為空氣層，兩片垂掛之陶瓷載體之間，由於廢水可以流通，故稱為水流層，整體串聯成完整的 BioGill 生物反應器，透過系統上方噴嘴，經由重力均勻噴灑廢水至載體。典型 BioGill 生物濾塔如圖 1 所示。

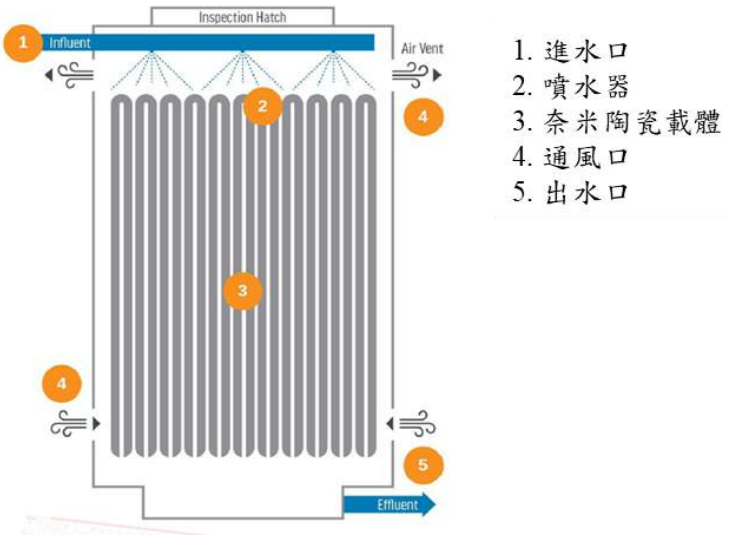


圖 1　BioGill 技術

2.該廠設計參數說明

表 2　設計參數

參數	數據	單位
水量	20.0	噸/天
COD	3,220	mg/L
COD/BOD	1.5	由現場測試確定
BOD (進水)	2,147	mg/L 客戶提供
BOD (出水)	300	mg/L
溫度	18	℃

該工廠之廢水系統含有一攪拌機和輸送泵的調均槽(60 噸)、循環槽或稱反應槽 (30 噸)和汙泥排放泵、9 台 BioGill (安裝在隔熱棚內)，如圖 2。另外，其他設備如: pH 值校正系統(安裝在調均槽與循環槽之間)，通風風扇，尿素滴定器，磷酸滴定器和太陽能熱水加熱系統，皆一併建於系統當中，此外，該工廠利用 PLC 全自動控制系統，並使用地面混凝土水池，整體系統流程可見圖 2，由調勻槽先蒐集廢水，再批次性輸送至循環槽，循環泵會將循環槽廢水反覆循環注入 BioGill 系統，直到廢水處理至理想的 BOD 為止，即完成一個批次週期，當循環槽該批次廢水處理結束後，會將廢水排出淨空，再次注入調勻槽的廢水。該系統的耗電源與其他使用鼓風機的廢水系統不同，抽水泵是系統的唯一耗電源，因此本設計大幅減少耗電量，整體系統，再循環泵的總壓力差為 7 米(分別是管道壓力損耗 3 米，BioGill 揚程 3 米及 BioGill 噴水器壓力損耗 1 米)，額外再加上幾米的備用揚程，以利將來擴建(案後再加入 3 米長的熱交換器揚程)，系統設計圖如圖 2。整體系統外觀如圖 3。

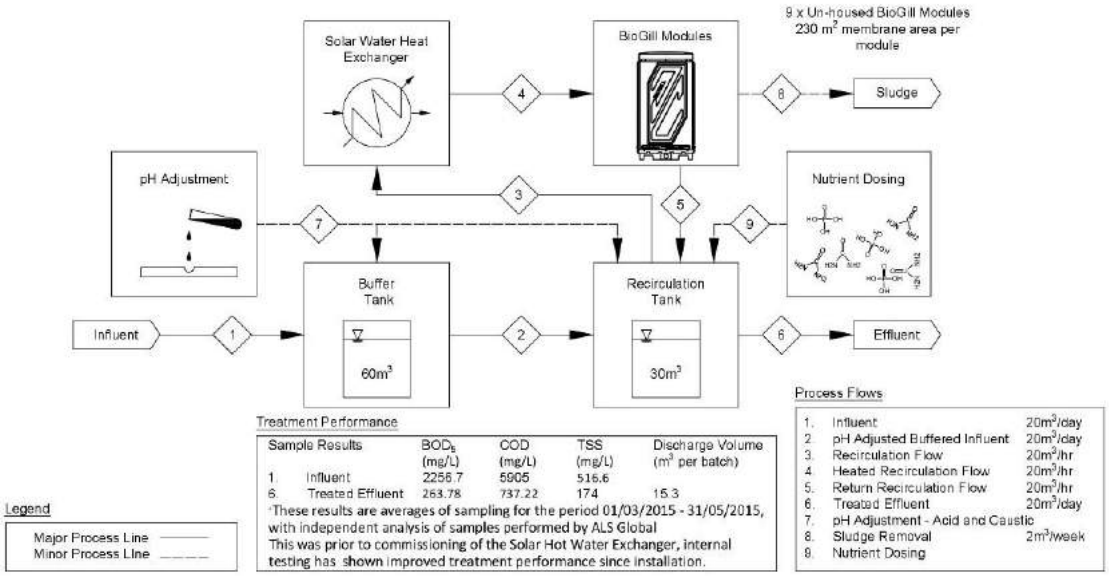


圖 2　　BioGill 系統設計圖

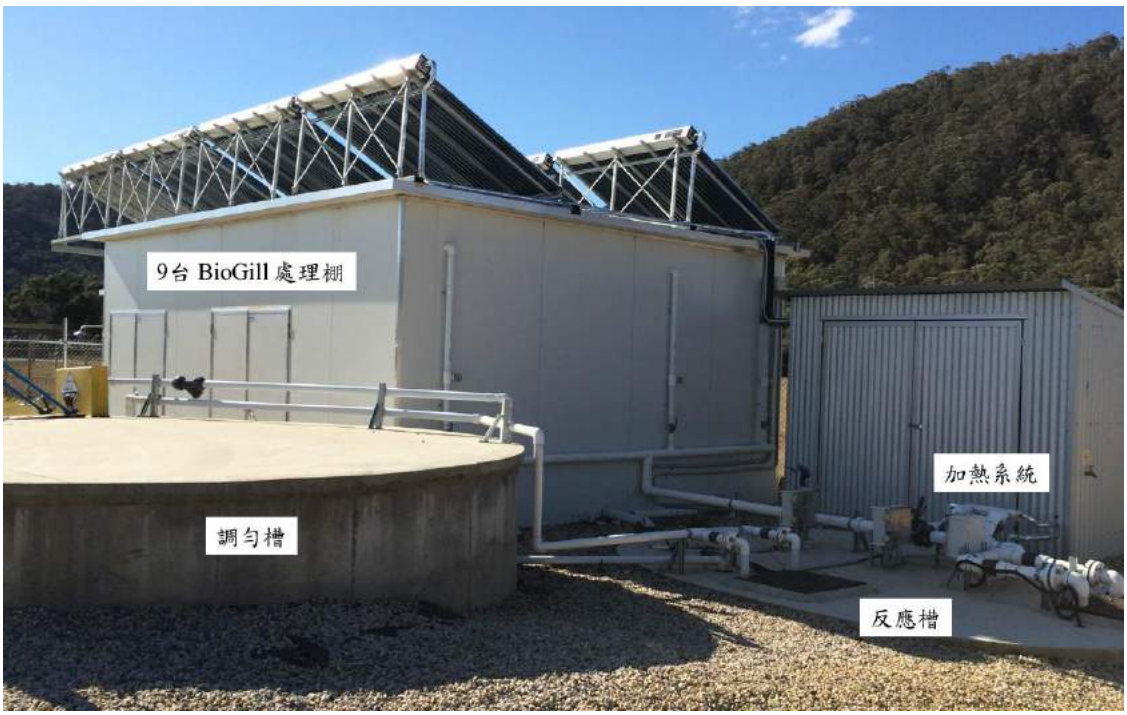


圖 3　　BioGill 整體廢水系統外觀

如圖 4 所示，BioGill 處理棚底座設計斜板，以防止大量汙泥脫落後直至反應槽內，反應槽的溢流水管位於地板的高處，操作人員於每個星期停止循環泵，並使用軟水管沖洗 BioGill，將多餘的老舊的汙泥沖洗下來，沿著隔板移動至排泥孔，逕至處理槽外的汙泥槽中(圖 5、6)，其汙泥則定期由汙泥泵抽取至臨時汙泥貯槽，進而繼續後段污泥處理，該系統每週生產 2 噸的污泥，大約為 1%的總懸浮物產出，換算可得 0.2 公斤 VSS/公斤 BOD，BioGill 目前正與客戶合作，在現場安裝上清液返回閥，以進一步減少汙泥的體積。

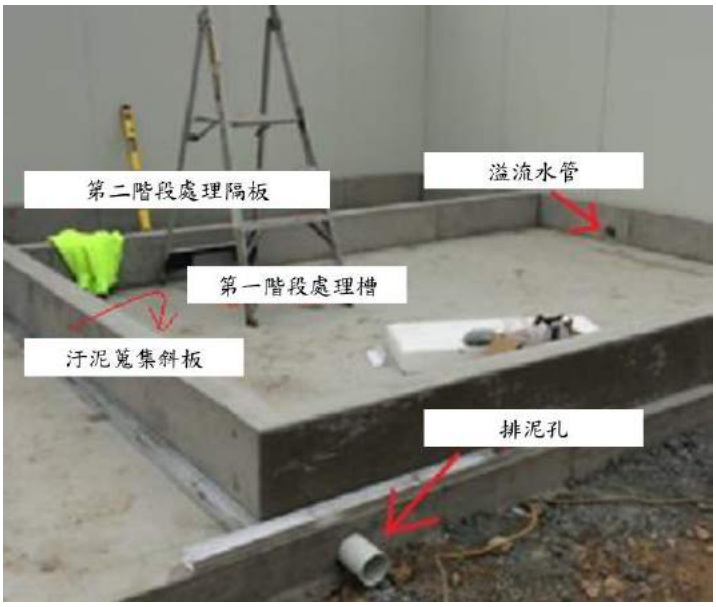


圖 4　BioGill 系統底座

圖 5　位於系統底座無帶殼 BioGill

圖 6　安裝在隔熱棚內的 BioGill

BioGill 陶瓷載體在此系統運行中，並無添加任何降解用化學藥劑，主要憑藉其載體可高效附著生物膜的特性，透過調勻碳氮磷等營養與 pH 調整，達到處理效果，健康的生物膜 pH 範圍須在 6.5~8.5 之間，而此法形成的生物膜可耐短時間(幾個小時)的 pH 浮動，浮動範圍為 5~10 之間。

該系統並無使用化學絮凝劑沉降汙泥，老舊的汙泥掉落至處理棚底下循斜板蒐集，由於生物膜附著生長在奈米陶瓷載體而非懸浮在廢水中，所以出水時該 TSS 濃度在 300 mg/L 內。BioGill 建議碳氮磷比例為 100: 10: 1 (Rittmann and McCarty 2012，Metcalf and Eddy 2014) 。 經過營養劑調勻後，化學劑用量減少至原設計化學加藥量的 50%。

3.設計基礎示範試點 (Cross,2013)

示範試驗於 2013 年 7 月設立(如圖 7)，其試驗含有 1 噸循環槽、含 40 平方公尺奈米陶瓷載體的 BioGill 生物反應器、3 台泵(進水泵、循環泵和排水泵)和一個控制器。該試驗以不同的水量和水質負荷條件下進行，同時也因為現場的環境溫度較低，所以使用隔熱毯來維持生物組群的溫度。

圖 7　BioGill 示範試驗(左-無隔熱毯;右-有隔熱毯)

該生物反應器的養菌方式是添加市售可用來處理化糞池的微生物製劑養成，其 pH 值調整至 6.5~8.5 之間，剛開始每隔一天加入氮源(尿素)和磷源(過磷酸鹽)，由於過磷酸鹽含硫量為 12%，導致系統水變黑，所以之後改以磷酸代替，該系統以批次式進行處理，抽取其 1 噸循環槽內的水量至陶瓷載體連續循環 23 小時後排出，於兩週內可觀察到微生物附著，且 6 週後可觀察到完整覆蓋的生物菌群。

三、結　果

於 2014 年，客戶簽約授予 BioGill 設計建造和委託全面污水處理系統，該系統於 2015 年 1 月開始運行，全面的安裝系統後，呈現以下結果：

1.COD 去除率

客戶的目標是出水達到 900 mg/L COD 或以下，以達到其新南威爾州排放限值所制定出水 BOD 300 mg/L 的 3 倍限值要求(如表 1)。該系統的水力停留時間根據進水水質而變化，其 COD 去除率通常在 65%和 95%之間(圖 8)，COD 進水與出水數據結果和 COD 百分比去除率的採樣結果顯示達標，進水 COD 與出水 COD 有顯著差異。

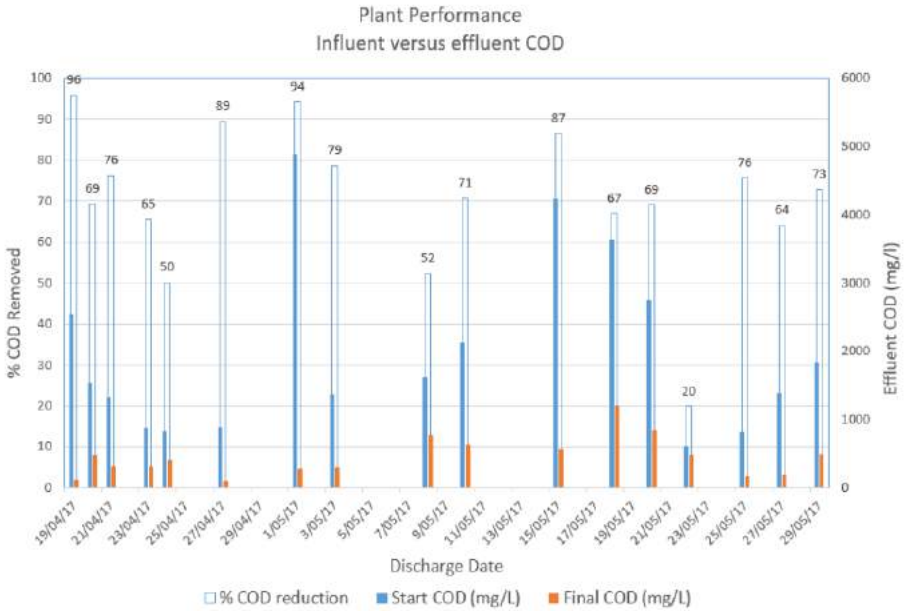


圖 8　進水 COD 和出水 COD

2.生物膜觀察

系統起始後，在陶瓷載體的兩側可觀察到不同種的生物膜菌落生長，如下圖(圖 9、10、11)，隨著時間的增長，老舊的生物菌群隨重力脫落至底下的收集槽。

圖 9 **水流層厭氧生物菌群**	**圖 10** **空氣層厭好氧生物菌群圖**	**11** **總和好氧和厭氧生物群**

四、討　論

1. 建立計算模型

BioGill 生物反應器提供高效載體與表面積，使生物菌群能夠適應生長環境，長出良好的生物膜，因為其介面環境與濾材特性，能於同一載體的兩側各自培養好氧和厭氧的細菌 (Taylor, 2005)，空氣側屬第一生物層，是為好氧菌，水流層則發現第二種生物組成，屬於厭氧菌。生物膜菌群的變化錯綜複雜，隨著水平或垂直層觀察，微生物皆有所不同，生長在上部的微生物可與底部的微生物不同，同樣的，生長在內層的微生物與在邊緣的微生物也有所不同，例如在 BioGill 其中一個乳製品案例中，可觀察到真菌生長在空氣側(圖 12) 。

圖 12　生長在空氣側的真菌

預期的營養物質濃度在空間和時間上都有變化，因此，可觀察到不同

空間和時間所產生的微生物，由於此一複雜度，使汙泥產出量難以發展計算公式，所以 BioGill 生物反應器仍無標準計算模型，這與活性汙泥系統不同，標準活性污泥 ASM 1, 2, & 3 (Henze, Gujer et al., 2000) 具有標準化計算和模擬軟體，可利用連續攪拌槽反應器(Continuously Stirred Tank Reactor, CSTR)系統的計算模式，直接以數學方法演算預估結果。

這種微生物分層狀況是本附著式生長系統的挑戰，在此我司設立一基本建模方法，可於前期小型實驗模型推估大型安裝的相關係數，此質量平衡的探討基礎，乃使用完全混合生物膜反應器(Complete Mixed Biofilm Reactor, CMBR)的原理(Rittmann and McCarty, 2012)，由於 BioGill 屬於地上型的生物反應器，其中生物膜與廢水分離，因此，為探討所需，將廢水循環過程成之為“循環水流, Recirculation Flow”，批次處理的質量平衡如下圖所示(圖 13)。

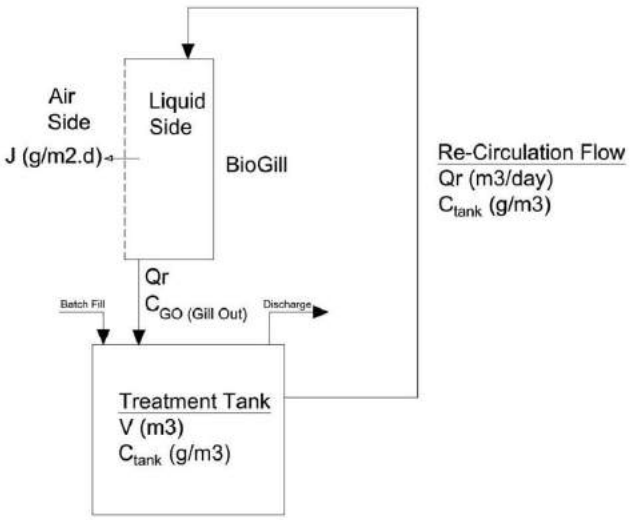


圖 13　質量平衡設計圖

本次實驗中進行了詳細的模型開發和驗證,而計算值與實際排放 COD 值之間存在顯著差異，這可能與覆蓋效率、通風設備以及處理槽本身的微生物代謝有關，而提升了 COD 去除率，此類模式開發研究已超出了本實驗的範圍，但將成為未來後續研究的主題。

2. 與傳統活性汙泥比較

BioGill 與一傳統活性污泥槽相比以作為設計門檻，由於工廠產線經常變化，BOD 一週內浮動可達 8 倍之差(Cross 2013)，因此常需要延長曝氣時間，此類活性污泥槽中常可發現污泥停留時間長達 21 天(Sludge Retention Time, SRT)。此外，曝氣量是根據所需的生物質量和曝氣池大小

計算，所有動力學和量學計算皆取自 Metcalf 和 Eddy 的理論 (Metcalf and Eddy 2014)，計算結果顯示，若使用傳統廢水處理系統，需要大約 45 噸曝氣池，7.5 噸沉澱池，以佔地面積來講，BioGill 和傳統廢水處理系統具有同樣的佔地，如圖 14 所示。

傳統活性污泥法的供氧量是根據 COD 質量平衡和計算提供微生物生長的 COD 溶解氧量，以圖 8 所示的進水 COD 平均濃度為 2,023 mg/L，出水 COD 平均濃度為 386 mg/L，平均每天進水量為 7 噸而言，COD 的總負荷約為 11.5 公斤(7×(2,023-386))，該傳統活性污泥槽的每日汙泥產出量為 3.8 公斤/日，換算可得其相當於 5.4 公斤 COD 缺少每日 6.1 公斤氧氣，或是需再增加 0.25 公斤/小時氧傳輸量(Oxygen Transfer Rate, OTR)。

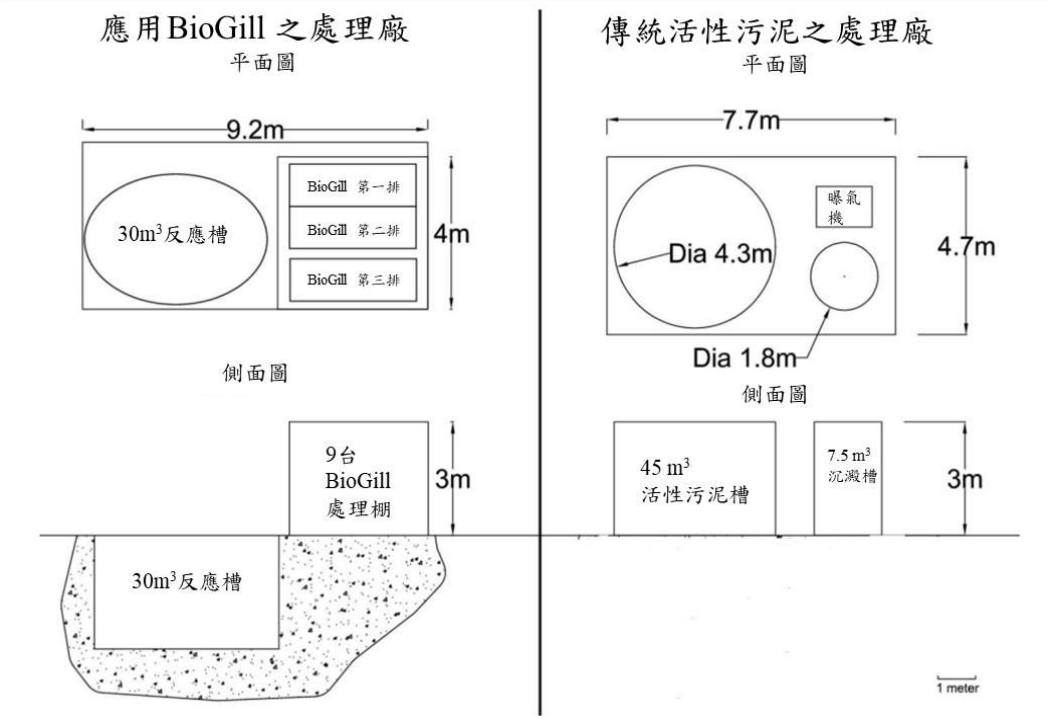


圖 14　BioGill 和傳統廢水處理的占地面積比較

在傳統浸入式系統中，氧傳輸量需應用以下列出的校正參數，以利計算其特定氧傳輸率(Specific Oxygen Transfer Rate, SOTR)，相關係數如溫度、海拔高度及水深都會影響氧氣在水中的轉移效率，而特定氧傳輸率則是用於計算鼓風機應用時的參數，浸入式生物系統常見擴散曝氣校正參數包含以下：

(1)Alpha (α)因子：用於增大氣流，以彌補因水中髒污造成氣體轉移過程中的損失。

(2)Beta(β)因子：因為髒水與清水的氧氣飽和度不同，此參數用於計算

調整氣流以改善髒水的氧氣飽和度。

(3)水溫：這會影響水的含氧量，溫度越高，氧氣飽和濃度越低。

(4)海拔高度：大氣壓力也會影響水中含氧量，本場地因為位於海拔 950 米，因此還需增加 10%曝氣量。

(5)反應槽深度: 這直接影響擴散曝氣效率，從氣體到液體的氧氣傳遞活動不是瞬時的，而具有時間依賴性，氣泡在水中停留時間越少，從氣體到水的氧氣擴散效率越低，這意味著反應槽的深度越淺，空氣擴散效率越差。文獻指出，這是浸入式曝氣過程極其重要的因素，其效率常為每公尺 2~10% (Metcalf and Eddy 2014)，具體取決於該曝氣機類型，鼓風機的數量和安裝密度，這是傳統系統的重大限制，因為大多數現成的反應槽都缺乏足夠的深度。

當綜合考慮上述情況後，並以每天的進水量 7 噸，循環泵的揚程為 7 公尺，循環水量為 17.4 噸/小時，可計算出 BioGill 系統所需的耗電量為 1.4 度/噸。而使用擴散曝氣的傳統廢水處理系統，以 3 公尺深的反應槽和 15% 的氧傳輸效率計算，所需耗電量為 22 流量立方公尺每小时 (Nm^3/hr)或 3 度/噸。

五、結　論

經過詳細計算所開發，該處理廠已使用 BioGill 生物反應器技術兩年半以上，隨後也滿足客戶預期的投資回報。在初步試驗過程中，開展了詳盡的模型建立工作，但結果與傳統 COD 預測的相關性相差甚遠，相關模型建立與計算工作目前正在完善階段。

該處理效能結果顯示，此類新型生物反應器技術可有效的處理高濃度的 COD 廢水，經過處理，從進水 COD 平均濃度為 2,023 mg/L 降低至出水 COD 平均濃度低於 400 mg/L，使該工廠的排汙量減少，同時也符合當地法規的排放要求，此外，該工廠只使用了相當與傳統活性汙泥系統的一半耗電量。

六、文　獻

1. Cross，G. (2013). "Reduction of the biological oxygen demand in liquid trade waste for a confectionery company." UWS Postgrad Science Health Research Project.
2. Henze，M.，et al. (2000). Activated sludge models ASM1，ASM2，ASM2d and ASM3，IWA publishing.
3. Metcalf and a. Eddy (2014). Wastewater engineering : treatment and resource recovery，New York，NY : McGraw-Hill Education.

4. NSW_Government (2009). "Liquid Trade Waste Regulation Guidelines." Retrieved 10th of June，2017，from http://archive.lithgow.nsw.gov.au/documents/town_planning_water_utilities _liquid_trade _waste_guidelines.pdf.
5. Rittmann，B. E. and P. L. McCarty (2012). Environmental biotechnology: principles and applications，Tata McGraw-Hill Education.
6. Taylor，A.，Patrick，Andrew ，FINNIE，Kim，Suzanne，Bartlett，John，Holden，Peter，(2005).
7. MEMBRANE BIOREACTOR SPRUSON & FERGUSON. ANSTO. International W O 2005/111193 Al

簡易型除水棒

張逢源*、黃滿美**

摘　要

為避免廢水污泥處置對環境產生二次污染，各國政府分別制定出污泥處理的法規或管制方式。已知對污泥處理的方式有許多，例如生物處理技術、物理處理技術、燒結技術、焚化處理技術、掩埋處理技術等。其中，物理處理技術常見的有乾燥及固化，目的皆在於降低污泥的含水率，以減少污泥的體積而便於後續的再處理現有用於降低污泥含水率的設備有真空過濾和離心等機械處理器具，惟，前述設備造價昂貴而適用於大量污泥處理使用，相較於污泥待處理量較少的環境來說，前述設備顯得不符合經濟效益。然，縱然污泥待處理量不適合以大型設備來處理，但污泥的高含水率問題，仍須積極處理方不會造成清運的不便與負擔。有鑑於此，本公司設計出一組簡易型除水棒，創作之目的在於提供一種污泥脫水裝置，其可降低污泥含水率，且售價親民、使用簡便。

簡易型除水棒裝置包括有一插管、一集水槽與一抽水裝置。其中插管係可插入污泥中；集水槽設置於該插管底部，用以收集污泥中的水分；抽水裝置則用以將該集水槽內的水抽出。經實場驗證可將減少重量約 18.3%(污泥含水率從 85%降至 81.6%)。而所需之操作費用低於一度電費，將有助於污泥減量之工作。

【關鍵詞】綠色科技、污泥減量、操作簡易、除水系統

---

*鑄詳科技有限公司　研發協理

**鑄詳科技有限公司　總經理

一、前　言

為避免廢水污泥處置對環境產生二次污染，各國政府分別制定出污泥處理的法規或管制方式。已知對污泥處理的方式有許多，例如生物處理技術、物理處理技術、燒結技術、焚化處理技術、掩埋處理技術等。其中，物理處理技術常見的有乾燥及固化，目的皆在於降低污泥的含水率，以減少污泥的體積而便於後續的再處理。

現有用於降低污泥含水率的設備有真空過濾和離心等機械處理器具，惟，前述設備造價昂貴而適用於大量污泥處理使用，相較於污泥待處理量較少的環境來說，前述設備顯得不符合經濟效益。然，縱然污泥待處理量不適合以大型設備來處理，但污泥的高含水率問題，仍須積極處理方不會造成清運的不便與負擔。有鑑於此，本公司特研發出一種簡易型污泥脫水裝置，其可降低污泥含水率，且售價親民、使用簡便。

二、污泥處理現況

污泥是廢水處理過程中產生的固體廢棄物,隨著國內經濟的快速發展和環保法規的加嚴，污水廠之處理水量和處理深度將不斷擴大和提高，產生的污泥量也將日益增加,目前在一般污水廠中污泥之處置費用約占污水廠總支出的 20 ~50%。全國污泥清除總申報量及事業端產出申報量之統計結果，民國 101 年污泥清除量約為 237 萬公噸(平均每月申報量為 19.7 萬公噸)，其中一般污泥清除量 224 萬公噸占全國污泥清除量約 94.98%。101 年及 102 年之污泥清理流向申報資料統計，依統計資料顯示 101 年污泥處清理方式主要以自行處理/自行再利用 83.8 萬公噸(占 36.57%)最多，其次為處理機構 75.1 萬公噸(32.75%)以及再利用機構 67.3 萬公噸(29.36%)(環保署 事業廢棄物線上申報資料)。統計 102 年之污泥清理流向申報資料並與 101 年污泥清理流向申報資料進行比較，除流向公有掩埋場趨勢下降外，其餘流向比率一致，推論 102 年由於北部及中部多家污泥處理機構發生違法事件而遭受停工、歇業處分後，原委託上述機構處理污泥之事業，主要去處仍為目前尚有營運之處理機構，同時，亦可由貯存量之增加，顯示事業可能因價格或其他內外在因素而將污泥暫存於廠內，持續尋找適合之清除處理機構。國內大部分脫水後的污泥餅多直接送至衛生掩埋場處理進行最終處置,但國內掩埋場容量越來越少，而且政府亦不鼓勵新設掩埋場，未來脫水後的污泥的去處

將是亟待解決問題(營建署污水處理廠節能計畫期末成果報告書，2011)。

本公司設計團隊在研發初期，已拜訪過 16 家廠商包含各種樣式的污泥乾燥設備，除分析各家設備優劣之外也瞭解此技術的關鍵瓶頸(表 1)。充分瞭解污泥粘結的機制與過程後，團隊運用巧妙的設計，成功地突破粘結的技術問題。因此，本公司的污泥乾燥設備較其他系統有更高的熱處理效果、更低的操作成本、更耐久的操作元件。

表 1　市面上污泥乾燥技術

	旋轉盤乾燥技術	氣流式瞬間乾燥機	微波真空乾燥設備	熱泵乾燥技術
技術簡介	採用塔型層盤式連續乾燥處理。特別針對較難乾燥之生物污泥設計。	同時乾燥、細粉碎及分級三項處理。可調整製品粒度及溼度。熱效率高、運轉費用低、連續式生產，形成負壓無粉塵產生。	對產品乾燥過程中的物理變化、內外熱質交換以及真空條件下水分遷移過程，乾燥溫度，乾燥濕度的深入研究基礎上的，發展起來的一項新技術。	乾燥空氣經加熱到60℃，導入污泥餅乾燥箱後，將水分攜出。含水空氣導入冷凝鰭片，將空氣中水分凝結及排出。
市場競爭性	只能適用少量污泥，需人工操作，市場競爭性低。	設備成本高，空間需求大，市場競爭性低。	電力需求大，操作成本高，較適用工業污泥。	熱效率高，但攪拌系統易卡住。

三、簡易型除水棒操作原理與效率

本公司提供的污泥脫水裝置包括有一插管、一集水槽與一抽水裝置。其中插管係可插入污泥中；集水槽設置於該插管底部，用以收集污泥中的水分；抽水裝置則用以將該集水槽內的水抽出。該插管為表面具有多數個篩孔12且具有預定長度的管體，該些篩孔的孔形可以是任何形態，也可以是類似縫隙的結構，篩孔的孔徑大小以可讓水通過但能阻擋污泥為佳。插管的頂部設有一接頭用以封住插管頂部的開口，以避免異物掉入；插管底部則接設有可盛水的集水槽，集水槽為不滲水之結構。

使用時，係將插管直立地插入污泥，使得集水槽及大部分的插管皆埋沒於污泥中，僅留該控制盒及導水管的一端於外部而不為污泥覆蓋。靜置一段時間，污泥所含的水分將自動地循該些篩孔而透入管內，並受重力影響而自動地匯流至集水槽中，在集水槽內的水到達預設的高水位時，該液位感應器旋即發出第一控制訊號予該控制盒，以進一步啟動該沉水馬達而將集水槽內的水循導水管抽出，所抽出的水控制在不迴流至污泥，因此可選擇導流或另為收集。

當集水槽內的水降至預設的低水位時，該液位感應器將自動發出第二控制訊號予該控制盒，並據以關閉該沉水馬達以停止抽水動作。如是，集水槽所騰出的空間，可作為下一次集水用，據此，反覆地執行集水、抽水程序，即能達成降低污泥含水率之目的，使得污泥體積濃縮而便於清運及降低清運成本。以上即為本創作較佳實施例之污泥脫水裝置之結構與使用說明，其確實可降低污泥含水率，且結構簡單、使用簡便、售價親民，適用於不便以大型設備處理且污泥待處理量較少的環境使用。當然，實際使用本創作之污泥脫水裝置的數量不以一支為限，可視需求適當增加數量。

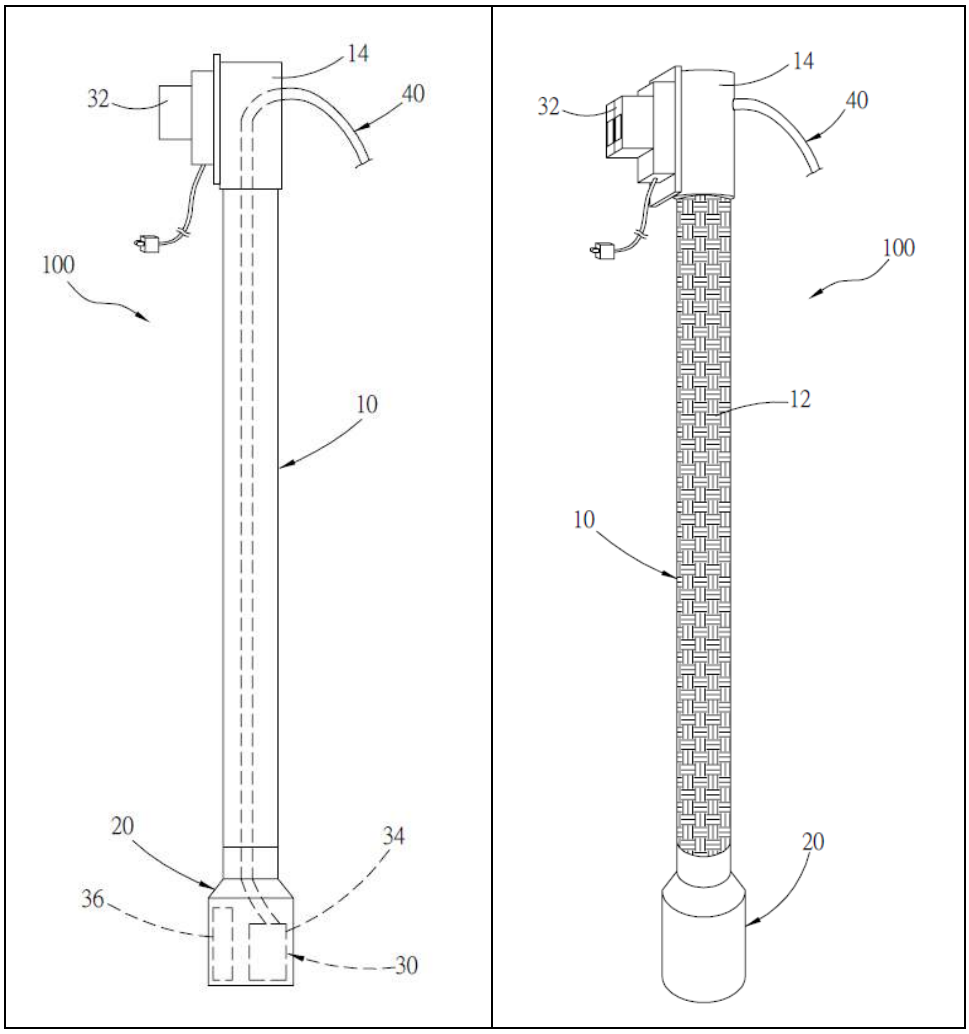


圖1　太空包適用型除水棒

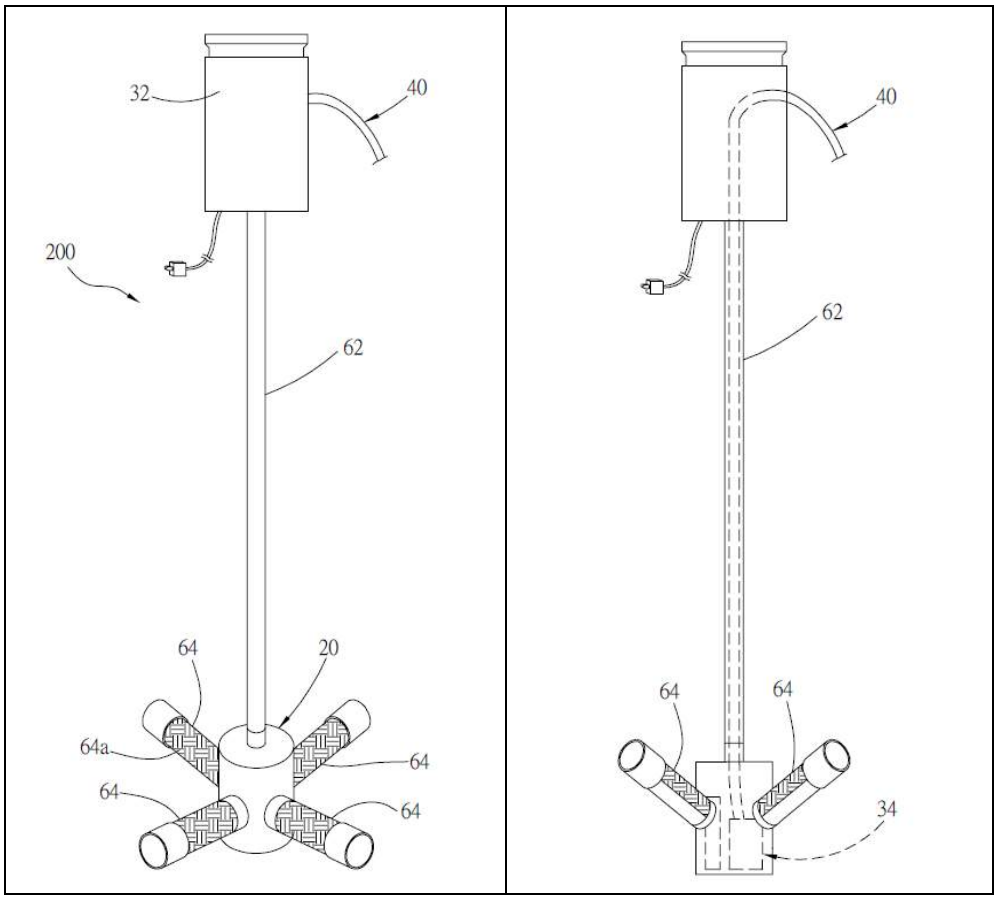


圖2　污泥曬乾床適用型除水棒

我們由圖3可以看到，簡易型除水棒插入太空包時，初期每日可除水28~40公斤左右(原污泥含水率87%)，經過10天連續除水測試後，每包可去除165~175公斤左右的間隙水。可減重17.9~18.8%之間。而採用的是一顆1/6碼的沉水馬達，耗電量約2.3~2.8度之間。

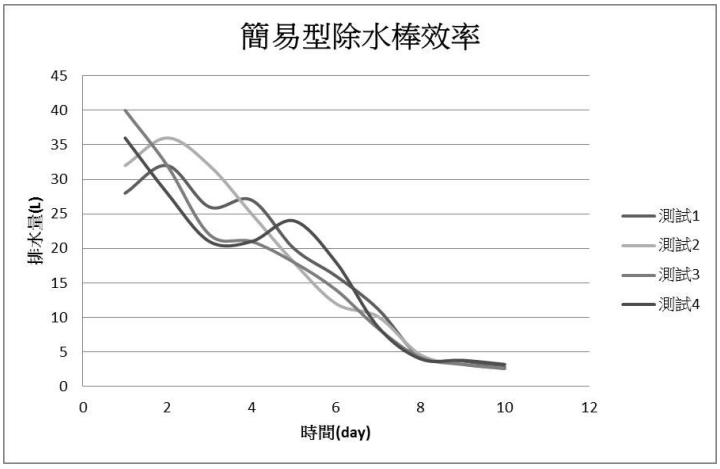


圖3　簡易型除水棒除水效率圖

四、結　論

簡易型除水棒有其先天上的缺點例如需要較長的操作時間與含水率如低於75%則效果就會顯著下降。但因成本低廉(一組僅為2萬台幣)足以將原高含水率的污泥減量18%左右，適合一般中小企業與養豬場使用。

五、參考文獻

1. 環保署事業廢棄物線上申報資料，105 年 10 月。
2. 污水處理廠節能計畫成果報告書，內政部營建署，100 年 5 月

處理含氟廢水的導電度分析與比較—
處理 1Kg 50%HF 氟酸為基礎

廖明輝*

摘　要

在台灣，半導體廠、太陽能面板廠、TFT-LCD 玻璃面板廠、不銹鋼廠等四大產業，都使用很多的氟酸混酸，當濕式蝕刻液，產生很大量的氟酸混酸廢水。一般都使用氯化鈣方法處理氟酸混酸廢水。

使用氯化鈣方法處理氟酸混酸廢水，其實是很糟糕的，使用氯化鈣是廢水導電度很高的主要原因。處理含氟酸混酸廢水，若是想要回收廢水再利用，若是要降低廢水的導電度，一定要放棄使用氯化鈣方法處理含氟酸混酸廢水。

若是處理單純的氟酸廢水，所有加進去的鈉離子與鋁離子，都會產生鈉鋁氟化合物沉澱出來。在處理後的廢水中，只存在相當微量的鈉離子，所以處理後的廢水，導電度很低很低，肯定可以回收再利用。若是處理混酸氟酸廢水(含鹽酸、硝酸、硫酸)，處理氟酸的部分，所有加進去的鈉離子與鋁離子，都會產生鈉鋁氟化合物沉澱出來，則使用任何方法處理(包含使用鈉鋁化合物處理也一樣)，都將在廢水中存在等量的鈉離子與氯離子、硝酸離子、硫酸根離子，那是沒有辦法的事。也就是說處理 1Kg49%HF，將使廢水中增加約(75 mole 氯離子+ 100 mole 鈉離子) ，總共氯離子與鈉離子約 175 mole，這就是廢水高導電度的主要原因。這就是使廢水不能回收再使用的主要原因。

以鈉鋁取代氯化鈣處理含氟酸廢水，是根本解決廢水高導電度的問題與廢水回收再利用的問題，並降低處理成本。目前都使用氯化鈣處理氟酸混酸廢水，其實氯化鈣是不好的東西，除了效果不好之外，又引入很多氯離子，因為要中和酸(鹽酸與氟酸)，又加大量液鹼，又引入很多鈉離子，這是廢水的導電度降不下來的罪魁禍首，如果以後管制廢水的導電度，肯定氯化鈣將沒有人敢用了，改用鈉鋁溶液將是解決之道。

【關鍵詞】含氟酸混酸廢水處理、廢水導電度、氯化鈣汙泥、污泥廢棄物、廢棄物資源化、廢棄物資源化、廢水回收再利用

---

*台有化學有限公司　總經理

一、前　言

處理廢氟酸混酸，使用氫氧化鈣，其實是不錯的方法，問題是氫氧化鈣($Ca(OH)_2$)水中溶解度很低: 1.8g/liter，需要長時間攪拌(有溶解才會有反應)，需要過量加藥，造成很多污泥。

因此，引用鹽酸，產生氯化鈣($CaCl_2$)，用來處理廢氟酸混酸，似乎是解決了氫氧化鈣($Ca(OH)_2$)溶解度的問題，不過，似乎又引來另兩個問題，一個是:原本是要處理氟酸，你卻在前面又加了鹽酸，造成需要很多很多的液鹼來中和，造成後端的廢水導電度過高，造成後端的廢水不能回收再利用，還需要很多的水來稀釋，才能排放，造成浪費很多水資源，一個是: 氯化鈣($CaCl_2$)入水之後，1/3 形成氟化鈣(CaF_2)，2/3 形成氯化鈣($Ca(OH)_2$)，造成氟化鈣不純，形成污泥而且數量很多，根本沒有辦法資源化。

流體化床，似乎操作上很麻煩，而且設置費用很高，問題不少，目前沒又有人敢採用了，

使用鈉鋁(Na^+Al^{+++})藥劑中和的方法，不需任何重大設備，只需中和的桶槽即可，簡單，方便，成本低，所加入的藥劑都會以沉澱物(Na_3AlF_6)沉澱出來，因為很純，又可以廢棄物資源回收再利用，廢水中幾乎不會殘存任何藥劑，又可以解決廢水導電度過高的問題，回收廢水再利用，降低操作成本，解決水資源不足的問題，一舉數得，相當完美。

其實氟化鈣(CaF_2)(螢石)如果很純，純度高於 75%，中鋼是要的，中鋼可以當煉鋼的除渣劑(或叫造渣劑)，問題是不純，根本是廢棄物，相當可惜。

二、詳細比較與說明

1.使用鈉鋁(Na^+Al^{+++})處理 1Kg 50%HF 氟酸

$$3Na^+ + Al^{+++} + 6F^- \rightarrow Na3AlF6$$

2.1Kg 50%HF 氟酸與冰晶石(沉澱物) 的關係

以 1Kg (1000g) 50%HF 為基礎：約可產製約 875g，精純的冰晶石 cryolite(乾基)若含水 50%，則約可產製約 1750kg，精純的冰晶石 cryolite(濕基)加進入的東西(Na^+鈉離子 Al^{+++}鋁離子)都會沉澱出來，不會殘存在廢水內，所以導電度可以很低! 加藥可以很精準，不必過量加藥!

如果是處理混酸廢水，處理之後，廢水之中是會有(Na^+鈉離子)(中和其他無機酸的產物)、與硫酸根、硝酸根、氯離子的!如果是混酸廢水中含有醋酸與磷酸，是可以一併產生沉澱物的 (廢水 BOD 是很低的)

3.1Kg 50%HF 氟酸與藥劑的關係

須處理藥劑鈉鋁約 801g，及液鹼 45%NaOH 約 660g，約鈉鋁的 0.8 倍左右

$$3Na^+ + Al^{+++} + 6F^- \rightarrow Na_3AlF_6$$

4.使用鈉鋁處理氟酸的結論說明:

所有加入的鈉鋁與液鹼 45%NaOH 都形成冰晶石 cryolite 沉澱出來，也就是說廢水之中根本沒有多餘的鈉離子與鋁離子(理論上)，所以廢水的導電度一定很低，因此利用鈉鋁處理 HF 氟酸廢水，其廢水是可以回收再使用的，在枯水期更顯珍貴，對於將來將管制廢水導電度一事，更是防患未然。

5.使用氯化鈣處理 1Kg 50%HF 的分析

$$Ca(OH)_2 + 2HCl \rightarrow CaCl_2$$

$$CaCl_2 + 2HF \rightarrow CaF_2 + 2HCl$$

6.氟酸、氯化鈣藥劑費用與氯離子(增加導電度)

以 1Kg 50%HF 為基礎：須要 12.5mole 氯化鈣，一般氯化鈣加藥須要預計量的 3 倍

一倍氯化鈣產生氟化鈣，約 2 倍氯化鈣產生氫氧化鈣，使水中增 75 mole 氯離子

7.產生氟化鈣污泥的重量與污泥的費用說明

所加入的 37%氯化鈣，一般氯化鈣加藥須要預計量的 3 倍，以 1Kg 50%HF 為基礎。也就是說 1 倍的氯化鈣產生 975g 的氟化鈣，有 2 倍的氯化鈣產生 1850g 氫氧化鈣，產生氟化鈣污泥的重量(乾基)= 2825g 污泥(乾基) = 5650 g(濕基)含水 50%污泥。

8.使用氯化鈣方法處理須要很多液鹼處理成本高(導電度也高)

(1)處理 1Kg 50%HF，採用(氟化鈣法)須用 37.5 mole 的氯化鈣，將須要 75 mole 的 NaOH 來中和，將使廢水中增加 75 mole 氯離子

(2)中和 HF 氟酸的部份，須要 NaOH 的 25mole

(3)處理 1Kg 50%HF 將使廢水中增加 100 mole 鈉離子與增加 75 mole 氯離子，這就是廢水高導電度的主要原因! 這就是使廢水不能回收再使用的主要原因！使用氯化鈣方法處理氟酸廢水，其實是很糟糕的，是廢水

導電度很高的主原因。產生氟化鈣污泥的重量 5650 g(濕基)含水 50%污泥，還沒有加計 polymer 與 PAC 及水電費。

表 1　基本資料比較表

	分子式	分子量	水中溶解度	溶解度積 ksp
氟化鈣	CaF_2	78	0.0146g/l，1.8717×10^{-4}mole/l	2.6231×10^{-9}
冰晶石	Na_3AlF_6	210	0.04175g/l，1.988×10^{-4}mole/l	1.2146×10^{-31}

解離方程式：$CaF_2 \rightarrow Ca^{++} + 2F^-$　　$Na_3AlF_6 \rightarrow 3Na^+ + Al^{+++} + 6F^-$

表 2　以 1 公噸 50%HF 為基礎的分析與比較表

	氫氧化鈣法	氯化鈣法	鈉鋁法(台有公司)	流體化床法
藥劑使用量	氫氧化鈣 90%公斤數約 6000Kg	氯化鈣 37%公斤數 9197Kg	鋁化鈉 約 785.2 公斤	未知
藥劑使用成本	氫氧化鈣的成本 約 12000 元	氯化鈣的成本 28510 元	鋁化鈉的成本 62816 元	未知
產生氟化鈣(濕基)俗稱污泥量	約 10000 kg	4630.5 Kg	冰晶石產製約(濕基含水 50%)1715kg	未知
污泥處理成本	氟化鈣污泥處理成本約 30000 元	氟化鈣污泥處理成本約 13892 元	冰晶石處理成本 免費	未知
須要 45%NaOH 液鹼的公斤數	約 4000Kg	7622.2Kg	約 656.2 公斤	未知
須要液鹼的成本	約 34000 元	64789 元	5578 元，如果是混酸這部份費用會增加	未知
還須要其他藥劑費用	約 30000 元 PAC 鹽酸與 polymer 費用	約 6000 元的 PAC 鹽酸與 polymer 費用	相當微量或不必	未知
處理 1 公噸 49%HF 的總成本	氯化鈣處理 1 公噸 49%HF 的總成本 約 110000 元	氯化鈣處理 1 公噸 49%HF 的總成本 113191 元	鋁化鈉處理 1 公噸 49%HF 的總成本 68394 元	未知
反應速度	很慢	慢	很快 (瞬間完成)	慢
處理效果	不佳	佳	較佳	未知
污泥資源化	不可資源化	不可資源化	可完全資源化	不可
桶槽設備費用	較貴	較貴(約須要 500 萬)	較便宜，約 50 萬	2500 萬
設備處理流程	複雜	複雜	簡單	較複雜
反應操控性	不容易	不容易	容易	非常不容易
加藥的精準程度	很不精準	較不精準	很精準	未知
PH 與 F sensor	需要很多	需要很多	要 PH sensor 僅供對比之用	需要非常多 F sensor
處理的安全性	較不安全	不安全	安全	非常不安全
反應程度的判斷	不好判斷	不好判斷	較好判斷	不好判斷
人力與電力	較耗費	較耗費	非常節省	非常耗費
需要空間的大小	大	較大	較小	較大

三、結　論

1.處理單純的氟酸廢水，若是要回收廢水再利用與要降低廢水的導電度，一定要放棄使用氯化鈣方法處理含氟廢水。

2.若是處理混酸氟酸廢水(含鹽酸、硝酸、硫酸)，則使用任何方法處理，都將在廢水中存在等量的鈉離子與氯離子、硝酸離子、硫酸根離子!

3.處理 1Kg50%HF 將使廢水中增加氯離子 75 mole 與鈉離子 100 mole，此為廢水高導電度的主要原因，亦是使廢水不能回收再使用的主要原因。

4.以鈉鋁取代氯化鈣處理含氟酸廢水，是根本解決廢水高導電度的問題與廢水回收再利用的問題，並降低處理成本。

5.氯化鈣是除了效果不佳外，又引入很多氯離子，因為要中和酸(鹽酸與氟酸)，又加大量液鹼，產生很多鈉離子，這是廢水的導電度降不下來的主要原因。如以後管制廢水的導電度，氯化鈣將不宜使用，改用鈉鋁溶液將是解決之道。

新穎低碳環境除氮節能技術

張鎮南*、黃啟裕**、陳威廷***、賴冠佑***

摘　要

活性污泥處理法於台灣已被普遍使用於廢汙水處理，主要將廢水中的污染物質(氮、磷等...)經由微生物的代謝作用處理。但使用活性污泥處理廢污水，須耗費大量能源，且產生大量廢棄污泥和衍生後續處理汙泥等問題。

本研究利用循序批次式接觸材反應槽，使用廢棄污泥回收製成中空多孔隙載體應用在兩個反應槽，其填充率分別為 20%與 40%；再植入自營性的厭氧氨氧化菌(Anaerobic Ammonium Oxidation Bacteria)達到減少碳源的目的，配合及時監測設備(ORP、pH、DO)減少廢水處理時 NO_3-N 產生，提高脫硝效率。實驗證明在低碳氮比(C/N<1.9)下除氮效率可達 86.2%，且利用即時監控設備，硝酸鹽氮可減少產生(分別減少 6.3%與 48.8%)。

【關鍵詞】同步硝化脫硝(SND)、循序批次式接觸材反應槽、厭氧氨氧化(Anammox)、廢棄污泥(WAS)

---

*東海大學環境科學與工程學系　教授

**東海大學環境科學與工程學系助理　教授

***東海大學環境科學與工程學系　學生

一、前　言

若水中的氮含量太高，會對人體健康以及周遭生態環境造成不良影響。而有鑑於環保署於 106 年 2 月 10 日修正及廢止總計 7 項放流水標準，其中包含修正氨氮等管制項目的限值。為進一步優化水體品質，訂定較高標準的氨氮排放總量，並針對公共污水下水道系統，增訂氨氮和總氮管制規定。因此發展水中除氮技術是必要的，而生物處理除氮技術是去除家庭及工業廢水中，較為經濟的處理方式，亦是目前廢水處理的趨勢。

循環是生態系營養源中非常重要的一個循環。氮循環[1]主要包括三種作用，固氮作用，藉由固氮菌、藍綠細菌與根瘤菌或經由閃電的作用，將氮氣轉換成氨。硝化作用，將氨氧化成亞硝酸，再氧化成硝酸的過程。脫硝作用，藉由脫硝菌的作用，將硝酸或亞硝酸鹽轉換成氮氧化物或氮氣回到大氣中。而本實驗即是利用厭氧氨氧化(Anammox) [2]之的特性，分類上歸屬於 *Planctomycete* 細菌將氨氮與亞硝酸鹽進行反應，使硝化-脫硝反應一步還原成氮氣後溢散至大氣中。而厭氧氨氧化菌以 CO_2 作為碳源，NO_2^- 做為 NH_4^+ 氧化時的電子接受者，同時也是 CO_2 還原時的電子供應者。

厭氧氨氧化菌有 Anammoxosome 構造，且具有雙分子結構的單層膜圍著，此單層膜是醚鏈和酯鏈混合的脂質，具有很高的不滲透性，可避免厭氧氨氧化反應產生的中間物質釋出 Anammoxosome 外毒害細胞；內部沒有 RNA 是厭氧氨氧化反應場所。

本實驗利用生物載體(小丸籽)產生生物膜，以此產生小區域中氧氣濃度差別，增加微生物多樣性。生物載體(小丸籽)與生物膜間微生物會先使用掉原污水中氧氣，使得氧氣進入不了生物載體(小丸籽)內部，因此載體內部為厭氧狀態，形成內部厭氧外部好氧的 SND 系統，增加脫氧菌存在，提高脫氮的效果

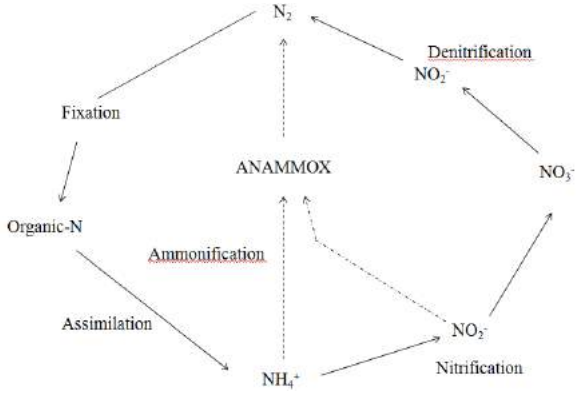


圖 1　氮循環與厭氧氨氧化(Anammox)循環路徑差別

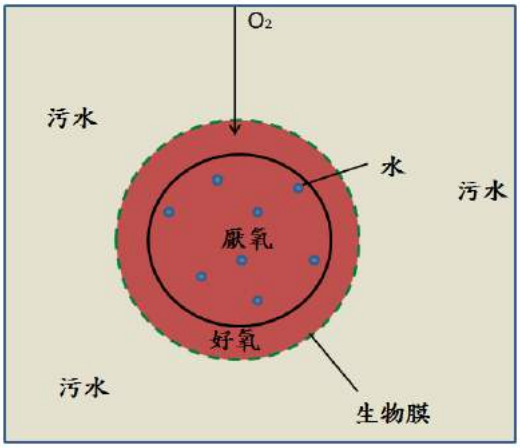


圖 2　生物載體示意圖

二、實驗材料與方法

1.材料

(1)緩衝溶液:KH_2PO_4、$FeSO_4 \cdot 7H_2O$、$MgSO_4 \cdot 7H_2O$、EDTA

(2)基質:無水醋酸鈉

(3)氮源:NH_4Cl

(4)微量營養元素:EDTA、$ZnSO_4 \cdot 7H_2O$、$CoCl_2 \cdot 6H_2O$、$MnCl_2 \cdot 4H_2O$、$CuSO_4 \cdot 5H_2O$、$NaMnO_4 \cdot 2H_2O$、$NiCl_2 \cdot 6H_2O$、$NaSeO_4 \cdot 10H_2O$、H_3BO_4

(5)碳酸氫鉀

2.方法

本研究設置兩個相同體積的循序批次性式接觸材反應槽(SBBR)，槽體高度 45 公分，內部長寬均為 25 公分，有效容積為 25 公升；使用廢棄污泥回收製成中空多孔隙載體應用在兩個反應槽，左槽體生物載體量為總有效體積 40%，右槽體生物載體為總有效體積 20%；本實驗採及時監測設備；水力停留時間為 36 小時，先攪拌 1 小時，在加入曝氣攪拌 33 小時，最後沉澱 2 小時。每次實驗採取左右槽出流水樣本之後將水放掉，加入人工基質之後，加入適當的水量，調整 pH 值為 7.50，再進行下一批次循環。實驗是採取左右槽進流水與出流水作為樣本。表 1 為本研究中各實驗方法介紹。

表 1　各實驗項目方法

1.氨氮	水中氨氮檢測方法－靛酚比色法
2.硝酸鹽氮	水中硝酸鹽氮檢測方法－分光光度計法
3.亞硝酸鹽氮	水中亞硝酸鹽氮檢測方法－分立式分析系統比色法
4.COD	水中化學需氧量檢測方法－密閉式重鉻酸鉀迴流法
5.SS、VSS	水中總溶解固體及懸浮固體檢測方法－103～105℃乾燥

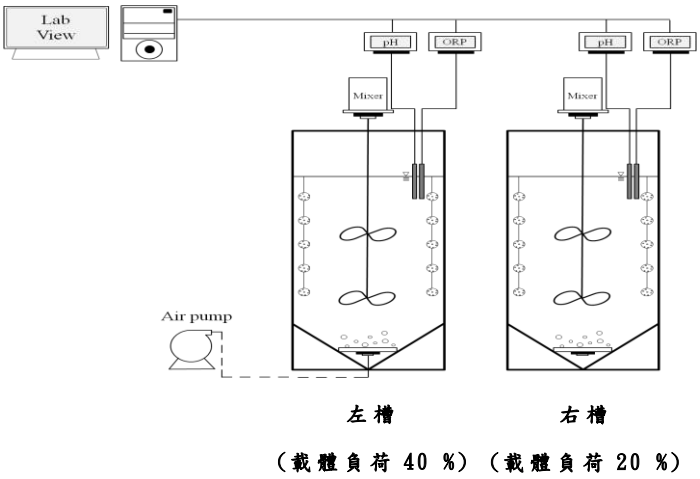


圖 3 槽體設計

三、結　論

本研究採用循序批次式接觸材反應槽，為達到減少碳源的目的在槽體中植入自營性的厭氧氨氧化菌(Anaerobic Ammonium Oxidation Bacteria)，配合及時監測設備(ORP、pH、DO)降低生物除氮時硝酸鹽氮的產生，觀測連續 4 個月以上進出流水除氮成效。

在本次研究中，左槽(載體負荷 40 %)SS 增加量為 1.8%，VSS 增加量為 -37.1%，右槽(載體負荷 20 %)SS 增加量為 3%，VSS 增加量為-7.5%，原因是進水及排水過程中會將右槽載體外的污泥沖刷導致懸浮固體的產生。

在實驗中左槽(載體負荷40 %)氨氮濃度在 3/24 進流的氨氮濃度較其他日期濃度高，推測為曝氣量不足，導致上一批次氨氮殘留影響下一批次進硫氨氮濃度。經由討論決定提高曝氣量，由原本 0.1 L/min 改為 0.2 L/min 後，之後的出流氨氮濃度逐漸恢復正常(圖 4)。右槽(載體負荷20 %)氨氮進流的濃度在 2/12 明顯地上升，因當天加入新配製成的微量營養元素以及氮源，影

響了氨氮的濃度(圖 4)。

左槽(載體負荷40 %)亞硝酸鹽氮濃度在 2/14 與 2/20 發現出流的濃度比進流高(圖 6)，表示氨氮沒有完全轉換成氮氣，無法完全除氮。經研究後發現 2 月時溫度較低，有時實驗場所會無預警地跳電導致溫度不夠高，降低除氮功能(圖 4)。

在 1 月底至 3 月底，此時右槽(載體負荷20 %)曝氣量為 0.2 L/min，左槽(載體負荷40 %)曝氣量為 0.1 L/min；碳氮比調整至 1.9 以下，溶氧控制在 1.0~1.5 mg/L，進流水總氮平均濃度為 113.06 mg/L，右槽(載體負荷20 %)總氮平均去除率為 56.58 %，左槽(載體負荷40 %)總氮平均去除率為 49.17 %。其中右槽(載體負荷20 %)出流硝酸鹽氮可控制到 60 mg/L 以內，亞硝酸鹽氮可控制到 10 mg/L 以內，氨氮可控制到 30 mg/L 以內。左槽(載體負荷40 %)出流硝酸鹽氮可控制到 50 mg/L 以內，亞硝酸鹽氮可控制到 20 mg/L 以內，氨氮可控制到 40 mg/L 以內。在這段時間內發現到左槽生物載體量雖然為 40 %但沒有較右槽生物載體量 20 %能去除總氮，與曝氣量的多寡也有關係。

在 3 月底至 5 月初，此時右槽(載體負荷20 %)曝氣量為 0.2 L/min，左槽(載體負荷40 %)曝氣量為 0.2 L/min；碳氮比調整至 1.2 以下，溶氧控制在 0.5~1.0 mg/L，進流水總氮平均濃度為 102.61 mg/L，右槽(載體負荷20 %)總氮平均去除率為 61.33 %，左槽(載體負荷40 %)總氮最高除氮效率可達 86.2%，平均去除率可到 34.66 %。右槽(載體負荷20 %)出流硝酸鹽氮可控制到 50 mg/L 以內，亞硝酸鹽氮可控制到 3 mg/L 以內，氨氮可控制到 40 mg/L 以內。左槽(載體負荷40 %)出流硝酸鹽氮可控制到 40 mg/L 以內，亞硝酸鹽氮可控制到 2 mg/L 以內，氨氮可控制到 20 mg/L 以內。在這段時間內重新調整了碳氮比與溶氧，有效地將亞硝酸鹽氮降低，但硝酸鹽氮與氨氮並沒有明顯降低，左槽(載體負荷40 %)雖然提高了曝氣量，總氮去除率卻下降，需要再重新調整曝氣量。

生物載體量 40 %的除氮效率因生物附著量高理論上會比生物載體量 20 %除氮效率高，但生物載體量不是唯一除氮的關鍵，仍需控制實驗中 DO 濃度才能有良好的除氮效果。

表 2　ORP、pH、DO 平均值

	ORP,mV	pH	DO ,mg/L
左槽 (載體負荷 40 %)	98.73±143.77	7.64±0.30	0.94±0.63
右槽 (載體負荷 20 %)	168.20±73.45	7.39±0.34	0.84±0.40

表 3　氨氮、硝酸鹽氮、亞硝酸鹽氮濃度平均值

	氨氮 (mg/L)	亞硝酸鹽氮氨氮 (mg/L)	硝酸鹽氮氨氮 (mg/L)
左槽(載體負荷 40 %)進流	87.59±27.38	11.71±4.44	10.15±11.13
左槽(載體負荷 40 %)出流	11.33±16.26	2.58±4.68	30.04±14.52
右槽(載體負荷 20 %)進流	77.62±21.70	12.33±2.83	18.66±10.40
右槽(載體負荷 20 %)出流	13.82±15.48	1.18±2.50	44.72±13.16

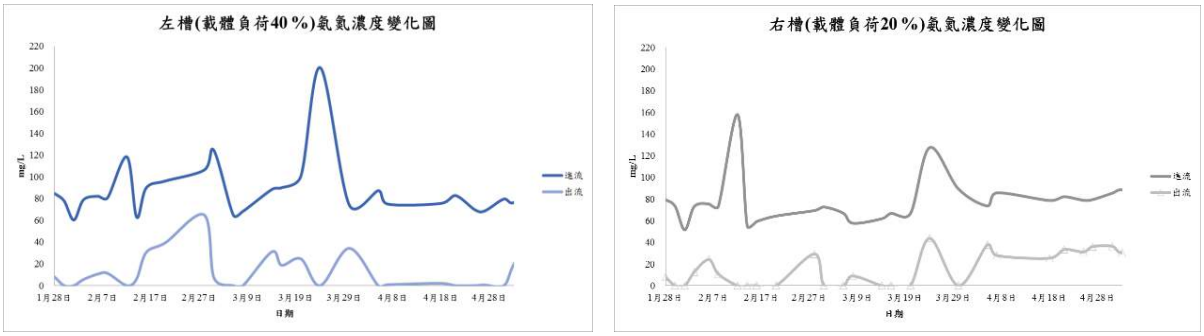


圖 4　氨氮濃度變化圖

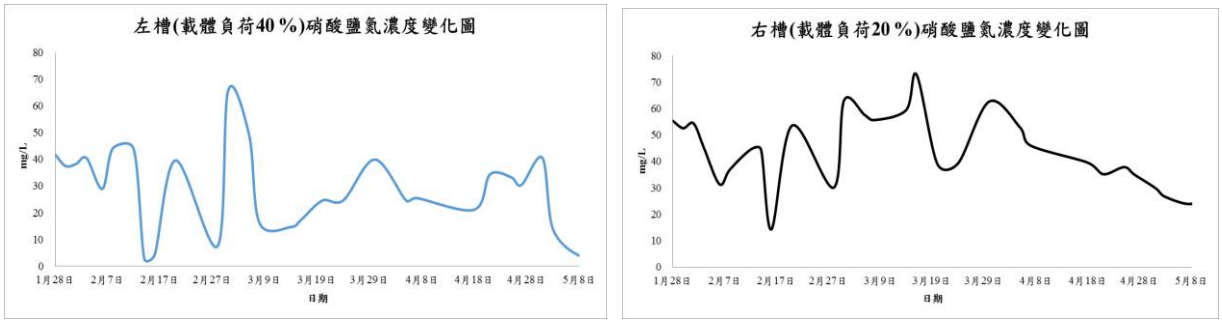


圖 5　出流硝酸鹽氮濃度變化圖

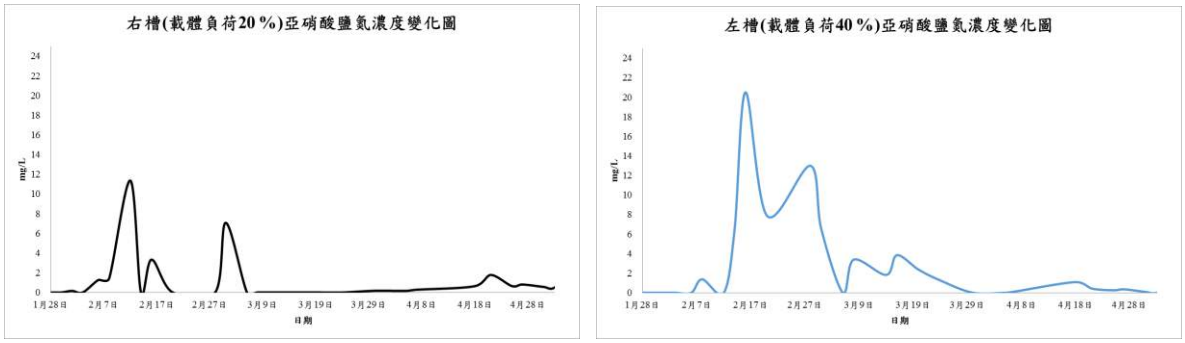


圖 6　出流亞硝酸鹽氮濃度變化圖

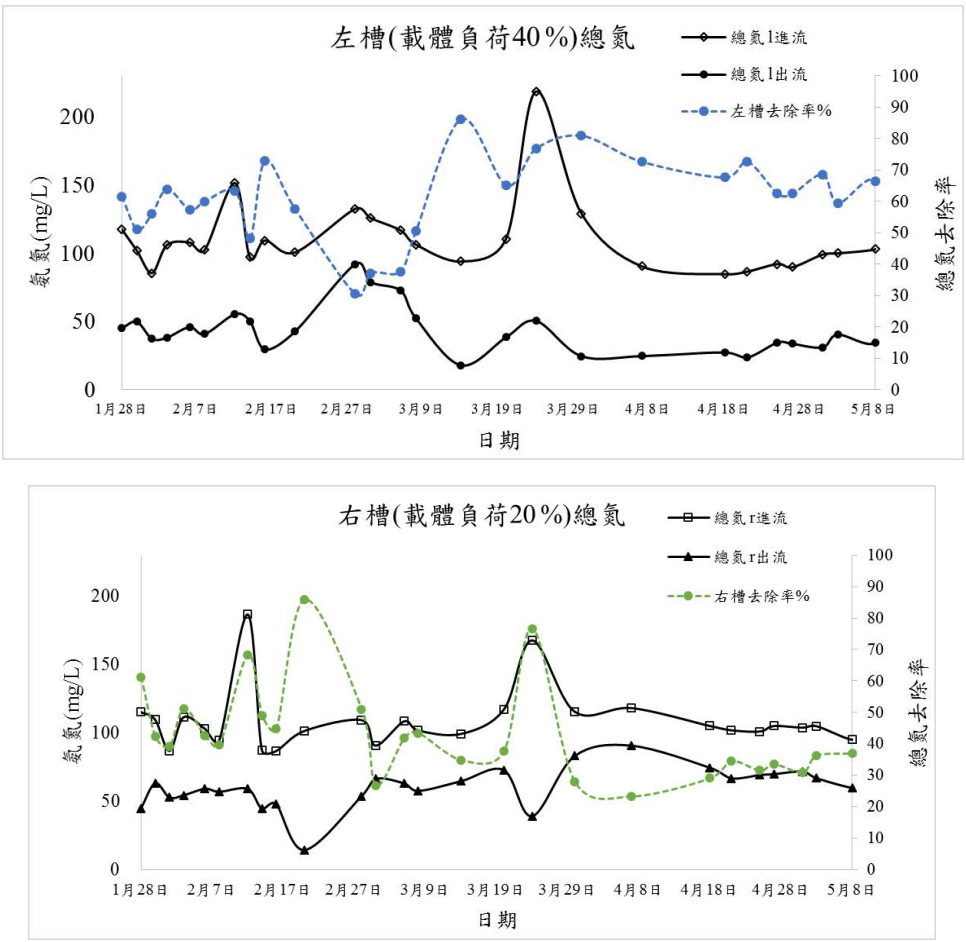


圖 7　總氮濃度變化與總氮去除率圖，上圖為左槽，下圖為右槽

四、參考文獻

1.丁文輝，Anammox 菌馴養，崑山科技大學，95 年 5 月。

2.林志高，新穎厭氧氨氧化技術之發展及應用，國立交通大學環境工程研究所，100 年 10 月。

3.蘇汶芳，以廢棄活性污泥製成孔隙生物載體進行同時硝化脫硝技術之探討，東海大學環境科學與工程學系，2008。

4.陳志哲，應用重製廢棄污泥顆粒於循序批分式生物膜反應器除氮及生物膜菌相分析，東海大學環境科學與工程學系，2015 年

5.Yoo H, Ann K-H, Lee H-J, Lee K-H, Kwak Y-J, Song K-G Nitrogen removal from synthetic wastewater by simultaneous nitrification and denitrification (SND) via nitrite in an intermittently-aerated reactor. (1999) Water Res 33(1):145–154.

6.Bao-Shan Xing,Qiong Guo, Xiao-Yan Jiang, Qian-Qian Chen , Miao-Miao He, Li-Min Wu ,Ren-Cun Jin Long-term starvation and subsequent reactivation of anaerobic ammonium oxidation (anammox) granules.(2015) Chemical Engineering Journal ,Volume 287, 1 March 2016, Pages 575-584

有機廢棄物免堆處理系統

李信宏*、邱淑靜**、李宥徵***、柯秀靜****

摘　要

「有機廢棄物免堆處理系統」是生物科技上高難度的課題，它是一種結合微生物酵素、生物與有機化學及土壤科技的創新技術，可以在 3~8 小時內將有機廢棄物轉製成有機質肥料，並達到安定化、無害化、有效化之目標。

有機廢棄物可不經堆肥化之過程，以直接快速「3~8 小時」改造及調配有機廢棄物，達到免堆過程。利用添加免堆配方至有機廢棄物中，以快速生產出有機質肥料，符合作物生長及安全之需求。此種免堆技術既省時省力省空間，又無污水、無毒、無臭，有一舉數得之功。

有機廢棄物的種類不同，其免堆技術及方法亦不盡相同，需依有機廢棄物的特性，以「物理、化學及生物法」加於改善，達到免堆之過程。因為堆肥法是以長時間與大空間達到穩定化，若不做堆肥化時則需知廢棄物之問題缺點，改善其問題，以達免堆之功效。

免堆廢棄物處理服務係計算從廢棄物取得、原料取得、免堆處理服務至最終廢棄階段產生之溫室氣體排放量(CO_2e)，在相同功能單位(處理每噸有機廢棄物)情境下，免堆處理之溫室氣體排放量是焚化/掩埋處置的 1/12~1/14 倍，即以免堆技術處理有機廢棄物可比焚化/掩埋處理，減少 92%溫室氣體排放量。

【關鍵詞】免堆科技、有機廢棄物處理、有機質肥料、有機廢棄物免堆服務處理碳足跡

---

*葉山環保生物科技股份有限公司　總經理

**葉山環保生物科技股份有限公司　經理

***葉山環保生物科技股份有限公司　應用工程師

****財團法人台灣綠色生產力基金會　工程師

一、前　言

隨著自然生態的破壞，以及環境污染的惡化，世界正處在商業條件改變的轉捩點上，過去的舊思維裡環境破壞與自然資源浪費並沒有被計入經濟體系成本之中且「綠色國民所得帳」是被忽略的。如何有效利用有機廢棄物的再生價值，並且『化垃圾為黃金』是免堆技術的研發理念。

二、有機廢棄物免堆處理系統

1.免堆科技原理

有機物的組成成份主要為 C(碳)、H(氫)、O(氧)、N(氮)、S(硫)、P(磷)、K(鉀)、Ca(鈣)、Mg(鎂)等及其他微量礦物元素。由於傳統堆肥或高速發酵是利用微生物「分解」原理，所以發酵過程中釋放的二氧化碳及甲烷，造成有機物中的碳大量流失(約 50%~60%)。免堆科技是運用微生物酵素之「反應」原理，快速將有機物「轉化」及「穩定化」成有機肥料，並可立即施用，時間很短，因此沒有碳含量的流失，因此相較於傳統堆肥處理或高速發酵法，免堆科技完全可達到減碳的目標。

2.免堆科技蘊含碳封存技術

免堆科技具有將廢棄物內的碳封存的技術。因為免堆科技反應作用時間短，且不是利用微生物分解，處理過程中不會有二氧化碳釋放的問題，廢棄物的碳含量在處理過程中只會有極微量的釋放，就好像人體食物消化過程中會只排放少量的氣體一樣，圖 1 為未經處理的有機廢棄物元素組成，圖 2 為有機廢棄物經過傳統或現行處理(堆肥、快速發酵、Biogas、掩埋)後的元素組成示意圖，可看出有機廢棄物內的碳含量已經大量流失，且氮磷鉀等成份含量依舊很低，圖 3 則是經過免堆科技處理後的成品的元素組成示意圖，可看出有機廢棄物經免堆處理不但碳含量沒有損失，且氮磷鉀的比例可以調整提升。

圖 1　未經處理的有機廢棄物元素組成

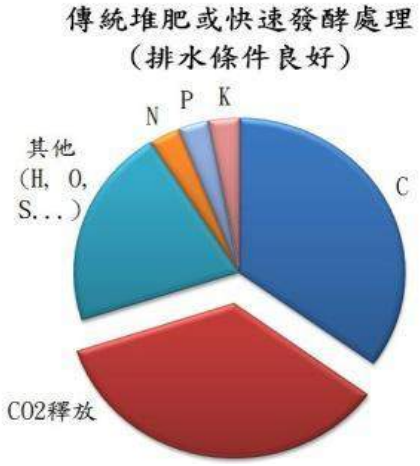


圖 2　傳統堆肥處理的有機廢棄物元素組成

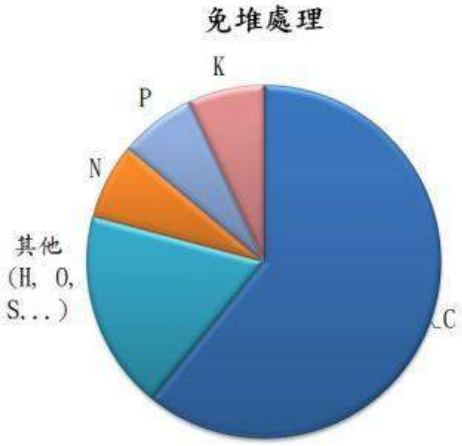


圖 3　免堆科技處理的有機廢棄物元素組成

3.免堆科技碳封存應用實例

以 100 公斤的廚餘為例，假設含水率為 80%，分別採用傳統堆肥堆置 60 天另高速發酵處理 3 天後再堆置 30 天，比較採用免堆處理添加 2 公斤反應劑經 1 小時及 3~24 小時乾燥後，其乾料及水分比變化如表 1。

表 1　有機廢棄物處理技術之比較

技術別	處理時間	處理後之成品			
		乾料重(公斤)	水份重(公斤)	總重量(公斤)	含水率(%)
未處理	未處理	20	80	100	80
傳統堆肥技術	60 天	10	5	15	33
高速發酵技術	3 天+30 天	10	5	15	33
免堆濕肥技術	1 小時	22	80	102	78
免堆固肥技術	3~24 小時	22	11	33	33

由表 1 可瞭解，採用傳統堆肥或高速發酵法處理有機廢棄物，由於微生物分解作用的原理，約會損失 50%~60%的乾料重(以二氧化碳方式釋放到空氣中)，因此最終成品量只剩下原物料的 15%。而免堆處理時間短且不釋放氣體(不消耗碳含量)，處理中並須添加 1~2%的免堆配方(酵素和資材)，因此成品量高達 102%(未乾燥之濕肥)及 33%(已乾燥之固肥)。由於免堆科技處理反應過程只要 1 小時，並可以選擇將廢棄物轉換成濕肥料，可節省乾燥所需的時間，及大幅降低能源成本。農業廢棄物處理成濕肥料是最經濟的，因為處理後未乾燥仍然可立即施用於耕地上，省去了存放及乾燥的費用。

4.免堆科技成品的特色

(1)免堆成品碳含量高

由於傳統或現行處理法(堆肥、快速發酵、Biogas)都是利用微生物發酵來「分解」有機物，所 以腐熟過程會大量釋放的二氫化碳及甲烷，造成有機物中的碳大量流失(約 50%~60%)；免堆科技則是運用酵素之「反應」原理，處理時間很短，因此幾乎沒有碳含量的流失，成品的碳含量自然較傳統或現行處理法來得高。

(2)免堆成品的碳氮比不變

傳統與現行有機廢棄物處理法產物的 C/N 比非常重要，因為它是判斷是否達到腐熟的依據，但是這並不是一個不變定律法則，例如未

經處理的大豆粉 C/N 比小於 20，但大豆粉是未腐熟的粕類；另森林泥炭(Peat)之 C/N 常大於 20，但是已安定之產品。況且 C/N 比並非構成肥料的要素， 碳含量也非影響作物生長的因素；免堆科技具有碳封存技術，所以免堆的產物之 C/N 比與原廢棄物相同。

(3)免堆成品的碳足跡較低

免堆成品肥料的生產過程中碳排放遠低於傳統堆肥法與其他處理法(ex: 厭氧發酵、快速發酵等)，因此以相同功能單位(ex: NPK 值及重量相同)的肥料，免堆成品的碳足跡只有其他處理法的一半，因相同的廢棄物經免堆或其他方式處理後，免堆的有機原肥料產量為其他處理法的兩倍，因此採用免堆的成品肥料不僅有高品質有機肥料帶來的農業效益，也有減緩溫室效應的環保效益。

5.免堆設備

結合「免堆技術」與「機械研發」，發明『免堆設備』，依不同層面的需求與目的，先後研發三種不同類型的「免堆固肥化處理設備」，以供不同的處理運用。三者具有異曲同工之效果，其機型分為：標準型；商業型；經濟型。

為針對開發中國家長期對有機廢棄物(尤甚是農畜牧業廢棄物)的漠視，任意丟棄－焚化或掩埋，帶給整個地球環境莫大的傷害。農民大量使用化學肥料來快速生產農作物，造成河川污染、土壤酸化、有機質大量流失、作物短收、病蟲害問題，更加速氣候變遷造成土壤劣化及沙漠化。而開發經濟實用的『免堆 DIY 肥料機』予開發中國家農業應用發展。

『標準型』是三種類型中的最高等級，也是高標準環保設備，適合公－民營企業單位大型處理場採用，隨廢棄物集中場所之需求可採固定式或移動式設置，如圖 4。

圖 4　標準型免堆設備

圖 5　商業型免堆設備

『商業型』是一種簡單且自動化之處理設備，適合一般社區、餐飲、監獄等區域性少量現場處理，適合處理人口密集之機關單位所衍生的有機廢棄物，如海鮮、雞、鴨、魚肉等等，容易造成惡臭、蚊蠅、病菌孳生影響環境衛生的餐廚垃圾，如圖 5。

『經濟型』為因應大量乾固類農業廢棄物因堆置或棄置造成地方政府無法也無能力解決又影響環境髒亂與衛生的問題，如稻稈、玉米稈、蔗渣、棕櫚、木屑等廢棄物，能為農戶創造再生利用價值，是高效率低成本的處理方式，產出物為可利用之資材或有機肥料，如圖 6。

圖 6　經濟型免堆設備

『DIY 肥料機』如圖 7，利用有機廢棄物(農業廢棄物、生活廢棄物、事業廢棄物)DIY 生產有機質肥料，帶動開發中國家農業經濟發展，以「資源再生多元利用」科技，將有機廢棄物來創造有機質肥料，改善土壤酸化貧瘠，並可同步解決糧食短缺危機等問題。

圖 7　DIY 免堆設備

三、免堆廢棄物處理服務碳足跡

1.界定服務系統邊界

依據 ISO/TS 14067 之內容，盤查邊界可分部份和全部二種，免堆廢棄物處理服務是在使用者於當地完成此服務，評估階段包含原料取得、服務與最終廢棄階段，功能之特性屬於全部。其生命週期流程包含了原料取得、服務與最終處置階段。服務生命週期流程圖如圖 8 所示：

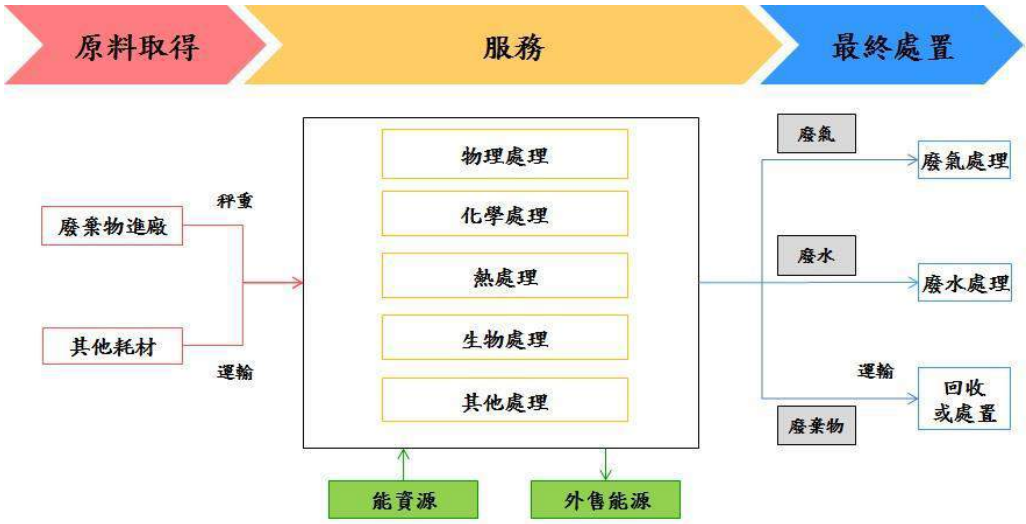


圖 8　服務生命週期流程圖

2.活動數據取得情形

執行碳足跡計算，需取得其相關之活動數據，且一級活動數據之蒐集應自免堆廢棄物處理服務服務開始至服務完成，故界定一完整年度的盤查期間為可取得一級活動數據之單據的期間。所需數據及其取得情形如表 2 所示。

表 2　數據取得情形一覽表

階段別	活動數據名稱	供應商/處理商	所需資料	資料取得說明		資料來源
				已取得	未取得	
原料	有機廢棄物	養雞場	投入量	V		服務碳足跡調查表單
	免堆酶	代工廠	投入量	V		服務碳足跡調查表單
服務-能資源	電力	台灣電力公司	使用量	V		服務碳足跡調查表單
	液化石油氣	台灣中油股份有限公司	使用量	V		服務碳足跡調查表單
服務-廠內廢棄物	一般垃圾	烏日焚化廠	清運量	V		行政院環保署 105 年 7 月 執行機關垃圾清理狀況-人均垃圾清運量
運輸	有機廢棄物	養雞場	運輸距離	V		google map
			車輛型式	V		供應商提供
	免堆酶	代工廠	運輸距離	V		google map
			車輛型式	V		供應商提供
	液化石油氣	台灣中油股份有限公司	運輸距離	V		google map
			車輛型式	V		供應商提供
	一般垃圾	垃圾清運車	運輸距離	V		google map
			車輛型式	V		清潔隊

3. 計算服務碳足跡

針對盤查取得之數據進行服務碳足跡分析，碳排放量計算公式為，碳排放量(CO_2e)＝活動強度數據×排放係數× GWP 值(IPCC2013)，活動強度數據及排放係數範例如表 3 所示。

表 3　碳足跡活動數據計算表

量化階段	活動數據範例	排放係數範例
原料取得	原料使用量	生產 1 公斤原料排放的二氧化碳當量係數
服務	服務時的電力消耗量	產生 1 度電排放的二氧化碳當量係數(台灣電力公司公告排放係數)。
原料/服務階段運輸	輸送距離(Km) 輸送量(Kg)	每 1 公噸服務運輸 1 公里排放的二氧化碳當量係數。

免堆廢棄物處理之單位服務碳排放量，為計算本服務原料取得階段、服務與終處置階段所造成之碳排放量，而生產過程中產生之廢棄物，其處理過程所造成之碳排放量亦納入服務階段。經分析計算，每 1 噸廢棄物處理量-免堆服務之碳足跡為 48.306 kg CO_2e。生命週期各階段的排放量占比如圖 9。

參考行政院環保署公告之垃圾焚化廠-廢棄物焚化處理服務每噸廢棄物之碳足跡為 606 kg CO_2e；南部科學工業園區台南園區廢棄物掩埋清理服務 707 kg CO_2e。在相同功能單位(處理每噸有機廢棄物)情境下，免堆處理之溫室氣體排放量是焚化/掩埋處置的 1/12~1/14 倍，即以免堆技術處理有機廢棄物可比焚化/掩埋處理，減少 92%溫室氣體排放量。

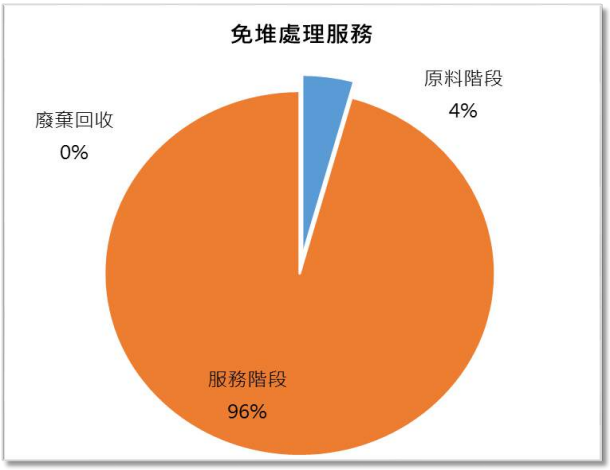


圖 9　免堆廢棄物處理生命週期各階段的排放量占比

四、結　論

免堆處理技術是結合微生物酵素、生化有機反應及土壤科技的創新技術，處理速度快，設備所佔空間小，且無二次污染問題，處理過程中無廢水、無臭、無毒物產生。

免堆技術除了解決環保問題外，固液有機肥可供直接施用於農田中及提升土壤肥力，並可減少土地退化，達到農地永續經營之多重目標，使地球資源能真正循環與利用。

免堆技術處理每噸有機廢棄物，於其服務之生命週期過程，原料取得階段、服務與終處置階段所造成之碳排放量為 48.306kg CO_2e。即每 1 噸廢棄物處理量-免堆服務之碳足跡為 48.306kg CO_2e。

五、誌　謝

本論文為參與經濟部中小企業處提升中小企業節能減碳能力輔導計畫之輔導成果，特此致謝。

六、參考文獻

1. 行政院環境保護署，碳足跡產品類別規則(CFP-PCR)，廢棄物處理服務 Waste aste Treatment Services，第 1.0 版，文件編號 15-024。
2. ISO/TS 14067 Greenhouse gases-Carbon footprint of product-Requirements and guidelines for quantification and communication.
3. 行政院環境保護署，2016，105 年 7 月環保署執行機關垃圾清理狀況。
4. 以 IPCC 方法推估不同廚餘處理方式之溫室氣體排放，陳鴻烈、廖英洲、許振峯、周孟融，水土保持學報，第四十五卷第一期，102 年 3 月。
5. 台灣產品碳足跡資訊網公用資訊資料庫，行政院環境保護署，2016 年。
6. 行政院環境保護署碳足跡數據品質評估手冊，第二版，工業技術研究院編製，2013 年。

電漿熔渣應用於混凝土磚資源化之研究

姜智釗*、賈佳蓉*、湯凱卉*、賴怡潔**、柯明賢***

摘　要

本研究以實驗室廢棄物之電漿熔渣應用於取代混凝土磚骨材，探討電漿熔渣於混凝土磚中之最適配比。本研究首先進行電漿熔渣之基本特性分析，電漿熔渣之元素組成主要為 Ca、Si、Al、Fe 等，而電漿熔渣 TCLP 溶出試驗中各重金屬的溶出濃度皆低於法規之規範值，顯示電漿熔渣不具有害特性。由電子顯微鏡觀察到熔渣表面呈現緻密之玻璃結構，其比重、吸水率及健度皆符合 CNS6299 混凝土用碎石之規範，而洛杉磯磨損率雖略大於 CNS6299 規範值，惟電漿熔渣應仍具有替代天然骨材的潛力。

在混凝土磚之試驗配比上，將電漿熔渣 100%取代細骨材使用時，最適配比條件為水膠比 0.48、電漿熔渣粒徑<4.75mm、粗細骨材比 40:60，其混凝土磚的 28 天抗壓強度已可達到 CNS13295 高壓混凝土地磚之 C 級磚標準 (450kgf/cm^2)。進一步將電漿熔渣同時取代粗、細骨材時，其最適配比條件為水膠比 0.48、粗細骨材比 40:60、粗骨材取代比 75%及細骨材取代比 75%，其混凝土磚 28 天抗壓強度同樣可達到 CNS13295 高壓混凝土地磚之 C 級磚標準。綜合以上研究結果顯示，將實驗室廢棄物之電漿熔渣應用於混凝土磚之資源化具有發展潛勢，可達到實驗室廢棄物全量資源化之目標。

【關鍵詞】電漿熔渣、資源化、混凝土磚、抗壓強度

---

*國立台北科技大學資源工程研究所　研究生
**國立科學工藝博物館科技教育組　副研究員
***國立台北科技大學材料與資源工程系　副教授

一、前　言

至今台灣各級教育單位所產生之實驗廢棄物多由教育部設置之實驗室廢棄物共同處理機構進行焚化、物化及熔融三種技術整合處理，而由於實驗室廢棄物具有性質複雜、毒性、危害性等性質，故需依據廢棄物性質及種類，以焚化及物化系統分別處理有機及無機實驗室廢棄物，電漿熔融系統則針對焚化灰渣、物化污泥及其他不可燃之固體廢棄物進行安定化處理。而經電漿熔融處理不僅具有減容、金屬回收及毒性削減等優點，殘餘之有害物質則會被固定於玻璃晶格中，形成穩定及無害之熔渣，若將熔渣進一步回收利用為土木營建材料、道路基底層材料等資材，可達成產業零廢棄與資源永續循環之目標。

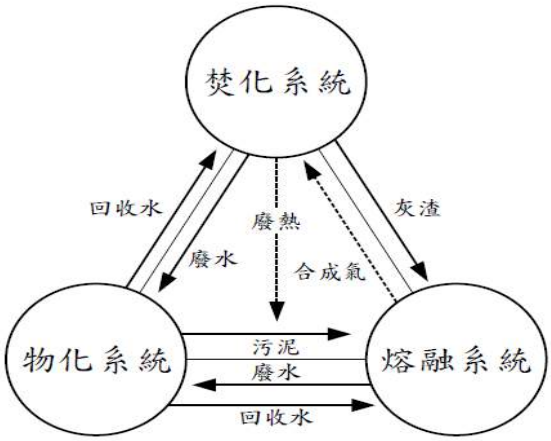


圖 1　實驗廢棄物之處理技術整合理念

目前應用於燃燒分解與熔融技術之電漿系統可分為高週波電漿及直流電弧電漿等，其中直流電弧電漿則被廣泛應用於廢棄物處理[1]。一般電漿熔融系統包括進料系統、電漿處理主體室、二次燃燒室、廢氣處理與排放及熔渣排出系統等五大單元。當廢棄物進入電漿處理主體室後，爐體內之高溫能使廢棄物中有機物揮發、分解或氧化，無機物則形成低溶出性且穩定之熔渣[2]。電漿熔融處理後所產生之熔渣，其穩定性與安定性為再資源化之關鍵因素。一般而言，經熔融處理後所產生之熔渣，依其溶液冷卻方式可分為水淬熔渣、空冷熔渣及結晶化熔渣等[3]。其中結晶化熔渣係將將水淬或空冷熔渣再經熱處理，以獲得化學特性較穩定、耐火性較佳且機械強度較高之熔渣，而廣泛應用於建築材料、工業材料、耐火材料或耐酸鹼性材料等高價值用途[4,5]。

郭益銘等人(2012)以固定配比之添加劑(焚化飛灰:碎玻璃=8:6)進行高溫熔融處理程序,探討電鍍污泥及焚化飛灰熱熔融之有價金屬回收效果及熔渣中重金屬之安定化,研究結果顯示焚化飛灰能有效取代石灰石作為添加劑,且於毒性特性溶出程序(toxicity characteristic leaching procedure，TCLP)部分之含量均符合法規，顯示熔渣為具有再利用潛力之資材[6]。

焚化灰渣及其熔渣之性質與天然砂石等土木工程材料近似,常用於填地基材、水泥攙和料、水泥原料、建築磚材及骨材等運用。簡呈至(2013)將焚化飛灰穩定固化物作為作為製作混凝土磚之骨材原料,探討不同參數對混凝土磚抗壓強度之影響，研究結果顯示混凝土磚 28 天最高抗壓強度可達 440.7kgf/cm^2,已達 CNS3930-預鑄混凝土緣石之抗壓強度標準(250kgf/cm^2),另由長期溶出試驗結果顯示混凝土磚試體中 Pb、Zn、Cr、Cd 及 Cu 的溶出量低於荷蘭 BMD 之標準，以焚化飛灰穩定固化物部分取代細骨材產製之混凝土磚具有良好的環境相容性[7]。惟針對混合物化處理污泥與焚化灰渣等實驗室廢棄物熔融之熔渣，目前較少研究探討其物化性質及其資源化用途。

由以上可知，電漿熔融法雖可將組成複雜之實驗室廢棄物安定化，以形成長期穩定及無害之玻璃體熔渣,但對所衍生的電漿熔渣進一步資源化的研究探討仍付之闕如。而若能將實驗室廢棄物熔渣應用作為土木營建材料之再利用資材，不僅可解決實驗室廢棄物熔渣處置的問題，亦可達到實驗廢棄物處理系統之零廢棄的終極目標。因此，本研究針對電漿熔渣進行特性分析，並將之再利用作為粗、細骨材以產製混凝土磚，探討電漿熔渣及其他原料配比對混凝土磚工程性質及環境特性之影響，以建立最適製磚之配比參數，做為未來推動電漿熔渣資源化利用之參考。

二、研究方法與內容

本研究採用田口實驗設計法,以電漿熔渣替代混凝土骨材製作混凝土磚試體，探討水膠比、熔渣粒徑、粗細骨材比及熔渣添加量等控制因子，對混凝土磚試體 28 天齡期抗壓強度之影響，以評析電漿熔渣製備混凝土磚之最適參數,並藉由混凝土磚試體中重金屬之溶出特性評估對環境可能造成的影響。研究架構與實驗流程如圖 2 所示。

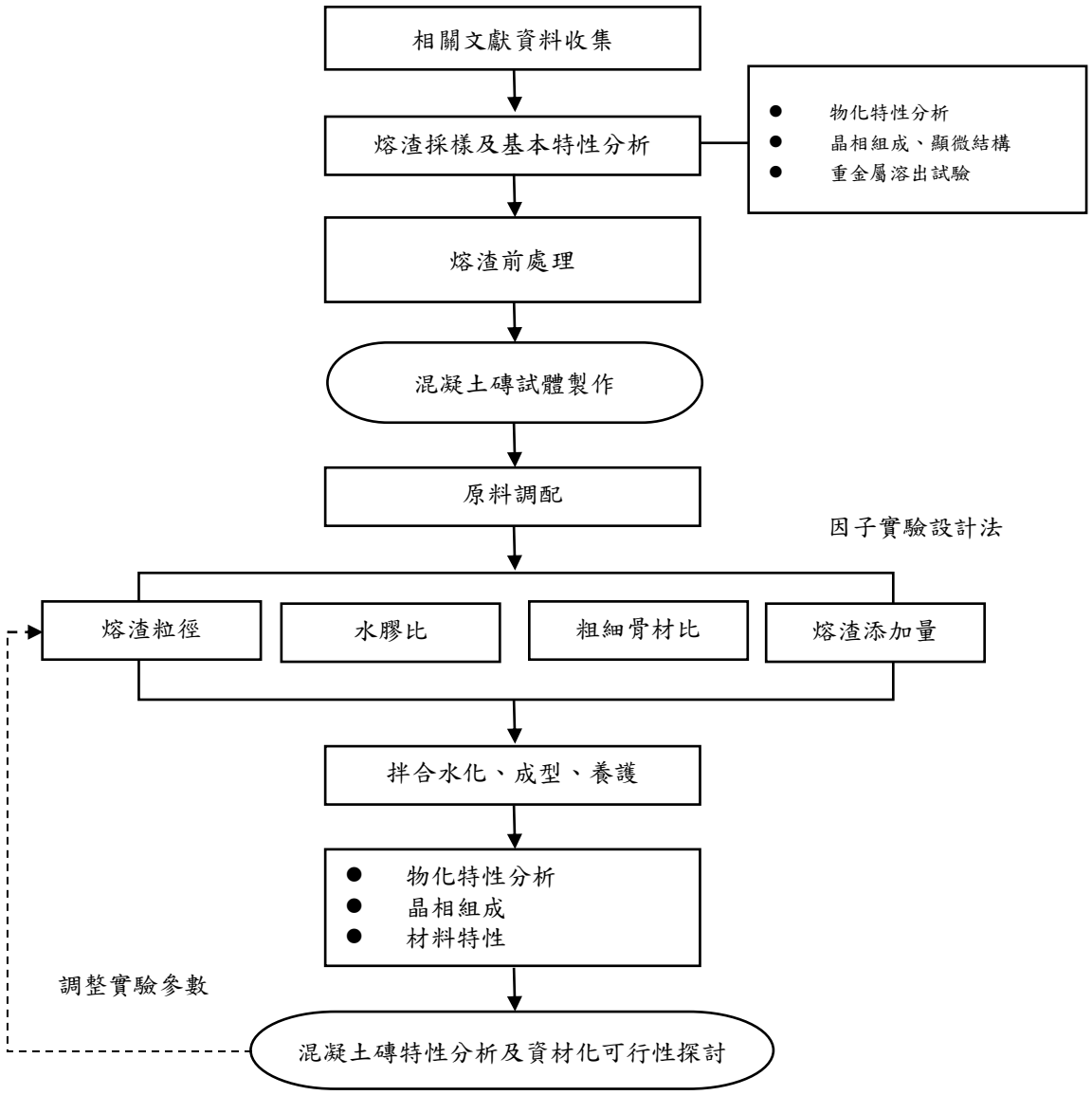


圖 2　研究架構與實驗流程圖

1.實驗材料

熔渣經顎式碎礦機粉碎後，利用轉輪碎礦機研磨至三種不同粒徑，分別為通過#4 篩(粒徑小於 4.75mm)、#8 篩(粒徑小於 2.36mm)及#16 篩(粒徑小於 1.18mm)，以替代天然細骨材進行混凝土磚試體製作。研究中使用之膠結材為波特蘭第I型水泥；天然細骨材及粗骨材分別為通過#4 篩之細砂及 3/4”-#4 篩之細石，經清洗後烘乾儲存備用，均符合 CNS 1240 混凝土粒料要求。

2.混凝土磚試體製作程序

本研究混凝土磚試體製作流程，首先將混凝土磚漿料依據田口式實驗設計之試驗配比進行混拌，混拌後漿料分三階段填入模具，利用機台震動，完成經 24 小時靜置後脫模，並於室溫下進行養護。混凝土磚試體由天然骨材、電漿熔渣、水泥及水組成，試體規格 5x5x5cm 及 10x10x5cm。

3.分析方法

本研究根據環檢所公告之 NIEA R203.02C 及 NIEA R205.01C 等檢測方法，以測定熔渣之水分、灰分及燒失量；根據 ASTM C-127、ASTM C-29 及 CNS 488 等規範進行熔渣之比重及吸水率試驗計算。另依照 CNS 490 及 CNS 1167 等規範測定洛杉磯磨損率試驗及健度試驗；而化學組成及重金屬溶出則分別以 NIEA R355.00C 及 NIEA R201.14C 等檢測方法進行測定。

X 光繞射分析則將熔渣球磨至小於 0.15mm(100mesh)，利用 X 光繞射儀(Bruker AXS,D8 Advance)以 Cu 作為靶材，掃描範圍 15-85°(2θ)，每 0.04°(2θ)收集一次資料，停留時間 2 秒，進行晶相分析。微觀結構則利用場發射掃描式電子顯微鏡(HITACHI S-4700)進行二次電子成像的觀察。

混凝土地磚品質則以田口式實驗設計之試驗配比所製作之試體，依照 CNS13295「高壓混凝土地磚」進行抗壓強度試驗，規範如表 1。

表 1　高壓混凝土地磚之標準

項目	抗壓強度	耐磨性	抗彎破壞載重
A 級磚 (重型車道)	65MPa (650kgf/cm^2)	15cm^3/50cm^2 且磨耗 3mm 內	>12kN
B 級磚 (中小型車道)	50MPa (500kgf/cm^2)	15cm^3/50cm^2 且磨耗 3mm 內	>12kN
C 級磚 (自行車及人行道)	45MPa (450kgf/cm^2)	15cm^3/50cm^2 且磨耗 3mm 內	>12kN

*抗彎破壞載重試驗適用於地磚尺寸長或寬度超過 280mm 以上者。

三、結果與討論

1.熔渣之基本特性分析

本研究針對電漿熔渣進行基本特性分析，藉以瞭解其物理特性、工程性質、晶相組成與重金屬溶出特性，提供後續作為混凝土磚骨材應用之參考。

(1)熔渣之物理特性

本研究之熔渣樣品為外觀呈乾燥之塊狀材料，表面光滑且質地較

為堅硬。為瞭解熔渣製備混凝土磚之可行性，首先將熔渣樣品混樣後進一步破碎及篩選，由熔渣破碎後粗、細顆粒來看，其外觀多為不規則且邊緣呈尖銳菱角狀，表面平滑偶有大孔洞，故為提高熔渣替代天然細骨材之比例，本研究將熔渣以轉輪碎礦機研磨至三整不同粒徑，如圖 3 所示。

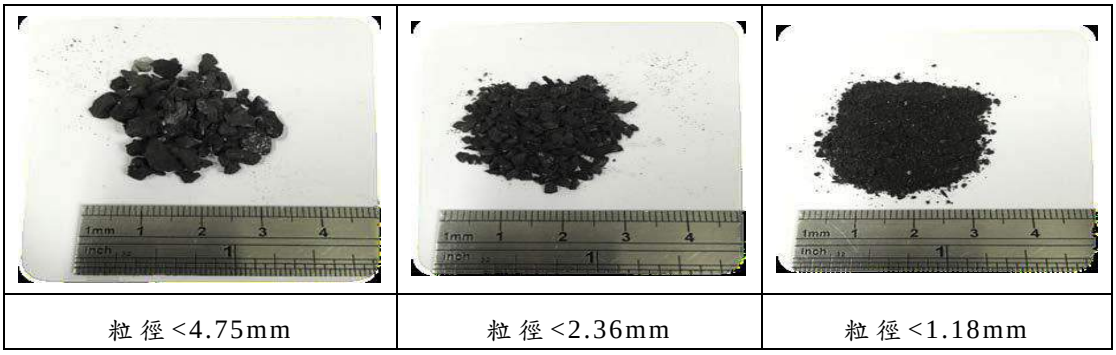


圖 3　三種粒徑之熔渣外觀

將破碎後熔渣樣品進行均勻混樣，之後取樣進行基本特性試驗，以瞭解熔渣作為混凝土磚骨材之可行性。電漿熔渣之三成分分析及工程與物理特性試驗結果如表 2、3 所示。經由電漿熔融系統處理後之熔渣其灰分佔 98.2%，由此可知電漿熔融系統能有效使廢棄物中有機物揮發、分解。由表 3 可得知比重、吸水率及健度皆符合 CNS 6299 之規範值，唯有洛杉磯磨損率略高於規範值。顯示熔渣在工程性質上具有資源化之潛勢。

表 2　熔渣之三成分分析

項目	Weight(%)		
	水分	灰分	燒失量
熔渣	0.50	98.2	1.32

表 3　熔渣之工程性質及物理特性

試驗項目	熔渣	天然粒料[8] (粗)	天然粒料[8] (細)	CNS 6299 規範值
比重	2.76	2.70	2.68	>2.5
吸水率(%)	0.25	0.73	1.3	<3%
洛杉磯磨損率(%)	44	16	16	<40%
健度(%)	0.1	1.86	1.01	<12%
抗壓強度(kgf/cm^2)	367	--	--	--

(2)熔渣之化學特性

為瞭解熔渣之元素組成及重金屬含量，本研究選取兩批次電漿熔渣樣品分別消化後進行全量分析，分析結果如表 4 所示。由表 4 可知熔渣中所含主要元素以 SiO_2 (6.50~17.9%)、Al_2O_3 (2.79~12.5%)、Fe_2O_3 (2.20~7.85%)、Na_2O (8.32~23.2%)及 CaO (3.22~8.30%)等為主。而熔渣中重金屬種類主要包含 Cr、Pb、Cu、Ni、Zn 等，其中 Cu、Pb 含量最高可達 4810mg/kg，但兩批次熔渣樣品間重金屬含量差異大。此概因由於實驗室廢液及廢棄物來源繁雜且不均質，各批次清運與處理之廢液或廢棄物皆不盡相同，受到物化系統與焚化系統進料特性之影響，導致電漿熔渣之化學特性差異性亦甚大。

表 4　熔渣之化學組成分析結果

單位	分析項目	slag-1	slag-2
wt.%	SiO_2	51.4	45.1
	Al_2O_3	19.6	18.4
	CaO	11.5	13.4
	Fe_2O_3	8.44	11.5
	Cr_2O_3	3.16	5.21
	P_2O_5	1.53	1.22
	K_2O	0.69	0.69
mg/kg	As	2.09	19.4
	Hg	0.285	13.6
	Cd	ND<0.00061	0.531
	Cr	223	242
	Pb	4810	44
	Cu	2470	1340
	Ni	217	601
	Zn	119	105
	Ba	61.6	942
	Se	ND<0.017	ND<0.017
	Cr(VI)	ND<0.15	ND<0.15
wt.%	Cl^-	0.0071	0.1090

本研究以毒性特性溶出程序(toxicity characteristic leaching procedure，TCLP)進行熔渣之重金屬溶出特性試驗及戴奧辛檢測，相關試驗結果如表 5 所示。由表 5 分析結果可知，熔渣主要以 Ba、Cu 及

Pb 有較高的溶出濃度，兩批次熔渣樣品之重金屬溶出濃度及戴奧辛含量皆低於法規限值。由本研究的分析結果可知，電漿熔渣 TCLP 之溶出濃度亦受到系統進料特性之影響而有較大的差異性。

表 5　熔渣之 TCLP 溶出試驗及戴奧辛檢測結果

分析項目	單位	slag-1	slag-2	有害事業廢棄物認定標準
總砷	mg/L	0.008	0.041	5.0
總汞	mg/L	0.0007	0.0011	0.2
總銀	mg/L	0.116	0.611	100
總鎘	mg/L	ND<0.004	0.033	1.0
總鉻	mg/L	0.027	0.086	5.0
總銅	mg/L	0.098	3.54	15.0
總鉛	mg/L	0.060	0.090	5.0
總硒	mg/L	0.053	ND<0.018	1.0
六價鉻	mg/L	0.01	ND<0.01	2.5
戴奧辛	ng I-TEQ/g	0.017	--	1.0

(3)熔渣之晶相組成

本研究以 XRD 針對熔渣之晶相組成進行分析，圖 4 為熔渣之 XRD 圖譜，由圖中可觀察到兩批次熔渣均以非結晶相之玻璃態物質為主，而由於實驗廢液組成複雜，雜質亦較多，使得兩批次熔渣的晶相組成則有較大的差異，熔渣 1(slag1)以氯化鈉(NaCl)、磷酸氫鈉水合物($Na_2H_2P_2O_7 \cdot H_2O$)及二氧化矽(SiO_2)等結晶相存在，而熔渣 2(slag2)以不過二氧化矽(SiO_2)、氧化磷(P_2O_5)、氧化鐵(Fe_2O_3)、亞硫酸鈉(Na_2SO_3)等結晶相存在。

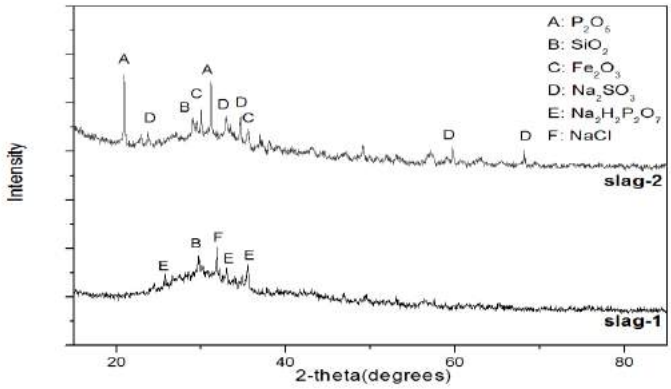


圖 4　熔渣樣品之 XRD 圖譜

2.混凝土磚試體之配比試驗

本研究採用田口玄一博士於 1949 年提出田口式實驗設計法，進行配比試驗，以探討電漿熔渣製備混凝土磚試體之配比參數。

有鑒於熔渣樣品之不均質特性，本研究將熔渣樣品混樣後，為探討水膠比、熔渣粒徑、粗細骨材比及熔渣添加量等四種因子對於混凝土磚試體特性之影響，每因子各設計三種不同水準，設計如表 6 所示，並依據田口式實驗設計法之 L9 (3^4)直交表(如表 7 所示)進行配比參數設計。混凝土磚試體規格為 5 cm×5 cm×5 cm。混凝土磚試體經 28 天常溫養護後，依據 CNS13295 規定對混凝土磚進行抗壓強度測試，每組實驗取 3 個試體進行抗壓強度試驗並取其平均值，以探討實驗設計因子對混凝土試體強度影響，並評析最適製磚配比。

表 6　田口式實驗設計法因子水準設計表

控制因子		水準 1	水準 2	水準 3
A	水膠比	0.80	0.85	0.90
B	熔渣粒徑 (篩網孔徑)	#4 (4.75mm)	#8 (2.36mm)	#16 (1.18mm)
C	粗細骨材比	50：50	40：60	30：70
D	熔渣添加量	30%	40%	50%

表 7　田口試實驗設計法 L9 直交表

實驗編號	A	B	C	D	抗壓強度 (kgf/cm^2)
1	1	1	1	1	273.3±11.7
2	1	2	2	2	303.4±13.5
3	1	3	3	3	231.7±33.2
4	2	1	2	3	258.9±24.0
5	2	2	3	1	255.4±18.2
6	2	3	1	2	258.5±14.2
7	3	1	3	2	231.3±10.4
8	3	2	1	3	242.3±3.8
9	3	3	2	1	254.9±10.0

(1)抗壓強度分析

由表 7 田口式實驗設計 9 組實驗配比混凝土磚之 28 齡期抗壓強度得知，28 天抗壓強度最高者為實驗編號 2，三個試體抗壓強度分別為 310.4、287.9、312.0 kgf/cm^2，平均值為 303.4 kgf/cm^2，已達到 CNS 3930 預鑄混凝土緣石之抗壓強度標準(250 kgf/cm^2)，又其中以實驗編號 7 之 28 齡期抗壓強度最低。另由研究結果得知，同一配比之三組試體抗壓強度變異性小，顯示實驗室製作混凝土磚試體的品質穩定。

(2)S/N 比分析

本研究將田口式實驗設計 9 組配比之 28 天抗壓強度代入望大特性公式，分別計算各因子之信號雜音比(Signal-to-Noise，S/N 比)，並依 S/N 及全距(Max-Min)評估水膠比、熔渣粒徑、粗細骨材比及熔渣添加量等四種因子對於混凝土磚試體 28 天抗壓強度之影響程度。

由表 8 抗壓強度之 S/N 回應表得知，因子 A 水膠比 0.8(水準 1)之 S/N 比值最高，且 S/N 比值隨著水膠比增加而降低，顯示降低水膠比將有助於提升混凝土磚試體抗壓強度。而因子 B 熔渣粒徑 2.36 mm(水準 2) 之 S/N 比值最高，但不同粒徑之 S/N 比值差異不大。因子 C 粗細骨材比 40:60 (水準 2)之 S/N 比值最高，而因子 D 三種熔渣添加量之 S/N 比值差異不大。根據控制因子中不同水準之 S/N 全距(Max-Min)可得，各控制因子對於混凝土磚 28 天抗壓強度的影響程度之大小排序為: 粗細骨材比(C) >水膠比(A) >熔渣添加量(D) >熔渣粒徑(B)，而最適配比組合水膠比 0.80、熔渣粒徑 2.36 mm、粗細骨材比 40:60、熔渣添加量 40%。

表 8　抗壓強度之 S/N 回應表

水準	控制因子			
	A	B	C	D
1	48.49	48.06	48.21	48.31
2	48.17	48.47	48.64	48.37
3	47.69	47.83	47.50	47.67
Max-Min	0.80	0.64	1.14	0.70
影響排序	2	4	1	3

3.增加熔渣替代量之配比試驗

(1)抗壓強度分析

為達到熔渣再利用量最大化之目標，本研究乃參考田口式實驗設計法所得最適配比參數，進一步提高混凝土磚試體之熔渣替代量。由前述各因子之信號雜訊比得知，三種熔渣粒徑之 S/N 比值差異不大，其對於抗壓強度之影響不顯著，因此本研究選定熔渣粒徑為 4.75~19 mm 及<4.75 mm，分別作為粗骨材及細骨材之替代。調整後六組配比設計如表 9，其中熔渣添加量之粗骨材 100%表示熔渣全數取代天然粗骨材，細骨材 100%表示全數取代天然細骨材。此外，為避免粗細骨材堆疊及分布不均而影響試體抗壓強度，混凝土磚試體尺寸亦放大為 10×10×5cm。

表 9　增加熔渣替代量之混凝土磚配比設計(10x10x5cm)

實驗編號	水膠比	粗細骨材比	膠骨比	熔渣替代量	
				粗骨材	細骨材
1	0.8	40：60	0.2	0%	50%
2	0.8	40：60	0.2	0%	75%
3	0.8	40：60	0.2	0%	100%
4	0.8	40：60	0.2	50%	50%
5	0.8	40：60	0.2	75%	75%
6	0.8	40：60	0.2	100%	100%

增加熔渣使用量之混凝土試體於四個養護齡期(1、7、14、28 天)之抗壓強度發展如圖 5 所示，由圖中得知混凝土磚試體抗壓強度大多隨著養護齡期增長而有不同程度的提升，除編號 2 之試體 28 天抗壓強度低於 14 天之外，其餘試體均以 28 天抗壓強度為最高。而六組試驗配比混凝土磚試體之 28 天抗壓強度最高者為實驗編號 5，其次為實驗編號 3，其抗壓強度分別為 313.1 及 309.9 kgf/cm^2，均已達到 CNS 3930 預鑄混凝土緣石之抗壓強度標準(250kgf/cm^2)。

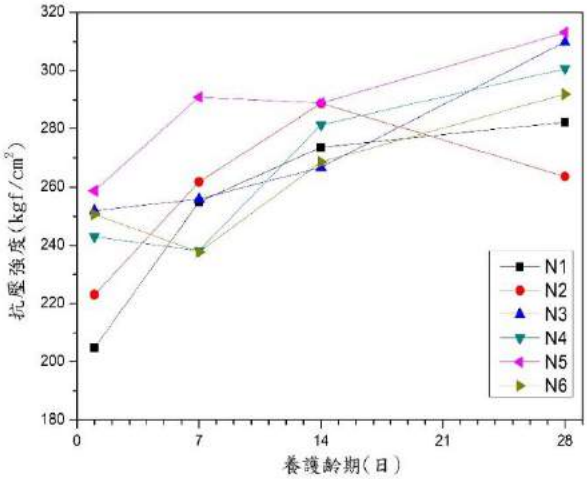


圖 5　混凝土試體於不同齡期之抗壓強度發展

(2)溶出特性分析

為瞭解熔渣製作混凝土磚試體之溶出特性，並評估電漿熔渣作為混凝土磚粗、細粒料之可行性，本研究選擇電漿熔渣替代比及其混凝土磚抗壓強度較高之兩組試體進行 TCLP 溶出試驗及戴奧辛分析，分析結果如表 10，由表中分析結果顯示混凝土磚試體中重金屬之 TCLP 溶出濃度均符合法規限值，以電漿熔渣再利用為混凝土磚之粗、細粒料亦不具有害特性，其重金屬具有良好的穩定性，無顯著溶出的現象。

表 10　混凝土磚試體之 TCLP 溶出試驗及戴奧辛檢測結果

分析項目	單位	試體#3	試體#5	有害事業廢棄物認定標準
總砷	mg/L	0.002	<0.001	5.0
總汞	mg/L	ND<0.0002	ND<0.0002	0.2
總鋇	mg/L	0.551	0.245	100
總鎘	mg/L	ND<0.004	ND<0.004	1.0
總鉻	mg/L	0.022	0.040	5.0
總銅	mg/L	0.055	ND<0.033	15.0
總鉛	mg/L	0.037	ND<0.036	5.0
總硒	mg/L	ND<0.018	ND<0.018	1.0
六價鉻	mg/L	ND<0.01	ND<0.01	2.5
戴奧辛	ng I-TEQ/g	<0.001	<0.001	1.0

(3)水膠比之影響

由 3-3-1 的研究果可知兩組最適配比之混凝土磚試體抗壓強度雖已達到 CNS 3930 預鑄混凝土緣石之抗壓強度標準(250 kgf/cm^2)，但並未達到 CNS13295 高壓混凝土地磚之 C 級磚標準(450 kgf/cm^2)。而由於本研究原先為考量漿體之流動性，而設定之水膠比(0.8~0.9)相較於一般混凝土磚之水膠比(0.3~0.5)為高，但有研究指出降低水膠比可減少膠體孔隙率及提高微結構緻密性，將有助於提升磚體之抗壓強度[9]。故本研究以 3-3-1 之實驗組別 3 及 5 的配比條件為基礎，進行水膠比對混凝土磚抗壓強度影響之探討。本研究將水膠比調整為 0.48，前述實驗組別 3 及 5 的混凝土磚抗壓強度分別可提升至 492.6 kgf/cm^2 及 476.7 kgf/cm^2，而可符合 CNS13295 高壓混凝土地磚之 C 級磚標準(450 kgf/cm^2)。

綜合熔渣之物化特性及工程特性結果可知，熔渣之工程特性優良，可作為天然骨材替代使用。而根據田口式實驗設計法所得最適配比，並考量熔渣替代量最大化之再利用目標，以及水膠比對磚體抗壓強度之影響，本研究歸納以實驗廢棄物電漿熔渣作為混凝土磚資源化之最適配比條件如表 10 所示。

表 11　最適配比條件

試體	水膠比	粗細骨材比	熔渣替代量	熔渣佔總量重
#3	0.48	40：60	細骨材100%替代	50%
#5	0.48	40：60	粗骨材75%替代 細骨材75%替代	62.5%

四、結　論

1. 電漿熔渣之比重、吸水率及健度皆符合 CNS 6299 混凝土用碎石規範，而洛杉磯磨損率雖略高於規範值，但仍顯示電漿熔渣具有替代天然骨材資源化的潛力。
2. 電漿熔渣之重金屬成分主要包含 Cr、Pb、Cu、Ni、Zn 等，而其 TCLP 溶出濃度則皆低於規範值，顯示電漿熔渣不具有害特性。
3. 由田口式實驗設計法之 S/N 比分析結果顯示，各控制因子對於混凝土磚 28 天抗壓強度的影響程度大小排序為: 粗細骨材比(C) >水膠比(A) >熔渣添加量(D) >熔渣添加量(B)。
4. 電漿熔渣作為細骨材使用，最佳配比條件為水膠比 0.48、熔渣粒徑<4.75

mm (細骨材)、粗細骨材比 40:60、熔渣替代量(細骨材)100%，其 28 天抗壓強度為 492.6 kgf/cm^2，已達到 CNS13295-高壓混凝土地磚之 C 級磚標準(450 kgf/cm^2)。

5. 電漿熔渣若同時作為粗骨材及細骨材替代，最佳配比條件為水膠比 0.48、熔渣粒徑 4.75~19 mm (粗骨材)及<4.75 mm (細骨材)、粗細骨材比 40:60、熔渣替代量粗骨材 75%及細骨材 75%，其 28 天抗壓強度為 476.7 kgf/cm^2，已達到 CNS13295-高壓混凝土地磚之 C 級磚標準(450 kgf/cm^2)。
6. 電漿熔渣作為天然骨材替代之混凝土磚試體僅有微量 As、Ba、Cr、Cu 及 Pb 之溶出，且均遠低於「有害事業廢棄物認定標準」，而戴奧辛含量亦屬微量，均遠低於規範值(1.0 ng I-TEQ/g)，顯示電漿熔渣再利用為混凝土磚亦不具有害特性，其重金屬具有良好的穩定性，無顯著溶出的現象。

五、參考文獻

1. 行政院環保署，從銀/氧化鋁(Ag/Al2O3)複合材料中分離銀金屬-高溫電漿熔融技術之開發研究，期末報告，2004。
2. Ecke, H.; Sakanakuras, H.; Matsuto, T.; Tanaka, N; Lagerkvist, A., Effect of Electric arc vitrification of bottom ash on the mobility and fate on metals. Environ Sci Technol. 35, pp. 1531-1536, 2001.
3. 江康鈺、王鯤生，污泥熔融處理及資源再利用技術，工業污染防治，第 64 期，156-188 頁，1997。
4. Endo, H.; Nagayoshi, Y.; Suzuki, K., Production of glass ceramics from sewage sludge. Water Sci Technol. 36, pp. 235-241, 1997.
5. Barbieri, L.; Bonamartini, A.C.; Lancellotti, I., Alkaline and alkaline-earth silicate glasses and glass-ceramics from municipal and industrial wastes. J. Eur. Ceram. Soc. 20, pp. 2477-2483, 2000.
6. 郭益銘，以高溫熔融法處理電鍍泥與焚化飛灰再利用之研究，工程科技與教育學刊第 10 卷，第 3 期，第 313-321 頁，2013。
7. 簡呈至，已焚化飛灰穩定化物取代細骨材產製混凝土磚之研究，國立台北科技大學資源工程研究所碩士論文，2013。
8. 財團法人成大研究發展基金會，焚化底渣作為瀝青混凝土添加料資源化再利用之可行性評析期末報告，2013。
9. 黃兆龍，混凝土性質與行為，詹氏書局，1998。

回收動力電池電能管理模組開發與測試

朱雅筠*、袁文璞*、江益賢**、施武陽***

摘　要

近年來回收電動車使用之報廢鋰離子電池,作為電力平衡與儲存再生能源電力，普遍認為是能夠有效再利用回收鋰電池剩餘容量的方式，然而，其壽命隨退役後大幅衰減是一項難題,本研究開發一無須電壓轉換器之電能管理模組，除了即時偵測回收電池循環壽命之外，並進行充放電高峰時電流的分配以延長回收電池的壽命。

具體來說，應用物理電池可大電力充放電以及脈衝寬度調變(Pulse Width Modulation，PWM)的方式，本研究開發了一種簡單的無電壓轉換器之電能管理系統來管理回收電池,物理電池與電能管理系統串接並聯回收動力電池，提供峰值功率以降低回收電池電壓降的範圍，另外為確保並即時監測回收電池循環壽命，本研究導入電池循環壽命監測機能，透過輸入之工作電壓與電流、即時估測回收電池循環壽命敏感型參數。

本研究使用電動汽車中常用的兩種類型鋰離子電池($LiFePO_4$ 和 $LiMnNiCoO_2$)，應用美國聯邦都會駕駛模式(FTP-75)，以模擬市區的隨機使用，整體測試是透過監測電池組壓降的充放電機進行，此外電池組和超級電容器之間的電流分配比是透過即時模擬器進行優化，目標是在 FTP-75 用電需求下最大限度地降低電壓降，並監測電池循環壽命，具體來說，在使用回收電池 $LiMnNiCoO_2$ 的情況下，電能管理系統可以降低電壓降低 50%，比單純將回收電池並聯物理電池控制更有效降低電壓降範圍,以延長壽命週期相對效應的概略估計，比沒有電能管理系統的循環壽命高出 145%。這項研究使我們能夠確認用於報廢鋰離子電池組的無電壓轉換電能管理系統的實用性及效能。

【關鍵詞】回收利用、鋰離子動力電池、電能管理系統、循環壽命

---

*中原大學環境工程學系　碩士生

**舜鵬科技研發部　資深工程師

***中原大學環境工程學系　助理教授

一、研究動機與目的

隨著日趨嚴格之排放標準，逐步對新能源車輛的銷售起效果，IEA 預估 2050 年時電動車銷售量將達 5,000 萬輛，在台灣市場已經逐步打開，根據歐盟與美國的 IEC619821-3 與 UL2580 法規，動力電池在可充電電量剩餘原電池 80%以下時即須汰換，即汰換後之舊電池組仍然具有大量可儲存電容量可供回收利用，作為火力發電廠或污水處理廠儲電設備進行離尖峰電力調控、緊急備用電源等用途。另外再搭配超級電容與本研究的電能管理開發系統去進行電流的分配比例，超級電容是具有超長壽命週期的物理電池，能夠對突發峰值功率進行放電和充電。有些研究已進行結合鋰電池和超級電容器的優點，從經濟角度來說，延長 LIB 生命週期具有成本效益和合理性，為了控制 LIB 和超級電容器之間的能量流動，目前已提出了一個較小的 DC-DC 轉換器原型和簡單的電路，代替了多電池組中的傳統大型 DC-DC 轉換器，輔助電源以及各個 LIB 與超級電容器之間的充放電。

在成本效益方面，除了賺取離尖峰電力費率差額外，更可降低傳統發電廠設計功率，但回收動力電池壽命衰減快、需建立線上即時偵測機制延緩老化，因此，本研究開發電池組循環壽命即時估測機能，並整合物理電池提供大電流，可對應不同情境之再生動力電池使用。

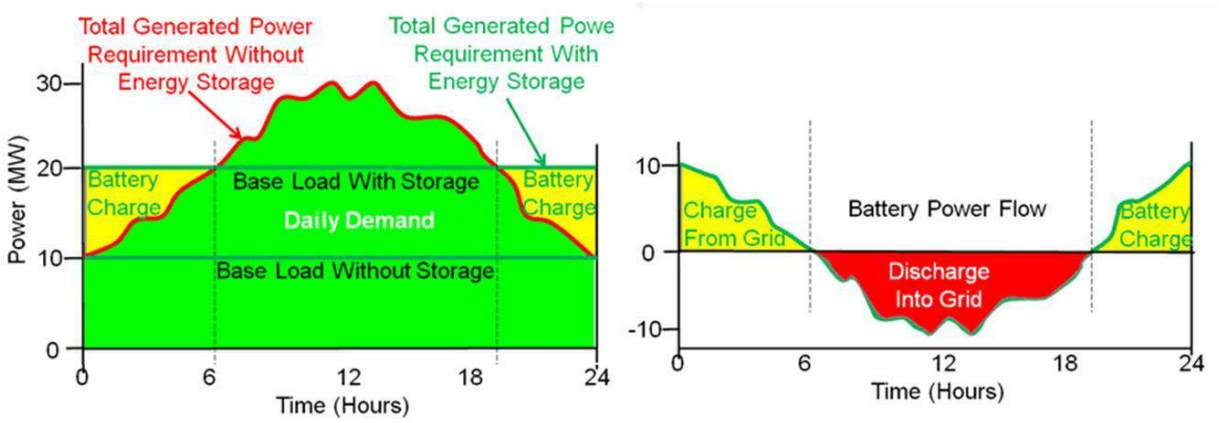


圖 1　離尖峰電力使用量

二、研究方法

1.鋰離子電池循環壽命估測機制(軟體)

本研究導入中原大學環工系能源研究室既有之電池循環壽命估測機制，透過量測電池組工作電流與電壓，經由適應性觀測器歸納出內電阻值，透過測試資料庫(lookup table)計算得到對應壽命值，參考流程圖如下：

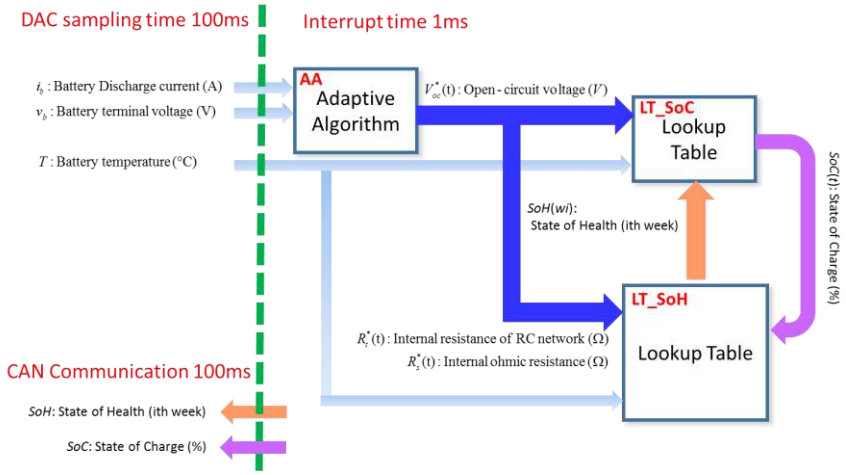


圖 2　測試資料庫流程圖

2. 電能管理系統(硬體)

應用循環壽命線上即時估測機制，寫入電能管理模組(EMS)並選定一適合之超級電容作為回收鋰電池之緩衝提供大電流並保護回收鋰電池。

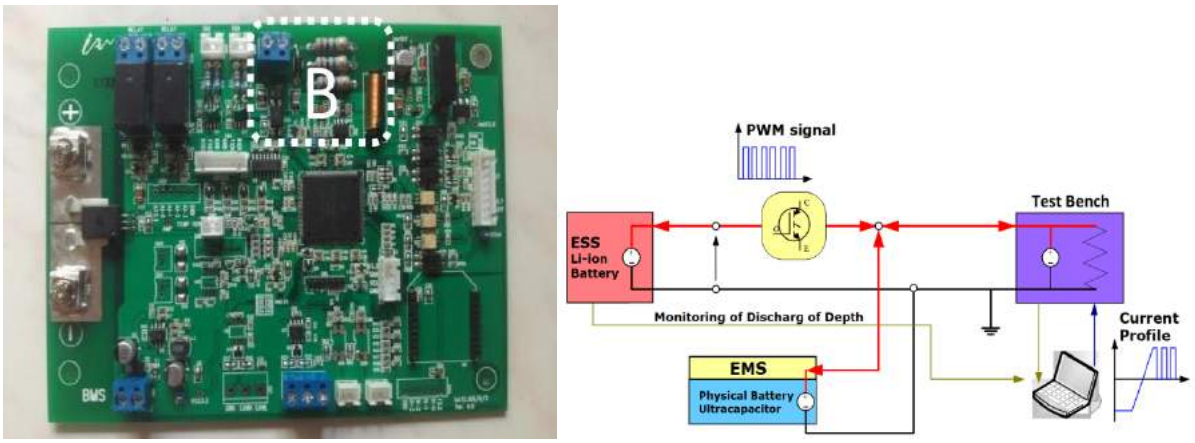


圖 3　電能管理模組開發板與 EMS 應用的簡單電路

(1)電能管理模組的結構

在研究中，脈衝寬度調變(PMS)控制空佔比應用於選擇 LIB 與超級電容之間的分流比，在智能電網中利用重新回收使用的 LIB 中使用 DC-DC 轉換器，在現有的案例當中，它比較的簡單同時也符合成本效益。超級電容器與 EMS 直接連接以提供瞬時功率流，以改善 LIB 的壽命週期。並開發以通過每單位時間切換單獨的電流分配比(佔空比)LIB 或超級電容器來實現主動控制，例如 LIB 每單位時間分攤的比例為 40%，則超級電容負載為 60%。負載功率模式是美國 FTP-75 驅動模式的一個週期，假設最大功率為 15kW，並假設家庭使用的最大需求，智能電網中由 EMS 控制的四個功率流情況如下：

A. LIB 充電超級電容

B. LIB 在優化的佔空比下為超級電容放電

C. 超級電容放電

D. 峰值功率狀況下 LIB 或超級電容由立即電壓決定

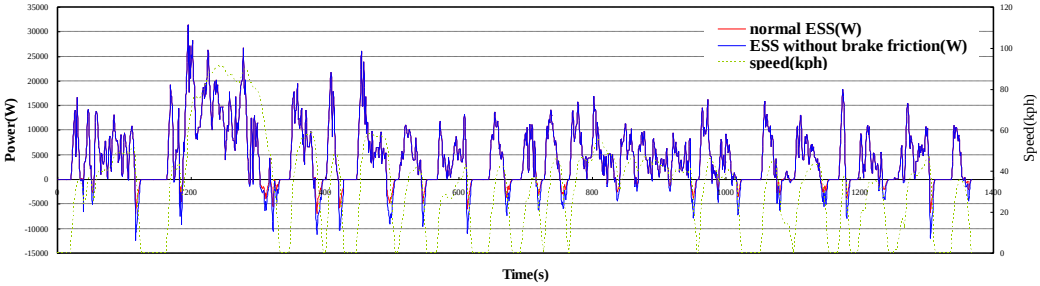


圖 4　假設 FTP-75 模式在智能電網中的功耗

(2)電流即時分配模擬系統

為了對模擬器中 EMS 的分析模型進行驗證，簡要控制策略如下：

A. 當需求低於額定值的 60%時，LIB 提供主要功率。

B. 在需求量大於額定的 60%的情況下，超級電容器提供主要的電力

C. 再生系統具有 50%的效率的機械能量轉化為電能，未用到的再生能源便儲存於超級電容中

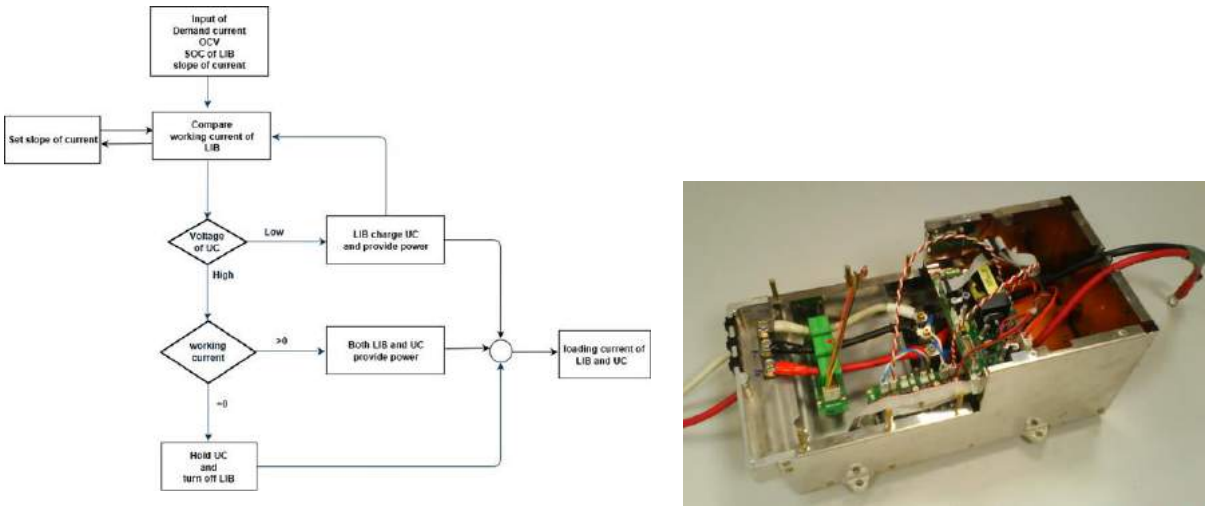


圖 5　功率控制流程圖與模擬器

三、研究結果

本研究提出了一種簡單並行電路的 EMS 與 LIB 連接為了改善 LIB 的壽命週期，使用一個超級電容器。超級電容器的容量由智能電網的最大功率需求決定。通過台架試驗監測電壓降，以評估通過比較具有和不具有 EMS 的情況來改善生命週期的效果，而分配比例由模擬器選擇。

1. 透過鋰離子電池循環壽命估測機制所量測之結果。Rs 為電池代表內電阻，Voc 為電池靜態開路電壓，透過估測機制在短時間即可收斂出正確值(0.001)，而開路電壓估測也相當準確。

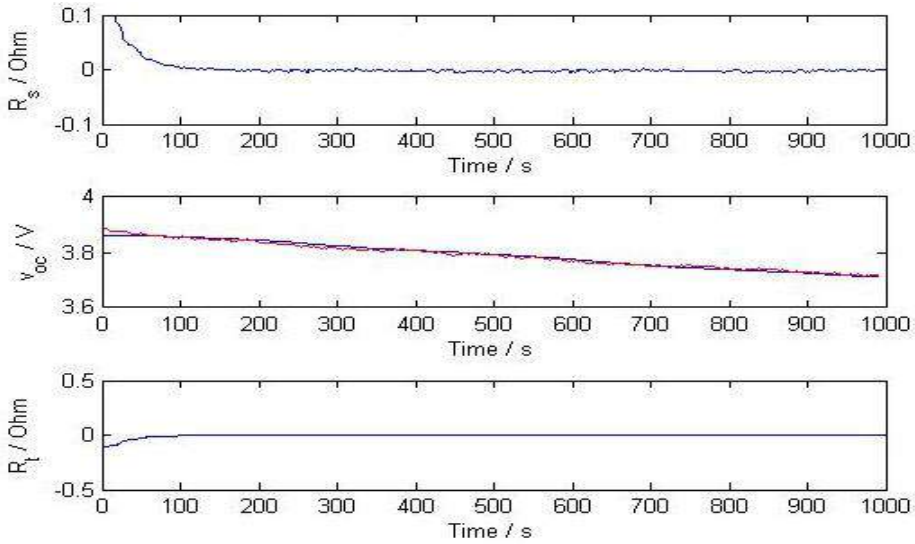


圖 6　透過估測機制量測圖

2. 為了研究在具體控制策略下使用不同 LIB 的影響，本研究中分別採用了兩種 LIB(LiFePO4 和 LiMnNiCoO2)。設置 LIB(60%)已經優化的佔空比，通過應用一個 FTP-75 驅動週期來測量每個 LIB 組的電池電壓變化範圍(DOD)在具有主動控制 EMS 和沒有的情況下為何。下圖是透過充放電設備進行電池組在導入 EMS 前後之電壓變化的量測，測試條件是使用美國 FTP-75 充放電模式，在兩種不同電池下，導入 EMS 皆降低了電池電壓變化範圍(DOD)，這意味著電池循環壽命的延長。

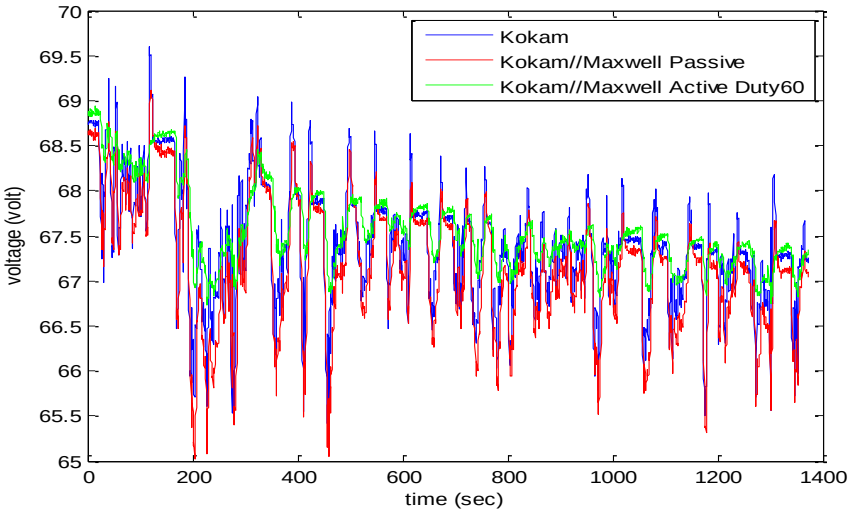


圖 7　LiMnNiCoO$_2$ 電池

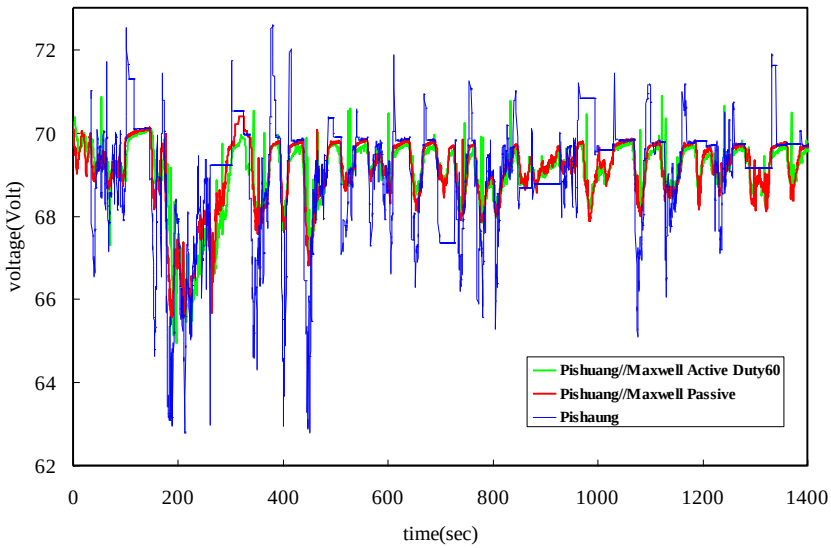


圖 8　LiFePO$_4$ 電池

四、結　論

為了考慮智能電網的能源使用情況，採用能源管理體係來控制廢棄的 LIB 的電流，以避免過載並保持有效利用可再生能源。在這裡，輔助能量系統如超級電容器用於提供瞬時需求能量，並能夠在智能電網中積累不穩定的可再生能源。在這項研究中，應用經濟有效的無轉換器 EMS 來管理智能電網中能量平衡應用中 LIB 的功率流。超級電容器與 EMS 直接連接，用於提供瞬時功率流，特別是改善廢棄的 LIB 的壽命週期。EV 中使用的兩種最常見的 LIB 組(LiFePO4 和 LiMnNiCoO2)被單獨用於評估 EMS 的性能。此外，仿真器與 LIB，超級電容器和 EMS 分析模組相結合，用於優化電池組的電流分配比，最大限度地降低電壓降，然後與台式測試結果進行比較。在符合美國 FTP-75 的嚴酷條件下，通過對電壓下降監測的台架試驗來評估 EMS 的性能。總而言之，即使在 LiMnNiCoO2 的情況下，主動控制可以提高電壓降的 50%，比被動控制更有效。通過計算改善生命週期的相對影響，粗略估計比原始使用高出 145%。通過採用超級電容器進一步採用適當的控制策略，可以獲得更好的節能效果。

這項研究整合回收鋰離子電池循環壽命估測機制與電能管理模組(EMS)為一，更有效控制回收電池組應用於大型整合電池組下之放電電壓與壽命保固，因此，透過本項研究之成果，將可推動回收電池應用於再生水廠之離尖峰電力調控，或是延長目前新能源車所使用之鋰離子電池壽命，對開拓環工環境能源開發具有產業效益。

五、致　謝

感謝環保署 EPA-106-U101-02-A121 計畫支持。

六、參考文獻

1. http://www.iea.org/etp/etp2016/
2. www.nrel.gov/transportation/energystorage/pdfs/48018.pdf
3. 3.L. BY, J. RG, G. Nagasubramanian, C. HL, and D. DH, “Modeling capacity fade in lithium-ion cells,” Journal of Power sources, Vol. 140, pp. 157-161, 2005.

4. 4.E. L. Schneider, W. Kindlein, S. Souza, and C. F. Malfatti, “Assessment and reuse of secondary batteries cells,” Journal of Power Sources 189, No. 2, pp. 1264, 2009.
5. 5.A. Andrijanovits, H. Hoimoja, and D. Vinnikov, “Comparative Review of Long-term Energy Storage Technologies for Renewable Energy Systems,” Electronics and Electrical Engineering 2, issue 118, pp. 21, 2012.
6. 6.Z. Yang, J. Liu, S. Baskaran, C. H. Imhoff, and J. D. Holladay, “Enabling Renewable Energy and the Future Grid with Advanced Electricity Storage,” JOM 62, No. 9, pp. 14-23, 2012.
7. 7.F. Diaz-Gonzalez, “A Review of Energy Storage Technologies for Wind Power.” Renewable & Sustainable Energy Reviews 16, No. 4, pp. 2154, 2012.
8. 8.J. F. Paulino, N. G. Busnardo, and J. C. Afonso, “Recovery of Valuable Elements from Spent Li-Batteries,” Journal of Hazardous Materials 150, No. 3, pp. 843, 2008.
9. 9.H. J. Khasawneh and M. S. Illindala, “Battery cycle life balancing in a microgrid through flexible distribution of energy and storage resources,” Journal of Power Sources, Vol. 261, pp. 378-388, 2014.
10. 10U. K. Debnath, I. Ahmad, D. Habibi, and A. Y. Saber, “Energy storage model with gridable vehicles for economic load dispatch in the smart grid,” Electrical Power and Energy Systems, Vol. 64, pp. 1017-1024, 2015.

煉鋼爐碴再利用於膠結材料水化特性之研究

曾雅玟*、陳昭旭**、葉平堯***

摘　要

由於煉鋼爐碴的成分組成與卜特蘭水泥相當接近，具有做為卜作嵐材料的潛力，故現今多朝資源化再利用的方向研究。為了達到增加煉鋼爐碴去化量及減少水泥的使用量，本研究將煉鋼爐碴作為卜作嵐材料來替代水泥的方式應用於砂漿試體的膠結材料。首先先透過原料的基本特性分析和研磨及篩分來製備不同細度的粉料作為後續砂漿試體配比設計。利用製備的砂漿試體透過體積穩定性、抗壓強度和微觀分析等項目，探討煉鋼爐碴的細度變化與替代用量對於砂漿試體的工程特性影響，來評估煉鋼爐碴水泥替代量的最佳配比。

在基本特性分析結果，由晶相組成分分析可發現，煉鋼爐碴含有大量的矽酸鈣(C_2S)及少量的氫氧化鈣($Ca(OH)_2$)，在此顯現此研究用的煉鋼爐碴具有作為卜作嵐材料的潛力，而在 XRD 分析中發現原料中含有常造成體積膨脹的成分，所以使用煉鋼爐碴替代水泥需特別注意體積膨脹的問題。

從研究結果可得知，將煉鋼爐碴作為砂漿試體的膠結材料，隨著煉鋼爐碴的替代用量增加，試體的強度發展及體積穩定性和凝結時間等都有負面的影響。在體積穩定性的部分，當替代量超過 20%時體積膨脹變化量需在 40 天齡期才會趨緩，反之則 20 天齡期就可收斂。根據實驗結果建議將煉鋼爐碴以膠結材料重量百分比的 25%為上限，才有較好的替代結果。煉鋼爐碴的細度變化從結果得知在強度發展趨勢的部分有較大的影響，而在體積穩定性只有乾縮量有些微影響。

【關鍵詞】煉鋼爐碴、卜作嵐材料、膠結材料、體積穩定性

---

*國立成功大學資源工程學系　研究生

**國立成功大學資源工程學系　教授

***國立成功大學資源工程學系　碩士

一、前　言

在營建工程中混凝土的使用相當頻繁，而在一般混凝土中通常是使用卜特蘭水泥做為膠結材料來使用。水泥的製作只要是以石灰石為主要成份，再搭配少量摻料(如細砂、黏土及鐵碴等等)所製成的生料，經過研磨後使用1450℃的高溫煅燒製成熟料，再添加大約5%的石膏進行研磨後及為工業上所使用的水泥。儘管使用上如此便利，但在水泥的製造過程中無法避免的需要消耗大量的能量及連帶產生氮氧化物(NO_x)和二氧化碳(CO_2)等汙染物及溫室氣體[1]。國內主要的石灰石礦場及水泥製作場皆多半位於花蓮及宜蘭等地區，在人民生活品質普遍提升及環保意識逐漸抬頭的時代，原礦開採所衍生的環境問題與位置爭議，均為一般大眾所詬病。因此，為了在建設發展及環境保護之間取得平衡，尋求可以部份代替或完全取代卜特蘭水泥的膠結材料，已成為目前重要的課題。

相同的，作為工業之母，鋼鐵工業、機械、國防及營建等相關產業之間皆有密切之關聯，在鋼鐵冶煉的過程中會產生大量的副產物-爐碴，爐碴的去化也是一直令人頭疼的問題。其中，煉鋼爐碴的化學成份及礦物相組成和水泥相似，具有作為水泥摻料及水泥原料的潛力。然而，在煉鋼爐碴中的游離氧化鈣(free CaO，f-Cao)和游離氧化鎂(free MgO,f-MgO)，容易遇水反應而產生氫氧化鈣($Ca(OH)_2$)和氫氧化鎂($Mg(OH)_2$)而造成體積的膨脹，若未經適當處理就使用於混凝土，長久之下可能會有健性不穩的問題產生。

二、研究方法與材料介紹

本研究的目的在於探討煉鋼爐碴資源化再利用於膠結材料的可行性，並透過增加煉鋼爐碴的細度，作為提升體積穩定性和強度之手段，進而達到提升煉鋼爐碴去化量及減少水泥使用量的目的並找到最佳煉鋼爐碴的取代量。

本研究的試驗內容共分為三部份，第一部份為原料的前處理和基本特性分析，作為研究架構及流程設計的參考；第二部份為砂漿試體的工程特性試驗，依設計的配比及各試驗項目分別製備試體，製備的砂漿試體進行工程特性試驗評估煉鋼爐碴資源化再利用作為膠結材料的可行性；第三部份為試體的微觀分析。

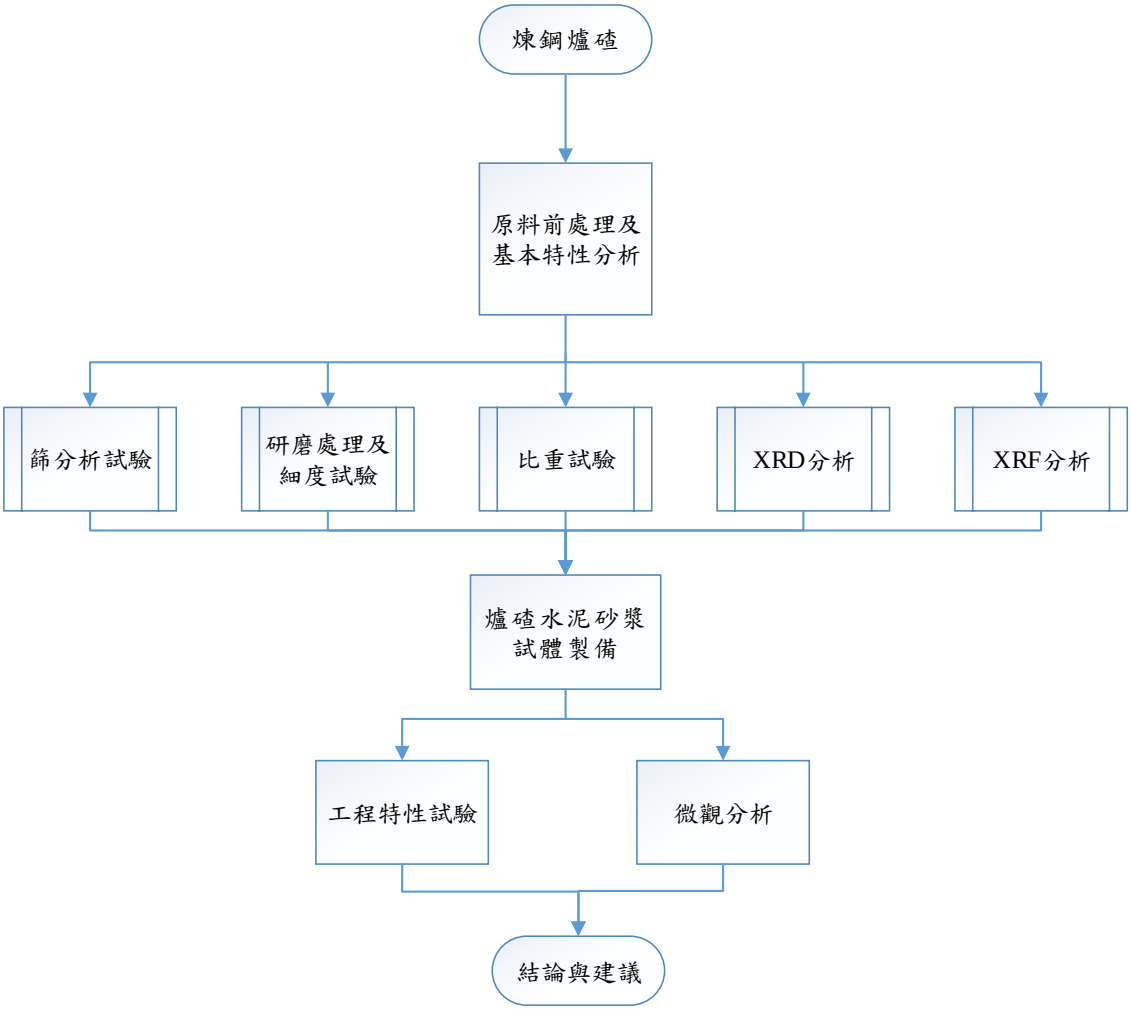


圖 1 研究流程

1.材料介紹

(1)水泥(Ordinary portland cement,OPC)

本試驗所使用之水泥為市售的環球牌卜特蘭 I 型水泥，為確保試驗結果不受水泥性質影響，採買時一次購足試驗所需用量並儲存於裝有乾燥劑的容器中，以防水泥受潮變質。

(2)煉鋼爐碴(steelmaking slags,SS)

本研究所用的煉鋼爐碴產自南部某煉鋼廠，在進行各項基本特性分析前先在烘箱中以 105℃烘乾。烘乾後的煉鋼爐碴，則儲存於放有乾燥劑的密封容器中，以避免受潮影響原料品質。

(3)天然細粒料

本研究所用的天然細粒料為里港溪產出之里港黑砂，用於後續試驗中的砂漿試體製備。自建材行購回後，先在烘箱中以 105℃烘乾，並取用通過 No.4 號(4.75 mm)標準篩之細粒料，儲存於放有乾燥劑的密封容器中，以避免細粒料受潮而影響後續試驗結果。

2.研究方法

將細度接近和超過卜特蘭 I 型水泥(3000 cm^2/g 和 7300 cm^2/g)的兩種煉鋼爐碴，依選定比例替代卜特蘭 I 型水泥(3500 cm^2/g)，並製備爐碴水泥砂漿試體。透過砂漿試體的工程特性試驗和微觀分析，探討細度變化和煉鋼爐碴用量對強度活性指數及體積穩定性(膨脹，乾縮)的影響，評估煉鋼爐碴作為卜作嵐材料使用的可行性，詳細配比如表 1 所示。

表 1 爐碴水泥砂漿(SC mortar)實驗配比設計

膠結材料	水泥替代量	工程特性分析試驗項目		
		抗壓試驗	膨脹試驗	乾縮試驗
OPC	0%	V	V	V
SS3000	10%	V	V	V
	20%	V	V	V
	30%	V	-	-
	40%	V	-	-
	50%	V	V	V
SS7300	10%	V	V	V
	20%	V	V	V
	30%	V	-	-
	40%	V	-	-
	50%	V	V	V

水:膠結材料(水泥+煉鋼爐碴):細粒料=0.485:1:2.75

3.試驗方法

(1)基本特性分析

試驗內容包括：篩分析試驗(CNS 13264)、研磨處理及細度試驗(CNS 2924)、比重試驗(CNS 11272)、XRD 分析、XRF 分析。

(2)試體製備

依照設計配比，將水泥、煉鋼爐碴及天然細粒料及水做拌合，分別灌入抗壓試驗用的 5cm×5cm×5cm 模具及體積穩定性試驗用的 25mm×25mm×285mm 模具，靜置 24 小時後拆模，並將抗壓試驗試體放入飽和石灰水容易中養護，而體積穩定性試驗試體則因對應乾縮及熱膨脹試驗進行不同條件方式養護。

(3)工程特性試驗

試驗內容包括：強度活性指數(CNS 1010)、體積穩定性試驗(CNS 1258)。

(4)微觀分析

試驗內容包括：X 光繞射分析(X-ray diffractometer, XRD)、掃描式電子顯微鏡(Scanning electron microscope, SEM)、X 光螢光分析(X-ray fluorescence, XRF)。

三、試驗結果與討論

1.基本特性分析結果

(1)篩分析試驗

自建材行和工廠取回天然細粒料和煉鋼爐碴原料後置於烘箱中烘乾，並利用試驗標準篩求得原料的粒徑分佈曲線，如圖 2 和圖 3 所示。由篩分析試驗的結果可看出，本研究所用的天然細粒料之粒徑分佈接近於不良級配，而煉鋼爐碴原料的粒徑分佈則較為均勻。

若以是否通過#100 標準篩(0.15mm)作為區分粒料及細粉料的界定標準，可看出本研究所使用之煉鋼爐碴，粒料部分佔 69 %，而細粉料部分僅佔 31 %。而前人[3][4]研究結果和建議皆表明，若欲將煉鋼爐碴作為卜作嵐材料使用，則至少應選用通過#200(0.075mm)標準篩之細粉料，才有足夠的反應活性。由於本研究煉鋼爐碴原料僅 14.5 %可通過#200 標準篩，為提升煉鋼爐碴的資源化用量及增加反應活性，考量煉鋼爐碴粒徑分佈曲線和所使用的球磨罐及磨球尺寸，選用通過#30 標準篩(0.6mm)的煉鋼爐碴細粒料作為後續研磨試驗的原料，搭配不同的餵料量和研磨時間，進行煉鋼爐碴細粉料的製備。

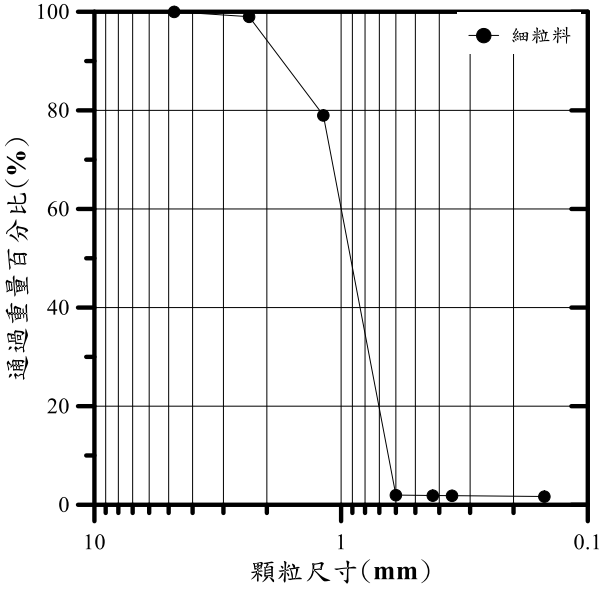


圖 2　天然細粒料粒徑分佈曲線

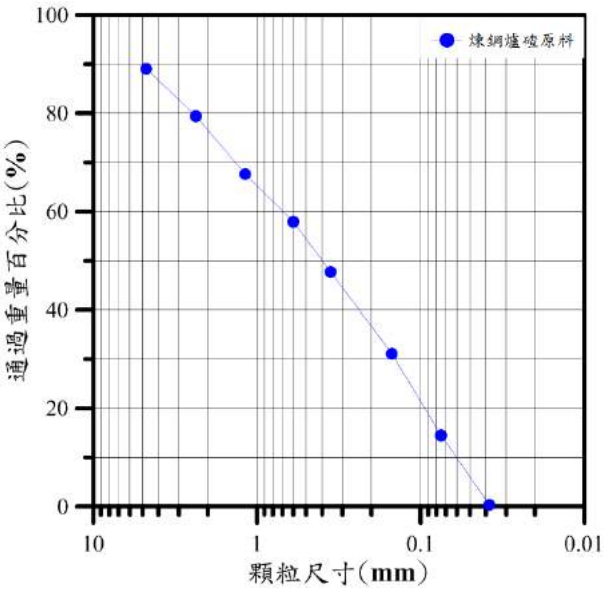


圖 3　煉鋼爐碴粒徑分佈曲線

(2)煉鋼爐碴細粒料研磨和細度試驗

經比重試驗求得過#30 標準篩之煉鋼爐碴細粒料的比重為 3.01，略低於普通卜特蘭水泥(約為 3.15)。在固定磨球數(d=20mm, 77 顆、d=10mm, 324 顆)及轉速(200 rpm)的條件下，將過#30 標準篩的煉鋼爐碴細粒料分別以 300 g、600 g 和 900 g 三種餵料量投入球磨罐中，再以 0.5 hr、1 hr 和 3 hr 的時間進行研磨。研磨後的煉鋼爐碴則過#200 標準篩，分別記錄篩上物及篩下物重量並換算為過#200 標準篩之細粉料百分比，再以布蘭氏氣透儀測定篩下物的細度，結果如表 2 所示。為評估細度變化對煉鋼爐碴粉料反應活性之影響，本研究選用直接過#200 標準篩的煉鋼爐碴細粉料(以下簡稱 SS3000)和 300 g 研磨 3 hr 後過#200 標準篩的煉鋼爐碴細粉料(以下簡稱 SS7300)做為後續試驗中的材料。

表 2　煉鋼爐碴細粒料研磨處理結果

試體	通過#200 細粉料百分比(%)	細度(cm^2/g)
過#30 煉鋼爐碴細粒料	-	1600
過#200 煉鋼爐碴細粒料	-	3000
300 g 研磨 0.5 hr	81	5400
300 g 研磨 1 hr	89	6300
300 g 研磨 3 hr	94	7300
600 g 研磨 0.5 hr	73	5200
600 g 研磨 1 hr	80	5400
600 g 研磨 3 hr	90	5900
900 g 研磨 0.5 hr	68	4900
900 g 研磨 1 hr	71	5100
900 g 研磨 3 hr	81	5400

(3)元素組成分析

以 XRF 和 EDS 儀器對煉鋼爐碴原料進行元素組成分析，結果如表 3 所示。元素組成分析結果中可發現，煉鋼爐碴原料的元素組成大多以 Ca、Si 為主。

表 3　煉鋼爐碴原料元素組成分析結果

	煉鋼爐碴原料 (XRF)	煉鋼爐碴原料 (EDS)	SS3000 (EDS)	SS7300 (EDS)
化學元素	(wt. %)	(at. %)		
Ca	65.46	58.03	61.22	61.72
Si	13.84	18.71	18.27	22.98
Mg	6.32	6.87	6.82	5.27
Al	1.42	2.52	1.95	1.5
Fe	2.95	-	-	0.91
Mn	1.56	-	-	-
C	2.035	-	-	-
N	1.25	-	-	-
F	0.59	11.22	9.28	4.64
P	0.09	-	-	-
Cl	0.01	-	-	-
K	0.05	-	-	-
V	0.13	-	-	-
Cr	3.91	-	-	0.84
Ni	0.11	-	-	-
Cu	0.03	2.03	2.14	2.14
Zn	0.04	-	-	-
Sr	0.03	-	-	-
Zr	0	-	-	-
Nb	0.01	-	-	-
CaO/SiO_2	3.09	2.02	2.19	1.75
	99.835	99.38	99.68	100

(4)晶相組成分析

將煉鋼爐碴之樣品以 XRD 進行礦物的晶相組成分析，其結果如圖 4、圖 5 和圖 6 所示。由結果可看出，在鈣質成分的部分，本研究所使用的煉鋼爐碴原料含有大量的矽酸二鈣(C_2S)活性礦物成分和微量的氫氧化鈣($Ca(OH)_2$),顯見本研究的煉鋼爐碴原料具有作為卜作嵐材料之潛力。而在可能造成體積膨脹的游離氧化鈣(f-CaO)和游離氧化鎂(f-MgO)，在分析結果有觀察到少量氧化鈣(CaO)的存在，氧化鎂(MgO)在圖譜上幾乎沒有出現，推測鎂質化合物主要是以鈣鎂橄欖石(CMS)的惰性礦物形式存在，綜觀上述分析結果，本研究所用的煉鋼爐碴原料仍有產生體積膨脹之健性問題的可能性。

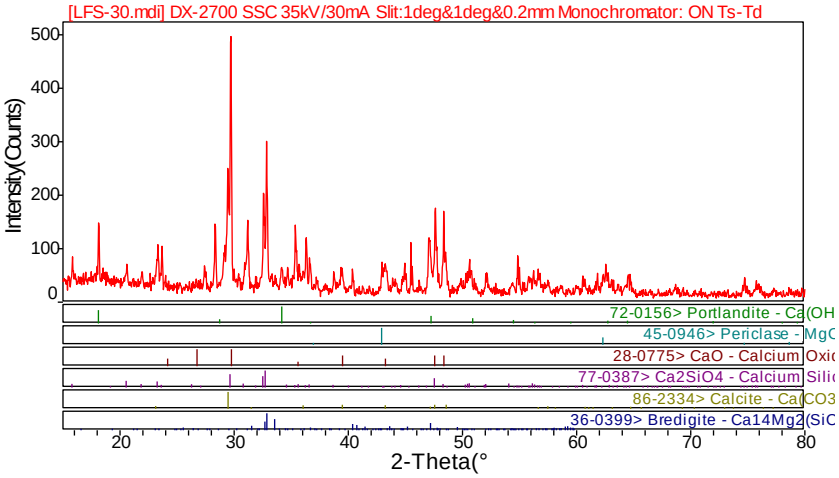


圖 4　煉鋼爐碴原料 XRD 分析結果

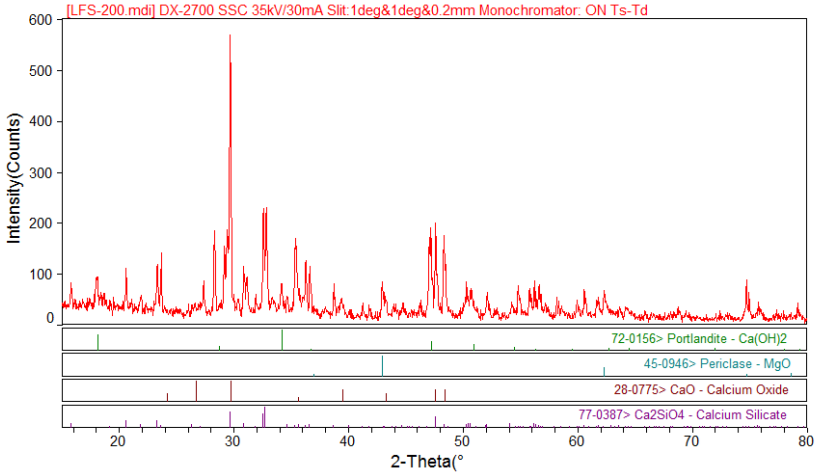


圖 5　SS3000 XRD 分析結果

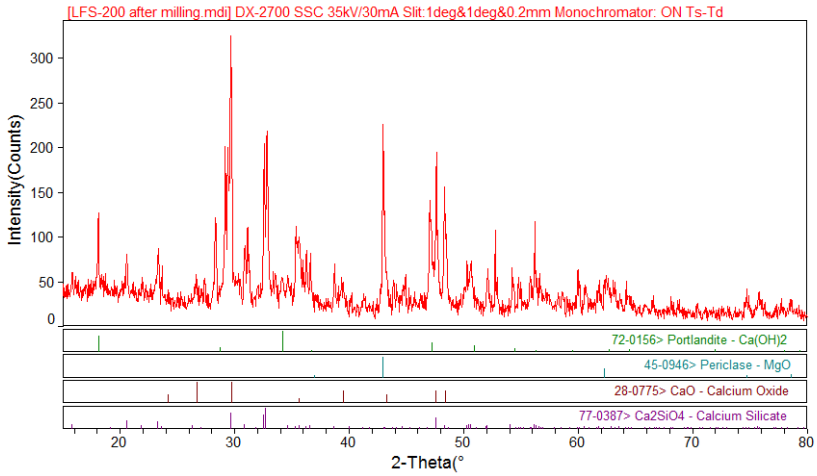


圖 6　SS7300 XRD 分析結果

(5)強度發展趨勢

將兩種細度(3,000 cm^2/g, SS3000 及 7,300 cm^2/g, SS7300)的煉鋼爐碴細粉料，取代 10 %~50 %的卜特蘭 I 型水泥，並製備成砂漿試體，分別在 1、3、7 和 28 天四個齡期進行抗壓強度試驗，探討爐碴水泥砂漿早期和後期的強度表現及強度發展趨勢。

圖 7 為 SS3000 煉鋼爐碴細粉料替代水泥比例和抗壓強度發展趨勢圖。從圖中可以看出，不同於 OPC 對照組的強度發展在七天齡期時已開始趨緩，10~30 %替代量的 SC3000 水泥砂漿之強度在晚齡期仍有持續發展的趨勢，雖然早期抗壓強度略低於 OPC 對照組，但在晚期時強度表現已經接近甚至超過 OPC 對照組。在高替代量(40%、50%)的部分，成長幅度明顯不如 10~30%替代量明顯，這表示在替代水泥比例過高的情況下，煉鋼爐碴無法經由卜特蘭水泥的水化反應得到足夠支持其卜作嵐水化反應持續發生的鹼性物質($Ca(OH)_2$)，而使強度表現不甚理想，若欲將煉鋼爐碴作為卜作嵐材料使用，其替代水泥之比例不宜過高。

圖 8 為 SS7300 煉鋼爐碴細粉料替代水泥比例和抗壓強度發展趨勢圖。各替代量在七天齡期後皆已沒有明顯的強度發展，且除了 10~20 %替代量時可以有接近 OPC 對照組之強度，其餘替代量之強度皆遠遜於 OPC 對照組。

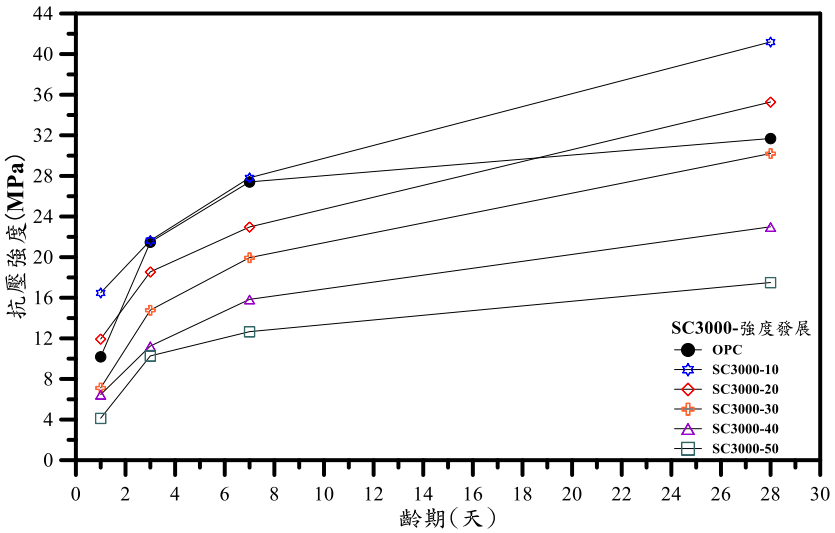


圖 7　SC3000 抗壓強度發展趨勢

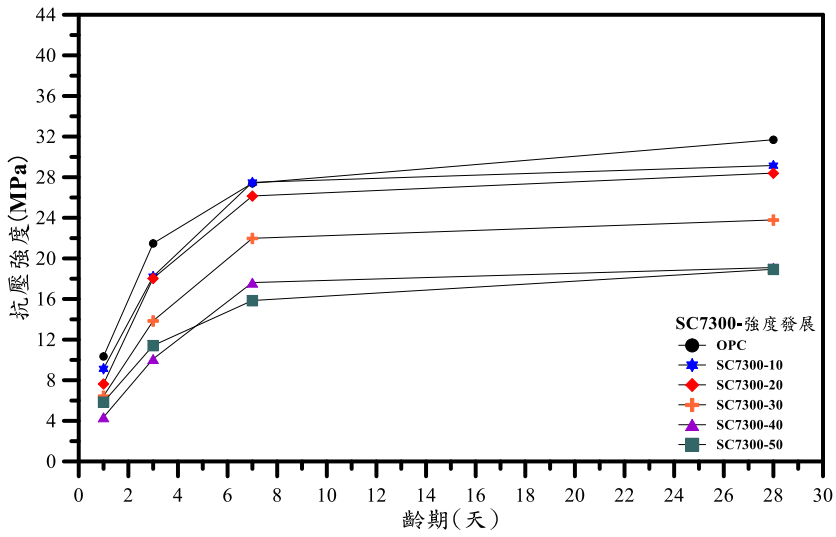


圖 8　SC7300 抗壓強度發展趨勢

(6)體積穩定性

本研究將 SS3000 和 SS7300 兩種煉鋼爐碴細粉料，以 10 %、20 %和 50 %比例替代卜特蘭 I 型水泥製備成 SC3000 和 SC7300 兩組砂漿長棒試體，將試體浸泡於 70℃之熱水槽中，觀察細度變化和煉鋼爐碴用量對體積膨脹之影響。

膨脹試驗結果如圖 9 和圖 10 所示。試驗結果顯示，隨著煉鋼爐碴替代水泥之比例提升，SC 砂漿試體棒的膨脹量也隨之增加，但在 10 %和 20 %替代量時，其膨脹量僅略高於 OPC 對照組砂漿棒試體，因此可推斷，在較低替代量的情況下，煉鋼爐碴不至於對砂漿試體之體積穩定性造成影響。

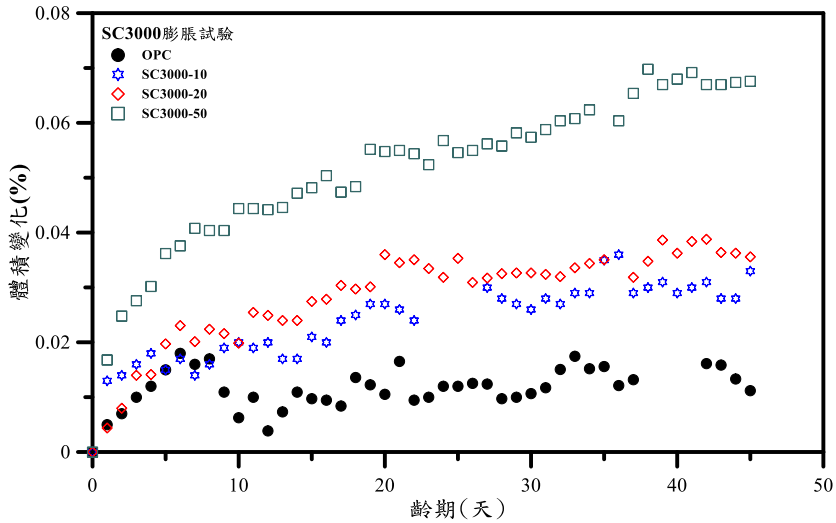


圖 9　SC3000 砂漿試體膨脹趨勢

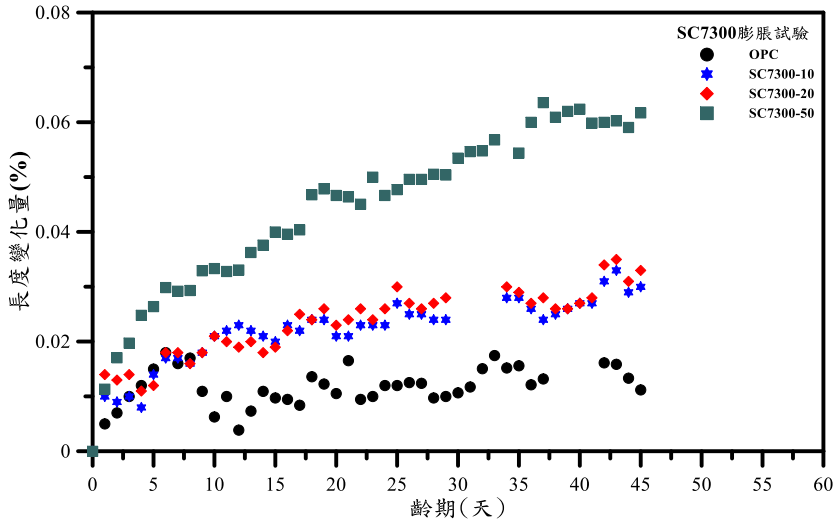


圖 10　SC7300 砂漿試體膨脹趨勢

乾縮為影響混凝土體積穩定性的關鍵因素之一，若乾縮量過大可能導致混凝土結構中產生裂隙，而對耐久性和強度等工程特性造成不利的影響。卜作嵐材料加入混凝土中對乾縮機制之影響目前尚無定論，Young[5]指出，若經適當養護則可減少乾縮量，反之則會造成較一般混凝土更大的乾縮量。為評估煉鋼爐碴做對乾縮量之影響，將 SS3000 和 SS7300 兩種煉鋼爐碴細粉料，以 10 %、20 %和 50 %比例替代卜特蘭 I 型水泥製備成 SC3000 和 SC7300 兩組砂漿長棒試體，觀察細度變化和煉鋼爐碴用量對乾縮量之影響，試驗結果如圖 11、圖 12 所示。

從研究結果中可看出，整體砂漿棒的乾縮主要分為兩個階段。自養護水槽取出後起算，7 天齡期時之乾縮量達到總乾縮量的 77 %。第二階段的收縮則發生在 7~25 天齡期，此時雖然仍有持續之乾縮行為，但已開始逐漸趨緩，直到 25 天齡期時，乾縮行為已經收斂。

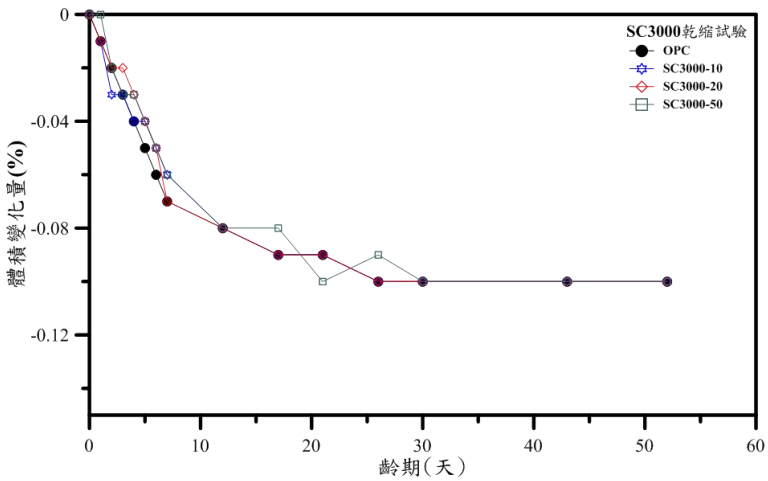


圖 11　SC3000 砂漿試體乾縮趨勢

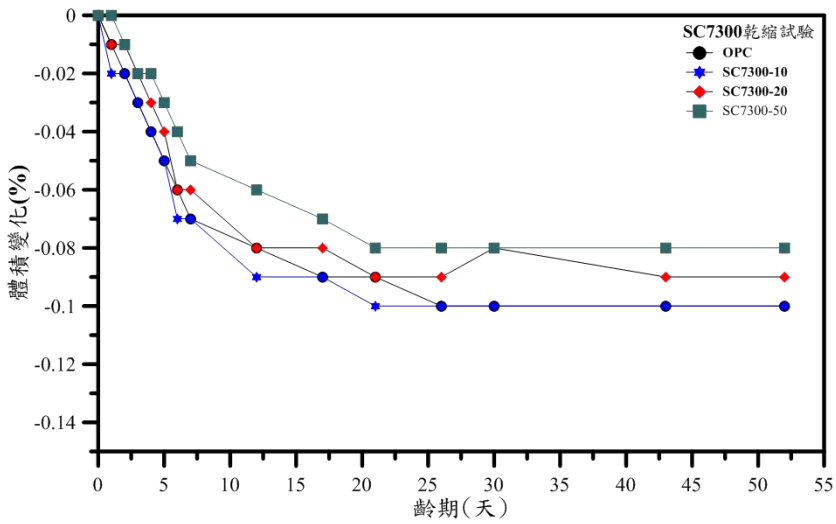


圖 12　SC7300 砂漿試體乾縮趨勢

四、結論與建議

本研究藉由將煉鋼爐碴資源化再利用作為膠結材料的方式，來達到工業副產品去化及減少水泥使用量之目的。第一部份實驗，在取得原料後先進行原料基本特性分析，作為後續實驗設計和原料處理的參考依據。第二部份實驗 SC 砂漿工程特性試驗，探討煉鋼爐碴的卜作嵐水化特性和粉料細度變化對水化作用的影響。茲將試驗結果整理歸納如下。

1.結論

(1)化學特性分析結果顯示，煉鋼爐碴原料中含有大量的鈣、矽成分，並觀察到 C2S、CaO 和 MgO 等晶相，化學成份和晶相組成相當接近卜特蘭水泥和常用的卜作嵐材料，顯示本研究所用之煉鋼爐碴具有作為卜作嵐材料的潛力，但也存在體積膨脹之疑慮。

(2)爐碴水泥(SC)砂漿工程特性試驗的結果顯示，煉鋼爐碴替代部分水泥時，直接通過#200 標準篩的煉鋼爐碴細粉料和原料經研磨處理後通過#200 標準篩的煉鋼爐碴細粉料，抗壓強度活性指數均符合卜作嵐材料之規範。雖然在強度發展趨勢上，直接通過#200 標準篩的煉鋼爐碴細粉料有較好的表現，但考量到增加煉鋼爐碴去化量之目的，仍建議將煉鋼爐碴原料先進行研磨處理。

2.建議

(1)本研究對水化作用行為之觀察多著重在較早期之反應，然而在抗壓強度發展趨勢的試驗結果中，觀察到多組試驗配比的強度發展明顯尚未

趨緩。有鑑於水化作用為一歷時甚長的反應機制，若欲實際將煉鋼爐碴作為工程上應用的膠結材料，仍須對後續長齡期的力學表現、體積穩定性和耐久性等工程特性作進一步的探討，深入了解煉鋼爐碴資源化作為膠結材料的長期水化反應行為，避免可能衍生的不良影響。

(2)相較於前人研究僅以熱壓膨脹試驗探討膠結材料是否符合規範標準，本研究的膨脹試驗著重於探討煉鋼爐碴的膨脹歷時行為，但考量到在工程上應用時，其膨脹量是否符合標準仍須經由熱壓膨脹等標準規範訂定之試驗方式評估，故建議後續可將本研究所用的膨脹試驗結果和熱壓膨脹試驗等標準規範試驗之結果進行比較，並建立一套可同時探討歷時膨脹行為和評估膨脹量標準的試驗方式。

五、參考文獻

1. 林世欽，台灣地區水泥製造業 NOX 與 CO2 排放特性及 DeNOX 設施成效探討，中央大學環境工程研究所碩士學位論文，96 年。
2. 黃文星、付建勛、林偉凱，台灣金屬資源再生技術之現況與展望， 科學發展月刊，第 457 期，第 92~96 頁，90 年。
3. 蔡和生，鹼活化還原碴砂漿之工程與環境特性研究 國立成功大學環境工程研究所碩士學位論文，95 年。
4. 林庭亦，電弧爐還原渣再生應用於高性能混凝土性質之研究，國立台灣科技大學營健工程系碩士學位論文，92 年。
5. Young, J.F., S. Mindess & D. David . "Concrete." United States: Prentice Hall Publisher. 2003.

國家圖書館出版品預行編目

綠色技術與工程實務研討會論文集. 106 年 / 經濟部工業局, 財團法人台灣產業服務基金會著. -- 初版. -- 臺北市 : 工業局, 產業服務基金會, 民 106.11
面 ; 公分
ISBN 978-986-05-3852-6 (平裝附光碟片)
1.環境保護 2.職業衛生 3.文集

445.907 106019913

106 年綠色技術與工程實務研討會論文集

出版日期：中華民國 106 年 11 月
發 行 人：呂正華
總 編 輯：凌韻生
審查委員：李公哲、李育明、胡憲倫、張祖恩、張添晉、歐陽嶠暉、鄭福田、顧洋(依姓氏筆劃排列)
編輯企劃：陳良棟、王義基、賴俊甫、陳見財、陳志銘、葉雅馨、薛玉佳
發 行 所：經濟部工業局
出 版 所：經濟部工業局
台北市信義路三段 41-3 號
TEL：(02)2754-1255 FAX：(02)2704-3753
http://www.moeaidb.gov.tw
財團法人台灣產業服務基金會
台北市四維路 198 巷 39 弄 14 號 1 樓
TEL：(02)2325-5223 FAX：(02)2784-4186
http://www.ftis.org.tw
版次：初版
GPN：1010601724
ISBN：978-986-05-3852-6
其他類型版本說明：本書另有電子版本，同時刊載於 http://proj.ftis.org.tw/eta/
展 售 處：國家書店：台北市松江路 209 號 1 樓(02-2518-0207)
http://www.govbooks.com.tw/
五南文化廣場：台中市軍福七路 600 號(04-2437-8010)
http://www.wunanbooks.com.tw/
美工排版：財團法人台灣產業服務基金會
印刷承製：致琦企業有限公司
定 價：新台幣伍佰元整
著作權利管理資訊：經濟部工業局保有所有權利。欲利用本書或部分內容者，需徵求經濟部工業局同意或書面授權。
聯絡資訊：圖書室(02)2754-1255 轉 3916