經濟部

108年
論文集

綠色技術與工程實務研討會

經濟部工業局 編印

序

文明的發展，帶動了經濟起飛、生活的富庶，然而資源的耗竭、氣候變遷的危機亦正在影響我們及下一代的未來。因此，聯合國的永續發展會議通過了 2030 年永續發展議程，以 17 項永續發展目標為核心，在兼顧「經濟成長」、「社會進步」與「環境保護」等三大面向之下開展出積極的行動方案，規劃出永續發展目標，用以推動世界永續發展的未來。台灣雖非聯合國成員，然而為能善盡地球村一份子，本局除積極推動國內產業升級轉型、協助產業有效發展綠色創新、環境友善之產品與技術外，並持續強化清潔生產、污染防治、綠色工廠與資源再生的工作。此外，亦透過循環經濟的思維，提升資源使用效率，減少廢棄物產生，以達到資源使用效率最大化，邁向循環經濟的時代、永續經營目的。

本局為提供產、官、學、研各界之經驗與環保技術交流平台，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「108 年綠色技術與工程實務研討會」，以「空氣品質與節能減碳技術類」、「資源減耗及再利用技術類」、「產業節水及水資源再生處理類」、「循環經濟與環境管理類」為主軸，廣納各界實務經驗，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 37 篇論文，包含口頭發表 31 篇、海報發表 6 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，感謝論文審查委員、本局相關同仁及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，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 108 年 11 月

目　錄

論文簡報發表議程1—空氣品質與節能減碳技術類

1-1 能源密集產業自願節能減碳投資回收年限分析

林宣宏、陳怡臻、鄭宥騰、陳裕民、王登楷----------1-1

1-2 製造業鍋爐採行低碳燃料與汙染防治設施之成本效益分析

吳冠諭、林育群、王秋霖、何皇智---------- 1-13

1-3 低溫 SCR 脫硝觸媒研製與模廠測試

曾志富、李宗諭、洪嘉圻、林國璋、郭麗雯、白曛綾---------- 1-31

1-4 鈣迴路二氧化碳捕獲系統穩定運轉示範驗證

周揚震、陳威丞、黃欽銘、徐恆文、萬皓鵬---------- 1-47

1-5 低碳熱風供應系統開發與智慧化溫控技術建立

林佩勳、陳俊勳、陳佐睦、伍健鵬、楊沛琨、陳易聰---------- 1-59

1-6 煉鋼電弧爐機電系統(含監控)改造效能提升實例探討

王清福、蘇茂豐---------- 1-75

1-7 噴塗製程 VOCs 廢氣管末淨化處理系統之應用

林詩婉、粘愷峻、張豐堂---------- 1-89

論文簡報發表議程2—資源減耗及再利用技術類

2-1 化煉鋁爐渣為乾燥設備產業用多孔陶瓷除濕轉輪性能研究
王多美、楊昇府、徐啟振、李灝銘、李恆毅----------2-1

2-2 利用無機聚合技術安定化轉爐石膨脹性之研究
林冠宇 、鄭大偉、 李韋皞、 吳佳正---------- 2-17

2-3 柑橘類生廚餘廢棄物使用超臨界醇熱炭化技術產製生物炭材料
謝哲隆、廖天惠、廖依如、周孟源、林金霖、游智婷---------- 2-31

2-4 焚化灰渣合成綠色材料之技術開發與應用研究
陳志成、林以潔、許育婷、張筱涵、范仲翔---------- 2-47

2-5 電弧爐煉鋼氧化碴應於道路瀝青混凝土鋪面之推動成效
賴彥博、鄭淑芬、劉蘭萍、林登峰、黃群真---------- 2-59

2-6 嘉義縣鹿草焚化廠焚化灰渣熔融資源化之研究
陳詩婷、陳盈良、張根穆、古渡周作---------- 2-73

2-7 還原碴廢棄物回爐改質為高應用價值氧化碴再生粒料之低能耗技術開發
林啟明、何長慶、凌宇康、邱永承、江謝立恆、吳威德---------- 2-89

2-8 水性印刷零排放控墨系統
李謹丞----------2-107

論文簡報發表議程3—產業節水及水資源再生處理類

3-1 以生物處理法處理金屬表面處理業廢水之可行性評估
陳冠霖、彭俊平、王詩磊 ----------3-1

3-2 以電聚浮除法處理織布廢水再生技術之研究
劉柏緯、楊騏瑞 ---------- 3-11

3-3 正滲透結合冷卻系統於低濃度氫氧化四甲基銨廢液資源化之研究
劉博文、翁煥廷、陳孝行 ---------- 3-19

3-4 染整廢水回收再利用之循環技術
林明旺、劉柏緯 ---------- 3-33

3-5 國產薄膜過濾器應用於化學研磨廢水回收效果實測
吳成湖、曾裕霖 、陳韋名、劉朝凱---------- 3-41

3-6 電混凝法應用於冷卻水循環回用之研究
蔡嘉恩、翁煥廷、陳孝行 ---------- 3-55

3-7 廢水氨氮系統精進實例
盧彭潭、黃俊評、黃冠哲 ---------- 3-67

3-8 前進印度進行廢水處理回收現場模廠試驗結果
林正祥、李岳翰 ---------- 3-85

論文簡報發表議程4—循環經濟與環境管理類

4-1 以循環經濟觀點分析企業永續之變革-以電子產業供應鏈為例
陳怡潔、李育明 ----------4-1

4-2 永續活動與碳中和驗證案例：以 2019 海峽兩岸氣候變遷與能源永續發展論壇為例
葉品君、李育明 ---------- 4-13

4-3 電子產業於廢棄物減量與循環經濟的落實
黃聖夫、周君頤、何宗仁、張欣榮、吳聲昌 ---------- 4-23

4-4 半導體封裝減薄研磨廢水回收技術與矽泥再利用
彭柏頤、蔡宛芯、黃任榆、吳俊湧 ---------- 4-33

4-5 借鏡電力需量反應，建立短期空污調節誘因機制
鄭柏彥、李宜螢、蘇漢邦 ---------- 4-39

4-6 評估我國製造業中分類行業於氣候變遷下的潛在風險
蔡易廷、王登楷 ---------- 4-49

4-7 免調質鋼產業鏈減碳效益分析與碳足跡認證
吳致呈、黃文輝、呂紹為、朱志弘、賴力行 ---------- 4-61

4-8 再生能源微水力發電之研究與案例實現
陳守仁、李學龍、管建明 ---------- 4-71

海報發表

1. 軋鋼廢油水脫水減量
謝政廷 ----------P-1

2. 華新麗華不銹鋼煉鋼爐碴之綠色技術與工程實務
楊謹隆、何錦淵、陳國輝 ---------- P-13

3. 廢太陽能電池模組回收再利用合成吸附材料之研究
劉姵吟、陳志成、林以潔 ---------- P-29

4. 燃煤飛灰與混燒煤灰材料特性分析及資源化再利用可行性評估
楊士鋒、林宸毅、吳明富、黃偉慶 ---------- P-37

5. 建構放流水中尿素濃度背景值
陳芷晴、吳鳴峯、黃欣栩 ---------- P-51

6. 養豬業廢水現行三段式處理系統強化與實廠改善-廢水處理資源化再利用案例
詹德炬、沈柏余 ---------- P-63

能源密集產業自願節能減碳投資回收年限分析

林宣宏*、陳怡臻*、鄭宥騰*、陳裕民**、王登楷***

摘　要

經濟部工業局長期以來致力於推動製造業節能減碳工作，於95年至107年間與鋼鐵業、石化業、水泥業、造紙業及紡織業（人纖業、棉布印染業及絲綢印染業）等能源密集產業公協會合作，共同推動自願節能減碳工作，總計投入548億元執行11,602項減量措施，節能量311萬公秉油當量，並減少溫室氣體排放量達1,333萬公噸CO_2e。

一般而言，廠商會優先執行投資金額較低或投資回收年限(措施投資成本/措施節省能源成本)低於2年的節能減碳措施，因此本研究依歷年產業溫室氣體自願減量推動經驗，探討近5年能源密集產業自主執行節能減碳措施的投資回收年限變化，發現廠商每年執行措施的投資回收年限低於2年者仍占比最高，但比例卻逐年減少，反之投資回收年限達6年以上之措施數占比逐年升高。顯示廠商優先執行易改善、投資回收年限短之措施，而投資成本較高(一般投資回收年限較長)之措施雖非廠商優先選項，但基於節能效益仍會逐步執行。本研究進一步分析各節能減碳措施以瞭解廠商推動節能減碳措施的改善方法，以製程類別來看，低於2年的措施，改善方法以能源管理(如製程/設備操作參數調整)及設備改善(加裝額外設備提升能效等)為主。投資回收年限在2年以上低於6年及6年以上之間的措施，改善方法以設備改善及設備汰舊換新為主。故後續需工業局等政府單位，提出可協助產業積極落實設備汰舊換新的相關資源或協助，以促使產業持續落實節能減碳工作。

【關鍵詞】能源密集產業、自願節能減碳、節能量、回收年限、溫室氣體

---

*財團法人台灣綠色生產力基金會　工程師

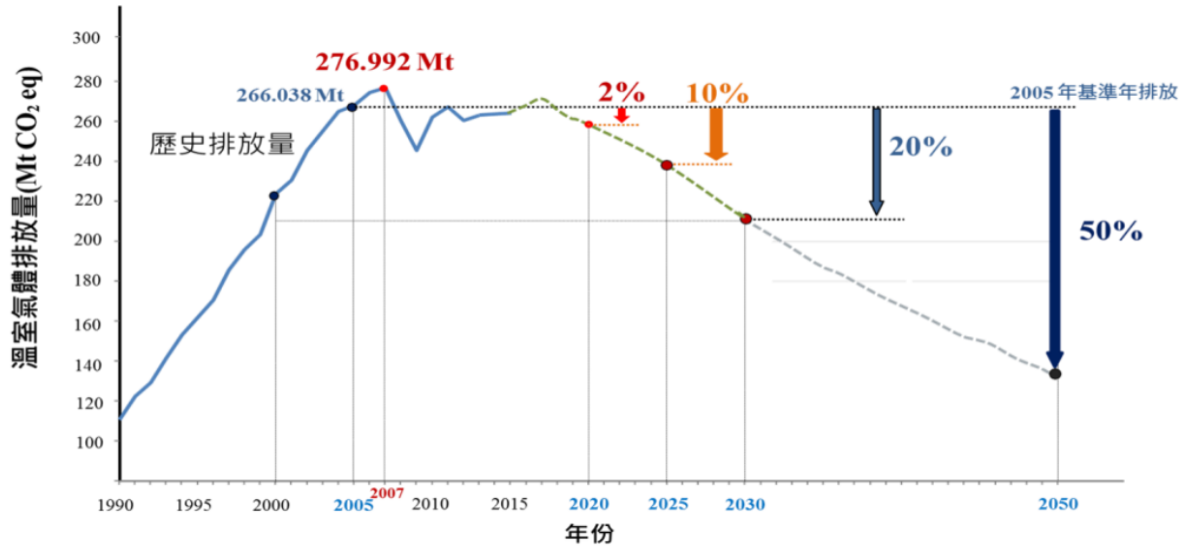
**財團法人台灣綠色生產力基金會　專案經理

***財團法人台灣綠色生產力基金會　經理

一、前　言

經濟部於京都議定書生效年(94 年)，即號召與鋼鐵業、石化業、水泥業、造紙業及紡織業（人纖業、棉布印染業及絲綢印染業）等能源密集產業公協會率其所屬會員廠商，共同推動自願節能減碳工作，以因應國際減碳趨勢。此外，我國業於 99 年成立行政院節能減碳推動會，擬定國家節能減碳總計畫，以協助產業因應氣候變遷，並促進產業升級。

為更積極推動我國自願性節能減碳工作，我國行政院環境保護署於 104 年 7 月 1 日公告施行「溫室氣體減量及管理法(以下簡稱溫管法)」，更是奠定我國因應氣候變遷的重要里程碑，也代表我國將正式邁入減碳的新紀元。為達成溫管法明訂之我國長期減量目標「139 年(2050 年)溫室氣體排放量降為 94 年(2005 年)排放量 50%以下」，及呼應我國因應巴黎協定所提出的「119 年(2030 年)溫室氣體排放量降為 94 年(2005 年)排放量再減 20%」減量承諾。行政院已於 107 年 1 月 23 日公布「第一期(105 年至 109 年)溫室氣體階段管制目標」與我國減碳路徑規劃，係採先緩後加速的減碳路徑設定：(1)109 年(西元 2020 年)溫室氣體排放量較基準年 94 年(2005 年)減量 2%為目標、(2)114 年(2025 年)較基準年減量 10%為努力方向、(3)119 年(2030 年)較基準年減量 20%為努力方向，如圖 1 所示。至此，我國溫室氣體短、中與長期的減碳目標皆已明確。



資料來源：行政院環境保護署第一期溫室氣體階段管制目標

圖 1　我國排放現況與短中長期減量目標

二、能源密集產業自願節能減碳績效

自 94 年 2 月 16 日「京都議定書」生效後，宣告正式邁入減碳新時代，已開發國家則率先訂定減碳目標，承擔減碳義務與歷史責任。我國為因應溫室氣體減量之全球議題，爰宣示對氣候變化綱要公約採無悔政策，以與國際接軌。

因此，經濟部工業局自 95 年度起推動產業自願節能減碳工作。參與自願節能減碳廠商於 95 年至 107 年，總計已投入新台幣 548 億元推動減量工作，共計執行 11,602 項減量措施，節能減碳績效達 1,333 萬公噸 CO_2e。

分析歷年能源密集產業溫室氣體自願減量成效約可分為三個階段，第一階段為 95 年至 98 年，每件減量措施之平均減碳貢獻量顯著大於 1,000 公噸 CO_2e(平均約為 2,200 公噸 CO_2e)；第二階段為 99 年至 103 年，每件減量措施之平均減碳貢獻量約為 1,000 公噸 CO_2e(平均約為 1,212 公噸 CO_2e)；第三階段為 104 年至 107 年，每件減量措施之平均減碳貢獻量小於 1,000 公噸 CO_2e(平均約為 725 公噸 CO_2e)，如圖 2 所示。由每件減量措施之平均減碳貢獻量呈現逐年下滑的趨勢，可推知廠商在推動節能減碳工作上，其效益逐年遞減，需政府單位提出具體政策，如協助產業積極落實設備汰舊換新的相關資源或協助，以促使產業持續落實節能減碳工作。

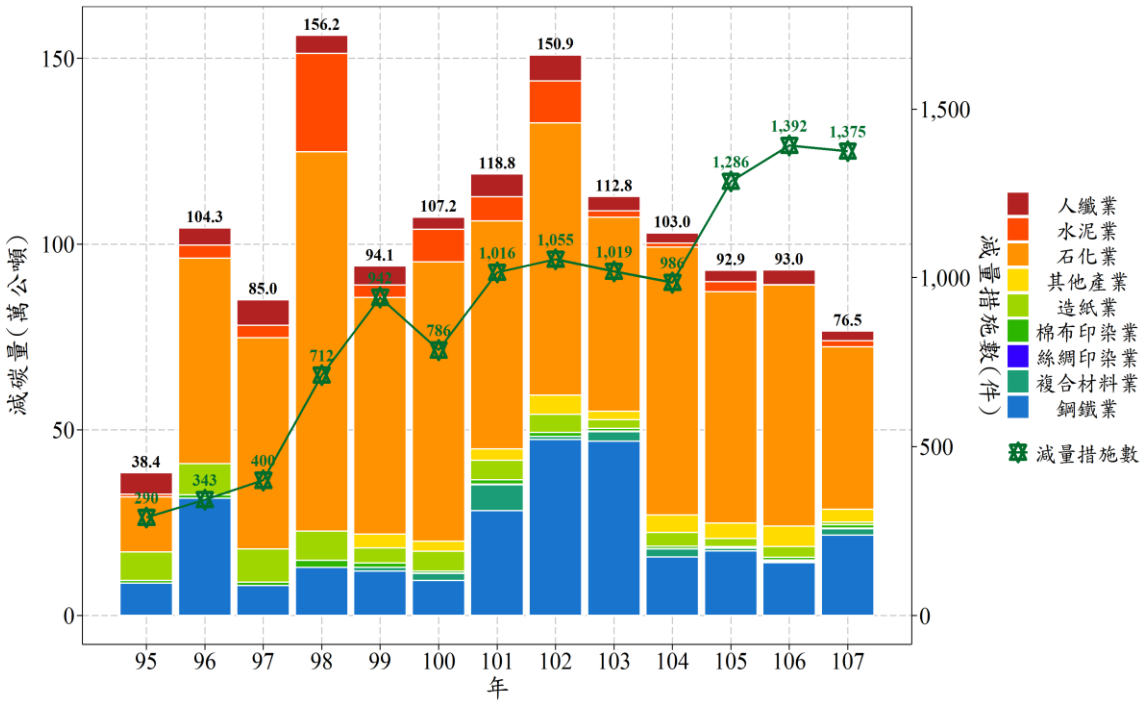


圖 2　自願節能減碳措施數與減碳量趨勢圖

三、能源密集產業自願節能減碳投資回收年限分析

即使減碳工作日趨艱難，但國內廠商平均每年仍維持新增節能減碳績效達 70 萬公噸 CO_2e 以上。本研究針對近 5 年(103~107 年)製造業參與自願節能減碳措施進行分析，彙整各產業在「措施類別」及「節能方法類別」上所分析之回收年限包括(2 年以下、2 年至 6 年間及 6 年以上)3 個區間之年度變化趨勢，期以發掘各產業推動最有效益的節能減碳方法之及其特性，有助未來公部門規劃製造業節能減碳策略與措施。本研究之節能類別分類包含：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、電梯及其他等類別；節能方法分類包含：能源管理、汰舊換新、設備改善、廢棄物利用、熱回收、水回收、新設或增設、其他節能措施及非能源燃燒等方法。

從能源密集產業自願節能減碳研析結果發現，廠商每年執行措施的投資回收年限低於 2 年者仍占比最高，但比例卻逐年減少，反之投資回收年限達 6 年以上之措施數占比逐年升高，如圖 3 所示，此現象尤以石化業、造紙業最為顯著，其次為其他產業，以 107 年為例，其投資回收年限達 6 年以上之措施數占比分別為石化業約 35.5%、造紙業約 56.9%及其他產業約 28.4%，皆接近或大於 107 年能源密集產業平均占比(29.8%)，如圖 4 所示。

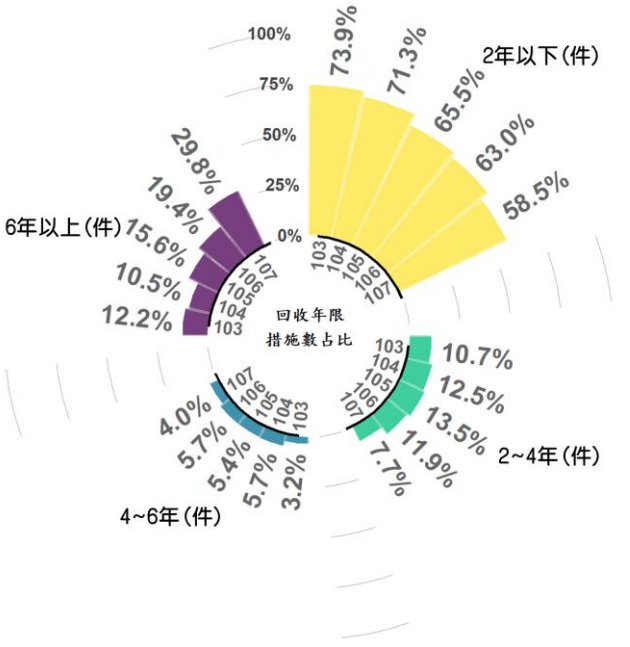


圖 3　能源密集產業近五年(103~107 年)減量措施分布

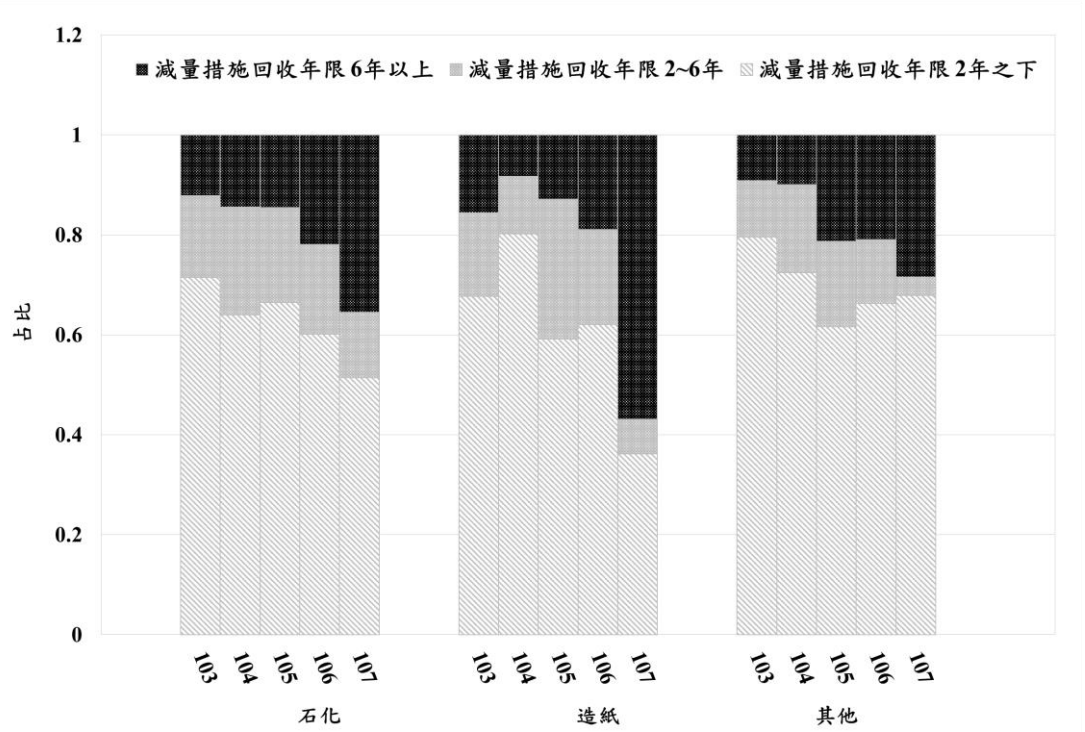


圖 4 石化業、造紙業及其他業近五年(103~107 年)減量措施回收年限占比分布

1.近五年(103~107 年)投資回收年限 2 年以下分析

研析 103~107 年能源密集產業自願節能減碳措施投資回收年限在 2 年以下之節能類別，主要落於「製程」類別之改善，共計推動減量措施為 1,869 件(占近五年度推動減量措施的 43.1%)，其他依序為「馬達(占 22.2%)」、「照明(占 12.1%)」、「空調(占 9.3%)」「空壓機(占 3.8%)」、「其他(占 3.2%)」、「鍋爐(占 2.2%)」及「蒸氣回收(占 2.0%)」。進一步針對主要節能減碳改善「製程」類別之節能方法分類分析，主要節能方法為「能源管理(占 46.9%)」，其他依序為「設備改善(占 35.7%)」、「非能源燃燒(占 4.7%)」、「熱回收(占 4.4%)」、「汰舊換新(占 4.0%)」及「新增或增設(占 2.5%)」，如圖 5 所示。

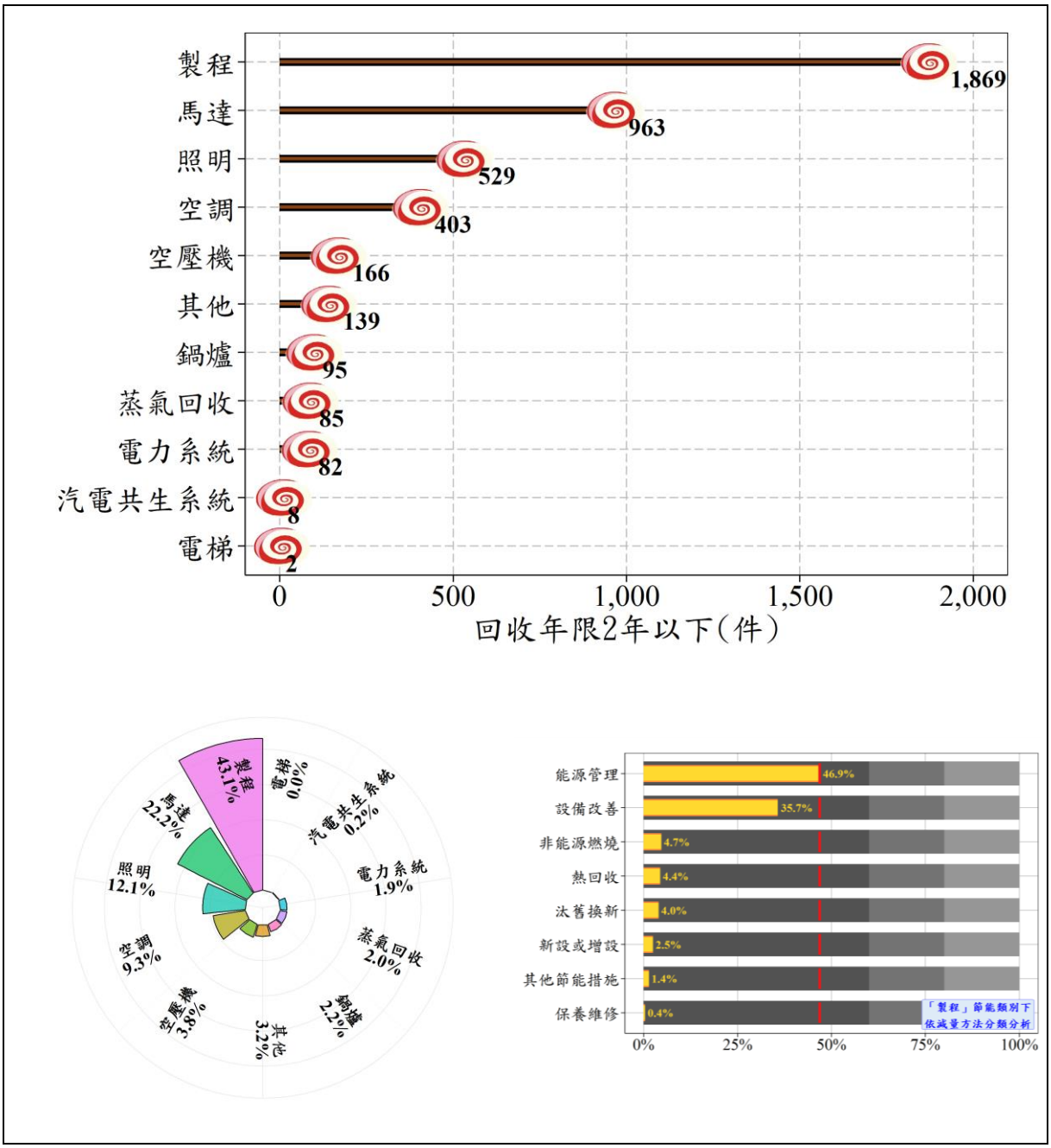


圖 5　103~107 年自願節能減碳措施投資回收年限在 2 年以下之分析圖

2.近五年(103~107 年)投資回收年限 2 年至 6 年間分析

研析 103~107 年能源密集產業自願節能減碳措施投資回收年限在 2~6 年以下之節能類別，主要落於「製程」類別之改善，共計推動減量措施為 268 件(占近五年度推動減量措施的 27.2%)，其他依序為「照明 (占 26.0%)」、「馬達(占 22.2%)」、「空調(占 11.7%)」「空壓機(占 5.2%)」、「其他(占 3.0%)」及「鍋爐(占 2.2%)」。進一步針對主要節能減碳改善「製程」類別之節能方法分類分析，主要節能方法為「設備改善(占 42.5%)」，其

他依序為「汰舊換新(占 29.4%)」、「能源管理(占 18.4%)」、「新增或增設(占 5.1%)」及「熱回收(占 2.8%)」，如圖 6 所示。

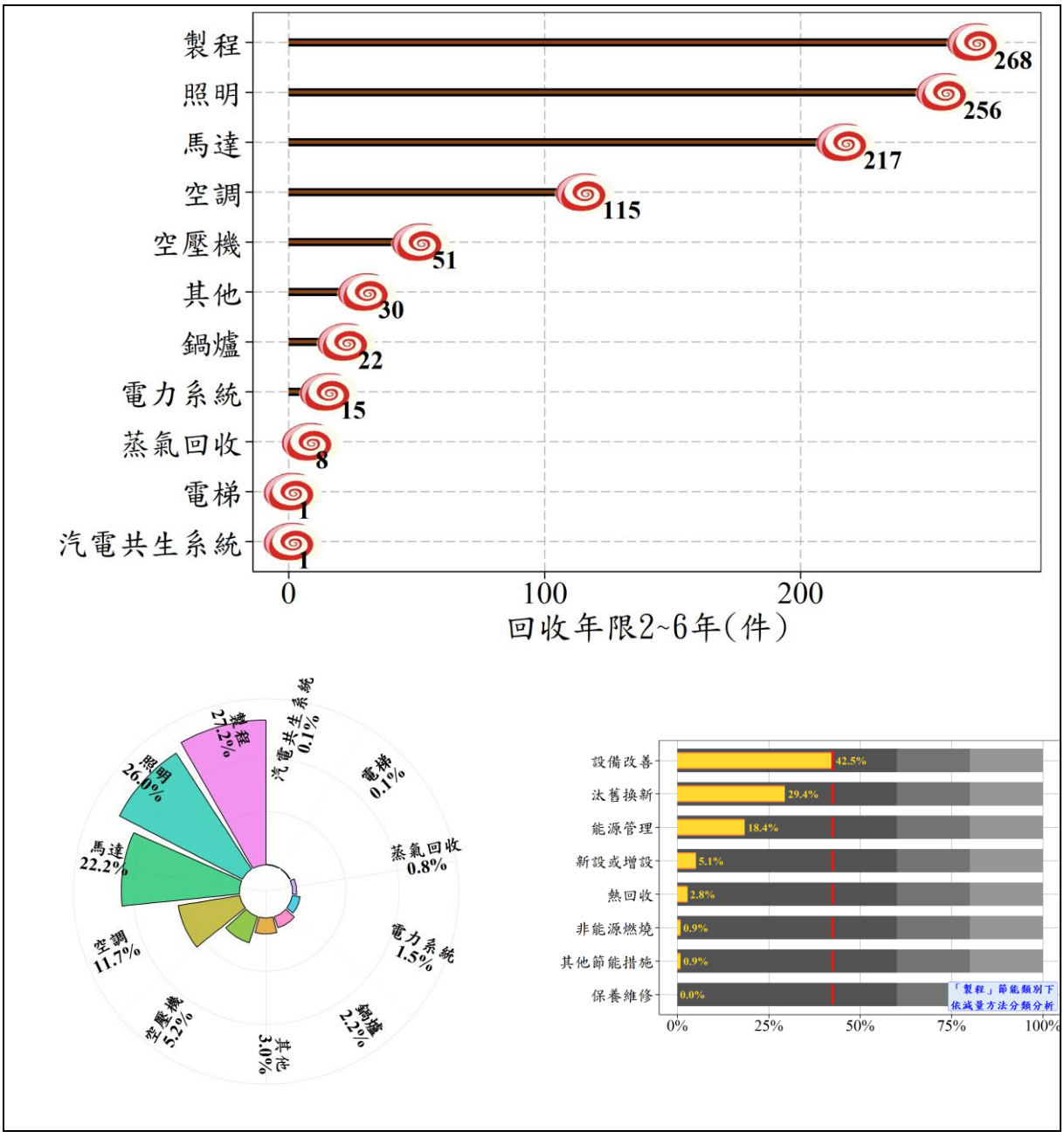


圖 6　103~107 年自願節能減碳措施投資回收年限在 2 年至 6 年間之分析圖

3.近五年(103~107 年)投資回收年限 6 年以上

研析 103~107 年能源密集產業自願節能減碳措施投資回收年限在 6 年以上之節能類別，主要落於「製程」類別之改善，共計推動減量措施為 214 件(占近五年度推動減量措施的 31.1%)，其他依序為「照明 (占 24.9%)」、「馬達(占 21.1%)」、「空調(占 8.4%)」、「電力系統(占 5.5%)」、

「其他(占 3.6%)」、「鍋爐(占 2.3%)」及「空壓機(占 2.3%)」。進一步針對主要節能減碳改善「製程」類別之節能方法分類分析，主要節能方法為「設備改善(占 42.5%)」，其他依序為「汰舊換新(占 29.4%)」、「能源管理(占 18.4)」、「新增或增設(占 5.1%)」及「熱回收(占 2.8)」，如圖 7 所示。

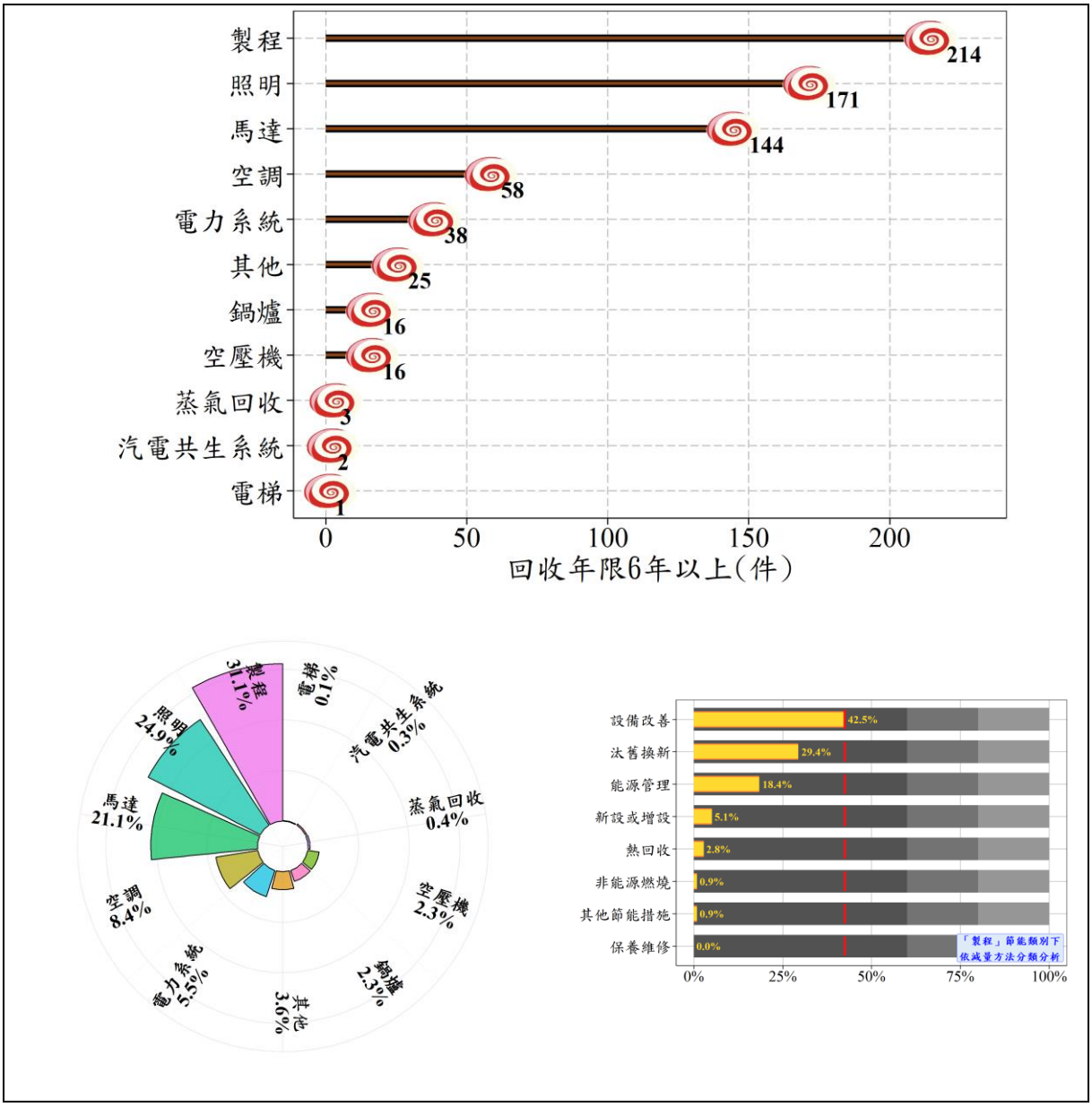


圖 7　103~107 年自願節能減碳措施投資回收年限在 6 年以上之分析圖

4.近五年(103-107 年)能源密集產業製程節能減碳成效

根據前述分析能源密集產業於製程類別之節能減碳作為，發現節能減碳措施投資回收年限在 2 年以下、2 年至 6 年間及 6 年以上等級距中，主

要節能減碳工作皆落於「製程」改善，因此本研究進一步針對「製程」類別改善作為，以節能方法進行探討，發現主要節能方法為能源管理，共推動 950 件節能減碳措施，其次為設備改善共執行 893 件節能減碳措施，如圖 8 所示。

進一步分析 107 年製程改善之方法，發現節能減碳措施投資金額以「汰舊換新」分類之貢獻為最高，為平均每件措施 2,343 萬元。節能減碳措施的減碳績效以「熱回收」分類之貢獻為最高，為平均每件措施 1,772 公噸，如圖 9 所示。而減碳成本則以「汰舊換新」分類，每噸減碳之所需投入費用最高，平均每噸 70,797 元，因此回收年限亦最高，平均回收年限為 12.99 年，如圖 10 所示。

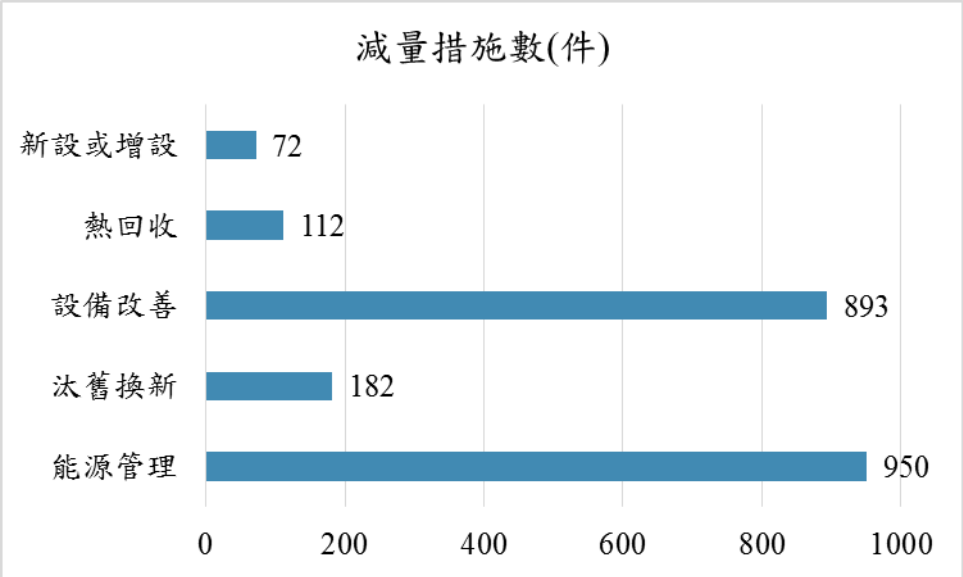


圖 8　能源密集產業 103-107 年製程類別之主要節能方法分析

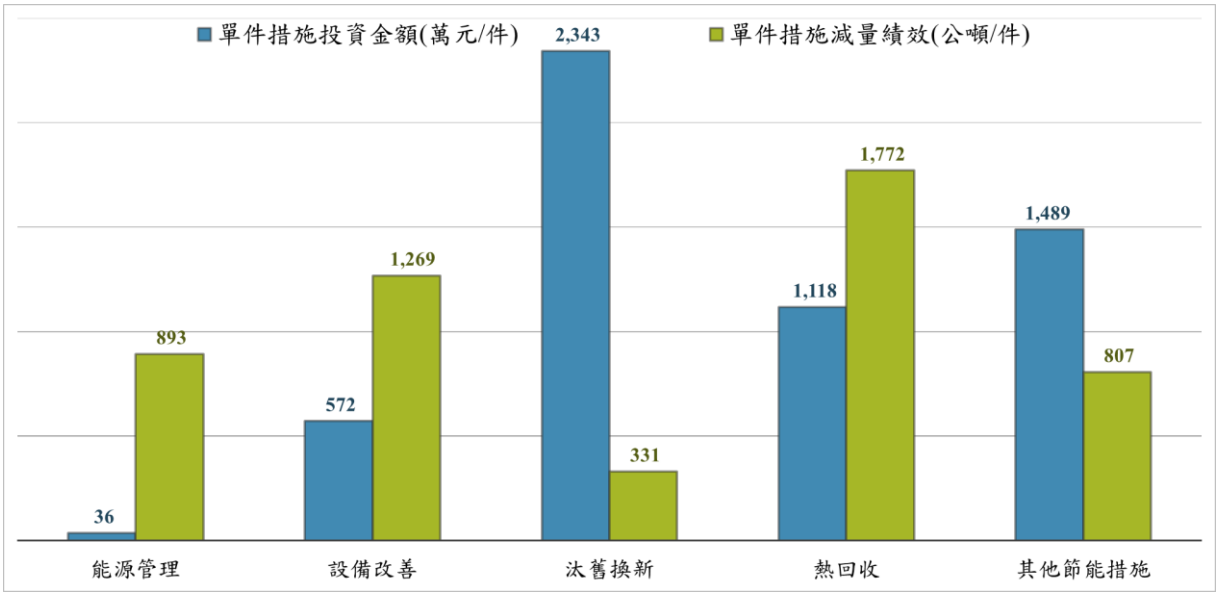


圖 9　能源密集產業 107 年製程類別之主要節能方法推動成效分析圖

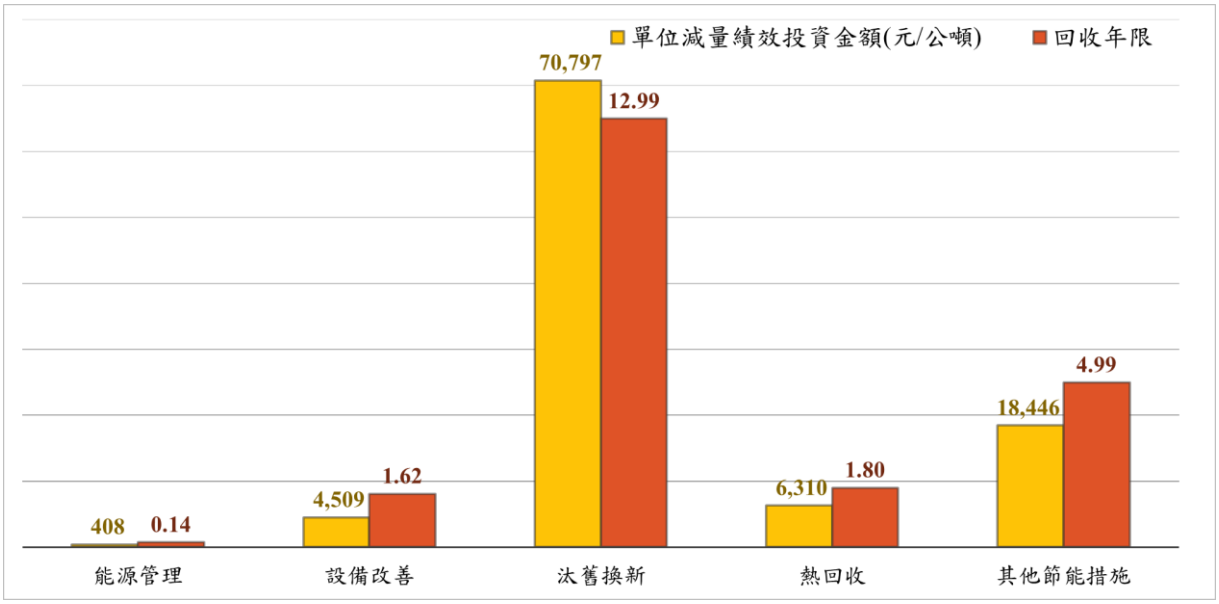


圖 10　能源密集產業 107 年製程類別之主要節能方法減碳成本與回收年限分析圖

五、結　論

為有效因應氣候變遷並逐年減緩溫室氣體排放量，工業局、各產業公協會及各廠商長期以來共同努力推動製造業節能減碳工作，在民國 95 年至 107 年間，我國製造業已創造溫室氣體減量 1,333 萬公噸 CO_2e 的亮眼成績。但

面對我國長期減量目標「2050 年溫室氣體排放量降為 2005 年排放量 50%以下」，及呼應我國巴黎協定所提出的「2030 年溫室氣體排放量降為 2005 年排放量再減 20%」減量承諾，後續製造業仍將面臨節能減碳的嚴格考驗。

一般而言，回收年限越低，則廠商對於節能減碳投資意願愈高(李堅明,2015)，與本研究分析近五年(103 年至 107 年)能源密集產業廠商自願性推動之節能減碳措施，以投資回收年限低於 2 年的措施占比最高(43.1%)之結果相同，惟本研究發現，近年來廠商執行投資回收年限低於 2 年的節能減碳措施占比呈逐年減少的趨勢，節能方法以能源管理為主；而投資回收年限達 6 年以上的節能減碳措施占比卻呈現逐年增加的趨勢，節能方法以設備改善為主。顯示初始投資成本低、投資回收期短的經濟價值高之節能減碳措施已逐步改善完成，若無其他如政府政策或產業鏈要求等外界因素，後續節能減碳成效將逐年趨緩。因此，發掘各產業具有推動效益及潛力的節能減碳措施，進而成為政府單位推動策略，將是政府單位未來的重要課題。

由於製造業廠商執行節能減碳工作越來越困難，而距離我國訂定的減量目標期限也越來越緊迫。因此，發掘各產業具有推動效益及潛力的節能減碳措施為政府應著重考量的策略及課題之一，從本研究的分析結果顯示製程類別節能減碳措施中單位減量績效投資金額及投資回收年限較低的措施為廠商優先選擇執行的措施，可作為掌握具有擴散潛力節能減碳措施的關鍵因子，同時可深入思考如何透過政策訂定合理可行的補助方案或獎勵機制或導入輔導機制，以提高廠商執行節能減碳工作意願，最終增加產業競爭力並達成我國減量目標。

六、參考文獻

1.「第一期溫室氣體階段管制目標」，行政院環境保護署，107 年 1 月。
2.107 年度產業溫室氣體管理與調適計畫，經濟部工業局，107 年 12 月。
3.李堅明等，臺灣能源大用戶節能投資影響因子實證分析，臺灣能源期刊，104 年 9 月。

製造業鍋爐採行低碳燃料與污染防治設施之成本效益分析

吳冠諭*、林育群*、王秋霖*、何皇智**

摘　要

因環保意識逐漸抬頭，製造業除了節省能源費用以外，亦積極降低二氧化碳排放量，以善盡企業社會責任。我國環保法規於 109 年起，針對固定污染源粒狀物排放調高管制標準，粒狀物排放量規範為 30 mg/Nm^3，部分燃料油鍋爐無法通過較嚴苛的環保規範，必須增設後端集塵設備或改用低碳燃料(天然氣)，因此所有製造業必須在這兩者之間做出改善的抉擇。

本文探討製造鍋爐各種燃料成本、維護成本、防治設備之成本分析，透過自償率、淨現值、內部報酬率等分析各成本收益比之間的關係。協助用戶深入了解鍋爐維護成本，改善成本以及經濟效益分析。更重要的是讓因地區限制無法進行低碳燃料替代之用戶，提供多元替代方案，期望透過適當的改善方法，符合環保規範、降低空氣污染。

【關鍵詞】低碳燃料、污染防治、溫室氣體減量

---

*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　副理

一、背景與現況

在全球暖化與氣候變遷影響下，國內外對於減碳的要求，長期加嚴趨勢已不可擋，國內已有「溫室氣體減量及管理法」訂定國家溫室氣體長期減量目標為「2050 年溫室氣體排放量降為 2005 年溫室氣體排放量 50%以下」、「國家自定預期貢獻(INDC)」國家減量目標為「2030 年溫室氣體排放量較 2005 年排放量再減 20%」等管制壓力。

107 年國內工業部門煤炭消費，總消耗量為 5,444.3 千公噸，其中化學材料製造業占 45.21%為最大宗，其次是水泥及水泥製品業，如表 1 近三年國內工業部門煤炭消費占比。

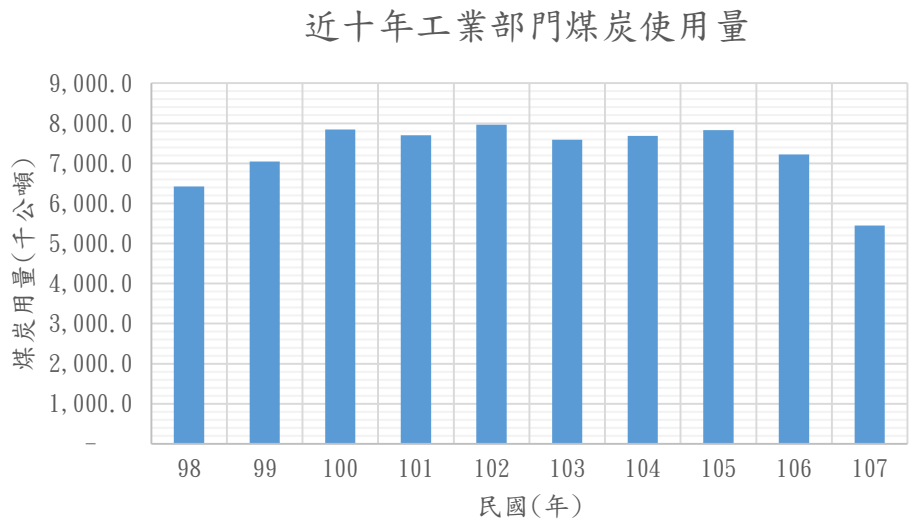
表 1　近三年國內工業部門煤炭消費

近三年國內工業部門煤炭消費						
年度	107		106		105	
項目	燃料煤	占比	燃料煤	占比	燃料煤	占比
	千公噸	百分比	千公噸	百分比	千公噸	百分比
食品飲料及菸草業	65.4	1.20%	72.0	1.00%	76.0	0.97%
紡織成衣及服飾業	535.8	9.84%	614.6	8.51%	642.5	8.21%
紙漿、紙及紙製品業	799.8	14.69%	652.6	9.04%	684.9	8.75%
化學材料製造業	2,461.3	45.21%	3,620.2	50.14%	3,988.2	50.97%
化學製品製造業	19.2	0.35%	17.8	0.25%	15.4	0.20%
橡膠製品製造業	6.0	0.11%	6.7	0.09%	8.0	0.10%
塑膠製品製造業	21.2	0.39%	18.7	0.26%	-	0.00%
水泥及水泥製品業	1,459.6	26.81%	1,474.7	20.43%	1,654.5	21.14%
其他	52.3	0.96%	510.0	7.06%	534.4	6.83%
電腦通信及視聽電子產品業	23.8	0.44%	232.6	3.22%	221.5	2.83%
總計	5,444.3	100.00%	7,219.9	100.00%	7,825.4	100.00%

參考出處：2018 年能源統計手冊

國內工業部門煤炭使用量從民國 98 年的 6,423.4 千公噸，下降至 107 年的 5,444.3 千公噸，主要原因不外乎近年環保意識抬頭，環保法規加嚴等。且環保署 107 年 9 月 19 日訂定發布「鍋爐空氣污染物排放標準」如表 2 所示，加嚴鍋爐的粒狀污染物、硫氧化物及氮氧化物排放標準。既設鍋爐須於

109 年 7 月 1 日符合標準；粒狀污染物為 30 mg/Nm^3、硫氧化物為 50 ppm、氮氧化物為 100 ppm。倘若繼續使用燃煤鍋爐不額外加裝防治設備，勢必無法滿足 109 年的法規要求。



參考出處：2018 年能源統計手冊

圖 1　近十年工業部門煤炭使用量

表 2　107 年 9 月 19 日訂定發布「鍋爐空氣污染物排放標準」

空氣污染物	排放管道標準	施行日期	
		新設鍋爐	既存鍋爐
粒狀污染物	30 mg/Nm^3	發布日	中華民國 109 年 7 月 1 日
硫氧化物	50 ppm		
氮氧化物	100 ppm		

二、污染防制設備技術

1.法規要求

環保署為強化管制力道改善空氣品質，參考國際間鍋爐之管制標準、審酌國內排放現況、可行控制技術及成本效益分析結果，訂定「鍋爐空氣污染物排放標準」，本項排放標準不分規模及燃料別，加嚴粒狀污染物至 30 mg/Nm^3、硫氧化物至 50 ppm 及氮氧化物至 100 ppm 的排放標準，並給予業者緩衝時間進行改善，所有鍋爐須於 109 年 7 月 1 日符合本標準，預期其硫氧化物、氮氧化物及粒狀污染物可分別減量 8,567 公噸/年、4,247 公噸/年及 2,598 公噸/年。

2. 污染防治技術

現行環保法規主要針對粒狀污染物、硫氧化物以及氮氧化物進行管控，以下針對常見污染防制設備進行說明：

(1)粒狀污染物

粒狀污染物防制設備特性概要如表 3 所示，粒狀污染物防制主要有四種防治方式：袋式集塵(如圖 2 所示)、靜電集塵(如圖 3 所示)、濕式洗塵(如圖 4 所示)及旋風集塵(如圖 5 所示)。由於既設鍋爐皆已有裝置粒狀污染防制設備，部分已能滿足新的排放標準，其餘僅需對既有的防治設備升級即可滿足標準。

表 3　粒狀污染物防治設備特性

設備種類	適用濃度範圍	流量範圍	粒徑範圍	設置費用	操作費用
袋式集塵	不限	不限	不限	中	中
靜電集塵	中-低	高	細	高	低
濕式洗塵	不限	中-低	中	低	高
旋風集塵	不限	中-低	粗	低	低

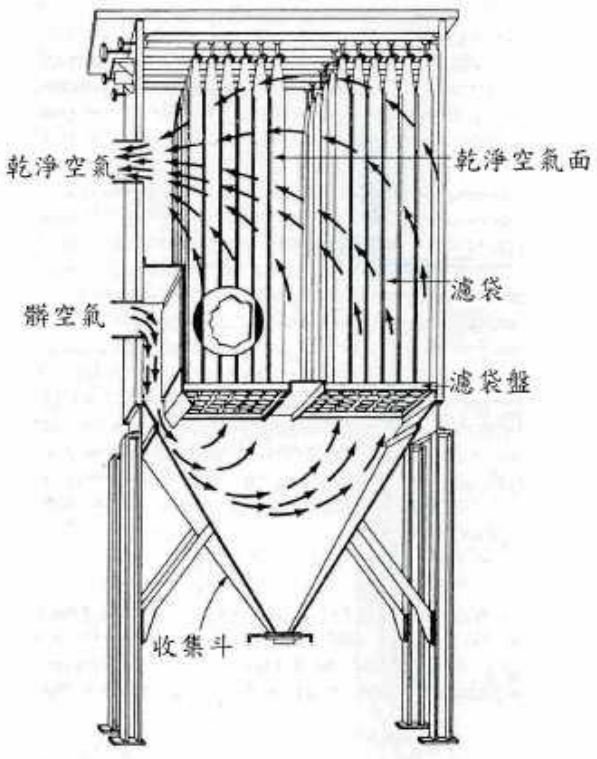


圖 2　袋式集塵裝置

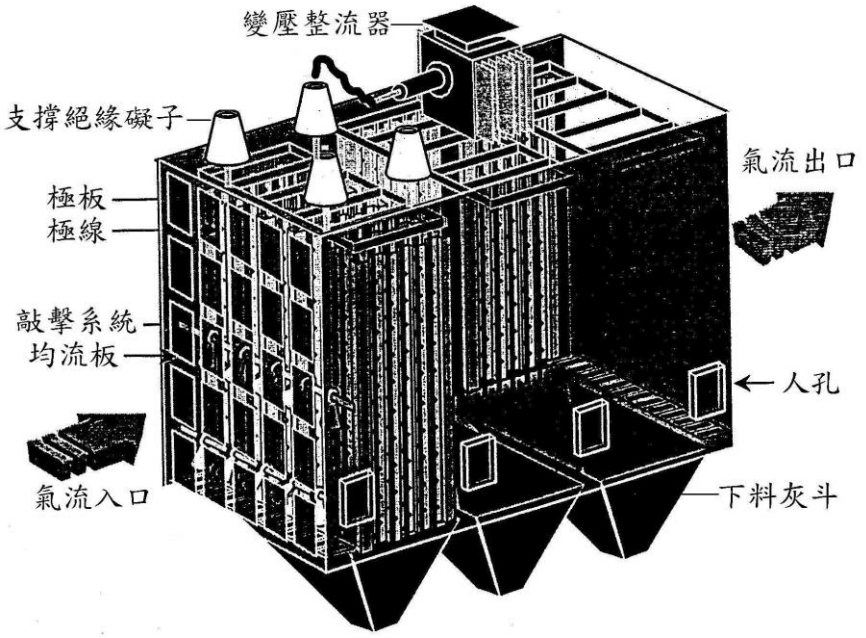


圖 3　靜電集塵裝置

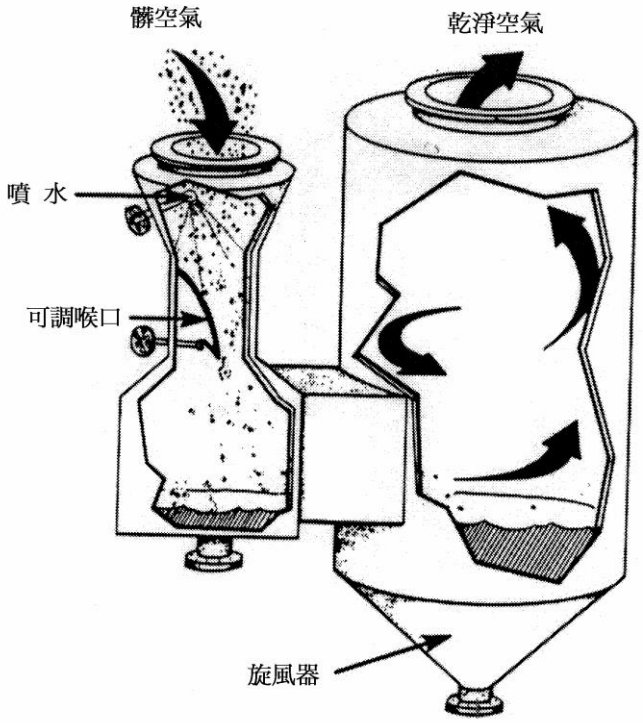


圖 4　濕式洗塵裝置

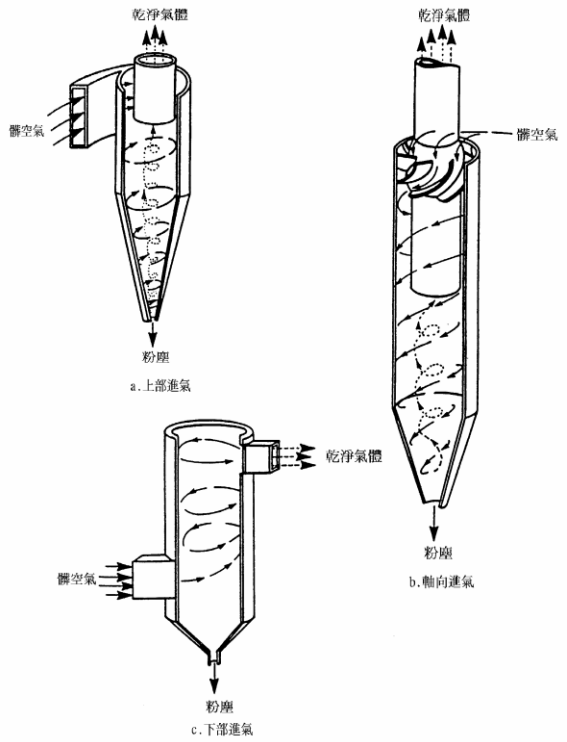


圖 5　旋風集塵裝置

(2)硫氧化物

硫氧化物防治設備(如表 4 所示)，主要使用排煙脫硫(FGD)其中分為三種：乾式脫硫、半乾式脫硫及濕式脫硫。同粒狀污染物，硫氧化物已在管制範圍內，故皆有設置硫化物防治設備，僅需對於現有的防治設備升級或保養及可滿足標準。圖 6 為乾式排煙脫硫原理概要圖。

表 4　硫氧化物防治設備特性

排煙脫硫法	設置費用	操作費用	除去率	廢棄物量	廢棄物處理費用
乾式脫硫	低	高	中	高	低
半乾式脫硫	中	低	低	中	中
濕式脫硫	中	高	高	高	高

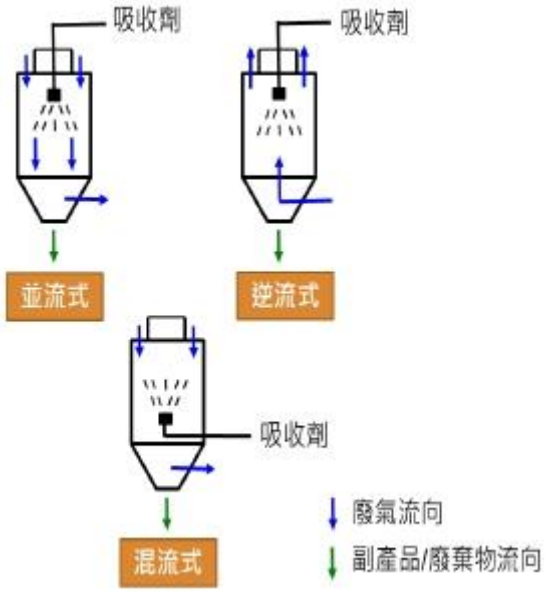


圖 6　乾式排煙脫硫處理方式

(3)氮氧化物

氮氧化物防治設備如表 5 所示，主要使用乾式法來進行去除其中以兩種還原法為主要處理方式：選擇性觸媒還原法(SCR)及選擇性非觸媒還原法(SNCR)。由於氮氧化物在 107 年公告 109 年法規之前的排放標準(300 ppm)是不需要特別加裝防治設備，僅需控制燃燒即可達到排放標準，故導致為了滿足 109 年排放標準(100 ppm)需加裝防治設備。其中 SCR 的操作溫度較為接近一般工業鍋爐的排氣溫度，故為一般用戶會選擇 SCR。其中 SCR 原理如圖 7 所示。

表 5　氮氧化物防治設備特性

乾式處理	設置費用	操作費用	操作溫度	除去率
SCR	中	中	200-450℃	高
SNCR	高	高	900~1000℃	高

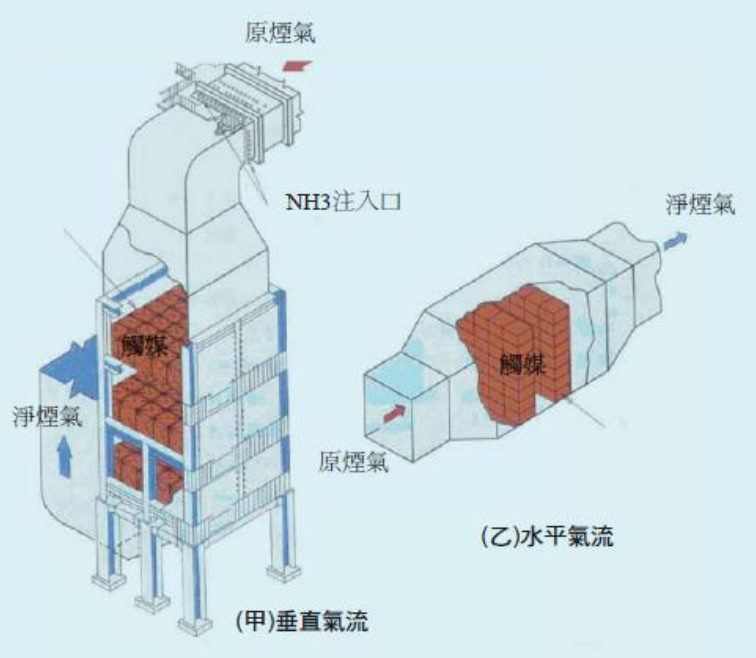


圖 7　SCR 處理原理

3.改用低碳燃料(天然氣)

過去幾年因環保因素及永續經營理念抬頭，不少國際知名品牌皆有綠色製程要求，促使能源用戶陸續轉用天然氣鍋爐、液化石油氣鍋爐以及柴油鍋爐等，透過廠商不斷累積成功經驗及設備技術提升，轉用低碳燃料技術已成熟。在轉用燃料過程中，燃煤鍋爐只有「整座鍋爐汰換為低碳燃料鍋爐」之方案。

然能源用戶可藉由進行燃料替代規劃時，重新檢視現場管路狀況是否需重新建置，因燃煤鍋爐建置年份較久，通常都未裝置熱能回收系統以及節煤器，可在改善後一併重新設計。原使用蒸汽鍋爐的能源用戶可以採用節能方案如下：

(1)尾氣溫度控制：鍋爐系統「能源查核及節約能源案例手冊」資料顯示燃煤鍋爐排氣溫度大多落於 150 ℃以上，設定此溫度是為了防止硫化物的凝結與低溫腐蝕之情形；且排氣溫度與周圍溫度差與排氣熱損失成正比，每降低 20 ℃可節省 1 %的燃料使用量。統計本會輔導能源用戶鍋爐運轉資料顯示，平均排氣溫度約為 180 ℃左右，若改用低碳燃料排氣溫度可以降低至 120 ℃，平均可以節省 3 %的燃料使用量。

(2)排氣含氧量控制：一般鍋爐可以用出口 O_2 含量來確認過剩空氣控制是否恰當。

A.改善後使用液態燃料排氣含氧量通常為 10-15 %之間，若針對含氧量進行控制可控制到 3-4%。根據能源查核手冊所示，平均每降低 3 %

含氧量可以節省 1 %燃料，若原排氣含氧量為 15 %降低至 3 %可以減少 4 %的燃料消耗。

B.改善後改用氣態燃料排氣含氧量通常為 5-10%之間，若針對含氧量進行控制可控制到 1～2%。根據能源查核手冊所示，平均每降低 3%含氧量可以節省 1%燃料，若原排氣含氧量為 10 %降低至 1%可以減少 3 %能源消耗。

(3)鍋爐水回收：將使用後的鍋爐水回收後，並用來提高鍋爐飼水溫度來減少鍋爐之消耗。根據實地府到各用戶鍋爐水回收後的溫度平均落於 50 ~ 80℃左右，根據能源查核手冊所示，每提升 6 ℃鍋爐給水溫度可以節省 1 %燃料消耗。若鍋爐給水溫度約為 24 ℃，若回收提高至 54 ℃，可以減少 5 %燃料消耗，若用戶使用熱媒鍋爐因無蒸汽，故無法適用鍋爐水回收之節能項目

(4)裝設節煤器：鍋爐進氣溫度通常為室溫約為 35 ℃，若裝設節煤器將排氣溫度做熱回收使用，平均每提升 6 ℃空氣溫度可以減少 1 %，若將進氣溫度提高至 60 ℃可以減少 4 %能源消耗。

三、經濟效益分析

以北部某工廠 1 座燃煤蒸汽鍋爐(10 噸/小時)，煤炭用量為 10,600 公噸/年作為案例，進行以下經濟效益分析：

1.加裝空污防制設備

若 A 工廠不進行燃料替代，選擇加裝空污防制設備來進行改善，原本建置的燃煤鍋爐已有設置粒狀污染物與硫氧化物等防治設備，故僅須加裝氮氧化物防治裝置，根據工廠詢價 SCR 設置成本如表 6 所示，且未來每個月會增加的營運成本如表 7 所示。

表 6　SCR 設置成本

設置成本	
改善工程項目	費用(萬元)
SCR 反應塔	1,200
加藥控制設備	100
觸媒活化設備	50
煙器再熱器	100
施工費	50
合計	1,500

表 7　每月增加營運成本

每月營運成本	
處理項目	費用(萬元)
防治設備藥劑處理費	16
廢棄物清理費	9
合計	25

2.改用低碳燃料(天然氣)

(1)燃料成本

若 A 廠選擇改用天然氣，以能源局 106 年公告煤炭熱值 6,080 kcal/kg 計算，煤炭用量 10,600 ton/年並假設無其他熱損，換算總熱值約為 64 億 kcal，天然氣以能源局 106 年公告天然氣熱值 9,000 kcal/m^3 計算，預計需要 7,160.89 千度，其熱值換算如表 8 所示。

表 8　煤炭熱值換算為天然氣用量

煤炭用量		單位熱值	
10,600	公噸/年	6,080	kcal/kg
需求熱值		天然氣單位熱值	
64,448,000,000	kcal	9000	kcal/m3
換算天然氣用氣量			
7,160.89		千度/年	

因煤炭價格浮動且各家報價皆不同，本文煤炭價格採用美聯儲經濟數據(Federal Reserve Economic Data)提供之近 10 年澳洲國際煤炭單價格來進行成本分析，天然氣則是中油公告近 10 年之天然氣單價來進行比對如表 8 所示。近十年煤炭與天然氣價格趨勢如圖 8 所示，其熱值與費用計算如表 9 所示。

以 107 年度的平均煤炭價格以及中油的天然氣均價計算後可以得知，若需獲得相同的熱值，天然氣的費用比煤炭高將近五千萬元；此外經過分析後可得知每單位金額可以購得熱值中，成本如圖 9 所示。可以觀察到花費相同的金額可以獲得天然氣 2～5 倍的熱值，近 10 年的單位金額可獲得熱值如表 10 所示。

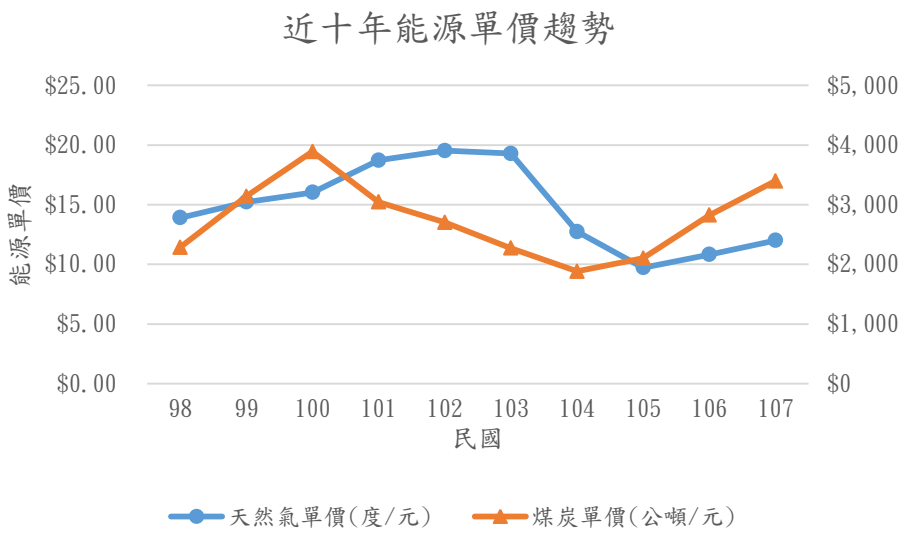


圖 8　民國 98~107 年國際煤炭單價及天然氣單價

表 9　煤炭與天然氣計算基礎表

燃料種類	天然氣(千立方米)	煤炭(公噸)
年用量	7,160.89	10,600
淨熱值(kcal)	9,000	6,080*1000
107 年平均單價(元)	12.01	3,396.92
107 年總價(元)	86,002,289	36,007,352

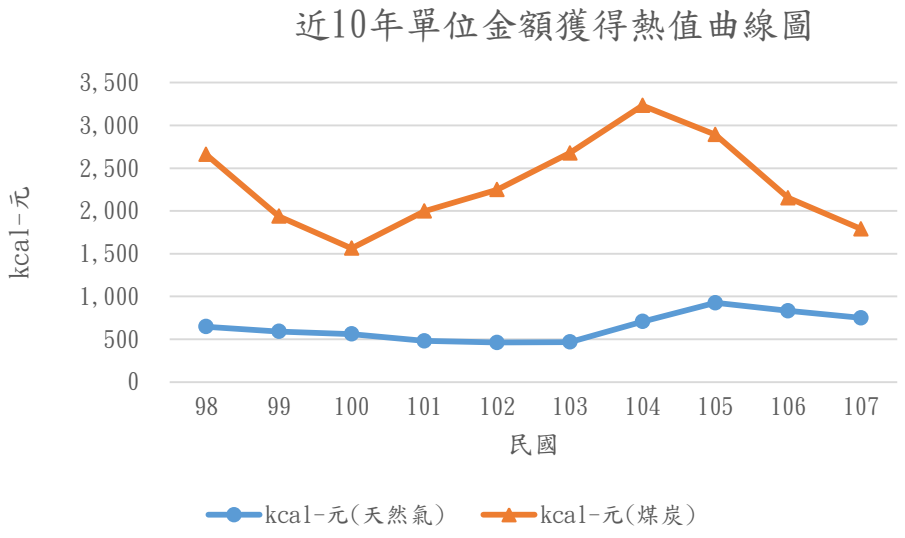


圖 9　近 10 年單位金額獲得熱值曲線圖

表 10　近 10 年單位金額可獲得熱值

燃料	煤炭		天然氣	
熱值	6,080 Mcal-公噸		9,000 kcal-立方公尺	
項目 / 年	元/公噸	kcal/元	元/立方公尺	kcal/元
98	2,284.79	2,661.08	13.91	647.07
99	3,137.96	1,937.56	15.22	591.14
100	3,888.22	1,563.70	16.03	561.49
101	3,043.29	1,997.84	18.72	480.88
102	2,704.02	2,248.50	19.53	460.93
103	2,271.87	2,676.21	19.29	466.60
104	1,880.78	3,232.71	12.74	706.70
105	2,102.45	2,891.86	9.72	925.96
106	2,824.14	2,152.87	10.81	832.19
107	3,396.92	1,789.85	12.01	749.66

(2)鍋爐汰換

因煤炭鍋爐汰換為低碳燃料鍋爐僅只有重新建置新鍋爐之手段，參考 A 工廠所提供資訊來進行成本分析，其成本概估表如表 11 所示。若預計購入一台 10 頓/hr 的天然氣鍋爐需要 700 萬元，天然氣廠內管線預計 200 公尺且須建置減壓站合計需 400 萬元，場外管線預計 500 公尺共 500 萬元，總計共 1,600 萬元。

表 11 鍋爐燃料轉換成本概估表

項目 / 鍋爐規模級距		3-6 噸/hr	6-8 噸/hr	8-10 噸/hr	10-12 噸/hr	12-15 噸/hr
		200 萬 -400 萬 kcal/hr	400 萬 -533 萬 kcal/hr	533 萬 -666 萬 kcal/hr	666 萬 -800 萬 kcal/hr	800 萬 -1000 萬 kcal/hr
成本項目(萬元)	汰換鍋爐成本(萬元/噸)	65	70	70	70	75
	拆除舊設備管線費用	1.附屬設備拆除費用約 3-5 萬。 2.燃煤鍋爐拆除(依規模 10 萬以上)。				
	廠內天然氣管線(含減壓站)	1.廠內天然氣管線依訪視時實際規劃長度每米，設地下暗管以 1 萬元計(明管較為便宜)。 2.減壓站設置費用 200 萬元計。				
	廠外天然氣管線費用(元/m)	<500 m		1,000-1,500 m		>1,500 m
		7,500-10,000		7,500-10,000		7,500~10,000

註：價格差異原因包含廠牌、國產或進口、配合鍋爐規格及生產特性進行相關調整，如控制系統整合設備、監控儀表數量等等，故此價目表僅供概略估算

3.投資成本分析

總結以上改善方案均可得知，倘若進行燃料替代光燃料成本會提高至少兩倍，未包含新鍋爐設置費用、天然氣管線以及減壓站或液化石油氣儲槽等費用。若無意願進行燃料替代加裝空污防制設備，大部分都是針對氮氧化物進行控制，成本不亞於進行燃料替代；除此之外使用到操作許可之期限後，未來空污排放標準是否會更加嚴格以及各地方政府是否加嚴自治標準(如新北市禁止使用煤炭做為燃料)等，一切都是未知數。以下針對 A 工廠現行狀況以及加裝防治設備以及改為天然氣作成本分析如表 12 所示、自償率分析詳見表 13、淨現值以及內部報酬率見表 14，其中內部報酬率以改善天然氣做為比較基準，改善 SCR 投資成本為 1,500 萬元，3 年總淨現值與天然氣差 8,268 萬元，使用此淨現值來計算內部報酬率可以獲得 47%，故改為天然氣的內部報酬率為 0%。

表 12　鍋爐燃料轉換成本概估表

項目	未改善		加裝污染防制設備		改為天然氣	
燃料價格	36,007,352	年	36,007,352	年	86,002,289	年
投資改善	0		15,000,000	次	16,000,000	次
營運成本	108,000	年	3,108,000	年	0	年
合計	36,115,352		54,115,352		102,002,289	
法規面向	不符合法規		符合法規		符合法規	

表 13　自償率分析表

項目	加裝污染防制設備	改為天然氣
估期間淨現金流入	-18,000,000	-56,886,937
流出現金總額	54,115,352	102,002,289
自償率	-33.26%	-55.77%

表 14　淨現值分析表

項目	加裝污染防制設備		改為天然氣	
許可期間	3	年	3	年
要求報酬率	33.33	%	33.33	%
第 0 年收益	0	元	0	元
第 0 年成本	54,115,352	元	16,000,000	元
第 1 年收益	0	元	108,000	元
第 1 年成本	3,000,000	元	49,994,937	元
第 2 年收益	0	元	108,000	元
第 2 年成本	3,000,000	元	49,994,937	元
第 3 年收益	0	元	108,000	元
第 3 年成本	3,000,000	元	49,994,937	元
第 0 年淨現值	-15,000,000		-16,000,000	
第 1 年淨現值	-2,255,639		-37,508,975	
第 2 年淨現值	-1,695,969		-28,202,237	
第 3 年淨現值	-1,275,165		-21,204,689	
總淨現值	-20,226,773		-102,915,901	
內部報酬率	47 %		0 %	

註：以天然氣作為基準

$$\text{淨現值計算公式} = \sum_{t=0}^{T(\text{許可期間})} \frac{(\text{第}t\text{年收益} - \text{第}t\text{年成本})}{(1+\text{要求報酬率})^{t}}$$

4.加裝污染防制設備與改用低碳然料進行成本分析

根據前述條件 10 ton/hr 燃煤蒸氣鍋爐，加裝 SCR 或著進行燃料替代，來進行不同燃料用量自償率、淨現值與內部報酬率來進行探討。將煤炭年用量分為高用量 10,000 公噸、中等用量 5,000 公噸、少用量 2,500 公噸、2000 公噸以及 1,000 公噸進行成本分析，匹配上不同管線長度，並分為：廠內管 0 公尺和廠外管 0 公尺、廠內管 100 公尺和廠外管 250 公尺、廠內管 200 公尺和廠外管 500 公尺、廠內管 300 公尺和廠外管 750 公尺以及廠內管 400 公尺和廠外管 1000 公尺，許可期間與要求報酬率皆與前例相同。

表 15 為不同燃料用量加裝污染防制設備自償率分析表，表 16 為不同然料用量進行燃料替代自償率分析表(廠內管 200 公尺和廠外管 500 公尺)。表 17 為將不同管線長度的投資成本計算出來並用來進行成本分析可以獲得加裝污染防制設備以及進行燃料替代（不同管線長度）的自償率如圖 10 所示，其自償率如表 18 所示。

並根據上述資料推算出內部報酬率進行分析如圖 11 所示，因不管增設防制設備或改用低碳然料都會增加成本無法用原本的公式計算出內部

報酬率，故改用以改善低碳然料作為基準來與增設防制設備進行內部報酬率進行分析，其分析出的內部報酬率如表 19 所示。

表 15　不同用量加裝污染防制設備自償率分析表

加裝污染防制設備自償率					
煤炭用量(公噸/年)	10,000	5,000	2,500	2,000	1,000
燃料費用(元)	33,969,200	16,984,600	8,492,300	6,793,840	3,396,920
加裝污染防治設備費用(元)	15,000,000	15,000,000	15,000,000	15,000,000	15,000,000
增加營運成本	3,000,000	1,500,000	750,000	600,000	300,000
估期間淨現金流入	-18,000,000	-16,500,000	-15,750,000	-15,600,000	-15,300,000
流出現金總額	48,969,200	31,984,600	23,492,300	21,793,840	18,396,920
自償率	-36.76%	-51.59%	-67.04%	-71.58%	-83.17%

表 16　不同用量加裝污染防制設備自償率分析表

改為低碳燃料自償率					
煤炭用量(公噸/年)	10,000	5,000	2,500	2,000	1,000
燃料費用(元)	33,969,200	16,984,600	8,492,300	6,793,840	3,396,920
轉換天然氣用量(千度/年)	6,755.56	3,377.78	1,688.89	1,351.11	675.56
燃料費用(元)	81,134,222	40,567,111	20,283,556	16,226,844	8,113,422
燃料價差	47,165,022	23,582,511	11,791,256	9,433,004	4,716,502
改善投資費用	16,000,000	16,000,000	16,000,000	16,000,000	16,000,000
估期間淨現金流入	-63,165,022	-39,582,511	-27,791,256	-25,433,004	-20,716,502
流出現金總額	97,134,222	56,567,111	36,283,556	32,226,844	24,113,422
自償率	-65.03%	-69.97%	-76.59%	-78.92%	-85.91%

表 17　不同長度的管線費用分析表

進行燃料替代投資成本分析					
新設鍋爐費用(元)	7,000,000	7,000,000	7,000,000	7,000,000	7,000,000
減壓站費用	2,000,000	2,000,000	2,000,000	2,000,000	2,000,000
廠內管線(公尺)	0	100	200	300	400
廠內管費用(元)	0	1,000,000	2,000,000	3,000,000	4,000,000
廠外管線(公尺)	0	250	500	750	1,000
廠外管費用(元)	0	2,500,000	5,000,000	7,500,000	10,000,000
總投資費用(元)	9,000,000	12,500,000	16,000,000	19,500,000	23,000,000

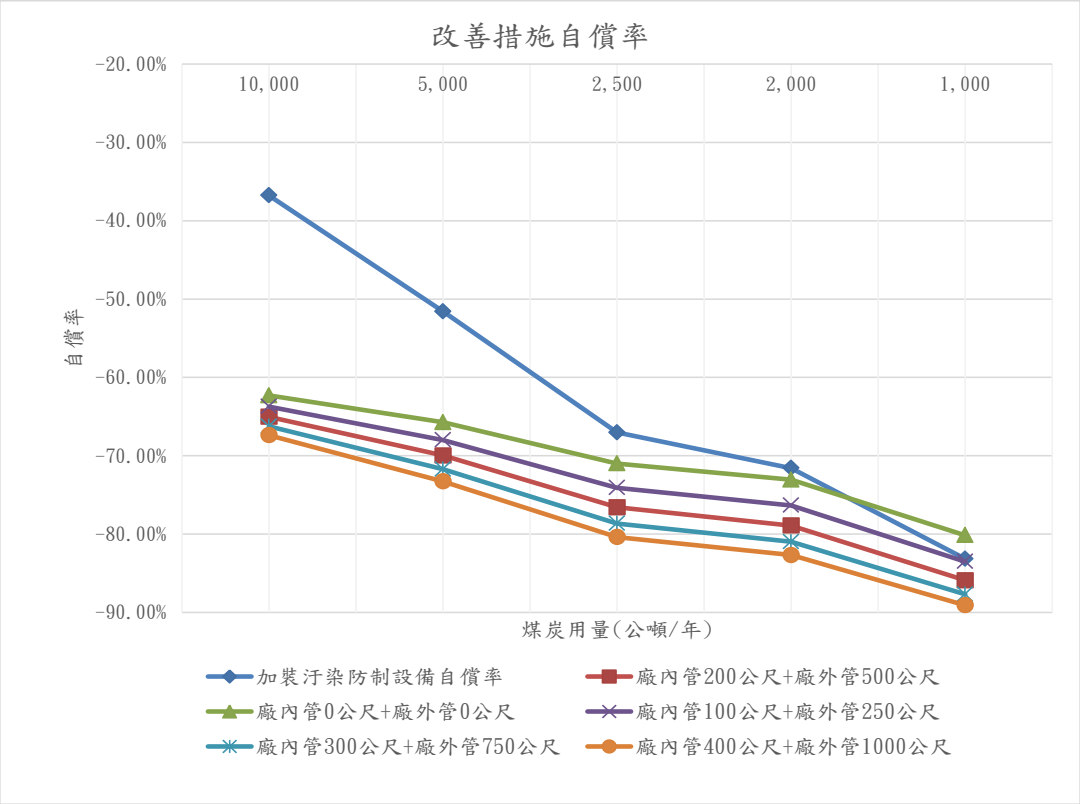


圖 10　燃料用量匹配不同改善方案自償率趨勢圖

表 18　燃料用量匹配不同改善方案自償率分析表

自償率分析表							
煤炭用量(公噸/年)			10,000	5,000	2,500	2,000	1,000
a. 加裝防制設備			-36.76%	-51.59%	-67.04%	-71.58%	-83.17%
b.進行燃料替代	廠內管線	廠外管線					
	0 公尺	0 公尺	-62.31%	-65.73%	-71.00%	-73.07%	-80.15%
	100 公尺	250 公尺	-63.72%	-67.99%	-74.10%	-76.35%	-83.52%
	200 公尺	500 公尺	-65.03%	-69.97%	-76.59%	-78.92%	-85.91%
	300 公尺	750 公尺	-66.24%	-71.72%	-78.65%	-80.98%	-87.70%
	400 公尺	1000 公尺	-67.38%	-73.28%	-80.38%	-82.68%	-89.08%

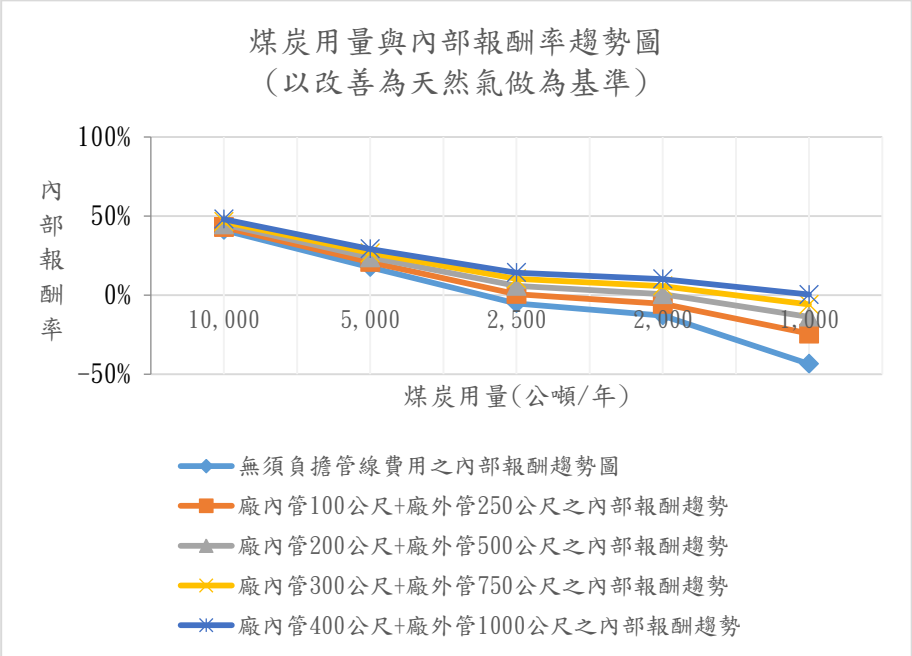


圖 11　燃料用量不同改善方案內部報酬率趨勢圖
(以改善為天然氣做為基準)

表 19　燃料用量匹配不同改善方案內部報酬分析表
(以改善為天然氣做為基準)

內部報酬分析表						以改善天然氣為基準	
煤炭用量(公噸/年)	10,000	5,000	2,500	2,000	1,000	廠內管線	廠內管線
加裝污染防制設備之內部報酬率	41.08%	17.62%	-5.29%	-12.96%	-43.52%	0 公尺	0 公尺
	42.91%	20.82%	0.67%	-5.50%	-24.39%	100 公尺	250 公尺
	44.67%	23.80%	5.74%	0.54%	-13.72%	200 公尺	500 公尺
	46.37%	26.58%	10.19%	5.67%	-5.95%	300 公尺	750 公尺
	48.02%	29.20%	14.16%	10.16%	0.28%	400 公尺	1000 公尺

四、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，各地方政府也開始實行自治標準，新北市環保局已於 105 年不在發放燒煤許可僅能燒至 108 年底、高雄市政府也於 106 年公告「高雄市燃燒設備空氣污染物排放標準」並於 107 年 7 月實行，環保署的空污法也將於 109 年實施，若不進行改善將會被地方權責機關開罰。

此外除了國際知名品牌也開始實行綠色製程、低碳生產等要求，若用戶沒有改用低碳燃料來進行生產，將不會獲得訂單。用戶迫於上游品牌壓力不得不進行改善，紡織業尤甚。

綜合以上資料整理可以得知，不論進行低碳燃料改善或進行增設空污防制設備皆會增加大量的生產成本，無法計算回收年限故採用自償率、淨現值、內部報酬率來進行成本分析。如同前述因僅會增加生產成本，自償率、淨現值、內部報酬率等都為負值。以一般狀況來說(廠內管線 200 公尺和廠外管線 500 公尺)燃料用量大於 2,000 公噸/年進行空污防制設備的增設所獲得的自償率、淨現值、內部報酬率都小於改為天然氣，一但小於 2,000 公噸/年就建議改為天然氣，但仍須依據實際天然氣減壓站與管線費用為主。若政府全額補助天然氣管線費用，則年用量提高 2,500 公噸/年以下都建議改為天然氣。根據內部報酬率分析表得知，防制設備的內部報酬率與煤炭用量以及燃料替代的成本成正比。

用戶雖然樂見政府與國際知名品牌為了環保減碳盡一份心力，但並非所有地方皆有天然氣管線，此次分析也尚未針對天然氣管線或液化石油氣之建置成本進行分析。若用戶身處於天然氣管線無法到達之位置，不僅沒有空地建設液化石油氣儲槽，甚至沒有空間增設空污防制設備，豈不是僅能停工不生產。

最後，決定轉用天然氣之用戶不外乎企業規模較大，為了國際品牌訂單不論增加多少成本都要進行改善；再者就是為了符合 109 年空污排放法標準，雖然沒有直接要求改用天然氣，但為了一勞永逸，以防未來空污標準又更嚴格還是進行改善；若用戶方圓 2 公里內無天然氣管線，若工廠尚有空間則是選擇改用液化石油氣。不改用天然氣的主要原因不外乎成本考量，加裝空污防制設備費用還低於天然氣管線鋪設費用，更不用說天然氣燃料成本遠高於煤炭。

五、參考文獻

1.林延彥，「產業溫室氣體減量之應用低碳燃料技術」，綠色技術與工程實務研討會，106 年。

2.李政道，「鍋爐蒸氣系統節能及實例」，工研院。

3.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。

4.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。

5.經濟部，廢熱回收節能管理手冊。

6.經濟部能源局網站，http://www.moeaboe.gov.tw。

低溫 SCR 脫硝觸媒研製與模廠測試

曾志富*、李宗諭**、洪嘉圻***、林國璋****、郭麗雯*****、白曛綾******

摘　要

選擇性觸媒還原法(Selective Catalyst Reduction, SCR)是指在一定的溫度及適量的 O_2 下，以及有觸媒存在的條件下，還原劑(如: NH_3 或尿素)有選擇性的將煙氣中的 NOx 還原為 N_2 和 H_2O，達到淨化煙氣的目的。低溫 SCR 觸媒系統之開發，可擴展傳統 SCR 觸媒之反應溫度範圍(80 ℃~200℃)，應用於較低溫之鍋爐煙道廢氣處理，若裝設於除塵或脫硫設備後端，可有效延長觸媒的壽命及降低運轉維護成本，以及降低能源之耗損。本研究以共沉澱法成功合成 $MnFeCe/TiO_2$ 與 $MnFe/TiO_2$ 低溫型觸媒，經實驗室量測結果，兩者於反應溫度 100oC~200℃之觸媒活性表現的趨勢相近，當反應溫度於 200℃時，兩者的脫硝效率皆可大於 95%，當反應溫度在 120℃時，兩者的脫硝效率皆可高於 50%以上。本研究將 $MnFe/TiO_2$ 觸媒塗敷於堇青石蜂巢載體上，並於大潭電廠燃氣複循環機組進行模廠測試，$MnFe/TiO_2$ 蜂巢觸媒可在 150℃~200℃溫度範圍內達到 50%以上之脫硝效率，現階段最佳測試結果為 T=160oC，SV=2090 h-1，其脫硝效率可達 73%。相當於大潭發電廠 NOx 排放可從 20 ppm 降低至 5.6 ppm，此可符合環保要求，本研究所開發之低溫觸媒很有機會應用於實際火力發電廠。

【關鍵詞】觸媒、脫硝、蜂巢型、低溫、模廠測試

---

*台電綜合研究所　研究專員

**國立交通大學環境工程研究所　博士

***台電大潭發電廠　機械專員

****台電大潭發電廠　機械經理

*****台電綜合研究所　資深研究專員

******國立交通大學環境工程研究所　教授

一、前　言

氮氧化物(NOx)是空氣污染主要物質之一，除造成人體健康危害外，在環境生態方面，會導致光化學煙霧、酸雨、溫室效應、臭氧層破洞與細微粒懸浮微粒(PM2.5)等問題。鍋爐的 NOx 是透過燃料及高溫燃燒所生成，目前 NOx 控制技術主要分為三類：一是低氮燃燒技術，即使用低氮含量的燃料，控制 NOx 的產生量。二是低 NOx 燃燒技術，即在燃燒過程中，控制燃燒時間及溫度，來降低 NOx 生成。三是煙氣淨化技術，即利用技術手段脫除尾氣中的 NOx。而在煙氣淨化技術中，選擇性觸媒還原法(Selective Catalyst Reduction, SCR)是目前工程實際應用最廣泛，也是技術最成熟的方法。

SCR 是指在一定的溫度及適量的 O_2 下，以及有觸媒存在的條件下，還原劑(如: NH_3 或尿素)有選擇性的將煙氣中的 NOx 還原為 N_2 和 H_2O，達到淨化的目的。目前國內外工業鍋爐使用最廣泛的 SCR 脫硝觸媒是以 TiO_2 作載體(約占 80~90%)，活性成分為 V2O5 或 V_2O_5-WO_3、V_2O_5-MoO_3，催化溫度範圍是 300℃~400 ℃的金屬氧化物類觸媒。近年來越來越多學者致力於低溫(80~200 ℃)選擇性觸媒還原技術之研究，主要使用活性成分為 Mn、Ce、Cu、Fe 和 Zr 等金屬氧化物，選擇性搭配載體如 TiO_2、γ-Al_2O_3 與 SiO_2 等。低溫 SCR 觸媒系統之開發，可擴展傳統 SCR 觸媒之操作溫度範圍，應用於較低溫之煙道廢氣處理，以降低能源之耗損。此外，低溫型 SCR 系統可裝設於袋式集塵或靜電集塵器後端，可避免飛灰的造成的堵塞、沖蝕及化學毒化，若裝設於排煙脫硫後端，可避免 SO_2 毒化及 $NH_4H_SO_4$ 形成，此可有效延長觸媒的壽命及降低運轉維護成本。

對既存火力電廠而言，無論是使用何種石化燃料，均無太大之空間可以加裝 NOx 處理設備以應付更嚴苛之排放標準，再加上火力電廠尾氣溫度多在 80~105℃之間，因此傳統 SCR 脫硝設備並無法以具成本有效且節能方式，被應用於機組進行尾氣脫硝處理。本研究標的為處理大潭電廠燃氣複循環機組尾氣 NOx 排放，為符合總量管制及環保承諾要求，大潭電廠既有#1~6 機組須進行 NOx 排放改善，從現有 NOx 出口濃度 16~25 ppm，降低至 8 ppm 以下，在不影響現有機組情況下，低溫 SCR 觸媒(80~200 ℃)可能為較佳的選項。

本研究目標是開發低溫抗水氣 SCR 觸媒，期望可應用於低溫

(80~200℃)下，處理煙道尾氣中 NOx 之排放。本實驗將選定以 Mn、Ce 為主要活性金屬，確保觸媒之低溫活性，再搭配 Fe 副金屬來嘗試抑制水氣之影響。此外，在擔體方面將以 TiO_2 作為基礎之擔體，並調整活性金屬比例進行脫硝活性及抗水氣測試。之後將最佳配方觸媒製作成蜂巢式觸媒塊，並裝設備觸媒模組中，於大潭電廠燃氣複循環機組進行模廠測試，實驗規劃流程如圖 1所示。

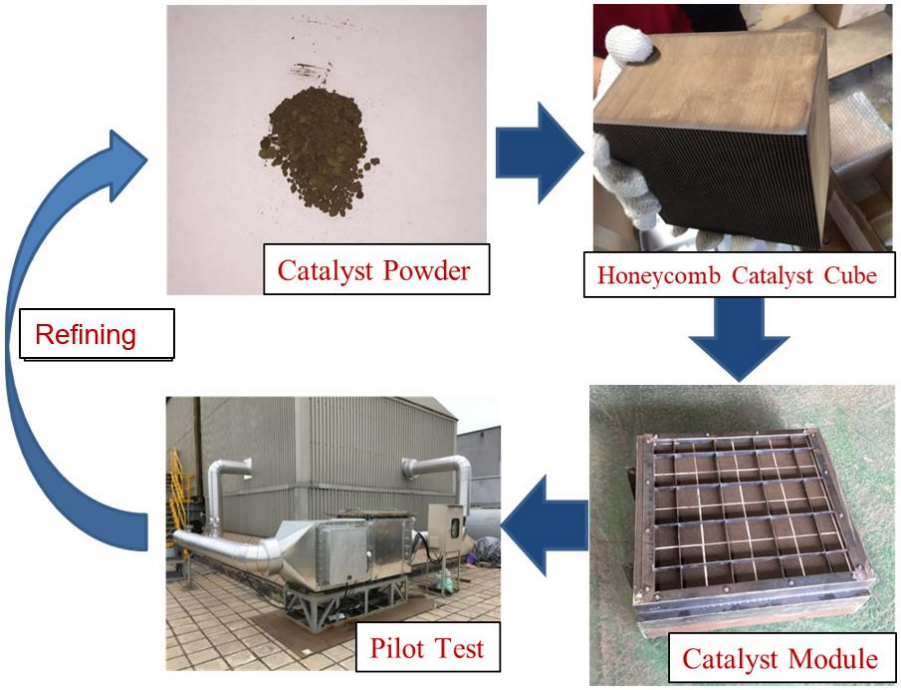


圖 1　實驗規劃流程

二、低溫抗水氣觸媒合成與性能測試

經由相關文獻可以得知，水氣對於 SCR 觸媒之影響在操作溫度低於 180℃時即開始顯著，也因此截至目前為止尚未有研究專注於 150°C 以下之抗水氣觸媒研發。本實驗將選定以 Mn、Fe 為主要活性金屬，確保觸媒之低溫活性，再搭配 Ce 副金屬來嘗試抑制水氣之影響。透過持續的觸媒研發工作，可以使觸媒之使用量更精進，減少低溫觸媒應用時之設備體積，並提升技術之成本效益。本實驗以共沉澱法製備擔體混合之觸媒，實驗流程如圖 2所示。

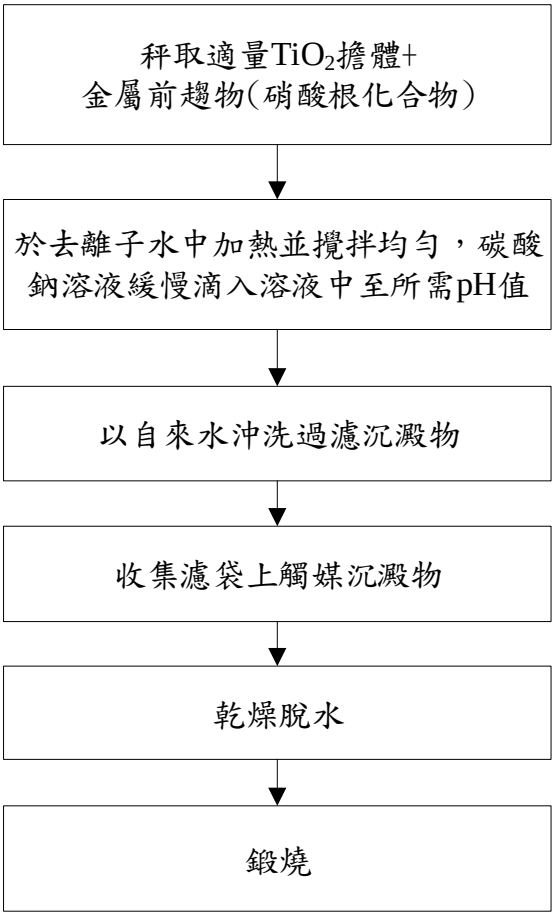


圖 2　觸媒製備流程

2.1 觸媒溫度影響測試

由於 $MnFe/TiO_2$ 與 $MnFeCe/TiO_2$ 在空間流速 25,000h^{-1}、水氣濃度 10 vol%、低溫範圍(100℃ ~105℃)下有較相近的觸媒活性表現(48 %與 54 %)，因此本試驗選擇 $MnFe/TiO_2$ 觸媒作為對照組，$MnFeCe/TiO_2$ 作為實驗組，模擬電廠煙氣組成條件下，進行溫度操作測試(操作溫度範圍 100 ^oC ~200℃，[NO]=200 ppm、[NH_3]=200 ppm、[H_2O]= 10 v/v %、GHSV= 25,000 hr^{-1}(@25℃))，探討觸媒效率與溫度關係。由圖 3 與圖4 之結果發現，MnFe 與 $MnFeCe/TiO_2$ 觸媒在此操作溫度區間(100 ℃ ~200℃)之觸媒活性表現的趨勢相當一致，其皆呈現脫硝效率隨溫度升高而升高，其當溫度在 120℃以上，兩者的脫硝效率皆高於 50 %以上。而在低於 120℃的溫度區間，能觀察到 $MnFeCe/TiO_2$ 其觸媒性能較 MnFe 之觸媒性能要穩定。

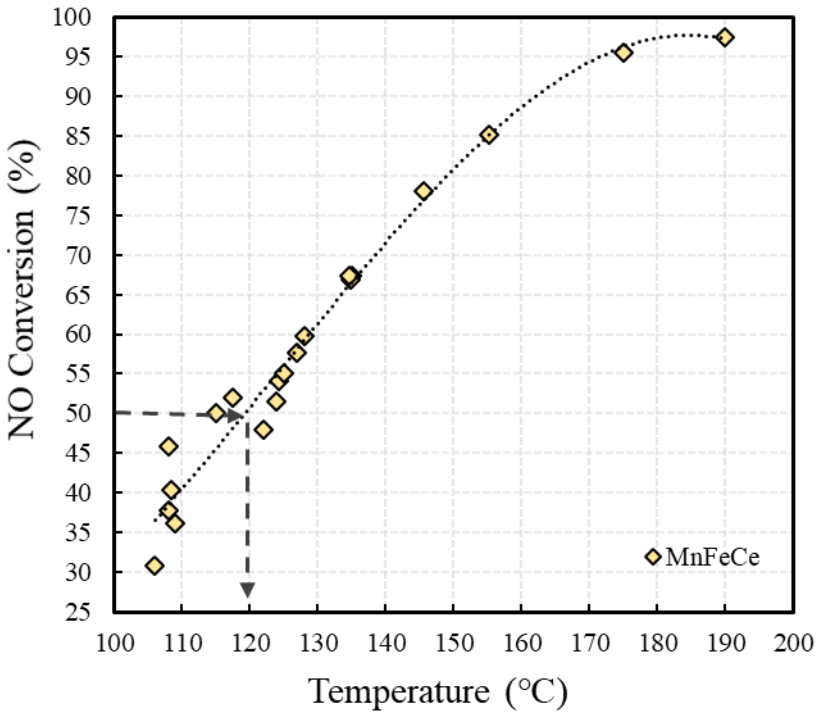


圖 3　MnFeCe/TiO_2 觸媒溫度影響測試

測試參數：[NO]=200 ppm、[NH_3]=200 ppm、[H_2O]= 10 v/v %、GHSV= 25,000 hr^{-1}(@25℃)、操作溫度= 100 °C ~200°C。

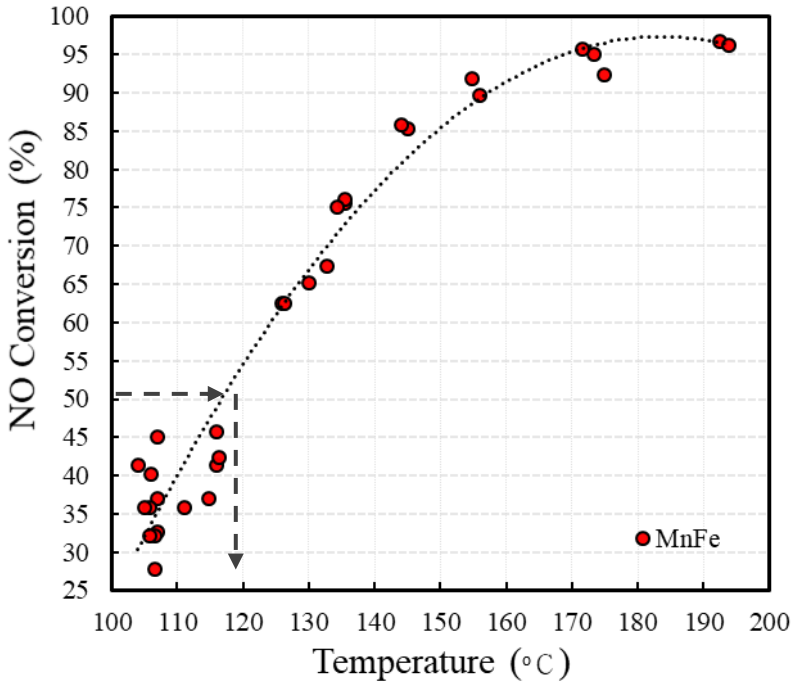


圖 4　MnFe/TiO_2 觸媒溫度影響測試

測試參數：[NO]=200 ppm、[NH_3]=200 ppm、[H_2O]= 10 v/v %、GHSV= 25,000 hr^{-1}(@25℃)、操作溫度= 100 °C ~200°C。

2.2 觸媒水氣影響測試

在模擬電廠煙氣組成條件下，同樣以 $MnFeCe/TiO_2$ 觸媒為實驗組，$MnFe/TiO_2$ 觸媒為對照組進行操作水氣測試，其操作條件為([H_2O]= 0~15 v/v%、 [NO]=200 ppm、[NH_3]=200 ppm、GHSV= 25,000 hr^{-1}(@25℃)、操作溫度= 140°C)，探討觸媒效率與水氣關係。實驗結果如圖5所示，當反應器中沒有水氣(H_2O = 0 v/v%)時，$MnFeCe/TiO_2$ 及 $MnFe/TiO_2$ 之脫硝效率分別有 99 %與 98 %；當水氣濃度為 5 v/v%時，脫硝效率分別為 96 %與 95 %；當水氣濃度為 10 v/v%時，脫硝效率分別為 80 %與 83 %；當水氣濃度為 15 v/v%時，脫硝效率分別為 71 %與 77 %。綜觀地說，當水氣濃度較低(≦5 v/v%)時，$MnFeCe/TiO_2$ 觸媒效能些微高於 $MnFe/TiO_2$ 觸媒；然而當水氣濃度較高(≧10 v/v%)時，$MnFeCe/TiO_2$ 觸媒之脫硝效能則低於 $MnFe/TiO_2$ 觸媒。而其誤差範圍較水氣濃度低時來得大，可說明水氣在濃度較高的情況下能使觸媒活性表現受到較巨幅的影響。

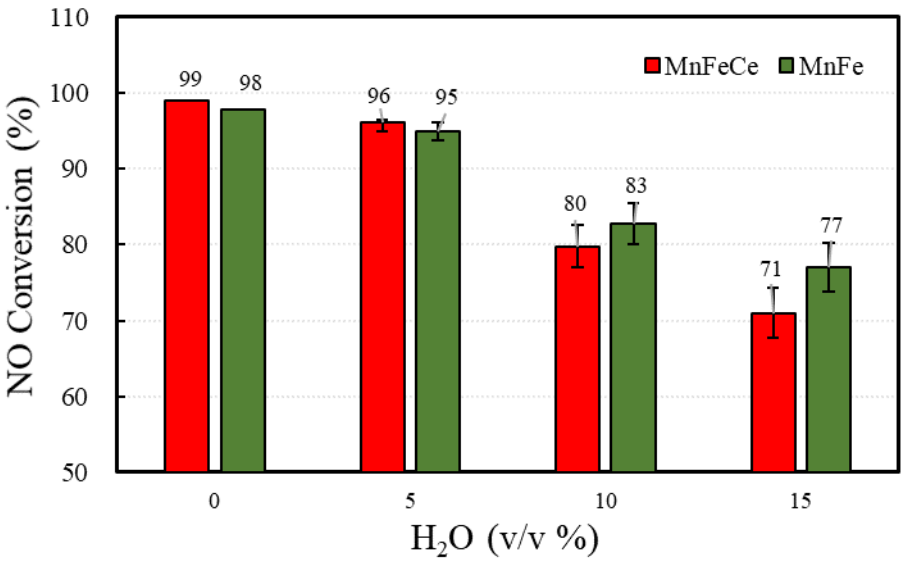


圖 5　觸媒水氣影響測試

測試參數：[NO]=200 ppm、[NH_3]=200 ppm、[H_2O]= 0~15 v/v %、GHSV= 25,000 hr^{-1}(@25℃)、操作溫度= 140°C。

由以上結果可得知，於溫度較低(100 ℃ ~110℃)之溫度區間時，$MnFeCe/TiO_2$ 與 $MnFe/TiO_2$ 觸媒有著相近之趨勢。然而，水氣濃度之影響在不同溫度區間有著不同之趨勢，在 105℃時 $MnFeCe/TiO_2$ 有著較高之效率，而在 140℃時 $MnFeCe/TiO_2$ 的觸媒性能卻略低於

$MnFe/TiO_2$。綜上而言，$MnFeCe/TiO_2$ 與 $MnFe/TiO_2$ 觸媒皆有良好之 SCR 脫硝效率，在成本之考量下，選定以 $MnFe/TiO_2$ 作為最佳的觸媒配方，進行模廠測試工作。

三、燃氣複循環機組模廠測試

本研究主要目標在於研發一低溫抗水氣之 SCR 觸媒，其可用於反應溫度範圍 100℃~200℃之間，且在大潭電廠煙道尾氣之高濕度環境中具 50 %以上之脫硝效率。本試驗將以實驗室製備之 $MnFe/TiO_2$ 作為觸媒，進一步將觸媒粉體披覆於堇青石蜂巢擔體上，之後於大潭電廠 3-1 號機之頂樓分流其煙道尾氣，以進行各種操作條件測試評估觸媒於實廠應用之可行性。

量產觸媒製程步驟如同實驗室觸媒合成一樣，放大觸媒製程約 200 倍，共沉澱反應過程會由激烈冒泡逐漸趨於平緩。待 pH 值達指定數值時停止加入 Na_2CO_3 沉澱劑，加自來水攪拌均勻後倒適量觸媒溶液入過濾裝置，如圖6 所示，反覆加水抽氣過濾，收集濾袋上的泥狀觸媒入鐵盆之中，如圖 7 所示，接著放入烘箱乾燥脫水如　圖8 所示，取出觸媒顆粒送入高溫爐鍛燒即可得到活性觸媒顆粒。之後再將鍛燒完之觸媒進行塗敷作業，其將觸媒與黏著劑充分研磨，得到塗敷之漿料，並進一步將其塗敷於堇青石陶瓷蜂巢狀擔體上。本試驗一共使用 32 塊 $MnFe/TiO_2$ 蜂巢觸媒塊(15 cm × 15 cm × 10 cm/塊，CPSI: 100)，如圖9 所示將其裝入觸媒模組中(共 2 層，每層 16 塊觸媒塊)，最後進行大潭電廠模廠測試。

本研究於大潭電廠之 3-1 號機頂樓設置一 SCR 系統，如圖10 及圖11 所示，其包含風機、注氨點、電熱器以及觸媒床。本試驗利用 $NO/NO_2/NOx$ 可攜式分析儀、氨氣分析儀、風速計以及壓力計來進行採樣與分析，其濃度測定將在煙道分流入口處、觸媒床之前與觸媒床之後採樣；風速測定係在注氨後採樣；壓力測定在觸媒床前後端採樣；氨氣則在觸媒床後端採樣。煙氣測試條件如表 11 所示。

圖 6　觸媒之抽氣過濾裝置

圖 7　過濾後泥狀觸媒

圖 8　乾燥後觸媒顆粒

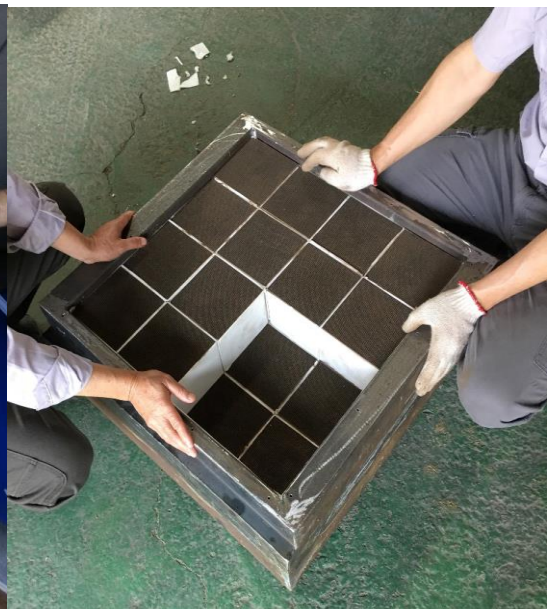


圖 9　蜂巢觸媒安裝於觸媒框

圖 10　模廠 SCR 系統

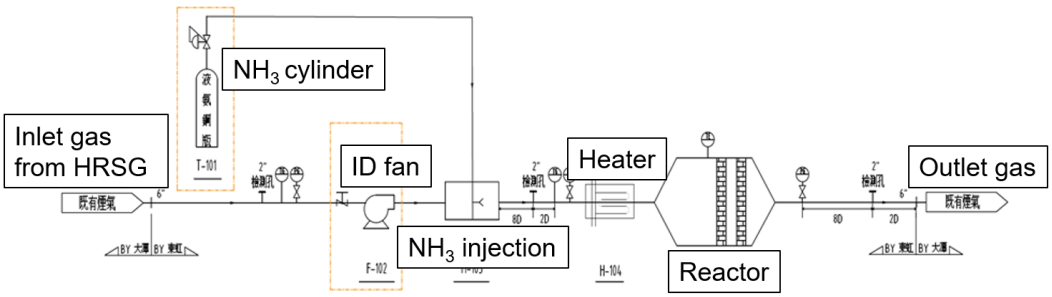


圖 11　模廠 SCR 系統示意圖

表 1　煙氣測試條件

Flue gas composition	Flue gas flow rate	Temp.	NOx (dry@15% O_2)	H_2O (wet)	O_2 (dry)	CO_2 (dry)	SO_2 (dry@15% O_2)	SO_3 (dry@15% O_2)	N_2 (dry)
Unit	Nm^3/min	℃	ppm	%	%	%	ppm	ppm	%
Value	10	90~100	13~16	11.15	13.58	4.5	0.01	0.01	balance

2.3 模廠觸媒溫度影響測試

本研究於大潭電廠測試 $MnFe/TiO_2$ 蜂巢觸媒於操作溫度 100℃~200℃下之 SCR 效率，選定之操作溫度為 120℃、140℃、160℃、180℃與 200℃，並於空間流速 4320 h^{-1}~4410 h^{-1} 間、注氨莫耳比

(NH_3/NO)為 1.0 下進行 SCR 之性能測試。由表2 之結果發現，其大潭電廠尾氣之 NO、NO_2 與 NOx 之濃度於滿載時皆為 11 ppm、2 ppm 與 13 ppm，在注氨後可發現，當操作溫度高於 160℃時可有效去除尾氣中之 NO_2，其 160℃、180℃與 200℃於觸媒後之 NO 濃度分別為 7 ppm、6 ppm 與 5 ppm。此外，由

圖12 可得知，NO 轉換效率隨著操作溫度提高而升高，當操作溫度高於 180℃時，SCR 之效率可高於 50 %，其 180°C 與 200℃之 NOx 去除效率分別為 54 %與 62 %。

表 2　模廠觸媒於不同之操作溫度之測試結果

操作溫度(°C)	空間流速(h^{-1}) @80°C	入口濃度(ppm) [NO]/[NO_2]/[NO_x]	注氨後濃度(ppm) [NO]/[NO_2]/[NO_x]	NOx 去除效率(%)
120	4320	11/2/13	9/2/11	15
140	4320	11/2/13	7/2/9	31
160	4320	11/2/13	8/0/8~7/0/7	42±4
180	4320	11/2/13	6/0/6	54
200	4410	11/2/13	5/0/5	62

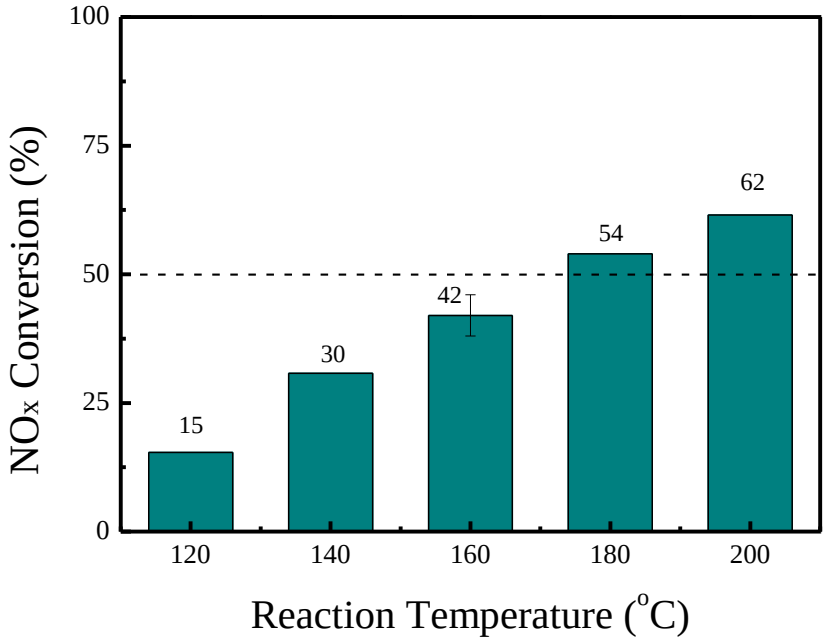


圖 12　$MnFe/TiO_2$ 蜂巢觸媒於不同操作溫度下之 SCR 模廠性能測試

2.4 模廠觸媒空間流速影響測試

本研究團隊於大潭電廠測試 $MnFe/TiO_2$ 蜂巢觸媒於空間流速 2,000 h^{-1} ~ 10,000 h^{-1} 下之 SCR 效率，選定之空間流速為 2090 h^{-1}、3010 h^{-1}、4210 h^{-1} 與 6120 h^{-1}，並於操作溫度 150℃與 160℃、注氨莫耳比(NH_3/NO)為 1.0 下進行 SCR 之性能測試。由表3之結果發現，大潭電廠尾氣之 NO、NO_2 與 NOx 之濃度會隨負載量而變動，其在降載期間 NO、NO_2 與 NOx 之濃度皆會提高，而在注氨後可發現，當操作溫度為 150℃時，在空間流速 2090 h^{-1} 與 3010 h^{-1} 下可完全去除尾氣中之 NO_2。另一方面，當操作溫度為 160℃時在空間流速為 2090 h^{-1}、3010 h^{-1} 與 4210 h^{-1} 下皆能完全去除尾氣之 NO_2。此外，由圖 13 可得知，NO 轉換效率隨著空間流速提高而降低，其於操作溫度 150℃與 160 ℃時，在空間流速 2090 h^{-1} 與 3010 h^{-1} 下之 SCR 之效率皆可高於 50 %，其中操作溫度 160 ^oC 於空間流速 2090 h^{-1} 之組別更有高達 73±4 %之 SCR 效率。

表 3 模廠觸媒於不同之空間流速之測試結果

操作溫度(^oC)	空間流速(h^{-1}) @80^oC	入口濃度(ppm) [NO]/[NO_2]/[NO_x]	注氨後濃度(ppm) [NO]/[NO_2]/[NO_x]	NOx 去除效率(%)
150	2090	10/2/12	4/0/4~5/0/5	62.5±4
150	3010	14/3/17	8/0/8	53
150	4210	11/2/13	7/1/8	38
150	6120	14/8/22	14/3/16	27
160	2090	11/2/13	3/0/3~4/0/4	73±4
160	3010	11/2/13	6/0/6	54
160	4210	11/2/13	7/0/7	46
160	6120	13/2/15	9/1/10	33

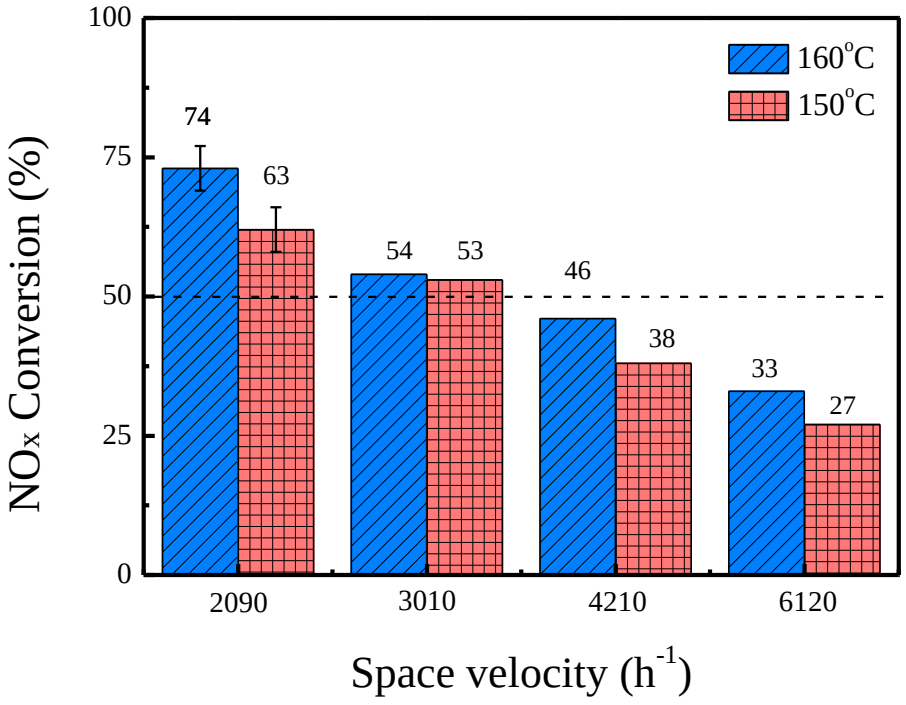


圖 13　MnFe/TiO$_2$ 蜂巢觸媒於不同空間流速下之 SCR 模廠性能測試

3.1 模廠觸媒長效測試

本次大潭模廠試驗於 107/07/03 將觸媒裝入實廠系統中，其後便開始暴露於煙道含水氣之尾氣中，在 8 月底一次電力設施完成後，於 107/8/30 開始注氨測試，至 107/10/11 完成所有測試工作，累計觸媒暴露於實廠尾氣之時間達 100 天，而實際注氨之日數則有 15 個工作天(8/30, 8/31, 9/3, 9/5, 9/7, 9/10, 9/13, 9/18, 9/20 ,9/21, 9/25, 10/1, 10/2, 10/8 以及 10/11)，各日期之 SCR 測試效率結果如圖14 所示。

因各日期之測試基準未必相同，因此為了解觸媒是否因為長期放置在煙道氣流中，受到水氣、SO_2 與注 NH_3 之影響，本計畫從中挑選出測試條件相同的三組數據，其為以操作溫度 160℃、空間流速 4430 h^{-1}@80^{o}C 下之測試結果，如圖15 所示，其分別為在 8/30、9/18 以及 10/11 號之測試效率，前後時間相距 42 天，注氨時間則相差 15 天，由圖可看到其 SCR 效率分別為 46%、38%以及 46%，由此結果可得知，觸媒經過 15 個注氨工作天後，其活性仍未降低。

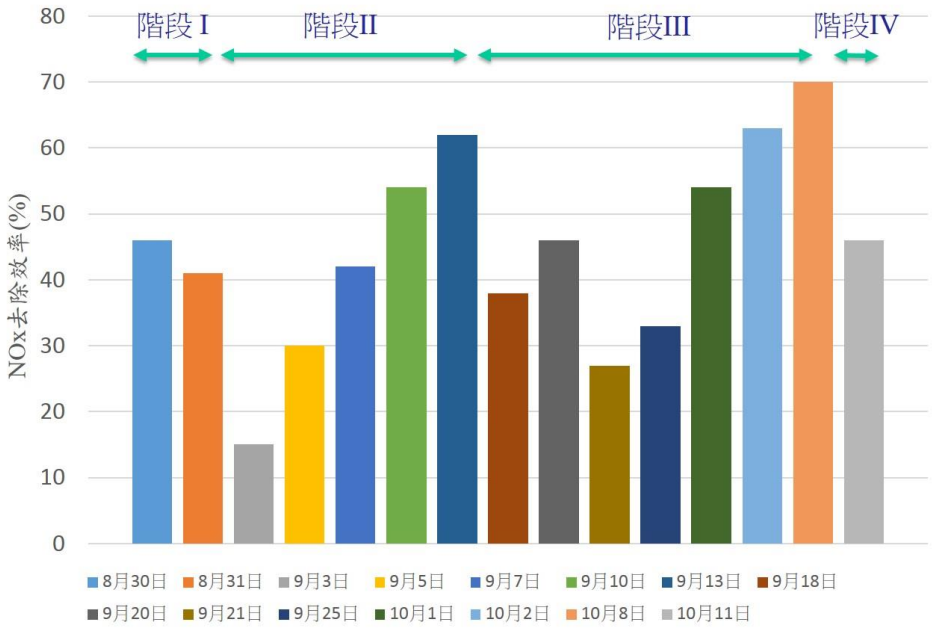


圖 14　不同日期之 NOx 去除效率

階段 I: 系統操作測試 (8/30:T=160°C、GHSV= 4,320 h^{-1}; 8/31:T=160°C、GHSV= 5,000 h^{-1})；階段 II:操作溫度影響測試(GHSV= 4,320 h^{-1}，T=120~200 °C)；階段 III:空間流速影響測試(GHSV= 2,090~6,120 h^{-1}，T=150&160 °C)與注氨量測試(10/1：GHSV= 3,010 h^{-1}，T=160 °C)；階段 IV: 長效測試對照組(10/11：GHSV= 4,320 h^{-1}，T=160 °C)。

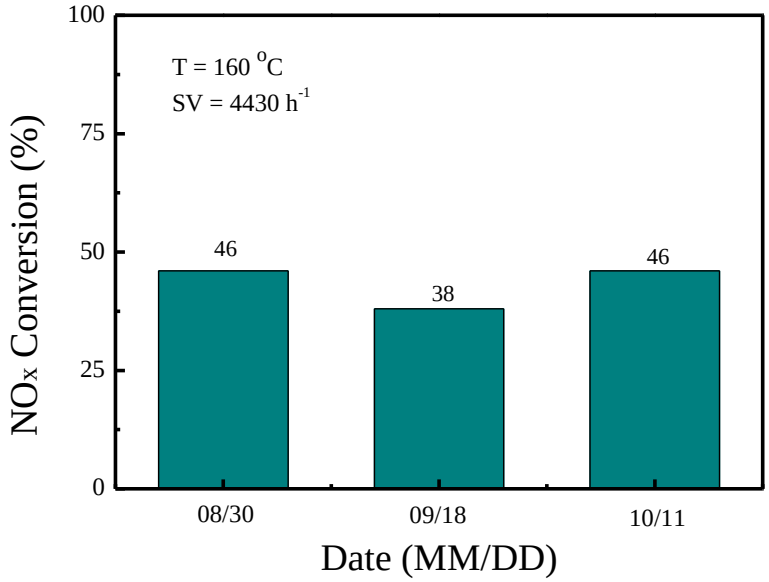


圖 15　$MnFe/TiO_2$-蜂巢觸媒於不同日期中之 SCR 實廠性能測試

測試參數：GHSV= 4,430 h^{-1}、操作溫度= 160 °C。

3.2 經濟性評估

本次實驗室製作之 $MnFe/TiO_2$ 觸媒皆使用工業等級之原料，所購買之觸媒原物料數量為 20~40kg 之包裝。其價格如**錯誤！找不到參照來源。**所示，其中 Mn、Fe，TiO_2 以及中和劑 Na_2CO_3 之每公克價格分別為 0.067、0.03，0.07 以及 0.006 元(以全球原料市場價格進行評估)，在乘上其每批次用量後，經加總可得每批次需花費 47 元，而每批次合成約可得 400g 觸媒，因此可得知每公斤觸媒所需 118 元，塗敷與 32 塊堇青石蜂巢價格為 11,720 元。本次試驗將 4 公斤觸媒塗敷於 $0.072m^3$ 之蜂巢(32 塊)之上，進而可以算出每 m^3 所需之觸媒總價為 169,333 元，但不含人力費、設備費、水電費用。如果以大潭電廠尾氣排氣量 $60,000Nm^3/min$ 進行計算，大約需使用 432 m^3 觸媒量才能將脫硝效率達 50 %以上，總觸媒費用需約 7,315 萬元。

本試驗採 $MnFe/TiO_2$ 觸媒塗敷於堇青石蜂巢擔體上進行實驗，目前火力電廠大多以押出成型法進行蜂巢式觸媒製備，如果改以此方法計算每 m^3 觸媒總價為 47,200 元(以密度 $0.4\ g/cm^3$ 計算)。如果以大潭電廠尾氣排氣量 60,000 Nm^3/min 進行計算，大約需使用 432 m^3 觸媒量才能將脫硝效率達 50 %以上，總觸媒費用約 2,039 萬元。目前傳統商用 V_2O_5-WO_3/TiO_2 觸媒市售價格為每 m^3 觸媒 165,000 元，以林口電廠為例，林口電廠每部機組每層觸媒體積約 146 m^3，目前已安裝 3 層蜂巢式觸媒，總體積為 876 m^3，觸媒總價為 1.4 億元。經過上述計算，使用低溫觸媒進行脫硝，極具有市場競爭性，未來將著重於更低溫(小於 100℃)、效率更高的方向進行開發，有機會可以取代傳統高溫型觸媒。

四、結　論

本研究以共沉澱法成功合成 $MnFeCe/TiO_2$ 與 $MnFe/TiO_2$ 低溫型觸媒，經實驗室量測結果，兩者於反應溫度 100℃~200℃之觸媒活性表現的趨勢相近，當反應溫度於 200℃時，兩者的脫硝效率皆可大於 95%，當反應溫度在 120℃時，兩者的脫硝效率皆可高於 50%以上。根據本次大潭電廠模廠測試結果，$MnFe/TiO_2$ 蜂巢觸媒可在 150℃~200℃溫度範圍內達到 50%以上之脫硝效率，現階段最佳測試結果為 $T=160^oC$，$SV=2090\ h^{-1}$，其脫硝效率可達 73%。相當於大潭電廠 NOx 排放可從 20 ppm 降低至 5.6 ppm。經濟性評估，如果以大潭

電廠尾氣排氣量 60,000Nm^3/min 進行計算，大約需使用 432m^3 觸媒量才能將脫硝效率達 50 %以上，以塗敷於堇青石蜂巢觸媒費用約 7,315 萬元，未來若採押出成型法進行蜂巢式觸媒製備，總觸媒費用可降低至約 2,039 萬元，低溫觸媒極具有市場競爭性，有機會可以取代傳統高溫型觸媒。

五、參考文獻

1.Kang M., Yeon T. H., Park E. D., (2007) Manganese oxide catalysts for NOx reduction with NH3 at low temperature. Applied Catalysis-A General, 327(2):261-269.

2.Tang X, Hao J M, Xu W. G., (2007) Low temperature selective catalytic reduction of NOx with NH3 over amorphous MnOx catalysts prepared by three methods. Catalysis Communications, 8(3):329-334.

3.Kapteijn F., (1994) Activity and selectivity of pure manganese oxide in the selective catalytic redcution of nitric oxide with ammonia. Applied Catalysis B-Environmental, 3(2-3):173-189.

4.Yang, S.J., Fu, Y.W., Liao, Y., Xiong, S.C., Qu, Z., Yan, N.Q. and Li, J.H. (2014a). Competition of selective catalytic reduction and non selective catalytic reduction over MnOx/TiO2 for NO removal: The relationship between gaseous NO concentration and N2O selectivity. Catal Sci TechNOl 4: 224-232.

5.Casapu M., Krocher O., Elsener M. (2009) Screening of doped MnOx-CeO2 catalysts for low temperature NO-SCR. Applied Catalysis B-Environmental, 88(3-4): 413-419.

鈣迴路二氧化碳捕獲系統穩定運轉示範驗證

周揚震*、陳威丞**、黃欽銘***、徐恆文****、萬皓鵬*****

摘　要

鈣迴路二氧化碳捕獲程序應用於捕獲水泥製程，可達到捕碳及資源循環再利用之多重效益，故可視為水泥製程之最佳可行性減碳技術。工研院在能源局與台灣水泥公司支持下，於台泥花蓮和平廠建立全世界最具規模的 1.9 MWt 鈣迴路先導廠及 500kWt 新世代鈣迴路捕獲系統，進行系統示範驗證。為了推動鈣迴路技術產業化，本研究以 500 kWt 新世代鈣迴路系統 101 小時運轉實驗為標的，分析系統長時間運轉所遇到的工程問題，提出系統改善方案，進一步提升系統長時間操作可行性，以因應產業化需求。

本研究顯示 500kWt 鈣迴路先導試驗廠經系統優化後，已可穩定連續運轉，驗證系統之可行性及操作穩定性。工研院未來仍持續與台泥合作，推動鈣迴路技術產業化；擬推動設置 10MWt 示範系統(年捕碳量 5.5 萬噸 CO_2)，並預計於 2025 年達到 100MWt 商轉系統，以協助政府達到階段性減碳目標。

【關鍵詞】鈣迴路捕獲程序、二氧化碳、煅燒、碳酸化、穩定運轉

---

*工業技術研究院綠能與環境研究所　專案經理

**工業技術研究院綠能與環境研究所　資深研究員

***工業技術研究院綠能與環境研究所　研究員

****工業技術研究院綠能與環境研究所　專案經理

*****工業技術研究院綠能與環境研究所　組長

一、前　言

《2017 能源技術展望》於未來全球氣溫上升情境中指出，二氧化碳捕獲、封存與再利用技術可在 2060 年可貢獻 1 億噸減碳量，以將氣溫上升控制在 1.75˚C。2016 年正式生效的巴黎協議，亦同意要將全球溫度上升控制在低於工業革命前大氣溫度 2 度以下。因此「減碳」是世界各國在能源與工業產業所共同面臨的挑戰，研發及佈署大規模減碳技術為維繫產業競爭力的重要工作。各項減緩全球暖化的情境、措施及協議代表的是挑戰也是機會。世界各國為了實現減碳承諾所投入各項資源，代表的亦是減碳產業的綠色商機，而二氧化碳捕獲、封存與再利用技術是極具潛力的減碳產業之一。

鈣迴路捕獲二氧化碳技術是以鈣基吸附劑，在煅燒及碳酸化反應器中不斷循環，進行吸附劑再生及碳酸化(捕碳)反應之二氧化碳捕獲程序。其簡易流程示意圖如圖 1 所示。該程序將碳酸鈣於煅燒系統內煅燒為氧化鈣吸附劑($CaCO_3 \rightarrow CaO+CO_2$, 吸熱 178.8KJ/mole)，以氧化鈣與煙氣中的二氧化碳在碳酸化爐進行碳酸化(捕碳)反應，捕獲二氧化碳($CaO+CO_2 \rightarrow CaCO_3$，放熱反應，178.8KJ/mole)。碳酸化反應形成的碳酸鈣可重新輸送至煅燒爐中進行吸附劑再生，同時回收高濃度二氧化碳。吸附劑於碳酸化與煅燒系統內反覆循環形成迴路，將製程煙氣中的二氧化碳捕獲及濃縮至 95%以上。該技術具有捕獲容量高、吸附劑價格便宜、設備簡單，及處理量大等優勢。台灣石灰石產量豐富，極具發展鈣迴路捕獲系統的潛力。

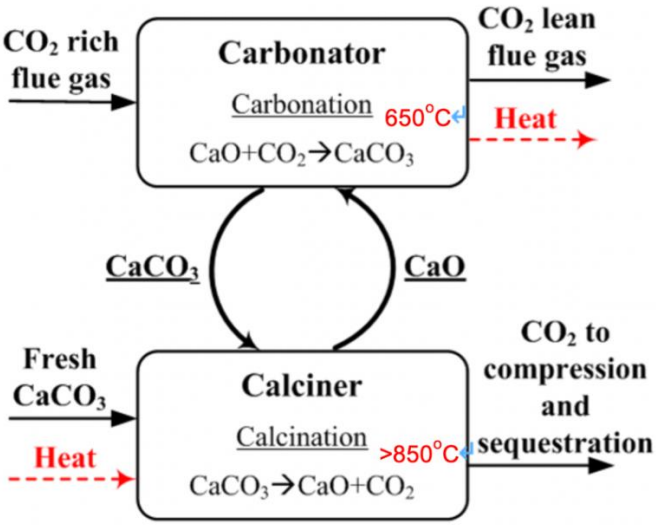


圖 1　鈣迴路二氧化碳捕獲程序示意圖

鈣迴路捕獲二氧化碳技術近年來快速發展，已擴展到示範廠等級的測試。工研院在經濟部能源局的研究經費支持下發展該技術；其發展歷程如圖 2 所示。本研究團隊於 100~106 年間建立全球最具規模之 1.9MWt 鈣迴路捕獲先導型系統，開發純氧煅燒煙氣迴流與水合反應技術，提升效率與鈣循環次數，已累積超過 2600 小時運轉操作經驗。並於 104 年著手開發整合蒸汽水合與多階旋風塔之新世代鈣迴路二氧化碳捕獲技術，並建立 500kWt 新世代鈣迴路系統[2、3]，累積運轉經驗已達 1,300 小時以上，可作為商業化系統之設計依據。

圖 2　工研院發展鈣迴路捕碳技術之歷程

本研究為驗證鈣迴路二氧化碳捕獲程序之系統產業化應用效益，以台泥和平廠做為鈣迴路捕獲二氧化碳先導型示範試驗廠場址。所建置之 1.9MWt 鈣迴路捕獲先導試驗廠及 500kWt 新世代鈣迴路捕獲先導試驗廠如圖 3 所示。本研究以 500kWt 新世代鈣迴路捕獲先導試驗廠為標的，探討系統長時間運轉所遇到的工程問題，提出系統改善方案，進一步提升系統長時間操作可行性，以因應技術產業化需求。

圖 3　(A)1.9MWt 鈣迴路捕獲先導試驗廠；(B)500kWt 新世代鈣迴路捕獲先導試驗廠

二、500kWt 新世代鈣迴路捕獲先導廠運轉操作分析

500kWt 新世代鈣迴路捕獲先導廠之現場圖及示意圖如圖 4。該系統之設計分別為多階旋風式煅燒系統、挾帶床式水合反應系統以及多階旋風式碳酸化系統。多階旋風式煅燒/碳酸化系統之設計，可增加系統內氣固接觸面積，提升煅燒系統熱交換效率及碳酸化系統反應轉化率。新鮮石灰石於多階旋風式煅燒系統內與高溫煙氣接觸，逐漸達到煅燒溫度(約 850°C 以上)，轉化成氧化鈣。煅燒後的粉體由迴路壓封閥(系統代號：S-02)收集，經迴路壓封閥下方通入之空氣或煙氣，將粉體形成流體化狀態，輸送至碳酸化爐中，進行碳酸化(捕碳)反應。碳酸化反應完後之粉體會排至 S-04 暫存槽，再向上氣送回煅燒爐，進行吸附劑再生。

圖 5 為新世代鈣迴路捕獲系統長期連續運轉之煅燒及碳酸化系統內溫度分佈圖。圖中煅燒系統之溫度紀錄，由上而下依序代表高溫煙氣由純氧燃燒室至反應器下游之溫度變化；圖中碳酸化系統之溫度紀錄，由下而上依序代表台泥製程煙氣流經碳酸化反應系統之溫度變化。

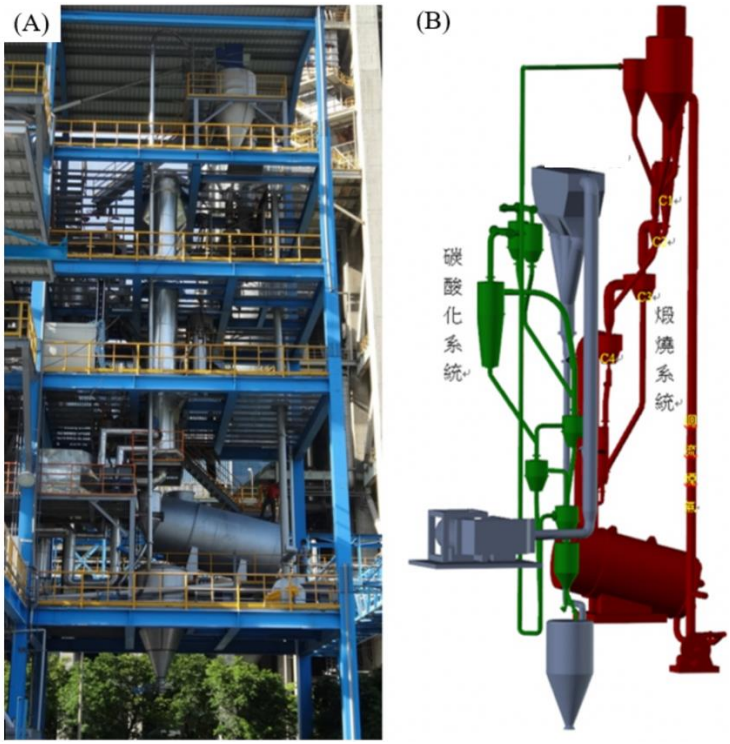


圖 4　500kWt 新世代鈣迴路捕獲先導廠(A)現場設備圖；(B)流程示意圖(右半部：煅燒系統、中間：水合反應系統、左半部：碳酸化系統)

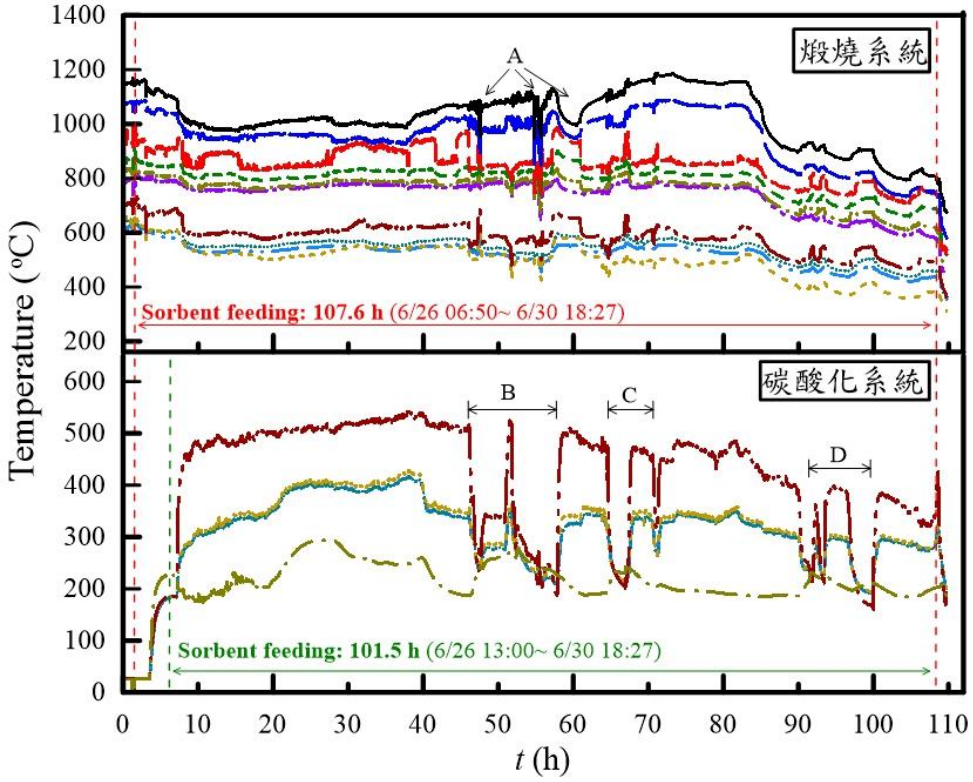


圖 5　500kWt 新世代鈣迴路捕獲系統長期連續運轉煅燒/碳酸化系統溫度分佈圖

由圖 5 中溫度變化可知，煅燒系統啟爐後的 85 小時中，煅燒及碳酸化系統溫度大部分均可維持穩定狀況，證實系統操作時具高度穩定性。啟爐 85 小時後進行降載測試，瞭解不同操作條件之捕碳效益。圖中所標示 A 至 D 的溫度驟降點，是由於煅燒系統之燃燒室熄火及迴路壓封閥異常所致。表 1 整理本次長期運轉測試過程中所遇到的操作問題。各項現場異常均可經由現場操作模式修正後，回復正常系統運轉；其中氣體分析及新料下料旋轉閥測試前維護已納入系統整備工作，以減少測試時發生異常的可能性；燃燒室熄火及迴路壓封閥異常的問題則納入系統改善規劃。

表 1　500kWt 新世代鈣迴路捕獲系統連續運遇到的操作問題及發生原因

項次	現場狀況	發生原因
1	氣體分析儀異常	現場診斷異常原因為 UPS 壞掉
2	碳酸化系統粉料取樣異常	取樣分支管角度不足，使得大部分粉料均通往暫存槽的分支管
3	新料下料異常	水汽凝結於下料管線，造成粉體堵料 粉料累積於下料旋轉閥葉片，使得下料量不足
4	燃燒室熄火	迴流煙氣挾帶大量粉體至燃燒室，累積於管線，遮蔽 UV sensor 偵測火焰
5	迴路壓封閥異常	由煅燒系統至迴路壓封閥管線堵料 閥內粉料無法流化

三、500kWt 新世代鈣迴路捕獲先導廠系統優化改善方案

本研究根據前述分析結果，針對燃燒室熄火及迴路壓封閥異常的問題進行系統改善。此外在後續系統測試時亦觀察到，煅燒系統的燃燒室內層耐火泥剝落如圖 6(A)所示；且高溫迴流風車葉片傾斜如圖 6(B)，造成運轉時機體顯著震動的問題，也一併納入系統改善項目中。主要改善方案包括：燃燒室重製、煅燒系統迴流煙氣除塵以及裝設單擺閥阻隔煅燒煙氣竄混等。系統改善說明如下：

圖 6　煅燒系統內(A)燃燒室內層耐火泥剝落；(B)迴流風車葉片偏斜

1.純氧燃燒室重製

500kWt 新世代鈣迴路捕獲先導廠自民國 105 年建置完成至今，已運轉超過 1,200 小時。煅燒系統在反覆高溫及降溫操作的過程中，已逐漸出現耐火泥龜裂及部分崩塌的狀況。此外由於原燃燒室的 UV sensor 偵測管線向下傾斜，在系統長時間操作時，易在管線中累積粉體，遮蔽感測器，造成燃燒室熄火。在考量系統操作安全及運轉穩定性，本研究重製純氧煅燒系統之燃燒室，同時更改 UV sensor 管線及迴流煙氣進口管道配置，以達到系統優化之目的。

圖 7(A)為灌注耐火泥前的純氧燃燒室內部狀態，爐壁皆焊接鉤釘，並以填充材纏繞於鉤釘上，降低高溫操作時耐火泥熱脹冷縮造成的不良影響。圖 7(B)為燃燒室所使用的斷熱可鑄性耐火材及高強度可鑄性耐火材，燃燒室外層斷熱可鑄性耐火材主要成分為 47%氧化鋁及 38%二氧化矽，密度為 1.55t/m^3，熱傳導率為 0.29kcal/mh˚C，最高使用溫度為 1,400˚C，可有效防止熱量散失；高強度可鑄性耐火材主要成分為 75%氧化鋁及 17%二氧化矽，密度為 2.8t/m^3，熱傳導率為 1.5kcal/mh˚C，最高使用溫度可達 1,800˚C，能承受純氧燃燒的煙氣溫度。

2.煅燒系統迴流煙氣除塵

本研究以具煙氣迴流之純氧燃燒爐應用於鈣迴路煅燒系統，藉以再生石灰石吸附劑。該系統於長期運轉測試時，迴流煙氣會挾帶大量粉體至燃燒室。本研究擬以沈降室及旋風集塵器去除迴流煙氣中粉體(如圖 8 所示)。

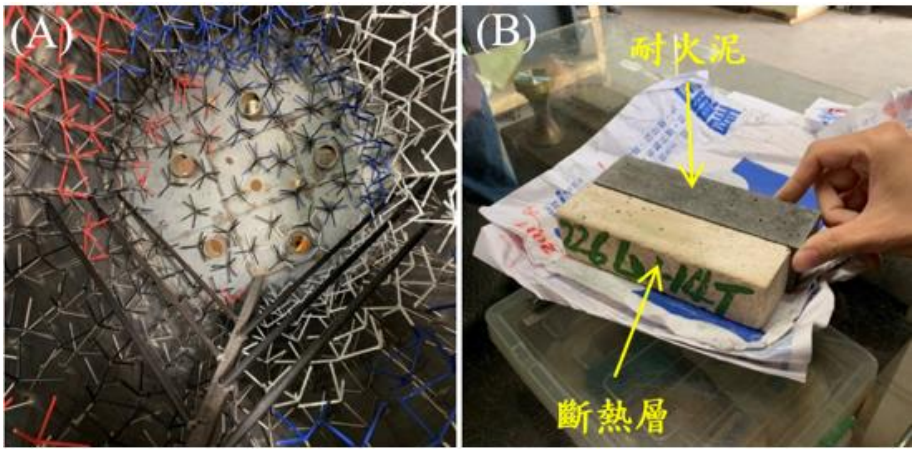


圖 7　純氧燃燒室(A)灌注耐火泥前內部狀況；(B)可鑄性及高強度耐火材

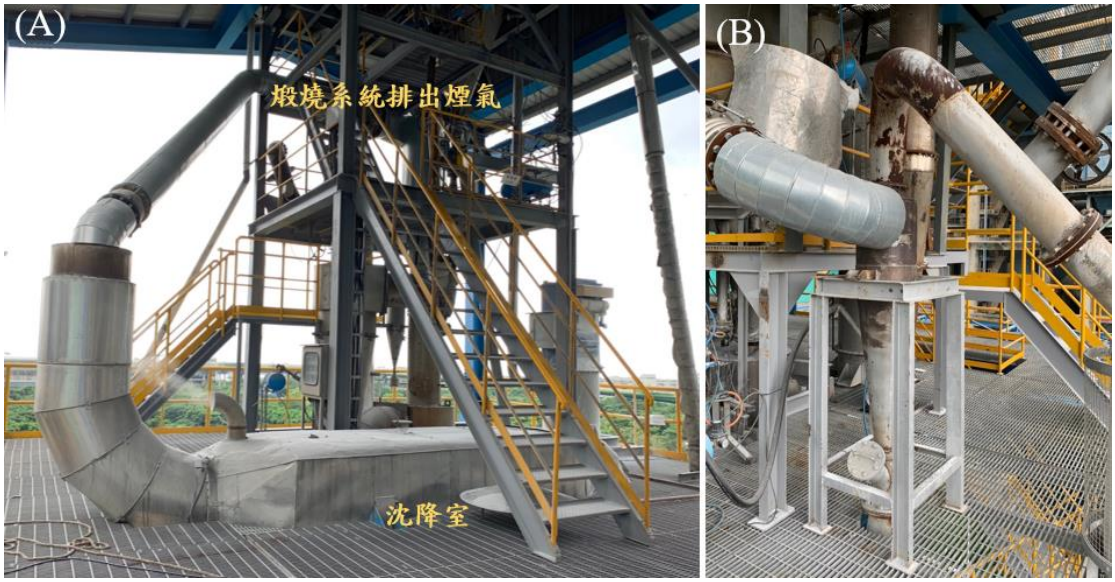


圖 8　(A)煅燒煙氣導入沈降室；(B)煅燒煙氣導入旋風集塵器

3.以單擺閥阻隔煅燒煙氣竄混

500kWt 新世代鈣迴路捕獲系統是以迴路封壓閥阻隔煅燒及碳酸化系統之氣體，同時將氧化鈣吸附劑由煅燒系統輸送至碳酸化系統。當迴路壓封閥內部吸附劑無法順利流化時，會使粉體輸送異常，造成系統無法連續運轉。因此本研究以單擺閥搭配氣爆筒(目前水泥廠脫酸塔的應用方法)取代迴路壓封閥。當高溫粉體由閥體上方進入後，藉由閥體舌片上粉體的累積重量和閥外砝碼的負重調整閥開度，達到粉料輸送及氣體阻隔的目的。

本次改善項目需調整煅燒及碳酸化系統配置位置，以符合單擺閥所需要的空間，並使連接管線的角度符合粉體下料所需的安息角。單擺閥內部

配置耐火泥，以承受煅燒後的高溫粉體。單擺閥外部配置氣缸，在無法以砝碼調控擺閥閥開度時驅動閥板開合。單擺閥下端配置一採樣管線，以閘刀閥控制取樣。修改後的系統如圖 9 所示。

圖 9　(A)連接煅燒及碳酸化系統的單擺閥；(B)取樣管

4.其他系統優化

為了達到系統穩定長期運轉，本研究針對上述系統進行優化。亦針對鈣迴路系統進行檢測，進行定期維護及汰換老舊設備等工作，其中包含：更換迴流風車葉片、裝設雙螺旋輸送機、修繕燃控系統、更換袋式集塵器濾袋、更換皮托管流量計、清理旋轉閥葉片、檢測及更換各項連接管線。

四、500kWt 新世代鈣迴路捕獲先導廠系統優化效益驗證

本次測試主要目的為驗證 500kWt 新世代鈣迴路捕獲先導廠系統優化效益。單元測試時以驗證迴流煙氣除塵效益、燃燒室長期操作穩定性以及單擺閥阻隔煅燒煙氣竄混效益為主。測試結果顯示：純氧燃燒爐體可承受操作溫度達 1,200°C，運轉時可明顯感受爐體表面溫度低於未改善前的系統，且高溫操作不會造成爐內耐火泥崩塌及龜裂，確認修改後之純氧燃燒爐可長期持續運轉。

本研究以沈降室及旋風集塵器去除煅燒迴流煙氣中粉體，系統運轉後開

啟煅燒系統之燃燒室，觀測去除煙氣中粉塵的效益如圖 10 所示。由圖中可觀測到靠近爐門處有粉體累積，主要是源自煅燒系統中無法被氣體輸送的粉體，直接從煅燒系統掉落至燃燒室內。燃燒室內靠近迴流煙氣口的區域無顯著粉體累積，表示鮮少碳酸鈣/氧化鈣顆粒被挾帶至燃燒室中，證實沈降室及旋風集塵器能有效去除迴流煙氣中的粒子，維持系統長期穩定操作。

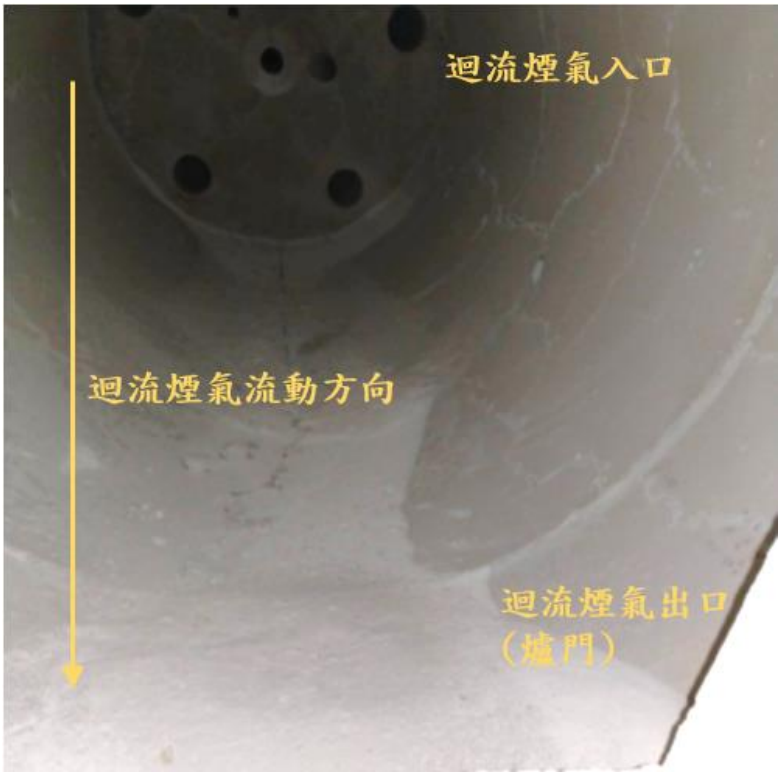


圖 10　系統測試後純氧燃燒室內粉體累積狀況

本研究擬將煅燒後的粉體通過單擺閥後至碳酸化系統，以阻隔兩個系統間的氣體。在單擺閥單元測試時，於煅燒系統進行碳酸鈣煅燒，於碳酸化系統內引入外界空氣，同時監測碳酸化系統進出口的二氧化碳濃度，確定單擺閥阻隔煅燒煙氣竄混的效益。

測試結果顯示：若煅燒系統進行碳酸鈣煅燒時，會造成大量煅燒煙氣隨粉體輸送至碳酸化爐，此時碳酸化系統內二氧化碳濃度會提昇約 5-10%。若使用單擺閥及閘刀閥雙機械閥分別開關的作動方式，可抑制煙氣竄混現象。圖 11 為操作條件對雙機械閥抑制煅燒煙氣竄混之影響。圖中各條件是改變不同閥開作動週期，測試時均錯開單擺閥及閘刀閥的開關時間。當縮短作動週期及減少閘刀閥開啟時間時，可將竄混二氧化碳濃度降至 1.5%。

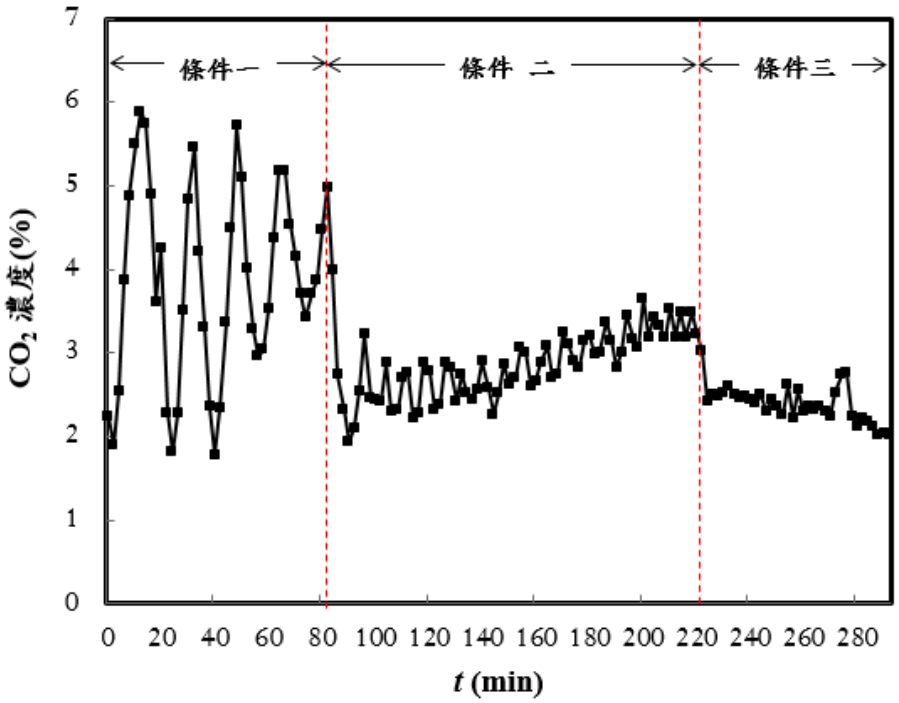


圖 11　操作條件對雙機械閥抑制煅燒煙氣竄混之影響

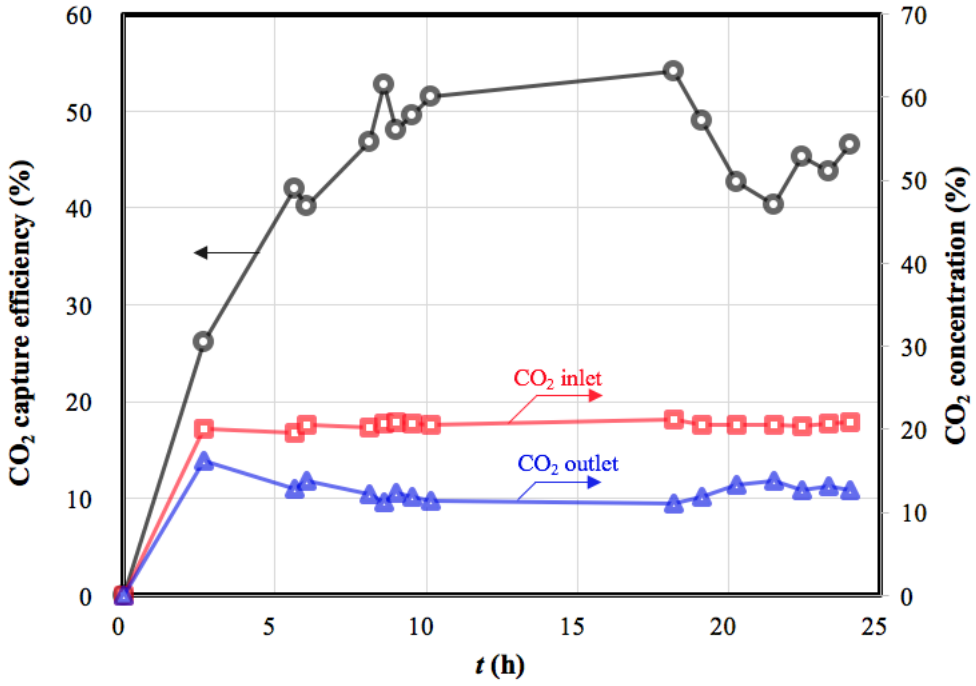


圖 12　500kWt 新世代鈣迴路捕獲系統之出口二氧化碳濃度及捕碳效率

圖 12 為 500kWt 新世代鈣迴路捕獲系統運轉之捕碳效益，測試期間為 108.6.10~108.6.14。本次測試之台泥製程煙氣的二氧化碳濃度約 20%，系統進行捕碳測試(將煅燒後粉體通入碳酸化爐)時，二氧化碳濃度會顯著下降，並維持在 11%。若考量此時煙氣中還有 1.45%二氧化碳竄混量，本次測試之捕碳效率可穩定維持約 50%。若能增加吸附劑循環量，將可進一步提升捕

碳效率。然而提升吸附劑循環量亦需提升吸附劑再生能耗，增加捕獲成本。因此本研究未來擬針對不同捕碳效率之成本進行估算，以設計具經濟效益之捕碳系統。

四、結　論

本研究以 500kWt 新世代鈣迴路捕獲先導試驗廠為標的，探討系統運轉所遇到的工程問題，針對燃燒室龜裂/熄火、迴流煙氣除塵及煅燒煙氣竄混等的問題進行系統改善，進一步提升系統長時間操作可行性，以因應技術產業化需求。系統優化後之運轉穩定性高，可維持穩定爐內溫度。現場操作無顯著氣體或粉體洩漏的情況，雙機械閥可以有效抑制煅燒煙氣竄混至碳酸化系統，顯示該系統具長期操作穩定性。工研院未來仍將持續累計系統優化及運轉經驗，取得放大參數，以設置 10MWt 示範系統(年捕碳量 5.5 萬噸二氧化碳)，推動鈣迴路技術產業化，並於 2025 年設置 100MWt 商轉系統，為我國階段性減碳目標盡一份心力。

五、致　謝

本文承經濟部能源局「化學迴路與二氧化碳捕獲再利用研發計畫」經費支持，謹此致謝。

六、參考文獻

1.International Energy Agency, Energy Technology Perspectives 2017(2017).
2.周揚震、徐恆文，“25kWth 鈣迴路捕碳程序之水合反應系統操作特性研究”，中華民國環境工程學會 2017 空氣污染控制技術研討會，台北，臺灣(2017)。
3.周揚震,陳威丞,徐恆文,萬皓鵬, 2018(11 月)，「500kWt 多階旋風式系統內之粉體輸送對煅燒效率之影響 」，第 30 屆環境工程學會年會空氣污染控制技術研討會，pp.7，台南，台灣。

低碳熱風供應系統開發與智慧化溫控技術建立

林佩勳*、陳俊勳**、陳佐睦***、伍健鵬***、楊沛琨****、陳易聰*****

摘　要

精進節能技術及發展綠能是中鋼集團重要經營方針，為降低製程碳排，本研究藉由顆粒燃料燃燒系統開發暨爐溫控制技術之精進來建構低碳熱風供應系統。研發進程首先根據木顆粒之裂解動力、灰熔融特性及三維數值分析研究結果，整合燃燒爐熱設計及分段燃燒控制等技術完成 5 MWth 等級之供熱系統開發，續以無因次參數分析搭配梯度提昇決策樹(Gradient Boosting Decision Tree；GBDT)機器學習演算法建立動態溫控決策模型，以解決供熱系統與應用端爐操整合之複雜溫控問題。研究結果發現，主燃燒室一/二次風量為影響主燃燒室氣溫最顯著之操作因子;藉由多段式供氧設計及動態溫度控制技術可將主燃燒室溫度控制在灰初始變形溫度之下,同時可控制燃燒室木顆粒裂解速度處於大於進料速度狀態，達成灰不熔融及不積料之目標，成功克服商用燃燒爐因溫度控制問題導致灰渣熔融、無法長時間穩定操作及其衍生之高操作成本問題；同時，此設計及溫控方法已獲得中華民國發明專利，運行結果亦顯示空汙排放符合高雄市加嚴法規之要求。

熱風產製及應用是工業生產重要之能源供應型態,目前本技術已獲得專利並落實應用於中聯資源水淬爐石粉產線，根據運轉數據，熱風供應系統之能耗(燃料率)較商用系統下降 10%，木顆粒取代燃煤作為能源之燃料替代技術更兼具溫室氣體減排 53%之效果，運用本系統生產水淬爐石粉所創造之循環經濟產值達 7,154 萬/年，整體工程在節能、減碳、減廢等面向上皆產出貢獻。

【關鍵詞】固態燃料裂解、分段燃燒、機器學習、低碳熱風供應系統

---

*中國鋼鐵股份有限公司　研究室室長

**國立交通大學　副校長

***中聯資源股份有限公司　工程師

****中聯資源股份有限公司　廠長

*****中國鋼鐵股份有限公司　工程師

一、前　言

生質顆粒取代燃煤是循環經濟重要之一環，亦是國際減碳趨勢之一；由燃料生命週期分析(life cycle assessment, LCA)[1]數據來看，以廢木材製成顆粒燃料取代燃煤具有 93%之溫室氣體減量效益。根據統計，全球木顆粒生產量在 2014 年達 2 千 7 百萬噸，預期 2020 年將進一步擴展至 4 千 5 百萬噸/年之規模[2]；此外，國際間如日本三菱、東芝等重要集團亦紛紛投入以生質能取代化石燃料之計畫，顯見其發展潛力。然在此低碳生產契機下，燃煤與木顆粒燃燒特性不同，燃燒載具及其對應之燃控技術是製程在燃料替代後能否穩定生產最重要關鍵；以 5 MWth 等級之供熱系統來看，商用燃燒爐面臨無法穩定連續操作之困難，即使使用高品級之木顆粒(ash<1%)，仍存在需每日需停機清爐，衍生起停機熱能耗損、起機引燃木顆粒之柴油消耗、固體燃料未完全燃燒之能量耗損及維護頻率高等問題。

精進節能技術及發展綠能是中鋼集團重要經營方針，為落實低碳生產，本研究藉由木顆粒燃燒系統開發暨爐溫控制技術之精進來建構低碳熱風供應系統，研發進程首先根據木顆粒之裂解動力、灰熔融特性及三維數值分析研究結果，整合燃燒爐熱設計及分段燃燒控制等技術完成 5 MWth 等級之供熱系統開發，續以無因次參數分析搭配梯度提昇決策樹機器學習演算法建立動態溫控決策模型，以解決供熱系統與應用端爐操整合之複雜溫控問題，並成功落實應用於中聯資源水淬爐石粉產線。

二、木顆粒燃燒系統開發

木顆粒燃燒爐進料量設計目標以 1 t/h 為基準，根據木顆粒熱值估算燃燒機熱釋放率約介於 5.14 及 5.24 MWth 間。為增加溫度控制能力，避免灰熔融狀況發生，並確保燃燒室木顆粒裂解速度處於大於進料速度狀態，達成穩定生產之目標，本研究利用多段燃燒設計及控制方法、風控佈料系統等完成燃燒爐開發；所開發之燃燒系統如圖 1 所示，主要爐體結構由主燃燒室及終端燃燒器構成，系統中一次側燃燒空氣風口位於爐體底部，燃燒空氣透過格柵構造進入燃燒爐，其孔隙率為 8.2%；燃燒所需二次風則由爐體側面的風口進入，燃燒爐爐膛出口設有一管狀之終端燃燒器，其上配置三次風進風口，用以確保整體過剩空氣達到爐操標準，確保燃燒效率。本開發案在工程面除由基本設計端著手，同時亦進行木顆粒燃燒參數、灰熔融行為等分析，並進行三維數值模擬分析等研究工作，以完整評估下料量達 1 t/h 之木顆粒

引燃特性、燃燒所需之空氣供給配置，並取得不同溫控目標所需之燃控參數等設計需求，相關結果敘述如下。

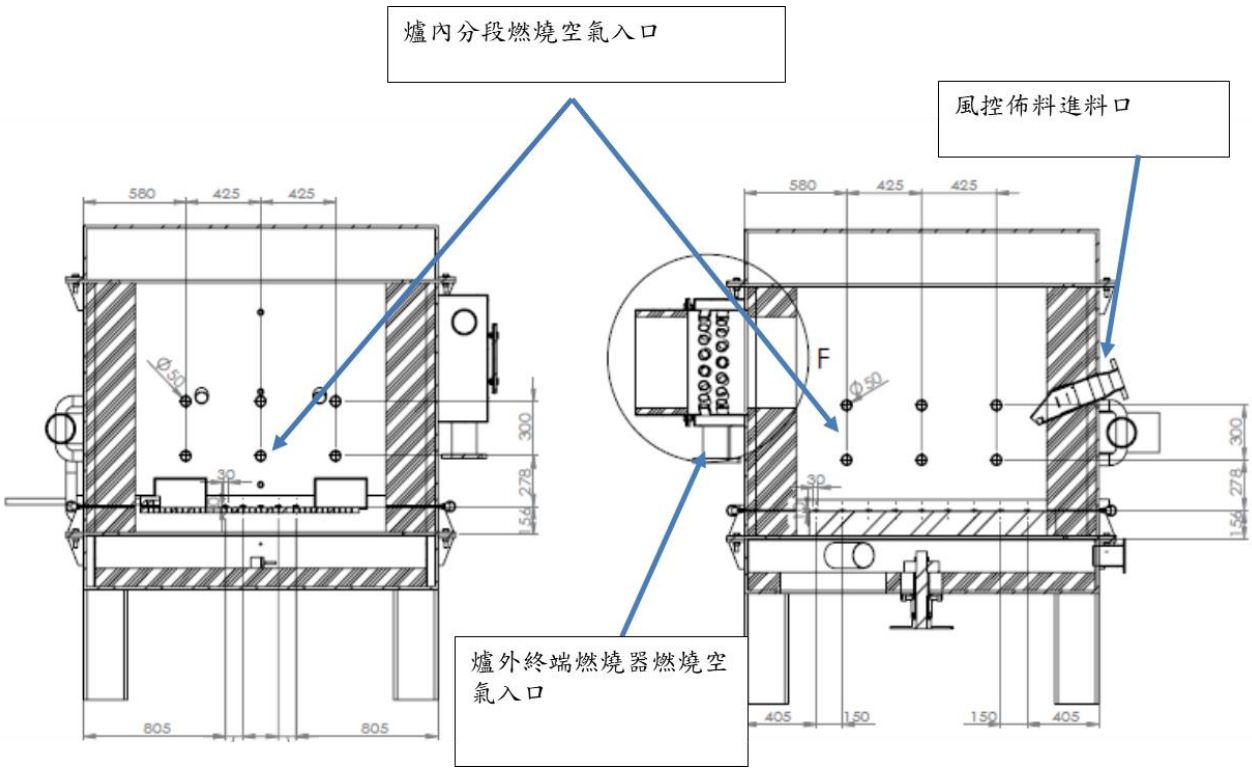


圖 1　燃燒爐示意圖

1.木顆粒燃燒參數分析

表 1 為本研究所採用之木顆粒特性檢測結果就單一樹種製成之顆粒燃料而言，其熱值介於 4,422 至 4,513 kcal/kg，其 C、H、O、N、S 分別為 46.25 wt%、5.48 wt%、39.37 wt%、0.40 wt%、0.15 wt%，燃燒所需化學當量空氣量為 4.27 Nm^3/kg-木顆粒；就混合樹種製成之木顆粒而言，其熱值介於 4,433 至 4,441 kcal/kg，其 C、H、O、N、S 分別為 46.15 wt%、5.29 wt%、38.89 wt%、0.67 wt%、0.04 wt%，燃燒所需化學當量空氣量為 4.22 Nm^3/kg-木顆粒。一般為達完全燃燒目的，燃燒爐提供之固體燃料燃燒過剩空氣比為 1.3 以上，不同學者亦進行廣泛研究[3、4、5、6、7]，並建議最佳過剩空氣比為 1.4 至 1.6。

表 1　木顆粒特性

樣本		單一樹種			混合樹種	
		1	2	3	4	5
Proximate analysis	Volatile matter (D.B.*, wt %)	84.55	85.51	85.08	82.47	84.98
	Ash(D.B.*, wt %)	0.67	0.69	0.62	0.84	0.81
	Fixed carbon(D.B.*, wt %)	14.78	13.8	14.3	16.69	14.2
	Moisture(A.D.*, wt %)	8.24	7.8	8.02	8.25	8.89
Gross heating value(kcal//kg)		4,422	4,463	4,513	4,433	4,441
Heating value (D.B.*, kcal//kg)		4,876	4,893	4,957	4,887	4,936
Bulk density (kg/m^3)		650	641	649	585	593

* D.B.－Dry basis; A.D.－Air dry.

除基礎燃燒數據外，灰熔融特性是燃燒生質物最重要參數，根據文獻資料[8、9、10]，木質生質灰之軟熔溫度(Softening temperature)介於 1,008 ℃至 1,538 ℃，溫度變化範圍相當廣，圖 2 及表 2 為顆粒燃料灰軟熔點測試結果，混合樹種與單一樹種顆粒最大差異在於其灰中 k 含量較高，導致灰軟熔溫度下降，若以樣本初始變形(Deformation)溫度做為判斷基準，低品級顆粒初始變形溫度為 1,150 ℃，松木顆粒初始變形溫度為 1,200 ℃，兩者差異為 50 ℃，將影響燃控策略，本研究即根據上述灰熔點測試結果訂定燃燒爐爐操溫度上限。

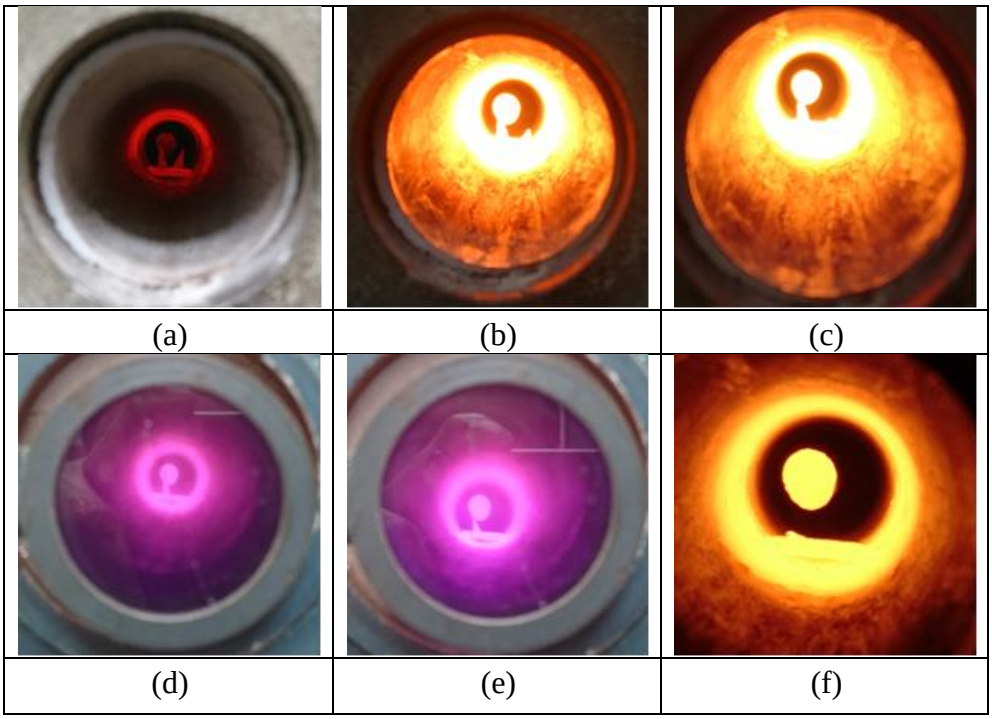


圖 2　灰燃燒行為測試結果

表 2　顆粒燃料灰燃燒行為測試結果

灰條件	原料經 800 ℃燃燒		原料經 500 ℃燃燒	
樣本	單一樹種	混合樹種	單一樹種	混合樹種
Deformation	1,200	1,150	1,200	1,150
Spherical	1,320	1,260	1,350	1,260
Hemisphere	1,330	1,270	1,355	1,270
Flow	1,340	1,290	1,360	1,290

固態生質物主要由碳(C)、氫(H)、氧(O)三元素構成，以木材類生質物為例，其由纖維素(cellulose)、半纖維素(hemicellulose)、木質素(lignin)、萃取成分(extractives)及灰份(ash)等組成，其中纖維素、半纖維素及木質素等高分子量物質約占 90%以上。為掌握裂解機制，以作為燃燒系統設計及爐操條件訂定基準，須進行裂解反應動力模式解析。所謂裂解反應動力模式解析主要係利用生質物在熱裂解反應過程中的溫度、時間等參數，建構反應物的轉化率之一種數學模式。根據化學反應理論[11]，生質物裂解反應可以方程式(1)表示。

$$\frac{dX}{dt} = k(1-X)^n \tag{1}$$

其中 k 為速率常數(min^{-1})；t 代表時間(s)；X 代表燃料轉化率，由 W_i(樣品初始重量(mg))、W_t(參與反應樣品重量(mg)及 W_f(實驗終了樣品重(mg))計算可得，相關代表方程式分述如下。

$$k = A\exp[-E/(RT)] \tag{2}$$

$$X = (W_i - W_t)/(W_i - W_f) \tag{3}$$

方程式(2)中，A 代表 the pre-exponential factor (1/s)、E 代表活化能(kJ/mol)、R 代表理想氣體常數(8.314 J/ mol-K)、T 代表溫度(K)，整合方程式(1)、(2)、(3)可知

$$\frac{dX}{dt} = A\exp(-\frac{E}{RT})(1-X)^n \tag{4}$$

在上式中，當平均加熱速率 β=(dT/dt)為常數，則方程式(4)經變數分

離後如方程式(5)所示：

$$\frac{dX}{(1-X)^n} = (\frac{A}{\beta})\exp(-\frac{E}{RT})dT \quad (5)$$

由於方程式(5)無解析解(Exact solution or Analytic solution)，許多學者曾就此級數函數展開作積分公式推導，並應用於固態燃料裂解動力參數之研究[11、12、13、14、15、16、17]，在此採用 Coats and Redfern 發展之積分式來求解，且假設反應階數 n=1，此時可推導出方程式(6)。

$$\ln[\frac{-\ln(1-X)}{T^2}] = \ln\frac{AR}{\beta E}\left[1-\frac{2RT}{E}\right]-\frac{E}{RT} \quad (6)$$

對生質物裂解反應而言 RT/E<<1 且 1-2RT/E≈1， 因此可將上述方程式簡化並利用回歸方程式求得相關反應常數。本研究中生質物裂解動力模式建立試驗於 PYRIS Diamond 儀器中進行,,加熱速率 β 設定為定值 10 ℃/min，試驗前樣品以 16MESH 篩網過篩，並於 105 ℃烘箱乾燥 4 小時，本次測試樣本初始重量為 8.417 mg,加熱調件係在空氣環境下以空氣流量 100 mL/min 進行裂解燃燒反應，加熱溫度由室溫至 800 ℃。圖 3 為熱重試驗結果,分析結果木顆粒活化能 E 為 40.63 kJ/mol,反應常數 A 等於 2.17 × 10^{-2} min^{-1}，其 R^2=0.947。

除燃燒動力模式外，本研究根據 TGA 曲線定義燃料起始裂解溫度(IDT)、引燃溫度(IT)、燃燼溫度(BT)作為爐操基準量化依據。起始裂解溫度(IDT)之解析由 DTG 曲線最大值所對應之溫度為基準，往低溫方向搜尋達 DTGmax 1%之點所對應之溫度即為 IDT；相對由 DTG 曲線最大值所對應之溫度為基準，往高溫方向搜尋 DTG 降至<0.5 wt%/min 之點所之溫度即為 BT；引燃溫度(IT；$T_{ignition}$)之定義由兩條線之交點所構成，首先由 DTG 曲線最大值所對應之溫度為基準作一垂直線，並由此垂直線與 TG 曲線交點繪出 TG 曲線之切線，此即為第一條線；第二條線是通過 IDT 所對應之 TG 曲線上之點構成之水平線，上述兩條線之交叉點即定義為 IT。依此定義找出其 IDT、IT、BT 分別為 234、296 及 462 °C；上述分析中，TGA 引燃溫度分析結果即作為柴油點火器在開機過程是否持續引燃之環境溫度參數設定依據。

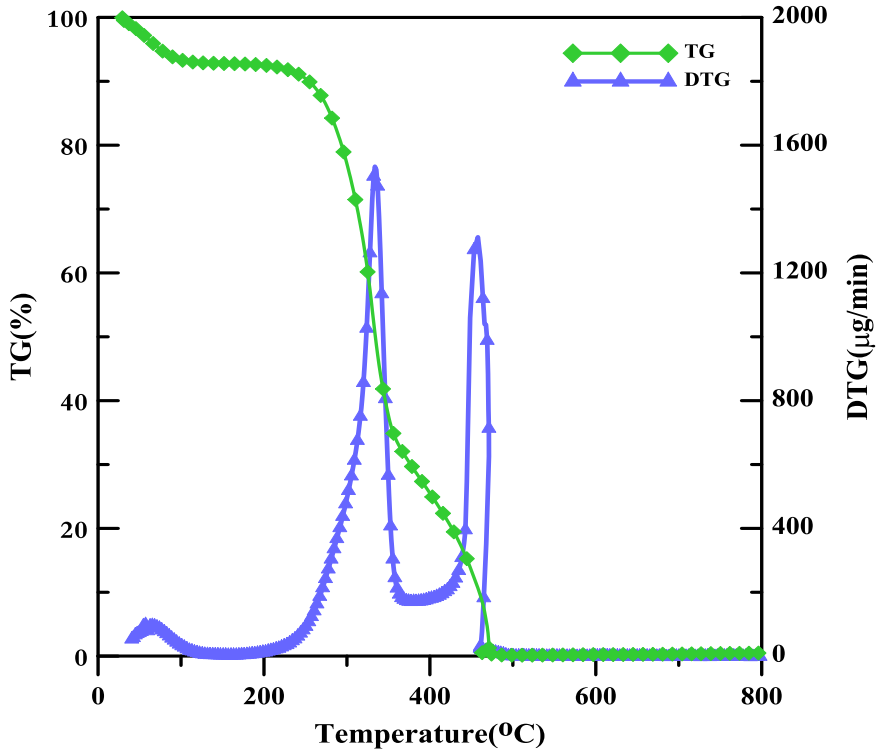


圖 3　熱重試驗結果

2.木顆粒燃燒爐設計

一般固態燃料燃燒爐單位面積熱負荷設計值< 4 MW/m^2 ，小型顆粒燃燒爐熱負荷甚至設置至<1 MW/m^2，但其爐溫較低，燃燒速度慢，經評估，本計畫開發之燃燒爐最高爐膛熱負荷設計最高值為 3.25 MW/m^2，且有別一般商用燃燒機，針對爐膛內不同高層及爐外利用獨立風機供氧，達到多段燃燒降低料溫及提升固態燃料燃燒效率之目的。為更深入了解燃燒爐運轉期間之熱流特性，本研究在工程設計過程同步展開實爐之三維模擬，技術開發之主要目的是進行設計與操作優化，並藉由理論預測降低開發風險。

木顆粒燃燒爐之數值模擬如圖 4 所示，根據固態燃料燃燒特性又可將其簡化為稀相(Free board)區及固定床區。本研究針對稀相區之流場做以下假設：(1)流場為三維、紊流，其中紊流模式包括 Reynolds-Averaged Navier-Stokes equations(RANS)及標準 $k-\varepsilon$ 紊流模型；(2)流體為不可壓縮的理想氣體；(3)受重力及浮力影響；(4)壁面為無滑移條件(no-slip condition)；(5)考慮熱輻射。

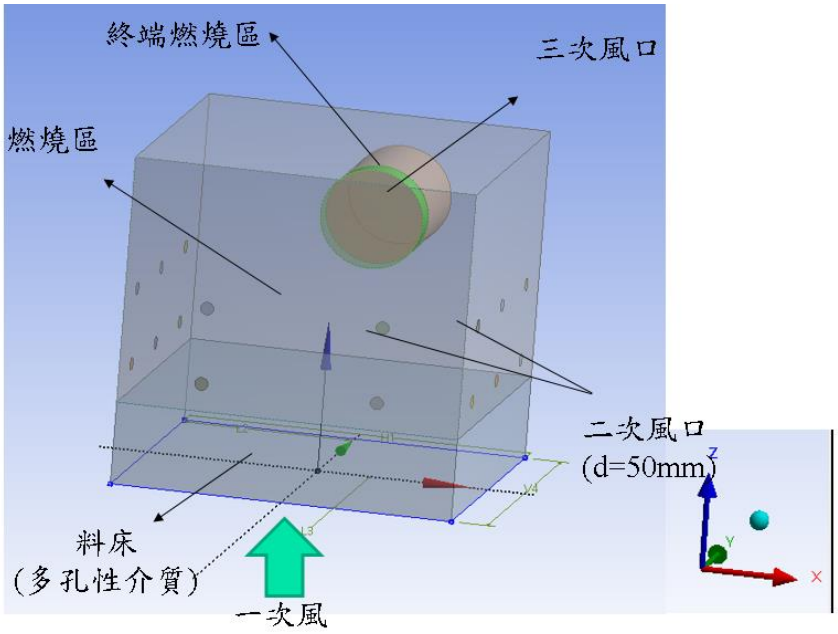


圖 4　燃燒爐模型示意圖

根據上述假設，其統御方程式包括連續方程式(Continuity Equation)、動量方程式(Momentum Equation) 、能量方程式(Energy Equation)、物種方程式(Species equation)及理想氣體方程式(Ideal Gas Law)及化學反應方程式等。其中，針對固態燃料裂解及燃燒所包含複雜之反應，本研究整合各國學者提出之計算方式[18、19、20]，以 C_6H_6、CH_4、H_2、CO 等分子代表顆粒燃料裂解後成分，並以其化學當量燃燒反應方程式及其對應之反應速率(方程式(1)至方程式(4))建構本研究之燃燒模型(Finite Rate/Eddy Dissipation 模型)。

$$r_{C_6H_6} = 1.349 \times 10^{9} \exp\left(-\frac{1.256 \times 10^{8}}{RT}\right)[C_6H_6]^{-0.1}[O_2]^{1.85} \quad (1)$$

$$r_{CH_4} = 5.012 \times 10^{11} \exp\left(-\frac{2 \times 10^{8}}{RT}\right)[CH_4]^{0.7}[O_2]^{0.8} \quad (2)$$

$$r_{H_2} = 9.87 \times 10^{8} \exp\left(-\frac{3.1 \times 10^{7}}{RT}\right)[H_2][O_2] \quad (3)$$

$$r_{CO} = 2.239 \times 10^{12} \exp\left(-\frac{1.702 \times 10^{8}}{RT}\right)[CO][O_2]^{0.25}[H_2O]^{0.5} \quad (4)$$

為完整模擬燃燒過程，除了爐內部之外，計算空間也延長至爐外五米長，網格方面，除了二次風口周圍幾何變化較大，採用四面體網格之外，其他網格皆為六面體網格。經格點測試，本研究使用 70 萬網格數進行模擬，並採用 SIMPLE 演算法(Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations)進行運算，收斂條件為殘值低於 10^{-3}。藉由不同燃控模式之參數分析結果顯示(圖 5)，在以管狀燃燒器確保總過剩空氣比控制在適當數值前提下，藉由主燃燒室過剩空氣之調整，平均溫度具操作於 900 ℃至 1,250 ℃之潛力，可控區間有利於控制爐床溫度小於灰軟熔溫度，以維持燃燒爐長期穩定運轉。

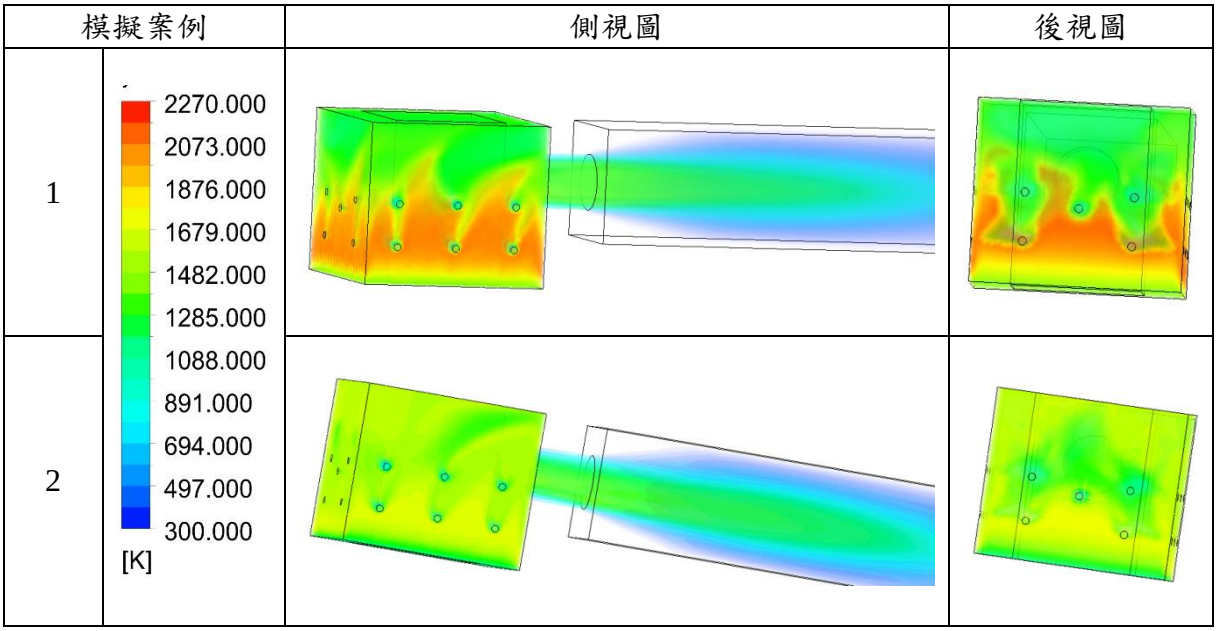


圖 5　不同空燃比數值模擬分析及驗證

本燃燒爐進料量以 1 t/h 為設計基礎，爐膛為邊長 1.3 米之正方體，實務操作上，針對生質顆粒下料量測試結果顯示，在送料風機設定為 50 Hz、下料螺桿設定為 50 Hz 時(最高可調控至 60Hz)，下料量為 1,200 kg/h；下料螺桿設定為 40 Hz 時，下料量為 986 kg/h；下料螺桿設定為 20 Hz 時，下料量為 496 kg/h。此外，於實際燃燒操時，利用此特殊設計之出料口，在燃燒爐引燃過程根據引燃源配置進行下料風配置，使引燃源可點於下料集中位置。引燃後根據生質顆粒燃燒爐特性，實施例每 15 分鐘變換一次風速，建立多段式佈料，使爐排上生質顆例分布均勻，避免局部高溫、甚至局部積料等問題。

三、智慧化溫控技術建立

在供熱系統開發完成後，必需進行供熱系統與應用端爐操整合，才可真正落實生產。圖 6 為以木顆粒燃燒爐為核心所建構之低碳熱風供應系統流程。

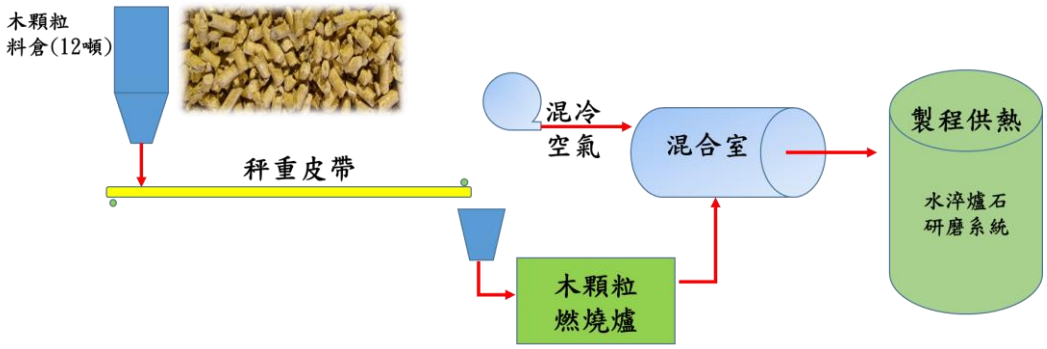


圖 6　低碳熱風供應系統流程

有鑑於溫度是顆粒燃料燃燒最重要控制參數，如過高溫燃燒會產生渣結塊、熔融等現象，不利長時間操作，本研究以主燃燒室平均溫度為目標函數，採監督式機器學習方法，利用梯度提昇決策樹(Gradient Boosting Decision Tree；GBDT)演算法[21]來建構木顆粒燃燒爐溫控模型。迴歸因子根據圖 7 中步驟 1 所取得之系統原始數據，經無因次化後整合成主燃燒室過剩空氣比、系統過剩空氣比、主燃燒室一/二次風量比、主燃燒室二次風風量、爐石系統配風風量、爐壁溫度、爐石系統負壓、爐石粉產量、木顆粒飼料量等參數作為燃燒爐溫度預測特徵因子。

所收集之資訊經篩選後，以隨機方式將其中 75%作為機器學習訓練資料庫，其餘 25%資料作為迴歸模型驗證測試資料。迴歸分析結果顯示，以梯度提昇決策樹迴歸所獲致之訓練集 R^2=0.999、測試集 R^2=0.977(圖 8)，較線性回歸訓練集及測試集對應之 R^2=0.773 及 R^2=0.736(圖 9)有顯著提升，顯示梯度提昇決策樹演算法在非線性燃燒現象之適用性，及其應用於製程溫度預測之可靠性。此外，操作因子中，對主燃燒室溫度影響性以燃燒系統一/二次空氣比最大，其次依序為爐外配風風量、主燃燒室過剩空氣比、系統負壓、爐壁溫度、爐石粉產量、二次風量、木顆粒秤飼量及系統過剩空氣比等。

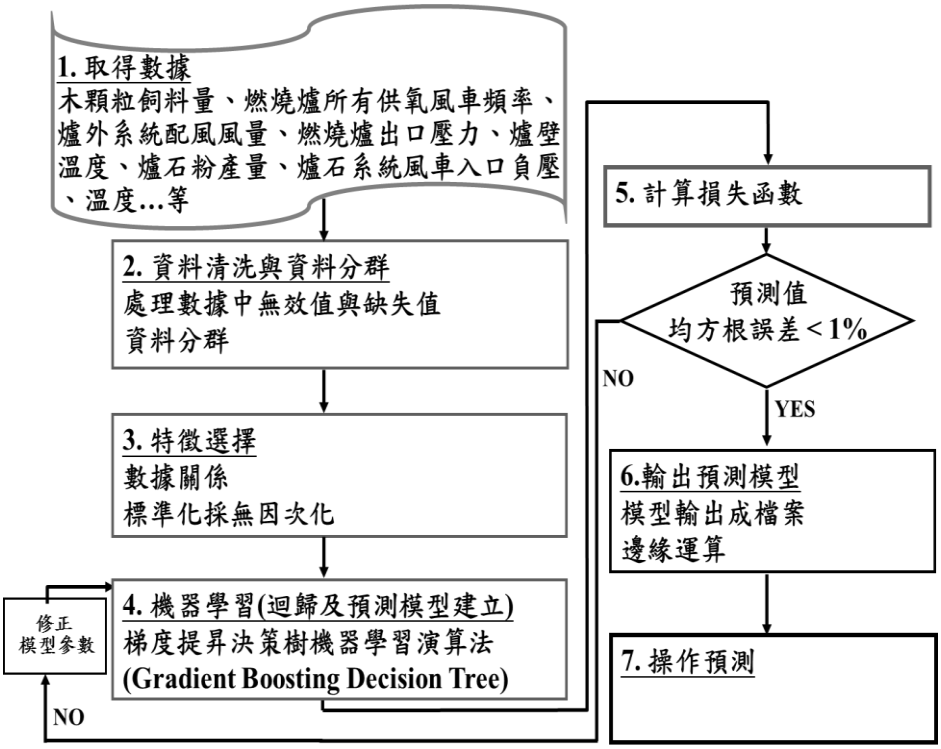


圖 7　木顆粒燃燒爐溫控模型建構流程

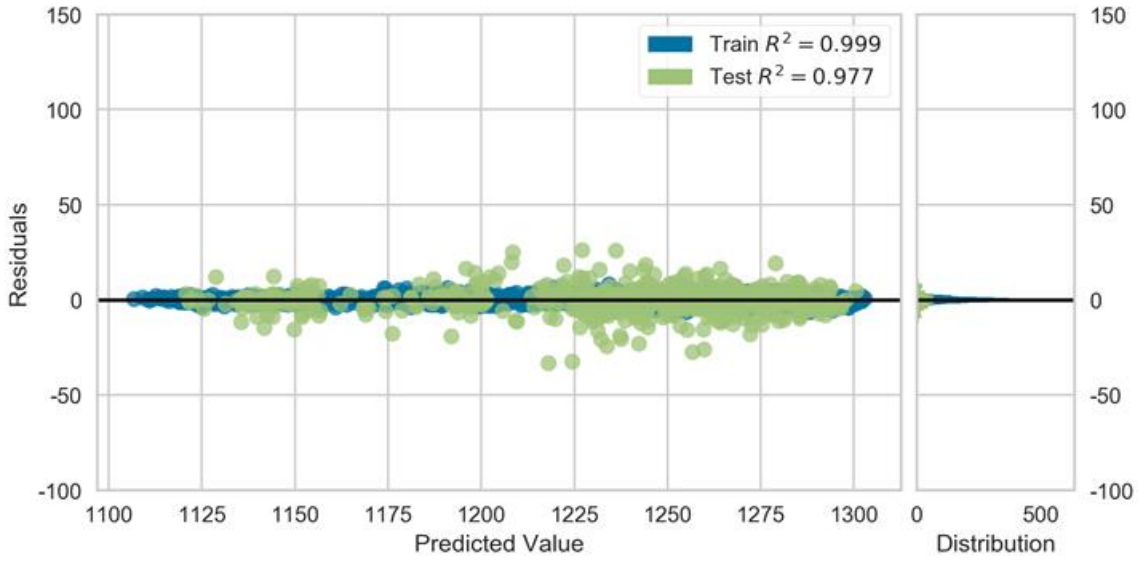


圖 8　梯度提昇決策樹迴歸分析結果

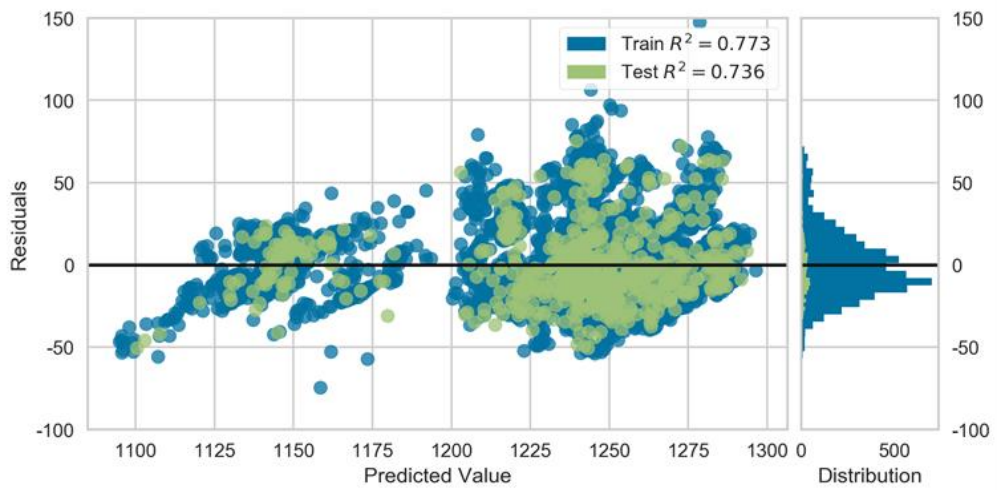
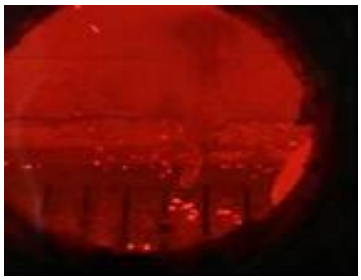


圖 9　線性迴歸分析結果

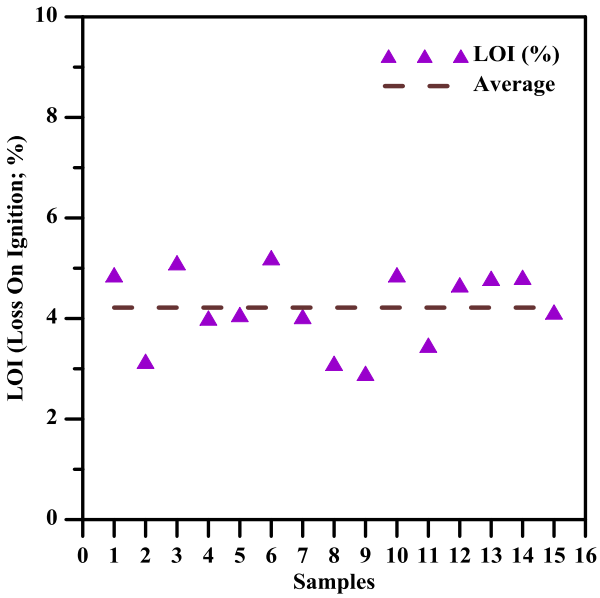
為在有限空間下達成灰不熔融及不積料之目標，本研究以主燃燒爐缺氧、整體過剩空氣>1.3 之爐操策略，藉由分段燃燒手段建立爐溫控制技術。在預測模式之輔助下，目前已可掌握爐內溫度控制方式，藉由爐內過剩空氣比之控制，當爐內過剩空氣比控制在 0.76，爐內均溫可控制在< 1000℃，當爐內過剩空氣比控制在< 1.31，爐內均溫可控制在 1,200 ℃以下。

圖 10 為燃燒後爐排及底灰資訊，燃燒後底灰占進料總重 0.3 - 0.6 wt%，樣本 LOI(Loss on ignition)平均值為 4.22 %，標準差 0.78%，較一般商用燃燒爐底灰 LOI 值 6.4 - 9.8 %低；另空汙排放亦皆符合法規標準[22]。



(a)關機後爐排狀況

(b)底灰



(c)底灰未燃炭(LOI)測試結果

圖 10 燃燒後爐排及底灰資訊

整體而言，本研究由掌握木顆粒裂解與灰熔融的溫度特性，進一步利用〝三段式供氧(主燃燒室兩段式燃燒+終端燃燒器)〞設計，結合監督式機器學習手段建立最適化操作技術，已開發出新一代低碳熱風供應系統，目前該爐連續生產時數最高達 116 小時，是商用燃燒機最大可連續生產時數之 9.6 倍，大幅減輕停爐清理之運維負荷及工安風險。熱風產製及應用是工業生產重要之能源供應型態，目前本技術已獲得專利(證書號 TW I661159B)並落實應用於中聯資源水淬爐石粉產線，根據運轉數據，熱風供應系統之能耗(燃料率)較商用系統下降 10%；另依據 CNS/ISO 14064 組織型溫室氣體盤查原則，使用生質能所導致之溫室氣體排放不加總至組織總排放量，經盤查統計，爐石生產所耗用之電力等能源占整體溫室氣體排放比例約 47%，以木顆粒取代燃煤作為能源之燃料替代技術具溫室氣體減排 53%之效果，運用本系統生產水淬爐石粉所創造之循環經濟產值達 7,154 萬/年。熱風產製及應用是工業生產重要之能源供應型態，期望藉由國內自主技術的開發及深化，在工業製程節能、減碳、減廢等面向上產出貢獻。

四、結　論

本研究藉由顆粒燃料燃燒系統開發暨爐溫控制技術之精進來建構低碳熱風供應系統。研發過程掌握木顆粒之裂解動力及灰熔融特性，並整合三維數值分析、燃燒爐熱設計及分段燃燒控制等技術完成 5 MWth 等級之供熱系統開發，續以無因次參數分析搭配梯度提昇決策樹機器學習演算法建立動態溫控決策模型，以解決供熱系統與應用端爐操整合之複雜溫控問題。研究結果發現，梯度提昇決策樹機器學習演算法較線性迴歸之預測爐溫準確度有顯著提升；燃燒系統一/二次空氣比、系統負壓等參數為影響主燃燒室溫度最顯著之操作因子；藉由多段式供氧設計及動態溫度控制技術可將主燃燒室溫度控制在灰初始變形溫度之下，同時可控制燃燒室木顆粒裂解速度處於大於進料速度狀態，達成灰不熔融及不積料之目標，成功克服商用燃燒爐因溫度控制問題導致灰渣熔融、無法長時間穩定操作及其衍生之高操作成本問題；同時，運行結果亦顯示空汙排放符合高雄市加嚴法規之要求。目前本技術已獲得專利並落實應用於中聯資源水淬爐石粉產線，所創造之循環經濟產值達 7,154 萬元/年。

五、參考文獻

1. Carly Whittaker, "Chapter 12 - Production of Wood Pellets from Waste Wood", Greenhouse Gas Balances of Bioenergy Systems, Edited by: Patricia Thorn ley and Paul Adams, 2018, pp. 181-191.
2. WBA Global Bioenergy Statistics 2015.
3. Roberto García, Consuelo Pizarro, Antonio G. Lavín, Julio L. Bueno , “Characterization of spanish biomass for energy use”, Bioresource Technology, 2012, Vol. 103, pp.249–258.
4. Christofer Rhe´n, Marcus öhman, Rolf Gref and Iwan Wästerlund, “Effect of raw material composition in woody biomass pellets on combustion characteristics”, Biomass and Bioenergy, 2007, Vol. 31, pp. 66–72.
5. M.V. Gil, P. Oulego, M.D. Casal, C. Pevida, J.J. Pis and F. Rubiera, “Mechanical durability and combustion characteristics of pellets from biomass blends”, Bioresource Technology, 2010 Vol. 101, pp.8859–8867
6. B.M. Jenkins, L.L. Baxter, T.R. Miles Jr. and T.R. Miles, “Combustion properties of biomass”, Fuel Processing Technology, 1998, Vol. 54, pp. 17–46.
7. Morten Tony Hansen, Anna Rosentoft Jein, Sandra Hayes and Patrick Bateman, “English handbook for wood pellet combustion”.
8. M.U. Degereji, S.R. Gubba, D.B. Ingham, L. Ma, M. Pourkashanian, A. Williams and J. Williamson, “Predicting the slagging potential of co-fired coal with sewage sludge and wood biomass”, Fuel, Vol.108, pp. 550-556, 2013.
9. LY. Yu, L.W. Wang and P.S. Li, “Study on prediction models of biomass ash softening temperature based on ash composition”, Journal of energy institute, Vol.87, pp. 215-219, 2014.
10. Shenglei Du, Haiping Yang, Kezhen Qian, Xianhua Wang and Hanping Chen, “Fusion and transformation properties of the inorganic components in biomass ash”, Fuel, Vol.117, pp. 1281-1287, 2014.
11. A. W. Coats and J. P. Redfern, “Kinetic parameters from thermogravimetric data”, Nature, Vol.201, pp. 68–69, 1964.
12. A.E.Ghaly, A. Ergudenler and A.M. Al Tawell, “Determination of the kinetic parameters of oat straw using thermogravimetric analysis”, Biomass

and bioenergy, Vol. 5, No. 6, pp. 457-465, 1993.
13.M.J.Safi, I.M. Mishra and B.Prasda, “Global degradation kinetics of pine needles in air”, Thermochimica Acta, Vol. 412, pp. 155-162, 2004.
14.P. Thipkhunthod, V. Meeyoo, P. Rangsunvigit, B. Kitiyanan, K. Siemanond, T. Rirksomboon, “Pyrolytic characteristics of sewage sludge”, Chemosphere, Vol.64, pp. 955-962, 2006.
15.R. K. Agrawal1 and M. S. Sivasubramanian, “Integral approximations for nonisothermal kinetics”, AIChE Journal, Vol. 33, pp. 1212-1214, 1987.
16.T.V. Lee and S.R. Beck, “A new integral approximation formula for kinetic analysis of nonisothermal TGA data”, AIChE Journal, Vol. 30, pp. 517-519, 1984.
17.Chung-Hsiung Li, “An integral approximation formula for kinetic analysis of nonisothermal TGA data”, AIChE Journal, Vol. 31, pp. 1036-1038, 1985.
18.Collazo J, Porteiro J, Patiño D, Granada E., “Numerical modeling of the combustion of densified wood under fixed-bed conditions”, Fuel, Vol. 93, pp. 149-159, 2012.
19.Charles K. Westbrook and Frederick L. Dryer, “Chemical kinetic modeling of hydrocarbon combustion”, Prog. Energy Combust. Sci., Vol. 10, pp. 1-57, 1984.
20.陳俊勳，中鋼委外研究計畫，RE- 98603 四號高爐熱風爐 BFG 單燒數值模擬分析技術建立結案報告。
21.Jerome H Friedman, “Greedy function approximation: a gradient boosting machine”, Annals of statistics, Vol. 29, NO.5, pp. 1189–1232, 2001.
22.高雄市燃燒設備空氣污染物排放標準，中華民國 106 年 6 月 29 日高市府環空字第 1060328000 號令訂定。

煉鋼電弧爐機電系統(含監控)改造效能提升實例探討

王清福*、蘇茂豐**

摘　要

本公司因煉鋼電弧爐(EAF)設備使用至今已 28 年，導致煉鋼能耗過高，生產效率不佳以及電極棒消耗量過高等因素，故提出此「煉鋼電弧爐機電系統(含監控)改造效能提升計畫」進行設備改造，藉以提升冶煉效率，進而降低每噸鋼冶煉之耗電量，達成節能減碳與低碳生產之目的。

本計畫節能改造項目如下：(1)電極 Gantry 升降機構，交流三相石墨電極手臂及爐蓋更新；(2)油壓設備更新，設備已老舊，沒有備品及可靠度差；(3)集塵設備改造，新設水冷集塵塔，有效改善工廠空氣品質；(4)冷卻水處理設備增購。(5)電能監控、操作介面及 PLC 系統升級，從 Level 1 提升至 Level 2。經改造後電弧爐可縮短製程冶煉時間，並降低集塵系統超抽多餘之熱能，同時提高熱效率及生產量。

經過一整年的操作運轉後，平均單位鋼水耗電量自 605kWh/T 降至 550kWh/噸，節電率約 9.1%，節電量為 5.9 MWh/年，實質減碳量為 3,139 TCO_2e/年；平均每爐次送電時間自 103 分/爐次縮短為 91 分/爐次，每爐節省約 12 分，產能可提升 879 噸/月，同時每噸鋼水電極棒耗用量也減少 21.5%。又經評估其擴散效益，國內鋼鐵業約有 6 家具有推動「電弧爐電極棒控制系統更新或機電系統節能改善」節能改善之潛力，依本研究案例推估其節電量約為 44.72MWh/年，以及減碳潛力可達 23,837 TCO_2e/年，顯示極具推廣效益。本次成功改造之案例，值得同業借鏡，然因特殊鋼種製程變化大，各產品出鋼溫度亦不相同，而新系統又有不同的操作模式，故在實際應用上節能率表現可能不盡相同，特此提醒並以此實務案例與同業分享。

【關鍵詞】系統電弧爐(EAF)、單位耗電量、減碳量

---

*榮剛材料股份有限公司　協理

**財團法人台灣綠色生產力基金會　經理

一、前　言

電弧爐係煉鋼廠用來熔解與精煉廢鐵的裝置，它的運作原理是用石墨電極棒與金屬料或熔液(Melt)之間短路所產生的電弧，瞬間產生的高熱來熔化廢鐵原料。電弧爐一般分為交流(AC)爐及直流(DC)爐兩種。交流電弧爐的容量為 15~100 噸，直流電弧爐的容量為 85~150 噸，圖 1 為交流電弧爐與直流電弧爐的基本架構。。交流電弧爐之爐用變壓器二次側銅排，經水冷電纜連接銅(鋁)導體電極手臂至末端的人造石墨電極棒(Graphite Electrode)；直流電弧爐之交流電源經整流器整成直流後，連接至石墨電極棒。由於通過電纜的電流相當大，因此電纜外殼及電極手臂會使用水冷循環提高散熱效果。電極棒穿過爐蓋圓孔插入爐體內之廢鐵原料，電極棒通電後，交流爐之三相電極間便會因短路引發電弧而產生高溫而熔解廢鐵；直流爐係由電極棒與爐底形成電壓正負端來引發電弧而熔解廢鐵。因此電極棒的控制系統係攸關電弧爐通電品質及熔煉順暢的主要設備之一。

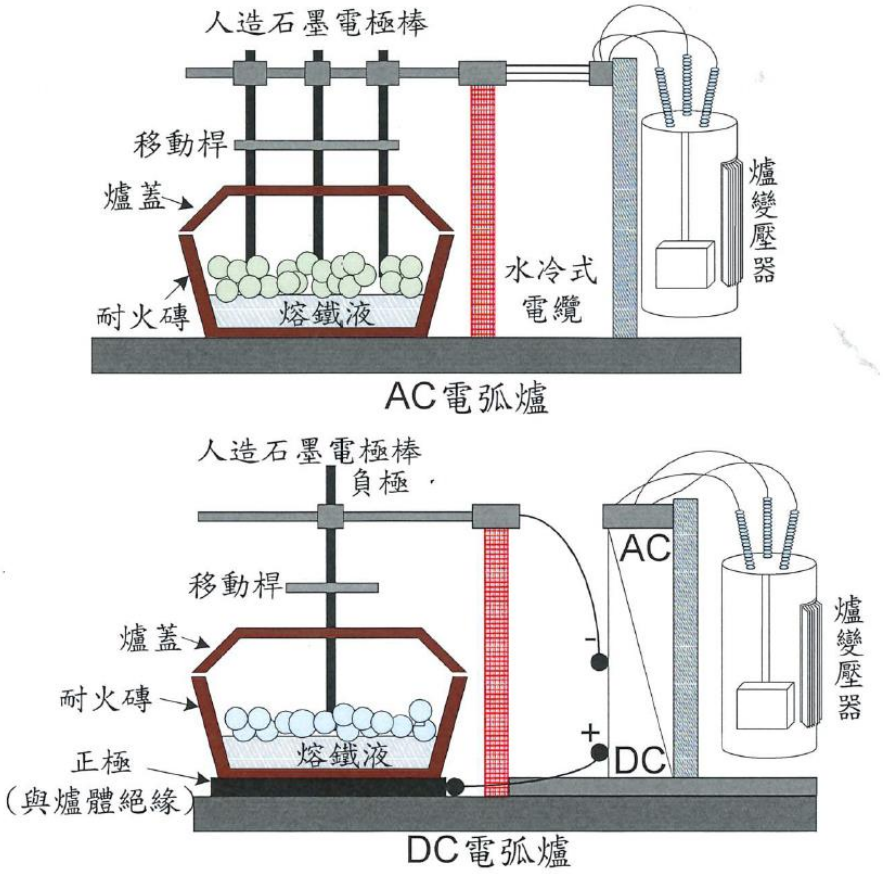


圖 1　電弧爐基本構造[1]

爐內部溫度約在攝氏1,500~1,700°C 左右，故爐體和爐蓋內層需鋪設高溫耐火磚(根據參雜的成分與製作方式又可分為火黏土磚、矽磚、鎂磚、高鋁磚、石灰磚...等)。廢鐵原料熔化後，爐渣經排渣門排出，再由爐嘴倒出完成的鋼水，再經下階段製程(LF+VOD/VD)產製鋼錠，以供鍛機熱成形加工。電弧爐煉鋼過程分三階段，依序為(1)點弧期，(2)熔解期，(3)精煉期，當中以點弧期及熔解期間之電弧爐電流變化較為劇烈，其原因乃是在溶解過程中廢鐵原料與電極棒之間由於電弧長度不斷變動，促使電流呈現極度的變動與不平衡和較低的功率因數。但通常經過二~三次加料後，會最後進入精煉期，此時電弧爐藉由自動電壓調整器控制可提升較高的功率因數。在煉鋼過程中會添加石灰、造渣劑及吹氧(部份鋼種)，藉以在煉製過程提升較佳的鋼鐵品質。電弧爐在操作時需防止電弧過長損及爐壁耐火磚。原料在熔解期間其熔解速度越快，則引發的電壓變動越大。在額定容量操作電弧爐，以一般碳鋼廠及不銹鋼廠平均一爐時程可在1小時以內，但特殊鋼平均一爐時程約1.5~2小時左右如以合金鋼的材料特性為求熔解快速，通常會機動提升電爐電壓或者減少電極棒前的串連緩衝阻抗，縮短冶煉時程，也因此更造成材料品質上的問題。

因此本案例即為特殊鋼電弧爐電極控制系統更新、爐體改造及集塵系統更新為主，本公司煉鋼電弧爐(EAF)設備使用至今已 28 年，且煉鋼廠用電量約占本公司用電量 45%，其中又以煉鋼電弧爐設備占比 80%最高，平均電爐(Tap-Tap)時間約 110 分鐘，因煉鋼時間較長導致能耗過高，設備生產效率不佳，影響生產成本等因素，據以提出煉鋼電弧爐設備改造及機電系統提升計畫，藉以所短冶煉時間、提升冶煉效率及電力品質、增加產量、降低成本，進而降低每噸鋼冶煉之耗電量，達成節能減碳之目的。

二、電弧爐電極控制系統原理及應用

交流電弧爐是冶金工業中的重點耗能設備之一，其耗電量約占各鋼廠總耗電量的一半以上。尤其是電能，許多鋼廠皆因電費在產品成本中所占比例過高而失去市場競爭優勢。電極控制器是電弧爐的核心控制系統，它通過控制電極高度來控制電弧長度，從而起到調節輸入功率之目的，其性能的優劣直接影響鋼水產量、質量和電能的消耗。電極控制系統是電弧爐煉鋼的關鍵環節，通過控制電極的位置可以改變輸入到電弧爐內的電功率。快速且準確的電極位置控制是節約電能、縮短冶煉周期、降低電極消耗及延長爐襯壽命的關鍵因素之一。然而，電極控制系統是一個具有高度非線性、參數時變、

變量耦合及隨機干擾較強的複雜系統。因此，電弧爐電極控制系統的改善具有重要的理論意義和應用價值。

電弧爐的冶煉過程為間歇式操作，每爐次主要分為點弧加料期和熔化期。前者的特點是電弧不穩定，電流波動極大，易發生斷弧、過電流跳脫和斷石墨電極事故；後者的特點是弧溫較低，爐料比電阻較高，電極弧光埋在未熔化的爐料中，電流隨冶煉的進行逐漸趨於平穩，如果控制的三相電極非平衡滿負荷送電，可能使爐料不能迅速熔化而延長冶煉時間，增大能耗。

依據經典控制理論，只有建立了被控制對象的數學模型，再按照系統工藝所要求的靜態指標和動態指標設計校正環節的參數，才能滿足工藝要求。但由於電弧爐具有多變量、非線性、強耦合、數學模型參數的不確定性和系統工作點的據烈變化等特點，其實質是一個多輸入、多輸出、非線性、強耦合的對象，顯然經典控制對此無能為力，甚至用現代控制理論也不能精確地解決問題。因為系統的特徵所決定的數學模型難以建立，因此難以實現對被控量的精確控制。通過對電弧爐在冶煉過程中特點的了解，以及對被控對象特性的分析得知，電極控制系統是一個位置控制系統，控制對象是弧長，但由於弧長没有合適的檢測設備，只能通過檢測電弧爐主電路的電弧電流間接地反映弧長的大小，也就是通過控制電流來控制弧長。

當控制對象的特性或參數隨著環境的變化或運行時間的加長而大幅度變化時，常規的反饋控制難以完成優良的控制，而採用自適應控制的控制方案比較合理。由電弧爐的功率特性曲線得知，不同的電弧電流對應相同的電弧功率，當弧流超過最有利的控制電流時，輸入爐內的功率並未因電流的增加而增大，反而線路的電耗增大，效率降低。在熔煉時，將某一熔煉過程中最有利的控制電流作為電弧電流的額定值，再用自適應控制來調整相關參數。

具體方法如下：當系統開始始運行時，首先是點弧程序。其控制邏輯是：投入高壓開關(VS)，冶煉開始，三相電極自動下降，在任一相電極接觸到導電爐料時，該相電極自動停止下降，直至另一電極起弧後第一相電極自動起弧，這時系統自動轉入熔煉程序，點弧程序結束。把電弧爐電流值的大小分為 5 個控制區(經 12 段電壓調整模式)，如圖 2 所示。

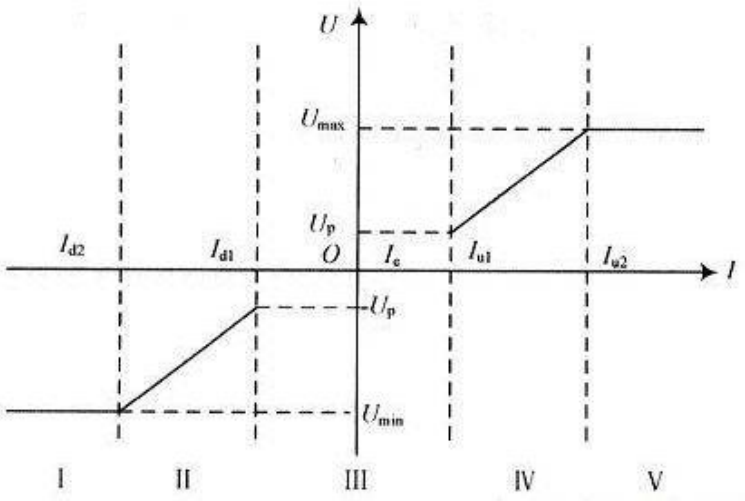


圖 2　電極控制示意圖[3]

橫坐標表示電弧電流值，縱坐標表示 PLC 的輸出控制信號(-10～10 V)，在 I 區電弧電流遠遠小於弧流額定值，PLC 輸出的控制電壓為 Umin，電極以最大的設定速度下降，該區也稱為下降飽和速度區。在Ⅱ區電弧電流小於弧流額定值，電極以速度線性減小下降，改變該區的寬度就可以改變直線的斜率，也就控制了靈敏度，該區也稱為電極下降速度控制區。在Ⅲ區電弧電流等於或近似等於弧流額定值，PLC 輸出的控制電壓為 0，電極保持靜止不動，該區也稱為非控制區或死區。在Ⅳ區電弧電流大於弧流額定值，電極以速度線性增加上升，改變該區的寬度就可以改變直線的斜率，也就控制了靈敏度，該區也稱為電極上升速度控制區。在 V 區電弧電流遠遠大於弧流額定值，PLC 輸出的控制电壓為 Umax，電極以最大的設定速度上升，該區也稱為上升飽和速度區。在非控制區与相鄰兩區的邊界點，PLC 輸出的控制電壓為±Up，Up 為液壓伺服閥功率放大版的輸入門檻電壓值，0～Up 的電壓不能使液壓閥有任何動作。在上述控制期間如果出現弧光竄動、電流振盪，甚至短路或斷弧時，再按照一定的程序去調整死區寬度，調整靈敏度和飽和臨界值，這樣反複幾次，直到最佳參數為止。對輸入 PLC 的信號進行處理後，輸出可調的速度控制信號以控制電極動作，使每相電極都能依據流過自身的電流而以相應的速度上升、下降或停止，在保證系統穩定性的同時，又提高了系統的快速性，使電爐的冶煉電流始終處於最佳狀態，控制系統的核心除了電極控制系統外就是伺服的油壓控制系統。

國內目前實際應用案例為燁聯公司的電弧爐電極棒控制軟體更新的節能改善計畫，由於電爐內的電弧狀況變化快速所以電極棒的控制及複雜運算式的計算需快速進行，如此才能穩定控制送電品質進而減少電極棒及補爐材等物料之耗損，因此靠PLC的運算能力是無法完成這任務的，所以才有獨立

快速運算控制的電極棒的控制系統的設置。其操作步驟如下：(1)操作員扳動控制桌搖桿向右進入自動模式;(2)PLC收到控制桌命令後通知電極棒控制系統進入自動控制；(3)電極棒控制系統依PLC設定之電壓電流(各送電階段有各別固定的設定)來控制油壓系統使電極棒升降來影響電壓電流達到設定值，如圖2所示。新系統的新硬體提供更快速的資料收集、運算及控制能力，且新系統的運算程式具較新的運算概念有動態控制功能，能更快速將送電狀況穩定下來，更快的穩定就能節省電力的虛耗及減少電極棒和補爐材等物料之耗損。其利用動態修正控制設定值，使控制命令更有力，讓實際值更快速達到設定值(如圖3所示)，經過實際評估節電效率佳。

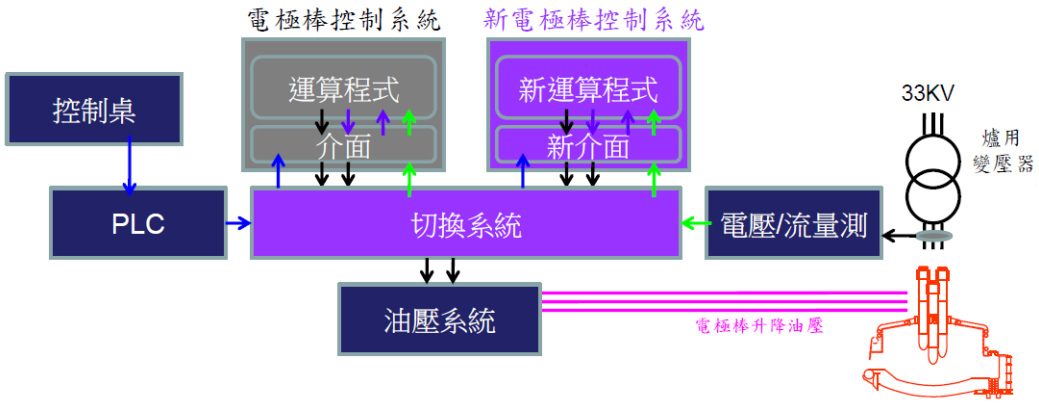


圖 2　燁聯公司電極棒控制系統流程[4]

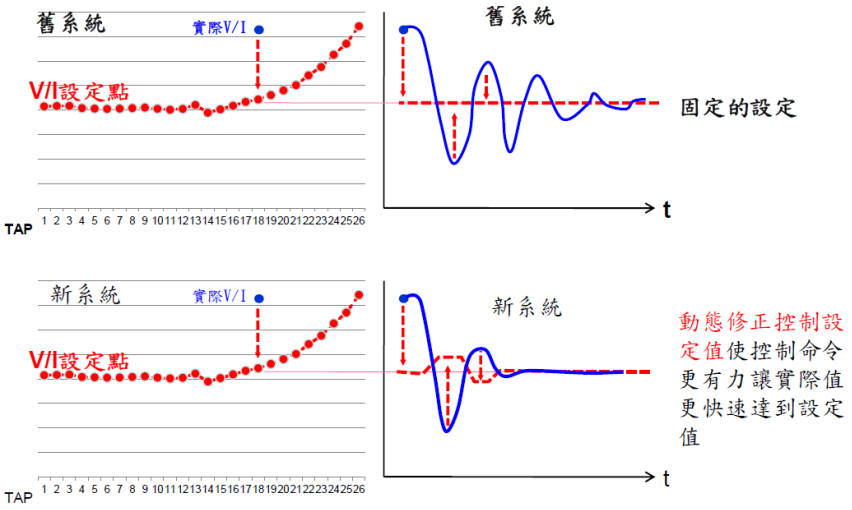


圖 3　燁聯公司電極棒控制系統示意圖[4]

三、35 噸煉鋼電弧爐機電系統(含監控)改造效能提升案例

1.公司簡介及製程概述

本公司新營廠位於台南市新營區，屬金屬基本工業，主要生產超合金系列、高清淨鋼(VAR)、高清淨鋼(ESR)、合金工具鋼、不鏽鋼系列、QT 調質材、模具鋼材料及高速鋼系列等，主要耗能設備有電弧爐、精煉爐、加熱爐、軋延機(鍛造、輥軋及精整)、熱處理等，製程單元包括熔煉、澆鑄、精煉、鍛造、輥軋、熱處理、精整等 7 道，如圖 3 所示

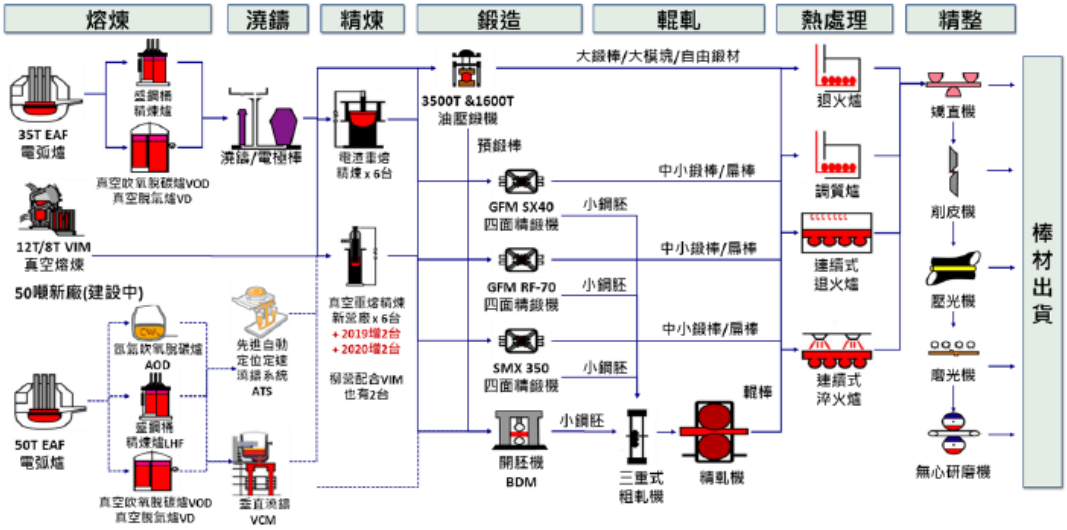


圖 3　榮剛材料科技(股)公司電弧爐煉鋼流程圖

2.改善前規劃

本案例推動低碳生產技術為電弧爐機電系統改造節能及監控技術。係針對公司煉鋼部之電弧爐為主要耗電設備，因此以電弧爐(EAF)當作改善標的設備，原系統已使用 28 年以上，PLC 也是舊系統，電能消耗及製程時間無法有效降低，目前經濟部要求國內用電大戶必須每年降低用電 1%(五年降低至 5%)，必須從最有大幅度改善的設備著力，所以選定電弧爐(EAF)之電極控制系統進行改善。本計畫改造項目如下說明：(1)電極 Gantry 升降機構，交流三相石墨電極手臂更新。(2)油壓設備更新，設備已老舊，沒有備品及可靠度差。(3)集塵設備改造，水冷集塵塔新設，有效改善工廠空氣品質。(4)冷卻水處理設備增購。(5)電能監控、操作介面及 PLC 系統升級，委由國內自動化公司設計規劃(其架構流程如圖 4 所示)。(6)機電設備拆裝，委託國內具整合能力廠商協助，此案從計畫、規劃至執行階段都由榮剛公司相關專業同仁負責(其改造組織流程，如圖 5 所示)。

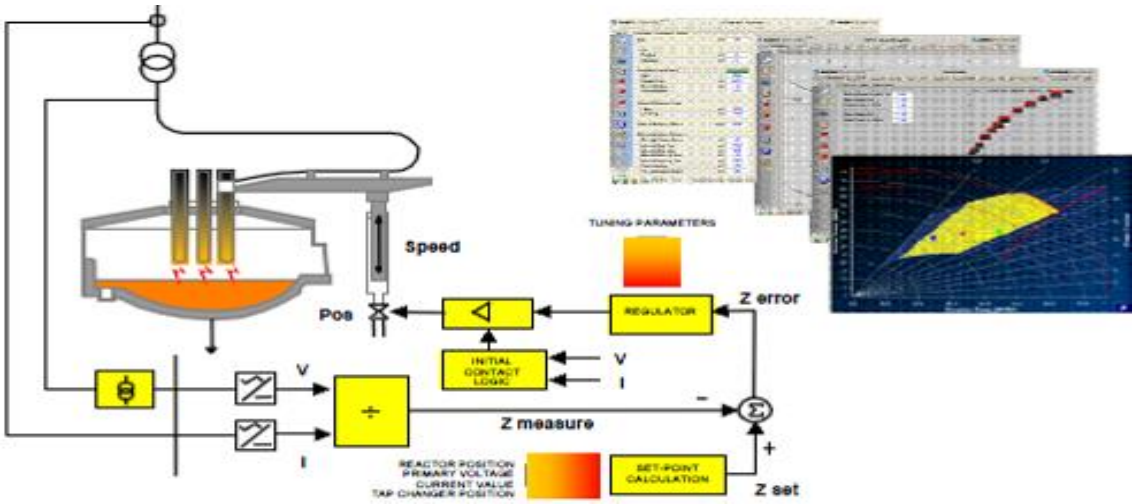


圖 4　本案例電極棒控制系統改造之架構圖

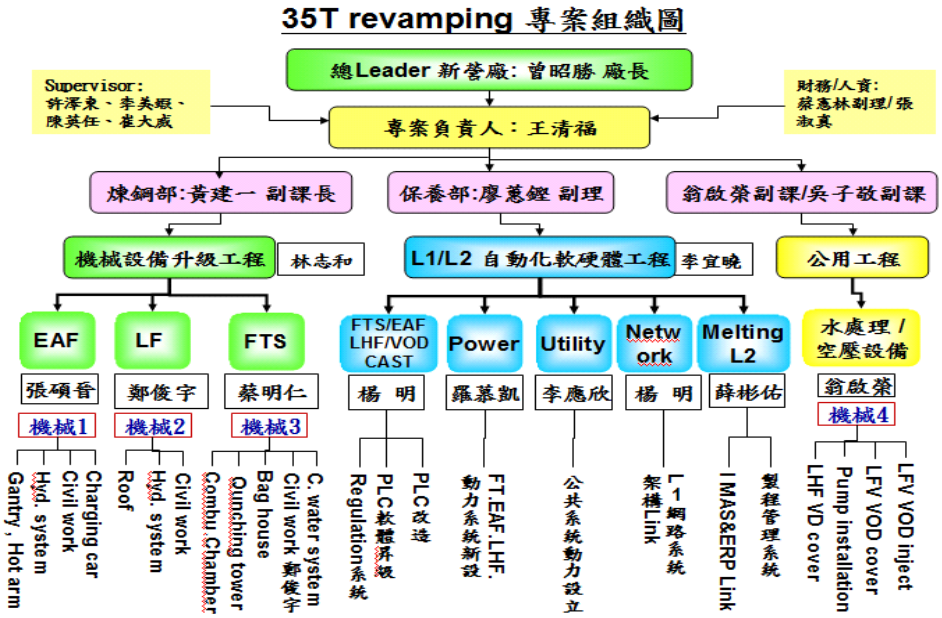


圖 5　本案例改造之組織架構圖

提供本技術之廠商為 35 噸電弧爐設備商奧地利商因泰克股份有限公司(Inteco 公司)，其中針對超級合金電弧爐進行機電系統及軟體升級改造，提供技術支援。因此國外設備商 Inteco 公司進行控制系統軟硬體改造，也協議以下驗收結果(如表 1 所示)。(1)電能消耗量：≦487 kWh/Ton+30 kWh/Ton(誤差值)，原始平均值：605 kWh/ Ton。(2)煉鋼電爐製程時間：Power on 降低至 85 分/爐+5 分/爐(誤差值)。原始時間 100 分/爐以上。(3)電極棒消耗量：降低至 3.9kg/Ton+0.4 kg/Ton(誤差值)，原始平均 4.7kg/Ton，107 年電極棒成本節節高升。(4)與設備原廠(Inteco 公司)簽定的驗收項目如下表 1 所示。

表 1　國外設備商 Inteco 公司承諾之改造結果

FU	GUARANTEED PERFORMANCE		GUARANTEED VALUE	GRACE	DEVIATION	PERCENTAGE FOR EACH DEVIATION	MAX DEVIATION
EAF	5.2.1	EAF POWER ON TIME	≤ 85 min	+ 1 minute	Per full 1 minute above	0.1 %	5 min
	5.2.2	EAF SPECIFIC ENERGY CONSUMPTION	≤ 487 kWh/ton of liquid steel	+ 5 kWh/t	Per full 5 kWh/t above	0.1 %	30 kWh/t
	5.2.3	EAF SPECIFIC ELECTRODE CONSUMPTION	≤ 3.9 kg/ton of liquid steel	+ 0.1 kg/t	Per full 0.1 kg/t above	0.1 %	0.4 kg/t

3.107 年改善後驗收評估

(1)單位產品耗電量：本項工程涵蓋軟體 PLC 升級為 Siemens TIA 1500 系統、電極機構及油壓設備改造及奧地利設備商一起進行設備 Revamping，且依據與設備原廠合約是以出鋼溫度 1,630℃，單位產品耗電量實際量測短期值為 516 kWh/T，符合預期目標≦517 kWh/Ton。

(2)煉鋼電爐製程時間減少：短期值為 78 分/爐，符合預期目標 85 分/爐+5 分/爐。

(3)電極棒消耗量降低：平均值為 3.95kg/Ton，符合預期目標 3.9kg/Ton+0.4 kg/Ton。

(4)集塵設備的集塵效果比過去佳，環保局要求煙囪的排放不透光率< 20%，目前都是 4%以內，現場環境也改善了，降地對周遭環境空氣污染的衝擊，也改善現廠同仁的工作環境。

(5)經過實際測試結果均符合預期目標，所以允以驗收(如圖 6 所示)，相關改善成果照片(如圖 7 所示)。

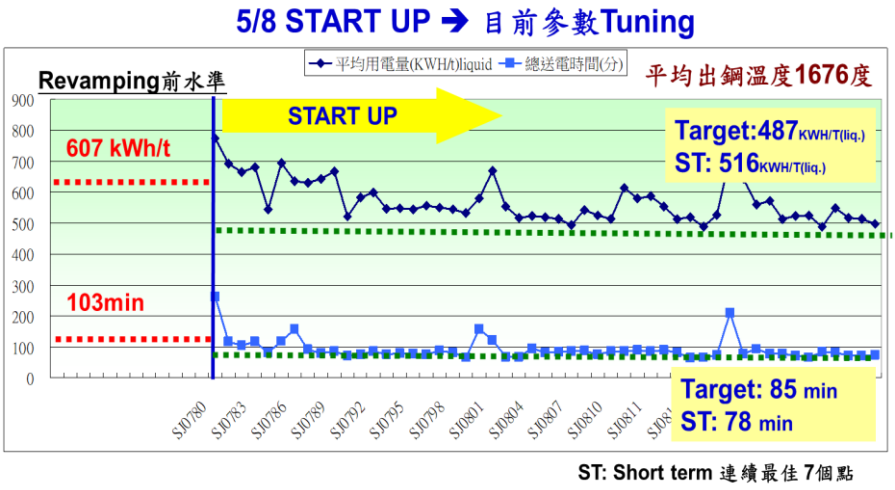


圖 6　驗收測試結果

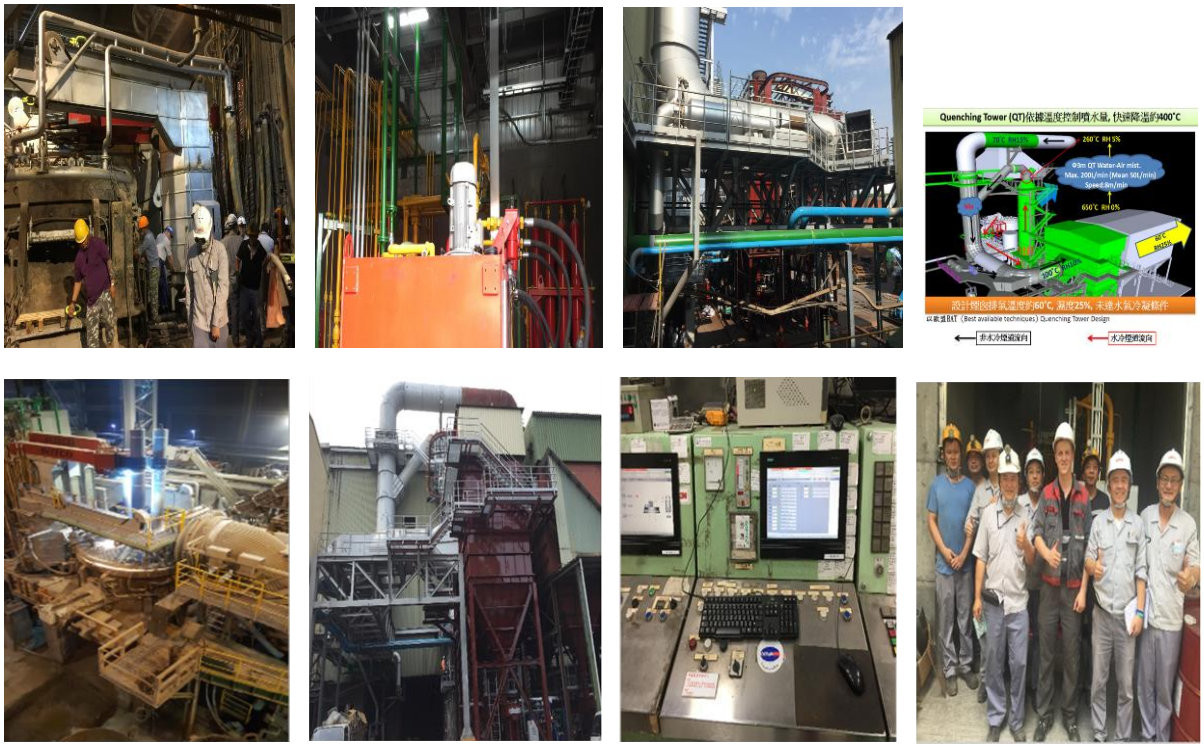


圖 7　本案例改造之成果照片

4.實際改善後效益評估

本案例之能源基線係以過去三年(104~106 年)單位煉鋼的耗電量進行評估，如下表 2 所示：

表 2　本案例之能源基線情境

用電量及改善前後項目	改善前			改善後
年份	104	105	106	108
煉鋼產出總量(ton)	89,103	92,329	96,101	107,080
電爐用電量(kWh)	54,154,337	57,071,100	56,751,198	58,894,000
EAF 單位耗電量(kWh/ton)	608	618	591	550
平均單單位耗電量(kWh/ton)	605			550
節電量(kWh/年)	5,889,400 kwh/年			
CO2 減量效益(ton/年)	3,139 噸/年			

註：107 年電力係數=0.533kg-CO_2e/kWh

榮剛公司生產的鋼種特性為特殊鋼，異於一般碳鋼廠(中鋼、豐興、東和...)，特鋼鋼種製程變化大，差異亦也大，各種產品出鋼溫度亦不相同，又新的系統有不同的操作模式，且鋼鐵業景氣未完全復甦的關係，導致無法如預期節能率達到 14.7%(由 605 kWh/噸降至 516 kWh/噸)。但經過一整年的實際量測後，平均單位鋼水耗電量為 550kWh/噸(如圖 8 所示)，平均每爐次 91 分/爐次(如圖 9 所示)，換算實際節電率約 9.1%；每爐節省約 12 分，產能提升 879 噸/月；每噸鋼水電極棒耗用量減少 21.5%。並依 107 年 6 月~108 年 5 月之鋼胚生產量為 107,080 公噸，實際節電量為 5,889,400 kwh/年，以及實際減碳效益為 3,139 TCO_2e。

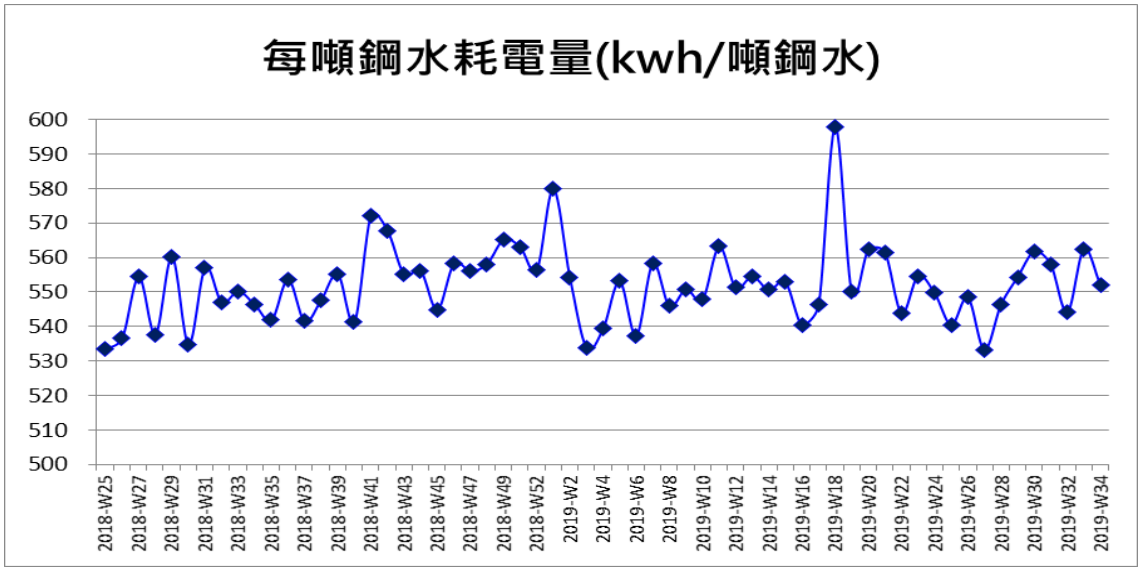


圖 7　實際執行一年平均單耗成果效益

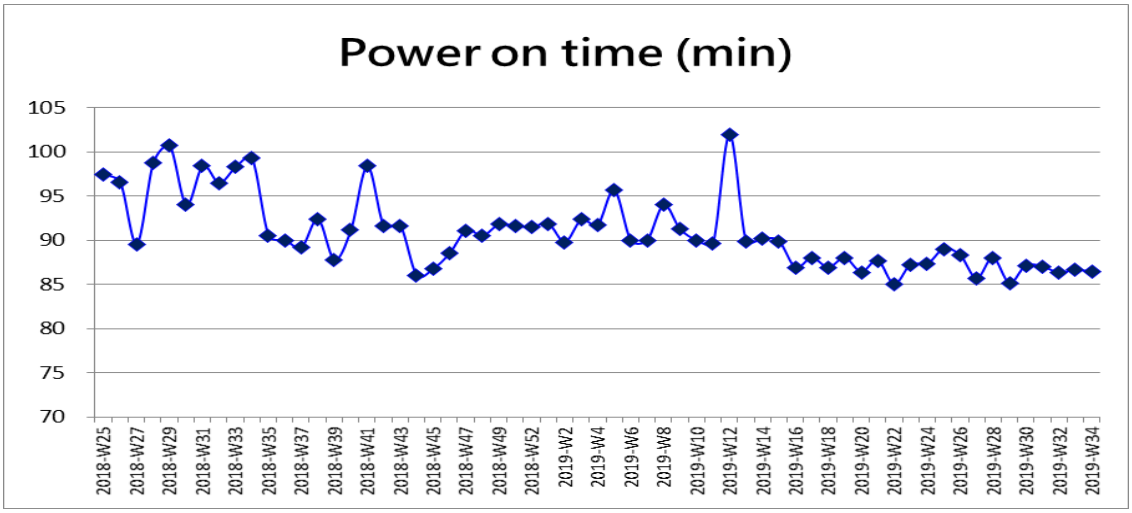


圖 8　實際執行一年平均冶煉時間成果效益

5.示範輔導擴散效益評估

榮剛材料公司「電弧爐機電系統節能技術」之改善效益佳，除了節能減碳效益外，亦可大幅縮短冶煉時間、提升產能及降低成本，值得推廣應用至國內鋼鐵業者。因此工業局「製造部門低碳生產推動計畫」團隊於執行 33 家低碳技術需求調查現場訪視時，即同時推廣及說明本項低碳技術。檢視國內電弧爐煉鋼廠具「電弧爐電極棒控制系統更新或機電系統節能改善」應用潛力之工廠約 6 家，經評估若均此用此低碳技術，其改善潛力之節電量約為 44.72MWh，以及減碳潛力可達 23,837 TCO2e，目前已有 2 家實際進行導入此低碳節能技術，顯示極具推廣效益。

四、結　論

電極控制系統是電弧爐煉鋼的關鍵環節，通過控制電極的位置可以改變輸入到電弧爐內的電功率，快速且準確的電極位置控制是節約電能、縮短冶煉周期、降低電極消耗及延長爐襯壽命的關鍵因素之一。因此以本實際案例而言，電弧爐電極棒控制系統更新，至少達成節電率 9%以上，實際減碳效益為 3,139 TCO_2e，且在節能減碳技術確實可行且回收年限為 2.14 年，值得國內推廣應用。經評估其擴散效益，國內鋼鐵業具推動「電弧爐電極棒控制系統更新或機電系統節能改善」之 6 家廠商，其預估節電量約為 44.72MWh，以及減碳潛力為 23,837 TCO_2e。本次成功改造之案例，值得同業借鏡，然因特殊鋼種製程變化大，各產品出鋼溫度亦不相同，而新系統又有不同的操作模式，故在實際應用上節能率表現可能不盡相同，特此提醒並以此實務案例與同業分享。

五、誌　謝

本計畫承蒙經濟部工業局「產業低碳科技應用補助計畫」之經費補助，財團法人台灣綠色生產力基金會協助，以及榮剛公司相關同仁的協助與支持，得以順利完成，謹此致謝。

六、參考文獻

1.吳啟瑞，「電弧爐變動性虛功率分析與先進改善技術」，國科會研究計畫期末報告(2012)。

2.劉雁宇，「交流電弧爐多模態電極控制系統的研究及應用」，上海交通大學碩士論文，2013。
3.控制工程網，「S7-300 PLC 的大型電弧爐控制系統 http://article.cechina.cn/15/0127/09/20150127093143.htm。
4.燁聯公司邱鴻圖，「蓄熱式燃燒器」，廢熱回收技術示範應用觀摩會簡報，105 年 7 月 21 日。
5.經濟部工業局 107 年度，「產業低碳科技應用補助計畫專案計畫全程結案報告-煉鋼 35 噸電弧爐(EAF)-機電系統(含監控)改造節能計畫」，107 年 11 月。
6.經濟部工業局 107 年度，「製造部門低碳生產推動計畫(2/4)執行成果報告」，107 年 11 月。

噴塗製程 VOCs 廢氣管末淨化處理系統之應用

林詩婉*、粘愷峻**、張豐堂***

摘　要

科技的進步促使經濟的繁榮，也給予人類方便、舒適的生活，使得人口快速膨脹，自然資源快速開發與使用，但科技所帶來的環境污染將造成人類的健康危害。環保意識的提升政府對於環境保護法規日趨嚴格與著重、全國人民的監督與重視。於 2013 年世界衛生組織公布 $PM_{2.5}$ 為一級致癌物，環保署同年提出全國一年 NMHC(非甲烷總烴)排放量 65,402 噸/年，有效控管 VOCs 排放為眼前最急迫的問題。

噴塗製程廢氣佔 VOCs 全年排放量約 2 成，並具有高粉塵(漆粒)、風量大及濃度低等特性，一直以來是 VOCs 廢氣中最難處理的製程廢氣。於噴塗製程操作時本公司會予以分流預處理後，再匯流輔以回溫控濕及再攔截裝置進行排氣溼度控制；廢氣經由三級過濾單元去除漆粒後再將低濃度 VOCs 廢氣導入沸石轉輪濃縮單元，再將脫附出來之廢氣導入焚化單元，市面上多數業者因設置成本考量選擇雙槽蓄熱式焚化爐(2T-RTO)，2T-RTO 在提升閥切換時會產生未處理的凸波間歇性異味，或者是高沸點 VOCs 經蓄熱式焚化爐(2T、3T RTO 或 RRTO)蓄熱槽間切換而被熱烘衍生次微米氣膠性異味問題，本公司將應用 RTO 尾氣攔截再處理裝置進行異味攔截予以改善；經以上複合技術的整合淨化處理，系統 VOCs 淨化處理效率可達 97%以上。另外，塗裝作業中需要使用大量的熱能進行烘乾，亦可進一步利用本公司應用於塗裝作業之乾燥室之氣體循環系統及氣體循環方法，有效降低噴塗製程能源的消耗。

於技術研究以探討沸石轉輪因孔洞較小，對大分子之 VOCs 吸附效率較差做出實驗與探討，提出沸石轉輪對 VOCs 廢氣處理效率改善建議。在不同類型之沸石處理同時含有小分子(如甲苯)及較大分子(如均三甲苯)之混合性 VOCs 對沸石轉輪吸附之探討，研究結果指出如將不同類型沸石(H-ZSM-5 及 MCM-41)結合為複合式沸石，可有效改善對混合 VOCs 廢氣(甲苯及均三甲苯)吸附能力，以貫穿時間與飽和吸附時間比較，複合式沸石吸附劑為最佳，單獨以 MCM-41-AS 及 H-ZSM-5-25 比較貫穿時間分別

為 3.2 倍及 5.9 倍，顯示混合型沸石可大幅提升吸附系統之效能。

【關鍵詞】NMHC(非甲烷總烴)、VOCs(Volatile Organic Compounds)、回溫控濕及再攔截裝置、沸石轉輪濃縮單元、雙槽蓄熱式焚化爐、塗裝作業之乾燥室之氣體循環系統及氣體循環方法 RTO 尾氣攔截再處理裝置

---

*傑智環境科技股份有限公司　高級工程師

**傑智環境科技股份有限公司　協理

***傑智環境科技股份有限公司　總經理

一、前　言

空氣污染為全球大眾所關切的重要環境議題，揮發性有機物(Volatile Organic Compounds ；VOCs)是產生衍生性 $PM_{2.5}$ 及臭氧的主要前驅物，VOCs 減量可大幅降低 $PM_{2.5}$ 及臭氧濃度。美國空氣清潔法修正案(Clean Air Act Amendments, CAAA)已列出多種有害空氣污染物，其中 VOCs 佔 70%以上，顯示 VOCs 排放與危害問題不容忽視。而國內眾多產業對於 VOCs 仍有很高的依賴性，如作為工業製程的原料、溶劑、去污劑、清潔劑、稀釋液及半導體業的製程、印刷電路板業的清洗劑、蝕刻劑及化工業的生產原料、塗裝業等都可見其應用，因 VOCs 極易於製程或加工過程中揮發及逸散，因此易衍生環境污染問題如異味及光化學煙霧等。

於 2013 年 10 月世界衛生組織(WHO)將戶外空氣污染，包含戶外懸浮微粒(含 PM_{10} 及 $PM_{2.5}$)，列為第 1 級致癌物。$PM_{2.5}$ 是直徑小於或等於 2.5 微米的懸浮微粒。環保意識的提升政府對於環境保護法規日趨嚴格與著重、全國人民的監督與重視，環保署 2017 年提出全國一年 NMHC(非甲烷總烴)排放量 65,402 噸/年，有效控管 VOCs 排放為眼前最急迫的問題，提出 VOCs 之排放控制除採取行政管制(如訂定 VOCs 排放標準)及經濟誘因(如徵收空污費)等措施外，最直接有效的方式則屬管末處理，其可分為破壞法及非破壞法，前者包含焚化、催化及生物處理法，後者則為吸收、吸附及冷凝等方法。就焚化法而言，如操作條件控制得當(燃燒系統符合燃燒 3T 要素)，其對各種類的 VOCs 皆有良好的去除效率(≥ 98%)；另外，吸附法具操作容易、設備要求低及穩定性高等優點，且整體系統只需少許的能量，即可達到 VOCs 的去除效果及回收，為國內業者最常採用的空氣污染控制技術之一，而行政院環保署發布對 VOCs 最佳可行控制技術[0]，除使用低污染性原物料及採用低污染製程外，於空氣污染排放控制設備方面，即沸石濃縮轉輪結合蓄熱式焚化系統(zeolite rotor concentrator + regenerative thermal oxidizer)。

二、噴塗製程 VOCs 廢氣管末淨化處理系統

表面噴塗製程多屬於風量大、濃度低，以往較舊技術是直接將廢氣導入焚化系統中，所造成設備成本高、空間使用大以及能耗高昂。本公司介紹如圖 1 主要噴塗區產生較大粒徑顆粒需先由水洗設備去除，經由回溫控

濕及再攔截裝置(I562819)進行排氣濕度控制；廢氣經由三級過濾單元(保護轉輪阻塞、增加壽命)去除漆粒後再將低濃度 VOCs 廢氣導入沸石轉輪濃縮單元(相關專利：I323183、I410274、I624297、I549739、I1517893)，搭配熱焚化單元(I326753)，組成高效率 VOCs 廢氣處理系統。市面上多數業者因設置成本考量選擇雙槽蓄熱式焚化爐(2T-RTO)，2T-RTO 在提升閥切換時會產生未處理凸波間歇性異味，或者是高沸點 VOCs 經蓄熱式焚化爐(2T、3T RTO 或 RRTO)蓄熱槽間切換而被熱烘衍生次微米氣膠性異味問題，本公司將應用 RTO 尾氣攔截再處理裝置專利技術(相關專利：I365960、M548246)進行異味攔截予以改善；經以上複合技術的整合淨化處理，系統 VOCs 淨化處理效率可達 97%以上。另外，塗裝作業中需使用大量的熱能進行烘乾，亦可進一步利用本公司應用於塗裝作業之乾燥室之氣體循環系統及氣體循環方法(I594803)專利應用技術，有效降低噴塗製程能源的消耗。

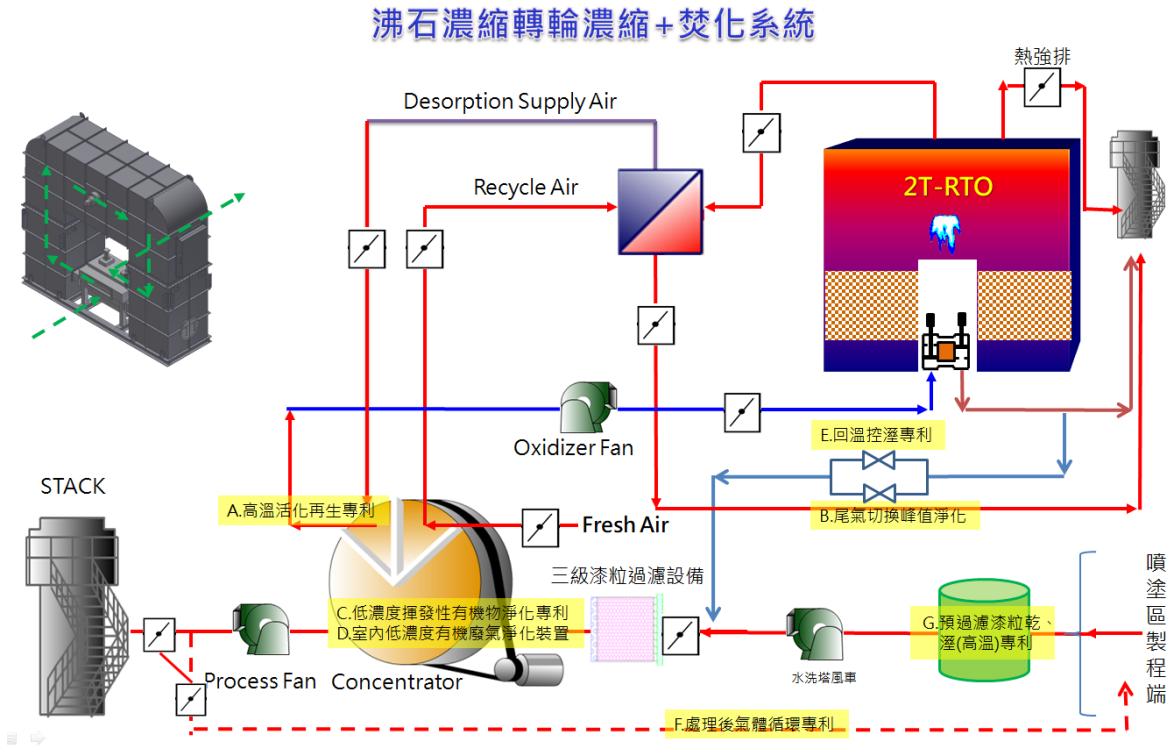


圖 1　表面噴塗製程處理技術流程圖

(一)回溫控濕及再攔截裝置

I562819 有機廢氣吸脫附濃縮淨化系統及其方法：市面上以噴塗處理會先採用濕式除漆霧方式(如水簾式或文丘里式)去除大顆漆粒，但廢氣相對濕度一般≧90%，需後端吸附理論，當廢氣中含有高濃度水氣時會與

VOCs 於沸石表面產生競爭吸附，降低沸石轉輪系統的吸附效率，因此本公司以回溫控濕單元將廢氣之相對濕度調整至<80%(以 75%為最佳)，並可將氣流溫度控制於 20~40℃內。如圖 2 主要利用(210 焚化爐)焚化爐的廢熱引出至廢氣，使得廢氣溫度上升及相對濕度降低後導入沸石轉輪濃縮裝置(134)提高吸附能力，進而提升廢氣中有機物質的去除效率，故此專利不需額外加裝加熱裝置及管線，並具有減少耗能之優點及減少系統管線中因外加元件所造成的壓損。

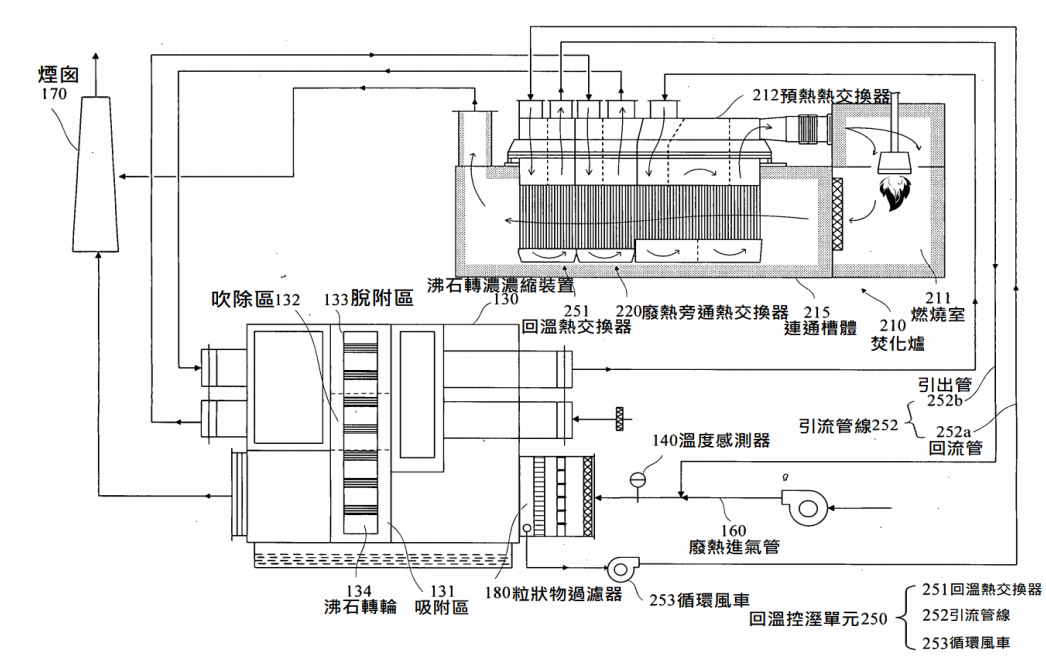


圖 2　有機廢氣吸脫附濃縮淨化系統配置圖

(二)三級過濾單元

為了避免沸石濃縮轉輪吸附劑阻塞進而降低吸附效率，甚至失活，一般應用於噴塗製程漆粒之過濾裝置可分為 3 個等級，分別為 G4(初效過濾)、F8(中效過濾)及 F9 或 H11(高效過濾)，如圖 3 所示。如 G4 級初效過濾器依 ASHRAE 52.1-1992 標準法測定，此種濾網具比色法效率 30~35%，比重法效率 90~94%，F8 級中效過濾器，依 ASHRAE 52.1-1992 標準法測試，濾網具比色法效率 45~50%、60~65%、80~85%及 90~95%等 4 者可供選擇，且可適用於 750 呎/分以下之表面風速，F9 (or H11) 高效過濾器，依歐規 EN1822 標準測試，過濾效率介於 95 ~ 99.999%。另外，亦有 H11 + V 型緩衝過濾吸附單元(若廢氣中含有≥ 5 mg/Nm^3 以上之高沸點 VOCs 時，可選擇 V 型緩衝過濾吸附單元)。本公司曾針對噴漆製程及烘烤製程排氣進行微粒濃度及粒徑分布量測與分析(結果如圖 4 所示)，結

果顯示噴漆製程廢氣之漆粒粒徑呈雙峰分布，而烘烤製程漆粒粒徑則主要分布介於 PM0.1~PM1，若能依照其粒徑分布及微粒負荷現況選用適當的漆粒過濾設備淨化裝置，漆霧顆粒之去除效率可達≥99%。

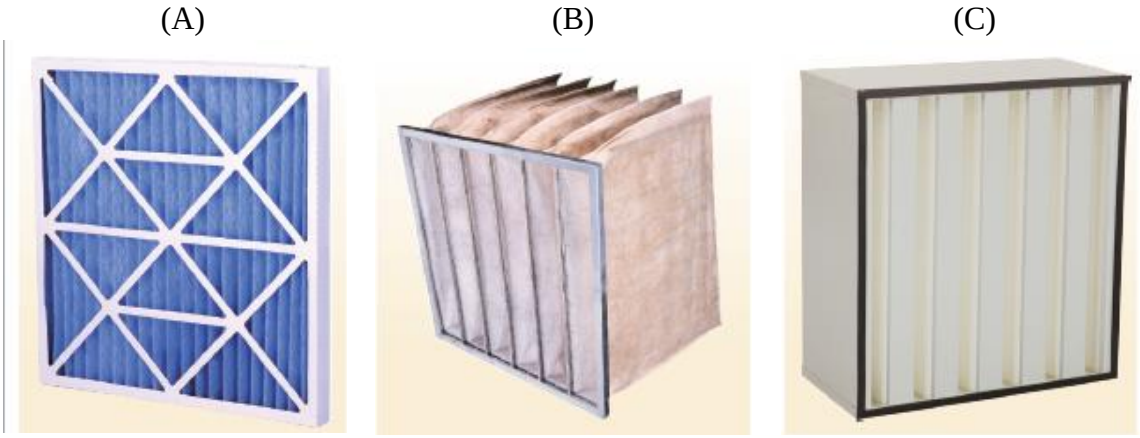


圖 3 三種不同等級之漆粒過濾裝置

(A)G4 級初效過濾器；(B)F8 級中效過濾器；(C) F9 (OR H11)高效過濾器

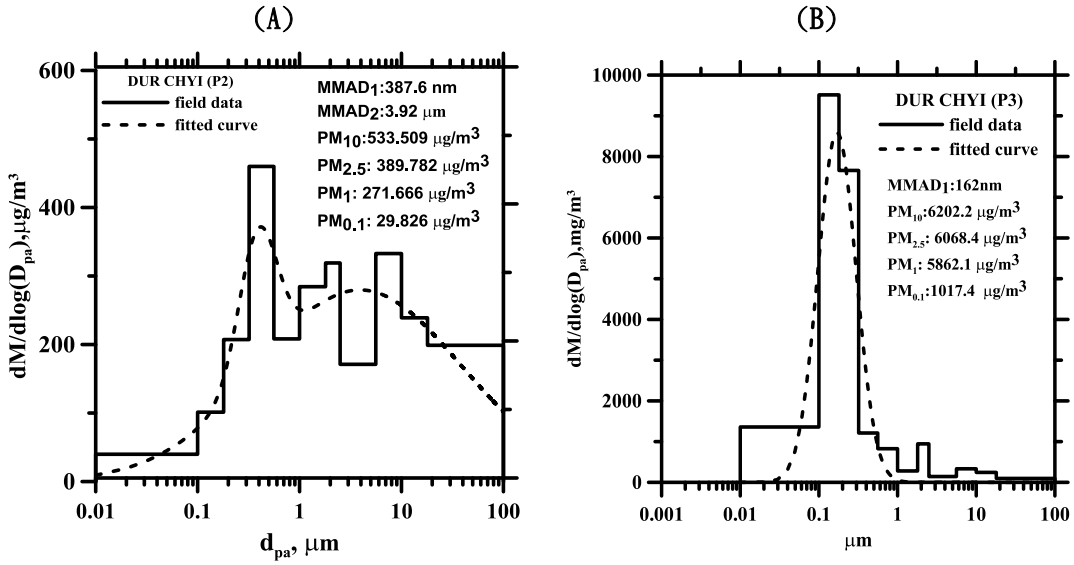


圖 4 不同製程之漆粒粒徑分析結果

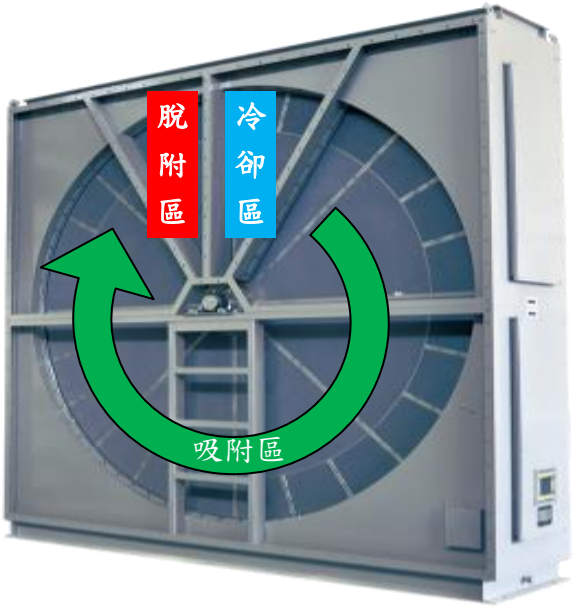
(A)噴漆製程；(B)烘烤製程

(三)沸石濃縮轉輪焚化系統之原理與概況

目前以溫變式吸附濃縮法(thermal swing adsorprion)搭配焚化法最受業者青睞。溫變式吸附濃縮法最常使用於吸附轉輪系統，其中吸附劑之類型又以含浸疏水性沸石(hydrophobic zeolite fine powder)之蜂巢狀平行通

道(honeycomb channels)濃縮轉輪吸附系統(又稱沸石吸附轉輪)居多。相關研究指出利用沸石濃縮焚化系統處理 VOCs 效率可穩定達≧90%。表面噴塗製程及半導體業應用沸石濃縮轉輪與蓄熱式焚化系統可符合 VOCs 排放量小於 0.6kg/hr，符合國內現行 VOCs 污染防制設備中最能符合空氣污染管制及排放標準者。

如圖 5 沸石吸附轉輪系統之轉輪及卡匣(cassette)，蜂巢狀之沸石吸附轉輪之外側金屬卡匣可分為三個區域，分別為下側之吸附區(adsorptive process zone)，上側左方之再生脫附區(desorption zone or regeneration zone)及上側右方之隔離冷卻區(purge zone or cooling zone)，三者之面積比例一般可為 3：1：1、5：2：1、6：1：1 或 10：1：1。沸石吸附轉輪系統運轉時，含 VOCs 廢氣由下方吸附區進入沸石轉輪，此時大部份 VOCs 均可被吸附劑(沸石)所吸附，同時排出乾淨氣體；此外，另一部份氣體可用於吸附劑之脫附與再生，此部份氣體先行預加溫；再經加熱器或熱交換器加溫而進入脫附再生區(一般吸附轉輪運轉速率約 2~6 rph)，經轉輪再生區之脫附空氣含高濃度 VOCs，可進入最終處理設備如焚化或冷凝回收。



資料來源：日商 NICHIAS 型錄

圖 5　蜂巢狀沸石吸附轉輪及卡匣

(四)沸石轉輪濃縮單元相關專利：

1. I323183 處理揮發性有機廢氣之濃縮轉輪線上高溫活化之再生裝置及方法：為了改善傳統技術所面臨能耗高的問題，圖 6 為本專利提供處理揮發性有機廢氣之濃縮轉輪線上高溫活化之再生裝置及方法。此發明可有效活

化再生沸石轉輪，增進吸附濃縮沸石轉輪處理效率及節省維修成本與時間。

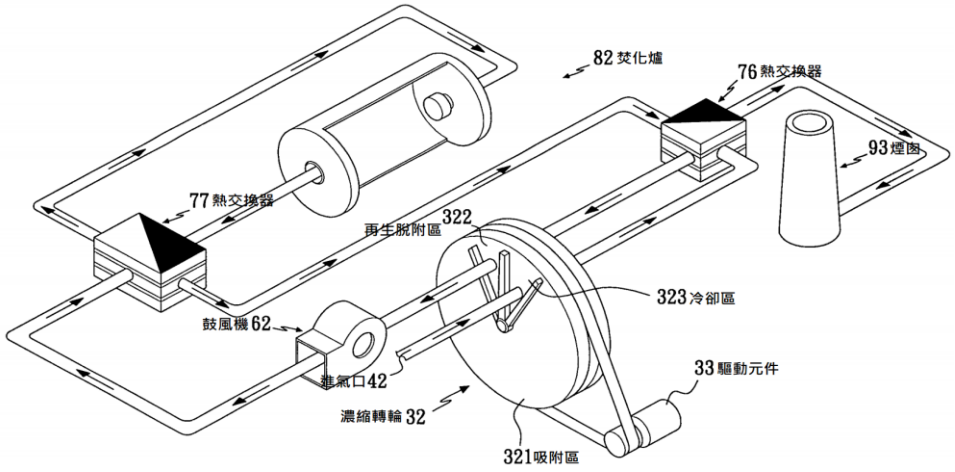


圖 6　處理揮發性有機廢氣之濃縮轉輪線上高溫活化之再生示意圖

2. I410274 一種沸石濃縮轉輪之改良線上再生裝置與方法：為了改善以往將使用一段時間之沸石轉輪拆卸下後，以高溫直接加熱氣體處理再生；以及另一種高溫活化再生方法，利用線上再生方式將高溫氣體流經轉輪後溫度下降，使得轉輪前後兩面活化結果不同，因此造成轉輪壽命不同。此專利為了提昇轉輪效率及壽命如圖 7，使用線上再生方式(322 再生脫附區)讓雙面脫附溫度一樣，使得改善免除拆卸以及轉輪壽命不均勻現象產生。

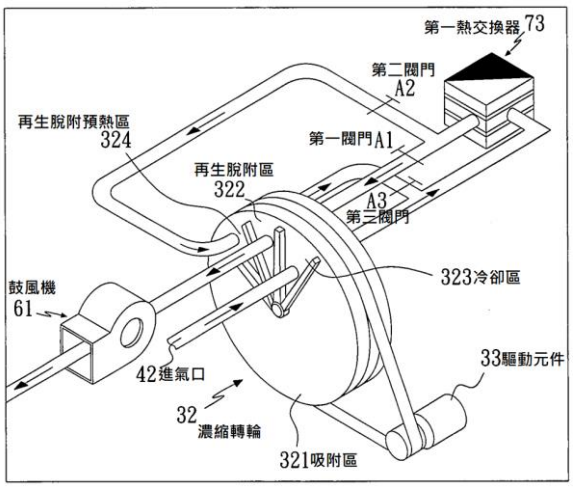


圖 7　濃縮轉輪線上高溫活化再生方法示意圖

3. I624297 具有較佳結構強度的轉輪結構及包括該轉輪結構的流體處理設備：轉輪纖維基材市面上分為 2 種，一種為陶瓷纖維有較佳的結構性，但重量較重以及較易吸收熱能，導致在吸脫附時效果較差，另一種為玻璃纖

維重量較輕、不易吸收熱在脫附出口時溫度可較高效率較佳，但結構強度卻低於陶瓷纖維，實務上曾碰到玻璃纖維基材的轉輪在高風壓的使用環境下，緊貼轉輪框體處的玻璃纖維基材出現裂痕的情況。本專利為了提升較佳結構強度於如圖 8，在至少一塊體表面具有至少一徑向凹陷的凹槽，而將該塊體表面分隔為若干區塊，凹槽與處理通道內的肋條實質互補並供肋條嵌設其內。藉此，肋條可在軸向上提供支撐力，進而提高處理塊體的結構強度。

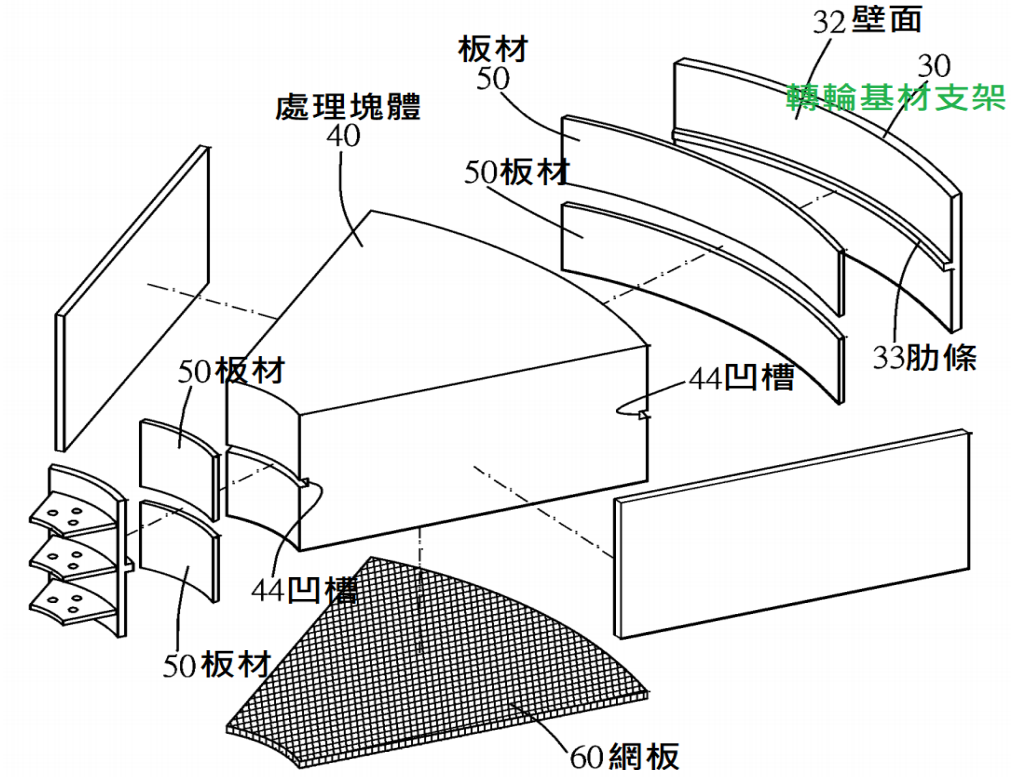


圖 8　轉輪結構局部元件分解圖

4. I549739、I1517893 轉輪、流體處理設備、轉輪處理材塊體之拆卸方法及轉輪處理材支架之拆卸方法：以往轉輪更換需要相關管件整體拆卸，另整個轉輪及箱體約 3~5 噸重需大型吊裝配合進行替換，所需工時也拉長，本專利如圖 9 說明可以在(1461 可動隔板)隔板上做可拆式，將需要更換的處理材塊體分別更換，減少管件及裝費，亦可減少更換的處理時間。

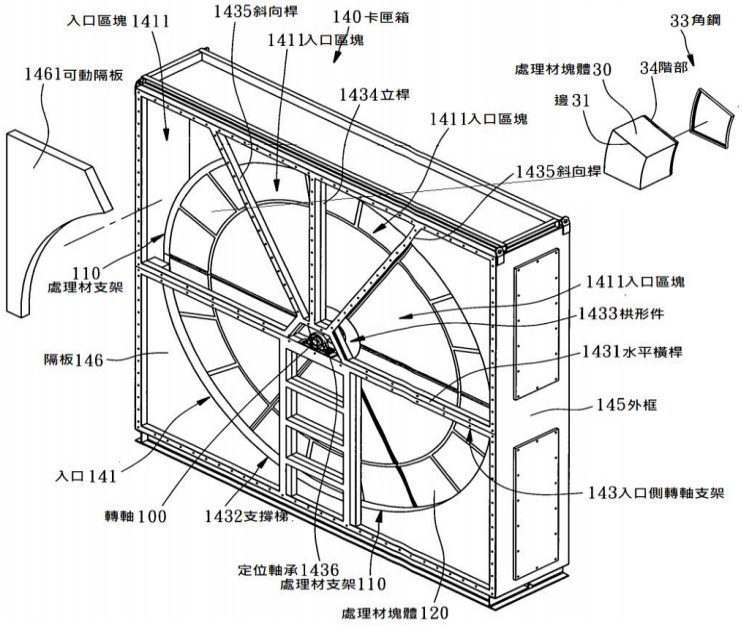


圖 9　濃縮轉輪拆卸分解圖

(五)熱焚化單元

I326753 蓄熱式焚化爐線上熱烘裝置與方法：圖 10 係亦提供一種蓄熱式焚化爐上熱烘方法，特別是一種用以去除或防止高沸點有機物、油霧及焦質(tar)類物質附著於含蓄熱材料於熱交換單元底部，使熱交換單元能正常保持其蓄熱再生功能及防止蓄熱床高溫悶燃之危害，兼具節省燃料費用支出，並削減二氧化碳等廢氣排放量之優點，以及有效降低操作成本及悶燃之危害風險，相當符合環保、安全及能源需求。

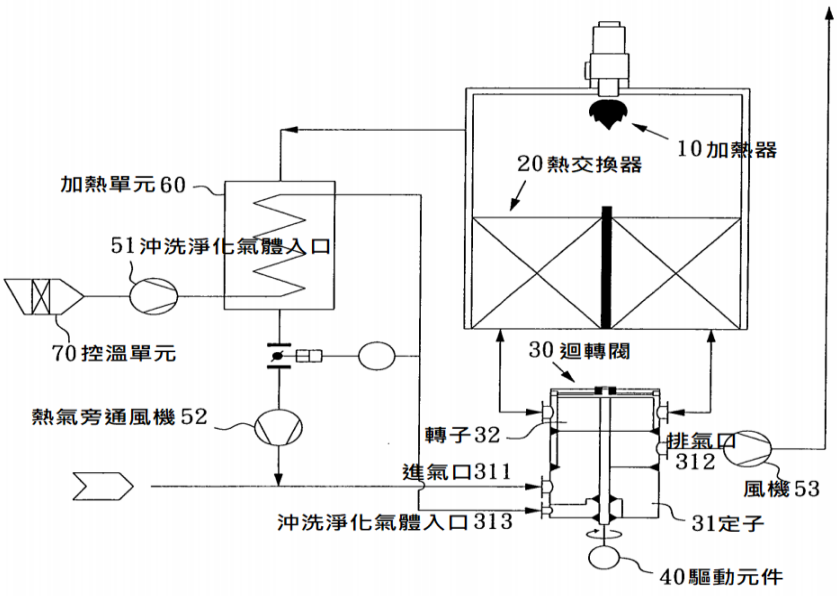


圖 10　迴轉式蓄熱焚化爐經迴轉閥轉子氣流分佈之示意圖

(六)RTO 尾氣攔截再處理裝置

1. I365960 蓄熱式焚化爐尾氣切換峰值淨化系統：雙槽式蓄熱焚化爐於蓄熱槽預熱/蓄熱切換時，預熱蓄熱槽中未處理氣體會因尚未焚化而被排放，於出口濃度於每次閥件切換時，會有週期性未處理氣體交替污染排放及洩漏(尖峰處)的問題，敬請參見圖 11；因此雙槽式蓄熱焚化爐尾氣需要進一步淨化後再進行排放，結構圖如圖 12。

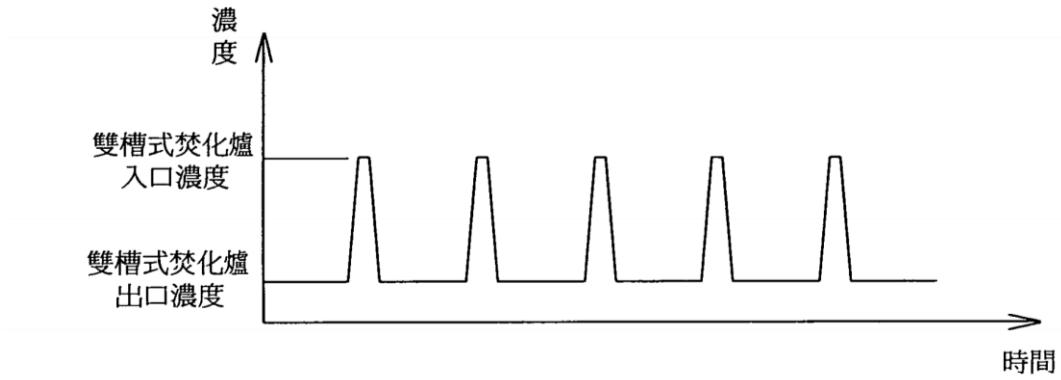


圖 11 雙槽式蓄熱焚化爐之尾氣濃度說明圖

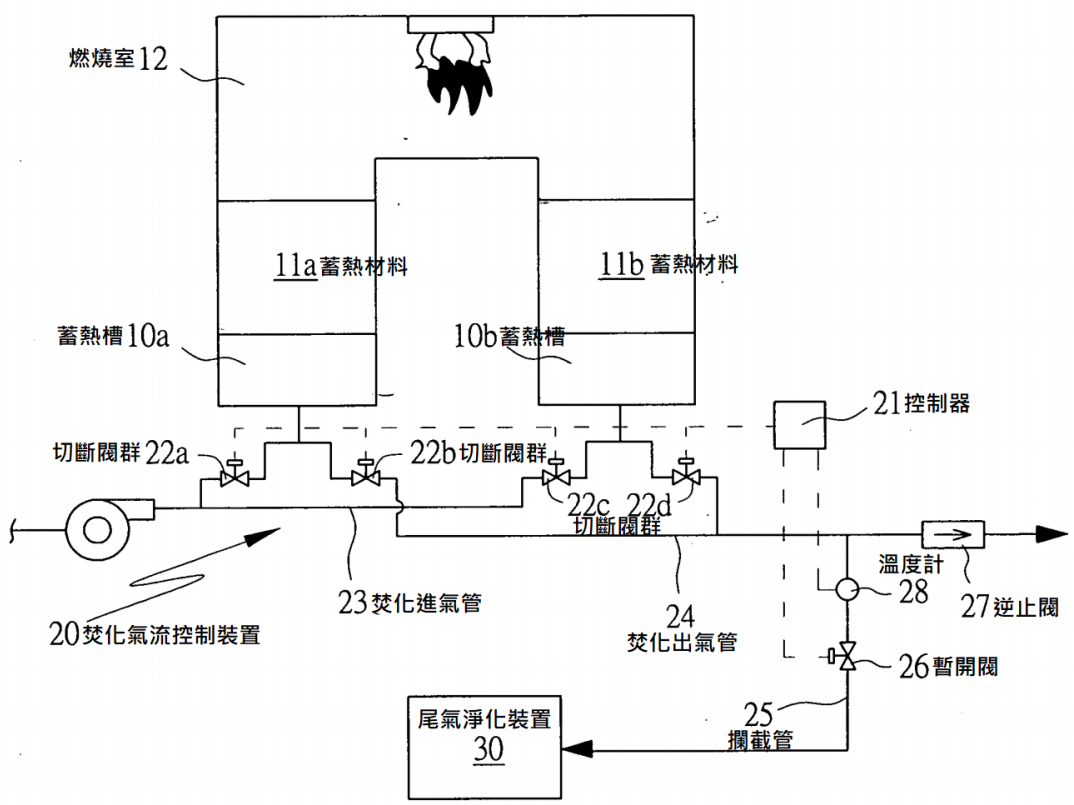


圖 12 蓄熱式焚化爐尾氣切換峰值淨化系統結構說明圖

2. M548246(轉輪高效率淨化系統)：以往使用單沸石轉輪濃縮約 10~25 倍，對揮發性有機物處理效率約 90~95%，但尾氣所未處理的也是不可忽略，以往有人提出 TW M444879「揮發性有機物二次濃縮處理系統」新型專利，新增第二轉輪將其廢氣直接進入焚化單元，但此焚化效率下降而增加設備成本，在本專利以如圖 13 中以新增第二轉輪，將廢氣再導入第一轉輪再淨化達到處理效率高達 98~99%以上，能耗以及設備成本皆為下降。

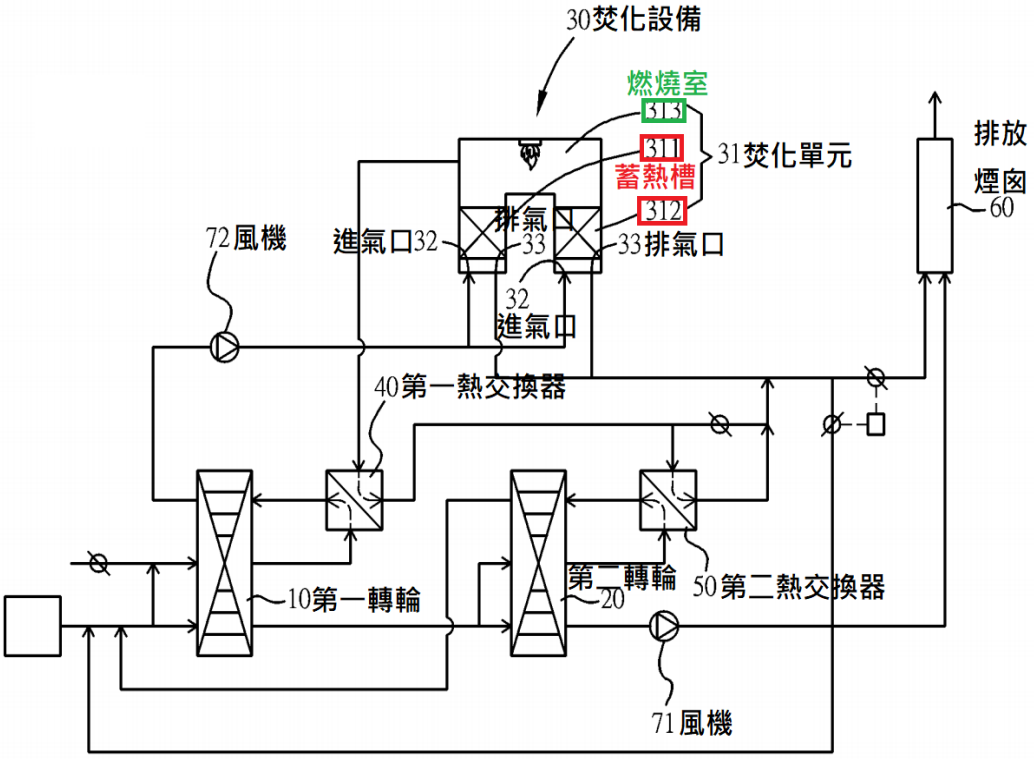


圖 13　淨化系統配置示意圖

(七)乾燥室之氣體循環系統再利用

I594803 應用於塗裝作業之乾燥室之氣體循環系統及氣體循環方法：部份塗裝(噴塗)製程需經過烘乾確保品質，因此本專利圖 14 利用管末處理設備(例如沸石轉輪、活性碳流體化床、焚化爐等)之氣體(40 引回預熱單元)(41 引流管線)導入乾燥區降低能耗及操作成本。

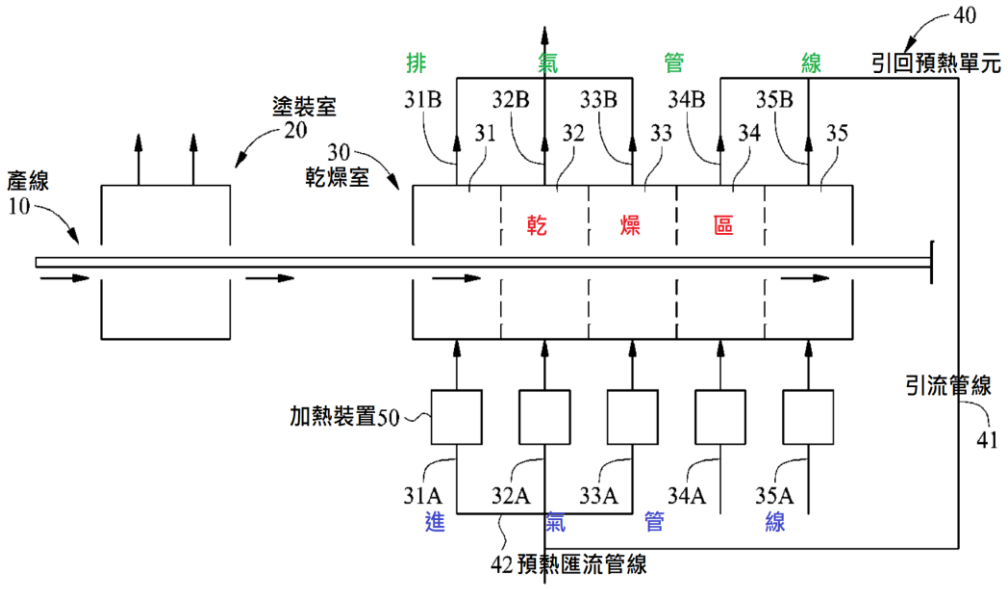


圖 14　有機廢氣吸脫附濃縮淨化系統配置圖

三、沸石轉輪研究與探討

沸石轉輪對於高風量、低濃度之特性氣體有顯著的優點，可使搭配焚化系統之設計及製造可相對縮小焚化尺寸，以維持更低的燃料成本，且提供了持續性及無人化的操控模式，而少量的更換零元件更確保高度的運轉時間。當濃縮倍率介於 8 倍到 25 倍之間時，能夠持續達到 95%~99%的處理效率(不含高沸點 VOCs、聚合物以及入流粒狀物<1mg/m^3)。

(一)不同類型沸石孔徑特性分析結果

本研究採用兩種類型之沸石進行測試，其分別為小孔洞 H-ZSM-5 及中孔洞 MCM-41，上述兩種類型沸石以不同的矽鋁比(Si/Al ratio)進行實驗，不同矽鋁比之沸石分別為：H-ZSM-5-25、H-ZSM-5-50、MCM-41-20 及 MCM-41-AS，代碼之最後一組數字為矽鋁比，如“H-ZSM-5-50”是矽鋁比為 50 的 H-ZSM-5、“MCM-41-20”是矽鋁比為 20 的 MCM-41；至於“AS”則代表 all silica，意指全部為矽不含鋁之沸石。表 1 列出本研究所使用四種沸石之孔洞特性，以平均孔洞直徑大小而言，依序為 MCM-41-AS > MCM-41-20 > H-ZSM-5-50 > H-ZSM-5-25，顯示 4 種沸石中以 MCM-41-AS 的平均孔徑最大，由孔洞直徑分析結果可知 H-ZSM-5 為小孔洞(5 Å)、而 MCM-41 為中孔洞(42~45 Å)，相關研究亦顯示 H-ZSM-5 對大分子 VOCs 有高擴散阻抗，因此不適用於吸附均三甲苯。中孔洞 MCM-41 的平均孔洞直徑大於均三甲苯之分子直徑(0.84 nm)，推測可用以吸附均三甲苯，此假

設亦符合其他學者的論述。另表 1 結果顯示 MCM-41-20 及 MCM-41-AS 之比表面積分別為 781 及 1,081 m^2/g，而 H-ZSM-5-25 及 H-ZSM-5-50 則分別為 308 及 278 m^2/g，顯示 MCM-41 之比表面積較 H-ZSM-5 大；由上述結果推估 MCM-41-AS 可能為四者中最具潛力的吸附材料。

表 1 沸石孔徑特性分析結果

Adsorbent	*Specific surface area (m^2/g)*	*Average pore diameter (nm)*	*Pore volume (cm^3/g)*
H-ZSM-5-25	308	0.5	0.19
H-ZSM-5-50	278	0.6	0.11
MCM-41-20	781	4.2	0.83
MCM-41-AS	1,081	4.5	1.0

(二)以噴塗業常使用甲苯及均三甲苯對於吸附探討

本研究應用不同類型沸石以處理同時含有小分子及較大分子之混合性 VOCs，探討提升沸石轉輪對 VOCs 去除效率的可行性。測試目標污染物為甲苯及均三甲苯，二者皆為噴塗製程中最重要的 2 種 VOCs，就實廠排氣而言，均三甲苯濃度雖不高(< 100 ppm)，但目前業界使用的沸石濃縮轉輪多採用成本較便宜的沸石種類，如 zeolite A、ZSM-5 或 zeolite X 等，其分別為 8、10 及 12 圓環之結構，而孔洞尺寸分別為 3.5~4.5、4.5~6 及 6~8 Å (1 Å = 0.1 nm)，均不適合用以吸附分子尺寸為 0.84 nm (或 8.4 Å)之均三甲苯。本研究提出複合式沸石吸附系統，其概念是利用兩種以上的沸石取代單一種沸石濃縮轉輪，預期此系統可較單一沸石的濃縮轉輪對不同分子 VOCs 具有更高的吸附效率。於沸石吸附系統，本研究先著眼於均三甲苯吸附，找出適當的吸附條件，再考量噴塗製程廢氣中含有分子尺寸大小不同 VOCs 的情況，建立適當的吸附技術。圖 15 為沸石吸脫附實驗裝置；其中，以曝氣方式產生含有飽和濃度的均三甲苯氣流，氣流中均三甲苯的濃度藉由混合稀釋法進行調整(進流氣體之均三甲苯濃度控制於 10~250 ppm)，之後通入吸附床反應器進行實驗，沸石吸附床反應器為固定床型式，其內徑為 10 mm，而沸石總填充高度 50 mm，吸附條件則為風量 2.4 Lpm、溫度 25°C。於脫附程序，以乾燥熱空氣為脫附氣體，脫附氣體的相對溼度≤ 10%，而脫附氣體流率為 4.7 Lpm，脫附溫度設定為 200°C，VOCs 濃度以總碳氫化合物分析儀(THC Model 400, Rosemount Analytical Co.)進行量測，此儀器的偵測器為火焰偵測器(FID, flame ionization detector)。

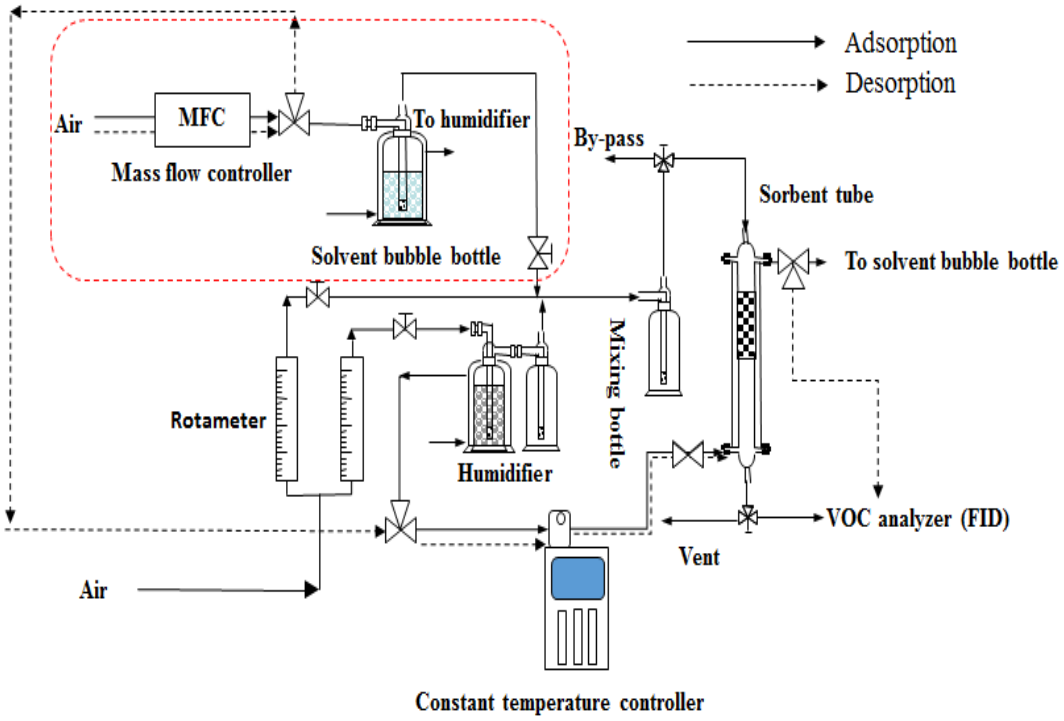


圖 15　沸石吸脫附實驗系統

(三)沸石孔隙大小對不同氣體分子尺寸之影響

此吸附實驗選擇甲苯及均三甲苯兩種分子大小不同的 VOCs 進行比較，吸附劑則選用 H-ZSM-5-25 及 MCM-41-AS 兩種不同孔洞大小的沸石各別進行實驗以了解相關吸附特性；最後再以複合吸附劑對 VOCs 做吸附實驗，建立適當的混合沸石之參數。表 2 為沸石不同孔洞大小對氣體分子測試，結果顯示吸附分子尺寸為較大的均三甲苯時，MCM-41-AS 的飽和吸附容量為 184 mg/g，H-ZSM-5-25 的飽和吸附容量為 14.2 mg/g，兩者相差達 13 倍，顯示中孔洞 MCM-41-AS 沸石之吸附效率遠優於小孔洞的 H-ZSM-5-25 沸石，相關研究顯示 H-ZSM-5 對大分子 VOCs 有高擴散阻抗，因此推測可能不適用於吸附均三甲苯。

由上述結果顯示單一沸石應用於分子尺寸不同的 VOCs 處理效果不佳。由於不同孔徑吸附劑對不同分子尺寸 VOCs 各有擅場，若能結合兩種吸附劑的優點，讓小孔洞沸石吸附較小分子，中孔洞沸石吸附較大分子污染物，是個值得探索的方向。表 3 顯示進流廢氣中同時含有甲苯與均三甲苯兩種 VOCs(濃度各為 50 ppm，總 VOCs 濃度為 100 ppm，其餘實驗條件同前)，貫穿時間由長至短的依序為: H-ZSM-5-25 & MC MCM-41-AS > H-ZSM-5-25；飽和吸附時間由長至短的順序為：H-ZSM-5-25 & MCM-41-AS > H-ZSM-5-25 > MCM-41-AS。貫穿時間與飽和吸附時間的趨

勢略有不同，但混合型的表現都為最優者。混合型的貫穿時間(20.5 min)為單獨 MCM-41-AS (6.5 min)的 3.2 倍，是單獨 H-ZSM-5-25 (3.5 min)的 5.9 倍，顯示混合型沸石可大幅提升吸附系統的效能。

表 2　HZSM-5 及 MCM-41-AS 吸附甲苯及均三甲苯之實驗結果

Adsorbate	*Adsorbent*	*BP (min)*	*SP (min)*	q_e *(mg/g)*
Toluene	H-ZSM-5-25	30	150	83.4
Toluene	MCM-41-AS	8	22	4.7
Mesitylene	H-ZSM-5-25	4	60	14.2
Mesitylene	MCM-41-AS	125	278	184.0

* BP = 貫穿時間、SP = 飽和吸附時間及 q_e =飽和吸附量

表 3　HZSM-5-25/MCM-41-AS 複合型沸石吸附甲苯及均三甲苯之效果

Adsorbent	*BP (min)*	*SP (min)*
H-ZSM-5-25	3.5	84
MCM-41-AS	6.5	22
H-ZSM-5-25 & MCM-41-AS	20.5	104

* BP = 貫穿時間、SP = 飽和吸附時間

四、結　論

近年環保單位對於產業界相關 VOCs 處理技術之要求日趨嚴格，因此，選擇適當的處理流程及空污控制技術為業者必須面臨的重要課題，以 BACT 的精神作為控制技術選用評估流程，是產業界可以參考及依循的最佳方式，但如要成功的選擇 VOCs 處理技術，需對產業製程排氣特性有確實的掌握及瞭解，必要時針對其排氣進行檢測分析，才可依此進行適當之前處理(如粒狀物減量)及廢氣調理(如溫度、濕度控制)程序，主要目的是降低 VOCs 處理設備負面限制因素，才能讓設備發揮應有之性能，以及確保其應有之壽命，而本文說明多項專利在探討沸石轉輪+焚化系統，結果顯示此系統成功應用於噴塗製程之尾氣處理，系統可對 VOCs 之去除效率 ≥ 98%。另外，本研究亦從學術角度探討如何從傳統沸石轉輪系統對 VOCs 吸附效率再提升，研究結果顯示沸石之吸附能受 VOCs 濃度、水氣及操作次數影響；本研究發現單一沸石不適用於不同分子尺寸之 VOCs 處理，需結合不同沸石吸附劑形成複合式沸石系統，使得吸附效能為單獨沸石吸附劑之數倍。

五、參考文獻

1.「Air Pollution and Cancer」，世界衛生組織(IARC Scientific Publication) NO.161 ISBN 978-92-832-2166-1，2013 年 10 月。

2.點源網格空氣污染排放量(TWD97)，行政院環境保護署，2017 年。

3.固定污染源最佳可行控制技術，行政院環境保護署，2016 年 5 月。

4.公司內部專利清冊，傑智環境科技股份有限公司。

5.晟鼎科技股份有限公司（AIRREX CO., LTD.）http://www.air-rex.com.tw/index.htm

6.張豐堂，次世代面板廠揮發性有機氣體淨化設備的特性研究，清華大學工程與系統科學系博士論文，2005 年 7 月。

7.白曛綾、李谷蘭、楊泰辰、黃文賢、林育旨，「園區半導體製造廢氣處理及排放調查研究期末報告」，新竹科學工業園區管理局，2000 年 12 月。

8.白曛綾、賴慶智、林育旨、康育豪、李谷蘭、曾映棠、劉政彰、陳建志、張國財、劉惠綺、楊德志，「新竹科學園區半導體及光電製造業空氣污染防制設施績效提升輔導」，新竹科學園區管理局，2001。

9.白曛綾、盧重興、曾映棠、許世杰、張國財、林育旨、林家欣、陳建志、洪錦德，「新竹科學園區半導體及光電製造業空氣污染防制設施績效提升輔導」II，2002。

10.粘愷峻，活性碳與沸石吸附之工程實踐評估，中央大學環境工程研究所博士論文，2018 年 7 月。

11.Mahmoudi, J., Lotfollahi, M.N., and Asl, A.H., (2015) Comparison of synthesized H-Al-MCM-41 with different Si/Al ratios for benzene reduction in gasoline with propylene, Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 24,p 113-120.

12.Meléndez-Ortiz, H.I., Mercado-Silva, A., Garcia-Cerda, L.A., Castruita, G and Perera-Mercado, Y.A., (2013), Hydrothermal synthesis of mesoporous silica MCM-41 using commercial sodium silicate, Journal of the Mexican Chemical Society,p 57, 73-79.

化煉鋁爐渣為乾燥設備產業用多孔陶瓷除濕轉輪性能研究

王多美*、楊昇府*、徐啟振*、李灝銘*、李恆毅*

摘　要

行政院原子能委員會核能研究所一直以來持續不斷致力於對鋁金屬製造業和鋁金屬製品製造業於熔煉製程所產生之鋁金屬冶煉爐渣及集塵灰進行研究，發展綠色材料化再利用技術，開發製作高鋁耐火磚和陶瓷原物料(氫氧化鋁及氧化鋁)，增加其生命週期，減少不當處置對環境造成衝擊。目前進一步完成開發煉鋁爐渣純化精煉活性氧化鋁，並以其為基材製作多孔陶瓷除濕轉輪，預計導入國內乾燥設備產業，應用於塑料乾燥、食品乾燥、空調除濕與其他民生防潮除濕領域。煉鋁爐渣經由沉澱純化和精煉後，可獲得比表面積為 122 m^2/g 的活性氧化鋁材料，泡棉網狀結構含浸於其調成之陶瓷漿料，利用高溫煅燒移除泡棉，可獲得多孔陶瓷轉輪。依據製作參數的調整，多孔陶瓷轉輪平均孔徑、體密度及孔隙度分別介於 0.42-1.27 mm/pore、0.36-0.42 g/cm^3 和 85.4%-87.6%。多孔陶瓷轉輪試體隨著單位長度孔洞數的增加，最大荷重值介於 61-116 kgf，抗彎強度值介於 17-32 kgf/cm^2 之間。直徑 15 公分和厚度 5 公分多孔陶瓷除濕轉輪等溫吸附動力實驗結果顯示，運轉 12 分鐘後會達到吸附平衡，此時最大吸附量為 51.4 克，每小時的最大吸附量為 257 克。以百分比來表示，則 60 PPI 多孔陶瓷輪的最大吸附量為 18.4%，也就是每公克多孔陶瓷輪可以吸附 0.184 公克水氣。多孔陶瓷除濕轉輪應用於乾燥設備，進行大蒜農產品乾燥，批次總重量為 350 公斤，連續操作一星期，除水率 30 %，未來將放大乾燥設備機台，進行總重量 1,000 公斤的大蒜乾燥場域測試。

【關鍵詞】鋁金屬冶煉爐渣、鋁金屬冶煉集塵灰、多孔陶瓷除濕轉輪、乾燥設備

*行政院原子能委員會核能研究所 研究人員

一、前　言

廢鋁原料在冶煉製鋁的過程當中會產生煉鋁爐渣，爐渣的組成主要分成兩大類。第一類是空氣污染防治設備所收集的集塵灰，稱為非有害集塵灰或其混合物（環保署廢棄物代碼 D-1099），鋁集塵灰外觀類似粉煤灰，是一種銀灰色粉狀物，鋁集塵灰中主要成份除鋁金屬外，其餘為氧化鋁(Al_2O_3)、氧化矽(SiO_2)、氧化鎂(MgO)、氧化鈉(Na_2O)、氧化鈣(CaO)和氧化鐵(Fe_2O_3)等，其中氧化鋁含量一般在 43%－75%，氧化矽含量一般在 5%-20%[1]。第二類是熔湯的漂浮物包括浮渣和鹽餅(Salt cake)等類型的廢棄物，為鋁金屬冶煉爐渣含原煉鋼出渣（環保署廢棄物代碼 D-1201），此類廢棄物是來自廢鋁冶煉過程當中所添加的鹽類助熔劑(Salt flux)，其成份主要為氯化鈉和氯化鉀(NaCl∶KCl＝7∶3)，一般佔原料重量之 0.2%左右。浮渣含有金屬鋁(10-20 wt%)、鹽類助熔劑混合物(40-45 wt%)和氧化鋁(20-25 wt%)，而鹽餅則包含 5-10 wt%金屬鋁，上述皆可以再次熔煉來回收鋁金屬[2]。爐渣因含有金屬鋁和鋁的氮化物、碳化物，當其曝露在空氣中遇潮或吸濕則會水解(Hydrolysis)產生氨氣、氫氣和甲烷，爐渣處置時需注意此可能延伸對環境造成的衝擊和風險[3-5]。在國內煉鋁爐渣的處理方式，仍以廠內堆置和掩埋為主要的處理方式，沒得到政府主管機關與業者足夠的重視。因此，非法棄置和違法境外輸出層出不窮，未得到適當有效的處理。若是處理不當仍會對環境造成衝擊，並危害人體健康。煉鋁爐渣無論從質與量來看，都具有相當之經濟價值，因此從零廢棄和資源再利用觀點，應發展有效材料化再生技術和方法，以達回收再利用煉鋁爐渣和集塵灰之目的。

國外研究單位針對鋁金屬冶煉爐渣及集塵灰再利用技術開發持續不斷在進行，如製作人造沸石($AlPO_4$-n zeolitic material)和無機陰離子交換劑(Hydrotalcite-like material)，作為吸附劑和去除重金屬之應用[6-7]；當為碳酸鉀(Potash)礦場採礦後裸露的土石堆覆土(Cover material)，以減少因雨水沖刷所產生含鹽的雨水逕流，降低其對環境造成危害[8]；與水泥和砂混拌製造水泥磚[9]；經由電漿處理或燒結程序後的衍生物，用來取代可鑄性耐火物(Castable)中的氧化鋁成份和耐火磚中耐燃的成份[10]；藉由金屬鋁和鹼性水溶液反應產生氫氧化鋁和氫氣，氫氧化鋁可供給相關應用廠商，氫氣則可被用作燃料和供燃料電池使用[11-13]；利用硫酸溶液將鋁和氧化鋁以硫酸鋁($Al_2(SO_4)_3$)的型式溶出，再藉由氨水來水解硫酸鋁形成氫氧化鋁，最後藉由鍛燒(900℃)來獲得 η-氧化鋁，η-氧化鋁屬於活性氧化鋁，可做為吸附劑或

是觸媒載體[14-16]；生產人造沸石、氫氧化鋁、氧化鋁、聚合氧化鋁混凝劑、道路基層級配和輕質牆面磚[17-21]。

台灣鋁金屬冶煉爐渣及集塵灰的再利用材料化方式，主要運用化學沉澱純化的方式來獲得目標化學物質，例如：將爐渣和氫氧化鉀進行反應獲得高鋁固體，高鋁固體再與電石渣進行混合、燒結來製作高鋁水泥[22]；利用稀氯化銨溶液與爐渣混合，經由固液分離和濃縮等單元來得到高純度的氯化銨[23]；爐渣於充滿氮氣的氣氛下進行燒結，來製作高度多孔性的氮化鋁產物[24]；以鹽酸作為爐渣脫臭的洗滌溶液，再將沉澱之爐渣運用於取代矽灰，添加於混凝土材料，填補骨材間之縫隙[25]。另外近幾年也有以煉鋁爐渣為原料製作耐火材料、複合材料與陶瓷材料之研究發表[26-29]。

多孔陶瓷的製作是在材料成形與高溫燒結過程中控制試體孔徑大小和分佈而形成，陶瓷材料試體內部具有彼此連通的氣孔稱為網狀陶瓷(Reticulate ceramic)，若是孔洞彼此獨立而且封閉則為發泡陶瓷(Foam ceramic) [30]。多孔陶瓷材料種類相當多，依據孔徑的大小可分為三類：1.微孔洞陶瓷(孔徑<2 nm)；2.中孔洞陶瓷(2 nm<孔徑<50nm)；3.大孔洞陶瓷(孔徑>50 nm)。多孔陶瓷材料因具有良好的化學穩定性、機械強度和耐高溫，因此被廣泛的應用在環保、冶金、化工、能源和電子等領域[31]。

本文主要使用濃度 5 M 的 NaOH 溶液從煉鋁爐渣純化萃取自製循環再生氫氧化鋁粉末，作為陶瓷結構體原料，採用孔徑 20、30、40、50、60 PPI 的多孔泡棉(Urethane)為載體，將陶瓷漿料浸入並以滾壓方式移除空氣，促進載體吸附陶瓷漿料，試體烘乾(110°C，6 小時)後分別送入高溫爐以 1,200°C 進行燒結，將陶瓷漿料和載體材料中有機成份和聚合多孔泡棉體高溫燃燒移除，多孔陶瓷轉輪的初步尺寸為直徑 150 mm 和厚度 50 mm，試片進行各種物理與化學性質之分析測試，多孔陶瓷除濕轉輪進一步應用於乾燥設備，進行大蒜農產品乾燥的性能研究。

二、實驗材料

實驗使用之煉鋁爐渣來源為南部某廢鋁再生冶煉工廠所提供，煉鋁爐渣主要化學組成和有毒重金屬溶出檢測結果分別如表 1 和表 2 所示，主要組成為氧化鋁之無機成份所構成。煉鋁爐渣有毒重金屬溶出檢測結果顯示，有毒重金屬之溶出，均低於環保署有害事業廢棄物認定之毒性特性溶出程序溶出管制標準。煉鋁爐渣使用濃度 5 M 的 NaOH 溶液進行純化萃取，萃取液控制酸鹼值在 11-13 後進行固液分離，固體為含有部份鹼液的白色氫氧化鋁

泥，氫氧化鋁泥於震盪器中用 60-90°C 的純水快速震動攪拌，再次進行固液分離，固形物於高溫爐中進行煅燒精煉，升溫速率為 2°C /min，最高溫為 600°C，樣品冷卻研磨後進行比表面積測試，測試結果為 122 m^2/g。多孔陶瓷漿料調製過程中加入 2 wt%的膨潤土(Bentonite)流變助劑(Rheological agent)、0.1 wt%的乙醇抗發泡劑、及 0.5 wt% 次乙亞胺(Ethyleneimine)凝聚劑(Flocculating agent)形成陶瓷漿料，促進該陶瓷漿料黏流性質減少架橋。

表 1　煉鋁爐渣主要化學組成份

項目	煉鋁爐渣	煉鋁集塵灰	單位
Al_2O_3	86.1	80.5	%
Na_2O	2.5	7.7	%
MgO	2.6	2.5	%
K_2O	0.7	3.6	%
CaO	1.1	0.9	%
Fe_2O_3	3.1	3.9	%
MnO	0.1	0.001	%
TiO_2	3.3	0.5	%
BaO	0.01	0.01	%
Cr_2O_3	0.002	0.0005	%
NiO	0.02	0.0003	%
CuO	0.3	0.0007	%
PbO	0.006	0.001	%
ZnO	0.04	0.001	%
SiO_2	0.1	0.4	%
P_2O_5	0.04	0.03	%

表 2 煉鋁爐渣的有毒重金屬溶出檢測結果

項目	煉鋁爐渣	煉鋁集塵灰	管制標準	MDL	單位
總鉛	ND	ND	5.0	0.0671	mg/L
總鎘	ND	ND	1.0	0.0035	mg/L
總汞	ND	ND	0.2	0.00038	mg/L
總砷	ND	ND	5.0	0.0003	mg/L
總鉻	ND	ND	5.0	0.0194	mg/L
六價鉻	ND	ND	2.5	0.009	mg/L
總硒	0.028	0.124	1.0	0.0475	mg/L
總銅	ND	ND	15.0	0.0646	mg/L
總鋇	0.727	0.900	100	0.0369	mg/L

三、實驗方法及步驟

使用濃度 5 M 的 NaOH 溶液從煉鋁爐渣純化萃取自製循環再生氫氧化鋁粉末後，精煉為活性氧化鋁，作為陶瓷結構體原料，粉末粒徑經過前處理篩選分級程序，使其粒徑分佈較為集中，增進粉末與漿料結合的均勻性，促進流動性。粉末經雷射粒徑分析儀測試，粒徑分佈結果如圖 1 所示，分別為 D10=22.4μm、D50=40μm、D90=63.5μm。採用孔徑 20、30、40、50、60 PPI 的多孔泡棉為載體，將陶瓷漿料浸入並以滾壓方式移除空氣及多餘漿料，促進多孔載體吸附陶瓷漿料，試體於 110°C 及 6 小時烘乾養護後分別送入高溫爐以 1,200°C 進行燒結(圖 2)，將陶瓷漿料和載體材料中有機成份和聚合多孔泡棉體高溫燃燒移除，試體無龜裂破損，多孔支撐架無崩塌，孔洞之間的空氣流道無阻塞。多孔陶瓷轉輪的初步尺寸為直徑 150 mm 和厚度 50 mm，試片進行各種物理、化學性質及機械強度之分析測試。

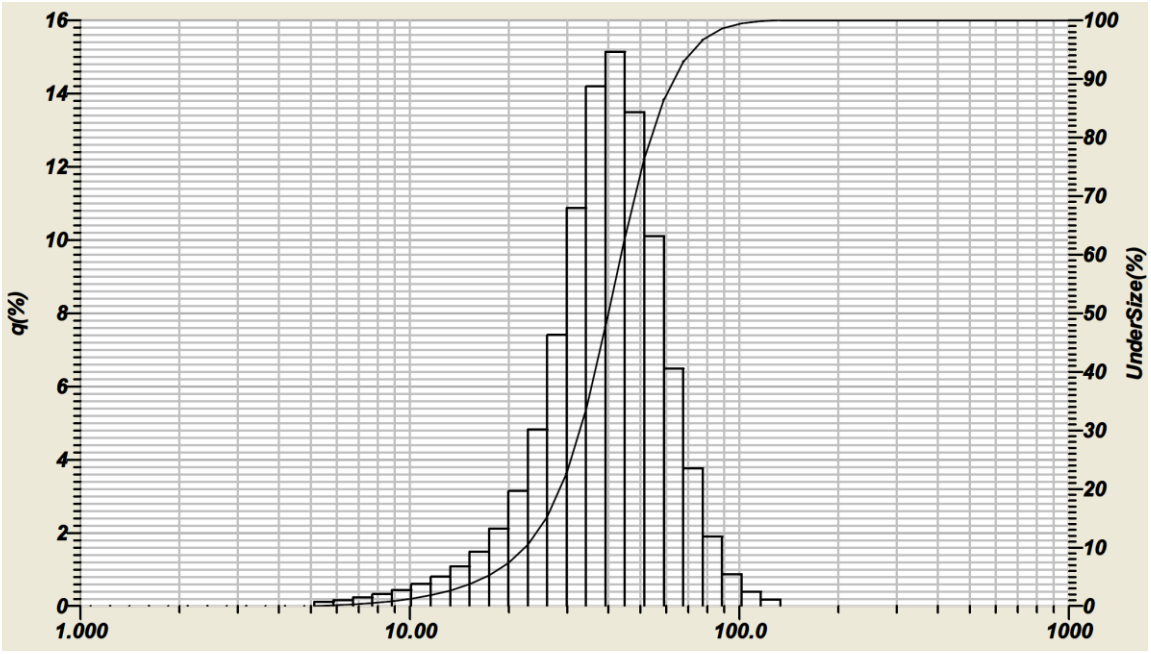


圖 1　活性氧化鋁粉末之粒徑分佈

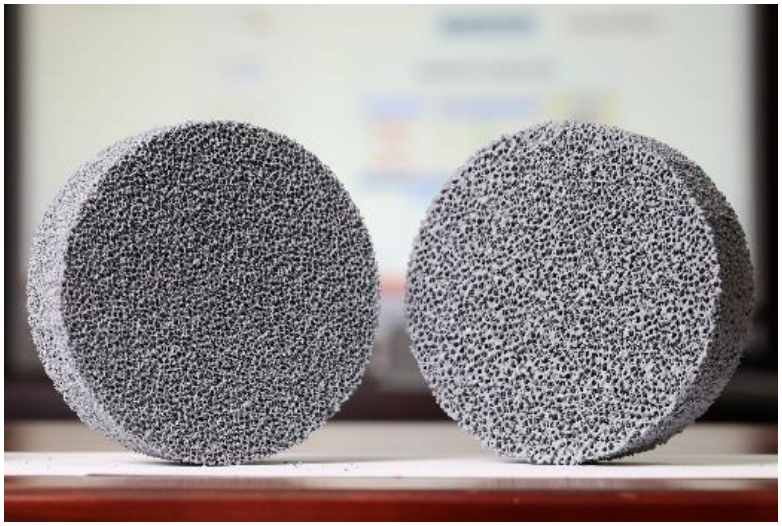


圖 2　直徑 150 mm 和厚度 50 mm 之多孔陶瓷轉輪

為了解除濕輪對於水份吸脫附的能力進行等溫吸附動力實驗。等溫吸附平衡實驗，5 種不同孔隙度除濕輪，分別為 20、30、40、50 和 60 PPI，輪體厚度為 5 公分，實驗裝置與測試照片如 3 所示。恆溫恆濕試驗機操作條件：溫度 25°C、濕度 6%，連續運轉。吸附平衡過程進行除濕輪重量變化連續監控，取得轉輪體水氣吸附量。孔陶瓷除濕轉輪進一步應用於乾燥設備，進行大蒜農產品乾燥，批次總重量為 350 公斤，連續操作一星期，進行大蒜農產品乾燥的性能研究。

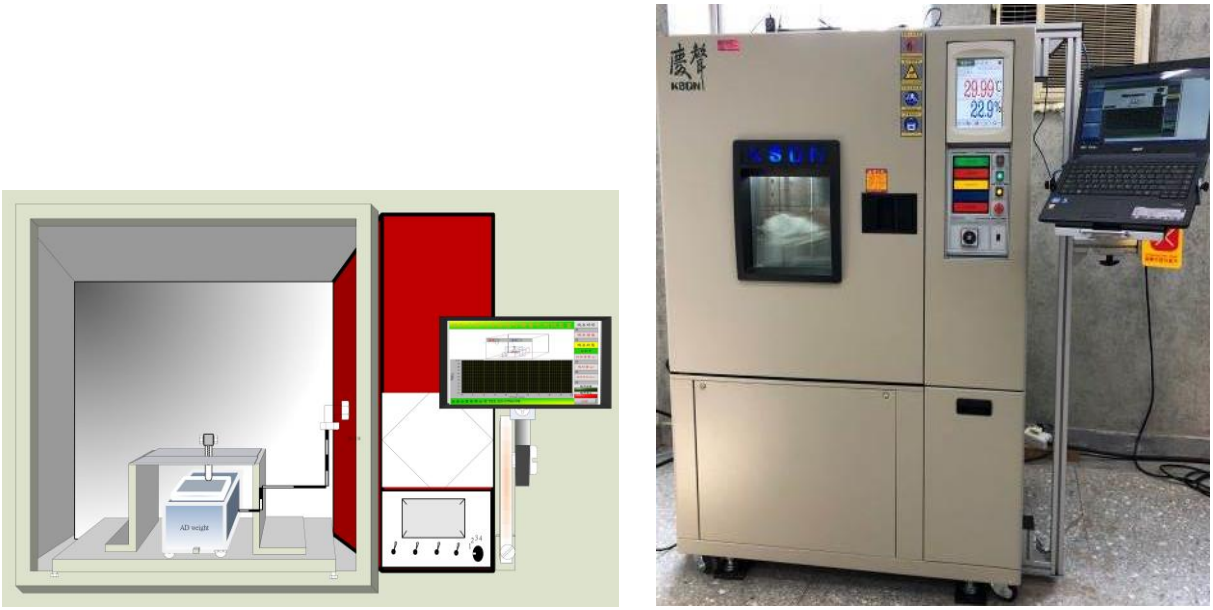


圖 3　等溫吸附動力量測設備

四、結果與討論

1.多孔陶瓷轉輪微結構

多孔陶瓷的孔徑及孔徑分佈是其重要的性質之一，依其應用的範疇如作為過濾材料、氣體的分離和淨化，則對滲透速率，透氣度和過濾性能等影響相當顯著。圖 4 和圖 5 分別為 20 PPI 和 50 PPI 多孔陶瓷轉輪於電子顯微鏡下觀察孔洞微結構、空氣流道及測量孔洞直徑。由微結構圖可知多孔陶瓷轉輪陶瓷骨架完整無崩塌，空氣流道順暢無堵塞情形發生，複合式孔洞結構可增加潮濕空氣與材料表面吸附點的接觸面積及質傳，有利於空氣中水氣的移除，相對的也增加輪體再生時水氣脫附的效率。20 PPI 除濕輪孔洞大小介於 1.48-1.57mm，50 PPI 除濕輪孔洞直徑大小介於 541-546 ㎛。

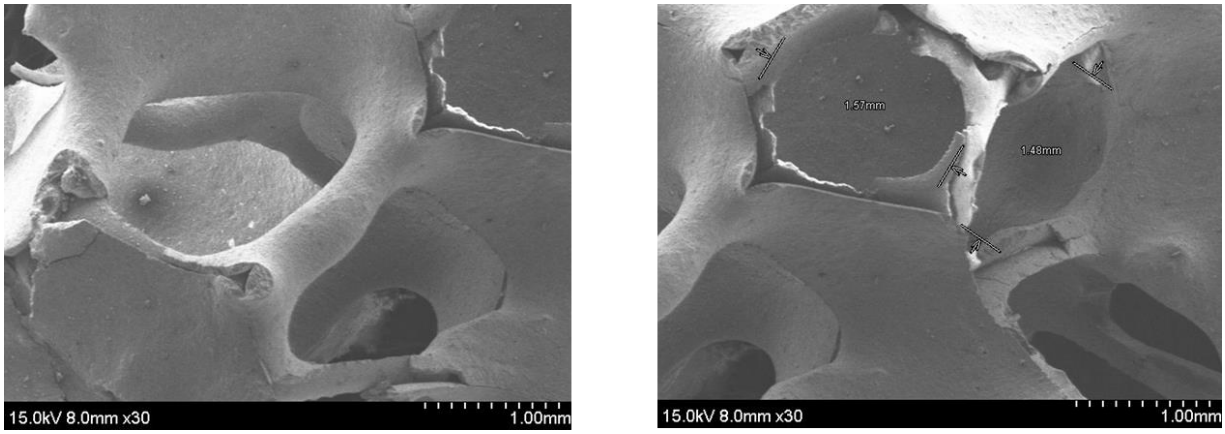


圖 4　20 PPI 多孔陶瓷轉輪微結構

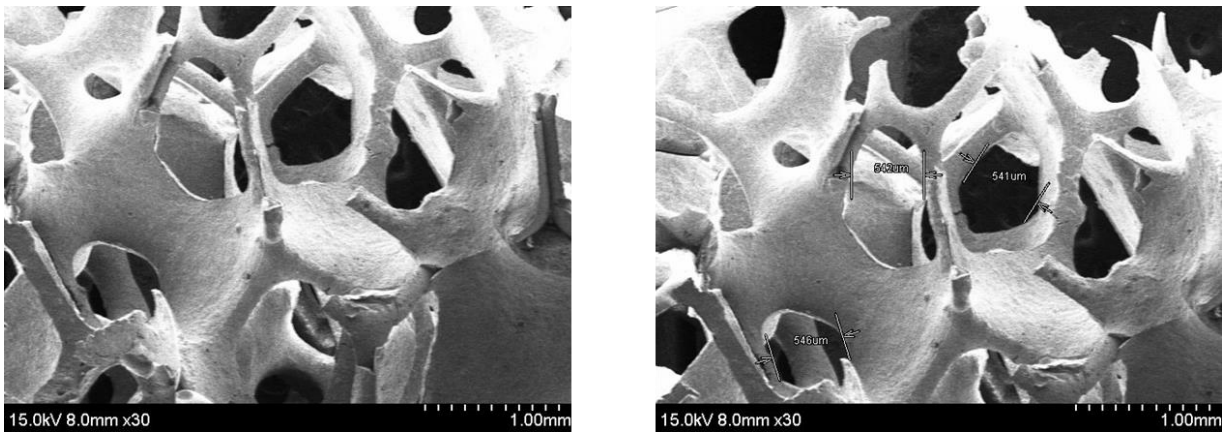


圖 5　50 PPI 多孔陶瓷轉輪微結構

2.多孔陶瓷轉輪體密度及孔隙率

運用阿基米得原理，測得試體在空氣中的重量(W1)、水中重量(W2)和水飽和試體重量(W3)，來計算試體的體密度。使用流體置換的阿基米德原理(Archimedes principle)和波義爾定律(Boyle's law)來定義體積，重量則是放入試管的樣品重，經由計算可得真密度數值。多孔陶瓷轉輪真密度為 2.91 g/cm^3。圖 6 為多孔陶瓷轉輪體密度及理論孔徑，本研究製作的多孔陶瓷屬於開口貫通氣孔的陶瓷試體，所運用的多孔泡棉載體孔洞的理論大小為 20、30、40、50、60 PPI，經由換算理論平均孔徑分別為 1.27、0.85、0.63、0.51 及 0.42 mm/pore。多孔陶瓷轉輪燒結完成後於電子顯微鏡下觀察孔洞大小，20 PPI 除濕輪孔徑介於 1.48-1.57 mm，50 PPI 除濕輪孔徑大小介於 541-546 ㎛。不同空徑大小的多孔陶瓷轉輪體密度介於 0.36 g/cm^3-0.42 g/cm^3。

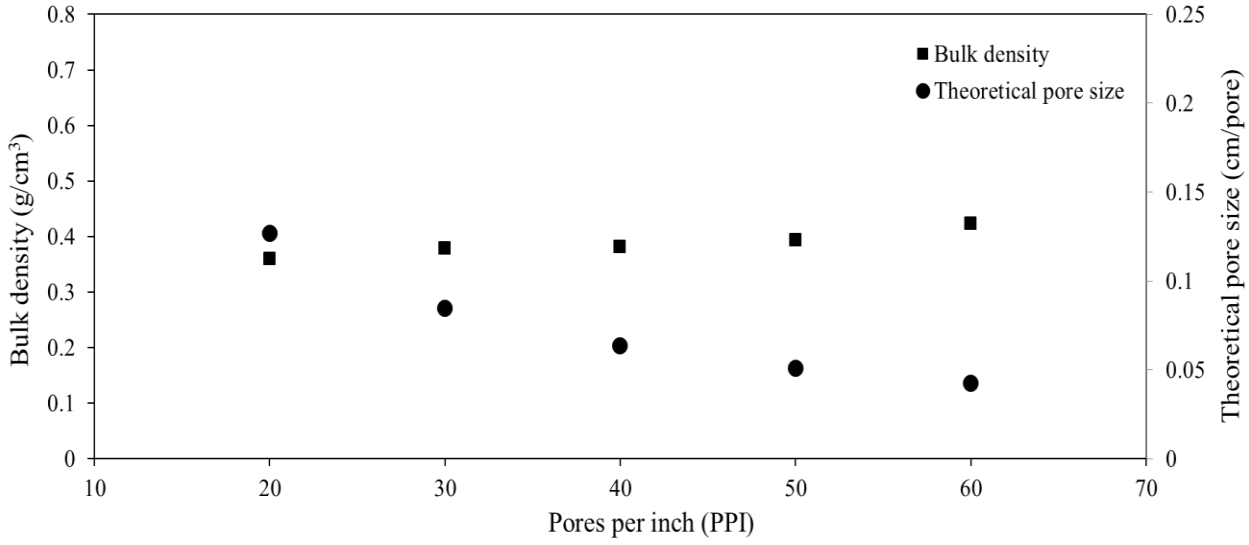


圖 6　多孔陶瓷轉輪體密度及理論孔徑

體密度和孔隙率對多孔陶瓷的熱性能和機械性能有顯著的影響，在一般情況下，孔隙率越大，體密度越小，多孔陶瓷的孔洞分佈及隔熱性能越好，而抗壓強度和抗彎強度等機械性能則較差。當多孔陶瓷轉輪的體密度和真密度為已知時，則多孔陶瓷轉輪的孔隙度可依下列方程式進行計算。Pt：孔隙度；Db：同一多孔陶瓷轉輪之體密度；Dt：同一多孔陶瓷轉輪之真密度。圖 7 為多孔陶瓷轉輪孔隙率的測試結果，20、30、40、50、60 PPI 多孔陶瓷轉輪的孔隙度介於 85.4%-87.6%之間，孔洞數目多有助空氣的流通。

$$P_t = (1 - \frac{D_b}{D_t}) \times 100$$

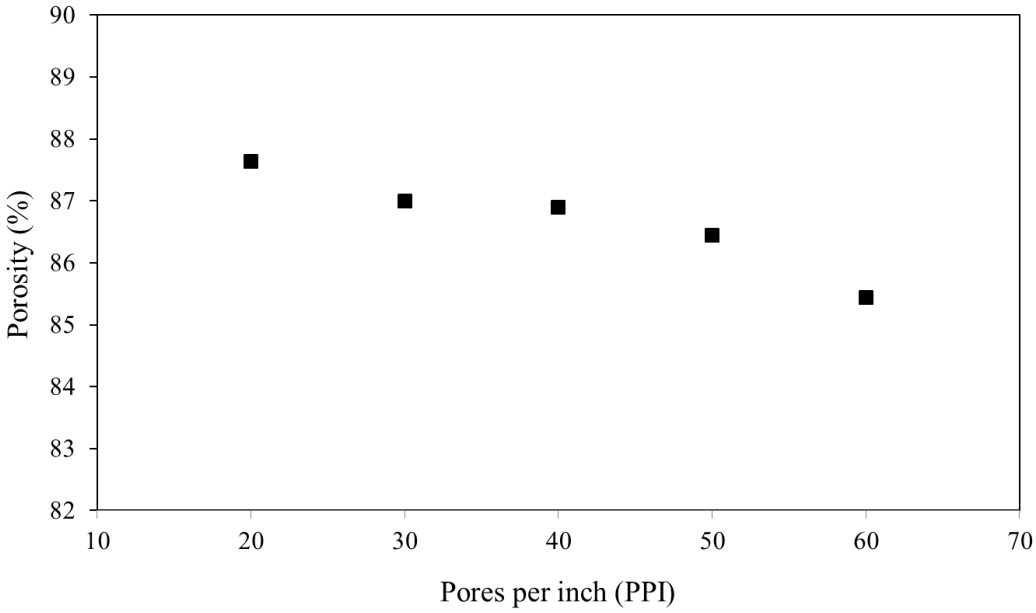


圖 7　多孔陶瓷轉輪孔隙率

3.多孔陶瓷轉輪抗彎強度

抗彎強度測試，每一孔徑多孔陶瓷轉輪測試試體數目為 3 個。試體大小為直徑 150mm 厚度 50mm 之圓型尺寸，試驗機台最大荷重為 250 公斤，載重施加平均速率為 1 至 3 分鐘內可到達預期最大載重，測試過程如圖 8。多孔陶瓷轉輪最大荷重及抗彎強度，如圖 9 所示，多孔陶瓷轉輪試體隨著單位長度孔洞數的增加(20-60 PPI)，其最大荷重及抗彎強度有增加的趨勢，最大荷重值介於 61-116 kgf，抗彎強度值介於 17-32 kgf/cm^2 之間。

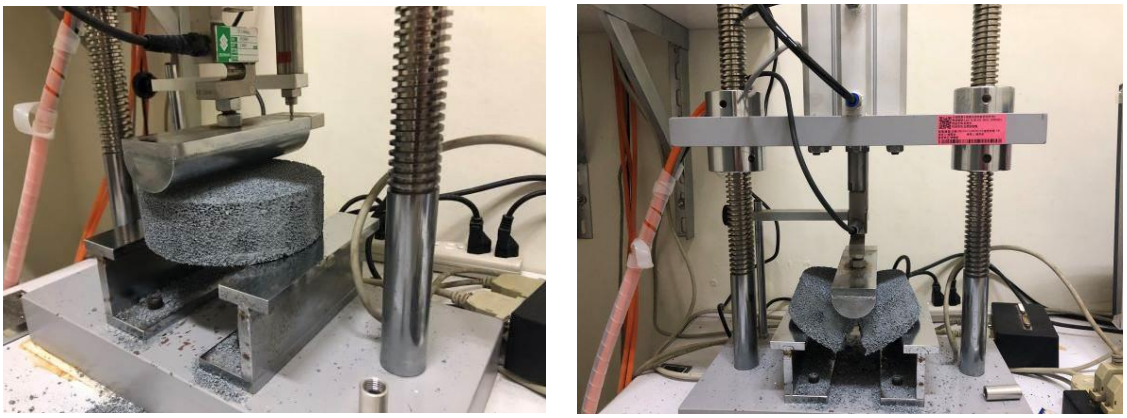


圖 8 多孔陶瓷轉輪抗彎強度測試

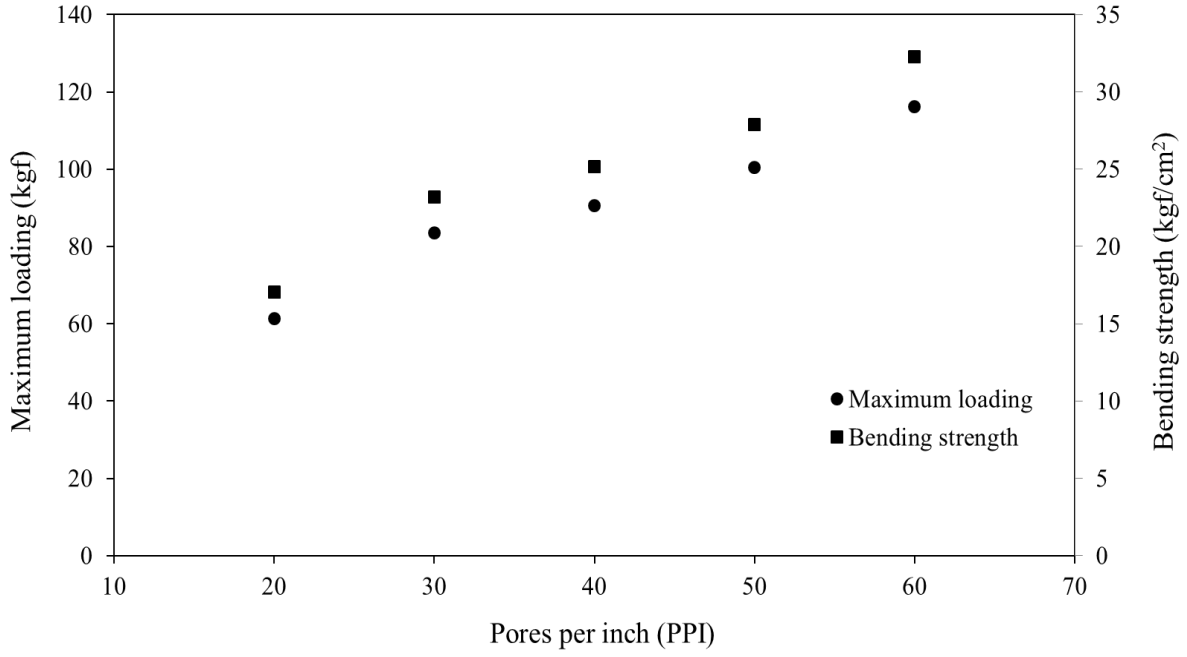


圖 9　多孔陶瓷轉輪最大荷重及抗彎強度

4.多孔陶瓷除濕轉輪等溫吸附動力

圖 10 及圖 11 分別為不同孔徑多孔陶瓷輪於溫度 25°C 及相對濕度 60% 條件下，等溫吸附總量及吸附百分比實驗結果。多孔陶瓷輪對於空氣中水氣的吸附能力是時間的函數，也就是隨著操作時間的增加，環境中水氣的移除量也隨之增加。目前所製作的多孔陶瓷輪在固定環境條件下，操作 12 分鐘後會達到吸附平衡，直徑 15 公分和厚度 5 公分的 20、30、40、50 和 60 PPI 多孔陶瓷輪的最大吸附量分別為 25.3、28.9、36.1、41.9 和 51.4 克，每小時的最大吸附量則分別為 126.5、144.5、180.5、209.5 和 257 克。若是以等溫吸附百分比來表示，則 20、30、40、50 和 60 PPI 多孔陶瓷輪的最大吸附量分別為 9.5、10.6、12.4、16.1 和 18.4%，也就是每公克多孔陶瓷輪分別可以吸附 0.095、0.106、0.124、0.161 和 0.184 公克。

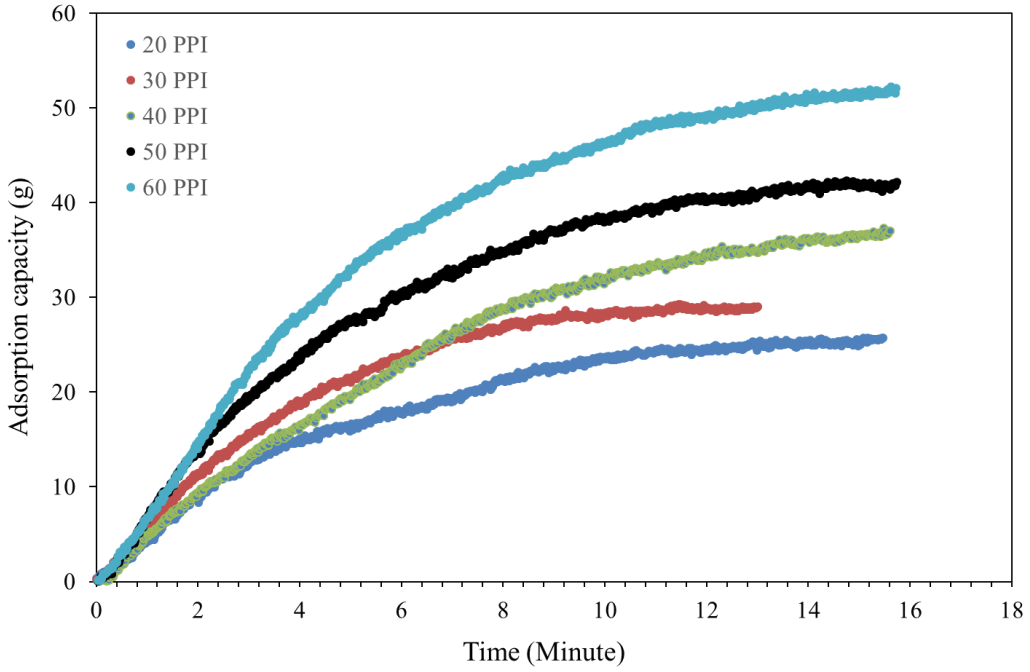


圖 10　不同孔徑多孔陶瓷輪等溫吸附實驗結果
(25°C、60% R.H.、吸附總量)

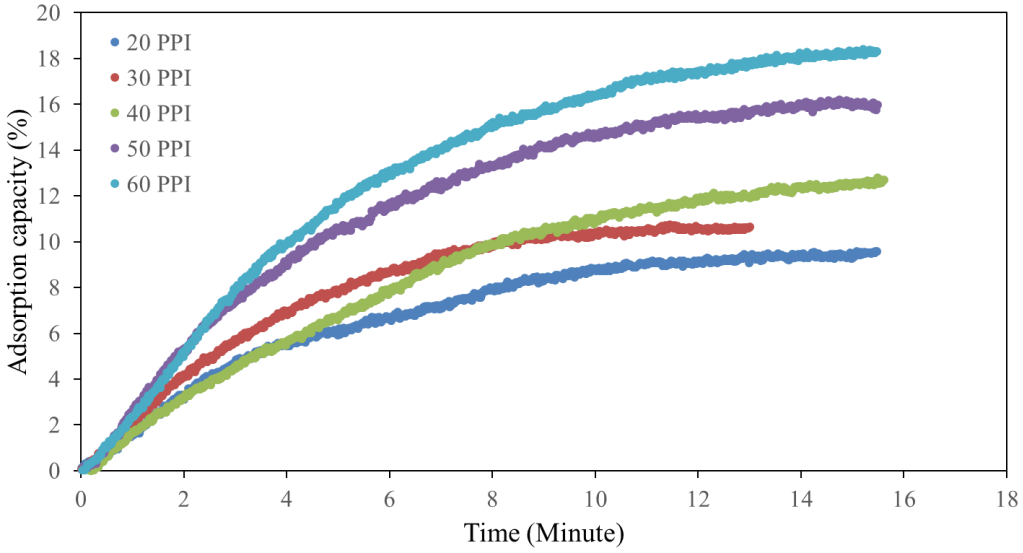


圖 11 不同孔徑多孔陶瓷輪等溫吸附實驗結果
(25°C、60%R.H.、吸附百分比)

5.多孔陶瓷除濕轉輪應用於大蒜農產品乾燥

大蒜一般皆利用柴油的燃燒提供熱空氣進行除濕乾燥以利後續保存及販售。由於柴油焚燒造成噪音及空氣污染嚴重不利農民身體健康及周界環境空氣品質的維護。因此，本研究開發之多孔陶瓷除濕轉輪應用於乾燥設備(圖12)，進行大蒜農產品乾燥，期望改善農產品乾燥過程，減少噪音及空氣污染物(如硫氧化物、氮氧化物及懸浮微粒)排放，並且達到節能省電等多項環保效益。多孔陶瓷除濕輪乾燥設備場域測試，批次進料總重量為 350 公斤，於多孔陶瓷除濕輪乾燥設備提供溫度 38℃及相對溼度 25%條件下，連續操作 10 天，除水率經由測試前後的重量差異，計算可得 30 %，符合期待。未來將放大乾燥設備機台，進行總重量 1,000 公斤的大蒜乾燥場域測試。

圖 12　多孔陶瓷除濕轉輪應用於乾燥設備

五、結　論

本技術以煉鋁產業廢棄物資源再生之活性氧化鋁材料為基材，添加至網狀結構泡棉載體中，經由燒結程序，將泡棉移除留下多孔性網狀結構，作為多孔陶瓷除濕輪結構，具有良好化學穩定性、機械強度和耐高溫的特性，無粉末化、不老化的優點，對於環境中水氣的移除具有不錯的效果。並進一步將本研究生產之多孔陶瓷除濕轉輪應用於乾燥設備，進行大蒜農產品乾燥，改善原使用柴油燃燒器所造成的噪音及空氣污染物(如硫氧化物、氮氧化物及懸浮微粒)排放，縮短農作物乾燥時間，減少能源消耗。煉鋁爐渣純化萃取自製循環再生氫氧化鋁後，再精煉為活性氧化鋁，可以替代原物料，增加資源之生命週期、降低對原物料進口的依賴、避免天然資源開採、能源消耗、減少碳排放和工業部門廢棄物不當處置對環境造成衝擊，促進國內產業創新

與永續發展。未來將放大乾燥設備機台，進行總重量 1,000 公斤的大蒜乾燥場域測試，落實研究開發技術，增加其應用性。

六、參考文獻

1.Murayama, N., Arimura, K., Okajima, N. and Shibata, J., “Effect of structure-directing agent on AlPO4 –n synthesis from aluminum dross”, International Journal of Mineral Processing 93, pp.110-114, 2009.

2.Shinzato, M. C. and Hypolito, R.,“Solid waste from aluminum recycling process: characterization and reuse of its economically valuable constituents”, Waste Management 25, pp.37-46, 2005.

3.Bruckard, W. J. and Woodcock, J. T., “Recovery of valuable materials from aluminium salt cakes”, International Journal of Mineral Processing Vol.93, pp.1-5, 2009.

4.Hermsmeyer, D., Diekmann, R., Ploeg R. R. and Horton R., “Physical properties of a soil substitute derived from an aluminum recycling by-product”, Journal of Hazardous Materials B95, pp.107-124, 2002.

5.Shinzato, M. C. and Hypolito, R., “Solid waste from aluminum recycling process: characterization and reuse of its economically valuable constituents”, Waste Management 25, pp.37-46, 2005.

6.Murayama, N., Arimura, K., Okajima, N. and Shibata, J., “Effect of structure-directing agent on AlPO4-n synthesis from aluminum dross”, International Journal of Mineral Processing 93, 110-114 (2009).

7.Hermsmeyer, D., Diekmann, R., Ploeg R. R. and Horton R., “Physical properties of a soil substitute derived from an aluminum recycling by-product”, Journal of Hazardous Materials B95, 107-124 (2002).

8.Korens N, Simbeck DR, Wilhelm DJ, Process screening analysis of alternative gas treating and sulfur removal for gasification, SFA Pacific, Inc. Mountain View, CA (2002).

9.Shinzato, M. C. and Hypolito, R., “Solid waste from aluminum recycling process: characterization and reuse of its economically valuable constituents”, Waste Management 25, 37-46 (2005).

10.Murayama, N., Arimura, K., Okajima, N. and Shibata, J., “Effect of structure-directing agent on AlPO4-n synthesis from aluminum dross”,

International Journal of Mineral Processing 93, 110-114 (2009).
11.Yoshimura, H. N., Abreu, A. P., Molisani, A. L., de Camargo, A. C., Portela, J.C.S. and Narita, N. E., “Evaluation of aluminum dross waste as raw material for refractories”, Ceramics International 34, 581-591 (2008).
12.Bruckard, W. J. and Woodcock, J. T., “Characterisation and treatment of Australian salt cakes by aqueous leaching”, Minerals Engineering 20, 1376-1390 (2007).
13.Davies, M., Bruckard, W. J. and Woodcock, J. T., “Treatment of salt cakes by aqueous leaching and Bayer-type digestion”, Minerals Engineering 21, 605-612 (2008).
14.Bruckard, W. J. and Woodcock, J. T., “Recovery of valuable materials from aluminium salt cakes”, International Journal of Mineral Processing 93, 1-5 (2009).
15.Das, B. R., Dash, B., Tripathy, B. C., Bhattacharya, I. N. and Das, S. C., “Production of η-alumina from waste aluminum dross”, Minerals Engineering 20, 252-258 (2007).
16.Dash, B., Das, B. R., Tripathy, B. C., Bhattacharya, I. N. and Das, S. C., “Acid dissolution of alumina from waste aluminium dross”, Hydrometallurgy 92, 48-53 (2008).
17.劉守信、劉曉紅、王華、程淑蓮，鋁灰綜合利用的技術發展，技術，第 2 期，40-42 (2009)。
18.楊異、吳竹成、楊冠群，鋁廢渣廢灰的治理，中國有色金屬，第 10 期，22-24 (2006)。
19.徐曉虹、熊碧玲、吳建鋒、李鵬、佘子偉、鄧大侃，廢鋁灰製備陶瓷清水磚的研究，武漢理工大學學報，第 5 期，13-16 (2006)。
20.李小忠、許曉路、申秀英、袁向紅以煉鋁灰渣為原料製備絮凝劑及其應用，環境科學與技術，第 8 期，22-24 (2004)。
21.袁向紅、吳凱、張健、陳軍、許曉路、申秀英，煉鋁廢渣的綜合利用試驗，環境污染與防治，第 1 期，37-39 (2000)。
22.張文宗，鋁渣資源化剩餘物之再利用檢討，成功大學碩士論文，92 年 6 月。
23.李安成、林宗曾、蔡政賢，鋁渣之除臭與再資化設備及方法，中華民國專利 200940457 (2009)。
24.鐘賢龍、林俊男、張智偉、謝承佑，經由鋁粉表面改質製備氮化鋁之方

法，中華民國專利 I315296 (2009)。
25.林宗曾、蔡政賢、顧紹楨、陳昭成、詹右任、何青薇，二次鋁渣資源再利用可行性研究，廢棄物處理研討會 (2009)。
26.楊昇府、李文成、孫金星、曾錦清，煉鋁爐渣再利用材料化現況及發展，工程，第 2 期，56-61 (2011)。
27.楊昇府、葉俊彥、張彥華、蔣世傑，以煉鋁爐渣為原料製作耐火材料之研究，鑛冶，第 1 期，51-56 (2011)。
28.Yang, S.F., Wang, T.M., Shie, Z.Y.J., Jiang, S.J., Hwang, C.S. and Tzeng, C.-C., "Fine Al_2O_3 powder produced by Radio-Frequency plasma from aluminum dross", IEEE Transactions on Plasma Science, IEEE Transactions on Plasma Science, 42 (12), 3751-3755 (2014).
29.楊昇府、王多美、蔣世傑、劉雅萍、林憲平，化煉鋁爐渣為高級耐火材料商業化生產技術開發，鑛冶，第 4 期，第 93-104 頁(2014)。
30.Saggio-woyansky, J., Scott, C. E. and Minnear, W. P., "Processing of porous ceramics", American Ceramic Society Bulletin, 71(11), 1674-1682 (1992).
31.Nettleship, I., "Application of porous ceramics", Key Engineering Materials, 122-124, 305-324 (1996).

利用無機聚合技術安定化轉爐石膨脹性之研究

林冠宇* 鄭大偉** 李韋皞*** 吳佳正****

摘　要

鑑於環境問題日益嚴重和原材料稀缺，固體廢物管理在鋼鐵行業中變得越來越重要。轉爐煉鋼產業之副產品為轉爐石，其具有優良之力學性質，如高硬度、高耐磨性等等，具有作為粒料使用之潛力。然而，轉爐石中含有過量之游離氧化鈣以及游離氧化鎂，其水化反應時會導致體積膨脹，此膨脹現象影響了轉爐石的再利用量。無機聚合技術為近年來發展迅速的一種新興材料，其性質與水泥相似。此技術無需添加水泥做為膠結材料，因此可減少大量之二氧化碳排放量。本研究希望透過無機聚合技術將轉爐石安定化。本研究在預拌混凝土廠進行大規模試驗，每次試驗量為 1.5 立方米，根據 CNS1258 之熱壓膨脹試驗方法測試其安定化結果，並檢測其熱壓膨脹試驗前後之抗壓強度。根據實驗結果發現，無機聚合技術可有效安定化轉爐石之膨脹性，其原因為無機聚合技術製程中，含有大量之游離矽，這些游離矽可與轉爐石中的游離氧化鈣與游離氧化鎂反應，形成穩定之矽酸鈣(鎂)化合物，因而抑制轉爐石之膨脹性。經熱壓膨脹試驗後，其長度變化率小於 0.5%。經熱壓膨脹試驗前後之抗壓強度比較，熱壓膨脹試驗後強度提升了 9.2%。此結果證明無機聚合技術可有效抑制轉爐石之膨脹行為，且大規模試驗成功，可進一步解決每年所產生數量龐大之轉爐石去化問題，同時可將其資化成為高值化產品。

【關鍵詞】轉爐石、游離氧化鈣、膨脹性、無機聚合技術、熱壓膨脹試驗

---

*國立臺北科技大學資源工程研究所 碩士生

**國立臺北科技大學資源工程研究所 教授

***國立臺北科技大學資源工程研究所 研究員

****中聯資源股份有限公司 專業工程師

一、前　言

轉爐石(Basic Oxygen Furnace Slag)係一貫煉鋼作業煉鋼廠轉爐煉鋼之副產品。在轉爐煉鋼過程中，透過通入純氧去除鋼水之含碳、矽，並加入廢鋼、鐵礦石作為調整成分之用，在出鋼之前添加過量之生石灰去除雜質。過程中生石灰因其多孔特性會吸附雜質結合形成轉爐石。因比重較鋼液小，因此會懸浮於鋼液上，可簡單分離爐石及鋼液，藉此達到去除雜質，純化鋼液之效果。每生產一公噸鋼鐵，約會產出 130 公斤之轉爐石[1,2]。

由於轉爐石含有大量之游離氧化鈣，造成其易膨脹之特性；現今轉爐石再利用方向，係將轉爐石進行破碎後，挑選粗料部分，做為 AC 粒料使用[3]，然而，每年仍有約 60 萬噸之轉爐石細料，由於其粒徑過細，無法做為粒料使用，而本身又具有高膨脹之特性，因此無法有效再利用，實為一重要且急需處理之問題。

無機聚合材料為類似沸石的一種三維架構鋁矽酸鹽材料，其具有優良的耐火絕熱、抗酸鹼性與機械性質[4,5,6]。無機聚合材料的基本原料取得容易，無需高溫製程及設備簡單，在常溫環境下即可製得，因此逐漸受到各界的重視，將其發展成為新一代環保綠色材料深具潛力。無機聚合材料中含有許多游離矽，游離矽可以將轉爐石中游離氧化鈣或氧化鎂反應成為穩定的化合物而可抑制轉爐石的膨脹性。

本研究期望透過無機聚合技術，將轉爐石細料進行安定化及資材化。首先，將轉爐石細粒料於實驗室內進行資材化配比開發，並進行多項性質及工作性檢測，其中包含試體體積穩定性，待配比開發完成後，再進行實廠的兩階段試驗：第一階段係使用小型試量產型水平雙軸拌合機，進行配比、漿體工作性及製備後之試體性能確認；第二階段係使用實廠量產型水平雙軸拌合機，進行量產型試拌，並進行相關性能之確認，期望透過本研究之研發成果，為轉爐石細料開拓出一條再利用及資材化之管道。

二、研究方法與流程

1.實驗材料

(1)轉爐石

本研究所使用之轉爐石，係由中聯資源股份有限公司提供。依據目前市場應用情形可分為轉爐石細粒料及粗粒料兩類，分別為 4 號篩之篩上物

與篩下物。目前轉爐石粗粒料大多做為瀝青鋪路時所添加之骨材；而轉爐石細粒料由於其具膨脹特性，且粒徑過細，尚無有效再利用之管道，因此，本研究係針對轉爐石細粒料進行安定化之研究。轉爐石細粒料之粒徑分布如圖 1 所示；符合 CNS486 規範之細粒料級配之標準。轉爐石成分分析如表 1 所示。主要以氧化鈣及氧化鐵為主，並使用甘油-乙醇法測定游離氧化鈣之含量，以苯甲酸-無水乙醇標準溶液與酚酞指示劑進行分析，發現其游離氧化鈣含量約為 5.0%。游離氧化鈣之含量只能做為參考依據，並不能做為是否膨脹之標準[7]。而其晶相如圖 2 所示。

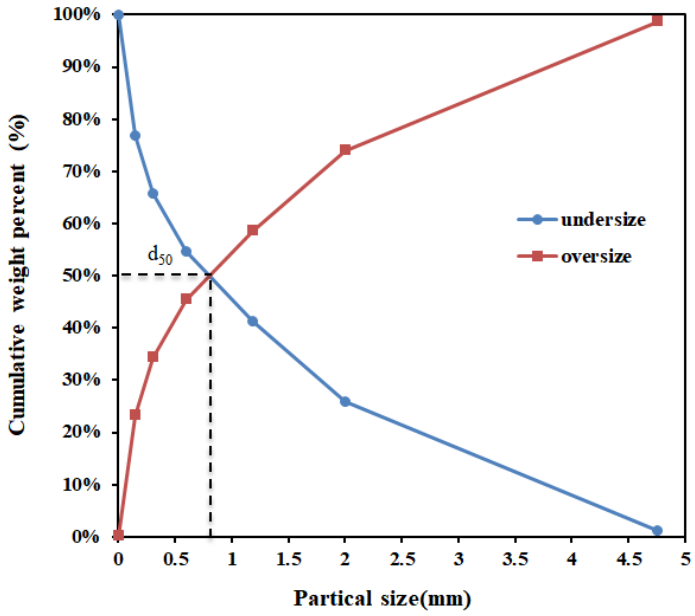


圖 1　轉爐石細料粒徑分布

表 1　轉爐石成分分析

化學成分	wt.%
Fe_2O_3	24.1
CaO	37.1
SiO_2	9.3
MnO	2.2
Al_2O_3	4.1
MgO	7.1
Na_2O	4.0
f-CaO	5.0
L.O.I	0.80

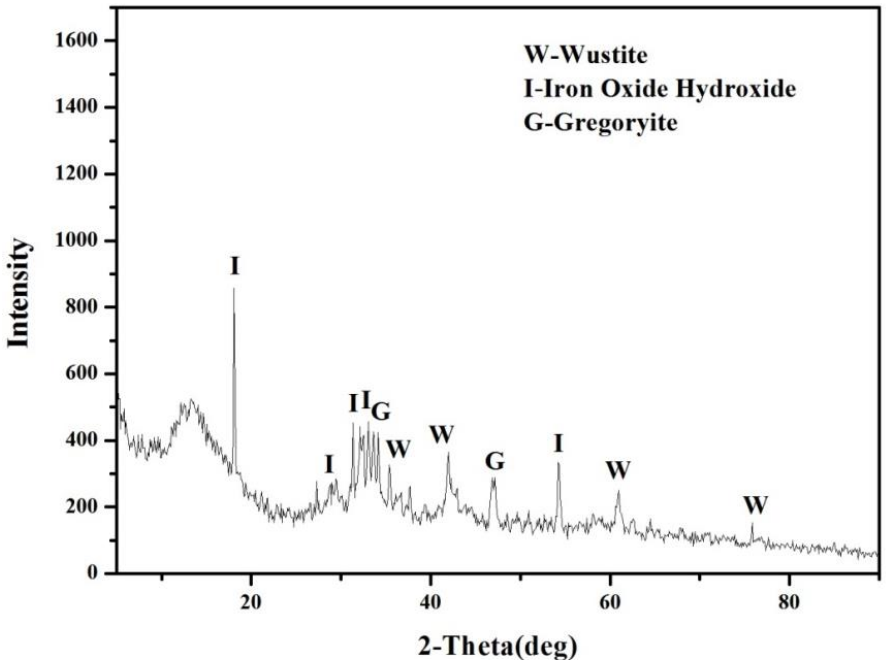


圖 2　轉爐石晶相分析

(2)燃煤飛灰

本研究所使用的燃煤飛灰為高雄興達火力發電廠之 F 級燃煤飛灰；燃煤飛灰為燃燒煤炭的火力發電廠及工業汽電共生鍋爐之集塵裝置所捕集之飛灰。其化學性質穩定，於卜特蘭水泥系統中，可以參與卜作嵐反應。F 級燃煤飛灰之中位徑(D50) 為 19.9μm。

(3)爐石粉

本研究所使用之爐石粉，係由中聯資源股份有限公司提供。其來源為中國鋼鐵公司進行一貫作業高爐煉鐵廠所生產之副產物，產品名稱為 S4000 水淬高爐石粉(CNS-12549 120 級)。爐石粉之中位徑(D50) 為 12.5μm。

(4)鹼性溶液

本研究所使用之鹼液係透過氫氧化鈉、鋁酸鈉及矽酸鈉，依照所需之 SiO_2/Na_2O、SiO_2/Al_2O_3 莫耳比，進行調配而成。

2.實驗方法及流程

(1)粉化率測試

粉化率測試引用大陸標準 GB/T 24175 - 2009 [鋼渣穩定性試驗方法]，進行轉爐石粉化率之檢測。實驗方式為將特定粒徑大小 800 g 未安定化之轉爐石放入熱壓膨脹試驗機中，以壓力 20.8±0.7 kgf、溫度 215±1.7℃ 維持

3 小時，烘乾後進行篩分，經篩分後篩下所佔之百分比即為其粉化率。

(2)浸水膨脹試驗

浸水膨脹試驗係根據 CNS15311 規範，量測以 CNS12382 所夯製之試體體積膨脹量。為了加速水合作用，試體必須浸入 70±3℃水中連續監測 7 天。樣品置入熱水中 30 分鐘，此時試驗設備熱膨脹效應已經完成。讀取測微錶數值，作為基準數值。每日添加熱水以保持樣品完全浸入水中，連續 7 天讀取測量測數值。

(3)無機聚合技術安定化轉爐石

本階段試驗透過無機聚合技術，使用爐石粉及燃煤飛灰做為膠結材料，透過鹼性配方液混拌後，形成無機聚合漿體，再添加未安定化之轉爐石細粒料，製備轉爐石基無機聚合砂漿試體，並透過 CNS1258 之熱壓膨脹試驗規範，進行熱壓膨脹測試，檢測試體之安定性。實驗流程如圖 3 所示。

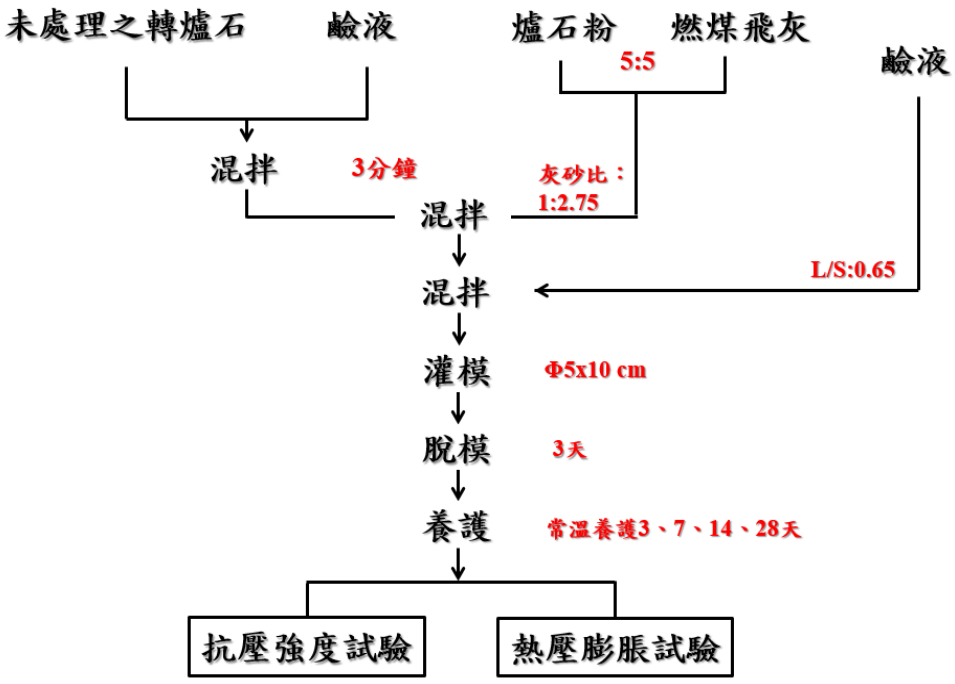


圖 3 無機聚合轉爐石砂漿製備流程圖

(4)熱壓膨脹試驗

熱壓膨脹試驗為依照 CNS1258[卜特蘭水泥熱壓膨脹試驗法]，將受測試體放入高壓蒸煮鍋中，內部飽和蒸汽壓控制在 20.8±0.7 kgf/cm^2 維持 3 小時。每 cm^2 壓力 20.8±0.7 kgf 相當於溫度 215.7±1.7℃。

三、 實驗結果與討論

1.轉爐石細粒料之膨脹性質

本階段研究係將轉爐石粒料進行熱壓膨脹試驗，並測試其粉化率。依照大陸之標準 GB/T 24175 - 2009 [鋼渣穩定性試驗方法]，粉化率試驗之粒徑大小為 3/8inch-#4mesh。而根據檢測結果顯示，轉爐石之粉化率為 29.9%，已遠超過標準規定最高的 5%指標，顯示其應用於水泥製品的困難性。

轉爐石原料浸水膨脹試驗是根據 CNS15311 標準測試，其結果如圖 4 所示。由圖可知，轉爐石原料的膨脹率隨著浸泡的天數增加而增加，其膨脹率到達 7 天約為 0.97%。雖然小於 1%，但超過規範標準之 0.5%。由於其膨脹率仍有持續上升的趨勢，因此推斷其膨脹現象即使超過 7 天仍有繼續發生的可能性。

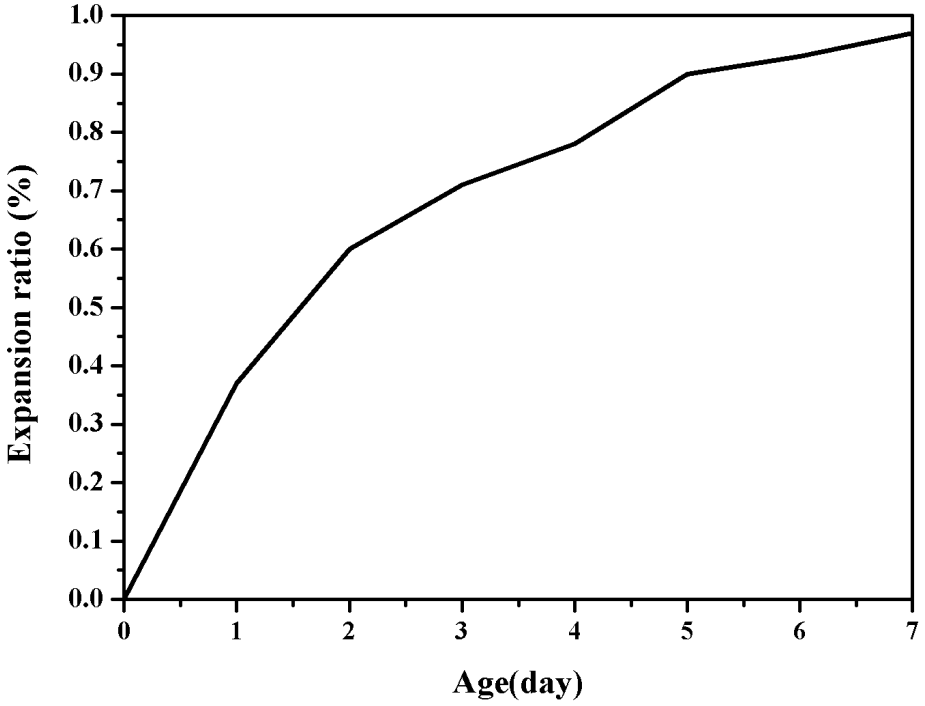


圖 4 轉爐石細粒料浸水膨脹試驗

2.轉爐石作為細粒料於不同系統製成砂漿之膨脹性

本階段試驗使用未安定化的轉爐石細粒料，製備卜特蘭水泥砂漿試體(Φ5x10cm)後，依照 CNS1258 之規範進行熱壓膨脹試驗，檢測試體之膨脹性。實驗結果顯示，轉爐石基卜特蘭水泥砂漿試體經熱壓膨脹試驗後其試體膨脹瓦解如表 2 所示，證實未處理過的轉爐石細粒料其試體之不穩定

性。但是，當利用無機聚合技術，以燃煤飛灰及高爐石粉作為膠結材料，透過鹼性溶液混拌後，形成無機聚合漿體，再添加未安定化之轉爐石細粒料，製備轉爐石基無機聚合砂漿，經養護至適當齡期後，參照 CNS1258 之熱壓膨脹試驗規範進行熱壓膨脹測試，檢測試體之膨脹性。根據實驗結果顯示，轉爐石基無機聚合砂漿試體，經熱壓膨脹試驗後，試體外觀保持完整，無破裂之情形，其體積變化不僅沒有膨脹反而呈些微收縮之情形。此結果證實無機聚合技術可有效安定化轉爐石。

表 2　轉爐石作為細粒料於不同系統製成砂漿之膨脹性(試體 Φ5x10cm)

CNS1258			
	熱壓前	熱壓後	體積 膨脹率(%)
水泥 系統			破裂 無法測量
無機聚合 系統			-0.12

將熱壓膨脹後之無機聚合砂漿以及無機聚合轉爐石砂漿破碎後研磨，再經由 XRD 分析其晶相(如圖 5)，可觀察到矽酸鈣之礦物相，此結果表示，無機聚合技術確實能夠安定化轉爐石。其原因則為無機聚合系統中，含有大量之游離矽存在於其中，而這些游離矽可與轉爐石表面之游離氧化鈣反應，形成穩定之化合物。當轉爐石於無機聚合材料中受外力導致材料本身

以及內部轉爐石產生裂隙時，水氣進入，會將材料中的矽離子溶出並帶入轉爐石中，再與內部或破裂而產生的游離氧化鈣反應形成穩定之矽酸鈣，因此可有效的抑制轉爐之膨脹行為。

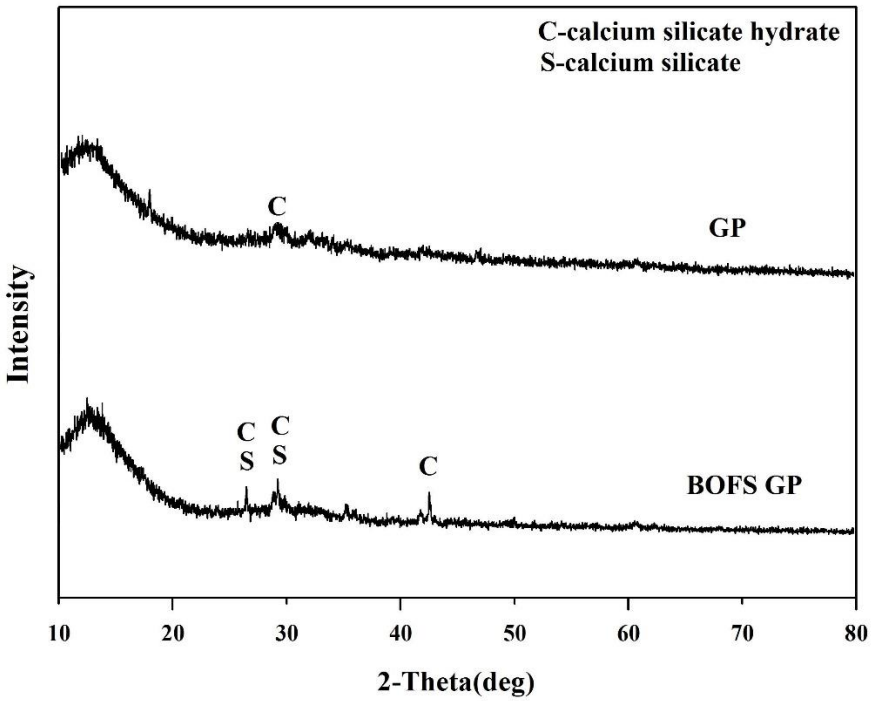


圖 5　轉爐石基無機聚合材料經高壓蒸煮過後試體 XRD 分析之結果

3.轉爐石基無機聚合材料模廠試驗

為了瞭解轉爐石於無機聚合材料之穩定性，將本研究團隊之最佳配比進行放大模廠試驗，試驗量放大至 100-120 公升之水平雙軸強制式拌合機規模。其試驗配比如表 3 所示。本次試驗量約為 0.06 m^3，兩參數主要差異為灰砂比，即轉爐石之添加量。灰砂比為 1:2.9 稱 GB-1；灰砂比 1:2.0 為 GB-2。新拌性質如表 5 所示。根據試驗結果發現，轉爐石製成無機聚合轉爐石砂漿，有良好之工作性。有關坍損之測試，GB-1 之初始坍流度為 540*580 mm，經靜置 45 分鐘後，其坍流度僅縮減為 520*520 mm。而 GB-2 之初始坍流度為 470*480 mm，經靜置 45 分鐘後，其坍流度縮減為 440*440 mm。另抗壓強度如圖 6 所示。隨著齡期增長，試體的抗壓強度有隨之增加的趨勢。GB-1 後期之強度高於 GB-2，其原因為無機聚合系統之強度來源為無機聚合漿體，而非粒料之堆積。故灰砂比較低之 GB-2 中，其抗壓強度會相較 GB-1 高。當試體(Φ10x20cm)在室溫養護 28 天後，進行熱壓膨脹試驗。試驗結果發現試體外觀完整，無膨脹破裂之現象，此結

果與實驗室試驗結果一致。將熱壓後之試體再次進行抗壓測試發現，其不僅能維持住一定之強度甚至能向上增長。根據各項測試結果得知，驗證無機聚合技術可有效地安定化轉爐石之膨脹性。

表 3　轉爐石基無機聚合材料模廠試驗之實驗參數

編號	L/S	灰砂比	混合比例（kg）				總重 (kg)
			爐石粉	燃煤飛灰	轉爐石（含水率 15%）	鹼性溶液	
GB-1	0.41	1：2.90	15.12	15.12	100.85 (87.70)	12.50	143.59
GB-2	0.38	1 : 1.98	19.70	19.70	90.00 (78.26)	15.00	144.40

表 4　轉爐石基無機聚合材料大型試驗之新拌性質

GB-1 (灰砂比 1:2.9)			
Initial		After 45 min	
坍度	坍流度	坍度	坍流度
265 mm	540*580 mm	250 mm	520*520 mm
GB-2 (灰砂比 1:2.0)			
Initial		After 45 min	
坍度	坍流度	坍度	坍流度
260 mm	470*480 mm	250 mm	440*440 mm

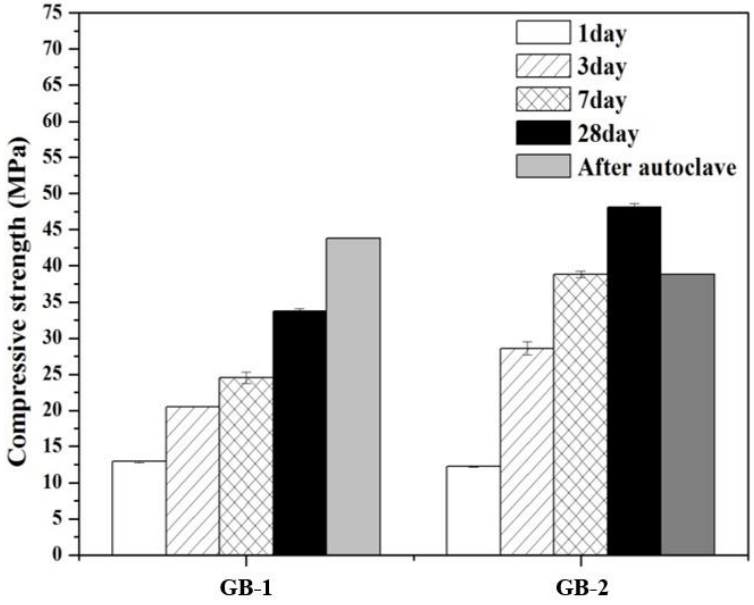


圖 6　轉爐石基無機聚合材料之大型試驗之抗壓強度(試體 Φ10x20cm)

4.轉爐石基無機聚合材料之實廠試量產試驗

本階段將先前模廠試驗結果再次放大，本次使用實廠量產型水平雙軸拌合機，其試驗配比如表 5 所示，試驗量為 1.5 m^3。本次試驗重複 GB-1 之配比並將拌合量放大至 1.5 m^3，此處稱 GBP-1。而試量產之第二組配比將調整飛灰:爐石粉之比例，以及提升轉爐石添加量，此處稱 GBP-2。其新拌性質如表 6 所示。GBP-1 之坍流度為 380*390 mm；GBP-2 之坍流度為 510*490 mm。造成此差異之原因為飛灰使用量之提升，而飛灰之形貌為球狀，有助於其流動性。抗壓強度如圖 6 所示。隨著齡期增長，試體(Φ10x20cm)的強度有隨之增加的趨勢。GBP-1 之強度略高於 GBP-2，其主要原因為飛灰與爐石之比例調整，GBP-2 因飛灰使用量較高，而飛灰本身之反應性較爐石粉差，故導致其強度略低於 GBP-1。經熱壓膨脹試驗之結果得知，隨著齡期增長，試體之結構更加完整，使其經熱壓膨脹試驗後，試體無破點之現象，且膨脹率為-0.41%，顯示熱壓後體積不但沒有膨脹，反而略微收縮。將熱壓後之試體再次進行抗壓測試發現，其不僅能維持住一定之強度甚至能向上增強。根據各項測試結果，再次驗證無機聚合技術可有效地穩定/安定化轉爐石之膨脹性。

表 5　轉爐石於無機聚合材料之試量產試驗之實驗參數

編號	燃煤飛灰：爐石粉	L/S	灰砂比	混合比例（kg）						總體積及重量
				鹼性溶液	爐石粉	燃煤飛灰	轉爐石(溼)	轉爐石含水率	外添加水	
GBP-1	5:5	0.50	1：2.936	374	375	375	2,400	9.0 %	20.0	1.5 m^3 3,544 kg
GBP-2	6:4	0.52	1：3.575	349	267	400	2,560	7.4 %	60.0	1.5 m^3 3,636 kg

表 6　轉爐石於無機聚合材料之試量產試驗之之新拌性質

GBP-1		GBP-2	
坍度	坍流度	坍度	坍流度
260 mm	380*390 mm	270 mm	510*490 mm

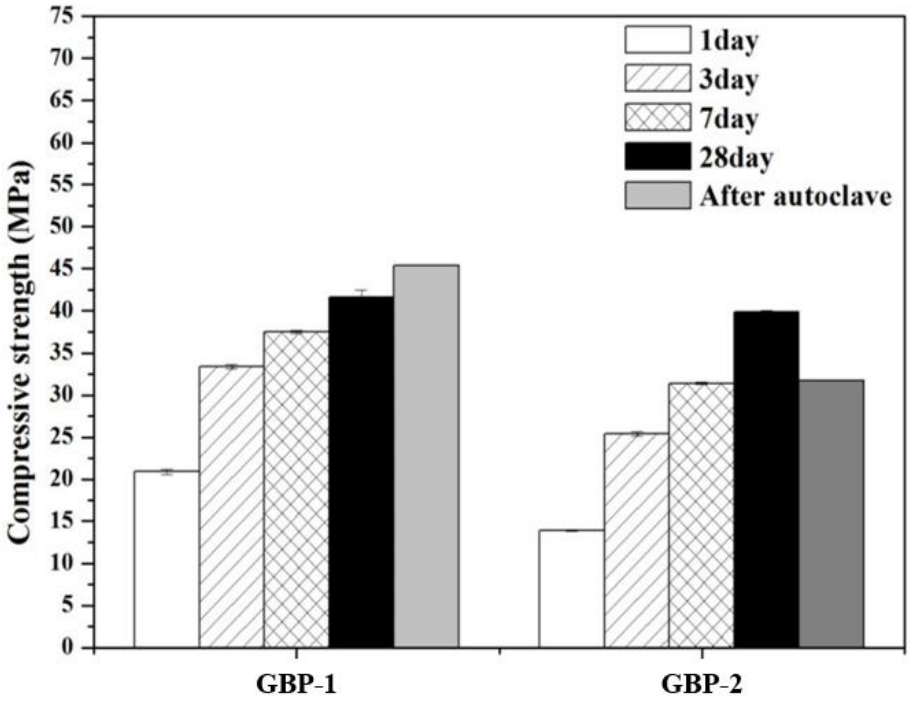


圖 6　轉爐石於無機聚合材料之試量產試驗之抗壓強度(試體 Φ10x20cm)

將實廠試量產試驗之無機聚合轉爐石砂漿，灌製 1m^3 之方型擋料塊及紐澤西護欄，如圖 8 所示。將試體經鑽心取樣後進行抗壓測試，其 28 天抗壓強度可達 40 MPa，結果如圖 9 所示，經熱壓膨脹試驗後其膨脹率小於 0.5%。其與先前之試驗有相同之趨勢，表示當進行放大試驗，無機聚合轉爐石砂漿依舊有穩定之力學性質。

圖 8 試量產試驗灌製 1m^3 方型試體之示意圖

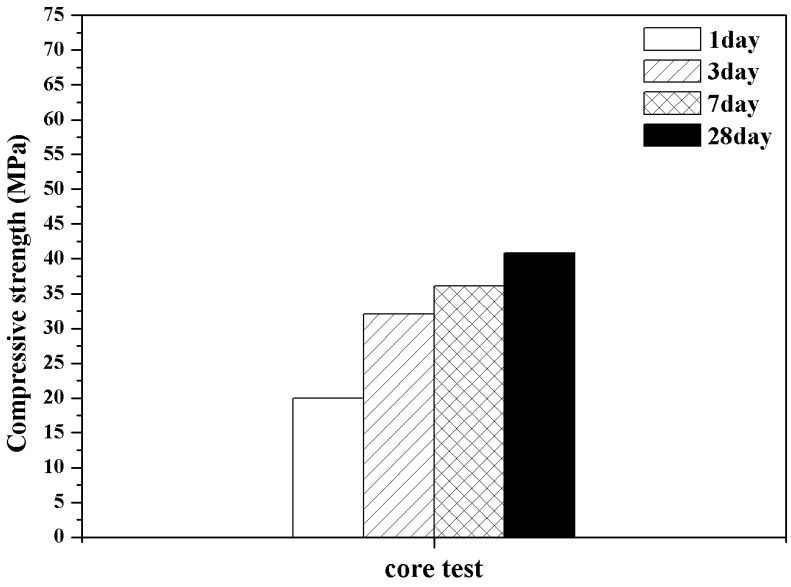


圖 9 1m^3 方型試體鑽心取樣之抗壓強度

四、結　論

由本研究得知，無機聚合技術可有效抑制轉爐石之膨脹行為，其原因為無機聚合系統中富含游離矽，其可與轉爐石中的游離鈣反應形成穩定之矽酸鈣，進而穩定無機聚合轉爐石砂漿之膨脹性。且各試驗配比之抗壓強度於齡期 28 天時皆可達 35MPa 以上，此表明無機聚合技術不僅能安定化轉爐石之膨脹行為，還具備優良之理學性質。根據實廠試量產試驗得知，無機聚合技術每 1 m^3 最高可安定化 1.7 噸之轉爐石，且製成之砂漿無膨脹之疑慮，可用作於非結構建材，達到工業副產物資材化之目的。對於未來轉爐石的資源化具有極高的潛力。

五、參考文獻

1. 黃隆昇、林登峰、林平全、許伯良，2010，評估煉鋼爐石應用於瀝青混凝土之性質及現場鋪設成效」中國工程師高雄會刊，第 18 卷，第 2 期，第 47-55 頁。
2. 許伯良、林平全、徐登科，2011，轉爐石產製與工程應用，轉爐石應用於瀝青混凝土鋪面研討會論文集，第 10-18 頁。
3. Chen S. H. , Lin D. F. , Luo H. L. , Lin Z. Y. ,2017, “Application of reclaimed basic oxygen furnace slag asphalt pavement in road base aggregate”, Construction and Building Materials, Vol. 157, PP. 647 - 653.
4. Andrzej K. , Magdalena K. , Miko ł. Z. ,2018, “The structu re of geopolymers e Theoretical studies”, Journal of Molecular Structure, Vol. 1163, PP. 465 - 471.
5. Xu, H., Van Deventer, J.S.J., 2000, Thegeopolymerisation of alumini-silicate minerals, International Journal Minerals Process,Vol. 59, pp. 247-266.
6. Schmücker, M., Mackenzie, K. J. D., 2005, Microstructure of sodium polysialatesiloxogeopolymer, Ceramics International,vol.31, pp. 433-437.
7. Carvalho S. Z. , Vernilli F. , Almeida B. , Demarco M. , Silva S. N. , 2017, “The recycling effect of BOF slag in the portland cement properties”, Resources, Conservation and Recycling, Vol. 127, PP. 216 - 220.

柑橘類生廚餘廢棄物使用超臨界醇熱炭化技術產製生物炭材料

謝哲隆*、廖天惠**、廖依如**、周孟源***、林金霖***、游智婷****

摘　要

目前收受家戶垃圾的機制，只收熟廚餘，不收果皮菜葉等生廚餘，熟廚餘做為肥料或豬飼料使用，廚餘肥料化已有成熟技術，卻無處去化，廚餘作為豬隻飼料雖為一去化管道，但若廚餘未充分殺菌，則可能造成豬之疫情傳染，在防疫非洲豬瘟使用上有較高之疑慮。生廚餘，具有較高含水量，若焚化處理則會造成處理成本的上升，因此通常採用堆肥化或能源化，廚餘堆肥化已有成熟技術，但傳統堆肥技術耗時漫長、衍生臭味、廢水等問題嚴重，且產出之堆肥產品去化管道有限。生廚餘經超臨界流體熱處理程序製成生物炭或燃料碳為一再利用之方法，除可替代肥料外，如作為燃料使用具有減碳之效益。超臨界流體可藉由壓力和溫度改變其物化性質，如黏度、密度及擴散係數等，用於生質物反應上為前瞻技術。傳統水熱法碳化技術利用水於臨界狀態下將生質物炭化，水之臨界條件下溫度及壓力需求相當高，對於設備具有一定腐蝕性，而改用乙醇做為反應劑，其臨界條件較低，對於設備成本之壓力也較低，因此本研究旨在以超臨界醇熱炭化技術評析各柑橘類果皮生質廢棄物再利用製成生物炭材料之可行性，提供廚餘除飼豬外之其餘可行方案。本研究產物分析項目包含 FT-IR、EA、熱值、SEM 及總回收率(TR)、能量密度 (EDR)、及質量產率(MY)等，其再利用性質參數為各柑橘類果皮反應物種之比較，分別為檸檬皮(LP)、橘子皮(TP)、柳丁皮(OP)及柚子皮(PP)。試驗結果顯示於超臨界條件(573 K、及 120 bar)及 0.5 h 反應時間下，TR 介於 90.17~93.06 wt.%。MY 介於 0.65~1.85 wt.%。HHV 熱值介於 6,611.48~7,473.52 kcal/kg，相較於原料皆有所提升。EDR 介於 135.03~171.23 wt.%，其中以 PP 能量密度最高。元素分析結果顯示各柑橘類果皮有脫氫脫氧反應產生。SEM 觀察於 PP 固體產物觀察到孔洞結構。不同種類之殘渣 FT-IR 測得相似的結果，都具有烷基以及氨基酸鹽之官能基。且在快速炭化脫水效益下，可降低一般乾燥或焚化所需的大量耗能。同時在醇熱高溫下亦足以殺死所有細菌，可快速提升處理速度(約 2 小時)，主因醇類溶劑之快速

揮發特性，節省產品需要再次烘乾除水所需之耗能。

【關鍵詞】柑橘類廢棄物、超臨界醇熱炭化技術、生物炭

---

*國立宜蘭大學環境工程系(所) 特聘教授
**國立宜蘭大學環境工程系(所) 專任助理
***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) 專題生

一、前　言

在台灣處理生廚餘之方式，為採收受家戶垃圾的機制，熟廚餘做為肥料或豬飼料使用，廚餘肥料化已有成熟技術，卻無有效去化機制，廚餘作為豬隻飼料雖為一去化管道，但若廚餘未充分殺菌，則可能造成豬之疫情傳染，在防疫非洲豬瘟使用上有較高之疑慮。生廚餘，具有較高含水量，若採傳統焚化處理則會造成處理成本的上升，因此通常採用堆肥化或能源化，廚餘堆肥化已有成熟技術，但傳統堆肥技術耗時漫長、衍生臭味、廢水等問題嚴重，且產出之堆肥產品去化管道有限。生廚餘經熱處理程序將其能資源化製成可再生生物炭或燃料碳，使用具有減碳之效益。生物炭主要是由市政，農業和森林廢料生產，可以作為燃料和土壤增強劑，以提高肥力並可防止土壤品質退化。生物炭的淨化、吸附特性，可以淨化水質；超多孔性結構有助於保留養分與提供微生物及益菌的生長，讓長期使用農藥、化肥呈現酸性的土壤酸鹼中和，提高土壤肥力與減少肥料使用。

超臨界醇熱技術源自超臨界水熱技術之開發，超臨界水熱技術，以水為溶劑，水於臨界溫度(>374℃)、臨界壓力(>22.1MPa)，可快速對生質物碳化，水之三相圖及臨界條件溫度、壓力範圍詳如圖 1 所示。此技術具有對環境友善、需求溫度低、高去除含氧能力、反應快速及適合濕基生質物之特性，超臨界水熱技術雖具有上述之優點，但同時對於設備要求也相對更高，因此更換溶劑或共溶劑成為另一發展方向[1]。以生廚餘或生質物為原料進行水熱碳化之研究因此發展快速。本研究在以超臨界醇熱炭化技術評析柑橘類果皮生質廢棄物再利用製成生物碳材料的可行性。所使用之溶劑乙醇，其臨界溫度為 513.9 K，臨界壓力則為 60.6 atm 以上。

Erdogan (2015)等人使用柑橘類果皮生廚餘為生質原料，使用水作為溶劑以 1:8 比例進行水熱碳化產出生物炭。研究結果顯示溫度是最為影響碳產物的元素組成，在 533 K，120 min，獲最高 C 元素約 70 %，H/C 為 0.96，O/C 為 0.19，溫度升高可使產物富含 Ca、Mg、及 P 礦物[2]。

Xiao (2018)等人使用柳橙果皮生廚餘進行水熱碳化處理，以水作為溶劑 1:8 比例再分別添加纖維素、半纖維素、木質素作為控制變因進行實驗，溫度設定為 513 K，120 min，當添加纖維素、半纖維素形成含呋喃芳香族結構有利於多孔材料，添加木質素提高產率、比表面積有利於負載催化劑[3]。

Zhu (2014)等人使用玉米桿作為生質原料，使用甲醇作為溶劑以及甲醇與水做為共溶劑情況下判斷對於生質物液化效果的影響。結果顯示最佳液化

溫度及時間分別為 573 K 及 30 min，醇水比例為 1:1。甲醇與水的摻混於此液化反應中具有協同效應。含水量的增加促進了水解的反應，甲醇的含量增加促進了酯化的反應[4]。

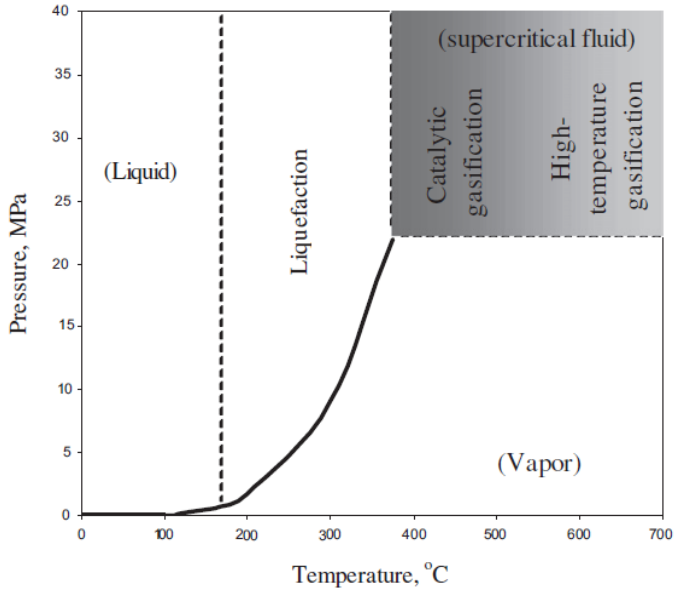


圖 1 水的三相圖 (Peterson et al., 2008)

Heuntae 等人(2017)觀察生質物使用醇類進行超臨界液化之反應，結果顯示，生質油品的產量受到反應溫度、反應壓力、停留時間、生質物粒度、加熱速率、冷卻速率等參數影響，提升反應溫度或反應時間可以提升生質油品的產率，而過高的溫度及過長的時間將會導致生質油品產量的減少，主要由於其被轉化為氣體或固體的生成。醇類在系統反應中作為供氫劑，有助於抑制再聚合的反應，可提升液體產率。因此 Heuntae 等人(2017)為了研究超臨界乙醇之作用，進行超臨界乙醇液化藻類研究，將超臨界乙醇與次臨界水、超臨界水液化反應進行比較，超臨界乙醇可提供氫，進而減緩中間體的重組，可提升油品的產率。另一優點為可以以 CO（即脫羰基），CO_2（即脫羧）和 H_2O（即加氫脫氧）的形式除去氧，形成較高熱量之生物油[5]。

本研究亦比較碳材料作為煤炭的指標，依據「台電公司燃煤採購情形」[6]顯示，其中長約之高熱值一般煙煤或非印尼一般煙煤規範項目分別為熱值下限為 6,200 kcal/kg、總水分上限 12%、灰份上限 14%、硫份 0.7%。如比較生物碳及活性碳兩種指標，生物碳部分比較標準則參考美國非營利組織 International Biochar Initiative (國際生物炭倡議組織，以下簡稱 IBI)2015 年所公佈的 “Standardized Product Definition and Product Testing Guidelines

for Biochar 7:That Is Used in Soil” 報告[7]，其中規定 Organic Carbon (Corg) 必須高於 10%，並依其公佈標準可再分為三個等級：Class 1≧60%、Class 2 介於 30 及 60%、Class 3 介於 10% 及 30%，及 H/Corg 莫耳比<0.7。有關活性碳相關品質標準，則參考市售一般廢水處理用活性碳標準，水份≦8%、灰份≦15 %、碘值約 800-1,000 mg/g，碘值代表吸附低分子量物質的能力，一般而言，較高碘價的活性碳對廢水中大多數有機物的吸附力較強[8]。

二、研究方法

1.研究設備

本研究所使用之實驗設備為高溫高壓液化反應釜，圖 2 為其系統構造圖，槽體容量為 1 L，此套設備是向中美科技公司採購，型號是 HP/HT 4570 bench top reactor。

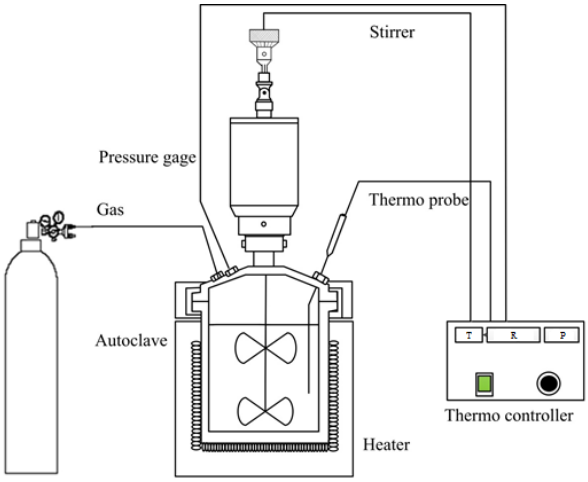


圖 2　高溫高壓液化反應釜的系統構造圖

2.研究藥品及樣品來源

(1)本研究所使用之藥品：

乙醇，為鼎好貿易有限公司，工業等級之乙醇，其濃度為 95%。

(2)研究使用之柑橘類果皮(圖 3)之來源為：

A.檸檬：其來源主要為具有產銷履歷之屏東內埔鄉所產檸檬。

B.文旦：其來源為臺南市麻豆區所產之文旦。

C.橘子：其來源為新竹北埔鄉所產之椪柑。

D.柳橙：其來源為雲林縣古坑鄉所產柳丁。

(a) (b) (c) (d)

圖 3　柑橘類果皮(a) LP;(b) PP;(c) OP;(d) TP。

3.研究方法

研究進行中超臨界乙醇液化之試驗步驟說明如下:

(1)果皮經取下後,經蒸餾水清洗,充分擦乾後,剪約長 1-1.5 cm、寬 3-5 mm 之果皮。

(2)果皮秤重後放入槽體。

(3)通入氮氣 5 min 將空氣趕走。

(4)由採氣口注入乙醇。

(5)系統升溫並持溫,葉片轉速維持於 200 rpm。

(6)持溫實驗結束開啟水冷系統降溫。

(7)系統降至 50 ℃後紀錄其壓力,並採集氣體,進行氣體組成(GC-TCD)分析,並利用檢量線計算氣體濃度及其氣體質量。

(8)固體及液體產物由系統中取出後秤重取得固體及液體重量。

(9)使用 60 μm 濾徑的濾紙過濾,所得之濾液即為超臨界乙醇液化後之液體產物。

(11)殘渣以 105 ℃ 乾燥 8 hr,秤重即為超臨界醇熱炭化技術產製之生物炭材料重量。

(12)轉化率、回收率、質量產率(Mass yield, MY)及能量密度提升率(Energy densification ratio, EDR)定義如下。

$$\text{Conversation rate}(\%) = \frac{(W_{Biomass} - W_{Solid\ residue})}{W_{Biomass}} \times 100\% \quad \text{(1)}$$

$$\text{Recovery rate}\ (\%) = \frac{Liquid + Residue + gas}{Biomass + Ethanol} \times 100\% \quad \text{(2)}$$

$$MY(\%) = \frac{Residue}{Biomass_{dry\ base}} \times 100\% \quad \text{(3)}$$

$$EDR(\%) = \frac{HHV_{residue}}{HHV_{biomass}} \times 100\% \quad \text{(4)}$$

表 1 為本研究原料及於不同反應條件下產品的縮寫對照表。

表 1　縮寫對照說明表

縮寫	定義
LP	檸檬皮 Lemon peel
TP	橘子皮 Tangerine peel
OP	柳橙皮 Orange peel
PP	柚子皮 Pomelo peel
L1T1573T0.5	檸檬皮 100 g，乙醇 100 g，反應溫度 573 K，反應時間 0.5 hr (Lemon peel 100 g, Ethanol 100 g, Reaction Temp. 573 K, Reaction time 0.5 hr)
T1E1T573T0.5	橘子皮 100 g，乙醇 100 g，反應溫度 573 K，反應時間 0.5 hr (Tangerine peel 100 g, Ethanol 100 g, Reaction Temp. 573 K, Reaction time 0.5 hr)
O1E1T573T0.5	柳橙皮 100 g，乙醇 100 g，反應溫度 573 K，反應時間 0.5 hr (Orange peel 100 g, Ethanol 100 g, Reaction Temp. 573 K, Reaction time 0.5 hr)
P1E1T573T0.5	柚子皮 100 g，乙醇 100 g，反應溫度 573 K，反應時間 0.5 hr (Pomelo peel 100 g, Ethanol 100 g, Reaction Temp. 573 K, Reaction time 0.5 hr)
VM	揮發份 Volatile matter
FC	固定炭 Fixed carbon
MY	質量產率 Mass yield
EDR	能量密度提升率　Energy densification ratio

三、結果與討論

1.原料產量及特性分析

臺灣柑橘類之種類、產地、年平均產量及其廢棄量如表 2 所示，表 2 為農糧署 2014 年至 2018 年平均統計結果所得。結果顯示台灣總柑橘類產量為 506,564 Ton/year，其中柑橘類包含椪柑、桶柑及其他，產量約為 241,736 Ton/year；甜橙類及為柳橙，其產量為 145,944 Ton/year；柚類包含文旦柚及白柚，其產量為 80,981 Ton/year；檸檬產量為 37,904 Ton/year[9]。

柑橘類果皮基本特性分析包含：(1)檸檬(Lemon peel, LP)；(2)橘子(Tangerine peel, TP)；(3)柳橙(Orange peel, OP)；(4)柚子(Pomelo peel, PP)的近似、熱值、碘價、FT-IR 及結果如表 3~5 以及圖 4~5 所示。

表 2　柑橘類果皮產量、果皮占比及廢棄量

種類 / 年份	柑橘類			柚類		甜橙類	檸檬	總計
	椪柑	桶柑	其他雜柑類	文旦柚	白柚	柳橙		
	產量(公噸)							
103	137,136	59,520	66,982	65,974	14,122	162,533	36,520	542,787
104	108,058	52,023	59,480	60,895	10,850	139,494	38,705	469,505
105	107,086	51,924	63,408	61,811	10,790	131,329	36,289	462,637
106	127,045	56,910	69,407	78,241	11,662	153,966	36,575	533,806
107	124,440	53,764	71,495	79,500	11,063	142,397	41,431	524,090
平均	120,753	54828	66,154	69,284	11,697	145,944	37,904	506,564
小計	241,736			80,981		145,944	37,904	

資料來源：107 年果品生產概況報告，行政院農業委員會農糧署(統計室)，本研究整理

表 3　柑橘類果皮特性分析結果

Sample	Moisture	VM	FC	Ash	HHV	LHV	Iodine value
	(wt.%)				kcal/kg	kcal/kg	mg/g
LP	69.36	28.98	0.11	1.56	5,129.70	1,571.74	139.59
TP	82.80	16.53	0.12	0.55	4,937.77	849.30	196.70
OP	75.76	23.41	0.17	0.66	4,712.53	1,142.32	380.7
PP	70.73	27.63	0.35	1.29	3,861.09	1,130.14	120.56

由表 3 可以得知，柑橘類果皮由於是新鮮之生質物料，因此主要具有 70-80 %含水量，其中又以橘子皮之含水量(Moisture)最高，其次要之組成為揮發分(VM)，占整體 16-28 %之間，揮發分的組成中又以檸檬皮之揮發分含量最高。其餘固定碳(FC)及灰分(Ash)比例均不高，因此適合以超臨界醇熱炭化進行處理。柑橘類果皮之高位發熱量介於 4,000-5,000 kcal/kg 之間。其中以檸檬高位發熱量為最高，具有較高之生質燃料開發潛力。如擬直接做為廢棄物進入焚化廠燃燒，其低位發熱量僅具有 849-1,572 kcal/kg，此熱值非常不適合直接燃燒使用。如擬直接做為燃料使用，必須將其烘乾後，熱值提升至 3,861-5,130 kcal/kg，才可達焚化爐設計值，但前處理除水過程需消耗大量能量，非常不符合能源效益。原料碘價則介於 120 至 380mg/g 之間，以柳橙(OP) 380.7 mg/g 最高。

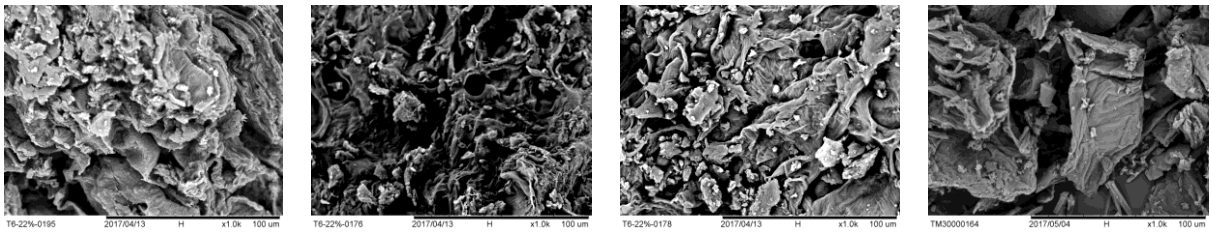
柑橘類果皮組成之乾基元素分析，從表 4 中顯示 C、N、H 及 S 數值，而氧元素為使用平衡差值取得。從表 4 中，柑橘類果皮以氧與碳含量為主。元素組成中之氮與硫總含量占整體果皮含量中之 1-2%，第三大元素則為 H，因此產品有較低含硫量及含氮量。圖 4 為柑橘類果皮乾基破碎後之 SEM 圖。可以看出柑橘類之果皮由於主要含有纖維素及半纖維素之組成，其組織

結構大致為層狀。而水分及精油等儲存於縫隙之中。從圖中呈現具有明顯的縫隙結構。

表 4 柑橘類廢棄果皮之元素分析結果

Sample	H	C	N	O[a.]	S	Atomic H/C ratio	Atomic O/C ratio
	(wt.%)						
Lemon peel, LP	6.25	45.34	1.32	47.08	0.01	1.65	0.78
Tangerine peel, TP	6.38	47.19	1.20	45.23	ND	1.62	0.72
Orange peel, OP	6.23	47.06	1.52	45.19	ND	1.59	0.72
Pomelo peel, PP	6.04	44.93	1.00	48.04	ND	1.61	0.80

a.:氧含量為推估值。



(a) (b) (c) (d)

圖 4 柑橘類生質物於穩定性測試下固體產物 SEM 圖。(a) LP (×1,000); (b) TP(×1,000); (c) OP(×1,000); (d) PP(×1,000)。

圖 5 為柑橘類果皮經 FT-IR 檢測後所得之圖譜結果，其結果整理至表 5。此為乾燥後之柑橘類果皮分析結果，其精油及水分皆已被去除，由於其物種相似，在組成上差異不大，所測得之官能基結果大致相同。FT-IR 圖譜標示於 1,050cm^{-1} 以及 3,643-3,630cm^{-1} 測得一級醇(OH)之訊號；於 1,600 cm^{-1} 測得氨根(NH_2)訊號，其連接型態應為一級胺；於 2,975 cm^{-1} 測得甲基(CH_3)之訊號，顯示柑橘類果皮均具有 OH、CH_2、CH_3、-NH_3 等相似的官能基。

經由 SEM、官能基、熱值、碘價及近似分析，顯示柑橘類果皮具有相近的特性，從外觀組成來看，除柚子果皮具有較高之白色海綿狀組成比例外，其餘柑橘類果皮結構均相似，故從此推斷，由於組成結構相似，生物碳產物成分將會大致相同。

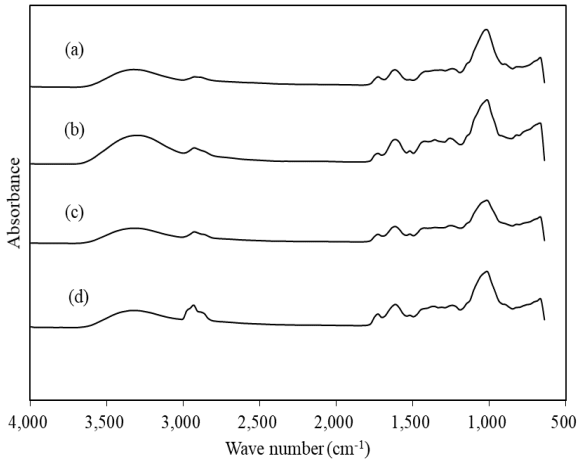
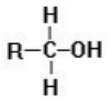


圖 5　乾燥後柑橘類果皮 FT-IR 圖譜。(a) LP; (b)TP; (c)OP; (d) PP。

表 5　柑橘類果皮 FT-IR 分析所得結果

Wave numbers (cm^{-1})	Functional group	Structure
1,050 3,630-3,643	Primary aliphatic alcohols	
2,975	Aliphatic hydrocarbons	R-CH_3 or CH_2
3,345-3,325 1,650-1,590 1,040-1,080	Aliphatic primary amines	 Primary

2.超臨界醇熱碳化穩定性特性分析

針對柑橘類果皮有效之穩定性測試，其實驗參數分別為：(1)果皮進料量為 100g (果皮種類為：檸檬、橘子、柳丁、柚子)；(2)乙醇進料量為 100g；(3)反應溫度為 573 K；(4)反應時間 0.5 hr。檸檬、橘子、柳丁、柚子於上述參數產品依序為：L1E1T573T0.5、T1E1T573T0.5、O1E1T573T0.5、P1E1T573T0.5。

圖 6 為不同柑橘種類生廚餘於穩定性測試下固、液、及氣體產率百分比，表 6 則為其產量、總回收率及轉化率分析結果。全部回收率均超過 90 %，最高為 LP 的 93.06 %。但最高轉化率發生在 PP 的 98.71 %，顯示柑橘類果皮大部分皆液化為液體產物，如要提升固體產物則需再調整相關實驗參數，但整體而言具有穩定性。

圖 7 及圖 8 分別為不同柑橘種類生廚餘醇熱穩定性測試下之液體及固體產物照片圖。柑橘類果皮經超臨界乙醇液炭化後，均形成黑色以及深棕色的

液體及固體，分別為生質油品及生物炭。

表 6　不同柑橘種類生廚餘穩定性測試

Condition	Reaction pressure (Gauge pressure bar)	Raw input sample (g)		Production (g)			Total recovery rate (%)	Conversion rate (%)
		Solid	Liquid	Liquid	Solid	Gas		
L1E1T573T0.5	120.08	100	100	181.75	3.69	0.68	93.06	96.31
T1E1T573T0.5	119.19	100	100	177.81	2.86	0.80	90.74	97.14
O1E1T573T0.5	119.84	100	100	176.32	3.21	0.80	90.17	96.79
P1E1T573T0.5	119.83	100	100	179.17	1.29	1.00	90.73	98.71

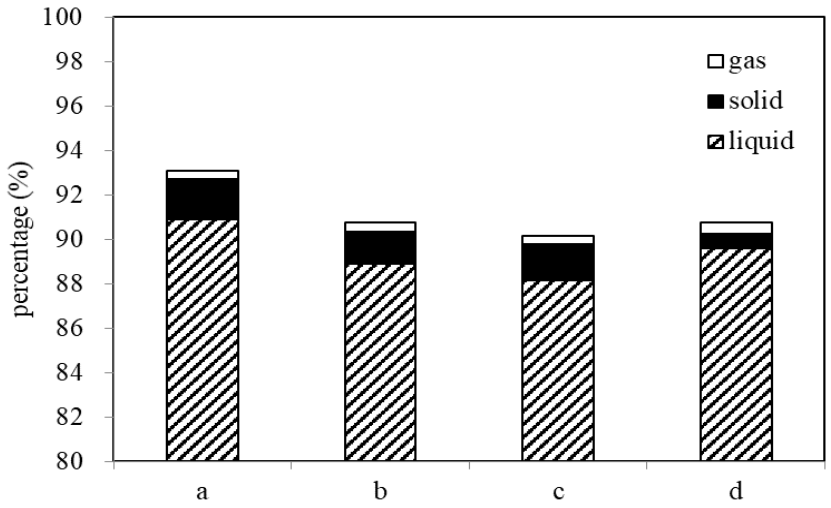


圖 6　不同柑橘種類生廚餘穩定性測試固、液、及氣體產率百分比。(a) L1E1T573T0.5; (b) T1E1T573T1; (c) O1E1T573T1.5; (d) P1E1T573T0.5。

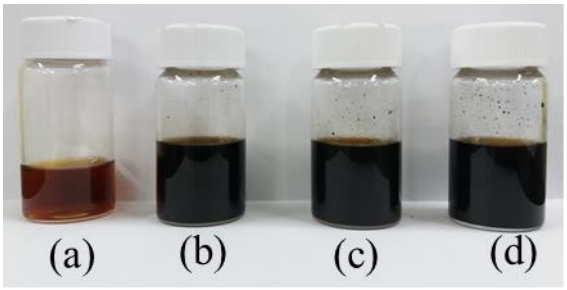


圖 7　不同柑橘種類生廚餘於超臨界乙醇液炭化反應後液體產物。(a) L1E1T573T0.5; (b) T1E1T573T1; (c) O1E1T573T1.5; (d) P1E1T573T0.5。

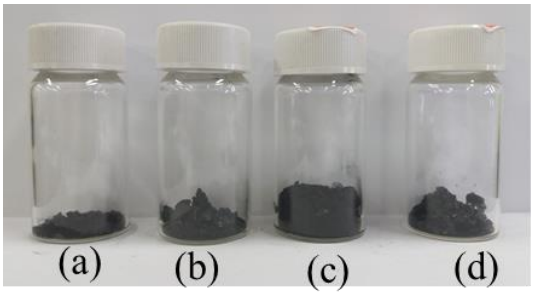


圖 8　不同柑橘種類生廚餘於超臨界乙醇液炭化反應後固體產物。(a) L1E1T573T0.5; (b) T1E1T573T1; (c) O1E1T573T1.5; (d) P1E1T573T0.5。

表 7　穩定性測試條件下原料與固體產品近似與熱值分析

Sample	Conditions	VM	FC	Ash	HHV	EDR	MY	Iodine value
		Wt %			kcal/kg	%	%	mg/g
Raw (dry basis)	Lemon peel	94.55	0.36	5.09	5,129.70	-	-	139.59
	Tangerine peel	96.10	0.70	3.20	4,937.77	-	-	196.70
	Orange peel	96.58	0.70	3.20	4,712.53	-	-	380.7
	Pomelo peel	94.40	1.20	4.41	3,861.09	-	-	120.56
Solid (dry basis)	L1E1T573T0.5	87.28	0.25	12.47	6,926.76	135.03	1.85	615.47
	T1E1T573T0.5	94.75	0.73	4.52	7,473.52	151.35	1.43	628.16
	O1E1T573T0.5	97.78	0.27	1.94	7,351.47	156.00	1.61	298.22
	P1E1T573T0.5	95.55	0.46	4.00	6,611.48	171.23	0.65	456.84

表 7 近似分析結果顯示，檸檬皮固體產品(L1E1T573T0.5)揮發分僅佔 87.28 %、固定碳佔 0.25 %、灰分佔 12.47 %，與橘子、柳橙及柚子之結果差異較大，灰分有非常大的濃縮效果，顯示檸檬皮組成中無機物種遠高於其他類。反應後固體產品碘價除橘子皮外，其餘皆有所提升，碘價範圍介於 298.22-615.47 mg/g，在尚未活性下，已經接近廢水處理用活性碳品質。反應後固體產物 HHV 亦均有所提升，範圍介於 6,611.48-7,473.52 kcal/kg。而比較能量密度提升率(EDR)，則以 PP 提升最多，達 171.23 %，轉化率 98.71% 最高，顯示柚子皮 PP 可達到非常好的去除效果。而整體 EDR 均達 135%以上，整體轉化均達 96 %以上，因此證明超臨界醇熱碳化技術適合用於柑橘類廢棄物的處理上。

表 8　不同柑橘種類生廚餘穩定性測試固體產物元素分析

Sample	Conditions	H	C	N	O[a]	S	H/C	O/C
		wt. (%)						
Coal							0.0705[b]	0.0571[b]
Raw (dry basis)	LP	6.25	45.34	1.32	47.08	0.01	1.65	0.78
	TP	6.38	47.19	1.2	45.23	ND	1.62	0.72
	OP	6.23	47.03	1.52	45.19	ND	1.59	0.72
	PP	6.04	44.93	1	48.04	ND	1.61	0.80
Solid (dry basis)	L1E1T573T0.5	5.54	68.4	2.13	23.66	0.27	0.97	0.26
	T1E1T573T0.5	6.09	75.74	2.33	15.69	0.15	0.96	0.16
	O1E1T573T0.5	6.24	74.93	2.30	16.30	0.23	1.00	0.16
	P1E1T573T0.5	5.41	70.81	1.95	21.75	0.09	0.92	0.23

a.:氧含量為推估值。

b:Trent et al., 1982.

表 8 為不同柑橘種類生廚餘穩定性測試固體產物元素分析結果。固體產物主要以 C 為主要元素，介於 68~75%之間。H/C 比介於 0.97~1.00，與生物炭 H/C≦0.7 有差距，但與原料相較已有下降趨勢，主因是 H 下降較不明顯。O/C 比介於 0.16~0.26 之間，相較原料則有明顯下降，主因是炭化及脫氧效果明顯。但如與煤炭相比，整體而言 H/C 比及 O/C 比皆與文獻所記載煤炭 0.0705、及 0.0571 值仍有明顯距離。

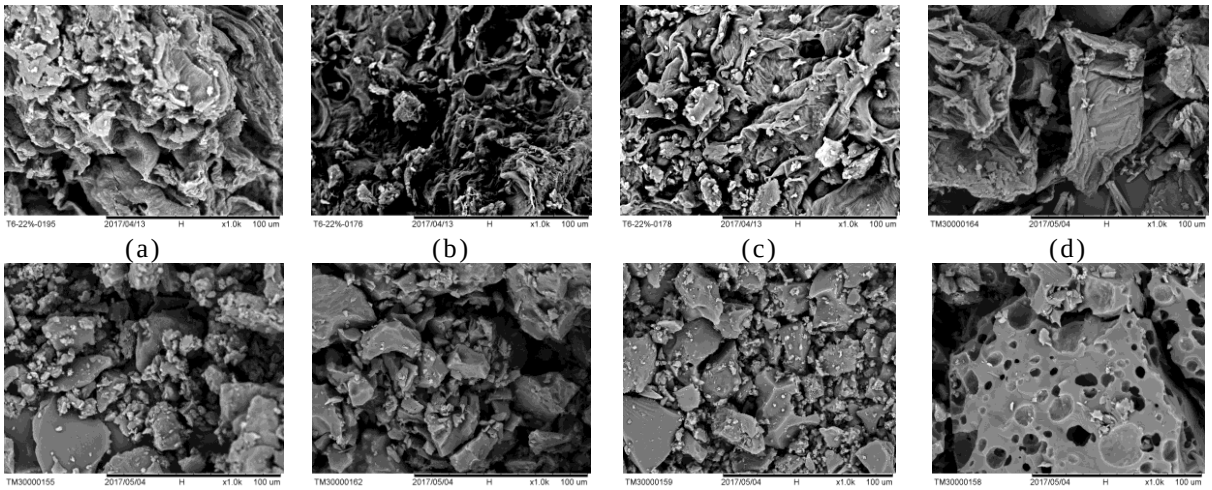


圖 9　柑橘類生廚餘於穩定性測試下原料及固體產物 SEM 圖。(a) LP (×1,000); (b) TP(×1,000); (c) OP(×1,000); (d) PP(×1,000)；(e) L1E1T573T0.5 (×1,000)；(f) T1E1T573T0.5 (×1,000)；(g) O1E1T573T0.5(×1,000)；(h) P1E1T573T0.5 (×1,000)。

由 SEM 圖顯示不同柑橘類固體產物液炭化後均呈現完全破碎狀細微顆粒，較特別的是柚子皮(PP)有非常多明顯的孔隙結構。應為超臨界流體進行裂解液炭化所形成，未來亦可考量做為多孔性吸附活性碳的可行性。相對 PP 其能量產率最低、轉化率最高來看，超臨界流體進入生廚餘反應趨勢明顯。

圖 10 及表 9 顯示不同柑橘種類之固體產物 FT-IR 測得相似的結果，都具有烷基以及氨基酸鹽，顯示不同種類之柑橘類結果會是相似的。

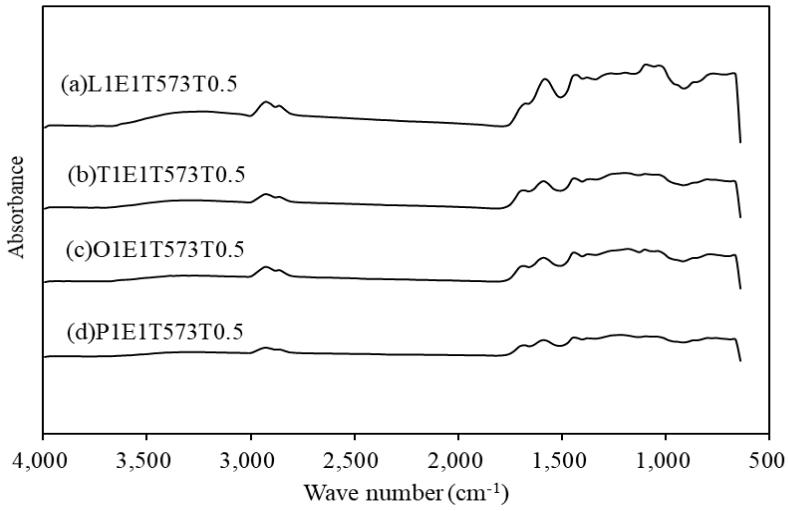


圖 10 不同柑橘種類生廚餘穩定性測試固體產物 FT-IR 圖譜。(a) L1E1T573T0.5； (b) T1E1T573T0.5；(c) O1E1T573T0.5；(d) P1E1T573T0.5。

表 9 不同柑橘種類生廚餘穩定性測試固體產物 FT-IR 分析之結果

Wave numbers (cm^{-1})	Functional group	structure
1640-1610 3130-3030	Aliphatic Amino Acid Salts	$H_2NCHRCOOH$
2975	Aliphatic Hydrocarbons	CH_3 or CH_2

3. 碳材比較標準

整體而言，以作為燃料碳而言，依據台電公司燃煤採購標準，本研究所產製之超臨界醇熱碳化固體產品已可符合高熱值一般煙煤(A1)之標準。比較生物碳及活性碳標準，本研究僅進行元素分析，因此僅作參考其 C 含量應可符合 Class1 之標準，且 H/C 莫耳比已接近生物碳所需標準，未來可再朝降低 H 含量及提高 C 含量為研究目標。碘價結果顯示柑橘類果皮超臨界醇熱碳產品已接近廢水處理用商用活性碳標準，如再經過活化，當可符合更高品質活性碳標準。

四、結　論

傳統水熱法碳化技術利用水於臨界狀態下將生質物炭化，水之臨界條件下溫度及壓力需求相當高，對於設備具有一定腐蝕性，而改用乙醇做為反應

劑，其臨界條件較低，對於設備成本之壓力也較低，因此本研究旨在以超臨界醇熱炭化技術評析各柑橘類果皮生質廢棄物再利用製成生物炭材料之可行性，提供廚餘除飼豬外之其餘可行方案。研究結果顯示，本研究主要目標之固相產物熱值(HHV)介於 6,611.48-7,473.52 kcal/kg 之間，產率(MY)則介於 0.65-1.85 wt.%，H/C 比介於 0.97-1.00，O/C 比介於 0.16-0.26 之間，相較於原料品質性質大部分皆有所提升，可產出較高品質之碳化產物。經由元素分析結果，顯示各柑橘類果皮皆有脫氫脫氧反應產生，佐證其能量密度提升之原因。因此本研究證明柑橘類果皮以超臨界醇熱碳化技術處理反應有相似性，可共同處理減少整體處理成本。本研究亦證實超臨界醇熱炭化技術所產生之固體產物具有高品值碳材料之研究價值。

五、參考文獻

1.Peterson A.A., Vogel F., Lachance R.P., Frling M., Antal M.J., Tester J.W. Thermochemical biofuel production in hydrothermal media: a review of sub- and supercritical water technologies. Energy and Environmental Science 2008, 1, 32-65.

2.Erdogan E., Atila B., Mumme J., Reza M.T., Toptas A., Elibol M., Yanik J. Characterization of products from hydrothermal carbonization of orange pomace including anaerobic digestibility of process liquor. Bioresource Technology 2015, 196, 35-42.

3.Xiao K., Liu H., Li Y., Yi L., Zhang X., Hu H., Yao H., Correlations between hydrochar properties and chemical constitution of orange peel waste during hydrothermal carbonization. Bioresource Technology 2018, 265, 432-436.

4.Zhu W.W., Zong Z.M., Yan H.L., Zhao Y.P., Lu Y., Wei X.Y., Zhang D. Cornstalk liquefaction in methanol/water mixed solvents. Fuel Processing Technology 2014, 117, 1-7.

5.Heuntae J., Hermawan P., Hassan Z., Jaehoon K. Upgrading low-boiling-fraction fast pyrolysis bio-oil using supercritical alcohol: Understanding alcohol participation, chemical composition, and energy efficiency, Energy Conversion and Management 2017,148, 197-209.

6.台電公司燃煤採購情形，台灣電力公司，106 年。網址：https://www.taipower.com.tw/upload/295/2017112716085280536.pdf

7. International Biochar Initiative (IBI)，“Standardized Product Definition and Product Testing Guidelines for Biochar 7: That Is Used in Soil”，2015，網址：

https://biochar-international.org/characterizationstandard/
8. 廢水用活性碳，宸昱企業有限公司，109 年。
9. 果品生產概況報告，行政院農業委員會農糧署(統計室)，107 年。

焚化灰渣合成綠色材料之技術開發與應用研究

陳志成*、林以潔**、許育婷***、張筱涵***、范仲翔***

摘　要

近年我國大型垃圾焚化廠之焚化處理量達到 644 萬公噸/年，約產生底渣 89 萬公噸/年以及飛灰 30 萬公噸/年。目前焚化飛灰主要處理方式大多採用固化/穩定化後掩埋堆置，不僅操作費用高(固化/穩定化藥劑及掩埋費用)，且面臨掩埋場空間日漸飽和不足之難題，至於焚化底渣雖可依目前再利用管理方式進行委外處理再利用，卻因底渣成分特性與品質不夠理想，以及工程應用相關規範與制度尚未建立成熟，導致實際執行上面臨諸多困難與限制。在處理費用逐年調漲、掩埋場容量漸趨飽和，以及底渣再利用受阻的情況下，開創焚化底渣與飛灰之其他處理與再利用方式更顯重要與迫切。

由於焚化灰渣中富含矽鋁鈣等成分，具有合成多功能性無機綠色材料之潛力，本研究團隊近年已成功將焚化飛灰及底渣透過鹼熔水熱合成技術製備出具有高比表面積(700-1,000m^2/g)之沸石等多孔性吸附材料，並應用於許多環境污染物(重金屬、有機物)之吸附控制，甚至可取代活性碳再利用於焚化廠之廢氣處理與廢水處理。本研究基於過去累積多年之研究經驗與成果，針對焚化底渣與飛灰再利用合成沸石之最佳操作條件進行深入探討，可作為未來實廠開發應用之參考，除了拓展焚化灰渣更多元可行之再利用途徑外，亦能提升焚化灰渣再利用產品之品質與價值，達到資源循環與高值化之雙重目標。

【關鍵詞】焚化、飛灰、底渣、鹼熔、水熱合成、沸石

---

*逢甲大學環境工程與科學學系　教授

**逢甲大學環境工程與科學學系　研究助理

***逢甲大學環境工程與科學學系　專題生

一、前　言

我國焚化飛灰目前仍採固化穩定化處理，焚化底渣則遇到去化受阻問題，本研究應用科學研究技術，透過水熱法將灰渣轉製成高值化吸附材料，開拓另一應用途徑。

二、台灣焚化灰渣處理現況與問題

根據環保署統計資料顯示，107 年全國 24 座營運中大型垃圾焚化廠之垃圾處理量約為 644 萬噸，同時產生 89 萬噸底渣與 30 萬噸飛灰穩定化物，分別佔垃圾處理量之 13.87%及 4.68%[1]。由於焚化飛灰屬有害事業廢棄物，目前處理方式大多採用飛灰固化/穩定化再送至掩埋場進行處置，不僅花費大量費用(穩定化藥劑及掩埋費用)，且掩埋地點逐漸飽和而日漸難尋，國內部分縣市亦出現掩埋場空間不足等問題;至於焚化底渣雖可依目前再利用管理方式進行委外處理再利用，卻因本身特性與品質不夠理想，加上工程應用相關規範與市場接受度尚未建立成熟，導致在實際執行上有諸多困難或限制，為促進焚化底渣之再利用用途與去化管道，環保署努力尋求相關可行技術及配套措施，期能讓民眾安心使用焚化底渣再生粒料於公共工程或建築材料等適當用途，因此國內焚化灰渣之妥善處理與再利用已成為各焚化廠所需克服解決之重要課題。

環保署推動焚化底渣再利用政策已行之多年，焚化底渣雖然經過篩分、破碎、篩選等處理程序，並通過戴奧辛與重金屬溶出試驗之品質檢驗後，可作為天然粒料的替代材料，應用於道路級配粒料基底層、控制性低強度回填材料及磚品等用途，但由於過去國內曾出現焚化底渣再利用產品之品質不佳、再利用地點管控不當、以及重金屬溶出等疑慮，造成許多焚化廠所產出的焚化底渣無法有效再利用，諸多挑戰導致去化管道不順暢，降低民眾使用信心。

本團隊統計 106-107 年全國 24 座焚化廠底渣之再利用流向，可歸納得知國內焚化底渣主要由永盛開發實業股份有限公司、博瑞環保股份有限公司、潤隆建設股份有限公司、全精英實業股份有限公司、旭遠科技企業股份有限公司、榮寶企業股份有限公司、映誠股份有限公司、力優勢環保股份有限公司等再利用廠商承攬，另仍有少數焚化底渣送至鄰近掩埋場直接掩埋。至於國內近 5 年焚化底渣再生粒料之去化用途統計如表 1 所示[1][2]，目前焚化底

渣再生粒料之再利用用途大多以基地填築及路堤填築、CLSM(控制性低強度回填材料)、道路級配粒料底層及基層為主，以 107 年為例，基地填築及路堤填築之使用比例最高(55.97%)，其次為 CLSM(42.70%)。

表 1 近 5 年焚化底渣再生粒料用途統計表

使用用途	103 年	104 年	105 年	106 年	107 年
基地填築及路堤填築(t)	59,127(3)	250,685(1)	232,111(2)	243,184(1)	347,594(1)
道路級配粒料底層及基層(t)	123,228(2)	114,035(3)	140,042(3)	100,929(3)	27,995(4)
控制性低強度回填材料(t)	433,256(1)	244,334(2)	237,917(1)	148,211(2)	265,197(2)
低密度再生透水混凝土(t)	0	0	0	0	9,081(5)
瀝青混凝土(t)	0	0	0	66(8)	104(8)
磚品(t)	31(5)	64(6)	2,986(5)	156(6)	1,040(7)
水泥生料(t)	0	1,371(5)	0	142(7)	3,579(6)
衛生掩埋場覆土(t)	0	0	0	245(5)	33,579(3)
無筋混凝土添加料(t)	5,399(4)	38,623(4)	3,914(4)	319(4)	-
底渣量(t)	937,177	970,966	916,152	849,381	893,738
再生粒料量(t)	621,014	649,112	616,970	493,252	688,169
再利用率(%)	**66.26%**	**66.85%**	**67.34%**	**58.07%**	**77.00%**

國內焚化底渣之再利用處理流程大致如圖 1 所示，首先將底渣「破碎篩分」分離大型物後經由「磁選」將鐵金屬回收，再經過「風選」或「篩選」將未燃物分離，最後由「渦電流分選」將非鐵金屬篩選出來，使底渣再生粒料符合規範，並視用途所需選擇進階處理程序(如熟化、穩定化、水洗方式處理)，或依實際需求進一步將粗粒料破碎、篩分成細粒料，不管熟化、穩定化、水洗處理目的皆為降低焚化底渣之重金屬溶出率，避免再生粒料對環境造成二次污染。穩定化係指透過噴灑磷酸鹽系、矽酸鹽系、硫化物系或螯合物系等類之藥劑，與底渣中重金屬生成低溶解度及穩定性高的化合物，達到降低重金屬溶出之目的。熟化則是藉由焚化底渣與空氣中的二氧化碳反應，使焚化底渣之重金屬組成發生碳酸化及礦化等作用，而形成低溶解性二次礦物，達到降低重金屬溶出之目的，並具降低異味之功效。水洗是藉由水或摻有化學藥劑之液體，將焚化底渣中重金屬及水溶性物質如氯鹽、硫酸鹽系與微細顆粒洗出，達到降低重金屬及氯離子溶出之目的，亦具降低異味之功效[3]。

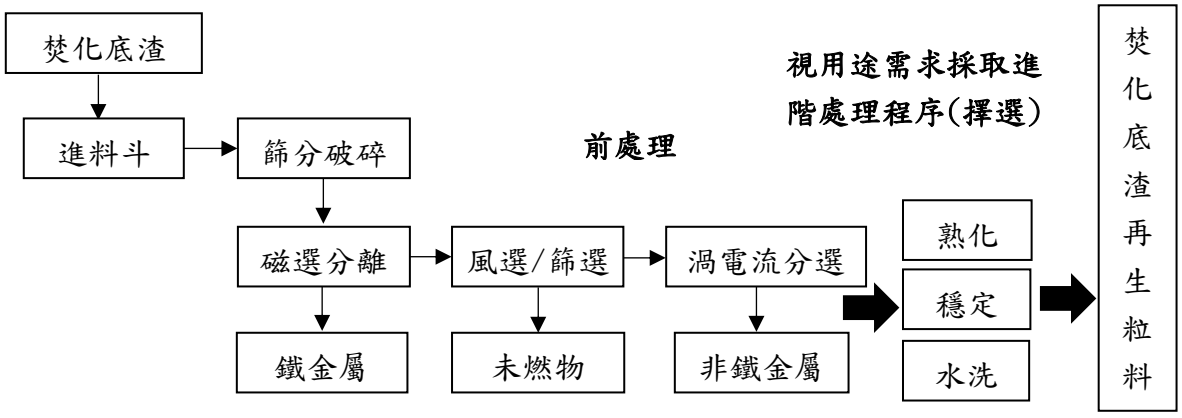


圖 1 焚化底渣再生粒料處理流程

至於焚化飛灰大多屬於有害事業廢棄物，其使用用途較為限縮，目前大多僅以固化穩定化方式進行處理，其後送至掩埋場進行掩埋處置，然而飛灰中含有高濃度氯鹽等無機性鹽類，常常導致固化過程延長及降低固化物耐久性，氧化鈣與氯鹽亦會形成氯化鈣化合物，容易吸濕而導致固化物膨脹崩解，於長期掩埋後仍有重金屬再溶出的疑慮。焚化飛灰採用固化掩埋之處理方式不但對於掩埋場造成極大運作空間負荷，且有環境風險疑慮及社會觀感不佳等問題，進而影響垃圾處理之穩定發展[4]，隨著掩埋場趨於飽和且逐年調高處理費用情況下，主管機關及焚化廠勢必面臨未來如何有效處理或再利用焚化飛灰之問題與挑戰。

此外，我國廢清法第 30 條規定，事業委託清理其廢棄物，應與受託人就該廢棄物負連帶清理責任，如受託者未妥善清理，委託事業應與受託者就該廢棄物負起連帶清理及環境改善責任。因此，焚化廠應注意管控焚化底渣與飛灰委外處理或再利用之後續流向與產品品質，以確保焚化灰渣處理與再利用之安全無虞，若再次發生處理品質不佳或不當再利用等事件，恐造成全國焚化廠之企業形象衝擊，降低民眾接受度與使用信心。

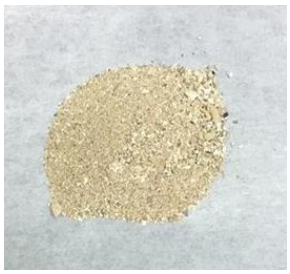
三、 焚化灰渣合成高值化綠色材料技術

1.焚化底渣與飛灰之成分特性

本研究所採集焚化灰渣樣品取自中部某垃圾焚化廠，底渣之原樣外觀形態如圖 2(A)所示，其顏色呈現深灰色，粗細顆粒混雜且夾雜部分陶瓷、玻璃、金屬碎片，整體而言以細顆粒無機成分所占比例較多，未採集大型結塊物或金屬物。焚化飛灰之外觀形態則由圖 2(B)可觀察出鍋爐灰呈現土黃棕色，反應灰則為質地細緻的灰色粉末圖 2(C)。焚化灰渣各項成分特性

之分析方法，皆以環保署所公告之標準方法或國家標準進行。

(A)底渣



(B)鍋爐灰

(C)反應灰

圖 2 焚化灰渣外觀

由於焚化底渣與焚化飛灰皆為廢棄物焚化處理之主要副產物，因此焚化底渣與飛灰之成分性質與有害特性為大家所關注的焦點。根據相關法規與管理規範，焚化底渣與飛灰需定期檢測其 TCLP 金屬溶出量，作為品質管控及判斷是否為有害事業廢棄物之依據，且目前環保署公告實施之焚化底渣再利用管理方式中亦規定焚化底渣再利用之交付條件須檢測 TCLP 溶出量。因此，本研究亦針對實驗對象之焚化灰渣進行 TCLP 溶出試驗分析，檢測分析結果如表 2 所示，可發現本次焚化灰渣樣品之重金屬溶出濃度均符合法規標準，此外根據文獻指出，一般焚化灰渣 TCLP 溶出液中之金屬濃度，通常以鉛、鉻、銅、鋇等金屬之溶出量較高，且不同金屬溶出量亦與進廠廢棄物之成分性質有關[5]。

表 2　焚化灰渣 TCLP 溶出試驗結果

項目	Hg	Cd	Se	Pb	Cr	As	Ag	Cu	Ba	Cr^{6+}
法規值	0.2	1.0	1.0	5.0	5.0	5.0	5.0	15.0	100.0	2.5
底渣	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	0.33	0.27	<0.02	0.12	0.62	0.20
鍋爐灰	<0.02	<0.02	0.08	0.17	0.01	0.66	0.10	0.27	0.16	<0.05
反應灰	<0.02	<0.02	0.07	0.12	0.05	0.66	0.09	0.27	0.17	<0.05

單位: mg/L

焚化灰渣通常富含矽、鋁化合物與其他金屬成分，具有回收再利用製成其他無機應用材料或產品之可能性，因此為了有效掌握焚化灰渣中之主要金屬成分，以作為後續焚化灰渣回收再利用之應用參考，本研究依據標準檢驗分析方法，採用微波消化與感應耦合電漿光譜儀分析灰渣中所含之主要金屬元素及其化合物含量，分析結果如表 3 所示，可知焚化底渣與飛灰之主要金屬氧化物皆為 SiO_2、CaO、Fe_2O_3、Al_2O_3、MgO、ZnO 等，其

中氧化矽含量高達 20-47%，氧化鋁含量為 4-12%，由於此兩種金屬氧化物為合成沸石等多功能無機材料或吸附材料之主要成分，因此焚化灰渣具備再利用合成各種無機綠色材料之潛力。

表 3　焚化灰渣之金屬化合物含量分析結果

項目	SiO_2	Al_2O_3	CaO	Fe_2O_3	MgO	Na_2O	TiO_2	K_2O
底渣	42.54	11.78	22.88	14.76	4.18	0.99	1.40	0.80
鍋爐灰	47.29	4.62	20.54	6.29	1.84	4.02	-	1.97
反應灰	20.22	4.47	25.50	3.86	1.83	3.84	-	2.14
項目	**BaO**	**CuO**	MnO_2	**HgO**	**NiO**	Cr_2O_3	**ZnO**	**PbO**
底渣	0.12	0.18	0.06	0.06	0.03	0.06	0.05	0.04
鍋爐灰	0.40	0.29	-	-	-	0.10	12.97	0.18
反應灰	0.27	0.29	-	-	-	0.08	20.92	0.22

單位：(%)

至於焚化灰渣之表面特性分析結果可知(如表 4)，焚化飛灰之原始比表面積不高，由於焚化飛灰主要是由燃燒廢棄物之灰分與不可燃物質等細微顆粒，於焚化過程中經高溫揮發、冷凝、濃縮、聚集、沉降，最終於袋式集塵器所捕捉去除，因此焚化飛灰之結構較為密緻且不具多孔性，故其比表面積不高。而焚化底渣之主要來源是廢棄物中無機物質或不可燃成分經過高溫燃燒後之殘留物，焚化底渣經高溫反應後又以水淬方式急速冷卻，導致焚化底渣顆粒表面發生局部熔化、燒結、淬冷、玻璃化等現象，因此焚化底渣顆粒表面較為密緻而無孔洞，比表面積偏低。檢測分析結果指出焚化底渣之比表面積僅有 4.93m^2/g，此數值也較一般吸附材料偏低許多，因此無法直接將焚化灰渣應用於吸附材料或化工材料等用途，需經過適當處理與合成技術方能提升改善其表面特性。

表 4　焚化灰渣之比表面積

項目	底渣	鍋爐灰	反應灰	混合灰
BET Surface Area (m^2/g)	4.93	2.20	6.54	3.9

2.焚化灰渣鹼熔水熱合成沸石與應用

由於焚化飛灰及底渣皆富含矽鋁氧化物等成分，適合作為合成沸石等多孔性吸附材料之原料，因此本研究應用鹼熔水熱合成技術，探討焚化底

渣與飛灰回收再利用合成沸石等環保用吸附材料之效果與可行性。文獻指出沸石屬於次穩定相(metastable phases)[5]，且合成沸石的反應機制相當複雜，常因改變其中一個操作條件而形成不同種類沸石與特性[6]，其基本原理係利用鹼熔程序將焚化灰渣中的矽氧化物與鋁氧化物解離溶出後，再利用水熱合成技術將矽氧化物與鋁氧化物於適當控制條件下重新排列組合並凝核、縮聚、結晶成類似沸石等多孔性無機材料，使其具有良好的比表面積與孔洞分布特性，可應用於環保、化工、材料、建築等領域之多種用途，如吸附劑、催化劑、調濕劑、耐火材、建材、過濾材等，可開創焚化灰渣多元再利用途徑與高值化再利用產品[7]。

將焚化灰渣應用鹼熔水熱技術合成沸石等多孔性材料之製備流程如圖 3、4 所示，不同試程所控制之操作參數與條件如表 5 所示，主要控制因子包含原料矽鋁比、鹼熔程序之鹼劑添加量、鹼熔溫度、鹼熔後之水解液體量(液固比)、水解時間、水解後有無固液分離，以及水熱合成時間等。

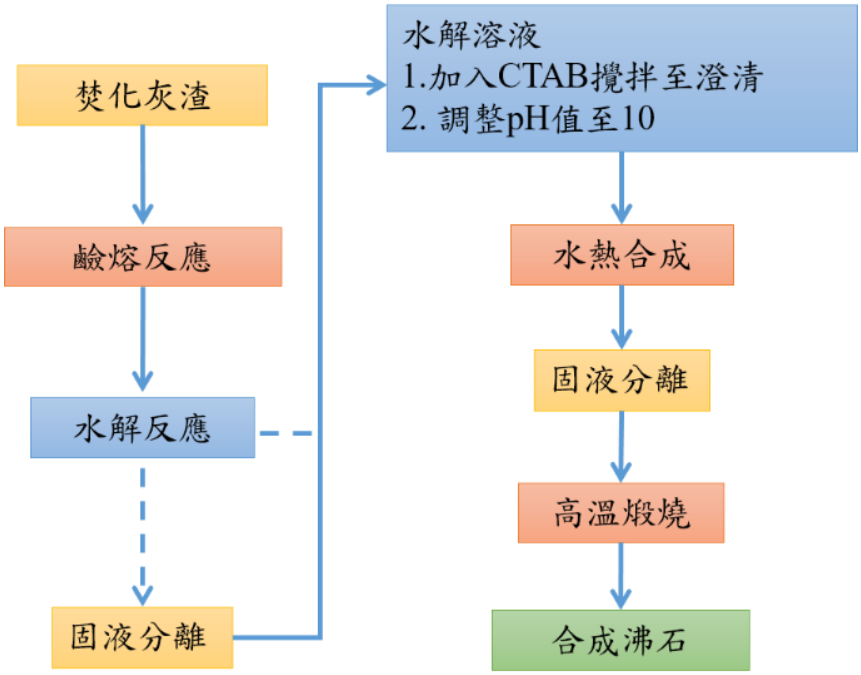


圖 3　焚化灰渣鹼熔水熱合成沸石流程圖

圖 4　焚化灰渣鹼熔水熱合成沸石過程實物圖

本研究各實驗試程之操作條件與控制參數、以及各試程所合成沸石之比表面積如表 5 所示，實驗結果顯示應用鹼熔水熱技術與控制適當條件，可成功將焚化灰渣合成高品質之多孔性吸附材料，可將原本低比表面積(3.90 m^2/g)之焚化飛灰合成比表面積高達 962.08 m^2/g 之人工沸石，其他操作條件所合成沸石之比表面積亦可達 600m^2/g 以上，而焚化底渣所合成沸石之比表面積亦可高達 700~800m^2/g 以上，皆具有良好的吸附特性與應用潛力。本研究團隊已掌握焚化灰渣合成沸石之比表面積高低與產率的關鍵技術，可依實際需求進一步合成特定比表面積之吸附材料，以再利用於各種污染物之吸附控制，有效拓展焚化灰渣之再利用途徑與效益。

表 5 焚化灰渣鹼熔水熱合成沸石之實驗操作條件與結果

項目	Si/Al	鹼/灰;渣	水解時間(hr)	鹼熔溫度(℃)	水解 L/S	水熱時間(hr)	合成沸石比表面積(m^2/g)
混合灰 1	5	1	24	200	50	12	91.23
混合灰 2	5	1.5	24	400	100	24	246.23
混合灰 3	5	2	24	600	150	36	327.06
混合灰 4	5	2.5	24	800	200	48	550.05
混合灰 5	10	1	24	400	150	48	**783.64**
混合灰 6	10	1.5	24	200	200	36	**639.37**
混合灰 7	10	2	24	800	50	24	254.99
混合灰 8	10	2.5	24	600	100	12	313.27
混合灰 9	20	1	24	600	200	24	**875.94**
混合灰 10	20	1.5	24	800	150	12	**962.08**
混合灰 11	20	2	24	200	100	48	**768.28**
混合灰 12	20	2.5	24	400	50	36	**619.86**
混合灰 13	40	1	24	800	100	36	**735.96**
混合灰 14	40	1.5	24	600	50	48	**762.39**
混合灰 15	40	2	24	400	200	12	**717.78**
混合灰 16	40	2.5	24	200	150	24	**650.97**
混合灰 17	20	1.5	24	800	200	48	**943.05**
底渣 1	20	1.5	2	400	150	48	**861.20**
底渣 2	20	1.5	4	400	150	48	**735.63**
底渣 3	20	1.5	8	400	150	48	**754.05**
底渣 4	20	1.5	2	400	150	48	402.55
底渣 5	20	1.5	4	400	150	48	375.29
底渣 6	20	1.5	8	400	150	48	316.81

為了解焚化灰渣合成沸石之吸附效果與特性，本研究選用碘、亞甲基藍及重金屬(銅、鉛、鎘)作為吸附效能測試之吸附質，吸附實驗結果與文獻比較如表 5 所示，可知本研究所合成沸石對於碘之吸附能力最高可達 1,881.11mg/g(碘值)，高於一般焚化廠所採用活性碳之碘值，對於重金屬離子之吸附能力亦優於相關文獻，具有良好吸附應用潛力；而合成沸石對於常見的工業用染料(亞甲基藍)之最高吸附量則為 29.61mg/g，由於亞甲基藍屬於大分子結構，而合成沸石大多為微孔或中孔結構，因此合成沸石對亞甲基藍之吸附效果較低。本研究結果證明利用焚化灰渣合成沸石之比表面積與不同污染物之吸附效果皆可優於一般市售吸附劑，除了可以協助

舒緩焚化灰渣處理與再利用困難外，以資源化的觀點來看亦具有相當良好的發展潛力。

表 6　焚化灰渣再利用合成沸石之吸附能力及文獻比較

文獻	吸附劑	吸附質(mg/g)				
		I_2	MB	Pb^{2+}	Cu^{2+}	Cd^{2+}
[8]	活性碳	1,300	250	-	-	-
[9]	方沸石	-	-	118.10	22.87	-
[10]	活性碳-沸石複合材料	-	89.24	350.79	96.64	-
[11]	MCM-41	-	-	204.08	80.00	80.00
[12]	活性碳-沸石複合材料	-	38.38	-	41.94	47.21
[13]	MCM-41	-	86.36	-	-	-
本研究	**焚化飛灰合成沸石**	**1,881.11**	**29.61**	**587.00**	**261.85**	**109.40**

此外，由於焚化飛灰屬於有害事業廢棄物，將焚化飛灰合成沸石後是否仍屬有害廢棄物或其中有害成分之含量必會影響其再利用之接受度與可行性，有必要進行焚化飛灰合成沸石之成分特性分析，以消除民眾疑慮並確認其無害性，因此本研究亦將焚化飛灰所合成沸石進行 TCLP 毒性特性溶出試驗與重金屬及戴奧辛含量分析，檢測結果如表 6 與表 7 所示，可證實透過鹼熔水熱合成法所製備出合成沸石，其重金屬含量與戴奧辛含量皆可大幅降低，TCLP 溶出試驗結果亦可符合法規標準，證明本研究所合成沸石已確實達到無害化與資源化之效果。

表 7　焚化飛灰合成沸石之金屬含量分析結果(%)

項目	**Hg**	**Cd**	**Se**	**Pb**	**Cr**	**As**	**Ag**	**Cu**	**Ba**
合成沸石	ND	ND	ND	0.15	ND	ND	ND	0.02	ND
項目	**Si**	**Al**	**Ca**	**Na**	**Fe**	**K**	**Mg**	**Zn**	**Cr^{6+}**
合成沸石	55.2	3.84	ND	0.17	ND	ND	ND	ND	ND

表 8　焚化飛灰合成沸石之 TCLP 溶出試驗結果(mg/L)

項目	Hg	Cd	Se	Pb	Cr	As	Ag	Cu	Ba	Cr^{6+}
法規值	0.2	1.0	1.0	5.0	5.0	5.0	5.0	15.0	100	2.5
合成沸石	ND	ND	ND	ND	0.02	ND	ND	0.24	ND	ND

3.焚化灰渣鹼熔水熱合成沸石之除氯效果與經濟評估

焚化底渣與飛灰之高氯含量亦為影響焚化灰渣再利用產品品質與用途之主要因素之一，因此本研究亦針對焚化灰渣應用鹼熔水熱技術合成沸石之過程進行氯離子含量分析檢測，分析結果證明，焚化灰渣中的氯離子皆能於鹼熔水熱過程中有效被分離析出，所合成沸石之氯含量皆可大幅降低至 0.012%~N.D.，有效提升再利用產品之品質，降低再利用之安全疑慮。

此外，本研究亦根據實驗結果與各項操作條件，進行焚化灰渣合成沸石再利用之經濟效益評估，評估結果顯示將焚化灰渣應用鹼熔水熱合成法製成沸石再利用之主要設置成本為水熱反應器，主要操作成本為藥品/試劑費用，其次為電費和維護保養費，但由於合成沸石之再利用市場價值高，因此將焚化灰渣鹼熔水熱合成沸石再利用仍具有相當良好的經濟可行性，在不計入焚化灰渣委託處理費用之額外收入時，合成沸石銷售總收入仍可大於製造成本。

四、結　論

1.焚化灰渣之比表面積偏低，但富含 SiO_2、CaO、Fe_2O_3、Al_2O_3 等金屬氧化物，具有再利用合成多功能綠色材料之潛力。

2.本研究成功應用鹼熔水熱技術，將焚化灰渣合成沸石等多孔性吸附材料，並建立最佳操作條件，所合成沸石之比表面積可大幅提升至 800 m2/g 以上，具有良好應用可行性，亦能提高再利用產品之市場價值與回收效益。

3.焚化灰渣合成沸石之碘值最高可達 1,881.11mg/g，優於市售活性碳，對於重金屬離子之吸附效果亦優於相關文獻，對於大分子結構之亞甲基藍的最大吸附量則較低。

4.焚化灰渣應用鹼熔水熱技術合成人造沸石，可有效破壞去除或大幅降低焚化灰渣中之戴奧辛、氯離子與重金屬，達到無害化與資源化之效果，檢驗分析結果證明合成沸石之氯離子、戴奧辛、重金屬含量與 TCLP 溶出量皆遠低於法規標準或再利用標準，有助提高再利用產品品質與民眾接受度。

5.經濟效益評估結果顯示，焚化灰渣應用鹼熔水熱技術合成沸石之處理操作成本高於目前焚化灰渣之處理成本，但由於合成沸石之再利用市場價值遠高於目前的灰渣再利用產品，因此仍具有相當良好的經濟可行性。

五、 參考文獻

1.焚化廠營運管理資訊系統(SWIMS)，行政院環境保護署，https://swims.epa.gov.tw/swims/swims_net/index.aspx，2019 年。

2.焚化再生粒料流向管理系統，行政院環境保護署，https://rams.epa.gov.tw/RAMS/，2019 年。

3.徐敏晃，「建置資源化產品之工程應用技術及通路制度專案計畫」，環保署專案計畫成果報告，財團法人臺灣營建研究院，2017 年。

4.林以潔，「焚化飛灰鹼熔水熱合成沸石與再利用研究」，碩士論文，弘光科技大學環境工程研究所，2017 年。

5.Johnson, E.B.G., Arshad, S.E., “Hydrothermally Synthesized Zeolites Based on Kaolinite: A Review,” Applied Clay Science, Vol. 97-98, pp. 215–221(2014).

6.陳志成，林以潔，「焚化飛灰合成綠色材料之技術開發與應用研究」，工業污染防治，經濟部工業局，2018 年。

7.陳志成，「107 年度垃圾焚化廠焚化底渣除氯與氯離子回收再利用技術可行性評估計畫」，苗栗縣政府環境保護局專案計畫成果報告，2019 年。

8.蔡政鴻，「合成及天然沸石之銨離子吸附能力」，碩士論文，國立台灣海洋大學應用地球科學研究所，2007 年。

9.吳雅雯，「水熱合成方沸石之離子吸附研究」，碩士論文，國立成功大學資源工程系，2009 年。

10. 劉錡樺，「水處理污泥轉換活性碳—沸石複合吸附材料之研究」，碩士論文，國立中央大學環境工程研究所，2010 年。

11. 黃子光,「下水污泥灰合成中孔徑分子篩及表面改質吸附重金屬之研究」,碩士論文，國立中央大學環境工程研究所，2010 年。

12. 陳雅馨，「利用水處理污泥轉換活性碳—沸石複合材料同時去除染料與重金屬之研究」，碩士論文，國立中央大學環境工程研究所，2011 年。

13. 盧柏雅，「利用淨水污泥灰與廢玻璃水熱合成鋁矽質中孔徑 MCM-41 之特性研究」，國立中央大學環境工程研究所，2012 年。

電弧爐煉鋼氧化碴應用於道路瀝青混凝土鋪面之推動成效

賴彥博*、鄭淑芬**、劉蘭萍***、林登峰****、黃群真*****

摘　要

鋼鐵工業是經濟發展的重要關鍵產業，而國內每年電弧爐煉鋼過程所產生的氧化碴約有 120 萬公噸，近年來由於幾起爐碴不當使用之事件，使得工程單位對爐碴(石)再利用產品品質缺乏信心而不願採用，致其應用管道受阻。為暢通電弧爐爐碴再利用產品通路，建立使用者信心，經濟部工業局於 105 年至 107 年擇定 6 段道路推動鋪築氧化碴瀝青混凝土之試辦工程，以驗證氧化碴粒料替代天然粒料應用於瀝青混凝土鋪面之成效，拓展氧化碴再利用產品用於公共工程之管道。

本文藉由探討氧化碴粒料之物理性質、膨脹性與品質，取代天然粒料進行密級配瀝青混凝土配合設計之結果，進而分析以配合設計之結果產製瀝青混凝土後鋪設於道路之路面平坦度、車轍、抗滑情形等工程成效與地下水水質變化情形，以評估應用於瀝青混凝土面層之工程成效及對環境之影響，經 3 年之試辦工程，已證明氧化碴瀝青鋪面之工程成效與天然粒料相當，期透過試辦工程之推動，除驗證使用之成效外，亦使工程單位於使用上有所依據並達到敢用、會用甚至一定要用之目標。

【關鍵詞】電弧爐煉鋼氧化碴、膨脹性、平坦度、車轍、抗滑

---

*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　協理

***財團法人台灣綠色生產力基金會　副執行長

****義守大學土木與生態工程學系　教授

*****經濟部工業局永續發展組　技正

一、前　言

鋼鐵工業是經濟發展的重要關鍵產業，舉凡製造業、營建工程、交通運輸及工商機具等皆與鋼鐵工業息息相關，國內鋼鐵業之煉鋼製程可分為以天然鐵礦砂為原料之一貫作業煉鋼，及以廢鐵為原料之電弧爐煉鋼，而電弧爐煉鋼產品又可區分為碳鋼與不鏽鋼，其以廢鐵、廢鋼為主要原料，經由電弧爐高溫熔煉後製成鋼材過程中所產生之爐石統稱為電爐爐(碴)石。

國外對於爐碴(石)之用途主要作為工程材料使用，而國內亦然，惟近年來幾起爐碴不當使用之事件，使得工程單位對電弧爐碴再利用產品品質缺乏信心而不願採用，致其應用管道受阻，為暢通電弧爐爐碴(石)再利用去化管道，經濟部工業局於 105 年至 107 年委託本會協助推動氧化碴瀝青混凝土鋪面試辦工程，並建立氧化碴再利用於瀝青混凝土正確使用方式，以拓展氧化碴再利用產品用於公共工程之管道。

本文分析電弧爐爐碴(石)產生源、特性、再利用情形與再利用管理機制，以及透過將氧化碴應用於瀝青混凝土之用途試鋪於 6 條道路，分析試鋪路段工程成效與地下水監測結果，驗證其使用成效與對環境之影響。

二、電弧爐爐碴(石)產生源、特性與再利用情形

1.產生源

國內現有 19 廠電弧爐煉鋼廠，其分布為北部 5 廠、中部 3 廠、南部 11 廠、東部 1 廠[1]，電弧爐煉鋼廠於電弧爐熔煉及精煉過程產生之爐碴分別為氧化碴及還原碴，其中氧化碴出碴程序多採自然風化及浸水冷卻之方式，使氧化碴冷卻後，進行破碴攪拌、吸浮等作業，電弧爐煉鋼製程如圖 1，電弧爐煉鋼氧化碴出碴程序如圖 2。經台灣鋼鐵工業同業公會(以下簡稱鋼鐵公會)統計國內電弧爐煉鋼廠每年產生之氧化碴約 120 萬公噸，還原碴約 40 萬公噸[2]。

2.氧化碴特性

(1)化學特性

依據鋼鐵公會統計 103 至 105 年各碳鋼廠氧化碴及 105 年各不鏽鋼廠氧化碴化學成分檢驗資料，碳鋼廠產生之氧化碴化學成分主要以氧化鐵、氧化鈣、二氧化矽為主；不鏽鋼廠之氧化碴化學成分則以氧化鈣、二氧化矽、氧化鎂、三氧化二鋁為主，其化學成分如表 1[2]。

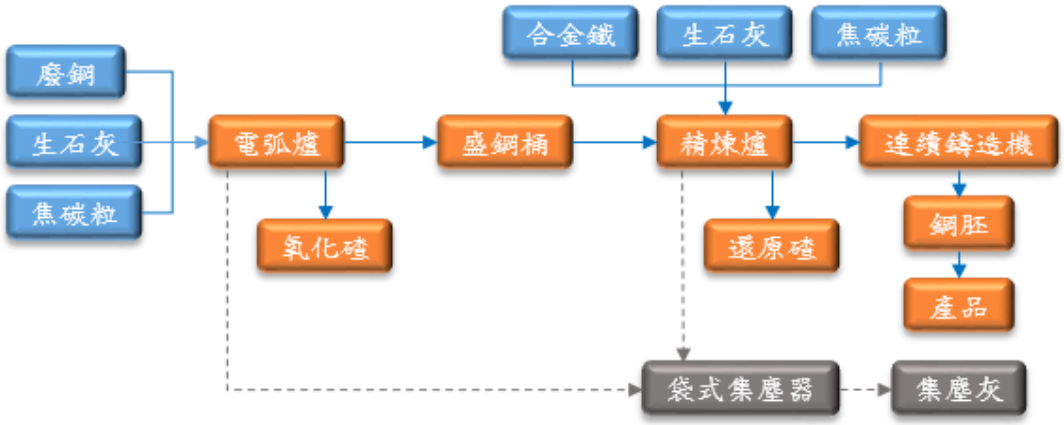


圖 1　電弧爐煉鋼製程程序

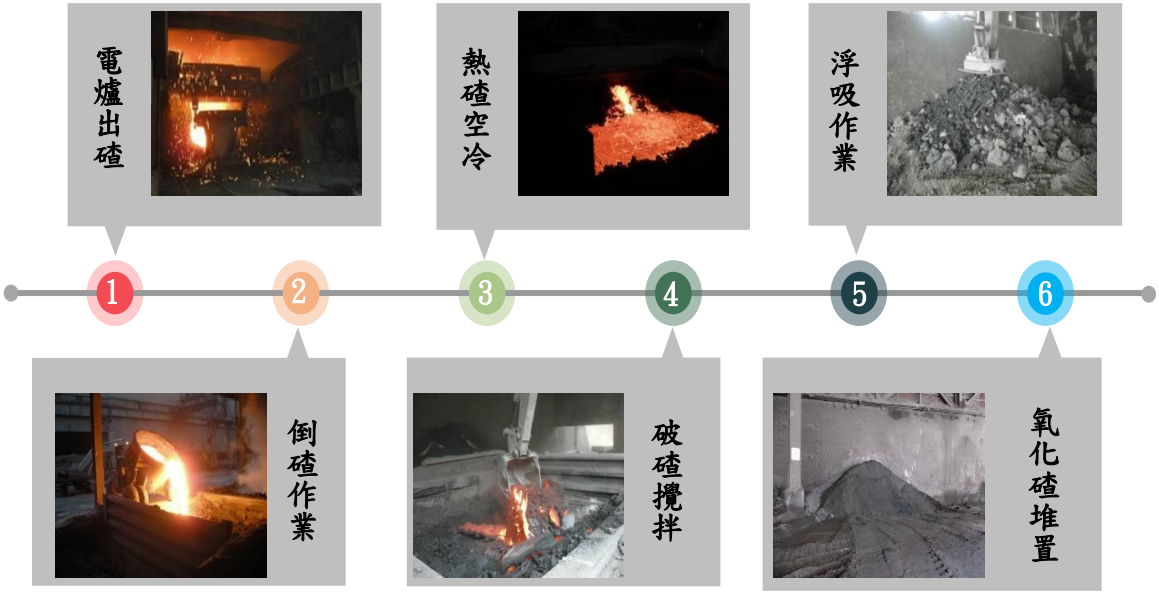


圖 2　電弧爐煉鋼氧化碴出碴程序

表 1　氧化碴化學成分分析[2]

化學成分	碳鋼碴含量(%)	不鏽鋼碴含量(%)
氧化鐵(Fe_2O_3)	20.10~38.19	0.38~0.52
氧化鈣(CaO)	23.39~37.44	26.1~39.72
二氧化矽(SiO_2)	13.81~20.43	22.56~34.60
三氧化二鋁(Al_2O_3)	2.69~11.27	4.12~5.58
氧化鎂(MgO)	1.89~9.98	4.90~12.40
氧化錳(MnO)	1.29~3.26	2.77~4.06
硫(S)	0.05~0.08	0.06~0.08
三氧化硫(SO_3)	0~0.16	0~0.03
游離氧化鈣(free-CaO)	0~0.16	0~0.16

(2)物理特性

氧化碴由多種礦物組成，具比重大、強度高、健度佳等特性，依據鋼鐵公會 106 年委託學術單位針對 12 家碳鋼廠之氧化碴檢測，其外觀、比重、吸水率、耐磨性、膨脹性等物理性質如表 2[2]。

表 2　氧化碴物理特性[2]

物理特性	說明
外觀	呈現黑色，以塊狀顆粒為主，次為粗顆粒，粉末狀之顆粒僅占少數，其粒型凹凸有菱角且表面粗糙多孔，孔隙結構複雜。
比重	金屬成分含量較高，比重介於 2.5～3.7 之間，平均值為 3.1，相較於一般天然砂石粒料之比重 2.5～2.7 為高。
吸水率	多孔隙，吸水率約 1.5～6.8%之間，平均值為 3.6，相較天然砂石粒料之吸水率 1.5～3.5%為高。
耐磨性	表面堅硬，其耐磨性高於天然砂石。
膨脹性	氧化碴較還原碴低，依「CNS15311 粒料受水合作用之潛在膨脹試驗法」檢測，檢測結果皆達低於 0.5%之法規要求。

3.爐碴再利用情形

經統計國內具再利用氧化碴資格之機構有 14 廠，其分布為北部 5 廠、中部為 3 廠、南部為 6 廠，主要再利用用途為將氧化碴再利用於控制性低強度回填材料(CLSM)原料、CLSM 粒料原料、鋪面工程之基底層級配粒料、瀝青混凝土粒料，再利用比例分別為 50%、31%、15%及 4%；還原碴則再利用於水泥生料原料、CLSM、回爐作為煉鋼熔劑使用，再利用比例分別為 31%、32%及 37%。

目前氧化碴之再利用多先經破碎、磁選及篩分等程序，以達工程材料所須之規格，有關氧化碴再利用產製粒料之流程如圖 3[2]，再利用程序說明如下。

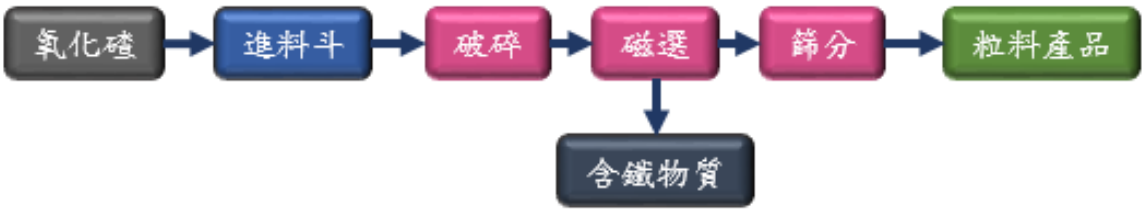


圖 3　氧化碴再利用產製粒料之流程[2]

(1)破碎：利用外力使較大塊之氧化碴碎裂，使其粒徑符合該工程所須。目前國內普遍使用機械破碎方式，利用破碎機具，以震動或槌擊等方式進行破碎。

(2)磁選：利用電磁原理以回收氧化碴之含鐵物質，例如：殘鋼。

(3)篩分：將完成破碎與磁選等程序之氧化碴，利用篩分機區分不同粒徑規格之氧化碴粒料。

經上述再利用程序產製之氧化碴粒料，依各再利用用途相對應之品質規範及其應檢測之項目進行檢測，並符合其品質之要求後，始得再利用於CLSM、鋪面工程之基底層級配及瀝青混凝土等用途，有關粒料品質規範如表 3[3、4]。

表 3　氧化碴粒料產品相對應之品質標準或規範[3、4]

再利用產品	品質標準或規範	品質應檢測項目
鋪面工程級配粒料	➢ CNS15358 公路或機場底層、基層用碎石級配粒料 ➢ CNS15305 級配粒料基層、底層及面層用材料 ➢ 公共工程施工綱要規範第 02722 章級配粒料基層 ➢ 公共工程施工綱要規範第 02726 章級配粒料底層	➢ 級配 ➢ 通過 0.075mm 篩之細粒料 ➢ C.B.R 值或 R 值 ➢ 細粒料液性限度 ➢ 細粒料塑性指數 ➢ 粗粒料洛杉磯磨損值 ➢ 含砂當量
CLSM 粒料	➢ CNS1240 混凝土粒料	➢ 級配 ➢ 細度模數 ➢ 有害物質：土塊及易碎顆粒、煤及褐碳、小於試驗篩 75 μ mCNS 386-1 材料含量、水溶性氯離子含量 ➢ 有機不淨物 ➢ 健度 ➢ 磨損率
瀝青混凝土粒料	➢ CNS15308 瀝青鋪面混合料用粗粒料 ➢ CNS15309 瀝青鋪面混合料用細粒料 ➢ CNS15310 瀝青鋪面混合料用鋼爐碴粒料 ➢ 公共工程施工綱要規範第 02742 章瀝青混凝土鋪面	➢ 級配 ➢ 塑性指數 ➢ 健度 ➢ 粒料中軋碎顆粒 ➢ 磨損率 ➢ 健度

三、電弧爐爐碴(石)再利用規定

電弧爐爐碴(石)為經濟部事業廢棄物再利用管理辦法附表再利用之種類[5]，電弧爐煉鋼廠與再利用機構得逕依其再利用管理方式規定再利用，目前經濟部工業局對於電弧爐爐碴(石)之再利用採產業自主管理、經政府/財團法人全國認證基金會(TAF)認證之實驗室檢驗，以及政府機關管理與監督等三級管理機制，其管理方式彙整表 4。

表 4　電弧爐爐碴(石)再利用管理機制

管理機制	管理方式
第一級：產業自主管理	1.產源事業端（煉鋼廠）：各類電弧爐碴分類貯存，定期檢驗有害特性；確認再利用機構提報之再利用產品銷售使用情形。 2.再利用機構端：再利用物料特性及產品品質管理。 (1)物料品質管理：不收受未分類之電弧爐碴或依法認定屬有害事業廢棄物者，並落實安定化處理及定期檢測膨脹量。 (2)再利用產出物品質管理：定期檢測戴奧辛及有毒重金屬溶出項目，每月檢測確認品質符合相對應之規範/標準。 (3)再利用產品流向管制：限制各產品銷售對象資格，避免轉賣及誤用；要求級配粒料產品出廠前應取得土地所有權人同意文件；要求申報產品營運紀錄及提報銷售對象及使用地點。
第二級：經政府/TAF認證(可)之實驗室檢驗	1.每年委託經環保主管機關認可之檢測機構檢驗電弧爐爐碴及再利用程序產出物之有害特性項目。 2.每月委託經TAF認證之實驗室檢驗電弧爐爐碴膨脹量及再利用產品品質。
第三級：政府機關管理與監督	1.確認及抽驗電弧爐爐碴膨脹量及再利用產品品質。 2.再利用產品之貯存及流向管理，以及查核產業運作之守規情形。

四、推動氧化碴應用於道路瀝青混凝土鋪面試辦工程

1.料源與材料性質分析

經濟部工業局近幾年來積極推動電弧爐氧化碴粒料運用於公共工程，自 105 年至 107 年期間已於桃園市龍潭區、彰化縣全興工業區與彰濱工業區，以及高雄市臨海工業區、林園工業區之 6 條道路試鋪氧化碴瀝青混凝土，試鋪使用之氧化碴為單一來源之電弧爐煉鋼廠，並將氧化碴委託具合格檢測資格之機構以毒性特性溶出程序(TCLP)檢測總鉛、總鎘、總鉻、總硒、總銅、總鋇、六價鉻、總砷、總汞等有毒重金屬、戴奧辛及 pH 值。

檢測結果符合規定之氧化碴運送至再利用機構經破碎、磁選、篩分產

製之瀝青混凝土粒料再委由財團法人全國認證基金會認證之實驗室，依「CNS 15310 瀝青鋪面混合料用鋼爐碴粒料」規定檢測級配、塑性指數、健度、粒料中軋碎顆粒、磨損率、膨脹量等[7]。另委由經環保主管機關認可之檢測機構檢測粒料之有毒重金屬、pH 值及戴奧辛，有關試辦工程之氧化碴瀝青混凝土粒料物性檢測結果彙整如表 5[1、6、7]。

表 5　氧化碴瀝青混凝土粒料物性檢測結果[1、6、7]

檢測項目			檢測方法	規範	檢測結果
品質	細粒料	級配	CNS 486 及 CNS 491	CNS15309 細粒料級配規定	符合 CNS 15309 表 1 細粒料之級配規定(級配稱號 1、3)
		塑性指數	CNS 5088	≦4	NP
		健度	CNS 1167	<15.0%(硫酸鈉法) <20.0%(硫酸鎂法)	1~1.4%(硫酸鈉法)
	粗粒料	級配	CNS 486 及 CNS 491	符合 CNS15314 之尺度	符合 CNS 15314 表 1 之級配規定(尺度稱號 67)
		粒料中軋碎顆粒	CNS 15312	≧40%	99%
		磨損率	CNS 490 或 CNS 3408	面層使用<40% 底層使用<50%	31%
		健度	CNS 1167	<12.0%(硫酸鈉法) <18.0%(硫酸鎂法)	0.3%(硫酸鈉法)
膨脹量	氧化碴細粒料		CNS 15311	≦0.5%	0.01~0.02%
	氧化碴粗粒料				0.32%

註：NP 表「無塑性」

2.瀝青混凝土配合設計

依據行政院公共工程委員會施工綱要規範「第 02742 章瀝青混凝土鋪面」規定，瀝青混凝土使用再生粒料時，其與天然粒料之組成比例，須依配合設計決定，惟再生粒料使用量不得超過全部粒料之 20%為限[3]。考量碳鋼氧化碴具較高之氧化鐵含量，其應用於瀝青混凝土鋪面較易使道路鋪面產生鏽蝕情形，倘以氧化碴細粒料作為瀝青混凝土之原料，可使瀝青油料完全包覆其表面，降低再利用於瀝青混凝土道路鋪面產生鏽蝕之情形，故於 105 年以小於 8 號篩(2.36 mm)之氧化碴細粒料進行物性試驗，其結果符合「CNS 15310 瀝青鋪面混合料用鋼爐碴粒料」之規範，並以氧化碴細粒料取代 30%天然砂石粒料之瀝青混凝土配合設計結果，亦符合公共工程施工綱要規範「第 02742 章 V10.0 瀝青混凝土鋪面」之密級配瀝青混凝土級配曲線規定，因此 105 年及 106 年氧化碴應用於瀝青混凝土推動

以瀝青混凝土添加 30%氧化碴細粒料作為配合設計之氧化碴添加量。

另依據 106 年高雄市政府工務局委託義守大學協助辦理之試鋪工程，其以不鏽鋼氧化碴細粒料取代 30%及 40%天然砂石粒料作為配合設計，工程成效良好[8]。此外，依 106 年南部某不鏽鋼廠委由中華鋪面工程學會協助辦理氧化碴瀝青混凝土廠內道路試辦工程，其以不鏽鋼氧化碴粗粒料取代 60%天然砂石粒料作為配合設計之氧化碴添加量，並經馬歇爾試驗結果得知，氧化碴瀝青混凝土相較天然瀝青混凝土除飽和度(VFA)略低，空隙率略高外，其餘流度值、穩定值、單位重、粒料間空隙率(VMA)均有明顯優勢。

107 年經濟部工業局為推動不鏽鋼氧化碴應用於瀝青混凝土試辦工程，參考上述相關試鋪工程經驗，以不鏽鋼氧化碴粗粒料 60%及細粒料 40%分別取代天然砂石粗、細粒料作為配合設計之氧化碴添加量。氧化碴密級配瀝青混凝土配合設計係以適當比例之氧化碴取代天然粒料，配合設計準則依循美國瀝青學會之馬歇爾方法(Mix Design Methods for Asphalt Concrete and other hot-min types,MS-2)[6]，進一步探討氧化碴瀝青混凝土性質，並藉由前述試驗獲得穩定值、流度值、單位重、空隙率、粒料間空隙率(VMA)、飽和度(VFA)，經由前述試驗結果決定最佳瀝青含油量，105 年至 107 年碳鋼氧化碴取代細粒料之最佳瀝青含量為 4.9-5%、不繡鋼氧化碴取代粗、細粒料之最佳瀝青含量分別 4.5%及 4.6%，詳細配合設計結果如表 6[1、6、7]。

表 6　氧化碴密級配瀝青混凝土配合設計試驗結果[1、6、7]

試驗項目	規範值	配合設計		
		不繡鋼氧化碴		碳鋼氧化碴
		細粒料 40%	粗粒料 60%	細粒料 30%
瀝青含量(%)	—	4.6	4.5	4.9~5.0
空隙率(%)	3~5	4.6	4.2	4.0
單位重(g/cm^3)	—	2.53	2.56	2.53
穩定值(kgf)	≧817	1,488	1,875	1,403~1,514
流度值(0.01 in)	8~14	8.5	8.5	13
粒料間空隙率 VMA(%)	≧12	13.8	12.6	13.3~15.9
飽和度 VFA(%)	65~75	66.3	65.5	71~74
建議拌合溫度範圍(℃)	—	167~173	167~173	154~160
建議夯壓溫度範圍(℃)	—	154~159	154~159	143~148

3.瀝青廠試拌試驗

為掌握氧化碴瀝青混凝土出料品質，於現場施工前依氧化碴瀝青混凝

土配合設計結果，進行廠內拌合試驗，將氧化碴瀝青混凝土粒料烘乾，水分控制於 1%以下，並針對尚未加入瀝青油料之粒料進行取料篩分析，確認粒料添加量是否與配合設計結果一致，最後加入瀝青油料拌合產製瀝青混凝土，檢測其拌合溫度及進行馬歇爾試驗，以驗證配合設計之結果，另依實務試拌經驗，氧化碴瀝青混凝土最佳含油量一般介於 4.3-4.4%之間，有關瀝青混凝土試拌試驗如圖 4 所示。

圖 4　氧化碴瀝青混凝土試拌試驗

4.地下水背景值監測

為確認道路鋪設氧化碴瀝青混凝土影響週遭地下水質之情形，於鋪築氧化碴瀝青混凝土前，於試鋪路段之上、下游設置地下水監測井，並依監測井地下水採樣方法(NIEA W103.53B)採取地下水水樣，檢測地下水之 pH 值及有毒重金屬(砷、鎘、鉻、銅、汞、鎳、鉛、鋅)，有關 105 年至 107 年試鋪路段之地下水經檢測皆符合地下水污染管制標準(第二類)及地下水污染監測標準(第二類)。

5.現場道路鋪設

現場鋪設則依公共工程施工綱要規範「第 02742 章瀝青混凝土鋪面」[3]之規定辦理，包含路面刨除作業，原路面刨除完成後之路面以清掃車清掃乾淨，並經現場工程司查驗是否達刨除深度，方可進行黏層噴灑作業；另觀察運送至現場之瀝青混合料，倘為塌平狀，即為用油量太多或粒料水氣過高，易使路面冒油及產生剝脫現象；若瀝青混合料表面呈現乾澀、粗糙或粗粒料瀝青包裹不均等現象，則因用油量太低或細粉料較多所致。瀝青混合料鋪設後，進行路面壓實作業，利用滾壓機將其壓實使體積縮小，降低其空隙率與提高密度，使氧化碴瀝青混凝土達至所需之穩定值，提高

路面耐久性。

105 年氧化碴瀝青混凝試鋪工程於桃園市龍潭區桃 68-1 線道，以刨 5 公分鋪 5 公分之施工方式進行鋪設；另 106 年氧化碴瀝青混凝土試辦工程於全興工業區興工路、工西二路及彰濱工業區彰濱路等 3 路段，以刨 10 公分鋪 10 公分及刨 5 公分鋪 5 公分之施工方式進行鋪設；107 年氧化碴瀝青混凝土試辦工程於臨海工業區中臨路及林園工業區工業三路等 2 路段，以刨 10 公分鋪 10 公分之施工方式進行鋪設。

氧化碴瀝青混凝土鋪設過程與傳統瀝青混凝土鋪設並無明顯差異，惟路面滾壓之壓縮比有些微差異，傳統瀝青混凝土之壓縮比為 1.16，以氧化碴粗粒料取代之瀝青混凝土之壓縮比為 1.18，另以氧化碴細粒料取代之瀝青混凝土之壓縮比為 1.20，且以氧化碴瀝青混凝土鋪設之路段，須延後 1~2 小時始得開放行車通行。有關氧化碴瀝青混凝土道路鋪設情形如圖 5。

圖 5　氧化碴瀝青混凝土試辦路段鋪設情形

五、氧化碴瀝青混凝土道路工程成效與地下水監測

1.路面工程成效監測

氧化碴瀝青混凝土鋪面施工品質之確認係委由具工程品質檢測能力之單位協助，監測項目包括抗滑能力、平整度、車轍、壓實度等，其監測方法彙整如表 7，現場監測情形如圖 6。其中平坦度之測試為檢驗及控制路面鋪面之平坦程度，其標準偏差規範值應小於 3.4mm；車轍試驗係為了解道路鋪面受交通荷重所產生之路面變形情況；而路面抗滑能力對於雨天路面濕滑為其重要，抗滑試驗 BPN 值越大，抗滑能力越好，行車安全之摩擦係數規範值需大於 55 BPN。

105 年至 107 年氧化碴瀝青混凝土鋪面試辦工程路段經工程完工監測，平坦度標準偏差介於 1.3-2.99mm 之間，無明顯車轍、抗滑介於 59.5-87.5 BPN 之間，其皆符合規範值，有關 105 年至 107 年試辦工程之成效監測結果彙整如表 8[1、6、7]。

表 7　試辦路段路面工程成效監測項目與方式

監測項目	監測方式
平坦度	利用高低平坦儀量測道路縱向平坦度標準差或依據 ASTM E 1926-98 進行國際糙度指標(IRI)量測。
車轍	利用三米直規量測道路橫向車轍深度。
抗滑	以英式擺錘方法試驗鋪面、道路表面的抗滑磨擦力(BPN)
壓實度	利用鑽心試體進行瀝青混凝土壓實度檢測。

▲平坦度試驗　▲車轍試驗　▲抗滑試驗　▲鑽心試驗

圖 6　氧化碴瀝青混凝土鋪面工程成效監測

表 8　試辦路段路面工程成效監測結果

監測項目 / 年度及粒料類別		平坦度(高低標準差)(mm)	平坦度(IRI)(mm)	抗滑(BPN)	車轍(mm)	壓實度(%)
105 年	碳鋼氧化碴細粒料(30%)	1.3	—	87.5	無	—
106 年	碳鋼氧化碴細粒料(30%)	—	2.99	60.5	無	—
107 年	不鏽鋼氧化碴粗粒料(60%)	1.85-2.15	—	70~71	無	96.03-98.66
	不鏽鋼氧化碴細粒料(40%)	2	—	59.5	無	100.01

註：「—」表當年度未進行檢測。

2.試鋪後地下水監測

為了解道路鋪築氧化碴瀝青混凝土對於週遭地下水之影響情形，針對試鋪路段連續監測地下水 5 年，監測項目包含 pH 值及重金屬(砷、鎘、鉻、銅、汞、鎳、鉛、鋅)，試鋪後之前 2 年採每季辦理 1 次地下水監測，若結果符合規定，第 3 年起改以每半年監測 1 次。

105 年至 107 年氧化碴瀝青混凝土鋪面試辦路段皆持續辦理地下水監測作業，以 106 年全興工業區氧化碴瀝青混凝土鋪面試辦工程為例，其迄今檢測結果皆符合地下水污染管制標準(第二類)及地下水污染監測標準(第二類)之規定如圖 7。

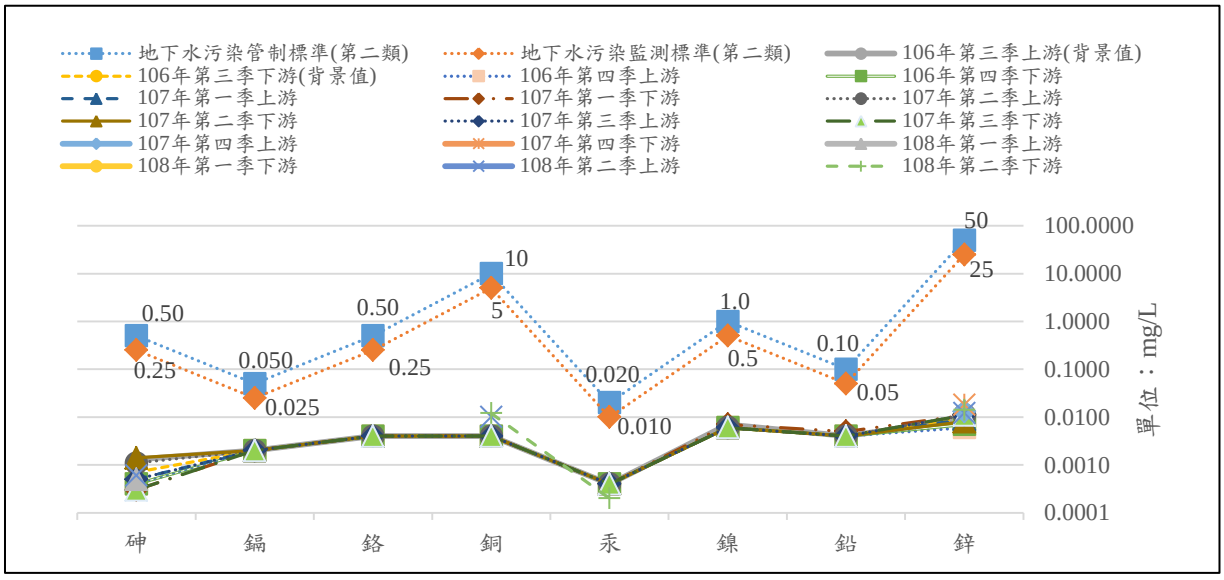


圖 7　全興工業區試鋪路段地下水監測結果

六、結　論

105 年至 107 年於 6 路段推動氧化碴瀝青混凝土鋪面試鋪工程，其使用之氧化碴瀝青混凝土粒料經物性試驗，符合「CNS 15310 瀝青鋪面混合料用鋼爐碴粒料」規範之瀝青混凝土粒料性質，且依馬歇爾試驗，亦符合瀝青混凝土配合設計之要求，並以碳鋼氧化碴細粒料取代 30%天然砂石細粒料，不鏽鋼氧化碴粗細粒料分別取代 60%、40%天然砂石粗、細粒料，監測路面工程成效，平坦度、抗滑、壓實度皆符合規範且無明顯車轍之現象，故氧化碴為適合用於道路鋪面之材料。另經監測試鋪路段週遭之地下水，其結果皆遠低於地下污染管制標準(第二類)及地下水污染監測標準(第二類)。

歷經 3 年試辦工程之推動，已證明氧化碴瀝青鋪面之工程成效與天然粒料相當，並於試辦過程中建立氧化碴粒料之使用程序，已納入鋼鐵公會所編撰之電弧爐煉鋼氧化碴瀝青混凝土鋪面使用手冊中，期能提高工程單位使用氧化碴之意願，達到敢用、會用甚至一定要用的目標。展望未來，透過氧化碴瀝青混凝土試辦工程經驗，大量推廣使用煉鋼業產生之氧化碴，以達廢棄物循環再利用，並提升廢棄物再利用產品之價值。

七、參考文獻

1.「資源再生產業推動及審查管理計畫期末執行成果報告」,經濟部工業局，105 年 12 月。

2.「電弧爐煉鋼氧化碴瀝青混凝土鋪面使用手冊」,台灣鋼鐵工業同業公會，107 年 5 月。

3.公共工程施工綱要規範第 02742 章 V10.0 瀝青混凝土鋪面，106 年 6 月。

4.國家標準(CNS)網路服務系統，網址：www.cnsonline.com.tw。

5.工業廢棄物清理與資源化資訊網，網址：riw.tgpf.org.tw。

6.「資源再生產業推動及審查管理計畫期末執行成果報告」,經濟部工業局，106 年 12 月。

7.「資源再生產業推動及審查管理計畫期末執行成果報告」,經濟部工業局，107 年 12 月。

8.「推動氧化碴瀝青混凝土鋪築道路成果案例分享」，林登峰，106 年 12 月。

嘉義縣鹿草焚化廠焚化灰渣熔融資源化之研究

陳詩婷*、陳盈良**、張根穆***、古渡周作****

摘　要

台灣都市廢棄物處理方式中，垃圾焚化為不可或缺的中間處理方式之一。台灣目前各縣市垃圾焚化廠產生焚化底渣大部分從焚化廠運至篩分處理廠進行回收再利用；焚化飛灰因具含有含有過量重金屬及戴奧辛等物質，依現行相關法規均採固化穩定化處理後掩埋處置。然而，飛灰採行固化穩定化處理後體積及重量均大幅增加(最大增重比可達 1.5 以上)，各縣市掩埋飛灰固化物之剩餘掩埋空間有限，即將面臨飽和，急需尋求其他因應方案。

106 年環保署補助嘉義縣政府環境保護局執行嘉義縣鹿草焚化廠焚化灰渣熔融資源化之研究，於 107 年 1-12 月在嘉義縣鹿草焚化廠旁設置日本直火乳化燃燒熔融爐試驗系統，針對鹿草焚化廠所產生之焚化灰渣(飛灰、底渣)進行熔融測試。本試驗系統採用獨特乳化燃燒技術，將重油與水充分混合為乳化燃料，降低燃料使用，有效提高燃燒效率，處理溫度高達 1,600℃，將焚化灰渣熔融下流洩至水中經水淬、固化成為玻璃質無害化熔渣。

本試驗系統為台灣首座焚化灰渣熔融爐模廠試驗系統試驗，建立台灣焚化灰渣熔融處理之相關本土化數據資料。旨在探討台灣焚化灰渣熔融處理最佳操作條件，並完成模組化設備現場試驗，確認焚化灰渣熔融處理後之無害化與減重、減容成效以及熔渣再利用的可行性。

【關鍵詞】焚化灰渣、熔融、熔渣、資源化、再利用

---

*台灣環境科技股份有限公司　副總經理

**國立成功大學資源工程學系　助理教授

***嘉義縣環境保護局　局長

****日本環境保全株式會社(JEP)　社長

一、前　言

為節約掩埋場空間並促進資源循環，都市垃圾焚化處理與焚化灰渣資源化已經成為目前廢棄物管理政策上重要的推動方向。然而由於都市垃圾來源複雜、組成變異性大、焚化爐操作狀況等因素之影響，使得焚化灰渣之特性變化很大，因此大幅增加再利用之困難。

雖然垃圾焚化處理具有減容、減重、去毒化、能源回收等優點，但焚化處理後產生的飛灰常含有重金屬、戴奧辛等有害物質，目前大部分仍然採用固化穩定處理後以掩埋進行最終處置。然而飛灰固化物之長期穩定性仍有許多疑慮，因而存在對於環境或人體健康之潛在危害風險；此外，焚化飛灰經固化處理後體積及重量均大幅增加，在掩埋空間日漸減少且新設掩埋場不易通過等因素下，尋求其他焚化飛灰資源化處理方法確有其急迫性。尤其以部分縣市目前營運中掩埋場之使用年限僅剩餘不到 3 年，未來垃圾焚化處理產出之飛灰與底渣當何去何從，實為現今必須審慎面對的迫切問題。

有鑑於此，台灣環境科技股份有限公司引進日本「直火乳化燃燒熔融爐系統」，與國立成功大學研究團隊合作執行「106 年嘉義縣鹿草垃圾焚化廠焚化灰渣熔融資源化之研究」計畫(以下簡稱為 106 年計畫)。本計畫為台灣首座焚化灰渣熔融爐模廠試驗系統，旨在探討台灣焚化灰渣熔融處理最佳操作條件，並完成模組化設備現場試驗，確認焚化灰渣熔融處理後之無害化與減重、減容成效以及熔渣再利用的可行性。並建立台灣焚化灰渣熔融處理之相關本土化數據資料，協助未來解決焚化灰渣處理問題，並開創台灣灰渣熔融處理之先河。

二、試驗方法與內容

(一)直火式乳化燃燒熔融爐系統介紹

熔融為熱處理法的一種，指固體受熱成為液體之現象。日本一般以 1,200℃以上高溫來熔融廢棄物，使有機物熱分解、氣化及燃燒，無機物熔融後冷卻固化，成為玻璃質或結晶質的固化熔渣，與原處理物相比約可減容 1/2-1/3。

本研究由台灣環境科技公司引進日本直火燃燒熔融系統，並協請日本 JEP 技術團隊來台進行熔融爐設置。設置地點為嘉義縣環境保護局鹿草垃圾焚化廠旁之空間，將針對其所產生之焚化飛灰與底渣細料進行現場熔融操作，

評估該直火燃燒熔融技術「無害化」、「減容化」效益，並完成操作成本估算。

JEP 二十幾年來致力於研究熔融技術，開發出符合市場需求之省能源、低成本的乳化燃燒器式小型高溫表面熔融爐。該熔融爐係以 A 重油*加水之油中水滴型乳化燃料為熱源，不須使用乳化劑即可將重油等液體燃料與水充份混合，並使用獨特乳化燃燒器的直接表面式熔融爐。JEP 採用獨特乳化燃燒技術，無需添加額外乳化劑，即可將重油等液體燃料與水充分均勻混合為乳化燃料，有效提高能源效率及爐內溫度，並縮減熱能損耗，大幅降低燃料費用與電費。熔融爐系統包括熔融爐本體、燃燒器、熱交換機、濾袋、旋風集塵機、煙囪、水淬室、熔渣水淬螺旋輸送帶等相關設備。「直火燃燒熔融爐主體」設備概略圖如圖 1 所示，分為上、中、下部。該實驗熔融爐系統設計之處理能力為 100 公斤/小時，所產生之熔漿以水淬水冷方式急速冷卻產生固化形成玻璃狀結晶熔渣，整套系統約佔地 200m^2。本研究在台灣的燃油選用與日本 A 重油成分相近之甲種低硫燃料油與柴油 1：1 的混合燃料。

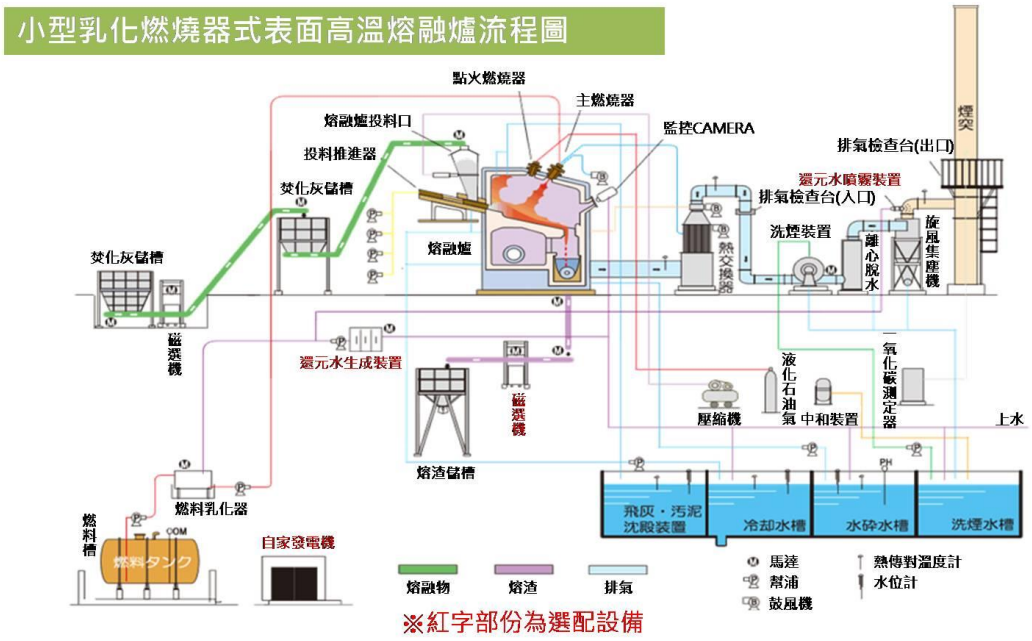


圖 1　直火式乳化燃燒熔融爐系統

(二)計畫團隊分工

圖 2 為計畫團隊與分工內容，計畫團隊主要由成大研究團隊進行計畫提案與實驗研究分析、日本環境保全株式會社(JEP)協助提供熔融系統設備與技術指導、達和公司協助現場模組化操作試驗，並由台灣環境科技進行計畫執行與整合。

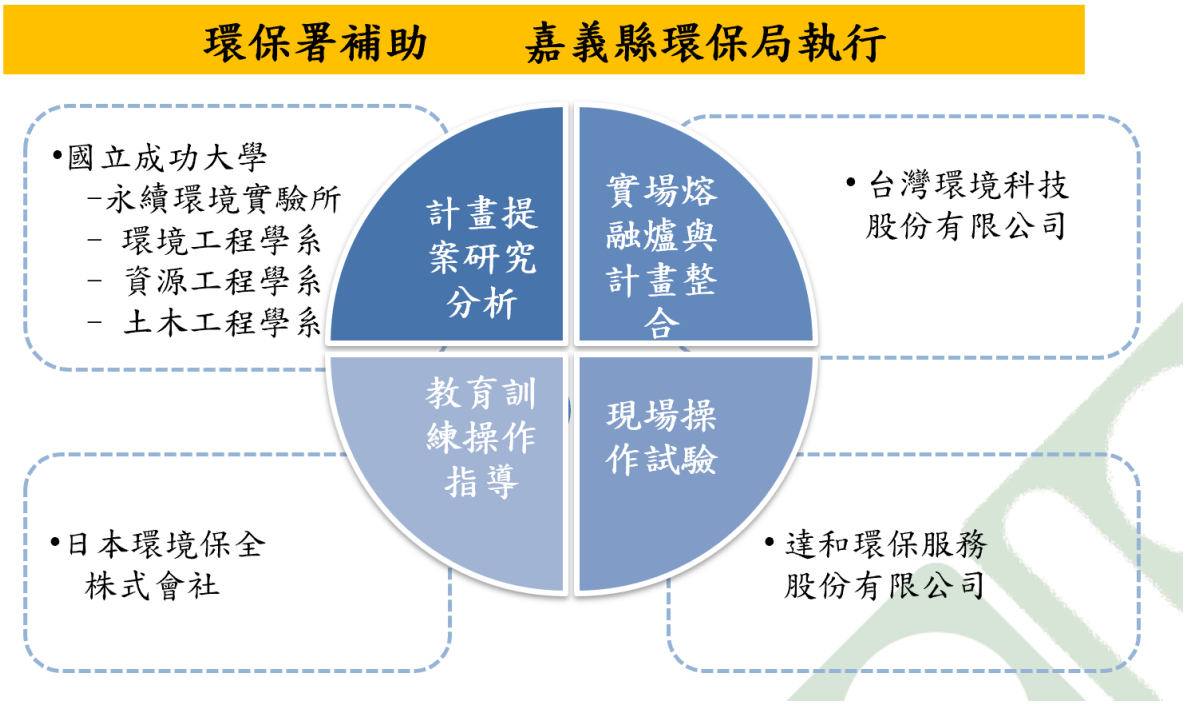


圖 2　計畫團隊與分工內容

(三)試驗內容

1.針對鹿草垃圾焚化廠焚化灰渣特性分析

本計畫以嘉義縣鹿草垃圾焚化廠產出之焚化灰渣進行特性分析。分析項目包括水分、灰分、熱值及重要元素分析。

2.評估鹿草垃圾焚化廠焚化灰渣熔融技術效能

(1)建立鹿草垃圾焚化廠焚化灰渣熔融最佳操作條

(2)針對焚化灰渣以及添加底渣等之配比之特性建立最佳之操作條件，包括最佳之操作溫度、操作時間、處理數量等。

(3)建置模組化設備進行實場測試

(4)建置焚化灰渣熔融之模組化設備，並進行實場測試。

(5)熔渣品質分析

針對產出之熔渣進行有害重金屬溶出量(TCLP)及戴奧辛進行分析，確保熔渣已轉化為安定化且無害化之固態熔渣。檢測之重金屬種類包括：汞、鉛、鎘、鉻、鋅、銅、鋇、砷、硒等。

3.評估熔渣之資源化應用方向

焚化灰渣經過高溫熔融形成穩定之玻璃質熔渣後，應具有作為工程材料應用之潛力，將針對熔渣進行材料特性分析，並評估作為道路基底層、混

凝土製品等資源化再利用可行性評估。

三、試驗結果

(一)鹿草焚化廠焚化灰渣之特性分析

本研究為了瞭解鹿草焚化廠焚化灰渣特性,首先針對焚化底渣、鍋爐灰、反應灰等 3 類樣品進行定期採樣分析(2-10 月),每次間隔約 1 個月,瞭解其物化特性與變異性。焚化底渣係焚化爐焚化後致殘留小部分灰及渣;鍋爐灰為焚化高溫尾氣經過鍋爐熱交換產生蒸氣時所附著的物質;反應灰為焚化廢氣離開鍋爐之後,先噴注消石灰乳泥中和廢氣中 HCl、SOx 等酸性氣體,並噴入活性碳粉末吸附重金屬與戴奧辛,隨後藉由袋濾式集塵器收集所有的粉塵顆粒即為反應灰。主要分析項目包含:外觀、烘乾容積密度、粒徑分布、水分、灰分、燒失量(loss on ignition,LOI)、元素組成(XRF)。

1.外觀與粒徑分布

圖 3 由左至右為底渣、鍋爐灰、反應灰樣品之照片。圖 4 為底渣、鍋爐灰、反應灰之粒徑分布。

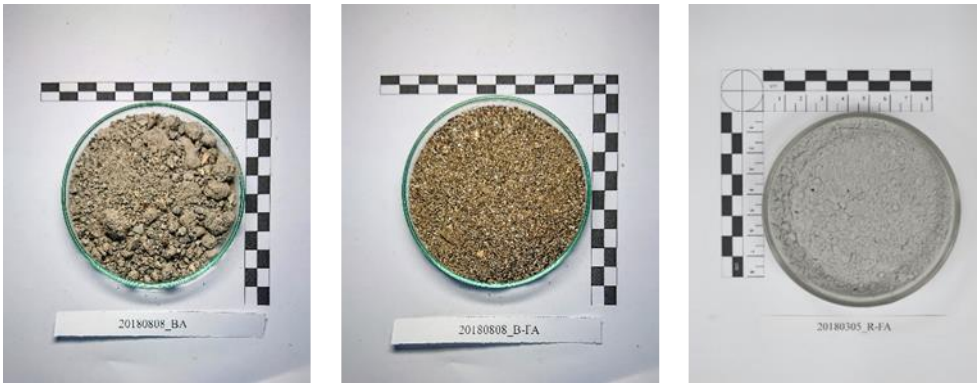


圖 3　底渣、鍋爐灰、反應灰樣品

(1)底渣

本研究採樣分析之底渣為未經篩分之樣品。由樣品外觀可發現,底渣之顏色為淺灰色至深灰色,粒徑尺寸大小不一,尺寸相對較鍋爐灰與反應灰大,在粒徑分布方面,底渣之顆粒尺寸主要集中於 0.6>9.5 mm 之間,總計共佔 80 wt.%。其中包含部分磚瓦碎片、金屬、未燃物等雜物,組成十分複雜。

(2)鍋爐灰

由樣品外觀可發現，鍋爐灰之顏色為黃褐色或灰色，粒徑尺寸小，在粒徑分布方面，鍋爐灰之顆粒尺寸主要集中於 0.075-0.6mm 之間，總計共約 81 wt.%。其中包含部分未燃碳、粉塵微粒、灰燼碎屑等。

(3)反應灰

由樣品外觀可發現，反應灰之顏色為淺灰色或深灰色，粒徑尺寸非常細小，反應灰之顆粒尺寸主要集中於 0.075-1.18 mm 之間，合計共 85 wt.%。其中包含部分未反應的消石灰以及活性碳等。

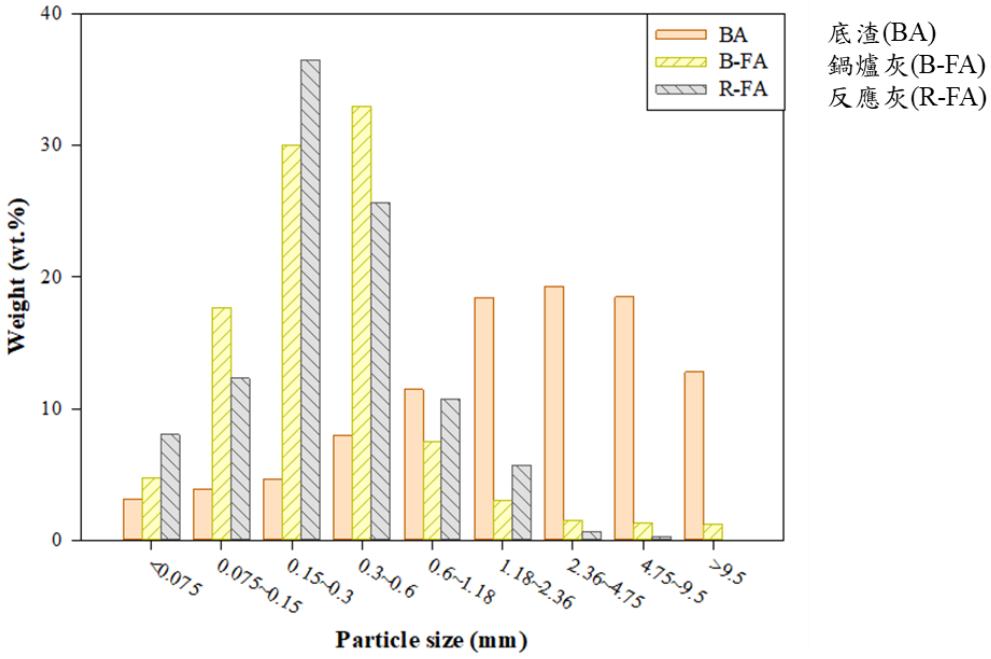


圖 4　底渣、鍋爐灰、反應灰之粒徑分布

2.烘乾容積密度

圖 5 為底渣、鍋爐灰、反應灰之烘乾容積密度之分析結果。底渣之烘乾容積密度介於 0.60-0.83 g/cm^3，平均值為 0.701 g/cm^3，其值高低變化主要受到水分含量與成分組成之影響。鍋爐灰之烘乾容積密度介於 0.47-0.65 g/cm^3，平均值為 0.533 g/cm^3，其值高低變化主要應受到其成分組成之影響。反應灰之烘乾容積密度介於 0.28-0.36 g/cm^3，平均值為 0.318 g/cm^3，其值高低變化不大。此3種之容積密度具有顯著差異，由小到大之順序為：反應灰<鍋爐灰<底渣。

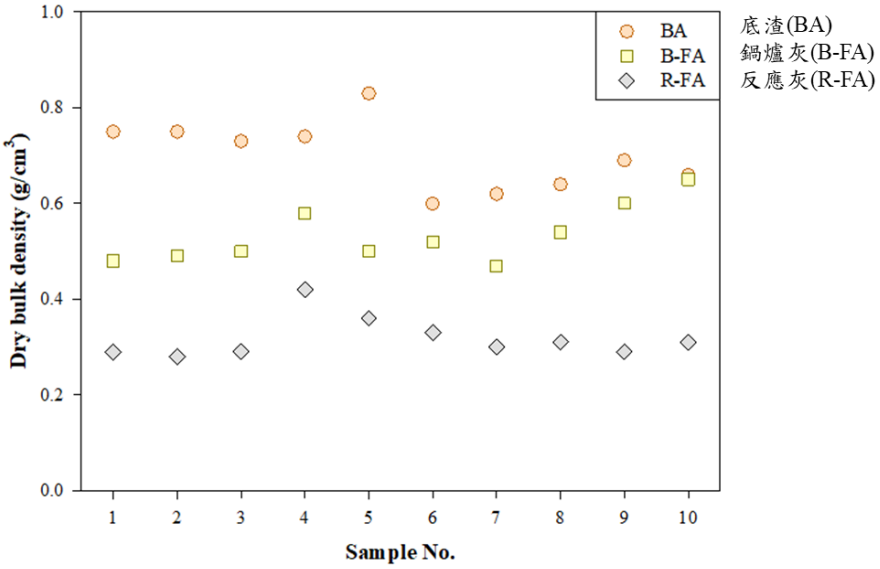


圖 5　底渣、鍋爐灰、反應灰之烘乾容積密度

3.水分、灰分、燒失量(loss on ignition，LOI)

圖 6 為底渣、鍋爐灰、反應灰之烘乾容積密度之分析結果。底渣灰分與燒失量之平均值分別約為 77.5 wt.%與 7.9 wt.%，水分含有 17 wt.%左右，燒失量可能來自於焚化過程中殘留的未燃物。鍋爐灰水分含量少，平均值為 1.4 wt.%，由於鍋爐灰為高溫燃燒產生，因此水分含量極低。其灰分與燒失量之平均值分別約為 93.5 wt.%與 5.2 wt.%，燒失量可能來自於焚化過程中反應不完全的未燃碳。反應灰水分含量僅為 0.84 wt.%；其灰分與燒失量之平均值分別約為 94.9 wt.%與 4.3 wt.%，燒失量可能來自於反應灰中的活性碳、礦物結晶水或化合水的脫除。

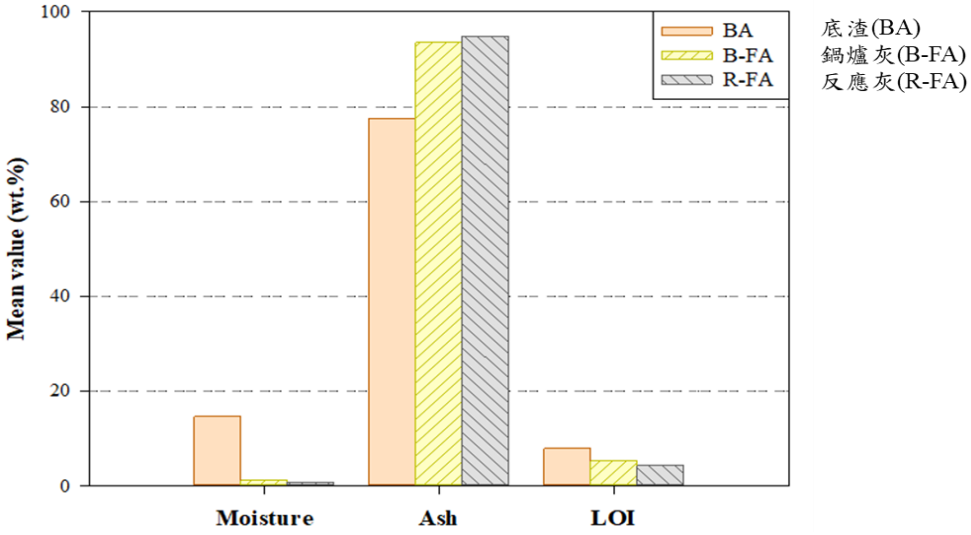


圖 6　底渣、鍋爐灰、反應灰之水分、灰分、燒失量

4.元素組成(XRF)

表 1 為 2-4 月底渣、鍋爐灰、反應灰之 XRF 分析結果。底渣之化學組成 Si 為底渣中主要元素，平均含量可達到 44 wt.%以上；含量次高的元素為 Ca，平均含量約為 27.2 wt.以上%。鍋爐灰之 XRF 分析結果。由表中可知，Si 與 Ca 為鍋爐灰中主要元素，平均含量分別可達到接近 30wt.%。其他主要元素包含 Al、K、Fe、 Cl 與 S。反應灰主要元素為 Ca，含量可達到 33.7 wt.%以上；含量次高的元素為 Cl，表示氯鹽含量極高。其他主要元素包含 K、S 以及 Si。重金屬方面，反應灰中可測得較高的 Zn 與 Pb。

表 1　2-4 月底渣、鍋爐灰、反應灰之 XRF 分析結果

項目	單位	2018/2/22			2018/3/5			2018/4/20		
		反應灰	鍋爐灰	底渣	反應灰	鍋爐灰	底渣	反應灰	鍋爐灰	底渣
水分	(%)	1.62	0.48	21.98	0.68	2.32	20.4	3.15	0.51	15.01
燒失量	(%)	7.97	4.32	15.24	5.22	8.77	7.25	0.83	11.63	5.87
灰分	(%)	90.41	95.20	62.77	94.1	88.21	72.35	96.03	88.21	79.12
Ca	(%)	37.81	33.84	30.7	>47.9	33.9	26.7	33.7	30.5	27.2
Si	(%)	1.31	33.36	>48.65	1.39	27.2	44	1.91	32.2	45.7
Al	(%)	-	10.24	12.94	0.49	9.79	14.5	0.16	12.8	15.6
Cl	(%)	>26.31	>6.17	1.292	>19.9	2.16	3.6	>28.7	>5.79	1.53
Zn	(mg/kg)	7,435	3,931	2,381	3,590	2,429	4,108	7,991	4,712	4,712
Pb	(mg/kg)	1,697	293	275	1,093	180	1,093	2,214	225	1,429
Cu	(mg/kg)	759	415	> 1,556	462	275	711	795	442	1,208
CaO/SiO_2		18.86	0.66	0.41	22.51	0.81	0.4	11.53	0.61	0.39

＊ 註：化學組成為XRF分析結果

＊ 註：分析數據from成大

(二)評估鹿草垃圾焚化廠焚化灰渣熔融技術效能

1.建立鹿草焚化廠灰渣熔融最佳操作條件

本試驗針對鹿草焚化廠焚化灰渣(底渣、飛灰)之特性，進行不同項目之批次試驗，藉由批次試驗瞭解不同項目最佳操作溫度與時間、處理數量等，並評估添加底渣細料之處理效能，用以作為建立鹿草垃圾焚化廠焚化灰渣熔融最佳操作條件之參考。表 2 為熔融實場進行各種批次與連續運轉穩定操作下之熔融溫度，共投料 5,654 公斤焚化灰渣，產生 3,439 公斤熔融熔渣。

表 2　各種批次與連續運轉穩定操作下之熔融溫度、熔渣數量、減重率、減容率

項次	熔融對象	熔融溫度(℃)	投料數量(kg)	熔渣數量(kg)	減重率(%)	減容率(%)
1	底渣未篩分	1,350	470	319	23	58
2	飛灰(一)	1,300	400	271	33	72
3	飛灰混合底渣(4：1)	1,330	525	318	40	68
4	飛灰(二)	1,320	580	383.9	34	70
5	反應灰	1,420	415	234	44	72
6	飛灰固化穩定物	1,350	465	194	59	82
7	飛灰混合底渣(1：1)	1,250	2,799	1,720	30	63

2.實場熔融減重、減容、無害化效果

(1)減重效果

表 2 可看出針對不同進料熔融處理後減重率為 23-59%。底渣減重率為 23%；飛灰減重率約為 33%；飛灰混合底渣(4：1)減重率為 40%；飛灰混合底渣(1：1)減重率為 30%；反應灰減重率為 44%；飛灰固化穩定物的減重率最高達 59%。底渣減重主要是水分蒸散與未燃物燒失等，而飛灰與反應灰之減重原因，主要是礦物分解或結晶水脫除、微量重金屬揮發等生成揮發性氯鹽(例如：NaCl、KCl 等)，除此之外，主要則來自於含氯化合物在高溫熔融過程中逸散至氣相。除了水分與二氧化碳之外，逸散至煙道氣體中的酸性氣體(例如：HCl)，以及少部分生成重金屬氯化物(例如：$ZnCl_2$、$CaCl_2$、$PbCl_2$ 或 Na_2SO_4 等，被分解而蒸發所致。一般在技術上均可藉由相關的空污防治設備加以捕捉並收集。而飛灰固化物因有加入穩定化藥劑、水及水泥混和，固化後增重最多致 1.5 倍。熔融之後包含大量水分散失、水泥水化物高溫分解，以及原來飛灰中氯鹽揮發等因素，因此減重率最高。

(2)減容效果

由於焚化灰渣熔融之後，熔渣的重量減少且容積密度上升，故總體積顯著減少，使得焚化灰渣經熔融處理後有良好的減容效果。表 2 可看出針對不同熔融進料，其減容率為 58-82%，亦即至少減容 50%以上，最高減容率可達 80%以上。

底渣減容率為 50%;飛灰減容率約為 61-74%;飛灰混合底渣(4:1)減容率為 68-72%；

飛灰混合底渣(1：1)減容率為 63%；反應灰減容率為 74%；飛灰固化穩定物的減容率最高達 82%。

(3)無害化效果

本研究針對不同熔融進料，委託成功大學研究團隊針對熔融後的熔渣進行熔渣特性分析以及 TCLP 溶出試驗。各種進料在不同溫度下熔融後，其 TCLP 溶出液之 EC 值分析結果皆顯示可溶出的離子量顯著下降，表示熔渣具有較穩定的特性。研究團隊取樣 18 組熔渣進行 TCLP 重金屬溶出濃度分析，藉以確認熔融處理是否可將焚化灰渣轉化為安定、無害的固態熔渣。檢測項目包括：汞及其化合物(總汞)、鉛及其化合物(總鉛)、鎘及其化合物(總鎘)、鋅及其化合物、銅及其化合物、鉻及其化合物(總鉻)、六價鉻化合物、砷及其化合物(總砷)、硒及其化合物、鋇及其化合物。本計畫取樣分析之 18 組熔渣各項重金屬溶出濃度均遠低於法規標準。並委請 SGS 進行樣本之戴奧辛與 TCLP 試驗。

表 3 為彙整本試驗計畫中熔渣之相關分析結果，可確認各種焚化灰渣與配比經熔融處理後，熔渣皆無重金屬溶出之虞且戴奧辛業已完全破壞，故可確認熔渣已轉化為無害化且安定化之固態熔渣。

表 3　實場熔融熔渣檢驗次數與結果

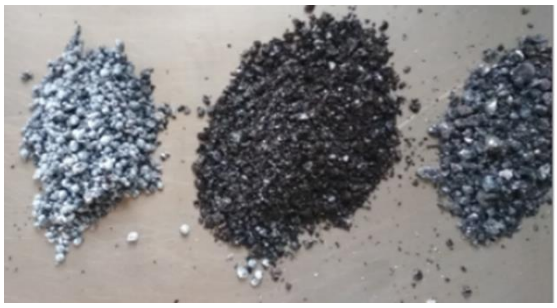
項目	熔融進料	熔渣取樣		熔渣檢驗項目		
				成大	SGS	
		取樣日	取樣溫度(℃)	TCLP	戴奧辛	TCLP
1	未篩底渣	2018/3/20	1,300	Pass	/	/
2	飛灰(一)	2018/3/22	1,200	Pass	Pass	Pass
			1,350	Pass	/	/
3	飛灰混合底渣(4：1)	2018/3/23	1,200	Pass	/	/
			1,350	Pass	/	/
4	飛灰(二)	2018/3/27	1,255	Pass	/	/
			1,317	Pass	/	/
		2018/3/28	1,400	Pass	/	/
5	反應灰	2018/3/28	1,455	Pass	Pass	Pass
6	飛灰固化物	2018/3/29	1,350	Pass	/	/
7	飛灰混合底渣(1：1)	2018/4/26 (00:00)	1,275	Pass	/	/
		2018/4/26 (06:00)	1,284	Pass	/	/
		2018/4/26 (12:00)	1,280	Pass	/	/
		2018/4/26 (18:00)	1,295	Pass	/	/
		2018/4/27 (00:00)	1,231	Pass	/	/
		2018/4/27 (06:00)	1,266	Pass	/	/
		2018/4/27 (12:00)	1,278	Pass	/	/
		2018/4/27 (18:00)	1,275	Pass	/	/
總計檢測次數				18	2	2

(三)熔融熔渣基本特性分析

本試驗將三種具代表性熔融後之熔渣(固化穩定物熔渣、飛灰混合底渣(1：1)熔渣與飛灰熔渣)交予成大研究團隊分析，分析項目包含外觀、粒徑分布、比重、吸水率、抗壓強度、膨脹率等相關材料特性以探討其功能性質，分析結果如下：

1.外觀

如圖 7 所示，固化穩定物熔渣為呈現灰白色，顆粒較圓潤無光澤；飛灰混合底渣(1：1)熔渣為呈現亮澤黑色，玻璃質脆性顆粒；飛灰熔渣呈現亮澤灰黑色，玻璃質棱角狀顆粒。



材料	顏色	晶體型態	光澤
穩定固化物	灰白色	圓角狀	無光澤
飛灰混合底渣（1:1）	亮澤黑色	非晶體	玻璃
飛灰	亮澤灰黑色	非晶體	玻璃

圖 7　固化穩定化物、飛灰混合底渣(1：1)、飛灰熔渣外觀

2.粒徑分布

按照 ASTM C136(CNS 486)粗細粒料篩析法對三種熔渣進行粒徑分析試驗，結果如圖 8。由圖 8 可見，固化穩定物熔渣熔渣主要由 2.38 mm(#8 篩) 顆粒組成，佔整體重量百分比 68%，其次為粒徑尺寸 1.19 mm(#16 篩)與 4.75 mm(#4 篩)，分別佔約 18%與 10%，合計超過固化穩定物熔渣整體重量 96%。飛灰混合底渣(1：1)熔渣的部份，主要粒徑亦集中在 #8、#16 與#30 號篩，分別佔比 33%、37% 與 19%，合計近 90%重量百分比。飛灰熔渣粒徑主要分佈在#4 篩到#30 篩之間，分別佔有 24%、31%、31%與 10%。由粒徑分析試驗可知，三種不同熔融條件產出之熔渣其粒徑分佈皆落於#4 篩到#30 篩之間，尤其集中在#8 與#16 篩此二粒徑。

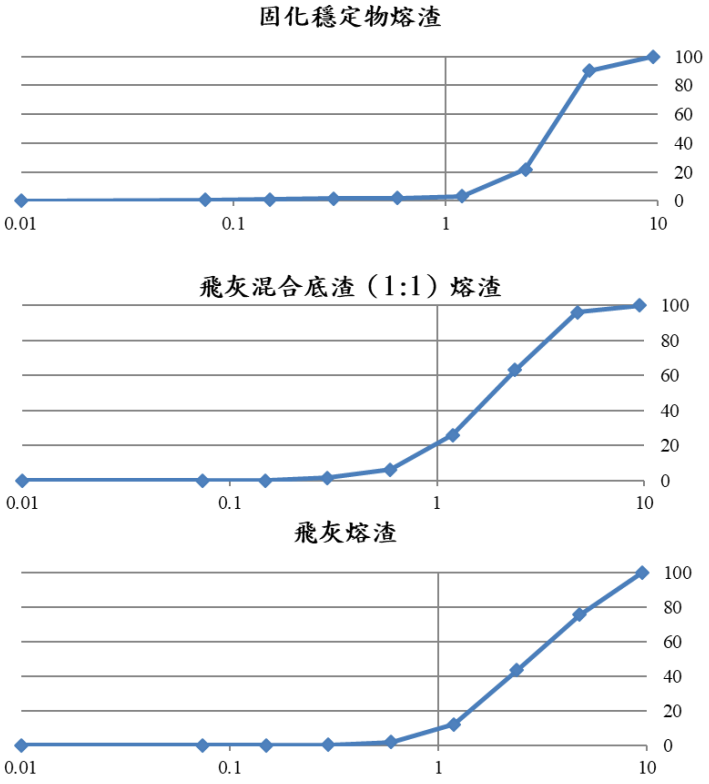


圖 8　固化穩定化物、飛灰混合底渣(1：1)、飛灰熔渣粒徑分布

3.比重與吸水率

熔渣比重與吸水率之試驗結果，表 4 為熔渣烘乾比重、表 5 為熔渣面乾內飽和比重，表 6 則為熔渣吸水率。其中飛灰混合底渣(1：1)熔渣與飛灰具有相似之比重約為 2.9，反之固化穩定物熔渣之比重相對較低僅為 2.78。在吸水率部份，固化穩定物熔渣比其他二種熔渣有高出 8~14 倍的吸水率，由外觀觀察可發現，飛灰混合底渣(1：1)熔渣與飛灰顯示表面緻密性之玻璃質顆粒，而固化穩定物熔渣為表面有明顯孔隙之圓形顆粒，因此可能為固化穩定物熔渣吸水率較其他二者為高之原因。

表 4　熔渣烘乾比重(OD)

熔渣	試樣烘乾重(g)	面乾內飽和重(g)	容器+水(g)	容器+水+試樣(g)	比重
固化穩定物	244.6	256.5	1,238.8	1,395.6	2.78
飛灰混合底渣(1:1)	94.8	95.4	1,238.8	1,302.0	3.00
飛灰	196.6	197.3	1,238.8	1,368.4	2.93

表 5　熔渣面乾內飽和比重(SSD)

熔渣	面乾內飽和重(g)	容器+水(g)	容器+水+試樣(g)	比重
固化穩定物	119.9	1,238.8	1,315.1	2.75
飛灰混合底渣(1:1)	98.1	1,238.8	1,303.2	2.91
飛灰	124.4	1,238.8	1,320.5	2.91

表 6　熔渣吸水率

熔渣	試樣烘乾重(g)	面乾內飽和重(g)	吸水率 (%)
固化穩定物	244.6	256.5	4.87
飛灰混合底渣(1:1)	94.8	95.4	0.63
飛灰	196.6	197.3	0.36

(四)評估熔渣之資源化應用方向

焚化灰渣經熔融資源化後，熔渣之再利用仍須考量對於環境之潛在影響。由於目前台灣對於焚化灰渣熔融資源化產出的熔渣並無特定法規予以規範，

現行可供參照之標準應以「垃圾焚化廠焚化底渣再利用管理方式」較為適宜。「垃圾焚化廠焚化底渣再利用管理方式」規範焚化再生粒料用途包含 8 種類別：(1)基地填築及路堤填築；(2)道路級配粒料底層及基層；(3)控制性低強度回填材料；(4)低密度再生透水混凝土；(5)瀝青混凝土；(6)磚品；(7)水泥生料；(8)衛生掩埋場覆土。但不得作為最終覆土；上述用途與目前設定之熔渣再利用途徑相近。焚化再生粒料標準共規範 4 大項目，包含：粒徑大小(≦19 mm)、毒性特性溶出程序(總鉛≦4.0 mg/L、總鎘≦0.8 mg/L、總鉻≦4.0 mg/L、總硒≦0.8 mg/L、總銅≦12.0 mg/L、總鋇≦10.0 mg/L、六價鉻≦0.20 mg/L、總砷≦0.4 mg/L、總汞≦0.016 mg/L)、戴奧辛總毒性當量濃度(≦0.1 ng I-TEQ/g)、雜質。有關熔渣之特性分析結果可知，本試驗各批次與連續操作之熔渣均可符合上述焚化再生粒料標準。

依照再利用用途與產品需求之品質條件，可添加一定比例之熔渣進行再利用，然實際上熔渣的前處理或添加比例需再進行驗證。同時，也可取代底渣再利用用途之可能性。建議可以進行熔融熔渣個案再利用計畫，確立熔渣再利用用途。

(五)焚化灰渣熔融處理與現有固化掩埋處理之比較

	固化掩埋	熔融處理	備註
處理成本	越來越貴	商轉機更有競爭力	試驗系統
環境安全	有害物質滲出汙染土壤	無害化	土壤汙染整治成本
掩埋空間	即將飽和，無處可埋	減容至飛灰穩定固化物 1/5	熔渣可資源化
新設掩埋場	設置成本、土地使用成本、管理成本、復育成本、環境監測成本、操作維護本、回饋金	不需	環境影響評估曠日廢時 民眾抗爭 不可能新設
將來性	無	可將固化物掩埋場活化 高值化資源化再利用	

四、結　論

台灣正面臨有害廢棄物無法有效及妥善處理之問題，根據日本經驗證實熔融為能使廢棄物無害化、減容、資源再利用之優良技術，若導入可解燃眉之急。106 年計畫為台灣首座焚化灰渣熔融爐模廠試驗系統試驗，建立台灣

焚化灰渣熔融處理之相關本土化數據資料。旨在探討台灣焚化灰渣熔融處理最佳操作條件，並完成模組化設備現場試驗，確認焚化灰渣熔融處理後之無害化與減重、減容成效以及熔渣再利用的可行性。依據執行 106 年計畫，結論如下：

1.減容化

不同焚化灰渣在 1,250～1,420℃(對應實際熔融溫度 1,400～1,620℃)下可完全熔融，並順利產生水淬熔渣減重率為 23-59%，減容率可高達 50-82%。

2.穩定無害化

熔渣之重金屬溶出濃度與戴奧辛物質皆遠低於法規標準。焚化灰渣熔融試驗結果已初步驗證其技術可行性，且產生的水淬熔渣已達無害化標準。

3.資源化

水淬熔渣係焚化灰渣高溫熔融熔漿掉落於水淬水槽中破裂為多孔隙細粒狀玻璃質熔渣。106 計畫針對熔渣外觀、粒度分布、比重、吸水率等相關材料特性進行分析，探討作為道路基底層骨材、瀝青混凝土、混凝土產品需求之品質條件，初步分析結果可添加一定比例之熔渣進行再利用。

4.取代飛灰固化掩埋之可行性

因掩埋成本持續增加，可能會高於焚化灰渣熔融操作成本。且飛灰固化掩埋還有長期有害物質滲出等環境污染問題以及群眾抗爭等無形社會成本。106 年計畫結果可提供焚化灰渣處理一個解決方案。

五、參考文獻

1.事業廢棄物貯存清除處理方法及設施標準，環保署，2006/12/14 修正。

2.「有關垃圾處理之防止戴奧辛類產生等準則(ごみ処理に係るダイオキシン類発生防止等ガイドライン)」，日本(原)厚生省，1997/1/28。

3.「戴奧辛類對策特別措置法(ダイオキシン類対策特別措置法)」，日本(原)厚生省，1999/7/16。

4.「焚化灰熔融爐基礎設計解説書」，日本環境保全株式會社，2015/4/13。

5.「垃圾焚化廠焚化底渣再利用管理方式」，2017 修正。

6.日本土壤污染對策法，日本環境省，2002。

還原碴廢棄物回爐改質為高應用價值氧化碴再生粒料之低能耗技術開發

林啟明*、何長慶**、凌宇康***、邱永承***、江謝立恆****、吳威德*****

摘　要

廢棄物循環再生之途徑往往取決於應用場合之需求與目的，而本論文鎖定之應用場合為電弧爐冶煉技術。根據世界鋼鐵協會統計台灣 2011-2017 年，以電弧爐製程所生產之粗鋼產量顯示，平均每年生產約 9.1 百萬噸，若生產 1 噸鋼約需製造出 0.025 噸的還原碴廢棄物，則還原碴廢棄物年生產量高達 22.75 萬噸，相當驚人。還原碴廢棄物擁有 40-60%的 CaO 與 5-20%的 MgO，導致與水反應時會產生嚴重膨脹有限制其再利用價值，但還原碴廢棄物所擁有的高 Free-CaO 與低熔點(<1,450^{o}C)特性，卻符合電爐脫磷造渣技術之優勢，故本研究期望透過回爐技術將不穩定還原碴廢棄物改質為較高穩定性的氧化碴再生粒料，並建立低能耗電爐造渣技術與達到廢棄物減量之目的。

本研究取至電爐鋼廠所生產之 $CaO\text{-}SiO_2$ 基、$CaO\text{-}Al_2O_3$ 基與 CaO-MgO 基等 3 種廢棄還原碴進行再利用率為 50%之改質回爐試驗，結果顯示脫磷率可達 47.0~59.3%，符合應用於鋼廠生產鋼筋等級之產品，此外經脫磷改質後之氧化碴再生粒料的 Free-CaO 含量從改質前的 4.2~5.2%下降至 0.9~1.1%，下降率高達約 79%。本研究透過 ASTM-D4792 的膨脹試驗得知經改質後的氧化碴再生粒料其膨脹率低於 0.5%，符合 CNS15311 再生粒料膨脹限制規範。

【關鍵詞】還原碴廢棄物、回爐改質製程、脫磷率、Free-CaO 含量、再生粒料、CNS15311 膨脹規範

---

*國立中興大學金屬研發中心　博士級助理研究員

**嘉德技術開發股份有限公司　董事長

***皓勝工業股份有限公司　總經理與經理

****詠泰環保科技有限公司　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

還原碴廢棄物為精煉爐(LF)脫硫後的產物，其化學成份特性如表-1 所示，由表中顯示主要由 CaO、SiO_2、MgO 與 Al_2O_3 等氧化物所構成，且其中 CaO 含量為 44.5-58.4%，高於 EAF(16.9~54.0%)與 BOF(37.4-56.4%)爐碴[6]，導致含有較高的 Free-CaO 而限制其再利用價值。就結晶性而言，$CaO-SiO_2$ 基還原碴的主要結晶礦物相為 γ-C_2S 相，此 γ-C_2S 相是由高溫 β-C_2S 相轉換而來，在 β-C_2S 相→ γ-C_2S 相的過程中會產生近 10%的體積膨脹，而導致室溫 $CaO-SiO_2$ 基還原碴皆以粉末狀形態存在[7]。此外 CaO-MgO 基還原碴的主要結晶礦物相，除了 γ-C_2S 相外還包含 C_3MS_2 與 MgO 等相；$CaO-Al_2O_3$ 基還原碴的主要結晶礦物相，除了 γ-C_2S 相外還包含 C_3A 與 $C_{12}A_7$ 等相。

表 1　不同來源之還原碴成份特性表

References	Sources	Chemical compositions, wt%				
		CaO	SiO_2	MgO	Al_2O_3	T-Fe
Kriskova et al. [1]	Belgium	51.5	28.3	11.3	1.2	-
Shi and Hu [2]	Canada	57.0	26.8	3.2	5.2	1.6
Sheen et al. [3]	Taiwan	50.6	23.5	8.2	4.1	0.1
Salman et al. [4]	Belgium	58.4	30.3	7.4	1.3	-
Choi et al. [5]	South Korea	44.5	10.9	6.6	26.6	4.3

還原碴廢棄物的循環再利用來減少環境資源浪費及減少 CO_2 排放量，兩者被認為是維護環境的重要課題，因此已有些許學者將 LF 產生的還原碴利用一些方法填充於水泥中再利用[8-10]。然而煉鋼冶煉所產生的還原碴成份特性會因不同鋼廠與生產鋼種而異，再加上還原碴成份中有未充分反應完之活性-CaO (Free-CaO)與活性-MgO (Free-MgO)存在，使得將還原碴取代水泥中結合劑的方法仍有待研究，針對此因素近年來亦有些許學者將還原碴回收活化再利用[11-17]，Yoshie et al. 將煉鋼產生的還原碴回收並添加一定比例的 CaO 配合機械攪拌進行鋼液脫硫，其對照原脫硫劑配方仍有 70%脫硫能力[11]。Lin et al. 亦針對不同還原碴種類與補充物配比進行鋼液脫磷研究，結果顯示擁有相當優異的脫磷能力[18-20]，但目前文獻中並無學者針對還原碴廢棄物回爐再利用脫磷後的氧化碴產物，進行再應用特性評估，因此本研究之目的為將台灣電爐廠之 $CaO-SiO_2$ 基、CaO-MgO 基與 $CaO-Al_2O_3$ 基等三大還原碴廢棄物，進行還原碴：石灰＝1：1 的脫磷劑配方設計，並透過高溫下與 FeO 及 P 的安定化反應，轉為氧化碴產物，再針對氧化碴產物進行結

晶性、Free-CaO 含量、膨脹率等試驗，藉此將氧化碴產物再應用於瀝青混凝土當再生粒料使用，而達到無二次污染之循環經濟目標。

二、台灣還原碴廢棄物特性與處理現況

根據圖 1 的世界鋼鐵協會統計台灣 2011-2017 年之粗鋼產量與不同生產製程比例圖可知，電弧爐冶煉所生產之粗鋼年產量高達 909 萬噸，產值高達 150 億元左右，替廢鋼找到再生產品出路，但亦連帶造就近 22.7 萬噸的還原碴廢棄物。本計畫已針對台灣 11 家電爐廠之還原碴成份特性進行分析，如圖 2 所示，得知共分成 3 大類，第 1 類為 CaO-SiO_2 基還原碴，其 CaO+SiO_2 總量為 67~83%，並包含適量 MgO 與少量 Al_2O_3；第 2 類為 CaO-MgO 基還原碴，其 CaO+MgO 總量為 43-70%，並包含適量 SiO_2 與少量 Al_2O_3；第 3 類為 CaO-Al_2O_3 基還原碴，其 CaO+Al_2O_3 總量為 68~78%，並包含適量 SiO_2 與少量 MgO。

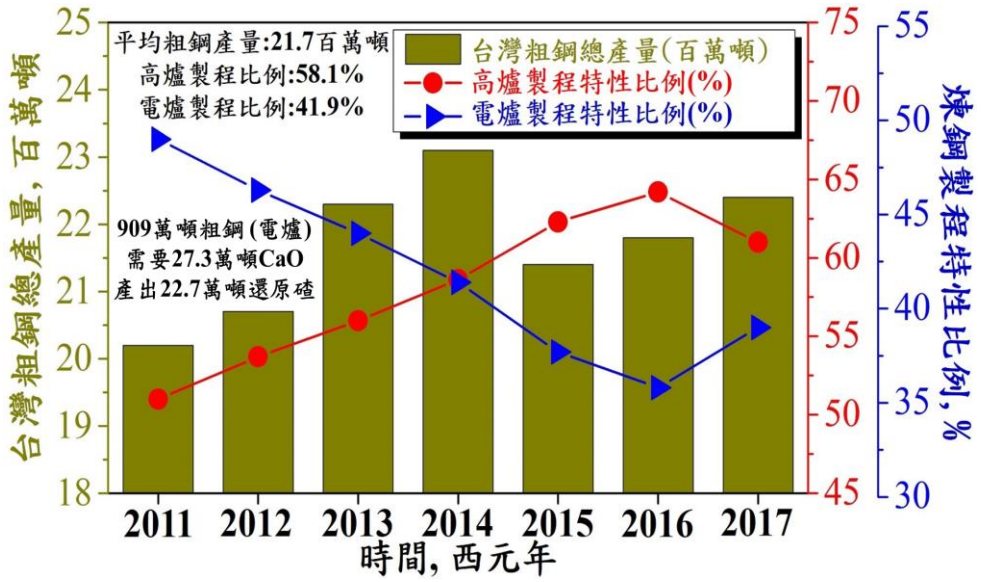


圖 1　世界鋼鐵協會統計台灣 2011-2017 年之粗鋼產量

還原碴廢棄物的再利用管道是目前台灣電爐廠迫切之需求，而目前台灣鋼廠在還原碴的處理方式主要都是委託台鋼資源進行高壓蒸氣安定化處理，然後應用於水泥製品上，僅有少數幾家電爐廠透過回爐技術進行去化處理。由於還原碴廢棄物的成份特性不一(如圖 2)，再者 Free-CaO 含量高，約為 1.3-5.2%，若使用高壓蒸氣進行安定化，則需要較長時間方能確保 Free-CaO 降至達到安定化狀態，為較耗能之再利用技術。本計畫期望能透

過回爐改質技術，將台灣電爐廠之 $CaO\text{-}SiO_2$ 基、$CaO\text{-}MgO$ 基與 $CaO\text{-}Al_2O_3$ 基等三大還原碴廢棄物，進行還原碴：石灰＝1：1 的脫磷劑配方設計，並透過高溫下與 FeO 及 P 的安定化反應，轉為氧化碴產物，再針對氧化碴產物進行結晶性、Free-CaO 含量、膨脹率等試驗，來評估是否符合再生粒料之 CNS15311 規範，最終再透過皓勝公司生產出符合規範之不同粒度的再生粒料產品，而達到無二次污染之循環經濟目標。本計畫之還原碴回爐改質技術開發理念示意圖如圖 3 所示。

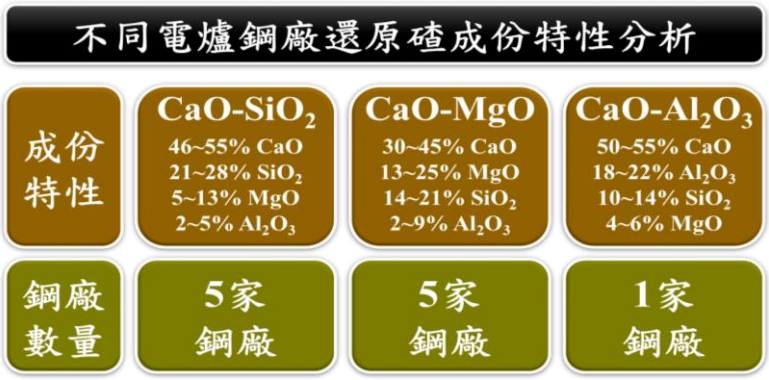


圖 2　不同電爐鋼廠之還原碴成份特性圖

圖 3　本計畫之還原碴回爐改質技術開發理念示意圖

三、還原碴廢棄物之再生流程與試驗方法

(一)還原碴廢棄物來源與成份特性

本研究所使用之3種不同還原碴廢棄物的化學成份特性如表2所示，由表中可知LF-1為$CaO-SiO_2$基還原碴廢棄物，擁有5.1%的Free-CaO含量；LF-2為$CaO-Al_2O_3$基還原碴廢棄物，擁有4.2%的Free-CaO含量；LF-3為CaO-MgO基還原碴廢棄物，擁有5.2%的Free-CaO含量。

表-2　本計畫所使用之不同還原碴成份特性表

Sources	Chemical compositions, wt%						Free-CaO %
	CaO	SiO_2	Al_2O_3	MgO	CaF_2	T-Fe	
LF-1	45.9	21.6	4.2	8.6	6.3	1.8	5.1
LF-2	44.1	17.5	3.4	17.9	2.6	2.3	5.2
LF-3	50.2	11.7	19.9	4.9	8.1	2.0	4.2

(二)高溫脫磷試驗

本研究之週波爐高溫脫磷試驗方法流程如圖-4所示。由圖中可知步驟-1是先將鋼筋放置於週波爐內，然後調整電流進行加熱至1,530°C；步驟-2是將預先秤好的FeP投入鋼液中進行P含量調整；步驟-3是進行0min的鋼錠取樣；步驟4是將預先秤好的再生脫磷劑投入溫度約1,530-1,580°C的鋼液中進行脫磷反應；步驟-5是進行10min的鋼錠取樣；步驟-6是進行0min與10min的鋼錠化學成份分析，最終得知不同再生脫磷劑配方之脫磷率。

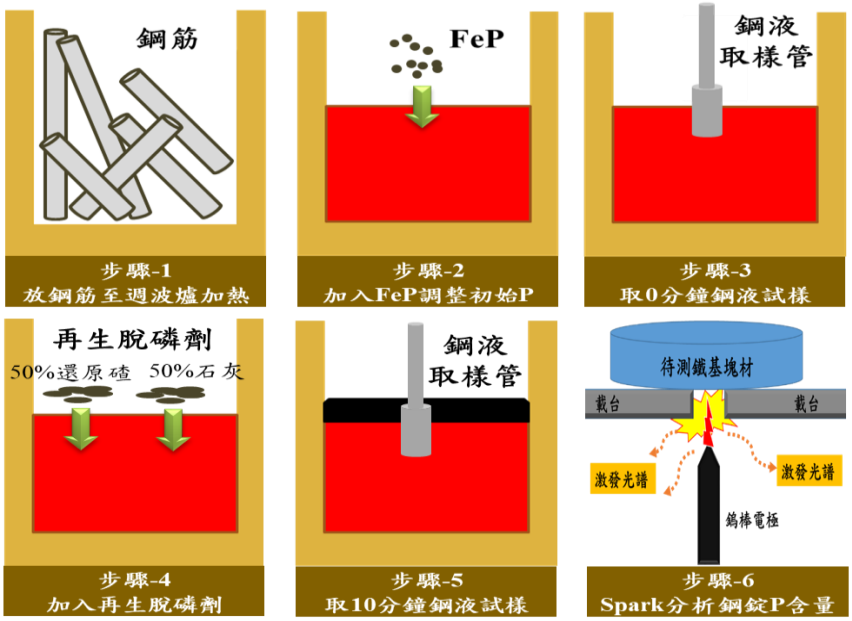


圖 4　週波爐之高溫脫磷試驗方法

(三)氧化碴產物之性質評估

1.化學成份分析

本研究會利用波長分散式X-ray螢光光譜分析儀(WDS-XRF)進行不同氧化碴產物中之CaO、SiO2、MgO、Al2O3、FeO、P2O5等氧化物的成份定量分析，其試樣之準備為將磨碎過篩，然後取約30g粒徑為75μm的粉末進行壓餅，並利用型號為Supermini200之WDS-XRF進行成份定量分析，藉此了解不同氧化碴產物之化學成份特性。

2. Free-CaO含量檢測

本研究之還原碴與氧化碴的Free-CaO含量分析流程如圖-5所示。本計畫是利用蔗糖法進行分析，其原理為利用蔗糖分子($C_{12}H_{22}O_{11}$)中的OH^-與Free-CaO接觸水後形成的$Ca(OH)_2$中的OH^-互溶後，形成可溶性的醣類$C_{12}H_{22}O_{11}\cdot CaO\cdot 2H_2O$，將$Ca^{2+}$離子萃取出來後，添加三乙醇胺作為隱蔽劑，再以KOH調整酸鹼性，最後以EDTA在pH值13的環境下進行滴定，EDTA與糖水中的Ca^{2+}離子螯合後，經方程式1計算之後即可得出爐渣中Free-CaO的百分比，反應式列於式方程式2-4。因經反應過後形成化合物的CaO無法形成$Ca(OH)_2$，故以蔗糖溶液無法溶解出OH^-，而無法得到其Ca^{2+}離子，因此，以EDTA溶液滴定時沒有Ca^{2+}離子與其螯合，故以此法所測得的Ca^{2+}離子只有CaO或$Ca(OH)_2$中的Ca^{2+}離子，可得到還原碴與氧化碴中Free-CaO的百分比。方程式1中，M表示EDTA濃度(M)，V表示EDTA滴定使用的體積(ml)，W表示樣品重量(g)。

$$CaO(\%)=\frac{M\times V\times 56.08}{W\times 1000}\times 100 \qquad \text{方程式 1}$$

$$CaO+H_2O=Ca(OH)_2 \qquad \text{方程式 2}$$

$$Ca(OH)_2+C_{12}H_{22}O_{11}=C_{12}H_{22}O_{11}\cdot CaO\cdot 2H_2O \qquad \text{方程式 3}$$

$$C_{10}H_{16}N_2O_8+C_{12}H_{22}O_{11}\cdot CaO\cdot 2H_2O=Ca(C_{10}H_{14}N_2O_8)+C_{12}H_{22}O_{11}+3H_2O \qquad \text{方程式 4}$$

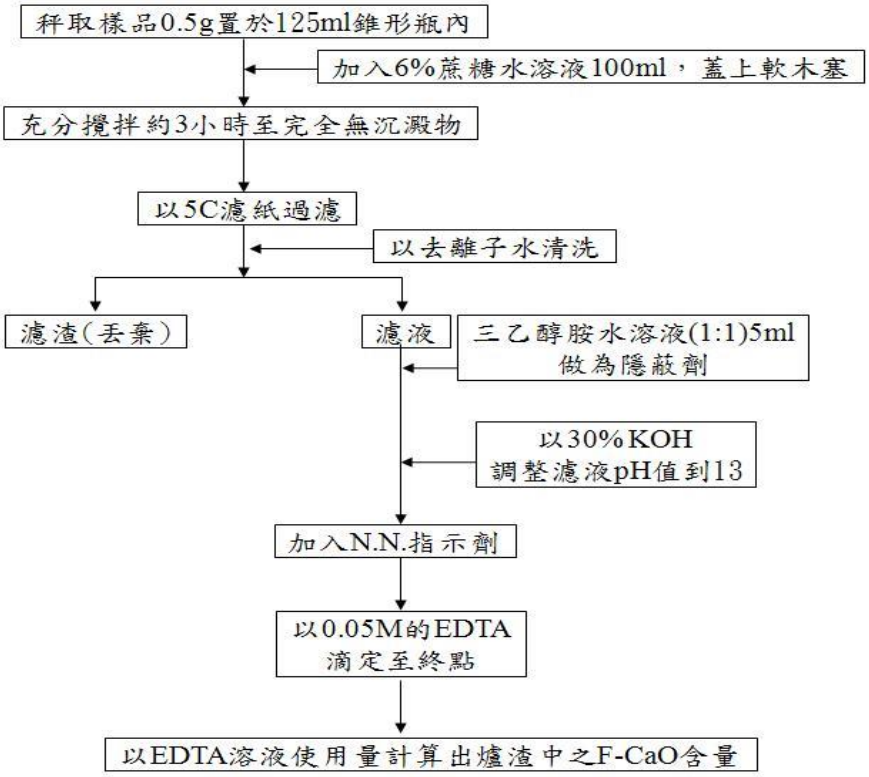


圖 5　爐碴進行 Free-CaO 含量分析之分析流程

3.組成相鑑定

本研究以 MXP-Ⅲ型的 X-ray 繞射儀進行不同還原碴與氧化碴之組成相鑑定分析，此儀器之靶材為銅靶，特性波長為 1.54056Å。儀器分析參數為工作電壓 40kV、工作電流 30mA、繞射速度 4°/min、繞射角度 2θ 由 20°~80°。利用 X-ray 繞射分析(XRD)可鑑定不同還原碴與氧化碴中存在的組成相與其晶體結構，藉此了解透過回爐脫磷後爐碴之組成相的變化情形。

4.組成相之容磷量評估

本研究會利用 JSM-IT100 掃描式電子顯微鏡(SEM)來觀察不同氧化碴之顯微結構特徵，並搭配能量分散式光譜儀(EDS)進行不同相區之元素成份半定量分析，藉此了解不同相區的容磷量特性而探究其脫磷率高低的原因。

5.膨脹試驗

本研究在膨脹試驗上是採用 CNS15311 粒料膨脹試驗規範，首先將(1)試驗的氧化碴經篩網篩出所需尺寸後，倒進膨脹釜中；(2)然後到適量高度後以加重物壓平，並以夯槌夯實；(3)重複數次 2 之步驟，直到爐碴平面到達基準點；(4)置放附有調整桿之有孔鋼板於鋼模內壓實試樣後，再

於鋼板上加足夠之載重板至 4.54 kg，並調整測微錶基準值；(5)鋼模連試體浸於(70 ± 3)℃之水中，使水分能夠自由進出試體頂面與底面，並於測試期間內保持水溫於(70 ± 3)℃，樣品置入熱水中 30 分鐘，此時相關試驗設備之熱膨脹效應已完成。讀取測微錶數值，此為測定樣品膨脹之「基準讀值」。每日添加熱水以保持樣品完全浸沒於水中，連續 7 天讀取測微錶讀數值，此為「每日讀值」，綜合上述之 1-5 的實驗步驟方法即完成 CNS15311 粒料膨脹試驗規範，最終期望氧化碴之膨脹率低於 0.5%而符合再生粒料規範。圖-6 顯示本研究執行 CNS15311 粒料膨脹試驗之流程圖。

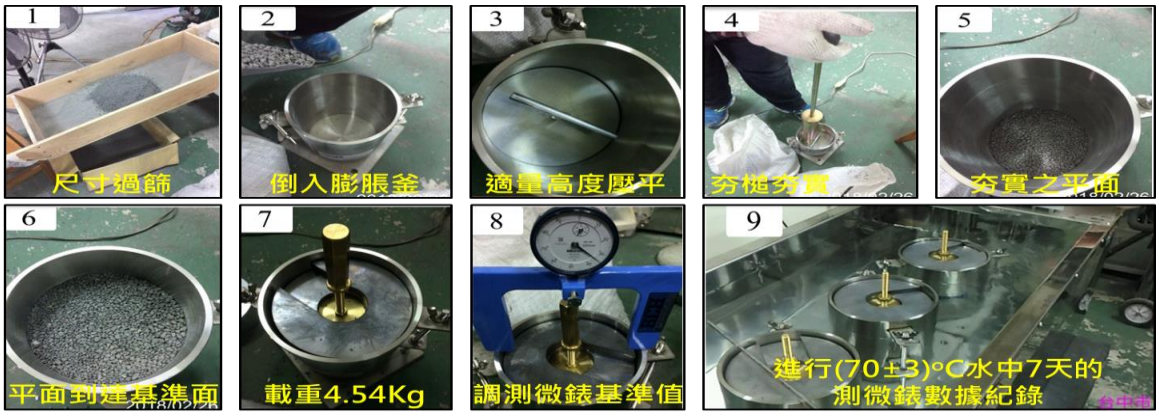


圖 6　本計畫執行 CNS15311 粒料膨脹試驗之流程圖

四、還原碴廢棄物回爐改質之成果說明

(一)高溫脫磷試驗結果

本研究已利用 1 公斤級週波爐進行不同再生脫磷劑配方之不同溫度下的脫磷試驗，其結果如圖 7 所示，由圖 7 的(b)-(d)可知再生脫磷劑經 4 分鐘反應後已全部液化，而由圖 7(e)的脫磷率結果顯示隨著溫度的增加則脫磷率隨之下降，且當脫磷溫度約為 1540^{o}C 時，則 3 組再生脫磷劑配方皆能擁有超過 50%的脫磷率。此外本計畫已透過圖 7(e)的結果進行運算，得知 3 組不同再生脫磷劑之溫度與脫磷率的關係式，如圖 7(f)所示，未來即可以透過這些方程式預估不同溫度下的再生脫磷劑之脫磷能力特性。

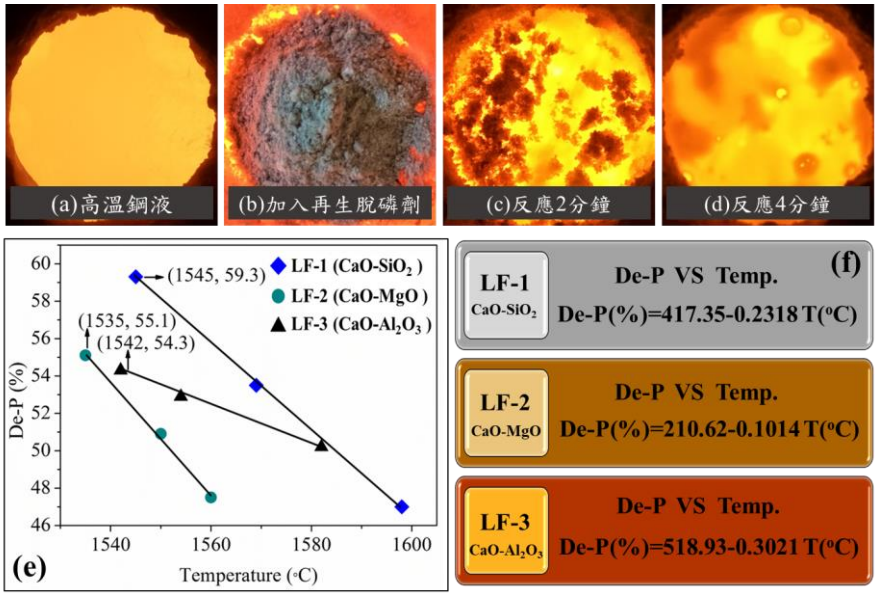


圖 7　再生脫磷劑之 1 公斤級週波爐脫磷試驗結果

本研究亦利用 50 公斤級週波爐進行不同再生脫磷劑配方之脫磷率驗證，其結果如圖 8 所示，由圖 8 的(d)~(f)可知再生脫磷劑經 6 分鐘反應後已全部液化，而由圖 8(g)的脫磷率結果顯示 3 組再生脫磷劑在反應溫度為 1550°C 下，亦皆可以達到 50%以上的脫磷能力，包含 $CaO\text{-}SiO_2$ 基擁有 54%；CaO-MgO 基擁有 53.1%；$CaO\text{-}Al_2O_3$ 基擁有 53.6%。圖 8(h)為還原碴廢棄物經脫磷改質後所生成之氧化碴產物。

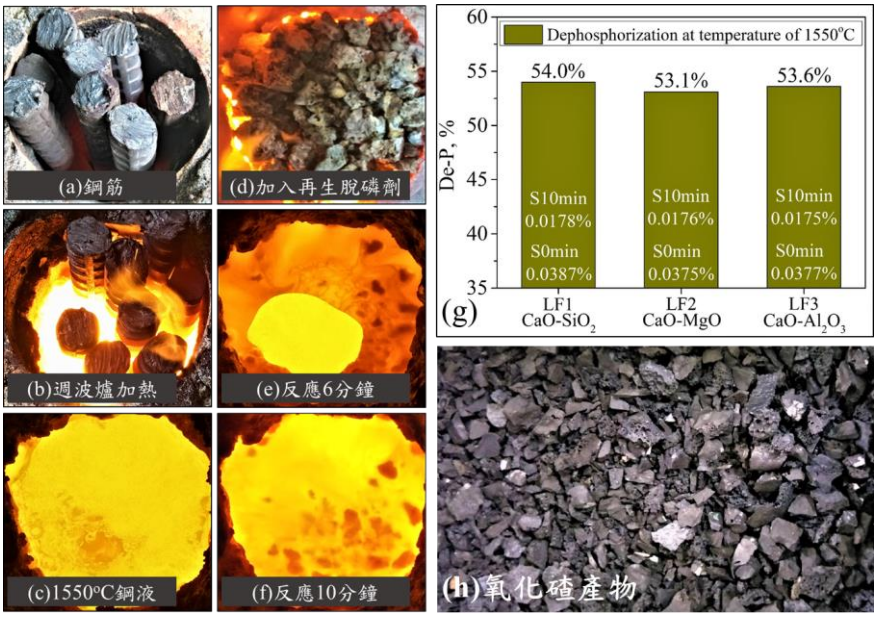


圖 8　再生脫磷劑之 50 公斤級週波爐脫磷試驗結果

(二)氧化碴產物之特性分析結果

本研究已利用波長分散式 X-ray 螢光光譜分析儀(WDS-XRF)進行不同氧化碴產物中之 CaO、SiO_2、MgO、Al_2O_3、FeO、P_2O_5 等氧化物的成份定量分析，其結果如表-3 所示，由表中得知不同還原碴廢棄物經回爐改質後之氧化碴產物皆為 40.2-44.5%FeO、24.4-25.8%CaO、7.9-8.6%SiO_2、17.6-21.7%Al_2O_3、3.6-5.5%MgO、0.5-0.6%P_2O_5 等氧化物所構成，且成份相當均勻。

此外本研究亦進行回爐改質技術之前後爐碴的 Free-CaO 含量比較，其結果如圖 9 所示，由圖中證實回爐技術確實可以有效將 Free-CaO 含量下降，從回爐前的 4.20-5.18%下降至回爐後的 0.94-1.03%，下降率高達 75.5-81.9%，為相當具有潛力之技術。

此外本研究亦針對回爐改質技術之前後爐碴的組成相進行鑑定，其結果如圖 10 與圖 11 所示，由圖 10 顯示 CaO-SiO_2 基還原碴主要由 C_2S 相所構成；CaO-MgO 基還原碴主要由 C_3S、MgO 與 CaO 等相所構成；CaO-Al_2O_3 基還原碴主要由 C_2S、$C_{12}A_7$、MgO 與 CaO 等相所構成，經回爐技術改質後之氧化碴產物的組成相(如圖 11)證實皆由 C_2S、C_2AS 與 FeO 所構成，改質後之組成相變得較單純且均勻。

表 3　不同氧化碴產物之化學成份特性

Oxidative slag	Chemical compositions, wt%						Free-CaO %
	FeO	CaO	SiO_2	Al_2O_3	MgO	P_2O_5	
LF1	41.3	24.4	8.4	21.7	3.6	0.6	1.03
LF2	44.5	24.5	8.6	17.6	4.2	0.6	0.94
LF3	40.2	25.8	7.9	20.1	5.5	0.5	1.03

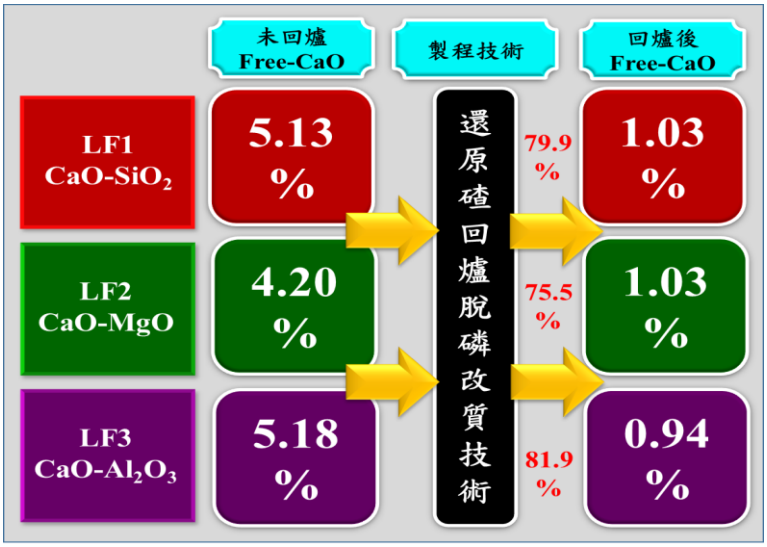


圖 9　還原碴廢棄物經回爐改質後之 Free-CaO 變化圖

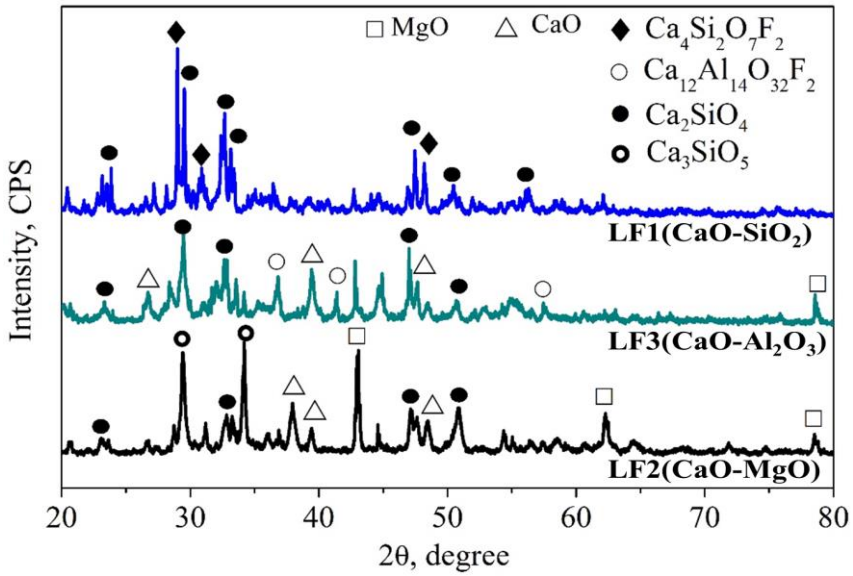


圖 10　不同還原碴廢棄物之組成相鑑定結果

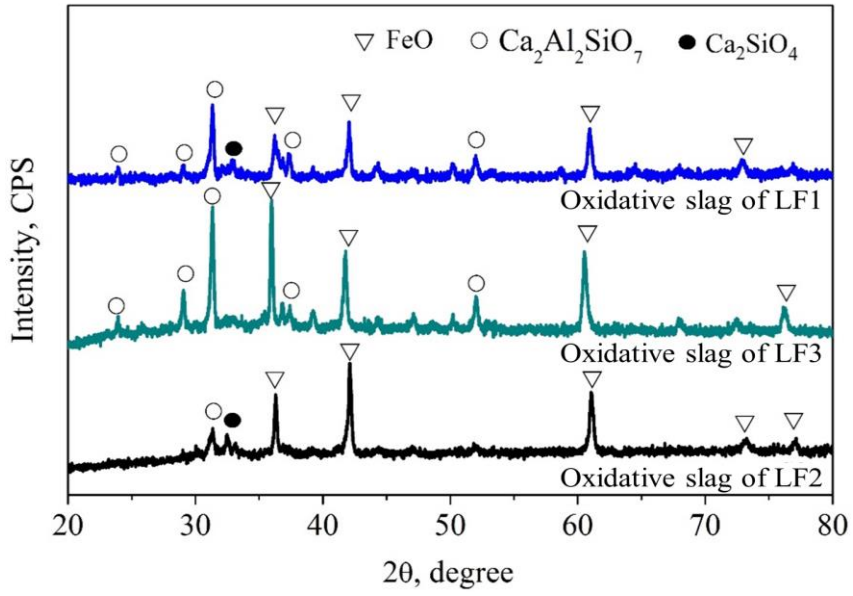


圖 11　不同氧化碴產物之組成相鑑定結果

本研究為了得知不同組成相對氧化碴之脫磷能力的影響，因此利用 SEM 之 EDS 進行不同組成相的容磷量評估。圖 12 顯示為 LF1 與 LF2 經回爐改質後氧化碴產物之 SEM-BEI 影像，由圖中顯示共分成 3 個相區，經 SEM-EDS 分析結果(如表 4)證實 Phase I 相區為 Fe_xO 相，完全無 P 含量；Phase II 相區為富 Ca 與 Al 的基底相區，完全無 P 含量；Phase III 相區為 C_2AS 相，包含約 0.3~0.4 的 P 含量，綜合圖 12 與表 4 的結果證實 C_2AS 相擁有較佳的容磷量。

本研究得知 C_2S 相擁有較佳之容磷量後，便進一步進行不同 CaO/SiO_2、Al_2O_3 與 FeO 含量對 C_2S 相之容磷量的影響探究，因此進行 15 個 C_2S 相區的化學成份半定量分析，其結果如表 5 所示，並將表 5 的數據進行整理後得知圖 13 的不同化學成份對容磷量之影響關係圖，由圖中可知當 C_2S 相中擁有 CaO/SiO_2 接近 2 且含少量 Al_2O_3(約 3.4%)與高量 FeO(22.3%)時，擁有最佳之容磷量，高達 0.67%，此外若 C_2S 相中擁有 CaO/SiO_2=2.45-2.72 且含高量 Al_2O_3=13.2-25.9% 與 FeO=8.5-16.3% 時，則擁有較佳之容磷量為 0.30~0.45%。

根據 Lee et al.的研究指出[21]電爐氧化碴因擁有較低的 CaO 含量而導致 Free-CaO 含量較低，具有較佳之安定性，如圖 14 所示，氧化碴的 CaO 含量約為 20-40%與 Free-CaO 含量約為 0.1-0.5%，相較還原碴的 CaO 含量約為 45-60%與 Free-CaO 含量約為 0.7-1.7%低很多，證實氧化碴確實具有較佳之安定性，因此本研究若可以透過回爐技術將還原碴改質為氧化碴，則可以有效安定化爐碴而開創出新的再利用路徑。

本研究已利用 CNS15311 粒料膨脹試驗規範進行還原碴與氧化碴之膨脹率試驗，其結果如圖 15 與圖 16 所示，由圖 15 的還原碴膨脹率顯示 Free-CaO 含量為 4.2%時，膨脹率高達近 5%，當 Free-CaO 含量低於 2.05%時則膨脹率約為 0.18%，符合 CNS15311 粒料膨脹試驗規範之膨脹率低於 0.5%，顯示並不是所有的還原碴皆無法直接再應用，只要用心分類與進行品管檢測，將可以達到有效去化還原碴之目標。

圖 16 的氧化碴膨脹率顯示 Free-CaO 含量低於 2.52%時，則膨脹率約為 0.021~0.027%，皆符合 CNS15311 粒料膨脹試驗規範之膨脹率低於 0.5%，顯示透過回爐技術，可將還原碴廢棄物(Free-CaO=4.20-5.18%)改質為膨脹率符合 CNS15311 粒料規範之氧化碴產物(Free-CaO=0.94-1.03%)，而順利將爐碴再生為不同尺寸粒料，並應用於瀝青混凝土細粒料與管溝回填用控制性低強度回填材料用粒料等之場合，而達到還原碴廢棄物循還再生且無二次污染之去化目標，其循環再生技術理念示意圖如圖 3 所示。

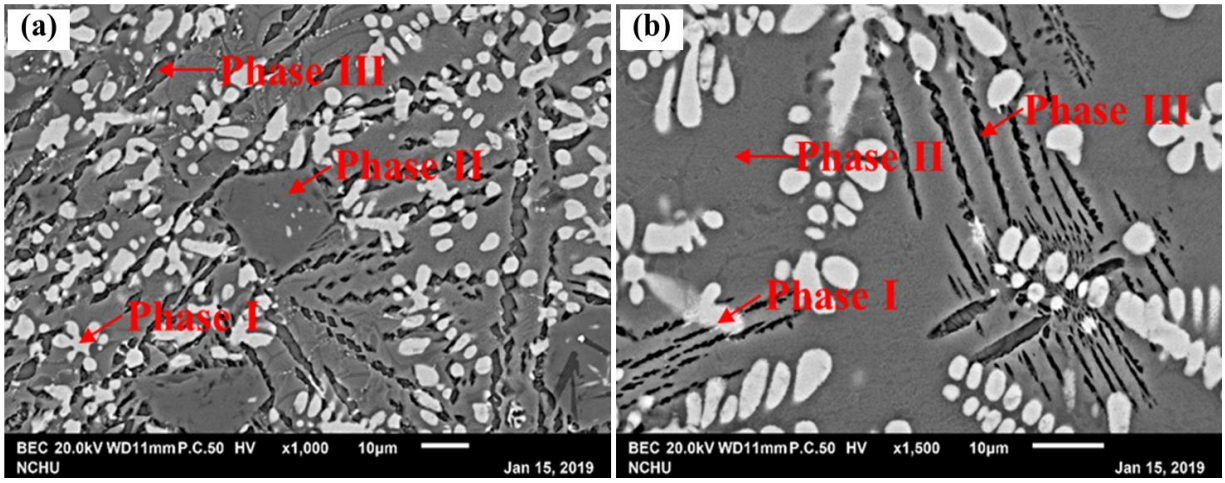


圖 12　SEM 之 BEI 影像圖：(a)LF1 氧化碴；(b)LF2 氧化碴

表 4　圖 12 中不同組成相之化學成份分析結果

Source	Phase	Chemical composition, at%						
		Ca	Si	Fe	Al	Mg	P	O
Oxidative slag of LF1	I-FexO	1.9	0.0	41.1	0.6	6.6	0.0	49.8
	II-Matrix	14.8	5.8	7.1	14.0	0.8	0.0	57.4
	III-C2AS	25.7	10.4	2.9	3.0	0.3	0.4	57.3
Oxidative slag of LF2	I-FexO	0.9	0.0	36.7	0.4	13.1	0.0	48.9
	II-Matrix	15.1	6.0	5.8	13.2	1.0	0.0	58.9
	III-C2AS	25.6	9.5	3.9	7.3	0.5	0.3	52.9

表 5　圖 12 中不同 C_2S 相區之化學成份分析結果

Point	Chemical composition, wt%					
	CaO	SiO_2	CaO/SiO_2	FeO	Al_2O_3	P
1	62.1	27.3	2.27	4.3	3.4	0.24
2	55.5	24.5	2.27	9.1	5.3	0.16
3	64.7	22.1	2.93	9.0	7.0	0.26
4	52.5	24.8	2.12	6.7	8.0	0.26
5	53.6	23.3	2.30	7.4	7.6	0.20
6	49.1	22.3	2.21	22.3	3.4	0.67
7	55.7	22.3	2.50	11.0	14.4	0.34
8	56.8	23.0	2.47	7.4	12.9	0.07
9	54.1	19.9	2.72	8.5	13.2	0.30
10	66.7	24.6	2.71	7.7	8.1	0.24
11	48.0	13.2	3.64	16.6	23.8	0.00
12	56.8	13.8	4.12	21.7	25.0	0.00
13	34.5	14.1	2.45	16.1	24.2	0.38
14	35.3	13.2	2.67	15.8	25.9	0.35
15	34.9	13.8	2.53	16.3	25.1	0.45

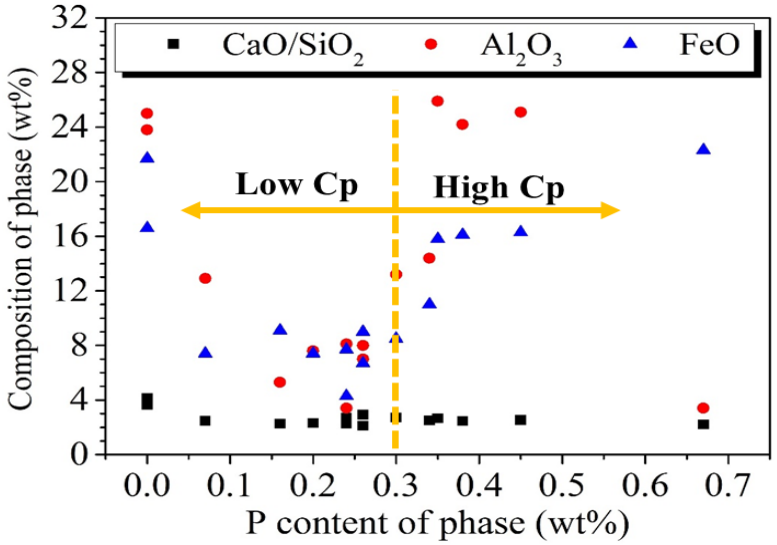


圖 13　C_2S 相中不同化學成份對容磷量之影響圖

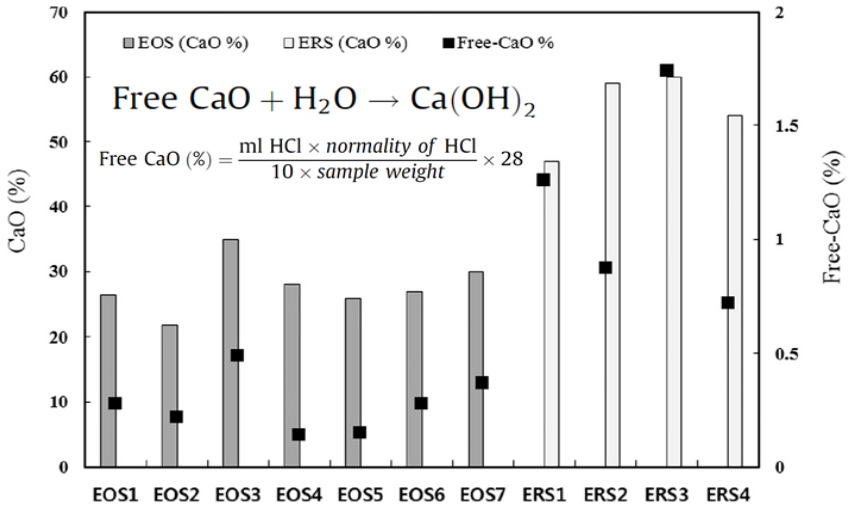


圖 14　電爐氧化碴(EOS)與還原碴(ERS)之 CaO 與 Free-CaO 含量圖[21]

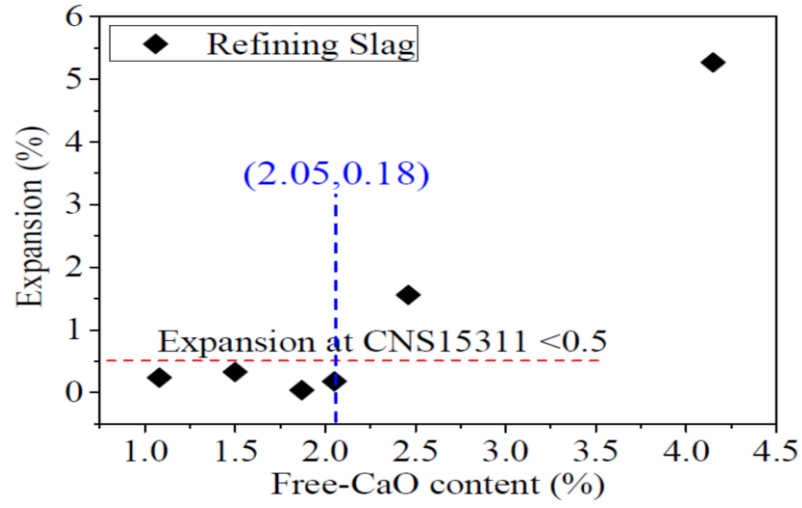


圖 15　電爐還原碴之 CNS15311 膨脹試驗的膨脹率與 Free-CaO 關係圖

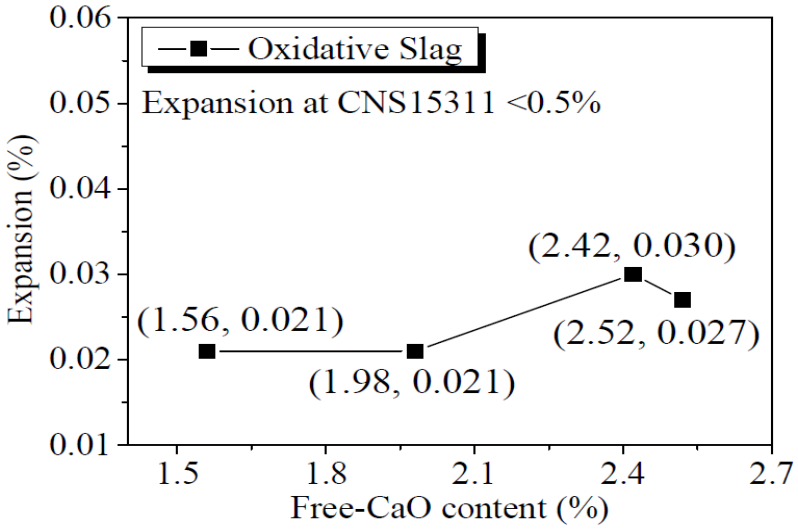


圖 16　電爐氧化碴之 CNS15311 膨脹試驗的膨脹率與 Free-CaO 關係圖

五、結　論

如何開創出還原碴廢棄物之低能耗的再生管道，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、皓勝公司與詠泰公司等之專長，共同開發還原碴廢棄物回爐改質為高應用價值氧化碴再生粒料之低能耗技術。研究結果顯示當再生脫磷劑配方為還原碴廢棄物:石灰=1:1 且反應溫度為 1,550^{o}C 下，3 組再生脫磷劑皆可以達到 50%以上的脫磷能力，包含 $CaO-SiO_2$ 基擁有 54%；$CaO-MgO$ 基擁有 53.1%；$CaO-Al_2O_3$ 基擁有 53.6%。由爐碴 Free-CaO 檢測結果顯示回爐技術確實可以有效將 Free-CaO 含量下降，從回爐前的 4.20-5.18%下降至回爐後的 0.94-1.03%，下降率高達 75.5-81.9%，為相當具有潛力之技術。由組成相鑑定結果驗證回爐改質後的氧化碴產物包含 C_2S、C_2AS 與 FeO 等組成相，具有較單純且均勻的組成相。經不同組成相之 SEM 的 EDS 分析結果得知 C_2S 相中擁有 CaO/SiO_2 接近 2 且含少量 Al_2O_3(約 3.4%)與高量 FeO(22.3%)時，擁有最佳之容磷量，高達 0.67%；若 C_2S 相中擁有 CaO/SiO_2=2.45-2.72 且含高量 Al_2O_3=13.2-25.9% 與 FeO=8.5-16.3% 時，則擁有較佳之容磷量為 0.30-0.45%。由膨脹試驗結果顯示還原碴之 Free-CaO 為 4.2%時，膨脹率高達近 5%；Free-CaO 低於 2.05%時則膨脹率約為 0.18%，符合 CNS15311 粒料膨脹試驗之膨脹率低於 0.5%的規範。氧化碴膨脹率顯示 Free-CaO 含量低於 2.52%時，則膨脹率約為 0.021-0.027%，驗證回爐技術所生成之氧化碴產物(Free-CaO=0.94-1.03%)，符合 CNS15311 粒料膨脹試驗之膨脹率低於 0.5%

的規範，將可順利應用於瀝青混凝土細粒料與管溝回填用控制性低強度回填材料用粒料等之場合，而達到還原碴廢棄物循還再生且減少 CO_2 排放與無二次污染之去化目標。

六、參考文獻

1. L. Kriskova, Y. Pontikes, Ö. Cizer, G. Mertens, W. Veulemans, D. Geysen, P. T. Jones, L. Vandewalle, K. V. Balen, and B. Blanpain, Effect of mechanical activation on the hydraulic properties of stainless steel slags, Cem. Concr. Res., Vol. 42, p. 778-788, 2012.
2. C. Shi and S. Hu, Cementitious properties of ladle slag fines under autoclave curing Conditions, Cem. Concr. Res., Vol. 33, pp. 1851-1856, 2003.
3. Y. N. Sheen, D. H. Le, and T. H. Sun, Innovative usages of stainless steel slags in developing self-compacting concrete, Constr. Build. Mater., Vol. 101, pp. 268-276, 2015.
4. M. Salman, Ö. Cizer, Y. Pontikes, R. Snellings, L. Vandewalle, B. Blanpain, and B. K. Van, Cementitious binders from activated stainless steel refining slag and the effect of alkali solutions, J. Hazard. Mater., Vol. 286, pp. 211-219, 2015.
5. S. Choi, J. M. Kim, D. Han, and J. H. Kim, Hydration properties of ladle furnace slag powder rapidly cooled by air, Constr. Build. Mater., Vol. 113, pp. 682-690, 2016.
6. Y. Jiang, T. C. Ling, C. Shi, and S. Y. Pan, Characteristics of steel slags and their use in cement and concrete, Resources, Conservation & Recycling, Vol. 136, pp. 187-197, 2018.
7. M. Salman, Ö. Cizer, Y. Pontikes, R. M. Santos, R. Snellings, L. Vandewalle, B. Blanpain, and K. V. Balen, Effect of accelerated carbonation on AOD stainless steel slag for its valorisation as a CO2-sequestering construction material, Chem. Eng. J., Vol. 246, pp. 39-52, 2014.
8. J. M. Kim, S. M. Choi, and D. Han, Improving the mechanical properties of rapid air cooled ladle furnace slag powder by gypsum, Constr. Build. Mater., Vol. 127, pp. 93-101, 2016.

9. S. D. G. Vilaplana, V. J. Ferreira, A. M. López-Sabirón, A. Aranda-Usón, C. Lausín-González, C. Berganza-Conde, and G. Ferreira, Utilization of ladle furnace slag from a steelwork for laboratory scale production of Portland cement, Constr. Build. Mater., Vol. 94, pp. 837-843, 2015.
10. R. I. Iacobescu, G. N. Angelopoulos, P. T. Jones, B. Blanpain, and Y. Pontikes, Ladle metallurgy stainless steel slag as a raw material in ordinary Portland cement production : a possibility for industrial symbiosis, J. Clean. Prod., Vol. 112, pp. 872-881, 2016.
11. N. Yoshie, K. Naoki, I. Maki, N. Seiji, and K. Yasuo, Development of slag recycling process in hot metal desulfurization with mechanical stirring, Steel Research International, Vol. 80, pp. 727-732, 2009.
12. B. Das, S. Prakash, P. S. R. Reddy, and V. N. Misra, An overview of utilization of slag and sludge from steel industries, Resources, Conservation and Recycling, Vol. 50, pp. 40-57. 2007.
13. C. M. Lin, L. H. Chen, K. Y. Wang, C. H. Wu, and Weite Wu, Effects of Recycling Desulfurization Slag on the Characteristics of Molten Steel, IUMRS-ICA 2011, Taipei, Taiwan, September, 2011.
14. 林啟明、王康羽、吳政翰、吳威德，再利用脫硫渣對鋼液性質之影響，礦冶季刊，第 4 期，12 月，2011。
15. 汪俊延、林宏茂、林俊凱、林孟昌、林啟明、陳玠宏、曾文甲、吳威德，精煉脫硫還原渣再利用於其他精鍊爐次之脫硫能力研究，鑄造科技季刊，第 267 期，12 月，2011。
16. 林啟明、汪俊延、曾文甲、吳威德，新型再利用脫硫劑於高週波爐與盛鋼桶精煉爐之脫硫研究，中國礦冶工程學會會刊，Vol. 57, pp. 51-62, 2013.
17. 林啟明、陳志宏、李佳峻、張顧齡、吳威德，精煉爐渣活化再利用於煉鋼脫磷與脫硫之研究，中國礦冶工程學會會刊，Vol. 59, pp. 101-110, 2015.
18. 林啟明、李佳峻、蘇育瑯、吳威德，廢棄精煉渣回爐再利用之高值化應用潛能與實例，105 年綠色技術與工程實務研討暨成果發表會，國立臺灣大學集思台大會議中心，台北，台灣，November，2016.
19. C. M. Lin, W. Wu, C. C. Li, and K. L. Chang, Development of high-value recycled desulfurization agent products by Thermo-Calc software, The 5th Seoul International Conference on Applied Science and Engineering (SICASE), Seoul, South Korea, December, 2017.
20. C. M. Lin, C. W. Yu, W. Wu, C. C. Li, and K. L. Chang, Effect of

FeO-CaO-SiO2-MgO-xAl2O3 slags with 12.0~26.0 wt.% Al2O3 content on dephosphorization of molten steel, Key Engineering Materials, Vol. 773, pp. 184-188, 2018.

21. H. S. Lee, H. S. Lim, and M. A. Ismail, Quantitative evaluation of free CaO in electric furnace slag using the ethylene glycol method, Construction and Building Materials, Vol. 131, pp. 676-681, 2017.

水性印刷零排放控墨系統

李謹丞*

摘　要

全國瓦楞紙器加工廠家數約 1,200 家，早期使用油性顏料，清洗印台多用舊報紙擦拭，故無廢水處理問題，後來改用水性顏料後，清洗印台產生廢水。因紙器加工廠多屬中小企業，多無用地設置廢水處理設施，或無法處理瞬間高濃度清洗廢水，致報章新聞報導經常見社區排水不定期被變色廢水污染，究其原因，清洗印刷設備的廢水直接排入水溝可能為污染源頭之一，如何找到方便有效乾淨的方法解決印刷廢水問題已為整個產業的當務之急。

瓦楞紙箱表面之印刷工作時，因印刷機之供墨方式採「氣壓式」，故油墨極易噴濺在管路、泵浦、印刷輪及槽體上，因此每隔一段時間就必須拆解機台或供墨系統以清除墨垢；且因墨水成分含有樹脂之關係，亦導致墨垢清洗不易，頗為費時，長期下來將對廠商生產成本及環境造成沉重之負擔。

本研究係將印刷機台油墨透過特殊設計之供墨系統，可降低供墨時所須之氣壓下限，以減少噴濺情形；且油墨流動於機台各處，不易產生固化而結成墨垢，故可使用最低水量清洗機台。另清洗下來之低濃度墨水，再利用同色系墨回添以形成迴流，達到幾無廢水產生、省墨之效果。不僅無須加裝設備、調整產線，更適用於各式水墨印刷設備。經實廠操作驗證，已達廢水降低 80%，耗墨降低 50%，可大幅降低人力、能源及廢水處理藥劑等支出，污泥量也降低至 50%，透過標準作業程序尚可將印刷廢水達到零排放，以協助業者解決印刷廢水排放之環保風險，並減少操作營運支出，切合政府積極推動循環經濟之「廠內小循環」自主回收體系建立。

【關鍵詞】紙器加工廠、廢水處理、零排放、控墨系統

---

*玉宗股份有限公司　經理

一、前　言

傳統印刷在瓦楞紙箱的墨量約 93%係於洗墨輪機台而消耗掉，主因為油墨無法快速回收，接觸空氣導致硬化結塊，需靠大量水資源清洗，造成廢水量大不易處理，須耗用大量人力、電力及藥劑處理，目前無論是國內內或國際上，各家水性樹脂墨印刷業者皆遇到相同的問題，雖有明定廢水排放標準，但依然有業者為節省成本偷排廢水，唯有透過具有指標性、標準化及國際認證的系統，結合政府推廣與公協會自主性要求，方能達到推廣與應用的最佳效果。

二、傳統供墨系統

一般進行瓦楞紙箱表面之印刷工作時，因印刷機之供墨方式採「氣壓式」，故油墨極易噴濺在管路、泵浦、印刷輪及槽體上，因此每隔一段時間就必須拆解機台或供墨系統以清除墨垢；且因墨水成分含有樹脂之關係，亦導致墨垢清洗不易，頗為費時。另每次換色清洗時，供墨系統平均浪費 2-3kg 之墨水，而每公斤之墨水約需消耗清洗水 30-50L。若以印刷機每日正常換墨洗車次數(3 次以上)、全國瓦楞紙器加工廠家數約 1,200 家估算，則長期下來將對廠商生產成本及環境造成沉重之負擔。

傳統供墨系統之優缺點說明：

1.優點：印刷在瓦楞紙箱上具快速乾燥、表面抗水、換墨顏色快速化、耐磨等特性。

2.缺點：因墨水成分具有樹脂易黏著之特性，因此在換色時須以大量清水將機台墨垢清除，造成真正用在紙箱印刷上之墨水僅約耗墨量之 10%，其餘均成為廢水成分排放。

傳統供墨系統因機台清洗之故，油墨樹脂經大量清水稀釋後，與色料分離，產生大量有色廢水。一般水性樹脂墨所產生之廢水，乃利用化學法將樹脂固型物與水分進行固液分離後，處理水經過濾後排放；固型物(污泥)則經脫水乾燥後進行後續處置。

上述之處理方式，對於環境主要質疑，固液分離後，廢水中尚存在化學藥劑及有機溶劑，僅以過濾並未能將其完全淨化，可能產生揮發性有機物(VOCs)排放問題。

三、省墨迴流系統

一般瓦楞紙箱，即工業用、水果、水產等各項產品外包裝紙箱，印刷機台目前多以 2 色系為主，部分有 3 色系、4 色系之機台；使用之印刷油墨為水性樹脂墨(國內外使用水性樹脂墨之機台約佔 95%)，其主要成分為樹脂、色料粉、有機溶劑及其他礦石粉，另有化學藥劑添加。原隔膜泵浦僅供墨上機台，墨流於兩側入墨槽再由上下落差式大口徑管線，慢速流回機台墨桶，在緩流中水墨因大量接觸空氣，在墨槽及大口徑管件不斷硬化產生結晶，導致水墨快速劣化。

本研究係以優化後之泵浦於供墨到機台後，流向兩側順流墨槽，快速將墨流入小口徑管線再由泵浦抽回原墨桶，保有原墨優質化，達到減少耗墨原理。清洗機台時，優化後之泵浦可將管線內墨盡可能排出回原墨桶，初期流回之高濃度墨可回添原墨桶，清洗機台以 2,400mm 長印刷轆，約 10 公升即可清洗乾淨，因為管徑線小口化，管線內清水易飽流清洗，所以可快速洗出管線內沾黏墨，此為減少廢水原理。爰此印刷機台油墨透過該特殊設計之供墨系統，可降低供墨時所須之氣壓下限，以減少噴濺情形；且油墨流動於機台各處，不易產生固化而結成墨垢，故可使用最低水量清洗機台。另清洗下來之低濃度墨水，再利用同色系墨回添以形成迴流，達到幾無廢水產生、省墨之效果，其系統示意圖如圖 1 所示。

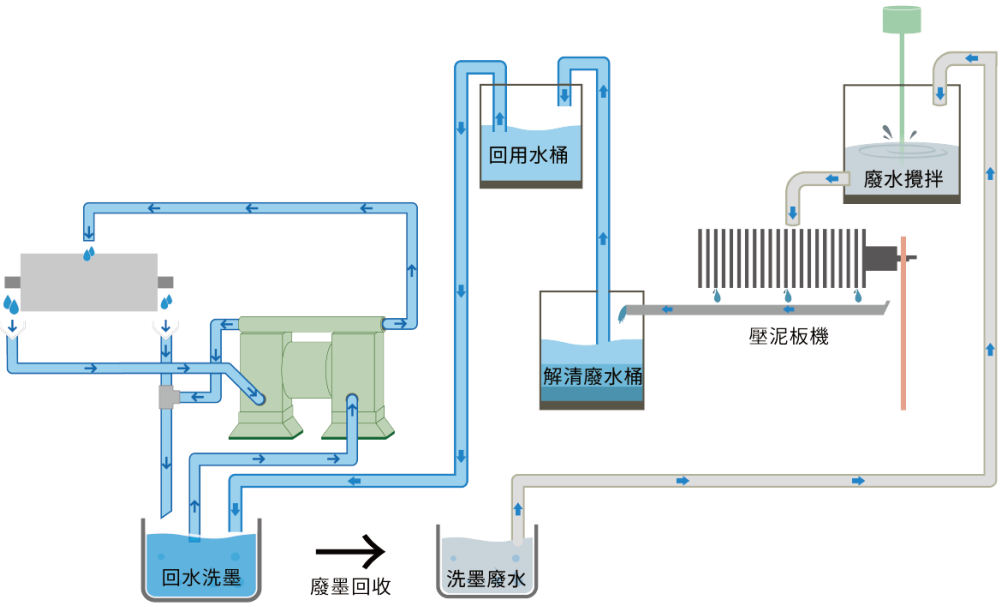


圖 1　優化油墨印刷循環控制系統

1.省墨迴流系統之優缺點說明

優點：

(1)機台迴流系統改裝後不易累積硬化墨水在管線內，亦不需常更換機台墨管。

(2)墨水最大化利用在印刷紙箱上，不產生含墨之清洗廢水，進而達到省墨化、無廢水化，亦不須設置大容量廢水處理設施。

缺點：設備安裝費需業者額外投資。

2.省墨迴流系統之技術優化說明

針對傳統供墨系統作業模式，本研究重新設計油墨印刷循環控制系統，由傳統單進單出幫浦改為雙進雙出幫浦，優化刮刀、管路與回收機構，解決耗墨與結塊問題，各項細部改善及機構創新說明如下：

(1)幫浦優化

將單進單出隔膜泵浦優化為雙進雙出隔膜泵浦，增加回收推力與吸力，快速送回墨桶。採定量供墨，滿足機台印刷作業，俾將管路、幫浦與輪轆殘墨迅速回流，減省墨水損耗，亦可大幅減少人力及廢水產出。

(2)控水量定量

不使用多餘的水，節省水資源同時減少廢水量。

(3)管路優化

將管徑細化設計，減少空氣接觸面，易飽流清洗，快速洗出管線內殘留墨液。

四、效益分析

保守估計，目前全國約有 1,200 台瓦楞紙箱印刷機，每台每天至少洗車 3 次，若 1 個月工作天以 25 日計算，則其耗墨量、耗水量之計算如下：

耗墨量 2kg/次.台×3 次/天×1,200 台 ＝7,000kg/天

耗水量 50L/次.台 ×3 次/天×1,200 台÷1,000L/m^3＝180CMD

茲將整體之規格比較及效益比較彙整於表 1 及表 2。目前無論是國內或國際上，各家水性樹脂墨印刷業者皆遇到相同的問題，雖有明定廢水排放標準，但依然有業者為節省成本偷排廢水，唯有透過具有指標性、標準化及國際認證的系統，結合政府推廣與公協會自主性要求，方能達到推廣與應用的最佳效果。

表 1　傳統供墨系統與省墨迴流系統規格比較

項次	供墨量 (L)	管線內清墨垢	洗車耗墨量 (kg)	洗車時間 (min)	洗車水量 (L)	是否增加設備	廢水處理設備	化學藥劑處理廢水	洗機操作管理
傳統供墨	12	半年	2~3	20~30	50~80	—	中大型	大量	難以管理
省墨回流	12	3 年	0.5~1	10~15 (快洗 5min)	8~16	改裝或添購	小型	少量	SOP 標準流程管理

表 2　傳統供墨系統與省墨迴流系統效益比較

項次	耗墨量		耗水量	
	每日(kg)	每年(ton)	每日(cmd)	每年(cmd)
傳統供墨系統	7,200	2,160	180	54,000
省墨迴流系統	1,800	540	28.8	8,640
節省效益	5,400	1,620	151.2	45,360
效率提昇	75%		84%	

五、結語

玉宗公司的包材已取得國際供應鏈中環保形象，但包裝上的必備元素—「印刷」卻是高污染製程，於國內、中國、日本、美國及歐盟等市場發展上，須因應 RoHS 2.0 及未來修訂進行印刷服務之永續提升。近年來各國正逐漸重視環境保護議題，除服務客戶賺取利潤外，還必須因應環保潮流進行轉型，於生產的過程中達到省水、減碳、零排放等要求，綠色服務供應商正逐漸成為品牌業者供應鏈採購的選擇指標。為符合國際供應鏈市場，運用循環經濟原則開發全新營收通路而獲益，玉宗公司取得 BS 8001:2017 最高級循環經濟認證，期許未來將服務由台灣、中國、日本擴展至歐美市場。自 108 年開始成立示範產線，由專業行銷團隊進行國內外印刷產業油墨使用與廢水排放調查，並針對印刷業者永續環保轉型為出發點，結合環境議題拍攝推廣影片，並舉辦廠商實地訪視與媒合交流活動，以綠色行銷做為玉宗公司與印刷業者與國際市場的溝通橋樑，以期帶動該系統於印刷業者之應用與台灣印刷服務能見度。

六、參考文獻

1.玉宗股份有限公司(2019)，油墨印刷循環控制系統加值與市場推廣輔導計畫。

2.謝莉莉、陳合進、王明堂(2005)，環保印刷材料發展之探討，永續產業發展雙月刊 NO.31 P19~P23。

3,邱裕閔(2012)，省油墨環保型新世代印刷供墨系統，台灣產業服務基金會

4.張國財(2004),環保包裝的外衣－水性印刷,永續產業發展雙月刊,pp.31-34.

5.經濟部工業局(1996)，印刷工業減廢技術手冊。

6.黃燈燐(2007)，鈔券及有價證券印刷製程污染防治技術研習。

7.中國污水處理工程網(2009)油墨印刷廢水處理工藝， http://www. dowater .com /jishu/2009-05-12/6880.html.

8.印刷工廠偷排廢水，環保局重罰 30 萬，社團法人台灣環境資訊協會，ttps://e-info.org.tw/node/81046.

9.基隆河染紅，印刷廠偷排油墨廢水遭查獲，台灣好新聞，http://www. taiwanhot.net/?p=564154.

10.台南永康印刷廠偷排廢水，環保局查獲重罰，ETtoday 地方新聞雲，https://www. ettoday.net/news/20190810/1509984.htm.

以生物處理法處理金屬表面處理業廢水之可行性評估

陳冠霖*、彭俊平**、王詩磊***

摘 要

金屬表面處理業廢水之 COD 主要來源為脫脂廢水，分為鹼性脫脂、電解脫脂及超音波脫脂等，屬難分解有機物物質；一般而言都採用氧化還原及化學混凝沉澱法處理，即可將廢水處理至放流水標準內。然而，不同製程與藥品的使用，經由上述處理程序處理後，其溶解性 COD 仍可能高於放流水標準。部分場商委託工程顧問公司規劃設計時，未詳細調查廢水特性，易造成廢水處理設施無法妥善處理廢水。

某金屬表面處理業者因放流水 COD 超標之問題，委託本公司針對廢水處理系統重新規劃設計。雖然脫脂廢水屬難分解有機物物質，但微生物經過馴養後，對部分難分解有機物仍有不錯的處理效果； 因此本公司規劃廢水處理流程為化學混凝+生物處理。經過約一個月的微生物馴養期後，針對 COD 處理效能探討，化學混凝程序對 COD 去除效率約為 70-80%，生物處理程序對 COD 去除效率約為 40-50%，可將廢水處理至放流水標準內。此外，在水質分析過程中發現廢水中含有大量的氯鹽及亞硝酸鹽，兩種物質對 COD 分析會產生正向的干擾，造成 COD 數值大幅偏高。其中亞硝酸鹽之干擾在 COD 分析中若未特別提及常被忽略。

【關鍵詞】金屬表面處理業、生物處理、操作維護

---

*全盛環境科技有限公司 總經理

**全盛環境科技有限公司 主任

***武漢大學環境工程系 學士

一、前　言

金屬表面處理業廢水之 COD 主要來源為脫脂廢水，脫脂廢水的主要來源為電鍍業的預處理程序，針對材料進行拋光、清洗和除油等工法。而該程序中排出的廢水中主要含油脂、酸、鹼和表面活性劑等，金屬含量較低，故處理脫脂廢水主要係以去除 COD 為主。

本文所述之改善場所(以下簡稱：場所)位於新北市新莊區，近板橋浮洲地區、樹林區及桃園市，為小型工業聚集地，主要生產機械金屬機件，其廢水中氯鹽及亞硝酸鹽含量較高；初期設置以活性碳吸附搭配混凝沉澱進行污染物去除，其放流水未能符合放中水標準，後委託本公司進行重新規劃，增加接觸曝氣法作為 COD 之主要去除程序，可獲得較佳之 COD 去除成效並符合放流水標準，下文就改善歷程、去除效率改善及成本分析進行討論。

二、金屬表面處理業的廢水特性分析及場所現況

金屬表面處理指利用工業手法保護金屬製品，防止銹蝕並使之美觀、提高產品附加價值及賦予特殊功能；目前我國的表面處理業大可分為電鍍、塗裝、研磨、陽極處理、真空鍍、鋼材表面處理、其他金屬製品表面處理業等，其中以電鍍業佔金屬表面處理業之大宗[1]，且多以小型工場為主，因其廢水排放量較低，建設廢水處理設施之成本無法有效攤提，故多數電鍍業以小型工業區方式聚集，由工業區統一處理廢水，以達成本分攤效果。

一般電鍍廢水來源可分為廢棄溶液、清洗廢水、意外排放之電鍍液，特性如下[2]：

1.廢棄溶液

電鍍程序中之前處理階段，其作用是去除被鍍金屬表面之塵土、鐵鏽、表面氧化之金屬薄膜及油脂等；一般來說前處理的清洗溶液可通過再生、補充等方法進行反覆使用，惟隨使用次數增加，其中之塵土、與鹽類含量逐漸增加，使清洗溶液最終將不堪使用；亦有部分電鍍溶液，因不可再生或再生成本過高，而必須廢棄之。

2.清洗廢水

係指在電鍍程序中，由前一程序進人下一程序中，須將被鍍金屬表面化學物質清洗乾淨所產生之廢水。該廢水雖污染物含量不高，但其水量為電鍍廢水之主要貢獻源。

3.意外排放的電鍍液

進行電鍍生產時，連接的管線，接頭熱交換器的接頭及壓力管線均有滲漏的可能；當滲漏狀況發生而未察覺時，所造成的污染不僅造成處理困難，且會破壞再生系統的操作。

另外，若依生產特性對事業排放廢水分類，主要可分為鉻系、氰系及酸鹼廢水。

前已言及，我國電鍍業以小型工場為主，若需妥善處理廢水，需以產業群聚方式分攤成本，惟從污水處理角度分析，此舉又衍生出處理綜合性廢(污)水的困難。

場所即為上述情況之污水處理場，參考 108 年 6 月場所產之進流水數據如表 1 所示：

表 1 108 年 6 月污水場進流水水質情況

項目	pH	COD (mg/L)	Cl^- (mg/L)	NO_2^- (mg/L)	NO_3^- (mg/L)	SO_4^- (mg/L)
數值	10.7	762.3	149.5	298.9	15.9	25.3

場所初期之設計為利用活性碳吸附搭配化學沈澱進行處理，惟成效不彰，放流水未能符合放流水標準，故新增生物處理作為 COD 之主要去除程序，並有一定程度之改善。其前後主要差異為 COD 的主要去除方式由活性碳吸附變為生物處理，下文主要針對兩種方法去除 COD 之成本分析，與水質特性之探討。

場所改善前流程如圖 1。

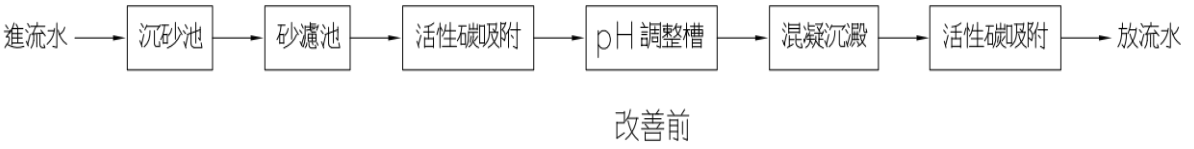


圖 1 場所改善前流程圖

三、 場所改善前利用活性碳作為 COD 主要去除程序之分析

1.活性碳去除原理與估算方法確認

因改善前場所營運狀況欠佳，及資訊保存不完善，其相關數據有失真狀況，故本估算以改善後之 108 年 6 月份進流水數據為主，以 Freundlich 吸附

方程式進行估算：

Freundlich 吸附方程式

$$q = KC_e^{\frac{1}{n}}$$

$$q = \frac{V(C_0 - C_e)}{m}$$

q—平衡濃度，mg/g；

K、n—常數；

V—被吸附溶劑體積，依水污染防治措施許可 13.5m^3；

C_0、C_e—被吸附質吸附前後濃度，mg/L；

m—吸附質(活性碳)質量，g。

2. 模式參數的選擇

一般而言，使用 Freundlich 吸附方程式進行吸附濃度計算時，需透過實驗建立 Freundlich 吸附等溫線，確定在使用該吸附質條件下之 K、n 值；本處應涉及工業區綜合廢(污)水處理，其來源非均勻穩定，通常無法以計算單一物質吸附效率之 Freundlich 吸附方程式估算，且以活性碳去除高 COD 濃度廢水本身即不甚合理，本處引用張自杰等[3]之實驗成果作為計算依據如表 2。

表 2 Freundlich 方程式常數表

物質	K	1/n
乙酸	3.3	0.34
丙酸	2.6	0.70
丁酸	8.5	0.49
戊酸	11.0	0.60
己酸	11.9	0.69
蔗糖	11.0	0.31
丁氨二酸	1.6	0.97
谷氨酸	1.9	1.47
丙醇	7.7×10^{-3}	1.70
異內醇	6.6×10^{-3}	1.67
丁醇	1.5	0.71
戊醇	4.3	0.67
甲酚	209.4	0.07
甲氧基酚	279.2	0.05
鄰氯酚	157.4	0.12
鄰硝基酚	72.0	0.27

如上表所示，K 與 1/n 呈負相關，又由方程式可知，1/n 值將主要影響 q 值大小，故本文分別選擇 1/n 的最大與最小值，即丙醇(1/n＝1.7)及甲氧基酚

(1/n＝0.05)作為本次估算值的上下限，以估算欲將廢水處理至符合放流水標準(Ce=80mg/L)時，活性碳最大與最小使用量，並計算當活性碳使用量最低時，場所的單位最低成本。

3.活性碳的估算成果與分析

依上述選擇計算活性碳使用量如下：

表 3 活性碳使用量估算結果

物質	丙醇	甲氧基酚
K	7.7×10^{-3}	279.2
1/n	1.7	0.05
q(mg/g)	13.2	347.6
m(kg)	695.9	26.5

設活性碳有效含量為 100%，即在最高效率情況下，使用活性碳處理該場所之廢(污)水，一日需要 26.5-695.9 公斤之活性碳，若依實際藥品行情 50 元/公斤計算，則單日成本至少需 1,325 元，單月成本至少為 40,302 元；單位水量成本至少為 98 元/噸・日。

四、場所改善後增建接觸曝氣程序作為 COD 主要去除程序之分析

1.增建接觸曝氣程序後之水質處理狀況與去除率

為解決處理效率問題，本公司規劃設置一接觸曝氣程序，以生物處理去除 COD，目前該設施已建置完成，經為期一個月之污泥訓養，全場 COD 去除率可達 90%以上，改善前後程序對照圖及 108 年 6 月全場水質參數分別如圖 2 及表 4 所示。

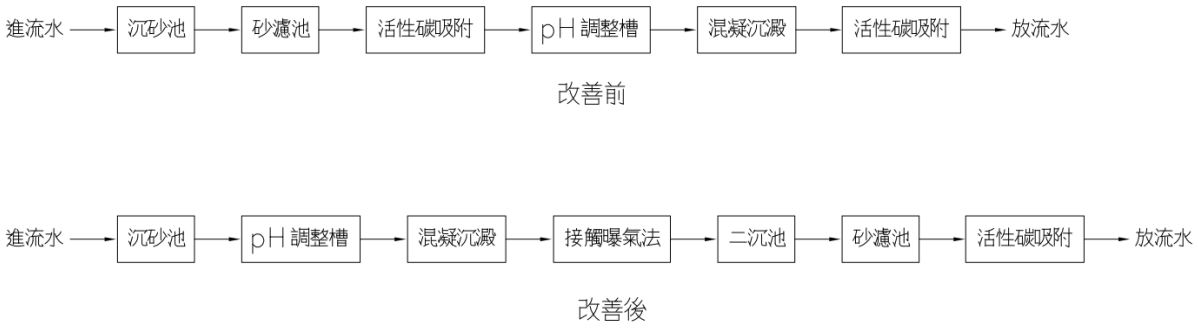


圖 2 場所改善前後處理程序比較

表 4 108 年 6 月場所水質狀況與去除率統計

指標	pH	COD (mg/L)	Cl^- (mg/L)	NO_2^- (mg/L)	NO_3^- (mg/L)	SO_4^- (mg/L)
進流水	10.7	762.3	150	298.9	15.9	25.3
放流水	7.53	64.3	931	262.9	50.8	190
去除率	–	91.6%	–	12.0%	-219.5%	–

2.增建成本分析，與改善前之成本比較

增建成本如表 5 所示。

表 5 生物處理程序增建價目表

項次	項　　目
1	生物處理池
2	生物處理池鼓風機
3	散氣設備及固定架
4	濾材及支撐架
5	污泥泵
6	調整池鼓風機
7	自動控制設置
8	現場安裝及配線
9	菌種訓養及水質分析
10	試運轉
合計	1,465,800

依改善後現況，其營運費用為 407,000 元/年(含人事、藥品及水電費)，即單位水量成本為 82.6 元/噸．日；月營運費用為 33,917 元，又因活性碳已非主要去除程序，故假設營運費(未含活性碳)之增加，僅由設備增加所產生電費貢獻，電價依 107 年電價表[4]估算流動電價為每度 1.846 元，以下述算式估算改善前後單月營運費用差：

改善前後單月營運費用差＝40302-1.846*新增設備總功率數*24*30

則改善後營運成本較改善前降低 25,429 元，節省 63.1%，預估 4.8 年後即可回收擴建成本。

3.其他問題

場所經改善後，COD 之去除有顯著成效，放流水均能穩定符合放流水標

準，但在分析過程中，該水質狀況反映出值得探討之情況，整合實驗數據如下：

表 6 場所水質數據表

組別	原水				化學沈澱池				生物沈澱池				放流槽			
	COD	Cl^- (mg/L)	NO_2^- (mg/L)	NO_2^- (mg/L)	COD	Cl^- (mg/L)	NO_2^- (mg/L)	NO_2^- (mg/L)	COD	Cl^- (mg/L)	NO_2^- (mg/L)	NO_2^- (mg/L)	COD	Cl^- (mg/L)	NO_2^- (mg/L)	NO_2^- (mg/L)
A	611				248				210				149			
B	438	2,130	190		312	2,410	140		115	2,090	143					
C	762	150	299	16	178	552	295	16	99	921	280	52	64	931	263	51

備註：

1. A 組即 4/3~4/26 場內檢測平均值；
2. B 組即 6/1~6/30 場內檢測平均值；
3. C 組為 6/24 委外化驗數據。

雖實驗數據有所欠缺，但該場所之水質狀況仍有一定程度是對事實之反映，分項說明如下。

建議內容如下：

(1)由表 6 可知廢水中含有氯離子且其濃度會隨處理流程之進行而逐漸增加。氯離子之來源可能是來自於所用原料含氯鹽或使用鹽酸，而其濃度之所以會隨處理程序之進行而增加則可能是來自於化學混凝程序所添加之 PAC 混凝劑中含氯離子所致。

(2)由於原料有採用亞硝酸鈉，因此廢水中含高濃度之亞硝酸根離子，且其濃度會隨處理流程之進行而稍微降低。而伴隨亞硝酸根離子濃度之變化，硝酸根離子濃度之變化則是逐漸增加，至放流時其濃度甚至超出放流標準 50 ppm。由於原料並未採用含硝酸鹽之化合物，因此可合理推論其濃度之增加應是來自於亞硝酸根離子之轉換所致，至於為何亞酸根離子會被氧化成為硝酸根離子其原因應是來自於接觸曝氣池在曝氣過程中所提供之氧氣所致。此一結果亦指出裝設生物處理系統雖解決了 COD 超標的問題但卻衍生出另外一個污染物超標的問題，而這也告訴我們在進行廢水處理設計時應作通盤之考量，不能僅針對單一污染物作考量，避免顧此失彼；此點在目前水污法日趨嚴格之情況下更顯重要。至於如何避免產生過高濃度之硝酸根離子，於此可考慮降低其來源亞硝酸鹽之使用量或控制曝氣量以降低氧氣量之供應及氧化反應之進行。

(3)由於氯離子及亞硝酸根離子均屬還原態之物質，除了亞硝酸根離子可能因氧化形成過高濃度之硝酸根離子導致放流水不合格以外，當使用重鉻酸鹽迴流法進行 COD 檢測時將會干擾檢測值，所得之 COD 檢測值將為高估之值，因此應特別注意其濃度之控管。針對此，較可行之道應是控管相關原

料之使用量。

A.處理水質氯離子、亞硝酸鹽濃度較高，在實驗上需特別注意干擾，根據 NIEA W515.55A[5]，其適用於氯離子濃度小於 2,000 mg/L 之水質檢測，本次實驗水樣中氯離子濃度相關性不明顯，且有部分結果大於 2,000 mg/L，說明其水質檢驗與工業排放規律有較大相關性，且對 COD 檢測有干擾作用；高濃度亞硝酸鹽產生之干擾，可通過每 1 mg 亞硝酸鹽氮加入 10 mg 來排除。

B.場所採用 NIEA W418.53C，即比色法進行亞硝酸鹽測定，該檢測範圍為 0.01-1.0 mg/L，且金屬表面處理業廢水中可能具有潛在顏色干擾，檢測結果已失真。

C.綜合分析 COD、NO_2^-、NO_3^-，雖其放流水 COD 濃度已低於標準，但仍屬於偏高狀況，又 NO_3^-低，NO_2^-極高，該現象的可能因素如下：

a.污泥馴養或 C/N 不理想，惟缺乏總氮數據無法進一步確認，或需長期觀察放流水 COD 是否呈下降趨勢。

b.水中過高的 NH_4+濃度影響硝化作用，主要由高 NO_2^-及低 NO_3^-濃度體現，惟實驗缺乏 NH_4^+數據，無法進一步確認。

c.NIEA W418.53C 檢驗方法失真，或 N 以亞硝基化合物形式存在，干擾檢驗結果。

五、結論與建議

1.針對場所的改善，在處理成效上確有明顯改善，依據 6 月 24 日委外檢 驗數據，其 COD 已可符合放流水標準，且去除率可達 91.6%。

2.進行接觸曝氣活性污泥法增設後，除 COD 去除率具有效且穩定提升外，因活性碳使用量顯著降低，每月營運成本估算降低 25,429 元，降低幅度達 63.1%，並可於 4.8 年內完成對擴建工程的成本回收。

3.場所所採用之亞硝酸鹽測定方法為 NIEA W418.53C 比色法，其檢測範圍不符規範，建議改以 NIEA W436.52C 鎘還原流動分析法分析亞硝酸鹽濃度。

4.場所之亞硝酸鹽檢測結果偏高，且根據文獻，電鍍廢水中之亞硝酸鹽含量本身較高，本場仍有 C/N 失調的情況，後續建議可評估添加糖蜜，以維持生物系統處理之穩定性。

5.亞硝酸鹽檢測方法失真、氨離子影響硝化、C/N 不理想、亞硝基干擾等因素，均係由現有實驗數據分析後之假設，現有實驗數據並無法完整支撐該論述，後續應著重完善氮化合物的實驗，增加 NH_4+、TKN 實驗，確定亞硝酸鹽實驗數據偏高之因素，以利後續操作優化。

六、參考文獻

1.財政部中區國稅局(2018)。107 年度表面處理業製造業原物料耗用通常水準。未出版。

2.李公哲(1995)。工業污染防治技術手冊—電鍍工場廢水污染防治。台灣。經濟部工業局工業污染防治技術服務團、財團法人中國技術服務社。

3.張自杰(1996)。環境工程手冊—水污染防治卷。北京。高等教育出版社。

4.台灣電力公司(2018)。台灣電力公司電價表。未出版。

5.環境檢驗所(2018)。水中化學需氧量檢測方法－密閉式重鉻酸鉀迴流法。未出版。

以電聚浮除法處理織布廢水再生技術之研究

劉柏緯*、楊騏瑞**

摘　要

紡織產業中游主要區分為織布及染整兩大製程，其製程廢水伴隨原料、製程、產品種類及排放單元不同，導致管末廢水處理技術繁瑣並提高循環再利用技術的門檻，此研究將針對織布製程管末廢水進行處理並達到循環再利用之目的進行深度研究。

傳統織布廢水管末處理方式多採用調勻、酸鹼值調整、快混、慢混、沉澱等進行。然而這樣的過程中，需添加大量的化學藥劑來降低硬度、懸浮固體、化學需氧量、色度、濁度等項目，此方式具高成本且高污泥量之缺陷。

本研究系用電聚浮除法進行織布廢水管末處理並達到回收再利用之目的。研究結果得知，採以電聚浮除法進行織布廢水管末處理，最佳操作條件為導電度 0.25mg/L、電解時間 30min 及酸鹼值控制在中性，如此可使織布管末廢水硬度降低 70%、懸浮固體降低 75%、化學需氧量降低 79%且處理後水質無色無味，可達循環再利用水質之標準，其可回用於織布製程亦可應用於染整製程。

經證實以電聚浮除法進行織布管末廢水處理確實具備高處理效益，亦也降低污泥產生量及管末處理成本。

【關鍵詞】廢水回收、電聚浮除

---

*東豐纖維企業股份有限公司創新研發中心 管理師

**東豐纖維企業股份有限公司創新研發中心 管理師

一、前　言

紡織產業是我國極重要之產業之一，從上游的石化工業經加工製造形成尼龍、聚酯…等原物料，再經過紡紗、織造、染整後才縫合形成衣物相關製品或其他紡織商品，在上述所提織布及染整程序因製程所需，經常使用大量淨水並產生大量管末廢水，然而也辦隨原料、製程、產品及排放單元的多元化，使得紡織產業對於管末廢水的處理技術更佳困難且不易達到回收再利用之循環，目前大部分的紡織相關產業由於工廠規模受限及沿用傳統管末處理方法，皆將所有廢水混合收集經處理排除污染物後進行流放，然而，織布及染整製程所產生的廢水污染物質主要是有機物、酸、鹼及少量重金屬，經過混合後再排除污染物質的做法相對耗時，且依循傳統方法處理後的廢水絕大部分無法再回收利用；近年來伴隨著紡織及成衣產業的蓬勃發展，管末廢水排放量亦持續不斷的升高，為達成友善環境及循環經濟之目標，如何在紡織產業設置新興技術的管末廢水處理技術，以達到回收再利用之目的，藉以達到將低成本、提高環境效益之目標，已成為我國目前相關紡織產業急需解決的課題之一。

織布、染整製程之管末廢水污染物質因纖維種類、加工方法、染料助劑及終端品質要求因素而有所差異，然而管末廢水通常含大量懸浮微粒，小粒徑、高濁度，亦含有部分金屬成份及製程中所添加的化學藥劑；現行較常見的管末處理技術，大多以化學方法為主，將製程廢水經過調勻、酸鹼值調整、快混、慢混、沉澱及最終酸鹼值調整後進行排放，經由上述過程所添加化學藥劑以達到降低硬度、去除懸浮固體、降低化學需氧量、色度及濁度之目的，但由於仍須使用化學藥劑進行水質淨化再利用，後續亦產生相關化學廢棄物(污泥)，且常因為操作因素、加藥超量及經濟效益低等問題[1]，產生的污泥量多且無法達到回收再利用，因此，若能將織布及染整製程所排放之廢水分別處理，勢必能達到較高水平之廢水處理並達到處理後回收再利用之目的。

二、電聚浮除法處理織布廢水再生技術及現況分析

紡織產業製程用水量大，故紡織、造紙、食品、化學、金屬與電子業等六大行業，被視為台灣地區高耗水工業；紡織業的水源供給大多以地下水為主自來水為輔，為了提升用水效率，需有效處理水資源，達循環再利用，以降低水資源使用率。

一般水資源回收再利用之簡易概念如廢水經過處理後回收再利用或排放。水處理技術，不外乎物理、化學、生物等方法，但針對當前越來越複雜之工業廢水，且政府訂定嚴格的放流水排放標準，單憑過去傳統的水處理技術或許能將目前廢水處理致符合排放標準，但其需投入相當多的人、物及財力，不僅僅浪費有效資源，且更不符實質效益[2]。然而常見廢水處理原則依其廢水處理方法多以物理及化學處理為綜合處理技術[3]如下表 1：

表 1　物化處理技術

廢水物化處理技術	處理方法	優點	適用場域
混凝沉澱	通過投加絮凝劑,使水體中的懸浮膠體及分散顆粒在分子力的作用下生成絮狀體,經沉澱水體中分離	該技術設備簡單,易於實現,處理後的水質較好	適用於懸浮濃度較高的紡織染整廢水的預處理和深度處理
化學脫色	指向廢水中投加具有氧化性的脫色劑,氧化紡織染整廢水中的顯色有機物，破壞其結構達到脫色木的	該技術設備簡單,易於實現,但處理成本較高	適用於經過生化處理後色度仍然較高的紡織染整廢水的脫色處理
砂濾	以天然石英砂、錳砂或無烟煤作為濾料的水過濾處理技術	技術處理成本低,但處理效果不穩定,易堵塞	適用於紡織染整廢水的深度處理
膜技術-超濾	利用一種壓力活性膜,在外界推動力(壓力)作用下截留水中膠體、顆粒和分子量相對較高的物質,而水和小的溶質透過膜的分離工程	超濾系統簡單,操作方便、占地小、投資省、出水質優	可滿足各類反滲透裝置的進水要求
膜技術-反滲透	利用反滲透膜的選擇透過性,以膜兩側的壓力差為動力,使溶劑透過而截留溶質實現濃液和清液的分離	無相變,占地面積小,不產生污泥	出水水質好、易於實現自動化控制,但運行費用較高。該技術適用於紡織染整廢水處理後回用於染整生產工法

現今因應水資源再生利用議題抬頭，許多業者紛紛提出有效之處理方法，但基於後續成本考量；皆與評估。近年來，國人自行研發電聚浮除法，除了保有電化學方法之處理成效，另快速反應縮短了處理時間，且佔地面積小具機動性、污泥量少、具回溶作用、模組化設計、耗電量低、操作及維護成本低，是個具有潛力的處理方法。我司目前應用此技術針對織布廠管末廢水進行處理，以達回收循環再利用效果。

三、電聚浮除法處理織布廢水再生技術之應用層面

廠內綜合廢水(織布及染整)利用生物處理法進行處理，處理過程需經過調勻、酸鹼值調整、快混、慢混、沉澱及最終酸鹼值調整等功能，相當繁瑣。在生物處理法過程中，需添加化學藥劑來降低硬度、懸浮固體、化學需氧量、色度、濁度等項目，也因此該方式具高成本且高污泥量之缺陷。

本研究系針對織布廠之管末廢水，以電聚浮除法進行驗之水質回收再利用，並分析回收水質及探討電聚浮除法之最佳操作條件，下方圖 1 為電聚浮除法之流程：

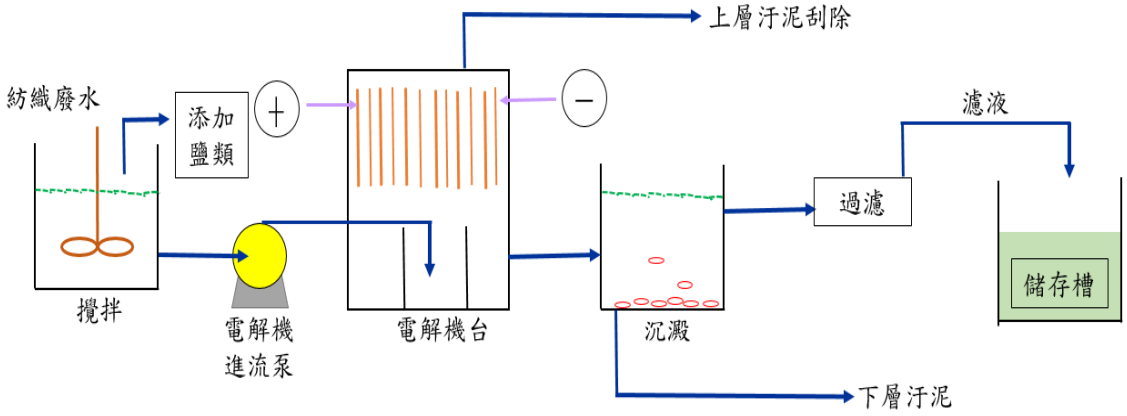


圖 1　電聚浮除法之流程

織布廢水處理流程主要將織布廢水，經電聚浮除法後、沉澱、過濾，再分析水質特性，其目的主要是將其處理後水樣回收應用至織布原製程及染整染色製程上。相關測試條件探討方向分別為導電度、電解時間、酸鹼度。

原廢水導電度 0.063(s/m)、酸鹼值 7.5、硬度 247(mg/L)、懸浮固體 28(mg/L)及化學需氧量 356.9(mg/L)進行電解測試，未調整水質狀態下，進行電解，電解時間設定為 30 分鐘，測試結果得知可，硬度降低至 111(mg/L)、懸浮固體降至 12(mg/L)、化學需氧量為 137(mg/L)，如下表 2 證實電聚浮除法確實能有效降低水質之數據，但化學需氧量仍未達回用之標準。

表 2　織布廢水電解效應

原織布廢水

導電度(s/m)	酸鹼值	硬度(mg/L)	懸浮固體(mg/L)	化學需氧量(mg/L)
0.063	7.5	247	28	356.9
(電解 30 分) ↓				
0.058	9	111	12	137

後續探討電聚浮除法對導電度、電解時間及酸鹼值之化學需氧量之影響：

1.探討導電度對於化學需氧量之處理效率

原廢水導電度 0.063(s/m)、酸鹼值 7.5、硬度 247(mg/L)、懸浮固體 28(mg/L)及化學需氧量 356.9(mg/L)進行電解測試，分別探討導電度 0.1(s/m)、0.2(s/m)、0.3(s/m)、0.4(s/m)、0.5(s/m)測試之結果，由圖 2 結果得知導電度 0.2(s/m)~0.3(s/m)能將化學需氧量降至 60~70(mg/L)。

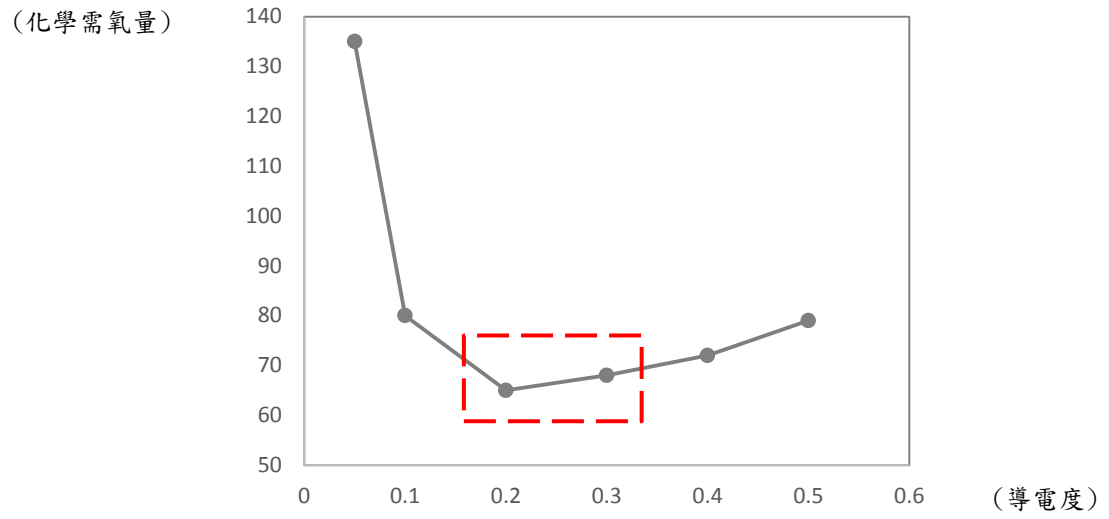


圖 2　探討導電度對於化學需氧量之處理效率

2.探討電解時間對於化學需氧量之處理效率

原廢水導電度 0.063(s/m)、酸鹼值 7.5、硬度 247(mg/L)、懸浮固體 28(mg/L)及化學需氧量 356.9(mg/L)進行電解測試，分別探討電解時間為 15 分、30 分、45 分、60 分、90 分、120 分測試之結果，由圖 3 結果得知

導電度 30 分，化學需氧量為 75(mg/L)，增加電解時間無明顯效益。

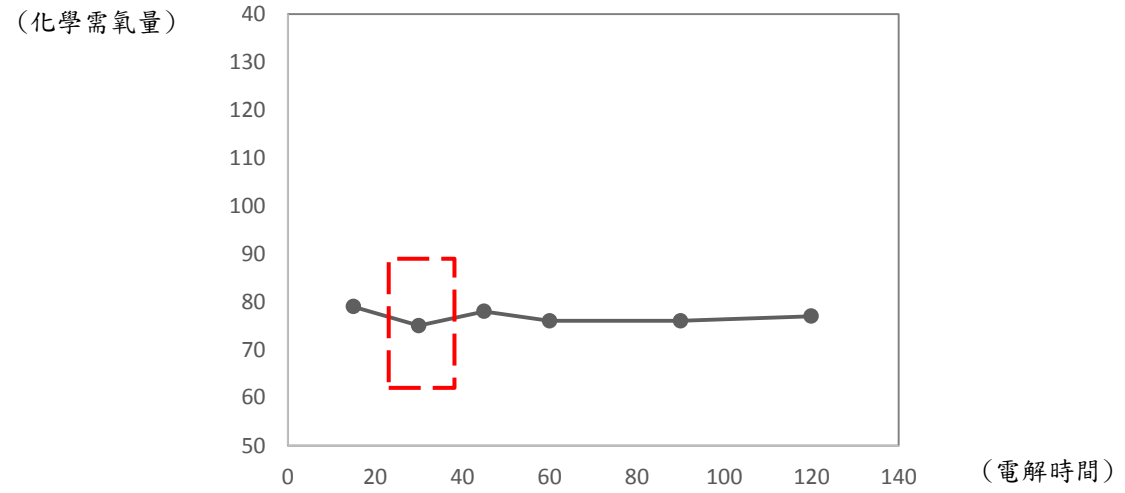


圖 3　探討電解時間對於化學需氧量之處理效率

3.探討酸鹼值對於化學需氧量之處理效率

原廢水導電度 0.063(s/m)、酸鹼值 7.5、硬度 247(mg/L)、懸浮固體 28(mg/L)及化學需氧量 356.9(mg/L)進行電解測試，分別探討酸鹼值 3、7、10 測試之結果，由圖 4 結果得知調整酸鹼值對於化學需氧量去除率影響大，以織布廠廢水為中性最佳。

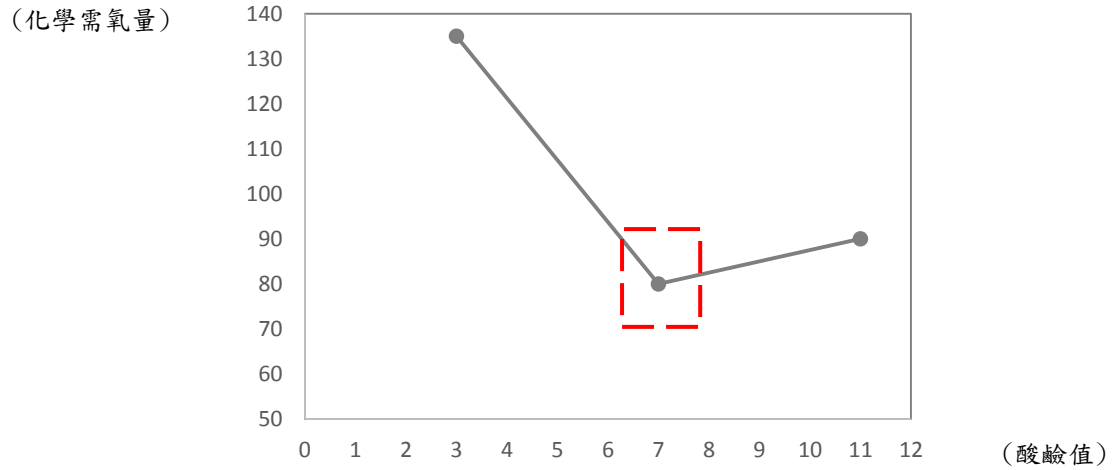


圖 4　探討酸鹼值對於化學需氧量之處理效率

綜合上述最佳條件為導電度 0.25mg/L、電解時間為 30min 及酸鹼值控制在中性，如表 3.可使硬度降低 70%、懸浮固體降低 75%、化學需氧量降低 79%及處理後水質為無色如圖 5.；達再利用水質之標準。

表 3　最佳條件織布廢水電解效應

織布廢水

	導電度(s/m)	酸鹼值	硬度(mg/L)	懸浮固體(mg/L)	化學需氧量(mg/L)
(電解 30 分) ↓	0.063	7.5	247	28	356.9
	0.241	9.62	73	7	74.6

處理前　　處理後水質清澈

圖 4　織布廢水經電聚浮除法後織水質

經電聚浮除法後處理之織布廢水，較為清澈。目前廠內已應用此回收水資源，回用於織布及染整染淺色之工業上。證實電聚浮除法確實有處理效益，亦也降低污泥生產量及成本。

四、結　論

本研究係藉由電聚浮除法將織布廢水進行實驗之水質回收再利用，分析回收水質及探討電聚浮除法之條件。經過多次的實驗及分析研究結果得知，利用電聚浮除法處理織布廢水，最佳條件當導電度 0.25mg/L、電解時間為 30min 及酸鹼值控制在中性時，可使硬度降低 70%、懸浮固體降低 75%、化學需氧量降低 79%且使處理後之水質呈現無色狀態，達到可回收再利用水質之標準，同時可重複應用於織布及染整製程上，經本實驗證實電聚浮除法確實有處理效益，亦也降低污泥生產量及成本；就目前而言，紡織工廠在於廢水回收前應先進行分類處理，污染性較低的織布廢水可藉由電聚浮除法進行初階回收淨化再利用，可大幅提升紡織工業循環經濟利用以及降低廢水處理以及排放處理之成本，同時達到環保及友善環境之紡織工廠生態。

五、參考文獻

1.經濟部工業局，2004。

2.經濟部，產業節水與水再生技術手冊，紡織業。

3.謝立生、黃建華譯，(1991)「環境工程化學」，科技圖書股份有限公司。

正滲透結合冷卻系統於低濃度氫氧化四甲基銨廢液資源化之研究

劉博文*、翁煥廷**、陳孝行***

摘　要

光電半導體業界生產需大量使用氫氧化四甲基銨，伴隨而來的就是廢水處理問題。同時生產光電半導體需要完整的配套廠務設備支援，例如需要冷卻水塔冷卻冰水機的運作廢熱，而冷卻水塔是運用部份冷卻水的蒸發，降低整體冷卻水的溫度，故冷卻水塔需要經常的補充冷卻水以維持運作。正滲透是一種先進的薄膜分離技術，這是運用溶液間的滲透壓差推動的低能耗技術。本研究將探討運用上述兩種系統之特性加以互補的可行性：以正滲透自低濃度廢液中萃取水分子，補充冷卻塔因蒸發損失的冷卻水，同時運用冷卻塔蒸發冷卻的方式濃縮被稀釋的驅動溶液;運用這種方式可減少冷卻水塔補水的需求，且正滲透驅動溶液也是使用節能的方式濃縮再使用。對暨有的廠務系統而言，驅動溶液與暨有設備的相容性，是能否整合應用的關鍵，本實驗將目前常見的驅動溶液與現行廠務系統進行腐蝕測試。其研究是以 ASTM G31–72 (Reapproved 2004)之規範進行浸泡測試，將目前廠務系統所慣用的鑄鐵、SUS 200 鋼材、SUS 304 鋼材、銅與黃銅等與氯化鈉、氯化鎂及乙二胺四乙酸二鈉鹽等三種驅動溶液進行相容性測試，並與實廠冷卻水對上述材質的腐蝕速率進行比較，實驗結果顯示以氯化鈉驅動溶液對現行廠務系統的腐蝕性是最低的，是暨有設備最佳的驅動溶液主配方。而以實廠廢液進行正滲透萃水實驗，平均水通量為 4.34 L/m^{2}h。進料溶液中的氫氧化四甲基銨濃度由 0.9 %濃縮至 1.97 %，濃度增加了約 54.3%。

【關鍵詞】正滲透、驅動溶液、氫氧化四甲基銨、冷卻塔

---

*國立臺北科技大學環境工程與管理研究所 碩士

**國立中央大學永續環境科技研究中心 顧問

***國立臺北科技大學環境工程與管理研究所 教授

一、前　言

正滲透(Forward osmosis, FO)是一種由滲透壓差驅動水分子移動的薄膜技術；不同於逆滲透需要外加操作壓力，其能源消耗遠小於逆滲透系統；但是藉由滲透壓操作的正滲透系統，需要驅動溶液(Draw solution)保持與進料溶液(Feed solution)一定的滲透壓差，才能維持系統的運作；在正滲透運作下，由於進料溶液中的水分子會持續進入驅動溶液，驅動溶液的滲透壓因稀釋而持續降低，導致正滲透的水通量持續下降，最終會使水通量接近於零。冷卻水塔的降溫機制之一，特別是在高環境溫度下，是以部份冷卻水的蒸發，吸收其他冷卻水的熱量，藉由部分冷卻水相變化的方式，降低冷卻水的溫度；藉由蒸發冷卻的方式雖然可以降低冷卻水的溫度，但是卻使冷卻水成為水蒸汽進入大氣，非常不容易回收，故需要適時的補充冷卻水。

而正滲透的自然滲透過程，溶劑從低滲透壓的一側透過選擇性半透膜滲透進入滲透壓較高的一側，利用此自然現象，以高滲透壓的驅動溶質調配而成的驅動溶液，配合相對低滲透壓的進料溶液就可以使溶液中水分子透過具選擇性的正滲透半透膜而在兩液側間移動，而且不需要如逆滲透系統外加的高壓力即可達成。

然而現行正滲透驅動溶液的濃縮再生大部分是以高耗能的方式為主；冷卻水塔蒸發失去的冷卻水則是持續的補充清水與相關藥劑。前述兩大問題是否能以實廠現行的設備與正滲透相結合進行處理之可行性？意即運用上述兩種系統，取上述兩種系統的之特性加以互補：以正滲透自低濃度廢液或其他次級水體中萃取水分子，補充冷卻塔系統因蒸發損失的冷卻水，同時運用冷卻塔蒸發冷卻的方式濃縮被稀釋的驅動溶液。

在前人的研究中，較常使用的驅動溶液為氯化鈉(NaCl)水溶液，其比例約佔四成[1]；氯化鈉為眾人所注目的驅動溶質，主要是具有許多優點：在水中具有高溶解度而較易得到較高的滲透壓[2]、便於循環二次使用、在系統中不易有結垢產生、低生物毒性、容易取得且取得成本低廉等優點[3]。在水中氯化鈉的高溶解度可以使驅動溶液具有較高的滲透壓，與低滲透壓的進料溶液相比產生的高滲透壓差，就能使正滲透系統產生較高的水通量。

Zhao 等人[4]為了找出正滲透系統最佳驅動液的研究，分別以氯化鈉(NaCl)、硝酸鈉($NaHNO_3$)、氯化鉀(KCl)、硝酸鉀(KNO_3)、氯化銨(NH_4Cl)、氯化鈣($CaCl_2$)與硝酸鈣($Ca(NO_3)_2$)等作為驅動溶液的溶質，以去離子水作為進料溶液，以 PRO 模式進行水通量實驗，在此研究中發現氯化鈉驅動溶液

具有最高的水通量(16.96L/m^2h) 其次是氯化鉀驅動溶液的水通量(16.55L/m^2h)。就水通量而言，氯化鈉為最佳驅動溶液的溶質，因具有高滲透壓，故具有較高的水通量；而以同濃度與同溶質的驅動溶液，分別以 PRO 模式與 FO 模式下進行水通量實驗，證明了 PRO 模式的水通量較 FO 模式高的許多，但正滲透薄膜卻容易產生結垢阻塞，而且較不易清洗。

Zhang 等人[5]研究以海水作為驅動溶液來處理污水，在此研究中驗證正滲透系統確實能截流許多污染物，且正滲透系統還具備較逆滲透系統為低耗能的優勢，實驗也發現，在正滲透薄膜上所產生的積垢遠較逆滲透系統為少，而且也容易清洗。這兩項優點均是由於正滲透系統中，驅動力是來自兩側液相間滲透壓差，促使水分子移動，這種自發反應，與傳統逆滲透系統是由高壓泵浦推動所達成的非自發反應，此種自發反應與非自發反應互相比較之下，促使正滲透系統所產生的薄膜積垢，不但其密度較逆滲透系統的積垢鬆散，而且更容易清洗，而且其積垢量更較逆滲透系統為少。此外，該實驗亦分別做了 PRO 模式與 FO 模式兩種的比較實驗，以探討欲設計正滲透進行處理污水時，是以何種模式架構系統較為適合。該實驗發現 PRO 模式，可以在系統初始階段得到很好的水通量，但隨著系統操作一段時間後，水通量便開始快速下降。其次是 PRO 模式系統的薄膜堵塞也較 FO 模式系統嚴重，而且其積垢也較 FO 模式系統的積垢難以清洗，從實驗結果來看，設計處理污水的正滲透系統時，因 FO 模式操作的水通量較為穩定，更重要的是 FO 模式下產生的薄膜積垢較 PRO 模式為少，且其積垢亦較 PRO 模式的積垢容易處理，便於重複使用，而使整套系統可以長期持續穩定的操作，總合上述的優點而言，架構需要長期且持續穩定運轉操作的正滲透污水回收系統，是以 FO 模式為主要處理模式較為合適。

Bamaga 等人[6]以氯化鈉為驅動溶質，控制改變驅動溶液中氯化鈉的濃度分別為 35g/L、50g/L、70g/L 及 100g/L 的條件下，實驗得到其純水通量各為 8.8L/m^2 · h、9.2 L/m^2 · h、11.4L/m^2 · h、14 L/m^2 · h。由此實驗結果，得知當氯化鈉濃度越高時，其所產生更大的滲透壓，將會促使正滲透系統的水通量增加。此實驗是兩階段薄膜程序，第一階段使用正滲透程序，第二階段再用逆滲透程序取得乾淨的水；在第一階段以海水作為正滲透程序的驅動溶液，在正滲透系統中回收廢水中的水分子；第二階段則以逆滲透系統回收正滲透程序使用後的被稀釋的驅動溶液，再經過濾等程序得到可供飲用的水與可再次使用的驅動溶液。此種正滲透系統與逆滲透系統組合，是由第一階段由正滲透系統回收廢水中的水分子，再以逆滲透系統濃縮被稀釋的驅動溶液；相較於直接以逆滲透系統進行廢水回收，可以減少在逆滲透系統的 RO

膜的結垢堵塞及伴隨的藥洗再生等困擾，藉以延長逆滲透系統 RO 薄膜之使用壽命、系統可操作時間及減少逆洗藥劑使用量等優勢。

二、光電半導體廠廠務系統及特殊化學品

1.中央空調系統

此類產業的生產廠房大部分為潔淨室(Clean room，俗稱無塵室)這種生產環境除了對粒狀物的嚴格控制外，也需要精確的溫度與濕度控制，提供此等大容積與高熱負荷的溫溼度控制能力，則需仰賴高功率的中央空調系統，其冷卻能力的核心就是冰水機(Chiller)，而冷卻冰水機所配套的冷卻水塔(Cooler tower)則是冰水機持續穩定運轉的重要輔助設備。

業界在高熱負荷環境下慣用的冰水機組原理是以壓縮機(Compressor)透過機械能把低溫低壓的空調製冷劑 Refrigerant (俗稱冷媒、一次冷媒，如常見的 R134a、R22 等) 氣體壓縮成高溫高壓的氣體送入冷凝器(Condenser)中，將壓縮機壓縮出來的高溫高壓氣體冷媒冷卻並凝縮成高壓高溫液體的冷媒，而此高壓高溫液體的冷媒，再回到蒸發器，在蒸發器內藉由液態的冷媒的蒸發，吸收來自相對高溫冷凍水的熱量，而氣態冷媒又經由冷凝器及壓縮機等回到蒸發器內，完成整個循環。二次冷媒的冷凍循環水由冷凍水泵將相對高溫的冷凍水泵入蒸發器盤管中與製冷劑進行熱交換，使原來的相對高溫的冷凍水降溫成為二次冷媒的低溫冷凍水，再將此低溫冷凍水送到終端裝置的各風機風口的冷卻盤管中吸收盤管周圍的空氣熱量，即可產生的低溫空氣，再由盤管風機將冷風吹送到需要的地方，以此達到降溫的目的。

空調系統中的冷媒製冷，其運作乃是依靠冷媒液體汽化製冷的原理，這是利用液體汽化時的吸熱效應及冷凝時的放熱效應來實現製冷的。當冷媒處在密閉的容器中時，此容器中除了液體冷媒及冷媒本身所產生的蒸汽外，並沒有其他任何氣體，而液體冷媒和蒸汽將在某一壓力下達到平衡，此時的汽體稱為飽和蒸汽，壓力稱為飽和壓力，溫度稱為飽和溫度。以巨觀的角度來說，密閉系統在平衡時液體不會汽化，但如果將一部分蒸汽從容器中抽走，液體則要開始汽化以產生一部分蒸汽來維持系統的平衡。液體汽化時需要自外界吸收熱量，此熱量稱為汽化潛熱。汽化潛熱是來自被冷卻的冷凍水，使冷凍水降低溫度。

冷卻水在冰水機內吸收壓縮機壓縮氣態冷媒的廢熱，使冷卻水的水溫升高後，送至冷卻塔上方的噴嘴，使冷卻水分散噴淋成細小水滴，流經填

料層時形成水膜，再流回塔底。冷卻水的水滴與水膜在流動的過程中與空氣直接接觸，產生熱量的直接傳遞，高溫冷卻水與空氣的溫度差是顯熱的傳遞的原因，而水滴與水膜表面飽和水蒸汽壓與空氣中的水蒸汽壓力差則是質量與潛熱傳遞的原因，這使部份液態冷卻水藉由蒸發至空氣中，同時吸收其周遭的熱量，並使其餘的冷卻水得以降溫的主要原因。

冷卻水塔的在高環境溫度下的冷卻水降溫機制：蒸發冷卻，這也是依靠液體汽化揮發時需要吸收熱量，進而促使整體冷卻水的水溫得以降低，但蒸發降溫的同時也會使的冷卻水的總量逐漸減少，而需要隨時監控並適時的加以補充才能維持系統的穩定持續運作。

大型冰水機等高熱負荷系統，搭配的冷卻水塔所需的保有水量非常龐大，且冷卻水會因蒸發冷卻而不斷的減少，另外因冷卻水水質控制所需的換水需求，使冷卻水塔所需的補充水量亦是相當龐大，一般每一次循環大約會因蒸發而減少整體冷卻水的 1%至 5%[8]，在此我們暫時先不計因操作不良或設計不良而造成冷卻水的風吹損失；隨著熱負荷的冷卻，部份的冷卻水持續的不斷汽化蒸發使整體的冷卻水溫度下降，我們知道水的汽化熱為 40.8 KJ/mole，相當於 2,266 KJ/Kg，再經過換算我們可知道每 1 公克的水汽化時，需要提供 539 卡的熱量；此有兩層意義：每 1 公克的水汽化蒸發時，可以帶走系統中 539 卡的熱量。但也表示，在冷卻水塔的蒸發冷卻的循環系統中每移除 539 卡熱量的同時，將會減少 1 公克的水。

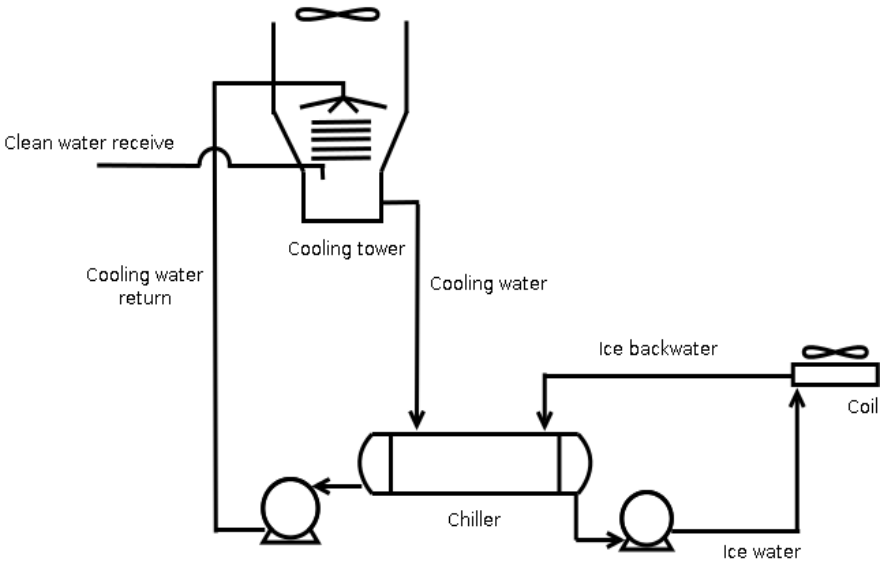


圖 1　中央空調系統運作原理示意簡圖

2.低濃度氫氧化四甲基銨廢液

氫氧化四甲基銨(Tetramethylammonium hydroxide, TMAH)在光電產業中通常廣泛使用在半導體表面處理及曝光微影兩大製程中；其中表面處理是利用氫氧化四甲基銨具有腐蝕的性質，做為晶圓或其他基材等清洗所的洗淨液。而在曝光微影的溼式蝕刻製程則是以氫氧化四甲基銨做為正型光阻的顯影液，以正光阻液其在曝光時保護需要保留的部分，再以氫氧化四甲基銨顯影液去除晶圓接受曝光後，受曝光的部份，並重復數次，以此方式在晶圓片上製造所需的部分與不需要部分的差異，此即晶圓的曝光微影製程。

光電產業界目前對於低濃度氫氧化四甲基銨廢液皆以排入廢水處理系統處理並排放為主，若能以正滲透加以回收再利用，即可減少廢水處理系統之有機負荷，以降低排入承受水體之氨氮，同時還具有低能耗的操作成本；同時，由於低濃度的氫氧化四甲基銨在回收上較無效益，也導致實廠上均選擇將其以廢水的方式處理，若能較為低廉成本的方式加以濃縮，則具有極大的回收誘因。

三、正滲透

正滲透是以兩液相間溶質濃度差所產生的滲透壓差所驅動水分子的薄膜技術，其水分子是由低濃度的低化學勢能處(進料溶液側)透過正滲透膜(選擇性薄膜)的孔隙進入到高濃度的高化學勢能處(驅動溶液側)的傳輸過程。進料溶液中的水分子透過此種自發反應，逐漸的移動到驅動溶液中，如此進料液的濃度將會逐漸的上升而得到濃縮的效果；而驅動液在持續的反應中，因水分子的增加而使濃度持續下降，所以需要進一步處理才能持續使系統的兩側的滲透壓差足以維持系統運作；而被稀釋的驅動液經過分離後，可以得到純淨的水與可再次使用的驅動溶液。也正因為在正滲透系統中使水分子轉移的動力是來自驅動液與進料液間的滲透壓差，並不若傳統逆滲透系統中需要外加泵浦所產生壓力差來驅動，所以有著低耗能、薄膜不易污染破壞與結垢的效果[9]。

圖 2 是正滲透與傳統逆滲透的比較圖，逆滲透(Reverse Osmosis, RO)通常是以泵浦外加高壓使水分子通過半透膜；但正滲透則是以兩側液相不同濃度溶液間的滲透壓差產生的壓力差使水分子通過半透膜。由於驅動力的來源不同，讓正滲透系統較傳統逆滲透系統有著相對環保節能與研究發展的未來性；不過由於正滲透膜的與系統應用組合的特性，造成驅動溶液

側的溶質分子也有反滲透 (reverse salt) 流進入進料溶液的現象。

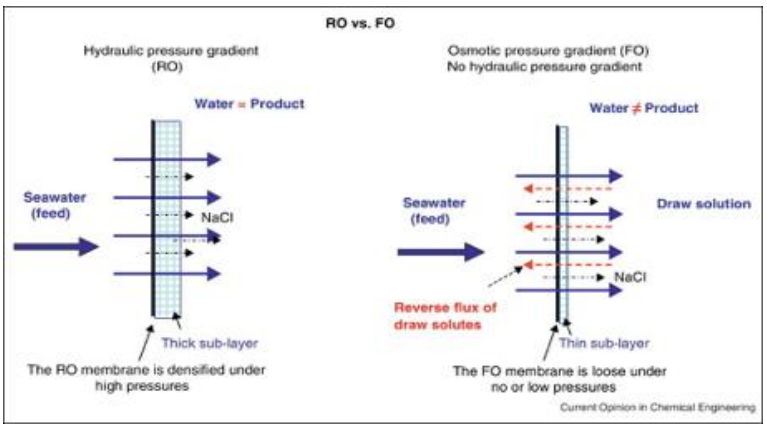


圖 2　正滲透與逆滲透之比較圖

四、正滲透技術與冷卻水塔的互補

正滲透的驅動溶液經過使用後其滲透壓會降低，通常需要進行濃縮等方式處理才能再次使用；而藉由蒸發冷卻運作的冷卻塔其冷卻水會持續減少，需要適時的補充。如何以節能的方式維持正滲透驅動溶液的滲透壓，一直是研究的重點；而對於冷卻塔而言，因其蒸發所消耗的水資源龐大，如何經濟的應用有限的水資源，則是業界的目標。本研究將探討將上述兩大問題以實廠現行的設備進行處理之可行性；意即運用上述兩種系統，取上述兩種系統的之特性加以互補：以正滲透自低濃度廢液中萃取水分子，補充冷卻塔系統因蒸發損失的冷卻水，同時運用冷卻塔蒸發冷卻的方式濃縮被稀釋的驅動溶液，其構想如圖 3 所示。

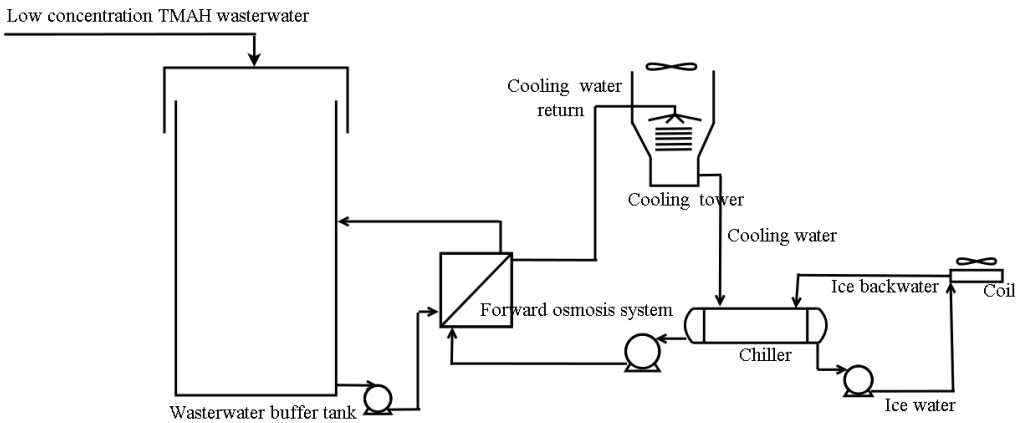


圖 3　正滲透廢液濃縮系統與冷卻水塔補水系統架構示意圖

在正滲透系統中，驅動溶質的選擇就是正滲透的系統運作時正滲透取水與否正常運作的關鍵，驅動溶液可藉由兩液側間不同的滲透壓差而將水分子自低滲透壓測(進料液側)汲取出來；同時在此混合系統中，此驅動溶液同時也是冷卻塔等運用蒸發冷卻原理的冷卻水，在提供熱負荷冷卻的效果的時，以蒸發冷卻降低冷卻水溫度的特性，濃縮被稀釋的驅動溶液，借此方式維持正滲透系統的運作。

五、正滲透與現行廠務系統相容性評估

雖然正滲透有著節能的特性，但與目前既有的廠務設備能否相容則是在整合前需要探討的地方。目前我國工業界的冷卻水塔，其冷卻水源以使用淡水為原水者為大宗，同時依靠添加腐蝕抑制劑(corrosion inhibitor)及其他藥劑，達成對於系統腐蝕的控制與冷卻水質的控制與穩定。探究其原因，其主要管路之材質均以鑄鐵為主，而熱交換部亦是以黃銅、銅或是其他銅基合金為主，此兩者選擇均是因其低廉的價格、成熟的安裝工法及良好的熱交換效率。而現行的設備，是否可以直接使用驅動溶液取代原先的清水基底冷卻水，則是我們需要先行評估的地方。

本實驗項目依據 ASTM G31–72 (Reapproved 2004) Standard Practice for Laboratory Immersion Corrosion Testing of Metals 進行五種材質與三種驅動溶液之重量損失實驗，取五種材料之原始試片，即鑄鐵板(ASTM A48M)、SUS 200(ASTM XM-31)級不鏽鋼板、SUS 304(JIS SUS 304)級不鏽鋼板、鋅銅合金板(UNS C28000)及銅板(UNS C10200)等五種板材，此五種材料為現行廠務系統較常見或較有可能採用之材質，分別代表水系統現行之鑄鐵管、SUS 200 管、SUS 304 管及用在熱交換系統之黃銅管與紅銅管之原始材料。

腐蝕測試所採用之驅動溶液採用氯化鈉驅動溶液、氯化鎂驅動溶液與乙二胺四乙酸二鈉鹽驅動溶液，其濃度統一均為 0.6M，另取某光電半導體廠空調系統所使用冷卻水塔之冷卻水及本實驗室之純水與上述三種驅動溶液對於五種材料腐蝕進行比對。本實驗配合實廠作業，將盛裝試片與溶液之溶器置於實廠現場，現場為一開放環境，確保受試組合處於真實環境溫度下進行六十天之實驗。完成之試樣，依照 ASTM G31-72 附屬指引 G1−03 (Reapproved 2011) Standard Practice for Preparing, Cleaning, and Evaluating Corrosion Test Specimens 進行後續之酸洗等後續處理程序。

表　1 各材質與浸泡溶液之腐蝕速率表

腐蝕速率 mpy（試片種類 / 浸泡溶液）	A48	SUS200	SUS304	C10200	C28000
DI	2.12	0	0	0.01	0.02
Cooling water	2.12	0	0	0	0
0.6M EDTA-2Na	4.96	0	0	2.48	2.23
0.6M $MgCl_2$	3.18	0.16	0	1.25	0.18
0.6M NaCl	2.17	0	0	0.43	0.13

從表 1 各材質與浸泡溶液之腐蝕速率表我們得知，本實驗採用的驅動溶液對於現行廠務系統的腐蝕性是很大的，這給我們兩個大方向去研究，第一個方向是減少驅動溶液的腐蝕性：本實驗採用的是單質未添加任何腐蝕抑制劑等的純驅動溶液，但就算是實廠系統採用清水為基礎仍然是要添加腐蝕抑制劑或抗腐蝕劑以減低對系統的腐蝕性。第二方向則是變更實廠廠務系統的材質，例如原先採用銅或鋅銅合金(黃銅)的熱交換器改採鎳銅合金(白銅)、鈦合金或是其他抗腐蝕的材質製作；原先採用鑄鐵的管路則可視預算與選用的驅動溶液改用 SUS 200、SUS 304 或其他抗腐蝕性更佳的材質配管，以配合正滲透系統驅動溶液的特性。

六、氫氧化四甲基銨濃縮回收之可行性分析

1 實廠廢液濃縮分析

本實驗以 HTI 生產之 CTA 薄膜搭配本實驗自製的正滲透實驗模組與流量控制系統，以某光電半導體廠的實廠廢液未過濾原液 2 公升做為進料容液，搭配使用本實驗室自行配置 5 公升的 0.6M 氯化鈉驅動溶液進行 50 小時的正滲透萃水實驗，使用進料溶液面對支稱層的 FO 模式進行。驅動溶液設定掃流速度為 73.985cm/min，進料溶液設定掃流速度為 74.715 cm/min。

實驗進行中其第一個小時的初始水通量達到 5.24 L/m^2h，隨著實驗時間的增加，逐漸下降，直至結束前一小時為 3.76 L/m^2h，全程平均為 4.34 L/m^2h。驅動溶液滲透壓自開始的 1,036mOsm/Kg 到最終結束為 773mOsm/Kg。進料溶液中的氫氧化四甲基銨濃度由 0.9 %濃縮至 1.97 %，濃度增加了約 54.3%，其結果如圖 4 所示。

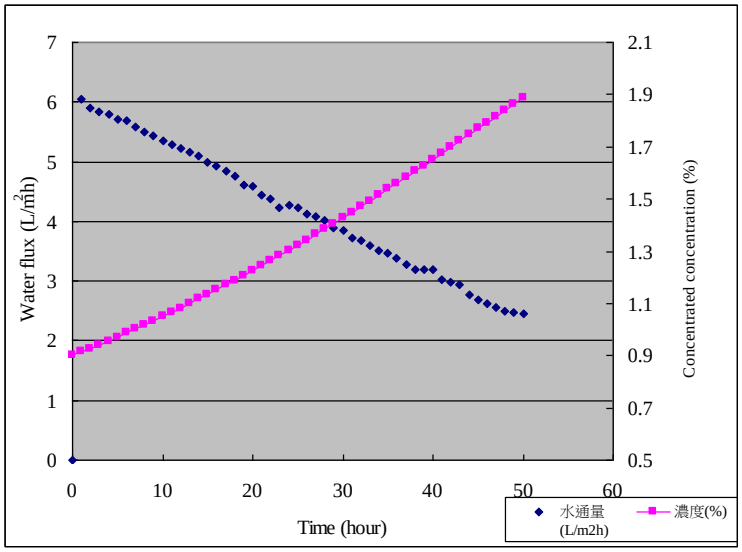


圖 4　實廠廢水 50 小時濃縮實驗結果

未經過濾等前處理程序之實廠廢液的原液其中含有許多雜質，非常容易造成正滲透薄膜在萃水過程中產生一層附著於薄膜表面的雜質累積，這在本實驗中亦獲得證實，而此雜質層亦會干擾正滲透萃水的程序進行，如圖 5 所示。但由於正滲透系統是採用低壓操作的特性，且本實驗採用 HTI 原廠建議的 FO 模式進行，這些累積的雜質完全不需清潔劑或藥劑，甚至於在正滲透萃水試驗結束時，採用類似實廠所慣用的配合鼓風機加入空氣的氣泡的方式衝擊，即可以有明顯的效果，其成效如圖 6 所示；若想要更進一步的清潔，亦只要些許微弱的衝擊(洗瓶提供的沖洗壓力即足夠清洗)，即可將表面累積的雜質自表面移除，同時清除後其薄膜的水通量也回到良好的狀態。

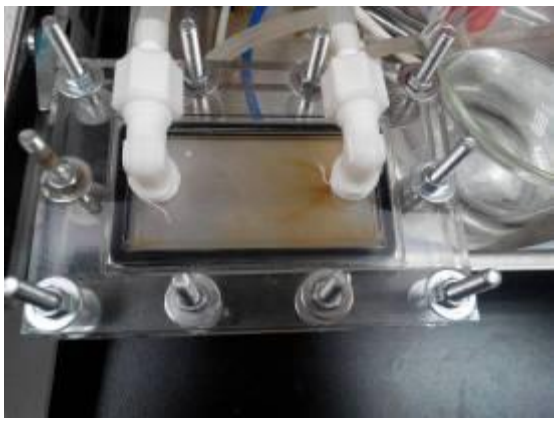


圖 5　實驗結束時的薄膜表面由雜質所堆積的薄層

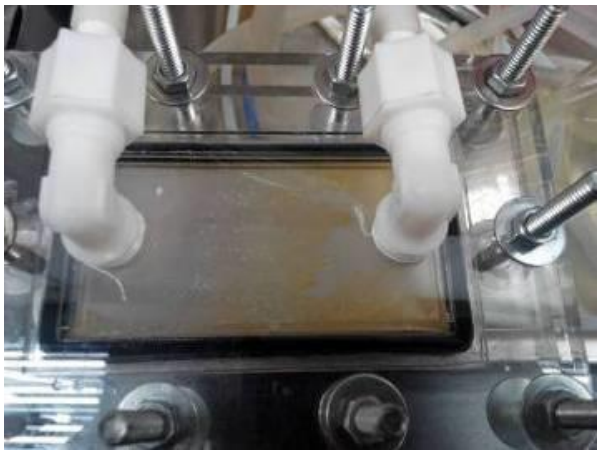


圖 6　模擬外加鼓風機造成氣泡衝擊之效果

圖 7　以洗瓶及去離子水清洗薄膜表面

圖 8　完成清洗之薄膜

將上述實廠廢水進行正滲透萃水的薄膜，經過簡單的清洗後，重新進

行清水通量測試。以 0.6M NaCl 做為驅動溶液，設定掃流速度為 73.985 cm/min；以 DI 為進料溶液，設定掃流速度為 74.715 cm/min，使用本實驗室自行設計的正滲透實驗模組進行測試。測試結果其清水通量為 4.94 L/m2h，對比進行實廠廢水正滲透實驗前以同樣測試條件進行清水通量測試所得之清水通量為 5.18 L/m^{2}h。由此兩數據進行比較，以未過濾實廠廢水進行 50 小時的正滲透萃水的 CTA 薄膜，以去離子水簡單的清洗後之薄膜，清水通量減少了 4.63%。

2.環境溫度與模擬廢液通量之比較

目前業界，低濃度氫氧化四甲基銨廢液是以排入有機廢水處理系統進行處理為主，若能以較為低廉的成本提高濃度，則可為低濃度氫氧化四甲基銨廢液處理的一個方向，即濃縮回收提純後再利用。本實驗使用 HTI OsMem 2521 進行測試，驅動溶液掃流速度為 2.959cm/min，進料溶液側的流量則為 2.989cm/min。以 0.6M 的氯化鈉溶液作為驅動溶液，以自行稀釋的 0.9%氫氧化四甲基銨溶液作為進料溶液，在自然環境溫度的條件下，進行 30 分鐘的濃縮效率的測試。在運用正滲透方式濃縮的過程中，我們可以發現其環境溫度越高，水通量與濃縮效果越好；其結果如表 2，結果如圖 9 所示。

表 2　氫氧化四甲基銨濃縮實驗數據

Environmental temperature (℃)	25.4	25.9	26.4	27.5	27.9
Water temperature (℃)	24.9	25.5	25.8	26.0	26.3
Concentrated concentration (%)	1.5	1.8	2.0	2.1	2.2
Water flux (L/m^{2}h)	3.3	4.1	4.3	4.5	4.7

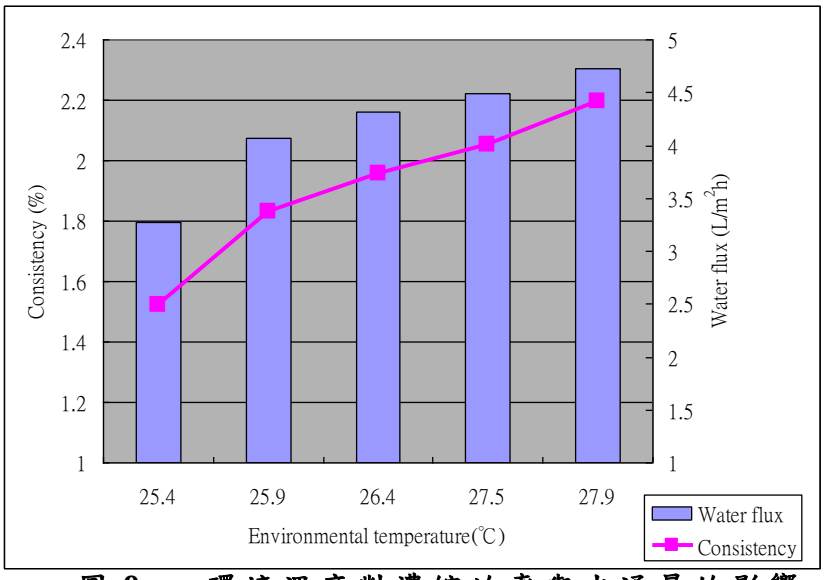


圖 9　環境溫度對濃縮效率與水通量的影響

七、結　論

將正滲透結合冷卻水塔：藉由蒸發冷卻來濃縮驅動溶液，同時冷卻水的補充也藉由正滲透自次級水體中取得，這兩種系統的互補將成為雙贏的選項，其效益是非常良好的；然而業界目前系統，並不適合直接使用現行的驅動溶液，需要減少驅動溶液的腐蝕性或是變更廠務端硬體才能應用。其中由於0.6M氯化鈉驅動溶液的已具有足夠的滲透壓與4.3 L/m^2h高水通量，且對鑄鐵腐蝕速率為2.17 mpy，腐蝕性相較0.6 M氯化鎂驅動溶液(對鑄鐵腐蝕速率為3.18 mpy)與0.6M EDTA-2Na驅動溶液(對鑄鐵腐蝕速率為4.96 mpy)為低，且氯化鈉驅動溶液與海水性質接近，現行業界已有成熟的對海水腐蝕性控制之技術，是正滲透系統應用良好的選擇。而採用支撐層面對進料溶液的方式(FO mode)進行正滲透，雖然系統的水通量較小，但可以確保正滲透薄膜本身的壽命較為長久，且正滲透薄膜萃水速率較為穩定，是較適含雜質較多的實廠狀況下，較佳的選擇。實廠氫氧化四甲基銨廢液濃縮實驗中，進料溶液中的氫氧化四甲基銨濃度由0.9 %濃縮至1.97 %，濃度增加了約54.3%。所以目前光電半導體廠中含低濃度氫氧化四甲基胺的廢液，可藉正滲透法進行分離回收，待濃度提高後，得以其他程序進行更進一步的濃縮回收或其他運用。

八、參考文獻

1.K. Lutchmiah, A.R.D. Verliefde, K. Roest, L.C. Rietveld, E.R. Cornelissen, “Forward osmosis for application in wastewater treatment: A review.” Water Research, vol. 58, 2014, pp. 179-197.

2.T. Y. Cath, A. E. Childress, M. Elimelech “Forward osmosis: Principles, applications, and recent developments.” Journal of Membrane Science, vol. 281, (1–2) 2006, pp. 70-87.

3.A. Achilli , T. Y. Cath, A. E. Childress “Selection of inorganic-based draw solutions for forward osmosis applications,” Journal of Membrane Science,vol. 364, (1-2), 2010, pp. 233-241.

4.P. Zhao, Q.Yue, B. Gao, J. Kong, H. Rong, P. Liu, H. K. Shon, Q. Li,

"Influence of different ion types and membrane orientations on the forward osmosis performance," Desalination, vol. 344(0) 2014, pp. 123-128.

5.X. Zhang, Z. Ning, D. K.Wang, João C. Diniz da Costa, "Processing municipal wastewaters by forward osmosis using CTA membrane," Journal of Membrane Science, vol. 468, (0), 2014, pp. 269-275.

6.O.A. Bamaga, A. Yokochi, B. Zabara, A.S. Babaqi, "Hybrid FO/RO desalination system: Preliminary assessment of osmotic energy recovery and designs of new FO membrane module configurations," Desalination, vol. 268, (1-3), 2011, pp. 163-169.

7.Peter G. Nicoll, Neil A. Thompson, Michael R.Bedford. MANIPULATED OSMOSIS APPLIED TO EVAPORATIVE COOLING MAKEUP WATER-REVOLUTIONARY TECHNOLOGY. World Congress/Perth Convention and Exhibition Centre (PCEC), Perth, Western Australia September 4-9,2011

8.徐德勝，韓厚德主編，製冷與空調-原理・結構・操作・維修，上海：上海交通大學出版社， 1998，第 140 頁。

9.Y. Xu, X. Peng, C.Y. Tang, Q.S. Fu, and S. Nie, "Effect of draw solution concentration and operating conditions on forward osmosis and pressure retarded osmosis performance in a spiral wound module," Journal of Membrane Science, vol. 348, (1–2) 2010, pp. 298-309.

10.A. H. Hawari, N. Kamal, A. Altaee, "Combined influence of temperature and flow rate of feeds on the performance of forward osmosis," Desalination , vol. 398, 2016, pp. 98-105.

染整廢水回收再利用之循環技術

林明旺*、劉柏緯**

摘　要

染整工業製程上使用大量水源，其製程廢水來源將伴隨著生產流程、產品種類及最終排放單元不同，亦有高複雜之變化，同時增加廢水回收再利用的困難度；回收水設備需要能穩定有效處理各式汙染的綜合廢水，並穩定維持回收水質，已成為重要之議題。

本研究針對染整之染色、水洗及烘乾製程用水單元，進行廢水處理後放流水回收再利用之研究；目標應用於中、深不敏感色系之染色及水洗製程中。其廢水處理方式為調勻、生物處理、快混、慢混及沉澱等功能。研究結果得知，利用該廢水處理方式，有效調整酸鹼值 6.0-8.0、生化需氧量≤100mg/L、硬度≤70mg/L、濁度≤300NTU、色度≤120 及導電度≤5,000μs/cm。此經處理回收之水質，應用於中、深不敏感色系之染色及水洗製程中，確實與原水染色所呈現之色度相近。目前總回收再利用率≥20%，證實可應用於廢水回收再利用清潔生產之開發，降低染整工業上之耗水及循環再利用之技術。

【關鍵詞】染整、回收水、循環

---

*東豐纖維企業股份有限公司創新研發中心　處長

**東豐纖維企業股份有限公司創新研發中心　管理師

一、前　言

由於早期我國紡織工業的高度發展以及消費者對於衣著的需求，許多不同的溶劑、染劑及有機化合物大量的應用在紡織工業製程原料中，經過紡紗、織造及染整程序後，所輸入之淨水形成大量具有汙染物之廢水產生，隨著不同原料、製程、產品及排放單元，所排放的廢水內容物包括有大量的有機化合物、酸、鹼及重金屬物質，使得紡織產業在於廢水回收再利用之環保工程繁複且不易達到廢棄回收重複使用之循環經濟，不同製程產生的廢水內容物也大不相同，不同製程對於回收再利用之水資源亦截然不同，但早期紡織工業的相關工廠因為規模較小且為求便利、快速，大多將所產生的廢水在混合後才進行淨化工程，投入大量的化學藥劑將廢水淨化至可排放之標準後進行廢水排放，從未由製程的根本進行分類回收再重複使用；隨著我國紡織工業的高度發展及改良，各製程排放之廢水亦持續不斷大幅成長，個別製程的廢水已可達到個別處理的排放量，因此，紡織工業如何能夠將個別製程的廢水進行分類回收淨化再利用，以達到環境保護及循環經濟的目標，已成為我國目前紡織工業極需解決的重要課題及發展目標。

因此，要達到廢水回收再利用之終極目標，應先從紡織工業製程進行分析，隨著纖維種類、加工方法、染料助劑及產品品質要求因素之差異，不同製程及產品所需要的淨水要求不盡相同，若能藉著製程廢水回收淨化再利用的方式，將染整廢水獨立經過淨化後應用於中、深不敏感色系之染色及水洗製程中，以達到與原水染色所呈現相近色度之回收再利用之廢水，即可大幅提升廢水回收再利用之效能及降低淨化廢水之成本，同時避免因多種廢水混合造成的投藥過量、效果不彰及經濟效益低落之問題；於是，本研究主要針對染整之染色、水洗及烘乾製程用水單元，個別進行廢水處理後放流水回收再利用之研究，藉由調勻、生物處理、快混、慢混及沉澱之程序重複淨化回收提升紡織工業染整製程中廢水回收率並有效淨化水質達到中、深不敏感色系之染色及水洗製程之淨水色度要求，同時評估其他廢水回收再使用之需求及可行製程。

二、染整廢水回收再利用之循環技術之現況及處理方法

國內染整業者面臨競爭激烈市場、利潤下降及染整廢水所造成環境汙染議題，其中又以染整廢水處理最為業者感到困擾。目前紡織工業以染整廢水最為複雜，主要包含染料中的有機化合物、酸、鹼及重金屬物質，其中，染料化合物中具有高色度、高有機濃度、特殊毒性、複雜結構及不易劣化等特性，已被環保署列為八大污染源之一[1]。染整製程中將胚布經過錫林、精煉、染色及整理等之處理過程如圖 1 所示，以提高紡織品之美感、手感等附加價值，並增加其特性及用途[2]，而製程及藥劑使用量上，主要是依其纖維種類而有所不同。

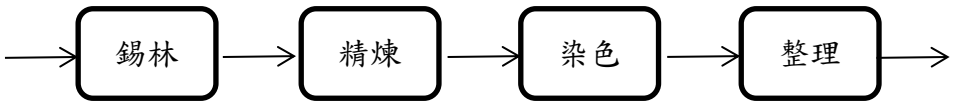


圖 1　染整製程

染整工業於製程中需要耗掉大量水、蒸氣、染料及助劑，而染料所造成之汙染，主要係因高色度及化學需氧量所造成之環境問題。而其廢水處理又因加工型態不同，以至於所產生之廢水成份複雜，增加處理技術上的困難，加上現今環保意識抬頭，故能有效的將染整廢水處理回收再利用，有效減少潔淨天然水資源、及能源用量、使得工廠成本降低、廢棄物減少及降低汙水處理費用已成為重要之議題。尤其近年來環保署訂定之染整業放流水之標準越來越嚴苛，將水資源再回收使用已成為相關業者的重要課題，行政院環保署對於染整業者所規定之法規[3-4]表 1 所示

表 1　行政院環保署染整廠制定水質標準

名稱	生化需氧量	化學需氧量	懸浮固體	真色色度
濃度值(mg/L)	30	160	30	550

常見廢水處理原則依其處理方法廢水處理可分為以下三種：

1. 物理處理：物理處理的主要目的是為了去除廢水中之懸浮固體物。
2. 化學處理：為降低水污染負荷，處理污染物質常利用化學藥品之化學作

用以達到處理廢水的目的。

3. 生物處理：利用微生物在適宜環境下，將廢水的有機化合物分解成無機鹽類。

目前對於染整業者之廢水的治理方式主要包含有水解酸化、活性污泥法、缺氧/好氧處理、生物接觸氧化法、生物活性碳法及曝氣生物濾池法…等方法如表 2 所示，許多染整工廠大多採取將廢水經過預處理後，以生物處理技術為主，物理化學處理技術為輔的綜合處理技術。

表 2　常見染整業者之廢水治理方式

方法	原理	優缺點	適用範圍
生化處理技術			
水解酸化	將厭氧生化作用控制在水解和酸化階段,將微生物降解的大分子有機物分解為較易生物降解的小分子有機汙染物，以利於廢水後續好氧生物處理，減輕處理負荷	可改善廢水可生化性，降低色度並有一定的有機物去除效果	適用於有機汙染濃度較高，可生化性較低的紡織染整廢水預處理
活性污泥法	通過活性污泥中微生物生化作用,將可生物降解有機汙染物轉化 CO_2,等無機物質	廣泛應用，經濟實用	適用於各類紡織染整廢水處理
缺氧/好氧	指在好氧池錢段設置缺氧池， 缺氧池中反消化系中轉化氮氣	脫氮效率高，工法成熟，廣泛應用，經濟實用	適用於各類紡織染整廢水處理
生物接觸氧化法	採用生物填料作為微生物載體,生長有微生物的載體浸泡在沸水中,在微生物代謝作用下，有機汙染物得到去除	微生物量大，處理效果好，且汙泥量少	適用於各類紡織染整廢水處理
生物活性碳	好氧池添加活性碳,使微生物大量聚集在表面，亦也提高汙泥沉降性能	可提高難降解有機汙染物的去除效果	適用於各類紡織染整廢水處理
生物濾池	曝氣生物濾池氧化與吸附過濾一體	處理流程短，效率高出水水質好	適用於各類染整廢水深度處理

本研究要旨，結合物理、生物及化學處理法，此法目的主要針對染整廢水之處理效能，如:降低藥劑投入量、縮短反應，並將處理過後的廢水回收再利用，進行染色，以達到水循環再利用的效果。

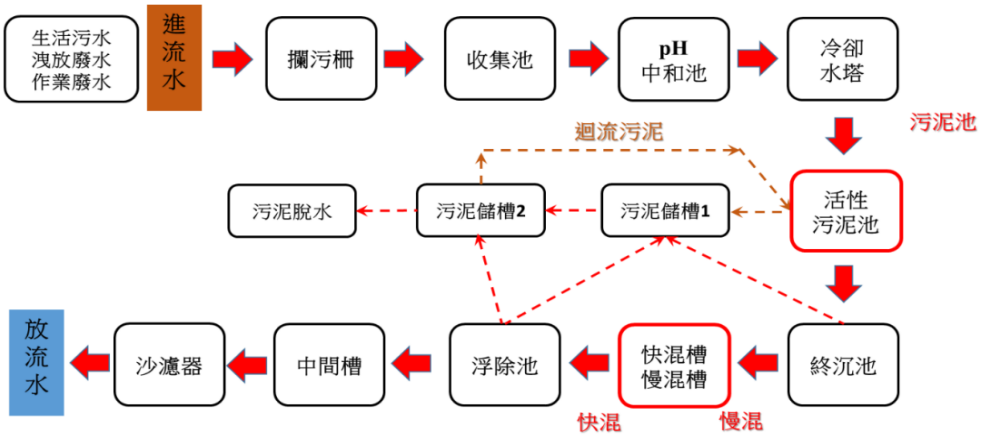


圖 2　廢水處理流程

本研究將以下部分進行長時間觀察及廢水處理之探討

1.處理之放流水檢測結果。

2.回收染整廢水對聚酯纖維染色之可行性探討。

3.水應用於實際染色之處理成效。

染整廢水回收再利用之循環技術的基本概念主要是藉由預處理後將 pH 值中和後導入活性污泥池，藉由調勻、生物處理、快混、慢混及沉澱等方法進行廢水回收再利用，再經由活性污泥池、汙泥儲槽、終沉池、浮除池使迴流汙泥重複循環過濾沉澱獲得可再利用於中、深不敏感染整廢水回收再利用之循環技術實驗結果及實施現況。

三、染整廢水回收再利用循環技術之相關要求及成效

染整廢水利用生物及化學處理法進行處理，處理過程需經過調勻、活性污泥、沉澱快混及慢混等功能。在生物處理法過程中，需添加生物型藥劑來有效分解有機物質等項目，後續再經化學藥劑去除無機物，以利降低水中化需氧量、硬度及色度，有效將水回用，圖 3 為染整放流水之回用流程圖。

利用該廢水處理方式，首先，將染整或織布廢水排放至收集池，集水一段時間後將其排入 pH 中和池內，使廢水之 pH 值中和達到接近中性程度，藉由添加適量生物型藥劑使其有機物進行分解以及利用些許化學藥劑去除水中無機化合物以降低水中需氧量、硬度及色度，經過放流水水質檢測結果得知，酸鹼值達 7.0~8.0、生化需氧量≤100mg/L、硬度≤70mg/L、濁度≤300NTU、色度≤120 及導電度≤5,000μs/cm。

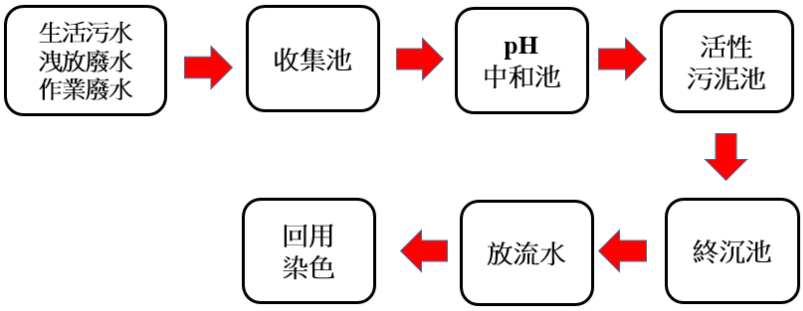


圖 3 放流水回用流程圖

由於紡織工業廢水產生之流程以及內含物具有極大差異性，所需投放之生物型藥劑及化學藥劑之種類及劑量各有不同，且若將其混合後再處理之方法將更為複雜，因此將染整製程廢水獨立進行回收、處理再利用之系統化程序有相當必要性，此經處理回收之水質，測試於染色中、深不敏感色系之染色及水洗製程中，如圖 4 下方係利用染色標準樣布為標準，以相同配方搭配一般標準水及回收放流水進行染色之測試結果數據如表 3：

(a) (b)

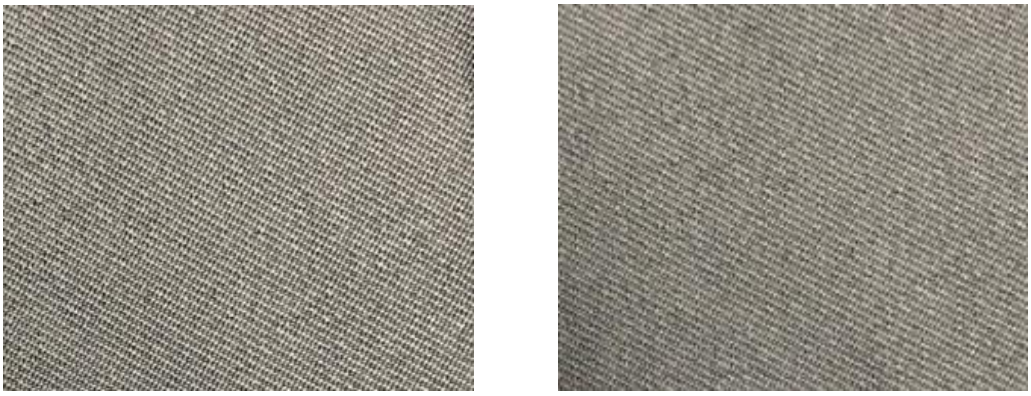


圖 4 (a)標準水染色(b)放流水染色

利用相同配方搭配不同水源染色測試之結果，確實與原水染色所呈現之色度相當接近，茲敘述如下表 3 所示。

經過染整廢水後，目前廠內總回收再利用率≥大於 20%，根據中、深不敏感色系之染色及水洗製程所需淨水使用色度及相關標準，經本研究結果得知可廣泛應用在中、深不敏感色系之染色及水洗製程中，使染整廢水回收再利用以降低廢水排放率及提升整體循環經濟效益。

表 3　(a)標準水染色(b)放流水染色數據表

標準水染色	DL*	Da*	Db*	CIE DE	Status	color Comment
D65 10	-0.21	0.05	-0.01	0.21	Pass	more red more blue
U3000 10	-0.21	0.07	-0.05	0.23	Pass	more red more blue
F02 10	-0.21	0.05	-0.03	0.22	Pass	more red more blue
放流水染色	DL*	Da*	Db*	CIE DE	Status	color Comment
D65 10	-0.26	-0.01	-0.13	0.29	Pass	more green more blue
U3000 10	-0.28	0	-0.18	0.33	Pass	more green more blue
F02 10	-0.27	0.01	-0.16	0.31	Pass	more red more blue

四、結　論

本研究針對染整之染色、水洗及烘乾製程用水單元，進行廢水處理後放流水回收再利用之研究;目標應用於中、深不敏感色系之染色及水洗製程中。其廢水處理方式為調勻、生物處理、快混、慢混及沉澱等功能。研究結果得知，利用該廢水處理方式，有效調整酸鹼值 6.0~8.0、生化需氧量≤100mg/L、硬度≤70mg/L、濁度≤300NTU、色度≤120 及導電度≤5,000μs/cm。此經處理回收之水質，應用於中、深不敏感色系之染色及水洗製程中，確實與原水染色所呈現之色度相近。目前總回收再利用率≥20%，證實可應用於廢水回收再利用清潔生產之開發，降低染整工業上之耗水及循環再利用之技術。

五、參考文獻

1.呂世宗，“台灣省染整工廠廢水解決方案之研究”，工業污染防治，第三卷，p.40-p.46，1984.

2.黃政平，「家庭與工業廢水處理」，萬人出版有限公司，地 100-101 頁(2002)

3.行政院環保署之環保訓練網站~ www.epa.gov.tw/trauning/index.html，2012。

4.行政院環境保護署環境保護人員訓練所，水污染防治法規，2002。

國產薄膜過濾器應用於化學研磨廢水回收效果實測

吳成湖*、曾裕霖 **、陳韋名***、劉朝凱***

摘　要

薄膜處理技術近年已成為全球水處理的主流設計，但台灣具有自製能力的廠商卻極少，市場幾乎為美、日等大品牌廠所壟斷；而為了印證台灣自行開發產製的薄膜過濾器(Continuous Membrane Filtration ,CMF)，其功能足以媲美進口品牌，集盛以自製的薄膜過濾器，參與國內某一採用國外品牌 CMF 處理化學研磨(Chemical Mechanical Polishing ,CMP)廢水的半導體廠，於其廢水處理廠進行為期近 3 個月的連續平行比對測試。

半導體廠 CMP 廢水水質大於 200 NTU，平均粒徑 115~120 nm，超濾膜(Ultra Filtration ,UF)產水水質要求須小於 1 NTU，方能進入 RO 系統處理；此次測試結果，國外知名廠商 UF 產水平均濁度為 0.106 NTU，膜組產水通量 27.1 LMH(liter/m^2/hour)，操作跨膜壓差 0.8 kg/cm^2，集盛自製 UF 產水平均濁度為 0.18 NTU，模組產水通量 87.9 LMH，操作跨膜壓差 0.5 kg/cm^2。

集盛與國外知名廠商 UF 產水濁度均小於 1 NTU，皆符合 UF 產水標準，於數據顯示集盛 UF 產水平均濁度雖相對較高，但可降低薄膜系統運作負擔，延長產品使用壽命；此外，集盛 UF 模組不僅產水平均通量超出既設系統 60 LMH 以上，操作平均跨膜壓差較低 0.3 kg/cm^2，故整體模組通量表現上，集盛均優於國外知名廠商，在規畫設計上，除可降低模組需求量，縮減系統佔地空間；而在操作方面，也因跨膜壓差較小，所需泵浦馬力較低，用電較省，使得處理費用更具競爭力。

【關鍵詞】中空纖維膜、薄膜過濾器、化學研磨、廢水回收、超濾

---

*集盛實業(股)公司水材業務部經理

**集盛實業(股)公司研發中心研究員

***集盛實業(股)公司水材廠產品工程師

一、前　言

現今化學機械研磨(CMP)製程已經廣泛使用於半導體業晶圓的製造程序，對於晶圓表面全面性平坦化是有效的製程。雖然 CMP 製程是現代半導體業晶圓製造重要的技術，但其排放的廢水是一個高污染的製程。

CMP 廢水包含來自於研磨液、晶圓本身以及 CMP 後續清洗程序所產生的各種無機及有機污染物質，大部份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，包含 SiO_2、$Al2O_3$ 及 CeO_2，還有一些在研磨時從晶圓本身掉下來的無機物質(例如：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 廢水中的有機物包含界面活性劑、金屬錯合劑以及其他物質。為了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。

據統計[1]，以一個擁有 20 台 CMP 製程機具的公司而言，每天將產生 700 m^3 的 CMP 廢水；在 1999 年及 2000 年估計分別有 4.088×108 m^3 及超過 5.223×108 m^3 的超純水用於 CMP 製程，此用水佔了整個半導體用水的 40% 左右。如此龐大的 CMP 製程用水必定產生大量的 CMP 廢水，此廢水量大且鹼度、總固體物及濁度高，因此必須妥善加以處理。

由於化學研磨(CMP)程序之耗水量佔了半導體廠總用水量近 40%；所以，在考量台灣目前枯水期供水不足、日益嚴格的排放水標準、及持續上漲的水污費等多重環境因素下，幾乎所有半導體廠均已針對此程序之廢水進行回收處理，以期達成節水、減排之雙重目的。

但化學研磨廢水因水量大、濁度及總懸浮物濃度高、粒徑分佈極窄(100-1,000nm)等特性，其處理難度頗高；加上半導體製程用水之水質要求相當高；所以，如要將化學研磨廢水處理後再回收供製程使用，更是一大挑戰。而以薄膜(UF+RO)系統作為化學研磨廢水回收處理技術，因具有操作彈性高、空間需求小、且處理水質佳等優點，目前已為各大半導體廠接納採用。

國內 UF 市場長年被國際大廠壟斷，無自行生產能力，集盛近年來投資資金與人力，自行研發 UF 中空纖維膜與封裝技術，並與國內半導體大廠合作，將集盛與國外大廠 UF，平行比較過濾 CMP 廢水，而藉由綜整此次測試結果分享，除展現集盛自製薄膜過濾器的性能外，期也能為擴展台灣自製環保設備市場貢獻一份心力。

二、文獻回顧

1.化學機械研磨技術

隨著時代的變遷以及科技文明發展日新月異，我國經濟產業發展亦由傳統工業逐漸發展成以高科技技術為導向的經濟產業型態。在目前所有的科技產業中，其中又以半導體元件產業為最受矚目，其主要基本概念係經由高精密度的積體電路(Integrated Circuit, IC)完成的電子電路元件與矽半導體所組合而成。簡而言之，半導體產業可區分前、中及後端製程，前端製程為晶圓加工製造，中段製程為晶圓與電子電路元件製造以及後端的晶圓封裝。在前及中段製程中，化學機械研磨(Chemical Mechanical Polishing, CMP)扮演成功與否的關鍵技術。在強勢的競爭環境下，企業為了維持在業界的優勢及塑造企業社會形象，近年投入大量的資本及人力，不斷地提升整個製程技術高精密化、輕量化、功能性及更微小化並積極研發低污染性產品，以降低對環境生態的衝擊。

2.化學機械研磨原理

化學機械研磨與晶圓基板的拋光製程相近[3]。利用類似“磨刀”這種機械式研磨的原理，配合適當的化學助劑(Reagent)，來把晶片表面高低起伏不一的輪廓，一併加以“磨平”的全面平坦化技術。圖 1 為 CMP 製程的示意圖[4]，主要是將晶圓夾於壓力旋轉軸及研磨墊之間，然後使用研磨液配合機械動作將晶圓薄膜不平整處磨平。影響平坦化的參數包括：研漿成分、晶片施壓大小、及研磨的轉速外，還有研磨墊的材質、研漿內的研磨微粒的大小分佈、研漿的供料速率、溫度、pH 值控制、及被研磨材質的種類等等。而隨著不同的製程以及技術的不斷進步、發展，其參數有不同的影響。

根據不同的製程要求需選擇不同的研磨液應用至該製程，以二氧化矽(SiO_2)CMP 為基礎的製程主要以氧化膜研磨液(Oxide slurry)，以鎢(Tungsten,W)CMP 為基礎的製程主要以金屬膜研磨液(Tungsten slurry or Copper slurry)。其中 Oxide slurry 及 Tungsten slurry 為目前半導體廠最為廣泛使用的研磨液種類，Copperslurry 則為具有較先進製程的半導體廠方有使用該類型的研磨液。研磨液主要的功能是要與晶片產生化學反應，並提供不同的選擇比做為判定研磨終點，其製作過程需特別注意以下幾個參數： pH 值、比重、粒徑分布、固體研磨劑、氧化劑等[5]。

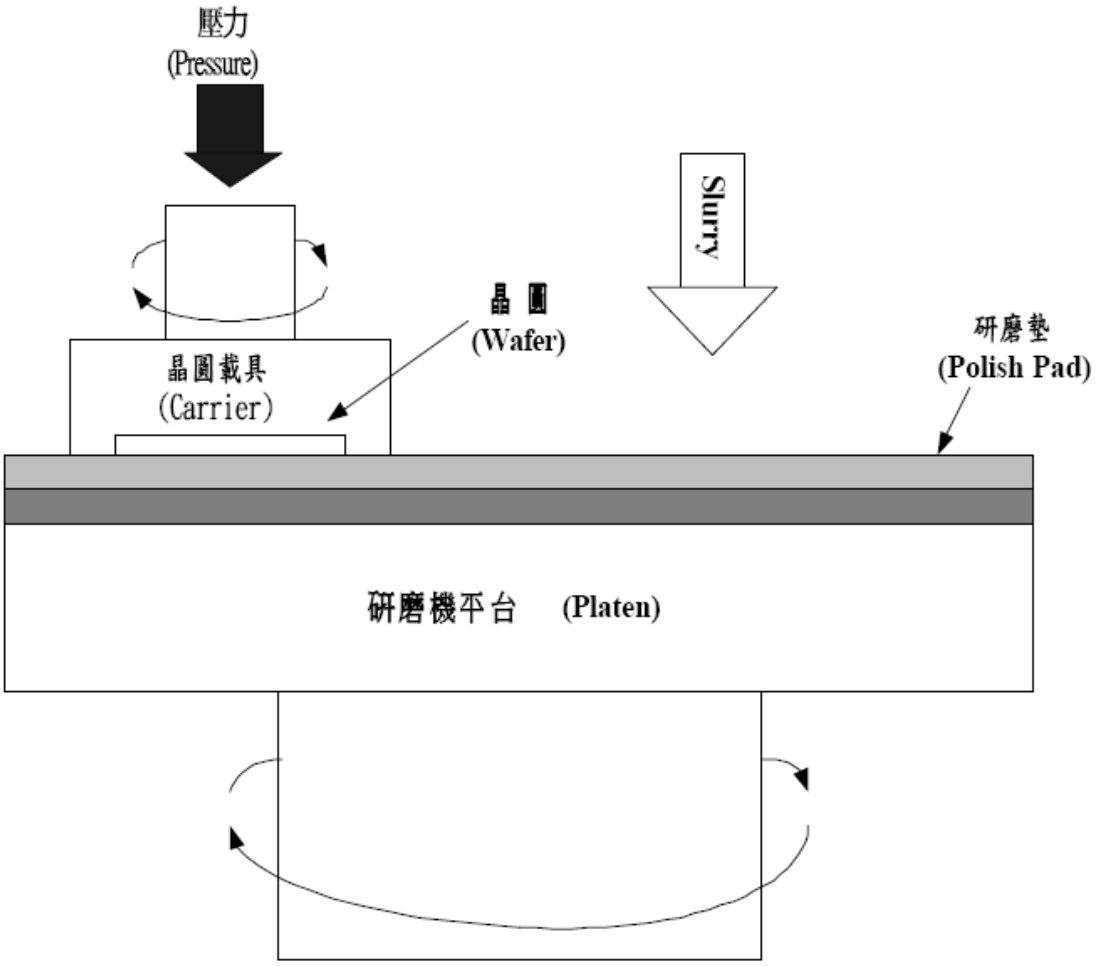


圖 1 CMP 製程示意圖[4]

(1)氧化膜研磨液：氧化膜研磨液主要是由膠體狀的矽土與鹼性的 KOH 或 NH4OH 等溶液混合而成，研磨粒以膠狀的矽土在液相合成的 silica 可分為沉澱性(precipitated silica) 及矽酸膠(colloidal silica)，以氣相燃燒合成的 silica 稱為 fumed silica[6]。表 1 顯示氧化膜用研磨液之物理特性與化學成分[7]。

(2)金屬膜研磨液：金屬膜研磨液使用鎢(Tungsten,W)，而鎢插塞(Tungsten Plug)是被用來取代乾式回蝕(Etch back)的製程，而鎢化學機械研磨(W CMP)與 SiO2 CMP 的差異點除了研磨液的組成成分不同外，最主要的差別為金屬膜研磨液有添加氧化劑以作為金屬層與金屬層間金屬表面被氧化的機制。表 2 為各種不同研磨劑種類與性質表[8]。

表 1 氧化膜用研磨液之物理特性與化學成分[7]

Base material		超高純度 Colloidal silica	Fumed silica	Fumed silica	氧化鈰
添加劑		-	KOH	Ammonia	-
pH		6.5 ~ 8.5	10.5~ 11.5	10.0 ~ 11.0	4.0 ~ 6.0
次微米粒徑(nm)		200 ~240	170 ~230	170 ~230	2830
粉粒重量含量(wt%)		19.5 ~20.5	11.3 ~13.0	11.3 ~13.0	30.0 ~32.0
不純物代表值(ppm)	Na	0.10	2.13	0.5	4.0
	K	0.04	1954	N.D.	>0.4
	Fe	0.02	0.44	0.45	16.0
	Al	0.01	N.D.	0.20	>4
	Ca	0.08	0.64	0.8	16.0
	Mg	0.02	N.D.	N.D	>4
	Ti	N.D.	0.52	0.48	>2
	Ni	N.D.	N.D.	0.01	2.8
	Cr	0.02	0.22	0.2	3.6
	Cu	0.01	N.D	N.D.	>2
	Zn	0.03	N.D	N.D.	>2
	Pb	N.D.	N.D	N.D.	>0.4
	Ag	0.003	0.02	0.02	3.2

表 2 研磨不同物質所採用的研磨劑種類與性質表[8]

研磨對象		研磨液		pH	固體含量 (wt%)
		砥粒	添加劑		
氧化膜	SiO_2(ILD) Si Poly Si	Colloidal SiO_2	KOH/NH_4OH	10-12	1-2
	SiO_2	Fumed SiO_2	KOH/NH_4OH	10-11	5-15
金屬膜	W(plug)	Al_2O_3,MnO_2, SiO_2	H_2O_2 $Fe(NO_3)_3$ KIO_3	2-4	5-10
	Al(wire/plug)	SiO_2			
	Cu(wire/plug)	Al_2O_3			
Others Low K,…		CeO_2 ZrO_2,…	$Fe(NO_3)_3$	<5	-

(3)CMP 製程研磨液種類：在 CMP 的製程上所使用的研磨液主要是由呈膠體狀的二氧化矽或呈分散狀的氧化鋁，以及鹼性的 KOH 或 NH4OH 等溶液混合而成。CMP 研磨對象不同時，其所需使用的研磨液亦有所差異(例如：在金屬鎢的 CMP 研磨當中，研磨液的組成將包括一些氧化劑及有機溶劑等)，一般研磨液之種類如表 3 所示，主要包含有 5～10％的 30～100 奈米的微細研磨粉體(亦稱為砥粒)，種類有 SiO_2、Al_2O_3、CeO_2、W…等。

表 3　CMP 所用之研磨液分類

CMP 的研磨對象		研磨液	
		研磨粉體	添加劑
SiO_2 (層間絕緣膜，Inter Level Dielectric, ILD)		SiO_2	KOH、NH_4OH
		CeO_2	-
		ZrO_2	-
		γ-Al_2O_3、Mn_2O_3	(有機分散劑)
Metal	W(plug)	Al_2O_3、Mn_2O_3、SiO_2	H_2O_2、$Fe(NO_3)_3$、KIO_3、H_2O_2
	Al(wire/plug)	SiO_2	H_2O_2、$Fe(NO_3)_3$、KIO_3
	Cu(wire/plug)	Al_2O_3	H_2O_2、$Fe(NO_3)_3$、KIO_3

3.國內半導體工廠 CMP 廢水處理現況

酸鹼性廢水主要來自晶片清洗廢水、再生廢水、廢氣洗滌廢水及空調排水。氟系廢水主要來自晶片清洗廢水及蝕刻清洗廢水。研磨廢水主要來自研磨液及研磨後清洗廢水，並分成氧化膜研磨廢水及金屬膜研磨廢水。有機廢水主要來自光阻廢液及光阻清洗廢水。表 4 為半導體廠常見之化學品及清洗步驟。由於個別廠的廢水來源所佔的百分比不盡相同，本研究之酸鹼性廢水來源約佔 30%-40%、氟系廢水來源約 10%-15%、研磨廢水來源約 20%-30%及有機廢水來源約 15% ~ 25%左右。

表 4　半導體廠常見之化學品及清洗步驟

清洗步驟	使用化學品
Particle	$NH_4OH/H_2O_2/H_2O$
金屬離子	H_2SO_4/ H_2O_2、HCl / H_2O_2/ H_2O、HNO_3/HF/ H_2O
有機物	H_2SO_4/ H_2O_2、NH_4OH /H_2O_2/ H_2O
自然氧化層	HF/ H_2O、HF /NH_4F/ H_2O
乾燥	異丙醇(Isopropyl alcohol ,IPA)
顯影	氫氧化四甲銨 ($(CH_3)_4NOH$；Tertamethyl ammonium hydroxide,TMAH)
去光阻	N-甲基吡咯酮(N-Methyl-2-Pyrrolidone ,NMP)、二甲基亞楓(Dimethyl Sulfoxide, DMSO)
稀釋	乙酸丙二醇單甲基醚酯(Propylene Glycol Monomethyl Ether Acetate, PGMEA)、乙二醇甲醚醋酸酯(Ethylene Glycol monomethyl ether acetate, ECA)、丁酮(Methyl Ethyl Ketone,MEK)
SiO_2	HF、HF/NH_4F/ H_2O
Si	HF/NHO_3/CH_3COOH系
Si_3N_4	H_3PO_4
Al	H_3PO_4/NHO_3/CH_3COOH系

4.薄膜程序應用於 CMP 廢水回收

化學機械研磨(chemical mechanical polishing，CMP)是一種精確性及重複性極高的製程技術，在製程中因加入大量超純水來清洗晶圓表面，造成廢水中含有數量龐大、粒徑小且不易沉降的懸浮性奈米微粒及金屬離子污染物。傳統上利用化學混凝方式直接處理 CMP 廢水，因混凝藥劑之加藥量難以控制在適當之處理範圍內，造成處理效果不彰，但若在混凝後加入薄膜程序，即可使水中之奈米微粒去穩定後進而更易去除，並有助於回收[12]。綜合實廠應用程度、污染物去除率、平均操作成本和操作難易度評估半導體廠 CMP 廢水處理方式，薄膜過濾法技術可行性高、處理效能佳、操作簡單，為當前最佳處理技術[14]。

三、實驗設備與方法

本次實驗選取兩種不同的 UF 膜作為對比樣本，以半導體 CMP 廢液作為本次試驗的原水。UF 模組在相同操作環境下進行測試，探究通量、跨模壓差和產水濁度隨時間的變化，選取更加穩定、運行簡單且維護成本較低的 UF 膜裝置。

1.模組特性

兩種不同的 UF 模組作為對比樣本

(1)國外大廠 UF 模組

A.膜材料：PVDF 中空纖維。

B.過濾孔徑：0.01~0.1 微米。

C.有效膜面積：55 m^2。

D.膜絲的結構及性能：UF、外壓。

E.系統運行過程設計：過濾、氣洗、反洗、正沖洗。

F.特色：國外知名大廠產品，具大型廢水回收廠實績，產品穩定，過濾精度高，為國內外廠商指定品牌。

(2)集盛 ZISECO 可拆換式 UF 模組

A.膜材料：PVDF 中空纖維。

B.過濾孔徑：0.05~0.1 微米。

C.有效膜面積 11 m^2。

D.膜絲的結構及性能：UF、外壓。

E.系統運行過程設計：過濾、氣洗、反洗。

圖 2 集盛 ZISECO 可拆換式 UF 模組

F.特色：由集盛實業股份有限公司（股票代號：1455）自行研發及製造，中空纖維膜材料為聚偏二氟乙烯（Polyvinylidene difluoride，簡稱 PVDF）所製成，本材質廣泛應用於水處裡產業當中，以抗污、耐化學性聞名，經本公司技術改良使其具有高通量及良好的親水特性，並均勻控制孔徑分布介於 0.05~0.1 微米之間，可濾除水中的細菌、顆粒物質及微生物等，且產品從生產到包裝，皆由台灣製造，品質穩定。

a.高效能：PVDF 膜改質親水性聚偏二氟乙烯跨膜壓差小，操作時可減少泵浦輸出功率，提高產水效能，減少反洗時間。

b.高壽命：模組內部經特殊設計，可提供膜絲擺動空間及較佳的質傳效率，降低薄膜表面積垢現象，增加使用壽命。

c.模組化：模組化設計，減少更換時的成本，且佔地面積小，運送便利，安裝快速，可並行安裝提升處理量。

d.簡易化：連續式自動化控制，皆由系統操作，降低人力需求，且可增設遠端控制系統。

e.安全化：PVDF 膜孔徑分布介於 0.05~0.1 微米，出水品質穩定，除菌率達 99.9%以上。

f.環保化：可獨立更換濾芯設計，更換快速，外殼可以重複使用，減少廢棄物之產生。

2.實驗方法

根據兩種薄膜過濾半導體 CMP 廢水，在相同的測試條件下，測試產水端濁度、通量與跨膜壓差等相關數據，並比較國外知名 UF 膜與集盛 ZISECO 可拆式 UF 膜，得出兩種膜對處理半導體 CMP 污水過濾的效果。

(1)濁度的測定原理及比較方法

濁度為比較水樣和標準參考濁度懸浮液對特定光源散射光的強度，以測定水樣的濁度。散射光強度愈大者，其濁度亦愈大。一般用來評估水質

優劣狀態。

比較方法:

A.測出兩種膜處理污水的濁度，UF 產水標準需<1 NTU。

B.確保兩種水質背景條件相同。

C.對比它們處理污水過濾的能力。

(2)通量的測定原理及比較方法:

通量為單位時間通過單位面積之過濾液的體積，常用的單位有 liter/m2/hour (LMH) 及 gallons/ft2/day (GFD) ，通量主要用於評估一個薄膜作業系統效率的一個重要指標，薄膜進行操作期間，由於水通量會隨著操作時間增加而下降，也會縮短整個薄膜的操作壽命。

比較方法:

A.測出兩種膜處理污水的通量

B.確保兩種通量單位相同 liter/m2/hour (LMH)

C.對比它們處理污水的通量。

(3)跨膜壓差的測定原理及比較方法:

跨膜壓差為單位膜面積所承受之壓力，常用的單位為 kg/cm2，跨膜壓差主要評估整體模組承受之壓力和操作成本，壓力越大，模組和膜絲壽命會減短；因泵浦電流輸出量越高，操作成本亦增加，故降低跨膜壓差，可減少操作成本。

A.測出兩種膜處理污水的跨膜壓差

B.確保單位相同 kg/cm^2

C.對比它們處理污水的跨膜壓差。

3.設備操作

本系統之設備操作流程 PID（Piping and Instrument Diagram），如圖 3 所示；研磨廢水先收集至廢水儲槽，再經由加壓式幫浦，將溶液壓入中空纖維薄膜模組中，經由幫浦與壓力控制閥調節，可控制系統操作所需之掃流速度與壓力差；進流流量、出流流量及過濾濾液流量的變化可藉由校正過之流量計觀察；系統壓力的量測點共有兩處，分別測量 UF 膜組之進流端與滲透端；研磨廢水經由 UF 模組過濾後之濃縮液再回流至廢水儲槽中進行下一步的濃縮；另外本系統採自動控制界面，利於更改操作條件，並能定時反沖洗薄膜，以減低薄膜阻塞的機率，操作程序為產水、氣洗和反洗，運行時間可依需求水量與水質狀況調整。

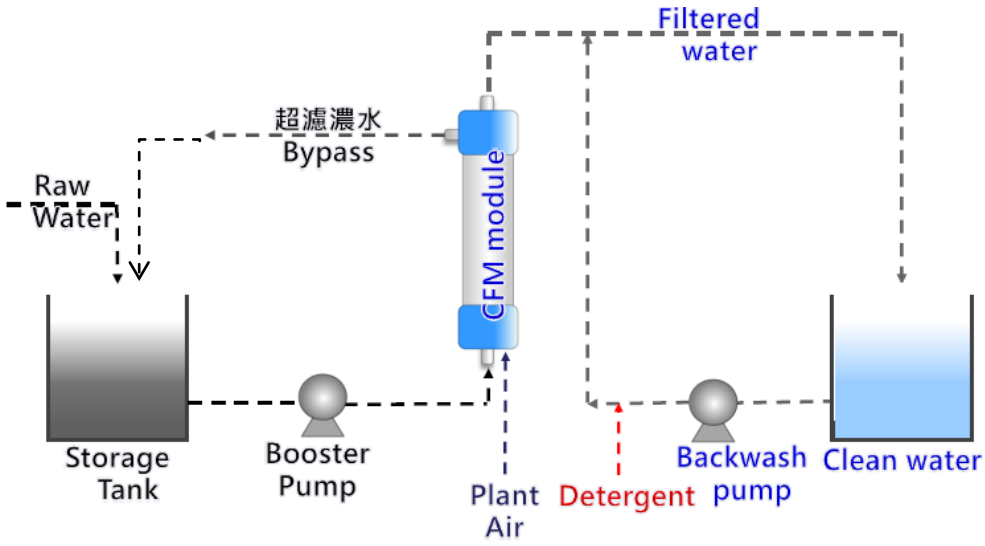
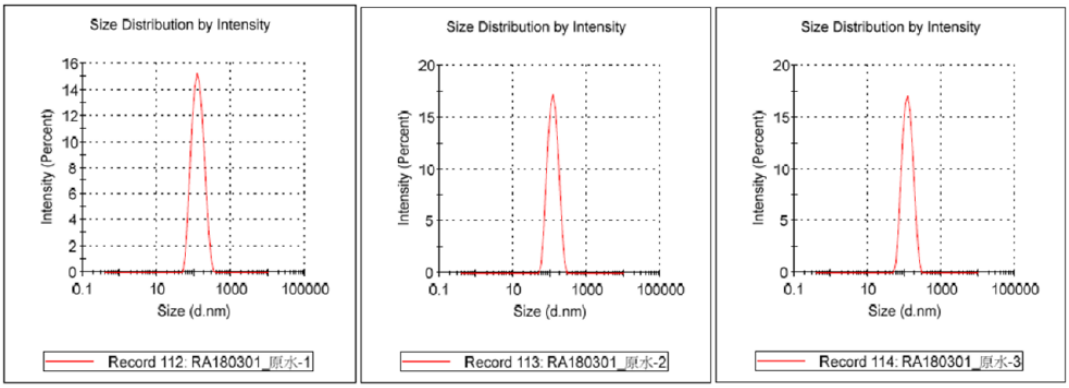


圖 3　設備流程圖

四、結果與討論

1.原水水質特性與產水水質標準:

原水平均濁度為 200 NTU，UF 目標產水水質濁度<1 NTU，半導體 CMP 廢水粒徑分部於 58~350 nm，平均粒徑為 115~120 nm 如圖 4，廢水水質穩定。



最小粒徑：58.77nm(1.2%)	最小粒徑：58.77nm(0.9%)	最小粒徑：58.77nm(0.9%)
平均粒徑：120.2nm	平均粒徑：116.5nm	平均粒徑：115.9nm
最大粒徑：342nm(0.1%)	最大粒徑：255nm(1.0%)	最大粒徑：255nm(0.1%)
Result quality：Good	Result quality：Good	Result quality：Good

圖 4　半導體 CMP 廢水平均粒徑

2.國外知名大廠 UF 和集盛 ZISECO UF 產水濁度(NTU):

圖 5 為 2018 年 4~6 月間，國外知名大廠 UF 和集盛 ZISECO UF 過濾半導體 CMP 廢水，產水濁度與操作時間關係圖。

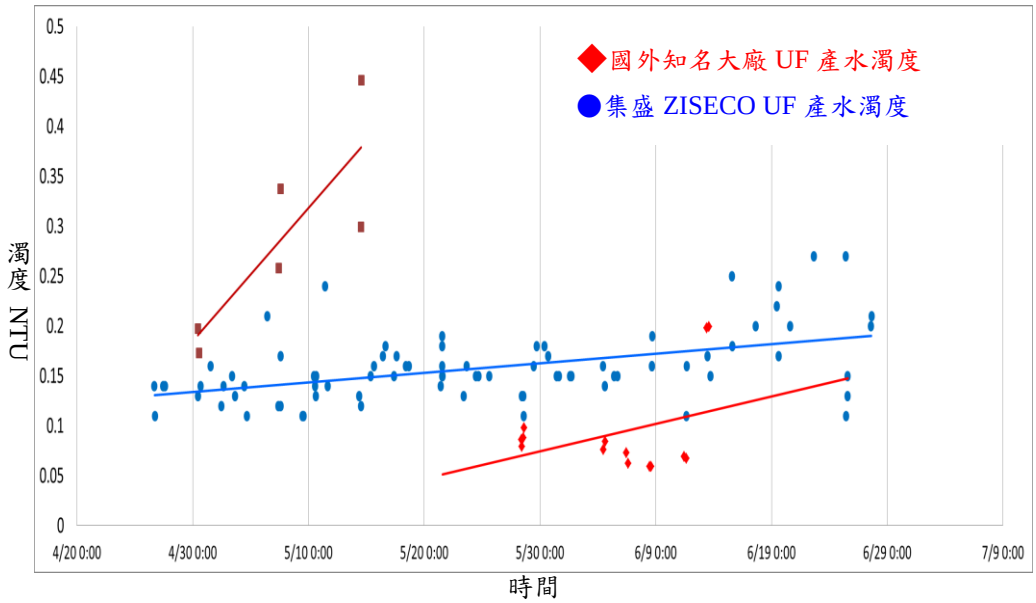


圖 5　國外知名大廠 UF 和集盛 ZISECO UF 產水濁度 NTU

國外知名大廠，測試第一個月，因其產水狀況異常，送至廠外清洗模組；測試期間，平均濁度為 0.108 NTU;集盛 ZISECO UF 平均產水濁度為 0.18 NTU，兩家 UF 皆符合產水標準<1 NTU，濁度隨時間增加而升高;兩者相較，國外知名大廠較集盛 ZISECO UF 產水平均濁度低，水質較佳。

3.國外知名大廠 UF 和集盛 ZISECO UF 模組通量(LMH)

圖 6 為 2018 年 4~6 月間，國外知名大廠和集盛 ZISECO UF 過濾半導體 CMP 廢水，模組通量與操作時間關係圖，因廢水中的粒子阻塞薄膜表面之孔洞，導致水通量隨操作時間增加而降低。國外知名大廠 UF 模組產水平均通量為 27.1 LMH；集盛 ZISECO UF 模組產水平均通量為 87.9 LMH，集盛 ZISECO 較國外知名大廠 UF 平均產水通量多愈 50 LMH，顯示在相同水質條件下，集盛 ZISECO UF 產水效率較高。

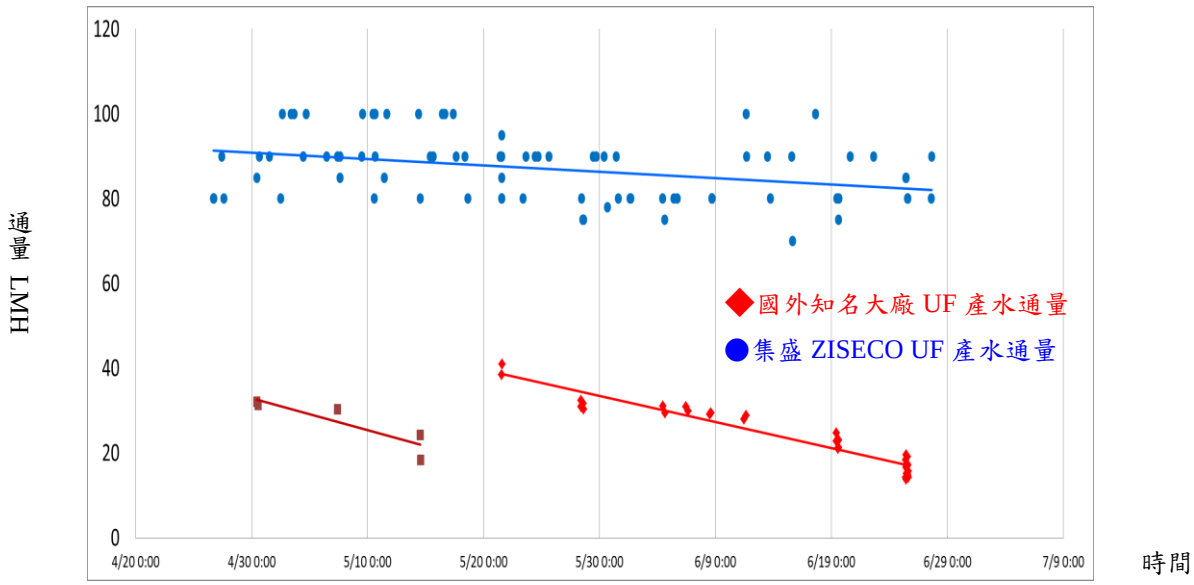


圖 6　國外知名大廠 UF 和集盛 ZISECO UF 薄膜通量 LMH

4.國外知名大廠 UF 和集盛 ZISECO UF 產水跨膜壓差(kg/cm^2)

圖 7 為 2018 年 4~6 月間，國外知名大廠 UF 和集盛 ZISECO UF 過濾半導體 CMP 廢水，產水跨膜壓差與操作時間關係圖，國外知名大廠 UF 薄膜產水平均跨膜壓差為 0.8 kg/cm^2；集盛 ZISECO UF 產水平均跨膜壓差為 0.5 kg/cm^2，跨膜壓差隨時間增加而升高。國外知名大廠 UF 模組產水跨膜壓差較 ZISECO 大，薄膜承受壓力和系統所需動力較高。

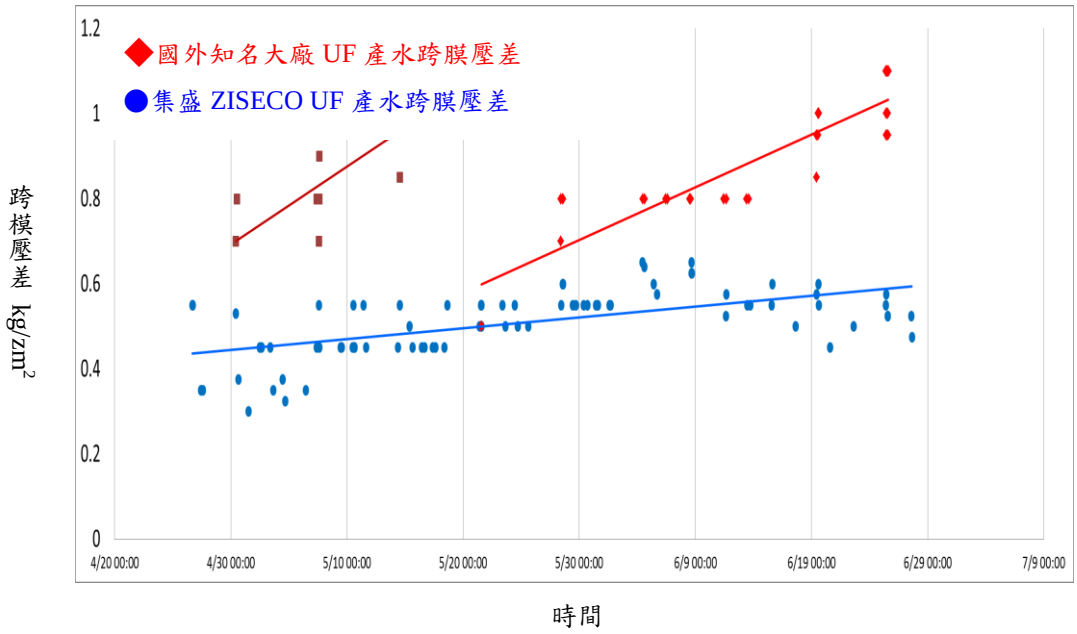


圖 7 國外知名大廠 UF 和集盛 ZISECO UF 薄膜跨膜壓差

五、結　論

綜整此次測試結果，依 UF 產水平均濁度、通量與跨膜壓差統計數據比較表(表 5)；於處理半導體 CMP 廢水實測中，集盛與國外大廠兩者濁度低於 1 NTU，皆符合產水標準；在濁度方面，國外大廠 UF 產水平均濁度較集盛低，水質處理表現較佳，可推論其薄膜平均孔徑較小，在系統運行中，薄膜將大部分的污染物質分離，使得產水濁度去除率表現較為優異，但也因國外大廠膜絲孔徑較小，導致其較快堵塞，操作上線時間較短；而以平均產水通量和跨膜壓差比對得知，集盛產水通量大於國外知名大廠近 50 LMH，跨膜壓差相對較低，由此可推論集盛薄膜平均孔徑較大，故通量與跨膜壓差表現數據較佳。

表 5　國外知名大廠與集盛 ZISECO UF 處理半導體 CMP 廢水數據比較表

	國外知名大廠 UF	集盛 ZISECO UF
原水濁度	>200 NTU	
原水粒徑分析	58~350 nm	
UF 產水標準	<1 NTU	
平均產水濁度	0.108 NTU	0.18 NTU
平均產水產水通量	27.1 LMH	87.9 LMH
平均產水跨膜壓差	0.8 kg/cm^2	0.5 kg/cm^2

兩家廠商處理半導體 CMP 廢水平行比對期間，國外大廠已拆下模組離線清洗兩次，集盛則可一套模組完成測試；集盛可拆式 UF 除較環保外，也可確保膜絲離線清洗的效果較佳，總體而言，既要符合產水標準和較低的操作成本，集盛 ZISECO UF 佔有相對優勢。

六、參考文獻

1.黃富昌、林平和、曹正文、吳宇蓁、張侑昌、蔡崇平、楊仁宏、陳德鴻、李昇雨、吳懿云-工業區污水處理廠對化學機械研磨廢液處理之成本效益評估，台灣環境資源永續發展研討會(2009)。

2.楊叢印，「結合電過濾/電透析技術處理 CMP 廢水同步產製電解水之研究」，博士論文，國立中山大學環境工程研究所，高雄(2003)。

3.戴寶通，「化學機械研磨技術積體電路製造關鍵技術」，工業材料，Vol 37，

pp.26-29(1996)。
4.張俊彥，「積體電路製程及設備技術手冊」，經濟部(1997)。
5.陳嘉平，「CMP 技術及其在半導體製程上的應用」，化工技術，第 7 卷，第 12 期，pp.47-52(1997)。
6.江建志，「氧化鈰粉體之合成及其在化學機械研磨漿料之特性探討」，碩士論文，逢甲大學化學工程學系，台中(2003)。
7.陳麗梅，「CMP 氧化膜用研磨液」，化工技術，第 5 卷，第 10 期，pp.38-41(1997)。
8.王建榮、林必窕、林慶福等編譯,「半導體平坦化 CMP 技術」,台北(2000)。
9.蔡明蒔，「化學機械研磨後清洗技術簡介」，奈米通訊，第 6 卷，第 1 期，pp.6-7(1999)。
10.鄭建南，「化學機械研磨廢水相關處理技術」，環保技術 e 報，第 19 期，p.3-4(2004)。
11.Wang,Y. L., Liu,C., Feng, M. S., and Tseng, W. T.，Exothermic 1reaction andtemperature measurement for tungsten CMP technology and its application onendpoint detection，Materials Chemistry and Physics，Vol. 52，pp.1125-1134(1998)。
12.何佩怡-薄膜程序應用於 CMP 廢水回收與成本分析，中興大學環境工程學系所碩士學位論文(2011)。
13.金光祖、湯鴻祥-化學機械研磨廢水處理之研究，工研院能資所
14.何永隆-半導體廠化學機械研磨廢水處理技術之比較研究，弘光科技大學環境工程研究所碩士論文(2010)。

電混凝法應用於冷卻水循環回用之研究

蔡嘉恩*、翁煥廷**、陳孝行***

摘　要

冷卻水塔為常見的熱交換設備，且廣泛應用於各行各業。由於水體中含有各種不同濃度的懸浮及溶解性固體物，隨著冷卻水循環次數增加及蒸散效應，導致冷卻水中的離子濃度快速累積，當水從冷卻水塔蒸發時，這些固體物會濃縮在水體內，因而沉積在傳熱界面形成水垢。鈣、鎂硬度和二氧化矽是造成冷卻水塔結垢的關鍵因子。一般工業冷卻水塔大多採用定量排棄冷卻水及補充新鮮水源搭配化學加藥方式，來維持冷卻水塔的水質。傳統化學加藥方式藥劑配置勞動條件差、加藥成本高且衍生大量污泥及二次污染問題，近年來電化學法廣泛被應用於水處理程序，應用電化學法具有離子去除效果顯著、耗電量低及操作維護簡易等優點。本研究對象為石化廠製程冷卻水塔排放水，應用電混凝法降低冷卻水中二氧化矽及鈣、鎂硬度等結垢形成物，探討其去除效果及適用實廠之最適操作條件，期未來可於實廠運用電化學處理技術，降低冷卻水塔排放水之硬度，回用作為冷卻水塔補充水源，以提高廠內水資源使用率。研究結果顯示，以鋁片為兩電極極板，透過施加電場於電極後，陽極於水中釋放出鋁離子，與二氧化矽反應而產生矽酸鋁沉澱去除，在 pH 7 條件下，當電混凝操作電流 2.2 A(電流密度為 25.73 mA/cm^3)與反應時間 60 分鐘時，二氧化矽及鈣、鎂硬度之去除率分別可達到 98.5%、56.4%及 93.2%。如以實廠冷卻水塔排放水量 900 CMD 推估，經電混凝與砂濾處理後全數回收作為冷卻水塔補充水源，推估工廠用水成本約 1,577 元/天，較工廠現行以定量排棄並補充新鮮自來水之用水成本約 10,800 元/天，約可節省 27.7 萬元/月之運轉成本；如考量設備投資費用之攤提，預估約 3.3 年即可回收，為具經濟效益之可行方案。

【關鍵詞】冷卻水、電混凝、二氧化矽、鈣硬度、鎂硬度

---

*環誠顧問有限公司　執行長

**國立中央大學永續環境科技研究中心　顧問

***國立臺北科技大學環境工程與管理研究所　教授

一、前　言

冷卻水塔為工業製程中最常見也是最重要的熱交換設備之一，依行業別及製程類型不同，工廠冷卻用水占整體工業用水量約 4～6 成，台灣每年冷卻用水需求量約 250 萬立方公尺以上，為工業節水之重要關鍵。工業冷卻用水係用於吸收或轉移製程設備或產品之餘熱，以達成所需溫度條件之目的。一般可區分為直接冷卻用水與間接冷卻用水，其中，間接冷卻用水因用水量較大且污染性較低之特性，最具備回收再利用的價值。

然而在冷卻水塔運作過程中，冷卻循環水因散熱蒸發，使水中的許多有機物質、無機物質(如 Ca_2^+、Mg_2^+、SiO_2、HCO_3^-、SO_4^{2-}等離子)不斷濃縮，溶解性固體(Total dissolved solids, TDS)濃度持續增高，逐漸形成水垢沉積物，進而導致冷卻系統的熱交換效率下降、形成無謂的能源損失，甚至造成製程設備過載跳脫的嚴重影響。一般工業冷卻水塔大多採用定量排棄冷卻水及補充新鮮水源搭配化學加藥方式，來維持冷卻系統的水質。相較於工業製程產生之廢污水，冷卻水污染性低、具回收使用之可行性，為工業用水回收之首選，惟冷卻水回收須克服結垢、腐蝕及菌藻滋生等問題。

冷卻水中的二氧化矽及鈣、鎂離子為造成冷卻水系統內產生結垢的重要因素之一，傳統的硬水軟化方法為添加阻垢劑或石灰軟化法，然衍生大量污泥及二次污染問題。近年來已有許多研究探討電化學技術應用於水處理，以及市場商業化產品，相較於傳統處理技術，電化學法具有離子去除效果顯著、無二次污染及操作維護簡易等特色。

本研究係以石化廠製程冷卻水塔排放水為研究對象，探討以電化學法降低冷卻水中二氧化矽及鈣、鎂硬度，比較各種方法之去除率，尋求適用於實廠之操作電壓、反應時間及 pH 值，並比較傳統化學混凝與電化學法應用於處理冷卻水塔排放水之成本分析，以評估冷卻水塔排放水回用之可行方案。

二、電混凝技術簡介

在水處理技術領域裡，傳統以加藥方式進行化學混凝沉澱為業界最常使用且具有一定效果的處理方式，然而以國內外已逐漸發展出以電混凝法(electro-coagulation，EC)取代傳統化學混凝法，主要是因電混凝法操作簡易且快速有效，電混凝法係由施加電力於極板，以產生混凝劑進而藉混凝機

制，來達成去除水中污染物質之目的。電混凝利用混凝作用以去除污染物之機制和傳統化學混凝法去除污染物之機制非常類似，傳統化學混凝法係利用額外添加化學混凝劑來產生混凝作用，而電混凝法則是以犧牲電極作為陽極，於極板通電後，當達到特定電壓下迫使陽極板氧化釋放電子而產生金屬離子，再形成金屬氫氧化物而具有混凝效果，若施予電壓高於氫及氧過電壓下，則可以將該金屬氫氧化物予以浮除。

電混凝程序包含氧化還原、絮凝及氣浮等 3 個作用機制，除利用反應生成絮凝體來進行混凝與吸附作用以去除污染物外，發生在陰、陽兩極的直接氧化還原反應或是藉由直接氧化還原反應所產生之強氧化劑或強還原劑，可將水中污染物氧化分解成可生物降解之較小分子，或礦化成無害之二氧化碳及水分子，或將氧化態污染物還原成較無害之還原態物質，此外電混凝程序去除污染物機制，尚包含利用電解過程中產生之氫氣及氧氣來進行類似於傳統之加壓浮除之氣浮程序。

電混凝法常以鋁做為電極材料，鋁離子在水中易於發生水解，除了產生氫氧化物外，也很容易產生聚合氫氧化物。鋁鹽和鹼劑反應會形成不溶性氫氧化物。實際上，鋁離子會進行一系列水解反應以形成多價水合氫氧化物，這些物種在低 pH 值時呈正電荷，在高 pH 值時則呈負電荷，因此，氫氧化鋁可視為因 pH 值而異的兩性化合物。可溶性的鋁在酸性環境(pH≦4)或鹼性環境(pH≧9)時，分別是以 Al_3+和 $Al(OH)_4^-$的形式存在，而在 pH 4 ~ 9 之間時，則會水解形成鋁聚合物種。表 1 為以鋁為電極材料時，在水溶液中兩電極可能發生之主要反應。由表列反應式可知，陽極氧化所產生之金屬陽離子會和陰極還原所產生之氫氧根離子結合，產生金屬氫氧化物混凝劑，以供後續絮凝或吸附污染物之用。

表 1　電混凝法之鋁電極反應方程式[1]

鋁電極	
陽　極　：	$Al_{(s)} \leftrightarrow Al^{3+}_{(aq)} + 3e^- \quad E^0 = +1.66V$
鹼性溶液：	$Al^{3+} + 3OH^- \leftrightarrow Al(OH)_3$
酸性溶液：	$Al^{3+} + 3H_2O \leftrightarrow Al(OH)_3 + 3H^+$
陰　極　：	$3H_2O_{(l)} + 3e^- \leftrightarrow \frac{3}{2}H_{2(g)} + 3OH^-_{(aq)} \quad E^0 = -0.83V$
總反應　：	$Al_{(s)} + 3H_2O_{(l)} \leftrightarrow Al^{3+}_{(aq)} + 3OH^-_{(aq)} + \frac{3}{2}H_{2(g)}$

參考研究文獻(Omar M. Hafeza et al., 2018)指出，鋁電極比鐵電極及鋅電極更可有效地從冷卻排放水中去除二氧化矽及鈣、鎂等水垢物質，因此，本研究試驗中採用鋁片為兩電極極板，經施加電力於電極後，鋁陽極因電解而在水中釋放出鋁離子，進而形成氫氧化鋁膠羽，本研究即利用鋁金屬極板釋出的鋁離子與二氧化矽反應而產生矽酸鋁沉澱去除。

目前業界於水處理應用較廣泛的是傳統化學混凝法，為評估電混凝技術於實廠應用之可行性，本研究探討以電混凝法處理冷卻水塔排放水之二氧化矽及鈣、鎂硬度之去除效果。

三、實驗設計與設備

本研究使用之實驗水樣為國內某石化大廠提供之製程冷卻水塔排放水，為非接觸冷卻水，實驗用水水質與冷卻水塔補給水水質標準如表 2 所示。由於冷卻水塔冷卻水不斷循環，會使水中離子持續濃縮而衍生結垢，進而導致冷卻水塔的冷卻能力下降且增加耗能，因此該廠採用定量排水並補充新鮮水源方式，以維持冷卻水水質。然而此股冷卻排放水若能移除水中二氧化矽及鈣、鎂離子，將可作為廠內回收使用的乾淨水源，提高水資源使用率。本研究期建置一操作簡易且可有效降低冷卻水中二氧化矽及鈣、鎂硬度之處理方案，以供實廠可將冷卻排放水回收使用。

表 2　實驗用水水質 V.S.冷卻水塔補給水水質標準

水質項目	單位	實驗水樣	冷卻水塔補給水水質標準（JRA-GA-02-1994）
pH (25℃)		7.9	6.0～8.0
導電度	μs/cm	2,830	≦ 300
M-鹼度	mg/L as $CaCO_3$	86	≦ 50
鈣硬度	mg/L as $CaCO_3$	675	≦ 50
鎂硬度	mg/L as $CaCO_3$	142	≦ 20
矽酸鹽	mg/L as SiO_2	65	≦ 30
硫酸鹽	mg/L as SO_4^{2-}	883	≦ 50
氯化鹽	mg/L as Cl^-	213	≦ 50
鐵份	mg/L as Fe	1.05	≦ 0.3
濁度	NTU	16.6	≦ 20

1.實驗設計

為探討應用電混凝法處理冷卻水塔排放水中二氧化矽及硬度，本研究設計之電化學反應槽為透明壓克力板黏合製作而成，如圖 1 所示，反應槽內徑為長 5 公分 × 寬 10 公分 × 高 15 公分，於反應槽內有兩條 0.2 公分之溝

槽(用於置放電極板)，兩溝槽中心點間隔為 1 公分。本研究所使用之電極板大小皆為長 10 公分 × 寬 10 公分 × 厚 0.2 公分，陰極與陽極兩片極版材質皆為鋁(Al，純度≧99%，原子量 27 g/mol，製造商：建源五金有限公司)，有效電極面積為 85.5 平方公分。另於反應槽底部使用磁石攪拌設備，藉由磁石攪拌促進反應槽內水樣之流動混合，確保水樣可均勻地進行電化學反應。

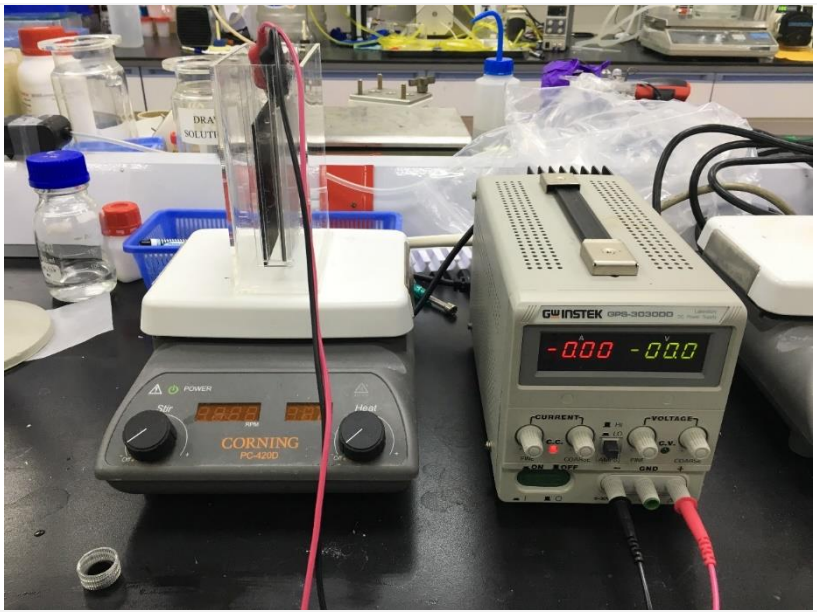


圖 1　電化學反應系統之設計

2.實驗步驟

(1)取實廠冷卻水塔排放水倒入反應槽中，將反應槽放置在磁石攪拌機上，設定轉速為 300RPM。

(2)使用 NaOH 及 H2SO4 調整水樣之酸鹼值 pH 4、pH 7、pH 10，以電源供應器分別調整電壓為 2 V、5 V、10 V，並分別測試電解反應時間 10 鐘、30 分鐘、60 分鐘。

(3)於實驗結束後，將反應槽靜置 30 分鐘後，取澄清液做水質分析。

四、結果與討論

1.電流強度對於電混凝去除效果之影響

本實驗以固定電解反應時間 60 分鐘及酸鹼值 pH 7(考量實廠應用，以中性條件操作)環境下進行電混凝，並分別將操作電流調整至 0.1 A、0.8 A、

2.2 A(電流密度分別為 1.17 mA/cm^2、9.36 mA/cm^2、25.73 mA/cm^2)，電解反應結束後靜置 30 分鐘，再取上澄液分析二氧化矽及鈣、鎂離子濃度，彙整如表 3 所示、去除率如圖 2 所示。文獻中提到：增加電流密度可提高電混凝的反應速率，但增加電流密度也會促使絮凝物的產生，進而降低去除效率，因此本研究參考 Omar M. Hafeza 等人的研究結果來設定本實驗的操作電流，從實驗結果可觀察到將電流密度從 1.17 mA/cm^2 增加到 25.73 mA/cm^2 且電解時間為 60 分鐘時，冷卻排放水中的二氧化矽去除率從 63.1%提升到 98.5%、鈣離子去除率從 18.6%提升到 56.4%、鎂離子去除率從 23.5%提升到 93.2%，印證了增加電流密度確實可以有效的提升冷卻水塔排放水中的二氧化矽及硬度離子之去除效率。

表 3　電混凝於 pH 7 比較不同操作電流觀察二氧化矽與鈣、鎂濃度變化

固定電解反應時間 60 分鐘、pH 7									
操作電流	SiO_2			Ca_2^+			Mg_2^+		
	殘留量 (mg/L)	去除量 (mg/L)	去除率 (%)	殘留量 (mg/L)	去除量 (mg/L)	去除率 (%)	殘留量 (mg/L)	去除量 (mg/L)	去除率 (%)
0.1 A	24.0	41.0	63.1	219.8	50.2	18.6	26.0	8.0	23.5
0.8 A	1.0	64.0	98.5	173.9	96.1	35.6	5.0	29.0	85.3
2.2 A	1.0	64.0	98.5	117.7	152.3	56.4	2.3	31.7	93.2

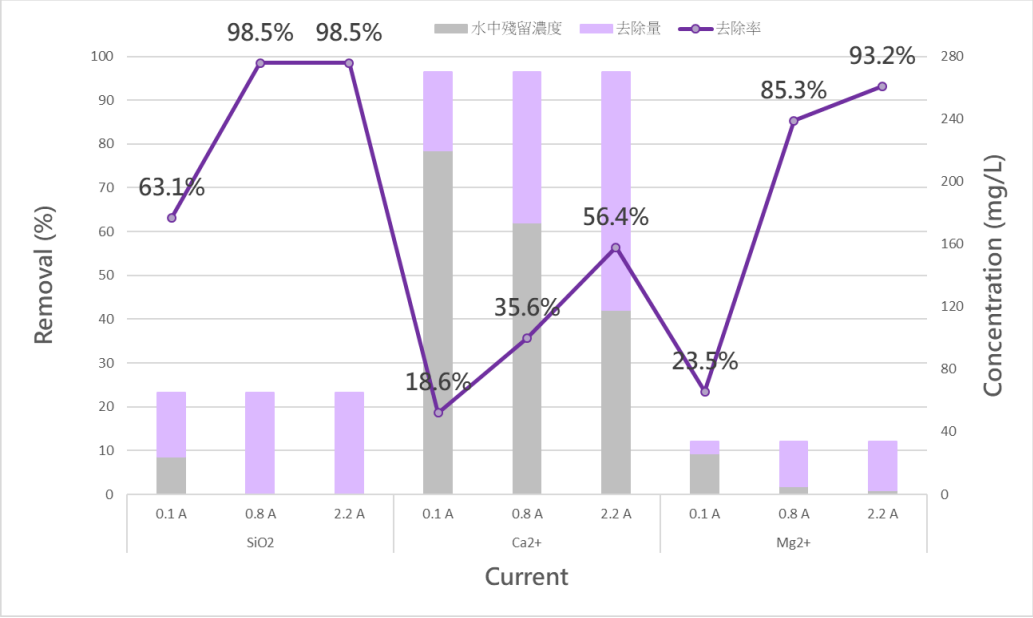


圖 2　電混凝於 pH 7 比較不同操作電流觀察二氧化矽與鈣、鎂去除率變化

2.電解時間對於電混凝去除效果之影響

在文獻中提到電解過程中，因為施加電場使陽極產生溶解和釋放出金屬離子，而與水中的二氧化矽與鈣、鎂離子結合，達到沉澱去除之目的，其處理效率取決於電極產生的金屬離子濃度，且藉由延長電解時間，促使陽極析出的金屬離子及其氫氧化物絮凝物的增加。本實驗以固定操作電流 2.2 A (電流密度 25.73 mA/cm^2)及酸鹼值 pH 7 環境下進行電混凝，分別測試 10 分鐘、30 分鐘及 60 分鐘等不同反應時間，電解反應結束後靜置 30 分鐘，再取上澄液分析二氧化矽及鈣、鎂離子濃度，彙整如表 4 所示、去除率如圖 3 所示。從實驗結果可以觀察到，在恆定電流下電解時間從 10 分鐘增加到 60 分鐘，冷卻排放水中的二氧化矽去除率從 96.9%提升到 98.5%、鈣離子去除率從 26.1%提升到 56.4%、鎂離子去除率從 55.9%提升到 93.2%，印證了延長電解時間，使鋁陽極可釋放出更多的鋁離子與水中的硬度離子產生混凝沉澱作用，確實有助於提升冷卻水塔排放水中的二氧化矽及硬度離子之去除效率。

表 4　電混凝於 pH 7 比較不同電解時間觀察二氧化矽與鈣、鎂濃度變化

固定電流強度 2.2 A（電流密度 25.73 mA/cm^2）、pH 7									
電解時間	SiO_2			Ca_2^+			Mg_2^+		
	殘留量 (mg/L)	去除量 (mg/L)	去除率 (%)	殘留量 (mg/L)	去除量 (mg/L)	去除率 (%)	殘留量 (mg/L)	去除量 (mg/L)	去除率 (%)
10 min	2.0	63.0	96.9	199.5	70.5	26.1	15.0	19.0	55.9
30 min	1.0	64.0	98.5	166.9	103.1	38.2	5.0	29.0	85.3
60 min	1.0	64.0	98.5	117.7	152.3	56.4	2.3	31.7	93.2

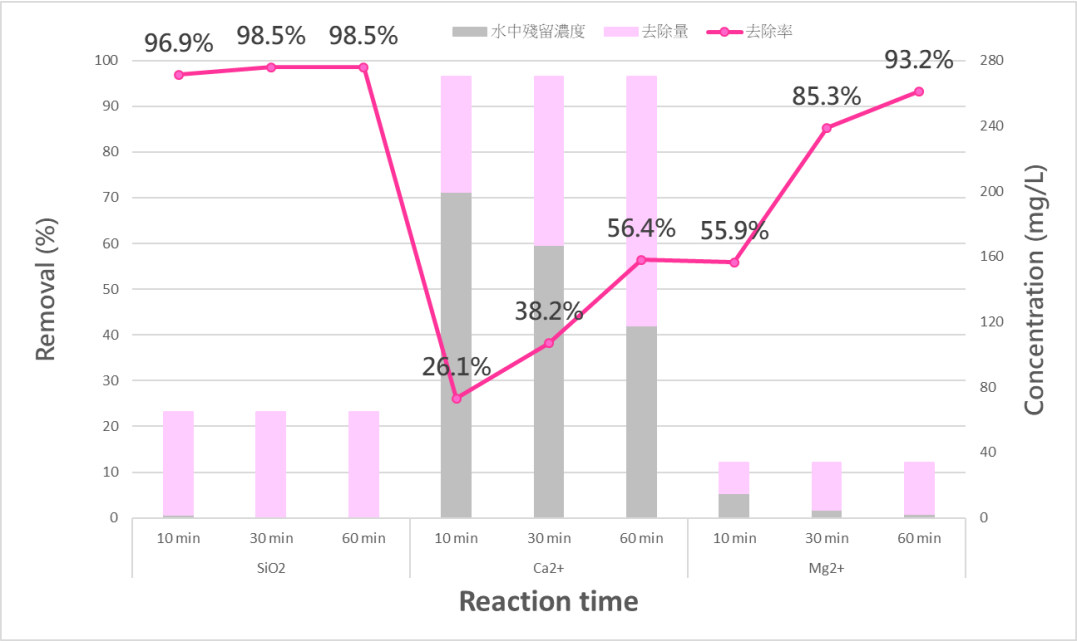


圖 3　電混凝於 pH 7 比較不同電解時間觀察二氧化矽與鈣、鎂去除率變化

3.水溶液啟始酸鹼值對於電混凝去除效果之影響

為了解電混凝於酸性、中性及鹼性水溶液之處理效果，本實驗以 1M 氫氧化鈉及 1M 硫酸調整冷卻排放水樣品酸鹼值，於 pH 4 酸性、pH 7 中性、pH 10 鹼性條件下進行電混凝，在固定操作電流 2.2 A(電流密度 25.73 mA/cm^2）及電解反應時間 60 分鐘進行實驗，電解反應結束後靜置 30 分鐘，再取上澄液分析二氧化矽及鈣、鎂離子濃度，彙整如表 5、去除率如圖 4 所示。由於電解釋放出鋁離子與水中二氧化矽形成矽酸鋁，從實驗結果可以明顯觀察到，使用電混凝法可大幅降低冷卻水塔排放水中二氧化矽濃度(SiO_2去除率達 98%以上)，而水中鈣、鎂硬度之去除率亦隨著 pH 值上升而增加。另，本研究未將冷卻排放水 pH 值再提升至 11～12，係因鋁於此 pH 環境下將會轉變為帶負電荷的離子，二氧化矽亦轉變為帶負電，因相同電荷無法產生聚合反應而失去處理效能。

表 5　電混凝於不同 pH 啟始值觀察二氧化矽與鈣、鎂濃度變化

固定電流強度 2.2 A（電流密度 25.73 mA/cm^2）、電解反應時間 60 分鐘									
酸鹼值	SiO_2			Ca_2^+			Mg_2^+		
	殘留量 (mg/L)	去除量 (mg/L)	去除率 (%)	殘留量 (mg/L)	去除量 (mg/L)	去除率 (%)	殘留量 (mg/L)	去除量 (mg/L)	去除率 (%)
pH 4	1.0	64.0	98.5	131.8	138.2	51.2	3.1	30.9	90.9
pH 7	1.0	64.0	98.5	117.7	152.3	56.4	2.3	31.7	93.2
pH 10	1.0	64.0	98.5	109.1	160.9	59.6	1.3	32.7	96.3

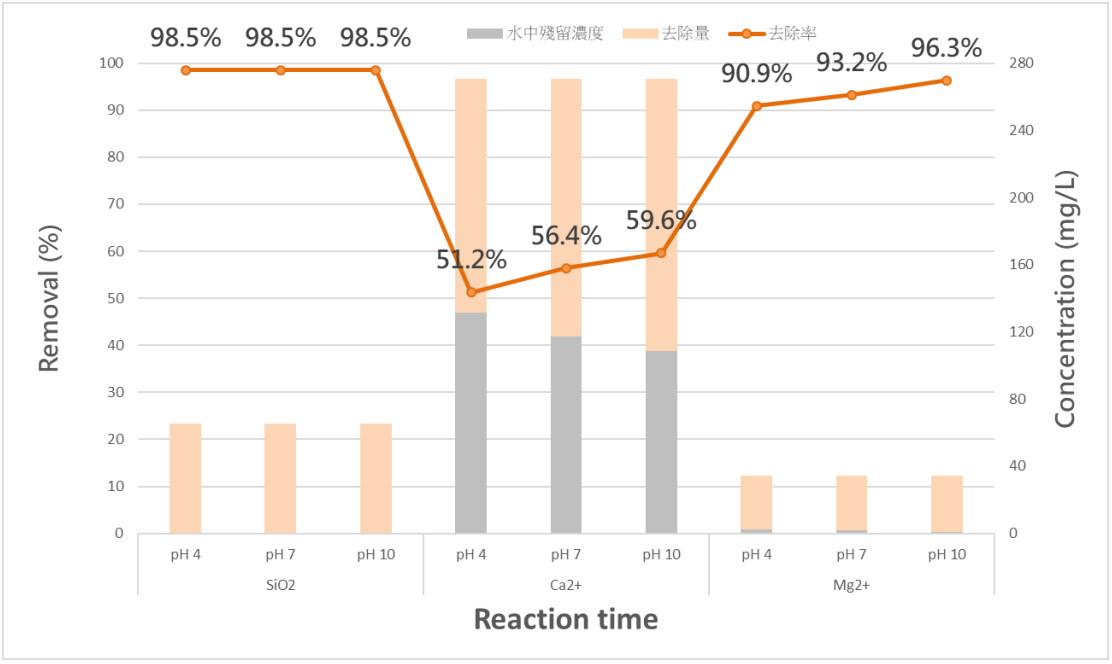


圖 4　電混凝於不同 pH 啟始值觀察二氧化矽與鈣、鎂去除率變化

4.電混凝處理之綜合探討

本研究之目的係為將冷卻排放水回收再利用，由於冷卻排放水通常具水量大的特性，為求實廠應用可行性，爰以不再調整酸鹼值為優先考量，以節省加酸或加鹼之藥劑成本及現場操作管理便利性，因此本研究以 pH 7 條件下，藉由增加反應時間及操作電流，探討二氧化矽及鈣、鎂硬度之去除率，實驗結果顯示，於固定操作電流時，二氧化矽及鈣、鎂硬度之去除率皆隨著反應時間增加而增加；於固定反應時間時，亦隨著操作電流增加而增加。依據本研究針對冷卻水塔排放水進行電混凝實驗結果，當操作電流 2.2 A 與反應時間 60 分鐘時，二氧化矽及鈣、鎂硬度之去除率分別可達到 98.5%、56.4%及 93.2%，與 Omar M. Hafez 等人的研究結果相仿，可作為實廠最適化操作參數之參考。

另，雖然二氧化矽與鎂離子去除率皆可達 90%以上，鈣離子去除率僅 56.4%，惟若以單位時間電混凝去除量的觀點來看，本實驗原水之二氧化矽濃度為 65 mg/L、鈣離子濃度為 270 mg/L、鎂離子濃度為 34 mg/L，經電混凝於 2.2 A 反應時間 60 分鐘，二氧化矽去除量為 64.0 mg/L、鎂離子去除量為 31.7 mg/L、鈣離子去除量則高達 152.3 mg/L，如再延長電混凝反應時間應可持續將水中鈣離子予以去除。在實廠應用上，則須同時考量冷卻水回用之水質條件及成本效益評估，延長電混凝時間雖可將二氧化矽及硬度離子大量去除，惟將增加用電能源成本，爰應視個案工廠冷卻水塔排水水質條件及用水水質需求，以評估電混凝最適化之操作時間。

5.冷卻水塔排放水循環回用之成本分析

本研究應用電混凝法可大幅降低冷卻水中的二氧化矽及鈣、鎂硬度，使冷卻水塔不致因離子濃縮而結晶形成水垢，因此評估將冷卻水排放水全部回收使用作為冷卻水塔補充水源。經查本研究探討對象工廠之製程冷卻水塔實際排水量約介於 760～900 CMD，根據本實驗結果，規劃將原直接排入廢水處理場的 900 CMD 冷卻排放水，利用電混凝法或傳統加藥混凝法(添加 $MgCl_2$)處理，再配合後端砂濾設備，將電混凝法或傳統加藥混凝法處理後殘留的 SS 去(砂濾逆洗所產生的反洗水排入既有廢水場的調勻槽內)，作為本研究探討成本分析之標的，以期降低廠內用水量及操作成本。冷卻水塔排放水循環回用處理單元主要設備及其操作費用分析如表 6 所示，其中：

(1)若以傳統加藥混凝作為前處理單元，其流程為進流泵將冷卻排放水輸送至 pH 調整槽一，將冷卻排放水的 pH 值調升至 11 後，再溢流至反應

槽，於反應槽加入的氯化鎂，添加劑量為 0.7g/L，隨後再流入快沉槽將反應槽中形成的氯化鎂—二氧化矽及氫氧化鈣等結晶物予以沉澱，其上澄液再流入 pH 調整槽二，並將 pH 值調整至 7，最後經砂濾後，直接回送至冷卻水塔內。依表 6 統計以加藥混凝為前處理之藥劑費及電費初估約 94,753 元/天。

(2)若以電混凝作為前處理單元，其流程為進流泵將冷卻排放水輸送至電混凝反應槽內，電解反應時間約 30 分鐘，反應後的原水溢流至快沉槽中予以沉澱，最後再經砂濾後，直接回送至冷卻水塔內使用。依據表 6 統計以電混凝為前處理之鋁極板損耗費用及電費初估約 1,577 元/天。

表 6　冷卻水塔排水循環回用主要設備及其操作費用分析

前處理	設備名稱	規格	數量	操作時間 (小時/天)	操作費 (元/天)
加藥混凝	進流泵	38 CMH	1 台	24	528.7
	調整槽	40 T	2 座		
	反應槽	4.5 T	3 座		
	加藥機	2.8 LPM	3 台	24	81
	攪拌機		3 台	24	40.5
	快沉槽	25 m^2	1 座	24	13.5
	藥劑貯桶		3 座		
	氯化鎂				93,139
	液鹼				208
	硫酸				611
電混凝	進流泵	38 CMH	1 台	24	528.7
	反應槽	20 T	1 座	24	432
	快沉槽	25 m^2	1 座	24	6.8
	鋁電極板				57
砂濾	暫存槽	40T	1 座		
	進流泵	38CMH	1 台	23.5	528.7
	反洗泵	78CMH	1 台	0.5	22.5
	鼓風機	2.5MM	1 台	0.1	1.1

註：估算基準為電費 3 元/度，工業級 45%氯化鎂 140 元/kg，45%液鹼 8 元/L，49%硫酸 4 元/L，鋁片 57.6 元/公斤；未將污泥處理費用納入計算。

進一步針對工廠現況作法(定量排棄 900 CMD 冷卻水循環水，並補充新鮮自來水)與本研究經電混凝法處理後全數回用至冷卻水塔，進行操作成本比較。以該廠每日需補充自來水 900 CMD 計算，冷卻水塔每日使用自來水費約 10,800 元(暫忽略排入廢水場後之處理費用)，相較於將冷卻水塔排放水以電混凝結合砂濾處理後，直接回補冷卻水塔約 1,577 元/天，高出約 9,223 元/天，換算每月可節省約 27.7 萬元之運轉成本；若再考慮設備攤提，以電混凝設備約 1,000 萬元、砂濾 100 萬元估算，預估約 3.3 年即可攤提，具高

經濟效益。如未來耗水費開徵後，工廠使用自來水水費可能上升至 14～15 元/m^3，相較之下，冷卻排放水已具回收之效益。在實務操作上，若以供水水質穩定度及操作穩定度為考量，本研究建議以電混凝為前處理後，再經砂濾為較佳之作法。

表 7　冷卻水塔用水成本比較—直接補新鮮水、電混凝及加藥混凝

方案	自來水成本(元/天)	操作成本(元/天)	每日總成本(元/天)	換算每月節省成本(元)
直接補充新鮮自來水	10,800	0	10,800	—
電混凝+砂濾處理後回用	0	1,577	1,577	276,690
加藥混凝+砂濾處理後回用	0	94,753	94,753	—

註: 自來水以 12 元/ m^3 計算

五、結　論

本研究係以石化廠製程冷卻水塔排放水為例，探討應用電化學法去除冷卻水中二氧化矽及鈣鎂硬度之可行性，並評估冷卻排放水回用作為冷卻水塔補充水源之成本分析。本研究使用鋁板作為犧牲陽極進行電混凝，可大幅降低冷卻排放水中二氧化矽及鈣、鎂濃度，於 pH 7 條件下，當電混凝操作電流 2.2 A(電流密度為 25.73 mA/cm^2)與反應時間 60 分鐘時，二氧化矽及鈣、鎂硬度之去除率分別可達到 98.5%、56.4%及 93.2%。另，為評估石化廠製程冷卻水塔排放水回收使用之可行性及經濟效益，以實廠冷卻水塔排放水量 900 CMD 推估，經電混凝及砂濾處理後全數回收作為冷卻水塔補充水源，推估工廠操作成本約 1,577 元/天，較工廠現行以定量排棄並補充新鮮自來水之用水成本約 10,800 元/天，約可節省 27.7 萬元/月之運轉成本；如考量設備投資費用之攤提，預估約 3.3 年即可回收。未來實廠應用須進一步考量實際水質條件及現場水質浮動變異性，建議先以小型模廠模擬測試各種可能水質狀況，據以規劃電化學處理之模組化設備，俾依水質即時狀況調整電化學操作參數。

六、參考文獻

1.Omar M. Hafeza, Madiha A. Shoeib, Mohamed A. El-Khateeb, Hussein I. Abdel-Shafy, Ahmed O. Youssef, “Removal of scale forming species from coolingtower blowdown water by electrocoagulation usingdifferent

electrodes.” Chemical Engineering Reserch and Design I36, 2018.
2.Mollah MYA, Morkovsky P, Gomes JAZ, Kesmez M, Parga J, Cocke DL. “Fundamentals, present and future perspectives of electrocoagulation.” Journal of Hazardous Materials B114, 2004.
3.Yousuf, M., Mollah, A., Schennach, R., Parga, J. R., Cocke, D. L. “Electrocoagulation (EC)-Science and Applications,” J. Hazad. Mater, B84, 2001.
4.李中光、廖佑誠、李念庭，「電混凝技術在廢水處理中之應用」，桃園市大學校院產業環保技術服務團環保簡訊，第 39 期，2018 年。
5.呂嘉敏,「混凝程序去除高科技產業廢水中非晶形二氧化矽之特性研究」，朝陽科技大學環境工程與管理系，2004 年。
6.張振林、王海林、楊綠，「電凝聚在廢水處理中的研究進展」，污染防治技術，2008 年。

廢水氨氮系統精進實例

盧彭潭*、黃俊評**、黃冠哲***

摘　要

隨著水資源的匱乏，全球已無法承受線性生產模式造成的資源浪費，水資源的有效再利用不僅促進循環經濟的推動，亦是善盡永續發展的企業社會責任。然落實節能減廢及資源再利用的漫漫長路上，有許多實務面的問題需要克服。縱觀廠內各處理系統，廢水氨氮系統過去因設備結垢嚴重造成處理效能不佳及運轉成本上升等問題；氨氮處理系統運轉過程因熱力設備結垢問題導致系統效能不佳，在 107 年回收水改善實例中，藉由改善回收水運用，使系統來源水洗滌塔排水硬離子濃度下降，雖降低無機結垢物生成，但仍有少量結垢情況。

為求精進改善氨氮系統問題，全面調查氨氮系統各單元發現，目前現有因水質因素造成鍋爐生鏽、觸媒反應特性使系統調整困難、硬度離子來源需重新檢視等三大攻堅目標待改善。分析鍋爐排水發現鐵離子含量過高有爐管壞損風險，藉由添加造膜劑改善爐管鏽蝕增加使用壽命；三段式觸媒設計使操作程序繁雜，異常時不易系統調整改善。分析流程後改以兩段式觸媒結合現有操作洗滌塔可維持系統穩定運轉，並縮短異常處理時間；硬度來源再分析發現使用物料工業用硫酸硬度偏高，規劃廠內(低硬度)廢硫酸回收再利用系統，除改善氨氮系統結垢，有效延長氨氮系統蒸餾塔停機酸洗週期外，同時可供其他系統加藥使用。達到循環經濟，廠內現有資源回收再利用，同時減少停機 PM 平時保養次數，有效降低人員工作負荷等多贏目標。

【關鍵詞】廢硫酸、氨氮、結垢

---

*華邦電子 300mm 廠務處廢水課副理

**華邦電子 300mm 廠務處廢水課資深工程師

***華邦電子 300mm 廠務處廢水課高級工程師

一、前　言

因應排放水質管制標準的提升及華邦製程產能擴增，廠務端陸續擴增為7套廢水處理系統，處理至符合納管標準後排放至中科污水廠。隨著系統日趨龐大複雜，各項運轉統計及運轉耗材調查，廢水管理不可或缺的工作。為精進廢水廠管理，分析107年適水適用改善後各系統每年耗材費用，氨氮系統佔比55%為最大宗，列其為今年精進目標。

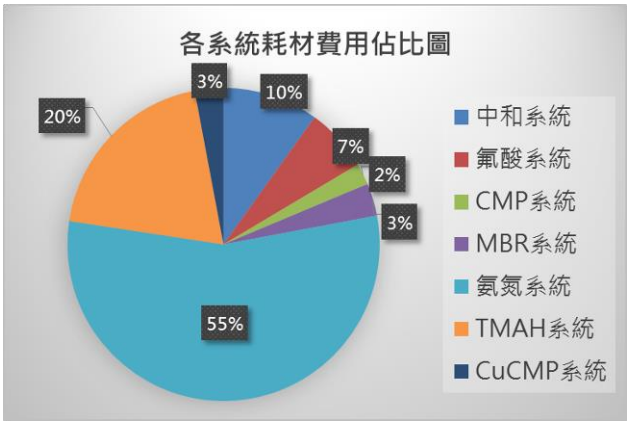


圖 1　廢水系統耗材圓餅圖

進一步分析氨氮系統耗材占比，將其做柏拉圖(圖 2)分析發現觸媒佔費用最高(60%)，其次為 Sensor(17%)，濾材(12%)，分析儀類(11%)。其中 sensor 及分析儀器為定期更換，不納入評估。氨氮系統的觸媒及濾料，列為優先挑戰項目。

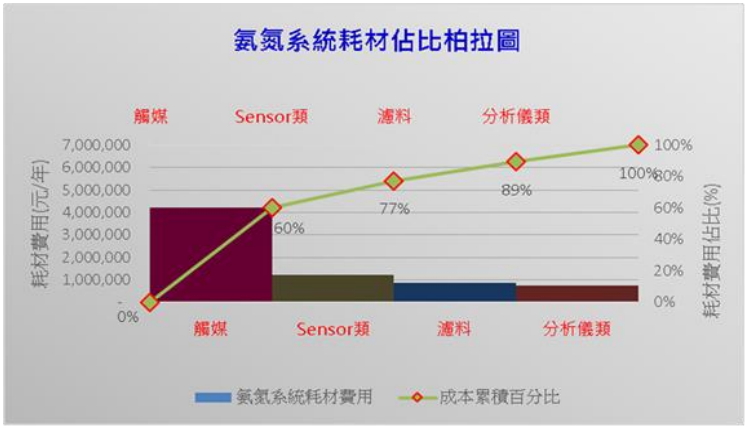


圖 2　氨氮系統耗材費用柏拉圖

氨氮原水主要為華邦廠區內之鹼系含氮氨之廢水，其流程分為三個子系統:前處理系統，蒸氣氣提系統及氨選擇性觸媒氧化還原系統(圖 1-3)。在前處理系統中，原水經過前處理濾袋濾心處理後進中間三段逆滲透提濃，逆滲透產水排放至總放流，濃縮水進氣提原水儲槽。在蒸氣氣提系統，根據氨氮特性將酸鹼值控制在鹼性環境下(pH>11.5)，使液態氨轉變為氣態氨(圖 3)後，藉由瓦斯鍋爐及蒸發器熱回收提供的蒸氣，讓氨水在蒸餾塔進行吹脫，順利氣液分離。接下來氨氣進三段觸媒系統(圖 5)，在第一段氧化觸媒，氨氣混合外界空氣中氧氣，氨氣氧化為氮氧化物(NOx)，在第二段還原觸媒，經排通的氨氣與第一段觸媒反應產生的氮氧化物還原為氮氣(N_2)及殘餘的氨氣及水氣，最後的殘餘氨氣再經過第三段氧化觸媒在氧化處理後形成成氮氣及水氣排出。整體觸媒系統設計為搭配兩種不同型態蜂槽狀多孔固定觸媒，將氨氣轉換為氮氣及水氣。

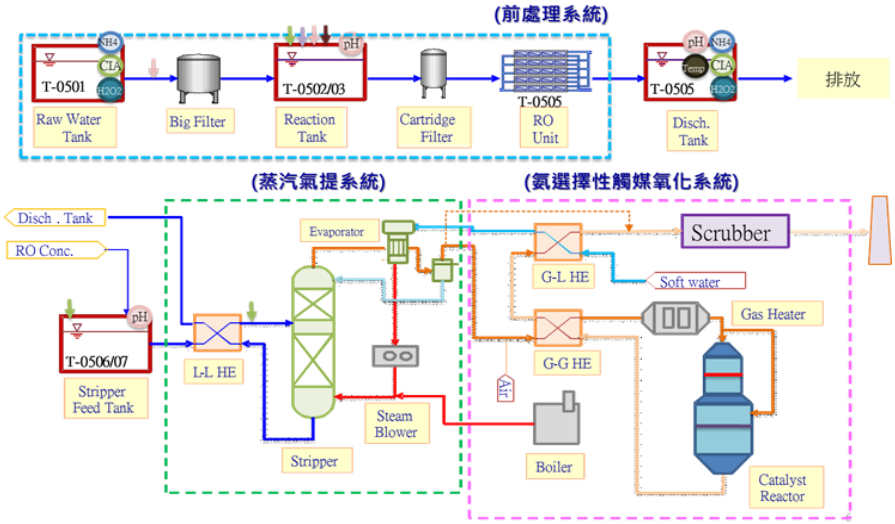


圖 3　氨氮系統流程圖

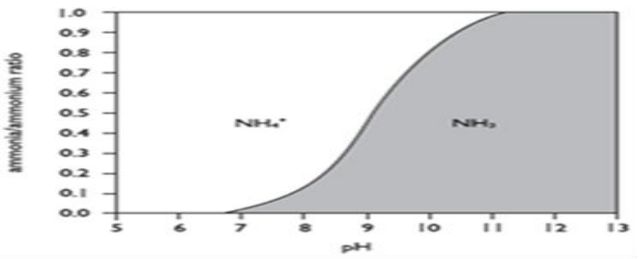


圖 4　氨氮系統轉換原理

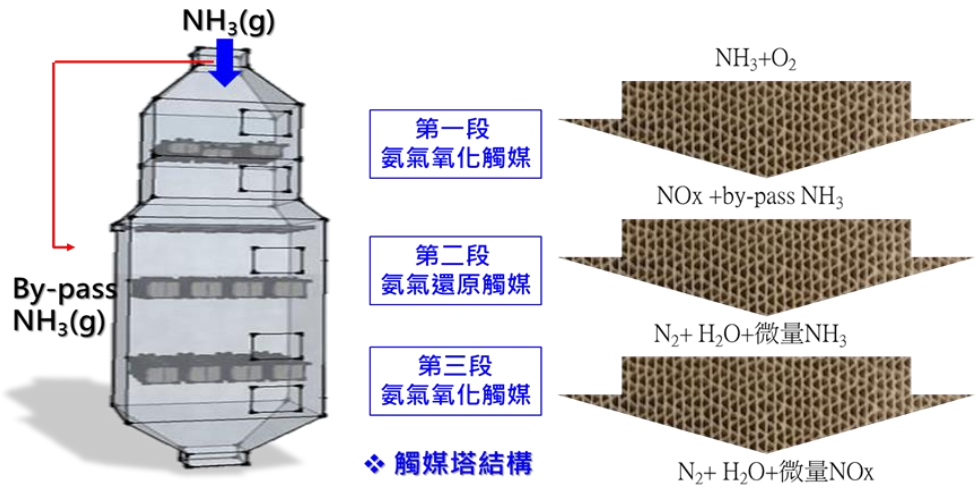


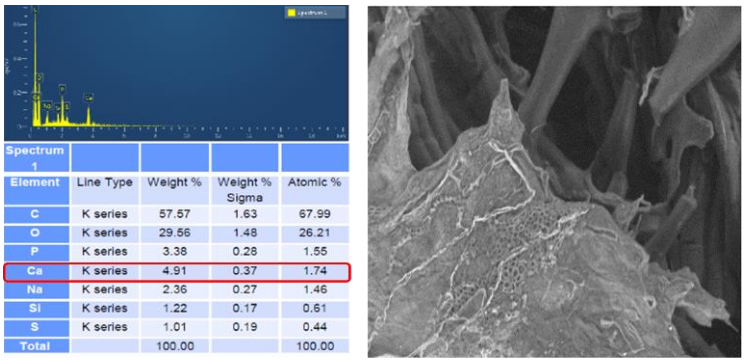
圖5　觸媒系統原理說明

二、現況分析

欲改善精進，需先對現況釐清了解後逐一抽絲剝繭了解問題點，再找出真因後對策下藥解決。針對氨氮系統濾料問題精進，先針對濾料結垢分析，水質分析及生菌數分析，菌落數來源分析探討再進行要因分析求改善。現況觸媒使用上問題，需先對尾氣濃度資料收集後再統計分析，再針對癥結點進行要因分析求改善。

1.氨氮系統濾料結垢物分析調查

針對結垢物刮除並打 EDS 及 SEM 分析檢測後發現，結垢物主要碳、氧、磷、鈣、鈉、矽，硫七種成份組成。結垢外表呈現不規則型態。



Spectrum 1

Element	Line Type	Weight %	Weight % Sigma	Atomic %
C	K series	57.57	1.63	67.99
O	K series	29.56	1.48	26.21
P	K series	3.38	0.28	1.55
Ca	K series	4.91	0.37	1.74
Na	K series	2.36	0.27	1.46
Si	K series	1.22	0.17	0.61
S	K series	1.01	0.19	0.44
Total		100.00		100.00

EDS檢測　　SEM檢測

圖 6　結垢物分析物質圖

2.氨氮系統原水水質再調查

氨氮系統來源水分為製程高濃度及低濃度鹼性廢水、洗滌塔鹼性排水及製程廢氨水，進行硬度離子檢測，與去年相比，A 廠、B 廠及 C 廠之鹼性洗滌塔排水鈣離子及鎂離子含量已大幅降低，鈣離子除原水貢獻外，氨氮酸鹼調和槽鈣離子來源自調整 pH 所加的工業級硫酸、液鹼。鈣離子濃度為中後段熱交換器阻塞物質來源，故研擬對策方案進行預先改善。

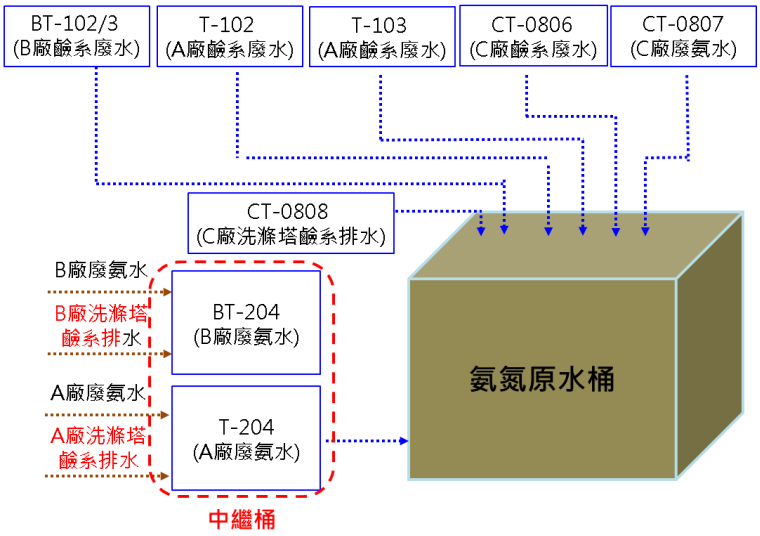


圖 7　氨氮原水圖

氨氮原水分析數據如下表：

項目(mg/L)	水量 (CMD)	Ca	Mg
T-102(A廠鹼系廢水)	52	0.1	0.1
T-103(A廠鹼系廢水)	191	0.1	0.1
A廠廢氨水	210	0.1	0.1
A廠洗滌塔鹼系排水	207	1.5	0.4
BT-102/3(B廠鹼系廢水)	203	0.1	0.1
B廠廢氨水	242	0.1	0.1
B廠洗滌塔鹼系排水	101	1.03	0.51
CT-0806(C廠鹼系廢水)	39	0.1	0.1
CT-0807(C廠廢氨水)	137	0.1	0.1
CT-0808(C廠洗滌塔鹼系排水)	51	0.778	0.31
原水推估	**1433**	**0.392**	**0.180**
氨氮系統酸鹼槽		**0.98**	**0.21**

❖ 委外分析數據

導熱板結垢　　導流孔結垢

項目	Ca(mg/L)	Mg(mg/L)
硫酸(工業)	6.18	25.4
液鹼(工業)	5.83	1.80

❖ 華邦實驗室分析數據

圖 8　氨氮原水水質數據

3.氨氮原水水生菌數調查

取各股原水發現 Scrubber 排水菌落數偏高，現況不明。

表 1　氨氮原水菌落數調查表

項目	菌落數(cuf/ml)
T-102(A廠鹼系廢水)	<5
T-103(A廠鹼系廢水)	13
A廠廢氨水	8
A廠洗滌塔鹼系排水	0.7*10^3
BT-102/3(B廠鹼系廢水)	38
B廠廢氨水	5
B廠洗滌塔鹼系排水	0.8*10^3
CT-0806(C廠鹼系廢水)	<5
CT-0807(C廠廢氨水)	<5
CT-0808(C廠洗滌塔鹼系排水)	1.1*10^3

4.菌落數來源調查

追查 Scrubber 用水來源，發現回收水收集槽，固定投藥量下但管路 Y 濾有黑色泥狀物，氨氮系統菌落數持續偏高，濾料數量頻率增加。緊急對策為先提高投藥量 25mg/L 控制菌落數生長，其現況原因不明。

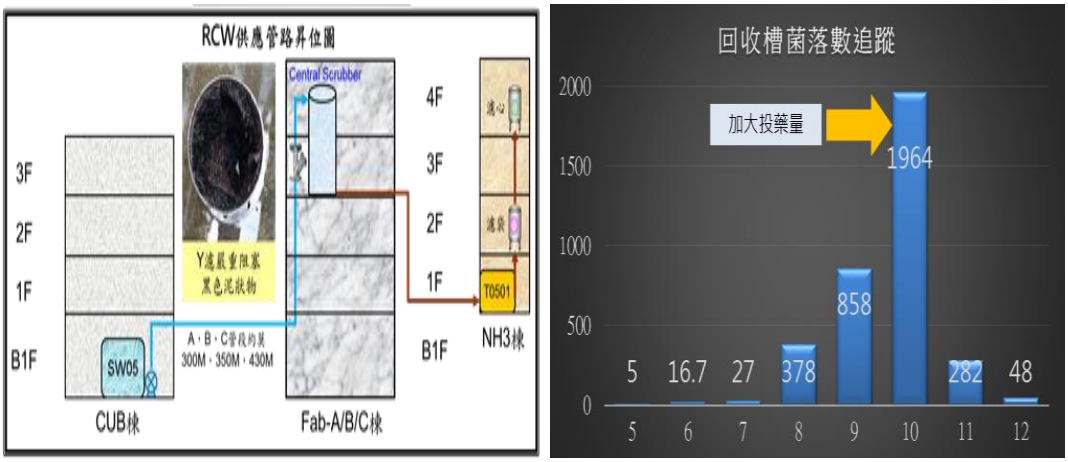


圖 9　回收水昇位圖及菌落數調查

5.氨氮系統尾氣調查

經收集尾氣(NOx)資料進行分析發現其尾氣濃度不穩定，製程能力Cpk僅0.61，現況未明。

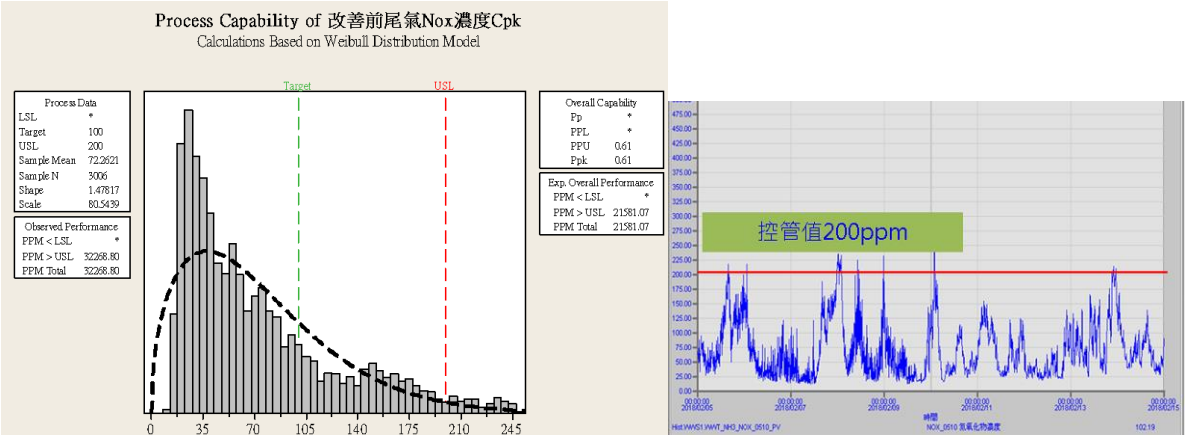


圖 10　氨氮尾氣製程能力指標分析圖

6.鍋爐異常調查

現況調查過程中，發生供氣鍋爐破管現象，分析鍋爐用軟水水質中全鐵，磷酸鹽及pH值超出控制範圍，現況未明。

項目	BWA 爐水	控制範圍 爐水
PH	8.0	10.5~12
Specific Conductance Micromho/cm 25℃ (電導度)	1573	<3500
M-Alkalinity as $CaCO_3$,ppm (M-鹼性度)	97	<1000
Total Hardness as $CaCO_3$,ppm (總硬度)	0	0
Total Iron as Fe,ppm (全鐵)	7.1↑	2~4
Ortho Phosphate as PO_4,ppm (磷酸鹽)	TRACE	20~40
Sulfite as SO_3,ppm (亞硫酸鹽)	ND	ND

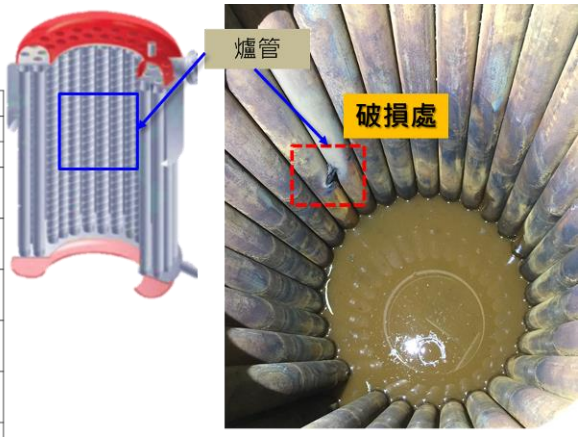


圖 11　鍋爐爐管異常圖

7.現況分析總結

經調查後共有三處未明處，分別是回收水收集槽菌落數投藥控管，但濾料更換數量頻率增加，尾氣濃度不穩定及及蒸氣鍋爐爐管破損，如表2所示：

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		酸鹼調和槽使用之硫酸及液鹼仍會造成結垢			V	
	V	回收水收集槽菌落數投藥控管，但濾料數量頻率增加	V			
	V	氮氣系統尾氣NOx濃度不穩定			V	
	V	氨氮系統蒸氣鍋爐爐管破損	V			

表 2　現況分析總結

三、要因解析

1.異常原因分析

藉由魚骨圖分析，為什麼回收水槽定量投藥但洗滌塔排水菌落數增加？以機物法環進行思考條列問題，並逐一驗證排除。經初步驗證後，剩回收水槽是否因單一投藥產生抗藥性，待使用不同殺菌劑殺菌改善釐清。

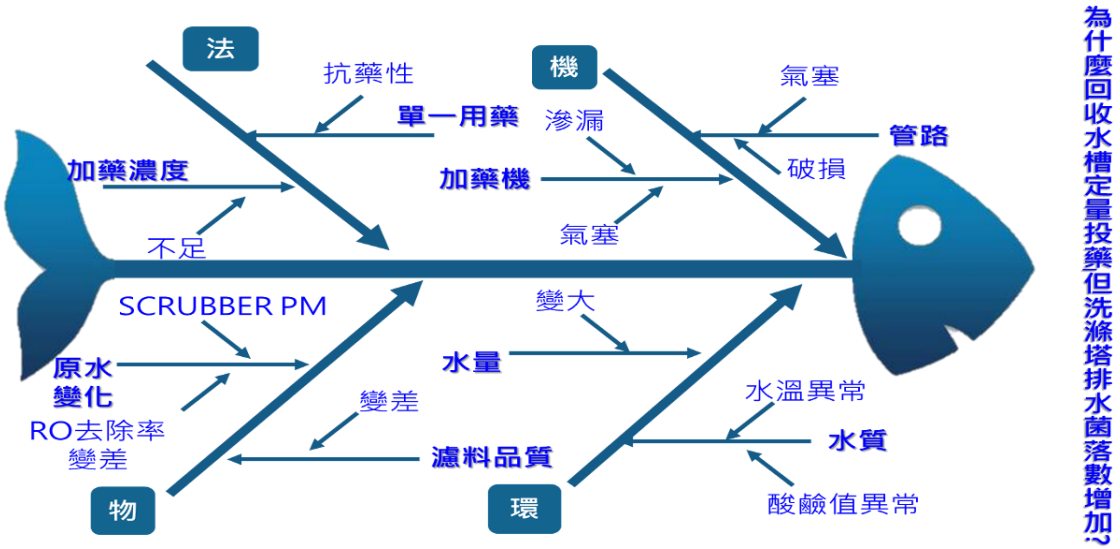


圖 13　菌落數增加特性要因圖

大要因	小要因	驗證方式及說明	判定	影響性
機	加藥機氣塞	現場檢視加藥量皆符合吐出量	非真因	▲
	加藥機滲漏	現場檢視均正常無損壞	非真因	▲
	管路破損	現場檢視均正常無損壞	非真因	▲
	管路氣塞	每日加藥使用量比對，現場加藥管檢查均正常	非真因	▲
物	SCRUBBER PM	檢查SCRUBBER PM頻率並無增加	非真因	▲
	RO去除率變差	回收用RO導電度去除率及回收產水導電度正常	非真因	▲
	濾料品質變差	表面檢查(目視)及濾料厚度抽檢均正常	非真因	▽
法	殺菌劑濃度不足	配比濃度計算，符合廠商建議值	非真因	▲
	單一用藥產生抗藥性	使用別種殺菌劑進行殺菌觀察是否改善	待釐清	▲
環	水溫上升	水溫量測，約10~25℃，四季無明顯差異	非真因	▽
	原水pH改變	抄表資料比對，pH控制在6~8均正常	非真因	▽
	回收水水量	抄表資料比對，水量趨勢無巨大變化	非真因	▽
▲:強相關 ▽:弱相關				

表 3　菌落數增加驗證表

2.異常原因分析

藉由魚骨圖分析，列出造成尾氣 NO_x 濃度不穩定可能要因，並進行初步驗證，剩下兩個要因待釐清查證是原水水質變化還是 By-pass 操作造成尾氣 NO_x 濃度不穩定。

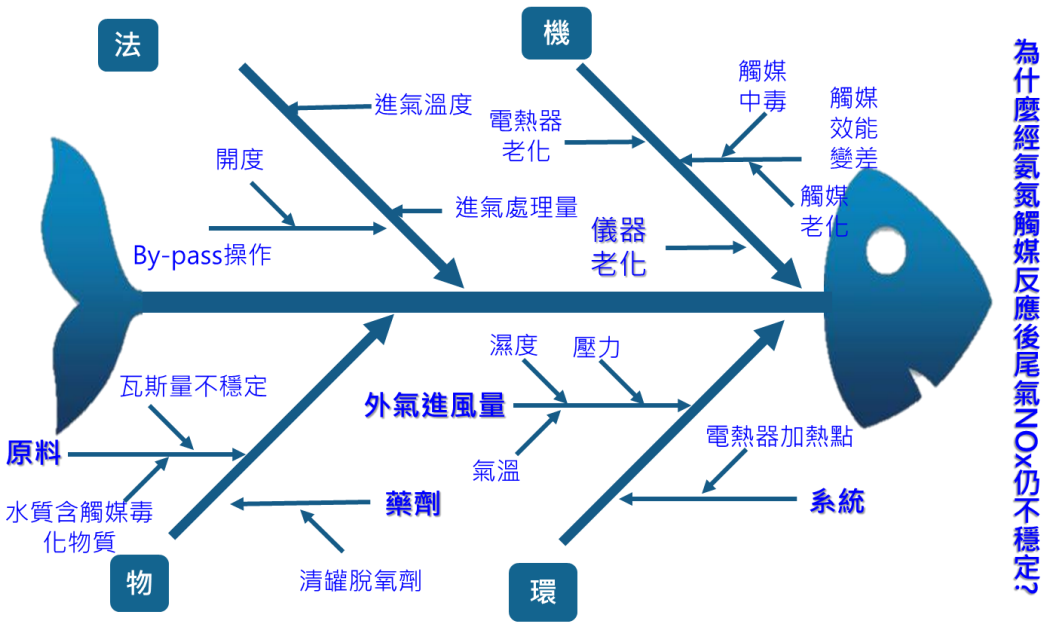


圖 14　尾氣不穩定特性要因圖

表 4　尾氣不穩定驗證表

大要因	小要因	驗證方式及說明	判定	影響性
機	觸媒老化導致效率變差	觸媒拆解檢查測試效率正常	非真因	▲
	觸媒毒化導致效率變差	觸媒拆解檢查測試效率正常	非真因	▲
	儀器老化導致讀值不穩	觸媒拆解檢查測試效率正常	非真因	▲
	電熱器老化導致讀值不穩	觸媒拆解檢查測試效率正常	非真因	▲
物	原水水質含觸媒毒化物質	查證原水內含物並無有機溶劑等毒化物質	驗證	▲
	瓦斯供應量變化導致讀值不穩	經查證瓦斯供應量變化尚屬SPEC.內	非真因	▽
	清灌脫氧劑影響觸媒	經查證成分不會影響觸媒	非真因	▽
法	開度過大/小導致讀值不穩	開度可自動調整，無影響	非真因	▲
	進氣溫度太低導致讀值不穩	電熱器可自動加熱，無影響	非真因	▲
	進氣量過大/過小導致讀值不穩	經查證進氣量變化尚屬SPEC.內	非真因	▲
	By-pass操作	懷疑三段觸媒將NH3氧化成NOX，造成不穩定	驗證	▲
環	氣溫過低影響外氣進風量	經查證操作外氣溫度尚屬SPEC.內	非真因	▽
	濕度過高影響外氣進風量	經查證當初設計並無影響	非真因	▲
	大氣壓變化影響外氣進風量	外氣進氣閥開度可自動調整，無影響進風量	非真因	▲
	電熱器加熱點導致加熱不均	經開塔檢查加熱點正常	非真因	▲
▲:強相關 ▽:弱相關				

3.異常原因分析

藉由魚骨圖分析，列出蒸氣鍋爐爐管可能要因，並進行初步驗證，剩下兩個要因待釐清查證是 DI 水水質還是藥劑不適用造成爐管生鏽。

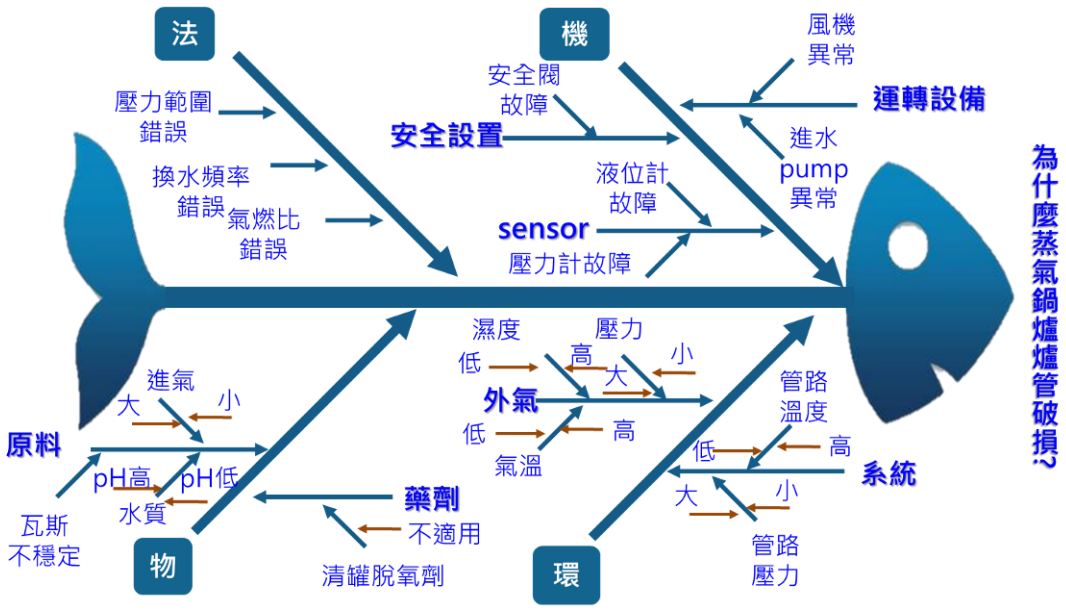


圖 15　蒸氣爐管破損特性要因圖

表 5　蒸氣爐管破損驗證表

大要因	小要因	驗證方式及說明	判定	影響性
機	安全設備	檢查洩壓安全閥，正常	非真因	▲
	運轉設備	檢查進氣風機及入水pump，正常	非真因	▲
	Sensor	檢察壓力計及液位計，正常	非真因	▲
物	水質	原水為DI水，因去離子水水質造成易生鏽。	需驗證	▲
	藥劑	現況使用清罐脫氧劑無法保護爐管造成腐蝕。	需驗證	▲
	瓦斯	測試瓦斯流量，符合標準。	非真因	▲
	進氣	測試進氣量，符合標準。	非真因	▲
法	壓力	操作壓力為5~7kg/cm²，符合標準。	非真因	▲
	換水頻率	每周定期排出1/3桶水，符合操作頻率。	非真因	▲
	氣燃比	原廠每用定期檢測，符合標準。	非真因	▲
環	系統	系統內部操作壓力及溫度，皆穩定。	非真因	▽
	外在	大氣溫度、壓力及濕度皆穩定。	非真因	▽
▲:強相關 ▽:弱相關				

4.真因驗證

(1)回收水槽是否因單一投藥產生抗藥性？

回收水槽用定量投藥殺菌劑為速效型(15mL/min) ，測試增加以長效型殺菌劑批次投藥 25kg/週。觀察一個月後Y濾阻塞情形改善無再發。此真因已明。

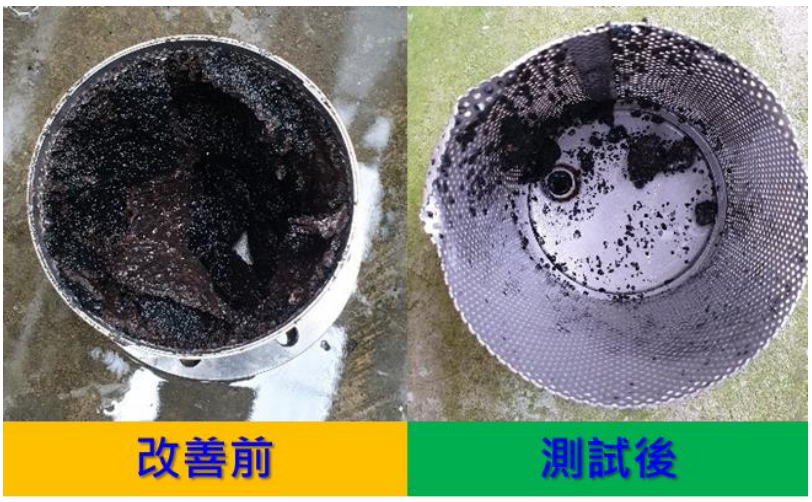


圖 16　回收水投藥

(2)By-pass 開度大小會導致讀值不穩？

學理上第三段為氨氣氧化觸媒，若 By-pass 開太大，第二段觸媒反應後殘留氨氣濃度較多時會氧化成 NOx。且後段接 Scrubber 並無洗滌去除 NOx 功能。

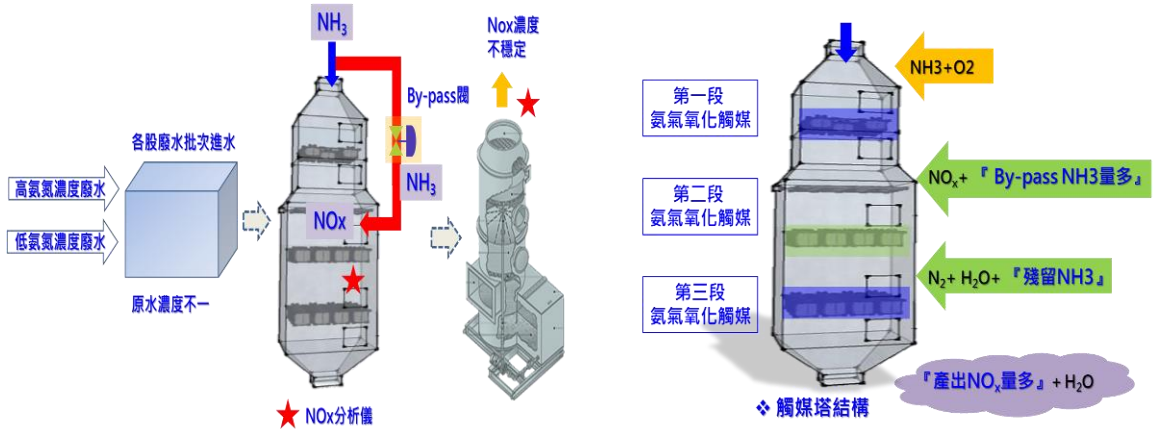
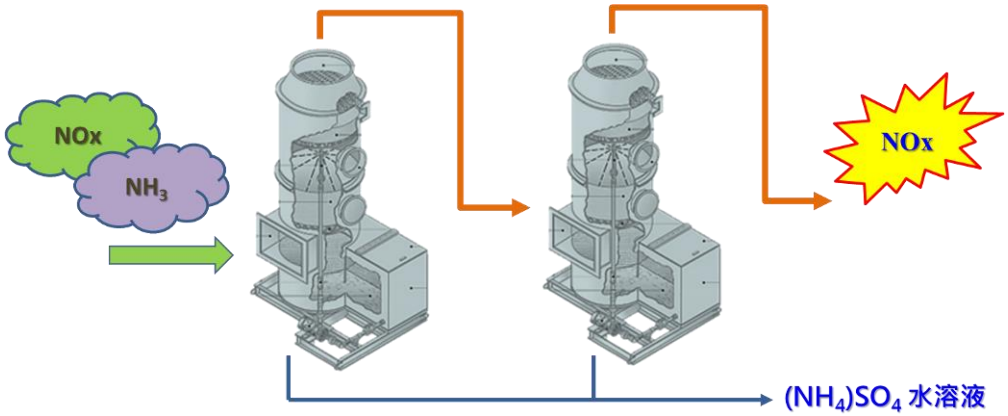


圖 17　觸媒 By-pass 開度說明



酸性洗滌塔去氨反應式：$H_2SO_4+2NH_4^++NOx+2OH^-\rightarrow(NH_4)SO_4+2H_2O+NOx$

圖 18　觸媒後 Scrubber 反應式

學理上 By-pass 開度過大/過小均會有 NOx 不穩定問題，接下來以定 By-pass 開度方式驗證是否三段觸媒是造成不穩真因。觀察 By-pass 閥固定開度下，尾氣 NOx 濃度趨勢高於二段反應後 NOx 濃度趨勢且無固定趨勢變化，代表殘留氨氣經第三觸媒氧化為 NOx 濃度隨時間而變，為不穩定真因。

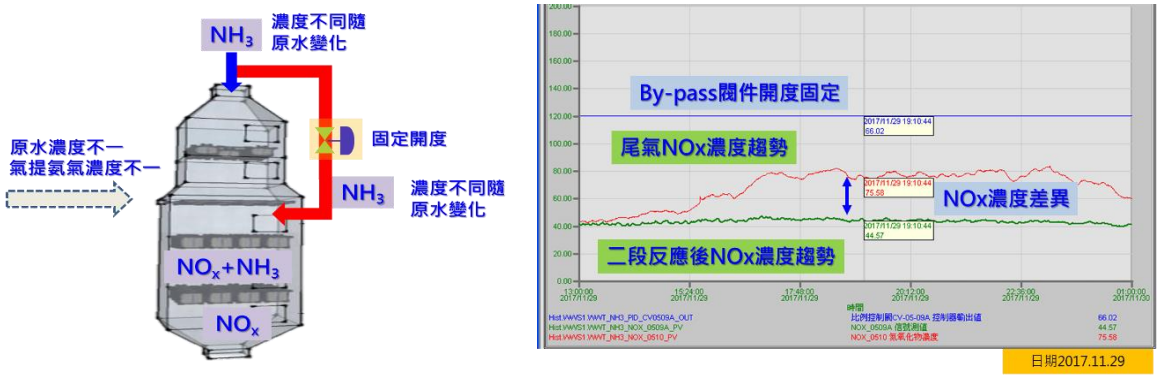


圖 19　定開度實驗結果趨勢圖

(3) DI 水是否是造成鍋爐生鏽破損原因？

DI 水供應點為超純水系統過 2B3T 之 DI 水，水質經過檢測總硬度，全鐵，磷酸鹽均 ND，pH 7.68，非此鍋爐生鏽破損真因。

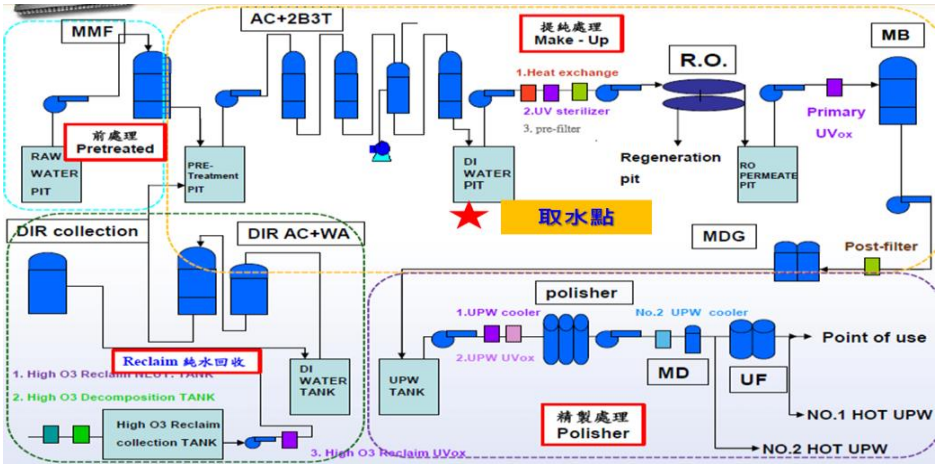


圖 20　DI 水來源說明圖

(4)清罐脫氧劑無法保護爐管是造成鍋爐生鏽破損原因？

調查添加藥劑成分：鍋爐用輕罐脫氧劑原先只使用脫氧劑(亞硫酸鈉)主要成分，磷酸鈉用途為軟化硬水原先不需使用，但使用 DI 水條件下因電極液位計判別液位需一定量的導電度，所以加入微量磷酸鈉。但磷酸鈉經循環濃縮後反而造成爐管鏽蝕。清罐脫氧劑無法保護爐管是造成腐蝕造成鍋爐生鏽破損真因。

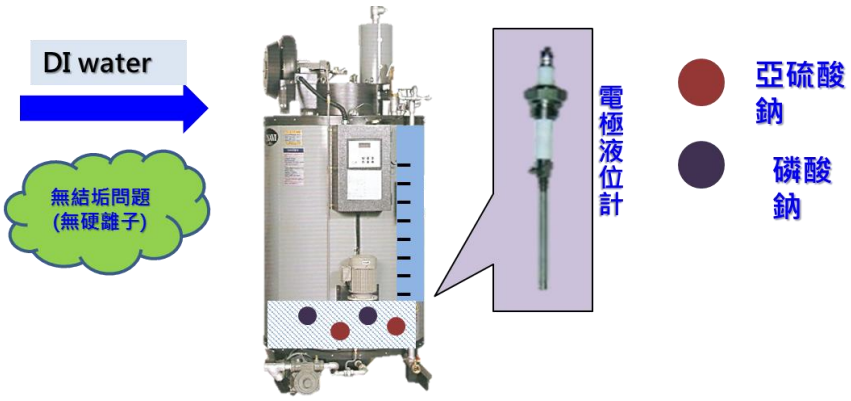


圖 21　DI 水來源說明圖

四、對策擬定與實施

1.改善單一殺菌劑產生抗藥性對策評估及實施

組員評估 3 個方策，回收水槽及供應管路定期停水高濃度計量泡藥，定期調整酸鹼值菌種不易孳生，增加長效型批次投藥避免菌種抗藥性產生。經評估後以增加長效型批次投藥為可行方案。

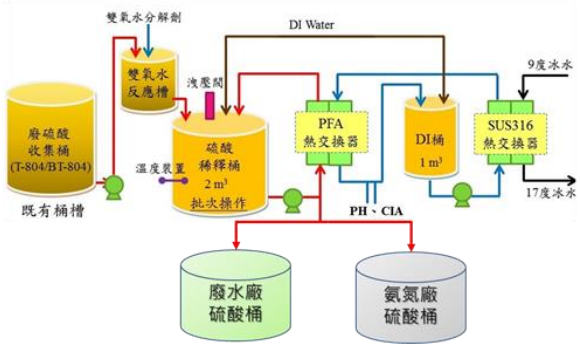
表 6　改善回收水補自來水，造成鈣鎂離子過高之對策評估比較表

對策方案	費用	優/缺點	選擇
回收水槽及供應管路定期停水高濃度計量泡藥	12萬元/年	1.可較完整將菌種殺除 2.需較長停機時間 3.會有瞬時菌種屍體剝落，可能會造成系統阻塞異常	
定期調整酸鹼值菌種不易孳生	無	1.利用系統既有設備調整，困難度低。 2.不符合後段供應水質	
增加長效型批次投藥避免菌種抗藥性產生	14.1萬元/年	1.可有效抑制菌種生長 2.不影響既有供應水質條件 3.需增加藥劑成本	●

2.氨氮系統硬度再改善對策評估及實施:

從氨氮原水分析所加的工業級硫酸液鹼含高濃度鈣鎂離子，影響原水單元操作。配合 106.09 廢硫酸系統完工，直接拉管至系統，以低鈣鎂離子的回收硫酸進行改善。

對策方案	費用	優/缺點
回收酸供應氨氮系統使用	50萬元	1.106.9月廢硫酸系統完工，新增管路至氨氮系統硫酸槽進行改善。



項目(回收硫酸)	濃度(mg/l)
鈣	<0.5
鎂	ND

圖 22　氨氮系統硬度再改善說明

3.氨氮系統尾氣不穩改善對策評估及實施分析三個對策，Scrubber 藥劑改為 NaOH+漂白水，移除第三段氧化觸媒，增加第二段還原觸媒。此三個對策以移除第三段氧化觸媒最便宜，且操作上較好控制，當二段觸媒氨氣過量時，仍可維持尾氣 NO_x 穩定，故選用之。但缺點是有衍生後續硫酸加藥費用(形成硫酸銨)。

對策方案	費用	優/缺點
scrubber藥劑改為NaOH+漂白水	346萬元/年	1.優-設備無需新增。 2.缺-次氯酸鈉藥劑量需求大。 3.缺-氯氣逸散人員危害高。
移除第三段氧化觸媒	35萬元/次	1.優-設備無需修改。 2.優-Scrubber 洗滌成硫氨後可調配原水。 2.缺-衍伸藥劑費用。
增加第二段還原觸媒	3,000萬元	1.優-增加後操作空間大。 2.缺-既有設備無法增加，空間及成本大。

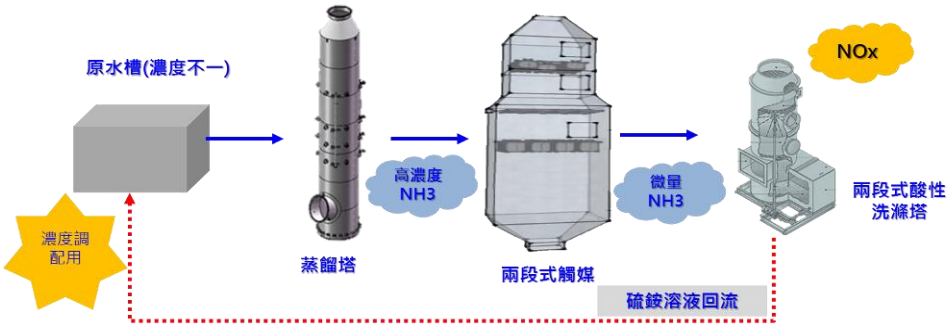


圖 23　氨氮系統尾氣不穩改善說明

4.鍋爐用水及藥劑改善對策評估及實施:

評估兩個對策，將鍋爐水水質改微軟水，缺點是未來後段系統結垢問題且費用高，增加皮膜劑改善有助於維持鍋爐系統正常運轉且價廉，故選用之。

表 7　鍋爐用水及藥劑改善說明

對策方案	費用	優/缺點
將入水水質改微軟水 (含微量鈣鎂)	100萬元	1.優-既有藥劑無需更換。 2.缺-既有軟水水量不足風險。 3.缺-熱力系統可能會有結垢問題。
增加皮膜劑	1.89萬元/年	1.優-既有藥劑無需更換，依水質情況添加。 2.優-保護爐管防止生鏽。 2.缺-衍伸藥劑費用。

五、效果確認

各項改善效益說明如下:

1.增加長效型批次投藥: 改善後，濾料更換頻率由 3.9 次/天下降為 1.9 次/天。

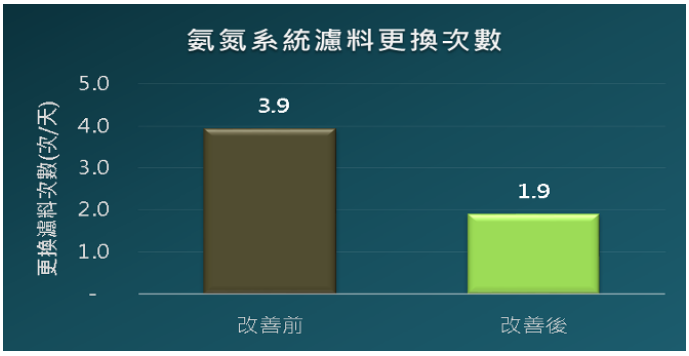


圖 24　氨氮系統濾料更換次數改善比較圖

2.回收廢硫酸供應氨氮系統使用: 改善後水對水熱交換器藥洗頻率由 4 次/年下降為 3 次/年。

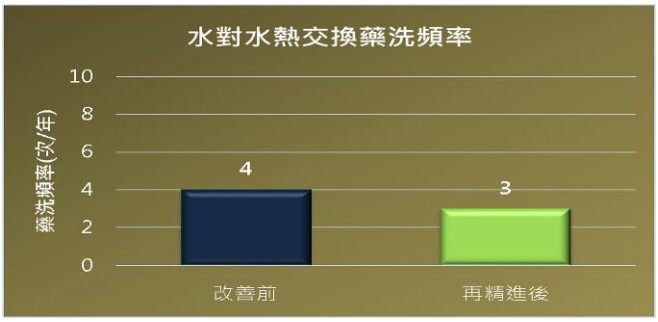


圖 25　水對水熱交換器藥洗頻率改善比較圖

3.增加皮膜劑:改善後鍋爐生銹指標全鐵濃度由 7.1ppm→1.4ppm，符合控管。

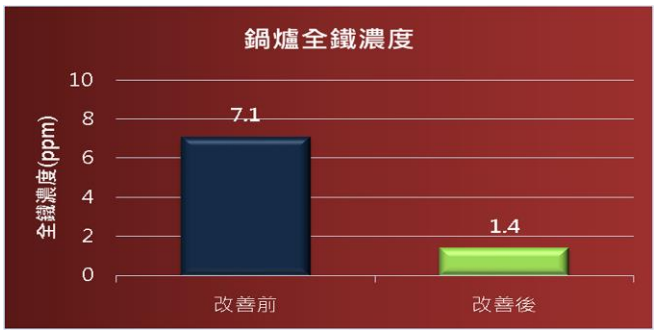


圖 26　鍋爐全鐵濃度改善比較圖

4.移除三段觸媒: 改善後，尾氣 NOx Cpk 由 0.61 上升至 3.73。

圖 27　氨氮系統尾氣 NOx Cpk 改善比較圖

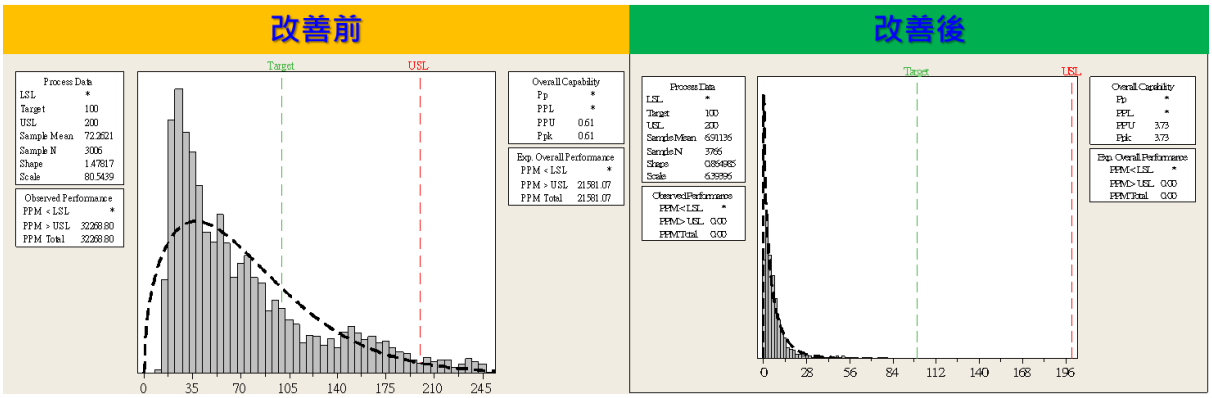


圖 28　系統精進後尾氣濃度分布圖

六、效益分析

1.有形效益:共節費約 141.7 萬/年，且氨氮耗材費用占比從 55%降為 51%。效益分析說明如下。

(1)耗材小計 86 萬元/年

減少濾料更換費用：濾袋 106,432 元/年+濾心 178,396 元/年=284,828 元/年；減少觸媒更換費用：576,000 元/年。

(2)減少異常費用小計 52.4 萬元/年

鍋爐更換費用：破損鍋爐(A)更換 250,000 元/年+預防性更換鍋爐(B)250,000 元/年=500,000 元/年。

系統異常處理：更換藥劑去除 NOx 4,740 元/年*工資 20,000 元/年=24,740 元/年。

(3)設備藥洗費用小計 3 萬元/年

減少水對水熱交換器藥洗費用：30,000 萬元/年。

以上節省合計：141.4 萬元/年

2.無形效益

(1)符合公司環保政策及放流水標準。

(2)同仁對氨氮系統有更深入了解。

(3)訓練同仁以系統思考方式來解決問題。

(4)氨氮系統因各項異常停機風險降低。

(5)降低系統操作調整參數 loading。

七、參考文獻

1.蔡騰龍，工業水處理，正文書局，2001。

2.顏登通，高科技廠務，全華圖書股份有限公司，2006。

3.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。

4.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。

5.吳榮宗，工業觸媒概論，國興出版社，1992。

6.羅基煌，鍋爐水處理，鉅邁 1982。

前進印度進行廢水處理回收現場模廠試驗結果

林正祥*、李岳翰**

摘　要

政府自 2017 近 3 年多來，為了更活絡國際貿易，積極推展南向及前進印度之各項經貿及科技輸出與合作之工作，筆者有幸，在具備亞太工程師及國際工程師之國際認證資格下，接受工業局及亞洲生產力組織 APO 的邀請，先後前進印度 7 次，在當地相關單位的安排下，作印度水環境市場的考察、聯合汙水廠(CETP)及私人企業之廢水處理效能診斷建議，除了簽訂合作協議書(MOU)外，並為實體工程之實施而在現場建置連續廢水進流之小型模廠試驗。

本報告即為在印度南部工業城清奈(Chennai)皮革專業區聯合污水處理廠(CETP)現地進行「陶瓷平板膜取代 UF 膜之模廠試驗」之試驗結果，本試驗過程，同步比較現場處理系統現況及模廠試驗狀況，這其中還包括微生物相之即時觀察與拍照，並比較分析，以證明我們陶瓷平板膜之優越性及成效。

【關鍵詞】印度、皮革廠、皮革專業區聯合污水處理廠、陶瓷平板膜、現地模廠試驗

---

*祥泰綠色科技有限公司 總經理、
臺灣環保暨資源再生設備工業同業公會 印度區域召集人
淡江大學水資源及環境工程學系博士候選人
**祥泰綠色科技有限公司 工程部經理

一、前　言

截至 2019 年 7 月印度擁有人口 13.6 億，僅次中國人口的 14 億，人口增長速度大於美國人口，是亞洲第二大也是南亞最大的國家，實際管轄之面積達 328 萬平方公里，大約為台灣的 90 倍，但水污染所引發的腸胃及寄生蟲疾病奪去約 180 萬條人命[1]。都市化後印度民眾對水的需求激增，迫使印度政府須積極開發水源， 廢水處理至零排放和供水系統設備的需求也同步增加，給了全世界水處理相關設備和公司投資的絕佳機會。德里在 1983 年時，地下水平均深度僅有 33 英尺，2011 年卻深達 132 英尺。馬哈拉施特拉邦經常遭受嚴重乾旱，許多農民因為歉收無法支付花費而自殺，數以千計的農村被政府宣布為災區。另外，由於許多州共享同一條河流的水，州與州之間也會衍生水資源分配不均的衝突，這項事實讓各州政府都意識到污水處理及回收的重要，目前各項節約用水和循環利用措施已逐步推行，也給了水處理相關設備和公司投資的絕佳機會。

根據國際貿易發展中心(Center for International Trade Development)報告顯示，印度水處理市場規模估計超過 40 億美元，每年還以 10 至 12％的比率成長，來自世界各地的水處理公司已在印度 20 個城市獲取超過 70 個水處理相關案子，其中政府機構的案子占了市場的 50％，另一半由私人企業貢獻。

印度在已使用過的水或廢水處理方面的基礎設施嚴重不足，只有約 26％的家庭廢水和 60％的工業廢水經過處理。印度 423 個超過 10 萬人口的城市中，只有 29％的廢水經過處理；而在人口數 5 萬至 10 萬人的城市中，則僅有 4％的廢水經過處理。即使是印度首都新德里，每天產生的 327 萬公噸廢水，處理過的也不到一半。

由此可見，印度污水處理是一項具有前景的行業，吸引企業紛紛投入。自 2010 至 2018 年印度汙水處理市場，以營業額而言，年複合成長率達 15％。印度聯邦政府和各州政府於 2012 至 2017 年期間，花費 200 億美元用於污水處理、灌溉和水資源回收等建設工程。不過民眾認為滲透濾水器效果最好，市占率快速提升，目前已占所有濾水器市場的 42％。

印度自來水設施仍短缺，一天一般僅供給 2 小時的水，高級飯店所需的水均由水車載運。

圖 1　2017 年媒體報導印度邦加羅爾(科技工業城)發生嚴重河川污染狀況

筆者林正祥先生是於 2016 年被推薦加入經濟部跨國合作之國際 APO 亞洲生產產力組織專案，以專家顧問名義一起前進印度，考察廢水處理、零排放水回收及相關水資源整合計畫，過程中，除了拜會印度 APO 對應之政府組織「國家生產力委員會(National Productivity Council,簡稱 NPC)外，並由其安排現勘、診斷公私立中大型污水處理廠，在現勘診斷後立即個別提出台灣成功之案例說明，經過數次之拜訪，印方認為技術可行下，即進入技術及設備採購之第一階段：現場連續操作模廠試驗，這也是此次搬運陶瓷平板膜在現場測試之目的。

二、模廠試驗方法及相關程序

1.模廠設備規格：如表 1 陶瓷平板膜(簡稱 CMBR)模廠設備規格所示

表 1　CMBR 模廠設備規格表

item	unit	specification	type	quantity	remarks
1	Ceramic Membrane		ceramic	10	package 1
2	inlet pump	4.6~5.6L/min ，1/4HP，0.2kw	Acrylic resin	1	package 2
3	Tank	0.5mL*0.35mW*0.16mH		1	package 3
4	filtration pump	0.3~1m^3/hr，1HP，0.4kw		1	
5	back wash pump	4.6~5.6L/min ，1/4HP，0.2kw		1	
6	blower	130 L/min，124w		1	
7	level meter			1	
8	flow meter	0.8~15L/min		2	
9	Pressure meter	positive:0~10 bar　　negative:-1~0 bar		2	
10	electric valve	0.1kw		3	
11	control panel and computer	0.5kw		1	

power consumption	3 kw	220V	3Ø
Weight	350 Kg		

2.配合第二屆台灣印度高峰論壇在印度的開會，以空運方式到印度清奈 Ranitec CETP 污水廠設置安裝完成，並運轉測試，如圖 1 所示。

<table>
<tr><td> </td><td> </td></tr>
<tr><td>照片 1，在 Ranitec CETP 模廠開箱</td><td>照片 2，模廠安裝，廠方人員協助</td></tr>
<tr><td> </td><td> </td></tr>
<tr><td>照片 3，CMBR 模廠及顯微診斷系統設置完成全貌</td><td>照片 4，廠方高層人員到場視察情形</td></tr>
</table>

圖 1　模廠安裝測試照片

3.CMBR 模廠是置於 Ranitec CETP 流程位置如圖 2 所示

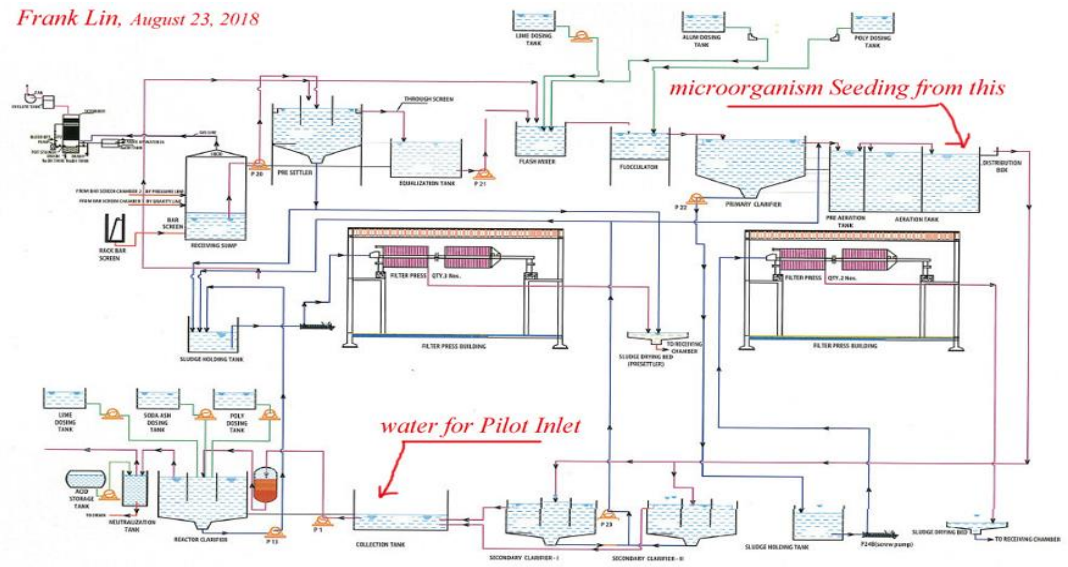


圖 2　Ranitec CETP 廢水處理流程及 CMBR 進水位置圖

三、試驗成果

1.印方試驗前對我方試驗容量之質疑及我方之答辯

Ranitec CETP 設計處理量為 4,500CMD，而我方 CMBR 模廠最高僅 2CMD 之處理量，如何證明此模廠試驗具代表性？

當場答覆並立即提供國內成功案例：工業污染防治團曾於 84 年成功的以 2 至 6CMD 模廠試驗結果，改善 35,000CMD 之實廠污水處理，使免於該廠被勒令停工之風險[2、3]，如圖 3 所示。

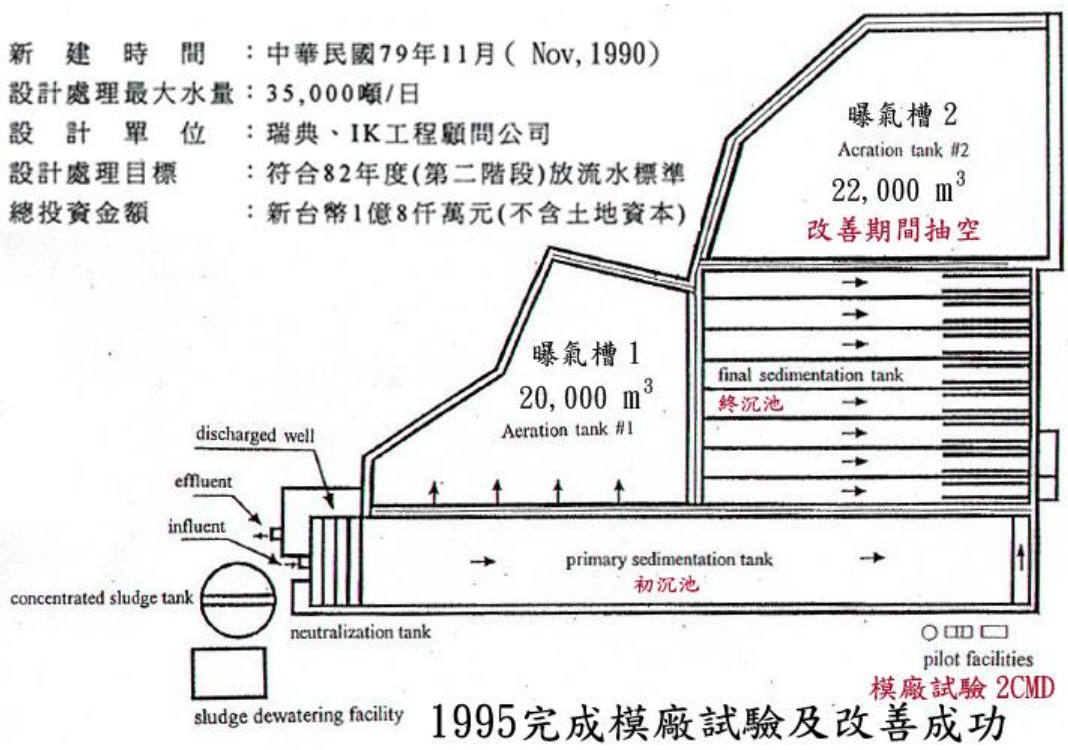


圖 3　工業污染防治團曾於 84 年模廠試驗結果成功應用至改善實廠

2.模廠試驗結果

經現場自 107 年 8 月 24 日至 9 月 1 日及 11 月 10 日至 22 日，有效數據作表如表 2 及圖 4 至圖 10 所示，由這些數據，可發現，通量 Flux 穩定在 0.4 $m^3/m^2/d$ (m/d)，NTU 出流水可穩定在 3mg/L 以下。TSS 出流水也穩定在 30mg/L 以下。不過，COD 則去除效果不佳。

表 2　現場 Ranitec CETP 第 1 階段模廠現地試驗

Date	8/22~8/23	2018/8/24	2018/8/25 ~ 26	2018/8/27	2018/8/28	2018/8/29	2018/8/30	2018/8/31	2018/9/1
Program	pilot set up	Clear water test run	Clear water test run/seeding microorganism	Test run 1st day	Test run 2nd day	Test run 3rd day	Test run 4th day	Test run 5th day/Clean membrane	Clear water test run
Flux(m/d)		2.7	3	0.86	0.5	0.4	0.4	0.4	2.7
Permeate(L/min)		3.8	4.3	1.2	0.7	0.55	0.55	0.55	3.8
Backwash(L/min)		5.4	5.4	5.4	5.4	0.6	0.6	0.6	0.6

備註：作 2 天的設備安裝(含電力轉換)、1.5 天清水試驗、5 天之實際運轉、最後一天作膜清洗及再次清水試驗

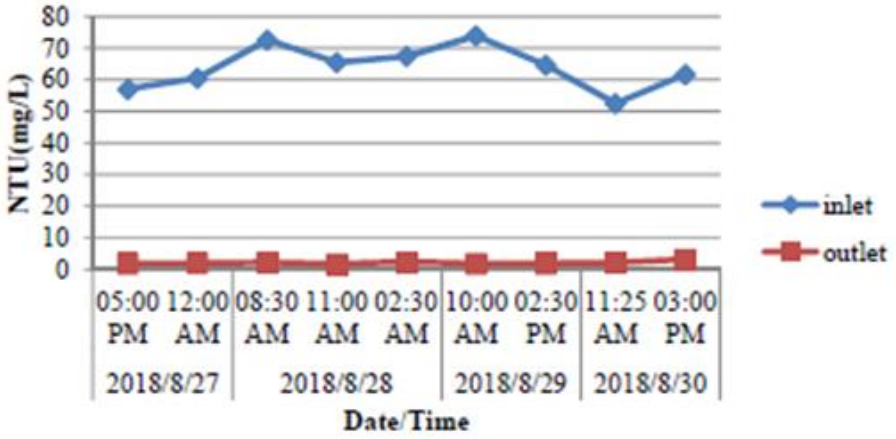


圖 4　第一階段 CMBR 進出流 NTU 數據

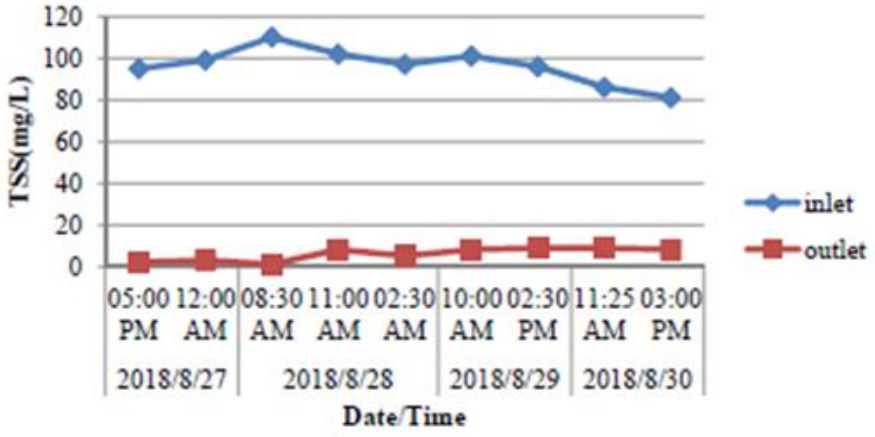


圖 5　第一階段 CMBR 進出流 TSS 數據

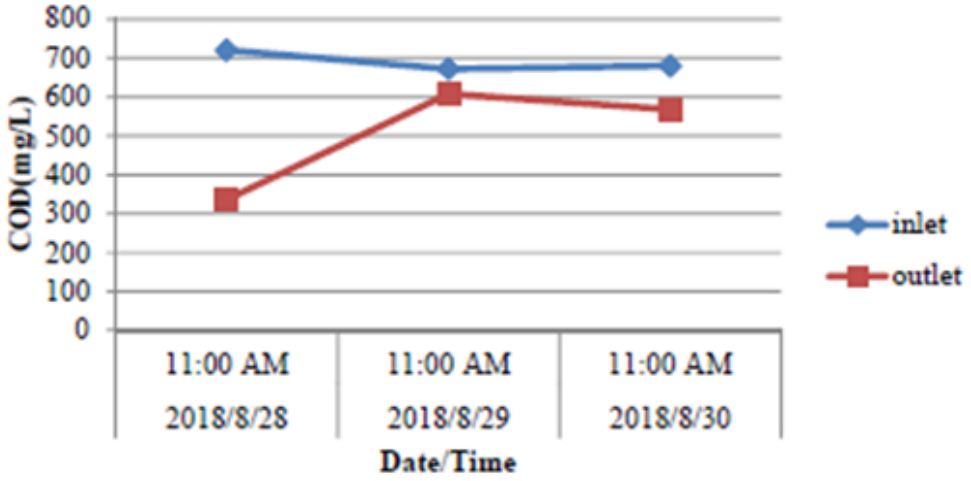
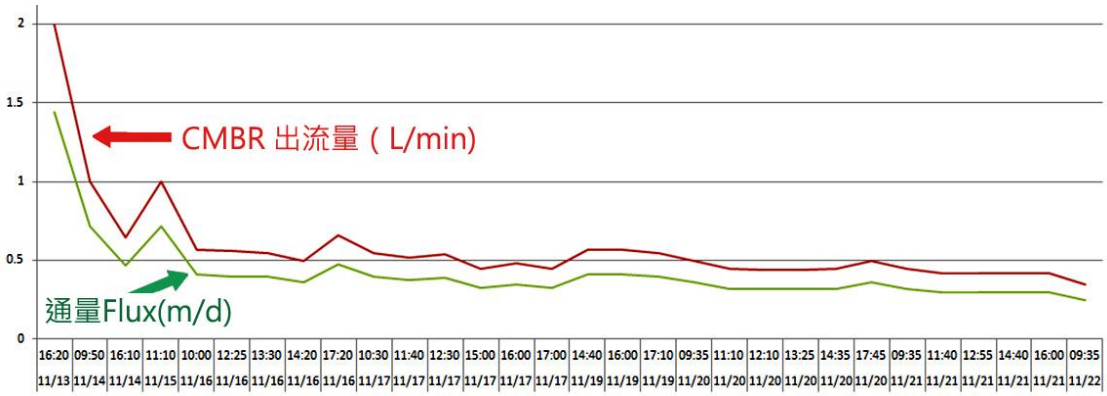


圖 6　第一階段 CMBR 進出流 COD 數據



備註　：通量 Flux 穩定在 0.4 $m^3/m^2/d$ (m/d)

圖 7　第二階段之通量曲線(11 月 13 日)先進行清水通量試驗

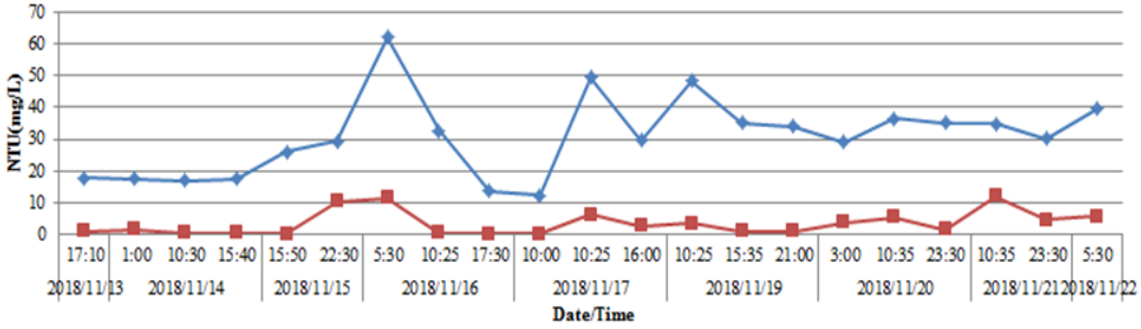


圖 8　第二階段 CMBR 進出流 NTU 數據

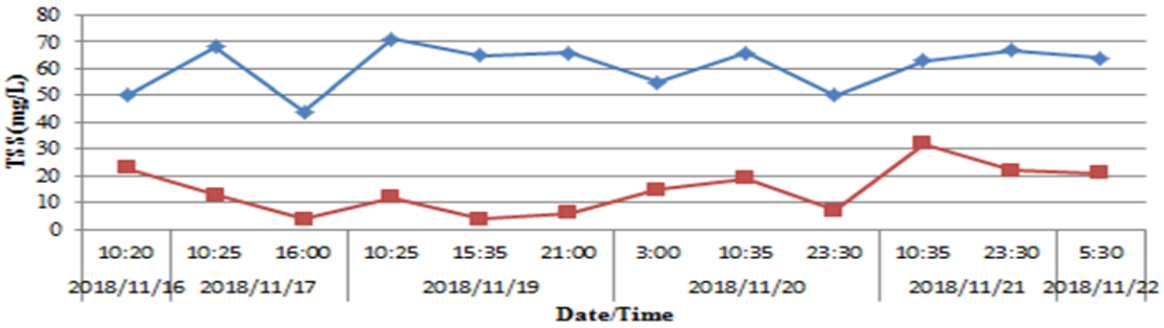


圖 9　第二階段 CMBR 進出流 TSS 數據

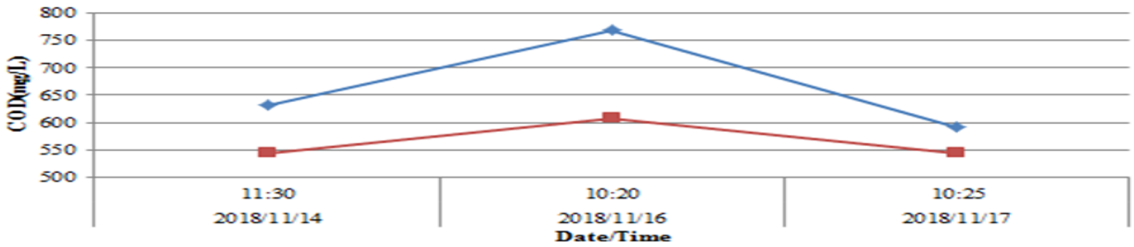


圖 10　第二階段 CMBR 進出流 TSS 數據

3.模廠測試後水質與顯微像觀察

Ranitec CETP 純氧曝氣池，現場顯微相觀察與拍照，如圖 11 所示；CMBR 中之顯微相如圖 12 所示。CMBR 水質處理前後與 現場 UF 出水之外觀比較，CMBR 出水清澈度比現場 UF 出水好很多，如圖 13 所示。

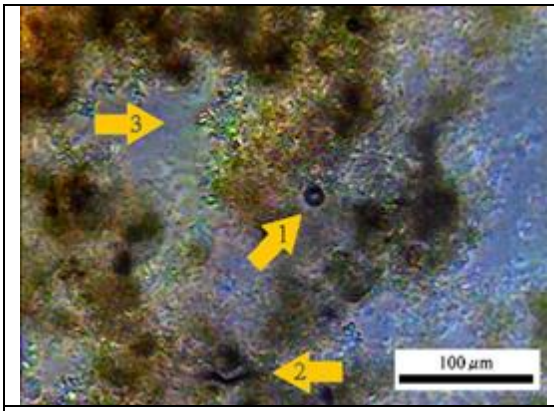
	
照片 1，箭頭 1 為油脂，數量不少；箭頭 2 為皮削纖維；箭頭 3 為分散狀細菌，數量多。100X	照片 2，箭頭 1，油脂，數量不少；箭頭 2 為特殊有殼變形蟲，數量多，此為廢水中含有生物難分解有機物，這也是 COD 不易降解之原因。箭頭 2 為分散狀細菌。100X

圖 11　Ranitec CETP 純氧曝氣池顯微相觀察

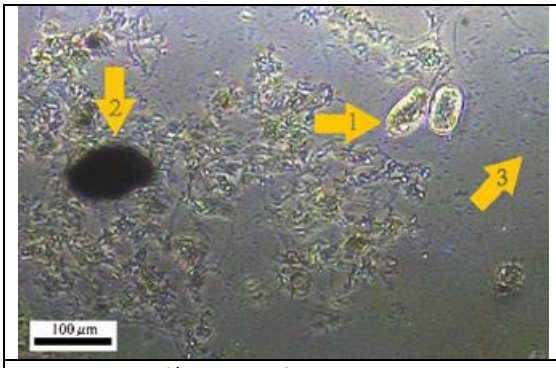
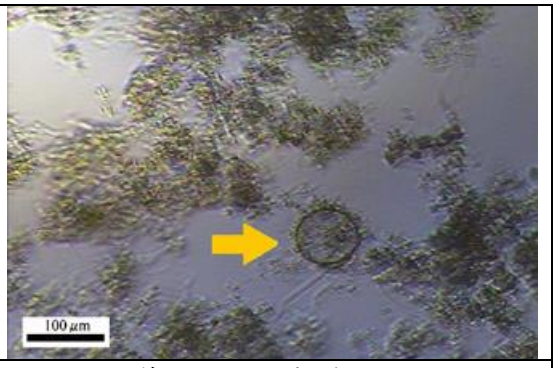
	
照片 1，箭頭 1 為活性良好之鐘形蟲；箭頭 2 為鈣雜質；箭頭 3 為分散狀細菌，不少，顯示系統負荷仍偏高。100X	照片 2，箭頭所指者為油脂。100X

圖 12　CMBR 中之顯微相觀察

註：手邊第 2 杯為 CMBR 出水，最右邊為現場 UF 出水

圖 13　UF 出水之外觀比較

四、試驗困難點與結論

1.試驗困難點分析

(1)電力不穩，常有瞬間停電再啟動之現象，需有高效復歸及 UPS 不斷電設備

(2)電壓與台灣不同，需配置較穩定之變壓器

(3)現場人員溝通仍有雞同鴨講之不易情形。

(4)曝氣槽之油脂甚多需注意，如圖 14 所示

圖 14　模廠曝氣停電一整晚後即呈現油脂上浮現象

2.結論

(1)印度市場廣大，是值得深根之市場，唯，必須步步為營。

(2)唯有組成堅強團隊，才有可能打入此市場及獲利，且需國家作必要之協助，包括金融、外交、法令等之協助。

五、參考文獻

1.http://www.cbc.ca/news/world/pollution-worldwide-deaths-1.4363613
"Pollution causing more deaths worldwide than war or smoking: Lancet At least 9 million premature deaths were caused by diseases from toxic emissions", The Associated Press Posted: Oct 20, 2017 7:51 AM ET Last Updated: Oct 20, 2017

2.謝金勳、黃國寶、陳明坤、李光裕，"活性污泥膨化問題之改善對策及成果"，經濟部工業局「1995 工業污染防治工程實務技術研討論會」論文集，PP：371 至 379 頁，84 年 12 月 21 日。

3.Tseng-Hsian Lin, Wastewater Treatment Technologies for Paper Industry – The Taiwan Experiences」, Sponsored by IDB & US-AEP, Training Course: Cleaner Production in Pulp and Paper Industry, Asia-Pacific Region, April 10-19, 1997

4.Tseng-Hsian Lin, Expert Report of APO Development of Demonstration Companies in India, Strengthening Cooperation on Green Technology Program INDIA with Taiwan, July 30, 2018

以循環經濟觀點分析企業永續之變革

-以電子產業供應鏈為例

陳怡潔 *、李育明 **

摘　要

企業社會責任或企業永續(CSR)已成為國際資本市場投資與企業經營策略研擬之主流趨勢，諸多研究均指出企業投入 CSR 的努力程度與經營績效或投資獲利高度正相關。而在 CSR 的相關作為方面，非財務資訊揭露尤其重要，為與利害相關者溝通企業永續推行狀況，企業均定期編製出版企業社會責任報告書或企業永續報告書，以掌握企業在環境、社會與治理三面向之 ESG 表現績效。

本研究以電子產業供應鏈上下游的指標企業為探討標的，藉由收集彙整供應鏈廠商之企業永續 ESG 資訊，以循環經濟的觀點，分析各企業在改善設計、廢棄物減量、以及資源使用效率提升等作為，從其執行策略之投入與改善成果之產出，歸納永續供應鏈之變革趨勢，並彙整具體有效之改善策略與作為，以發揮組織學習之功效，進而達到企業永續發展的目的。

研究將從分析電子行業公民聯盟(EICC)轉換成為負責任商業聯盟(RBA)之歷程出發，篩選其行為準則(CoC)中與環境資源類別相關之指標項目，採行第二者稽核之評估流程，鑑別供應鏈廠商關注之議題，再執行策略與作為之 SWOT 分析，最終再以循環經濟觀點，探討並進一步研提電子產業供應鏈「從搖籃到搖籃」之改善建議。

【關鍵詞】循環經濟、企業永續、ESG 非財務資訊揭露、第二者稽核

---

* 國立臺北大學自然資源與環境管理研究所 碩士生

台灣科高工程有限公司 經理

**國立臺北大學自然資源與環境管理研究所 特聘教授兼所長

一、前　言

根據聯合國 2018 年發布的報告指出，2017 年是有記錄以來最熱的三個年份之一。永續發展的議題持續發燒，截至 2018 年 4 月，已有 175 個國家批准「巴黎協定」，全球營收前 250 家企業中，有 93%揭露其永續發展情況，在 49 個國家中的營收排名前 100 的企業裡，有 75%也發布相關永續發展的報告。

在 2014 年臺灣證交所要求上市公司編製與申報企業社會責任報告(CSR)前，道瓊指數公司與瑞士投資公司 RobecoSAM 在 1999 年合編全球第一個以永續發展為主題的指數，Dow Jones Sustainability Indices (DJSI)，2001 年英國富時集團(FTSE Russell)發表 FTSE4Good index series，中國大陸、日本、新加坡以及著名的 MSCI 公司都發表關於永續發展，環境 Environmental、社會 Social 和 公司治理 Governance 三面向(合稱 ESG)的指數。臺灣指數公司與 FTSE Russell 在 2017 共同發布臺灣永續指數，2019 年 8 月，追蹤此 ESG 主題的 ETF 掛牌上市。意謂 ESG 資訊是在財務資訊外，另個提供給法人及一般大眾投資的參考指標，鼓勵企業推動永續發展。

多位國內學者指出國內企業的公司治理與財務績效呈現正向關係(劉美纓等，2014)，國內 CSR 得獎企業較未得獎企業有更好的財務績效表現(李秀英等，2011)，陳振遠、洪世偉(2013)根據臺灣證交所公布的「上市上櫃企業社會責任實務守則」，編製出的 CSR Top50 指數，證實在 2011 年 9 月至 2012 年 11 月間，投資績效是優於臺灣 50 ETF。但亦有國內學者沈中華、張元(2008)研究國外 FTSE4Good UK index 後指出，找不到社會責任企業有較佳財務績效的證據。後續以國內企業社會責任評分為樣本的研究，指出雖然社會責任評分較佳的公司的長期財務績效也相對較佳，但並沒有支持社會責任行為與公司績效有顯著關係(張元，2009)。

Griffin and Mahon(1997)回顧多篇文獻，發現支持社會責任績效及財務績效兩者有正相關的文獻有 33 篇，支持兩者有負相關為 19 篇。呈現不完全一致的結果。王言、張阜民、呂芝倚和柯俊禎(2016)的研究指出在臺灣資訊通訊 ICT 產業中，落實企業社會責任可為效率低的公司提升些許效率，提高競爭力。

祝道松、盧正宗、洪晨桓和楊秀萍(2008)提出「環境資訊揭露的中介效果」觀點，證實以國內企業為樣本的研究中，環境改善績效好的公司在揭露「企業在環境政策與具體作為」與以 Tobin Q 為指標的經濟績效，有顯著正

相關。代表揭露程度越多，經濟績效越好。優良的環境改善績效，公開揭露後可幫助企業贏得更多的商譽。

二、研究成果

本研究的樣本選取方向參考先前文獻回顧所提及的脈絡，從國內 2018 年的 CSR 獲獎企業中挑選，以生產具體產品，並面向終端消費者的資訊電子類別做為本研究的選擇標的，讓研究者能從該產業供應鏈上下游的企業永續 ESG 揭露資訊中，歸納出變革趨勢。另一方面，以個人電腦、筆記型電腦及手機等為產品的企業對消費者心中企業形象營造，有較大的熱情。本文所挑選的三家下游企業，仁寶電腦、宏碁和華碩電腦，也皆是「負責任商業聯盟(RBA)」的會員，該組織最初由美國的數家大型電子資訊產業公司所創立，旨在確保所有設計、銷售、製造電子產品的組織及其供應鏈的從業人員，都能在合乎環保的工作環境下安全且有尊嚴地工作。筆者從已挑選的這三家企業出發，再尋找與其具有相關程度供應鏈關係的零組件廠商，與上游的原物料廠商。詳細的名單與企業的 CSR 獲獎記錄列表 1 如下。

表 1　樣本企業簡介

公司名稱	華新麗華	中國鋼鐵	晶元光電	億光電子	台達電子	友達光電	仁寶電腦	宏碁	華碩電腦
營業項目	電線電纜及不銹鋼產業	熱軋鋼品、冷軋鋼品	LED晶粒	發光二極體(LED)、照明	電源及零組件、基礎設施	薄膜電晶體液晶顯示器	3C電子產品	個人電腦、電腦週邊	資訊產品
產業位置	上游原物料	上游原物料	上游原物料	中游零組件	中游零組件	中游零組件	下游系統廠	下游系統廠	下游系統廠
RBA會員							是	是	是
台灣企業永續獎(2018)	金獎	白金獎	銀獎	金獎	白金獎	白金獎	白金獎	金獎	白金獎
天下企業公民(2018)		列第22位			列第1位	列第6位			列第8位
遠見企業社會責任(2018)						類別首獎			
Dow Jones Sustainability Indices (DJSI) (2019)		入選新興市場指數			入選世界指數	入選世界指數		入選新興市場指數	
MSCI ESG Leaders Indexes(2018)					入選成份股	入選成份股	入選成份股	入選成份股	入選成份股
台灣永續指數(with FTSE4Good) (2018)		入選成份股			入選成份股	入選成份股	入選成份股	入選成份股	入選成份股

從這些企業在 2018 年所公布的企業社會責任報告書中，可彙整出各公司針對聯合國永續發展的主題如下。

表 2　樣本企業的永續發展目標

聯合國2030年永續發展目標 Sustainable Development Goals (SDGs)																	
項目	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
公司\內容	無貧窮	零飢餓	良好健康與福祉	優質教育	性別平等	清潔飲水和衛生設施	經濟適用的清潔能源	體面工作和經濟成長	產業、創新和基礎設施	減少不平等	可持續城市和社區	負責任消費和生產	氣候行動	水下生物	陸地生物	和平、正義與強大機構	促進目標實的夥伴關係
華新麗華			●	●	●	●	●	●	●			●	●			●	
中國鋼鐵			○	○	○	○	○	●	○		●	●	○		○	○	
晶元光電	○			●	●		●	●				●	●			●	
台達電子				●			●		●		●	●	●				●
友達光電				●		●	●	●	●		●	●	●				●
億光電子			●			●	●	●			●	●	●			●	●
仁寶電腦		○	●	○			○	●		●	○	●	●	○		●	○
宏碁			●	●			●	●	●	●	●	●	●			●	●
華碩電腦			●	●	○	○	●	●	●			●	●			○	○

●指該公司實踐中或以核心主題實踐

○指該公司以日常營運方式實踐或擴及實踐

由表 2 可以發現樣本中各企業的永續發展主題集中在三個目標，分別是經濟適用的清潔能源、負責任消費和生產，氣候行動。深入仔細閱讀企業的 CSR 報告後，筆者整理出各企業在因應氣候變遷的具體作為，能源運用的方式如表 3。

各企業針對溫室氣體排放都有付出大量投入，在改善設備能源消耗、綠色產品、製程節能優化都投入專案進行改善。也有廠商逐漸重視產品輸送過程的碳足跡的消耗並而改善。在原物料方面，有大型企業已重視原料的循環再利用，使用再生產品如塑料、紙張，或是生產時製造出的副產品蒸汽，都在循環經濟的概念下發揮貢獻。

在能源使用上，樣本中有超過半數的企業使用綠能，部份企業已進行或準備碳權的交易。總體來說，發現若企業僅對日常營運做節約，改善的效果並不十分顯著。觀察在已揭露的改善成效，見表 4。企業若發展「綠色產品」、「使用綠建築」、「使用綠能」，有明顯的改善績效。就綠色產品已揭露的訊息而言，中鋼、友達、仁寶電腦及華碩電腦在開發綠色產品佔總產品的比列皆高過 60%，台達電子和宏碁雖然沒明列綠色產品佔比，但亦取得多數環保標認證。綠色產品對企業減碳量的具體貢獻，在友達揭露的訊息可看出，綠色產品的創新貢獻 66%的效益，雖然筆者搜集到的數據尚不足以分析友

達提及的綠色製造貢獻 32%是否來自於使用綠能。但比較其它企業，有使用綠能或使用綠建築的企業，在改善績效取得極大的進展。如使用綠能的中國鋼鐵在 3 年間，已達成 2020 目標的 122%，超前許多，晶元光電的能源耗用量下降 19.6%，溫室氣體減少 20.2%;宏碁在 2018 年溫室氣體排放總量較基準年減少 50.04%。同時使用綠能與綠建築的台達電子，建築節能 12.42%，同年溫室氣體降低 16.8%。亦有使用綠建築的華碩電子，2018 年溫室氣體排放減量 21.7%。

表 3　樣本企業對氣候變遷的因應

項目	氣候變遷因應 Climate Change											
	溫室氣體排放管理方案	改善方案					能源使用			原料循環經濟		環境友善
		設備	產品	原物料	製程	運輸	節能再生	使用綠能	經營碳權	可回收	回收再利用	
華新麗華	*陸續推動 ISO 50001/14064 系統，量化能源管理。 *完成溫室氣體盤查優化，涵蓋範疇一、二。	•	•		•	•	• (節能)	•	提前準備碳權經營。	*不銹鋼事業99%使用回收原料與可再利用原料 *鋼線與電線電纜96.7%使用可再利用原物料	不銹鋼事業使用回收原料與可再利用原料佔比合計99%	將持續推動各項空氣污染自主減量工程。
中鋼	*導入ISO 50001 能源管理系統。 *依據國際標準 (ISO14064)執行溫室氣體盤查及查證作業。 *參與碳揭露組織 (CDP) 。 *為建立綠色鋼材產業鏈減碳之本土化係數，共計算 23 項產品碳足跡，涵蓋範疇一、二、三。 *建立能源管理資訊系統。 *成立能源調度中心，集中監測所有能源。	•	•	• (原料循環)	•	•	• (再生)製程中會產出副產燃氣亦供給應汽電共生機組產出蒸汽與電力	• (風力)	參與碳權經營	高雄工業區內互通多餘能源，包括蒸汽、氫氣、氮氣、氬氣、壓縮空氣及焦爐氣等，將區域能資源做最有效率的整合。		共設置 6 個空氣品質監測站，列管 7 項空污改善計畫，管制臭氣層消耗物質
晶元光電	*依據PAS 2050 盤查碳足跡。 *依ISO 14064-1，涵蓋範疇一、二。	•	•	• (材料減量)	•			• (太陽能)		未提及	未提及	空氣污染防制
台達電子	*導入TCFD架構。 *建置碳足跡納入碳足跡規範。 *簽署We Mean Business 倡議。 *依ISO 14064-1 盤查溫室氣體，範疇一與範疇二。 *用 GHG Protocol Evaluator Tool 鑑別台達範疇三主要排放項目，並通過14064-1 查證。	• (含建築)	•			•	• (節能)	• (太陽能，比例達22.2%)	參與中國碳交易市場	未提及	未提及	導入無鉛銲錫製程
友達光電	*參考CDSB 架構與TCFD架構。 *推動環境會計制度。 *推動能源管理平台。 *取得ISO14001、OHSAS18001 及 ISO50001 管理系統認證，溫室氣體盤查包含範疇一、二、三，陸續擴大調查範疇三。	•	•	•	•	•	• (節能)	• (太陽能)		未提及	廢溶劑轉為回收再利用	針對高溫室效應潛勢氣體，全面安裝符合 IPCC 指定型式的破壞去除設備。 展開處裏排外項目削減計畫 降低 50% 之鎘含量(RoHS)
億光電子	*承諾參考TCFD架構。 *取得 ISO 50001認證。 *取得環境管理系統 ISO14001 認證。 *每年進行 1 次破壞臭氧物質鑑別。 *每年進行溫室氣體盤查(針對範疇一、範疇二)及驗證。	•	•		•		• (節能)			提高可回收材料使用比例	未提及	材料 100% 符合 RoHS/REACH 指令
仁寶電腦	*完成以TCFD架構揭露氣候相關風險與機會 *ISO 14001 環境管理系統認證 *ISO 14064-1 溫室氣體盤查認證，涵蓋範疇一、二，每年持續進行且完成外部查證，並揭露。 *導入ISO 50001能源即時管理系統。 *簽署環保署綠色採購意願書與發佈庇務性物品綠色採購宣言	•	•	• (原料循環)	•	•	• (節能)	•		*筆電補可回收率80%以上。 *64%的型號可回收率超過90% *4個型號可回收率高於96%。	17.3%使用PCR回收塑料。	持續導入整機產品無鹵化
宏碁	*參與CDP揭露。 *參考TCFD建議中情境分析與氣候風險管理的意涵。 *持續針對溫室氣體排放，範疇一、二及範疇三進行全球查證。 *推動地球回收計畫。	•	• (含軟體應用)	• (原料循環)		•	• (節能)	• (範疇一55.89%)		*所有產品紙張採用永續林業認證(FSC) *使用100%加強再生紙	積極地使用再生塑膠(PCR)於商用顯示器機種及一體成型機等機種	持續贊助碳揭露專案在台灣的推廣會。 *產品無鹵化邁進。
華碩電腦	*支持巴黎協定及TCFD架構。 *推動循環係數計畫 Circularity Fact Program。 *環境損益評估計劃。 *分析拓展到Tier2 主要部件製造及Tier3 原物料關採製造。 *溫室氣體排放調查涵蓋範疇一、二、三。	• (含建築)	• (含軟體應用)	• (材料減量、原料循環)		•				*彩盒使用100%再生紙	聚乳酸 (Polylactic Acid, PLA) 循環再利用	*無鹵料件佔比超過83.2% *線材PVC減量18.2% *自主性地禁用如鈹、銻、紅磷等具有潛在風險的物質。

表 4　樣本企業對溫室氣體的改善成效

項目	氣候變遷因應 Climate Change		
	溫室氣體排放管理方案	溫室氣體排放改善	
		改善成效	節能標章
華新麗華	*陸續推動 ISO 50001/14064 系統，量化能源管理。 *完成溫室氣體盤查優化，涵蓋範疇一、二。	電線電纜及不銹鋼單位產品耗能3.75% 及 1.25%	未提及
中鋼	*導入ISO 50001 能源管理系統。 *依據國際標準 (ISO14064)執行溫室氣體盤查及查證作業。 *參與碳揭露組織 (CDP)。 *為建立綠色鋼材產業鏈減碳之本土化係數，共計算 23 項產品碳足跡，涵蓋範疇一、二、三。 *建立能源管理資訊系統。 *成立能源調度中心，集中監測所有能源。	*105 年至107 年已完成節能專案343 件，達成2020 節能行動計畫總目標的122% *減碳效益的綠色鋼品約占高品級鋼訂單之 72%， *平均年節電率已達 1.51% *原料循環經濟可減少二氧化碳排放量約 38.3 萬公噸、SOx排放 1,222 公噸、NOx排放 847 公噸及固體懸浮物 120 公噸	未提及
晶元光電	*依據PAS 2050 盤查碳足跡。 *依ISO 14064-1，涵蓋範疇一、二。	*能源單位產量能源耗用量下降 19.6%。 *減少碳排放量，累計完成目標84.5%。 *溫室氣體排放強度較2012下降 20.2%	未提及
台達電子	*導入TCFD架構。 *建築碳足跡納入碳足跡規範。 *簽署We Mean Business 倡議。 *依ISO 14064-1 盤查溫室氣體，範疇一與範疇二。 *用 GHG Protocol Evaluator Tool 鑑別台達範疇三主要排放項目，並通過14064-1 查證。	*溫室氣體，範疇一與範疇二碳密集度降低16.8% *建築節能降低12.42%	Energy Star 台灣環保標章 台灣節能標章 中國環保標章
友達光電	*參考CDSB 架構與TCFD架構。 *推動環境會計制度。 *推動能源管理平台。 *取得ISO14001、OHSAS18001 及 ISO50001 管理系統認證，溫室氣體盤查包含範疇一、二、三，陸續擴大調查範疇三。	*五年減碳100萬公噸計畫，至2018年減碳達成79.1% (綠色採購與運籌佔 2%、綠色製造佔 32%、產品創新佔 66%) *節電率1.94% *落實複合式運輸路線，改善比例達 83%	經濟部能源局金能獎
億光電子	*承諾參考TCFD架構。 *取得 ISO 50001認證。 *取得環境管理系統 ISO14001 認證。 *每年進行 1 次破壞臭氧物質鑑別。 *每年進行溫室氣體盤查(針對範疇一、範疇二)及驗證。	2018 年臺灣樹林廠能源使用量較 2017年降低 1% 以上，其他廠則略為增加。	未提及
仁寶電腦	*完成以TCFD架構揭露氣候相關風險與機會 *ISO 14001 環境管理系統認證 *ISO 14064-1 溫室氣體盤查認證，涵蓋範疇一、二，每年持續進行且完成外部查證，並揭露。 *導入ISO 50001能源即時管理系統。 *簽署環保署綠色採購意願書與發佈庶務性物品綠色採購宣言	75項(92.6%)產品取得Energy Star 6.1 6項產品取得Energy Star 7.1 23個機種取得EPEAT(2009)金牌 1項產品取得中國節能(CECP)認證	Energy Star 6.1 Energy Star 7.1 EPEAT 中國節能標章 (CECP)
宏碁	*參與CDP揭露。 *參考TCFD建議中情境分析與氣候風險管理的意涵。 *持續針對溫室氣體排放，範疇一、二及範疇三進行全球查證。 *推動地球回收計畫。	已進行盤查的排放量進行全球外部查證，針對範疇一、範疇二及範疇三。2018年的排放總量較基準年減少50.04% 公務車用油量降低9.8%，海外出差飛行公里數降低15.6%	Energy Star EPEAT 台灣環保標章 台灣節能標章 瑞典TCO 中國環境標誌 中國節能標章
華碩電腦	*支持巴黎協定及TCFD架構。 *推動循環係數計畫 Circularity Fact Program。 *環境損益評估計劃。 *分析拓展到Tier2 主要部件製造及Tier3 原物料開採製造。 *溫室氣體排放調查涵蓋範疇一、二、三。	*溫室氣體排放，在範疇1、2項目，排放減量21.7%。 *全系列商用機種取得環保標章，產品營收佔比76.1%， *NB產品能源效率提升37% *2018 系列NB全數符合Energy Star7.0 *達成全球第一台碳中和筆記型電腦。	Energy Star EPEAT 台灣環保標章 台灣節能標章 瑞典TCO 中國環境標誌 國推RoHS UL ECOLOGO

在針對水資源及廢棄物管理方面，據筆者的整理的結果，如表5所呈現，企業揭露出的數據與具體的作為，亦指出節約用水的成效遠不及製程用水回收再利用。以台達電子為例，高比率的製程回收水率可降低生產廠區用水量19.8%。

表 5　樣本企業對水資源與廢棄物的因應

項目	水資源			廢棄物		
	減量使用	非製程水回收	製程水回收再利用	廢棄物產出減量	循環再利用	包裝材料
華新麗華	*持續降低原料及自來水用量。 *減少酸液平均用量。	未註明	*持續強化中水及廢液回收技術。 *常熟華新廠區作業廢水經生化系統、中水回用系統及多效蒸發器 (MVR) 處理後，實現廢水零排放。	服務客戶減少下游加工製程或物料耗用	*持續找尋及研發廢棄物再利用技術。 *整體廢棄物回收再利用率達96% 以上 *掩埋率降至台灣區1.07%及大陸區1.15%	*減少包裝 *69%使用可回收材
中鋼	未提及 *熱軋鋼捲及冷軋鋼捲產品取得水足跡認證	*回收雨水再利用 *增加第二水源如海水淡化及生活廢水回收，針對都市污水以鳳山溪再生水廠等進行再生利用。用水量49%為再生水源。	製程用水回收率98.5%	未註明	*擴大產出廢棄物之再利用鏈結作業，包括各種爐石、礦泥、煤焦油、廢酸、廢耐火材。 *開發各種資源化技術，95%資源化再利用，僅5% 廢棄物採焚化處理，達到零固化掩埋。	未提及
晶元光電	*通過清潔生產並取得清潔生產證書 *酸性化學品耗用逐年遞減 *總用水量較 2012 年減少 13.3% *單位產量用水量由 2012 年減少 55.7%	未註明	*製冰機廢水回收工程 *水塔過濾系統導入 *製程水回收及再利用率 78.6%	未註明	廢棄物可回收比率達79%。	包材交由客戶回收。
台達電子	*建立水資源風險鑑別方法及建立用水監控系統 *總回收水量佔用水量 3.66% *生產廠區用水量減少19.8%	*建築用水量減少10% *雨水回收率佔總回收水量 15.2%	*自設廢水處理場有效降低逕流廢水污染量。 *冷凝水回收水量佔總回收量 84.8%	廢棄物產生量減小2.5%	回收率達 74.8%。	90.7%使用再生紙包材。
友達光電	*生產用水強度減少17.5% *水中和;輔導供應商節水	未註明	製程水回收達91.0% 廢水排放量降低20.7%	廢棄物產生量下降較2014年下降27.7%	廢溶劑轉為回收再利用	推動客戶包材回收，包材平均回收率為 40%
億光電子	未註明	未註明	廢水回收再利用，回收率 8.05%。	2018 年臺灣樹林廠區廢棄物產生量較 2017 年減少 2.56%。	未註明	包裝改善設計，減積減材
仁寶電腦	節約用水，設定年度節約1%	未註明	未註明	率先響應環保署海洋廢棄物治理行動方案	*支持WEEE(歐盟廢電子電氣設備指令) *廢棄物回收再利用比率3.4%	包材優化設計
宏碁	*改善用水設備 *強化用水管理 *龍潭渴望會館推動水足跡認證。	水資源回收再使用	未註明	全球環境管理系統涵蓋率達 72%。	*回收廢棄乾電池以及不限品牌的廢棄手機、平板和筆記型電腦。回收成長超過3倍。 *支持個別生產者責任(IPR)，嚴格要求其回收供應商做到責任回收(R2)或eStewards標準認證。	*PC包材導入減量設計 *使用100%加強再生紙
華碩電腦	設立水回收設施	設立水回收設施	未註明	未註明	*廢棄物轉化率 85.4% *產品回收率 14.5%	*包材減重、紙量減少。 *包裝材質改以紙板取代發泡材質聚乙烯 (EPE)。 *彩盒使用100%再生紙

在盤查各樣本企業對於能源及氣候主題的因應及改善成效後，將進一步探討「負責任消費和生產」的永續指標。我們進一步篩選「負責任商業聯盟(RBA)」關於此目標的行為準則，藉由其細項來逐一檢視各企業採取的措施。

在道德規範中訂有很明確項目的衝突礦突一項，見表 6。可以發現每間企業都承諾做出拒用的宣言，身為 BRA 會員的 3 家企業，仁寶電腦、宏碁，華碩電腦不僅對鉭、錫、鎢、金，此四類礦產進行盡職調查，調查範圍還擴

大至鈷、雲母。在稽核部份，由企業揭露的訊息，主動稽核查實的趨勢有自產業下游企業往中上游擴展的現象。

表 6　樣本企業對衝突礦產的因應

	大綱	細項	具體行為	華新麗華	中鋼	晶元光電	台達電子	友達光電	億光電子	仁寶電腦	宏碁	華碩電腦
供應鏈管理與負責任商業聯盟行為準則	D、道德規範	負責任地採購礦物	無衝突礦產（鉭、錫、鎢、金）	承諾不採用	承諾不採用	承諾不採用	承諾不採用	承諾不採用	承諾不採用	承諾不採用	承諾不採用	承諾不採用
			管理作為	將採行管理措施。	有效甄別和追溯原料來源。	採取商業上合理的盡職調查。	約 93% 主要物料供應商簽署「不使用衝突金屬宣告書」。	2018年調查超過95間供應商，主動稽核51間供應商。	*要求供應商承諾採購非衝突礦產 *執行供應鏈盡責調查 *建立符合經濟合作暨發展組織(OECD)發布的盡職調查架構。	*2018年約93%以上供應商完成衝突礦產(4項)調查問卷。 *於2019年啟動「鈷」之「盡職調查due diligence」。	*參與負責任礦產貿易公私聯盟(PPA)夥伴計畫。 *符合OECD盡責調查指南的合格冶煉廠在宏碁供應鏈中的百分比從83%增加96%。 *亦揭露鈷與印尼錫礦的盡責調查現況。	*確信鉭、錫、鎢和黃金 100%來自合格冶煉廠。 *關鍵供應商鈷及雲母 衝突礦產管理機制。

在表 7，管理體系一項，可以看出各企業的供應商完成相關社會責任承諾，簽署率亦有同樣的趨勢，完成度是下游最佳、中游次之，上游再次之。有部份企業亦針對第二階供應商(第一階的供應商的供應來源企業)展開調整評估。檢視各企業在完成調查之後，對環境改善的具體作為，如表 8。比較明確的方向是在地採購及包材回收的方向。據企業已揭露的訊息可知，在地採購化已達到 50%以上。

企業的柔性政策是鼓勵其供應商進行碳足跡調查、能源管理。如 ISO-50001、ISO-14064、TCFD 架構等的導入，因為進行溫室氣體排放調查是找出改善方案的第一步。身為供應鏈企業對導入碳揭露(CDP)的優勢是可以針對關鍵因子提出改善外，更可得到量化數據來確認改善成效，更可以配合下游產業的鼓勵政策與方針，在供應鏈評比中取得優勢。而關於碳揭露的執行方式，如前文所述，業界已有很明確的規範可供依循，雖然中小企業可能缺乏專業知識或可運用資源，但部份企業客戶亦樂意給予其供應商改善建議，並持續以論壇等形式對供應商進行輔導，這對有意於採取行動的企業，是很好的機會。除溫室氣體，聯合國也一直警言未來水資源缺乏的問題。之後企業客戶不僅會將溫室氣體排放列入管制項目，也會進行水足跡的調查與減量計劃。我們相信這個趨勢是會朝全面進行且持續被追蹤的指標之一。

表 7　樣本企業的供應鏈管理體系

	供應鏈管理與負責任商業聯盟行為準則			
大綱	E、管理體系			
細項	供應商的責任		改進目標	
具體行為	簽署相關文件狀況	監管措施	績效改善	其它管理計劃
華新麗華	85%的新供應商簽署供應商經營管理承諾書	不定期稽核關鍵供應商家。	提升供應商永續評估問卷自評比率。目前整體為82%，關鍵供應商約 86%。	*原物料價格波動 *避免供料中斷
中鋼	未提及	對3家供應商進行環境衝擊評估。	未提及	強化運輸供應商風險管理。
晶元光電	取得前二十大供應商CSR問卷	*每年進行CSR 問卷調查。 *不定期進行供應商稽核與訪談。	陸續建立更完整的供應商 CSR 評鑑流程與管理。	未提及
台達電子	100% 的供應商簽署RBA承諾書	*每年進行供應商ESG問卷調查，完成率87%。 *2018年對 8 家台灣地區高風險供應商進行實地稽核。	輔導供應商的缺失改善率為 72%	ESG 問卷調查擴及直接材料一階供應商 968 家及關鍵非第一階供應商(二階供應商) 117家。
友達光電	100% 的新供應商簽署CSR 風險評估表	*針對重點供應商進行RBA年度稽核。 *2018年完成39家重要供應商RBA稽核。	建置的企業碳盤查系統及生態效益指標系統。	碳資產管理，運用碳權資產作為碳中和與減量之推廣。
億光電子	*93%的供應商簽屬RBA 符合聲明書 / 自評表 / 社會責任承諾書。 *100%的新供應商回覆RBA 自評及 RBA 聲明書	*每年定期對主要原物料供應商進行 RBA 稽核。 *2018年臺灣實際稽查廠商家數為 3 家。海外實際稽查廠商家數為 2 家	強化綠色供應鏈延伸責任管理。	推行禁用物質管理系統。
仁寶電腦	100% 的供應商簽署RBA承諾書	*完成供應商衝突礦產調查及加強第一階供應商的CSR查核與管理。 *預計2020成立管理平台。	每年抽測稽核高度風險之供應商。 2018年稽核完成率為100%。	以ISO 14001環境管理系統，評估供應商環境政策與實施。
宏碁	100% 的供應商簽署RBA承諾書	*每一年度進行CSR評分表 。 *每年進行RBA現場稽核 *2018年進行105場現場稽核，包含一階及二階供應商。	2014年供應商須進行自我評估問卷。	2016年起一階供應商必須根據RBA行為準則展開二階供應商的風險評估與管理
華碩電腦	100% 的供應商簽署RBA承諾書	100% 完成關鍵供應商稽核。	供應商CAR 提升至90%	亦要求供應商配合完成衝突礦產、碳足跡、水足跡調查。

表 8　樣本企業的環境管理作為

	供應鏈管理與負責任商業聯盟行為準則						
大綱	C、環境						
細項	預防污染和節約資源	固體廢物	廢氣排放	水資源管理	能源消耗和溫室氣體排放		
具體行為	執行內容	執行內容	執行內容	執行內容	能源消耗	溫室氣體排放	在地化採購
華新麗華	投入綠色採購，採購可回包材占整體比率為11.75%	未提及	未提及	未提及	未提及	未提及	持續落實當地採購。 關鍵供應商屬於在地採購比例達 52.3%，較去年提升 6.3%。
中鋼	*對供應商所有機具進行符合環保標準評估。 *已有 95.29% 車輛符合環保第四、五期排放標準。	未提及	未提及	運輸供應商船上廢油水，由中鋼進行回收作業。	鼓勵供應商船舶可具有環境控管相關證書	採鐵路運輸取路公路運輸	未提及
晶元光電	未提及	未提及	未提及	未提及	未提及	未提及	支持在地採購商 在地採購金額大約 61%。
台達電子	執行包裝材料回收	*包裝材料以可重複利用載體(膠框)取代紙箱。 *2019目標 關鍵供應商減量2%	未提及	*針對關鍵供應商以及產業別耗水大戶，協助供應商擬定水資源管理及應對策略。 *2019目標 關鍵供應商減量2%	協助供應商導入節能減碳產品或解決方案。	*透過供應鏈碳足跡/節能減碳管理，協助供應商減少營運成本 *2019目標 關鍵供應商減量1%	運用在地化採購策略 在地採購平均62%。
友達光電	供應商包材回收率實際達成狀況為 93.04%	供應商包材回收率實際達成狀況為 93.04%	未提及	推動水中和目標，輔導供應商節水	未提及	未提及	*優先選擇在地採購。 *顯示器事業在地比例 台灣地區 94% 中國大陸 90% 太陽能事業在地比例 台灣地區 80%
億光電子	未提及	未提及	未提及	未提及	未提及	未提及	*在條件相當的情況下，優先與在地的廠商合作。 *臺灣廠區在地採購比例 73.33% 中國廠區在地採購比例 43.12%
仁寶電腦	推動供應鏈碳管理，鼓勵廠商制定方案與目標，提出減量行動	未提及	未提及	推動供應鏈水資源管理，鼓勵廠商制定方案與目標，提出減量行動。	未提及	推動供應鏈碳管理，鼓勵廠商制定方案與目標，提出減量行動	位於台灣與中國地區之在地採購比例平均為70%，相較於2017年提升了8%
宏碁	鼓勵參與碳揭露專案供應鏈計劃，廠商回覆率為91%，涵蓋主要一階及主要二階供應商。	未提及	未提及	未提及	將綠色能源採用狀況等的表現列為CSR評分項目。	*在整體碳管理、減碳成果等的表現列為評分項目。 *2018年31.43%關鍵供應商完成科學基礎減量目標(SBT)之設定。並於2021年起，開始落實絕對量減碳。	宏碁在主要生產基地(中國)的在地採購金額超過60%。
華碩電腦	*鼓勵供應商採用再生能源。 *鼓勵供應商制定並落實溫室氣體及水足跡減量計畫。	未提及	未提及	*進行水足跡調查。 *要求前10大水資源使用代工廠及供應商制定減量計劃並追蹤。	鼓勵取得 ISO 50001 能源管理驗證之供應商	*進行碳揭露(CDP)調查 *要求前10大水資源使用代工廠及供應商制定減量計劃並追蹤	未提及

三、結果與建議

針對 9 家電子資訊產業上中下游企業 CSR 報告的檢視，發現企業除對本身產品改良外，投入綠建築與綠能是對企業在節能減碳上最有效益的方案之一。提升製程回收水比率，原物料回收再利用，也都具體地呼應循環經濟的概念。主流、包含國際間的企業客戶不僅著手進行本身對溫室氣體、水資源、廢棄物的檢視，也將這些指標擴展到其供應商。跟上業界發展的潮流趨向，是在全球人民關注永續發展下，務實的經營對策。

本文所參考的企業 CSR 報告雖都有依循國際原則撰寫，且經過外部驗證，如附錄一。但受限於筆者在解讀報告資訊時可能會存在的疏漏，及企業

可能緣於種種原因，未將全部資訊予以揭露，本文所發現的結果會因此有所誤差。希望未來在多方組織的推動下，各企業可以相同的評估方式、相同的比較基礎，讓更多人取得這些數據進行探討，而歸結出的改善對策會讓所有人受利。

附錄一　樣本企業的報告撰寫原則與外部查證

	CSR報告撰寫原則與外部查證			
公司	依循GRI原則	AA1000 AS(2008)外部查核	ISAE3000 外部查核	其它
華新麗華	核心選項	X	X	中華民國確信準則公報第一號 有限確信 (Deloitte)
中鋼	核心選項	Type 1 中度保證 (BSI)	X	X
晶元光電	核心選項	Type 1 中度保證 (BSI)	X	X
台達電子	核心選項	Type 2 高度保證 (SGS台灣)	有限確信 (PwC Taiwan)	X
友達光電	全面選項 (Comprehensive)	X	有限確信 (KPMG)	ISO14064 溫室氣體排放量 (DNV)
億光電子	核心選項	Type 1 中度保證 (TUV NORD)	X	X
仁寶電腦	核心選項	Type 2 中度保證 (SGS台灣)	X	ISO14064-1 溫室氣體排放量 (CQC中國質量驗證中心)
宏碁	核心選項	X	有限確信 (KPMG)	ISO 14064 溫室氣體及能源數據 (SGS台灣)
華碩電腦	核心選項	Type 2 高度保證 (SGS台灣)	X	中華民國確信準則公報第一號 有限確信 (PwC Taiwan)

四、參考文獻

1.李秀英、劉俊儒、楊筱翎，2011，「企業社會責任與公司績效之關聯性」，東海管理評論，13(1): 77-112。

2.陳振遠、洪世偉，2013，「企業社會責任指數投資績效之研究」，證券櫃檯，165：88-97

3.沈中華、張元，2008，「企業的社會責任為可以改善財務績效嗎?以英國FTSE 社會責任指數為例」，中央研究院經濟研究所經濟論文，36(3)：339-385

4.張元，2008，「企業社會責任與財務積效－臺灣的實證研究」，社會科學論叢，3(1)：57-120

5.王言、張阜民、呂芝倚、柯俊禎，2016，「探討企業社會責任執行與公司營運績效之相關研究-以資訊通訊產業(ICT)為例」，財金論文叢刊，25:62-80

6.祝道松、盧正宗、洪晨桓、楊秀萍，2008，「環境績效對環境揭露與經濟績效的影響」，當代會計，9(2)：237-270
7.Griffin, J. J., & Mahon, J. F. , 1997, “ The corporate social performance and corporate
8.financial performance debate.” Business and Society 36(1)：5-31
9.聯合國 2030 年永續發展目標 Sustainable Development Goals (SDGs) https://sustainabledevelopment.un.org/?menu=1300

永續活動與碳中和驗證案例：

以 2019 海峽兩岸氣候變遷與能源永續發展論壇為例

葉品君*、李育明**

摘　要

為因應氣候變遷議題並追求永續發展，國際標準化相關機構紛對活動之辦理研訂驗證規範，其中最著稱的應屬國際標準化組織(ISO)之永續活動(ISO 20121)，以及英國標準協會(BSI)之碳中和(PAS 2060)等標準。ISO 20121 強調一項活動的辦理，須從規劃到執行階段，全程考量利害關係人所關切之議題，並做出適切的對應，考量之議題須兼顧永續發展之三大面向。而 PAS 2060 則針對組織或活動，進行碳足跡盤查後採行抵換以達成碳中和。

本文規劃以「2019 海峽兩岸氣候變遷與能源永續發展論壇」為案例，建構 ISO 20121 及 PAS 2060 之管理流程，並尋求第三方驗證，以落實活動辦理之永續性提升與碳中和。案例活動的前身是「兩岸能源與環境永續發展科技研討會」，係 2005 年由兩岸學者共同發起，並於 2009 年改稱為「海峽兩岸氣候變遷與能源永續發展論壇」。論壇由兩岸大學輪流主辦，2011 年由國立臺灣科技大學主辦時，曾嘗試引入碳中和制度。會議迄今已辦理 14 屆，本年度為第 15 屆，並由國立臺北大學主辦。此次活動預計會有來自對岸之院士與校長 24 人，以及本地之專家者約 120 人共同參與。

在 ISO 20121 驗證方面，將針對論壇活動進行利害關係人評估，並鑑別其所關注之環境、社會與經濟三大層面議題，撰寫永續活動手冊，最後執行評估審查及改善。本研究亦將引用 PAS 2060 標準，針對此次活動執行碳足跡盤查，制定碳足跡管理計畫，擬訂碳中和之承諾宣告，設定減量目標，最後進行碳足跡之抵換及宣告碳中和。在學術交流之餘，若能藉由引進國際驗證標準，使活動之辦理得以進一步提升永續性並達成碳中和，將可大幅擴大活動辦理之成效。

【關鍵詞】國際標準、永續發展、永續活動、碳足跡盤查、碳中和

---

*國立臺北大學自然資源與環境管理研究所　碩士生；

**國立臺北大學自然資源與環境管理研究所 特聘教授兼所長

一、前　言

自從十八世紀後的工業革命，隨著全球暖化所造成的氣候變遷，對生存在地球上的物種造成了前所未有的威脅，人們因此開始討論如何利用減緩(mitigation)與調適(adaptation)兩項措施來降低衝擊所造成的影響；同時，國際上針對溫室氣體也制定出了許多條約及規範。永續發展主要涵蓋環境、經濟及社會三個層面，要使環境能夠永續，同時發展經濟顧及社會，成為了大家開始重視及討論的新議題。

我們生活當中時常舉辦各式各樣的活動，其資源的浪費更是不在話下，為此國際標準化相關機構(International Organization for Standardization，簡稱：ISO)針對永續活動的辦理制定了一套規範---永續活動管理系統(ISO 20121)，希望藉由各關係者間的溝通、約束，達到永續活動的目標；為追求活動的節能減碳，英國標準協會(British Standars Institution，簡稱 BSI)鼓勵各活動主辦方進行碳中和(PAS 2060)的確證，透過設立減碳目標及碳抵換政策，努力達到零碳排放。

此次辦理之「2019 第十五屆海峽兩岸氣候變遷與能源永續發展論壇」，前身為「兩岸能源與環境永續發展科技研討會」，係 2005 年由兩岸學者共同發起，並於 2009 年改稱為「海峽兩岸氣候變遷與能源永續發展論壇」。論壇由兩岸大學輪流主辦，著眼於推動氣候變遷與永續發展之相關行動經驗交流，作為交流平台，提供各界氣候變遷與永續發展之解決方案。2011 年由臺灣科技大學主辦時，曾實施碳中和確證，當時總排放量為 21.79 公噸，友達光電贊助了 22 公噸進行抵換，而在此次辦理，我們更多加引進了 ISO 20121 永續活動系統管理為會議規劃與辦理之準則，希望除了降低碳排放量外，還可降低會議衍生的相關環境、經濟及社會衝擊，提供與會者及利害相關者永續發展的參與體驗，並作為未來論壇或活動辦理之典範，達到永續活動之目標。

二、標準驗證介紹

本研究將探討活動辦理期間造成之碳排放與利用管理系統控制因活動所衍生出的各項衝擊，以達成活動永續。

1.碳中和 PAS 2060

PAS 的全文為 Publicly Available Specification，最初是指「可公開取得之規範」，類似於英國標準化文件，提供了一種快速引入標準化的方法；

IPCC 特別報告中表示：「若保持現今的溫室氣體增加率，在 2030 及 2052 年全球暖化將達到 1.5°C，」為了降低隨著溫室氣體排放而增加的溫度，人們開始探討節能減碳等相關環境議題；因此「碳中和」一詞逐漸出現，碳中和顧名思義便是將排放出的碳進行中和以達到零碳排放；我國行政院在 2008 年時提出的「永續能源政策綱領」中要求政策中需有碳中和概念，英國標準協會(BSI)與行政院環保署於 2014 年共同編撰了「實施碳中和參考規範」，其中針對碳中和之範疇界定、步驟皆做闡述，預期可帶來提高消費者保護意識、增進氣候變遷行動、準確與可查證的碳中和宣言等效益。

碳中和實施規範中將排放源分成了範疇一(直接排放)、範疇二(能源間接排放)及範疇三(其他間接排放)排放，將碳中和步驟分成了三大方向：盤查、減量及抵換，其標的物可包含、活動、產品、服務及建築物等；界定範疇、基準日、宣告日及盤查日期，成立減碳小組，設立減量目標及措施，進行盤查，最後針對剩餘之碳排放量進行抵換，宣告碳中和之達成，其詳細時程可參照圖 1。

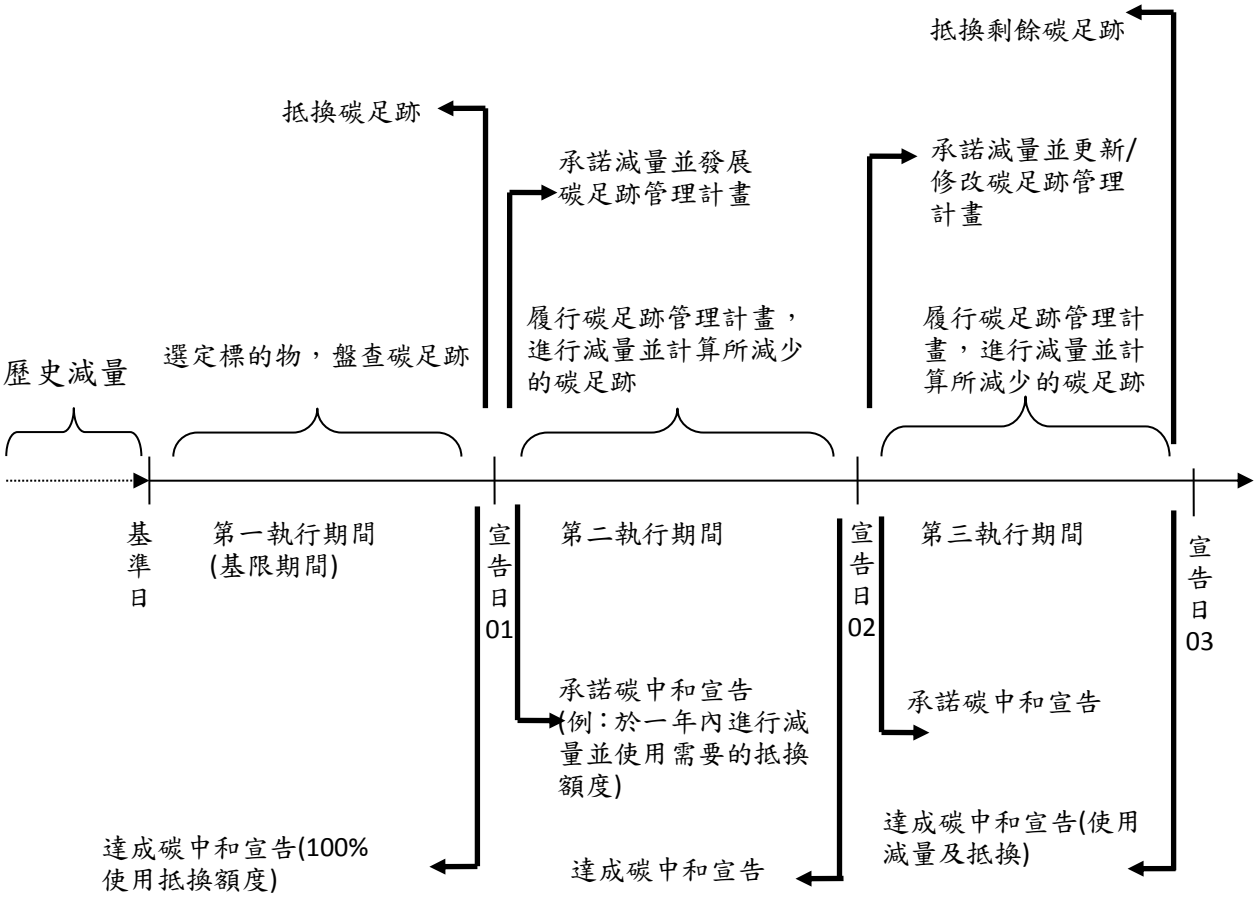


圖 1　碳中和執行循環過程[1]

2.永續活動管理系統 ISO 20121

我國於 2013 年開始推動綠色會展，並由經濟部國際貿易局編定了「綠色會展指南」，將綠色會展活動分為「展覽」與「會議」，其中「會議」之構成主體含主辦單位、場地提供者及與會者；同時，綠色會展參考「PAS 2060：2014 實施碳中和參考規範」，盡力降低廢棄物製造量，已減少對環境之衝擊，在綠色會展指南中，建議使用節能燈具降低會用電量、減少使用一次性之布置物，並鼓勵活動辦理融入永續活動管理系統 ISO 20121 之方法，注入永續精神，為地球永續盡一份心力，目前國內針對辦理 ISO 20121 驗證之活動包含 2014 年的國際綠色產品展[2]，以及英國的可口可樂公司等。

國際標準化組織(International Organization for Standardization，簡稱：ISO)於 1947 年成立，屬於一個非官方性質的國際組織，成員包含各會員國之國家標準組織，其目的制定國際通用標準，促進標準國際化，減少技術性貿易障礙，這些標準可以為自願性的也可為強制性的，如 ISO 14000 環境管理系統與 ISO 9000 品質管理系統已應用於國際貿易市場中[3]。

組織應將永續管理系統放入其活動中；永續包含了環境、經濟及社會三個層面，使用 P(PLAN)、D(DO)、C(CHECK)、A(ACTION)的管理系統模式(如圖 2)辦理活動，設立永續目標及政策，評估相關議題及利害關係人及建立文件化資訊，與內外部進行溝通，最後藉由內部稽核及外部稽核模式，對不符合之事項進行改正措施，以減少未來對永續活動辦理的衝擊。

圖 2　ISO 20121 活動永續管理系統推行步驟[4]

三、驗證流程

本研究將使用實際操作的方式進行，設立「2019 第十五屆海峽兩岸氣候變遷與能源永續發展論壇」作為此次盤查之標的，進行碳中和確證及永續會場管理系統驗證，界定盤查日期為 9 月 23 日至 9 月 24 日，同時參考 2011 年「海峽兩岸氣候變遷與能源永續發展論壇」碳中和之過程進行查證，其時程可參考圖 3。

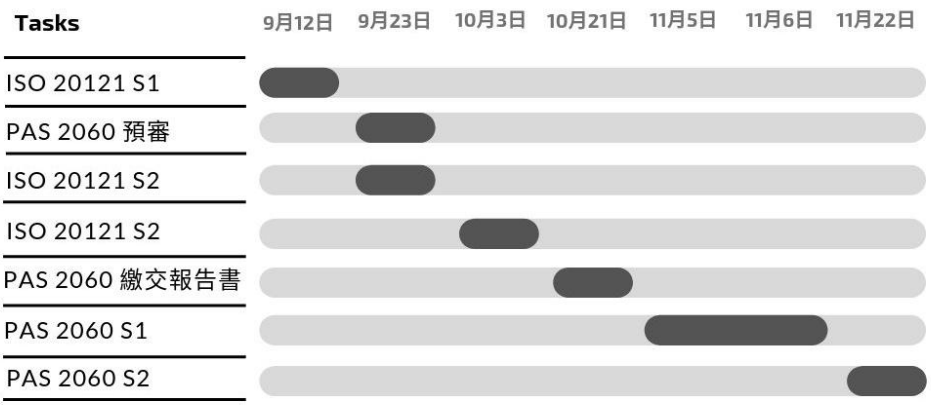


圖 3　PAS 2060 驗證及 ISO 20121 之驗證時程

永續活動系統透過事前設立永續目標等方式，進行供應鏈管理及內外部溝通，同時文件化相關資料，針對可量化之項目進行量測，最後透過內外部稽核檢討未達標之情況並進行改善，以達成永續目標；活動碳中和藉由盤查活動中所排放之碳足跡，填寫碳盤查清冊，設定減量目標，減少資源浪費，最後利用抵換方式，中和掉辦理活動所造成的排放量，以達成零碳排放，我們將此次活動區分為三個區塊：會前籌備、會議期間及會後處理，針對其相對應之時程，進行不同項目之工作，會議工作辦理流程可參照圖 4。

本次活動我們於事前一個月開始著手進行 ISO 20121 之驗證作業，期間鑑別利害關係人及議題，並透過溝通，使與會者共同參與永續行動；利用鑑別出之議題思考減量政策，如：使用鐵盒便當，取代一般紙盒便當，減少資源浪費，同時，參考經濟部國際貿易局「108 年綠色會展指南」[5]中的項目進行永續活動辦理。

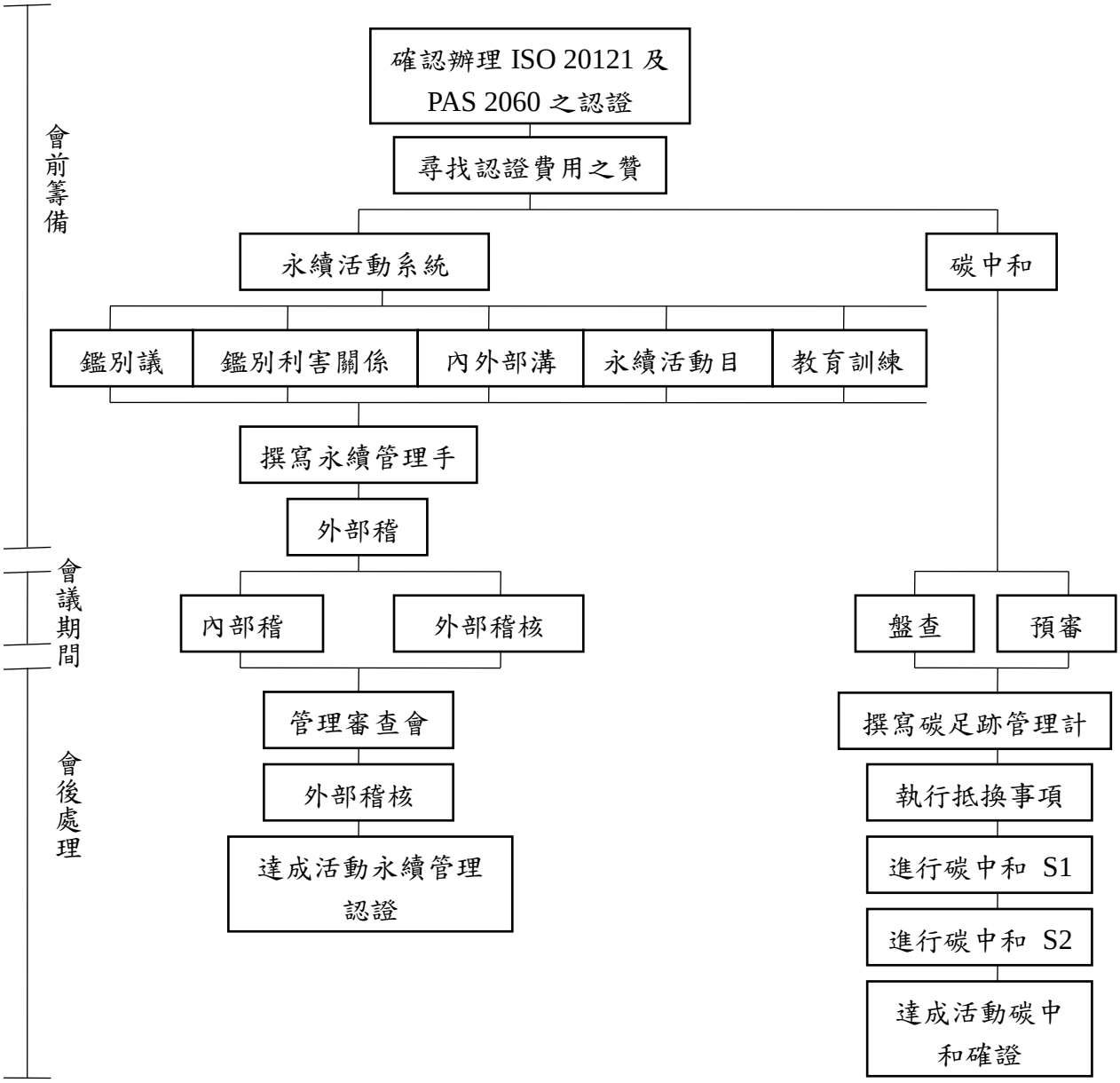


圖 4　PAS 2060 確證及 ISO 20121 之驗證工作流程

四、文件系統及稽核意見

1.ISO 20121

為使本論壇辦理政策、流程與紀錄能夠明確且文件化，將 ISO 20121 中之文件，以三階層方式建立，第一階層為永續管理手冊，作為闡述辦理目的、價值、範疇、方法之主要內容；第二階層為程序書，是呈現受限於篇幅或特殊性，無法於本手冊載明之相關程序說明；第三階層為紀錄表單，

係記錄第一階層與第二階層各項程序所提應記錄事項之表單，設立文件一覽表並對文件進行編號排序以清楚展示所有文件；本次驗證辦理之所有文件如下表 1：

表 1 「2019 第十五屆海峽兩岸氣候變遷與能源永續發展論壇」ISO 20121 驗證之文件一覽表

文件階層	文件名稱
一	永續活動手冊
二	永續議題鑑別
二	法規鑑別程序及結果
二	內部稽核程序與計畫
三	永續活動文件一覽表
三	內部稽核表
三	教育訓練紀錄
三	管理審查會議紀錄
三	不符合事項矯正措施
三	消防配置
三	保單資訊
三	水質檢測紀錄
三	廚師及配膳員健檢紀錄
三	外部稽核意見回覆
外部	臺北大學辦理活動應規劃辦相關保險之規定，課外活動指導組，網址 https://www.ntpu.edu.tw/admin/a8/org/a8-2/news_more.php?id=4573
外部	CNS20121-zh_TW

在第一次外部稽核時稽核員給予我們 6 項之改善事項，例如「標準作業程序與 ISO 20121 標準之連結關係宜再加強。」、「議題鑑別及評估之準則宜再清晰，以利鑑別議題之重要性」等，針對稽核員給予之意見，我們的回覆如下表 2，而後進行之第二次稽核意見及答覆如表 3，未來針對永續活動將參照此次流程及稽核意見辦理。

表 2　ISO 20121 第一次稽核之意見回覆

項次	稽核意見	改善回覆
1	標準作業程序與 ISO 20121 標準之連結關係宜再加強。	已於手冊中建立條文對照表，可參照第 II 頁之條文對照表。
2	外來文件之管制宜再加強。	外來文件皆會收錄於文件一覽表，並註明來源與文件編號。
3	議題鑑別及評估之準則宜再清晰，以利鑑別議題之重要性	已對議題鑑別之程序及評估準則建立議題鑑別之文件，可參照「2019forum-2-01 議題鑑別」程序。
4	永續性目標宜更全面考量，並盡可能訂定可量化之績效指標。	針對永續之定義「環境、社會、經濟」的三個層面作為出發點，設立永續性目標及量化指標，可參照第 2.6 節。
5	變更管理及緊急應變流程宜再加強，以利活動順利進行	已針對可能發生之 4 種狀況設置緊急應變流程，請參見第 3.5 節。
6	請再注意內部稽核小組人員之適任性及獨立性。	已針對內部稽核人員進行訓練，並於內稽時不稽核自己負責之業務。

表 3　ISO 20121 第二次稽核之意見回覆

項次	稽核意見	改善回覆
1	宜在活動會場適當時間或地點宣導相關廢棄物分類規劃。	納入司儀宣佈之注意事項，提醒與會者進行分類。
2	茶敘餐點宜確保供應商確實執行低溫配送，並注意餐點放置時間。	會前要求廠商執行低溫配送，並於會議期間由專人管制餐點放置時間。
3	請注意提供參與者之餐點宜留樣，以利確保食物安全無虞。	由專人採集樣本置於夾鏈袋(註明採樣日期時間與餐點)，並存放於攝氏 5 度之冰箱中 72 小時。
4	廚餘暫存桶宜加蓋。	未來活動可配合執行。
5	研討會場出入口後門宜關閉，以利節約能源耗用。	未來活動將視實際狀況管制出入口。
6	請考量宣導自備環保杯，避免使用紙杯及提供瓶裝礦泉水。	於報名時宣導外，講師與主持人則提供專用杯，避免使用紙杯與瓶裝礦泉水。

2.PAS 2060

辦理碳中和需具備「碳足跡盤查清冊」及「碳足跡管理計畫」(CFM Plan)，針對在活動中所量測到的數據紀錄在碳足跡盤查清冊中，並標示排放係數，進行計算，後撰寫碳足跡管理計畫，將盤查結果、減量措施及抵換結果紀錄於計畫中，由於碳中和查證時程較晚，稽核員僅於活動當天進行預審，尚未對管理計畫及排放清冊進行稽核及給予意見，未來驗證稽核過程與意見處理將持續更新，並於發表會呈現稽核結果。

五、結　論

永續發展：「人類具有發展永續的能力，以滿足當前所需，卻不影響後代子孫滿足自身所需」(United Nations, 1987)，為達到永續發展，聯合國於2015 年提出了 17 項「永續發展目標」，而此次活動包含了其中的第 7 項保障大家皆有乾淨且永續的能源、第 4 項高品質教育及第 17 項的合作關係。

此次之「2019 第十五屆海峽兩岸氣候變遷與能源永續發展論壇」為臺北大學首次辦理碳中和確證及永續管理系統驗證，因此對驗證流程及所需文件並不清楚；感謝英國標準協會台灣分公司協助進行此次驗證，同時，也感謝英國標準協會臺灣分公司及新北市環保局對此次驗證之贊助；碳中和之排放係數資料主要為環保署產品碳足跡服務網及日本味の素グループ版中「食品関連材料 CO_2 排出係数データベース」所提供。

由於此次研討會邀請 25 位來自大陸之貴賓，我們使用中華航空的飛行碳計算器計算貴賓們往返臺灣的碳排放，前往臺灣的航班中，分成了北京機場到桃園機場、廣州機場到桃園機場、青島機場到桃園機場及上海虹橋機場到松山機場四種航線，以每位貴賓皆搭乘經濟艙計算，結果排放將近 9 公斤的碳，為本次活動中最大宗的排放數據；在餐點上，我們選擇了「頂極餐飲有限公司」所製作的鐵盒便當，減少了約 0.162 公斤之排放量(以一個便當盒 15 公克計算)，並且我們要求廠商進行廚餘回收，因此不列入本次碳足跡計算中；住宿方面，選擇居住三峽福容飯店，我們使用桃園福容之每人每日住宿碳足跡計算，共住宿了 29 間房，排放量為 638 公斤二氧化碳當量；後續之碳抵換預計請「友達光電股份有限公司」進行捐贈。

為使將來辦理活動可以更加永續、減少碳足跡的排放，於事前規劃時，建議先評估所需之耗材，並思考替代方案，同時選取可重複使用之材料或再生材料，以減少資源浪費，人員交通方面，除選擇交通較發達之地區，同時

提供交通資訊，鼓勵與會者搭乘大眾交通工具，詳細估算用餐人數，避免食材浪費；選用在地廠商，減少運送過程中之碳排放；在進行內外部溝通時，詳細說明要求事項，與廠商簽訂條約，明確要求廠商需達成之事項；對工作人員進行訓練，確保每位工作人員皆理解，且能勝任賦予的任務，設立永續目標，並宣導活動之永續目標，以傳達對活動永續之決心。

六、文獻參考

1.英國標準協會(2014)，實施碳中和參考規範。

2.經濟部國際貿易局(2019)，108 年綠色會展指南。

3.賴柏宏(2015)，臺灣會展產業永續性之挑戰---以 ISO 20121 為解決方案，國立政治大學科技管理與智慧財產研究所碩士論文。

4.Meet Taiwan,https://www.meettaiwan.com/zh_TW/menu/M0000885/活動永續管理系統：ISO%2020121.html?function=M0000885

5.經濟部國際貿易局(2018)，綠色會展指南。

6.IPCC, 2018: Summary for Policymakers. In: Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, and T. Waterfield (eds.)].

7.United Nations, 1987."Report of the World Commission on Environment and Development." General Assembly Resolution 42/187, 11 December 1987. Retrieved: 2007-04-12.

8.SUSTAINABLE DEVELOPMENT GOALS,https://www.un.org/sustainable development/sustainable-development-goals/

9.行政院環保署國家溫室氣體登錄平台，https://ghgregistry.epa.gov.tw/co2/about.aspx

電子產業於廢棄物減量與循環經濟的落實

黃聖夫*、周君頤**、何宗仁***、張欣榮****、吳聲昌*****

摘　要

電子產業在生產高科技電子材料的過程中，大量有價工作溶劑常以揮發性有機廢氣(以下簡稱 VOCs)型態離開系統，若沒有合適的技術，不僅限制產業發展，對環境汙染與資源的浪費都是無法迴避的課題與挑戰。目前常用的 VOCs 處理技術有焚化法、吸附法、吸收法、冷凝法及生物處理等方法，其中冷凝法因其簡易性被廣泛應用於電子產業的 VOCs 處理，產生的冷凝液大多以廢棄物形態委外處理，但在產業競爭趨於嚴峻與循環經濟的趨勢下，已無法滿足業者的需求。

鑒於此，技術團隊著手開發合適的 VOCs 處理與溶劑回收技術，在此以全球前四大聚醯亞胺薄膜(Polyimide，以下簡稱 PI)生產廠商達邁科技作為案例分享。原本達邁科技採冷凝方式捕捉製程尾氣中的 VOCs，並設有溶劑回收系統將其純化回收，但因系統效率不佳，導致大量的液體廢棄物仍需委外處理。隨著營運規模擴張以及環保意識提升，VOCs 捕捉效率不佳、溶劑回收效益不彰及大量液體廢棄物委外處理等問題逐漸成為擴廠時的沉重包袱。為此，技術團隊為達邁科技導入新技術，從 VOCs 處理、溶劑回收再到廢水處理，規劃合適的工藝流程。系統實際上線後，產生的效益除了大幅減少各工作溶劑的外購費用，委外處理廢棄物更大幅減少 90%以上，綜合年效益高達數億元。

達邁科技在追求利潤的同時，善盡企業社會責任，將環境保護工作內化為企業核心價值，達到企業經營、環境永續發展雙贏的目標，為同類型生產企業立下標竿。

【關鍵詞】廢棄物減量、揮發性有機廢氣、循環經濟、廢水零排放

---

*工研院材化所化工技術組　技術經理

**工研院材化所化工技術組　副工程師

***工研院材化所化工技術組　經理

****達邁科技股份有限公司　經理

*****達邁科技股份有限公司　董事長

一、前　言

各國政府為解決日趨嚴重的資源短缺與環境汙染問題，紛紛開始提倡資源再生的循環經濟模式，在策略和產業創新上提出許多新的作為以加速循環經濟的實現，台灣也不例外。為展現邁向循環經濟的決心，行政院於 107 年 12 月 20 日通過「循環經濟推動方案」，將循環經濟理念及永續創新的思維融入各項經濟活動，以解決台灣資源匱乏、資源浪費以及廢棄物過多的問題，並期望創造經濟與環保雙贏局面，接軌國際。除了極需轉型的經濟運作模式，空氣汙染亦為近年各國迫切需共同面對的環境汙染問題之一，因此，我國政府分別於 106 年的 4 月及 12 月提出「空氣污染防制策略」與「空氣污染防制行動方案」，並於同年 12 月 14 日再通過《空氣污染防制法》修正草案，為空氣品質建構起更為完整的管理制度，期望能全面改善空氣污染問題。

隸屬於工研院材化所化工技術組的技術團隊，已成立二十餘年。當時鑑於國內化學工業的蓬勃發展，成立先導製程與應用研究室，旨在協助化工產業提升生產效率，降低製程耗能，多年來已在業界累積許多蒸餾塔去瓶頸改善設計、分離塔節能設計、高純度化學品回收與純化、分離純化工廠整廠工程設計、製程廢液廢氣減量等的實戰經驗；隨著產業政策與需求轉型，近年來依據業界需求，協助開發合適的零排放、零廢棄製程，帶領產業界朝循環經濟、零廢棄的目標前進。

二、VOCs 濃縮處理與溶劑純化技術簡介

過去十多年來，電子產業在國內蓬勃發展，相關業者不停地擴建新廠與提升產能，其背後可能帶來的資源耗用與環境危害，相對於傳統的石化廠亦不容小覷。尤其，高科技電子產品與電子元件在製造過程中常需使用大量易揮發的有機溶劑進行製造或清洗，其衍生的揮發性有機物(Volatile Organic Compounds, VOCs）廢氣若沒有導入妥善的末端處理技術，不僅對環境造成相當大的負荷與危害，其原物料耗用與產生的廢棄物量也相當可觀。

VOCs 廢氣常見的處理技術可依據 VOCs 的最終樣貌分為破壞性與非破壞性兩大類。破壞性方法是將 VOCs 利用光、熱、催化劑或是微生物發生化學或生物反應，將有機物轉化成無害的水與二氧化碳，例如直接燃燒法、催化燃燒法、光觸媒催化分解法與生物氧化法等皆屬於此類。而非破壞性法主要透過物理方法將 VOCs 進行回收，因此又稱回收法，例如活性炭吸附、變

壓吸附、冷凝法、濕式洗滌法等。

其中，受到高科技電子廠的生產特性影響，以冷凝法最廣泛被使用；冷凝法是將高溫廢氣直接以冷凝的方式回收廢氣中的有機溶劑，但受台灣高濕度環境的影響，此股冷凝液水分含量通常高達 50wt%以上，大幅增加後續溶劑純化處理成本；且單靠冷凝處理後的尾氣因仍含有一定濃度的 VOCs，大多需再以洗滌塔加以處理才可排放至大氣；洗滌時需添加大量的酸、鹼洗滌液，不僅增加一筆酸鹼添加藥劑量的費用，還多了酸、鹼洗滌廢液的處理成本。一般而言，冷凝法較適用於回收高濃度的高沸點有機揮發物，對低沸點有機揮發物的回收效果不佳。鑑於此，本技術團隊針對業界需求開發出合適的 VOCs 濃縮處理與溶劑純化技術，並成功申請「氣體處理方法及系統」與「分離裝置」專利。以下將針對本團隊的 VOCs 濃縮處理與溶劑純化進行技術簡介。

1. VOCs 濃縮處理技術

本 VOCs 濃縮處理技術特徵是在捕捉 VOCs 前增設濃縮塔，利用高溫廢氣既有之過熱能量及塔頂的回流操作將廢氣中的水分與有機溶劑初步分離，藉以回收上游製程提供之能量，降低後續溶劑純化系統運轉成本。如圖 1 所示，高溫廢氣自濃縮塔底部進到濃縮塔，經由濃縮冷凝回流操作，可淨化富含 VOCs 的高溫廢氣，並於濃縮塔頂部得到以廢水為主的冷凝液，濃縮塔底部則為工作溶劑 80wt%以上的濃縮液；淨化廢氣、冷凝液與濃縮液去處則視廢氣組成的複雜度而有所不同。

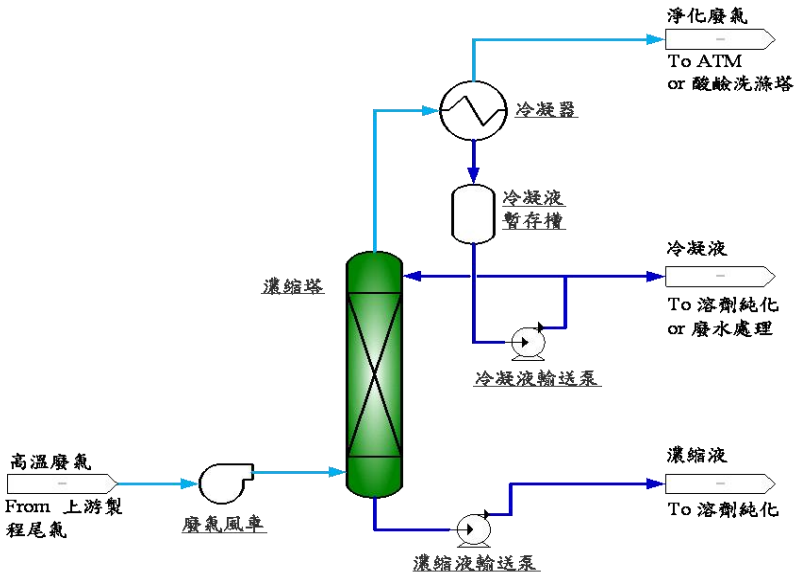


圖 1　本 VOCs 濃縮處理流程圖

本文將針對不同的廢氣組成作案例分享，此節先以單一組成的高溫廢氣做說明。一般而言，若高溫廢氣 VOCs 組成僅含有沸點高、揮發度低的有機溶劑，處理後的淨化廢氣可直接排放至大氣；且其冷凝液為 99.9wt%廢水，該廢水的化學需氧量 (Chemical Oxygen Demand；COD)值低，可直接送往一般的廢水處理廠處理。表 1 為某電子廠一股含有 N-甲基吡咯烷酮(N-Methyl-2-pyrrolidone;以下簡稱 NMP)的 VOCs 廢氣分別以本 VOCs 濃縮處理技術與冷凝法的處理結果，除了先前技術說明提到的可將回收工作溶劑濃度提高到 80wt%，大幅降低後續純化處理成本外；在冷凝溫度皆為 15℃時，本 VOCs 濃縮處理技術之淨化廢氣 VOCs 濃度遠低於 1ppm，且 VOCs(工作溶劑)的回收率亦高達 98%以上，各方面表現皆優於冷凝法。

表 1　含有 NMP 之 VOCs 廢氣處理比較表

廢氣溫度：80℃；VOCs 組成：~2000ppm；風量：600CMM		
採用 VOCs 處理技術	本 VOCs 濃縮處理技術	冷凝法
冷凝溫度	15℃	15℃
淨化廢氣 VOCs 濃度	<<1ppm	~34ppm
濃縮液/冷凝液有機物濃度	80wt%	65wt%
VOCs(工作溶劑)回收率	>98%	~85%

2. VOCs 濃縮處理技術與溶劑純化技術的整合

一般而言，VOCs 廢氣處理後的冷凝液或濃縮液都具有回收價值，目前業界大都以蒸餾的方式進行純化以回收工作溶劑。蒸餾是溶劑純化最常見的方式，依據溶劑種類不同，所採用的蒸餾技術也不同；當溶劑彼此間具有複雜的共沸行為時，還需透過高階的破共沸技術，才可將溶劑純化。在冷凝液或濃縮液僅含水、工作溶劑與重沸物三種成分且無共沸行為的情況下，為得到高純度的工作溶劑，一般是採傳統的兩根序列式蒸餾塔串聯設計，其硬體投資成本較高，且能耗也較高；為此，本技術團隊在蒸餾塔的硬體設計上導入製程強化後的隔板蒸餾塔技術，並成功申請「分離裝置」專利；其技術特點為利用緊湊的設備將複雜的流程簡單化，使原本需要兩根蒸餾塔的工作縮減至單一蒸餾塔即可完成，大幅減少設備投資費用。

圖 2 為結合本 VOCs 濃縮處理技術與隔板蒸餾塔技術的流程圖，同樣以某電子廠一股含有 NMP 的 VOCs 高溫廢氣作為案例分享，由於該股廢氣 VOCs 僅含 NMP 與微量重質，故濃縮塔塔頂與純化塔塔頂皆為 99.99wt%以上的廢水冷凝液，因此可經由適當的操作達到廢水零排放。值得一提的是，外界溫度與濕度影響著濃縮塔的操作，因此特於表 2 列出該廠在不同

氣候條件下的操作結果，可清楚發現，不論是夏天高溫高濕度或冬天低溫低濕度的情況下，其淨化廢氣的 VOCs 濃度皆小於 1ppm，且純化後的工作溶劑純度皆達 99.99wt%以上；並結合濃縮塔與純化塔的操作，在工作溶劑總收率皆達 97.8wt%的情況下，流程皆無廢水排放。

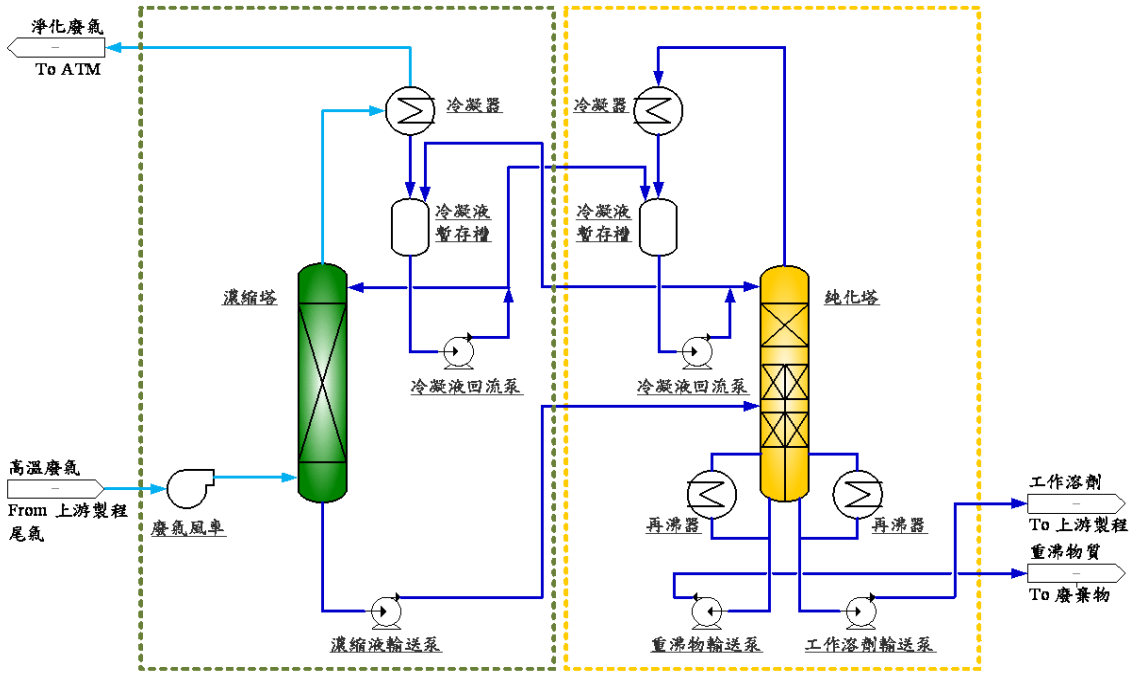


圖 2　VOCs 濃縮處理與溶劑純化流程圖

表 2 含有 NMP 之 VOCs 廢氣處理比較表

外界溫/濕度 (℃/%)	高溫廢氣中有機物濃度		淨化廢氣排放溫度 (℃)	淨化廢氣之 VOCs 濃度	回收之工作溶劑組成			工作溶劑總回收率 (%)	廢水處理量 (kg/hr)
	NMP	重質			水分	NMP	重質		
36/80	0.2wt%	77ppm	32	<1ppm	<100ppm	>99.99wt%	ND	97.8wt	0
10/65	0.2wt%	79ppm	12	<1ppm	<100ppm	>99.99wt%	ND	97.8wt	0

除了上述以單一工作溶劑的高溫廢氣作為本技術的案例說明之外，下一節將以組成複雜的高溫廢氣作案例分享。

三、達邁科技廢棄物減量與循環經濟的作法與成果

達邁科技是全球第四大聚醯亞胺(Polyimide)薄膜的生產供應商，僅次於美國杜邦、日本鐘淵化學及韓國 SKC。其製程共使用三種工作溶劑，因其製程特性，這些工作溶劑最終會以 VOCs 的型式離開上游製程系統，其 VOCs 廢氣組成包含工作溶劑 A、工作溶劑 B 與副產物 C。由於此股 VOCs 廢氣含有大量可回收之工作溶劑，須經由 VOCs 回收處理與溶劑純化系統，進行尾氣處理與工作溶劑的回收。圖 3 為達邁科技舊廠之 VOCs 處理與溶劑純化系統流程方塊圖。來自上游製程富含工作溶劑 A、工作溶劑 B 與副產物 C 之 VOCs 廢氣於 VOCs 廢氣處理系統進行冷凝與酸鹼洗滌，淨化後的廢氣得以排放至大氣；冷凝液則進到溶劑純化系統，透過蒸發和蒸餾的方式，將工作溶劑 A 回收到上游製程使用。圖 3 顯示舊廠僅回收工作溶劑 A，大量有價的工作溶劑 B 與副產物 C 皆以廢棄物形式委外處理，這些有價廢棄物不僅造成資源浪費，且對廠內運作與地球環保皆為沉重負擔。另一方面，由於冷凝液中含有超過一半的水分，導致後段溶劑純化系統的能源消耗甚高；且 VOCs 廢氣處理系統效率不佳，仍有大量 VOCs 無法被冷凝，需以酸鹼洗滌塔進一步處理，不但 VOCs 回收率不高，洗滌塔的酸鹼添加藥劑量也多。光是舊廠，每年 VOCs 廢氣處理系統與溶劑純化系統所排出的廢棄物總量高達 3,000 噸，其廢棄物處理成本極高。

因有舊廠多年運轉的實際經驗，達邁科技深知廠內需要的是能夠將廢棄物資源化與資源循環的新技術，因此在擴建新廠時，特別透過本技術團隊從 VOCs 處理到溶劑回收，建立一套完整的高效率尾氣處理與溶劑純化系統。前者的 VOCs 處理採本 VOCs 濃縮處理之「氣體處理方法及系統」專利，不但在 VOCs 處理段的收率大幅提升，更降低溶劑廢液中的含水量，進而使後段溶劑回收系統耗能大幅降低；而後者的溶劑純化系統，則導入共沸蒸餾及變壓蒸餾技術用以將工作溶劑 B 與副產物 C 純化回收，達到廢棄物資源化的目標。除了要將廢棄物資源化，廢水零排放才是達邁科技的終極目標，因此本技術團隊亦協助設計廢水濃縮與乾燥系統，搭配合適的節能技術，除了將廠內高鹽廢水濃縮乾燥，並將含鹽洗滌廢液回收乾燥，將鹽類以固體廢棄物的形式委外處理；乾燥後的凝結液則由廠內廢水處理與純化系統再製為純水與逆滲透水回到廠內使用。這不僅符合園區管理局的規範，廢水零排放的達成更是達邁科技對環境友善、永續經營的宣示以及循環經濟的具體落實。

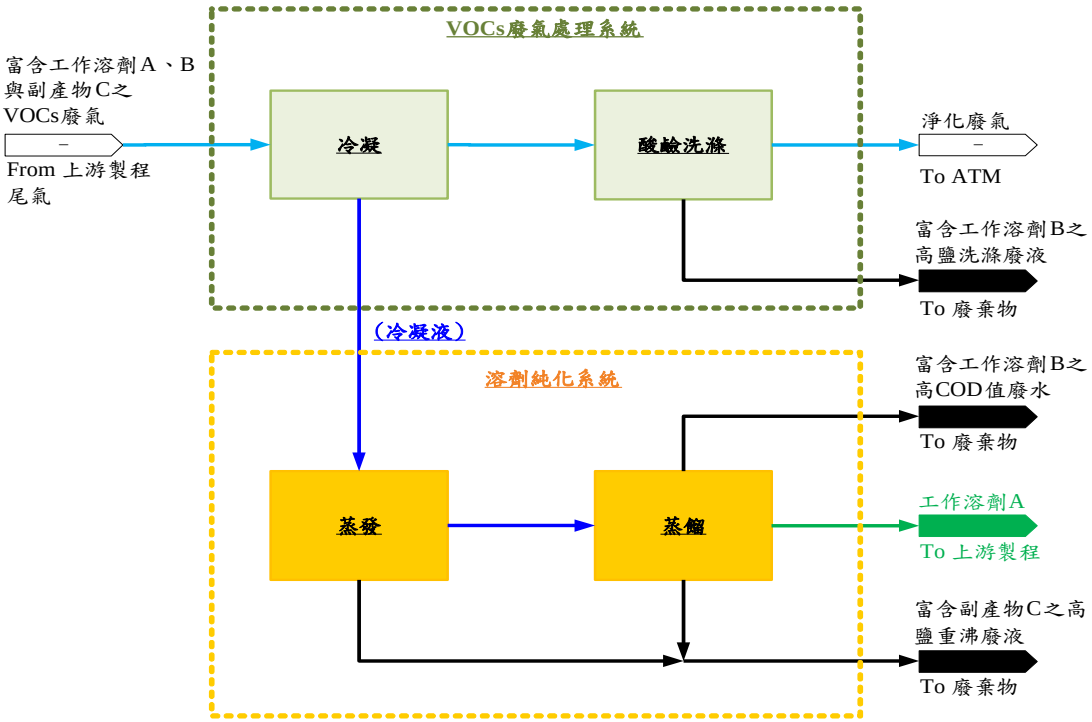


圖 3　達邁科技舊廠 VOCs 處理與溶劑純化系統流程方塊圖

圖 4 為達邁科技新廠的 VOCs 廢氣處理與溶劑純化暨廢水處理與濃縮乾燥系統方塊流程圖。與舊廠比較，新廠僅兩股廢棄物，分別為少量的重沸物質以及鹽類固體廢棄物，單位產品之廢棄物減量 90%以上；除了工作溶劑 A 與工作溶劑 B 可回到上游製程端循環使用外，達邁科技並秉持資源共享的精神，將製程所產生的副產物 C 純化以作為其他生產廠商之產品原料。經兩年多來實廠運轉數據驗證，工作溶劑自上游端投入算起，工作溶劑 A、工作溶劑 B 與副產物 C 於整廠回收率分別為 85%、92%及 88%，正式宣告達邁科技已在綠色循環製程的道路上。

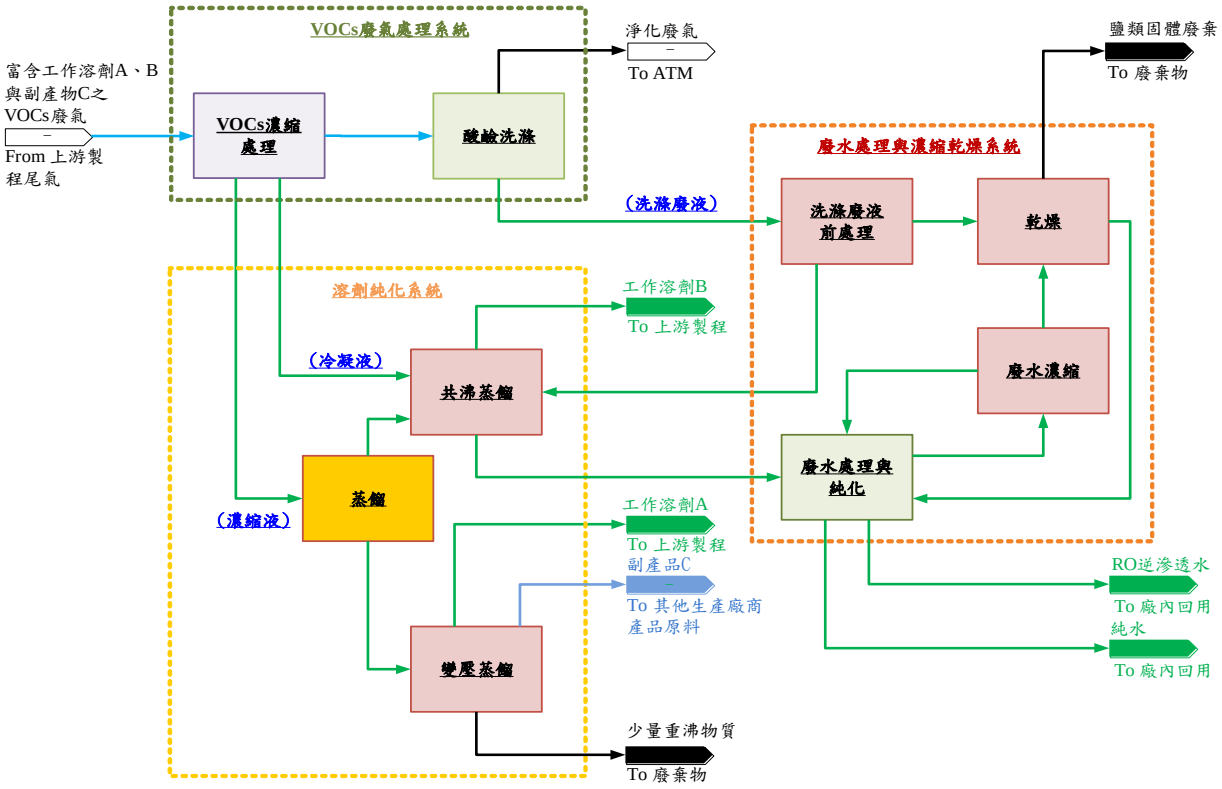


圖 4　達邁科技新廠 VOCs 處理與溶劑純化暨廢水處理與濃縮乾燥系統流程方塊圖

四、結　論

企業在追求利潤的同時，也須善盡企業社會責任，將環境保護工作內化為企業核心價值，達到企業經營、環境永續發展雙贏的目標。為落實環境保護及有效利用地球資源，本技術團隊以節能、節水、減廢、污染防治、溫室氣體減量及綠色生產為技術開發之宗旨，在兼顧產業競爭力及社會責任下，藉由引進高效率之生產技術及廠內自行回收再利用理念的推廣，降低產業在生產過程中對環境造成的衝擊與污染，協助廠商建立對地球環境最友善的綠色產業技術。

五、參考文獻

1.林文川，「製程 VOCs 廢氣之收集與處理」，工業污染防治 110 期，P.105-173。

2.黃育徵，「循環經濟」，天下雜誌。

3.工業技術研究院,「氣體處理方法及系統」,中華民國專利證書號 I511771。

4.工業技術研究院，「分離裝置」，中華民國專利證書號 I577436。

半導體封裝減薄研磨廢水回收技術與矽泥再利用

彭柏頤*、蔡宛芯**、黃任榆***、吳俊湧****

摘　要

研磨廢水(Lapping Wastewater)為半導體封裝製程中減薄研磨所產生之廢水，佔封裝製程大宗用水之一，其水質特性佳(導電度<10 μs/cm，TOC<3 ppm)具有良好的水回收條件，因為含有高濃度之矽顆粒(800~1,300 mg/L TS；濁度> 9,000 NTU)且粒徑多數分佈於數百奈米間(100~1,000 nm)較不易處理，但具有經濟價值。而業界常見為使用化學混凝法進行固液分離後放流，並產生大量之含鐵、鋁成份之矽污泥，其雜質較高、經濟效益差；另外或以較高運轉成本之超濾膜(ultra-filter)方式過濾處理，亦有濾膜阻塞、濃縮側排水及逆洗水等問題產生。

本回收技術為分離研磨廢水之奈米級顆粒，應用脫水機連續進水並以批次方式處理污泥，使原本需要排放、逆洗廢水可以回收使用，另可獲得高純度矽泥，作為再利用之原料或添加劑。

主要方式利用板框脫水機於濾布上預敷助濾劑(filter aid)形成預敷層，再經研磨廢水顆粒建立過濾層後，經由物理過濾方式分離奈米級矽顆粒，總固體(TS)去除率高達 99%以上，藉此獲得高純度之二氧化矽污泥(SiO_2)，經燒結及合成加工後之產品可投入綠建材、橡膠製品或塗料相關添加劑。

此技術不僅可提升水回收率、亦可將矽泥再利用，也避免以一般廢棄物之方式處理間接造成環境二次污染，達到永續發展並創造循環經濟之最大效益。

【關鍵詞】研磨廢水回收、矽污泥、循環經濟

---

*矽品精密工業股份有限公司　資深工程師

**矽品精密工業股份有限公司　工程師

***矽品精密工業股份有限公司　技術經理

****矽品精密工業股份有限公司　部經理

一、前　言

近年在集團及政府的政策方向下，對水資源與環境上具有明確之目標與重視，矽品(SPIL)也長期致力於 UF&RO 回收技術，2018 年起為精進並提升回收水量及減少廢水排放，開始執行廢水回收提升等相關研究與尋求最佳之解決方案，本研磨廢水回收專案目標為(1)不添加藥劑、不影響水質前提下進行回收；(2)加入循環經濟概念；則經由進行蒐集多種技術、比較與測試，最終選定物理性過濾結合預敷技術，使本專案符合目標並達成實質效益。

二、減薄研磨廢水回收技術說明

1.封裝研磨廢水特性

研磨(LP)廢水為晶圓於封裝前之拋光減薄程序，主要以超純水進行研磨，其水質非常良好具有回收價值，導電度<10μs/cm、TOC<3ppm、pH=6.5-7.5，如下表 1，但含有高濃度之奈米級矽顆粒，總固體物濃度變化於 800-1,300 mg/L、濁度>9,000 NTU，粒徑以 400-600 nm 為主要分佈粒徑，如圖 1。

表 1　水質表

指標項目	原水水質	產水水質	單位
導電度 (Conductivity)	0.5~10	同左	μs/cm
總有機碳 (TOC)	ND<3.0	同左	mg/L
總固體物 (TS)	>800	<5	mg/L
濁度 (Turbidity)	>9,000	<20	NTU
pH 值 (pH)	6.5-7.5	同左	-

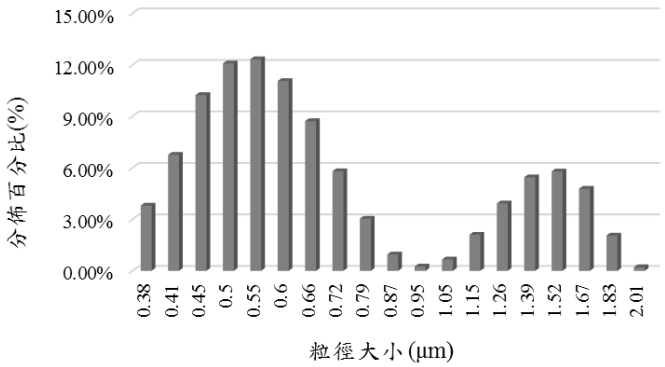


圖 1　研磨廢水粒徑分析圖

2.研磨廢水前處理原理及流程

(1)原理說明

技術原理為物理性之截流過濾方式，利用板框式脫水機選用適合之濾布作為支撐層，藉由助濾劑預敷於濾布表層約數厘米(mm)即可。助濾劑為接近 85%中空構造的矽藻土，使其經由研磨廢水形成之泥餅(filter cake)可改善多孔性助濾劑的過濾效果，初期為大孔徑之顆粒物楔入助濾劑之孔洞上，隨後顆粒將進行循環堆疊成泥餅，參圖 2，於孔隙間形成排水通道，藉此將奈米級矽顆粒逐層截流與水分離。

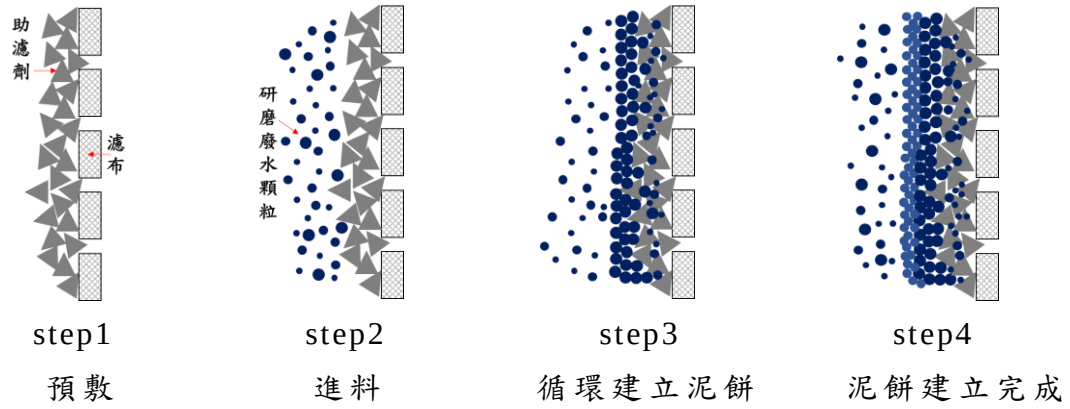


圖 2　理想條件下預敷建立泥餅過程

(2)流程說明

SPIL 原將 LP 廢水以化學混凝方式處理後排放，僅少部分 LP 廢水以 Dosing 方式與切割(die saw, DS)廢水混合，再以 UF+RO 系統回收，回收率約 60%。

本技術為保持良好水質，以不添加藥劑進行物理性方式回收 LP 廢水，為一種前處理方案，再依不同需求選別至次級使用或由 UF+RO 回用至製程純水前端，且 UF+RO 回收率亦可提高至 70-80%，如下圖 3 所示。

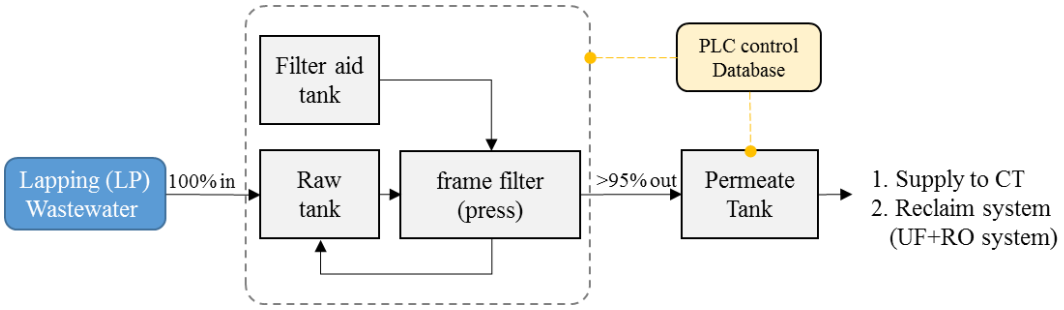


圖 3　研磨廢水前處理回收流程

研磨廢水回收技術以批次方式處理，每次達設定壓力及流量條件下，進行開板卸泥，每批次可獲得二氧化矽為主之污泥(含部份純矽)，含水率約在 40-50%，具有高經濟價值之污泥，可做為再利用之原料。

3.研磨廢水回收成效

應用本技術使高濁度廢水之濁度降低至 0-20 NTU 並保持原良好水質、參圖 4，故對於 SPIL 回收水量有顯著的成長，目前以 SPIL 中科廠為例可提升全公司製程回收率約 4.5%，同時也減少自來水取水量 34.6 萬噸/年；未來其他廠區導入約可再減少 59 萬噸/年之用水量，在水資源取用合計共 減少約 90 萬噸/年以上，並初步預估可減少 500 噸/年之廢棄矽污泥。

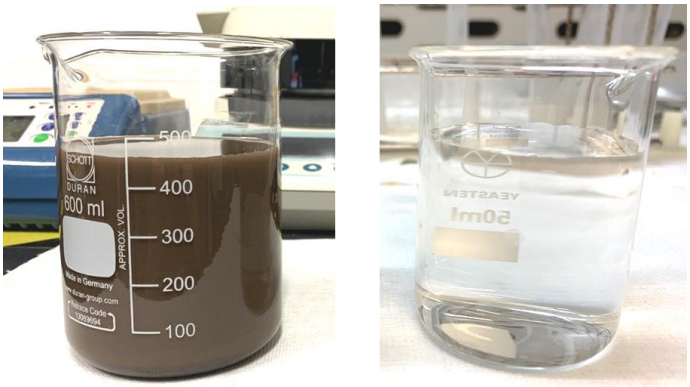


圖 4　LP 原水(左)、LP 前處理產水(右)

三、矽污泥之循環經濟模式

SPIL 研磨廢水經固液分離產生回收水及矽污泥，其中污泥經檢測發現主要為 SiO_2 (XRD-定性分析，如下圖 5)，考量其經濟價值，並與相關技術再利用廠確認再利用之可行性，分析後確認可應用於工業級 SiO_2 或綠建材等用途，則將原本需廢棄掩埋之污泥，可由再利用技術轉化為原料或產品回至市場使用，如圖 6。廢水技術與循環經濟結合，業界雖已有許多案例，但在半導體封裝研磨之矽污泥，為一種新的再利用物質或種類，相信未來於法規之適法、適用性的加快下，方能使循環經濟更加完整。

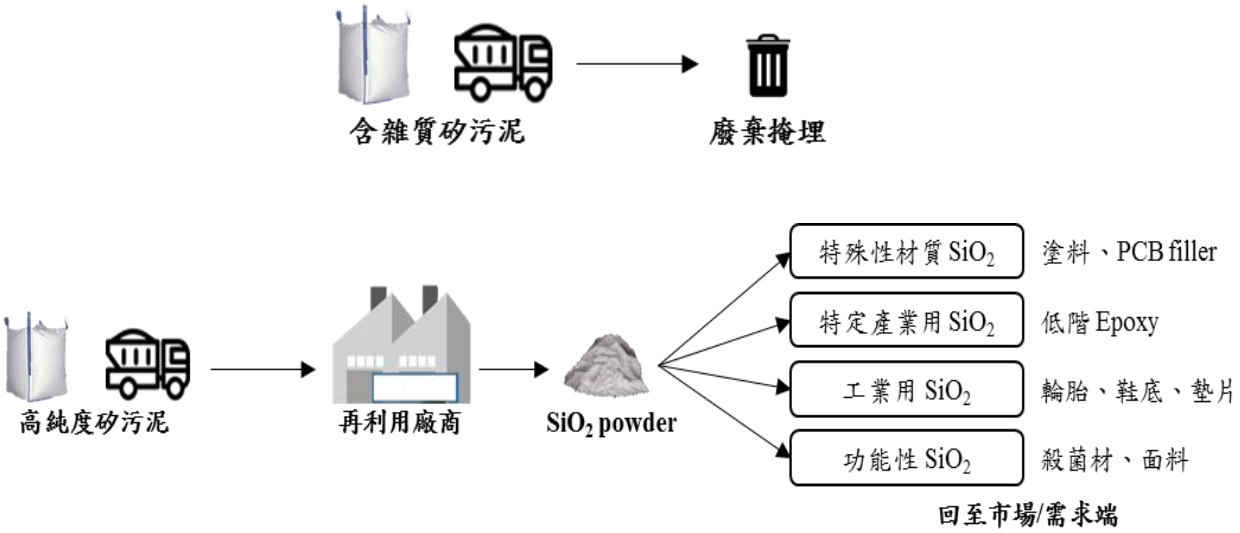


圖 6　原清運途徑(上)、再利用途徑(下)

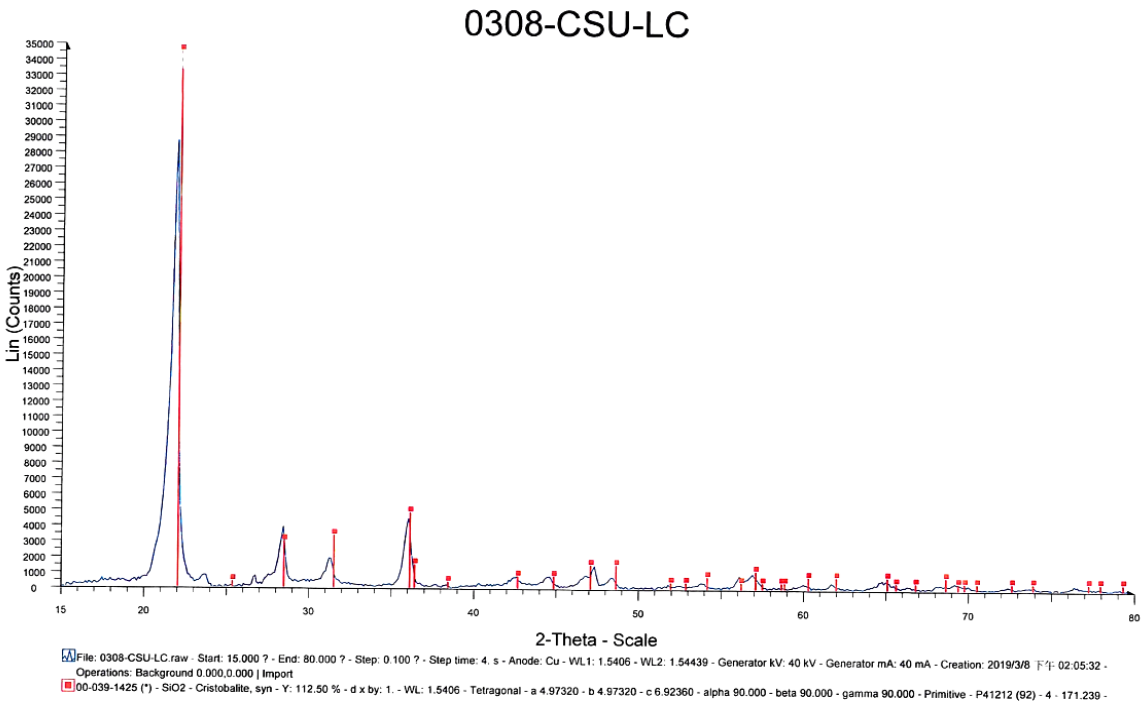


圖 5　XRD 定性分析(SiO_2)

四、結　論

前述原理與流程應用之技術，使原不易處理的研磨廢水有效的回收使用，也同時產生具有附加價值的 SiO_2 污泥，使得廢水處理程序簡化且具有效益。

本技術應用於 UF+RO 回收系統前端做為前處理，降低 UF+RO 回收系統之負荷並減少反洗水量與加藥量，有效提升回收系統效率，另外經由選別方式監控水質及有效調配水量，使 SPIL 具有一股穩定的供水來源，亦可減少缺水之衝擊，並衍伸出的循環經濟的效益，於企業與環境是一種雙贏的做法。

五、參考文獻

1.Pauline M. Doran，Bioprocess Engineering Principles (Second Edition)，Pages 445-595，2013。

2.Peter F.Stanbury、Allan Whitaker、Stephen J.Hall，Principles of Fermentation Technology (Third Edition)，Pages 619-686，2017。

3.Metcalf、Eddy，Wastewater Engineering (Fifth Edition)，Pages 1117-1215，2014。

4.Richard L.，Filter Media Aid the Removal of Heavy Metals from Wastewater，Volume 37、Issue 9、Pages 28-30，2000。

5.Ying Qi、Khagendra B. Thapa、Andrew F.A. Hoadley，Benefit of lignite as a filter aid for dewatering of digested sewage demonstrated in pilot scale trials，Volume 166、Issue 2、Pages 504-510，2011。

6.經濟部，永續產業發展期刊，Volume 78，2017。

7.光宇材料，半導體特定廢棄物處理方案，2018。

借鏡電力需量反應，建立短期空污調節誘因機制

鄭柏彥*、李宜螢**、蘇漢邦***

摘　要

空氣污染主要來自工業生產和交通工具的廢氣排放，隨著工業發達和全球城市化，污染也越來越嚴重，因此空氣污染逐漸成為重要的議題，也越來越受到關注，我國由 1975 年制定空氣污染防治法，持續關注空氣污染問題。

由於空氣品質監測為防制空氣污染工作的重要依據，因此，環境保護署建立各式監測站，其中一般空氣品質監測站共 60 站，於各縣市至少設置 1~2 站。透過空氣品質監測站即時監測空氣品質，並發布空氣品質指標，其包含內容有 O_3、$PM_{2.5}$、PM_{10}、CO、SO_2、NO_2 等 6 個測項，各測項依公式計算後，得出即時副指標值，再取出其中最大值為空氣品質指標。

根據中華民國空氣品質監測報告 107 年年報，近 5 年空氣品質指標超過 100 以上(空氣污染超過標準)情況逐年下降，顯示近五年空氣品質改善；然而，我國空氣品質呈現季節性變化，隨著風向由西南風轉為東北風，高壓出海或籠罩等不利因素，導致我國空氣品質不佳，尤其是中南部地區，超過標準站日數比率將近 50%，顯示雲嘉南、高屏冬季之空氣品質仍有改善空間。

目前空氣品質監測網已針對未來 3 天各空品區之空氣品質進行預報，並透過環境物聯網及空氣網即時監測細部區域空氣品質，若能結合空污監測以及空氣品質預測，建立適當的誘因機制，將可進一步調節短期空氣污染的高峰，降低空氣污染「紅爆」天數，確保國人健康。

相似於短期調節空氣污染的高峰，我國電力使用亦有尖峰抑低的需求，目前台電已有完整電量反應機制，借鏡台電作法，例如：台電可在抑低用電 15 分-2 小時前通知廠商，並給予獎勵。然短期調節空污誘因機制仍需考量適用對象、啟動條件、獎勵方式等元素。獎勵方式可考量空污費減免；並可考量於雲嘉南、高屏區域試行，運作較為成熟後，亦可進一步參考台電作法，採競價方式降低空污，降低獎勵廠商的成本。

【關鍵詞】空氣污染、空氣品質預測、需量反應、短期空污調節誘因機制

*財團法人台灣綜合研究院　副研究員

**財團法人台灣綜合研究院　組長

***財團法人台灣綜合研究院　所長

一、前　言

空氣污染主要來自工業生產和交通工具的廢氣排放，隨著工業發達和全球城市化，污染也越來越嚴重，因此空氣污染逐漸成為重要的議題，也越來越受到關注，主因是因為空氣污染會引發肺部和呼吸道疾病，與心臟疾病和癌症都有密切的關係[1]，世界衛生組織指出，2012 年全世界共有 7 百萬人因為空氣污染而死亡。

歷史上有許多件重大空氣污染事件，例如：(1)1940 年洛杉磯光化學煙霧事件，主要是因為汽車尾氣與工業廢氣中的污染物，伴隨強烈紫外線等情況，發生光化學反應，以致城市上空瀰漫黃棕色煙霧；(2)1952 年倫敦煙霧事件，該年冬季高氣壓覆蓋英國，大量二氧化硫等空污物質無法擴散，支氣管肺炎、心臟病患者湧入醫院，總計大煙霧期間死亡人數達 4,000 餘人。2013 年中國大陸霾害事件，中國大陸受大陸冷高氣壓籠罩，大量空氣污染物形成大範圍的霧霾；大氣中的二氧化硫、氮氧化物經過化學反應，轉化為硫酸鹽、硝酸鹽等細懸浮微粒等有害物質，累積形成大範圍的霧霾污染，影響戶外活動並且危害人體健康。

因此，各國紛紛制定法規，例如：美國國會於 1963 年頒布第一部「清潔空氣法」，英國則於 1956 年制定清潔空氣法響應 1952 年倫敦煙霧事件的法案，以引入空氣污染防治措施，而我國則於 1975 年訂定「空氣污染防治法」，顯示我國於工業化初期即注意到空氣污染問題，於 2003 年 07 月 23 日修訂「空氣污染防制法施行細則」，其中第 2 條規定空氣污染物有以下數種，包含：(1)氣狀污染物，如 SOx、NOx、CO、揮發性有機物(VOCs)；(2)粒狀污染物，如：懸浮微粒(PM_{10})；(3)衍生性污染物，如前述的光化學霧；4.毒性污染物。

另外，根據 2017 年 5 月環境保護署空氣品質保護及噪音管制處之「臺灣空氣品質現況與防制策略」簡報[2]，說明我國細懸浮微粒($PM_{2.5}$)來源比率，其中境外傳輸來源比率約為 34-40%，境內污染源比率約為 60~66%；境內污染源中，移動源影響比率約為 30-37%、工業源約為 27-31%、其他污染源約為 32~43%。因此，若可有效控制工業源，可降低空氣污染程度。

由於目前國人持續關注我國空氣污染，且其事關國人健康，因此，本文簡介我國空氣品質監測方法、相關技術發展，短期內可抑低空氣污染的方法。

二、空氣品質監測方法[3]

由於空氣品質監測為推動空氣品質保護及防制空氣污染工作的重要依據，欲有效掌握空氣品質，有賴長期運轉維護監測系統，以獲得高品質的、完整的、代表性的、可靠的監測數據。

因此，環境保護署建立各式監測站，依不同監測目的，分為一般空氣品質監測站、交通空氣品質監測站、工業空氣品質監測站、國家公園空氣品質監測站、背景空氣品質監測站及其他監測站等 6 種類型，共 77 個空氣品質監測站。

其中最常見為一般空氣品質監測站共 60 站，於各縣市至少設置 1-2 站。測站主要分布於人口密集區及可能發生較高污染濃度之地點，以評估人體曝露情形及對健康影響程度。為代表大區域範圍空氣品質，設置時須避開局部污染源，如汽機車排放廢氣等，採樣口設置以距地面 3-15 公尺為原則。透過空氣品質監測站即時監測空氣品質，並發布空氣品質指標(Air Quality Index, AQI)，其包含內容有 O_3、$PM_{2.5}$、PM_{10}、CO、SO_2、NO_2 等 6 個測項，各測項即時濃度依下列公式計算後，再對應下表得出 6 個測項之即時副指標值，再取出其中最大值為即時空氣品質指標，該最大值測項即為指標污染物，公式說明如下：

O_3,8hr：取最近連續 8 小時移動平均值 (例如今日上午 10 點發布的 O_3 的 8 小時濃度平均值，是取今日上午 2 點至上午 9 點監測數據的平均值。)

O_3：取即時濃度值

$PM_{2.5}$：0.5×前 12 小時平均+0.5×前 4 小時平均

PM_{10}：0.5×前 12 小時平均+0.5×前 4 小時平均

CO：取最近連續 8 小時移動平均值

SO_2：取即時濃度值

SO_2,24hr：取最近連續 24 小時濃度平均值

NO_2：取即時濃度值

計算出 AQI 後，再以不同狀態色塊呈現，並註記對不同族群之影響，如下表 2，若 AQI>100 即超過標準，一般媒體所謂「紅爆」即是指 AQI 介於 151~200，對所有族群不健康的狀況，而「紫爆」即是指 AQI 介於 201~300，空氣品質非常不健康的狀態。

表 1　污染物濃度與污染副指標值對照表

污染物	$O_{3,8hr}$	O_3[1]	$PM_{2.5}$	PM_{10}	CO	SO_2	NO_2
即時統計	最近連續8小時移動平均值	即時濃度值	0.5 ×前12小時平均 + 0.5 × 前4小時平均	0.5 ×前12小時平均 + 0.5 × 前4小時平均	最近連續8小時移動平均值	即時濃度值	即時濃度值
單位	ppm	ppm	μg/m³	μg/m³	ppm	ppb	ppb
AQI值							
0～50	0.000 - 0.054	-	0.0 - 15.4	0 - 54	0 - 4.4	0 - 35	0 - 53
51～100	0.055 - 0.070	-	15.5 - 35.4	55 - 125	4.5 - 9.4	36 - 75	54 - 100
101～150	0.071 - 0.085	0.125 - 0.164	35.5 - 54.4	126 - 254	9.5 - 12.4	76 - 185	101 - 360
151～200	0.086 - 0.105	0.165 - 0.204	54.5 - 150.4	255 - 354	12.5 - 15.4	186 - 304[3]	361 - 649
201～300	0.106 - 0.200	0.205 - 0.404	150.5 - 250.4	355 - 424	15.5 - 30.4	305 - 604[3]	650 - 1249
301～400	[2]	0.405 - 0.504	250.5 - 350.4	425 - 504	30.5 - 40.4	605 - 804[3]	1250 - 1649
401～500	[2]	0.505 - 0.604	350.5 - 500.4	505 - 604	40.5 - 50.4	805 -1004[3]	1650 - 2049

註：1.一般以 $O_{3,8hr}$ 值計算各地區之 AQI。但部分地區以 O_3 即時值計算 AQI 更具有預警性，故兩者皆計算之，取較大值作為 AQI。

2. AQI 301 以上之指標值，是以 O_3 即時值計算之，不以 $O_{3,8hr}$ 值計算。

3. AQI 200 以上之指標值，是以 $SO_{2,24hr}$ 值計算之，不以 SO_2 即時值計算之。

表 2　AQI 狀態色塊

對健康影響	良好	普通	對敏感族群不健康	對所有族群不健康	非常不健康	危害
空氣品質指標(AQI)	0~50	51~100	101~150	151~200	201~300	301~500
狀態色塊	●	■	▲	⬢	◆	✸

三、近年空氣品質狀況[4]

根據中華民國空氣品質監測報告 107 年年報，107 年度 AQI 平均值為 65(標準差 33)，各等級占比為，良好等級(AQI≦50)占 42.92%；普通等級(51≦AQI≦100)占 41.88%；對敏感族群不健康等級(101≦AQI≦150)占 12.94%；對所有族群不健康等級(151≦AQI≦200)占 2.24%；非常不健康以上等級(201≦AQI≦500)占 0.04%。近 5 年空氣品質指標超過 100 以上情況為逐年下降，且 107 年較 103 年降幅 10.46%，詳如下表 3。

表 3　歷年空氣品質指標各等級比率表

比率(%) / 年度	0-50	51-100	101-150	151-200	201-300	301-500
103	30.33	43.99	18.68	6.86	0.14	0.00
104	39.29	40.10	16.04	4.51	0.06	0.00
105	42.10	39.45	14.33	3.96	0.16	0.00
106	39.34	42.91	15.02	2.69	0.04	0.00
107	42.92	41.88	12.94	2.24	0.04	0.00

備註：因細懸浮微粒自動監測站於 103 年起以鄰近手動監測站線性迴歸式進行校正，故空氣品質指標歷年結果從 103 年起統計。

若觀察 107 年度測站整體空氣品質不良情形，由表 4 顯示 AQI>100(AQI 達橘色提醒)占 15.23%；AQI>150(AQI 達紅色警示)占 2.28%。若區分為各空品區 AQI>100 及 AQI>150 指標污染物站日數比率表，如下表 5、6；高屏空品區於 107 年度 AQI>150 之站日數比率約為 3%，中部與雲嘉南空品區約為 2%，在 AQI>100 的方面，高屏空品區與雲嘉南地區約為 15%，而中部則在 10%。

表 4　107 年度測站 AQI>100 及 AQI>150 指標污染物站日數比率表

AQI	總有效監測站日數	107 年度 AQI>100 及 AQI>150 指標污染物站日數及比率													
		CO		O_3		O_3,8hr		NO_2		SO_2		PM_{10}		$PM_{2.5}$	
		站日數	百分比	站日數	百分比	站日數	百分比	站日數	百分比	站日數	百分比	站日數	百分比	站日數	百分比
>100	**28074**	**0**	**0.00**	**0**	**0.00**	**1870**	**6.66**	**0**	**0.00**	**3**	**0.01**	**44**	**0.16**	**2353**	**8.40**
>150	**28074**	**0**	**0.00**	**0**	**0.00**	**359**	**1.28**	**0**	**0.00**	**0**	**0.00**	**2**	**0.01**	**277**	**0.99**

備註：各指標污染物 AQI>100 及 AQI>150 站日數統計以最大指標污染物為主。

表 5　107 年度空品區 AQI>100 指標污染物站日數比率表

空品區	總有效監測站日數	107 年度 AQI>100 指標污染物站日數及比率													
		CO		O_3		O_3,8hr		NO_2		SO_2		PM_{10}		$PM_{2.5}$	
		站日數	百分比	站日數	百分比	站日數	百分比	站日數	百分比	站日數	百分比	站日數	百分比	站日數	百分比
北部	6932	0	0.00	0	0.00	320	4.62	0	0.00	0	0.00	8	0.12	136	1.96
竹苗	1823	0	0.00	0	0.00	79	4.33	0	0.00	0	0.00	0	0.00	114	6.25
中部	3282	0	0.00	0	0.00	275	8.38	0	0.00	0	0.00	0	0.00	329	10.02
雲嘉南	3281	0	0.00	0	0.00	294	8.96	0	0.00	0	0.00	10	0.30	525	16.00
高屏	4012	0	0.00	0	0.00	616	15.35	0	0.00	2	0.05	2	0.05	573	14.28
宜蘭	730	0	0.00	0	0.00	12	1.64	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00
花東	730	0	0.00	0	0.00	6	0.82	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00

備註：各指標污染物 AQI>100 站日數統計以最大指標污染物為主。

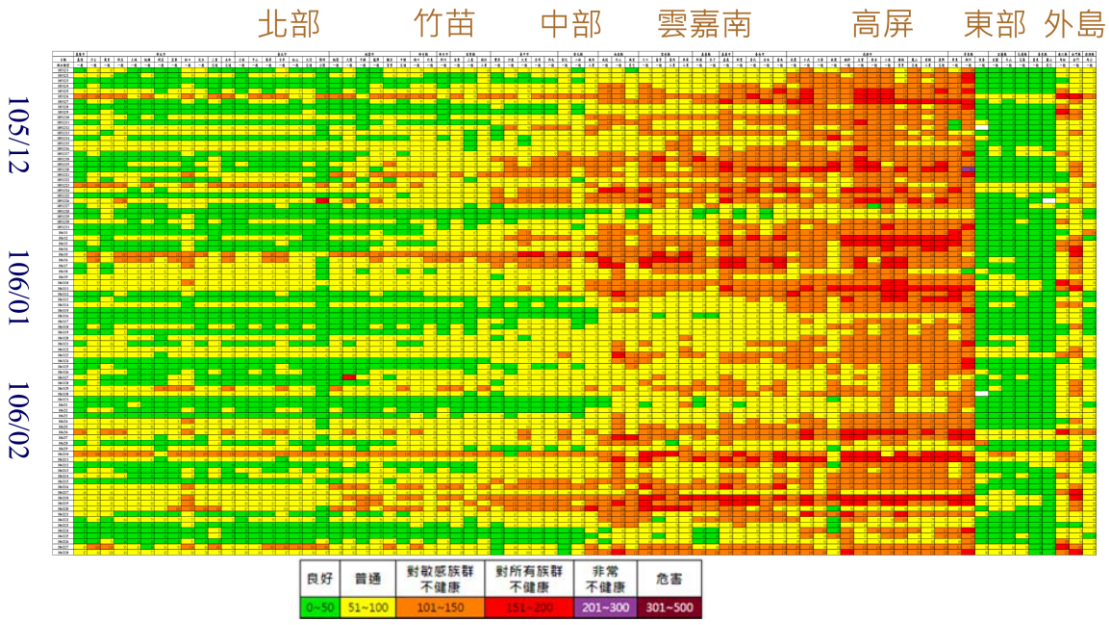
表 6　107 年度空品區 AQI>150 指標污染物站日數比率表

空品區	總有效監測站日數	107 年度 AQI>150 指標污染物站日數及比率													
		CO		O_3		O_3,8hr		NO_2		SO_2		PM_{10}		$PM_{2.5}$	
		站日數	百分比	站日數	百分比	站日數	百分比	站日數	百分比	站日數	百分比	站日數	百分比	站日數	百分比
北部	6932	0	0.00	0	0.00	37	0.53	0	0.00	0	0.00	0	0.00	14	0.20
竹苗	1823	0	0.00	0	0.00	14	0.77	0	0.00	0	0.00	0	0.00	3	0.16
中部	3282	0	0.00	0	0.00	59	1.80	0	0.00	0	0.00	0	0.00	23	0.70
雲嘉南	3281	0	0.00	0	0.00	64	1.95	0	0.00	0	0.00	0	0.00	69	2.10
高屏	4012	0	0.00	0	0.00	123	3.07	0	0.00	0	0.00	0	0.00	90	2.24
宜蘭	730	0	0.00	0	0.00	2	0.27	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00
花東	730	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00

備註：各指標污染物 AQI>150 站日數統計以最大指標污染物為主。

另根據「臺灣空氣品質現況與防制策略」簡報[5]，我國空氣品質呈現顯著的季節性變化，每年 10 月至隔年 3 月各空品區監測站之 AQI 如下圖 7，隨著季節風向由西南風轉為東北風，高壓出海或籠罩等氣象不利因素，導致我國空氣品質不佳，尤其是中南部地區，超過標準(AQI 達橘色提醒及紅色警示)站日數比率將近 50%。

圖 7　我國冬季 AQI 逐日變化



四、空氣品質預報及相關技術發展

目前環保署建置之空氣品質監測網已針對未來 3 天各空品區之空氣品質進行預報[6]，如下表 8。並可透過環境物聯網[7]及空氣網[8]即時監測細部

區域空氣品質，甚至可監測單一排放源之空氣污染物排放情形，因此可結合空污數據、地理資訊、時間資訊、風向數據、風速數據等等進行視覺化數據還原，用視覺回推當時空污飄散狀況，再結合時間軸調整功能，可動態切換檢視特定時間區段，模擬當時空氣污染熱區和排放潛勢。

若可結合監測空氣污染的方法，以及空氣品質預測，透過適當的機制，可能短期抑低空氣污染的高峰，降低空氣污染「紅爆」天數，進一步確保國人健康。

表 8 空氣品質未來 3 天預測

日期	05/30		05/31			06/01
空品區	AQI 指標	指標污染物	AQI 指標	指標污染物	AQI 指標	指標污染物
北部	90	臭氧八小時(90)	115	臭氧八小時(115)	80	細懸浮微粒(80)
竹苗	80	臭氧八小時(80)	100	臭氧八小時(100)	75	細懸浮微粒(75)
中部	100	細懸浮微粒(100)	80	細懸浮微粒(80)	55	細懸浮微粒(55)
雲嘉南	100	細懸浮微粒(100)	90	細懸浮微粒(90)	55	細懸浮微粒(55)
高屏	80	細懸浮微粒(80)	60	細懸浮微粒(60)	50	
宜蘭	50		50		50	
花東	45		40		40	
馬祖	70	臭氧八小時(70)				
金門	65	臭氧八小時(65)				
澎湖	55	臭氧八小時(55)				

分類	良好	普通	對敏感族群不健康	對所有族群不健康	非常不健康	危害
指標等級	0～50	51～100	101～150	151～200	201～300	301～500

備註:AQI預報為該預報日有效時間內(0至24時)，出現之可能最大即時AQI值及當時之指標污染物。但污染物濃度可能受其日夜變化影響，即時之指標污染物將有所變化。

圖 1 環境物聯網畫面

五、參考作法

相似於短期抑低空氣污染的高峰，電力需求亦有尖峰抑低的需求，且目前台電已有完整的機制，因此可借鏡台電作法。

台電公司透過各種誘因，鼓勵用戶調整用電習慣，將尖峰時間用電移轉至離峰時間使用，將電力需求尖峰抑低，稱為「需量反應」，根據台電公司於 2018 年 7 月 10 日公布之「需量反應負載管理措施」文件，需量反應的機制共可分為下述 4 類型，如表 9。其中臨時性減少用電措施中的「緊急通知型」，在抑低用電 15 分前、30 分前、1 小時前及 2 小時前通知廠商，並以流動電價扣減 10 元/度，且若未達最低抑低契約容量須加計電費，按適用流動電費扣減標準之 50%計算。

短期抑低空氣污染的高峰之機制可參考台電上述方案，但仍需詳細考量適用對象、啟動條件、通知方式、空污抑低程度、獎勵及懲罰方式，其中獎勵方式可考量空污費減免；機制設計完整後可考量於冬季空污較嚴重之雲嘉南或是高屏等區域試行，運作較為成熟後，亦可考量參採台電「需量競價措施」，採競價方式降低空污，並可降低獎勵廠商的成本。

表 9　台電需要反應措施

類別	計畫性減少用電措施			臨時性減少用電措施		需量競價措施			空調暫停用電措施
方案名稱	月減 8 日型	日減 6 時型	日減 2 時型	限電回饋型	緊急通知型	經濟型	可靠型	聯合型	
適用對象	≧100 瓩 高壓以上用戶		≧100 瓩高壓以上、學校用戶	≧1000 瓩 生產性質用戶	≧500 瓩 高壓以上用戶	≧100 瓩 高壓以上用戶		≧100 瓩高壓以上用戶得聯合申請，每一群組戶數至多以 10 戶為限	中央空調≧20 馬力箱型空調≧10 噸 (非生產性質用戶)
啟動條件	經常性執行			依系統需要		依系統需要及競價結果			經常性執行
通知方式	事先約定			限制用電前一日下午 4 時前	抑低用電 15 分前、30 分前、1 小時前及 2 小時前	抑低用電前一日下午 6 時前或抑低用電前 2 小時	抑低用電前一日下午 6 時前	抑低用電前一日下午 6 時前或抑低用電前 2 小時	事先約定
抑低用電期間	6 月至 9 月 (得單月選用) 平日自選 8 天/月 10-17 時(7 小時)	6 月至 9 月 (得單月選用) 平日 10-12、13-17 時 (6 小時)	6 月至 9 月 (得單月選用) 平日 13-15 時 (2 小時)	全年 (得單月選用) 任何時段 配合工業限電	全年任何時段 夏月最低 1 次/月 非夏月 2 次/8 個月 每次(日)2 或 4 小時， 每月不超過 36 小時	全年任何時段(得單月選用) 每次(日)2 或 4 小時，每月不超過 36 小時		5 月至 12 月任何時段 (得單月選用) 每次(日)2 或 4 小時， 每月不超過 36 小時	6 月至 8 月平日 中央空調：10~18 時 箱型空調：12~16 時 (週期性啟停)
最低抑低契約容量	經常契約容量之 25%			經常契約容量之 15%	經常契約容量 5000 瓩以下部分之 20%，5001 瓩以上部分之 10%	經常契約容量 50 瓩		經常契約容量 100 瓩	無，但有上限(經常契約容量之 60%)
基準用電容量(CBL)	每一約定日之前 5 日上午 10 時至下午 5 時用電需量之平均值，與經常契約容量取小值	抑低用電月份前 10 日上午 10 時至 12 時、下午 1 時至 5 時用電需量之平均值，加計負載調整因子後，與經常契約容量取小值 負載調整因子=抑低用電月份星期一至星期五上午 8 時至 10 時用電需量之平均值，扣除抑低用電月份前 10 日同時段用電需量平均值	星期一至星期五上午 10 時至 12 時及下午 3 時至 5 時用電需量之平均值，與經常契約容量取小值	工業限電通知執行日前 5 日每日相同抑低用電時段之最高需量之平均值	通知前之 2 小時之最高需量	執行抑低用電日前 5 日每日相同抑低用電時段之最高需量之平均值		各別用戶執行抑低用電日前 5 日每日相同抑低用電時段之最高需量之平均值	不量測
實際抑低容量	基準用電容量扣除抑低用電期間用電需量平均值之差額			基準用電容量扣除抑低用電時段最高需量之差額				各別用戶基準用電容量扣除其抑低用電時段最高需量之差額，再加總計算	不量測
基本電費扣減	依執行率、達成次數給予不同扣減，執行月份每月最高扣減 30%	依執行率給予不同扣減，執行月份每月最高扣減 100%	依執行率給予不同扣減，執行月份每月最高扣減 50%	1.給予執行當月基本電費扣減，每次最高扣減 40% 2.抑低期間基本電費按實際用電最高需量計算	1.依執行率、達成次數及通知方式給予不同扣減，執行月份每班最高扣減 96 元 2.未執行月份每班最高 48 元(未配合次數超過 3 次者則無)	無	1.依執行達成次數不同給予扣減，執行月份每班最高扣減 72 元 2.未執行月份不給予電費扣減	無	中央空調：執行月份扣減 30% 箱型空調：執行月份扣減 20%
流動電費扣減	無				每度 10 元	依得標價計算，每度報價不超過 10 元，依執行率及通知方式調整後，每度最高扣減 12 元	依得標價計算，每度不超過 10 元	依得標價計算，每度報價不超過 10 元，依執行率及通知方式調整後，每度最高扣減 12 元	無
加計電費	無				未達最低抑低契約容量須加計電費，按適用流動電費扣減標準之 50%計算	無	未達抑低契約容量須加計電費，按得標價之 50%計算	無	無

六、結　論

本文簡介空氣污染概念發展，目前我國空氣污染監測透過 60 個一般空氣品質監測站進行，近年來我國空氣污染已有改善，然後局部區域，如：雲嘉南及高屏區域於冬季空氣污染較嚴重，且由於我國空氣污染預報以及即時監測技術已然成熟，因此，建議可參考台電「需量反應負載管理措施」，建立空氣污染短期抑低措施，詳加考量機制的各元素後，於雲嘉南或高屏地區試行。

七、參考文獻

1. 科學發展，https://ejournal.stpi.narl.org.tw/sd/download?source=10401-12.pdf&vlId=F267F8EB-842F-4229-9031-8D2147337B1C&nd=1&ds=1
2. http://cfss.sinica.edu.tw/downloadFile_m.php?file=00002a.pdf&_download.
3. 本節主要參考空氣品質監測網 https://taqm.epa.gov.tw/taqm/tw/default.aspx。
4. 本節主要參考 https://www.epa.gov.tw/DisplayFile.aspx?FileID=9FDF33456FA 1DB1F。
5. http://cfss.sinica.edu.tw/downloadFile_m.php?file=00002a.pdf&_download.
6. https://taqm.epa.gov.tw/taqm/tw/AqiForecast.aspx，2019 年 5 月 30 日擷取。
7. https://iot.epa.gov.tw/iot/.
8. https://wot.epa.gov.tw/.

評估我國製造業中分類行業於氣候變遷下的潛在風險

蔡易廷*、王登楷**

摘　要

受全球氣候變遷影響，台灣溫度、降雨量已呈現漸進卻明顯的變化，近年來極端氣候所釀成的災害(如水災、乾旱、熱浪等)頻仍發生，已直接或間接影響到產業，造成其設備損毀、資產損失、原物料供應短缺及交通中斷等而影響正常營運。為瞭解極端氣候對製造業造成的影響程度，本研究以實質生產毛額較高之前十中分類行業為對象，並依照 IPCC AR5 氣候變遷風險分析方法，以危害度、脆弱度及暴露度進行製造部門之中分類行業氣候風險分析。

本研究考量降雨與溫度之氣候因子，並將產業分布之地理差異，作為區位差異之重要衡量基準，透過評估準則方式將其風險數值化。經分析結果發現，「化學原材料、肥料、氮化合物、塑橡膠原料及人造纖維製造業」、「基本金屬工業」及「金屬製品製造業」等係屬面臨氣候變遷時之未來潛在風險較高之中分類行業。主要原因為行業對於水資源與電力的依賴程度相較於其他行業高，及行業分布集中於南部地區，亦屬未來在面臨淹水與缺水之氣候情境下之高風險地區。

【關鍵詞】製造業、氣候變遷、風險評估

---

*財團法人台灣綠色生產力基金會　專案經理

**財團法人台灣綠色生產力基金會　經理

一、前　言

受全球氣候變遷影響，台灣外氣溫度、降雨量已呈現漸進卻明顯的變化，近年來極端氣候所釀成的災害(如水災、乾旱、熱浪等)頻仍發生(如 2017 年台灣熱帶低壓帶來的豪雨，造成大武崙工業區淹水)，已直接或間接影響到產業，造成其設備損毀、資產損失、原物料供應短缺及交通中斷等而影響正常營運。然產業為穩定營運，對於廠址與環境之安全性設計標準都較高，且為符合現行政府法規與政策目標，多數產業在因應氣候變遷相關議題時，較著重於減少溫室氣體的排放。然而，氣候變化已愈趨明顯，增加降雨與溫度的發生頻率與幅度，所產生的淹水、乾旱或高溫等氣候災害，已對許多國家(包括企業)造成影響。事實上，2018 年美國受颶風影響經濟損失達 170 億美元[1]；2013 年和 2014 年英國洪水災害影響約 21%的工業，造成其 270-365 萬美元的損失[2]；2011 年泰國發生多次強烈颱風，經濟損失 457 億美元[3]，有 7 個主要經濟區受到影響。故氣候災害的影響不是單一企業問題，而是一個區域性問題，而一般的中小型企業通常沒有投資研究的財務預算，是需要依賴政府的基礎建設來減輕其衝擊，以穩定其營運。目前我國政府正積極推動製造部門氣候變遷調適，並提供產業氣候變遷風險評估工具，這使得企業可透過該工具初步釐清自身的風險，透過由上而下的方式提高製造部門應進行氣候變遷調適之意識。但不同的行業及其所在區域，對於受到氣候災害影響的程度有其差異。

然目前氣候變遷相關因應或調適係屬於私有財維護的領域，產業受氣候影響或相關調適成果難以量化，且在推動氣候變遷調適前須先瞭解其受氣候變遷衝擊程度。因此，本研究目的是建立一個綜合性分析方法來釐清哪些製造部門之行業受未來氣候災害的影響較為明顯。

二、研究方法

1.氣候風險評估

氣候風險評估是透過評估未來產業暴露在氣候變化下的敏感度與可能的損失。IPCC(2007)將氣候變化因素定義為氣候干擾(嚴寒、洪水、乾旱、颱風等)對系統的影響程度及透過環境和社會制度的調適能力以因應氣候變遷的影響。本研究依據此概念及參照 IPCC 於 2012 年發布的 SREX

及 IPCC Fifth Assessment Report(IPCC AR5)，將風險定義為危害度、脆弱度、暴露度三項指標，以此進行我國製造業中分類行業於氣候變遷下的氣候風險評估，並透過訪談訂定相關評估準則，藉由將行業受氣候變遷影響之關鍵性議題轉化為準則，並進一步數值化，藉此有效進行各行業間之氣候風險差異比較。

2.評估資料

為瞭解極端氣候對製造業造成的影響程度，並考量製造業之行業分布於各縣市區域且廠家數量歧異度高，故為區別出廠家分布之地理區域受到氣候影響之差異，本研究係以各縣市行政轄區界定為區域評估範圍，以進一步探討其區域內之行業受氣候災害影響程度。

本研究以「乾旱(缺水)」與「淹水」等 2 種氣候災害類型探討對行業之影響，為瞭解未來上述氣候災害可能對各縣市中之行業造成的影響差異，係依據經濟部水利署所推估的 2021 年各縣市用水需求量及第三版淹水潛勢圖，作為未來降雨量變化對各縣市的影響依據；在溫度變化部分，根據國家災害防救科技中心在 IPCC RCP6.0 情境下顯示，台灣在未來 2021-2040 年平均年溫度改變量在平地區域皆將上升約 0.75 至 0.875 度(臺灣氣候變遷推估資訊與調適知識平台網站)，故在高溫氣候災害類型考量上，則假設各縣市平地區域皆一致。

3.評估對象

根據行政院主計總處「行業標準分類(第 10 次修訂)」，製造業有 27 項中分類行業，本研究以製造業中分類之實質生產毛額較高行業(電子零組件製造業、其他資訊電子工業、學原材料、肥料、氮化合物、塑橡膠原料及人造纖維製造業、金屬基本工業、金屬製品製造業、食品飲料及菸草業、機械設備製造業、運輸工具製造業、非金屬礦物製品製造業、其他工業製品製造工業)，作為評估對象。為瞭解上述 10 個中分類行業分布於各縣市情形，則依據經濟部統計處資料，經彙整後得知，10 個中分類行業主要分布縣市為新北市、花蓮縣、桃園市、臺南市、高雄市、臺中市、新竹地區、苗栗縣、彰化縣等 9 個縣市，各行業於各縣市比例分別為「運輸工具製造業(93.46%)」、「機械設備製造業業(93.9%)」、「其他工業製品製造工業(87.7%)」、「其他資訊電子工業(92.44%)」、非金屬礦物製品製造業(80.39%)」、「基本金屬工業(89.43%)」、「電子零組件製造業(96.22%)」、「金屬製品製造業(93.65%)」、「食品飲料及菸草業(72.77%)」、「化學材料製造業(81.32%)」(如表 1)。

表 1　製造業中分類行業分布於主要縣市之比例

行業於各縣市比例(%)	運輸工具製造業	機械設備製造業	其他工業製品製造工業	其它資訊電子工業	非金屬礦物製品製造業	基本金屬工業	電子零組件製造業	金屬製品製造業	食品飲料及菸草業	化學材料製造業
新北市	12.75	16.85	23.82	37.16	16.70	13.07	34.54	21.41	16.67	6.60
花蓮縣	0.02	0.16	0.10	-	8.39	-	-	0.09	0.95	0.38
桃園市	12.28	14.01	8.40	14.87	9.95	14.81	26.89	9.00	9.95	17.17
臺南市	17.48	8.05	17.44	8.38	6.47	15.52	5.85	9.59	10.71	10.94
高雄市	9.36	7.60	6.34	6.53	8.31	15.58	7.34	11.10	10.50	15.57
臺中市	20.94	34.54	17.90	13.44	10.40	16.72	6.12	23.64	10.53	13.11
新竹地區	2.68	3.55	2.51	6.67	5.77	3.52	12.03	2.10	2.82	4.62
苗栗縣	1.19	1.47	1.38	1.82	7.90	2.39	2.60	1.45	2.28	4.06
彰化縣	16.76	7.67	9.82	3.57	6.51	7.82	0.85	15.26	8.35	8.87
合計	**93.46**	**93.90**	**87.70**	**92.44**	**80.39**	**89.43**	**96.22**	**93.65**	**72.77**	**81.32**

4.產業氣候風險評估準則擇定與計算

從產業訪談結果發現，我國製造業在面臨極端氣候所帶來的風險，在於影響其生產所需的水電及原物料供應的穩定性。目前國內外針對製造業相關行業或工業區所進行的氣候風險評估準則訂定之文獻較少，但德國與韓國分別於 2013 與 2016 年提出氣候災害於工業區的脆弱度評估方法[4][6]，亦透過訂定評估準則的方式進行風險量化評估，包括危害度、脆弱度之敏感度(sensitivity)與調適能力(adaptation)。故依國內外文獻與產業訪談，訂定出產業氣候變遷風險評估準則項目(如表 2)，包括 2 項危害度準則、3 項脆弱度準則及 1 項暴露度準則。

表 2　製造業中分類行業氣候風險評估準則

類型	指標	準則	次準則
危害度	危害度	降雨	供水缺口比例
			淹水面積比例
脆弱度	敏感度	基礎建設	能源密集度
			水密集度
			進口品中間投入率
暴露度	暴露度	產值	產值

危害度準則係採用供水缺口比例與淹水面積比例，對於各行業而言，降雨的多與寡將影響到區域的可供水量或可能產生的積淹水情形，進而影響到行業的營運。另依據聯合國研究報告指出，企業認為原物料短缺、缺水及能源安全等問題對企業的營運影響最大，而本研究經產業訪談結果，亦顯示出原物料供給的穩定性、生產穩定性及能源使用的穩定性較受其在考量氣候變遷影響時之關注議題，故本研究於脆弱度準則中，選定以能源密集度、水密集度及進口品中間投入率為主要的評估準則。暴露度因指產業面臨氣候變遷時氣候災害對產業產生衝擊損失之程度，故本研究以產業產值作為評估準則。

評估準則確立後，考量各準則項所採用之資料統計單位不同，為使各項準則能夠進行綜合性分析及進行區域性間之結果比較，第一步係採用極值正規化(Min-Max Normalization)，進行數值標準化於 0 至 1，如公式(1)。式(1)中，Indexi 為標準化之準則數據，Xi 為某準則原始數據，Xmin 為某準則於所有評估對象中原始數據之最小值，Xmax 為某準則於所有評估對象中原始數據之最大值。

$$Index_i = \frac{x_i - x_{min}}{x_{max} - x_{min}} \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (1)$$

第二步則經各項準則完成標準化後，依照風險評估方法進行風險計算，其公式如式(2)。式(2)中，風險(Risk)為風險值，$\sum_{i=1}^{i} H_i$為危害度各項準則計算結果數據之加總，$\sum_{i=1}^{i} V_i$為脆弱度各項準則計算結果數據之加總，$\sum_{i=1}^{i} E_i$為暴露度各項準則計算結果數據之加總。

$$\text{風險(Risk)} = \sum_{i=1}^{i} H_i \times \sum_{i=1}^{i} V_i \times \sum_{i=1}^{i} E_i \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (2)$$

其中，危害度(H)係考量行業家數於各縣市占比之綜合性危害風險值(如公式(3))。氣候風險(Risk)ij 為氣候災害於縣市的風險等級(係指風險等級愈高時該縣市發生機率愈大)、i 行業為行業於縣市中的家數、N 行業為行業總家數。

$$危害度(\mathrm{H})_{行業} = \sum_{1}^{ij} 氣候風險(\mathrm{Risk})_{ij} \times \frac{i_{行業}}{N_{行業}} \quad \cdots\cdots(3)$$

$i \in \{1,2,3,\ldots,n\}$，係指縣市別；$j \in \{1,2,3\}$，係指氣候災害之風險等級。

透過風險計算可得出各行業於各縣市的氣候風險值，為能區別其差異，本研究依「百分等級(Percentile rank, PR)」進行風險等級排序(如表 3)。風險值界於前 80%至 100%屬於風險等級 5，即為高風險，反之界於 0%至 20%則風險等級為 1，即為低風險。

表 3　風險等級表

百分等級(PR)	等級	風險
80%-100%	5	高
60%-80%	4	稍高
40%-60%	3	中
20%-40%	2	稍低
0%-20%	1	低

三、分析結果

1.危害度分析結果

危害度分析係綜合「乾旱(缺水)」、「淹水」對各縣市中之各行業的影響，本研究首先針對各縣市之供水缺口比例及淹水面積比例進行計算，從表 4 結果得知，新北市、花蓮縣及桃園市至 2021 年無供水缺口，反之臺南市、高雄市及臺中市供水缺口比例分別為 27%、16%及 21%；另彰化縣、臺南市、桃園市及高雄市等 4 縣市之淹水面積占縣市土地面積比例皆超過 60%，分別為 95.81%、86.36%、70.11%及 61.48%，再依風險等級表(如表 3)顯示各縣市分別於「供水缺口比例」及「淹水面積比例」之風險等級，從表 4 顯示出「供水缺口比例」風險等級較高之縣市包括有臺南市、臺中市及高雄市；。「淹水面積比例」風險等級較高之縣市包括有彰化縣、桃園市、臺南市、高雄市。

表 4　製造業中分類行業危害度準則結果表

縣市別	供水缺口比例(%)	風險等級	淹水面積占縣市土地面積比例(%)	風險等級
新北市	0	1	25.91	2
花蓮縣	0	1	39.21	2
桃園市	0	1	70.11	4
臺南市	27	5	86.36	4
高雄市	16	4	61.48	4
臺中市	21	5	35.53	2
新竹地區	9	2	3.92	1
苗栗縣	11	3	1.59	1
彰化縣	5	2	95.81	5

為得到各行業的危害風險值，本研究依照各縣市「供水缺口比例」及「淹水面積比例」之風險等級及各行業於各縣市的分布比例，透過綜合性危害風險值(H)公式進行計算，可得各縣市之各行業的綜合性危害風險值，再依照各行業於各縣市之值進行加總，表示為各行業之綜合性危害風險值，從表 5 結果可得知其風險值最高為「運輸工具製造業(6.09)，其次為「基本金屬工業(5.69)」、「金屬製品製造業(5.69)」及「機械設備製造業(5.66)」。若從各縣市來看，臺南市與臺中市在整體行業而言，受氣候災害影響之潛在性相較於其他縣市明顯，主要可能原因在於縣市內之廠家數分布比例較高，使得受影響比例提高，造成風險值較高之情形。

表 5　製造業中分類行業綜合性危害風險值結果表

綜合性危害風險值	運輸工具製造業	機械設備製造業	其他工業製品製造工業	其它資訊電子工業	非金屬礦物製品製造業	基本金屬工業	電子零組件製造業	金屬製品製造業	食品飲料及菸草業	化學材料製造業
新北市	0.38	0.51	0.71	1.11	0.50	0.39	1.04	0.64	0.50	0.20
花蓮縣	0.00	0.00	0.00	0.00	0.25	0.00	0.00	0.00	0.03	0.01
桃園市	0.61	0.70	0.42	0.74	0.50	0.74	1.34	0.45	0.50	0.86
臺南市	1.57	0.72	1.57	0.75	0.58	1.40	0.53	0.86	0.96	0.98
高雄市	0.75	0.61	0.51	0.52	0.66	1.25	0.59	0.89	0.84	1.25
臺中市	1.47	2.42	1.25	0.94	0.73	1.17	0.43	1.65	0.74	0.92
新竹地區	0.08	0.11	0.08	0.20	0.17	0.11	0.36	0.06	0.08	0.14
苗栗縣	0.05	0.06	0.06	0.07	0.32	0.10	0.10	0.06	0.09	0.16
彰化縣	1.17	0.54	0.69	0.25	0.46	0.55	0.06	1.07	0.58	0.62
綜合風險	**6.09**	**5.66**	**5.29**	**4.60**	**4.17**	**5.69**	**4.45**	**5.69**	**4.33**	**5.14**

2.脆弱度分析結果

脆弱度係指產業面臨氣候變遷時無法消弭氣候衝擊所呈現的脆弱程度。本研究以能源密集度、水密集度及進口品中間投入率作為評估準則，經各項評估準則標準化後進行加總，可得出表 6 結果。其結果顯示出綜合性脆弱度數值最高之行業為「食品飲料及菸草業(2.292)」，其次為「化學原材料、肥料、氮化合物、塑橡膠原料及人造纖維製造業(1.886)」、「非金屬礦物製品製造業(1.466)」、「其他工業製品製造工業(1.097)」、「其它資訊電子工業(1.047)」，「機械設備製造業(0.237)」為最低。

表 6　製造業中分類行業脆弱度分析結果表

行業別	能源密集度 (TOE/產值百萬元)		水密集度 (千立方公尺/產值百萬元)		進口品中間投入率 (%)		綜合性脆弱度數值 (4)
	原始值	標準化值(1)	原始值	標準化值(2)	原始值	標準化值(3)	
運輸工具製造業	0.373	0.005	0.022	0.000	45	0.591	0.596
機械設備製造業	0.199	0.000	0.023	0.010	24	0.227	0.237
其他工業製品製造工業	1.491	0.036	0.159	0.869	22	0.191	1.097
其它資訊電子工業	0.948	0.021	0.026	0.026	68	1.000	1.047
非金屬礦物製品製造業	7.083	0.194	0.180	1.000	27	0.273	1.466
基本金屬工業	5.557	0.151	0.080	0.370	29	0.313	0.834
電子零組件製造業	0.830	0.018	0.024	0.015	38	0.464	0.497
金屬製品製造業	3.411	0.090	0.092	0.443	12	0.000	0.534
食品飲料及菸草業	1.250	0.030	0.303	1.779	39	0.483	2.292
化學原材料、肥料、氮化合物、塑橡膠原料及人造纖維製造業	6.127	0.167	0.230	1.317	34	0.402	1.886
註：(4)=(1)+(2)+(3)							

3.暴露度分析結果

暴露度係指產業面臨氣候變遷時氣候災害對產業產生衝擊損失之程度。本研究在進行製造業中分類行業之暴露度分析，係以產業產值表示之。從表 7 結果可知，綜合性暴露度數值最高之行業為「電子零組件製造業(1.000)」，其次為「其他資訊電子工業(0.485)」、「化學原材料、肥料、氮化合物、塑橡膠原料及人造纖維製造業(0.300)」。

表 7　製造業中分類行業暴露度分析結果表

行業別	產值(百萬元)		綜合性暴露度數值
	原始值	標準化值	
運輸工具製造業	820,233	0.164	0.164
機械設備製造業	1,133,039	0.248	0.248
其他工業製品製造工業	208,104	0.000	0.000
其它資訊電子工業	2,014,638	0.485	0.485
非金屬礦物製品製造業	344,081	0.036	0.036
基本金屬工業	996,229	0.211	0.211
電子零組件製造業	3,936,062	1.000	1.000
金屬製品製造業	1,227,157	0.273	0.273
食品飲料及菸草業	628,204	0.113	0.113
化學原材料、肥料、氮化合物、塑橡膠原料及人造纖維製造業	1,325,358	0.300	0.300

4.氣候風險分析結果

經危害度、脆弱度及暴露度各項指標計算後，本研究依照公式(2)進行各行業之風險值計算，可得出風險值最高的行業為「化學原材料、肥料、氮化合物、塑橡膠原料及人造纖維製造業(0.286)」，其次為「基本金屬工業(0.14)」與「金屬製品製造業(0.116)」，最低為「食品飲料及菸草業(0.021)」(如表 8)。從結果而言，「其他工業製品製造工業」與「非金屬礦物製品製造業」之風險值為 0，並不表示在面臨未來氣候變化時其行業完全不會受到影響，主要原因在於計算危害度時，將各項準則進行綜合計算為單一數值，再經標準化，會使得最小值為 0，暴露度亦因考量 1 項準則，故會有相同情形，這使得最後結果之風險值呈現為 0 的原因。

再進一步，本研究為瞭解各行業之風險值之排序情形，係採用「百分等級(Percentile rank, PR)」進行風險等級劃分及排序，其結果顯示出「化學原材料、肥料、氮化合物、塑橡膠原料及人造纖維製造業」、「基本金屬工業」及「金屬製品製造業」，在 10 個行業別氣候變遷風險評估中，屬面臨氣候變遷時之未來潛在風險較高之產業(如表 8)。

表 8　製造業中分類行業氣候風險分析結果表

產業別	危害度	脆弱度	暴露度	風險值	百分等級(PR)	風險等級
化學原材料、肥料、氮化合物、塑橡膠原料及人造纖維製造業	0.505	1.886	0.3	0.286	95	5
基本金屬工業	0.796	0.834	0.211	0.14	89	5
金屬製品製造業	0.793	0.534	0.273	0.116	84	5
其它資訊電子工業	0.224	1.047	0.485	0.114	79	4
運輸工具製造業	1	0.596	0.164	0.098	74	4
電子零組件製造業	0.145	0.497	1	0.072	68	4
機械設備製造業	0.779	0.237	0.248	0.046	63	4
食品飲料及菸草業	0.083	2.292	0.113	0.021	58	3
其他工業製品製造工業	0.582	1.097	0	0[註]	53	3
非金屬礦物製品製造業	0	1.466	0.036	0[註]	53	3
註：因數值標準化的關係造成僅有 1 項準則之危害度與暴露度的最小值為 0，使得風險值為 0。						

四、結果與討論

對政府部門而言，由於氣候變遷與極端氣候事件的不可預測性，規劃及執行氣候變遷調適策略無疑是一項挑戰。我國政府針對氣候變遷調適議題已於 101 年通過「國家氣候變遷調適綱領」，103 年核定「國家氣候變遷調適行動計畫(102-106 年)，104 年發布「溫室氣體減量及管理法(下稱溫管法)」，並依溫管法第 9 條第 1 項規定所擬訂的「國家因應氣候變遷行動綱領」，行政院已於 106 年 2 月 23 日正式核定。此行動綱領明確擘劃我國推動溫室氣體減緩及氣候變遷調適政策總方針，並啟動跨部門的因應行動，期能逐步健全我國面對氣候變遷調適能力，並致力達成我國溫室氣體長期減量目標，以確保國家永續發展。行動綱領秉持減緩與調適兼籌並顧的精神，明列我國因應氣候變遷的 10 大基本原則，對外因應巴黎協定，對內作為我國因應氣候變遷政策指導綱要。

目前我國各領域相關單位刻正推動相關氣候變遷調適行動方案，但仍處氣候風險評估階段，並主要針對「維生基礎設施」、「能源產業」、「水資源」及「農業生產與生物多樣性」等領域，就產業或企業之評估較少，故本研究嘗試提出產業綜合性氣候風險評估方法，藉此初步釐清各行業受氣候變化之影響差異。但因各行業有廠家數分布於不同區域之變動因素，為將其分布歧異度能夠反應在最終的風險值上，本研究將各區域之廠家分布比例作為權重

值之概念進行計算危害度。

目前我國製造部門之行業常面臨到的氣候事件，主要為颱風、極端降雨及連續不降雨日數增加，此氣候發生頻率與幅度已愈趨顯，已導致如廠區淹水，可能使生產設備停擺或損壞，台電電力供應緊急跳脫，導致工廠無法營運；當瞬間強降雨造成原水濁度過高導致暫停供水，或者因乾季降雨減少致使供水量不穩定，皆可能會影響產業製程。故各氣候事件對產業之衝擊，包括資產面-重要設施或公用設備損壞、製程面-生產中斷損失、供水/供電系統停擺、人員面-人員安全及管理調度、供應鏈-運輸通路停擺及財務面-額外的營運成本及生產成本增加。

由於評估產業氣候變遷風險時，其所面對的氣候事件(如暴雨、乾旱、高溫等)，會因產業所在的區域而有降雨及溫度上的變化，亦即同產業但處於不同區域時，在面對相同的氣候事件，其影響程度亦有差異。故從分析結果來看,傳統產業面臨未來的氣候變化所可能造成的影響相較於電子業高，尤其是在「化學原材料、肥料、氮化合物、塑橡膠原料及人造纖維製造業」、「基本金屬工業」及「金屬製品製造業」，主要原因在於傳統產業的廠家數及分布區域相較於電子業多，故會提高受氣候災害影響的可能性與損失情形。

五、參考文獻

1.Weather, Climate & Catastrophe Insight,2018,Annual Report.

2.UKCIP. UK Climate Change Risk Assessment 2017: Evidence Report; UKCIP: Oxford, UK, 2017; p. 23.

3.Hagiwara, Y.; Kuribayashi, D.; Sawano, H. Enhancement of Flood Countermeasures of Japanese-Affiliated Firms Based on the Lessons Learned from the 2011 Thai Flood. JDR 2016, 11, 1176–1189.

4.Khazari B, Merz M, Schulz C, Borst D, 2013, An integrated indicator framework for spatial assessment of industrial and social vulnerability to indirect disaster losses. Nat Hazards 67：145-167.

5.Merz, M.; Hiete, M.; Comes, T.; Schultmann, F. A composite indicator model to assess natural disaster risks in industry on a spatial level. J. Risk Res. 2013, 16, 1077–1099.

6.Ryu, Jieun; Yoon, Eun Joo; Park, Chan; Lee, Dong Kun; Jeon, Seong Woo. 2017. "A Flood Risk Assessment Model for Companies and Criteria for Governmental Decision-Making to Minimize Hazards." Sustainability 9, no.

11: 2005.
7. Ryu, J., Lee, D., Park, C. et al., 2016, Assessment of the vulnerability of industrial parks to flood in South Korea. Nat Hazards, 82：811-825.
8. 經濟部，2014，能源供給及產業領域行動方案。
9. 國家災害防救科技中心，2017a，臺灣氣候變遷科學報告-物理現象與機制。
10. 國家災害防救科技中心，2017b，臺灣氣候變遷科學報告-衝擊與調適面向。
11. 經濟部統計處，2018，全國工廠點位資訊及所屬產業類別圖資。
12. 經濟部水利署，2016a，各項用水統計資料庫-105 年工業用水量統計報告，網址：http://wuss.wra.gov.tw/annuals.aspx
13. 經濟部水利署，2016b，臺灣中部區域水資源經理基本報告
14. 經濟部水利署，2017a，歷史颱風淹水範圍圖資。
15. 經濟部水利署，2017b，臺灣北部區域水資源經理基本報告。
16. 經濟部水利署，2017c，臺灣南部區域水資源經理基本報告
17. 經濟部水利署，2017d，臺灣東部區域及離島地區水資源經理基本報告
18. 經濟部工業局，2018，101 至 107 年度調適示範專案之氣候變遷調適管理與評估報告書。

免調質鋼產業鏈減碳效益分析與碳足跡認證

吳致呈*、黃文輝**、呂紹為***、朱志弘****、賴力行*****

摘　要

高機能鋼(High-Functional Steel, HFS)能升級鋼鐵材料性質，可於應用上增進產業鏈及用鋼產品生命週期之環保效益，例如高強度鋼使汽車減重降低油耗，以及高品級電磁鋼使馬達用電效率提升等。本研究鑑別免調質鋼(Non-Quenched and Tempered steel, NQT steel)應用於鍛造業具節省熱處理、運輸與噴砂等生產製程，具產業鏈減碳效益。

為經由碳足跡認證來確認免調質鋼減碳效益，本研究先依 ISO14025 的程序訂定「車用鍛造件」產品類別規則以界定目標產品的生命週期評估範疇，經標的產品 14 項生產流程之溫室氣體盤查與量測分析，完成熱處理廠調質鋼製程能耗調查並計算碳足跡。碳足跡分析報告通過 TÜV 查證，分別取得調質鋼與免調質鋼車用控制臂碳足跡證書，及調質鋼與免調質鋼鍛造件碳足跡比較之聲明文件，嚴謹量化免調質鋼外部減碳效益。結果顯示，調質鋼車用控制臂碳足跡 6.13 $kgCO_2e/kg$，調質製程佔 14 個生產製程總排碳 25%。免調質鋼能省去鍛造業之調質、運輸與噴砂等製程，經認證免調質鋼車用控制臂碳足跡 5.26 $kgCO_2e/kg$，每公斤較調質鋼產品減碳 0.87 $kgCO_2e$(降低 14%)，與本原料「直棒鋼」碳足跡 2.70 $kgCO_2e$ 比較而言，減碳量占原料 32%。本研究量化免調質鋼產業鏈減碳效益，從應用面減碳實證材料研發的重要性，而碳足跡資訊並提供環保署納入碳足跡資料庫。

【關鍵詞】產業鏈減碳、免調質鋼、車用鍛造件產品類別規則、碳足跡認證

---

*中鋼公司新材料研究發展處　研究員

**工業技術研究院綠能與環境研究所　博士

***金鍛工業股份有限公司　經理

****工業技術研究院綠能與環境研究所　研究員

*****金鍛工業股份有限公司　開發工程師

一、前　言

鋼鐵材料之環保減碳潛能，可以從鋼鐵產品生命週期中原物料開採運輸、鋼材製造、鋼材加工、產品使用、棄置回收等各個階段進行發掘。例如用鋼產品使用階段之減碳，能透過高機能鋼(High-Functional Steel, HFS)之研發以升級鋼鐵材料性質，而於應用上增進產業鏈及用鋼產品生命週期之環保效益[1]，例如應用高強度鋼使汽車輕量減重進而降低使用階段之燃料耗用，應用高品級電磁鋼於電機產品使馬達效率提升，進而降低使用階段之電力耗用，開發耐蝕鋼以延長橋樑與建築等鋼鐵結構的使用年限，降低建築結構生產與工程施工之頻率進而達到節能減碳目的。本研究則鑑別免調質鋼(Non-Quenched and Tempered steel, NQT steel)應用於鍛造業具節省熱處理、運輸與噴砂等生產製程，具產業鏈減碳效益。

免調質鋼係透過微合金添加及控制軋延技術，使鍛造件於熱間鍛造後做冷卻控制，以得到接近淬火回火調質熱處理之強度。煉鋼技術上之特點，包含添加微量錳鉻使具有適當強度，添加 Ti、Al 及增 N，促使 TiN 、MnS-TiN 或 AlN 析出，抑制高溫鍛造時之沃斯田鐵晶粒成長，添加 S、V 以形成 MnS 利於鍛件車削加工，形成 VN 附著在 MnS 上而成為肥粒鐵的成核核心，增加肥粒鐵之析出數量且細化肥粒鐵晶粒，促進鋼料強韌性[2]。因此免調質鋼只須藉鍛造後之餘熱施予適當冷卻控制，即可得到接近淬火回火之強度，而省略傳統調質熱處理製程，與傳統調質碳鋼比較，免調質鋼可減少噴砂及熱處理製程，為鍛造業界提供了降低成本、省工省時、減少污染的鋼鐵材料，其效益約降低客戶加工成本 10-15%。本研究由中鋼公司、金鍛公司、工研院、環發會與鍛造公會合作，量化免調質鋼於產業鏈之減碳效益並進行碳足跡認證。

二、研究方法

本研究分析比較免調質鋼與傳統調質鋼汽車鍛造件之碳足跡，以量化免調質鋼於產業鏈之減碳效益，並完成碳足跡認證。本研究方法與步驟包含：(1)成立碳足跡盤查專案小組，依據 ISO14025 建立「車用鍛造件」產品類別規則(PCR)；(2)建立 14 項流程溫室氣體盤查、量測與分析方法；(3)至熱處理廠量化調質製程碳足跡，各製程碳足跡盤查及計算分析；(4)製作碳足跡盤查報告書及 TÜV 外部稽核等，研究方法重點說明如下。

1.建立「車用鍛造件」產品類別規則

本研究依據 ISO14025 及免調質鋼與傳統調質鋼汽車鍛造件生產特性建立供碳足跡盤查與認證使用之 PCR。產品類別規則文件由金鍛工業股份有限公司起草，由台灣鍛造協會協助進行文件內容之交流討論，並在利害相關者說明與諮詢會議(於 2016.10.20 舉辦)以及專家審查會議(於 2016.11.08 舉辦)後進行修訂及定稿，「車用鍛造件(The Forging Parts for Motor Vehicles)」PCR 中文版本[3]，已公告於經濟部工業局製造業產品環境足跡與資源永續推動計畫網頁(http://www.idbcfp.org.tw/DownloadSubDetail.aspx?id=4)，英文版本已發布於 PCR Library (http://pcr-library.edf.org.tw/index.asp)全球第三類環境宣告組織網站。本 PCR 之宣告單位為一件車用鍛造件，且應同時標示其主要材質、功能及重量(例：碳鋼製控制臂鍛造件 3.19kg)，車用鍛造件產品系統邊界包含原物料取得階段、製造階段及配送階段(圖 1)。

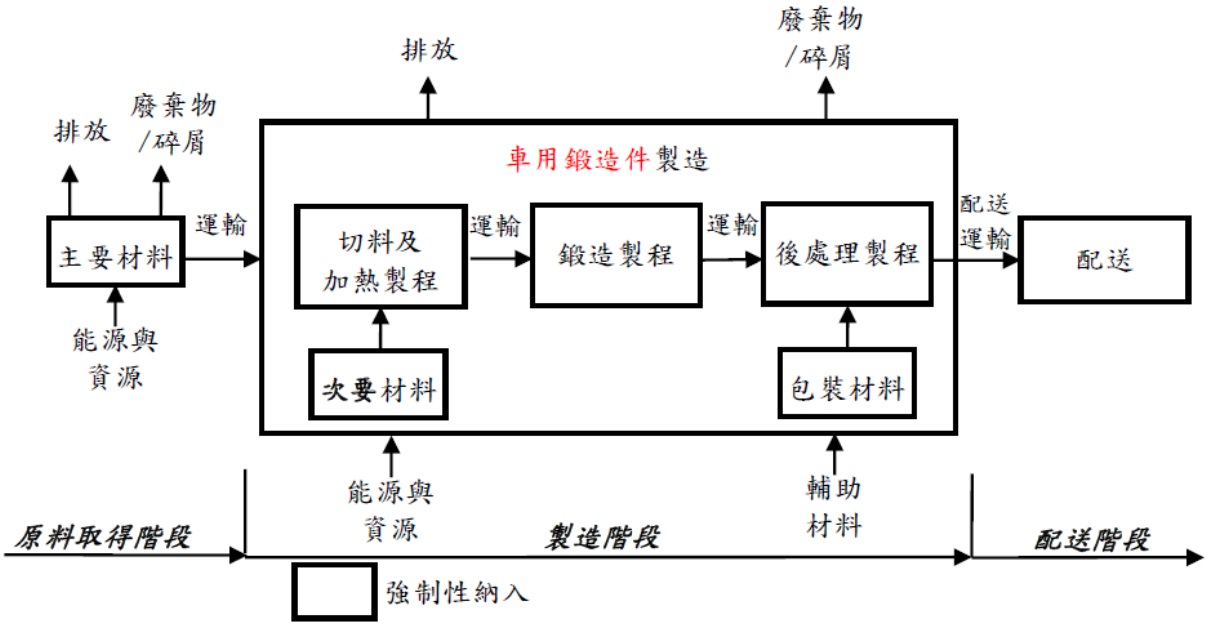


圖 1 車用鍛造件產品系統邊界

2.碳足跡盤查與查證

本計劃產品碳足跡計算與查證方面，可概分為啟始階段、碳足跡盤查與計算階段及完成結果的報告與查證階段[4、5]，各階段的工作內容如表 1 所示。於啟始階段設定目標為，以免調質鋼及調質鋼為原物料，比較生產出的汽車零組件產品碳足跡數值，並分析其差異造成原因。選擇之產品係

由金鍛公司挑選分別使用中鋼公司免調質鋼及調質鋼為原料之汽車零組件車用控制臂(圖 2)，該產品為車用懸吊系統的構件之一。其使用的鋼材規格、產品單件重量如表 2。供應商導入部分，因本計畫受限於生產過程中物料及外包活動供應商的配合意願，依重要性選擇調查調質鋼產品生產過程外包的熱處理廠商，盤查其生產過程中的用電量等數據，另向代理商購入的輔助項(磁探磁粉液、防鏽油)之來料運輸碳足跡貢獻，則計算從代理商出貨地點到金鍛公司之碳排放。

表 1 碳足跡盤查與查證各階段作業內容

階段	作業內容
1.啟始階段	➢ 設定目標 ➢ 選擇產品 ➢ 供應商導入
2.碳足跡盤查與計算階段	– 建立製程地圖 – 檢查邊界與優先性 – 數據蒐集 – 計算碳足跡與分析熱點，並比較數值差異
3.報告與查證階段	◆ 碳足跡報告書準備 ◆ 依據查證單位發現缺失改正報告內容

圖 2 (a)免調質鋼汽車連桿 368-006 (b)調質鋼汽車連桿 368-002/003

表 2 兩件比較用標的產品的材質與重量

標的產品	368-006 免調質鋼車用控制臂	368-002/003* 調質鋼車用控制臂
產品材質	38MnVS6(免調質鋼)	SCM440H(調質鋼)
產品重量(kg/pcs)	2.247	2.823

*為左右對稱成對之產品，盤查分析數值為兩件平均結果

碳足跡盤查與計算階段包含建立製程地圖、檢查邊界與優先性等工作。免調質鋼車用控制臂(368-006)與調質鋼車用控制臂(368-002/003)兩項產品之生產流程圖分別如圖 3 與圖 4 所示，此圖用於檢視盤查項目完整性。檢查邊界與優先性方面，因兩項產品都是批次生產，本次資料蒐集期間選定為同時有兩項產品生產的期間(2016 年 10 月至 2017 年 03 月)進行廠區數據盤查。依照本計畫建立的「車用鍛造件」產品類別規則第五章規定，車用鍛造件的生命週期盤查涵蓋範疇包含：(1)原料取得階段：包括產品製造過程投入之各項原物料與輔助項，以及各原物料與輔助項運送至盤查工廠為止之運輸資訊；(2)製造階段：包括(a)標的產品製作過程的能、資源使用量，(b)製造生產階段所盤查到的能源運送到盤查對象工廠為止之運輸資訊，(c)為製造標的產品而產生的空污、水污、其他逸散與廢棄物的清除處理與運送到處理廠之運輸資訊；(3)配銷階段：兩項標的產品全部運至客戶指定交貨位置，此階段的盤查數據包括從盤查對象工廠運送至基隆港貨櫃碼頭之陸上運輸、從基隆港貨櫃碼頭經海運運送至英國 Port of Felixstowe 之海上運輸，以及於 Port of Felixstowe 上岸後到客戶指定交貨地點的運輸三階段。

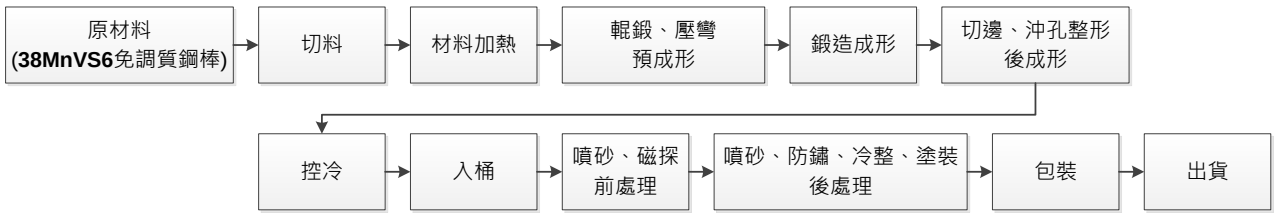


圖 3　免調質鋼車用控制臂(368-006)製作流程

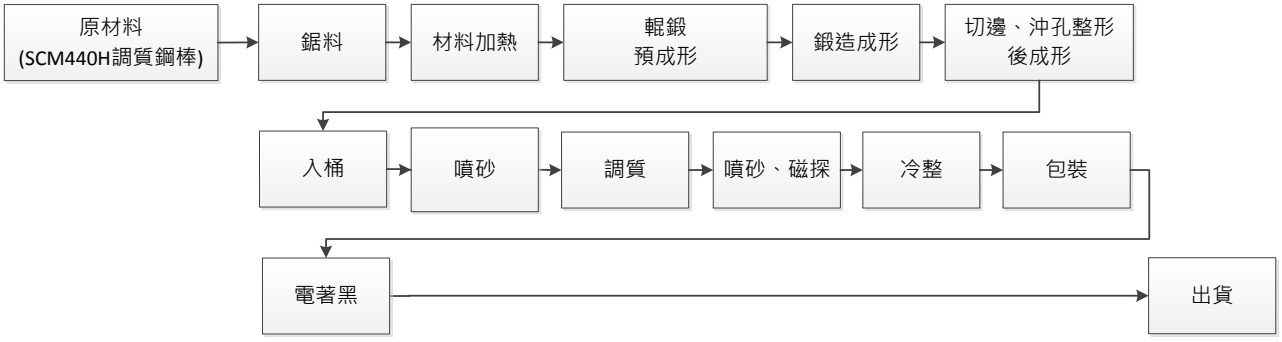


圖 4　調質鋼車用控制臂(368-002/003)製作流程

碳足跡計算、熱點分析與比較兩項產品碳足跡數值差異方面，係採用財團法人工業技術研究院發展，具本土化資料庫之生命週期評估軟體「DoITPro」進行運算與分析。盤查所得活動數據資料(碳足跡盤查一級與二級數據鑑別及數據來源表，詳見表 5)，須於資料庫中檢索適當的對應資料，或加入外部資料庫資料進行運算。排放係數為層層追溯產生，盤查結果皆透過彼此間的關係串連，銜接至基本流為止，可將其中任一盤查結果整理歸納為基本流，即盤查(Life Cycle Inventory, LCI)結果，之後再將 LCI 結果分類與特徵化，以表現出各種類別的環境衝擊評估結果。因本計畫只探討其中的碳足跡結果，因此依照 ISO/TS 14067:2013 規範，全球暖化潛勢須採用最新版本，目前以 IPCC(2013)第 5 次評估報告具 GWP 值之溫室氣體物質與潛勢，作為碳足跡計算的潛勢依據[5、6、7]。

表 5　碳足跡盤查一級與二級數據鑑別及數據來源

數據類別			數據來源
一級數據	投入	原物料使用量	廠務統計
		原物料的製造	實際盤查
		輔助項(含包裝材)使用量	廠務統計 包裝規格
		包裝材塑膠袋、氣泡紙 單件重量	直接秤重
		包裝木箱重量	規格書
	產出	產品產出量	產能報表
		產品單件的重量	直接秤重
		料頭產出量	直接秤重
	能源使用	電力	抄錄於每個生產階段測量數個時段的耗電量(量測設備顯示畫面快照之數據)，之後將該時段的耗電量與產量相除，得到每個產品用電量 上述每個產品用電量算出後，排除最大與最小值，剩下的數值認定為穩定區間者取最高值，此數值具生產實際情形的代表性
	直接排放	化糞池 CH_4 排放	員工人數*排放係數
	運輸	投入物料來料運輸	廠商地址+GPS 里程計算
		包裝材來料運輸	廠商地址+GPS 里程計算
		廢棄物委託處理運輸	廠商地址+GPS 里程計算
		配銷運輸	港口地址+GPS 里程計算
二級數據	LCA 運算	輔助項的製造	· DoITPro 資料庫 · 環保署產品碳足跡計算服務平台係數資料庫 · 以產品組成成分為依據，自行建立
		電力碳足跡	引用產品碳足跡計算服務平台內，2015 年台灣電力碳足跡數值
		電著黑步驟除用電以外的碳足跡貢獻	引用 Ecoinvent3 資料庫「hard chromium coating, electroplating, steel substrate, 0.14 mm thickness GLO」資料以 IPCC2013 算出的碳足跡數值

三、結果與討論

免調質鋼車用控制臂(368-006)與調質鋼車用控制臂(368-002/003)兩項標的產品之碳足跡分別為 11.8 kg CO_2^e/件與 17.3 kg CO_2^e/件(詳表 6)，整體分析結果顯示，使用調質鋼製成的車用控制臂的碳足跡，每公斤比使用免調質鋼的碳足跡高 0.87 kg CO_2e。兩項標的產品於各階段之碳足跡數值與佔比詳如表 7，結果顯示調質鋼車用控制臂於原料取得階段佔 78.5%，製造階段佔 14.6%，配銷階段佔 6.9%；免調質鋼車用控制臂於原料取得階段佔 75.6%，製造階段佔 16.4%，配銷階段佔 8.0%，皆顯示原料取得階段佔比最高，製造階段次之。

表 6　免調質鋼車用控制臂與調質鋼車用控制臂產品碳足跡

標的產品	碳足跡數值(單位：kg CO_2^e)	
	每件產品	每公斤產品
調質鋼車用控制臂 (368-002/003)	17.29	6.13
免調質鋼車用控制臂 (368-006)	11.82	5.26

表 7　兩項標的產品各階段的碳足跡

標的產品 (碳足跡單位：kg CO_2^e)	原料取得階段		製造階段		配銷階段	
	Per pcs	Per kg	Per pcs	Per kg	Per pcs	Per kg
調質鋼車用控制臂	13.57	4.81	2.53	0.89	1.19	0.42
(368-002/003)	78.48%		14.61%		6.91%	
免調質鋼車用控制臂	8.94	3.98	1.93	0.86	0.95	0.42
(368-006)	75.60%		16.36%		8.04%	

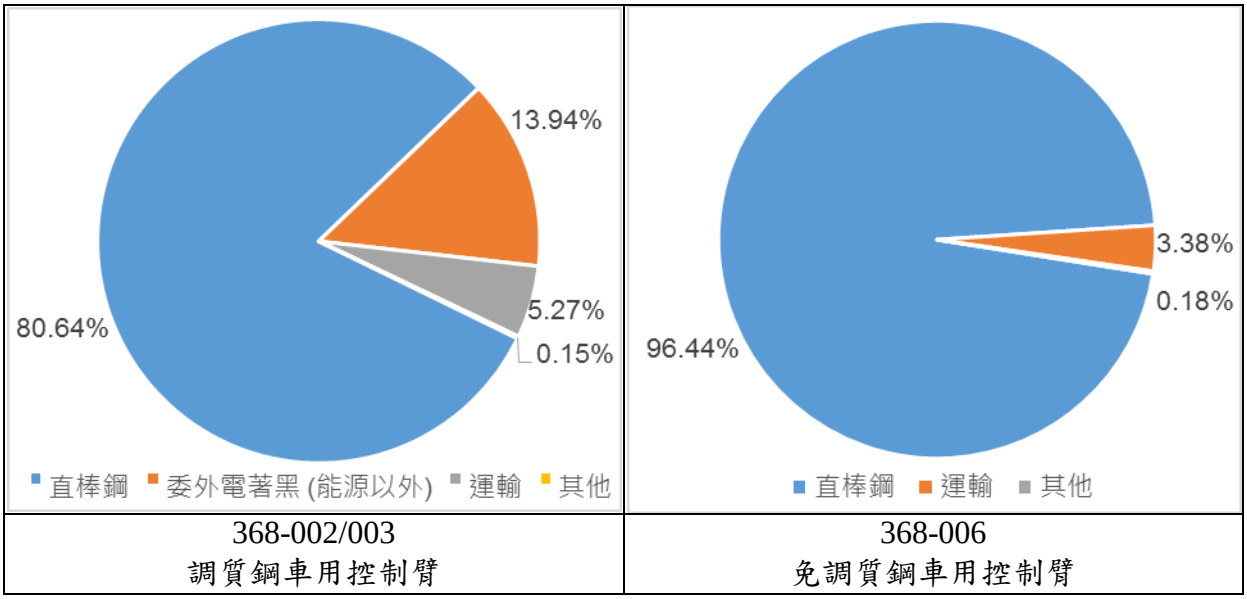
對於使用調質鋼製成的車用控制臂每公斤碳足跡，較使用免調質鋼車用控制臂每公斤碳足跡高 0.87 kg CO_2^e 之細部差異，在於使用免調質鋼為原料的車用控制臂，在物料使用及生產過程能源消耗方面，具有原物料與能源使用量較少或不需要使用的優勢。而兩項產品都運輸到同一地點，因此每公斤鍛件在配銷階段貢獻碳足跡一樣，以下針對兩項標地產品在原料取得與製造兩階段碳足跡數據再進一步分析。

1.原料取得階段

對於生產每公斤車用控制臂產品所需之原物料(直棒鋼)而言，使用免調質鋼之原物料比起使用調質鋼為原物料，減少約 15g 的使用量，除降低鋼材生產貢獻的碳足跡外，也連動降低從中鋼公司輸送到鍛造廠金鍛公司

運輸過程的碳足跡；此外，免調質鋼進入產線後的第一步驟為「切料」，而非調質鋼所需之「鋸料」，因此此「切料」步驟不需要使用切削油；另外，使用免調質鋼為原料製成車用控制臂，沒有調質與電著黑步驟，因此也不需要將半成品多次轉運到其他廠商加工。

原料取得階段碳足跡為這兩項產品碳足跡貢獻最大的部分，其各自碳足跡貢獻分析如圖 5 所示，原物料直棒鋼在此階段碳足跡中的貢獻度最大，分別占兩項產品碳足跡原物料取得階段的 80.6%與 96.4%，調質鋼車用控制臂的碳足跡第二大貢獻者是電著黑過程能源以外的貢獻，占該階段的 13.9%，運輸為第三大貢獻者，占該階段 5.3%。免調質鋼車用控制臂之原物料直棒鋼的碳足跡貢獻最大，運輸則貢獻 3.4%。此外，兩項產品製造時，直鋼棒有將近 43%會成為下腳料而進入廢鋼回收體系。



368-002/003 調質鋼車用控制臂	368-006 免調質鋼車用控制臂

圖 5　兩件標的產品於原料取得階段碳足跡貢獻度分析

2.製造階段

在車用控制臂製造階段，免調質鋼鍛造件單位公斤用電為 1.27 度，低於調質鋼鍛造件每公斤用電 1.33 度；單位公斤的免調質鋼鍛造件生產過程比調質鋼鍛件亦減少約 15g 的廢鋼產生量，係連動降低廢鋼清除運輸的碳足跡貢獻。兩件標的產品在製造階段的碳足跡分別如圖 6 與圖 7 所示，生產階段的多個生產步驟皆使用電力，因此製造生產階段的碳足跡以「電力使用」為主要貢獻，兩件標的產品分析結果用電總貢獻度都是占此階段碳足跡貢獻度之 99%以上。進一步分析，免調質鋼車用控制臂碳足跡貢獻以加熱用電為最大(79.9%)，其次為壓彎、預成形用電(9.9%)，再其次

則為空壓機(2.9%)與冷整用電(2.3%)；調質鋼車用控制臂產品碳足跡貢獻以加熱用電為最大(55.6%)，其次為調質用電(23.9%)，再其次則分別為預成形用電(7.0%)與電著黑用電(4.5%)。顯見調質鋼產品在製造階段中較免調質鋼增加出的調質、電著黑步驟，在此階段多耗用許多電力。整體而言，加熱步驟是此階段主要碳足跡貢獻來源，未來若能引進更多節能技術，亦可降低此階段的碳足跡。

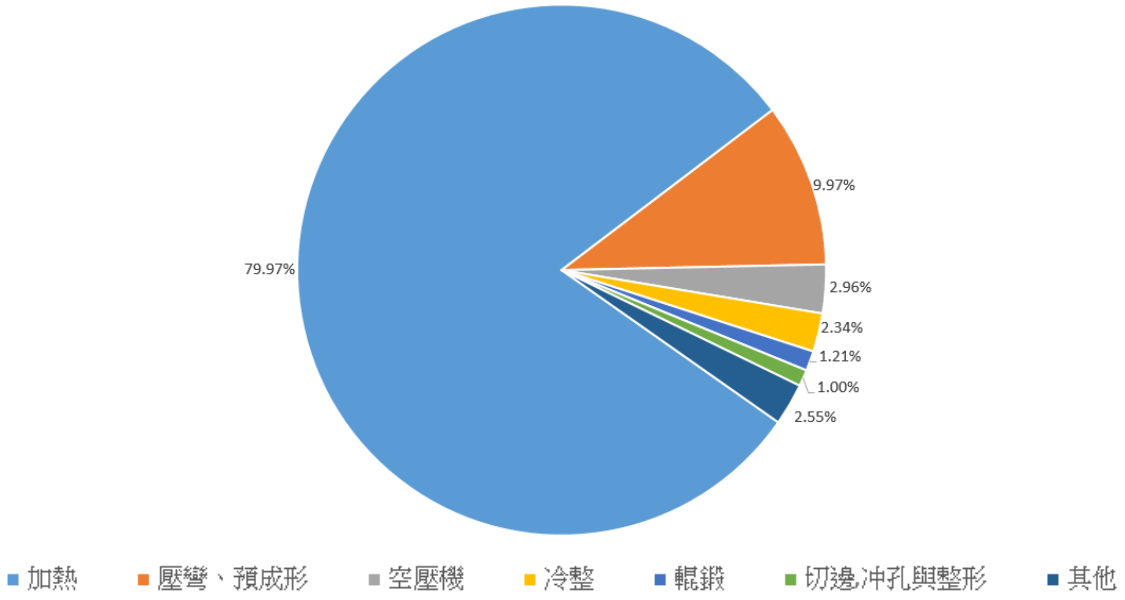


圖 6　免調質鋼車用控制臂(368-006)製造階段之碳足跡貢獻度分析

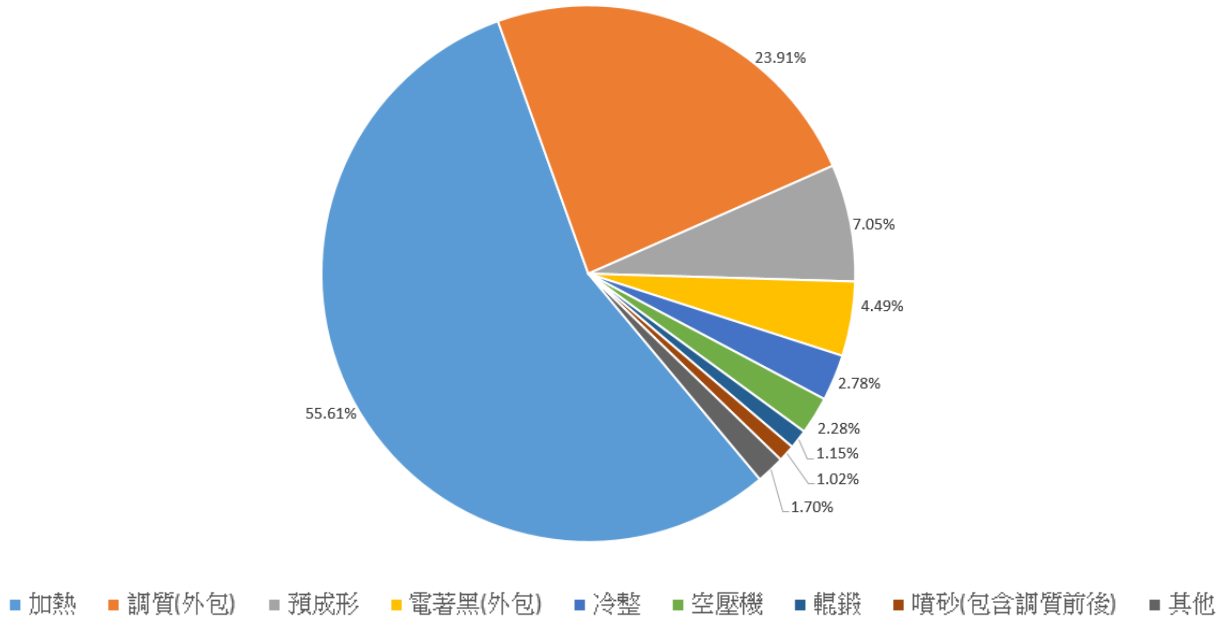


圖 7　調質鋼車用控制臂(368-002/003)製造階段之碳足跡貢獻度分析

四、總　結

本研究鑑別免調質鋼(NQT steel)應用於鍛造業具節省熱處理、運輸與噴砂等生產製程，具產業鏈減碳效益。經建立「車用鍛造件」產品類別規則，盤查與量測分析兩項標的產品 14 項生產流程溫室氣體，完成碳足跡分析及查證。結果顯示，調質鋼車用控制臂碳足跡 6.13 $kgCO_2e/kg$，調質製程佔 14 個生產製程總排碳 25%，免調質鋼能省去鍛造業之調質、運輸、噴砂與電著黑等製程，及具有免用切削油與減少廢鋼等效益，經認證免調質鋼車用控制臂碳足跡 5.26 $kgCO_{2e}/kg$，每公斤較調質鋼產品減碳 0.87 $kgCO_2e$，與本原料「直棒鋼」碳足跡 2.70 $kgCO_2e$ 比較而言，減碳量占原料 32%。本研究量化免調質鋼產業鏈減碳效益，從應用面減碳實證材料研發的重要性。

五、參考文獻

1.吳致呈、陳俊達，「綠色鋼材在生命週期之減碳效益」，永續產業發展季刊 61 期，經濟部工業局，101 年 12 月。

2.梁聖樂、郭春億、張顧齡，「熱鍛免調質棒鋼開發與改善」，礦冶期刊 59/1 期，中國鑛冶工程學會，104 年 3 月。

3.產品類別規則供使用於準備「車用鍛造件(The Forging Parts for Motor Vehicles)」產品環境宣告(EPD) ，第 1.0 版，2016。

4.ISO 14044:2006, Environmental management - Life cycle assessment - Requirements and guidelines, 2006。

5.ISO/TS 14067:2013, Greenhouse gases - Carbon footprint of products-Requirements and guidelines for quantification and communication, 2013。

6.行政院環境保護署產品碳足跡查證技術指引，2017 年 1 月。

7.產品碳足跡排放係數數據品質評估標準手冊，第 2.0 版，行政院環保署，2013 年 3 月。

再生能源微水力發電之研究與案例實現

陳守仁*、李學龍** 、管建明***

摘 要

隨著科技發展，工業與經濟發展對於電力依賴日益密不可分。然而因應地球暖化及能源多樣化等環境因素考量，發展綠色再生能源已成為國家重要政策與發展目標。民國 104 年 1 月全國能源會議關於「供給穩定開源」及「再生能-1.5 水力」核心議題之總結報告中特別提到「開發對環境友善之水力資源」以及「增加水力計畫」。民國 104 年 5 月上修再生能源發展目標。105 年 6 月 22 日立法院經濟委員會第 24 次全體委員會議中，經濟部針對「綠色能源政策目標、未來規劃及執行現況」，規劃水力發電推廣目標為 114 年 2,150 MW；119 年 2,200MW。因此，水力發電已成為再生綠能重點發展選項之一。

傳統水力發電需要建置水庫、攔水壩及引水壩等各項水工建築設施，佔地面積廣大，對環境生態產生重大衝擊，因而往往引發各方爭論與抗爭，造成發展瓶頸與困難。台灣大型水力發電設施經多年發展，適合進一步開發水力發電的地方已經寥寥可數，加上環境及生態議題的衝擊，幾乎無法有新的發展地點。依據再生能源法規定，使用既有水利設施、水圳設施的微水力發電符合再生能源之定義。而微水力發電並可有效分散對於部分能源之依賴，解決部分地區電力供給及經費不足等問題。本研究以宜蘭縣大同鄉為例，依照專業評估與軟體模擬，使用水輪發電機機組，建置微水力發電設施，探討微水水力發電機組之效能與可行性。同時，所產生之電能透過獨立電網控制與運作，能供給鄰近之居民使用，解決目前沒有電源設施之困境，進而實現綠能再生初衷，改善居民生活品質。

【關鍵詞】再生能源、綠能科技、微水力發電、水輪發電機組、電能轉換、電源轉換控制

---

* 碩晟科技有限公司　經理

**韋峰能源股份有限公司　董事長

***韋峰能源股份有限公司　經理

一、前　言

水能-自然界中水體在流動過程產生的能量，其中含有壓力能、動能、及位能。水力可以說是人們最早運用的動力之一，早在 1882 年 9 月 30 日，在威斯康辛州就有世界第一座水力發電廠開始運作[1]。水力發電發展已有百年以上的歷史，在台灣也有百年以上水力發電廠仍在運轉中[2]。水力發電是引導水流經過水輪機，產生旋轉扭矩，將水的重力位能轉為動能，進而帶動發電機，將水輪機所產生機械能轉換成電能。

隨著環境保護意識發展，水力發電雖然是一個很好再生能源，但因傳統水力發電廠多屬大型建設，以致水力發電給人印象就是「大範圍影響生態環境」、「投資金額龐大」。目前大型水力發電廠都是建水庫，從取水、引水工程就開山闢路，建成水庫又有大面積的淹沒區，人尚可遷移，而其他物種就因此受到浩劫，同時因為工程浩大，需要投入龐大資金，相對回收年限也跟著拉長達 10 年、20 年以上。台灣水力發電經過多年發展，根據資料目前台灣水力發電設備總裝置容量為 4541.607 MW[3]，民間企業要再投入中大型水力發電開發，可說是困難重重，諸如水權申請、電蘆售電價過低、法令規定 20 MW 以上為國營、用地問題、地方民眾意願等，致使民間投入水力發電開發很難有重大進展。此外，目前在台灣可說沒有量產化水輪發電機組設備廠商，所有設備都靠手工打造或國外進口，造成台灣的水力資源開發頻頸。故本文以微水力水輪發電機組進行水力資源開發可行性探討。

二、水力發電現況

水力電廠種類可依照運作型態及規模大小區分如下：

1. 依照運作型態區分：

水力發電廠須依照河段條件進行開發，按照不同的開發方式所修建水力發電廠，其各項佈置、建築物組成等也截然不同。水力電廠依運作型態可區分為慣常式與抽蓄式，說明如下：

(1)慣常式：河川的水經由引水設施取得後，經過壓力隧道、鋼管等水路設施送至水力發電廠(圖 1)。當機組須運轉發電時，打開主閥門，後開啟導流翼(引導水流控制輸出力量)使水衝擊水輪機，水渦輪機旋轉動後帶動發電機，在發電機加上激磁後，發電機產生電壓，並將開關打開，後開始將電力送至電力系統。慣常式可再細分為川流式、調整池式、水庫式等形式[4]。

(2)抽蓄式：抽蓄式水力電廠與慣常水力電廠最大同，設有上、下池，原則上發電後的

水並不排掉而是儲存於下池。白天電力系統尖峰時段，發電流程與慣常水力電廠一樣，但於夜間電力系統離峰時段，利用原有的發電機改作馬達運轉，讓水輪機反轉成為水泵將下池的水抽到上池(圖 2) [4]。所以抽蓄式水力電廠的水流是雙方向，循環利用水資源，擁有平衡電網尖離峰用電差距、增進電網穩定性、減少發電機組停機與降載、以及重複水資源的利用之優勢。

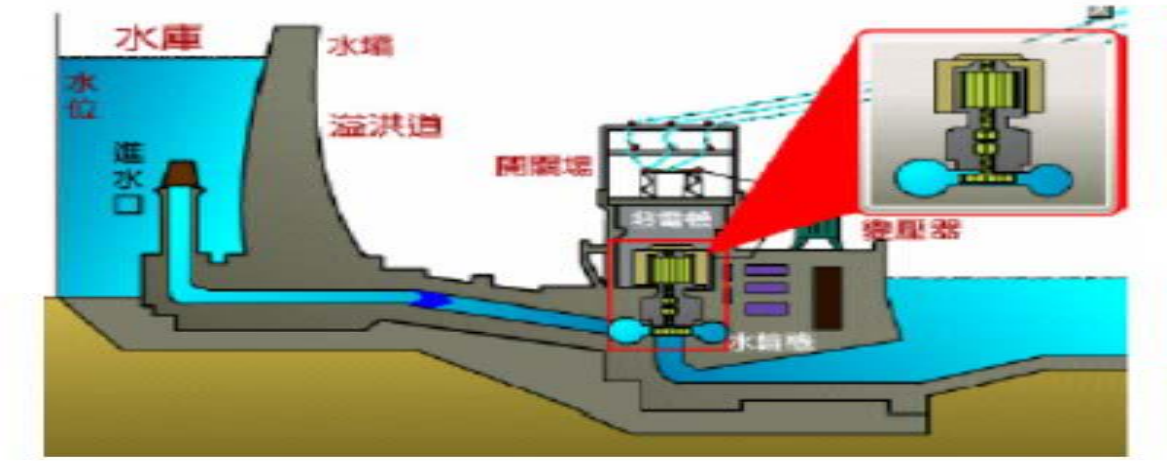


圖 1　慣常式電廠示意[4]

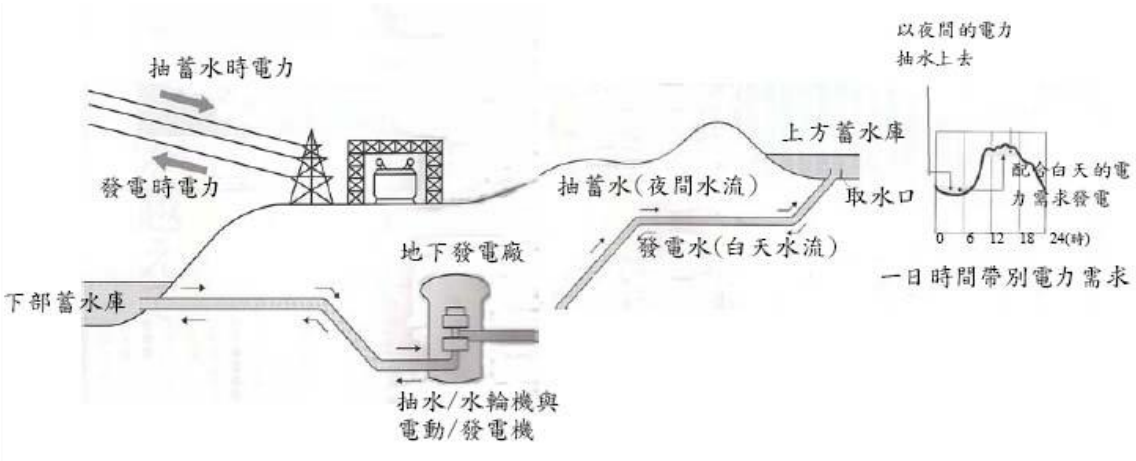


圖 2　抽蓄水力發電廠布置示意圖[10]

2. 以裝置容量規模區分：

目前各國對於水力發電規模，並沒有一致的區分標準，國內也無明確規範，只有電業法第八條規定 500 kW 以下為「小型電業」的明確規定。目前以日本有較為完整之區分，如表 1。其他各國以的區分差異相當大，如表 2。國內各法規對於水力發電規模區分，如表 3。

表 1　國外以規模區分水力發電廠[11]

區分	裝置容量（kW）		
	日本	美國	中國
大水力發電	>100,000		
中水力發電	10,000～100,000		
小水力發電	1,000～10,000	<15,000	<50,000
迷你小水力發電	100～1,000		
微小水力發電	<100 kW		

表 2　各國水力發電廠分級表[12]

國家/組織名稱	裝置容量（kW）		
	微型(Micro)	迷你型(Mimi)	小型(Small)
本研究	< 100	–	< 500
台灣(電業法)	–	–	<500(小型電業)
國際能源協會(WEC)	< 100	< 1,000	< 10,000
拉美能源組織	< 50	< 500	< 5,000
中國	< 100	< 500	< 50,000
加拿大	–	< 1,000	< 3,000
印度	< 100	< 2,000	< 15,000
德國	–	–	< 10,000
英國	< 1,000	–	< 5,000
美國	< 500	< 2,000	< 15,000
日本	< 100	< 1,000	< 10,000
瑞士	< 300	< 2,000	–
法國	< 500	< 2,000	< 8,000
波蘭	< 100	< 1,000	< 15,000
小水力並無嚴格定義，數十 kW～數千 kW左右的較小規模水力發電總稱為小水力發電，可用於農村之水壩、水道等，利用水的落差與流量發電。			

表 3　台灣各法規水力發電規模分級表[13]

法規	裝置容量（kW）	
	微型	小型
台灣(規劃中分級)	< 100	＜500
電業法	無	＜500
再生能源發展條例#3-7	無	＜20,000
再生能源發電系統併聯技術要點	無	無明確定義

政府遷台後，因應經濟發展，用電量增加，除將日人規劃的天輪、烏來等未完工電廠繼續加以完成，並持續電源開發。在整體國家工商業發展，用電需求年年增加的情況下，台電從 1953 年起開始實施一連串長期電源開發計畫，開發大甲溪、濁水溪、立霧溪等主要河川水力資源，持續規畫興建各發電機組。同時在政府為改善民生供水所興建水庫，也同時進行水力發電廠規劃，多方並進，充裕電源開發。其後，台灣電

力公司配合政府組織改造，進行組織整併、改組所屬水力發電廠，並完成遙控、操作維運整合[2]。此外，在電業自由化、促進民間投資等方面，也開放民營電廠的興建，2002 年 6 月第一座民營發電廠「烏山頭水力發電廠」完成併聯發電[5]。依據台灣電力公司統計，2019 年分布於全台各地水力發電廠如圖 3，各發水力電廠之裝置容量如表 4，台灣地區歷年水力發電量統計如圖 4。圖 4 之承攬水力係指電廠所有權並非台電所擁有，由台電承攬操作發電之電廠發電量；慣常水力係指河水以築壩等方式取得水源，以壓力管、渠道引導水流進入水渦輪機，帶動發電機旋轉發電的發電方式。

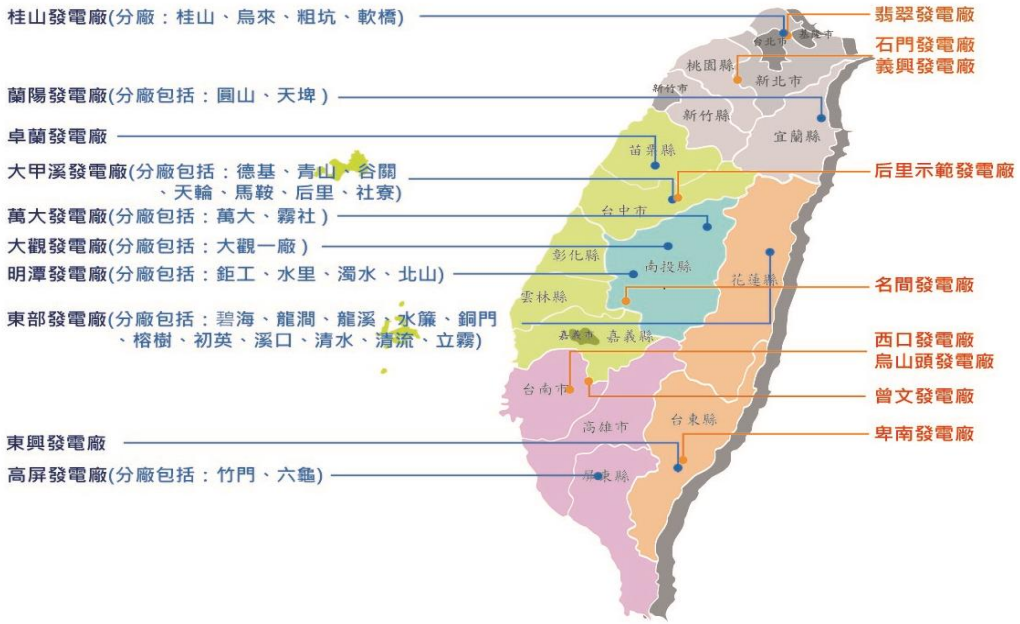


圖 3　台灣水力電廠分布圖[2]

表 4　台灣水力發電廠裝置容量表

電廠名稱	裝置容量(MW)	電廠名稱	裝置容量(MW)
明潭發電廠	1666.2	卓蘭發電廠	80
大甲溪發電廠	1137.2	萬大發電廠	36
大觀發電廠	1110	曾文發電廠	50
石門發電廠	130	蘭陽發電廠	26.4
東部發電廠	183	高屏發電廠	7.2
桂山發電廠	110.7	后里圳低落差示範電廠*	0.11
石門發電廠*	90	名間水力發電廠**	16
義興發電廠*	40	曾文發電廠**	50
烏山頭水力發電廠**	8.75	卑南上圳小型發電廠**	1.98
八田水力發電廠**	2.19	牡丹小型水力發電廠**	0.45
西口水力發電廠**	11.5	*承攬水力 **民營水力	

資料來源：整理自台灣電力公司[2]

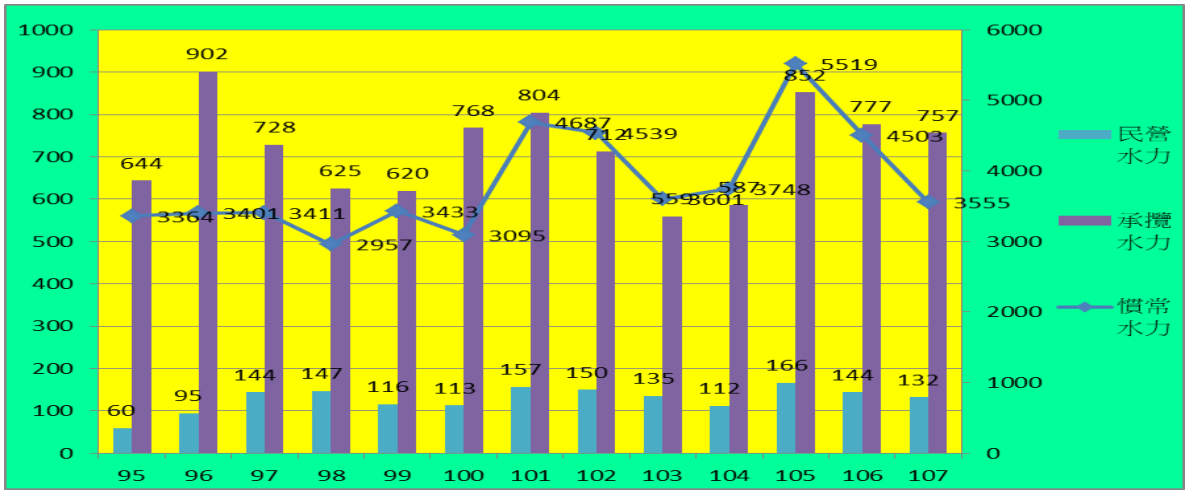


圖 4 台灣地區歷年水力發電量統計(單位：百萬度)[2]

三、水力發電技術與設備

1.水輪機種類

水輪機是一種轉變水力位能、動能轉成為有用的機械能量的機械，是水力發電不可或缺的零組件[6]。目前水輪機普遍分為衝擊式(Impulse)、反應式(Reaction)二種，每一種又因設計差異細分不同型式(如圖 5 及圖 6)。

(1)衝擊式水輪機

利用噴嘴的增速將低速水轉換為高速水流，將壓力頭（Pressure head）轉換為速度頭（velocity head），水流從噴嘴直接噴向渦輪葉片，在葉片上產生作用力使渦輪旋轉。衝擊式水渦輪的機械動力輸出來自水流的動能，它可以在全開式或半開口式機殼中運行，但由於其噴嘴的設計而無法反轉[7]。衝擊式水渦輪適用於低流速高壓流體，常見的有佩爾頓水輪機(Pelton Turbine)、斜擊式水輪機(Turgo Turbine)、及橫流式水輪機(Cross Flow Turbine)，如圖 5。

a) 佩爾頓水輪機：又稱水斗式水輪機，以設計者萊斯特·佩爾頓的名字命名，是常見的渦輪設計方式[5]。佩爾頓水輪機是一種衝擊式圓形渦輪機，渦輪外輪周圍被一系列等距的彎曲的葉片包圍，這些葉片承受水的衝擊產生動能。由於水流的所有能量幾乎全都進入推動葉片，使水輪旋轉，從而產生較大的扭矩與動力[1]。

b) 斜擊式水輪機：是另一種衝擊式水輪機的設計，設計類似佩爾頓水渦輪，但噴嘴以 20o 左右的角度噴射彎曲或特定角度的葉片，使得水從一側衝擊葉片，並從另一側流出。葉片在水流過渦輪時產生推力，從而使渦輪機旋轉[5]。斜擊式水輪的效率比以前的佩爾頓水輪機低[8]。

c) 橫流式水輪機人們使用最久的水力設計，傳統水車就是典型代表，是讓水流以接近於 90 o 水流方向垂直衝擊葉片，再順著葉片流出葉輪，產生轉動的扭矩與動力，如此將水的勢能轉換為旋轉動能[7]。

(2)反應式水輪機：

這種類型的水輪機設計是將渦輪機葉片完全浸沒在水流中，並封閉在加壓殼體內藉由水壓和速度的降低釋放能量，通過移動渦輪機葉片來引起反應。由於內部葉片的角度，通過反應渦輪的水流可能會反轉，因此反應渦輪也可以用於泵水[9]。反應式應用廣泛，依照不同設計而適用於各種不同水頭高度與水量，常見有混流式水輪機(Mixed Flow Turbine)、斜流式水輪機(Diagonal Flow Turbine)、軸流式水輪機(Axial Flow Turbine)、貫流式水輪機(through-flow Turbine)。如圖 6。

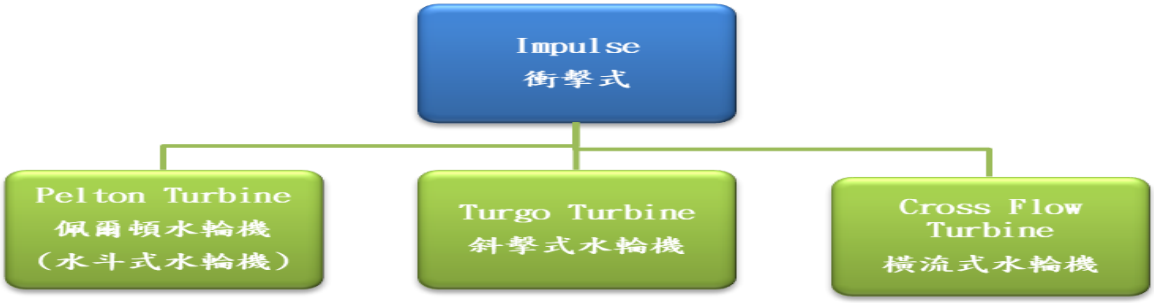


圖 5　衝擊式水渦輪型式分類

a) 混流式水輪機： 水流從四周徑向流入轉輪，然後以近似軸向方向流出轉輪，轉輪由上冠，下環和葉片組成。混流式水輪機結構緊湊，效率較高，能適應很寬的水頭範圍，是目前世界各國廣泛採用的水輪機型式之一[7]。

- 法蘭西斯水輪機(Francis Turbine)又稱：混流式水輪機、佛式水輪機，很常見的水輪機類型。將有壓力的水流導入封閉而飽和的渦輪室中，使水流作用在整個水輪上，使水流釋放壓力，帶動葉輪轉動產生動能。導葉在水輪機旋轉流道外圍，以控制水流通過水輪機流速的方式來控制不同的電力生產率[7]。常用於中水頭、大流量的地方，轉換的效率可高達 90%。可使用在水頭高度 40～600 米之間運作，其最常見於水力發電廠所使用[9]。

b) 斜流式水輪機：水流經過槳葉的方向與主軸線呈 45～60 度的傾斜角。在結構上介於混流式與軸流式之間。傾角 45 度的槳葉和導葉聯結調節。槳葉和導葉由於雙重調節，高效率區的流量和出力範圍較寬廣，但結構複雜，生產技術要求高，造價昂貴，實際應用不多[7]。

- 德里亞茲水輪機(Deriaz Turbine) 德里亞茲渦輪機最大特點就是同時

具有可調和固定葉片，水渦輪包含電機和操作機構，有助於根據負載調整運行葉片，當轉動調節葉片時，就可以在各種負載下高效運行。因此適用於負載變化較大的電站。優點是與 Kaplan 渦輪相比，在部分負荷下具有更高的效率，也可用於可逆式水輪機維修[7]。

c) 軸流式水輪機：是指水流由軸向進入轉輪，沿其葉片自軸向流出，將水流能量轉換為機械能的水輪機[5]。

- 定槳式水輪機(Propeller Turbine)又稱：旋葉水輪機，主要部件有轉輪、導水機構、水輪機室、座環和尾水管。還有主軸、軸承和聯軸器等非過水零件。軸流定槳式水輪機的輪葉是被剛性聯接於輪軸上[1]。這種水輪機結構比較簡單，造價便宜，但它只能利用導水機構調節出力，當水頭及出力變化時，水輪機效率降低很多[10]。多使用於水頭範圍為 10～70m，轉輪直徑在 2m 到 8m 之間[7]。
- 轉槳式水輪機(Kaplan Turbine)又稱：卡普蘭式水輪機，轉槳式水輪機具有螺旋槳式葉片，且葉片可以機械調節的軸流式轉輪，和混流式水輪機轉輪的固定式葉片截然不同[9]。這種可調式葉片可以在很寬的流量和水頭範圍內保持較高的水力效率，轉槳式機組很適合河床式水電站[7]。

d) 貫流式水輪機：即水流在流道內基本上沿著水準軸向運動，主要運用在 1～25m 的低水頭、大流量的專用機型，由於其水流在流道內基本上沿軸向運動，不轉彎，因此機組的過水能力和水力效率能有所提高[7]。特適用於潮汐電站，其雙向發電、雙向抽水和雙向泄水等功能很適合綜合利用低水頭水力資源。貫流式水輪機適合低水頭應用，而且效率高投資低，發展較快，而且功率也越來越大[9]。

- 有軸貫流式水輪機(Shaft-extension type tabular turbine)結構上明顯的特徵是導葉與機組中心線成 65°佈置，採用軸向錐形導水機構。軸伸貫流式水輪機流道由進水管、座環、錐形導水機構、轉輪室、尾水錐管和 S 型尾水肘管及尾水渠組成。由於水流平行於水輪機軸流向轉輪，可以將上游來水以盡可能少的水力損失、均勻地引入錐形導水機構，形成理想的環量進入轉輪室，然後高效地轉化為水輪機的機械能[7]。
- 豎井貫流式水輪機(Pit-type turbine) 是指發電機裝設在通入廠房的豎井中，也就是是把發電機、齒輪增速器裝在具有流線型斷面的鋼筋混凝土或鋼結構的豎井中，與安裝在流道內的水輪機相連接。其進水是從豎井兩側或加上底部進水引入水輪機，在管型座前水流才匯成圓環型，從導水機構至尾水管出口[7]。
- 全貫流式水輪機(Rim-generator turbine) 貫流式水輪機的引水部件、轉輪、排水部件都在一條軸線上，水流一貫平直通過，故稱之。圓錐形導水機構主要有導葉外室、導葉內室、導葉、導葉臂、連桿、控制環等，圓錐形導水機構導葉軸線與機組軸線成 60~70°角布置。導葉內

外室上都設有支撐導葉的軸承。導葉在內、外室之間組成一個圓錐面，起著調節水流或關機的作用，為了減少導葉端面漏水損失，導葉內、外室表面均為球面[7]。

- S 型水輪機(S-type Turbine) 以 S 型配管將葉槳安裝在管道內，在轉彎處用連動軸，連結在管到外的發電機。由於發電機安裝於水道外，因此不再需要球燈泡狀護罩，這是透過水流緩慢的流動來運轉的水輪機[9]。
- 燈泡式水輪機(Bulb Turbin) 將發電機、葉槳、導葉等設計放在管線中，順水流軸向布置，為減少對水流影響將整體成流線型[5]。

2.發電機種類

小型水力發電機多數為同步發電機，非同步發電機使用較少，微型水力可使用的發電機有非同步發電機、同步發電機、永磁發電機,其中又分為單相和三相發電機。發電機選用必須配合後續電力控制與穩壓系統，選擇適合操作條件產品。

圖 6　反應式水渦輪型式分類表

3.水輪機選用

水輪機必須配合水頭、水量、安裝位置、、、等因素進行選擇，集中仍以水頭為決定選用型式主要參考，水量雨水頭則是影響發電兩關鍵參數。

小、微水力多選擇衝擊式、軸流式、貫流式水渦輪機，比較符合現場情況，而市場上也有較多既有產品可供選擇，如:微型佩爾頓衝擊式機組(Micro Pelton)、微型貫流衝擊式機組(Micro Cross Flow)、迷你/微型燈泡式機組(Mini/Micro Bulb)、迷你/微型管狀式機組(Mini/Micro Tubular)可減少設備採購時程，而且有一定操作參數與經驗，有助日後操作。

表 5　各類型式水輪機適用水頭參考表[11]

類型	型式		水頭範圍(m)
反應式	混流式	混流式	40~700
		混流可逆式	80~600
	軸流式	軸流轉槳式	3~90
		軸流定槳式	3~50
	斜流式	斜流式	40~200
		斜流可逆式	40~120
	貫流式	貫流轉槳式	2~30
		貫流定槳式	
衝擊式	水斗式		300~1700
	斜擊式		20~300
	雙擊式		5~100

四、案例說明

本研究以宜蘭縣大同鄉進行小水力發電開發案為例,研討從評估、規劃、設備選用之過程與方案比較，呈現出小(微)發電站設置過程。

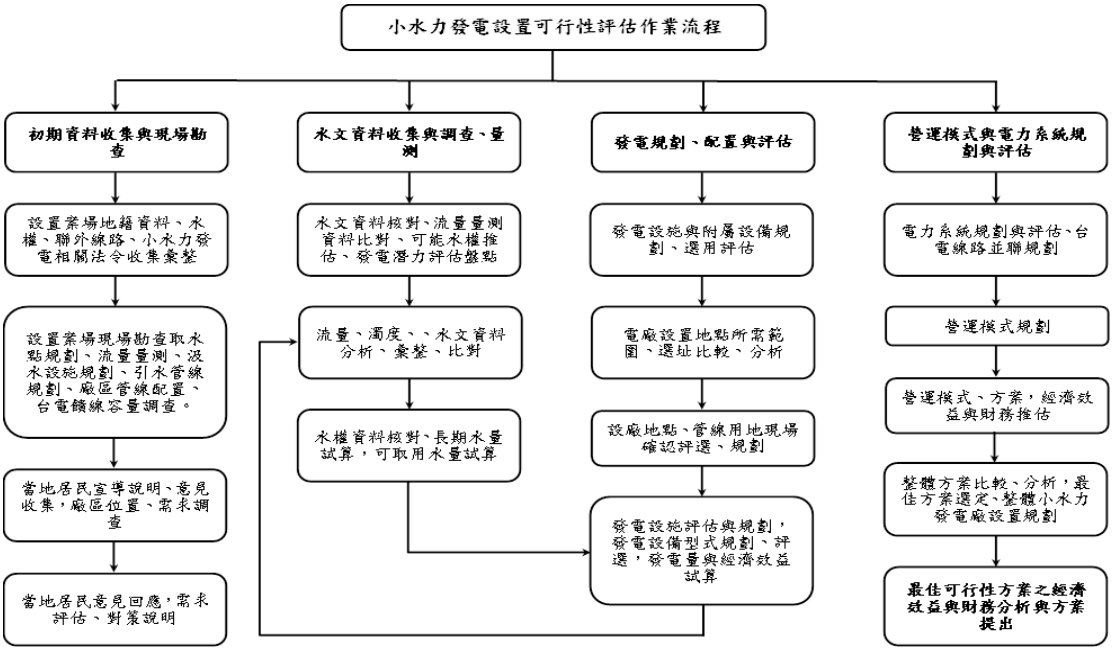


圖 7　小水力發電設置可行性評估作業流程

1. 可行地點性評估：在符合法令規定「既有水利設施」前提下，以目前已設有引水設備地點為必要條件，評估後，初步提出 3 個具有開發潛力的案址，以水量、水頭評估為主要項目，目前部分溪流都有水量相關數據，3 個地點評估潛力，如表 6：

表 6　可行性評估案址列表

項目	水頭(H)	水量(Q)	可發電量
案址 A	60M	0.3CM/S	123KW
案址 B	40M	0.3CM/S	82KW
案址 C	50M	0.3CM/S	102KW
水力發電計算公式： P = 9.8ηQH (kW)， 式中的 η 為整體效率(0.7)			

2. 選址因素說明：本次可行性評估中，共提出 3 個地點可供設置小水力發電站，其中案址 A、案址 B 位「原住民保留區」，依法必須經過「部落會議」同意，才能進行開發，經過多次說明會的溝通說明，部落會議都未能同意設置小水力發電站，案址 C 雖屬於大同鄉，並非屬於「原住民保留區」，無須「部落會議」同意，在地方人士協助下，進行數場說明會，獲得多數居民均贊成設置想水力發電站。經與地方人士討論都認為，規劃案能順利通過主要有發電站設置案址與村落上有一段距離、與社區發展生態旅遊理念相結合，讓大部分居民同意設置。
3. 設置規劃：業者探詢國內工程顧問公司、發電設備廠商、、、等，發現相關經驗並不多，於是找尋國外日本、奧地利、澳洲、紐西蘭、、等國家廠商，除日本提出規劃費用，大部分都因國內沒有代理或經銷商，無法技術支援，而未提出報價。日本廠商評估、規劃約需 2 年時間，總工程投資約 3000 萬，以 100kw 裝置容量，回收年限約 20~30 年，設備保用年限為 50 年，明顯很難有投資效益。

本案由業者自行組織團隊，委託相關技師與廠商進行評估、規畫、施工。

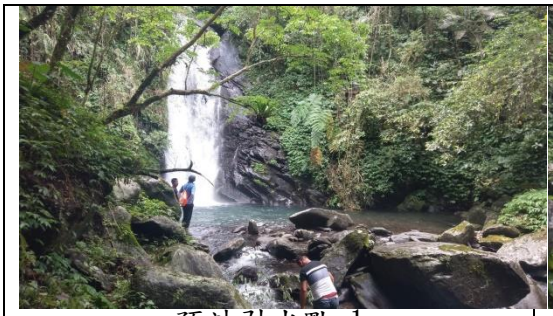
a) 水量評估：目前此溪流並無水量相關統計，團隊採取引用清水溪數據，配合現場測量，推估水量，考量水權申請等因素後，評估可能引水量，如表 7。

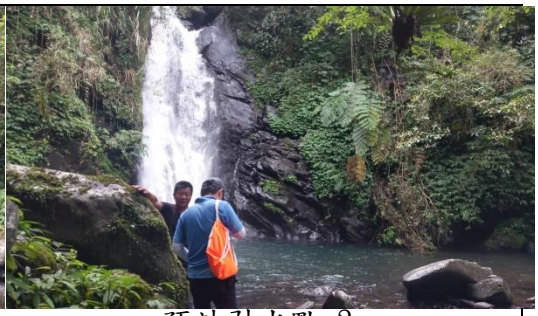
表 7　預估引水量表

水量	全年時間比
0.1　CM/S	85 %
0.15 CM/S	75 %
0.2　CM/S	60 %
0.25 CM/S	45 %
0.3　CM/S	40 %
0.35 CM/S	30 %
0.4　CM/S	25 %

b) 引水工程規劃：經委託專業水土保持、水利技師專業團隊，規畫預計取水、引水等作業，如圖 8。預計將目前簡易取水措施，加強為簡易取

水壩，以 HDFE 管引水(約 150 公尺)，沿途 15 公尺或適當地點設置排砂閥門，靠近水輪機入口 30 公尺，採用壓力鋼管配置，且不設置排砂閥門。


預計引水點-1


預計引水點-2

簡易引水壩示意圖

簡易引水取水措施示意圖

HDPE 管及固定方式之一示意圖

管線排砂設置示意圖

圖 8　規劃案址說明

c) 水渦輪發電機組規格：業者與日本、奧地利、紐西蘭、澳洲廠商洽詢水渦輪機組製作，每 KW 價格約為 8~15 萬，且後續備品、維修都有一定難度，無法短時間供應。最後選定國內廠商配合進行發，預估每 KW 控制在 2.5 萬元之內，採取委託設計製造模式，以利後續備品準備、維修更迅速，預計設置 80kw 水渦輪發電機組二台，如表 8。

表 8　水渦輪發電機組技術資料表

水渦輪型式	佩爾頓	發電機型式	非同步發電機
適合高程(H)	15~60m	相數	三相
水量 (Q)	0.1~0.5 CM/S	額定電壓	380 V
功率範圍	20KW~80KW	額定電流	210 A
額定功率	80KW	額定頻率	60 HZ
額定轉速	1800 RPM	絕緣等級	E 級
飛逸轉速	3000 RPM	適合溫度	5~50 ℃
保用年限	30 年	濕度環境	不結露情況

d) 經費預估：團隊歸納初期各項投資費用，並找尋廠商進行報價、比價，擬出預估所需投資經費，作為各項評估基礎與條件，如表 9。

表 9　投資專案經費預估表

項次	費用名稱	金額	備註
1	委辦、規劃費用	1,500,000	
2	簡易取水壩工程	1,200,000	
3	引水管線工程	1,500,000	
4	發電、變電機房工程	1,000,000	
5	水渦輪發電機組	2,500,000	
6	變電站設施工程	1,000,000	
7	設備驗證、檢驗費用	500,000	
8	其他	800,000	
合計		10,000,000	

e) 投資、回收、效益試算：以團隊自行建立試算軟體，配合所建構可能模式，進行各項試算、比較，顯示出裝置二台容量較小水渦輪發電機，透過操作調配，除可輪流進行設備維修、保養，更能將有限水量做最有效運用，發出比裝置單一機組更多電力，發電量試算：

全年二台皆滿載(160kw)發電時間為 20%，24*365*0.2=1752 小時

全年一台滿載、一台半載(120kw)發電時間為 25%，24*365*0.25=2190 小時。

全年一台滿機，一台停機(80kw)發電時間為 35%，24*365*0.35=3066 小時

全年一台半載，一台停機(40kw)發電時間為 15%，24*365*0.15=1314 小時

全年維修、保養停機為 5%，24*365*0.05=438 小時

預估全年發電量：

160*1752+120*2190+80*3066+*40*1314=840,960Kw/h

躉售電費收入：(以 2019 年 2.81 計算)

840960Kw/h*2.81=2,363,097 元

f) 每年各項維運、支出費用預估：團隊針對運轉後建立維運模式，併羅列各項支出，擬出預估所需維運經費，作為各項評估基礎與條件，如表 10。

表 10　維運各項費用支出表

項次	費用名稱	金額	備註
1	人事費	250,000	
2	業務行政費用	350,000	
3	管線、設備維護費	250,000	
4	睦鄰基金	150,000	
5	設備重置準備金	100,000	
6	稅費、規費、保險費	300,000	
合計		1,550,000	

g) 回收年限計算：

每年躉售電費收入：840,960Kw/h*2.81=2,363,097 元

每年支出：1,550,000 元

年收益：2,363,097-1,550,000=813,097 元

總投資 10,000,000

10,000,000/950,000=12.29 年

20 年總收益：813,097*20=16,261,940 元

(扣除投資後純利為 6,261,940)

30 年總收益：813,097*30=24,392,910 元

(扣除投資後純利為 14,392,910)

50 年總收益：813,097*50=40,654,850 元

(扣除初期建設 1000 萬與設備重置約 400 萬投資後，純利為 26,654,850)

五、結　論

國內現階段最有可能發展的水力發電，應以小、微水力發電規模為主，但目前產業鏈尚未建立，擁有完成評估、規劃、設計、施工並順利商業運轉經驗的廠商只有少數幾家，相關設備的設計、製造業者就更少，更別說水渦輪機效率、性能、參數測試的實驗室或廠商了，這些都將成為小水力發電未來重要課題。這次在規劃選用設備過程，相關廠商對於水渦輪發電機的各項參數、規格都沒辦法提供，以致評估規劃、選購設備遇上頻頸，造成時程延誤。

水力發電站設置最大特性就是每一個都是個案，不論大小開發案，都必須從頭開始評估、規劃、設計、安裝、測試、運轉，任何一個步驟都不能少，50、100kw 的案子或許還能符合開發成本，50kw 以下回收年限就會更長。目前國外廠商已有量產化，整體配套產品，因此要能迅速發展小水力發電環境，優先引進國外經驗(如：日本、紐西蘭、澳大利亞、、、)發展與設計經驗，初期先採購國外設計或量產化之產品，累積足夠的經驗後在進行設備本土化、模組化規劃，進行生產本土化。目前金屬中心已經著手開始進行水渦輪機測試平台的建置，也可以開始接受委託測試，將對國內廠商水渦輪機本土化生產，有長遠影響，未來也可建立水渦輪、水渦輪發電機組各項參數與性能數據，供業者評估、選用。

小水力發電事業，若以日本廠商設計運轉 50 年，將面臨設備重置再次投資的問題，以廠商現有估算設備 30 年壽命，應該是以 30 年運轉為最佳效益，若是能再突破，將設備壽命延到 50 年，長期運轉效益才能顯現。本案例已進入設備設計階段，透過這樣的案例，也將讓相關人員累積經驗，規劃過程中向台電、能源局等單位學習過往經驗，使得規化程序能得以繼續推進，在未來安裝完成後，驗證規劃過程相關推估，作為後續案場發展的經驗。

水力發電為潔淨之自產能源，充分利用水資源，對環境友善的小型水力發電的設置，對業者具有投資的效益，當前應盡速整合產、官、學各方力量共同推動小型水力發電機組測試及認證，以利提升廠商規畫、設計能力，使國內水力產業得以發展。

參考文獻

1.王振勇，2017 水利產業發展策略研討會，開發潔淨再生能源-微(小)水力發電產業發展，2107 年 12 月 28 日
http://www.water.org.tw/2017twicdss/05_%E9%96%8B%E7%99%BC%E6%BD%94%E6%B7%A8%E5%86%8D%E7%94%9F%E8%83%BD%E6%BA%90-%E5%BE%AE%E5%B0%8F%E5%9E%8B%E6%B0%B4%E5%8A%9B%E7%99%BC%E9%9B%BB%E7%94%A2%E6%A5%AD%E7%99%BC%E5%B1%95.PDF

2.台灣電力公司網站 https://www.taipower.com.tw/tc/index.aspx

3.經濟部能源局網
https://www.moeaboe.gov.tw/ECW/populace/home/Home.aspx 。

4.張天瑞，民 96，水力發電系統介紹，物理雙月刊，(廿九卷，三期)

http://psroc.phys.ntu.edu.tw/bimonth/download.php?d=1&cpid=157&did=7
5.維基百科網站
https://zh.wikipedia.org/wiki/%E8%87%BA%E7%81%A3%E6%B0%B4%E5%8A%9B%E7%99%BC%E9%9B%BB%E5%BB%A0%E5%88%97%E8%A1%A8
6.Micro-hydro power, Adam Harvey,2004,Intermediate Technology Development Group. Retrieved 1 January 2005.
7.能源科技課程網
http://www.phys.nthu.edu.tw/~gen_sci/Energy/content4.html
8.Micro Hydro Penstock Design, Andreas von Flotow, 2012, Oregon State University Independent Study and Research Fellow Transcript Notation.
9.逢甲大學，民 105，石門水庫及寶山第二水庫附屬設施小（微）水力發電潛能評估（1/2），經濟部水利署。
10. 中州科技大學通識中心科技世代公民素養課程水力發電教材，網址：http://www.ccut.edu.tw/adminSection/gc_project/downloads/%E6%B0%B4%E5%8A%9B%E7%99%BC%E9%9B%BB.pdf。
11. 日本全國小水力利用推進協議會，網址：http://j-water.org/about/index.html。
12. 經濟部水利署，2009，微型水力發電潛能調查分析及開發策略與相關配套措施之研究。
13. 台灣水利產業發展促進協會，2017，水利產業發展策略研討會。

軋鋼廢油水脫水減量

謝政廷*

摘　要

低熱值廢棄物(礦泥、廢油水)產出量逐年增加，占事業廢棄物焚化(IWI)系統進場廢棄物總量 76%，使 IWI 需耗用大量天然氣(Natural Gas；NG)來處理，導致 IWI 系統 NG 年使用量有增加趨勢。研究團隊採取廢棄物就源減量策略以突破困局，針對軋鋼廢油水研擬脫水減量方案。

基於水在廢油中存在機制，本研究結合懸浮固體粒徑分析、油水界面觀察、脫水試驗、產物去化測試，解析出不同產源廢油水性質有明顯差異，需客製脫水減量程序。對於油分物質比重較水小之廢油，採重力沈降分離即可輕易分離出上部漿狀產物(油層)及下部澄清水相產物(水層)。對於粒徑 1~100 μm 與 100~1000 μm 之油分子均勻懸浮於水層之廢油，採離心式分離法才能有效將油層與水層分離。經投資與改造項目分析，確認油分物質比重較水小之廢油進行改善較具工程可行性及經濟效益，進而研擬出利用既有廢油水暫存槽進行重力沈降油水分離，並增設暫存槽抽水回流廢水處理系統管線之廢油減量方案。分離出的水分每日抽回廢水處理系統，油罐車抽取脫水後的廢油運往事業廢棄物焚化系統處理作業從每日改成隔日。

本研究鑑別軋鋼廢油水分離特性並確認油水分離後產物之可行去路，使挑選對應之合適油水分離技術得以實現，達成廢油減量之目標。節省軋鋼廢水處理系統廢棄物處理/運送費、事業廢棄物焚化系統天然氣費合計 5,264,257 元/年，減少 CO_2 排放 212.8 噸/年。

【關鍵詞】軋鋼廢油水、脫水減量、節能減廢降成本

---

*中國鋼鐵股份有限公司 研究員

一、前　言

事業廢棄物焚化系統(IWI；Industrial Waste Incineration)每月接收礦泥與廢油佔 IWI 接收量的 76%。礦泥熱值低，廢油含水率又在 80~90%之間，使 IWI 需要耗用大量天然氣才能焚化處理低熱值廢棄物，導致 IWI 天然氣的年使用量有逐漸增加的趨勢。

IWI 收受低熱值廢油中 90%來自廢水處理系統。低熱值廢油為高含水廢油，移除水分將能減少天然氣用量，同時節省廢水處理系統廢油處理運送費用。廢油產源多且分散，不同產源間廢油性質與油水混合狀態有明顯差異。本研究選定產源較為集中，且產量占比較高的廢油(代號廢油 A、廢油 B)作為優先研究標的。

二、廢油 A、廢油 B

產出廢油 A、廢油 B 之製程為收受軋鋼廠之含油廢水，進行廢水處理。含油廢水經初步油水分離，浮油經刮臂收集至設備(A)，設備(A)內之廢油即為廢油 A(如圖 1)。

廢油 B(如圖 2)主要為加壓浮除池內，上層浮油與底泥經個別收集、集中暫存之混合物。經水分分析，廢油 B 含水率分析結果如表一，廢油 B 含水率達 96.39 wt%。廢油 B 內懸浮固體經粒徑分析，結果如圖 3。圖 3(a)顯示廢油 B 內懸浮固體粒徑分佈有二個範圍，分別是 1~100 μm 與 100~1,000 μm，若粒徑分析過程再施入超音波(如圖 3(b))，可發現廢油 B 內懸浮固體粒徑主要分佈於 1~100 μm，由此可知廢油 B 內，部分懸浮固體是團聚型態存在的。

廢油 A、廢油 B 顯微照片分別如圖 4 與圖 5，結果顯示，廢油 A 黑色油層基本上為一均勻相，僅少數水滴以油包水形態存在，橙色油層則有懸浮固體(深色物質)、油包水界面等現象。

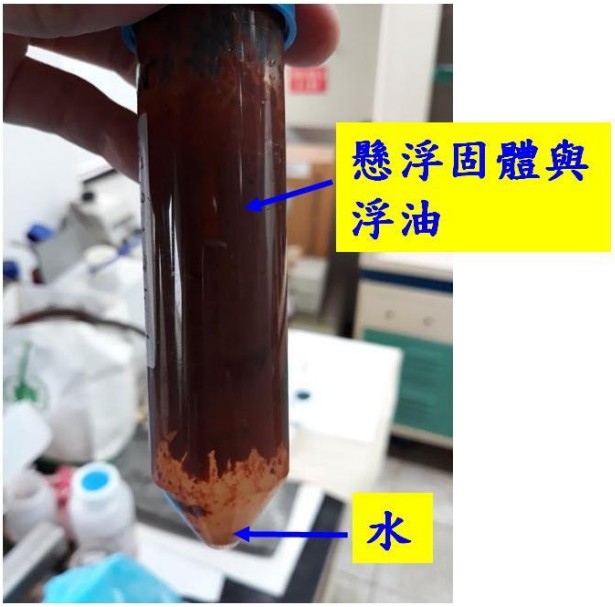
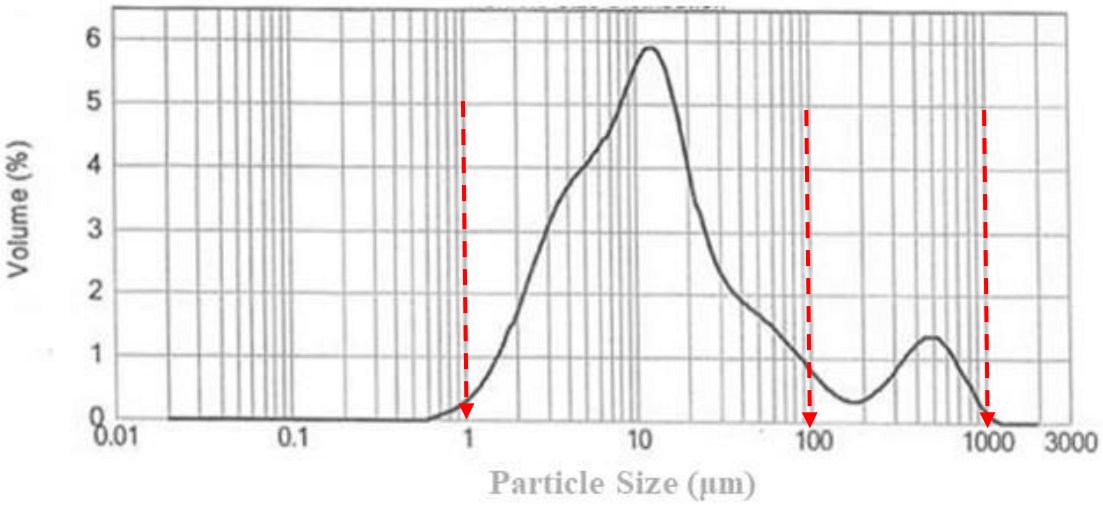
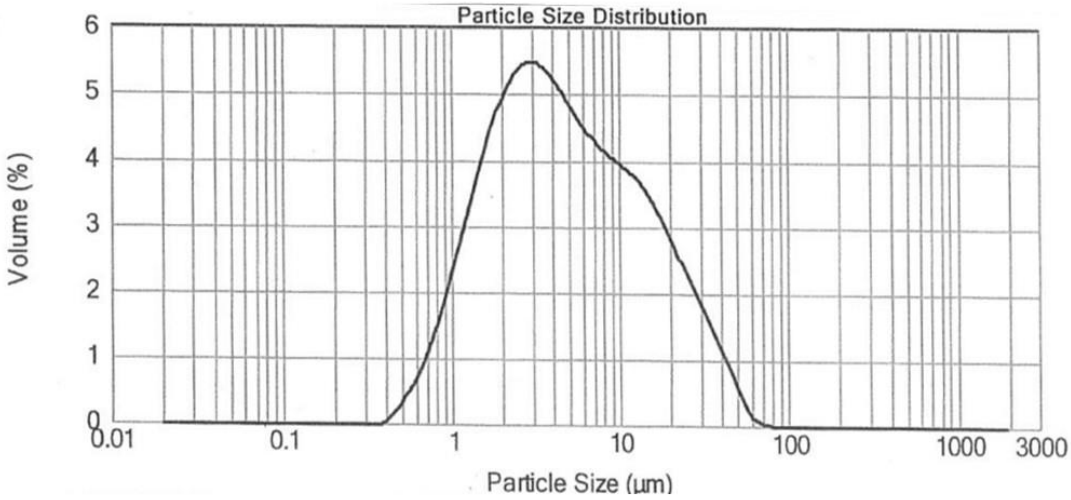


圖 1　廢油 A

圖 2　廢油 B 外觀



(a) 無超音波



(b) 有超音波

圖 3　廢油 B 懸浮固體粒徑分布

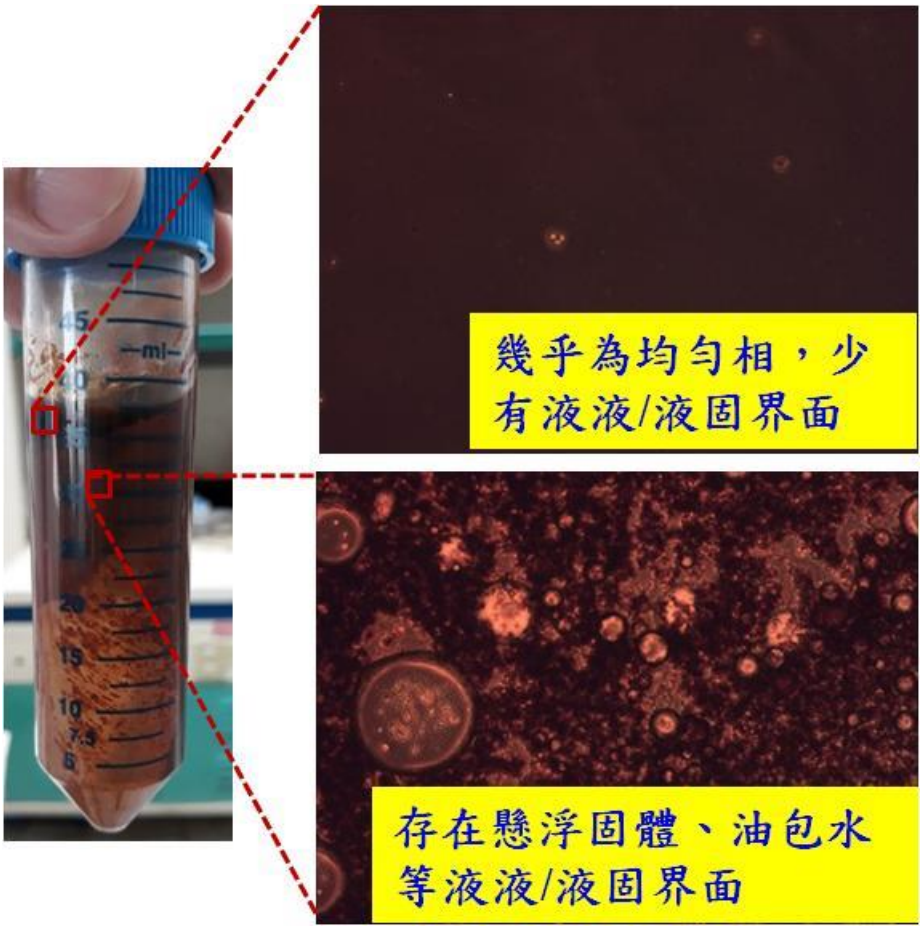


圖 4　廢油 A 顯微照片

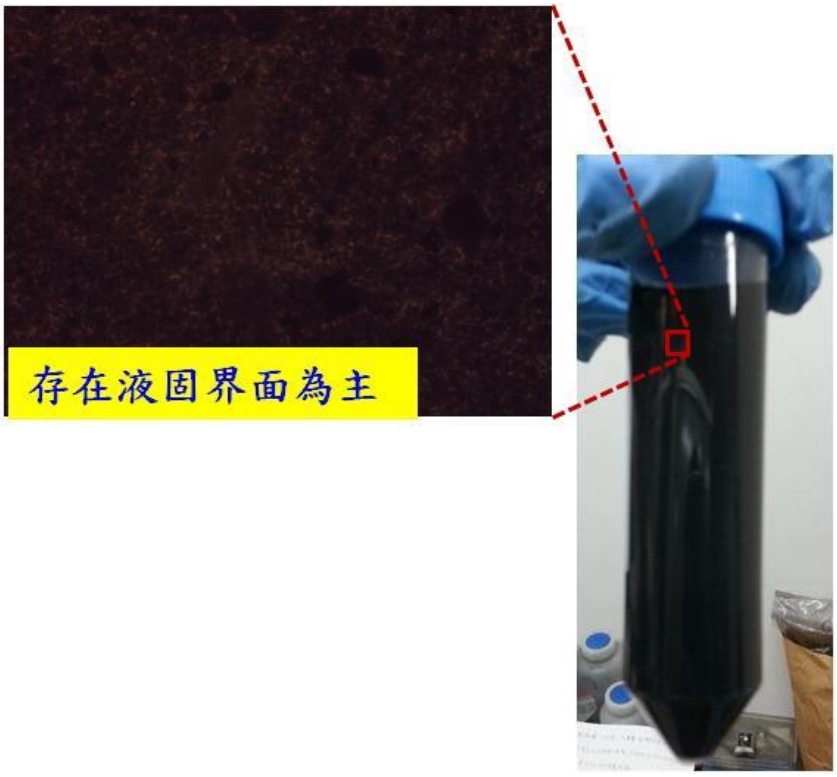


圖 5　廢油 B 顯微照片

表 1 廢油 B 含水率

編號	1	2	3	平均
檢測樣品重量 (g)	1.024	1.022	1.044	
含水率 (wt%)	96.58	96.15	96.45	96.39

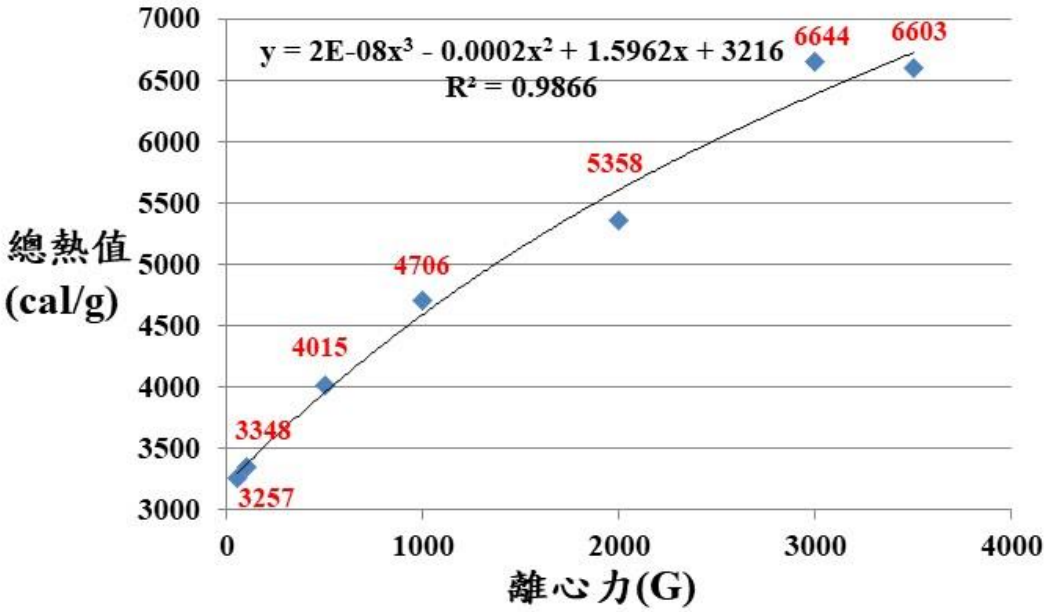
三、脫水方法對脫水效果的影響

廢油 A 具黏稠油分組成，易造成濾布堵塞，脫水效果變得極差，廢油 B 之油分物質粒徑小，受浮力影響，不易自然沈降，因此選擇重力沈降法、離心法為廢油 A 優先評估之脫水方法；選擇過濾法、離心法為廢油 B 優先評估之脫水方法。

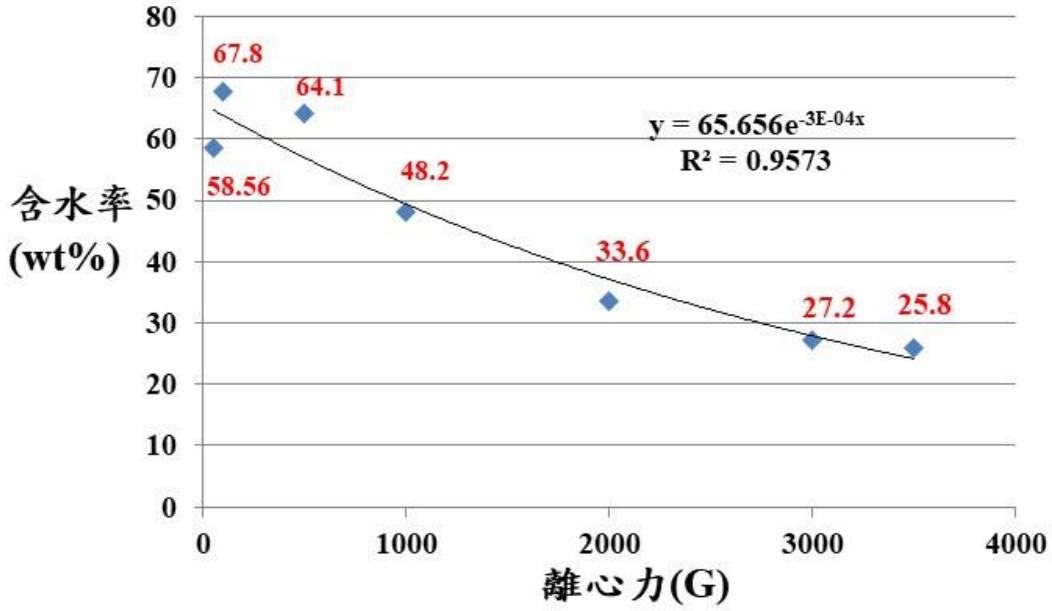
廢油 A 在離心力 50 ~ 3500 G，離心時間 3 min 作用下，油層產物之總熱值與含水率分別為 3257~6603 cal/g、67.8~25.8 wt%(如圖 6)，水相產物之 pH 值、導電度、懸浮固體量(如圖 7)分別為 5.88~5.32、1270~842 μs/cm、41~82 wt%，pH 值隨離心力增加，pH 值愈低。

廢油 A 經靜置後，收集暫存槽之廢油 A(槽車抽取作業前之廢油 A；如圖 8 左邊)，待例行性槽車抽取作業後，再收集廢油 A(作業後之廢油 A；如圖 8 右邊)。作業前之廢油 A，經人員由上逐步舀取檢視，可發現約上半部分為橙色之油分物質，下半部分為透明之水層。

槽車抽取作業後之廢油 A，經人員由上逐步舀取並取樣分析(結果如圖八 右邊；縮寫說明，Mois.為含水率，GHV 為總熱值)，結果顯示，槽車抽取作業後之廢油 A 全是橙色之油分物質，含水率/總熱值在液面處為 62.3wt%/4852 cal/g，隨著取樣位置愈接近底部，含水率/總熱值愈高/低，顯示證實廢油 A 經重力沈降後，底部為富含水之水層，上部為富含油分之油層，當槽車抽取作業進行，將暫存槽底部富含水之水層抽走，暫存槽內僅剩富含油分之油層。

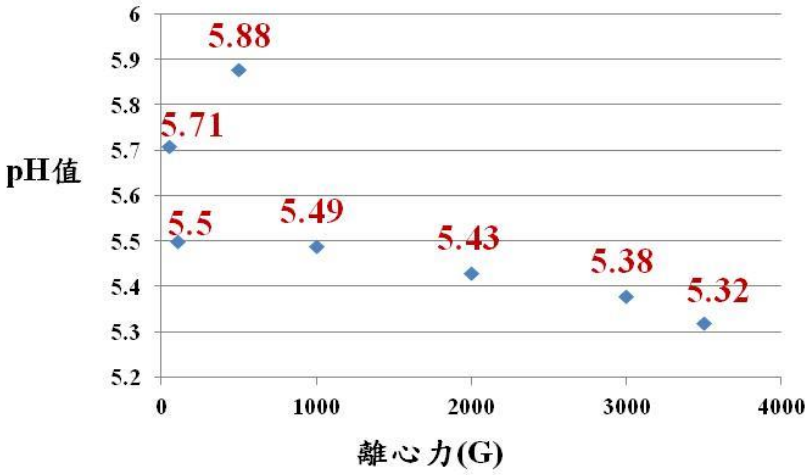


(a)油層產物總熱值隨離心力變化

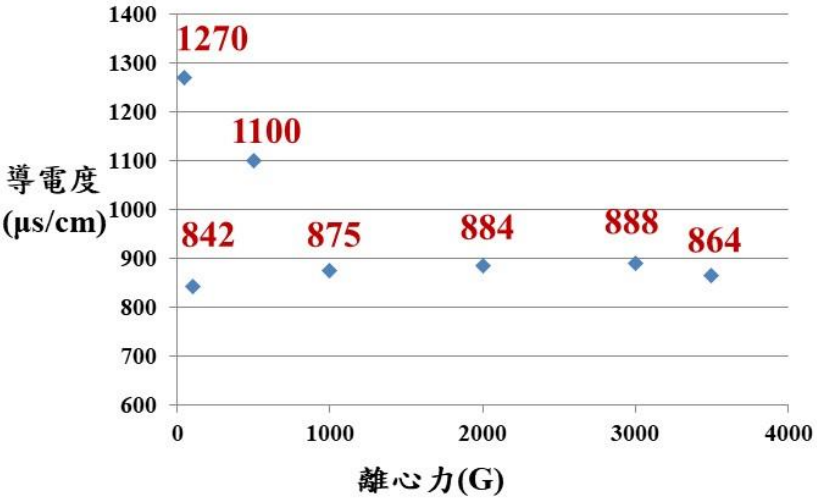


(b)油層產物含水率隨離心力變化

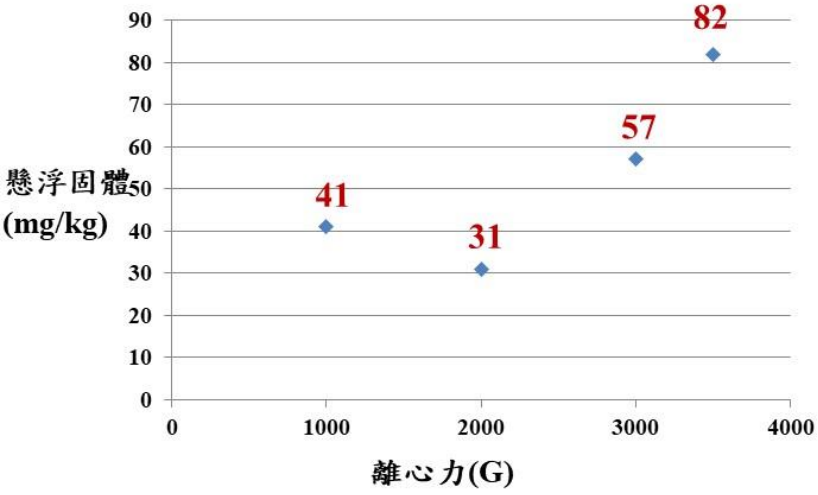
圖 6　廢油 A 經離心分離之油層產物性質



(a)水層產物 pH 值隨離心力變化



(b)水層產物導電度隨離心力變化

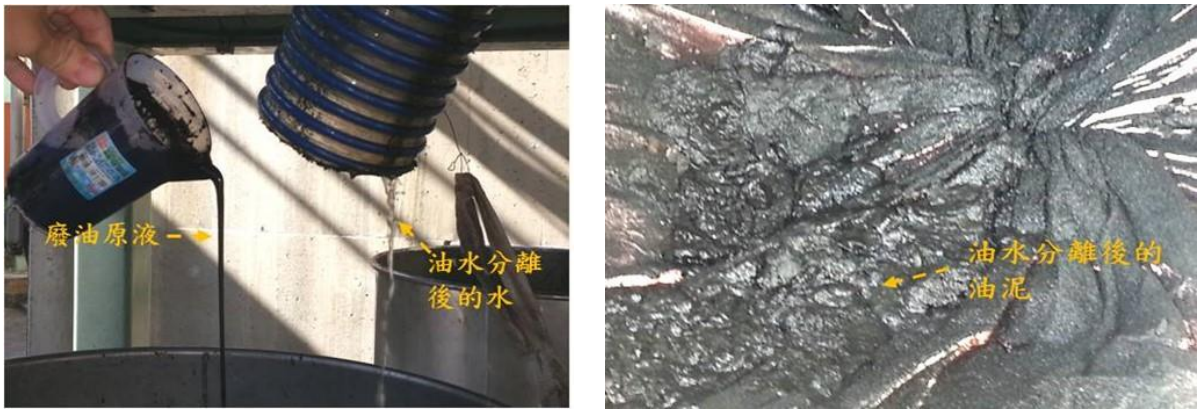


(c)水層產物懸浮固體隨離心力變化

圖 7　廢油 A 經離心分離之水層產物性質

圖 8　槽車抽取作業前/後之廢油 A

針對廢油 B，比較過濾法、離心法的分離效果，結果顯示，以孔徑 1 μm 之過濾材過濾廢油 B，可獲得澄清透明的水及黑色油泥，但 50 ml 之廢油約需 30 分鐘過濾時間才可過濾完畢；在 2,250 G(即 2,250 倍重力)之離心力條件下，經 30 秒的離心時間，廢油 B 可由均相黑色油品分離出澄清透明水相與黑色油泥，顯見離心法能較有效率將水從廢油 B 中分離。為進一步確認，利用橫形螺旋式離心機(工業級離心機)，於廢油 B 產源進行試驗。當進料量為 0.12 m^3/hr 時，於離心力 3,500 G，可獲得澄清之水相產物，結果如圖 9 所示。廢油 B 經離心式油水分離後，固相產物(如圖 9 黑色油泥)含水率為 85 wt%。



(a) 廢油 B 原液與水相產物　　**(b) 固相產物**

圖 9　廢油 B 產源離心式油水分離試驗結果

表 2　水相產物性質

	進料量為 0.12 m^3/hr、3500 G	進料量為 0.12 m^3/hr、3500 G + 濾袋(濾孔 5 mm)
pH	8.27	8.39
導電度 (μs/cm)	1743	1728
懸浮固體量 (mg/kg)	1951	115

四、落實廢油 A 脫水減量

為落實廢油 A 脫水減量，在既有設施增設富含水層回流管線，並每日執行將暫存槽內底部水層抽回廢水處理系統。追蹤結果顯示，槽車可順利將脫水廢油 A 抽取至車上、運至 IWI 後泵入 IWI 廢油儲槽，與其他廢油混合後進入焚化爐焚化，焚化系統依例行操作，系統運作及尾氣排放品質皆無異常。落實效益計算如表 3。

表 3　落實效益計算

數值	單位	說明
節省事業廢棄物處理費		
3,325,050	元/年	每年節省事業廢棄物處理費
節省廢油抽取運送費		
444,000	元/年	
節省天然氣費		
13.82	元/m^3	每立方公尺天然氣費用(以 107.10.02 牌價計)
1,439,707	元/年	節省天然氣費
總計		
5,208,757	元/年	

五、結　論

應用靜置觀察/追蹤、懸浮固體粒徑分析、離心測試、產物物化性分析，發現廢油 A 重力沈降後底部是富含水之水層，上部為富含油分之油層；廢油 B 為粒徑 1~100 μm 與 100~1,000 μm 之懸浮固體均勻懸浮於水層。

針對廢油 B 離心式脫水減量，經油水分離試驗，得知當進料量為 0.12 m3/hr 時，於離心力 3500 G 條件下，可獲得澄清之水相產物，固相產物含

水率為 85wt%。針對廢油 A，利用重力沈降油水分離，分離後之水抽回廢水處理系統，剩餘油分才由油罐車抽取運往 IWI，落實後，廢油 A 脫水減量 50%，效益 5,208,757 元/年，減少 CO_2 排放 212.8 噸/年。

華新麗華不銹鋼煉鋼爐碴之綠色技術與工程實務

楊謹隆*、何錦淵**、陳國輝***

摘　要

電弧爐煉鋼爐碴為煉鋼過程中所隨之產出的副產品，理應為土木特定用途的級配料，但因誤用而被污名化。近期在環保意識高漲的情況下，相關再利用與處理法令受到政府單位嚴謹的規範。為期資源化與再利用與改變觀感，需全面評估爐碴性質與特性，瞭解適合應用之領域、探詢多元應用與滿足大量再利用的需求，方能有效達可長可久循環經濟的目的，滿足市場性的資源循環體系。

有鑑於此，華新麗華已推動諸多研究及產官學合作案，以持續提升自身綠色技術與推廣工程實務。對不銹鋼爐碴分類管理(氧化碴及還原碴)與流向管控，依各自爐碴特性建立多元與可行之應用規畫。在綠色粒料(氧化碴)方面，其具備低磨損率、高健性、高硬度且表面粗糙多稜角，故已實際鋪設於瀝青混凝土面層及基底層級工程；而在綠色粉料(還原碴)方面，其具備高含量氧化鈣、低含量氧化鎂之優良特性，故與營建研究院共同研究及多家水泥業者合作，持續取代部份水泥原料(石灰石)減少水泥業高碳排的開採與燒結作業。另針對還原碴粉化特性，利用分級加工方式取得適當粒徑，研究作成為水泥熟料膠結材，成為水硬性混合水泥摻料的可行性。

除上述爐碴技術研究及工程案以外，華新麗華亦藉由勞動部「企業人力資源提升計畫」，用以提升內部人力有關資源化再利用技術的能力與素質。同時，建立再利用循環鏈，期待發展自身爐碴資源化技術(如科技部支持的爐碴耐燃摻料研究...等)，發揮材料特性，朝高值化產品的爐碴原料開發，並強化爐碴資源化產業鏈結構，遂真正實踐爐碴資源化循環經濟。

【關鍵詞】電弧爐煉鋼、不銹鋼爐碴、氧化碴、還原碴、資源化再利用、產官學合作、循環經濟

---

*華新麗華股份有限公司　資深管理師

**華新麗華股份有限公司　副理

***華新麗華股份有限公司環安衛管理委員會　處長

一、前　言

現今電弧爐煉鋼製程所產出的爐碴已受到政府單位嚴格的規範與管理，華新麗華鹽水廠為實現不銹鋼爐碴資源化工作，除了積極配合政府及鋼鐵公會的督導，更大力推動不銹鋼氧化碴及還原碴產品的研究，以提升綠色技術及建立工程實績。同時，亦整合爐碴資源化產業鏈結構，為實踐爐碴循環經濟貢獻一份心力。

二、爐碴資源化之研究現況與工程實績

電弧爐碴是以廢鋼為原料，通過電弧爐熔解冶煉與後續精煉，大致分成氧化期和還原期，出碴後分別稱為氧化碴和還原碴。氧化碴中氧化鈣含量會較低；而還原碴則反之。另在礦物組成方面，氧化碴礦物組成以橄欖石、薔薇輝石為主；而還原碴其礦物組成以 C_3S(矽酸三鈣)、C_2S(矽酸二鈣)及 RO(二價金屬氧化物固熔體)為主[1、2]。茲將氧化碴與還原碴之資源化研究及工程實績分述於下。

1.不銹鋼氧化碴

華新麗華煉鋼原料來源多屬廢棄不銹鋼，所生成氧化碴內部含較多鉻、鎳、銅等高價金屬，故華新麗華爐碴資源化首要工作即是提高鋼碴分離程度。如此，高價金屬可回收為製程原料，再重新投入煉鋼製程；另外，氧化碴可依其特性研發其再利用產品。上述兩項工作任務均須充分發展，以達成循環材料再利用之訴求。

華新麗華氧化碴具備成為瀝青混凝土粒料之潛力，故與學界合作一系列試鋪道路計畫，以研究華新麗華氧化碴取代瀝青混凝土粗粒料以進行再利用的正確方式。而此一系列計畫成果係以氧化碴綠色材料推廣再利用為目的，同時也可減緩廠內堆置問題。

(1)基礎特性：華新麗華氧化碴經由破碎、磁選、篩分後，可成為六分石、三分石及砂三種綠色粒料。由於其屬於鹼性材料，又表面富含孔隙，推知氧化碴與天然石之物理化學性質有所不同。若將氧化碴應用於瀝青混凝土中，須先研究氧化碴與天然石基本性質上的差異，才可適當調配氧化碴瀝青混凝土配比設計，最終達成現場鋪築品質最佳化。茲將氧化碴基礎性質之相關試驗說明如下。

A. 毒性溶出試驗：為確認氧化碴有害物質的量值是否超過法規規範，氧化碴採樣後，送往相關單位進行 TCLP 檢驗。其試驗結果如表 1 所示，其依據 NIEA M103.00C 規範進行檢測，包括鉛、鉻、六價鉻、鎘、銅、汞、硒、砷、鋇等重金屬含量外，尚有氫離子濃度指數 pH 值等。從檢測結果得知，氧化碴各重金屬溶出含量皆未超標，且其他數值皆符合法規標準，故可免於應用時對環境的衝擊。

表 1　氧化碴 TCLP 試驗

檢驗項目	檢驗值 1	檢驗值 2	標準值
事業廢棄物毒性特性溶出程序	*	*	-
萃出液中總鉛(Pb)，mg/L	ND	ND	4.0
萃出液中總鉻(Cr)，mg/L	0.013	0.1	4.0
萃出液中總六價鉻(Cr^{+6})，mg/L	ND	ND	0.2
萃出液中總鎘(Cd)，mg/L	ND	ND	0.8
萃出液中總銅(Cu)，mg/L	ND	ND	12.0
萃出液中總汞(Hg)，mg/L	ND	ND	0.016
萃出液中總硒(Se)，mg/L	ND	ND	0.8
萃出液中總砷(As)，mg/L	ND	ND	0.4
萃出液中總鋇(Ba)，mg/L	0.505	0.736	10.0
氫離子濃度指數 pH 值	12.39	12.33	2.0~12.5
含 2,3,7,8-氯化戴奧辛及呋喃同源物等 17 種化合物之總毒性當量濃度	0.002	<0.001	1.0

B. 物理性質試驗：氧化碴各項基礎物理性質如表 2，氧化碴比重為 2.9，略大於天然石比重 2.6。此外，氧化碴具有低磨損、低扁平率與高破碎面比例，其表面粗糙多角，對於粒料互鎖作用有增強效果，可提升瀝青混凝土之回彈模數、間接張力強度及抗滑性，故提高抵抗車轍的能力。

表 2　氧化碴基本性質試驗

材料種類	氧化碴粗粒料	天然粗粒料	規範值	規範
比重試驗	2.9	2.6	>2.2	ASTM C127
吸水率試驗	2.12	1.49	<10%	ASTM C128
破碎率試驗(%)	87.69	63.5	≧60.0	ASTM D5821
扁長率試驗(%)	9.56	9.8	<10.0	ASTM D4791
洛杉磯磨損試驗(%)	20.9	28	<40.0	ASTM C131
細長率試驗(%)	0.27	1.6	<10.0	ASTM D4791
含砂當量試驗(%)	51.67	50.39	≧50.0	ASTM D2419

C. 篩分析試驗：在進行配比設計前，須先完成篩分析試驗，以利查看氧化碴與天然石粒徑分佈，尋求氧化碴取代天然石最佳配比曲線。

從圖 1 各分料曲線中，氧化碴試體粒徑分佈相對不均勻，呈現大粒徑偏多現象。因大粒徑粒料之互鎖能力較佳，推論對瀝青混凝土穩定值比天然石者為高，顯示氧化碴粗粒料適合取代天然石粗粒料。

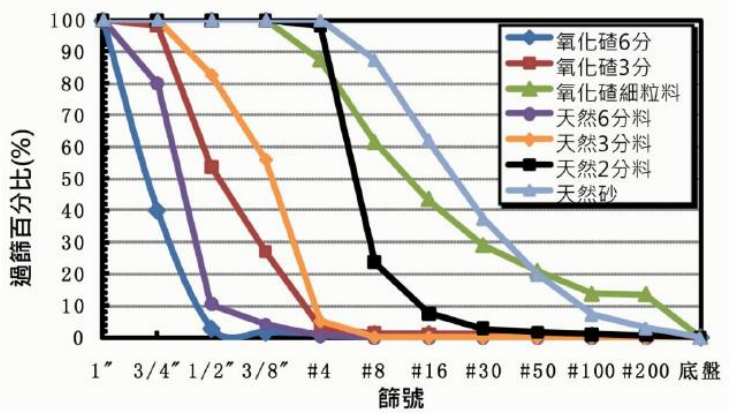


圖 1　氧化碴各分料篩分析曲線

D. 含油量試驗：圖 2 試驗結果顯示，瀝青混凝土內氧化碴取代量 0%、20%、40%、60%之最佳含油量分別為 4.7%、4.6%、4.45%、4.3%，此說明最佳瀝青含量隨氧化碴取代量增加而下降。因氧化碴本身含有 CaO 成分，其為鹼性物質能有效吸附瀝青膠泥，推測氧化碴取代量愈高，粒料破碎面愈多，粒料間空隙愈少，進而降低無效瀝青含量，因此最佳含油量隨之降低。

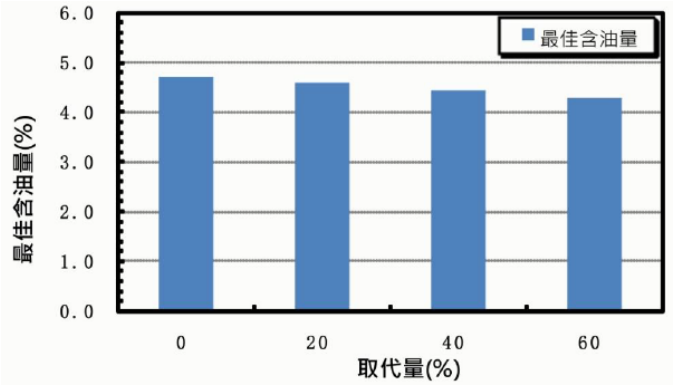


圖 2　氧化碴各取代量最佳含油量

E. 穩定值試驗：穩定值為道路強度指標之一，在圖 3 顯示氧化碴取代量增加，穩定值相對增加，且全數皆在規範值以上。穩定值愈高，表示鋪面可以承受較大載重而不產生變形。意味氧化碴應用於道路上，承受交通荷重能力提高，特別適合應用於交通量大或重車行經之地區。

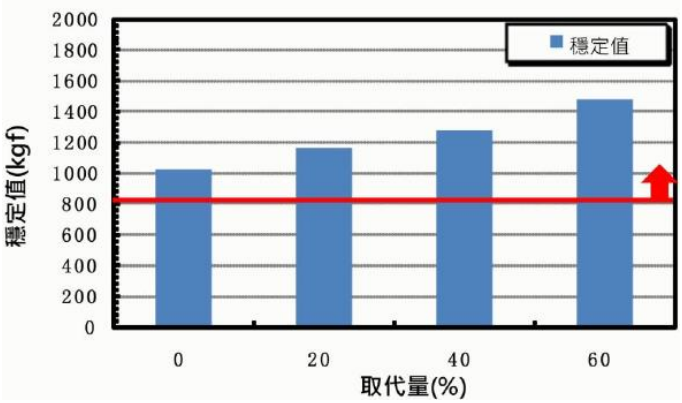


圖 3　氧化碴各取代量穩定值

F. 流度值試驗：流度值乃指試體破壞時的最大垂直變形量，若其值過低，則表示瀝青混凝土剛脆，承受重交通量將造成鋪面開裂；若其值過高，則表示瀝青混凝土柔軟，容易造成車轍現象。在圖 4 中，顯示氧化碴瀝青混凝土隨著取代量增加而些微增加流度值，且符合流度值規範之區間內。

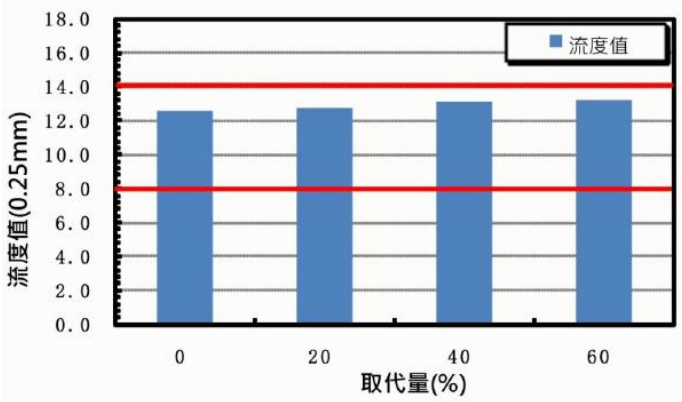


圖 4　氧化碴各取代量流度值

G. 回彈模數試驗：依據 ASTM D4123 來進行回彈模數試驗，以探討氧化碴取代部分天然粒料對於密級配瀝青混凝土之回彈模數(MR)的影響，其結果如圖 5 所示。顯示密級配瀝青混凝土之回彈模數隨氧化碴取代比例增加而增加，可相對提升瀝青混凝土整體勁度。

H. 水份敏感性特性試驗：此試驗乃探討使用氧化碴取代部分粒料對於密級配瀝青混凝土之水份敏感性特性的改變，故依據 AASHTO T283 進行水份敏感性特性試驗，簡稱 TSR 試驗。此試驗 TSR 值越高代表越不容易產生雨天剝脫的現象，其結果如圖 6 所示。從圖中可以觀察到隨著添加氧化碴量增加，TSR 值隨之上升的情況，其皆高於國內外所採用需高於 75%之規範，使用氧化碴會比天然石有較佳抗浸水剝脫的效應。

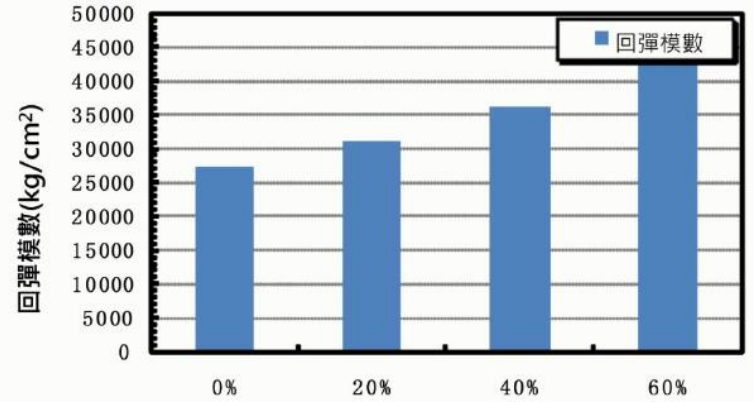


圖 5　氧化碴不同取代量回彈模數

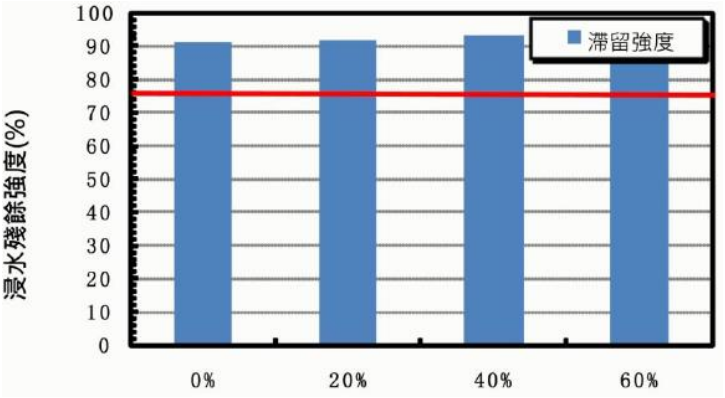


圖 6　氧化碴不同取代量浸水殘餘強度

(2)應用方向：華新麗華思考氧化碴資源化應用方向甚廣，但可從下列要項探索現今最適合發展之途徑。

A. 依據法規：由經濟部所制定「事業廢棄物再利用管理辦法」，其中載明氧化碴(石)再利用用途有：水泥原料、瀝青混凝土粒料原料、瀝青混凝土原料、管溝回填用控制性低強度回填材料用粒料原料、管溝回填用控制性低強度回填材料原料、鋪面工程（道路、人行道、貨櫃場或停車場）之基層或底層級配粒料原料等。

B. 根據綜合分析：由財團法人營建研究院針對“性質符合”、“再利用處理難易程度”、“再利用供需單一化”以及“再利用市場效益”等因子，分析再生材料優先使用規畫適當性議題所作之分析報告。報告指出氧化碴再生材料優先使用於瀝青混凝土粒料，其次使用於CLSM粒料用途。

C. 根據產學研究：由我廠委託國內學術單位研究指出，我廠氧化碴性質堅硬耐磨，粗粒料表面粗糙且形狀多角，經各項試驗證明無水合

膨脹性及毒性溶出特性，適合應用於瀝青混凝土粒料以及道路基底層級配粒料。

(3)工程實績：

A. 鹽水廠內試鋪道路

華新麗華於 2017 年委託國內知名大學進行氧化碴瀝青混凝土鋪面試鋪，而該實績地點位於鹽水廠區內，其工程於五、六月間完成。其中道路之一為南三路，此鋪設長度為 74 公尺，寬度 9.4 公尺，如圖 7 所示；其二為二道門前鋪面，而鋪設長度為 60 公尺，寬度 22 公尺，如圖 8 所示。此兩條鋪面以氧化碴瀝青混凝土作為面層，鋪設厚度則於鋪面現況調查後，依實際檢測數據規劃為 20 公分。而氧化碴取代天然石之比例，則依不同氧化碴取代量之馬歇爾瀝青混凝土配比設計決定，最終以最高取代量 60%為之。

圖 7　華新麗華鹽水廠南三路試鋪作業實景

圖 8　華新麗華鹽水廠二道門前鋪面試鋪實景

目前該委託計畫已完成大部分之道路監控項目，其中路面平整度檢測結果顯示：在開放通車 24 個月後，兩道路之平坦度標準差皆符合規範要求，意謂氧化碴瀝青混凝土之耐用性較天然石瀝青混凝土為佳。另外，鋪面表層幾乎不會發現像其他爐碴(石)產生明顯銹斑而影響觀瞻，此亦為不銹鋼氧化碴瀝青混凝土之一大優點。

B. 台南市 74 號道路

有鑑於華新麗華於 2017 年之廠內試鋪取得良好成果，於 2018 年再與學術單位向台南市政府爭取南 74 號道路試鋪，其道路長度共約 185 公尺，如圖 9 所示。同樣檢視華新麗華氧化碴材料基本性質、瀝青混凝土工程性質、配合設計、產製及施工及品質管制後，再實際鋪設於該道路上，後續擬定長期觀測鋪面成效，其成果提供予政府工務單位作為重要參考。

圖 9　南 74 道路試鋪作業實景

目前南 74 號道路開放通車期間已達三季，追蹤顯示氧化碴瀝青混凝土經過 3 個月的荷重輾壓，檢測其下陷深度皆較天然石瀝青混凝土低，展現較優良的抗車轍能力。

C. 高雄市臨海工業區

為建立更多氧化碴示範道路實績，由財團法人鋼鐵工業同業公會與經濟部工業局合作，共同於 2018 年底於高雄市內之工業區進行氧化碴試鋪道路工程，而臨海工業區之中林路即為試鋪道路之標的之一。華新麗華亦積極投入配合該項試作工程，並直接與學術單位合作且提供氧化碴料源，其試鋪道路實景如圖 10 所示。

圖 10　高雄市臨海工業區中林路試鋪作業實景

中林路試鋪路段全長 400 公尺，寬 13 公尺，已於 2018 年底竣工。累測至今之地下水質檢驗數據均呈現無重金屬汙染之情事。

D. 高雄市林園工業區

與臨海工業區相同，林園工業區工業三路亦由財團法人鋼鐵工業同業公會與經濟部工業局合作，於同年底所進行之氧化碴試鋪道路工程。工業三路試鋪路段全長 200 公尺，寬 10 公尺，亦於 2018 年底竣工，如圖 11 所示。其累測至今之地下水質檢驗數據均呈現無重金屬汙染之情事。

圖 11　高雄市林園工業區工業三路試鋪作業實景

2.不銹鋼還原碴

除了上一章節提及不銹鋼氧化碴之外，不銹鋼還原碴亦為煉鋼廠製程之副產物，因主要成分含鈣、矽、鐵及鋁等水泥原料所需元素組成，故參考文獻[3]以評估導入水泥製程之技術可行性，希冀免除水泥廠產生製程及品管之疑慮。爰此，華新麗華委託財團法人臺灣營建院與國內水泥大廠合作推動「不銹鋼還原碴部分取代水泥原料研究計畫」，以期儘早建立還原碴循環再利用之坦途。

因不銹鋼還原碴少量含有水合體積膨脹物質，諸如：游離氧化鈣(f-CaO)及游離氧化鎂(f-MgO)，其材料再利用途徑相對受到限縮。但根據國內外相關研究[4、5]顯示，還原碴之化學成分與礦物相組成和矽酸鹽水泥熟料者接近，故發想以細化加工對還原碴原料進行前處理(例如：篩分細化及研磨細化)，並摻入水泥以瞭解還原碴資源化為膠結材料的可行性。

(1)基礎特性：華新麗華還原碴基本特性分析有：化學成分、粒徑分布、篩粉細度、晶相組成等，均為影響還原碴成為水泥生料替代料及熟料摻料之重要因子。

A.還原碴原料成分

華新麗華還原碴經檢驗成分結果，如表 3 所示。在水泥製程中，CaO 為其最重要之成分之一。檢視表中可發現還原碴 CaO 含量高達 55%，相較他廠還原碴高，應用於部分取代石灰石生料用途頗具優勢。此外，水泥另一重要控制成分為 MgO，研究顯示原料含 MgO 比例愈高，往往對其熟料煅燒、結粒、強度以及安定性帶來負面影響，其含量應當愈低者為佳。華新麗華還原碴 MgO 的平均含量約在 4.8%至 5.7%範圍，由表中顯示還原碴製程管控 MgO 含量愈趨穩定低值。

表 3　還原碴原料成分檢驗

	CaO	MgO	Cl	Cr2O3	TiO2	MnO	F	水分
	試燒期間							
最大值	54.28	6.98	0.15	2.25	0.35	0.84	1.31	12
最小值	50.79	4.69	0.1	1.46	0.3	0.59	0.81	4.33
平均數	52.84	5.7	0.12	1.91	0.32	0.68	1.07	6.53
標準差	0.96	0.71	0.01	0.20	0.02	0.06	0.13	1.82
	生產期間							
最大值	54.63	6.18	0.14	2.48	0.39	0.94	1.41	12.8
最小值	51.32	4.18	0.04	1.12	0.26	0.51	0.85	1.6
平均數	52.84	4.79	0.09	1.7	0.32	0.68	1.07	5.67
標準差	0.64	0.33	0.02	0.35	0.03	0.09	0.12	1.72

B.篩粉細度

藉由布蘭氏氣透儀測量細度試驗結果，顯示通過#30 標準篩的還原碴細度約為 1,200 cm^2/g，其與標準水泥試驗值 3813 cm^2/g 相距甚遠。依照 CNS 61 對卜特蘭水泥細度規範，比表面積不得低於 2,800 cm^2/g，比表面積值若低於 2,800 cm^2/g 時，其混凝土之工作度不佳，並明顯發生浮水現象，因此若還原碴應用於水泥摻料時，應進行研磨加工程序。

C.晶相組成

以 XRD 進行還原碴晶相組成分析，其結果如圖 12 所示。結果顯示還原碴原料含有大量的矽酸二鈣(C_2S)活性礦物成分和微量的氧化鈣(CaO)及氫氧化鈣($Ca(OH)_2$)，亦即說明還原碴具有作為卜作嵐材料之潛力。

D.部分取代水泥生料特性

水泥生料係由石灰質原料、黏土質原料或其他原料按比例配合，並研磨至某一細度的物料。而水泥生料配料作業乃依據水泥型別、原料與燃料品質、工廠生產設備條件等，所選擇合理的搭配，其可簡稱為配料。後續配料計算須確認各種原料、燃料的消耗比例以生產品質穩

定、高產能、低消耗的水泥熟料。故於試燒作業之前，比較導入華新麗華還原碴與未導入者之水泥生料成份差異不大，顯示兩者配料結果相近。同樣地，於試燒作業之後，再比較未導入還原碴與導入者之水泥熟料成份，結果顯示兩者熟料成份差異亦小，分別如圖 13(a)及圖 13(b)所示，此結果證明還原碴部份取代水泥生料具備技術可行性。

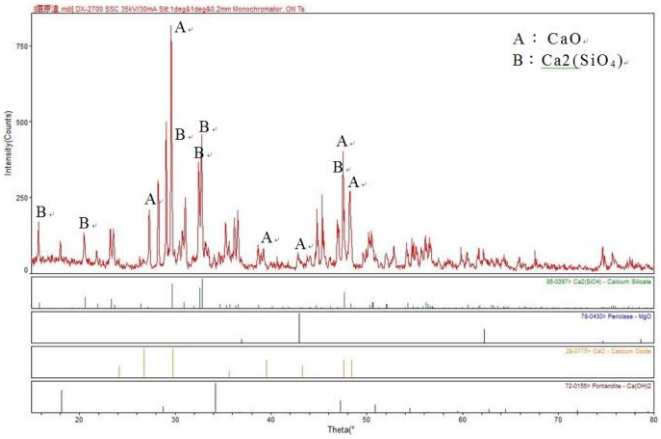


圖 12　還原碴 XRD 分析圖譜

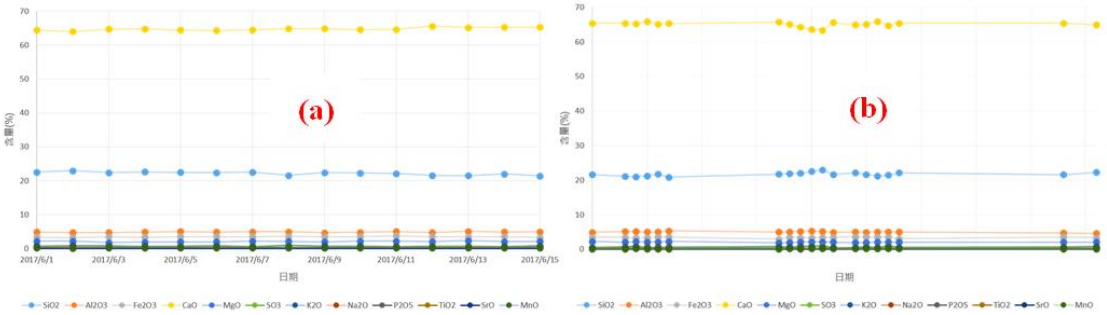


圖 13　(a)未導入及(b)導入還原碴之水泥熟料成份

E.部分取代水泥熟料特性

強度活性指數可判斷還原碴原料可否作為工程應用之卜作嵐材料之依據。檢視 CNS 3036 之規定，將還原碴細粉料摻合水泥做為混合膠結材料，並製備成砂漿試體以測試抗壓強度，利用各齡期之抗壓強度換算為活性指數，若砂漿試體的 7 天和 28 天抗壓強度活性指數達 75%以上，則表示試驗材料之活性符合卜作嵐材料之規範。在本次試驗中，添加 20%之各細度還原碴所製成的砂漿試體中，其抗壓強度活性指數皆無法達到 75%以上，如圖 14 所示。故還原碴取代膠結材料的重量百分比應控制在 20%以下。

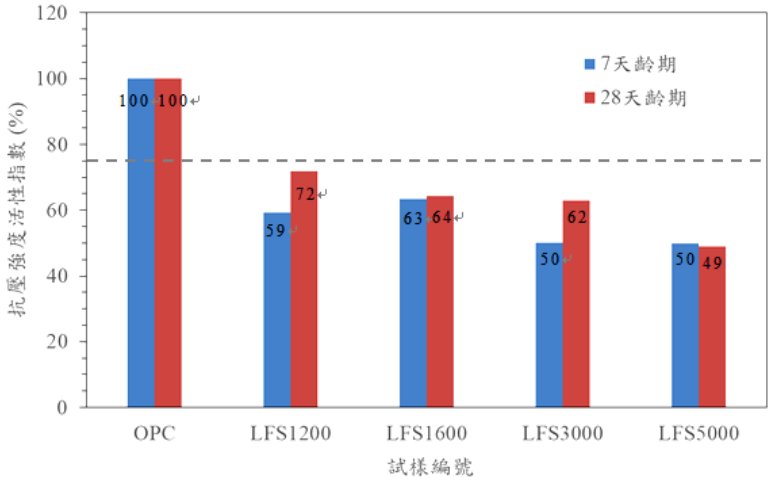


圖 14　不同細度之水泥砂漿試體強度活性指數

(2)應用方向：華新麗華還原碴資源化應用方向甚廣，但可從下列要項探索現今最適合發展之途徑。

A. 依據法規：由經濟部所制定「事業廢棄物再利用管理辦法」，其中載明還原碴(石)再利用用途與上述氧化碴部分雷同。但特別獨立說明不銹鋼製程產生之還原碴(石)之用途為水泥原料、紐澤西護欄原料，或經高壓蒸氣處理後作為非構造物用預拌混凝土粒料原料、非構造物用預拌混凝土原料或混凝土(地)磚、空心磚、水泥瓦、水泥板、緣石、混凝土管、人孔、溝蓋之原料。

B. 根據綜合分析：由財團法人營建研究院針對“性質符合”、“再利用處理難易程度”、“再利用供需單一化”以及“再利用市場效益”等因子，分析再生材料優先使用規畫適當性議題所作之分析報告。報告指出還原碴再生材料優先使用於水泥生料，其次使用於 CLSM 粒料用途。

C. 根據產學研究：由我廠委託國內學術單位研究指出，我廠還原碴含 Ca 量特別高，且爐碴於降溫過程易於粉化，經各項試驗證明水合膨脹性及毒性溶出特性均符合規範，適合應用於部分取代石灰石原料之水泥生料。另外，XRD 分析結果顯示還原碴含有大量矽酸二鈣(C_2S)活性礦物成分，亦即還原碴具有作為卜作嵐材料之潛力。若經細化加工並摻入水泥，應具備成為膠結材料的潛力。

(3)合作實績：

A.台灣第三大水泥廠

於 2017 年委託「財團法人臺灣營建研究院」研究華新麗華還原碴

應用水泥生料之議題，並聯合台灣第三大水泥公司的冬山水泥廠共同合作以評估製程可行性。該合作計畫已於 2018 年順利導入量產，茲將合作檢驗重點敘述如下。

a. 水泥產品成分：檢測水泥生料及熟料成份，結果顯示添加還原碴與未添加還原碴之水泥生料配料成份差異小，且添加還原碴與未添加還原碴之水泥熟料成份亦差異不大。現今持續追縱後續生產之生料、熟料成份，整體趨勢均呈現穩定。

b. 水泥產品抗壓強度：根據水泥廠、營建院以及預拌廠檢測之出庫水泥抗壓強度，結果均顯示添加還原碴對抗壓強度並無負面效應，並持續追縱後續生產之水泥產品的抗壓強度，其各項數值結果呈現穩定。

c. 六價鉻檢測：依據第三單位檢測之結果，含還原碴之水泥產品之六價鉻含量未超過有害事業廢棄物認定標準(2.5ppm)，故不對環境與人體造成負面之影響。

B.台灣第一大水泥廠

因有前例水泥廠合作經驗及詳實分析，更利於再於 2018 年與台灣第一大水泥廠測試本公司還原碴，並於 2019 年亦順利導入量產。下列簡明敘述雙方合作之檢驗要項。

a. 氧化鈣成分含量：經水泥廠實測還原碴之 CaO 含量為 55.08%，證明其為部分取代石灰石之優良材料。

b. 氧化鎂成分含量：經實測還原碴之 MgO 含量低於水泥廠進料規範值，水泥廠可藉由適當配料降低 MgO 帶來之風險。

三、強化爐碴資源化產業鏈結構

1.教育訓練

為配合國家 5+2 產業政策之循環經濟推動，並結合行政院前瞻基礎建設計畫，華新麗華與國立成功大學合作，以申請勞動部「企業人力資源提升計畫」。藉由開設相關課程以及實務研究創新經驗分享，期可提升組織內部爐碴循環經濟之創新與管理能力。此外，華新麗華參與和其他諸多學術單位合作所獲得研究成果，由內部講師彙整後，再開設一系列新知推廣課程，例如：循環經濟概論、氧化碴粒料資源化、還原碴部分取代水泥生料及熟料摻料等，亦是本次參與本計畫之重點項目。

華新麗華自從 2018 執行該計畫循環經濟系列課程期間，公司內部所

成立之「爐碴資源化推動小組」展開後續申請產官學合作之科專計畫，期待教育訓練成為研發創新之墊腳石，為爐碴資源化產業鏈建立厚實之基礎。

2018「企業人力資源提升計畫」執行完成後，經勞動部勞動力發展署審評核，已獲得人才發展品質管理系統(Certificate of Talent Quality-management System, TTQS)銅牌證書之殊榮。今年再獲得勞動部青睞，已接續執行 2019「企業人力資源提升計畫」中，並邀請更多循環經濟領域之專家擔任課程講師，諸如：學界教授、建材通路商及回收業廠商，為華新麗華受訓人員挹注更豐富及多元的資訊。

2.整合下游廠商

華新麗華屬於爐碴產源事業單位，然而爐碴被定義成事業廢棄物，故必須交由具備再利用資格廠商處理之。但因應不同爐碴資源化再利用之途徑，則必須透過不同功能之再利用機構為之。有鑑於此，華新麗華擬成立一再利用機構為爐碴再利用之總樞紐，希冀成為各個不同產業鏈之原料起始點，提供下游廠商優質原料，建立長期穩定之經濟循環體系。目前積極拓展爐碴再利用產品如下所述。

(1)瀝青混凝土綠色粒料：建置初期，擬定新設再利用機構成為提供瀝青混凝土粒料之廠商，並配合政府循環經濟方針與服膺政府制定相關法令，推動各地方道路鋪面翻修工程。

(2)非結構用綠色建材原料：因應華新麗華爐碴具備特殊膠結性，經過若干加工程序使之成為非結構用之建材摻料。此爐碴資源化技術乃透過產學合作或是科專計畫進行，並依照法令得申請個案再利用，方可進行爐碴產品之生產。

四、結　論

華新麗華股份有限公司面對日益嚴峻的爐碴問題，已經開展一系列計畫行動以突破現有困境。除了積極與事業主管機關、鋼鐵公會等配合相關審查作業之外，亦積極委託學術單位與縣市政府、下游廠商推動爐碴再利用研究與建立工程實績，其成果已逐漸受到各界重視。又華新麗華知悉爐碴問題最終面為社會問題，於是對內展開一系列教育訓練課程以奠定爐碴資源化正確觀念；對外則多方參與爐碴產品供應鏈整合工作，為國內提升綠色技術及實踐循環經濟貢獻綿薄心力。

五、參考文獻

1.「煉鋼爐石種類」，台灣鋼鐵工業同業公會(http://steelslag.tsiia.org.tw)，(2018)。

2.曾仕文，「電弧爐還原碴應用於控制性低強度材料及其安定化成效評估研究」，國立中央大學土木工程研究所碩士論文，(2012)。

3.Vilaplana, A.S.d.G., V.J Ferreira, A.M.L. Sabiron, A.A. Uson, C.L. Gonzalez C.B. Conde & G. Ferreria (2015). "Utilization of Ladle Furnace slag from a steelwork for laboratory scale production of Portland cement." Construction and Building Materials 94: 837-843.

4.Sheen, Y.N., D.H. Le & T.H. Sun (2015). "Greener self-compacting concrete using stainless steel reducing slag." Construction and Building Materials 82: 341-350.

5.吳明富，「還原碴-高爐石作為混合膠結材料之應用」，國立中央大學土木工程研究所碩士學位論文，(2013)。

廢太陽能電池模組回收再利用合成吸附材料之研究

劉姵吟*、陳志成**、林以潔***

摘　要

綠色能源為我國能源政策之推動方向，其中太陽能光電產業為主要發展重點之一，隨著太陽能光電模組設置量逐年攀升，未來太陽能板廢棄量將相當可觀。目前國內廢太陽能光電模組之處理或再利用方式，除部分材料可回收再利用為產業用料外(如矽晶圓)，大部分則委託國內代清除處理業者進行掩埋處置，不但造成許多有用資源的浪費，更將面臨掩埋場地難尋問題，因此環保署積極規劃建立廢太陽能板之回收處理體系。

太陽能電池模組主要以玻璃(70%)、鋁框(15%)、EVA 與 PVDF 等封裝塑料(10%)、矽晶(3%)、以及接線盒與極線等其他配料(2%)所組成，其中玻璃成分純度高並富含矽鋁氧化物，極具有回收再利用合成高應用價值之多孔性吸附材料的潛力。本研究應用實驗室過去累積多年之研發經驗與成果，已成功透過鹼熔水熱合成技術將廢太陽電池模組玻璃回收再利用製成沸石等多孔性吸附材料，並更進一步探討操作條件優化與放大量產測試。

研究結果顯示，將鹼熔水熱條件控制於矽鋁比 20、鹼玻比 1.2、鹼熔溫度 400°C、液固比 100、水解/水熱溫度 105°C 及水熱時間 12 小時條件下，可成功將廢太陽能板玻璃再利用轉製合成沸石，並能達到放大量產與縮短反應時間、降低操作成本之目標。每 1 公斤廢太陽能電池模組約可產生 0.7 公斤廢玻璃，經鹼熔水熱合成技術可將其轉製成 0.5 公斤之多孔性吸附材料(沸石)。本研究成果有助於開創廢太陽能板之其他再利用技術與應用管道，有效將廢太陽能板玻璃回收再利用製成具有高經濟價值與高應用性能之再生產品，達到資源循環與高值化之多重效益。

【關鍵詞】太陽能電池模組、鹼熔、水熱、沸石、資源循環

---

*逢甲大學環境工程與科學學系　研究生

**逢甲大學環境工程與科學學系　教授

***逢甲大學環境工程與科學學系　研究助理

一、前　言

由於化石燃料日漸枯竭、環保意識抬頭以及政府大力推動，再生能源產業日漸蓬勃發展，其中太陽能光電產業為主要發展重點之一[1]。太陽能電池模組之平均壽命約為 15-25 年，未來需面臨大量除役問題[2]，文獻推估 2023 年國內將產生 1 萬公噸之廢太陽能電池模組，並以每年 0.5~1 萬公噸之速度持續快速增加[3]，然而目前國內對於廢太陽能板之回收再利用技術尚未成熟，多以暫存、掩埋及製成次級產品等方式進行處理及處置，因此如何將大量廢棄太陽能電池模組進行有效地處理處置與回收再利用將成為太陽能光電產業所需面臨的重要課題。

市面上太陽能電池模組可分為矽晶太陽能電池與非晶矽太陽能電池(薄膜矽太陽能電池)，其市佔率分別為 95%及 5%[4]。矽晶太陽能電池模組之主要成分以玻璃(70%)、鋁框(15%)、封裝塑料如 EVA 及 PVDF(10%)、矽晶(3%)及其他配料如接線盒及極線(2%)所組成[5、6]。根據文獻指出，廢太陽能板之可行回收處理流程係採用熱處理法先將有機物質(如 EVA、PVDF 等)進行熱分解，並將玻璃及太陽能電池兩大部分進行分離，再利用物理或化學方法將太陽能電池進行分離，最後則以金屬冶煉方法將具經濟價值之微量金屬或貴金屬進行純化及再利用[6]，典型矽晶太陽能光電模組回收處理流程如圖 1 所示。然而，文獻中許多研究大多著重於矽晶片及其他貴金屬之回收，但事實上廢太陽能電池模組中之最大成分是玻璃，因其純度高且富含矽、鋁氧化物，極適合再利用合成沸石等無機吸附材料，若能有效將廢太陽能板玻璃回收再利用製成高值化應用材料，對提升廢太陽能板回收再利用之經濟價值與再利用效益將有良好助益與發展潛力。

沸石主要是以矽氧四面體($[SiO_4]_4^-$)及鋁氧四面體($[AlO_4]_5^-$)所構成之多孔性材料，其主要特性為微孔結構(0.5~1.2nm)、比表面積高、高吸附容量、離子交換特性、良好熱及化學穩定性，故沸石在工業及日常生活中常被作為吸附劑、分離劑、離子交換及觸媒載體等應用[6]，因此沸石極具高經濟價值及再利用性。過去通常是以天然礦石或純化學品作為合成沸石之原料，並透過水熱合成技術進行人工合成沸石。然而，因天然礦石逐漸匱乏以及利用純化學品合成沸石之操作成本較高，近年有許多學者致力於應用工業廢棄物作為人工合成沸石之研究，指出焚化飛灰、粉煤灰、污泥、焚化底渣及廢玻璃等工業廢棄物之主要成分為石英(quartz)或莫萊石(mullite)等，富含 SiO_2 及 Al_2O_3[8]，適合作為合成沸石之原料。然而，應用水熱合成技術合成人工沸石之反應機制相當複雜，常因原料矽鋁比差異、添加鹼活化劑種類及濃度高低、液固比及水熱時間/溫度等條件改變而造成不同的合成效果與沸石產品

品質，且過去應用水熱合成法將廢棄物成功轉製成人工沸石之研究大多為小型實驗規模，故如何將鹼熔水熱合成技術放大規模並進行量產測試，優化各項操作條件，以因應市場需求與實務成本考量，值得深入探討與測試開發。

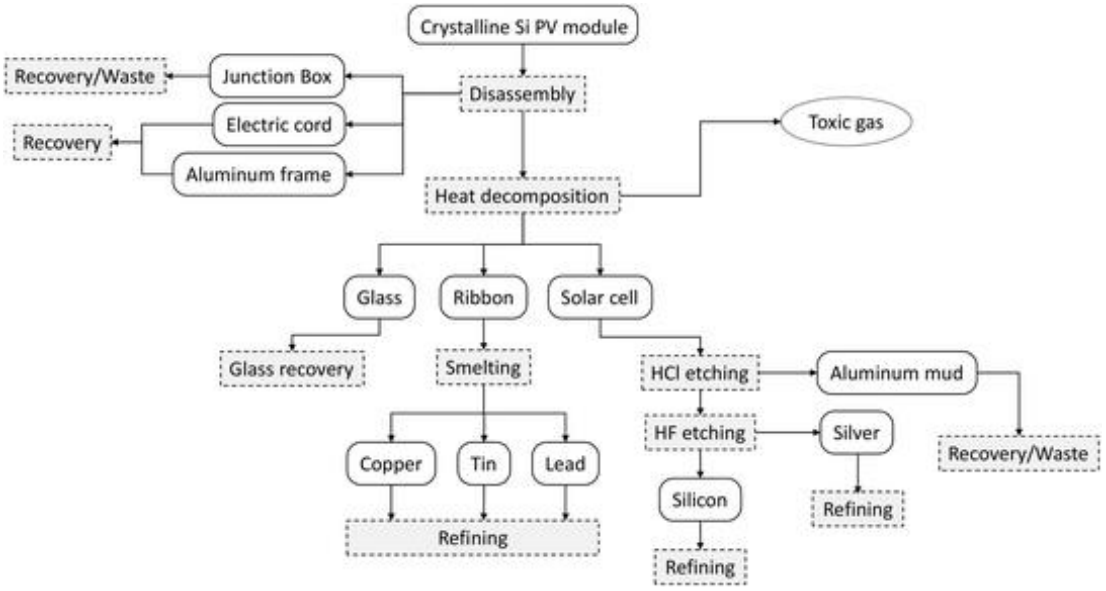


圖 1　矽晶太陽能光電模組回收處理流程[6]

本研究以實驗室過去累積多年之鹼熔水熱合成沸石的經驗、技術及成果為基礎，已可成功將廢太陽能板玻璃進行回收再利用並轉製合成高經濟價值之沸石等多孔性材料。然而因應市場需求量及實廠開發應用之可能性，本研究進一步探討操作條件優化及放大量產測試，期能達成產率最大化、縮短反應時間、降低操作成本以及兼顧產品品質之多重目標，使廢太陽能電池模組能有效回收再利用並創造更多再利用價值與去化管道。

二、研究方法

本研究採用之廢太陽能電池模組係取自國內某太陽能板製造廠之不良品，首先將廢太陽能板進行初步拆解及秤重，置入高溫爐中以 800°C 進行熱分解反應 3 小時，同時通入空氣(20% O_2 in N_2)。完成反應後進行秤重並以人工分選方式將破碎之廢太陽能板分成玻璃、矽晶片及少量極線，熱處理前後之重量損失部分則為受熱分解之塑料封裝材料(如 EVA 膜及背板 PVDF)。完成分選後之玻璃及矽晶片則分別進行機械破碎、過篩，以作為本研究合成沸石之原料使用。

本團隊根據過去實驗室開發應用鹼熔水熱合成技術之經驗與成果，已成

功將廢太陽能板玻璃轉製成多孔性吸附材料-沸石，並探討影響鹼熔水熱合成效果之各項控制參數及條件(鹼熔溫度、矽鋁比、鹼玻比、液固比及水熱時間)，已初步建立廢太陽能板玻璃轉製合成沸石之最佳操作條件，本研究以此初步結果為基礎，進一步測試探討實驗參數與控制條件之優化以及放大製程規模，以達到量產與實務應用目標。廢太陽能板回收再利用合成沸石之實驗流程圖如圖 2 所示。

本研究為有效提高沸石產率並模擬實廠放大量產之實際情況，除提高原料投入量外更將水熱合成反應器容積加大，量產測試方法及步驟簡述如下：調配原料之矽鋁比值為 20，添加適量鹼活化劑(NaOH)使鹼玻比為 1.2，以溫度 400°C 進行鹼熔反應 1 小時，再加入去離子水使其液固比為 100，以 105°C 進行水解反應 40 分鐘，待水解反應完成後，添加適量模板劑(CTAB)及調整 pH 值至 10 左右，即可進行水熱反應 12 小時，水熱反應完成後所得之固體，經烘乾並以 550°C 高溫煅燒 3 小時即可完成沸石之製備。將合成沸石產物進行 BET 比表面積分析及產率分析，比較量產測試及小型實驗規模合成沸石之產率及品質差異，據以評估實廠應用鹼熔水熱合成技術量產沸石之可行性，並分析探討放大量產之可能潛在問題與經濟效益。

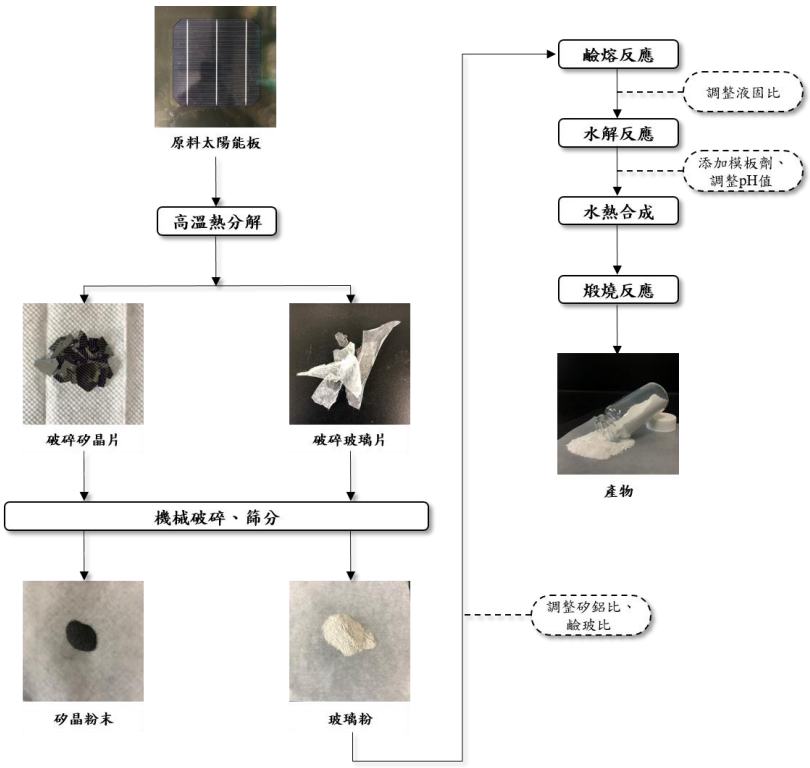


圖 2　廢太陽能板回收再利用合成沸石流程圖

三、結果與討論

圖 3 顯示廢太陽能光電模組經熱處理及人工分選之處理流程，將廢太陽能光電模組以 800°C 進行熱分解，可使太陽能板之背板及 EVA 膜被有效分解，未受熱分解之殘餘固體則透過人工分選方式，分離回收玻璃及矽晶片。應用熱分解前後之重量變化可探討太陽能光電模組之主要成分比例，如表 1 及圖 4 所示，廢太陽能光電模組主要成分為玻璃(79%)，其次為受熱分解之 EVA 及 PVDF 等封裝塑料(18%)，構成太陽能電池之矽晶片僅佔總重量之 3%。相關文獻亦指出，構成結晶矽太陽能光電模組之主要成分為玻璃(70%)、鋁框(15%)、封裝塑料如 EVA 及 PVDF(10%)、矽晶(3%)及其他配料如接線盒及極線(2%)[9]，與本研究分析結果相符。

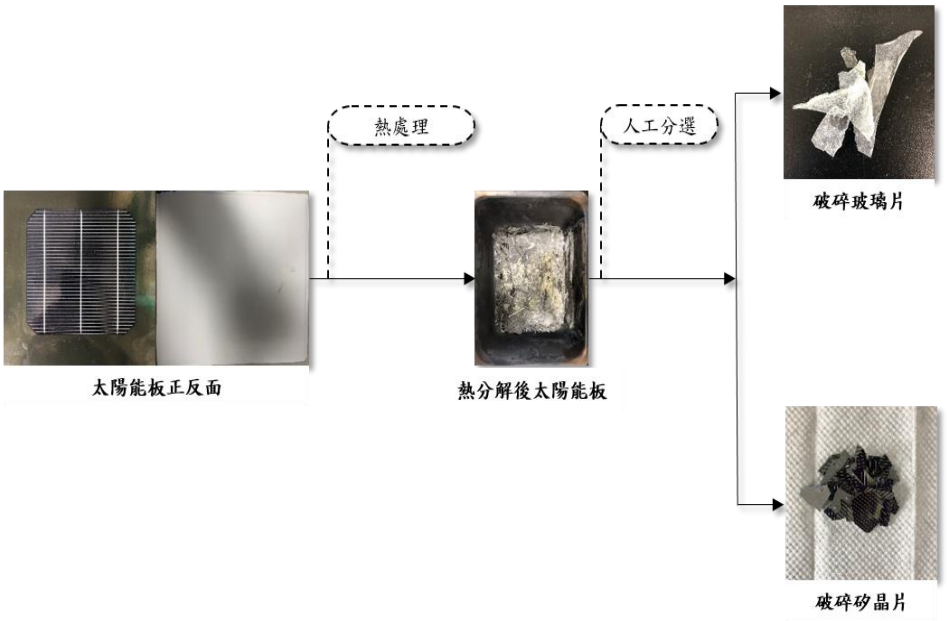


圖 3　廢太陽能光電模組經熱處理及人工分選流程圖

表 1　廢太陽能光電模組之主要成分百分比

	重量(g)	
熱分解前太陽能板總重	390	
熱分解後太陽能板總重	321	
主要成分	重量(g)	重量百分比
EVA、PVDF	69	18%
玻璃	309.63	79%
矽晶片	11.63	3%

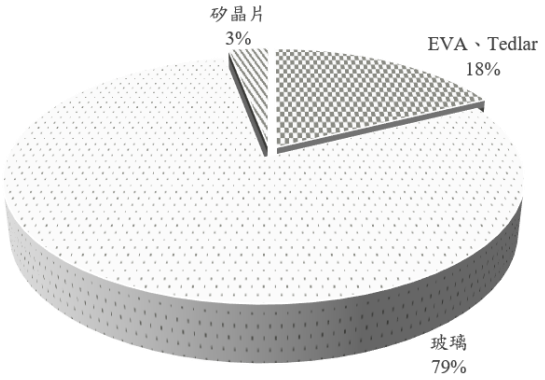


圖 4　太陽能光電模組之主要成分比例圖

本團隊根據過去實驗室開發應用鹼熔水熱合成技術之經驗與成果，已可成功將廢太陽能板玻璃轉製合成沸石，並發現當合成條件為矽鋁比 20、鹼玻比 2.4、鹼熔溫度 600°C、液固比 50 及水熱時間 36 小時，可達最佳產率為 56%；當合成條件為矽鋁比 20、鹼玻比 0.6、鹼熔溫度 400°C、液固比 200 及水熱時間 24 小時，則可合成出最大比表面積為 1068.41m^2/g 之人工沸石。不同操作條件對產率及比表面積之影響程度分別為矽鋁比>鹼玻比>鹼熔溫度>水熱時間>液固比以及鹼玻比>液固比>水熱時間>矽鋁比>鹼熔溫度。

為同時製備出兼具高產率及高比表面積之沸石產品，本研究將鹼熔水熱合成操作條件進行優化並控制矽鋁比為 20、鹼玻比為 1.2、鹼熔溫度為 400°C、液固比為 100、以及水熱時間為 12 小時，並進一步放大實驗製程規模進行量產測試，其控制參數條件及主要結果如表 2 所示。結果發現此優化條件可成功應用鹼熔水熱合成技術將廢太陽能板玻璃回收再利用轉製合成沸石，並可將產率提升至 70%，且合成沸石之比表面積可達 288.12m^2/g，製程中各項資源皆能重複回收再使用，並縮短反應時間及降低操作成本，有效達成量產與兼顧經濟成本之目標。

典型矽晶太陽能光電模組之單片尺寸規格為長 1.65m*寬 1.00m，約 18~19 公斤重，發電量為 260W，因此推算 1MW 發電量約需使用 3846 片矽晶太陽能光電模組，未來除役約可產生 71 公噸廢棄物，其中廢太陽能板玻璃約佔 56 公噸。依本研究量產測試結果顯示，每 1 公斤廢矽晶太陽能光電模組將產生 0.7 公斤廢玻璃，經鹼熔水熱合成技術可轉製合成 0.5 公斤沸石，可將廢太陽能板回收再利用製成高價值與高應用性能之再生產品，達到資源循環與高值化之多重目標；另外，若將廢矽晶太陽能模組中佔 3%之高純度矽晶圓進行回收，亦可作為鹼熔水熱合成沸石過程中用於調整矽鋁比之矽源，更可降低操作成本並提高廢太陽能光電模組之回收再利用效益。

表 2　廢太陽能板鹼熔水熱合成沸石之量產測試條件及結果

量產測試參數與條件					量產測試結果	
矽鋁比 (Si/Al)	鹼玻比 (NaOH/Glass)	液固比 (L/S)	鹼熔溫度 (°C)	水熱時間 (hr)	產率 (%)	比表面積(m^2/g)
20	1.2	100	400	12	70	288.12

四、結　論

1.廢太陽能光電模組主要成分為玻璃(79%)，其次為 EVA 及 PVDF 等封裝塑料(18%)，高純度矽晶片僅佔總重量之 3%。

2.將廢太陽能板玻璃應用鹼熔水熱合成技術轉製合成沸石之最佳操作條件為矽鋁比 20、鹼玻比 1.2、鹼熔溫度 400°C、液固比 100、水解/水熱溫度 105°C 及水熱時間 12 小時。

3.量產測試結果中，廢太陽能板玻璃轉製合成沸石之產率可提升至 70%，比表面積為 288.12m^2/g，製程中各項資源皆能重複回收再使用，並縮短反應時間及降低操作成本，有效達成量產與兼顧經濟成本之目標。

4.依測試結果顯示，每 1 公斤廢矽晶太陽能模組將產生 0.7 公斤廢玻璃，以鹼熔水熱合成技術可轉製合成 0.5 公斤沸石，可將廢太陽能板回收再利用製成高價值與高應用性能之再生產品，達到資源循環與高值化之多重目標。

五、參考文獻

1.Tao, J., & Yu, S.,「Review on feasible recycling pathways and technologies of solar photovoltaic modules」, Solar Energy Materials and Solar Cells, 141, 108-124 (2015).

2.Granata, G., Pagnanelli, F., Moscardini, E., Havlik, T., & Toro, L.「Recycling of photovoltaic panels by physical operations」, Solar Energy Materials and Solar Cells, 123, 239-248 (2014).

3.吳耀杉、王雨筠、鄭隆藤及林福銘，「日本太陽光電模組回收技術解析」，第 381 期，第 128-135 頁，工業材料雜誌，2018。

4.鄧麗維，「混凝土使用再生太陽能板玻璃粉特性之研究」，博士論文，國立海洋大學河海工程學系，2015。

5.Tammaro, M., Rimauro, J., Fiandra, V., & Salluzzo, A.,「Thermal treatment

of waste photovoltaic module for recovery and recycling: experimental assessment of the presence of metals in the gas emissions and in the ashes」, Renewable Energy, 81, 103-112 (2015).
6.Wang, T. Y., 「Recycling of Solar Cell Materials at the End of Life. In Advances in Solar Photovoltaic Power Plants」, pp.287-317, Springer, Berlin, Heidelberg (2016).
7.涂耀中，「水庫淤泥經水熱法合成沸石礦物」，碩士論文，國立成功大學資源工程學系碩博士班，2012。
8.劉錡樺，「水處理污泥轉換活性碳-沸石複合吸附材料之研究」，碩士論文，國立中央大學環境工程研究所，2010。
9.王珽玉，「太陽光電模組之材料回收與資源循環技術(上)」，工業材料雜誌，第 378 期，第 135-142 頁，2018。

燃煤飛灰與混燒煤灰材料特性分析及資源化再利用可行性評估

楊士鋒*、林宸毅**、吳明富**、黃偉慶***

摘　要

本文主要針對國內設有流體化床鍋爐廠，並使用事業廢棄物燃料部分取代煤為燃料所衍生出之副產物「混燒煤灰」進行材料特性研究。選用飛灰種類包括純燃煤飛灰與紡織污泥混燒煤灰。針對上述材料取樣進行工程材料相關物理性質及化學性質基本試驗，並將試驗結果與燃煤電廠產出之飛灰加以比較，依據其材料特性探討做為工程材料資源化再利用可行性。

試驗結果顯示，純燃煤飛灰與紡織污泥混燒煤灰之比重相近，兩者化學成分組成以 SiO_2 與 Al_2O_3 為主，由於石灰脫硫程序的緣故，含有較高的 $CaSO_4$，與電廠飛灰比較顯示其拌和需水量、燒失量、以及含硫量高。在取代 20%水泥用量下，28 天抗壓強度活性指數其純燃煤飛灰為 116%，而紡織污泥混燒煤灰可達 124%。在耐久性方面純燃煤飛灰與紡織污泥混燒煤灰兩者健度與電廠飛灰相近，惟乾縮量較大以及抗硫酸鹽侵蝕能力低。在取代不同比例水泥用量下，純燃煤飛灰與紡織污泥混燒煤灰之抗壓強度隨著齡期的增加而隨之增強。由上述結果顯示，純燃煤飛灰與紡織污泥混燒煤灰兩者具有良好卜作嵐膠凝活性，若取代部分水泥作為混凝土攙和物或應用於控制性低強度回填材料(CLSM)，除可達到廢棄物減量化、資源化再利用的目標外，更能獲得較高的附加價值、提升實用性，亦可減少目前燃燒生煤所帶來空污及溫室氣體排放之危害，故可同時達到多目標多功能之效益。

【關鍵詞】燃煤飛灰、混燒煤灰、紡織污泥、資源化再利用

---

*國立中央大學土木工程學系　碩士

**國立中央大學土木工程學系　研究生

***國立中央大學土木工程學系　教授

一、前　言

因應全球暖化之問題，燃煤減量成為環保議題中不可延宕之目標。聯合國氣候綱要公約(UNFCCC)締約國大會(COP21)在 2015 年通過了氣候變遷議題最為重要的「巴黎協議」草案，協議中亦納入「非締約方利害關係人」的參與，明確肯定城市與次國家層級政府在氣候行動的重要角色。而國內也針對上述原因，推動節能減碳及能資源永續循環利用的政策，生質燃料的應用及廢棄物能源化的研究逐漸受到重視。

另一方面，隨著環保需求，鍋爐類型與技術也隨時日進步。流體化床鍋爐為一新型鍋爐，經文獻證明，此種類之燃燒設備可具有良好達到環境保護與節省成本之效益[1、2]，並且具有燃燒均勻、效率高之特性而生質燃料一般具有熱值較低的問題，若作為燃料可能導致燃燒室溫度降低或是燃 燒不均勻等問題，因此流體化床鍋爐成為混燒燃料之最適用類型鍋爐。因鍋爐之進步，混燒成為生質能源使用上最保險之初步應用方向。

然而，利用生質燃料或廢棄資源燃料作為鍋爐與燃煤混燒所產生之一般性底渣混合物，其性質特性依添加比例已與燃煤底渣大為相異，且於環保署公告事業廢棄物代碼亦有所不同。因此，勢必需要先了解目前國內鍋爐混燒物衍生飛灰、底灰之特性及其再利用用途，以利後續研究。

二、文獻回顧

灰渣之性質與鍋爐燃燒效率、燃燒參數有關，根據王銘澤[3]的研究表示使用鍊條式鍋爐為較早期之鍋爐，其生質燃料底灰與飛灰都有比重輕、高吸水率、灼燒減量高之性質；其原因為鍊條式蒸汽鍋爐廠為了保持熱能最大化，所以鍊條運送燃料快速，導致還有些未燃燒完全之燃料直接送入鍋爐底部，使得底渣之灼燒減量值普遍偏高。胡志誠[4]之研究發現底灰具有較高含水量是由於底灰的多孔特性，含水量介於 15%~25%間、且含水量多寡與焚化廠儲存底渣方式、時間、季節以及區域等因素有關。而根據雷揚中 [5]、吳坤達[6]等研究指出底渣含過多孔隙、於應用上可能增加流填料之拌合用水量、瀝青混凝土之含油量、影響結構強度等。蕭柏洋研[7]將生質燃料飛灰再處理期待增加其可用性，發現生質燃料飛灰之細度能增加與水泥摻配後之砂漿抗壓強度，而經過灼燒之飛灰，雖可降低其灼燒減量數值，卻可能因晶相

的改變使活性下降。而生質燃料飛灰與水泥摻配後之性質可能會因生質燃料使用時之添加物而被影響。

由上述回顧,鍋爐燃燒參數與情形可能直接決定灰渣使用之可行性並應注意混燒燃料或燃燒程序中有無添加物，燃料灰渣在使用上應注意其細度、灼燒減量以及吸水率等性質，因底渣含水量較高之因素、於流填料之應用時、需注意用水量之控制。

三、研究方法

本研究之流體化床鍋爐(Circulating Fluidized bed boiler,下稱 CFB)燃燒燃料為煙煤純燒，以及煙煤與紡織污泥混燒(混燒比例約 5:1)，探討混合生質物之灰渣性質變化，而研究主體也分為兩種材料：流體化床鍋爐衍生之煙煤飛灰 (Coal Fly Ash,下稱 CFA) 、流體化床鍋爐衍生之煙煤與紡織污泥混燒飛灰 (Co-fired with coal and textile sludge, Fly Ash,下稱 TSFA)。

首先將研究材料(CFA、TSFA)以土木材料領域進行飛灰、底灰之基本性質：物理性質及與水泥摻配之性質試驗。其中物理性質包含比重、粒徑分析、細度、灼燒減量、燒失量與 pH 值等；與水泥摻配之飛灰水泥性質，包含凝結時間、活性指數、抗壓強度等試驗。依照上述材料基本性質，探討 CFB 鍋爐純燒、混燒衍生飛灰底灰之性質與比較。後續依研究材料之性質擬定再利用方向：控制性低強度回填材料(CLSM)，並且作為配比計算之必要數據。

控制性低強度回填材料(CLSM)：將一般性飛灰、底渣混合物分別作為再利用材料應用於 CLSM，並依據工作性(坍流度)、續行施工性(凝結時間)以及再開挖性(抗壓強度)，將其材料對 CLSM 工程性質進行分析評估，以利其施工可行性。製作 CLSM 標準圓柱試體，並根據 ASTM D6103 之管流度範圍在 15~20 cm、CNS 14842 之坍流度範圍在 40 cm 以上、CNS 15862 之落球試驗在 24 小時後、落沉球造成的陷落直徑應小於 76mm、ASTM D4832 之 CLSM 在齡期 28 天單軸抗壓強度不得超過 90 kgf/cm^2 等要求下，依據其試驗結果評估鍋爐底渣再利用之可行性。

四、研究成果與分析

1.流體化床鍋爐衍生混燒灰基本物、化性質差異

(1)飛灰外觀差異:

研究之飛灰由圖 1 與圖 2 所示，外觀呈現灰黑色，有些許塊狀物並非顆粒，而是由許多細小飛灰團聚而成;並且兩者顆粒非常細小，以手指搓揉甚至感受不到粒狀物;CFA 與 CTFA 兩者差異不大。

圖 1　煙煤飛灰

圖 2　煙煤紡織污泥混燒飛灰

(2)飛灰基本物理性質:

由表 1 可以看出，電廠飛灰之比重較 CFA 與 TSFA 小;經濕篩法與雷射粒徑分析可結果顯示 CFA 之顆粒較細；而 TSFA 之灼燒減量值為 6.7%可見有機質較多，而相較之下電廠飛灰為 1.2%，燃燒的則相當完全；燒失量電廠飛灰為 2.3%，CFA 為 6.5%，TSFA 為 7.3%。而 pH 值兩者同樣低於有害廢棄物認定標準而兩者健度與電廠飛灰相近。

表 1　不同種類飛灰物理性質比較

	電廠飛灰	CFA	TSFA
比重	2.20	2.44	2.46
細度 (#325 篩餘量) (%)	14.50	14.34	15.48
雷射粒徑 (中位數) (μm)	14.5	13.3	13.9
灼燒減量 (600℃，3hr) (%)	1.2	6.3	6.7
燒失量 (750℃) (%)	2.3	6.5	7.3
pH 值	11.2	10.5	10.3
健度	0.1	0.1	0.1

(3)飛灰化學成分比較:

表 2 為電廠飛灰與 CFA 之化學組成比較。由表可以看出電廠飛灰之

化學成分 SiO_2、Al_2O_3、Fe_2O_3 成分為主。而 CFA 與 TSFA 化學成分組成則是以 SiO_2、Al_2O_3、CaO 為主。而 CFA 與 TSFA 與電廠飛灰之化學成分差別主要還是在於脫硫程序，因此 CFA 及 TSFA 之鈣與硫含量會較高，而鈣與硫之元素可能是以脫硫灰，也就是硫酸鈣($CaSO_4$)的形式存在。其他成分無論含量與組成比例皆較相似。

表 2　電廠與流體化床鍋爐飛灰之成分比較

成分%	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	Na_2O	K_2O	MgO	SO_3
電廠飛灰	55.74	29.25	5.42	3.86	0.46	1.09	1.34	0.57
CFA	34.11	30.93	6.73	12.86	1.06	0.63	2.58	4.55
TSFA	30.98	33.81	5.73	13.72	0.80	0.60	2.74	4.28

2.飛灰與水泥摻配之新拌性質

(1)標準稠度:

依照 CNS3590 進行標準稠度試驗，可以由表 3 看出以 CFA 與 TSFA 取代 20%wt 之水泥漿體需要更多水分才能達到對照組之稠度質。

(2)凝結時間:

CNS786 測定凝結時間，試驗結果如圖 3 所示，電廠飛灰初、終凝時間較長之原因可能由於飛灰的水化反應是在水泥水化後才發生，而延長凝結時間;而 CFA 與 TSFA 由於 CFB 鍋爐使用石灰石作為脫硫之輔助燃料，而脫硫之產物石膏，用於水泥一般有緩凝的效用，導致 CFB 鍋爐衍生飛灰的添加不但減少水泥總量，又增加石膏含量，會導致初凝至終凝的時間延長，出現些微緩凝現象。TSFA 與上述 CFA 之凝結時間性質亦相當類似，都有增加用水量與些微緩凝之現象發生，且以 TSFA 所呈現之緩凝現象更為顯著。

表 3　電廠與流體化床鍋爐飛灰之用水量比較

標準稠度試驗				
	水泥漿體	電廠飛灰	CFA	TSFA
用水量 g	130	125	175	175
水膠比	0.26	0.25	0.35	0.35

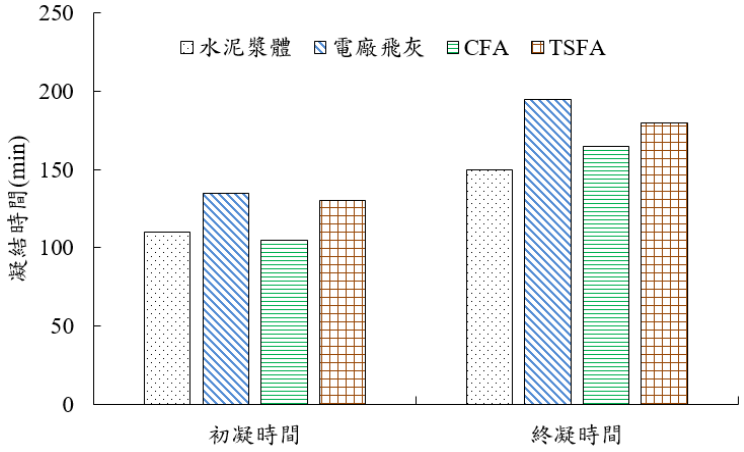


圖 3　電廠飛灰、CFA 與 TSFA 取代水泥 20%wt 凝結時間

3.飛灰與水泥摻配之硬固性質

(1)強度活性指數:

圖 4 所示為飛灰取代 20%wt 水泥之砂漿試體抗壓強度試驗結果,CFA 水泥砂漿之表現，7 天抗壓強度活性指數為 129%，28 天抗壓強度活性指數在 116%，而 3 天強度活性指數也有 97%；而 TSFA 水泥砂漿 7 天活性指數有 123%，28 天有 124%，而 3 天之活性也有 99%。如圖 4 所示。由上述抗壓強度可知，CFA 與 TSFA 取代 20%wt 水泥時之活性相當良好，3 天齡期之抗壓強度不但與水泥相近，7 天、28 天之抗壓強度更是優於水泥砂漿試體。可見在水泥系材料中加入 CFA、TSFA 可以增進材料之力學性質。

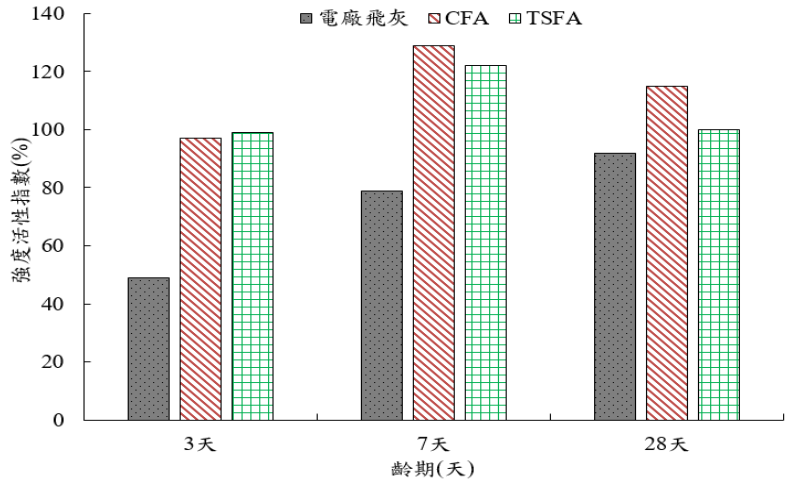


圖 4　電廠飛灰、CFA 與 TSFA 取代水泥 20%wt 強度活性指數

(2)體積穩定性:

由圖 5 可見無論是電廠飛灰或是流體化床飛灰試體皆有收縮的現象，表示使用飛灰會造成乾縮量增大，圖 6 為 CFB 鍋爐純燒、混燒飛灰之乾縮量比較圖，由圖可見在乾縮量上，CFB 鍋爐純燒與混燒飛灰的乾縮量皆較大，並所得 28 天乾縮增加量約為 0.028%與 0.033%；兩者差異並不大。電廠飛灰試驗組的乾縮增加量明顯較小，表示流體化床鍋爐飛灰砂漿試體有較明顯的乾縮情形。

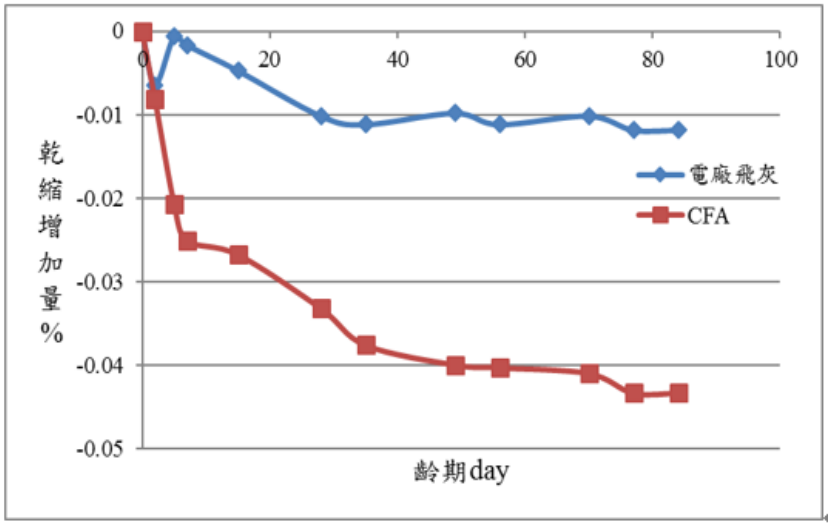


圖 5　不同鍋爐飛灰對乾縮增加量之影響

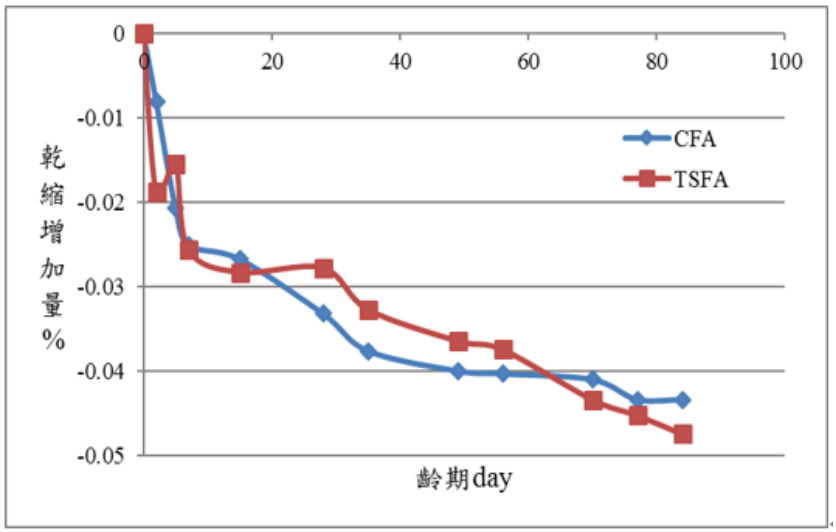


圖 6　CFB 鍋爐純燒、混燒飛灰之乾縮量比較

(3)耐久性:

圖 7 為電廠飛灰與 CFA 之抗硫酸鹽侵蝕試驗結果，由圖可見電廠飛灰是可以增進水泥抗硫酸鹽侵蝕的，但 CFA 在約 50 天時產生較大的反應後，一路膨脹直到 91 天完全破壞。圖 8 為流體化床鍋爐純燒與混燒飛灰抗硫酸鹽侵蝕試驗結果，由圖可見兩者皆受硫酸鹽侵蝕產生很大的膨脹量，再浸泡硫酸鈉溶液約 90 天後，砂漿棒試體即完全斷裂。

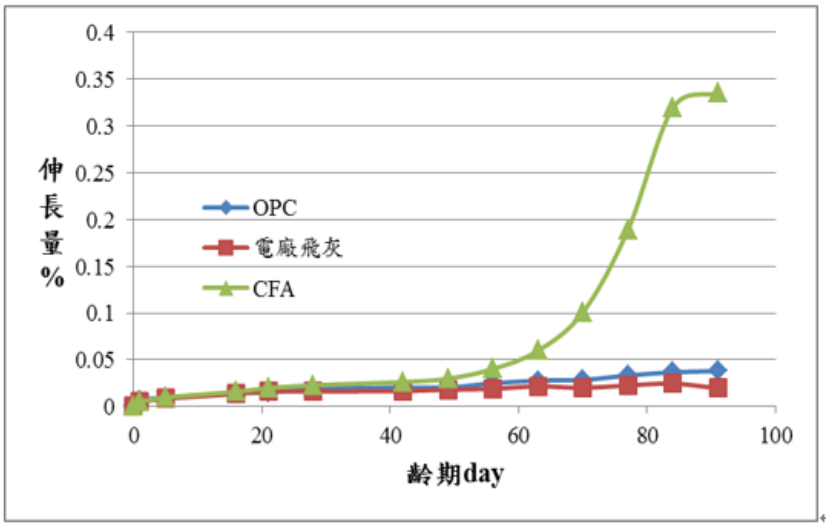


圖 7　不同鍋爐飛灰抗硫酸鹽侵蝕能力

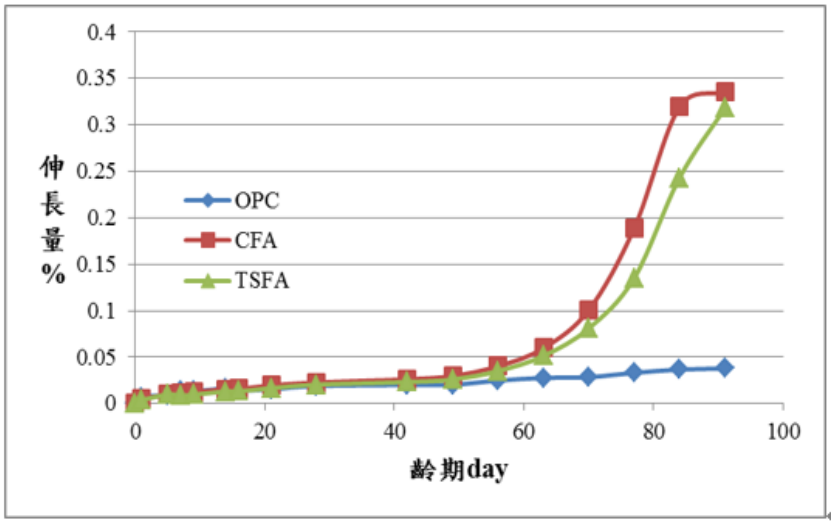


圖 8　純燒與混燒飛灰抗硫酸鹽侵蝕能力

4.不同比例飛灰與水泥摻配之抗壓強度比較

由圖 9 所示，可以看出抗壓強度由 20%、35%、50%之不同比例取代

量之飛灰水泥砂漿區塊，隨著取代量的增加而整個區塊有強度下降的趨勢，即無論是電廠飛灰或是 CFA，各個齡期之強度皆隨著取代量的增加而降低，可見兩種飛灰皆會隨取代量增加，使水泥減少進而影響到抗壓強度。

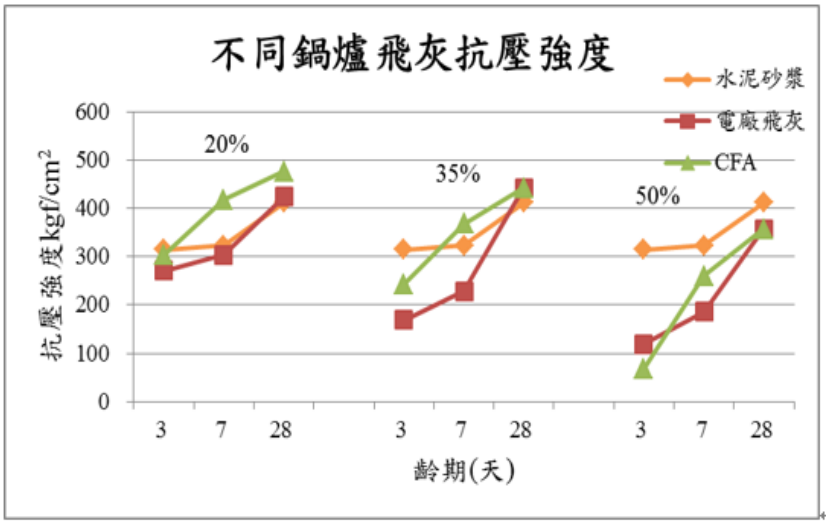


圖 9　電廠與流體化床鍋爐飛灰水泥砂漿抗壓強度

5.飛灰再利用於控制性低強度回填材料(CLSM)

依據本研究之材料基本性質結果發現研究灰渣與水泥摻配的強度性質有良好表現，並且大量添加會降低強度但不影響強度發展，因此 CLSM 再利用配比參考台電公布之施工規範「高煤灰量控制性低強度回填材料」。以上述配比為基礎，探討額外以飛灰取代水泥之可行性；照上述配比以飛灰取代 CFBA 與 TSFBA 之水泥 25%wt、50%wt。因此 CLSM 再利用配比共有七組：電廠飛灰、CFBA、TSFBA、CFBA25%、CFBA50%、TSFBA25%、TSFBA50%。

(1)CLSM 新拌性質試驗:

由圖 10、圖 11 可以看出透過水量調整，各組 CLSM 試樣之新拌性質(管流度、坍流度)控制在規範值範圍，圖 12 顯示了各材料所需要之用水量，。其中電廠飛灰顆粒皆為玻璃質圓球狀顆粒，因此電廠飛灰較不吸水，基本性質試驗也顯示電廠飛灰之需水量並不高，甚至有使需水量降低之趨勢。而 CFBA、TSFBA 兩組則因 CFB 鍋爐燃燒溫度較低，未達熔融溫度使得灰渣形成結晶之機會較少，所導致的不規則顆粒結構、灼燒減量較高等因素造成需水量高，所以導致大量使用 CFB 鍋爐之飛灰時用水比設計用水相差大，用水量多。圖 13 為落球試驗結果，試驗於試體拌和完成後 24 小時後施作，可以看出 CFBA25%、TSFBA25%兩組使用較多 CFB 鍋爐

飛灰，導致 CLSM 早期強度指標：壓紋直徑數據較其他組高；而CFBA50%、TSFBA50%兩組飛灰使用量更高，壓紋直徑數據則更能表現這項特徵。

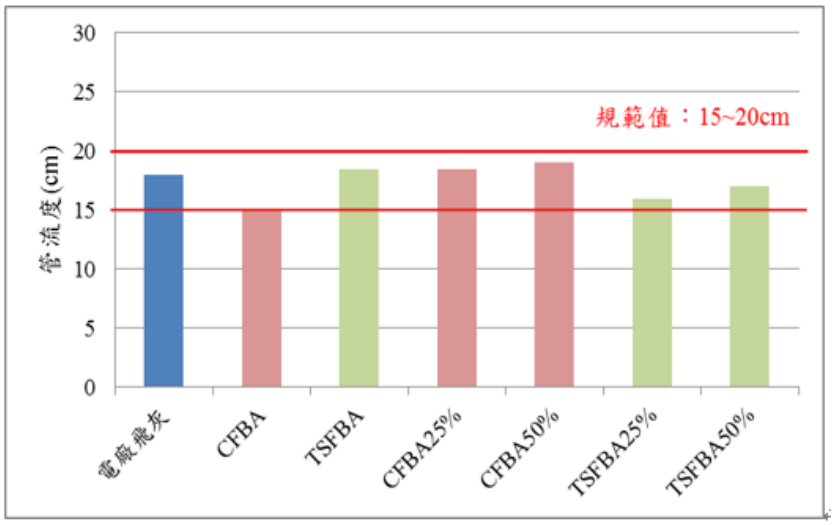


圖 10　CLSM 管流度試驗

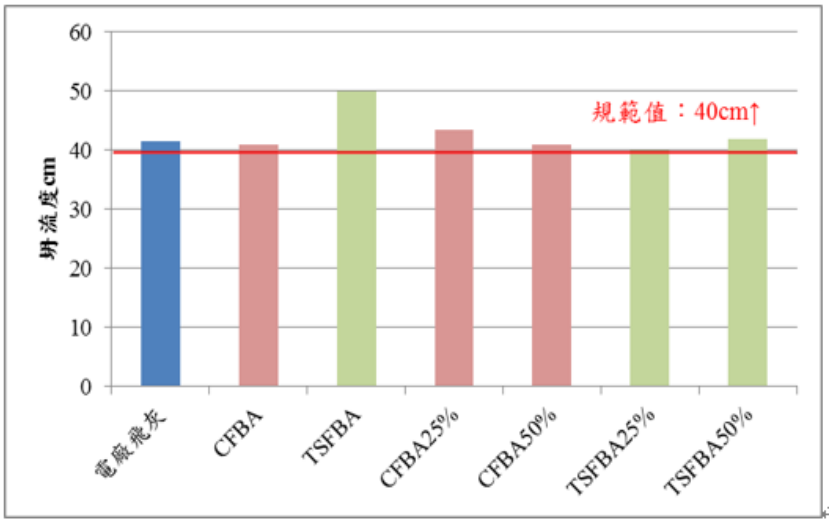


圖 11　CLSM 坍流度試驗

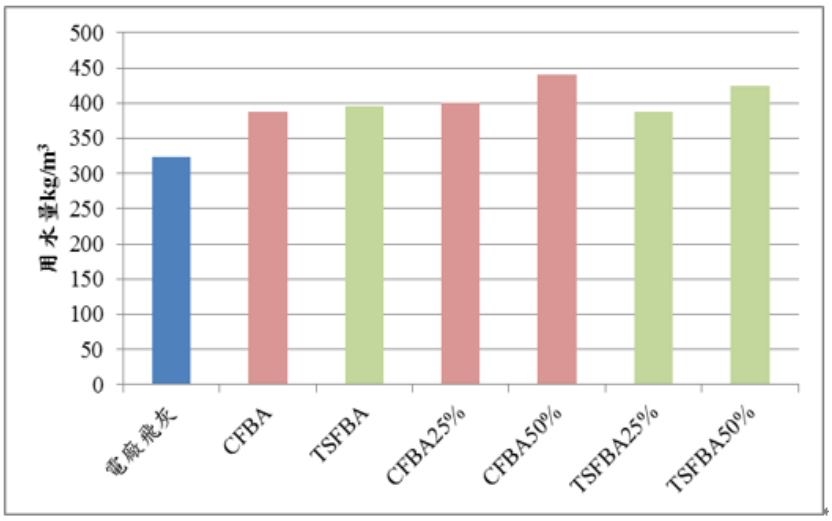


圖 12　CLSM 用水量

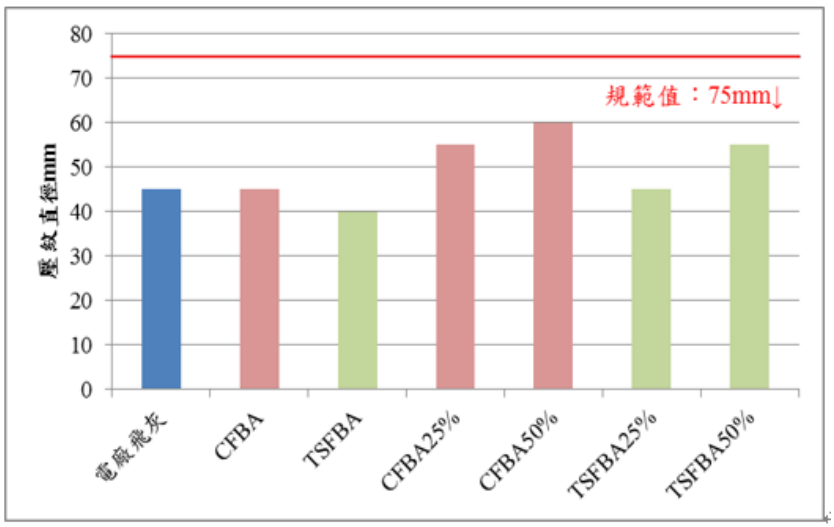


圖 13　CLSM 落球試驗

(2)CLSM 抗壓強度成效:

CLSM 硬固性質試驗是依公共工程施工綱要規範第 03377 章規範規定，28 天抗壓強度需低於 90kgf/cm^2。由圖 14 顯示電廠飛灰組 28 天抗壓強度然達到 68.43kgf/cm^2。而 CFBA、TSFBA 兩組 CLSM 則有超常的表現。雖如上述所言，大量使用飛灰與底灰相對地導致水泥用量與水化反應減少、強度降低；又基本性質試驗中之活性指數與底灰取代粒料之抗壓強度結果表示：飛灰與底灰大量使用導致強度降低但強度仍隨齡期發展。28 天 CFBA 與 TSFBA 兩組之抗壓強度卻分別達到 198.66191.54kgf/cm^2 與 191.54kgf/cm^2。

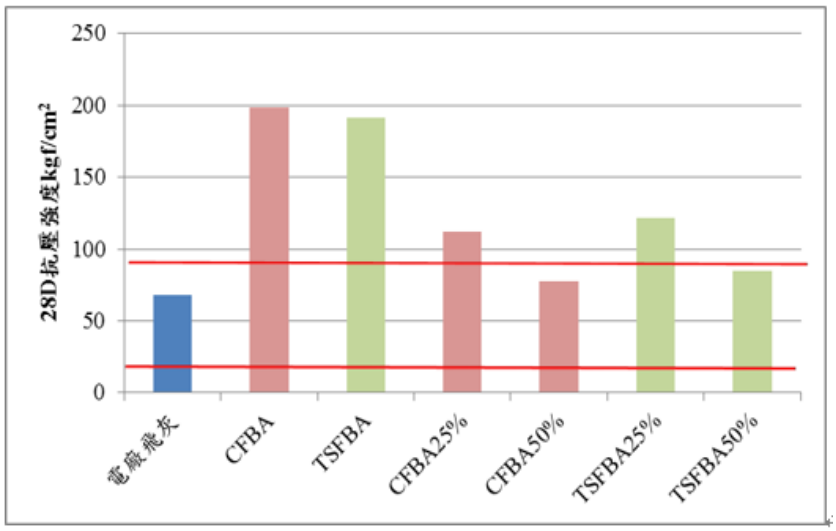


圖 14　CLSM 28 天抗壓強度試驗

五、結　論

1.經基本試驗結果顯示，流體化床鍋爐飛灰為比重較水泥輕、吸水率高、燒失量較低、細度極細之材料，而其化學成分組成以矽、鋁為主，且由於鍋爐燃燒程序中加入石灰石作為脫硫劑，使飛灰中含有石膏 $CaSO_4$ 之成分。

2.以流體化床鍋爐飛灰取代部分水泥，因含有石膏會導致飛灰水泥漿體有緩凝現象發生，但強度活性指數試驗結果則顯示流體化床飛灰早期即有良好卜作嵐活性。

3.參考 CNS3036 試驗及方法將研究飛灰與電廠鍋爐飛灰比較，結果顯示電廠鍋爐飛灰符合規範規定；流體化床鍋爐飛灰則有需水量高、燒失量稍高以及含硫量高等問題，至於耐久性方面，流體化床鍋爐飛灰導致水泥乾縮量大、不耐硫酸鹽侵蝕等特性。

4.流體化床鍋爐衍生灰渣用於 CLSM 可通過調整用水量使產品達到規定之工作性能，底灰吸水率大導致析離現象透過使用大量飛灰即可改善，而飛灰可大量取代水泥使強度達到規範限制內，用於 CLSM 為一理想之材料。

六、參考文獻

1.G.Yue, W.Li,Y.Wu, J.Lu, D.Che, “Structure and performance of a 600 MW supercritical CFB boiler with water cooled panels” , Proceedings of the 20 th intemational conference on fluidized bed combustion 2010.

2.M.Y.Tsai, K.T.Wu, C.C.Huang, H.T.Lee, “Co firing of paper mill sludge and coal in an industrial circulating fluidized bed boiler” , 2002.
3. 王銘澤，生質燃料衍生飛灰與底渣特性分析及再利用評估，碩士論文，國立中央大學土木工程學系，106 年 7 月。
4. 胡志誠，焚化廠底灰應用於工程回填材料之環境安全性研究，碩士論文，台灣大學土木工程學系，92 年 6 月。
5. 雷揚中，焚化廠底渣應用於道路工程之研究，碩士論文 國立中央大學土木工程學系，93 年 6 月。
6. 吳坤達，下水道污泥作為道路基底層及 CLSM 材料之工程特性研究，碩士論文，國立成功大學資源工程學系，95 年 6 月。
7. 蕭柏洋，生質燃料灰渣之再利用與在處理方法探討，碩士論文，國立中央大學土木工程學系，107 年 4 月。

建構放流水中尿素濃度背景值

陳芷晴*、吳鳴峯*、黃欣栩**

摘　要

台灣產業用水量持續成長，各地區供水壓力日益升高，再生水資源已為我國水資源開發之重要一環。依再生水資源發展條例定義，再生水係指廢污水或放流水經處理後可再利用的水，而公共污水處理廠放流水具有水量大且穩定、不受水文天候限制的優勢，為再生水資源發展之重點水源。此外，有鑑於高科技產業為我國重點發展產業，其具有用水量大、耐受度低的特質，為穩定產業用水，高科技產業將為我國再生水主要使用端，但隨著產品與製程日益精進，水中微量物質如尿素，可能影響生產製程與產品品質，降低產業使用再生水之意願，因此本研究針對臺灣六處公共污水處理廠以每月 1 次的頻率進行放流水採樣檢測，以建立再生水原水中尿素濃度背景值。從 107 年 9 月至 108 年 8 月期間檢測結果顯示，TYN 放流水尿素平均濃度為 7.25 μg/L，FT 為 10.53 μg/L、SN 為 5.51 μg/L、AP 為 12.78 μg/L、RD 為 28.41 μg/L 及 FS 為 8.86 μg/L，污水處理廠放流水尿素濃度落於 1.79~58.32 μg/L 之間，本研究結果可作為公共污水處理廠再生處理程序設計之參考。

【關鍵詞】再生水資源、高科技產業、放流水、尿素

---

*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　高級研究員

一、前言

台灣因降雨豐枯不均，水文豐枯頻率加劇，為降低國內缺水風險，促進水資源永續利用，我國水資源開發已朝向多元化水源供應，其中再生水為新興水源發展重點之一。再生水係將廢污水經再生處理，達到所需的水質後予以利用，而公共污水處理廠放流水具有水量大、穩定且不受水文天候限制的優勢，因此，使用再生水可以減少天然水資源開發及污水排放。目前已有許多國家逐漸將其規劃供作平時民生次級用水及工業用水或作為乾旱時期之救急水源，例如美國約有三分之一的再生水(約 250 萬 CMD)用於農業灌溉，其他則多用於景觀澆灌及地下水補注；日本再生水多作為環境保育及親水用水為主，部分區域則用於建築物沖廁；新加坡甚至已將再生水注入水庫，與原水混合後，經進一步處理成為飲用水水源。公共污水下水道系統污水處理廠放流水具有水量大且穩定、不受水文氣候限制的優勢，可減少天然水資源開發及污水排放，具有回收再利用之潛力，臺灣接軌國際發展再生水趨勢，已將公共污水處理廠放流水回收再利用納為水資源永續發展擘畫之重點。

二、臺灣再生水資源發展現況

為推動國內再生水發展，我國已於民國 104 年 12 月 30 日公布「再生水資源發展條例」作為推動再生水之法源依據，並由內政部營建署挹注 152 億推動「公共污水處理廠放流水回收再利用推動計畫」，以臺中市豐原水資源回收中心、臺中福田水資源回收中心、臺南永康水資源回收中心、臺南安平水資源回收中心、高雄鳳山水資源回收中心及高雄臨海污水處理廠等 6 座污水處理廠(或水資源回收中心)作為再生水示範案，臺中水湳水資源回收中心及臺南仁德水資源回收中心則納入 106 年核定之「前瞻基礎建設計畫」中，其中高雄鳳山水資源回收中心已於 107 年 8 月 25 日建設完成，為我國首座萬噸級再生水廠，並於 108 年 8 月 25 日正式全期通水，可望舒緩當地產業用水之壓力。

目前國內再生水之利用依照不同來源可分為系統再生水及非系統再生水。系統再生水部分，包含公共污水下水道系統及工業區專用下水道系統的廢污水處理廠放流水再生利用；非系統再生水方面，係指民生用水大戶污水自行回收及工業用水大戶自行於廠內設置水回收再生設備所產製之再生水。依據水利署(2018)「建置再生水媒合與稽核系統及產業推動服務(2/2)」調查統計，目前我國再生水利用量約為 57.1 萬 CMD，以工業用水為主要用

途，其中系統再生水約為 7.1 萬 CMD，以景觀澆灌及設備清洗為主，可發現因公共污水下水道系統污水處理廠之再生水在我國為剛起步階段，水量明顯較低。

近年來各污水處理廠(或水資源回收中心)產製之再生水大多規劃作為製程用水使用，故用水端對於再生水水質有一定要求，其中高科技產業之製程條件嚴苛，製程用水中尿素濃度>5 μg/L 即可能對產品品質造成影響。為瞭解再生水中尿素可能存在之濃度，本計畫針對臺灣六處公共污水處理廠之放流水(即潛在的再生水水源)進行每月一次的採樣檢測，以建立再生水原水中尿素濃度背景值，並檢測水中氨氮、凱氏氮及總有機碳濃度，評估尿素與其他水質檢測項目之相關性。

三、採樣廠區背景介紹

本研究針對臺灣六處公共污水處理廠進行放流水採樣檢測，包括 TNCU 之 TYN、採用標準活性污泥法之 FT 與 AP、採用 AO 搭配薄膜生物反應器之 SN、具硝化脫硝功能之氧化渠系統之 RD 及以滴濾池搭配固體接觸池之 FS，採樣廠區分布如圖 1，各廠區說明如下。

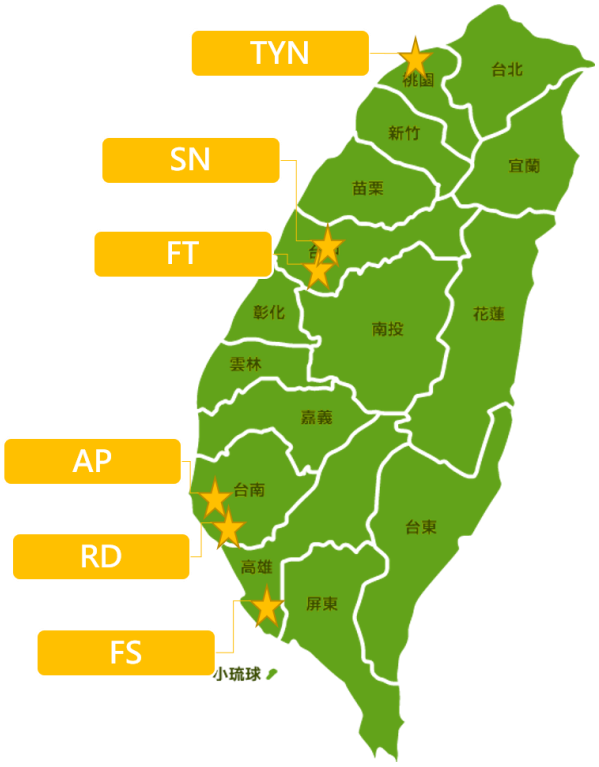


圖 1　採樣廠區分布圖

TYN 第一期興建完成污水處理容量為 50,000 CMD，於 105 年 1 月進入營運期，污水處理流程以 TNCU 生物處理法為主，處理流程如圖 2 所示。

採樣期間平均日處理水量約 34,579 CMD，放流水質 BOD 及 SS 均低於 10 mg/L，COD 可低於 19.0 mg/L 以下，而氨氮濃度在 2.1~10 mg/L 間，平均約 6.27 mg/L。

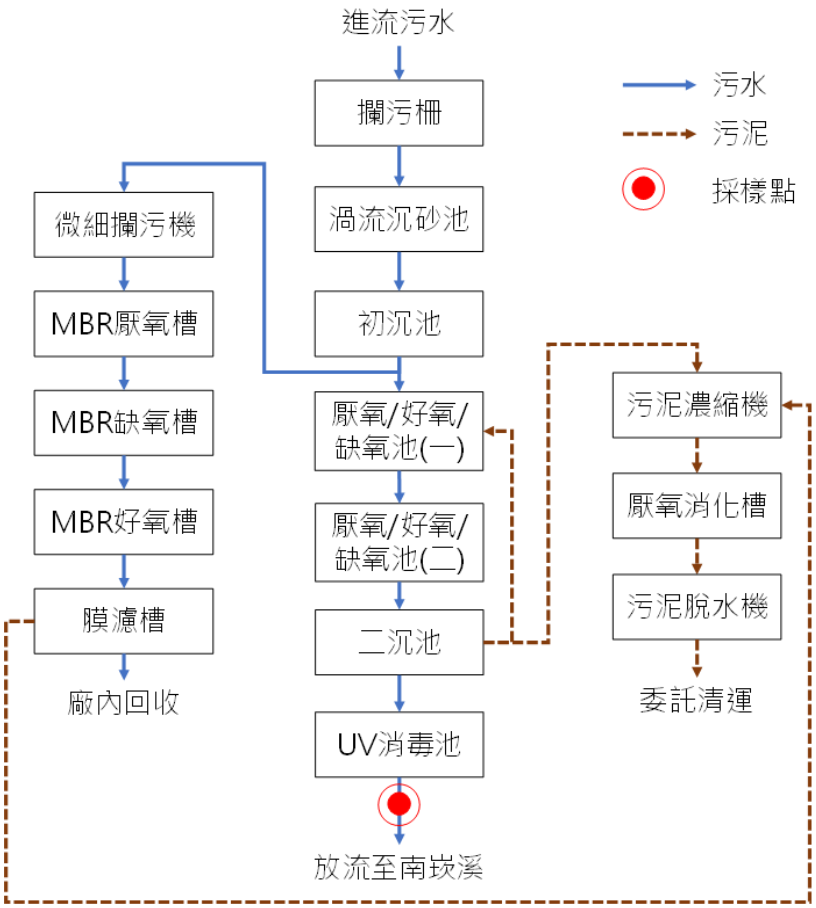


圖 2　TYN 污水及污泥處理流程

FT 主要處理臺中市都市計畫區內污水下水道所收集之生活污水，目前設計處理量為 152,000 CMD，主要生物處理單元為標準活性污泥法，處理流程如圖 3 所示。

該廠採樣期間平均日處理量約 102,082 CMD，進、放流水質概況如表 5.1-6，放流水之 BOD 及 SS 均可低於 10 mg/L 以下，COD 於 11.2~20.8 mg/L 之間變動，總氮濃度則在 15.7~26.6 mg/L，平均約為 20.24 mg/L。

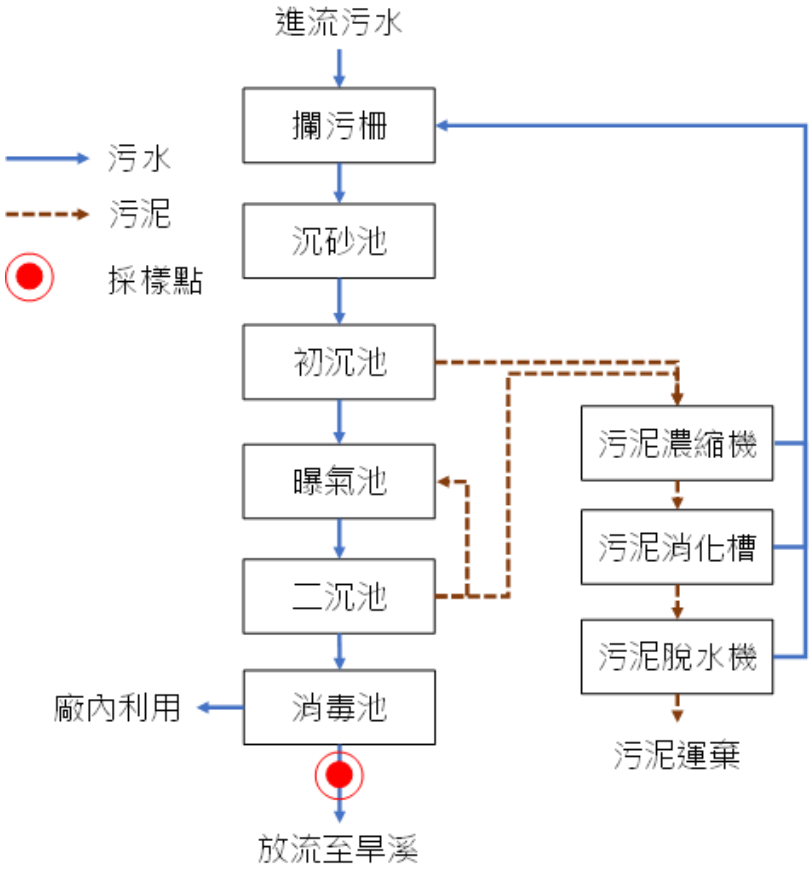


圖 3　FT 污水及污泥處理流程

SN 係配合經貿園區開發計畫設置，預定接管計畫區面積為 626 公頃，全期計畫預定用戶接管數為 8,000 戶及經貿園區入駐商。SN 自 106 年 2 月 24 日啟用，現階段尚屬新建工程完工後三年試運轉時期，全期設計污水處理量為每日 18,000 噸，處理程序為 AO 搭配薄膜生物反應器，處理流程如圖 4，由於經貿園區及鄰近區域用戶接管工程尚未啟動，主要截流福田系統污水進行處理。

採樣期間平均日處理量 2,498 CMD，放流水之 BOD 落於 2.2~6.3 mg/L 之間，SS 為 2.5 mg/L，COD 在 6.6~16.9 mg/L 之間，放流水總氮濃度落於 9.2~34 mg/L 之間，平均約為 21.3 mg/L。

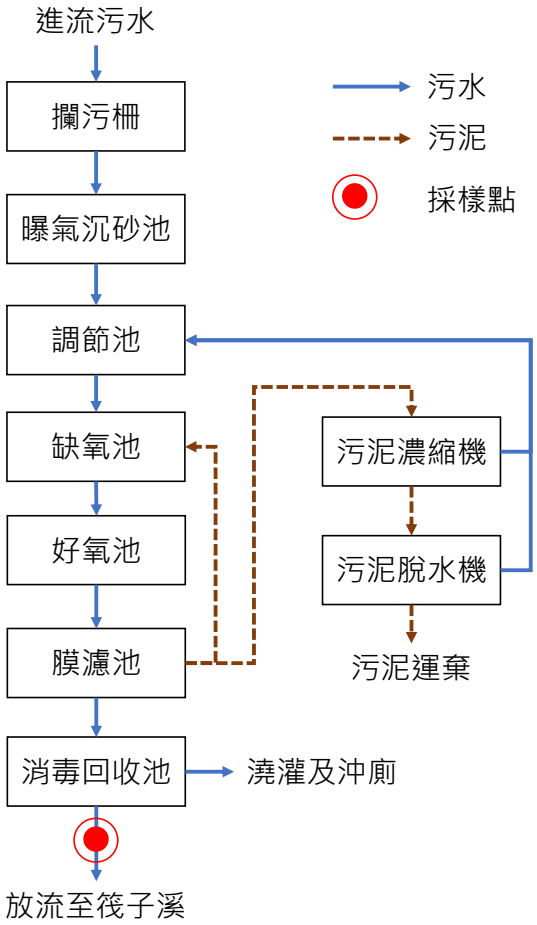


圖 4　SN 污水及污泥處理流程

AP 主要涵蓋範圍包括前臺南市第五期市地重劃區與臺南市北區、中西區、南區以及安平區，污水收集面積共 1,518 公頃，目前污水下水道接管率已達 65%以上，全期設計處理量為每日 13.2 萬噸。AP 於 84 年 3 月開工，88 年 7 月竣工，90 年 6 月取得放流水排放許可證，處理程序為標準活性污泥法，如圖 5 所示。另外 AP 每日提供數千噸消毒後之放流水，供民眾自由取用，可作消防用水、清洗街道及澆灌花木之用途。

採樣期間平均日處理量 134,404 CMD，放流水 BOD、SS 平均為 7.27 mg/L 及 8.06 mg/L，COD 約 20~30 mg/L 之間，而總氮介於 13~26 mg/L 之間，平均為 20.28 mg/L。

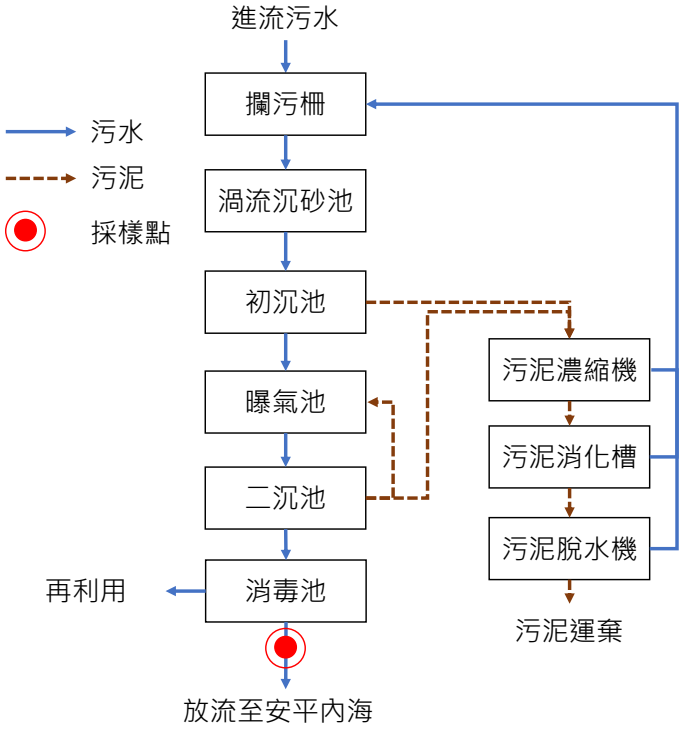


圖 5　AP 污水及污泥處理流程

RD 位於台 86 北側及三爺溪南側乙級工業區用地，共分為兩期興建，每期工程設計處理量為 15,500 CMD，合計 31,000 CMD，第一期工程於 104 年 12 月 26 日竣工，105 年 5 月 31 日進入三年試運轉期，主要處理單元為具硝化脫硝功能的氧化渠系統，如圖 6 所示。

採樣期間平均日處理量 1,560 CMD，放流水之 BOD 約介於 9~10 mg/L，SS 約介於 4.5~21 mg/L，COD 約 32 mg/L，總氮均在 13~30 mg/L 之間。

FS 第一期設計處理量為每日 10.96 萬噸，於 95 年興建完成，並於 98 年 7 月起正式營運，原設計之處理程序為滴濾池搭配固體接觸池，102 年 FS 為「公共污水處理廠放流水回收再利用示範推動方案」之示範案之一，為提升再生水廠處理效能，於再生水廠興建期間，同步辦理部分污水處理單元效能優化工程，包括生物系統改為 A2O 處理，增加除氮功能，且恢復厭氧消化槽之產氣功能，並增加污泥脫水成效，改善後污水及放流水再生處理流程如圖 7 所示。

採樣期間平均日處理水量約 86,017 CMD，放流水 BOD 約 2~5 mg/L，COD 於 107 年 12 月較高，平均約 18.63 mg/L，SS 落於 2~7 mg/L，總氮約介於 8~28 mg/L 之間，於 107 年 10 至 107 年 12 月濃度有增加情形，推測此與再生水廠之 RO 濃排水與放流水併同放流所致，至 108 年 3 月降低至 14.53 mg/L。

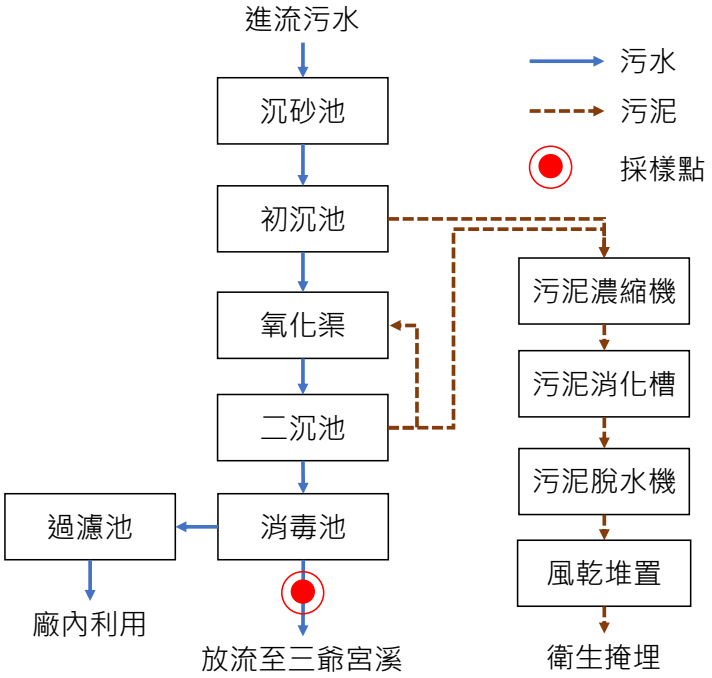


圖 6　RD 污水及污泥處理流程

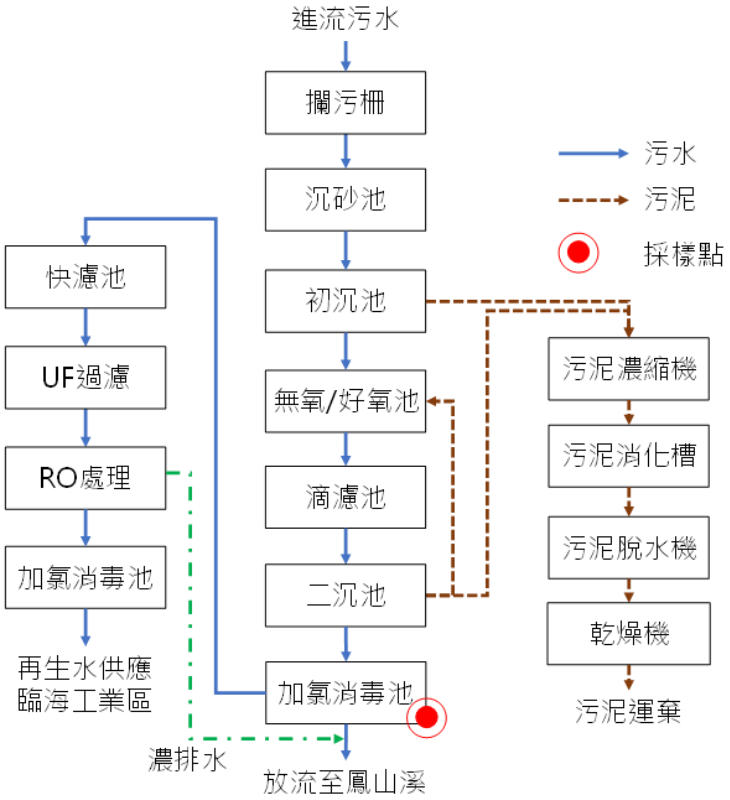


圖 7　FS 污水及污泥處理流程

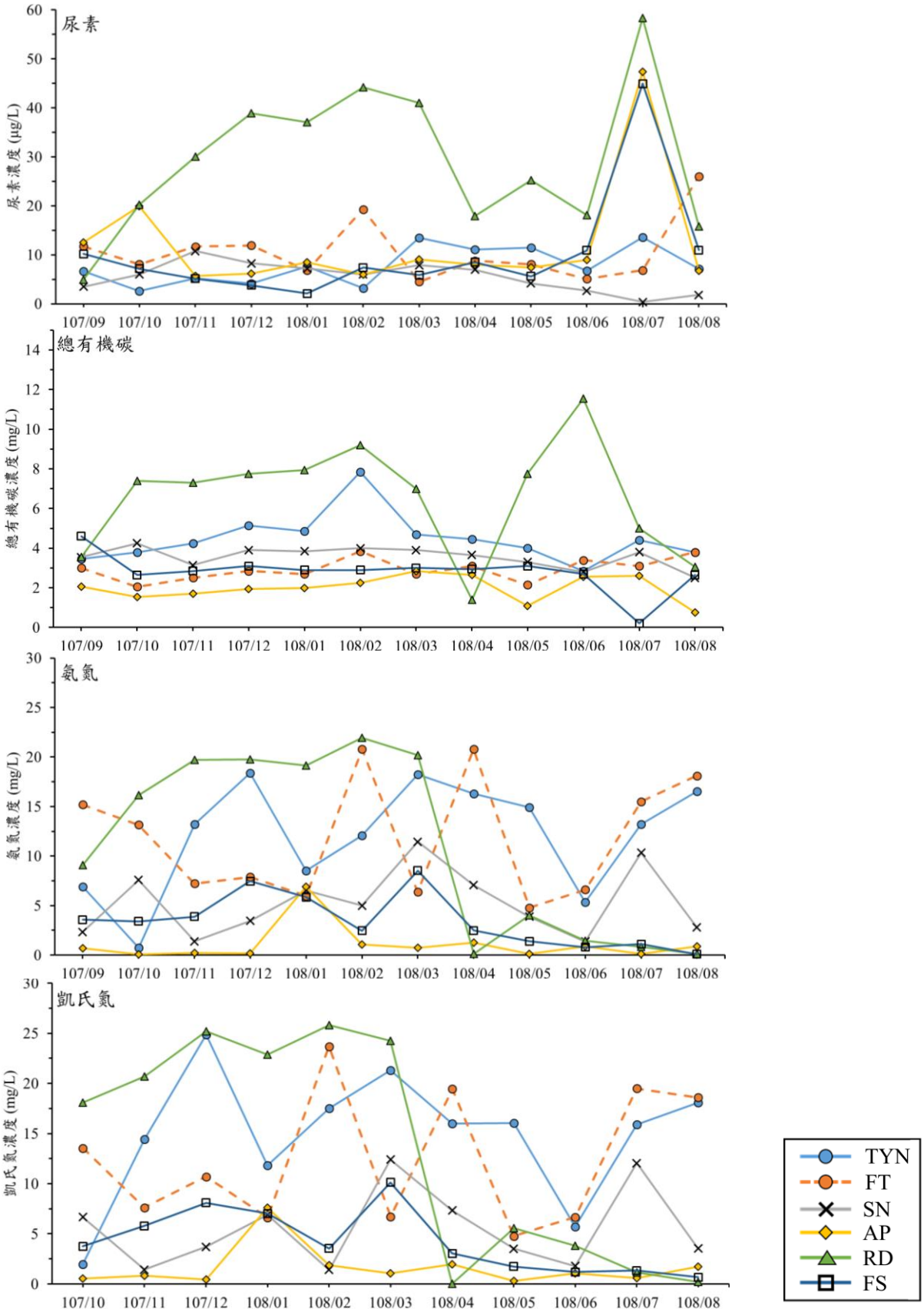
四、放流水尿素背景濃度

本研究於 107 年 9 月至 108 年 8 月期間，針對六廠區放流水每月採樣檢測 1 次，各廠區放流水水質檢測項目濃度變化如圖 8。從 107 年 9 月至 108 年 8 月期間檢測結果顯示，TYN 放流水尿素平均濃度為 7.25 μg/L，FT 為 10.53 μg/L、SN 為 5.51 μg/L、AP 為 12.78 μg/L、RD 為 28.41 μg/L 及 FS 為 8.86 μg/L，以採行 TNCU 生物處理法之 TYN 放流水尿素濃度最低，其次為採用 A2O 處理之 FS，污水處理廠放流水尿素濃度落於 1.79~58.32 μg/L 之間。

尿素濃度部分，TYN 落於 2.89~13.57 μg/L 之間，FT 落於 5.09~26.0 μg/L 之間，SN 落於 0.35~12.41 μg/L 之間，AP 落於 5.72~47.38 μg/L 之間，RD 落於 4.59~58.32 μg/L 之間，FS 落於 1.79~44.96 μg/L 之間。六廠區總有機碳濃度介於 0.7~11.6 mg/L 之間，氨氮濃度落於 0.04~22.4 mg/L 之間，凱氏氮則介於 0.21~25.6 mg/L 之間。

各廠區中以 AP 尿素濃度變異性最高，相對標準偏差為 86%，變異性最低之廠區為 FS，相對標準偏差為 33%，另外 FS 於 108 年 7 月時因進流水遭惡意傾倒污染廢水導致該月尿素、氨氮及凱氏氮濃度異常增加，若扣除該月數據，FS 尿素濃度落於 1.79~10.96 μg/L 之間，相對標準偏差為 33%，顯示相較於採用標準活性污泥法之 AP，FS 採行 A2O 處理可有效降低含氮物質濃度，且經處理後尿素濃度變異較低，較容易掌握放流水中尿素濃度。

為了解放流水中尿素與其他水質檢測項目之直線關係，本研究利用 ANOVA 之皮爾森相關係數分析 (Pearson correlation coefficient) 檢定 6 個廠區放流水中尿素濃度與總有機碳、氨氮及凱氏氮濃度之直線相關性如圖 9，尿素濃度與總有機碳濃度之相關係數(R)為 0.4967，為顯著相關，總有機碳濃度大多集中在 0~5 mg/L 之間，尿素與氨氮濃度之相關係數為 0.3594，具顯著相關性，尿素濃度與凱氏氮濃度之相關係數為 0.3130，亦具有顯著相關性，惟尿素濃度與氨氮及凱氏氮濃度直線迴歸方程式之斜率較小，表示氨氮與凱氏氮濃度變異性較大，且尿素濃度低，以方程式估算尿素濃度有其困難性。



註 1：若當月採集 2 個重複水樣，數據以平均濃度表示

圖 8　各廠區水質檢測項目濃度變化

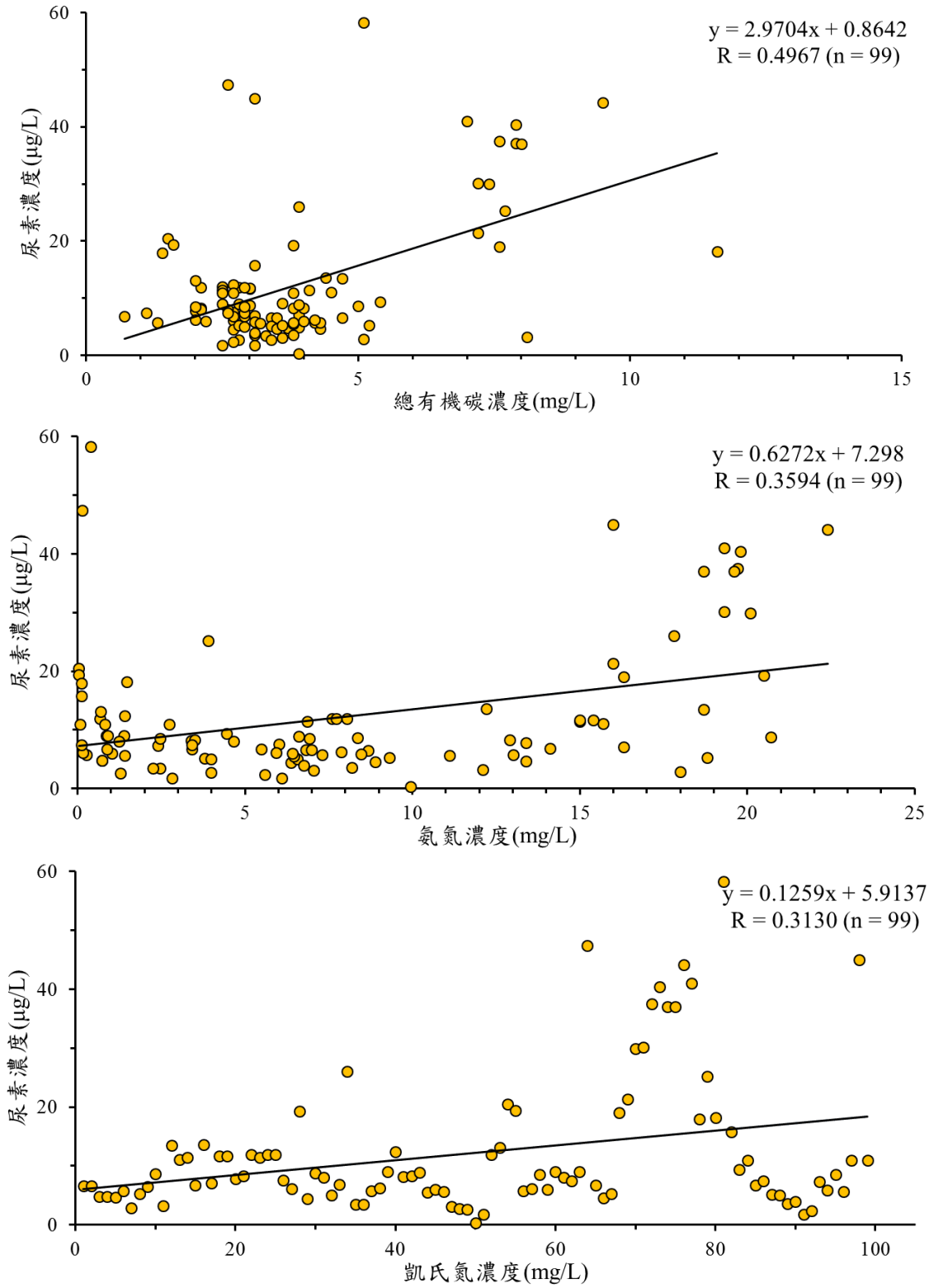


圖 9　尿素與總有機碳、氨氮及凱氏氮濃度之直線相關性分析

四、結　論

各廠區放流水尿素濃度變化大，尿素濃度落於 1.79~58.32 μg/L 之間，且尿素濃度與總有機碳的相關性較高，採行 TNCU 生物處理法之廠區放流水尿素濃度最低，採用 A2O 處理之廠區放流水尿素濃度與尿素濃度變異性較接近高科技產業用水需求,若產製再生水處理單元之前端污水處理設施採用標準活性污泥法，應加強後端尿素去除處理程序。

五、參考文獻

1.經濟部水利署(2017)「建置再生水媒合與稽核系統及產業推動服務(2/2)」。

養豬業廢水現行三段式處理系統強化與實廠改善–廢水處理資源化再利用案例

詹德炬*、沈柏余**

摘　要

本研究針對彰化縣竹塘鄉某養豬畜牧場之豬糞尿高濃度廢水，進行可行性處理實驗及實場設置與操作。該場既有三段式廢水處理流程，採用固液分離-厭氧-生物曝氣處理-終沉排放程序，處理系統設計為 30 日之滯留處理時間，廢水進流量每日 30 噸，因固形物淤積，處理容量不足，水質處理不佳。現場採樣原廢水 COD=8,580mg/L，經三段式厭氧曝氣處理後排放水質為 COD=1,200mg/L。經實驗室階段分別探討添加微生物調理劑之生物處理，電凝處理與土質絮凝劑(TCET-Floc-1105)等之處理程序可行性，進而結合既有處理系統規劃建置完整之 30TPD 實廠生物與電凝處理系統，並進行連續操作與相關之水質取樣監測。除了有效提升生物處理的效能，其生物處理後排放水質於 14 日後為 COD=480mg/L(放流標準為 COD=600mg/L)，養豬場環境既有之臭味消失。而該排放水再經電凝處理系統進一步處理後，水質更達 COD=101 mg/L，SS=14.8 mg/L。可經收集後資源化再用於豬舍清洗澆灌等，充分利用水資源，達到節水與資源化再生之綠色廢水處理目標。

【關鍵詞】養豬場、生物處理、兼氧性微生物調理劑、電凝、絮凝劑

*泰程環境科技有限公司 研發經理

**龍曜國際有限公司 總經理

一、前　言

中華民國在台灣地區的養豬產業養豬戶的數量於2002~2005 年間,養頭數皆維持在 680 萬頭左右。由於養豬業的發展，污染問題逐漸突顯，自 1991 年起政府制訂相關養豬政策調整方案,積極輔導養豬農場從事廢水處理及其他污染的防治工作，目前排放標準修正為 BOD=80 mg/L , COD=600mg/L, SS=150mg/L。大多數的廢水處理都是以三段式廢水處理為主。實施迄今，一般的問題在於硬體設備雖然完善,但由於操作管理不易,常導致排放水值未能達到標準。

依農委會就液體廢棄物處理的介紹顯示,三段式廢水處理設施的第一段是固液分離槽，第二段是厭氧槽，第三段是曝氣槽加最終沉澱池。目前國內推廣且建置的豬屎尿廢水處理設備主要為三段式廢水處理模式,包括固液分離、厭氣處理與好氣處理。固液分離以固液分離機；厭氣處理為覆皮是厭氣發酵槽；好氣處理採用標準活性污泥法。滯留時間于厭氧發酵為 10 日，好氧處理為 1 日。

目前臺灣地區畜牧業廢水經推廣後所採行的處理方法，大都以「三段式廢水處理設施」為主流。三段式廢水處理設施雖有其優點，但因其第三段好氧槽之操作管理不易，且需較大的土地面積方得設置，故對欠缺專人操作之中小型畜牧場，往往因一時疏忽或天候條件不佳，致其放流水超出標準而遭致環保單位處罰。

同時由於國內養豬場常用大量水來沖洗，造成極龐大的廢水量，以每頭豬一天之廢水量 20～50 L 計，台灣之養豬頭數為 800 萬頭，一日可排放 16 萬噸的水，造成水資源的浪費，如能將之再利用於豬舍清洗或其他用途，將可不排放或是減少排放，，對於水資源的節省、降低畜牧廢水污染均會有莫大之助益；而豬場不排出放流水，亦可以減輕其在環保上所面臨的壓力與負擔。

本研究以彰化某養豬場之高濃度豬糞尿尿廢水經可行性評估後進行實廠設置，處理該養豬場產生之廢水。經處理程序實驗評估，本實廠研究選定處理程序為微生物強化處理以及後續之電化學混凝處理程序(EC),運用既有之三段式處理設施(30TPD、厭氧 HRT=20day、好氧 HRT=1day)外加兼氧性微生物調理劑 PACB，施作二周後 COD 值大幅降低至 500mg/L，再將生物處理後之排放水經 EC 處理系統，其處理水質經處理後達到低於排放標準(COD=101mg/L、SS=14mg/L)而可再利用於場內清洗澆灌等，減少用水水量

與廢水的排放量。

相關處理程序介紹如下:

1.兼氧性微生物調理劑

此微生物調理劑(PACB)經殖入後可產生與繁殖菌群，使之同時存在於乏氧及富氧之水體狀況中形成好氧與厭氧相互依存的兼氧性微生物之生態系統(Microbial eco system)，多年來已經驗證可用於國內各種高濃度與難處理之工業廢水，如煉油廠、樹脂硬化劑、高濃度白糊廢水、皮革與染料等高濃度廢水以及食品、染整廢水、畜牧業廢水、生活廢水、餐廳廢水等。其特性為 COD 降解速率快、無馴養期、生物污泥量低等，由於其兼氧性質國外多年來已用之為油類與有機類污染土壤的復育上。

2.電凝處理

電化學混凝，以鋁板作為電極，施予電壓後陽極氧化釋出鋁離子，陰極還原水為氫氣與陽極於酸性狀況則產生氧氣，金屬離子作用於各種有機與重金屬污染質使之絮凝成為 $Al(OH)_3$ 的膠羽共沉分離。

陽極反應

$$Al - 3e \rightarrow Al^{3+}$$

鹼性狀況:

$$Al^{3+} + 3OH- \rightarrow (OH)_3$$

酸性狀況:

$$Al^{3+} + 3H_2O \rightarrow (OH)_3 + 3H^+$$

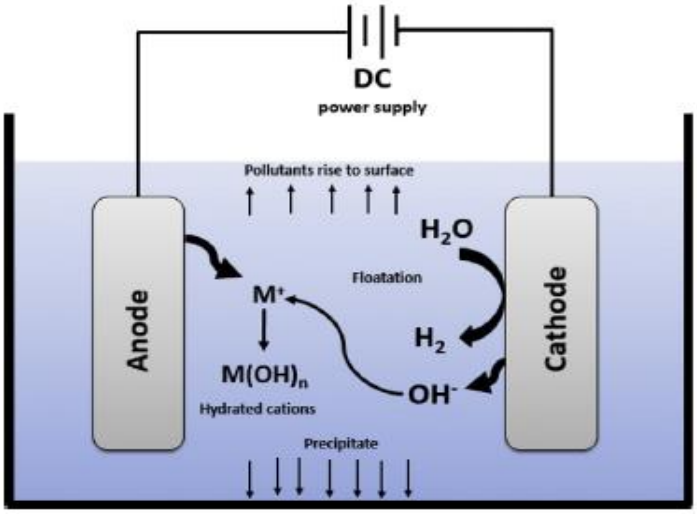
$$2H_2O - 4e \rightarrow O_2 + 4H^+$$

陰極反應:

$$2H_2O + 2e \rightarrow H_2 + OH-$$

電凝反應直接利用反應槽中陽極(常為鋁片或鐵片)所產生之金屬離子與陰極所產生氫氧根離子形成膠羽而達到混凝沉澱去除污染物之目的，而且電凝過程中可藉由陽極產生之氧氣氣泡及陰極產生之氫氣氣泡達到攪拌或浮除之效果，因此不需加入化學藥品及機械攪拌即可達到初步絮凝之目的，電凝槽處理廢水時會發生氧化反應、還原反應、混凝及浮除等作用機制，使污染物從廢水中凝集分離，達到處理的目的。電凝處理程序可適用於染整、皮革、造紙、石化、電鍍、含砷、食品廠與餐廳及切削機械含油廢水等應用上，無論是移除有機污染、重金屬污染皆有相當高的移除率(1)，在操作上會影響的因素有極板材料、極板間距、廢水初 pH 值、導電度與電流密度及電凝時間等，依據 Lekshmi MohanV.等 2014 年於 IWA 12th Conference 的報告顯示，材料上鋁板經電解可產生 0.05-1μm 之鋁離

子，而鐵離子為 10-30μm，對於電凝作用顯然鋁離子會優於鐵離子。極板的間距增大可減少硬體成本但會降低處理效率。pH 值於電凝時會改變，初始值於酸或鹼性時均優於中性。電流密度大時可縮短電凝時間。導電度高低影響電凝作用，同時可依據處理目的使用電解質如 NaCl 使導電度增加降低能耗，於增加導電度同時達到污染物移除及抑菌等效果。電凝相較於傳統化學混凝法的好處在經濟層面有低設置成本、維護容易、能耗低與處理成本低等優點，同時由於污泥生成量低使污泥有較低之含水率、較大膠羽與較好的沉降性，能避免化學藥劑的使用及系統簡單、小型、易於自動化等，而對廢水的酸鹼度有較大的彈性與具備電化學浮除(EF) (Ville Kuokkanen 等 Green and Sustainable Chemistry, 2013, 3, 89-121)的特性。



Journal of Environmental Management xxx (2016) 1–18

圖 1　電凝作用原理示意圖

本實廠研究著眼於電凝處理尚無應用於養豬場之高濃度糞尿尿廢水之實際處理，故針對該養豬場廢水進行可行性評估，決定於強化既有生物處理功能後，導入電凝處理系統處理生物後排放廢水，使處理後水質達到可排放與回收使用之目的。

二、養豬場廢水處理系統改善與電凝處理系統建置

1.養豬場改善前狀況

該養豬場位於彰化縣，為種豬與肉豬養殖場，豬隻數目約為 3000 頭。每日廢水排放量為 20-30TPD 間，原廢水水質如表 1、表 2：

表 1　養豬場原廢水水質

溫度	酸鹼度	BOD(mg/L)	COD(mg/L)	SS(mg/L)
15-35	6-9	1,000-7,000	3,000-15000	800-5,000

表 2　取樣水質

項目 / 取樣點	酸鹼度	COD(mg/L)	SS(mg/L)
集合池	6.2	8,050	3,700
厭氧池	6.9	5,080	,3000
曝氣池	7.4	2,500	2,200
放流池	7.5	1,200	1,000

養豬作業廢水經原廢水池送至固液分離機分離出固形物經曬乾後做堆肥用。廢水則經重力送至集合池到調整池(1-4)流至兼氧池(1-4)經約 20 日之滯留時間後流至活性污泥曝氣池(1-5)最後經最終沉澱池到放流池流放。處理設施之平面配置圖如圖 2。

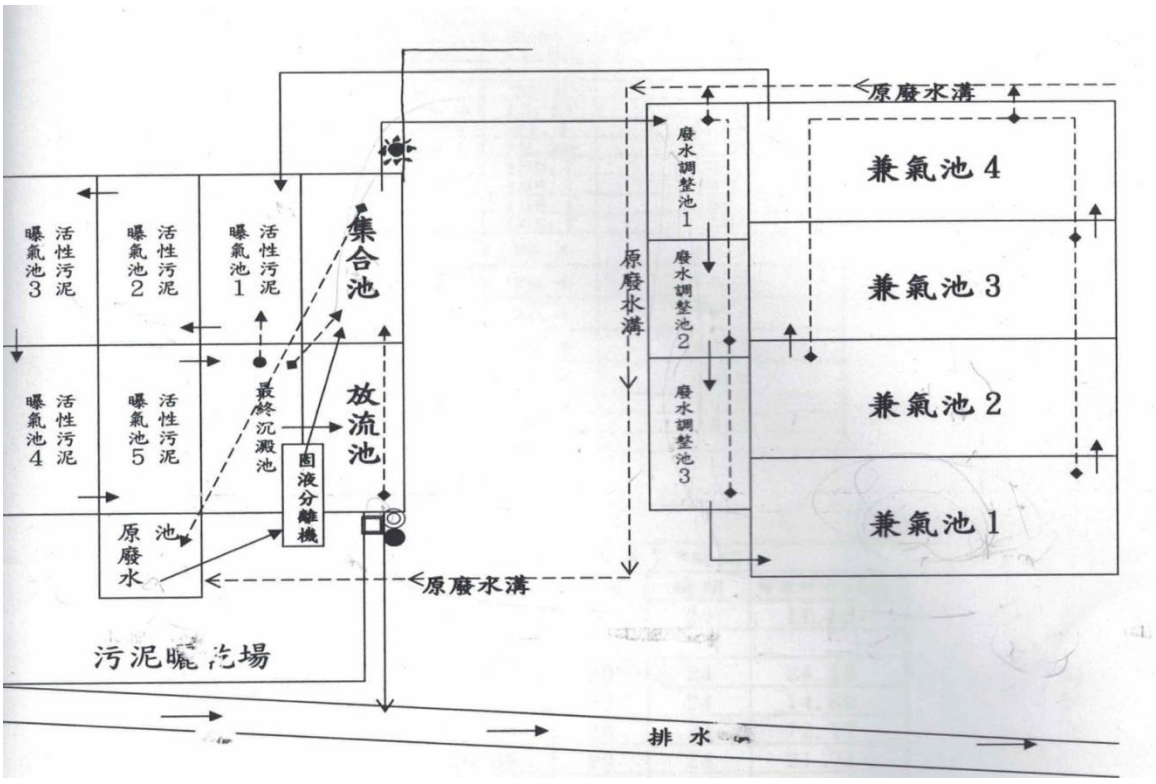


圖 2　廢水處理設施平面配置圖

此廢水處理系統操作上因調整池與兼氧池底部長久累積固形物無法消化形成未處理之底部沉積與沙質硬塊，同時管線因淤積硬化流動不順暢，使有效處理容積減少，滯留時間減少，肇使生物處理功能大減，產生廢水未及消化有機污染造成水質不佳及味道問題。原有三段式廢水處理系統之槽均淤積嚴重，使廢水滯留時間縮短，處理水量減少，不堪負荷。曝氣池由於淤泥沉積嚴重，處理功能降低。圖 3 及圖 4 為改善前之狀況。

圖 3　兼氣池與固液分離機作業區

圖 4　活性污泥曝氣池

2.改善作業

第一階段運用 PACB 微生物調理劑修復並建立原有三段式廢水處理池之微生物處理生態系統。微生物殖種與培養，不止可於短時間內先期解決現有處理效能問題，並可各槽底部陳年淤泥開始消化減少淤積厚度。第二階段為建置電凝處理系統，針對已達畜牧業排放標準(COD=600mg/L)之生物處理後水質(500mg/L)再處理使之進一步能夠回收再利用。另於改善計畫執行期間實施整場水質監測，兼測 pH 及 COD 以了解水質變化。

(1)強化生物處理功能:兼氧池總有效容積約 600 噸，使用液態微生物調理劑 PACB 進行殖種作業，第一周使用 200L，第二週使用 100L，第四周使用 100L，完成殖種作業，而後第三個月再使用 80L 作為維護，爾後每月使用 20L。

(2)電凝處理系統建置:以 30TPD 之水量，設計規劃每日 20 小時，每小時 1.5 噸處理量之電凝處理系統。

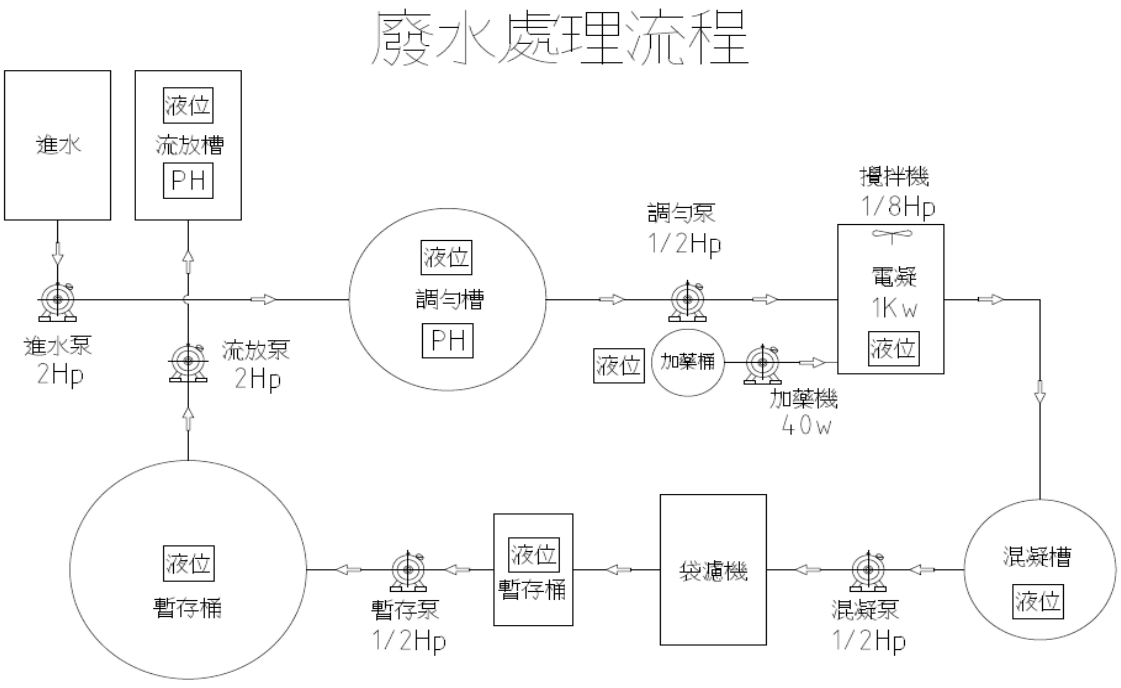


圖 5　電凝處理系統流程圖

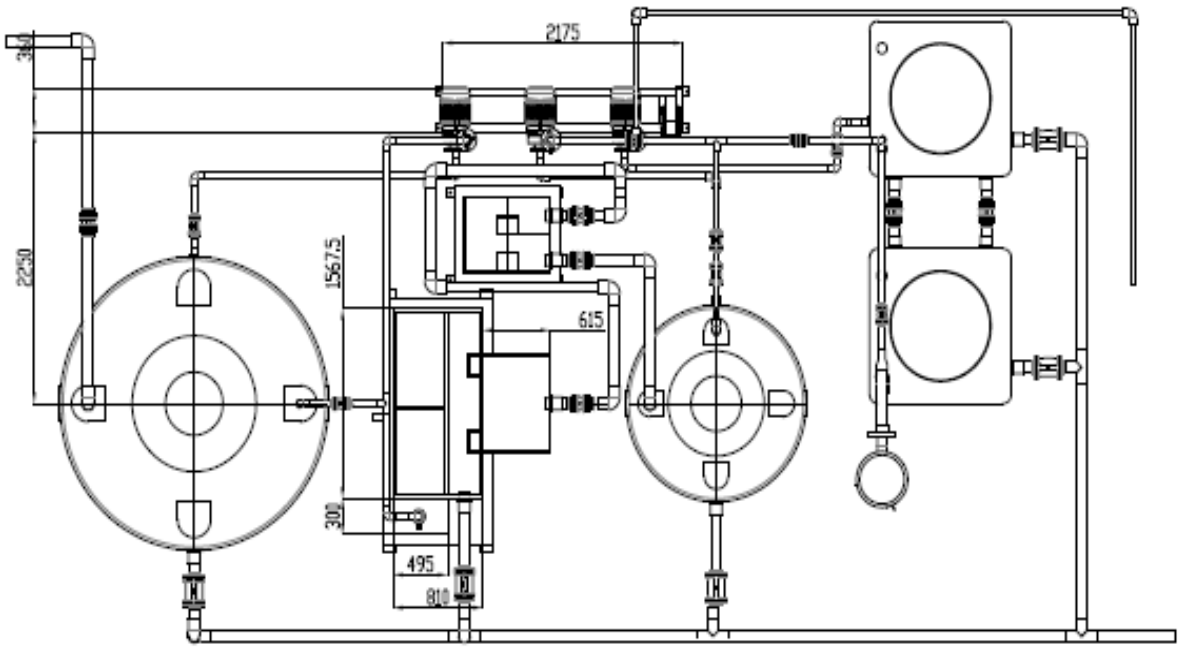


圖 6　電凝處理系統現場配置圖

三、 結果與討論

1. 生物處理功能強化: 經運用 PACB 微生物調理劑修復並建立原有三段式廢水處理池之微生物處理生態系統。於短時間(15 日)內提升處理效能，經取樣分析生物後排放水質較未改善前之 COD=1200mg/L，降至 450 mg/L，就兼氧池各槽底部陳年淤泥觀察，三個月後污泥質地明顯變化為細小綿密的狀態，迴流順暢，槽內舊有污泥塊明顯消化使淤積厚度開始減少。

圖 7　電凝槽裝置

圖 8　系統電控箱

圖 9　兼氧池施作前

圖 10　兼氧池施作後約一個月

圖 11　曝氣池施作前

圖 12　曝氣池施作後

微生物培養於 PACB 施用後，12-16 天後明顯消化表層淤泥，微生物系統開始建立，於培養 27-34 天起、底層淤泥開始逐步活化，各池上層污泥不再沉積而是呈現濕潤狀態，完成初期微生物系統之建立。放流口排放水經微生物施作前後比較，顏色變淺，懸浮顆粒明顯減少。

圖 13　放流口於施作前

圖 14　放流口施作一個月

2.電凝處理系統設置運轉:電凝處理系統設置完成後針對生物處理程序後已達畜牧業排放標準(COD=600mg/L)之生物處理後水(COD 在 300-500mg/L 間)，作二次處理。經電凝處理後之水質可進一步能夠回收再利用。廢水經電凝槽後之快混攪拌槽家要注入絮凝劑後經沉降槽到達混凝槽，以液位控制數送至砂濾裝置過濾，經暫存槽輸送至終沉槽(40 噸)，處理後之水質由第三方檢驗，經沉降後可達 COD=101mg/L，BOD=18.4mg/L，SS=14.7mg/L，pH=7.9，原廢水水質則為 COD=6,820mg/L，BOD=2,900mg/L，SS=3,700mg/L， pH=8.0。

電凝處理槽因電場作用，於運轉中會攔截大量 SS，於系統設置時原有規劃絮凝劑之使用，幾經調整將絮凝劑停用，而於後使用 40 噸之容積使污泥自然沉降，隔夜後之沉降效果極佳。此因電凝後產生之懸浮固體量已大幅減少，，且電凝後之絮凝與混凝沉降效果明顯之故。於運轉二個月左右即將絮凝劑家要系統停用，以觀察處理後水中污泥沉降情形與 COD 變化，發現 COD 變化不大，因 COD 之移除取決於電凝槽的作用，經過濾後 SS 之沉降則多發生在終沉槽，只要有足夠的沉降時間，SS 會繼續進行絮凝與混凝作用將固體自水中分離，其沉降時間估計在 6-12 小時之間。

圖 15　系統操作人機介面

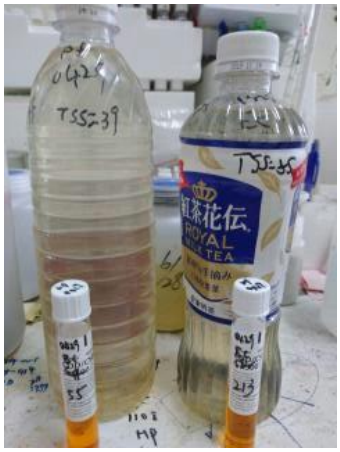


圖 16　電凝處理後水樣

對於生化需氧量及氨氮的移除上，電凝處理對於生化需氧量及氨氮的移除上亦有效果，水質檢驗結果報告如表 3 顯示生物後水樣經電凝處理後的水質狀況。

表 3　水質檢驗結果

生物處理後放流水質			
分析項目	單位	檢測值	檢測方法
BOD	mg/L	428	NEA W510.55B
NH_4^-N	mg/L	224	NEA W437.52C
SS	mg/L	88.5	NEA W210.58A
電凝處理後水質			
分析項目	單位	檢測值	檢測方法
BOD	mg/L	21.6	NEA W510.55B
COD	mg/L	55.8	NEA W517.53B
SS	mg/L	25.6	NEA W210.58A
NH_4^-N	mg/L	180	NEA W437.52C
TP	mg/L	9.95	NEA W442.51C
EC	μmho/cm	2480	NEA W203.51B

3.操作成本估計:於本案例研究中，系統處理量為 $3m^3/h$，經評估使用之藥劑劑量、絮凝劑耗材與電力消耗，列之如下;藥劑使用 TCET-Floc-1105，劑量為 $0.3Kg/m^3$，$0.288Kwh/m^3$。電極板使用時數約 1,000 小時後，觀察極板厚度沒有明顯減少。砂濾不定時清洗後重複使用未更換。整體操作費用評估在不使用絮凝劑狀況下(操作中期已停用絮凝劑)，處理一噸廢水僅消耗電力約 0.3 度電力，對於養豬業廢水處理成本考量上有極大誘因，且文獻顯示電凝之污泥產生量僅為一般化學混凝法之十分之一以下，而實際上在本電凝處理系統後之 40 噸桶，污泥體積僅占總體積二十分之一左右。

四、結　論

養豬場產生之廢水污染物濃度高且難以妥善處理,一般如配合沼氣發電程序所產生之沼液沼渣因鹽分高且多含有微量之銅鋅,同時生物處理程序對有些大分子的化合物較難有效處理，導致處理後的水質 COD 仍高而且 SS 偏高,如水質要達到再利用的水平有必要導入二次處理的程序,於本案例研究中乃採用電凝處理程序。運轉結果驗證生物處理可達 COD 移除率 90%以上，而電凝處理則有 80%COD 移除率，原有三段式處理系統處理效能不彰之問題,經本案例結合兼氧性生物處理與電凝處理程序後，處理水質已可回收再用，充分利用水資源，達到節水與資源化再生之綠色廢水處理目標。

五、參考文獻

1.Ahmed Samir Naje*, Shreeshivadasan Chelliapan*, Zuriati Zakaria, Mohammed A. Ajeel and Peter Adeniyi Alaba，A review of electrocoagulation technology for the treatment of textile wastewater，Rev Chem Eng 2016; aop.

2.Shah Kruna A. Prof. M.J. Pandya Electrocoagulation- A Promising Technology for Sewage Treatment, IJSRD, Vol.1 Issue 12,2014 p.2686-2688.

3.Lekshmi Mohan V. etc. Greywater Treatment using Electrocoagulation, 12th IUA Specialist Conference on Small Water and Wastewater Systems Nov. 2014 Muscat, Sultanate of Oman India.

4. Shivayogimath C, Naik VR. Treatment of dairy industry wastewater using electrocoagulation technique. Int J Eng Res Technol 2014;3: 1897 – 1902.

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. 108 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 108.11
面 ; 公分
ISBN 978-986-5442-19-4(平裝)
1.環境保護 2.職業衛生 3.文集
445.907 108018737

108 年綠色技術與工程實務研討會論文集

出版日期：中華民國 108 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、馬小康、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、曾志雄、王義基、賴俊甫、陳見財、吳宜樺、陳志銘、葉雅馨、古瑩瑄
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
https://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)2784-4188 FAX：(02)2784-4186
https://www.ftis.org.tw
版次：初版
GPN：1010802025
ISBN：978-986-5442-19-4
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：偉新影印社
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

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 978-986-5442-19-4
9 789865 442194
GPN：1010802025
定 價：500元